HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	西部北太平洋155°E線に沿った春季植物プランクトン群集の水平および鉛直分布：多波長励起蛍光光度計による解析
Author(s)	松本, 健太郎; 有馬, 大地; 松野, 孝平; 山﨑, 康裕; 大西, 広二; 大木, 淳之; 平譯, 享; 山口, 篤; 今井, 一郎
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 66(1), 29-38
Issue Date	2016-03-18
DOI	10.14943/bull.fish.66.1.29
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/61052
Type	bulletin (article)
File Information	bull.fish.66.1.29.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北 大 水 産 彙 報
66(1), 29–38, 2016.
DOI 10.14943/bull.fish.66.1.29

西部北太平洋 155°E 線に沿った春季植物プランクトン群集の水平および鉛直分布：多波長励起蛍光光度計による解析

松本健太郎[1)]・有馬　大地[1)]・松野　孝平[2)]・山﨑　康裕[3)]・大西　広二[4)]
大木　淳之[4)]・平譯　　亨[4)]・山口　　篤[4)]・今井　一郎[4)]

(2015 年 11 月 30 日受付，2015 年 12 月 21 日受理)

The Spatial and Vertical Distributions of a Spring Phytoplankton Community along 155°E in the Western North Pacific : An *In Situ* Multi-Excitation Fluorometer Analysis

Kentaro MATSUMOTO[1)], Daichi ARIMA[1)], Kohei MATSUNO[2)], Yasuhiro YAMASAKI[3)], Hiroji ONISHI[4)], Atsushi OOKI[4)], Toru HIRAWAKE[4)], Atsushi YAMAGUCHI[4)] and Ichiro IMAI[4)]

Abstract

The spring phytoplankton community in the western North Pacific is characterized by large variability in both the horizontal and vertical dimensions. To evaluate this variability, phytoplankton communities at 39°30′N–44°00′N along 155°E were investigated *in situ* using a multi-excitation fluorometer during May 2014. The sea surface chlorophyll *a* (Chl. *a*) level was high and composed mainly of diatoms near 43°30′N–42′N, while it was low and composed of dinoflagellates south of 40°N. Based on seven fixed-station investigations, the phytoplankton communities were classified into 4 types : a low Chl. *a* level before bloom (44°N), massive diatom bloom (42°N–43°N), low Chl. *a* level with dinoflagellates (40°N–41°N) and lowest Chl. *a* (at the southernmost station at 39°30′N). These phytoplankton communities corresponded with the formation of a water mass separating the Subarctic front (SAF) and Subarctic boundary (SAB). Multi-excitation fluorometry data showed a high correlation with Chl. *a* measurements obtained via Thermo-salinometer and biovolume microscopic analyses (r^2=0.67–0.97, p<0.05). Thus, we concluded that a multi-excitation fluorometer can be applied for the evaluation of detailed spatial and temporal changes in the phytoplankton community at various locations.

Key words : Chl. *a* sensor, Diatom, Dinoflagellate, Multi-excitation fluorometer, Phytoplankton, Spring bloom

緒　　言

海洋において植物プランクトンは重要な一次生産者であり，植物プランクトンの現存量や分類群組成は，捕食者である動物プランクトンや，浮魚類など高次生物に大きな影響を及ぼす (Lalli and Parsons, 1997)。北太平洋亜寒帯海域において，春になると植物プランクトンは冬季の鉛直混合により，有光層以深から供給された栄養塩を用いて，活発に光合成を行う (Longhurst, 2006)。北太平洋亜寒帯域は西部と東部で植物プランクトン群集の特徴が異なる (Harrison et al., 1999)。西部海域はクロロフィル *a* (Chl. *a*) の季節変化が大きく (Shiomoto and Asami, 1999)，春季には細胞サイズが 10 μm 以上の大型植物プランクトンが優占することが知られている (Odate and Maita, 1989 ; Shiomoto and Hashimoto, 2000)。南北変化も大きく，亜寒帯域の窒素源は硝酸塩であるが，亜熱帯域の窒素源はアンモニアであり，優占植物プランクトン群集サイズにも南北差がある (Shiomoto and Maita, 1990)。ただ，これらの知見はいずれも採水試料に基づくもので，細かな時空間スケールで変動する植物プランクトン群集の時空間分布を連続的に評価した例は乏しいのが現状である。

植物プランクトン現存量の微細な時空間分布を評価するには，採水試料採集よりも，機器による連続測定の方が適している。植物プランクトン現存量の微細な時空間変動を評価し得る機器としては，Chl. *a* センサーが有用である (Lorenzen, 1966)。しかし，Chl. *a* センサーでは分類群

[1)] 北海道大学大学院水産科学院
(*Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University*)
[2)] 国立極地研究所
(*National Institute of Polar Research*)
[3)] 独立行政法人水産大学校
(*National Fisheries University*)
[4)] 北海道大学大学院水産科学研究院
(*Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University*)

を判別することが出来ないのが欠点であった。近年，植物プランクトンの分類群組成を評価できる機器として，多波長励起蛍光光度計が開発された (Horiuchi and Wolk, 2008；吉田・長澤，2012)。植物プランクトンは分類群毎に異なる補助色素を有している (Jeffrey et al., 1997)。この色素組成の違いにより，植物プランクトンは分類群毎に異なる光吸収スペクトルをもつ (Jeffrey and Hallegraef, 1987)。光化学反応の光化学系 II (PSII) から放出される蛍光強度は，光吸収量と良い比例関係にあるため，光吸収スペクトルと励起蛍光スペクトルは相似関係を示す (Lutz et al., 2001)。つまり，*in vivo* 励起蛍光スペクトルは光吸収スペクトルと同様に，色素組成を反映した植物プランクトンの分類群組成の情報を得ることが出来る (Yentch and Phinney, 1995)。多波長励起蛍光光度計は波長 375-590 nm 間の 9 波長の励起光を照射し，受光波長 640-1,000 nm 間の蛍光強度を測定する機器で (堀内ら，2008；Yoshida et al., 2011)，植物プランクトンの分類群組成を評価することが出来る。また，多波長励起蛍光光度計は最短 0.1 秒間隔の，時間的にも細かな *in vivo* 測定が可能である。このように多波長励起蛍光光度計は，植物プランクトン現存量や分類群組成の微細分布評価が可能な機器であるが，まだ実際の海洋における研究例は少ないのが現状である。

