

II-19 段落ち部近傍の水利特性と 局所洗掘に関する研究

北海道大学工学部 正会員 山田 正
北海道大学工学部 学生員 竹本 典道

1.はじめに 段落ち流れはせきや水門周辺あるいは河床波、砂れき堆の形成に伴って発性する局所流であり従来多くの研究がされてきた。しかしそれらの多くは直角段落ち流れの研究であり、河道に形成される砂堆にみられるような斜め段落ちに関する研究は著者らの知る限り Allen, 村本・藤田らの研究以外ほとんどなされていない。本研究は直角段落ち流れと斜め段落ち流れとの水利特性を比較検討し、さらに段落ち近傍における局所洗掘に関してその特性を実験的に明らかにすることを目的にしたものである。なお実験装置としては風洞を用いているが、これは水の場合より空気流の方が測定値のばらつきが少なく、自由表面の影響を受けないためである。

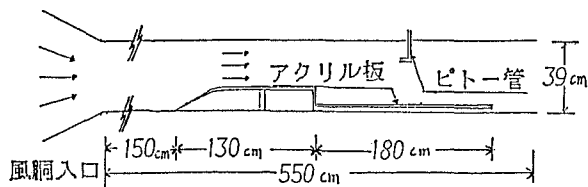
2.実験装置 2.1実験方法および実験条件 実験装置は図1に示すよう長さ5.5m 幅40cm、高さ39cmの吹出型の風洞であり風洞入口から2.8m下流の位置に段落ち高さ H_s 、2、4、5cmおよび10cmの段落ちを設け、この近傍の流れの風速、圧力、底面せん断応力等を測定した。段落ち角度としては0、30、45度および60度の4種類を採用した。なお模型表面は水理学的滑面となるようアクリル板を使用している。風速はビトー管をベツツ型マノメーターに接続し測定した。表面圧力は風洞底面に設けた孔径 $d=1\text{mm}$ の圧力孔を5mmのビニル管に接続してベツツ型マノメーターで測定した。表面摩擦応力は底面に密着させた外径1mmの先端を切り落とした注射針をプレストン管として用い、プレストンの提案する実験式で求めている。図2、3、4、5においては左端に段落ち地点より2cm上流の平均風速の分布が示されている。これから段落ち上流では境界層暑さが2cm程度であり、接近流速はほぼ一様流であることがわかる。

3.実験結果及び考察 3.1平均流速分布と剥離後の流れの挙動 図2から5は段落ち部近傍における平均流速の分布を示している。これらの図より段落ち部下流には時間平均的には段落ち高さ H_s の8-9倍程度の長さを持った渦が存在していることが分かる。しかし目視による観察では渦の長さは常に変動している。図6は表面タフト法によって観察した糸の方向を平面的に写真に撮りこれを示したものである。糸は4cmの木綿糸を使用し5cmメッシュに底面に貼り付けた。このときの風速は段落ち上流3cmで 1.4m/s 、段落ち高さ $H_s=4.5\text{cm}$ の場合である。なお破線は再付着点位置を示している。再付着点位置下流では糸はほぼ流下方向を示すが、段落ち面から再付着点位置間において複雑な動きをしていることがわかる。これは段落ち後の圧力差によって生じる逆流や横方向への流れ、および段落ち面に沿った剥離渦が定在的に存在することを示している。上記の渦は主に剥離後面のものに関してであるが、図7は同時に行った開水路流れにおける可視化実験のものである。用いた水路のスケールはかなり小さいものであるが、流れのレイノルズ数は約 1.0×10^4 である。この図より剥離点から流れの横断方向に平行な渦糸が周期的に放出されていることが分かる。よって平均流速の分布からだけでは剥離後面の渦のみが存在するように見えるが段落ち角部(剥離点)から舞い上がり主流の中に混入する渦あるいは渦糸の存在もこの様な流れの構造には重要な要素と思われる。

3.1再付着点距離におよぼす段落ち角度の効果 本研究では再付着点位置は底面におけるプレストン管で測定した風速がゼロになるところ、すなわち底面せん断応力がゼロとなるところとして定義されている。図8は段落ち角度別に再付着位置を平面的に示したものである。この図より再付着点位置は斜め段落ち面に対してほぼ平行になっていることがわかる。段落ち高さ H_s で無次元化した再付着点距離 X_r と段落ち角度 θ の関係を示したものが図9である。これから X_r/H_s は、段落ち角度が大きくなるほど再付着点距離は短くなっていることがわかる。図10は流れのレイノルズ数に対する再付着点距離を示したものである。ここに $Re=V \cdot H_s/\nu$ で定義する。この図より本研究で示した X_r/H_s はレイノルズ数に関係なくほぼ一定の8-9前後の値を取っており、他の研究者らのものと比較すると Re で約 10^4 あたりで一度最低値の5程度を取ったのちレイノルズ数の増加とともに次第に著者らの実験値に漸近しているように見える。しかし著者らの値が他の研究者らの値よりより大きめの値になっている原因として、本研究では直径1mmのプレストン管を使用しているのに対して他の研究者らの

