

単一半円形トリッピングワイヤ付き円柱に作用する流体力

Fluid forces acting on a circular cylinder with single semi-circular cylindrical tripping wire

斎藤 隆^{*}、乗越 晃^{**}、多和芳雄^{**}、赤松利之^{**}

By Takashi SAITOU, Akira NORIKOSI, Yosio TAWA and Tosiya AKAMATU

The purpose of this paper is to investigate the effect of a semi-circular tripping wire on the aerodynamic character of a circular cylinder. An experimental investigation on the fluid forces acting on a circular cylinder with a semi-circular tripping wire were carried out. It was found that there were the range of the bi-stable flows in which the short time-mean values of fluid force change intermittently, the mean values of drag and lift coefficient with setting angle of tripping wire from front stagnation point changed remarkably and the strongest correlation was observed between fluctuation of drag and lift.

Keywords : circular cylinder, fluid forces, tripping wire
bistable flow, drag and lift coefficient.

1. まえがき

レインバイブレーションが発現する要因^{1, 2)}の一つとしてケーブル面上に形成される水路による空力不安定がある。半円形側線を模擬水路として、半円形側線付き円柱に作用する流体力を実験的に検討してきた³⁾。この問題は、自然現象の結果であるが、円柱まわりの流れの制御である。円柱まわりの流れを制御する方法としては、境界層流れを制御する方法^{4 ~ 7)}と後流流れを制御する方法^{8 ~ 10)}とに大別することができる。具体例としては、ケーブル表面にV-ストライプを設けて不安定振動を制御¹¹⁾したり、小円柱を配置して水管橋の渦励振を制御¹²⁾する等の方法が提案されている。本研究と関連する研究としては、前方淀み点に対して対称の位置にトリッピングワイヤを円柱に接合した境界層の制御である。トリッピングワイヤの設置位置がある角度以下ではワイヤから剥離したせん断層が円柱表面に再付着することで抗力係数が0.5まで減少する等のことが明らかにされている⁶⁾。単一のトリッピングワイヤを円柱に接合した実験の結果、抗力係数の軽減は対称に設置した場合に比べて約1/2であるが、揚力係数は最大0.4~0.45と大きな値となり、

^{*} 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

^{**} 学生会員 山口大学大学院工学研究科社会建設工学専攻
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

境界層が制御されてない面での円柱表面圧力分布が単円柱のそれと同じであると仮定して得られる結果とほぼ一致する結果である。はく離泡の再付着領域では三次元の大規模うず構造が流下していくことが明かにされていて^{14, 15)}、その下流の円柱表面からの流れのはく離になんらかの影響を及ぼして特異な流れ場を形成することが考えられる。すでに、著者らは二つの流れ場が間欠的に変化することによる流体力の矩形波的な変動が単一の半円形トリッピングワイヤの接合位置と Re 数によって生起することを変動流体力の頻度分布形の検討から見だしている³⁾。本研究はこの特異な流体力の変動が生起する条件、矩形波の変動流体力の切り替わり時間ならびに矩形波の変動流体力の変動差について検討した結果について報告するものである。

2) 実験装置と実験方法

実験は断面が幅1m、高さ10cmで長さ1mの試験部を有する貫流式風洞で行った。試験部の側壁は10mm厚さの亚克力樹脂板、上面は9mm厚さの板硝子、床面は15mm厚さのベークライト板である。使用した円柱は外径 D が50mmの円柱で、測定部の中心線上で入口から20cmの位置に設置した。円柱設置断面での静圧分布は一様で、流下方向には直線的に静圧は減少して出口断面では大気圧となっている¹⁶⁾。流体力測定部の円柱長さは60mmで内径47mmの亚克力樹脂製の円筒である。流体力測定部の上下には厚さ20mmのダミー円柱が0.1mmの間隔を設けて設置されている。上下のダミー円柱は相対位置が変わらない様に流体力測定円柱を貫通し接触しない四本の小円柱で結合されている。ダミー円柱の厚さと流体力測定円柱との間隙については予備実験によって定めた。すなわち、ダミー円柱との間に0.1mmの間隙を設けることによって上下の流れが分断されることによって、流体力測定部円柱表面圧力の円柱軸方向の分布は一様となり、円周方向の分布は従来のアスペクト比が十分大きい場合の測定結果と一致することを風速を変えた実験で予め確認している¹⁶⁾。

