



西部北太平洋時系列観測研究による 生物ポンプに関する研究

本 多 牧 生*

1. はじめに

産業革命以降に顕著になった人間活動により放出された大気中二酸化炭素 (CO_2) の増加により、地球温暖化が進行中であり世界全体の深刻な問題となっている。IPCC AR6 (2021) によると 2010 年台における人為起源 CO_2 放出量は炭素換算で年間約 11 ギガトン (GT-C) と見積もられているが、そのうちの約 1/4 (2.5GT-C) は海洋が吸収している (ちなみに大気への残存量: 約 2/4, 陸上森林への吸収量: 約 1/4)。また海洋には大気中 CO_2 総量の約 60 倍の CO_2 が貯蔵されており、海洋が地球上の CO_2 循環を制御していると言っても過言ではない。海洋が CO_2 を吸収する (海洋内部へ輸送する) メカニズムは“溶解ポンプ”と“生物ポンプ (もしくは生物炭素ポンプ)”に大別できる。“溶解ポンプ”とは海水へ物理化学的に溶解した CO_2 が海水流動に伴い海洋内部へ輸送されるメカニズムである。それに対して“生物ポンプ”とは海洋表層有光層の植物プランクトンが光合成により CO_2 を吸収し、それが死後に他の物資を加えて凝集化して、あるいは動物プランクトンに捕食され一連の食物連鎖を介して、主に粒状態有機炭素 (POC) として海洋内部へ沈降していくメカニズムである。ちなみにこの沈降粒子を英語ではマリンスノーと呼ぶが、これは誇らしいことに日本人研究者が命名した (Suzuki and Kato, 1953)。この沈降粒子の実海域における観測研究に沈降粒子捕集装置セジメントトラップが用いられてきた。筆者は 1990 年台初期から

30 年以上、このセジメントトラップを用いて西部北太平洋の生物ポンプの観測研究を行ってきた。ここでは同観測研究および並行して実施された海洋観測研究、衛星データ解析、数値シミュレーション研究で明らかになった西部北太平洋の生物ポンプの特徴、そしてセジメントトラップで明らかになったユニークな事象について紹介する。

2. 時系列式セジメントトラップ

セジメントトラップとは沈降粒子を集める主に筒型もしくは円錐型の“バケツ”である。1970 年台後半から湖沼や近海で、船から吊り下ろしたり、あるいは浮力材、ロープ、重錘を用いて係留したりして、沈降粒子が捕集されていた。ただし生物ポンプは季節変動するため時間分画して時系列的に沈降粒子を捕集することが望まれた。1980 年台後半に円錐型のバケツの底に複数の防腐剤入沈降粒子捕集カップを設置し、それらが自動的に交換され様々な季節の沈降粒子を時系列的に捕集可能な時系列式セジメントトラップが開発された (Honjo and Doherty 1988) (図 1)。1980 年台後半から 2000 年にかけて、海洋の CO_2 吸収能力・海洋内循環を含め海洋の物質循環を総合的に解明する国際的プロジェクト Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) (<http://ijgofs.whoi.edu/>) が実施された。時系列式セジメントトラップは JGOFS の中心的観測装置として、世界の海の様々な水深に設置された。その結果、炭素を中心とした化学成分が、いつ、どこで、どれぐらい、

*海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター・シニア上席研究員

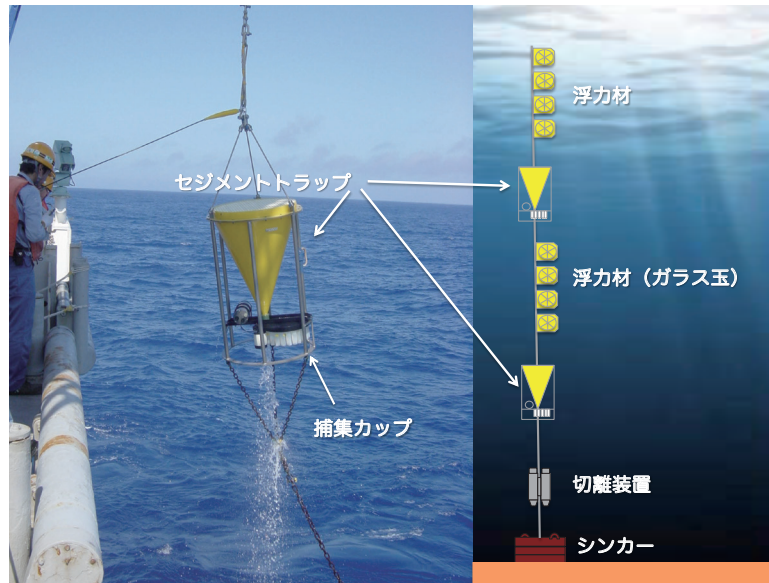


図1. 時系列式セジメントトラップ

どのように、そしてどの深さまで鉛直輸送されるかが明らかになってきた。

3. 西部北太平洋の生物ポンプ

日本では、1997年から5年間、JGOFS北太平洋プロセス研究（通称KNOTプロジェクト）が実施された（Saino et al. 2002）。筆者はこのプロジェクトで時系列式セジメントトラップを用いて、西部北太平洋亜寒帯循環域の生物ポンプの観測をおこなった。さらにKNOTプロジェクト以降も同海域もしくは西部北太平洋亜熱帯海域でセジメントトラップ観測を行ってきた。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 高い生物起源オパールフラックス，濃度，有機炭素／無機炭素フラックス比（rain ratio），輸出生産力，POC輸送効率

