

河川水辺の国勢調査結果を用いた全国河川の魚種数の特性とその評価手法

佐合純造¹・永井明博²

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所水循環研究グループ長 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

Email:sagou@pwri.go.jp

²正会員 農博 岡山大学教授 環境理工学部 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

Email:nagai@cc.okayama-u.ac.jp

本研究は既往の「河川水辺の国勢調査」の結果を用いて、各河川で生息の確認された魚種数と流域・河川の諸指標、魚類以外の生物種数との相関関係を明らかにして河川環境の定量評価の可能性を検討したものであり、要旨は次の通りである。①全国109の1級河川の魚種数の分布特性を求めた結果、魚種数の平均は37.8種、魚種数の最大は淀川で61種、最少は本明川で16種であった。②魚種数と流域・河川及び水環境指標との相関を求めて、流域面積、河口の緯度、河道密度、河畔市街地率、魚類以外の生物種数等と有意な相関が示された。③各河川の生息魚種数を上記指標等から推算できる重回帰式を提示し、その適応性を実証した。

Key Words : fish species, multiple regression model, National census on environments

1. はじめに

河川には様々な生物が生息しているが、その中でも魚類は河川生態系の中核となっている重要な生物である。我が国には200種を越える回遊魚を含めた淡水魚が生息しているといわれている¹⁾。その生息分布は河川の成り立ちや変遷等の地歴的条件を基本にして、①河川や流域の構造、気象等に由来する物理環境条件（非生物条件）②他生物との相互関係などに由来する生態的な条件（生物条件）③人為的影響（人為条件）等によって定まっていると考えられる²⁾。

上記の関係を単純化して魚類の生息分布特性が定量化できれば、河川の環境評価等を行うために有益な判断材料になると考えられる。たとえば、各河川で確認された魚種数は河川の生物多様性を示す最も単純な指標であることから、河川の諸条件と魚種数の関係を定量化しておけば、河川が河川改修や水質変化などのインパクトを受けた場合に魚種数の変化を予測したり、魚種数を保全・復元の達成目標にした保全・復元策の定量評価が可能となる。

国土交通省では、平成2年(1990)から全国の河川環境の現況や経年変化を大局的に把握することを目的として「河川水辺の国勢調査」（以下「水辺の国調」）を実施しており、調査結果が公表されている³⁾。しかし、

調査開始から10年余であることもあり、このデータが河川環境の定量的評価にどの程度活用できるのかなど、明確にされていない。

これまでの「水辺の国調」を利用した研究で、特に魚類を対象として全国データを扱ったものとしては、文献4)～10)等がある。文献4)は「水辺の国調」で確認された各河川での確認種数について既存の調査結果との比較、文献5)～7)は主に外来種等に絞ってその侵入状況から見た各河川の環境変化の比較、文献8)はクラスター分析を用いて全国河川の地域区分を行った事例、文献9), 10)は水質指標のDO, BODを対象にしてこれらと魚類の生息条件の関係を求めた事例である。

以上に見られるように、これらの研究は一部の魚種等を用いた河川環境変化の評価であったり河川の地域区分への活用等の研究が主である。

本研究では全国109の1級河川において「水辺の国調」で確認された魚類の種類数（魚種数）を用いて、魚種数と流域・河川等の各種物理・水環境データ、魚類以外の他生物種類数との相関分析を行い、魚種数とこれらの指標との回帰分析を行った。その結果、確認魚種数と流域・河川特性との関係が統計的に明らかになるとともに、これらの結果を用いて河川ごとに生息魚種数を推算できる重回帰式を提案した。これらは河

川環境についての定量的な評価手法や基準作成の参考材料の1つになると考えている。

2. 調査データ

(1) 河川水辺の国勢調査

「水辺の国調」は平成2年度(1990)から全国109の1級河川及び国の所管する多目的ダムを対象に、平成5年度からは一部の2級水系の河川及び都道府県営ダムも対象に加えて、調査方法、調査地点、調査時期等を統一して大規模に実施されている。このうち、河川関係の調査は、「魚介類(魚類及びエビ・カニ・貝類)」、「底生動物」、「植物」、「鳥類」、「両生類・爬虫類・哺乳類」、「陸上昆虫類等」の6項目の生物調査のほか、「河川調査」、「河川空間利用実態調査」が行われている。6項目の生物調査は全河川を毎年全項目を一斉に実施するのではなく、5年で6項目の生物調査が一巡するような頻度で行われている。調査方法は「河川水辺の国勢調査マニュアル・河川版(生物調査編)」¹¹⁾に基づいて、河川ごとに調査地点と時期を定めて行われている。

これらの生物調査に基づき、各河川の調査地点、調査時期別に「魚類」「エビ・カニ・貝類」「底生動物」「植物」「鳥類」「両生類」「爬虫類」「哺乳類」「陸上昆虫類」の9つに区分されて、それぞれの確認種名と個体数がリスト化されている。

今回、対象としたデータは既に公表されている平成2年度(1990)から平成11年度(1999)までのもので、全国109の1級河川とした。2回以上調査が行われている河川については、年々調査レベルの向上が図られていることも考慮して、最新年度のデータを用いた。このため、使用データのはほとんどが平成7年度(1995)から平成11年度(1999)のものである。

これまでの実績によれば、調査は全国109河川全体で約1600地点、本川でみると概ね10kmに1地点の密度で行われている。調査の時期は春または夏と秋の2回が標準となっている。

本研究の扱うデータで、河川別の生物種数については各河川の各調査地点、各時期に生息が確認された生物種数を河川全体として集計したものであり、分類不明とされたものも1種類と数えた。

魚類については「水辺の国調」では全魚種を「純淡水魚」「回遊魚」「汽水・海水魚」の3つに細分化している。本研究の研究対象を海域環境に強く影響される「汽水・海水魚」を「全魚類」から除いて「純淡水魚」と「回遊魚」とした。以下では特に記述しない限り、「魚種数」とは各河川で生息の確認された淡

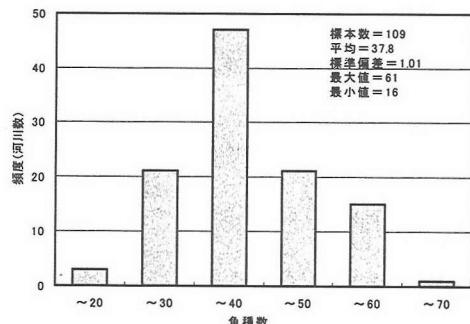


図-1 全国1級河川の魚種数分布(淡水魚+回遊魚)

表-1 確認された魚種数の多い河川と少ない河川

魚種(淡水・回遊魚)上位河川		魚種(淡水・回遊魚)下位河川	
順位	河川名	順位	河川名
1	淀川	1	本明川
2	利根川	2	沙流川
3	阿賀野川	3	鶴川
3	矢作川	4	留萌川
5	信濃川	5	安倍川
5	木曾川	5	五ヶ瀬川
5	吉井川	5	旭川
5	利根川	5	利根川

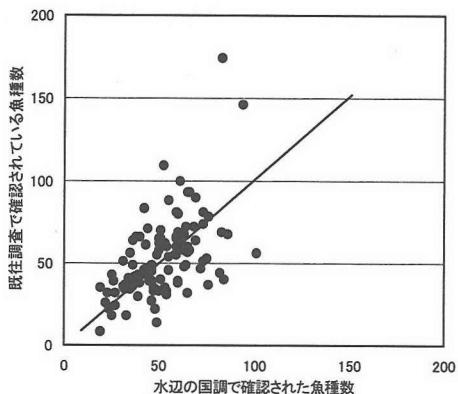


図-2 「水辺の国調」結果と既往調査値との比較(全魚種)

水魚と回遊魚の合計種類数である。

また、データは全国109の1級河川を網羅しているが、調査年度は異なっている。1~4年の調査年度の違いについては、その間に大きな気象変動や河川改変がない限り、河川環境上の変化は僅かであると考えられる。河川によっては、調査前の大出水などの擾乱現象が確認魚種数等の調査結果に影響を与える可能性もあるが、今回はデータのバラツキの1つとして扱い、特別の扱いはしなかった。

