河川魚類の個体数に影響を及ぼす多様な環境要因の相対的重要度の評価：繁殖時期に着目して

EVALUATION OF RELATIVE IMPORTANCE OF VARIOUS ENVIRONMENTAL FACTORS INFLUENCING POPULATION VARIABILITY OF RIVERINE FISHES BASED ON REPRODUCTION TIMINGS

梁 政寛¹・吉村 千洋²・岩崎 雄一³

Masahiro RYO, Chihiro YOSHIMURA and Yuichi IWASAKI

¹正会員 工博 東京工業大学研究員 土木工学専攻 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-4)

²正会員 工博 東京工業大学准教授 土木工学専攻 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-4)

³非会員 環博 東洋大学研究助手 生命環境科学研究センター (〒374-0193 群馬県邑楽郡板倉町泉野1-1-1)

We evaluated the relative importance of flow regimes, water temperature, and water quality influencing on the inter-annual population variability of 20 fish species (1993–99) in the Sagami River, Japan, using a random forests approach. A result indicated that flow regime conditions before and after spawning season (April–August and October–December, respectively) and temperature after spawning season influence the population variability of many species most dominantly (relative importance >15% for 10, 8, and 5 species, respectively). Hence, to mimic the natural variability of these factors particularly in the suggested seasons may contribute to better sustain the ecological healthiness in the Sagami River.

Key Words : Flow regime, Random forests, Data mining, Non-linearity, Conservation, Ecosystem

1. はじめに

河川を含む淡水生物の個体数は過去わずか40年で76%も減少し、陸域や海域における減少(40%)よりも一層深刻であることが推定されており¹⁾, その保全対策は喫緊かつ重要な課題である。定性的な環境評価に加えて、これまでに数多くの定量的な環境—生態応答モデルが開発され、実河川への適用が試みられてきた。著名なものとしてWeighted Usable Areaに基づくPhysical Habitat Simulation (PHABSIM) やHabitat Suitability Indexに基づく在不在ポテンシャルの評価などがある²⁾。これらは高い汎用性を持ち、比較的簡便に定量的な環境影響評価が可能なモデルである。しかし、狭い少数の生息場にしか適用できない事や、一部の環境要因が変化した際に既存の経験式が適用できなくなるなどの報告も多く、このような適用限界も明らかになるにつれて、生態学的な過程に基づく(Process-based) モデルの開発へと研究の潮流はシフトしつつある³⁾。

環境変化に対する生物応答のプロセスをモデル化するためには、その生活史戦略や、行動様式(摂食、

産卵、移動など)といった点にまで考慮する必要がある。しかし、実際の河川において環境の変化が動物の行動に及ぼす影響(例えば、洪水中の回避行動)はあまり定量化されておらず、さらに種によっても応答は異なるため⁴⁾, プロセスベースの生態モデル構築のための知見が不足している。従って、個々の生態学的なプロセスに着目した際の、環境要因と生物応答の関係を定量化する試みが必要であり、様々な環境要因が異なる種や行動に対して及ぼす相対的な影響度の評価もプロセス型モデル化に向けて有益な知見となる。

従来の在不在や生息場の好適性評価では表現できない生物応答の特徴として、個体数の変動が挙げられる。例え在不在解析によって、ある種が生息すると推定された場合でも、個体数は定量的に推定できない。また、現在生息するとしても長期的に個体数が減少傾向にあるならば、保全対策は必要となるだろう。従って、個体数変動に関わるプロセスに着目した際の、環境要因と個体数変動の関係性評価をすることで、個体群動態を考慮した河川生態系の保全

手法が見えてくる。また、個体数変動の主要因である繁殖行動は、多くの河川生物は強い季節的な周期性を持ち、産卵時期の知見は比較的蓄積されている⁵⁾。そのため、産卵期やその前後の時期に着目した環境条件と繁殖行動は関連性を評価しやすい（例えば産卵期の水温とふ化率の関係など）。

