

材料システム

第30巻

小特集

複合材料の耐久性



金沢工業大学 材料システム研究所

材料システム (年刊)

Materials System (Annual)

編集委員長

中田 政之 (金沢工業大学材料システム研究所)

編集委員

宮野 靖, 新保 實, 田中 基嗣,
杉森 勝, 斉藤 博嗣

(以上: 金沢工業大学材料システム研究所)

編集顧問

Stephen W. Tsai (スタンフォード大学)

Editor

Professor M. NAKADA, Dr. Eng.
Materials System Research Laboratory
Kanazawa Institute of Technology

Associate Editors

Professor Y. MIYANO, Dr. Eng.

Professor M. SHIMBO, Dr. Eng.

Dr. M. TANAKA

Dr. S. SUGIMORI

Dr. H. SAITO

Researchers of Materials System Research
Laboratory, Kanazawa Institute of Technology

Advisory Board

Professor S. W. TSAI, Ph. D.

Stanford University

COPYRIGHT 2012 © Materials System Research Laboratory

It is a condition of publication that manuscripts submitted to this journal have not been published and will not be simultaneously submitted or published elsewhere. By submitting manuscripts, the authors agree that the copyright for their article is transferred to the publisher if and when the article is accepted for publication. However, assignment of copyright is not required from authors who work for organizations which do not permit such assignment. The copyright covers the exclusive rights to reproduce and distribute the article, including reprints, photographic reproductions, microform or any other reproductions of similar nature and translations. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, electrostatic, magnetic tape, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without permission in writing from the copyright holder.

金沢工業大学

材料システム研究所

〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1

TEL 076-274-9263

FAX 076-274-9251

Materials System Research Laboratory

Kanazawa Institute of Technology

3-1 Yatsukaho Hakusan

Ishikawa 924-0838, Japan

目 次

巻頭言

材料システム第30巻の発行にあたって…………… 中田 政之 1

特別寄稿

論文集「材料システム」発行の30年を振り返って…………… 宮野 靖 3

小特集

複合材料の耐久性

解説

CFRP積層板の横方向層における初期損傷に関する

数値シミュレーション…………… 岡部 朋永 5

CFRP積層板の長期寿命予測のための加速試験法…………… 中田 政之 11

宮野 靖

蔡 洪能

展望

クラックアレスターを用いたき裂進展評価について…………… 廣瀬 康夫 21

論文

一方向繊維強化複合材料の引張強度に及ぼす界面特性の影響…………… 荻原 慎二 27

中谷 隼人

森本 哲也

NCFの曲げ挙動に及ぼすZ糸の影響…………… 坂井 建宣 35

C-R Rios Soberanis

若山 修一

CFRPサンドイッチミラーの鏡面精度の時間・温度依存性…………… 小柳 潤 41

荒尾与史彦

武田 真一

宇都宮 真

川田 宏之

構造健全性診断技術との融合に向けたCFRP構造の簡易急速補修技術に関する検討

－損傷検知の不確定性の影響評価－…………… 水口 周 47

高井 元

大嶽 晴佳

武田 展雄

論文

熱硬化成形プロセスを考慮した複合材料製造設計技術の開発 第2報 製造法の違いによる成形品の力学的特性への影響評価 …	関根 一史 尾崎 毅志	53
分子動力学法による多結晶銅薄膜の変形挙動評価 ……………	藤井 朋之 秋庭 義明	61
表層発泡体の成形プロセスと機械的・光学的特性 ……………	新保 實 堀 智博 三澤 章博	71

寄稿

“材料システム”と私 ……………	新保 實	77
------------------	------	----

総目次（昭和57年～平成23年）

邦文……………		79
英文……………		111

編集後記

目 次

巻頭言

材料システム第30巻の発行にあたって……………	中田 政之	1
-------------------------	-------	---

特別寄稿

論文集「材料システム」発行の30年を振り返って……………	宮野 靖	3
------------------------------	------	---

小特集	複合材料の耐久性
-----	----------

解説

CFRP積層板の横方向層における初期損傷に関する 数値シミュレーション……………	岡部 朋永	5
CFRP積層板の長期寿命予測のための加速試験法……………	中田 政之 宮野 靖 蔡 洪能	11

展望

クラックアレスターを用いたき裂進展評価について……………	廣瀬 康夫	21
------------------------------	-------	----

論文

一方向繊維強化複合材料の引張強度に及ぼす界面特性の影響……………	荻原 慎二 中谷 隼人 森本 哲也	27
NCFの曲げ挙動に及ぼすZ糸の影響……………	坂井 建宣 C-R Rios Soberanis	35
CFRPサンドイッチミラーの鏡面精度の時間・温度依存性……………	小柳 潤 荒尾与史彦 武田 真一 宇都宮 真 川田 宏之	41
構造健全性診断技術との融合に向けたCFRP構造の簡易急速補修技術に関する検討 — 損傷検知の不確定性の影響評価 —……………	水口 周 高井 元 大嶽 晴佳 武田 展雄	47

論文

熱硬化成形プロセスを考慮した複合材料製造設計技術の開発 第2報 製造法の違いによる成形品の力学的特性への影響評価 …	関根 一史 尾崎 毅志	53
分子動力学法による多結晶銅薄膜の変形挙動評価 ……………	藤井 朋之 秋庭 義明	61
表層発泡体の成形プロセスと機械的・光学的特性 ……………	新保 實 堀 智博 三澤 章博	71

寄稿

“材料システム”と私 ……………	新保 實	77
------------------	------	----

総目次（昭和57年～平成23年）

邦文……………		79
英文……………		111

編集後記

材料システム第30巻の発行にあたって

金沢工業大学材料システム研究所
「材料システム」編集委員長

中 田 政 之

材料システム研究所は今年で設立30周年の節目を迎え、その機関誌である論文集「材料システム」もここに第30巻を無事に発行することができました。これはひとえに皆様のこれまでの絶大なるご支援とご協力の賜物であります。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

昨年は、東日本大震災、原子力発電所の事故、タイの長期にわたる大規模な洪水、さらには欧米における景気減速など、われわれの生活を脅かす多くの出来事がありました。災害や事故に対しては速やかに最善の対策をとることが求められますが、その一方で、災害や事故を踏まえて、これまでよりもさらに安全で安心な環境づくりのための技術開発が急務となってきます。「継続は力なり」と言われますが、数百年に一度とも言われる災害に対する安全・安心な技術開発には科学技術者の世代を超えた「あくなき挑戦」が必要のように思います。今を生きる科学技術者の地道な切磋琢磨と同時に、それを未来につなぐための努力も必要であると感ずる次第です。

さて、本巻では「材料システム」第30巻を記念して、特集「複合材料の耐久性」を企画いたしました。解説2編、展望1編、論文4編からなる特集と一般論文3編で構成されています。その内容は、特集として、CFRP積層板の横方向層における初期損傷に関する数値シミュレーション、CFRP積層板の長期寿命予測のための加速試験法、クラックアレスターを用いたき裂進展評価、一方向繊維強化複合材料の引張強度に及ぼす界面特性の影響、NCFの曲げ挙動に及ぼすZ糸の影響、CFRPサンドイッチミラーの鏡面精度の時間・温度依存性、構造健全性診断技術との融合に向けたCFRP構造の簡易急速補修技術に関する検討です。一般論文として、熱硬化成形プロセスを考慮した複合材料製造設計技術の開発、分子動力学法による多結晶銅薄膜の変形挙動評価、表層発泡体の成形プロセスと機械的・光学的特性となっております。

本巻が材料システムの研究に何らかの寄与をすることを期待すると同時に、ご投稿を賜りました皆様に心から感謝申し上げます。この論文集の当初の姿勢である、国内外に開かれた論文集として形式にとらわれず、研究の新しい芽に対して敏感に光をあてるという姿勢を今後とも続けていく所存です。皆様からのご投稿を心よりお待ちしております。

論文集「材料システム」発行の30年を振り返って

金沢工業大学材料システム研究所 所長 宮野 靖

論文集「材料システム」は昭和57年6月1日に創刊以来、年1回の発行を重ね、この度第30巻の発行に漕ぎ着けました。発行に深く関わってきた一人として感無量の面持ちです。

昭和56年12月26日に、金沢工業大学に材料システム研究所が開設されました。開設の趣旨は、素材から様々な工程を経て構造物になるまでを一つの流れと考える材料システムにおいて、自然環境のみならず、社会、資源、経済環境といった人間との係わり合いをも勘案した基盤のもとで、その最適化を計る方法論を研究することにあります。当時は宇宙航空分野や生体分野で新しい材料が次々と世に登場し、それらの素材から構造物に至る流れも既存の材料のそれとは異なった様々な様相を呈し、人間との係わり合いにもようやく関心が持たれるようになった時代でもありました。

研究所の構成員はわずか4人でしたが全員が30歳代と若く、この「材料システム」という新しい概念について毎日時間を忘れて議論したことを覚えています。そのような中から、材料システムに関する具体的な技術課題を個々に解決しながら、材料システムの最適化を計る方法論の完成を目指す議論の場として、年刊の論文集「材料システム」が生まれた次第です。

これまで多くの研究者・技術者の皆様より材料システムを様々な角度から議論した論文を賜りました。そして、これらの論文が多くの読者に興味を持たれたお陰で、これまで30年に亘って発行を続けられました。論文集を支えていただいたこれらの方々に心から感謝致します。

これまで発行した論文集「材料システム」30巻の中で8回に亘って下記の特集あるいは小特集を組ませていただきました。

第3巻：繊維系複合材料の材料設計

第6巻：粘弾性

第13巻：プラスチックの残留応力

第16巻：複合材料の将来

第23巻：統合化学

第25巻：船舶用複合材料の長期耐久性と損傷許容性

第27巻：高信頼ものづくり専攻

第30巻：複合材料の耐久性

これらの特集の題名からも判るように、プラスチックおよびプラスチック系複合材料が材料システムの概念を深める上で格好の対象になったといえますし、逆にこれらの材料の研究開発にとって材料システム的思考は必要不可欠であったといえるのではないかと思います。飽くなき現象の追求、深い論理的思考、コンピューターによる精緻なシミュレーションと実験による検証が材料システム研究にとって武器であることにはこれからも変わらないと思います。

今後も論文集「材料システム」が、形式に捉われず、様々な角度から自由闊達に議論が展開

できる場で在り続けて欲しい，と願う次第です。

最後に，これまで30年に亘って論文集「材料システム」の発行を資金的に支えて下さった金沢工業大学に深甚の謝意を表するものです。

CFRP積層板の横方向層における初期損傷に関する 数値シミュレーション*

岡 部 朋 永**

Numerical Simulation of Initial Damage in a Transverse Ply of CFRP Laminates
by
Tomonaga OKABE

(Department of Aerospace Engineering, Tohoku University, Sendai)

This paper reviews the numerical simulation of initial damage in a transverse ply of CFRP laminates. Especially, we recently studied the effect of fiber arrangement on transverse tensile failure in unidirectional CFRP with a strong fiber-matrix interface using a unit-cell model that includes a continuum damage mechanics model. The simulated results indicated that tensile strength is lower when neighboring fibers are arrayed parallel to the loading direction than with other fiber arrangements. A shear band occurs between neighboring fibers, and the damage in the matrix propagates around the shear band when the interfacial normal stress (INS) is sufficiently high. This work is briefly introduced with the other literatures. (Received October 3, 2011)

キー・ワード：CFRP, 層内き裂, 初期損傷, 周期セルシミュレーション

Key Words : CFRP, Ply Crack, Initial Damage, Periodic Unit Cell Simulation

1 緒 言

炭素繊維強化プラスチックはその優れた機械的特性により、適用範囲を広げている。特に、軽量化の求められる輸送機（宇宙機、航空機、自動車）への適用が急速に拡大している。航空機を例に挙げると、ボーイング社製の新型旅客機787は重量比において50%以上が炭素繊維強化プラスチックからできており、1次構造部材にも適用されている。このように、適用が広がるにつれ、その構造健全性や長期耐久性に対する関心が高まってきている。

炭素繊維強化プラスチックは積層板あるいはFW形式のパイプとしての使用が一般的である。いずれの使用方法においても、外的な負荷が加えられた時の初期損傷は、負荷に垂直な方向に繊維が配置された横方向層における層内き裂である。現在のところ、この層内き裂が設計における安全基準の目安として用いられている。しかしながら、この層内き裂は材料全体の破断ひずみの約20-30%の負荷ひずみにて発生し、終局破壊における寄与もあまり大きくないため、現状では大変不効率な設計を強いられている。このため、横方向層における層内き裂の発生のメカニズムを理解し、改善することは、設計上大変意味がある。

40年以上にわたり、横方向層における層内き裂に関

しては議論がなされてきた。特に、英国の研究者の果たした役割は大変大きく、初期の応力基準モデル¹⁾、エネルギー基準モデル²⁾、大変精度の良い応力解析等³⁾や実験結果との比較⁴⁾により、多くの知見が得られている。今までに得られた知見を簡単にまとめる。

- (1) 横方向層における層内き裂は端部から発生し、試験片幅方向に進展する⁴⁾。
- (2) 横方向層が厚いときには、層内き裂は端部から発生すると停止することなく幅方向に貫通し、横方向層が薄いときには、端部にて停滞き裂となる⁴⁾。
- (3) 層内き裂の発生は、界面が弱いときには繊維・マトリックス界面近傍からであり、界面が強固なときにはマトリックス内の延性き裂によって生じる⁵⁾。

である。これまでのモデリングは(1)と(2)に絞ったものが多く、(3)については最近関心を集めている。この背景としては、これまで設計者は横方向層の層厚を薄くし、端部から発生した層内き裂を進展させないことにより、構造の健全性を保ってきた。しかし、端部から初期損傷が発生する以上、設計における安全基準を見直すことはできない。また、端部から発生した初期損傷は疲労荷重化では幅方向に進展することが知られている。このため、世界的に“破壊力学モデルによる層内き裂進展”から“弾粘塑性力学や損傷力学を駆使した横方向層における初期損傷モデリング”へ

* 原稿受付 2011年10月3日

** 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 仙台市青葉区荒巻

と関心が移ってきている。そこで、本解説では、日本および欧州における最近の取り組みを紹介した後、我々の周期セルシミュレーションを用いた取り組みについて紹介する。

2 日本および欧州における取り組み

緒言で述べたように、複合材積層板に力学的負荷が加わると、負荷に直交する繊維方向を持つ層(横方向)において、層内き裂と呼ばれる初期損傷を生じ、これが時間とともに幅方向に進展する。したがって、複合材積層板の構造設計のみならず信頼性確保のためにも、繊維に対して横方向に負荷が加わった際の層内き裂の発生メカニズムの理解が極めて重要となっている。そのためこの層内き裂の発生に関して多くの研究がなされている。

例えば、日本においては、北條ら^{5),6)}が、CFRP積層板の曲げ試験を行うことで、一方向CFRPの横方向引張破壊において発生するクラックを走査型電子顕微鏡(SEM)を用いたその場観察を行っている。彼らの報告によれば、繊維-マトリクス界面が強固である場合、横方向引張破壊においては、界面近傍のマトリクスが破壊していると報告している。また、クラック発生時の界面の法線応力(Interfacial Normal Stress, INS)を均質化法により求め、クラックの発生はINSと強い相関があることを報告している。さらに彼らは、INSを用いて、繊維配置の変化によるマトリクスの応力状態の変化も議論している。しかしながら、彼らはINSとクラックの発生のみ議論しており、横方向引張破壊においてマトリクス中に現れる初期損傷の進展プロセスについては解析していない。

欧州においては、Aspらによる系統的な研究がある⁷⁻⁹⁾。彼らは、エポキシ樹脂の試験を多重応力下にて行い、その損傷について議論している。彼らの説によれば、材料内部の空孔成長が大変重要であり、その意味において、金属材料の延性破壊と大変酷似した破壊様式であることを報告している。また、その中で、体積膨張に必要なエネルギーが破壊のクライテリオンとして有効であるとしている。彼らはこの知見に基づき、繊維とマトリクスからなる単位セルモデルによって、マトリクス内に発生する初期損傷について議論している。また、続く論文では、繊維近傍における界面層の形状と破壊について議論している。Fielderら^{10),11)}はさらに詳細にエポキシ樹脂の特性について吟味し、体積膨張クライテリオンに基づき、熱残留ひずみや繊維配置がトランスバースクラックに与える影響について議論している。また、Canalら¹²⁾は、マトリクス中の損傷進展をJeongによって提案された構成則・ボイド進展則にて表現することで、組み合わせ応力におけるゴム強化された一方向CFRPの横方向破壊を解析し、

繊維-マトリクス界面が強固である場合とそうでない場合の両方にて、横方向引張強度への影響について検討している。ここでは、ランダムな繊維配置を用いて解析されている。彼らは、繊維-マトリクス界面が強固である場合、マトリクスの塑性変形に伴うボイド進展プロセスが横方向引張強度に影響していると結論づけている。

3 周期セルシミュレーション

この節では、我々の周期セルシミュレーションを用いた横方向層における層内き裂に関する取り組みを紹介したい¹³⁾。

Fig. 1に示すような周期性を有するユニットセルYを考える。このYに対して直交座標 y_i を設け、Y内の応力分布とひずみ分布をそれぞれ $\sigma_{ij}(y, t)$ および $\epsilon_{ij}(y, t)$ と表す。このときY内における釣り合いの式は、速度形にて

$$\dot{\sigma}_{ij} = 0 \tag{1}$$

にて与えられる。

Fig. 1のようにY内は繊維とマトリクスからなっているとす。このとき、それぞれの構成式を次のように与える。¹⁴⁾

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} &= C_{ijkl}^{f,e} \dot{\epsilon}_{kl} && \text{for fiber} \\ \dot{\sigma}_{ij} &= (1-D) C_{ijkl}^{m,v} \dot{\epsilon}_{kl} - (1-D) \frac{3\mu \dot{\epsilon}^p \cos \delta}{\bar{\sigma}} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\dot{D}}{1-D} \sigma_{ij} && \text{for matrix} \end{aligned} \tag{2}$$

ただし

$$\begin{aligned} C_{ijkl}^{m,v} &= \frac{1}{1+3\mu(1-D) \frac{\dot{\epsilon}^p}{\bar{\sigma}} k} \\ &\times \left[C_{ijkl}^{m,e} + 3\mu(1-D) \frac{\dot{\epsilon}^p}{\bar{\sigma}} k \left\{ \frac{3\lambda+2\mu}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} + 3\mu \frac{\dot{\sigma}_{ij} \dot{\sigma}_{kl}}{\bar{\sigma}^2} \right\} \right] \end{aligned} \tag{3}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \dot{\sigma}_{ij} \dot{\sigma}_{ij}}, \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \dot{\sigma}_{ij} \dot{\sigma}_{ij}} \tag{4}$$

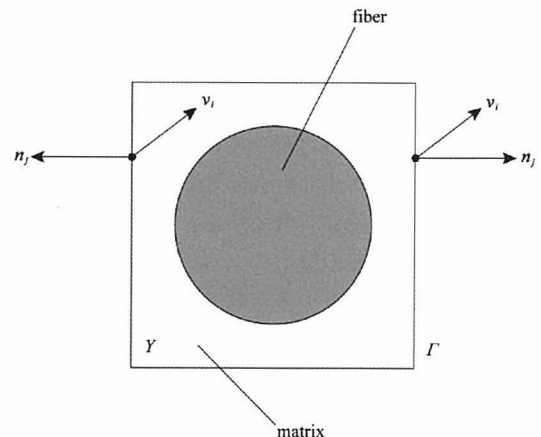


Fig.1 Schematic figure of a unit cell.

ここで、 σ_{ij} は応力テンソル、 ε_{ij} はひずみテンソル、 σ'_{ij} は偏差応力テンソル、 $C_{ijkl}^{m,e}$ は4階の弾性構成則テンソル、 D は損傷変数、そして λ と μ はラメ定数である。また、 $\dot{\cdot}$ は時間微分を表す。相当塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}^p$ は、松田ら¹⁵⁾が提案したエポキシ樹脂の硬化則を用いる。

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\varepsilon}_r \left(\frac{\bar{\sigma}}{g(\bar{\varepsilon}^p)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

$$\text{where } g(\bar{\varepsilon}^p) = g_1(\bar{\varepsilon}^p)^{g_2} + g_3$$

ここで、 m はひずみ速度感度指数、 $\dot{\varepsilon}_r$ は基準ひずみ速度であり、それぞれ $m = 1/35$ 、 $\dot{\varepsilon}_r = 1 \times 10^{-5}$ を用いることとした。 g_1 、 g_2 、 g_3 は材料定数であり、それぞれ、実験で求めたエポキシの応力-ひずみ関係から $g_1 = 75(\text{MPa})$ 、 $g_2 = 0.165$ 、 $g_3 = 30(\text{MPa})$ とする。また、偏差応力 σ' と偏差塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}^p$ のなす非共軸角 δ は次のように表される。

$$\sin \delta = k \sin \alpha$$

$$\text{where } k = \begin{cases} p_1 \sin\left(\frac{\pi m}{2 p_2}\right) & (0 \leq m \leq p_2) \\ p_1 \{\tanh[-p_3(m-p_2)] + 1\} & (p_2 \leq m) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 p_1 、 p_2 、 p_3 は材料定数である。 α は σ' と $\dot{\varepsilon}^p$ のなす角であり次のように与えられる。

$$\cos \alpha = \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\sigma}} \quad (7)$$

剛性低下をもたらす損傷変数 D の発展式は次式で表される。

$$\dot{D} = (1-D)C \langle \dot{\varepsilon}_m^p \rangle + (B_0 + B_1 D) \dot{\varepsilon}^p$$

$$\text{where } C \langle \dot{\varepsilon}_m^p \rangle = A \left[D \left(\frac{\langle \sigma_m \rangle}{\hat{\sigma}} \right) \right]^* \quad (8)$$

この発展式の第1項は平均塑性垂直ひずみによるポイドや欠陥の成長を表し、第2項はせん断変形による損傷の成長を表している。ここで、 σ_m は静水圧応力、 $\hat{\sigma}$ は参照応力、 A 、 B_0 、 B_1 は無次元定数であり、 $\langle \cdot \rangle$ はMacauleyの括弧である。西川¹⁶⁾が示した $A = 0.5$ 、 $B_0 = 0$ 、 $B_1 = 0.5$ 、 $\hat{\sigma} = 73(\text{MPa})$ を用いる。この損傷変数は、各積分点において計算され、要素ごとに平均化される。さらに、マトリクスの損傷によるメッシュ依存性を避けるために、損傷変数 D の非局所化^{17),18)}を次の式によって行う。

$$D(\mathbf{x}) = \frac{1}{V_r(\mathbf{x})} \int_V h(\mathbf{s}-\mathbf{x}) D_{\text{elem}}(\mathbf{s}) dV(\mathbf{s}) \quad (9)$$

ここで、 D_{elem} は各要素における損傷、 V は参照体積である。また、 $h(\mathbf{x})$ 、 V_r は次のように与えられる。

$$h(\mathbf{x}) = \exp\left\{-\frac{k|\mathbf{x}|^2}{l^2}\right\} \quad (10)$$

$$V_r(\mathbf{x}) = \int_V h(\mathbf{s}-\mathbf{x}) dV(\mathbf{s}) \quad (11)$$

ここで、 k はモデルの次元数、 l は非局所化における参照長さであり、メッシュ依存性の小さくなる $l = 0.15\mu\text{m}$ を用いた。

今、ユニットセル内の変位速度場 $\dot{u}_i(\mathbf{y}, t)$ は、セル内に与えられる巨視的変形勾配速度 $\dot{F}_{ij}(t)$ とセル内のY-周期性をもつ局所変位速度 $\dot{u}_i^l(\mathbf{y}, t)$ より

$$\dot{u}_i(\mathbf{y}, t) = \dot{F}_{ij}(t)y_j + \dot{u}_i^l(\mathbf{y}, t) \quad (12)$$

と書くことが出来る。このときひずみ $\varepsilon_i(\mathbf{y}, t)$ は

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{y}, t) = \varepsilon_{ij}^G(t) + \varepsilon_{ij}^L(\mathbf{y}, t) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ij}^G(t) = \frac{1}{2}(\dot{F}_{ij}(t) + \dot{F}_{ji}(t)) \quad (14)$$

$$\varepsilon_{ij}^L(\mathbf{y}, t) = \frac{1}{2}(\dot{u}_{ij}^L + \dot{u}_{ji}^L) \quad (15)$$

となる。このとき $\dot{u}_i^l(\mathbf{y}, t)$ の変分を $v_i^l(\mathbf{y}, t)$ とすると仮想仕事の原理は

$$\int_Y \dot{\sigma}_{ij} v_{ij} dY - \int_{\Gamma} \dot{\sigma}_{ij} n_j v_i d\Gamma = 0 \quad (16)$$

とかける。 v_i におけるY-周期性より

$$\int_Y \dot{\sigma}_{ij} v_{ij} dY = 0 \quad (17)$$

を得る。 $\dot{\sigma}_{ij}$ の対称性および v_i に伴い ε_{ij}^G は変化しないので

$$\int_Y \dot{\sigma}_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dY = 0 \quad (18)$$

となる。上と同様にして時間微分を外した

$$\int_Y \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dY = 0 \quad (19)$$

も成り立つ。

次に時間増分を考える。時刻 t から $t + \Delta t$ において直線的な増分を仮定すると

$$\Delta t \left(\int_Y \dot{\sigma}_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dY \right) = \int_Y \sigma_{ij}(t + \Delta t) \delta \varepsilon_{ij} dY - \int_Y \sigma_{ij}(t) \delta \varepsilon_{ij} dY \quad (20)$$

一般に右辺第2項は完全に(19)を満たしておらず、一方で第1項は(19)を満たす解を得ることを目的としているため、

$$\Delta t \left(\int_Y \dot{\sigma}_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dY \right) = - \int_Y \sigma_{ij}(t) \delta \varepsilon_{ij} dY \quad (21)$$

と書ける。つまり、右辺は一種の残差処理である。上式に構成則を代入すると

$$\begin{aligned} & \int_{V_f} C_{ijkl}^{f,e} \Delta \varepsilon_{kl}^L \delta \varepsilon_{ij} dY + \int_{V_m} (1-D) C_{ijkl}^{m,e} \Delta \varepsilon_{kl}^L \delta \varepsilon_{ij} dV \\ &= - \int_{V_f + V_m} \sigma_{ij}(t) \delta \varepsilon_{ij} dY + \int_{V_m} (1-D) \frac{3\mu \Delta \bar{\varepsilon}^p \cos \delta}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV \\ &+ \int_{V_m} \frac{\Delta D}{1-D} \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dY - \int_{V_f} C_{ijkl}^{f,e} \Delta \varepsilon_{kl}^G \delta \varepsilon_{ij} dY \\ &- \int_{V_m} (1-D) C_{ijkl}^{m,e} \Delta \varepsilon_{kl}^G \delta \varepsilon_{ij} dV \end{aligned} \quad (22)$$

となる。この式を離散化すると、次の

$$\begin{aligned} &({}^t \mathbf{K}_f + {}^t \mathbf{K}_m) \Delta \mathbf{U}_L \\ &= -({}^t \mathbf{Q}_f + {}^t \mathbf{Q}_m) + {}^t \mathbf{Q}_v + {}^t \mathbf{Q}_{dam} - (\Delta \mathbf{Q}_{f,G} + \Delta \mathbf{Q}_{m,G}) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\mathbf{K}_f = \sum_e \int_{V_f^e} \mathbf{B}^{eT} \mathbf{D}_f^e \mathbf{B}^e dV \quad (24)$$

$$\mathbf{K}_m = \sum_e \int_{V_m^e} (1-D) \mathbf{B}^{eT} \mathbf{D}_m^e \mathbf{B}^e dV \quad (25)$$

$$\mathbf{Q}_f = \sum_e \int_{V_f^e} \mathbf{B}^{eT} \hat{\boldsymbol{\sigma}} dV \quad (26)$$

$$\mathbf{Q}_m = \sum_e \int_{V_m^e} \mathbf{B}^{eT} \hat{\boldsymbol{\sigma}} dV \quad (27)$$

$$\mathbf{Q}_v = \sum_e \int_{V_m^e} (1-D) \frac{3\mu \Delta \bar{\epsilon}^p \cos \delta}{\bar{\sigma}} \mathbf{B}^{eT} \hat{\boldsymbol{\sigma}} dV \quad (28)$$

$$\mathbf{Q}_{dam} = \sum_e \int_{V_m^e} \frac{\Delta D}{1-D} \mathbf{B}^{eT} \hat{\boldsymbol{\sigma}} dV \quad (29)$$

$$\Delta \mathbf{Q}_{f,G} = \sum_e \int_{V_f^e} \mathbf{B}^{eT} \mathbf{D}_f^e \Delta \boldsymbol{\epsilon}_G \quad (30)$$

$$\Delta \mathbf{Q}_{m,G} = \sum_e \int_{V_m^e} (1-D) \mathbf{B}^{eT} \mathbf{D}_m^e \Delta \boldsymbol{\epsilon}_G dV \quad (31)$$

が得られる。ここで、 \mathbf{U} は節点変位ベクトル、 \mathbf{K}_f と \mathbf{K}_m は繊維とマトリクスの剛性マトリクス、 \mathbf{Q}_f と \mathbf{Q}_m は繊維とマトリクスの内力ベクトル、 \mathbf{B} はひずみ-変位関係マトリクス、 \mathbf{D} は構成則マトリクスである。また、 \mathbf{Q}_v や \mathbf{Q}_{dam} は式 (2) にある粘性や損傷の項によって得られる内力ベクトルであり、 $\mathbf{Q}_{f,G}$ と $\mathbf{Q}_{m,G}$ は全体ひずみ増分 $\Delta \boldsymbol{\epsilon}_G$ によって発生する内力ベクトルである。また、時間ステップを大きく取るために Pierce¹⁹⁾ の接線係数法を用いて解析を行っている。

以上より、クロスプライ積層板の90°層における周期セルシミュレーションを行った。具体的には Fig. 2 に示すような RVE モデルに周期セルシミュレーションを適用している。ここでは、Fig. 2 に示すような正方モデル S model と六方最密モデル H model を想定している。図中縦方向に、横方向の応力がゼロとなるように巨視的ひずみをコントロールしながら解析を行った。Fig. 3 は解析によって得られた巨視的応力-巨視的ひずみ線図を示す。図よりわかるように、両モデル

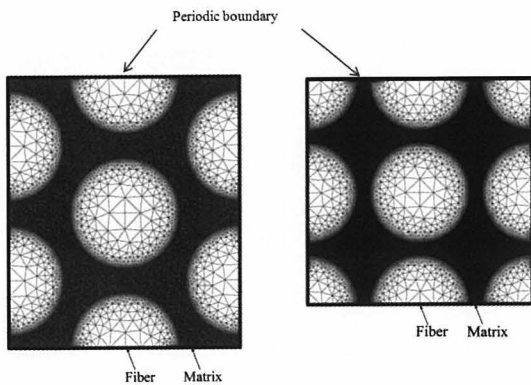


Fig.2 Unit cell models.

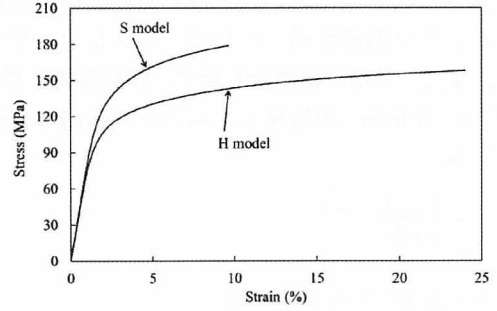


Fig.3 Simulated stress-strain curves.

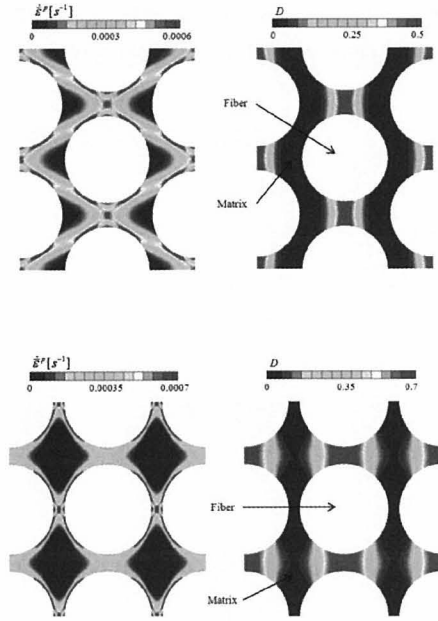


Fig.4 Simulated results.

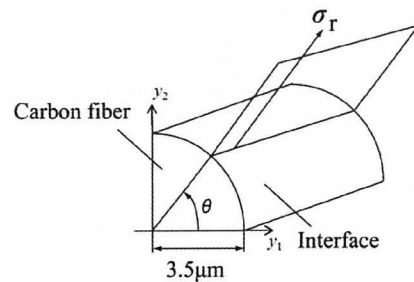


Fig.5 Schematic figure of coordinate system.

から得られた初期剛性は同じであるが、破断時の応力とひずみは大きく異なることがわかる。つまり、繊維の配置が横方向層における層内き裂の初期損傷に大きな影響を与えていることがわかる。Fig. 4 は相当塑性ひずみ分布と損傷分布である。引張方向に繊維が並んでいる部分の繊維間において、せん断帯が形成され、それにより塑性変形が局所化し、損傷が累積していることがわかる。

Fig. 5 に示すような正方モデルにおける繊維半径方

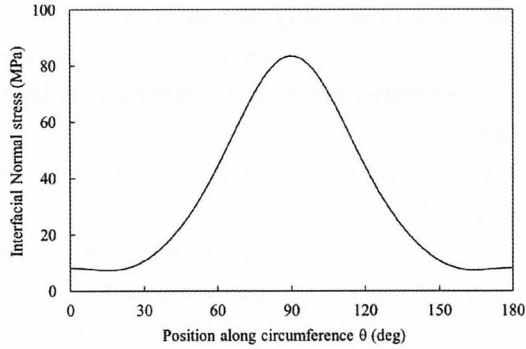


Fig.6 Simulated stress distribution.

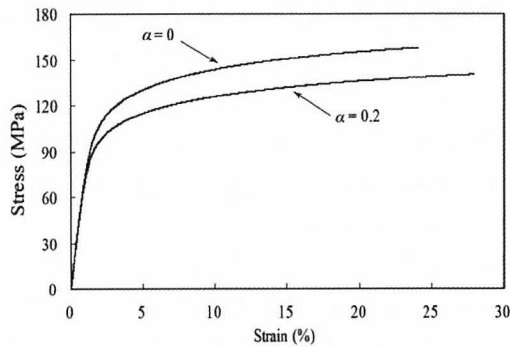
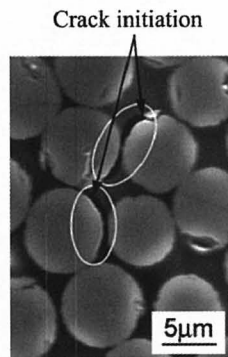


Fig.7 Simulated stress-strain curves.



After crack initiation

Fig.8 Experimental results.

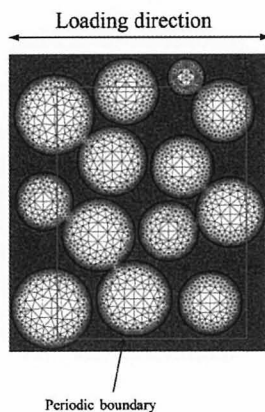
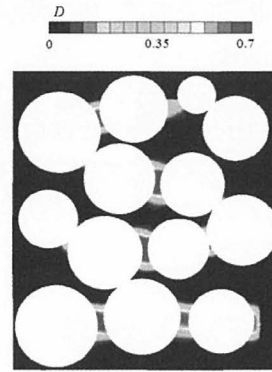


Fig.9 Image-based finite-element model.



Damage variable

Fig.10 Simulated results.

向の応力 (INS) 分布を Fig. 6 に示す。繊維半径方向の応力の最大の場所が、最大の損傷位置と一致している。つまり、繊維半径方向の応力が横方向層における層内き裂の発生を理解するうえで重要である。この結論に関しては、Asp らや北條らによって報告されている結果と整合している。ただし、Asp らや北條らは損傷則を導入しているわけではなく、Asp らは体積膨張エネルギーの最大位置を基に、北條ら実験事実に基づき結論付けている。過去多くの研究が、エポキシの損傷に関する研究では静水圧の影響を無視できないことを指摘している。そこで、次のように、ひずみ硬化に静水圧効果を組み入れて計算を行った。

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}_r \left(\frac{\bar{\sigma} + \alpha \sigma_m}{g(\bar{\epsilon}^p)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (32)$$

ここで、 α は静水圧効果を表す係数である。Fig. 7 に示すように、静水圧が強度に影響を与えていることがわかる。複合材料内部のマトリックスの応力は 3 軸応力状態に近く、エポキシ単体よりも強度が低下していることが想像できる。

最後に、北條ら⁵⁾によって行われた走査型電子顕微鏡下での横方向層における初期層内き裂 (Fig. 8) についての解析を行った。Fig. 9 の様に、写真と同様のメッシュを作成し、周期セルシミュレーションを行った。Fig. 10 はその損傷図であり、実験と同じ位置に損傷が発生しており、先ほどの議論と同様に引張方向に繊維が並んでいる部分の繊維間において損傷が生じている。

4 結 言

複合材積層板の横方向層における初期層内き裂に関して、過去の研究および我々の取り組みを紹介した。十分に成熟した層内き裂の進展過程と比べて、初期損傷の取り組みは十分とはいえない。また、寿命の大半はこの初期損傷発生過程にあるのだから、工学的な意味も十分にある。特に、その発生は弾粘塑性や空洞成長、損傷力学といった、連続体力学や固体力学といっ

たアプローチを必要とする点⁸⁾、従来の線形破壊力学研究と比べて目新しい。

本解説では書けなかったが⁹⁾、実際の初期損傷は試験片の端部にて発生する。このことは研究を行う必要がある。また、負荷速度に応じて破壊の様相が変化することが、報告されている²⁰⁾。このことも今後の研究課題として残されている。

参 考 文 献

- 1) GARRETT, K. W. and BAILEY, J. E., *Journal of Materials Science*, **12**, (1977), 157.
- 2) PARVIZI, A., GARRETT, K. W. and BAILEY, J. E., *Journal of Materials Science*, **13**, (1978), 195.
- 3) McCartney, L. N., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **40**, Issue 1, (1992), 27.
- 4) Boniface, L., Smith, P. A., Bader, M. G. and Rezaifard, A. H., *Journal of Composite Materials*, **31**, (11), (1997), 1080.
- 5) Hobbiebrunken, T., Hojo, M., Adachi, T., Jong, C. D. and Fiedler, B., *Composites : Part A*, **37**, (2006), 2248.
- 6) Hojo, M., Mizuno, M., Hobbiebrunken, T., Adachi, T., Tanaka, M. and Ha, S. K., *Composites Science and Technology*, **69**, (2009), 1726.
- 7) Asp, L. E., Berglund L. A. and Talreja, R., *Composites Science and Technology*, **56**, (1996), 1089.
- 8) Asp, L. E., Berglund, L. A. and Talreja, R., *Composites Science and Technology*, **56**, (1996), 1291.
- 9) Asp, L. E., Berglund L. A. and Talreja, R., *Composites Science and Technology*, **56**, (1996), 657.
- 10) Fiedler, B. Hojo, M. Ochiai, S., Schulte, K. and Ando, M., *Composites Science and Technology*, **61**, (2001), 1615.
- 11) Fiedler, B., Hojo, M. and Ochiai, S., *Composites : Part A*, **33**, (2002), 1323.
- 12) Canal, L. P., Segurado, J. and LLorca, J., *International Journal of Solids and Structures*, **46**, (2009), 2265.
- 13) Okabe, T., Nishikawa, M. and Toyoshima, H., *International Journal of Solids and Structures*, **48**, (2011), 2948.
- 14) Kobayashi, S., Tomii, D. and Shizawa, K., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, **70**, (2004), 810.
- 15) Matsuda, T. , Ohno, N., Tanaka, H. and Shimizu, T., *JSME International Journal, Series A*, **45**, (2002), 538.
- 16) Nishikawa, M. Dr. Eng. Thesis, (2008), The University of Tokyo.
- 17) Pijauder-Cabot, G. and Bazant, Z. P., *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **113**, (1987), 1512.
- 18) Tvergaard, V. and Needleman, A., *International Journal of Solids and Structures*, **32**, (1995), 1063.
- 19) Pierce, D., Shih, C. F. and Needleman, A., *Computers & Structures*, **18**, (5), (1984), 875.
- 20) Koyanagi, J., Yoneyama, S., Nemoto, A. and Melo, J. D. D., *Composites Science and Technology*, **70**, (2010), 1395.

CFRP積層板の長期寿命予測のための加速試験法*

中田 政之** 宮野 靖** 蔡 洪能***

Accelerated Testing Methodology for
Long-Term Life Prediction of CFRP Laminates

by

Masayuki NAKADA, Yasushi MIYANO

(Materials System Research Laboratory, Kanazawa Institute of Technology, Hakusan)

and Hongneng CAI

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China)

The advanced accelerated testing methodology(ATM-2)for the long-term life prediction of CFRP laminates exposed to an actual loading having general stress and temperature history is proposed based on the accelerated testing methodology(ATM-1)established for the long-term life prediction of CFRP laminates exposed to a fixed stress history such as static, creep or fatigue loadings at a constant temperature. The most important condition for ATM-1 is the fact that the same time-temperature superposition principle to be held for the viscoelastic behavior of matrix resin holds for the static, creep and fatigue strengths of CFRP laminates. Furthermore, three conditions as the basis of ATM-2 are introduced with the scientific bases. The long-term fatigue strength of CFRP laminates under an actual loading is formulated based on the three conditions. The viscoelastic coefficients of matrix resin, which perform an important role for the time and temperature dependence of long-term life of CFRP laminates, are also formulated based on the time-temperature superposition principle. The applicability of ATM-2 is demonstrated by predicting the long-term fatigue strengths of typical four directions of unidirectional CFRP laminates.

(Received December 29, 2011)

キー・ワード：複合材料, CFRP, 寿命予測, 加速試験

Key Words : Polymer Composites, CFRP, Life Prediction, Accelerated Testing

1 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) は長期の使用期間中に高い信頼性が要求される航空機や船舶はじめ様々な分野の一次構造材として使われるようになってきた。それと共に、温度、水、その他に曝される実際の環境下における CFRP 構造物の長期寿命予測のための加速試験法が確立されることに期待が高まってきた。すなわち、長期に亘っての高い信頼性を有する CFRP 構造物の開発は、CFRP 積層板の加速試験によるデータの集積の上に、そのデータを使つての CFRP 構造物の耐久性設計、その結果としての CFRP 構造物の開発といった段階を踏むことになるが、この前提としての加速試験の方法論の確立が必要不可欠になってきた。著者らが開発してきた加速試験法は包括的であることから、CFRP が主要構造物に用いられる様々な回転機械、航空機、宇宙構造

物、風力発電の風車、船舶、自動車などの耐久性設計にこれまで利用されてきており、これからも利用されることが期待される。

著者らは CFRP の母材である熱硬化性樹脂の粘弾性挙動に成立する時間-温度換算則 (Time-temperature Superposition Principle: TTSP) を基盤として CFRP 積層板の長期疲労挙動を予測する加速試験法 (Accelerated Testing Methodology: ATM-1) を開発した¹⁾。この ATM-1 は、環境温度、負荷の時間、周波数、振幅といった負荷および環境条件の広い範囲を包含する所謂マスター曲線によって長期寿命の予測を可能にするものである。著者らは、この寿命のマスター曲線を温度、負荷の周波数、破断時間および破断繰返し数の関数として表現する定式化を提案した。しかし、この定式化は CFRP 積層板の疲労寿命を良く表現するものであるが、定式化の科学的根拠に乏しく、負荷振幅や周波数が一定の負荷パターンで一定の温度条件の下での疲労寿命の定式化であった。

最近、著者らは複雑に変動する実際の負荷および温

* 原稿受付 2011年12月29日

** 金沢工業大学材料システム研究所 白山市八束穂

*** 西安交通大学材料科学与工程学院 中国西安市

度履歴に曝された CFRP 積層板の寿命予測に適用できる先進加速試験法 (Advanced Accelerated Testing Methodology: ATM-2) を開発した²⁾. ATM-2 の最も重要な前提条件は ATM-1 と同様に母材である熱硬化性樹脂の粘弾性挙動に成立する時間-温度換算則が CFRP 積層板の静的, クリープ, 疲労強度に成立することである. ATM-2 ではこれに加えて科学的根拠を持った3つの前提条件が加わり, これらの条件の下で実際の負荷および温度履歴における CFRP 積層板の長期疲労寿命の定式化が行われた. この過程で, CFRP 積層板の寿命の時間および温度依存性に重要な役割を演ずる母材樹脂の粘弾性特性係数は時間-温度換算則を基盤として定式化された. この ATM-2 は炭素繊維と熱硬化性樹脂の様々な組み合わせの CFRP 積層板に適用され, その有用性が確認された^{2)~5)}.

本論文は先進加速試験法である ATM-2 の内容を概説し, その具体的な適用例を紹介するものである.

2 マトリックス樹脂の粘弾性によって支配される CFRP の寿命

2・1 熱硬化性樹脂のクリープコンプライアンスのマスター曲線

本節では, CFRP のマトリックスとして使われる熱硬化性樹脂の粘弾性挙動について説明し, 時間-温度換算則に基づいて粘弾性特性係数のマスター曲線を求めることによって, 長期挙動の予測が可能であることを述べる.

Fig. 1 (a) の図中の太枠内の曲線は, 比較的短い時間で, 種々の試験温度 ($T_1 \sim T_3$) において計測した熱硬化性樹脂の粘弾性挙動を表現する特性係数の一つであるクリープコンプライアンス D_c と時間 t の関係を模式的に示したものである. ここで T_1 における D_c を基準として他の温度における D_c が互いに滑らかに重なり合うように横軸の対数時間軸および縦軸の対数 D_c 軸に沿って平行移動することによって, 基準温度 $T_0 (=T_1)$ における換算時間 t' に対する1本の滑らかなマスター曲線を求めることができる. このマスター曲線を用いることにより, 任意の温度下における長期の D_c を予測することが可能となる.

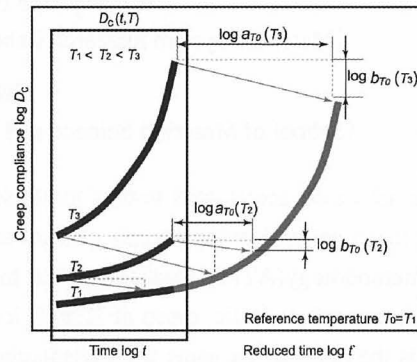
マスター曲線作成時の横軸の平行移動量である時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ および縦軸の平行移動量である温度移動因子 $b_{T_0}(T)$ と温度の関係を Fig. 1 (b) および Fig. 1 (c) にそれぞれ示す. これらは, 式 (1) および式 (2) でそれぞれ定義される.

$$a_{T_0}(T) = \frac{t}{t'} \quad (1)$$

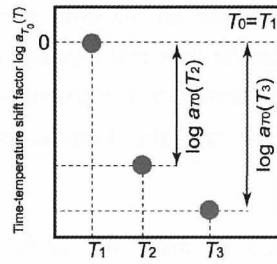
$$b_{T_0}(T) = \frac{D_c(t, T)}{D_c(t', T_0)} \quad (2)$$

$a_{T_0}(T)$ は温度の上昇による計測時間の加速倍率を表しており, 本加速試験法においては, これを精度よく評価することが重要となる. また, $b_{T_0}(T)$ は温度

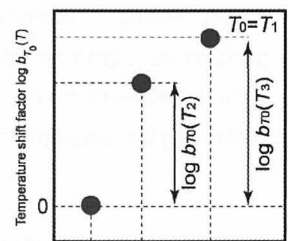
変化に伴う熱硬化性樹脂の密度変化などによる D_c の変化を表している. マスター曲線作成時に横移動に加えて縦移動を行うことによって, 長期の D_c を精度よく求めることができることを著者らは実験的に確認している⁶⁾. クリープコンプライアンスを精度よく計測できる時間範囲は他の特性係数に較べて長時間側にあることから, これを使って長期の特性係数を予測する上では有利であるが, 計測に長時間を要することからより簡易的な決定方法が期待される.



(a) Master curve of creep compliance



(b) Time-temperature shift factor



(c) Temperature shift factor

Fig.1 Master curve of creep compliance and shift factors.

2・2 動的粘弾性試験による損失正接と貯蔵弾性係数の測定と定式化

本節では, 粘弾性特性係数のマスター曲線と時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ の簡易な決定法として, 動的粘弾性試験による方法を説明する.

Fig. 2 の左側の曲線は, 動的粘弾性試験によって求めた種々の試験温度 ($T_1 \sim T_3$) における損失正接 $\tan \delta$ と時間 (ここでは周波数の逆数 $(1/f)$) の関係を模式的に示したものである. 損失正接 $\tan \delta$ は, 貯蔵弾性係数 E' と損失弾性係数 E'' の比であることから, D_c のマスター曲線作成時のような縦移動は本質的に不要であり, 横軸の平行移動のみによって右側に示すような $\tan \delta$ のマスター曲線を構成し, 時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ を比較的精度よく決定することができると考えられる.

次に, Fig. 3 に示すように, 同じく動的粘弾性試験によって求めた種々の試験温度 ($T_1 \sim T_3$) における

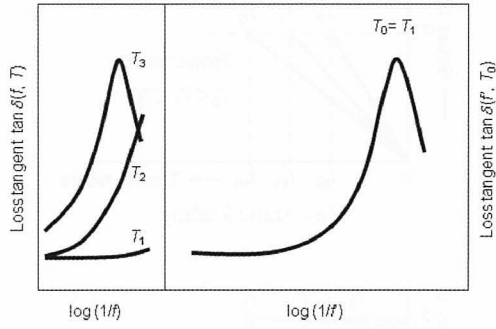


Fig. 2 Master curve of loss tangent measured by DMA.

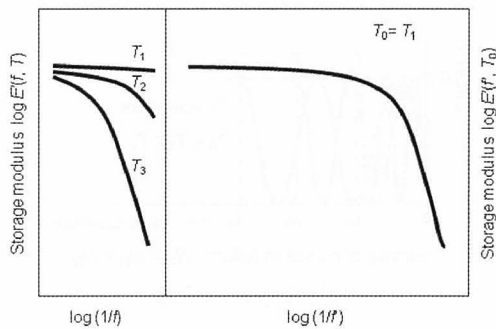
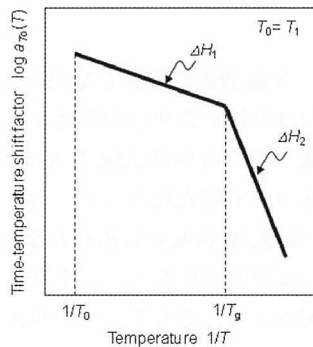
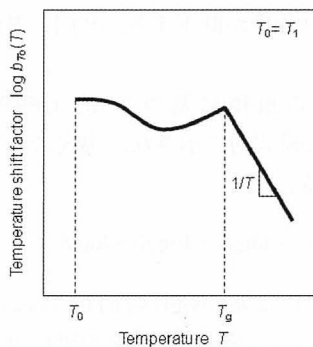


Fig. 3 Master curve of storage modulus measured by DMA.



(a) Time-temperature shift factor



(b) Temperature shift factor

Fig. 4 Formulations for the shift factors.

貯蔵弾性係数 E' と時間（周波数の逆数 $(1/f)$ ）の関数の曲線より、 E' のマスター曲線を作成する。このときの横軸の平行移動量は $\tan \delta$ のマスター曲線により決定されるものを用い、各温度の E' が滑らかに重なり合うように縦移動を行い、温度移動因子 $b_{T_0}(T)$ を決定する。

時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ と温度の関係は WLF 式やアレニウス式で表現されるが、架橋密度の高い熱硬化性樹脂の場合はガラス転移温度 T_g 以上はもちろん T_g 以下でもアレニウス式に従う⁷⁾。本加速試験方法では、Fig. 4 (a) に示すように、 T_g を境に低温側と高温側で異なる活性化エネルギー ΔH_1 および ΔH_2 をもつアレニウス式によって定式化する。

$$\log a_{T_0}(T) = \frac{\Delta H_1}{2.303G} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) H(T_g - T) + \left[\frac{\Delta H_1}{2.303G} \left(\frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_0} \right) + \frac{\Delta H_2}{2.303G} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_g} \right) \right] (1 - H(T_g - T)) \quad (3)$$

ここで、 G はガス定数 ($8.314 \times 10^{-3} [\text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{mol})]$) であり、 H はヘビサイドの階段関数である。

温度移動因子 $b_{T_0}(T)$ については、 T_g 以上の温度領域ではゴム状態つまりエントロピー弾性より応力は絶対温度に比例する⁷⁾ものとして、 T_g 以下の温度領域では温度に対して密度が変化することなどを考慮して、式 (4) で表現した。

$$\log b_{T_0}(T) = \left[\sum_{i=0}^4 b_i (T - T_0)^i \right] H(T_g - T) + \left[\sum_{i=0}^4 b_i (T_g - T_0)^i + \log \frac{T_g}{T} \right] (1 - H(T_g - T)) \quad (4)$$

ここで、 b_i ($i = 0 \sim 4$) は近似係数である。

貯蔵弾性係数 E' のマスター曲線より、式 (5) を用いてクリープコンプライアンス D_c のマスター曲線を近似的に求めることができる⁸⁾。さらに、求めた D_c のマスター曲線は、式 (6) を用いて、Fig. 5 に示すように定式化することができる。

$$D_c(t) \sim 1/E(t), \quad E(t) \cong E'(\omega) \Big|_{\omega \rightarrow 2/\pi t} \quad (5)$$

$$\log D_c = \log D_{c,0}(t'_0, T_0) + \log \left[\left(\frac{t'}{t'_0} \right)^{m_g} + \left(\frac{t'}{t'_g} \right)^{m_r} \right] \quad (6)$$

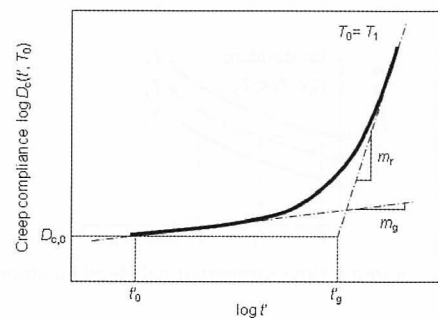


Fig. 5 Formulation for the master curve of creep compliance.

ここで, $D_{c,0}$ は基準換算時間 t'_0 および基準温度 T_0 におけるクリープコンプライアンス, t'_g は基準温度 T_0 における換算ガラス転移時間, m_g および m_r はマスター曲線のガラス状およびゴム状領域における勾配である.

2・3 CFRP の強度への時間-温度換算則の適用性とマスター曲線

本加速試験法における特徴は, 前節で述べた熱硬化性樹脂の粘弾性挙動に成立する時間-温度換算則が, これをマトリックスとする CFRP の静的強度, クリープ強度, 疲労強度にも適用できるとすることにある.

Fig. 6 は, 熱硬化性樹脂に対する一定の応力負荷に対するひずみ応答の時間および温度依存性を模式的に表現したものである. ここで, 温度 T_0 , 時刻 t_0 におけるひずみ ϵ_0 と同じひずみは, 異なる温度 T_1, T_2 ではそれぞれ時刻 t_1, t_2 で計測されるとする. Fig. 7 は, この熱硬化性樹脂をマトリックスとする CFRP の同じ破壊応力を異なる温度 T_0, T_1, T_2 で計測した時の模式図であり, (a) は定ひずみ速度 (静的) 負荷, (b) は一定 (クリープ) 負荷, (c) は繰り返し (疲労) 負荷に対するものをそれぞれ示したものである. これより, CFRP の各負荷に対する破壊応力の時間依存性と温度依存性の間にマトリックスである熱硬化性樹脂のクリープ挙動に成立するものと同じ時間-温度換算則が成立するとすれば, 時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ は, 式 (7) で表わされる.

$$a_{T_0}(T_i) = \frac{t_i}{t_0} = \frac{t_{si}}{t_{s0}} = \frac{t_{ci}}{t_{c0}} = \frac{t_{fi}}{t_{f0}} \quad (7)$$

ここで, $t_{s0}, t_{c0}, t_{f0}, t_{si}, t_{ci}, t_{fi}$ は温度 T_0 および T_i における静的負荷, クリープ負荷, 疲労負荷に対する破壊時間をそれぞれ示す.

著者らは, PAN 系炭素繊維と熱硬化性樹脂の組合せからなる種々の積層構成の CFRP について, 種々の

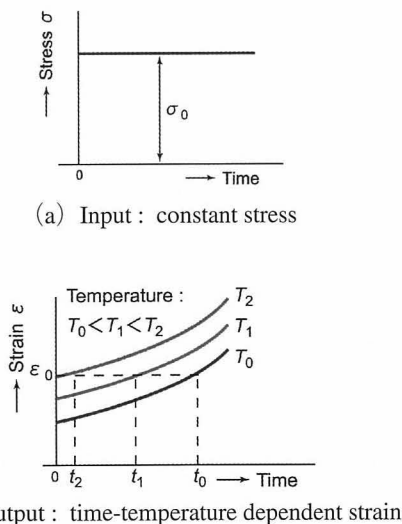


Fig.6 Viscoelastic behaviour of polymer resin.

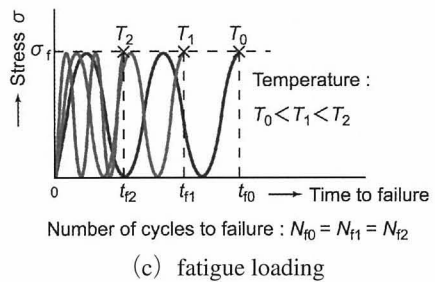
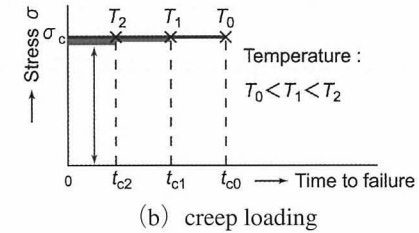
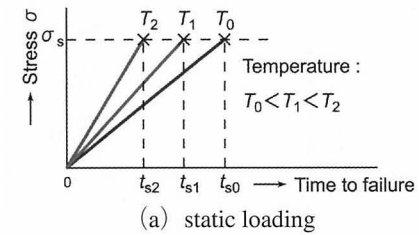


Fig.7 Definition of static, creep, and fatigue loadings and failure time for each loading.

