〈論 文〉

藻類生産の潜在力 (AGP) 測定による 博多湾における富栄養化の評価

Evaluation of Eutrophication in Hakata Bay by Determination
of Algal Growth Potential (AGP)

吉 武 和 人* 西 田 政 司*
Kazuto YOSHITAKE Seiji NISHIDA

Abstract

An investigation was pursued on the eutrophication problem in Hakata Bay from June 1981 to April 1982. By the chemical analysis and the examination for Phytoplankton of the water samples collected from the surface and bottom of several stations, it was proved that eutrophication was remarkable in the eastern region of the bay.

The population density of phytoplankton revealed a range of 44 to 2,200 cells/ml in the western region, while the density frequently exceeded a level of 20,000 cells/ml in the central and eastern regions. Several species of diatoms and flagellates were found in the red tides developed in the bay during the investigation period.

In addition, Algal Growth Potential (AGP) was determined in the water samples by the use of *Skeletonema costatum* and *Olisthodiscus* sp., and the ratio of AGP to COD value in Hakata Bay was calculated. Thus, the range of 0.44 to 0.80 and 0.27 to 0.60 were obtained respectively by the former plankton and by the latter. In conclusion, the results obtained from the ratio suggested the fact that eutrophication more profoundly proceeds in Hakata Bay under the optimal condition of phytoplankton growth.

Key word : Hakata Bay, Eutrophication, Phytoplankton, AGP, Red tide

1. は じ め に

近年、内海や内湾などの閉鎖性水域では、生活排水、工場排水、かんがい排水などの流入や底質からの栄養塩類の溶出によって富栄養化の急速な進行が続いている。

博多湾は、西部海域で水深20m、中部海域で10m、東部海域では3～5mで、比較的浅い準閉鎖性の内湾であり、那珂、御笠、多々良、室見川などの中小河川および、大規模下水処理場排水が流入している。また、底質は西部海域では砂質状を若干とどめているところもあるが、中部、東部海域ではヘドロ化しており、栄養塩類の溶出も考えられる。

現在、中部、東部海域で、しばしば珪藻や鞭毛藻による赤潮が発生しており、富栄養化の進行に伴ない赤潮は今後ますます多発してくるものと思われる。

これまでに、博多湾の水質調査¹⁾、生物調査²⁾、赤潮発生機構に関する研究³⁾⁴⁾ 報告が数多くみられるが、いまだこれらに関する総合的な解析がなされていないのが現状である。

われわれは、これまで珪藻の *Skeletonema costatum* と黄色鞭毛藻の *Olisthodiscus* sp. についての生理特性、ビタミン類、重金属に対する要求性、および湾内での制限因子の推定等について報告した⁵⁾。そこで、本報では、湾内水質を化学的手法によりとらえるとともに植物プランクトンの種類と総数についても併せて考察を試み、富栄養化の実態把握を行なった。さらに、富栄養化の予測、制御を目的として、前述の両藻類を用いて年間を通しての藻類増殖の潜在能力 (AGP) を求めた。

2. 測定地点の概況

湾全域を西部、中部、東部海域に分け、それぞれ St. 1, St. 2, St. 3 を Fig. 1 のとおり設定し、その表層水と底層水について、1981年6月から1982年4月までの期間で毎月1回測定を行なった。なお、CODとAGPの変化については、1981年7月から1982年5月まで行なった。

*福岡市衛生試験所 〒810 福岡市中央区舞鶴2-5-10, Fukuoka City Institute of Public Health (2-5-10 Maizuru Chuo-ku Fukuoka 810 JAPAN)

Fig. 1 Station map of Hakata Bay.

