

流況－生息環境評価モデルに基づく 最適河道断面の選択手法の提案

永矢 貴之^{1*}・白石 芳樹²・筈瀬 明日香²・鬼束 幸樹³・東野 誠⁴・
高見 徹⁴・東 均⁵・秋山 壽一郎⁶

¹株式会社 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）
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

²株式会社 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）

³九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系（〒804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1）

⁴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）

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

⁶九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系

* E-mail:nagaya@ctie.co.jp

本研究では、五ヶ瀬川水系大瀬川を対象とし、仮想的な掘削断面をいくつか想定し、平面二次元流況解析モデルを用いて平水時における流況解析を行った。川村の提案したアユ、オイカワ、カワムツおよびウグイに関する水深、流速および底質の選好曲線を利用し、これらの魚種の生息適正值を各仮想断面について予測した。続いて、Simpsonの多様度指数を用いて各仮想断面における多様度指数を比較した。また、同様の解析モデルを用いて洪水時における流況解析を行い、計画高水時における治水効果を評価した。最後に、魚類の利用可能生息場面積、魚種の多様性、治水効果および河道の安定性を総合的に考慮した最適な河道断面の選択手法を提案した。

Key Words : fish, habitat, environment, PHABSIM, suitability index, 2-D numerical simulation

1. はじめに

1997年に「環境影響評価法」、いわゆる「環境アセスメント法」が成立し、1999年に施行された。この法律によって一定規模以上の事業を行う場合には環境アセスメントを行うことが義務付けられた。河川もその例外ではなく、大規模な改修を行う際に環境アセスメントを行う必要がある。しかし、実際に信頼性の高い河川環境アセスメントを行うことは容易ではない。なぜなら、河川構造物を設置した後の水深や流速の予測はある程度可能であるが、流況変化後の河川に生息する生物相およびその個体数を予測することは極めて困難だからである。これは、各種生物相が好む水理環境が解明されていないことに主たる原因がある。各種生物相の中でも、河川においては魚類相の変化が最も注目される。河川には様々な種類の魚が生息しており、その全ての魚種を保全する

必要がある。

魚の生息環境評価法の代表例として、PHABSIMが挙げられる。PHABSIMは、水深、流速、底質、カバーなどに対する各魚種の選好曲線SI (Suitability Index)から合成適正值CSI (Composite Suitability Index)を求め、これを面積積分することで利用可能生息場面積WUA (Weighted Usable Area)を算出する方法である¹⁾。PHABSIMを用いた魚類の生息環境評価の精度は、選好曲線が正確かどうかに大きく依存する。各魚種の水深、流速、底質、カバーなどに関する選好曲線の解明は主として海外で行われており、サーモンやトラウトについての選好曲線が既にModde & Hardy²⁾やThomas and Bovee³⁾によって解明されている。一方、我が国に生息する河川魚の選好曲線については、ほとんどと言っていいほど解明されていない。傳田ら⁴⁾は信濃川水系千曲川において、定置網、エレクトロフィッシャーおよび潜水による魚類調査を行い、アユ、

アブラハヤ、オイカワ、ウグイ、コイ、ギンブナなど20魚種程度の生息場の特性を調査したが、選好曲線の定式化には至っていない。近年、川村¹⁾は津保川、武儀川および黒川を調査し、アユ、オイカワ、カワムツ、ウグイ、アマゴ、ニゴイ、カワヨシノボリおよびアジメドジョウの生息選好曲線を定式化した。我が国の河川魚に関する選好曲線は現在のところ、川村¹⁾のものが代表的といえよう。

一方で、我が国では記録的な集中豪雨が近年報告されており、たびたび堤内が洪水氾濫の被害を受けている。宮崎県延岡市を貫流する五ヶ瀬川もその1つで、平成17年に洪水氾濫を引き起こした。現在、五ヶ瀬川は激甚災害対策特別緊急事業に採択されているが、治水および環境の両立がとれた川づくりが望まれている。洪水は一年の内、ごく僅かな期間にしか発生しないイベントであり、通常は河川の流量は低水路内に収まっている。したがって、平水時に対しては魚類の生息環境評価を行うべきで、一方、洪水時に対しては治水効果の検討を行うべきである。また、長期にわたる視点からは河道の安定性も考慮に入れるべきである⁶⁾。

本研究では、五ヶ瀬川水系大瀬川を対象とし、仮想的な掘削断面をいくつか想定し、平面二次元流況解析モデルを用いて平水時における流況解析を行った。川村の提案したアユ、オイカワ、カワムツおよびウグイに関する水深、流速および底質の選好曲線を利用し、これらの魚種の生息適正值を各仮想断面について予測した。続いて、Simpsonの多様度指数⁷⁾を用いて各仮想断面における多様度指数を比較した。

次に、同様の解析モデルを用いて洪水時における流況解析を行い、計画高水時における治水効果を評価した。最後に、魚類の利用可能生息場面積、魚種の種多様性、治水効果、河道の安定性を総合的に考慮した最適な断面選択手法を提案した。

2. 河道の特性

(1) 対象流域

五ヶ瀬川は、図-1に示すような流路延長106km、流域面積1,820km²の一級河川であり、その流域は、宮崎・大分・熊本の3県にまたがっている⁸⁾。五ヶ瀬川水系は、水系内の北に位置する北川、その南西に位置する祝子川および南に位置する五ヶ瀬川によって構成され、さらに五ヶ瀬川は下流域で分流し、五ヶ瀬川と大瀬川によって構成されている。



図-1 五ヶ瀬川流域概要図

a) 治水事業の概要

五ヶ瀬川流域の年間平均雨量は約2,500mmであり、全国平均よりも約800mmも降雨量が多い。そのため、古来から水害が多発している。主な洪水は、台風性のものが多く、近年では平成5年8月洪水、平成9年9月洪水、平成17年9月洪水など、五ヶ瀬川の計画高水流量と同等かそれ以上の規模の洪水が発生している。特に平成17年9月洪水では、五ヶ瀬川・大瀬川の各観測所で軒並み既往最高水位を記録し、越水被害等甚大な被害が発生した⁸⁾。

このことから、平成17年度に「五ヶ瀬川激甚災害対策特別緊急事業(激特事業)」が採択され、図-2に示すよう



図-2 五ヶ瀬川激特事業概要⁸⁾

に平成21年度までの5カ年で五ヶ瀬川本川約13.1km(河口～直轄上流端), 派川大瀬川約7.9km(河口～五ヶ瀬川分派地点)および支川祝子川, 北川を対象とし, 河道掘削, 堤防築堤, 橋梁架け替え等が実施される予定である. これらの区間の内, 大瀬川河口から6.0km区間は河道掘削が予定されている.

b) 検討対象領域に生息する魚類

「河川水辺の国勢調査」⁹⁾は全国の一級河川を対象として行われる調査であり, 五ヶ瀬川では 1994 年, 2000 年および 2005 年に魚介類調査が行われた. 大瀬川の激特区間(河口～五ヶ瀬川分派地点までの約 8.4km)には 1K6～2K0(河口からの距離を意味し, 例えば 1K6 は河口から 1.6km 地点となる)および 5K8～6K0 の 2カ所が調査領域となっているが, 前者は感潮域に属している. ここで本研究が対象とした区間は非感潮域のため, 後者のデータのみを採用する. すると, 表-1 に示すような 23 種の魚類が生息していることが確認できた. 河道改修を行う際には, これらの魚種が生息可能で, なおかつ, 治水効果が期待される縦断形状, 横断形状に施工しなければならない.