流体力の測定は、流体力測定円柱の重心を一辺が7mmで長さ25mmの真鍮角柱の上部に固定し、角柱の垂を四面に張り付けたKSP型半導体ゲージ（ゲージ率は約225）で測定する方法で行った。角柱の各対面のゲージでホイットストン・ブリッジが構成されていて、抗力と揚力が同時に測定することが出来る。この流体力測定系の固有振動数は約1500Hzで、単円柱でのうず放出周波数の10倍以上である。

外径が2mm、3mm、4mmの円柱を半円柱形に加工したものをトリッピングワイヤとして用いた。円柱に接合した場合のワイヤの高さ d は1.0mm、1.45mm、2.0mmで円柱径比 d/D はそれぞれ0.02、0.029、0.04である。藤田ら⁷⁾が実測した円柱表面圧力より、ベルヌーイの定理を用いて求めた円柱に沿っての無次元速度 u_e/U の分布に基づいて Thwaites の近似法を用いて算出した境界層の運動量厚さより、本実験での境界層厚さは $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ で0.2~0.3mm程度と推測される。したがって、トリッピングワイヤ高さ d は境界層厚さ δ の3~10倍で、境界層外縁より十分高いトリッピングワイヤである。

実験は一本のトリッピングワイヤを前方淀み点からの角度 θ が $30^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で $1^\circ \sim 5^\circ$ 間隔で位置を変えて接合し、各接合位置に対して遠方流速 U を $8 \sim 20$ m/s ($Re = 2.56 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4$) の範囲で七通りに変化させて流体力を測定した。流体力は500HzでA/D変換し、平均流体力ならびに変動流体力の統計特性を解析した。

3) 実験結果とその検討

抗力、揚力は図-1に示してある矢印の方向を正としている。

抗力係数、揚力係数

トリッピングワイヤの接合位置 θ による抗力係数、揚力係数の変化を Re 数をパラメータにして、ワイヤ高さの円柱径比 d/D で分けて描点したのが図-2、3である。両係数の定義は通常用いられているものである。抗力係数 C_D の値は接合位置 θ の増大によって小さくなっていき、 θ が $50^\circ \sim 60^\circ$ の範囲で最小値をとり、その角度よりも 10° 程度の範囲で急に増大して最大値をとる。さらに θ が大きくなると単円柱の値に漸減していく。抗力係数が最

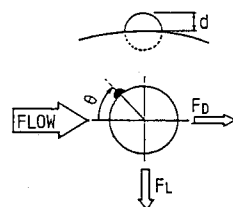


図-1 流体力の定義

小となるワイヤの接合位置 θ はワイヤ高さの円柱径比 d/D が大きいほど小さく、 Re 数が大きくなると小さくなっている。

以上の θ による抗力係数の変化は、対称にトリッピングワイヤを設置した藤田らの実験結果⁷⁾と同じ傾向であるが、最小の抗力係数の値が0.5であるのに対して、本実験では0.8と抗力係数の低減率はほぼ半分である。藤田⁷⁾らは円柱表面の平均圧力分布を測定して、図-4に示す3つのtypeに分類している(図中の点線はワイヤなしの場合の圧力分布)。この図の圧力分布を参考にして、ワイヤがない側での円柱からの流れのはく離は単円柱でのそれに近い状態であるとする、円柱背後のはく離領域の大きさが異なり、かつ背圧が両状態での中間値となることから、抗力係数の低減率が約1/2になることはほぼ妥当な結果であると考ええる。

ワイヤ高さ d と接合位置での円柱表面流速 ue とによるレイノルズ数 Red の値は Re 数より2桁小さいことから、 Re 数によってワイヤ背後のはく離泡の長さが違う結果として、 Re 数によって効力係数の値が変わることになる。

図-3をみると、揚力係数と抗力係数のワイヤの接合位置 θ による変化はきわめて密接に関連している。すなわち、抗力係数が低下していく θ の範囲では θ の増大によって揚力係数の絶対値は大きくなっていき、抗力係数が最小となる所で揚力係数の絶対値が最大となる。抗力係数が急増する所で揚力係数の絶対値は急減して、揚力が負から正に変わり、揚力の作用方向が反転している。藤田⁷⁾の実験条件と比較すると、揚力係数の反転はtype IIIに移行した角度で生じている。

