

函館海洋気象台海洋速報 (1977): 15, 3.  
 函館海洋気象台海洋速報 (1978): 16, 3.  
 函館海洋気象台海洋速報 (1979): 17, 3.  
 函館海洋気象台海洋速報 (1981): 19, 2.  
 HARRIS, J. E. and J. B. ROBINSON (1979): Circulation in Western Port, Victoria, as deduced from salinity and reactive-silica distributions. *Mar. Geol.*, **30**, 101-116.  
 IDA, H. (1962): On the water masses in the coastal

region of the South-western Okhotsk Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 20th Anniversary Volume, 272-276.

STEFANSSON, U. and L. P. ATKINSON (1971): Relationship of potential temperature and silicate in the deep waters between Cape Lookout, North Carolina, and Bermuda. *J. Mar. Res.*, **29**, 3, 306-318.

### 3. 噴火湾における栄養塩と粒状有機物質の季節変動と収支

築田 満 (函館市役所)

米田 義昭 (北海道大学水産学部)

#### 1. はじめに

海水中での栄養塩の挙動が、生物生産および有機物分解などの生物化学的過程に支配されていることは当然であるが、沿岸海域の場合、その過程に加えて、海水の水平、鉛直混合などの物理的作用および海底堆積物との相互作用によって大きく影響されているものと思われる。

噴火湾は表面積 2,270 km<sup>2</sup>、最大水深 107 m、湾口部水深 85 m の海盆状の内湾である。この湾に関する周年的な基礎研究には過去において KOTO (1965)、大谷・秋葉 (1970)、大谷 (1971a) および大谷ら (1971b, 1971c) による海況変動に関する研究があるが、栄養塩の季節変動に関する研究および生物化学的過程に関する研究は現在までほとんど行われていない。そこで、著者は、この湾に設定した33観測点から得た栄養塩の資料 (1974年~1975年) に基づき、栄養塩の挙動を支配する要因と考えられる生物生産、懸濁性有機物質の分解、海水の物理的な移動および堆積物からの栄養塩の放出を考慮し、栄養塩、特にリン (PO<sub>4</sub>-P) および窒素 (NO<sub>3</sub>-N) の年間収支のモデル化を試みた。

#### 2. 栄養塩の季節変動

噴火湾に設定した33観測点を図1に示す。これらの観測点を代表して湾のほぼ中央に位置する St. 30 におけるリン酸態リンおよび硝酸態窒素の季節変動を図2に示す。リン酸態リンの分布をみると、その濃度は2月下旬では鉛直的にほぼ均一であるが、夏季にかけて上層では減少し、下層では逆に増加している。そして、11月頃には再び濃度は鉛直的に均一となり、2月下旬の濃度に回復している。一方、硝酸態窒素の季節変動についてもリン酸態リンの季節変動とほぼ一致している。このような

噴火湾における栄養塩の季節変動の様相は大筋で多くの沿岸域および外洋域の様相 (ARMSTRONG and BUTLER: 1960, 1962; SPENCER: 1975) と一致する。しかし、春季から秋季にかけて湾内の底層附近に認められる高濃度の栄養塩は上述の海域および噴火湾外では認められない。また、湾内の底層附近のN/P比(原子比)をとると、その値は5~8であり、外洋域の値 (REDFIELD: 1934, PHIEFER and THAMPSON: 1973, ARMSTRONG and BUTLER: 1960, CHOW and MANTYLA: 1965) よりも小さ

