

— 論 文 —

## 西部北太平洋亜熱帯海域における台風の影響を受けた可能性のある植物プランクトン群集組成と沈降粒子\*

石田 洋<sup>1\*\*</sup>・古澤 一思<sup>2</sup>・牧野 高志<sup>3</sup>・石坂 丞二<sup>4</sup>・渡邊 豊<sup>5</sup>

### 要 旨

西部北太平洋亜熱帯海域の定点 (北緯 22.5 度, 東経 131.8 度) で, 2004 年から 2006 年の各年の夏季に, 調査地点の 500 km 以内に台風が通過した後の 10 日以内におこなわれた植物プランクトン群集組成の調査結果を解析した。2006 年の台風は EWINIAR と BILIS で, 最接近時の移動速度がそれぞれ 2.8 と 4 m s<sup>-1</sup> であり, 2004 年の KOMPUS (6.5 m s<sup>-1</sup>) と 2005 年の HAITANG (7.9 m s<sup>-1</sup>) に比べて遅かった。人工衛星による観測では, 2006 年のこれらの台風が通過した後, 海表面水温が低下し, クロロフィル a が調査地点を含む広範囲において増加していた。また, 植物プランクトンが増加しており, 優占種は *Planktoniella sol* で, 細胞数は 4×10<sup>7</sup> cells m<sup>-2</sup> であり, 2004 年 (1×10<sup>5</sup> cells m<sup>-2</sup>) と 2005 年 (5×10<sup>4</sup> cells m<sup>-2</sup>) に比べて 2-3 桁高かった。さらに, シアノバクテリアおよびバクテリアの炭素態現存量も, 2004 年と 2005 年に比べ約 2 倍高かった。同じ地点で 2002 年 12 月から 2005 年 7 月まで実施したセジメントトラップによる沈降粒子観測では, 台風の影響と考えられる変動はみられなかった。

キーワード: 西部北太平洋亜熱帯海域, 台風, 植物プランクトン群集, 珪藻, 沈降粒子

\* 2015 年 5 月 22 日受領; 2016 年 1 月 27 日受理

著作権: 日本海洋学会, 2016

- 1 株式会社環境総合テクノス  
〒541-0052 大阪市中央区安土町1丁目3番5号
- 2 株式会社日本海洋生物研究所  
〒142-0042 東京都品川区豊町4丁目3番16号
- 3 株式会社ケーズブレインズ  
〒186-0005 東京都国立市西1丁目4番2号
- 4 名古屋大学宇宙地球環境研究所  
〒464-8601 愛知県名古屋市中千種区不老町
- 5 北海道大学大学院地球環境科学研究院  
〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西5丁目

\*\* 連絡著者: 石田 洋

TEL: 06-6263-7337

FAX: 06-6263-7311

e-mail: ishida\_hiroshi@kanso.co.jp

### 1. はじめに

亜熱帯海域は, 海洋下層から表層への栄養塩供給が乏しく貧栄養海域であり, 生物量も少なく, 時空間的な変動も非常に小さい安定した海域であることから, 「海の砂漠」と考えられてきた (Karl, 2002)。しかし, その面積は大きいと, 地球規模の物質循環に与える影響は大きい (Field *et al.*, 1998)。特に, 西部北太平洋亜熱帯海域は, 黄砂の飛来や台風の通過といった他の海域にはない特徴があるために, そこでの物理・化学・生物環境の時空間的な変動は小さくはないと考えられ, そこでの大気-海洋間の相互作用を踏まえた物質循環のメカニズムを明

らかにする試みがなされてきた(例えば, 植松, 2013; 本多, 2014)。さらに, 同海域について, 10年スケール変動・地球温暖化・海洋酸性化の影響が存在する可能性も指摘されている(Watanabe *et al.*, 2005; Ishida *et al.*, 2009; Ishii *et al.*, 2011)。

一般に, 貧栄養な外洋域では, 大型藍藻類であるトリコデスミウムが海面にパッチ状に大增殖することが知られている(Saino and Hattori, 1978; Capone *et al.*, 1997)。また, 小型の藍藻類である長径2-10  $\mu\text{m}$ のシアノバクテリアが北太平洋の熱帯・亜熱帯海域に広く分布し, 窒素固定を通じて一次生産に寄与している可能性がある(Ishizaka *et al.*, 1994; 塩崎ら, 2009)。これらの藍藻類は, 大気から大陸由来の黄砂やダストの降下により供給された鉄やリン酸を利用して, 窒素固定を促進させブルームを起こす。同様に, 西部北太平洋でも, 大気-海洋間の相互作用が海洋生物による物質循環にとって重要と考えられている(植松, 1999; 角皆, 2011; Nishioka *et al.*, 2011)。

大気-海洋間の相互作用に関して, 西部北太平洋の特徴のひとつは, 台風が発生し, 発達しながら移動する海域という点にある。台風が引き起こす大型の低気圧渦の擾乱により, 貧栄養な海洋表層に下層から栄養塩をもたらし, 海洋の生産性を促進させる(Price, 1981)。発達した台風が頻繁に通過する東シナ海では, 人工衛星クロロフィル画像を利用した研究がなされ, 台風通過後には一次生産が増加するケースについて, そのメカニズムが明らかになりつつある(Siswanto *et al.*, 2008; 石坂ら, 2012)。また, 台風が発生し, 発達しながら移動する西部北太平洋の熱帯から亜熱帯海域においても, 人工衛星クロロフィル画像を利用した研究により, 台風が通過した経路付近において局所的に植物プランクトンが増加するケースがあることが報告されている(Toratani *et al.*, 2008; Lin, 2012)。台風は, その強さと移動速度などの性質により, 一次生産の増加に資する海水の鉛直混合を引き起こすかどうかが決まる(Siswanto *et al.*, 2007; Toratani *et al.*, 2010)。

台風の性質と一次生産の関係に関して, 生態系モデルを用いて解析した結果では, 西部北太平洋亜熱帯海域においては, 台風の移動速度が約 $3\text{ m s}^{-1}$ 以上の場合には, 海洋下層から表層への栄養塩の供給が生じにくく, 逆に,

その速度以下では, 規模が小さな台風であっても速度が遅いほど一次生産性は高まるなど, その定量的な評価がなされている(Shibano *et al.*, 2011)。また, 栄養塩が豊富な海洋下層の海水と表層の海水を混合させる船上培養実験から, 台風の影響で珪藻類が増加する可能性も指摘されている(Ishizaka *et al.*, 1983; Furusawa, 1997; 鈴木・津田, 2009; Yasuki *et al.*, 2013)。珪藻類は周りの有機物を巻き込んで落ちるため, 表層の生物量を減らす一方で, 生物ポンプとして海洋表層から炭酸系物質を海洋下層に輸送するバラスト効果が大い(Honda and Watanabe, 2010)。よって, 亜熱帯海域における珪藻類の増殖は, 炭素固定にとって重要である。

実海域においても, 南シナ海や相模湾において, 台風通過数日後に珪藻類が増加したとの報告がある(Chen *et al.*, 2009; Tsuchiya *et al.*, 2013)。しかしながら, 西部北太平洋亜熱帯海域における実態は明らかではない。さらに, 台風で増殖した珪藻類が海洋の沈降粒子にどの程度寄与しているかについてもその実態は明らかではない。

以上のように, 台風の西部北太平洋亜熱帯海域における物質循環への影響は, 人工衛星観測やシミュレーションモデルによって次第に明らかになりつつあるが, その実態を検証できる実海域データは乏しいのが現状である(神田ら, 2013; 浜崎ら, 2013)。

2002年から2006年に, 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(Research Institute of Innovative Technology for the Earth; RITE)が実施した, 「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」の一環として, 西部北太平洋亜熱帯海域の定点で植物プランクトン群集組成を毎年1回調査した(RITE, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007)。この中で2004年から2006年には, 調査地点の500 km以内に台風が通過した後の10日以内に調査していた。西部北太平洋外洋海域では, 台風の影響で植物プランクトンが増加した状態が1週間から1ヶ月間維持される可能性がある(齊藤ら, 2012)。よって, RITEの観測は台風の影響を受けた海域において実施されていた可能性が大い。このため, そのデータを解析することにより, 台風の影響を受けた植物プランクトン群集組成について考察できる可能性がある。また, 同地点に, 2002年12月から2005年7月の間, セジメントトラップを設置し連続的な時系列観測を実施していたため, 測点付近

を通過した台風が沈降粒子に与える影響についても考察できる可能性がある。そこで本研究では、台風の性質や人工衛星のデータを参考として、植物プランクトン群集組成および沈降粒子束と台風との関係を明らかにすることを試みた。

## 2. サンプリングおよび方法

### 2.1 海洋調査

海洋調査は、2002年冬季および2003年から2006年の夏季に、北緯22.5度、東経131.8度（水深約5700m）において、株式会社オフショアオペレーションの第12海工丸で、それぞれ約1週間実施した（Fig. 1およびTable 1）。また、沈降粒子束の時系列観測を同地点の深度2900mにおいて2002年12月1日から2005年7月20日まで実施した。なお、本研究で用いたデータの多くは、前述の「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」報告書（RITE, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006）に記載されている。

### 2.2 植物プランクトンおよびバクテリア

植物プランクトンおよびバクテリア試料は、2002年は12月1日、2003年から2006年は7月20日の前後1日以内に深度300m以浅の8層から12層をCTD（SBE9+, SBE17, SBE34）付カルーセル多連採水システム（CMS）

に搭載した12LニスキンX採水器により、また、表面海水はバケツによってそれぞれ採取した（Table 1）。それらを分析対象に応じて適宜ボトルに分取し、グルタルアルデヒドは最終濃度1%になるように、中性ホルマリンは容量割合として10%となるようにそれぞれ添加して固定し、冷暗条件で持ち帰った。

植物プランクトンは、主に原核緑藻類、独立栄養微小

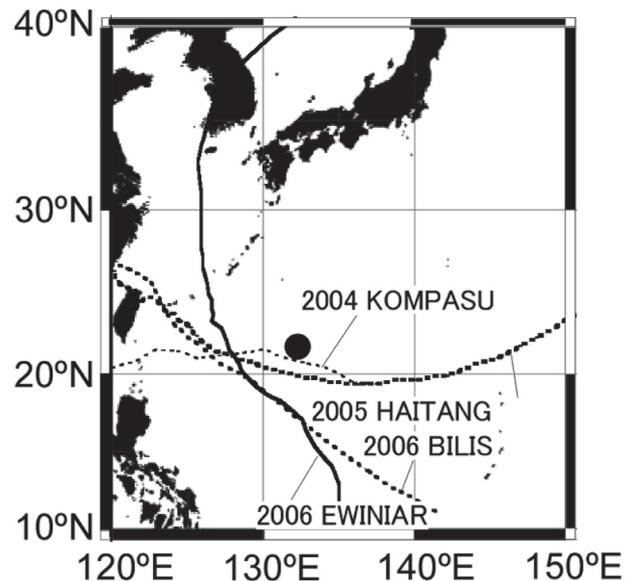


Fig. 1. Location of oceanographic survey site and tracks of typhoons passing within 500 km apart from the site during 10 days before the oceanographic survey.

Table 1. Dates and depths of plankton sampling at the oceanographic survey.

Survey period	Date of sampling	Sampling Depth (m)
2002/11/21 ~ 2002/12/17	12/1	0, 10, 25, 40, 50, 75, 95, 100, 125, 150, 200, 300
2003/7/7 ~ 2003/7/22	7/19	0, 25, 50, 75, 100, 125, 200, 300
2004/7/10 ~ 2004/7/27	7/20	0, 25, 50, 75, 100, 125, 200, 300
2005/7/16 ~ 2005/7/25	7/21	0, 25, 50, 75, 100, 110, 125, 200, 300
2006/7/15 ~ 2006/7/27	7/20	0, 25, 50, 75, 100, 110, 125, 200, 300

鞭毛藻類, 藍藻類, 円石藻類, 珪藻類および渦鞭毛藻類に分類した (Table 2)。グルタルアルデヒドで固定した試料は, 孔径 0.2  $\mu\text{m}$  および 3  $\mu\text{m}$  のヌクレポアフィルターを用いてろ過し, 4',6-Diamidino-2-Phenylindole, Dihydrochloride (DAPI) で染色した後, 蛍光顕微鏡を用いて, 長径 0.2-20  $\mu\text{m}$  の植物プランクトンおよび細菌を対象に同定・計数した。中性ホルマリンで固定した試料は, 長径 2  $\mu\text{m}$  以上の植物プランクトンを対象として, 偏光顕微鏡を用いて円石藻類を, 生物顕微鏡を用いてその他の植物プランクトンをそれぞれ同定・計数した。同時に植物プランクトンのサイズを計測して細胞体積を求め, さらに既存の炭素換算式を使って炭素量を求めた (Table 2) (清沢ら, 1995)。なお, 原核緑藻類, 独立栄養微小鞭毛藻類および長径 10  $\mu\text{m}$  以下の渦鞭毛藻類は, 蛍光顕微鏡を用い, 細胞が発する自家蛍光を指標として計数したが, 試料採集から分析まで約 1 週間経過しており, 試料によっては自家蛍光が退光して計数が困難なケースがあったため, 本研究では使用していない。これにより, 本研究における細菌は, DAPI により染色された長径 0.2  $\mu\text{m}$  前後の細胞であり, 原核緑藻類が含まれていることになる。

生物顕微鏡で分析された珪藻類と渦鞭毛藻類は, 海表

面から深度 200 m までの水柱における多様度指数 ( $H'$ ) を次式により求めた (Shannon and Weaver, 1949)。

$$H' = -\sum pi \ln pi$$

ここで  $pi$  は種  $i$  の個体数が, 群集の全個体数に占める割合を示す。

### 2.3 生物活動に関わる環境

海表面水温は, 表面海水をバケツで採取し, 標準水温計で計測した。CTD-CMS により深度 5500 m まで 1 m 間隔で取得した水温データから海表面水温よりも 1.0  $^{\circ}\text{C}$  低くなる深度を混合層水深として求めた (Qie and Chen, 2006)。なお, 2005 年の CTD-CMS 観測では, 塩分センサにノイズが入り, 連続したデータを取得することができなかった。

クロロフィル a と粒子態有機炭素 (POC) 分析用試料は, 植物プランクトン試料を採取した深度から, それぞれ 1 L 容ポリカーボネイト試料瓶, 9 L 容ポリカーボネイト試料瓶に採取した。また, 栄養塩と塩分の分析用試料は, 海表面, 深度 50 m, 100 m, 200 m, 300 m, 500 m および 1000 m から, 250 ml 容ポリプロピレン試料瓶, 褐色

Table 2. Summary of analytical methods identifying the phytoplankton community including bacteria summarized by Kiyosawa *et al.* (1995).

