

夏季噴火湾海域における物理・化学環境の変化に対する 植物プランクトン群集の応答

今井圭理*・小達恒夫**・築田 満*・米田義昭*

Response of Phytoplankton Community to Physico-Chemical Changes in the Neritic Water of Funka Bay in Summer

Keiri IMAI*, Tsuneo ODATE**, Mitsuru YANADA*, and Yoshiaki MAITA*

Abstract

Physico-chemical properties of water columns were investigated in the near shore and central part of Funka Bay, from June to October, 1995. During the period the water columns were well stratified. The present study shows that phytoplankton growth was suddenly elevated following the physical events. High chlorophyll-specific growth rate of phytoplankton ($1.15-1.36 \text{ d}^{-1}$) was observed in the water columns where the thermocline was uplifted and the Tsugaru Warm Water was inflowed. On August 4, about 10 m upward shift of the thermocline was observed in the near shore sea area when the strong south-west wind blowed ($4-7 \text{ m s}^{-1}$). In September inflow of the Tsugaru Warm Water occurred at the middle layer of the water column. The high growth of phytoplankton in summer may be supported by upward transport of nutrients derived from the bottom of the euphotic layer by wind induced coastal upwelling. The autumnal high growth of phytoplankton may be attributed to the inflow of Tsugaru Warm Water, which disturbs near bottom waters of euphotic layer.

1. はじめに

一般に沿岸域では、気象条件の変化に伴い局所的に海洋の物理・化学環境が変化し、植物プランクトンの生長および現存量に変動を引き起こすと考えられる。例えば、大谷・出口(1981, 1983)は、噴火湾南岸の渡島半島沿いでは、湧昇に適した風が半日~数日にわたって吹き続けると、沿岸湧昇が起こることを指摘した。また、彼らは湧昇を生じる範囲は海岸線から約10 km沖合以内であり、その範囲内では栄養塩に富む低層水が光の届く水深層まで上昇するので植物プランク

トン現存量が増加することを示した。一方、FURUYA *et al.* (1993)は、大槌湾内において形成された植物プランクトンの春季ブルームが、継続した西風が吹くことによって湾内水が湾外水と交換するため、湾内で発達していたブルームが中断することを見出している。米田・戸屋(1986)およびMAITA(1996)は、異水塊の流入によって栄養塩枯渇状態の有光層内へ下層の栄養塩が移送され、植物プランクトンの高い生産量が持続することを示した。この様に植物プランクトンの現存量は、水柱の物理特性、さらにそれに引き起こされる化学特性に大きな影響を受けて変化する。

一方、噴火湾海域では水塊の交替が季節的に起こり、それに伴いプランクトン群集の構造も大きく変化することが知られている(田村, 1951)。夏季には、親潮系水が変質した高温・低塩分の水塊が表層部を占め、成層構造を形成するが、秋口には高温・高塩分の津軽暖流水が中層より侵入し、それまで湾内を占めていた

1997年11月7日受付 1997年12月26日受理

* 北海道大学水産学部

Faculty of Fisheries, Hokkaido University, 3-1-1
Minato-cho, Hakodate 041-8611, Japan.

** 現在: 国立極地研究所

National Institute of Polar Research 9-10, Kaga
1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515, Japan.