図-4の結果では、本実験での揚力の作用方向が反転することは説明出来ないが、ワイヤの無い側での流れのはく離は円柱での状態に近いであろうことから、type IIIでの背圧が図で示されているほど低下していないことで揚力の作用方向が反転することが説明できる。現在、この点を確認するために円柱表面の平均圧力分布と変動圧力を測定する準備を進めている。

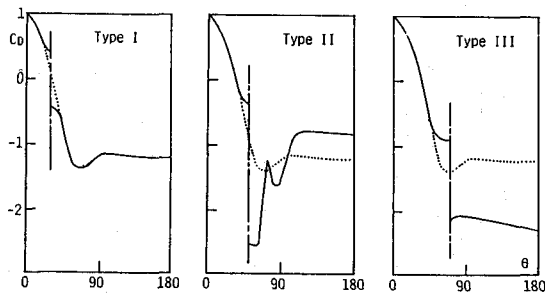


図-4 トリッピングワイヤ付き円柱表面圧力分布

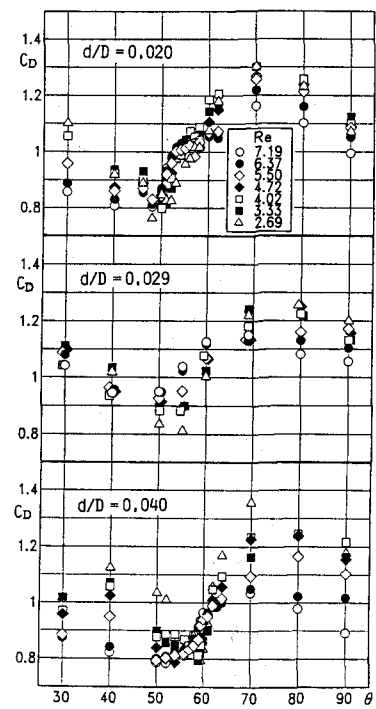


図-2 抗力係数

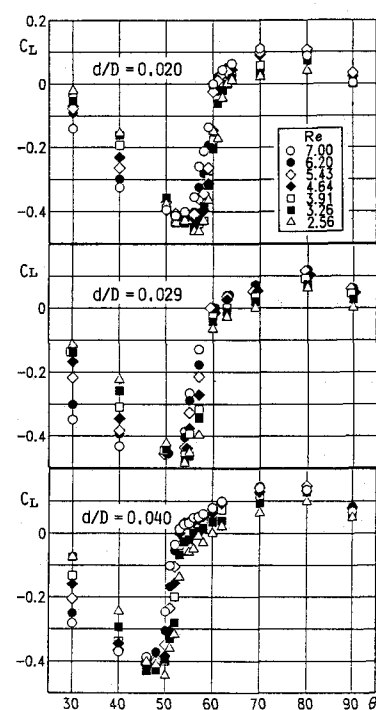


図-3 揚力係数

流体力の変動波形

揚力係数の絶対値が急減し、揚力の作用方向が反転する θ の範囲で流体力が時間的に不安定な変動をすることから、流体力の変動波形と変動流体力の頻度分布を調べた結果、変動流体力は図-5に示す4つの型に大別することができる。流体力の変動波形は θ が大きくなることで、Type A、B、C、Dと変化する。

