マクロベントスの調査データによる対応分析法と Rsn 法の比較

品川 汐夫, 多部田 修

(1997年5月8日受付)

Comparison of Rsn Method with Correspondence Analysis
Based on Actual Data on Benthic MacrofaunaSekio Shinagawa*¹ and Osame Tabeta*²

We have indicated some advantages of the Rsn method over correspondence analysis (CA) by numerical experiments on simulated data. In order to confirm these advantages over CA with actual fauna, we used published data on macrobenthos. For the comparison between CA and Rsn ordination, fuzzy cluster analysis was applied to each result of the ordination. Using the result of the fuzzy clustering of sites and species, we proposed some practical methods for the evaluation of the correspondence between site groups and species ones. With these methods, it was shown that the clustering of sites based on Rsn ordination corresponded better with that of species and gave more interpretable results than those based on CA. This means that Rsn ordination reflected more sensibly the species distribution patterns relatively free from noise. It was also shown that the fuzzy clustering of sites and species could provide useful tools to evaluate the correspondence between site groups and species ones. Therefore, the Rsn method together with fuzzy cluster analysis of sites and species is applicable to actual data such as benthic macrofauna.

キーワード: マクロベントス, 群集解析, 座標づけ, クラスタ解析, ファジイクラスター, 多変量解析, 関係類似度

マクロベントスの種×地点の個体数データは、分布のバッチ性や採集上の困難さなどにより変動が大きい。また、実際の調査結果には著しく個体数の多い種や、ごく希にしか採集されない種がともに存在し、データの不均質性や多数の0要素の存在などのため、^{1,2)} 他の分野では広く一般的に応用されている主成分分析などの多変量解析の諸方法が、この分野では適用し難い。適用可能な方法として、座標づけとクラスタ解析がある。³⁾ 加藤⁴⁾は、クラスタ解析は、ノイズが多く複雑な構造のデータ解析に対処し易いが、グループ化された地点群と種群間の対応がつけ難く、他方座標づけは、比較的単純な構造のデータ解析に向くが、種間、地点間の相互関係を把握し易い利点があるとしている。また Field and Warwick⁵⁾は、この両者を互いに相補的な方法として位置づけ、併用している。

一方品川⁶⁾は、このようなマクロベントスの個体数データ解析に適した方法として、関係類似度 Rsn を用いた座標づけ (Rsn 法) とファジイクラスター解析を用

いた方法を提案し、実際の調査データにも適用している。⁶⁾ この方法は、座標づけを不規則な変動成分 (ノイズ) を除いて、より理解し易いクラスタ解析結果を得るための前処理として位置づける点が、上に述べた考え方とは異なる。

群集の座標づけは、主として植生学の分野で1950年代以降発展してきた方法とされるが、⁷⁾ 1970年代以降、コンピュータの普及とともに、主座標解析 (PCO)、多次元尺度解析 (MDS)、対応分析 (CA) などの数学的最適化にもとづく方法が発展してきた。⁷⁾ 中でも CA は、種と地点が同時に座標づけされることや、群集の類似度を必要としないことなどの利点があり、河川のベントス群集では適用例⁸⁾が多い。海域のベントス群集の解析においても、Gamito and Raffaelli⁹⁾は、地点当たりのサンプリング回数に対する安定性の点で、他の方法と比較して高い評価を与えている。

CA は交互平均法 (RA)¹⁰⁾とも呼ばれるが、我が国では数量化Ⅲ類¹¹⁾あるいは双対尺度解析¹²⁾として広く知

*¹ 下関女子短期大学 (Shimonoseki Women's Junior College, Shimonoseki 750-0035, Japan).

*² 長崎大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Nagasaki University, Nagasaki 852-8131, Japan).

られている。この方法を改良した方法として除歪法 (DCA)¹³⁾があるが、加藤¹⁴⁾は、DCA が CA による座標づけのアーチ効果を強制的に取り去るため、意味のある変動まで消し去ることがあることから、DCA のもとの形態である CA との併用が望ましいとしている。Field *et al.*¹⁵⁾ も同じ理由から、奨められないとしている。

そこで品川、多部田¹⁶⁾は、CA と Rsn 法の座標づけと、ノイズに対する安定性を比較するために人工データによる数値実験を行ない、Rsn 法は、CA よりノイズの影響を受け難いことから、採集個体の少ない種が多くかつ変動が大きいマクロベントスのようなデータの座標づけに対しては効果的であるとの結果を得た。著者らは、この数値実験で指摘された CA と Rsn 法の相違が、実際の群集のデータでも問題になるか否かを明らかにすることを目的として、過去に行われたマクロベントス調査結果の原データを用い、CA と Rsn 法を比較するための解析を行った。またその中で、座標づけ結果のファジィクラスタリングを用いて、地点群と種群の対応関係を把握するための方法を提案した。

材料および方法

用いたデータと調査地点 用いたデータは、Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾による熊本県天草下島の巴湾におけるマクロベントス調査の原データである。Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾によれば、調査地点は Fig. 1 に示す 7 地点で、エックマン・バージ型採泥器を用いて生物採集が行われた。採泥面積は 1 回当たり 0.0225 m² で、1 地点各

Fig. 1. The survey area of Tomoe Cove showing sampling stations (1~7) and iso-depth contours.