Phytoplankton and Bacteria	Fixativesolution	Microscope*	Equation of carbon conversion	References of each equations
<b>Bacteria</b>				
Prochlorophytes			$C = \text{cell} * 0.02$	Lee and Fuhrman (1987)
<b>Picoeukaryotes</b>				
Cyanobacteria	Glutaraldehyde 1% (end conc.)	EM	$C = 0.47 * V$	
Autotrophic Micro Flagellates				
Autotrophic Dinoflagellates				
Diatoms			$C = 0.433 * V^{0.863}$	Verity <i>et al.</i> (1992)
Haptophyta		PM, BM		
Tricodesmium	Neutral formalin 10%(v/v)			
Autotrophic Dinoflagellates		BM		
Diatoms			$\text{Log}_{10}(C) = -0.422 * \text{Log}_{10}(V^{0.758})$	Strathmann (1967)

\*Microscope: EM; epifluorescence microscope, PM; polarization microscope, BM; biological microscope

塩検瓶に採取した。クロロフィル a 分析用試料は試料海水 1 L を採取後直ちに船上で孔径 3  $\mu\text{m}$  のヌクレポアフィルターおよび Whatman GF/F フィルターを用い、1 kPa 以下の陰圧で粒子をサイズ別にろ過捕集し、フィルターの水分を定性ろ紙を用いて除去した後、ジメチルフォルムアミド 7 ml に浸漬して色素を抽出した (Suzuki and Ishimaru, 1990)。POC 分析用試料は、試料海水 5-9 L を、450  $^{\circ}\text{C}$  で 4 時間強熱処理した Whatman GF/F フィルターを用い、20 kPa 前後の陰圧でろ過して粒子を捕集した。クロロフィル a 分析用試料は、抽出溶媒に浸漬した状態のまま、POC 分析用試料は、ろ過が終了したフィルターを超純水で調製した人工海水 20 ml でリンスしてから、それぞれ冷凍保存して持ち帰った。栄養塩分析用試料は、分取後直ちに冷凍保存し、塩分分析試料は冷暗所で保存し持ち帰った。

実験室に持ち帰った後、クロロフィル a は蛍光光度計 (Turner Designs 10-AU) で分析し、クロロフィル a 濃度を求めた (Holm-Hansen *et al.*, 1965)。POC は、フィルターを凍結乾燥し、塩酸蒸気に一晩晒し、真空状態で塩酸を除去した後、CHN 分析計 (Parkin-Elmer 2400CHN elemental Analyzer) で分析した。栄養塩は、オートアナライザー (Bran + Luebbe TRAACS-800) を用い、CFA 法で亜硝酸+硝酸態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸態珪素をそれぞれ測定した (気象庁, 1999b)。なお、栄養塩分析には、栄養塩測定用海水標準物質 (KANSO\_RMNS) を用い精度管理をおこなった (Ota *et al.*, 2009)。塩分は、IAPSO の標準海水で校正された電気伝導度塩分計 (Guildline AUTOSAL 8400B) を用い、電気伝導度比から求めた (気象庁, 1999a)。

## 2.4 沈降粒子

海洋表層の生物量の変動や植物プランクトン組成変化の影響を海洋内部で確認するために、セジメントトラップ (日油技研工業 SMD21-6000) を、調査地点の深度約 2900 m に 2002 年 11 月 28 日に設置し、同年 12 月 1 日から 2005 年 7 月 20 日まで毎月 1 日 0:00 に捕集容器が交換するようにした。捕集容器には 250 ml 容ポリエチレン試料瓶を用い、保存溶液で満たして取り付けた。保存溶液は、Whatman GF/F フィルターでろ過した現場で採

取した表面海水 20 L に対し塩化ナトリウム 50 g を添加した後、塩化水銀飽和溶液を最終濃度が 1 % になるように添加して調製した。セジメントトラップの回収・再設置は、年 1 回の海洋調査時におこなった。セジメントトラップで得られた試料は、冷暗条件で持ち帰り、実験室で 1 mm 以上の粒子をスイマーとしてナイロン製の網を使って除去した後、1 mm 以下の粒子を孔径 0.6  $\mu\text{m}$  のヌクレポアフィルターでろ過し、フィルター上に捕集した。集められた試料は凍結乾燥機で乾燥させ、全粒子束 ( $\text{mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) を算出した。全粒子束を算出した後、フィルター上の粒子はメノウ乳鉢を用いて粉碎することで均一化し、生物起源沈降粒子として、有機炭素、全窒素、生物起源ケイ酸塩 (オパール)、無機炭素 (炭酸カルシウム)、また、陸起源沈降粒子としてアルミノケイ酸塩の分析をそれぞれおこなった。

有機炭素および全窒素は、セラミックボードに載せた乾燥試料を塩酸蒸気下に晒して炭酸塩を除去した後に、CHN 元素分析 (ヤナコ MT-5CHN アナライザー) により測定した (Yamamuro and kayanne, 1995)。

生物起源ケイ酸塩 (オパール) は、乾燥試料を 1 M 塩酸と 10 % 過酸化水素で処理して、炭酸塩と有機物を分解した。これに 2 M 炭酸ナトリウム溶液を加えて 85  $^{\circ}\text{C}$  で 5 時間放置して、溶出したケイ素をモリブデンイエロー法により分光光度計 (島津製作所 UV1600) を用いて比色測定した (Mortlock and Froelich, 1989)。オパールは、次式を用いて求めた (Noriki and Tsunogai, 1986)。

$$[\text{オパール}] = 2.4 \times [\text{生物起源ケイ酸塩}]$$

無機炭素は、乾燥試料に 10 % リン酸を添加して発生した二酸化炭素をクーロメーター (UIC CO2 Coulometer 5012) を用いて測定した。炭酸カルシウムは、次式を用いて求めた (Honda *et al.*, 2002)。

$$[\text{炭酸カルシウム}] = (100/12) \times [\text{無機炭素}]$$

陸起源物質の指標であるアルミノケイ酸塩は、湿式酸分解法によった (Noriki *et al.*, 1980)。乾燥試料約 10 mg を 450  $^{\circ}\text{C}$  で 6 時間以上加熱して消却減量を求めた後、硝酸、過塩素酸、フッ酸を加えてテフロン密閉容器で 150  $^{\circ}\text{C}$  で 5 時間以上加熱して試料を分解した。テフロン蒸発皿で蒸発乾固した溶液は、塩酸溶液に塩を置換した

後、ポリエチレン容器に回収した。この溶液を適宜希釈して、ICP 発光分析計 (Rigak CIROS 160) により全アルミニウムを測定した。アルミノケイ酸塩は、次式を用いて求めた (Taylor, 1964)。

$$[\text{アルミノケイ酸塩}] = (100/8.13) \times [\text{全アルミニウム}]$$

## 2.5 台風と人工衛星データ

台風に関する情報については、「RSMC (The Regional Specialized meteorological Center) Tokyo-Typhoon

Center」の Best Track Data (気象庁, 2013) から、2002 年から 2006 年に発生した台風のうち、調査地点の 500 km 以内を通過した台風を選択し、規模や通過速度などを求めた。また、風速  $25 \text{ m s}^{-1}$  暴風域直径と通過速度から Transit Time を求めた (Lin, 2012)。さらに、Transit Time, 調査地点との距離関係、通過速度から台風を 6 段階のランクに分類した (Table 3)。

人工衛星データは、クロロフィル a は「OceanColor WEB」(NASA OB. DAAC, 2013) の MODIS-Aqua の Level 3 データから、台風通過前後 1 週間のコンポジットデータを用いた。表面水温は「外洋域新世代海面水温

Table 3. Summary of typhoons passing the closest approach within 500 km from the oceanographic survey site during sediment trap observations (from the Best Track Data of RSMC (Tokyo-Typhoon Center)).

Typhoon Case	Day&Time at Closest Approach	Before Ocean Survey (day)	Pressure (hpa)	Category*	Size in Diameter of 50 kt Wind (km); SDW	Distance from the Station (km); DS	DS - Radius** (km)	Translation Speed (m sec <sup>-1</sup> ); Uh	Transit Time*** (h; SDW/Uh)	RANK****	Period of sediment trap experiment
SINLAKU	2002/9/3 12:00		955	C1	333	366	199	3.3	28	5	↑ ↓
HIGOS	2002/9/30 0:00		930	C2	370	422	237	6.2	17	2	
LINFA	2003/5/29 18:00		980	TS	148	340	266	4.3	10	3	
ETAU	2003/8/5 18:00		960	C1	296	271	122	6.4	13	2	
DUJUAN	2003/8/31 0:00		970	C1	296	383	235	8.1	10	2	
MAEMI	2003/9/8 18:00		970	C1	148	177	103	6.4	6	1	
KETSANA	2003/10/24 6:00		945	C1	444	257	35	4.5	27	6	
LUPIT	2003/11/29 18:00		940	C2	519	188	-71	6.4	22	3	
SUDAL	2004/4/14 0:00		950	C1	370	326	140	7.4	14	2	
NIDA	2004/5/19 18:00		950	C1	296	259	111	4.9	17	3	
DIANMU	2004/6/18 18:00		925	C2	519	252	-7	6.0	24	6	
<b>KOMPASU****</b>	<b>2004/7/12 12:00</b>	<b>7</b>	<b>1008</b>	<b>TS</b>	<b>-</b>	<b>234</b>	<b>-</b>	<b>6.5</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	
RANANIM	2004/8/9 6:00		980	TS	185	337	245	3.7	14	3	
CHABA	2004/8/26 6:00		920	C3	556	460	182	3.5	44	5	
AERE	2004/8/21 18:00		975	TS	222	341	230	5.1	12	3	
SONGDA	2004/9/3 18:00		935	C2	407	148	-56	5.8	19	4	
MEARI	2004/9/24 18:00		940	C2	333	122	-44	5.7	16	4	
MA-ON	2004/10/7 12:00		930	C2	259	115	-14	1.6	45	6	
TOKAGE	2004/10/17 6:00		940	C2	556	306	28	4.0	39	6	
SONCA	2005/4/26 0:00		940	C2	296	350	202	11.3	7	1	
NESAT	2005/6/6 6:00		945	C2	259	212	82	3.6	20	3	
<b>HAITANG****</b>	<b>2005/7/15 18:00</b>	<b>5</b>	<b>930</b>	<b>C2</b>	<b>444</b>	<b>321</b>	<b>99</b>	<b>7.4</b>	<b>17</b>	<b>2</b>	
TALIM	2005/8/29 12:00		935	C2	556	177	-101	6.0	26	6	
NABI	2005/9/3 12:00		935	C2	556	163	-115	2.1	74	6	
KHANUN	2005/9/9 6:00		955	C1	185	318	226	7.7	7	1	
LONGWANG	2005/9/30 0:00		950	C1	222	63	-48	5.3	12	5	
KIROGI	2005/10/13 18:00		940	C2	222	35	-76	3.5	18	4	
<b>EWINIAR****</b>	<b>2006/7/6 12:00</b>	<b>14</b>	<b>955</b>	<b>C1</b>	<b>259</b>	<b>458</b>	<b>329</b>	<b>3.2</b>	<b>22</b>	<b>2</b>	
<b>BILIS****</b>	<b>2006/7/11 6:00</b>	<b>9</b>	<b>990</b>	<b>TS</b>	<b>630</b>	<b>485</b>	<b>170</b>	<b>4.0</b>	<b>44</b>	<b>5</b>	

\* Category : TS, 34 - 63 kts, C1, 64 - 82 kts; C2, 83 - 95 kts; C3, 96 - 112 kts; C4, 113 - 135 kts; C5, > 135 kts (Category in Saffir-Simpson scale).

\*\* Transit Time (h):  $25 \text{ m s}^{-1}$  Long Diameter / Translation Speed.

\*\*\* DS - Radius: Radius is half of SDW, DS - Radius indicates the value in which Radius is subtracted from DS.

The typhoon is hitting the survey point directly when DS - Radius is negative.

\*\*\*\* These typhoons passed closest approach from the oceanographic survey site before date conducted the oceanographic survey.

\*\*\*\*\* RANK

6: Transit Time is  $24 \text{ h} \leq$  and DS - Radius is minus or  $\leq 50 \text{ km}$  and Uh is  $\leq 6.0$ .

5: Transit Time is  $24 \text{ h} \leq$  and Uh is  $\leq 6.0$ .

4: DS - Radius is minus or  $\leq 50 \text{ km}$  and Uh is  $\leq 6.0$ .

3: Uh is  $\leq 6.0$  or DS-Radius is minus or  $\leq 50 \text{ km}$ .