Type A: 頻度分布がほぼ正規分布で、 θ が小さく抗力係数が減少し、揚力係数の絶対値が大きくなることで見られる。

Type B: 揚力係数が最小となる θ より 10° 程度小さい範囲で見られ、瞬間的に非常に大きな揚力が生起している。

Type C: 流体力の短時間平均値が間欠的に急変していて、頻度分布が双山の分布を呈する。流体力係数が θ で急変する範囲で生起する。

Type D: Type Bとは逆になった変動波形で、抗力係数が最大となる θ より 10° 程度大きな θ のところで生起する。

図-4の円柱表面圧力分布に基づいて円柱まわりの流れと変動流体力との関係を検討してみる。 θ が 30° 以下では、ワイヤ背後に安定したはく離領域が形成されて、type Iの安定した圧力分布と安定した流れ場が形成され、 θ の増加に伴って揚力の絶対値が大きくなり、円柱からはく離点が下流に移るため抗力係数が低減されていく。 θ が大きくなると再付着点と円柱からはく離点とが近くなるので、再付着点付近に形成される三次元大規模うず構造¹⁴⁾によるはく離泡の不安定によって後流域がはく離泡内に達し、はく離泡内の圧力が瞬間的に上昇することで Type Bの変動波形が生起する。さらに θ が大きくなると、ワイヤ背後のはく離泡が独立して形成されている時間と後流域となる時間とが均衡して、Type Cの変動波形となる。円柱まわりの流れははく離点が異なる二つの流れが間欠的に変化する。すなわち、再付着流れとはく離流れとが間欠的に切り替わる双安定流れである。この再付着流れとはく離流れの安定性の度合によって、変動波形は

Type B、C、Dと変わっていく。ワイヤ背後にはく離泡が形成されることなくワイヤの頂部ではく離し再付着する流れがなくなると、Type Aの頻度分布が正規分布となる変動となる。

双安定流れの生起条件

変動流体力の歪度 α_s 、尖り度 α_k ならびに抗力と揚力の変動の相関係数 s のワイヤ接合位置 θ による変化を調べた一例が図-6である。これらの統計量の算出は、双安定流れが生起する条件を明らかにするのが目的であるので、円柱からのうず放出による過誤を避けかつスパイクの変動をも抽出するため、揚力の生波形をストロハル数 $St=0.2$ で与えられる周期の2~3倍の時間で移動平均した波形を用いた。図-6の結果を模式的に描いたのが図-7で、流体力の変動波形の特徴と各統計値の θ による変化を考

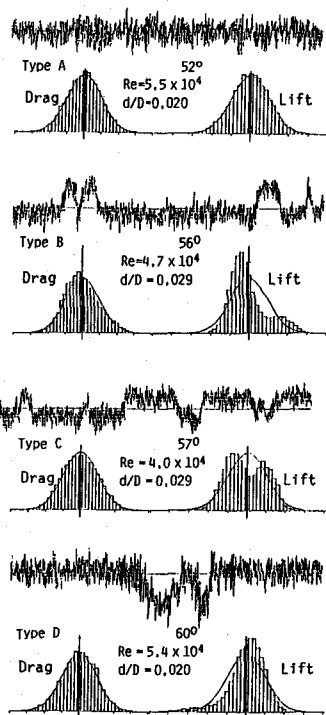


図-5 流体力の変動波形と頻度分布

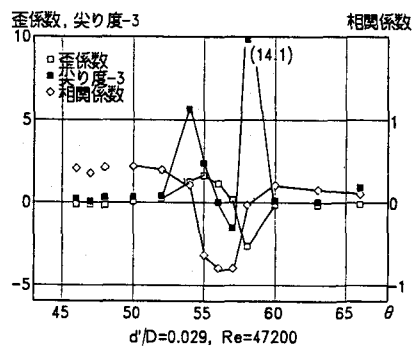


図-6 変動波形の統計量と θ の関係

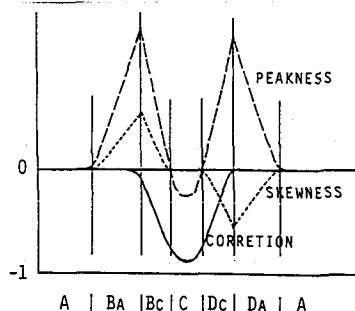


図-7 流れタイプの分類基準

慮して、生起する変動波形のTypeを図の下方に示した。この図に基づいて各変動波形が生起する θ と Re 数との関係が図-8である。図において、双安定流れが生起する θ の範囲はワイヤ高さの円柱径比 d/D が大きいほど上流側である。ワイヤ高さが高い程その背後のはく離泡の長さが大きいことから当然の結果である。

Re 数が小さくなると双安定流れが生起する θ の範囲は狭くなっている。ワイヤ背後のはく離泡の大きさはワイヤ高さとその点での流速によるレイノルズ数の Re_d によって規定されるはずである。前述したように、はく離泡の長さは Re 数の減少によって小さくなることで双安定流れが生起し始める θ が下流に移動する結果として双安定流れの生起範囲が狭くなると考えられる。

