

生息域の季節変動に着目した 魚類生息域適性基準に関する研究

SUITABILITY CRITERIA FOR FISHES FOCUSING ON SEASONAL CHANGE OF FISH HABITAT

知花武佳¹・玉井信行²

Takeyoshi CHIBANA and Nobuyuki TAMAI

¹学生員 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 博士課程 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

²フェロー会員 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

PHABSIM is one of the most famous methods to estimate condition of fish habitat. Recently many researches are performed to improve PHABSIM. In this study we derived the criteria for habitat of Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*). At first, we paid attention to the seasonal change of Japanese dace's habitat. Japanese dace utilized a different area in each season, but the local condition of depth and velocity was approximately constant all the year round. So we clarified that the neighboring condition affects the condition of fish habitat. Next, we evaluated the effect of morphological changes on the fish habitat, and we clarified that flattening of sand bars and local incisions of riverbed cause the degradation of fish habitat. So we improved original PHABSIM to estimate the morphological impacts, and suggested the new suitability criteria of Japanese dace based on rapid-pool conditions.

Key Words : PHABSIM, suitability criteria, rapid-pool condition

1. 研究の背景と目的

近年、河川に生息する様々な生物の生息環境に配慮した河川管理が行われるようになってきたが、正常流量¹⁾としてどの程度の流量を確保すべきかという問題に対しては、明確な答えが出せない状況にある。そのような中で注目される手法の一つがPHABSIM(Physical HABitat SIMulation model)である¹⁾。本手法は、魚類の生息域を水深、流速、底質といった各物理環境指標に対する魚類の適性基準を設けて定量的に評価する所にその特徴がある。また、その構造は比較的簡潔ではあるが、我が国の河川に適用された既往の研究においても、その効果が証明されている²⁾。

しかし、その簡潔な構造故に、いくつかの欠点が指摘されており、これまでもいくつかの改良が試みられてきた。例えば、個々の物理環境指標を対等に取り扱っているという問題を指摘し適性曲線に重み付けを行ったもの³⁾や、採餌や避難といった各行動特性に対応した場の連結性を取り込んだもの⁴⁾などがあげられる。このように PHABSIM における問題点

が、1) 個々の環境因子を単独かつ対等に取り扱っている点、2) 評価値はある一点だけの情報で求まり、周囲の環境が全く考慮されていない点、にあることは各研究者間で共通している。そこで筆者らは、既往の研究において、瀬・淵構造内での相対的位置と瀬、淵自体の評価値を組み合わせた新手法を提案している⁵⁾。この中で我々は、魚類が瀬・淵構造内で特定の部位を選好するという特徴に着目したが、本研究においてはウグイが選好している領域が経年的にどのように変化したのか、またそれを支配している因子が何であるかを追究することにより、従来の適性基準に改良を加えることを目的とする。

2. 対象地区

本研究の対象としたのは、多摩川河口から約 52 km 上流付近に位置する一組の瀬と淵を含む約 200m の区間である。本地区は、多摩川扇状地上に位置し河床勾配約 1/218、対象区間内の水域における平均粒径は 56 mm であった。また、本対象区間の直上流には羽村堰があり、ここでの取水のために対象区間の

流量は洪水時を除き年間 $2\text{ m}^3/\text{s}$ で一定である．さらに，砂利採取やダムや堰の影響を受け，河床低下も顕著になってきているなどさまざまな問題が指摘されている⁶⁾．また，本研究においては，1997 年 11 月～1999 年 11 月の間に行われた 4 回の調査結果を取り扱うこととする．この間 1998 年 8 月までは大きな出水はなかったが，1998 年 9 月，及び 1999 年 8 月に，本区間よりも下流に位置する多摩川石原地点で，ピーク流量 $2180\text{ m}^3/\text{s}$ ，及び $2620\text{ m}^3/\text{s}$ の出水があったために，その地形は大きく変化した⁶⁾．

