

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	世界の河川を対象とした流況の評価と魚類の種多様性との関係解析
Title(English)	EVALUATING FLOW CHARACTERISTICS AND THEIR RELATION TO FISH SPECIES RICHNESS IN WORLD RIVERS
著者(和文)	梁政寛, 岩崎雄一, 吉村千洋
Authors(English)	Masahiro Ryo, Yuichi Iwasaki, Chihiro Yoshimura
出典(和文)	水工学論文集, , 55, S1459-S1464
Citation(English)	水工学論文集,第55巻,2011年3月 水工学論文集,第55巻,2011年2月, , 55, S1459-S1464
発行日 / Pub. date	2011, 3

世界の河川を対象とした流況の評価と 魚類の種多様性との関係解析

EVALUATING FLOW CHARACTERISTICS AND THEIR RELATION TO FISH SPECIES RICHNESS IN WORLD RIVERS

梁政寛¹・岩崎雄一²・吉村千洋³

Masahiro RYO, Yuichi IWASAKI and Chihiro YOSHIMURA

¹学生会員 東京工業大学 工学部土木・環境工学科 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²非会員 環博 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (同上)

³正会員 工博 東京工業大学准教授 大学院理工学研究科土木工学専攻 (同上)

Hydrologic regimes play a major role in determining aquatic ecosystems. However, most research has not focused on the effects of flow characteristics on fish species richness in freshwater at the global scale. In this paper, we evaluated flow characteristics in world rivers and showed general trends of rivers and distinctive features of Japanese rivers. The results showed that daily mean discharge and duration and frequency of floods significantly correlated with fish species richness. The present study suggests that it is important for the prediction of fish species richness in freshwater to consider not only average flow volume but also other flow characteristics such as variability and seasonality.

Key Words: *reduced discharge, river ecosystems, species diversity, flow regime*

1. はじめに

近年、淡水域における生物多様性は、陸上または海洋に比べて早く失われつつあると報告されている¹⁾。その減少の要因として、水質汚染、乱獲、外来種の侵入などとともに、ダム建設などによる人為的な流況の改変が取りあげられている¹⁾²⁾。今後も人口増加による農業用水や工業用水の増加に伴い河川流量が減少し、また気候変動による降雨パターンの変化が流況に影響を及ぼすことが予想される³⁾。流況は河川生態系の機能や構造を決定する主要な要因であり⁴⁾、生物多様性の維持・保全の観点から、流況の変化が世界河川の種多様性にどのような影響を及ぼすかを定量的に予測することが求められている。このような要請のもと、Xenopoulosら⁵⁾は将来の流量減少に着目し、全球レベルで淡水魚類の種数が最大75%減少すると予測し、この結果はミレニアム生態系評価⁶⁾にも利用されている。

河川の流況は水理学的観点から、年間を通じた川の流量変動により特徴づけが可能であり、Richterら⁷⁾は、生物の生息に重要と考えられる流況指標として「強さ・変動性・頻度・期間・時期」といった5つの要素を提唱している。事実、洪水や渇水等が起る河川環境に、長い年月をかけて適応・進化して

きた魚類や底生動物の例は数多く報告されている⁸⁾。前述したXenopoulosら⁵⁾が予測に用いた流量-魚類種数関係は、現時点で利用可能な最も定量的なモデルと認識されているが⁹⁾、平均流量以外の流況特性（例えば、流量の変動性や洪水の頻度）は考慮されていない。

魚類は河川生態系において上位の栄養段階に属し、その構造と機能を支配する重要な構成員といえる。魚類は底生無脊椎動物などの他の分類群に比べて、流況の変動に対する感受性が高い可能性が指摘されている¹⁰⁾。しかしながら、世界の河川において魚類種数と流況の関係を調べた研究は少なく、いずれも日平均流量以外の流況特性と魚類種数の関係については調査されていない^{5),11)}。

