

# 使ってもらえる河川魚類生息場評価・予測手法の開発を目指して

山口大学大学院創成科学研究科教授（九州環境管理協会 理事） 関根 雅彦

## 要旨

漁業生産量を予測するためには、魚類の選好性に基づく移動を計算できる必要があることが明らかになった。そのため、魚類の選好性を柔軟に表現できる修正乗法形選好強度式を提案した。これに行動モード毎の選好性と行動圏を組み合わせることで、小河川における魚の分布を再現できることを示した。以上の研究で得た知識を応用し、河川事業の実務で実用されることを意図した簡易指標である生態環境多様性指数 EED を提案し、EED が魚種数と正の相関を持つことを示した。さらに、EED を簡易に計算するためのソフトウェア DHABSIM を開発し、河川浚渫事業の前後における魚種数の変化を予測することに成功した。

## 1. 魚の遊泳で生物量が変わる

私自身の本務である大学教員としての定年を 2 年後に控え、私の研究の中でも一つの軸をなす魚類生息場評価・予測手法についてこの機会を借りてまとめてみたい。私が山口大学に奉職した 1983 年当時、河川や海域の富栄養化とその漁業影響が研究室の研究テーマの一つであった。プログラミングが得意であった私は、魚類まで含めた水域生態系モデルを作成し、その可否を水産の専門家に相談したところ、「いくら物質収支のとれたモデルを作っても、水温がちょっと変わるだけでその魚自体が対象水域から移動していなくなってしまうよ」と

と言われてしまった。そこで、当時目新しかったオブジェクト指向言語を用い、魚の遊泳移動を表現できるシミュレーションモデルを作成した(図 1)。この研究では、長崎県の志々伎湾を対象に、マダイの遊泳移動を考慮するかどうかでバイオマスが大きく変化することを示すことができた<sup>1)</sup>。ただし、マダイの遊泳移動を引き起こす選好性は恣意的に与えたものであり、マダイの実際の選好性を反映しているかどうかはわからない。マダイの選好性についての教を専門家に請うたところ、「そんなのシミュレーションするのは無理だよ」とあっさり言われてしまったためである。