河道改修後の各魚種の生息環境評価を行うには, それぞれの魚種における選好曲線が既知の必要がある. 上記の魚種の内, 川村によって選好曲線が解明されているものはアユ, オイカワ, カワムツおよびウグイだけである. そのため, これらの魚種に限定して生息環境評価を行わざるを得ない.

表-1 河川水辺の国勢調査による五ヶ瀬川下流域の確認魚種およびそれらの選好曲線の有無(川村の研究による)

魚種	調査年	場所	選好曲線の有無
アユ	2000, 2005	5K8-6K0	○
ウキゴリ	2005	5K8-6K0	×
ウグイ	2000, 2005	5K8-6K0	○
ウナギ	2005	5K8-6K0	×
オイカワ	2000, 2005	5K8-6K0	○
オオヨシノボリ	2005	5K8-6K0	×
カマキリ	2000	5K8-6K0	×
カマツカ	2000, 2005	5K8-6K0	×
カワムツ	2000, 2005	5K8-6K0	○
ギンガメアジ	2000, 2005	5K8-6K0	×
ギンブナ	2000, 2005	5K8-6K0	×
コイ	2005	5K8-6K0	×
ゴクラクハゼ	2000, 2005	5K8-6K0	×
シマヨシノボリ	2000, 2005	5K8-6K0	×
スズキ	2000, 2005	5K8-6K0	×
スミウキゴリ	2000, 2005	5K8-6K0	×
タカハヤ	2005	5K8-6K0	×
トウヨシノボリ	2005	5K8-6K0	×
ドジョウ	2000	5K8-6K0	×
ドンコ	2000, 2005	5K8-6K0	×
ヌマチチブ	2000, 2005	5K8-6K0	×
ボウズハゼ	2000, 2005	5K8-6K0	×
ボラ	2000, 2005	5K8-6K0	×

3. 平面二次元流況解析及び生息環境評価モデル

(1) 計算対象領域および断面形状

前述したように, 大瀬川では河口から 6.6km 区間で河道掘削が予定されている. このうち, 3K4～4K8 は安賀多の瀬に代表される良好なアユの生息域および産卵場が点在し, 河積確保と魚類の生息・生育環境の保全を両立しなければならない重要な区間である. そのため, 3K4～4K8 の区間を検討対象とした.

魚の生息に適した河道掘削断面を決定するには次のようなプロセスが必要である. まず, 現実的な河道掘削断面を複数想定し, それぞれの治水効果および環境への負荷を予測し, 総合的に最適な掘削断面を選択することが必要になる. 一般的に, 河積確保の方策として河床掘削, 低水路拡幅, 高水敷切り下げ等が挙げられるが^{9, 10)}, 量的安全度を確保しても, 河道の安定性, 河川環境とのバランスが必要となってくる. このため, 最近では, 河川環境への配慮から河床掘削以外の方策を採用することが多くなってきている. このことから, 本研究では 4 ケースの仮想的な掘削断面を図-3 に示すように想定した. 各ケースの名称および特徴は以下に示す通りである.

- a) 現況河道: 2002 年の測量に基づいた地形
- b) ケース 1: 高水敷切り下げ・・・平常時には現況河道と同様に低水路のみに流水させる掘削方法
- c) ケース 2: 河道掘削・・・大規模な河床掘削が実施できない場合に拡幅で対応する方法
- d) ケース 3: 緩傾斜勾配で河道掘削・・・高水敷の掘削断面の傾斜を緩やかにした掘削方法
- e) ケース 4: 河床掘削・・・河積確保上やむを得ない場合に採用される方法

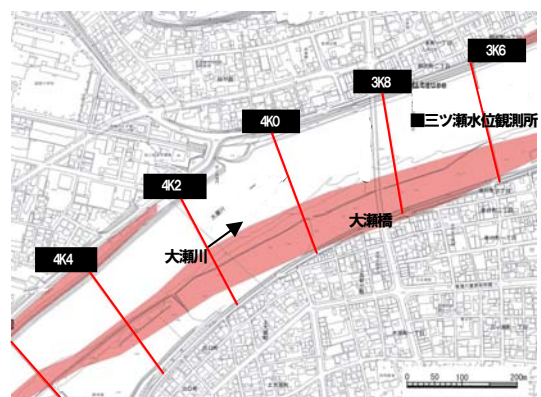


図-3 検討対象領域 (図中シャドーは河道掘削予定範囲)

ケース 4 は, 河積確保上やむを得ない場合に採用される案であるが, ケース 1～3 との比較を行うために検討対象とした. 各ケースの 3K8 における横断面形状を図-4 に示した.

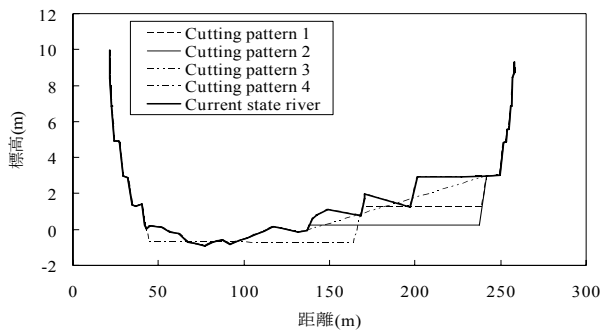


図4 仮想的な掘削断面ケース

(2) 計算モデルおよび計算条件

複雑で広域な流況が解析可能な長田¹¹⁾の一般座標平面二次元流況解析モデルを採用した。

計算メッシュは、4K2から下流端の三ツ瀬水位観測所地点まで縦断方向10m×横断方向5mとし、その他の区間(3K4~3K8, 4K2~4K8)については、縦断方向200m×横断方向5mとした。

a) 平水時における計算条件

表-2(a)に示すように、計算条件として、平成15年9月3日における実測流量の24.9m³/sを計算領域の上流端に与えた。このときの実測水位を下流端に与えた。計算時間間隔は0.1sで、流れが定常になるまで繰り返し計算を行った。平成15年9月3日に行われた対象領域の水深測定の結果と計算結果を比較した結果、水深および水際線の位置などを良好に再現していることを確認した¹²⁾。

b) 洪水時における計算条件

表-2(b)に示すように、平均年最大流量1,930m³/s(概ね2~3年に1回発生する流量)を計算領域の上流端に与えた。このときの下流端水位はH-Q曲線より求めた。計算時間間隔は0.1sで、流れが定常になるまで繰り返し計算を行った。

表-2(a) 平水時における計算条件

項目	条件
上流端	対象区間上流端に 24.9m ³ /s (平水流量相当)の流量を与える
下流端	対象流量流下時の水位観測所 (三ツ瀬) の実測水位を与える
計算方法	定常状態になるまで計算を繰り返す
粗度係数	高水数: 0.020~0.080s/m ^{1/3} 低水路: 0.030~0.033s/m ^{1/3}
計算時間間隔	0.1s