本研究は，2014 年 5 月に行われた北海道大学附属練習船おしょろ丸第 269 次航海の途上，西部北太平洋 155˚E の南北観測線に沿って，多波長励起蛍光光度計を用いた植物プランクトン群集の連続表面海水モニタリングと，44˚N-39˚30′N 間に設けた 7 定点における鉛直分布の観測を行い，植物プランクトンの相対的な現存量と分類群組成の微細分布を明らかにしたものである。多波長励起蛍光光度計により得られたデータは，同時に連続測定したサーモサリノメーターの Chl. *a* センサーの値や，採水試料の検鏡に基づく植物プランクトンの分類群定量データとの比較を行った。

材料及び方法

表面海水連続モニタリング

北海道大学附属練習船おしょろ丸の第 269 次航海 (2014 年 5 月 8 日-19 日) の 155˚E 線南北観測ラインにおいて，船底 (喫水下約 5 m) よりポンプアップした表層海水について，船舶装備のサーモサリノメーター (ケーエンジニアリング，CT センサー RBR 社製，蛍光センサー Seapoint 社製) による水温，塩分および蛍光度の連続測定と，多波長励起蛍光光度計 (MFL05W-CAD, JFE アドバンテック) による蛍光スペクトルの連続測定を行った。堀内ら (2008) の手法により，励起スペクトルから珪藻類，渦鞭毛藻類および緑藻類の相対的な現存量を推定した。本研究では抽出 Chl. *a* 濃度は測定していないので，現存量は相対値であることに注意を要する。

定点観測

155˚E 線では 7 点 (44˚00′N，43˚15′N，42˚30′N，41˚45′N，41˚00′N, 40˚15′N および 39˚30′N) にて停船観測を行った (Fig. 1)。観測時には CTD (Sea-Bird 911 Plus, Sea-Bird Electronics) を水深 500 m まで降下し，ニスキンロゼットサンプラーにて水深 10, 30 および 50 m 層，バケツにて海表面より 10 mL ずつを採水した。また各定点の CTD キャストにて Chl. *a* 蛍光最大値を示した層より 1 L の試水を採水し，終濃度 1% のグルタールアルデヒドを加え固定した。10 mL 採水試料は凍結保存し持ち帰り，オートアナライザー (QuAAtro 2-HR, BLTEC) にて硝酸塩，リン酸塩および珪酸塩濃度をそれぞれ測定した。多波長励起蛍光光度計はワイヤ-を用いて水深 35 m まで降下し，降下および上昇中に 0.5 秒毎の測定を行った。

検鏡

1 L 採水試料は陸上実験室にて，沈澱濃縮法により 20 ml まで濃縮した。濃縮試料から 0.1 ml をスライドガラス上に分取し，倒立顕微鏡下で珪藻類の種同定と計数を行った。珪藻類の種同定は Hasle and Syvertsen (1997) と Hoppenrath et al. (2009) を参照した。また渦鞭毛藻類については，濃縮試料に Calcofluor White (M2R, Sigma-Aldrich) を添加し，1 時間以上染色後に，0.2-1.0 ml をスライドガラス上に分取し，UV 励起光下で鎧版配列を観察して種同定と計数を行った (Fritz and Triemer, 1985)。渦鞭毛藻類の種同定は福代ら (1997) と Hoppenrath et al. (2009) によった。すべての試料は 1 回ずつ検鏡し，計数の際には種同定の精度を考慮して，細胞サイズが 10 μm より大きい細胞を同定および計数の対象とした。また，細胞サイズを接眼ミクロメー

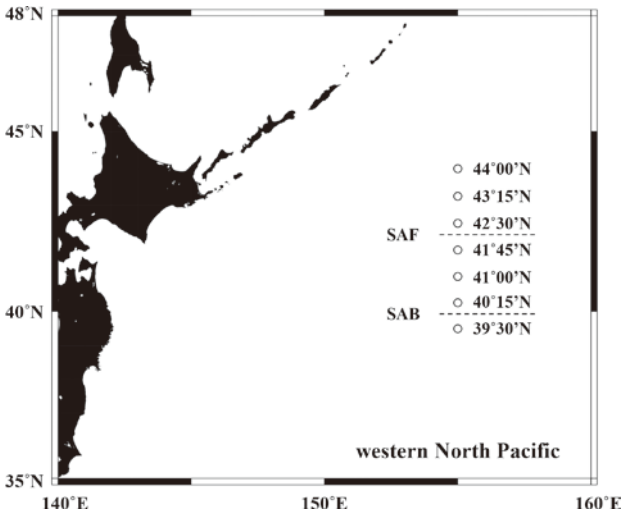

Fig. 1. The location of the sampling stations along the 155˚E line in the western North Pacific from May 8 to 19, 2014. Approximate positions of the Subarctic Front (SAF) and Subarctic Boundary (SAB) are shown using broken lines (cf. Fig. 3).

ターにより 10 μm の精度で測定し，細胞体積換算式 (宮井ら，1988) を用いてバイオボリューム ($\mu m^3\ \mu L^{-1}$) を算出した。

結　　果

多波長励起蛍光光度計の測定特性

多波長励起蛍光光度計による蛍光値は，船舶装備型のサーモサリノの蛍光値と良い相関を示した (Fig. 2)。多波長励起蛍光光度計の蛍光値を Y, サーモサリノの蛍光値を X とした Y=aX の式で回帰すると Y=0.687X となり，多波長励起蛍光光度計の蛍光値はサーモサリノの蛍光値の 68.7% であった。この回帰式は r^2=0.968, p<0.0001 と極めて有意な相関関係を示した。

表面海水モニタリング

155˚E 線に沿った CTD に基づく水温・塩分の鉛直断面図と，サーモサリノメーターと多波長励起蛍光光度計による表面海水の水温・塩分および蛍光値の結果を Fig. 3 に記す。155˚E 線では水温 4˚C 等温線が鉛直的に描かれる亜寒帯フロント (Subarctic front : SAF) は 42˚N 付近にあり，40˚N 付近の塩分 34 の等温線収斂部には亜寒帯境界 (Subarctic boundary : SAB) があったと判断された (安間ら，1990 ; Fig. 3A, B)。表面海水の水温と塩分はいずれも SAF 以北では低く一定であったが，SAF から SAB の間 (移行領域) では上昇し，SAB 以南ではいずれもさらに高かった (Fig. 3C)。蛍光値は SAF 以北の 44˚N では低い値で，43˚30′N-42˚00′N にかけては 4〜6 と高かったが (Fig. 3D)，これに対応した水温と塩分の変化は見られなかった (Fig. 3C)。優占分類群は SAF 以北では珪藻類と渦鞭毛藻類が同程度であったが，SAF 以南では渦鞭毛藻類であった (Fig. 3E)。

