

帯状側線付き円柱に作用する流体力と双安定流れ

齋藤 隆*・多和 芳雄**・赤松 利之**

On the Bi-stable Flows Around a Circular Cylinder with a Board Rib

Takashi SAITOU, Yoshio TAWA and Toshiyuki AKAMATU

Abstract

It is the purpose of this paper to make clear the condition required to bi-stable flow around a circular cylinder with a board rib and the change of fluid forces by switching of flow patterns.

We did a few measurements of fluid forces acting on a circular cylinder with a board rib.

It is decided quantitatively the condition required to bi-stable flow and the change of fluid forces with switching of two flow patterns by analysed the measured fluctuation of fluid forces transformed into low frequency fluctuation through the low pass filter with 2 or 3 times period of eddy shedding from a circular cylinder.

And it became clear from discussion on the change of pressure distribution at the surface of circular cylinder with the separation region formed at vicinity of riblet that the relation between the change of fluid forces with a position of riblet and the flow pattern around a circular cylinder.

1. はじめに

円柱表面あるいは円柱の近傍に極く小さい柱状体を設置し、円柱周りの流れを制御することで円柱に作用する流体力、円柱の振動を制御することが行われている。

円柱表面に帯状の側線が接合された場合、間欠的に流体力が階段的に変化する特異な現象がみられる。間欠的に流体力が変化する継続時間は、渦放出周期に比べて数倍から数十倍であり、かつ流体力が転換する平均的強さが渦放出による流体力の変動よりも大きいことから、2つの流れパターンが間欠的に変化する事による流体力の変化と考えられる。すなわち階段状の流体力の変化は、双安定流れに起因するものと考えら

れる。従来このような現象は殆ど報告されてなく、きわめて興味をもたれる現象である。

本研究は、上記の特異現象が生起される条件、それに伴う流体力の変化を明らかにすることを目的としたもので、帯状側線の厚さ、側線の接合位置、Re数を系統的に変化させ、帯状側線を接合した円柱に作用する流体力を測定し、側線の厚さ、側線の接合位置、Re数によって円柱に作用する流体力の違いを、側線の前・後端での流れの剥離と再付着による円柱表面で予測される圧力の変化との関連で検討したものである。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験は、測定部高さ10cm、幅100cmの偏平断面で長さ100cmの貫流式風洞で行った。実験円柱は外径50mmで、流体力測定部高さが60mmの亚克力製円柱で、上流から200mmの位置に設置した。上下面に沿って発達

*社会建設工学科

**大学院社会建設工学専攻

する境界層流れの影響を除くため高さ20mmのダミー円柱が上下面に設置されている。

流体力の測定は片持ち梁方式で、梁の基部に張り付けたP・N半導体ゲージで梁の歪から、抗力成分と揚力成分を同時に測定する。梁は流体力測定円柱内にあり、下部ダミー円柱でベークライト床に固定されている。測定系の固有振動数は1.5kHzであり、測定現象に対して十分大きなものである。使用した帯状側線の形状はFig. 1に示す三種類である。

2.2 実験方法

本研究では、Re数が $10^4 \sim 10^5$ の範囲で、接合側線の厚さ、接合位置 θ を系統的に変化させて流体力を測定した。接合位置 θ 、流体力の作用方向の関係はFig. 2の様に定義してある。流速は、上流から20cmの位置でピトー管、差圧計、ストレインメーターを介して、流体力は、直付けの小型アンプを通してデータレコーダーとペンレコーダーに記録した。このデータをサンプリング周波数500Hz、サンプリング時間30秒でAD変換(0.75mV/bit)した後パソコンで統計処理をした。

3. 結果及び考察

3.1 流体力係数

通常の定義に従った流体力係数 C_D 、 C_L 、と設置位置 θ との関係をRe数をパラメータにして描点したものが、Fig. 3 ~ Fig. 5である。縦線で結ばれている描点は、Fig. 6のType Cの様に間欠的に揚力が階段状に変化している場合で、揚力が一定している時間でそれぞれ揚力係数を求めたものである。

3.1.1 $d/D=0.006$

Fig. 3では $\theta=50^\circ, 70^\circ$ 付近で揚力が間欠的に転換す

d (mm)	B (mm)	d/D	B/D
0.30	10.0	0.006	0.20
0.70	10.0	0.014	0.20
1.50	10.0	0.030	0.20

