

## (4) アユに関する流速の選好曲線の提案

鬼東幸樹<sup>1\*</sup>・永矢貴之<sup>2</sup>・白石芳樹<sup>3</sup>・笠瀬明日香<sup>3</sup>・東野誠<sup>4</sup>・高見徹<sup>4</sup>・  
横峯正二<sup>5</sup>・秋山壽一郎<sup>6</sup>・小野篤志<sup>7</sup>・芹川泰介<sup>8</sup>

<sup>1</sup>九州工業大学大学院准教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

<sup>2</sup> (株) 建設技術研究所 東京本社河川部 (〒330-0071 さいたま市浦和区上木崎 1-14-6)  
九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻博士後期課程

<sup>3</sup> (株) 建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)

<sup>4</sup> 大分工業高等専門学校准教授 都市システム工学科 (〒870-0152 大分市大字牧 1666)

<sup>5</sup> 国土交通省九州地方整備局延岡河川国道事務所所長 (〒882-0803 延岡市大貫町 1-2889)

<sup>6</sup> 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系

<sup>7</sup> 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

<sup>8</sup> 九州工業大学大学院 工学府先端機能システム工学専攻

\* E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

1997年に河川法が改正され、河川環境の整備と保全が法の目的として明文化された。河川環境に配慮した川づくりを行うには法律だけでなく、河川環境を評価する手法を確立しなければならない。生息環境評価法として、HEPおよびIFIMの1つのモジュールであるPHABSIMが挙げられる。1978年に公開されたPHABSIMの概略としては、対象領域をセルで分割し、水深、流速、底質、カバーなどの選好値の積である合成適正値を計算し、さらに対象領域で面積積分して利用可能面積を求めるものである。河川に生息する魚類に関する選好曲線は、中村、河村などによって求められているが、同魚種においても異なる形状となっているのが現状である。本研究では、河川水辺の国勢調査に収録されているデータに基づき、アユに関する流速の選好曲線を求めた。

**Key Words :** PHABSIM, preference curve, flow depth, velocity, ayu

### 1. はじめに

1990年に「『多自然型川づくり』の推進について」が旧建設省河川局から全国へ通達され<sup>1)</sup>、1997年には河川法が改正され、河川環境の整備と保全が法の目的として明文化された。一方、1993年には生物の多様性に関する条約が採択され、これを受けて生物多様性国家戦略やこれを改訂した新生物多様性国家戦略が策定された<sup>2)</sup>。また、2003年には自然再生推進法が施行され、2006年には多自然型川づくりを見直した多自然川づくり基本方針が河川局長より通知された。

河川環境に配慮した川づくりを行うには、法律を整備するだけでなく、河川環境を評価する手法も確立しなければならない。生息環境評価法として、HEP(Habitat Evaluation Procedure)<sup>3,4)</sup>およびIFIM(Instream Flow Incremental Methodology)の1つのモジュールであるPHABSIM(Physical Habitat Simulation System)が主として挙げられる。HEPは1969年に配布された環境アセスメント法であるNEPA(National Environmental Policy Act)を実行するために開

発された手法である。対象地域をセルに分割し、餌、水、繁殖地、森林までの距離といった対象セルの環境指標を用いて生息環境を評価するモデルである。我が国でも近年使用され始めている<sup>5,6)</sup>。

IFIMは1976年に設立されたアメリカ合衆国魚類および野生生物保護局・正常流量共同研究班によって開発され、その1つのモジュールのPHABSIMが1978年に公開された。概略としては、対象領域をセルで分割し、水深、流速、底質、カバーなどの選好値の積である合成適正値CSI(Composite Suitability Index)を計算し、さらに対象領域で面積積分して利用可能面積WUA(Weighted Usable Area)を求めるもので、HEPとの類似点が多い。中村ら<sup>7)</sup>は5つの河川において魚類の生息調査を行い、7魚種の選好曲線を求めた。なお、「選好曲線」<sup>7,13)</sup>については、「評価曲線」<sup>7)</sup>、「評価関数」<sup>9)</sup>、「適正基準」<sup>14-16)</sup>と様々な呼称が存在するが、本研究では「選好曲線」を採用する。金・玉井<sup>17)</sup>は愛知県の乙川を対象として、1次元水面形計算を行うと共に現地河川で得られたオイカワ、カワムツおよびカワヨシノボリの選好曲線を用いてWUAと生

