

サロマ湖の多毛類群集の構造特性と漁場環境 ：過去 20 年間の変化傾向

園田 武¹・中尾 繁¹・高安克己²

Polychaete community structure and its temporal change through last 20 years in the intensive scallop culture area, Saroma Lagoon, northern Japan.

Takeshi Sonoda¹, Shigeru Nakao¹ and Katsumi Takayasu²

Abstract: The accumulative impact of the intensive scallop culture on the bottom environment and polychaete community structure were studied in Saroma Lagoon, northern Japan. The bottom sampling was carried out in 1995, and the multivariate analysis have been used to compare 1975, 1987 data with 1995 data. 55 species were identified in 1995 samples, among them the dominant species were *Maldane cristata*, *Lumbrineris longifolia* and *Scalibregma inflatum*, which were typical species in Japanese eutrophic coastal bays. The result of comparative analysis of the polychaete community structure during period of the past 20 years showed marked changes in species number, density and species composition. The species composition of polychaete community in 1995 indicates that the lagoon environment may not be in the state of heavily organic pollution. But clear temporal changes in the community structure and frequent occurrence of spreading hypoxic water and red tides in recent time suggest the accumulative organic loading by the intensive scallop culture in the lagoon may cause severe bottom hypoxia, eutrophication of water and stressful disturbances to the benthic community.

Key words: community structure, disturbance, organic loading, polychaete, scallop culture

緒 言

沿岸域の生物群集の構造形成プロセスにおいて、近年ますます増大する人間活動は重要な作用因の一つになっている。そのような沿岸域での人間活動の一つに漁業があげられる。沿岸漁業による生態系への影響については様々な角度から検討されてきているが (Dayton et al., 1995; Jennings & Kaiser, 1998; Eleftheriou, 2000), 漁業生産にもネガティブな影響を与えているものとして、乱獲や混獲、投棄魚の間

題 (松宮, 1998), トロールやドレッジによる海底の攪乱 (Collie et al., 2000), さらに集約的増養殖事業に由来する周辺海域の富栄養化や海底の有機汚染があげられる (代田, 1990; Omori et al., 1994; Wu, 1995; 横山, 2000)。

水産増養殖は過去 20 年間に世界中の沿岸域で急激に拡大し、生産量は 2 倍以上に増加して、人間が消費する魚介類の 1/4 を占めるにいたっている (Naylor et al., 2000)。こうした活動の増大にともなって沿岸生態系への影響についての関心が深ま

¹ 北海道大学大学院水産科学研究科 Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hakodate 041-0821, JAPAN

² 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue 690-8504, JAPAN

り、増大する需要に質的・量的に応え、かつ持続可能な生産をおこなう水産増養殖のありかたについての活発な議論が展開されてきている (Wu, 1995; Naylor et al., 2000)。

ホタテガイ *Patinopecten (Mizuhopecten) yessoensis* はわが国北方沿岸域においてきわめて重要な水産資源の一つであり、近年の漁業生産量は年間約 50 万トン、生産額は約 800 億円に達している (農林水産省統計情報部, 2000)。ホタテガイは垂下式養殖または地まき放流により生産される典型的な水産増養殖種である。このうち垂下式養殖は地まき放流稚貝の養成または採苗から漁獲までの一貫した養殖生産方法として採用されている。このような養殖生産水域は大量のホタテガイを集約的に配置・管理しやすい特性を持つことが求められるため、内湾や沿岸海跡湖などに選定されるのが一般的である。

沿岸海跡湖は、陸域と海域をつなぐ連絡・境界面として位置しており、日本の沿岸生態系において重要な構成要素の一つである。一方、北海道には 61 の海跡湖沼があり、そのうち 22 が汽水湖で、日本列島に分布する汽水性沿岸海跡湖のほぼ半数が存在する。とくに北海道オホーツク海側沿岸は「海跡湖銀座」と呼ばれ、我が国の主要な沿岸海跡湖が分布している (小疇ほか, 1994)。このなかでもサロマ湖は湖面積 150.4 km²、最大水深 19.6 m、平均水深 8.7 m の我が国最大の多鹹性・海水性沿岸海跡湖で、ホタテガイの種苗生産・垂下養殖漁場として利用されている重要な水域である (西浜, 1994)。

サロマ湖におけるホタテガイ垂下養殖は 1960 年代後半から飛躍的に増大し、近年では年間約 7000 トンの生産量に達している。養殖水面は湖内全域に及び、養殖漁場面積は約 72.5 km² で湖面積の約 48 % を占めている。湖内ではホタテガイの他にカキ養殖施設も設置されており、これとあわせると養殖漁場面積は約 79.3 km² で湖面積の約 53 % が二枚貝垂下養殖水面として利用されている (中尾・園田, 2000)。

このように集約的な養殖漁場として利用されている水域で一般的な問題となるのは、水域の富栄養化や有機汚染である。二枚貝垂下養殖の場合は無給餌養殖であり、給餌式の魚類養殖に比べると有機汚染の顕在化の速さは遅く、初期の影響は小さいものと考えられる。しかしながら、生態的物質循環系の特定位置への物質停滞が引き起こす問題は、すでにカキ養殖漁場においては biodeposit による漁場老化 (Ito & Imai, 1955; 荒川ほか, 1971) や自家汚染

(森, 1999) の問題として慢性化しており、サロマ湖のホタテガイ垂下養殖においても、ここ 30 年間に飛躍的に増大した養殖生産の累積的影響が水底環境にさまざまな変化を引き起こしていることが予想される。

サロマ湖の湖沼環境と生物群集に関する調査・研究は長年に渡り様々な角度から取り組まれているが、垂下養殖による湖底環境への影響を群集生態学的観点から検討した例はない。とくに湖底環境を有効に指標しうるベントス群集に関する研究は少ないのが現状である。しかしながら、ベントス群集の構造特性に関する研究は水域環境の状態をより正確に把握する上で有用な情報を提供するものである (Nakao, 1982; 中尾, 1989, 1997)。

一方、環形動物多毛類は軟体動物・甲殻類と共に軟泥底マクロベントス群集で種数・密度・生物量において優占する分類群であり、その生活様式と生態は極めて多様性に富んでいる。多毛類に関しては様々な面からの研究が進んでいるが、とくに近年は、人間活動の増大による沿岸環境の人為的攪乱と悪化が深刻化する中で、多毛類の環境指標性の価値が改めて認識されるようになってきている (Reish, 1979; 中尾, 1983; Pocklington and Wells, 1992)。

そこで本研究は、二枚貝養殖漁場として高度に利用されてきているサロマ湖において、マクロベントス群集で優占する多毛類を対象とし、(1) 現状の多毛類群集の構造特性をあきらかにすること、(2) 過去の同様な調査結果と比較検討することで、多毛類群集の構造に特定の変化傾向があるかどうかをあきらかにすること、(3) 以上の結果をもとにサロマ湖の湖底環境の現状と変遷過程を考察することを目的とした。

材料と方法

1 現地調査およびサンプル分析

調査はサロマ湖に 55 地点を設定して 1995 年 10 月におこなった (Fig.1)。ベントスの採集は、Smith-McIntyre 型採泥器 (採集面積 1/10 m²) を用いて、1 地点 1 回おこなった。採集した湖底堆積物サンプルは、1 mm メッシュの篩を用いてふるい、篩上に残ったベントスを 10% 中性ホルマリンで固定・保存した。

ベントスサンプルは実験室でソーティングした後、多毛類サンプルについて可能な限り種レベルまでの分類同定をおこない、種毎の個体数を計数した。

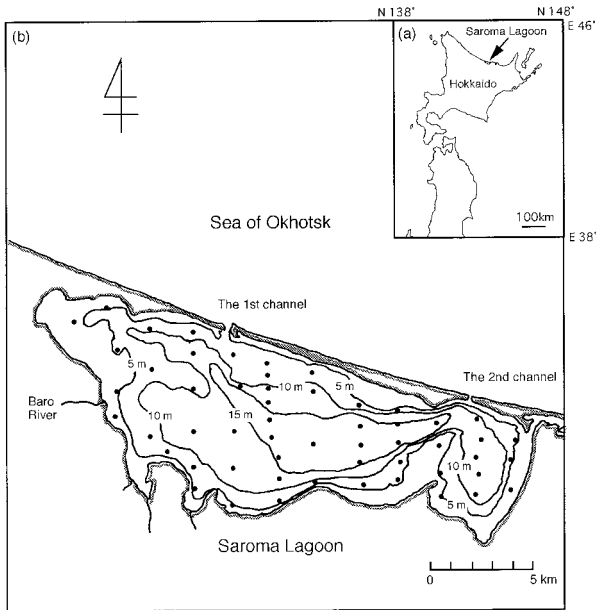


図 1 (a) サロマ湖位置図 (b) 調査地点および水深
Fig. 1 (a) Map of Saroma Lagoon on the northeast coast of Hokkaido. (b) sampling stations (closed circle) and depth contour in Saroma Lagoon.

