

水工学シリーズ 09 - A - 6

河川物理生息場モデルと気候変動

山口大学大学院 理工学研究科 教授

関根 雅彦

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2009 年 8 月

河川物理生息場モデルと気候変動

Physical habitat modeling in rivers and climate change

関根雅彦

Masahiko SEKINE

1. はじめに

河川物理生息場モデルは、河川における水生生物にとっての環境の良否を、計測可能な物理指標を説明変数として定量的に計算しようとするものである。生態系に配慮したダムの放流量の決定や、多自然川づくりにおける改修計画の事前評価など、さまざまな応用が検討されている。また、流速、水深などを説明変数とするところから、これらに大きな変化をもたらすであろう気候変動の影響評価への応用も期待される場所である。

本講義では、まず、河川物理生息場モデルが生まれた背景を紹介する（2章）。次に、河川物理生息場モデルの代表である PHABSIM の概要を説明する（3章）。4章では、河川物理生息場モデルにおいて気候変動の影響をどのように扱うか、その考え方について論じる。5章では河川物理生息場モデルを事業に使用した事例を紹介する。

2. HEP と IFIM

近年の定量的な生息場評価手法への要求の背景には、ミティゲーションの登場があげられよう。ミティゲーションとは、環境影響をできるだけ小さくするとともに、どうしても失われる環境の代償を積極的に作り出していこうとするものであり、1970年に米国で施行された NEPA(National Environmental Policy Act, ネパ, 国家環境政策法)に端を発している。事業の中で実際に代償措置を講じていくためには、破壊された環境の価値、代償として創造された環境の価値を定量的に評価することがどうしても必要なのである。

この定量評価の要求に応えるために、US-FWS（内務省魚獣局）により開発された影響評価手法が HEP（Habitat Evaluation Procedure, ヘップ, 生息場評価手続き）（日本生態系協会 2004）である。第一版は1976年に公表され、同年中に第二版、1980年には現行の第三版が完成した。その考え方の骨子は、ある生物にとっての生息場の価値は、評価対象地域の環境がその生物にとってどのくらい適しているかという生息場の質を表す指標（HSI, Habitat Suitability Index, 生息場適性指数）に、生息場の量を表すその地域の面積を乗ずることで表現できる、ととらえる点である。生息場適性指数は、理想的な環境条件におけるある生物の最大収容力に対する現在の収容力を表す0から1の無次元数である。個々の生物種ごとに採餌、再生産、居住、越冬などの生存行動に影響を与える生息場特性を調べ、生息場適性モデル（Habitat Suitability Model）を用いて生息場適性指数を算定する。

生息場の質と生息場の量の積で生息場の価値を算定するという考え方は、以後の多くの生息環境評価手法に影響を与えた。その中の一つに、ダムからの放流水量の管理を主目的として1980年代前半に野生生物保護局（U.S.Fish and Wildlife Service）の指導下で開発された IFIM（Instream Flow Incremental Methodology, アイエフアイエム, 河川流量漸変法）（Stalnaker et al. 1994）（中村ら 1999）がある。

IFIM は、河川における流量に何らかの変化をもたらす計画案に対して、変化後の流量下で生じることが予想される生息場の空間的・時間的変化を記述するためのモデル群を中心として、問題の分析から結論の導出に至る分析・検討プロセスを規定したものである。IFIM におけるモデル群とその結びつきを図1に示す。

IFIM では、河川の生物の生息場を、流下方向に1次元的に変化する環境条件によって規定されるマクロ生息場と、流下方向だけでなく横断方向にも変化する環境条件によって規定されるマイクロ生息場に分けて考える。マクロ生息場を規定する環境要因として、水温、溶存酸素、総アルカリ度、濁度など、マイクロ生息場を規定する環境要因として、流速、水深、カバー（日陰や隠れ場所）、河床材料などがいくつかの研究を通じて抽出されている。マクロ生息場の評価モデルによって対象生物が生息可能な河川区間長を定め、マイクロ生息場モデルによってその区間の生息場としての価値を HEP 流に生息場適性指数と水面積の積によって定めるのである。

IFIM のモデル群の中でも、河川の水理学的シミュレーションと生息場適性モデルを組み合わせるマイクロ生息場を計算するためのソフトウェア PHABSIM（Physical HABitat SIMulation, ピーハブシム）は、米国地質調査局（U.S.Geological Survey, USGS）のホームページからダウンロードできることもあって利用実績も多く、PHABSIM=IFIMであると誤解している人も多い。IFIMを実施する際にPHABSIMが必須というわけではないが、IFIMにおける生息場評価モデルの事実上の標準となっている。最近ではRiver 2D (University of Alberta)などの2次元流況計算に基づく生息場評価ソフトウェアが普及しつつあり、PHABSIMはもう古い、との声が聞かれることもあるが、河川生息場評価を志す者に対する入門ソフトウェアとしての地位は揺るいでいない。

一方で、マクロ生息場モデルについては、U.S. EPA（United State Environmental Protection Agency, 米国環境保護局）のQUAL2Kなどがあげられているが、標準的なものは定まっていないのが現状である。

3. PHABSIM の概要

PHABSIM の概念を図 2 に示す。まず、図 2(A)のように、対象河川を物理環境が均一とみなせる小区画に分割し、その小区画ごとに種々の流量に対する水深、流速、カバー、河床材料のデータを収集する。これらが説明変数となる。一方、評価対象種に対してこれらの物理環境についての生息場適性基準（Habitat Suitability Criteria, HSC）を調査や実験などに基いて定めておく。例えば水深 1 ft の地点には 5 尾/m²、2ft の地点には 10 尾/m²の魚が観察されたとすると、

