

河川湾曲部における3次元乱流構造の現地計測と底面せん断応力の評価方法

Field Measurements of Three Dimensional Turbulent Structure in Curving River Flows and Evaluation of Bed Shear Stress

富永晃宏*、金田雪雄**、神谷昌文***

By Akihiro TOMINAGA, Yukio KANADA and Masafumi KAMIYA

Field measurements of three-dimensional turbulent structures were conducted in curving river streams at a point bar and an alternating bar. Clear secondary currents were observed in the curved sections, but they were transformed by shape effects of the cross section. The structures of mean velocity and turbulent quantities indicated characteristic properties according to the developing stage of flow due to the stream curvature. Evaluation methods of bed shear stress using the log-law, Reynolds stress and turbulence intensities were investigated.

Keywords: field measurement, curving river flow, secondary currents, bed shear stress, turbulent structure

1. まえがき

最近、電磁流速計や超音波流速計等の性能向上に伴って、野外での乱流計測が盛んに行われるようになった^{1), 2), 3)}。幅の狭い水路における2次流構造を含めた3次元の乱流構造が、実験室の高精度の結果とほぼ相似であることが電磁流速計による計測から明らかになった⁴⁾。また、これによって実験室では得難い条件における現地計測が乱流構造も含めて十分な精度で行えるようになった。開水路湾曲部の流れについても、実験室レベルでは曲率半径が小さくしかとれず実スケールの流れとはかなり異なったものとなる可能性があり、現地でのデータが望まれる。河川湾曲部の現地計測はこれまでにいくつか行われているが^{5), 6)}、計測時の水理条件によって流れ構造は変化するため、普遍的な特性を把握するには今後さらに多くの実測データを蓄積していくことが必要である。著者らは、これまでに水路湾曲部において計測を行い⁷⁾、湾曲によるプラントルの第1種の2次流と乱れによる第2種の2次流が干渉しあい複雑な2次流構造が見られることを示した。今回はより実際の河川の流れ構造を把握する第1歩として礫床河川の湾曲部の固定砂州形成部とほぼ直線の砂床河川の交互砂州形成部において横断面内の乱流計測と2次流の計測も行ったものである。このような流れ場では流れ構造は複雑になり、流速分布及び乱れ統計量はかなりの変動を示すようになる。このとき、乱れ構造の普遍性や、2次流の影響等について検討するとともに、底面せん断応力の評価方法について様々な角度から検討を加えた。

* 正会員 名古屋工業大学助教授 工博 社会開発工学科
(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

** 大和ハウス

*** 学生会員 名古屋工業大学大学院

表-1 各地点の計測時の水理条件

	流量 $Q(m^3/s)$	水面幅 $B(m)$	最大水深 $h_{max}(m)$	平均流速 $U_m(m/s)$	最大流速 $U_{max}(m/s)$	フルート数 $Fr(=U_m/\sqrt{gh})$	レイノルズ数 $Re(=U_mD/\nu)$
庄内川A断面	5.18	19.0	0.50	0.90	1.56	0.52	2.70×10^5
庄内川B断面	4.77	17.0	0.58	0.78	1.59	0.43	2.65×10^5
天白川C断面	2.12	14.3	0.50	0.49	0.74	0.29	1.47×10^5
天白川D断面	2.39	12.7	0.57	0.81	1.33	0.54	1.86×10^5

2. 計測について

2.1 計測地点

計測地点は、まず湾曲河道として名古屋市北部を流れる庄内川の河口から32.2km地点で計測した。計測は平成4年9月8日及び9日に行った。計測地点付近の河道平面図を図-1に示す。計測は図に示したA断面とその13m下流のB断面で行った。河道は緩やかに湾曲しているが、ポイントバーが広く露出し、外岸側の幅15m~20mに水が流れている状態であった。河床材料は、径2cm程度から15cm程度までの粗い礫が砂層の上を被いアーモークートを形成していた。B断面は外岸側に堅い段差部があり小段のような形状となっている点がA断面と異なる。

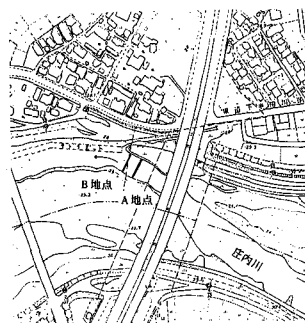


図-1 計測地点平面図
(庄内川)