表-2(b) 洪水時における計算条件

項目	条件
上流端	対象区間上流端に 1,930m ³ /s (年平均最大流量)の流量を与える
下流端	対象流量流下時の水位観測所 (三ツ瀬) のH-Q関係より水位を与える
計算方法	定常状態になるまで計算を繰り返す
粗度係数	高水数: 0.020~0.080s/m ^{1/3} 低水路: 0.030~0.033s/m ^{1/3}
計算時間間隔	0.1s

(3) 生息環境評価モデル

a) PHABSIM

水理量から魚の生息環境を予測するものとして、PHABSIM が挙げられる¹⁾。一般に魚の生息環境に及ぼす因子として、流速、水深、底質およびカバーが挙げられる。

$$CSI = SI(h) \times SI(v) \times SI(s) \times SI(c) \quad (1)$$

ここに、 $SI(h)$ 、 $SI(v)$ 、 $SI(s)$ 、 $SI(c)$ は、それぞれ、水深 h 、流速 v 、底質 s 、カバー c に対する選好値である。

続いて、次式より利用可能生息場面積 WUA (Weighted Usable Area)が求められる。

$$WUA = \int_A (CSI) dA \quad (2)$$

ここに、 A は面積である。

b) 河川魚の生息に関する選好曲線

川村¹⁾は津保川、武儀川および黒川を調査し、8月におけるアユ、オイカワ、カワムツ、ウグイ、アマゴ、ニゴイ、カワヨシノボリおよびアジメドジョウの水深 h 、流速 v 、底質 s に関する生息選好曲線を定式化した。図-5にアユ、オイカワ、カワムツおよびウグイの水深 h 、流速 v 、底質 s に関する選好曲線を図示した。ここに、 k_s は平均粒径である。

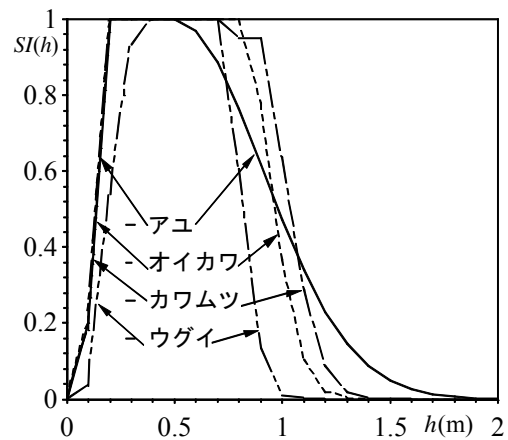


図-5(a) 水深に対する選好曲線

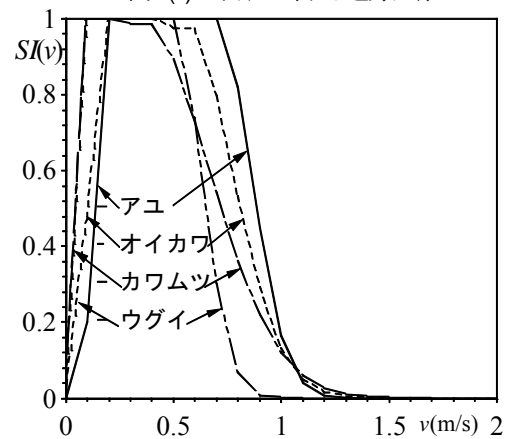


図-5(b) 流速に対する選好曲線

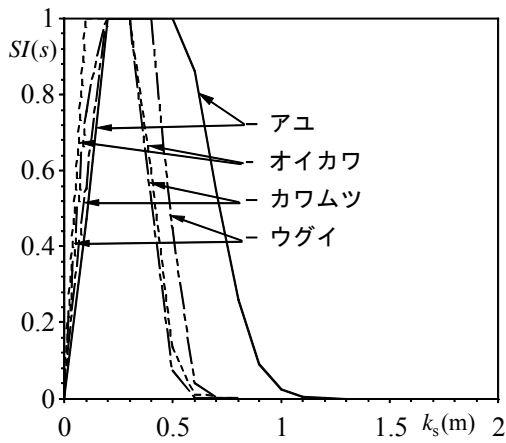


図-5(c) 底質に対する選好曲線

同一魚種において河川が異なると選好曲線に相違が生じるかどうかについては現在明確にはされていない。Nishida¹³⁾は湖産アユ、鹿児島産アユ、対馬産アユおよびリュウキュウアユ間に遺伝的な形態的異変が生じていることや卵数に相違があることを明らかにした。アユは母川回帰性のない通し回遊魚であり¹⁴⁾、世代交代するにつれて生息する河川が変化する可能性がある。それにも関わらず遺伝的な形態的異変が日本列島内で生じている。オイカワ、カワムツ、ウグイについては同様な研究がほとんど知られていないが、オイカワおよびカワムツのほとんどは一生を河川で生息する純淡水魚であり、アユよりもさらに地理的に遺伝的な形態的異変が生じていることが想像される。しかし、遺伝的な形態的異変によって選好する水理環境に変化が生じるかどうかは現在解明されていない。そのため、本研究は川村¹⁾の提案した選好曲線が他の河川でも適用可能と仮定するが、この仮定は今後の検証が必要である。なお、季節に応じて選好曲線が変化することが知られているため、川村の選好曲線を用いた生息環境予測は夏頃にしか適用できない。また、川村¹⁾はカバーに関する選好曲線を示していないため、カバーによる影響を考慮することができない。ただし、本研究が対象とした領域は河川の下流域で、そもそも樹木によるオーバーハングなどがほとんどない。また、対象とした魚類も樹木によるオーバーハングや石の隙間に隠れる性質が顕著でないため、今回はカバーによる影響を無視した。

$$CSI = SI(h) \times SI(v) \times SI(s) \quad (3)$$

一方、底質の平均粒径 k_s については次式から求めた¹⁵⁾

$$k_s^{1/6} = 7.66n\sqrt{g} \quad (4)$$

ここに、 g 、 n はそれぞれ重力加速度、マンニングの粗度係数である。

4. 洪水防御と魚類の生息環境を考慮した河道断面の検討

(1) 平水時における魚の生息適正の評価

a) 平水時における流況

図-6に現況河道および各ケース(1~4)の水深コンターを示す。図中左岸側に示した表示は河口からの距離を示している。同図より、現況河道では、4K0付近のやや左岸よりの領域で水深が浅くなっていることが確認される。この領域は、安賀多の瀬に相当する。

ケース1(高水敷切り下げ)においては、現況河道では陸域であった右岸側高水敷に水が流れている。ケース2(河道掘削)も同様であるが、ケース1よりも右岸側高水敷水深は深くなっている。ケース3(緩傾斜勾配で河道掘削)では右岸側の水際線が現況河道よりも内陸に移動しているが、その変化量はケース1および2と比較し、微小である。ケース4(河床掘削)では水深が横断方向に一樣になり、現況河道よりも全体的に水深が低下している。

図-7に現況河道および各ケース(1~4)の流速コンターを示す。現況河道の結果に着目すると、地形が左岸方向に湾曲しているため、内湾側の流速(0.2m/s程度)よりも外湾側の流速(0.4~0.6m/s)の方が高速になっている。