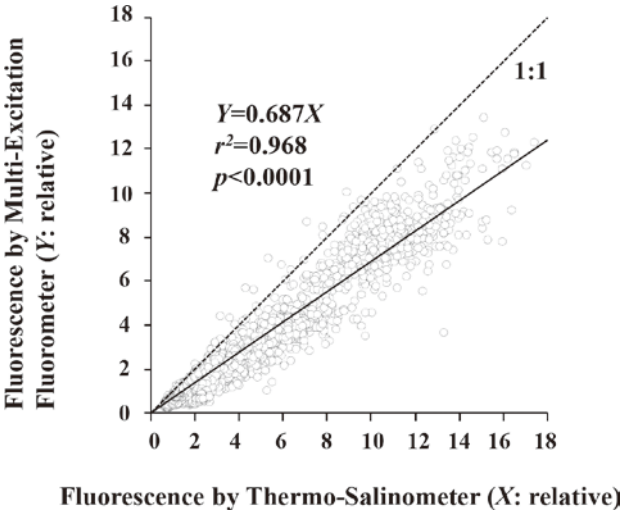

Fig. 2. Comparison between multi-excitation fluorometer-derived fluorescence (Y) and thermo-salinometer-derived fluorescence (X) for the total pigments identified via *in situ* multi-excitation fluorometer in the western North Pacific along the track of the T/S *Oshoro-Maru* cruise from May 8 to 19, 2014. The dashed line indicates positions along the line Y=X (1 : 1).

定点観測

155˚E 線に沿った 7 定点における水理環境，栄養塩，蛍光値および植物プランクトン分類群組成は，大きく 4 タイプに分けられた (タイプ①-④) (Fig. 4)。最北端の 44˚N では水温と塩分ともに鉛直的に一様で，栄養塩も豊富に存在し，蛍光値は低く，優占分類群は全層を通して珪藻類であった (タイプ①)。SAF 以北の 43˚15′N と 42˚30′N では水深 20 m 付近に弱い水温躍層が見られ，それ以浅の栄養塩は低く，蛍光値は躍層以浅で 5〜10 の極大を示した。また，優占分類群は躍層以浅では珪藻類であった (タイプ②)。SAF から SAB の間の移行領域の 3 定点 (41˚45′N, 41˚00′N, 40˚15′N) では，水深 50 m 以浅の水温は 9˚C 程度で一様で躍層は見られず，栄養塩も低く，蛍光値も低く，優占分類群は渦鞭毛藻類であった (タイプ③)。最南端の 39˚30′N では，SAB を越えて，水温は 13˚C とさらに高い値を示し，栄養塩はさらに低く，蛍光値も低く，優占分類群は渦鞭毛藻類であった (タイプ④)。

検鏡結果

検鏡による各定点の蛍光最大層における細胞密度，バイオボリューム，および検鏡バイオボリュームと多波長励起蛍光光度計の蛍光値との相関解析結果を Fig. 5 に示す。全定点を通して細胞密度およびバイオボリューム共に珪藻類の方が渦鞭毛藻類よりも多かった。細胞密度とバイオボリューム共に 43˚15′N (0 m) と 42˚30′N (20 m) で高く，その他の定点では低かった。珪藻類 *Fragilariopsis* 属と *Proboscia* 属は 41˚45′N 以北の定点のみで出現した。41˚00′N と 40˚15′N では *Thalassiosira* 属が優占し，39˚30′N ではバイオボリュームに *Coscinodiscus* 属が優占していた。検鏡に基づくバイオボリュームと多波長励起蛍光光度計の蛍光値の間には，有意な相関が見られた (r^2=0.668, p<0.05) (Fig. 5C)。

考　　察

多波長励起蛍光光度計の妥当性

外洋域における植物プランクトン現存量や種組成の情報は, 海洋低次生態系構造を理解する上で欠かせない (Lalli and Parsons, 1997)。植物プランクトン現存量評価の方法として，採水試料に基づく顕微鏡を用いた観察手法がある。しかし，顕微鏡観察は種同定技術が必要で，検鏡に多大な時間を要する。また，採水間隔はどうしても粗くなってしまうため，植物プランクトンの微細な時空間変動を評価するのに不向きであった。植物プランクトンの詳細な時空間変動を評価するには機器による自動測定が適している。現場植物プランクトンの機器測定として，最も