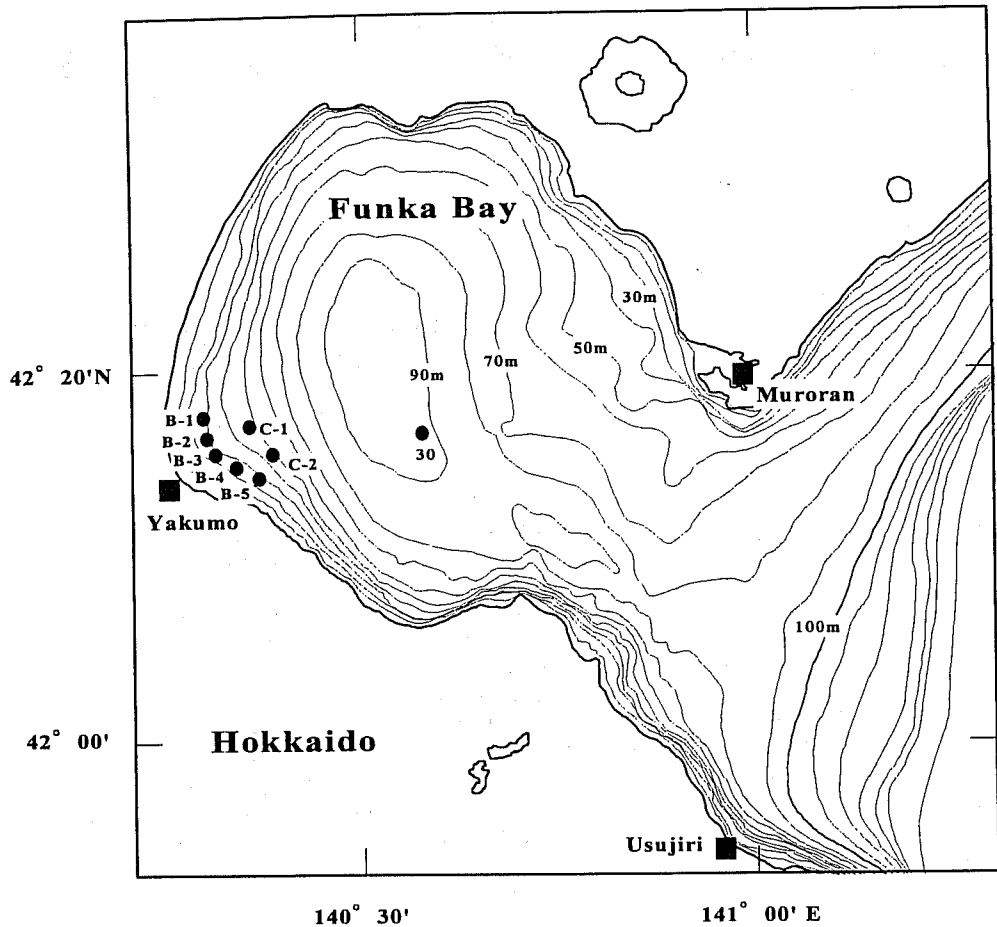


Fig. 1. Location of sampling stations in the Funka Bay.

親潮起源の水塊と入れ替わる（大谷ほか，1971）。また，当海域の水深50m以浅の沿岸域ではホタテガイの垂下式養殖が集約的に行われており，近年では年間約10万トンの生産量を上げている（北海道水産部漁政課，1997）。ホタテガイを含む従属栄養生物の生産を支える当海域の一次生産過程は，年間一次生産量のほぼ半分をもたらす春季の植物プランクトン大增殖によって特徴づけられる（MAITA and ODATE, 1988）。一方，夏季においては水柱の成層構造が発達するので有光層内の栄養塩濃度および植物プランクトン現存量は低いレベルで推移する（塩本，1987；MAITA and ODATE, 1988）。

本研究では，噴火湾海域のホタテガイ垂下式養殖が行われている沿岸部および養殖施設の無い湾中央部において，夏季に低レベルで推移する植物プランクトン現存量の動物プランクトンへのエネルギーフローを明ら

かにするために，植物プランクトン群集の現存量，比生長速度および微小動物プランクトンによる摂食速度を調べ，水柱の物理・化学特性との関係について検討を加えた。

2. 方法

1995年6月から10月の間，ほぼ毎月一回，北海道八雲町ホタテガイ養殖施設内に設定した7測点（B1～5，C1～2）および噴火湾中央部に位置する測点30において海洋観測を行った（Fig. 1）。測点B1～5，C1～2および30の水深はそれぞれ30m，50mおよび90mである。本研究では測点B1～5，C1～2を沿岸部，測点30を湾中央部と呼ぶ。沿岸部の観測は八雲漁業協同組合調査船「やくも」，湾中央部の観測は北海道大学研究調査船「うしお丸」を用いて行った。