そこで、本研究では、まず①全世界の河川を対象にして、上記の5つの分類ごとに流況指標を導出し、主要な流況特性を抽出した。この際、世界（流域面積により4つに区分）及び日本河川に分類し、得られた流況特性を基に世界における日本河川の特徴についても考察した。流域面積は魚類種数との関連性も報告されており¹¹⁾、また河川の特徴を決める重要な要因と考えられる。さらに、②日本を含む世界河川における魚類の種数データを収集し、流況特性との関係を評価した。本研究の成果は、将来の流況変

化に伴う魚類種数の応答をより適切に予測するための基礎的な情報となると考えられる。

2. 方法

(1) 使用データ

a) 河川流況データ

本研究では、流域面積が2500km²以上の河川を対象にし、雨量・流量年表データベース（日本河川協会）から日本15河川、Global Runoff Data Centreから日本を除く740河川の流域面積、緯度、河口における日平均流量データ（1981~1985）を取得した。5年間分の日平均流量は常用対数変換値（ $\log_{10}(X+1)$ ）を用いて、「強さ・変動性・頻度・期間・時期」の5つの水理学的な流況分類に従い、計14項目の流況指標を計算した（表-1）。なお、日平均流量だけでなく、月や年平均流量を用いてその中央値や変動係数なども計算したが、日平均流量を用いた変数との相関が高く（ $r > 0.9$ ）、本稿では省略した。比流量speQdは単位面積当たりの日平均流量の中央値（m³/s/100km²）、日平均流量の変動係数CVdは $100 \times \text{SDd}/\text{Qd}$ 、日平均流量の変動割合PDC（Percent Daily Change）は連続した二日間の日平均流量（ Q_{day0} , Q_{day1} ）を用い、 $\text{PDC}_1 = |(\text{Q}_{\text{day1}}/\text{Q}_{\text{day0}}) - 1|$ として5年間分を算出した値の平均値である。また、河川の地理的特徴として、流域面積、緯度も解析に用いた。

表-1 本研究で用いた流況指標

強さ	Qd	日平均流量の中央値 (m ³ /s)
	Qmax	日平均流量の最大値 (m ³ /s)
	Qmin	日平均流量の最小値 (m ³ /s)
	Q10	5年間日平均流量の上位10%値 (m ³ /s)
	Q90	5年間日平均流量の下位10%値 (m ³ /s)
	speQd	比流量 (m ³ /s/100 km ²)
期間	durHI	Q10を超える連続日数の平均値 (day)
	durLOW	Q90を下回る連続日数の平均値 (day)
頻度	freqHI	Q10を超える年平均回数 (day)
	freqLOW	Q90を下回る年平均回数 (day)
時期	MONTH	月平均流量が最大値を取る月
変動性	SDd	日平均流量の標準偏差 (m ³ /s)
	CVd	日平均流量の変動係数 (-)
	PDC	日平均流量の変動割合 (%)

なお、比流量を除く強さ及び変動性の指標は、実測値を常用対数変換後に計算したものである。

b) 魚類種数

流況データが得られた計755河川のうち、魚類種数のデータが得られた河川は計63河川であった。地域区分では、ヨーロッパ: 17河川、アフリカ: 2河川、アジア: 27河川（うち、日本は15河川）、北・中央アメリカ: 15河川、南アメリカ: 2河川となった。

河川に生息する純淡水魚及び回遊性魚類の種数は、World Resources Instituteから40河川、Xenopoulosら⁵⁾から4河川、Hugueny¹²⁾から4河川、河川環境データベース（国土交通省）から15河川のデータを得た。得られた魚類種数（純淡水魚及び回遊性魚類の種数の合計）を常用対数変換して解析に用いた。なお、これら種数データは複数の誤差要因を含んでいることに留意する必要がある。過小評価となる要因としては、不十分な調査努力量もしくは生息していた種が移動する可能性、過大評価としては、定着していない魚類を調査時に含めてしまう可能性が挙げられる¹¹⁾。