3. 水深，流速に対する選好性の季節変化

従来の適性曲線では，横軸に水深又は流速，縦軸に個体数をとって比較されることが多いが，水深や流速が独立の変数ではない点と，個体数だけではその選好性が不明瞭である点を踏まえて，横軸に水深，縦軸に流速をとった平面上に，Ivlev の餌選択指数を用いた適性値をプロットしたもの⁷⁾を用いた．図-1 は，各調査時期におけるウグイの水深，流速に対する適性値を季節毎に示したものである．先に述べたように，流量は一定であるために，出水後の 1999 年 11 月以外，水深流速分布に大きな違いは見られない．図を見てわかるように，ウグイの選好する水深，流速の範囲は季節を問わず 0.5 m 及び 0.5 m/s を中心とした領域で，11 月にやや深い領域での適性値が高くなる以外変化は見られない．また，水深に関しては水深 30 cm 以下の領域がほとんど利用されており，これが閾値となっていることがわかるが，流速に関する閾値はここからは読みとれない．

4. 瀬－淵構造内での選好箇所の季節変化

前章において，ウグイが選好する水深，流速の範囲は年間を通じて変化していないことを示したが，例えば水深，流速が等しくとも，瀬－淵構造内での相対的位置が異なればその環境は大きく変化する⁵⁾．そこで，本章では生息域の瀬－淵構造内での相対的な位置に着目する．

ここで，瀬－淵構造内で相対的にどの位置にいたのかを明瞭に示すために，我々が提案した瀬－淵構造無次元表記法について説明する．

まず，河道の滞筋に沿った縦断方向の水深分布に着目する．ここで，最も浅い早瀬の水深 h_0 ，および最も深い淵の水深 h_1 を基準とする．すると，ある任意の水深 h_x に対応した位相 θ_x は次式によって求められる．

$$h_x = \frac{(h_0 - h_1)}{2} \cos \theta_x + \frac{(h_0 + h_1)}{2} \quad (1)$$

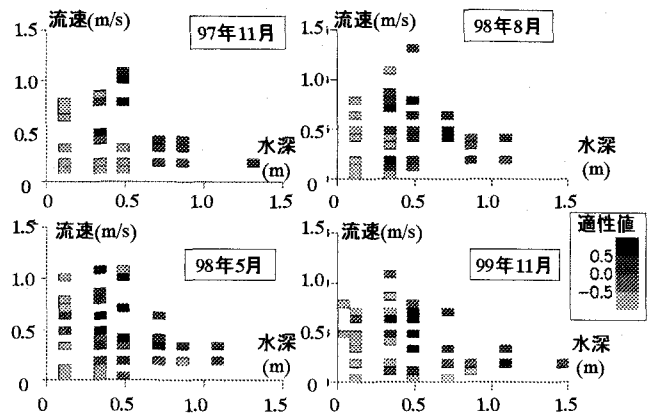


図-1 各季節におけるウグイの水深，流速に対する適性値

この任意の地点が，早瀬～淵中央部の間に位置する点であれば， $0 \sim \pi$ の間の値を与え，淵中央部～次の早瀬の間に位置するときには $\pi \sim 2\pi$ の間の値を与える．そうすれば，滞筋の水深に対応した位相が求められ，同じ水深でも淵中央部より上流か下流かによって違う位置情報を与えることができる．

次に同様の概念を横断方向にも適用する．今度は断面内で，最も深い滞筋上の水深 $h_{\max}$ を基準とすると，ある任意の地点における水深 h_y に対応した位相 θ_y が次式によって求められる．

$$h_y = h_{\max} \theta_y \quad (2)$$

ここでは，滞筋より右岸側に $0 \sim \pi/2$ の間の値を，左岸側に $\pi/2 \sim \pi$ の間の値を与えることで，同じ水深であっても区別が可能である．

ここで滞筋に沿った水深も一様に増加，減少していくわけではないので，順序が前後する点や，実際の面積を反映できない点などの欠点がある．しかし，逆に様々な水深の環境がまんべんなく存在するのか，ある水深に偏った分布をしているのかなど，水深の多様性を判断できることや，規模の全く異なる河川間での分布傾向の比較を行う事も可能となる⁸⁾．また，魚類の生息域は水深，流速に関わらず，瀬－淵構造内での特定の部位に限られていることが多いので，その条件を定量的に与えることもできる⁵⁾．

この手法を用いて，横軸に縦断方向の位相，縦軸に横断方向の位相をとった図上にウグイの生息密度をプロットしたものが図-2 である．ここで， $x=0$ 及び 6.28 が早瀬の断面， $x=3.14$ が淵の断面に相当する．また $y=1.57$ が滞筋に相当し，流れは左から右である．また，今回の対象区間では，上流から早瀬，早瀬と平瀬の間，砂州を横切る早瀬，淵の順に並んでいるが，基準としては，上流側の早瀬における水深と淵の水深をとった．

