多変量解析を用いた浅川における付着珪藻群集の研究

Multivariate Analysis of Periphytic Diatom Assemblage in the Asa-Kawa River

加 藤 和 弘
(東大・教養・生物)

Kazuhiro KATO

(Department of Biology, College of Arts and Sciences, University of Tokyo)

1. 序

生物とそれを取り巻く環境との間の関係は古くからの興味の対象であり、これまでも多くの研究がなされてきた。付着珪藻の場合この種の研究は水質に焦点を当てることが多く、とりわけ水質汚濁とのかかわり合いが盛んに論じられてきた。これらの中には生物学的水質評価手法として発展したもの (Lange-Bertalot, 1978, 1979; Watanabe et. al., 1986) もみられる。

しかし、これまでの研究の多くは環境の側の因子として一度に一項目のみしか扱っていなかった。これは本来多くの因子によって影響を受けている付着珪藻群集を扱う上で無視できない問題である。これに対し安田・井山 (1982) は環境の側の変数を C, N, P の 3 つとし、各々の物質について低濃度・高濃度の 2 区分を行った上、その組合せに対応する藻類の taxon を提示するという方法を用いているが、これは基本的には単一の項目に対する直接傾度分析の手法を複数の項目に対して繰り返し適用したものである。

本研究ではこのような状況を鑑み、近年発達 of 著しい多変量解析の手法を用いて分析を行うことを試みた。生態学における多変量解析の適応に関する利点及び諸問題については Gauch (1982), Digby & Kempton (1987) において詳細に論じられているが、サンプル数、出現種数共に多量になる生態データの解析には不可欠な手法であり、コンピュータの今後の発達と共にますます重要になるものとしている。

付着珪藻群集の研究に多変量解析手法を適用した例は近年いくつか現れている。Descy (1979) は因子分析を

用いて付着珪藻の各 taxon の出現頻度と水質汚濁, pH とを結び付けようと試みている。Watanabe et. al. (1986) は反復平均法 (Hill, 1973) に似た序列化手法を用いて付着珪藻群集の生物指標化を行っている。クラスター分析を用いて環境における主たる要因を捜そうとする試みは後藤・根来 (1986, 1987), 伯耆 (1986), 加藤 (1984, 1987) など最近増えてきているが、クラスター分析そのものの性格のため一度に扱い得る環境の側の要因には限りがある。

本研究においては、珪藻群集に対して影響を与えている要因を可能な限り抽出すると共に珪藻群集の変化のパターンをモデル化することを目指して、多変量解析における 2 つの大きな方向、すなわち分類と序列化の両方を用いてみた。同時に付着珪藻群集の生態研究における多変量解析手法の適用に関する問題点についても考察を行った。

2. 調査地域

本研究の事例地域として選んだのは、多摩川支流の浅川 (図 1) である。浅川は八王子市の大半と日野市の一部を流域とする河川で全長約 30 km, 流域面積約 156 km² である。源流域は奥多摩・戸倉三山から裏高尾を経て高尾山に至る稜線ではほぼ全域がスギ・ヒノキ植林に覆われている。これに対し中・下流域は八王子・日野の市街地となっており河川の汚濁が進行している。浅川水系は多くの支流を持つが、本研究ではこのうち南浅川と合流後の本流及びこれらに直に流入する支流の河口部を対象とし、図 1 に示す 16 ケ所の調査地点を設定した。

3. 調査方法

本研究では1986年11月より2カ月に1回の割合で計6回、1987年9月まで行った調査の結果について検討を行った。調査日は1986年11月3日、1987年1月11日、3月9日、5月28日、7月25日、9月21日である。

水質調査項目は気温、水温、水素イオン濃度（pH）、化学的酸素要求量（COD）、電気伝導度（EC）、アンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、亜硝酸態窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、リン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）、溶存ケイ酸（ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ）である。各項目の測定方法は以下の通りである。

- a) 気温、水温：棒状アルコール温度計を用いた。
- b) pH：試験紙（東洋濾紙製品）を用いた。
- c) COD：過マンガン酸カリウム酸性法。加熱は直火で5分間煮沸させて行った。詳細は日本分析化学会北海道支部（1971）に従った。
- d) EC：携帯型メーター（東亜電波工業・CM-1K）を使用した。値は25℃の状態に換算した。
- e) $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ：日本水質汚濁研究協会（1982）の分析法によった。いずれも手動の比色分析である。
- f) $\text{NO}_3\text{-N}$ ：Volghe & Clays（1983）による比色分析法を採用した。