仮想断面の各ケースの結果に着目すると、ケース1(高水敷切り下げ)では右岸側高水敷において低流速(0.2m/s程度)の領域が広がっている。ケース2(河道掘削)では、低水路において現況河道よりも大幅に減速している。これは、河岸拡幅に伴う河積の増加により生じたものと考えられる。ケース3(緩傾斜勾配で河道掘削)では、右岸側水際部の狭い領域で流速の増加が観察されるが、概略は現況河道と類似している。ケース4(河床掘削)では、外湾側の流速が顕著に増加している。これは、低水路が横断方向に凹凸のないフラットな形状のため、遠心力によって外岸側に流れが集中することが原因と考えられる。

b) 平水時における魚類の生息適正值 CSI

平面二次元計算によって得られた結果に図-5および式(4)を適用すると、各魚種の生息適正值 CSI が求められる。図-8~図-11にアユ、オイカワ、カワムツ、ウグイにおける生息適正值 CSI のコンターを示した。

アユの生息適正值 CSI について着目する。図-8(a)に示された現況河道では、両岸の水際部および4K0付近の河道中央で CSI が高くなっている。水際部における CSI の増加については検証データの欠如のために適切かどうかを判断できないが、河道中央で CSI が増加している領域は、安賀多の瀬に相当している。当然、瀬では淵よりも水深が低下し、流速が増加するが、図-5(a)に示されたように、水深の低下によって $SI(h)$ が増加し、その結果 CSI が増加したことを示している。なお、淵

よりも瀬の方がアユの生息数が多いことが知られており、妥当な結果と判断できる¹⁶⁾。

続いて、各仮想断面の結果について着目する。ケース1(高水敷切り下げ)では、高水敷切り下げ箇所において、広い領域でCSIが高くなっている。これは、水深、流速および底質のいずれもSIが高い値を有することが原因である。

ケース2(河道掘削)では、高水敷切り下げ箇所においてCSIが高い領域が存在するものの、ケース1の変化と比べると領域の範囲が狭く、またCSIの値も小さい。これは、ケース1よりも水深が増加したことが原因である。

ケース3(緩傾斜勾配で河道掘削)では、現況河道のCSIとほぼ同様になっている。これは、図-5および6で明らかになったように、水深および流速が現況河道のものと同様になっていることが原因である。

ケース4(河床掘削)では、兩岸付近でCSIが増加している。

いずれのケースにおいても、4K0付近の河道中央でCSIの値が高くなっている。すなわち、いずれのケースにおいても、安賀多の瀬におけるアユの生息域は保全されると判断される。

続いて、魚種間の相違について着目する。今回、対象としたオイカワ、カワムツ、ウグイにおける生息適正值CSIの分布およびその強度はアユの結果とかなり類似している。水野・御勢¹⁷⁾は宇川において河川魚の生息調査を行い、オイカワはBb型からBb-Bc移行型まで、カワムツはAa-Bb移行型からBb-Bc移行型まで、ウグイはAa型からBb-Bc移行型まで、アユはBb型からBb-Bc移行型まで主として生息することを明らかにし、また、それぞれの河川形態型における個体出現率(ある河川形態型におけるある魚種の確認個体数/当該河川におけるその魚種の総確認個体数)が各魚種で異なることを明らかにした。これは、上記の魚種の水深、流速および底質の選好曲線に相違があることを示唆している。また、オイカワとカワムツが同一河川に生息する場合、オイカワは下流域に、カワムツは上流域に棲み分けを行うことが知られている。こうした複数の魚種が生息する場合に棲み分けが生じることは、アユとオイカワでも知られている。したがって、その河川に存在する魚種の種類によって、各魚種の選好曲線は変化する可能性が高い。川村の提案した選好曲線を使用する上で以上のような課題が残されているが、現時点では川村の提案した選好曲線以外に河川魚の選好曲線が存在しないので本研究では採用した。今後、より精度の高い選好曲線が得られれば生息適正值CSIの精度の向上が期待される。

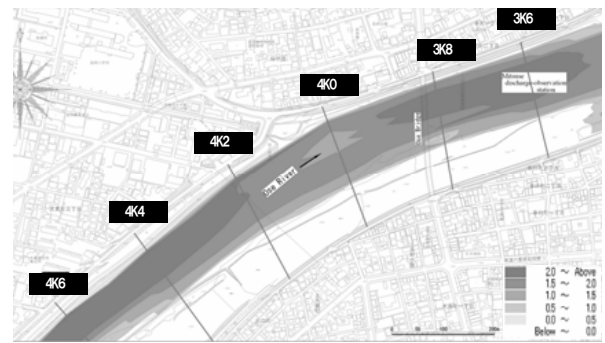


図-6(a) 水深コンター図 (現況河道)

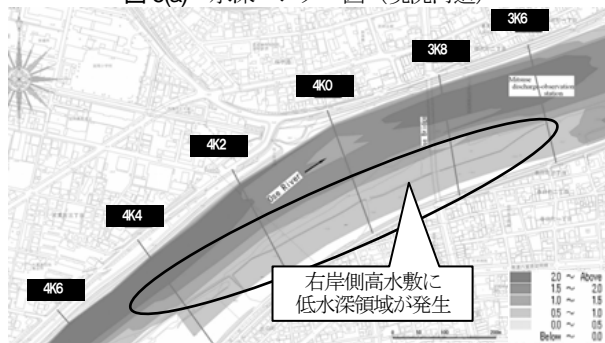


図-6(b) 水深コンター図 (ケース1)

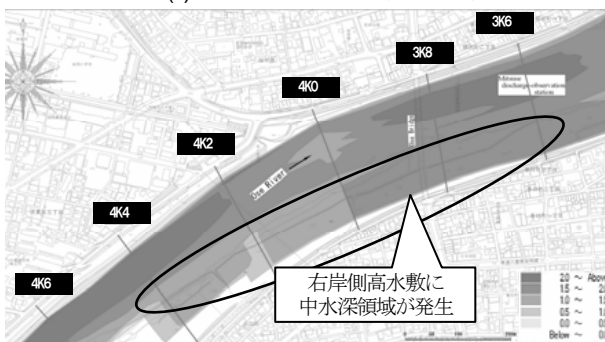


図-6(c) 水深コンター図 (ケース2)

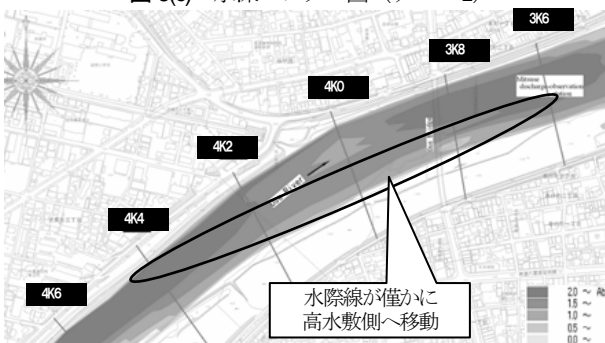


図-6(d) 水深コンター図 (ケース3)

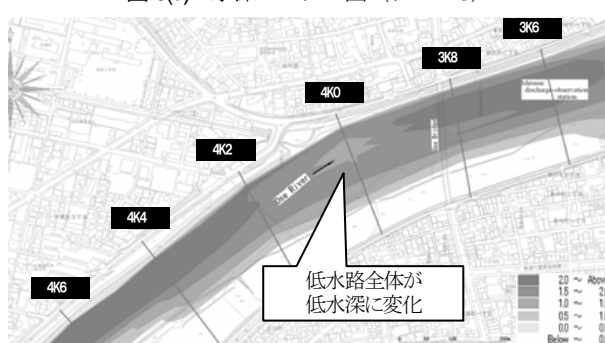


図-6(e) 水深コンター図 (ケース4)