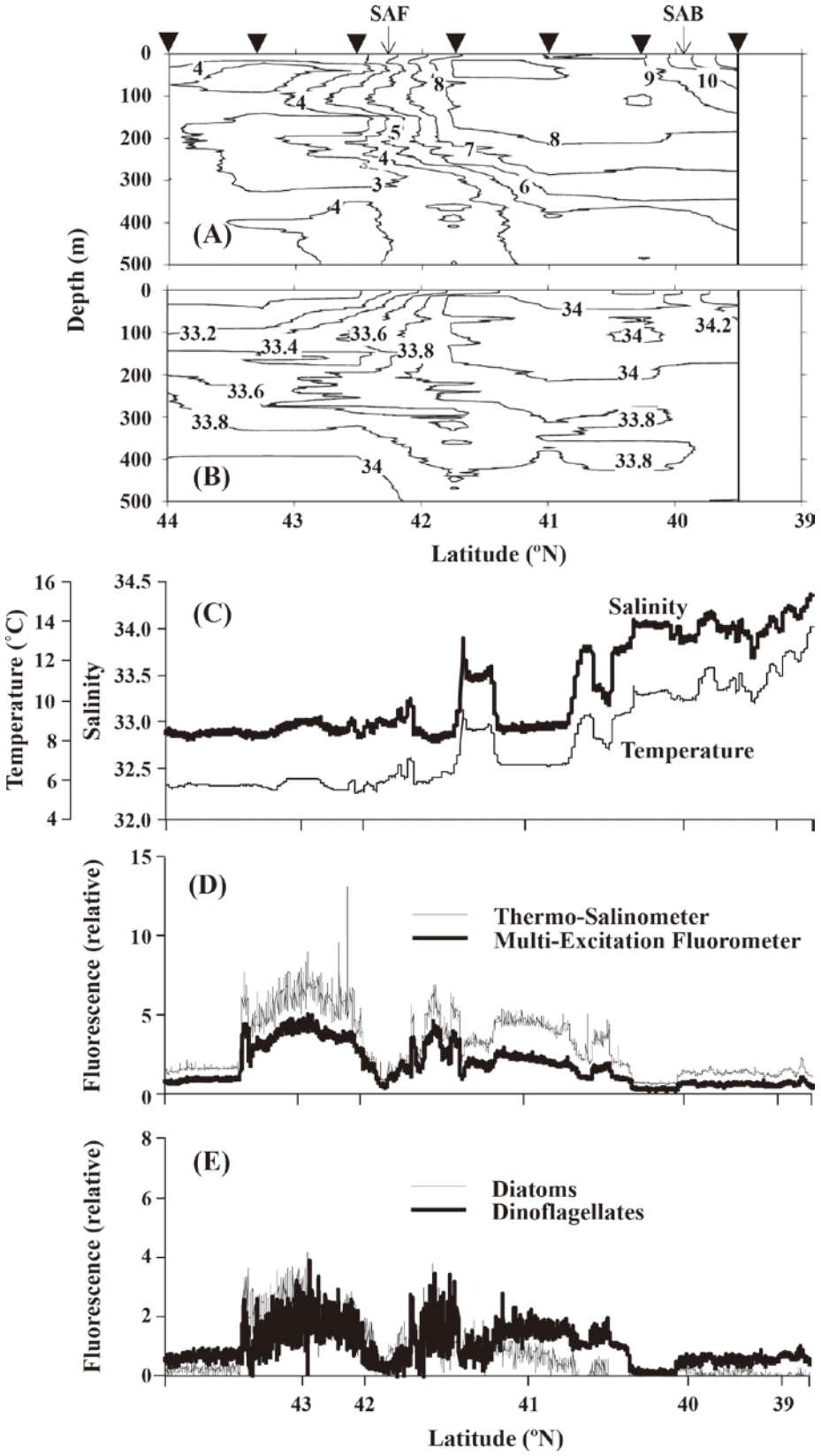

Fig. 3. Latitudinal changes in the vertical dimension of temperature (A) and salinity (B), surface temperature and salinity (C), total fluorescence detected by *in situ* multi-excitation fluorometer and thermo-salinometer (D), and diatom and dinoflagellate fluorescence detected by *in situ* multi-excitation fluorometer (E) in the western North Pacific along 155°E from May 8 to 19, 2014. The solid triangles in (A) indicate sampling stations. The positions of the Subarctic front (SAF) and Subarctic boundary (SAB) are shown with arrows in (A).

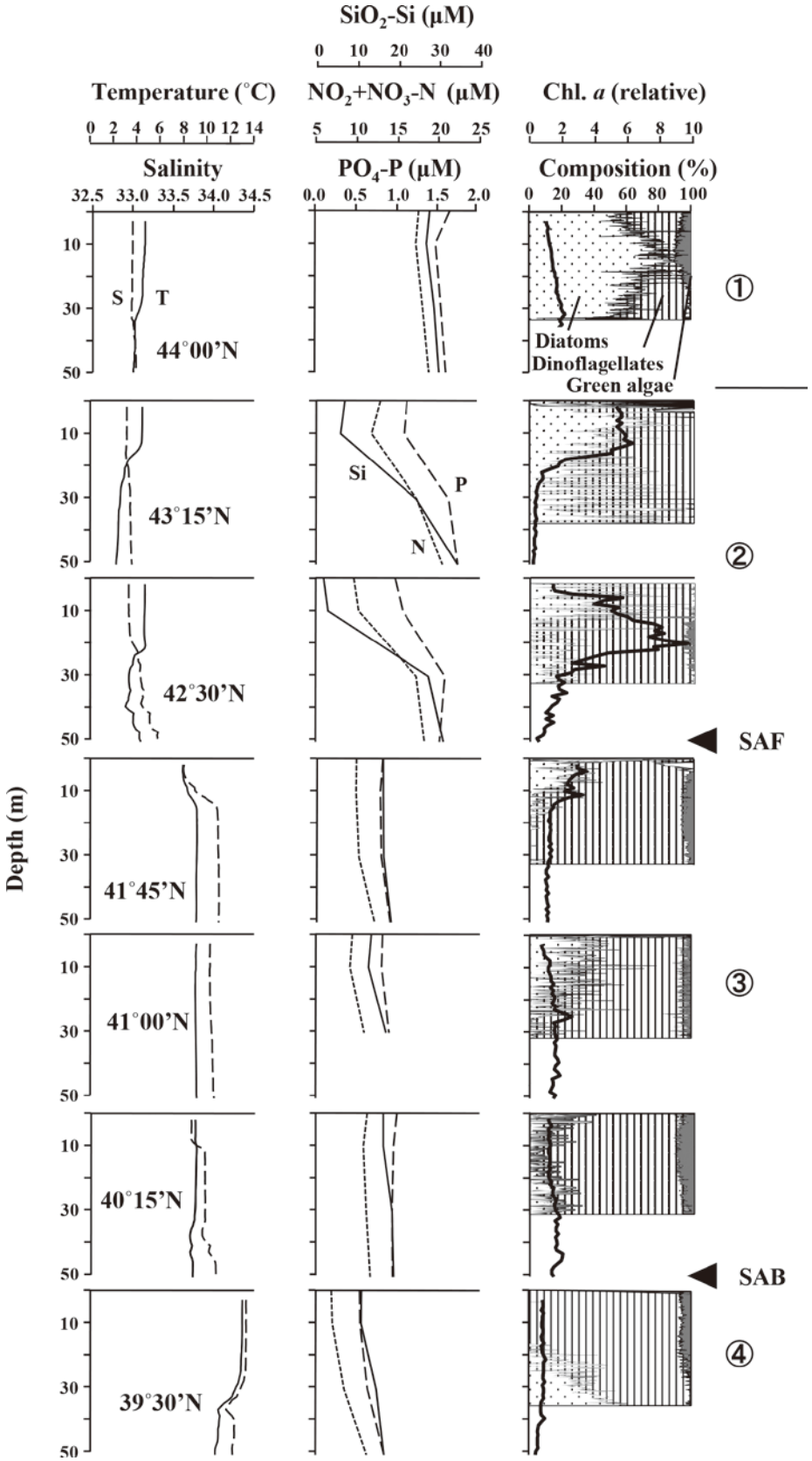

Fig. 4. The vertical distribution of temperature and salinity (left), inorganic nutrients (middle) and chlorophyll *a* and their taxonomic compositions (right) at seven stations along the 155˚E line in the western North Pacific from May 8 to 19, 2014. The solid arrow heads indicate the positions of the Subarctic Front (SAF) and Subarctic Boundary (SAB) (cf. Fig 3). The circled numbers in the right column indicate the four types of phytoplankton communities along the 155˚E line.