1997-2001年に実施した西部北太平洋亜寒帯域の観測地点KNOT（44°N / 155°N）におけるセジメントトラップ観測の結果を世界で行われたセジメントトラップの結果と比較した。その結果、西部北太平洋亜寒帯域の生物ポンプの季節変動は他の海域に比べて大きいこと、また沈降粒子の主要成分が生物起源オパールであることが確認された。これは同海域の植物プランクトンの優占種が

珪藻であることと調和的であった。また植物プランクトンのCO₂吸収効率の指標となる有機炭素／無機炭素フラックス比（通称rain ratio）が高いことが明らかとなった（Honda et al. 2002）。さらに世界の代表的海洋観測地点（PAPA：東部北太平洋亜寒帯アラスカ湾，ALOHA：太平洋亜熱帯ハワイ沖，BATS：大西洋亜熱帯バミューダ沖）と比較すると、海洋表層から海洋中層へ輸送されるPOC：輸出生産力（Export flux），その基礎生産力に対する割合：輸出生産率（Export ratio），そして深海まで輸送されるPOC量のExport fluxに対する割合：輸送効率（Transfer efficiency）が高く、西部北太平洋亜寒帯にはCO₂吸収に関して効率的な生物炭素ポンプが存在していることが示唆された（Honda 2003）。

- (2) 沈降速度

2005年3月から1年間、中層域（100 m-1000 m、通称トワイライトゾーン）の沈降粒子フラックスを観測するために、KNOTを引き継いだ亜寒帯観測地点K2（47°N / 160°E）の水深150 mに時系列式セジメントトラップを設置した。一方、水深40 mに自動採水装置を設置し、栄養塩濃度の時系列変化と沈降粒子フラックスの時系列変化を同時観測した。その結果、栄養塩の溶存ケイ酸塩

が急激に低下し始めた一週間以内には水深 150 m のセジメントトラップの生物起源オパールフラックスが増加し始めた (図 2)。計算の結果, この水深での生物起源オパールの沈降速度は 15 m/日 (110 m/7 日) 以上であることが明らかとなった (Honda and Watanabe, 2007)。また同じく水

深 40 m に設置した水中光測定装置で得られた複数の波長光の割合から推定した約 1 年半の基礎生産力と水深 150 m, 500 m, 1000 m, および 4800 m に設置したセジメントトラップで観測された POC フラックスの時系列変化を比較した。その結果, 晩春期に見られた基礎生産力ピークと,

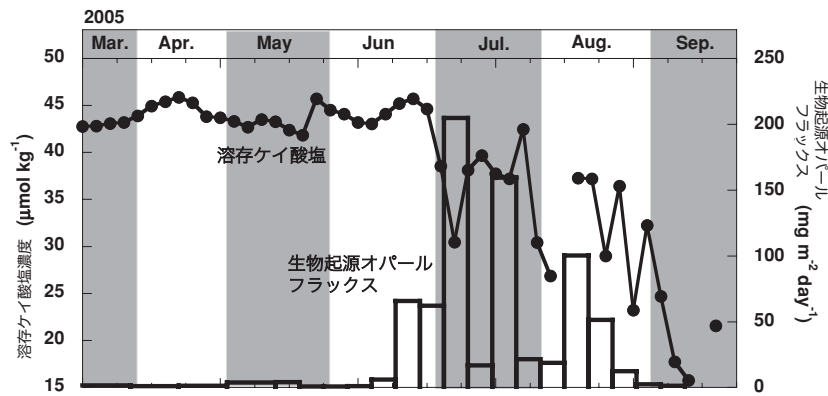


図 2. 水深 40 m における溶存ケイ酸塩 (折れ線グラフ) と水深 150 m における生物起源オパールフラックス (棒グラフ) の時系列変化 (Honda and Watanabe 2007 を改変)。