負荷方向, 負荷形式の強度に対してこの関係が成り立つことを実験的に確認している^{1),9)}.

3 先進加速試験法と定式化

3・1 3つの前提条件と定式化の基礎

著者らが提案している加速試験法 ATM-2 は, 次の3つの根拠に基づいて定式化される. (A) CFRP の破壊確率は時間, 温度, 負荷履歴に依存しない. (B) CFRP の強度の時間および温度依存性はマトリクス樹脂の粘弾性挙動に支配される. そして, それゆえ, マトリクス樹脂の粘弾性挙動に成立する時間-温度換算則が CFRP の強度の時間依存性と温度依存性の間に成立する. (C) CFRP に加わる応力振幅の繰り返しによる損傷の蓄積により強度が低下する. 時間, 温度, 周波数に依存しない.

上述の3つの根拠に基づけば, CFRP の寿命は Fig. 8 のように模式的に示され, 次式によって表現することができる.

$$\log \sigma_f = \log \sigma_{f0} + \log f_A + \log f_B + \log f_C \quad (8)$$

ここで, σ_{f0} と f_A は基準換算時間 t'_0 における静的強度とそのばらつきであり, CFRP の繊維の種類, 織り構造, 繊維体積含有率, 負荷方向などによって決定される. f_B はマトリクス樹脂の粘弾性挙動によって

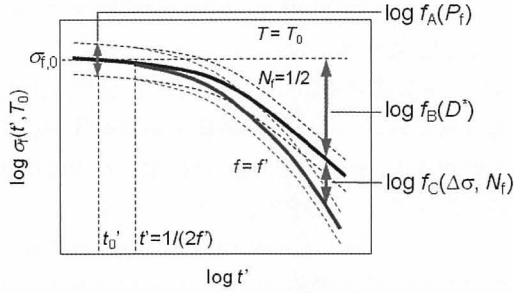


Fig. 8 Master curves of static and fatigue strength of CFRP.

決定される強度変化, f_c は応力振幅と破壊繰返し数によって決定される強度低下をそれぞれ示す。

3・2 破壊確率 f_A

CFRP の繊維の種類, 織り構造, 繊維体積含有率, 負荷方向などによって決定される強度はワイブル分布を仮定すると次式で表現される。

$$\sigma(P_i) = \sigma_0 [-\ln(1 - P_i)]^{1/\alpha} \quad (9)$$

ここで, σ_0 は尺度母数, α は形状係数, P_i は破壊確率である。

Christensen と Miyano¹⁰⁾ は, 形状係数 α が時間と温度に依存せず, 任意の時間と温度における強度とその尺度母数の比は次式で表わされることを実験と理論から証明しており, これが式 (8) の f_A となる。

$$f_A = \frac{\sigma(P_i, t', T_0)}{\sigma_0(t', T_0)} = [-\ln(1 - P_i)]^{1/\alpha} \quad (10)$$

3・3 強度変化 f_B

著者らは, 一方向 CFRP について, その繊維方向引張強度, 繊維方向圧縮強度, 繊維直角方向引張強度を広い範囲の負荷速度と温度のもとで計測し, それぞれの強度とマトリックス樹脂の粘弾性特性との関係を調べたところ, これらの強度の時間および温度依存性がマトリックス樹脂のコンプライアンスのべき乗で表現できることを明らかにした¹¹⁾。これより, CFRP の強度の時間および温度依存性とマトリックス樹脂の粘弾性特性係数との関係は式 (11) によって表現することができる。

$$f_B = \frac{\sigma_i(t', T_0)}{\sigma_i(t'_0, T_0)} = \left(\frac{1/D^*(t', T_0)}{1/D_c(t'_0, T_0)} \right)^{n_r} \quad (11)$$

ここで, $\sigma_i(t', T_0)$ は換算時間 t' , 基準温度 T_0 における CFRP の強度, $\sigma_i(t'_0, T_0)$ は換算基準時間 t'_0 , 基準温度 T_0 における CFRP の強度であり, $D_c(t'_0, T_0)$ は換算基準時間 t'_0 , 基準温度 T_0 におけるマトリックス樹脂のクリープコンプライアンスである。 n_r は負荷方向, 負荷形式に応じた破壊モードによって決定されるパラメータである。 $D^*(t', T_0)$ はマトリックス樹脂の任意の温度・負荷履歴に対するコンプライアンスであり, 次式で表現できる。

$$D^*(t', T_0) = \frac{\varepsilon(t', T_0)}{\sigma(t', T_0)} = \frac{\int_0^{t'} D_c(t' - \tau', T_0) \frac{d\sigma(\tau')}{d\tau'} d\tau'}{\sigma(t', T_0)},$$

$$t' = \int_0^t \frac{d\tau}{a_{T_0}(T(\tau))} \quad (12)$$

ここで, $\sigma(\tau')$ はマトリックス樹脂の任意の応力履歴, $a_{T_0}(T(\tau))$ はマトリックス樹脂の任意の温度履歴に対する時間-温度移動因子である。

3・4 強度低下 f_c

CFRP の負荷の繰返しに対する強度の低下を表現する適切な破壊モデルは, 著者らの知る限り今のところ見当たらない。ここでは, CFRP の疲労強度が負荷の繰返しによる損傷の蓄積によって低下することを線形損傷則であるマイナー則と残留強度の概念から定式化を行った。また, CFRP の損傷は負荷振幅と繰返し数のみの関数とし時間や温度の影響は受けないものと仮定した。

Fig. 9 に示すように, CFRP の S-N 曲線が直線で表わされ, その傾きが応力振幅と応力比のみによって決まるとすれば, CFRP の繰返し負荷に対する強度の低下比 f_c は次式で表現できる。

$$f_c = \frac{\sigma_f(N_f)}{\sigma_f(N_0)} \quad (13)$$

$$\log \frac{\sigma_f(N_f)}{\sigma_f(N_0)} = -\frac{(1-R)}{2} \cdot n_r \cdot \log \left(\frac{N_f}{N_0} \right) + n_r^* \cdot \log(1 - k_D) \quad (14)$$

ここで, $\sigma_f(N_0)$ は静的負荷に対する強度であり, 静的負荷が繰返し負荷周期の半分とすれば $N_0 = 1/2$ となる。 N_f および R はそれぞれ破壊繰返し数および応力比である。 n_r および n_r^* は材料定数である。 k_D は損傷の累積度であり, マイナー則に基づいて次式で表わされる。

$$k_D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} < 1 \quad (15)$$

ここで, n_i および N_{fi} は, Fig. 10 のような繰返し負荷パターンを仮定した場合のそれぞれの応力ステップにおける応力の繰返し数とその応力が最初から変動せずに負荷された場合の破壊繰返し数である。

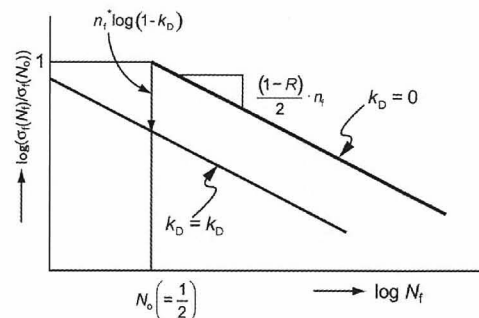


Fig. 9 S-N curve concerning with residual strength.

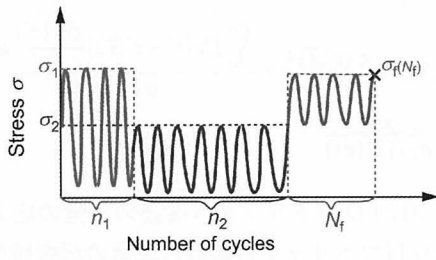


Fig.10 Variable stress histories.

3・5 先進加速試験法を基盤とする定式化

3・2節から3・4節において定式化された f_A , f_B , f_C を用いて, CFRP の任意の負荷履歴・温度履歴に対する長期の疲労強度を表わすと次式となる.

$$\begin{aligned} \log \sigma_f(t', T_0, N_f, R, P_f) = & \log \sigma_{f0}(t_0', T_0) \\ & + \frac{1}{\alpha} \log[-\ln(1 - P_f)] \\ & - n_r \log \left[\frac{D^*(t', T_0)}{D_c(t_0', T_0)} \right] \\ & - \frac{(1 - R)}{2} n_f \log(2N_f) \\ & + n_f^* \log(1 - k_D) \end{aligned} \quad (16)$$

定ひずみ速度負荷を受ける CFRP の強度 (静的強度) の場合, 式 (16) は次式のように表わされる.

$$\begin{aligned} \log \sigma_f(t', T_0, P_f) = & \log \sigma_{f0}(t_0', T_0) \\ & + \frac{1}{\alpha} \log[-\ln(1 - P_f)] \\ & - n_r \log \left[\frac{D^*(t', T_0)}{D_c(t_0', T_0)} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

ここで, D^* は定ひずみ速度負荷を受ける場合のマトリックス樹脂のコンプライアンスであり, 定ひずみ速度負荷を1段の階段状の応力履歴とみなせば近似的に次式で表わされる.

$$D^*(t', T_0) \approx D_c(t'/2, T_0) \quad (18)$$

応力比 $R = 0$ の正弦波状の繰り返し応力負荷を受ける CFRP の強度 (片振り疲労強度) の場合, 未損傷材 ($k_D = 0$) を仮定すれば次式で表わされる.

$$\begin{aligned} \log \sigma_f(t', T_0, N_f, R, P_f) = & \log \sigma_{f0}(t_0', T_0) \\ & + \frac{1}{\alpha} \log[-\ln(1 - P_f)] \\ & - n_r \log \left[\frac{D^*(t', T_0)}{D_c(t_0', T_0)} \right] \\ & - \frac{1}{2} n_f \log(2N_f) \end{aligned} \quad (19)$$

ここで, D^* は応力比 $R = 0$ の正弦波状の繰り返し応力負荷を受ける場合のマトリックス樹脂のコンプライアンスであり, 次式で表わされる.

$$D^*(t', T_0) \approx \frac{1}{2} D_c(t', T_0) + \frac{1}{2} D_c \left(\frac{1}{4f^{\alpha}}, T_0 \right), \quad f' = \frac{N_f}{t'} \quad (20)$$

ここで, f' は基準温度 T_0 における換算周波数である.

3・6 定式化の手順

CFRP の長期疲労強度を前節において定式化した. 式に含まれているいくつかの材料定数は実験的に決定する必要がある. それらは, Fig. 11 に示した手順に従って加速試験を行い, 決定することができる.

まず, マトリックス樹脂について, 種々の時間と温度において粘弾性試験を行い, クリープコンプライアンス D_c を求め, 時間-温度換算則に基づいて D_c のマスター曲線を求める. これにより, 時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ を決定する.

次に, 未損傷材 ($k_D = 0$) の CFRP について, 一つのひずみ速度で, 種々の温度のもとで静的試験を行い, 室温における静的強度 σ_{f0} , ワイブル形状係数 α , 材料定数 n_r を決定する. また, 上述のように求めた時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ を用いて, 静的強度のマスター曲線を求めることができる. さらに, これらの材料定数がわかれば, 負荷応力が一定の場合のクリープ強度のマスター曲線も容易に求めることができる.

そして, 未損傷材 ($k_D = 0$) の CFRP について, 一つの周波数で, 種々の温度のもとで片振りの疲労試験を行い, 材料定数 n_f を決定する. これによって, 片振り疲労強度のマスター曲線を求めることができる. なお, 損傷材 ($k_D \neq 0$) の CFRP の評価については, その都度, 適宜任意の k_D の CFRP を用意し, 上述の加速試験を行い, 材料定数 n_f^* を決定すれば良い.

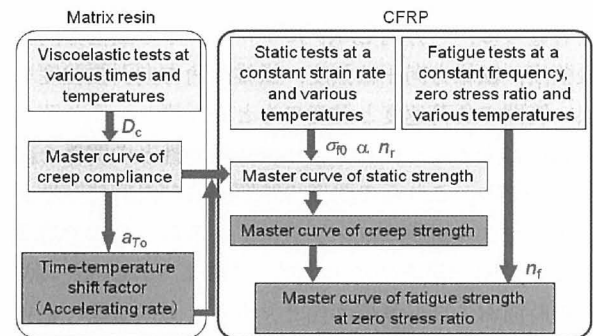


Fig.11 Determination procedure of materials parameters by accelerated testing.

4 一方向 CFRP 積層板の各種負荷方向の静的および疲労強度のマスター曲線

前節で示した手順に従って加速試験を行った結果の一例^{1),4)}を以下に紹介する.

4・1 一方向 CFRP 積層板と試験方法および試験条件

ここでは, PAN 系炭素繊維とエポキシ樹脂からなる一方向 CFRP 積層板 (MR60H/1053) を取り上げる. この積層板は, MR60H/1053 の一方向プリプレグを試験片厚さに合うように所定枚数積層し, オートクレーブ法によって成形したものである. オートクレーブにより 180℃ で 2 時間の硬化を行い, その後,

所定の試験片形状・寸法に加工し、マトリックス樹脂の化学的な状態が加速試験中に変化しないようにするために、160℃で70時間の後硬化処理を施した。

マトリックス樹脂の粘弾性特性試験については、マトリックス樹脂単体での評価は行わず、一方向CFRP積層板の繊維直角方向について動的粘弾性試験を実施した。動的粘弾性試験には粘弾性アナライザー（レオメトリックス社製RSA-III）を用いた。試験片形状は短冊形であり、寸法は長さ50mm、幅6.4mm、厚さ1.6mmである。 $T=25\sim 210^{\circ}\text{C}$ の範囲の種々の一定温度のもとで、 $f=0.01\text{Hz}\sim 10\text{Hz}$ の範囲の種々の周波数で、正弦波による0.01%の定ひずみ振幅を試験片に加え、種々の温度および周波数における損失正接 $\tan\delta$ と貯蔵弾性係数 E' を求めた。一方向CFRP積層板の繊維直角方向の貯蔵弾性係数 E' からマトリックス樹脂のクリープコンプライアンス D_c を求める方法は後述する。

上述の一方向CFRP積層板について、繊維方向引張(LT)、繊維方向3点曲げ(LB)、繊維直角方向3点曲げ(TB)、繊維直角方向圧縮(TC)による静的試験と疲労試験を種々の一定温度の下で実施し、それぞれの試験により、繊維方向引張強度 X 、繊維方向圧縮強度 X' 、繊維直角方向引張強度 Y 、繊維直角方向圧縮強度 Y' を求めた。なお、繊維方向3点曲げ試験においては圧縮破壊を生じ、繊維直角方向3点曲げ試験においては引張破壊を生じることから、それぞれの3点曲げ試験によって求めた曲げ強度を繊維方向圧縮強度および繊維直角方向引張強度とした。静的試験および疲労試験の試験片形状・寸法は同じで、繊維方向引張試験ではISO527、繊維方向および繊維直角方向3点曲げ試験ではISO14125、繊維直角方向圧縮試験ではISO604に準じた。具体的な試験条件をTable Iに示す。

Table I Testing method and conditions.

		Cross-head speed V [mm/min]	Loading frequency f [Hz]	Stress ratio R	Temperature T [°C]
LT	static	1	-	-	25, 80, 150, 180
	fatigue	-	2	0.05	25, 80, 150
LB	static	2	-	-	25, 80, 150, 180
	fatigue	-	2	0.05	25, 80
TB	static	2	-	-	25, 80, 150
	fatigue	-	2	0.05	25, 80, 150
TC	static	2	-	-	25, 80, 150
	fatigue	-	2	0.05	25, 80, 150

4・2 マトリックス樹脂の粘弾性特性

一方向CFRP積層板の繊維直角方向について、種々の周波数および温度の下で動的粘弾性試験を行い、得

平成24年3月

られた各温度における損失正接 $\tan\delta$ と時間(周波数の逆数 $(1/f)$)の関係をFig.12の左側に示す。各温度の $\tan\delta$ を横軸の対数時間軸に対して平行移動することによって互いに滑らかに重なり合うようにして求めた基準温度 $T_0=25^{\circ}\text{C}$ における $\tan\delta$ のマスター曲線を右側に示す。滑らかな1本のマスター曲線が得られたことから、マトリックス樹脂の粘弾性挙動には時間-温度換算則が成立するといえる。

$\tan\delta$ のマスター曲線作成時の横軸の平行移動量である時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ は、Fig.14に□印で示すように、ガラス転移温度 T_g を境に、低温側と高温側で異なる活性化エネルギー ΔH_1 および ΔH_2 をもつアレニウス式で近似することができる。

一方向CFRP積層板の繊維直角方向の貯蔵弾性係数 E' と時間(周波数の逆数 $(1/f)$)の関係をFig.13の左側に示す。各温度の E' について、横軸に対する平行移動はFig.14に□印で示す $\tan\delta$ のマスター曲線作成時のものを適用し、縦軸に対する平行移動は各温度の E' が互いに滑らかに重なり合うようにして求めた $T_0=25^{\circ}\text{C}$ における E' のマスター曲線を右側に示す。 E' についても滑らかな1本のマスター曲線が得られた。

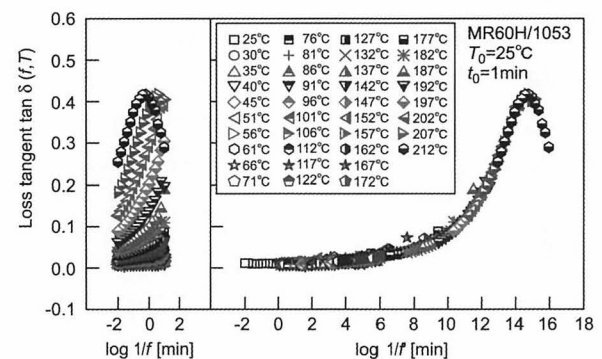


Fig.12 Master curve of loss tangent in the transverse direction of unidirectional CFRP.

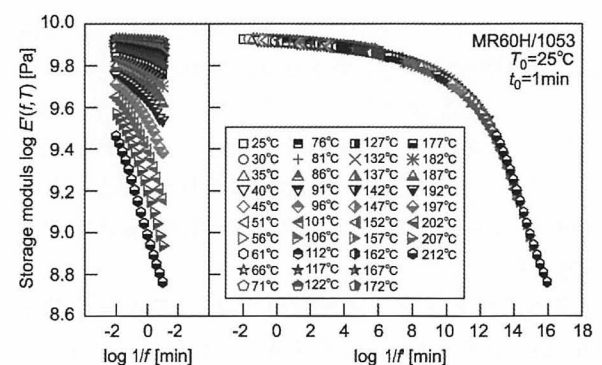


Fig.13 Master curve of storage modulus in the transverse direction of unidirectional CFRP.

E' のマスター曲線作成時の横軸の平行移動量である時間-温度移動因子 $a_{T_0}(T)$ と縦軸の平行移動量で

ある温度移動因子 $b_{T_0}(T)$ (Fig. 14の○印) は, 式 (3) および式 (4) により近似することができる. それぞれの近似線を Fig. 14に示すとともに, 近似により決定された各パラメータを Table II に示す.

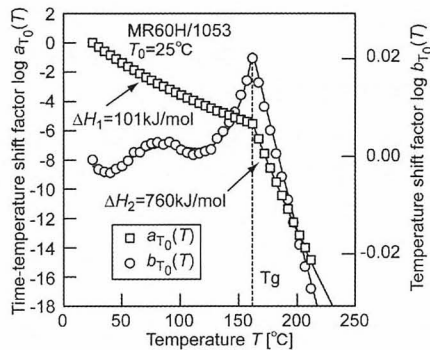


Fig.14 Time-temperature shift factor $a_{T_0}(T)$ and temperature shift factor $b_{T_0}(T)$ for storage modulus in the transverse direction of unidirectional CFRP.

Table II Material parameters of time-temperature shift factor $a_{T_0}(T)$ and temperature shift factor $b_{T_0}(T)$ for storage modulus in the transverse direction of unidirectional CFRP.

T_0	[°C]	25
T_g	[°C]	162
ΔH_1	[kJ/mol]	101
ΔH_2	[kJ/mol]	760
b_0	[-]	1.13E-02
b_1	[-]	-9.85E-04
b_2	[-]	2.43E-05
b_3	[-]	-2.23E-07
b_4	[-]	6.98E-10

一方向 CFRP 積層板の繊維直角方向の貯蔵弾性係数 E' のマスター曲線より, 式 (5) を用いてクリープコンプライアンス D_c のマスター曲線を求めると同時に, 複合則を用いて, マトリックス樹脂単体の D_c のマスター曲線を求めることができる. ここでは, 複合則として, 植村らの平均化近似解析による式¹²⁾を採用し, マトリックス樹脂の基準換算時間 t'_0 および基準温度 T_0 における縦弾性係数を $E=3.0\text{GPa}$ と仮定して求めた.

求めたマトリックス樹脂の D_c のマスター曲線を Fig. 15に示す. また, このマスター曲線を式 (6) により近似した. 得られた近似曲線を図中に示すとともに, 近似により決定された各パラメータを Table III に示す.

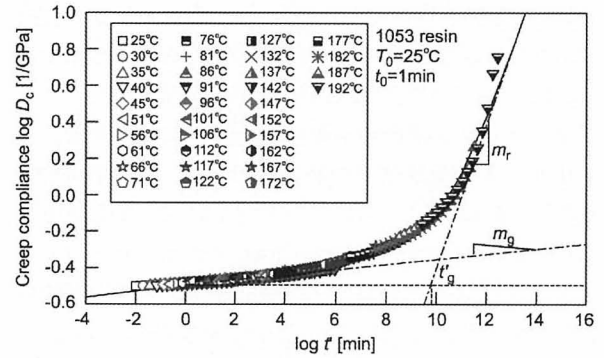


Fig.15 Mater curve of creep compliance for matrix resin calculated from storage modulus in the transverse direction of unidirectional CFRP.

Table III Material parameters of creep compliance for matrix resin calculated from storage modulus in the transverse direction of unidirectional CFRP.

$D_{c,0}(t'_0, T_0)$	[1/GPa]	0.333
t'_0	[min]	1
t'_g	[min]	9.85E9
m_g	[-]	0.0170
m_r	[-]	0.413

4・3 一方向 CFRP 積層板の各種負荷方向の静的および疲労強度のマスター曲線

一方向 CFRP 積層板の繊維方向引張強度 X , 繊維方向圧縮強度 X' , 繊維直角方向引張強度 Y , 繊維直角方向圧縮強度 Y' のマスター曲線を Fig. 16および Fig. 17に示す. 各図の上図は静的強度, 下図は疲労強度を示す. 左図は, 種々の温度における静的強度および疲労強度と破壊時間の関係を示す. 右図は, Fig. 14の a_{T_0} を用いて基準時間 $T_0=25^\circ\text{C}$ に換算した破壊時間に対する静的強度および疲労強度を示す. 右図の実線, 点線および破線は式 (17) および式 (19) を用いて実験結果を近似したものであり, それぞれ強度の尺度母数, 破壊確率10%および90%の応力水準を示す. これらの図より, すべての結果を式(17)および式(19)

Table IV Material parameters of master curves of fatigue strengths of unidirectional CFRP.

	X	X'	Y	Y'
σ_{T_0} [MPa]	2831	2426	122	212
n_r	0.142	1.00	2.33	2.04
n_f	0.07	0.06	0.14	0.06
α	50.4	36.7	7.73	17.6
α_s	19.0	13.4	12.1	15.0
α_f	6.23	8.70	7.00	6.23

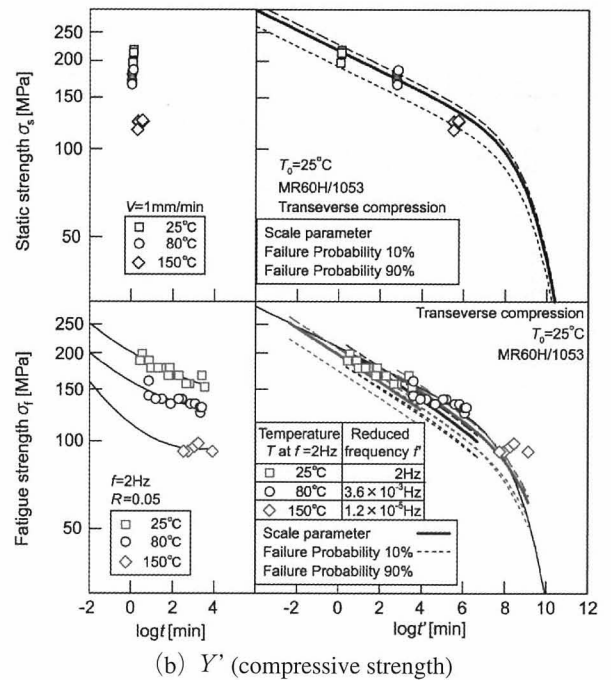
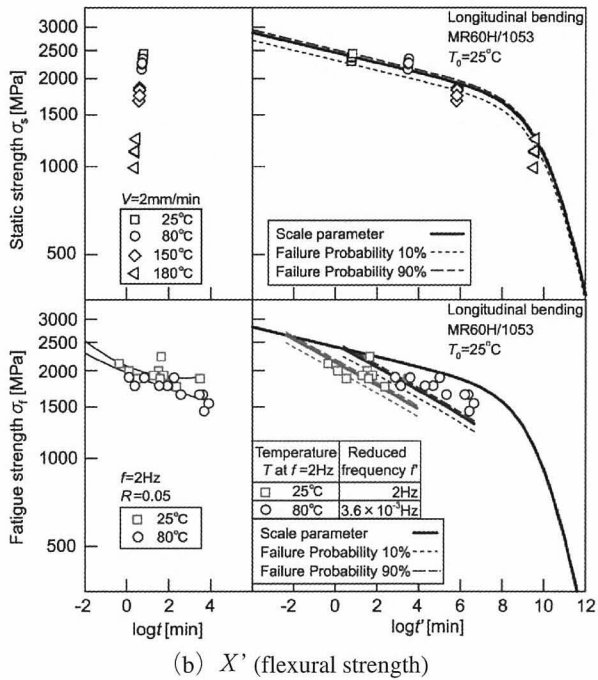
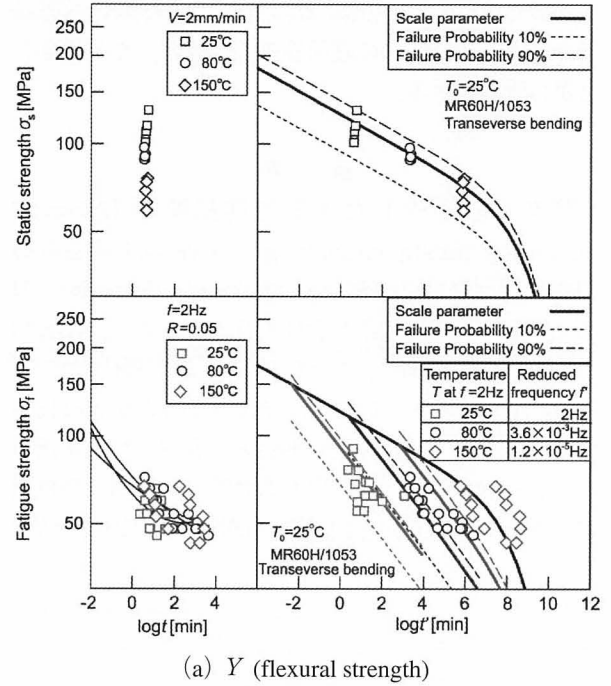
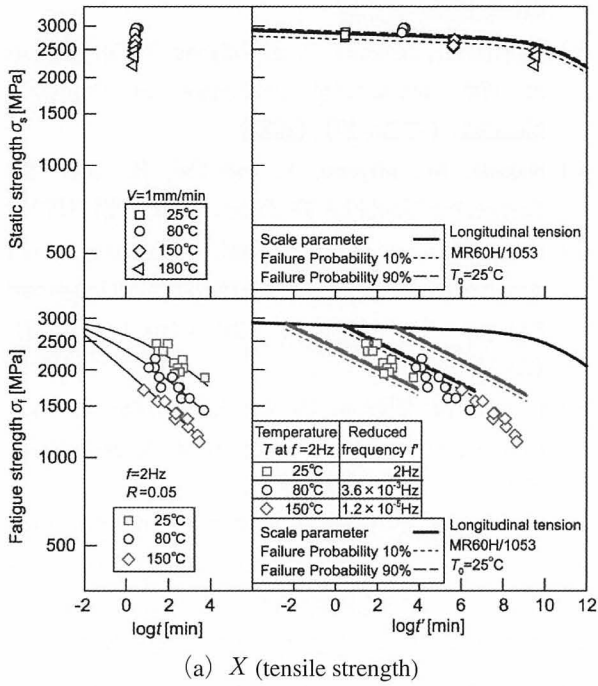


Fig.16 Mater curves of static and fatigue strengths in the longitudinal direction of unidirectional CFRP.

Fig.17 Mater curves of static and fatigue strengths in the transverse direction of unidirectional CFRP.

で近似することができ、 $\sigma_{t,0}$, α , n_r , n_f を決定することができた。近似により決定された各パラメータを Table IV に示す。なお、 α_s および α_f はそれぞれ静的強度および疲労強度の全試験温度のデータより求めた参考値である。

5 結論

著者らが開発した先進加速試験法 (Advanced Accelerated Testing Methodology: ATM-2) について、その基盤となっている科学的根拠を説明し、実際の負

荷および温度履歴における CFRP 積層板の長期疲労寿命の定式化について概説した。また、その適用例として、PAN 系炭素繊維とエポキシ樹脂の組合せから成る一方方向 CFRP 積層板の繊維方向引張および圧縮強度、繊維直角方向引張および圧縮強度を評価し、その有用性を紹介した。

今後は、本手法の適用限界をさらに明確にするとともに、本手法の科学的根拠である条件 (B) および (C) の理論的検討、使用環境による化学的な劣化の影響の検討、今後の利用が期待される新しい繊維と樹脂の組

合せから成る FRP (たとえば炭素繊維と熱可塑性樹脂の組合せなど) への適用性の検討など, やるべきことが山積している。

謝 辞

著者らが開発した先進加速試験法 (Advanced Accelerated Testing Methodology: ATM-2) の基本的概念の構築は ONR (Office of Naval Research: N000140110949) の支援を受けて行った。また, 本研究を遂行するにあたり, Stanford 大学航空宇宙学科の S. W. Tsai 教授と R. M. Christensen 教授および Ljubljana 大学機械工学科の I. Emri 教授より有益な助言を頂いた。さらに, 本解説で引用した実験データは, 経済産業省の「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの 1 テーマである「複合材非加熱成形技術開発」の一環として, RIMCOF との契約に基づき実施した試験研究により取得したものである。この場を借りて, 関係各位に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Miyano, Y., Nakada, M. and Cai, H., *Journal of Composite Materials*, **42**, (2008), 1897.
- 2) Miyano, Y., Nakada, M. and Cai, H., *Proceedings of 17th International Conference on Composite Materials* (ICCM-17), (2009).
- 3) Nakada, M., Hanatani, Y. and Miyano, Y., *Proceedings of 17th International Conference on Composite Materials* (ICCM-17), (2009).
- 4) Nakada, M., Miyano, Y. and Cai, H., *The 15th Composites Durability Workshop (CDW-15)*, (2010).
- 5) Nakada, M., Makino, K., Hatori, D., Miyano, Y. and Katoh, H., *Proceedings of 12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-12)*, (2011).
- 6) Nakada, M., Miyano, Y., Cai, H. and Kasamori, M., *Mechanics of Time Dependent Materials*, **15**, (2011), 309.
- 7) 隆 雅久, 國尾 武, *材料システム*, **6**, (1987), 21.
- 8) Christensen, R. M., *Theory of Viscoelasticity*, 2nd edition, Dover Publications, Inc., (1982), 142.
- 9) 例えば, 中田政之, 宮野 靖, *実験力学*, **6**, (2006), 115.
- 10) Christensen, R. M. and Miyano, Y., *International Journal of Fracture*, **137**, (2006), 77.
- 11) Yamashiro, S., Cai, H., Nakada, M. and Miyano, Y., *Proceedings of the 3rd International Conference on Materials and Processing (ICM&P 2008)*, (2008).
- 12) 植村益次, 山田直樹, *材料*, **24**, (1975), 156.

クラックアレスターを用いたき裂進展評価について*

廣 瀬 康 夫**

Crack Onset Diagram using Crack Arrester

by

Yasuo HIROSE

(Materials System Research Laboratory, Kanazawa Institute of Technology, Hakusan)

Foam core sandwich panel structures are an excellent structural concept to realize full potential capabilities of composite materials owing to its high strength to weight and stiffness to weight ratio together with suitable formability for integral structures. However, degradation of strength due to the interfacial crack initiated from the damaged area is one of serious problems of this concept. Authors proposed the interfacial crack suppression method named the crack arrester. This concept is to install materials with higher stiffness on the crack propagation path and induce the redistribution of load between foam core area near the crack tip and the leading edge of the crack arrester in order to decrease energy release rate at the crack tip less than the interfacial fracture toughness. Crack suppression effect of the crack arrester were analytically estimated and experimentally validated under mixed mode of mode I and mode II, and mode III loading conditions. As for the analyses, it was confirmed that the energy release rates at crack tip decreased as crack tip approached the leading edge of the arrester under constant loadings. In the experimental validation, fracture toughness tests were conducted and apparent fracture toughness increased as crack tip approached the leading edge of the arrester. Based on the acquired apparent fracture toughness derived from test data, a crack onset estimation method was proposed and a crack onset diagram was prepared in order to apply this concept to structural design.

(Received December 17, 2011)

キー・ワード：発泡コアサンドイッチパネル，界面き裂，クラックアレスター，エネルギー解放率

Key Words : Foam Core Sandwich Panel, Interfacial Crack, Crack Arrester, Energy Release Rate.

1 緒 言

発泡コアサンドイッチパネル構造は、複合材料の潜在的な特性を活かして複雑な3次元構造を一体で成型することにより重量軽減と部品点数低減を可能にする構造様式である。しかしながら、電衝突等の衝撃損傷を受けた場合に、損傷を目視で検知することが困難であり、損傷を起点とするはく離の進展により静強度、疲労強度が著しく低下するという問題点が指摘されている。このはく離は面板直下の発泡コア内を進展するき裂によって生じるので、著者らは、このき裂の進展を抑制する構造様式としてクラックアレスターを考案して、破壊力学を用いた解析によりその効果を予測して試験により確認した。このクラックアレスターを実用化するためには、本構造様式を実機構造に適用した場合にき裂の進展の有無を判定する設計基準を設定することが必要である。本解説ではクラックアレスターによるき裂進展抑制効果の定量的評価とクラックアレ

スターを適用した設計基準の作成について検討した結果を報告する。

2 クラックアレスター^{1)~4)}

著者らは、き裂進展経路上に発泡コアよりも剛性が高い物質（クラックアレスター）を埋め込むことにより、き裂先端周辺とクラックアレスター端部で荷重の再配分を生じさせ、き裂先端のエネルギー解放率を

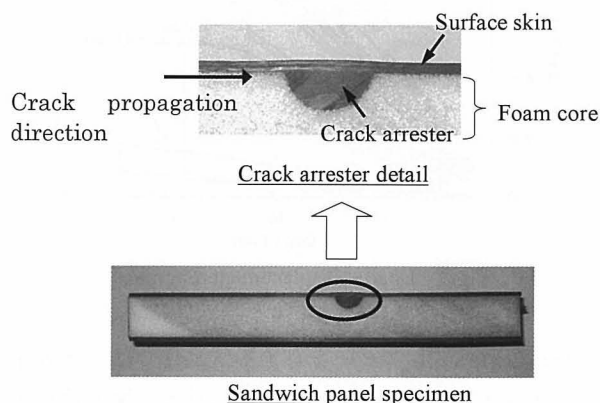


Fig.1 Crack arrester concept.

* 原稿受付 2011年12月17日

** 金沢工業大学材料システム研究所 白山市八束穂

低減してき裂の進展を抑制するアイデアを考案した。クラックアレスターとして炭素繊維強化プラスチック (CFRP) で構成される半円筒状の構造要素を考えた。クラックアレスターを埋め込んだ発泡コアサンドイッチパネルの例を Fig. 1 に示す。

クラックアレスターによるき裂進展抑制効果の評価するため、FEM 解析と破壊じん性試験を実施した。FEM 解析ではクラックアレスター有と無の二つの FE モデルを用いて一定荷重、同じき裂長さの条件でき裂先端のエネルギー解放率をき裂閉口法で計算した。モード I 型負荷形態の結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 において横軸はき裂先端とクラックアレスター端部間の距離 (L) を示している。また、アレスターについては半径が異なる 3 種類について評価した。Fig. 2 から一定荷重の条件下ではき裂先端がクラックアレスター端部に接近するのに伴ってき裂先端のエネルギー解放率が低下することが判る。

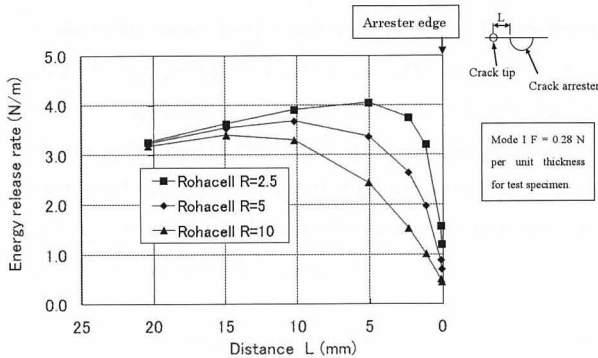


Fig.2 Relation between energy release rate G and distance L for mode I type loading.

次に、クラックアレスターによるき裂進展抑制効果を確認するため破壊じん性試験を行った。試験は JIS K7086 を準用して負荷速度を 2.0mm/min として行った。モード I 型負荷形態の荷重とクロスヘッド変位の関係を Fig. 3 に示す。

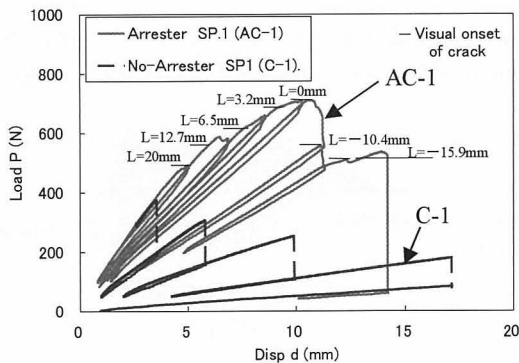


Fig.3 Load - Displacement diagram.

Fig. 3 からアレスターを有する供試体では、き裂先端がアレスター端部に接近するのに伴って臨界荷重が増加することが判るので、クラックアレスターによる

き裂進展抑制効果が確認された。

次に、クラックアレスターによるき裂進展抑制効果を定量的に評価するため見かけの破壊じん性値を計算した。これは、クラックアレスターを有する供試体の試験荷重と対応するき裂長さを入力データとして、クラックアレスターのない FE モデルを用いて求めた節点変位と節点力からき裂閉口法により計算したエネルギー解放率である。結果を Fig. 4 に示す。このことから、アレスターにより約 5 倍のき裂進展抑制効果が得られたことがわかる。

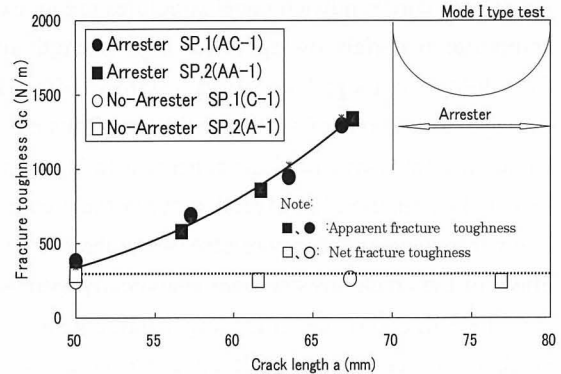


Fig.4 Apparent fracture toughness for mode I type loading.

モード II 型の負荷形態についても同様の解析と破壊靱性試験を行った。モード II 型の負荷形態で一定荷重を荷重した場合のき裂先端位置とエネルギー解放率の関係を Fig. 5 に示す。

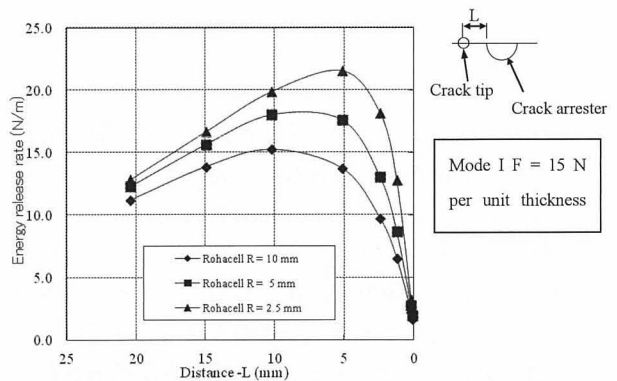


Fig.5 Relation between energy release rate G and distance L for mode II type loading.

Fig. 5 からモード II 型の負荷形態においても異なる 3 種類の半径のクラックアレスターについて、一定荷重の条件下ではき裂先端がクラックアレスター端部に接近するのに伴ってき裂先端のエネルギー解放率が低下することが判る。

次に、モード II 型の負荷形態でクラックアレスターによるき裂進展抑制効果を確認するため、3 点曲げで破壊じん性試験を行った。試験条件はモード I 型と同様に JIS K7086 を準用して負荷速度を 2.0mm/min とし

て行った。試験結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 において、アレスター付の場合、アレスター端部でき裂が停止した時点で荷重を一旦除荷、さらに再負荷してき裂を進展させた。このときの臨界荷重は、き裂が進展しているにも関わらず、最初の臨界荷重と同程度であった。このことから、モード II 型負荷形態においてもクラックアレスターによるき裂進展抑制効果が確認できた。

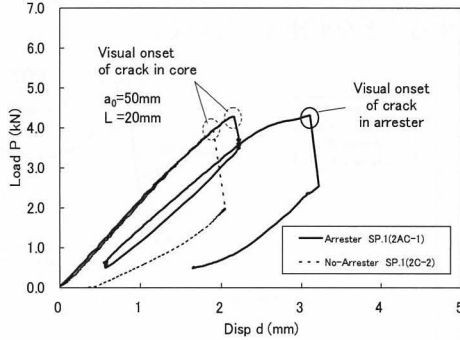


Fig.6 Relation between load and cross head displacement (Mode II type loading test).

次に、モード I 型と同様に見かけの破壊じん性値を計算してき裂進展抑制効果を定量的に評価した。その結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、クラックアレスターが無い場合と比較して、クラックアレスター近傍では 1.9 倍のき裂進展抑制効果が得られた。

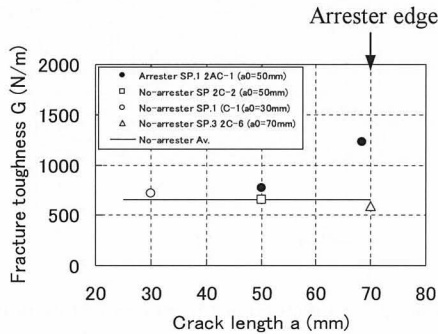


Fig.7 Relation between fracture toughness and crack length (Initial crack length $a_0=50\text{mm}$).

3 き裂進展評価線図の提案

実機での評価を考えるにあたり、機首構造で評価対象になる損傷モードとして、次の 2 ケースを考えた。

- ①鳥衝突などの運用中に発生し、認識される欠陥を起点とした静的破壊。
- ②成形時や電衝突による欠陥等、認識されていない欠陥を起点とした疲労き裂進展。

ここでは、①のケースについての評価結果を紹介する。

また、き裂進展評価方法としては次のように考えた。すなわち、発泡コアサンドイッチパネルの CFRP 面板とコア界面に生じた剥離の先端では、き裂発生位置により様々なモードが混在したエネルギー解放率（以下、 G 値と称する）が生じる。一方、DCB（モード I 型）、

ENF（モード II 型）、MMB（モード I、II 混合型）、ECT（モード III 型）の負荷形態では、それぞれの供試体でのき裂先端でのモードは、実機構造に想定した欠陥でのモードと一致していない。そこで、それぞれの試験結果より、混合モードの影響を考慮したき裂進展評価線図を作成することを提案する。この混合モードき裂進展評価線図と、実機構造で想定した欠陥での G 値を比較することで、想定した欠陥からき裂の進展が生じるかどうかを評価する。Fig. 8 に評価の流れを示す。

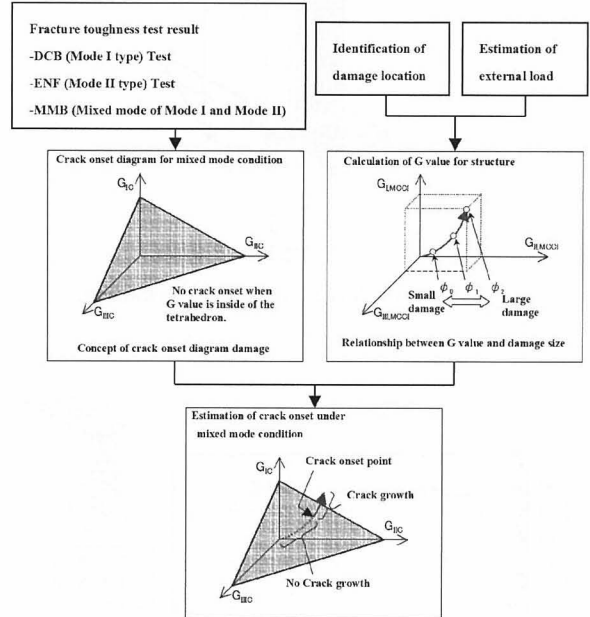


Fig.8 Concept of crack onset diagram.

Fig. 8 において、 G_{IC} 、 G_{IIC} 、 G_{IIIc} を各軸とする 3 次元空間で破壊じん性試験のデータに基づいてき裂が進展しない範囲を示す四面体の領域を求める。ここで、 G_{IC} 、 G_{IIC} 、 G_{IIIc} は、モード I 型、モード II 型、モード III 型の各負荷モードでの発泡コアサンドイッチパネルの界面の破壊じん性値である。次に、損傷を想定した実構造の負荷条件で、き裂先端の G 値を求めてモード分離をした結果を前述の 3 次元空間内にプロットする。その点が、四面体内に位置すればき裂は進展しないと判定される。

次に、Fig. 8 の考え方に基づいてき裂進展評価に用いる評価線図（き裂進展評価線図）の試案を作成する。

本評価線図において、modified crack closure integral (MCCI) で求められた各モードに対応する $G_{I,MCCI}$ 、 $G_{II,MCCI}$ 、 $G_{III,MCCI}$ を評価線図の各軸とした 3 次元空間を考える。そして、き裂進展評価線図を作成するために 2 章で示したクラックアレスターを有する供試体を用いて、モード I 型 (DCB)、モード II 型 (ENF)、に加えて、モード III 型、およびモード I 型とモード II 型の混合モード (MMB) の破壊じん性試験を実施してデータを取得した。モード III 型の負荷状況を Fig. 9

に示す。なお、Fig. 9 に示すモードⅢの負荷形態における、き裂先端のエネルギー解放率の分布の代表例を Fig. 10 に示す。Fig. 10 から、き裂先端の応力状態は供試体中央部で近似的にモードⅢとみなせることがわかる。

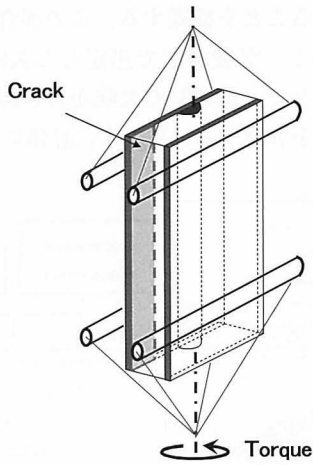


Fig.9 Test method of mode III type loading.

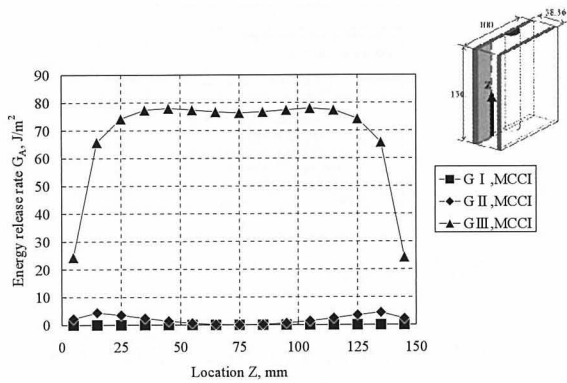


Fig.10 Distribution of energy release rate in width direction ($L=0.119\text{mm}$).

ここで、一定トルクを負荷した場合のモードⅢの負荷形態でのき裂先端位置とき裂先端の G 値の関係を Fig. 11 に示す。Fig. 11 から、き裂先端がクラックアラスタの端部に接近するのに伴って、き裂先端の G 値が低減することが判る。このことから、モードⅢ負

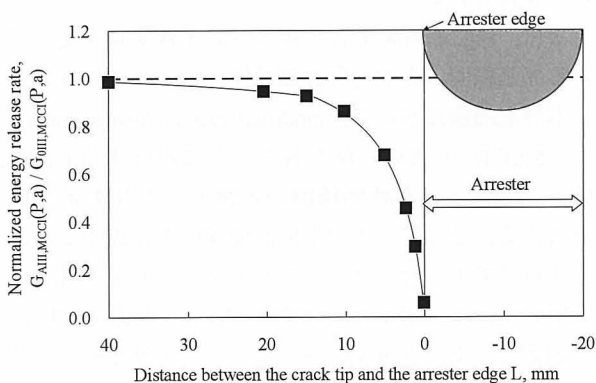


Fig.11 Relation between energy release rate G and distance L for mode III type loading.

荷形態でもクラックアラスタによるき裂進展抑制効果が予測される。モードⅢ負荷形態での破壊じん性試験結果に基づく見かけの破壊じん性値を Fig. 12 に示す。Fig. 12 から、クラックアラスタによるき裂進展抑制効果が定量的に確認された。

次に、モードⅠ型とモードⅡ型の混合モードの負荷状況を Fig. 13 に示す。Fig. 13 の試験治具においてレバー長さ C を変えることによりモード比をコントロールすることを可能としている。

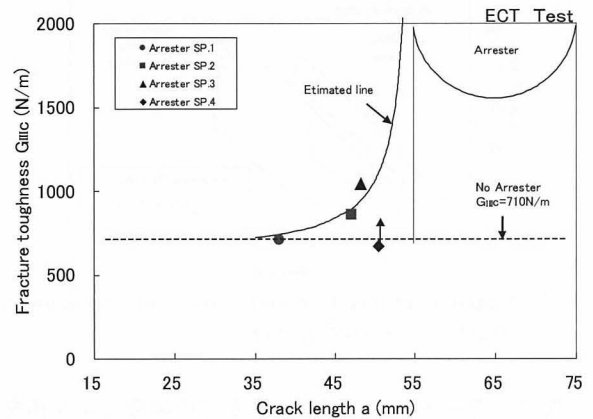


Fig.12 Apparent fracture toughness for mode III loading.

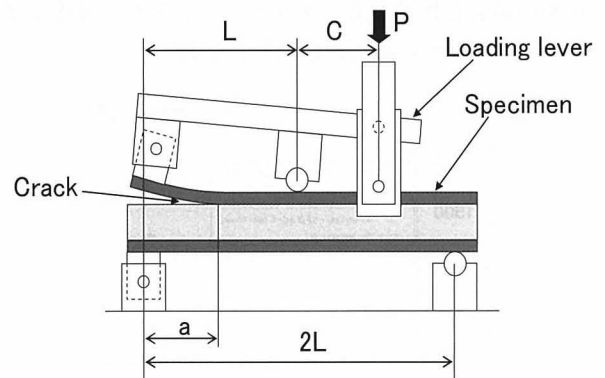


Fig.13 Test method of mixed mode condition.

また、一定荷重を負荷した場合の混合モードの負荷形態でのき裂先端位置とき裂先端のエネルギー解放率の関係を Fig. 14 に示す。

Fig. 14 から、混合モードの場合においても、き裂先

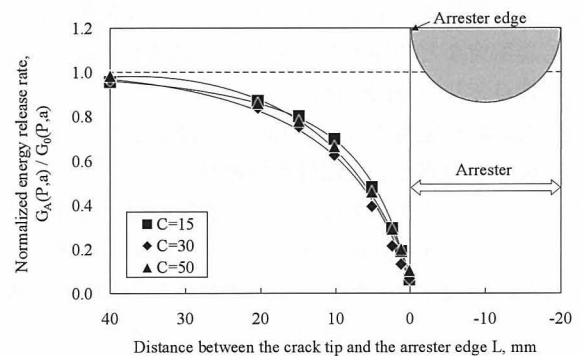


Fig.14 Relation between energy release rate G and distance L for mixed mode loading.

端がクラックアレスターの端部に接近するのに伴って、き裂先端の G 値が低減することが判る。このことから、混合モードの荷重形態でもクラックアレスターによるき裂進展抑制効果が予測される。

また、混合モードの荷重形態での破壊じん性試験結果に基づく見かけの破壊じん性値を Fig. 15 に示す⁵⁾。

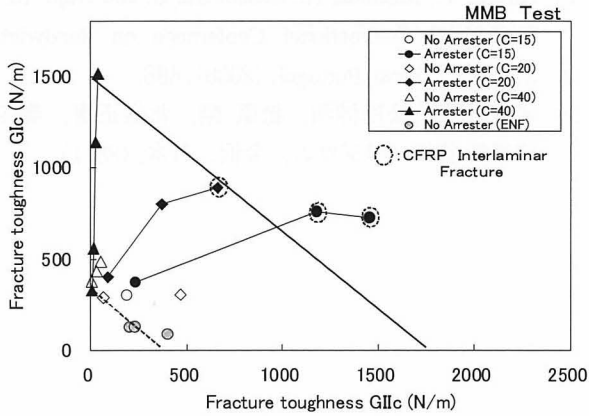


Fig.15 Apparent fracture toughness for mixed mode condition.

上記の試験結果のうちクラックアレスターを有さない供試体の試験結果を用いて Fig. 8 に示した考え方で作成した静的破壊に対するき裂進展評価線図を Fig. 16 に示す。

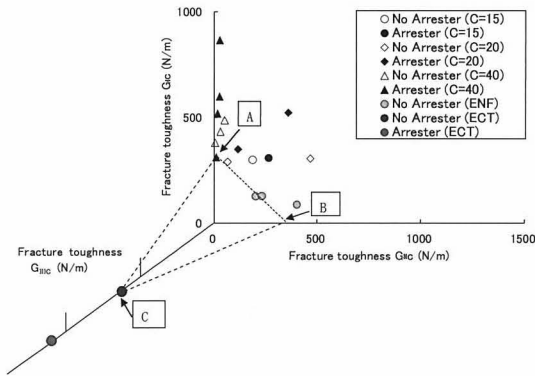


Fig.16 Concept of Crack onset diagram.

Fig. 16 に示すき裂進展評価線図において、破壊じん性値の下限線（き裂が進展する限界線）は類似の破壊じん性試験結果から線形則で表した。すなわち、図中に示す破線は、データの下限を直線で結んだ線で、この破線で囲まれた領域（原点、A 点、B 点、C 点）では、静的にはき裂が進展しない領域である。したがって、発生 G 値が図中の評価面以内（四面体の内側）にプロットされる場合、静的破壊は生じない。また、発生 G 値が評価面上にプロットされる場合の欠陥寸法が、静的破壊に対する許容欠陥寸法となる。これについては (1) 式で表される。

$$D = \frac{G_{I,MCCI}}{G_{IC,MCCI}} + \frac{G_{II,MCCI}}{G_{IIc,MCCI}} + \frac{G_{III,MCCI}}{G_{IIIc,MCCI}} \quad (1)$$

$D < 1$: き裂進展しない

$D > 1$: き裂進展する

$D = 1$: このときの欠陥寸法が静的破壊に対する許容欠陥寸法となる

次に、同様な考え方に基づいてクラックアレスターを有する供試体の破壊じん性試験結果を追加して作成したき裂進展評価線図を Fig. 17 に示す。Fig. 17 において、内側の四面体がクラックアレスターがない場合のき裂進展評価線図であり、外側の四面体がクラックアレスターがある場合のき裂進展評価線図である。なお、クラックアレスターがある場合の破壊じん性値は 2 章で説明した見かけの破壊じん性値である。

実際の解析では、構造物に損傷が生じた場合、所定の荷重条件下でき裂先端の G 値を算出してモード分離を行い、モード I 型、モード II 型、モード III 型のエネルギー解放率を求めて、その結果をき裂進展評価線図上にプロットすることによりき裂進展の有無を判定することになる。すなわち、プロットした点が四面体の内部にあればき裂が進展しないと判断される。

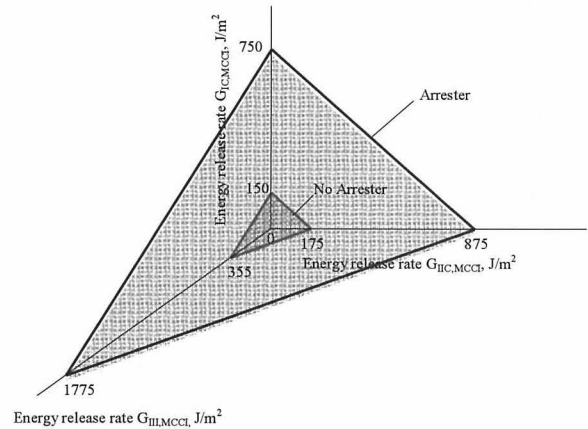


Fig.17 Crack onset diagram with and without arrestor.

本研究では破壊じん性試験結果から静的にき裂が進展する限界線を求めたが、さらに設計基準にまで深化させるには、信頼性を高めるためのデータ取得と部分構造レベルを含めた実証試験による検証が必要である。

4 まとめ

本研究により以下の成果が得られた。

- ① モード I 型とモード II 型の混合モードの荷重条件下でもクラックアレスターによるき裂進展抑制効果が確認できた。
- ② モード III 型の荷重条件下でもクラックアレスターによるき裂進展抑制効果が確認できた。
- ③ 各モードの荷重条件下でのクラックアレスター

の有無による破壊じん性試験結果に基づいてき裂進展の有無を判定する評価線図（き裂進展評価線図）を提案した。

5 謝 辞

本研究の成果は、日本航空宇宙工業会殿の委託研究により得られたものである。日本航空宇宙工業会殿のご支援に深く感謝する。

参 考 文 献

1) Hirose, Y., Hojo, M., Fujiyoshi, A. and Matsubara, G., Proc. 9th Japan International SAMPE Symposium

& Exhibition, Tokyo, Japan, (2005).