2: Others

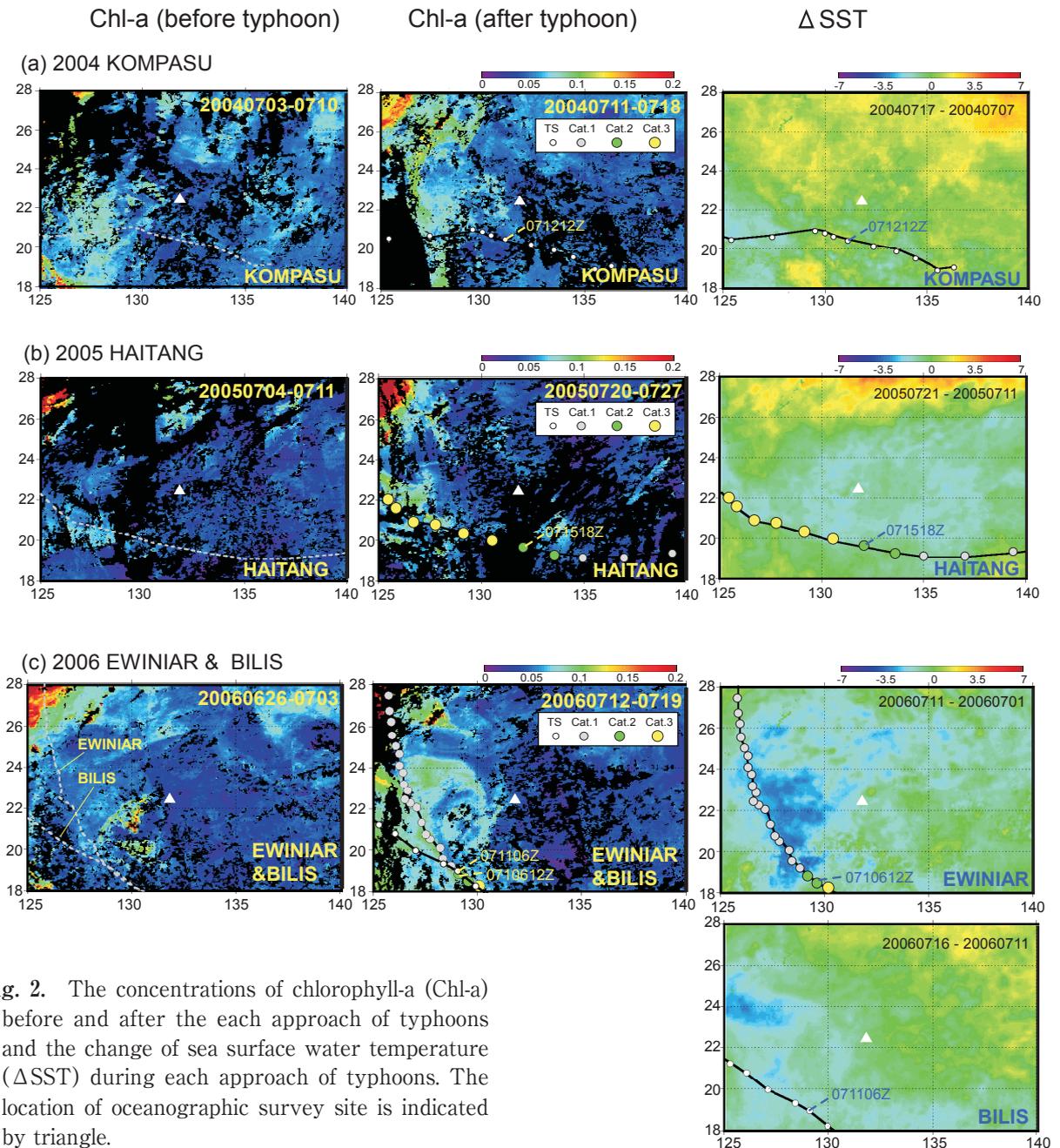
1: Uh is  $6.0 \leq$ .

Ver. 1.0」(Sakaida *et al.*, 2009) を用いた。台風通過後のクロロフィル a 濃度と表面水温の変化値は、調査地点を中心とした周囲 100 ピクセル× 100 ピクセル四方 (1 度四方に相当) の領域において、台風通過後の値から通過前の値を差し引き、平均値として求めた。

### 3. 結果

#### 3.1 台風および人工衛星データ

海洋調査と沈降粒子観測をおこなった期間中に、調査



**Fig. 2.** The concentrations of chlorophyll-a (Chl-a) before and after the each approach of typhoons and the change of sea surface water temperature ( $\Delta$ SST) during each approach of typhoons. The location of oceanographic survey site is indicated by triangle.

地点の 500 km 以内を通過した台風をまとめた (Table 3)。この内、海洋調査が行われる前の 10 日以内に調査地点に接近した台風は、2004 年が KOMPUS, 2005 年が HAITANG, 2006 年が BILIS であり、2006 年には BILIS が通過する 5 日前に EWINIAR も通過した (Table 3 斜体太字)。これら台風の中で、2004 年の KOMPUS は、気圧や暴風域などの規模が最も小さかった。2005 年の HAITANG は最も気圧が低く、カテゴリーが高かったが、通過速度は最も速く、Transit Time は 16 時間と最も短かった。2006 年には、2 つの台風が連続して測点付近を通過しており、1 つ目の EWINIAR の通過速度は  $2.8 \text{ m s}^{-1}$  であり、これら台風の中で最も遅く、BILIS の Transit Time が最も長く 44 時間であった (Table 3)。

海洋調査の 10 日前までに調査地点付近を通過していた台風の数は前述の通り 2004 年と 2005 年では 1 つ、2006 年では 2 つである。調査地点において人工衛星で観測されたクロロフィル a と海表面水温のそれぞれの台風通過前後での差は、2004 年の KOMPUS は  $-0.0004 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $+0.2^\circ\text{C}$ , 2005 年の HAITANG は  $+0.005 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $-1.5^\circ\text{C}$  であった。また、2006 年はいずれの台風でもクロロフィル a の変化は  $+0.01 \text{ mg m}^{-3}$  で、水温変化は、EWINIAR, BILIS 通過後でそれぞれ  $-1.6^\circ\text{C}$ ,  $-1.2^\circ\text{C}$  であった。このように、2005 年と 2006 年の調査地点周辺で、これら台風が通過した後にクロロフィル a が高く、水温が低くなる傾向を示しており、2 つの台風が通過した 2006 年は 2005 年に比べると、それらの傾向が高かった (Fig. 2 および Table 4)。

**Table 4.** Changes of SST and chlorophyll-a concentration during passing of each typhoon at oceanographic survey site.

Year	Typhoon Case	$\Delta\text{Chl-a}$ ( $\text{mg m}^{-3}$ )	$\Delta\text{SST}$ ( $^\circ\text{C}$ )
2004	KOMPUS	-0.0004 (0.01)	0.2 (0.5)
2005	HAITANG	0.005 (0.007)	-1.5 (0.2)
2006	EWINIAR	0.01 (0.009)	-1.6 (0.5)
	BILIS		-1.2 (0.3)

The value in parentheses shows standard deviation.

### 3.2 生物活動に関わる環境

海洋調査における夏季の表面水温は、 $29.2\text{--}31.3^\circ\text{C}$  の範囲で、2003 年が最も高温であり、混合層水深は、26–56 m で 2006 年が最も深く、塩分と密度は、海表面付近において 2006 年が高くなっていた (Fig. 3 および Table 5)。

硝酸+亜硝酸態窒素濃度は、深度 200 m では、2006 年が 2003 年および 2004 年に比べて約 2 倍高くなっていた (Fig. 3)。海表面から深度 200 m までの水柱積算した硝酸+亜硝酸態窒素存在量は、2006 年が最も高く、冬季 (2002 年) の結果と同レベルであった (Table 5)。

クロロフィル a の海表面から深度 200 m までの水柱積算存在量は、 $3 \mu\text{m}$  未満のサイズは、2003 年と 2006 年が  $20 \text{ mg m}^{-2}$  をやや超えていた。また、 $3 \mu\text{m}$  より大きなサイズは、2004 年と 2006 年が  $5.1 \text{ mg m}^{-2}$  で最も高くなっており、2006 年は両サイズで高い結果となっていた (Table 5)。POC の海表面から深度 200 m までの水柱積算存在量は、2006 年が  $5300 \text{ mgC m}^{-2}$  で最も高くなっていた (Table 5)。クロロフィル a の鉛直分布とサイズ別濃度は、2006 年の表面と亜表層において  $3 \mu\text{m}$  を超えるサイズ、亜表層において  $3 \mu\text{m}$  未満のサイズが他の年に比べて高くなっていた (Fig. 4)。

### 3.3 植物プランクトンおよびバクテリア

ここで示す結果は、植物プランクトンとバクテリア (従属栄養バクテリア+原核緑藻類) であり、植物プランクトンは、原核緑藻類とトリコデスミウム以外のシアノバクテリア、トリコデスミウム、円石藻類、珪藻類および渦鞭毛藻類とした。

シアノバクテリアは、2006 年の深度 100–150 m の亜表層に  $4000 \text{ cells ml}^{-1}$  近い極大値を示し、他の年に比べて約 3–4 倍高かった (Fig. 5 の (a))。トリコデスミウムは、2003 年には海表面に目視できるほどにパッチ状に分布していた。パッチ内での採水はしていないが、海表面において約  $100 \text{ cells L}^{-1}$  であり、他の年と比べて 5–10 倍であった (Fig. 5 の (b))。円石藻類は、2003 年には海表面から深度 100 m まで一様に  $7500 \text{ cells L}^{-1}$  であり、他の年に比べて 2–3 倍高かった (Fig. 5 の (c))。渦鞭毛藻類と

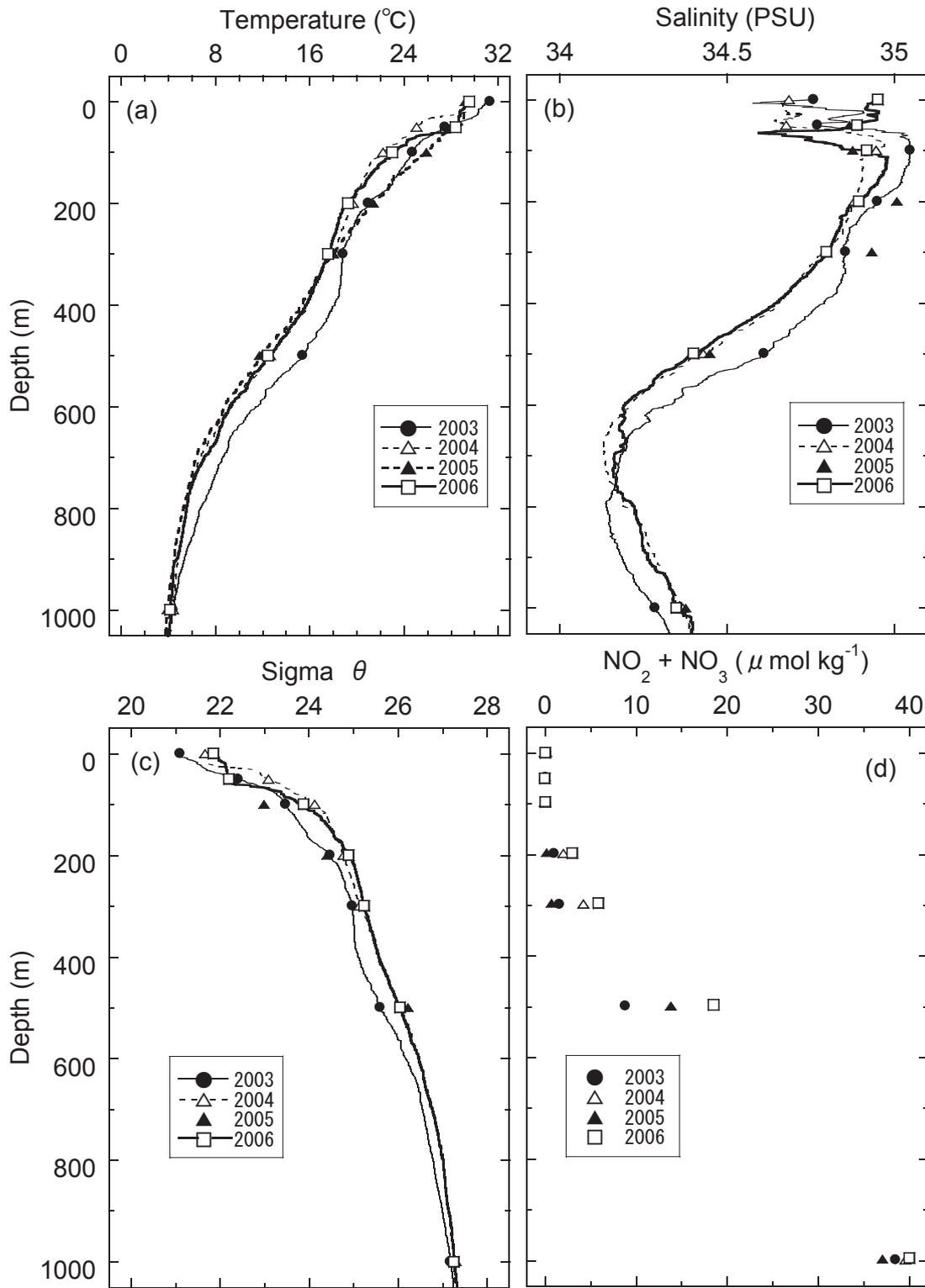


Fig. 3. Vertical profiles of water temperature (a), salinity (b), sigma- $\theta$  (c) and  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$  (d) at the survey site. Marks indicate the depths of water samplings. Salinity in 2005 was obtained only by water sample.

Table 5. Hydrographic and biogeochemical data for each of oceanographic surveys.

date	SST (°C)	Mixed layer(m) SST-1.0°C	Standing Stock NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> -N (mmol m <sup>-2</sup> )	Standing Stock Chlorophyll-a (mg m <sup>-2</sup> )		Standing Stock POC (mgC m <sup>-2</sup> )
				< 3 μm	> 3 μm	
2002/12/1	26.2	86	153	13.0	2.8	4335
2003/7/19	31.3	34	66	21.0	4.4	4116
2004/7/20	29.5	26	104	15.8	5.1	3886
2005/7/21	29.2	47	17	16.0	4.5	3695
2006/7/20	29.6	56	155	20.1	5.1	5311

Standing Stock data is above 200 m.

