

ストリーム型魚道の流れの構造について

Structure of Flows in Various Kinds of Stream-Type Fishways

辻本哲郎*・泉 倫光**・山本貴章**

By Tetsuro TSUJIMOTO, Norimitsu IZUMI and Takaaki YAMAMOTO

Numerical analysis based on $k-\epsilon$ turbulence model is applied to complicated flows in stream-type fishways: Denil type, superactive-type bottom baffles and Alaska steep pass. In these fishways, the hydraulic resistance and cellular motions are controlled by obliquely arranged fins, and the effect of fins are represented by adding the terms of the longitudinally averaged drag and turbulent energy production corresponding to the workdone by the drag to the governing equation of flow. The present model can describe the outline of the flow behavior in various fishways of stream-type.

Keywords : local flow, fishway hydraulics, stream-type fishways, $k-\epsilon$ model, numerical analysis

1. まえがき

魚道はもともと水産用の魚種について、遡上の妨げられている状況の改良として取水堰等の付帯構造物として設置されてきた水路であるが、近年の流況の変化や河道動態の変化のなかで、また河川整備におけるハビタート (habitat) 制御の一貫として新しい観点でも焦点があてられている。とくに、河床低下の進む中で機能しなくなった従来の魚道の改良、魚道のなかった構造物での新設、ハビタート整備として、近年の河川水理学の成果をいかした設計が望まれている。とくに、玉井・水野・中村¹⁾は河川の生態環境としてのとらえ方を示し、また中村²⁾は魚道の設計概念を合理的に整理し魚道水理の一つの研究方向を示唆している。

本研究では標準デニール魚道に代表されるストリーム型魚道を対象とする。これは河床低下河川での河床の不連続部、浮き上がった魚道の代替として使い勝手がいいだけでなく、固定施設化・大型化も期待されていること、また本研究のような解析法の呈示で形式改良が容易で発展性があると考えたためである。ストリーム型はフィン (阻流板) の配置で急勾配流れを制御するタイプの魚道であるが、実際、フランスで様々な配置のものが提案されている³⁾。しかしその設計に当たってはそれぞれに膨大な模型実験をしなければならない。ストリーム型魚道の流れは、局所的に変化する3次元流れで数値計算が難しく、実験に頼らざるを得ない。もっとも従来は実験でも大雑把な流速測定と流れの状況の目視程度であった。魚道のポイントは、主として断面内流れに魚が遡上できる流速領域が充分あるかどうか、与えられた流量に対して適切な水深が確保

* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科

(〒920 金沢市小立野2-4 0-2 0)

** 学生会員 金沢大学大学院修士課程学生 工学研究科土木建設工学専攻

できるか（我国ではとくに魚道に放流できる流量はわずかな環境維持流量分であることが多い）である。魚の遡上に適しているかどうかは実際に魚を放流して遡上実験をして効果を確認するのがベストではあるが、どのような水理条件を好むのか、その水理条件が満足されているかといった観点で設計するようにしないと、今後必要になってくるハビタート制御に向けていつでも魚を用いた模型実験で感覚的に了解するといった段階から脱することができない。本研究では、こうした状況を踏まえた最小限の情報を数値解析で説明・予測できるようにしようとするものである。

上記のような観点からすれば、ストリーム型魚道の流れとしては、流下方向に平均化したものが設計対象とされており、断面内での流下方向平均としての流れの構造を的確に把握するということに集約できそうである。そうであれば、フィンの効果も流下方向に平均化して扱うような流れの解析が一つの手段となろう。そしてそこが本研究のポイントである。こうした解析により、従来提案されているものの中でも、図1に示す(a) 標準デニール (standard Denil), (b) 舟通し型 (superactive-type bottom baffles), (c) ステーパーパス (Alaska steeppass) といった代表的なもの^{3)~5)}のみならずそれ以外の様々な魚道に対して同じような解析によって流れの概要がつかめるようになるし、これらがフィンの配置・組み合わせによって流下方向平均の流れを制御したものと考えれば、新たなより効率的な魚道の設計にもつながろう。