- 2) Hirose, Y., Hojo, M., Fujiyoshi, A. and Matsubara, G., Adv. Compos. Mater., **16**, (1), (2007), 11.
- 3) Hirose, Y., Matsuda, H., Matsubara, G., Hojo, M. and Inamura, F., J. Sandwich Struct. Mater., **11**, (6), (2009), 451.
- 4) Hirose, Y., Matsuda, H., Matsubara, G. and Hojo, M., Proc. 8th International Conference on Sandwich Structures, Porto, Portugal, (2008), 488.
- 5) 廣瀬康夫, 松田博和, 松原 剛, 北條正樹, 第49回飛行機シンポジウム, 金沢, 日本, (2011).

一方向繊維強化複合材料の引張強度に及ぼす界面特性の影響*

荻原 慎二** 中谷 隼人** 森本 哲也***

Effect of Interfacial Properties on the Tensile Strength
in Unidirectional Fiber Reinforced Composites

by

Shinji OGIHARA, Hayato NAKATANI

(Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science, Noda)

and Tetsuya MORIMOTO

(Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu)

Effects of the fiber/matrix interfacial properties on the tensile strength of unidirectional Tyranno ZMI fiber reinforced epoxy matrix composites are investigated experimentally. The interfacial properties are evaluated by using the fragmentation test and the single fiber tension test. Tensile tests on the unidirectional composites are also performed to clarify the relation between the interfacial properties and the composite strength. Both fibers with and without sizing treatment are used to discuss the effect of difference in the interfacial properties. Preliminary results of the Monte Carlo simulation prediction of the composite strength are shown for further discussion of the effect of the interfacial properties on the composite strength.

(Received October 14, 2011)

キー・ワード：フラグメンテーション試験，界面特性，一方向強化複合材料，強度予測

Key Words : Fragmentation Test, Interfacial Properties, Unidirectional Fiber Reinforced Composite, Strength Prediction

1 緒 言

繊維強化複合材料の力学的特性において、繊維/マトリックス界面特性の効果は重要であり、高性能な複合材料を開発するために、複合材料の界面特性と巨視的な特性との関係を知ることは重要である¹⁾。これまで複合材料の界面特性評価法として様々なものが提案され使用されているが、その中で代表的なものがフラグメンテーション試験である。フラグメンテーション試験は、単一繊維強化複合材料の引張負荷による繊維多重破断の観察から、界面でのせん断による応力伝達特性を評価するものである。

一方、一方向繊維強化複合材料の繊維方向強度の解析的予測については、Rosen²⁾以来多くの研究がある^{3)~4)}。これらのモデルでは、複合材料を長さ方向のリンクに分割し、リンク内の同一面内の破壊を検討している。しかし、実際の一方向繊維強化複合材料の破断面は凹凸が形成されるが、このような破断面の凹凸を考慮した強度予測の研究は少ない⁵⁾。

そこで本研究では、界面強度が複合材料強度に及ぼす影響を検討することを目的として、界面強度のみを変化させた複合材料の強度を評価することを試みた。

そのためにチラノ ZMI 繊維について、サイジング処理を有するものと有しないものを用い、単繊維引張試験、フラグメンテーション試験により、繊維強度分布はほぼ同等で界面強度のみ異なることを確認した。これらの一方向繊維強化複合材料について、界面特性と強度及び破断面の関係を実験的に検討した。また、界面特性が複合材料強度に及ぼす影響を検討するための基礎として、モンテカルロシミュレーションを用いた一方向繊維強化複合材料の強度予測を試みた。

2 実験方法

本研究に用いた繊維は、Tyranno ZMI fiber (宇部興産(株)製)であり、Table Iにその力学的特性を示す。また、サイジング処理の有無による界面特性の違いを検討するため、同繊維のサイジング処理を施した繊維と、除去した繊維を用意した。

単繊維引張試験の試験片形状を Fig. 1 に示す。製作手順は、まず紙製ホルダに繊維をエポキシ系接着剤アララダイト (ニチバン(株)製) で接着する。そして破断後繊維が飛び散らないように表裏をフィルムで覆

Table I Mechanical properties of Tyranno ZMI fiber.

Young's modulus[GPa]	Tensile strength[GPa]	Ultimate strain [%]	Diameter [μm]
200	3.4	1.7	11

* 原稿受付 2011年10月14日

** 東京理科大学理工学部機械工学科 野田市山崎

*** 宇宙航空研究開発機構 調布市深大寺東町

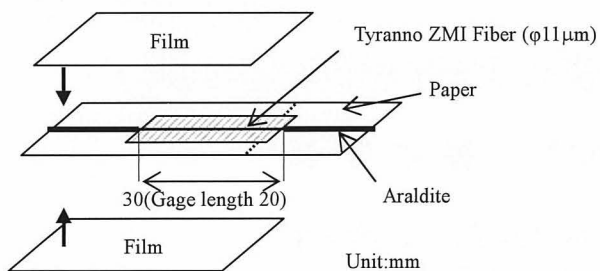


Fig.1 Specimen configuration for single fiber tensile test.

い, 中を界面活性剤で満たした. 試験片を試験機に設置した後, Fig. 1 の破線部を切断する. 引張試験は INSTRON 万能材料試験機4442を用いてクロスヘッド速度0.1mm/min. で行った. また, 試験機のチャッキングによる繊維への応力集中の影響を考慮し, 繊維の両端から5mm以内で破断した試験片はデータから除外し, ゲージ長を20mmとした.

フラグメンテーション試験の試験片は, Fig. 2 に示すように Tyranno ZMI fiber をエポキシ樹脂に埋め込んだ単一炭素繊維強化プラスチックである. マトリックスには, Epikote828 (ジャパンエポキシレジン(株)製)に硬化剤として TETA (東ソー(株)製)を重量比100:11で混合し, 硬化条件として, 50℃60分, 100℃80分で硬化させたものを使用した. フラグメンテーション試験は光学顕微鏡下で, クロスヘッド速度0.5mm/min で引張試験を行い, 繊維破断の発生した数を記録し, さらに繊維破断周りの損傷状態を観察した. 測定範囲は試験片中央部10mmとした.

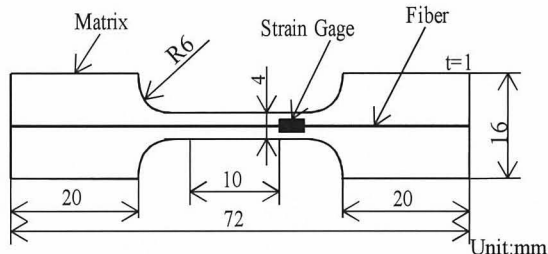


Fig.2 Specimen configuration for fragmentation test.

一方向繊維強化複合材料の引張試験は, Fig. 3 に示すような Tyranno ZMI fiber800本の束を, フラグメンテーション試験と同様のエポキシ樹脂に埋め込んだ複合材料を用いた. 繊維の体積含有率は26.8%である. クロスヘッド速度0.5mm/min とし, 強度分布を測定し, さらに破断面観察を行った. ゲージ長10mm, 30mm, 100mm の3種類の試験片を用意した.

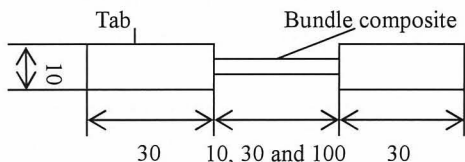


Fig.3 Specimen configuration for unidirectional composite.

3 実験結果及び考察

3・1 単繊維引張試験

単繊維引張試験により得られた繊維の強度分布を次式の累積分布関数で表されるワイブル分布を用いて評価する.

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\frac{L}{L_0}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^\rho\right\} \quad (1)$$

ここで, $F(\sigma)$ は応力 σ における長さ L の繊維の破壊確率であり, ρ は形状パラメーター, σ_0 は尺度パラメーターである. 本研究では, ゲージ長 L_0 を20mmとした. 式(1)より,

$$\ln[-\ln\{1-F(\sigma)\}] = \rho \ln \sigma - \rho \ln \sigma_0 + \ln \frac{L}{L_0} \quad (2)$$

の関係が得られ, 横軸を $\ln \sigma$, 縦軸を $\ln[-\ln\{1-F(\sigma)\}]$ とし, 分布を最小二乗法で直線近似することでワイブルパラメーター (ρ および σ_0) を算出することができる.

単繊維引張試験より得られた繊維強度のワイブルプロットを Fig. 4 に示す. これを直線近似し得られたワイブルパラメーターを Table II に示す. これより Tyranno ZMI fiber は, サイジング処理の有無による繊維強度分布への大きな影響はないことを確認した.

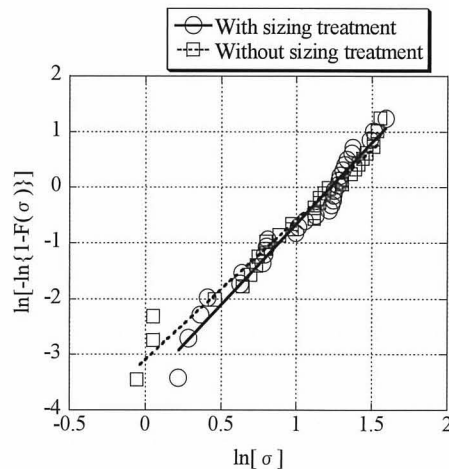


Fig.4 Weibull distribution of fiber strength for Tyranno ZMI fiber.

Table II Weibull parameters of Tyranno ZMI fiber.

	With sizing treatment	Without sizing treatment
ρ	2.90	2.50
σ_0 [GPa]	3.42	3.43

3・2 フラグメンテーション試験

Fig. 5 にフラグメンテーション試験中に観察された繊維破断の一例を, Fig. 6 に偏光顕微鏡で観察した繊維破断の一例を示す. Fig. 5 より繊維破断に伴いマトリックスクラックが発生していることがわかる. また, Fig. 6 より繊維破断周りの顕微鏡観察結果から, 繊維破断周りにはく離が生じていることが確認できる.

観察部における単位試験片長さ当たりの繊維破断発

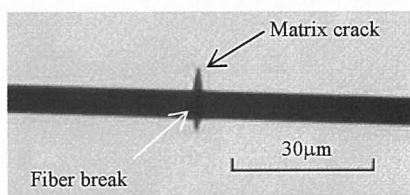


Fig.5 Fiber break and matrix crack observed in fragmentation test.

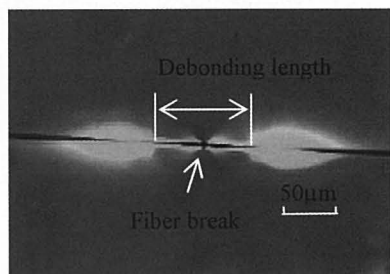


Fig.6 Fiber break and debonding observed by a polarized optical microscope.

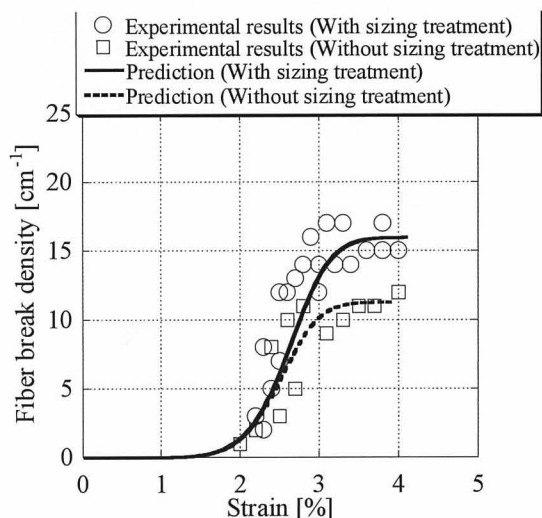


Fig.7 Change in fiber break density with specimen strain.

生数を繊維破断密度と定義した。試験片ひずみと繊維破断密度の関係を Fig. 7 に示す。これより、繊維破断発生後、繊維破断密度が増加し飽和にいたる傾向が見られた。また、その飽和繊維破断密度は、サイジング処理を施した方が大きいという結果が得られた。

Fig. 7 には、Curtin により行われた繊維破断プロセスの予測モデル⁶⁾ (本研究では Curtin モデルと呼ぶ) の結果も示している。Curtin モデルは、ワイブル分布で表した繊維強度分布と、一定と仮定した界面せん断応力が与えられれば、フラグメンテーション試験中における単一繊維複合材料の応力 (ひずみ) とフラグメント長さ分布 (繊維破断密度) の関係を予測できるモデルである。すなわち、繊維強度のワイブル分布に対応する繊維中の欠陥分布から、繊維破断周りの新たな破断が発生しない領域を考慮することにより、複合材料応力 (ひずみ) 増大に伴う新たな繊維破断発生を予

測し、フラグメント長さ分布 (繊維破断密度) の変化を算出するものである。本研究では、繊維破断密度の実験値に一致するような繊維強度分布及び界面せん断応力を求めた。Fig. 7 に示される実線及び破線で表される繊維破断密度予測を与える繊維強度分布及び界面せん断応力を Table III に示す。この際、前項実験結果よりサイジング処理有無による繊維強度分布の影響はないと考えた。 σ_0 は実験結果に近い 3.5 GPa を用いたが、 ρ はフラグメンテーション試験の繊維破断挙動の実験結果にフィッティングするためには、単繊維引張試験より得られた値より大きな値 ($\rho=7.5$) を使う必要があった。これは、複合材料中での繊維強度分布が単繊維試験で得られるものと異なる (複合材料中で繊維強度のばらつきが小さい) ことを示唆するが、界面せん断応力を一定と仮定していることも影響している可能性があり、これについては、今後さらに検討が必要である。本研究では、この仮定の下で、界面せん断応力を算出し、Table III に示すようにサイジング処理を施した繊維の方が高い値が得られた。

負荷中に発生、進展する界面はく離を定量化するため、観察部におけるはく離長さの割合をはく離率と定義し、その測定を行った。試験片ひずみとはく離率の関係を Fig. 8 に示す。これより、サイジング処理を施している方が低いはく離率を示している。これはサイジング処理を施している方が高い界面強度を有することを意味する。以上のことにより、本研究で用いた材料においては、サイジング処理を施した繊維の方が複合材料中で高い応力伝達能力を持つことが確認できた。

Table III Weibull parameters for fiber strength distribution and the interfacial shear stress used in the Curtin model.

	With sizing treatment	Without sizing treatment
ρ	7.5	7.5
σ_0 (GPa)	3.5	3.5
τ (MPa)	40	27

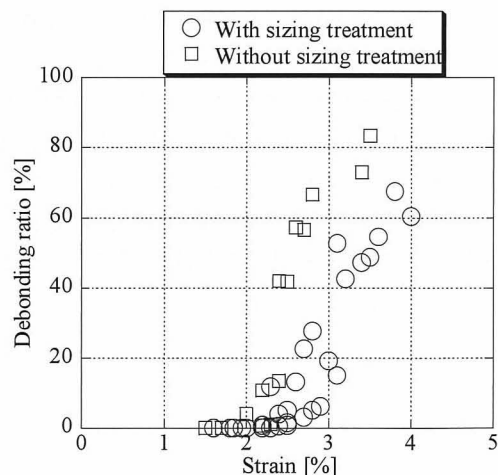


Fig.8 Change in debonding ratio with specimen strain.

3・3 一方向繊維強化複合材料の引張試験

一方向繊維強化複合材料の引張試験により得られた強度データから, 単繊維引張試験と同様にワイブル分布と仮定して, パラメーターを得た. Table IV に得られたそれぞれのゲージ長におけるワイブルパラメーターを示す. また一例として Fig. 9 にゲージ長さ30 mm における一方向繊維強化複合材料強度のワイブル分布を示す. これより, 全てのゲージ長においてサイジング処理の施された一方向繊維強化複合材料の方が, 高い強度を有することが確認できた. また, ゲージ長が長くなるにつれ強度低下する寸法効果が確認された.

Table IV Weibull parameters for composite strength.

Gage length (mm)		10	30	100
With sizing treatment	σ_0 (GPa)	1.07	1.04	0.96
	ρ	21.4	30.7	17.8
Without sizing treatment	σ_0 (GPa)	1.02	1.02	0.94
	ρ	26.3	26.2	15.5

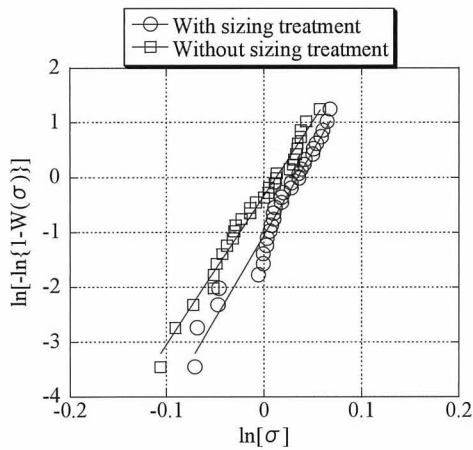
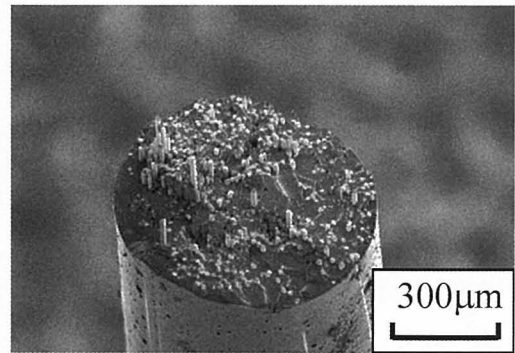


Fig.9 Weibull distribution of unidirectional composite strength(gage length30mm).

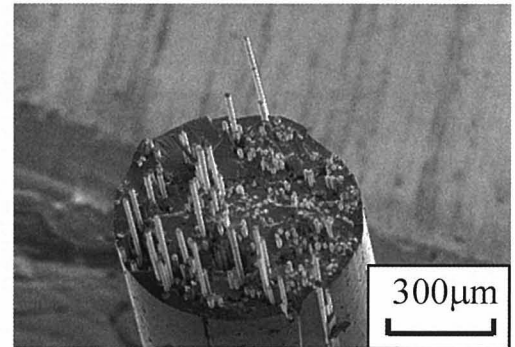
Fig. 10に一方向強化複合材料引張試験後の破断面のSEM 観察結果を示す. サイジング処理を施した試験片では, 比較的平坦な破断面を有するのに対し, サイジング処理を除去した試験片では繊維のプルアウトが多く観察され, 大きな凹凸を有する破断面となることがわかる. 本研究では, この破断面の凹凸を定量評価することを試みた. Fig. 11に示すように破断面における凹凸部を本研究ではクラスターと呼ぶ. 破断面において最も面積の占有率の高い断面を基準面とし, 基準面からの高さをクラスター高さ h とした. またクラスターの大きさ V_{cl} を式 (3) で定義し, 破断面上における V_{cl} の和を複合材料の断面積 r_c で割った値を表面あらさ Ra と定義した (式 (4)).

$$V_{cl} = h \times N \times \frac{\pi r_f^2}{V_f} \quad (3)$$

$$Ra = \frac{\sum V_{cl}}{\pi r_c^2} \quad (4)$$



(a) With sizing treatment.



(b) Without sizing treatment.

Fig.10 SEM Photograph of fracture surface of unidirectional composite(Gage length30mm).

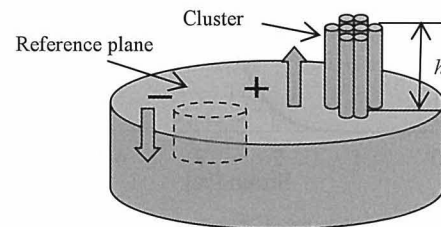


Fig.11 Schematic of fracture surface for unidirectional composite.

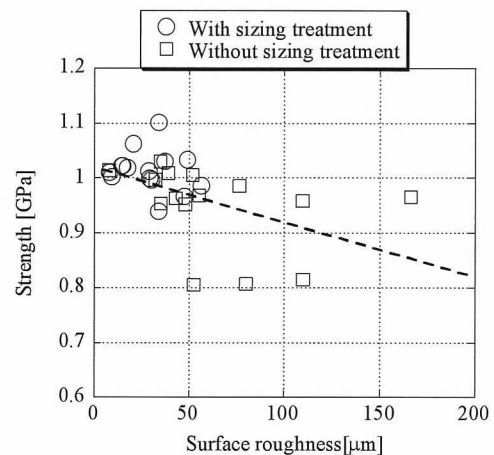


Fig.12 Relation between the composite strength and the surface roughness.

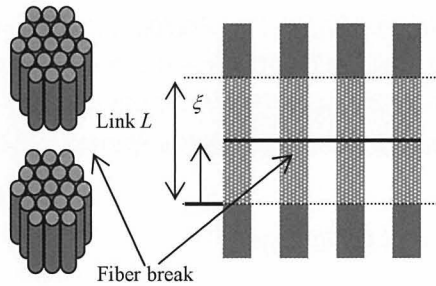
ここで、 N はクラスターに含まれる繊維本数、 r は繊維半径である。Fig. 12に引張強度と表面あらかさの関係を示す。これより、サイジング処理を除去した一方向強化複合材料の方が引張強度が低く、破断面あらかさが大きくなっていることが確認できる。この結果は、フラグメンテーション試験で確認されたように、サイジング処理の除去により界面強度が低下し、界面はく離が進展しやすいため、破断面の凹凸部を大きくしているものと考えられる。

4 強度予測シミュレーション

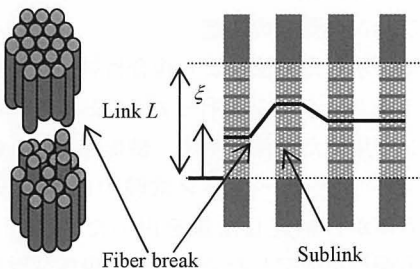
前項までで、界面特性が及ぼす複合材料強度への影響を実験的に明らかにした。実験結果を検討するため、複合材料の強度分布を予測できるシミュレーション手法を確立することが重要である。しかし、複合材料の破壊過程においては、繊維破断、界面はく離とその合体、成長など複雑な現象を考慮する必要があると考えられる。本研究では、その準備段階として、モンテカルロシミュレーションを用いた強度予測手法の基礎的検討を行う。

4・1 繊維方向の応力集中変化を考慮した一方向繊維強化複合材料モデル

一方向繊維強化複合材料の引張試験結果より、破断面に凹凸が形成されていることが確認された。しかし、従来多く用いられている繊維方向の応力集中変化を考慮しない強度予測モデルは、リンク内の繊維強度分布



(a) Simulation model which does not consider the stress change along the fiber direction in a link



(b) Simulation model which considers the stress change along the fiber direction in a link

Fig.13 Schematic of simulation model for strength prediction in unidirectional composite.

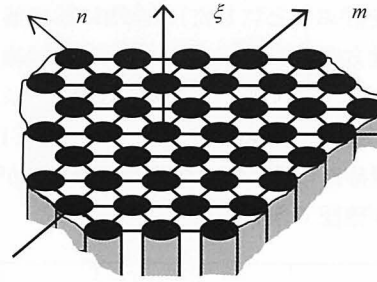


Fig.14 Unidirectional composite model of hexagonal array.

は一定としており (Fig. 13 (a)), 同一平面内の応力集中変化しか考慮しておらず、実際の複合材料の破壊挙動とは異なる。そこで、リンクを繊維方向 (ξ 方向) に分割しサブリンクを作成することで、繊維方向の応力集中変化を考慮して、実際の複合材料に近い破壊挙動 (Fig. 13 (b)) を予測することを試みた。また、Fig. 14 に示すように、隣接繊維の配列を正六角形に配列し、一方向繊維強化複合材料のモデルとした。繊維破断に伴う、破断繊維周りの応力分布、つまり応力集中係数の変化は、Hedgepeth^{7)~8)} のシア・ラグ理論を用いた。

Fig. 14のように六方配列された繊維を有する複合材料内でのシア・ラグ解析の釣り合い式は次式のようになる^{7)~8)}。

$$\frac{\partial^2 u_{n,m}}{\partial \xi^2} + (u_{n+1,m} + u_{n,m+1} + u_{n,m-1} + u_{n+1,m-1} + u_{n-1,m+1} - 6u_{n,m}) = 0 \quad (5)$$

これは、繊維方向 (図中では ξ の方向を x 方向と定めた釣り合いの式を次式にて無次元化したものである^{7)~8)}。

$$u_{m,n} = (EAGh/dP)^{1/2} U_{m,n} \quad (6)$$

$$\xi = (Gh/EAd)^{1/2} x \quad (7)$$

ここで、 $U_{m,n}$ は座標 (m,n) の繊維の変位、 E 、 A は繊維のヤング率及び断面積、 Gh はマトリックスの有効せん断剛性、 d は繊維間隔である^{7)~8)}。Hedgepeth^{7)~8)} らは影響関数法を用いて、繊維の応力分布を求める手法を示しており、遠方応力で無次元化された繊維応力 $p_{m,n}$ は次式で求められる。

$$p_{n,m}(\xi) = 1 + \sum_{i=0}^{r-1} \sum_{j=0}^{r-1} q_{n-i,m-j}(\xi) u_{i,j}(0) \quad (8)$$

ここで、 $q_{m,n}$ は影響関数であり

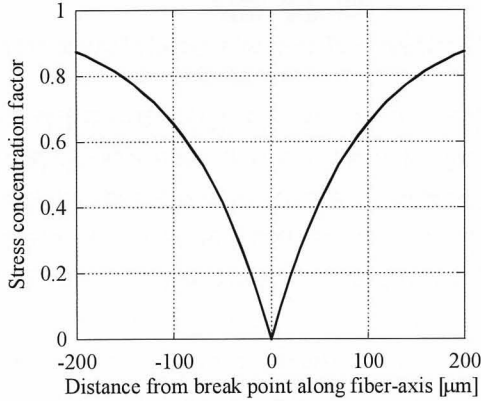
$$q_{n,m}(0) = -\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta d\phi \lambda \cos(n\theta + m\phi) \quad (9)$$

$$\lambda = \sqrt{2(3 - \cos\theta - \cos\phi - \cos(\theta - \phi))} \quad (10)$$

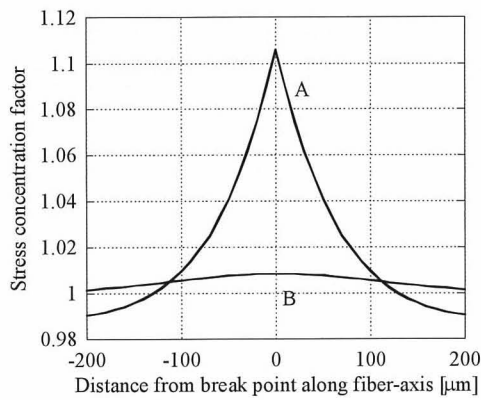
r は破断繊維の数、 i, j は繊維破断箇所である。

Fig. 15に繊維が1本破断した時の破断繊維とその隣接繊維の応力集中係数の変化を示す (本研究では、得られた応力を破断前の繊維応力で正規化したものを応

力集中係数を呼ぶことにした). 縦軸に応力集中係数, 横軸に繊維軸方向 (ξ 方向) における破断繊維からの距離をとる. また破断繊維に隣接する繊維を A, さらにその外側に隣接する繊維を B とする (Fig. 16). これより, 繊維破断に伴い隣接繊維に応力集中が発生していることが確認できる.



(a) Broken fiber



(b) Surrounding fibers

Fig.15 Change in stress concentration factors in (a) broken fiber and (b) surrounding fibers.

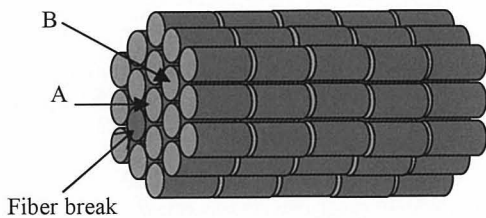


Fig.16 Schematic of stress concentration factor model around a fiber break along fiber-axis.

4・2 モンテカルロシミュレーション

Fig. 17に, 本シミュレーションの流れを示す. まず繊維本数, リンク長さ L のモデルを決定する. 繊維の各々のサブリンクにワイブル乱数で繊維強度 σ_f を与える.

$$\sigma_f = \sigma_0 \left(-\frac{L_0}{L} \ln(1 - rand) \right)^{1/\rho} \quad (11)$$

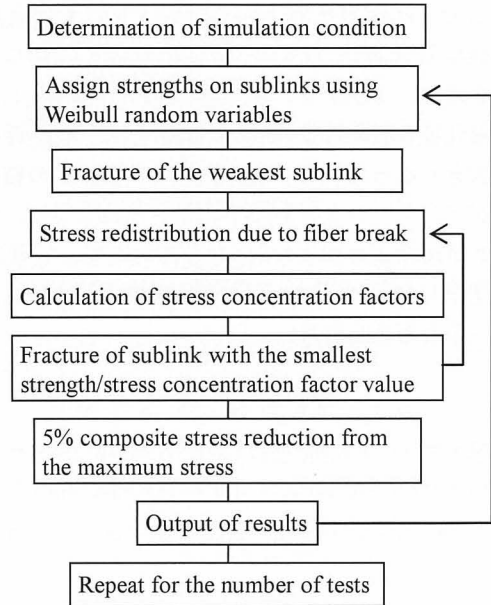


Fig.17 Flow chart of Monte Carlo simulation.

ここで, σ_0 は scale parameter, ρ は shape parameter, L_0 は基準長さ, $rand$ は破壊確率 ($0 < rand < 1$) を乱数で与えたものである. 繊維強度を応力集中係数で割った最小値のリンクが切れることとする. リンクが切れると, 応力再分配が起こり, 応力集中係数の値が変化する. そのもとでまた繊維強度/応力集中係数の最小値を探す. 以上の過程を繰り返す. 同一リンク上で最大応力を受けた後, 最大応力から 5% 低下した時点まで繰り返した. シミュレーション結果は, 実際の一方向強化複合材料のゲージ長 30mm に対応させるために, 式 (12) を用いてスケーリングを行った.

一方向強化複合材料強度がワイブル分布に従うとすると, 破壊確率が $G(\sigma)$ の長さ n 倍の破壊確率 $W(\sigma)$ は,

$$W(\sigma) = 1 - \{1 - G(\sigma)\}^n \quad (12)$$

で表すことができる.

$$G(\sigma) = \frac{i}{1 + N} \quad (13)$$

ここで, i は順序数, N はサンプル数である.

4・3 サブリンク長さの決定

前節までに示した方法により複合材料強度のモンテカルロシミュレーションを行った. Table V にシミュレーションで用いた条件を示す. 繊維強度分布については, フラグメンテーション試験の結果を用いて Curtin モデルから推定した値を用いた (Table III). また, 六方配列を仮定したことから, 繊維本数は実験で用いた複合材料中の繊維本数 (800本) に近い 721本とした. また, リンク長さは複合材料の繰り返し単位としての長さであり, 繊維破断の影響が及ばない長さを設定する必要がある. 本研究では前節までのシア・

ラグ解析による応力解析結果を参考に300 μm を設定した。Fig. 18に繊維の繊維方向における分割数（サブリンク数）を変えてシミュレーションを行った結果のワイブル分布を示す。またTable VIにワイブルパラメーターを示す。これより、分割数を増やすと強度は増加し、一定の値に収束することがわかる。これは、分割数が増えるとサブリンク自体に与える強度が大きくなるためリンク全体としての強度も大きくなるが、サブリンク間の繊維方向距離が短くなると応力集中の影響を受けやすくなるため強度が収束していると考えられる。分割数が30、つまりサブリンク長さが10 μm のとき強度が収束していることから、サブリンク長さは10 μm にするのが妥当であると考えられる。

Table V Material properties used in the simulation.

Fiber axial Young's modulus [GPa]	200
Fiber radius [μm]	5.5
Number of fibers	721
Scale parameter of fiber strength distribution [GPa]	3.50
Shape parameter of fiber strength distribution	7.5
Reference length of fiber strength distribution [mm]	20
Link length [μm]	300
Volume fraction [%]	26.8
Matrix Shear Modulus [MPa]	1.24

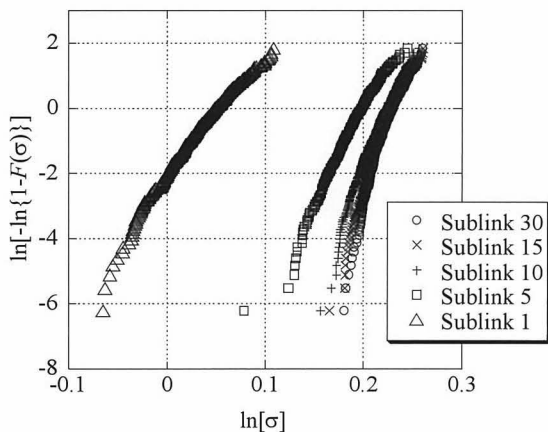


Fig.18 Weibull distribution of strength simulation results for several sublink numbers in a unit link.

Table VI Weibull parameters of the simulation results for several sublink numbers in a unit link.

Number of sublink	30	15	10	5	1
σ_0 (GPa)	84.79	81.20	74.11	57.97	39.39
ρ	1.26	1.26	1.25	1.22	1.05

4・4 シミュレーション結果

Table Vの条件のもと、サブリンク長さを10 μm としシミュレーションを500回行った。Fig. 19にシミュレーション結果と実験結果のワイブル分布を、Table VIIにワイブルパラメーターを、Fig. 20に本シミュレ

ーション結果の代表的応力-ひずみ線図を示す。シミュレーション結果は、実際の一方向強化複合材料のゲージ長30mmに対応させるために、式(10)を用いてスケールングを行った。シミュレーションの強度が実験結果より高い値を示しているが、これは繊維の初期損傷や不整列を考慮していないためと考えられる。

以上から、繊維強度の統計的性質を考慮し、繊維破断による応力集中を考慮した複合材料強度予測のためのモンテカルロシミュレーションの基礎を構築したのと考えられる。従来多く行われている応力集中係数の繊維軸方向変化を無視したのではなく、それを考慮し、その場合に必要サブリンク分割数を検討した。本研究の範囲では、界面特性の影響はシミュレーションで考慮されていないが、今後この手法を基に検討していく予定である。

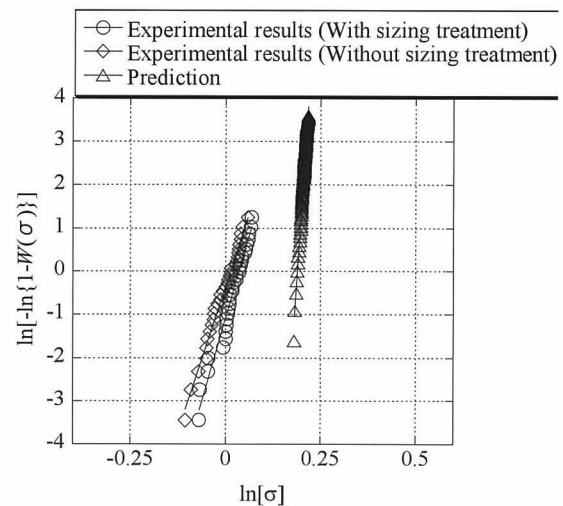


Fig.19 Weibull distribution of unidirectional composite strength.

Table VII Weibull parameters of unidirectional composite strength.

Gage length (mm)	10	30	100
σ_0 (GPa)	1.22	1.21	1.20
Prediction ρ	106	131	144

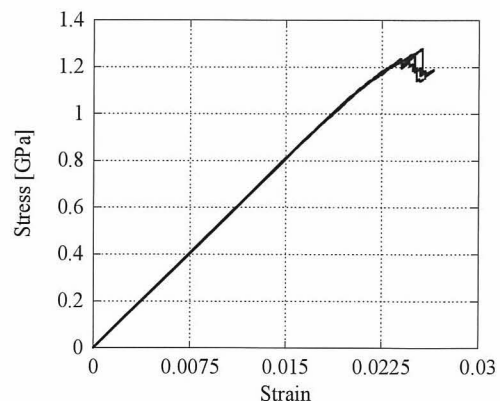


Fig.20 Simulated strain-stress diagrams of unidirectional composite.

5 結 言

一方向繊維強化複合材料の強度に及ぼす界面特性の影響を実験的に評価した。フラグメンテーション試験より、サイジング処理の有無による界面せん断応力の差異を評価し、はく離進展挙動を定量化することにより界面特性（応力伝達能力）の差異を明らかにした。サイジング処理の異なる一方向繊維強化複合材料の引張試験及び破面観察を行った結果、破面凹凸の小さい材料で強度が高い傾向が見られた。また、得られた実験結果を検討する基礎とするため、繊維強度分布と繊維破断による応力集中の軸方向分布を考慮した強度予測シミュレーションを試みた。強度シミュレーションにおいて界面特性の差異を考慮し、それが複合材料強度のどのように影響するか検討することが今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) Kim, J.-K. and Mai, Y.-W., *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*, Elsevier, (1998).
- 2) Rosen, B. W., *AIAA Journal*, **2**, (1964), 1985.
- 3) Zweben, C., *AIAA Journal*, **6**, (1968), 2325.
- 4) Batdorf, S. B., *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **1**, (1982), 153.
- 5) Landis, C. M., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **48**, (2000), 621.
- 6) Curtin, W. A., *Journal of Materials Science*, **26**, (1991), 5329.
- 7) Hedgepeth, J. M., *Stress Concentration in Filamentary Structures*, NASA TN D-882, (1961).
- 8) Hedgepeth, J. M. and Dyke, P. Van., *Journal of Composite Materials*, **1**, (1967), 294.

NCFの曲げ挙動に及ぼすZ糸の影響*

坂井 建宣** C-R Rios Soberanis*** 若山 修一**

Effect of Z-yarn on Bending Behavior of Non-crimp Fabric Composites

by

Takenobu SAKAI, Shuichi WAKAYAMA

(Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan University, Hachioji)

and C-R Rios SOBERANIS

(Unidad de Materiales, Centro de Investigacion Cientifica de Yucatan, Mexico)

In this paper, a composite material based on epoxy matrix reinforced with glass-fibre non-crimp fabric was evaluated. The multi-axial E-glass reinforcement textile has a mass per unit area of $972 \pm 5 \text{ g/m}^2$ and a $[0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ]$ stacking sequence. The layers are stitched together with a polyester (PES) multifil binding yarn. Epoxy system chosen was constituted of resin D.E.R331 from Dow Company, which is a liquid resin of low viscosity and high content of epoxy groups. Samples were cut from several laminas having each of the four plies of unidirectional fibers' orientations ($0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$) parallel to sample length in order to test the effect of the polyester knit yarn on the damage initiation and propagation. To evaluate the mechanical properties of NCF, the three S-S diagrams at different textiles' orientations ($0^\circ, 45^\circ$ and 90°) were compared. Samples at 0° exhibited better mechanical properties, on the other hand, 90° shown higher deformation. Higher Young's modulus and bending strength was shown for 0° composites while results for 45° and 90° were not very dissimilar. For all samples, discontinuities on the curves appeared when a significant crack emerged. Materials at 90° were observed to have more serrations on its curve due to the higher crack density due to the reinforced textile geometry. To evaluate the crack initiation and propagation, Acoustic Emission (AE) Technique was applied during bending tests. Cumulative AE Energy was increased at the decrease point in load on each material. With Projected Wavelet Transform Analysis, the major frequencies of all AE waves were calculated. As the result of frequency analysis, the discriminative frequency was determined with the observation by the optical microscope. Considering with the all of the data suggested that the stress concentration by the outer layer and the PES stitch caused the crack initiation and propagation.

(Received November 24, 2011)

キー・ワード：エポキシ系複合材料，アコースティック・エミッション，Z糸，多軸挿入たて編物基材

Key Words : Epoxy Composites, Acoustic Emission, Z-yarn, Non Crimp Fabric

1 緒 言

織物複合材料は一方向性複合材料と比較して、生産コスト・ドレープ特性・剥離および衝撃強さの観点で優れているため、近年開発が盛んに行われている^{1),2)}。しかし、織物複合材料の面内における機械的特性、すなわち剛性や強度は、一方向性複合材料と比較して低いのが現状である。これらの原因は、繊維の編み方により生じる面外方向へのうねりが原因である。特にこのうねりは、荷重を負荷した際に、ポアソン効果により繊維に対して軸直交方向への圧縮がかかり、繊維破断に繋がる³⁾。

これに対し、近年ではNCF (Non crimp fabric) と呼ばれる複合材料が開発されている。これは、一方向性の層を2層以上重ねて作られる複合材料に対して、各層の接着性を高めるため、Z方向に細い繊維（ポリエステル繊維など）を用いて縫い込む技術である。この細い繊維は前述のようなうねりの影響を与えないだけでなく、複合材料のき裂伝播の低減効果も示すことが明らかにされている^{4),5)}。また、どのような積層構成においても対応できるため、その機械的特性に注目が集まっている。

本研究では、アコースティック・エミッション法 (AE法) と呼ばれる、材料内部に生じた損傷により発生する弾性波をリアルタイムモニタリングする技術を用い、NCFの曲げ変形による損傷の発生・蓄積過程を評価する。また、NCFの積層構成の違いおよび

* 原稿受付 2011年11月24日

** 首都大学東京理工学研究科 八王子市南大沢

*** Unidad de Materiales, Centro de Investigacion Cientifica de Yucatan

Z糸が曲げ特性に及ぼす影響を, AE法を用いて明らかにすることを目的とする。

2 供試材料および実験方法

2.1 供試材料

本研究では, ガラス繊維織物強化エポキシを評価した. 多軸Eガラス繊維織物 (by Italian industry Nastrificio Gavazzi, 密度 $972 \pm 5 \text{ g/m}^2$ 積層構成 $[0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ]$)を用いた. 織物の構造をFig. 1に示す. 各層は, ポリエステル (PES) 繊維により, 縫い合わされている. エポキシ樹脂は D.E.R. 331 (Dow Company)

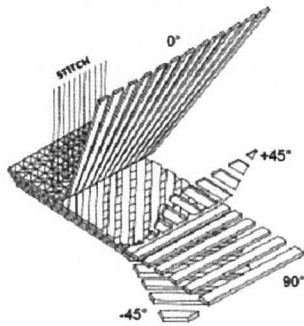


Fig.1 Non-crimp textile structure.

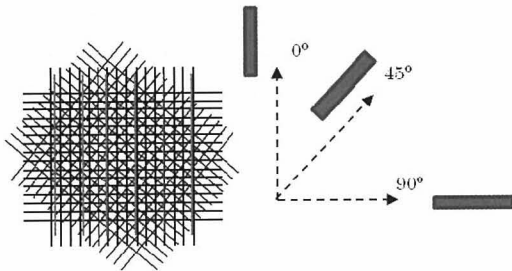


Fig.2 Sample orientations for bending test.

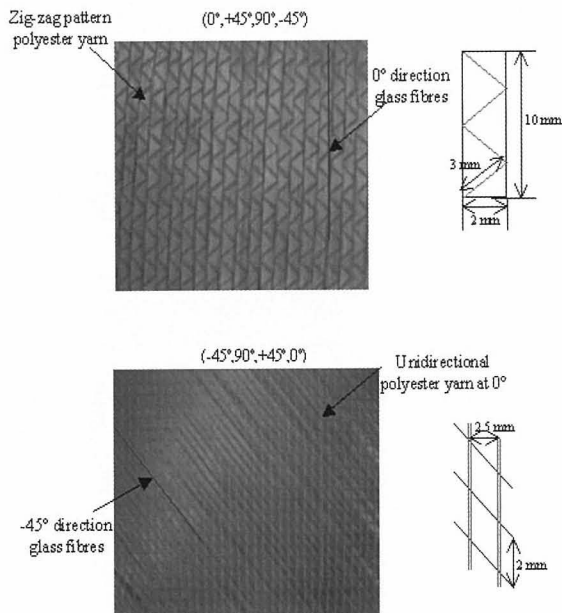
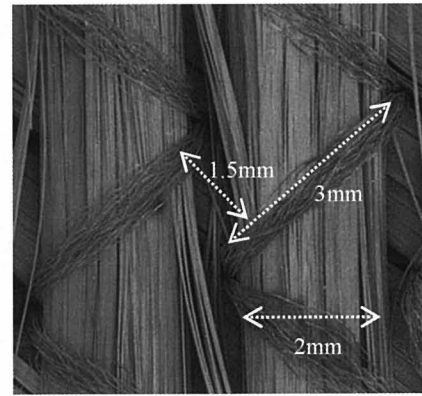


Fig.3 Multi-axial textiles structure, inspection from both sides.

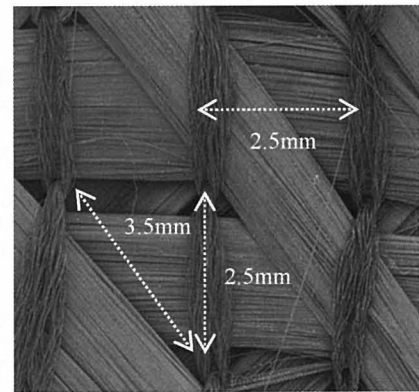
を用いた. 試験片は, ポリエステル繊維が損傷の発生および進展に及ぼす影響を明らかにするため, 引張角が $(0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ)$ と配向するようにファインカッターを用いて短冊形 $(60 \times 20 \times 3 \text{ mm})$ に切断した. 繊維配向をFig. 2に示す. また, 作製した試験片の表面の写真をFig. 3に, 拡大写真をFig. 4に示す.

Fig. 3より, 0° 材の 0° 層 (表面) には, PES 繊維によるジグザグパターン of 縫い目および, 0° 方向のガラス繊維が確認できる. また -45° 層 (裏面) には, 0° 方向のPES 繊維の縫い目および -45° 方向のガラス繊維が確認できる. PES 繊維の縫い方の詳細は, Fig. 3右側に模式的に示す.

Fig. 4 (a) からは, ガラス繊維束同士が, お互いに編み込まれていないことが確認できる. また, Fig. 4 (b) からは, ガラス繊維およびPES 繊維がそれぞれストランド形状をしており, ガラス繊維束をPES糸がまとめるように縫われていることが確認できる.



(a)



(b)

Fig.4 (a) Unidirectional PES threads and knots and (b) Zig-zag pattern.

2.2 実験方法

静的4点曲げ試験を行った. 静的4点曲げ試験条件は, 島津製作所社製万能試験機AG-100Eを用い, クロスヘッドスピード 0.5 mm/min , 内スパン 10 mm , 外スパン 30 mm , 大気中 23° C にて行った. また試験中の損傷の発生および蓄積過程を評価するため, アコースティック・エミッション法 (AE法)を用いた.

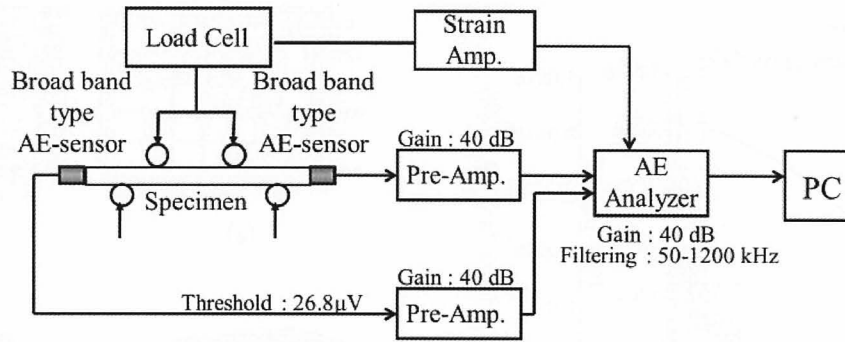


Fig.5 The AE measurement chain of the 4-point bending test.

AE センサは2つの広帯域型 AE センサ (NF 回路ブロック: AE-900M) を用い、4点曲げ試験片の両端に接着剤を用いて取り付けられた。AE 計測条件は、プリアンプゲイン40dB、しきい値26.8dB、測定周波数帯を50~1200kHzとした。AE 信号は AE アナライザ (Valen Systeme: AMSY-5) を用いて取得した。静的4点曲げ試験の測定概要を Fig. 5 に示す。

3 結果及び考察

3・1 静的曲げ特性

静的4点曲げ試験結果を横軸に時間、縦軸に曲げ強度を用いて Fig. 6 に示す。また、弾性率は以下の式を用いて算出した。

$$E = \frac{23l^3}{4 \times 27wt^3} \frac{P}{Y} \quad (1)$$

ここで、 P/Y は弾性領域における荷重・変位曲線の傾きとする。算出した弾性率および曲げ強度を Table I に示す。これより、 0° 材は 45° 、 90° 材と比較して曲げ強度・弾性率が高いことがわかる。また、 45° 材および

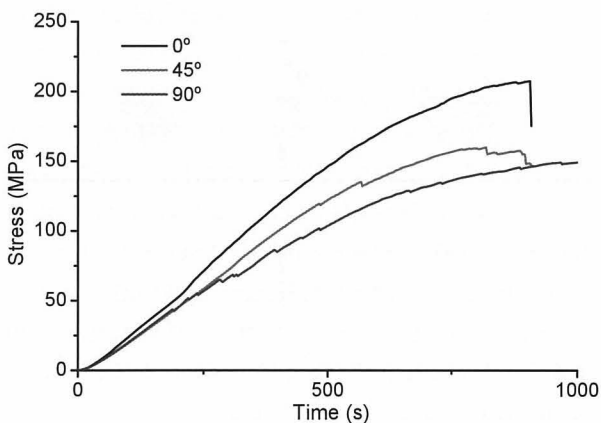


Fig.6 Bending behavior of NCF composites.

Table I Mechanical parameters for NCF composites.

	E (GPa)	US (MPa)
0°	2.7	207
45°	1.5	157
90°	1.3	150

び 90° 材の曲げ強度・弾性率はほとんど変わらない結果を得た。これらの値は以前の研究⁶⁾における、引張試験の結果とほぼ変わらない値である。また全ての試験結果において、不連続な曲線を描いていた。

曲げ試験中に発生した損傷の発生・蓄積を評価するため、AE法を用いて検討を行った。Fig. 7~9に各材料における累積AEエネルギーおよびAE振幅を示す。

0° 材は試験初期において、樹脂のクレイズと思われる比較的小さな振幅のAEが検出されはじめ、その後最終破断直前に樹脂割れと思われる大きな振幅のAEが検出された。荷重-時間曲線では、累積AEエネルギーの増大と同時に、わずかな荷重の低下が見られた。

45° 材においても、試験初期からクレイズと思われる振幅の小さいAEが検出されはじめた。480秒以降より振幅の大きいAEが検出されはじめると同時に、荷重-時間曲線において不連続部が観測されはじめた。この荷重-時間曲線に不連続が生じると同時に、振幅の大きいAEが検出されていることから、これらのAEは荷重負担能力の大きい樹脂の損傷、すなわち樹脂割れに相当していることが理解される。試験後の試験片において繊維破断は見られなかったことから、樹脂割れであることが理解される。

90° 材においても同様に、試験初期にはクレイズと思われる振幅の小さなAEが検出され、200秒付近から振幅の大きいAEが多数検出されている。このとき、累積AEエネルギーが急増すると同時に荷重の低下が見られた。これは 45° 材と同様に、多数の樹脂割れが発生していることが理解される。

また、 45° 材および 90° 材は、 0° 材の結果よりも早い段階から損傷が発生・蓄積し、破断に至っている。 0° 材においては、曲げ試験中に発生したAE信号は比較的少なく、破断直前に急増している。すなわち 0° 材では、引張面に破壊の起点となる繊維が少なく、結果として損傷が生じる応力が高くなったことが理解される。また、 45° 材および 90° 材は、それぞれ引張面にある 45° および 90° 方向の繊維および厚さ方向に編み込まれているポリエステル繊維が応力集中部となり、き裂の発生および成長に影響を及ぼし、損傷が生じる応力が低

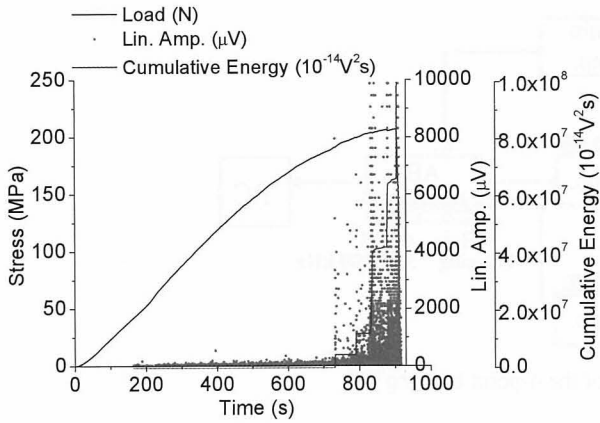


Fig.7 AE signal behavior in composites at 0°.

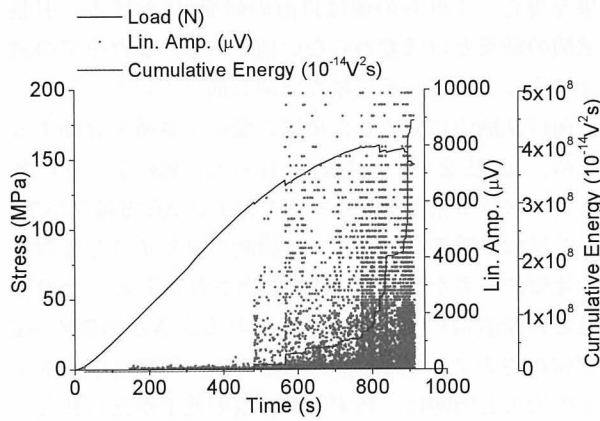


Fig.8 AE signal behavior in composites at 45°.

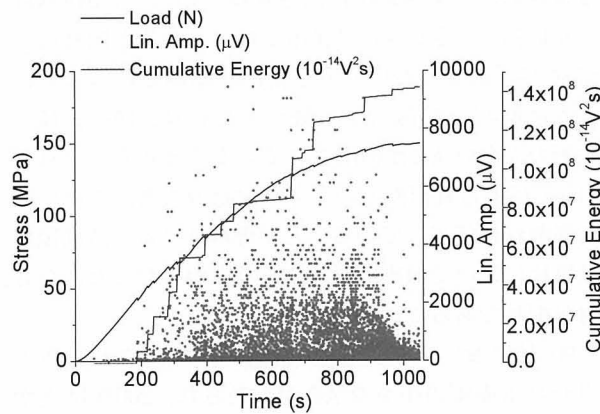


Fig.9 AE signal behavior in composites at 90°.

なくなったことが想定される。

3・2 AE信号の周波数応答

次に、Fig. 7～9で得られた個々のAE信号を時間-周波数解析することで、破壊の識別を試みた。時間-周波数解析には Projected Wavelet Transform法を用いた。Projected Wavelet Transform法とは、Fig.10に示すように、AE波形をWavelet変換し、3次元表示した後に、時間軸方向に投影することで、検出された1つの波形全体の周波数応答を得る方法である。この方法は、FFT（高速フーリエ変換）と比較して、時間軸方向に積分していないことなどから、より適確に波形の周波数応答が検討できるのが特徴である。

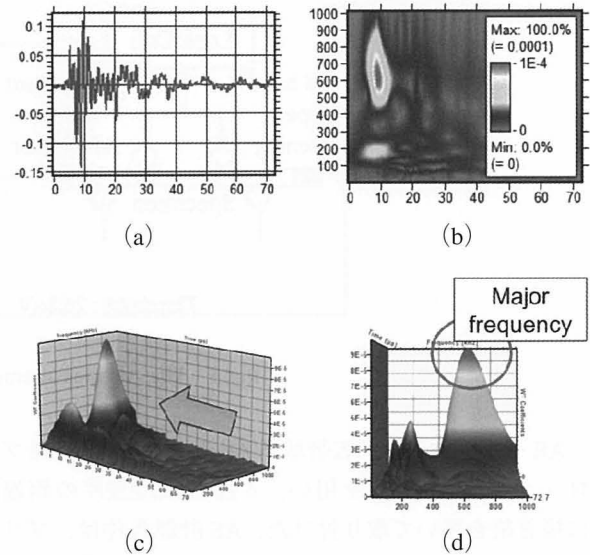


Fig.10 Schematic drawing of Projected Wavelet Transform Method (a) AE wave signal, (b) 2D image of Wavelet transformed AE wave, (c) 3D image of Wavelet transformed AE wave and (d) projected 3D image along time axis.

本研究では、Projected Wavelet Transform法により得られたグラフにおいて、1つの波形の特徴を表す周波数である、最も大きなWavelet係数を示す周波数 (Fig.10中のMajor Frequency)を求めた。また、その周波数を縦軸に、横軸を試験時間、円の大きさをWavelet係数としてプロットすることで、曲げ試験中に生じる損傷の種類と周波数・規模を対応させることで、評価を行った。Fig.11～13に引張試験中に得られたAE信号のProjected Wavelet Transformの結果を示す。

Fig.11より、0°材ではFig.7と同様に試験初期において比較的小さな振幅のAEが検出された。得られた周波数帯は、様々な周波数帯域、主に500kHz以上の周波数帯において多く存在した。750秒付近ではFig.7における振幅の大きさと同様に、Wavelet係数の大きなAE信号が検出された。これらの波形の周波数帯域は、100～650kHzと広範囲にわたっていた。中でも、350kHz付近および180kHz付近のAE信号は、Wavelet係数の値が大きいため、0°材に生じた損傷から生じたAE信号の多くは、350kHzおよび180kHzに対応していることが理解される。

Fig.8に示す45°材の周波数解析結果をFig.12に示す。同様に試験初期においてほぼ全ての周波数帯において比較的小さなAEが検出されている。500秒付近より、AEの振幅が大きくなるとともにWavelet係数も大きく、150～250kHzにWavelet係数の大きい信号が集まっている。また、300kHz以上において、断続的に大きな振幅のAEが検出されている。観察の結果からは、繊維/樹脂界面における損傷および樹脂割れ

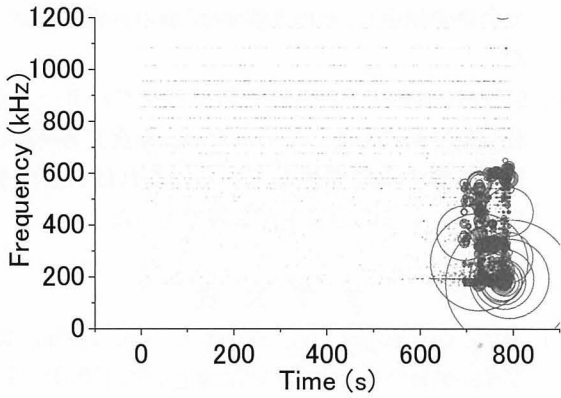


Fig.11 AE signal projected wavelet transform for samples at 0°.

