

翼構造を持つターボファン一体成形技術の開発とその展開

Development of Plastic Molding Technologies of Wing-Structured Turbofans

相澤 龍彦* 山田 崇* 松田 正雄**

Tatsuhiko Aizawa*, Takashi Yamada* and Masao Matsuda**

The wing-structured turbofans have been widely utilized in various industrial systems. In particular, the continuous plastic turbofans become popular because of their light-weight, structural integrity and cost-competitiveness. In the present paper, the engineering base for design of multi-wing structured turbofans for each application is built in with importance on the effect of geometric parameters on the pressure and volume velocity distributions. Next, the mechatronic mold design is proposed to make a single shot injection molding of turbofans. This mold design holds on the efficient production of various wing-structures in practice. Mini-/micro continuous turbofans with multi-wing structures are fabricated by the mini-mold-stamping system on the basis of miniature mechatronic mold design.

Keywords: Turbofans, Multi-wing structure, Mechatronic mold, Single-shot injection molding, Mini-turbofans, CFD

1. はじめに

ターボファンは、空調あるいはエアータオルの心臓部として広く利用されている¹⁾。さらに羽のない扇風機、ダイソンに代表される掃除機など、その用途は拡大を続けており、[1]空気・水の搬送による冷却、[2]空気・水の流速加速による清掃・脱水、[3]差圧発生による吸気・吸水など、その仕様特性もさまざまである²⁾。またターボファンへの高速化・軽量化・高信頼化は基本的な要請であり、金属ターボファンからプラスチックターボファンへ、分割・接合・溶接ターボファンから一体成形したターボファンへと、製品デザインコンセプトも大きく変貌を遂げている³⁾。さらに用途特性・仕様特性を適切に満足するターボファン形状最適化、微小部位の冷却・微小空間の吸気・吸水などターボファンにおいても、微小サイズ化が強く求められつつある^{4, 5)}。

研究者らは、6年間にわたり、メカトロ金型によるターボファンの一体成形技術の開発に従事してきた。特にその中で、翼構造を有するターボファンが特性向上をはかる上で重要な形状因子であることを見出した。ここでは、種々の形状を有するターボファンの中で、この翼構造を有するターボファンに注目する。最初に、翼列モデルに準じた解析的取り扱いならびに、3次元空気流体解析をベースに、3次元ターボファンデザインについて検討する。特に、翼構造パラメータの変化に対応して、

どのように圧力・体積速度などが変化するかを議論する。実験的には、3次元プリンターで作製した一体化ターボファンの風洞実験結果の比較検討から、その特徴を定量化する。次に、メカトロ金型を用いた一体成形型構造を考案し、その動作挙動と成形挙動について詳細に述べる。これにより、一体化ターボファンの製品特性と製造手法との対応を示す。その上で新しい一体化ターボファンの展開として、一体化成形システムの微小化を進め、一体化マイクロミニ・ターボファンの可能性を検討する。上記の理論結果ならびに実験結果より、一体化ターボファンデザインのための計算風洞技術のあり方ならびに、一体化成形技術の展開についても考察する。

2. 一体化ターボファンデザイン

前述したように、一体化ターボファン形状には種々の製品群がある。ここでは、図1に示すように、中央から吸い込み、周辺へと移流する3次元空気流を実現する形状を考える。最初に、実験結果との比較が比較的容易な簡易モデルを考える。圧力・体積速度分布等に影響を与える一体化ターボファンの形状因子に注目し、簡易モデルによるパラメータ依存性を検討した。次に、非圧縮流体を仮定した3次元CFD解析モデルを構築し、ターボファン内での3次元空気流体挙動を詳細に調査した。最後に、簡易モデルによるターボファンデザインの可能性を

* デザイン工学部デザイン工学科 Department of Engineering and Design, College of Engineering and Design

** 松田金型工業株式会社 Matsuda Mold Engineering, Co. Ltd

検討するために、3次元造形法により一体化ターボファンモデルを作製し、簡易風洞実験によりパラメータ依存性を実験的に検証した。

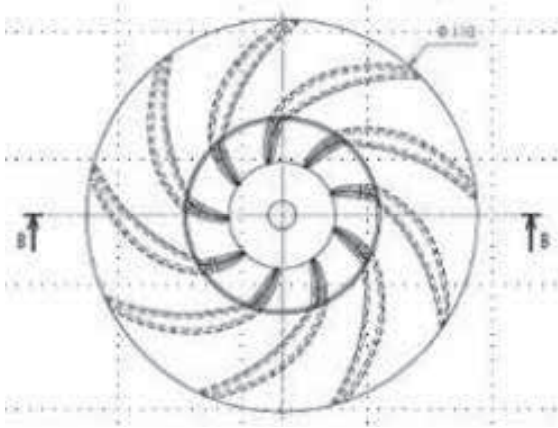


図1 代表的な翼構造を有する一体化ターボファンの例。

Fig. 1 A typical continuous turbofan with the multi-wing structure.

2.1 簡易理論モデル

多翼構造を有する一体化ターボファンの簡易理論モデルとして、翼列モデル⁶⁾を考える。この簡易理論では、ターボファンがなす仕事 (W) は、回転数 (ω) とトルク (T) との積で与えられ、トルクは空気流入量 (Q) と入口・出口の圧力差あるいはヘッド (P) の積で与えられる。すなわち、

$$W = \omega \times T, T = Q \times P, \quad (1)$$

ここで、理論ヘッド P は、出口流速 (u_2) およびターボファンの出口形状によって以下で与えられる。

$$P = \rho \times [\sigma \times u_2^2 - u_2 \times Q / A_2 / \tan(\beta_2)], \quad (2)$$

