



## 側岸の透過性構造物の横方向流速分布に対する影響に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 多田, 博登 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24729/00007708">https://doi.org/10.24729/00007708</a>

# 側岸の透過性構造物の横方向流速分布に対する影響に関する研究

多田 博登\*

Effect of Permeable Structures near the Side Wall on Lateral Distribution of Velocity

Hiroto TADA\*

## ABSTRACT

Lateral distribution of velocity model in open channel flow with permeable structures near the side wall is proposed, by taking a method of separating flow fields to four regions based on experimental and theoretical observation. This paper discusses how to obtain the various parameters of the model from measurement of permeable structures, order estimation, or experimental results.

The calculated flow velocity distributions are compared with the experimental results, by applying the proposed model using the order estimated values of the parameters.

Key Words : open channel flow, lateral distribution of velocity, permeable structures, Reynolds stress

## 1. はじめに

河川側岸に繁茂する植生の、生態系の保存および水の浄化作用における効用からその必要性については最近認識されてきたため、植生が多く淀みのあるまた景観も考慮した多自然型河道の設計<sup>1)</sup>が脚光を浴び、実際に施工される河道が出始めてきた。一方植生は治水的には洪水の疎通を阻害する構造物としての認識は変わらないから、結局これらの試みも治水的にあまり重要でないような部分に限られることになっている。これは植生による流れの抵抗がどの程度のものかについて、まだ定量的に明らかにされていないことが原因であると考えられる。

植生は流れに対して種々の様態を示し流れとの相互作用が行われる。<sup>2)</sup>まず集団的には空隙の大きい透過性の構造物であり、主流域と植生域間の水塊の交換があること、流れに対して揺動することによって流れに逆らわず抵抗を減じること、および冠水が植生の大部分におよぶ場合は倒伏し流れの抵抗が小さくなることなどである。そのような要素が多い植生について理論的、実験的にアプローチすることが困難であり、また現地観測として巨視的に抵抗のオーダーを提示した研究もあまり見られない現状であ

る。

筆者らは開水路において側岸に植生がある流れの特性を把握する目的で、特に抽水域に繁茂するヨシ類を対象として植生域とし、これを透過性があるという性質だけを持つ構造物にモデル化して、水路横断方向流速分布に関する理論的および実験的に研究を行ってきた。それにより実験的には

- ①主流域と植生域間で水塊の周期的な交換が見られ、空隙の特性によっては規則的に行われること、
- ②主流域において最大流速の生じる位置は植生モデルを配置してない側岸方向に偏ること、
- ③植生側の流速分布の勾配は対数則に比較して小さいことが判明した。また
- ④理論的に上の②の現象は側壁の粗度の相違がピークの偏りを引き起こすことを説明し、<sup>3)</sup>
- ⑤上の③は①の現象がこれを誘発することが予想されること、および
- ⑥植生域と主流域の境界においてスリップ速度が存在するため主流域流速分布の原点は植生域中に存在するが推定された。

本研究では上の④の結果を基に、側岸に空隙のある構造物が存在する開水路流において、植生域内から主流域にわたる流速分布のモデルを提案し、実験結果から各パラメーターの特性と値を検討するものである。

2000年4月12日 受理

\* 建設工学科 (Department of Civil Engineering)

## 2. 流速分布モデルの検討

流れ場は直線の矩形断面水路で、植生域と見なす空隙が大きい透過性の構造物が左岸側壁に一定幅で設置されているとする。右岸側壁および河床は非透過性となっている。河床勾配  $I$  は緩勾配で、流れは等流である。

水深は水路幅に比較して小さく、鉛直方向流速の分布はほとんど無視できると考え、我々の興味は水路幅方向の流速分布であるとする。

流れ方向である水路縦方向を  $x$  軸、左岸から右岸への横方向（水路幅方向）を  $y$  軸とし、それぞれ方向流速を  $u$  および  $v$  とする。

