宮城県中南部に生息する河川底生動物群集の種多様性の空間階層構造

HIERARCHICAL SPATIAL STRUCTURE OF SPECIES DIVERSITY OF RIVERRINE BENTHIC FAUNAL COMMUNITY IN SOUTH-CENTRAL MIYAGI PREFECTURE

浜本洋[1]・風間聡[2]・渡辺幸三[3]・沢本正樹[4]・大村達夫[5]
Hiroshi HAMAMOTO, So KAZAMA, Kozo WATANABE, Masaki SAWAMOTO, Tatsuo OMURA

[1]学生会員　工学　東北大学大学院環境科学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20）
[2]正会員　工博　東北大学准教授　環境科学研究科（同上）
[3]正会員　工博　日本学術振興会特別研究員（PD）　東北大学大学院土木工学専攻（同上）
[4]フェロー会員　工博　東北大学大学院教授　土木工学専攻（同上）
[5]正会員　工博　東北大学大学院教授　土木工学専攻（同上）

Collection of benthic animals contributes to making biodiversity indexes in the Natori river basin. Biodiversity indexes are composed of alpha, beta, and gamma diversities. The relationship between biodiversity and habitat environment is investigated, and high diversity exists in the middle stream region and negative relation to agricultural areas. Furthermore elevation and agricultural land divided up 4 groups in the Natori River basin by nonhierarchical cluster analysis. At last, we discuss the relationship the gamma diversities.

Key Words : *cluster analysis, watershed scale diversity, benthic community survey*

１．はじめに

河川は水生生物の生息場として生物多様性の維持に大きな役割を果たしている．近年，河川を取り巻く状況は，治水・利水等の人間活動面からの要請に加え，生物の生息空間や生物多様性を保全するという要請にも十分に応えることが必要とされている．

現在，水生生物の種多様性のモニタリングが活発に進められている（例，河川水辺の国勢調査）．評価結果をもとにして，種多様性と河川環境が解析され，生物群集の種多様性を保全・再生するために必要な環境条件が一部明らかにされつつある[1)]．しかし，これらの解析の多くは，ある局所的な地点内における種多様性を増大させるための河川環境（流速，底質，水質等）の模索に止まっている．今日，地先的な河川管理から流域一貫の河川管理への脱却の重要性が高まっており，ある地点内に生息する種数だけでなく，マクロな視点から，流域内に生息する種数，あるいは複数の流域を包括する地域内に生息する種数も，保全目標として重要と考えられる．

Whittaker[2)]は生物群集の構造上の多様性をα，β，γ多様性の3つに分けて考えた．各地点の多様性を表すα多様性，地点間の群集の多様性を表すβ多様性，全体の多様性を表すγ多様性である．河川は生息場，リーチ（地点），河川（本川，支川），流域等の異なる空間スケールの構成因子から形成される．これに対応して，河川生物の種多様性も，地点内の多様性，流域内地点間の多様性，そしてこれら2つのレベルの多様性の合計である流域内の多様性から形成されている．流域内地点間の多様性は，流域内に見られる地点間の環境状態の変化の大きさによって決まる可能性がある．地点内，地点間の各多様性を決めている環境因子が明らかになれば，従来にはない，流域全体の種多様性を保全することができる河川環境管理の実現に繋がることが期待される．

以上の背景から，本研究は，宮城県中南部の5流域45地点を対象として，河川底生動物群集を河川環境の調査を行い，地点内，地点間，流域内の種多様性を調べ，各空間階層の多様性に影響している環境因子を明らかにした．環境データについては，環境の変化に伴う生物多様性の予測を調査地点外で行う際の汎用性を高めることを念頭において，数値地図情報と数値シミュレーションを組み合わせて流域環境を数値化する手法を用いた．

２．方法

(1) 対象領域

宮城県中南部に位置する名取川，増田川，川内沢川，五間掘川の4水系を解析対象とした**(図-1)**．解析対象エリアは，西部の山地，東部の海岸平野，その中間の丘陵部に分けられる．山地．丘陵地のほとんどは森林に覆われ，自然環境も豊かである．下流域は，仙台市中心部を含む市街地と水田が広がる仙台平野である．名取川水系は，名取川流域（流域面積=628km^2，本川流路長=55km）と広瀬川流域（流域面積=311km^2，本川流路長=49km）から構成される．名取川は宮城-山形県境付近を水源とし，下流域で広瀬川と合流して名取市閖上で太平洋に注いでいる．それぞれの流域の上流域には，釜房ダムと大倉ダムがある．他の増田川（流域面積=60km^2），川内沢川（流域面積=17km^2），五間掘川（流域面積=44km^2）は，標高が比較的低い丘陵地を源としており，名取川流域や広瀬川流域に比べると規模が小さい．

