

流体中で旋回運動する円柱に働く流体力

—— 第3報 衝撃的に旋回を開始する時のはく離渦 ——

石 綿 良 三*・川 口 隆 史*

Fluid Forces on a Swinging Cylinder in a Fluid
—— 3rd Report, Separation Vortex about a Suddenly
Accelerated Cylinder ——

Ryozo ISHIWATA and Takashi KAWAGUCHI

Abstract

It is known that manipulators of marine robots are oscillated by Karman-vortex shed from themselves when they move in a water. Therefore, as a fundamental study, flows about a circular cylinder turned steadily round its end were visualized in the second report²⁾. In the present report, flows when the cylinder started suddenly to swing were visualized by means of hydrogen-bubble method, because it was necessary to be understood the flow structure, especially the separation vortices. The experimental conditions were as follows: the diameter of test cylinders d was 30 mm, and the length l was 300 mm or 196 mm; the angular velocities Ω ranged from 0.0754 to 0.603 rad/s; the Reynolds numbers based on the peripheral velocities of test cylinders Re ranged from 705 to 3.61×10^3 . The behaviour of vortex shedding from the cylinder depended on l/d and r/l . Roughly asymmetric vortex was observed in low Reynolds number. In high Reynolds number twin vortex appeared behind the cylinder as soon as it began to swing and collapsed by turbulence after a while.

1. 緒 言

近い将来、水中ロボットなどの水中作業機械が軽量化、高速化されていくことが予測される。これに伴って、作業時にマニピュレータに作用する流体力が本体重量に比べ相対的に大きくなり、カルマン渦によるマニピュレータの振動、あるいは位置決め制御に対する流体力の影響などの問題が生じてきた。本研究では基礎研究として、マニピュレータを模擬した有限長円柱を水中でその一端を旋回中心として旋回させ、そのとき円柱に作用する流体力および流れの状態について研究する。第1報では定常旋回する円柱に作用する流体トルクを明らかにした¹⁾。第2報では同じく定常旋回する円柱まわりの流れを可視化し、はく離渦の構造を

明らかにし、そのシミュレーション・モデルを示した²⁾。

本報では、静止状態から衝撃的に旋回を始めるときの円柱まわりの流れの可視化を行い、スタート直後のはく離渦が非対称な流れへと移行する過程を明らかにすることを目的とした。このようなスタート時のはく離の発生とはく離渦の形成過程は非定常はく離の基本的な問題であり、同時に実用的な面から言えば、スタート時の流体力の予測やカルマン渦による振動の抑制のための参考資料になり得るものと考ええる。

運動を開始するときの円柱まわりの流れについては多くの研究例が見られるが、永田らによる一連の研究³⁻⁹⁾が最も代表的である。永田らは、円柱が軸方向と直角に衝撃的に運動を開始するときの流れを可視化を中心として研究した。この場合、スタート直後はポテンシャル流れ、その後円柱背後に双子状のはく離渦が発生、成長し、やがてその双子渦が崩壊していくとい

平成3年10月3日受理

* 機械システム工学科

う過程を詳細に解明した³⁻⁹⁾。しかし、これらの研究は2次元的な流れ場を対象としており、これに比べて3次元的な流れ場では渦の形成、離脱の形態はきわめて複雑なものとなる。本研究で対象とする円柱旋回開始時の渦の形成についてはほとんど研究報告がなされていないのが現状である。

2. 実験装置・方法

実験装置の概略は Fig. 1 に示されている通りであり、前報^{1,2)}の装置に比べステッピング・モータがダイレクトドライブ・サーボモータ（横河プレジジョン DM1100A, 定格出力 410 W）に換えられ、さらに上方からの観測用ビデオカメラが回転系の中に組み込まれている点が改善されている。

供試円柱は合成樹脂製で直径 $d=30$ mm, 長さ $l=300$ mm および 196 mm であり、アスペクト比 $l/d=10.0$ と 6.53 である。供試円柱の上下側面には表面から約 3 mm 離れてステンレス線（線径 0.050 mm）を張り、これを陰極線として水素気泡法により可視化した。電極には連続した直流電圧を印加したので流脈を可視化したことになる。静止状態からステップ状に角速度を変化させ、円柱を加速旋回させた。角速度は $\Omega=0.0754 \sim 0.603$ rad/s, 円柱先端周速に基づくレイノルズ数は $Re=d\Omega/\nu=705 \sim 3.61 \times 10^3$ の範囲で実験した。一定

