

機関番号：12601

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18067008

研究課題名（和文） ダスト降下に伴う海洋表層生物群集の応答と気候へのフィードバック

研究課題名（英文） Ecosystem responses by epipelagic organisms to dust flux and its feedback to climate

研究代表者

津田 敦 (TSUDA ATSUSHI)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：80217314

研究成果の概要（和文）：本研究は、DMS などの生物起源ガスを計測するグループに海域の生物学的な情報を提供し、その変動機構を推測する一助となった。また、台風通過を再現する培養実験により、台風通過時には大型植物プランクトンである珪藻が卓越し海域の炭素循環や食物網構造を変えることを明らかにした。クロロフィルセンサー付きアルゴフロートは、台風には遭遇しなかったが幾つかのアノマリーを観測している。知見の少なかった亜熱帯の動物プランクトンに関しては、極域で特徴的にみられる、季節的な鉛直移動が亜熱帯種においても多く観察され、台風など時空間的に予測できない高い生産が、亜熱帯の生物生産を支えている可能性を示唆した。

研究成果の概要（英文）：This group provided the biological information to the group who studied the biogenic gasses such as DMS to understand the mechanisms of the variation. Some on-deck incubation experiments showed that diatoms are most important phytoplankton enhanced by typhoon passing and suggested possibilities of altering the carbon cycling and food web structure. Argo-floats with a chlorophyll sensor were deployed. Although we have not observed a typhoon passing, some anomalies of high chlorophyll concentration have been observed. We also found that many copepod species showed seasonal vertical migration behavior, which had recognized as characteristic behavior to polar zooplankton. These results suggest that biological production in the subtropical Pacific is largely depend on the unpredictable spatial and temporal variability of primary production.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	27,900,000	0	27,900,000
2007 年度	21,000,000	0	21,000,000
2008 年度	22,100,000	0	22,100,000
2009 年度	16,700,000	0	16,700,000
2010 年度	13,500,000	0	13,500,000
総計	101,200,000	0	101,200,000

研究分野：生物海洋

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：鉄、ダスト、生態系変動、亜熱帯太平洋、動物プランクトン、台風

1. 研究開始当初の背景

海洋生態系の生物生産は、主に窒素栄養塩の不足によって制限されていると従来考えら

れていた。しかし 1980 年代後半に、微量金属測定手法の確立されると、鉄が多くの海域における生物生産制限要因となっているこ

と、すなわち"鉄仮説"が示された。海洋の25%を占める HNLC 海域（栄養塩が余っていて植物濃度が低い海域、南極海、赤道湧昇域、亜寒帯太平洋）では、この"鉄仮説"を検証するために、我々を含む世界中の研究者によって現場中規模鉄散布実験が行われ、鉄が、光合成、栄養塩摂取を制限することが確認された。これらの研究の中で、海洋表層で生物生産に利用される鉄は主に大気経路で輸送される鉱物粒子(ダスト)起源であり、黄砂のようなダストイベントが海洋の生物生産に大きく影響することが指摘された。また、これらの研究の中で亜熱帯域のように窒素栄養塩が不足している貧栄養海域では、鉄の供給によって増加する窒素固定が、生物生産や物質循環に大きな影響を与えることが示唆された。この、鉄と窒素固定および生物生産の関係解明は、氷期-間氷期における大気二酸化炭素濃度の変動要因の解明、地球史における窒素循環の進化解明、気候変化に伴う地球環境予測においても重要であることは広く認識されている。また、雲核形成に関与する硫化ジメチル (DMS) やオゾン層破壊に関与するハロゲン化合物の幾つかは海洋が主要な放出源と考えられているが IPCC 報告が指摘するように、放出に関与する生物による生産消費過程がよく解っていない。