調査地点は，調査範囲において，上流から下流にかけてほぼ均一に面的に分布する45地点を選んだ（**図-1**，**表-1**）．全調査地点において，河床はコンクリートで固められておらず，河床材料は主に砂礫から構成され，瀬-淵構造が残された河川構造であった．調査地点の標高は，1.0mから660mの範囲に分布している．縮尺1：25000の地図で求めた各地点のStream Orderの範囲は1から5であった．

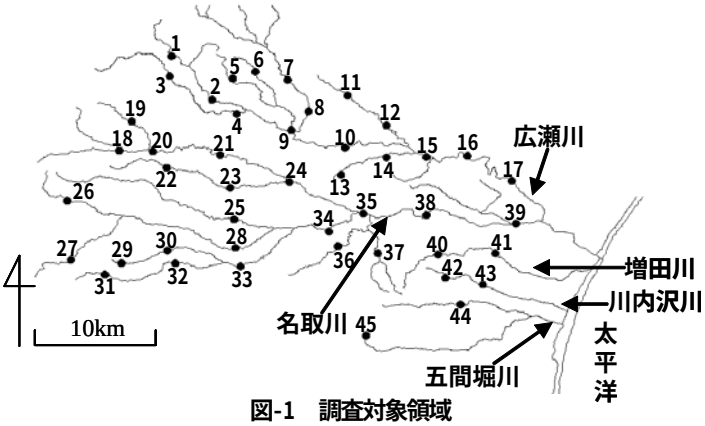

図-1　調査対象領域

(2) サンプリング

底生動物のサンプリングは，2006年9月～10月に対象領域内の全45地点で行った**(図-1)**．底生動物は，各調査地点の平瀬の中からランダムに選んだ2ヶ所で，コドラード付きサーバーネット（30cm×30cm，メッシュサイズ：250μm）を用いた定量サンプリングを行った．2回サンプルしたもの合計を各地点のデータとした．実験室に持ち帰った底生動物は，70-80% エタノールで固定し，実体顕微鏡（150倍）を用いて日本産水生昆虫検索図鑑に[3] 従って，可能な限り細かいレベル（種，属，科）まで同定した．同定された計116分類群のうち，67分類群（58%）が種，29分類群（25%）が属，18分類群（16%）が科，1分類群（1%）が目レベルで分類された．

(3) 種多様性解析

a) 地点内の多様性

各地点内の多様性を，Shannon-Weiner多様度指数（H’）と分類群数（S）の2指標で評価した．H’は種の豊富さと種組成の均等さの２つの要素を考慮して群集の多様性を表す指標であり，x_iをi分類群の個体群密度，Nを全分類群の総個体群密度としたとき，以下の式から算出される[4]．

$$H' = S\left\{-x_i / N \times \log_{10}\left(x_i / N\right)\right\} \qquad (1)$$

b) 地点間の多様性

各地点間の群集種構成の違いの大きさを，群集類似度C_λを用いて，群集相違度θ＝１－C_λによって評価した．θは0から1の間の値をとり，0の場合に相互の種組成が同一となる．θの計算に必要な群集類似度はMorishitaのC_λ関数[5]を用いて，以下の式で計算した．

$$C_\lambda = \left(2\sum_i^{45} n_{iA} \cdot n_{iB}\right) \Big/ \left\{\left(\lambda_A + \lambda_B\right) N_A N_B\right\} \qquad (2)$$

$$\lambda_A = \left(\sum_i^{45} n_{iA}\left(n_{iA} - 1\right)\right) \Big/ \left\{N_A\left(N_A - 1\right)\right\}$$

$$\lambda_B = \left(\sum_i^{45} n_{iB}\left(n_{iB} - 1\right)\right) \Big/ \left\{N_B\left(N_B - 1\right)\right\}$$