は底面よりもう少し高いところの位置における流速を測定していることに起因しているのかもしれない。表面せん断応力を直径5mmのピトー管の総圧をプレストン管圧力として再付着点距離を求めてみると注射針を用いた場合より最大30cm程度長めの距離を算出してすることがわかったので、以後の測定では総て注射針を使用して底面せん断応力を算定している。3.2 段落ち部下流底面上の圧力分布 図11 段落ち角度0度における段落ち下流部の圧力分布を圧力係数 $C_p = 1/2 (P - P_0) / \rho V_0^2$ を X/Hs 対して表したものである。ここに ρ : 流体の密度, P_0 , V_0 : 基準点 (段落ち3cm上流) での静圧と主流速度, X : 段落ち部よりの下流距離, $X/Hs = -1$ から 0 は段落ち面を表す。この図より再付着後の圧力上昇はステップ高さが大きいほど大きく、ピーク値からの圧力の減少は少ないことが分かる。

3.3 再付着後の壁面摩擦応力分布 図12から15は段落ち角度、段落ち高さごとに $C_f = \tau_0 / (1/2) \rho V^2$ で定義される摩擦抵抗係数の下流方向変化を表したものである。ここに V は各測定点直上の最大風速、 τ_0 は底面せん断応力である。段落ち角度0度の場合には他の研究者の値も併記した。Bradshaw and Wongの場合にはプレストン管の径が0.109mmの場合であり、石川の場合は風速が4.25m/sである。これから段落ち角度が増しても摩擦抵抗係数は同様の傾向を示すが、角度が増すほど C_f が最大になるまでの距離がやや短くなっている。 C_f の最大値はほぼ同一の0.3から0.4値を取っていることから斜め段落ちの場合も直角段落ちの場合と同じように議論できることになる。4. 段落ち部後方の局所洗掘 前節までは風洞全面がアクリルによって構成されていた場合であるがここでは段落ち前の底面はアクリル、段落ちの後には底面に (豊浦産) 標準砂を敷き詰め、段落ち後の底面の洗掘状況と斜め段落ちの洗掘に及ぼす影響を検討する。図16から19は段落ち角度ごとの風洞中央線に沿った洗掘状況を時間の経過と共に表示したものである。これらの図より段落ち角度が大きいほど洗掘速度は速いことが分かる。しかし前節の再付着点距離の特性から角度が大きいほど最大洗掘深を示す距離は短くなっている。図20は風洞末端に設けた補砂器によって測定された飛砂量である。この図より段落ち角度にかかわらず単位時間当りの飛砂量は同じ値を示していることが分かる。このことから斜め段落ちの効果は局所洗掘の速度や洗掘部分の長さは異なっても断面平均流砂量は同じになるといえる。ところで移動床の場合時間の経過と共に河床は低下していくが段落ち角度が0で風速が十分に大きいときには河床低下は風洞中心線部がより深くなる。しかし本実験の場合平均風速が6m/s以下 (移動限界は約4.8m) のときは図21に示すように風洞側壁に近い部分の方がより速く洗掘され、中央部は取り残されたような形状を示す。この点に関して著者らは図22に示すような段落ち両端から続く側壁に沿った縦方向の渦が存在し、この渦から誘起される風洞中央に向かう流速成分により風洞側壁に近い部分がより速く洗掘されるものと思われる。しかし主流風速が6m以上になるとなぜこの傾向が消失するかは未だ不明である。図22は段落ち後の局所洗掘を流砂の連続式に基づいて算定したものである。このとき流砂量の算定は定常平衡流砂量公式を用いており、底面せん断力は前節に示した固定床実験により得られた分布を用いている。この結果大略的には上に示した計算方法により段落ち後の洗掘を予測することができることが分かる。しかし底面せん断力の算定には底面形状の変化しない固定床のものを用いているため精度は悪く、今後は時々刻々低下変形する河床形状に合わせたせん断力の算定方法を開発する必要がある。