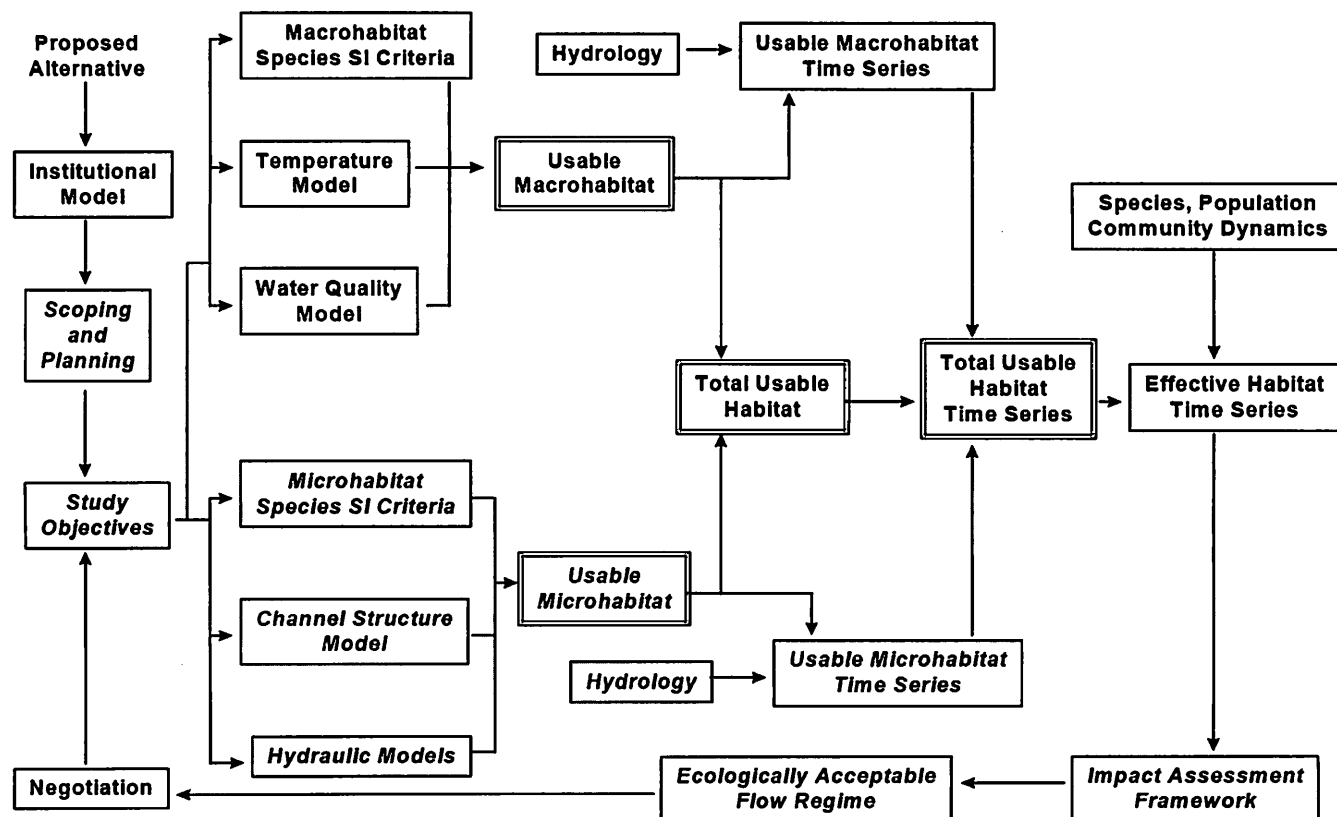


図 1. IFIM のモデル群とその結びつき（イタリックは PHABSIM 関連部分）（Hardy 2003）

$SI_d=1ft : SI_d=2ft = 1 : 2$ となる。こうした観察を多数繰り返し、観察された SI_v の最大値を 1 となるように正規化することで、図 2(B)に示すような曲線を描くことができる。最後に、この 2つの情報を組み合わせることにより、図 2(C)に示すような、流量と WUA (Weighted Usable Area; 重みつき利用可能面積)の関係を得る。対象区間がその魚種にとって最適な状態なら、WUA は対象区間の水面積と一致する。

PHABSIM の特徴は、説明変数がすべて物理項目であることから、水理学的シミュレーションによって任意の流量に対する説明変数値が予測できることである。これによって、水資源開発に伴う河川流量の変化が水生生物に与える影響を予測することができる。

ここで WUA の計算に用いられている CSI が、HEP の HSI に相当しており、図 2 (C) の例では乗法形の生息場適性モデルを使用していることになる。また、流速、水深、カバー (河床材料と隠れ場所をまとめてカバーとして指標化することが多い) を説明変数に選ぶのは、それぞれ生物の行動を司る 3 大要因であるエネルギー的な優位、生物的相互作用、再生産の成功と関連の深い物理指標であるとの認識からである。

説明変数に何をとりか、どのような生息場適性モデルを用いるかは常に議論の対象となるが、幅広い生物種を扱う HEP と比べると、専ら水生生物を扱う PHABSIM では図 2 の標準的なモデルがそのまま採用されることが多い。ただし、紛

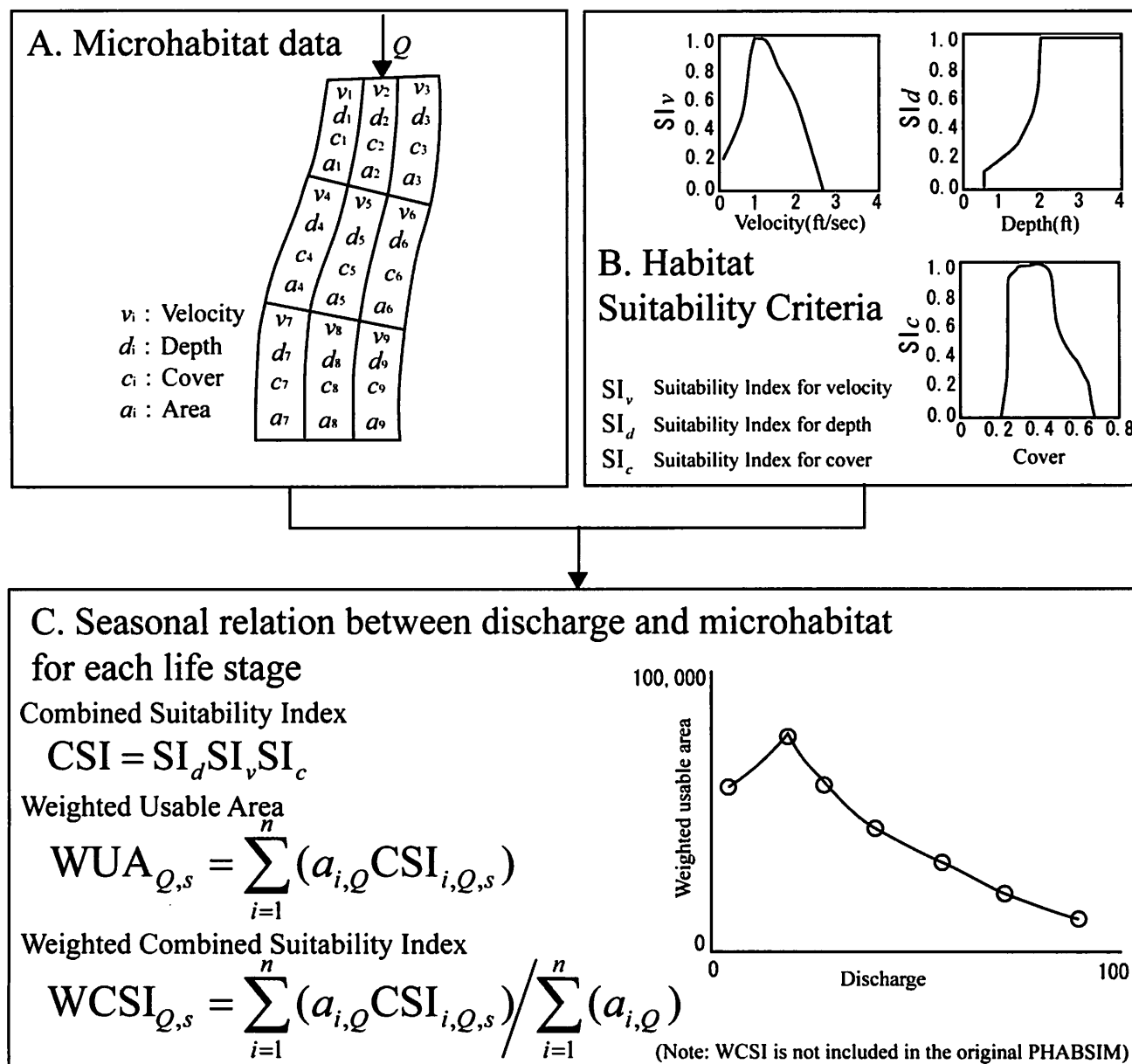


図 2. PHABSIM の概念 (Stalnaker 1994 を改変)

争の対象となるような微妙な事業における交渉ツールとして PHABSIM を使用する場合には、HSC や生息場適性モデルにも十分な検討が必要なのは言うまでもない。

4. 気候変動の影響のモデルにおける扱い

気候変動が河川環境に与える影響には、豪雨や渇水による流況変化、気温上昇による水温の上昇、河畔や河道内の植生変化、海面上昇による塩分の増加などが考えられる。これらのうち、流況変化については、PHABSIM や River2D が直接扱うことのできる説明変数であり、別途降雨変化予測などにに基づき流況変動を予測すれば対応可能である。水温上昇や塩分の増加については、マクロ生息場モデルで対応することになる。対象種の生息場が上流側に移動するという形で影響すると考えられる。河畔や河道の植生変化については、流況シミュレーションにおける粗度係数の変化や生息場評価におけるカバーの変化などの形で影響すると考えられるが、これらについては予測することは現状では難しいだろう。想定される温度域に現存する植生などから推測することになると思われる。なお、流況の変化も河床材料の変化を通じて粗度に影響を与えることが予想される。これについては計算によりある程度予測することは可能ではないかと考える。その他、生息種が変化する可能性も高いが、これについても計算などで予測することは難しい。植生などと同様、想定される水温域に現存する生物などから推測せざるを得ないと考えられる。

5. ホタル水路建設の事例

山口県では、古くは室町時代の大内氏の時代からゲンジボタル(*Luciola cruciata*)が人々に親しまれてきた。現在でも県内の 3 水系 25 河川が国の天然記念物指定河川となっており、中でも山口市の一の坂川ホタル護岸は、わが国最初のホタル護岸の成功例として知られている。しかしその一方で、山口市の中心を流れる榎野川では、過去にゲンジボタルが大量発生していたと伝えられている中流域において、現在ではゲンジボタルがまったく見られなくなっている。山口県では、この榎野川中流域にゲンジボタルの自生地を再生する事業を実施しているが、上流域や支川と比較して、中流域ではゲンジボタルだけでなくゲンジボタルの唯一の餌料とされるカワニナ(*Semisulcospira libertine*)までもが極端に少ないことが明らかになってきた。