2 データ解析

(1) 多毛類群集の構造特性と湖底環境

群集構造の特性について、種構成と優占種、優占種の分布パターンをあきらかにした。ついで各調査地点の種構成と密度から地点間の構造的類似性を検討し、群集型分析をおこなった。データ解析には解析プログラム PRIMER 4.0 (Clarke & Warwick, 1994) を用いて、Bray-Curtis 類似度指数行列に基づく非加重群平均方式のクラスター解析をおこなった。ついで検討された群集型がどのような底質環境に対応しているかを、本調査と同時に実施された底質分析結果 (三瓶ら, 1997) から検討した。

(2) 多毛類群集の変遷過程

サロマ湖でのベントス調査は、中川 (1977) が 1975 年から 1976 年に実施した詳細な調査が定量的に比較可能な最初の調査である。ついで北海道開発庁 (1988 a, b) が 1987 年におこなっている。サロマ湖でのホタテ養殖生産が本格化してきた 1965 年以後に実施されたこれら 2 つの調査結果に本調査結果をあわせると、ほぼ 10 年間で 20 年間の比較検討が可能となる。そこで、これらの調査データを整理し、サロマ湖の多毛類群集の構造特性について次の解析をおこなった。

まず、データ解析に先立ち、調査方法を比較した。中川 (1977) は採集面積 $1/17 \text{ m}^2$ の田村式採泥器で 1

地点 2 回計 23 地点で 1975 年 5 月, 8 月, 10 月および 1976 年 5 月に、北海道開発庁 (1988 b) は採集面積 $1/20 \text{ m}^2$ の Smith-McIntyre 型採泥器で 1 地点 1 回計 29 地点を 1987 年 7 月に、本研究では採集面積 $1/10 \text{ m}^2$ の Smith-McIntyre 型採泥器で 1 地点 1 回計 55 地点を 1995 年 10 月に採集している。ふるいのメッシュサイズはどれも 1 mm で共通していた。1 地点当たりの採集面積は中川 (1977) と本研究ではほぼ等しく、北海道開発庁 (1988 b) で本研究の $1/2$ である。したがって、密度は比較可能なように標準化した。出現種数も採集面積によって影響を受けるが、ここではデータを直接用いた。

群集構造の多様性について、種数、密度、Shannon-Wiener 関数による種多様度 H' および Pielou の均等度 J' ならびに Simpson の優占度 D を調査時点毎に求めた。これら群集構造特性を表現する単変量測度のデータは、 $\ln(x+1)$ 変換した後に、一元配置分散分析 (1 way-ANOVA) により調査時点間で違いがあるかどうかを検討した。なお、この際に中川 (1977) についてはほかの調査年と同様の季節である 1975 年 10 月の結果を用いた。調査時点間の群集構造パターンを検討するために、解析プログラム PRIMER 4.0 (Clarke & Warwick, 1994) を用いて、Bray-Curtis 類似度指数行列に基づく非加重群平均方式のクラスター解析および非計量の多次元尺度構成法 (MDS)、および調査時点間の群集構造の類似性に差異があるかどうかを検討するために類似度行列分析 (ANOSIM, Clarke & Green, 1988; Clarke, 1993) をおこなった。なお、個体数データは正規性を確保するために 4 乗根変換をおこなった。ANOSIM により類似度行列間に有意差が認められた場合は Bonferroni の多重比較をおこない、群集構造類似度の差異にどの種群が寄与しているかを検討するため類似度百分率分析 (SIMPER, Clarke & Ainsworth, 1993) をおこなった。

また、多毛類群集の構造特性を摂餌様式から検討するため、Fauchald & Jumars (1979) にしたがって出現種の摂餌様式を分類し、各群に属する種群の密度から、それぞれの生態的機能群の構成とその変化を検討した。ただし、表層下堆積物食者にはタケフシゴカイ科 (Maldanidae, bamboo-worms) のように堆積物表層から 30 cm 程度まで潜って摂餌する種群もいるため、このような種群は深表層下堆積物食者として分類した (Holte, 2001)。また、堆積物表層で摂餌する種群にはスピオ科 (Spionidae) のように環境条件に応じて摂餌様式を堆積物食から懸濁物食へ転換

表1 1995年のサロマ湖の多毛類相. RA%:相対優占度, mean:個体数/m², SE:1標準誤差.

Table 1 List of polychaete species found in Saroma Lagoon, 1995. RA %: relative abundance of species, mean: ind./m², SE: 1 standard error of mean.

	RA%	mean	SE
<i>Maldane cristata</i>	14.47	48.54	11.63
<i>Lumbrineris longifolia</i>	12.57	42.18	9.00
<i>Scalibregma inflatum</i>	9.05	30.36	10.25
<i>Glycinde</i> sp.	7.26	24.36	5.60
<i>Dorvillea</i> sp.	6.93	23.27	9.28
<i>Laonice cirrata</i>	6.72	22.54	4.19
<i>Cirriformia tentaculata</i>	6.66	22.36	7.59
<i>Heteromastus</i> sp.	6.61	22.18	3.87
<i>Pista</i> sp.	3.63	12.18	3.90
<i>Harmothoe imbricata</i>	2.60	8.72	2.89
<i>Sigambra tentaculata</i>	2.60	8.72	2.88
<i>Nicomache minor</i>	2.43	8.18	6.87
<i>Polydora</i> sp.	2.38	8.00	3.70
<i>Haploscoloplos elongatus</i>	1.78	6.00	2.78
<i>Lagis bocki</i>	1.57	5.27	1.72
Pilargidae sp.	1.57	5.27	5.22
<i>Cirratulus</i> sp.	1.08	3.63	1.39
<i>Praxillella</i> sp.	1.08	3.63	1.04
<i>Melinna</i> sp.1	0.97	3.27	1.40
<i>Goniada maculata</i>	0.81	2.72	2.52
<i>Glycera capitata</i>	0.70	2.36	0.88
<i>Scoloplos armiger</i>	0.65	2.18	0.84
<i>Amaeana trilobata</i>	0.48	1.63	1.14
<i>Chone</i> sp.	0.48	1.63	0.88
<i>Aricidea</i> sp.	0.27	0.90	0.46
<i>Maldanella</i> sp.	0.27	0.90	0.59
<i>Nephtys caeca</i>	0.27	0.90	0.46
<i>Owenia fusiformis</i>	0.27	0.90	0.73
<i>Pherusa plumosa</i>	0.27	0.90	0.90
<i>Cirratulinae</i> sp.	0.21	0.72	0.72
<i>Euclymene</i> sp.	0.21	0.72	0.72
<i>Eularia</i> sp.	0.21	0.72	0.35
<i>Genetyllis castanea</i>	0.21	0.72	0.72
<i>Onuphis holobranchiata</i>	0.21	0.72	0.72
<i>Potamilla</i> sp.	0.21	0.72	0.35
<i>Spio</i> sp.	0.21	0.72	0.43
<i>Terebella</i> sp.	0.21	0.72	0.56
<i>Anaitides maculata</i>	0.16	0.54	0.39
<i>Nereis</i> sp.	0.16	0.54	0.39
<i>Sigambra</i> sp.	0.16	0.54	0.30
<i>Typosyllis</i> sp.	0.16	0.54	0.39
<i>Apoprionospio</i> sp.	0.10	0.36	0.25
<i>Glycera</i> sp.	0.10	0.36	0.36
<i>Nereis vexillosa</i>	0.10	0.36	0.36
<i>Nereis virens</i>	0.10	0.36	0.36
<i>Ophelia limacina</i>	0.10	0.36	0.36
<i>Thelepus</i> sp.	0.10	0.36	0.25
<i>Ampharete</i> sp.	0.05	0.18	0.18
<i>Eteone longa</i>	0.05	0.18	0.18
Hesionidae sp.	0.05	0.18	0.18
<i>Lepidonotus</i> sp.	0.05	0.18	0.18
<i>Melinna</i> sp.2	0.05	0.18	0.18
<i>Spiophanes bombyx</i>	0.05	0.18	0.18
<i>Syllinae</i> sp.	0.05	0.18	0.18
<i>Tharyx</i> sp.	0.05	0.18	0.18