2. 研究の目的

(1) 概要

北太平洋亜熱帯海域は、大陸からのダスト降下によって促進される窒素固定が盛んに行われているが、この影響の定量的な評価に必要な、鉄微量測定、超クリーン培養、分子生物学的手法、衛星観測など最新手法を用いた観測・研究は未だなされていない。本研究ではダスト分布、水色画像をもとに有効な観測点を設定して、鉄、窒素固定生物の空間分布を把握し、ダスト降下に伴う窒素固定生物のブルーム（大増殖）の時間変化を追うことによって食物網構造、物質循環の変化を解明する。また本研究では、生産性の低い亜熱帯における重要な新生産メカニズムとして台風に注目し、観測と模擬実験によりこれらの寄与を解明する。これらが明らかになれば、地球規模での窒素循環の解明と今後の予測、氷期-間氷期における二酸化炭素変動、窒素循環進化の理解を飛躍的に進む。また、三陸沖は春の珪藻大増殖によって日本近海で最も生産性が高い海域であるが、この生産に与えるダスト起源の鉄の役割や鉄の動態および気候効果微量気体の生産は不明である。そこで、春季に集中観測を行うことによって、海洋表層の生物組成、食物網構造の変化と気候関連微量気体の生産・消費過程を解明し、気候変化に伴う海洋生態系・物質循環の予測に大きく寄与する。

(2) 学術的な特色

この研究は、地球気候変化に対し、正確にかつ安全に対処するために必要な精度の高い科学的知見を提供する上で緊急性が極めて高い課題である。さらに、海洋における鉄供給と二酸化炭素吸収、DMS 等気候効果ガス放出のメカニズムを明らかにすることは、過去の氷期・間氷期における気候変動のメカニズムの一端を明らかにすることであり、また近未来における気候変化を予測する上でも不可欠な情報を提供する。本研究の目的と研究計画は IGBP 第2期のコアプロジェクト SOLAS（海洋・大気間の物質相互作用計画）の Focus1 の研究計画に基づいている。

3. 研究の方法

(1) 生物環境の把握

本特定領域研究では、白鳳丸、淡青丸を用いて、多くの研究分野にまたがる乗船者が、観測・実験を行った。具体的には、白鳳丸航海 KH-08-2, KH-09-4, KH-10-1、淡青丸 KT07-06, KT-11-21 に乗船し、生物起源ガス成分を測るグループへ生物環境情報を提供した。

水中光環境は、HyperProfiler II により、水中照度および輝度の分光測定を行い。植物プランクトン測定に関しては、現存量を抽出法用いた蛍光光度測定でクロロフィル a を測定し、群集組成に関しては、HPLC を用いた色素分析を行った。またクロロフィルの測定においては濾紙を用いてサイズ分画して測定した。さらに細かい情報が必要とされた場合は、顕鏡（光学顕微鏡および SEM）による種査定をおこなった。また、窒素固定生物群集の解析は、定量 PCR 法及び変成剤濃度勾配ゲル電気泳動 (DGGE) 法を用いた。

航海中は表面海水の連続モニタリングを、表面モニタリング装置 (AMMEMBO II) を用いて行い、水温、塩分、in-vivo クロロフィル蛍光、硝酸濃度を位置情報とともに、1分間隔で記録した。さらに、光合成活性に関しては、FIRe 蛍光光度計を用いて連続測定をすることを試みた。

(2) アルゴフロート観測

通常のアルゴフロートに in-vivo クロロフィルセンサーを搭載し、台風通過による物理過程の変化と生物応答を観測することを試みた。アルゴフロートは、水深 500m に待機し、10日に一度表面までの観測を行うよう設定し、さらに、台風接近時には、より間隔を狭くして観測ができるよう、イリジウム通信機能で、設定を変えられるように設計した。データは、浮上時に衛星経路で陸上の基地局に送られ、他のフロートと同様にアーカイブされる。

(3) 培養実験

台風通過を再現するために、想定される、鉛直混合、湧昇を再現する、培養実験を行った。すなわち、混合を再現するボトルでは、200 m、亜表層クロロフィル極大、10m の試