本来ならば魚類種数の調査年次と河川流況データの取得時期を一致させることが好ましいが、一部の魚類種数データに関しては、調査年次が不明であった。今回は流況データにおいて欠損値が最も少ない1981~85年を解析対象としたが、1986~90年、1991~95年、1996~2000年の各5年間のデータを使用して算出した流況指標でも同様の値が得られたため、他の時期のデータを用いても本稿で示した結果は大きく変わらないと考えられる。

(2) データ解析方法

a) 流況特性の抽出

世界河川における流況特性を抽出するために、得られたすべての流況指標を用いて、主成分分析を行い、固有値が1以上となる主成分を抽出した。さらに、日本以外の河川を流域面積で4つに区分し（常用対数値で、<4, 4~5, 5~6, 6~7）、それらと日本の河川における流況特性を評価した。

b) 流況特性と魚類種数の関係

主成分分析により得られた主成分得点を用いて、流況特性と魚類種数の関係を単回帰モデルの回帰係数の有意性（ $\alpha = 0.05$ ）により評価した。すべての統計解析はSTATISTICA 6.1を用いて行った。

3. 結果と考察

まず、基礎データとして流域面積によって4つに区分した世界河川及び日本河川における主な流況指標の平均値と標準偏差を求めた（表-2）。流域面積が大きくなるにつれて、強さに属する指標は増加、変動性に属するCVd及びPDCは減少傾向がみられた。期間・頻度に関する指標であるdurHI・freqHIはやや増加・減少傾向がみられたが、その他の指標においては明確な傾向はなかった。また、日本河川では特に流量の変動割合（PDC）の平均値が0.53と、世界の河川（0.003~0.08）に比べ顕著に大きかった。

(1) 流況特性の抽出

主成分分析の結果、4つの主成分が抽出され、累積寄与率は74%となった（表-3）。主成分1（PC1）は、日平均流量などの5つの強さの流況指標及び変動性の指標であるCVdと高い相関を示した。PC2は、

表-2 日本及び世界（流域面積により4つに区分）河川における主な流況指標の平均値（±標準偏差）

区分：log(Area(km ²))		日本(<4.16)	< 4	4 ~ 5	5 ~ 6	6 <
対象にした河川の数		15	404	262	77	12
Qd (m ³ /s)	日平均流量	2.1 ± 0.3	1.3 ± 0.5	1.9 ± 0.8	2.5 ± 0.8	3.8 ± 0.5
Qmin (m ³ /s)	最低流量	0.2 ± 0.6	0.8 ± 0.5	1.4 ± 0.8	2.0 ± 1.0	3.4 ± 0.6
Qmax (m ³ /s)	最大流量	3.2 ± 0.4	2.4 ± 0.5	2.9 ± 0.6	3.4 ± 0.6	4.4 ± 0.5
durHI (day)	高水連続日数	15 ± 4	20 ± 8	23 ± 8	25 ± 7	30 ± 6
durLOW (day)	低水連続日数	14 ± 4	26 ± 12	27 ± 18	24 ± 13	27 ± 7
freqHI (回/年)	高水回数	9 ± 2	5 ± 3	4 ± 3	3 ± 3	2 ± 2
freqLOW (回/年)	低水回数	10 ± 2	5 ± 5	6 ± 10	7 ± 8	3 ± 2
SDd (m ³ /s)	Qdの標準偏差	0.35 ± 0.07	0.37 ± 0.14	0.36 ± 0.15	0.42 ± 0.26	0.29 ± 0.15
CVd (-)	Qdの変動係数	16.4 ± 2.8	38.7 ± 35.0	28.8 ± 32.2	21.8 ± 21.3	7.6 ± 4.0
PDC (%)	流量の変動割合	0.53 ± 0.38	0.08 ± 0.17	0.08 ± 0.33	0.04 ± 0.11	0.003 ± 0.002