### (1) 領域区分

水路横断方向を区分するして考える。まず主流域と植生モデルのある空隙域に分けることができる。空隙域では、その物理的特性は空隙率と透過係数である。両領域の境界でスリップ速度が存在することから、主流域の流速分布の原点は空隙域にあることになるのでこれを仮想原点位置と呼ぶことにして、これより側壁側と主流域側に分けられると考える。前者は主流域の乱流特性が及ばない領域であるから「粘性領域」、後者は境界における乱流から仮想原点における層流に変化するような領域で「遷移領域」と言うことにする。

主流域では、アスペクト比があまり大きくないような流れ、すなわち狭幅では最大流速が生じる位置が一点存在する。広幅では最大流速となる範囲が存在することになる。この点あるいは範囲より空隙域

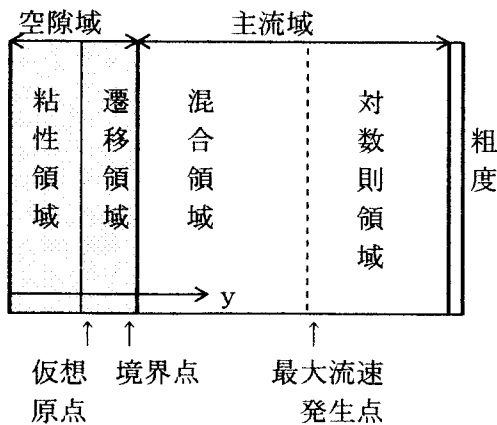


図-1 流れ場の領域区分図

側と、非透過性側壁側に分けることができ、前者は遷移領域と主流域間で周期的な水塊の交換があることを考慮して「混合領域」、後者は固定床の乱流がそのまま適用できると考えられるので「対数則領域」と言うことにする。

これらを図-1に示す。

### (2) 粘性領域

ここでは主流域との水塊の交換はなく乱流の影響が及ばないので、流れは層流であると考えることができる。N-S方程式が適用され、定常等流であるから、

$$0 = \rho gI + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \dots\dots\dots (1)$$

積分して、

$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} = -\rho gIy + \tau_0 \dots\dots\dots (2)$$

よって流速分布は、

$$u = \rho (-gIy^2/2 + \tau_0/\rho) / \mu \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\tau_0$ : 植生域付け根の壁面せん断力、 $I$ : 河床勾配、 $g$ : 重力の加速度、 $\rho$ : 水の密度である。

ここで  $\mu$  はN-S方程式では分子粘性係数であるが、単に流れ場に水だけが存在する場合に適応するのである。植生があるような空隙中ではこれをそのまま適用することができない。そこで以下のように考えた。透過性構造物中では半径  $a$  の小管が網の目のようにつながっている多孔体であり、これが空隙となっていて水が流れている。1本の小管中を流れる流量  $q$  は円管層流の Poiseuille の法則が適用されるとして、

$$q = \rho g i \pi a^4 / 8 \mu \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $i$  は小管の勾配であるが、小管は曲がっているから長さが増加する割合を  $m (> 1)$  とすれば  $i = I/m$  となるから、

$$q = \rho g I \pi a^4 / 8 \mu m \dots\dots\dots (5)$$

ここに小管は単位面積あたり  $n$  あるとすると、単位面積当たりの流量  $Q$  は、

$$Q = \rho g I / 8 \mu (n \pi a^4 / m) \dots\dots\dots (6)$$

ここでこの流れに Darcy 則 :  $Q = k I$  が適用できるから、

$$\mu = \rho g / 8 k (n \pi a^4 / m) \dots\dots\dots (7)$$

$k$  : 透過係数であり、(7) 式は透過性構造物の特性  $a$ ,  $n$ ,  $m$ , および  $k$  のみで与えられ、(3) に代入して粘性領域の流速分布が得られる。透過特性の値は  $k$  のみが実験的に決定できる。

**(3) 遷移領域**

ここでは境界を通じて主流域から水塊が流入、また遷移領域から主流域に流出するため、平均的には乱流応力は仮想原点位置で 0、境界点に近づくにつれ増加すると考えられる。仮想原点の位置を  $y = \delta$  とし、 $y' = y - \delta$  を軸として用いると、Reynolds 方程式を用いて、

$$0 = \rho g I + \partial^2 u / \partial y'^2 + \partial (-\rho \overline{u'v'}) / \partial y' + \partial (-\rho \overline{u'w'}) / \partial z \dots\dots\dots (8)$$