次に、名古屋市東部の天白川で流況の異なる2カ所で、断面Cは平成4年8月9日に、断面Dは10月21日に計測した。計測場所はほぼ直線河道の明確な単列交互砂州を形成している区間であり、平面図を図-2に示す。河床材料は平均粒径1mm程度の砂と1~3cm程度の礫が混在している。断面Cは約50m上流で流路が左岸から右岸へ移行した後、右岸のコンクリート護岸に沿ってほぼ直線的に流れている。河床は砂が主で、砂は深いところで移動しており砂漣の形成がみられた。一方、断面Dは断面Cより約300m上流で流れが右岸から左岸に移行する地点で、流路の幅が狭まって右岸側が急な深掘れをしている。

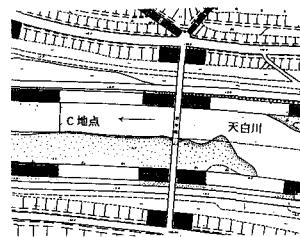


図-2 計測地点平面図
(天白川)

2.2 計測方法

流速計は2成分と1成分の電磁流速計を5cm離して一体として移動できるようにし、流速の3成分の同時計測を行った。2成分の流速計で主流方向成分 u と鉛直方向成分 v を計測し、1成分流速計で横断方向成分 w を計測した。ただし、天白川では (u, v) の2成分計測のみを行った。流速計は上下にスライド可能な移動装置に取り付け、直接河床におかれた脚立に固定した。サンプリング周波数は50Hzで120秒間計測を行い、データはデジタルレコーダに記録した後パーソナルコンピュータで処理した。計測時の水理条件を表-1に示す。

2.3 データ処理法

3成分同時計測では、平均流速 (U, V, W) 、乱れ強度 (u', v', w') およびレイノルズ応力 $(-\overline{uv}, -\overline{uw}, -\overline{vw})$ の計測が可能であるが、 (u, v) プローブと (w) プローブが離れているために、レイノルズ応力の $-\overline{uw}$ と $-\overline{vw}$ は良い精度が期待できない。この計測では流速計の向きを主流方向に直角に合わせるのが困難である。しかし、鉛直方向の1測線については一定の角度で計測されたと考えてよいため、横断方向の質量保存則から横断方向平均流速 W の補正が可能であり、これによって補正を行った。鉛直方向平均流速 V の計測値は横断方向の測線に対して質量保存則を満たすべきであるが、今回の計測法では横断方向に上下の角度のばらつきがあると考えられるためこのような補正を行うことはできない。したがって、 V の値はかなりばらついたものとなった。

3. 平均流速分布

図-3に4地点の主流速 U のコンターを示す。A断面では等流速線は断面形状に沿った分布を示し、最大流速は外岸よりの最深部より少し外岸側に現れている。したがって、湾曲部の流れ特性に応じた安定横断面形状を有していると考えられる。また、最深部では最大流速点が水面より下に現れている。次にB断面はA断面に比べてアスペクト比が少し小さくなり、中央部が深く掘れ込んだような形状に変化している。最大流速点の位置はA断面と同様外岸よりにあるが、 $z/H=5\sim 7$ 付近にある堅固な段差の影響を受けて若干内岸に移動している。この段差上では流速分布が複雑に入り組み、複断面水路の流れと類似した構造を示す。天白川のC断面は、湾曲部を過ぎて50m程度直線部が続いているにも関わらず、湾曲の影響が強く残っている。流速は外岸に当たる右岸側にいくにしたがって速くなっている。ただし、外岸近傍の計測点がないので最大流速位置が確認できない。この断面では残念ながら横断方向流速の計測を行っていないが、安定な2次流によって外岸に移動した流心が維持されているものと考えられる。これは2次流の強く発達した流れ構造を示しているものと考えられるが、結論づけるにはさらに詳細な計測が必要であろう。湾曲途中のD断面は、深く切れ込んだV字形の形状をしており、水面幅が急に減少し縮流した地点に当たり、かなり加速されている。流速分布はほぼ断面形状に対応しており、最大流速点もほぼ最深部に現れている。