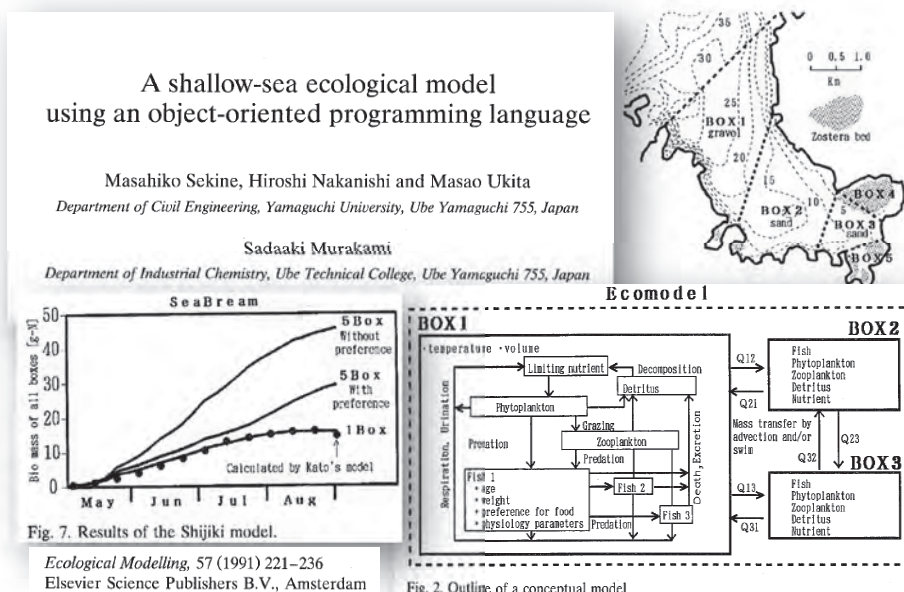


図1 選好性による魚の遊泳移動を考慮すると生物量が変わる

## 2. 実験室での選好性の計測と修正乗法形選好強度式の発見

そこから、魚の選好性を定式化する研究が始まった。当時はインターネットも未発達だったことや、自分自身の英語能力もまだまだだったこともあり、既存の類似研究を見つけないことができず、手探りで魚の好みを数値化する実験方法を考えた。予算もないことから廃棄されていた小さなオキシジェンディッチの実験水路の直線部を金網で仕切り、上流と下流に河床などが異なる環境を設定して、当時容易に現地調達できたアブラボテやヤリタナゴを用いて上下どちらの環境を選ぶか実験した。上流と下流では変更できる環境条件が限られることから、翌年には左右の水路が下流端で接合された実験水路を考案し、流速や水質・水温などを独立して変更した実験が行えるようになった。図2に当時の実験結果を示す。この研究では、水深、流速、水温、濁度、遮蔽物(隠れ場所)の有無、餌料の有無、植生の有無などに対する選好性の他に、これらのうち2条件を組み合わせた実験も行った。そこで大きな困難に出会った。流速だけ、遮蔽物だけだとそれぞれ明確な選好性が見られるのに、

流速と遮蔽物を組み合わせると、流速への選好性が消え去ってほとんど遮蔽物への選好性だけで支配されてしまうのである。個々の環境条件に対してなんらかのウェイトがあることは容易に予想できるのだが、左右水路の魚の分布という明確な実験結果の数値を統一的に説明できる式はなかなか見つからなかった。アイデアは突然やってきた。冬の早朝、スキーに行くために真っ暗な国道9号を北に向かっているとき突然ひらめいたのが図3に示す式である<sup>2)</sup>。忘れないようにぶつぶつ言葉にしながら駐車場を探したのを思い出す。修正乗法形選好強度式と名付けたこの式の重要性に気づいてくれた研究者は少ないが、人間の選好性も含めて適用可能なたいへん柔軟な式で、私の研究の中で最も重要な成果の一つだと思っている。この式を用いて、パラメータフィッティングなしに複雑な環境状態を分布させた実験水槽中の魚の分布の再現が可能になった<sup>3)</sup>。九州環境管理協会の協力を得て博多湾でマコガレイの貧酸素からの逃避行動調査を行ったのはこの少し後である。マコガレイが自身の選好性に基づいて貧酸素水塊から脱出する行動がシミュレーションで表現できた<sup>4)</sup>。

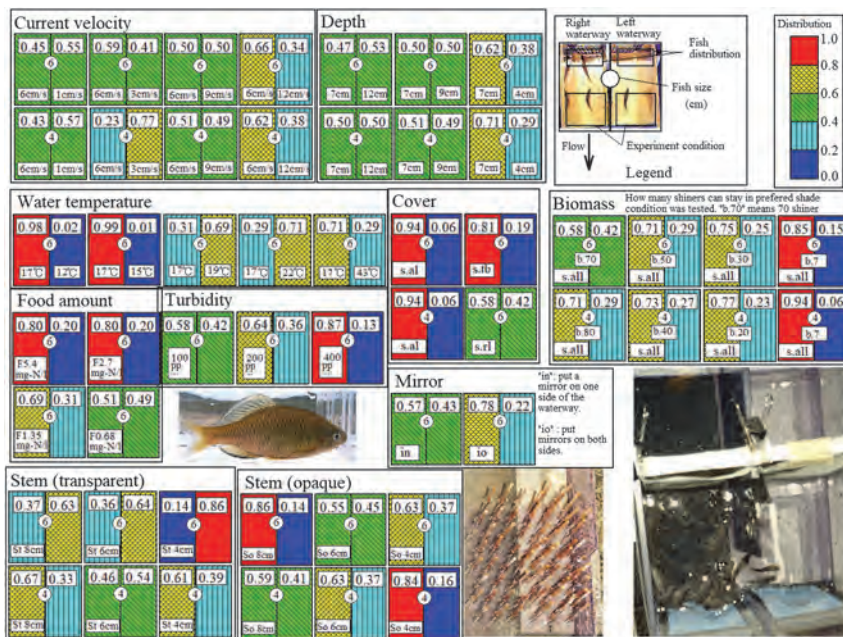


図2 左右の水路を下流端で接合させた選好性実験で得られたタナゴ類の分布

$$P^* = \prod_{j=1}^J (P_j)^{W_j / W_{max}}$$

$$W_{max} = \begin{cases} \max(W_j; j \in V) & V \neq \emptyset \\ \infty & V = \emptyset \end{cases}$$

