

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25340009

研究課題名(和文)北極圏ポーフォート海におけるバイオロジカルカーボンポンプの定量的解明

研究課題名(英文)Quantification on the biological carbon pump in the Beaufort Sea in Canadian Arctic

研究代表者

三瓶 真 (Sampei, Makoto)

広島大学・生物圏科学研究科・特任講師

研究者番号：60643103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、バイオロジカルカーボンポンプの定量的解明を、特にこれまでに知見が著しく不足している動物プランクトンの直接的寄与の観点から実施した。研究のための試料採集はセディメントトラップをはじめとする係留系観測を用いて行った。その結果、これまでに無視されていた動物プランクトンの新鮮な遺骸が表層混合層からの粒状有機炭素の移出に大きく寄与していることが分かった。しかし、これらの遺骸は生物活動が盛んなトワイライトゾーンにおいて、そのほとんどが消費されていることが明らかになった。これは、特に秋から冬にかけての表層下において、餌料の供給源として大きな意味を持つと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study focused on quantification of biological carbon pump, especially on direct contribution of zooplankton to it. Sampling was mainly done with mooring observatories such as sediment traps. As a results, we found that fresh zooplankton carcasses contributed significantly to export flux from the surface mixed layer (ca. 100 m). However, those exported carcasses were rapidly consumed by heterotroph in the twilight zone (above 200 m). This suggests that fresh carcasses make important contribution as a food resource to marine ecosystem in the twilight zone, especially in autumn and winter.

研究分野：生物海洋学

キーワード：生物ポンプ 物質循環 北極圏海域 プランクトン 沈降粒子

## 1. 研究開始当初の背景

北極圏海域は、地球温暖化の影響が地球上で最も早く、かつ強く表れる海域である。実際に、この地球温暖化等の環境変動に伴う急激で大きな変化（例えば、海水の減少、海水の酸性化および氷河の崩落による氷山の増加等）が既に確認されており、さらに今後も継続すると予測されている（例えば ACIA 2004 等）。特に本研究の調査対象海域であるポーフォート海では、北極圏海域の中でも、近年最も急激な海水減少および海水の酸性化が観察されている（例えば Barber et al. 2008, Yamamoto-Kawai et al. 2009）。そのため、水柱中の生物・化学・物理学的過程（つまり物質循環や海洋生態系等）に急激な変動が起こると予想される。地球規模で環境が大きく変化しつつある現在、これらの定量的理解及び変動前の基準値となる知見の蓄積が、世界的に優先すべき研究課題である。

表層における生産や消費等の生物活動の指標として、また温室効果ガスである二酸化炭素の海表からの除去、および表層以深の生態系を支えるための有機物供給（つまり、バイオロジカルカーボンポンプ（植物プランクトンにより固定された有機炭素が鉛直輸送される働き）の観点から、粒状有機炭素沈降量（POC flux：バイオロジカルカーボンポンプの指標となるもの）の把握は、世界中の海域で行われてきた。この POC flux は基礎生産量（特に新生産量）に依存して変動する事が早期に発見されたので、その後は主に基礎生産量との関連性に注目されてきた。しかし、近年の研究により北極圏海域等において、POC flux が植物プランクトンによる基礎生産量やその種組成と共に表層付近（およそ 200-1000 m 以浅）における従属栄養生物によって強く支配される事が明らかになった（例えば Sampei et al. 2004, 2009, 2011, 2012）。この従属栄養生物による支配は、具体的に大きく以下の 2 項目に分けられる。一つは、POC flux を減少させる作用である消費や微細粒子化等がある。この作用により、例えばカナダ北極圏のポーフォート海において POC flux は、基礎生産量の 5% から 96% と地理的な変化が大きくなる事が申請者らのグループによる研究で明らかになった。二つ目は、POC flux を増加させる作用である動物プランクトン死骸の沈降や鉛直移動行動等がある。この作用により、ポーフォート海において動物プランクトン死骸の沈降による影響のみを含めるだけで、POC flux はこれまでの一般的な測定値の倍以上になる可能性があることが申請者らのグループの研究により示唆された。