ゲンジボタルは日本に 44 種を数えるホタルの中で最大の種であり、ほぼ一年で卵・幼虫・蛹・成虫の 4 つの形態変化を行う完全変態の昆虫である。そのうちの 7 月から翌 3 月の約 9 ヶ月間を幼虫として水中で過ごし、カワニナを専食する。十分成長した幼虫は春先、雨天時の夜間に発光を行ないながら陸上に上がり、河岸の土の中で蛹になる。約 1 ヶ月後、羽化し、成虫として発光を伴いながら飛翔し、一週間ほどの短い一生を終える。この期間に水際に産卵された卵は約 1 ヶ月後に孵化し、ただちに水中に戻る。

このように、ゲンジボタルの再生を進める上では、水中から陸上、空中におよぶ多様な生息空間について検討しなければならない上に、カワニナの生息環境もあわせて考慮する必要がある。これらの困難な与条件下で無駄のない事業を実施するため、近年注目が集まっている生物生息環境の定量評価手法を適用し、事業が生物に与える効果について定量的に評価を加えながらゲンジボタル再生事業を推進することとなった。

5. 1 ゲンジボタルの生息場評価法

先述のように、ゲンジボタルは水中だけでなく、その周辺空間を広く利用して生息している。このため、幼虫の生息場である流水中の生息場評価だけではなく、飛翔空間、産卵空間としての周辺環境評価も必要となる。また、唯一の餌量であるカワニナの生息環境評価も必要である。HEP の HSI モデルの考え方に立てば、これらの諸条件を組み合わせた単一の生息場適性モデルを構成することが必要になると思われるが、そのためには生態学的な調査研究が必要となる。本事例では、学術的な成果を得ることよりもむしろ事業の効率化が生息場評価導入の主目的であること、また事業そのものが紛争の対象となる可能性はきわめて小さいことをふまえ、精度の高い生息場適性モデルを構成することはせず、できるだけ既存の情報を活用しつつ、流水環境についてはゲンジボタルとカワニナを標準的な PHABSIM を用いて評価し、周辺環

境についても PHABSIM の考え方を援用した単純な生息場適性モデルを構成して、それぞれの結果を事業者の視点から総合的に判断することで、迅速な判断を下すためのツールとして生息場評価手法を利用した。

5. 2 周辺環境からみたゲンジボタルの HSC

ゲンジボタルの生息場についての既存の情報の一部を表 1 にまとめる。ゲンジボタルについてはその人気の高さから市民研究家による研究も多く、表 1 には学術的でないものも含まれているが、幅広く情報を収集した。表 1 から読み取れるように、ホタルが多く生息、飛翔する空間パターンは河川の片側には雑木林をつくる植生や急傾斜が迫っており、もう一方には水田や湿地などのオープンランドが広がっているような場所だといわれている。そこで、我々の調査した山口県槇野川水系、厚東川水系のホタル飛翔数と、GIS で容易に入手可能な河道から田・森林・傾斜・市街地までの距離の関係について整理した（井上ら

2000）。その結果、田についてはホタル護岸の整備された一の坂川を除いてはすべて河川から 10m 以内に田がある場所でホタルの飛翔が確認された。森林・傾斜については、一の坂川とやはりホタル護岸の整備された吉敷川を除いては、150m 以内に森林・傾斜が存在する場合にホタルの飛翔が確認されている。市街地については、先述の一の坂川・吉敷川、およびビオトープに近接する須賀河内川を除いて市街地から 500m 以上離れた場所でホタルの飛翔が確認された。この結果をもとに、周辺環境の HSC を構成したものを図 3～図 6 に示す。この HSC を用いて、PHABSIM と同様の方法で、GIS 上にて周辺環境からみた CSI を計算することができる。本手法を用いて山口県厚東川流域、槇野川流域におけるホタル飛翔状況の予測値と観測値を比較したところ、おおむね良好な一致が見られたことは井上ら（2000）が報告した。

表 1. ゲンジボタルの生息条件

項目	内容
流速	流速は 10～30cm/s、緩急の変化があるのがよい①②。10～40cm/s の所を好む③。最も速い所 35cm/s、最も遅い所 10cm/s、幼虫の最も多い所約 17cm/s～25cm/s④。急流は不適で、なるべく緩やかな水流がよく、秒速 17～25cm 程度が最も良いが、これ以上の流れの場所でも多くの幼虫が見られている⑥
水量	1年を通して安定していること②。流速を保つためにある程度必要③。
水質	DO 6.8～11.8(mg/l)、常に飽和状態に保たれていること②。90～100(%)③。DO の欠乏を招くと致命的⑤
	BOD 0.5～1.8(mg/l)①。有機的な汚濁にはかなり強い⑤。
	COD 0.5～1.5(ppm)②。0.5～3.4(mg/l)③
	その他 農薬、合成洗剤、工場排水等の汚水が混入しないこと①。農薬の流入がないこと②。炭酸カルシウムが多く含まれ、炭酸カリウム、炭酸ナトリウム、硝酸塩、リン酸塩、塩化物などは少ない方がよい③。重金属汚染には比較的強い。特に Cu ²⁺ には異常に強い。塩素イオンにも強い。合成洗剤(LAS)による水質汚濁には弱い⑤。アルカリ性の流水地では、ホタルの生息が見られるが、酸性の水質は適しない⑥
水温	適温 10℃(冬季)～20℃(夏季)。20℃を超えて直ちに死滅することはないが、最高でも 25℃以下に抑える。低温には強いが高温には弱い①。冬季:5℃以上、夏季:25℃以下②。0℃から 27℃の所で生活するが、適した水温は 14℃～20℃(幼虫は低温には強いが、高温には弱い)③。2.0℃～28.0℃③
水深	表面流から 100cm の深いところまで幅広く生息するが平均 5～30cm が多く、重要なのは川床にも DO が十分に存在するかどうか①。5～30cm 程度②。幼虫が特に多く棲んでいる場所は 30～40cm であり、大部分が水深約 50cm までである③。約 15cm～80cm、大きくなった幼虫が特に多く棲んでいるのは 30cm～40cm④。水深は 1cm から 2m まで⑤。水中の酸素を必要とするので、水深 50cm 以下がよく、淵や堰のある深い場所では生息は不可能である⑥。
濁り	泥系のにごりは、生息には支障がない③
川幅	幅ね 1.5～2.5m の川幅のところに幼虫が多く見られる③
底質	玉石ないし軽石あるいはれき質ないし砂れき質、あるいはこれらの組み合わせが良い③。砂礫質:珪藻類付着、泥土:落葉堆積①。底質それ自体ではなく、底質条件と他の環境条件、特にカワナのエサ条件との間にどのような相互関係を持たせるかであり、礫質の時には付着藻類、泥質の時には落葉である①④。幼虫は昼間は小石の下、砂や土の中にいる①。底質は泥から砂礫、礫まで⑤。日中、川底の砂や小石の下に潜むので、砂地に小石が散在する場所がよい⑥。砂 9～7、土 1～3 の割合で玉石・礫が多い川底には幼虫が多くなる。川底が玉石や礫になるところは、一般に水量が多く比較的流速もあるために DO が多く、水質や水温も安定していることから、生息に適している
水路形状	変化に富んだ多様な形状が良い。横断面が、瀬、淵、川原、中洲など変化に富んだ組み合わせとするのが良い。更に、水路と湿地が一体となっていると非常に良い①。瀬、淵、河原、中洲などの多様性。湿地と一体で最良②。
護岸	幼虫の上陸に影響する法面における最適勾配といえるものはない。護岸の高さは垂直で 3～4m 位上るケースもあるが高くないほうが望ましい①。土が最適、他に木や石などの自然素材、石材使用の場合、土や木と組み合わせる、山などに接する場合、山側を残す②。砂まじりの土、水はけが良く、樹木や雑草などによる日陰があり、適度な湿気と柔らかさが必要、最も理想的な護岸は土羽であり、次に木や石を用いた自然素材が良い③。法面ないし護岸の素材は土が最も適している、土以外で護岸する場合に土木材や石材の自然材を用いる、どちらかといえば木材の方が石材より良い。護岸素材および工法のポイントは、土中水分の連続性があり、苔の付着の良いこと
法勾配	なるべく緩勾配とする(1:0.3 での上陸例あり)②
水際線	斜面の植生はクヌギ・コナラ・ミズキなどのいわゆる雑木林を構成する落葉広葉樹の高木があることが望ましい、木の密度は、木漏れ日のさす程度が良い。直線的でなく、色々入り組み、変化に富むのが良い①
空間パターン	水路を挟んで片側が斜面(林)、反対側が水田などのオープンランド。水田以外では湿地(休耕田)の方が畑(草地)よりも良い。①。2m 以下の枝下空間では飛翔活動が見られない⑦。照度 0.05～0.2lux および樹冠被度 0.5～0.6 に高密度と低密度の境界がある。水面上の半分ほどが開けていることが条件⑨。高い位置でも樹木が水路上を被うことによって飛翔活動が阻害され、かつ樹木が水面を被うことによってゲンジボタル成虫の高い密度が維持されない⑨。雄成虫は川面下に探索飛翔のために空間が必要⑨。
植生	休息場所は草でも可能だが、選好としては樹木のほうが高い。樹木の種類による選好性は認められない①。雑木林をつくる落葉広葉樹林②。両岸に樹木や雑草が生い茂って日陰がある。柳が良い(湿度が高い葉が柔らかい)④。河川の堤には植物が生え、水面が半日は日陰となる場所がよい⑥。水面を覆うほどの植物の繁茂は飛翔活動を阻害されることが指摘されている⑨。
立地	ホタルが自然発生できる環境の範囲として、ホタルの実際の生息範囲だけでなく、その背景となっている空間も考慮する必要がある、谷戸の目安は集水域である①。
水路長	可能な限り長い方が良い。数 10 メートル～100 メートル以上あればより安定する①。数 10m～100m 以上で安定②
周辺環境	飛翔するための広い空間と、休息したり、交尾するための樹木や草で囲まれている必要がある。昼間の直射日光を防ぐとともに夜間における街路灯、車のヘッドライト、人家の明りなど人工的な光も防御が必要があり、そのためにも樹木等で囲まれた空間が必要である②。東西に流れる河川よりも南北に流れる河川の方が日陰が多いことから、ホタルの発生地も多く見られる⑥。夜間に活動する。一般に発光を用いて個体間交信を行うため、その光交信を有効に利用されるために暗い空間が必要であり、明条件下では活動せず、月の明かりもその活動を阻害する⑨