付着珪藻の採集は次のように行った。まず各地点において水面下 10 cm 程度の所に上向きの水平面を持つ石を選び、その面の付着物を洗い落として採集した。これを

石上付着のサンプル（記号 S = stone）と呼ぶ。付着物が多い石と少ない石とでばらつきがある場合には多い石を選んだ。これは、群集遷移のなるべく後のより安定した状態の群集を選ぶためである。この他に水中の落葉・落枝（記号 L = litter）からもサンプルを得た。これらのサンプルはホルマリンで固定したのち研究室に持ち帰り、酸処理の上ブリューラックスで封入、液浸 100 倍の対物レンズを用いて検鏡し 1 サンプルあたり 400 個体以上を同定した。同定に際しては 2000 倍に引き伸ばした顕微鏡写真を併用した。

4. 結果及び考察

4.1 水質の概要

水質調査の結果をまとめたものを表1に示す。流域の人間活動に最も関係の深い水質項目として今回の測定項目の中からはCOD、EC、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の5項目が指摘できる。水質は流域の人口の増加にともない第6地点と第7地点の間で急激に悪化するほか、源流に近い第1地点と人家が現れてくる第2地点以下との間でも変化がみられた。

4.2 データの前処理

全てのデータをそのまま解析するのは効率が悪い。そこでまず1回の採集で得られたサンプルを一まとめにしてクラスター分析を行い、時間変化以外の要因を抽出すると共に次の段階の分析に用いるサンプルを決定した。分析のアルゴリズムは最長距離法と群平均法の2つ、類似度はJaccardの係数、パーセンテージ類似度及び相対

表1 水質概況（各調査地点における平均値）

水質項目 (単位)	水温 (℃)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	BOD (mgO_2/l)	NH ₄ -N (ppm)	NO ₂ -N (ppm)	NO ₃ -N (ppm)	PO ₄ -P (ppm)	SiO ₂ -Si (ppm)
第1地点	13	6.3	92.4	0.87	0.02	0.03	1.14	0.01	5.41
2	15	6.4	127	1.42	0.15	0.03	1.38	0.07	6.73
3	16	6.5	162	3.32	1.32	0.03	2.28	0.18	6.51
4	17	6.3	141	1.88	0.15	0.02	1.66	0.06	6.41
5	17	6.4	149	1.76	0.17	0.03	1.99	0.07	6.32
6	20	6.8	180	3.15	0.42	0.08	2.00	0.16	6.30
7	22	7.1	348	6.16	6.42	0.35	8.37	0.28	6.93
8	20	6.9	250	3.85	0.52	0.08	3.14	0.14	6.40
9	21	7.1	270	4.74	2.85	0.17	3.87	0.17	6.89
10	23	7.3	268	8.71	1.48	0.26	1.95	0.15	7.12
11	21	7.6	527	7.89	13.2	0.30	1.52	0.93	6.92
12	22	7.3	373	6.56	8.49	0.39	2.34	0.50	7.29
13	22	7.3	442	6.35	7.61	0.34	2.72	0.53	7.84
14	20	7.2	353	3.98	2.02	0.16	1.63	0.37	8.51
15	24	7.4	382	6.40	7.53	0.38	2.33	0.54	7.57
16	22	7.0	374	6.34	5.52	0.44	3.02	0.50	7.22

表2 クラスター分析（前処理段階）による調査地点の分類

採集月	類似度*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
'86・11	A	◎	◎	◎	◎	◎	○										
	B	◎	◎	◎	◎	◎	◎										
	C	◎	◎	○	◎	◎	◎										
'87・1	A	◎	◎	○	◎	◎	◎										○
	B	◎	◎	◎	◎	◎	◎										
	C	◎	◎	○	◎	◎	◎										
'87・3	A	★	◎	◎	◎	◎	◎		○	○		○					
	B	◎	◎	◎	◎	◎	◎										
	C	★	◎	○	◎	◎	◎	○	○	○	○				○		
'87・5	A	★	◎	◎	◎	◎											
	B	◎	◎	◎	◎	◎	◎		○								
	C	◎	◎	◎	◎	◎											
'87・7	A	◎	◎	◎	○	◎	◎										
	B	◎	◎	◎	○	○	○										
	C	◎	◎	◎	○	◎	◎										
'87・9	A	◎	◎	◎	◎	◎	◎										
	B	◎	◎	◎	◎	◎	○										
	C	◎	◎	◎	◎	◎	◎										