しかし、POC flux に関して、これらの制御過程に対する定量的な知見は北極圏海域をはじめ世界中の海域において依然不足している。特に北極圏海域では、鉛直移動行動等による POC flux への寄与に関する定量的知

見は全く存在しない。さらに、動物プランクトン死骸の沈降が POC flux に対する寄与に関する定量的知見も限定的である。これまでに、POC flux に対する動物プランクトン死骸の沈降の重要性を定量的に証明したのは、北極圏海域をはじめ世界中の海域において、申請者らのグループのみである。上述の通り、現段階では、北極圏海域を含めて世界中の海域において、POC flux を制御する機構に関しての定量的理解は進んでいない。特に、従属栄養生物による POC flux を増加させる働きに対する定量的理解は極めて不足している。

## 2. 研究の目的

北極圏ポーフォート海において、POC flux とその変動を支配する機構に関して、従属栄養生物の影響を POC flux の増加・減少の両作用の観点から多角的に解明する事を目的とする。その中でも特に、その重要性は認識され始めているが、定量的把握が進んでいない動物プランクトンの死骸や鉛直移動行動によるバイオロジカルカーボンポンプ（つまり POC flux）への貢献の定量的解明を中心課題とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、研究協力者の一人であるカナダ・ラバル大学のルイ・フォーティエ教授らのグループが実施するカナダ北極圏における研究プロジェクト ArcticNet のフィールドワークに参加して、係留系を用いた観測および観測船上における観測や実験を行った（図 1）。係留系に関しては、沈降粒子採集装置であるセディメントトラップ（100 m と 200 m に設置）および音響観測機器である Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) を設置した。そして、セディメントトラップから回収した沈降粒子試料の全粒子 flux（単位時間・単位面積あたりの沈降量）、粒状有機炭素・窒素 flux を化学分析にて求めて、その季節変動および深度による違いについても観察した。さらには、顕微鏡下においてスイマー（トラップサンプルに混入した動物プランクトン）の観察を行い、スイマーの種組成やカイアシ類遺骸 (PSC) flux を Sampei et al. 2009 の方法に従って明らかにした。また ADCP から得られた、流向・流速データをトラップデータの有効性を確認するのに使用した。

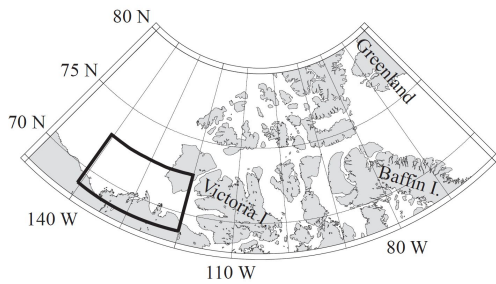


図1. カナダ北極圏の地図。太枠で囲まれたのが研究海域のボーフォート海南東部海域。

#### 4. 研究成果

##### 対象海域のバイオロジカルカーボンポンプの特性

対象海域は、北極海でも最大規模の大陸棚であるマッケンジー大陸棚の縁辺部に位置する。一般的に大陸棚は生物生産および生物ポンプも活発で、大陸棚の外側に位置する海盆域は生物生産が低く、バイオロジカルカーボンポンプも比較的活性が低い。そのため、調査海域のバイオロジカルカーボンポンプを制御する機構を解明するためには、まず大陸棚域表層から海盆域深層に粒子が輸送される仕組みを理解する必要がある。そこで、マッケンジー川河口のシェルフブレイク(大陸棚の辺々部で急激に海底深度が深くなる場所)の100 および200 m水深に設置したセディメントトラップから得られた沈降粒子試料を主に用いて年間を通した粒子の三次元方向の移動について考えた。