①(自然環境復元研究会 1991)、②(藤咲雅明、後藤章 1995)、③(島川ホタル保存会 2005/12/25 現在)、④(平野慎吾 1999)、⑤(大場信義 1988)、⑥(児玉行 1994)、⑦(波江桂子、大場信義、藤井英二郎 1995)、⑧(遊磨正秀 1987)、⑨(遊磨正秀 2001)、⑩(今森光彦 2000)

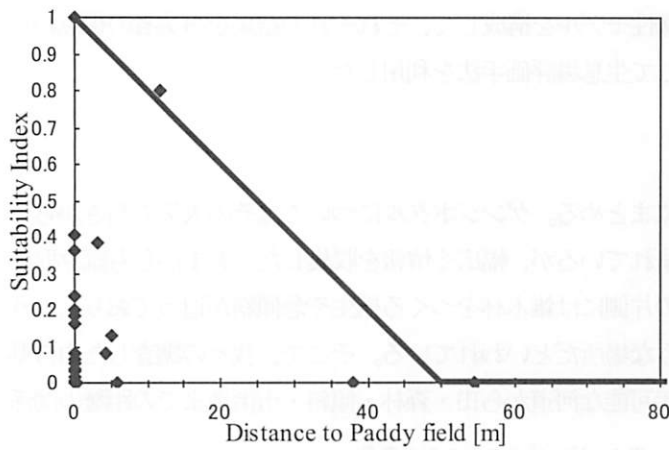


図 3. 田からの距離に関するゲンジボタルの HSC

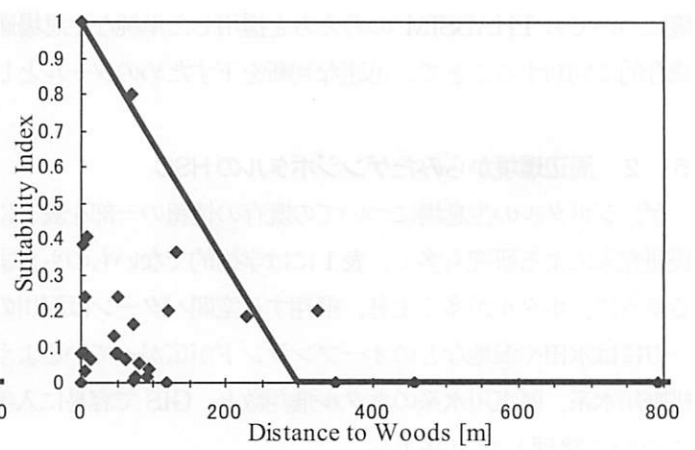


図 4. 林からの距離に関するゲンジボタルの HSC

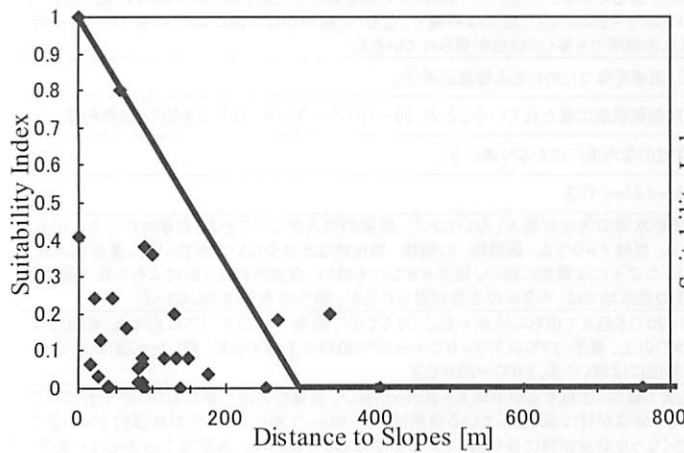


図 5. 斜面からの距離に関するゲンジボタルの HSC

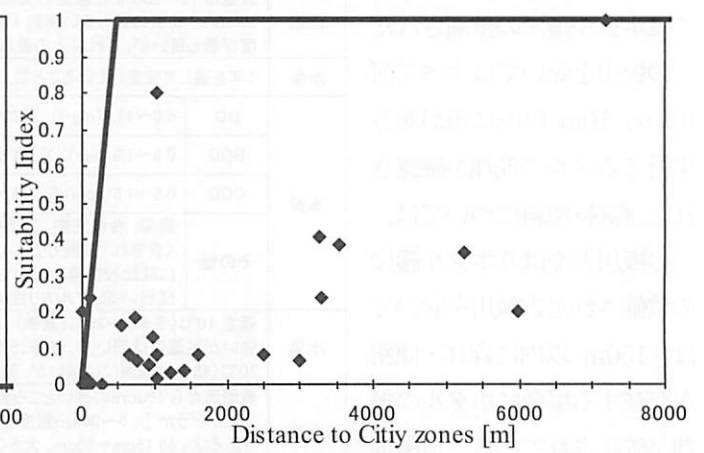


図 6. 市街地からの距離に関するゲンジボタルの HSC

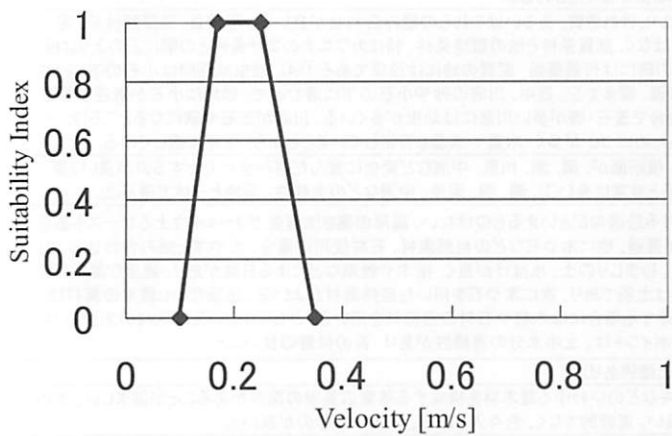


図 7. 流速に関するゲンジボタルの HSC

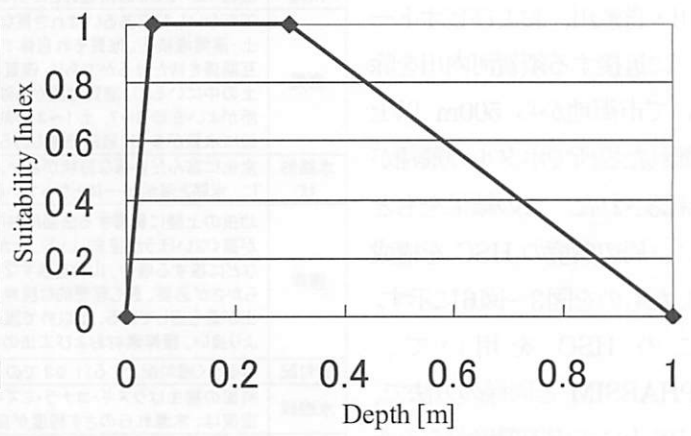


図 8. 水深に関するゲンジボタルの HSC

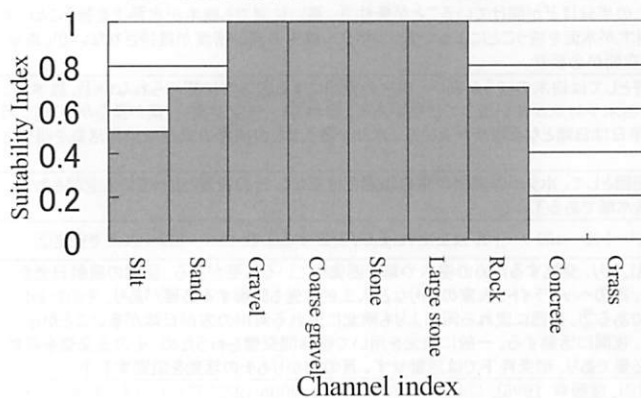


図 9. 河道指標に関するゲンジボタルの HSC

なお、一の坂川などで見られるように、ホタル護岸やビオトープなどで微視的な周辺環境が整備されていれば、本 HSC から計算された CSI が低くとも、ホタルが飛翔する可能性はある。ここで示した HSC は、あくまでも巨視的な GIS スケールでの評価指標であり、この HSC で評価の高い場所は、あまり作り込まなくともホタルが飛翔する可能性のある場所であると言える。

5. 3 流水環境からみたゲンジボタル、カワニナの HSC

表 1 に示すように、ゲンジボタルについては既に多数の知見が蓄積されている。このため、既存の知見を参考にして図 7、図 8、図 9 の HSC を作成した。

カワニナについては既存の知見がホタルに比べて限られている(表 2)。このため、2 水系 4 8 地点におけるカワニナの生息分布と物理環境条件を調査により計測した(後藤ら 2004)。その結果、カワニナの成貝は稚貝に比べ、生息場所が広く分布し、明確な選好が抽出できなかった。調査で得られた傾向として、成貝のみが生息する場所は多数存在するが、稚貝は常に成貝と共に出現するという結果を得ている。殻高が大きくなる成貝は洪水で流れやすく、環境条件とは関わりなく流れついた場所で生息し続けると推察される。一方、稚貝が選好する場所は成貝と稚貝が共存し、再生産性の高い良好な生息環境であると推測できる。そこでここでは稚貝の生息分布に基づいて HSC を作成した。流速、水深、底質に対するカワニナ稚貝の生息密度と、それを元に描いた HSC を図 10、図 11、図 12 に示す。

5. 4 榎野川中流域の生息場評価