ここに、 ρ は空気密度、 A_2 は出口断面積、 β_2 は出口翼角度度であり、式(2)の第2項が出口形状の依存性を反映した圧力損失項になる。特に、パラメータ σ は有限翼列におけるすべり係数であり、以下のように、翼数と出口翼角度が影響する。

$$\sigma = 1 - [\sin(\beta_2)]^{1/2} / Z^{0.7} \quad (3)$$

ここに、 Z は翼数を示し、翼数が多くなると式(3)の第2項は事実上ゼロとなり、無限翼列モデルに帰着する。また出口翼角度がゼロに近くなっても、この補正効果はな

くなる。この簡易モデルにより、トルク・回転数および出口半径を既知とすると、種々の出口形状パラメータおよび翼数の影響を定性的に議論できる。

2.2 モデル実験による評価

3次元光造形法を用いることで、材質・幾何学的精度を別として、CAD で設計したターボファン実験モデルを作成することができる。ここでは、図2に示すように、翼間の空気層の入口・出口高低差を変化させるとともに、翼数・入口半径も変化させ、ターボファンモデルを作製した。

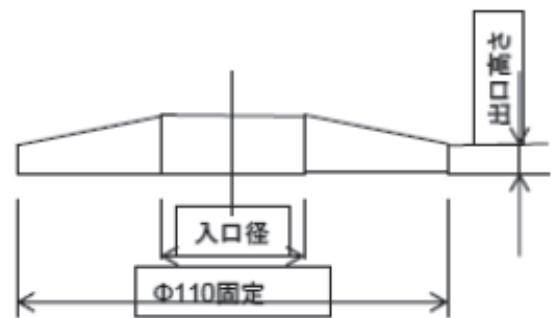


図2 ターボファンモデルの3次元光造形作製におけるパラメータ変化。

Fig. 2 Geometric configuration of turbofan models.



図3 簡易風洞実験装置。

Fig. 3 A simplified blowing experimental apparatus.

評価実験では、図3に示す簡易風洞実験を行い、ターボファンを所定の回転速度で稼働させ、入口・出口速度・圧力などを測定した。なお、一連の実験では実用化試験も兼ねて実施したので、雑音発生・消費電力など、製品としてのターボファン特性についても調査した。

ここでは、種々のパラメータ依存性の中で、入口径・

入り口高さの影響は、圧力差で最大 0.2kPa 程度と小さくなく、上述した簡易理論モデルのように出口形状のみで議論してよいことが実験的に確認できた。以下では、出口形状の影響のみを記述する。式(2)より、出口高さの増大による出口断面積の増大、ならびに出口翼角度の増大により、静圧は単調に増加すると予想される。図 4 および図 5 に、出口高さならびに出口翼角度に伴う静圧の変化を示す。

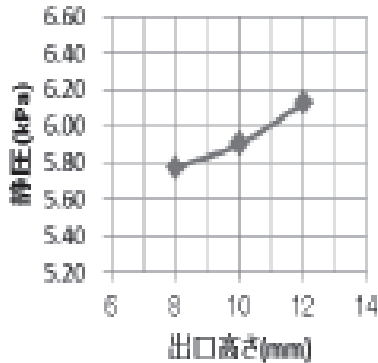


図 4 出口高さに伴う静圧の変化。

Fig. 4 Variation of the static pressure with increasing the exit height in the turbofan.

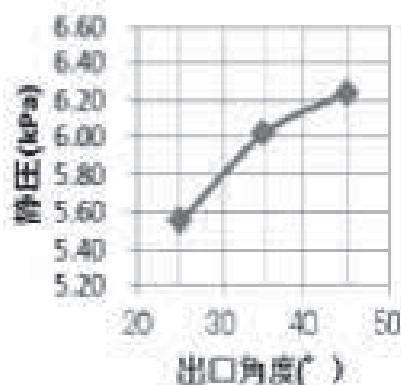


図 5 出口翼角度に伴う静圧の変化。

Fig. 5 Variation of the static pressure with increasing the wing angle at the exit of turbofan.

上記の実験データは、簡易理論モデル予測と定性的に一致しており、ターボファンの出口形状などのおおまかなデザインは、式(2)にしたがって行うことができる。また翼数が 7 以上のターボファンでは、有限翼列に伴う補正の影響は、実験誤差範囲内であり、ここで対象とした小型ターボファンでは、無限翼列として扱っても事実上支障のないこともわかった。しかし、後述するように、次世代のターボファンをデザインする場合には、翼間の

空気流動層形状ならびにターボファン上部・下部構造も曲面となるため、簡易化の取り扱いが難しい。以下ではこの課題を解決するために、3 次元 CFD (Computational Fluid Mechanics) によるシミュレーションを用いた定量評価を開始した。

2.3 3 次元 CFD によるシミュレーション

ここでは、CFD (数値流体解析) による遠心ターボファン内部における回転 (運動) 時の内部流体の流れを静的 (定常的) に計算する手法を確立し、ターボファンデザインへの展開を模索した。簡易モデルあるいは簡易風洞実験からも推察されるように、遠心ターボファンの性能と用途は、その形状との関係性とその最適化がきわめて重要である。また後述するように、ターボファンの一体成形技術においては、3次元形状として実現できるターボファン形状に一定の制約が生じる。限定された形状パラメータの中で、ターボファン特性を用途別に向上させるかが課題となる。

最初に簡易理論モデルでは不明確であった、翼間の空気流動について記述する。ターボファンでは、図6に示すように、ファンの回転により入口速度が変化して出口速度となる、速度三角形を考える。

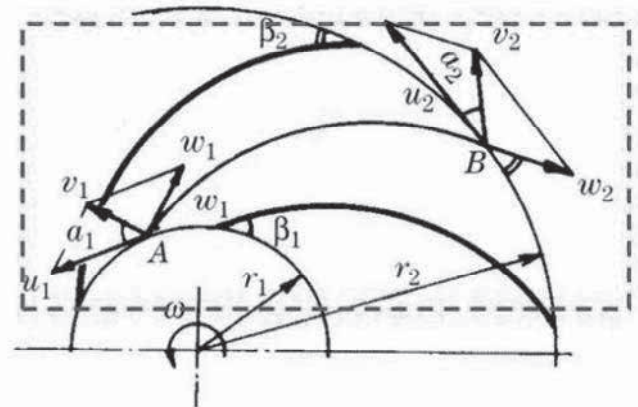


図 6 ターボファンデザインにおける速度三角形。

Fig. 6 Velocity triangle in the turbofan design.