(記号) ★ サンプルが「源流グループ」*2に分類されたケースが1回でもあった地点

◎ 全サンプルが、全ての分析で「上流グループ」*3となった地点

○ サンプルが「上流グループ」*3に分類されたケースが1回でもあった地点

*1 A: パーセンテージ類似度

B: Jaccard の係数

C: 相対出現頻度1%未満の種を除外して計算した Jaccard の係数

*2 第1地点のサンプルが3分の2以上を占めるクラスター

*3 第2～第6地点のサンプルが3分の2以上を占めるクラスター

出現頻度1%以上の taxon を対象とした Jaccard の係数の計3つを用いたため、1セットのサンプルの分析に合計6つのデンドログラムを得たことになる。なお、類似度に関しては Mueller-Dombois & Ellenberg (1974) によった。

以上の結果、サンプルは類似度やアルゴリズムによらず第1～6地点(上流)のものとそれ以外(下流)の地点のものに分かれ、さらに第1地点(源流)のものが独立のクラスターをなした場合もあった(表2)。クラスターの区分に関わる要因は水質汚濁であって、それ以外の環境要因は下位のクラスターにおいても現れてこ

なかった。

そこで解析に用いるサンプルとして第1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 15 地点における計120サンプル(10地点×2種×6回)を選んだ。源流, 上流, 下流の各グループからもれのないように、また前処理の段階では考慮できなかった季節変化を検討するためにこのような選び方をしたものである。taxon については相対出現頻度が少なくとも1つ以上のサンプルで1%以上となった98 taxa を分析の対象とした。

4.3 クラスター分析

類似度はパーセンテージ類似度を用い、アルゴリズム

図2 クラスター分析結果(サンプル)

*1 年平均值。上段 = $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上, 中段 = $100 \sim 200 \mu\text{S}/\text{cm}$, 下段 = $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 未満, 無印 = $200 \sim 500 \mu\text{S}/\text{cm}$

*2 上段 = 7・9月, 中段 = 11月, 下段 = 5月, 無印 = 1・3月。

*3 マークあり = “S”, マークなし = “L”。

は群平均法を使用した。この結果得られたデンドログラムが図2である。サンプルについてはまず水質汚濁の状況によって大きく分かれ、ついで季節によって細かく分かれてくることが伺える。前処理の段階の3区分に加えて第11地点が他の下流域からかなりはっきりと分離していることが注目されるがこれはこの地点の電気伝導度が他に比べて高いことと関係があるものと考えられる。

“L”, “S”の違いはクラスターの区分に影響を与えているようには見えない。一方 taxon の場合には出現の多少がクラスターを分ける重要な要素で、一部のサンプルに少数出現するにとどまった taxon と多くのサンプルで普通にみられる taxon とがまず分かれ、後者はさらに水質との関係によって細分された。この結果を模式化したものを図3に示す。これはいわば珪藻群集が水質に対応してどのように変化していくかを表すモデルになっている。これを見ると、珪藻の taxon は

- 1) 汚濁の見られない水域にのみ生息する種類
- 2) 中程度に汚濁した水域にまで見られる種類
- 3) 広い範囲の汚濁条件に対応している種類
- 4) 少産の種類

に分けられ、かつ3は、出現のピークの位置によってさらに比較的きれいな水域を好むもの(3a)から汚い水域を好むもの(3c)にまで分けられることがわかる。さらに、2と3aの間には強い連続性がある。

この区分を既存の研究例と対応させてみると、Watanabe, et. al. (1986)のDAIpoにおける区分に対してはSaproxenosusが1, Saprophilousが3cに対応し、残りはEuryaprobicに対応する。Lange-Bertalot (1978, 1979)の識別群法に対しては小林ほか(1985)等によって国内の主要な taxon がどの群に属するかについての検