山口県より提供された榎野川の河道測量データを用いて流水環境評価を行った。水位・流量情報が限られた断面でしか得られなかったため、水位・流量情報のない断面においては粗度係数を仮定することでマニングの式を用いて水位を推定し、実測水位の代替とした。河川の粗度係数はすべての区間で 0.03 とした。流量は、水位観測局より得られた 2003 年と 2004 年の 2 年間のデータを使用し、最小・豊水・平水・低水・渇水・最大流量の 6 通りの流量に対して水面形を求めた。底質は流量と流積から計算された流

表 2 カワニナの生息条件

項目	内容
流速	ほとんど流れのない場所から人がやっと立っているほどの流れの速さまで。同一水質でも流れの早さで繁殖の程度が変わる①。流速はあまり関係なく、ほとんど流れのない場所から 0.5m/sec 程度の速い場所でも生息⑩
流量	同一水質でも安定性で繁殖の程度が変わる①
水質	有機物 河川上流の清流地域ではカワニナの生息は少ない②。カワニナはきれいな川よりも比較的汚れているものを好むと言われている⑦。成長の度合いに関しては有機質に富む場所でも早い
	DO 水温が上がり酸素が少なくなると水面上に這い上がる③比較的多くの酸素を必要とする⑥
	pH 弱アルカリ性の水質を好む⑥
	合成洗剤 合成洗剤(LAS)による水質汚濁には弱い、0.5ppm が限界①
	Cl ⁻ 塩素イオンには弱い①
水温	成長 15℃以下では成長が停止する。カワニナの成長適水温を考えると、16～22℃④。水温 0～27℃くらいで生息できるが適温は 14～20℃くらい⑩
	産仔 増殖させる場合の水温は 20～22℃⑤。産仔は 12℃以下では見られず、10～23℃の間では水温が高いほど産仔数が多い⑧。16～17℃で最も産仔がさかんになり、高温となる夏季には落ちる⑨。低温には強いが高温には弱い⑪。実験的に水温が 20℃前後で最も稚貝の産出が多いことが確認されている。特に温度上昇期に産仔が多い。
水深	全般 水深、表面流から 1m を越すものも。同一水質でも河川の深さで繁殖の程度が変わる①。水深が 1cm ぐらいいから 1m 以上のところでも棲んでいる③。水深 1cm～80cm 程度までの分布があるが、15.5cm 程度の場所に特に多い⑩。カワニナは夜行性で深みから浅い場所に移動する⑪。水深 1.5m くらいまでの浅い場所に主に棲んでいる⑫。生息する河川の水深はおおよそ 1cm～1m と様々である。
	季節変化 季節的にカワニナの居場所が異なる。夏季には比較的浅い場所に、冬季には深い場所に出現する⑫
	成長段階 稚貝は成貝に比べ、浅い場所に分布している⑫
川幅	同一水質でも河川の幅で繁殖の程度が変わる①
底質	礫から泥まで多様。同一水質でも底質で繁殖の程度が変わる①。底質は砂礫質にもっとも多く、石面や岩盤面に群がることが多い⑪。
落差	同一水質でも落差で繁殖の程度が変わる①。
植生	同一水質でも日照で繁殖の程度が変わる①。どちらかというと木陰のように日照条件の悪い場所には少ない⑪。

①(大場信義 1988)、②(児玉行 1994)、③(吉岡良一 2001)、④(平松和也 1994)、⑤(檜山博昭、田中裕一、中瀬浩太 1992)、⑥(原内裕 1993)、⑦(渡部重久、板垣博 1978)、⑧(高見明宏 1991)、⑨(高見明宏 1995)、⑩(南喜市郎 1983)、⑪(自然環境復元研究会 1991)、⑫(渡辺直 1980)

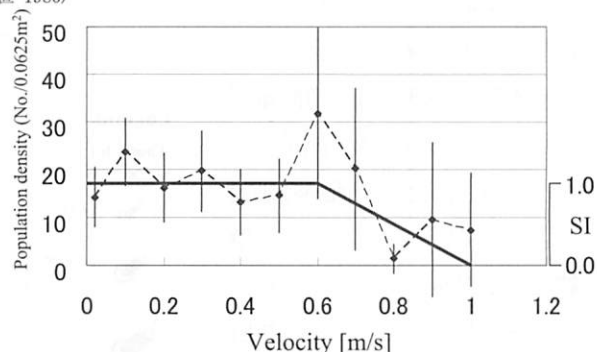


図 10. 流速に関するカワニナの生息密度と HSC
(垂線は生息密度の 95%信頼区間)