CFDでは絶対座標系で空気流動を記述するため、上記の速度三角形は、図7に示すように、翼の回転にともなう回転座標系からの相対速度効果と、翼間におけるコリオリ力の効果の2つを考慮しなければならない。具体的には、回転座標系内に流入する空気速度に遠心力の効果を加味し、翼間ではコリオリ力を、出口では回転座標系からの相対流出速度を考慮することで、簡易風洞実験と同

様に絶対座標系あるいは空間固定座標系における速度分布ならびに圧力分布が求められる。

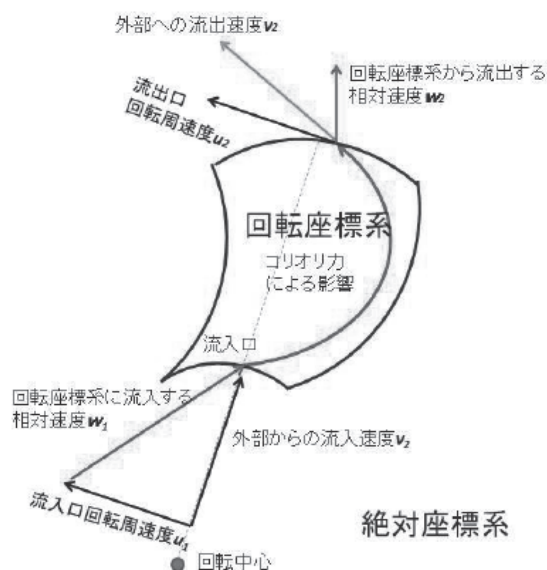


図7 絶対座標系における速度三角形。

Fig. 7 Velocity triangle in the turbfan, defined at the absolute coordinate system.

上記により、2枚の翼の間の空気層に関する流体モデルが構築できる。加えて、ターボファンは多数枚の翼列から構成されている。このため、解析モデルとしても、図8に示すように多列モデルを必要とする。

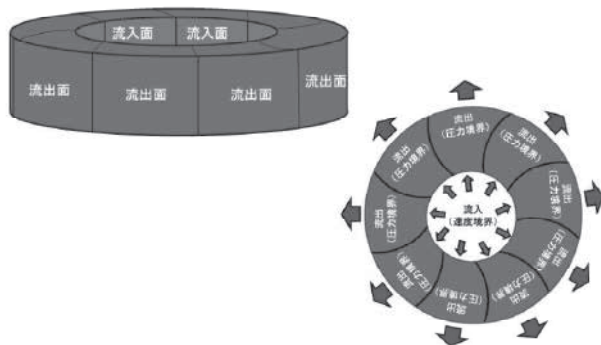


図8 ターボファンに対応する多翼列モデル。

Fig. 8 Multi-wing structured model for a turbfan.

実際のCFDでは、上記を考慮した上で、図9に示すように、翼間・上下構造内の空気層を3次元要素に分割したモデルを構築することで、解析モデルとなる。

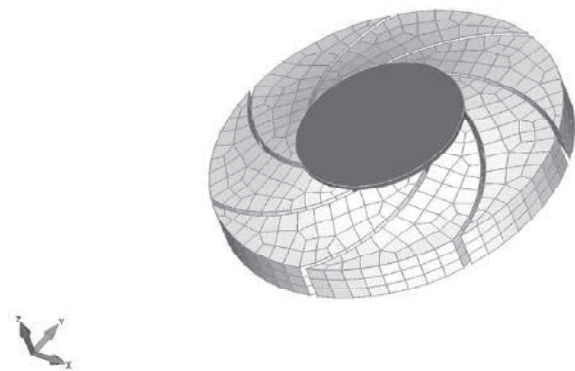
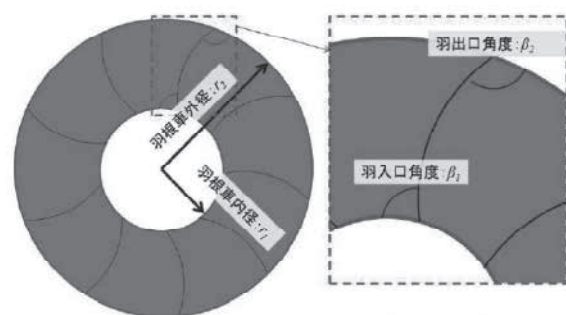


図9 3次元CFD解析のための要素モデル。

Fig. 9 Three dimensional mesh model for CFD analysis.

実際のシミュレーションには、流体計算を行う汎用熱流体解析コードとして、FINAS/CVD（伊藤忠テクノソリューション社製）を用いた。このプログラムでは、時間積分法として陰解法（Implicit scheme）を、圧力計算アルゴリズムとしてSimple法を用いている。後者は、ナビエ・ストークス方程式（微分系）では直接算出できない流れ内部の圧力分布を、評価体積に出入りする流体の各方向の速度差から近似的に算出する手法である⁷⁾。

図9に示すような解析用メッシュモデルを作製し、境界条件を設定するとともに、解析結果を可視化・評価をするポストプロセッシングには、FEMAP（Siemens社）を利用した。ターボファン形状パラメータとして、図10に示すように、メッシュモデル寸法形状を変化させ、シミュレーションを行った。



計算モデル
 ・ 羽根車外径: 0.20[m]
 ・ 羽根車内径: 0.05[m] or 0.10[m]
 ・ 羽根入口角度: 45°, 60°, 75°
 ・ 羽根出口角度: 60°, 90°, 120°

羽根枚数: 10枚(固定)

図10 ターボファン形状パラメータ設定。

Fig. 10 Geometric parameters in the three dimensional CFD simulation for turbfan design.