ストリーム型魚道の流れを流下方向に平均化して見れば、フィンは抗力を流体に返して、抵抗として作用しているが、このフィンを斜めに配置すると抗力に鉛直・流下方向成分がもたらされ、2次流の駆動力となる。たいていのストリーム型魚道は断面が左右対象で、そのため2次流は対の螺旋流 (pair of cellular motions) を形成する。2次流は、流下方向主流速に加えて、横断・鉛直方向流速成分を生むだけでなく主流速分布をも変化させ、魚の遡上・降下 (fish migration) を助ける魚道の設計が可能である。

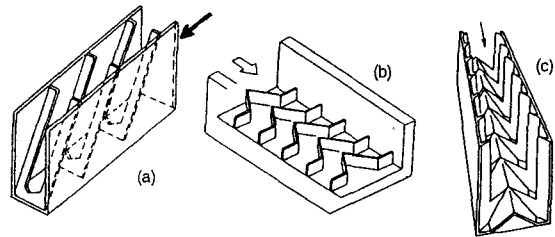


図1 代表的なストリーム型魚道

著者らは栈粗度を路床あるいは側岸に斜めに配置してら旋流を生起させ、開水路流れの構造を制御することによって多機能な水路が設計できる⁶⁾として実験的⁷⁾・数値解析的研究⁸⁾を行ってきた。これらでは栈粗度を栈の10倍程度の間隔で設置して流下方向にほぼ均質な流れを作ることを前提に議論していたが、一般にストリーム型魚道では栈粗度に対応するフィンの密度は極めて高く、また相対粗度高も大きく流れの流下方向変化は著しい。しかしながら、これまでの設計思想では魚道としての機能が流下方向に平均化された流れの構造に依存していると考えられることから、これらの研究成果が応用できるものと考えた。

2. フィンの斜め配置による2次流の生成

フィンが斜めに配置されているとき、フィンの設置状況はフィンの高さ K 、間隔 s に加えて図2に示すような2つの角度 θ, φ の組み合わせによって表わされる。1つのフィンに作用する抗力 (D_x, D_y, D_z) は、摩擦力を無視するとフィンの面に垂直に作用するから、抗力係数 C_D を導入して次式のように書ける。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho (U \sin \theta \sin \varphi - V \sin \theta \cos \varphi - W \cos \theta \sin \varphi) \quad (1)$$

$$D_x = D \sin \theta \sin \varphi; \quad D_y = -D \sin \theta \cos \varphi; \quad D_z = -D \cos \theta \sin \varphi \quad (2)$$

ここに、 x, y, z : 流下・鉛直及び横断方向座標、 U, V, W : 時間平均かつ流下方向平均した流速の流下・鉛直及び横断方向成分、 ρ : 水の密度である。抗力係数 C_D は一般に一様流中の孤立物体に対してわずかに知られているだけで、ここで扱うような条件での値は不明なため、実験定数とすることとした。

流下方向のフィンへの投影部分で流下方向平均された水の単位質量当たりの抗力 (F_x, F_y, F_z) は、次のようである。

$$F_x = \frac{D_x}{sK}; \quad F_y = \frac{D_y}{sK}; \quad F_z = \frac{D_z}{sK} \quad (3)$$

数値解析において、フィンは直接流れの固定境界とせず、上記の力を考慮して水路全体としての路床と側壁のみ固定壁として解析する。こうした流れでは、流下方向平均構造としても乱流特性の大

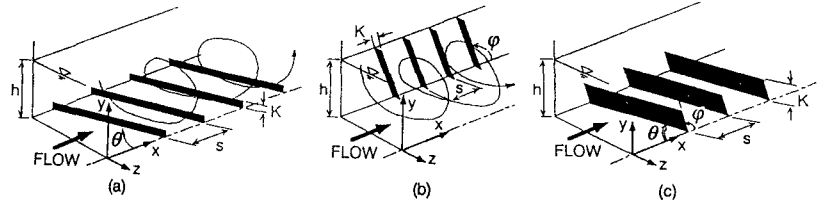


図2 フィンの配置の基本的パターン

幅な変化が予想され、一定の渦動粘性の仮定や、混合距離の仮定は難しく、 k - ε 乱流モデルを採用することとし、運動量式に加え、乱れエネルギー k 及びその散逸率 ε についての輸送方程式で支配方程式系を構成することとした。これらは一般的に次式のように書ける。

$$\frac{\partial}{\partial x^*}(\phi U^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(\phi V^* - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y^*}) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\phi W^* - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z^*}) = S_\phi \quad (4)$$