ここで，N_A，N_Bを地点A，Bの総個体群密度，n_{iA}，n_{iB}を地点A，Bにおける種iの個体群密度である．

c)流域内の多様性

流域内の多様性であるγ多様性を，各流域内に出現した全地点の分類群数で評価した．α多様性を全地点の分類群数の平均値とし，文献に基づき[5]，各流域内地点間のβ多様性の大きさをβ＝γ－αで算出することで，各流域のα，β，γ多様性の大きさを評価した．つまりγ多様性は，各地点の分類群数の平均値と地点間の多様性の和となる．

(3) 環境指標

a) 水理指標

水理指標は，白岩ら[6]，土田ら[7]が作成した流出，水温解析モデルを用いて，2004年7月から2005年6月までの1年間の水深，流速，水温の水理データを求めた． 調査地点の年間を通した河川状況を考慮するために，年間の平均値を用いた．

b) 地理指標

地理データは，集水グリッドセル数，標高，勾配，市街化率，農地率，森林率，市街地までの距離，河川次数に

表-1　環境指標の概要

水理データ	最小値		最大値	平均	標準偏差
年平均流速(m/s)	0.002	-	2.3	0.48	0.49
年平均水深(m)	0.009	-	1.5	0.33	0.35
年平均水温(℃)	8.4	-	18.40	11.79	1.80
地理データ	**最小値**		**最大値**	**平均**	**標準偏差**
集水面積(km^2)	2.00	-	423.4	67.0	104.9
標高(m)	1.00	-	660	205.9	151.7
農地率	0.00	-	0.95	0.23	0.25
森林率	0.00	-	1	0.51	0.36
市街化率	0.00	-	0.49	0.10	0.13
勾配	0.00	-	0.85	0.26	0.25
市街地までの距離(km)	0.00	-	4.20	0.58	0.95

よって構成される．これらのデータは，国土地理院の「数値地図」および国土交通省の「国土数値情報」を用いて作成した．国土数値情報の中から，250m標高データを含むKS110－1と1/10細分区画土地利用データを含むKS202－1および流域界のデータを含むKS273の3つを使用した．数値地図の中から，対象地域の50m標高データを含む数値地図50m(標高) －日本Ⅱを用いた．勾配は，解像度50mの標高マップを用いて求めた．勾配算定対象グリッドセルとそれを取り囲む8つのグリッドセルのうち対象より低いものとの標高差を求め，その差をグリッドセル間の距離で除したものを勾配とし，求めた周囲8グリッドセルの勾配のうち，最大のものを対象グリッドセルの勾配（50m×50m）とした．作成した勾配マップを元に，次のような方法で対象とするグリッドセルの集水グリッドセル数を算定した．まず対象グリッドセルへ流入するグリッドセルを求め，さらにそのグリッドセルへ流入するグリッドセルを求める作業を繰り返し，遡れない時点での流入グリッドセル数を対象グリッドセルの集水面積とした．市街化率は，土地利用マップにおける荒地と建物用地と幹線交通用地を「市街地」とし，対象グリッドセルの周囲81グリッドセル（450m四方）の土地利用を調べ，市街化地域に当たるグリッドセル数を総グリッドセル数81で除することにより算定した．同様にして，農地率と森林率を作成した．市街地までの距離は，算定対象グリッドセルから最寄りの市街地までの距離を求め，対象グリッドセルの値とした．

(4)統計分析

底生動物群集の地点内の多様性（H’，S）と環境指標の関係を重回帰分析で調べた．年平均流速，集水グリッドセル数，市街地までの距離の指標は標本分布の正規性がより強い自然対数値を用いた．ただし，変数に自己相関がある場合，変数の独立性が保証されないため，回帰分析を行うのは不適切となる．したがって，Durbin-Watson 検定で自己相関がないことを確認してから分析を行った．2地点間の環境の違いの大きさを表す指標として，環境差異度（Environment difference index:: EDI）を，y_iを地点i，y_jを地点jの各環境変数の値の時，$EDI=|y_i-y_j|$として定義して求めた．そして，EDIと群集相違度θの相関を，重回帰分析によって調べた．重回帰分析は，F=2.0を選択基準として，説明変数を変数増減法で選択した．また，群集相違度θを連関測度とするUPGMAによるクラスター分析を行い，45地点の群集種構成の類似関係を表す樹状図も作成した．