表-1 我が国に生息する純淡水魚および通し回遊魚に関する既存の水深および流速に関する選好曲線

|                            | アムドジョウ | アブラハヤ | アマゴ | アユ | ウグイ | オイカワ | カジカ | カマツカ | カワムツ | カワヨシノボリ | サケ | タモロコ | ニゴイ | マス | ヨシノボリ | 備考                      |
|----------------------------|--------|-------|-----|----|-----|------|-----|------|------|---------|----|------|-----|----|-------|-------------------------|
| 中村ら(1995) <sup>7)</sup>    |        |       |     | ◎  | △   | △    |     |      |      |         |    |      | △   |    | △     | 季節別に整理                  |
| 金ら(1996) <sup>20)</sup>    |        |       |     |    |     | ◎    |     |      | △    | △       |    |      |     |    |       | 季節別に整理、一部は複変数局面表示       |
| 金・玉井(1996) <sup>19)</sup>  |        |       |     |    |     | ○    |     |      | ○    | ○       |    |      |     |    |       |                         |
| 川本ら(1998) <sup>8)</sup>    |        |       |     |    |     | ◎    |     |      |      |         |    |      |     |    |       | 季節別に整理                  |
| 知花ら(1998) <sup>21)</sup>   |        |       |     |    | ○   |      |     |      |      |         |    |      |     |    |       | 複変数局面表示                 |
| 辻本・永禮(1998) <sup>18)</sup> |        | ◎     |     |    | ◎   |      | △   | △    |      |         |    |      |     |    | △     | 底生魚、遊泳魚でそれぞれ選好曲線が普通     |
| 辻本・永禮(1999) <sup>9)</sup>  |        | ◎     |     |    |     |      |     |      |      |         |    |      |     |    | △     | 体長別に整理                  |
| 中村(1999) <sup>22)</sup>    |        |       |     |    | ◎   | ◎    | ◎   |      | ◎    |         |    |      |     |    | ◎     | 第1種適正基準、生活史別に整理         |
| 川本ら(1999) <sup>23)</sup>   |        |       |     |    |     | ◎    |     |      | ◎    |         |    |      |     |    |       |                         |
| 知花・玉井(2000) <sup>24)</sup> |        |       |     |    | ◎   |      |     |      |      |         |    |      |     |    |       | 第3種適正基準、複変数局面表示         |
| 辻本ら(2000) <sup>15)</sup>   |        |       |     |    |     |      |     |      | ◎    |         |    |      |     |    |       | 第1種適正基準、生活史別に整理         |
| 北村ら(2001) <sup>25)</sup>   |        |       |     | ○  |     | ○    |     |      |      |         |    |      |     |    |       | 第1種適正基準                 |
| 原田ら(2001) <sup>26)</sup>   |        |       |     |    | ◎   |      |     |      |      |         |    |      |     |    |       | 第3種適正基準(基準を明示していない(明白)) |
| 知花・玉井(2002) <sup>27)</sup> |        |       |     |    | ◎   |      |     |      |      |         |    |      |     |    |       | 第1種適正基準、季節別に整理、複変数局面表示  |
| 河村(2003) <sup>12)</sup>    | ◎      |       | ◎   | ◎  | ◎   | ◎    |     |      | ◎    | ◎       | ◎  | ◎    | ◎   | ◎  |       | 季節別に整理、生活史別に整理          |
| 知花ら(2004) <sup>14)</sup>   |        |       |     |    | ◎   |      |     |      |      |         |    |      |     |    |       | 季節別に整理、複変数局面表示          |
| 鬼束ら(2005) <sup>21)</sup>   |        |       |     | ◎  |     |      |     |      |      |         |    |      |     |    |       | 産卵適正のみ                  |
| 小出水ら(2005) <sup>9)</sup>   |        |       |     |    |     |      |     |      |      |         |    | ◎    |     |    |       | 生活史別に整理                 |

◎は流速、水深共に選好曲線が存在、○は水深の選好曲線がなく流速のそれが存在、△は流速の選好曲線がなく水深のそれが存在

息数を比較し、PHABSIMの有効性を裏付けた。辻本・永禮<sup>18)</sup>は川那部・水野<sup>19,20)</sup>の図鑑に基づきアブラハヤ、ウグイ、ヨシノボリ、カマツカおよびカジカの選好曲線を求め、森下川を対象としてそれらの魚種のWUAを算出し、総面積で除した値で生息環境を評価した。砂田ら<sup>15)</sup>は富士川本川の1次元不等流計算結果に中村<sup>22)</sup>の提案したウグイの選好曲線を適用し、現地計測結果と一致することを述べた。これは、河川が異なっても同一魚種であれば同一の選好曲線を示すという「選好曲線の普遍性」が成立することを示唆している。中村ら<sup>7)</sup>もアユの選好曲線に普遍性があると推定している。ところが、金ら<sup>20)</sup>が愛知県の乙川で得たオイカワ選好曲線を用いて山口県の新甲川におけるオイカワの選好値を川本ら<sup>8)</sup>が求めたところ、現地計測結果と一致しなかった。このような相違が生じた原因として、現地調査を行う際に必ずしも生息している全ての魚を捕獲できないために生じる調査結果の誤差や<sup>23,24)</sup>、検証に用いた選好曲線の精度が必ずしも高くないことが挙げられる。現在、河川に生息する魚類に関する選好曲線は、中村<sup>22)</sup>、河村<sup>12)</sup>などによって求められているが、同魚種においても異なる形状となっているのが現状である。

魚の生息している河川における水理データは河川水辺の国勢調査に膨大に収録されている。本研究では、全国的に広く分布し、水産価値の高いアユを対象とし、河川水辺の国勢調査のデータを基に、流速の選好曲線を求めた。

## 2. 純淡水魚および通し回遊魚の既存の選好曲線

### (1) 選好曲線の作成方法

選好曲線の作成方法は3種類存在する<sup>21)</sup>。第1種適正基準は専門家の意見に基づいて作成されるものである。選好曲線を求める過程で何ら数学的手法を用いないために、専門知識に裏付けられた正しい判断が求められる。第2種適正基準は現地調査で得られた物理データ数をヒストグラムにし、最小値を0、最大値を1とするものである。この場合、例えば水深の低いデータばかりを収集すると、バイアスを含む結果となる。第3種適正基準は重みを用いるなどしてバイアスを取り除く手法である。したがって、バイアスを数学的に取り除く手法が第3種適正基準で、経験的に取り除く手法が第1種適正基準と換言できる。そのため、専門的な知識がない場合は第3種適正基準を採用すべきと判断される。

### (2) 既存の選好曲線の比較

表-1に我が国に生息する純淡水魚および通し回遊魚に関する既存の水深および流速に関する選好曲線の有無を示す。論文中に適正基準の種類が明示されている場合は備考にその旨を示した。また、複変数局面表示とは、水深と流速で構成される平面上に選好値の等値線を表示したものである。オイカワやウグイに関する既存の選好曲線はいくつか提案されているものの、同魚種でも形状が異なっているのが現状である。この一因として以下の3