右辺第 3 項の応力に良く観測されている 3 角形分布を適用すると、

$$-\rho \overline{u'w'} = \tau_b (1 - z/h) \dots\dots\dots (9)$$

河床せん断力  $\tau_b$  は本領域で近似的に直線分布であり、仮想原点 ( $y'=0$ ) において 0 であると近似すれば、境界点での河床せん断力  $\tau_b$  から  $y$  方向の勾配  $\alpha$  が得られ、

$$\partial (-\rho \overline{u'w'}) / \partial z = -\alpha y'/h \dots\dots\dots (10)$$

また同様に  $-\rho \overline{u'v'}$  についても仮想原点で 0、境界点まで直線的に増加すると仮定しその勾配を  $\beta$  とすれば、(8) 式は、

$$0 = \rho g I + \partial^2 u / \partial y'^2 + \alpha - \beta y'/h \dots\dots\dots (11)$$

積分すると流速分布形が得られる。

$$u = (\beta y'^3 / 6h - (\rho g I + \alpha) y'^2 / 2 + \tau_b y') / \mu + u_1 \dots (12)$$

ここで、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau_b$  : 境界点におけるレイノルズ

応力、および  $u_1$  : 境界点の流速がパラメーターとなる。

**(4) 最大流速発生点<sup>3)</sup>**

主流域における最大流速の発生点が透過性構造物のない側に偏るのは、両岸の粗度の値の相違による説明が良く合うこと、および実験的知見である流速勾配の小さい部分は植生域に近い部分でそれを離れると対数則とほぼ一致することから、筆者の提案したレイノルズ応力分布モデルが適用されるのが妥当であると考えられる。

基本的な考え方は以下のようなものである。

- ①主流域は完全乱流で流速分布は対数則が適用される。このとき流速分布の鉛直分布は河床粗度と河床せん断力に、横断分布は壁面粗度と壁面せん断力の関数で表される。
- ②空隙域側は原点が空隙域内にあるため、非透過性壁面に比べて粗度の値が大きい。
- ③流れ場の境界は、空隙域内の流れが十分小さいため主流域の境界を用いてもよい。

基礎式は次のようである。ここで軸  $y_j$  は両側壁から水路中央に向かう軸として定義する。添え字  $j$  は 1 および 2 に相当する。

①流速分布

$$u / (\tau_b \sqrt{\rho})^{1/2} = \phi(z / ks_b) \dots\dots\dots (13)$$

$$u / (\tau_j \sqrt{\rho})^{1/2} = \phi(y_j / ks_j) \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $z$  : 河床からの高さ軸、 $\phi$  : 流速分布の関数形である。

②運動量方程式

$$\int_0^B \tau_b dy_j + (\tau_1 + \tau_2) h = \rho g B I \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 $\tau_2$  は非透過性側壁におけるせん断力である。

②レイノルズ方程式

(8) 式において粘性応力を省略し、また (9) 式を適用すると、

$$d(-\rho \overline{u'v'}) / dy_j = -\rho g I + \tau_b / h \dots\dots\dots (16)$$

以上から、最大流速発生点は  $\tau_b = 0$  となる地点であることを考慮して求められる。ただし関数  $\phi$  を定義しなければならない。これは対数則を与えれば、 $B/h$ ,  $ks_j / ks_b$ ,  $ks_b / h$  をパラメーターとすることにより数値計

算によって得られる。

(5) 対数則領域

式(14)における $\phi$ に対数則がそのまま適用できる。すなわち非透過性側壁の粗度と側壁せん断力で流速分布が決定される。

$$u/(\tau/\rho)^{1/2} = 8.5 + (1/\kappa) \log(y/k_s) \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 $\kappa=0.4$ ：カルマン定数である。