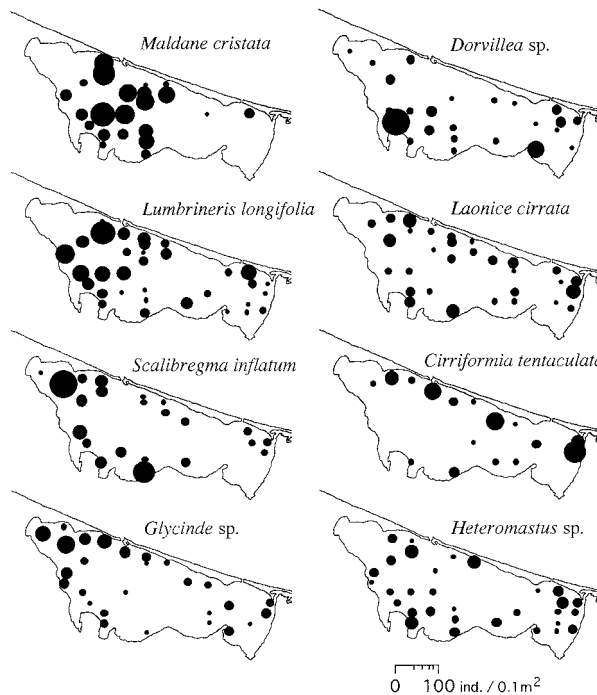


図2 1995年10月の優占種の空間分布

Fig. 2 Spatial distribution of the dominant species in Saroma Lagoon, 1995.

する独特の摂餌様式を持つものがあるため、これを条件の表層懸濁物・堆積物食者として分類した (Holte, 2001).

結 果

1 多毛類群集の構造特性と湖底環境

種類相: 95年調査で確認された多毛類は計11目25科55種であった (Table 1). もっとも優占していたのはタケフシゴカイ科のホソタケフシ *Maldane cristata*, ついでギボシイソメ科の *Lumbrineris longifolia* であった. 1地点当たりの平均種数は8.4, 最大値は16種で, 平均密度は384.3個体/m², 最大値は1030個体/m²であった.

優占種の分布: Table 1で示した優占度が6%以上の8種の分布様式をみると (Fig.2), 各々の種で異なる分布傾向が認められた. 最優占種である *Maldane cristata* は第1湖口がある湖中西部の水深5mから15mまでの範囲に集中的に分布し, 第2湖口付近に一部分布していたものの湖西端部と東部湖盆にはほとんど分布していなかった. *Lumbrineris longifolia*, イトゴカイ科の *Heteromastus* sp. は *Maldane cristata* と類似した分布パターンを示すが, 第2湖口のある湖東部湖盆にも分布している.

表 2 1995 年の各群集型の優占種. RA%:相対優占度, mean:個体数/m², SE:1 標準誤差.

Table 2 Dominant species of each community type in Saroma Lagoon, 1995. RA%: relative abundance of species, mean: ind./m², SE: 1 standard error of mean.

A1 type				A2 type				B type			
	RA%	mean	SE		RA%	mean	SE		RA%	mean	SE
<i>Sigambra tentaculata</i>	23.25	33.30	10.10	<i>Maldane cristata</i>	21.24	108.50	23.40	<i>Cirriformia tentaculata</i>	16.63	84.00	30.00
<i>Maldane cristata</i>	20.15	28.80	18.00	<i>Lumbrineris longifolia</i>	19.29	98.50	17.00	<i>Glycinde</i> sp.	13.46	68.00	19.50
<i>Dorvillea</i> sp.	19.37	27.70	19.20	<i>Scalibregma inflatum</i>	9.50	48.50	14.40	<i>Scalibregma inflatum</i>	12.47	63.00	43.20
<i>Heteromastus</i> sp.	13.95	20.00	5.20	<i>Dorvillea</i> sp.	8.66	44.20	21.80	<i>Pista</i> sp.	9.70	49.00	16.00
<i>Glycinde</i> sp.	8.52	12.20	6.90	<i>Heteromastus</i> sp.	8.20	41.90	7.10	<i>Laonice cirrata</i>	8.51	43.00	10.40
<i>Lumbrineris longifolia</i>	7.75	11.10	2.90	<i>Laonice cirrata</i>	6.98	35.70	7.30	<i>Nicomache minor</i>	8.51	43.00	35.70
<i>Laonice cirrata</i>	2.32	3.30	2.20	<i>Glycinde</i> sp.	4.28	21.90	7.10	<i>Harmothoe imbricata</i>	7.72	39.00	11.20
<i>Polydora</i> sp.	1.55	2.20	2.00	<i>Polydora</i> sp.	2.23	11.40	5.30	<i>Heteromastus</i> sp.	3.16	16.00	6.90
<i>Scalibregma inflatum</i>	1.55	2.20	2.00	<i>Lagis bocki</i>	2.14	10.90	3.60	<i>Goniada maculata</i>	2.97	15.00	13.20
<i>Apopriospio</i> sp.	0.77	1.10	1.00	<i>Cirriformia tentaculata</i>	1.86	9.50	3.90	<i>Melinna</i> sp.1	2.77	14.00	6.00
Species number		4.33	0.38	Species number		11.1	0.55	Species number		9.9	0.99
Total density		143	23.98	Total density		510.9	43.11	Total density		505	79.43

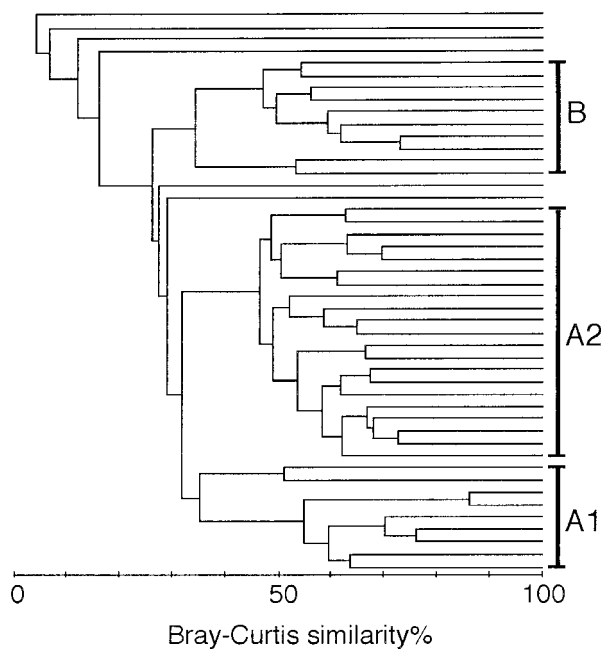


図 3 1995 年の多毛類群集構造のクラスター解析結果
Fig. 3 Result of cluster analysis for the polychaete community structure in 1995.