討がなされているが、そこに示されている識別群3(清浄)には1~3a, 識別群1(汚濁)には3cがそれぞれ対応している。このことは、DAIpoが珪藻の分布の幅を重視して区分を行っているのに対し、識別群法では珪藻の分布の中心の相対的な位置を重視していることの現れといえる。

得られたクラスターがどのような環境要因に対応しているかは図2のような形にデンドログラムを加工すればある程度の検討がつくが、これに対してもさらに多変量解析の手法を導入する場合には重判別分析を行なうことになる。今回のクラスター分析結果に対して各サンプルを得た時点での水質データを用いて重判別分析を行った結果が表3(線形モデル)と図4・表4(正判別分析)である。複数の水質項目の中から電気伝導度がクラスターの区分と特に強い相関をもっていることが明瞭にわかる。他の項目の中には単相関としては大きなものがあるのだが、電気伝導度との内的相関が高いために複数の変数を同時に扱う重判別分析では陰に隠れてしまう。

4.4 主成分分析

クラスター分析がサンプルや taxon を分類するための手法であるのに対し、データの中に何らかの序列を見だしサンプルや taxon をそれにしたがって並べていく手法を序列化と呼ぶ。主成分分析はその代表的な手法で各方面で広く用いられている。本研究でも序列化のための手法としてこの主成分分析を用い、データの解析を行ってみた。用いたデータは4.3節で用いたものから相対出現頻度がどのサンプルでも3%に達しない taxon を除いた120サンプル×41 taxaのものである。 taxon を減らしたのは計算時間を減少させることと偶在種を除くことでノイズの影響を減少させて有効な主成分を抽出しやす

表3 線形重判別分析結果

変数(単位)	偏F値	第1地点	第2~6地点	第7~16地点
水温(℃)	< 2			
pH	7.65**	27.7	29.0	32.4
電気伝導度(μS/cm)	28.2 **	0.0875	0.118	0.177
COD(mgO ₂ /l)	3.48*	0.855	1.26	1.78
NH ₄ -N(ppm)	19.2 **	-2.39	-3.05	-4.14
NO ₂ -N(ppm)	3.05*	-8.99	-11.2	-2.58
NO ₃ -N(ppm)	< 2			
PO ₄ -P(ppm)	< 2			
SiO ₂ -Si(ppm)	< 2			
定数項		-90.6	-103.	-142.

F値 = 20.1 (自由度 10,164) . . . 1%水準で有意

偏F値自由度(2,82) . . . *: 5%水準で有意 ***: 1%水準で有意

図3 付着珪藻群集の変動パターン

①, ②は既往研究にみられる区分

①: Lange-Bertalot (1979), 小林他 (1985) (識別群法)

②: Watanabe et. al. (1986) (DAIpo)

第1グループ: *Achnanthes crenulata*, *Ach. exigua*, *Eunotia pectinalis* v. *minor*, *E. lunaris* v. *subarcuata*, *Diploneis boldtiana*, *Surirella robusta*, *Su. linearis*, *Amphora ovalis*, *Frustulia vulgaris*, *Fru. rhomboides*, *Caloneis bacillum*, *Amphipleura lindheimeri*, *Cymbella aspera*

第2グループ: *Achnanthes clevei*, *Ach. krasskei*, *Ach. subhudsonis*, *Ach. convergens*, *Ach. hungarica*, *Ach. minutissima*, *Amphora pediculus*, *Diatoma hiemale* v. *mesodon*, *Fragilaria construens*, *Fra. capucina*, *Gomphonema quadripunctatum*, *Meridion circulare* v. *constricta*, *Nitzschia dissipata*, *Rhoicosphenia abbreviata*

第3グループa: *Achnanthes lanceolata*, *Ach. lan.* v.

elliptica, *Cocconeis placentula*, *Cymbella minuta*, *Fragilaria construens* v. *venter*, *Melosira varians*, *Navicula gregaria*, *Nav. Cryptocephala*, *Nav. veneta*, *Nitzschia linearis*, *Synedra ulna*

第3グループb: *Fragilaria capucina* v. *vancheriae*, *Surirella angusta*, *Navicula radiosa* v. *nipponica*, *Nav. pseudoacceptata*, *Cymbella sinuata*, *Amphora submontana* 他