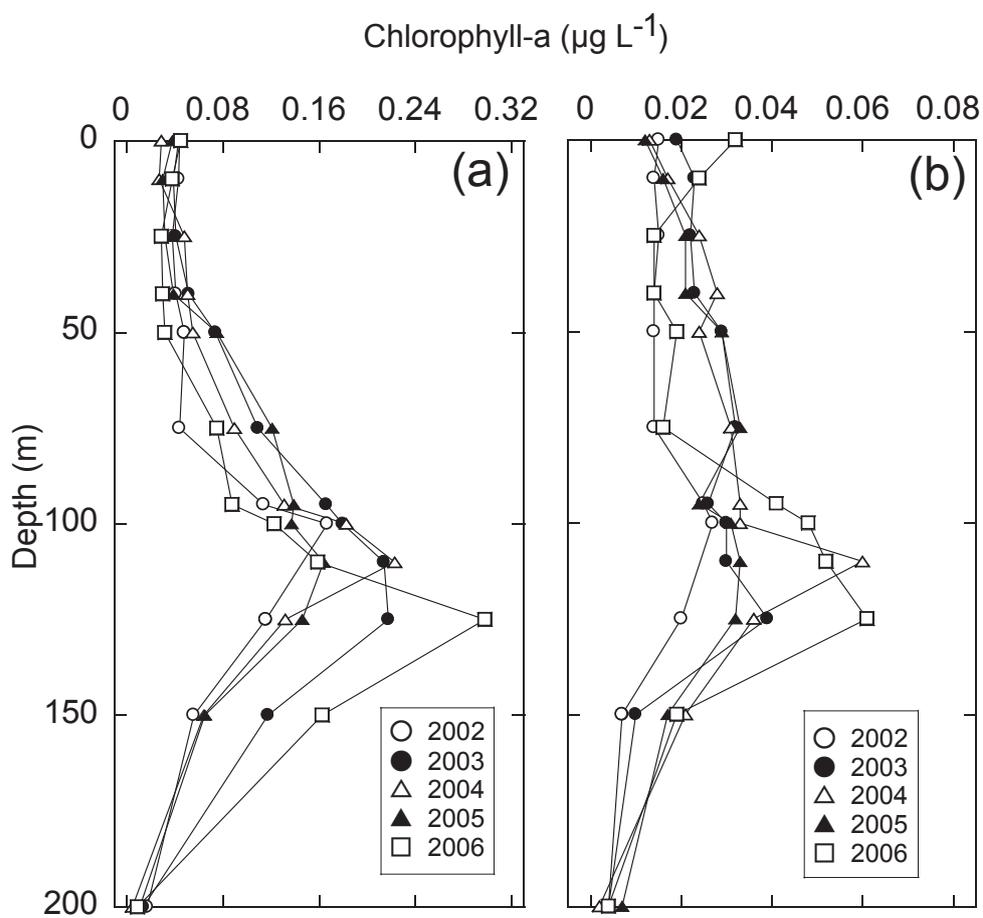


Fig. 4. Vertical profiles of size fractionated chlorophyll-a concentration. (a): Chlorophyll-a concentration of less than  $3 \mu\text{m}$ . (b): Same as (a) except larger than  $3 \mu\text{m}$ .

珪藻類は、2006年には表層から深度100 mにおいて200-600 cells L<sup>-1</sup>であり、2002年の珪藻類を除き、他の年より2桁以上高かった (Fig. 5の (d) と (e))。2002年の珪藻類は、海表面から深度100 mまで200 cells L<sup>-1</sup>で同様であり、100 mで800 cells L<sup>-1</sup>になり深度300 mにかけて緩やかに低くなった (Fig. 5の (e))。バクテリアは、

深度100 m前後の垂表層において2006年が8 × 10<sup>8</sup> cells ml<sup>-1</sup>であり、他の年より2-4倍高くなっていた (Fig. 5の (f))。

海表面から深度200 mまでの炭素態水柱現存量は、植物プランクトンが95-220 mgC m<sup>-2</sup>、円石藻類を除いた植物プランクトンが40-108 mgC m<sup>-2</sup>、バクテリアが657-

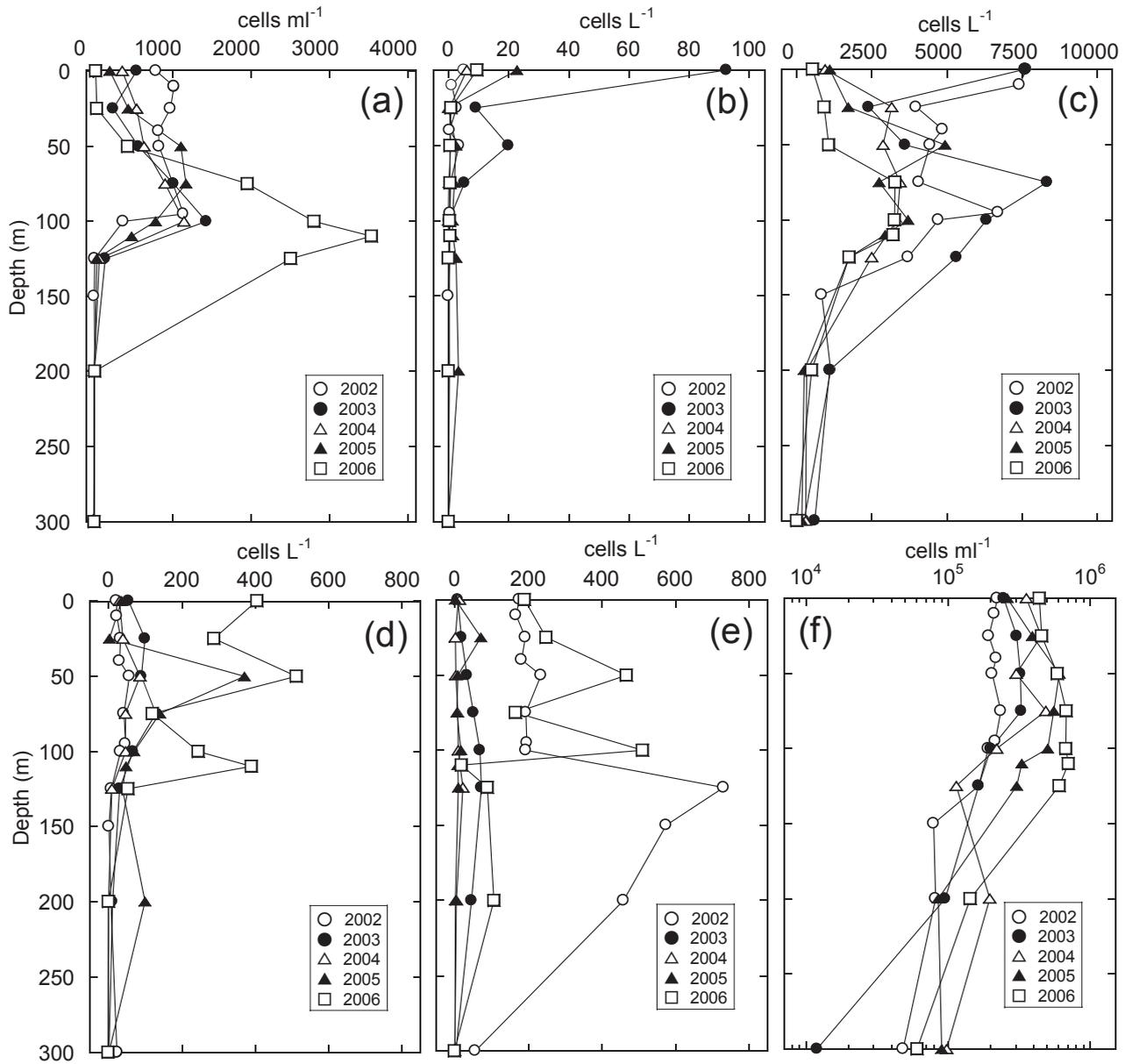


Fig. 5. Annual variation of vertical distributions of phytoplankton and bacteria. (a): Cyanobacteria (b): Tricodesmium (c): Coccolithophorid (d): Dinofragelate (e): Diatom (f): Bacteria

2205 mgC m<sup>-2</sup>の範囲であり、円石藻類を除いた植物プランクトンとバクテリアは2006年が最も高かった (Fig. 6の(a))。海表面から深度200 mまでの植物プランクトン炭素態水柱現存量の組成比は、シアノバクテリアは2005年および2006年がそれぞれ全体の47%、トリコデスミウムは2003年が45%、円石藻類は2002年および2003年がそれぞれ70%、珪藻類は2006年が10%、渦鞭毛藻類は全年5-7%であった。2006年においては珪藻類の炭素態水柱現存量、組成比とも最も高くなっており、現存量は2003年から2005年が0.8-3.1 mgC m<sup>-2</sup>、2006年が16.9 mgC m<sup>-2</sup>、組成比は、2003年から2005年が0.6-2.0%、2006年が9.8%であり、2006年がそれぞれ約5倍高くなっていった (Fig. 6)。

珪藻の種類数、多様度指数および炭素態現存量は、それぞれ14-40種類、0.2-3.5および1-17 mgC m<sup>-2</sup>の範囲

であり、2006年には、種類数は最も少なく、多様度指数は最も低く、炭素態現存量は最も高かった (Table 6)。2006年の珪藻の優占種は *Plantoniella sol* であり、細胞数は  $4 \times 10^7$  cells m<sup>-2</sup>、炭素量は珪藻の炭素量の90%以上を占めた。2006年の *Plantoniella sol* は細胞数および炭素量が他の年と比べ2-3桁高く、サイズが長径15-38 μmであり、他の年の20-48 μmと比べてやや小型であった (Table 6)。渦鞭毛藻類の種類数、多様度指数および炭素態現存量は、27-50種類、3.1-3.5および7-14 mgC m<sup>-2</sup>で、2006年には種類数が少なく、多様度指数が低かった (Table 6)。

3.4 沈降粒子と台風の状況

セジメントトラップによる沈降粒子束の観測結果と沈

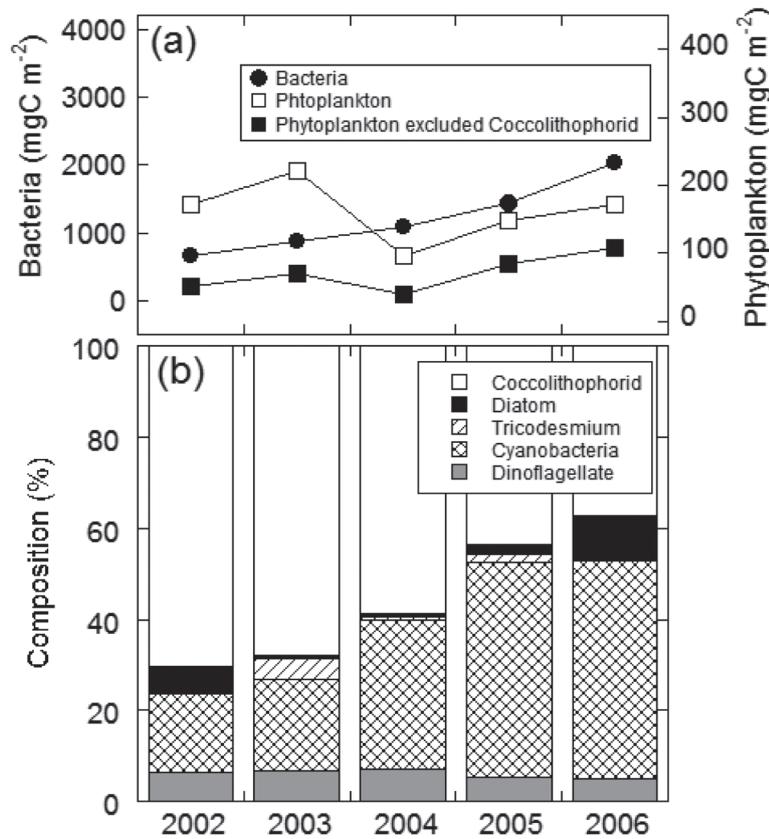


Fig. 6. Year-to-year variations of water-column integrated carbon biomasses for phytoplankton and bacteria (a) and taxonomic compositions of phytoplankton (b).

**Table 6.** Number of cells, carbon biomass, number of species and the species diversity ( $H'$ ) for diatom and dinoflagellate at the water column from surface to 200 m together with the dominant species (the highest rank 5 species by the carbon biomass).

Taxa	Date	Number of species	Number of cells (cells m <sup>-2</sup> )	Carbon biomass (mgC m <sup>-2</sup> )	diversity index $H'$	High rank species	Size range (μm)	Carbon biomass (%)
Diatom	2002/12/1	40	1.9E+08	10.0	3.5	Pennales	5-386	33.0
						<i>Rhizosolenia clevei</i> v. <i>communis</i>	100-2300	9.8
						<i>Climacodium biconcavum</i>	37-50	7.3
						<i>Thalassiosira</i> spp.	9-65	6.9
						<i>Hemiaulus hauckii</i>	27-145	5.6
	2003/7/19	22	9.2E+06	1.4	3.0	<i>Planktoniella sol</i>	20-43	22.4
						<i>Thalassiosira</i> spp.	16-93	20.9
						<i>Entomoneis</i> spp.	95-213	15.3
						Pennales	15.5-230	12.6
						<i>Asterolampra marylandica</i>	70-152	10.5
	2004/7/20	22	2.1E+06	0.8	3.3	<i>Thalassiosira</i> spp.	13-72	25.6
						<i>Thalassiothrix</i> spp.	200-1500	11.1
						<i>Coscinodiscus</i> sp.	105-105	10.3
						<i>Tropidoneis</i> sp.	90-90	9.9
						<i>Planktoniella sol</i>	25-48	8.6
	2005/7/21	20	3.2E+06	3.1	2.4	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	150-250	42.1
						Pennales	26-230	23.9
						<i>Rhizosolenia clevei</i> v. <i>clevei</i>	710-710	12.7
						<i>Thalassiosira</i> spp.	12-95	10.4
						<i>Rhizosolenia bergonii</i>	380-630	3.4
2006/7/20	14	4.1E+07	16.9	0.2	<i>Planktoniella sol</i>	15-38	97.8	
					<i>Coscinodiscus</i> sp.	50-160	1.0	
					Pennales	20-290	0.5	
					<i>Rhizosolenia imbricata</i>	180-400	0.3	
					<i>Hemiaulus hauckii</i>	35-90	0.1	
Dinoflagellate	2002/12/1	51	4.9E+06	10.8	3.7	<i>Prorocentrum compressum</i>	32-39	35.5
						<i>Ceratium teres</i>	6-118	17.9
						<i>Triposolenia bicornis</i>	1400-1400	6.0
						<i>Ceratium pulchellum</i>	20-295	3.9
						<i>Podolampas bipes</i>	105-105	3.4
	2003/7/19	54	1.2E+07	14.6	3.7	<i>Prorocentrum compressum</i>	32-50	38.9
						<i>Prorocentrum balticum</i>	7-23	14.1
						<i>Oxytoxum</i> spp.	20-75	6.7
						<i>Ceratium macroceros</i>	75-410	6.1
						<i>Ceratium teres</i>	6-290	3.1
	2004/7/20	41	6.5E+06	6.8	3.6	<i>Ceratocorys horrida</i>	80-235	35.7
						<i>Kofoidinium splendens</i>	205-205	16.3
						Gymnodiniales	50-72	6.1
						<i>Ceratium pentagonum</i>	185-350	5.0
						<i>Oxytoxum</i> spp.	15-45	4.7
	2005/7/21	40	2.1E+07	7.7	3.1	Peridinales	9-45	48.3
						<i>Oxytoxum variabile</i>	15-38	9.3
						<i>Ceratocorys horrida</i>	150-150	6.9
						<i>Pyrophacus steinii</i>	130-130	5.8
						Gymnodiniales	22-80	5.6
2006/7/20	27	4.0E+07	8.7	3.1	Peridinales	6-50	29.9	
					Gymnodiniales	15-100	24.9	
					<i>Ceratocorys horrida</i>	140-180	11.1	
					<i>Oxytoxum</i> spp.	15-40	9.6	
					<i>Pyrophacus steinii</i>	150-150	4.2	

$H'$  : Calculated by Shannon and Weaver (1949). Size range: Length of long axis. Carbon biomass percentage: Calculated respectively for diatom and dinoflagellate.