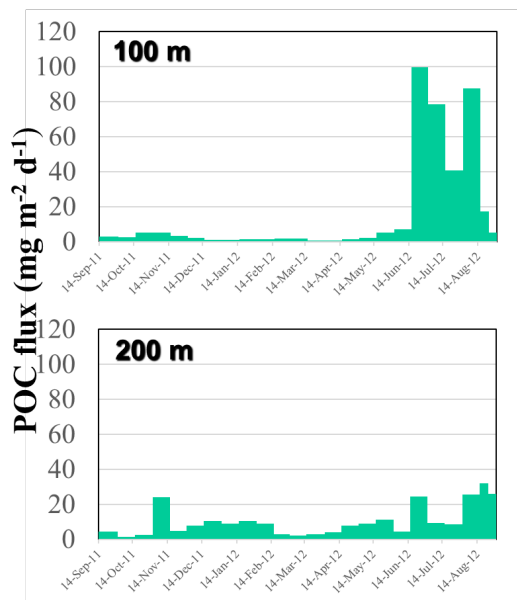


図2. POC フラックスの時空間変動。上のパネルが100 m、下のパネルが200 mのフラックスをそれぞれ示す。

その結果(図2)、100 mおよび200 mの両方において、季節変化が観察された。しかしその季節変化の傾向は異なっており、100 m

では、基礎生産や生物生産が比較的高い春・夏にのみ高い値が観察された。しかし、200 mでは、春・夏の時期に加えて冬の時期にも比較的高いピークが確認された。また、深度による変化を見ると、春・夏は100 mにおいて200 mよりも高い値を示したが、冬の時期には、特に200 mにおいて100 mよりも高い値が観察された。これは、横方向から粒子が移入して来たことを示す。これらの結果をまとめると、春・夏の表層の基礎生産に由来する粒子がその時期により深い海盆域を含んだ深層に輸送されており、基礎生産がほとんど起きない冬の時期でも、春から秋にかけて生産されて海底に堆積した有機物が水の動きの影響(例えば、風による鉛直混合など)により再懸濁され、それらが海底直上の高濁度層を伝い海盆方向に移送されると考えられた。

##### カイアシ類遺骸(PSC)のエクスポートフラックスに対する寄与

これまでに Sampei et al. (2009, 2012)によって、ボーフォート海の表層混合層からのPOCの輸送(つまり生物ポンプ)に対するPSCの寄与が大きい(最大で3割程度)ことが報告されていた。しかし、この2つの研究のみの報告なので、これがボーフォート海で一般的に起こる現象なのかは検証の余地があった。そこで、100 mに設置したトラップ試料を入手して、表層混合層からのPOCの輸送に対するPSCの寄与に関する検証を行った。