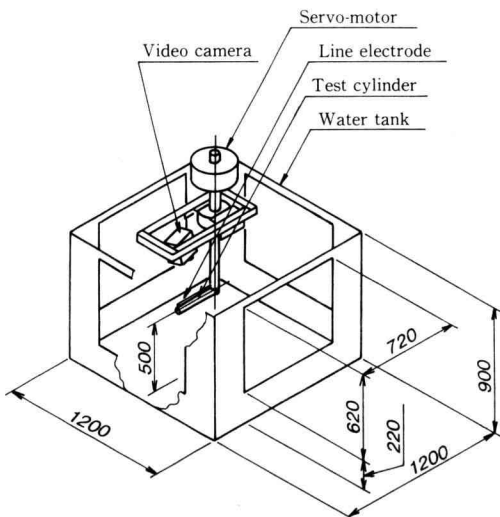


Fig. 1. Schematic view of experimental apparatus.
(unit: mm)

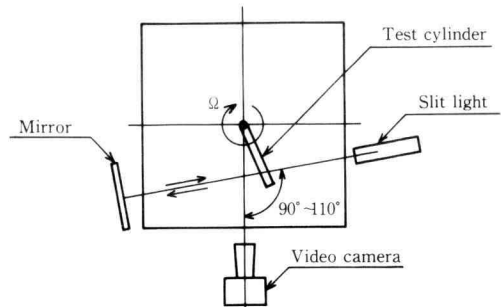


Fig. 2. Visualization condition.

角速度に達するまでの立ち上がり時間はおおよそ 0.1 s であり、ステップ状であると見なした。

ビデオ撮影時の状況を Fig. 2 に示す。撮影はおもに水槽側面の観測窓を通して旋回半径方向から行い、カメラはビクターGX-S700 (VHS タイプ) および松下電器産業 NV-S2 (S-VHS-C タイプ) を使用した。照明はクセノンスリット光源（カトウ光研 KS150-100）で行い、 $l/d=10.0$ の円柱では半径位置 $r=240$ mm および 160 mm. $l/d=6.53$ の円柱では $r=80$ mm および 140 mm 付近だけを照らし、そのスリット断面内の可視化を行った。撮影されたビデオ画面を再生し、旋回開始時の渦の形成過程について検討を行った。

3. 実験結果

3.1 可視化写真例

まず、ビデオ撮影結果から円柱背後の渦の形成を検討する。ビデオの再生画面を連続写真に撮影した代表例を Fig. 3～Fig. 6 に示す。

Fig. 3 の実験条件はアスペクト比 $l/d=10.0$, 無次元半径 $r/l=0.80$, 角速度 $\Omega=0.151$ rad/s, 円柱先端周速に基づくレイノルズ数 $Re=d\Omega/\nu=1.41 \times 10^3$, その半径位置の周速に基づくレイノルズ数 $Re_r=dr\Omega/\nu=1.1 \times 10^3$ である。Fig. 3(a)～(c) は旋回開始後の移動距離 x を円柱直径 d で無次元化した値 x/d をパラメータとして時系列的に並べたものであり、各写真の右側の円は旋回開始前の位置を示している。(a) は $x/d=3$ のときであり、円柱背後には上下ほぼ対称な双子渦が形成されている。(b) は $x/d=4$ であり、はく離点から渦度の供給を受け、双子渦がさらに大きく成長している様子がうかがえる。(c) は $x/d=5$ であり、双子渦の安定性が失われ、下側のはく離渦が押しつぶされ

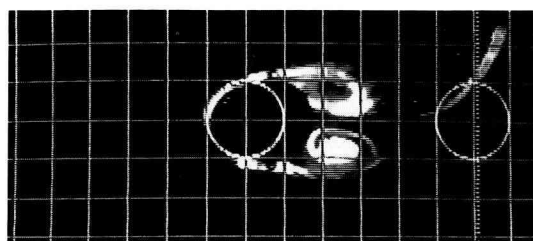
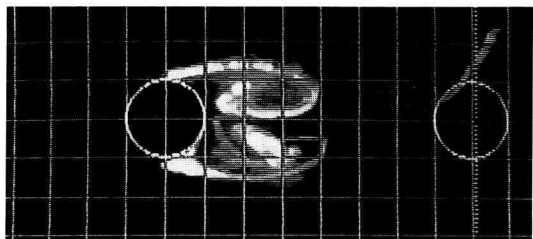
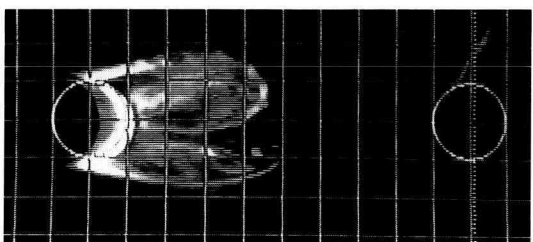
(a) $x/d=3$ (b) $x/d=4$ (c) $x/d=5$

Fig. 3. Separation vortex about a suddenly swung cylinder.