(2) 魚種数の分布特性

図-1は全国109の1級河川における魚種数(純淡水魚+回遊魚)の頻度分布を示す。表-1には魚種数の多い河川、少ない河川をそれぞれ5位まで示した。

図-2は「水辺の国調で確認された魚種数」と「既往文献や聞き取り等による魚種数」との比較を示す。既往文献等では汽水・海水魚も含めた全魚種を対象としているため、比較は全魚種とした。

両者の相関係数は0.55でバラツキは見られるものの一定傾向にある。また、水辺の国調データは既往データに比べほぼ同数となっており、水辺の国調で得られる魚種数はほぼ全国同質のデータとして扱うことができると考えられる。

ただし、各河川に生息する全ての魚種数に対する確認された魚種数の割合(捕捉率)は不明である。今後の継続調査で新たな確認魚種の追加が予想され、捕捉率は1に近づいていくと考えられる。

(3) 流域・河川の物理指標

全国109の1級河川において、今回、とりあげた流域・河川の物理指標の基本統計量、出典を表-2に示す。

これらの指標は、どの河川でも手に入る指標である。「流域面積」や「河川延長」は空間の大きさを表す指標、「緯度(河口地点)(°N)」はその地理的位置の指標、「山地面積率(%)」、「1/平均河床勾配」、「河道密度(河川延長/流域面積)(km/km²)」は流域・河川の物理的構造を示す指標である。

「流域人口密度(人/km²)」、「低水護岸整備率(国直轄区間)(%)」、「河畔の市街地率(国直轄区間)(%)」、「障害横断施設の平均間隔(km)」は人為による影響指標として選定した。

「河川延長」は様々な定義があるが、ここでは「河川便覧」¹³⁾に記載されている本支川合わせた合計河川延長の値を用いた。

「緯度(河口地点)(°N)」は河川流域の地理的位置として河口の緯度(北緯)をとった。

「平均河床勾配」は「河川便覧」に記載されている複数地点(2~3地点)の河床勾配を調和平均した値とし

表-2 流域・河川の物理指標の基本値と出典

物理指標	平均値	標準偏差	最大値	最小値	出典
流域面積(km²)	2201	2883	16840	87	
河川延長(km)	802	1044	6803	68	
河道密度(河川延長/流域面積)(km/km²)	0.395	0.135	0.811	0.149	河川便覧
平均河床勾配	1571	1425	6680	100	
緯度(河口地点)(°N)	36.2	3.3	44.9	31.4	地形図
山地面積率(%)	80.1	13.2	99.0	28.0	国交省工事研究所概要等
人口密度(人/km²)	353	806	7038	12	
河畔市街地率(%)	17.1	13.4	78.4	1.0	日本の河川地図
低水護岸整備率(%)	20.6	14.5	77.6	0.0	河川便覧
障害横断施設平均間隔(km)	23.2	32.3	185.8	1.0	全国一般水系における河川横断施設の地点検結果

た。河床勾配の値は通常分数表示のため、指標値では「1/平均河床勾配」(分数表示の分母値)とした。

「河畔市街地率」は日本の河川環境¹²⁾の中で、縦断方向1km間隔、左右岸各100m幅で求めた市街・工業地の面積比率を左右岸平均したものである。

「低水護岸整備率」は「河川便覧」に記載されている「直轄河川区間で低水護岸の整備されている延長値(左右岸合計)」を用いて、これを直轄河川区間長の2倍で除した値とした。

「障害横断施設の平均設置間隔」(以下「横断施設間隔」)は、「全国1級水系における河川横断施設の概略点検結果」¹⁴⁾で扱っているダム、堰、水門、床止め等の河川横断施設で魚類の遡上が困難な施設(障害横断施設)の中から「水辺の国調」対象区内に設置されている施設数を求めて、これが均等に設置されていると仮定して平均設置間隔を求めたものである。障害横断施設は、①魚道のないものについては施設上下流の落差が30cm以上ある施設、②魚道があるものでも落差が30cm以上で魚道が有効に機能していない施設とした。

上述の「全国1級水系における河川横断施設の概略点検結果」では、全国の1級河川本川において河川横断施設は2647箇所設置されている。このうち、上記で定義した魚の遡上等の障害となっている施設は2031箇所あり、そのうち、水辺の国調対象区間には909の施設が存在する(平成6年度)。

なお、「水辺の国調」対象区間に障害横断施設のない場合は、河口から対象区間外直上流にある障害横断施設までの長さ(ただし、上限は直轄管理区間長)とした。

(4) 水環境指標

今回、とりあげた水環境指標の基本統計量、出典を表-3に示す。

流量やその変動を表す指標としては、流量値、継続時間、変動幅、変動間隔等が考えられる。本研究では、指標として代表的な年間流況値とその流量比をとりあ

表-3 水環境指標の基本値と出典

水環境指標	平均値	標準偏差	最大値	最小値	出典
年最大水流量(m³/s/100km²)	427.6	337.7	2016.2	14.3	
豊水比流量(m³/s/100km²)	5.05	2.40	14.11	1.18	
平水比流量(m³/s/100km²)	2.95	1.57	9.26	0.48	
低水比流量(m³/s/100km²)	1.91	1.09	6.45	0.24	
枯水比流量(m³/s/100km²)	1.06	0.72	4.41	0.06	
年最小水流量(m³/s/100km²)	0.19	0.35	2.22	0	流量年表
年平均水流量(m³/s/100km²)	5.00	1.97	10.96	1.62	
最大流量/最小流量	821	1236	8690	8	
最大流量/低水流量	323	358	2353	7	
豊水流量/低水流量	6.9	5.5	27.9	1.9	
枯水流量/低水流量	3.0	1.4	12.5	1.6	
SS(mg/l)	17.39	31.88	268.9	1	
BOD(mg/l)	1.86	1.64	13	0.4	日本水質年鑑
DO(mg/l)	9.9	1.25	12.1	5.1	

げた。

年間流況値は「流量年表」¹⁵⁾で年別に整理されている年最大比流量、豊水比流量、平水比流量、低水比流量、渴水比流量、年最小比流量及び年平均比流量($m^3/s/100km^2$)を用いた。比流量値を用いたのは流域面積の影響を取り除くためである。

各河川で「流量年表」に複数の観測地点がある場合には原則として最下流の観測地点を採用した。また、流況値は観測開始(概ね、昭和30年代)から平成10年(1998)までの平均値を採用した。平均値としたのは魚種数が当該年度の流況だけに影響されるのではなく、継続的な流況が支配要因として大きいと推察したためである。

流量比は、種々組み合わせが考えられるが、本研究では「年最大流量／渴水流量」、「年最大流量／低水流量」、「豊水流量／渴水流量」、「豊水流量／低水流量」の4つを指標とした。なお、流量年表にデータの記載がない相模川は、検討から外して108河川のデータで分析した。

水質についても流況と同様に魚種数との相関を検討した。本研究では「日本水質年鑑」¹⁶⁾に記載されている一般的な水質指標であるBOD(75%値)(mg/l), SS(平均値)(mg/l), DO(平均値)(mg/l)をとりあげた。また、これらにおいて1河川で複数の調査地点がある場合は原則として最下流の調査地点の値を用い、昭和63年(1988)～平成9年(1997)の10年間の平均値を採用した。平均値を用いた理由は流況値の場合と同じである。

3. 魚種数の分布特性と相関分析

一般的には自然環境が豊かな河川ほど魚種数など生物多様度が大きいと考えられている。しかし、各河川での物理、流況、水質等の条件の違いによって魚種数などの生物多様性は異なり、たとえば、いくら自然豊かな河川でも流域や河川の物理条件等によっては魚種数の少ない場合もある。自然環境を定量的に比較するためには、種数と流域・河川の物理条件、流況、水質等との関係を明らかにしておく必要がある。本研究では相関分析を用いてこれらの関係を統計的に明らかにすることを試みた。