3. 測定方法

3-1 化学成分

- (1) COD: 酸性過マンガン酸カリウム法⁶⁾
- (2) I-N (無機態窒素) (a), (b), (c)の総量
 - (a) $\text{NH}_4\text{-N}$: インドフェノール青法⁶⁾
 - (b) $\text{NO}_2\text{-N}$: N- (1-ナフチルエチレンジアミン) 法⁶⁾
 - (c) $\text{NO}_3\text{-N}$: Cd-Cu カラム還元, N- (1-ナフチルエチレンジアミン) 法⁶⁾
- (3) DON (溶存有機態窒素): ケルダール分解, インドフェノール青法⁶⁾
- (4) $\text{PO}_4\text{-P}$: モリブデン青法⁶⁾
- (5) DOP (溶存有機リン): 過硫酸カリウム-硫酸分解, モリブデン青法⁶⁾
- (6) クロロフィル a: 90%アセトン抽出, 吸光度法⁷⁾

3-2 植物プランクトン数

検水 0.25 ml をプランクトン計数盤に採り, 盤上の全プランクトンを計数した。

3-3 AGP

3-3-1 藻類の培養条件

供試藻類を SWM-3⁸⁾, NH-15 培地で保存培養した後, 接種の 4~5 日前に 75% 人工海水⁹⁾ に植え換える。この前培養した藻類を無菌的に汙過し, 滅菌人工海水で洗浄し, これを植種液とした。接種濃度は, 1000~2000 cells/ml とし, 23℃, 7000 lux (12時間明, 12時間暗) で最大増殖量に達するまで静置培養した。

3-3-2 試料の調製

採水後, 前汉過し, 最終的には 0.22mμ のメンブランフィルターで無菌的に汉過し, その 50ml を 100 ml 容平底フラスコに採取して AGP の試料とした。

3-3-3 AGP の測定方法

プランクトン計数盤またはフックス, ローゼンタール氏血球計数盤を用いる直接計数で測定した。なお, *Olisthodiscus* sp. については, グルタルアルデヒド固定液⁷⁾ で固定後, 細胞数を測定した。また, 得られた細胞数は, Fig. 2, 3 に示す関係式より COD に換算して

Fig. 2 Relationship between cell number and COD value of *Olisthodiscus* sp. suspension.

Fig. 3 Relationship between cell number and COD value of *Skeletonema costatum* suspension.

表わした。これらの図は, 純粋培養を行なった藻類を人工海水に懸濁させた懸濁液を用いて, その細胞数と希釈した試料の COD を測定して, 両者の関係をプロットしたものである。

4. 結果と考察

4-1 富栄養化の現状

4-1-1 化学分析結果

生物の増殖制限要因としての $\text{PO}_4\text{-P}$, I-N 濃度と溶存酸素の変化は, 環境水の生化学的変動を見積るための有効な水質指標¹⁰⁾と考えられている。そこで, 有機物濃度の指標である COD と併せて $\text{PO}_4\text{-P}$, I-N 等についての分析結果の要約を Table 1 に示してあるが, いずれの項目についても St. 3 (東部海域) での汚濁が大きいことがわかった。

とくに I-N に関して, St. 3 の表層水で St. 1 の約 8 倍の濃度を示した。また, 植物プランクトンの現存量と考えられるクロロフィル a は, St. 3 の年平均値で約 $20 \mu\text{g}/\text{l}$ であり, 水温が 25℃ を示した 9 月には $40 \mu\text{g}/\text{l}$ を越える高い値を示すこともあった。

これらの結果を, 他の準閉鎖水域と比較すると, 東京港¹¹⁾, 三河湾¹²⁾等とほぼ同程度の汚濁であることがわかった。

一方, 植物プランクトンは, I-N, $\text{PO}_4\text{-P}$ の他に一部の溶解性の有機態窒素 (DON) や有機態リン (DOP) の

利用も可能である¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾と言われているが、今回の分析結果の年平均値をみると、DONはI-Nに比べ、St. 1, St. 2で約5倍、St. 3では約2倍量存在し、DOPは、各測定点でPO₄-Pとほぼ同程度存在してい

ることが確認された。

4-1-2 植物プランクトン相

博多湾の植物プランクトン総数を Table 2 に、優占種とそれらが総数に占める割合を Table 3 に示す。

Table 1 Chemical analysis of water samples from Hakata Bay

(June, 1981 - April, 1982)