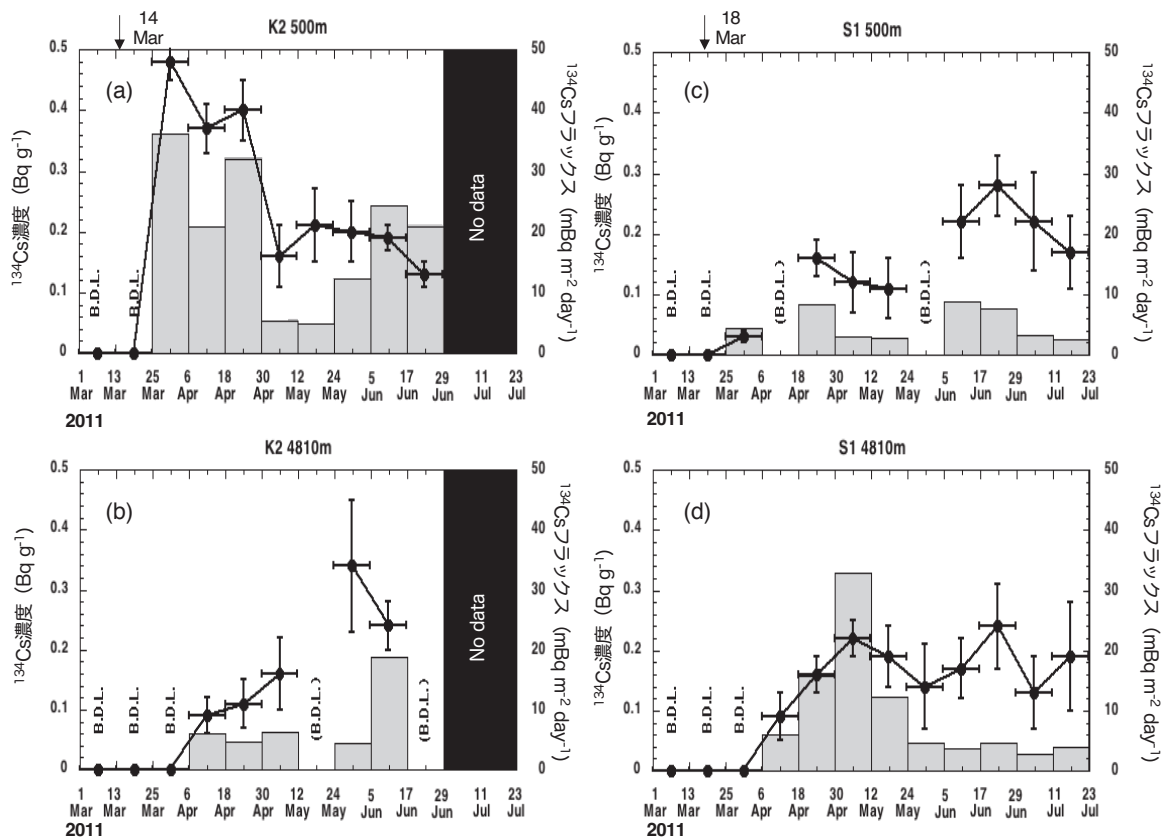


図 3. 沈降粒子中放射性セシウム 134 (^{134}Cs) フラックス (棒グラフ) と濃度 (折れ線グラフ) (Honda et al. 2013 を改変). (a) K2 500 m, (b) K2 4810 m, (c) S1 500 m, (d) S1 4810 m. B.D.L. は検出限界以下. (a) (c) の矢印は数値シミュレーションで推定される大気経路放射性セシウムの各観測点海面への到達日。

各層の POC フラックスのタイムラグから、沈降粒子の平均沈降速度は約 140 m/日と見積もられた (Honda et al. 2009). 一方, 2010-2011 年に, 観測定点 K2 と亜熱帯観測定点 S1 (30°N / 145°E) の水深 500 m と水深 4800 m に時系列式セジメントトラップを設置したところ, 2011 年 3 月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムが検出された. 両地点共に, 水深 500 m セジメントトラップでは 2011 年 3 月 25 日 ~ 4 月 6 日に捕集された沈降粒子から, 水深 4800 m セジメントトラップでは, 一区間後の, 4 月 6 日 ~ 4 月 18 日に捕集された沈降粒子から放射性セシウムが検出された (図 3). 数値シミュレーションで得られた各地点への放射性セシウムの到達時期から, 観測定点 K2 (S1) では表層から水深 500 m までの放射性セシウムの沈降速度は 22-46 (21-76)m/日, 両地点とも水深 500-4800 m 間は 180 m/日以上と見積もられた (Honda et al. 2013). ただし K2 でのより長期の観測の結果, K2 の水深 500 m に輸送された放射性セシウム総量が, 水深 4800 m に全て輸送された時間経過を解析すると, 沈降速度は徐々に遅くなり, 平均的には約 50 m/日であることがわかった. これは初期のものは“ホットパーティクル”と呼ばれる放射性セシウム濃度が高い比較的大きな粒子によって海中を鉛直輸送されたが, 多くの放射性セシウムは沈降速度の遅い海中粒子に取り込まれて沈降していたと推察された (Honda and Kawakami, 2014).

(3) バラスト

一般的に POC もしくは有機物は海水より密度が小さいために単体では重力沈降しないが, 密度が海水密度より高い物質と凝集化することで重力沈降が可能となる. この物質をバラスト (錘) と呼び, どのようなバラストが POC の鉛直輸送に貢献しているのか, 21 世紀に入り活発に議論されてきた. ある海域では陸起源物質 (アルミノケイ酸塩) が重要視されたが, 多くの海域では単体

ではその密度が最も大きい炭酸カルシウムが重要であることが報告された (例えば Francois et al. 2002). しかしこれらの多くの報告は年平均フラックスの解析結果であり, 季節的変動が無視されている可能性があった. 特に西部北太平洋で有機炭素フラックスが顕著に大きくなるのは生物起源オパールフラックスが大きくなる時であった. そこで K2 や KNOT のセジメントトラップ時系列観測で得られ POC フラックスに対する生物起源オパール/炭酸カルシウム/陸起源物質フラックスの多変量解析を行った. その結果, 生物起源オパールと POC フラックスの相関関係が最も強くなり, 少なくとも西部北太平洋では生物起源オパールのバラスト効果が高いことが示唆された (Honda and Watanabe 2010).