(1) 相関係数と有意検定¹⁷⁾

全国109河川の魚種数と11の流域・河川の物理指標、14の水環境指標の中から1指標をとりだして、これらの相関係数を求めた。

相関の有意性は、以下の手順のように相関係数が0,

すなわち無相関であるとの帰無仮説が棄却できるかどうかで検定した。

- ① 帰無仮説 H_0 : 相関係数(r) = 0, 及び有意水準(α)の設定
- ② 検定統計量t値の算定(nは標本数、ここでは河川数で109)

$$t = r (n-2)^{1/2} / (1-r^2)^{1/2} \quad (1)$$

- ③ p値(t分布による確率)の算出および判定
p値が有意水準 α に比べて、小さければ帰無仮説は棄却されて相関係数は有意と判定する。

(2) 検討のための流域・河川の物理指標

河川の魚種数を左右する要因には多くの指標が候補としてあげられるが、ここでは次のような流域・河川の物理指標をとりあげて検討する。

a) 流域面積及び河川延長

空間の大きさの指標となる流域面積や河川延長は大きくなるほど魚類の生息場所が多様で多くなることから、魚種数も多くなると考えられる¹⁸⁾。

b) 緯度(河口地点)

生態学的には熱帯地域のような低緯度ほど多様な生物種が生息しており、高緯度にいくにしたがって種数は減少することが知られている²⁰⁾。

c) 河道密度(河川長/流域面積)

この値が大きければ、河道が流域内に高密度に存在することから、魚類の生息場所が多くなる。このため、河道密度と魚種数とはプラスの相関をとることが予想される。

d) 1/平均河床勾配(分数表示の分母)

河床勾配が急であれば、同一流量でも流速は大きくなり、水位は低くなる。また、河床は不安定で、粒径の大きい河床材料が多くなる。その結果、魚の生息場所も不安定となり、魚種数と「1/平均河床勾配」との相関はプラスとなることが予想される。

e) 山地面積率

山地面積率の魚種数に与える影響の考え方は2通りが考えられる。1つは平野部河道は魚の生息場としての役割は大きく、山地面積率が小さいと平野部の規模が大きくなることから、魚種数は大きくなり、マイナスの相関をとることが考えられる¹⁸⁾。他の考え方は、森林は水生生物の栄養供給源としての機能もあることから、山地面積率が大きいほど魚種数は多くなり、プラスの相関をとることが考えられる。

f) 人口密度

河川への人為インパクトが大きくなると魚種数は減少すると考えられ、人口密度と魚種数はマイナスの相関が予想される。

g) 河畔市街地率

人口密度と同様の理由から河畔市街地率と魚種数はマイナスの相関が予想される。

h) 低水護岸整備率

コンクリート等による低水護岸整備が進んだ河川では、水際が単調で河道も直線化されることが多いため、魚種数は減少すると考えられ、低水護岸整備率と魚種数はマイナスの相関が予想される。

i) 横断施設間隔

固定堰などの河川横断施設は河川縦断方向の設置間隔が短ければ、回遊魚の遡上、降下に影響を及ぼすため魚種数は少なくなり、プラスの相関をとることが予想される。

(3) 魚種数と水環境指標の関係

河川の生息魚種数と水環境指標については、一般に以下の関係が考えられる。

a) 流量

流量は「中規模搅乱は生物多様性を高める」²¹⁾と言われているように、ある程度の出水やその変動は時々河川生態系を搅乱するため河原の植生や付着藻類等が更新されて生態系を健全に維持する役割を果たすことになり、魚種数とはプラスの相関をとることが予想される。しかし、どの程度の流量や変動が生態系にとって望ましいのか、また、魚類の生息にどのような効果や影響があるのかについては十分解明されていない。

b) 水質

実河川での水質と魚類との関係の定量的な調査例はほとんどない。しかし、ある水質値の範囲内では魚類の選好性は一定の傾向を示しにくく、場合によって逆の選好性を示す場合もあるとも言われている²²⁾。一般的にはSS, BODと魚種数とはマイナスの相関、D

Oとはプラスの相関を示すことが予想される。

(4) 分析結果

図-3は、全国109の1級河川の全てのデータを用いて、先に示した「流域・河川の物理指標」と「魚種数」の相関係数を示す。図-4は同じく「水環境指標」と「魚種数」の相関係数を示す。同図には信頼係数($1 - \alpha$)を0.95にした場合の信頼区間を併記した。

図-5及び図-6は地域別の傾向を見るため、北海道、東北、関東、北陸、中部、近畿、中国、四国、九州の9ブロック(国土交通省の北海道開発局及び地方整備局単位)に分けて、地域別に各指標(「緯度」は除く)と魚種数の相関係数を示した。また、同図に地域別の相関係数および信頼係数($1 - \alpha$)を0.9にした場合の信頼区間を併記した。さらに各指標と魚種数との相関結果について「相関係数 = 0」で仮説検定を行い、図-3～図-6で有意な相関がある指標は着色した。

なお、仮説検定ではデータ数の多少を考慮して、全国109河川の全てのデータで解析する場合には有意水準 $\alpha = 0.05$ 、地域別データで解析する場合には $\alpha = 0.1$ とした。

a) 流域面積及び河川延長

流域面積及び河川延長と魚種数の相関係数は全国データでは図-3に示すように、それぞれ+0.426, +0.532であった。仮説検定でも有意な相関があることが確認され、流域や河川の規模の増大とともに魚種数も増大の傾向があることが示された。

地域別に見た場合も図-5に示すように、各地域でプラスの相関を示した。流域面積、河川延長とも近畿で相関が小さいのは琵琶湖の影響ではないかと推察される。北海道、九州で相関が低い理由は不明である。

今回、生息空間の大きさをマクロに表す指標として

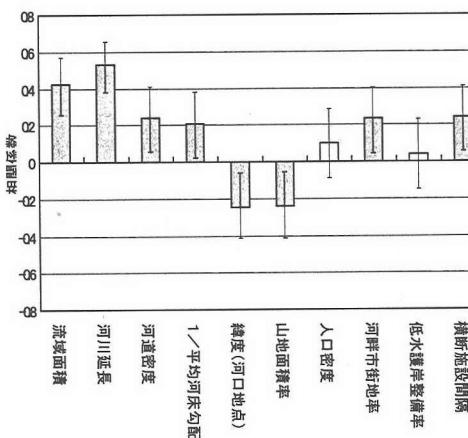


図-3 河川物理指標と魚種数の相関係数（全国）
(着色した指標は相関が有意な指標 ($\alpha = 0.05$))

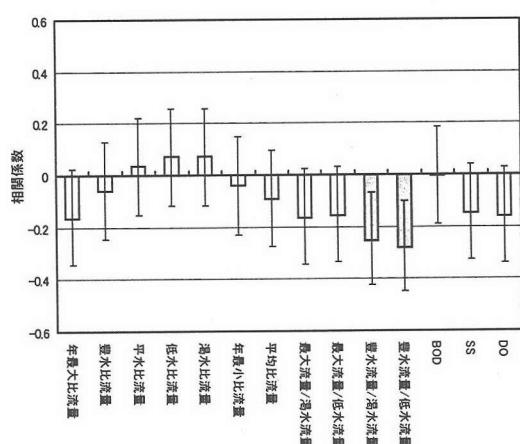


図-4 水環境指標と魚種数の相関係数（全国）
(着色バーは有意指標 ($\alpha = 0.05$))

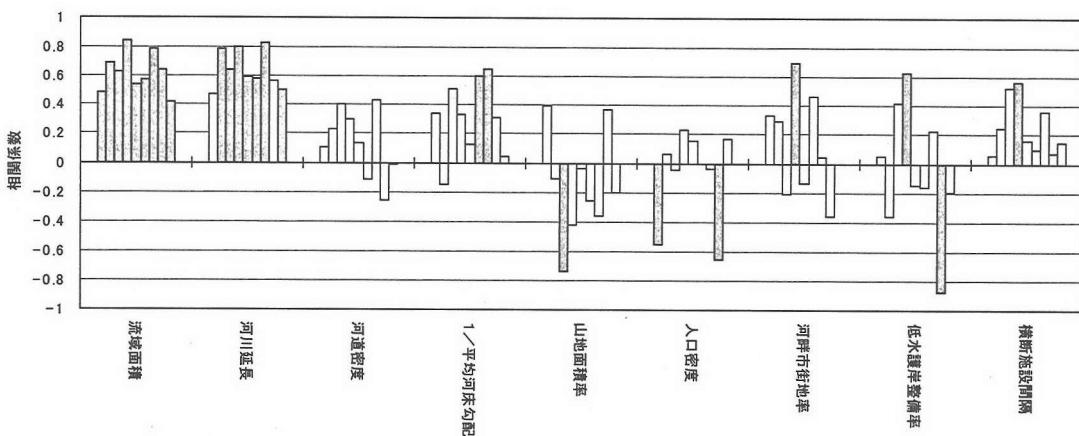


図-5 流域・河川物理指標と魚種数の相関係数（地域別）（棒グラフは各指標とも左から北海道、東北、関東、北陸、中部、近畿、中国、四国、九州であり、着色バーは有意指標 ($\alpha = 0.1$) を示す）