流域面積2500km²以上 (log(Area) ≥ 3.40)

表-3 主成分分析より得られた4つの主成分（PC）とそれらの因子負荷量

流況指標	因子負荷量			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Qd	<u>0.98</u>			
Q10	<u>0.92</u>		-0.26	0.15
Q90	<u>0.96</u>		0.20	0.11
Qmin	<u>0.93</u>		0.21	
Qmax	<u>0.81</u>		-0.34	0.26
speDIS	0.46	-0.34		0.23
MONTH		0.12	-0.30	0.37
durHI	0.15	<u>0.87</u>	0.24	
durLOW	-0.23	0.57	-0.22	0.42
freqHI		<u>-0.90</u>	-0.21	
freqLOW	-0.13	-0.27	0.46	0.41
SDd	-0.10		<u>-0.88</u>	
CVd	<u>-0.78</u>			0.37
PDC	-0.42	-0.17		<u>0.72</u>
寄与率	38%	15%	11%	9%

流況指標の詳細は表-1を参照。因子負荷量は絶対値が0.10以上のものを表示し、0.70以上のものについては下線を引いた。

期間の指標であるdurHI及び頻度の指標であるfreqHIと強い相関関係にあった。PC3、PC4は変動性のSDd、PDCとそれぞれ高い相関を示した。

全対象河川において寄与率の大きいPC1及びPC2得点をプロットした結果（図-1）、流域面積が大きい河川ほど、PC1及びPC2得点が高くなる傾向が見られた。PC1及びPC2と流域面積の相関係数はそれぞれ、0.58と0.24（ $p < 0.01$ ）であった。また、全河川において、日本の河川は、PC1が中程度でPC2は低かった。すなわち、本研究で対象とした日本の河

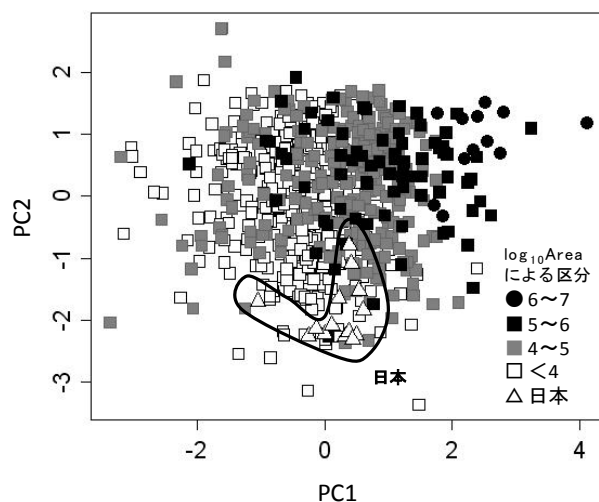


図-1 全対象河川のPC1及びPC2得点

川では流量は相対的に中程度で、高い流量（Q10）が観察される頻度は高いが、それが維持する連続期間は短いという傾向があると言える。

（2）流況特性と魚類種数の関係

まず、河川の地理的特徴である流域面積及び緯度（絶対値）と魚類種数の関係を評価した（図-2）。その結果、魚類種数に対して流域面積、緯度はそれぞれ有意な正、負の効果を示した。なお、流域面積と緯度には顕著な相関関係は認められなかった（ $R=0.03$, $p=0.82$ ）。緯度と魚類種数に関する結果は、Oberdorffら¹¹⁾の結果と一致する。一般に種数の緯度勾配をもたらす要因として、低緯度ほど生物にとって利用可能なエネルギー量が多いこと（エネルギー仮説）¹³⁾、氷河期に温帯の生物の生息が低緯度に制限されたこと（時間仮説）¹⁴⁾、低緯度ほど