$$V = \{j | (\exists_{i,i'}) (P_{j,i} \neq P_{j,i'})\}$$

$P^*$ : 総合的な選好強度、 $P_j$ : 因子*j*についての選好強度、 $W_j$ : 因子*j*についてのウェイト、 $W_{max}$ : 代替案*i*間で選好強度に違いが存在する因子に対するウェイトのうち最大値をとるウェイト、 $\emptyset$ : 空集合、 $\exists$ : 存在記号

図3 修正乗法形選好強度式

### 3. 生息場評価手法との出会い

90年代の土木界では、住民の環境意識の高まりに伴い、環境の内部目標化が叫ばれ、関連法の改正が続いていた。中でも河川分野は1997年の河川法改正に先立つ1990年から「多自然型川づくり」を謳い、水生生物の再生を指向した事業が模索されていた。生物に住みよい河川的设计法が確立されていない中、1995年頃には、北米には選好性に基づく生息場評価手法 HEP やその河川版である PHABSIM があるという情報が伝わっていた。マコガレイの選好性を研究中の1996年夏から半年間、私は、カナダ内水面研究所に留学する機会を得た。ここで、先の研究で私が考案した左右水路を接合した水路は、U字迷路型水路と称する選好性実験によく用いられるタイプのものであったことや、生息場創造・再生が各所で試行され、参考書も出版されていることを知り、PHABSIMの生の情報に触れることもできた。

PHABSIMでは、魚類の水深、流速、底質・遮蔽物の

3環境因子に対する選好性 (PHABSIMではHSI(生息場適性指標)、あるいはHSC(生息場適性基準)と呼ぶ) を実河川の多くの地点での環境条件と魚類密度の観測に基づいて定式化し、**図4**の方法で生息場の指標であるCSIやWUAを計算する。CSIは修正乗法形選好強度式の $P^*$ に類似しているが、各環境因子のウェイトは考慮されていない。そのため、このままでは魚類の分布を正確に表現できないことは私には明白に思われたが、簡明さからか実務上受け入れられていた。当時私は、生物量まで計算できる生態系モデルに魚の選好性に基づく移動を組み込んだシミュレーションモデルを構築することを指向していたが、同研究所で生息場再生を行っていた博士から「行動のシミュレーションや生物量予測は忘れろ。実用上は生息場の評価が本命だ。」と諭された。その時は承服できなかったが、その言葉は心に残った。実際、これ以降私は生物量予測の研究をほとんど行っていない。