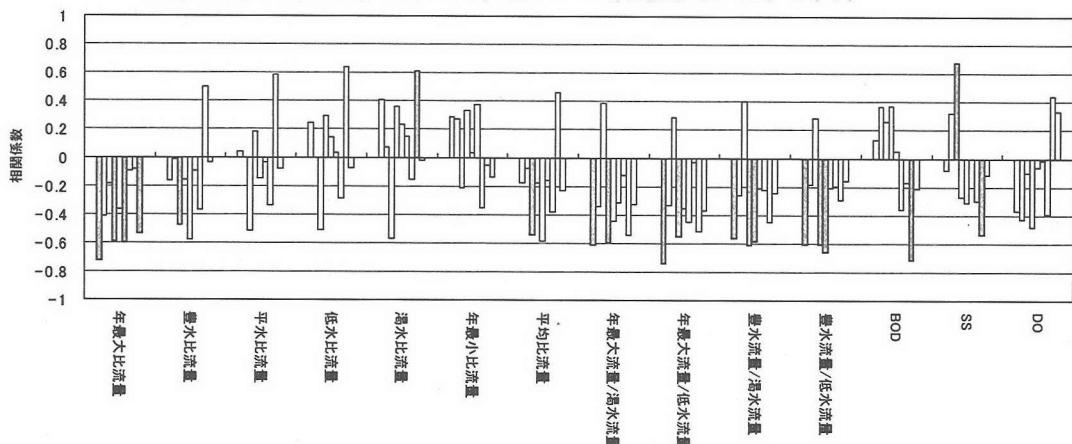


図-6 魚種数と水環境指標との相関係数（地域別）（棒グラフは各指標とも左から北海道、東北、関東、北陸、中部、近畿、中国、四国、九州であり、着色バーは有意指標 ($\alpha = 0.1$) を示す）

流域面積と河川延長をとりあげたが、実用的には河道指標として「セグメント」や「リーチ」等のスケールからみた検討も必要であろうが、これらについては今後の課題としたい。

「河川延長」は図-3に示すように魚種数と最も高い相関を示しているが、河川延長の求め方には河川起点をどこにするか、あるいはどの支川まで含めるか等で様々な定義があり、標準的な方法がないため、指標として客観性に欠ける。このため、以下では、空間規模の指標として客観性のある「流域面積」に絞って更に検討を進めることにする。

b) 種数一面積曲線（アレニウス式）の適用

一般的に規模と生物種の関係として「面積と生物種数」を一般化したアレニウス (Arrhenius) の式があり、次の式で表される¹⁹⁾。

$$S = c A^a \quad (2)$$

ここで、Sは生物種数、Aは対象面積 (km^2)、c及びaは定数で、特にaは周囲と境界がない対象では0.1、離島のような隔離された対象では0.24～0.34といわれている¹⁹⁾。

「水辺の国調」データにアレニウスの式をあてはめた結果、 $c = 15.1$ 、 $a = 0.123$ となった。図-7は実測値との適合状況を示す。この相関係数は0.431である。aの値は上記の「周囲と境界のない場合」に近い値となった。また、北海道から九州までの9つの地域別に同様の関係を整理したところ、東北、中国、四国等で比較的高い相関係数が得られた。図-8では東北及び中国・四国での相関関係を示す。cはとともに似た値であるが、aの値は中国・四国に比べて東北が小さいのは緯度の差によると考えられる。

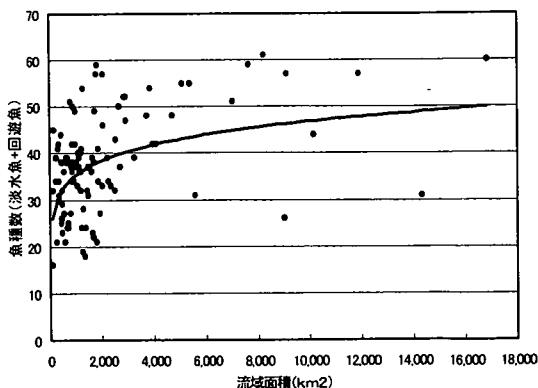


図-7 魚種数と流域面積の関係（全国）

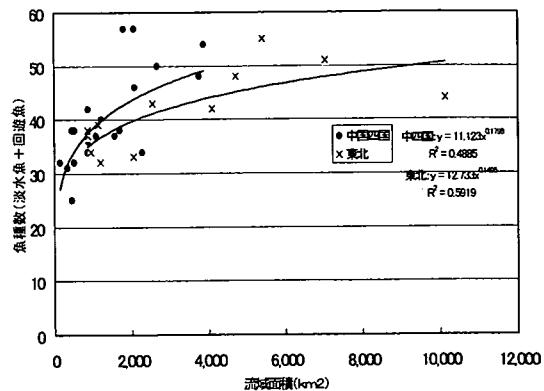


図-8 魚種数と流域面積の関係（東北と中四国の一例）

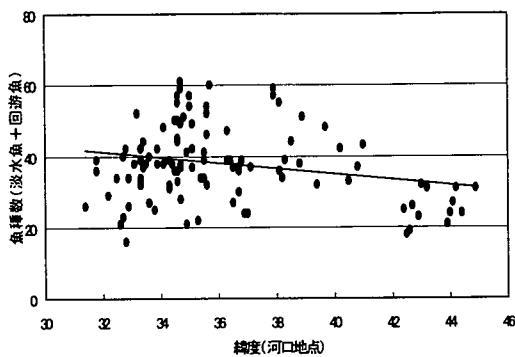


図-9 魚種数と緯度（河口地点）の関係

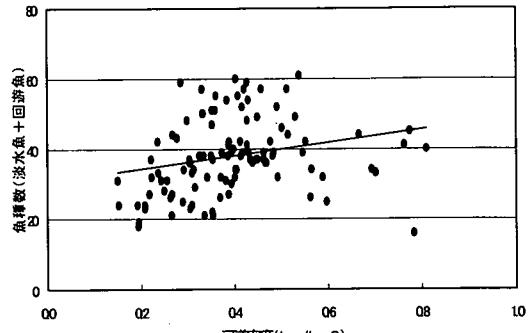


図-10 魚種数と河道密度の関係

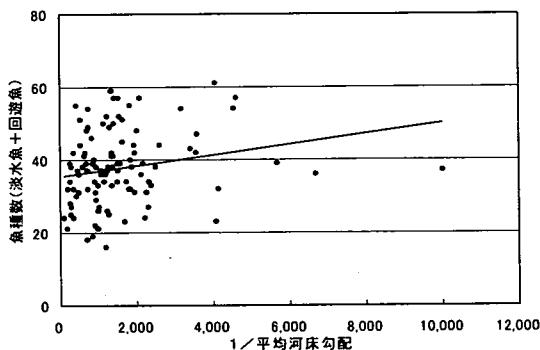


図-11 魚種数と1／平均河床勾配の関係

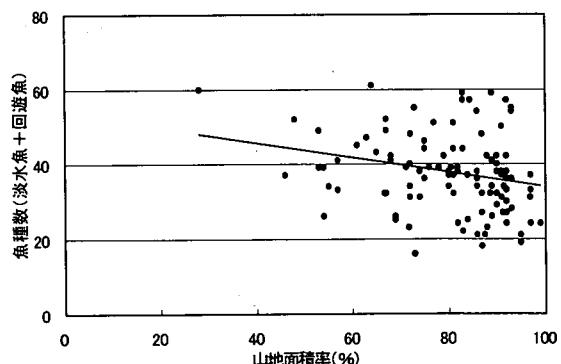


図-12 魚種数と山地面積率の関係

c) 緯度（河口地点）

緯度（河口地点）と魚種数の相関係数は -0.245 で有意な相関関係が得られた（図-3, 図-9）。河川の魚種数においても「低緯度ほど魚種数が増加する」傾向を示している。