		St. 1		St. 2		St. 3	
		Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
Water Temp. (℃)	Max.	26.5	24.7	27.0	25.5	27.0	26.3
	Min.	10.0	10.0	7.5	7.0	5.0	4.6
	Ave.	17.6	17.4	17.2	16.9	16.7	16.4
Cl ⁻ (‰)	Max.	19.1	19.1	18.5	19.0	18.2	18.0
	Min.	17.7	18.3	15.0	17.9	10.4	16.7
	Ave.	18.7	18.8	17.8	18.5	16.5	17.3
COD (mg/l)	Max.	3.3	2.2	3.9	3.8	4.5	4.9
	Min.	0	0.3	0.4	0.5	1.4	0.7
	Ave.	0.9	1.0	2.2	1.5	3.8	3.2
I-N (μg/l)	Max.	33	126	154	97	696	441
	Min.	13	10	8	10	6	9
	Ave.	21	33	42	37	158	109
DON (μg/l)	Max.	280	360	400	290	320	340
	Min.	70	60	130	80	160	130
	Ave.	140	150	200	170	250	240
PO ₄ -P (μg/l)	Max.	13.3	28.9	22.0	22.0	45.9	44.7
	Min.	1.4	1.8	1.4	1.6	1.6	1.6
	Ave.	4.9	7.1	7.3	8.1	15.9	15.7
DOP (μg/l)	Max.	14	10	19	15	31	32
	Min.	0	2	7	4	12	11
	Ave.	7	7	12	8	20	19
Chl-a (μg/l)	Max.	3.9	2.2	34.9	8.9	44.2	45.2
	Min.	0.5	0.7	2.3	0.7	3.5	3.5
	Ave.	1.8	1.3	11.7	3.9	20.6	21.0

Table 2 Population density of phytoplankton in Hakata Bay.

(cells/ml)

	St. 1		St. 2		St. 3	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
June, 1981	190		1200		4000	
July	2200	99	9000	340	9700	3300
August	44	170	28000	3300	19000	30000
September	650	510	1100	160	5400	4600
October	400	150	1600	1500	2500	2600
November	770	700	9900	1600	21000	15000
December	570	410	1800	720	3600	2800
January, 1982	130	110	580	460	820	1100
February	120	140	9400	980	8200	8900
March	130	48	100	150	720	630
April	100	170	180	300	460	780
Max.	2200	700	28000	3300	21000	30000
Min.	44	48	100	150	460	780
Ave.	480	250	5700	950	6900	7000

Table 3 Proportion of cell number of predominant plankton to total number of phytoplankton in Hakata Bay (%).

	St. 1		St. 2		Sp. 3	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
June, 1981	O : 44	—	S : 34, O : 25	—	S : 54, O : 34	—
July	C : 60	N : 59	C : 40	T : 29, Gy : 29.	C : 46	T : 24
August	C : 27, S : 27	C : 43	S : 83	S : 76	S : 70	S : 61
September	MF : 60	S : 72	MF : 27	S : 50	T : 34	T : 47
October	T : 35	C : 24	Gy : 87	Gy : 81	Gy : 54	Gy : 51
November	S : 84	S : 72	S : 95	S : 82	S : 94	S : 94
December	MF : 70	MF : 57	MF : 93	MF : 86	MF : 93	MF : 79
January, 1982	MF : 52	MF : 32	MF : 45	MF : 42	MF : 32	T : 52
February	MF : 43	MF : 43	H : 63	MF : 41	H : 59	H : 54
March	R. f : 24	MF : 50	N : 31	R. f : 39	H : 61	H : 38
April	MF : 40	Gyr : 42	Gyr : 42	MF : 25	MF : 88	MF : 97

S : *Skeletonema*, C : *Chaetoceros*, T : *Thalassiosira*, N : *Nitzschia*
 R. f : *Rhizosolenia flagilissima*, O : *Olisthodiscus*, Gy : *Gymnodinium*
 H : *Heterocapsa*, Gyr : *Gyrodinium*, MF : *Micro Flagellata*