第3グループc: *Achnanthes minutissima* v. *saprophila*, *Cycrotella meneghiniana*, *Gomphonema parvulum*, *Gom. pseudoaugur*, *Navicula atomus*, *Nav. minima*, *Nav. pupula*, *Nav. seminulum*, *Nav. subminuscula*, *Nitzschia palea*, *Nit. amphibia*, *Nit. hantzschiana*

注) 3aのうちの*Nav. cryptocephala*, *Nav. veneta*, 3cのうちの*Nit. hantzschiana*については3bに近い分布傾向をもつものとして下位区分された。

表 4 正準判別分析の正準変量の係数

変数 (単位)	標準偏差	第 1 正準変量	第 2 正準変量
水温 (℃)	6.55	-0.0318	-0.101
pH	0.497	1.26	0.742
電気伝導度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	91.5	0.0162	-0.0018
COD (mgO_2/l)	2.20	0.157	-0.216
$\text{NH}_4\text{-N}$ (ppm)	4.33	-0.300	-0.213
$\text{NO}_2\text{-N}$ (ppm)	0.128	3.67	8.29
$\text{NO}_3\text{-N}$ (ppm)	3.23	0.0294	-0.197
$\text{PO}_4\text{-P}$ (ppm)	0.218	-1.09	-3.75
$\text{SiO}_2\text{-Si}$ (ppm)	1.53	-0.0335	-0.230

くすることの2つを目的としたものである。さらに、データの分布を正規分布に近づけるために相対出現頻度に対して対数変換を行った。

図5はサンプルに対して計算された主成分得点の散布図である。第1, 第2主成分は水質, 第3主成分は季節性, 第4主成分は付着の基物に対応していることがわかる。ここで第2主成分は第1主成分の“arch effect”であると判断したものである。クラスター分析では表面に現れてこなかった付着の基物による珪藻群集の相違が主成分分析ではこのような形で現れてくることには注目する必要があるだろう。各主成分の寄与率を見ればその主

○ 第1地点 ● 第2～第6地点 × 第7～第16地点

図 4 正準判別分析結果

図 5 主成分得点散布図

(記号) a) ○: 第1地点, ●: 第2～第6地点, ×: 第7～第16地点
b・d) ●: 11月, ○: 1・3月, ×: 5月, □: 7・9月
c) ●: "S", ○: "L"

表5 主成分の寄与率

主成分	寄与率	累 積	要 因
1	29.9%	29.9%	水質汚濁（電気伝導度）
2	9.2	39.1	第1主成分“arch effect”
3	7.6	46.8	季節性（累積水温）
4	6.1	52.8	付着の基物
5	5.0	57.8	第3主成分“arch effect”？

成分に対応している環境要因が付着珪藻群集に対しどの程度の影響を与えているかが推測できる。これについては表5に示したが、水質が圧倒的に大きな影響をもっており、水温や付着基物の影響はその4～5分の1程度であることがわかる。

各主成分の固有ベクトルを見れば分析の対象となった41 taxaが水質汚濁、季節性、付着基物に対しどのような対応をしているかがわかる。このうち、水質汚濁と季節に対する対応を知るために第1、第3主成分の固有ベクトルを散布図にしたものが図6である。水質汚濁に強いとされている種では第1主成分方向の値が小さくなっていることがわかる。また *Cocconeis placentula* のような夏季によくみられる種類では第3主成分の値は小さく、*Nitzschia dissipata* のような冬季によくみられる種類では第3主成分の値は大きくなっているが、汚濁耐性の強い種類（第1主成分の値が小さい）では季節性がほとんどなくなっていることがわかる。このことは主成分得点の散布図（図5b）からもうかがえる。

分析によって得られた主成分を環境条件を示すデータと対応させる手法としては、今のように経験的なやり方の他に回帰分析や正準相関分析を組み合わせるやり方が考えられる。回帰分析の場合は個々の主成分得点を被説明変数、関係があると思われる環境条件を説明変数として分析を行い相関の高さを検討すればよい。今回のデータのうち第1主成分について分析を行った結果を図7と表6に示すが、水質の中でもCODや電気伝導度との相関が高いこと、水質測定値を対数変換することによって結果が向上すること、個々の測定値よりは年平均値との相関が高いことがわかる。また多くの項目の総合的な効果を考えることでよりよい対応関係を得ることができるものと考え重回帰分析を実施したが、結果の改善は小幅であった。（COD、ECの2変数で $r = 0.91$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ を加えても $r = 0.92$ 。年平均値を用いるとCOD、ECの2変数で $r = 0.94$ 。いずれも分散分析の結果1%水準で有意性があつた）。一方正準相関分析の場合には各サンプルについて、得られた主成分得点を第1の変数群、採集と同時に測定した水質や他の生物に関す