段落ち角度の種類

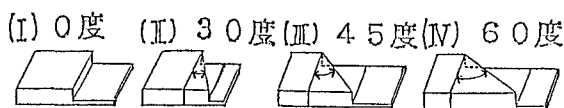


図1 実験装置の概要

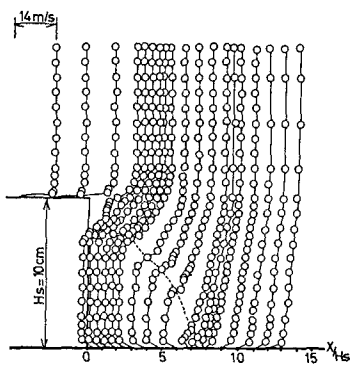


図2 段落ち後の平均流速分布
(0°の場合)

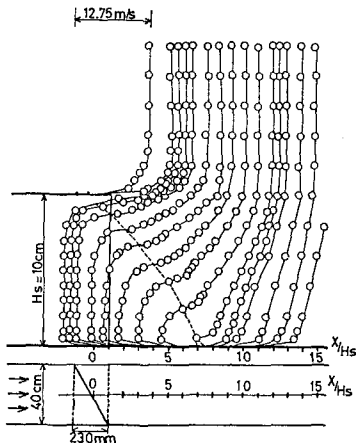


図3 段落ち後の平均流速分布
(30°の場合)

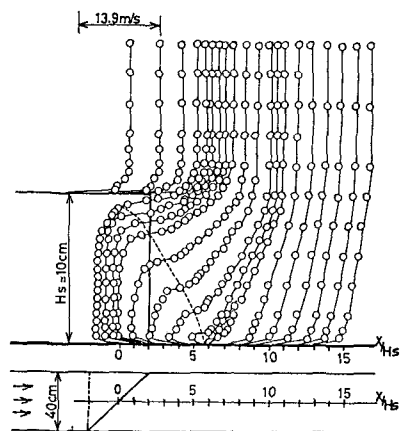


図4 段落ち後の平均流速分布
(45°の場合)

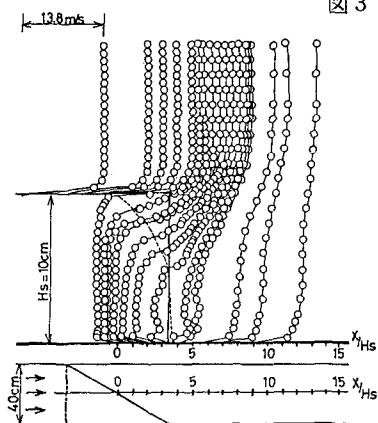


図5 段落ち後の平均流速分布
(60°の場合)

