

開水路漸縮部における流況について

Flow Characteristics of Gradually Contracted Open Channel Flows

鬼束幸樹* 浦 勝** 秋山壽一郎*** 坂本 真****

By Kouki ONITSUKA, Masaru URA, Juichiro AKIYAMA and Shin SAKAMOTO

Flow fields of gradually contracted open channel flows are measured by a Hot-film anemometer. Mean velocity profiles of the inner and the outer region are well expressed by the log-wake law. The wake strength parameter Π decreases in the flow direction, and shapes of Reynolds stress distributions are slenderized than the universal distribution for a 2-D uniform flow. The turbulence energy is transformed into the mean flow energy, because the region, where the value of turbulence production is negative, exists. The intensity of the secondary flow decreases in the flow direction.

keywords : experiment, turbulence energy, gradually contracted open channel flow, secondary flow

1. はじめに

流水のエネルギー損失としては、流体と壁面との摩擦によって生じる摩擦損失と、流体の通水する断面が変化することによって生じる形状損失がある。開水路等流については断面形状が流下方向に変化しないため、エネルギー損失は摩擦損失のみとなり、Manning 式や Chezy 式などでエネルギー損失を算出することができる。水路幅の急拡あるいは急縮する開水路流については、石原・志方^{1), 2)}が長方形断面の水路幅拡大比および Froude 数を系統的に変化させ、水位および流速分布を測定することによって形状損失を明らかにしている。さらに、水路幅が漸拡する開水路流の形状損失については、閉管路 Diffuser での値と同オーダをとることが指摘されている³⁾。ところが、水路幅が漸縮する開水路流については、摩擦損失に対して形状損失は無視できるとされている⁴⁾、その理由などについては十分には明確にされていない。また、水路幅の漸縮が平均流や乱れ特性に与える影響などについても、ほとんど明らかにされていない。

本研究は水路幅が漸縮する開水路流の流速分布を詳細に測定することにより、断面内における2次流速分布、主流速分布、Reynolds 応力分布および乱れエネルギー分布を明らかにし、開水路漸縮流のエネルギー損失の特性について検討したものである。

* 学生員 九州工業大学工学研究科博士後期課程 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)
** 正会員 工博 九州工業大学工学部設計生産工学科建設工学教室
*** 正会員 Ph.D. 九州工業大学工学部設計生産工学科建設工学教室
**** 学生員 九州工業大学工学研究科博士前期課程

2. 実験装置および実験条件

実験に用いた水路は図-1に示すような長さ2050cm、水路幅60cm、高さ60cmの可変勾配水路である。本水路の下流端より600cm上流側の区間をアクリル板を用い

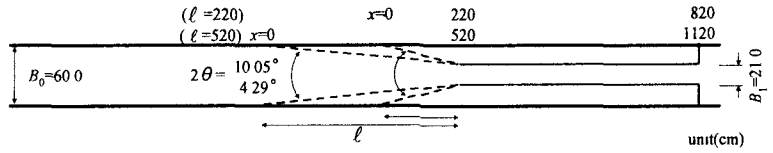


図-1 漸縮水路の平面図

て水路幅 $B_1=21\text{cm}$ にし、さらに、これより上流側に長さ $\ell=220\text{cm}$ または 520cm の漸縮部を設置した。水路幅の変化角度はそれぞれ $2\theta=10.05^\circ, 4.29^\circ$ である。座標系として、漸縮部上端より流下方向に x 軸を、 x 軸と垂直上向きに y 軸を、右岸から左岸に向かい z 軸をとった。

実験条件は漸縮部より下流側の一樣幅断面において水深 h が 8.0cm で Froude 数が 0.6 の等流となるように、流量を $Q=7.84\ell/\text{s}$ 、水路床勾配を $\sin\Theta=1/610$ とした。

測定は、水路中央線上流速分布測定（Cシリーズ）および横断面内流速分布測定（Rシリーズ）を行った。CシリーズではX型 Hot-film 流速計を用いて水路中央線上の x 方向流速 $\bar{u}=U+u$ および y 方向流速 $\bar{v}=V+v$ を流下方向に11断面測定し、RシリーズではX型 Hot-film 流速計を2回使用することで、右岸側横断面内の x 方向流速 $\bar{u}=U+u$ 、 y 方向流速 $\bar{v}=V+v$ および z 方向流速 $\bar{w}=W+w$ を流下方向に6断面測定した。ここに、 x 、 y 、 z 軸の瞬間流速を $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ 、変動成分を u 、 v 、 w 、時間平均流速を U 、 V 、 W 、乱れ強さを u' 、 v' 、 w' とした。なお、 $\ell=220, 520\text{cm}$ のCシリーズの実験名をC2、C5とし、Rシリーズの実験名をR2、R5とした。