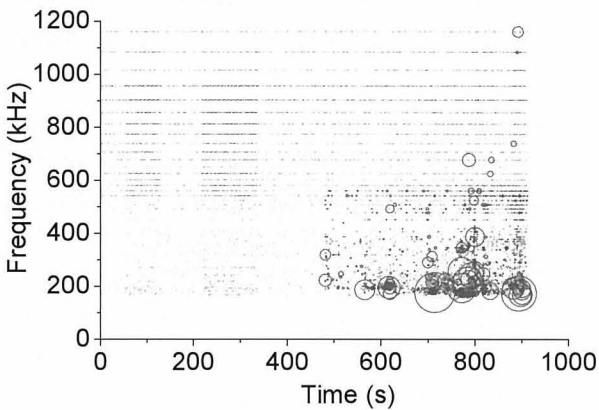


Fig.12 AE signal projected wavelet transform for samples at 45°.

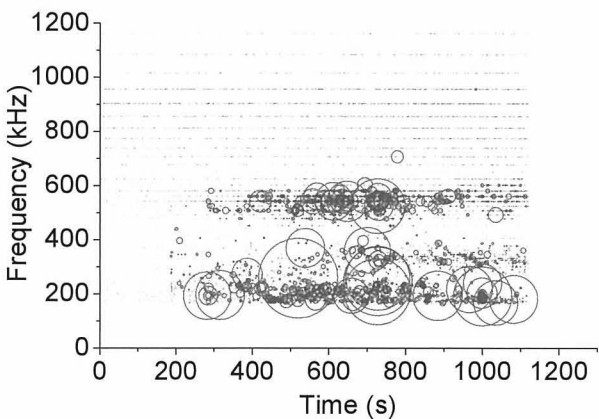


Fig.13 AE signal projected wavelet transform for samples at 90°.

以外見られなかった。発生頻度から考え、150~250kHzに対応した損傷は、繊維/樹脂界面において発生した損傷であり、300kHz以上にある大きな振幅のAEは樹脂割れに対応していることが推察される。

Fig. 9 に示す90°材の試験結果を周波数解析した結果を Fig. 13 に示す。200秒以降に、150~250kHzおよび300kHz以上、特に500~600kHzに大きなWavelet係数の信号が検出された。先の結果より、150~250kHzに対応した損傷は、繊維/樹脂界面における損傷であることを、観察結果及び発生頻度より提案されている。

また、破断直前には、低い周波数のAE（繊維/樹脂界面）は、高い周波数のもの（樹脂割れ）よりも多く検出されている。これは試験中盤までにおいてほとんどの部分でき裂が発生し、き裂密度が飽和に至ったことから、これ以上新たなき裂の発生が見られず、結果として破断直前には繊維/樹脂界面における損傷および摩擦が生じていることが想定される。このことから、300kHz以上の周波数帯は、樹脂割れに対応していることが理解される。

ここで、500~600kHzの成分を有する波形は、0°材においても同様に検出されているが、45°材では検出されていない。このことから、0°、90°材と45°材では損傷の発生メカニズムが異なることが想定されるが、その解明には至っていない。

3・3 曲げ試験後の試験片観察

Fig. 14に、曲げ試験後の各試験片の写真を示す。図中のジグザグな曲線は、PESのジグザグの縫い目を示し、直線は曲げ試験における引張面の繊維配向を示す。Fig. 14 (a) に示す0°材の結果より、試験片中央部に曲げによる損傷が見られた。これらの損傷は、ジグザグに編み込まれたPES繊維の山部および谷部が損傷の起点となり、軸直交方向に樹脂割れが発生している。Fig. 14 (b) に示す45°材においては、PES繊維が配向している45°方向と同じ方向にき裂が存在している。これは、ジグザグな網目の直線部分(0°層の配向方向)に沿ってき裂が発生し、そのき裂が45°層のき裂に繋がっている様子が見られる。

Fig. 14 (c) より、90°材ではPES繊維のジグザグパターンが軸直交方向に配向しているため、軸直交方向のき裂が0°層のみに発生しており、その間隔は、ジグザグパターンの山と谷を結んだ距離である約3mmもしくはその半分である約1.5mm程度であった。すなわち、PES繊維の存在による応力集中を原因として理解される。

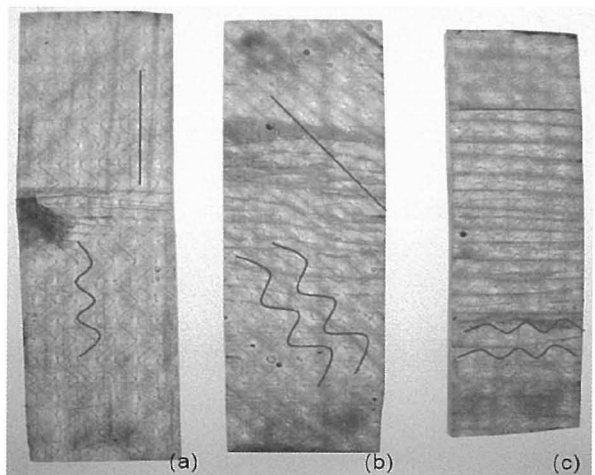


Fig.14 Crack development in samples at (a) 0°, (b) 45° and (c) 90°.

0°および90°材と45°材の違いは、PES 繊維の存在による応力集中が原因で損傷が発生しているか、いないかの違いであることが理解された。

以上のように、試験後の試験片の様相から、45°、90°材では PES 繊維の影響が大きいことが理解される。また、前節の結果と併せて考えると、ある特定の周波数帯の AE 波を検出した場合、それに対応する損傷をある程度特定可能であること、また繊維配向の違いが損傷に及ぼす影響を明らかにした。また、PES 繊維がき裂発生 の 起 点 に な り う る こ と が 明 ら か と な っ た 。

4 結 言

本研究では、Non crimp fabric 複合材料に関する積層構成の違いおよび Z 糸 (PES 繊維) の存在が損傷に及ぼす影響の、AE 法を用いての検討を行い、以下の結言を得た。

1. 0°材において、試験片中央部に生じた曲げによる損傷は、ジグザグに編み込まれた PES 繊維の山部および谷部が損傷の起点となり、軸直交方向に樹脂割れが発生した。
2. 45°材において、PES 繊維が配向している45°方向と同じ方向にき裂が存在していることから、ジグザグな網目の直線部分 (0°層の配向方向) に沿っ

てき裂が発生し、そのき裂が45°層のき裂に繋がった。

3. 90°材において、PES 繊維のジグザグパターンが軸直交方向に配向しているため、軸直交方向のき裂が0°層のみに発生している。これは PES 繊維の存在による応力集中が原因であった。

参 考 文 献

- 1) Ernst, G., Vogler, M., Hühne C. and Rolfes, R., *Composites Science and Technology*, **70**, (2010), 61.
- 2) Bogdanovich, A. E. and Pastore, C. M., *Composites Science and Technology*, **56**, (1996), 291.
- 3) Lomov, S. V., Belov, E. B., Bischoff, T. S. Ghosh, B., Chi, T. Truong and Verpoest, I., *Composites, Part A*, **33**, (2002), 1171.
- 4) Cruz-Santos, G., Rodriguez-Laviada, J. and Rios-Soberanis, C. R., *Polymer Composites*, (2009), 1800.
- 5) Edgren, F., Mattsson, D., Asp, L. E. and Varna, J., *Composites Science and Technology*, **64**, (2004), 675.
- 6) Canto-Chale, R., Cruz-Santos, G., Rodriguez-Laviada, J. and Rios-Soberanis, C. R., *Annual Technical Conference ANTEC 2008 (SPE) Milwaukee, Wisconsin, USA.*, (2008), 2035.

CFRPサンドイッチミラーの鏡面精度の時間・温度依存性*

小柳 潤** 荒尾 与史彦*** 武田 真一****
宇都宮 真**** 川田 宏之*****

Time and Temperature Dependence of Surface Accuracy on CFRP Sandwich Mirror
by

Jun KOYANAGI,

(Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara)

Yoshihiko ARAO,

(Department of Mechanical System Engineering, Doshisha University, Kyotanabe)

Shin-ichi TAKEDA, Shin UTSUNOMIYA

(Aerospace Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu)

and Hiroyuki KAWADA

(Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering, Waseda University, Tokyo)

Mirrors of satellite are one of the heaviest parts in the satellite. The maximum weight of the satellite is determined by the launch capacity of the rocket. Of course, the weight of the main mirror is limited but larger mirror enable higher resolution observation. A specific stiffness of the mirror material is hence a key factor. Since carbon fiber reinforced polymeric composite material(CFRP)is superior to not only the specific stiffness also in-plane thermal stability, it may be suitable to use as mirror. Before applying CFRP to the mirror, several problems should be solved; one of them is long-term reliability of mirror surface accuracy. It is reported that there exist a "print-through" problem for CFRP mirror surface. To address this problem, a lot of works regarding surface coating treatment have been done for the mean time. However, the long-term assurance of the surface roughness has not been discussed nevertheless the mechanical property of CFRP is inherently time-dependent. There is a possibility that the time-dependent deformation of the material deteriorates the mirror surface accuracy. The deformation induced by physical ageing, dewater and internal stress relaxation of the matrix may change the surface accuracy. A deformation induced by temperature change is another problem. In this paper, time and temperature dependence of the surface accuracy is studied for CFRP sandwich mirror. The effect of different surface treatment on the surface accuracy is also investigated.

(Received October 31, 2011)

キー・ワード：高分子系複合材料，ハニカムサンドイッチ，鏡面精度，耐久性

Key Words : Polymer Composites, Honeycomb Sandwich, Mirror Surface Accuracy, Durability

1 緒 言

CFRPの衛星部材への適用に関して、近年CFRP製の鏡の開発が望まれている。周知の通り、ロケットの性能の面から衛星の重量は厳しく制限されている。現状、熱膨張率が小さいガラスが鏡の材料に用いられているが、ガラス製鏡を衛星に搭載すると、それに伴って制振機などが必要となり、結果的に鏡の直径は大き

く制限されてしまう。鏡の直径は観測性能にクリティカルに影響し、例えば鏡の直径が2倍になると、観測解像度は4倍、観測対象物の同定までに必要な積分時間は16分の1になる。ガラス製の鏡と比べて重量を同等とした場合、CFRP製の大型軽量鏡により観測性能は飛躍的に向上する。衛星は地球からの輻射熱とその方向が変化するため、時間の経過とともに温度が変化するが、面内の熱伝導率がCFRPはガラスよりも優れ、ミラー内温度差が抑えられるため温度変化に対しても安定した観測を行うことができる¹⁾。

一般に、鏡面精度は対称とする電磁波の波長の20分の1以下のRMS (Root mean square) が必要である。

* 原稿受付 2011年10月31日

** 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 相模原市中央区由野台

*** 同志社大学機械システム工学科 京田辺市多々羅都谷

**** 宇宙航空研究開発機構研究開発本部 調布市深大寺町

***** 早稲田大学基幹理工学部 東京都新宿区大久保

例えば、可視光線より波長が長い近赤外線（最短波長約0.7 μm ）を正確に反射させるためには、鏡面精度は35nmRMS以下でなくてはならない。しかし、現状最も正確な平面が創製できるとされているオプティカルフラットを用いた転写を利用してCFRP積層板を成型した結果、表面荒さは100nmRMSを大きく超え、可視光線を対象にした場合などを考えると、鏡面精度はまったく不十分である。この表面荒さはFig. 1の写真に示す繊維が凹凸となって表面に現れる「プリントスルー」に起因する問題であると考えられる^{1)~4)}。

Fig. 1に示すように、表面に近い炭素繊維一本一本の繊維の凹凸が、CFRP表面に現れている。このため、CFRP表面の表面荒さが悪化し、鏡に使用できない大きな理由の一つとされていた。従来、このプリントスルーの問題の対策として、「ゲルコーティング」が有効であるとされている。Fig. 2にゲルコーティング処理後のSEM写真を示すが、オプティカルフラットを用いて転写して作製したCFRP表面に樹脂の薄い層をさらに塗布する（この際にもオプティカルフラットを使用）ことで、表面のプリントスルーが解決できているように見える。しかしこのゲルコーティングの妥当性・長期持続性をナノオーダーの測定にて議論したこ

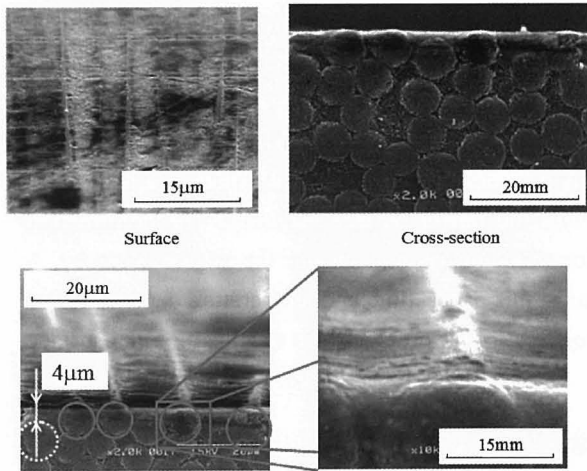
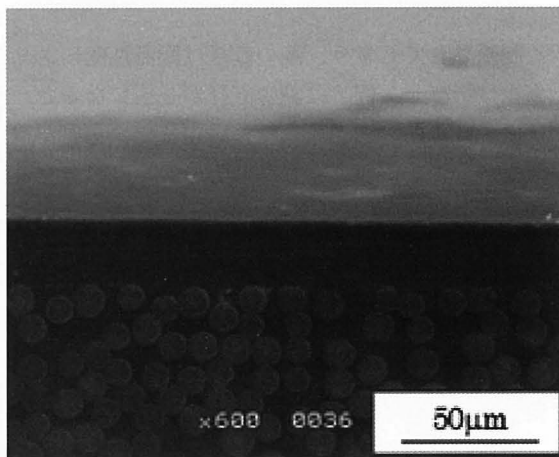


Fig.1 Fiber-print through on CFRP surface.



とは過去にない。

本研究ではプリントスルー対策として、表面にゲルコーティングを施したオールCFRP製サンドイッチ鏡を作製した。本論文ではその鏡面精度の経時変化、温度・時間依存性を測定した結果を述べ、考察を行う。

2 CFRPミラー作製

Fig. 3に本研究にて作製したCFRPミラーの作成方法を示す。まずオプティカルフラットをツール面として用い、サンドイッチの表皮となるCFRP積層板を作製する (Fig. 3-1)。積層構成は疑似等方、 $\{[(45/0/-45/90)]_{R50}\}_s 32\text{ply}$ とした。この積層構成は特別な構成であり、まず8ply積層したプリプレグに同じく8plyのものを180°回転させて積み合わせて16plyとし、再びこれを2セット用意したあと、また一方を90°回転させて積層して合計32plyにする方法である。本積層手法により、繊維の配向誤差を相対的に抑えることが可能であり、これによって従来必ず発生するとされていた、積層板の面外変形を小さくすることができる。材料として炭素繊維は高弾性のピッチ系カーボン繊維を用い、マトリクスには吸湿・経時変形の小さいシアネート樹脂を使用した。成型温度は232°Cである。サンドイッチミラーの裏側の表皮については、作製費用節約のためスーパーインバーを用いて成型した (Fig. 3-2)。積層構成はFig. 3-1と同様である。これらにほぼ同様の機械的特性値を持つ構成機材からなるハニカムCFRP (ウルトラコアUCF-160-1/4-3.0 (SF-YSH50A/Cyanate Resin)) をシアネート接着剤を用いて張り合わせた。同じく232°Cにて接着を行った (Fig. 3-3)。

このようにサンドイッチミラーを接着してから、表面のオプティカルフラットとスーパーインバーから外した (Fig. 3-4)。次に1cm四方あたり100gのおもりを用いてゲルコーティングを行った (Fig. 3-5)。これを常温で硬化させ、型から外してオールCFRP製

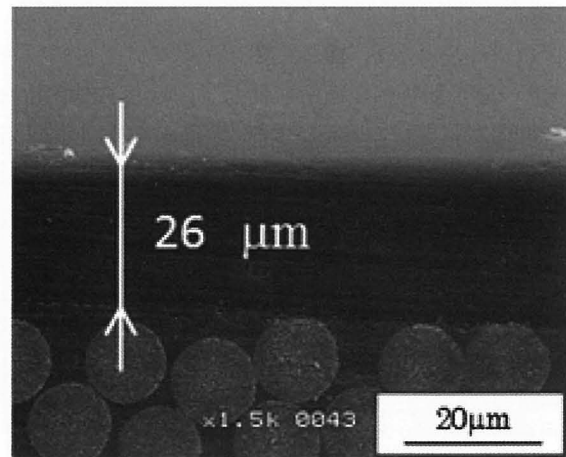


Fig.2 Gel-coated CFRP plate surface taken by SEM.

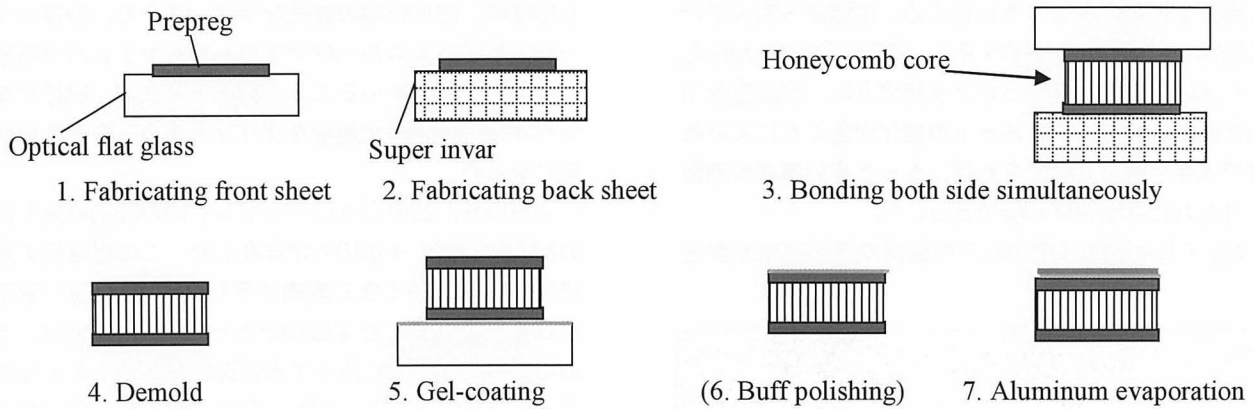


Fig.3 Fabrication flowchart for CFRP sandwich mirror.

サンドイッチ鏡を作製した。比較のために、ゲルコーティング層をバフ研磨し、コーティング層を薄くしたサンドイッチ材作製も試みた (Fig. 3-6)。その後、Zygo 干渉計にて表面精度を測るために必要な反射率を確保するために、アルミ蒸着を施した (Fig. 3-7)。これらの作業はすべて(株)TMPにておこなった。作製されたミラーの大きさは、縦横10cm、高さ3cmで、1cm四方当たり0.9gの軽量ハニカムサンドイッチ構造材である。作製したCFRPミラーの写真を

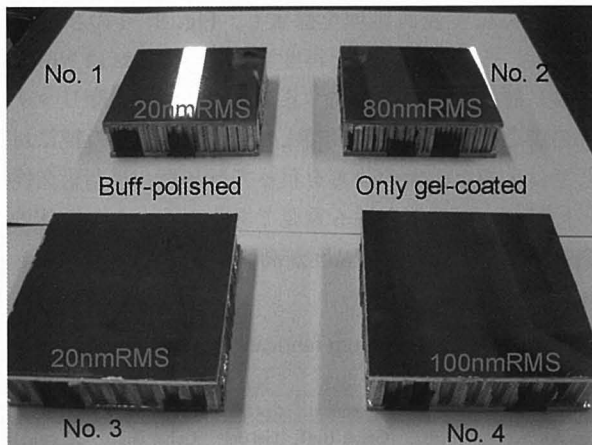


Fig.4 Gel-coated (and then buff-polished) and Al evaporated CFRP sandwich mirrors.

Fig. 4 に示す。また納入直後の測定した面精度を Fig. 4 に併記する。

3 鏡面の経時変形

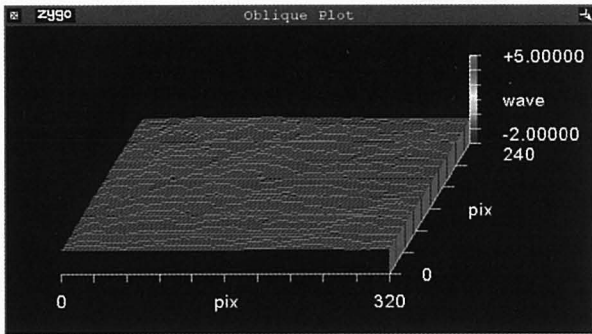
2体の鏡 (Fig. 4におけるNo. 1とNo. 2)を様々な環境にて静置した後の鏡面測定結果を Table I に示す。Table I に示す通り、納入直後のCFRPミラーの表面荒さは、20~100nmRMSとなっており、赤外線のみラーとしての十分な適用可能性を示している。特に、ゲルコーティング後バフ研磨を施したミラーの鏡面は納入直後の測定で20nmRMSという結果を示しており (Fig. 4)、CFRP製鏡としては革新的に精巧な鏡面が仕上がっていた。ゲルコートのみ鏡面と比べて表面精度が良い傾向があった。次に、様々な環境にてCFRPミラーを静置し、その都度鏡面精度を測定した。初め数日の測定では鏡面が概ね劣化していることが確認できる。この要因としては、吸湿変形・脱水変形・フィジカルエージングによる収縮、粘弾性による熱残留応力の解放に伴う変形などが挙げられるが、個別の定量的議論は難しく、ここでの議論は差し控える。ある程度の日数を経て鏡面が劣化した後は、鏡面の劣化が極めて緩やかとなり、この時間スケールでは安定し

Table I Surface roughness measurement results after various hostile condition durations.

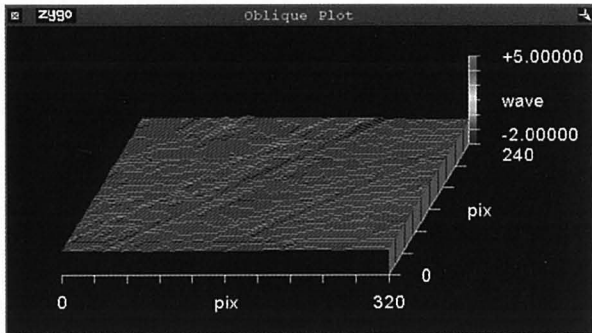
State #	Condition	Duration	Surface roughness nmRMS	
			No. 1 (Buff-polished)	No. 2 (Gel-coating only)
0	Initial	-	20	80
1	Normal room	13 days	50	100
2	Normal room	6 days	40	120
3	80°C 95%RH	1 day	60	180
4	20°C vacuumed	1 day	60	180
5	Normal room	8 days	60	180
6	80°C vacuumed	7 days	60	180

た鏡面を保っているように見える。成型から納入までに鏡面が劣化したと仮定すると、成型直後は20nmRMSより良い鏡面状態であったと予測できる。成型直後から低温環境などのシアネートの変化が起りにくい条件で保存することができれば、もっと高い精度の鏡面が得られた可能性が示唆できる。

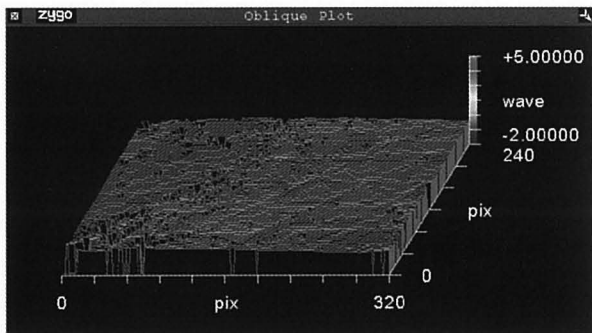
Fig. 5 には CFRP 鏡 No. 1 の鏡面の経時変化を測定



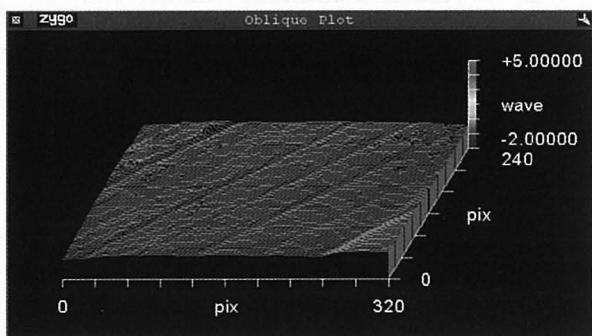
(a) Just after arrival



(b) 3weeks under room temperature



(c) 1day under 80°C, 95%RH



(d) 1day under 20°C, vacuumed condition

Fig.5 Z-displacement plot measured by Zygo in approximately 1x1 inch area.

した際の、高さ分布の結果を示す。図より、繊維一本一本のプリントスルーはゲルコーティングとバフ研磨により改善されていることが確認できたが、繊維の束レベルの相対的に大規模なプリントスルーの存在が明確になった。

すなわち、図のようにプリプレグ内の繊維の束と束の隙間に溝のような凹みが存在した。この溝は納入直後から始めは深くなる傾向を示し（図中 a→b）、吸湿後は少し溝が浅くなる傾向があった（図中 b→c）。その後真空での脱湿に伴って再び溝が深くなったように見える（図中 c→d）。これを繊維の束と束の間に存在する樹脂リッチ部と仮定する。樹脂のフィジカルエージング収縮→吸湿膨張→脱水収縮と想定すると、図の a から d までの挙動と定性的に一致するため、この「溝」のようなプリントスルーは繊維の束と束の間の樹脂リッチ部であると予想できる。

4 表面の再処理

前節の結果から、ゲルコーティングの後、バフ研磨を施した鏡面（No. 1 と No. 3）が相対的に良い鏡面状態であった。そこで、2体のCFRP鏡（No. 3 と No. 4）を用いて、表面の再処理を行った。すなわち、化学薬品にて表面処理を除去し、Fig. 3-4の状態まで戻り、5～7の工程を再度実施した。これはNo. 3の鏡に対しては前節に述べる繊維束の間の樹脂リッチ部の溝を埋める効果を期待して行い、No. 4の鏡に対しては大幅な鏡面の改善を狙って行った。長期耐久性と同様に、温度依存性も重要であるため、この2体のCFRP鏡に対しては、温度が高い状態での鏡面精度も

Table II History from fabrication to measurement.

Mirror No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Fabrication	Common	Common	Common	Common
Surface treatment	Gel & Buff	Gel only	Gel & Buff	Gel only
Initial RMS (nm)	20	80	20	100
After harsh exposure	60	180	60	240
Long exposure	-	-	1 year	1 year
Re-treatment	-	-	Gel & Buff	Gel & Buff
After long exposure	-	-	0.5 year	0.5 year
Ambient temperature	-	-	53	980
Elevated temperature	-	-	54	730

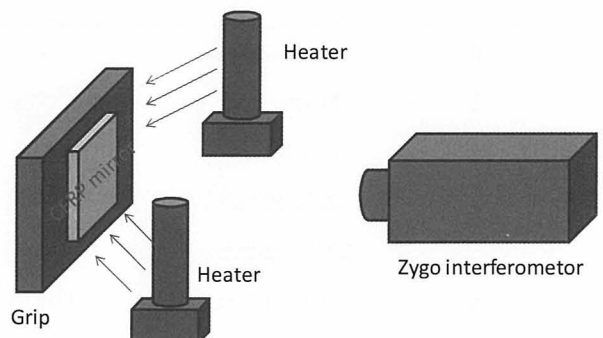


Fig.6 Schematic of measurement system.

測定した。成型からの履歴、並びに再処理後の面精度測定結果、また高温状態での鏡面精度の測定結果を Table II に示す。高温環境は測定器には不適切なため、Fig. 6 に示すように、CFRP 鏡のみを直接ヒーターで暖め、その面精度を測定した。

ここで Table II の結果について詳細に述べる。Fig. 4 に示す通り、各 CFRP 鏡に番号を付けた。Table I には No. 1 と No. 2 の結果を示したが、No. 3 は前者、No. 4 は後者と類似した結果であったため割愛した。この段階で、ゲルコーティングにバフ研磨を施した鏡の方が鏡面精度は優れていた。前節に述べる試験終了後、CFRP 鏡を 1 年間常温にて静置した。しかる後 No. 3 と No. 4 の鏡面を再処理（ゲル＋バフ）し、その後（測定器の都合上）さらに半年放置してから鏡面精度を測定した。常温での測定結果は No. 3 は 53 nmRMS であった。再処理により鏡面精度が改善されたことと、半年の静置での鏡面が劣化したことにより、結果的に 60nmRMS から少し改善されたと考えられる。一方、No. 4 は常温でかなり鏡面精度が低下しており、表面の再処理の効果があつたとは言いがたい。再処理により、No. 4 も 60nmRMS かそれ以下の面荒さを期待したが、期待とは異なる結果となった。さらに、これらの鏡の温度を上げ、面精度を測定した結果、No. 3 は変化せず、No. 4 は面精度が改善した。鏡の温度プロフィールは Fig. 7 に示す。図中 (a), (b) は No. 3 の常温, 昇温, (c), (d) は No. 4 のそれらである。Fig. 6 に示す簡易的な昇温方法であるため、Fig. 7 に示すように、温度分布が生じていた。No. 3 は 25℃～35℃で分布し、No. 4 は 30℃～50℃で分布している。温度分布の存在により、鏡面精度は低下すると予測できるが、No. 3 では変化無し、No. 4 では予測と反対で多少改善された。

Fig. 8 には、Fig. 5 同様の高さの分布をそれぞれの

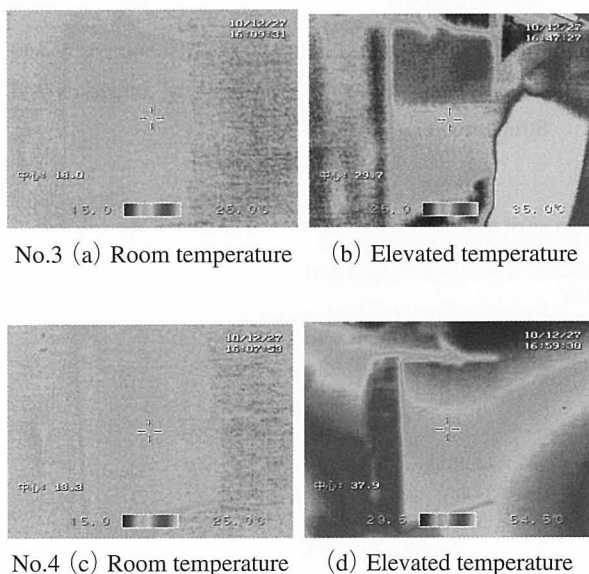
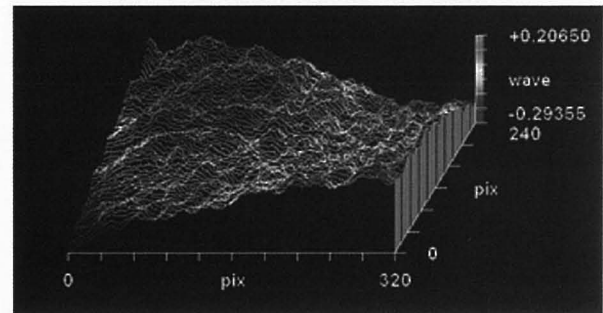


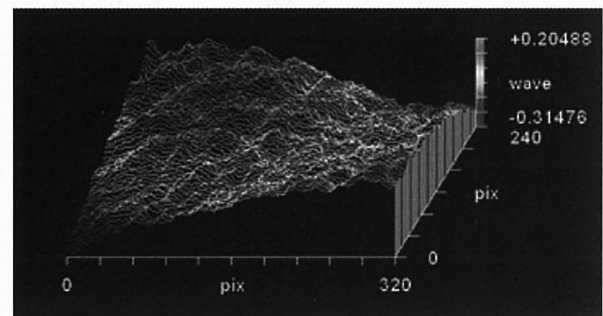
Fig.7 Temperature distributions at measurements.

測定ごとに示す。(a), (b) は No. 3 の結果で、高さが (c), (d) より 20 倍程度拡大されていることに注意されたい。再処理により、No. 3 の束単位の溝が改善されたように見える。No. 4 は精度の悪さから高さの倍率が小さく表しているため、図では表面が滑らかに見えるが、拡大すると No. 3 と同様であった。

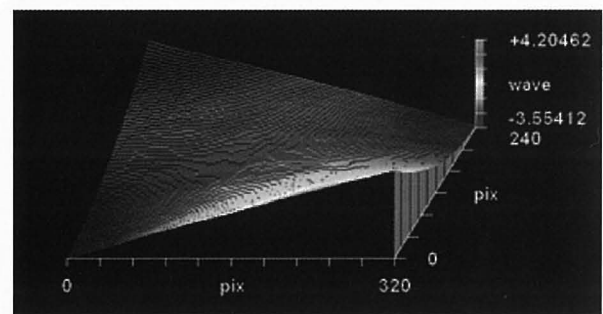
いずれの鏡面も巨視的には「鞍型」に面外変形していたことが共通の結果である。鞍型面外変形の発生メカニズムを考慮し、面精度の温度依存性、時間依存性



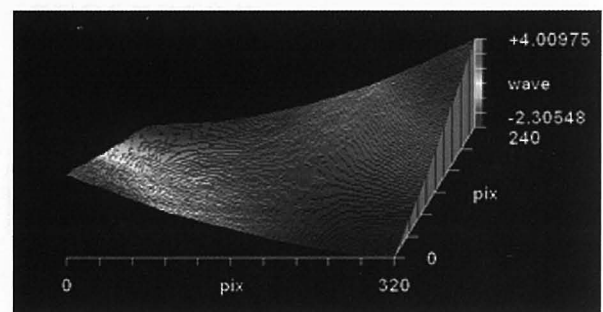
(a) No.3 at room temperature



(b) No.3 at elevated temperature



(c) No.4 at room temperature



(d) No.4 at elevated temperature

Fig.8 Measurement results by Zygo interferometer.

を次節にて考察する。

5 考 察

著者らの過去の研究により, CFRP のサンドイッチ構造物は微視的に見るとほとんどの場合, Fig. 9 に示すような鞍型面外変形が発生することが報告されている⁵⁾。

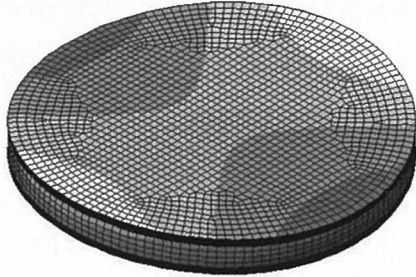


Fig.9 Out-of-plane deformation of CFRP sandwich structure⁵⁾.

CFRP 積層板内部の繊維の方向がわずかに想定と異なる場合, 熱などの外力に対して疑似等方積層板の面内での力学的アンバランスが発生し, これが面外変形に逃げるというメカニズムである。精密機器を用いて, プリプレグを正確にレイアップしても, 繊維の束は基本的に緩やかなより糸状態となっているため, 繊維方向の微少誤差が必ず発生する。その CFRP のマトリクスが膨らんだり縮んだりすることで, 成型時には完全にフラットであったとしても, CFRP は微少面外変形を生じる。面外変形が小さいか大きいかは表面処理方法とは関係なく, 繊維がいかに想定通りの角度で配置されているかに依存する。Fig. 9 の変形は Fig. 8 の結果と酷似している。下記の考察によって, 本研究の結果をよく説明することができる。面精度とマトリクスの膨張収縮には Fig. 10 の関係があると考え。すなわち, 成型時の温度では面精度は最も良く, 繊維配向誤差がなければ, マトリクスの体積変化に関係なく面精度を保てるが, 繊維配向誤差があれば, マトリクスの体積変化にともなって, 面精度が低下する。No. 4 は繊維配向誤差が相対的に大きく, フィジカルエージ

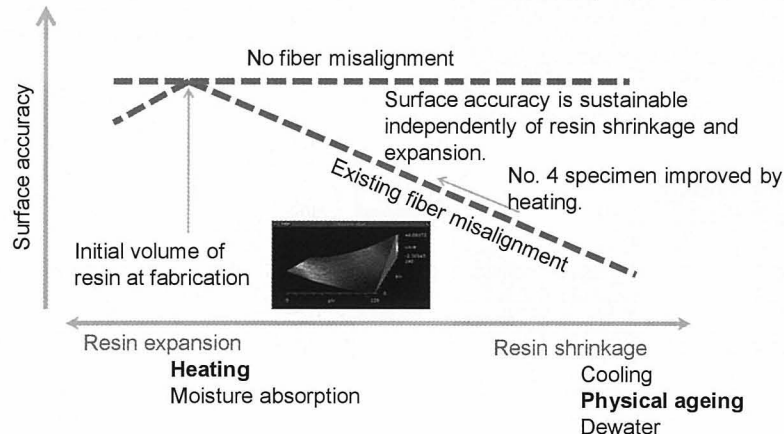


Fig.10 Relationship between surface accuracy and matrix volume change.

ングの進行とともにマトリクスが収縮し, 面精度が低下した。温度を上げるとマトリクスが膨張し, 面精度が回復した。さらに表面の再処理はあまり影響していない。一方で No. 3 は繊維配向誤差が相対的に小さく, マトリクスの体積変化があまり面精度に影響しなかった。

6 結 言

本研究では CFRP サンドイッチミラーの時間・温度依存性を調査した。CFRP 積層板内部の繊維配向誤差が小さければ, 時間・温度に影響されず良い鏡面を保ち, 配向誤差が大きければ時間・温度によって, 鏡面が劣化していくことが示唆された。繊維配向誤差の小さい CFRP 鏡であれば, 赤外線のみラーとして長時間使用できることがわかった。

謝 辞

本研究は, 科学研究費若手研究 B (ナノオーダー精度を有する大型軽量熱安定 CFRP 製鏡の開発) の援助により遂行された。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Koyanagi, J., Arao, Y., Utsunomiya, S., Takeda, S. and Kawada, H., Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 4, (2010), 1540.
- 2) Massarello, J. J., Hochhalter, J. D., Fuierer, P. A. and Maji, A. K., Proceedings of SPIE, 5868, (2005), 58680.
- 3) Hochhalter, J. D., Massarello, J.I., Maji, A.K. and Fuierer, P. A., Proceedings of SPIE, 6289, (2006), 628902.
- 4) Massarello, J. J., Welsh, J. S., Hochhalter, J. D., Maji, A. K. and Fuierer, P. A., Optical Engineering, 45, (2006), 123401.
- 5) Arao, Y., Koyanagi, J., Terada, H., Utsunomiya, S. and Kawada, H., Mechanics of Advanced Materials and Structures, 17, (2010), 328.

構造健全性診断技術との融合に向けた CFRP 構造の簡易急速補修技術に関する検討 — 損傷検知の不確定性の影響評価 — *

水口 周** 高井 元** 大嶽 晴佳** 武田 展雄**

Rapid Repair Concept for CFRP Structures Monitored by Structural Health Monitoring Systems : On Uncertainty of Detected-damage Information

by

Shu MINAKUCHI, Moto TAKAI, Haruka OTAKE and Nobuo TAKEDA

(Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Kashiwa)

Even though carbon fiber reinforced plastic (CFRP) has remarkable mechanical properties, invisible or barely visible damage significantly degrades the strength of CFRP, restricting design space of CFRP aircraft structures. In this context, several structural health monitoring (SHM) technologies have been developed. If detected damage can be repaired by using rapid cure CFRP patch immediately after its occurrence, CFRP structures can be designed to tolerate larger damage, and thus more lightweight and adaptable aircraft structures may be realized. However, damage size, position, and type estimated by SHM systems are not absolutely accurate. Hence, this study experimentally and numerically investigated effects of the uncertainty about detected-damage information on the strength of repaired parts. Simulated impact or lightning damage was introduced in strip specimens, and tensile tests were conducted using them after repairing. It was shown that the strength requirement of the repaired part can be fulfilled by deciding the size of the CFRP repair patch in consideration of the uncertainty about the damage information. Furthermore, required capability of an impact damage detection system combined with the rapid repair method was identified.

(Received September 6, 2011)

キー・ワード：炭素繊維強化プラスチック，構造健全性診断技術，衝撃損傷，落雷損傷，補修，設計

Key Words : CFRP, Structural Health Monitoring, Impact Damage, Lightning Damage, Repair, Design

1 緒 言

優れた機械特性を有する炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の航空機構造への適用が拡大しているが、耐損傷性等の課題により十分な軽量化には至っていないのが現状である¹⁾。こうしたなか、センサを構造と一体化させることで構造の健全性を常時モニタリングし、損傷を自動的に検知する構造健全性診断 (SHM) 技術に注目が集まっている²⁾。これまでに、構造内を伝播する弾性波をピエゾ素子で計測する方法^{3),4)}、材料内のひずみや温度の分布を計測する光ファイバセンサ技術^{5),6)}、CFRP の電気抵抗変化を用いる手法^{7),8)}、亀裂による真空の破れを利用した Comparative Vacuum Monitoring (CVM)^{9),10)} など、様々な手法が提案・実証されてきている。これらの SHM システムは従来メンテナンスでの非破壊検査 (NDI) に代わる損傷検知技

術として実際の航空機への適用が始まりつつあるとともに、将来的にはより軽量の CFRP 航空機構造設計を実現するためのキーテクノロジーとしても期待されている。

そこで本研究は、SHM 技術と新たな簡易急速補修技術の融合を提案する。損傷の発生を SHM 技術で自動的に検知したのち、即座に補修し構造強度を回復することを目指したものである。構造健全性診断技術と急速補修技術を併せて用いることで、より大きな損傷の発生を許容することが可能になり、将来航空機のさらなる薄肉・軽量化 (設計ひずみレベルの向上)、より柔軟な運用へとつながると考えられる。本論文では異物衝突や落雷により CFRP に発生する損傷を対象にし、まず急速補修法を用いた新規設計・運用方法の概要を述べ、その実証のため Single-strap joint test を用いた検証を行う。最終的には補修パッチのサイズ決定指針を提案するとともに、急速補修を行うという観点か

* 原稿受付 2011年9月6日

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科 柏市柏の葉

ら考えた SHM 技術で検知するべき損傷の種類を明らかにする。

2 簡易急速補修法

提案する簡易急速補修法を用いた CFRP 航空機設計・運用の概要を Fig. 1 に示す。薄肉設計された構造には SHM のためのセンサが取り付けられており、各フライト後（あるいはフライト中）に自動検査が行われる。損傷が検出された場合にはその部分に即座に簡易的な補修をほどこし、あるレベル（例えば、終局荷重の 8 割程度）まで構造強度を回復させ安全な継続運用を可能にする。その際には、超音波・X 線探傷など高コストの NDI は行わず、SHM システムから得られる損傷情報のみを用いて補修を行う。その後、定期検査の際等に詳細な NDI を実施し、より精密な補修を行うことで強度を完全に回復させる。

以上のような運用を想定した場合に、簡易急速補修技術としては可視光硬化プリプレグ等の非加熱成形 CFRP^{(11), (12)} を用いてパッチ補修^{(13)~(17)}を行うことが有効であると考えられる。急速硬化可能な非加熱成形プリプレグを用いることで曲面構造を含めた部位に対して飛行前の短時間で補修を完了可能であり、またパッチ補修であるため損傷部の加工が最小限で済み、機材・装置が十分でない空港においても実施可能である。しかしながら、一般に SHM 技術で損傷の位置、種類およびサイズを誤差なく特定することは困難である¹⁾。つまり、これら SHM システムから得られる損傷情報

にあいまいさがあっても、構造強度を要求値以上に回復可能な補修技術を構築する必要がある (Fig. 2)。

この点を考慮し、次節以降では短冊状試験片を用いて、損傷検知の不確実性がパッチ補修部の引張強度に与える影響を調べる。衝撃負荷や落雷により CFRP に発生する損傷をまず貫通損傷（ギャップ）で簡易的に模擬し、補修パッチと損傷の位置関係を変化させた試験を行う。また衝撃や落雷による損傷は複数の損傷モードが組み合わさって生じるため、模擬損傷形態を変化させた試験についても実施する。

3 損傷位置が補修強度に与える影響の評価

3・1 Single strap joint 引張試験

Fig. 3 に用いた短冊試験片（幅20mm）の概要を示す。幅方向に一様な断面を有しており、ギャップは幅方向にも貫通している。被着材、パッチともにプリプレグ T700S/2592（株東レ）を用い、積層構成は $[O_2/90_2]_{2S}$ とした。また被着材とパッチの接着にはフィルム接着剤 AF163-2 K（3M Co.）を用いた。ギャップ長さ（損傷長さ）はすべて20mmとし、模擬貫通損傷の位置とパッチ長さの違いによって5種類の試験片を準備した。これらの寸法は下記の目的にしたがって決定した。

- A. 試験片 (a), (b), (c) (Fig. 3) の比較から、損傷推定位置中央からの実際の損傷位置のずれが補修部の強度に与える影響を評価する。
- B. 片側で同じ接着長さを持つ試験片 (b) と (d),

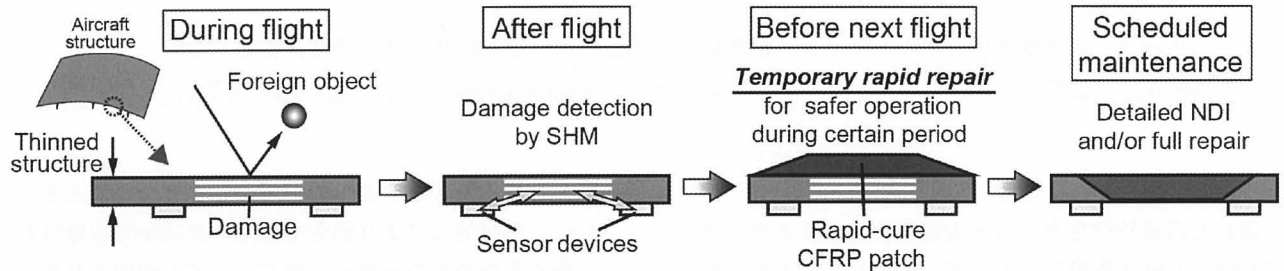


Fig.1 Design and operation of CFRP aircraft structure employing SHM system and proposed rapid repair technique.

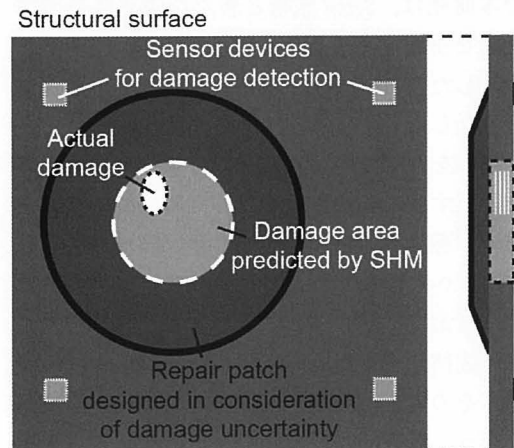


Fig.2 Schematic of rapid repair concept.

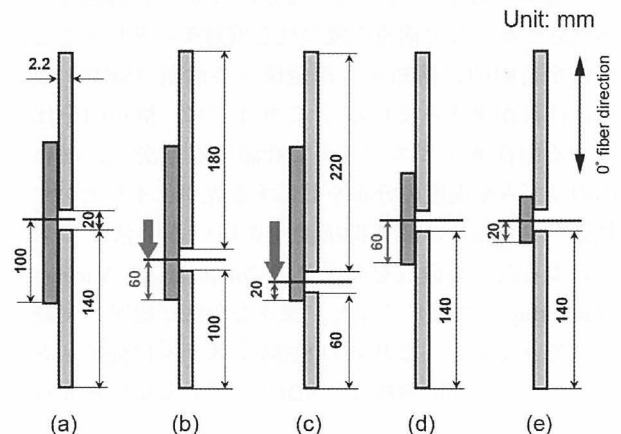


Fig.3 Five configurations of test specimens.

および (c) と (e) の比較から、損傷位置の偏りが補修部の強度に与える影響を評価する。5 種類の試験片寸法ごとに引張試験を 4 回ずつ行い、得られた破壊荷重の平均をその試験片の強度とした。

Fig. 4 に試験片寸法ごとの強度を示す。エラーバーはそれぞれの最大値および最小値を示している。すべての試験片で接着層の亀裂が一気に進展して最終破壊

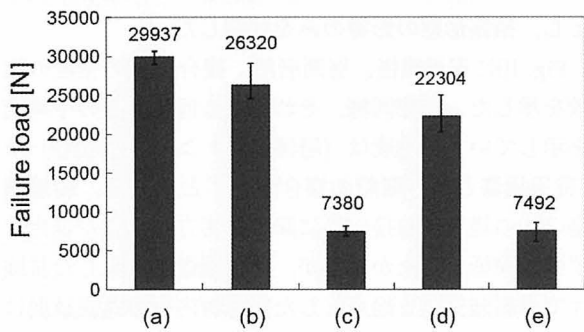


Fig.4 Tensile strength depending on specimen configuration.

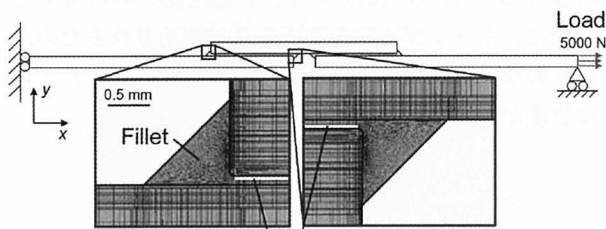


Fig.5 Schematic of finite element model.

Table I Material properties used in finite element analysis.

		T700S/2592	AF163-2K
Elastic moduli (GPa)	E_1	135	1.1
	E_2	8.5	
	G_{12}	4.8	
Poisson's ratio	ν_{12}	0.34	0.34

に至った。同じパッチ長さを持つ試験片 (a), (b) 及び (c) では、模擬貫通損傷の位置がパッチ端部に近づき、片側の接着長さが短くなるにしたがって強度が大幅に低下した。すなわち本研究で提案する急速補修法では、SHM 技術による損傷領域推定の不確定性を十分考慮にいたした補修部設計を行う必要があることがわかる。一方で片側の接着長さが同じ試験片 (b) と (d) (Fig. 3) の結果から、模擬貫通損傷の位置の偏りのあるほう (試験片 (b)) が偏りのないもの (試験片 (d)) に比べて 20% 程度高い強度を示すことがわかった。

3・2 有限要素解析

実験で得られた強度変化の原因を定性的に明らかにするために、Abaqus6.10を用いた2次元有限要素解析を行った。解析モデルの概要を Fig. 5 に示す。平面ひずみを仮定し、接着層フィレットの高さおよび接着層厚さは、前節で用いた試験片の観察結果からそれぞれ 1 mm, 0.1mm とした。材料定数を Table I に示す。被着材とパッチの偏心によって生じる幾何学的非線形性を考慮し、破壊の要因となる peel stress の分布を図中に示す接着層内の経路に沿って算出した。

まず試験片 (a), (b), (c) の peel stress 分布を Fig. 6 に比較した。パッチ端部あるいは被着部端部に向かって徐々に増加していき、全体の傾向として内側のフィレット近傍での peel stress のほうが外側よりも高くなることが確認された。また損傷位置がパッチ端部に近づき、接着長さが短くなるにしたがって接着層端部での peel stress が大きくなる傾向が確認され、これが実験で確認された強度変化の原因と考えられる。また Fig. 7 には試験片 (b) と (d) の内側フィレット近傍での peel stress の分布を比較した。2 種の試験片では同じ接着長さを有するにもかかわらず (Fig. 3), 損傷位置に偏りのある試験片 (b) のほうが、わずかに低い応力を持つことが分かった。両試験片の損傷近傍の変形図 (変形拡大倍率: 5 倍) を Fig. 8 に示す。

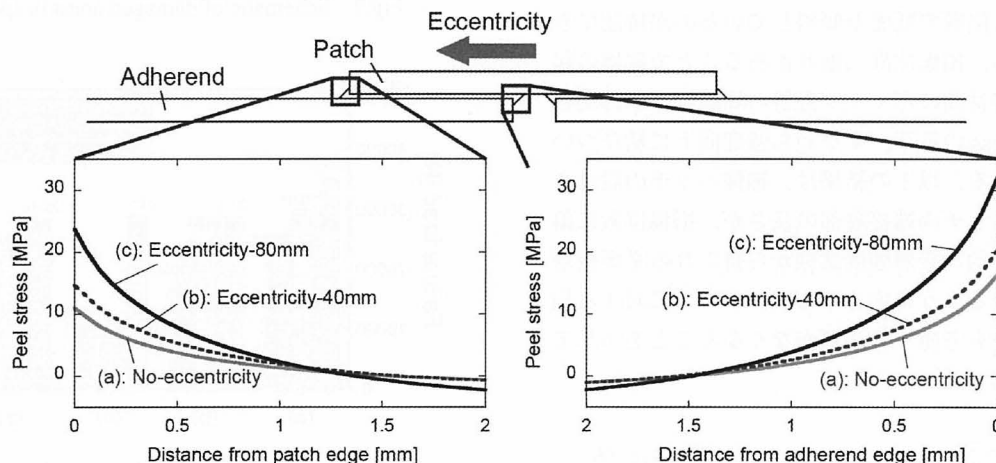


Fig.6 Peel stress distributions of specimens (a), (b), and (c).

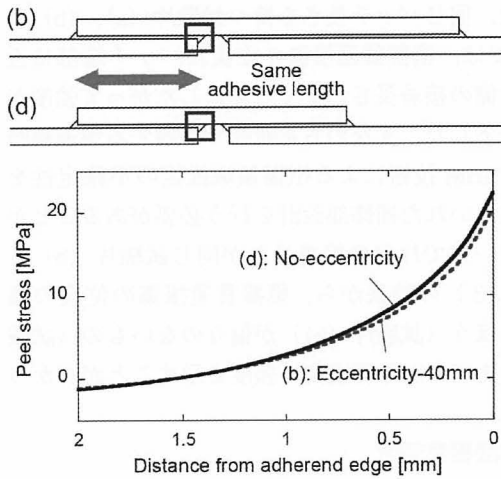


Fig.7 Peel stress distributions of specimens (b) and (d).

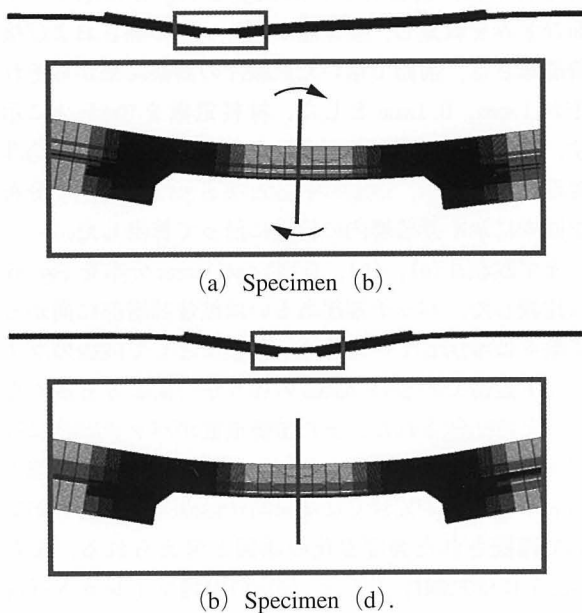


Fig.8 Simulated deformation around damage.

ここで CFRP パッチの断面方向に着目すると、試験片 (d) では損傷部（ギャップ部）中央において鉛直であるのに対して、試験片 (b) では右側接着部の変形に起因して同じ位置で断面が傾斜しているのが確認できる。すなわち、損傷位置に偏りがあることで破壊の起点となる被着材間のギャップ近傍の局所変形が抑制され、peel stress の低下、すなわち強度向上に結びついたと考えられる。以上の結果は、補修パッチの設計を行う際に、パッチ両端接着部の長さが、損傷位置に偏りのない標準的な接着強度試験から得られる必要接着長さ以上になるようにすることで、パッチに対する損傷位置の偏りを考慮する必要がなくなることを示している。

4 損傷の形態が補修強度に与える影響の評価
次に損傷形態がパッチ補修部の強度に与える影響を

明らかにするために、層間剥離あるいは層間剥離と貫通損傷の複合損傷を与えた試験片 2 種類の引張試験を実施した。層間剥離は Fig. 3 に示す貫通損傷の位置にテフロンフィルム（長さ20mm, 厚さ0.1mm）を CFRP プリプレグ二層ごとに合計 7 枚挿入し模擬した (Fig. 9 (a))。一方の複合損傷は10mm の大きさの貫通損傷（ギャップ）の両外側に長さ 5 mm の層間剥離を挿入することで模擬した (Fig. 9 (b))。試験片の寸法や接着長さ等の条件は貫通損傷のみの場合と同じとし、損傷形態の影響のみを評価した。

Fig. 10 に貫通損傷、層間剥離、複合損傷の強度の比較を示した。前節同様、それぞれ 4 回の試験の平均値を示している。強度は（層間剥離）>（貫通損傷）>（貫通損傷と層間剥離の複合損傷）となった。剥離損傷のみの場合には接着層に顕著な応力集中部が発生せず強度が低下しなかったが、複合損傷を導入した試験片では剥離先端を起点とした被着材内部の亀裂進展によって最終破壊に至り、貫通損傷のみと比べて強度が低くなる傾向が見られた。また損傷位置の偏りがある場合 ((b) および (c)) には、貫通損傷のみの場合と同様に、ギャップ近傍の局所変形が抑制されるため、偏りのない場合 ((d) および (e)) と比較してわずかに強度が上昇する傾向が確認された。

5 補修パッチのサイズ決定指針の提案

以上の結果から、損傷の補修に必要な CFRP パッチのサイズを決定することが出来る (Fig. 11)。まず従来の補修方法では、NDI 等で損傷サイズ l_d および損傷形態・位置を決定することが出来るので、 l_d の損傷

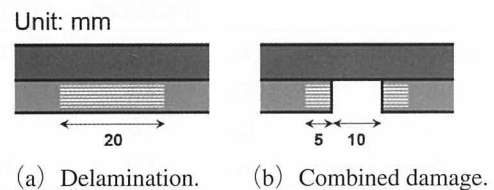


Fig.9 Schematic of damaged areas in specimens.

