

環境傾度を考慮した魚類生息環境評価法 に関する研究

SUITABILITY CURVES FOR FISH HABITAT EVALUATION WITH A CONCEPT OF ENVIRONMENTAL GRADIENT

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 a powerful technique for habitat evaluation utilizing physical parameters that we are able to control in a design. But there are still several difficulties to apply it to real river improvement works. In present simulation, the same magnitude of physical parameters gives the same points in habitat evaluation. However, from ecological point of view the same condition in physical parameter, for instance, depth does not always give the same impact on fishes when a location in a rapid-pool system is different. In this study we improved a suitability curve of fishes taking environmental gradient into consideration for pools. Although we need to improve accuracy of a suitability curve that include environmental gradient, a new basic methodology has been formulated.

Key Words : PHABSIM, suitability curves, environmental gradient

1. はじめに

流量調整や河川改修といった様々な人為的インパクトが、魚類の生息環境に及ぼす影響を定量的に予測、評価するモデルは今のところ確立されていない。こういった目的にあうものとしては、PHABSIM が有名であるがそこにはいくつかの欠点が指摘されている。本論文で着目した問題点は、1) 水深や流速といった環境因子を独立に考えている点。2) 生息場が点で考えられているために、その位置情報が入っていない点。3) 早瀬や淵といった近くに存在すべき環境の評価が全く入っていない点。の3つである。そして、題目にもあるように「環境傾度」と言う概念を導入することにより、これらの問題を解決する手法を提案した。未だ荒削りではあり、改良の余地はあるものの、有効な手段であると考えられる。

2. 適性基準の作成

適性基準はその作成方法によって大きく二つのグループに分けることができる。一つは専門家の知見や文献を基に作成される第一種適性基準であり、もう一つは現地観測により得られた魚類密度を 0~1 に基準化して

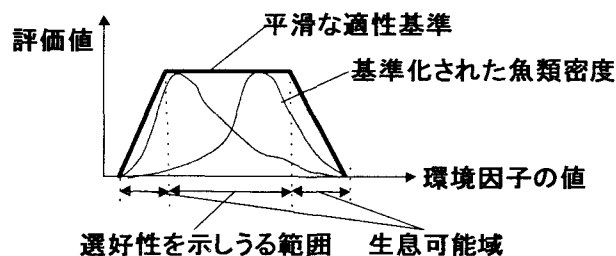


図-1 適性基準作成のイメージ

作成される、第二種適性基準、第三種適性基準、及び第四種適性基準である。しかしながら前者は、未だ多くの情報が集まっておらず、その値の決定が困難であるという問題を抱えている。また、後者はその他の環境の影響で大きく変動するために、ある一時期に得られた情報をそのまま評価基準として用いるのは適切であるとは考えにくい。最も理想的なのは、魚類密度が最大値を取りうる範囲全体に適性値1を与え、生息可能な範囲に 0~1 の適性値をあたえる平滑な適性基準を作成することである(図-1)。最終的にこのような形の適性基準を作成するには、多くの情報が集まるのを待つこととなるが、本研究では、生息密度から作成された適性基準(さらに、環境の偏差まで考慮した第三種適性基準)をまず作成し、

それに図鑑などの知見を加えて平滑な適性基準を作成するという方針を取る。しかし、最終的に適性基準を決定するには、あらゆるフィールドで魚類生息場の選好性を把握していく必要がある。

3. Ivlev の餌選択指数を用いた第三種適性基準の作成

第三種適性曲線は、環境の偏りを補正されたものであり、選択度と呼ばれる値を用いる。選択度は、

$$E_i = U_i / A_i \tag{1}$$

(但し、 E_i :選択度、 U_i :魚による環境 i の利用度、 A_i :環境 i の供給度)