Fig. 1 Shape and size of board rib

る現象がみらる。流体力の側線接合位置による変化を、側線上流端の側線面上と側線下流部の円柱表面上に形成される剥離領域による円柱表面圧力分布の違いによって考察すると、次の5つの流況に大別することができる。

I) $\theta < 45^\circ$ では、側線上面、側線下流に剥離領域が形成される。 θ の増大にともない両剥離領域、ならびに円柱表面からの剥離点が下流へ移動するため (Fig. 7

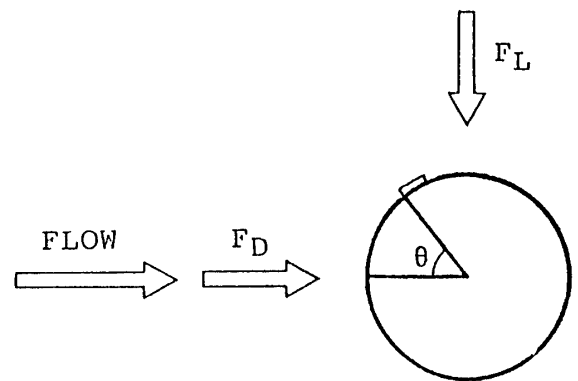


Fig. 2 Definition of fluid forces and position of board rib

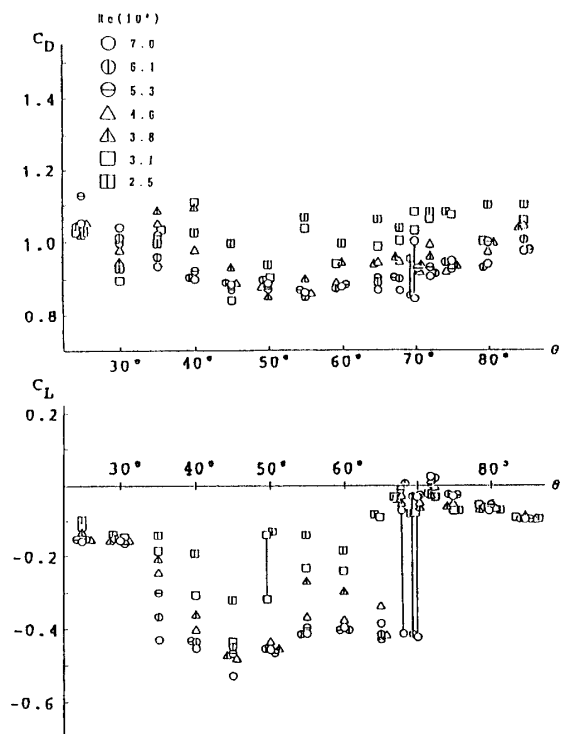


Fig. 3 Relation between fluid force and position of rib ($d/D=0.006$)

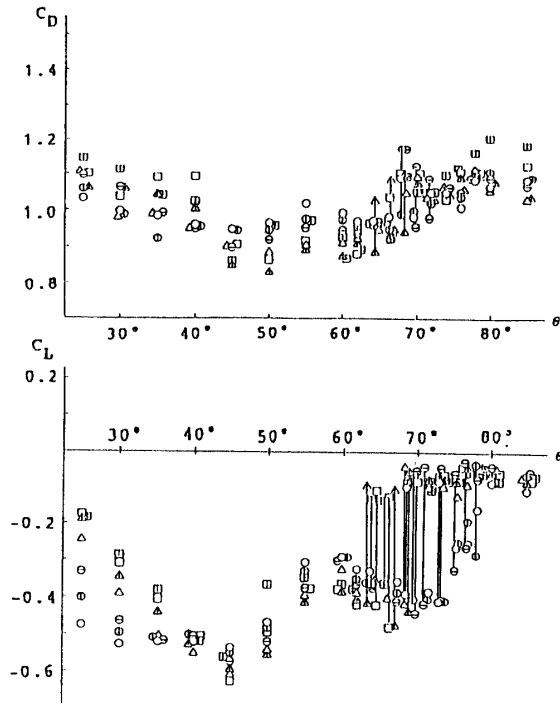


Fig. 4 Relation between fluid force and position of rib ($d/D=0.014$)