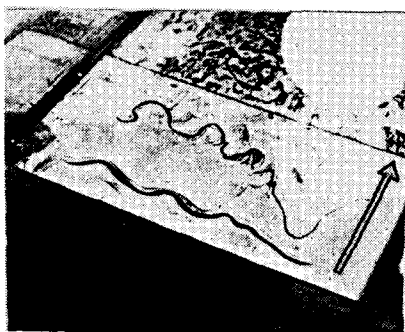


図7 開水路段落ち流れの可視化実験

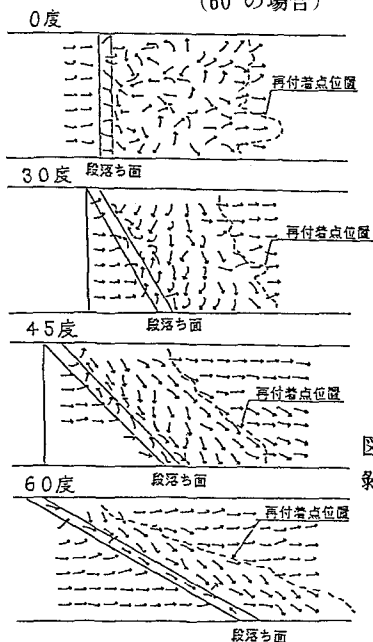


図6 タフト法による
剝離領域の流れのパターン

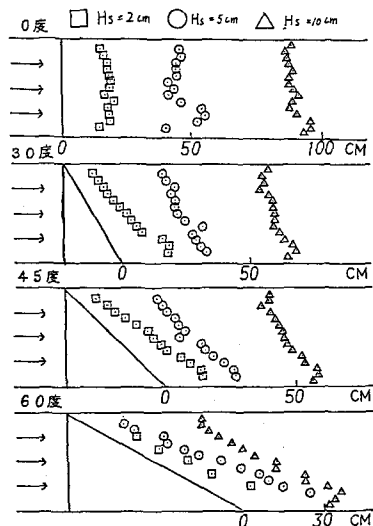


図8 段落ち高さごとの再付着点距離

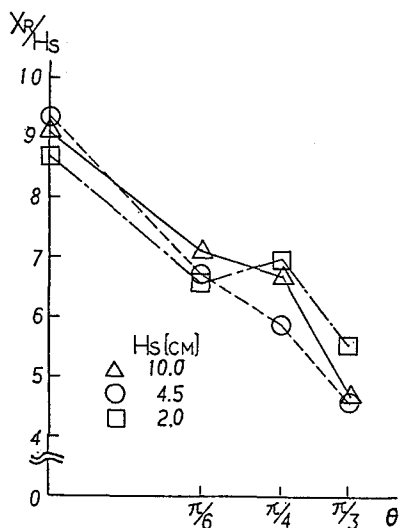


図9 段落ち角度に対する再付着点距離

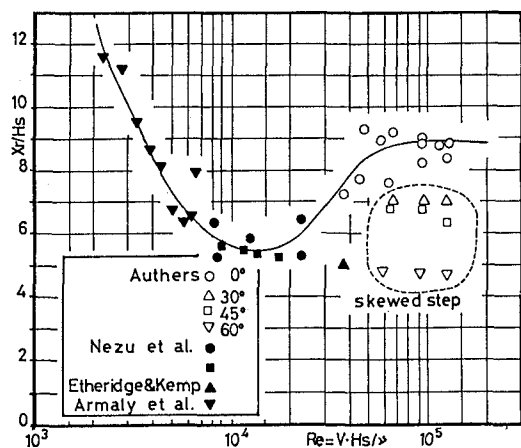


図10 レイノルズ数に対する再付着点距離

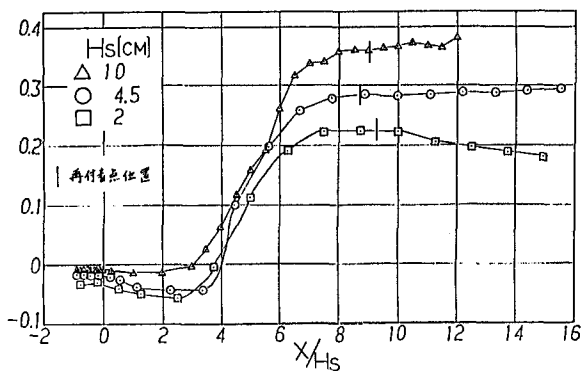


図11 圧力係数の流下方向分布

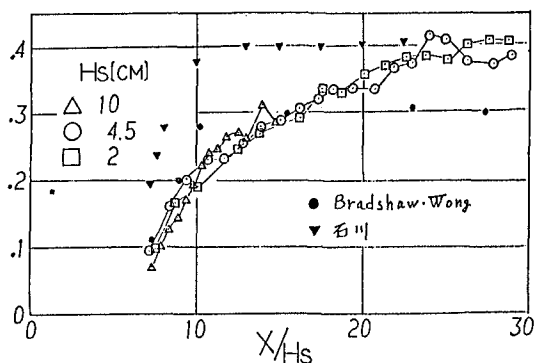


図12 摩擦抵抗係数の流下方向分布
(0°の場合)

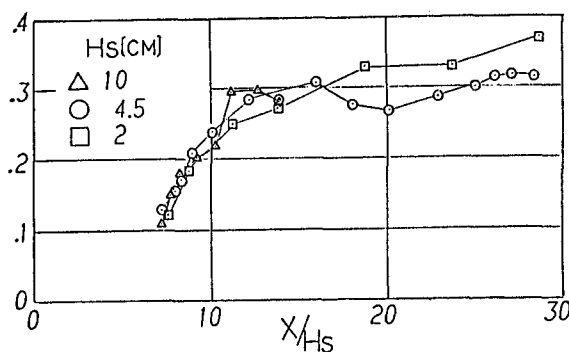


図13 摩擦抵抗係数の流下方向分布
(30°の場合)