で与えられ、この式を用いた場合、適性指数は 0～1 の値で与えられる¹⁾。しかし、これはあくまでも魚類密度を基準化したものであり、この値だけでは、たまたま魚がそこにいたのか(生息可能な領域であるか)、積極的に利用していたのか(生活に利用している生息域であるのか)の判断が困難となる。そこで Ivlev によって提案された、餌選択指数と呼ばれるものを用いることとした。これは魚の個体数に比べて利用度の低い環境には負の値を与え忌避度を表すものであり、次式で与えられる²⁾。

$$E_i = (U_i - A_i) / (U_i + A_i) \tag{2}$$

この指標は、一匹もその環境を利用しなかった場合に-1となり、魚が特別な選好性や忌避性を示さずランダムに存在したと考えられる場合に0となる。この式を用いて、適性指数を計算し、横軸に水深縦軸に流速を取った平面上に評価値を表したものの一例が図-2 である。ただし値はわかりやすくするために、-1、-0.5、0、0.5、1の五段階で示した。なお、データの無い地点は0として扱っている。ここでは-1から1までの値で結果を出しているために、どの領域を使用し、どの領域を使用しなかったかが一目でわかる。そして、同様に水深-流速平面上で水理量や河床型の区分を行った図-3と比較することもできる。このように、河床型との関連を見たり、各環境因子の影響の強弱を見たりするには非常に有効な手段である。また、図-4の左に示すのは、水深-流速平面上で適性値を計算してから、選好性を示しうる範囲を判断した場合の例であるが、もし最初から水深と魚類密度の関係を求めていれば、図中右に示すように実際の選好性をうまく表現できない。これは、同じ水深でも様々な流速を持った環境が存在するためであり、この様なずれを防ぐためには水深-流速平面上の適性値が有用である。ただし、水深と流速のみから適性値を判断するならば、この適性基準をそのまま用いればよいが、対象となる環境因子が3つ以上になる場合には、総合適性値の判断が困難である。そこで、図-2のような適性基準をも

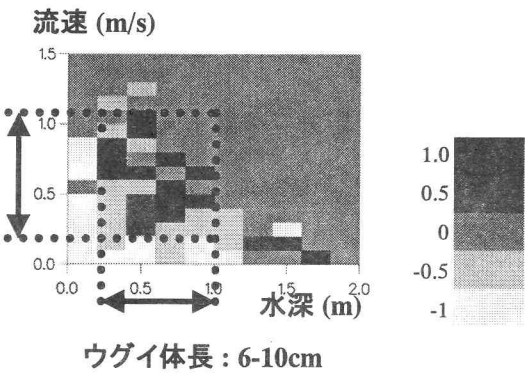


図-2 Ivlev の餌選択指数を用いた適性基準の一例

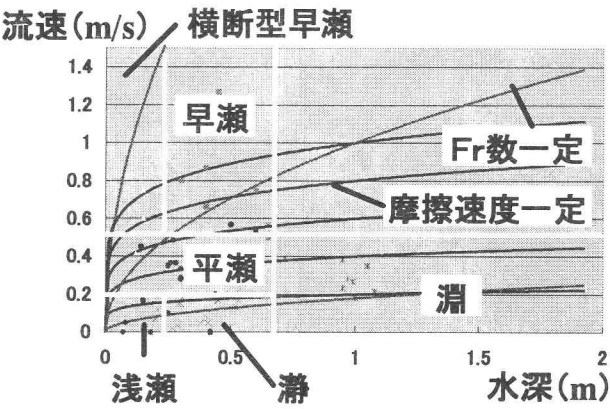


図-3 水深—流速平面上で表される情報

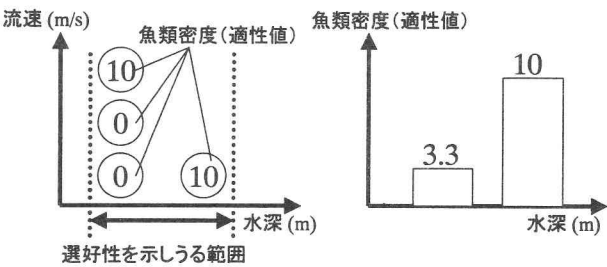


図-4 水深—流速平面上で適性値を表現する場合(左)と水深だけの適性値を考える場合(右)の結果の違い

とに、水深、流速それぞれについて図-1のような平滑な適性曲線を作成し、二つの適性曲線で図-2の適性領域を表現することにした。

4. 瀬—淵構造に関する環境傾度を考慮した適性評価

前章においては環境因子として水深、流速を用いて魚類の生息条件を表す際に、横軸に水深、縦軸に流速をとったグラフにその適性値を三次元的に表せば、瀬や淵といった河床型とも比較しつつその生息場条件を与えら