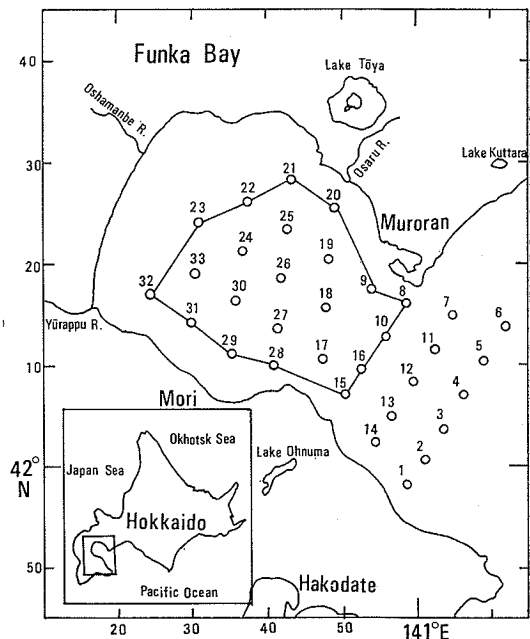


図1 噴火湾における試料採取地点

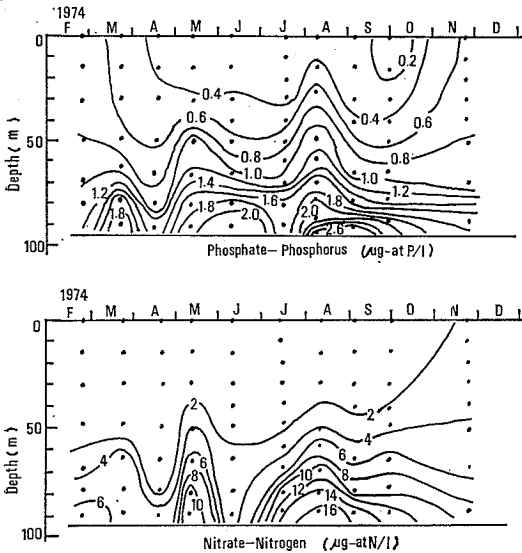


図2 St. 30 における栄養塩の季節変動

な値である。このように底層付近に高濃度の栄養塩が存在し、窒素に比べてリンの蓄積が大きいことは、噴火湾の栄養塩の特徴といえる。

### 3. 生物生産過程

表層の栄養塩濃度が春季から夏季にかけて減少し、この現象が植物プランクトンの生産による栄養塩の消費に大きく依存していることは、多くの研究者によって認められている。そこで、植物プランクトンの生産によって海水中から消費される栄養塩を求めするために、St. 30 で  $^{14}\text{C}$ -法 (STEEMAN-NIELSEN: 1952) により基礎生産力を求めた。

その結果、基礎生産は各月とも水深 50 m 以浅で行われ、その生産力は表面で最大値を示し、深度とともに指数関数的に減少していた。また、基礎生産量の季節変動をみるために、各月の基礎生産力の鉛直分布から積算して求めた水柱当りの基礎生産量を図 3 に示す。噴火湾における基礎生産量は、11月下旬の  $0.04 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{day}$  から 7月中旬の  $0.79 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{day}$  の範囲内であり、各月の基礎生産量を積算して年間の生産量を求めると、約  $100 \text{ gC/m}^2$  となる。一方、季節変動をみると、基礎生産量は、夏季に高い値を示し、冬季に低い値を示している。このことは、夏季の上層で生物生産によって著しい栄養塩の消費が行われていることを示唆している。

生物生産による栄養塩の消費量を求める場合、RED-FIELD ら (1963) によるプランクトン生体中の炭素と栄養塩との関係 (C:N:P=106:16:1) から求める方法があ

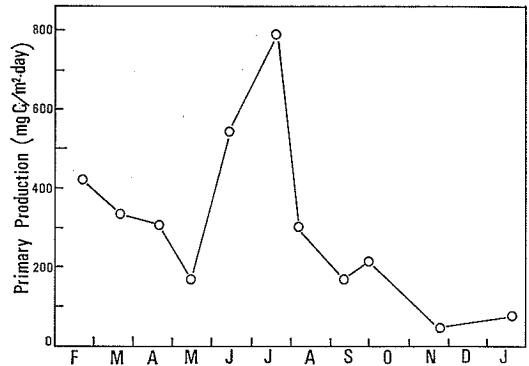


図3 St. 30 における基礎生産量の季節変動

る。噴火湾においてもこの関係が適用できるかどうかを確認するために、夏季の表面水を用いて植物プランクトンによる  $^{14}\text{C}$  および  $^{32}\text{P}$  の取り込み実験を行った。その結果、炭素とリンの摂取速度比は、C:P=105:1 (原子比) であり、上述のプランクトン生体中の組成比と一致する。このように噴火湾における生物生産過程は、量的にも質的にも一般にいわれている外洋域での過程と大きな差がないと思われる。