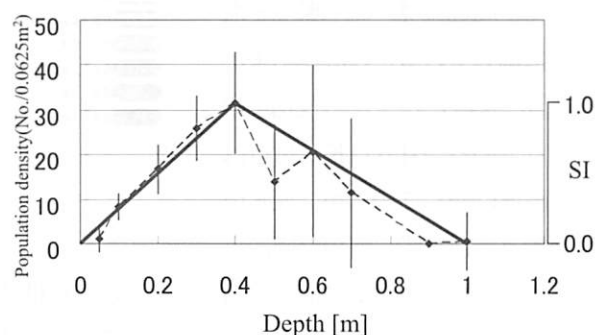


図 11. 水深に関するカワニナの生息密度と HSC
(垂線は生息密度の 95%信頼区間)

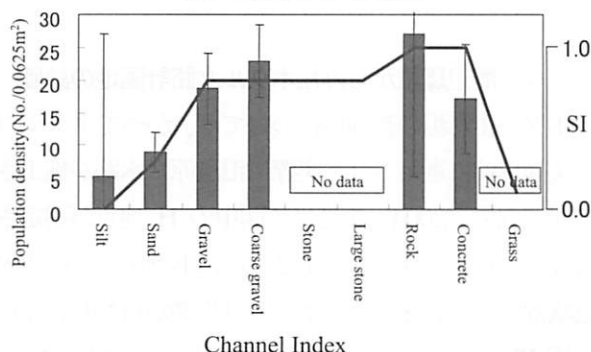


図 12. 河道指標に関するカワニナの生息密度と HSC
(垂線は生息密度の 95%信頼区間)

速より摩擦速度を求め、限界掃流力に対応する粒径が河床に堆積していると仮定して計算した。こうして得られた流速、水深、底質の縦断方向1次元データを用いて、流水環境のCSIを計算した。計算内容は本質的にはPHABSIMと同様であるが、中流域全体をおおづかみに評価することを目的として、河川をPHABSIMより単純な流下方向1次元モデルとして扱ったため、計算はPHABSIMではなく、一般的な表計算ソフトウェアを用いて行った。また、同じ区間に対してGISソフトウェア上で周辺環境のCSIも計算した。それぞれ図13、図14に示す。

本流水環境評価では河道測量データが必要であるため、測量データがないほとんどの支流が評価対象外となっている。このため、解析範囲でホタルの飛翔が見られた地点があまりない。わずかに榎野川本川上流部(図中のA付近)において、周辺環境、流水環境とも生息に適しているとの計算結果が得られ、実際にホタルの飛翔が観察されている。図中のF点付近は周辺環境は適しているが、流水環境が整っておらず、河川整備によってはホタルの生息が可能となると考えられる区間である。B点、C点なども周辺環境、流水環境を少し手直することでホタルが飛翔する可能性がある場所であると言える。点Eより下流部では周辺環境的には可能性のある部分もあるが、流水環境が整わないという結果となった。

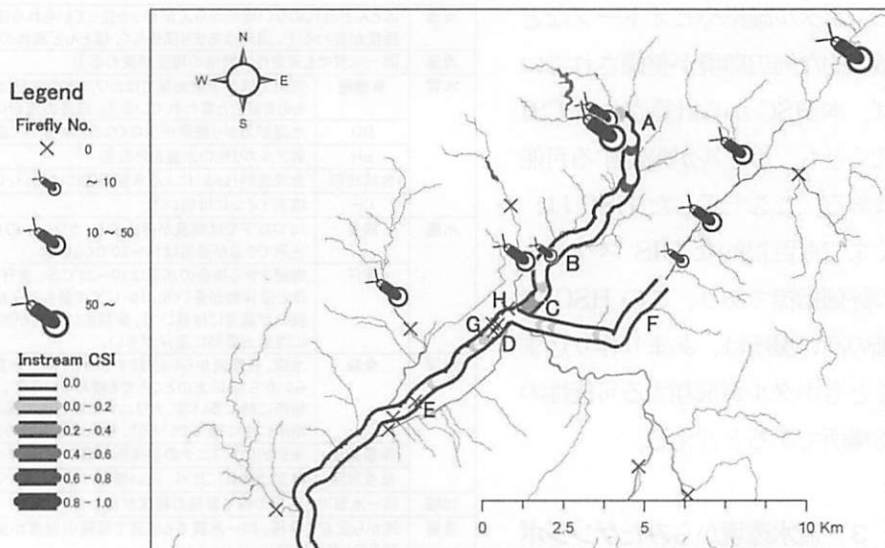


図13. 榎野川の流水環境のCSI(低水時)

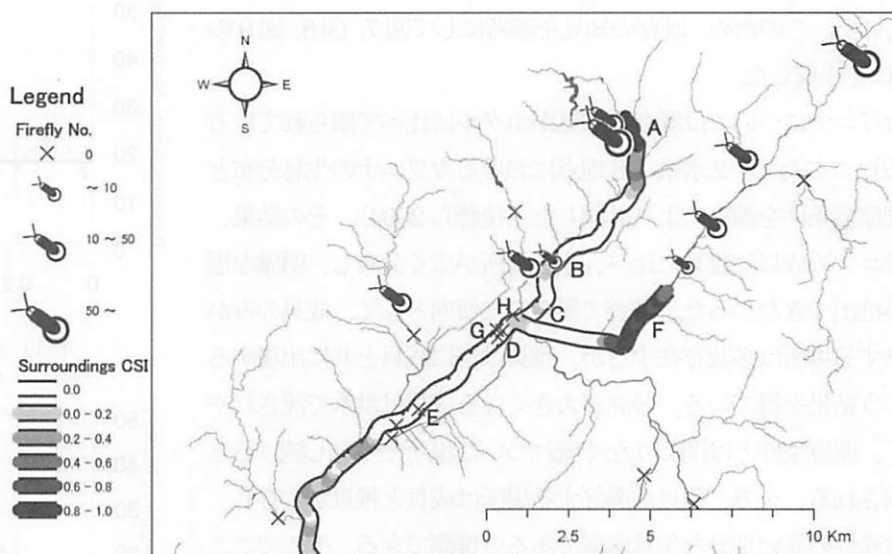


図14. 榎野川の周辺環境のCSI

5. 5 周辺環境からみたホタル水路計画地の評価

ホタル生息場の整備地については、かつてホタルの乱舞が見られたという記録が残っている地点(図中G地点)が本研究実施以前に選定され、実際に氾濫原に水路が施工されたが、カワニナの生息が確認されず放棄された。その後、後藤らの研究成果(2004)を受けて図中のH地点が選定され、平成15年度には設計まで行われたが、諸般の事情で断念を余儀なくされ、平成15年12月頃にE地点があらためて選定された。平成16年初頭よりE地点のPHABSIMによる生息場評価とそれを受けた水路設計作業が行われ、平成17年3月初頭で水路の施工がほぼ完了した。

図13より、かつてホタルが乱舞していたと言われる当初計画地点Gでは、その周辺区間に比べれば河川改修の進んだ

現在でも若干流水環境が整っていることが興味深い。H 地点は本川の流水環境は悪いが周辺環境は比較的整っている。E 地点は周辺環境、本川そのものの流水環境ともに整っていない。このため、H 地点、E 地点とも、榎野川本川でのホタル再生は諦め、本川とは別に導水した水路を本川近傍に建設することでホタルの再生を目指すことが計画された。

もちろん、E 地点でも微視的な環境整備でホタル飛翔の環境を整備することは不可能ではない。また、巨視的に見た周辺環境は前述のとおり良好とは言えないが、E 地点の周辺には GIS データには含まれていない高水敷の植生や堤防斜面、河道内の開けた空間などホタルに必要な要素に類似した環境がほぼ揃っている。前節で述べたように本事例における周辺環境評価は GIS データを用いたきわめて巨視的なものであり、微視的な環境整備を行うことで E 地点でもホタルが生き可能な空間を構築可能だと判断した。