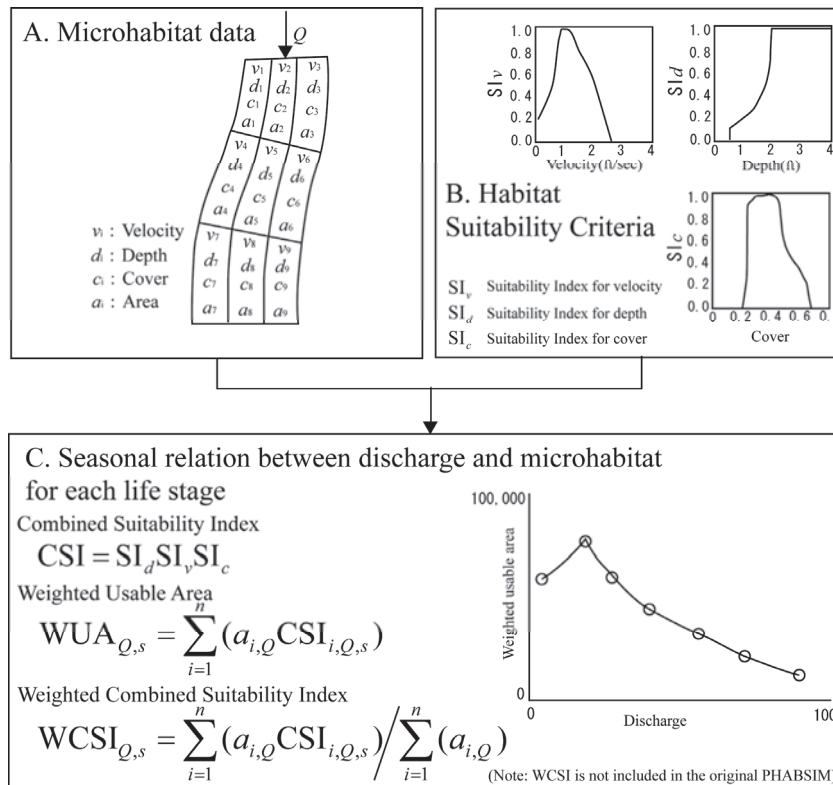


図4 PHABSIMにおける生息場評価計算方法

#### 4. 魚の分布予測の高精度化と停滞

帰国後、PHABSIM や HSI の検証に取り組んだ。その結果、やはり PHABSIM では小河川の魚の分布を説明できないことが示された<sup>5)</sup>。(一方、ゲンジボタルの幼虫など、遊泳しない生物の分布は PHABSIM でほぼ説明できることが後に示された<sup>6)</sup>。その理由は後述する。) PHABSIM では、先述のように環境因子のウェイトがない他にも、川那邊の研究<sup>7)</sup>などで日本ではよく知られている、瀬と淵が連続して存在することの重要性が表現されていない。私は実験的にも昼夜で魚の選好性が変化することを定量的に示している<sup>8)</sup>。遊泳力の高い魚種であっても、その魚の行動圏の中には休息の場も必要なのである。図5のように魚の行動圏と摂餌や休息などの行動モード毎に異なる HSI を導入することで、PHABSIM では再現できなかった魚の分布がかなり正確に再現できることが調査で示された<sup>5)</sup>。

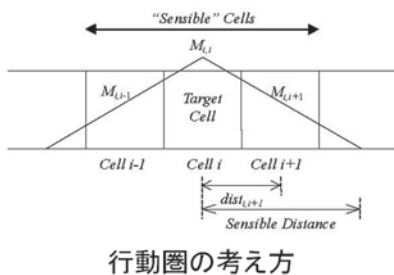
この時点で私は、河川の生物の分布のメカニズムは

ほぼ解明できたと思った。ゲンジボタルの幼虫のような行動圏の小さな生物は、PHABSIM で(環境因子のウェイトがないとは言え)その分布がほぼ説明できるが、魚類のような行動圏が大きな生物は、行動圏と行動モードを考慮しないと分布が説明できないのである。

これで一件落着かと思えたが、この研究は誰にも使ってもらえなかった。それどころか、自分自身ですらこれ以降この式を使った研究を行わなかった。魚種毎・行動モード毎の HSI とそのウェイトを求めることが大変すぎたからである。ここにきて私の魚の分布予測の研究は停滞を迎え、微量有害物質などによる生物の減少や魚巣ブロック・魚道・落差工といった局所的構造物の評価を扱うようになる。

#### 5. もっと簡単に河川生物生息環境を評価したい

一方河川事業の実務では、比較的単純な PHABSIM すら表立って利用されることは稀であった。アユの産卵



$$P_i = \sum_m \left\{ W_m \left( \frac{\sum_k M_{i,k} \times P_{m,k} \times A_k}{\sum_k M_{i,k} \times A_k} \right) \right\}$$