Cited and modified from Kikuchi and Tanaka.¹⁷⁾

5 回ずつ行われた。こうして 1966 年 4 月から 1 年間に毎月採集されたものを合計して、種×地点の個体数データにまとめて公表されている、採集個体数が 5 個体以上の 94 種を用いて解析を行った。これは、全採集個体数の 93% を占める。

比較の方法 CA および Rsn 法による座標づけを行い、その結果を用いて、それぞれについてファジィ k-means 法¹⁸⁾による地点と種のクラスタリングを行った。つぎに、以下の 1~3 に述べる方法を用いて、それぞれのグループ化された地点群と種群の対応関係を明らかにし、その相違と実際の種の分布から、CA と Rsn 法の座標づけの相違と問題点を検討した。

1. 地点のクラスタリングのあいまい度：地点のファジィクラスタリングでは、あらかじめ定められた数の地点群への、各地点の所属率が求められる。地点 j の、地点群 i への所属率を u_{ij} 、地点群の数を g 、地点総数を t とする。また u_{ij} を全地点について平均した値を U_i とする。すなわち、

$$U_i = \sum_{j=1}^t u_{ij} / t$$

また、種 p の、地点 j での出現個体数を n_{pj} 、全地点での個体数の合計を N_p とし、種 p が出現した地点の地点群 i への所属率を、出現比率を重みとして平均した値を m_{pi} とする。すなわち、

$$m_{pi} = \sum_{j=1}^t n_{pj} u_{ij} / N_p$$

m_{pi} は、種 p が地点群 i に偏って出現する程大きくなり、 $m_{pi} = U_i$ であるとき、種 p は地点群 i に関しては最もあいまいな分布をしていることになる。そこで種 p の、地点のクラスタリングに関する分布のあいまい度 Fz_p を次式で定義する。

$$Fz_p = \min \{Fz_{p1}, Fz_{p2}, \dots, Fz_{pg}\}$$

ただし、

$$Fz_{pi} = (1 - m_{pi}) / (1 - U_i), i = 1, 2, \dots, g$$

種 p の分布パターンが地点群のクラスタリングとよく一致する場合には Fz_p は小さくなるであろうから、これを全種について平均すれば、地点のクラスタリングが種の分布と平均的に一致しない程度を表すことができる。これを地点のクラスタリングのあいまい度と定義して、2 つのクラスタリング結果の比較に用いる。すなわち、総種類数を s とすれば、

$$\text{地点のクラスタリングのあいまい度} = \sum_{p=1}^s Fz_p / s$$

2. 種群の地点群への平均所属率と分布のあいまい度：上に述べた種 p と地点群 i の関係 $m_{pi} (i = 1, 2, \dots, g)$ および分布のあいまい度 Fz_p を種群別に全種について平均して、その種群と地点群 i の平均的關係を示す、

平均所属率 (Averaged membership function) および
 種群の分布のあいまい度 (Fuzziness) と定義する。た
 だし平均は、各種のその種群への所属率の二乗を重みと
 したものにす。すなわち、種 p の種群 j への所属率を
 v_{jp} とすれば、

$$\text{種群 } j \text{ の地点群 } i \text{ への平均所属率} = \sum_{p=1}^s v_{jp}^2 m_{ji} / \sum_{p=1}^s v_{jp}^2$$

$$\text{種群 } j \text{ の地点群 } i \text{ への平均所属率} = \sum_{p=1}^s v_{jp}^2 m_{ji} / \sum_{p=1}^s v_{jp}^2$$

3. 種群の個体数とその特化係数: 個別の種の個体数
 は不規則な変動が大きいため、その分布から環境勾配を
 明らかにすることは一般に困難である。しかし分布の類
 似した種の個体数を合計すれば、これらの不規則成分が
 相殺されて、環境勾配に対応した変動パターンを見出せ
 ることが期待される。そこで各種の個体数を、種群への
 所属率の二乗を重みとして種群に配分して、全種につい
 て合計したものを種群の個体数と定義する。すなわち種
 群の数を q として、地点 j における種群 i の個体数 x_{ij}
 を、

$$x_{ij} = \sum_{p=1}^s \left(v_{jp}^2 m_{ji} / \sum_{k=1}^q v_{kp}^2 \right)$$

と定義する。 x_{ij} の値は、種群および地点による個体数
 の多さに影響されるため、必ずしも地点における組成比
 率の特性を表さない。そこでこれを特化係数¹⁹⁾に換算
 すれば、より地点の特徴がはっきりすると考えられる。
 地点 j における種群 i の特化係数 c_{ij} は、

$$c_{ij} = \left(x_{ij} / \sum_{k=1}^q x_{ik} \right) / \left(\sum_{k=1}^q x_{kj} / \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^q x_{kl} \right)$$