なお、H 地点や E 地点より有利な環境条件の F 地点などは、榎野川中流域（H 地点より下流）という条件から外れているため本事業では見送られている。

5. 6 流水環境からみたホタル水路計画地の評価

E 地点の詳細を図 15 に示す。水路は農業用水の余水吐きからの流水によって堤外地の高水敷に自然に形成されたものを利用することとした。

水路の水源は榎野川本川の 1.2km 程上流から取水されており、流量は、ホタル水路施工以前には、農業用水の需要の少ない冬期には $0.02\text{m}^3/\text{sec}$ 程度まで低下し、夏期には $0.8\text{m}^3/\text{sec}$ を超えることもあった。流量の低下する冬季には河床にシルトの堆積や枯死した藻類の付着が見られ、ホタルやカワニナにとって良好な環境とは言えなかった。しかし、ホタル水路竣工時には比較的自由にホタル水路の流量を調節してよいという約束を水利権者より得たことから、流量を適切に調節することでシルトの堆積を制御できると判断した。水質については冬季に限られた回数の調査からは問題は発見されなかったが、原水が農地を通過してくるため、農薬の混入についての懸念は残った。しかし、余水吐き直上流部の農業用水路でいくらかゲンジボタルやヘイケボタルの発生が見られたこと、また

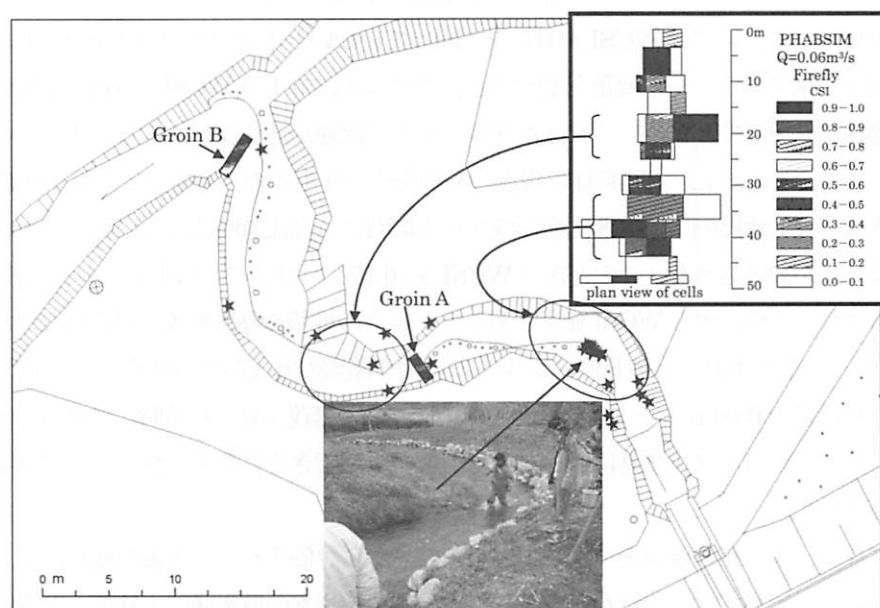


図 15. ホタル水路平面図とホタル幼虫上陸地点(★)および PHABSIM による CSI 計算結果 (右上)。水制 A と B は PHABSIM の計算結果から設置された。

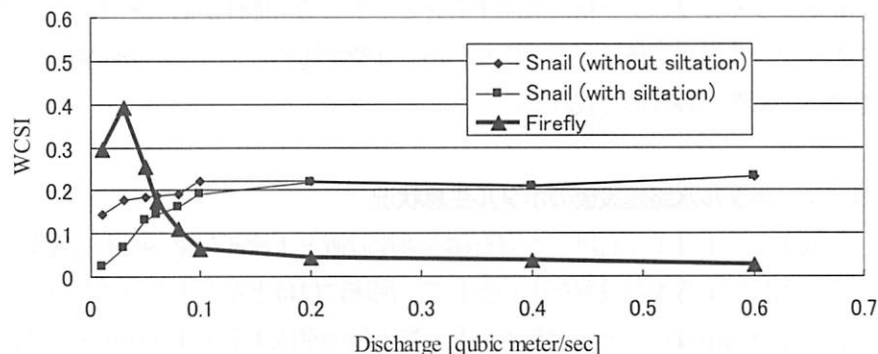


図 16. 水制がない状態でのホタル水路の WCSI

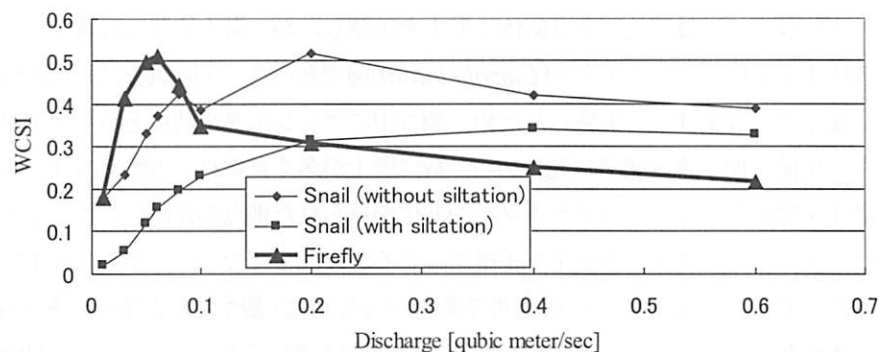


図 17. 水制がある状態でのホタル水路の WCSI

同じ堰から取水された別の水路で大量のカワニナが発生している地点があることなどから、大きな問題はないと判断した。

PHABSIM を用い、建設前のホタルとカワニナの WCSI を計算した結果を図 16 に示す。なお、先行研究(後藤ら 2004)により流速が 30cm/sec を下回るとシルトが堆積しやすくなり、カワニナの生息に悪影響を与える可能性があることが示唆されている。この点を考慮し、図 16 では、図 10 で示した流速に対する HSC に加えて、流速 30cm/sec から 20cm/sec にかけて SI が 0 に直線的に低下する HSC を用いた計算結果も合わせて表示している。

ホタルで名高い一の坂川、吉敷川のホタルに対する WCSI が 0.4~0.6、カワニナに対する WCSI が 0.3 前後であることを考えると、ホタル水路では流量を 0.04m³/sec 程度とした場合、ホタルの WCSI が一の坂川や吉敷川に近い値となる。ただしこのとき、カワニナに対する WCSI は、藻類の繁茂やシルトの堆積を考えると 0.1 程度となる。先行研究からは、カワニナについては WCSI が 0.3 を上回っていないと十分なカワニナが見られないという結果を得ているため、これは心配な結果である。一方流量を増やすと、カワニナに対する WCSI は 0.2 強に増加するものの、ホタルに対する WCSI は急速に低下してしまう。これはホタルに対して流速が速くなりすぎるためである。

この点をふまえ、水路自体は現況のものを生かすものの、水路の 2 カ所(図 15 の Groin A,B) に水制を設けて背水部を形成させ、水路内に低流速部を形成すると同時に、高流量時には広い範囲が冠水し、全体として流速を低減するようホタル水路が設計された。このときの WCSI を図 17 に示す。この設計により、高流量時のホタルの WCSI の低下は大幅に改善され、カワニナの WCSI 値も上昇し、シルトの堆積や藻類の繁茂が見られなければ、広い流量範囲にわたって十分な値となった。計画水路で低流量時にシルトの堆積や藻類の繁茂が見られるかどうかは、今後の確認が必要である。現実的には、維持流量を 0.06m³/s とし、シルトの堆積や藻類の繁茂が見られる時には 0.2m³/s 程度まで流量を一時的に増加するなどの管理をすればホタル生息に適した流水環境が維持できると考えられた。周辺環境整備については、水路周辺への植栽が実施された。

なお、本水路の環境をマクロ生息場の観点から評価すると、水温が夏期に 30 度を超えることがあり、ホタルやカワニナにとって高すぎる恐れがある。これは、本農業用水の取水堰により広大な滞留部が形成されているためである。できることならホタル水路はより上流に建設したかったが、5.5 節で述べたような諸般の制約からこの場所以外を選ぶことができなかった。このため、ホタルやカワニナの生息数の推移については注意深く見守る必要があり、場合によっては畜養したホタルやカワニナを秋に放流する必要があると考えている。本事例では水環境についてはモデルを用いたマクロ生息場評価は行っていないが、4 章で述べたように、気候変動の影響のうち気温の変化はこのようなマクロ生息場への影響という形で表れる。