これらの図を見比べると，季節によってその選好する場所が変化している様子が見て取れる．出水に

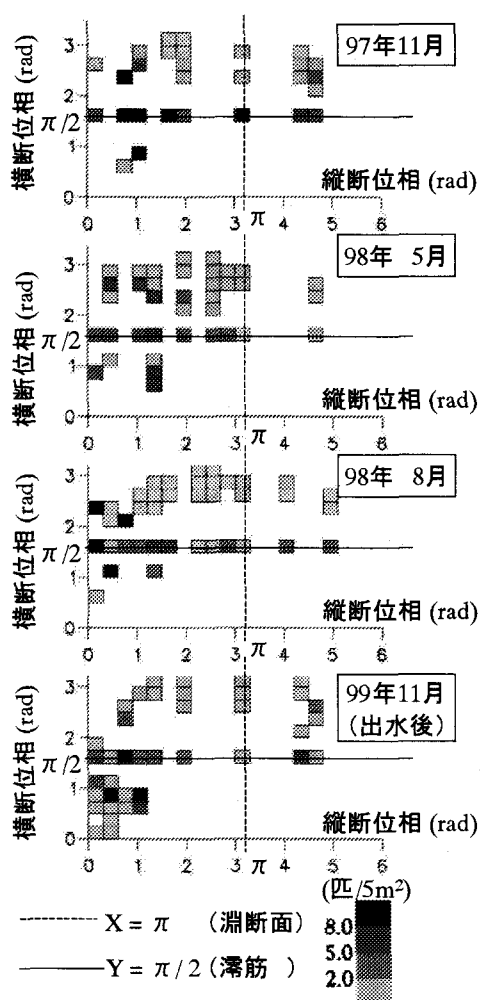


図-2 無次元表示法を用いた瀬淵構造内におけるウグイの分布の季節変動

より地形が変化した1999年11月を除き、水深、流速分布はほとんど同じであるために、このような生息域の変化は、水深流速分布では説明が付かない。そこで、季節による分布の違いをもう少し細かく見るために、図-2と共に、生息密度が最大値を示した点における、水深、流速の値および淵頭、瀬尻の別を元に考察していくこととする。二回の出水後である1999年11月に関しては次章でその考察を行う。

まず、1997年11月に、もっともウグイの密度が高かった地点は、水深0.44m、流速0.51m/sで瀬に位置しており、1m²あたり12匹が確認されている。また、図-2より、瀬のやや深くなったところから淵の前半分にかけて選好度の高い領域が広がっている様子が分かる。98年5月になると、全確認個体数が減少するが、淵頭において水深0.62m、流速0.42m/sの地点において、5m²あたり16匹というのが最高密度である。図をみると、この時淵中心部を利用する個体はほとんどおらず、その大半が瀬から淵頭にかけての領域に生息していることがわかる。8月になると、瀬に対する選好性はより強まり、瀬の流心部

付近に個体が集まっている様子が見て取れる。しかし、最も密度が高かったのは、瀬脇であり、水深0.44m、流速0.2m/sの地点で1m²あたり9匹が確認された。

このように、もっとも密度の高い一点についても、その水深、流速はある程度似た値であるものの、その瀬-淵構造内での位置は変化している。すなわち、年間を通じて瀬から淵頭にかけての領域での選好性が高いが、水温の高い夏には淵をあまり利用せず、その大半が瀬を中心に活動していることがわかる。また、秋においては瀬で最も多くの個体が確認されたものの、淵中心部近くまで広くその生息域が広がっているが、これは、全個体数が多いことと、水温が下がってきたために深場への選好性が増したためと思われる。春には、秋に比して全個体数が少ないこともあり、淵中央部にはあまり見られず、瀬中心にウグイがみられるものの、最大密度は淵頭で観測されており、淵への依存性も伺われる。このように、季節によって活動の中心が瀬と淵頭の間で微妙にシフトしている様子が見て取れる。

5. 出水による河床形状変化に伴う影響

次に、1997年11月のデータと1999年11月のデータを比較することにより、出水による河床形状の変化が生息域にどのような影響を与えたかを考察する。上述した二回の出水により、環境がどのように変化したかをまとめたものが図-3である

