

気流に平行な円柱の背圧と細長比の関係

○ 澤田秀夫、国益徹也、須田信一 (JAXA/ISTA)、
御簾納徹 (NECエンジニアリング)、樋口博 (シラキュース大学)

Relation between Base Pressure and Fineness Ratio of Axial Cylinder

Hideo SAWADA, Tetsuya KUNIMASU, Shinichi SUDA (JAXA/ISTA),
Toumu MISUNOU (NEC Engineering), Hiroshi HIGUCHI (Syracuse Univ.)

Key Words : Wake, Axisymmetric Flow, Base Pressure, Drag, Flow Measurements

Abstract

Base pressure coefficient and drag coefficient of an axial cylinder of 110mm diameter were measured without any support interference, utilizing the JAXA 60cm MSBS (Magnetic Suspension and Balance System) at speeds from 8m/s to 15m/s. Drag coefficient depended on the fineness ratio of the cylinder but not on the Reynolds number within the tested range (1.27-1.79). The drag coefficient shows a minimum value around the fineness ratios from 1.6 to 1.8. The base pressure coefficient showed a maximum value around the same fineness ratio region. The base pressure coefficient depends on Reynolds number at fineness ratios from 1.27 to 1.55 but did not at the ratios from 1.65 to 1.79. Power spectrum of base pressure fluctuations showed several dominant peaks clearly.

1. はじめに

気流に平行に置かれた円柱では細長比が 0 (円板に相当) から大きくなるにつれ、後流を含む円柱周りの流れが大きく変化することが知られている。円柱の抵抗係数 (C_D) は細長比が減少するにつれて、細長比 1.7 付近の値で極小値を取りその後増加に転ずることが著者らの磁力支持天秤装置を用いた試験結果から確実なものとなった。

このような細長比に依存した抵抗係数の変化は、細長比が 4 以上では、参考文献 1) で示されているように、円柱前縁部分から剥離した流れが再付着し、その後乱流境界層に近い流れを形成した結果、この部分の抵抗増加分に相当する抵抗係数の増加を示すことが分かっている。

更に、細長比 1.27 以上 4 未満の抵抗係数測定結果の速報値は文献 1) に示されていて、既存の計測値とは細長比 2 付近で大きく異なった値を示していることが分かった。細長比が 2 付近でのこのような抵抗係数の強く複雑な細長比依存性を決定している要因は粘性抵抗の変化によるのではなく、円柱前縁から剥離して形成される大きな後流とその中に含まれる円柱自身との間で起こる複雑な干渉によるものと考えられる。当然、こうした干渉は円柱後縁の圧力 (背圧) にも強い影響を及ぼすものと考えられている。また、背圧変動は複雑な後流変動の中に隠された規則性に関する情報を提供してくれるものと期待される。しかしながら、模型後縁に後方からステーグのようなもので支持するのでは、正しい背圧を測定できる保証は無く、信頼できる背圧測定結果が求められる。

このため、支持の影響を受けることの無い磁力支持による背圧計測が適切と考えた。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の 60cm 磁力支持天秤装置 (以降、60cmMSBS と呼ぶ。) を用い、図 1 に示す写真の様に、支持干渉の無い状態で模型を支持しながら、NEC エンジニアリングが開発した無線伝送機器を用いて模型の背圧計測を試みたので、その結果について報告する。

また、気流に平行に置かれた細長比 1.27 以上 4 未満の

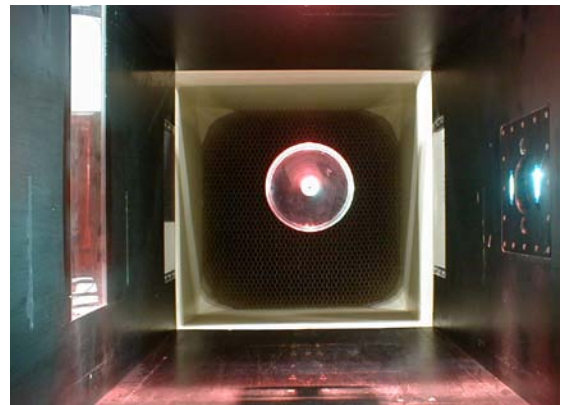


図 1 磁力支持中の円柱 (直径 110mm 円柱)
(Figure 1 A magnetically suspended cylinder)