(4) POC フラックスの鉛直変化率とその決定要因

CO₂ 吸収に関する生物ポンプ効率の指標として, POC フラックスの水深に伴う減少率 (鉛直変化率) がある. 各海域の鉛直変化率を数式化すべく様々な経験式が提案されてきたが, 1980 年台後半に東部北太平洋亜寒帯域のセジメントトラップ観測結果をベースに提案された以下の累乗関数 (提案者の名前をとってマーチンカーブ) が一般的となった (Martin et al. 1987).

$$POCF_{(z)} = POCF_{(z_0)} \times (Z/Z_0)^{-b}$$

ここで $POCF_{(z)}$, $POCF_{(z_0)}$ は水深 Z m, および基準層 Z_0 m (例えば 100 m) における POC フラックスである. この式により様々な海域の POC フラックスの鉛直変化率が数式化され, この式の累乗指数 “b” の大小で生物ポンプ効率が評価された. 累乗指数 “b” が大きいほど, POC フラックスの鉛直変化が大きい, 逆に小さいほど鉛直変化が小さく, より多くの POC フラックスが海洋内部へ効率的に輸送され大気から, より長期間隔離されることを意味する. 2010-2014 年に実施された西

部北太平洋亜寒帯・亜熱帯生物地球化学比較研究 (通称 K2S1 プロジェクト: Honda et al. 2017) でも K2 と S1 で POC フラックスが、海底設置型時系列式セジメントトラップおよび船から投入して数日間の浅層の沈降粒子を捕集する漂流型セジメントトラップにより観測され、その POC フラックスの鉛直変化がマーチンカーブで数式化された。その結果、K2 の累乗指数 “b” は S1 のものより小さいことが明らかとなった (図 4)。この要因

としては、沈降粒子の主要成分が K2 では生物起源オパールであったのに対し、S1 では炭酸カルシウムであったことである。先に述べたように西部北太平洋では生物起源オパールのバラスト効果が高いため、あるいは生物起源オパールが POC を保護する “鎧 (よろい)” の役割を果たしているため、と考察した。次に考えられたのは、S1 は K2 に比べ沈降粒子の分解が活発におこる海洋中層 (水深約 100–1000 m: 通称トワイライトゾー

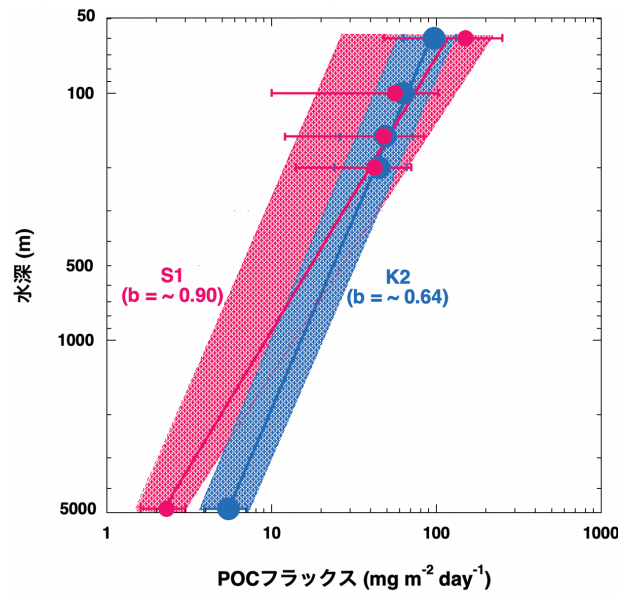


図 4. POC フラックス (POCF) の鉛直変化 (Honda 2020 を改変)。縦軸、横軸は対数表示。直線はマーチンカーブ。

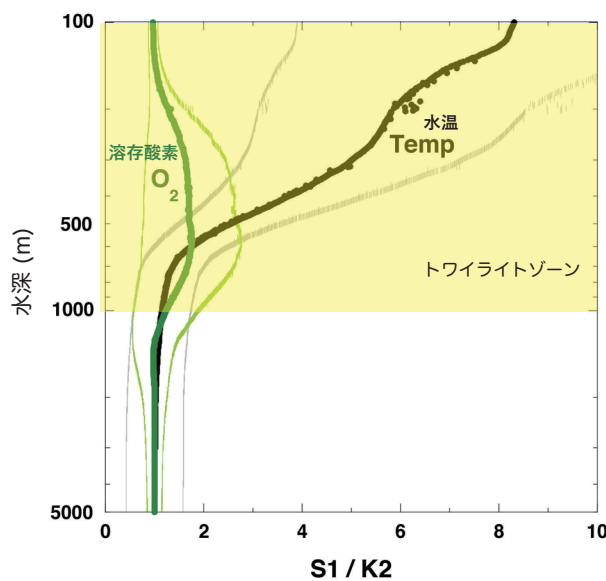


図 5. K2 における水温 (Temp) および溶存酸素 (O_2) による POC 分解速度に対する S1 におけるそれぞれの比 (Honda 2020 を改変)。縦軸は対数表示。

ン) の水温, 溶存酸素濃度が高いため微生物による炭素分解速度が高い可能性である。そこで水温と溶存酸素に依存する微生物の炭素分解速度の経験式から, 水温, 溶存酸素それぞれの分解速度を試算した。その結果, 溶存酸素の違いで約2倍, 水温の違いで約8倍, S1における微生物による炭素分解速度が高い可能性が示唆された(図5)。算出されたPOC分解速度の鉛直分布は, セジメントトラップで観測されたPOCフラックスの鉛直変化と調和的であった(Honda 2020)。