図-4はA、B断面の横断方向平均流速 W の鉛直分布を示す。これは式(1)で補正された値であり、最大流速 U_{max} で無次元化してある。A断面では、水面で内岸から外岸に向かい、底面近傍で外岸から内岸に向かう湾曲部特有の単一セルの2次流が明確に認められる。 W の値は最も水深が深い $z/H=10$ 付近で最大となり、最大主流速 U_{max} の約9%に達する。また鉛直分布形はほぼ直線のかまたはサインカーブに近いものである。このような断面における2次流はいくつかの現地計測で得られているが、例えばRozovskii(1957)⁸⁾の計測では約12%程度であった。B断面でも全体としてはA断面と同様の2次流が認められるが、外岸の段差の影響を受けてこの付近で歪まされている。特に $z/H=8$ から10付近では段差の角からの斜昇流のような流れが、湾曲の2次流と干渉しているように見える。また、B断面では内岸の水深が大きくこの部分ではA断面に比べて大きな2次流が存在している。 W の最大値は U_{max} の5%程度になっている。A、B断面は水面幅に比して流下方向にわずかしか離れていないが、少しの断面形状の変化で2次流構造はかなり異なったものとなっているといえる。

4. 底面せん断応力分布の評価法

4.1 対数則による方法 図-5はA断面の代表的な3点における U の片対数プロットである。いずれも底面近傍で直線分布しこの傾きから摩擦速度が決定できる。このときの摩擦速度の横断分布を図-6に示す。