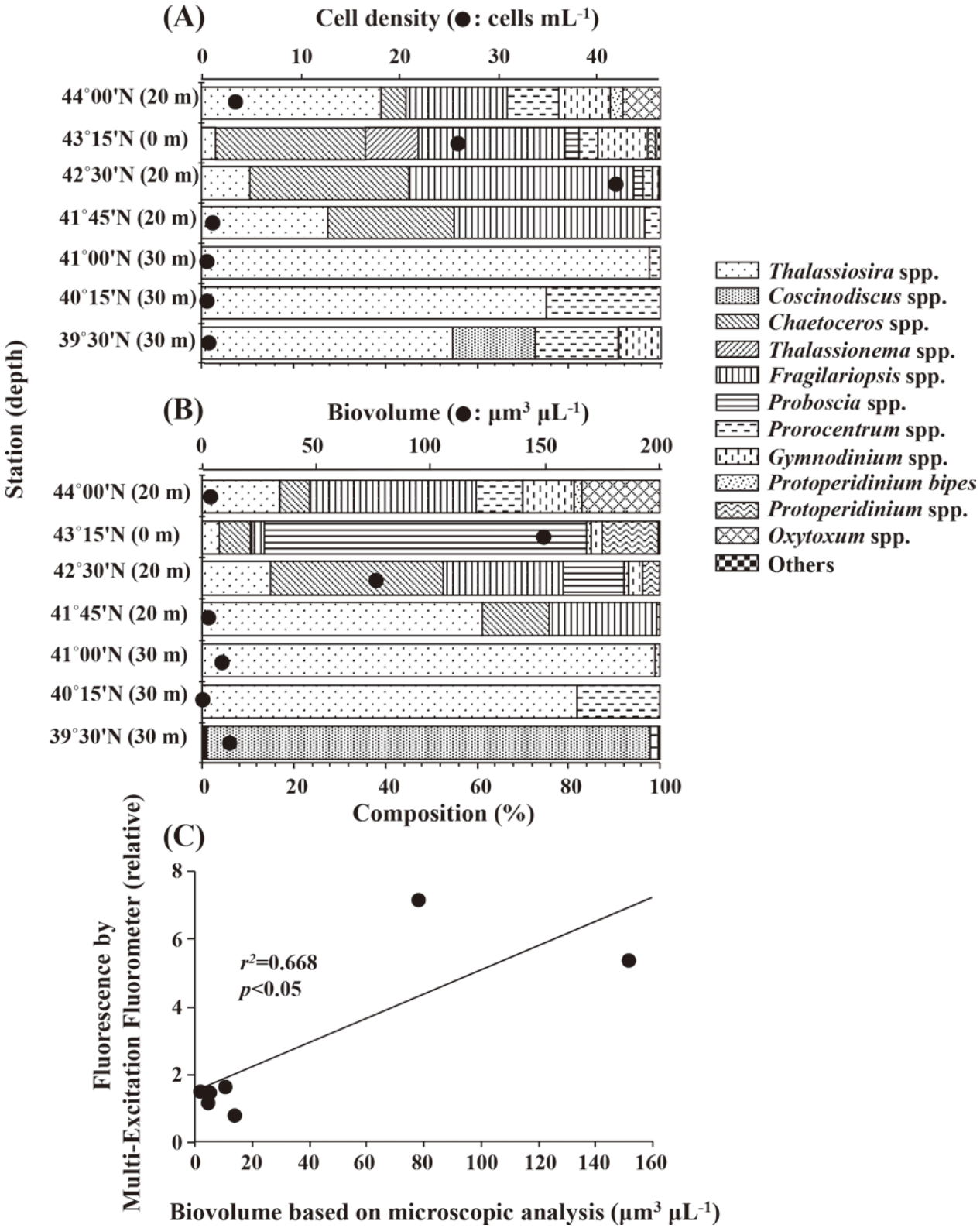

Fig. 5. Results of a microscopic analysis. Species composition in terms of phytoplankton cell density (A) and biovolume (B) at the fluorescence peak depth of each station along the 155°E line in the western North Pacific from May 8 to 19, 2014, are indicated. The relationship between fluorescence evaluated by *in situ* multi-excitation fluorometry and the biovolume quantified by microscopic analysis is shown (C).