れることを示した。しかし、ここで残されている問題は、水深や流速といった値はあくまでも一点の環境を示すものであるということである。実際は連続した環境の中で、ある程度の広さを持った環境が魚類の生息場となっているはずである。そう考えると、水深や流速の絶対値と言った情報も大切ではあるが、魚のいた場所が周囲の環境の中でどういった位置づけになるのかを考える必要がある。とはいっても、周囲の環境の情報をすべて条件として与えたのでは、サンプル数の割に条件が増えすぎる。そこで、そのような位置情報を与えるものとして、河床型の利用を考えた。前章で述べたように水深、流速で河床型が完全に表現できれば、一点の水深、流速の値だけで十分なのであるが、たとえば淵頭と淵尻といったように同じ様な水深、流速の値を取っていても周囲の環境を考えれば全く異なる環境が存在し、これらを区別することはできない。そこで、水深、流速に加えて河床型を定量的に表現する因子を求めたいのであるが、ここでは縦断方向と横断方向の二つの軸を設定しその軸上での値を考えることとした。ここで設定した軸とは、滞筋に沿った流下方向には水深が最も浅くなる早瀬の一点と最も深くなる淵の一点、横断面方向には最も水深の深くなる滞筋の一点と水際の一点をとり、この二つの両極端な環境間の環境傾度を与えるものである。環境傾度は環境の程度を定量的に表したものであるが、今回は水深を用いて考える。縦断方向における環境傾度を用いて位置情報を考える際には、早瀬と淵の水深を h_0 、及び h_1 とした時、その間の水深 h_x を式(3)に代入し、そこから位相 θ_x をもとめた。

$$h_x = \frac{(h_0 - h_1)}{2} \cos \theta_x + \frac{(h_0 + h_1)}{2} \quad (3)$$

位相 θ_x の範囲を $0 \sim 2\pi$ までとすると、一つの水深に対して、二つの位相が求まることとなる。そこで、淵より上流（早瀬→淵）の場合は 0 から π の値を、淵より下流（淵→早瀬）の場合は π から 2π の値を与えることとして、同じ水深でも淵頭なのか、淵尻なのかを区別した。これを河床型位相と呼ぶこととし、イメージで示したものが図-5 である。

次に横断方向について考える。基本的には縦断方向と同じ考え方で、滞筋に対する相対的な水深を位相で表すこととする。先と同様に、断面内の水深 h_y 、滞筋の水深 $h_{\max}$ を次式に代入して、 θ_y を求める。

$$h_y = h_{\max} \sin \theta_y \quad (4)$$

これも、蛇行部の内岸側は 0 から $\pi/2$ 、蛇行部の外岸側は $\pi/2$ から π といった形で、同じ水深でも分けること

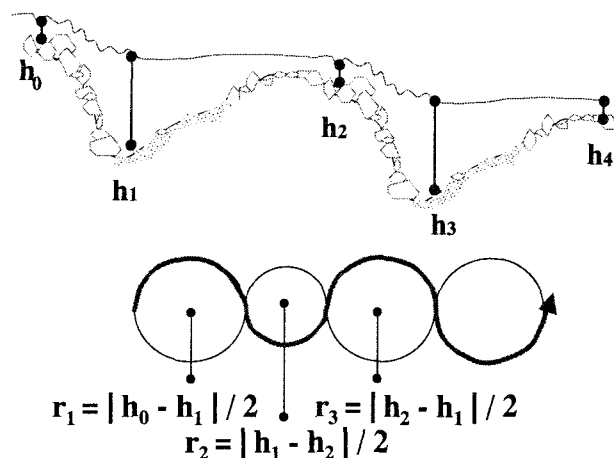


図-5 河床型位相の概念図

ができる。瀬脇の評価においても、一方はコンクリート護岸が形成されていて、もう一方はツルヨシ群落であるといった場合に、同じ水深、流速を取っていても状況は全く変わるが、そういったこともこの位相で区別すると便利であろう。ただし、今回の調査区域においては、左右岸に大きな差がなかったために区別はせず、位相は 0 から $\pi/2$ で与えている。この位相を河道断面位相と呼ぶこととする。