まず、図-3a)に示したように、左岸側の砂州の比高が減少し、半分以上が水面下となった。図-3a)中AB線に沿った断面形上の変化を図-3b)に示してある。低水路内では、砂州の比高が減少すると共に滞筋部の水深が浅くなり全体的に平坦化した様子が見て取れる。また、砂州の前縁線は上下流に長く伸び、これを横切る早瀬はその幅を増している。このため、図中の模式図に示したとおり、出水前に淵頭であった所には水が集まらず、ここでの単位幅流量は減少する結果となった。このような平坦化と単位幅流量の減少に伴い、淵頭は浅く遅い流れとなり、生息適性は低下した。一方、淵中心部の水深は逆に30cm程度深くなったことで、瀬と淵の水深は二極化の傾向を示し、図-2の1999年11月の適性基準に示されるとおり、縦断方向の位相が $\pi/2 \sim \pi$ の領域が減少し、 $0 \sim \pi/2$ の範囲の水深に偏っている。また1997年11月には比較的に利用されていた淵の深い領域は、1999年11月の水理量においても従来の適性曲線¹⁾では評価値が高い領域にあるにもかかわらず、あまり利用されていない。そこで、淵の状況を詳しく調べるために図-3a)のCD線に沿った断面内の流速コ

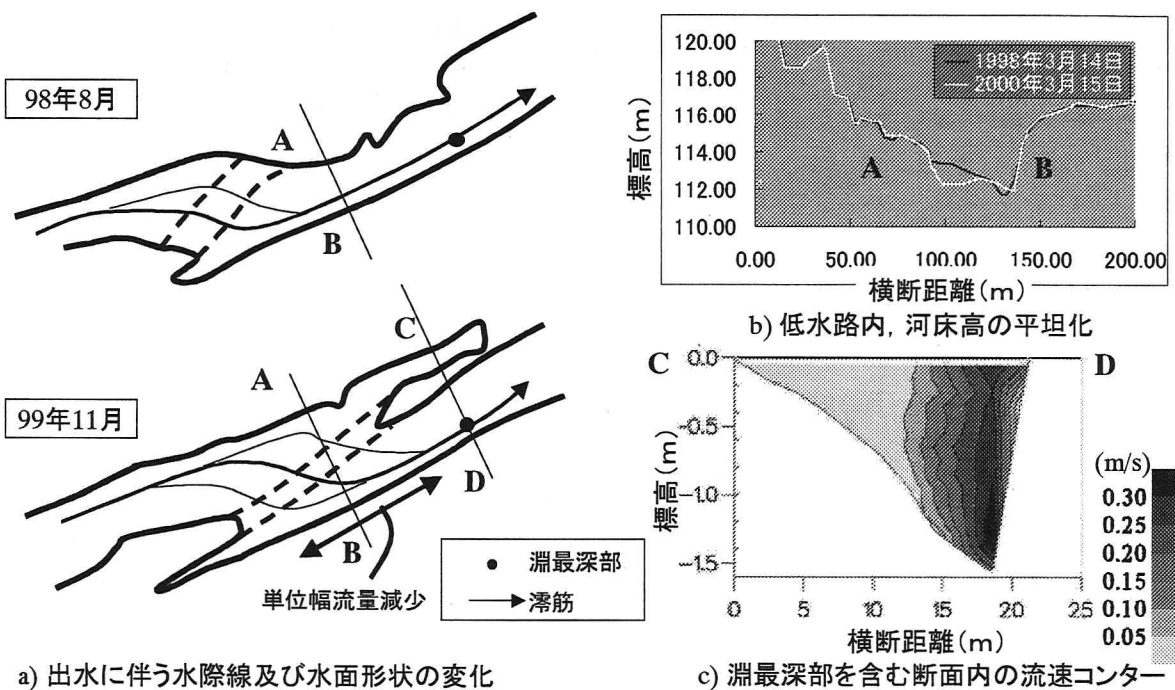


図-3 出水に伴う地形変化と地形変化後の断面内流速分布
(横断面データは国土交通省国土技術政策総合研究所の提供による)