により計算される。

結 果

地点と種の座標づけ CA と Rsn 法による座標づけ
 により、地点と種を第 I × II 軸および第 I × III 軸平面に
 配置した結果をそれぞれ Fig. 2 と 3 に示す。Figures
 2, 3 に示すように、CA の第 III 軸成分では意味のある群
 がみられないが、Rsn 法の第 III 軸成分では地点 4, 5 が
 他から分離され、意味のある配置となっている。そこ
 で、CA では第 II 軸成分まで、Rsn 法では第 III 軸成分ま
 でを以下の解析に用いた。固有値の累積率は、CA の第
 II 軸成分までが 68.7%, Rsn 法の第 III 軸成分までが
 89.7% であった。図中種の配置では、後述するファジ
 イクラスターリング結果から、3 つの種群 SP-A, B, C の
 いずれかへの所属率が 0.5 以上の種、および全ての種群
 への所属率が 0.5 未満の種を記号で示した。

Fig. 2 から分かるように、CA による地点の配置で
 は、第 I 軸によって湾奥部の地点と湾口部の地点が大き
 く 2 分されるとともに、軸に沿ってほぼ湾奥から湾口

Fig. 2. CA ordination of stations (left) and species (right) onto axis I × II (upper) and I × III (lower) planes.

The labeled numbers in the left graphs denote the station numbers. Symbols in the right graphs represent the species with high membership function above 0.5 of the species group obtained by fuzzy cluster analysis. Solid circle: SP-A, Open triangle: SP-B, Open circle: SP-C. Star marks represent the species with low membership functions below 0.5.

Fig. 3. Rsn ordination of stations (left) and species (right) onto axis I × II (upper) and I × III (lower) planes.

Numbers in the left graphs and symbols in the right graphs represent the same as those in Fig. 2.

への順に配置され、さらに第 II 軸成分では、7.5 m の等
 深線に沿った比較的潮流の影響を受けやすい地点¹⁷⁾ (地
 点 3~5, 7) が、他から分離されている。

Rsn 法の場合も湾奥部と湾口部に大きく 2 分される
 点は同じであるが、地点の配置が単位球面上であることを
 考慮すれば、¹⁶⁾ 地点は第 I × II 軸平面上では時計回りに、
 ほぼ湾奥から湾口への順に配置され、また第 III 軸成
 分によって、中間の地点 4 と 5 が他から分離されてい
 る。その結果、地点および種ともに、3 つの群を比較的

明瞭に識別できる。さらに、それぞれの地点群が点対称には配置されていないことは、全域に広く分布する種が多いことを意味する。¹⁶⁾

CA の場合も 3 つの群を識別できるが、地点 6 と 7 がかなり隔たっていること、および地点 3 が地点 4 と 5 に近いことなどが、Rsn 法の場合とは異なっており、また種の配置では、Rsn 法の場合ほど 3 群が明瞭ではない。

地点のファジィクラスタリング 上に述べた地点の座標づけ結果を用いて、ファジィ k-means 法によつて地点のクラスタリングを行った。CA と Rsn 法それぞれの結果を Table 1 に示す。これは、各地点が地点群 A, B, C に所属する割合 (所属率, Membership function) を示している。

Table 1 に示す CA と Rsn 法のクラスタリング結果の相違は、上に述べた座標づけの相違を反映している。この相違のどちらが種の分布とよく一致しているかを、先に定義した地点のクラスタリングのあいまい度で評価すると、CA に基づく場合は 0.617, Rsn 法に基づく場合は 0.547 であった。このことは、Rsn 法に基づくクラスタリングの方が、種の分布と平均的によく一致していることを示している。

出現種のファジィクラスタリング 上に述べた出現種の座標づけを用いて、出現種を種群 SP-A, B および C に分割する。地点と同様のファジィクラスタリングを行った。CA および Rsn 法に基づく結果をそれぞれ Table 2 に示す。Figures 2, 3 にもその結果を示していることはすでに述べた。Table 2 では、各種群の所属率が大きい 20 種を示した。

つぎに、CA および Rsn 法による各種群の地点群へ

の平均所属率と分布のあいまい度を Table 3 に示す。これから分かるように、SP-A と C については、Rsn 法を用いた場合の方があいまい度が小さく、地点群との対応がよい。すなわち Table 3 では、Rsn 法による SP-A と C は、それぞれ地点群 A と C に多く分布し、一方 SP-B は広く分布しているが、地点群 B の中での割合が大きいことなど、各地点群と種群にそれぞれ特徴がみられる。一方 CA の場合、SP-A と B はいずれも地点群 A で多く、SP-C は B と C の両地点群で多い。このため地点群 B と C の区別が不明瞭である。