細長比の円柱の阻塞効果補正無しの抵抗係数結果は文献 2) で報告済であるが、抵抗係数の値自体を議論するには、直径 85φ、110φ の模型では阻塞効果が大きく現れ、細長比の変化に対する抵抗係数の変化について、模型直径が異なる 3 つの模型で不連続となっている。このため、抵抗係数の値に関しての阻塞効果を含む詳細な検討を実施

表 1 抵抗測定試験に用いた模型の細長比
(Table 1 Model fineness ratios used in the drag measurement tests)

Diameter (mm) (D)	Blockage ratio (%)	Fineness ratio (L/D)
45	0.44	4.13, 4.58, 5.02, 5.47, 5.91, 6.13, 6.80, 7.47, 8.13 Ref.1
85	1.58	1.79, 2.04, 2.25, 2.75, 3.28, 3.79
110	2.64	1.27, 1.31, 1.35, 1.41, 1.55, 1.62, 1.68, 1.79

したので、その結果についても併せて報告する。

なお、JAXA の 60cmMSBS と磁力支持風洞の詳細は文献 3) を参照されたい。

2. 抗力係数測定試験

2.1. 円柱模型と風洞気流

細長比 4 以上の試験では直径が 45mm の模型を用いたので、模型断面積は測定部断面の大きさ (600mm 角) に比して小さく、阻塞比は 0.44% であった。一方、JAXA60cmMSBS の模型位置姿勢センサーの性能上の制限から、模型全長が 140mm 以下にできないので、細長比を小さくするために円柱直径を増やすことにした。このため、模型直径は 85mm と 110mm を選定し、長さは直径 45mm 円柱模型の時と同様に基本模型にセンサーを取り付けて変化させ、表 1 に示す細長比の試験を実施した。しかしながら、円柱直径が 85mm、110mm と大きくなることにより、阻塞比がそれぞれ 1.58% と 2.64% になり、阻塞効果の影響が明瞭に現れるようになった。細長比 2 付近までは前縁で剥離した流れは模型に一旦再付着し、その後後縁で剥離して後流を形成することが判っているので、直径 85mm 模型の場合は通常の阻塞効果補正を施した。一方、直径 110mm 模型では前縁で剥離した流れが模型後縁までに再付着しないと考えられるので、大きな剥離域を伴う阻塞効果があるものと考えられる必要が有る。このため、Maskell の手法⁵⁾を使って補正を施した。

模型が気流に平行になっているかどうかの確認は模型直径が大きいため、後流域が大きく全体の総圧分布を測定して、一様流方向の速度分布が同心円状に変化することを確認する方法は非効率なため、模型の姿勢を変化させたときに模型に作用する空気力の変化から気流に平行な模型の姿勢角を決定した。模型に加わる揚力、横力は非常に小さいが、変化そのものは十分に捉えることはできた。なお、模型の抗力測定精度は文献 4) と同じ方法で評価した。

2.2. 抗力測定結果

抗力測定試験は風速(U)が直径 85mm 模型では 8m/s から 25m/s まで、直径 110mm 模型では 7m/s から 15m/s までの範囲で実施し、共に、レイノルズ数が 100,000 で比較できるようにしている。総ての抗力は測定部中心の動圧と模型断面積の積により無次元化され、浮力効果補正を施した。但し、阻塞効果が大きいと推定されたため、試験結果の検討段階では阻塞効果補正は施していない。

図 2 は模型直径を基準長にしたレイノルズ数(Re_p)に対する直径 85mm 模型の抗力係数の変化を、代表的幾つかの細

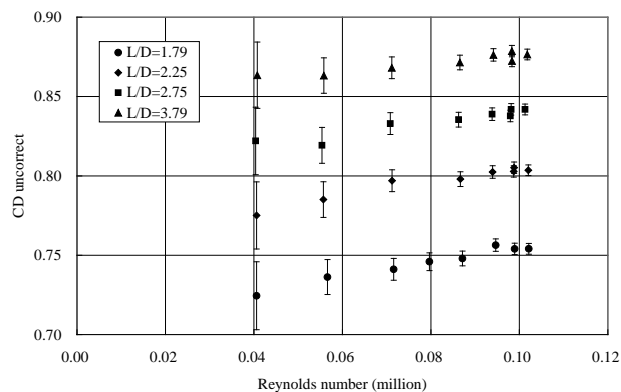


図 2 85φ 模型抵抗係数のレイノルズ数依存性 (Figure 2 85φ model drag coefficient versus Reynolds number)