双安定流れにおける平均揚力の変動特性

ワイヤ背後にはく離泡が形成されている流れの状態を再付着流れと、ワイヤ頂部から剥離して後流流れを形成する流れの状態をはく離流れとする。両流れの状態が間欠的に変わる結果、両流れの状態に対応して揚力の短時間平均値が矩形波状に変化する。

前述した移動平均で平滑化した変動波形から長時間での平均揚力を求め、瞬間の揚力がこの平均値よりも大きい、小さいかによって分け、分けられたそれぞれの平均値の差を揚力の矩形波変動の平均振幅 F' とする。遠方流速 U と流れに直交する面への円柱の投影面積 A とで F' を流体力係数の形に無次元化した値を Cls とする。すなわち、

$$Cls = F' / (\rho U^2 A)$$

Cls とワイヤの接合位置 θ との関係を描点した一例が図-9 ($Re = 7 \times 10^4$ の場合)である。図-5の変動波形から当然予測される結果であるが、図-8と対比してみると変動波形との関係がより明確である。すなわち、間欠的に短時間のはく離流れが生起するType B になると変動強さが大きくなっていき、Type C の双安定流れの状態では変動強さが最大となる。さらに θ が大きくなり、間欠的な再付着流れの生起する時間が短くなるType D では変動強さが小さくなっていく。

双安定流れの状態での変動強さの無次元係数 Cls をワイヤ高さの円柱径比をパラメタにしてのレイノルズ数に対して描点したのが図-10である。 $Re = 4 \sim 5 \times 10^4$ で最大値をとる傾向にある。双安定流れの状態における再付着流れとはく離流れのそれぞれにおける揚力の平均値の差は、瞬間揚力の最大値と最小値の平均値と時間平均値とはほぼ一致していること、ならびに両流れの状態が持続する時間が平均的に同じであることから、大雑束に Cls の $2^{1/2}$ 倍と見積ることができる。このような推測を適用すると、再付着流れからはく離流れに、逆に、はく離流れから再付着流れに変わるとき、揚力が変化する大きさを揚力係数値にすると、0.35～0.45となり、きわめて大きな変化であることが注目される。

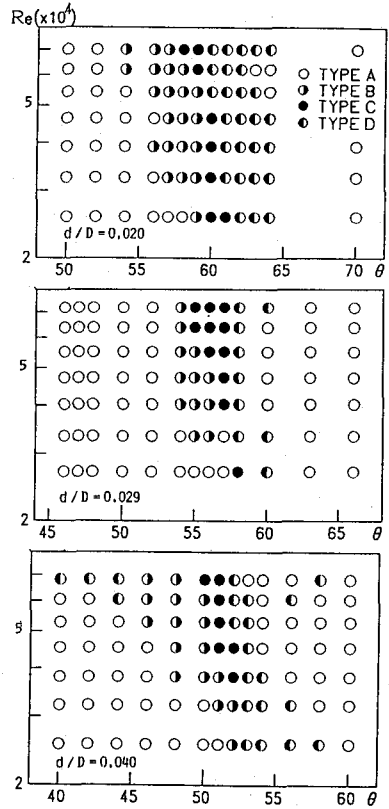


図-8 双安定流れの生起条件

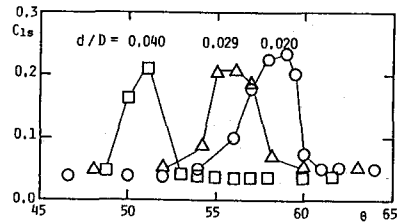


図-9 揚力の変動強さと θ との関係

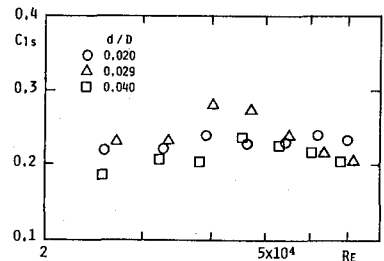


図-10 双安定流れでの揚力変動強さ

再付着流れとはく離流れとの切り替わりはワイヤ背後に形成されるはく離泡の安定性が重要な役割をもつと考えられる。この観点から、双安定流れにおける再付着流れからはく離流れに変わり再び再付着流れとなる平均周期を求め、ワイヤ高さと接合位置 θ でのポテンシャル流れで与えられる円柱表面流速とでストロハル数の形に無次元化した Std をレイノルズ数に対して描点したのが図-11である。図-10で揚力の変動強さが最大となる $Re=4 \sim 5 \times 10^4$ において Std が最小値となることが注目される。