また、河川管理上欠かせない解析対象の環境要因として、流況がある。流況（平時流量のみならず、渇水や洪水を含めた流量の変動特性）は他の環境要因を動的に変動させることを介して、生態系の構造や機能を維持、駆動する主要因の一つである⁶⁾。近年、水力発電や取水などの水資源利用により引き起こされる流況の改変が世界的にも深刻な問題となっており、流況改変が生態系に及ぼす影響を軽減する試み（人工洪水など）の重要性は河川管理において認知されつつある。事実、流量は他の環境要因（地形形状、水質、水温、水理条件など）に比べても定量的かつ精確に管理・操作を行いやすい。従って、流況が生物に及ぼす影響を理解することは、河川生態系の適切な管理・保全に役立つ⁷⁾。

上記の背景を踏まえ、本研究では、神奈川県相模川下流平野部（総延長45km）の魚類を対象として、産卵期とその前後の時期における主要な環境要因（流況・水温・水質）を用いて、複数年（1993, 94, 97, 99年）にまたがる魚類種（代表20種）の個体数の増減傾向の解析を行った。環境要因は、魚類調査年およびその前年を考慮し、地形や魚類採捕調査時における調査方法も説明要因に含めた。これら環境要因の相対的重要度を評価するため、最新の機械学習法の一つであるランダム・フォレストを適用した。

2. 方法

（1）対象河川

a) 地理・地形形状・構造物

山梨県・神奈川県を跨ぐ相模川水系相模川の平野部を対象とした（図-1）。集水面積は1680km²、全長109kmの一級河川である。流域の山岳部は森林で、平野部は都市が支配的である。雨季は主に6月から10月で、時に台風や梅雨による強い豪雨を伴う。

流域のなかでも研究対象区域となる平野部河川の構造として、本流の相模川と支流の中津川がある（図-1）。共にダムによる河川の分断化（相模川は城山ダム、中津川は宮が瀬ダム）が生じており、また河口は湾へと流れ込む。なお、対象区域において河口から本流および支流の上端（すなわちダム）までの距離は共に約33 kmであり、本流と支流の合流点は河口から15 kmである。取水堰などの河川横断構造物は複数あるが、それら全ては魚道を備えるなどして、魚類の上下の往来に配慮している⁸⁾。

b) 流況

対象期間である1990年代において、相模川は年間平均流量（最下流の長期平均推定値32 m³ s⁻¹）の観点から、大きく分けて平年（1992–93年: 33 m³ s⁻¹）、

図-1 相模川における対象区域と魚類調査地点

渇水年（1994–96年: 22 m³ s⁻¹）、洪水年（1998–99年: 60 m³ s⁻¹）であった。そのため後述の魚類は幅広い範囲の流況を経験している。区域の本流では、上端の城山ダムの多目的運用に流況の改変の端を発しており、中津川との合流までに、複数の取水堰地点においては、減水が生じる。特に顕著な流況改変として、自然状態に比べ夏場の平時流量が70%減、年間最低流量が80%減、高水の頻度・継続時間の30%減、および低水の30%長期化⁹⁾が挙げられる。ただし、中津川からの流入によって、合流点以下の流況、特に低水に関しては多少改変が緩和される¹⁰⁾。中津川の流況は、本研究での対象期間1990年代においては中津川上端の宮が瀬ダムの運用は開始されていないことから（2000年4月から）、自然流況と仮定してよい（参考：宮が瀬ダム運用開始後の流況改変はRyo et al. (2015)⁹⁾に詳しい）。

（2）対象魚類

相模川水系魚類調査報告書⁸⁾に記録されている、魚類種計20種の採捕数を用いた。解析を行うデータである調査本来の目的は、相模川の魚類生息状況の把握（種の存在や構成割合）であり、本研究はその調査結果を個体数変動と環境要因の関係性評価に利用する。対象地域全体で行われた1993年、1994年、1997年、1999年を対象とし、秋期（9–11月）における計45地点での合計108回調査（複数年の地点の重複あり、それぞれ29, 8, 35, 36回）に基づいた。なお、各調査は河川縦断方向におおよそ250m（中央値。河口を除き全て<500m）の区間を設け、投網（6, 10, 24mm）と電気ショッカー（Smith-Root社製12B）を用いている。投網の投打回数は平均23回（6–68回）である。