降粒子束の観測期間中に調査地点から 500 km 以内を通過した台風の Transit Time を Fig. 7 に示した。沈降粒子束は、陸起源物質 (Clay) および生物起源粒子として炭酸カルシウム (BIC), 有機炭素 (BOC) およびオパール (Opal) を示した。また、この図には 2003 年および 2004 年の沈降粒子束の各成分の年間積算値とそれらの比を示し、さらに台風通過時期として 6 月から 12 月のそれぞれの値をカッコ内に示した。

沈降粒子束は、陸起源物質 (Clay) が  $2\text{--}6 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , 生物起源粒子のうち炭酸カルシウム (BIC) が  $10$

$\text{--}20 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , オパール (Opal) が  $2\text{--}5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , 有機炭素 (BOC) が  $1\text{--}2 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  の範囲でそれぞれ推移していた (Fig. 7 の (a))。

沈降粒子束のうち、BIC の占める割合が常に約 60 % と高く、次いで Clay と Opal が 10–15 % で、Clay がやや高く、BOC は 10 % 前後となっていた。2002 年 12 月 1 日の観測開始から 2004 年末までにかけては、それぞれの沈降粒子束が 3 月から 4 月にピークを持って高くなっており、その後、翌年 1 月にかけて低い値で、小さな増減を繰り返していた。2005 年は、2003 年と 2004 年に見られ

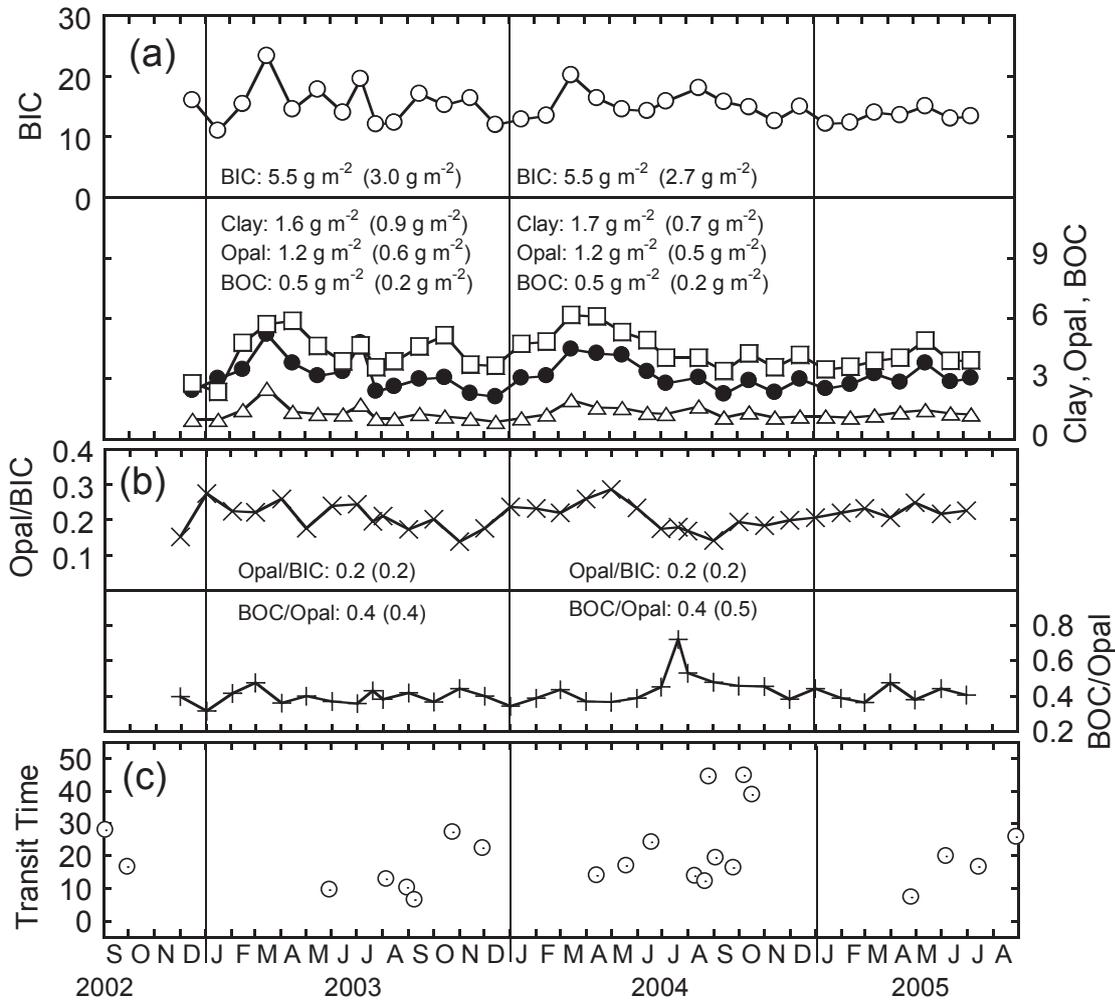


Fig. 7. Time series of settling particle fluxes and transit time of typhoon at the survey site. (a): Settling particle fluxes of BIC (○), Clay (□), Opal (●), and BOC (△) in  $\text{mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ . (b): Opal / BIC (+) and BOC / Opal (×). (c): Transit time in hours. See text for details. Annual flux is indicated by numeral and its typhoon seasonal flux from June to December by numeral in parentheses.

た3月から4月のピークは認められず、5月にピークが認められた (Fig. 7の(a))。2003年および2004年のそれぞれの年間積算沈降粒子束は、Clay, BIC, OpalおよびBOCが、それぞれ $1.6\text{--}1.7\text{ g m}^{-2}$ ,  $5.5\text{ g m}^{-2}$ ,  $1.2\text{ g m}^{-2}$ および $0.5\text{ g m}^{-2}$ であり、2003年と2004年は、Clayが約6%異なるだけで、ほぼ同じであった (Fig. 7の(a))。

OpalとBICの比 (Opal/BIC) は、0.1-0.3の範囲を変動し、粒子束と同様に、春季にやや高くなる傾向がみられ、2002年から2004年前半までは、小さな増減を繰り返していた。2004年後半以降は、ほぼ0.2で一定であった。BOCとOpalの比 (BOC/Opal) は、0.3-0.7の範囲で変動し、2004年7月に最大ピークが認められた (Fig. 7の(b))。2003年および2004年の年間のOpal/BICおよびBOC/Opalは、それぞれ0.2および0.4であり、2003年と2004年に大きな違いはなかった (Fig. 7の(a))。

セジメントトラップ設置期間中 (2002年11月28日から2005年7月20日) に調査地点から500 km以内を合計20個の台風が通過していた (Table 3)。通過した台風の数は、2003年が6個、2004年が11個 (Transit Timeが計算できなかった台風1個を含む) で7月から11月に多く、その内Transit Timeが24時間を越える台風は、2003年が1個、2004年が4個であった (Table 3とFig. 7の(c))。

## 4. 考察

### 4.1 台風と生物量の関係

2006年は、調査地点において、台風EWINIARおよびBILIS通過前より通過後に、人工衛星で観測されたクロロフィルaは高く、表面水温は低くなっていた (Table 4)。また、台風が通過した経路上の周囲である北緯20度から24度、東経126度から130度の範囲においては、台風通過後にクロロフィルaが約 $0.1\text{ mg m}^{-3}$ 増加し、表面水温が約 $4^\circ\text{C}$ 低下していた (Fig. 2の(c))。さらに、2006年は混合層 (表面水温 $-1.0^\circ\text{C}$ ) 深度が他の夏季調査と比べて最も深く、深度200 mまでのクロロフィルaおよび栄養塩積算値が高くなっていた (Fig. 3とTable 5)。

西部北太平洋亜熱帯海域においては、台風の通過速度

が遅く、暴風域が長時間留まった場合には、通過海域の鉛直混合や湧昇が促進され、海洋表層の生産性が向上することが指摘されている (Lin., 2012; Shibano *et al.*, 2011; Toratani, 2008)。2006年の海洋調査前に調査地点付近を通過した台風EWINIARおよびBILISは、2004年および2005年の調査前に通過した台風に比べて、調査地点付近における通過速度が遅く、調査地点付近に44時間と長時間留まっていた (Table 3)。調査の約10日前にこのような性質の台風が通過し海洋表層へ低層から栄養塩類が供給されたことが、2006年に調査地点のクロロフィルaが高い要因の一つとして考えられる。海洋表層への栄養塩類の供給については、台風の通過により海洋表層の鉛直混合が促進された影響などが考えられる。本研究では、前述の通り2006年に混合層深度が他の年よりも深く、海表面側の塩分および密度が他の年に比べて高く、また、海表面から深度200 mまでの硝酸+亜硝酸態窒素存在量が他の年よりも高い結果が得られており (Fig. 3, Table 5)、それらから、栄養塩類は鉛直混合により供給されたことが推測できる。ところで、2006年は、深度200 mおよび深度500 mの硝酸+亜硝酸態窒素が他の年よりもやや高濃度となっている (Fig. 3)。このような栄養塩類の鉛直構造が、台風前からあったのか、台風によって形成されたのかは明らかではないが、仮に台風前からこのような構造であったとしたら、他の年に比べて鉛直混合により栄養塩類が表層側に供給されやすい状況であったことが推測できる。逆に、台風後にこのような構造になったとしたら、台風により湧昇が引き起されたためとも考えられる。

一方で、2006年は、人工衛星画像に基づくと、調査地点はクロロフィルaが高まり、表面水温が低下していた範囲の東端に位置しており、台風の経路からは約500 km離れている (Fig. 2の(c))。また、台風が通過する前において調査地点の南西方向に約100 km離れた地点 (およそ北緯21度、東経130度) にクロロフィルaの高い海域が見られる (Fig. 2の(c))。これらのことから、2006年に調査地点において生じたクロロフィルaの台風通過後の増加は、水平方向からの移入によって生じた可能性も考えられ、例えば中規模渦など、台風のような短期間イベントよりも大きなスケールのイベントの影響もあった可能性もある。

2006年において増加した植物プランクトンは、珪藻類とシアノバクテリアであり、珪藻類は *Plantoniella sol* が優占し、炭素態現存量として他の年より2-3桁高くなっていた。一方で、2006年の渦鞭毛藻類と珪藻類の多様度指数は他の年よりも低くなっており、特に珪藻類の多様度指数が低かった。調査地点は、冬季(2002年)において40種類の珪藻類が出現しており、その内2006年は、台風の影響などによる一時的な富栄養化に対し *Plantoniella sol* のみが適合して優占的に増殖している。その結果2006年の珪藻類の多様度指数が低くなったと考えられた (Table 6)。

2006年に著しく増殖していた *Plantoniella sol* は、熱帯から亜熱帯外洋海域に普遍的に存在する種類であり、密度は相対的に低いという報告がある (Hasle and Syvertsen, 1997; Gómez *et al.*, 2007)。我々の調査においても、出現した珪藻類全54種類中、全ての調査において出現していた珪藻類は2種類であり、その中の1つが *Plantoniella sol* であった。*Plantoniella sol* の個体数密度は2006年を除いて珪藻類の0.3-14%であり、亜熱帯外洋海域に普遍的に、低密度で存在していることが伺える。一方で、亜熱帯海域においておこなわれた、海底資源開発による海洋環境の影響を評価するために、深層と表層の海水を混合させ、増加する植物プランクトンを調査した研究や、台風による海水の鉛直混合を模擬した培養実験では、増加した珪藻類の中に *Plantoniella sol* は報告されていない (Furusawa, 1997; Yasuki *et al.*, 2013)。それぞれの試験において、もとの海水に *Plantoniella sol* が存在していたかどうかは明らかではないが、*Plantoniella sol* は培養実験では増殖しにくい種類かもしれない。

インド洋におけるセジメントトラップ実験では、*Plantoniella sol* が北西と南東の季節風が強い時期に多く捕捉されたという報告例がある。しかし、大西洋および太平洋の赤道周辺の熱帯海域では、沈降粒子内に *Plantoniella sol* が確認はされているものの、優占的ではない (Romero *et al.*, 2009; Treppke *et al.*, 1996; Onodera *et al.*, 2009)。このインド洋の結果を踏まえると、*Plantoniella sol* は、強い風による海洋深部からの栄養塩類の供給等で一時的に増加できる種類のひとつと推測できる。一方で、赤道周辺の沈降粒子に多く含まれていないことから、

西部北太平洋亜熱帯海域よりも栄養塩環境が良い赤道域で少ないということとなる。よって、*Plantoniella sol* の増殖には、貧栄養な状態に一時的に栄養塩が供給される環境条件が適している可能性がある。いずれにせよ、培養実験や観測結果から、西部北太平洋亜熱帯海域において、*Plantoniella sol* が2006年のように高い密度で存在することは、これまで確認されていない。

## 4.2 台風と生物生産速度の見積り

ここでは、2006年の生物量が他の年よりも増加していたことが台風の影響によるものとして、台風による生物量増加を支える生産性がどの程度であったかを、調査時の基礎生産速度とバクテリアの生産速度を既存式から求めて考察を加えた。

基礎生産速度 ( $IPP: \text{mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) は、Kameda and Ishizaka (2005) の以下に示す経験式を用いた。

$$IPP = 0.66125 \times P_{opt}^B \times E_0 / (E_0 + 4.1) \times Z_{eu} \times Chl_{opt} \times D_{irr}$$