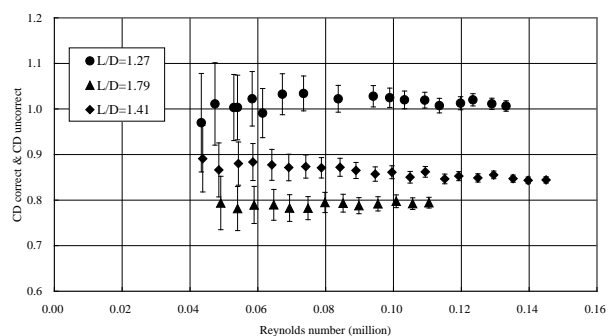


図 3 110φ 模型抵抗係数のレイノルズ数依存性 (Figure 3 110φ model drag coefficient versus Reynolds number)

長比の場合に対して示したものである。細長比 4 以上の場合と異なり、レイノルズ数の増加につれて測定結果そのものは増加する傾向が伺えるが、誤差を考慮してもレイノルズ数 55,000 の時と 100,000 の時で有意な差が認められるが、その差は C_D の僅か 1% 程度である。レイノルズ数 100000 前後 10% 程度の変化量では抵抗係数が増加したとは断定できない。

一方、模型直径が 110mm の場合は細長比が 1.27 から 1.79 までの範囲となる。同様に抵抗係数のレイノルズ数依存性を調べると図 3 の様になる。誤差を考慮するとレイノルズ数 40,000 から 100,000 までの範囲ではレイノルズ数依存性は観られない。また、文献 1) の直径 45mm 円柱模型の場合は、このレイノルズ数域ではレイノルズ数依存性は観られていない。この結果、円柱直径 85mm の模型で観られた僅かなレイノルズ数依存性の原因は、85mm 直径の円柱模型だけが他の 2 つの模型と異なっている部分にあるといえる。詳細調査の結果、85mm 直径の円柱模型だけは模型前後縁を角から 0.5mm だけ 45 度で削り落としており、こうした隅切りの効果が現れたためと考えている。今後、鋭い模型前後縁角を持った 85mm 直径の円柱模型による試験を実施し、その原因を特定する予定でいる。

直径 45mm の円柱模型の試験結果を含めて阻塞効果の補正無し結果を図 4 に示す。同じ細長比での試験は細長比 1.79 の場合だけであるが、細長比 4 と 2 付近で直径の異なる模型の抵抗係数をそれぞれ比較すると、明確に異なった値となり、直径が大きな場合ほど大きな抵抗係数を示している。直径が大きいことは阻塞比が大きいことに対応し、阻塞比が大きいと大きな抵抗係数を測定するという傾向は阻塞効果によるものと考えられる。

鈍頭物体の阻塞効果の補正方法は現在でも重要な研究課題であり、確実に補正できる方法は無い。しかしながら、しばしば利用されている方法として Maskell の方法がある⁵⁾。この方法は半実験式で正方形断面をした板状物体の補正を基にして提案されたものであり、Maskell 自身はこの手法が多く鈍頭物体の阻塞効果補正に適用

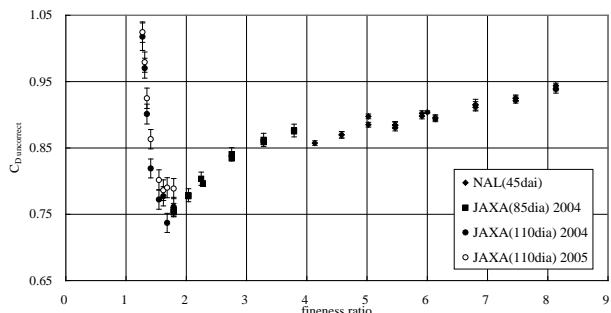


図 4 抵抗係数への阻塞比の影響 (Figure 4 Blockage effect on drag coefficient)

