海面埋立地内水面の水質環境とプランクトン組成の変動

山田真知子, 花田喜文, 末田新太郎, 鶴田新生, 吉田陽一

(1989年10月16日受付)

Change of Water Quality and Composition of Plankton in the Pond of Reclaimed Site

Machiko Yamada,*¹ Yoshifumi Hanada,*¹ Shintaro Sueta,*¹
Arao Tsuruta,*² and Yoichi Yoshida*³

In order to obtain some fundamental data for maintenance of the coastal reclaimed site for disposal of various solid wastes, change of plankton population were investigated in relation to the change of water quality in a reclaimed site pond formed along the coastal line of Kitakyushu City, Japan. The pond water became rapidly brackish and polluted during seven years needed for the completion of the reclamation by disposing of the solid wastes.

The water quality in this pond was arranged in five clusters by use of one numerical classification method, agglomerative cluster analysis, which employs four water factors: pH, chlorinity, suspended solids, and COD on four seasons: February in winter, May in spring, August in summer, and November in autumn.

The occurrence pattern of dominant phytoplankton and five clusters of water quality were compared; it was found that the alternation between marine plankton and brackish-water plankton was observed around 10‰ in chlorinity, and fresh-water plankton began to appear below 5‰ in chlorinity. The marine plankton's highest COD value was 17 mg/l, and fresh- and brackish water forms were able to occur as high as 40 mg/l in COD. One species of a phototrophic bacterium was observed in one cluster which had abnormal conditions of 160 mg/l in COD and 11.2 in pH.

These results revealed that there was an intimate relation between the characteristic occurrence of plankton and water quality in each of the five clusters. The appearance of planktonic biota and the variation of water quality were affected by the climatic conditions, such as rises of temperature and copious rainfall.

北九州市響灘側沿岸部に設立された廃棄物投棄用埋立地内水面では約7年にわたる埋め立ての間、細菌および植物プランクトンの各種が遷移しながら多量に出現した。これらの生物群は本内水面で酸化池的機能を不十分ながら果たしていたことが推察された。¹⁾ また、プランクトンが内水面の水質を示すバイオメーターとして利用できる可能性のあることも示唆された。¹⁾

一方、本内水面においては投棄される各種廃棄物から海水中にCOD成分や窒素、リンなどが溶出することが確かめられており、それらの溶出抑制実験なども試みられている。^{2,3)} そこで、本報では今後増加の予想される海

面埋立地⁴⁾の維持管理のための基礎資料を得ることを目的として、本内水面について、プランクトン調査と、同時に実施された理化学的水質調査結果を検討するとともに、プランクトンと水質環境との関連についても検討した。

調査方法

埋立地の概要およびプランクトン調査の方法は前報¹⁾で述べたとおりである。

水質の理化学的測定は、プランクトン調査と同じ調査地点の午前9時から10時の間に採取した表層水(20

*¹ 北九州市環境衛生研究所 (Kitakyushu Municipal Institute of Environmental Health Sciences, Kitakyushu 804, Japan).

*² 水産大学校増殖学科 (Department of Aquaculture and Biology, Shimonoseki University of Fisheries, Shimonoseki 759-65, Japan).

*³ 京都大学大学院農学研究科熱帯農学専攻 (Division of Tropical Agriculture, Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto 606, Japan).

Fig. 1a. Variation of pH, chlorinity (Cl^-), suspended solids (SS), and COD during coastal reclamation.
Bar line, estimated with extrapolation.

cm 以浅) について, 1980 年 4 月から測定項目によっては 1 年あるいは 3 年遅れて測定を開始し, 1987 年 1 月まで毎月 1 回実施した。水温, pH および COD は JIS K0102⁶⁾, 浮遊物質 (プランクトンを含む) および総窒素量は環境庁告示第 59 号⁷⁾, アンモニア態窒素および塩素量は下水道試験法⁷⁾ によって行った。このうち, 塩素量は 1981 年 4 月から測定をはじめたので, データの不足した 1980 年 4 月から 1981 年 3 月の値はそれ以後の約 6 年間にわたる測定結果を用い, 理論的傾向線の式を算出して外挿して求めた⁸⁾。また, 総窒素量とアンモニア態窒素の 2 項目は他の測定項目とはことなり, 1984 年から年に 4 回ないし 5 回随時測定したが, アンモニア態窒素は 1986 年以降, 測定を実施しなかった。なお, 1983 年 4 月から 1984 年 3 月にわたる一年間, 表層水と底から 1 m 上の底層水の 2 試料についてプランクトンの出現状況を比較検討した結果, 成層期と呼ばれる季節を含めて両者に明瞭な差異が認められなかったので, 今回の検討には表層水で得られた結果を用いることとした。