これら 3 種の分布パターンとは対照的にトノサマゴカイ *Scalibregma inflatum*, ニカイチロリ科の *Glycinde* sp. は水深の浅い水域に分布し, 湖西端部でも高密度に分布していた. また, スピオ科の *Laonice cirrata*, ミズヒキゴカイ科のミズヒキゴカイ *Cirriformia tentaculata* も比較的浅い水域に分布し, とくに湖口よりの水域に多い傾向がみとめられた. これに対し, コイソメ科の *Dorvillea* sp. は第 2 湖口付近に分布が認められたが, 湖の南側に多い傾向があった.

群集型解析: 群集構造の特性を地点間の構造類似度からクラスター解析した結果, 3 つの群集型が認

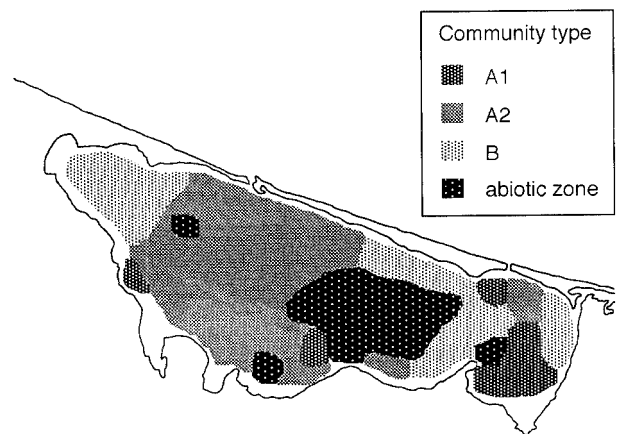


図 4 1995 年の群集型の空間分布 (無生物域を含む)
Fig. 4 Spatial distribution of each community type, including abiotic zone in 1995.

められた (Fig.3). それぞれの群集型の種組成を Table 2 に, それらの空間分布パターンを Fig.4 に示した. なお, Fig.4 にはマクロベントスが確認できなかった地点を無生物域として同時に示した. A1 は湖南側東部に分布し, 3 タイプのなかでは種数, 密度がもっとも小さかった. 構成種はカギゴカイ科の *Sigambra tentaculata*, および *Maldane cristata*, *Dorvillea* sp., *Heteromastus* sp. で相対優占度 76% を占めていた (Table 2, Fig.4). A2 は *Maldane cristata* と *Lumbrineris longifolia* で特徴づけられ, これら 2 種の主要な分布域に A2 分布域が対応していた. 種数・密度と分布域はもっとも大きかった (Table 2, Fig.4). B は湖西端部, 東部にみられ, A2 について種数・密度が大きく, *Cirriformia tentaculata*, *Glycinde* sp. および *Scalibregma inflatum* で特徴づけられ, A1・A2 で優占していた *Maldane cristata* と *Lumbrineris longifolia* の優占度は非常に低くなって

いた (Table 2, Fig.4). また, 無生物域は湖東部の水深 10 m 以深を中心として広がっていた.

底質環境: これらの各群集型が環境傾度とどのような対応にあるかを, 各群集型に含まれる地点群の底質特性から検討した (Fig.5). 各群集型は水深・泥分含量・有機炭素・窒素・イオウ濃度から表される底質特性とよく対応しており, A1 から B にかけてこれらの特性値が小さくなる傾向にあった. すなわち, B は水深が浅く砂質で有機物量が少ない酸化的環境であり, A1 は水深が深く泥質で有機物が多くやや還元的環境に対応し, A2 がこの中間的特性を示していた. 3 タイプの各々の間で有意に異なっていた底質特性は泥分含量であり (1-way ANOVA, Scheffe's test, $p < 0.05$), 有意差がなかったのはイオウ濃度であった. また, 主要な群集型である A2 と B 間で有意差があったのは水深および泥

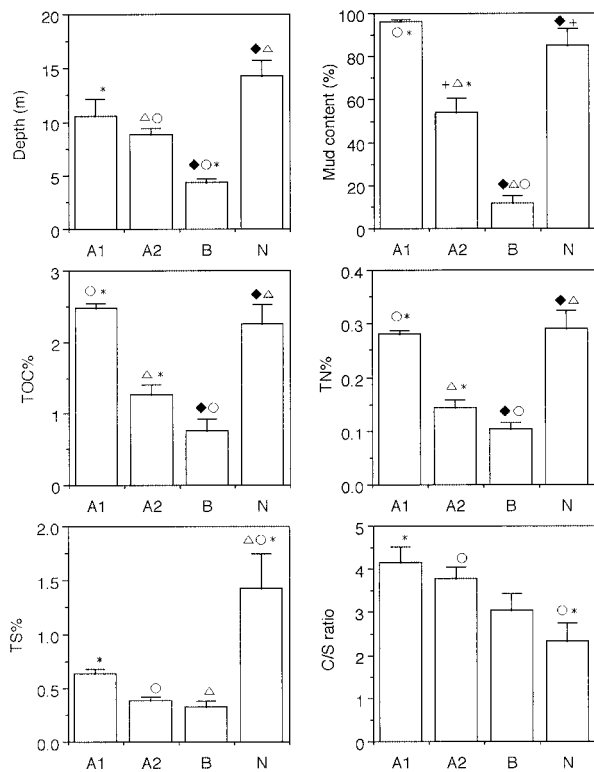


図5 各群集型に対応する底質環境特性. カテゴリー N は無生物地点群. 値は平均値±標準誤差. シンボル (*○△◆+) は群間の有意差 ($p < 0.05$) を示す (データは三瓶ほか, 1997 から引用).

Fig. 5 Sediment characteristics of each community type. See text for A 1, A 2, B. The category N means abiotic stations. Values are mean \pm SE. Symbols (*○△◆+) indicate significant differences ($p < 0.05$) of each pair of the community type. (Data cited from Sampei et al. (1997)).

分含量であった (1-way ANOVA, Scheffe's test, $p < 0.05$).

2 多毛類群集の変遷過程

構造パラメータの比較: 本研究であきらかにした 1995 年の結果を 1975 年, 1987 年の結果と比較した. 各調査年における多毛類群集の種数, 密度, 多様度指数について比較した結果 (Fig.6), 種数と密度は時間経過とともに減少する傾向があり, 1975 年と 1995 年で有意差が認められた (1-way ANOVA, Scheffe's test, $p < 0.05$). とくに密度の低下は著しく 1975 年では 1600.5 個体/ m^2 であったのが 1995 年には 384.3 個体/ m^2 と約 1/4 に減少している. 種多様度指数の H' と D には調査年間に有意差は認められなかった. しかし均等度 J' では 1975 年と他の調査年間に有意差が認められ (1-way ANOVA, Scheffe's

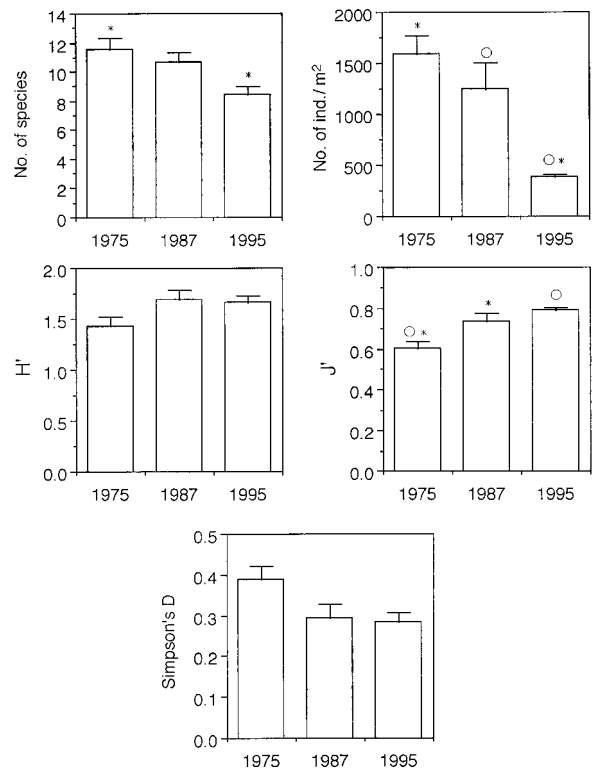


図6 各調査年毎の種数, 密度, 多様度指数 H', 均等度 J', 優占度 D 値. シンボル (*○) は調査年間の有意差 ($p < 0.05$) を示す. 値は平均値±標準誤差.