ここでは、距離スケールとして水深 h を、速度スケールとして断面平均流速 U_m を用いて無次元表示している。こうした無次元量には $*$ を付した。また ϕ :対象とする輸送される量(運動量、乱れエネルギー及びその散逸率で無次元表示してある); Γ , S_ϕ : ϕ の拡散係数及びいわゆる「生成項」で(無次元表示)それらの詳細は表1にまとめられている。ここに、 P :断面平均圧力、 P' :圧力偏差、 ν_t :渦動粘性係数、 $Re=U_m h/\nu$: Reynolds数、 ν :動粘性係数である。フィンの無い場合に比べて、運動量式では抗力の各成分が加えられ、乱れエネルギー式及びその散逸率の式には抗力のなす仕事の分が付加的な乱れエネルギーの生成率として加えられている。すなわちフィンによる形状損失は、一旦乱れを生成してそして散逸するというプロセスを経た現象と理解した。 $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε , C_{fk} , C_{fe} :モデルの数値パラメータである。 P_k は流下方向に平均された流れ場の速度勾配による乱れエネルギーの生成率で次式のように書ける。

$$P_k^* \equiv \nu_T^* \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial V^*}{\partial y^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial W^*}{\partial z^*} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial U^*}{\partial y^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial U^*}{\partial z^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial V^*}{\partial z^*} + \frac{\partial W^*}{\partial y^*} \right)^2 \right] \quad (5)$$

また渦動粘性係数 ν_t は、 C_μ を数値パラメータとして次のように k , ε と関係づけられている。

$$\nu_T = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

モデルの数値パラメータについて C_{fk} , C_{fe} 以外には標準値($C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_\mu=0.09$)を採用することとし、 C_{fk} , C_{fe} については同様な離散障害物である植生を個々の抗力の空間平均で扱った解析⁹⁾で同定された値($C_{fk}=1.0$, $C_{fe}=1.3$)を用いる。

表1 支配方程式の拡散係数及び生成項の内容

ϕ	Γ	S_ϕ
U^*	$\nu_T^* + \frac{1}{Re}$	$-\frac{dP^*}{dx^*} - \frac{2}{3} \frac{\partial k^*}{\partial x^*} - F_x^* + \frac{\partial}{\partial y^*}(\nu_T^* \frac{\partial V^*}{\partial x^*}) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\nu_T^* \frac{\partial W^*}{\partial x^*})$
V^*	$\nu_T^* + \frac{1}{Re}$	$-\frac{\partial P^*}{\partial y^*} - F_y^* + \frac{\partial}{\partial y^*}(\nu_T^* \frac{\partial V^*}{\partial y^*}) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\nu_T^* \frac{\partial W^*}{\partial y^*})$
W^*	$\nu_T^* + \frac{1}{Re}$	$-\frac{\partial P^*}{\partial z^*} - F_z^* + \frac{\partial}{\partial y^*}(\nu_T^* \frac{\partial V^*}{\partial z^*}) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\nu_T^* \frac{\partial W^*}{\partial z^*})$
k^*	$\frac{\nu_T^*}{\sigma_k} + \frac{1}{Re}$	$P_k^* - \varepsilon^* + C_{fk}(U^* F_x^* + V^* F_y^* + W^* F_z^*)$
ε^*	$\frac{\nu_T^*}{\sigma_\varepsilon} + \frac{1}{Re}$	$\frac{\varepsilon^*}{k^*} \{ C_{\varepsilon 1} [P_k^* + C_{fe}(U^* F_x^* + V^* F_y^* + W^* F_z^*)] - C_{\varepsilon 2} \varepsilon^* \}$