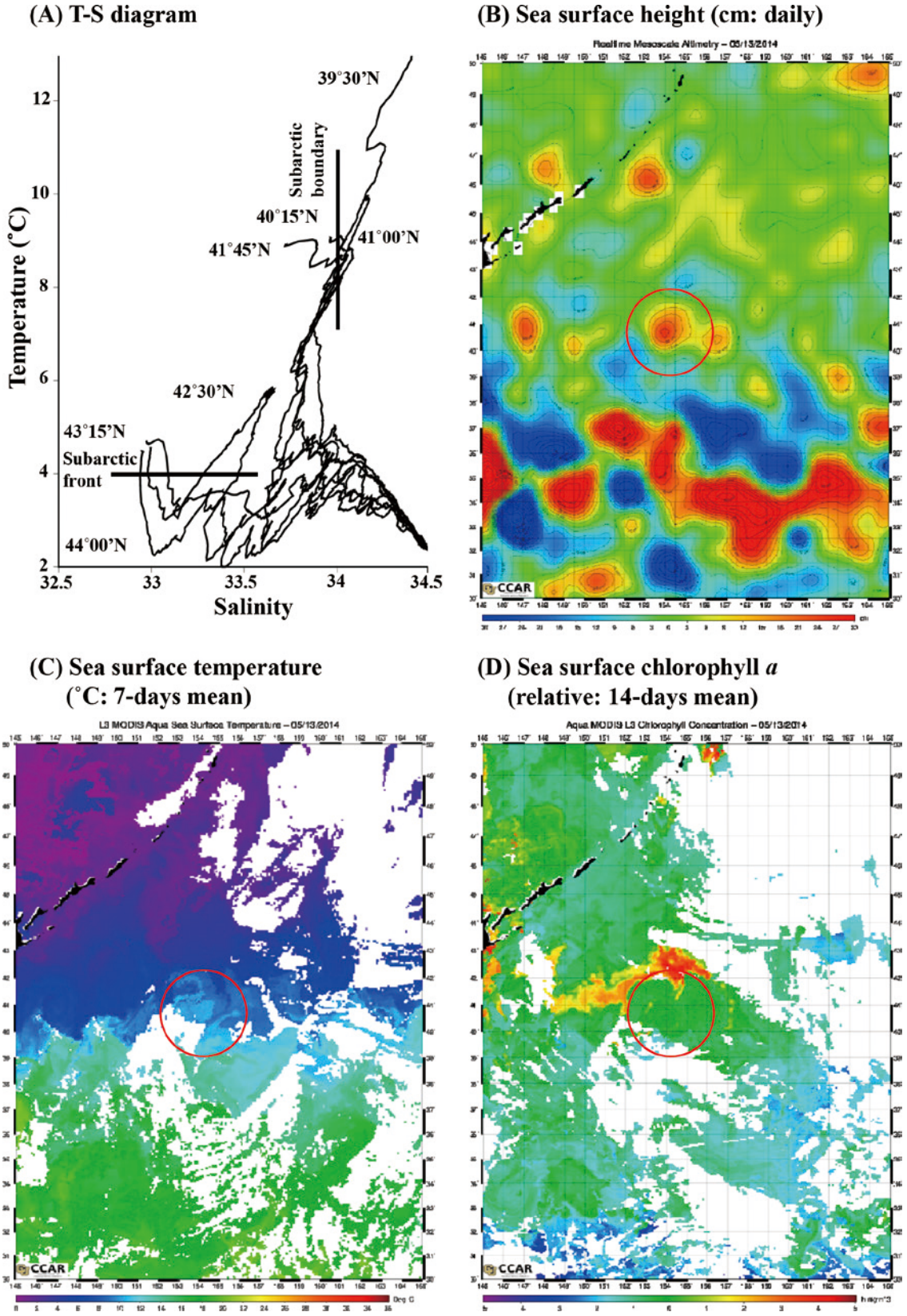

Fig. 6. T-S diagram of data obtained at seven stations along the 155°E line (A), the sea surface height (B), sea surface temperature (C) and chlorophyll *a* levels (D) in the western North Pacific from May 8 to 19, 2014. The data for (B)-(D) were obtained from Colorado University (http://eddy.colorado.edu/ccar/ssh/nrt_global_grid_viewer). The positions of the subarctic front (i.e., the 4°C isotherm line) and subarctic boundary (the 34 isohaline line) are shown in (A). The circles in (B)-(D) indicate the approximate positions of the warm core detected by satellite data.

広く普及している Chl. *a* センサーによる観測手法は，励起効率の高い，青色単一光源による Chl. *a* 濃度測定である (吉田･長澤, 2012)。本研究で使用したサーモサリノメーター付属の蛍光センサーはこれに相当する。しかし，この手法は全植物プランクトンの Chl. *a* 濃度測定のみで，分類群毎の現存量推定が出来ず，植物プランクトン分類群により異なる生態学的役割の評価は出来ない。

植物プランクトンは分類群毎に異なる補助色素組成を持ち，補助色素は互いに異なる光吸収特性を持つことから，光吸収スペクトルとほぼ比例関係にある励起スペクトルを測定することで，植物プランクトン分類群組成の推定が可能になる (吉田・長澤，2012)。多波長励起蛍光光度計は，375–590 nm 間の 9 波長の励起波長を有している (Horiuchi and Wolk, 2008)。海水中には，植物プランクトン以外に光学特性を持つ要因として，溶存有機物，デトライタス，水による吸収散乱成分などが存在するため，植物プランクトンの *in vivo* 光吸収スペクトルを連続測定することは困難である。しかし多波長励起蛍光光度計の *in vivo* 蛍光測定に用いる，波長 680 nm 近傍の赤色蛍光は，植物プランクトン以外の物質からは殆ど放出されないため，正確な植物プランクトン現存量を評価することが出来る (堀内ら，2008)。本研究でもサーモサリノメーターによる蛍光値と比較した結果，r^2=0.968, p<0.0001 と極めて高い相関を示した (Fig. 2)。実際の Chl. *a* 濃度によるキャリブレーションは必要なものの，多波長励起蛍光光度計による相対的な植物プランクトン現存量は信頼し得るものといえる。

表面海水モニタリング

今回の東経 155 度線に沿った，水温と塩分の鉛直断面図からは，水温 4˚C の等温線が水深 100–500 m でほぼ鉛直的に描かれる移行領域の北方境界である SAF と，塩分 34.0 の等塩分線により定義される南方境界である SAB は (安間ら，1990)，それぞれ 42˚N 付近と 40˚N 付近にあると考えられた (Fig. 3A, B)。しかし，この範囲は，従来当海域において報告されている両境界および移行領域の範囲に比べて (安間ら，1990 ; Odate, 1994 ; 高木ら，1997)，特に北方境界の SAF が南下している。T-S 図からも，移行領域の水塊が存在しないような形状が伺えた (Fig. 6A)。そこで，衛星データ (コロラド大学 Web データ http://eddy.colorado.edu/ccar/ssh/nrt_global_grid_viewer) を用いて，海面高度 (日平均)，海面水温 (7 日合成)，海色-クロロフィル (14 日合成) の各図を作成した (Fig. 6B-D)。その結果，移行領域と解釈された 41˚N を中心とする，高気圧性渦 (時計回りの暖水渦) が存在していたことが明らかになった (Fig. 6B)。海面高度と水温データから，43˚N 付近が渦の北端で，亜寒帯海流系の水塊を南に引き込み，フロントを南下させていたと考えられる (Fig. 6C)。このように，渦の境界とフロントが一緒になっており，40–43˚N の間はほぼ渦の影響の中を観測していたことになる。植物プランクトンが渦により輸送されていれば，その群集は 43˚N を境に極端に変化する事が予想される。衛星クロロフィルからは，フロント北側にクロロフィルの極大域が認められた (Fig. 6D)。この植物プランクトンクロロフィル極大は，多波長励起蛍光光度計とサーモサリノメーターによる表面海水モニタリングでも明確に検出された (Fig. 3D)。