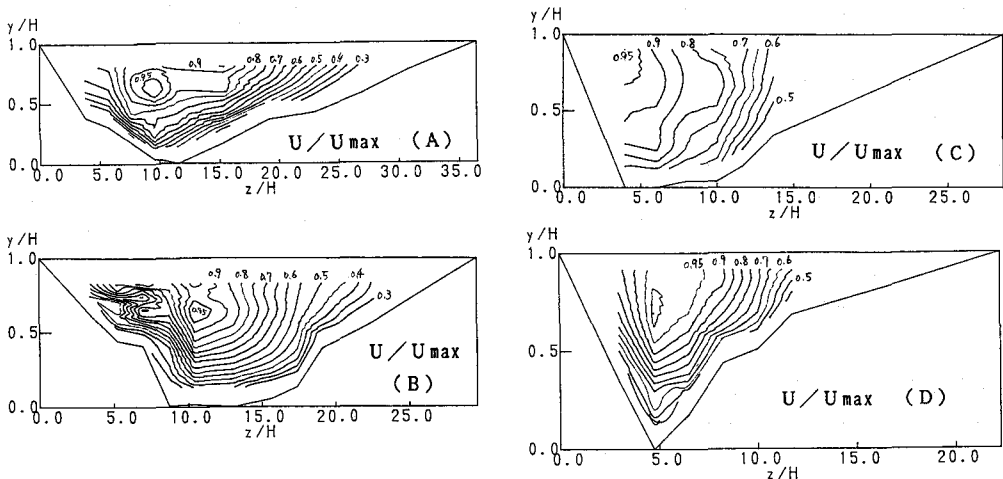


図-3 主流速コンター

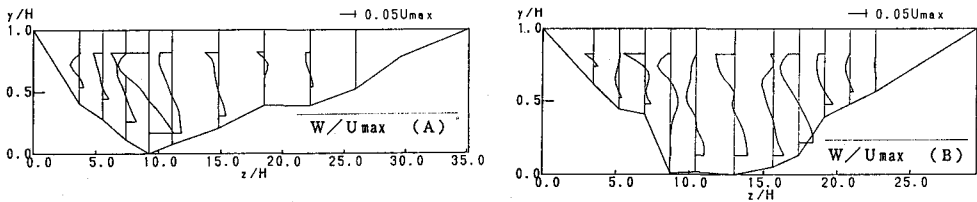


図-4 横断方向流速Wの鉛直分布

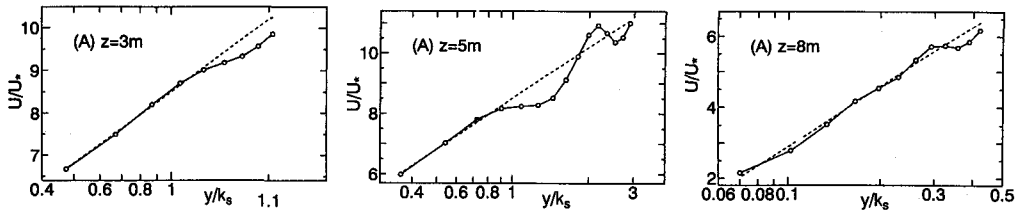


図-5 対数則分布

図中の点線は水深の外形を示したものである。A断面では $z=8\sim 10$ 付近で水深に比して大きな値をとる。B断面では複断面のような断面形状を反映して、 $z=5\text{m}$ と $z=10\text{m}$ でくびれた分布となるが、 $z<4\text{m}$ の外岸の値が水深に比して大きい。しかしながら、ここで求められた U_* は潤辺平均で約 16cm/s と大きく、これではエネルギー勾配が $1/100$ 程度と異常に大きくなり実際と一致しないことは明かである。そこで、底面を完全粗面とし相当砂粒粗度 k_s を逆算すると図-7

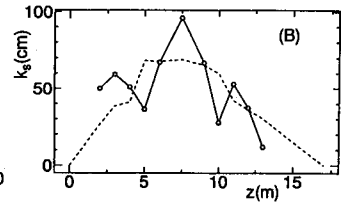
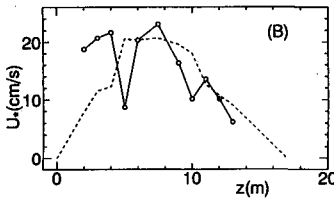
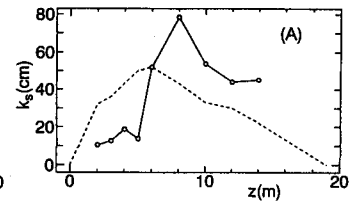
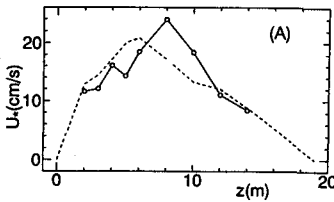


図-6 摩擦速度分布

図-7 相当砂粒粗度 k_s の分布

のようになった。A断面では $z>6\text{m}$ で急に大きくなり水深以上の大きさにまで達する。B断面では全体に大きな値となっている。河床材料から判断するとA断面の $z<5\text{m}$ で見られるような $k_s=15\text{cm}$ 程度が妥当と思われる。そこで、全断面で $k_s=15\text{cm}$ と仮定し平均流速が等しくなるように適当な摩擦速度 U_* を求める方法を採用した。当然 $z=8\text{m}$ では対数則よりも急勾配となり一致しない。これと同様の傾向はD断面の内岸側でもみられ、C断面では全体的にほぼ対数則に従った。

4.2 レイノルズ応力分布による方法

図-8にレイノルズ応力のコンターを示す。A断面では最深部の外岸寄りに値のピーク領域が存在し、ここから少し内岸側の $z/H<17$ 付近にかけて大きな値の領域があり、これより外岸に向かって急に減少している。一方、B断面では、外岸の段差付近を中心にして外岸に沿って乱れの大きな領域があり、ここから内岸側へ減少している。分布形はA断面とかなり異なっている。この領域の $-\overline{uv}$ の大きさはA断面に比べて大きく、複断面のような段差の影響が現れたものと考えられる。C断面では $z/H=7$ を境に外岸側が小さく内岸側が大きくなる顕著な変動を示している。これは図中に示したような鉛直方向の2次流の影響がよく現れたものと考えられる。D断面では、A、B断面にみられたような外岸側のピーク領域が存在せず、底面近くは境界に沿った分布で、 $y/H>0.5$ ではほぼ水平な分布を示し、むしろ湾曲の影響の少ない鉛直方向に2次元的な分布である。以上を総合的に考えると、A B C D断面が湾曲流の特徴的な段階に分類できる。すなわち、D断面は湾曲の初期段階で発達していない状態、A断面は湾曲の発達中