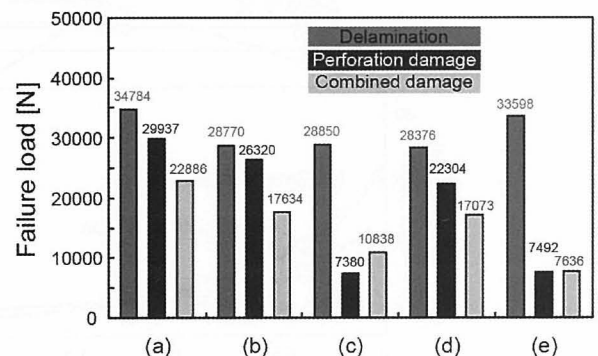
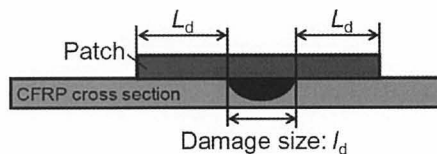
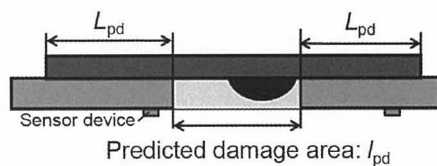


Fig.10 Tensile strength depending on damage mode and specimen configuration.

に対して強度回復に必要な接着長さ L_d を決定し、合計で $2L_d + l_d$ 以上の長さの CFRP パッチを用いることになる。一方で SHM システムでの損傷検知に基づく急速補修法では、まず損傷が発生している可能性のある領域 $l_{pd} (\geq l_d)$ が同定される。この際、損傷の種類およびサイズがある範囲内で不確定であるため、可能性のあるもののなかで最も強度低下が大きい損傷を想定して必要な接着長さ $L_{pd} (\geq L_d)$ を決定し、 $2L_{pd} + l_{pd}$ 以上の長さの CFRP パッチを用いる。実際の損傷 l_d が損傷推定領域 l_{pd} の中央に位置した場合には接着長さが $L_{pd} + (l_{pd} - l_d) / 2 (\geq L_{pd})$ となり、また万が一損傷が推定領域の端部に存在した場合にも L_{pd} 以上の接着長さを確保することができ、損傷位置の偏りに関係なく強度を回復することが可能である。上記検証において強度低下が最も大きかったのは剥離損傷と貫通損傷の複合損傷であり、損傷を検知する SMH 技術は、貫通損傷の有無とともに剥離が生じている可能性がある最大領域を同定可能な必要があると言える。



(a) Conventional repair employing NDI.



(b) Rapid repair employing SHM.

Fig.11 Design of CFRP patch repair.

6 結 言

SHM 技術との融合に向けた急速簡易補修技術の基礎的検討のため、Single strap joint の引張試験を実施した。模擬損傷の位置、種類を変化させることで、SHM 技術の有する損傷検知の不確定性が補修強度に与える影響を評価した。損傷情報にあいまいさがある場合の補修パッチサイズ決定指針を提案するとともに、SHM 技術によって検知すべきパラメータは貫通損傷の有無および剥離の最大領域であることを示した。今後は本研究で行った検討をもとに、実際の衝撃損傷を導入した CFRP 板構造に対し、急速硬化 CFRP パッチを用いた検討を行っていく予定である。

謝 辞

本研究は科研費（若手研究（B）22760621）の助成を受けたものである。甚大なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Rouchon, J., Plantema Memorial Lecture, 25th Symposium of International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF), (2009), Rotterdam.
- 2) Boller, C., Chang, F-K. and Fujino, Y.(ed), Encyclopedia of Structural Health Monitoring, (2009), John Wiley & Sons.
- 3) Kessler, S.S., Spearing, S.M. and Soutis, C., Smart Materials and Structures, **11**, (2), (2002), 269.
- 4) Qing, X.P., Beard, S.J., Ikegami, R., Chang, F-K. and Boller, C., Encyclopedia of Structural Health Monitoring, (2009), 1881, John Wiley & Sons.
- 5) Takeda, N., Okabe, Y. and Mizutani, T., Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G - Journal of Aerospace, **221**, (4), (2007), 497.
- 6) Luyckx, G., Voet, E., Lammens, N. and Degrieck, J., Sensors, **11**, (1), (2011), 384.
- 7) Chung, D.D.L., Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G - Journal of Aerospace, **221**, (4), (2007), 509.
- 8) Todoroki, A., Journal of Aeronautical and Space Sciences, Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, **11**, (3), (2010), 155.
- 9) Barton, D.P., Encyclopedia of Structural Health Monitoring, (2009), 1849, John Wiley & Sons.
- 10) Roach, D., Smart Structures and Systems, **5**, (4), (2009), 317.
- 11) Honda, Y., Ogisu, T., Yoneda, H., Arai, N., Natsume, N., Ishikawa, T. and Imuta, M., Proceedings of 16th International Conference on Composite Materials, (2007), ThFA1-05.
- 12) Imuta, M. and Enomoto, K., Proceedings of 16th International Conference on Composite Materials, (2007), ThFA1-01.
- 13) Duong, C. N. and Wang C.H., Composite Repair : Theory and Design, (2007), Elsevier Science.
- 14) Tong, L. and Soutis, C., Recent Advances in Structural Joints and Repairs for Composite Materials, (2011), Kluwer Academic Publisher.
- 15) Armstrong, K.B., Cole, W. and Bevan, G., Care and Repair of Advanced Composites, (2005), SAE International.
- 16) Banea MD, Silva LFM, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L : Journal of Materials Design and Applications, **223**, (1), (2009), 1.
- 17) Roh, H.S. and Sun, C.T., Proceedings of the 51st AIAA /ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, (2010), AIAA 2010-2704.

熱硬化成形プロセスを考慮した複合材料製造設計技術の開発*

第2報 製造法の違いによる成形品の力学的特性への影響評価

関根一史** 尾崎毅志***

Process Simulation of Fiber Reinforced Plastics Part II Formulation of Mechanical Properties in Various Molding Methods by

Kazushi SEKINE

(Advanced Technology Research & Development Center, Mitsubishi Electric Corporation, Amagasaki)

and Tsuyoshi OZAKI

(Composites Research and Development Co.Ltd.

and Synthesized Engineering, Graduate School, Kanazawa Institute of Technology, Tokyo)

Mechanical properties and dimensional accuracy of FRP parts depend on molding process. In this study, a simulation method considering molding process to predict those of FRP parts has been developed. In this paper, new parameters of the simulation method to predict the stiffness and the strength of a co-cured honeycomb sandwich structure were proposed. The new parameters were acquired experimentally by evaluating the proportions of the strength and stiffness of a CFRP faceskin/aluminum honeycomb sandwich panels molded by co-cure to those of them molded by pre-cure. In addition, the relationships between the dimple depths of the CFRP faceskins and the strength of the aluminum honeycomb sandwich panels were investigated experimentally to prepare the parameters more efficiently.

(Received May 20, 2011)

キー・ワード：繊維強化プラスチック，製造法，コキュア成形，ディンプル

Key Words : FRP, Molding Method, Co-cure Molding, Dimple

1 緒 言

CFRP等の先進複合材料は、優れた力学的特性や熱特性を有し、また材料の異方性を活用した限界設計が可能であることから、航空宇宙分野を中心に活用されている。

しかしながら一方で、複合材料の力学的特性や成形寸法精度等の成形品の性能は、製造プロセスに大きく依存する。そのため、高精度な成形が困難であり、大型の複雑な構造体にはこれまであまり積極的に活用されてこなかった。

そこで本研究では、複合材料の熱硬化成形プロセスにおいて、成形品の性能に影響を及ぼす因子と成形品の性能との相関関係について、成形品の挙動をフィードバックして実験的に求めた特性データを用いて解析することで、機械設計に加えて成形プロセス上の因子による影響を考慮して、成形品の性能を高精度に予測できる製造設計ツールの開発を目的としている。

前報では、成形プロセス中の成形型の熱抵抗や熱変形、とくに大型の成形品では成形品の中での硬化温度分布が成形品自体の性能に対して及ぼす影響について考慮するため、成形型を含めた伝熱解析と樹脂の硬化温度分布解析および熱変形解析とを組み合わせた成形品の熱変形や残留熱歪みを算出することが出来るFRPの熱硬化成形シミュレーションツールを開発した¹⁾。

一方、本研究が主要な対象としているCFRP表皮アルミハニカムサンドイッチパネルの実製品においては、締結金具点数や組立工数、成形サイクルの削減によるコスト低減や、締結金具の削減による重量低減を目的として、CFRP製の表皮材とアルミハニカムコアから構成される大型の円筒及び円錐状のサンドイッチ構造を一体成形で製造する試みが行われている^{2)~4)}。具体的には、予め成形した表皮材を後からハニカムコアに接着するプリキュア成形法(従来法)と異なって、表皮材の成形とハニカムコアへの接着を同時に行うコキュア成形法を用いてハニカムサンドイッチ構造を一体成形しており、本製造設計ツールにおいても、この

* 原稿受付 2011年5月20日

** 三菱電機株式会社 尾崎市塚口本町

*** コンポジット技研株式会社 東京都港区南麻布

製造法の違いを考慮できる実用的なものにする必要がある。

サンドイッチ構造のコキユア成形に関わる性能予測についてはいくつかの先行研究が行われている。例えば Fornari ら³⁾は、コキユア成形法でハニカムサンドイッチ構造を製造し、その圧縮弾性率を評価している。その結果、実測した値が古典積層理論で求めた値よりも低くなることを示しており、この弾性率の低下はハニカムサンドイッチ構造の表皮に発生した凹凸に起因していると考えられている。

CFRP 表皮とアルミハニカムコアから構成されるサンドイッチ構造では、その成形時において、構成要素間の熱膨張係数の差に起因するコアセル内での表皮座屈が発生し、表皮に凹凸（ディンプル）が残留することがある。表皮に凹凸が残留すると、ハニカムサンドイッチ構造の強度や剛性が低下することが報告されている^{5)~9)}。

本池ら⁶⁾は、表皮に凹凸を発生させたハニカムサンドイッチ板と、表皮に凹凸が発生するのを抑制したハニカムサンドイッチ板を製作して曲げ試験を行い、表皮に凹凸を発生させた場合の方が強度と剛性が低下することを実証している。また、渡辺ら^{7)~9)}は、ABAQUS による解析を行い、ディンプル深さが大きくなるにつれて、表皮の弾性率が低下することを示している。

これら先行研究ではいずれもサンドイッチ構造の性能と表皮に発生する凹凸の程度との相関について指摘している。表皮に発生する凹凸の程度は製造法に依存すると考えられることから、従来のプリキユア成形からコキユア成形に製造法を変更して、ハニカムサンドイッチ構造の製品を製造する場合には、成形法の違いによる成形品の力学的特性の違いを把握しておくことで、相当のレベルでその性能を予測することが可能で

あると考えられる。

以上により本報では、ハニカムサンドイッチ構造の製造法の違いによる成形品の力学的特性への影響をマクロ的に評価することにより、プリキユア、コキユアのそれぞれの成形法で製造されたサンドイッチ構造の性能を予測する実用的な手法を開発することとした。

2 製造法の違いによる性能予測の手法と複合材料製造設計ツールにおける位置づけ

本研究で開発している複合材料製造設計ツールのフローを Fig. 1 に示す。本ツールでは成形品および成形型を数学モデル化し、成形温度プロファイルを与えることによって成形品の硬化温度と使用温度との関係において熱歪みや残留応力を算出することがメインフローとなっている。

ハニカムサンドイッチ構造をコキユア成形することによる性能低下は、表皮材とコア材との熱膨張差に起因する部分も大きいことから、これらをモデル化し、メインフローに乗せることによって熱応力を数値的に算出することも可能ではあるが、製造設計ツールが対象とする成形品のスケールとハニカムコアのセルのスケールとでは桁が違うため、ハニカムコアを一つ一つモデル化することは現実的ではない。加えて、表皮の硬化温度の分布についても、コア間のディンプル深さの僅かな差に反映されるにすぎず、これが更に表皮の強度・剛性に及ぼす影響まで考慮すると、温度分布との相関は無視できるレベルにあると言える。

従って、コキユア成形を選択することによるハニカムサンドイッチ構造の性能予測は、ハニカムコアをミクロ的に数学モデルとしてメインフローに乗せる手法ではなく、サンドイッチ構造全体のマクロ的な強度低下、ないし剛性低下として取り扱う方がより実用的で

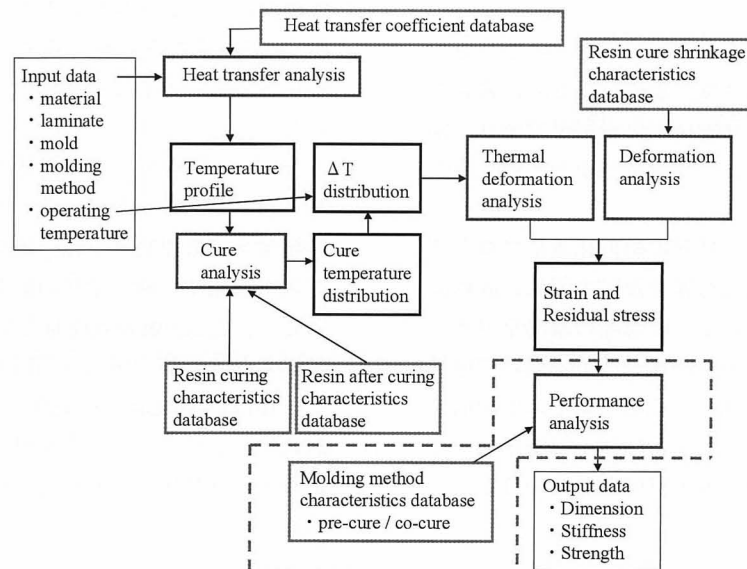


Fig.1 Process simulation of fiber reinforced plastics.

ある。従って、Fig. 1の図中に点線で囲われた部分に示したように、製造法の違いによる成形品の性能への影響を「製造法の特性データベース」を参照して全体的に修正をかけていく方式とした。

具体的には、プリキュア成形及びコキュア成形で製作したハニカムサンドイッチ構造の面内圧縮強度と曲げ剛性を取得し、コキュア成形品の値をプリキュア成形品の値で除したデータベースを構築する。さらに、離散的なデータベースを補完するために、プリキュア成形品及びコキュア成形品の面内圧縮強度を、表皮のディンプル深さで整理する方法に関して検討した。以降の章に、その詳細を示す。

3 製造法の特性データベースによる性能予測手法

各製造法で製作した成形品の力学的特性を実験的に取得し、基準となる成形品の力学的特性に対する比(リダクションファクタ)として構築した製造法の特性データベースを参照して、製造法の違いによる影響を考慮した成形品の性能を予測する解析に関して検討を行った。具体的には、異なる製造法で作成した試験片に関して力学的特性の評価を行い、結果を比較して係数を規定し、製造法の異なる成形品の性能を予測する場合に、その係数を使用する。例えば、コキュア成形で作成した試験片の強度をプリキュア成形で作成した試験片の強度を除した係数を規定しておけば、プリキュア成形で作成した成形品の強度が既知であったとき、その成形品の強度に規定した係数を掛けることで、コキュア成形で作成した場合の成形品の強度を予測することができる。

3・1 リダクションファクタの規定法

基準となる成形品の力学的特性に対する、ある成形品の力学的特性の比をリダクションファクタとして規定する。各製造法で製作した製品の力学的特性を予測するために、各製造法で試験片を製作し、機械試験を行い、リダクションファクタのデータベースを構築する。このとき、基準となる製品の力学的特性が既知であれば、ある製品の力学的特性は、以下の式(1)で与えられる。

$$M = M_{\text{base}} \times RF \quad (1)$$

M , M_{base} はそれぞれ製品の力学的特性、基準となる製品の力学的特性、 RF はリダクションファクタであり、式(2)で表される。

$$RF = Ms / Ms_{\text{base}} \quad (2)$$

Ms , Ms_{base} はそれぞれ試験片の力学的特性、基準となる試験片の力学的特性である。このように、リダクションファクタからなる製造法の特性データベースを構築することで、従来の方法から製造法を変更する場

合に、新規の製造法で製作した場合の製品の力学的特性を予測することができる。

本研究では、CFRP表皮とアルミハニカムコアからなるサンドイッチパネルを対象とした、従来法であるプリキュア成形と、コキュア成形との間の面内圧縮強度と曲げ剛性に関するリダクションファクタを導出した。

3・2 ハニカムサンドイッチパネルの面内圧縮強度の評価

プリキュア成形法及びコキュア成形法にて、CFRP表皮とアルミハニカムコアからなるサンドイッチパネルの試験片を製作し、各試験片の面内圧縮試験を行い、その強度を評価した。サンドイッチパネルの面内圧縮試験は、ASTM C364-99 (Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions)に準拠して行った。Fig. 2に試験片の形状を示す。試験片寸法は縦80mm、横80mm、コアの厚さ12mmであり、R85mmの括れ形状である。試験片の構成をTable Iに示す。表皮材には、炭素繊維M55J(東レ製)と120℃硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグ、若しくは炭素繊維M60J(東レ製)と170℃硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグを使用し、擬似等方性を有するように積層して、中立面に対して対称なサンドイッチパネルを製作した。成形後の表皮二枚分の厚さは、M55J/エポキシの場合0.60mm、M60J

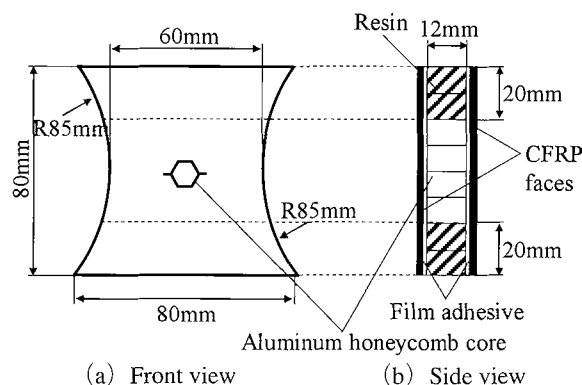


Fig.2 Specimen geometry for edgewise compression test.

Table I Several types of specimen.

Type	Molding method	CFRP face	Laminate layup	Honeycomb core cell size (inch)
A-1	Pre-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
A-2				1/4
A-3				3/16
B-1	Co-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
B-2				1/4
B-3				3/16
C-1	Pre-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
C-2				1/4
C-3				3/16
D-1	Co-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
D-2				1/4
D-3				3/16

/エポキシの場合0.35mmであった。また、アルミハニカムコアには、セルサイズがそれぞれ3/8inch, 1/4 inch, 3/16inchの三種類を用いて、プリキュア成形法若しくはコキュア成形法で試験片を成形した。プリキュア成形の場合だけでなく、コキュア成形の場合も、CFRP表皮材とコアとの間にエポキシ樹脂のフィルム接着剤を入れた。

サンドイッチパネルの面内圧縮試験は、1185型万能試験機(INSTRON製)を用いて行った。このとき、0.5 mm/minの試験速度で試験を行って最大圧縮荷重を測定し、面内圧縮強度を式(3)から算出した。

$$\sigma = P/A \quad (3)$$

σ , P , A はそれぞれ表皮の面内圧縮強度, 最大圧縮荷重, 試験片の中央部の表皮断面積である。

Table IIに面内圧縮試験の結果を示す。試験結果は、試験片数6個の平均値である。この結果から、コキュア成形で製作した試験片の方が、プリキュア成形で製作した試験片よりも、CFRP表皮の面内圧縮強度が低くなることが確認された。さらに、プリキュア成形で製作した試験片とコキュア成形で製作した試験片の両者において、ハニカムコアのセルサイズが大きくなるほど、CFRP表皮の面内圧縮強度が低くなる傾向が見られた。ハニカムコアのセルサイズが大きくなるほど、成形後にCFRP表皮に発生する凹凸の深さが大きくなると考えられることから、この面内圧縮強度の低下には、CFRP表皮の凹凸が関係していると考えられる。

Table II The results of edgewise compression test.

Type	Facing compressive strength (MPa)
A-1	141.1
A-2	173.6
A-3	214.2
B-1	123.8
B-2	148.3
B-3	179.2
C-1	100.2
C-2	120.4
C-3	143.2
D-1	72.0
D-2	89.4
D-3	100.9

3・3 ハニカムサンドイッチパネルの曲げ剛性の評価

プリキュア成形法及びコキュア成形法にて、CFRP表皮とアルミハニカムコアからなるサンドイッチパネルの試験片を製作し、各試験片の曲げ試験を行い、その剛性を評価した。サンドイッチパネルの曲げ試験は、ASTM C393-00 (Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions)に準拠して行った。Fig. 3に試験片の形状を示す。試験片寸法は縦70mm, 横400mm, コアの厚さ12mmである。試験片の構成を

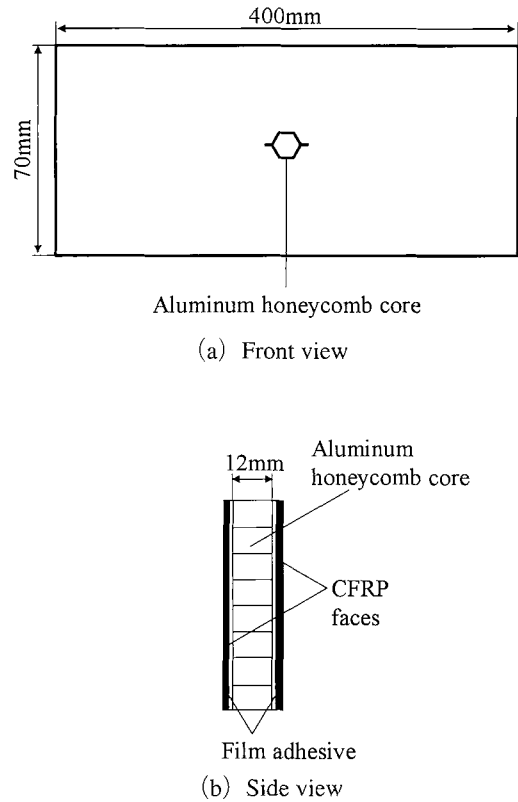


Fig.3 Specimen geometry for flexure test.

Table III Several types of specimen.

Type	Molding method	CFRP face	Laminate layup	Honeycomb core cell size (inch)
A-1	Pre-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
B-1	Co-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
C-1	Pre-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
D-1	Co-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8

Table IIIに示す。表皮材には、炭素繊維 M55J (東レ製)と120℃硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグ、若しくは炭素繊維 M60J (東レ製)と170℃硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグを使用し、擬似等方性を有するように積層して、中立面に対して対称なサンドイッチパネルを製作した。成形後の表皮二枚分の厚さは、M55J/エポキシの場合0.60mm, M60J/エポキシの場合0.35mmであった。また、アルミハニカムコアには、セルサイズが3/8inchのコアを用いて、プリキュア成形法若しくはコキュア成形法で試験片を成形した。プリキュア成形の場合だけでなく、コキュア成形の場合も、CFRP表皮材とコアとの間にエポキシ樹脂のフィルム接着剤を入れた。

サンドイッチパネルの曲げ試験は、1185型万能試験機(INSTRON製)を用いて行った。このとき、曲げ剛性を計算するために、各試験片に対して三点曲げ試験と四点曲げ試験の二つの試験を行った。曲げ試験治具の試験片との接触部は、全て圧子半径を5mmとし、支点間距離は、両試験共に350mmとした。両試験と

もに0.5mm/minの試験速度で試験を行い、荷重と試験片の中心部のたわみ量を測定した。試験片の中心部のたわみ量はダイヤルゲージを用いて計測した。曲げ剛性は式(4)を用いて算出した。

$$D = P_1 L_1^3 [1 - (11L_2^2/8L_1^2)] / (48\Delta_1 [1 - (2P_1 L_1 \Delta_2 / P_2 L_2 \Delta_1)]) \quad (4)$$

D , P , Δ , L はそれぞれ曲げ剛性, 曲げ荷重, 中心部のたわみ量, 支点間距離である。また, 添字1は三点曲げ試験の場合を示しており, 添字2は四点曲げ試験の場合を示している。

Table IV に曲げ試験の結果を示す。試験結果は, 試験片数6個の平均値である。この結果から, コキユア成形で製作した試験片の方が, プリキユア成形で製作した試験片よりも, サンドイッチパネルの曲げ剛性が低くなることが確認された。

Table IV The results of flexure test.

Type	Flexural stiffness (N・mm ²)
A-1	1.31E+08
B-1	1.25E+08
C-1	6.07E+07
D-1	5.40E+07

3・4 リダクションファクタの規定結果

プリキユア成形で製作した成形品の面内圧縮強度に対する, コキユア成形で製作した成形品の面内圧縮強度の比を式(2)で計算し, 面内圧縮強度のリダクションファクタとして規定した。規定した面内圧縮強度のリダクションファクタをTable Vに示す。表より, アルミハニカムコアのセルサイズが変化しても, 面内圧縮強度のリダクションファクタはほとんど変化しないことが分かった。これは, セルサイズが大きくなると, CFRP表皮に発生する凹凸は大きくなり面内圧縮強度が低下するが, その強度低下の割合がプリキユア成形品でもコキユア成形品でもほぼ同じであることを示している。この結果から, 製造法をプリキユア成形からコキユア成形に変更すると, 表皮材がM55J/Epoxyの場合は約16%の面内圧縮強度の低下が起こり, 表皮材がM60J/Epoxyの場合は約28%の面内圧縮強度の低下が起こると言える。

また, プリキユア成形で製作した成形品の曲げ剛性に対する, コキユア成形で製作した成形品の曲げ剛性の比を式(2)で計算し, 曲げ剛性のリダクションファクタとして規定した。規定した曲げ剛性のリダクションファクタをTable VIに示す。この結果から, 製造法をプリキユア成形からコキユア成形に変更すると, 表皮材がM55J/Epoxyの場合は4%程度の曲げ剛性の

低下が起こり, 表皮材がM60J/Epoxyの場合は11%程度の曲げ剛性の低下が起こると言える。

Table V Reduction factor of facing compressive strength.

Type	Reduction factor (-)
B-1/A-1	0.88
B-2/A-2	0.85
B-3/A-3	0.84
D-1/C-1	0.72
D-2/C-2	0.74
D-3/C-3	0.70

Table VI Reduction factor of flexural stiffness.

Type	Reduction factor (-)
B-1/A-1	0.96
D-1/C-1	0.89

4 ディンプル深さをパラメータとした製造法の特性データベース構築の検討

前章では, プリキユア成形で製作した成形品及びコキユア成形で製作した成形品の面内圧縮試験と曲げ試験を行い, 各製造法での成形品の面内圧縮強度と曲げ剛性を評価し, リダクションファクタを規定した。この方法は, 製造法の異なる場合の成形品の力学的特性を予測する上で, 実用的で有効な方法であると考えられるが, 成形品の構成が変わる毎に機械試験を行う必要があるため, 手間が掛かる。そこで, 本手法で必要な機械試験の手間を最小限に抑えるために, 成形品の力学的特性をパラメータで整理することを試みた。具体的には, ハニカムサンドイッチパネルのCFRP表皮のディンプル深さを測定し, プリキユア成形で製作した成形品とコキユア成形で製作した成形品の面内圧縮強度との相関関係を調査した。各成形品の面内圧縮強度とディンプル深さの相関関係を導出することで, 面内圧縮試験を行わずとも, 表面形状を測定してディンプル深さを求めることで, 面内圧縮強度のリダクションファクタを規定することができると考えられる。以下に, 検討結果の詳細を示す。

4・1 ハニカムサンドイッチパネルのディンプル深さの評価

プリキユア成形法及びコキユア成形法にて, CFRP表皮とアルミハニカムコアからなるサンドイッチパネルの試験片を製作し, 各試験片の表面形状測定を行い, ディンプル深さを評価した。Fig. 4に試験片の形状を示す。

試験片寸法は縦60mm, 横60mm, コアの厚さ12mm

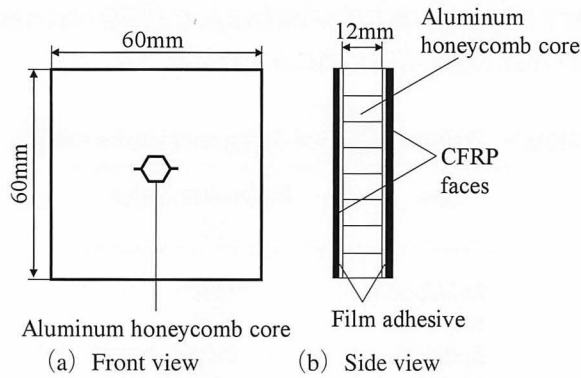


Fig.4 Specimen geometry for 3-dimensional coordinate measurement.

Table VII Several types of specimen.

Type	Molding method	CFRP face	Laminate layup	Honeycomb core cell size (inch)
A-1	Pre-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
A-2				1/4
A-3				3/16
B-1	Co-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
B-2				1/4
B-3				3/16
C-1	Pre-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
C-2				1/4
C-3				3/16
D-1	Co-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
D-2				1/4
D-3				3/16

である。試験片の構成を Table VII に示す。表皮材には、炭素繊維 M55J (東レ製) と 120℃ 硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグ, 若しくは炭素繊維 M60J (東レ製) と 170℃ 硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグを使用し、擬似等方性を有するように積層して、中立面に対して対称なサンドイッチパネルを製作した。成形後の表皮二枚分の厚さは、M55J/エポキシの場合 0.60mm, M60J/エポキシの場合 0.35mm であった。また、アルミハニカムコアには、セルサイズがそれぞれ 3/8inch, 1/4inch, 3/16inch の三種類を用いて、プリキュア成形法若しくはコキュア成形法で試験片を成形した。プリキュア成形の場合だけでなく、コキュア成形の場合も、CFRP 表皮材とコアとの間にエポキシ樹脂のフィルム接着剤を入れた。

サンドイッチパネルの表面形状測定は、非接触式の三次元形状測定装置 NH-3N (三鷹光器製) を用いて行った。装置のステージ上に試験片を配置し、幅 5mm の試験片端部を測定範囲外とし、縦 50mm, 横 50mm の領域において測定を行った。測定は常温で行った。

Fig. 5 に測定結果の一例として、表皮材が M55J/Epoxy の場合の表面形状の測定結果を示す。各測定結果において、ハニカムコアのセル形状の凹凸が発生していることが分かる。また、表面形状の測定結果からディンプル深さを算出した結果を Table VIII に示す。ディンプル深さは、コアセル上の高さとはコアセル中央

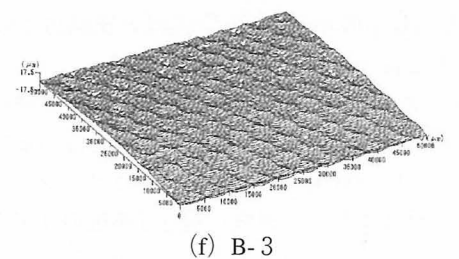
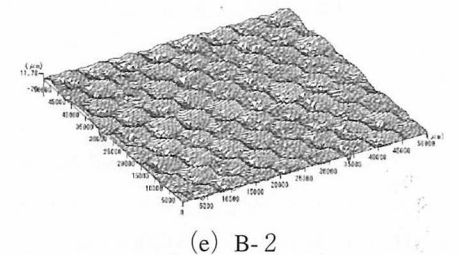
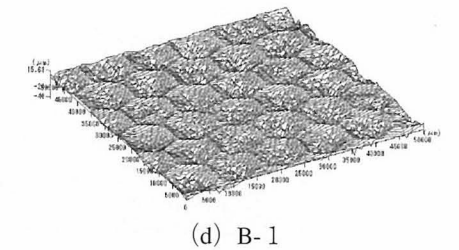
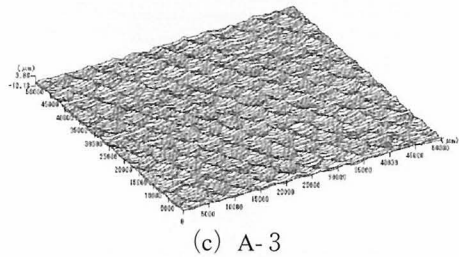
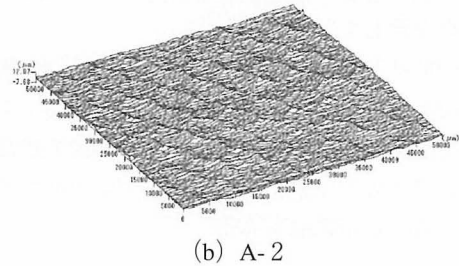
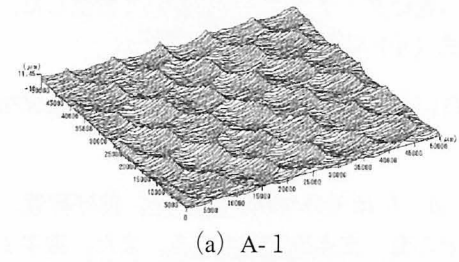


Fig.5 The results of 3-dimensional coordinate measurement in A and B.

Table VIII The results of dimple depth.

Type	Dimple depth (μm)
A-1	26
A-2	15
A-3	12
B-1	58
B-2	41
B-3	24
C-1	43
C-2	21
C-3	15
D-1	79
D-2	58
D-3	51

の最深部の高さとの差で定義した。試験結果は、6箇所のディンプルの平均値である。この結果から、コキュア成形で製作した試験片の方が、プリキュア成形で製作した試験片よりも、CFRP表皮に発生するディンプルの深さが大きくなることが確認された。さらに、プリキュア成形で製作した試験片とコキュア成形で製作した試験片の両者において、ハニカムコアのセルサイズが大きくなるほど、CFRP表皮に発生するディンプルの深さが大きくなる傾向が見られた。

4・2 ディンプル深さによるハニカムサンドイッチパネルの力学的特性データの整理

プリキュア成形で製作した成形品とコキュア成形で

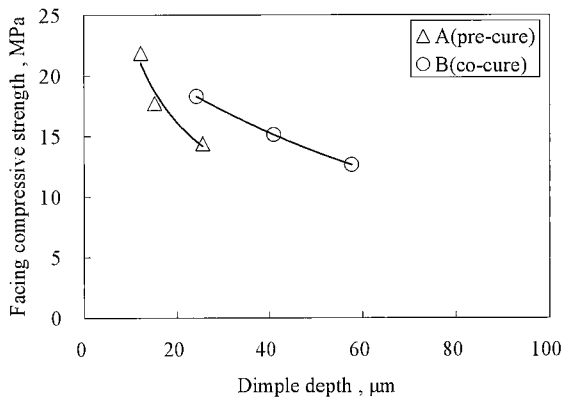


Fig.6 The relationship between dimple depth and facing compressive strength in A and B.

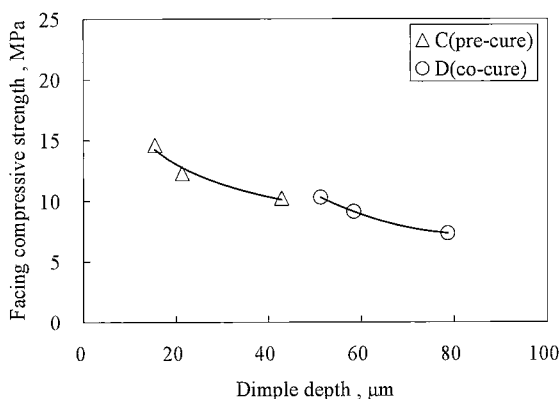


Fig.7 The relationship between dimple depth and facing compressive strength in C and D.

製作した成形品の面内圧縮強度のデータを、ハニカムサンドイッチパネルのCFRP表皮のディンプル深さで整理した。表皮材がM55J/Epoxyの場合及び表皮材がM60J/Epoxyの場合のハニカムサンドイッチパネルにおける、ディンプル深さと面内圧縮強度の関係をそれぞれFig. 6及びFig. 7に示す。これらの図より、製造法がプリキュア成形法の場合でもコキュア成形の場合でも、CFRP表皮に発生するディンプル深さが大きくなるにつれて、成形品の圧縮強度が低下することが分かる。この結果は、初期たわみを有する板の座屈応力の観点から、妥当であると考えられる。Fig. 6とFig. 7から明らかなように、プリキュアで製作した成形品とコキュアで製作した成形品の面内圧縮強度を、ディンプル深さを用いて整理することが出来た。これにより、力学的特性をディンプル深さに置き換えることができるため、リダクションファクタを規定する際の機械試験の回数を大幅に減らせると考えられる。

5 結 言

CFRP等の先進複合材料の大型精密構造を含む用途拡大のため、従来の機械設計に加えて製造プロセス上の因子による影響を考慮して、成形品の性能を高精度に予測できる製造設計ツールの開発を行っている。

本報では、とくにハニカムサンドイッチ構造の製造法の違いを考慮した複合材料の製造設計技術を確立するため、各製造法で製作した成形品の力学的特性を実験的に取得し、基準となる成形品の力学的特性に対する比として構築したデータベースを参照することで、製造法の違いによる影響を考慮した成形品の性能を予測する手法を開発した。また、プリキュア成形及びコキュア成形で製作したハニカムサンドイッチ構造の面内圧縮強度と曲げ剛性を取得し、コキュア成形品の値をプリキュア成形品の値で除したデータベースを構築した。

さらに、離散的なデータベースを補完するために、プリキュア成形品及びコキュア成形品の面内圧縮強度を、表皮のディンプル深さで整理する方法についても開発した。

謝 辞

本研究は、「異種材料を含む大型構造体用複合材料製造設計技術開発」を経済産業省から委託を受けて(財)無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)が開発を進めているものである。当社は、USEF殿のご指導の下、本製造設計技術のツール化に係るアルゴリズムの設計及び検証、解析プログラムの製作を担当させて頂いた。関係者の皆様からの多くのご指導・助言を賜りここに、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 関根一史, 尾崎毅志, 材料システム, **29**, (2011), 11.
- 2) Jimenez, A., 41th International SAMPE Symposium, (1996), 829.
- 3) Fornari, B., Zavadlay, R. and Del Frate, R., 40th International SAMPE Symposium, (1995), 1603.
- 4) 正井卓馬, 村瀬三朗, 大塚正人, 日本複合材料学会 2005年度研究発表講演会予稿集, (2005), 17.
- 5) 井上登志夫, 小島 浩, 第34回構造強度に関する講演会講演集, (1992), 86.
- 6) 本池 誠, 岩堀 豊, 田中隆吉, 第40回構造強度に関する講演会講演集, (1998), 105.
- 7) 西 泰史, 渡辺直行, 第39回構造強度に関する講演会講演集, (1997), 37.
- 8) Watanabe, N., Sato, H. and Nishi, Y., AIAA Paper 97-1249, (1997), 2492.
- 9) Watanabe, N. and Kimura, S., AIAA Paper 98-1994, (1998), 2413.

分子動力学法による多結晶銅薄膜の変形挙動評価*

藤井 朋之** 秋庭 義明***

Molecular Dynamics Analysis for Deformation Behavior of
Polycrystalline Copper Thin Films

by

Tomoyuki FUJII

(Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu)

and Yoshiaki AKIWA

(Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Yokohama National University, Yokohama)

Tensile loading simulation of a nano-sized pillar-shaped polycrystalline thin film which has a preferred orientation in a specific direction was conducted, and effect of grain size on deformation behavior was examined by the molecular dynamics analysis. The model which was constructed by 2-dimensional Voronoi tessellation consisting of a columnar aggregate of cubic crystals with fiber texture whose axis was $\langle 110 \rangle$, $\langle 100 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$ direction perpendicular to the film surface. The uniaxial displacement was applied to the models to obtain the deformation behavior of thin film. In the stress-strain relationship, the average atomistic stress increases monotonously with increasing applied strain. After taking a maximum value, the average stress decreases moderately with applied strain. The 0.2% offset stress increases with decreasing grain size following by Hall-Petch relation if the grain is larger than 15nm. However, the offset stress decreases with decreasing grain size following by inverse Hall-Petch relation if the grain is smaller than 15nm. The transgranular strain increases with increasing applied strain. However, when the stress-strain relationship becomes nonlinear, the transgranular strain decreases with applied strain.

(Received September 25, 2011)

キー・ワード：分子動力学，薄膜，変形，破壊，粒界，優先方位

Key Words : Molecular Dynamics, Thin Film, Deformation, Fracture, Grain Boundary, Preferred Orientation

1 緒 言

材料表面に新たな特性を有する材料を付与し優れた機能を発現する薄膜技術は、従来より機械構造部材の耐摩耗性や疲労強度向上等の表面改質を目的として用いられている。

近年では、半導体デバイスをはじめ、センサ、記録デバイス等のエレクトロニクスにも用いられており、さらにマイクロマシン、MEMS への応用も期待されている。このようなマイクロ構造体の製作技術の進歩に伴い、更なる高集積化・高密度化が図られるため、薄膜の信頼性評価が重要となる。多結晶薄膜では、結晶粒がナノメートルオーダーであることが多く、さらに結晶は柱状に成長し、特定の結晶方位に整列した優先方位を有している¹⁾。よって、多結晶薄膜の変形・破壊特性が従来のバルク材料に比較して異なることが予想される。薄膜の変形・破壊特性の解明には粒内および粒界の変形挙動の理解が重要である。実験的手法

を用いて力学特性の評価^{2,3)}や X 線回折法に基づく残留応力測定⁴⁻¹⁰⁾、有限要素法による弾性変形特性の評価^{11),12)}などが行われているが、薄膜の変形特性と微視組織との関係については必ずしも明確ではない。実験的に材料内部のすべりやき裂の発生などを直接観察することは困難であり、また連続体モデルによる解析ではすべりや破壊挙動を直接取り扱うことができないためである。そこで、原子運動を直接記述する分子動力学法を用いることにより、原子スケールにおける変形挙動の評価を定量的に行うことが可能となると考えられる。分子動力学法による金属材料の解析は近年広く行われており、ナノ結晶材料を対象とした変形・破壊特性の結晶粒径依存性や結晶粒界の影響等が議論されている¹³⁻¹⁷⁾。例えば Schiøtz らは、多結晶銅に着目し Voronoi 分割により多結晶モデルを構築し、流動応力に及ぼす結晶粒径の影響を検討した¹³⁾。さらに Shimokawa らは、多結晶アルミニウムに着目し、正六角形からなる多結晶モデルにおいて流動応力に及ぼす結晶粒径の影響を検討するとともに、Hall-Petch 関係および逆 Hall-Petch 関係が生じるメカニズムを個々の

* 原稿受付 2011年9月25日

** 静岡大学工学部 浜松市中区城北

*** 横浜国立大学 横浜市保土ヶ谷区常盤台

結晶粒の粒内変形および粒界変形に着目して検討している¹⁶⁾。従来の分子動力学によるナノ結晶材料の機械的特性に関する研究は、周期境界条件を用いたバルク材や、二次元平板に厚みを持たせた材料を対象としている。

優先方位を有する薄膜の微視組織を考慮した研究は少なく、薄膜における変形・破壊の素過程は明らかではない。また、個々の結晶粒に着目した結晶学的評価も実施されていない。

そこで本研究では、薄膜における変形・破壊の素過程の解明のため、柱状組織を有する多結晶薄膜モデルを構築し、多結晶モデルに対し単軸引張負荷による変形・破壊シミュレーションを行った。まず、マクロな変形・破壊挙動である応力-ひずみ関係を導出した。さらに、結晶学的評価のため、構造解析手法を用い変形中の多結晶体の結晶構造の変化の導出を行い、変形・破壊挙動の素過程を評価した。

次いで、結晶粒径および優先方位を種々に変化させ、変形挙動に及ぼす薄膜の優先方位および結晶粒径の影響の評価を行った。

2 解析方法

2.1 解析モデル

多結晶モデルには、乱数を用いて発生させた核より構成される Voronoi 分割^{18),19)}を用いた。二次元平面における Voronoi 分割は、平面内に発生させた核におい

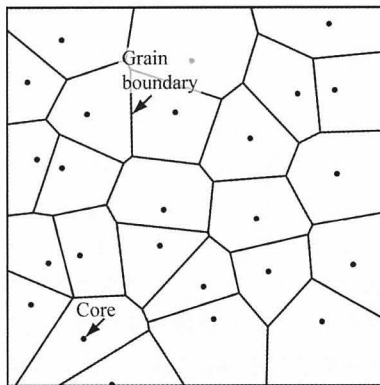


Fig.1 Voronoi tessellation for polycrystalline model.

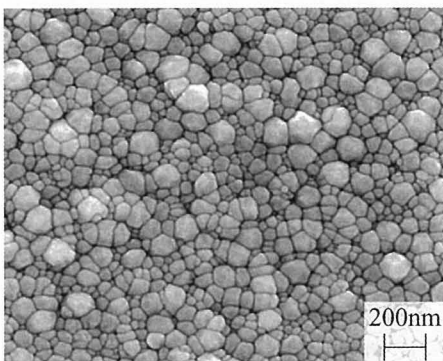


Fig.2 SEM image of copper thin film[25].

て、他の核との垂直二等分線を引き、その他の垂直二等分線との交点を Voronoi 点とし、Voronoi 点を次々に結んで領域分割する方法である。この構造は同時に核生成が生じ、同一速度で成長した結晶構造とみなすことができる Fig. 1 および Fig. 2 に、スパッタリング法により成膜した Cu 薄膜の SEM 写真および Voronoi 分割により得られた解析モデルを示す。

これにより結晶粒分布がほぼ再現されていることがわかる。

さらに、薄膜の柱状組織を得るため、厚さ方向に伸張させることで柱状構造を有する解析モデルを構築し、作成した Voronoi 粒子の膜厚方向に種々に結晶方位を与えることで多結晶薄膜モデルとした。

2.2 優先方位を有する多結晶薄膜モデル

多結晶薄膜モデルとして、前述に示した Voronoi 分割を用い、モデル一片の長さ60nm、膜厚1.5nmの三次元モデルを作成する。解析モデルの各結晶粒には、Fig. 3 に示すように、厚さ方向に優先方位を与えるため膜厚方向に結晶方位を固定し、面内において結晶系を一様乱数により発生したランダムな角度 θ だけ反時計回りに回転させた。ここで、本解析において1つの結晶粒に着目し粒内ひずみの評価を行うため、モデル中心付近にある結晶粒において結晶粒に対して回転角を任意に変更し、負荷方向に特定の結晶方位となるよう配置した。なお、本解析において使用した乱数列は、線形合同法によって発生させた一様乱数である¹⁸⁾。

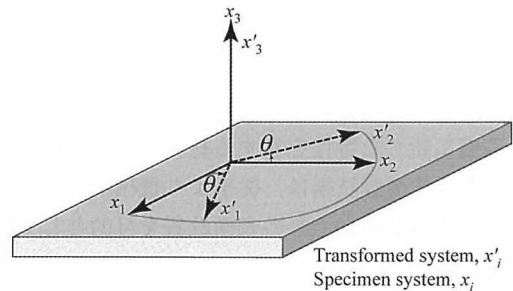


Fig.3 Schematic of preferred orientation of each grain.

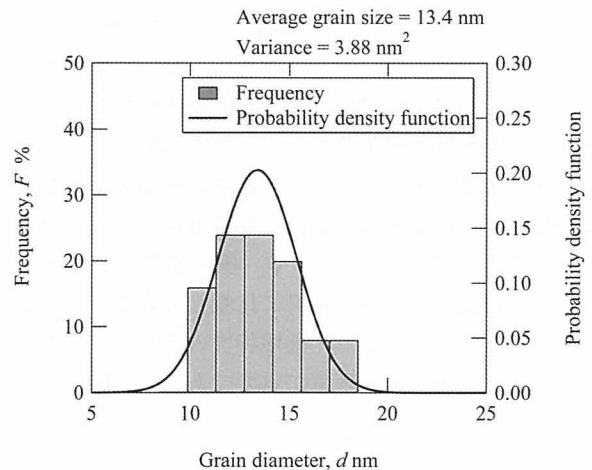


Fig.4 Schematic of preferred orientation of each grain.

また、結晶粒径 d は次式に示した面積平均とした。

$$d = 2\sqrt{\frac{S}{\pi N_m}} \quad (1)$$

ここで、 S はモデルの全面積、 N_m は粒子数である。なお本解析では面積 S を一定とし、粒子数 N_m を種々に変化させることによって、任意の結晶粒径を作成した。

Fig. 4 に平均結晶粒径が約13nmの解析モデルにおける結晶粒径のヒストグラムと正規分布を示す。本解析で用いた多結晶薄膜モデルの結晶粒径の分布は、おおよそ正規分布となっていることがわかる。

2・3 計算手順および解析条件

原子系における解析モデルの作成のため、上述のVoronoi分割によって作成した多結晶薄膜モデルに、Cu原子を配置した。膜厚方向の方位を $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ および優先方位を有さないランダム構造とした。このとき、結晶粒界では原子間距離が非常に短くなり、解析初期で局所的に不安定になることを防ぐため、原子間距離が0.23nmよりも短い原子は排除した。次に、系の構造安定化のために、焼きなまし法(SA法)²¹⁾により緩和計算を行った。ここで得られた多結晶薄膜モデルを、初期構造とし単軸引張シミュレーションを実施した。

単軸引張シミュレーションは、Fig. 5に示すようにモデルに y 軸方向に公称ひずみが $\Delta\epsilon = 0.002$ となる強制変位を与え、その後1.2fsの緩和計算を行った。

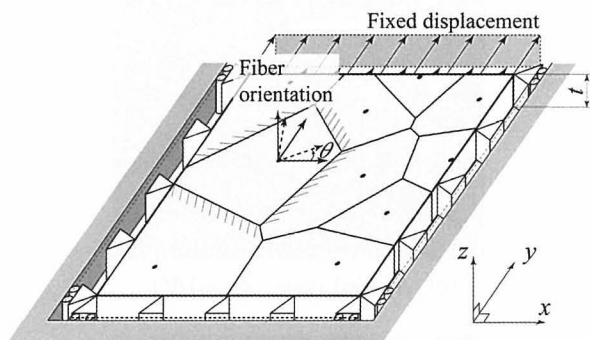


Fig.5 Boundary condition of tensile simulation.

Table I Analytical conditions for tensile loading.

Potential	Effective medium theory
Difference equation	velocity-Verlet, $\Delta t = 4.0$ fs
Temperature	300 K
Applied strain	$\Delta\epsilon = 0.002$ per $2000\Delta t$
Model size, nm	$60 \times 60 \times 1.5$
Total atom number	About 500,000
Preferred orientation (Thickness direction)	$\langle 110 \rangle$, $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, Random

ここで、境界条件は次式で表される。

$$\begin{cases} u_y = \Delta & \text{at } y = D \\ u_y = 0 & \text{at } x = 0, x = D \\ u_y = 0 & \text{at } y = 0 \\ u_z = \Delta & \text{at } x = 0, z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 Δ は1ステップあたりの強制変位、 D はモデルサイズである。なお、ひずみ負荷の際には応力波の影響を除去するため各原子の間隔が一定の割合で広がるようにするため、全ての原子に強制変位を与えた。強制変位と緩和計算を1ステップとして連続計算を行った。

分子動力学計算においては、原子間相互作用は有効媒質理論(EMT)^{22),23)}を、時間積分法には高精度かつ安定な velocity-Verlet 法²⁴⁾を使用し、温度スケールリング法²¹⁾を用いて系の温度を300Kで一定とした。本解析の解析条件をまとめて、Table I に示す。

さらに多結晶薄膜モデルの変形挙動の原子モデルと均質体モデルの比較を行うため、Fig. 5に示した境界条件のもと一軸一定変位を与え弾性挙動を導出した。なお、本モデルにおいては粒界の厚さは定義せず、方位の異なる粒子同士を連結した。有限要素解析には、汎用有限要素解析ソフト MSC. Marc2001を用い、弾性定数として Table II に示した EMT によって Cu にフィッティングされた弾性定数を使用し、三次元弾性計算を行った。

3 解析結果と考察

3・1 多結晶モデルの微視組織

Fig. 6 に、平均結晶粒径13.4nm、 $\langle 110 \rangle$ 優先方位を有するモデルにおける初期緩和後の Cu 原子の配置を示す。

Table II Elastic stiffness of single crystal copper(EMT).

c_{11} , GPa	c_{12} , GPa	c_{44} , GPa
173	116	91

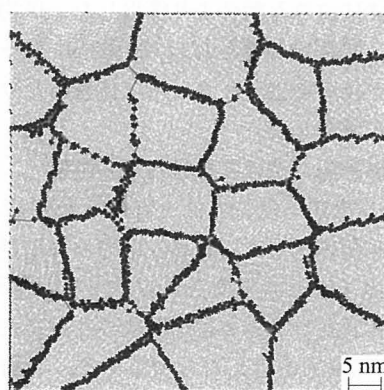


Fig.6 Microstructure of polycrystalline copper thin film.

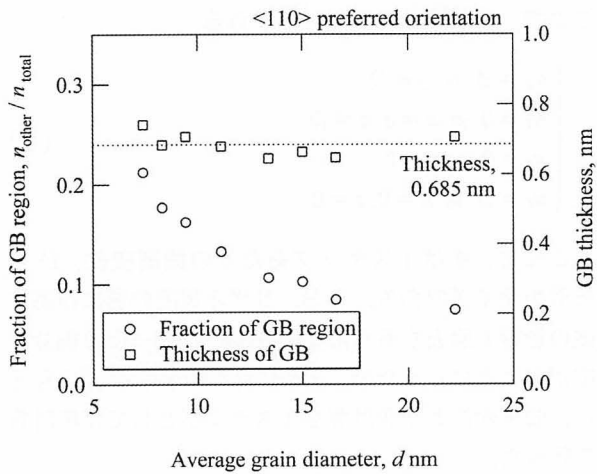


Fig.7 Grain boundary thickness vs. grain diameter.

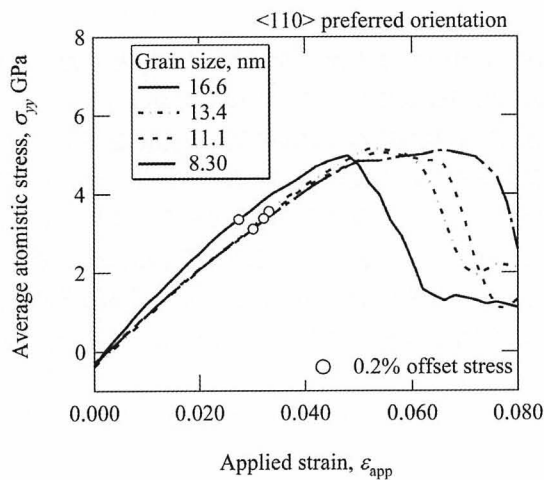
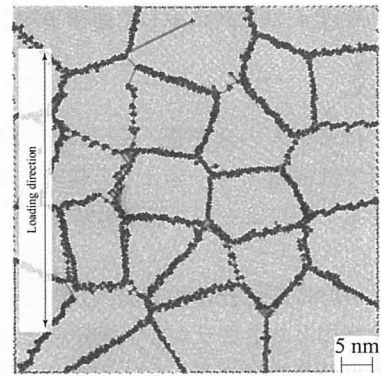


Fig.8 Atomistic stress-applied strain relationship.

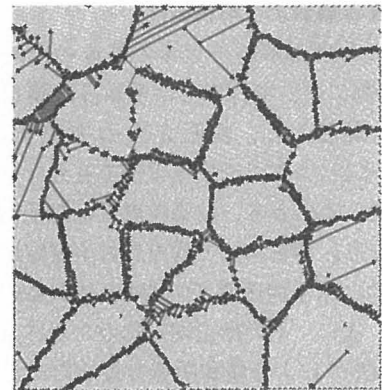
なお、隣接する原子の幾何学的な情報を用いて Common Neighbor Analysis (CNA) により原子の局所構造解析を行った^{25), 26)}。図中の原子を表す丸印は、白抜き丸で示した原子が fcc、グレーで示した原子が hcp、黒丸がその他の不均質な構造である。結晶粒界において不均質な構造が存在しており、Voronoi 分割により多結晶薄膜モデルが作成されていることがわかる。Fig. 7 に平均結晶粒径と粒界の割合および粒界厚さの関係を示す。なお、平均粒界厚さは fcc 以外の構造の原子が全体に占める割合より算出した。平均結晶粒径によらず、平均粒界厚さはほぼ 0.69nm で一定であるが、結晶粒径の増加とともに単位体積あたりに占める結晶粒界が減少した。

3・2 変形挙動に及ぼす結晶粒径の影響

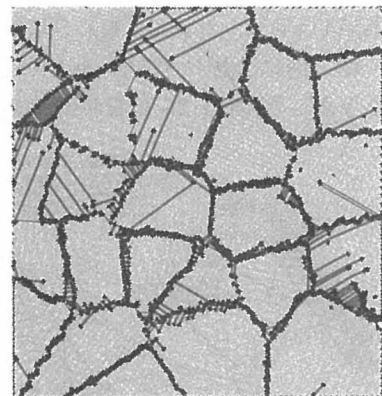
Fig. 8 に<110>優先方位を有する条件における応力-ひずみ関係を示す。なお、応力およびひずみには、それぞれ原子応力の平均として算出した平均応力 σ_y および公称負荷ひずみ ϵ_{app} を採用した。また、図中の丸印は 0.2% 耐力を示したものである。平均結晶粒径 13.4nm のモデルでは、公称ひずみの増加とともに平均垂直応力が単調に増加し、公称ひずみ 0.054 で最大



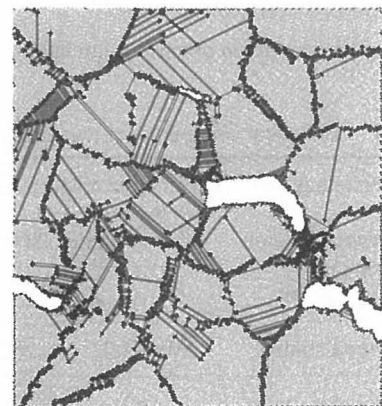
(a) Applied strain, $\epsilon_{app}=0.010$.



(b) Applied strain, $\epsilon_{app}=0.030$.