水温・塩分は沿岸部においてはメモリーSTD（ア

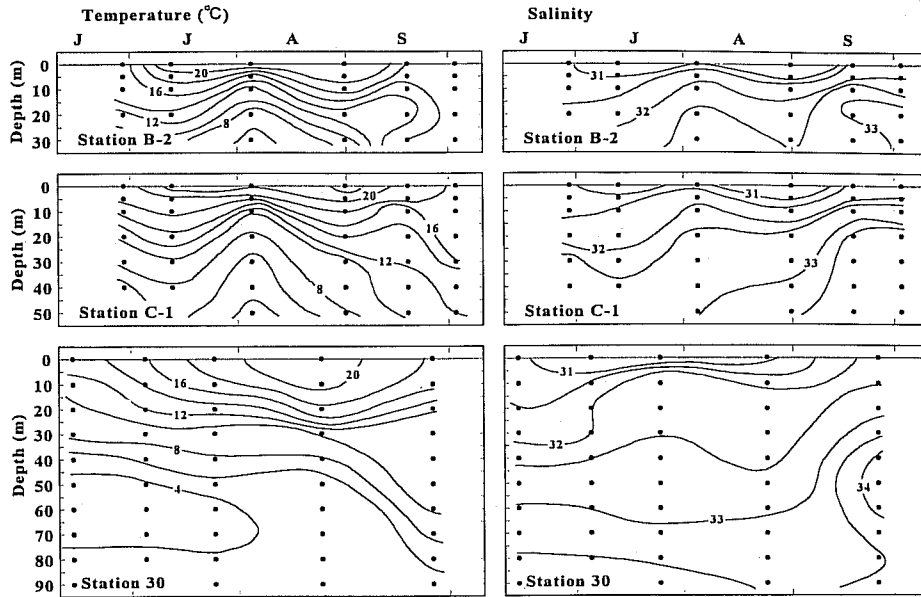


Fig. 2. Seasonal change in the vertical distributions of temperature and salinity in the coastal waters (Stations B2 and C1) and the central waters (Station 30).

レック電子社), 湾中央部においてはCTD (Sea Bird社)によって測定された。海水試料の採集はバンドン採水器(沿岸部)またはニスキン採水器(湾中央部)によった。得られた海水試料をもとに、クロロフィルa濃度および栄養塩濃度の測定が行われた。クロロフィルa濃度はグラスファイバーフィルター(Whatman GF/F)を用いて海水試料(200ml)をろ過した後、N,N-Dimethylformamideを用いて抽出し、PARSONS *et al.* (1984)の方法に従い蛍光法により測定された。栄養塩濃度はSTRICKLAND and PARSONS (1972)に従いTechnicon AutoAnalyzer IIを用いて測定された。また、観測海域の気象条件は、八雲町に設置されたアメダスによる風速データを用いた(気象庁資料)。

沿岸部の測点B2とC1および湾中央部において、植物プランクトン群集の比生長速度と200 μ m以下サイズ画分の微小動物プランクトン群集の摂食圧を希釈培養法(LANDRY and HASSETT, 1982)によって見積もった。培養実験は、沿岸部においては6月から12月の5回、湾中央部では7月から12月の4回、バケツによって表面より採取した表面海水試料を用いて行われた。採取された海水試料は大型の動物プランクトンを取り除くために200 μ m目合いのナイロンメッシュを用いて、直ちにろ過した。その後、この現場海水をグラスファイバーフィルター(Whatman GF/F)を用いて、サ

イフォンによる自然ろ過により、ろ過海水を作成した。このろ過海水を用いて、原海水の率が100%(原海水:ろ過海水=1:0), 75%(同比=3:1), 50%(同比=1:1), 25%(同比=1:3)となるように調整した。これらの海水試料をポリカーボネイト製の瓶(250ml)に充填し、現場表面水温に保った水槽中に入れて、天然光下で24時間の培養を行った。培養開始から終了までの間、6時間毎にそれぞれの希釈率の瓶から採水し(3本)、上述の方法でクロロフィルaを測定し、植物プランクトンの比生長速度と微小動物プランクトンの摂食速度を見積もった。

3. 結果

観測海域の水温・塩分の鉛直分布をFig. 2に示す。沿岸部の7地点ではほぼ同じような水塊構造が見られたので、沿岸部の代表として測点B2およびC1の結果を示した。観測期間中、水柱には成層構造が見られた。沿岸部における表面の水温は7月から8月にかけて、湾中央部では8月下旬に表面水温が20°C以上に達し、水深とともに低下した。8月初旬の沿岸部では、その前後の観測時に比べ水温の低下が見られた。8月下旬以降、いずれの観測点でも表面水温は下降したが、水深25m以深では10°C以上に上昇した。沿岸部では、10月になると30m以浅の層では水温16~18°Cとなり鉛直