そこで CA と Rsn 法による出現種のクラスタリング結果を Table 2 により比較すると、つぎのような相違がみられる。まず SP-A については、Rsn 法による方が CA による種群に比べて全体的に所属率が大きい。これは、Rsn 法の SP-A に含まれる種の座標配置が群としてよくまとまっていることを反映したもので、これらの種の分布範囲が比較的限られていることを意味している。Table 2 に示す CA の SP-A の種は、すべて Rsn 法においても SP-A の所属率が 0.7 以上であったが、Rsn 法の SP-A の種である *Amphioplus japonicus*, *Pilulina pisidium*, *Caprella decipiens* などは、CA では全ての所属率が 0.5 未満のあいまいな種となっていた。つぎに SP-B についてみると、CA, Rsn 法ともに所属率が小さく、クラスターとしてのまとまりが悪い。これは、SP-B に含まれる種の分布パターンのはばらつきが大きいことを意味する。また、CA と Rsn 法では構成種がかなり相違している。とくに CA の SP-B である *Laternula flexuosa*, *Propallene longiceps* および *Tiberia pulchella* は、Rsn 法では SP-A の所属率が 0.6~0.8 であった。さらに SP-C についてみると、Table 2 に示す Rsn 法の

Table 1. Comparison of the station groups of CA ordination with those of Rsn ordination by fuzzy k-means method

		Based on CA ordination			
Station no. of A	Membership function	Station no. of B	Membership function	Station no. of C	Membership function
7	0.862	5	0.999	1	0.960
6	0.838	4	0.951	2	0.939
		3	0.838		
		Based on Rsn ordination			
Station no. of A	Membership function	Station no. of B	Membership function	Station no. of C	Membership function
7	0.986	4	0.977	2	0.976
6	0.984	5	0.973	3	0.903
				1	0.894

Membership function means the fitness ratio of each station to each station group A, B, and C.

Table 2. Comparison of the species groups of CA ordination with those of Rsn ordination by fuzzy k-means method