水質のクラスター分析⁹⁾は pH, 塩素量, 浮遊物質, および COD の 4 項目を用いて, 2 月, 5 月, 8 月, および 11 月の各月の非類似度を標準化ユークリッド平方距離であらわして, さらに非類似度の小さいものから順次階段状につないでもとめた。

Fig. 1b. Variation of total nitrogen (—●—) and ammonia nitrogen (—▲—) during coastal reclamation.

結 果

各水質測定項目の推移 約 7 年間にわたる調査の間, 水温は 6.9 から 28.9°C の間を変動した。Fig. 1a に示すように, pH は 7.3 から 11.2 の間を変動したが, 埋め立ての進行とともに低下の傾向がみられた。塩素量は, 海面を仕切った当初は周辺海水の塩素量 18.4 から 19.1 ‰¹⁰⁾ と類似した値であったことが推定される。水質測定をはじめた 1981 年 4 月には, 海面を仕切ってわずか 1 年半しか経過していなかったが, すでに 11.8‰ まで低下しており, その後漸次減少し, 最低値は 0.5‰ であった。COD は, はじめ 2 mg/l 前後であったものが埋め立

Fig. 2. Dendrogram resulting from linkage of unsimilarity matrices with standardized squared Euclidean distance among 27 samples with four water factors such as pH, chlorinity, suspended solids, and COD during coastal reclamation.

での進行とともに徐々に増加していき、1985年12月には35 mg/l となり 1986年2月には一時160 mg/l まで急上昇し、その後低下して15 から45 mg/l であった。浮遊物質は2 から57 mg/l で、各月毎に大きく変動していた。総窒素量も埋め立ての進行とともに漸次増加する傾向が認められ、最大値は23.5 mg/l であった。このうち、アンモニア態窒素の占める割合も年々増加してゆき1985年11月には総窒素量の91% を占めた (Fig. 1b)。

水質のクラスター分析 pH、塩素量、浮遊物質、およびCODの4項目(試料数不足のため総窒素量およびアンモニア態窒素量は除いた)を用いてクラスター分析を行った (Fig. 2)。この図から、水質は大きく5つのクラスターに区分された。

各々のクラスターの推移状況を Table 1 に示す。第 I クラスターは、途中で第 II クラスターをはさんで1982年までで、Fig. 3 に示すように pH は8.7 から9.1、塩素量は10.2 から16.4‰、浮遊物質は4 から14 mg/l、COD は3.3 から11.2 mg/l であった。第 II クラスターは第 I クラスターにはさまれた1981年の5月と8月、および第 I クラスター終了後の1982年5月と短い期間であった。このクラスターの pH は8.9 から9.5 と高く、浮遊物質は平均42 mg/l と著しく高く、塩素量は第

Table 1. Change of clusters of water quality during coastal reclamation

Date	Cluster				
	I	II	III	IV	V
1980 May	●				
August	●				
November	●				
1981 February	●				
May	●	●			
August	●	●			
November	●				
1982 February	●				
May		●			
August			●		
November			●		
1983 February			●		
May			●		
August			●		
November			●		
1984 February			●		
May			●		
August				●	
November				●	
1985 February				●	
May				●	
August				●	
November				●	
1986 February					●
May				●	
August				●	
November				●

Fig. 3. The range of pH, chlorinity (Cl^-), suspended solids (SS), and COD in each cluster.
Bar: Each bar shows the mean value.