本数値解析では、流下方向に平均されたものとは言え、流速の3成分、乱れエネルギー（乱れ強度）、Reynolds応力、渦動粘性係数などの断面内変化も評価できる。魚道設計の現況は主流平均速度が対象ではあるが、最近の実際の魚を用いた遡上実験の報告を参照すると変動量も魚類遡上意欲に影響するものと考えられ、これらの結果も今後魚道の適否の判定資料に使えることが期待される。

ここでは最近発行された農林水産省の頭首工魚道設計指針⁽¹¹⁾に従って次のような幾何形状を標準型とした(Larini⁽¹²⁾のそれとは若干異なる)。すなわち、

とする。基礎式はすでに無次元化されており，ここではReynolds数一定（流量一定）の条件で水深・幅比が流れ構造に及ぼす影響を見ることとする。



図5 標準デニール魚道内の2次流ベクトル分布

4. 舟通し型魚道

図6及び次式に示すような舟通し型魚道^{(11)・(12)}を標準として計算を行なった。

$$\frac{s}{K} = 2.60; \quad \frac{B}{K} = 6.0; \quad \theta = 150^\circ \quad (8)$$

この場合、それぞれの側岸より水路幅の1/4部分で路床・側岸に垂直なフィンが設置され、中央部はV型浅粗度配置^{(6)・(8)}と似た形式である。このタイプの魚道では中心軸に沿って水面に低流速が現われ底部に高速域が現われる流れの状況となり、やはり魚が好きな流速域を選べるという点のほか、表層が低流速のため舟通しとして利用しやすいという効用がある。計算結果でも、フィン高が水深に比べ極めて小さい場合を除き、表層に低流速が現われる流れが得られる。図9は主流速の断面内分布であるが、フィン頂部、フィンの角度の変化部に高速流の出る状況になっており、図10に示すような1対の螺旋流（デニール型とは反対の回転）がこうした流れを産み出していることがわかる。またこの螺旋流によって舟