4. セジメントトラップ観測で得られたその他の知見

(1) 東シナ海大陸棚海底堆積物の水平輸送

米国ウッズホール海洋研究所(WHOI)が1989-1990年に実施したオホーツク海におけるセジメントトラップ観測, および1991-1992年に実施したベーリング海におけるセジメントトラップ観測で得られた沈降粒子中炭酸カルシウムの放射性炭素(^{14}C)濃度を測定した。その結果, ^{14}C 濃度は季節変動しており, 解析の結果, 炭酸カルシウムが形成された季節の海水中 ^{14}C 濃度を反映していることが明らかとなった(Honda 1996)。次に1993-1995年に実施した東シナ海沖繩トラフ海域で実施したセジメントトラップ観測で得られた沈降粒子中POCの ^{14}C 濃度を測定した。その結果, ^{14}C 濃度は表層海水の ^{14}C 濃度よりもはるかに低い値を示した。低い ^{14}C 濃度を示す原因としては隣接する東シナ海海底堆積物中の古い有機炭素の混入が考えられた。そこで海洋表層海水の ^{14}C 濃度と東シナ海海底堆積物中有機炭素の ^{14}C 濃度をエンドメンバーとしてセジメントトラップで捕集された有機炭素の起源を推定した。その結果, 沖繩トラフ海域のセジメントトラップで捕集されたPOCの40-95%は東シナ海海底堆積物中有機炭素である可能性が示唆された。このことは東シナ海での生物ポンプの結果, 東シナ海海底堆積物に堆積した有機炭素が季節的な海水流動によって隣接する外洋である沖繩トラフ海域に水平

輸送されている様子が示唆された(Honda et al. 2000)。

(2) 海底堆積物の再懸濁と水平輸送

前述の通り, 2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故で放出された人工放射性核種放射性セシウムは, 事故から約1ヶ月半後には原発から約2000 km(約900 km)離れた観測地点K2(S1)の水深4900 mに輸送されていたことが明らかになった(Honda et al. 2013)。一方, 原発により近い場所での粒状態放射性セシウムの動態を把握するために, 2011年7月-2015年7月の4年間, WHOIと共同で原発から南南東方向に約100 km離れた水深1300 mの大陸棚斜面に観測点を設け(観測点F1: $36.5^{\circ}\text{N} / 141.5^{\circ}\text{E}$), 水深500 mと1000 mにセジメントトラップを係留し時系列観測を実施した。放射性セシウムは2011年7月から検出され, そのフラックス量はK2やS1で観測されたフラックス量(図3)の数十倍-数百倍であった(図6)(Buesseler et al. 2015)。また秋季にフラックスのピークが観測された。2012年以降, 放射性セシウムフラックスは減少傾向を示した。しかし2012年および2013年の秋季に突発的なフラックス増加が観測された。この高い放射性セシウムフラックスは周辺海水の放射性セシウム濃度からは説明できるものではなかった。当時, 原発近辺の海底堆積物には多くの事故由来の放射性セシウムが沈積されていた(例えばBlack and Buesseler 2014)。またF1トラップの放射性セシウムフラックスが増加する秋季には台風が原発周辺域を通過していた。F1トラップで捕集された粒子の主要成分は陸起源物質であり, 水深500 mよりも水深1000 mの粒子フラックスの方が平均的に大きいことなど, 全ての結果を統合すると, F1トラップには, 福島原発周辺海底堆積物が再懸濁し, 水平輸送されてきたものが多く捕集されていた, 特に2012年以降は台風などのイベントの後にそれが顕著であった, というシナリオが考えられた。このシナ

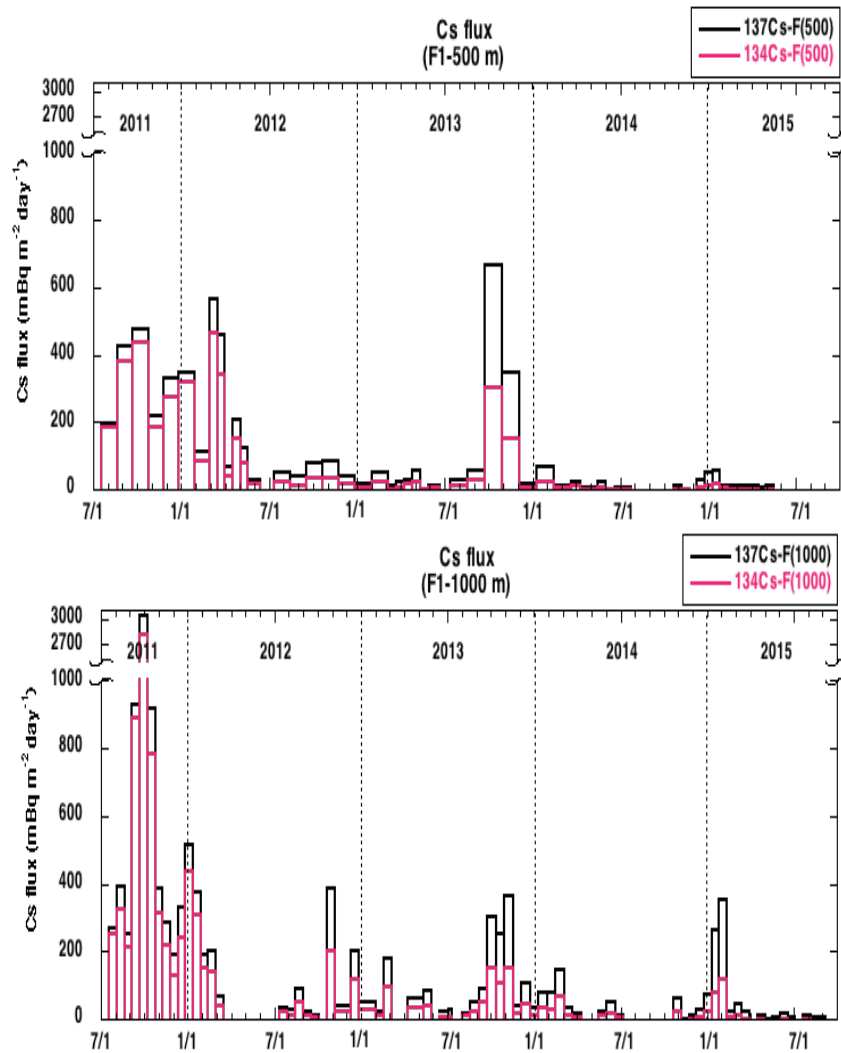


図 6. F1 の水深 500 m (上図) と 1000 m (下図) における放射性セシウムフラックスの時系列変化 (Buesseler et al. 2015 論文のデータを基に作成).