３．結果と考察

(1)底生動物

同定の結果，調査期間に名取川の45地点でサンプルされた計5208個体の底生動物は計116分類群から構成されていた．この総分類群数うち，カゲロウ目（27 分類群），カワゲラ目（17 分類群），トビケラ目（43 分類群），コウチュウ目（12分類群）の4 目の分類群数が85% を占めていた．これら4目以外に，ウズムシ目，カメムシ目，チョウ目，ヘビトンボ目，そしてトンボ目の分類群も確認された．分類群数S，多様度指数H’，総個体群密度の概要および相関関係を**表-2**に示す．

個体群数は，対象地域内の最大で499個体，最小で31個体，そして平均個体数が115個体であった．個体群数が200個体以上となった地域は4地点で，内2地点が釜房ダムの上流の最奥部地点，他の2地点が大倉ダム下流の名取川中流域の地点であった．

分類群数は，最大で38種，最小で6分類群，平均が19.5分類群であった．分類群数が30以上は4地点であり，そのうち3地点が総個体群数200個体以上の地点であった．

Shannon-Weiner多様性指数H’は，名取川では上中流域で高く，広瀬川では中流域で高かった．五間堀川，川内沢川，増田川の小規模河川では，名取川，広瀬川と比べ低い値となった．

相関関係は，総個体群数と分類群数，分類群数と多様度指数の間には相関が見られたが，総個体群数と多様度指数の間には相関が見られなかった．Shannon-Weinerの多様度指数は，地点内の群集で個体数が多い種が存在する場合，多様度指数が低くなることがこの原因として考えられる．

また，分類群数，多様度指数の値の大小から5段階に分けた分布図を図-2,３に示す．図より，五間堀川，増田川，川内沢川では，分類群数と多様度指数が共に低い傾向が見られた．また，分類群数の多い地点は上流域が中心となる一方で，多様度指数の高い地域は中下流域でも見られた．調査地点26，31は分類群数が最も多いグループであったにも関らず，多様度指数は低いグループとなっているが，キタガミトビケラなどの一部種がこれら地点で大量発生していたことから，これが原因のひとつとして考えられる．

表-2　生物指標の相関と指標間の相関係数
ここで分類群数をS，多様度指数をH'，
総個体群密度をNとする．
****はP<0.001で無相関の帰無仮説が棄却されたことを表す**

	最小		最大	平均	S	H'	N
S	6	-	38	19.5	-		
H'	1.26	-	4.09	3.3	0.68**	-	
N(ind/m^2)	172	-	2772	643	0.58**	0.07	-

図-2 分類群数の分布

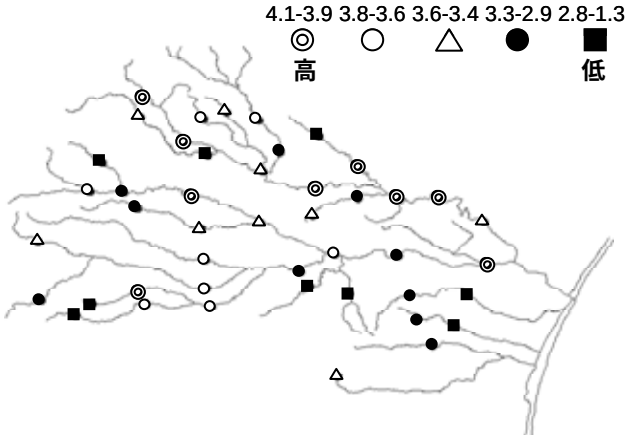

図-3 多様度指数の分布図

(2) 生物多様性

a) 地点内の多様性

重回帰分析の結果，分類群数，多様度指数H'を環境変数で有意(p<0.05)に説明する重回帰式が推定された．総個体群密度を有意に説明できる重回帰式は得られなかった．分類群数の重回帰分析の結果を表-1に，多様度指数H'の結果を**表-2**に示す．分類群数の重回帰モデルでは説明変数として年平均水温のみが選択された．年平均水温に関する偏回帰係数は負なので，年平均水温が低い地点ほど分類群数が多い傾向にある．一方，多様度指数の重回帰モデルでは，集水グリッドセル数と農地率が説明変数として選択され，分類群数のモデルと異なる変数が選択された．標準偏回帰係数は集水グリッドセル数が正，農地率が負であることから，集水面積が大きく，農地率が低い地点の多様度指数が高い傾向がある．