St. 1では、プランクトンの年平均値は、表層水で 480 cells/ml, 底層水で 250 cells/mlと比較的少なかった。また、年間を通して表層水と底層水の平均プランクトン数に大きな差はみられなかった。優占種をみると、6月に鞭毛藻の *Olisthodiscus* sp. が出現した以外は珪藻の *Chaetoceros* sp., *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* sp. が優占種になることが多かった。冬期には珪藻も少なくなり、微小鞭毛藻が優占種となった。

St. 2では、St. 1に比較して表層水の植物プランクトン数が著しく増大しており、最大 28,000 cells/ml となった。底層水では、表層水に比較して平均 1/6 程度であり、とくに 7, 8, 9 月および 2 月には両層の植物プランクトン数に大きな差がみられた。この現象は両層における水温の差からは説明し難く、夏期の躍層の形成もみられないことにより、主要因は、この地点の水深が 10m, 透明度が約 2m であるため、底層への光の透過が妨げられたためと考えられる。一方、植物プランクトン相については、夏から秋にかけて、*Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* sp. などの珪藻類が多く、時折、鞭毛藻の *Gymnodinium* sp. が優占種として出現した。冬から春にかけては、St. 1と同様に珪藻類が減少し、微小鞭毛藻が優占種となることが多かった。2月に鞭毛藻の *Heterocapsa* sp. が表層水で 5,400 cells/ml 存在し、赤潮を発生させた。また 3月には前述の珪藻とは異なり、*Nitzschia seriata*, *Rhizosolenia flagilissima*, *Eucampia zoodiacus* が出現した。

St. 3では、前述の2地点と比較して植物プランクトン

ン数が増加し、しかも表層、底層水でのその差は少なく、植物プランクトン相も両層で類似していた。

地点別に鞭毛藻類が植物プランクトン総数に占める割合を年平均値でみると、St. 1では表層水 46%, 底層水 45%, St. 2ではそれぞれ 49%, 51%, St. 3では両層とも 54% となり、西部海域より東部海域へ向かう程高くなっており、富栄養化の進んだ海域ほど鞭毛藻が多く出現する傾向がみられた。

なお、調査期間中に数多く優占種として出現した微小鞭毛藻については、その生理特性を明らかにするとともに、自然環境水域における役割りについて今後検討すべきであろうと考える。

Fig. 4 は調査期間中に博多湾で発生した赤潮プランクトンの顕微鏡写真である。

(a)は *Skeletonema costatum* で博多湾で最も普通にみられる珪藻であり、単独あるいは他の珪藻と共存して赤潮を発生した。

(b)は *Thalassiosira* sp. で、夏期に多く出現し、8月に *Skeletonema costatum* と共存して赤潮を発生した。

(c)は 6月に湾南部の河口域を中心として赤潮を発生させた黄色鞭毛藻の *Olisthodiscus* sp. で、その数は 140,000 cells/ml にも及んだ。その際に渦鞭毛藻の *Gymnodinium* sp. 990 cells/ml や、*Prorocentrum triestinum* 650 cells/ml などの混在がみられた。

(d)は渦鞭毛藻の *Gymnodinium* '65 で、8月に珪藻の *Skeletonema Thalassiosira* sp. による混合赤潮が発生した後に発生し、その数は 6,100 cells/ml であった。そ

Fig. 4 Microscopic figure of phytoplankton present in red tide in Hakata Bay.

の際、珪藻 *Thalassiosira* sp., 過鞭毛藻の *Prorocentrum triestinum*, ユーグレナ藻の *Eutreptiella* sp. がそれぞれ 200 cells/ml のレベルで混在していた。

(e) は 2 月に湾東部を中心として発生した *Heterocapsa* sp. であり, 5,900 cells/ml の密度で出現し, その際 *Gymnodinium* sp., 微小鞭毛藻がそれぞれ 2,200 cells/ml, 1000 cells/ml 混在した。

(f) は 4 月に湾南部の港湾施設内で発生した *Eutreptiella* sp. で 240,000 cells/ml の密度でほぼ単独で赤潮を発生させた。