(6) 混合領域

本領域は水塊の流入・流出が周期的にあり、現象が複雑で、レイノルズ方程式を用いること、および対数則をそのまま適用することはいずれも困難である。

そこで、本領域の空隙域に近い範囲では空隙中の遅い水塊の流出の影響によって、平均的には速度に欠損が生じると簡単には考えることができる。すなわち本領域における流速分布は、対数則から欠損量を差し引いたものとして表されるとした。

$$u = (\tau/\rho)^{1/2} (8.5 + (1/\kappa) \log(y''/(B-\delta))) - \Delta u \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 $y''$ は仮想原点からの距離である。  
 $\Delta u$ は簡単のため適当な長さ $l$ まで直線分布するとすると、

$$\Delta u = (u_2 - u_1) (l - y'')/l \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 $l$ ：速度欠損の及ぶ長さ、 $u_2$ ：境界点における流速、 $y''=1$ における流速である。 $y''>1$ で、最大流速発生地点までの範囲における流速は、(18)式において $\Delta u=0$ とすればよい。

3. 実験

(1) 実験条件と方法

長さ9m、幅30cmの塩ビ性矩形断面水平床の水路の左岸側に沿って透過性構造物モデルを、右岸には粗度モデルを設置し、所定の流量と下流端堰高において通水し、下流より約4mの断面において流

速を計測した。

透過性構造物モデルは空隙の大きいプラスチック製の糸を絡み合わせた厚さ3cmの板状のろ過材で、空隙率はほぼ等しいが材質の異なるため透過係数の値が異なる2種類を用いた。また塩ビ棒をこれに挿入し、空隙率と透過係数を変えたもの2ケースを追加した。さらに2枚重ねて設置し厚さも変化させた。

粗度モデルは3mmの塩ビ板にほぼ均質な平均粒径2mmおよび5mmの砂を張り付けた2種類を用いた。

流速分布は2方向電磁流速計(ケネック社製)で、 $x$ および $y$ 方向の局所瞬間流速を測定し出力することができる。A/D変換ボードで刻み時間0.05秒で計3分間サンプリングレパソコンのハードディスクに記録する。後に計算によって、実験時の流速計の設置誤差の修成を施し、流速値に変換して新たに変動流速値 $u'$ 、 $v'$ を記録した。

(2) 解析と結果

図-2は平均流速 $\bar{u}$ の $y$ 方向分布例をしめす。図における測点の数値は右岸側壁からの距離である。図から分かるように左岸の透過性構造物モデルの側における流速の勾配が粗度側に比べ小さく速度欠損の影響が見られ、最大流速が生じている点が粗度側に偏っているのが明らかである。

図-3は $\overline{u'v'}$ の $y$ 方向分布例をしめす。図から明らかに植生側のせん断力が大きく、兩岸の粗度の差に伴うせん断力の値の相違が流速分布の偏りをもたらすことを示している。

図-4は $y$ 方向と $x$ 方向の乱れ強度の比 $\overline{v'^2}/\overline{u'^2}$ の分布を示す。植生側のみが大きくここでは空隙域と水塊の交換が行われていることが推定できる。またその大きさは測点17~16cm付近にいたるまで減少している。式(19)で考察した距離 $l$ は本実験ケースでは約8~9cmであると推定できる。

図-5(1)は $y=25$ cmの透過性構造物モデルの側における瞬間レイノルズ応力 $u'v'$ の大きさの分布を柱状図にし、その平均値と標準偏差が等しい正規分布曲線を比較して示している。測点は $y=25$ cmで透過性構造物モデルの近傍であるから、レイノルズ応力(瞬間値の平均) $\overline{u'v'}$ は大きいのであるが分布の中央値は0に近い。すなわち分布の歪度が大きいため上尾側に長い。このことから、時間の大部分では $u'v'$ の大きさは小さいのであるが、周期的に発生する水塊の流入・流出による時々生じる大き