リオを基に、原発周辺の放射性セシウムで汚染された海底堆積物が全て大陸斜面に運ばれてしまう時間を約 70 年と試算した (Buesseler et al. 2015).

(3) 中規模低気圧性渦による基礎生産力の増加と POC フラックスの増加

K2S1 プロジェクトのハイライトの一つが、貧栄養な亜熱帯海域観測定点 S1 の基礎生産力が富栄養な亜寒帯観測定点 K2 の基礎生産力より高いことであった。この高い基礎生産力を支える栄養塩の供給過程を考察するため、米国大気海洋庁 (NOAA) 太平洋海洋環境研究所 (PMEL) が 2004 年以降表層観測ブイを設置し、海上気象や

水深 500 m 以浅の海洋物理を時系列観測している観測点 KEO (32.5°N / 144.5°E) の水深 4900 m にセジメントトラップを設置し、2014 年 7 月 -2016 年 7 月、気象・海洋物理の変動と沈降粒子の変動を同時観測した。その結果、2014 年 10 月頃、2015 年 1 月頃、2015 年 4 月頃に顕著な全粒子フラックス (そして POC フラックス) のピークが観測された (図 7)。2015 年 4 月頃のピークは同年同海域の 2-3 月頃に発生する植物プランクトンの春の増殖 (春季ブルーム) で説明できた。しかし 2014 年 10 月頃、2015 年 1 月頃のピークは、それらの粒子が形成されるであろう 1-2ヶ月前の海洋表層付近のほぼ枯渇した栄養塩濃度および低い植物プランクトン濃度を考えると説明が困難で

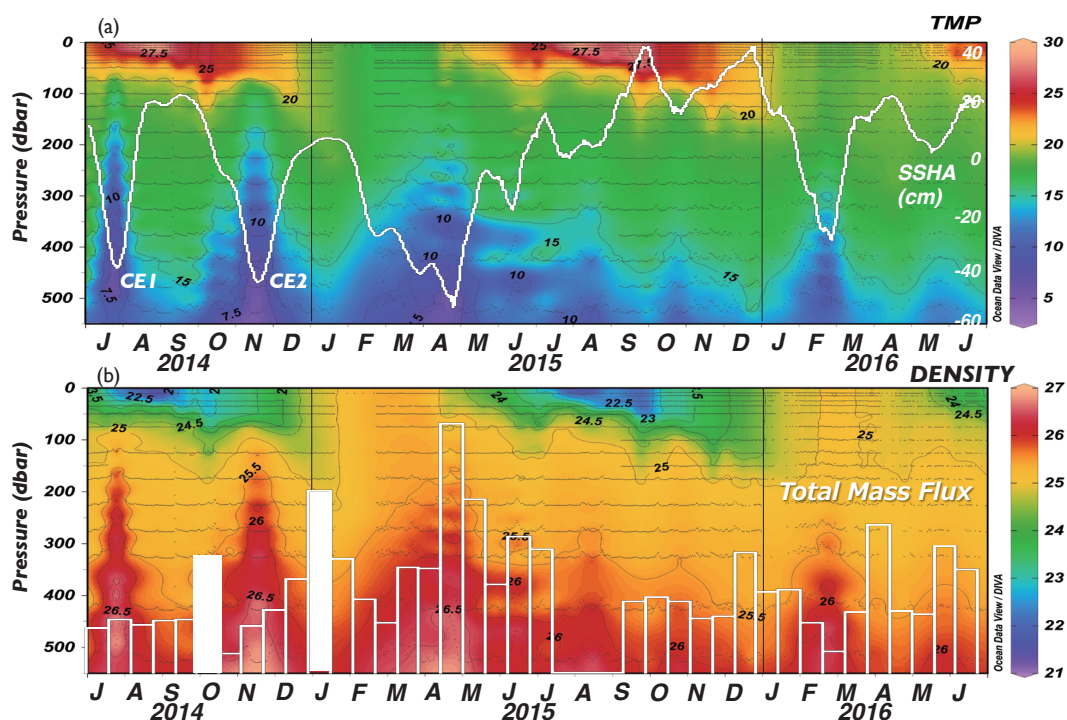


図7. 水圧 550 dbar (～水深 550 m) 以浅における (上) 水温, (下) 密度鉛直分布の時系列変化 (Honda et al. 2018 を改変). 上図の白線は海面高度偏差 (SSHA), 下図の棒グラフは水深約 4900 m における全粒子フラックス (Total Mass Flux) の時系列変化. 上図に示された中規模低気圧生渦 (CE1, CE2) の湧昇流により栄養塩が供給され亜表層の基礎生産力が増加した結果, 下図の白塗り全粒子フラックス増加を導いたと推察される.

