

境界層強制遷移に伴う臨界レイノルズ数前後の球に 作用する支持干渉の無い空気力について

澤田秀夫、須田信一

宇宙航空研究開発機構/総合技術研究本部

About support-interference-free aerodynamic force acting on a sphere with boundary layer trip around its critical Reynolds number

by

Hideo SAWADA, Shinichi SUDA (JAXA/IAT)

Abstract

Through advanced detail simulation tests, adjusting model mass and control factors made successful measurement of aerodynamic force on a sphere at Reynolds numbers around critical one at the JAXA 60cm magnetic suspension and balance system. The obtained averaged aerodynamic force for 8 seconds shows that the minimum drag coefficient after the critical Reynolds number reaches 0.062 and that any hysteresis phenomenon on drag coefficient with respect to Reynolds number was not observed around the critical one. Through the obtained fluctuations of aerodynamic force, the shrunk force fluctuating around the sphere axis parallel to main flow and some force swirling the sphere about the axis for a short time were observed at Reynolds numbers larger than the critical one. And some oscillating force on a plane including the axis was observed in the test of a sphere with double tapes for boundary layer trip in large Reynolds number region around the critical one.

1. はじめに

球の抵抗測定は古くから実施されていて、レイノルズ数（一様流速 $U(\text{m/s})$ 、球の直径 $D(\text{m})$ 、動粘性係数 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ とするとレイノルズ数 Re は UD/ν と定義される。)が 3×10^5 付近で抵抗係数（抵抗 $F_D(\text{N})$ 、一様流動圧 $q(\text{Pa})$ 、球の最大断面積 $S(\text{m}^2)$ とすると、抵抗係数 C_D は $F_D/(qS)$ と定義される。)が急に減少することが知られている。特に、 C_D が 0.3 になる時の Re を球の臨界 Re と呼び、風洞気流乱れの程度を示す指標としても利用されている。球の風洞試験の多くは後流への支持装置の影響を出来る限り小さくするため、球を細いスティンクで支える等、様々な工夫を施している¹⁻³⁾。しかし、どの場合でも模型を支えている支持部やワイヤーが模型周りの流れや後流にどのような影響を及ぼすかは十分に解明されていない。当然、 C_D にも底面圧の違い等を通して影響することが考えられる。

磁力支持天秤装置(以降、MSBS と記す。)は磁気力で風洞模型を支持し、模型に加わる空気力を計測するもので、支持干渉が無い。このため、後流が大きく変化する臨界 Re 付近での球の空気力測定には適している。しかし、臨界 Re 付近では球に作用する空気力が激しく変化するため、磁力支持している球の位置変動が大きくなり、これまでは最高 Re が 3.8×10^5 程度で、模型を磁力支持できなくなっていた⁴⁾。そこで、今までの試験結果から最大変動空気力の大きさを評価し、その程度の変動空気力に対しては模型位置変動が MSBS の模型位置姿勢測定センサーの測定域内に留まるように制御能力の再調整を実施した。更に、測定を確実にするため、臨界 Re が小さくなる様に境界層強制遷移用のテープを模型表面に貼り試験を実施した。その結果、臨界 Re を超え、球がどのような空気力を受けるか、JAXA の 60cmMSBS を用いて測定することが出来た。JAXA の 60cmMSBS とそれを装備した風洞(磁力支持風洞)の詳細は文献 5)を参照されたい。

2. 変動空気力対策

直径 150mm 球では、臨界 Re 付近の抗力変動は約 0.1 秒の間に 6N 程度の変化が発生している。⁶⁾したがって、フィードバック制御はこれだけの急な抗力変化に対しても模型を一定の位置に保持し続ける能力が要求される。そこで、この現象を模擬するモデルを作り、この抗力変化に対して気流方向の位置変動のシミュレーションを行い、臨界 Re を超えて模型を安全に磁力支持するための方策について検討した。なお、MSBS で利用している座標系は測定部中心を座標原点とし、風洞気流方向を x 軸にとり、鉛直上向きを z 軸にして、これらと直交右手系を成すように y 軸を取っている。球は測定部中心に設置するようにしている。(以降、MSBS 座標系と呼ぶ。)