3. 実験結果および考察

3.1 水路中央線上における水理諸量の変化

(a) 水面形

図-2にC5の場合の水位の実測値を○印で、次式によって求めた水面形を実線で示す。

$$\frac{dh}{dx} = \left(\sin\Theta - n^2 R^{-4/3} \left(\frac{Q}{Bh} \right)^2 + \frac{\alpha Q^2}{g B^3 h^2} \frac{dB}{dx} \right) / \left(\cos\Theta - \frac{\alpha Q^2}{g B^2 h^3} \right) \quad (1)$$

ここに、 n は粗度係数、 R は径深、 B は水路幅、 α はエネルギー補正係数、 g は重力加速度であり、 α は実測値、 n は 0.011 を用いた。漸縮部より上流側での水位の低下は緩やかであるが漸縮部では比較的急であり、ここで大きな圧力勾配が生じていることが分かる。また、式(1)によって求めた水面形は実測値と良好な一致を示す。

(b) 主流速分布

図-3にC2の場合における摩擦速度 U_τ で無次元化された主流速分布 U/U_τ の流下方向変化を示す。ただし、縦軸は断面ごとに10ずつシフトさせている。摩擦速度 U_τ は内層（ $50 \leq yU_\tau/\nu$ 、 $y/h \leq 0.2$ ）において、式(2)のlog則より求めた。

$$\frac{U}{U_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yU_\tau}{\nu} + A \quad (2)$$

ここに、 ν は動粘性係数、 $\kappa=0.41^{(5)}$ は Karman 定数、 A は積分定数である。積分定数 A については、次式で表される無次元圧力勾配 β に比例することが瀬津ら⁶⁾によって示されているが、本研究で算出された A には大きなばらつきがあることより、等流での値 $A=5.3$ を採用した。

$$\beta = \frac{gh}{U_\tau^2} \left(\frac{dh}{dx} \cos\Theta - \sin\Theta \right) \quad (3)$$

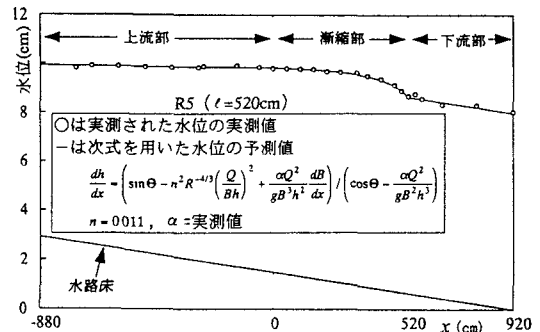


図-2 C5の水面形

図中に●印で示した内層の主流速分布は上流部・漸縮部および下流部において、図中に直線で示した log 則で表示可能であることがわかる。しかし、○印で示した外層 ($y/h > 0.2$) では、流下に伴い一様化されて最大流速点が水面より降下し、log 則より低流速側にずれを生じている。この内・外層を含む主流速分布を式(4)の log-wake 則によって表現し、図中に曲線で示した。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yU_*}{\nu} + A + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2\left(\frac{\pi y}{2y'}\right) \tag{4}$$

ここに、 π は円周率、 y' は wake 頂点の y 座標、 Π は式(4)より求めた wake strength parameter である。上流部・漸縮部および下流部の内・外層を含む主流速分布が log-wake 則で表現できることがわかる。

図-4にC2およびC5における Π の流下方向変化を示す。上流部では Π は流下方向にほぼ一定値をとり、漸縮部では減少し、下流部では増加して再び上流部での値に近づいている。漸縮部での Π の減少傾向はC5よりC2の方が顕著である。

瀬津ら⁶⁾は一樣幅の滑面水路で水深の増加する開水路減速流および水深の減少する開水路加速流における Π は、 β と次式の関係があることを示した。

$$\Pi = 0.06\beta + 0.45 \tag{5}$$

図-5にC2, C5における Π と β の関係を○印および△印で、瀬津らによる一樣幅の滑面不等流の値を×印で、Kironoto⁷⁾による一樣幅の粗面不等流での値を□印で示し、式(5)を実線で示した。本実験の Π と β の関係は式(5)にあまり適応していないが、これは、本実験流れは圧力勾配だけでなく上流からの履歴や側壁の効果を受けるためと思われる。しかし、 Π が β に比例する定性的傾向は一致する。