4測点におけるPSCの寄与に関する観察を行った結果を図3に示す。

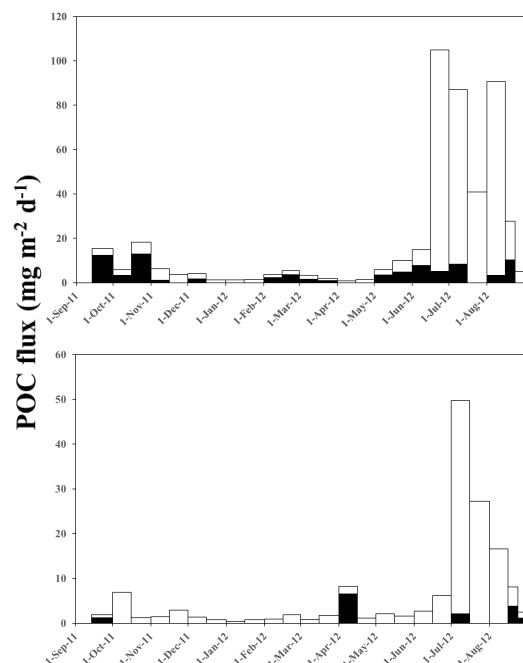


図3は次のページへ続く

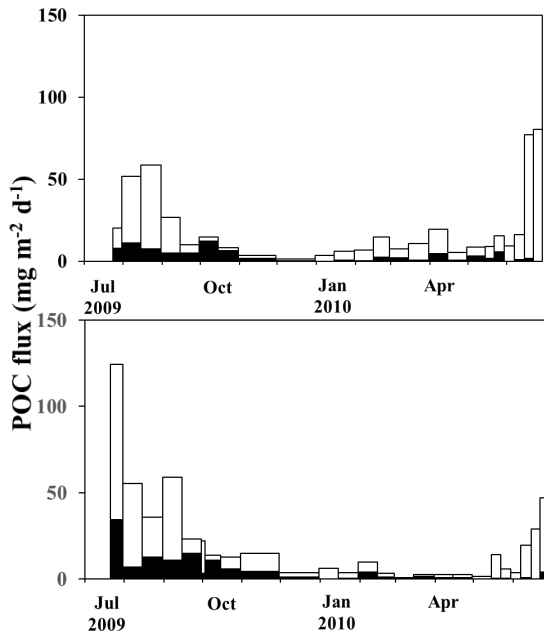


図3. 4測点の100 m水深におけるPOCフラックスの季節変動。黒の棒がPSCフラックスを示し、白の棒がその他の沈降粒子フラックスを示す。

その結果、PSCフラックスは最大で  $34 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  を記録した。PSCフラックスのPOCフラックスに対する寄与は、これまでの先行研究の結果と同様に、季節変動が観察され（0-395%）秋・冬に高い傾向を示した。PSCフラックスの周年を通じた寄与には4測点間の変動があるものの（9-46%）平均で28%と寄与が大きく、ポーフォート海におけるバイオロジカルカーボンポンプに対するPSCの重要性は一般的であることが示唆される。

#### 「トワイライトゾーン」内におけるPSCのPOCフラックスに対する寄与の深度変化

これまでの研究では、表層混合層（100 m）からのエクスポートフラックスに対するPSCの寄与については述べられてきたが、それ以深のPSCの変動に関しては、明らかにされてこなかった。しかし、バイオロジカルカーボンポンプの海洋生態系における主な重要性の観点（海洋表層からのCO<sub>2</sub>除去、および表層以深の従属栄養生物に対する、餌物質の供給）から表層混合層以深のPSCの挙動を把握することは、バイオロジカルカーボンポンプの定量的解明に非常に重要なので、ここではそのことに関して明らかにする。

そのため、図3に示したデータを導き出した試料と同時にセディメントトラップを200 mに係留して得られた試料を用いて行った解析結果を図4に示す。

全体的に見ると、PSCフラックスが100 m（図3）において観察されたものと比較して、最大でも  $2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  と低くなっていた。また、全ての測点および季節において、PSCフ

ラックスのPOCフラックスに対する寄与は、100 mのそれと比較して、明確な季節変動（0-18%）は確認されなかった。PSCフラックスの周年を通じた寄与には3測点間の変動のも小さく（1%程度）平均で1%とその寄与は小さかった。更に、100 mから200 m間のPSCフラックスの変化を見ると、100 mで観察されたPSCフラックスの95-99%が100 mと200 mの間で減少していた。これらPSCの沈降速度は、本研究により  $340\text{-}820 \text{ m d}^{-1}$  と非常に早いと見積もられた。そのため、PSC粒子はわずか数時間の沈降中に従属栄養生物によって破壊および消費されたと考えられる。

以上のように、動物プランクトンの遺骸であるPSCは、表層混合層からのCO<sub>2</sub>の移出には貢献しているが、トワイライトゾーンの活発な重要栄養生物の活動により、ただちに消費され、PSCは深海へのCO<sub>2</sub>の隔離よりも表層直下の生態系にとって餌料源として、重要であると考えられた。