表6 珪藻群集に関する第1主成分得点と環境要因との相関

環 境 要 因	相関係数
電気伝導度	-0.88
COD	-0.83
$\text{NH}_4\text{-N}$	-0.71
$\text{NO}_2\text{-N}$	-0.75
$\text{NO}_3\text{-N}$	-0.29
$\text{PO}_4\text{-P}$	-0.65
$\text{SiO}_2\text{-Si}$	-0.27
電気伝導度（平均*1）	-0.92
COD（平均*1）	-0.91

測定値には対数変換を実施

*1 各地点における1986年11月から翌年9月までの平均値

るデータを第2の変数群として正準相関分析を実行すればよい。今回は第2の変数群として水質項目と付着の基物（“L”のときに0，“S”のときに1となるダミー変数）を用いた。但し水温についてはさきに述べた時間遅れの傾向を考慮したうえで生育期間の水温の累積による効果と考え、採集時に測定した水温にその前の採集（2カ月前）の時の水温を加えたものを用いた。累積水温としては不十分な形であるが、これ以上のデータがないためやむを得ない。分析によって得られた正準変数を求めるための各変数に対する係数（標準化したもの）を表7に示した。第1主成分については電気伝導度と関連が強いこと、栄養塩類の一部については抑制変数のような形で機能していること、などがうかがえる。

第3主成分については水温と密接な関係があることがわかる。付着の基物は第4主成分にのみ関係があること、第5主成分以下についてはここに取り上げた水質項目ではおおよそ説明がつかないことも見て取ることができる。“arch effect”と判断した第2主成分は、ここでは汚濁や水温（第1、第2正準変数に現れている要因）が同じ場合にアンモニア性窒素が多ければ高い値をとる主成分として読み取ることができる。しかし実際にはそうではないことは第1地点でも第2主成分の値が大きいことから明らかである。このように何らかの軸に沿って単調に増減するのではない変数は正準相関分析では処理できない。

4.5 元のデータによる確認

多変量解析手法によってサンプルや種について環境との対応関係を知ることができたが、正準相関分析の例でわかるように多変量解析自体は元々かなり単純なモデル

図6 主成分分析・固有ベクトル

を想定しているために誤った結果を出力している可能性もある。そこで、見いだされた傾向が実際に妥当なものであるか否かを元のデータの段階に戻って直接傾度分析的に確認を行うことが有効であろう。もちろん小さな要因については大きな要因に隠されてしまい見だしにくくなってしまうが、それはデータの表示形式を工夫する

ことによってある程度対処できる。

図8は水質汚濁を代表するものとして電気伝導度を取り上げて横軸とし、4.4節の正準相関分析に用いた累積水温を縦軸として主要な taxon について水質汚濁と累積水温に対応する相対出現頻度の動向を示したものである。さらに付着の基物毎の相対出現頻度とその標準偏差も示

図7 珪藻群集に関する第1主成分得点と水質値との散布図

(記号) ○：第1地点，・：第2～第6地点，□：第7～第16地点

表7 正準相関分析結果

正 準 変 量	1	2	3	4	5	6
正準相関係数の2乗	0.877	0.629	0.394	0.314	0.137	0.080
第1主成分	0.979	-0.152	0.119	-0.008	-0.041	-0.041
第2主成分	-0.054	0.244	0.902	-0.139	0.254	0.202
第3主成分	0.137	0.636	-0.147	0.700	0.178	0.183
第4主成分	-0.136	-0.598	0.323	0.697	-0.178	-0.051
第5主成分	0.001	-0.247	-0.112	0.050	0.911	-0.307
第6主成分	0.021	-0.306	-0.185	-0.054	0.204	0.909
水温	-0.292	-1.131	0.439	-0.435	0.311	-0.451
pH	-0.052	0.404	0.263	0.082	-0.829	1.194
電気伝導度	-0.908	0.392	-1.620	-0.938	-1.061	-0.396
COD	-0.216	-0.227	-0.293	0.536	0.454	0.800
NH ₄ -N	0.189	0.308	1.604	-0.413	0.831	-0.687
NO ₂ -N	-0.066	0.446	0.585	1.017	0.232	-0.090
NO ₃ -N	0.026	-0.388	-0.335	-0.055	0.457	0.512
PO ₄ -P	0.191	-0.331	-0.259	0.209	0.103	-0.495
SiO ₂ -Si	0.029	-0.046	-0.372	-0.044	-0.146	-0.588
付着基物 (L or S)*1	-0.055	0.205	0.151	-0.716	0.284	0.276