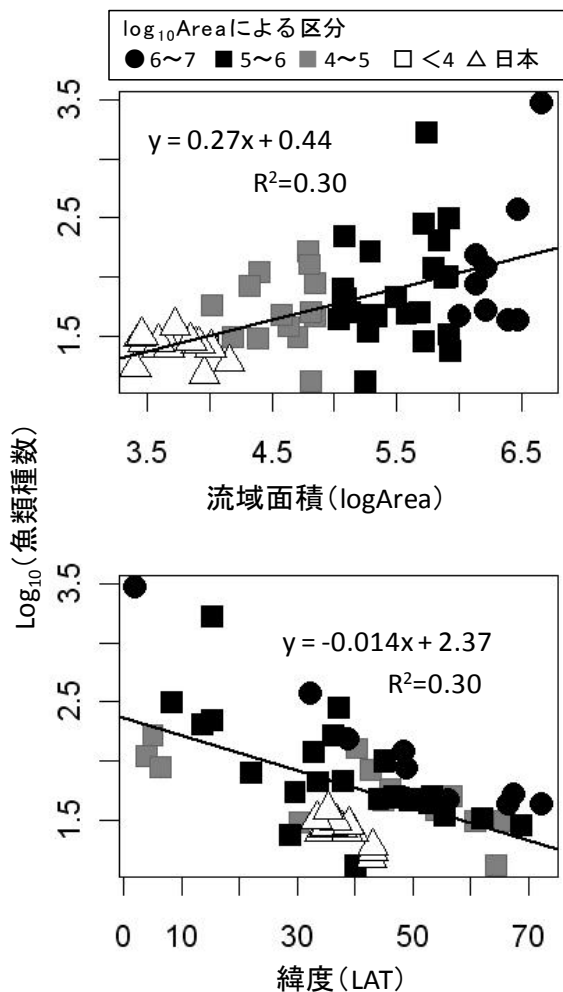


図-2 流域面積及び緯度と魚類種数の関係。
(回帰モデルの傾きはいずれも有意, $p < 0.05$)

類似した気候がみられる面積が大きくなり、種の絶滅率が低くなること（面積効果仮説）¹⁵⁾などが考えられる¹⁶⁾。

次に、主成分分析より得られたPC1~4と河川の魚類種数（常用対数変換）の関係を評価した結果（図-3）、PC1（強さの指標と相関）及びPC2（期間と頻度の指標と相関）について、魚類種数との有意な正の関係が得られた。しかしながら、PC1とPC2は流域面積との相関が高かったため（ともに $R = 0.71$, $p < 0.01$ ）、因果関係の議論には注意が必要である。実際、 $\log_{10}$ （魚類種数）を $\log_{10}$ （流域面積）で除したものの関係を見ると、有意な相関関係は検出されなかった（図-4）。

一方、PC4（変動性の指標であるPDCと相関）については魚類種数との有意な線形関係は得られなかったが（図-3）、 $\log_{10}$ （魚類種数）を $\log_{10}$ （流域面積）で除した指標とは有意な正の関係が検出された（図-4）。また、本研究ではPC4得点の高い河川が少ないため、明確な結論を導くことは困難であるが、いずれの図でもPC4得点が高程度の河川で種数が増える傾向が見られた。生態学では中程度の攪乱で高い種多様性みられるという中規模攪乱仮説が

提唱されており¹³⁾、それを支持する実証研究が多数報告されている。PDCは河川の流量の変動性を表す指標であり、この仮説が適用できる可能性がある。今後はPC4の値が高い（すなわちPDCが高い）河川のデータを追加するなどして、さらなる検証が必要である。

4. まとめと今後の展望

本研究では、世界及び日本の河川を対象に、「強さ・変動性・頻度・期間・時期」の5つの要素に基づく流況指標を用いて流況評価を実施し、得られた流況指標を用いて魚類種数との関係を調査した。