このように物理環境を把握するものとして、従来の水深、流速に加えて河床型位相、河道断面位相、という4つの因子が現れたことになる。これら4つの因子それぞれについて適性基準を作成し、そこから求まる適性値を掛け合わせれば総合評価値がもとまるが、前章で述べたように、おのおのの因子は独立ではないために情報のロスが生じる。そこで、今回はまず河道断面位相を用いて、水深が滞筋の半分以上あるか無いか（河道断面位相が $\pi/6$ より大きいかな否か）で二つに分けた。そして、それぞれ「岸寄り」、「滞筋寄り」という二種類の環境について、残る3つの因子に対する適性基準を作成することとした。そして、前章同様の手法を用いて環境因子間の関係をみつつ適性基準を考えることにするが、河床型位相は水深から求まったものであるため、河床型位相と流速平面上に Ivlev の餌選択指数を用いた適性基準を作成した。こうしてウグイの体長 6-10cm のものについて作成したのが図-6 である。

この図から読みとれることは、同じ様な流速を取っていても、生息場は早瀬の中心から淵頭にかけての領域に集中しているということと、岸寄りの所では生息域が早瀬周辺に集中しているということである。すなわち、これらからわかる生息域を図で示すと図-7 のようになる。

これで、実際の生息密度を元に第三種適性基準が作成された。そこで、次は図鑑などの知見を加えて平滑な適性基準を作成することになる。また、先に述べたとおり環境因子が3つ以上あるため、それぞれの環境因子に

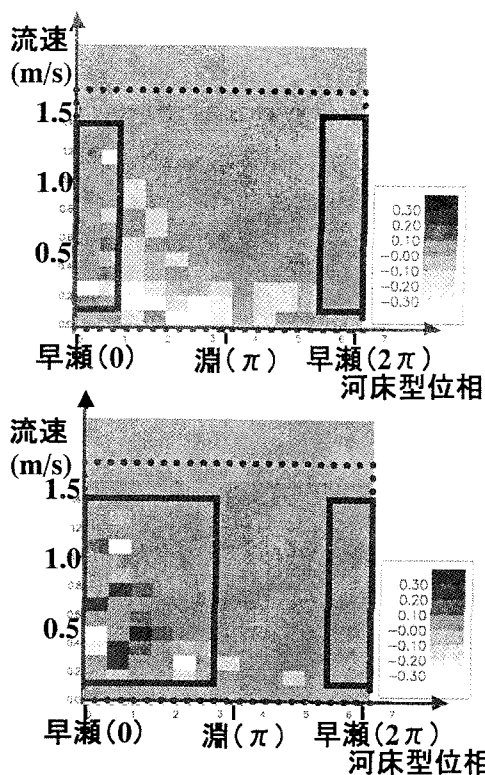


図-6 ウグイ (体長 6-10cm) に関する適性基準
(上：岸寄り，下：滞筋寄り)

対しての適性曲線に変換する。ここで、図-2 及び図-6 を見れば、流速は 0.2m/s～1m/s のあたりで高い選好性を示しており、0m/s～1.2m/s の範囲であれば生息できることがわかる。また、図-2 より水深に関して、0.2m～1.8m の広い範囲で選好性を示す領域が出現していることがわかる。そして、河床型に関しては、滞筋寄りならば早瀬から淵にかけて、岸寄りならば早瀬の脇にすることがわかる。中村が提案する第一種適性基準³⁾も、これと範囲は類似しており、流速は 0.1m/s～1.4m/s において高い選好性をもち、0m/s～1.8m/s で生息可能、水深は 0m 以上で生息可能であり 0.4m 以上で高い選好性となっている。そこで、今回は水深、流速に関しては中村の第一種適性基準を使用し、河床型に関してはこれまでの調査で適性ありと判断された領域に評価値 1 をその他の領域に評価値 0.5 を与えることとする。ちなみに、これらの適性基準により高い選好性を示すと考えられる領域と生息可能と考えられる領域を図-6 中に枠で囲って表記した。

こうして平滑な適性基準が作成されたわけであるが、これらを用いて位相を考慮した WUA_p を計算する。 WUA_p は

$$WUA_p = \sum_i^n S_{pi} \times S_{vi} \times S_{di} \times A_i \quad (5)$$

ただし、

S_{pi} : セル i における河床型位相の適性値

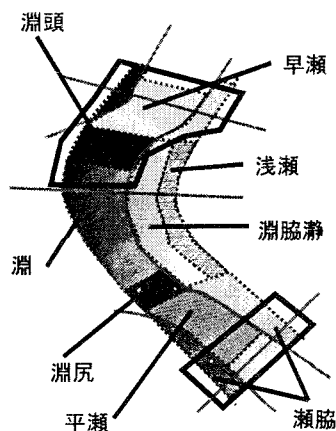


図-7 ウグイ (体長 6-10cm) の生息域

表-1 実測値と評価値の相関係数

実測値との相関係数	97年秋	98年春	98年夏
河床型考慮した場合	0.455	0.578	0.387
河床型考慮しない場合	0.313	0.425	0.336