4-2 AGP

前述の化学分析値, 植物プランクトン総数と相をみる

ことにより, 富栄養化の現状を知ることができた。富栄養化の予測や制御を目的とする場合, AGP の測定は, 1 つの有効な指標となりうる。

著者らは, すでに博多湾において, AGP の測定を行ない, 藻類の増殖はリンにより制限されていることを明らかにするとともに, PO_4-P 濃度と AGP 値との間に相関性があることを報告した⁵⁾。

本報では, AGP を顕在化した有機汚濁指標の COD との比較ができるように, COD に換算して表示したうえで, 水質分析値, 植物プランクトン調査の結果をもとに, 富栄養化の評価を行なった。

AGP の結果は, Table 4 に示すように, *Skeletonema*

Table 4 AGP in the water of Hakata Bay (%).

(June, 1981-April, 1982)

		St. 1		St. 2		St. 3	
		Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
S - AGP (COD mg/l)	Max.	2.4	3.7	4.3	3.5	9.2	4.6
	Min.	0	0	0	0	0	0.1
	Ave.	0.4	0.8	1.2	0.7	2.6	1.9
O - AGP (COD mg/l)	Max.	1.8	4.3	5	2.5	5.3	4.5
	Min.	0	0	0	0	0	0
	Ave.	0.3	0.6	0.6	0.6	1.7	1.3

Table 5 The ratio of AGP to COD value in Hakata Bay.
(June, 1981–April, 1982)

	St. 1		St. 2		St. 3	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
s-AGP/COD	0.44	0.80	0.55	0.47	0.68	0.59
o-AGP/COD	0.33	0.60	0.27	0.40	0.45	0.41

Fig. 5 Seasonal change in COD value and AGP using with *Skeletonema costatum*.

*Skeletonema costatum*を用いた S-AGP, *Olisthodiscus* sp.を用いた O-AGPともに, St. 1 < St. 2 < St. 3 の傾向が顕著であり, St. 3 の表層水では St. 1 に比べ約 6 倍の藻類生産力を保有することが判明した。また層別にみると, St. 1 では表層水 < 底層水であったが, これは **Table 1** に示す $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度に依存していると考えられる。このように表層水で $\text{PO}_4\text{-P}$ が低値を示したのは, 植物プランクトン等により, 栄養塩が摂取された結果であることが **Table 1** のクロロフィル a 量からも推定されるが, 底泥からの溶出により, 底層水に $\text{PO}_4\text{-P}$ が負荷された可能性もある。一方, St. 3 では逆に表層水 > 底層水であった。**Table 1** の結果では, $\text{PO}_4\text{-P}$ については両層で差が認められなかったため, この AGP の差は他の因子によるものと考えられる。すなわち, この地点での表層水および底層水の塩化物イオン濃度の平均値は, それぞれ 16.5 ‰, 17.3 ‰であることより, 表層水で河川水の影響が大きいことが示唆され, これが AGP に反映されたと思われる。著者らは, St. 3 の表層水に鉄または珪酸を添加することにより, 著しく高い AGP を示したことを報告している⁵⁾。

Table 5 に COD に対する AGP の比を示す。この結果は, S-AGP では 0.44 ~ 0.80, O-AGP では 0.27 ~ 0.60 であり, とくに St. 1 の底層が高かった。これは藻類の増殖に適した条件が整えば, 藻類生産は一段と進行し, COD を増加させることを表している。

Fig. 5 に St. 3 での COD と S-AGP の季節変動を示す。COD が低下する冬期に AGP が高くなる傾向があるが, 両者の和でみると大きな変動はみられない。注目すべき点は, 12 月の表層水で, COD が 1.4 mg/l であったのに対し, S-AGP はその 6.6 倍を示したことである。これは, I-N が 430 $\mu\text{g/l}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ が 46 $\mu\text{g/l}$ という高い濃度で存在した結果であろう。