分類群数と多様度指数で異なる説明変数が選択されたが，この理由としてそれぞれの指標の性質の違いが考えられる．これは，地点26，31などの分類群数が多い上流地点でも，特定の種が大量に確認された場合は多様度指数が低くなるためで，反対に，分類群数が少ない地点でも，大量発生する個体群がない場合には多様度指数が高くなり，反対の結果を示すことがあるためである．また，分類群数の重回帰式では上流に行くほど低くなる水温が説明変数に選ばれ，多様度指数の重回帰式では，集水面積，農地率が選ばれたが，これは，集水面積が大きい中下流ほど多様度指数が高くなり，農地率が高い増田川，川内沢川，五間堀川では多様度指数が低かったためであると考えられる．

表-3　分類群数の重回帰モデル(r^2=0.096,p<0.05)

変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	P　値
年平均水温(℃)	-1.2	-0.31	0.04
定数項	33.4		0.00

表-4　多様度指数の重回帰モデル(r^2=0.168,p<0.05)

変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	P　値
log集水グリッドセル数	0.32	0.31	0.03
農地率	-0.76	-0.28	0.05
定数項	2.65		0.00

表-5　群集相違度の重回帰モデル(r^2=0.205,p<0.001)

変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	P　値
地点間距離(km)	0.0058	0.19	0.000
農地率	0.17	0.18	0.000
標高(m)	0.00035	0.20	0.000
年平均流速(m/s)	0.058	0.12	0.000
年平均水深(m)	0.054	0.08	0.005
log集水グリッドセル数	0.018	0.06	0.045
定数項	0.416		0.000

b) 地点間の多様性

群集相違度θについて地点間の環境差異度および地点間距離で説明する重回帰式を推定した結果，**表-5**に示す有意な重回帰モデルが求められた．11の環境変数のうち6つが選択された．標準回帰係数の絶対値の大きさが被説明変数への影響の大きさとなるが，群集相違度のモデルでは地点間距離，標高の変数に加えて，人為的な環境変数である農地率の群集相違度への影響が大きい傾向が示された．

また，クラスター分析から**図-4**の樹形図が作成された．この樹形図に基づいて，45の調査地点を4つのグループに分類した．**図-5**にそれぞれのグループの地理的分布を地図上に示した．グループ1，2が上中流域，グループ3,

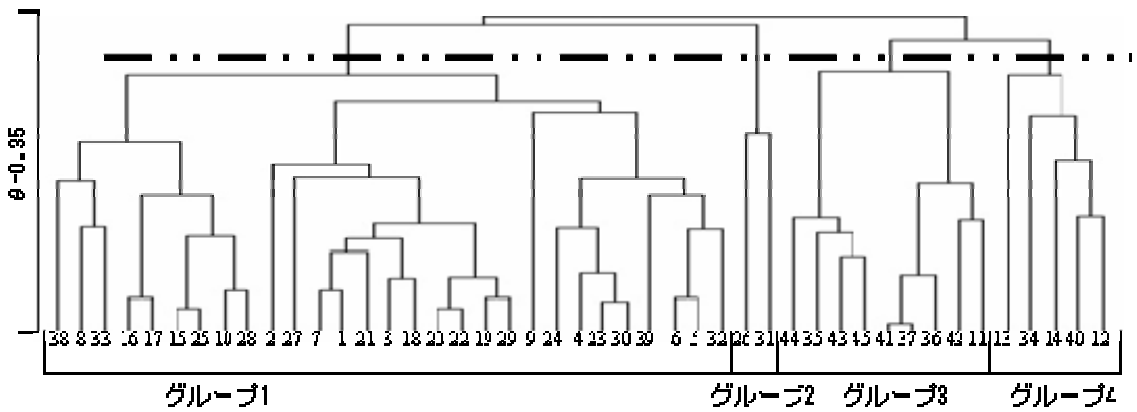

図-4 群集相違度θを連関測度とするUPGMAを用いたクラスター分析の結果
図中の点線θ=0.29において、4グループに分類した.