あった. 一方, NOAA-PMEL の観測ブイデータを解析したところ, 7-8 月および 11-12 月に水深 500 m 付近の低水温の海水が水深 100 m 付近まで湧昇していたことがわかった. 同時期の衛星データの解析の結果, 海面高度が低下しており, 7-8 月および 11-12 月に中規模低気圧性渦が KEO を通過していたことが明らかになった. 従って中規模低気圧性渦により水温が低く栄養塩濃度が高い中層水が水深 100 m 程度まで湧昇し, その結果, 同海域で通常見られる亜表層の植物プランクトン量が増加し, ひいては POC フラックスが増加した, というシナリオが考えられた. これを検証するために数値シミュレーションを実施し, 同程度の中規模低気圧性渦の通過に伴う栄養塩供給による基礎生産力の増加を推定し, 同海域 (観測点 S1) で得られたマーチンカーブを用いて水深 4900 m の POC フラックスを推定すると, 観測された POC フラックスと一致した. 従って貧栄養な西部北太平洋亜熱帯海域の基礎生産力を維持す

るための供給源として中規模低気圧性渦が重要であることが窺えた (Honda et al. 2018).

5. 生物ポンプ研究の今後の課題

以上, 30 年以上にわたって, 様々なプロジェクトの下, 国内外の多くの仲間の協力を得ながら, 西部北太平洋でセジメントトラップ観測を行ってきた. その結果, 西部北太平洋の高い生物ポンプ効率を検証することができた. 一方では新しい課題も見つかっている. 以下にそれを列挙して本報告を終了する.

(1) 小粒子による炭素鉛直輸送

近年, セジメントトラップで観測してきた重力沈降する POC フラックスおよび海水流動に伴う溶存有機炭素 (DOC) フラックスだけでは, 中層に生息する動物プランクトンや微生物の炭素要求量を満たすことができないことが世界中の海域で報告されてきた (Boyd et al. 2019). K2S1 プ

プロジェクトでも観測点 K2 で同様な “需要と供給のミスマッチ” が観測された (Honda et al. 2017). Boyd et al. (2019) は、これまでの関連する論文を総括し、重力沈降する POC フラックス (Biological Gravitational Pump: BGP と命名) に加え、従来は海洋表層付近に滞在する懸濁物や沈降速度が極めて小さい小粒子が、冬季混合や中規模渦により発生する下降流など海水流動により海洋内部へ輸送されるメカニズムが重要であることを定量的に示した。これに動物プランクトンの日周鉛直移動、季節的鉛直移動時の呼吸、排泄、脂肪による炭素輸送メカニズムを併せて、Particle Injection Pumps (PIPs) と命名している。そして IPCC AR6 (2021) で報告されている粒状態による生物ポンプ量 (年間 11GT-C) は BGP 6.5GT-C と PIPs 4.5GT-C で構成されているとした。今後は西部北太平洋でもこの PIPs に関して観測研究を行い定量化することが望まれる。

(2) 複合ストレスによる生物ポンプの変化

現在、海洋の温暖化、酸性化、貧酸素化など複合ストレスが進行中であり、西部北太平洋も例外では無い。例えば温暖化が進行すると海洋が成層化し海洋内部からの栄養塩供給が低下する可能性がある。一方では植物プランクトンにとっては光環境がよくなるかもしれない。酸性化によって炭酸カルシウム形成が低下すると、バラストが少なくなり POC フラックスが低下する可能性がある。貧酸素化が進行すると生態系に影響がある一方、前述のように微生物炭素分解速度も弱まるので、POC フラックスの鉛直変化は小さくなる、換言すると POC が分解せずに効率的に深海まで鉛直輸送されるかもしれない。これらの点を検証するためには数値モデル研究とともに、できる限り長期間にわたる定点観測が重要である。

(3) 粒子の光学観測

前述の小粒子の観測はセジメントトラップでは困難である。近年、小粒子の観測に有効と考えら

れているのが、波長 700 nm 程度の光を利用した後方散乱測定である。20 世紀の海洋観測機器のブレイクスルーと言われている漂流ブイ (アルゴフロート) に後方散乱計を搭載することで、数年間にわたる海中粒子の時空間変動観測が可能になってきた。後方散乱計に加え蛍光光度計や溶存酸素計、硝酸センサーなどを搭載した生物地球化学アルゴフロートを複数台、西部北太平洋に投入し、時系列式セジメントトラップ観測と組み合わせることで、BGP と PIPs の同時観測研究が可能となる。

著者の研究活動詳細に関しては以下の著者ホームページを参照されたい。

<https://www.jamstec.go.jp/rigc/ress/hondam/index.html>

また今回の受賞記念講演 (正確にはそれをベースにした所内セミナー) を Youtube 動画として公開した。ご興味のある方はご笑覧あれ。

<https://www.youtube.com/watch?v=ewq3NW5FCV8>

謝辞

この度、荣誉ある海洋化学学術賞 (石橋賞) を授与していただきました。身に余る光栄です。本賞に私を推薦して下さった渡邊修一先生 (前海洋研究開発機構むつ研究所所長、現日本海洋科学振興財団むつ海洋研究所所長)、それを後押しして下さった蒲生俊敬先生 (東京大学名誉教授)、宗林由樹先生 (京都大学教授) そして選考委員の先生方に深く感謝いたします。恩師の角皆静男先生 (北海道大学名誉教授) には化学海洋学全般、そして研究の厳しさと奥深さ、他分野連携の重要性を教えていただきました。もう一人の恩師である本庄丕先生 (米国ウッズホール海洋研究所名誉教授) にはセジメントトラップ観測技術や研究方法、研究の楽しさと国際共同研究の面白さを教えていただきました。お二人の弟子である、というだけで会話が弾み、国内外の人脈が広がりました。