### 4. 懸濁性有機物質の分解による再生過程

海水中における有機物質の分解による栄養塩の再生は生物生産と同様に栄養塩の挙動に重要な影響を与えていることが知られている。そこで、春季から秋季にかけて高濃度の栄養塩が蓄積している噴火湾下層における栄養塩の再生量を求めてみた。

噴火湾下層に存在する塩分量 33.4~33.5‰ の海水中の栄養塩の時間的濃度変化をみると、2月下旬から6月中旬の107日間の変化量は、 $1.7 \mu\text{g-at P/l}$  であり、この間の平均再生速度は、 $0.018 \mu\text{g-at P/l} \cdot \text{day}$  となる。一方、同様にして、求めた7月中旬から9月上旬までの50日間のリン酸態リンの平均再生速度は、 $0.024 \mu\text{g-at P/l} \cdot \text{day}$  である。これらの値は、RILEY (1951), KETCHUM (1947), KETCHUM and CORWIN (1965) が報告している有機物分解によるリンの再生速度 ( $2 \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{g-at/l} \cdot \text{day}$ ) と比較すると、1桁高い値である。一方、同海水の N:P をみると、再生速度比は、N:P=6:1 の関係にあり、RICHARD ら (1965) が報告している有機物分解による再生比 (16:1) と異なる。

次に、噴火湾における懸濁性有機物質の分解過程を考えてみる。噴火湾における懸濁性有機物質の季節変動は築田・米田 (1976) によって明らかにされている。それによると、懸濁性有機物質 (POC, PON, POP) の年平

均値は、166  $\mu\text{g C/l}$ 、22  $\mu\text{g N/l}$ 、および 3.2  $\mu\text{g P/l}$  であり、季節変動をみると、懸濁性有機物量は、春季から夏季に上層で高く、秋季から冬季では低い。この量および季節変動は、PARSONS (1975)、CHESTER and STONER (1974) が報告している外洋域の様相とはほぼ一致している。しかし、噴火湾における懸濁性有機物の組成比 (C:N:P) は、春季の上層では植物プランクトンの組成比と一致するが、他の季節では植物プランクトンと比較してリン・窒素を含む割合が小さいなど季節および深度によって著しく異なる。そこで、1  $\text{m}^2 \times 70 \text{ m}$  の水柱中での懸濁性有機物現存量の変化量、基礎生産量および沈降量から懸濁性有機物の分解量を求め、現場の水温と懸濁性有機物の組成比との関係をみると、水柱中での平均分解速度は、水温が上昇すると大きくなり、水温が低下し、懸濁性有機物の C/N 比、N/P が増大すると小さくなることが明らかになった。このようにして、現場の水温と組成比を考慮して求めた上層 (0~50 m) および下層 (50 m~90 m) における懸濁性有機物の分解速度を表 1 に示す。

上層における年平均分解速度は、4.0  $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{day}$ 、0.95  $\text{mg N/m}^3 \cdot \text{day}$  および 0.141  $\text{mg P/m}^3 \cdot \text{day}$  であり下層における年平均分解速度は、1.8  $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{day}$ 、0.20  $\text{mg N/m}^3 \cdot \text{day}$  および 0.047  $\text{mg P/m}^3 \cdot \text{day}$  である。各有機物とも上層での分解力が下層より大きく、特に夏季の上層での分解力が大きい。懸濁性有機リンの分解速度をみると、上層および下層ともその値は RILEY ら (1951) が報告している有機物分解によるリンの再生速度 ( $2 \sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{g-at/l} \cdot \text{day}$ ) と一致している。したがって噴火湾における有機物分解による再生過程は他の海域と大きな差がないと思われる。しかし、春季から秋季にかけての下層についてみると、この分解速度と栄養塩の変化量から求めた平均再生速度とに大きな差がある。このことは、下層における大きな再生量を懸濁性有機物の分解だけでは説明がつかないことを示唆している。

### 5. 海底堆積物からの栄養塩の放出

ここで、海底堆積物からの栄養塩の放出過程を考えてみる。

噴火湾における堆積物中の有機物含有量の鉛直変化を表 2 に示す。有機物含有量は表層 (0~2.5 cm) で高く、堆積環境が異なる 10~20 cm 層を除くと、5~10 cm 層からほぼ一定となる。このことは、堆積物の表層数 cm で有機物が分解されていることを示唆するものであり、 $^{14}\text{C}$  でラベルしたアミノ酸を用いてアミノ酸の分解力を測定した結果でも同様の傾向を示した。

