河川水温を考慮したHSIモデルによる 水生生物の生息環境評価

HABITAT EVALUATIONS OF AQUATIC CREATURES USING HSI MODEL CONSIDERING THE RIVER WATER TEMPERATURE

糠澤 桂¹・白岩 淳一²・風間 聡³

Kei NUKAZAWA, Jun-ichi SHIRAIWA, So KAZAMA

¹学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²非会員 修(工) 平成建設(株)

³正会員 博(工) 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

Habitats of aquatic creatures (fishes *Oncorhynchus masou masou*, *Plecoglossus altivelis altivel* and *Cyprinus carpio*, fireflies *Luciola cruciata* and *Luciola lateralis*, and frogs *Anura* sp) in the Natori River basin located at the middle of Miyagi prefecture were evaluated dynamically using the water temperature as one of the environmental indices. HSI (Habitat Suitability Index) and WUA (Weighted Useable Area) of aquatic creatures were quantitatively calculated from numerical map information and hydrological simulation with a heat budget model. As results, general HSI of fireflies increased but of frogs decreased by adding the factor water temperature. Migration of *Plecoglossus altivelis altivel* could be represented by the variation of WUA.

Key words: heat budget model, habitat suitability index, WUA, seasonal change

1. はじめに

近年, 生息環境を定量的に評価する手法として, HEP (Habitat Evaluation Procedure) や IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) における PHABSIM (Physical Habitat Simulation Model) がしばしば用いられている¹⁾³⁾.

HEPは米国において開発された生態系を野生生物のハビタットとしての適否から評価する一連の手続きのこと⁴⁾であり, 評価指標として HSI (Habitat Suitability Index) モデルがその根幹を成す. HSIモデルは, 対象地域をセルに分割し, 対象生物の生息に関わるセル内の環境の指標(水深, 水質, 森林までの距離など)を用いて生息データ(生息の有無, 生息数)を解析し生息適性を物理的に評価する構造のモデルである.

HEPにおいては, 流水の生物は各々の環境条件に適した生息域に分布していると推定される. 河川的环境条件においては, 水深や流速, 勾配, 土地利用, 水温など多くの要素がある. 特に水温は水生生物の呼吸・生長・繁

殖(増殖)に著しい影響を持つ. 水温と水生生物の生息場の関係についての報告は散見する⁵⁾⁸⁾が, 河川水温の変動に対する生息場の適否を定量的に示した例は少ない. 気候変動による河川水温の変化が予測される^{9) 10)}ため, 今後の環境アセスメントやミティゲーションの計画・実施のためにも, 河川水温の変動と水生生物の関係性を把握しておくことは有意義である.

本研究においては, 宮城県の名取川流域における水温を考慮した分布型流出モデルと数値地図情報, 土地被覆データを用いて HSIモデルを構築し, 対象水生生物(ヤマメ, アユ, コイ, ゲンジボタル, ヘイケボタル, カエル類)の生息環境の評価を行う.

2. 研究対象流域

名取川水系は, 宮城県のほぼ中央部に位置し, 流域面積939km², 幹川流路延長55.0kmの一級河川である(図-1). その水源を宮城と山形の県境付近の神室岳に発し, 奥羽

山脈から発する碓氷川や広瀬川等の大小支川を合わせて仙台市を東流し太平洋に注ぐ。上流域は標高1000mを越える山岳地帯のため冬季は多くの積雪があり、中流域は仙台市を中心とした市街地を有し、下流域は水田地帯が広がる。また、大型の多目的ダムである大倉ダムと釜房ダムは、それぞれ広瀬川の支川である大倉川と、名取川の支川である碓氷川において設置されている。

3. データセット

(1) 土地被覆データ

植生データとして第5回自然環境保全基礎調査（平成5年～10年度）の植生調査結果から作成された植生区分データファイルを利用した。植物群落名として植物社会学的群落名が採用されており、10種類に区分されている。