ここで、 $P_{opt}^B$  は単位クロロフィル当り1時間当りの基礎生産速度 ( $\text{mgC mgChl}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) であり、

$$P_{opt}^B = (0.071 \times T - 3.2 \times 10^{-3} \times T^2 + 3.0 \times 10^{-5} \times T^3) / Chl_{total} + (1.0 + 0.17 \times T - 2.5 \times 10^{-3} \times T^2 + 8.0 \times 10^{-5} \times T^3)$$

で求められる。

これらの計算には、Fig. 4に示す海表面クロロフィルa濃度 ( $Chl_{opt}$ ,  $Chl_{total}: \mu\text{g L}^{-1}$ ) と有光層深度(クロロフィルa極大深度,  $Z_{eu}: \text{m}$ ) および Table 5に示す海表面水温 ( $T: ^\circ\text{C}$ ) を使用した。また、JASMES (JAXA Satellite monitoring for Environmental Studies) 公開データ (宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター, 2015) から、各調査月における調査地点の平均的な海表面光合成有効放射量 ( $E_0$ ) を2002年12月は  $30 \text{ mol quanta m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , 2003-2006年7月は  $50 \text{ mol quanta m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , 日照時間 ( $D_{irr}$ ) を2002年12月は12時間, 2003-2006年7月は15時間とした。

バクテリアの生産速度 ( $BP_{BB}: \text{mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) は、Dufour and Torreton (1996) の方法により、バクテリア

炭素態現存量 ( $BB$ :  $\text{mgC m}^{-2}$ ) から見積もった。Dufour and Torretton (1996) の式は以下の通りである。

$$BP_{BB} = 10^{\{(LogBB - 1.4) / 0.4\}} \times 24$$

基礎生産速度は、2002年から2006年は  $109\text{--}242 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  であった (Table 7)。この値は、西部北太平洋亜熱帯海域 (北緯 25 度, 東経 137 度) の 9 月と 1 月において炭素安定同位体  $^{13}\text{C}$  を使って得られた基礎生産速度の  $180\text{--}300 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  の範囲内であった (石田ら, 2003)。これら観測結果は、本研究と時空間的に異なるため、直接的な比較はできないが、本研究で試算した基礎生産速度が亜熱帯海域において取得された結果と同レベルであったことから、この基礎生産の試算値を使って台風と基礎生産速度の関係が評価できると考えられた。

基礎生産速度は 2006 年が最も高く、2003 年が最も低くなった。2003 年は台風が調査地点付近を通過したのは調査の 1 ヶ月以上前であり、台風の影響は極めて低い状況と考えられる。2006 年以外の夏季の基礎生産速度の

2006 年夏季の値からの減少分は  $57 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (2005 年) から  $133 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (2003 年) となり、平均  $92 \pm 38 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  となった。西部北太平洋亜熱帯海域において、台風とクロロフィル a の関係を人工衛星データで評価した研究では、2003 年 10 月後半において、台風 KETSANA により促進された基礎生産速度は  $165 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  と見積もられている (Lin., 2012)。この値は、本研究における台風の影響がないといえる 2003 年の値から試算された 2006 年の基礎生産速度の増加分である  $133 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  とほぼ同レベルであった。KETSANA は、2003 年 10 月に亜熱帯海域を移動しながら、およそ北緯 16 度–東経 130 度から北緯 20 度–東経 135 度にかけてクロロフィル a を増加させ、その Transit Time は 27 時間であった。また、海洋構造は、表面水温約  $29^\circ\text{C}$ 、深度 200 m の水温が約  $20^\circ\text{C}$  であった (Lin., 2002 の図から読み取り)。KETSANA と本研究とは時空間的に異なるが、水温の鉛直構造や、2006 年台風の Transit Time (EWINER:22 時間, BILIS:44 時間 (Table

Table 7. Primary productivity (IPP), bacteria productivity ( $BP_{BB}$ ) and their ratio.

Production ( $\text{mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )	Dec. 2002	Jul. 2003	Jul. 2004	Jul. 2005	Jul. 2006
IPP <sup>*1</sup>	237	109	156	185	242
$BP_{BB}$ <sup>*2</sup>	37	78	152	296	624
$\Delta\text{IPP}_{(2006\text{-others})}$ <sup>*3</sup>	5	133	86	57	-
$\Delta\text{BP}_{BB(2006\text{-others})}$ <sup>*3</sup>	587	546	472	328	-
Ratio	Dec. 2002	Jul. 2003	Jul. 2004	Jul. 2005	Jul. 2006
$BP_{BB}/\text{IPP}$	0.2	0.7	1.0	1.6	2.6
$\Delta\text{IPP}_{(2006\text{-others})}/\text{IPP}_{(2006)}$ <sup>*4</sup>	0.02	0.55	0.36	0.24	-

\*1 Primary Production estimated by using the empirical equation of Kameda and Ishizaka (2005).

\*2 Bacteria production calculated from bacteria biomass by using the empirical equation of Dufour and Torretton (1996).

\*3 Difference of value in 2006 from that in other years.

\*4 Considered to represent the f-ratio (= New production / Total “Net” production).

3)) に高い類似性が見られる。このことから、本研究で試算した基礎生産速度の増加分と KETSANA の人工衛星画像データを元にして見積もられた基礎生産速度増加分が同レベルであることは、それぞれの研究結果を相互に支持していると考えられる。

本研究における 2003 年と比較した 2006 年の基礎生産速度の増加分を仮に新生産とすると、新生産と総生産の割合 (f-ratio,  $\Delta\text{IPP}_{(2006\text{-others})}/\text{IPP}_{(2006)}$ ) は 0.55 である。東シナ海においては、2004 年の台風 MEARI 通過後の人工衛星クロロフィル a から求めた基礎生産速度と、台風時にその付近の ARGO フロート観測による硝酸塩供給量から求めた新生産量から f-ratio は 0.57 と試算されている (Siswanto *et al.*, 2008)。また、北太平洋亜寒帯海域や台湾の湧昇海域では約 0.5 が報告されている (Laws *et al.*, 2000; Chen, 2003)。本研究における f-ratio の試算結果は、台風の影響を受けた東シナ海や生物生産性の高い亜寒帯海域と同範囲となった。

バクテリアの生産速度は、 $37\text{--}624\text{ mgC m}^{-2}\text{ day}^{-1}$  となり、2006 年は他の年よりも  $328\text{--}587\text{ mgC m}^{-2}\text{ day}^{-1}$  高くなっていた (Table 7)。基礎生産速度とバクテリア現存量から見積もったバクテリア生産速度の比 ( $\text{BP}_{\text{BB}}/\text{IPP}$ ) は、0.2–2.6 の範囲であり、2006 年が最も高くなっていた (Table 7)。浮遊性のバクテリアの生産量は、基礎生産量の約 30–50 % に相当し、貧栄養な水域ではバクテリア生産量が基礎生産量を越える場合があるとされる (Ducklow and Carlson, 2002; del Giorgio *et al.*, 1997)。バクテリアの生産速度と基礎生産速度の比は、報告されている数値の範囲であったが、2006 年ではバクテリア生産速度が他の年の 3–20 倍となり、基礎生産速度を約 3 倍上回っていた。バクテリアの増殖には、珪藻類のブルーム時に藻類細胞から浸出する溶存有機物 (TEP, アミノ酸など) が重要であるということが知られている (Bell and Mitchell, 1972; Passow, 2002)。2006 年は、*Planktoniella sol* が炭素態現存量として他の調査時よりも 2–3 桁高かったことから、バクテリアの増殖に不可欠な栄養素も豊富な状態であり、その状況に適応したバクテリアの生産速度が高まり、現存量を増加させたことが示唆される。

ここで、バクテリアとして計数した細胞は、DAPI で染色して計数された細胞であり、原核緑藻類が含まれている。西部北太平洋亜熱帯から赤道海域においては、バ

クテリアに対する原核緑藻類の炭素態現存量の割合は 5–10 % である (Ishizaka *et al.*, 1997; Yamaguchi *et al.*, 2004)。よって、ここで示すバクテリア炭素態現存量には、全ての結果において原核緑藻類が、炭素量として 5–10 % は含まれている可能性がある。また、東シナ海での台風の影響を模擬して、真光層より下層の海水を上層の海水に混合させた培養実験によると、原核緑藻類が有する光合成色素である *Divinyl chlorophyll-a* (Jeffrey and Wright, 1997) の濃度は、初期値から 3 日目で倍化した後、6 日目では初期値レベルまで低下し、色素を植物プランクトン組成比に変換した結果では、原核緑藻類は、3 日目においても初期の存在割合である約 20 % とほぼ同じであり、6 日目では著しく減少している (Yasuki *et al.*, 2013)。この実験からは、台風の影響で原核緑藻類は増殖するが持続的ではなく、植物プランクトンに占める割合は初期値以上にはならないことが示唆される。よって、東シナ海の培養実験結果 (Yasuki *et al.*, 2013) を参考にすると、本研究結果においては、台風の影響で原核緑藻類が増加した可能性はあるが、バクテリア炭素態現存量に大きく影響するほどではなかったと考えられる。

#### 4.3 台風通過後の生物間相互作用の推定

2006 年が台風の影響により栄養塩が供給されて生物量が増加していたとして、どのような段階を観測していたかを生物相から推定し、生物相互作用について以下で考察する。

海洋においては植物プランクトンのブルームが終焉した後に、バクテリアが増加することが報告されている (Teeling *et al.*, 2012)。2006 年以外は台風の影響がない状態と仮定した場合、2006 年は、植物プランクトンの炭素態現存量が、他の年に比べ 0.8–1.8 倍であったのに対し、バクテリアの炭素態現存量は、1.4–3.1 倍であり、植物プランクトンよりも増加していた (Fig. 6)。バクテリアの生産速度も基礎生産速度を上回っていた (Table 7)。このように、植物プランクトンよりもバクテリアの炭素態現存量や生産性が高かったことは、2006 年の観測では、台風通過後から植物プランクトンが増加するピークを越え、バクテリアが増加するピーク周辺であった状況を捉えていた可能性がある。

また、シアノバクテリアは、2003年、2004年、2005年に比べて、2006年は、細胞数が亜表層極大深度において3-5倍、全水柱で約2倍高く、海表面から亜表層にかけては半数以下になっていた (Fig. 5の(a))。2003年から2004年を台風の影響がない状態とすると、2006年のシアノバクテリアは台風の影響で増加していたといえる。

海洋深部の海水と表層海水を混合させた栄養塩添加実験によると、シアノバクテリアは、亜熱帯海域においては、培養開始から2日目で最大増殖速度を示し、細胞数は10-100倍増加し、その状態が約1週間から2週間継続した後、急激に減少している (Furusawa., 1997)。また、東シナ海での栄養塩添加実験では、植物色素の結果から、シアノバクテリアが有する色素 *Zeaxanthin* (Jeffrey and Wright, 1997) 濃度が培養3日目でピークとなり、濃度は倍化し、その後は急激に低下している (Yasuki *et al.*, 2013)。そして、両実験もシアノバクテリアにやや遅れて珪藻類が増殖し始める傾向が認められる。

2006年の観測は、大型でかつ移動速度が遅かった EWINIAR が通過した14日後、BILIIS が通過した9日後に行われており、培養実験でシアノバクテリアの増殖がピークとなる栄養塩添加後から2日から3日後の期間をすでに過ぎていた。よって、観測日は、台風通過後のシアノバクテリアのピーク後であり、細胞数が減少し、珪藻類が増加から減少に移るまでのいずれかの段階の中で、バクテリアが珪藻の挙動に追従して増加していた状況を調査していた可能性がある。2006年の亜表層以浅では、シアノバクテリアの細胞数が他の年の約半数であったことから、表層側から栄養塩が枯渇しはじめ、細胞数が顕著に減少していく過程であった可能性が推測できる。

2006年調査時には、植物プランクトンの増殖がピークを越えていた可能性があったが、生物量はバクテリアを含めて高かったことから、台風の影響で、台風通過後から少なくとも約10日間は生物量が高い状況を維持できるだけの栄養塩類が供給されたことが示唆される。

#### 4.4 台風が沈降粒子束に及ぼす影響

2006年は、沈降粒子束の観測を実施しておらず、台風通過後にみられた珪藻類の増加などの海洋表層の生物群

集構造の変化が、沈降粒子束にどのような影響をおよぼしたかはわからない。しかしながら、2002年12月から2005年7月の間の沈降粒子束の結果から、台風の影響で高くなった生物生産速度や増加した珪藻類などが、沈降粒子束にどのような影響を及ぼしていたのかを考察できる可能性がある。

人工衛星画像を利用して、西部北太平洋の1998年から2007年に発生した台風起因する基礎生産速度を見積もった研究では、2004年が基礎生産速度を促進させる台風が最も多く発生しており、台風による基礎生産量の年間増加量は2004年が約1700 GgCで、2003年の約1500 GgCに比べてやや高い (斉藤ら, 2012)。彼らの研究には、本研究の海域および台風が含まれているため、本研究における年間の積算沈降粒子束は2003年よりも2004年が高くなることが期待される。しかしながら、年間積算した生物起源の沈降粒子束は2003年と2004年で違いは認められなかった (Fig.7の(a))。

一方で、沈降粒子束のデータが年間を通じて時系列で整っている2003年と2004年の沈降粒子束観測結果からは、台風通過のタイミングと沈降粒子束の変動の関連性が評価できると考えられる。そこで、台風と沈降粒子束の時系列データからそれぞれの関連性を考察する。

セジメントトラップ設置期間を含む2002年9月から2005年9月の間に、西部北太平洋で発生した台風は80個であり、その内の20個が、セジメントトラップ設置期間中に調査地点から500 km以内を通過していた (Table 3)。沈降粒子束は、1月から5月にかけてピークがある (Fig. 7の(a))。しかし、この期間は台風が発生していないため解析から除き、台風が発生していた2003年と2004年の6月から12月の沈降粒子束について台風との関係を解析する。