表 1. St. 30 における懸濁性有機物の分解速度  
POC

Date	Intervals (days)	The average decompositive rate	
		Upper layer ( $\text{mgC/m}^3 \cdot \text{day}$ )	Lower layer ( $\text{mgC/m}^3 \cdot \text{day}$ )
Mar. 26			
Apr. 19	24	2.9	3.0
May 15	26	2.3	1.5
Jun. 13	29	5.0	1.6
Jul. 18	35	8.7	2.5
Aug. 7	20	8.3	3.0
Sept. 4	28	2.8	0.7
Mar. 26	203	3.0	1.5

### PON

Date	Intervals (days)	The average decompositive rate	
		Upper layer ( $\text{mgN/m}^3 \cdot \text{day}$ )	Lower layer ( $\text{mgN/m}^3 \cdot \text{day}$ )
Mar. 26			
Apr. 19	24	0.15	1.32
May 15	26	0.29	0.25
Jun. 13	29	1.33	0.02
Jul. 18	35	1.67	0.02
Aug. 7	20	2.29	0.01
Sept. 4	28	0.66	0.01
Mar. 26	203	0.85	0.17

### POP

Date	Intervals (days)	The average decompositive rate	
		Upper layer ( $\text{mgP/m}^3 \cdot \text{day}$ )	Lower layer ( $\text{mgP/m}^3 \cdot \text{day}$ )
Mar. 26			
Apr. 19	24	0.043	0.222
May 15	26	0.058	0.041
Jun. 13	29	0.137	0.058
Jul. 18	35	0.248	0.014
Aug. 7	20	0.352	0.003
Sept. 4	28	0.066	0.002
Mar. 26	203	0.134	0.041

一方、海底に堆積すると思われる懸濁性物質中の有機物含有量を求めると、70 m 層での年平均値は、240  $\text{mg C/g}$ 、30  $\text{mg N/g}$ 、3.7  $\text{mg P/g}$  であり、堆積物中に蓄積される有機物量は、沈降してくる有機物量の C:9%、N:10%、P:54% に相当する。すなわち、炭素にして 91%、窒素にして 90%、リンにして 56% に相当する有機物量が堆積物直上および表層数 cm で著しい分解を受け、無機化した栄養塩が海水中へ放出されるものと考えられる。この栄養塩が噴火湾下層における高濃度の栄養塩に大きな影響を与えているものと考えられる。

表 2. 噴火湾における海底堆積物中の有機物含有量と懸濁物質 (S.S) 中の有機物含有量

Station 30				Station 23			
Depth (cm)	Carbon	Nitrogen (mg/g)	Phosphorus	Depth (cm)	Carbon	Nitrogen (mg/g)	Phosphorus
S.S.	240	30	3.7	S.S.	—	—	—
0-2.5	27	3.7	—	0-2.5	25	3.6	2.6
2.5- 5	26	3.7	2.4	2.5- 5	21	2.7	2.1
5-10	22	2.9	2.0	5-10	16	2.1	1.5
10-15	16	2.0	1.7	10-15	14	1.7	1.4
15-20	14	2.7	1.5	15-20	16	2.2	1.8
20-25	22	3.2	1.8	20-25	21	2.8	1.6
25-30	23	4.3	1.9	25-30	22	2.8	1.8
30-35	24	2.8	1.9				

6. 海況変動に伴う栄養塩の移動

1974年2月から1975年1月までの海況変動は、大谷・木戸 (1977) によって詳細に報告されている。それによると、親潮系水は、すでに2月下旬湾内の20m以浅に存在し、3月以降、徐々に下層に侵入し、6月には70m層に達する。一方、津軽暖流水の影響は、9月頃から中層に認められ、11月には湾内は津軽暖流水起源の海水で占められている。この両水塊の流入は、同時に湾内水を湾外へ流出させる現象を引き起す。すなわち、親潮系水の流入は湾内下層水を、津軽暖流水の流入は湾内の表層水と底層水を流出させる。したがって、流入水と流出水の栄養塩濃度に相違があると、湾内の栄養塩の季節変動に大きな影響を与えることが考えられる。