		Based on CA ordination			
Species name of SP-A	Mf	Species name of SP-B	Mf	Species name of SP-C	Mf
<i>Fabulina minuta</i>	0.999	<i>Laternula flexuosa</i>	0.999	<i>Praxirella affinis</i>	0.992
<i>Pherusa eruca</i>	0.982	<i>Sigambra tentaculata</i>	0.978	<i>Streblossoma persica</i>	0.991
<i>Dimorphostylis asiatica</i>	0.974	<i>Phascolion ikedai</i>	0.965	<i>Mantellum hakodatenense</i>	0.990
<i>Prionospio malmgreni</i>	0.897	<i>Ringicula doliaris</i>	0.964	<i>Nephtys polybranchia</i>	0.988
<i>Nipponomysella oblong.</i>	0.891	<i>Propallene</i>	0.937	undet. Turbellaria	0.975
<i>Laevicardium undat.</i>	0.859	undet. Gammarid sp. 1	0.894	<i>Setia bifasciata</i>	0.963
<i>Heterocyathus jap.</i>	0.855	<i>Tiberia pulchella</i>	0.861	<i>Macoma awajensis</i>	0.948
<i>Indomitrella lischkei</i>	0.855	<i>Eufenella subpellucida</i>	0.859	<i>Turbonilla multigyra</i>	0.947
<i>Myodocopa B</i>	0.797	<i>Odostomia deshimana?</i>	0.820	<i>Paradrillia inconstans</i>	0.923
<i>Zafra zonata</i>	0.756	<i>Campilaspis striata</i>	0.813	<i>Terebellides stroemi</i>	0.918
<i>Turbonilla sp.</i>	0.756	<i>Cirriiformia tenta.</i>	0.813	<i>Niotha livescens</i>	0.887
<i>Cerianthus aust.</i>	0.740	<i>Lepidasthenia sp.</i>	0.757	<i>Retusa minima</i>	0.874
<i>Syrnola subcincta</i>	0.727	<i>Labidoplax dubia</i>	0.748	<i>Alvenius ojanus</i>	0.854
<i>Pusia hizenensis</i>	0.686	<i>Macoma tokyoensis</i>	0.730	<i>Cylichnatys angusta</i>	0.811
<i>Proclava pfefferi</i>	0.660	<i>Acteocina gordonis</i>	0.728	<i>Leanira yhleni</i>	0.803
<i>Thracia pusilla</i>	0.603	<i>Anatanaia normani</i>	0.712	<i>Musculus sp.</i>	0.801
<i>Philine argentata</i>	0.567	<i>Eocuma hilgendorfi</i>	0.707	<i>Cypridina hilgendorfi</i>	0.800
<i>Magelona japonica</i>	0.537	<i>Dimorphostylis brev.</i>	0.681	<i>Veremolpa micra</i>	0.800
<i>Haploscolos elongatus</i>	0.525	<i>Musculista japonica</i>	0.679	<i>Raeta pulchella</i>	0.796
<i>Petrasma pusilla</i>	0.520	<i>Glycera spp.</i>	0.589	<i>Fulvia mutica</i> juv.	0.795
		Based in Rsn ordination			
Species name of SP-A	Mf	Species name of SP-B	Mf	Species name of SP-C	Mf
<i>Myodocopa A</i>	0.970	undet. Nereidae sp.	0.883	<i>Alpheus brevicrist.</i> juv.	0.972
<i>Dimorphostylis asiatica</i>	0.957	<i>Harmothoe imbricata</i>	0.881	<i>Veremolpa micra</i>	0.919
<i>Thracia pusilla</i>	0.950	<i>Chone sp.</i>	0.873	<i>Setia bifasciata</i>	0.906
<i>Fusinus perplexus fer.</i>	0.943	<i>Cypridina hilgendorfi</i>	0.793	<i>Streblossoma persica</i>	0.892
<i>Nipponomysella oblong.</i>	0.938	<i>Odostomia desimana?</i>	0.788	<i>Nephtys polybranchia</i>	0.891
<i>Pherusa eruca</i>	0.936	<i>Clathrofenella retic.</i>	0.776	<i>Raeta pulchella</i>	0.889
<i>Amphioplus japonicus</i>	0.928	<i>Glycera spp.</i>	0.763	<i>Terebellides stroemi</i>	0.887
<i>Petrasma pusilla</i>	0.923	<i>Macoma awajensis</i>	0.662	undet. Turbellaria	0.887
<i>Lophitoma indicum</i>	0.916	<i>Musculus sp.</i>	0.650	<i>Alvenius ojanus</i>	0.886
<i>Pillucina pisidium</i>	0.911	<i>Eufenella subpellucida</i>	0.643	<i>Turbonilla multigyra</i>	0.868
<i>Caprella decipiens</i>	0.910	<i>Cylichnatys angusta</i>	0.626	<i>Niotha livescens</i>	0.838
<i>Haploscoloplos elongatus</i>	0.909	<i>Odostomia hilgendorfi</i>	0.613	<i>Fulvia mutica</i> juv.	0.785
<i>Fabulina minuta</i>	0.905	<i>Lumbrineris nipponica?</i>	0.610	<i>Fulvia hungerfordi</i>	0.758
<i>Syrnola subcincta</i>	0.904	undet. Gammarid sp. 1	0.609	<i>Notomastus latericeus</i>	0.735
<i>Philine argentata</i>	0.900	<i>Scariola bella</i>	0.608	<i>Reticunassa chibi</i>	0.710
<i>Leptaxinus rotundata</i>	0.898	<i>Leanira yhleni</i>	0.599	<i>Paradrillia inconstans</i>	0.694
<i>Laevicardium undat.</i>	0.888	<i>Dentalium octangulatum</i>	0.598	<i>Praxirella affinis</i>	0.670
<i>Pusia hizenensis</i>	0.887	<i>Platynereis bicanal.</i>	0.573	<i>Ciona intestinalis</i>	0.666
<i>Heterocyathus jap.</i>	0.878	<i>Kellia japonica (?)</i>	0.546	undet. Tunicata	0.659
<i>Indomitrella lischkei</i>	0.878	<i>Macoma incongrua</i>	0.541	<i>Mantellum hakodatenense</i>	0.648

Mf, membership function meaning the fitness ratio of each species to each species group. The twenty species are listed in descending order of the membership function of each species group SP-A, SP-B, and SP-C.

Table 3. Comparison of averaged membership function and fuzziness of each species group of CA ordination with those of Rsn ordination

Based on CA ordination									
	A	B	C	Fz		A	B	C	Fz
SP-A	0.707	0.191	0.101	0.384	SP-A	0.751	0.114	0.135	0.347
SP-B	0.443	0.286	0.271	0.710	SP-B	0.323	0.353	0.324	0.766
SP-C	0.149	0.412	0.440	0.699	SP-C	0.180	0.189	0.631	0.586

A, B, C, station groups; SP-A, SP-B, SP-C, species groups; Fz, fuzziness.
For averaged membership function and fuzziness see text.

SP-Cの種で、CAのSP-Cの表にない種についても、全てCAのSP-Cの所属率が0.5以上であったが、CAのSP-Cの種である *Macoma awajensis*, *Leanira yhleni*, *Musculus* sp. および *Cypridina hilgendorfi* は、Rsn法ではいずれもSP-Bの種となっている。

これらの相違を検討するために、上に挙げた種の分布をFig. 4に示した。まず、Fig. 4の左と中央の図をみると、どの種も地点6と7で多数出現しており、Rsn法によるSP-Aへのクラスタリングが妥当であることを示している。さらに右の図をみると、どの種も地点1~6に広く出現しており、やはりRsn法によるSP-Bへのクラスタリングが妥当といえる。Fig. 4には示さなかったが、*C. hilgendorfi* についても同様であった。

Fig. 4. The numerical distribution of individuals of the species having large difference in the membership function of each species group between the CA and Rsn result of the fuzzy clustering.