本研究で用いたような流況指標の変動の多くは、流量の大きさに関わる指標（強さ）や増水の連続期間や頻度に関わる指標（期間、頻度）によって説明された。また、このような流況特性は、世界と日本河川で比較することで、日本河川の特徴を明確化できた。ただし、本研究では2500km²以上の河川を対象をしているため、より一般的な評価を行うためには、流域面積の小さい河川を含めて解析を実施する必要がある。

流況特性と魚類種数の関係を評価した結果、既往研究で報告されている流量（PC1）や流域面積、緯度との関係に加え、頻度や期間（PC2）、変動性（PC4）といった特性が魚類種数に関連している可能性が示唆された。頻度、期間や変動性といった流況指標は河川生物の生息場環境を特徴づけている重要な要素であり、これらが河川の魚類種数に対して影響を及ぼしているかもしれない。ただし本研究の結果はあくまで相関関係に基づいた評価であり、因果関係に言及することは困難である。また、本研究では流況特性に着目し、魚類種数の相関関係を調査したため、それ以外の環境要因が交絡している可能性がある。

このような限界がある一方で、全球レベルで複数の河川を対象に魚類種数と流況指標の関係を評価する際に、平均流量以外の流況特性との関連性を報告している研究がほとんどない現状を考えると、本研究から得られた上記の知見は、魚類種数の将来的な減少をより精度よく推定していく上で、重要な基礎知見を提供しうると考えられる。今後、さらなる調査・研究を実施し、平均流量以外の流況指標の影響についてより多くの知見を蓄積していく必要があるだろう。

次に、本研究の課題も踏まえ、今後の展望を示したい。まず、流況指標については本研究では、高水・低水流量は河川流況を説明する際に一般的に用いられているQ10、Q90と定めた。しかし、魚類への影響を考慮する場合にこの定義が最も適切であるという根拠はなく、魚類の生息により重要な流況を特定した上でより適切な流況指標を開発する必要があるかもしれない。一方、魚類種数については、淡水魚及び回遊性魚類などの種組成を考察していない。