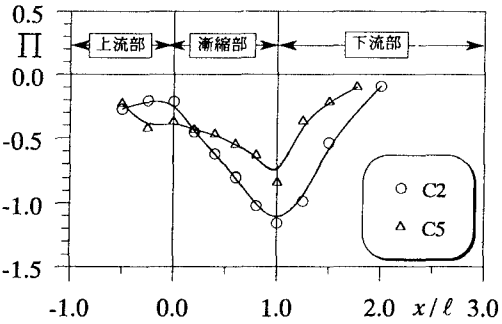


図-4 C2およびC5における Π の流下方向変化

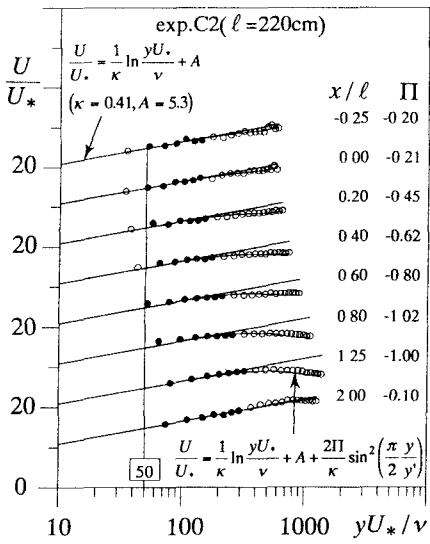


図-3 C2の主流速分布 ($\ell = 220\text{cm}$)

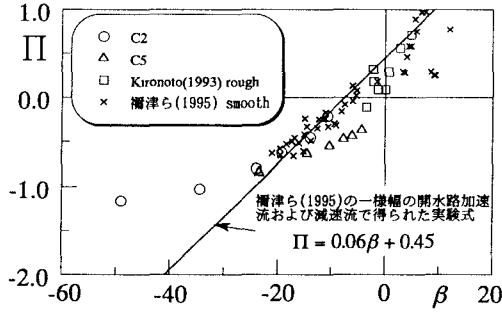


図-5 Π と β の関係

(c) Reynolds 応力分布

図-6にC2の Reynolds 応力 $-\overline{uv}/U_*^2$ の流下方向変化を示す。上流部の $x/\ell = -0.5$ での Reynolds 応力分布は図中に直線で示した等流において成立する普遍分布 ($-\overline{uv}/U_*^2 = 1 - y/h$) とほぼ一致する。漸縮部では流下に伴い、半水深付近において普遍分布から徐々に減少する傾向が見られる。これは、瀬津ら⁶⁾による開水路加速流の結果と類似している。下流部では底面付近より水面に向かい再び普遍分布に回復していく。

3.2 エネルギーに関する検討

一般に、平均流と乱れとの間のエネルギー変換は、単位時間あたりに Reynolds 応力と速度勾配の積で表される乱れの生成率によって行われる。乱れの生成率が正の場合は平均流から乱れにエネルギーが渡され、流速