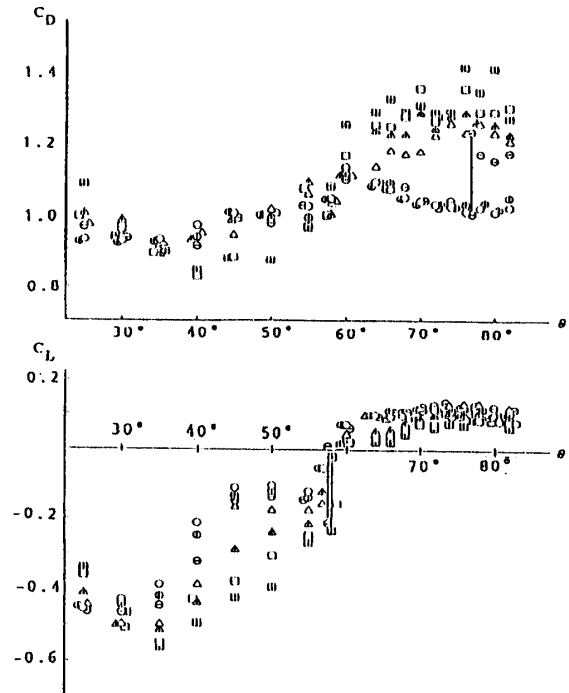


Fig. 5 Relation between fluid force and position of rib ($d/D=0.030$)

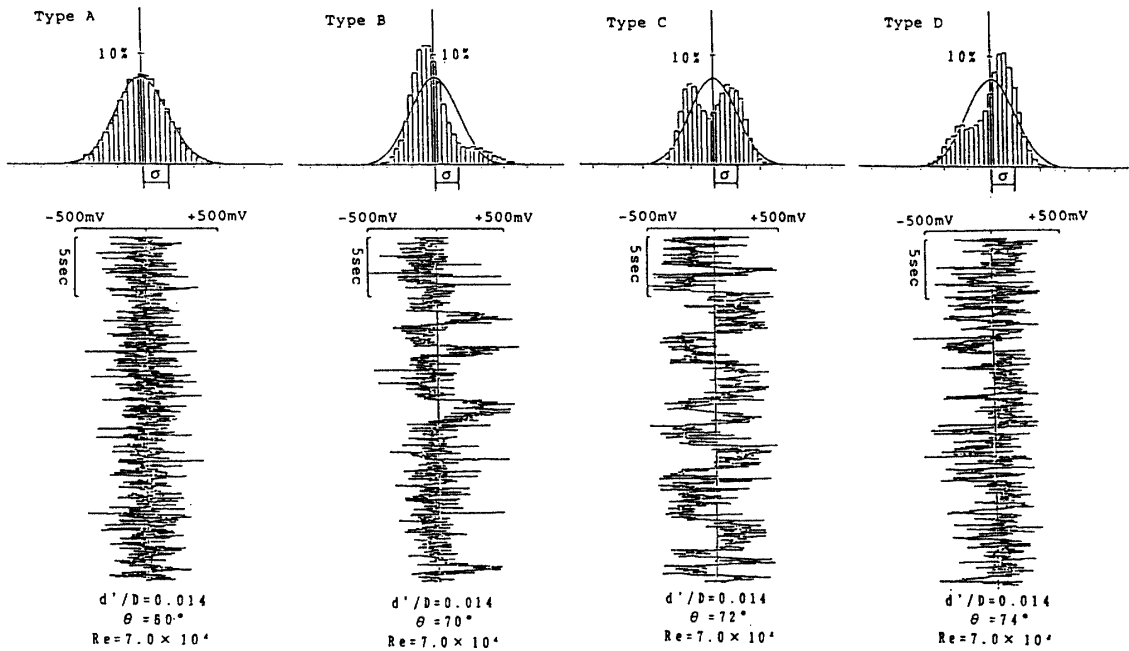


Fig. 6 Examples of fluctuation of lift force and histogram

(I) 抗力は減少し、揚力の絶対値は増大する。また、側線厚さ d とポテンシャル流として求めた側線位置での円柱表面での流速 V_s による Re 数が $dV_s/\nu <$