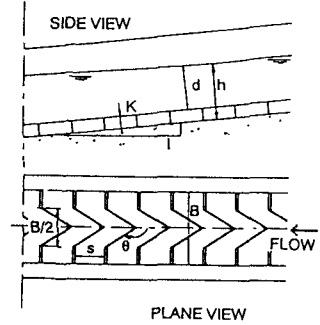


図6 舟通し型魚道

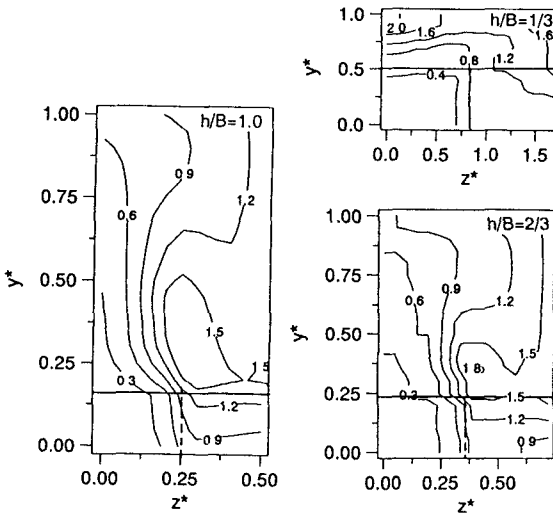


図7 舟通し型魚道内の主流速コンター

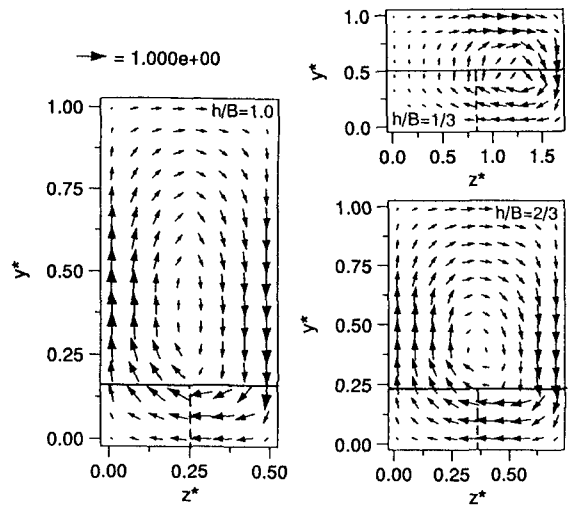


図8 舟通し型魚道内の2次流ベクトル分布

通し部の表層流れが中心に集中するようになり船の中心軸に沿った航行が確保できる。魚道としてはむしろ側岸部の低流速域が指向される⁽²⁾。この低流速域の確保に側岸に垂直なフィンが貢献している。図9はこの部分も斜めは位置とした場合の計算結果であるが、これでは側岸周辺の低流速域が出現しない。本計算では抗力係数を4.5と大きく取っているが、なお抵抗を過小評価している。

5. スティーブパス魚道

標準デニールや舟通し魚道では上述のような数値解析を待たずとも、フィンの角度から螺旋流を容易に推定でき、魚道設計で着目される中心軸での主流速分布の概要も推測できるが、スティーブパスではフィンが複雑に配置され、誘起される螺旋流の予測は容易でない。ここでは頭首工魚道設計指針⁽¹⁰⁾で示されている幾何形状（図10参照）を標準として計算の対象とした。

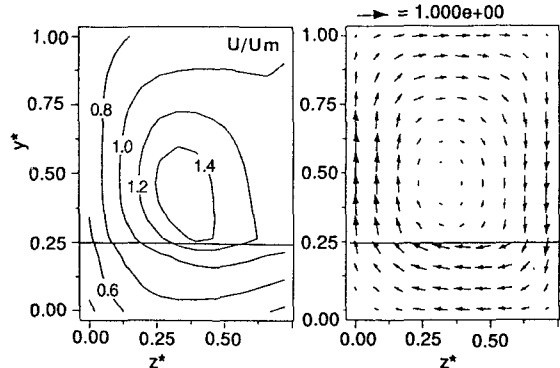


図9 両側垂直フィンのない場合

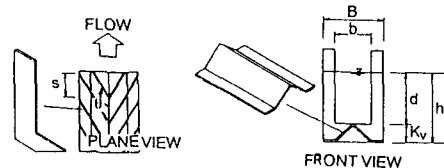


図10 スティーブパス魚道

インの形状・配置の幾何比率は次の様である。

$$\frac{B}{b}=1.58; \quad \frac{s}{b}=0.715; \quad \frac{K_v}{b}=0.357 \quad (9)$$

スティーブパスでは路床の三角状突起は固定壁で、側壁とそこで対数則、乱れエネルギーの局所平衡を境界条件に課した。計算結果は図11, 12に示すとおりで、表層で低速、底層で高速となるタイプの魚道であることがわかる。実際には底層の高速域に大型魚が突進するように考えられた魚道のようなものである。