d) 河道密度（河川延長／流域面積）

河道密度と魚種数の相関係数は $+0.239$ で有意な相

関が得られた（図-3, 図-10）。河道密度が高いほど魚種数は多くなる傾向が得られた。しかし、地域別にみると相間に大きな差異がみられる（図-5）。

e) 1／平均河床勾配

「1／平均河床勾配」と魚種数の相関係数は $+0.208$ で有意な相関が得られた（図-3, 図-11）。

地域別では近畿、中国でプラスの相関を示したが、

他の地域では有意な相関は得られなかった（図-5）。

f) 山地面積率

魚種数と山地面積率の相関係数-0.243で有意な相関が得られた（図-3、図-12）。

この結果は3. (2) e) で述べた2通りの考え方のうち前者であった。すなわち、平野部の大きさが魚種数の多さにつながった結果として、マイナスの相関になったものと考えられる。

地域別では関東でマイナスの相関を示したが、他の地域では有意な相関は得られなかった（図-5）。

g) 人口密度

人口密度と魚種数の相関係数は+0.101と小さく、有意な相関は得られなかった（図-3）。

地域別では北海道、四国でマイナスの相関を示したが、他の地域では有意な相関は得られなかった（図-5）。

h) 河畔市街地率

河畔市街地率と魚種数の相関係数は+0.232で有意な相関が得られた。これは予想に反した結果であり、河畔市街地率が大きくなるほど魚種数が大きくなる傾向である（図-3）。

地域別では北陸でプラスの有意な相関を示したが、他の地域では有意な相関は得られなかった（図-5）。

i) 低水護岸整備率

低水護岸整備率と魚種数の相関係数は+0.041と小さく、有意な相関は得られなかった（図-3）。

地域別では北陸でプラスの相関、四国でマイナスの相関が得られた以外は有意な相関は得られなかった（図-5）。

j) 横断施設間隔

障害横断施設の平均設置間隔と魚種数（淡水魚+回遊魚）の相関係数は+0.242で有意な相関が得られた（図-3）。予想どおり、施設間隔が小さいと魚種数は小さくなる傾向を示した。しかし、回遊魚のみをとりだして同様の相関を求めたところ、相関係数は+0.085

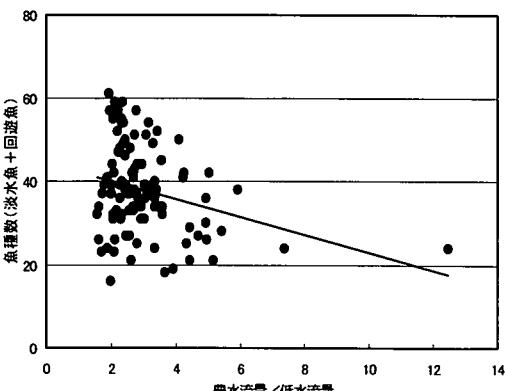


図-13 魚種数と豊水流量/低水流量の関係

で有意な相関が得られず、回遊魚だけの種数では明確な傾向は確認できなかった。

k) 流量

魚種数と各種比流量の相関係数はいずれも小さく、有意な相関が得られなかった（図-4）。

地域別では関東は多くの比流量指標でマイナスの相関を示したが、四国はプラスの相関を示すなど反対の傾向を示した（図-6）。

また、年最大比流量など大きい流況の指標では多くの地域でマイナスの相関を示し、渇水比流量など小さい流況の指標ではプラスの相関を示した。

各流量比と魚種数との相関では、流量比が「豊水流量／渇水流量」、「豊水流量／低水流量」の場合に相関係数はそれぞれ-0.254、-0.282で有意な相関を示した（図-5）。相関の高かった「豊水流量／低水流量」と魚種数の関係を図-13に示す。地域別では全般にマイナスの相関傾向を示した（図-6）。

以上のように、比流量はいずれも有意な相関を示さず「生物多様性」の向上との関係を確認できなかった。また、流量比ではその値が小さいほど魚種数が大きくなることから流量変動が小さいほど魚種数が多くなる傾向にあることが示された。

l) 水質(BOD, SS, DO)

河川水質を表す指標としてSS, BOD, DOをとりあげて魚種数との相関を求めた。

その結果、いずれの関係も有意な相関は得られなかった（図-4）。

地域別ではBOD, SSが四国でマイナスの相関、SSは関東でプラスの相関が得られたのみであった（図-6）。これは水質データの測定地点選定など代表性の問題や水質に対する魚種ごとの選好性や適応能力の違いの影響とも考えられるが、明確な理由は不明である。

以上、各指標と魚種数の相関について総括すると、流域・河川物理環境指標と魚種数との関係では、プラスの相関を示したのは「河川延長」、「流域面積」、「河畔市街地率」、「河道障害施設間隔」、マイナスの相関を示したのは「緯度（河口地点）」、「山地面積率」であった。

「流域面積」、「河川延長」のような空間規模が大きいほど魚種数が大、「緯度」のような地理的位置については南にいくほど魚種数が大となり、予想どおりの結果を得た。

また、人為インパクトの指標である「流域内人口密度（河口地点）」、「河畔市街地率」、「低水護岸整備率」、「障害横断施設の平均間隔」については、「河畔市街地率」及び「障害横断施設の平均間隔」がプラ

スの相関となった以外、人的インパクトと魚種数には明確な相関は得られなかった。今回は河川全体を1つにした分析であり人為インパクトもマクロの扱いであること、対象としている1級河川は一般に人為インパクトの大きさに比べて流域・河川規模が大きく影響を捉えにくくいようにも考えられる。

水環境指標と魚種数については全体的に相関が小さく、各比流量値、S S、BOD、DOと魚種数についてはいずれも有意な相関が得られなかった。ただし、年間流量変動の指標については「豊水流量／渇水流量」、「豊水流量／低水流量」ではマイナスの相関を示し、流量変動が小さいほど魚種数が多くなる傾向が示され、予想に反する結果となった。

4. 重回帰式の適用

前章までの検討結果を用いて、流域・河川及び水環境の各指標から魚種数を求める試みを試みた。すなわち、魚種数を目的変数として、流域・河川及び水環境の各指標を説明変数とする重回帰式を求める。その重

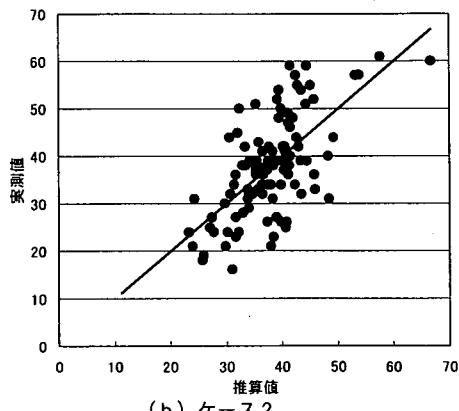
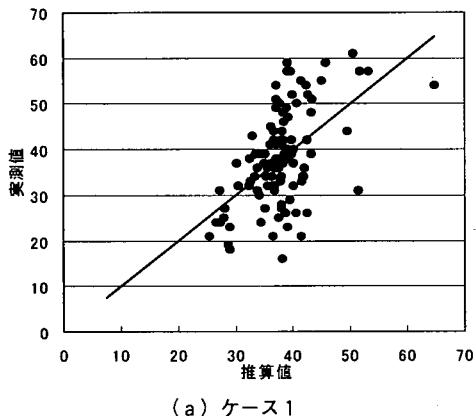