Left: fuzzy species with low membership function of SP-A below 0.5 in case of CA but with high membership function of SP-A above 0.5 in case of Rsn, Center: the species with high membership function of SP-B in case of CA but with that of SP-A in case of Rsn, Right: the species with high membership function of SP-C in case of CA but with that of SP-B in case of Rsn.

CAとRsn法でこのような相違が生じる理由はつぎのように考えられる。CAの地点の座標づけでは、第I軸のほぼ両端に地点1~5と6, 7が大きく分けられている。第II軸で地点1, 2と3, 4, 5が分離されているが、種の配置では第II軸に沿った群はみられず、第I軸の成分が群の形成に大きく寄与している。このため、Fig. 4の左と中央の図に示す種のように、地点6と7に多数出現する種でも、地点1~5にある程度出現している種は、SP-AとSP-Bとの境界またはSP-Bの群の中に配置される。また *C. decipiens* の場合、地点1と6の配置に対応して第II軸の座標値が負で大きくなったため、SP-AとBの境界に配置されたものである。またFig. 4の右図に示す種の場合、地点1~5に多数出現しているため、CAでは第I軸座標が負となり、SP-Cの群の中に配置された。これに対してRsn法では、第III軸によって地点1~3と地点4, 5が明瞭に区分され、種の配置でも各成分により群が識別できるため、地点1~3に多数出現する種 (SP-C) が地点1~5に広く出現する種から区別された。CAのSP-Bの種の多くは、Rsn法では所属のあいまいな種となっている。

種群の個体数の特化係数 CAおよびRsn法による種群SP-A, B, Cの個体数の特化係数をFig. 5に示す。Figure 5に示すように、CAのSP-BとCでは、地点1~5の間に際立った相違がなく、CAによる地点のクラスタリング結果とも一致しない。この理由は上に述べ

Fig. 5. Comparison of the distribution pattern of characterizing coefficient of each species group of CA (left) with that of Rsn (right).

For details of the characterizing coefficient, see the text.

たように, CA の SP-B には SP-A に含まれるべき種が, また SP-C には SP-B に含まれるべき種が含まれているためと考えられる。

これに対して Rsn 法では, SP-A は地点 6 と 7 でとくに割合が高いこと, SP-C は地点 1 で最も割合が高く, 地点 7 までならかに減少していること, さらに SP-B は全域に広く出現しているが, 地点 4 と 5 でやや割合が大きいことなど, クラスタリングされた地点群と種群ごとに特徴を見出すことができる。

考 察

CA と Rsn 法による座標づけと種の分布パターン
CA と Rsn 法による座標づけは, 地点が湾奥部と湾口部に大きく 2 分されることでは一致しているが, 湾奥部の地点の細分および湾口部の地点相互の関係では相違がみられる。すなわち地点 3 が, CA では地点 4, 5 の群 B に区分され, Rsn 法では地点 1, 2 の群 C に区分されていること, および地点 6 と 7 の相違が, CA では地点 1~5 相互間の相違に比べるとかなり大きいことである。

Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾が行った個体数順位の上位 30 種による, Morishita の類似度 C_d を用いたデンドログラムは, 地点 3 に関しては Rsn 法と一致し, 地点 6 と 7 に関しては CA と一致している。これをクラスタリングされた種群の分布 (Fig. 5) と対比すると, 地点 1~5 の中の細分に関して, CA では地点の区分と一致する種群がみられない。その理由として, CA では種の座標配置において種群の境界が不明瞭なため, クラスタリングで誤分類される種が多いことが挙げられる。

これに対して Rsn 法では, 3 つの種群の分布パターンが地点群の区分をよく説明できる。事実, 個別の種の分布を調べると, ここでは示さなかったが, *Nephtys polybranchia*, *Terebellides stroemi*, *Streblossoma persica* などの多毛類が地点 1~3 でとくに多数出現しており, 地点 1~3 と 4, 5 が区別される。したがって CA では, 地点 1~3 に多数出現する種の分布パターンが正確に反映されていないといえる。

Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾による底質の粒度分析結果では, 地点 1~3 は, 粒径 62.5 μm 未満のシルト成分が 82% 以上を占めることで, 80% 以下の地点 4, 5 とは区別される。

一方, 個体数が多い, *Lumbrineris* sp. cf. *nipponica* (個体数順位第 4 位, その後の報告²⁰⁾では *L. longifolia* と改められた) の個体数は, 地点 6 と 7 でかなり相違し, CA や C_d によるデンドログラムと一致する。しかし, 個体数が少ない種で地点 6 と 7 に共通して出現する種は多く, Rsn 法では地点 6 と 7 の類似度が大きくなる要因となっている。たとえば計算に用いた種で,