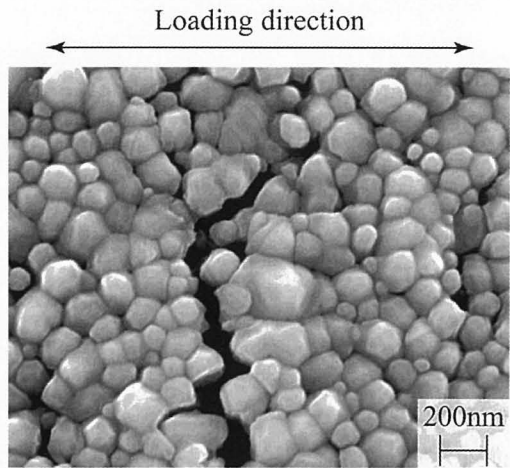


(c) Applied strain, $\epsilon_{app}=0.066$.

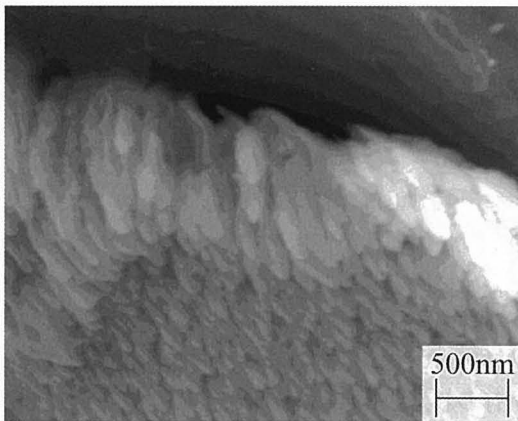


(d) Applied strain, $\epsilon_{app}=0.080$.

Fig.9 Deformation behavior of <110> model, $d=13.4$ nm.



(a) Fracture behavior of Cu thin film.



(b) Fracture surface viewed from oblique angle.

Fig.10 SEM images of Cu thin film after tensile loading.

応力5.15GPaとなり、その後なだらかに減少した。また、公称ひずみがおおよそ0.04よりも大きくなると、非線形性挙動が顕著になり塑性変形挙動を示していることがわかる。また、全てのモデルにおいて応力-ひずみ関係挙動は同様の傾向を示した。Fig. 9に、平均結晶粒径が13.4nmにおける単軸引張負荷中の原子配置を示す。ε_{app}=0.010では、いくつかの結晶粒で転位と積層欠陥が確認できるがこれは初期構造において既に存在していたものである。ついで (b) および (c) では、いくつかの結晶粒において粒界より部分転位が放出され、粒界と転位の間には積層欠陥が形成された。なお、粒界から射出された部分転位と積層欠陥の大部分は、膜厚方向に平行で生じたすべりは面内変形であった。また応力-ひずみ関係の非線形性は、部分転位の放出により構造が緩和されたために生じたと考えられる。また、放出された転位の多くは、粒界に吸収されており、結晶粒界を越えて隣接する結晶に転位が移動することは観察されなかった。さらに (d) では、負荷軸方向と垂直な結晶粒界においてき裂が発生するとともに、さらなる転位の放出および積層欠陥の形成が認められた。

他の結晶粒径においても、部分転位の放出およびす

べり変形、粒界におけるおけるき裂の発生が確認された。

Fig. 10に、カプトン基板上に成膜したCu薄膜の引張試験終了後のSEM写真を示す²⁷⁾。(a)はTarget Powerを100Wで成膜した試験片の破壊後の表面である。大部分が粒界き裂であり、さらに中央のき裂以外にも粒界き裂が複数確認できた。(b)は、Target Powerを10Wで成膜した試験片の破壊後の破面であり、基板から成長したと考えられる柱状の結晶が観察でき、試料表面のみならず破面全体にわたって粒界破壊が生じていることがわかる。これらの傾向は、本解析結果で得られた粒界における破壊挙動に一致した。

Table IIIに平均結晶粒径13.4nmのモデルにおける、活動すべり系と転位が放出されすべりが生じた結晶の平均Schmid因子を示す。(a) および (b) はそれぞれ非線形性が顕著になる負荷ひずみ0.040および最大応力となる負荷ひずみ0.056における結果であり、単一すべり、多重すべりおよびすべり系が活動していない結晶粒に分類した。本解析では、すべり変形は部分転位の放出にともなう積層欠陥の形成によって行われるため、Schmid因子は部分転位における原子の移動方向を考慮して算出した。負荷ひずみ0.040および0.056の両条件ともに、主すべり系、第2すべり系およびその

Table III Active slip system taking account of Schmid factor.

(a) At ε_{app}=0.040

Slip systems	Average Schmid factor	Counts at ε _{app} = 0.040
1st	1st : 0.452	5
2nd	2nd : 0.366	2
1st+2nd	1st:0.486, 2nd : 0.369	3
No dislocation	1st : 0.425, 2nd :0.352	15
Total	1st : 0.443, 2nd :0.355	25

(b) At ε_{app}=0.066, maximum stress

Slip systems	Average Schmid factor	Counts at ε _{app} = 0.056
1st	1st : 0.451	10
2nd	2nd : 0.366	2
1st+2nd	1st:0.486, 2nd : 0.369	3
No dislocation	1st : 0.412, 2nd :0.342	10
Total	1st : 0.443, 2nd :0.355	25

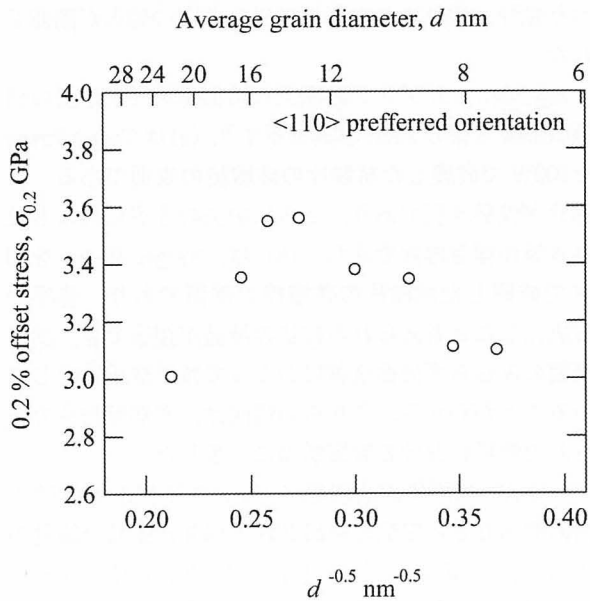


Fig.11 Relationship between 0.2% offset stress and grain size of <110> preferred orientation.

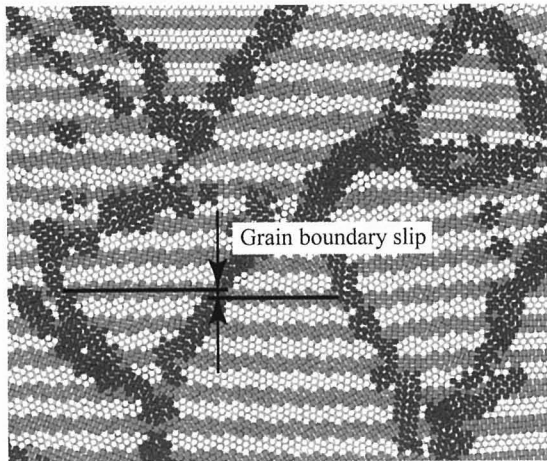


Fig.12 Deformation behavior of grain and grain boundary.

多重すべり系が活動し、他のすべり系は活動していない。また、主すべり系が活動した結晶粒の平均 Schmid 因子は、モデル全体の平均値より大きくなっており、Schmid 因子の大きい結晶粒において選択的にすべりが生じていることがわかる。また、第2すべり系のみが活動した結晶粒も存在したが、少数であった。さらに負荷の増大に伴いすべり系が活動する結晶粒が増え、それに伴い活動した結晶粒の Schmid 因子の平均値が低下していることがわかる。負荷ひずみの増大に伴い分解せん断応力が増加し、臨界分解せん断応力を超える結晶粒が増加したためであると考えられる。以上のように、原子系モデルでは外部負荷が各結晶に作用すると仮定することによって、容易に活動すべり系を求めることが可能であることがわかる。転位の放出される方向は臨界分解せん断応力により支配されており、分解せん断原子応力が最大となる主すべり系が活動することによって、塑性変形が進行するものと考えられ

る。

Fig. 11に0.2%耐力と結晶粒径の関係を示す。結晶粒径が約15nm以上の比較的大きな領域では、結晶粒径の減少に従い耐力が増加する。この関係は、Hall-Petchの関係に対応する。本解析では、転位は粒界から放出され粒界に吸収されるため、結晶粒径の減少により転位の運動を阻害する粒界の割合が増加するため、結晶粒径の減少とともに耐力が増加すると考えられる。しかしながら、結晶粒界が15nmよりも小さくなると、結晶粒径の減少とともに耐力が減少しており、逆 Hall-Petch の関係を示した²⁸⁾。Fig. 12に、最大応力時の原子配置を示す。なお、原子配置は、初期構造において0.5nmおきに、原子を白とグレーで交互に示したものであり、黒色は不均質な構造の原子である。原子配置において、中心の結晶粒と、隣り合う結晶粒の変形量が、粒界を隔てて僅かに異なっており、粒界すべりが生じていることがわかる。結晶粒内における原子の移動は、均一ではなく結晶粒内において分布を持つことに起因していると考えられる。したがって、結晶粒径の減少に伴い、塑性変形挙動への転位の寄与は減少し、結晶粒界の変形挙動が支配的になると考えられる。バルク材のナノメートルサイズの結晶粒を有する多結晶材料において分子動力学法や実験的手法に基づく評価が行われ、Hall-Petchの関係が成立する臨界寸法が11から50nmであることが報告されており^{13)~16), 28)~31)}、本解析の多結晶 Cu 薄膜における結果とよく一致した。

3・3 結晶粒の変形挙動

Fig. 13に、<110>優先方位を有するモデルの負荷軸方向の負荷公称ひずみ ϵ_{app} と粒内ひずみ ϵ_{tr} の関係を示す。なお、粒内ひずみはモデル中心部の結晶粒に着目し、負荷方向における格子面間隔より算出した。(a)は平均結晶粒径16.6nm、(b)は平均結晶粒径8.30nmである。図中の円印が原子モデルの解析結果、一点破線は有限要素モデルの結果である。

(a)で示した結晶粒径が大きいモデルでは、粒内ひずみは、弾性変形挙動では連続体モデルの結果とほぼ一致し、また負荷公称ひずみとともに増加する。さらに、負荷ひずみ0.02において非線形性を示し、粒内ひずみが一定となった。これは結晶粒内に転位が放出され積層欠陥が形成されたため、構造が緩和されたためであると考えられる。更なるひずみの負荷によって、粒界にき裂が生じたため、粒内ひずみは急激に減少した。一方で、(b)で示した結晶粒径が小さいモデルでは、粒内ひずみは、弾性変形範囲内では連続体モデルの結果より小さく、また負荷公称ひずみとともに増加する。その後、応力-ひずみ関係に非線形性が顕著になる公称ひずみ0.04程度より粒内ひずみは減少した。従って、弾性変形においても結晶粒が小さくなると、結晶粒の変形挙動よりも結晶粒界の変形挙動が支配的

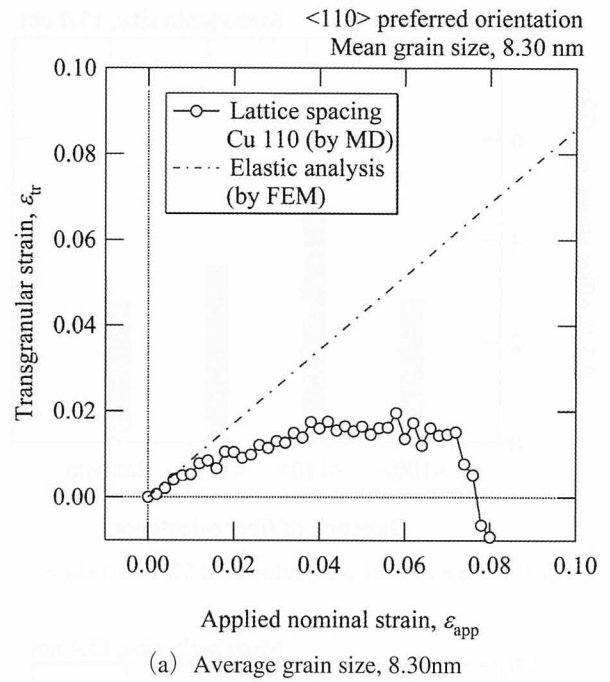
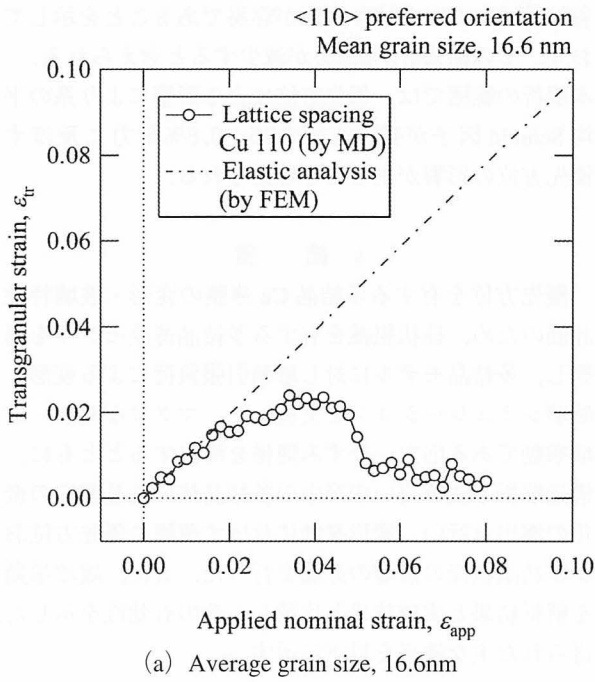


Fig.13 Transgranular strain vs. applied strain of <110> preferred orientation.

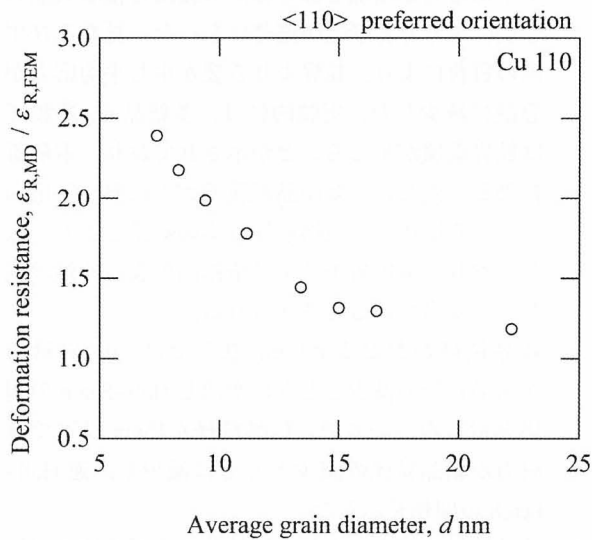


Fig.14 Effect of grain size on deformation resistance.

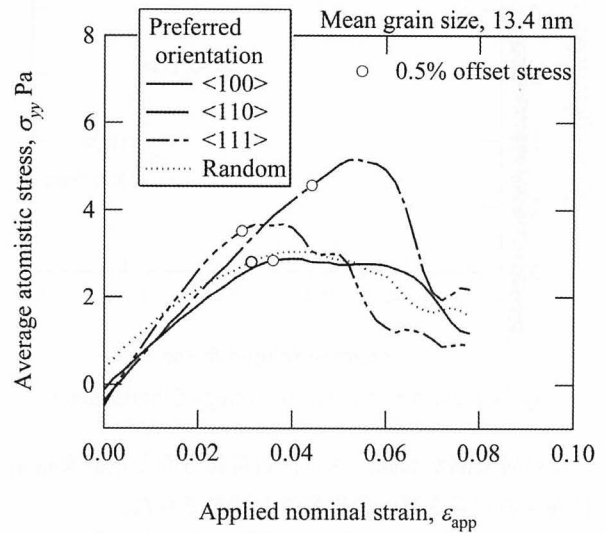


Fig.15 Stress-strain curves of various fiber orientation.

になると考えられる。

結晶粒の変形特性量として、変形抵抗 ϵ_R を単位粒内ひずみ ϵ_{tr} を生じさせるために必要な負荷ひずみ ϵ_{app} として次式で定義する。

$$\epsilon_R = \frac{\epsilon_{app}}{\epsilon_{tr}} \quad (3)$$

Fig. 14に、結晶粒の変形抵抗と結晶粒径の関係を示す。なお、結晶粒の変形抵抗は、原子モデルの結果を有限要素モデルの結果で除し無次元化した値を採用した。結晶粒径がおおよそ15nmよりも大きいモデルでは、結晶粒の変形抵抗がほぼ一定であるが、15nmよりも小さいときには、結晶粒の減少に伴い変形抵抗が増加しており、結晶粒の小さいモデルにおいては、結

晶粒界の変形が支配的になることがわかる。

3・4 変形挙動に及ぼす優先方位の影響

Fig. 15に面外方向に種々の優先方位を有するモデルにおける応力-ひずみ関係を示す。また、図中の丸印は0.5%耐力を示したものである。全てのモデルにおいて、前述の<110>優先方位モデルと同様に、負荷初期では公称ひずみの増加とともに平均原子応力が単調に増加し、最大応力となった後、なだらかに減少した。また、負荷初期では応力-ひずみ関係は線形挙動を示している一方で、その後非線形挙動が顕著になり塑性変形挙動を示している。微視構造変化は、全てのモデルにおいて前述の<110>優先方位モデルと同様に、粒界より部分転位が放出および粒界と転位の間

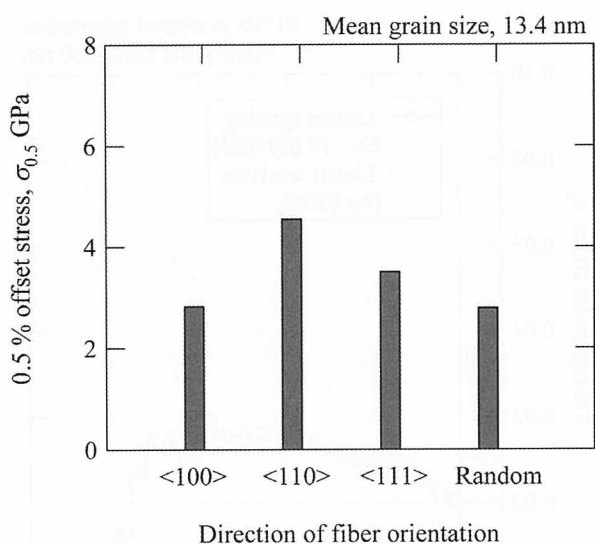


Fig.16 Effect of fiber orientation on 0.5% offset stress.

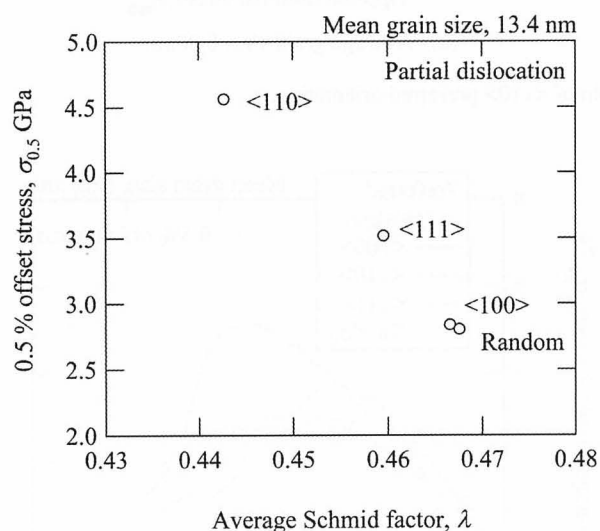


Fig.17 0.5% offset stress vs. average Schmid factor

には積層欠陥が形成，さらに負荷軸方向と垂直な結晶粒界においてき裂の発生挙動が観察された。

Fig. 16に比較的塑性変形が進行した段階の指標として0.5%耐力を採用し，耐力と優先方位の関係を示す。<110>優先方位モデルの0.5%耐力が最も耐力が大きく，ついで<111>優先方位モデル，<100>優先方位モデルとなった。また，ランダムモデルの0.5%耐力は<100>優先方位モデルとほぼ同程度であった。0.5%の塑性ひずみが進行した段階では，複数の結晶粒において転位の放出と積層欠陥の形成が生じている。従って，系の全結晶粒におけるすべり変形挙動により0.5%耐力の評価が可能であると考えられる。Fig. 17に，0.5%耐力と系のSchmid因子の平均値の関係を示す。

系のSchmid因子の平均値の増加とともに，0.5%耐力が減少している。系のSchmid因子の平均値の増加は，系全体の結晶粒におけるすべりの生じやすさを示す。従って，系の平均Schmid因子が小さいほど，

各結晶粒において滑り変形が容易であることを示しており，その結果0.5%耐力が減少すると考えられる。本解析の範囲では，優先方位による影響により系の平均Schmid因子が変化したため，0.5%耐力に及ぼす優先方位の影響が生じたと考えられる。

4 結 言

優先方位を有する多結晶Cu薄膜の変形・破壊特性評価のため，柱状組織を有する多結晶薄膜モデルを構築し，多結晶モデルに対し単軸引張負荷による変形・破壊シミュレーションを実施した。マクロな変形・破壊挙動である応力-ひずみ関係を導出するとともに，構造解析手法を用い変形中の多結晶体の結晶構造の変化の導出を行い，変形挙動に及ぼす薄膜の優先方位および結晶粒径の影響の評価を行った。また，破壊挙動を解析結果と実験結果と比較し，その有効性を示した。得られた主な結果を以下に示す。

1. 応力-ひずみ関係において，ひずみの負荷によって平均応力が増加し部分転位の放出と積層欠陥の形成により非線形性が顕著になった。更なるひずみの負荷により，粒界よりき裂が生じ平均応力が急激に減少した。実験的には，多結晶Cu薄膜では粒界破壊が生じることが示されており，本解析結果と一致した。多結晶薄膜モデルにおける応力-ひずみ関係や，破壊形態は実験結果とよく一致しており，本解析モデルは多結晶薄膜の特性評価として妥当であると考えられる。
2. 結晶粒径がおおよそ15nm以上では，0.2%耐力が結晶粒径の減少とともに増加しHall-Petchの関係を示した。一方で，結晶粒径が15nm以下では，耐力が結晶粒径の減少とともに減少し，逆Hall-Petchの関係を示した。
3. 結晶粒径の減少により，結晶粒の変形抵抗が増加した。これは，結晶粒径の減少によって結晶粒界の全体に対する割合が増加し，結晶粒界において変形が集中するためであると考えられる。
4. 0.5%耐力は系のSchmid因子の平均値の増加とともに減少し，ナノ結晶材料においても，比較的大きな塑性変形に対しては，Schmid因子が重要なパラメーターとなることが示唆される。従来の分子動力学による変形挙動評価では未解明であった，個々の結晶粒におけるすべり挙動と機械的特性の関係が明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) Kinbara, Sputtering Phenomenon, (1984), 177, The University of Tokyo Publication Association.
- 2) Nix, W. D., Metallurgical and Materials Transactions.

- A20A, (1989), 2217.
- 3) Ogawa, H., Suzuki, K., Kaneko, S., Nakano, Y., Ishikawa, Y. and Kitahara, T., *Microsystem Technologies*, **3**, (3), (1997), 117.
 - 4) Stoney, G. G., *Proceedings of the Royal Society, London, Series. A82*, (1909), 172.
 - 5) Tanaka, K., Ishihara, K. and Akiniwa, Y., *Adv. X-ray Anal.***39**, (1997), 251.
 - 6) Tanaka, K., Akiniwa, Y., Ito, T. and Inoue, K., *JSME International Journal*, **A42**, (1998), 224.
 - 7) Hanabusa, T., *Materials Science Research International*, **5**,(1999), 63.
 - 8) Weiss, D., Gao H. and Arzt, E., *Acta Materialia*, **49**, (2001), 2395.
 - 9) Hommel, K. M. and Artz, E., *Materials Science and Engineering*, **A288**, (2000), 209.
 - 10) Schwaiger, R., Dehm G. and Kraft, O., *Philosophical Magazine*, **83**, (6), (2003), 693.
 - 11) Mullen, R. L., Bakkarini, R., Yin Y. and Heuer, H., *Acta Materialia*. **45**, (6), (1997), 2247.
 - 12) Serizawa, K., Tanaka, K. Kimachi, H. and Akiniwa, Y., *Journal of The Society of Materials Science, Japan*, **53**, (2004), 150.
 - 13) Schiøtz, J., Vegge, T., Tolla, F. D. Di and Jacobsen, K. W., *Physical Review B*, **60**, (17), (1999), 11971.
 - 14) Schiøtz, J. and Jacobsen, K. W., *Science*, **301**, (5), (2003), 1357.
 - 15) Shimokawa, T., *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, **14/5**, (2006), 63.
 - 16) Shimokawa, T., Nakatani, A. and Kitagawa, H., *Physical Review B*, **71/22**, (2005), 224110.
 - 17) 久保田義大,松本龍介,宮崎則幸,日本機械学会論文集 A 編, **73**, (733), (2007), 989.
 - 18) Gibson, L. J. and Ashby, M. F., *Cellular Solids Structure & Properties*, (1988), 18, Pergamon Press.
 - 19) Grenestedt, J. L. and Tanaka, K., *Scripta Materialia*, **40**, (1), (1999), 71.
 - 20) Tuda, T., *Monte Carlo Method and Simulation Probability Theory Application of Computer*, (1995), 10, Baifukan.
 - 21) Kitagawa, H., Kitamura, T., Shibutani, Y. and Nakatani, A., *Molecular Dynamics Moehdos for Beginners*, Yokenndo, (1997), 22.
 - 22) Jacobsen, K. W., Norskov, J. K. and Puska, M., *Physical Review B*, **35**, (1988), 7423.
 - 23) Jacobsen, K. W., Stoltze, P. and Norskov, J. K., *Surface Science*, (1996), 394.
 - 24) Ueda, A., *Molecular Simulation*, (2003), 82, Shoukabo.
 - 25) Honeycutt, J. D. and Andersen, H. C., *Journal of Physical Chemistry*, **91**, (1987), 4950.
 - 26) Jonsson, H. and Andersen, H. C., *Physical Review Letters*, **60**, (1988), 2295.
 - 27) 秋庭義明,鈴木 剛,木村英彦,日本機械学会論文集.A 編 **74**, (739), (2008), 356.
 - 28) Nieh, T. G. and Wadsworth, J., *Scripta Metallurgica et Materialia*, **25**, (1991), 955.
 - 29) Chokshi, A. H., Rosen, A., Karch, J. and Gleiter, H., *Scripta Metallurgica*, **23**, (1989), 1679.
 - 30) Yip, S., *Nature*, **391**, (1998), 532.
 - 31) Arzt, E., *Acta Materialia*, **46**, (1998), 5611.

表層発泡体の成形プロセスと機械的・光学的特性*

新保 實** 堀 智博*** 三澤 章博****

Foaming Process and Mechanical and Optical Characteristics of
Surface Layer-foamed Plastics

by

Minoru SHIMBO,

(Materials System Research Lab., Kanazawa Institute of Technology, Hakusan)

Tomohiro HORI

(AISIN SEIKI Co. Ltd. Kariya)

and Akihiro MISAWA

(Mechanical Engineering, Kanagawa Institute of Technology, Atsugi)

In this study, various foaming conditions for a surface layer foaming process by means of a batch type forming process were examined, where saturation times and saturation temperatures of surface layer-foamed plastics thus formed were measured. While, the change of inner structures (cell sizes and foaming depth) with respect to saturation times and saturation temperatures observed. Thus, investigations were made as to the effect of these factors on the inner structures, as well as impact absorption characteristics of surface layer-foamed plastics and their light diffusion characteristics. As a result, following matters were clarified. The forming process of surface layer-foamed plastics has been established, where foaming depth and cell diameter are controllable. The knowledge on the effectiveness in impact absorption characteristics and optical characteristics of surface layer-foamed plastics were obtained.

(Received September 30, 2011)

キー・ワード：表層発泡体，発泡成形プロセス，衝撃吸収エネルギー，光学特性

Key Words : Surface Layer-foamed Plastics, Foaming Process, Impact Energy-absorption, Optical Characteristics

1 緒 言

発泡プラスチックは，気泡を導入することで材料低減が図れるが，強度特性の低下を引き起こすといった欠点を有する．材料低減が図れ，且つ強度特性を維持あるいは向上し得る発泡プラスチックの成形が可能となった場合には，省資源素材としての用途範囲を格段に広げることができる．

一般的に発泡体の強度向上に寄与する因子として以下のことが考えられている．一つは，極微細な気泡径の導入，一つは，気泡内の発泡剤による内圧効果，さらに，数多くの気泡によるクラック進展抑止効果である．しかし，これらの効果を定量的に解明した報告は殆どされていない．

発泡体の強度特性の向上の他の手法として，①気泡の直径を材料内部に潜在的に存在する欠陥サイズ（10 μm）以下にすること，②急激な熱力学的不安定性に

よる気泡成長に伴う気泡壁の分子配向を引き起こすこと，③各種強化繊維を混入し複合化すること，④表面に未発泡のスキン層を形成しサンドイッチ構造体にするなどが考えられる．著者らはこれまでに発泡プラスチックの強度向上に関して，上述の①，②，③そして④について種々の検討を行っている．①の微細気泡を有する発泡プラスチックつまりマイクロセルラープラスチックについては，種々の樹脂を用いて微細な気泡を導入した場合の引張強度を検討し，結晶性樹脂のポリエチレンテレフタレート（CPET）については，数ミクロンの気泡を導入することで，引張強度が未発泡体と同等のものが得られることを見出している¹⁾．しかしながら，発泡サンプルが大きくなった場合や他の樹脂を用いた検討においては，発泡化による強度保持がかなり困難であるといった知見も得ている．

②の気泡壁の分子配向に伴う強度特性については，結晶性樹脂のポリエチレンテレフタレート（CPET），ポリプロピレン（PP）を用いた検討において，分子配向を起こしやすい結晶性樹脂は気泡径を小さくすることで，発泡倍率並びに応力集中から推定される理論

* 原稿受付 2011年9月30日

** 金沢工業大学材料システム研究所 白山市八束穂

*** アイシン精機(株) 刈谷市朝日町

**** 神奈川工科大学機械工学科 厚木市下萩野

Table I Foaming conditions of PS and PC.

Materials	PS					PC				
Sample size [mm]	50×50×2									
Saturation pressure [MPa]	20									
Saturation temperature [°C]	90	95	100	105	110	140	145	150	155	160
Saturation time [min]	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3,5

Materials	PS			PC		
Sample size [mm]	50×50×2					
Saturation pressure [MPa]	20					
Saturation temperature [°C]	1	3	5	1	3	5
Saturation time [min]	90,95,100, 105,110	90,95,100, 105,110	90,95,100, 105,110	140,145,150, 155,160	140,145,150, 155,160	140,145,150, 155,160

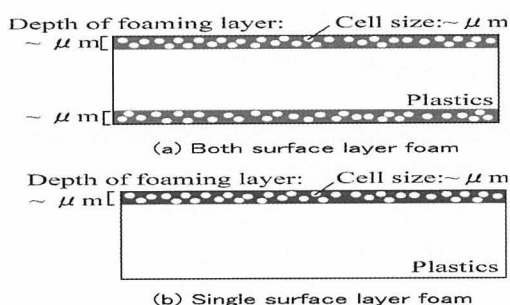


Fig.1 Surface layer plastics.

強度よりも高くなり、その要因は発泡による表面積の増加に伴う分子配向の効果であることを明らかにしている²⁾。③の強化繊維の混入した発泡体の強度特性について、充填材として微小繊維に注目し、これが発泡プラスチックの強度や弾性率といった機械的特性に及ぼす効果について検討している。充填材として針状型であるチタン酸カリウム繊維とテトラポット型酸化亜鉛繊維を取り上げ、含有量を変化させたポリスチレン樹脂 (PS) 複合体を製作し、これら複合体の発泡成形を行い、得られた発泡体の曲げ強度、弾性率を調査している。その結果、微小繊維を含有した PS 発泡体の曲げ比強度は、PS 単体の発泡体の曲げ比強度に比べ約35%から60%の向上が見られること、また、曲げ比弾性率は PS 単体の発泡体の曲げ比弾性率に比べ約130%から140%の向上が見られることを明らかにしている³⁾。さらに、④のスキン層の効果について、スキン層が殆ど無い発泡体の比強度は、未発泡体の比強度の20~30%程度の低下が見られるが、スキン層厚さの増加と共に強度の向上が見られ、スキン層を付加することで未発泡と同等の比強度を得ることができる。そして、スキン層厚さは試料全体厚さの7~8%程度で強度向上に寄与することを明らかにしている⁴⁾。

本研究では、プラスチックの表面層のみを発泡させ、内部に未発泡部を残すといった表層発泡体の成形プロセスと諸特性について検討した。発泡体としての表面層発泡体は、Fig. 1 に模式的に示すように、両表面層

を発泡させる両表面層発泡体と片面のみの片表面層発泡体の2つの形態が考えられる。両表面層部分を発泡させ、内部に未発泡部を残す両表面層発泡体は、材料本来の強度を保ちながら衝撃吸収特性を向上でき、衝撃吸収素材として応用が期待できる。また、片表面層発泡体は光の拡散といった光学的特性を発現し得る可能性があり、液晶ディスプレイへの応用が期待できる。しかしながら、これら表面層発泡体の成形は困難であり、安定な発泡素材を得る成形プロセス並びに成形条件を確立することが必要である。ここでは、表面層発泡成形プロセスをバッチ式発泡成形プロセスにより種々の方法で成形条件を検討した。そして、成形された表面層発泡体の含浸時間や含浸温度に伴う内部構造（気泡径、発泡層深さ）を観察し、内部構造に及ぼすそれら因子の影響並びに表面層発泡体の衝撃吸収特性や光の拡散性を調査した。

2 表層発泡成形

2.1 供試材料

本研究では、供試材料として非結晶樹脂である汎用ポリスチレン樹脂 (PS ジャパン社製: G9305, 重量平均分子量約24万, 以下 PS と省略する) と非結晶樹脂である汎用ポリカーボネート樹脂 (住友ダウ社製: 30I-4, 重量平均分子量約2.7万, 以下 PC と省略する) を使用した。試験片は50×50×2 mm の正方形板とした。

2.2 成形方法

Fig. 2 にバッチ式発泡成形の一つである減圧発泡成形プロセスを示す^{5)~7)}。減圧発泡法は、同図に示すよ

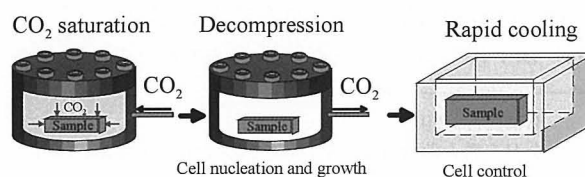


Fig.2 Batch foaming process and foaming method.

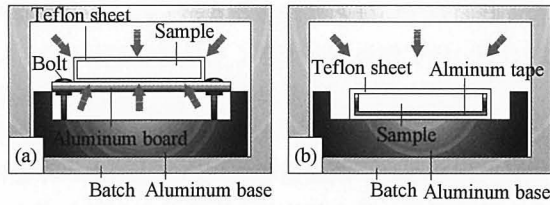


Fig.3 Foaming method of molds foamed surface layer ; (a) Both surface layer, (b) One surface layer.

うに試料をガラス転移温度以上の高温（含浸温度＝発泡温度となる）に設定した压力容器に入れ、高压で物理的発泡剤を含浸させた後、減圧することによって気泡核生成と成長を行い、冷却することで気泡成長を制御するものである。Fig. 3の(a)に両表面発泡体、(b)に片表面発泡体の具体的な成形方法を示す。両表面発泡体は、同図の(a)に示すように、試料をテフロン布で密着するように包み、減圧する際に生じる発泡剤の気化熱による急激な冷却を防止した。アルミ台の上に中央部分に空間を持たせるように、アルミ板をボルトで浮かせて固定したジグを压力容器内に設置し、両表面から発泡剤を含浸し成形サイクルの向上を図った。片表面発泡体は、同図の(b)に示すように、片表面にアルミ製テープを付着させることで、一方の片表面からの発泡剤の含浸を防止することで発泡が伴わないように工夫した。また、減圧時の気化熱による急激な冷却を防止するため、両表面発泡と同様にテフロン布で保護した。表面層の発泡は、Table Iに示すように含浸時間と含浸温度を種々変化させることで、発泡層深さ並びに気泡径を制御した。尚、物理的発泡剤は二酸化炭素（純度：99.95%以上）を使用した。

3 評価方法

3・1 衝撃吸収特性

機械的特性として落錘試験による衝撃吸収特性を評価した。衝撃試験の模式図をFig. 4に示す。衝撃試験は、一定の高さから落下錘を自由落下させ、その跳ね返り高さを高速度カメラで測定する方法で行なった。衝撃試験は、一条件でそれぞれ3本以上の試験片について行ない再現性を確認した。衝撃吸収エネルギーは、以下の式より算出した、

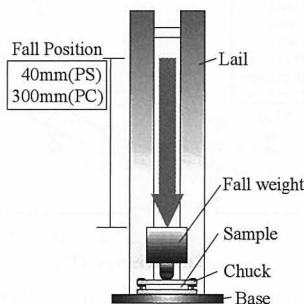


Fig.4 Method of impact test.

$$E = mg(h_0 - h_1) \quad (1)$$

ここで、 m は落下錘の質量 (0.998kg), g は重力加速度 (9.8m/s²), h_0 (m) は落下高さ, h_1 (m) は跳ね返り高さである。この落下高さは、用いた試料の未発泡試験片が落下錘によって破壊しない限界を基準として、PS材については40mm, PC材については300mmとした。

3・2 光学特性

Fig. 5に光学特性試験の模式図を示す。光学特性はこの図に示すように、片表面発泡体を円筒に密着し、円筒内からハロゲンランプを照射させ、片表面発泡体を透過する光を照度計で計測した。

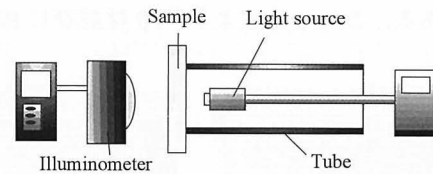


Fig.5 Optic test.

4 結果及び考察

4・1 発泡倍率

Fig. 6, Fig. 7にPS材並びにPC材の両表面発泡体の発泡温度（＝含浸温度）及び含浸時間を変化させた場合の発泡倍率をそれぞれ示す。これらの図の縦軸は発泡倍率であり、横軸は発泡温度と含浸時間である。

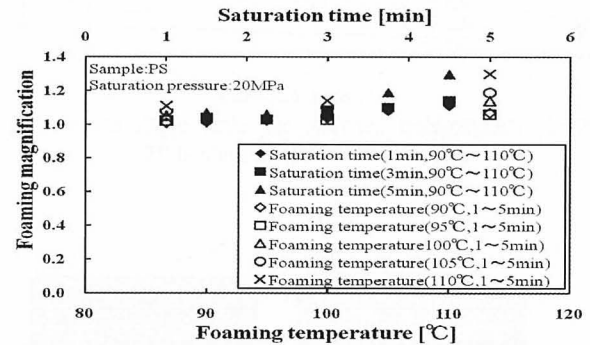


Fig.6 Relationship between foaming magnification and, foaming temperature, saturation time of foamed PS.

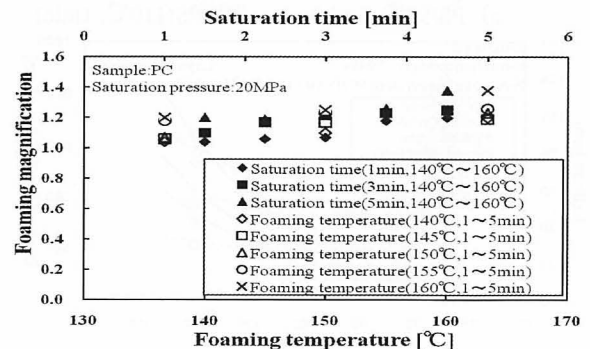


Fig.7 Relationship between foaming magnification and foaming temperature, saturation time of foamed PC.

これらの図より, 表層発泡体は表層部分のみの発泡であることから, PS 材並びに PC 材とも本実験で行った発泡温度や含浸時間の範囲ではこれらの影響を受けずほぼ同じ倍率となることが分かる.

4・2 内部構造

含浸圧力と含浸温度を一定にし, 含浸時間のみを変化させた場合の発泡層深さに対する含浸時間の影響並びに含浸圧力と含浸時間を一定にし, 発泡温度のみを変化させた場合の発泡層深さに対する発泡温度の影響を調査した. Fig. 8 から Fig. 11 に PS 材並びに PC 材の両表層発泡体の結果を内部構造と共に示す. これらの図の上部は発泡内部構造の一例であり, 図中の破線は気泡径, 実線は発泡層のデータを最小二乗近似したものである. これらの図より, PS 材並びに PC 材と

も含浸時間が長いほど発泡層深さが大きくなり, 発泡温度が高いほど気泡径が大きくなることわかれる. このことは, 温度が高くなるほど素材の粘性が小さくなり気泡の成長が促進され, 含浸時間が長くなるほど気泡成長が促進され, 成長過程で気泡同士の合一や破泡が起こり最終的に残る気泡径が大きくなったと考えられる. 尚, 本研究では, 発泡層深さを一定にして気泡径を変化させたサンプル並びに気泡径を一定にして発泡層深さを变化させたサンプルの作成を目指したが, これらの結果のようにその発泡制御は実現できなかった. これについては今後の課題としたい.

4・3 衝撃吸収特性

ここでは, 含浸時間が PS 材, PC 材とも 1~3 min, 発泡温度が PS 材で 90~100°C, PC で 140~150°C の範

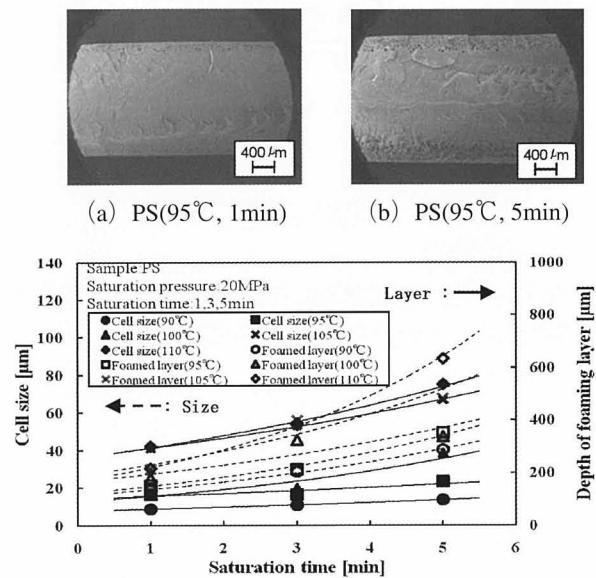


Fig.8 Relationship between cell size, depth of foaming layer and saturation time of foamed PS.

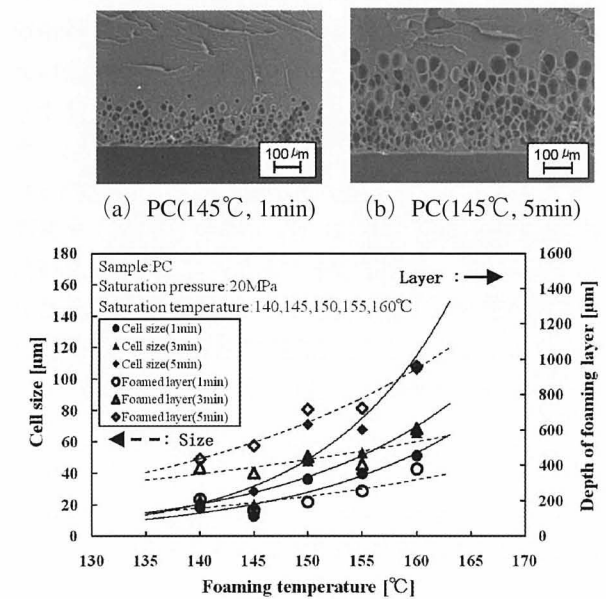


Fig.10 Relationship between cell size, depth of foaming layer and saturation time of foamed PC.

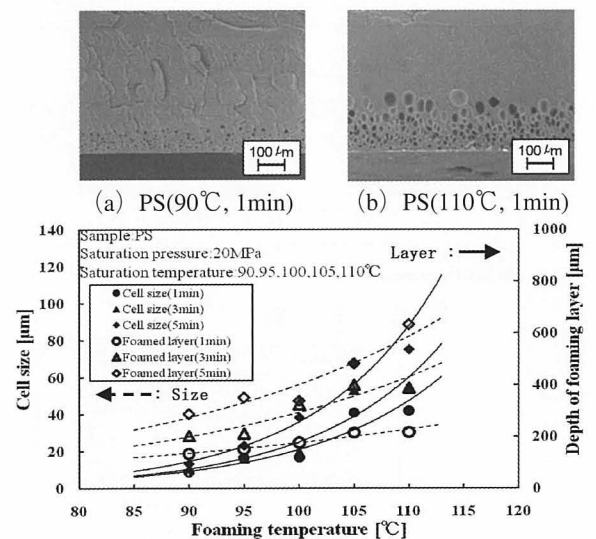


Fig.9 Relationship between cell size, depth of foaming layer and foaming temperature of various foamed PS.

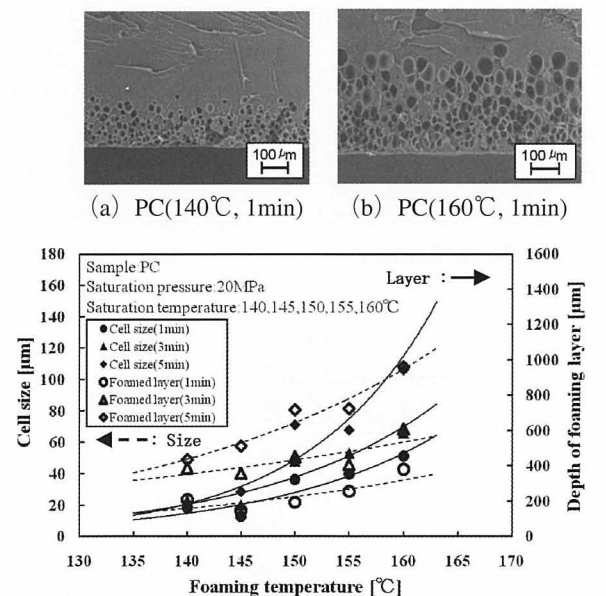


Fig.11 Relationship between cell size, depth of foaming layer and foaming temperature of foamed PC.

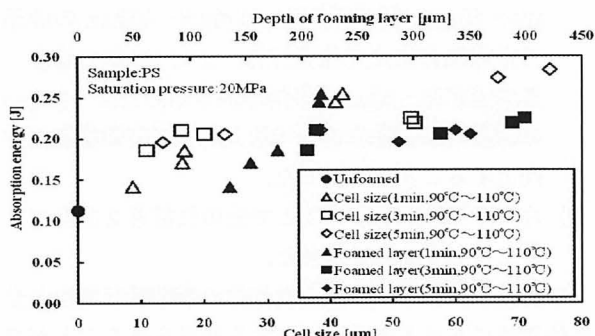


Fig.12 Relationship between absorption energy and depth of foaming layer, cell size of foamed PS.

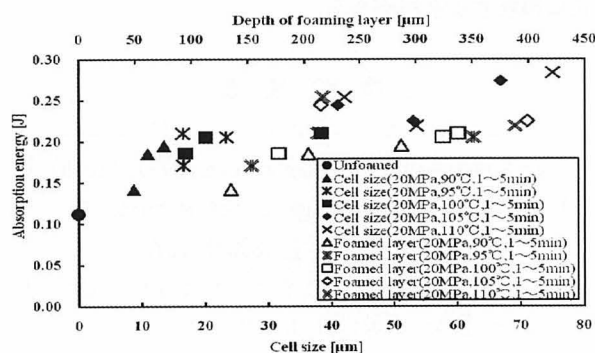


Fig.13 Relationship between absorption energy and depth of foaming layer, cell size of foamed PC.

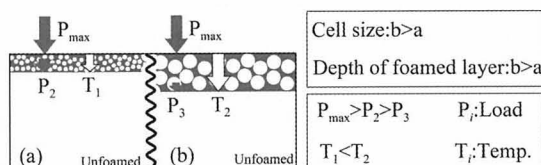
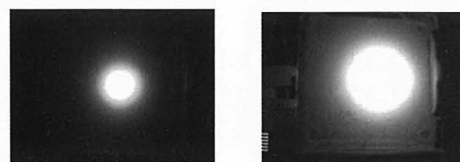


Fig.14 Mechanism of thickness of foaming layer of foamed plastics on impact strength.

囲で発泡倍率がほぼ同じであることから、この範囲で成形したサンプルについて気泡径及び発泡層深さによる衝撃吸収特性を評価した。

Fig. 12に PS 材の両表層発泡体の衝撃吸収エネルギーと気泡径並びに発泡層深さの関係を示す。この図に示す●印は PS 材の未発泡体の値である。この図に示すように、発泡層深さ並びに気泡径の増加と共に、衝撃吸収エネルギーは未発泡体に比べ増加することがわかる。そして、発泡層深さが約70μm、気泡径が15μm以上で、衝撃吸収エネルギーが未発泡体に比べ約2倍強となることがわかる。

Fig. 13に PC 材の両表層発泡体の衝撃吸収エネルギーと気泡径並びに発泡層深さの関係を示す。この図に示す●印は PC 材の未発泡体の値である。この図に示すように、発泡層深さ並びに気泡径の増加と共に、衝撃吸収エネルギーは未発泡体に比べ増加することがわかる。Fig. 12に示す PS 材の結果と比べ、PC 材の衝撃吸収エネルギーの増加は少ないものとなっている。つ



(a) PS(90°C, 5min) (b) PS(110°C, 5min)

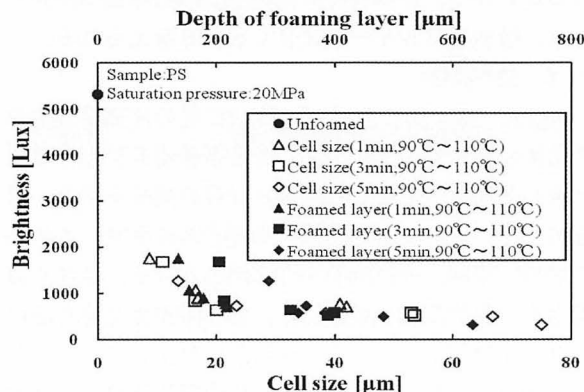
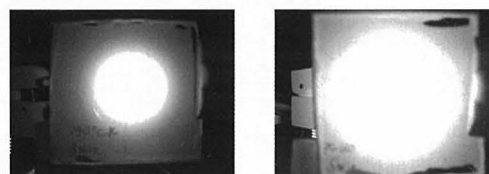


Fig.15 Relationship between brightness and depth of foaming layer, cell size of foamed PS.



(a) PC(140°C, 3min) (b) PC(160°C, 3min)

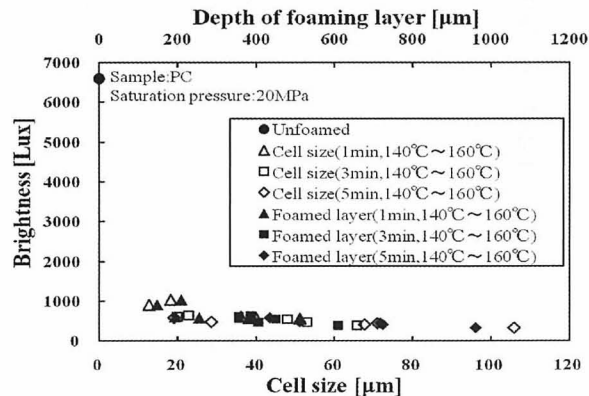


Fig.16 Relationship between brightness and depth of foaming layer, cell size of foamed PC.

まり、素材の種類によって吸収エネルギーの効果が異なることが伺える。

上述のように、本研究では発泡層深さを一定にして気泡径を変化させたサンプル並びに気泡径を一定にして発泡層深さを変化させたサンプルの成形が出来なかったことから、衝撃吸収エネルギーに及ぼす気泡径と発泡層深さの影響の優位性を評価することはできなかった。ただ、気泡径が大きく、または発泡層深さが大きくなるにつれ、衝撃吸収エネルギーが増加するメカニズムとして以下のことが考えられる。Fig. 14に表層発泡体が衝撃を受けた際の力 (P_i) の伝わり方と未発泡部に伝わるまでの時間を模式的に表したものを示

す。この図に示すように、気泡径が小さく発泡層深さが小さい場合は、発泡層の剛性が比較的高いことから、未発泡部に伝わる衝撃力の時間が短くなり、吸収エネルギーは小さくなると考えられる。一方、気泡径が大きく発泡層深さが大きい場合は、発泡層の剛性が低くなることから、未発泡部に伝わる衝撃力の時間が長くなり、吸収エネルギーは大きくなると考えられる。

4・4 光学特性

Fig. 15, Fig. 16にPS材並びにPC材の片表面発泡体の含浸圧力と含浸時間が一定で含浸温度を変化させたときの発泡層深さ及び気泡径と光度の関係を示す。両図の(a), (b)に光の拡散性の画像例を示す。これらの図の●印は、未発泡体の値を示している。これらの図から、発泡層深さが大きく、気泡径が大きくなるにつれて光度が小さくなり、拡散性が向上していることがわかる。これらの結果より、片表面発泡体は拡散板としての応用が可能であることが伺える。

5 結 言

本研究では、両表面発泡体及び片表面発泡体の成形プロセス並びに成形条件を検討し、これにより成形された表面発泡体の含浸時間や発泡温度(=含浸温度)における内部構造の影響(気泡径, 発泡層深さ)を調査し、これら表面発泡体の衝撃特性や光学特性について検討した。その結果、以下の事柄を明らかにできた。

- 1) 表面発泡体の成形プロセスを確立し、発泡層深さ、気泡径の制御が可能であることが明らかにできた。
- 2) 表面発泡にすることでPS材の場合、気泡径が25

μm ~40 μm , 発泡層深さが120 μm ~200 μm の範囲で未発泡体に比べ最大87%, またPC材の場合、気泡径が35~50 μm , 発泡層深さが350 μm ~450 μm の範囲で未発泡体と比べ最大27%の衝撃吸収性が向上することがわかった。

- 3) 片表面発泡体にすることで光の拡散性を向上させることが明らかにできた。

本研究においては、表面発泡体の衝撃吸収特性と光学的特性における有効性に対する知見を得ることができたが、気泡径による効果と発泡層深さによる効果が明確に分離できなかった。今後は、これらの効果を独立に解明する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Nakano, S. and Shimbo, M., 5th International Conference of Thermoplastic Foam, S7-1, (2006), 1.
- 2) Shimbo, M., Higashitani, I. and Miyano, Y., J. of Cellular Plastics, **43**, (2), (2007), 157.
- 3) Shimbo, M., Taniguti, S., Kinpara, A. and Misawa, A., Seikei-Kakou, **20**, (3), (2008), 201.
- 4) Shimbo, M., Nakano, S. and Misawa, A., Materials System, **27**, (2009), 49.
- 5) Muratani, K., Shimbo, M. and Miyano, Y., Cellular Polymer, **24**, (1), (2005), 15.
- 6) Nakano, S. and Shimbo, M., Cellular Polymers, **25**, (3), (2006), 127.
- 7) Nakano, S., Shimbo M. and Misawa, A., Cellular Polymers, **26**, (5), (2007), 295.