図-14 重回帰式の適合度

表-4 分散分析表（ケース1～ケース4）

		平方和	自由度	不偏分散	分散比	有意確率
ケース1 (2変数)	回帰	3760	2	1880	25.0	1.36314E-09
	残差	7912	105	75		
	合計	11673	107			
ケース2 (5変数)	回帰	4888	5	978	14.7	7.70016E-11
	残差	6785	102	67		
	合計	11673	107			
ケース3 (4変数)	回帰	6874	4	1719	36.9	4.12084E-19
	残差	4799	103	47		
	合計	11673	107			
ケース4 (7変数)	回帰	7445	7	1064	25.2	1.71115E-19
	残差	4228	100	42		
	合計	11673	107			

回帰式は線形式を用いる。また、説明変数はできるだけ少ない数で重相関係数や寄与率が大きくなるように選定した。

(1) 重回帰式の推定方法²³⁾

目的変数が y 、説明変数が $x_1 \cdots x_p$ のとき、線形重回帰式は式(3)で表される。

$$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \cdots + b_p \cdot x_p + b_0 \quad (3)$$

ここで、 b_1, b_2, \dots, b_p は偏回帰係数であり、最小2乗法を用いて求めることができる。

重回帰式の有意性については、説明変数 x_1, x_2, \dots, x_p が全体として y の予測に役立つかどうかを検定する。すなわち、

$$H_0 : b_1 = b_2 = \cdots = b_i = \cdots = b_p = 0 \quad (4)$$

を仮説として、分散分析表に基づき判定する。

説明変数となり得る指標は、これまで検討してきた流域・河川物理指標9、流況指標10、水質指標3の合計22である。図-3から魚種数との相関係数は大きい方から「河川延長」、「流域面積」であるが、これらはともに空間規模の指標であり、第1番目の説明変数はどちらか一方を採用すればよい。ここでは、3. (4) a) に述べた理由から、一般性の高い「流域面積」を採用することにした。

2番目以下の説明変数の追加は自由度調整済み寄与率を見ながら行った。すなわち、「流域面積」に各指標を1個ずつ追加し、自由度調整済み寄与率が最大となる指標を説明変数に追加していく、以下のようにして説明変数が2～5個の重回帰式を求めた。

(2) 魚種数を求める重回帰式

a) ケース1 (2変数：流域・河川物理指標)

2個の説明変数の重回帰式として、「流域面積」に「緯度（河口地点）」を加えた2指標を説明変数とする重回帰式(5)を求めた。

$$\begin{aligned} \text{魚種数} &= 0.00190 \times \text{流域面積} (\text{km}^2) \\ &\quad - 1.20 \times \text{河口緯度} (\text{°N}) \\ &\quad + 77.3 \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)の重相関係数は0.568、自由度調整済み寄与率は0.309である。また、分散分析表(表-4)から、有意確率 \leq 有意水準($\alpha=0.05$)であり、この重回帰式是有意であると判定された。

b) ケース2(5変数：流域・河川の物理指標と水環境指標)

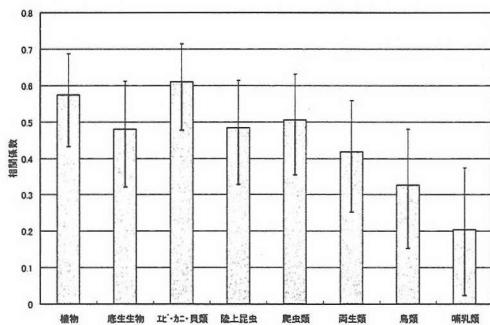


図-15 魚種数と魚類以外の他生物種数との相関係数

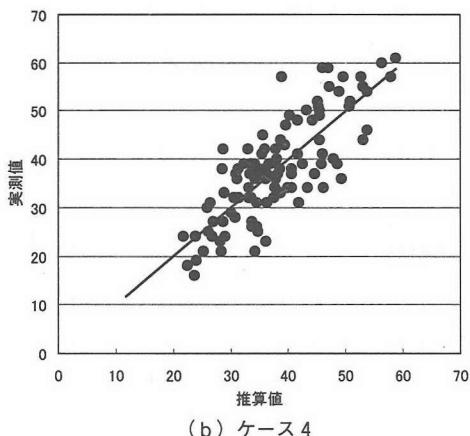
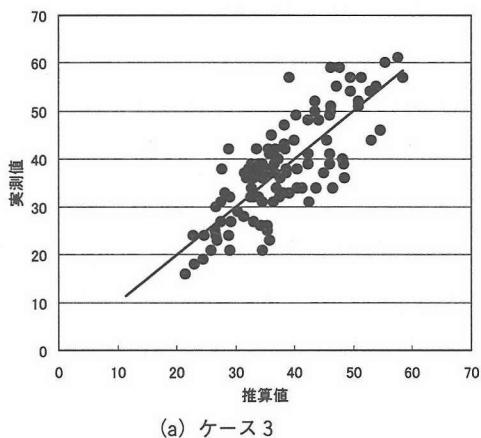


図-16 重回帰式の適合度

上述の手順で式(5)に説明変数を追加した際の結果を図-17に示す。この図から説明変数が増えると自由度調整済み寄与率も大きくなるものの、その増加割合はあまり上昇しないことがわかる。そこで、自由度調整済み寄与率の増加割合が頭打ちとなる下記の5つの説明変数とした場合の重回帰式(6)を求めた。

$$\begin{aligned}
 \text{魚種数} = & 0.00147 \times \text{流域面積(km}^2\text{)} \\
 & - 1.17 \times \text{河口緯度(}^\circ\text{N)} \\
 & + 20.4 \times \text{河道密度(km/km}^2\text{)} \\
 & + 0.00123 \times \lceil 1/\text{平均河床勾配} \rceil \\
 & - 0.00967 \times \text{年最大比流量(m}^3/\text{s/100km}^2\text{)} \\
 & + 71.6
 \end{aligned} \quad (6)$$

重回帰式(6)の重相関係数は0.647、自由度調整済み寄与率は0.390となった。分散分析表(表-4)から、この回帰式是有意であると判定された。式(6)では4つの河川・流域の物理指標の説明変数に加えて、水環境指標である年最大比流量の加わった重回帰式となつた。しかし、図-14(a)(b)を比較して、説明変数を2個から5個に増やしても自由度調整済み寄与率や適合状況はあまり向上していない。

c) ケース3(4変数：ケース1+他生物種数(2変数))

河川・流域の物理指標や水環境指標だけの説明変数では限界があると判断して、「水辺の国調」で得られている魚類以外の他生物種数を説明変数に加えることによって重相関係数や自由度調整済み寄与率を高めることを試みた。

「水辺の国調」で調査されている「魚類」以外の生物である「エビ・カニ・貝類」、「底生動物」、「両生類」、「爬虫類」、「哺乳類」、「鳥類」、「陸上昆虫類」、「植物」の8項目について魚種数と各生物種数との相関を求めた。その結果を図-15に示す。相関係数は高い順に「エビ・カニ・貝類」、「植物」、「爬虫類」、「陸上昆虫類」、「底生動物」、「両生類」、「鳥類」、「哺乳類」であった。

式(5)、(6)に上記指標8指標のうち説明変数を1つのみ追加する場合には自由度調整済み寄与率が最も大きくなるのは「エビ・カニ・貝類」であった。

さらに、式(5)、(6)に上記8指標のうち2つの説明変数を追加する場合には「エビ・カニ・貝類」と「植物」の追加で自由度調整済み寄与率が最も大きくなつた。式(5)に上述の2変数を追加した場合の重回帰式を式(7)に示す。

$$\begin{aligned}
 \text{魚種数} = & 0.000993 \times \text{流域面積(km}^2\text{)} \\
 & + 0.142 \times \text{河口緯度(}^\circ\text{N)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +0.625 \times \text{エビ・カニ・貝類種数} \\
 & +0.0144 \times \text{植物種数} \\
 & +12.8 \quad (7)
 \end{aligned}$$

式(7)の重回帰係数は0.767、自由度調整済み寄与率は0.589である。また、分散分析表(表-4)から、この回帰式は有意であると判定された。この重回帰式の適合状況を図-16(a)に示す。

d) ケース4 (7変数: ケース2+他生物種数 (2変数))