590であることから側線下流部円柱表面上に形成される剥離域は Re 数の増加にともないその長さが長くなる。その結果揚力の絶対値は大きくなる。

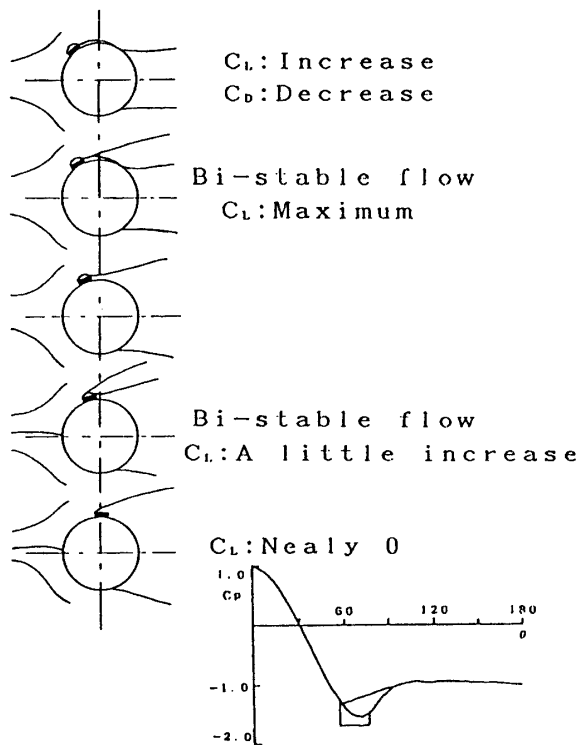


Fig. 7 Relation between flow patterns and fluid forces

II) $\theta = 50^\circ$ 付近では、側線下流に形成されていた剥離領域が不安定となり、側線下流に剥離領域を形成する流況と、側線下流端から円柱の後流域が形成される流況とが、間欠的に転換する双安定流れがみられる。(Fig. 7 (II))

III) $55^\circ < \theta < 65^\circ$ では、側線下流端から後流域を形成する安定した流れとなる。(Fig. 7 (III))

IV) $65^\circ < \theta < 70^\circ$ では、円柱後流域となる剥離点が側線の下流端から側線面上に移動する。その結果、側線前端、側線後端から後流域を形成する流況が転換する双安定流れがみられる。(Fig. 7 (IV))

すなわち、側線面上に形成される剥離領域による強い揚力（負値）と、側線上面から形成される後流域の背圧（側線を接合していない側と同じ程度まで上昇）とが間欠的に転換されるため、間欠的に揚力が階段状に変化することになる。

V) $70^\circ < \theta$ では、側線前端から後流域を形成する様になる。安定した流れとなり揚力係数はほぼ0で単円柱の値に近い値となっている。

3.1.2 $d/D=0.014$

Fig. 4 において接合位置による抗力、揚力係数の変

化を流況と対比することによって5領域に大別できる。
I) $\theta < 45^\circ$ では側線の後端の円柱表面に安定した剥離領域が形成されるため (Fig. 7 (I)), θ の増大にともない抗力係数は小さくなり、揚力係数の絶対値が大きくなっている。

側線厚さ d とポテンシャル流として求めた側線位置での円柱表面での流速 V_s による Re 数が $dV_s/\nu = 300 \sim 1400$ であることから、側線下流部の剥離域の長さや圧力低下量が Re 数と θ によって変わる。この結果として、 θ の増加によって揚力の絶対値は大きくなり、 Re 数が大きいほど θ が小さくて揚力の絶対値は大きくなる。

II) $45^\circ < \theta < 55^\circ$ では、側線下流端から後流域が形成される (Fig. 7 (II))。この場合、先の $d/D=0.006$ に比べ d/D が大きいことと、側線厚さに対する幅の比が小さいため、側線下流端上での流速分布が安定していないことから間欠的な流況の変化（双安定流れ）は、起こりにくいものと思われる。

この側線面上と下流部 ($\theta + 23^\circ$) での圧力変化の抗力への寄与は小さく、また側線に作用する抗力の寄与も主円柱に対して1%程度で、抗力係数の変化は小さい。

III) $55^\circ < \theta < 62^\circ$ では側線後端から後流域が形成され、 θ の増大により後流域が後退するため、揚力係数の絶対値が減少して、極小値をとるようになる。側線下流端位置が $78^\circ \sim 85^\circ$ で、側線下流端が安定した剥離点である。この結果、抗力、揚力の両係数が安定した値となる。

IV) $62^\circ < \theta < 78^\circ$ では側線面上に形成されている剥離領域が不安定となり、側線の前・後端から後流域が形成される2つの流れが間欠的に転換される双安定流れの状態となる (Fig. 7 (IV))。