Fig. 6 The number of species, density, Shannon's index H', Pielou's J' and Simpson's D in each sampling time. Symbols (*○) indicate significant differences ($p < 0.05$) of each pair of time. Values are mean \pm SE.

test, $p < 0.05$), 1975 年と比較して 1995 年ではやや均等度が高くなっていました。

構造類似度の比較: 群集構造の類似性について検討した結果, クラスタ解析では各々の調査年は異なるサブクラスターを形成し, それぞれの調査年の群集構造は異なっていることが示唆された (Fig.7). また MDS による結果もそれぞれの調査年のプロットは相互にはほぼ重ならず位置しており, 類似度行列分析の結果, 各々の調査年は相互に有意に異なる群集構造を示していた (1-way ANOSIM, Global R=0.30, $p < 0.001$).

ここで, 各調査年の地点データをプールして, 1975 年の 5 月, 8 月および 1976 年 5 月の結果を加えて構造類似性の解析をおこなったのが Fig.8 であ

る. この結果, 1975・76 年調査は 1975 年 5 月がやや離れたプロットになるが, 1987 年, 1995 年の位置から比較して相互にまとまっており, 1975・76 年の調査期間中の群集構造変化, すなわち季節的变化は調査年間の変化よりも小さいことが示唆された。

種構成の比較: 20 年間の各調査時期で群集構造が変化してきたことが示されたが, そのような構造変化がどの群集構成種の変化によってもたらされたのかを類似度百分率分析で検討した. 各調査年における優占種構成と優占度, 平均密度を Table 3 に示した. 調査年間の群集構造の平均非類似度は, 1975 年・1987 年の間で 71.93, 1987 年・1995 年の間で 70.13, そして 1975 年と 1995 年の間では 75.77 で, 1975 年と 1995 年の間でもっとも大きかった。

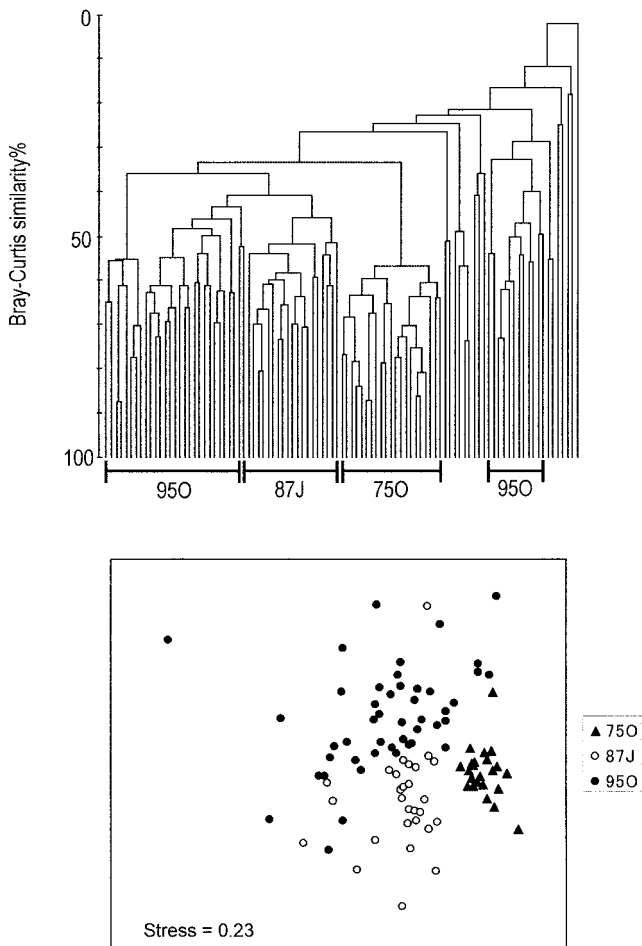


図 7 各調査年の群集構造のクラスター解析と MDS の結果. データは 1975 年 10 月 (75 O), 1987 年 7 月 (87 J), 1995 年 10 月 (95 O).

Fig. 7 Results of cluster analysis and MDS ordination for each sampling time. Data are October 1975 (75 O), July 1987 (87 J) and October 1995 (95 O).

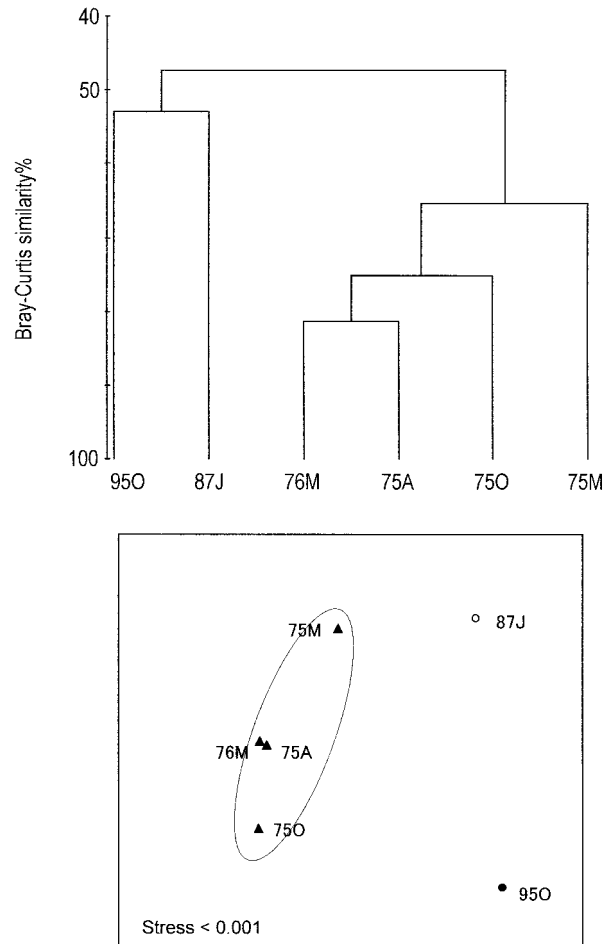


図 8 各調査年の群集構造のクラスター解析と MDS の結果. 1975・76 年データは調査月毎にまとめて解析した。

Fig. 8 Results of cluster analysis and MDS ordination for each sampling time. Data are summarized monthly in 1975-76.

表3 各調査年の優占種. RA%:相対優占度, mean:個体数/m²,SE:1標準誤差.Table 3 The top 10 dominant species of each sampling time in Saroma Lagoon. RA %: relative abundance of species, mean: ind./m², SE: 1 standard error of mean.

1975	RA%	mean	SE	1987	RA%	mean	SE	1995	RA%	mean	SE
<i>Lumbrineris longifolia</i>	45.20	723.61	169.30	<i>Sabellides</i> sp.	20.44	246.20	240.50	<i>Maldane cristata</i>	14.47	48.54	11.63
<i>Dodecaceria concharum</i>	14.22	227.63	64.73	<i>Lumbrineris longifolia</i>	15.63	188.20	39.53	<i>Lumbrineris longifolia</i>	12.57	42.18	9.00
<i>Sigambra tentaculata</i>	7.36	117.81	23.43	<i>Maldane cristata</i>	9.50	114.40	43.88	<i>Scalibregma inflatum</i>	9.05	30.36	10.25
<i>Dorvillea japonica</i>	7.22	115.60	28.54	<i>Ampharete</i> spp.	9.16	110.20	85.96	<i>Glycinde</i> sp.	7.26	24.36	5.60
<i>Notomastus</i> sp.	5.14	82.36	19.79	<i>Dorvillea japonica</i>	7.67	92.40	64.36	<i>Dorvillea</i> sp.	6.93	23.27	9.28
<i>Paraprionospio pinnata</i>	4.15	66.47	22.05	<i>Capitella capitata</i>	3.83	46.20	40.57	<i>Laonice cirrata</i>	6.72	22.54	4.19
<i>Scalibregma inflatum</i>	2.53	40.63	20.85	<i>Laonice cirrata</i>	3.55	42.60	10.26	<i>Cirriformia tentaculata</i>	6.66	22.36	7.59
<i>Maldane cristata</i>	2.30	36.89	11.62	<i>Notomastus</i> sp.	3.55	42.60	11.85	<i>Heteromastus</i> sp.	6.61	22.18	3.87
<i>Scoloplos</i> spp.	2.30	36.89	9.81	<i>Glycinde</i> sp.	3.43	41.20	6.31	<i>Pista</i> sp.	3.63	12.18	3.90
<i>Goniada maculata</i>	2.23	35.78	6.65	<i>Sigambra tentaculata</i>	3.37	40.60	9.87	<i>Harmothoe imbricata</i>	2.60	8.72	2.89