心より謝意を表します。セジメントトラップ観測を含む海洋観測が基本の本研究は、様々なプロジェクト、共同研究の下、国内外の多くの研究者の協力無しでは決して実施できませんでした。ご協力いただいた研究者のみならず、観測船乗組員、観測技術支援員、そして事務方の皆様にこの場を借りて感謝いたします。最後に、航海や学会、研究会など出張を含むすべての研究活動を自由にやらせてくれ、幸せな家庭生活と一緒に築いてくれている妻と娘に心より感謝します。

参考文献

- Black, E. E. and K. O. Buesseler: Spatial variability and the fate of cesium in coastal sediments near Fukushima, Japan. *Biogeosciences* 11, 5123–5137. (2014)
- Boyd, P. W., H. Claustre, M. Levy, D. A. Siegel, and T. Weber: Multifaceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature* 568, 327–335. doi: 10.1038/s41586-019-1098-2 (2019)
- Buesseler, K. O., C. R. German, M. C. Honda, S. Ootosaka, E. E. Black, H. Kawakami, S. J. Manganini, and S. M. Pike. Tracking the fate of particle associated Fukushima Daiichi cesium in the ocean off Japan. *Environmental Science and Technology* 49, 9807-9816. DOI: 10.1021/acs.est.5b02635 (2015)
- Francois, R., S. Honjo, R. Krishfield, and S. J. Manganini: Factors controlling the flux of organic carbon to the bathypelagic zone of the ocean, *Global Biogeochemical Cycles* 16 (4), 1087. doi: 10.1029/2001GB001722 (2002)
- Honda, M. C.: Inorganic radiocarbon in time-series sediment trap samples: Implication of seasonal variation of ^{14}C in the upper ocean. *Radiocarbon* 36, 583–595. (1996)
- Honda, M. C., Kusakabe, M., Nakabayashi, S., Katagiri, M.: Radiocarbon of sediment trap samples from the Okinawa trough: lateral transport of ^{14}C -poor sediment from the continental slope. *Marine Chemistry* 68, 231–247. (2000)
- Honda, M. C., Imai, K., Nojiri, Y., Hoshi, F., Sugawara, T., Kusakabe, M.: 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 Research II* 49, 5595–5625. (2002)
- Honda, M. C.: Biological pump in the northwestern North Pacific. *Journal of Oceanography* 59, 671–684. (2003)
- Honda, M. C., Watanabe, S.: Utility of an automatic water sampler to observe seasonal variability in nutrients and DIC in the Northwestern North Pacific. *Journal of Oceanography* 63, 349–362. (2007)
- Honda, M. C., Sasaoka, K., Kawakami, H., Matsumoto, K., Watanabe, S., Dickey, T. D.: Application of underwater optical data to estimation of primary productivity. *Deep-Sea Research I* 56, 2281–2292. (2009)
- Honda, M. C., Watanabe, S.: 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. *Geophysical Research Letters* 37, L02605. doi: 10.1029/2009GL041521 (2010)
- Honda, M. C., H. Kawakami, S. Watanabe and T. Saino: Concentration and vertical flux of Fukushima-derived radiocesium in sinking particles from two sites in the Northwestern Pacific Ocean. *Biogeosciences* 10, 3525–3534. (2013)

- Honda, M. C. and H. Kawakami: Sinking velocity of particulate radiocesium in the northwestern North Pacific, *Geophysical Research Letters*, 41, 3959–3965. doi: 10.1002/2014GL060126. (2014)
- Honda M. C., M. Wakita, K. Matsumoto, T. Fujiki, E. Siswanto, K. Sasaoka, H. Kawakami, Y. Mino, C. Sukigara, M. Kitamura, Y. Sasai, S. L. Smith, T. Hashioka, C. Yoshikawa, K. Kimoto, S. Watanabe, T. Kobari, T. Nagata, K. Hamasaki, R. Kaneko, M. Uchimiya, H. Fukuda, O. Abe, Toshiro Saino: Comparison of carbon cycle between the western Pacific subarctic and subtropical time-series stations: highlights of the K2S1 project. *Journal of Oceanography*. DOI: 10.1007/s10872-017-0423-3 (2017)
- Honda M. C., Y. Sasai, E. Siswanto, A. Kuwano-Yoshida, H. Aiki, M. F. Cronin: Impact of cyclonic eddies and typhoons on biogeochemistry in the oligotrophic ocean based on biogeochemical / physical / meteorological time-series at station KEO. *Progress in Earth and Planetary Science* 5:42, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0196-3> (2018)
- Honda, M. C.: Effective Vertical Transport of Particulate Organic Carbon in the Western North Pacific Subarctic Region. *Frontiers in Earth Science* 8:366. doi: 10.3389/feart.2020.00366 <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00366> (2020)
- Honjo, S. and K. Doherty: Large aperture time-series sediment traps: Design objectives, construction and application. *Deep-Sea Research* 35: 133–149. (1988)
- IPCC: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. (2021)
- Martin, J. H., Knauer, G. A., Karl, D. M., and Broenkow, W. W.: VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific. *Deep Sea Research*. 34, 267–285. doi: 10.1016/0198-0149(87)90086-0 (1987)
- Saino, T., A. Bychkov, C. T. A. Chen, P. J. Harrison: The joint global ocean flux study in the North Pacific. *Deep Sea Research II* 49:5297–5301. (2002)
- Suzuki, S. and K. Kato: Studies on suspended materials marine snow in the sea: part 1. Source of marine snow. *Bulletin of Faculty of Fishery, Hokkaido University* 4, 131–137. (1953)