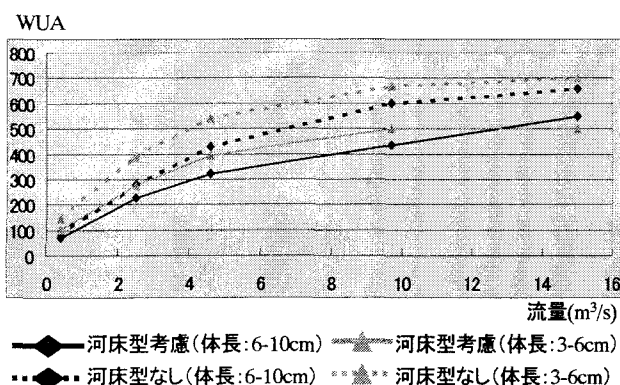


図-8 河床型を考慮した場合としない場合の WUA 変化の比較

S_{di} : セル i における水深の適性値

S_{vi} : セル i における流速の適性値

A_i : セル i の水表面積

で計算される。また、適性値を掛け合わせたものと、魚の個体密度との相関係数を取ったものが表-1 である。河床型位相を考慮することによりその精度は向上している。

水理計算は汎用ソフト MIKE 11 を用いて、流量 0.4m³/s～15m³/s の場合に関して一次元不等流計算を行った。得られた断面平均流速をもとに、断面内の流速はその水深に比例するものと仮定して横断方向の流速分布を求めた。こうして得られた、各流量に対する水深、流速分布を用いて WUA を求め、流量との関係を図で表したものが図-8 である。

図のように、河床型を考慮した場合には河床型を考慮しない場合に比べて少し評価値が下がる程度であり、今回のケースに関しては大きな違いは見られなかった。さらに、いずれの場合も、流量の増加に伴って、その評価値が単調に増加していく様子が見て取れる。

5. 淵造成の効果を評価できるか

前章で求めた WUA の結果は、流量が増加すればするほどウグイの生息環境は改善されるというものであった。しかし、疑問が残る。確かに $15\text{m}^3/\text{s}$ 程度はさほど大きな流量ではないが、現状の河道にその量が流れたとすれば、早瀬や淵のメリハリは無くなり、湍筋上では最も浅いところでも 70cm 以上の水深を持ってしまう。そのような状況では、餌生物にとっての藻類の生息環境は、低下していると考えられるが、これまでの経緯を見てわかるとおり、WUA はあくまでも魚のいた場所の評価であり、そういった周囲の環境の評価は組み込まれていない。

ここで別のケースを考えてみる。近頃、土砂が堆積し浅く静のようになってしまった淵を再び深く掘るという試みがなされており、この作業により魚類の現存量が増加したという報告がなされている⁴⁾。このような状況を、PHABSIM ではどのように評価できるだろうか。そこで、対象地区である永田地区の断面データにおいて淵の水深を最大で 1m 深く掘り下げたと仮定して、PHABSIM を適用した。すると、淵の造成により WUA は低下するという結果となった。この原因は、WUA の値が水表面面積に大きく依存しており、淵を深く掘り下げることでその水表面面積が減少し、総合評価値が下がったからである。また、適性基準は魚が選好性を示す可能性のある場所を表すものにすぎず、淵が深くなったというような質の改善を表現することはできない。

そこで、次のような評価体系の枠組みを考えた。まず、これまで適性曲線によって表されてきたものは魚類が日常生活(主に採餌行動)で利用するための条件である。それに対して、淵というのは淵で採餌行動をとる魚類にとってはもちろんのこと、早瀬などで採餌行動をする魚にとっても増水時や鳥類などからの避難場として利用される、共用の場なのである。同時に早瀬は、そこで採餌行動をするものはもちろんのこと、淵において、浮遊藻類を待ちかまえる魚に餌を供給する場なのである。実際に、先に述べた淵造成の報告では淵のみならず、近隣の早瀬や早瀬での現存量も増加している。そこで、採餌行動で利用される可能性のある領域がどれくらい存在するかというこれまでの評価に加えて、早瀬が一つ存在するリーチスケールに餌を供給する早瀬の環境がどれくらい整っているか、流れてきた浮遊物が滞留してそれを待ち受ける魚にとって好適な淵頭(淵の入り口)の環境がどれくらい存在するか、そして十分なカバーを提供できる淵の環境