JAXA 60cm MSBS の制御系では基本的には二重位相進み付きの PI 制御を採用しており⁷⁾、模型の全質量を m 、これに作用する磁気力を F_{mag} 、空気力を F_{aero} とすると、模型の運動方程式は式(1)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x}(t) &= F_{\text{mag}}(t) + F_{\text{aero}}(t) \\ &= M_x h_{xx} I_x(t) + F_{\text{aero}}(t) \\ \ddot{x}(t) &= \frac{M_x h_{xx}}{m} I_x(t) + \frac{1}{m} F_{\text{aero}}(t) \end{aligned} \right\} \dots(1)$$

ここで、 t は時間を表し、 M_x は模型内部に組み込んだ永久磁石の x 方向磁気モーメント成分を、 h_{xx} は抗力と釣合わせ磁気力を発生させる抗力コイルに単位電流を流したときに作り出される x 方向磁場強さ成分の x 方向勾配を、 I_x は抗力コイルに流す電流の大きさを表すものとする。

フィードバック制御を含めたシステム全体の伝達関数は式(2)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} X(s) &= \frac{M_x h_{xx}}{ms^2} I_x(s) + \frac{1}{ms^2} F_{aero}(s) \\ X(s) &= \frac{\frac{10^3}{ms^2}}{1 + \frac{M_x h_{xx} \times 10^3}{ms^2} \times G_c \times k_p - \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s} \times H_p \times H_n \times H_{sensor}} F_{aero}(s) \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

ここで、 k_p は比例定数を、 T_i は積分時間を表し、 G_c は抗力コイルの制御要素、 H_p 、 H_n 、 H_{sensor} はそれぞれ位相進み要素、ノイズカットフィルター要素、 x 位置のセンサー要素の伝達関数を表している。JAXA 60cm MSBS 制御系のブロック図を図1に示す。

臨界 Re を越えるための対策の一つとして、模型質量を増加させることが考えられる。質量を増やせば変動空気力に対して位置変動を小さく出来るということは式(1)から分かる。そこで、模型の材質をアルミニウム製から黄銅製に変更し、全体の質量を増やすことにした。質量 7.0kg の元の模型では、急激に 6N の変動が起こった場合、最大 3.5mm の変位が発生していたが、例えば質量を 12.0kg に増やせば、2mm 程度にまで減らせることが分かった。

二つ目の対策として、フィードバック制御による効果も前回より強化することを図った。比例定数 k_p はフィードバックによる磁気力の大きさを決定し、積分時間は模型位置がずれてからフィードバックが作用するまでの時間を決定する。そして、これらの制御パラメータを調整すれば、最大変位を約 1.1mm に迄減らせることが判明した。このシミュレーション結果を基に、実際に総質量 10.7kg の模型を製作した。

しかし k_p が大き過ぎれば、或いは積分時間が小さ過ぎれば模型の制御は不安定となり易い。実際の磁力支持では、模型を落下させることの無い安全な磁力支持が求められ、実際の模型の応答を観察しながら制御定数に補正を加える必要がある。最終的に制御定数の調整はシミュレーション時のものと若干異なり、 x 方向の制御では k_p は約 10% 増やし、積分時間は 2 秒とした。

3. 試験

試験に用いた今回の球形模型では、形状測定の結果、 x 軸から 53 度と 233 度の位置で全周に亘り模型接合部分で模型両端部分の方が約 0.17mm だけ直径が大きく、前方では後ろ向き段差が、後方では前向き段差が残されていることが判った。特に前方の後ろ向き段差は臨界 Re にどの程度、またどの様に影響するか不明であり、こうした影響を知るために接合部直下流部分に幅約 4mm のテープで段差を変えて 3 通りに貼り、試験を実施した。また、野球ボールに似せ、縫い目に相当する部分に幅 4mm の厚いシールテープ 3 本を 2 枚重ねて並べて貼った場合についても調べた。図 2 にこの模型を磁力支持している様子を示す。

また、表 1 に今回の試験で実施した総ての試験ケースを示す。なお、60cm 角の測定部断面に比べ模型直径が 150mm と大きいので (阻塞比 4.9%、球最大断面面積 $S(m^2)$ 、測定部断面積 $A(m^2)$ とすると、阻塞比は S/A と定義される。)、約 8 秒間の時間平均した空力係数の評価では通常の壁干渉補正として、いわゆる solid blockage effect と wake blockage effect の補正を文献 8) に従い測定結果に施した。