本研究における個体数とは、調査時において採捕された総個体数であり、その増減は調査区間に生息する総個体数の増減を反映すると仮定している。複数の調査方法（投網回数・電気ショッカーの使用有無）が用いられ、採捕努力量と採捕数の関係（例えば、投網回数と採捕数の間に比例を仮定する妥当性

¹¹⁾ も明らかでないことから、調査方法自体を説明変数として含め、採捕数に及ぼす影響を除いた。

調査全体では40種以上が確認されているが、個体数変動の評価に適さないであろう出現頻度が低い（本研究では5回以下）の種は対象外とし、対象とする魚類種は20種とした。また、対象魚種は漁協などにより放流が行われていないことを確認した。

コイ科・ハゼ科が共に7種と支配的であり、残りはドジョウ科が2種、キュウリウオ科・ナマズ科・ボラ科・カジカ科が1種ずつであった。また、産卵期⁵⁾は夏の7-9月が最も幅広い種（>8種）にとって適しており、冬から春にかけて（11-5月）産卵する種は少ない（図-2）。ほとんどの種の産卵期は、流量が多く、また高水が発生しやすい時期である雨季（6-10月）に対応している。

図-2 各月毎の産卵期に該当する種の総数

（3）環境要因

a) 環境要因

年間の魚類の採捕数変動を説明するために、流況、水温、水質、地形形状、および調査状況を用いた（解析に用いた説明変数は表-1）。流況はRyo et al. (2015)⁹⁾の流出モデルによる推定値を用い、月ごとの平均流量Qおよび低水・高水の発生回数FL, FH（それぞれ20年分の流量の25th, 75th値流量を基準とし、それらを下回った・上回った回数）を計算した。水温Tと水質項目であるDO, CODは、対象区間において6地点で毎月観測している実測値を用いた（国土交通省）。なお、魚類調査地点における水温・水質項目は、最近接する観測地点の値とした（5km以内）。地形形状は、河口からの距離、河床材の代表粒径、河床勾配、相対的最大水深（河川横断面における平均標高から最低標高を引いたもの）に加えて、調査地点の近傍（<500m）にある地形形状の特徴（堰の上流・下流側か、わんどおよび支流との合流点の有無）も考慮した。更に、魚類調査時の努力量や環境によっても捕獲量は左右される可能性があるため、調査時における電気ショッカー使用の有無、投網の投打回数、水温も考慮した。

b) 環境の時間的区分

季節的に変動する要因（流況、水温、水質）に関しては、各種魚類の繁殖期に対応させるため、繁殖期とその前後の期間（各2か月）、およびその他期間の計4期間に区分した後に、平均値を計算した（説明変数にはそれぞれspawn, pre, post, othersと区

表-1 解析に用いた説明変数

項目	変数	説明	平均値と幅
流況	Q	平均流量($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	19 (1.3-179)
	FH	高水発生回数	1.3 (0-6)
	FL	低水発生回数	1.0 (0-6)
水温	T	平均水温($^{\circ}\text{C}$)	15 (2.9-29)
水質	DO	平均溶存酸素量(mg L^{-1})	9.5 (4.8-14)
	COD	化学的酸素要求量(mg L^{-1})	2.3 (0.1-24)
地形形状	distance	河口からの距離(km)	20 (0-36)
	weir_up	堰の上	0/1
	weir_down	堰の下	0/1
	D50	河床材代表粒径(mm)	54 (2-90)
	deepest	相対的最大水深(m)	1.9 (0.4-5.4)
	gradient	河床勾配(%)	0.38 (-0.2-1.2)
	backwater	近傍におけるわんどの有無	0/1
	conf	近傍における合流点の有無	0/1
調査	elect	電気ショッカー使用の有無	0/1
	net	投網の投打回数	23 (6-68)
	temp	調査時水温($^{\circ}\text{C}$)	16 (8-25)

分）。例えば、ある魚類種の繁殖期が7-9月であれば、①繁殖期前5-6月、②繁殖期、③繁殖期後10-11月、④その他12-6月と分け、環境要因はそれぞれの期間における平均値に区分する。また、環境変動とそれに伴う魚類の個体数変動の時間差を考慮するため、調査年(t)に加えその前年(t-1)の環境要因も説明変数とした。時間区分も考慮した場合の説明変数の総数は60である。