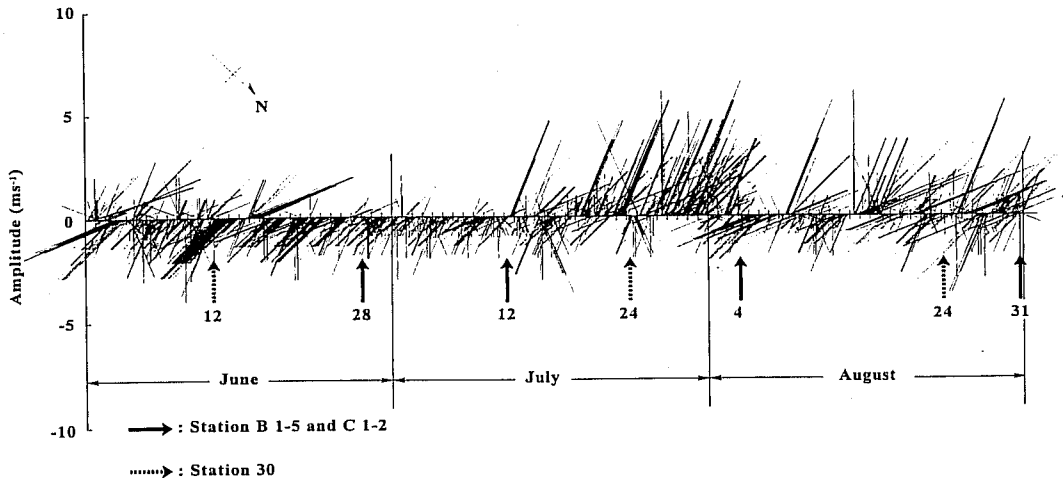


Fig. 3. The wind directions and wind speed recorded at the local observing station belong to Japan meteorological Agency in Yakumo. The arrows of solid line and broken line show the observed days at respectively Stations B 1-5 and C 1-2, Station 30. This wind data were contributed by Japan Meteorological Agency.

的な勾配が小さくなった。湾中央部では9月下旬に40m以深の層の水温が上昇した。8月下旬までの表面の塩分は、すべての測点で31.5 (psu) 以下で、下層に向かって高くなっていった。沿岸部の下層では8月下旬以降、下層の水温上昇に対応して塩分の上昇がみられ、塩分33以上になった。湾中央部でも9月下旬に水深20m以深の塩分が上昇した。特に、40~70mの層では塩分33.5以上となった。

6月から8月に八雲町において観測された、風向・風速を Fig. 3 に示す。6月から7月中旬にかけては風速 2ms^{-1} 前後の東よりの弱い風が卓越していた。7月後半から8月始めにかけては、南西のやや強い風(風速 $4\sim 7\text{ms}^{-1}$) が卓越していた。8月4日の沿岸部の観測はこのような風が2週間ほど連続的に吹いた直後に行われたものである。

沿岸部における7月12日と8月4日の水温・塩分の鉛直分布およびT-Sダイアグラムを Fig. 4 に示す。7月12日と8月4日の水温の鉛直分布を比較すると、8月4日には沿岸部のすべての測点において水深5m以深の水温が7月12日よりも低下しており、水深10m層では約 7°C 低下していた。この時、水温躍層は約10m上昇していた。両時期の塩分の鉛直分布を比較すると、7月12日から8月4日にかけて10~20m層での塩分は約0.5 (psu) 上昇していた。8月4日の10~20m層に見られた水温・塩分は、7月12日に30~50m層で観測されたそれらの値とほぼ一致していた。

沿岸部における7月12日と8月4日の栄養塩およびクロロフィルa濃度の鉛直分布を Fig. 5 に示す。栄養塩は表層から水深20mまで枯渇した状態であったが、両観測月ともそれ以深で増加傾向を示した。しかしながら、7月12日の30m層における硝酸態窒素濃度の平均値 ± 1 標準偏差は、 $1.0\pm 0.6\mu\text{M}$ であったが、8月4日には $2.6\pm 0.6\mu\text{M}$ に増加していた。クロロフィルa濃度は水柱中で7月12日、8月4日それぞれ $0.3\sim 2.7\mu\text{g l}^{-1}$ 、 $0.4\sim 4.3\mu\text{g l}^{-1}$ の範囲で分布していた。また、0~30m層におけるクロロフィルa濃度の平均値は、それぞれ $1.12\pm 0.65\mu\text{g l}^{-1}$ および $1.21\pm 0.79\mu\text{g l}^{-1}$ であり、有意差は無かった ($P>0.05$)。

上述の水温・塩分の性質が一致していた、7月12日の30~50m層と8月4日の10~20m層の硝酸態窒素濃度は、それぞれ $1.27\pm 0.75\mu\text{M}$ および $0.07\pm 0.06\mu\text{M}$ であり、有意に8月4日の濃度が低かった ($P<0.01$) (Table 1)。また、同層内のクロロフィルa濃度は、それぞれ $0.86\pm 0.43\mu\text{g l}^{-1}$ および $1.07\pm 0.54\mu\text{g l}^{-1}$ であ

Table 1. The mean values of nitrate and chlorophyll a concentrations on July 12 and August 4 at the Stations B1-5 and C1-2 in the coastal waters

| | July 12 (30-50m depth) | August 4 (10-20m depth) |
|---|--------------------------------------|----------------------------|
| | mean values \pm standard deviation | |
| Nitrate (μM) | 1.27 ± 0.75 | 0.07 ± 0.06 |
| Chlorophyll a ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) | 0.86 ± 0.43 | 1.07 ± 0.54 |