ケース3と同様に「エビ・カニ・貝類」と「植物」の2変数を式(6)を追加した場合の重回帰式を式(8)に示す。

$$\text{魚種数} = 0.000865 \times \text{流域面積} (\text{km}^2)$$

$$+0.115 \times \text{河口緯度} (\text{°N})$$

$$+17.2 \times \text{河道密度} (\text{km}/\text{km}^2)$$

$$\begin{aligned}
 & +0.000651 \times \text{「1/平均河床勾配」} \\
 & -0.00719 \times \text{年最大比流量} (\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2) \\
 & +0.561 \times \text{エビ・カニ・貝類種数} \\
 & +0.0138 \times \text{植物種数} \\
 & +10.6 \quad (8)
 \end{aligned}$$

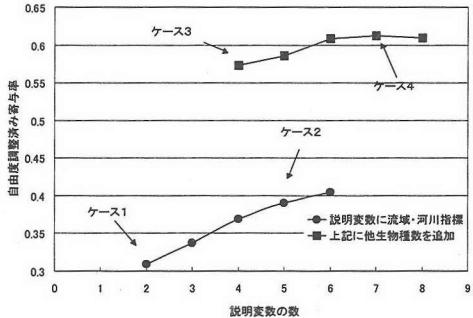


図-17 説明変数の数と自由度調整済み寄与率

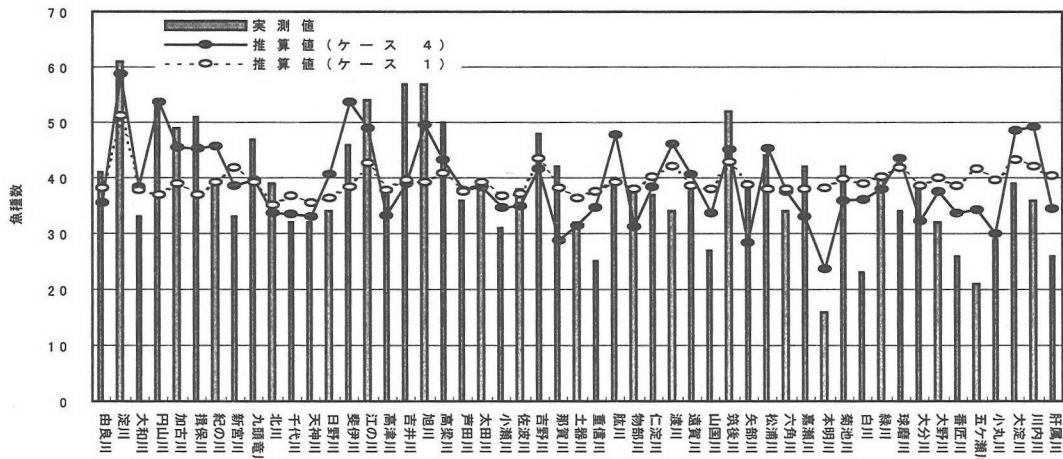
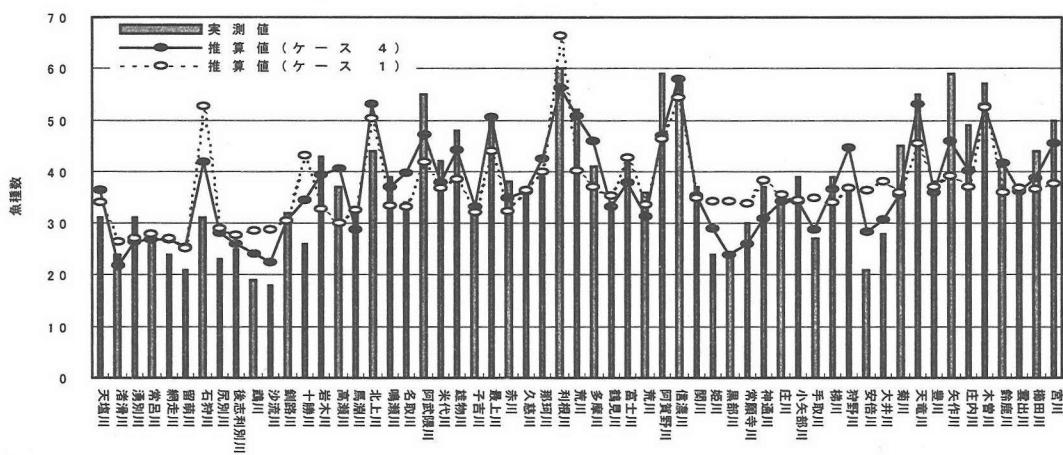


図-18 重回帰式(ケース1、ケース4)の河川別適合度

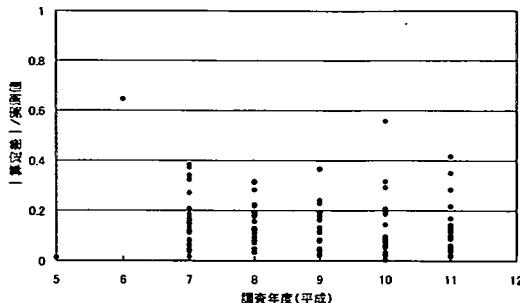


図-19 回帰式の推算誤差（「水辺の国調」年度別）

式(8)の重相関係数は0.799、自由度調整済み寄与率は0.612となった。また、分散分析表（表-4）から、この回帰式は有意であると判定された。この重回帰式の適合状況を図-16(b)に示す。

図-17は説明変数の追加や組み合わせ方法とともに自由度調整済み寄与率の変化状況を示す。

図-17に示すように、他生物種類数を説明変数（ここでは2変数）に追加した場合、説明変数の数を7個よりも多くしても自由度調整済み寄与率の上昇はみられない。このことから、ケース4が今回の重回帰分析において説明変数の追加によって精度を上げられる限界と考えられる。

(3) 重回帰式の特徴と課題

重回帰式によって魚種数を予測する場合、「流域面積」と「緯度（河口地点）」の2つの説明変数では自由度調整済み寄与率が0.3、これに「河道密度」、「年最大比流量」、「1／平均河床勾配」を加えて5つの説明変数で予測しても自由度調整済み寄与率は約0.4であり十分な推定精度は得られなかった。このため、魚類以外に河川に生息する「エビ・カニ・貝類」及び「植物」の種類数を重回帰式に加えることによって、寄与率を0.6以上まで上げることができた。

すなわち、図-17によれば、ケース1とケース2の変化に比べて、ケース1とケース3、またはケース2とケース4のほうが寄与率の向上が大きいことがわかる。

図-18はケース1とケース4の重回帰式を用いた各1級河川の魚種数の推算値と実測値の比較を示す。

ケース1及びケース4とも実測値の傾向をほぼ再現している。しかし、ケース1とケース4を比較すると、ケース4はケース1に比べて推算値が河川ごとの変化をより鋭敏に表現していることがわかる。

地域別にみるとケース4でも西日本の河川で、推算値と実測値のずれが大きく実測値に比べて推算値が大きめの値となっている。最大は五ヶ瀬川で推算値が実測値の約1.6倍となっている。

図-19はケース4での実測値と推算値との誤差（|実測値-推算値|/実測値）と実測値の調査年度との関係を示す。調査年度が古いほど調査が不慣れで調査方法も各河川で十分統一されていなかったようで誤差が大きく、確認された魚種数も少ないなど結果が不安定であったが、平成7年以降は誤差はほぼ0.4以下に収まっている。

このような推算値と実測値の差の原因として以下のことが考えられる。

- ① 現地調査の方法や調査地点数
 - ② 漁業等による漁獲、放流の影響
 - ③ 調査直前の洪水や渇水等の影響
 - ④ 選定した物理指標の代表性
 - ⑤ 地域性が加味されていない
 - ⑥ 回帰式形の適合性 等
- ①については、各河川での調査者の技能、調査年度や調査密度等の違いが考えられる。
- ②③については、今回は漁獲や放魚量、調査直前の洪水の影響等については考慮していないことによる。今後、これらの考慮も必要である。
- ④⑤については、ここで説明変数は容易に入手できる指標を用いたが、今後、別の指標を加えるなどによって適合性改善の可能性がある。