水を混合し、湧昇を再現するボトルでは、亜表層クロロフィル極大直下の試水を培養した。培養は甲板上に設置した調温型水槽を用いて表面水温より3°C下げて培養を行い、光強度は天然光を黒布を用いて30%に下げ培養を行った。培養は6-12日間継続し、適当な時間間隔(1-3日)で、採水しクロロフィル、栄養塩濃度、HPLC色素分析、FCMを用いた粒子組成解析、種組成解析用固定試料を採取した。

(4) 動物プランクトンの生活史解明

上記航海において、VMPS ネット(口径50x50cm、目合0.1mm)を用いて2000mまたは1000mより4層の各層採集を行った。試料はホルマリン固定を行い、顕鏡は陸上で行った。さらに、広い海域、季節を網羅するため、過去の白鳳丸航海で蓄積された試料、および、水産総合研究センター中央水産研究所所蔵の御前崎ライン観測においける四季を網羅する試料も使用し解析を行った。分析は、適当に分割した試料から目的とする、*Neocalanus* 属および *Eucalanidae* 科カイアシ類をすべて抜き出し、種の同定および発育段階の査定を行った。

4. 研究成果

(1) 生物起源気体に関連する生物環境の把握と窒素固定生物現存量のマッピング

淡青丸 KH07-06 次航海において、三陸沖海域で発生する春季植物プランクトンブルームとそれに伴う生物起源気体の発生に関して、大気・エアロゾルグループと共同調査を行った。当グループは、連続モニタリングによるブルーム情報の取得と、植物プランクトン組成に関する情報を提供した。ハロカーボン類 CH_2ClI が高濃度で分布した海域は、栄養塩濃度が低くピコプランクトンが優占する非ブルーム海域であることを明らかにした。

2008年夏季の西部北太平洋域において採取した植物プランクトンおよび窒素固定生物の群集組成をより詳細に解析した。その結果、亜寒帯循環域において相対的に高い基礎生産力および高い光合成水柱光利用率を支えていた植物プランクトンが主に *Odontella* 属及び *Fragilariopsis* 属の珪藻種であったことが走査型電子顕微鏡により明らかとなった。今まで西部北太平洋亜寒帯循環域の植物プランクトンによる基礎生産力および光合成水中光利用率は年間を通して低いと考えられてきたが、本研究によりそれら値は時空間的に大きく変動することが示唆された。さらに、定量 PCR 法及び変成剤濃度勾配ゲル電気泳動 (DGGE) 法により、熱帯および亜熱帯域における窒素固定生物は顕著な空間的棲み分けをしていたことが解明された。その要因として、水温および海水中のリン酸塩濃度の違いが寄与していたこ

とが本研究によって明らかとなった。

2010年夏季における西部北太平洋、ベーリング海及びアリューシャン列島海域表層における植物プランクトン群集の光合成特性を FRe 蛍光光度計を用いて、連続的に測定する試みを行った。残念ながら、本装置の解析プログラムにバグがあることが判明したが、年度末にはデバッグに成功した。

(2) 台風通過と生物生産に関わる研究

① アルゴフロート観測

A03-10 課題の東海大学虎谷準教授と協力し、過去10年間の台風の進路と水色衛星画像の探索を行い、台風の進行速度が低下する変曲点付近で台風通過によると考えられるクロロフィルの増加が認められることが判明し、投入地点としては、北緯20度、東経134度付近が、最も可能性の高い海域として絞り込んだ。

クロロフィルセンサー付きアルゴフロートは、2007年から観測を開始し、700日以上、亜熱帯海域に滞留し、水温塩分およびクロロフィルの鉛直分布の時系列変化を得た。これは太平洋西部の亜熱帯海域の観測では最も充実したデータセットとなる。基本的には水深100m前後に最高値を示す亜表層クロロフィル極大型の分布が常に観測されたが、クロロフィル濃度の2峰型鉛直分布、最高値アノマリー、積算値アノマリーを検出し、台風通過との関係を解析したが、今回の観測では、台風通過が植物プランクトン生産を高めた証拠は得られなかった。現在も残り2機が観測中である。