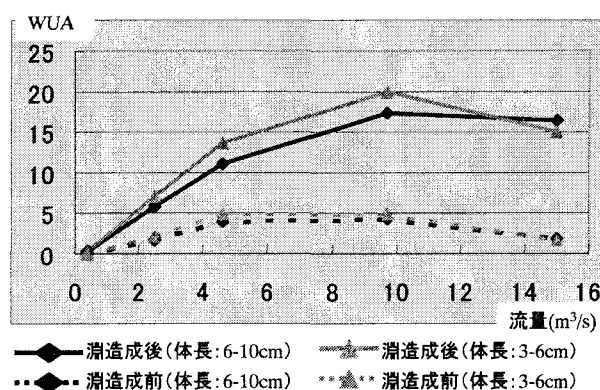


図-9 淵造成前後での総合的 WUA と流量の関係

がどれくらい存在するかというこの3つの要素に対する評価を行った。評価基準としては、早瀬は底面まで十分に光が届き、かつ大型魚が遡上可能と考えられる、 $40\text{cm} \sim 60\text{cm}$ が最も好適であり、淵頭に関しては流速の低減率がある値以上の環境が好適であるとした。淵に関しては水野の提案を元に水面幅の1割以上の水深が最も好適という基準を作成した⁵⁾。それらの基準から求まる評価値とこれまでの WUA_p を掛け合わせたものを本論文では“総合的 WUA”と呼ぶこととし、ウグイに関しての総合的 WUA と流量の関係を示したものが図-9 である。ここでの大きな特徴は、まずこれまでは単調増加していた総合評価値に最適点が現れたということと、淵造成後にその総合評価値が増加するということである。もちろん、これは仮定した基準を用いた結果であり、厳密な議論はできない。しかし、このように早瀬が一つとなった単位形態のなかでそれぞれの場所の機能を考え、魚のいる場所のみならず全体を評価することで、本当の意味での環境傾度を考慮した評価が可能となるであろう。

6. 結論

本論文ではいくつかの角度から PHABSIM の改良を検討してみた。その結果、大きく分けて以下の3つのアプローチが提案できた。

- 1) 水深-流速平面上に Ivlev の餌選択指数を用いた適性値を表すことで、水深、流速に対する選好性や忌避性を河床型とも比較しつつ理解できる。
- 2) 縦横断に環境傾度の軸を設定し、早瀬-淵構造の中での位置情報を与える“位相”を用いることで、評価値の精度は向上する。
- 3) 魚のいた場所のみならず、影響を及ぼすであろう範囲全体を評価すれば、その結果は大きく変わってくる。こういった要素をどのように評価するのか、今後の課題となる部分は多いが、今回提案した総合的 WUA の考え方は、そのような早瀬-淵構造全体をとらえる評価法としての可能性を持つものである。

謝辞：本研究は河川生態学術研究会多摩川グループの総合的な調査研究の一環として実施されたものである。魚類データを提供して下さった、君塚芳輝氏及び、お世話になった研究会の皆様にご心より感謝いたします。

参考文献

1) Bovee, K.D. et al.: Stream Habitat Analysis Using The Instream Flow Incremental Methodology. U.S. Geological Survey Biological Resources Division, Information and Technology Report 1997-0006 : 70-722. 1997.

2) 佐原雄二: 魚の採餌行動, 東京大学出版会, 1993.

3) 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.

4) 玉井信行, 水野信彦, 中村俊六: 河川生態環境工学, 東京大学出版会, 1993.

5) 水野信彦: 淵の水深と魚の生態, 第3回応用生態工学シンポジウム講演集, 財団法人 ダム水源地環境整備センター, pp11-17, 1996.

6) 宮地傳三郎, 川那部浩哉, 水野信彦: 原色日本淡水魚類図鑑, 1996.

(2000. 4. 17 受付)