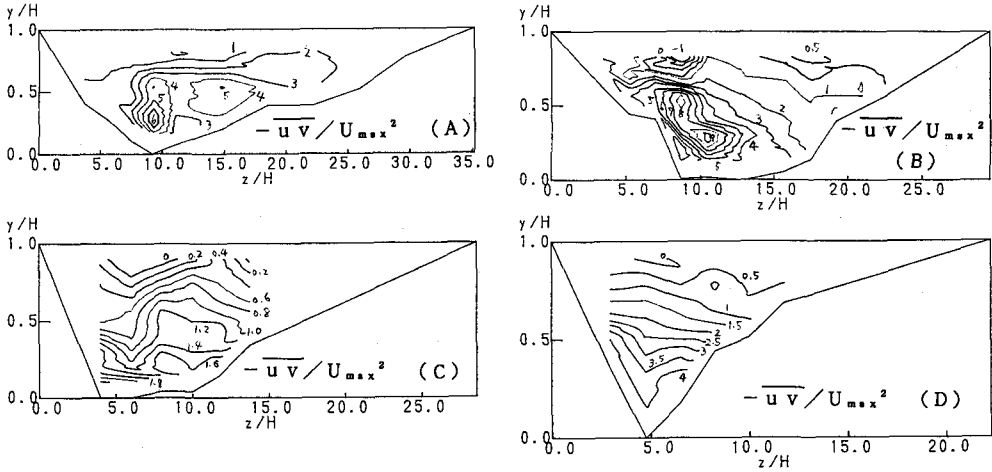


図-8 レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ のコンター

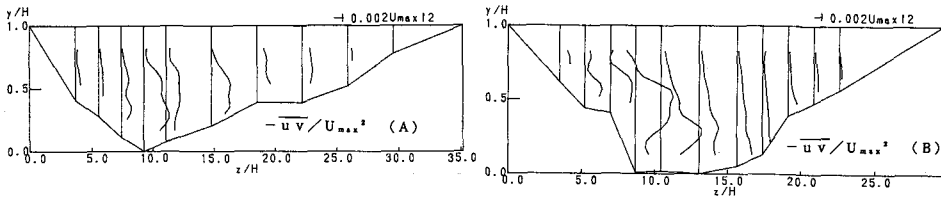


図-9 レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の鉛直分布

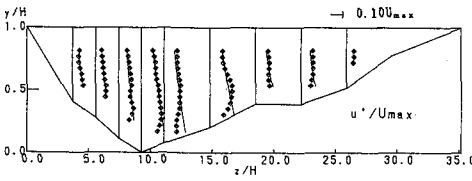


図-10 乱れ強度 u' の鉛直分布

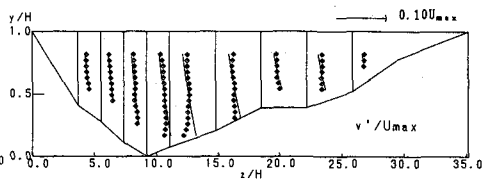


図-11 乱れ強度 v' の鉛直分布

期段階、C断面は発達終期の安定段階そしてB断面は外部擾乱による発達変形段階ということができよう。

また、 $-\overline{uv}$ のA、B断面での鉛直分布を図-9に示す。A断面では最深部より外岸側ではほぼ直線的な分布を示す。最深部で $-\overline{uv}$ は最も大きな値をとるが、底面近傍は減少している。 $z/H=11$ ではこれより減少し、 $z/H=15$ では再び増大する。 $z/H>10$ の内岸側では分布は水深方向の変化が少なくなり一様化する傾向にある。一方、B断面では段差のある外岸側が屈曲した分布を示し、特に $z/H=8$ では段差の角の影響を受けてか、 $y/H=0.5$ 付近で最大となるような大きな値をとる。この場合はむしろ $z/H>10$ の内岸側がほぼ直線分布に従うようである。これより、A断面の外岸領域とB断面の内岸領域ではレイノルズ応力による摩擦速度の評価が何とか可能と考えられるが、その他では2次元流れの直線分布からかけ離れた分布を示し、この方法も適用が困難である。

4.3 乱れ強度分布による方法 図-10、11は u' 及び v' の鉛直分布を示したもので、図中の曲線は次式で示される普遍分布式に一致させるように U_x を求めこの式を示したものである。

$$u' = 2.30 \exp(-y/h)、 \quad v' = 1.27 \exp(-y/h)$$

u' はほぼ $-\overline{uv}$ と同様の分布を示すが、底面から離れた外層での変動は少ない。また、分布は底面近くで減少す

る粗面乱流の特性を示している。特に最深部付近での傾向が顕著である。内岸側では鉛直方向には一様化する傾向にあり、むしろ横断方向の変化が支配的である。一方、 v' を見ると鉛直方向の変動は $-\overline{uv}$ や u' に比べて小さくなり、安定した分布を示し、 v' は鉛直方向にほとんど変化しない。