春季から夏季にかけて流入する親潮系水のリンおよび窒素の濃度は、 $0.3 \mu\text{g-at P/l}$ 、 $1 \mu\text{g-at N/l}$  であり、湾外に流出する湾内水の濃度は、この期間平均すると、 $2.3 \mu\text{g-at P/l}$ 、 $14 \mu\text{g-at N/l}$  である。したがって、親潮系水の流入は、湾内の栄養塩の現存量を減少させる方向に働いている。

一方、津軽暖流水のリン・窒素の濃度は、 $0.7 \mu\text{g-at P/l}$  および  $6.7 \mu\text{g-at N/l}$  であり、親潮系水の濃度より高い値を示す。この暖流水の流入は、その濃度よりも低い湾内表層水と、その濃度よりも高い底層水を流出させる。

このように両水塊の流入は、春季から秋季にかけて底層附近に蓄積した高濃度の栄養塩を湾外へ運び出し、冬季の湾内の栄養塩濃度を形成するのに大きな役割を果たしている。

7. 噴火湾における栄養塩および懸濁性有機物質の年間収支モデル

ここで、図1に示す実線で囲まれた海域 (表面積  $991 \text{ km}^2$ 、容積  $77 \text{ km}^3$ ) をボックスと考え、その中を行われ

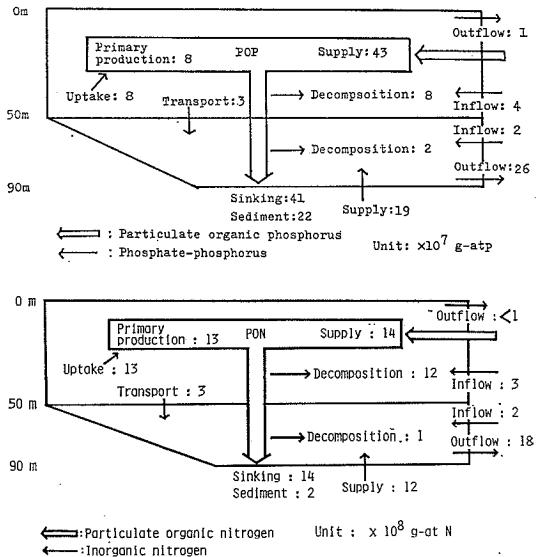


図 4 噴火湾における栄養塩および懸濁性有機物質の年間収支モデル

る生物生産、懸濁性有機物の分解、水塊の移動および堆積物上での有機物の分解に伴う栄養塩の定量化を行い、栄養塩と懸濁性有機物質の収支をモデル化したものを図4に示す。

上層における、海水中からの栄養塩の除去は、湾内の生物生産による消費、津軽暖流水の流入に伴う湾内表層水の流出および親潮系水の下層への移動に伴う上層水の移動によるものである。この除去量を補う供給量は、生物生産による消費量に匹敵する懸濁性有機物質の分解による再生量であり、親潮系水および津軽暖流水が運び込む量である。

一方、下層では高濃度の栄養塩の蓄積があり、その要

因としては、懸濁性有機物質の分解による再生、上層からの栄養塩の移動および津軽暖流水による運び込みはいずれも微々たるもので、堆積物上で行われる有機物質の分解に伴う栄養塩の再生が考えられる。しかし、下層での栄養塩の蓄積も長続きせず、親潮系水および津軽暖流水の流入によって栄養塩は湾外へ運び去られるものと考えられる。

次に懸濁性有機物質の収支をみると、湾内で生産される懸濁性有機物質量は、ほとんど上層で分解される。したがって、最終的に下層の栄養塩の供給源となる堆積物上の有機物質量は、湾外から補う必要がある。この有機物質の供給源として、津軽暖流水によって運ばれる懸濁性有機物質、湾内に回遊するネクトン、動・植物プランクトンなどが考えられるが、その供給量の N:P をとると、N:P=3:1 の関係があり、湾外から供給される有機物質はリンを多く含むと考えられる。したがって、この組成比から推測すると、その有機物質は骨が主体である魚の死骸を起源とする有機物あるいは魚卵を主成分とする有機物と思われる。