揚力がIIIと同程度である場合の流況はIIIと同じであり、揚力が殆どない場合の流況は側線上流端で流れが剥離して円柱の後流域を形成している。側線面上での剥離域の形成がないので揚力が生じない。

V) $\theta > 80^\circ$ では側線の前端から後流域が形成され抗力、揚力の両係数との単円柱の値と一致してくる。

3.1.3 $d/D=0.030$

Fig. 5 から抗力係数、揚力係数の変化を、前述2種類の側線による実験結果に対するものと同様な考察によって検討する。

$\theta < 30^\circ$ では、 θ の増加にともない側線によって形成された剥離域が、下流に移動するので揚力係数の絶対値は増大し、抗力係数は減少する。

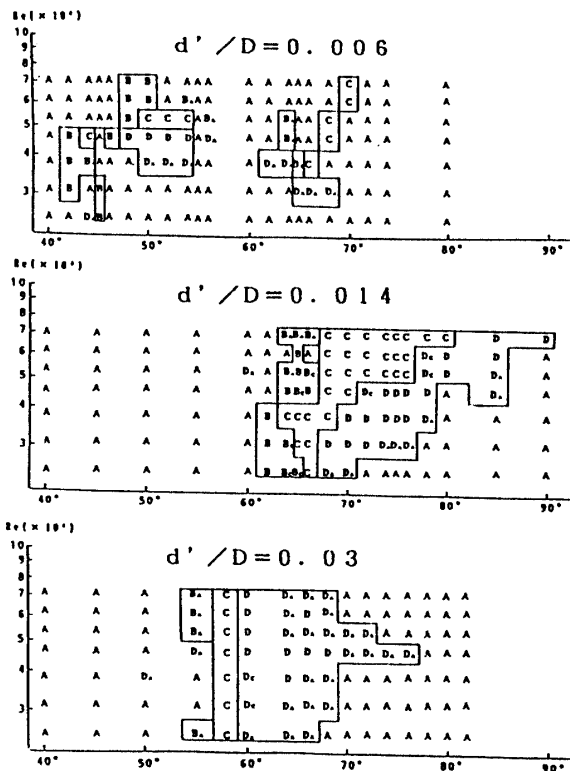


Fig. 8 Distribution of flow patterns

30° < θ < 55°では、d/Dが大きいため物体の非対称性が強められる。その結果Stagnation Point (停留点) が側線接合側に移動し、Magnass効果により揚力の正方向に力が加わる。この現象はRe数の増加にともない強められるのでRe数が大きいほど揚力の絶対値は小さい。

θ = 58°付近では側線によって剥離域が形成される流況と、側線前端から後流域を形成する流況が間欠的に転換する双安定流れがみられる。前述の通り非対称性が強いので揚力は正に転換する。

60° < θでは、側線前端から後流域が形成される。側線前端まで背圧が入ってくることで、非対称性が強いことによりMagnass効果が強められた結果、揚力係数は正の値をとり、側線と反対側の円柱表面からの剥離点が上流に移るので、抗力係数は1.3程度の大きい値をとる。また、側線厚さdとポテンシャル流として求めた側線位置での円柱表面での流速V_sによるRe数が1400 < dV_s/ν < 4100である。dV_s/ν = 2000程度で抗力係数が明確に分かれている。すなわち、Re数が大きくなると抗力係数の値は小さくなっている。この結果は、Re数によって円柱前面の停留点と円柱表面からの剥離点が移動することによるものと考えられる。

3.2 双安定流れの生起条件

典型的な揚力の変動波形と揚力の変動値の頻度分布を示したのがFig. 6である。変動波形は、変動値の頻度分布が正規分布となる場合と、2つの山をもつ分布となる場合がある。上述の流れパターンが移行する過程で、安定した流れパターンに瞬間的に他の流れパターンが生じていて、それぞれの流れパターンの安定度の違い(経続時間の違い)によって、Fig. 6に示すType B, C, Dの変動波形が見られる。

間欠的に流体力が階段状に変化する、双安定流れがみられる条件を定量的に評価するために、揚力の変動波形を500Hzでサンプリングし、円柱からの渦放出による変動成分をカットするために、渦放出周期の2~3倍の時間での移動平均値を解析波形として、解析波形の歪度、尖り度の側線接合位置による変化を調べた。Type Cの変動波形では、正規密度分布から、歪度はσ = 0で、尖り度はε < 3となる。Type B, Cの正規密度分布の形を参考にして、双安定流れが出現する条件を調べた結果がFig. 8である。