($l/d=10.0$, $r/l=0.80$, $Re=1.41 \times 10^3$, $Rer=1.1 \times 10^3$)

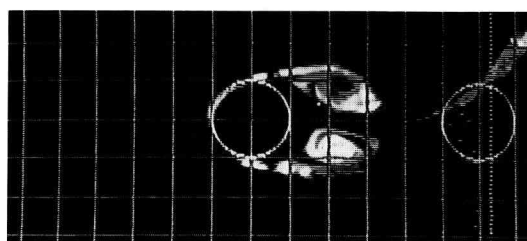
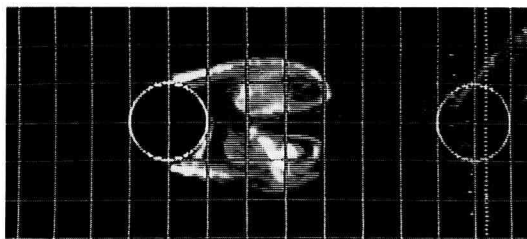
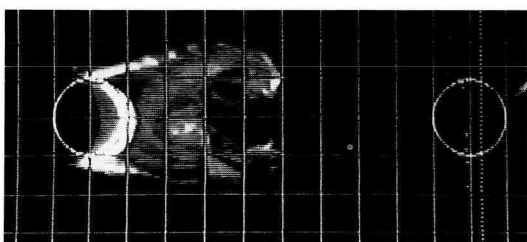
(a) $x/d=3$ (b) $x/d=4$ (c) $x/d=5$

Fig. 4. Separation vortex about a suddenly swung cylinder.

($l/d=10.0$, $r/l=0.80$, $Re=1.77 \times 10^3$, $Rer=1.4 \times 10^3$)

始めている。

Fig. 4 は、 $\Omega=0.188$ rad/s, $Re=1.77 \times 10^3$, $Rer=1.4 \times 10^3$ の場合であり、その他の条件は Fig. 3 と同一である。(a), (b) は双子渦が形成され、しだいに大きく成長する過程を表している。 $x/d=5$ の (c) では渦層が不鮮明であり、はく離渦の中に 3 次元的な乱れが発生し、円柱背後には種々のスケールの渦が混在する完全に乱れた渦領域となっているものと思われる。このような場合、乱れとともに双子渦が崩壊し、非対称となっていくが、どこまでが対称か、あるいは非対称かの判別が非常に困難になる。

Fig. 5 の実験条件は、 $l/d=6.53$, 無次元半径 $r/l=$

0.71 , $\Omega=0.452$ rad/s, $Re=2.69 \times 10^3$, $Rer=1.9 \times 10^3$ である。 $x/d=2$ の (a) では双子渦が形成されている。 $x/d=3$ の (b) では上側の渦が下流側へと伸び始めている。 $x/d=4$ の (c) ではさらに上の渦が伸び、流れが非対称に遷移している。これは片側の渦が円柱から離脱を始め、対称性を失うというパターンである。

Fig. 6 の実験条件は、 $l/d=6.53$, 無次元半径 $r/l=0.71$, $\Omega=0.264$ rad/s, $Re=1.57 \times 10^3$, $Rer=1.1 \times 10^3$ である。 $x/d=2$ の (a) ですでに上の渦が円柱から離脱を始めており、非対称となっている。(b), (c) のように時間とともにその非対称性はさらに明確なものとなっていく。対称性を失うパターンは Fig. 5 の場合と同じ