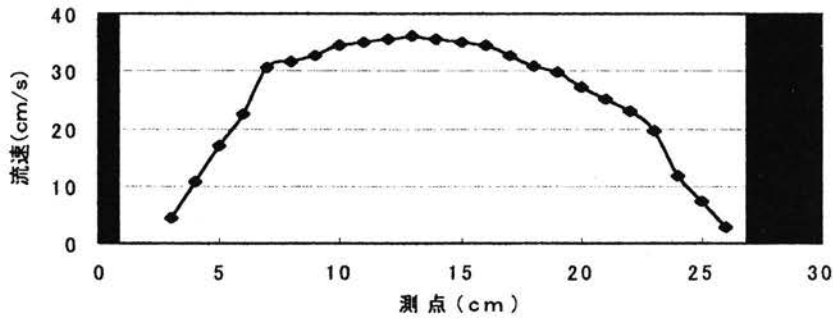


図-2  
平均流速 $\bar{u}$ のy方向分布

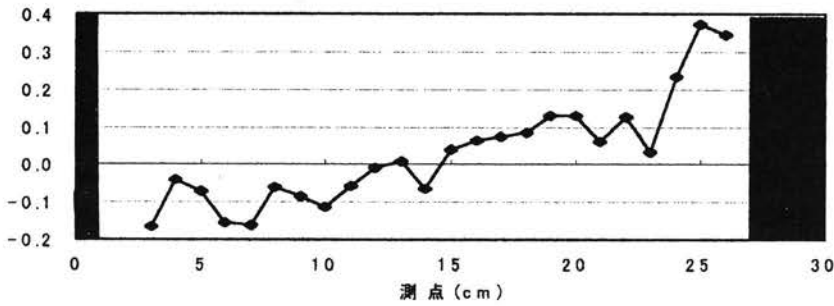


図-3  
レイノルズ応力 $\overline{u'v'}$ のy方向分布

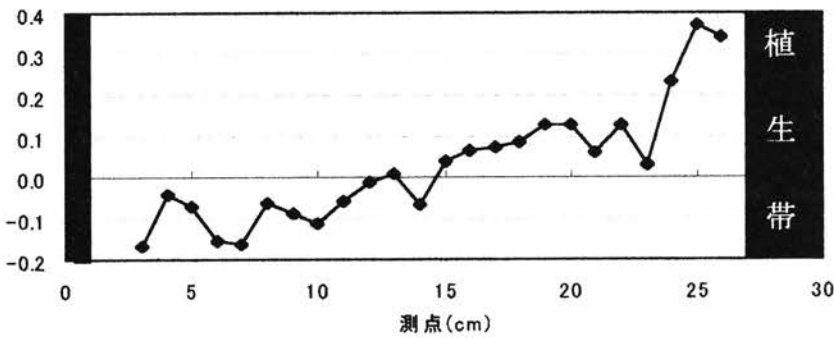


図-4  
 $\overline{v'^2/u'^2}$ のy方向分布

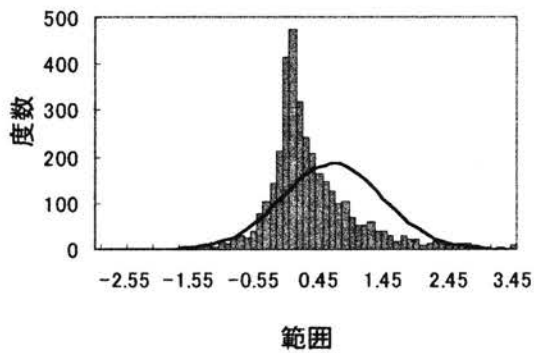


図-5 (1)  
 $u'v'$ の度数分布と分布の歪み  
(透過性構造物モデル側)

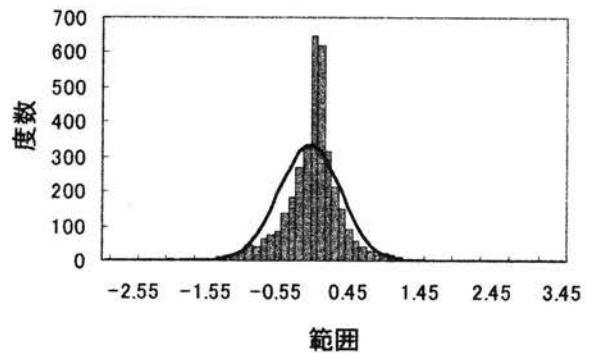
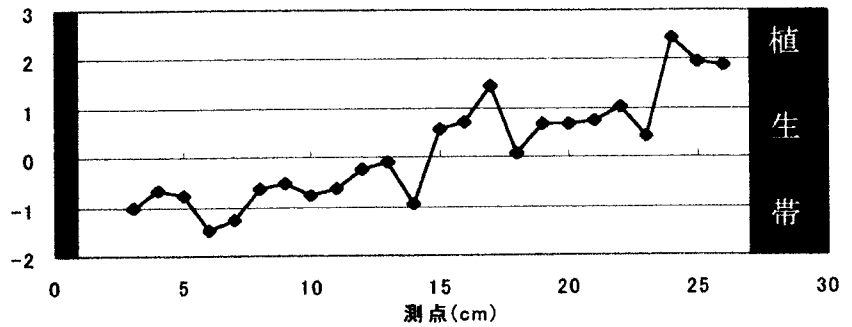