土地利用データとして国土数値情報の宮城県土地利用格子データ（平成3年）を使用した。これらは田、森林、建物用地、ゴルフ場などの11種に区分されている。

(2) 数値的地理データ

解像度50mの標高マップを用いて勾配を求めた。勾配算定対象メッシュとそれを取り囲む8つのメッシュのうち対象より低いものとの標高差を求め、その差をメッシュ間の距離により除したものを勾配とし、求めた周囲8メッシュの勾配のうち、最大のものを対象メッシュの勾配（50m×50m）とし、その方向を流下方向とした。市街化率は、土地利用マップにおける、建物用地と幹線交通用地を「市街地」と仮定し、対象メッシュ（50m×50m）の周囲81メッシュ（450m四方）の土地利用を調べ、市街化地域に当たるメッシュ数を合計し、それを総メッシュ数81により除することにより算定した。市街地、森林までの距離マップは、土地利用マップをもとに作成した。算定対象メッシュから最寄りの市街地および森林までの距離を求め、対象メッシュの値とした。同様に、河道マップおよび地勢図より水辺までの距離マップを作成した。本研究においては、河道および田

図-1 名取川流域図

を水辺と定義した。ここで河道は、50m標高データから作成した落水線図により得られた河道マップにおいて、国土地理院作成の2万5千分の1地形図上において確認できる規模以上の河道を指す。

(3) 水理データ

土田ら¹¹⁾と白岩ら¹²⁾がそれぞれ開発した分布型流出モデルと水温解析モデルを用いて、2004年7月から2005年6月の1年間における水深、平均流速、水温の分布データを算定した。これらのモデルにおいて必要となる、気温、降水量などの気象データは、仙台、川崎、新川の3地点のAMeDASデータを用いた。

分布型流出モデルは、大きく河道部と斜面部の二つに分けられる。斜面部をさらに直接流層、基底流層、積雪・融雪層の3層に分けて計算しており、それぞれ kinematic wave法、貯留関数法、degree-day法を用いている。河道部において dynamic wave法を用いている。本モデルは、観測流量との誤差を把握する目的で使用される Nash and Sutcliffe の効率係数で0.85以上の精度で推定できることが確認されている。

水温解析モデルは、熱収支計算、地下水温の推定、放射量推定から構成されており、水熱収支の差分計算により連続的に求めている。本モデルは、上流部と下流部に分けて検証された。上流部の観測値として、北川の3箇所において2004年10月、11月、12月、2005年1月、4月、6月にそれぞれ1日ずつ観測した。1日のうち、9時、13時、17時の計3回観測した。下流部の観測値として、三橋水文水質観測所において1時間毎の水温データ（2004年7月～2005年6月）を使用した。検証結果を図-2と次ページ図-3に示す。上流部($R^2=0.88$)・下流部($R^2=0.93$)ともに再現性は良好であると言える。

4. 生息環境評価方法

(1) 対象生物

対象とした生物は魚類、ゲンジボタル、ヘイケボタル、カエル類である。本生物データは、名取川流域下流部に位置する名取市の生物調査¹³⁾の結果を使用した。これは、解像度250m四方の区域において生息の有無を生態学の専門家が種を特定していき、底生動物から哺乳類まで全

図-2 水温モデルの検証。計算値と北川の観測点における観測値（2004年10月～2005年6月）

図-3 水温モデルの検証. 計算値と三橋水文水質観測所における観測値(2004年7月～2005年6月)

1231種の動物を確認したものである。魚類については、流域を上流，中流，下流域の3つに分け，それぞれを代表するヤマメ，アユ，コイを選んだ。ホタル，カエル類に関しては，風間ら¹⁴⁾が既に評価しているが，水温の要素は加味していない。風間らの評価においては，一部生物種におけるHSI分布が上流～下流において高低の差を示した。この差が地形，水理，水温のどの条件に依存するのかを把握するため，また，水温の要素が対象生物にどの程度寄与するのかを明らかにするために，本研究においては風間らの評価指標に水温の指標を加えた。さらにその年間の変動が6種の対象生物の生息場に与える影響を評価した。ここでカエル類は，サンプル数が多く，生息環境が類似しているニホンアカガエル，トウキョウダルマガエル，ツチガエルを一つの生物群とみなしたものを表す。

(2) HSIモデル

HSIモデルは，セル内の環境指標（水深，流速，水温など）を用いて生息適性を物理的に評価する構造である。まず，各評価指標に関する生物の生息適性指数を0.0(全く不適)～1.0(最適)の間の数値により表現されるSI(Suitability Index)モデルを作成する。