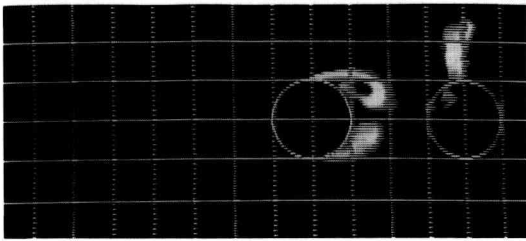
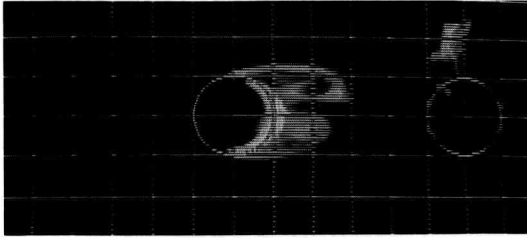
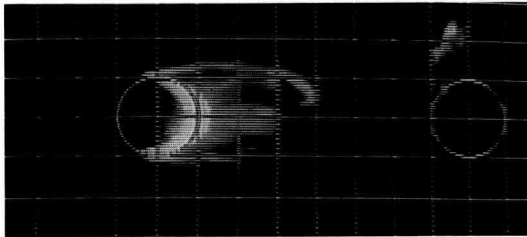
(a) $x/d=2$ (b) $x/d=3$ (c) $x/d=4$

Fig. 5. Separation vortex about a suddenly swung cylinder.
 $(l/d=6.53, r/l=0.71, Re=2.69 \times 10^3, Rer=1.9 \times 10^3)$

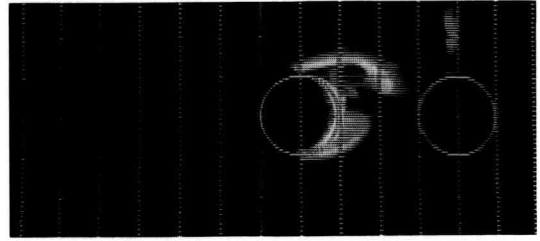
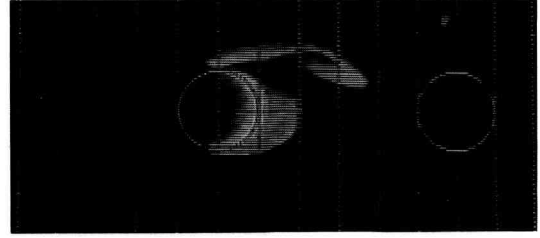
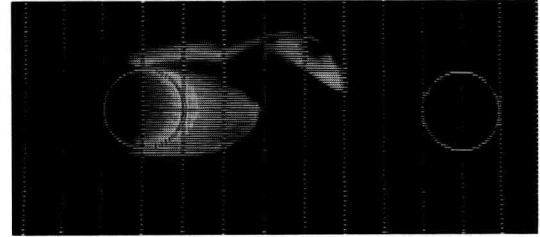
(a) $x/d=2$ (b) $x/d=3$ (c) $x/d=4$

Fig. 6. Separation vortex about a suddenly swung cylinder.
 $(l/d=6.53, r/l=0.71, Re=1.57 \times 10^3, Rer=1.1 \times 10^3)$

であるが、速度が遅い（レイノルズ数が小さい）ほどこのように早い位置から非対称な流れ場となる傾向があった。

対称性が失われるパターンはいくつか見られたが、全体として旋回開始直後に上下対称な双子渦が形成され、渦度を集めしだいに大きく成長し、やがて安定性を失い双子渦が崩壊することが確認された。これは永田ら³⁻⁹⁾によって報告された2次元的な加速円柱の場合に共通することである。

3.2 双子渦崩壊のパターン

前項の結果から、双子渦が崩壊するパターンを分類

するとおおよそ次の3つの場合に分けられる。

- (A) 片側の渦だけが円柱から離脱し、下流へと流れ始める場合（たとえば、Fig. 5, Fig. 6）
- (B) 片側の渦がもう一方の渦によって圧迫され、上下方向に押しつぶされる場合（たとえば、Fig. 3）
- (C) 双子渦の中に3次元的な乱れが発生し、その乱れとともに双子渦が崩壊する場合（たとえば、Fig. 4）

永田らによれば、2次元的な加速円柱の場合、(D) $Re=100 \sim 250$ では層流状態のまま一方の渦が下流に放出され、2次元的な渦の交互放出が起こり、(E) Re