② 培養実験

白鳳丸 KH07-2 次航海においては本研究で開発した調温水槽を用いて、台風通過をシミュレーションする培養実験を行った。湧昇を再現する、亜表層水を強光下で培養する区画および混合を再現する亜表層水と表層水を混ぜた培養区画を設定し、20°Nおよび15°Nの2点で約1週間の変化を追った。その結果、全ての区画で、24時間以内にクロロフィル現存量および光合成系 II 量子効率が著しく低下し強光損傷が認められた。その後、次第に量子効率、現存量とも回復し、4日以降は初期値より高くなった。初期条件では10μm以下のナノ、ピコ植物プランクトンが優占したが、培養後に増加したのは HPLC 分析および顕微鏡観察により珪藻を主体とする大型植物プランクトンであることが明らかになった。

KH08-2 次白鳳丸航海において、昨年度と同様の実験を、計4点で行った。結果は昨年度の結果を支持するものであり、すべての湧昇や混合を模擬する実験区画で、20μm以上の大型の藻類が増殖し、HPLCによる色素分析で、珪藻類および黄金色藻類が増加したことが

明らかとなったが、検鏡の結果、有殻黄金藻種は希であったことが判明した。さらに、窒素固定に関与する遺伝子の発現を調査した結果、台風通過は窒素固定速度を増加させる可能性は低いことが示された。この結果、貧栄養で大型藻類が優占することが周年ない亜熱帯外洋においても、台風の通過による湧昇や混合によって栄養塩が添加されると、大型藻類が増殖することが確かめられた。

白鳳丸航海 KH-10-1 および淡青丸航海 KT-11-21 に乗船し、台風通過がもたらす効果を検証する、船上培養実験を、亜熱帯太平洋および、東シナ海で行った。この実験では、特に植物生産を支える seed population が亜表層からもたらされるかどうか、および、微小動物プランクトンの応答解明を目的に実験を行った。2回の実験で珪藻類を中心とする大型植物が増殖し、かつ seed population は亜表層に依存しないことが判明した。すなわち、台風通過が生物生産に及ぼす影響は、表層への栄養塩供給が主な要因と結論された。

以上3回の実験により、台風通過は沈降や高次捕食者につながると考えられる新生産が起こることが初めて明らかにされ、亜熱帯の生物生産・物質循環の概念を大きく変える可能性が示唆された。

(3) 亜熱帯海域における動物プランクトンの生活史に関する研究

暖海種とされてきた *Neocalanus* 属カイアシ類 *Neocalanus gracilis* は、黒潮続流域よりも南に分布し熱帯域まで分布が見られた。鉛直分布においては、成体が 200 m より深い層まで分布していたのに対し、コペポダイト幼生は 200 m 以浅に分布し、表層性カイアシ類と見なせ、すべての季節で、成長組成が変わらなかったことから、周年、再生産を行っていることが明らかとなった。貧栄養海域の環境に適応して、脂肪蓄積能を有し産卵にこれら蓄積栄養を使うこと、さらには、若干深い水深で産卵し、成長に伴う鉛直移動を行うことが示唆され、これらの生態学的特徴が、同属の、北方への進化的進出に有利に働いたと考えられた。表層に生息する亜熱帯性カイアシ類における成長に伴う鉛直移動および、脂肪蓄積は本種が初めての報告となった。

さらに、西部北太平洋に分布する Eucalanidae 科カイアシ類、8 種に関する、地理分布、生活史を解析した結果、多くの種 (*Eucalanus bungii*, *E. californicus*, *E. hyalinus*, *Paraeucalanus paeki*, *Rhincalanus nastus*, *R. rostifrons*, *Subeucalanus crassus*) で季節的鉛直移動と、中層における休眠が認められた。亜熱帯に分布する多くの種では、冬季から春季にかけて、亜熱帯の縁辺域で再生産していることが示