表面海水モニタリングでも，亜寒帯海域に最も近い 44˚N では，蛍光値が 1 以下で，ブルームは起こっていなかった (Fig. 3D)。一方，渦の北端に該当する 43˚N 付近では蛍光値が高く (3 以上)，ブルームが発生していたと考えられた (Fig. 3D)。西部北太平洋亜寒帯域の春季ブルームにおける Chl. *a* 濃度は東部の値よりも高く (Shiomoto and Asami, 1999 ; Han and Takahashi, 2000)，また一次生産量も東部北太平洋亜寒帯域や北大西洋亜寒帯域に比べて高いことが報告されている (Shiomoto, 2000)。この高い Chl. *a* 量はサイズが 10 μm 以上の大型植物プランクトンの寄与が大きい (Odate and Maita, 1989 ; Shiomoto and Hashimoto, 2000)。当海域における 10 μm 以上の大型植物プランクトンは主に珪藻類で，珪藻類は他の植物プランクトンよりも早い速度で増殖することが知られている (Liu et al., 2002)。実際に，分類群毎の現存量を定量出来る多波長励起蛍光光度計によっても，43˚N 付近には珪藻類が優占していたことが示された (Fig. 3E)。この珪藻類の優占は 43˚N–41˚15′N に限られ，それ以南では渦鞭毛藻類が優占していた (Fig. 3E)。155˚E 線に沿った亜寒帯海域，移行領域，亜熱帯海域の 3 海域の中では亜熱帯海域表層が Chl. *a* 濃度は最も低く，また Chl. *a* 低濃度時には 2 μm 以下の小型植物プランクトンが優占する傾向がある (Odate and Maita, 1989)。後述する定点観測でも，特に SAB 以南では栄養塩が乏しいことから (Fig. 4)，大型の珪藻類が増殖できなかったものと解釈出来る。

定点観測

当海域における植物プランクトン群集を種組成まで観察した例として，St. KNOT (44˚N, 155˚E) にて周年にわたる検鏡を行った Mochizuki et al. (2002) がある。本研究を行った 5 月は植物プランクトンバイオマスが年間最大になる季節である (Mochizuki et al., 2002)。本研究でも栄養塩は 44˚00′N では 50 m 以浅の全層で豊富に存在し (Fig. 4, グループ①)，また 43˚15′N, 42˚30′N においては水深 10 m 以深に豊富に存在していた (Fig. 4，グループ②)。44˚00′N では周年を通して植物プランクトンの増殖による栄養塩枯渇は見られないことが報告されており (Mochizuki et al., 2002)，亜寒帯海域や移行領域では窒素源は硝酸塩として多く存在し，新生産に用いられる (Shiomoto and Maita, 1990)。この海域において植物プランクトン増殖の制限要因となるのは鉄とされており，例えば，珪藻類 *Chaetoceros* 属は鉄不足時には無視出来る程のバイオマスであるが，鉄散布により，1 日 2.6 倍の速度で増殖し，細胞サイズも大型化したと報告されている (Tsuda et al., 2003)。本研

究の検鏡結果において，44˚00′N では珪藻類，渦鞭毛藻類ともに少なかったが，43˚15′N, 42˚30′N の 2 定点では主に珪藻類が優占していた (Fig. 5)。St. KNOT での調査結果によると，年間を通して *Thalassiosira* 属の優占が報告されているが (Mochizuki et al., 2002)，今回の調査では *Thalassiosira* 属は 44˚00′N 付近の定点よりも，40˚15′N-41˚00′N といった南部海域において占有率が高かった (Fig. 5A, B)。

暖水渦の中心に位置していた 41˚45′N, 41˚00′N, 40˚15′N の 3 定点においては Chl. *a* 値が著しく低く，渦鞭毛藻類の割合が高かった (Fig. 4, グループ③)。St. KNOT における植物プランクトン群集の季節変化の結果によると，渦鞭毛藻類は夏季に増加している (Mochizuki et al., 2002)。41˚45′N, 41˚00′N の表層では珪藻類も少し存在していたが (Fig. 4)，水温上昇とともに，今後は表層における渦鞭毛藻類が増加していくものと考えられる。また分類群の特徴として，珪藻類 *Fragilariopsis* 属と *Proboscia* 属は 41˚45′N 以北の定点にのみ確認された (Fig. 5)。これら両属は高緯度の低水温の環境下に多いと報告されており (Kang and Fryxell, 1992 ; Sukhanova et al., 2006)，亜寒帯海流系の水塊の影響を評価する指標種として活用できると考えられる。

暖水渦を抜けた SAB 以南の 39˚30′N では，全層を通して栄養塩は最も低かった (Fig. 4, グループ④)。このような海域では，アンモニアが重要な窒素源で，小型植物プランクトンが再生生産を中心に行うことが知られている (Shiomoto and Maita, 1990)。多波長励起蛍光光度計からは表層では渦鞭毛藻類が優占していたが，30 m 以深では珪藻類が多かったことが示された (Fig. 4)。St. KNOT でも 7 月には珪藻の休眠期細胞が水深 200 m で観察されており (Mochizuki et al., 2002)，今回 39˚30′N の深い層にて検出された珪藻類も，休眠細胞や休眠胞子などの休眠期細胞を観測したものであると考えられる。

本研究で示されたように，多波長励起蛍光光度計は表面海水モニタリングと，各定点における鉛直分布観察においても，植物プランクトン群集の詳細な微細分布を明らかにする上で，非常に有用であると考えられる。今後の多波長励起蛍光光度計を用いた研究展開として，分類群毎の現存量が測定できることから，沿岸域では，赤潮や貝毒など有害・有毒藻類の検出や，淡水域における藍藻類のアオコ等の検出が挙げられる。外洋域では，本研究で行ったように，表層で植物プランクトンブルームの起こっている海域での，細かな植物プランクトン群集の時空間変動の評価に有用であると考えられる。

謝　　辞

本研究に用いた採水試料や水理環境データの採集に際し，多大なご協力を頂いた，北海道大学水産学部附属練習船「おしょろ丸」の船長，乗組員の方々および同乗された研究者の皆様に謹んで御礼申し上げます。本研究は科学研究費補助金 (基盤研究 (A) 24248032 および新学術領域研究 24110005) の成果の一部です。

引 用 文 献

安間　元・増田紀義・小林源司・山口秀一・目黒敏美・佐々木成二・大谷清隆 (1990)　夏季北太平洋 180˚ 度線移行領域周辺の海洋構造とその変動．北海道大学水産学部研究彙報，**41**, 73-88.

Fritz, L. and Triemer, R.E. (1985)　A rapid simple technique utilizing calcofluor white M2R for the visualization of dinoflagellate thecal plates.　*J. Phycol*., **21**, 662-664.

福代康夫・井上博明・高山晴義 (1997)　渦鞭毛藻綱 . pp. 31-112, 千原光雄・村野正昭 (編)，日本産海洋プランクトン検索図説，東海大学出版会，東京.