4. 測定結果

4. 1 時間平均抗力係数

表 1 で示した 5 種類の試験で得られた C_D と Re の関係を以前実施した真球の結果 4) と共に図 3 に示す。ケース I では層流境界層が形成されている所に 0.17mm の後ろ向き段差が軸対称に有り、この段差は境界層の強制遷移因子と

して働く。実際、以前の真球では C_D の減少が始まっていない Re が 3.5×10^5 程度でケース I では C_D の減少が観られる。また、 Re に関する C_D の減少率は以前のものよりも小さい。

臨界 Re を超えた後の C_D は 0.062 となったが、今回の試験では真球とは異なり 0.17mm の後ろ向き段差が有るが、臨界 Re 超えの C_D に及ぼすこの段差の影響は小さいと考えられ、真球の C_D は少なくとも 0.062 以下と考える。

ケース II の C_D と Re の関係は試験ケース I とほぼ同じであるが、臨界 Re 超えの C_D が 0.09 と若干大きい。試験ケース II では先の後ろ向き段差がテープ 1 枚によりほぼ解消され、新たに 4mm 下流にこの段差が移動している。その外に、テープを貼り付ける際に流れ方向の皺ができ、これがボルテックスジェネレーターの役割を果たしている可能性がある。単純に 4mm だけ段差が下流に変位しただけで、臨界 Re 超えの C_D 値が変化したとは考え難く、流れ方向の皺から誘起された縦渦の影響も考えられる。

ケース III は約 0.17mm の前方段差で、しかも 4mm 下流では 0.35mm の後方段差がある場合となる。この時の C_D と Re の関係では臨界 Re が 3.2×10^5 にまで減少し、 Re に関する C_D の減少率がケース I と II に比べて小さい。更に、臨界 Re 超えの C_D は 0.13 とケース II の場合より大きい。

ケース IV はケース III よりも更に高い段差の場合で、臨界 Re は 1.43×10^5 となり大幅に小さい。また、 C_D は臨界 Re を超えた後も Re の増加に伴い変化する。その中で最小の C_D は 0.16 程度であった。

ケース I から III では臨界 Re を超えた後に、再び Re を減少させて C_D を測定したが、臨界 Re 付近で C_D 変化に関する有意な履歴現象は観測されなかった。

Achenbach の実験 9) では球にラフネスを付けると、 Re が増加するにつれて C_D は極小値を取り、最終的に 0.4 近い値にまで回復する現象が観察されているが、本試験では全く観察されなかった。 Re 変化に対する C_D のこうした挙動は球後方でスティング支持をしている影響の可能性が有る。

ケース V は野球のボールに似せ、縫い目に相当する部分に幅 4mm の厚いシールテープ 3 本を 2 枚重ねて並べて貼り、模型の抵抗を測定したものである。 Re が 0.5×10^5 で既に球の C_D とは異なる値を示している。臨界 Re は 2.5×10^5 であるが、 C_D の減少量も他の 3 種と比べて大幅に小さい。このことからケース V は球周り流れとはかなりかけ離れたものと推定される。

4. 2 流れに直角方向の時間平均空力係数 (横力) 係数

ここでは横力とは x 軸に直角な平面に射影された空力成分ベクトルを示すことにする。テープは x 軸周りに軸対称に貼り付けたので、試験ケース V を除き、横力方向を特定させる要素は無く、横力の向きは偶然であり、平均量に関してはその大きさにのみ注目する。図 4 に横力係数ベクトル (球に作用する空力ベクトルを (F_x, F_y, F_z) (単位: N) とすると、横力係数ベクトルは $(F_x/(qS), F_z/(qS))$ と定義される。) の大きさと Re の関係を示す。

ケース I と II では臨界 Re に近づくにつれて横力係数が増大しているが、極大値は 0.1 程度で C_D に比べると小さい。また、 Re が 3.5×10^5 を超すとケース I では横力係数は殆ど 0 となるが、ケース II では 0 から 0.1 の間で変化し一定の傾向を示さない。一方、ケース III では Re が 2.1×10^5 辺りから急速に横力係数が増加し 0.2 以上となる。更に、 Re が 2.8×10^5 辺りで極大値を取り、その後減少する。また、 Re が 2.5×10^5 辺りを中心にして大きな履歴が観測されている。このことから、ケース III では球表面の平均的な剥離線の x 軸周りに関する対称性が大きく崩れていると考えられる。後述する変動空気力について調べると、 Re が 2.5×10^5 付近では C_D は 0.5 近い値を示しながら、空気力変動が極小になってお