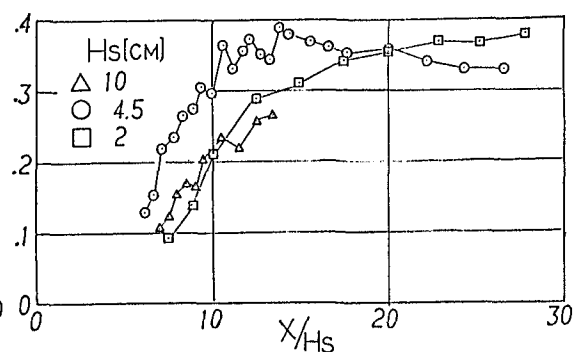


図14 摩擦抵抗係数の流下方向分布
(45°の場合)

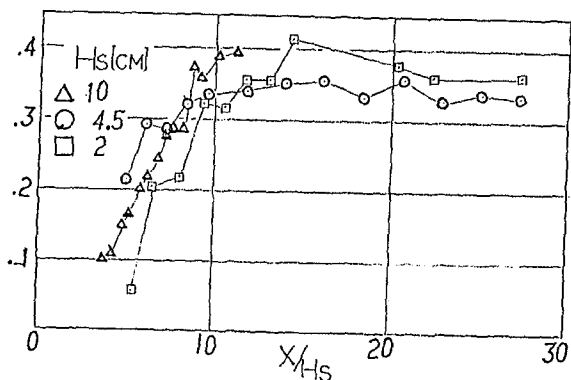


図 15 摩擦抵抗係数の流下方向分布
(60° の場合)

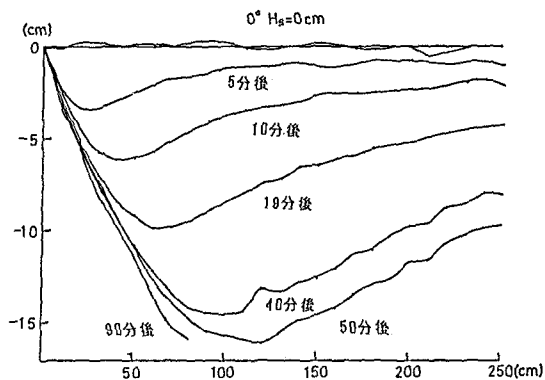


図 16 段落ち後の局所洗掘
(0° の場合)

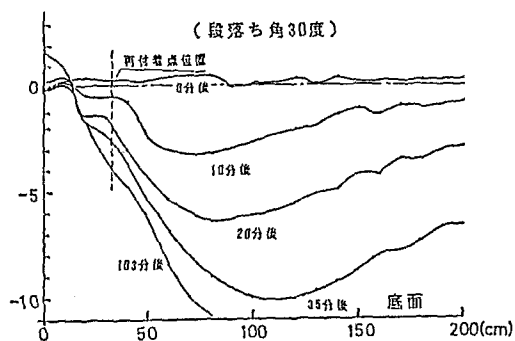


図 17 段落ち後の局所洗掘
(30° の場合)

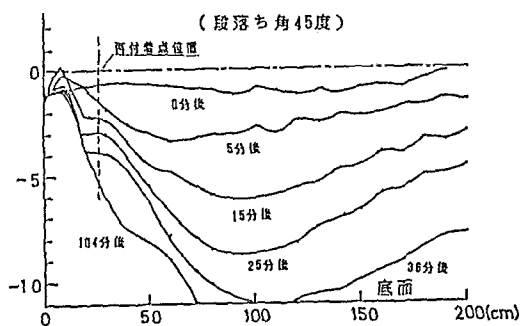


図 18 段落ち後の局所洗掘
(45° の場合)

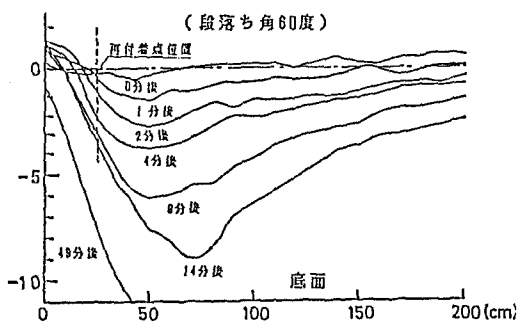


図 19 段落ち後の局所洗掘
(60° の場合)

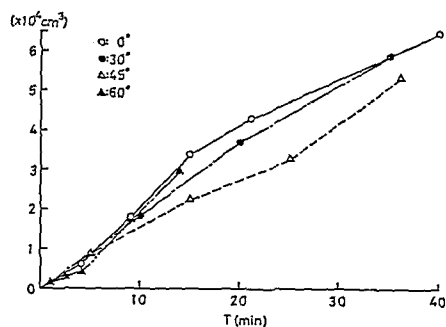


図 20 洗掘時の累積飛砂量(10m/s)