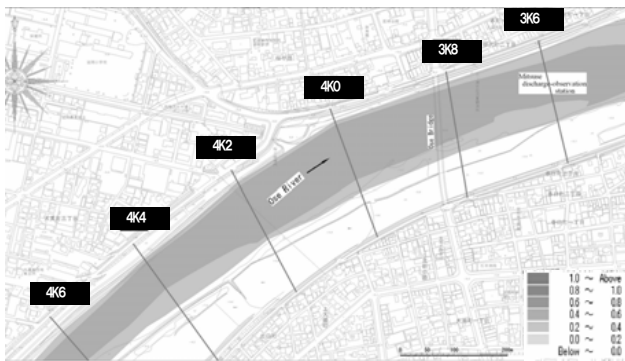


図-7(a) 流速コンター図 (現況河道)

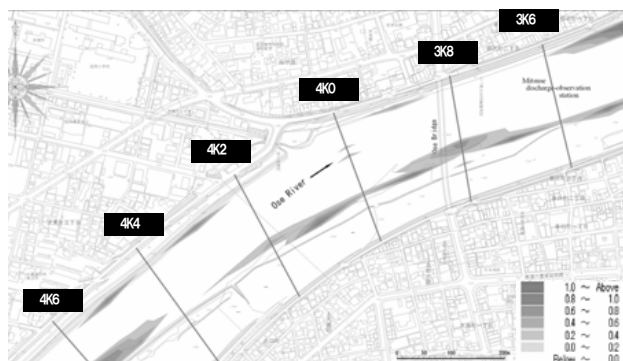


図-8(a) CSIコンター図 (アユ: 現況河道)

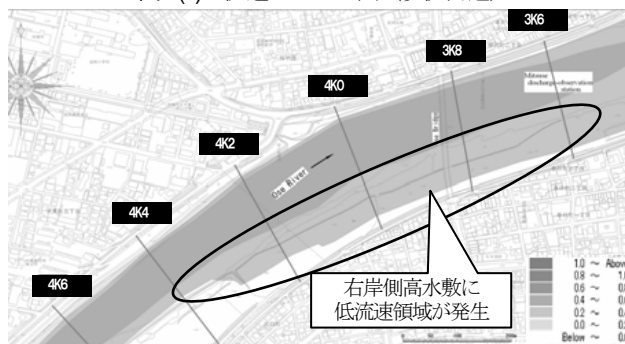


図-7(b) 流速コンター図 (ケース 1)

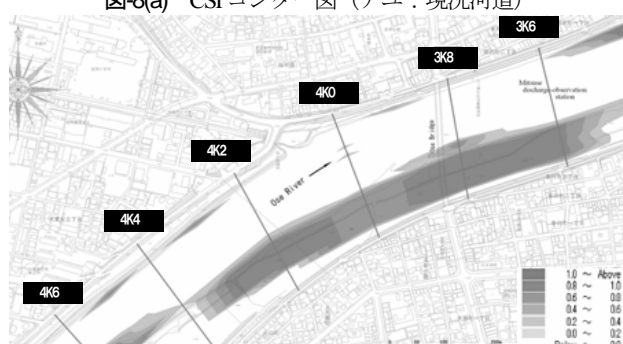


図-8(b) CSIコンター図 (アユ: ケース 1)

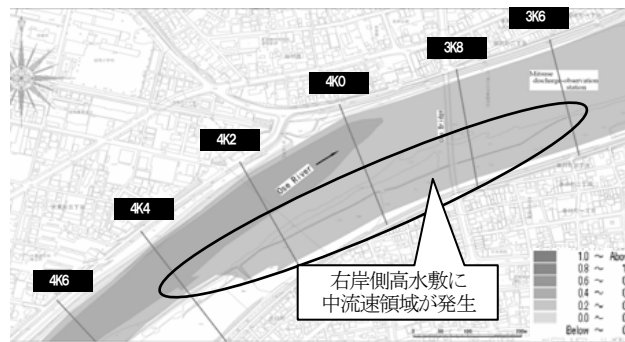


図-7(c) 流速コンター図 (ケース 2)

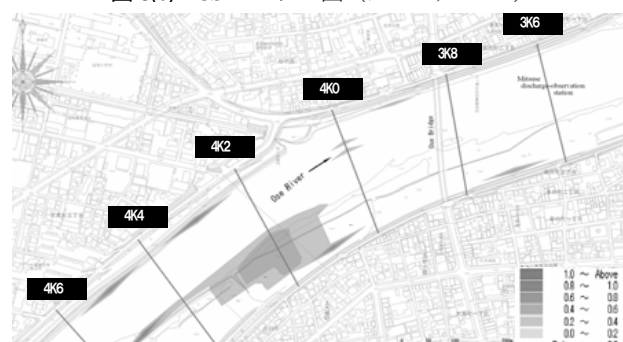


図-8(c) CSIコンター図 (アユ: ケース 2)

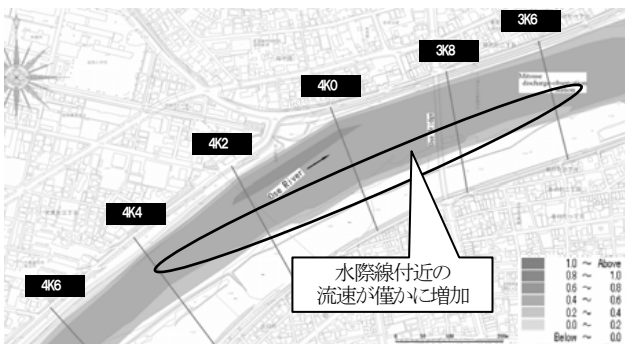


図-7(d) 流速コンター図 (ケース 3)

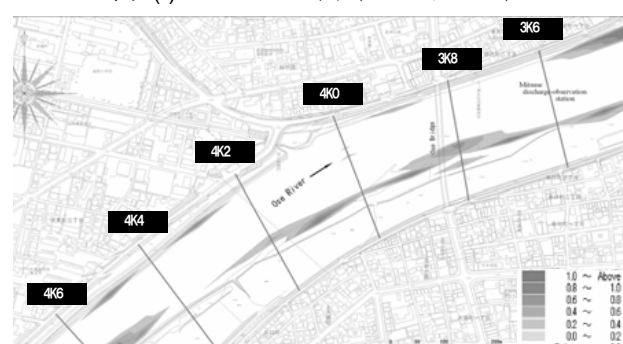


図-8(d) CSIコンター図 (アユ: ケース 3)

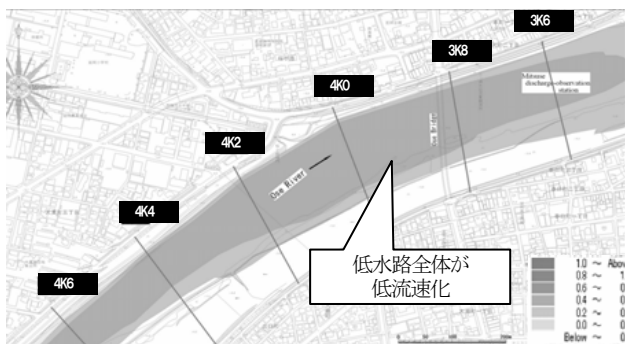


図-7(e) 流速コンター図 (ケース 4)