り、極めて興味深い現象を示している。また、 Re が 3.5×10^5 以上ではケース II と同様の变化を示している。

5. 変動空気力

MSBS ではコイル制御電流から模型に作用している磁気力を推定できるので、模型の位置情報から模型の慣性力を評価すれば、運動方程式から空気力の時間変化を推定出来る。詳細は文献 10) を参照されたい。本試験の制御周波数は 248Hz で、慣性力評価時に 10Hz のローパスフィルターを用いている。

空気力係数ベクトル (球に作用する空気力ベクトルを (F_x, F_y, F_z) (単位: N) とすると、空気力係数ベクトルは $(F_x/(qS), F_y/(qS), F_z/(qS))$ と定義される。MSBS 座標系で表しているのが、 $F_D = -F_x$ の関係が有る。) を x 軸に直交する断面へ射影すると、球に作用する横力変動の様子を観測出来る。図 5 はケース I の場合で、 Re が増えるにつれて横力係数の空間変動が激しくなり、その後収まる様子が観察される。 Re に関する C_D 減少率が最大になる Re で横力係数の空間変動も最大となる。更に、変動はほぼ点対称で方向性は観察されない。また、 Re が 3.58×10^5 以上になると、横力の軌跡で中心部分を通る確率が周りに比べて相対的に低くなっている。このことは空気力変動が x 軸に対して傾いていながら、同時に x 軸周りに旋回的に作用していることを示している。この現象は球に近い super pressure balloon の上昇時に観測されている "helical motion" に対応していると考えられる¹¹⁾。また、種子田の実験²⁾ で 5.0×10^5 より大きい Re で煙による可視化で観察された振幅 180 度以下の後流の回転的振動現象に似ている。本試験でこの回転に対応する周波数は Re が 3.76×10^5 で約 1.5Hz が主要な周波数であり、ストローハル数 (f : 変動周波数 (Hz) とすると、ストローハル数 St は $f \cdot D/U$ と定義される。) に換算すると種子田の観測結果にほぼ近い値になっている。

次に、横軸に C_D 、縦軸に横力係数の大きさを取って、同じ Re に対して描くと図 6 になる。空気力が x 軸周りに旋回するように作用すると、 C_D の変動はそれまでに比べて急に大きくなり、横力変動と同程度になる。更に、変動は原点を通り x 軸に対して約 35 度傾いた直線周りに集中している。 Re が更に増加すると変動自体が小さくなり、 C_D も減少していく。このことは、 Re が増加するにつれて、球中心を頂点にした頂角約 70 度の円錐面上を空気力係数は変動しながら大きさを減少させていくものと考えられる。しかし、 C_D の減少が収まる Re が 3.9×10^5 付近でこの傾向は観察されなくなる。

ケース II ではケース I の空気力変動の傾向とはほぼ同じ傾向を観察したが、ケース I ほど明瞭な旋回的な力変動は観察されなかった。また、試験した最大の Re でも横力係数の変動の大きさはケース I ほど小さくはならなかった。

一方、図 7 と 8 に示すように、ケース III の空気力変動はそれらと全く異なった傾向を示している。 Re が 2.1×10^5 程度では横力係数の変動はケース I と同様に軸対称的であるが、その後、 Re の増加に伴い急に横力が発生し、更に変動がほぼ x 軸を横切るように反対側まで増大し、 x 軸に対して対称な変動に成長し、その後は、ケース I の場合と同様に空気力が x 軸に対して傾いて、 x 軸周りに旋回するように作用する。この x 軸を含む平面内の振動現象は球に近い super pressure balloon の上昇時に平面内の "wavy motion" として観測されているものに対応していると考えられる¹¹⁾。なお、図 9 に、レイノルズ数増加に伴うこの振動の横力係数の水平方向成分の時間変動の変化の様子を示す。1 秒間から 2 秒間にわたり、一方の値に滞留し、その後急に反符号側の値に移動して滞留する。更にレイノルズ数が増加すると、こうした滞留する時間が短くなり、一方の値に滞留