できると、幾つかの実験結果を基にして主張している。

本試験結果にも Maskell の方法⁵⁾を適用すると図 5 のようになり、阻塞比の異なる 3 種の模型から得られる抵抗係数の細長比依存性がほぼ一本の曲線状に載るようになる。阻塞比 0.44% の模型では阻塞効果の影響は一般的な流線型物体の阻塞効果補正方法⁶⁾を適用した場合も Maskell の方法を適用した場合もほぼ同じであり、阻塞効果自体が小さく抵抗係数の値は殆ど変わらない。

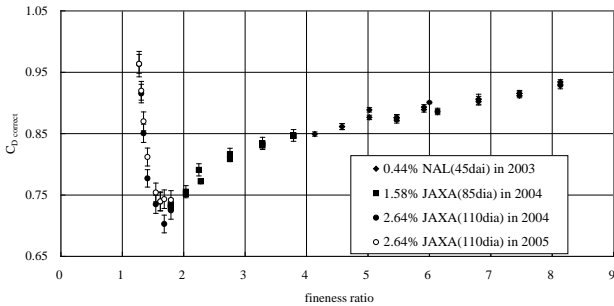


図 5 Maskell の方法⁵⁾による補正後の抵抗係数 (Figure 5 Corrected drag coefficient by Maskell's method)

この結果を基に、細長比 4 未満の円柱抵抗係数の変化を観ると、細長比 1.6 から 1.8 の間で抵抗係数は細長比に関して極小値を取り、その値は 0.75 以下である。こうした性質は既存の報告からは推定できないもので、磁力支持天秤装置を用いて測定した結果と考えられる。また、文献 1) で示した抵抗係数の細長比依存性の原因は模型前縁で剥離した流れが下流で付着してその後乱流境界層に近い境界層として模型表面で発達する結果生じる粘性抵抗の増加であるとした流れの様相は、細長比 2.5 程度までは維持されていると考えられる。

しかしながら、細長比が 1.5 付近から 2.0 付近までは抵抗係数が極小値になる辺りで後流構造が複雑に変化しているものと予想される。細長比が 1.27 から 1.5 までの間は細長比の増加に伴い抵抗係数は急激に減少する傾向を示している。この付近の流れでは前縁で剥離した流れは最早模型表面に再付着することは無いので、時間平均の抵抗係数変化の直接的な原因は後縁の時間平均圧力(背圧)が細長比の増加に伴い増加するためと考えられる。詳細は背圧測定結果の項で論じることとする。

既存の報告では細長比 1 から 2 の間では抵抗係数の細長比依存性は認められるが、図 5 に示すほど大きなものではない。また、極小値を取るとしてもその時の細長比は 2 から 3 の間を示している。

3. 背圧測定試験

3.1. 模型と伝送機器

背圧測定に用いた伝送機器は NEC エンジンリンク[®](株)が共同研究用に製作したものをを使用した。仕様はサンプル速度が最大 12.5kHz、4ch 同時サンプル、12bit AD 変換、測定信号はデジタルデータとして伝送可能な双方向無線 LAN 方式である。本機器は磁力支持天秤装置内の強い変動磁場内で、正確なデータ送信を可能とすようにしており、磁力支持中の模型内に格納された圧力変換器からの出力を磁場の影響を受けずに正確に伝送することが可能である。また、外部から操作可能な 4bit 分のデジタル信号源があり、計測信号を切り替えることもできる。

本試験では圧力変換器は 500PaFS の差圧型 1 台を用い、電源としては電池を利用し、模型中心軸上の前後の圧力差を測定した。また、12.5kHz と 6.25kHz で差圧データをサンプルした。模型の圧力孔は模型上流側と後流側の円板中心部

分に直径 0.5mm の穴を明け、ピエゾチューブにより差圧型圧力変換器の両端に繋げた。上流側の圧力は模型が気流に正対しているため総圧に対応し、下流側は模型後縁の中心点の圧力(ここでは背圧と呼ぶ)となる。

模型は直径 110mm の円柱模型を利用し、内部の磁石として外側直径 100mm、内側直径 75mm、高さ 100mm の円管磁石を利用し、図 6 の写真のように円管内部に伝送機器、圧力変換器、電源を組み込んだ。また、模型の細長比は長さ 140mm の基準の模型の後縁部に写真に示すような 4 種類のスペーサーを組み合わせて追加する方法で変化させている。(図 6 では厚さ 4mm のスペーサーは模型後縁部に取り付けた状態にある。)スペーサーを変更する毎に圧力測定用のパイプも変更して、表 1 の太字の細長比に対して背圧測定を実施した。なお、差圧型圧力変換器は MKS 社のパラトロン型圧力変換器 698A11T で較正した。