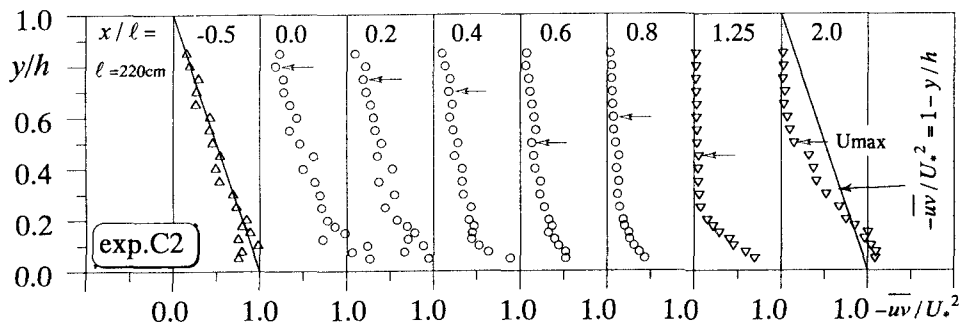


図-6 C2における Reynolds 応力分布の流下方向変化

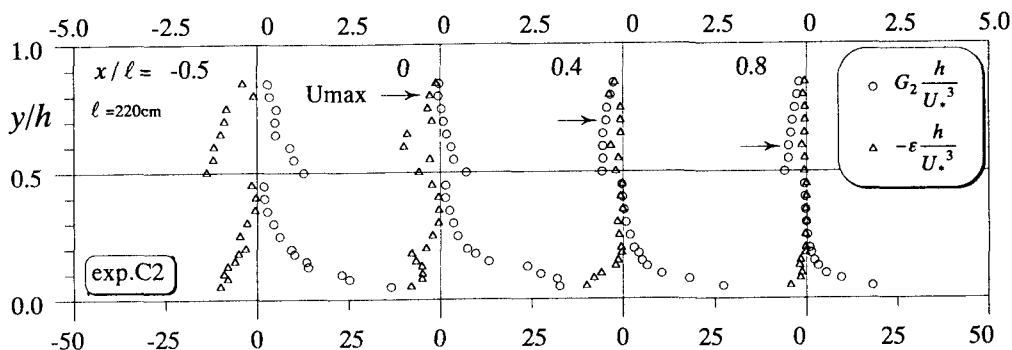


図-7 C2におけるエネルギー収支 ($y/h > 0.5$ は 10 倍に拡大表示)

分布は矩形分布からなだらかな分布へと変形していく。開水路等流における平均流から乱れへのエネルギー変換は主に壁面付近で生じているため、等流でのエネルギー損失は摩擦損失のみとなり形状損失は存在しない。

本実験乱れの水路中央線上の乱れの生成率 G_2 は次式で与えられる。

$$G_2 = -\overline{uu} \frac{dU}{dx} - \overline{uv} \frac{dU}{dy} \quad (6)$$

図-7に乱れの生成率 $G_2 h/U^3$ の分布および散逸率 $-\epsilon h/U^3$ の分布の流下方向変化を示す。ただし、 $y/h > 0.5$ の領域は横軸を10倍に拡大して表示している。また、散逸率 ϵ は主流速のスペクトル図の慣性領域に $-5/3$ 乗則を適用する方法⁸⁾で求めた。上流部の $x/l = -0.5$ では、断面内における乱れの生成率と散逸率がおおよそ釣り合っているが、漸縮部の水面付近の領域では乱れの生成率は負の値をとり、渦動粘性係数が負となる。これは $-\overline{uu} < 0$ かつ $dU/dx > 0$ であることと、最大流速点より水面側の領域で $-\overline{uv} > 0$ かつ $dU/dy < 0$ のためである。よって、乱れから平均流にエネルギーが渡されているため、半水深付近での Reynolds 応力が流下方向に減少していき、主流速分布はなだらかな分布から矩形的な分布へと変形していくのであろう。また、断面内での乱れの生成はほとんど底面付近で行われている。これらの現象は鉛直方向のみならず、水平方向にも同様に生じている。よって、漸縮流での主流のエネルギー損失は摩擦損失のみとなる。

3.3 横断面内流況変化

(a) 2次流

図-8にR2の2次流ベクトルを示す。上流部において、互いに逆向きの回転を有する一対の水面渦と底面渦が存在している。これらの渦の水平スケールは水深程度であり、最大2次流速度は最大主流速の4%程度である。この特性は、柵津・中川⁹⁾や富永・江崎¹⁰⁾によって得られた等流の結果とほぼ一致する。漸縮部では流下に伴い、水面渦および底面渦のパターンはほとんど変化せず、渦のスケールおよび強度が減少していく。漸縮部出口直前の $x/l = 0.98$ では明確な渦パターンは確認できないが、この原因として、流下に伴う2次流強度の減少による2次流検出の困難さが考えられる。

(b) 主流速分布

図-9に断面内最大主流速 $U_{\max}$ で無次元化されたR 2の主流速分布 $U/U_{\max}$ の等値線を示す。ただし、 $U_{\max}$ の90%の等値線を太線で示している。上流部の $x/\ell=-0.45, -0.05$ において、等値線は水面付近では水面渦の影響により水面に垂直とはならず水路中央側を向き、隅角部付近では底面渦の影響により側壁および底面と平行とはならず丸みを帯びている。漸縮部においては、2次流強度の減少により上流部で観察された隅角部付近での等値線の丸みは流下に伴い失われていき、主流速分布は矩形分布に近づく。最大流速点は右岸側と左岸側の2つに分裂し、次第に水路側壁へと移動していく。このような、最大流速点が2つに分裂する現象は今本ら¹¹⁾によって開水路急縮流においても観察されている。また、図-8の2次流ベクトルには最大流速点の分裂を裏付けるような傾向が見られない。今後、精密な測定をする必要がある。