標準化された変数に対する，正準変量を構成するための係数の値を示した

*1 Lの時に0，Sの時に1となるダミー変数

図8 電気伝導度と累積水温に対する主要な taxon の出現動向
taxon 名に続く数値は第1, 第3, 第4主成分の固有ベクトルの成分。

* 本文参照

してある。これをみると、主成分分析やクラスター分析によって示された諸 taxon の性質は妥当なものであるということがいえる。

4.6 多変量解析の利点と問題

以上、南浅川から得られた付着珪藻群集と水質に関するデータについて分析を行ってきた。多変量解析手法の目的はこのように膨大な量のデータからサンプルや種に関する情報を簡潔な形でとりだすことであるが、そのときに副次的な要因とその程度についても知ることができることも大きなメリットである。今回の場合に即していえば、従来の分析手法ではよくわからなかったような累積水温や付着基物の差の効果が明瞭に抽出できたこと、しかもそれが珪藻群集の変動の中でどのくらいの割合を占めているかについてもある程度の見通しを得ることができたことがそれにあたる。

一方欠点としては既存の多変量解析手法が想定しているモデルと生物群集の変動パターンとが必ずしも一致していないことからくる結果の歪みがあげられる。これは arch effect (horseshoe effect) と呼ばれ序列化手法の適用上大きな問題となっており、Gauch (1982) や Digby & Kempton (1987) 等にも取り上げられている。実際の分析に当たってはこのような歪の現れない手法を見だしていくか、それともある程度の歪を覚悟で分析を行い分析結果を元のデータに戻して確認するかのどちらかを行うことが望ましい。今回は後者を選んだが Gauch (1982) の “Detrended Correspondence Analysis” のように前者を目指した手法もある。また順序データを用いることである程度まで非線形性を回避することも考えらるだろう（例えば多次元尺度構成法など）。

分類手法の場合にはこのような欠点とは無縁であるが、生物群集は本来連続的に変化するという立場をとるなら、サンプルの取り方にもよるが分類手法を適用することは生物群集の持つ性質に反するということになる。階層的なクラスター分析にしてもまた近年発達してきた非階層的な分類手法にしても、対象が連続的であった場合でも何らかの分類を行ってしまう。その結果現実とは異なった結論を得てしまうこともあり得る。そのため、複数の類似度や分析手法を用いて結果の安定性を示すなどして分類の妥当性を確認することが必要になろう。同時にサンプルを得る際に連続性が強くないような配慮をすることも有効だろう。ちょうどコドラート法による植生調査における方形区の配置の手続きを考えれば良いであろう。

5. まとめ

本研究は浅川水系における1年間の付着珪藻類の調査結果を多変量解析手法により分析したものである。分析の結果同水系においては付着珪藻群集に最も大きな影響を与える要因は水質であり、それに次ぐ要因である累積水温や付着の基物による影響はそれよりも大幅に小さいことが示された。主成分得点を用いた回帰分析や正準相関分析、クラスター分析結果を用いた線形重判別分析の結果は水質項目の中でも電気伝導度の変化が付着珪藻群集の変化とよく対応していることを示し、また一時点の値よりも一定期間における平均値が、そのままの値よりも対数変換した値がそれぞれ説明のために有効であることを示した。また分析の対象になった taxon については水質、水温、付着の基物の選好性を知ることができた。その結果は主成分の負荷量として図6のように示すことができるほか、生のデータに戻って図8のような形で示すこともできる。クラスター分析を用いた場合は環境要因との対応に関しては主成分分析ほどの情報を抽出することはできないが、水質との対応関係に基づきサンプルや種のグルーピングを行えるため水質の変化に伴う群集構造の変化を段階的なモデルに描くことができる。その結果が図3である。多変量解析は多くの taxon を含む多量のサンプルを処理するにはきわめて有効な方法であるが背景になるモデルが生物の分布の実体と必ずしも一致していないため結果に歪みが生じることになる。そのため生のデータに戻って結果の確認を行うことが今の段階では不可欠である。