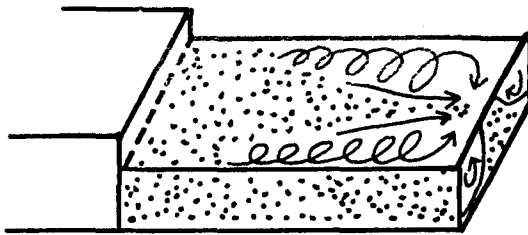


図 2 1 流速が小さいときの
側壁近傍流れの模式図

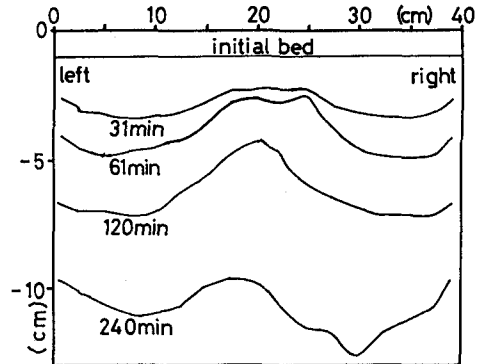


図 2 2 流速が小さいときの
洗掘横断面図

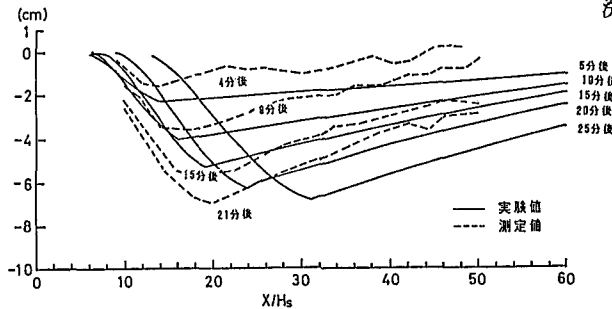


図 2 3 局所洗掘の計算値と実験値の比較

結論 本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 段落ち後の剥離領域は段落ち角度が大きいほど短い。(2) 剥離領域には強い渦が形成されるが、剥離点から主流に周期的に放出される渦も可視化によって見いだされる。(3) 段落ち高さで無次元化された再付着点距離はレイノルズ数によらずほぼ一定値をとる。(4) 段落ち角度が大きくなるに連れて剥離領域(再付着点距離)は短くなる。(5) 再付着点以後の底面せん断力は本文中に示す無次元化のもとでは段落ち角度に関わりなく同様のぶんぶけいじょうをする。(6) 段落ち角度が大きいほど洗掘速度は速くなり、洗掘深も大きくなる。(7) 流速が大きいときには段落ち後の風洞中央部の河床低下が激しいが、移動限界より少し大きい風速では側壁部分の方が大きく河床低下する。(8) 段落ち後の河床低下は固定床実験で求めた河床せん断力と粒砂の連続式を用いて予測できるが、より精度良く求めるためには任意形状をした河床形状での壁面せん断応力を求める計算手法の開発が必要である。謝辞 本研究を遂行するに当たり著者らは文部省科学研究費重点領域研究(1)、及び一般研究c(代表山田正)の補助を受けている。

参考文献 (1) Bradshaw, P. and Wang, F. Y. F., J. Fluid Mech. 52, 113, 1972. (2) 石川忠晴: 土木学会論文報告集, No. 257, 21-29, 1977. (3) 祢津家久、中川博次、天野邦彦: 土木学会年次学術講演会講演概要集, 1985. (4) Eaton, J. K. and J. P. Johnston, AIAA Journal, vol. 19, no. 9, 1981. (5) Etheridge, D. W. and P. H. Kemp, J. Fluid Mech., vol. 86, 1978. (6) Allen, J. R., Development of Sedimentology, Sedimentary Structures, Elsevier, 1984. (7) Tani, I., Proc. of IUTAM Symposium on Boundary Layer Research, 1949. (8) Rayle, R. E. and M. S. Theris, Dept of Mech. Engr., M. I. T., 1949. (9) Dean, R. C. Jr., Gas Turbin Lab., M. I. T., 1953. (10) Preston, J. H., J. Roy. Aero. Soc., 58, 1954. (11) Evans, R. A. and M. I. G. Bloor, J. Fluid Mech., vol. 82, 1977. (12) 村本嘉雄、藤田祐一郎、京都大学防災研究所年報、第21号、B-2、pp. 288-289、1978.