する傾向は見られなくなるのが判る。

また、図 7 から、空気力係数は球中心を頂点にした頂角約 90 度の円錐面上を変化しているが、 Re が増加しても、横力係数の変動域の大きさは減少しなくなる点がケース I と異なっている。

6. まとめ

事前に詳細なシミュレーションを実施し、模型質量の調整、制御定数の再調整等を実施することで、JAXA 60cm MSBS で球の臨界 Re 超えの空気力を測定出来た。その結果、球の臨界 Re 前後での球に作用する平均空気力、変動空気力に関する以下の知見を得ることが出来た。

- 1) 8 秒間に亘る平均空気力から臨界 Re 超えの最小抵抗値は約 0.062 である。
- 2) C_D と Re の関係では、 Re 変化に伴う明瞭な履歴は観測されない。
- 3) C_D が 0.3 未満では球の x 軸周りに力が縮退していく様子や、球を x 軸周りに旋回させる力が発生する様子を観測した。
- 4) 強制的境界層遷移が強いと、 x 軸を含む平面内で振動的力が作用する場合を観測した。

あとがき

今回の試験により、MSBS を用いた変動空気力測定は大規模剥離を伴う鈍頭物体周りの流れを研究する上で、貴重な情報を提供できることが分かった。このことは、大規模剥離を伴う鈍頭物体周りの流れの CFD 検証では流れ場の可視化結果の比較といった定性的比較が現在は主流であるが、今後、MSBS を用いて測定した特長的力変動を比較することにより定量的 CFD 検証が可能となり、信頼性を上げることが期待できる。

今後は、真球の臨界 Re 超えの試験を実施すると共に、MSBS を用いて支持干渉の無い状態における後流の平均流れ場、変動流れ場計測を実施する予定である。とりわけ、流れ場計測の際の計測装置の干渉を避けるには PIV 計測が望ましく、今後この分野の研究者との協力を求めたい。

参考文献

- 1) Berger, E., Sholtz, D., and Schumm, M.: "Coherent Vortex Structures in the Wake of a Sphere and a Circular Disk at Rest and under Forced Vibrations", J. Fluid and Structures(1990), Vol.4, pp.231-257
- 2) Taneda, S., "Visual Observations of the Flow past a Sphere at Reynolds numbers between 104 and 106," J. Fluid Mech., Vol. 85, part 1, pp. 187-192, 1978
- 3) Achenbach, E., "Experiments on the Flow past Spheres at very High Reynolds Numbers," J. Fluid Mech., Vol. 54, part 3, pp. 565-575, 1972
- 4) 澤田秀夫、国益徹也、須田信一: 「航技研60cm磁力支持天秤装置を用いた球形模型の抗力測定」、日本風工学論文集、Vol.98、2004年1月号
- 5) 澤田秀夫、国益徹也: 「低速風洞用60cm磁力支持装置の開発」、日本航空宇宙学会論文集、第50巻、第580号、pp.188-195、2002年5月号
- 6) 須田信一、澤田秀夫: 「風洞用磁力支持天秤装置」、日本設計工学会誌、第41巻、第5号、pp.235-241、2006年
- 7) Sawada, H., Suda, S., and Kunimasu, T.: "NAL 60cm Magnetic Suspension and Balance System", ICAS 2004-3.1.2, August, 2004
- 8) Pankhurst, R.C. and Holder, D. W., "WIND-TUNNEL TECHNIQUE," SIR ISAAC PITMAN & SONS, LTD, pp.340-348, 1948
- 9) Achenbach, E., "The effect of surface roughness and tunnel blockage on the flow past sphere," J. Fluid Mech., Vol. 65,

part 1, pp. 113-125, 1974

- 10) 澤田秀夫、樋口博、加藤裕之、国益徹也、「磁力支持風洞試験における非接触計測」、第38回流体力学講演会前刷集、pp.169-172、2006年9月
- 11) Soggins,J.R., “Sphere Behavior and Measurement of Wind Profiles,” NASA TN D-3994, 1967