図 6 圧力伝送システムと模型 (直径 110mm 円柱) (Figure 6 A pressure telemeter system and a model (a 110mm diameter cylinder model))

3.2. 背圧測定結果

約 4 秒間にわたり計測した背圧を平均して、一様流静圧を基準にした圧力係数 C_{pb} に変換し、細長比に対してプロットしたものが図 7 である。文献 5) によると、抵抗係数の場合と同様に圧力係数 C_{pb} にも阻塞効果の影響があるはずであるが、その詳細は不明なため、測定結果をそのまま利用した。抗力係数とは反対に、細長比が 1.27 から 1.6 まで増大するにつれて C_{pb} は急速に増加し、その後、細長比が更に増えると急に減少に転じている。このため、細長比 1.6 から 1.8 の間で極大値を取っていると考えられる。文献 1) で模型後縁部の境界層から抵抗係数を評価した結果によると、 C_{pb} は細長比 4 以上では -0.35 程度であることが判っている。この結果、 C_{pb} は細長比 1.8 以上 4 付近までは再び細長比の増大につれて減少に転ずるものと考えられるのが合理的である。文献 7) 等によると、模型背面部の圧力分布はほぼ一定である

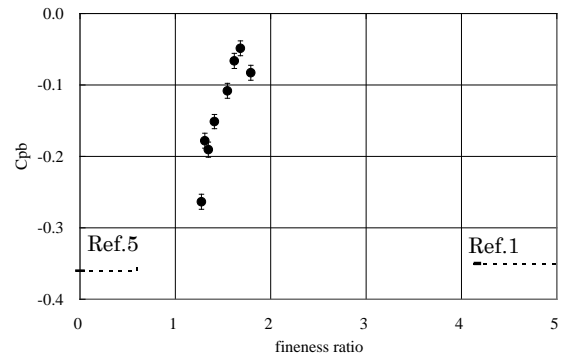


図 7 110φ 模型背圧係数の細長比依存性 (Figure 7 110φ model base pressure coefficient versus fineness ratio)

ことが報告されている。このことから細長比1.27から2付近までは模型背圧の変化が円柱の抗力係数の変化の直接的な原因であると考えられる。

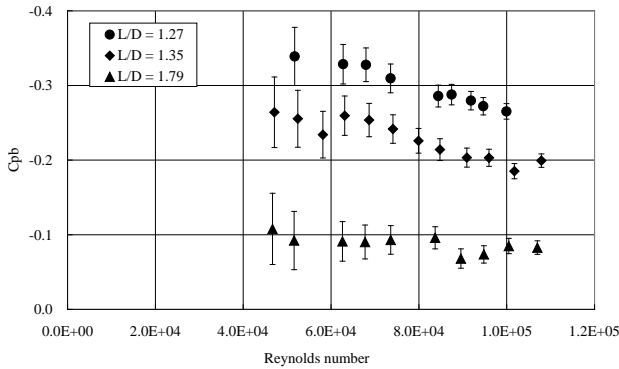


図 8 110 φ 模型背圧係数のレイノルズ数依存性
(Figure 8 110 φ model base pressure coefficient versus Reynolds number)

また、細長比1.27から1.55までは有意な抵抗係数のレイノルズ数依存性は観られなかったが、図8に示す様に細長比依存性に比すと小さいが、背圧係数には有意なレイノルズ数依存性が観られる。更に、抵抗係数が極小値付近の値をとる細長比の背圧係数では有意なレイノルズ数依存性は観られない。この結果、今回試験した細長比範囲では後流の時間平均形状がレイノルズ数に依存し、更にforebody部分にも影響を及ぼしている可能性を示唆している。今後は、どのような後流構造の変化が細長比の変化によるC_{pb}変化を生み出しているのか研究を進めるつもりである。