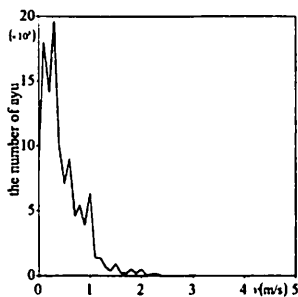


図-1 アユの流速別総個体数

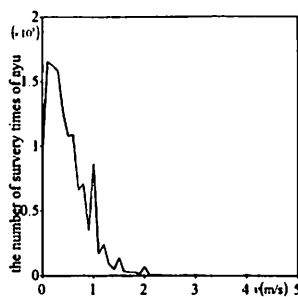


図-2 アユの流速別観測点数

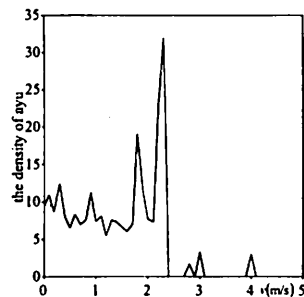


図-3 アユの流速別平均個体数

つの整理法が統一的行われていないことが考えられる。

- a) 生活史別整理(体長別に整理)
- b) 季節別整理
- c) 地方別整理

a)については、仔魚、稚魚、成魚、成熟魚といった成長に応じて生息域が変化することを考慮したものである<sup>23)</sup>。b)については、季節ごとに水温が変化することを考慮したものであるが、多くの魚は季節ごとに成長段階が決まることが多いので完全にa)の影響と分離して整理することはできない。一方、Nishida<sup>24)</sup>はアユに遺伝的な形態的変異が地域ごとに生じていることを解明した。表-1中に示したアユ以外の魚種については同様な検討がなされた例がほとんどないが、河川で一生を過ごす純淡水魚は、通し回遊魚のアユよりもさらに遺伝的な形態的変異が地方ごとに生じている可能性がある。

### 3. 対象データおよびデータ処理方法

#### (1) 対象データ

1990年度から2005年度までの河川水辺の国勢調査には全国112河川で延べ約20万の魚種別個体数データと、その魚種の体長別個体数、観測日時、観測地点の流速、水深、河床勾配、セグメントの種類、河床形態、水温、緯度、経度が記録されている。ただし、水深データは1990年度～1991年度に74河川で計測されたものしか存在しない。本研究では全国に広く生息し、水産価値の高いアユを対象とした。なお、流速に関するアユ個体数のデータ数は6757であるが、流速データの刻み幅は測定区間によって異なり、0.01 m/s、0.05 m/s、0.1 m/sごとの個体数が記載されている。

#### (2) データ処理

1990年度から2005年度までに得られたアユの全データにおいて、流速0.1m/sごとのアユの総個体数を算出し、図-1に示した。流速の増加に伴い総個体数が減少することが確認されるため、この図のみを観察すると流速の増加に伴いアユの生息数が減少するように感じられる。

図-2に流速0.1m/sごとに算出された観測点数を示した。流速の増加に伴い観測点数が減少していることが確認される。そのため、図-1に示したアユの総個体数をそのまま解析することは適切ではなく、観測点数の偏りを考慮した解析が必要と判断される。そこで、流速0.1m/sごとのアユの総個体数を各流速における観測回数で除した値、すなわち、流速別平均個体数を算出し、図-3に示した。流速別平均個体数は任意の流速におけるアユの確認数を意味するので、この数が多いほどアユは選好してその流速場に定位していることを意味する。本研究では体長、季節および地方別に整理された流速別平均個体数に基づいてアユの流速に関する選好曲線の定式化を試みる。

#### (3) 選好曲線の算出方法

第3種適正基準の代表的な手法として、Tolerance Limits分析<sup>25)</sup>、Bivariate Polynomial分析<sup>26)</sup>、河村の方法<sup>12)</sup>、Univariate Polynomial分析<sup>27)</sup>およびその他の様々な関数が挙げられる。Tolerance Limits分析は観測値の頻度に対して特定の範囲を決め、これに適正指標を割り当てる方法であるから、数学的に選好値を算出することができない。また、Bivariate Polynomial分析は2つの生息域変数を対象とした解析をする必要があるため、流速のみを生息域変数とする場合は用いることができない。そこで、Tolerance Limits分析およびBivariate Polynomial分析を除く、河村の方法、Univariate Polynomial分析およびその他の様々な関数の精度を検証する。本研究では様々な関数として、ガンマ分布およびベータ分布を取り上げた。a)～d)に、河村の方法、Univariate Polynomial分析、ガンマ分布、ベータ分布に用いられる関数を示す共に、選好曲線の作成方法を示す。変数を $x$ 、選好値を $SI(x)$ としている。

##### a) 河村の方法

式(1)に河村の方法で採用された選好曲線の関数を示す。

$$\left. \begin{aligned} SI(x) &= \exp\left[-C_3(x-C_1)^2\right] & (x \leq C_1) \\ SI(x) &= 1 & (C_1 < x \leq C_2) \\ SI(x) &= \exp\left[-C_4(x-C_2)^2\right] & (x \geq C_2) \end{aligned} \right\} (1)$$

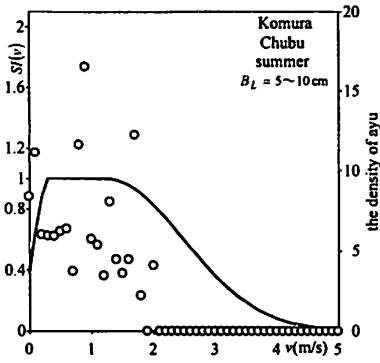


図-4(a) 選好曲線:河村の方法

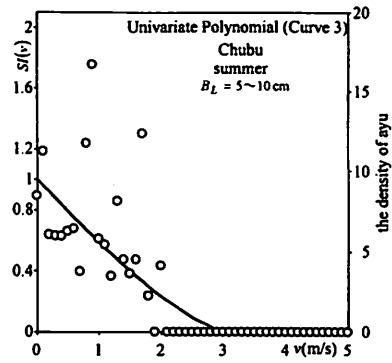


図-4(b) 選好曲線:Univariate Polynomial分析  
(3次曲線)

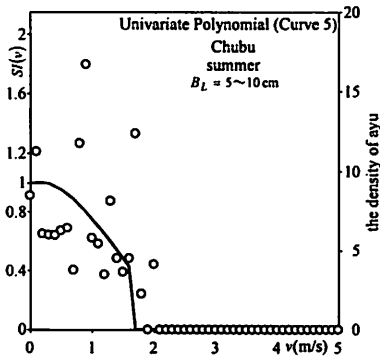


図-4(c) 選好曲線:Univariate Polynomial分析  
(5次曲線)