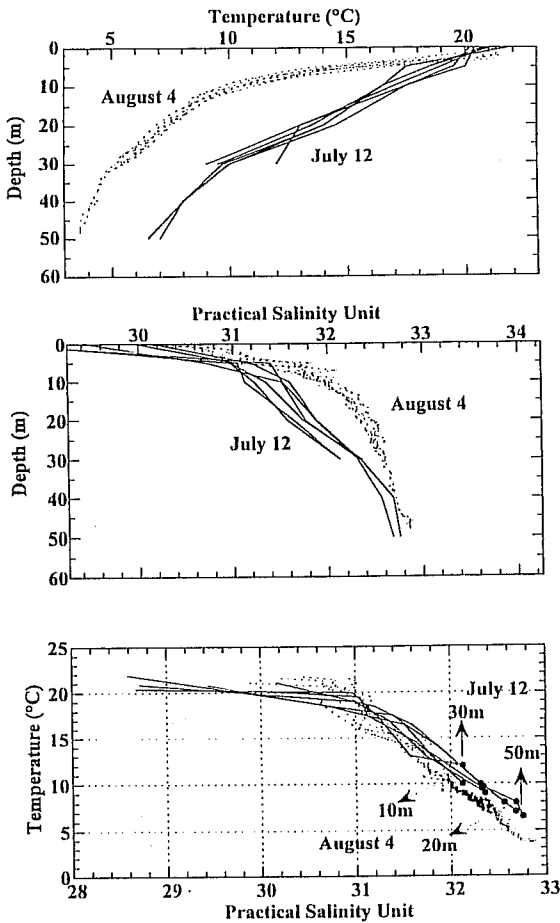


Fig. 4. Vertical distributions of temperature, salinity, and T-S diagrams on July 12 (solid line) and August 4 (broken line) in the coastal waters. The marks on line show the points of 30–50m depth and 10–20m respectively depth on July 12 and August 4.

り、有意差は無かった ($P > 0.05$).

8月から9月にかけての沿岸部および湾中央部の水温・塩分の鉛直分布およびT-SダイアグラムをFig. 6に示す。この時期、水深20m以浅の水温は低下したが、30m以深では上昇した。塩分は全層で上昇しており、水深30~65mでは約33.8になった。T-Sダイアグラムから明らかなように、8月から9月にかけて水深30~65m層では、全湾規模で水塊の入れ替わりがあったことが示される。

Fig. 7は8月から9月における硝酸態窒素およびクロロフィルa濃度の鉛直分布である。水深30~50mの層では8月に $2 \mu\text{M}$ 以下 ($0.68 \pm 0.49 \mu\text{M}$) であった

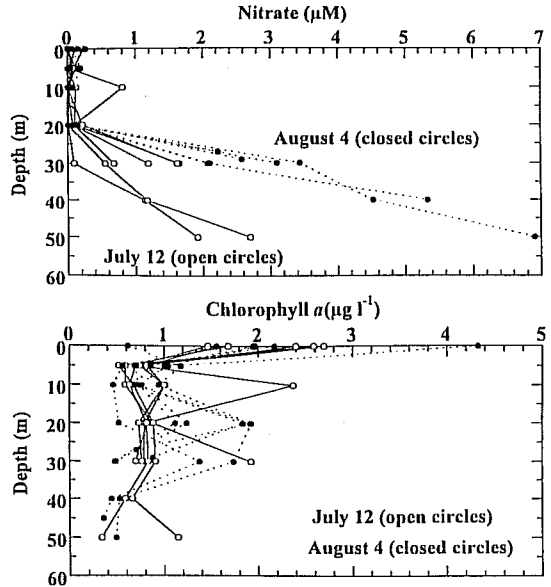


Fig. 5. Vertical distributions of nitrate and chlorophyll *a* concentrations on July 12 and August 4 in the coastal waters.

が、9月では $2.08 \pm 1.98 \mu\text{M}$ となり有意に高かった ($P < 0.05$). 同層内の平均クロロフィルa濃度は8月に $0.53 \pm 0.49 \mu\text{g l}^{-1}$ で、9月の $2.82 \pm 2.14 \mu\text{g l}^{-1}$ の方が有意に高かった ($P < 0.01$). 特に、沿岸部測点C1および2においては、30m付近で $7 \mu\text{g l}^{-1}$ を超す高い顕著なクロロフィルa極大層を形成した。