6. 謝 辞

本研究を行うに当たっては多くの先生がたに様々な形でご指導、ご援助を賜りました。東京大学の松本忠夫先生には研究室の指導教官として終始ご指導していただきました。東京大学の綿袂邦彦先生には水質分析に関してご指導並びにご援助をいただきました。東京学芸大学の小林弘先生、真山茂樹先生には珪藻類の顕微鏡写真の同定をしていただきました。関西外国語大学の渡辺仁治先生には付着珪藻類と水質との関係について貴重な知見を授けていただきました。東京女子体育大学の福島博先生には累積水温を解釈に取り入れるように助言していただきました。最後ではありますがお世話になりました先生がたに心からお礼を申し上げます。

7. 文 献

Descy, J. P. (1979) : A New Approach to Water

- Quality Estimation Using Diatoms, Nova Hedwigia Beiheft 64 : 305 – 323
- Digby, P. G. N. & R. A. Kempton (1986) : Multivariate Analysis of Ecological Communities, 206pp., Chapman and Hall
- 福島・小林・寺尾 (1986) : 河川付着藻のザプロビ指数と水温との関係, DIATOM 2 : 163 – 168
- Gauch, H. G. (1982) : Multivariate Analysis in Community Ecology, 298pp., Cambridge University Press
- 後藤, 根来 (1986) : 清澄な河川, 宇川 (京都府) の珪藻植生, 陸水学雑誌 47(1) : 77 – 86
- 後藤, 根来 (1987) : 十津川・熊野川水系の珪藻植生, 陸水学雑誌 47(2) : 143 – 153
- Hill, M. O. (1973) : Reciprocal Averaging : an eigenvector method of ordination, Journal of Ecology 61 : 237 – 249
- 伯耆晶子 (1986) : 猪名川 (兵庫県・大阪府) の付着珪藻群集と DAipo に基づく汚染地図の季節変化, DIATOM 2 : 133 – 151
- 加藤和弘 (1984) : 小集水域生態系における人為の影響, 三浦半島森戸川・下山川の場合, その 2 珪藻植生を決定する要因, 水処理生物学会誌 20(1) : 11 – 17
- 加藤和弘 (1987) : 南会津・窓明山及びその周辺の珪藻類, 日本珪藻学会第 8 回大会講演要旨集
- 小林・真山・浅井・中村 (1985) : 東京及びその近郊の各種汚濁河川から採取したケイソウの出現様式, 特に相対出現頻度と BOD5 との関係について, 東京学芸大学研究紀要第 4 部門・数学・自然科学 37 : 21 – 46
- Lange-Bertalot (1978) : Diatomeen-Differentialarten anstelle von Leitformen : ein geeigneteres Kriterium der Gewässerbelastung, Arch. hydrobiol. Suppl. 51 : 393 – 427
- Lange-Bertalot (1979) : Pollution Tolerance of Diatoms as a Criterion for Water Quality Estimation, Nova Hedwigia Beiheft 64 : 285 – 304
- Mueller-Dombois & Ellenberg (1974) : Aims and Methods of Vegetation Ecology, 547pp., Wiley International Edition
- 日本分析化学会北海道支部 (1971) : 水の分析, 化学同人
- 水質汚濁研究協会 (1982) : 湖沼環境調査指針, 公害対策技術同友会
- Volge & Clays (1983) : Rapid Spectrophotometric Determination of Nitrate with Phenol, Analyst August, 1983 : 1018 – 1022
- Watanabe, T., K. Asai, A. Houki, S. Tanaka & T. Hizuka (1986) : Saprophylic and eury saprobic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index (DAipo), Diatom 2 : 23 – 74
- 安田・井山 (1982) : 有機汚濁に対する川床付着藻類の指標性について, 「環境科学」研究報告 B121 – R12 – 10 : 17 – 21