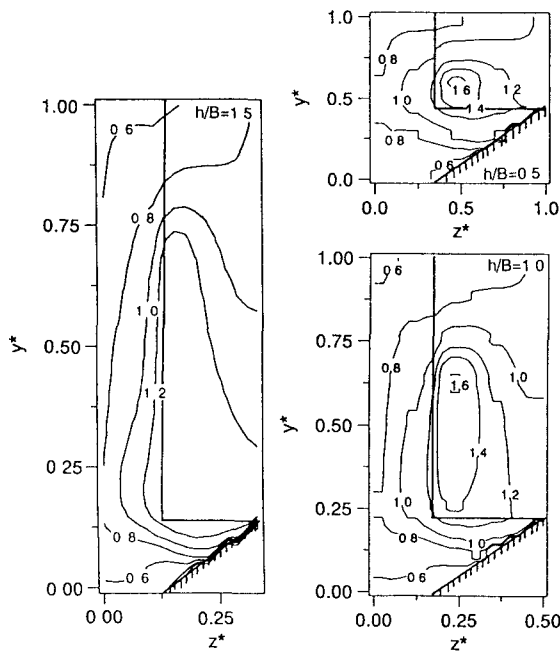


図11 スティーブパス内の主流速コンター

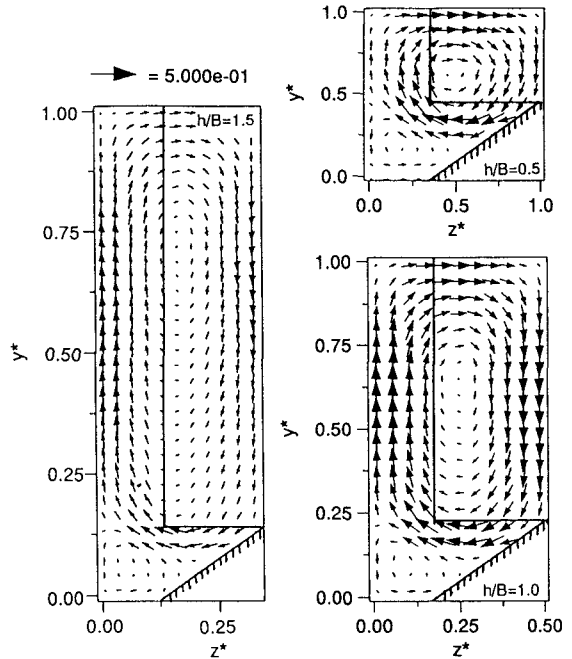


図12 スティーブパス内の2次流ベクトル分布

6. あとがき

本研究では、ストリーム型魚道の流れは複雑であるものの魚道としての機能は流下方向に平均化された構造で断面内の流れの多様性が重要であるとの判断から、こうした観点で3次元解析法を提案した。このときフィンの効果は流れの境界条件としてでなく流れに向かう面への流体力の反力を流下方向平均して扱えばよく、比較的容易に断面内流れの解析が可能となる。鍵となる抗力係数が魚道で使われるような密な配置条件で評価されていないこと、有効断面をどう設定するかなどなどの問題が残っているものの、魚道の流れの構造と効能の関係を理解し、改良したり新しい形式を提案する上で有効な手段となり得る。本研究の遂行に当たっては京都大学工学部北村忠紀助手の協力を得た。また文部省科学研究費・一般研究(C) (代表：辻本哲郎) の補助を受けた。ともに謝意を表する。

参考文献

- 1) 玉井・水野・中村：河川生態環境工学，東大出版会，309p., 1993.
- 2) 中村：魚道のはなし，リバーフロント整備センター／山海堂，225p, 1995.
- 3) Larinier, M. and A. Miralles: Caracteristiques hydrauliques des passes a ralentisseurs, Report, CEMAGREF, France, 1981.
- 4) Rajaratnam, N. and C. Katopodis: Hydraulics of Denil fishways, *Jour. Hydraul. Eng.*, ASCE, 110-9, pp.1219-1233, 1984.
- 5) Katopodis, C.: Advancing the art of engineering fishways for upstream migrants, *Proc. Int. Sym. Fishways '90*, Gifu, 1990
- 6) Tsujimoto, T., A. Saito and K. Okamoto: secondary flow induced by V and A type arrangements of strip roughness in open channel, *Memoirs, Fac. of Tech., Kanazawa Univ.*, 22-2, pp.79-91, 1989
- 7) 辻本・宮垣・森田：斜棧粗度の配置の工夫による開水路流制御，*水工学論文集*，36，pp 259-264, 1992.
- 8) 辻本・清水・松尾：斜棧粗度による螺旋流制御，*水工学論文集*，39，pp.571-576, 1995.
- 9) 清水・辻本・中川：直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，*土木学会論文集*，447，pp 35-44, 1992
- 10) Patanker, S.V. and D.B. Spalding: A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *Int. Jour. Heat Mass Transfer*, 15, pp.1787-1806, 1972.
- 11) 農林水産省構造改善局建設部設計課編：頭首工の魚道設計指針，194p., 1994.
- 12) Larinier, M.: Les passes a ralentisseurs, Chapt. 6, *Bull. Fr. Peche Piscic.*, 326-327, pp 73-94, 1992.
- 13) Katopodis, C.: A Study of the Hydraulics of Denil Fishways, MS Thesis, The Univ. of Alberta, Canada, 158p., 1982.
- 14) 原・和田：デニール式魚道における遡上特性，*国際魚道会議岐阜'95論文集*，pp.249-252, 1995