地点 1~5 の各 2 地点間の共通種数は 40~51 種, Jacard の共通係数²¹⁾が 0.49~0.66 であるのに対し, 地点 6 と 7 のそれは, それぞれ 68 種, 0.76 と, 一段と大きいことがそのことを示している。さらに計算に用いた種で各地点に出現した種類数は, 地点 1~5 では 51~66 種であるのに対して, 地点 6 と 7 ではそれぞれ 77, 81 種と多く, この点でも両地点は類似している。Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾はこのような地点 7 の性質を, 泥質底から砂質底への ecotone として説明しているが, 地点 6 にもそれは当てはまるように思われる。実際, 地点 6 と 7 の粒度組成¹⁷⁾は, 粒径 62.5~500 μm の極細~中砂がそれぞれ 44.4% と 37.4% で, 地点 1~5 の 12.1%~28.4% とはかなり異なる。このように Rsn 法では, 個体数の少ない種が多種類出現する両地点の類似性が, 大きく評価されている。

Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾は, 出現種の分布パターンとして, ここで述べた Rsn 法の SP-A と SP-C の分布に一致する 2 つのパターンのほかに, 地点 3~5 と 7 で多数出現した *Lumbrineris* sp. をとりあげて, 湾の西岸に沿った潮流との関連を指摘している。Rsn 法による解析では, この種は SP-B に含まれおり, その分布は SP-B の個体数に反映されてはいるが一致はしない。SP-B の種の多くは湾内に広く不規則に出現しており, *Lumbrineris* sp. の分布が代表的なパターンとはいえない。しかし, 地点 4, 5 で SP-B の割合が相対的に大きく, 地点 4, 5 が 1~3 と区別されることは, Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾が指摘する潮流が要因となっている可能性も考えられる。すなわち, SP-B に含まれる種が示す, 湾内に広くかつ不規則な出現パターンは, 湾岸に沿った潮流による種の分散が要因として考えられる。

地点と種のファジィクラスタリングとその解釈の方法
Rsn 法による座標づけは, 数値実験¹⁶⁾で示されたように塊状の群を生じる傾向があるから, ファジィ k-means 法によるクラスター解析に向いており,¹⁸⁾ ファジィクラスタリングを用いれば, ここで述べた方法によりクラスタリングされた地点群と種群の対応を簡潔に表現できる。

地点と種の座標配置が示すように, 種による分布パターンの変化は, 地点による種組成の変化と異なり, 連続性が大きい。したがって種群は本質的にファジィな群と考えられるから, 種の分布パターンを通常のクラスター解析により要約することは適当ではない。ファジィクラスタリングを用いた種群の個体数による分布パターンの要約は, より現実的な方法といえる。さらに Fig. 5 に示したように, 種群の個体数においては, 個々の種の不規則な変動が緩和されるから, 理化学的環境データなどの外的基準を取り入れた, 回帰分析や相関分析など他の

多変量解析を適用して、環境要因と群集組成との関係を解析することも可能となるであろう。

Rsn 法を用いた解析の利点と問題点 上に述べた Rsn 法を用いた解析結果は、地点の区分に関しては Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾が行った C_4 によるデンドログラムを用いた解析とほぼ一致し、見出された種の分布パターンも、大きくみれば Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾の報告と一致する。これは地点数が少なく、データの構造が比較的単純なことから、当然のことであろう。しかしなお、Rsn 法には座標づけ法の一般的特質として、つぎのような利点がある。

1. 地点間の関係を容易に把握できる：デンドログラムでは、たとえば地点 1 と 2 あるいは地点群 1~3 と 4, 5 の順序関係は不明であり、これらを入れ替えても、デンドログラムとしては全く同じである。これに対して Rsn 法による座標づけでは、地点 1 と 7 が湾奥と湾口の両極端で、地点 3, 2 から 5, 4 の順に、湾奥から湾口へと群集が変化していることを読み取ることができる。

2. 地点の区分と種の分布の対応関係を把握しやすい：類似度を用いた地点のデンドログラムからは、種の分布に関する情報は得られない。Rsn 法と CA では、Figs. 2, 3 に示したように、出現種を地点と同じ平面に配置するから、地点の区分に対応する出現種の群が存在することを把握できる。これにファジィクラスタリングを適用すれば、Fig. 5 に示したように、連続的な群集変化の様子が示される。

以上の利点は、地点数が多く構造が複雑で、地点の順序関係が自明ではないデータの場合、一層効果的となるであろう。しかし同時に、つぎのような問題点も存在する。

先に示した種群の分布は、多数の種の分布に共通する傾向を取り出したもので、架空の種の分布である。個々の種の分布はこれとは異なっている。それは単にノイズによる場合もあるが、意味のある変動を示していることもあり得る。Kikuchi and Tanaka¹⁷⁾が指摘した *Lumbrineris* sp. と潮流との関係や、地点 1~5 に広く多数出現する *Musculista senhousia* の分布はその例である。種群の個体数では、重要な情報をもつ種の分布も、多数の種の分布と異なる成分は打ち消されてしまう。このような情報のロスは、ファジィクラスタリングを行う際に種群の数を如何に設定するかにも関係する。たとえば上の解析で、種群の数を 4 とすれば、SP-B はさらに、地点 4, 5 に比較的多数で地点 6, 7 には少ない種群と、地点 4, 5 では少なく、地点 6, 7 で比較的多数の種群に分けられる。しかしクラスターの分割数が増加すればノイズの影響も大となるから、意味のある解釈が可能な、適切