ここでも、出口形状・ターボファン径などの流速分布・圧力分布への影響を調査する。最初に、外径200mm, 入り口翼角度 60° , 出口翼角度 90° 一定として、内径が50mmの場合の速度分布を図11に、内径が100mmの場合を図12に示す。

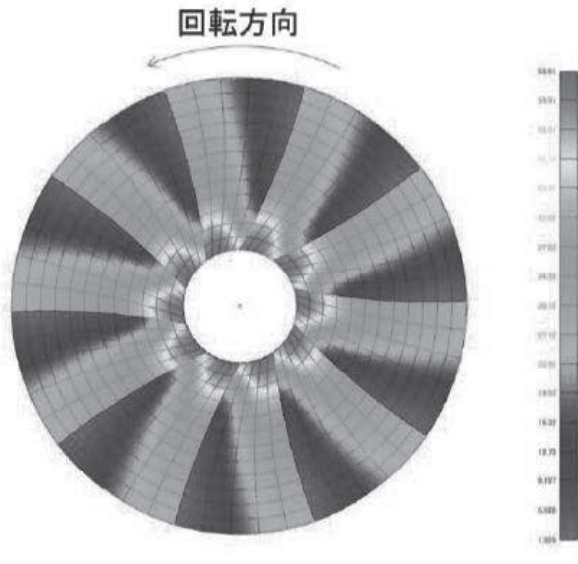


図11 内径を50mmとした場合のターボファン流速分布。

Fig. 11 Three dimensional velocity distribution in the turbfan when its inner diameter is 50 mm.

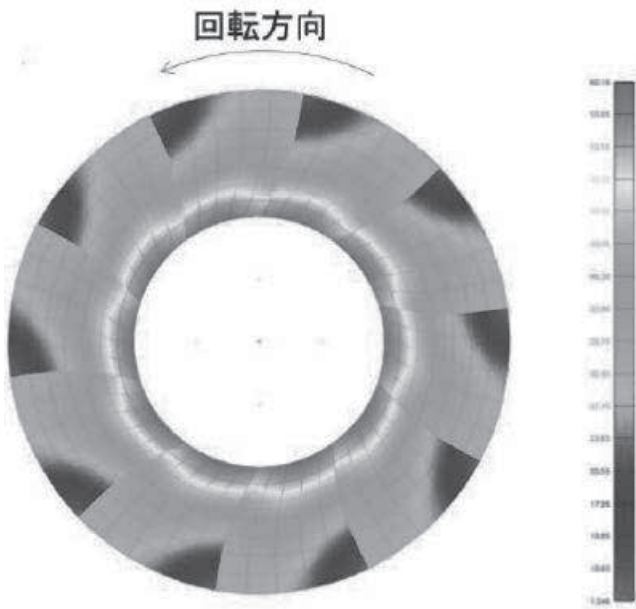


図12 内径を100mmとした場合のターボファン流速分布。

Fig. 12 Three dimensional velocity distribution in the turbfan when its inner diameter is 100 mm.

両図において、内径のみの差異により速度分布に大きな差が生じている。内径の差による曲率変化の影響もさることながら、内径50mmでは各翼間の左側、100mmでは右側において速い流れが生じており、流速分布パターンが全く逆となっている。詳細を調査すると、両者における主流の流出速度は20 m/s, 50mm内径における流速が遅い領域あるいは失速領域では2 m/s, 他方100mm内径ではその領域では8 m/s程度と、内径増加に伴い速度差が低減している。このことは、内径100mmのターボファンが効率ならびに2次流れなどの不確定要素低減で有利であることを示唆している。

次に圧力分布を比較してみよう。図13において、内径50mmにおける出口圧力の最大値が1.8Paであり、きわめて低い。一方、図14に示すように、100mm内径では、約57Paと30倍の圧力上昇が認められる。これは翼形状によるDiffuser効果が内径を増大することで飛躍的に増大することを意味している。

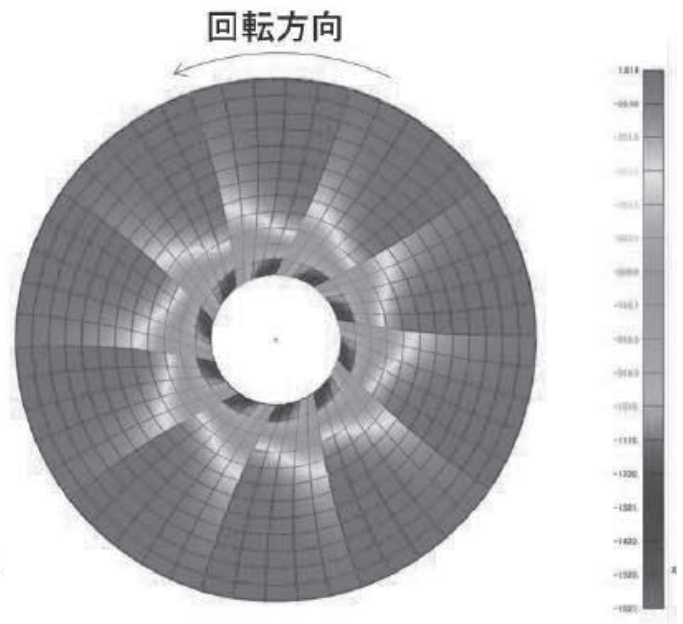


図13 内径を50mmとした場合のターボファン圧力分布。

Fig. 13 Three dimensional pressure distribution in the turbfan when the inner diameter is 50 mm.