植物プランクトンの比生長速度は、全観測を通して 0.12d^{-1} から 1.36d^{-1} の範囲であった (Table 2). 全測定数 (13) 中、8測定においては 0.1d^{-1} から 0.7d^{-1} 程度の値を示していたが、8月4日の沿岸部測点B2、C1および9月中旬から下旬ごろの全点においては 1.15d^{-1} から 1.36d^{-1} の値が見積もられた。また、動物プランクトン群集による被摂食速度は、全測定数中、10測定においては 0.1d^{-1} から 0.7d^{-1} の範囲にあった。植物プランクトンの比生長速度が高くなった8月4日の沿岸部測点B2およびC1における、動物プランクトンによる被摂食速度は 0.84d^{-1} から 1.09d^{-1} であり、植物プランクトンの比生長速度の66~95%に相当する高い値であった。9月下旬の湾中央部においては、被摂食速度は 1.32d^{-1} と高い値となったが、9月中旬の沿岸部では 0.38d^{-1} および 0.48d^{-1} であり、植物プランクトンの比生長速度 (1.20d^{-1} および 1.36d^{-1}) と比べ必ずしも高い値ではなかった。

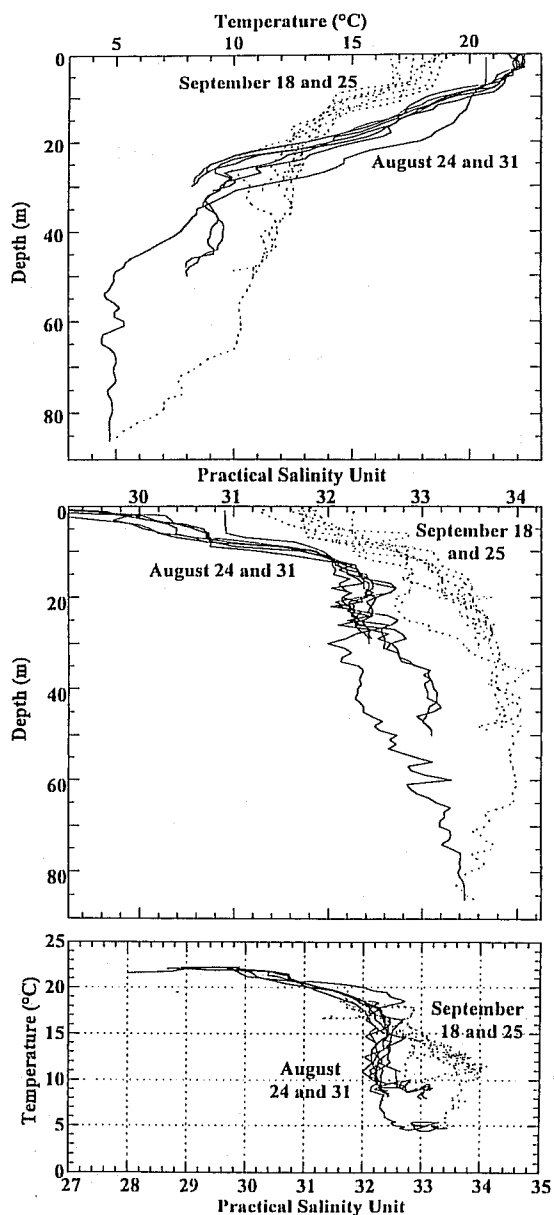


Fig. 6. Vertical distributions of temperature and salinity and T-S diagram in August (solid line) and September (broken line) in the coastal waters (Stations B2 and C1) and the central waters (Station 30).

4. 考察

近年の研究では、気象条件の変動がもたらす海洋の物理構造の変化が、一次生産過程に大きな影響を与えていることが指摘されるようになった。例えば、北太平洋の貧栄養外洋域では低気圧の通過が躍層を壊し、