5.7 ホタル水路建設後のホタル生息状況

平成 17 年 1 月より右岸への空石積み護岸設置と下流部左岸への木杭護岸の設置、ならびに水路中央部と下流部の 2 箇所への木杭による水制設置を中心として、河床にはほとんど手をつけない形で工事が行われ、3 月初旬に竣工した。竣工後は流量 0.1m³/sec 前後に調整された。竣工後の平成 17 年 4 月初旬~5 月初旬の 5 回の降雨時の午後 8 時から 12 時にかけて、幼虫上陸調査を実施した。上陸調査結果と PHABSIM により計算されたゲンジボタルについての CSI の分布は図 15 に示されている。

上陸調査では最終的に 23 個体の潜土を確認したが、潜土位置に設置した羽化トラップにより羽化が確認できた 19 個体中 17 個体がヘイケボタル(*Luciola lateralis*)であった。上陸調査は雨天の夜間に基本的には無灯火で、最小限の赤色灯火使用という条件下で実施したため、調査中にゲンジボタル幼虫とヘイケボタル幼虫を区別することは困難であった。また、田植え期の流量調節の失敗から、特に潜土が多く見られた水路上流部で水没により羽化を確認できなかったことや、潜土を確認した以上にヘイケボタルの羽化が見られた地点が存在したことなどから、上陸調査で確認された幼虫のゲンジボタルとヘイケボタルの比率を正確に論じることができない。しかし、図 15 にみられるように、PHABSIM でゲンジボタルの CSI が高く評価された範囲で多くの幼虫上陸が観察された事実は興味深い。

本水路のホタル・カワニナ生息状況は今後も継続してモニタリングし、HSC の改善にフィードバックしていくことに

なっている。

6. おわりに

2章でも述べたように、河川物理生息場モデルは環境の定量評価の法的な要求があるアメリカで発展した。日本では残念ながらいまだ法的には定量評価のインセンティブはなく、物理生息場モデルが広く利用されるには至っていない。しかし、気候変動の影響の主要な部分が本モデルの説明変数として利用可能であることを考えると、本モデルについての経験を積み、正しく利用できるようになっておくことが、今後予想される気候変動に迅速に対応していくためにも重要である。5章の事例は、比較的単純で低コストな生息場評価手法でも、目的と利用法によっては事業推進上の参考となることを示している。このような小さな事業で経験を積むことが、本手法の発展・普及には必要であろう。

一方、上の記述とは反するが、紛争が予想されるような微妙な事業での利用こそが本手法の真骨頂であり、かつそのような場面での利用にあたっては5章で紹介したような取り組み方では不十分な場合もあることを最後に強調しておきたい。5章では HSC を既存の情報や比較的簡単な調査に基づき定めたが、それはこの事業に争点となる要素が少なかったからである。多方面からの敵意を持った批判に耐える HSI モデルを構築するには、多大な時間と費用が必要であることもまた事実である。基本的なコンセプトの単純さやプログラムがダウンロードできる気安さゆえに無邪気にこうした手法を利用し、かえって事業費を浪費したあげくに事業が頓挫してしまわぬよう、十分注意する必要がある。本場米国にあっても、「勝手」に PHABSIM をダウンロードして事業に使用し、その挙句に裁判沙汰になっている事例があると USGS 関係者から聞いている。そうした微妙な事業に本手法を適用する場合には、まずは PHABSIM の大部のマニュアル(USGS 2001) (Hardy 2003) の HSC 構築法や解析結果の解釈法、さらには合意形成術などのノウハウをじっくり読破し、理解する必要があるのではないかと。幸い、中村らの邦訳(1999)や、HEP の書籍(日本生態系協会 2005)、筆者らによる Hardy (2003) の和訳、日本で構築された HSI モデル事例(日本生態系協会 2004) など、日本語で勉強するための資料も整いつつある。こうした原資料に近いところからしっかり理解する必要があることを、自戒も込めて述べておきたい。

参考文献

- 後藤益滋, 関根雅彦, 金尾充浩, 羽原正剛, 高杉昌司, 浮田正夫 (2004) ホタルが生息する河川を創造するためのカワニナ生息条件の研究. 河川技術論文集. 10, 453-458.
- 平野慎吾 (1999) 一の坂川ホタル放流. 平成 11 年度 計画と資料. 山口ふるさと伝承総合センター
- 藤咲雅明、後藤章 (1995)ホタルの生息を考慮した水路構造の研究. 農業土木学会関東支部大会講演要旨 46.17-19.
- 原内裕 (1993) ホタルの導入について. HEC レポート, 133, 6-7.
- Hardy, T. B. (2003) The Theory and Application of the Physical Habitat Simulation System (PHABSIM) for Windows (PHABWin-2002) Lecture Manual. pp. 150.
- 檜山博昭, 田中裕一, 中瀬浩太 (1992) ヘイケボタル育成環境造成法の確立ーヘイケボタル生態学的研究ー. 五洋建設技術研究所年報. 22. 165-170.
- 今森光彦(2000)ヤマケイポケットガイド⑱ 水辺の昆虫. 山と溪谷社. pp.281.
- 井上倫道, 関根雅彦, 金尾充浩, 後藤益滋, 浮田正夫 (2003) GIS によるホタル生息適地の探索. 第 31 回環境システム研究論文発表会講演集, 525-530.
- 児玉行 (1994) 山口のゲンジボタルと保護対策. 瀬戸内海科学. 16, 142-148.
- 南喜市郎 (1983) ホタルの研究. サイエンティスト社. pp.350.
- 中村俊六、テリー・ワドゥル (原著: アメリカ合衆国内務省/国立生物研究所) (1999) IFTM 入門. (財) リバーフロント整備センター. pp. 197.
- (財) 日本生態系協会 (2004) 環境アセスメントは HEP でいきる. ぎょうせい. pp. 206.
- (財) 日本生態系協会(2004)日本リスの HSI モデル Ver1.0. (財) 日本生態系協会. pp.14.(他に、テン、ミドリシジミの

HSI モデルが公表されている)

大場信義 (1988) 日本の昆虫⑫ ゲンジボタル. 文一総合出版. pp.198.

渋江桂子, 大場信義, 藤井英二郎 (1995) 三浦半島野比地区におけるゲンジボタルの成虫個体数に影響を及ぼす生息環境要因の解析. ランドスケープ研究. 58(5), 121-124.

自然環境復元研究会 (1991) ホタルの里づくり. 信山社サイテック. pp. 136.

Stalnaker, C., Lamb, B. L., Henriksen, J. Bovee, K., Bartholow, J. (1994) The instream flow incremental methodology A Primer for IFIM. National Ecology Research Center and National Biological Survey. pp. 99.

高見明宏 (1991) カワニナ属 3 種の産仔頻度,産仔数と新生貝の大きさ. Venus. 50(3),218-232.

高見明宏 (1995) 室内実験におけるクロダカワニナの成長と産仔数. Venus. 54(2),123-132.

鳥川ホタル保存会(2009/7/10 現在)ゲンジボタルの生態・人工飼育ホームページ

<http://www2.gol.com/users/nekopapa/hotaru/torikawa/genji.htm>

University of Alberta (2009/7/10 現在) River2D ホームページ <http://www.river2d.ualberta.ca/>

U.S. Environmental Protection Agency (2009/7/10 現在) River and Stream Water Quality Model ホームページ <http://www.epa.gov/athens/wwwqtsc/html/qual2k.html>

U.S. Geological Survey (2001) PHABSIM for Windows User's Manual and Exercises. Midcontinent Ecological Science Center Open File Report 01-340, pp. 288.

U.S. Geological Survey (2009/7/10 現在) PHABSIM ホームページ <http://www.fort.usgs.gov/products/software/phabsim/phabsim.asp>

渡部重久, 板垣博 (1978) カワニナの生態学的研究. Venus. 37(2), 77-82.

渡辺直(1980)びわ湖南湖におけるタテヒダカワニナおよびカゴメカワニナの分布とその決定要因について. 陸水学会誌,41(4),212-224.

吉岡良一 (2001) ゲンジボタルの話 (その 2) : 社団法人中部建設協会会報.69. 23-27.

平松和也 (1994) ゲンジボタルの飼育試験. 大阪府立淡水魚試験場 業務報告. 26. 87-94.

遊磨正秀(1987)人工水路のゲンジボタル成虫個体群. 遺伝,41(3), 48-52.

遊磨正秀(2001)ゲンジボタル成虫の生息密度におよぼす照度と樹冠被度の影響. 応用生態工学. 4(1), 59-63.