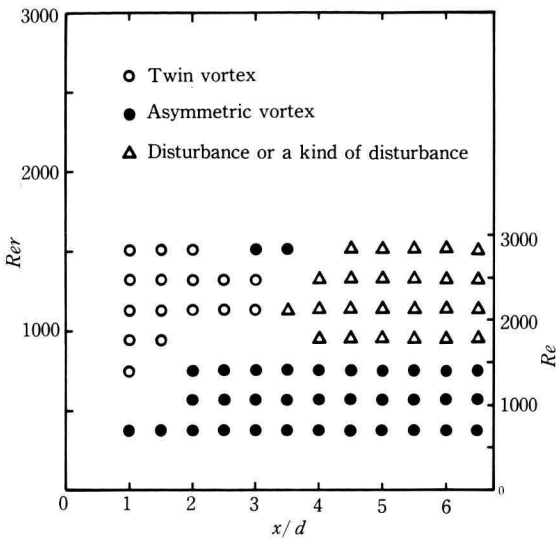


Fig. 7. Vortex patterns for a suddenly swung cylinder.
($l/d=10.0$, $r/l=0.53$)

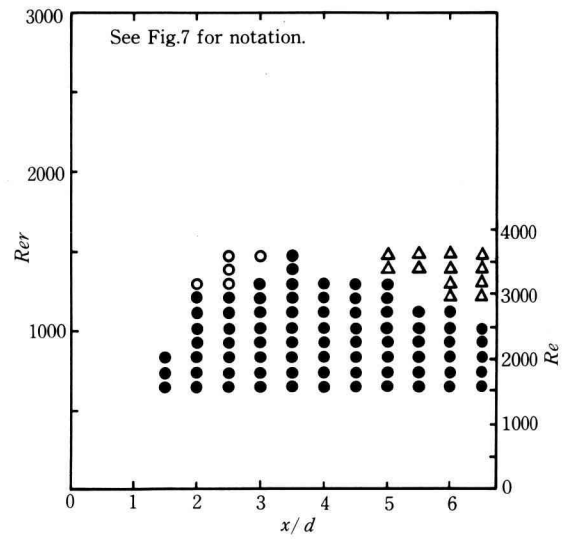


Fig. 9. Vortex patterns for a suddenly swung cylinder.
($l/d=6.53$, $r/l=0.41$)

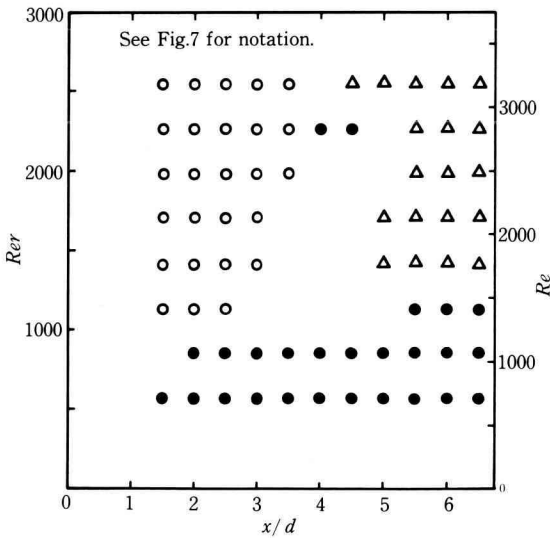


Fig. 8. Vortex patterns for a suddenly swung cylinder.
($l/d=10.0$, $r/l=0.80$)

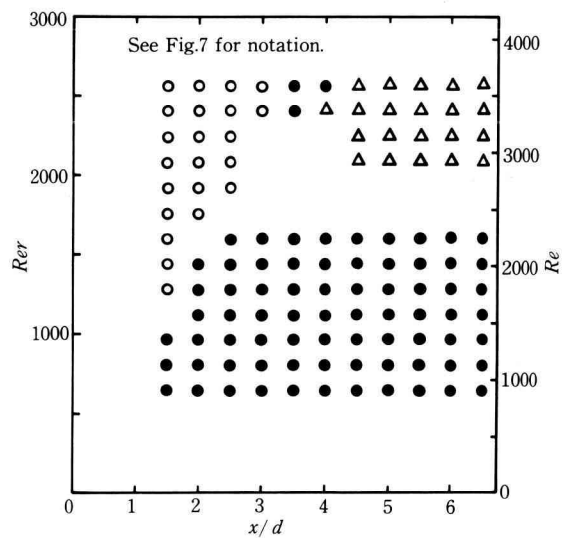


Fig. 10. Vortex patterns for a suddenly swung cylinder.
($l/d=6.53$, $r/l=0.71$)