1975年と1995年を比較した場合, 両時期の群集構造の非類似性にもっとも寄与していた上位5種は, ミズヒキゴカイ科の *Dodecaceria concharum*, ギボシイソメ科の *Lumbrineris longifolia*, カギゴカイ科の *Sigambra tentaculata*, ニカイチロリ科の *Goniada maculata*, コイソメ科の *Dorvillea japonica* で, これら5種の非類似性への累積寄与率は33.57であった.

各調査年間の優占種構成の変化をみると (Table 3), 1975年で最優占種であった *Lumbrineris longifolia* は優占順位ではほぼ変わらないものの, 優占度・密度が低下していた. また *Sigambra tentaculata* も同様に密度が低下していた. これに対して *Maldane cristata* は密度が1987年で高かったものの優占度では徐々に増加し, 1995年では最優占種となっていた.

摂餌様式の構成と変化: 群集構成種の摂餌様式を砂泥底における餌資源の利用方法からまとめ, その構成比の時間変化を検討した (Fig.9). その結果, 表層下堆積物食者は1975年以後減少し, 深表層下堆積物食者は時間経過とともに増加したことが認められた. 表層堆積物食者は1987年に密度が高いものの1995年では減少していた. 1995年ではやや肉食性種が増えたものの雑食者や懸濁物食者, 条件的表層懸濁物・堆積物食者の割合に大きな変化は認められなかった.

考 察

沿岸浅海域での富栄養化・有機汚染の進行にともない堆積物および底層水の物理・化学的性状は変化していく. 増大する沈降有機物の分解は堆積物中の溶存酸素の欠乏と硫化物の生成を促進し, さらにはこうした還元的堆積物に接する底層水の貧酸素化

と, 水中への硫化物とくに硫化水素の溶出によって, 堆積物を生息場所や餌資源として利用するベントス群集へ攪乱要因かつ強いストレスとして作用するようになる. 一般に強度の攪乱と環境ストレスにさらされている生物群集の構造特性は, 種多様性の低下と特定種群の優占度増加, 総個体数密度や生物の体サイズの減少, 'r-戦略者'の増加などの傾向を示すといわれている (Odum, 1985; Hall, 1994).

このような富栄養化・有機汚染の進行にともなう軟泥底ベントス群集の変化・遷移過程についても多くの研究がなされてきており (e.g. 堤・井上, 1996; Karakassis et al., 1999), (1) 多毛類の増加, 甲殻類

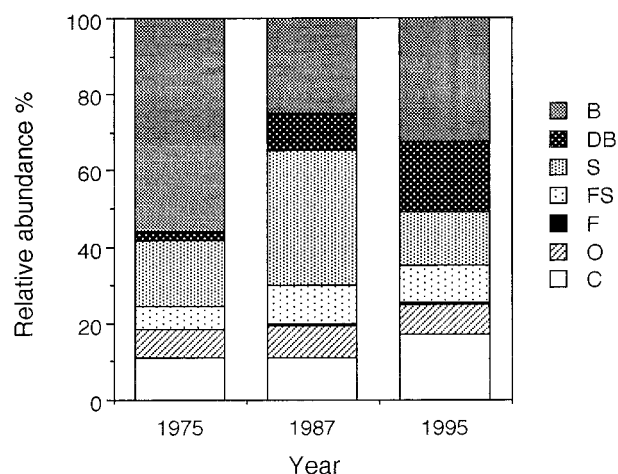


図9 サロマ湖の多毛類群集における摂餌様式組成の時間変化. B: 表層下堆積物食者, DB: 深表層下堆積物食者, S: 表層堆積物食者, FS: 条件的表層懸濁物・堆積物食者, F: 懸濁物食者, O: 雑食者, C: 肉食者.

Fig. 9 Temporal changes in feeding mode composition of the polychaete community in Saroma Lagoon. B: subsurface detritivores, DB: deep subsurface detritivores, S: surface detritivores, FS: facultative surface suspensivores/detritivores, F: suspensivores, O: omnivores, C: carnivores.

と棘皮動物の減少・消滅, (2) 種数の減少, 多様度の低下, (3) 大型長命種の減少, 小型短命種の増加, (4) 汚染指標種の相対優占度の増加, (5) 底層水の貧酸素化にともなう無生物域の出現, という一般的傾向が指摘されている(北森, 1975; 菊池, 1975・1982; Pearson & Rosenberg, 1978; 玉井, 1990). これらの傾向は強度の攪乱と環境ストレスにさらされている生物群集一般の構造特性に一致する. 多毛類はこうした有機汚染が進行した環境条件においても優占し, 他のベントスの生息が認められないような状態でも特定種の生息が認められることから, その群集構造特性の検討は有機汚染の進行状況を考察する上で有用な情報を提供すると考えられる.

サロマ湖の多毛類群集の優占種群は他の内湾ホタテ漁場と非常に類似しており(陸奥湾, 中尾ほか, 1989; 高橋ほか, 1991; 噴火湾, 中尾, 1997; 三陸内湾群, 中尾ほか, 投稿準備中), これらの漁場に共通する群集型であると考えられる. とくにギボシイソメ科の *Lumbrineris longifolia*, ホソタケフシ *Maldane cristata*, トノサマゴカイ *Scalibregma inflatum* は日本列島の内湾ホタテ漁場で優占度が高い種群である. また, *Lumbrineris longifolia*, *Maldane cristata* や *Cirriformia tentaculata*, *Dorvillea* sp., *Heteromastus* sp. は有機汚染にともなって増加する種群として, また日本列島の内湾における指標種として指摘されている(Pearson & Rosenberg, 1978; 菊池, 1982). 一方, 有機汚染が極度に進行した沿岸浅海域で優占する多毛類, すなわち汚染指標種としては, イトゴカイ科の *Capitella capitata*, スピオ科の *Paraprionospio pinnata* (A 型) などが指摘されているが(菊池, 1982), 1975 年・1987 年のサロマ湖調査では確認されているものの, 1995 年 10 月においては両種とも生息が確認できなかった.

1995 年 10 月のサロマ湖の多毛類群集は 3 つの群集型を示し(Fig.3), 湖底の大部分は構造多様度の高い A2, B 型の群集型が分布していた(Fig.4). 両タイプは種構成に違いがあるものの, 種数・密度・生物量などの構造類似性は高く(Table 2), また底質の泥分含量の差異によく対応しており(Fig.5), A2 型が砂泥質底, B 型が砂質底に対応した群集型となっていた. 構造多様度が低く密度・生物量ともに小さい A1 型は, 芭露川河口域, 東部湖盆と無生物域周辺に分布し, 泥分含量や有機物量で他の 2 タイプとは異なる底質に対応していた. もっとも分布域が広く *Maldane cristata* と *Lumbrineris longifolia* が優占する A2 型は, 他の内湾ホタテガイ漁場でも

優占する群集型であり(中尾ほか, 1989; 中尾, 1997), 対応する底質環境も類似性が高い. したがって種組成と汚染指標種の優占度, および群集型パターンからは, サロマ湖の湖底環境は他の内湾ホタテガイ漁場と類似した群集構造を示し, 極度の有機汚染の進行を指標する状態にはなっていないと考えられる.