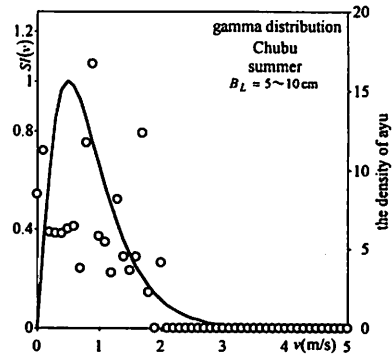


図-4(d) 選好曲線:ガンマ分布

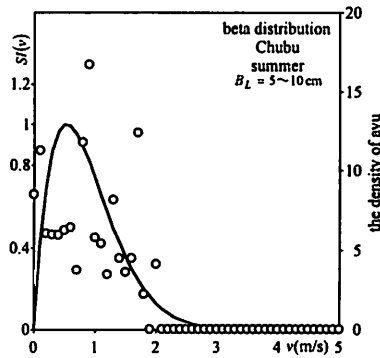


図-4(e) 選好曲線:ベータ分布

ここに、 $C_1 \sim C_4$  は定数であり、流速別平均個体数データに従い  $C_1 \sim C_4$  を決定する。

#### b) Univariate Polynomial分析

式(2)にUnivariate Polynomial分析で用いられる選好曲線の関数を示す。

$$SI(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + \dots \quad (2)$$

ここに、 $A_0, A_1, \dots$  は定数である。流速別平均個体数を式(2)に与えて最小二乗法を用いて定数  $A_0, A_1, \dots$  を求め、選好曲線の形状を決定する。通常は3次または5次関数が用いられる。

#### c) ガンマ分布

式(3)にガンマ分布で用いられる選好曲線の関数を示す。

$$SI(x) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \alpha^\lambda x^{\lambda-1} e^{-\alpha x} \quad (3)$$

ここに、 $\Gamma(\lambda)$  は次式で示されるガンマ関数である。

$$\Gamma(\lambda) = \int_0^\infty x^{\lambda-1} e^{-x} dx \quad (3)'$$

流速別平均個体数を式(3)に与えて最小二乗法を用いて平均値  $\lambda/\alpha$ 、分散  $\lambda/\alpha^2$  を算出し、選好曲線の形状を決定する。

表-2(a) 中部地方における選好曲線の誤差(春)

|             | 両村の方法 | Univariate Polynomial分析 |       | ガンマ分布 | ベータ分布 |
|-------------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|
|             |       | 3次曲線                    | 5次曲線  |       |       |
| 3~5cm (%)   | 54.18 | 26.42                   | 24.02 | 11.96 | 34.08 |
| 5~10cm (%)  | 47.69 | 20.15                   | 22.21 | 20.93 | 29.35 |
| 10~20cm (%) | 45.09 | 27.97                   | 34.22 | 22.91 | 23.88 |
| Average     | 48.99 | 24.84                   | 26.82 | 18.60 | 29.10 |

表-2(b) 中部地方における選好曲線の誤差(夏)

|             | 両村の方法 | Univariate Polynomial分析 |       | ガンマ分布 | ベータ分布 |
|-------------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|
|             |       | 3次曲線                    | 5次曲線  |       |       |
| 3~5cm (%)   | 57.91 | 43.84                   | 39.58 | 25.50 | 37.52 |
| 5~10cm (%)  | 50.34 | 23.26                   | 25.76 | 23.25 | 31.80 |
| 10~20cm (%) | 49.74 | 34.90                   | 38.18 | 26.42 | 28.82 |
| Average     | 52.67 | 34.00                   | 34.50 | 25.06 | 32.71 |

表-2(c) 中部地方における選好曲線の誤差(秋)

|             | 両村の方法 | Univariate Polynomial分析 |       | ガンマ分布 | ベータ分布 |
|-------------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|
|             |       | 3次曲線                    | 5次曲線  |       |       |
| 3~5cm (%)   | 56.42 | 39.46                   | 28.41 | 4.07  | 35.43 |
| 5~10cm (%)  | 46.26 | 21.79                   | 14.20 | 16.76 | 26.36 |
| 10~20cm (%) | 45.88 | 20.14                   | 11.06 | 17.00 | 27.86 |
| 20~ cm (%)  | 56.62 | 58.48                   | 65.83 | 30.06 | 29.91 |
| Average     | 51.29 | 34.97                   | 29.87 | 16.97 | 29.89 |

表-3 各レンジの分類

| 体長 $B_L$ (cm) | 季節 | 地方  |
|---------------|----|-----|
| 0~3           | 春  | 北海道 |
| 3~5           | 夏  | 東北  |
| 5~10          | 秋  | 北陸  |
| 10~20         |    | 関東  |
| 20~           |    | 中部  |
|               |    | 近畿  |
|               |    | 中国  |
|               |    | 四国  |
|               |    | 九州  |

## d) ベータ分布

式(4)にベータ分布を示す。

$$SI(x) = \frac{x^{\lambda_1-1}(1-x)^{\lambda_2-1}}{B(\lambda_1, \lambda_2)} \quad (4)$$

ここに、 $B(\lambda_1, \lambda_2)$  は次式で示されるベータ関数である。

$$B(\lambda_1, \lambda_2) = \int_0^1 x^{\lambda_1-1}(1-x)^{\lambda_2-1} dx \quad (4)'$$

流速別平均個体数を式(4)に与えて最小二乗法を用いて平均値  $\lambda_1/(\lambda_1+\lambda_2)$ 、分散  $\lambda_1\lambda_2/\{(\lambda_1+\lambda_2)^2(\lambda_1+\lambda_2+1)\}$  を算出し、選好曲線の形状を決定する。

以上の4つの方法を用いて、アユのデータ数が最も多い中部地方における、体長、季節および地方別に整理された流速別平均個体数を再現した。Univariate Polynomial分析については3次および5次関数を採用した。例として、アユの夏における体長5~10cmの選好曲線を図-4に示す。ここで、各選好曲線の最大値が選好値  $SI(v)$  の最大値である1.0となるようにしている。

いずれの曲線においても比較的低流速の場合に選好値が高く、高流速の場合に選好値が低くなっている。ただし、流速が0付近でUnivariate Polynomial分析の3次関数および5次関数では選好値の最大値である1.0をとるのに対