=500~800 ではいずれか一方の渦領域に 3 次元的な乱れが発生し、渦の交互放出が始まり、(F) $Re > 10^3$ では双子渦の両方に 3 次元的な乱れが発生し、円柱背後は複雑に乱れ、渦の交互放出は見られないとしている³⁾。2 次元的な加速と旋回時との対応は単純ではないが、上記 (A) は (D) あるいは (E) に、(B) および (C) は (F) に対応するのではないかと考えられる。

3.3 はく離渦の形成と崩壊過程

レイノルズ数 Re と無次元移動距離 x/d をパラメータとしてはく離渦の形成と崩壊過程を調べ、Fig. 7~10 に観測結果をまとめた。図中の記号は、○は双子渦の場合、△は乱れがあり対称・非対称の判別が困難な場合、●は非対称の場合を表している。Fig. 7 は $l/d=10.0$, $r/l=0.53$, Fig. 8 は $l/d=10.0$, $r/l=0.80$, Fig. 9 は $l/d=6.53$, $r/l=0.41$, Fig. 10 は $l/d=6.53$, $r/l=0.71$ である。

Fig. 7, 8 より、 $l/d=10.0$ の場合、 Rer が 800 より小さい領域では渦の交互放出が見られた。 Rer が 800 を越え 2,000 程度の領域では、 x/d が 3 程度までは双子渦の放出が確認され、 x/d が 4 を越えると双子渦の中に 3 次元的な乱れが発生し、その乱れとともに双子渦が崩壊した。また同様に、Fig. 9, 10 より、 $l/d=6.53$ の場合、 Rer が 1,200 より小さい領域では渦の交互放出が見られた。 Rer が 1,200 を越えた領域では、 x/d が 2 ないし 3 程度までは双子渦が観測され、 x/d が 4 を越えると双子渦の中に 3 次元的な乱れが生じ、双子渦が崩壊した。

以上から、はく離渦の形成と崩壊過程は、 l/d , r/l に依存するが、概ねこの実験の範囲では定性的に共通の傾向にあることが分かった。すなわち、レイノルズ数が小さいとき、はく離渦は早く非対称となり、渦は交互放出され、レイノルズ数が大きくなると、円柱が旋回を開始してしばらくの間は双子渦が生じ、その後双子渦が乱れて崩壊していくのである。

4. 結 言

円柱が衝撃的に旋回を開始するときのはく離渦の発生、形成過程を流れの可視化によって調べた。はく離

渦の発生と形成過程は、アスペクト比 l/d 、無次元半径 r/l に依存するが、概ね、レイノルズ数が小さいときに流れは早く非対称となり、渦は交互放出され、レイノルズ数が大きくなると、円柱が旋回を開始してしばらくの間は双子渦が生じ、その後双子渦が乱れて崩壊していく過程が観察された。これは軸と直角に 2 次元的に運動を開始する円柱の場合に共通している。

例えば、 $l/d=10.0$ のとき、局所のレイノルズ数 $Rer (= drQ/\nu)$ が約 800 以下の領域では、渦が相互に放出され、一方、 Rer が約 800~2,000 の範囲では双子渦は $x/d=3$ 程度まで維持され、その後双子渦の内部に乱れが発生し、これによって双子渦が崩壊することが観測された。

本研究を進めるにあたって、平成 2 年度文部省科学研究費（奨励研究 A）の補助を受け、さらに実験装置の一部に三木ブーリ株式会社からの援助を受けました。また、可視化実験には本学学生の本間孝喜君、峰尾毅君、山澤新巨君の協力をいただきました。ここに謝意を表します。

文 献

- 1) 石綿, 川口, 神奈川工科大学研究報告 B 編, 第 13 号 (1989), p. 19.
- 2) 石綿, 川口, 神奈川工科大学研究報告 B 編, 第 15 号 (1991), p. 17.
- 3) 永田ほか, 日本機械学会論文集, 41-341 (1975) p. 161.
- 4) 永田ほか, 日本機械学会論文集第 2 部, 44-384 (1978) p. 2673.
- 5) 永田ほか, 日本機械学会論文集 B 編, 51-463 (1985) p. 738.
- 6) 永田ほか, 日本機械学会論文集 B 編, 54-502 (1988) p. 1260.
- 7) 永田ほか, 日本機械学会論文集 B 編, 54-505 (1988) p. 2291.
- 8) 永田ほか, 日本機械学会論文集 B 編, 55-514 (1989) p. 1505.
- 9) 永田ほか, 日本機械学会論文集 B 編, 55-519 (1989) p. 3288.