また、全国一律の回帰式ではなく、地域区分ごとの回帰式の検討も改善策の1つである。

⑥については、今回は線形の回帰式を採用したがべき乗を用いた回帰式の適用なども考えられる。

また、重回帰式の説明変数のうち、「緯度（河口地点）」の係数はケース3とケース4ではプラスであるが、他のケースではマイナスとなり、説明変数の組み合わせによって異なっている。これは説明変数間に相関があったり、データ値の範囲が限られていることに原因があると考えられる。既往の生態学の知見を取り入れながら、適合度の向上や適用範囲の拡大を図れるように回帰式に改良していく必要がある。

上記のような課題があるものの今回の重回帰式は河川の自然環境を量化するための評価指標の1つとなり得ると考えられる。特に、魚類へのインパクトとレスポンスの関係、すなわち、代表指標として魚種数を用いることにより、マクロではあるが流域や河川の物理環境や人為インパクトから定量的に変化を予測・評価する目途を与えることができたと考えている。

5. 結論

平成2年から平成11年までの水辺の国調データと流域・河川の物理指標を用いて、全国109の1級河川にお

いて、魚種数を河川環境の代表指標にとりあげ、流域・河川の物理環境データや魚類以外の生物種数とのマクロな相関分析および重回帰分析を行った。これらの結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 確認された魚類（純淡水魚と回遊魚）について、全国109の1級河川に関する頻度分布と河川別順位を求めた。その結果、平均魚種数（純淡水魚＋回遊魚）は37.8種、そのうち、最大の魚種数の河川は淀川で61種、最小は本明川で16種であった。

(2) 魚種数と物理環境指標との相関を求めたところ、魚種数と有意の相関が得られたのは「河川延長」、「流域面積」、「緯度（河口地点）」、「河道密度」、「河畔市街地率」、「山地面積率」、「横断施設間隔」等であった。「河川延長」、「流域面積」、「河畔市街地率」、「河道障害施設間隔」はプラスの相関、「緯度（河口地点）」、「山地面積率」はマイナスの相関を示した。

「流量比」と魚種数はマイナスの相関となり、流量変動幅が大きいほど魚種数が減少する傾向となった。

また、各「比流量」、「SS」、「BOD」「DO」は有意な相関は得られなかった。

(3) 上記で算定された相関係数は予想とは異なり小さい値のものも多い。これは調査が統一マニュアルにもとづき実施されているが、河川や年度によって現地での調査方法や熟練度から生じる精度の限界とも考えられる。今回の各指標との関係は今後の調査手法改善の参考にもなるであろう。

(4) 魚種数を目的変数として「流域面積」、「河口緯度」を説明変数とした重回帰式、これに「最大比流量」、「河道密度」、「1/平均河床勾配」を加えた5つの説明変数とした重回帰式を求めた。さらに適合度を向上させるため、上記の重回帰式に魚類以外の生物種との関係を追加した。その結果、「エビ・カニ・貝類種数」及び「植物種数」の2変数を追加して、4及び7つの説明変数の重回帰式を得た。これらにより、各河川の指標や他生物種が変化した場合に魚種数の増減を予測・評価することが可能にした。

謝辞：以上の解析においては国土交通省河川局河川環境課監修、（財）リバーフロント整備センター編集、山海堂発行の平成2・3年度から平成11年度までの「河川水辺の国勢調査年鑑」のデータを使用した。これらの調査に携わった関係者各位、及び、独立行政法人土木研究所水循環研究グループ河川生態チームの中村研究員には有益なアドバイスを得た。合わせて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 後藤晃、塚本勝巳、前川晃司：川と海を回遊する淡水魚－生活史と進化、東海大学出版会、1994.10.
- 2) たとえば、土木学会：水理公式集（平成11年度版）第2編第7章河川環境、丸善、1999.11.
- 3) 国土交通省河川局監修、（財）リバーフロント整備センター編集：河川水辺の国勢調査年鑑（平成2・3年度～平成11年度）、山海堂、1993～2001.
- 4) 飛鳥川達郎、小川鶴蔵：河川水辺の国勢調査データの課題、リバーフロント研究所報告第11号、2000.10.
- 5) 松間充、小川鶴蔵、南城利勝：河川水辺の国勢調査からみた河川の生物相について、リバーフロント研究所報告第12号、2001.10.
- 6) 南城利勝、小川鶴蔵、林尚、飛鳥川達郎：河川水辺の国勢調査結果からみた日本の河川環境と生物相の研究、リバーフロント研究所報告第11号、2000.10.
- 7) 深沢博、池内幸司：河川水辺の国勢調査結果からみた日本の河川に生物の分布変化、リバーフロント研究所報告第9号、1998.3.
- 8) 古川博一、寺神俊雄、矢野明夫：河川水辺の国勢調査の淡水魚類相データを利用した日本列島の魚類区分手法、リバーフロント研究所報告第9号、1998.3.
- 9) 渡辺昭彦、島谷幸宏、保持尚志：河川水辺の国勢調査を用いた魚類の生息環境の一推定、土木計画研究・講演集No18.(2)、1995.12.
- 10) 渡辺昭彦、島谷幸宏：河川水辺の国勢調査を用いた魚類の生息条件の推定、土木学会第50回年次学術講演会、1995.9.
- 11) 建設省河川局河川環境課監修：河川水辺の国勢調査マニュアル・河川版（生物調査編）、（財）リバーフロント整備センター、1997.4.
- 12) 環境庁：日本の河川環境、大蔵省印刷局、1989.12.
- 13) (社)日本河川協会監修：河川便覧（平成6年版），国土開発調査会、1994.9.
- 14) 建設省河川局河川環境課監修：全国一級水系における河川横断施設の概略点検結果、（財）リバーフロント整備センター、1995.12.
- 15) 建設省河川局：流量年表、(社)日本河川協会
- 16) (社)日本河川協会編：日本水質年鑑、山海堂、2000.4.
- 17) たとえば、内田治：すぐわかるEXCELによる多変量解析、東京図書、1996.4.
- 18) 玉井信行、水野信彦、中村俊六編：河川生態環境工学・河川生態と河川計画、東京大学出版会、1993.11.
- 19) 木元新作、武田博清：群集生態学、共立出版、1989.6.
- 20) Kricher, J.C. : A Neotropical Companion, An Introduction to the Animals, Plants, and Ecosystems of the New World, Tropics, Princeton University Press, 1989 (伊沢紘生監修、幸島司郎訳：熱帯雨林の生態学、どうぶつ社、1992).

- 21) たとえば、玉井信行、奥田重俊、中村俊六編：河川生態環境評価法、東京大学出版会、2000.3.
- 22) 関根雅彦：水質汚濁が魚に与える影響に関する実験的研究（河川整備基金事業「河川における水質環境向上のための総合対策に関する研究」の一部）、（財）河川環境管理財団、2001.11.
- 23) たとえば、田中豊、鷹本和昌：多変量統計解析法、現代数学社、1983.5.

(2002.3.26受付)

STASTICAL ANALYSIS OF FRESHWATER FISH SPECIES IN JAPAN USING THE NATIONAL CENSUSES ON RIVER ENVIRONMENTS

Junzo SAGO and Akihiro NAGAI

This study is to examine quantitative relationships between physical indices of basins or rivers and the number of fish species using the National Census on Environments. A summary of this study is given as follows. ① We determined the distribution characteristics of the fish species found in 109 class A rivers. Among the class A rivers studied, the Yodo River is characterized by the largest diversity with 61 fish species. The Honmyo River exhibits the smallest diversity with 15 fish species. Mean of the fish species in 109 class A rivers is 37.8. ② The regression analysis of the data revealed that the number of fish species has strong relationships to the parameters, including basin area, latitude of river-mouth, river density, flow variation, the number of shrimp, crab, shellfish species, and the number of plant species. ③ A multiple regression model was developed to estimate the number of fish species from the physical indices of river (or basins) and the number of aquatic biota (except for fish). The model was shown to predict the change in the number of fish species resulting from the physical impacts.