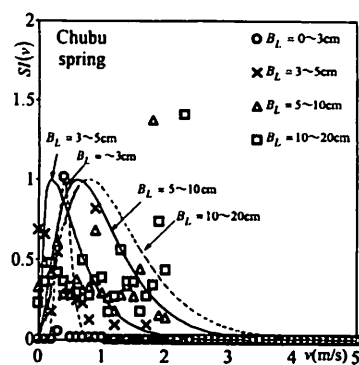


図-5(a) アユの選好曲線(中部地方:春)

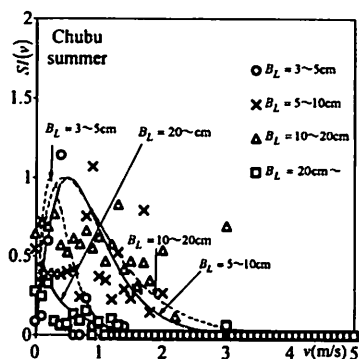


図-5(b) アユの選好曲線(中部地方:夏)

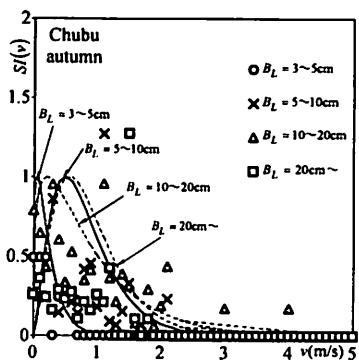


図-5(c) アユの選好曲線(中部地方:秋)

し、その他の曲線では0~0.4程度となっている。アユは瀬を好むことが知られているため、流速が0の時に選好値  $SI(v)$  が1.0をとるのは不自然であり、Univariate Polynomial分析では低流速で誤差を生じる可能性がある。

各選好曲線で得られる選好値  $SI(v)$  と観測データとの差の絶対値を各選好値  $SI(v)$  で割って平均して算出される相対誤差を表-2に示した。表-2に示す4つの方法の中で、季節および体長が変化してもガンマ分布の誤差が常に小さい。また、ガンマ分布は流速が0付近の時に選好

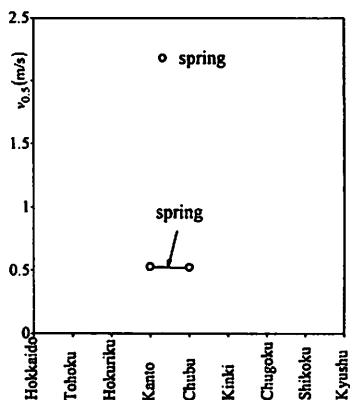


図-6(a) 体長別の半値流速( $B_L = \sim 3\text{cm}$ )

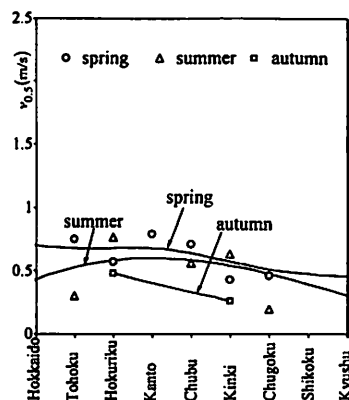


図-6(b) 体長別の半値流速( $B_L = 3 \sim 5\text{cm}$ )

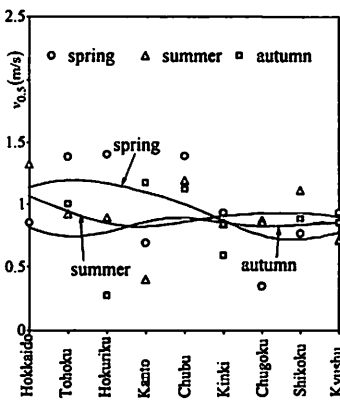


図-6(c) 体長別の半値流速( $B_L = 5 \sim 10\text{cm}$ )

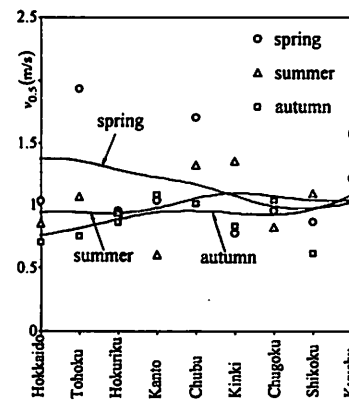


図-6(d) 体長別の半値流速( $B_L = 10 \sim 20\text{cm}$ )

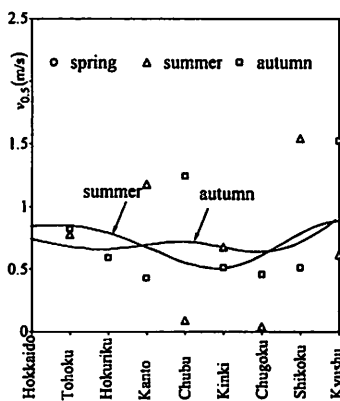


図-6(e) 体長別の半値流速( $B_L = 20\text{cm} \sim$ )

値  $SI(v)$  が小さな値を有している。そのため、本研究では選好曲線にガンマ分布を採用する。

#### 4. 解析結果および考察

##### (1) 体長、季節、地方別の解析

##### a) 体長、季節、地方別の分類方法

体長  $B_L$ 、季節および地方別に選好曲線を求めるべき

であることは既に述べた。本研究では、表-3に示すように体長を5種、季節を3種、地方を9種に分類した。その結果、135分類となった。なお、季節に冬が含まれていないのは、冬におけるアユの個体数データが存在しないためである。

##### b) 体長、季節、地方別の選好曲線

体長、季節および地方別の選好曲線をガンマ分布を用いて求めた。ここでは紙面の関係より、図-5に各季節

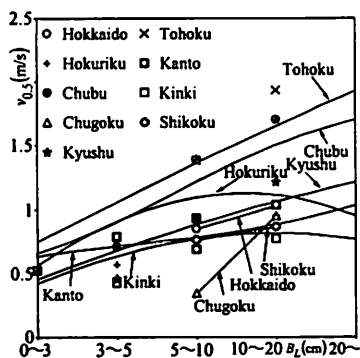


図-7(a) 季節別の半値流速(春)