上記の計算条件では、回転数を実験条件範囲まで増加できないため、半定量的な議論でとどまっている。これは風洞実験レベルさらにターボファン製品レベルで使用される回転数 10^4 にいたる過程で、CFDシミュレーションが不安定となり、特に圧力精度が低下することに起因している。定量的なCFDシミュレーションデザインを行う

には、計算機風洞シミュレーションに耐えられるプログラムの改良が不可欠となる。

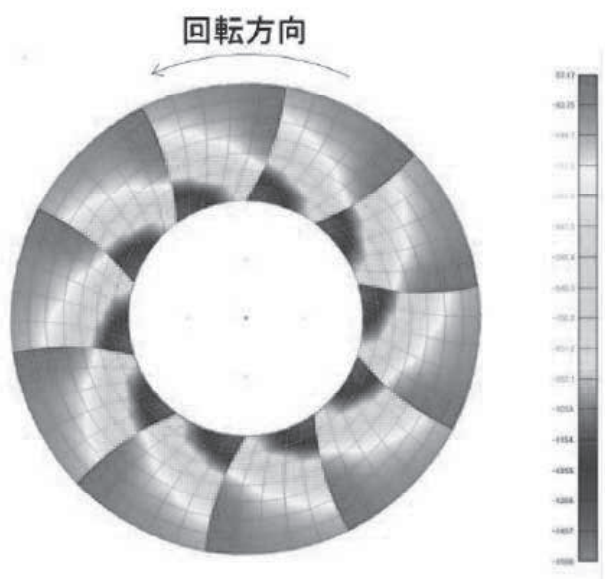


図14 内径100mmとした場合のターボファン圧力分布。

Fig. 14 Three dimensional pressure distribution in the turbofan when the inner diameter is 100 mm.

3. ターボファン一体成形技術

ここでは、ターボファンを構成する上部構造体および翼列を、射出成形により一体成形するための金型技術、一体成形方法および一体成形したターボファンについて述べる。

3.1 メカトロ金型構造

図1に示すようなターボファンを、通常のコ型のようには、射出したプラスチック製品を冷却後取り出すパーティション方式で生産することは、製品形状が金型と干渉するため不可能である。翼間の空気層を確保しつつ、上下板構造体と翼列とを一体成形するには、空気層部分にはプラスチック溶融材は流入しないように金型でふさいで成形し、成形・冷却後は、その部分の金型が自動的に移動して、成形品を取り出すシステムが必要となる。これがメカトロ金型である。

図15に、当該のメカトロ金型のCADシミュレータ図を示す。要は、後述する翼間の空気層形状を実現する稼動金型設計と、多翼列に対応した稼動金型の同期制御にある。射出成形時には、図15a)のように空気層部分の金型が主金型コア内にあるため、注入されたプラスチックは

主金型コア壁面と稼動金型とのクリアランス部位に流入、凝固する。図15b)のように冷却後、稼動金型を同時にコア内部から送出することで、射出したプラスチックターボファンを取り出すことができる。

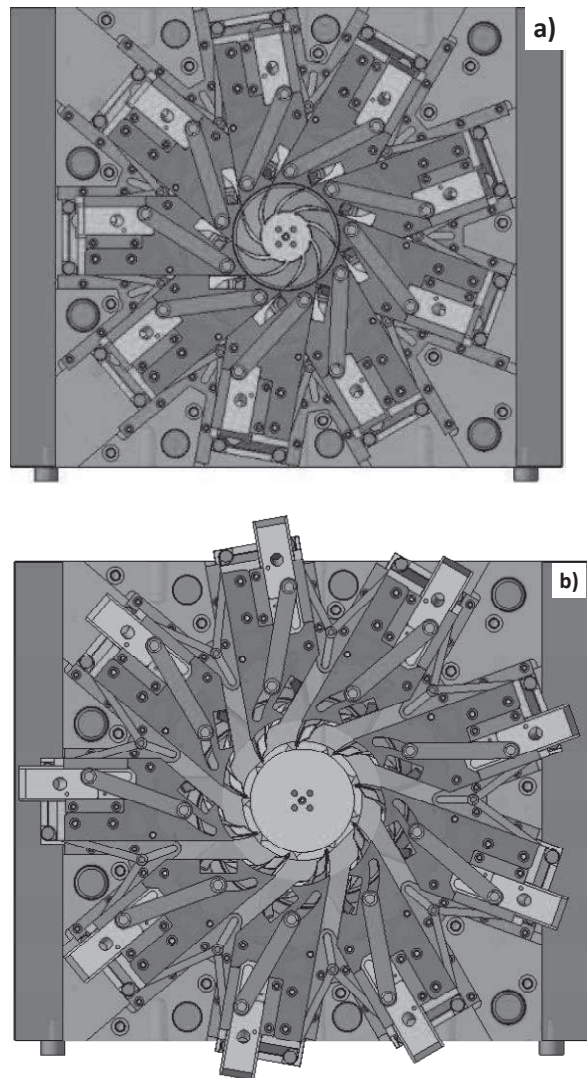


図15 メカトロ金型のCADシミュレーション図。a)ターボファン射出成形時、b)ターボファン取り出し時。

Fig. 15 CAD-simulation of mechatronic mold. a) During the injection molding of turbopumps, and, b) During the ejection of molded turbopumps.

3.2 稼動金型メカニズム

図15の機構から予想されるように、ターボファンの空気層部位を金型で置換するには、入ロウ出口高低差・翼の曲率など、金型ならびにその駆動方法に大きな制約条件が課される。またメカトロ金型として製品不良（プラスチック材の未充填あるいは、バリ発生）を回避するためには、稼動金型形状も最適化する必要がある。さらに、

多翼構造ゆえに図15に一部示すように、同期制御のための機構部品を装備しなければならない。

図15に対応して設計作製した、稼動金型のCAD図面を図16に示す。特に入口・出口の高低差をカバーするために、稼動金型が上下でスライドする機構となっている。

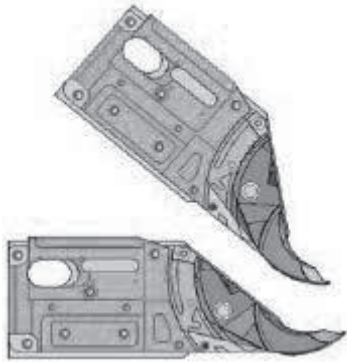


図 16 メカトロ金型における稼動金型の一例。

Fig. 16 Sliding mold units to move simultaneously in the mechatronic mold system.