ンター図を図-3c)に示した。これを見ると、流れは滞筋付近のみに、水面から河床までほぼ一定の流速が流れていることが見て取れる。これは、以前に比べて流れが河岸に垂直に近い角度で入ってくるために(図-3a)),流れが河岸近くに限定され内岸が止水域になったという地形による影響と、流量が変わらぬまま洗掘により河積が広がり流れが停滞したことが理由として考えられる。底面付近で流速が最大値を取っているのも地形に伴う流れの偏りの影響によるものと推測される。

6. 評価基準の作成

これまでの結果を基にウグイ生息域の特徴をまとめる。まず、本来ウグイは年間を通じて淵中央部にかけても多いはずであるが、春と夏に利用されていたのは瀬から淵頭だけであり、1997 年秋にはまだ利用されていた淵最深部付近も、1999 年秋にはあまり利用されていない点に着目する。このようにウグイが淵頭のみを利用しているという現象は、取水に伴い、流量が本来あるべき状態より減少している区間(減水区間)においてしばしば報告されており、この理由は淵における流れが停滞したためといわれている⁹⁾。ここで、この停滞の意味について考察する。図-1 を見てもわかるとおり流速自体は 0.1m/s 前後の所でも選好度が高い領域は存在する上、規模が小さい河川における淵では、流速が永田地区よりも小さくとも十分な密度が確認されることもあり⁸⁾、流

速自体がその主要因とは考えにくい。しかしながら、たとえ流速が同じ値であったとしても、水深が深くなればそれだけ水深方向の流れの変化は乏しくなり、ウグイのように流れに変化のある環境を好む魚にとって好ましくない状態であると考えられる。淵頭のみを利用しているという現象もこれを裏付けている。

もう一つの特徴は、ウグイが生息していた場所の水深、流速といった値は年間を通じて変化しないものの、その中心は季節によって瀬であったり、淵頭であったり変化している点である。

これら二つの特徴を考慮し、次のような行動パターンの仮説を立てた。すなわち、1) ウグイが活発な時期は、平面的に流れが多様な瀬を中心に採餌を行っており、その中でやや流れの緩やかな領域を中心に、時々その周囲で流速が 1m/s を越えるような場所にアクセスする。2) ウグイの活性が低い時期は、平面的には流れがあまり変化しない淵の中で、河床近傍から表層へ向かっての緩やかな流速変化を活用し、時々上層部へ移動し採餌する。これらをもとに評価法の開発を行う。

すると、瀬においては、流れの速い領域と遅い領域が混在するような状態が、淵においては、水深方向に流速が変化していくような状態が生息域の条件となる。出水に伴う淵の洗掘は、水深方向の流速変化を乏しくさせ、ウグイにとっての淵の適性度は低下したと考えられる。すると、1997 年 11 月に比べて 1999 年 11 月には淵全体の利用度が低下したことも説明が付く。そこで、この現象を定量的に表現す

るために、図-1 同様水深、流速平面上で、ウグイが通常生息している領域（生息適性領域）、瀬にいるウグイが時々アクセスする流れの速い領域（高流速域）、減水区間の淵に見られるように変化に乏しく利用されにくい領域（停滞域）の3つを表現し、これらを用いて瀬、淵の機能を評価する手法を提案する。図-4 はこれらの領域を水深—流速平面上に示したものである。図中には、従来の第一種適性基準¹⁾において、ウグイ成魚の適性値が1.0となる領域も破線で示してある。減水区間の淵においては、発見個体数が少ないにも関わらず PHABSIM による評価値が高めに出るのは、この停滞域を高く評価していることによるものと考えられる。また、PHABSIM においては、0-1 の中間の適性値をとる領域を与えているが、本論文においては、簡単のため、基準値をクリアしているか否かで評価を行う。まず、これまでのデータに基づき水深の下限は 0.3m を設定した。次に上述した3つの領域を分割している①～③の3本の曲線をどのように求めたかを述べる。

まず、淵において流れが水深に応じた適切な範囲にあるか否かを③の曲線で分けた。これは、次式に従い導いた。

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 5.75 \log_{10} (H / ks) + 6.0 \quad (3)$$

$$u_* = \sqrt{gHI} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{u}$ ：平均流速、 H ：水深、 ks ：相当粗度、 u_* ：摩擦速度、 I ：エネルギー勾配である。対象が淵であることを考慮して、現場の底質状況から $ks=0.3m$ を仮定した。また、図-1 の結果より、 $I=1/10000$ 程度が妥当であると判断し、この値を代入して③の曲線を得た。むろん、現実の流れは等流ではないためこの式から算出される値は近似値であるが、水深方向に流速の変化があるかないかを定める一つの基準としては利用できると考えている¹⁰⁾。また、 Fr 数を用いて、瀬淵の状態を判別するという試みもいくつかなされているが^{11) 12)}、この場合 $Fr=0.1$ に相当する曲線がこの③の曲線と極めて近い挙動を示している。