Table 2a. Enumeration of dominant bacteria and phytoplankton in each occurrence type obtained from clusters of water quality in the coastal reclamation pond

Occurrence type*	Bacteria and phytoplankton	Occurrence type*	Bacteria and phytoplankton
1	<i>Ceratium furca</i> <i>Gymnodinium nagasakiense</i> <i>Gymno. splendens</i> <i>Heterocapsa triquetra</i> <i>Noctiluca miliaris</i> <i>Pyrophacus steinii</i> <i>Scrippsiella trochoidea</i> <i>Asterionella glacialis</i> <i>Cerataulina bergonii</i> <i>Chaetoceros affine</i> <i>Chaeto. curvisetum</i> <i>Chaeto. debile</i> <i>Chaeto. decipiens</i> <i>Chaeto. didymum</i> <i>Chaeto. sociale</i> <i>Corethron pelagicum</i> <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> <i>Coscino. granii</i> <i>Guinardia flaccida</i> <i>Leptocylindrus danicus</i> <i>Rhizosolenia delicatula</i> <i>Rhizo. fragilissima</i> <i>Rhizo. imbricata</i> <i>Rhizo. setigera</i> <i>Rhizo. stolierfothii</i> <i>Streptotheca thamensis</i>	1-3	<i>Ebria tripartita</i>
		1-2-3-4	Fillamentous bacteria Cryptophyceae <i>Cyclotella</i> spp.
		3	<i>Coccochloris</i> sp. <i>Hemiselmis</i> sp. <i>Skeletonema</i> sp. 2 <i>Eutreptiella</i> sp. <i>Dispora</i> sp.
		3-4	<i>Pyramimonas</i> spp. <i>Oocystis</i> sp. <i>Chlamydomonas</i> sp.
		4	<i>Oscillatoria</i> spp. <i>Chroomonas</i> sp. <i>Cymbella</i> sp. <i>Gomphonema</i> spp. <i>Navicula</i> spp. <i>Nitzschia</i> spp. <i>Pinnularia</i> spp. <i>Euglena</i> sp. <i>Phacus tortus</i> <i>Chlorella</i> sp. 1 <i>Chlorella</i> sp. 2
1-2	<i>Prorocentrum</i> spp. <i>Cylindrotheca closterium</i> <i>Skeletonema costatum</i>		<i>Eudorina elegans</i> <i>Ourococcus</i> sp. <i>Pandorina morum</i> <i>Scenedesmus</i> spp.
2	<i>Chaetoceros orientale</i>		<i>Spondilomorum quaternarium</i> <i>Wastella</i> sp.
1-2-3	<i>Anabaena spiroides</i> var. <i>crassa</i> <i>Chaetoceros</i> sp. 1 <i>Chaetoceros</i> sp. 2 <i>Entomoneis</i> sp. <i>Skeletonema</i> sp. 1	4-5	<i>Thiocapsa roseopersicina</i>

* Occurrence type 1 indicates that appearance of plankton was found only within cluster I; occurrence type 1-2-3 means that plankton appearance extended over clusters I, II, and III.

Table 2b. Enumeration of dominant zooplankton in each occurrence type obtained from clusters of water quality in the coastal reclamation pond

Occurrence type*	Zooplankton	Occurrence type*	Zooplankton
1	<i>Tintinnopsis beroidea</i> <i>Tin. kofoidi</i> <i>Tin. radix</i> <i>Acartia</i> sp. <i>Euterpina actifrons</i> <i>Microsetella norvegica</i> <i>Oithona</i> sp. <i>Evadne</i> sp.	1-3	<i>Eurytemora</i> sp.
1-2	<i>Halteria</i> sp.	1-3-4	<i>Euplotes</i> spp.
1-2-3	<i>Mesodinium</i> spp.	3	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>
1-2-3-4	<i>Cyclidium</i> spp. <i>Strobilidium</i> spp. <i>Asplanchna</i> spp. <i>Brachionus plicatilis</i>	3-4	Cyclopoida <i>Sinocalanus tenellus</i> <i>Moina macropa</i>
1-2-4	<i>Didinium ballinani</i>	4	<i>Paramecium</i> sp. <i>Brachionus angularis</i> <i>Bra. calyciflorus</i> <i>Bra. rubens</i> <i>Daphnia longispina</i> <i>Daph. pulex</i> <i>Hexarthra mira</i> <i>Polyarthra trigla</i>

* Same as those in Table 2a.