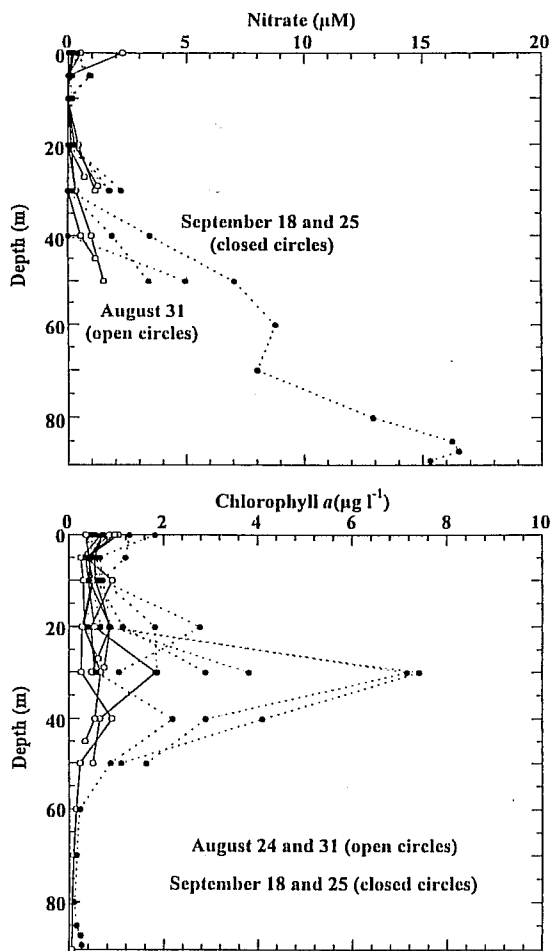


Fig. 7. Vertical distributions of nitrate and chlorophyll *a* concentrations in August (solid line and open circle) and September (broken line and closed circle) in the coastal waters (Stations B2 and C1) and the central waters (Station 30).

栄養塩が有光層に供給されることによって植物プランクトンの生産性が向上する (DITULLIO and LAWS, 1991). また、大谷・出口 (1981, 1983) は、渡島半島南東部太平洋側の木直沖で、 7ms^{-1} 程度の南東の風が10時間連続して吹き続けると、岸から10km沖の範囲の海域で水温躍層が約10m上昇することを明らかにした。8月4日の沿岸部で観測された水温躍層の上昇が、本研究では $4\sim 7\text{ms}^{-1}$ 程度の南西から南南西の風が2週間連吹した後観測されている。八雲から長万部にかけての噴火湾沿岸の海岸線はほぼ南北に延びている。ここでの湧昇に適した風向は南～南西方向で、本研究で

Table 2. Growth rate of phytoplankton community and grazing rate by zooplankton in the near shore (Stations B2 and C1) and the central waters (station 30) of Funka Bay

| Date | Station | Stations B2+C1 | | | Date | Station | Station 30 | Grazing rate | r ² |
|--------------|---------|----------------|--------------|----------------|--------------|---------|-------------|--------------|----------------|
| | | Growth rate | Grazing rate | r ² | | | Growth rate | | |
| June 28 | B2 | 0.12 | 0.32 | 0.79 | July 4 | 30 | 0.65 | 0.68 | 0.89 |
| June 28 | C1 | 0.36 | 0.61 | 0.79 | | | | | |
| August 4 | B2 | 1.15 | 1.09 | 0.94 | July 27 | 30 | 0.49 | 0.13 | 0.75 |
| | C1 | 1.27 | 0.84 | 0.87 | August 24 | 30 | 0.68 | 0.34 | 0.88 |
| August 31 | B2 | 0.38 | 0.48 | 0.88 | | | | | |
| August 31 | C1 | 0.14 | 0.59 | 0.94 | September 25 | 30 | 1.23 | 1.32 | 0.80 |
| September 18 | B2 | 1.20 | 0.38 | 1.00 | | | | | |
| September 18 | C1 | 1.36 | 0.48 | 0.86 | | | | | |

示された風向とほぼ一致していることから、8月4日の沿岸部で観測された水温躍層の上昇は風により表層水が沖合へ運ばれ、下層の冷水が上昇したいわゆる沿岸湧昇の結果と考えられる。

大谷・出口 (1981, 1983) によれば、植物プランクトン現存量は栄養塩に富む下層水が光の届く水深まで上昇することにより、増加することを示した。本研究では、沿岸湧昇が起こっていたと思われる8月4日の30m層における栄養塩濃度は増加していたが、0~30m層におけるクロロフィル a 濃度は、それ以前の観測値と有意差はなかった。希釈培養法で得られた植物プランクトンの比生長速度は他の時期よりも高い値であった。この値によれば、植物プランクトンが1日1回以上分裂することとなり (GIFFORD, 1988)、夏季の噴火湾としては高い生長速度である。一方、同時に得られた微小動物プランクトン群集の捕食による減耗速度は、植物プランクトンの比生長速度の66~95%に相当した。このことは、沿岸湧昇によって植物プランクトンの生長が活発化するが、同時に動物プランクトンによる捕食強度が高まるため植物プランクトンの現存量は大きく増加しないことを示しているものと思われる。また、動物プランクトンの摂食速度が植物プランクトンの比生長速度に比べるとやや低かったことは、微小動物プランクトンの他に本研究では取り扱えなかった調査海域に生息する植食者の貢献を示唆する。特に、本研究を行った沿岸部はホタテガイ養殖施設内であることから、植物プランクトンの比生長速度の最大35%に相当する分がホタテガイなどを含む養殖施設周辺生態系の動物群集へのエネルギーフローおよび海底への沈降量