（4）解析手法

解析にはアンサンブル機械学習法の一つであるランダム・フォレスト¹²⁾を用いた。ランダム・フォレストは以下の特徴を持ち、予測精度の向上を目的とした統計解析手法の一つである：(a) サンプルデータ母集団の2/3のみを使い、残りは正誤率の検証に用いる、(b) ブートストラップ法を用いて無数の異なる回帰木モデルを構築し、全ての回帰木モデルの出力の平均値を出力、(c) 回帰木の各分岐点における基準は説明変数から毎回ランダムに選択される。また、このアプローチの利点として、①非線形関係および相互作用を考慮、②アンサンブルによる過学習の回避、③ $n < p$ 問題に対処（すなわち、説明変数の数pがサンプル数nより多い場合は一般的に解析不可能という問題）がある。

Breimanがランダム・フォレストの基本的概念を2001年に提唱¹²⁾してから、様々な発展系が派生してきた。その中でも、既往の派生形に比べ、「応答変数に対して重要な説明変数を選択し、要因を説明する」という観点で優れているHapfelmeier and Ulm (2013)のpermutation-based型¹³⁾を用いた。特徴として、①各変数の効果が統計学的に有意かどうかを判別可能、②偏相関係数に基づく条件付推測により疑似相関（2つの事象に因果関係はないが、見えない要因

表-2 複数の魚類種の個体数変動に影響を与える説明変数

種数	影響を及ぼす説明要因(表-1に対応)
8	distance
7	elect
6	D50
5	COD_others (t-1)
4	deepest, FL_pre (t), FL_post (t-1), FH_pre (t-1)
3	weir_down, temp, Q_pre (t), Q_spawn (t), T_others (t), COD_pre (t-1)

(潜伏変数)を介して相関関係を持つこと)を考慮、③欠損値を含むデータも解析可能、といった点が挙げられる。

本研究ではR¹⁴⁾のpartyパッケージ¹⁵⁾を用いて、各魚類種に対し以下の手順で解析を行った。まず、回帰モデル数を500、統計的有意性($\alpha=0.05$)を判別するpermutation数を100としたランダム・フォレストを用いて、各説明変数が有意かどうかを判別し、有意でない変数は除外した。次に、精度を高めるために回帰モデル数を3000として、有意な変数のみを用いて解析した。結果として得られる、各魚類種の採捕数の年間変動に対する各説明変数の相対的重要度(ジニ係数基準)を評価した。また、その他多くのパラメーターはパッケージの初期設定値のままとした。

3. 結果と考察

(1) モデルの当てはまり精度と傾向

合計20種に対するモデル推定値および実測採捕数の相関係数の中央値は0.72であり、モデルに選択された有意な説明変数の数は、平均で21個であった。ナマズとオオヨシノボリについては、有意な変数が一つも選ばれなかった。

モデルの当てはまりは、相関係数 >0.7 を考えると妥当であるが、有意である説明変数の数は、一般的な多変量解析、特にAIC基準によるベストモデル選択など、に比べてかなり多い。これは、ランダム・フォレストは過学習を防ぐ性質を持つが、なるべく少ない説明変数に厳選するベストモデル選択の概念とは本質的に異なり、あくまで予測精度を最大化することに重点を置いていること、またアンサンブルを用いることで比較的重要性の低い説明変数すらも含まれてしまうことに起因する。この傾向は、応答変数に特に影響を及ぼす説明変数の選択、という観点からは少し使い勝手が悪い。例えばある変数の影響が統計的に有意だが1%しか説明力を持たない場合、それは本研究の目的としては決して重要視される環境要因ではない。従って、本研究では、選択された各変数の相対的重要度が低いもの(5%以下)については議論を行わない。