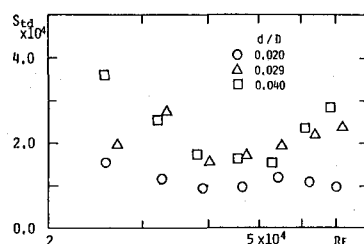


図-11 低周期の無次元揚力変動時間

4. まとめ

斜長橋で起るレインバイブレーション現象が発現する要因の一つであるケーブルに形成される水路によるところの不安定性についての最も基本的な問題として、単一の半円形トリップワイヤを接合した円柱に作用する抗力と揚力とを同時に測定し、両流体力の平均値ならびにその変動特性を検討した。本研究で明らかにされた結果を要約すると次の通りである。すなわち、

1、抗力係数、揚力係数は、トリッピングワイヤを前方よどみ点に対称に接合した場合と同様に、 θ によって図-2、3のように変化する。ただし、抗力の低減率はほぼ半分である。揚力係数の変化は抗力係数の変化と密接に関連していて、抗力係数が最小となるところで揚力係数が最大となり、 $C_L=0.4 \sim 0.45$ となる。

2、抗力係数、揚力係数の値が急変するワイヤの接合位置では円柱まわりの流れが間欠的に再付着流れとはく離流れとに変わる双安定流れが生起する。双安定流れの生起する条件は図-8の通りで、双安定流れが生起する位置はワイヤ高さの円柱径比 d/D が小さいほど下流側である。

3、双安定流れでの揚力の変動強さと周期は図-10、11の通りである。円柱まわりの流れが再付着流れからはく離流れへ、逆にはく離流れから再付着流れへ変化する際に生じる揚力の変化は大雑束に見積もると、無次元値でほぼ $0.35 \sim 0.45$ と非常に大きい。

以上を総括すると、抗力係数、揚力係数の θ による変化率に加えて、このような揚力の変動強さが作用することで円柱は空力的に非常に不安定となることが予想される。

参考文献

- 1) 松本 勝、白石成人、辻井正人、平井滋登：土木学会論文集 第416号/I-13, pp.225-234, 1990
- 2) 宮崎 正、山口宏樹：土木学会第44回年次学術講演会概要集, pp.796-797, 1989
- 3) 斎藤 隆、横山 均、多和芳雄：第24回乱流シンポジウム講演論文集, pp.90-94, 1992
- 4) Guben O., Facell C. and Patel V.C.: J.F.M., Vol.98, part 4, pp.673-701, 1980
- 5) 岡島 厚、中村泰治：九州大学応用力学研究所所報, 第40号, pp.384-400, 1983
- 6) Leung Y.C. and Ko N.W.M.: Experiments in Fluids, 10, pp.322-332, 1991
- 7) 藤田秀臣、高浜平七郎、川合忠雄：日本機械学会論文集 (B編), 50巻, 453号, pp.1275-1284, 1984
- 8) Apel C.J. and West G.S.: J.F.M., vol.71, part 1, pp.145-160, 1975
- 9) 安達 勤、他4名：日本機械学会論文集 (B編), 56巻, 528号, pp.2225-2232, 1990
- 10) 五十嵐 保：日本機械学会論文集 (B編), 51巻, 462号, pp.591-599, 1985
- 11) 宮崎正男：第10回風工学シンポジウム論文集, pp.145-150, 1988
- 12) 中原智法、久保喜延、中村聖三：土木学会第46回年次学術講演会概要集, pp.490-491, 1991
- 13) Achenbach E.: J.F.M., vol.34, part 4, pp.625-639, 1968
- 14) 佐々木久郎、木谷 勝：日本機械学会論文集 (B編), 51巻, 461号, pp.308-316, 1985
- 15) 鈴木雍宏、木谷 勝：日本機械学会論文集 (B編), 51巻, 461号, pp.317-324, 1985
- 16) 斎藤 隆、羽田野袈裟義、奥野雅晴：水工学論文集, 第34巻, pp.229-234, 1990