6月から12月の沈降粒子束は低い値で推移していたが、極大値の出現時期や極大および極小の起伏の形状に年によって違いがあるように見られ、粒子束で変化の大小を判別することは難しいと判断した。そこで、以下の式を用いて生物起源粒子束および各粒子束の比の変化を標準化した。

$$A.I. = (F_{i,t} - F_{i,m}) / i\sigma$$

ここで、

$A.I.$  : 偏差 (Anomaly Index)

$F_{i,t}$  : 期間  $t$  における成分  $i$  の粒子束

$F_{i,m}$  : 全期間  $m$  における成分  $i$  の平均粒子束 (加重平均)

$i\sigma$  : 全期間における成分  $i$  の粒子束の標準偏差

この式の  $A.I.$  は、ある期間  $t$  における成分  $i$  の粒子束の期間平均からの偏差の程度を表しており、偏差が 0 の時には期間平均値に一致し、正偏差の時は期間平均よりも大きく、負偏差の時は期間平均よりも小さい粒子束であることを示す。

標準化した生物起源粒子束および粒子束の比の時系列変化を、セジメントトラップ設置点付近を通過した台風のランクとともに示した (Fig. 8)。

通過した台風は、2003 年が 6 個、2004 年が 12 個であり、2004 年の台風のランクは平均で 3.8 であり、2003 年の平均値 2.8 を上回っていた。台風のランク付けの要素である Transit Time は 2004 年が平均値 23 時間で、2003 年の平均値 15 時間を上回った。また、台風の中心から調査地点までの距離から台風の半径を引いた値 (DS-Radius) は、その値が負の場合、その台風は調査地点上を通

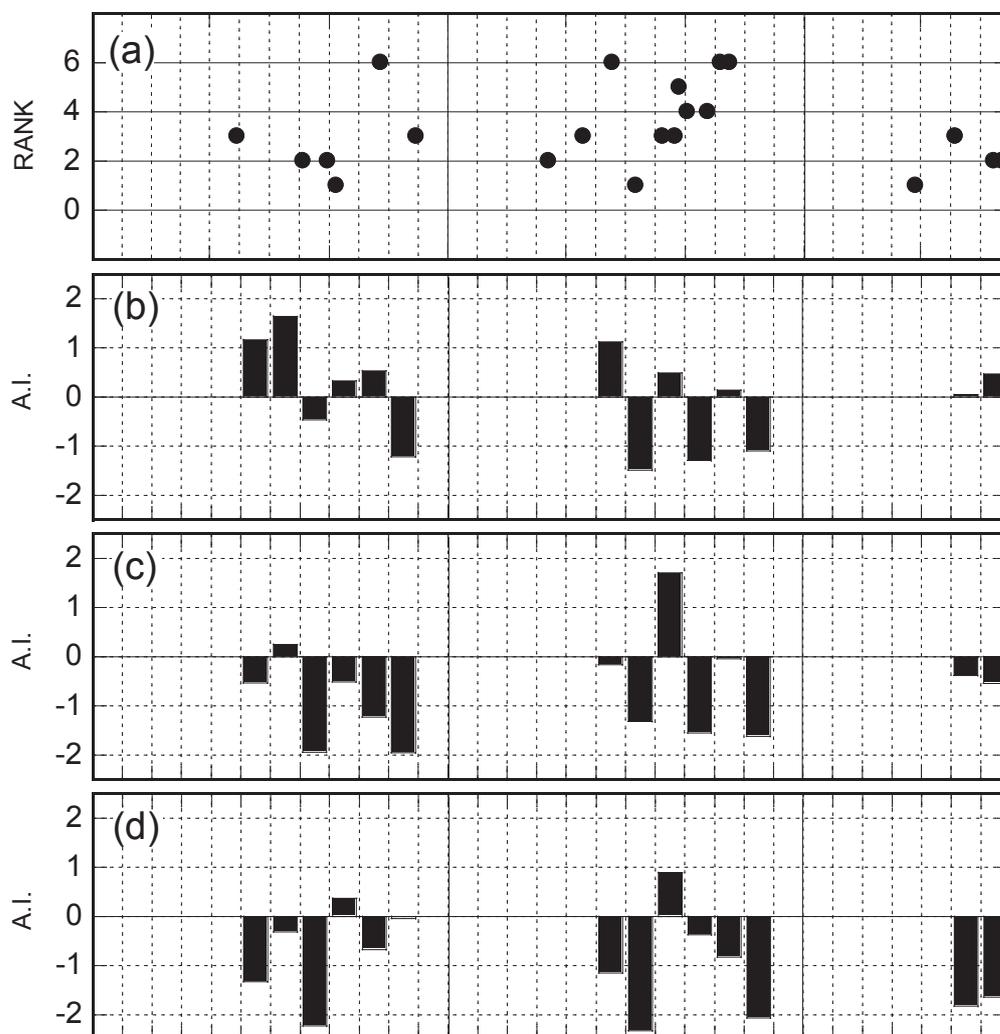


Fig. 8. Time series of the typhoon RANK and the anomaly indices of monthly particle fluxes from June to November in years from 2003 to 2005. (a) : typhoon RANK (see Table 3) (b) : Opal (c) : BOC (d) : BIC

過していることを示し、負の回数は2003年が1回、2004年が4回で、2004年は2003年に比べて調査地点を直撃する台風の数が多かった (Table 3)。つまり、生物活動を促進させる性質を持った台風は、2003年よりも2004年の方がより多く、しかもより近く調査地点を通過していたことになる。しかしながら、生物起源沈降粒子束には、ランクの高い台風が通過した後に、期間平均よりも沈降量が高くなるという、台風の通過と連動した挙動は認められず、台風と生物起源粒子束偏差との間には時間的かつ量的な関係は見られなかった (Fig. 8)。また、台風が多く通過していた期間 (6月から12月) で積算した生物起源粒子束においても、2003年と2004年で明確な違いは認められなかった (Fig. 7の(a))。本研究におけるセジメントトラップによる沈降粒子の時系列観測は、1地点で行われ、設置深度が約2900mで、捕集期間が1ヶ月間であった。この方法では、台風が沈降粒子に及ぼす影響を定量的に評価できる観測ができなかった可能性も考えられる。

## 5. 結論

2006年の台風EWINIARおよびBILISが通過した約10日後のプランクトン群集構造を調査した結果、珪藻類、シアノバクテリアおよびバクテリアが増加しており、珪藻類は、*Planktoniella sol*が優占種であった。台風の通過によって栄養塩類が供給されたことが、生物量増加の要因の一つとして考えられた。一方で、2003年12月から2005年7月まで実施したセジメントトラップによる沈降粒子時系列観測結果からは、台風と台風により増加すると予想される生物量 (沈降粒子量) との間に関連性が認められなかった。この要因は、沈降粒子の観測が2006年の珪藻類増加時にあわせて実施できていなかったこともあるが、セジメントトラップの観測方法 (設置深度、設置台数、設置範囲 (地点)、捕集期間等) が、台風の影響を捉えるために必要な時空間的条件を満たしていなかったためとも考えられた。

珪藻類は増加して沈降することにより、海洋の表層から深層に炭素を輸送する役割がある (Honda and Watanabe, 2010)。海洋の炭素循環像を把握するためには、本研究により台風の影響で珪藻類が増加する可能性が示

された亜熱帯海域において、増加した珪藻類などが沈降粒子にどの程度の影響を及ぼすのかを定量的に評価できる調査の実施が今後望まれ、本研究の結果がその研究基盤となることが期待される。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) が経済産業省 (METI) の補助・委託により実施した「二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業\_\_二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」の海洋調査で得られた成果を用いました。また、人工衛星クロロフィルデータは、アメリカ航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration (NASA)) の Ocean Biology Distributed Active Archive Center (OB. DAAC) により運営・管理されている「OceanColor WEB」上で公開されているデータを用いました。海洋調査においては、株式会社オフショアオペレーション所属「第12海工丸」の坂口茂之船長、小久保純一郎作業長、乗組員の方々、そして「NOPACCS (Tsubota *et al.*, 1999)」から著者らとともに外洋調査を実施してきた株式会社環境総合テクノスのメンバーに多大なるご協力を頂きました。論文をまとめるにあたっては、東京大学の津田敦博士にシンポジウムで発表の機会を設けて頂いたことがきっかけとなり、北海道大学の鈴木光次博士、国立研究開発法人水産総合研究センターの桑田晃博士、九州大学の下島公紀博士、公益財団法人海洋生物環境研究所の喜田潤博士、そして株式会社日本海洋生物研究所の清沢弘志氏から、有益なアドバイスと度重なる励ましを頂きました。論文を投稿し改稿する際には、編集の担当をして頂いた香川大学の多田邦尚編集委員と査読して頂いた匿名査読者、独立行政法人海洋研究開発機構の本多牧生博士、そして最終的なチェックをして頂いた市川洋編集委員長には、それぞれお忙しい中、大変貴重かつ適切な多くのご助言を与えて頂きました。皆様に心からお礼を申し上げます。

## References

- Bell, W., and R. Mitchell (1972): Chemotactic and growth responses of marine bacteria to algal extracellular products. *Biol. Bull.*, **143**, 265–277.
- Capone G. D., J. P. Zehr, H. W. Paerl, B. Bergman, and E. J. Carpenter (1997): Trichodesmium, a Globally Significant Marine Cyanobacterium. *Science*, **276**, 1221–1229.
- Chen, C. T. A. (2003): New vs. export production on the continental shelf. *Deep-Sea Res. II*, **50**, 1327–1333.
- Chen, Y. L., H. Y. Chen, S. Jan, and S. Tuo (2009): Phytoplankton productivity enhancement and assemblage change in the upstream Kuroshio after typhoons. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **385**: 111–126, doi: 10.3354/meps08053.
- del Giorgio, P. A., J. J. Cole, and A. Cimleris (1997): Respiration rates in bacteria exceed phytoplankton production in unproductive aquatic systems. *Nature*, **385**, 148–151, doi: 10.1038/385148a0.
- Ducklow H. W., D. L. Kirchman, and T. R. Anderson (2002): The magnitude of spring bacterial production in the North Atlantic Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **47**, 1684–1693.
- Dufour, P. H., and J. P. Torretton (1996): Bottom-up and top-down control of bacterioplankton from eutrophic to oligotrophic sites in the tropical northeastern Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. I*, **43**, 1305–1320.
- Field, C. B., M. J. Behrenfeld, J. T. Randerson, and P. Falkowski (1998): Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, **281**, 237–240.
- Furusawa, K. (1997): Effect of deep sea bottom water on growth and composition of phytoplankton communities. In *Proceeding of International Symposium on Environmental Studies for Deep-Sea Mining*, 20–21 Nov. 1997, Tokyo, 321–320.
- Gómez, F., H. Claustre, P. Raimbault, and S. Souissi (2007): Two High-Nutrient Low-Chlorophyll phytoplankton assemblages: the tropical central Pacific and the offshore Per´u-Chile Current. *Biogeosciences*, **4**, 1101–1113.
- 浜崎恒二, 石坂丞二, 齊藤宏明, 杉崎宏哉, 鈴木光次, 高橋一生, 千葉早苗 (2013): 海洋学の10年展望(Ⅲ) —日本海洋学会将来構想委員会生物サブグループの議論から—, *海の研究*, **22**, 253–272.
- Hasle, R. G., and E. E. Syvertsen (1997): Chapter 2. Marine diatoms. In Tomas, R. C. (ed.), *Identifying Marine Phytoplankton*. Academic Press, San Diego, 386 pp.
- Holm-Hansen, O., C. J. Lorenzen, R. W. Holmes, and J. D. H. Strickland (1965): Fluorometric determination of chlorophyll. *ICES J. Mar. Sci.*, **30**, 3–15.
- Honda, M. C., K. Imai, Y. Nojiri, F. Hoshi, T. Sugawara, and M. Kusakabe (2002): The biological pump in the northwestern North Pacific based on fluxes and major components of particulate matter obtained by sediment-trap experiments (1997–2000). *Deep-Sea Res. II*, **49**, 5595–5625.
- Honda, M. C., and S. Watanabe (2010): Importance of biogenic opal as ballast of particulate organic carbon (POC) transport and existence of mineral ballast-associated and residual POC in the Western Pacific Subarctic Gyre. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L02605, doi:10.1029/2009GL041521.
- 本多牧生 (2014): 気候変動による生態系を介した物質循環過程の変化とそのフィードバック: 西部北太平洋亜寒帯・亜熱帯循環比較研究を通して (K2S1 プロジェクト) 主旨説明と本プロジェクトハイライト, 日本海洋学会 2014 春季大会シンポジウム J.
- 石田洋, 渡邊豊, 石坂丞二, 渡辺雄二, 播本孝史, 坪田博行 (2003): 西部北太平洋におけるクロロフィル a の長期変動の検出の試み, 月刊海洋, **35**, 25–31.
- Ishida, H., Y. W. Watanabe, J. Ishizaka, T. Nakano, N. Nagai, Y. Watanabe, A. Shimamoto, N. Maeda, and M. Magi (2009): Possibility of recent changes in vertical distribution and size composition of chlorophyll-a in the western North Pacific region. *J. Oceanogr.*, **65**, 179–186.
- Ishii, M., N. Kosugi, D. Sasano, S. Saito, T. Midorikawa, and H. Y. Inoue (2011): Ocean acidification off the south coast of Japan: A result from time series observations of CO<sub>2</sub> parameters from 1994 to 2008. *J. Geophys. Res.*, **116**, C06022, doi:10.1029/2010 JC006831.
- Ishizaka, J. M. Takahashi, and S. Ichimura (1983): Evaluation of coastal upwelling effects on phytoplankton growth by simulated culture experiments. *Mar. Biol.*, **76**, 271–278.
- Ishizaka, J., H. Kiyosawa, K. Ishida, K. Ishikawa, and M. Takahashi (1994): Meridional distribution and carbon biomass of autotrophic picoplankton in the Central North Pacific Ocean during late Northern summer 1990. *Deep-Sea Res. I*, **41**, 1745–1766.
- Ishizaka, J., K. Harada, K. Ishikawa, H. Kiyosawa, H. Furusawa, Y. Watanabe, H. Ishida, K. Suzuki, N. Handa, and M. Takahashi (1997): Size and taxonomic plankton community structure and carbon flow at the equator of Central Pacific during 1990–1994. *Deep-Sea Res. Part II*, **44**, 1927–1949.
- 石坂丞二, エコシスワント, 山田圭子, 牧野高志 (2012): 東シナ海・日本海における基礎生産への台風の影響, 沿岸海洋研究, **50**, 39–44.
- Jeffrey, S. W., and S. W. Wright (1997): Qualitative and quantitative HPLC analysis of SCOR reference algal cultures. In Jeffrey, S. W., Mantoura, R. F. C., and S. W. Wright (ed.), *Phytoplankton Pigments in Oceanography*, UNESCO Press, Paris, 661 pp.
- Kameda, T., and J. Ishizaka (2005): Size-Fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. *J. Oceanogr.*, **61**, 633–672.
- 神田稔太, 石井雅男, 小川浩史, 小埜恒夫, 小畑元, 川合美千代, 鈴木昌弘, 本多牧生, 山下洋平, 渡邊豊 (2013): 海洋学の10年展望(Ⅱ) —日本海洋学会将来構想委員会化学サブグループの議論から—, *海の研究*, **22**, 219–251.
- Karl, D. M. (2002): Nutrient dynamics in the deep blue sea. *TRENDS Microbiol.*, **10**, 410–418.
- 気象庁 (1999a): 塩分, 海洋観測指針, 38–48.
- 気象庁 (1999b): 栄養塩, 海洋観測指針, 63–98.
- 気象庁 (2013): Best Track Data, RSMC Tokyo-Typhoon Center, [http://www.jma.go.jp/jma/eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/RSMC\\_HP.htm](http://www.jma.go.jp/jma/eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/RSMC_HP.htm) (最終閲覧日: 2013年4月7日).
- 清沢弘志, 石坂丞二, 石川公敏, 高橋正征 (1995): 外洋プランクトンの群集構造の把握方法 —Northwest Pacific Carbon Cycle Study—での方法一, 資源と環境, **4**, 87–103.
- 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) (2002): 平成13年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」成果報告書, 平成14年3月.
- 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) (2003): 平成14年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」成果報告書, 平成15年3月.
- 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) (2004): 平成15年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「二酸化炭素の海洋隔離に