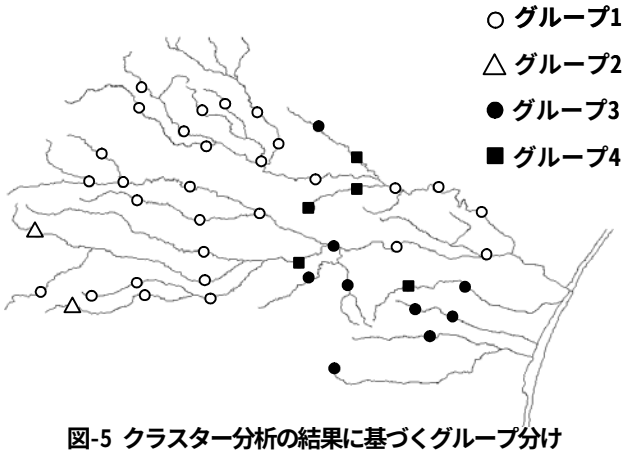

図-5 クラスター分析の結果に基づくグループ分け

4が下流域および支川などに分布している傾向が見られた．群集相違度の重回帰式で，地点間距離に次いで，農地率，標高が説明変数として選択され，対象領域の下流域に水田などの農地が発達していることから，グループ1，2とグループ3，4の分布が分かれた原因が，これらの環境状態が上中流域と下流域，支川の間で大きく異なっていたものと考えられる．

c）流域内の多様性

図-6に広瀬川，名取川，五間堀川，川内沢川，増田川，の底生動物群集のα，β，γ多様性の関係を示す．また，γ多様性と集水グリッドセル数の関係を**図-7**に示す．ここで，集水グリッドセルは流域の規模を示す指標であり，β多様性の解析から河川規模が大きく影響すると考え相関をとった．これより，名取川および広瀬川は他の3流域と比較してβ多様性がγ多様性に占める割合が大きいことがわかる．また，γ多様性と集水グリッドセル数の相関関係を調べた結果，強い正の相関が見られた．

さらに，α，β，γ多様性の間の関係について調べた．α多様性とγ多様性の各河川の関係を**図-8**に，β多様性とγ多様性の各河川の関係を**図-9**に示す．この2つの図から，α多様性とγ多様性の間では，やや相関がある程度だが，γ多様性とβ多様性の間には強い相関があることが理解された．

以上のことから，γ多様性には，α多様性よりもβ多様性がより影響が大きいことが示唆された．群集差異度の重回帰モデルから，地点間で種構成の違いが生じるのは，標高，農地率，地点間の違いであることが理解されたため，γ多様性を高めるためにもこれらの環境因子を流域内で多様に保つことが重要であると考えられる．