#### 8. おわりに

噴火湾における栄養塩の分布の特徴として春季から秋季の底層付近で高濃度の栄養塩の蓄積があり、特にリンの蓄積が大きいことが上げられるが、湾内の生物化学的過程は、外洋域などの過程と大きな差がない。それにもかかわらず、外洋域では認められない栄養塩の蓄積と組成比は、堆積物からの栄養塩の放出に帰因し、元来、湾外から供給される懸濁性有機物質の質と量に帰因するものと思われる。このようにして噴火湾の下層では栄養塩が蓄積してゆくが、秋季に湾内に流入する津軽暖流水がそれまで蓄積されていた栄養塩を湾外に運び去り、津軽暖流水の運び込む栄養塩によって冬季の栄養塩濃度が支配され、再び春のブルーミング時期を迎える。このように、噴火湾の栄養塩の挙動は、生物化学的作用によって影響を受けていることはもちろんであるが、それ以上に、親潮系水および津軽暖流水の流入および湾外からの懸濁性有機物質の供給に大きく影響されていると思われる。

#### 参考文献

- ARMSTRONG, F.A.J. and E.I. BUTLER (1960): Chemical changes in sea water off Plymouth during 1959. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **39**, 525-528.
- ARMSTRONG, F.A.J. and E.I. BUTLER (1962): Chemical changes in sea water off Plymouth during 1960. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **42**, 253-258.
- CHESTER, R. and J.H. STONER (1974): The distribution of particulate organic carbon and nitrogen in some surface waters of the world ocean. *Marine Chemistry*, **2**, 263-275.
- CHOW, T.J. and A.W. MANTYLA (1965): Inorganic nutrient anions in deep ocean waters. *Nature*, **206**, 383-385.
- KETCHUM, B.H. (1947): The biochemical relation between marine organisms and their environment. *Ecol. Monographs*, **17**, 309-315.
- KETCHUM, B.N. and N. CORWIN (1965): The cycle of phosphorus in a plankton bloom in the Gulf of Maine. *Limnol. Oceanogr. Sup.* **10**, R148-R161.
- KOTO, H. (1965): Stagnation, mixing and renewal of the water of the Funka Bay. *Mem. Fish. Hokkaido Univ.*, **13**, 65-78.
- 大谷清隆・木戸和男 (1977): 噴火湾の海洋構造の年変化と水塊の交替量。噴火湾の研究中間報告, 川村輝良編, 三秀印刷, 函館, 54 pp.
- 大谷清隆・秋葉芳雄 (1970): 噴火湾の海況変動の研究 I, 湾水の周年変化。北海道大学水産学部研究彙報, **20**, 303-312.
- 大谷清隆 (1971): 噴火湾の海況変動の研究 II, 噴火湾に流入, 滞留する水の特性。北海道大学水産学部研究彙報, **22**, 58-66.
- 大谷清隆・秋葉芳雄・吉田賢二・大槻知寛 (1971): 噴火湾の海況変動の研究 III, 親潮系水の流入, 滞留期の海況。北海道大学水産学部研究彙報, **22**, 129-142.
- 大谷清隆・秋葉芳雄・伊藤悦郎・小野田 勝 (1971): 噴火湾の海況変動の研究 IV, 津軽暖流水の流入, 滞留期の海況。北海道大学水産学部研究彙報, **22**, 221-230.
- PARSONS, T.R. (1975): Particulate organic carbon in the sea, *In*, *Chemical Oceanography*. Vol. 2, ed. J.P. RILEY and G. SKIRROW, Academic Press, Inc., London, 365-383.
- PHIEFER, L.D. and T.G. THOMPSON (1937): Seasonal variations in the surface waters of San Juan Channel during the five year period, January 1931 to December 30, 1935. *J. Mar. Res.*, **1**, 34-74.
- REDFIELD, A.C. (1934): On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. *James Johnstone Memorial Volume*, Liverpool, 177-192.
- REDFIELD, A.C., B.H. KETCHUM and F.A. RICHARDS (1963): The influence of organisms on the composition of sea-water, *In*, *The sea*, Vol. 2, ed. M.N. HILL, Interscience publishers a division of John Wiley & Sons, 554 pp.
- RICHARDS, F.A., J.D. CLINE, W.W. BROENKOW and L.P. ATKINSON (1965): Some consequences of the decomposition of organic matter in Lake