図-8(e) CSIコンター図 (アユ: ケース 4)

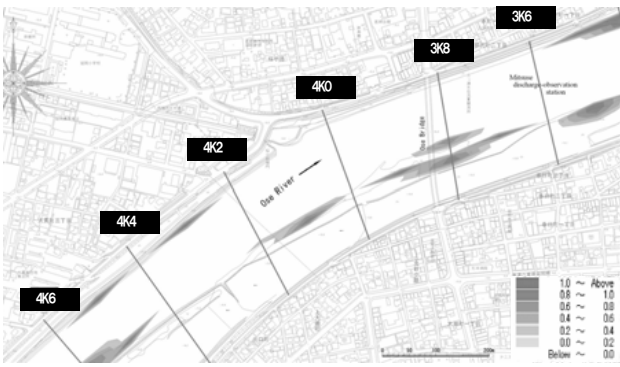


図-9(a) CSIコンター図 (オイカワ：現況河道)

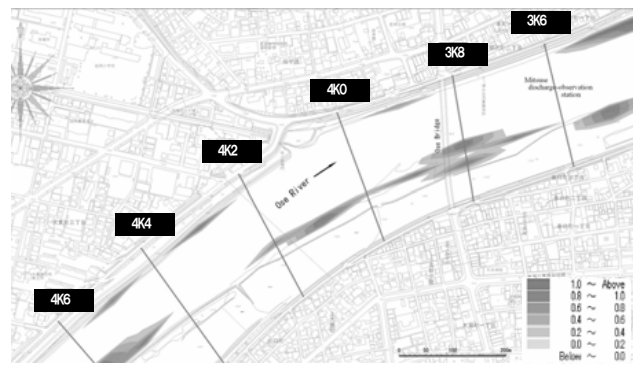


図-10(a) CSIコンター図 (カワムツ：現況河道)



図-9(b) CSIコンター図 (オイカワ：ケース1)



図-10(b) CSIコンター図 (カワムツ：ケース1)

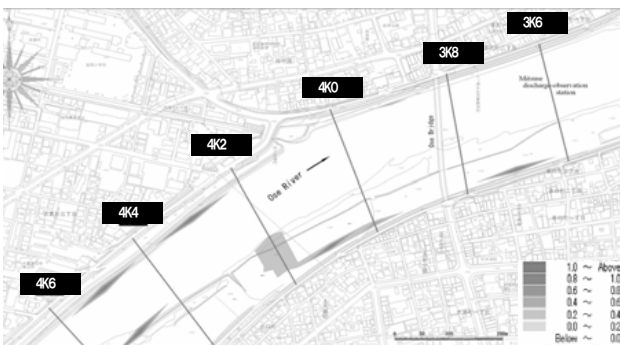


図-9(c) CSIコンター図 (オイカワ：ケース2)



図-10(c) CSIコンター図 (カワムツ：ケース2)



図-9(d) CSIコンター図 (オイカワ：ケース3)

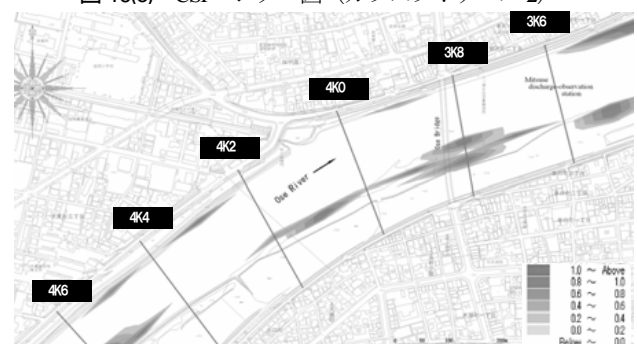


図-10(d) CSIコンター図 (カワムツ：ケース3)

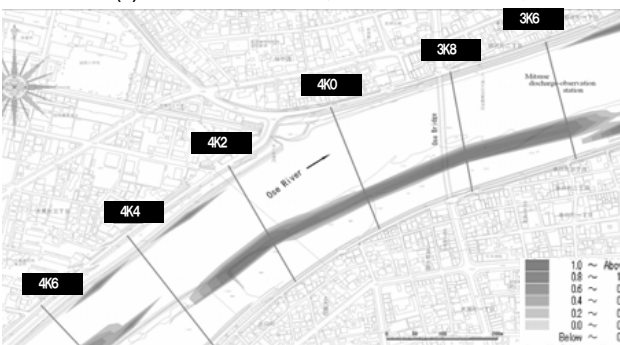


図-9(e) CSIコンター図 (オイカワ：ケース4)

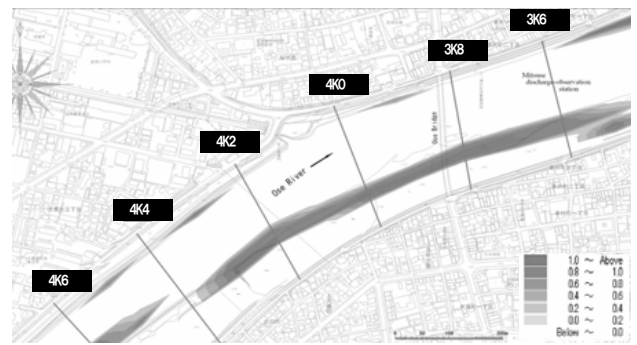


図-10(e) CSIコンター図 (カワムツ：ケース4)



図-11(a) CSIコンター図 (ウグイ: 現況河道)

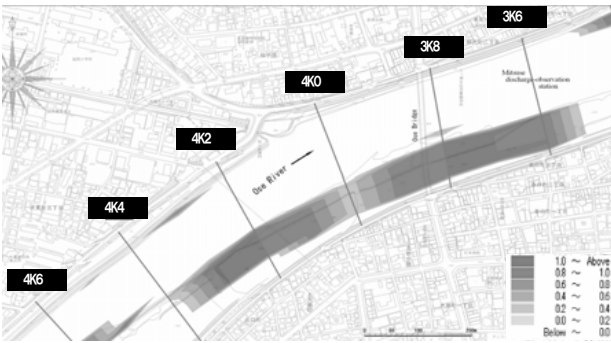


図-11(b) CSIコンター図 (ウグイ: ケース1)



図-11(c) CSIコンター図 (ウグイ: ケース2)



図-11(d) CSIコンター図 (ウグイ: ケース3)

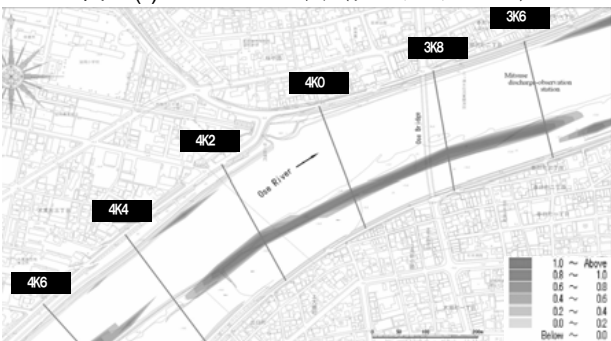


図-11(e) CSIコンター図 (ウグイ: ケース4)

c) 平水時における魚類の利用可能生息場面積 WUA

生息適正值 CSI を定量的に把握するために、式(2)より利用可能生息場面積 WUA を算出した。図-12 に WUA のケース変化を魚種ごとに示した。まず、魚種ごとのレスポンスの相違に着目する。なぜなら、ある魚種の WUA が増加しても、他の魚種の WUA が減少する場合、断面形状を抜本的に見直すか、魚種間で保全すべき優先順位を決めるなどといった必要性が生じるからである。