と考えることができる。

9月には、沿岸部・湾中央部とも高い植物プランクトンの比生長速度が見積もられた。この時期には水深30~65m層で全湾規模で水塊の入れ替わりがあったことが示された。これは例年この時期に起こる夏季噴火湾水と津軽暖流水との交換である (大谷・木戸, 1980)。また、異水塊の流入によって栄養塩枯渇状態にある有光層内へ下層の栄養塩が移送されることにより、植物プランクトンの生産量を高めている可能性がある (米田・戸屋, 1986; MAITA, 1996)、津軽暖流水流入する層が栄養塩躍層の形成される有光層底部と一致するので、栄養塩躍層付近で擾乱が生じ、下層の栄養塩が有光層内へ広がるため植物プランクトンの生産量を高められていると考えられる。

夏季の噴火湾海域では植物プランクトン量が少ない状態で推移するため、一次生産も低い (塩本, 1987; MAITA and ODATE, 1988)。しかし、本研究では気象条件や季節的な水塊交替によってもたらされる水柱の物理・化学環境の変化により、間接的に植物プランクトンの生産が高まることが示された。特に、ホタテガイ養殖の盛んな湾内沿岸部においては、パルス的に生産される有機物をホタテガイも利用しているものと考えられる。こうした養殖施設のある沿岸海域においては、本研究で明らかにされたような突発的な一次生産の貢献を考慮に入れて生態系のエネルギーフローおよび物質循環を明らかにしてゆく必要がある。

謝 辞

本稿を取り纏めるに際し北海道大学水産学部三宅秀

男博士に有益な助言を得た。また、現場における観測の際には、八雲漁業協同組合の皆様および北海道大学水産学部「うしお丸」の乗組員の皆様の協力を得た。ここで深く感謝する次第である。本研究の一部は北水協会による研究助成、文部省科学研究費補助金（課題番号 08660215）および北海道大学教育研究学内特別経費を用いて行われた。

引用文献

- DITULLIO, G. R. and E. A. LAWS (1991) Impact of an atmospheric-oceanic disturbance on phytoplankton community dynamics in the North Pacific Central Gyre. *Deep-Sea Res.*, **36**, 1305-1329.
- FURUYA, K., K. TAKAHASHI and H. IIZUMI (1993) Wind-dependent formation of phytoplankton spring bloom in Otsuchi Bay, a ria in Sanriku, Japan. *J. Oceanogr.*, **49**, 450-475.
- GIFFORD, D. J. (1988) Impact of grazing by microzooplankton in the Northwest Arm of Halifax Harbour, Nova Scotia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **47**, 249-258.
- 北海道水産部漁政課（編）（1997）平成7年北海道水産現勢，北海道，449pp.
- LANDRY, M. R. and R. P. HASSETT (1982) Estimating the grazing impact of marine microzooplankton. *Mar. Biol.*, **67**, 283-288.
- MAITA, Y. (1996) Characteristic on the distribution and composition of nutrients in the Okhotsk Sea. International workshop on the Okhotsk Sea and Arctic; The physics and biogeochemistry implied to the global cycles, Proceedings, Tokyo, 140-148.
- MAITA, Y. and T. ODATE (1988) Seasonal changes in size-fractionated primary production and nutrient concentrations in the temperate neritic water of Funka Bay, Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **44**, 268-279.
- 米田義昭・戸屋健治（1986）亜寒帯海域における栄養塩の分布と構成比の特性. 水産海洋研究会報, **50** (2), 105-113.
- 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. 北大水産研究彙報, **31**, 84-114.
- 大谷清隆・木戸和夫（1980）噴火湾の海洋構造. 北大水産研究彙報, **31**, 84-114.
- 大谷清隆・出口良二（1981）渡島半島東岸の沿岸湧昇-1. 北大水産研究彙報, **32**, 77-96.
- 大谷清隆・出口良二（1983）渡島半島東岸の沿岸湧昇-2. 北大水産研究彙報, **34**, 291-311.
- PARSONS, T. R., Y. MAITA and C. M. LALLI (1984) A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analyses. Pergamon Press, Oxford, 173pp.
- 塩本明弘（1987）植物プランクトンによる無機窒素化合物とりこみに関する研究. 北海道大学学位論文, 函館, 76 pp.
- STRICKLAND, J. D. H. and T. R. PARSONS (1972) A practical handbook of seawater analysis. Fish. Res. Bd. Canada, Ottawa, 311pp.
- 田村 正（1951）噴火湾近海に出現するプランクトンの季節的变化について. 北水試研報, **22**, 221-230.