“材料システム”と私

金沢工業大学材料システム研究所 新保 實

Time is flying! (光陰矢のごとし) ; 月日の経つのは早いもので、論文集“材料システム”も発刊以来今回で30巻つまり30年目となります。この一つの節目に、30年間の「“材料システム”と私」について述べたいと思います。

論文集“材料システム”の初版が発行された当時、私は内地留学で本学の博士後期課程に在学中であり、材料システム研究所の所長である宮野 靖教授の下で研鑽中の身でした。

材料システム研究所は、材料をベースに、製品に至る過程を系統的に捉えようとする概念を基に設立された研究集団であり、特に建屋や研究設備つまりハード面に頼らず、上記の概念を確立すべく所員のソフト面に主眼を置いていました。こういった特徴について当時は驚き、且つ斬新な研究集団であるとの印象を受けたことを思い出します。材料システム研究所の年間成果として、オリジナルの論文を集約した論文集“材料システム”を年一回発刊することを設立当初から目指していました。今回は30巻つまり30年間もの長きに亘って途中途切れることなく続いており、まさに“継続は力なり”を実感している昨今です。

材料システムの「材料」は、全ての素材を対象としていますが、宮野先生の下で指導を受けたのは当時まだまだマイナーであったプラスチック材料でした。初めての素材で全く予備知識もなく多大な不安を抱えながら始めたことを思い出します。研究として取り組んだのは、プラスチック成形品の成形過程で生ずる残留応力の発生メカニズムを明らかにすることでした。プラスチック成形品は、成形過程における成形品の厚さ方向の温度分布に伴う粘弾性挙動等によって残留応力が生じ、これが成形時並びに成形後の変形の要因となり、成形不良を引き起こす場合があります。門外漢であった私に、宮野先生がプラスチックの合成方法をはじめ研究試料の作成並びに取扱い等を身を持って指導して下さったことが昨日のように思い出されます。当時研究設備も乏しく、研究に必要な設備は全て手作りで賄い、その指導も一から身を持って示され、物が無くても研究は行えることを体得することができたことが、後の研究活動に大いに役立ったものです。お陰様で、私の学位論文は小さな恒温槽と冷却用の水槽（プラスチック製のたらい）と手作りの実験治具といった設備で得たデータを基に纏めることができたものです。

その後今日に至るまで、一貫してプラスチックの粘弾性挙動を基礎として、プラスチック成形時の寸法精度や寸法安定性に関する研究を、“材料システム”の概念の下で継続出来たことを一つの一里塚とし得たと思っています。さらに、宮野先生からは企業との委託・共同研究を通して、基礎研究の応用としての実問題を解決する方法も指導していただきました。研究としての研究でなく実用面への展開の重要性を体得できたことが後の産学官との共同研究の推進へとつながっていきました。

軽量化と成形の容易性から、プラスチック成形品の用途が拡大し、高信頼性が要求される箇

所にも適用が進んでいます。一方で、成形時の不良や成形品の経時的な強度低下・変形が予想もしない事故を引き起こす危険性もあります。成形不良の要因を把握し素材の特性を考慮した強度・変形の予測手法の確立が強く求められている昨今，“材料システム”の概念に基づく検討がますます重要ではないかと考えています。

1991年8月から1992年9月の間、マサチューセッツ工科大学（MIT）に留学の機会をいただきました。お世話になったMITの機械工学科のDr.Nam.P.Suhの下で、プラスチックに潜在的に存在する欠陥のサイズよりさらに微細な気泡を導入することで、材料低減と共に強度特性を保持あるいは向上し得る“マイクロセルラープラスチック”と呼ばれる新素材の研究に携わることができました。この新素材は、当時まだ概念的な検討に留まり、成形プロセスといった製造技術に関する研究・開発がようやく緒についた段階でありました。発泡プラスチックに関しては、私も初めての検討であり、一からの挑戦でありました。これに関しては、留学期間を通じてDr.Suhから概念的なご指導をいただくことができました。帰国後、上記の残留応力に関する研究テーマに加えて、この新素材の製造プロセスに関する研究を立ち上げることができました。この際にも基礎となったのが“材料システム”の概念でありました。プラスチック内に導入する気泡の生成・成長並びに制御は、素材の粘弾性挙動に大きく依存することから、材料の特性から始まり成形品に至る過程を系統的に捉えることでこのテーマの飛躍的な進展を図ることができたものです。この新素材の研究・開発は、現在いろいろなところで鋭意行われていますが、未だ実用化レベルまで達していないのが現状です。素材から最終製品に至る過程をより系統的に検討することで、今後さらなる進展がもたらされるものと思っています。

以上のように、私のこれまでの研究活動は、“材料システム”の概念に沿って行うことができたものと思っています。

私事、来春（平成24年3月）で60歳になるのを機に金沢工業大学を退職することにしました。紙面をお借りして、これまでご指導、ご鞭撻を賜りました材料システム研究所所員並びに関係各位に心から感謝の意を表します。そして、論文集“材料システム”が今後も途切ることなく継続されることを切に願っています。 (平成23年12月)

総目次

《第1巻～第29巻》

(昭和57年～平成23年)

第 1 卷 (昭和57年 6 月発行)

巻頭言

「材料システム」創刊にあたって	京藤 睦重	1
論文集「材料システム」について	宮野 靖	2

特別寄稿

材料システム研究所開設に寄せて	國尾 武	3
材料システム研究所の発展を祝して	藤井 太一	4
未来材料と材料システム	藤村 善雄	5
材料システム研究所のあり方と将来について	角倉 敏彦	6

解説

構造設計における統計的手法の応用について — 設計安全率と信頼性設計における 破損確率との整合問題を中心に —	中易 秀敏	7
---	-------	---

論文

面内剛性特性を基準とする複合材料積層板の材料設計	三木 光範	21
一方向CFRPの破断強さに及ぼすマトリックスの影響	金光 学 宮野 靖 國尾 武	31
粘弾性モデルを用いた熱硬化性樹脂はりの焼入れによる 残留応力発生機構の解明	新保 實 宮野 靖 國尾 武	39
エポキシ樹脂はりの焼入れによる熱応力の光粘弾性応力解析	杉森 勝 宮野 靖 國尾 武	45
両面焼入れされた熱硬化性樹脂はりに生じる残留応力の 光学的簡易測定法の実験的検討	宮野 靖 中村 省三 横野 中 國尾 武	51
材料システム研究所開設主旨		57
材料システム研究所構成員紹介		58

第 2 卷 (昭和58年 6 月発行)

卷頭言	材料システム第 2 巻の発行にあたって	宮野 靖	1
特別寄稿	粘弾性と材料システム	國尾 武	3
	Composites in Motion	藤井 太一	5
総説	ゴム系複合材の Material Design	藤本 邦彦	9
解説	二次元光粘弾性法について	宮野 靖 杉森 勝 國尾 武	21
展望	シンセシスとしてとらえる材料システム設計の一試案	中易 秀敏	35
論文	最小重量トラス構造形態の創成法	山崎 光悦 尾田 十八	49
	反応射出成形(R I M)における発泡過程のシミュレーション	都竹 進 横野 中 日良 康夫 後藤 昌生 宮野 靖	61
	C F R P 繊維直角方向の低サイクル疲労強度の温度依存性	金光 学 川本 芳久 宮野 靖 國尾 武	71
技術資料	サンドイッチ型複合材料はりの最適設計 — 設計解の挙動の分析と実用設計への試案 —	三木 光範	81
	反りを拘束して片側焼入れした熱硬化性樹脂帯板の残留応力に及ぼす 樹脂の粘弾性挙動	新保 實 宮野 靖	91
	硬質ポリウレタンの R I M 成形品の曲げ特性	飯田 誠 後藤 昌生 横野 中 宮野 靖	101
	材料システム第 3 巻以降の編集方針ならびに原稿種別の改訂について		109

第3巻 (昭和59年7月発行)

繊維系複合材料の材料設計特集

巻頭言

材料システム第3巻の発行にあたって	宮野 靖	1
繊維系複合材料の材料設計特集について	三木 光範	3

特別寄稿

特集号に寄せて	國尾 武	5
特集号に寄せて	藤井 太一	7

展望

これからの材料設計について思うこと	瀬口 靖幸	9
新世代の材料設計の展開	島村 昭治	11
FRPの2, 3の特性について	門谷 建蔵	17

解説

繊維強化複合材料における材料設計の現状と将来	藤井 太一	25
波浪衝撃荷重を受ける高速船舶構造の材料設計	竹鼻 三雄	35
機械構造の形状設計と材料設計問題における最適化の方法論について	尾田 十八	39
繊維複合材料の強度に対する最適設計	池上 皓三	51
ハイブリッド複合材料の材料設計	金原 勲	59
繊維強化複合材料の衝撃設計	宮入 裕夫	69
複合材構造要素の最適設計	平野 陽一	75
剛性を基準とする複合材料積層板の材料設計と最適化	三木 光範	83

工学論文

Designing with Composite Materials	Ippi Susuki Stephen W. Tsai	99
FW圧力容器の最適設計	植村 益次	107
繊維強化複合材料による前進翼の ダイバージェンス防止に関する一考察	小林 繁夫	121
線形化2次モーメント法を用いた繊維強化積層板の信頼性設計	前川善一郎	127
積層板の振動特性と最適化	中易 秀敏 福永 久雄	135
一方向CFRPのマトリックス樹脂の材料設計に関する一考察	平野 陽一 宮野 靖	143
	金光 学 國尾 武	

第4巻（昭和60年6月発行）

巻頭言	材料システム第4巻の発行にあたって……………	宮野 靖	1
寄稿	材料システム第4巻発行に寄せて……………	藤井 太一	3
	米国ピッツバーグ大学に滞在して……………	宮野 靖	5
解説	複合材料における微視強度論の発展……………	福田 博	13
展望	「材料システム」に関する周辺文献調査……………	中易 秀敏 杉森 勝	27
技術論文	確率有限要素法を用いた複合材料の最適信頼性設計……………	中山 明 中川 隆夫	35
	切欠きを有する繊維強化プラスチックの強度の変動に及ぼす 強化材の影響……………	五辻 精一 藤井 太一 前川善一郎	45
	冷却条件の相違による熱硬化性樹脂成形品の残留応力と変形……………	新保 實 宮野 靖 國尾 武	51
速報論文	曲げ-ねじれカップリングを考慮した複合材料積層板の材料設計……………	三木 光範 藤井 太一	61
	クロスプライ積層CFRPの曲げ破断強度の時間および温度依存性……………	金光 学 宮野 靖 國尾 武	67
	複合材料疲労試験データの総合処理管理システムの試作開発……………	中易 秀敏 上野 一也	73
書評……………			43 50

第5巻（昭和61年7月発行）

卷頭言			
材料システム第5巻の発行にあたって	宮野 靖	1	
寄稿			
材料システム第5巻発行に際して思うこと	國尾 武	3	
材料システム第5巻の発行に寄せて	藤井 太一	5	
展望			
複合材料の研究とその開発に対するコンピュータ 援用工学的アプローチ	福田 武人	7	
解説			
高分子材料のキャラクタリゼーション	小川 俊夫	17	
工学論文			
R-R I M成形品の衝撃特性とその解析	鈴木 恵	27	
FRPの強度に及ばず繊維の混入率および分布状態の影響	宗宮 詮 國尾 武	35	
エポキシ有孔帯板の急冷による熱応力の光粘弾性解析	杉森 勝 宮野 靖 國尾 武	43	
技術論文			
エポキシ樹脂平板の急冷による残留応力	新保 實 宮野 靖 C. E. Maneschy T. C. Woo	51	
速報論文			
2層アングルプライ積層板の変形特性	平野 陽一 飯野 明 井山 向史	59	
技術資料			
組合せ曲げ・ねじり衝撃荷重を受ける薄肉FRP 箱型はりの強度について	水川 清 藤井 太一 逢坂 勝彦 板見 和夫	65	
C/Aハイブリッド一方向強化FRP積層板の静的強さと積層構成	天城 滋夫 宮野 靖	69	
<hr/>			
総目次（昭和57年～昭和60年）			
材料システム研究所構成員紹介		77	
材料システム研究所論文目録		81	
材料システム研究所論文目録		87	

第 6 卷（昭和62年10月発行）

巻頭言

材料システム第 6 巻の発行にあたって	宮野 靖	1
粘弾性特集について	國尾 武	3

特別寄稿

材料システム第 6 巻の発行に寄せて	藤井 太一	5
--------------------------	-------	---

粘弾性特集

解説		
時間および温度に依存する粘弾性固体の力学的挙動		
— 粘弾性に関する基礎事項 —	國尾 武	7
粘弾性挙動と特性係数	隆 雅久	21
線形粘弾性固体の力学	國尾 武	49
プラスチックの熱粘弾性挙動と残留応力	三沢 章博	81
粘弾性固体におけるき裂問題の基本的取扱い	宮野 靖	81
粘弾性固体におけるき裂問題の基本的取扱い	新保 實	101
光粘弾性法による応力・ひずみ解析	三沢 章博	101
光粘弾性法による応力・ひずみ解析	國尾 武	117
熱可塑性高分子材料における損傷累積挙動	宮野 靖	117
熱可塑性高分子材料における損傷累積挙動	杉森 勝	139
熱可塑性高分子材料における損傷累積挙動	國尾 武	139
熱可塑性高分子材料における損傷累積挙動	隆 雅久	139

工学論文

熱弾性問題の新しい境界要素解析法	田中 正隆	157
	旭 広明	
繊維強化ゴムダイヤフラムの成形による		
繊維交角変化と弾性定数分布について	赤坂 隆	163
	加藤 満	
TiO ₂ の機械的性質に及ぼす粒径の影響	松尾陽太郎	169
	大沢 栄也	
	安田 公一	
	阿知波達雄	
	木村 脩七	
両振り衝撃ねじり荷重下における S C M435合金鋼の疲労強度について	能瀬 春雄	181
	坂本 勇	
	中山 英明	

技術論文

短冊形試験片を用いたガラスマット F R P の引張強さの統計的考察	福田 武人	189
	逢坂 勝彦	
	藤井 太一	
	早川 雄三	

寄稿

Pittsburgh Conference に出席して		
— 分析機器と化学計測技術の進歩 —	小川 俊夫	195
ミュンヘン工科大学に滞在して	中易 秀敏	199
フランス・ポアチエ大学に滞在して	宮野 靖	205

第7巻（昭和63年8月発行）

巻頭言			
材料システム第7巻の発行にあたって……………	宮野 靖		1
特別寄稿			
材料システム第7巻の発行に寄せて……………	國尾 武		3
くじらのひげと年産100万トンを目指すFRP……………	藤井 太一		5
展望			
接触応力分布測定法の現状と問題点……………	尾田 十八		7
Smalltalkによる構造設計の試み……………	三木 光範		17
	杉山 吉彦		
解説			
複合材料のAEの周波数解析			
— 疲労破壊への応用 —……………	鈴木 惠		23
二次元形状を有する熱硬化性樹脂成形品の			
残留応力の光学的簡易測定法……………	杉森 勝		31
	中村 省三		
	宮野 靖		
	國尾 武		
工学論文			
C/Aハイブリッド一方向FRP積層板の衝撃挙動と積層構成……………	天城 滋夫		43
	中田 政之		
	新保 實		
	宮野 靖		
SUS 304/SUS 304同種摩擦圧接継手の			
疲労き裂進展特性について……………	中山 英明		53
	大植 義夫		
	兎沢 健三		
	沖田 耕三		
	有年 雅敏		
技術論文			
CFRP積層板の層間靱性とその評価法……………	西原 正浩		59
複合材料の疲労における損失正接……………	日和 千秋		67
	中川 隆夫		
	上田 俊一		
SiC粒子分散強化金属複合材料……………	古田 敏康		73
	牛込 進		
	山本 君二		
	副田 和美		
寄稿			
スウェーデンにおける複合材料研究の現状……………	北条 正樹		81
共同研究による技術教育の活性化に関するケーススタディ			
— 主として材料システムに関連して —……………	鈴木 秀人		85
	角井 宏		

第 8 卷 (平成元年 8 月発行)

巻頭言			
材料システム第 8 巻の発行にあたって	宮野 靖	1	
特別寄稿			
知勇兼備の材料	國尾 武	3	
寄稿			
藤井太一先生の思い出	中易 秀敏	7	
展望			
日本における実験応力解析の現況について	林 卓夫	9	
光塑性に関する最近の趨勢	高橋 賞 島本 聡	23	
繊維強化複合材料積層板の確率材料設計法の問題点	中易 秀敏	41	
ニューラル・ネット適用による構造システムの離散的最適設計	岸 光男	51	
制振鋼板の現状と展望	日高 靖和 小川 俊夫 丸山 学	59	
解説			
複合発泡構造体の力学特性の最適化について	飯田 誠 宮野 靖 後藤 昌生	69	
ポリプロピレン複合材料	福井 修	77	
先進複合材料における下限界近傍モード I 層間はく離 疲労き裂伝ば挙動の計算機制御自動試験法	北條 正樹 田中 啓介 Claes-Göran Gustafson 剣持 潔	89	
論文			
面内荷重を受ける対象積層板の強度最適化	薄 一平	101	
ぜい性材料からなるはりや板の衝撃曲げ挙動とその条件	木田 外明	109	
FRP(SMC)の疲労破壊機構について	宗宮 詮 國尾 武	115	
寄稿			
SMD会議参加報告ならびにバージニア工科大学滞在記	三木 光範	121	

第9巻（平成2年8月発行）

巻頭言			
材料システム第9巻の発行にあたって	宮野 靖		1
特別寄稿			
ボーダーレス時代と研究協力	國尾 武		3
焼入冷却剤	田村 今男		5
展望			
光塑性に関する最近の趨勢(Ⅱ)	高橋 賞 島本 聡		7
解説			
カーボン/アラミドハイブリッドFRP 積層板の機械的性質	中田 政之 宮野 靖 鈴木 惠 服部 陽一		21
論文			
面内強度および面内剛性を基準とする複合材料積層板の最適設計	三木 光範 杉山 吉彦 長井 謙宏		41
減衰比に着目する構造物の形状決定問題	多田 幸生 松本 隆一 下村 徹徳		51
繊維強化複合材料積層板の有効破損パスの選択 および近似破損確率評価法による一考察	中易 秀敏 前川善一郎		59
応力凍結法の光粘弾性理論に基づいた一考察	杉森 勝 宮野 靖 國尾 武		69
ガラス短繊維強化ポリエチレンテレフタレートの 微視的損傷機構における繊維体積含有率の効果	高橋 清 崔 洛三		75
合わせガラスの衝撃実験と貫通式	木田 外明 鈴木 惠 柿島 浩之 伊藤 和英 尾田 十八		83
金属材料の繰返し荷重下でのすべり帯方位分布に関する 確率論的一考察	酒井 達雄 太田 努		89
耐熱型プラスチック光ファイバの特性	阿部 富也 浅野 秀樹 田上 正敏 浅井 孝康 松本 正幸 竹谷 則明 丹野 清吉		97
資料			
粒子充てんエポキシ樹脂の残留曲げ変形	小瀬 良治 鵜飼 淳行 鈴木 惠		105
寄稿			
A STMを中心とした複合材料の 層間破壊靱性試験法規格化の動向	北篠 正樹 影山 和郎		113

第10巻（平成3年9月発行）

巻頭言		
材料システム第10巻の発行によせて……………	佐藤 豪	1
材料システム第10巻の発行にあたって……………	宮野 靖	3
特別寄稿		
ポリマーの力学性質 — 時間・温度依存性を持つ力学物性 —……………	國尾 武	5
自動車とプラスチック……………	田村 今男	7
展望		
アルミニウムとTRIP鋼……………	田村 今男	9
繊維強化型プラスチック系複合材料の材料特性と製品設計……………	宮入 裕夫	11
光塑性に関する最近の趨勢(Ⅲ)……………	高橋 賞 万 向	21
解説		
金属材料の破壊と靱性……………	寺崎富久長 高野 則之	43
論文		
繊維強化複合材料積層板の確率材料設計法と最適設計問題……………	中易 秀敏	53
複合材料データベース支援システムにおける知的処理の試み……………	北條 正樹 吉岡松太郎 福田 博 劔持 潔 篠ヶ谷達司 白坂 芳久	63
樹脂系三次元強化複合材料の熱機械特性……………	八田 博志 竹井尋賀子 森 顕伸	71
表面—界面切削法(SAICAS法)による材料強度の深さ方向解析……………	西山 逸雄 木嶋 芳雄 黒木 健	81
先進FRPの機械的性質におけるマトリックスの役割……………	宮野 靖 笠森 正人 服部 陽一	87
押出成形ポリエチレン板の形成過程で生ずる残留応力……………	新保 實 名田 拓嗣 宮野 靖 國尾 武	97
資料		
オブジェクト指向によるトラス構造の解析と最適化の概念……………	三木 光範	105
寄稿		
スウェーデンの工科大学訪問記……………	杉山 吉彦	121
<hr/>		
総目次（昭和57年～平成2年）……………		125
材料システム研究所構成員紹介……………		137
材料システム研究所論文目録……………		143

第11巻（平成4年9月発行）

巻頭言			
材料システム第11巻によせて……………	宮野 靖	1	
特別寄稿			
技術のシステム化とコンピュータ……………	國尾 武	3	
展望			
先進複合材料における用途開発の活性化……………	村山 邦彦	5	
解説			
海洋構造物について — 材料関係の問題点を中心として —……………	服部 陽一	13	
鉄および低強度鋼の水素脆性……………	高野 則之 寺崎富久長	19	
論文			
切欠きをもつ硬質プラスチックおよびFRPの破壊の条件……………	百武 秀	33	
CF/エポキシ方向積層板の層間はく離抵抗と じん性のマイクロメカニズム……………	轟 章 小林 英男	43	
変動応力下におけるSMCの疲労破壊機構……………	宗宮 詮 國尾 武	51	
炭化チタン—グラファイト系複合セラミックスの 微細構造と機械的特性……………	小野 透 福田 応夫 遠藤 英宏 植木 正憲	57	
曲げたわみ計測による対称積層板の材料特性同定……………	福永 久雄 関根 英樹	63	
コーステックス法による三次元き裂の 応力拡大係数の解析に関する研究……………	呉 大方 高橋 賞	71	
2本の丸棒の軸衝突に関する研究……………	木田 外明 鈴木 恵	81	
寄稿			
京都大学工学部附属メゾ材料研究センター……………	駒井謙治郎	87	
高分子材料表面の微細形態を追って……………	田川 高司	91	
マサチューセッツ工科大学に滞在して……………	新保 實	97	
Ayers Rock……………	田村 今男	103	

第12巻（平成5年11月発行）

巻頭言			
	材料システム第12巻の発行にあたって	宮野 靖	1
特別寄稿			
	仮定について — 落とし穴と有用性 —	國尾 武	3
	In-Situ Visualization of Nanometer Sized Corrosion Damage by STM/AFM	Kenjiro Komai Kohji Minoshima Masahiko Itoh	5
解説			
	Ni および Ni 基合金の水素脆性	高野 則之 寺崎富久長	15
論文			
	コンピュータ・シミュレーションによる短繊維強化金属基 複合材料の巨視的非線形応力 — ひずみ挙動の予測	関根 英樹 鈴木 寛 福永 久雄 緒方 政彦	29
	インターレイヤで高靱化された層間を有するCFRPの層間破壊特性	影山 和郎 金原 勲	39
	SMCの破壊靱性と表面損傷との関係	宗宮 詮	49
	セラミックス系複合材料の高温熱膨張係数	八田 博志 向後 保雄 伊藤 智紀 澤田 豊	55
	Data Analysis by a Data System on High-Tc Superconducting Materials	Hailong Chen Shuichi Iwata	63
	複屈折縞の比較による粘弾性体のハイブリッド応力解析法	松本 重男 杉森 勝 宮野 靖 國尾 武	71
	エポキシ樹脂の長期クリープ変形の予測	笠森 正人 宮野 靖	77
寄稿			
	「ヨーロッパ複合材料会議/複合材料の試験法と標準化」 に参加して	北條 正樹	83

第13巻 (平成6年11月発行)

巻頭言

材料システム第13巻の発行にあたって	宮野 靖	1
プラスチックの残留応力特集について	新保 實	3

特別寄稿

若い研究者の活躍を期待して — 研究者の心構えについて —	國尾 武	5
-------------------------------	------	---

プラスチックの残留応力特集

解説		
エポキシ樹脂固化過程での内部応力と残留応力	池上 皓三	7
エポキシ樹脂における残留応力の発生と硬化物の化学構造の影響	越智 光一	17
熱枯弾性挙動による熱硬化性樹脂の残留応力	宮野 靖 新保 實	23
射出成形における残留応力の予測	多田 和美	31
物性値分布を考慮した残留応力の予測と射出成形シミュレーション	石島 守 山部 昌 宮野 靖	37
フーリエ変換を用いた応力・ひずみ分布測定	森本 吉春	43
粘弾性体に生ずる応力およびひずみの光学的簡易測定法	杉森 勝 松本 重男 宮野 靖 國尾 武	51
光ディスク基板の射出成形における残留複屈折	吉井 正樹 蔵本 浩樹	61
論文		
熱可塑性樹脂の成形過程で生ずる残留応力	新保 實 宮野 靖	71
銅張積層板のはんだ付け工程で生じる反り変形の予測	池田 順一 菊川 幸 牧 春彦	79
微小ドット格子法によるひずみ測定	島本 聡 梅崎 栄作	87
プラスチックの熱誘起変形 — その現象と応用 —	岡井 紀彦 町田 輝史	95

論文

滑剤を添加したアルミナ粉末のサイクリックCIP成形	松尾陽太郎 北村 正 西村 聡之 安田 公一 林 剛	105
射出成形機加熱筒内溶融樹脂の画像解析	多田 幸生 岩崎有希子	111
多孔質複合材料の熱膨張挙動に及ぼす湿度の効果	八田 博志 竹井多賀子 吉原 芳男 澤田 豊	117
BMC材料のクリープ挙動の統計的取扱い	宗宮 詮 木村 宏	127
多層人工二相ステンレス鋼の水素透過と水素脆性	高野 則之 村上 泰之 宮野 靖 寺崎富久長	133

第14巻（平成7年11月発行）

巻頭言			
材料システム第14巻の発行にあたって	宮野 靖		1
特別寄稿			
藤村善雄先生の思い出	國尾 武		3
展望			
テキスタイルコンポジットの可能性	村山 邦彦		5
C/C複合材料の高温熱物性	八田 博志		15
	向後 保雄		
	吉原 芳男		
	澤田 豊		
	高橋 清久		
	細野 和也		
	堂園 利徳		
粘弾性特性による複合材料の損傷評価と界面評価	日和 千秋		25
	猪飼 靖		
解説			
水素脆性機構への原子論的アプローチ	高野 則之		35
	吉川 明静		
	寺崎 富久長		
論文			
画像解析法を用いた高分子材料破壊面の特徴抽出	飯塚 淳史		43
	米元 聡志		
	小川 和雄		
	隆 雅久		
ニューラルネットワークを用いた多成分系材料の材料設計法	尾田 十八		51
	岡田 裕康		
炭素繊維ガラス繊維補強プラスチックにおける自己診断機構の統計的解釈	岸本 昭		57
	柳田 博明		
小型引張り試験片によるC/C複合材のモードI破壊じん性 — R曲線挙動と破壊機構の検討 —	川田 宏之		65
	山本 嘉秀		
	中尾 仁		
	岡部 利明		
CFRPクロスプライ積層板における熱残留応力の実験的評価	武田 展雄		73
	新妻 秀規		
	荻原 慎二		
	小林 昭		
熱可塑性プラスチックの冷間鍛造に及ぼす圧延加工の効果	松岡 信一		79
寄稿			
国際会議における研究発表	國尾 武		85
米国スタンフォード大学に滞在して	宮野 靖		87
First International Conference on Mechanics of Time Dependent Materials に参加して	矢ヶ崎隆義		91

第15巻（平成8年11月発行）

巻頭言

材料システム第15巻の発行にあたって…………… 宮野 靖 1

特別寄稿

近ごろ思い悩んでいること…………… 國尾 武 3

解説

システム信頼性設計における標準化空間への設計点写像…………… 中西 真悟 5
中易 秀敏

論文

環境強度問題に対する知識工学手法の応用…………… 駒井謙治郎 23
箕島 弘二

窒化硼素－銅系複合材料…………… Milan Hubacek 39
植木 正憲
佐藤 忠夫

CFRP積層板における層間せん断強度の積層角依存性…………… 武田 展雄 43
谷村 寛
萩原 慎二
小林 昭

一方向FRPの面内混合モード破壊じん性評価
— き裂の進展を考慮した破壊シミュレーション —…………… 川田 宏之 49
丸尾 和弘
沼田 浩明

汎用FEMプログラムを利用した均質化法による
複合材料の有効材料特性の解析…………… 小石 正隆 57
加部 和幸
白鳥 正樹

回転接触負荷を受ける矩形平板の光粘弾性応力解析…………… 後藤仁一郎 65
綾目 大輔
三澤 章博
隆 雅久

接合部に樹脂を用いたテーパ構造FRP継手の引張特性に関する研究… 中田 政之 73
宮野 靖
門谷 建藏
熱可塑性プラスチックの冷間深絞り加工に及ぼす圧延の効果…………… 松岡 信一 81
芝原 正樹

液体包装袋に用いるラミネートフィルムのヒートシール部の
補強効果について…………… 二瀬 克規 87
島本 聡
高橋 賞
青木 博之
鎌田 幸彦

射出成形品の残留応力に及ぼす成形条件の影響…………… 新保 實 93
石島 守
山部 昌
宮野 靖

寄稿

英国規格BS5324に関する疑問点…………… 加瀬 滋男 103

第16巻（平成9年11月発行）

巻頭言

材料システム第16巻の発行にあたって	宮野 靖	1
「複合材料の将来」の特集について	金原 勲	3

特別寄稿

高分子系複合材料のマトリックスについて — とくにその時間・温度依存性 —	國尾 武	5
--	------	---

特集 複合材料の将来

寄稿		
「複合材料の将来」特集号に寄せて	野村 勲	7
展望		
クォ・ヴァデス・コンポジット — 複合材料はどこに行くのか —	森田 幹郎	9
複合材料・21世紀へのトレンドを探る	上田 市三	13
スマート化を目指す複合材料の多機能化とデザインの融合	金原 勲	27
材料設計と複合化技術 — 将来の用途展開を考えて —	宮入 裕夫	35
ハード・コンポジットからソフト・コンポジットへ	前川善一郎	45
21世紀に向けての複合材料の展開 — メゾメカニクスとメゾ構造制御の可能性 —	北條 正樹 落合庄治郎	55
複合材料のマクロメカニクス — 損傷許容設計をめざして —	武田 展雄	63
特性変換の視点から見た複合材料	影山 和郎	73
環境調和性スマート複合材料の研究開発	劔持 潔	79
PAN系炭素繊維の展望	泉妻 秀一	87
ピッチ系炭素繊維を用いた樹脂系複合材料の現状と将来	毛利三知宏	95
重電機用複合材料への期待	天城 滋夫	105
材料システムと複合材料の寿命推定	宮野 靖 中田 政之	109

論文

計算機シミュレーションによる2相金属材料中の水素透過挙動	高野 則之 吉川 明静 寺崎富久長	115
対称積層板の剛性特性と最適化	佐藤 正善 福永 久雄 関根 英樹	121
層間高靱化CFRP積層板のトランスバースクラック 近傍の微視的変形メカニズム	荻原 慎二 鈴木 信彦 武田 展雄 小林 昭	135
光ファイバセンサによるCFRPの歪測定	津田 浩 池口 貴信 高橋 淳 劔持 潔	143
散乱光弾性しま画像における雑音軽減法	金尾 正康 隆 雅久	149
有限要素法解析による伸縮管継手のシール性の評価	福地 雄介 沖田 耕三	157

第17巻 (平成10年12月発行)

巻頭言			
材料システム第17巻の発刊にあたって	宮野 靖	1	
特別寄稿			
我が師・我が友			
— 私の研究生活をご支援下さった方々に感謝の意を込めて —	國尾 武	3	
解説			
金属薄板の超音波接合	松岡 信一	5	
論文			
WWWを利用した高分子系複合材料のLCA			
— 強度による材料選択および素材の環境負荷感度解析 —	永井 英幹 高橋 淳 劔持 潔 松井 醇一 酒井 信介	13	
PMCの繊維 - マトリクス界面におけるはく離き裂の破壊力学的評価	川田 宏之 沼田 浩明 川崎 衛	21	
層間高靱性化CFRP積層板の90°層クラック発生に及ぼす熱サイクルの影響	荻原 慎二 松尾 圭悟 武田 展雄 小林 昭	29	
ポリカーボネートの降伏とクリープ挙動	百武 秀	39	
2次元短繊維強化複合材の構造画像解析に関する確率論的研究	鈴木 寛	45	
レーザーラマン分光およびFT赤外分光によりモニターしたKevlar/UPモデルコンポジット界面の水環境劣化過程	川越 誠 竹島 誠 水野 渡 野宮 恵 邱 建輝 森田 幹郎 北野 博巳	55	
高分子系複合材料の温度環境下における疲労寿命の推定	宮野 靖 中田 政之 Michael K.M ^c MURRAY 牟岐 鹿樓	63	
宇宙インフレーターブルチューブ用発泡材料の圧縮弾性率および強度	宇田川 敦 八田 博志 樋口 健 横田 力男 杉林 俊雄	73	
電氣的応答を用いた α -SiCセラミックスのインデンテーション破壊および曲げ破壊のモニタリング	中道 晃洋 岸本 昭	83	
膜接合材料の疲労き裂伝ば挙動に及ぼす樹脂接着層の影響	鳥居太始之 松葉 朗 渡邊 智	89	
白色楕円偏光を用いた新しい縞画像解析法と光粘弾性解析への適用	米山 聡 隆 雅久	97	
資料			
エラストマーの開口変位に関する基礎研究	塚越 誠二 高橋 賞	105	
寄稿			
55年の疲労寿命の研究を顧みて	中村 宏	109	

第18巻（平成11年12月発行）

巻頭言			
材料システム第18巻の発行にあたって	宮野 靖	1	
特別寄稿			
日本語文雑感	國尾 武	3	
解説			
マイクロセルラープラスチックの現状と展開	新保 實	5	
論文			
CFRPアングルプライ積層板のマトリックスクラック発生	荻原 慎二 青木 涉 小林 訓史 武田 展雄 小林 昭	11	
ENF試験片を用いたFRP積層板のモードII層間はく離 疲労き裂伝ば試験法	松田 聡 村上 惇 北條 正樹 落合庄治郎	19	
一方向繊維強化複合材料のDCB試験片におけるき裂先端近傍の 応力場に及ぼす繊維架橋効果に関する解析手法の提案	多田 直哉 大谷 隆一	31	
PCクラスタ上での並列処理によるFRP破壊シミュレーションの 高速化	島村 佳伸 山村 庸介 轟 章 小林 英男 中村 春夫	37	
開孔を有するCFRP積層板の非線形挙動解析と実験	邊 吾一 森 伸行 早崎 宏美	45	
有機および無機繊維強化ポリプロピレンの破壊・衝撃特性	西谷 要介 関口 勇 長塚 惟宏 北野 武	51	
C/C複合材料の接着技術	八田 博志 坂東 貴政 向後 保雄 後藤 健 福田 博	67	
Determination of Time-Temperature Dependent Tensile Strength of Unidirectional CFRP by Strand Test	Masayuki Nakada Yasushi Miyano	75	
熱硬化性樹脂の硬化過程において生ずる残留応力評価	宇津野五大 米山 聡 隆 雅久	83	
プラスチック光ファイバを用いたライトガイド	阿部 富也 平野 光樹 早川 良和	89	
資料			
転がり接触負荷を受ける粘弾性体の応力・ひずみ解析	後藤仁一郎 白鳥 正樹 隆 雅久	97	
寄稿			
材料開発雑感	寺崎富久長	105	

第19巻（平成12年12月発行）

巻頭言		
材料システム第19巻の発行にあたって	宮野 靖	1
特別寄稿		
弾性・粘弾性の対応原理について	國尾 武	3
論文		
構造材料の環境強度寿命・余寿命予測	駒井謙治郎	7
円孔を有するCFRP積層板の損傷進展及びひずみ集中に対する積層構成の影響	小林 訓史 萩原 慎二 武田 展雄	15
熱サイクルを受けたCFRP積層板の微視的損傷進展	萩原 慎二 武藤 哲彦 武田 展雄 小林 昭	23
繊維，樹脂，界面を考慮した一方向強化複合材料の強度予測	和田 敦博 福田 博	29
AE法による直接射出成形したFRPAの破壊機構と残存強度	鈴木 惠 木田 外明 宮野 靖 相川 和人 森脇 毅	37
有機繊維/ガラス繊維ハイブリッド複合系の熔融粘弾性	種子島貴裕 北野 武	47
カーボンブラック充填ポリプロピレンの力学特性と導電性	永田 謙二 上田 益宏 久村 崇之 高橋 清久	57
黄銅および炭素鋼の疲労き裂発生と初期進展挙動に関する研究	酒井 達雄 真木 聡 大屋 聖 久郷 康行	63
冷延鋼板の角筒深絞り成形に関する研究	松岡 信一 坂田 裕子	71
資料		
技術伝承ソフトウェア開発 —「表面改質ノウハウ支援システム」のデータベース構築—	崎野 純子 鈴木 秀人	77
寄稿		
工学雑感	寺崎 富久長	85
材料研究における縦断的研究開発と横断的研究開発	大谷 隆一	91
材料と感性	田川 高司	99
Timoshenko と Timoshenko Medal	牟岐 鹿樓	101

第20巻（平成14年2月発行）

巻頭言

材料システム第20巻の発行によせて	石川 憲一	1
材料システム第20巻の発行にあたって	宮野 靖	3

特別寄稿

飲水思源	國尾 武	5
------------	------	---

解説

社会の変化と繊維強化複合材料の技術開発	松井 醇一	7
デコレイティブ・コンポジット		
— 繊維産業活性化に向けての一提案 —	前川善一郎	19
高機能を目指す材料開発 — 複合材料と知能材料 —	宮入 裕夫	23
我が国におけるスマート複合材料の R&D の現況	福田 武人	29
知的な人工物における知的性質の定義, 必要性および目的	三木 光範	37
工学的設計における総合的最適化の展開	中易 秀敏	43
	中川 雅央	
複合材料構造の力学特性および損傷評価に関するモデリング	金原 勲	65
プラスチック系複合材料およびその構造物の耐久性評価	宮野 靖	75
	中田 政之	
	関根 尚之	
マイクロセルラープラスチックの成形技術の現状	新保 實	87

論文

Comparison of Various Progressive Failure Criteria	Akira Kuraishi	95
	Stephen W. Tsai	
炭素量の異なる Cr-Mo 鋼の YAG レーザ焼入れによる硬化組織	中崎 一之	105
	井上 達雄	
異方性複合材積層板上に作用する点衝撃荷重の荷重位置		
・荷重履歴の簡便同定方法	小野崎 徹	115
	関根 英樹	
微視的損傷を有する複合材料積層板のせん断弾性特性の評価	小林 訓史	125
	川本 浩延	
	若山 修一	
非対称 CFRP 積層板の吸湿における変形挙動	高戸谷 健	131
	James C. Seferis	

資料

FRP 劣化事例 1 硫酸タンク	藤井 善通	137
	溝口真知子	
	濱田 泰以	

寄稿

The Viscoelastic Theory of Materials Behavior		
and Its Applications	Richard M. Christensen	143
工学の恒常的な発展と次世代の航空機産業を支える技術者の育成	菊川 廣繁	147

総目次（昭和57年～平成12年）

邦文		153
英文		175

第21巻（平成15年2月発行）

巻頭言			
材料システム第21巻の発行にあたって	宮野 靖		1
特別寄稿			
物覚えと物忘れ	國尾 武		3
論文			
熱サイクル負荷を受けた CFRP 積層板のマトリックスクラック挙動	荻原 慎二 石黒 陽基 澤 芳昭 小林 昭		5
積層複合材を伝播する板波特性とその層間はく離検出への応用	津田 浩 具 滋滸 夏木 俊明 渋谷 祐介		15
トランスバースクラックを有する FRP 積層板のクリープ曲線に及ぼす緩和弾性率の効果	黄木 景二		21
炭素繊維織布複合材料の損傷メカニズム解明のための損傷観察とシミュレーション	山口 晃司 金原 勲		27
AE 法とデバイダ法による疲労荷重を受けて損傷した複合材料のフラクタル次元の比較	芹沢 昭仁 高野 則之 木田 外明 鈴木 惠博 中西 博 宮野 靖		41
柔軟性界面相を有する平織複合材料の各種力学的特性	小林 訓史 荻原 慎二 仲井 朝美 濱田 泰以		49
カーボンブラック充填 PE 及び PP の電気抵抗率に及ぼす無水マレイン酸変性の影響	永田 謙二 高橋 清久 峠 直樹 稲葉 光治 鈴木 直子		55
熱粘弾性モデルを用いた硬化収縮による残留応力の発生機構の解明	新保 實 宮野 靖		63
MCPの気泡径および気泡密度に及ぼす発泡温度の影響	川島 秀隆 新保 實		69
資料			
径10m の宇宙反射鏡とインフレータブル支持構造体の地上展開実験	久保村健二 里谷 知則 松葉 恭尚 賀谷 信幸 福岡 野歩 角田 博明		77
寄稿			
スポーツ用具研究の回想	棚橋 良次		85
ドイツ・カイザースラウテルン大学複合材料研究所に滞在して	中田 政之		91

第22巻（平成16年1月発行）

卷頭言			
材料システム第22巻の発行にあたって	宮野 靖		1
特別寄稿			
Professor Max L. Williams のこと	國尾 武		3
解説			
歯科用光硬化型接着材評価とその特性	宮入 裕夫		5
複合材料の耐久性加速試験方法	中田 政之 関根 尚之 宮野 靖		13
論文			
先端荷重を受けるアーム状3次元可変形状トラスの 剛性最適形態の探索	関根 英樹 新館 恭嗣 柳田 英輝		21
カーボン/ビスマレイミド積層板の応力-ひずみ関係の非線形挙動	荻原 慎二 金井 俊樹 津田 浩		31
エポキシ樹脂/PES/NBR 3成分系ブレンドの構造と物性	西谷 要介 関口 勇 堀内 伸 北野 武		39
酸環境下 GFRP の破壊靱性に及ぼす界面強度の影響	日和 千秋 児玉 淳 中井 善一 藤井 善通		55
コンバージョン法による C/C 複合材料表面における SiC 膜形成	八田 博志 丸山 大介 向後 保雄		59
カーボンブラック充填ポリプロピレン/ポリエチレン ポリマーブレンドの電気抵抗率に及ぼす表面処理の影響	永田 謙二 尹 昊圭 稲葉 光治 高橋 清久		67
アルミニウム陽極酸化皮膜の水熱処理による耐アルカリ性の向上	石黒 智明 松岡 信一		73
常圧溶解法による FRP リサイクル	柴田 勝司		79
資料			
FRP 劣化事例 II — 12年間使用した GFRP 煙突の腐食状況 —	藤井 善通 溝口真知子 濱田 泰以		87

第23巻（平成17年 2 月発行）

巻頭言

材料システム第23巻の発行にあたって	宮野 靖	1
「統合工学」小特集号について	金原 勲	3

小特集 統合工学

随想

「統合工学」小特集号に寄せて	堀 幸夫	7
----------------------	------	---

寄稿

統合工学の創出にむけて	竹井 義法	9
統合工学に思う	山部 昌	11
統合工学的発想について	菊川 廣繁	15
統合工学について思うこと		
－複合材料の耐久性評価の視点から－	宮野 靖	19
複合材料構造の研究		
－統合工学を意識した取り組み－	金原 勲	25
福祉・介護ロボットの開発		
－統合工学創生のためのケーススタディー	南戸 秀仁	31
	竹井 義法	
機械加工分野から見た統合工学	新谷 一博	37

論文

一方向強化 CFRP 積層板のオフアクシス負荷下における 非線形変形及びクリープ変形挙動	荻原 慎二 森脇 晋一郎	41
CFRP 積層板の微視的損傷挙動に及ぼす繊維表面形態の影響	小林 訓史	49
	山本 勝	
	若山 修一	
プラスチック製止血帯を用いた軟器官の変形シミュレーション	黄木 景二	55
	高橋 学	
	渡部 祐司	
	岡部 永年	
	中西 高英	
C/C 複合材料の二軸応力場における破壊挙動	八田 博志	61
	渡辺 充洋	
	小山 昌志	
	塩田 一路	
高 Cr フェライト系耐熱鋼のクリープ特性と組織に及ぼす 磁場中熱処理の影響	大久保 弘	69
	宗木 政一	
	五十嵐正晃	
	阿部富士雄	

資料

FRP 劣化事例Ⅲ －20年使用した GFRP タンクの腐食状況－	藤井 善通	77
	溝口真知子	
	濱田 泰以	

第24巻（平成18年 2 月発行）

巻頭言			
材料システム第24巻の発行にあたって	宮野 靖	1	
特別寄稿			
第 5 回 MTDM 国際会議における國尾シンポジウム	隆 雅久	3	
論文			
光ファイバセンサによる CFRP 複合材料の衝撃損傷および 変形挙動の同時検知	明松 圭昭 影山 和郎 村山 英晶 大沢 勇 鶴沢 潔 金井 誠 秋山 暁	5	
FBG センサを用いた高速ひずみ計測	津田 浩	11	
Cruciform 試験片を用いた複合材料界面強度評価に関する研究	荻原 慎二 梅崎 岳	17	
Environmental Effects on Damage Tolerance Performance of CFRP Laminate for Marine Use	Hiroshi Saito Isao Kimpara	27	
Accelerated Testing for Long-Term Durability of Innovative CFRP Laminates for Marine Use	Yasushi Miyano Masayuki Nakada	39	
VARTM 法による多軸ニットファブリック CFRP 積層板の力学的特性	斉藤 博嗣 金原 勲	47	
特殊プラスチックの実用的マテリアルリサイクルにおけるリサイクル プラスチックの品質安定性に関する研究	宮永 俊明 関根 英樹	57	
フェニルシルセスキオサン系有機無機ハイブリッドから作製した 炭素繊維強化シリコンオキシカーバイド複合材料の開発	小林 訓史 福島 学 渡辺 宏幸 田邊 靖博 安田 榮一	67	
PVA/クレイナノコンポジットフィルムの力学特性に及ぼす 有機修飾剤の影響	永田 謙二 中島 正伸 川合 俊佑 青山 晃 高橋 清久	73	

第25巻（平成19年 2 月発行）

巻頭言

材料システム第25巻の発行にあたって 宮野 靖 1

解説

プラスチック発泡体の気泡数に関する時間-温度換算則の適用 中野 晋 3
 新保 實

論文

C/C 複合材料の高温強度とクリープ挙動 後藤 健 11

八田 博志
 塩田 一路
 町田 輝史

CF/PES および CFRP/PES の電気抵抗の温度依存性 黄木 景二 19

井上 宏樹
 白石 哲郎
 藤村 雅博

FW-ハイブリッド FRP 複合パイプの衝撃後内圧強度に及ぼす

母材樹脂の影響 小林 訓史 29

荻原 慎二
 岡田 明久
 小林 訓史

天然繊維を用いた生分解性複合材料の力学的特性評価 荻原 慎二 35

廃棄セリシンのフィルム化及び引張特性と生分解性 永田 謙二 43

高橋 清久
 小関 裕貴
 川村 真弓
 尹 興洙

長繊維強化および短繊維強化 3 成分ブレンド系（エポキシ/PES/NBR）
 の成形と物性 西谷 要介 53

関口 勇
 堀内 伸武
 北野 武

緩和スペクトルの平滑性を考慮した貯蔵・損失モジュラスの
 プロローニ級数近似法 藤川 正毅 65

三上 貴央
 隆 雅久
 三原 康子
 小林 卓也

小特集

船舶用複合材料の長期耐久性と損傷許容性

資料

Long-Term Durability and Damage Tolerance of Innovative Marine Composites (NICOP)
 Part I : Accelerated Testing for Long-Term Durability of
 Various FRP Laminates for Marine Use Yasushi Miyano 71
 Masayuki Nakada

Long-Term Durability and Damage Tolerance of Innovative Marine Composites (NICOP)
 Part II : Post-Impact Fatigue Behavior of Woven and Knitted Fabric
 CFRP Laminates for Marine Use Isao Kimpara 83
 Hiroshi Saito

MSRL-ONR Data Base (Version 1.0) Materials System Research Laboratory, K I T 95

第26巻（平成20年3月発行）

巻頭言

材料システム第26巻の発行にあたって 中田 政之 1

特別寄稿

高信頼ものづくり専攻について 宮野 靖 3

解説

繊維強化プラスチックの長期寸法安定性 荒尾与史彦 5
 小柳 潤
 川田 宏之
 八田 博志

論文

物理的発泡剤を用いたシリコーンゴムの発泡成形プロセスに関する研究
 新保 實 17
 中野 晋
 三沢 章博
 福村 功昌

サブマイクロメートルサイズの細孔を有する多孔質アルミナ支持体の
 作製及び微細構造評価 福島 学 23
 吉澤 友一

二段焼結による ZrO_2 - $MgAl_2O_4$ 助剤系窒化ケイ素セラミックスの
 作製法と機械的特性 日向 秀樹 29
 近藤 直樹
 北 英紀
 岡野 宏昭
 菅井 淳
 土田 二郎

2次元短繊維強化複合材を表面から観察したときの
 繊維重なり部分の予測式 鈴木 寛 35

梁モデルを用いた織物複合材料の力学的特性の解析 吉田啓史郎 41
 青木 隆平

CFRP 積層板のモードⅢ層間破壊靱性評価 荻原 慎二 49
 松田 勝博

VARTM 法により一体成形された継手構造を有する CFRP 積層板の
 継手強度評価 斉藤 博嗣 55
 金原 勲

一方向竹繊維強化 PBS 複合材料の力学的特性評価 荻原 慎二 61
 岡田 明久
 小林 訓史

リン酸カルシウム/ポリ乳酸複合材料の力学的特性に及ぼす
 リン酸緩衝液浸漬の影響 小林 訓史 67
 坂本 和紀

編物構造複合材料の再生医療用スカフォールドへの適用 (Ⅰ)
 — 生分解性樹脂による編物構造複合材料の開発 — 田中 信生 79
 日和 千秋
 井元 俊之
 安達 泰治
 北條 正樹
 馬場 俊輔

編物構造複合材料の再生医療用スカフォールドへの適用 (Ⅱ)
 — マウス骨芽細胞様細胞による骨組織形成過程 — 日和 千秋 89
 沖添 晃政
 中井 善一
 田中 信生
 安達 泰治
 北條 正樹
 馬場 俊輔

第27巻（平成21年 3 月発行）

巻頭言

材料システム第27巻の発行にあたって	中田 政之	1
計報		3
特別寄稿		
國尾 武先生の思い出	宮野 靖	5

小特集 高信頼ものづくり専攻

寄稿		
「高信頼ものづくり専攻」における複合材料領域の教育	金原 勲 宮野 靖	7
論文		
FRP 船サンドイッチ構造の接着接合継手の強度に関する研究	大倉 雄一	13
フィルムの耐折性に及ぼすフィラーの充填量と粒径の影響	品田 詠逸	19
プラズマディスプレイパネル用電磁波遮蔽フィルムのための樹脂設計	藤枝 忠恭	27

論文

多孔質セラミックスの破壊特性とそのモデル解析	堤 三佳 黄木 景二 岡部 永年 生宗 健治	35
Experimental Characterization of Silicon Carbide Fiber Reinforced Silicon Oxycarbide Matrix Composites Through the Sol-Gel Route	Satoshi Kobayashi Dai Nakatani	43
発泡プラスチックの強度特性に及ぼすスキン層の効果	新保 實 中野 晋 三澤 章博	49
繊維配置均一性を制御した繊維強化樹脂基モデル複合材料の作製 およびその破壊挙動に及ぼす繊維配置均一性の影響	田中 基嗣 廣澤 慶文 北條 正樹 落合庄治郎 岩下 哲雄 藤田 和宏 澤田 吉裕	55
Cruciform Specimen 法による 繊維/樹脂界面破壊クライテリア確立手法の解析的検討	小柳 潤 加藤 肇 萩原 慎二	63
等価介在物法に基づいた織物複合材料のための インターネット CAE システムの開発	辻上 哲也 岡田 貴史 奥田 真吾 廣澤 覚	71

第28巻（平成22年 3 月発行）

巻頭言

材料システム第28巻の発行にあたって…………… 中田 政之 1

論文

フラーレン誘導体を用いた炭素材料表面の改質と SAICAS 法による炭素/樹脂界面付着力評価……………	田島 右副 沼田 陽平 松浦 孝伯 川村 博昭 大背戸 浩樹	3
多段荷重下におけるポリカーボネートのクリープ挙動予測……………	坂井 建宣 隅原 晋平 宗宮 詮	9
ポリプロピレン樹脂の粘弾性特性に及ぼす EB 照射の影響……………	新保 實 山田 博 池田 雅幸 宮野 靖	15
CFRTP 射出成形品の寸法精度と成形プロセス中の粘弾性挙動……………	武部 佳樹	21
硬化過程の樹脂と未硬化樹脂の界面接着性評価……………	斉藤 博嗣 金原 勲	27
絹繊維強化 PBS 複合材料の力学的特性に及ぼす繊維表面処理の影響……………	井崎 泰斗 荻原 慎二 Tran Huu Nam 宋 東烈 吉井 圭	33
薄層 CFRP 直交積層板における90°層内の損傷進展の実験的評価……………	竹内 博紀 北口 哲也 金原 勲 斎藤 博嗣	39
CFRP 直交積層板におけるトランスバースクラック発生の温度依存性……………	川田 宏之 小柳 潤 細井 厚志 梶原 俊作 石岡 義和 佐藤 成道	47
一方向 CFRP 積層板の曲げ疲労強度における時間-温度-吸水量換算則……………	関根 尚之 中田 政之 宮野 靖	53
CFRP/Metal ボルト継手の引張疲労強度への時間-温度-吸水量換算則の適用性について……………	関根 尚之 中田 政之 宮野 靖	63
複合材料部品製造過程のコストモデリング・シミュレーションに関する基礎的考察……………	龍谷 朋宏	71

第29巻（平成23年1月発行）

巻頭言

材料システム第29巻の発行にあたって…………… 中田 政之 1

論文

2組の電極を使った電界印加によるエポキシ樹脂中の CNFの方向制御に関する基礎的研究……………	鈴木 寛 平 尚行	3
熱硬化成形プロセスを考慮した複合材料製造設計技術の開発 第1報 熱硬化成形シミュレーション……………	関根 一史 尾崎 毅志	11
鍛造法によるポリ乳酸スクリューの成形とその評価……………	小林 訓史	23
鈴構造体の製造法と減衰特性に関する研究……………	新保 實 越田 伺励 三澤 章博	31
変位分布の測定値を用いた境界条件および応力分布の決定法……………	米山 聡	39
肝臓の応力緩和挙動に及ぼす流体特性の影響……………	高橋 学 黄木 景二 松枝 正樹	47
ガラス繊維強化ポリアミドの繊維含有率及び結晶化度が クリープ挙動に及ぼす影響……………	坂井 建宣 平井 悠斗 宗宮 詮	53
銅膜材の疲労破壊挙動に及ぼす樹脂接着効果とその支配要因 (疲労過程のSEM観察と平均応力の影響に注目して)……………	石田 浩規 鳥居太始之 清水 憲一	61

General Index

《vol. 1 ~ vol.29》

(1982~2011)

Volume 1, June 1982

Forewords

MUTSUSHIGE KYOTO	1
YASUSHI MIYANO	2

Special Contributions

TAKESHI KUNIO	3
TAICHI FUJII	4
YOSHIO FUJIMURA	5
TOSHIHIKO SUMINOKURA	6

Review

HIDETOSHI NAKAYASU	7	Application of Statistical Method on Structural Design
--------------------------	---	--

Original Papers

MITSUNORI MIKI	21	Material Design of Composite Laminates with Constraint on In-plane Elastic Properties
MANABU KANEMITSU, YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO	31	Influence of Matrix Resin on Ultimate Strength of Unidirectional CFRP
MINORU SHIMBO, YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO	39	Explanation with Viscoelastic Model for the Growth Mechanism of Residual Stress in Thermosetting-resin Beam by Quenching
SUGURU SUGIMORI, YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO	45	Photoviscoelastic Analysis of Thermal Stress in Epoxy-resin Beam by Quenching
YASUSHI MIYANO, SHOZO NAKAMURA, HITOSHI YOKONO & TAKESHI KUNIO	51	Experimental Study on Expedient Optical Method for Residual Stress in Thermosetting-resin Beams by Quenching on Both Surfaces

Editor's note : The Purpose and Goals, and the Organization of Materials System Research Laboratory	57
Briefs of the members of the Materials System Research Laboratory	58

Volume 2, June 1983

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contributions

TAKESHI KUNIO 3

TAICHI FUJII 5

Reviews

KUNIHICO FUJIMOTO 9 Material Design of Rubber Composite Materials

YASUSHI MIYANO,
SUGURU SUGIMORI & TAKESHI KUNIO...21 Two-Dimensional Photoviscoelasticity

HIDETOSHI NAKAYASU35 A Draft on Materials System Design Considered
as Synthesis

Original Papers

KOUETSU YAMAZAKI, JUHACHI ODA ...49 A Design Technique to Generate Optimum Layout
of Minimum Weight Truss Structure

SUSUMU TSUZUKU, HITOSHI YOKONO,
YASUO HIRA, MASAO GOTOH &
YASUSHI MIYANO.....61 Simulation of Foaming Process in Reaction
Injection Molding

MANABU KANEMITSU,
YOSHIHISA KAWAMOTO,
YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO ...71 Dependence of Temperature on Transverse Low
Cycle Fatigue Strength of CFRP

Technical Reports

MITSunORI MIKI81 Optimum Design of Composite Beam with
Sandwich Structure
— Investigation of the Behavior of the Solution
and a Proposal for Practical Design —

MINORU SHIMBO,
YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO ...91 Effect of Viscoelastic Behavior on Residual Stress
Thermosetting-resin Strip with Constraint of Warp
by Single-side Quenching

MAKOTO IIDA, MASAO GOTOH,
HITOSHI YOKONO & YASUSHI MIYANO 101 Flexural Properties of Moldings of Rigid
Polyurethane RIM

Editor's note109

Volume 3, July 1984

Special Issue on Materials Design of Fibrous Composite Materials

Forewords

YASUSHI MIYANO	1
MITSUNORI MIKI	3

Special Contributions

TAKESHI KUNIO	5
TAICHI FUJII	7

Reviews

YASUYUKI SEGUCHI.....	9	On the Material Design in Future
SHOJI SHIMAMURA	11	Materials Design in 21 st Century
KENZO KADOTANI	17	Notes on Some Properties of Fiber Reinforced Plastics
TAICHI FUJII	25	The Status and Future Trend of Material Design of Fibrous Composite Materials
MITSUO TAKEHANA	35	Special Design Considerations on the Bottom Shell of High Speed FRP Boat
JUHACHI ODA	39	On Optimum Techniques of Shape and Material Designs for Mechanical Structures
KOZO IKEGAMI	51	Optimum Design for the Strength of Fibrous Composite Materials
ISAO KIMPARA	59	Materials Design of Hybrid Composites
HIROO MIYAIRI	69	Impact Design of Fiber Reinforced Composites
YOICHI HIRANO.....	75	Optimum Design of Laminated Composite Structural Elements
MITSUNORI MIKI	83	Stiffness-based Material Design and Optimization for Laminated Composites

Engineering Papers

IPPEI SUSUKI & STEPHEN W. TSAI	99	Designing with Composite Materials
MASUJI UEMURA	107	Optimum Design of Filament-wound Pressure Vessel
SHIGEO KOBAYASHI	121	A Study on Prevention of Divergence of Sweptforward Wing by Fiber Reinforced Composite Materials
ZENICHIRO MAEKAWA & HIDETOSHI NAKAYASU	127	Probabilistic Design of Fiber Reinforced Composite with First Order Second Moment Method
HISAO FUKUNAGA & YOICHI HIRANO	135	Vibration Characteristics and Optimization of Laminated Composite Plates
YASUSHI MIYANO, MANABU KANEMITSU & TAKESHI KUNIO	143	A Study on Material Design of Matrix Resin for Unidirectional CFRP

Volume 4, June 1985

Foreword

YASUSHI MIYANO	1
----------------------	---

Special Contributions

TAICHI FUJII	3
YASUSHI MIYANO	5

Reviews

HIROSHI FUKUDA	13	Developments of Micromechanical Strength Theory of Composite Materials
HIDETOSHI NAKAYASU & SUGURU SUGIMORI	27	Paper Survey with respect to Materials System

Technical Papers

AKIRA NAKAYAMA & TAKAO NAKAGAWA	35	Optimum Reliability Design of Composite Materials by Using Stochastic Finite Element Method
ZENICHIRO MAEKAWA	45	Influence of Reinforcement on Variation of Strength of Fiber Reinforced Plastic Laminate with Notch
MINORU SHIMBO, YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO	51	Residual Stress and Deformation of Thermosetting Resin Molds under Various Cooling Conditions