(2) 多くの魚類に対して重要な説明要因

相対的影響度 $>5\%$ の環境要因で、最も多くの魚種の採捕数に影響を与えていたものは、地理的要因である河口からの距離(distance)と河床材代表粒径(D50)であった(表-2)。これらは解析上時間的に一定であるため、それらの空間的な分布が個体数に影響しているといえ、上流から下流にかけての流程変位による生息環境の変化が相対的に重要であることを示唆している。例えば、ワカサギ、ニゴイ、ボラ、マハゼはこれら2つの変数がモデル重要度の30-50%を占める。加えて、最大水深(4種)および堰直近下流(3種)も相対的に重要な変数であった。種によって重要であった変数は異なり、また説明変数に対する個体数の非線形的な応答もみられたため、個々の種の結果は詳述しない。ただし一例挙げると、ワカサギ($r=0.61$)は、河口から20km以下ではほとんど存在しないがそれより上流に発生し(distanceの重要度29%)、かつ水深が1m以下の浅瀬には存在せず(deepestの重要性21%)、河床代表粒径が70-80mm(D50の重要性10%)以外にはほとんど存在しない。

年毎に個体数が異なる環境要因としては、流況・水温・水質が挙げられる。なお、これらは地理的要因(例えば河口からの距離)と相関しているが、今回適用した手法¹³⁾は、そのような説明変数同士の相関の影響を考慮した上での関係解析である¹⁰⁾ため、基本的には地点における年変動の影響と考えてよい。特に複数の種に影響していたのは、調査前年の繁殖に関わらない時期の化学的酸素要求量CODであった。CODと生物化学的酸素要求量BODは高い相関をもち($r=0.75-0.91$)、似た傾向を示した。鬼倉・川本(2013)¹⁶⁾によれば、魚類の生息場選好性はBODに大きく左右され、本研究対象区域でも酸素要求量(BODおよび相関の高いCOD)の影響が見られた。

なお、調査時の状況も多くの種の採捕数に影響していた。電気ショッカー使用の有無が18種中7種(主にコイ科、表-3)、調査時の水温が3種に影響していた一方で、いずれの種でも投網の投打回数は重要な変数として選ばれなかった。投網の回数が増えれば増えるほど採捕数が上昇するとは言えず、逆に少ない回数でも採捕数が多い場合もあった。これらは、調査方法によって採捕数が変わることを意味し、「個体数」推定の困難さを表している¹¹⁾。例えば、個体数解析で一般に用いられる、単位努力量あたりの採捕数だけでは、個体数を適切な推定を行えない可能性を示唆している。

(3) 流況

高水・低水発生回数(FH_pre (t-1), FL_pre (t), FL_post (t-1))が水深と同様に4種に対して影響した。それに引き続き、調査年の産卵期前と中の平均流量(Q_pre (t), Q_spawn (t))が3種に影響した(表-2)。

表-3 魚類各種の個体数変動に及ぼす各環境要因の相対的影響度(%)。説明変数を表-1の調査項目にまとめ、4つの時期(産卵期前、産卵期、産卵期後、その他(各々、前・期・後・他と表記))に分類した。また各環境項目が影響する総種数、影響する場合の相対的影響度の平均値を算出した。

科	種	地形 状	調査 状況	流況				水温				水質			
				前	期	後	他	前	期	後	他	前	期	後	他
コイ	ウグイ		10	6	16							15			7
	アブラハヤ		23	15		7	5			7					
	モツゴ	7	8	10		8		12	8			5			6
	カマツカ	33	14								7	30			
	ニゴイ	51	15								5				
	ギンブナ	7		7	15	23	7			9					
	ゲンゴロウブナ					49	51								
ハゼ	シマヨシノボリ	44				9	17								
	トウヨシノボリ	46	28	7	5	5	6							7	
	ヌマチチブ			24	7			8						6	
	ウキゴリ		9	11	8		30			19				6	
	マハゼ	7												15	17
	ボウズハゼ							12							
ドジョウ	ドジョウ			59		34									
	シマドジョウ	6	6	35		20	12					8			8
	ボラ											14		7	11
	ワカサギ	59					5				20				
キュウリウオ	カジカ	47		8	8			8	30						
影響する種の総数		10	8	10	6	8	8	2	2	5	3	5	0	4	6
影響する場合の平均重要度(%)		31	14	18	10	19	17	10	10	15	11	14	0	9	9