SIは環境指標ごとに作成する。本研究において用いた指標は，(1)水温(年平均・年最大・年最小)，(2)水深(年平均・年最大・年最小・年間変動の分散)，(3)流速(年平均・年最大・年最小・年間変動の分散)，(4)勾配，(5)土地利用，(6)植生，(7)市街化率，(8)市街地までの距離，(9)森林までの距離，(10)水辺からの距離である。ただし，魚類に関しては，(1)～(3)までの項目のみにより評価した。SIの決定は，第一種（生物の生態データから求める方法）と第二種（現地調査による生物の生息地データから求める方法）の2通りのSI決定法を用いた。

(1)水温と魚類における(2)水深と(3)流速に関しては，文献・資料^{15), 16)}をもとにそれぞれの生物の最適値を調べ，その値を平均とした正規分布を求め，SIとした(第一種)。このときの分散値は，任意指標について生物が持つ選好範囲の1/2とした。水温の選好範囲は，ヤマメが2-15，アユが13-25，コイが15-28，ホタル類が2-28，カエル類が15-28(°C)である。これ以外は第二種によりSIを作成した。第二種のSIの決定は次の手順により行う。①調査地域において対象生物を捕獲し，その場所の評価指標のデータを記録する。②対象生物捕獲数の頻度分布図を作

成する。③頻度の最大値が1.0となるように基準化する。これがSIとなる。作成した全評価指標のSIを総合的に判断したものがHSIとなり，次のように表せる。

$$HSI = \sqrt[p]{\prod_{j=1}^p SI_j} \quad (1)$$

ここで， SI_j ：評価指標 j の生息適性指数， p ：評価指標の数である。

対象地域に占める生息適性地域の割合を表す値であるWUA(Weighted Usable Area)を次式により求めた。

$$WUA = \sum_i^A a_i HSI_i \quad (2)$$

ここで， A ：対象地域全域のセル数， a_i ：セル i の面積， HSI_i ：セル i の生息適性指数である。

5. 結果と考察

次ページ図-4は，分布型流出モデルと水温解析モデルにより2004年7月から2005年6月において算定された水理データと水温データ（以降，年データ）を使用して作成した(a)ヤマメ，(b)アユ，(c)コイのHSI分布である。魚類の評価領域は河道においてのみとなる。(a)ヤマメのHSI分布は，全体的に大きな値であり，特に上流端や支流において適性が認められる。これは，ヤマメが冷水性の淡水魚で，溪流などの流れの速い環境にも対応できることから理解できる。(b)アユのHSI分布は，ヤマメと同様に，本流よりも支流において適性が大きいことが認められるが，上流から下流を通して一貫性のある傾向が得られていない。平成14年の水辺の国勢調査における実際の生息確認箇所を次ページ図-5(i)に示した。筑川においてはHSIが増加しており，一部においてアユの生息がHSIモデルにより推測され得る結果を得た。しかしながら，アユの両側回遊等に代表される年間の移動を考慮すると，流域の年間HSI分布のみから生息適性を評価することは困難である。このため，より正確なモデルを構築するためには，アユが陸域にいる時期のみに焦点を当てる必要があると言える。(c)コイのHSI分布は，集水面積の大きい河川では適性が非常に小さく表現されている。図-5(ii)における実際の生息確認場所は名取川中下流域から河口までと筑川であり，HSI分布により表現出来てい

図-4 (a)ヤマメ, (b)アユ, (c)コイの年平均HSI分布

ない。コイは湖沼にも生息しており、比較的流れの緩やかな環境を好む¹⁷⁾。そのため、早い流速に耐性がなく、その影響が分布に表れたと考えられる。計算上では1メッシュ内の流速は一定であるが、実際の河川では退避地となる澁みが存在し、その地点において生物の多様性が大きいことが提言されている¹⁸⁾。そのため、流速に耐性のないコイを扱う際には、河道内の特性を吟味する必要があると考えられる。次ページ図-6における(d)ゲンジボタル及び (e)ヘイケボタルのHSI分布をみると、同