I クラスターにはほぼ含まれる値で、一方 COD は 10.5 から 16.6 mg/l でこれは第 III クラスターに含まれる値であった。第 III クラスターは 1982 年 8 月から 1984 年 5 月までの約 2 年間で pH, 塩素量, および浮遊物質は第 II クラスターでの値より低くなる傾向がみとめられたが, COD のみは最高値が 25 mg/l と高くなっていた。第 IV クラスターは, 1986 年 2 月を除く 1984 年 8 月から 1986 年 11 月までの約 2 年間で, 塩素量は 0.9 から 5.0‰ と第 III クラスターでの場合より低下し, COD は 22 から 40 mg/l とさらに高くなっていた。第 V クラスターは 1986 年 2 月の 1 回のみで, pH 11.2, 塩素量 3.2‰, 浮遊物質 55 mg/l, COD 160 mg/l で塩素量以外は異常値を示していた。

水質のクラスター分析結果と細菌類やプランクトンの出現組成との関係 前報¹⁾で示したプランクトン優占種を本報の Table 1 と対比し, 得られた結果を Table 2a, 2b に示す。細菌類では, 糸状細菌類が第 V クラスターを除く 4 つのクラスターに出現し, 一方紅色イオウ細菌の *Thiocapsa roseopersicina* が第 IV と第 V クラスターに出現していた。

植物プランクトンでは, 沿岸, 内湾性と呼ばれる海産珪藻類と渦鞭毛藻類が第 I クラスターに出現し, このうち多くの珪藻類は 1 回目の第 I クラスター内で消滅した。一方, 渦鞭毛藻類の数種は 1 回目の第 II クラスターの終了時まで出現した。海産珪藻類の *Skeletonema costatum* は第 II クラスターにも出現したが, おもに 1 回

目と 2 回目の第 I クラスターに多量に出現した。渦鞭毛藻類の *Prorocentrum* 属と珪藻類の *Cylindrotheca closterium* の 2 種は第 I および第 II クラスターの両方に出現した。第 II クラスターにのみ出現したのは珪藻類の *Chaetoceros orientale* 1 種のみであった。2 回目の第 I, 第 II, および第 III クラスターの 3 つのクラスターに出現したのは藍藻類の *Anabaena spiroides* var. *crassa*, 珪藻類の *Chaetoceros* 属 2 種, *Entomoneis* sp.,²⁾ および *Skeletonema* 属 1 種で, *Chaetoceros* 属 2 種の消滅時は第 III クラスターの終了時と一致した。第 I および第 III クラスターに出現したのはエブリア藻類の *Ebria tripartita* のみであった。第 III クラスターにのみ出現したのは珪藻類の *Skeletonema* 属の 1 種, クリプト藻類の *Hemiselmis* sp. など 5 種で, このうち 2 種が第 III クラスターの終了時まで継続して出現した。第 III クラスターから第 IV クラスターにわたって出現したのはクリソ藻類の *Pyramimonas* 属や緑藻類の *Oocystis* sp. など, でこれらの出現開始時期は第 III クラスターの開始時と一致した。第 IV クラスターにのみ出現したのは, 緑藻類の *Ourococcus* sp. や *Chlorella* 属 2 種, および羽状珪藻類の多くの種類で, *Ourococcus* sp. などは出現開始時期が第 IV クラスター開始時と一致した。

以上のように埋立地内水面に出現した糸状細菌, 植物プランクトン 65 種 (属レベルでまとめたものも 1 種として数えている。また, 種名の同定できなかったクリプト藻類も 1 種とした) の水質クラスターに対する出現パ

ターンは若干複雑なものがあつた。しかしこれらのうち出現期間が1つのクラスターの中に入ってしまうものや、出現が2つ以上のクラスターにわたつたが出現の開始時期や消滅時期が各クラスターの変わり目に一致あるいは前後したものは51種におよんでいた。