本研究の範囲では、すべての側線において双安定流れがみられ、θの増加に伴い流況が遷移していく様子が統計量から(B→C→A)示されている。特にd/D = 0.006の側線においては2領域で双安定流れがみられた。本研究に用いた側線の幅は、3本ともB = 10mmであり円柱径に対する無次元数B/Dはいずれも0.2であるが、厚さdに対する無次元定数B/dは、6.67, 14.29, 33.33となっており最大5倍の違いがあるので、単純に比較することはできない。

側線の接合によるギャップd(側線厚さ)に対して、形成される剥離領域の長さはほぼ5~15倍であることから、d/D = 0.006(B/D = 33.33)では閉じた剥離域が(側線上面に形成)後流域の影響を受けにくく安定しているのに対して、d/D = 0.014, 0.030(B/D = 14.29, 6.67)では後流域の影響を受けやすく不安定であり、双安定流れが1領域のみみられ、d/D = 0.014の方がより広範囲出現するものと思われる。

B/Dが大きいと(側線の幅が大きい)側線後端での流速分布が安定し、後流域の影響を受けにくいことに注意してB/Dの影響について系統的な実験を行っていく必要がある。

3.3 ストローハル数S_r

渦発生に伴う流体力は揚力成分が支配的であると考えられることから、揚力の変動波形のスペクトル解析を行い、その卓越周波数を用いてストローハル数を求めた。ストローハル数とRe数の関係を、接合位置θをパ

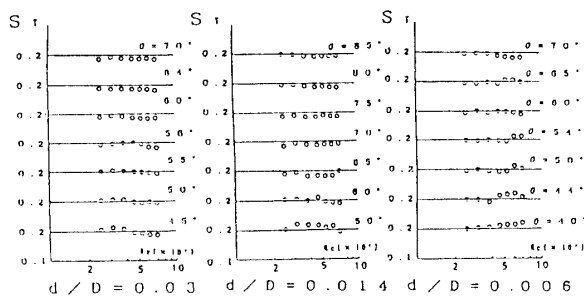


Fig. 9 Relation between reynolds number and strouhal number

ラメータにして描点したものがFig. 7である。

ストローハル数は、どの側線においても0.17~0.23の値をとり、単円柱の場合の一般的な値である0.2付近の値をとっている。双安定流れによる低周波成分をも含めてでの解析結果であるので、本実験範囲における側線付き円柱からの渦放出は、単円柱からの渦（カルマン渦）の放出と基本的には変わらないと考えられる。

4. 結 語

帯状側線付き円柱に作用する流体力を測定し、流体力が側線接合位置によって変化していく状態を、側線面上と側線下流円柱表面状に形成される剥離領域により、円柱表面圧力分布と関連付けて、円柱周りの流れパターンについて検討した結果を要約すると、次の通りである。

- 1) 流れの剥離が2点で起きる帯状側線が接合された場合、接合位置 θ と、流体力との関連から基本的には

側線接合位置によって5つの流況に分類できる。

- 2) 側線の接合位置による平均流体力と変動流体力の違いは側線の面上と下流部に形成される剥離領域によって、円柱表面で予測される表面圧力分布の変化で説明できる。
- 3) 側線厚さが大きくなると、円柱周りの流れの非対称性が強められ、円柱前方停留点位置が移動することによるMagnuss効果で、抗力、揚力が変わる。
- 4) 適当な時間での移動平均で変換した揚力波形の統計処理で双安定流れの出現条件を示した。

本研究においては側線の幅と厚さの比 B/d の影響についての検討が行われていないので、今後検討する計画である。

参考文献

- 1) 斎藤隆, 多和芳雄, 赤松利之: 帯状側線付き円柱に作用する流体力と双安定流れ, 中四国土木学会講演集
- 2) 斎藤隆, 多和芳雄, 赤松利之: 帯状側線付き円柱での双安定流れ, 日本土木学会年次講演集
- 3) 斎藤隆, 横山均, 多和芳雄: 半円形側線付き円柱の空力特性, 第24回乱流シンポジウム講演論文集, 1992
- 4) 斎藤隆, 羽出野袈裟義, 英野雅晴: 水工学論文集, 第36巻, 1990
- 5) 日野幹雄著: スペクトル解析
- 6) 椿東一郎著: 水理学 I, II

(平成5年4月15日受理)