- 伴う環境影響予測技術開発」成果報告書, 平成 16 年 3 月。  
 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) (2005): 平成 16 年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」成果報告書, 平成 17 年 3 月。  
 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) (2006): 平成 17 年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」成果報告書, 平成 18 年 3 月。
- Laws, E. A., P. Falkowski, W. O. Smith, H. Ducklow, and J. J. McCarthy (2000), Temperature effects on export production in the open ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, **14**, 1231–1246.
- Lee, S., and J. A. Fuhrman (1987): Relationship between biovolume and biomass of natural derived marine bacterioplankton, *Appl. Environ. Microb.*, **53**, 1298–1303.
- Lin, I.-I. (2012): Typhoon-induced phytoplankton blooms and primary productivity increase in the western North Pacific subtropical ocean, *J. Geophys. Res.*, **117**, C03039, doi: 10.1029/2011JC007626.
- Mortlock, R. A., and P. N. Froelich (1989): A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments, *Deep-Sea Res.*, **36**, 1415–1426.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) Ocean Biology Distributed Active Archive Center (OB. DAAC) (2013): OceanColor WEB, OceanColor Data, MODIS - Aqua Ocean Color Data, <http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODISA/Mapped/8Day/4km>, Maintained by NASA OB. DAAC, Goddard Space Flight Center, Greenbelt MD (最終閲覧日: 2013 年 4 月 6 日)。
- Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, K. Sakaoka, and T. Yoshimura (2011): Oceanic iron supply mechanisms which support the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic Pacific, *J. Geophys. Res.*, **116**, C02021, doi: 10.1029/2010JC006321.
- Noriki, S., K. Nakanishi, T. Fukawa, M. Uematsu, T. Uchida, and S. Tsunogai (1980): Use of a sealed teflon vessel for the determination of chemical constituents of various marine samples., *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, **31**, 354–361.
- Noriki, S., and S. Tsunogai (1986): Particulate fluxes and major components of settling particle from sediment trap experiment in the Pacific Ocean, *Deep-Sea Res.*, **33**, 903–912.
- Onodera, J., K. Takahashi, F. Kobayashi, I. Ono, and Y. Katsurada (2009): Diatom sinking fluxes in the western and central Equatorial Pacific during 1999–2002: Summary and data, *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth & Planet. Sci.*, Vol. XXXII, No. 2, 15–44.
- Ota, H., H. Mitsuda, M. Kimura, and T. Kitao (2009): Reference materials for nutrients in seawater: Their development and present homogeneity and stability, p. 11–30. In *Comparability of nutrients in the world's ocean*, INSS International Workshop 10–12 Feb. 2009, Paris, edited by M. Aoyama, Mother Tank, Tsukuba, Japan.
- Passow, U. (2002): Production of transparent exopolymer particles (TEP) by phyto- and bacterioplankton, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **236**, 1–12.
- Price, J. F. (1981): Upper ocean response to a hurricane, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 153–175, doi: 10.1175/1520-0485(1981)011<0153:UORTAH>2.0.CO;2
- Qiu, B., and S. Chen (2006): Decadal variability in the formation of the North Pacific Subtropical Mode Water: Oceanic versus atmospheric control, *J. Phys. Oceanogr.*, **36**, 1365–1380.
- Romero, O. E., T. Rixen, and B. Herunadi (2009): Effects of hydrographic and climatic forcing on diatom production and export in the tropical southeastern Indian Ocean, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **384**, 69–82, doi: 10.3354/meps08013.
- Saino, T., and A. Hattori (1978): Diel variation in nitrogen fixation by a marine blue-greenalge, *Trichodesmium thiebautii*, *Deep Sea Res.*, **25**, 1259–1263.
- Sakaida, F., H. Kawamura, S. Takahashi, T. Shimada, Y. Kawai, K. Hosoda, and L. Guan (2009): Research and development of the New Generation Sea Surface Temperature for Open ocean (NGSST-O) product and its demonstration operation, *J. Oceanogr.*, **65**, 859–870, doi: 10.1007/s10872-009-0071-3.
- 斉藤誠一, 石坂丞二, 新野宏, 虎谷充浩, 森本昭彦, 平澤享 (2012): 衛星による大気海洋環境変動と突発現象の解明, p. 141–148, 海洋表層・大気下層間の物質循環リネージュ研究成果報告書。
- Shannon, C. E., and W. Weaver (1949): *The mathematical theory of communication*, The University of Illinois Press, Urbana, 117 pp.
- Shibano, R., Y. Yamanaka, N. Okada, T. Chuda, S. Suzuki, H. Niino, and M. Toratani (2011): Responses of marine ecosystem to typhoon passages in the western subtropical North Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L18608, doi:10.1029/2011GL048717.
- 塩崎拓平, 武田重信, 古谷研 (2009): 熱帯・亜熱帯貧栄養海域における新生産の評価, *海の研究*, **18**, 213–242.
- Siswanto, E., J. Ishizaka, K. Yokouchi, K. Tanaka, and C. K. Tan (2007): Estimation of interannual and interdecadal variations of typhoon-induced primary production: A case study for the outer shelf of the East China Sea, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L03604, doi:10.1029/2006GL028368.
- Siswanto, E., J. Ishizaka, A. Morimoto, K. Tanaka, K. Okamura, A. Kristijono, and T. Saino (2008): Ocean physical and biogeochemical responses to the passage of Typhoon Meari in the East China Sea observed from Argo float and multiplatform satellites, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L15604, doi: 10.1029/2008GL035040.
- Strathmann, R. R. (1967): Estimation the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume, *Limnol. Oceanogr.*, **12**, 411–418.
- Suzuki, R., and T. Ishimaru (1990): An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using n,n-dimethylformamide, *J. Oceanogr.*, **46**, 190–194, doi: 10.1007/BF02125580.
- 鈴木光次, 津田敦 (2009): 台風擾乱に伴う北太平洋熱帯外洋域における植物プランクトン群集組成の変化, *W-PASS NEWS LETTR*, **4**, 4.
- Taylor, S.R. (1964): Abundance of chemical elements in the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **28**, 1273–1285.
- Teeling, H., B. M. Fuchs, D. Becher, C. Klockow, A. Gardebrecht, C. M. Bennke, M. Kassabgy, S. Huang, A. J. Mann, J. Waldmann, M. Weber, A. Klindworth, A. Otto, J. Lange, J. Bernhardt, C. Reinsch, M. Hecker, J. Peplies, F. D. Bockelmann, U. Callies, G. Gerdts, A. Wichels, K. H. Wiltshire, and F. O. Glö (2012): Substrate-controlled succession of marine bacterioplankton populations induced by a phytoplankton bloom, *Science*, **336**, 608–611, doi: 10.1126/science.1218344.
- Toratani, M. (2008): Primary production enhancement by typhoon Ketsana in 2003 in western North Pacific, *Proc. SPIE*, **7150**, 715013, doi: 10.1117/12.806426.
- Toratani, M., K. Suzuki, A. Tsuda, and S. Saitoh (2010): Primary production enhancement by typhoon in Western North Pacific over a decade from 1998 to 2007, American Geophysical Union, *Fall Meeting 2010*, abstract #B31C-0332.

- Treppke, U. F., C. B. Lange, and G. Wefer (1996): Vertical fluxes of diatoms and silicoflagellates in the eastern equatorial Atlantic, and their contribution to the sedimentary record, *Mar. Micropaleontol.*, **28**, 73–96.
- Tsubota, H., J. Ishizaka, A. Nishimura, and Y. W. Watanabe (1999): Overview of NOPACCS (Northwest Pacific Carbon Cycle Study), *J. Oceanogr.*, **55**, 645–653.
- Tsuchiya, K., V. S. Kuwahara, T. Yoshiki, R. Nakajima, H. Miyaguchi, N. Kumekawa, T. Kikuchi, and T. Toda (2013): Phytoplankton community response and succession in relation to typhoon passages in the coastal waters of Japan, *J. Plankton Res.*, **0**, 1–15, doi: 10.1093/plankt/fbt127.
- 角皆静男 (2011): 海洋を介した物質循環と気候変化に関する研究, *地球化学*, **45**, 45–59.
- 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター (2015): JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies (JASMES), [http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index\\_j.html](http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_j.html) (最終閲覧日: 2015年3月17日).
- 植松光夫 (1999): 大陸起源エアロゾルの海洋への影響—物質循環に関連して—, *エアロゾル研究*, **14**, 209–213.
- 植松光夫 (2013): 大気圏を通して海洋に運ばれる化学物質に関する研究, *海の研究*, **22**, 35–45.
- Verity, P. G., C. Y. Robertson, C. R. Tronzo, M. G. Andrews, J. R. Nelson, and M. E. Sieracki (1992): Relationships between cell volume and the carbon and nitrogen content of marine photosynthetic nanoplankton, *Limnol. Oceanogr.*, **37**, 1434–1446.
- Watanabe, W. Y., H. Ishida, T. Nakano, and N. Nagai (2005): Spatio-temporal decreases of nutrients and chlorophyll-a in the surface mixed layer of the western North Pacific from 1971 to 2000, *J. Oceanogr.*, **61**, 1011–1016.
- Yamaguchi, A., Y. Watanabe, H. Ishida, T. Harimoto, K. Furusawa, S. Suzuki, J. Ishizaka, T. Ikeda, and M. M. Takahashi (2004): Latitudinal differences in the planktonic biomass and community structure down to the greater depths in the western North Pacific, *J. Oceanogr.*, **60**, 773–788.
- Yamamuro, M., and H. Kayanne (1995): Rapid direct determination of organic carbon and nitrogen in carbonate-bearing sediments using Yanako MT-5 CHN analyser, *Limnol. Oceanogr.*, **40**, 1001–1005.
- Yasuki, N., K. Suzuki, and A. Tsuda (2013): Responses of lower trophic-level organisms to typhoon passage on the outer shelf of the East China Sea: an incubation experiment, *Biogeosciences Discuss.*, **10**, 6605–6635. doi:10.5194/bgd-10-6605-2013.

# The effect of typhoons on phytoplankton communities and settling particle flux in the western North Pacific subtropical region

Hiroshi Ishida<sup>1\*</sup>, Kazusi Furusawa<sup>2</sup>, Takashi Makino<sup>3</sup>,  
Joji Ishizaka<sup>4</sup> and Yutaka W. Watanabe<sup>5</sup>

## Abstract

Phytoplankton communities and carbon biomass were investigated at 22.5 °N, 131.8 °E in the western North Pacific subtropical region between 2004 and 2006 within 10 days of a typhoon passing within 500 km of the survey point. The typhoons of 2006 were EWINIAR and BILIS. The translation speeds of these typhoons at the nearest area from the survey point were 2.8 and 4 m s<sup>-1</sup>, respectively slower than that of 2004's typhoon KOMPUS (6.5 m s<sup>-1</sup>) and 2005's typhoon HITANG (7.9 m s<sup>-1</sup>). After the 2006 typhoons, the sea surface water temperature decreased, and the chlorophyll-a increased over a wide area, including the investigation point. The number of diatoms in 2006 increased, and the carbon biomass was 5–10 times higher compared with 2004 and 2005. The dominant species of diatom was *Planktoniella sol* with  $4 \times 10^7$  cells m<sup>-2</sup> which was considerably higher than the cell density 2004 ( $1 \times 10^5$  cells m<sup>-2</sup>) and 2005 ( $5 \times 10^4$  cells m<sup>-2</sup>). 2006 carbon biomass of the cyanobacteria and bacteria was twice as high as that of other years. The settling particle flux after a specific typhoon was not increased, in contrast with the hypothesis we derived from the increasing biomass data.

**Key words** : Western North Pacific Subtropical Ocean, typhoon, phytoplankton community, diatom, settling particle flux

(Corresponding author's e-mail address : ishida\_hiroshi@kanso.co.jp)

(Received 22 May 2015 ; accepted 27 January 2016)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2016)

---

1 The General Environmental Technos Co., Ltd., Chuoh-ku, Osaka 541-0052, Japan.

2 Marine Biological Research Institute of Japan Co., Ltd., Shinagawa-ku, Tokyo 142-0042, Japan

3 K's Brains Co., Ltd., Kunitachi-City, Tokyo 186-0005, Japan

4 Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

5 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

\* Corresponding author : Hiroshi Ishida

TEL : +81662637337

FAX : +81662637311

e-mail : ishida\_hiroshi@kanso.co.jp