$$\sum_m W_m = 1$$

表-3 摂餌モードと休息モードのウェイト

季節別	摂餌モード $W_f$	休息モード $W_r$
夏	0.33	0.67
秋	0.23	0.77

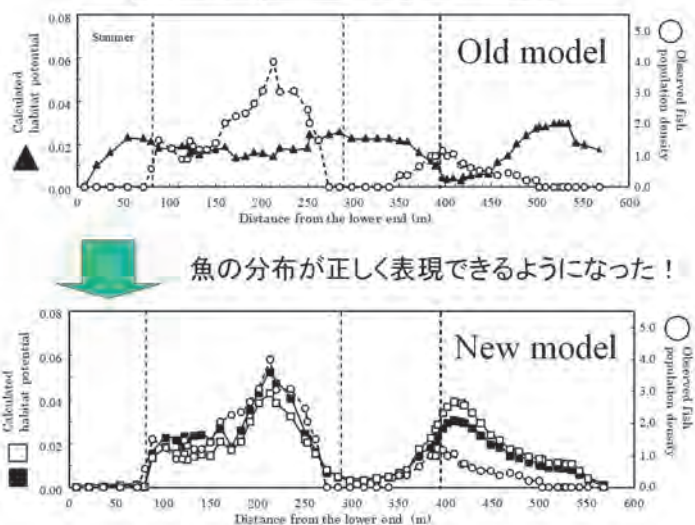
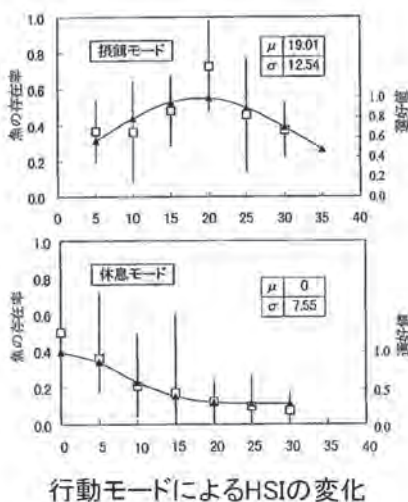


図5 行動圏と行動モードを導入することで魚の分布が正しく表現できた

場など行動圏を考慮しなくても良い一部の事業ではコンサルタントなどで内々に使用されていたようではあるが、HSIを定めるコストや複数種を扱う難しさに比べて予測精度が十分ではないことも普及の妨げになったのではないかと思う。また 2000 年代末からの洪水被害の頻発により、住民の意識が環境から防災にシフトしたこともあるだろう。事業者側も多自然(型)川づくりに慣れ、国交省の指導にもかかわらず、次第に「環境保全型ブロック」の使用といった定型的なものが目に付くようになる。しかし、これまでの環境問題の歴史から、人間は大きな問題が解決されたその後には、身近な自然環境に目を向けるようになることがわかっている。災害問題が解決された後、「魚がいなくなった」という議論が再燃するだろう。そうならないようにするには、PHABSIM よりもっと簡単に、もっと安価に、もっと正確に、そして事業を行う前に、その事業が複数の生物の生息環境に与える影響を予測し、災害対策においてもせめて生物生息環境を劣化させない事業を行っていく必要がある。

## 6. 生態環境多様性指数 (EED) の提案

早い段階から、環境多様性が高い方が豊かな生物相になるという一般的に受け入れられている考えを生息場評価式として利用できないかという考えは持っていた。2010 年に至って実際にその可能性の検討を始めたが、実河川の魚の分布を説明できるようにはならないまま2年が過ぎた。そこで、これまでの研究成果も考えに入れて再度熟考と議論を重ねて提案したのが図 6 に示す生態環境多様性指数 (EED) である<sup>9)</sup>。まず、既存の多くの身近な河川魚の HSI を収集して一覧し、多くの魚種にとっておおむね共通して HSI の大小が変化する流速・水深・河床材料の粒径の閾値を環境因子毎に2つ定めた。HSI は主に日中の現場観察により求められることから、摂餌モードの選好性を代表していると考え、ある魚種にとって HSI が低い環境条件であっても、休息モードのような異なる行動モードでは HSI が高くなる可能性があると考えた。これにより、上述の閾値で区切られた流速・水深・粒径それぞれの3カテゴリと、これまでの研究から遮