Technical Notes

MITSUNORI MIKI & TAICHI FUJII	61	Material Design of Laminated Fibrous Composites with Required Bending-Twisting Coupling
MANABU KANEMITSU, YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO	67	Time and Temperature Dependences of Flexural Strength in Cross-ply Laminated CFRP
HIDETOSHI NAKAYASU & KAZUYA KAMINO	73	Development of Data Processing and Management Information System in Composite Fatigue Testing
Book Reviews	43	
	50	

Volume 5, July 1986

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contributions

TAKESHI KUNIO 3

TAICHI FUJII 5

Reviews

TAKEHITO FUKUDA 7 Computer-Aided Engineering Approach to
Research and Development of Composite
Materials

TOSHIO OGAWA 17 Characterization of Polymeric Materials

Engineering Papers

MEGUMU SUZUKI 27 Impact Characteristics of R-RIM Compound and
Its Analysis

SATOSHI SOMIYA & TAKESHI KUNIO ... 35 Effect of Fiber Volume Fraction and Fiber
Distribution on the Strength of FRP

SUGURU SUGIMORI, YASUSHI MIYANO
& TAKESHI KUNIO 43 Photoviscoelastic Analysis of Thermal Stress by
Rapid Cooling in an Epoxy Strip with a Circular
Hole

Technical Paper

MINORU SHIMBO, YASUSHI MIYANO,
C. E. MANESCHY & T. C. WOO 51 Thermoviscoelastic Analysis for Residual Stress
of an Epoxy Plate Subjected to Rapid Cooling

Technical Note

YOICHI HIRANO, AKIRA IINO &
HISASHI IYAMA 59 Extension-Twisting Coupling of Two-Layered
Angle-Ply Laminates

Technical Reports

KIYOSHI MIZUKAWA, TAICHI FUJII,
KATSUHIKO OSAKA & KAZUO ITAMI ... 65 Strength of Thin-Walled FRP Box Beam under
Combined Impact Bending and Torsion

SHIGEO AMAGI & YASUSHI MIYANO ... 69 Influence of Lamination on Static Strengths of
C/A Hybrid Unidirectional Reinforced FRP
Laminates

Index for 1982~1986 77

Personnel of MSRL 81

List of Published Articles of MSRL 87

Volume 6, October 1987

Forewords

YASUSHI MIYANO	1
TAKESHI KUNIO	3

Special Contribution

TAICHI FUJII	5
--------------------	---

Special Issue on Viscoelasticity

Reviews

TAKESHI KUNIO	7	Mechanical Behavior of Viscoelastic Body Dependent on Time and Temperature — Fundamentals of Viscoelasticity —
MASAHISA TAKASHI & TAKESHI KUNIO	21	Introduction to Mechanics of Linearly Viscoelastic Body
AKIHIRO MISAWA	49	Characterization of a Viscoelastic Materials
YASUSHI MIYANO & MINORU SHIMBO	81	Residual Stress of Plastics due to Thermo- viscoelastic Behavior
AKIHIRO MISAWA & TAKESHI KUNIO	101	Basic Concepts for Crack Threshold in Viscoelasticity
YASUSHI MIYANO, SUGURU SUGIMORI & TAKESHI KUNIO	117	Stress and Strain Analysis by Photoviscoelas- tic Technique
MASAHISA TAKASHI	139	Cumulative Damage in a Thermoplastic Polymer

Engineering Papers

MASATAKA TANAKA & HIROAKI ASAHI	157	New Boundary Element Methods for Thermo- elastic Problems
TAKASHI AKASAKA & MITSURU KATOH	163	Fiber Crossing Angle Variation and Elastic- Moduli Distribution of Fabric-Reinforced-Rubber Diaphragm due to Forming Process
YOHTARO MATSUO, SHIGENARI OHSAWA, KOUICHI YASUDA, TATSUO ACHIWA & SHIUSHICHI KIMURA	169	The Effect of Grain Size on Mechanical Properties of TiO ₂
HARUO NOSE, ISAMU SAKAMOTO & HIDEAKI NAKAYAMA	181	Fatigue Strength of SCM 435 Alloy Steel under Fully Reversed Impact Torsional Load

Technical Paper

TAKEHITO FUKUDA, KATSUHIKO OSAKA, TAICHI FUJII & YUUZOU HAYAKAWA	189	Statistical Examination of Tensile Strength of Glass-Mat FRP by Using Rectangular Specimens
---	-----	--

Special Contributions

TOSHIO OGAWA	195	On Participation in Pittsburgh Conference — Progress in Analytical Instruments and Measuring Techniques in Chemistry —
HIDETOSHI NAKAYASU	199	On Stay in Technische Universität München
YASUSHI MIYANO	205	On Stay in Universite de Poitiers, France

Volume 7, August 1988

Foreword

YASUSHI MIYANO	1
----------------------	---

Special Contributions

TAKESHI KUNIO	3
TAICHI FUJII	5

Reviews

JUHACHI ODA	7	Recent Advance of Techniques Measuring Contact Stress Distributions
MITSUNORI MIKI & YOSHIHIKO SUGIYAMA	17	Basic Investigation on Structural Design by Smalltalk
MEGUMU SUZUKI	23	Frequency Analysis of Acoustic Emission Generated in Composite Materials
SUGURU SUGIMORI, SYOUZOU NAKAMURA, YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO	31	Simplified Optical Method for Measuring Residual Stress in Two-Dimensional Thermosetting Resin Molding

Engineering Papers

SHIGEO AMAGI, MASAYUKI NAKADA, MINORU SHIMBO & YASUSHI MIYANO	43	Influence of Laminate Constitution on Impact Behavior of C/A Hybrid Unidirectional FRP Laminates
HIDEAKI NAKAYAMA, YOSHIO OHUE, KENZO TAZAWA, KOHZOH OKITA & MASATOSHI ARITOSHI	53	Fatigue Crack Growth Characteristics of SUS 304/SUS 304 Friction Welded Butt Joint

Technical Papers

MASAHIRO NISHIHARA	59	Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Laminates and Its Simplified Evaluation Method
CHIAKI HIWA, TAKAO NAKAGAWA & SHUN'ICHI UEDA	67	Loss Tangent of Composites during Fatigue
TOSHIYASU FURUTA, SUSUMU USHIGOME, KUNJI YAMAMOTO & TOMOMI SOEDA	73	Silicon Carbide Powder Reinforced Aluminum Alloys

Special Contributions

MASAKI HOJOU	81
HIDETO SUZUKI & HIROSHI TSUNOI	85

Volume 8, August 1989

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contributions

TAKESHI KUNIO 3
HIDETOSHI NAKAYASU 7

Reviews

TAKUO HAYASHI 9 A Review of Recent Experimental Stress Analysis
in Japan

SUSUMU TAKAHASHI &
AKIRA SHIMAMOTO23 A Survey of Recent Photoplasticity
HIDETOSHI NAKAYASU41 Some Problems for Stochastic Materials Design of
Composite Materials

MITSUO KISHI & TASUKAZU HIDAKA ...51 Discrete Optimization Technique with Neural
Networks and Its Application to Structural Design

TOSHIO OGAWA &
MANABU MARUYAMA59 Review of Laminated Steel Plate for Vibration
Damping

MAKOTO IIDA, YASUSHI MIYANO &
MASAO GOTOH69 Optimization of Mechanical Properties of
Composite Foamed Structures
Polypropylene Composites

OSAMU FUKUI77
MASAKI HOJO, KEISUKE TANAKA,
CLAES-GöRAN GUSTAFSON &
KIYOSHI KENMOCHI89 Computerized Test Method for Near-Threshold
Growth of Delamination Fatigue Cracks under
Mode I Loading in Advanced Composite
Laminates

Papers

IPPEI SUSUKI101 Strength Optimization of Symmetric Laminate
under In-Plane Loading

SOTOAKI KIDA109 Impact Bending Behavior and Its Criterion of
Beams and Plates made of Brittle Materials

SATOSHI SOMIYA &
TAKESHI KUNIO115 Fatigue Fracture Mechanisms on FRP(SMC)

Special Contribution

MITUNORI MIKI121

Volume 9, August 1990

Foreword

YASUSHI MIYANO	1
----------------------	---

Special Contributions

TAKESHI KUNIO	3
IMAO TAMURA	5

Reviews

SUSUMU TAKAHASHI & AKIRA SHIMAMOTO	7	A Survey of Recent Photoplasticity(II)
MASAYUKI NAKADA, YASUSHI MIYANO, MEGUMU SUZUKI & YOICHI HATTORI	21	Mechanical Behavior of Carbon/Aramid Hybrid FRP Laminates

Papers

mitsunori MIKI, YOSHIHIKO SUGIYAMA & KANEHIRO NAGAI	41	Optimum Design of Laminated Composites Based on In-Plane Strength and In-Plane Stiffness
YUKIO TADA, RYUICHI MATSUMOTO & TETSUYOSHI SHIMOMURA	51	Spape Design Problem of Structures Aiming to Maximize Damping Ratio
HIDETOSHI NAKAYASU & ZENICHIRO MAEKAWA	59	Trial of Selection of Effective Failure Path and Approximated Failure Probabilities of Fiber Reinforced Composites Laminates
SUGURU SUGIMORI, YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO	69	A Photoviscoelastic Study on Stress Freezing Method
KIYOSHI TAKAHASHI & NAK-SAM CHOI	75	Influenc of Flber Volume Fraction on Failure Mechanisms of Poly(ethylene terephthalate) Reinforced by Short Glass Fiber
SOTOAKI KIDA, MEGUMU SUZUKI, HIROYUKI KAKISHIMA, KAZUHIDE ITOU & JUHACHI ODA	83	Impact Test and Penetration Formula of Laminated Glasses
TATSUO SAKAI & TSUTOMU OHTA	89	A Probabilistical Analysis on Orientation Distribution of Slip Bands Appeared on Metal Surface under Syclic Loading
TOMIYA ABE, HIDEKI ASANO, MASATOSHI TAGAMI, TAKAYASU ASAI, MASAYUKI MATSUMOTO, NORIAKI TAKETANI & SEIKICHI TANNO	97	A Highly Heat-Resistant All Plastic Optical Fiber
Technical Report RYOJI KOSE, ATSUYUKI UKAI & MEGUMU SUZUKI	105	Residual Bending Deformation of Particulate Filled Epoxy Resin
Special Contribution MASAKI HOJO & KAZURO KAGEYAMA	113	

Volume 10, September 1991

Forewords

TAKESHI SATO	1
YASUSHI MIYANO	3

Special Contributions

TAKESHI KUNIO	5
IMAO TAMURA	7

Reviews

IMAO TAMURA	9	Aluminum and TRIP Steel Sheet for Automobile
HIROO MIYAIRI	11	Material Properties and Products Design of Fiber Reinforced Plastics Composites
SUSUMU TAKAHASHI & XIANG WAN	21	A Survey of Recent Photoplasticity(Ⅲ)
FUKUNAGA TERASAKI & NORIYUKI TAKANO	43	Fracture and Toughness of Metals

Papers

HIDETOSHI NAKAYASU	53	Stochastic Material Design of Composite Material and Optimum Design Problem
MASAKI HOJO, MATSUTARO YOSHIOKA, HIROSHI, FUKUDA, KIYOSHI KENMOCHI, TATSUSHI SHINOGAYA & YOSHIHISA SHIRASAKA	63	Basic Investigation on Database Access System for Composite Materials Using Artificial Intelligence Method
HIROSHI HATTA, TAKAKO TAKEI & AKINOBU MORI	71	Thermo-Mechanical Properties of Resin Matrix 3 D Fabric Composites
ITSUO NISHIYAMA, YOSHIO KISHIMA & TAKESHI KUROKI	81	Study on Depth Profiling of Polymer Mechanical Property by Surface and Interfacial Cutting Method(SAICAS Method)
YASUSHI MIYANO, MASATO KASAMORI & YOICHI HATTORI	87	Role of Matrix on Mechanical Properties of Advanced Fiber Reinforced Plastics
MINORU SHIMBO, TAKUJI NADA, YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO	97	Residual Stress in Polyethylene Plate Made by Extrusion Molding

Technical Report

MITUNORI MIKI	105	A Concept on Object-Oriented Approach to The Analysis and Optimization of Truss Structures
---------------------	-----	---

Special Contribution

YOSHIHIKO SUGIYAMA	121
--------------------------	-----

Index for 1982~1990	125
Personel of MSRL	137
List of Published Articles of MSRL	143

Volume 11, September 1992

Foreword

YASUSHI MIYANO	1
----------------------	---

Special Contribution

TAKESHI KUNIO	3
---------------------	---

Reviews

KUNIHICO MURAYAMA	5	Activation of Uses Development in Advanced Composite Materials
YOICHI HATTORI	13	On Offshore Structures — Mainly Problems of Their Materials —
NORIYUKI TAKANO & FUKUNAGA TERASAKI	19	Hydrogen Embrittlement of Iron and Low Strength Steels

Papers

HIIZU HYAKUTAKE	33	Fracture Criterion for Notched Bars of Rigid Plastics and FRP
AKIRA TODOROKI & HIDEO KOBAYASHI	43	Delamination Resistance and Toughness Micro-mechanism of CF/Epoxy Unidirectional Laminates
SATOSHI SOMIYA & TAKESHI KUNIO	51	Degradation of Stiffness Ratio of FRP (SMC) under Two-Step Loading
TORU ONO, KANAO FUKUDA, HIDEHIRO ENDO & MASANORI UEKI	57	Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Carbide-Graphite Composites
HISAO FUKUNAGA & HIDEKI SEKINE	63	Identification of Material Properties in Symmetric Laminated Plates by the Measurement of Bending Deflections
DAFANG WU & SUSUMU TAKAHASHI	71	Study on the Analysis of Stress Intensity Factors for Three-Dimensional Cracks by the Caustics Method
SOTOAKI KIDA & MEGUMU SUZUKI	81	Study on Axial Collision of Two Rods

Special Contributions

KENJIRO KOMAI	87
TAKASHI TAGAWA	91
MINORU SHIMBO	97
IMAO TAMURA	103

Volume 12, November 1993

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contributions

TAKESHI KUNIO 3

KENJIROU KOMAI, KOHJI MINOSHIMA &
MASAHIKO ITOH 5 In-Situ Visualization of Nanometer Sized
Corrosion Damage by STM/AFM

Review

NORIYUKI TAKANO &
FUKUNAGA TERASAKI 15 Hydrogen Embrittlement of Ni and Ni Based
Alloys

Papers

HIDEKI SEKINE, HIROSHI SUZUKI,
HISAO FUKUNAGA &
MASAHIKO OGATA 29 Computational Simulation of Macroscopic
Nonlinear Stress-Strain Relationship of Short-
Fiber Reinforced Metal Matrix Composites

KAZUO KAGEYAMA &
ISAO KIMPARA 39 Interlaminar Fracture Characteristics of an
Interlayer-Toughened Carbon/Epoxy Composite
Material

SATOSHI SOMIYA 49 Relationship between Fracture Toughness and
Failure Observed on Material's Surface on FRP
(SMC)

HIROSHI HATTA, YASUO KOGO,
TOMONORI ITO & YUTAKA SAWADA 55 High Temperature Thermal Expansion Behavior
of Ceramic Matrix Composites

HAILONG CHEN & SHUICHI IWATA 63 Data Analysis by a Data System on High-Tc
Superconducting Materials

SHIGEO MATSUMOTO, SUGURU SUGIMORI,
YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO 71 Hybrid Stress Analysis of Viscoelastic Body by
Comparing Photoviscoelastic Birefringences

MASATO KASAMORI &
YASUSHI MIYANO 77 Characterization of Long Term Creep
Deformation of Epoxy Resins

Contribution

MASAKI HOJO 83

Volume 13, November 1994

Forewords

YASUSHI MIYANO	1
MINORU SHIMBO	3

Special Contribution

TAKESHI KUNIO	5
---------------------	---

Special Issue on Residual Stress of Plastics

Reviews

KOZO IKEGAMI	7	Internal Stress and Residual Stress of Epoxy Resin in Solidification Process
MITSUKAZU OCHI	17	Effect of Network Structure on the Occurrence of Residual Stress in Cured Epoxy Resins
YASUSHI MIYANO & MINORU SHIMBO	23	Residual Stress of Thermosetting Resin due to Thermoviscoelastic Behavior
KAZUMI TADA	31	Prediction of Residual Stress in Injection Molding
MAMORU ISHIJIMA, MASASHI YAMABE & YASUSHI MIYANO	37	The Prediction Method for Residual Stress with Distribution of Material Properties' Values in Injection Molding
YOSHIHARU MORIMOTO	43	Stress and Strain Distribution Measurement using Fourier Transform
SUGURU SUGIMORI, SHIGEO MATSUMOTO, YASUSHI MIYANO & TAKESHI KUNIO	51	Simplified Optical Method for Measuring Stress and Strain in Viscoelastic Body
MASAKI YOSHII & HIROKI KURAMOTO	61	Residual Birefringence of Injection Molded Substrates for Optical Disc

Papers

MINORU SHIMBO & YASUSHI MIYANO	71	Generation Mechanism of Residual Stress in Thermoplastic Resin due to Molding Process
JIN'ICHI IKEDA, OSAMU KIKUGAWA & HARUHIKO MAKI	79	Numerical Estimation of Warp of Copper Clad Laminates during Soldering Process
AKIRA SHIMAMOTO & EISAKU UMEZAKI	87	Measurement of Strain using Fine Dot Grid Method
TOSHIHIKO OKAI & TERUFUMI MACHIDA	95	Recovery-Induced Thermal Deformation of Thermoplastics-

Papers

YOHTARO MATSUO, TADASHI KITAMURA, TOSHIYUKI NISHIMURA, KOUICHI YASUDA & TSUYOSHI HAYASHI	105	Forming of Alumina Powder with Lubricant by Cyclic-CIP
YUKIO TADA & YUKIKO IWASAKI	111	Image Analysis of Melting Polymer in Heat Barrel of Injection Molding Machine
HIROSHI HATTA, TAKAKO TAKEI, YOSHIO YOSHIHARA & YUTAKA SAWADA	117	Effect of Humidity on Thermal Expansion Behavior of Porous Composites
SATOSHI SOMIYA & HIROSHI KIMURA	127	Statistical Treatment of Creep Behaviors of BMC
NORIYUKI TAKANO, YASUYUKI MURAKAMI, YASUSHI MIYANO & FUKUNAGA TERASAKI	133	Hydrogen Embrittlement and Permeation in Multilayered Dual Phase Stainless Steel

Volume 14, November 1995

Foreword

YASUSHI MIYANO	1
----------------------	---

Special Contribution

TAKESHI KUNIO	3
---------------------	---

Reviews

KUNIIHIKO MURAYAMA	5	Applicability of Textile Composites
HIROSHI HATTA, YASUO KOGO, YOSHIO YOSHIHARA, YUTAKA SAWADA, KIYOHISA TAKAHASHI, KAZUYA HOSONO & TOSHINORI DOZONO	15	Thermal Properties of C/C Composite at Elevated Temperature
CHIAKI HIWA & YASUSHI IKAI	25	Evaluation of a Damage and an Interfacial Bonding on Composites from the Viewpoint of Viscoelastic Property
NORIYUKI TAKANO, AKIYOSHI YOSHIKAWA & FUKUNAGA TERASAKI	35	Atomistic Computer Simulation of Hydrogen Embrittlement

Papers

ATSUSHI IIZUKA, SATOSHI YONEMORI, KAZUO OGAWA & MASAHISA TAKASHI ...	43	Extraction of Characteristics on Fracture Surface of Epoxy Resin using Image Analysis
JUHACHI ODA & HIROYASU OKADA ...	51	Design Method of Materials Composed of Some Ingredients by Using Neural Network
AKIRA KISHIMOTO & HIROAKI YANAGIDA	57	Statistic Interpretation of Self-Diagnostic Carbon-Fiber-Glass-Fiber-Reinforced Plastic Composites
HIROYUKI KAWADA, HITOSHI NAKAO, TOSHIAKI OKABE & YOSHIHIDE YAMAMOTO	65	Mode I Fracture Toughness in 2-D Carbon-Carbon Composite using CT Specimens—R-Curve Behavior and Fracture Mechanism—
NOBORU TAKEDA, HIDEKI NIIZUMA, SHINJI OGIWARA & AKIRA KOBAYASHI ...	73	Experimental Evaluation of Thermal Residual Stress in CFRP Cross-Ply Laminates
SHIN-ICHI MATSUOKA	79	Effect of Cold Rolling on Cold Forging of solid Polymer

Contributions

TAKESHI KUNIO	85
YASUSHI MIYANO	87
TAKAYOSHI YAGASAKI	91

Volume 15, November 1996

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contribution

TAKESHI KUNIO 3

Review

SHINGO NAKANISHI &
HIDETOSHI NAKAYASU 5 Transformation of Design Points into the
Standardized Spaces for Systems Reliability-
Based Design

Papers

KENJIRO KOMAI & KOUJI MINOSHIMA ...23 Application of Knowledge Engineering Method to
Environmental Strength of Metals

MILAN HUBACEK, MASANORI UEKI &
TADAO SATO39 Composite Materials in the Boron Nitride-Copper
System

NOBUO TAKEDA, HIROSHI TANIMURA,
SHINJI OGIHARA & AKIRA KOBAYASHI...43 Effects of Fiber Orientation on Interlaminar Shear
Strength in CFRP Laminates

HIROYUKI KAWADA, KAZUHIRO MARUO
& HIROAKI NUMATA49 Evaluation of In-Plane Mixed Mode Fracture
Toughness Tests in Unidirectional FRP
—Fracture Simulation by Considering Crack
Propagation—

MASATAKA KOISHI, KAZUYUKI KABE &
MASAKI SHIRATORI57 Analysis of Effective Properties of Composite
Materials using Homogenization Method based on
General-Purpose FER Code

JIN'ICHIRO GOTOH, DAISUKE AYAME,
AKIHIRO MISAWA &
MASAYUKI TAKASHI65 Photoviscoelastic Stress Analysis in a Strip Plate
under Rolling Contact

MASAYUKI NAKADA, YASUSHI MIYANO
& KENZO KADOTANI73 A Study of the Tensile Behavior for Conical
Shaped FRP Joints Using Polymeric Adhesives

SHIN-ICHI MATSUOKA &
MASAKI SHIBAHARA81 Effect of Cold Rolling on Cold Drawing of Solid
Polymer

KATSUNORI FUTASE, AKIRA SHIMAMOTO,
SUSUMU TAKAHASHI, HIROYUKI AOKI &
YUKIHIKO KAMADA87 Study on Partial Reinforcement Effect of
Laminate Film Used in Liquid Packing Bag

MINORU SHIMBO, MAMORU ISHIJIMA,
MASASHI YAMABE &
YASUSHI MIYANO.....93 Influence of Molding Conditions on Residual
Stress in Injection Molds

Contribution

SHIGEO KASE103

Volume 16, November 1997

Forewords

YASUSHI MIYANO	1
ISAO KIMPARA	3

Special Contribution

TAKESHI KUNIO	5
---------------------	---

Special Issue on Future of Composite Materials

Contribution	
ISAO NOMURA	7
Reviews	
MIKIO MORITA	9
ICHIZO WEDA	13
ISAO KIMPARA	27
HIROO MIYAIRI	35
ZENICHIRO MAEKAWA	45
MASAKI HOJO & SHOJIRO OCHIAI	55
NOBUO TAKEDA	63
KAZURO KAGEYAMA	73
KIYOSHI KEMMOCHI	79
HIDEKAZU IZUNOME	87
MICHIHIRO MOHRI	95
SHIGEO AMAGI	105
YASUSHI MIYANO & MASAYUKI NAKADA	109

Papers

NORIYUKI TAKANO, AKIYOSHI YOSHIKAWA & FUKUNAGA TERASAKI	115
MASAKI SATO, HISAO FUKUNAGA & HIDEKI SEKINE	121
SHINJI OGIHARA, NOBUHIKO SUZUKI, AKIRA KOBAYASHI & NOBUO TAKEDA	135
HIROSHI TSUDA, JUN TAKAHASHI, KIYOSHI KEMMOCHI & TAKANOBU IKEGUCHI	143
MASAYASU KANAO & MASAHISA TAKASHI	149
YUSUKE FUKUCHI & KOZO OKITA	157

Volume 17, December 1998

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contribution

TAKESHI KUNIO 3

Review

SHINICHI MATSUOKA 5 Ultrasonic Welding of Metal Sheets

Papers

HIDEKI NAGAI, JUN TAKAHASHI,
KIYOSHI KEMMOCHI,
JUNICHI MATSUI & SHINSUKE SAKAI13 LCA of Polymer Based Composite Materials
using WWW

HIROYUKI KAWADA, HIROAKI NUMATA
& MAMORU KAWASAKI21 Fracture Mechanics Evaluation of Debonding
Crack at Fiber-Matrix Interface of PMC

SHINJI OGIHARA, KEIGO MATSUO,
NOBUO TAKEDA & AKIRA KOBAYASHI ...29 Effects of Thermal Cycling on Transverse
Cracking in 90° Ply of Interlaminar-Toughened
CFRP Laminates

HIIZU HYAKUTAKE39 Yield and Creep Behavior of Polycarbonate
HIROSHI SUZUKI45 Probabilistic Study for Image Analysis of Internal
Structure in 2 – Dimensional Short Fiber
Reinforced Composites

MAKOTO KAWAGOE, MEGUMI NOMIYA,
JIANHUI QIU, MIKIO MORITA,
MAKOTO TAKESHIMA, WATARU MIZUNO
& HIROMI KITANO55 Interfacial Degradation Process in a Kevlar/UP
Model Composite in Water Environment
Monitored by Laser Raman and FT–Infrared
Microspectroscopy

YASUSHI MIYANO, MASAYUKI NAKADA,
MICHAEL K. MCMURRAY &
ROKURO MUKI63 Prediction of Fatigue Life for Polymer
Composites Under Temperature Condition

ATSUSHI UDAGAWA, HIROSHI HATTA,
KEN HIGUCHI, RIKIO YOKOTA &
TOSHIO SUGIBAYASHI73 Compressive Modulus and Strength of Foaming
Material for Space Inflatable Tubes

AKIHIRO NAKAMICHI &
AKIRA KISHIMOTO83 Monitoring of Indentation Fracture and Bending
Fracture in α -SiC Ceramics Utilizing Electric
Response

TASHIYUKI TORII, AKIRA MATSUBA &
SATOSHI WATANABE89 Effects of Adhesive Resin Layer on Fatigue Crack
Propagation Behavior in Film-Bonded Plates

SATORU YONEYAMA &
MASAHISA TAKASHI97 A New Fringe Pattern Analysis Method Using
Elliptically Polarized White Light with Applica-
tion to Photoviscoelastic Analysis

Technical Report

SEIJI TSUKAGOSHI &
SUSUMU TAKAHASHI105 A Basic Study on Crack Opening Displacement
for Elastomer Material by Fine Dot Method

Contribution

HIROSHI NAKAMURA109

Volume 18, December 1999

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contribution

TAKESHI KUNIO 3

Review

MINORU SHIMBO 5 The Present Situation and Development of Micro-cellular Plastics

Papers

SHINJI OGIHARA, WATARU AOKI,
SATOSHI KOBAYASHI, NOBUO TAKEDA &
AKIRA KOBAYASHI11 Matrix Cracking in CFRP Angle-Ply Laminates

SATOSHI MATSUDA, ATSUSHI MURAKAMI,
MASAKI HOJO & SHOJIRO OCHIAI19 Test Method for Mode II Delamination Fatigue Crack Propagation of FRP Laminates Using ENF Specimen

NAOYA TADA & RYUICHI OHTANI31 Method for Analyzing the Effect of Fiber Bridging on the Stress Field in the Vicinity of Crack Tip in Double Cantilever Beam Specimen of Unidirectional Fiber Reinforced Composite

YOSHINOBU SHIMAMURA, YOSUKE YAMAMURA,
AKIRA TODOROKI, HIDEO KOBAYASHI &
HARUO NAKAMURA37 Acceleration of FRP Fracture Simulation Using Parallel Processing on a PC Cluster

GOICHI BEN, NOBUYUKI MORI &
HIROYOSHI HAYASAKI45 Experimental and Nonlinear Behavior Analysis of CFRP Laminated Plates with a Hole

YOSUKE NISHITANI, ISAMU SEKIGUCHI,
YOSHINOBU NAGATSUKA &
TAKESHI KITANO51 Fracture and Impact Properties for Organic and Inorganic Fibers Reinforced Polypropylenes

HIROSHI HATTA, TAKAMASA BANDO,
YASUO KOGO, KEN GOTO &
HIROSHI FUKUDA67 Bonding Technique of Carbon/Carbon Composite

MASAYUKI NAKADA &
YASUSHI MIYANO75 Determination of Time-Temperature Dependent Tensile Strength of Unidirectional CFRP by Strand Test

YUKIHIRO UTSUNO, SATORU YONEYAMA
& MASAHISA TAKASHI83 A Study on Residual Stress Generation during Curing Process in a Thermosetting Resin

TOMIYA ABE, KOUKI HIRANO &
YOSHIKAZU HAYAKAWA89 Light Guide Using Plastic Optical Fiber

Technical Report

JIN'ICHIRO GOTOH, MASAKI SHIRATORI &
MASAHISA TAKASHI97 Stress and Strain Analyses of a Viscoelastic Body under Rolling Contact

Contribution

FUKUNAGA TERASAKI105

Volume 19, December 2000

Foreword

YASUSHI MIYANO	1
----------------------	---

Special Contribution

TAKESHI KUNIO	3
---------------------	---

Papers

KENJIRO KOMAI	7	Life Estimation of Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue in Structural Materials
SATOSHI KOBAYASHI, SHINJI OGIHARA & NOBUO TAKEDA	15	Effect of Laminate Configuration on the Damage Progress and Strain Concentration in CFRP Laminates with an Open Hole
SHINJI OGIHARA, AKIHIRO MUTO, NOBUO TAKEDA & AKIRA KOBAYASHI	23	Microscopic Damage Progress in CFRP Laminates under Thermal Cycling
ATSUSHI WADA & HIROSHI FUKUDA	29	Prediction of the Strength for Unidirectional Composites, considering Fiber, Matrix and Interface
MEGUMU SUZUKI, SOTOAKI KIDA, YASUSHI MIYANO, KAZUTO AIKAWA & TAKESHI MORIWAKI	37	Fracture Mechanisms and Residual Strength of FRPA made with Direct Injection Molding Method by Means of Acoustic Emission Technique
TAKAHIRO TANEGASHIMA & TAKESHI KITANO	47	Viscoelastic Properties of Organic Fiber/Glass Fiber Filled Hybrid Composites in Molten State
KENJI NAGATA, YOSHIHIRO UEDA, TAKAYUKI KUMURA & KIYOHISA TAKAHASHI	57	Mechanical Properties and Electrical Conductivity of Carbon Black filled Polypropylene
TATSUO SAKAI, SATOSHI MAKI, SATORU OHYA & YASUYUKI KUGO	63	A Study on Fatigue Crack Initiation and Propagation Behaviors for Brass and Carbon Steel
SHIN-ICHI MATSUOKA & YUKO SAKATA	71	Drawing of Rectangular Shell of Steel Sheet

Technical Report

JUNKO SAKINO & HIDETO SUZUKI	77	The Technology Transmission Software Development—The Database Construction of “Surface Modification Know-How Support System” —
------------------------------------	----	--

Contributions

FUKUNAGA TERASAKI	85
RYUICHI OTANI	91
TAKASHI TAGAWA	99
ROKUROU MUKI	101

Volume 20, February 2002

Forewords

KENICHI ISHIKAWA	1
YASUSHI MIYANO	3

Special Contribution

TAKESHI KUNIO	5
---------------------	---

Reviews

JUNICHI MATSUI	7	On the Development of Fiber Reinforced Composite Materials Induced by the Social Reformation
ZEN-ICHIRO MAEKAWA	19	Decorative Composites –A proposal for Fibrous Industry Activation–
HIROO MIYAIRI	23	Material Development to Aim at High-functional Properties –Composite Materials and Intelligent Materials–
TAKEHITO FUKUDA	29	Recent R&D of Smart Composites in Japan
MITSUNORI MIKI	37	Definition, Necessity, and Purpose of Intelligent Characteristics on Intelligent Artifacts
HIDETOSHI NAKAYASU	43	Development of Generalized Optimization in Engineering Design
ISAO KIMPARA	65	Modeling of Mechanical Properties and Damage Evaluation of Composite Material Structures
YASUSHI MIYANO, MASAYUKI NAKADA & NAOYUKI SEKINE	75	Durability Analysis of Polymer Composites and Structures
MINORU SHIMBO	87	The Present Situation of Process Technology of Microcellular Plastics

Papers

AKIRA KURAISHI & STEPHEN W. TSAI	95	Comparison of Various Progressive Failure Criteria
KAZUYUKI NAKASAKI & TATSUO INOUE	105	Laser Hardened Structure of Cr-Mo Steels with Different Carbon Content
TOHRU ONOZAKI & HIDEKI SEKINE	115	Simple Identification Method of Force Locations and Histories of Point Impacts on Anisotropic Composite Laminated Plates
SATOSHI KOBAYASHI, HIRONOBU KAWAMOTO & SHUICHI WAKAYAMA	125	Evaluation of Shear Modulus of Composite Laminates Containing Microscopic Damages
TAKESHI TAKATOYA & JAMES C. SEFERIS	131	Deformation Behaviors of Unsymmetric CFRP Laminates with Moisture Absorption

Technical Report

YOSHIMICHI FUJII, MACHIKO MIZOGUCI & HIROYUKI HAMADA	137	Case Study of Degradation for GFRP Vessel
--	-----	---

Contributions

RICHARD M. CHRISTENSEN	143
HIROSHIGE KIKUKAWA	147

General Index for 1982~2000

In Japanese	153
In English	175

Volume 21, February 2003

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contribution

TAKESHI KUNIO 3

Papers

SHINJI OGIHARA, TAKAMOTO ISHIGURO,
YOSHIAKI SAWA & AKIRA KOBAYASHI... 5 Matrix Crack Behavior in CFRP Laminates under
Thermal Cycle Loading

HIROSHI TSUDA, JA-HO KOO,
TOSHIAKI NATSUKI
& YUSUKE SHIBUYA15 Characterization of Plate Waves Propagating in
Laminated Composites and its Application to
Detection of Delamination

KEIJI OGI21 Effect of Relaxation Moduli on Predictions of
Creep Curves for FRP Laminates with Transverse
Cracking

KOJI YAMAGUCHI & ISAO KIMPARA ...27 Damage Observation and Simulation of Woven
Fabric CFRP for Clarification of Damage
Mechanism

AKIHITO SERIZAWA, NORIYUKI TAKANO,
SOTOAKI KIDA, MEGUMU SUZUKI,
HIROSHI NAKANISHI & YASUSHI MIYANO...41 Comparisons between Fractal Dimensions of
Fatigue-Damaged Composite Material by Use of
AE and Divider Techniques

SATOSHI KOBAYASHI, SHINJI OGIHARA,
ASAMI NAKAI & HIROYUKI HAMADA ...49 Mechanical Properties of Plain Woven Compos-
ites with Flexible Interphase

KENJI NAGATA, KIYOHISA TAKAHASHI,
NAOKI TOGE, MITSU HARU INABA
& NAOKO SUZUKI55 Effect of Maleic Anhydride Modification on
Electrical Resistivity of Carbon Black filled PE
and PP

MINORU SHIMBO & YASUSHI MIYANO 63 Generation Mechanism of Residual Stress due to
Curing Shrinkage using Thermoviscoelastic
Model

HIDETAKA KAWASHIMA
& MINORU SHIMBO69 Effect of Foaming Temperature on Cell Size and
Cell Density of MCP

Technical Report

KENJI KUBOMURA, TOMONORI SATOYA,
YASUNAO MATSUBA, NOBUYUKI KAYA,
NOBU FUKUOKA & HIROAKI TSUNODA ...77 The Inflation Experiment for 10m Space Inflatable
Ring Structure and Reflector

Contributions

RYOUII TANAHASHI85

MASAYUKI NAKADA91

Volume 22, January 2004

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contribution

TAKESHI KUNIO 3

Reviews

HIROO MIYAIRI 5 Evaluation of Adhesive Properties of High-Cured Restorative Composites and Their Properties

MASAYUKI NAKADA, NAOYUKI SEKINE
& YASUSHI MIYANO13 Accelerated Testing Methodology for Durability of Composite Materials and Structures

Papers

HIDEKI SEKINE, KYOJI SHINTATE
& HIDEKI YANAGIDA21 Geometric Optimization for Maximizing Structural Stiffness of 3-D Arm-Like Variable Geometry Trusses Subjected to an External Static Load

SHINJI OGIHARA, TOSHIKI KANAI
& HIROSHI TSUDA31 Nonlinear Behavior in Stress-Strain Relation of Carbon/Bismaleimide Laminates

YOSUKE NISHITANI, ISAMU SEKIGUCHI,
SHIN HORIUCHI & TAKESHI KITANO ...39 Morphology and Physical Properties Study on Ternary Blends of Epoxy, Poly (ether sulfone) and Acrylonitrile Butadiene Rubber

CHIAKI HIWA, JUN KODAMA,
YOSHIKAZU NAKAI
& YOSHIMICHI FUJII55 Effect of Interfacial Strength on Fracture Toughness of GFRP under Acid Environment

HIROSHI HATTA, DAISUKE MARUYAMA
& YASUO KOGO59 Formation of SiC Coating on Surface of C/C Composite by Conversion Method

KENJI NAGATA, HO-GYU YOON,
MITSU HARU INABA
& KIYOHISA TAKAHASHI67 Effects of Surface Treatment of Carbon Black on Electrical Resistivity of Carbon Black Filled Polypropylene/Polyethylene Polymer Blend

TOMOAKI ISHIKURO
& SHIN-ICHI MATSUOKA73 Development of Alkali Resistance of Aluminum Anodic Oxide Film by Hydrothermal Treatment

KATSUJI SHIBATA79 FRP Recycling using Depolymerization of Unsaturated Polyester

Technical Report

YOSHIMICHI FUJII, MACHIKO MIZOGUTI
& HIROYUKI HAMADA87 Case Study of Degraded GFRP II
— 12 Years used GFRP Stack for Exhaust Gas —

Volume 23, February 2005

Forewords

YASUSHI MIYANO	1
ISAO KIMPARA	3

Special Issue on Synthetic Engineering

Essay

YUKIO HORI	7	On Special Issue on Synthetic Engineering
------------------	---	---

Contributions

YOSHINORI TAKEI	9	Towards the Creation of Synthetic Engineering
MASASHI YAMABE	11	Comments on Synthetic Engineering
HIROSHIGE KIKUKAWA	15	Conception based on Synthetic Engineering
YASUSHI MIYANO	19	Considering Synthetic Engineering — From the Viewpoint of Durability Assessment of Composite Materials—
ISAO KIMPARA	25	Synthetic Engineering Approach to Composite Materials Structural Engineering
HIDEHITO NANTO & YOSHINORI TAKEI	31	Development of Utility Robot with Odor Sensor System for Welfare—Case Study of Creation of Synthetic Engineering—
KAZUHIRO SHINTANI	37	Synthetic Engineering from the Standpoint of Machine Work

Papers

SHINJI OGIHARA & SHINICHIRO MORIWAKI	41	Nonlinear Deformation and Creep Deformation Behavior in Unidirectional Carbon/Epoxy Laminates under Off-axis Loading
SATOSHI KOBAYASHI, MASARU YAMAMOTO & SHUICHI WAKAYAMA	49	The Effect of Fiber Surface Morphology on the Microscopic Damage Behavior in CFRP Laminates
KEIJI OGI, MANABU TAKAHASHI, YUJI WATANABE, NAGATOSHI OKABE & TAKAHIDE NAKANISHI	55	Simulation of Deformation in a Soft Organ with the use of a Plastic Tourniquet
HIROSHI HATTA, MITSUHIRO WATANABE, ICHIRO SHIOTA & MASASHI KOYAMA	61	Fracture Behavior of C/C Composite under Bi-axial Tensile Loading
HIROSHI OKUBO, SEIICHI MUNEKI, MASAKI IGARASHI & FUJIO ABE	69	Effect of Magnetic Heat Treatment on Creep Properties of High Cr Ferritic Heat Resistant Steels

Technical Report

YOSHIMICHI FUJII, MACHIKO MIZOGUTI & HIROYUKI HAMADA	77	Case Study of Degraded GFRP Tank used for 20 years
---	----	---

Volume 24, February 2006

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Special Contribution

MASAHISA TAKASHI 3

Papers

- YOSHIKI AKEMATSU, KAZURO KAGEYAMA,
HIDEAKI MURAYAMA, ISAMU OHSAWA,
KIYOSHI UZAWA, MAKOTO KANAI
& SATORU AKIYAMA 5 Detection of Impact Damage and Displacement
Behavior of CFRP by using Optical Fiber Sensor
- HIROSHI TSUDA11 Fast Speed Strain Measurement using Fiber Bragg
Gratings
- SHINJI OGIHARA & TAKASHI UMESAKI...17 On the Composite Interfacial Strength Evaluation
using a Cruciform Specimen
- HIROSHI SAITO & ISAO KIMPARA.....27 Environmental Effects on Damage Tolerance
Performance of CFRP Laminate for Marine Use
- YASUSHI MIYANO
& MASAYUKI NAKADA39 Accelerated Testing for Long-Term Durability of
Innovative CFRP Laminates for Marine Use
- HIROSHI SAITO & ISAO KIMPARA.....47 Mechanical Properties of Multi-Axial Knitted
CFRP Laminate Molded by VARTM
- TOSHIKI MIYANAGA
& HIDEKI SEKINE57 Study of Quality Stability of Special Plastics in
Practical Material Recycling
- SATOSHI KOBAYASHI, MANABU FUKUSHIMA,
HIROYUKI WATANABE, YASUHIRO TANABE
& EIICHI YASUDA67 The Development of Carbon Fiber Reinforced
Silicon Oxycarbide Ceramic Matrix Composite
derived from Phenylsilsesquioxane Hybrid
- KENJI NAGATA, MASANOBU NAKASHIMA,
SYUNSUKE KAWAI, AKIRA AOYAMA
& KIYOHISA TAKAHASHI73 Effect of Cationic Surfactants on Mechanical
Properties of Poly (Vinyl Alcohol) / Clay
Nanocomposite Films

Foreword

YASUSHI MIYANO 1

Review

SUSUMU NAKANO & MINORU SHIMBO... 3 Application of Time-temperature Superposition Principle on Cell Density of Foamed Plastics

Papers

KEN GOTO, HIROSHI HATTA,
ICHIRO SHIOTA & TERUFUMI MACHIDA ...11 High Temperature Tensile Strength and Creep Behavior of Carbon-carbon Composites

KEIJI OGI, HIROKI INOUE, TETSURO SHIRAISHI
& MASAHIRO FUJIMURA19 Temperature Dependence of Electric Resistance in CF/PES and CFRP/PES Composites

SATOSHI KOBAYASHI
& SHINJI OGIHARA29 The Effect of Matrix Resin on the Burst Strength of FW-Hybrid FRP Composite Pipes after Impact

SHINJI OGIHARA, AKIHISA OKADA
& SATOSHI KOBAYASHI35 Evaluation of Mechanical Properties in Biodegradable Composites Reinforced with a Natural Fiber

KENJI NAGATA, KIYOHISA TAKAHASHI,
YUHKI OZEKI, MAYUMI KAWAMURA
& HEUNG SOO YOON43 Preparation of Waste Sericin Films Modified by Isocyanate Compounds and Tensile Properties and Biodegradability

YOSUKE NISHITANI, ISAMU SEKIGUCHI,
SHIN HORIUCHI & TAKESHI KITANO ...53 Fabrication and Physical Properties of Long and Short Fiber Reinforced Ternary Blends of Epoxy, Poly (ether sulfone) and Acrylonitrile Butadiene Rubber

MASAKI FUJIKAWA, TAKAO MIKAMI,
MASAHISA TAKASHI, YASUKO MIHARA
& TAKAYA KOBAYASHI65 Prony Series Approximation Technique for Storage/Loss Modulus with a Smoothness of the Relaxation Spectrum

Special Issue on Long-Term Durability and Damage Tolerance of Marine Composites

Technical Reports

YASUSHI MIYANO
& MASAYUKI NAKADA71 Long-Term Durability and Damage Tolerance of Innovative Marine Composites (NICOP) Part I: Accelerated Testing for Long-Term Durability of Various FRP Laminates for Marine Use

ISAO KIMPARA & HIROSHI SAITO83 Long-Term Durability and Damage Tolerance of Innovative Marine Composites (NICOP) Part II: Post-Impact Fatigue Behavior of Woven and Knitted Fabric CFRP Laminates for Marine Use

Materials System Research Laboratory,
KIT95 MSRL-ONR Data Base (Version 1.0)

Foreword

MASAYUKI NAKADA 1

Special Contribution

YASUSHI MIYANO 3

Review

YOSHIHIKO ARAO, JUN KOYANAGI,
HIROYUKI KAWADA & HIROSHI HATTA ... 5 Long-term Stability of Their Dimension and
Geometry in Polymer Matrix Composites

Papers

MINORU SHIMBO, SUSUMU NAKANO,
AKIHIRO MISAWA
& KOUSHOU FUKUMURA17 Foaming Process of Silicone Rubber by using
Physical Blowing Agent

MANABU FUKUSHIMA
& YU-ICHI YOSHIZAWA23 Preparation and Microstructural Characterization
of Porous Alumina Membrane Support with
Submicrometer Pores

HIDEKI HYUGA, NAOKI KONDO,
HIDEKI KITA, HIROAKI OKANO,
JUN SUGAI & JIRO TSUCHIDA29 Fabrication and Mechanical Properties of Si_3N_4
Ceramics with ZrO_2 - MgAl_2O_4 Additive System via
Reaction Bonding Route

HIROSHI SUZUKI35 An Equation Formulation for Predicting Width
Distribution of Overlapping Part of Fibers
Observed under the Surface of a 2 Dimensional
Short Fiber Reinforced Composite

KEISHIRO YOSHIDA & TAKAHIRA AOKI ...41 Beam Network Analysis for Mechanical Properties
of Woven Fabric Composite

SHINJI OGIHARA
& KATSUHIRO MATSUDA49 Evaluation of Mode III Interlaminar Fracture
Toughness in CFRP Laminates

HIROSHI SAITO & ISAO KIMPARA.....55 Evaluation of Joint Strength of CFRP Laminate
with One-Process Molded Joint by VARTM

SHINJI OGIHARA, AKIHISA OKADA
& SATOSHI KOBAYASHI61 Evaluation of Mechanical Properties in Unidirectional
Bamboo Fiber Reinforced PBS Composites

SATOSHI KOBAYASHI & KAZUKI SAKAMOTO 67 Mechanical Properties of TCP/PLA Composites
after Long term Immersion in Phosphate Buffered
Solution

NOBUO TANAKA, CHIAKI HIWA,
TOSHIYUKI IMOTO, TAIJI ADACHI,
MASAKI HOJO & SHUNSUKE BABA79 Application of Novel Knitted Fabric Structural
Composites for Regenerative Medical Scaffold
— Development of Tubular Knitted Fabric
Composites Made of Biodegradable Polymers —

CHIAKI HIWA, TERUMASA OKIZOE,
YOSHIKAZU NAKAI, NOBUO TANAKA,
TAIJI ADACHI, MASAKI HOJO
& SHUNSUKE BABA89 Application of Novel Fabric Structural Compos-
ites for Regenerative Medical Scaffold
— Formation Process of Bone Tissue by Mouse
Osteoblast-like Cell (MC3T3-E1) —

Volume 27, February 2009

Foreword

MASAYUKI NAKADA 1

News of Death 3

Special Contribution

YASUSHI MIYANO 5

Special Issue on Graduate Program in Synthesized Engineering

Contribution

ISAO KIMPARA & YASUSHI MIYANO ... 7

Papers

YUICHI OHKURA13 Strength of Secondary Bonded Joints of Sandwich Constructions for FRP Ships

EIICHI SHINADA19 Influence of Filler Content and Filler Diameter on Bending Resistance of Composite Film

TADAYASU FUJIEDA27 Polymer Design for EMI Shielding Film Applied to Plasma Display Panel

Papers

MITSUYOSHI TSUTSUMI, KEIJI OGI,
NAGATOSHI OKABE & KENJI IKIMUNE ...35 Fracture Properties Model Analysis of Porous Ceramics

SATOSHI KOBAYASHI & DAI NAKATANI ...43 Experimental Characterization of Silicon Carbide Fiber Reinforced Silicon Oxycarbide Matrix Composites Through the Sol-Gel Route

MINORU SHIMBO, SUSUMU NAKANO
& AKIHIRO MISAWA49 Effect of Skin Layer on Strength of Foamed Plastics

MOTOTSUGU TANAKA,
YOSHIFUMI HIROSAWA, MASAKI HOJO,
SHOJIRO OCHIAI, NORIO IWASHITA,
KAZUHIRO FUJITA
& YOSHIHIRO SAWADA55 Preparation of FRP Model Composites with controlled Fiber Arrangement Uniformity and Effect of Fiber Arrangement Uniformity on Their Fracture Behavior

JUN KOYANAGI, HAJIME KATO
& SHINJI OGIHARA63 Analyses for Establishing Failure Criterion on Fiber/Matrix Interface Using Cruciform Specimen Test

TETSUYA TSUJIKAMI, TAKASHI OKADA,
SHINGO OKUDA & SATORU HIROSAWA ...71 Development of Internet CAE System for Textile Composites Based on Equivalent Inclusion Method

Foreword

MASAYUKI NAKADA 1

Papers

YUSUKE TAJIMA, YOUHEI NUMATA, TAKANORI MATSUURA, HIROAKI KAWAMURA & HIROKI OSEDO ... 3	Surface Modification of Carbon Materials by Fullerene Derivatives and Evaluation for Adhesion Strength of Carbon/Matrix Interface Using SAICAS
TAKENOBU SAKAI, SHINPEI SUMIHARA & SATOSHI SOMIYA 9	Estimation Method of Creep Behavior on PC under Multi-Stage Load
MINORU SHIMBO, HIROSHI YAMADA, MASAYUKI IKEDA & YASUSHI MIYANO ... 15	Effect of Electron Beam on Viscoelastic Behavior of Polypropylene Resin
YOSHIKI TAKEBE 21	Viscoelastic Behavior during Molding Process on Dimensional Accuracy of Injection Molded CFRTP
HIROSHI SAITO & ISAO KIMPARA 27	Evaluation of Interfacial Bonding Performance Between Under-cured and Uncured Resins
TAITO IZAKI, SHINJI OGIHARA, TRAN HUU NAM, DONG YEUL SONG & KEI YOSHII 33	Effects of Fiber Surface Treatment on Mechanical Properties of Silk Fiber Reinforced Polybutylenesuccinate (PBS) Composites
HIROKI TAKEUCHI, TETSUYA KITAGUCHI, ISAO KIMPARA & HIROSHI SAITO 39	Experimental Evaluation of the Damage Growth in 90° Layer of Thin-ply CFRP Cross-ply Laminates
HIROYUKI KAWADA, JUN KOYANAGI, ATSUSHI HOSOI, SYUNSAKU KAJIWARA, YOSHIKAZU ISHIOKA & NARUMICHI SATO 47	Temperature Dependence of Transverse Cracking in Cross-Ply CFRP Laminates
NAOYUKI SEKINE, MASAYUKI NAKADA & YASUSHI MIYANO 53	Time-Temperature-Water Absorption Superposition Principle on Flexural Fatigue Strength of Unidirectional CFRP Laminates
NAOYUKI SEKINE, MASAYUKI NAKADA & YASUSHI MIYANO 63	Applicability of Time-Temperature-Water Absorption Superposition Principle on Tensile Fatigue Strength of CFRP/Metal Bolted Joint
TOMOHIRO RYUTANI 71	Fundamental Study for Cost Modeling and Simulation of Composite Material Parts Manufacturing

Volume 29, January 2011

Foreword

MASAYUKI NAKADA 1

Papers

- HIROSHI SUZUKI & NAOYUKI TAIRA ... 3 Basic Study for Orientation Control of CNF in Epoxy Resin by Applied Electric Field with Two Pairs of Cathodes
- KAZUSHI SEKINE & TSUYOSHI OZAKI...11 Process Simulation of Fiber Reinforced Plastics
Part I Formulation of Process Simulation
- SATOSHI KOBAYASHI23 Processing and Characterization of Forged Poly (lactic acid) Screw
- MINORU SHIMBO, SHIREI KOSHIDA
& AKIHIRO MISAWA31 Production and Damping Characteristics of Bell Structure
- SATORU YONEYAMA39 A Method for Determining Boundary Conditions and Stresses from Measured In-plane Displacements
- MANABU TAKAHASHI, KEIJI OGI
& MASAKI MATSUEDA47 Influences of Fluid Properties on Stress Relaxation Behaviors of a Liver
- TAKENOBU SAKAI, YUTO HIRAI
& SATOSHI SOMIYA53 Effect of Crystallinity and Fiber Volume Fraction on Creep Behavior of Glass Fiber Reinforced Polyamide
- KOKI ISHIDA, TASHIYUKI TORII
& KENICHI SHIMIZU61 Effects of Resin Bonding on Fatigue Fracture Behavior and its Controlling Factors in Copper Films (Noting SEM Observation during Fatigue and Mean Stress Effects)

編集後記

材料システム第30巻を発行しました。今回も多くの方々にご投稿を賜り、心から感謝いたします。発行が遅れ気味になり、早々にご投稿いただいた方々にはご迷惑をおかけいたしております。心からお詫び申し上げます。

今回は10巻毎の節目となりましたが、恒例により論文集「材料システム」の創刊号から第29巻までの邦文と英文の目次を巻末に載せております。ご活用いただければ幸いに存じます。

早速ではございますが、平成24年度発行予定の第31巻の準備を進めています。次巻については、内容の一層の充実を目指す所存です。近々ご案内を致しますので、奮ってのご投稿をお待ちしております。

(杉森 勝)

平成24年 3月10日印刷

平成24年 3月15日発行

編集者 中 田 政 之
発行者

発行所 金沢工業大学
材料システム研究所
〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1
TEL 076-274-9263
FAX 076-274-9251

印刷所 (株) 橋本確文堂
〒920-0912 金沢市大手町2-35
TEL 076-261-8221

材料システム投稿規定

1 原稿種別

材料システムに掲載される論文は、材料のシステムの解析および設計の方法論の確立に寄与するもので、その内容に応じて次のように分類される。

種	別	内	容
論 文	論 文 (Paper)	工学的領域内で一つの学問体系の構築に寄与する問題提起を与えるもの、あるいは工学を実用化と結びつける上での問題点や工学的問題を解く上での技法上の問題点に対し、回答を与えるもの。	
	資 料 (Technical Report)	既発表であっても、見方やとらえ方を再検討し、価値ある結論が導かれているもの。	
	展 望 (Review)	工学的領域内で学問体系の構築あるいは先端技術開発に寄与する新しい概念あるいは主題についての将来の見通しを記述したもの。	
	解 説 (Review)	先端的な研究分野における手法、概念、成果などに関する事項をその背景も含めて歴史的あるいは体系的に記述したもの。	
	寄 稿 (Contribution)	編集委員会の依頼により、特定の主題について記述されたもの。	
	そ の 他 (Miscellaneous)	上記の分類以外の原稿。	

2 投稿資格

投稿資格は、特にこれを問わない。

3 原稿の体裁

原稿は邦文を原則とするが、編集委員会が認めた場合はこの限りでない。論文・資料・展望・解説は表題、著者名、所属、英文タイトル、英文著者名、英文アブストラクト、邦文ならびに英文キー・ワード、本文からなる。本文は、原稿種別に即して以下の項目に関する記述が明確かつ簡潔に表わされているものが望ましい。

- i) はじめに、緒言、緒論
- ii) 理論、実験方法、実験結果、考察、検討
- iii) おわりに、結言、結論
- iv) 謝辞、付録
- v) 参考文献

なお、図表およびそれらの説明文は英文とする。

4 論文の採否

論文は編集委員会にて審査の上採否を決定する。その他の採否は編集委員会に任される。

5 原稿の締切

原稿締切は年1回その都度定める。

以 上

MATERIALS SYSTEM

Volume 30, 2012

CONTENTS

Foreword

MASAYUKI NAKADA 1

Special Contribution

YASUSHI MIYANO 3

Special Issue on Durability of Composite Materials

Reviews

TOMONAGA OKABE 5 Numerical Simulation of Initial Damage
in a Transverse Ply of CFRP Laminates

MASAYUKI NAKADA, YASUSHI MIYANO
& HONGNENG CAI 11 Accelerated Testing Methodology for
Long-Term Life Prediction of CFRP Laminates

Review

YASUO HIROSE 21 Crack Onset Diagram using Crack Arrester

Papers

SHINJI OGIHARA, HAYATO NAKATANI
& TETSUYA MORIMOTO 27 Effect of Interfacial Properties on the Tensile Strength
in Unidirectional Fiber Reinforced Composites

TAKENOBU SAKAI, SHUICHI WAKAYAMA
& C-R RIOS SOBERANIS 35 Effect of Z-yarn on Bending
Behavior of Non-crimp Fabric Composites

JUN KOYANAGI, YOSHIHIKO ARAO,
SHIN-ICHI TAKEDA, SHIN UTSUNOMIYA
& HIROYUKI KAWADA 41 Time and Temperature Dependence of Surface
Accuracy on CFRP Sandwich Mirror

SHU MINAKUCHI, MOTO TAKAI,
HARUKA OTAKE & NOBUO TAKEDA 47 Rapid Repair Concept for CFRP Structures
Monitored by Structural Health Monitoring Systems
: On Uncertainty of Detected-damage Information

Papers

KAZUSHI SEKINE & TSUYOSHI OZAKI 53 Process Simulation of Fiber Reinforced Plastics
Part II Formulation of Mechanical Properties
in Various Molding Methods

TOMOYUKI FUJII & YOSHIAKI AKINIWA 61 Molecular Dynamics Analysis for Deformation
Behavior of Polycrystalline Copper Thin Films

MINORU SHIMBO, TOMOHIRO HORI
& AKIHIRO MISAWA 71 Foaming Process and Mechanical and
Optical Characteristics of Surface Layer-foamed Plastics

Contributions

MINORU SHIMBO 77

General Index for 1982–2011

In Japanese 79
In English 111

Commentary