な分割数を決めなければならない。その場合、重要種については、個別にその分布を吟味しながら、何回かの試行計算を繰り返す必要がある。ここでの場合、分割数を 4 としても、*Lumbrineris* sp. の分布に一致するパターンは見出せなかった。したがって基本的には、湾内の群集構成を、湾奥部を中心に分布する種群、湾口部を中心に分布する種群および広範囲に分布する種群の 3 つの分布パターンに要約して説明できる。

Rsn 法による解析には上に述べたような問題点もあることを考慮して、重要種については個別にその分布を吟味する必要がある。しかしその場合においても、地点の群集構成の変化を、多数の種に共通する分布傾向との関係で把握しておくことは有益であり、そのための方法として Rsn 法は役立つであろう。その意味で、Rsn 法による解析は、それ自体完結した解析法としてではなく、種の分布の吟味を基本とした一連の解析作業の一段階として位置づけられる。

謝 辞

本論文で使用したデータと図版の借用を快くご承諾頂いた、九州大学理学部名誉教授、菊池泰二博士並びに *Publications from the Amakusa Marine Biological Laboratory* の編集者に対して、謹んで感謝の意を表する。

文 献

- 1) J. G. Field and R. M. Warwick: A practical strategy for analysing multispecies distribution pattern. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 8, 37-52 (1982).
- 2) B. J. Burd, A. Nemecek, and R. O. Brinkhurst: The development and methods in benthic marine infaunal studies, in "Marine Biology" (ed. by J. H. S. Blaxter and A. J. Southward), Vol 26, Academic Press, London, 1990, pp. 178-232.
- 3) 小林四郎：生物群集の多変量解析，第 1 版，蒼樹書房，東京，1995，pp. 71-148.
- 4) 加藤和弘：生物群集の多変量解析とその地域環境計画への応用。ランドスケープ研究，60，46-55 (1996).
- 5) 品川沙夫：底生動物相による海域環境解析の一方。日本ベントス研究会誌，26，49-65 (1984).
- 6) 品川沙夫：動物の種一個体数組成の類似度にもとづく多変量解析法とその適用例。下関女子短期大学紀要，Nos. 10/11，1-18 (1992).
- 7) M. Kent and P. Coker: Vegetation Description and Analysis, 1st ed., Belhaven Press, London, 1992, pp. 162-243.
- 8) J. M. Culp and R. W. Davis: Reciprocal averaging and polar ordination as techniques for analyzing lotic macroinvertebrate communities. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37, 1358-1364 (1980).
- 9) S. Gamito and D. Raffaelli: The sensitivity of several ordination methods to sample replication in benthic surveys. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 164, 221-232 (1992).
- 10) E. C. Pielou: The Interpretation of Ecological Data, 1st ed., John Wiley & Sons, New York, 1984, pp. 176-188.
- 11) 岩坪秀一：数量化法の基礎，第 1 版，朝倉書店，東京，1987，pp. 98-160.

- 12) 西里静彦: 質的データの数量化, 第1版, 朝倉書店, 東京, 1982, pp. 1-60.
- 13) M. O. Hill and H. G. Gauch, Jr.: Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. *Vegitatio*, **42**, 47-58 (1980).
- 14) 加藤和弘: 生物群集分析のための序列化手法の比較研究. 環境科学会誌, **8**, 339-352 (1995).
- 15) J. G. Field, R. H. Green, F. A. de L. Andrade, E. Fresi, P. Gros, B. H. McArdle, M. Scardi, and D. Wartenberg: Numerical ecology: developments for studying the benthos, in "Developments in Numerical Ecology" (ed. by P. Legendre and L. Legendre), Springer-Verlag, Berlin, 1987, pp. 485-494.
- 16) 品川汐夫, 多部田修: 数値実験の比較による Rsn 法の利点. 日本誌, **64**, 56-64 (1998).
- 17) T. Kikuchi and M. Tanaka: Ecological studies on benthic macrofauna in Tomoe Cove, Amakusa. I. Community structure and seasonal change of biomass. *Publ. Amakusa Mar. Biol. Lab.*, **4**, 189-213 (1978).
- 18) 大隈 昇: ファジィ・クラスタリング. 数理科学, **17**, 34-41 (1979).
- 19) 上田尚一: データ解析の方法, 初版, 朝倉書店, 東京, 1982, pp. 5-10.
- 20) H. Tsutsumi and T. Kikuchi: Benthic ecology of a small cove with seasonal oxygen depletion caused by organic pollution. *Publ. Amakusa Mar. Biol. Lab.*, **7**, 17-14 (1983).
- 21) 木元新作: 動物群集研究法 I, 初版, 共立出版, 東京, 1976, p. 131.