図-5 (i)アユ, (ii)コイの生息確認箇所

じボタルであるのに大きく分布が異なる。これは、両者の基本的な生活史は同じであるが、ゲンジボタルの幼虫が里山の小川や山間部の溪流に棲むのに対して、ヘイケボタルの幼虫は、水田や用水路にも生息しているという生息条件の違い¹⁹⁾のため、それぞれが求めている地理・土地被覆が異なることに起因すると考えられる。(f)カエル類のHSI分布は、勾配の大きい上流域と市街地を除く流域全体で平均的な値であり、高い適性を示す地域は殆ど無いことが確認された。

次ページ図-7は(a)ゲンジボタルと(b)ヘイケボタル、(c)カエル類について、水温を考慮した場合としていない場合のHSIの差を示しており、すなわち本モデルにおいて水温が生息環境にもたらす変化を表現している。この値が正であれば水温を考慮したことによって生息環境が向上したと言える。ここで、用いた指標は年データである。この結果から、(a)ゲンジボタルと(b)ヘイケボタルは広い地域においてHSIの増加が見られた。逆に(c)カエル類は減少傾向を示した。本研究において設定した水温に対するSIは、ボタルは2-28℃と広い選好水温を持つ。一方カエル類は15-28℃と比較的高い温度に耐性をもつが、低温に弱い。そのため、最低水温がカエル類の生息環境を減少させる要因であると本モデルから推測された。

6ページ図-8に(a)ヤマメ, (b)アユ, (c)コイ, (d)ゲンジボタル, (e)ヘイケボタル, (f)カエル類のWUA年間変動と水温あり・なしを比較した。生物は一年の環境の変化に対応するために、生息地を移動したり、冬眠をしたりするなどの生活している。例えば、回遊魚であるアユは、秋に産卵し孵化した稚魚は冬期を水温の高い海において過ごす。その後春になり、河川の水温が高くなるのを見計らい河川へと戻ることが知られている¹⁷⁾。このことから、水生生物の生息環境評価を行う際は、年変動の大きい水温の季節的な変動を考慮することが必要である。

図-8を見ると、水温の季節的変動を考慮しない場合は6種全ての生物において年間の生息環境変動を表現できないことが分かる。時系列に変動する要素としては水温のほかに水深や流速等の水理指標を使用しているが、これらは局所的な変化が大きいものの、広域の年変動を表現することは出来ないと考えられる。

本モデルにおいて水温の季節的変動を考慮した場合(d)ゲンジボタルと(e)ヘイケボタル以外の生物について

図-6 (d) ゲンジボタル, (e) ヘイケボタル, (f) カエル類の年平均HSI分布

図-7 (a) ゲンジボタル, (b) ヘイケボタル, (c) カエル類のHSI変化量分布 (水温SIあり-水温SIなし)

生息環境の年変動が表現されていることが分かる。(a) ヤマメは6～8月の夏期にWUAが減少する, 9月から上昇し, 11～翌年5月がピークになる。実際のヤマメは9～11月に産卵を行う。これはWUAが増加傾向を示す時期と一致する。しかし, 夏の間ダム湖に生息場所を移動する個体や, 河川を下り7～10月をオホーツク海などで生活する個体(サクラマス)などもあることから, 実際には夏期の生息適性地域は減少していることが考えられる。(b)アユと(c)コイは似た傾向を示した。10～翌年3月の期間においてWUAが減少し, 4月から増加, 6～9月にピークを迎えている。アユの実際の生活史は, 9～10月に産卵を行い, 孵化後直ちに海に下る。河川への遡上が始まるのは翌年4～6月である。この結果は, アユの陸域への遡上行動が, 環境要素としての水温を加味したことを要因としてWUAの変動という形で予測され得ることを示している。(d)ゲンジボタルと(e)ヘイケボタルは選好水温が2～28℃と幅広いため, 水温の年変動をすべてカバーしている。このため, 水温の変化に鈍感であり, 生息に関して水温の影響をあまり受けず, 年間を通して安定した生息環境を保持していることが分かる。(f)カエル類のWUAは5～9月に増加し, 11～翌年3月に減少している。ニホンアカガエルとトウキョウダルマガエルは冬期に冬眠する。冬眠期は対象種の生息適性は減少していると考えられ, 水温を加味したWUAの年間変動によりこの傾向を表現し得ることを示している。