(c) Reynolds 応力分布

図-10にR 2における水路中央摩擦速度で無次元化されたReynolds 応力 $-\overline{uv}/U^2$ の分布を示す。ただし、 $-\overline{uv}/U^2=0$ の等値線は太線で示している。上流部において、Reynolds 応力は底面付近で強度が大きく、側壁付近の水面近傍で負の値をとる。負の領域は水面渦が存在する領域とほぼ一致している。漸縮部では、流下に伴い半水深付近で強度が減少し、 $x/\ell=0.75$ までReynolds 応力が負をとる領域が次第に小さくなっていく。これは、流下に伴う水面渦のスケールの減少によるものと思われる。

(d) 乱れエネルギー分布

図-11にR 2における水路中央摩擦速度で無次元化された乱れエネルギー k/U^2 の分布を示す。太線で示した $k/U^2=1.0$ の等値線に着目すると、流下に伴い底面および側壁に近づいていることから、乱れエネルギーの減少が伺える。また、主流速分布と同様に、漸縮部において、流下に伴い等値線の形状が底面および側壁と徐々に平行になる様子が観察される。

4. 結論

開水路漸縮流の流速分布が測定され、以下の知見が得られた。(1)内・外層の水路中央部での主流速分布はlog-wake 則によって表現可能で、wake strength parameter Π は無次元圧力勾配 β の減少に応じて減少する。(2)水路中央部でのReynolds 応力分布は等流