図-12 より、現況河道と比較すると全てのケースにおいて、全魚種の WUA が同様な割合で増加、減少あるいはほぼ不変となっている。例えば、ケース1における各魚種の WUA はアユ、オイカワおよびカワムツにおいては約 $7,500\text{m}^2$ から約 $10,500\text{m}^2$ に増加し、ウグイにおいては約 $4,500\text{m}^2$ から約 $7,000\text{m}^2$ に増加しており、全魚種とも WUA は約 1.5 倍程度の増加を示している。したがって、魚種間のレスポンスの相違は顕著ではない。

続いて、各ケースの変化について着目する。現況河道と比較すると、ケース1(高水敷切り下げ)では全魚種の WUA が顕著に増加している。これは、ケース1においては、今回対象とした全魚種の個体数が増加することを意味する。一方、ケース2(河道掘削)では全魚種の WUA が減少している。ケース3(緩傾斜勾配で河道掘削)では、 WUA は現況河道の値からほとんど変化していない。これは、水深および流速が現況河道のものと同様であり、そのため図-8～図-11 に示した通り、生息適正值 CSI も現況河道のものと同様であることが原因である。ケース4(河床掘削)では、全魚種の WUA が現況河道のものより微増している。

次に、今回対象としたアユ、オイカワ、ウグイ、カワムツの生息適正を総合的に判断するために、累積利用可能生息場面積 S を求める。

$$S = \sum_{\text{各魚種}} WUA \quad (5)$$

図-13に累積利用可能生息場面積 S のケース変化を示す。これより、図-12の結果と同様に、ケース1(高水敷切り下げ)が現況河道と比較して最も面積が大きく、次いでケース4、ケース3、ケース2の順となった。すなわち、ケース1および4では累積利用可能生息場面積 S が増加し、ケース3はほぼ不変で、ケース2では減少する。

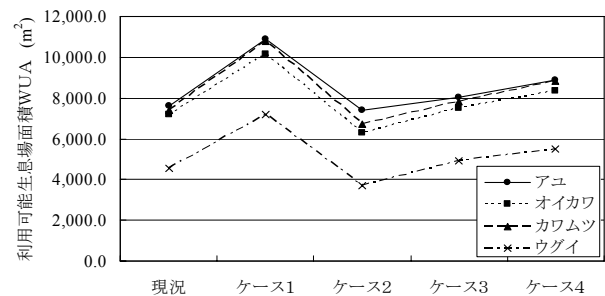


図-12 利用可能生息場面積 WUA のケースごとの比較

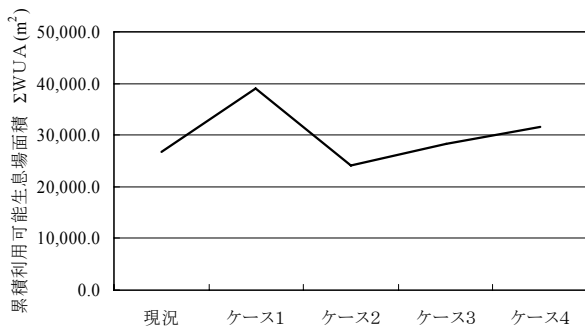


図-13 累積利用可能生息場面積 S のケース変化

d) 平水時における魚類の多様度指数

生態系の多様性を定量的に示すものとして、Simpson²⁾の多様度指数 D が挙げられる。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (6)$$

ここに、 n は群集に含まれる種の数、 p_i は種 i の個体数が群集の全個体数に占める割合である。PHABSIMを用いれば利用可能生息場面積 WUA は算出可能であるが、各魚種の個体数は予測できない。そこで、 WUA と個体数は比例すると仮定し、各ケースにおける多様度指数 D を求めた。この仮定は必ずしも成立しないと考えられる。なぜなら、 WUA は利用可能な面積を示しているだけで、必ずしも魚がその面積を利用して生息することを示していないからである。例えば、 WUA が大きな値をとったとしても、 BOD が極端に高い場合や DO が極端に低い場合には魚類の生息は困難である。また、先述したように各魚種間の棲み分けの問題があるため、全魚種が WUA に比例して個体数が増加するとは考えにくい。しかし、今まで河道計画の段階で種多様性を定量的に予測して、利用した例は全くと言っていいほど存在しない。そのため、魚類の生息に配慮した河道計画の確立を目指す第一歩として、本研究では採用することとした。

図-14 に現況河道および各ケースにおける多様度指数 D を示した。現況河道の値と顕著な差異は生じていないが、多様度指数 D の高い順から、ケース 1, 4, 3, 2 となった。これは、ケース 1 が最も種多様性が高くなることを意味する。

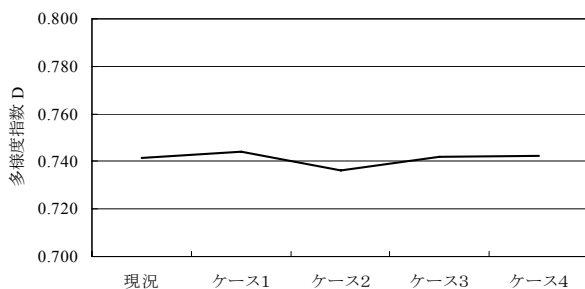


図-14 各ケースにおける多様度指数 D

(2) 洪水時の水位比較

治水効果を確認するため、平均年最大流量 $1,930\text{m}^3/\text{s}$ 時の現況河道およびケース 1~4 における水位の縦断変化を図-15 に示す。ケース 3(緩傾斜勾配で河道掘削)では現況河道の値より上昇しており、治水効果がないどころか逆に氾濫の危険性が高まる。一方、ケース 3 以外は現況河道の値より低下している。計算の上流端 4K8 地点における水位低下量は、ケース 1(高水敷切り下げ)が 0.13m 、ケース 2(河道掘削)が 0.17m 、ケース 4(河床掘削)が 0.04m であり、ケース 1, 2, 3 の順に治水効果が高いことが判明した。

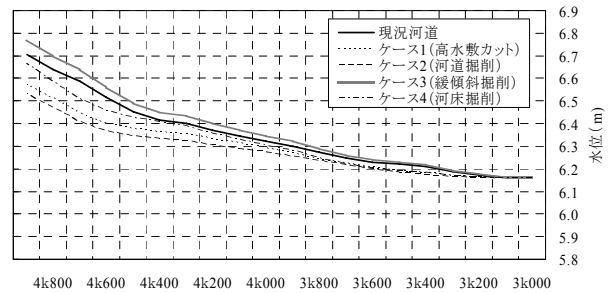


図-15 水位縦断図(平均年最大流量相当時)