6. まとめ

本研究は分布型流出モデルと水温解析モデルから算定した水理情報と水温情報, 地理・土地被覆情報を使用して作成されたHSIモデルを用いて生息環境を評価した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 対象生物のHSI分布を示した。ヤマメの一般的な生息場所やアユの一部地域における実際の生息確認箇所の傾向と近い分布を得ることが出来た。
- (2) 水温を考慮することにより, ゲンジボタルとヘイケボタルのHSIが増加するが, カエル類は減少することが示された。
- (3) 動的な水温の要素を評価に取り入れたことにより, 従来年毎においてのみ可能な評価が, 月ごとの時系列データにおける評価を可能とした。
- (4) 水温を加味したWUAの年変動により, アユの河川への遡上行動及びカエル類の冬眠期における生息適性の減少が表現され得ることが示された。

謝辞: 本研究は, 科学研究費補助金(22360192)と科学研究費補助金(21254003)の助成を受けた。併せてここに深甚なる謝意を表します。

図-8 6種生物のWUA年間変動(水温あり・なし)

参考文献

- 1) Daniel Gillenwater, Timothy Granata, Ulrike Zika: GIS-based modeling of spawning habitat suitability for walleye in the Sandusky River, Ohio, and implications for dam removal and river restoration. *Ecological Engineering* 28 pp311-323, 2008.
- 2) 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, pp1145-1150, 2002.
- 3) 小出水規行, 竹村武士, 奥島修二, 相賀啓尚, 山本勝利, 蛭原周: 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, pp489-494, 2005.
- 4) 田中章: 何をもち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) 砂田憲吾, 熊木朋子, 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.
- 6) Cindy Chu, Nicholas C. Collins, Nigel P. Lester, Brian J. Shuter: Population dynamics of smallmouth bass in response to habitat supply, *Ecological modeling* 195, pp. 349-362, 2006.
- 7) 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.
- 8) Wan Ruijing, Zhou Feng, Shan Xiujuan, Sun Shan: Impacts of variability of habitat factors on species composition of ichthyoplankton and distribution of fish spawning ground in the Changjiang River estuary and its adjacent waters, *Acta Ecologica Sinica* 30, pp. 155-165, 2010.
- 9) Keltoum Chaouche, Luc Neppel, Claudine Dieulin, Nicolas Pujol, Bernard Ladouche, Eric Martin, Dallas Salas, Yvan Caballero: Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change, *Comptes Rendus Geoscience* 342, pp. 234-243, 2010.
- 10) 宮本仁志, 菅原康之, 道奥康治: 気候変動が流域の河川水温に及ぼす影響解析, *水工学論文集*, 第54巻, pp.1207-1212, 2010.
- 11) 土田恭平, 風間聡, 沢本正樹: 河川環境確保のための土地利用と許容人口の関係, *水工学論文集*, 第48巻, pp475-480, 2004.
- 12) 白岩淳一, 風間聡, 沢本正樹: 気候変動による河川水温の影響. *水工学論文集*, 第50巻, pp1063-1068, 2006.
- 13) 名取市: 名取市環境基本計画策定基礎資料IV動植物調査報告書, 平成14年, 2002.
- 14) 風間聡, 松本哲, 沢本正樹: 数値地図情報ならびに水文モデルデータを用いたHSIモデルによる生物生息域の推定, *土木学会論文集B*, Vol.63 No.4, pp.323-337, 2007.
- 15) 宮地傳三郎, 川那部浩哉, 水野信彦: 原色日本淡水魚図鑑, 保育社, 1976.
- 16) 落合明, 田中克: 新版魚類学(下), 恒星社厚生閣, 1965.
- 17) 宮城県・内水面水産試験場: <http://www.pref.miyagi.jp/naisuisi/>
- 18) Colin R.Townsend, Sylvain Doledec, Mike R.Scarsbrook: Species traits in relation to temporal and spatial heterogeneity in streams: a test of habitat templet theory, *Freshwater Biology*, Vol.37-2, pp.367-387, 1997.
- 19) 東京にそだつホテル: <http://members.jcom.home.ne.jp/hotaru-net/>

(2010. 9. 30受付)