3.3 射出一体成形プロセス

実際の一体成形は、図15のメカトロ金型をパーティション方式で成形装置にセットし、実験を行った。図17に、射出成形機にセットしたオープン上体のメカトロ金型を示す。

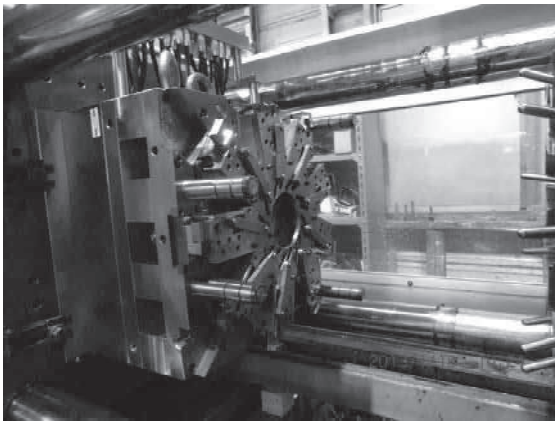


図 17 メカトロ金型を搭載した射出成形装置。

Fig. 17 Injection molding machine with the mechatronic mold.

この設定により、サイクル時間 30 秒でターボファン 1 個を生産する目標を達成した。

3.4 ショートショット実験結果

図17に示した射出成形方法が適切な否かは、射出するプラスチック材料と射出パラメータを制御して、モールド

ド金型のコアへの充填割合を変化させることで、判断することができる。このショートショット実験結果の一例を図18に示す。

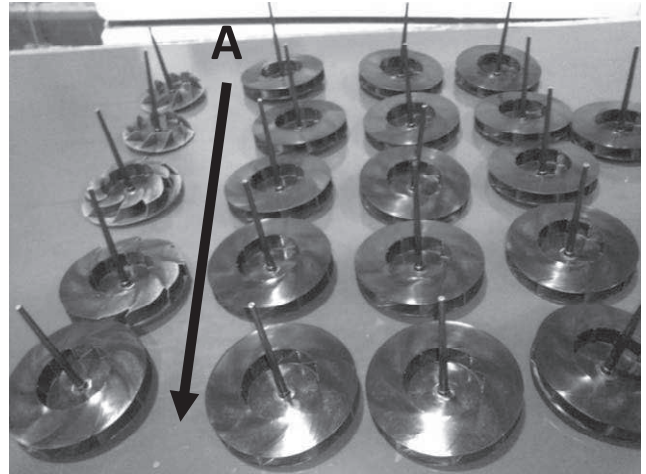


図 18 ショートショット実験ならびに連続射出成形したターボファン。

Fig. 18 Short-shot experimental results with the fully molded turbofan products.

図 18 中の A から 5 段階の成形途中のステップを示す。中心のスプルーから注入されたプラスチック材は、最初の下部構造であるターボファン底板部分を充填する。次に稼動金型間のクリアランス部位（ここが翼部位となる）を充填し、上部構造である上板に達する。プラスチック材の導入方向と逆方向に充填していくことで、未充填部位の発生を防止している。

3.5 一体成形したターボファン

図18の右に、連続して射出成形したターボファン製品を示す。製品精度のチェックを行ったが、バリの発生もなく、一体成形により高精度でターボファン形状を創出できることを確認した。

4. ミニターボファン成形への展開

微小機械システムあるいは医療用・電子部品冷却用のターボファンは微小化が求められている。ここでは、メカトロ金型のコンセプトを活用した、多翼ターボファン生産技術について述べる。一般に微小プラスチック製品の生産技術には、ミニ射出成形プロセスとミニ・マイクロモールドプレス法がある。ここでは、後者をベースに

微小ターボファンの生産方式を検討した。

4.1 多翼構造のターボファン成形設計

ここでは、直径10mmの斜め多翼構造をもつミニターボファンの成形を考える。一般的な射出成形では、図15に示すスプール以外にランナー・ゲート部が必須であり、製品形状が微小化するに伴い、成形に必須でも製品に不要となる部位でのプラスチック材の比率が増大する。文献[4]における試算でも、製品に要する体積の5～10倍のプラスチック材料を必要とする。したがってミニターボファンなどの微小プラスチック製品を成形するには、文献[5]にあるような小型射出成形装置あるいはモールドプレス成形装置が必要となる。

後者では、後述するように材料供給方法になお、改良の余地はあるが、図19に示すようにCNC制御することで、ほぼ製品体積に匹敵するプラスチック材料のみを供給することで、製品成形を行うことができる。

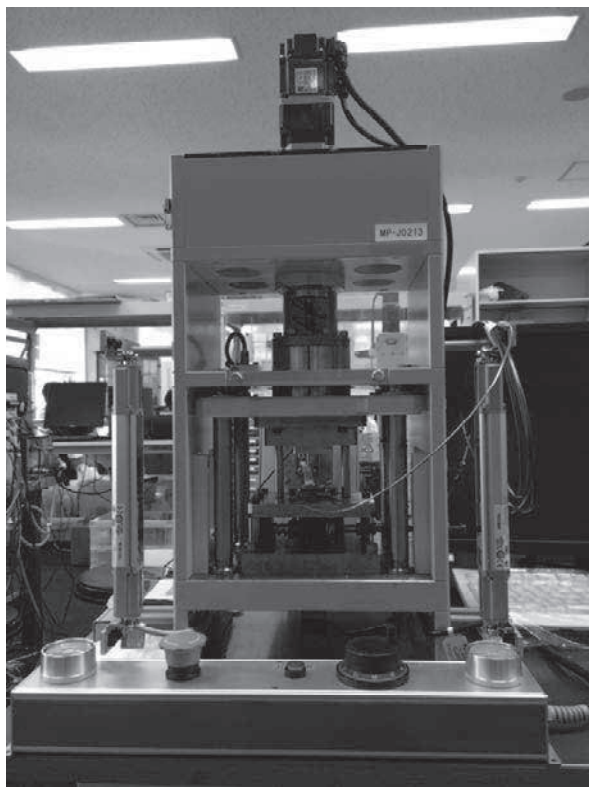


図19 CNC制御で製品成形するテーブルトップモールドプレス成形装置。

Fig. 19 A table-top CNC mold-stamping system for single-shot forming of plastic turbfan.