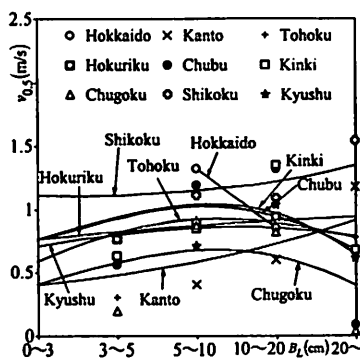


図-7(b) 季節別の半値流速(夏)

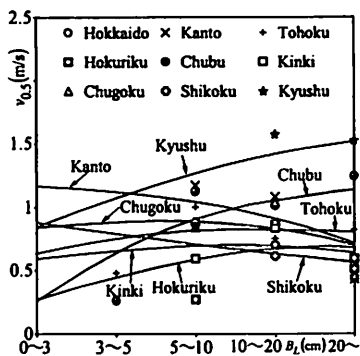


図-7(c) 季節別の半値流速(秋)

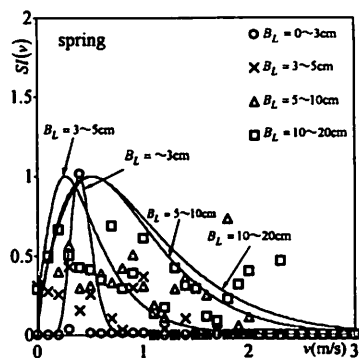


図-8(a) アユの選好曲線(春)

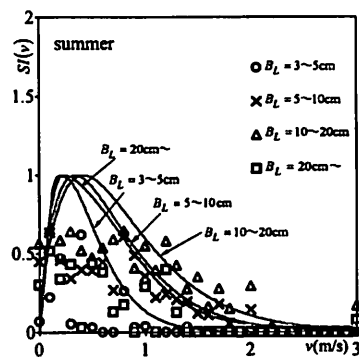


図-8(b) アユの選好曲線(夏)

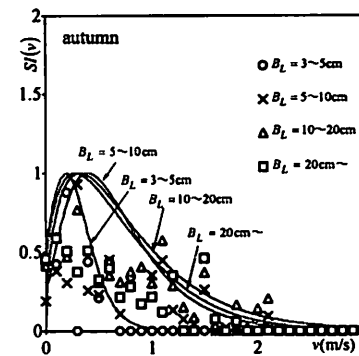


図-8(c) アユの選好曲線(秋)

における流速 $v$ と選好値 $SI(v)$ との関係の体長別変化を中部地方についてのみ示す。いずれの季節においても体長 $B_L$ の増加に伴い、ガンマ分布の裾が高値方向に広がっていく傾向が認められる。すなわち、体長の増加に伴い選好曲線が変化することが示された。ただし、季節変化については明確には判断できない。そこで、選好曲線の選好値 $SI(v)$ が最大値1.0をとった後に流速の増加に伴い減少するが、選好値 $SI(v)$ が下降時に0.5となる流速を半値流速 $v_{0.5}$ と定義する。半値流速 $v_{0.5}$ はガンマ分布の高値方向への広がりを示しており、これに着目する

ことで低流速と高流速のどちらを選好するかを容易に判断することができる。以下では、半値流速 $v_{0.5}$ に及ぼす体長 $B_L$ 、季節および地方別の影響を検討する。

#### c) 半値流速を用いた体長、季節、地方の影響検討

図-6に地方および季節変化に伴う半値流速 $v_{0.5}$ の変化を各体長別にプロットした。図中の曲線については後述する。横軸の地方の順番については、その地方の最北端および最南端の緯度の平均値を求め、その降順とした。図-6に着目すると、プロットのはばらつきが極めて大きいために全体の傾向を把握することが困難である。最

表4 選好曲線の係数

| season | $B_L$     |  | ~3cm | 3~5cm | 5~10cm | 10~20cm | 20cm~ |
|--------|-----------|--|------|-------|--------|---------|-------|
| spring | $\alpha$  |  | 0.40 | 0.70  | 0.72   | 0.91    |       |
|        | $\lambda$ |  | 0.17 | 0.37  | 0.64   | 0.86    |       |
| summer | $\alpha$  |  |      | 0.75  | 0.98   | 1.50    | 1.19  |
|        | $\lambda$ |  |      | 0.29  | 0.69   | 1.25    | 0.69  |
| autumn | $\alpha$  |  |      | 7.77  | 0.76   | 0.80    | 0.89  |
|        | $\lambda$ |  |      | 2.11  | 0.50   | 0.62    | 0.54  |

も簡単に傾向を把握する方法として、各体長および各季節において半値流速  $v_{0.5}$  が地方変化に対して線形的に変化すると仮定して最小二乗法を用いて線形式を求め、その傾きを観察する方法が挙げられる。しかし、半値流速  $v_{0.5}$  が地方変化に対して線形的に変化する保証はなく、また、周囲データから突出して値の異なるデータがごく少数でも存在する場合、この突出した少数データの値が線形式の傾きおよび切片に大きな影響を与えるため、必ずしも傾向を正確に把握できるとは限らない。突出したデータの影響を比較的受けにくい関数として、 $n-1$  次平滑化スプライン関数やベジェ関数が挙げられる。両関数共に、各プロットを必ずしも通過せずに緩慢な変化を示すことが特徴で、プロットのばらつきが極めて大きな場合に傾向を捉えることができる関数である。ただし、 $n-1$  次平滑化スプライン関数はプロットのばらつきが大きくなるときに上下に激しく変化する、いわゆるルンゲの現象が起きやすいのに対し、ベジェ関数ではルンゲの現象が起きにくいことが知られている。そこで、各季節において半値流速  $v_{0.5}$  と地方との関係をベジェ関数を用いて求め、図中に実線で示した。なお、ベジェ関数は両端に位置するプロットを必ず通るため、曲線の形状が両端の2つのデータに強く影響を受ける。そのため、本研究では両端のデータと同じ値のデータをそれぞれ1つずつ外挿して求めた。図-6 で示されたベジェ関数は幾つかの凹凸を示すものの、地方別に系統的な変化を示していないと判断される。季節との関係については、春が最も高い半値流速  $v_{0.5}$  を示し、次に夏が高い値で、秋の値が最も低い傾向が観察される。