表1 試験ケース

試験ケース	テープ厚(mm)	枚数	幅(mm)	位置	備考
I	無し			接合部	段差有
II	0.17	1	4	接合部	
III	0.17	2	4	接合部	
IV	2~3	1	4	接合部	
V	2~3	2	12		擬似野球ボール

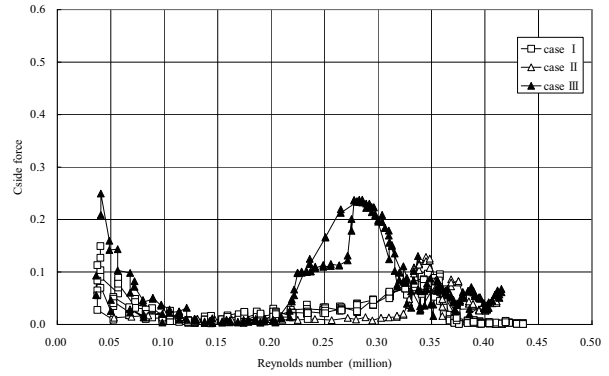


図4 横力係数と Re の関係

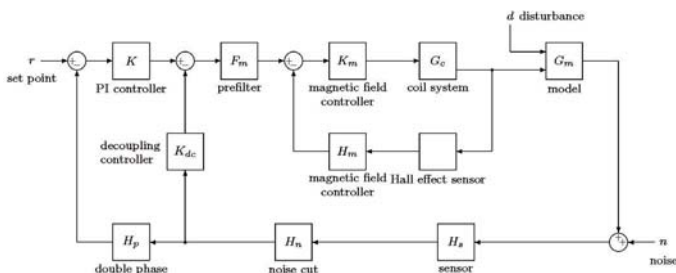


図1 JAXA 60cm MSBS の制御系



図2 磁力支持中のケースVの模型

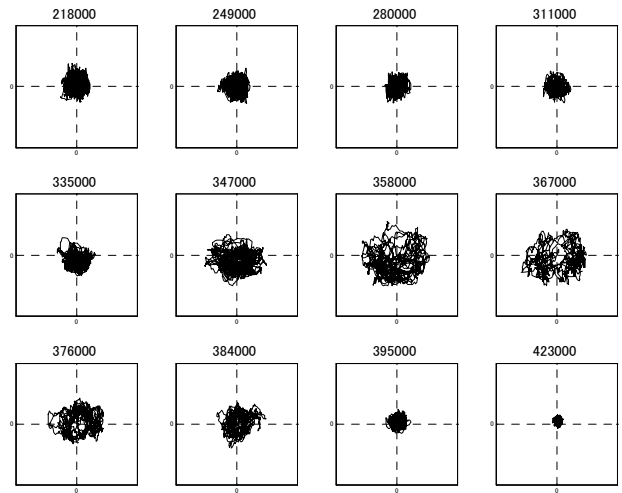


図5 CASE I の横力係数変動

(球後方から観た場合。正方形の一辺の長さは空力係数で1.0に相当。各図上方の数値は Re を示す。)

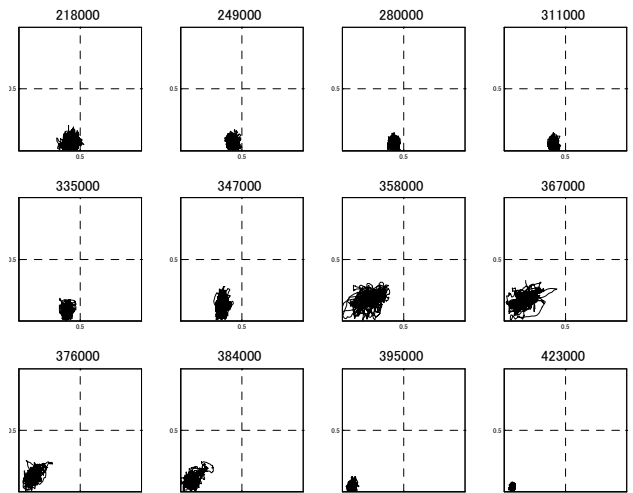


図6 CASE I の気流に平行平面内空力係数変動

(横軸は C_D、縦軸は横力係数の大きさ。正方形の一辺の長さは空力係数で1.0に相当。左下を原点としている。各図上方の数値は Re を示す。)