Han, D.H. and Takahashi, M.M. (2000)　Chlorophyll *a* biomass of netplankton in surface waters of the northern North Pacific Ocean and the adjacent seas from summer to autumn.　*J. Oceanogr*., **56**, 213-222.

Harrison, P.J., Boyd, P.W., Varela, D.E., Takeda, S., Shiomoto, A. and Odate, T. (1999)　Comparison of factors controlling phytoplankton productivity in the NE and NW subarctic Pacific gyres.　*Prog. Oceanogr*., **43**, 205-234.

Hasle, G.R. and Syvertsen, E.E. (1997)　Marine diatoms. pp. 5-385, Tomas, C.R. (eds), *Identifying Marine Phytoplankton*, Academic Press, San Diego, USA.

Hoppenrath, M., Elbrächter, M. and Drebes, G. (2009)　*Marine Phytoplankton*.　Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany.

Horiuchi, T. and Wolk, F. (2008)　Multiple measurements of fluorescence and phytoplankton.　*Sea Tech. Mag*., (**Sep. 2008**), 15-19.

堀内智啓・和田章嗣・千賀康弘・秋葉龍郎 (2008)　植物プランクトン種組成測定のための生体励起蛍光スペクトルの特性抽出．海洋理工学会誌，**14**, 15-26.

Jeffrey, S.W. and Hallegraeff, G.M. (1987)　Chlorophyllase distribution in ten classes of phytoplankton : a problem for chlorophyll analysis.　*Mar. Ecol. Prog. Ser*., **35**, 293-304.

Jeffrey, S.W., Mantoura, R.F.C. and Wright, S.W. (eds.) (1997)　*Phytoplankton Pigments in Oceanography : Guidelines to Modern Methods. Monographs on Oceanographic Methodology, 10*.　UNESCO Publishing, Paris.

Kang, S.H. and Fryxell, G.A. (1992)　*Fragilariopsis cylindrus* (Grunow) Krieger : The most abundant diatom in water column assemblages of Antarctic marginal ice-edge zones.　*Polar Biol*., **12**, 609-627.

Lalli, C.M. and Parsons, T.R. (1997)　*Biological Oceanography : an Introduction, 2nd Edition*.　Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K.

Liu, H.B., Suzuki, K. and Saino, T. (2002)　Phytoplankton growth and microzooplankton grazing in the subarctic Pacific Ocean and the Bering Sea during summer 1999.　*Deep-Sea Res. I*, **49**, 363-375.

Longhurst, A. (2006)　*Ecological Geography of the Sea, 2nd Edition*. Academic Press, San Diego, USA.

Lorenzen, C.J. (1966)　A method for the continuous measurement of *in vivo* chlorophyll concentration.　*Deep-Sea Res*., **13**, 223-227.

Lutz, V.A., Sathyendaranath, S., Head, E.J.H. and Li, W.K.W. (2001)　Changes in the *in vivo* absorption and fluorescence excitation spectra with growth irradiance in three species of phytoplankton.　*J. Plankton Res.*, **23**, 555-569.

宮井　博・松崎加奈恵・小川数也 (1988)　植物プランクト

ンの形態に基づく種類別生物量の簡易推定法. 日本プランクトン学会報, **35**, 121-126.

Mochizuki, M., Shiga, N., Saito, M., Imai, K., and Nojiri, Y. (2002) Seasonal changes in nutrients, chlorophyll *a* and the phytoplankton assemblage of the western subarctic gyre in the Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 5421-5439.

Odate, T. (1994) Plankton abundance and size structure in the northern North Pacific Ocean in early summer. *Fish. Oceanogr.*, **3**, 267-278.

Odate, T. and Maita, Y. (1989) Regional variation in the size composition of phytoplankton communities in the western North Pacific Ocean, spring 1985. *Biol. Oceanogr.*, **6**, 65-77.

Shiomoto, A. (2000) Chlorophyll-*a* and primary production during spring in the oceanic region of the Oyashio water, the northwestern Pacific. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **80**, 343-354.

Shiomoto, A. and Asami, H. (1999) High-west and low-east distribution patterns of chlorophyll *a*, primary productivity and diatoms in the subarctic North Pacific surface waters, midwinter 1996. *J. Oceanogr.*, **55**, 493-503.

Shiomoto, A. and Hashimoto, S. (2000) Comparison of east and west chlorophyll *a* standing stock and oceanic habitat along the transition domain of the North Pacific. *J. Plankton Res.*, **22**, 1-14.

Shiomoto, A. and Maita, Y. (1990) Uptake of nitrate and ammonia in the subarctic boundary and adjacent regions of the northwestern Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, **37**, 1887-1897.

Sukhanova, I.N., Flint, M.V., Whitledge, T.E., Stockwell, D.A. and Rho, T.K. (2006) Mass development of the planktonic diatom *Proboscia alata* over the Bering Sea shelf in the summer season. *Oceanology*, **46**, 200-216.

高木省吾・桜井泰憲・亀井佳彦・明井崇子・坂岡桂一郎・志賀直信 (1997) 北太平洋東経 155 度線における夏季と秋季の海洋構造と表層性魚類・イカ類の分布. 北海道大学水産学部研究彙報, **48**, 13-28.

Tsuda, A., Takeda, S., Saito, H., Nishioka, J., Nojiri, Y., Kudo, I., Kiyosawa, H., Shiomoto, A., Imai, K., Ono, T., Shimamoto, A., Tsumune, D., Yoshimura, T., Aono, T., Hinuma, A. Kinugasa, M., Suzuki, K., Sohrin, Y., Noiri, Y., Tani, H., Deguchi, Y., Tsurushima, N., Ogawa, H., Fukami, K., Kuma, K. and Saino, T. (2003) A mesoscale iron enrichment in the western Subarctic Pacific induces a large centric diatom bloom. *Science*, **300**, 958-961.

Yentsch, C.S. and Phinney, D.A. (1985) Spectral fluorescence : an ataxonomic tool for studying the structure of phytoplankton populations. *J. Plankton Res.*, **7**, 617-632.

吉田光男・長澤泰宏 (2012) 多波長励起蛍光光度計の開発. *EICA*, **17**, 177-179.

Yoshida, M., Horiuchi, T. and Nagasawa, Y. (2011) *In situ* multi-excitation chlorophyll fluorometer for phytoplankton measurements. *OCEANS*, **17**, 177-180.