動物プランクトンの場合、分類を属、科レベルでまとめたことも影響して出現期間が長く検討が困難であつたが、繊毛虫類のうち *Tintinnopsis* 属は第 I クラスターにのみ出現し、*Paramecium* sp. は第 IV クラスターにのみ出現した。輪虫類のシオミズツボムシ *Brachionus plicatilis* のみは、単一種でありながら、第 V クラスターをのぞく4つのクラスターのすべてに出現した。一方、本種と同じ属の淡水産種 *B. calyciflorus* など3種は、第 IV クラスターにのみ出現していた。

節足動物の橈脚類や枝角類においても *Acartia* sp., *Euterpina actifrons*, *Microsetella norvegica*, *Oithona* sp., および *Evadne* sp. などの海産種が第 I クラスターに出現した。汽水産種の *Eurytemora* sp. が第 I および第 III クラスターに、*Sinocalanus tenellus* が第 III および第 IV クラスターに出現し、*Daphnia longispina* や *Daph. pulex* などの淡水産ミジンコ類2種が第 IV クラスターのみに出現した。

考 察

当地の海面埋立地内水面は、廃棄物の投入によりわずか10年足らずのうちに急速に陸化した。そのため、本内水面の水質は塩素量が海水から淡水近くの値まで急激に低下し、また汚濁が著しく進行したという特殊性が認められた (Fig. 1)。

このように急激な変化をたどる水質も、pH、塩素量、浮遊物質、および COD の4つの理化学的水質測定値を用いてクラスター分析を行なえば、5つのクラスターに分類することができた (Table 2)。これらクラスターの塩素量や COD の値とそれぞれのクラスター内に出現したプランクトンの出現傾向を比較検討すると、*Skeletonema costatum* をはじめとする多くの海産種が活発に増殖し消滅した第 I クラスターと、一部の海産種のみが出現した第 II クラスターの塩素量の下限値はそれぞれ 10.2‰ と 9.7‰ であった。また、汽水産珪藻の *Chaetoceros orientale* が出現した第 II クラスターの8月の塩素量は 9.7‰ であった。一方、淡水産種の出現がみられた第 IV クラスターの塩素量の上限値は 5.0‰ であった。これらのことから、本内水面で海産種と汽水産種とが交代した塩素量は 10‰ で、5‰ 以下からは淡水産種の出現が可能であることが示唆された。伊藤¹¹⁾は、養鰻用の汽水池の動物プランクトン調査から、9‰ 以上は海産系、1 から 9‰ は汽水系、塩素量 1‰ 以下は淡水系

が卓越するとし、5‰ 以下には一部の淡水系も出現すると報告した。これらの結果は本埋立地内水面の植物プランクトンの出現パターンとよく一致している。しかし、養鰻用の汽水池では *Ceratium furca*, *Ceratium macroceros*, *Tintinnopsis radix*, *Favella ehrenbergii*, および *Oithona nana* など5種の海産種が塩素量 5‰ まで出現していた¹¹⁾が、本埋立地内水面では 10‰ までしか出現しなかったことが異なっている。

COD についてみれば、多くの海産種が出現できた第 I クラスターの上限値は約 10 mg/l であり、一部の海産種が出現できたのは第 II クラスターの上限値の 16.6 mg/l であった。吉田¹²⁾は海域の栄養階級区分で、海産植物プランクトンの出現が著しく減少する腐水域の COD は 10 mg/l からとしている。このことから本内水面での 10 から 17 mg/l という COD は海産種から汽水産種への交代に関与していたと推定される。汽水産および淡水産プランクトンは第 III および第 IV クラスターの COD が 20 から 40 mg/l のあいだでもよく増殖した。第 V クラスターの COD 160 mg/l の時は植物および動物プランクトンが全く観察されず、*Thiocapsa roseopersicina* などの細菌類を除きプランクトンの生育には適していなかったことが示唆された。なお、第 V クラスターの pH は 11.2 と他のクラスターと比べ高かったが、これはこの時植物プランクトンが観察されなかったことから、赤潮による pH の上昇ではなく、内水面へ投棄処分された廃棄物の影響によるものと考えられる。

本埋立地内水面において、単一種で第 I から第 IV クラスターの4つのクラスターに出現したのはシオミズツボムシ *Brachionus plicatilis* 1種のみであった。本種は調査を行った7年間にわたって出現したが、12月から3月の低水温期には出現が認められず、水温によって出現時期が規制された。しかし、塩素量に対する出現範囲は 0.5 から 15.4‰、COD では 4.5 から 40 mg/l、pH では 7.3 から 9.5 とこれらの3つの環境要因のかなり広い変化に耐えていた。