続いて、図-7 に地方および体長変化に伴う半値流速  $v_{0.5}$  の変化を各季節別にプロットすると共に、ベジェ関数を実線で示した。秋の関東地方および中国地方以外では、各季節において体長の増加に伴い半値流速が上昇する傾向にある。図-6 に見られる地方の変化に伴うばらつきよりも、図-7 に見られる体長の変化に伴う増加量の方が顕著に大きいことが認められる。

以上のことから、アユの流速に関する選好曲線に対して、地方による影響よりも体長による影響の方が支配的であると判断され、また、季節による影響は体長ほどではないものの、ある程度存在することが判明した。ただし、アユは季節ごとに成長段階が決まるため、体長によ

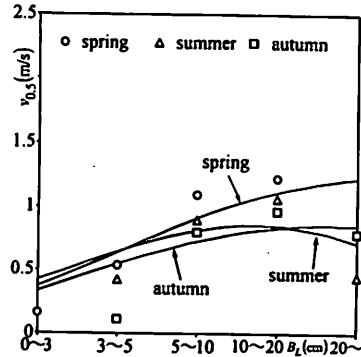


図9 全地方の半値流速

る影響と季節による影響が完全には分離されていない。そのため、どちらが真の因子かは現時点では不明である。いずれにせよ、少なくともアユの流速に関する選好曲線に及ぼす地域の影響は体長および季節による影響よりも微小であることが判明したため、以下では地方を区別せずに全地方データを統合して解析を行う。

## (2) 全地方を統合したデータを用いた体長、季節別の解析

図-8 に全地方を統合したデータを用いた流速  $v$  および体長  $B_L$  と選好値  $SI(v)$  との関係を各季節ごとに示し、表-4 に選好曲線の式(3)における係数  $\alpha$  および  $\lambda$  の値を示す。すべての季節において、体長  $B_L$  が 3cm 以下および 3~5cm の選好曲線は低流速側に分布しており、体長の増加に伴い高流速を選好していることがわかる。また、3つの季節の中で春(図-8(a))の選好曲線が最も高流速側に分布している傾向が見られる。

図-9 に全地方を統合したデータを用いて得られた体長  $B_L$  と半値流速  $v_{0.5}$  との関係を季節別に示す。3つの季節において体長 20cm 以上を除くと、体長  $B_L$  の増加に伴い半値流速  $v_{0.5}$  は増加傾向にある。また、全体的な傾向としては、春が最も半値流速が高く、次に夏、さらに秋と低下する傾向にある。

## (3) 得られた選好曲線に対する考察

図-8(a)~(c)に着目すると、図-8(a)に示された春のガンマ分布の裾が夏および秋よりも高流速側に広がっており、春季にアユが高流速を好む傾向にあることが理解される。これは、春になるとアユは河口から上流へ遡上を開始するが、その際に呼び水効果のある高流速域で遡上行動を行うためと考えられる。また、図-8 のすべての季節において、体長の増加に伴い高流速を選好する傾向が見られる。一般に、遊泳力は体長に比例し、突進速度および巡航速度共に体長に正比例することが知られており、生理運動学的にも裏付けられる。ただし、体長が 20cm 以

上では低流速を好む理由は現在不明である。

## 5. おわりに

本研究は、河川水辺の国勢調査のデータに基づいてアユの流速に関する選好曲線を求めたものである。以下に結論を示す。

- (1) 第3種適正基準の選好曲線の作成方法である河村の方法、Univariate Polynomial分析、ガンマ分布およびベータ分布を比較検討した結果、ガンマ分布が最もアユの流速に関する選好曲線の再現性がよいことが判明した。
- (2) 地方、季節および体長の3因子がアユの選好流速に及ぼす影響を解明するため、これらの3因子をレンジ分けして検討したところ、地方変化による影響をほとんど受けないことが示された。一方、体長による影響が支配的であるが季節による影響も若干受けることが明らかとなった。
- (3) アユの流速に関する選好曲線としてガンマ分布を採用し、ガンマ分布を構成する各係数が体長および季節ごとに求められた。