4.4 底面せん断応力分布 主流速分布の傾きだけから U_x を求めると過大評価となったから、平均流速を対数則と一致させるようにして求めた摩擦速度から得られるせん断応力を τ_u 、 $-\overline{uv}$ を強引に直線回帰して求めたせん断応力を τ_R 、 u' 、 v' の普遍分布式に一致させるようにして求めたものを $\tau_{u'}$ 及び $\tau_{v'}$ として比較したのが図-12である。これらの値はオーダー的に一致する。図にはこの平均値から逆算されたエネルギー勾配Iを用いた $\tau_o = \rho ghI$ も示している。 τ_R 、 $\tau_{u'}$ 、 $\tau_{v'}$ はB断面の段差近傍を除きいずれもほぼ一致しており、乱れの自己保存性が保たれていることがわかる。 τ_u と τ_R についても、A断面の外岸側 $z < 4m$ のところ

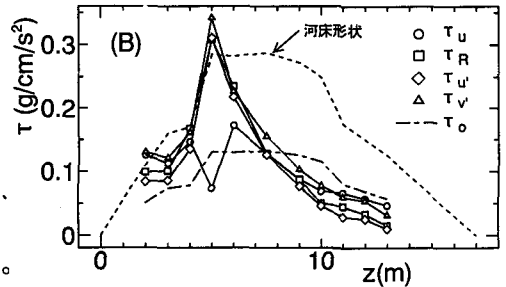
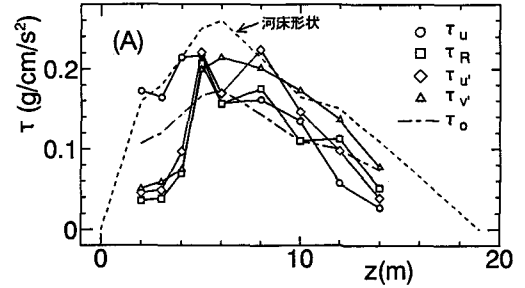


図-12 底面せん断応力分布(各種方法による)

で特に大きいところを除けば、ほぼ同様の分布形状を示している。横断方向の運動量輸送がない場合のせん断応力 τ_o と比較すると τ_u は外岸で τ_o より大きくなり、内岸では τ_o より小さくなる傾向にあり、2次流の運動量輸送効果を示しているものと考えられる。

5. あとがき

比較的粗い礫河床の浅い河川流湾曲部及び交互砂州形成部の横断面内乱流構造を計測し、湾曲部の2次流の存在が確認された。主流速の鉛直勾配がかなり大きい領域があり、勾配のみから摩擦速度を評価するとかなりの過大評価となった。レイノルズ応力も特に外岸側で直線分布からかなりのズレを示した。主流速、レイノルズ応力及び乱れ強度の普遍分布から平均的な底面せん断応力を評価したところ、これらはオーダー的に一致し、このような流れ場でも乱れの自己保存性がほぼ保たれていることがわかった。また、外岸の形状の異なる2断面での計測から流れ構造が外岸の段差によってかなり変化することが示された。今後は1湾曲区間で連続的に断面をとった計測が望まれる。なお本研究で用いた電磁流速計システムは、禰津家久助教授(京都大学)に借り受け計測について指導を受けました。また計測にあたっては名古屋工業大学水工研究室の学生諸君に多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 禰津家久、中川博次、瀬谷和彦：水工学論文集、第35巻、pp. 333-338, 1991
- 2) 辻本哲郎、北村忠紀、岡田敏治、王子義徳：水工学論文集、第35巻、pp. 333-338, 1991
- 3) 瀬良昌憲：水工学論文集、第35巻、pp. 287-292, 1991
- 4) 禰津家久、富永晃宏、中川博次：土木学会論文集、No. 407/II-23, pp. 49-56, 1993
- 5) Rozovskii, I. L.: Academy Science of the USSR, pp. 1957
- 6) Bathurst, J. C. et al.: J. Hydraulics Div., ASCE, vol. 105, No. 10, pp. 1277-1295, 1979
- 7) 富永晃宏：第24回乱流シンポジウム講演論文集、pp. 253-257, 1992