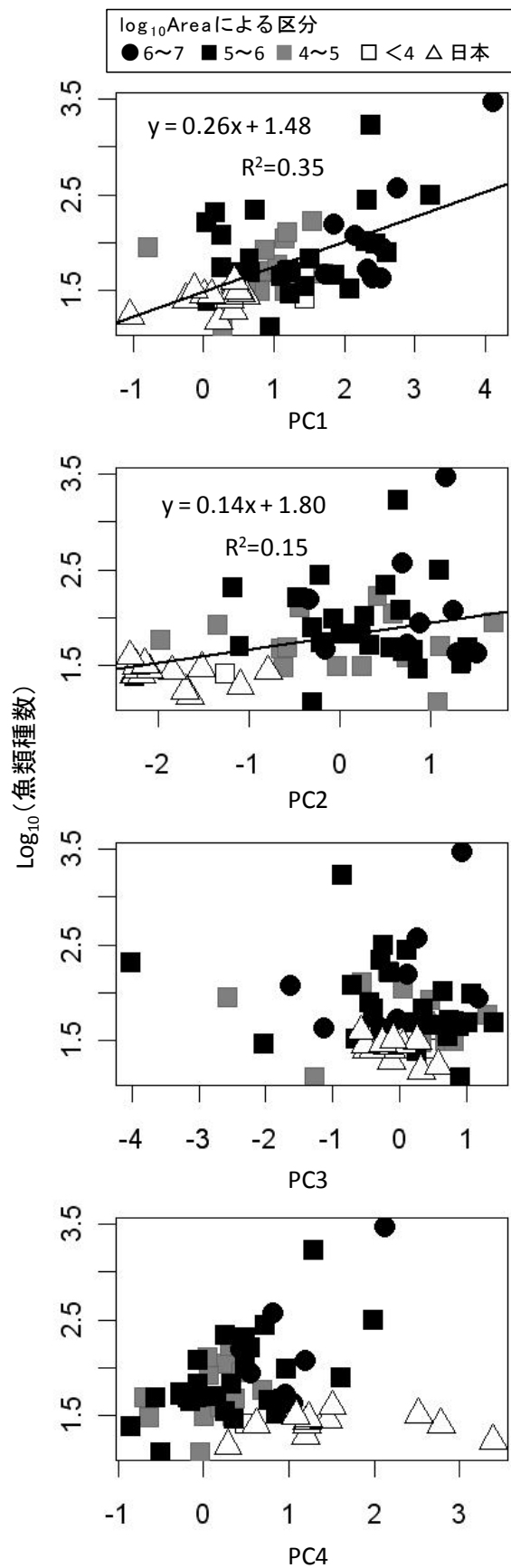


図-3 4つの主成分得点と魚類種数の関係。
(回帰モデルの傾きはいずれも有意, $p < 0.05$)

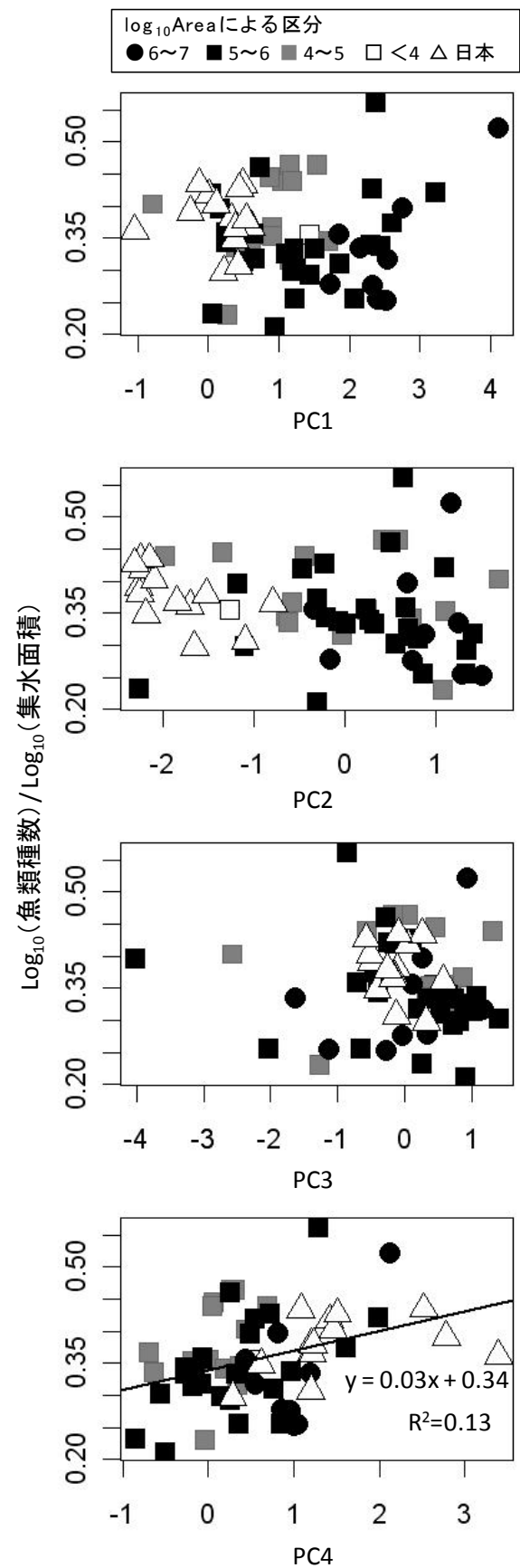


図-4 4つの主成分得点と
 log_{10} 魚類種数/ log_{10} 流域面積の関係。
(回帰モデルの傾きは有意, $p < 0.05$)

今後は流況の変化により敏感な種を特定し、それらへの影響を評価することが有益かもしれない。また特定の魚類種の保全を考える際には、その分布域の情報についても把握する必要がある。すなわち、いずれの場合も、より生物学的かつ生態学的に妥当な仮定を用いて解析を実施する必要がある。