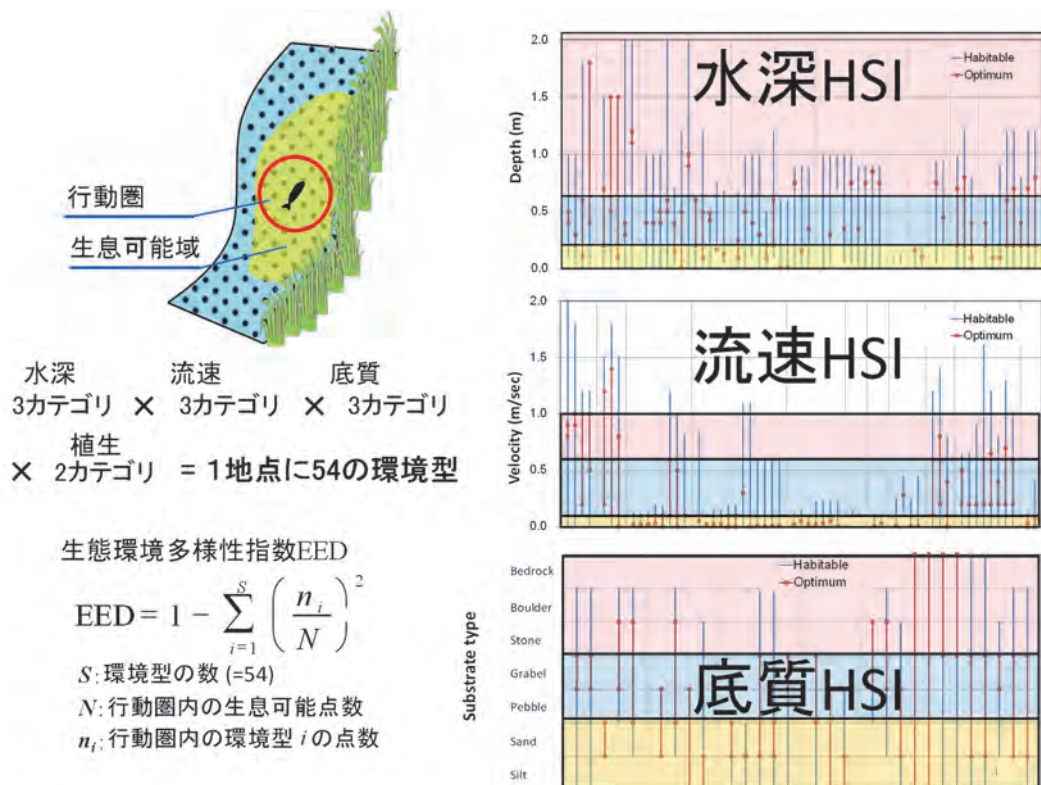


図 6 生態環境多様性指数

蔽物や餌料供給源として重要であるとわかっている植生の有無の2カテゴリを乗じた $3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$ の環境型の1つで、ある点の環境が表現できる。この環境型の一つ一つが、ある魚種のある行動モードに対して良好な生息場となると考えられる。従って、魚の行動圏内の環境型の多様性が高い方が、多くの魚種にとってよい生息場となると予想した。図7はEEDの計算例である。

実際に河川調査を行ってみると、この予想は的中した。山口県内の中小河川で調査を行ったが、水質などEEDで考慮していない環境因子が大きく変化していないとみられる同一河川内では、EEDと魚種数には正の相関があり、おおまかに言ってEEDが0.1増えると1魚種増えていた。EEDは魚の個体数とも正の相関がある河川が多いが、個体数とEEDが明らかに負の相関を示す河川もあった。これらの河川の魚の個体数の少ない地点ではカワニナとゲンジボタルが多く、一次生産が魚につながっていないとみられたが、これらの条件はEEDでは考慮されていないため致し方ない。魚種数の多さは生物多様性の高さに直結するため、EEDが魚種数の

指標となり得るだけでも生息場評価指標として十分価値のあることだと考えられた。また、EEDの計算には水深、流速、底質の粒径、植生の有無という比較的容易に将来の状況が予測あるいは仮定できるもののみを使用するため、流況シミュレーションと組み合わせることで河川改修事業の将来予測を簡単に行うことができる。水質などEEDで考慮されていない環境因子も多いが、同じ河川区間の河床地形改変の影響予測であれば多くの因子は同じと仮定できるため、問題なく使用できる。

### 7. EEDの普及を目指して

EEDの大小と魚種数の多寡の間には定量的な因果関係は存在しないため、EEDの信頼性を示すには測定事例を増やす以外にはないと考えている。これまで山口県内中小河川の30以上の区間でEEDと魚種数の計数を行ってきたが、同一河川でEEDが増加しているのに魚種数が減少した事例はない。またEED予測を容易にするため、広く普及している流況シミュレーションプラ