図-5 (2)  
 $u'v'$ の度数分布と分布の歪み  
(粗度側)

図-6  
u'v'の歪度のy方向分布



な値が影響して結局大きな  $\overline{u'v'}$  の値となっていて、歪度が大きいほど影響の大きいことが分かる。

図-5 (2) は測点  $y = 5 \text{ cm}$  のもので粗度側の対数則領域における度数分布を示しているが、同様な傾向はあるものの歪度の値が小さい。

図-6 は  $u'v'$  の歪度の  $y$  方向分布を示しているが、明らかに透過性構造物モデルの側における値が大きく、流速が最大値を示す付近で 0 となり、粗度側で負となるがその絶対値は小さい。いずれも図-4 と同様の傾向であって、混合領域と対数則領域の相違が明確に見られる。

#### 4. パラメーターの特性に関する考察

##### (1) 粘性領域

透過性構造物モデルで計測可能なパラメーターは空隙率  $\gamma$  と透過係数  $k$  である。  $\gamma$  は、

$$\gamma = n \pi a^2 \dots\dots\dots (20)$$

によって関係づけられる。  $k$  は  $m$ 、  $a$  および  $n$  と関係することが予想されるが、もう一つ条件がなければこれらの値は特定されない。オーダーは、  $k=O(10^0 \sim 1) \text{ cm/s}$ 、  $n=O(10^2 \sim 4) \text{ cm}^2$ 、  $m=O(10^0 \sim 2)$  であると考えられる。

##### (2) 仮想原点と透過性構造物モデルの粗度値

仮想原点の位置は  $k$  あるいは  $\gamma$  に左右される。すなわち  $\gamma=0$  ( $k=0$ ) では仮想原点は境界点であり、  $\gamma=1$  であれば空隙域がなくなることを意味するから仮想原点は側壁に来ることになる。実際  $0 < \gamma < 1$  であるので、空隙域の中に存在することは確かである。境界点と仮想原点間の距離が透過性構造物モデルの相当粗度と等しいと考えられよう。

##### (3) 混合領域

式 (19) の欠損量に関する重要なパラメータ  $l$  は最大流速発生点と境界点の距離の差と 0 の間にある

ことは確かである。一方透過係数  $k$  は小管径  $a$  に関係するが、  $a$  あるいは  $k$  が大きいほど空隙域と主流域間の水塊の交換が大規模で規則的になることが実験的に分かっている。よって  $l$  は  $k$  に関係すると思われる。

適当な仮定を用いた式 (18) と実験値の比較は良く一致していると思われる。

#### 5. おわりに

側壁に透過性構造物モデルがある流れ場を、実験的知見と物理的考察に基づき領域に区分することによって、各領域での支配方程式を検討し、簡単な横方向流速分布モデルを構築した。

モデル中の多くのパラメーターは、未知数として他の新しい条件式から得られるのではなく、材料の特性のように計測によって得られるもの、オーダー値のみが推定できるもの、および将来の実験的研究によりお互いの関係が明るみになってくるものに分類することができる。

本研究では分類を明確に提示することができなかったが、実験値と試行錯誤的に近い分布形を描くことができたことは興味深い。

最後に、本研究は多田研究室の卒業研究生の助力により形作られたものである。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Klingeman, P.C.: 自然の復元と再生のための河川工学, 財団法人リバーフロント整備センター, pp.1 ~ 130, 1998
- 2) 福岡捷二・藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告第 180 号-3, 1990
- 3) 多田博登: 側岸に透過性構造物のある開水路流における横方向流速分布, 大阪府立工業高等専門学校研究紀要第 28 巻, 1994