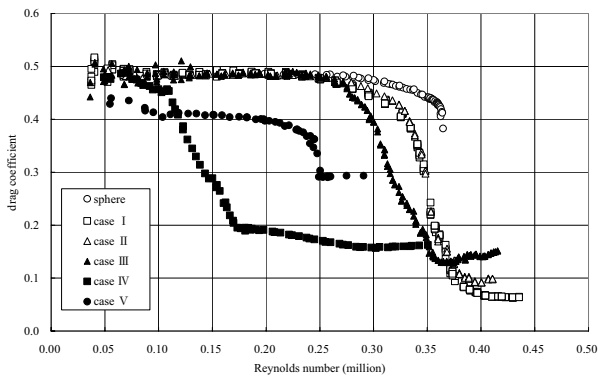


図3 C_D と Re の関係

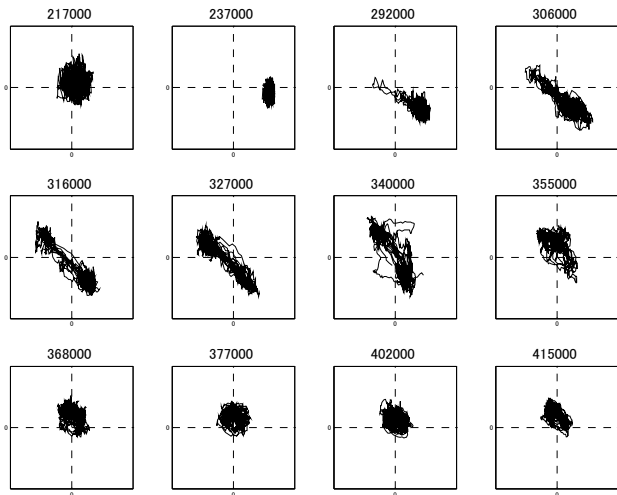


図7 CASEIIIの横力係数変動（座標仕様は図4と同じ）

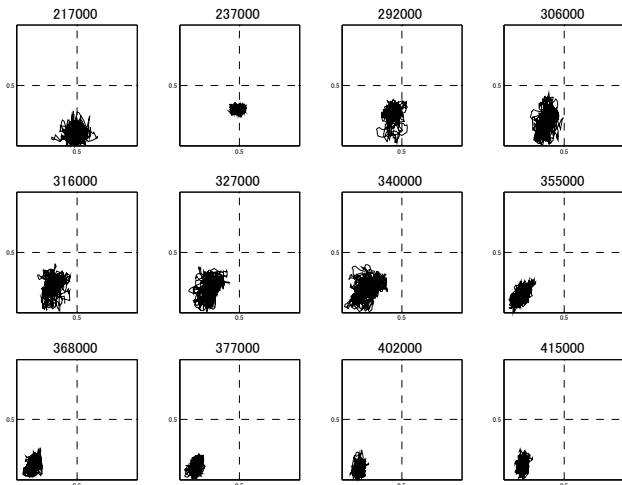


図8 CASEIIIの気流に平行平面内空力係数変動
（座標仕様は図5と同じ）

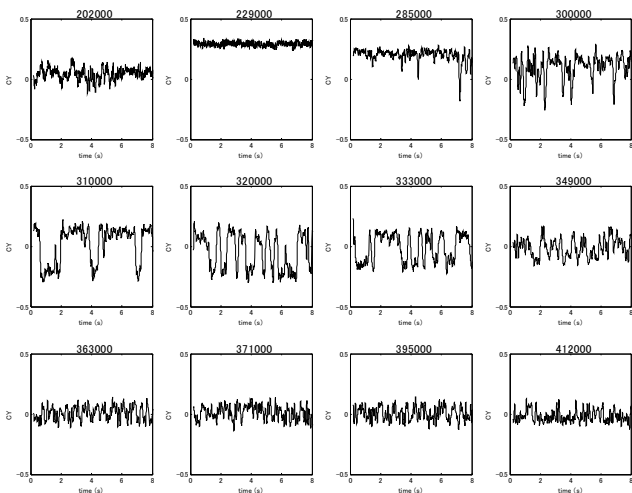


図9 CASEIIIの横力係数時間変動の水平方向成分