同図において、中央に設置しているカセット金型を、材

料供給機能を含むメカトロ金型とすることで、モールドプレスによるターボファン成形を行う。

4.2 ミニターボファン成形システム

成形システムのコア技術は、メカトロ金型設計にある。前述したように、モールドプレスによるターボファン成形においても、翼構造の成形で幾何学的干渉が生じるため、モールド成形時には翼間の空気層を型駒が占めることで、上下ターボファン構造と翼構造とを一体成形する。成形終了後に型駒を稼動させることで、製品を取り出す。図20に、図19に設置するカセット金型の全体図を示す。

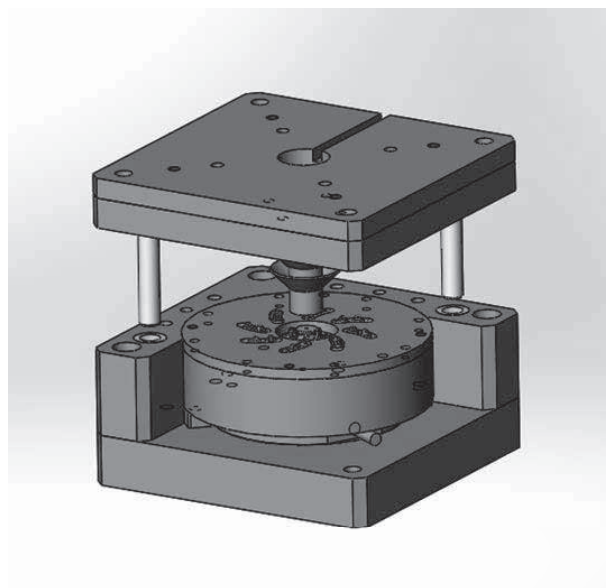


図20 メカトロ金型部位を含むカセット金型。

Fig. 20 A cassette mold-die set housing the mechatronic mold core in its inside.

同図において上部が溶融プラスチック部位であり、下部がメカトロモールド部位となる。この部位の詳細を図21に示す。ミニターボファン直径が最大で10mm程度を想定しているため、1つ1つの型駒を制御する機構は採用せず、空気層を示す型駒を同時に稼動する方式を採用した。具体的には、メカトロ金型を2分し、ターボファンの形状を創製する中央部分の型駒群と、それらを稼動する金型部位から、型を構成する。後者を回転させることで、前者が空気層を占め、ターボファン翼部分のコアを形成する。この時点で、プラスチック材料を充填・成形することで、ターボファンを成形する。成形後は、後者を逆回転させ、前者の稼動型駒を中央部位より同時に離すことで、製品を取り出すスペースを回復する。

この方式により、微小な翼構造であっても一体成形するメカトロ金型を構築できる。

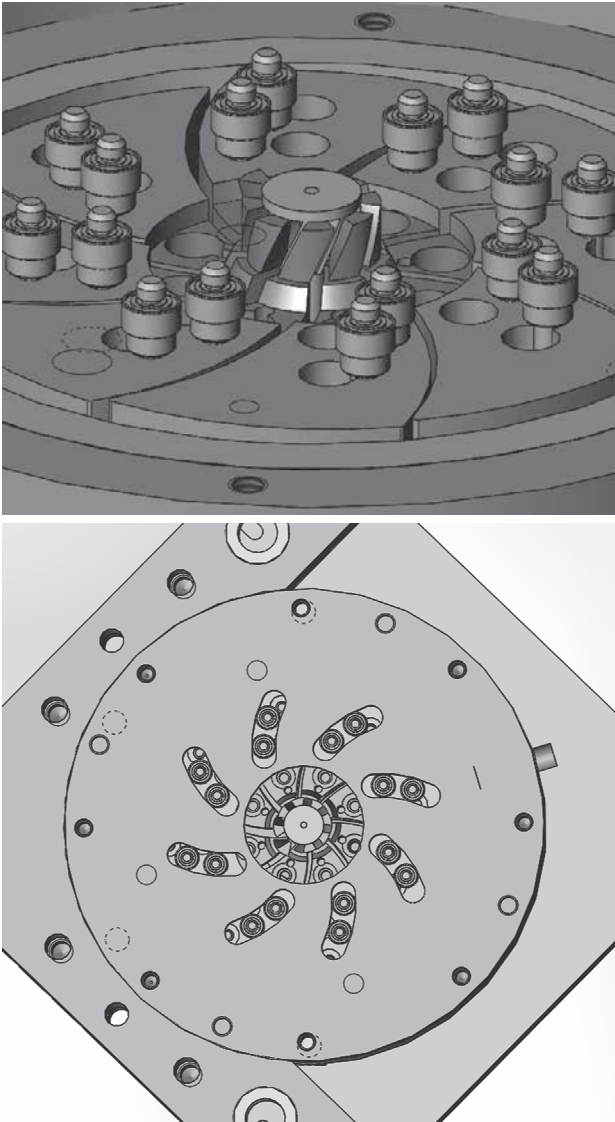


図21 メカトロ金型部位の詳細構造。

Fig. 21 Detail structure of mechatronic mold system.

4.3 ミニターボファン成形結果

ここでは主として、ABS樹脂（ガラス転移点：約100℃）を用いた成形実験結果を示す。出発原料は粒状化したABS樹脂を用い、それを図20における上部の材料供給部分に投入し、超高周波IHで急速加熱・溶融化し、溶融体を上部からメカトロ金型部位に注入することで成形を行う。モールドプレス成形では、射出成形と異なり、図20のカセット金型上部に負荷を与えることで、形状創製を行う。ガラス転移点直上の成形温度範囲で、プラスチック溶融体粘度が高い条件でも成形でき、未充填・バ

リなどの不具合を防止することができる。成形したターボファンの一例を図22に示す。

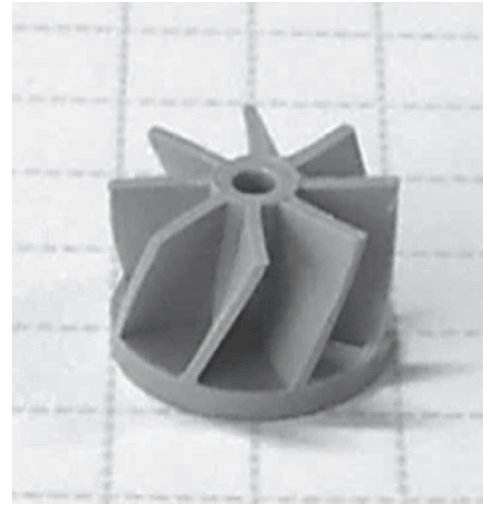


図22 成形したターボファン製品事例。

Fig. 22 Mold-stamped turbofan with the skewed wing structure.