一方, 1975 年から 1995 年にかけて, サロマ湖の多毛類群集の構造が変化してきたことがあきらかになった. 種数・総個体数密度は減少し(Fig.6), 優占種構成は変化した(Table 3). 群集構造は長期的傾向を持つ変化と一年の季節的な環境変動に対応した周期的変化を示す. したがって, 群集構造における長期的傾向をもつ変化パターンの検出には季節的な変動パターンを考慮して, 時系列データにもとづく解析が必要である. 本研究で用いたデータは 1987 年・1995 年データが一季節に限定したものであるが, 1975・76 年の周年データと比較して明確に異なることが示されたことから(Figs.7,8), これらの構造変化は長期的傾向を反映したものと考えられる.

優占種構成の変化で顕著なのは *Lumbrineris longifolia* の密度・優占度の低下と *Maldane cristata* の相対的な優占度の増加である. *Maldane cristata* の密度は 1975 年と 1995 年の比較では大きな変化が認められないが, *Lumbrineris longifolia* の個体群密度は 1975 年から 1995 年にかけて約 1/15 に低下した. また, 類似度百分率分析の結果からは, ミズヒキゴカイ科の *Dodecaceria concharum*, カギゴカイ科の *Sigambra tentaculata* なども群集構造類似度の変化に寄与した種群であることが示された.

このような優占種構成と密度の変化について, 高橋ほか(1991)は陸奥湾における多毛類群集の 10 年間の経時調査から, 密度の年変動の大きさと最優占種の交替現象を指摘し, この要因として種間相互作用, とくに競争的排除作用の可能性を指摘している. 本研究であきらかになった優占種構成の変化も同様の可能性を否定できない. しかしながら, タケフシゴカイ科とギボシイソメ科多毛類の種間関係には, タケフシゴカイ科多毛類による易分解性有機物を豊富に含む表層堆積物の表層下への輸送行動が, ギボシイソメ科多毛類を含む他の表層下堆積物食者に餌資源を供給し, gardening 仮説(Hylleberg, 1975)を支持しているとの指摘もある(Levin et al., 1997). また, Holte (2001) はタケフシゴカイ科多毛類の生物攪拌による堆積物の再懸濁化や堆積物表層への糞粒の堆積による微生物密度の増加が表層堆積

物食者に正の効果と及ぼす一方、高密度の棲管形成と堆積物攪拌作用などで表層下堆積物食者には負の効果と及ぼすとしている。しかし、サロマ湖の多毛類群集構成種の摂餌様式組成 (Fig.9) からはこのような機能群間との関係を推測できるような明瞭な傾向は見出せなかった。密度と優占種構成の変化における生物間相互作用の解明にはさらなる研究が必要であると思われる。

サロマ湖でのホタテ垂下養殖が本格化したのは1965年以後で、中川 (1977) が調査をおこなった1975年はサロマ湖でのホタテ垂下養殖生産がそれまでの10年間で飛躍的に増大した時期にあたる。1975年以後、ホタテ生産量は1980年まで7000-9000トン/年を推移したが、その後、大量斃死現象が起り生産量が低下、1985年から再び回復した。この間、1978年12月に第2湖口が人工開削されている。北海道開発庁 (1988 a, b) が実施した1987年調査はそれらのイベント後にあたる。

サロマ湖でコア試料を分析した菊池ほか (1984) は、1929年の第1湖口開削後の堆積速度増加と、1965年以後1982年までの有機物量の増加傾向をあきらかにし、1965年以後の堆積有機物の増加は増大したホタテ垂下養殖量と関係することを指摘している。ついで1988年に表層堆積物を分析した西浜・干川 (1992) は、1965年の大島ほか (1965) によるサロマ湖底質の調査結果と比較して、砂質で有機炭素含有率が低い底質が拡大していることを指摘し、この現象は、第1・第2湖口の開削後の影響によりサロマ湖内の潮流と堆積環境の変化が続いていると考えられることから、シルト・粘土質粒子と有機沈積物が湖外や湖内深底部に移送・再集積されているためと考察している。

一方、1965年以降のサロマ湖の底質環境を検討した中尾・園田 (2000) は、1978年の第二湖口の開削以後に湖底有機物量は減少したが、近年再び増加する傾向にあり、また硫化物を多く含む還元的底質の分布が拡大傾向にあることをあきらかにしている。サロマ湖では1974年以後赤潮の発生が確認され、また夏期には水深15m以深での貧酸素化が確認されている (西浜, 1994)。しかし近年は水質の富栄養化傾向が明確になり、また貧酸素水塊の形成が深部のみならず沿岸域でもみられることが報告されている (サロマ湖養殖漁業共同組合, 1999)。

群集構造の変化における生物的要因の重要性はいうまでもないが、総個体密度の顕著な低下は (Fig.6)、群集構成種の個体群密度の年変動が大き

いことに起因するものと判断するにはなお検討が必要であると考えられる。過去20年間のサロマ湖における底質と水質の変化傾向を考慮すると、1995年の群集構造と無生物域の存在はサロマ湖の富栄養化現象を反映し、顕著な密度低下は貧酸素水塊の発生頻度と形成スケールの増大に影響を受けた可能性が考えられる (Diaz & Rosenberg, 1995)。サロマ湖の垂下養殖ホタテガイの排泄量は春から夏にかけて増加し、10月下旬にピークに達した後減少することがあきらかにされている (蔵田ほか, 1991)。養殖生物の排泄物に由来する沈降有機物量もこのような変動を示し、夏から秋にかけて生物の酸素要求量が増大する時期に底層水の貧酸素化を導いてきたと考えられる。近年はサロマ湖と同様なホタテガイ垂下養殖の発展過程をもつ噴火湾でも底層水の貧酸素化現象が確認されるようになり、ホタテガイ養殖との関係が検討されている (中尾・園田, 2000)。

二枚貝垂下養殖漁場における貧酸素水塊の形成と赤潮の発生、底質中の硫化物の増加はすべて漁場老化現象の兆候である。このような兆候を把握するための養殖漁場の環境基準についてはすでに水質や底質から基準値が定められているが、近年はベントスによる指標性とその有機物分解作用を考慮に入れた基準も検討されている (横山, 2000)。この問題の基本点は養殖生物による底質への有機物負荷と底層生物による分解の平衡維持という観点であり、これを指標する生物学的・化学的特性のより正確で簡潔な把握が重要になる。今後、サロマ湖の多毛類群集構造から推測された環境変化をさらに検討し、持続的な養殖生産をはかる漁場環境を保全していく上では、多毛類をはじめとするベントス群集と底層環境のモニタリング調査、ならびに両者の関係を解明する研究の継続が極めて重要であると考えられる。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費総合研究A (課題番号07309009) 「海跡湖堆積物からみた汽水域の環境変化」 (研究代表者・高安克己) の調査の一環としておこなわれました。現地調査では「汽水域総研」メンバーの方々ならびにサロマ湖養殖組合の藤芳義裕氏に大変お世話になりました。特に採集とサンプル処理には島根大学理学部の丹後雅憲氏、立見博俊氏、梅木信宏氏にご協力いただきました。また、本研究について北海道大学大学院水産科学研究科多様性生物学講座 (ベントスグループ) の皆さんには非