謝辞：本研究を行うに当たり、北川漁協の長瀬一己組合長、延岡五ヶ瀬川漁協の須田政道組合長、工藤平寿郎理事、甲斐勝組合員、土田栄組合員、国土交通省九州地方整備局延岡河川国道事務所の高尾秀敏副所長、甲斐浩幸課長、川越邦俊専門員、甲斐隆嗣技官、青木繁技官らには貴重なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 多自然型川づくりレビュー委員会：多自然川づくりへの展開、2006。
- 2) 環境省編：生物多様性国家戦略、ぎょうせい、2002。
- 3) U.S. Fish and Wildlife Service: Habitat Evaluation Procedures (HEP). U.S. Dept. of Interior, Fish and Wildlife Service, Ecological Service Manual, 1980。
- 4) 田中章：何をもって生態系を復元したといえるのか？生態系復元の目標設定とハビタット評価手続き HEP について、ランドスケープ研究, Vol.65, No.4, pp.1-5, 2002。
- 5) 小出水規行、竹村武士、奥島修二、山本勝利、鉦原周：HEP法による農業排水路におけるタモロコの適性生息場の評価：千葉県谷津田域を事例として、河川技術論文集, 第11巻, pp.489-494, 2005。
- 6) 風間聡、松本哲、沢本正樹、浜本洋：HSIモデルによる生物生息場推定を利用した流域環境評価、土木学会論文集 B, Vol.63, No.4, pp.338-350, 2007。
- 7) 中村俊六、石川雅朗、築坂正美、東信行、中村緩徳：河川における魚類生息環境評価 (IFIM 適用) のための基礎調査、第2回河道の水利と河川環境シンポジウム, pp.127-134, 1995。
- 8) 川本泰生、関根雅彦、楊継東、今井崇史、浮田正夫：IFIMにおける河川生態環境評価法の精度と普遍性に関する一考察、環境システム研究, Vol.26, pp.447-452, 1998。
- 9) 辻本哲郎、永禮大：魚類生息環境変質の評価のシナリオ、水工学論文集, 第43巻, pp.947-952, 1999。
- 10) 辻本哲郎、田代喬、伊藤壯志：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道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。
- 11) 田代喬、辻本哲郎：河床掘乱頻度を指標とした生息場評価による瀬・淵構造の変質に関する考察、水工学論文集, 第46巻, pp.1151-1156, 2002。
- 12) 河村三郎：リバーフロント整備センター、2003。
- 13) 傳田正利、天野邦彦、辻本哲郎：物理生息場モデルを用いた一時的水域内の物理環境特性が魚類生息に与える影響の評価、水工学論文集, 第51巻, pp.1297-1302, 2007。
- 14) 須藤達美、永瀬恭一、道上正規、檜谷治：PHABSIMを用いた純淡水魚類生息場の定量的評価に関するケーススタディ、水工学論文集, 第44巻, pp.1203-1208, 2000。
- 15) 砂田憲吾、熊木明子、川村和也：河川の流況特性による魚類の生息適性のマクロな評価に関する検討、水工学論文集, 第47巻, pp.1123-1128, 2003。
- 16) 知花武佳、辻本哲郎、玉井信行：物理環境の階層構造を考慮した魚類生息場評価法の開発、水工学論文集, 第48巻, pp.1567-1572, 2004。
- 17) 金亨烈、玉井信行：乙川における IFIM を用いた魚類の生息域評価に関する研究、環境システム研究, Vol.24, pp.77-82, 1996。
- 18) 辻本哲郎、永禮大：河川の魚類生息環境評価 石川県森下川の例、第4回河道の水利と河川環境シンポジウム, pp.207-212, 1998。
- 19) 川那部浩哉、水野信彦：川と湖の魚1、保育社、1998。
- 20) 川那部浩哉、水野信彦：川と湖の魚2、保育社、2000。
- 21) アメリカ合衆国内務省・国立生物研究所原著作、中村俊六・テリー・ワドゥル訳：IFIM 入門、財団法人リバーフロント整備センター、1999。
- 22) 金亨烈、玉井信行、松崎浩憲：流量増分生息域評価法における生息数基準に関する研究、水工学論文集, 第40巻, pp.151-156, 1996。
- 23) Mathur, D.: A critique of the instream flow incremental methodology, *Can. J. Fisheries and Aquatic Sci.*, Vol.42, pp.825-831, 1985。
- 24) 黒田直樹、玉井信行、知花武佳、鈴木一平：瀬淵構造を考慮した魚類生息域評価法に関する研究、河川技術に関する論文集, 第7巻, pp.303-308, 2001。
- 25) 知花武佳、松崎浩憲、玉井信行：多自然型河川整備のための魚類生息環境評価、第4回河道の水利と河川環境シンポジウム, pp.201-206, 1998。

- 26) 川本泰生, 関根雅彦, 楊継東, 小林宏正, 浮田正夫: IFIM  
における魚の選好曲線の河川間の互換性に関する検討, 環  
境工学研究論文集, 第 36 巻, pp.271-276, 1999.
- 27) 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.
- 28) 北村忠紀, 田代喬, 辻本哲郎: 生息場評価指標としての河  
床攪乱頻度について, 河川技術に関する論文集, 第 7 巻,  
pp.297-302, 2001.
- 29) 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,  
2001.
- 30) 知花武佳, 玉井信行: 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, 水工学論文集, 第 46 巻,  
pp.1145-1150, 2002.
- 31) 鬼束幸樹, 永矢貴之, 東野誠, 高見徹, 大塚法晴, 秋山壽  
一郎, 尾関弘明, 白石芳樹: アユの産卵に適した水深およ  
び流速の選好曲線に関する検討, 河川技術論文集, No.11,  
pp.483-488, 2005.
- 32) 水野信彦: 魚にやさしい川のかたち, 信山社出版, 1995.
- 33) Nishida, M.: Geographic variation in the molecular, morphological and  
reproductive characters of the Ayu *Plecoglossus altivelis* (Plecoglossidae) in  
the Japan-Ryukyu Archipelago, *Japan J. Ichthyol.*, Vol.33, pp.232-248,  
1986.

(2009. 5. 22 受付)

### A Proposal of Preference Curves of Velocity for Ayu

Kouki ONITSUKA<sup>1</sup>, Takayuki NAGAYA<sup>2</sup>, Yoshiki SHIRAISHI<sup>2</sup>, Asuka UKESE<sup>2</sup>,  
Makoto HIGASHINO<sup>3</sup>, Tohru TAKAMI<sup>3</sup>, Shoji YOKOMINE<sup>4</sup>, Juichiro AKIYAMA<sup>1</sup>,  
Atsushi ONO<sup>1</sup> and Taisuke SERIKAWA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Civil Engineering, Kyushu Institute of Technology

<sup>2</sup>CTI Engineering Co., Ltd.

<sup>3</sup>Oita National College of Technology

<sup>4</sup>Ministry of Land, Infrastructure and Transport Japan

<sup>5</sup>Applied Science for Integrated System Engineering, Kyushu Institute of Technology

To conduct an environmental assessment is necessary before large scale improvement of river due to the environmental assessment law was established in 1997. The most famous environmental assessment method for fish living in river is PHABSIM which calculate the WUA(Weighted Usable Area) based on CSI(Composite Suitability Index). CSI is calculated with SI(Suitability Index) concerning with flow depth, velocity, substrate, cover and so on. Some researchers suggested SI for several fishes living in Japanese rivers. However, those are not corresponding. In this study, a lot of data of the flow velocity where ayu is living were collected and preference curves are suggested. It was found that the preference curves are the same, irrespective of regional difference and also that the effects of the seasonal climate on the preference curves are small in compared with that of body length. The preference curve of ayu concerning with velocity is suggested based on seasonal climate and body length.