このように AGP の測定は, 富栄養化の予測に新しい手法を与えたものと思う。

5. 要 約

- (1) 博多湾において化学分析を行なった結果, St. 1 < St. 2 < St. 3 の傾向があり, とくに東部海域の汚濁が進んでいた。
- (2) I-N, $\text{PO}_4\text{-P}$ に比べて DON が 2 ~ 5 倍, DOP がほぼ等量存在しているため, それらが藻類の増殖にあたる影響について検討する必要がある。
- (3) 植物プランクトン数は, St. 2, St. 3 で 20,000 cells/ml を越えることもあった。また, 1981 年 5 月から 1982 年 4 月までの間に, 珪藻, 鞭毛藻による赤潮が発生した。
- (4) 鞭毛藻が植物プランクトン中に占める割合は, St. 1 < St. 2 < St. 3 となっており; 富栄養化が進んだ海域ほど大きくなる傾向がみられた。
- (5) St. 3 の表層水では, St. 1 の 6 倍の AGP 値を示し, また, COD に対する AGP の比を求めると, 0.70 に相当することがわかった。
- (6) 冬期には, COD が低下する傾向がみられたが, AGP は高い値を示すことがあった。

6. お わ り に

博多湾は, 西部海域では比較的清澄を保っているが, 中部海域, とくに東部海域では富栄養化がかなり進行しており, 鞭毛藻や珪藻による赤潮が多発しているのが現

状である。これまでの調査で、主にリンが藻類増殖の制限因子であったことから、湾内へ流入する河川や下水処理水のリンを制御することにより、富栄養化の進行をある程度抑制することができるのではないかと考える。

今後の課題として、各流入河川の A G P 試験を試み、各河川が博多湾に与える影響について調査を行なうとともに、底質からの溶出成分が藻類にあたえる影響についても検討を加えていきたい。

謝 辞

本研究に際し、藻類を供与していただいた、北九州市環境衛生研究所 山田真知子研究員、また本研究での窒素、リンの分析を担当していただいた、当所理化学課の藤本和司、高野昭男両氏に深謝いたします。

(原稿受理：昭和 57 年 12 月 8 日)

— 引 用 文 献 —

- 1) 福岡市衛生局環境保全部：公害の現状と対策，1971～1981
- 2) 川上大和，田中義興，河辺克己：博多湾の富栄養化に関する調査Ⅳ，福岡県福岡水産試験場研究業務報告，1979．
- 3) 本城凡夫，花岡資：博多湾における赤潮発生機構に関する研究 日本プランクトン学会報 20 126-130
- 4) 本城凡夫：博多湾における赤潮発生機構に関する研究Ⅳ，東海区水研報 79 77-121
- 5) 吉武和人，西田政司：博多湾の富栄養化の現状(I)，福岡市衛試報 7 (投稿中)
- 6) 日本工業標準調査会：工場排水試験方法 J I S-K 0102 日本規格協会 (1981)
- 7) 西沢一俊 千原光雄 (1979)：藻類研究法 399 共立，東京
- 8) 尾形英二 (1973)：水圏の富栄養化と水産増養殖 68-77 恒星社厚生閣 東京
- 9) 国立公害研究所：陸水域の富栄養化に関する総合研究 (X) 26 (1981)
- 10) 吉武和人，藤本和司，高野昭男：博多湾における栄養塩負荷と生物利用の関係 福岡市衛試報 5 105-109
- 11) 江角比出郎，會田京三：東京港の水質 東京都公害研年報 93-101 (1980)
- 12) 近藤正夫：藻類の生理と富栄養化 (第 2 報) 愛知公セ所報 34-39 (1980)
- 13) 岩崎英雄 (1975)：海洋の微小生物 101-123 恒星社厚生閣 東京
- 14) 岩崎英雄 (1976)：赤潮 11-24 恒星社厚生閣 東京
- 15) 真鍋武彦 (1979)：水域の自浄作用と浄化，恒星社厚生閣 東京
- 16) 岩崎英雄：富栄養化と赤潮発生 用水と廃水 15 47-54
- 17) 多賀信雄 (1975)：海洋の微小生物 93-100 恒星社厚生閣 東京