(3) 河道の安定性

治水効果が高く、環境への負荷が小さい掘削断面であっても、長期にわたる維持管理に耐えない断面は適切とはいえない。整備後の河床安定性をチェックする方法として、「平均年最大流量時の摩擦速度を算出し、現況からの変化が $\pm 15\%$ 以内であれば、整備後の河床は安定すると判断する」という判定法がある⁹⁾。そこで、現況河道と各ケースの摩擦速度の比率を算出し、表-3 に示した。いずれのケースにおいても摩擦速度比は $0.85 \sim 1.15$ の範囲に入っており、河道の安定性には問題がないと判断される。

表-3 各ケース河道/現況河道摩擦速度比

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
現況河道からの摩擦速度比	0.88	0.86	1.01	1.01

5. 総合評価

以上得られた結果を表-4 に集約する。河道改修を行う上で重要な検討項目である水位低下効果、魚類の累積利用可能生息場面積、魚類の種多様性および河道安定性の4項目について検討する。これら4項目を定量的に評価するために、次式で評価する。

$$\text{水位低下率} = \frac{\text{洪水時現況河道での水位}}{\text{洪水時仮想断面での水位}} \quad (7a)$$

$$\text{利用可能面積変化率} = \frac{\text{仮想断面河道でのS}}{\text{現況河道でのS}} \quad (7.b)$$

$$\text{魚類の種多様性変化率} = \frac{\text{仮想断面河道でのD}}{\text{現況河道でのD}} \quad (7.c)$$

$$\text{河道安定性} = 1.15 - \left| \frac{\text{仮想断面河道での摩擦速度}}{\text{現況河道での摩擦速度}} - 1 \right| \quad (7.d)$$

上式は1よりも値が増加するほど良好な状態になるように工夫している。

まず、ケース3については洪水時に現況河道よりも水位が上昇するため、他の項目を検討するまでもなく不適と判断される。続いて河道の安定性に着目すると、全ケースとも問題ない。そのため、ケース1,2,4より総合的に選択する必要がある。河川によって、水位低下率、利用可能面積変化率、魚種の種多様性変化率および河道安定性に対する重要性は異なるので、一般性のある重みは決定できない。ここでは、試験的に上記の項目の重みが全て等しいと仮定する。表4中に平均値を示したが、最も値の大きなものは、ケース1の1.13であった。したがって、ケース1(高水敷切り下げ)が最適案と自動的に判定される。以上の断面決定手法を図-16に示した。

表4 総合評価

項目	ケース1 (高水敷切り下げ)	ケース2 (河道掘削)	ケース3 (緩傾斜掘削)	ケース4 (河床掘削)
水位低下率	1.02	1.03	0.99	1.01
利用可能面積変化率	1.46	0.90	1.06	1.18
魚類の種多様性変化率	1.00	0.99	1.00	1.00
河道安定性	1.03	1.01	1.12	1.12
平均	1.13	0.98	1.04	1.08

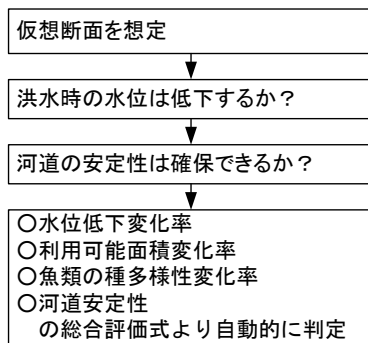


図-16 断面決定手法

6. おわりに

本研究は治水と環境のバランスがとれ、さらに長期的に河道が安定する河道断面形状の決定手法を試作し、図-16に提案したものである。

ただし、本研究ではアユ、オイカワ、カワムツおよびウグイの4魚種のみを対象として解析しており、精度の高い評価とは言い難い。また、川村の提案した選好曲線

に十分な精度を有しているかを検証していない。さらに、水際部のCSIの精度の検証を行っていない。しかしこれまで、河道断面を選定する上で生息環境評価法や種多様性を予測して総合的に判断した例はほとんどなく、精度が低い可能性を否定できないが、今回はそれらに基づく検討を試みた。今後、選好曲線の高精度化および水際部のCSIの精度の検証を行うと共に、他の魚種の選好曲線を解明すれば、さらなる精度の向上が期待される。

謝辞：本研究を行うに当たり、現地計測に理解・協力いただいた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、土田栄組合員およびその他の組合員の皆様には貴重なコメントを頂きました。北川漁協の長瀬一己組合長およびその他の組合員の皆様には貴重なコメントを頂きました。国土交通省九州地方整備局延岡河川国道事務所の塚本剛好副所長、甲斐浩幸課長、徳富泰則専門員、荒巻栄輔係長、甲斐隆嗣技官の諸氏には現地調査に際して調整をして頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 川村三郎：魚類生息環境の水理学，リバーフロント整備センター，2003。
- Modde, T. and Hardy, T.B.: Influence of different microhabitat criteria on salmonid habitat simulation, *Rivers*, Vol.3, pp.37-44, 1992
- Thomas, J.A. and Bovee, K.D.: Application and testing of procedures to evaluate transferability of habitat suitability criteria, *Regulated Rivers, Research and Management*, Vol.8, pp.285-294, 1993.
- 傳田正利，天野邦彦，辻本哲郎：一時的水域の魚類群集多様性向上への寄与とそれを支える物理環境に関する研究，土木学会論文集G, Vol.62, No.3, pp.340-358, 2006.
- 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.
- 財団法人国土技術研究センター編：河道計画検討の手引き，山海堂，2002。
- Krebs, C. J.: *Ecological Methodology*, Addison Wesley Longman, Menlo Park, 1999.
- 国土交通省延岡河川国道事務所：事業概要 2007 のべおか，2007。
- リバーフロント整備センター：河川水辺の国勢調査年鑑，山海堂。
- 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 長田信寿：一般化座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析，水工学における計算機利用の講習会講義集，土木学会水理委員会基礎水理部会，pp.61-76, 1999。
- 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。
- 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.

- 14) 堀木信男：和歌山県における海産稚アユ採捕量の年変動, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol.57, No.6, pp.1065-1070, 1991.
- 15) 椿東一郎：水理学I, 森北出版, 1991.
- 16) 日野和弘, 神田学, 井上綱雄：第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.217-222, 1997.
- 17) 水野信彦, 御勢久右衛門：河川の生態学, 築地書館, 2000.
- (2008.5.22受付)

Evaluation of suitable hydraulic conditions for living environment of fishes with horizontal 2-D numerical simulation and PHABSIM

Takayuki, NAGAYA¹, Yoshiki, SHIRAIISHI¹, Asuka UKESE¹, Kouki ONITSUKA², Makoto, HIGASHINO³, Tohru, TAKAMI³, Hitoshi HIGASHI⁴ and Juichiro AKIYAMA²

¹CTI Engineering Co., Ltd.

²Department of Civil Engineering, Kyushu Institute of Technology

³Department of Civil Engineering, Oita National College of Technology

⁴Nobeoka Work Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

Before river improvement work, it is necessary to conduct the environmental assessment. However, the accuracy of the environmental assessment is not so high, because the preference curves of the flow depth, velocity and so on have been not clear. Recently, the preference curves of the flow depth, velocity and substrate concerning with *Zacco platypus*, *Zacco temminckii*, *Tribolodon hakonensis* and *Rhinogobius flumineus* are suggested by Komura. In this study, the living environment of those fishes in Gokasegawa River is predicted on the basis of preference curves suggested by Komura. Further, environmental characteristics were compared. As a result, the most suitable cross section was suggested.