8翼構造かつ斜め翼構造のターボファンであり、斜向角度・翼厚ともに精度よく成形できることがわかった。

5. 考察

ここでは特に、一体化ターボファンデザインのための計算機ターボファン風洞コンセプトとミニターボファンの実用化技術について考察する。

5.1 計算機ターボファン風洞システム

計算機ターボファンでは、ターボファン形状およびそのメッシュモデルは、FEMAPのニュートラルファイルをエクスポートし、風洞条件（圧力差；速度条件；回転数など）を入口・出口の境界条件・初期条件として与え、定常解析・非定常解析によって、ターボファン内部の3次元速度分布・圧力分布を回転数の関数として求める。

前述したように、圧力を近似的に求めるSimple法では直接的に圧力バウンダリーを考慮できないため、高回転数のターボファン特性を求めることが難しくなる。

現在開発を行っているシステム⁸⁾では、圧力境界条件のみでもCFD解析できるようにするとともに、非定常解析を通じて定常解を回転数増加にともない逐次的にもとめていくことで、目標回転数における3次元速度分布ならびに圧力分布を求める。その上で、この解析データを用いて、ターボファン入口・出口での体積速度変化、圧

力差などを求め、風洞特性データをターボファン形状ごとに特性データ化する。さらに、ターボファン形状変化に伴う特性データ変化を対応させ、形状最適化を進める感度解析機能を高めていく。

5.2 ミニターボファン実用化技術

ミニターボファンを実用化するには、成形プロセス時間の短縮化と成形安定性が必要である。当該のモールドプレス成形では、材料供給の連続化がプロセス時間短縮・プロセス安定化の両面で重要である。現在、プラスチック粒状体を連続的に供給しつつ、メカトロ金型への熔融プラスチックを制御注入する機構部品を作製中である。ここでは、スパイラル流路中を圧力負荷しつつ過熱制御し、メカトロ金型への注入時に熔融体粘度もコントロールして成形する⁹⁾。これにより、成形時間を大幅に短縮し、1ショットを1分以内におさめる成形プロセスとする。

6. おわりに

一体成形されたターボファンは、その大小に係わらず、種々の工業用製品で採用され、使用される機会が増大している。その要請に応えるには、用途・仕様に適合するターボファン形状をデザインし、その流動特性を予測する手段が求められる。計算機ターボファン風洞は、その要請を満足する唯一ともいえる手段であり、今後整備を急ぎたい。特に、ターボファン製造メーカーならびに大手川下メーカーとも連携して、過去の設計製作事例の分析も行い、計算機ターボファン風洞の定量的特性解析能力を目指したい。特に圧力バウンダリーを自在に設定し、各回転数において非定常解析で得た定常解を求めることで特性データを取得する。

一体成形用金型に関しては、メカトロ金型の機構を検討し、これまでの一体成形手法からの脱皮と展開をはかる必要がある。特にミニ・マイクロターボファンの一体成形では、原料供給機構改良も含めた技術改良を進め、

より微小なプラスチックターボファンの創製を目指す。

謝辞

本研究を進めるにあたり、戦略的基盤技術高度化事業に携わった多くの技術者ほかに感謝の意を示す。特に、タマTLO・松永氏の実験ならびに解析に関する協力に感謝したい。またミニターボファン製造装置の開発では、芝浦工業大学・学生であった中島氏・中村氏・八木氏・馬場氏によるところが大きい。ここに謝意を示す。

なお、本研究の成果の一部は上記事業費による。

なお、本論文は、筆者らがまとめた戦略的基盤技術高度化支援事業研究成果報告(2013年度)を元に、その後の共同研究を通じて深化させた内容を加味し、さらに筆者らがMF2015（鍛圧機械工業会主催、2015年7月ビッグサイト）で口頭発表した内容も含めた論文である。

参考文献

- [1] SUNON Corporation: Ultra mini-turbofans for heat management in the small space of electric parts and devices. 2012. (<http://special.nikkeibp.co.jp/ts/article/aa0h/110823/>).
- [2] SONY: Introduction to micro-turbofans and mini-turbofans. 2012. http://www.sony.co.jp/Products/SCHP/cx_pal/vol69/pdf/fanmotor.pdf.
- [3] 経済産業省, 「ターボファン一体成形用メカトロ金型の開発」平成 25 年度戦略的基盤技術高度事業最終報告書(2013).
- [4] T. Aizawa, M. Nakajima, S. Kurozumi, S. Iwa, K. Itoh, "Micro mold-stamping of plastic mini-turbofans via table-top CNC-pressing system," Proc. 8th ICOMM (2013) 650-657.
- [5] T. Aizawa, K. Itoh, T. Fukuda, "Fine micro-stamping system for micro-pattern printing onto polymers and glasses," Proc. 10th ICTP Conference (2011) 1097-1102.
- [6] ターボ機械協会編, 「ターボ機械・入門編」日本工業出版(1989).
- [7] S.V. Patankar, 「コンピュータによる熱移動と流れの数値解析」森北出版(1983).
- [8] 山田崇, 「MF-Tokyo での講演報告」塑性と加工, 日本塑性加工学会(2016)(印刷中).
- [9] T. Aizawa, T. Baba, S. Kurozumi, "CNC micro-mold-stamping of plastic turbofans via mechatronic mold system," Mechanical Engineering Journal. (2016) (to be published).

(2015 年 9 月 27 日 受付)