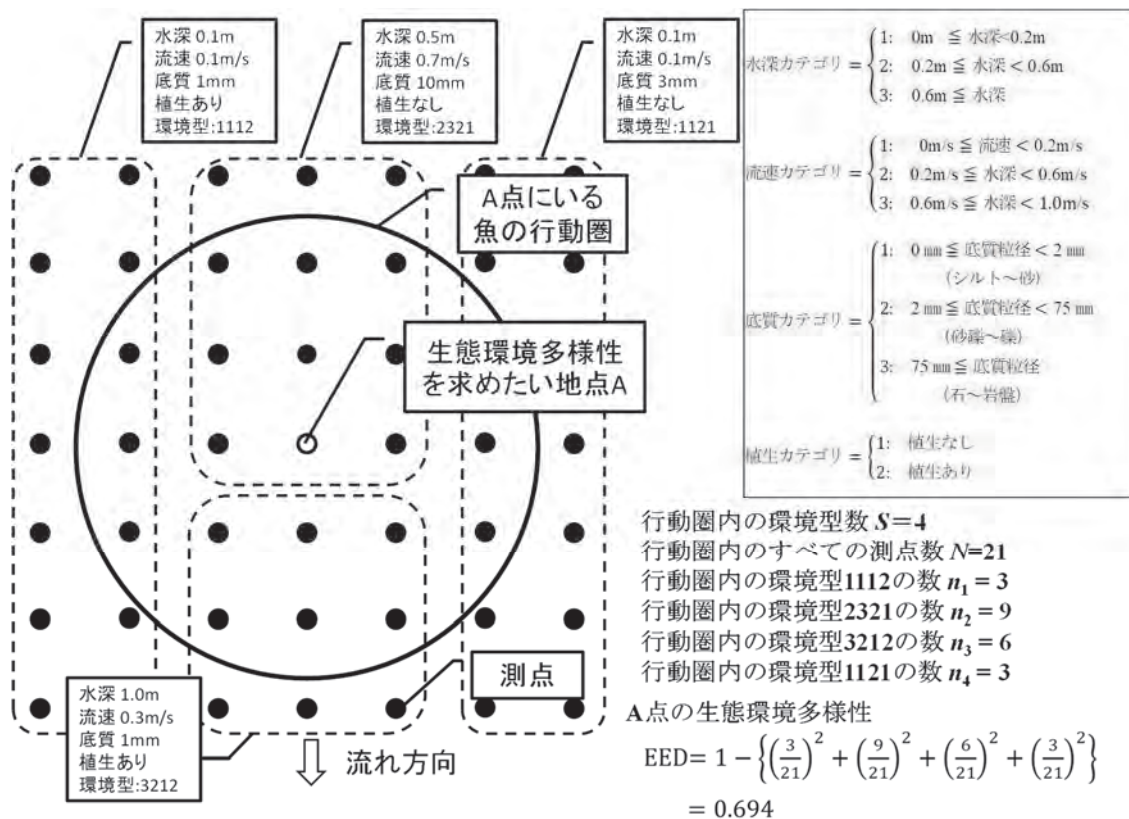


図7 EEDの計算例

ソフトウェア iRIC 上の任意の2次元流況シミュレーションソルバーによる流況計算結果を用いて EED を計算する DHABSIM ソルバーを開発した(図 8)。これを用いれば、河川事業前後の河床地形データを与えることで、事業による EED の変化が計算でき、河床地形デザインの良否が事前に評価できる。同時期に PHABSIM と同じ計算式を用いた生息場評価ルーチンも開発し、国土交通省の EvaTRiP ソルバーの生息場計算ルーチンとして提供した。移動能力の小さいホタル幼虫やアユ産卵場の評価や特定魚種の特定行動モードの評価にはこちらが適しているので、DHABSIM とうまく使い分けてほしい。いずれも iRIC に標準添付されている<sup>10)</sup>。DHABSIM を使って河床浚渫の影響を予測し、事業実施後に予測が正しかったことが実証されている<sup>11)</sup>。