また、本研究では流況指標と魚類種数の関係に線形性を仮定して解析を行ったが、中規模攪乱仮説¹⁷⁾で示されているように非線形性な応答を示す可能性も十分に考えられる。加えて、複数の流況指標が魚類種数に同時に影響を及ぼしている可能性もある。本研究では、魚類種数データが限られていたため、これらの可能性に対応する解析は行わなかった。したがって、魚類種数を予測するより良いモデルを構築するためには、より多くの魚類データを取得し、このような側面からの解析が必要となってくる。

最後に、魚類の生息環境を規定する要因は、流域面積や緯度、流況指標に限らない。気候や気象環境、水質、ダムなども考慮した上で、解析を進めることが有益である。今後は以上のような課題の解決に向けて、研究を進めていく必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたり、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業（CREST）の支援を受けた。ここに記して、謝意を表する。

引用文献

- 1) Jenkins, M.: Prospects for biodiversity, *Science*, Vol.298, pp.1233-1236, 2003
- 2) Postel, S. and Richter, B.: *Managing water for people and nature, Rivers for life*, p.220, Island Press, Washington, 2003
- 3) Doll, P. and Zhang, A.: Impact of climate change on freshwater ecosystems: a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations, *Hydrology and Earth System Science*, Vol.14, pp.783-799, 2010
- 4) Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., Apse C., Bledsoe, B. P., Freeman, M. C., Henriksen, J., Jacobson, R. B., Kennen, J. G., Merritt, D. M., O'Keeffe, J. H., Olden, J. D., Rogers, K., Tharme, R. E. and Warner, A.: The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards, *Freshwater Biology*, Vol.55, pp.147-170, 2010
- 5) Xenopoulos, M.A., Lodge, D.M., Alcamo, J., Marker, M., Schulze, K., and Van Vuuren, D.P.: Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal, *Global Change Biology*, Vol.11, pp.1557-1564, 2005
- 6) Millennium Ecosystem Assessment: *Ecosystem Human Well-being: Biodiversity Synthesis*, p.155, World Resource Institute, 2005.
- 7) Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. and Braun, D.P.: A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems, *Conservation Biology*, Vol.10-4, pp.1163-1174, 1996
- 8) Lytle, D. A. and Poff, N. L.: Adaptation to natural flow regimes, *Trends in Ecology & Evolution*, Vol.19, pp.94-100, 2004.
- 9) Xenopoulos, M. A. and Lodge, D. M.: Going with the flow: using species-discharge relationships to forecast losses in fish biodiversity, *Ecology*, Vol.87, pp.1907-1914, 2006
- 10) Poff, N.L. and Zimmerman, J. K. H.: Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows, *Freshwater Biology*, Vol.55, pp.194-205, 2010
- 11) Oberdorff, T., Guegan, J. -F. and Hugueny, B.: Global scale patterns of fish species richness in rivers, *Ecography*, Vol.18, pp.345-352, 1995
- 12) Hugueny, B.: West african rivers as biogeographic islands: species richness of fish communities, *Oecologia*, Vol.79, pp.236-243, 1989
- 13) Wright, D. H.: Species energy theory: an extension of species-area theory, *Oikos*, Vol.41, pp.495-506, 1983
- 14) Whittaker, R. H.: Evolution of species diversity in land communities, *Evolutionary Biology*, Vol.10, pp.1-67, 1977
- 15) Chown, S. L. and Gaston, K. J.: Areas, cradles and museums: the latitudinal gradient in species richness, *Trends in Ecology and Evolution*, Vol.15, pp. 311-315, 2000
- 16) 宮下直・野田隆史: 群集生態学, p.187, 東京大学出版会, 2003
- 17) Connell, J. H.: Diversity in tropical rain forests and coral reefs, *Science*, Vol.199, pp.1302-1310, 1978

(2010. 9. 30受付)