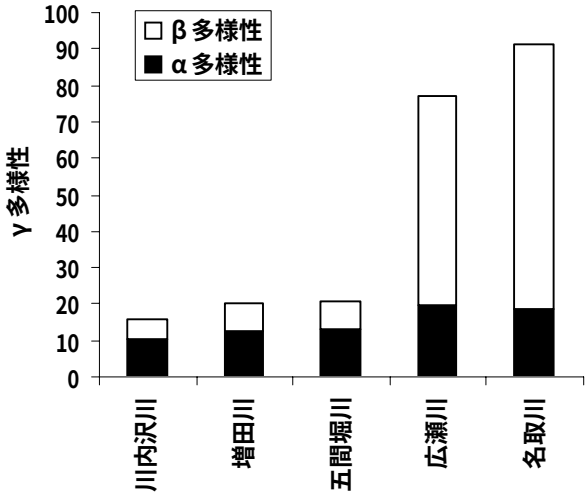

図-6 α，β，γ多様性の関係

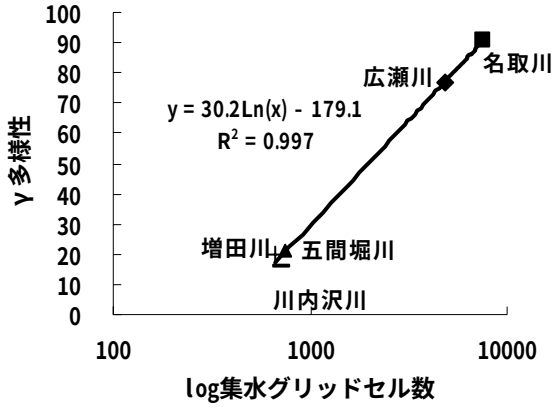

図-7 集水グリッドセル数とγ多様性の相関

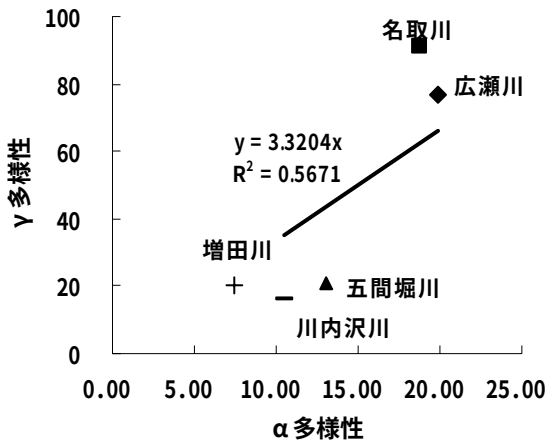

図-8　α多様性とγ多様性の相関

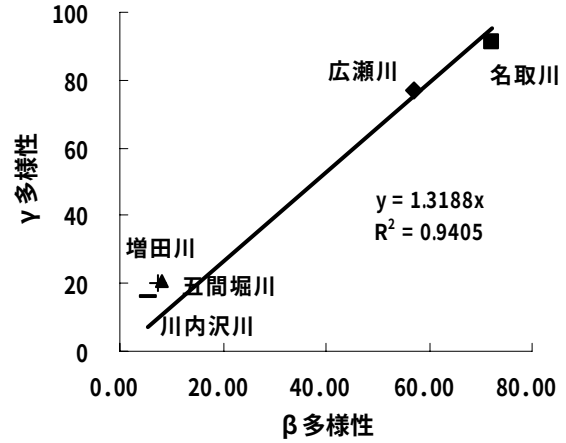

図-9　β多様性とγ多様性の相関

４．まとめ

名取川流域において底生動物のサンプリングを行い，数値地図情報および，シミュレーションによって作成した調査地点の環境データと生物データの関係について考察を行い，以下のことが理解された．

（1）分類群数，多様度指数と各環境因子の関係を重回帰分析により調べた結果，分類群数は年平均水温と負の相関をもち，多様度指数は集水面積と正の相関，農地率と負の相関を持つことがわかった．

（2）群集相違度ついて，環境指標の差とクラスター分析を行った結果，名取川流域では種の組成により４つのグループに分けられた．さらに，グループ間の環境因子の分布状況から，標高，農地率が種の組成に大きな影響を与えていることが理解された．これは，重回帰式の説明変数とも一致した．

（3）γ多様性は，流域面積と強い相関があることが理解された．また，β多様性の大きさはγ多様性の大きさに準じて大きくなる．

今後は，今回得られたデータをもとに，名取川流域における底生動物群集の多様性を予測するモデルを作成していく予定である．

謝辞：本研究は，国土交通省建設技術研究開発補助金（研究代表者：大村達夫），科学研究費萌芽研究（研究代表者：風間聡），科学研究費補助金特別研究員奨励費（研究代表者：渡辺幸三）から援助を受けた．また，（財）リバーフロント整備センターから資金的援助を受けた．ここに併せて謝意を表します．

参考文献

1) 環境影響評価支援ネットワーク：http://www.env.go.jp/policy/assess/7-2guideline/index.html
2) Whittaker, R. H., Dominance and diversity in plant communities. Science 147, pp250-260, 1965.
3) 川合禎次：日本産水生昆虫 科・属・種への検索, 東海大学出版会, 2005.
4) E.P.オダム著，三島次郎訳：.基礎生態学，培風館，1991.
5) 小林四郎：生物群集の多変量解析，蒼樹書房，1995.
6) 白岩淳一，風間聡，沢本正樹：気候変動による河川水温の影響．水工学論文集，第50巻，pp1063-1068，2006.
7）土田恭平，風間聡，沢本正樹：河川環境確保のための土地利用と許容人口の関係，水工学論文集，第48巻，pp475-480，2004.
8）建設省国土地理院：数値地図ユーザーズガイド，財団法人日本地図センター，1992.

(2007.9.30受付)