残された課題としては、大河川における検証と、サケ・マス類などの大型魚が優占する寒冷地河川での検証があげられる。原理的に、大河川でも中小河川と同様に EED は有効だと考えているが、大河川では魚類の全量採取が難しく、これまで直接的な検証はできていなかった。一方大型魚の優占は行動圏の拡大と直結するため、より本質的に EED の計算値に影響する。しかし定性的に考えて、実際の行動圏より小さい範囲しか考慮していないとしても、その範囲の環境多様性が大きければ生

物多様性も大きくなる可能性は高く、そのままの形で寒冷地河川にも EED が適用できる可能性はあると考えている。近年環境 DNA により魚種の在否を検出する手法が提案されており、現在、これを援用して大河川および寒冷地河川での調査を実施中である。環境 DNA の河川内での挙動は未解明であり、採水点から上流何 km 内に生息する魚が検出できているのか明確ではないが、遠方から到達したと考えられる DNA 検出数が少ない魚種を除去すると大河川でも EED が高い区間の魚種数が増える結果を得ている。

## 8. おわりに

長い年月がかかったが、生物の行動や分布という不確定要素が多い事象の一端を曲がりなりに解明し、またそこで得た知識を駆使して、実用される可能性が感じられる程度に簡易化した生息場評価指標を提案することができた。研究成果が実用されるには長い年月がかかるのだろうし、見出されないまま消えていく成果も多いのだろうと思うが、大学教員としての残りの期間、この成果が実用され、河川の生物生息環境の維持向上につながるよう微力を尽くしていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Masahiko Sekine, Hiroshi Nakanishi, Masao Ukita, Sadaaki Murakami: A shallow-sea ecological model using an object-oriented programming language. *Ecological Modelling*, 57, 221-236(1991).
- 2) 関根雅彦, 浮田正夫, 中西弘, 内田唯史: 河川環境管理を目的とした生態系モデルにおける生物の環境選好性の定式化. *土木学会論文集*, No. 503/II-29, pp. 177-186(1994).
- 3) 関根雅彦, 檜崎寿晃, 浮田正夫, 中西弘: 水域環境管理への応用を目的とした魚の行動の実験的解析. *環境工学研究論文集*, 31, 225-232(1994).
- 4) 関根雅彦, 上浦慎太郎, 山本義男, 濱田悦之, 浮田正夫: 沿岸開発にともなう貧酸素水塊発生がマコガレイの挙動に与える影響の実験的研究. *環境工学研究論文集*, 34, 239-247 (1997).
- 5) 楊継東, 関根雅彦, 浮田正夫, 今井剛: 行動モード



図 8 DHABSIM ソルバー

- を考慮した魚の生息環境評価手法に関する研究.  
土木学会論文集 No.671/VII-18, 13-23(2001).
- 6) 関根雅彦, 後藤益滋, 伊藤信行, 田中浩二, 金尾充浩, 井上倫道:生息場評価手法を用いたホタル水路の建設. 応用生態工学, 10(2), 103-116(2007).
- 7) 川那部浩哉, 宮地伝三郎, 森主一, 原田英司, 水原洋城, 大串竜一:遡上アユの生態—とくに淵におけるアユの生活様式について. 京都大学理学部 生理・生態学研究業績, 79, 37(1956).
- 8) 楊継東, 関根雅彦, 浮田正夫, 今井剛:行動モードを考慮した魚の環境選好性に関する実験的研究. 土木学会論文集, No.636/VII-13, 35-45(1999).
- 9) 伊藤浩文, 関根雅彦, 神野有生, 山本浩一, 樋口隆哉, 今井剛, 中村好希:中小河川における魚類生息場評価のための生態環境多様性指数の提案. 土木学会論文集 G(環境), 72(1), 1-11(2016).
- 10) iRIC | 河川の流れ・河床変動解析ソフトウェア, <https://i-ric.org/ja/>
- 11) 松永晋平・関根雅彦・加藤琢己:DHABSIM を用いた島田川における河川浚渫が魚類生息場に与える影響予測評価. 河川技術論文集, 26, 349-354(2020).