次に①と②であるが、ここでも流速分布は対数則に従うと仮定した。

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log_{10} (h / ks) + 8.5 \quad (5)$$

ここで、 h ：河床からの高さ(0.1m)、 u ：その位置での流速、である。また、ここでは早瀬であることを考慮して、 $ks=0.5m$ を用いる。①と②の基準として、河床近傍の流速に着目した。対象であるウグイ成魚のサイズを考慮して河床から 10 cm 上に於ける流速を考え、生息適性領域の上限を 0.6m/s、アクセスできる高流速域の上限を 0.8m/s と設定し、これ

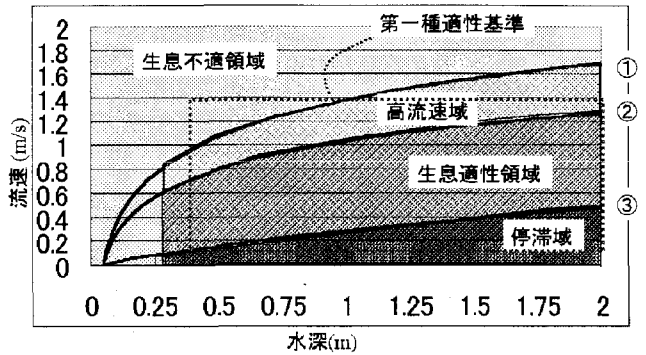


図-4 新たに作成した適性基準案

らと、式(3)から算出される u_* を、式(5)に代入することにより、平均流速と水深の関係が求まり、曲線①、②を描くことができる。

7. 新適性基準に基づく評価と考察

新しく作成した適性基準を用いて、1998年8月と1999年11月の水深、流速分布をもとに、生息適性領域、停滞域、および高流速域に分けて図-2 同様の表記法を用いたものが図-5である。

出水前には淵中央部（縦断位相が π ）付近の領域が利用されていたものの、出水後は利用されなくなったという現象が図-2で見られたが、これは淵中央部の環境が生息適性領域から停滞域へと変化したためであるということが、図-5で表現できている。従来の適性曲線を用いた場合は、この停滞域の評価値も高くなることを考えれば、改良の効果が見て取れる。

次に、これらの評価基準をもとに、ウグイの生息域に影響を及ぼす各領域の面積比を瀬、淵に分けてまとめたものが表-1である。ここでの瀬淵の区分は、河床勾配の変曲点で区分し¹³⁾、簡単のため、面積の代わりに河道内をほぼ等面積で分割したセルの数を用いた。ここで、流量は出水前後で変化していないにも関わらず、出水後は淵より瀬の割合が増加すると共に、淵においてもともと多かった停滞域がさらに増加した様子が分かる。また、この評価によれば瀬の適性領域は広がったものの、高流速域はさほど増加しておらず、流速場の多様性はあまり向上していないと判断される。6章で述べたように瀬における遅い領域と速い領域を行き来しながら摂餌しているという仮説に基づけば、瀬の適性度も低下したことになる。この観点で図-2を見れば、瀬において選好されていた環境は限られており、この仮説は妥当であったと推測される。このように、様々な場を区分しその量を評価することで、場の多様性を定量的に議論することが可能となる。