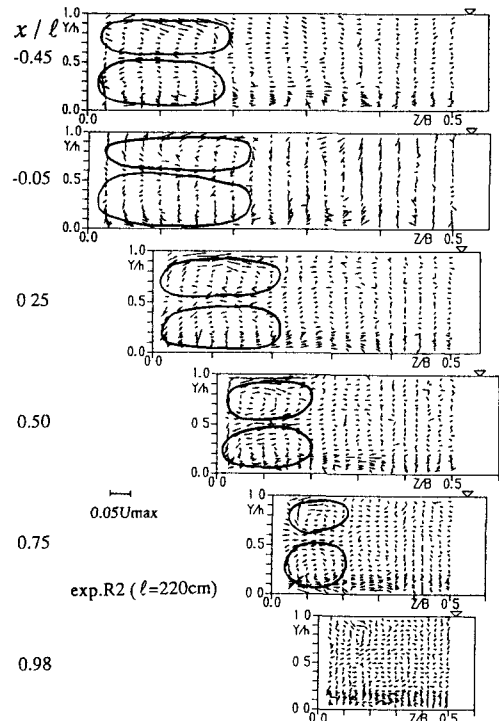


図-8 R 2の2次流

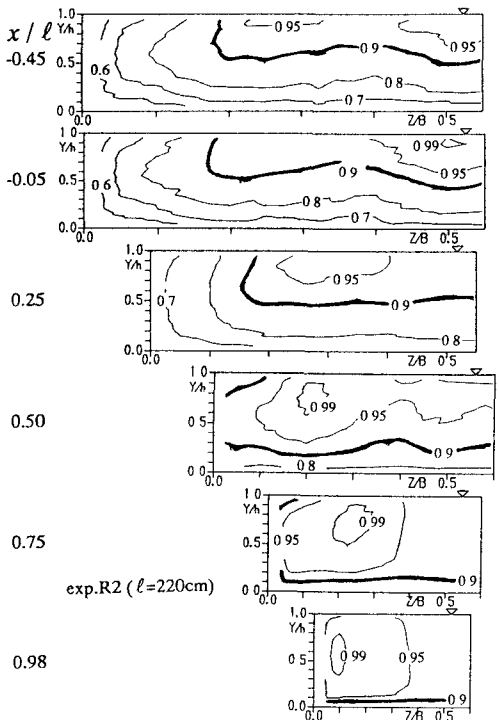


図-9 R 2の主流速 $U/U_{\max}$ 分布

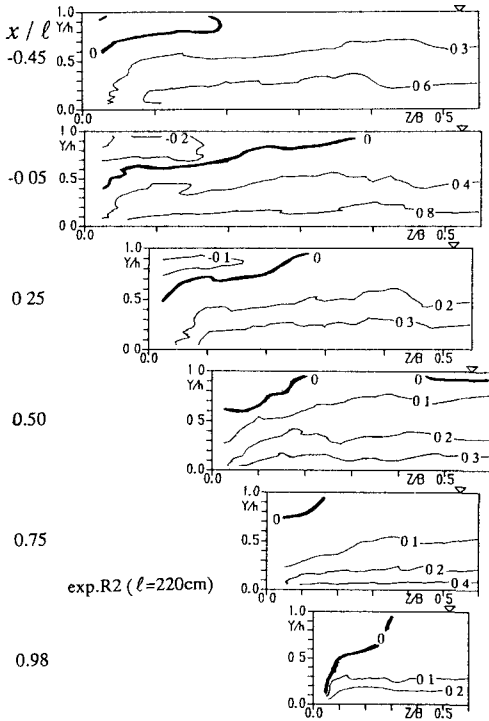


図-10 R 2 の Reynolds $-\overline{uv} / U^2$ 応力分布

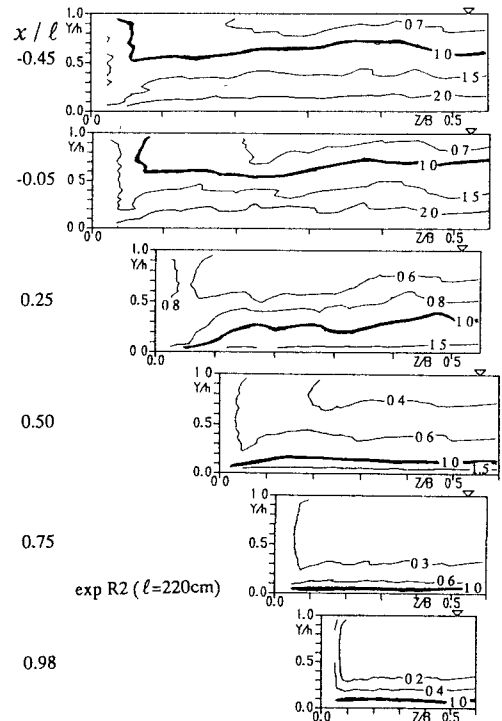


図-11 R 2 の乱れエネルギー k / U^2 分布

で成立する普遍分布よりも、半水深付近で減少した分布となる。(3)渦動粘性係数が負となる領域があり、ここでエネルギーが乱れから平均流へと渡される。(4)乱れの生成が主に壁面付近で生じているために形状損失はほとんど存在しない。(5)最大流速点は流下に伴い両側の側壁付近に分裂して移動し、2次流強度が減少することにより主流速分布は矩形分布に近づく。

謝辞：実験に多大な協力して頂いた本学4年生、堀越公博および技術補佐員の白神晴崇の両氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 石原藤次郎, 志方俊之: 開水路急拡部の水理学的性状に関する研究, 土論, 第128号, pp.12-28, 1966.
- 2) 石原藤次郎, 志方俊之: 開水路急縮部の水理学的性状に関する研究, 土論, 第138号, pp.30-38, 1967.
- 3) 鬼束幸樹, 浦 勝, 秋山壽一郎, 政徳克志, 水工学論文集, 第39巻, pp.397-402, 1995.
- 4) 土木学会編: 水理公式集(昭和38年版), 博栄社, pp.149, 1963.
- 5) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.
- 6) 柳津家久, 門田章宏, 戸田孝史, 中川博次: 加速流および減速流の解析手法とその乱流特性, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.89-97, 1995.
- 7) Kironoto, B. A., *Doctoral Dissertation* No.1094, Ecole Polytechnique Federale, Lausanne, Switzerland, 1993.
- 8) 浦 勝, 廣畑浩司: 二成層場の吹送流の乱流構造と連行現象, 第31回海岸工学論演会論文集, pp.650-654, 1984.
- 9) 柳津家久, 中川博次, 第29回水理講演会論文集, pp.769-774, 1985.
- 10) 富永晃宏, 江崎一博, 第29回水理講演会論文集, pp.827-832, 1985.
- 11) 今本博健, 藤井良啓, 藤井義文: 開水路断面変化部における流れの水理特性について(2), 京大防災研年報, 第20号B-2, pp.309-329, 1977.