唆された。また、表層で成長する時期、休眠する成長段階組成、休眠深度は大きく 4 つのパターンに分けられ、熱帯表層性種を起源とし、稀に遭遇する高生産域で再生産を行うために鉛直移動を獲得し、この生活史様式が、高緯度の季節性に適応するために応用されたと考えられた。また、亜熱帯海域は、「海の砂漠」と考えられてきたが、カイアシ類の生産など高次生産につながる新生産は、縁辺域や台風の通過に伴う生産など非定常状態における栄養塩供給が支えている新しい亜熱帯像が提示されたと考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 65 件)

1. Takahashi, K., A. Kuwata, H. Sugisaki, K. Uchikawa and H. Saito (2009) Downward carbon transport by diel vertical migration of the copepods *Metridia pacifica* and *Metridia okhotensis* in the Oyashio region of the western subarctic Pacific Ocean. *Deep Sea Research I*, 56: 1777-1791. 査読あり
2. Tsuda, A., H. Saito, R.J. Machida, S. Shimode (2009) Meso- and microzooplankton responses to an in situ iron fertilization experiment (SEEDS-II) in the northwest subarctic Pacific. *Deep-Sea Research II*, 56: 2767-2778. 査読あり
3. Suzuki, K., H. Saito, T. Isada, A. Hattori, H. Kiyosawa, J. Nishioka, R. M.L. McKay, A. Kuwata, A. Tsuda (2009) Community structure and photosynthetic physiology of phytoplankton in the northwest subarctic Pacific during an in situ iron fertilization experiment (SEEDS II). *Deep-Sea Research II*, 56, 2733-2744. 査読あり
4. Tsuda, A., H. Saito (3 番目), K. Suzuki (7 番目) 他 41 名 (2007) Evidence for the grazing hypothesis: Grazing reduces phytoplankton responses of the HNLC ecosystem to iron enrichment in the western subarctic Pacific (SEEDS II). *Journal of Oceanography*, 63: 983-994. 査読あり
5. Boyd, P.W., T. Jickells, C.S. Law, S. Blain, E.A., Boyle, K.O. Buesseler, K.H.

Coale, J.J. Cullen, H.J.W. de Baar, M. Follows, M. Harvey, C. Lancelot, M. Levasseur, N.P.J. Owens, R. Pollard, R.B. Rivkin, J. Sarmiento, V. Schoemann, V. Smetacek, S. Takeda, A. Tsuda, S. Turner, A.J. Watson, (2007) Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: Synthesis and future direction. Science, 315: 612-617. 査読あり

[学会発表] (計 83 件)

1. Tsuda, A., (2010) "Western Pacific Air-Sea Interaction Study (W-PASS), Introduction and highlights. AGU Fall Meeting 2010, San Francisco USA. 2010 年 12 月 13 日、(Invited)
2. Tsuda, A. (2008) Perturbation experiments with iron in the subarctic Pacific: Zooplankton responses and its consequences. 5th World Fisheries Congress, Yokohama, 2008 年 10 月 20 日、(Invited Keynote)
3. 津田敦・武田重信「北太平洋での海洋鉄散布実験における生物・化学的応答」第 30 回日本鉄バイオサイエンス学会学術集会、東京、2006 年 9 月 16 日、(invited)

[図書] (計 6 件)

1. 津田敦 (2009) 「海洋鉄散布と地球環境」 「鉄 137 億年の宇宙誌」宮本英明・橘省吾編、東京大学総合研究博物館 p103-108

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.ecosystem.ori.u-tokyo.ac.jp/plankton/main/planktonj.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津田敦 (TSUDA ATSUSHI)
東京大学・大気海洋研究所・准教授
研究者番号：80217314

(2) 研究分担者

道田豊 (MICHIDA YUTAKA)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号：20323628
齊藤宏明 (SAITO HIROAKI)
(独)水産総合研究センター・東北区水産
研究所・室長
研究者番号：30371793
高橋一生 (TAKAHASHI KAZUTAKA)
(独)水産総合研究センター・東北区水産
研究所・主任研究員
研究者番号：00301581
鈴木光次 (SUZUKI KOJI)
北海道大学・地球環境科学研究所・准教授
研究者番号：40283452

(3) 連携研究者

なし