6.25kHzで圧力を計測したので、背圧の変動も調べた。その結果、細長比1.27の場合、レイノルズ数は100,000で、図9に示す様に40Hz付近の変動のピークが明瞭に観察された。明瞭な変動ピーク周波数の存在は圧力変動を伴う後流構造に規則性の存在を示唆している。特に、これらのピーク位置に対応するストローハル数0.34は、ジェット下流で生成される大規模渦構造の発生周波数に対応した値^{9),10)}に近いが、著者らの知る限り、後流の場合については今まで観測されていない。本試験で測定した背圧測定位置は、後流再循環領域で下流から上流への流れが模型に当たる部分に対応しており、下流で生成される大規模渦構造の発生周波数に対応した圧力変

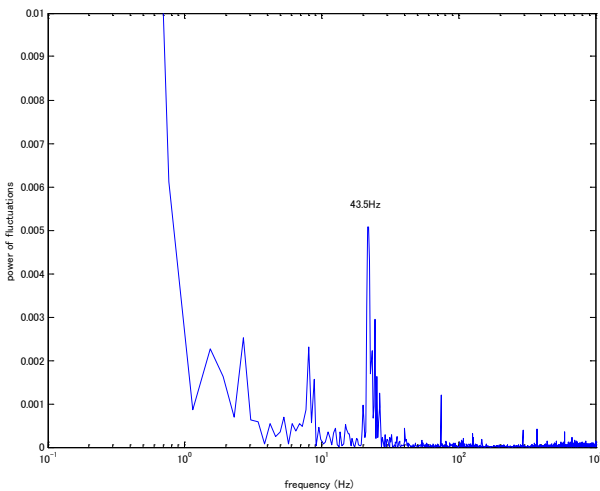


図 9 110 φ 模型背圧変動のハワースペクトル
(L/D=1.27, Re = 100,000)

(Figure 9 Power spectrum of 110 φ model base pressure fluctuations (L/D=1.27), Re = 100,000)

動を観測している可能性もあり、ジェットの場合と同様に大規模渦構造の発生周波数に対応しているのか、今後慎重に調べる予定である。

4. まとめ

- ✓ 磁力支持天秤装置を用いて支持干渉の無い状態で、レイノルズ数100,000で気流に平行に磁力支持した円柱の抵抗係数及び背圧係数と細長比の関係を直径85mmと110mmで測定した。その結果、細長比1.6から1.8までの間で抵抗係数は極小値を取り、円柱背圧は極大値を取り、背圧係数の極大値は約-0.05である。
- ✓ 抵抗係数の極小値は0.8以下であるが、阻塞効果の影響により現段階ではその値を特定できない。
- ✓ 背圧係数は細長比1.27から1.55の間では有意なレイノルズ数依存性が観察されるが、細長比1.65以上1.79以下ではレイノルズ数依存性は観測されなかった。
- ✓ 背圧変動では、明瞭な変動ピークが観測できた。

あとがき

本研究は平成17年度科学研究補助金により実施されたものである。また、背圧計測はNECエンゾニリング(株)との共同研究により実施されたものである。

参考文献

1. 澤田秀夫、樋口 博、国益徹也、須田信一：「気流に平行に磁力支持された円柱の抵抗係数」、日本風工学会論文集、Vol. 29, No. 4, pp. 55-62, 2004
2. Higuchi, H., Sawada, H., Van Langen, P.: "Flow over a Magnetically Suspended Cylinder in an Axial Free Stream", AIAA-2005-1078, 2005
3. 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、2002年5月号、pp. 188-195
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の抵抗計測」、日本風工学会論文集、第98号、2004年1月号、pp. 129-135
5. Maskell, E.C.: "A theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed wind Tunnel," ARC R.&M. No.3400, 1965
6. R.C.Pankhurst, Holder, D.W.: "WIND-TUNNEL TECHNIQUE", SIR ISSAC PITMAN & SONS, LTD., 1952, pp.340-348
7. Roberson, J.R., et al.: "TURBULENCE EFFECTS ON DRAG OF SHARP-EDGED BODIES", J. Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp.1187-1203, July, 1972
8. Berman, P.W.: "An Investigation of the Force on Flat Plates to a Turbulent Flow", J. Fluid Mech., Vol.46, Part 1, pp.177-198, 1971
9. M.Hayakawa, S.Iida, S.Takezawa: "The Near Field of a Fully Turbulent Circular Jet," Phys. Fluids, Vol.28, No.12, Dec., 1985, pp.3703-3704
10. 豊田国昭：「乱れと波の非線形現象」、朝倉書店、9章、「噴流中の渦構造」、pp.160-178, 1997