常に有意義なご意見をいただきました。記して以上の皆様に心から感謝いたします。

引用文献

- 荒川好満・楠木豊・神垣正昭(1971) カキ養殖場における生物源堆積現象 (Biodeposit) の研究 (1) 養殖適正密度について. *Venus*, 30: 113-128.
- Clarke, K. R. (1993) Non-parametric multivariate analysis of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18: 117-143.
- Clarke, K. R. and Green, R. H. (1988) Statistical design and analysis for 'biological effects' study. *Marine Ecology Progress Series*, 46: 213-226.
- Clarke, K. R. and Ainsworth, M. (1993) A method of linking multivariate community structure to environmental variables. *Marine Ecology Progress Series*, 92: 205-219.
- Clarke, K. R. and Warwick, R. M. (1994) Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. Plymouth Marine Laboratory, Plymouth, 144 pp.
- Collie, J. S., Hall, S. J., Kaiser, M. J. and Poiner, I. R. (2000) A quantitative analysis of fishing impacts on shelf-sea benthos. *Journal of Animal Ecology*, 69: 785-798.
- Dayton, P. K., Thrush, S. F., Agardy, T. M. and Hofman, R. J. (1995) Environmental effects of fishing. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 5: 205-232.
- Diaz, R. J. and Rosenberg, R. (1995) Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 33: 245-303.
- Eleftheriou, A. (2000) Marine benthos dynamics: environmental and fisheries impacts: introduction and overview. *ICES Journal of Marine Science*, 57: 1299-1302.
- Fauchald, K. and Jumars, P. A. (1979) The diet of worms: A study of polychaete feeding guilds. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 17: 193-284.
- Hall, S. J. (1994) Physical disturbance and marine benthic communities: life in unconsolidated sediments. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 32: 179-239.
- 北海道開発庁 (1988 a) サロマ湖の水質・底質環境. 寒冷地圏域の海跡湖における環境保全に関する研究, 昭和 62 年度研究成果報告書, 北海道開発局土木試験所第 1 研究部水産土木研究室, pp.52-76.
- 北海道開発庁 (1988 b) サロマ湖の生物環境. 寒冷地圏域の海跡湖における環境保全に関する研究, 昭和 62 年度研究成果報告書, 北海道開発局土木試験所第 1 研究部水産土木研究室, pp.77-82.
- Holte, B. (2001) Possible ecological effects from Maldanid (Annelida, Polychaeta) "super-dominance" in a small north Norwegian sill system. *Ophelia*, 55: 69-75.
- Hylleberg, J. (1975) Selective feeding by *Arenicola pacifica* with notes on *Abarenicola vagabunda* and a concept of gardening in lugworms. *Ophelia*, 14: 113-137.
- Ito, S. and Imai, T. (1955) Ecology of oyster bed I. On the decline of productivity due to repeated cultures. *Tohoku J. Agc. Res.*, 5: 9-26.
- Jennings, S. & Kaiser, M. J. (1998) The effects of fishing on marine ecosystems. *Advances in Marine Biology*, 34: 201-352.
- Karakassis, I., Hatziyami, E., Tzapakis, M. and Plaiti, W. (1999) Benthic recovery following cessation of fish farming: a series of successes and catastrophes. *Marine Ecology Progress Series*, 184: 205-218.
- 菊池和夫・野沢靖・松本英二 (1984) 堆積物からみたサロマ湖の環境変化について. 北水試報, 26: 11-24.
- 菊池泰二 (1975) 環境指標としての底生動物 (2) 群集組成を中心に. 日本生態学会環境問題専門委員会 (編), 環境と生物指標 2 (水界編), 共立出版, 東京, pp. 255-264.
- 菊池泰二 (1982) 海域における富栄養化と底棲生物の指標性. 日本水産学会 (編), 沿岸海域の富栄養化と生物指標, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 84-100.
- 北森良之介 (1975) 環境指標としての底生動物 (2) 指標生物を中心に. 日本生態学会環境問題専門委員会 (編), 環境と生物指標 2 (水界編), 共立出版, 東京, pp. 265-273.
- 蔵田護・干川裕・西浜雄二 (1991) サロマ湖における垂下養成ホタテガイの摂餌量. 北水試研報, 37: 37-57.
- Levin, L., Blair, N., DeMaster, D., Plaia, G., Fornes, W.,

- Martin, C. and Thomas, C. (1997) Rapid subduction of organic matter by maldanid polychaetes on the North Carolina slope. *Journal of Marine Research*, 55: 595-611.
- 松宮義晴 (1998) 水産資源の保全へ向けての新たな展開. 月刊海洋, 30: 183-188.
- 森勝義 (1999) カキ養殖場の自家汚染の現状と対策 (総説). 水産増殖, 47: 173-180.
- 中川義彦 (1977) 漁業開発振興調査 ホタテガイ養殖許容量調査 1. 底質・大型底生動物調査. 昭和51年度北海道立網走水産試験場事業報告書, 北海道立網走水産試験場, pp.119-151.
- Nakao, S. (1982) Community structures of the macrobenthos in the shallow waters in northern Japan. *Memoirs of the Faculty of Fisheries, Hokkaido University*, 28: 225-304.
- 中尾繁 (1983) 多毛類の種多様度と底質環境. ベントス研究会誌, 24: 54-59.
- 中尾繁 (1997) 噴火湾八雲町沿岸域におけるマクロベントスの群集構造と底質環境. 水産学術研究・改良補助事業報告, 平成8年度, 北水協会, pp. 27-37.
- 中尾繁・五嶋聖治・野村浩貴・山口宏史・吉武誠司 (1989) 陸奥湾の軟泥底マクロベントス群集と底質との関係. 北大水産彙報, 40: 159-168.
- 中尾 繁・園田 武 (2000) ホタテガイ養殖漁場および周辺水域の海底環境 全国漁業協同組合連合会報告書, 19 pp.
- Naylor, R. L., Goldberg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H. and Troell, M. (2000) Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405: 1017-1024.
- 西浜雄二 (1994) オホーツクのホタテ漁業 北海道大学図書刊行会, 札幌, 218 pp.
- 西浜雄二・干川裕 (1992) サロマ湖における底泥の粒度組成と有機炭素含有率の分布. 北水試研報, 39: 1-9.
- 農林水産省統計情報部 (2000) 第75次農林水産省統計表 平成10~11年, 農林統計協会, 613 pp.
- 小疇 尚・福田正己・石城謙吉・酒井 昭・佐久間敏雄・菊池勝弘 (編) (1994) オホーツク海沿岸の湖沼群. 日本の自然地域編1, 北海道, 岩波書店, 東京, pp.70-72.
- Odum, E. P. (1985) Trends expected in stressed ecosystems. *Bioscience*, 35: 419-422.
- Omori, K., Hirano, T. and Takeoka, H. (1994) The limitations to organic loading on a bottom of a coastal ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 28: 73-80.
- 大島和雄・渡辺浩・佐竹俊孝・塩沢孝之・小原昭雄・丸邦義 (1965) 北海道サロマ湖の生態学的研究: 形成史と底質について. 北水試報, 6: 1-32.
- Pearson, T. H. and Rosenberg, R. (1978) Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 16: 229-311.
- Pocklington, P. and Wells, P. G. (1992) Polychaetes: Key taxa for marine environmental quality monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 24: 593-598.
- Reish, D. J. (1979) Bristle worms (Annelida: Polychaeta). In, *Pollution ecology of estuarine invertebrates*, Hart Jr, C. W. and S. L. H. Fuller (eds), Academic Press, 406 pp.
- 三瓶良和・倉門由希子・清水紋・高安克己・石田聖 (1997) サロマ湖・網走湖底質の有機炭素・窒素・イオウ濃度. *Research in Organic Geochemistry*, 12: 51-60.
- サロマ湖養殖漁業協同組合 (1999) サロマ湖における環境保全対策: 水質・底質環境調査解析資料. 10 pp.
- 代田昭彦 (1990) 養魚場の汚染と被害の現状. 渡辺競 (編), 海面養殖と養魚場環境, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 11-27.
- 高橋豊美・河村卓・藤岡崇 (1991) 陸奥湾における夏季のマクロベントスの密度と群集型の経年変動. 日本ベントス学会誌, 41: 15-27.
- 玉井恭一 (1990) 底生生物. 渡辺競 (編), 海面養殖と養魚場環境, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 69-78.
- 堤裕昭・井上貴子 (1996) 約20年間にわたる魚類養殖漁業による大量の有機物が堆積した内湾域の海底環境と底生生物群集の特徴. 日本ベントス学会誌, 50: 39-49.
- Wu, R. S. S. (1995) The environmental impact of marine fish culture: towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31: 159-166.
- 横山寿 (2000) 海面魚類養殖漁場の環境基準—その施策と問題点—. 養殖研究所研究報告, 29: 123-134.