時間による区分を全てまとめると、Qに関する総変数(計8変数)は、20種中8種に影響を示した。また高水発生頻度に関しては6種であり、ゲンゴロウブナとギンブナ(高水の相対的重要度は49%と29%)に対して顕著な影響力をもった。低水発生頻度は10種に影響し、特にドジョウは調査前年の渇水頻度の相対的重要度が93%と非常に高い(低水発生が多いほど個体数が多い、ただし最大採捕数は3匹と、値は低い)。

未だ流況と個々の種の関係の多くは未解明であり、これらのような推察は、今後の河川魚類生態の理解に役立つ。平均流量と比べても、高水・低水発生頻度の影響度は遜色がないほどの種数に対して重要な環境要因であった。例えばギンブナは、調査前年の産卵期7-8月に高水が2回以上発生した場合には、採捕数が少ない傾向が示唆された。現在、河川管理上においても、高水発生の生態学的重要性は認知されてきている(相模川でも人為的な小規模出水の影響試験が実施されている)が、その頻度や時期に関しても、生息する生物の生活史の周期性を考慮する必要があると言えよう。

ただし、相対的重要度5%以下も含めると(未掲載)、多くの種に影響を及ぼす環境要因の上位4-8位は全て流量Qの変数で占められ(上位1-3位の変数はdistance, D50, electで変わらず)、18種中15種において統計的に有意であった。従って、平均流量は多くの種にとって幅広く影響する要因であることに

は変わらない。

(4) 時間的区分：繁殖期とその前後の環境

各環境要因(表-1)が個体数の変動に及ぼす相対的影響度は、時期によって、また種によっても異なった(表-3)。例えば、ハゼ科ボウズハゼの個体数変動は、産卵期前の水温のみに影響される(12%)。これは、産卵期前の水温の年ごとの変動(相対的に高いか低い)と、ボウズハゼの個体数の年ごとの変動(相対的に多いか少ない)が統計的に有意に相関していることを示している。一方で、産卵期前以外の時期の水温や、その他環境要因の年ごとの変動は個体数の変動と統計的には有意な関係がないと判断される。

各環境要因・各時期が影響する種の総数や、影響する場合の平均的な影響度を考慮し(表-3)、総合的に流況・水温・水質の時期の重要性を一般化すると、興味深いことに、産卵期中の環境要因は比較的重要ではなく、むしろ産卵期の前後の時期において影響度が高いという結果になった。流況は概してどの時期も水質や水温と比べて多くの種に影響し、また相対的な影響度も高い傾向にあった(表-3)。最も多くの種に影響していたのは産卵期前の流況(10種)であった。また、産卵期後の流況が影響する場合(8種)にはもっとも相対的重要度が高く(19%)、その影響度は産卵期(10%)の倍となった。産卵期前後はそれぞれ、産卵環境の更新や、仔

稚魚の生存率に関係しているものと思われる。また、水温と水質は比較的明確な時期傾向を示し、水温は産卵期後が5種に15%の相対影響度を持って影響し、産卵期前の水質がほぼ同等の影響度（5種、14%）であった。その他の時期においては影響する種の総数・相対影響度がやや低い傾向にあった。

4. 結論と今後の展望

本研究は、複数年にまたがる個体数変動および繁殖時期に焦点を当てた解析を行った。従来の在・不在や生息場好適性の解析に加え、河川魚類の生態と環境要因を異なる観点から評価した。また多くの既往研究では、環境要因の季節性を考慮して生態系と関連付ける際に、気候的な季節性（気温・降雨量など）に基づく区分が多いが、本研究では、個体数に影響を及ぼす要因のうち、比較的時期が既知である産卵期を基点とした季節区分を行った。時期の違いによって環境要因が魚類の個体数に与える影響度は異なり、今回解析対象とした20種を総合的に評価すると、産卵期前（相模川ではおおよそ4-6月、図-2）の流況および産卵期後（10-12月、図-2）の流況と水温が特に重要であることが分かった。