Nitinat, an anoxic fjord. *Limnol. Oceanogr.*, Sup. **10**, R185-R201.  
 RILEY, J. P. (1951): Oxygen, phosphate and nitrate in the Atlantic Ocean. *Bull. Bingham Oceanogr. Collection*, **13**, 1-126.  
 SPENCER, C. P. (1975): The micronutrient elements. In, *Chemical Oceanography*, Vol. 2, ed. J. P. RILEY and G. SKIRROW, Academic Press, Inc.,

London, 245-300.  
 STEEMAN-NIELSEN, E. (1952): The use of radioactive carbon ( $C^{14}$ ) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Perm. int. Explor. Mer.*, **18**, 117-140.  
 築田 満・米田義昭 (1976): 噴火湾における粒状有機物質の鉛直分布と周年変化. 北海道大学水産学部研究彙報, **27**, 152-159.

#### 4. 植物プランクトン・ブルームおよび有毒赤潮発生にかかわる 溶存ケイ酸の役割\*

角 皆 静 男 (北海道大学水産学部)

#### 5. 噴火湾口鹿部沖におけるクロロフィル量の季節変化に関する 10年間の観測, 1973-1982年

西 浜 雄 二 (北海道立栽培漁業総合センター)

噴火湾で春に珪藻の大増殖があることを最初に報告したのは、遠藤 (1911)「噴火湾口における赤潮について」である。この報文の表題は“赤潮”となっているが、渦鞭毛藻による赤潮ではなく、珪藻の増殖によるものであることを著者自身が認めている。

噴火湾における植物プランクトンの季節変化を調査したのは、田村 (1951) が最初である。彼は、噴火湾およびりも以西海域の多くの調査点で、プランクトン・ネット採集を行い、種別の出現状況を5段階法によって表わすとともに、沈澱量を測定し、春秋2回、珪藻の大増殖があることを報告している。

続いて西浜ら (1975) は、噴火湾口の鹿部沖でプランクトンの季節変化を種別に5段階法で表わすとともに、クロロフィル量の季節変化を調べ、早春に珪藻の大増殖があることを述べた。この結果は上述の田村 (1951) が示した春秋2回の型とは異なるものであった。

本稿では、上記調査に引き続いて行った鹿部沖での10年間のクロロフィル量の季節変化について述べる。

報告に先立ち、長期間にわたって現場調査に協力いただいた鹿部村漁業協同組合に、深謝申し上げる。

##### 1. 調査点と調査方法

調査点は噴火湾南岸湾口部の鹿部村出来潤崎の北方

1.4 km, 水深約 20 m (St. 1) および同東南東 4.2 km, 水深約 50 m (St. 2) である (図 1)。1973 年から 1978 年までは St. 1 で、1979 年から 1982 年までは St. 2 でほぼ月 1~2 回調査を行った。

調査項目は水温、塩分、透明度、クロロフィル a 量および硝酸態窒素である。測定方法は西浜ら (1975) が用いたのと同じである。

##### 2. 結 果

1973年から1982年までの上層3層平均のクロロフィル a 量と硝酸態窒素の季節変化を図2に示した。クロロフ

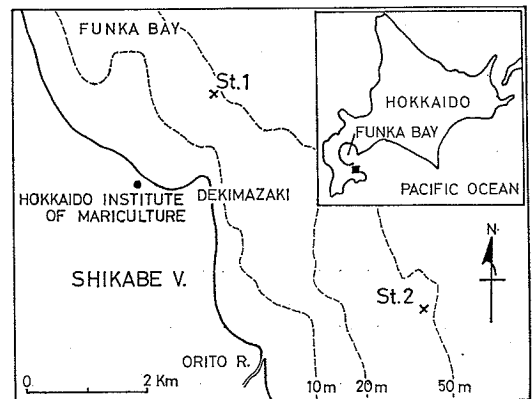


図1 調査点の位置

\* 要録省略