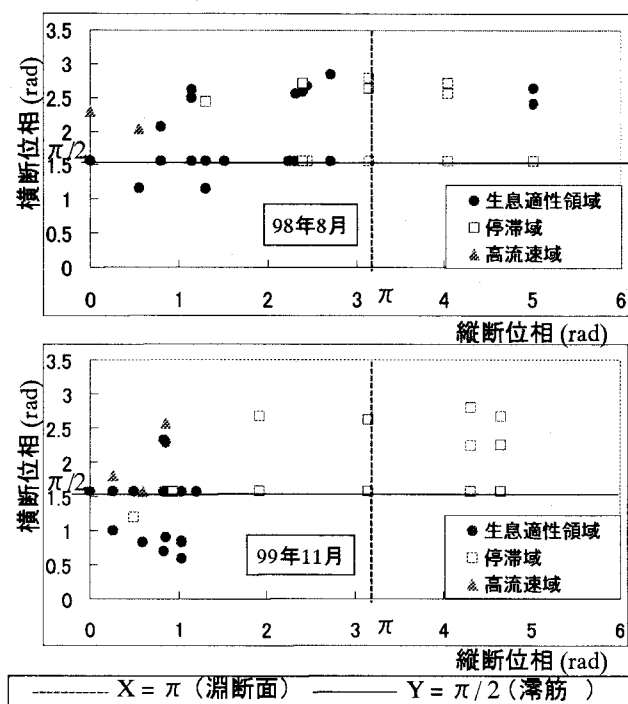


図-5 無次元平面上で表される,新基準に基づく属性の分布

表-1 各領域の面積比率の変化

		生息適性領域	高流速域	停滞域	生息不適領域	合計
98年	瀬	9	2	1	8	20
夏	淵	11	0	10	14	35
99年	瀬	17	3	0	17	37
秋	淵	1	0	14	8	23

8. まとめ

本論文では,ウグイが水深,流速の値だけでなく,周囲の環境との関係の中で,生息域を季節により変えていることを明らかにし,従来の水深流速に基づく適性曲線に改良を加えることで,瀬-淵内でウグイの生息域に影響を与えられられる場の特徴を表現できた。

今後は底質の条件を評価すると共に,産卵,避難など他の行動も考慮した総括的な評価法を提案することが課題となる。

謝辞:本研究は河川生態学術研究会の研究の一環として行われたものである。魚類データを提供してくださった君塚芳輝氏,河床横断面データを提供してくださった国土交通省国土技術政策総合研究所河

川研究部河川研究室の皆様を始め,関係者の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) アメリカ合衆国内務省・国立生物研究所(テリーワドル・中村俊六訳): IFIM 入門,財団法人リバーフロント整備センター, pp.145-150, 1999.
- 2) 小出水規行,藪木昭彦,中村俊六: IFIM/PHABSIM による河川魚類生息環境評価—豊川を例にして—,河川技術に関する論文集 第6巻, pp.155-160, 2000.
- 3) 原田守啓,藤田裕一郎,深谷治由: 河川の生息環境評価手法に関する一考察,水工学論文集 第45巻, pp.1129-1134, 2000.
- 4) 辻本哲朗,田代喬,伊藤壮志: 生活圏の連結性に着目した魚類生息環境評価法の提案と河川内微地形の役割評価,河川技術に関する論文集 第6巻, pp.167-172, 2000.
- 5) 知花武佳,玉井信行: 環境傾度を考慮した魚類生息環境評価法に関する研究,河川技術に関する論文集 第6巻, pp.161-166, 2000.
- 6) 河川生態学術研究会多摩川研究グループ: 多摩川の総合研究—永田地区を中心として—, 2000.
- 7) 知花武佳,玉井信行: 魚類生息域適性曲線に関する考察,応用生態工学研究会 第3回研究発表会講演集, pp.73-76, 1999.
- 8) N.Tamai, T.Chibana.: Estimation of Suitability for Fishes Focused on Rapid-pool Conditions, Proceedings of FISH TREC 2001 pp.85-94, 2001.
- 9) 沼田真監修,水野信彦,御勢久右衛門: 河川の生態学,築地書館, pp.200-207, 1995.
- 10) 岡滋晃,知花武佳,玉井信行: 鉛直流速勾配に着目した生息環境評価方法に関する考察,第5回応用生態工学研究会研究発表会講演集, pp.89-92, 2001.
- 11) 野上毅,渡邊康玄,中津川誠,土屋進,岩瀬晴夫,渡辺恵三,加村邦茂: 真駒内川に於ける底生魚類生息環境の改善についての現地実験,河川技術論文集 第7巻, pp.309-314, 2000.
- 12) 土屋十園: 都市河川の総合親水計画,信山社サイテック, pp.135-164, 1999.
- 13) 知花武佳,玉井信行,黒田直樹,鈴木一平: 河床勾配で区分される小区間に着目した魚類生息環境評価に関する基礎的研究,第56回年次学術講演会講演概要集 第II部門, 2001.

(2001. 10. 1受付)