河川管理上において、地形形状や水質に比べて流況はダム放流などにより操作がしやすい。それゆえ流況保全の観点に基づいたダム下流生態系の管理が期待される。しかし、どのように流況操作を行うべきかは、依然議論の余地がある。本研究が示唆したように、高水の発生頻度は魚類の個体数とも関係しており、更にその発生時期によって影響度・影響される種は異なるため、人為的な高水出水の影響評価には魚類の個体数も加味すべきである。

現在、河川生物のモデルは統計的な関係の記述（線形回帰など）から、より一層生態プロセスに基づいたモデルへと移行しつつある³⁾。そのためには行動や死亡に関わる詳細なパラメーター、すなわち環境要因と生物生活史に関連した関係性の知見の蓄積が必要である。従って、実河川における長期の動態を、まずは統計から段階的に明らかにしてゆくことが望まれる。

謝辞

データ提供をして下さった神奈川県庁および神奈川県水産技術センター内水面試験場に感謝の意をここに表します。また、多くの有益な意見を下さった森照貴氏に感謝します。この研究は、JST CREST、JSPS特別研究員制度（26_11771）、JSPS科研費（15K00592）による支援を受けました。

参考文献

- 1) World Wide Fund for Nature: Living Planet Report 2014, 2014.
- 2) 高瀬陽彦, 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 分布型水文モデルと確率密度関数を用いた底生動物の生息環境および種多様性評価, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp.I_1297-I_1302, 2014.
- 3) Beechie, T. J., Sear D. A., Olden J. D., Pess G. R., Buffington J. M., Moir H., Roni P. and Pollock M. M.: Process-based Principles for Restoring River Ecosystems, *Bioscience*, Vol. 60, No. 3, pp. 209-222, 2010.
- 4) Mims, M. C. and Olden J. D.: Life history theory predicts fish assemblage response to hydrologic regimes, *Ecology*, Vol. 93, No. 1, pp. 35-45, 2012.
- 5) 川那部 浩哉, 水野 信彦, 日本の淡水魚 (山溪カラー名鑑改訂版), 山と溪谷社, pp. 719, 2001.
- 6) Poff, N. L., Allan D. J., Bain B. B., Karr J. J. R., Prestegard K. L., Richter B. D., Sparks R. E. and Stromberg J. C.: The natural flow regime, *Bioscience*, Vol. 47, No. 11, pp. 769-784, 1997.
- 7) Poff, N. L., Richter B. D., Arthington A. H., Bunn S. E., and 15 others: The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards, *Freshw. Biol.*, Vol. 55, No. 1, pp. 147-170, 2010.
- 8) 相模川水系魚類生息状況調査報告書, 神奈川県水産総合研究所 内水面試験場.
- 9) Ryo, M., Iwasaki Y., Yoshimura C. and Saavedra O. C. V.: Evaluation of Spatial Pattern of Altered Flow Regimes on a River Network Using a Distributed Hydrological Model, *PLoS One*, Vol. 10, No. 7, pp. 1-16, 2015.
- 10) Ryo, M., Yoshimura C., Saavedra O. C. V., and Sui P.: Longitudinal trends of flow regimes altered by dams in the lowland section of Sagami River, *Annu. J. Hydraul. Eng.*, Vol. 58, 2014.
- 11) McCluskey S.M. and Lewison R.L.: Quantifying fishing effort: a synthesis of current methods and their applications, *Fish and Fisheries*, Vol. 9, pp.188-200, 2008.
- 12) Breiman, L.: Random Forests, *Mach. Learn.*, Vol. 45, pp. 5-32, 2001.
- 13) Hapfelmeier, A. and Ulm K.: A new variable selection approach using Random Forests, *Comput. Stat. Data Anal.*, Vol. 60, pp. 50-69, 2013.
- 14) R Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing, *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria, 2014.
- 15) Strobl, C., Hothorn T. and Zeileis A.: Party on! A new, Conditional Variable-Importance Measure for Random Forests, *R J.*, Vol. 1, No. 2, pp. 14-17, 2009.
- 16) 鬼倉 徳雄, 川本 朋慶: 九州北部の一級水系における水質と純淡水魚類の出現との関係, 水環境学会誌, Vol. 36, No. 3, pp. 99-106, 2013.

(2015. 9. 30受付)