なお、福所¹³⁾によれば、我国の汽水域に出現するシオミズツボムシは高水温域のみに出現する S 型と低水温域にも出現する L 型の2型が存在する。また、塩素量に対しては 0.6 から 7.3‰ の範囲に出現し、培養種では塩素量 18‰ でも培養可能とされている。pH 変化に対しては適応範囲が広く、pH 5 から 10 で正常の増殖がみられ、好適範囲は pH 5 から 10 と報告されている。本埋立地内水面のシオミズツボムシは、S 型の出現傾向を示し、塩素量に対しては高濃度域での出現が可能で、pH に対しては正常増殖を行っていたものと考えられる。

しかし、シオミズツボムシを除く多くのプランクト

ン優占種は4つのクラスターにわたっての出現は認められず、1つのクラスター内で出現し消滅しているか、あるいは2, 3のクラスターにわたって出現した。2, 3のクラスターにわたって出現した場合は、出現の開始時期や消滅時期が各クラスターの変わり目に一致するものが多かった。これらのことから、理化学的水質要因からみた水質の数値分類群の推移とプランクトンの出現遷移パターンには関連のあることが示唆された。

水質の各クラスターの開始期は、分析に用いた2月、5月、8月、および11月の4つの月のうち、5月と8月に多かった (Fig. 3)。一方、植物プランクトン優占種の出現開始時期や消滅時期もこれらクラスターの変わり目の5月と8月に重なることが多かった。5月および8月は水温の上昇および降雨と関連が深いことから、気象現象と水質さらにはプランクトンの生理生態学的特性との間に関係のあることが推察される。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、藍藻類や緑藻類の同定を賜った京都大学梅崎 勇先生、珪藻類数種の同定と興味深いご助言を賜った日本大学の高野秀昭先生ならびに光合成細菌の同定と有益なご助言を賜った長崎大学松山通郎先生に感謝の意を表する。また、埋立地内水面のプランクトン試料と水質の測定結果を提供して下さった北九州市環境事業局施設課の職員の皆様に衷心より感謝する。この研究の実施について厚意あるご配慮いただいた同市環境衛生研究所の安田英一所長および城戸浩三主幹に深

謝する。

文 献

- 1) M. Yamada, Y. Hanada, A. Miyazaki, A. Tsuruta, and Y. Yoshida: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **56**, 00-00 (1990).
- 2) 内村 豊, 武富 真, 堀 悌二: 水処理技術, **29**, 109-114 (1988).
- 3) 内村 豊, 石川精一, 安田和彦: 水処理技術, **29**, 365-370 (1988).
- 4) 石田省三, 岡沢和好: 水, **387**, 16-23 (1986).
- 5) 日本工業調査審議: 工場排水試験法 JIS K 0102, 日本規格協会, 東京, 1971, pp. 1-169.
- 6) 環境庁環境法令委員会: 環境六法, 昭和 59 年版, 中央法規, 東京, 1984, pp. 558-606.
- 7) 日本下水道協会: 下水試験法 1974 年版, 日本下水道協会, 東京, 1977, pp. 119-131, 137-140.
- 8) 岸根卓郎: 理論応用統計学, 養賢堂, 東京, 1974, pp. 156-163.
- 9) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉澤 正: 多変量解析法, 日科技連, 東京, 1983, pp. 393-400.
- 10) 北九州市環境衛生研究所: 北九州市環境衛生研究所報 (昭和 54 年度), **7**, 42 (1980).
- 11) 伊藤 隆: *Rep. Fac. Fish. Mie Pref. Univ.*, **2**, 473-501 (1957).
- 12) 吉田陽一: 漁業環境アセスメント (吉田多摩夫編) 水産学シリーズ 48, 恒星社厚生閣, 東京, 1983, pp. 25-46.
- 13) 福所邦彦: シオミズツボウムシー生物学と大量培養 (日本水産学会編) 水産学シリーズ 44, 恒星社厚生閣, 東京, 1983, pp. 35-51.