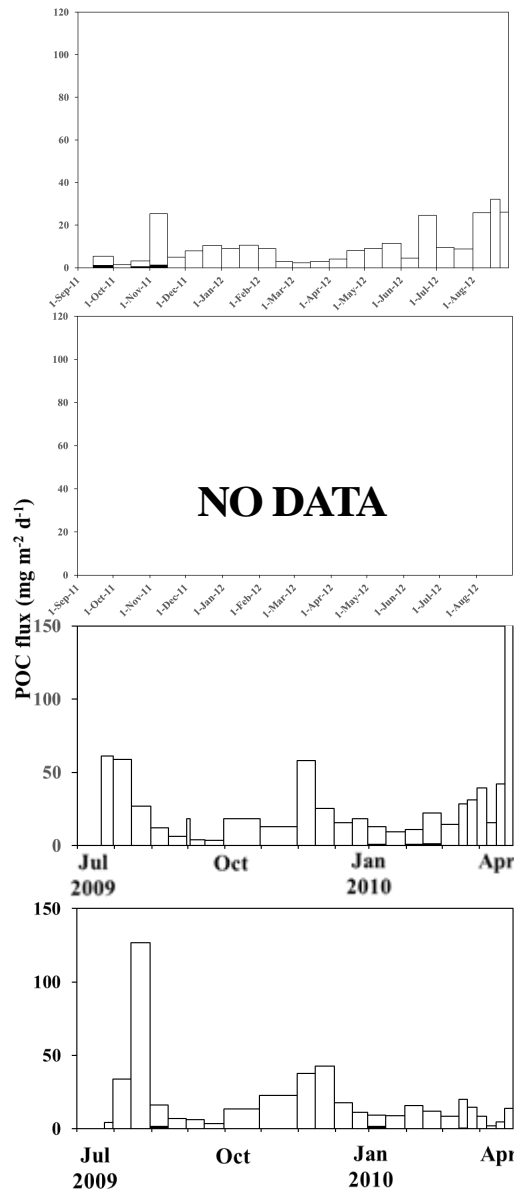


図4. 3測点（上から2番目はデータが存在

しないため)の200 m水深におけるPOCフラックスの季節変動。黒の棒がPSCフラックスを示し、白の棒がその他の沈降粒子フラックスを示す。

## 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 2 件)

1. R. Makabe, H. Hattori, M. Sampei, G. Darnis, L. Fortier, H. Sasaki, Can sediment trap-collected zooplankton be used for ecological studies? Polar Biology, On-line first, 査読有, 2016, pp1-12, DOI 10.1007/s00300-016-1900-7
2. A. Forest, P.D. Osborne, L. Fortier, M. Sampei, M.G. Lowings, Physical forcings and intense shelf-slope fluxes of particulate matter in the halocline waters of the Canadian Beaufort Sea during winter, Continental Shelf Research, 101 巻, 査読有, 2015, pp1-21, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2015.03.009>

〔学会発表〕(計 4 件)

1. M. Sampei, A. Forest, L. Fortier, Vertical change of passively sinking copepods flux under the pycnocline in the Canadian Beaufort Sea, Arctic Change 2014, 9-12 Dec., 2014, Ottawa Canada
2. 三瓶真, カナダの砕氷船を用いた海洋生態系研究の紹介—アムンゼン号の研究体制など—, 北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会, 2014年10月27日, 北海道大学低温科学研究所(北海道・札幌市)
3. M. Sampei, K.T. Takahashi, A. Tanimura, A. Forest, L. Fortier, Rapid decrease in vertical flux of fresh copepod carcass under the pycnocline in the southeastern Beaufort Sea, 4<sup>th</sup> Polar Sciences symposium, 2013年11月12-15日, 国立極地研究所, (東京都・立川市)
4. 三瓶真, 自分達の砕氷観測船を持つ前および持った後に行うべき研究: プランクトン生態系と物質循環研究の例, 極域研究集会, 2013年10月29日, 国立極地研究所, (東京都・立川市)

〔その他〕(計 1 件)

アウトリーチ活動

1. 三瓶真, 北極・南極物語, 東広島市さざなみこども園父兄向け講演会, 2014年11月15日, さざなみこども園, (広島県・東広島市)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

三瓶 真 (SAMPEI MAKOTO)

広島大学・大学院生物圏科学研究科・特任講師

研究者番号: 60643103

(2)研究分担者

山本 民次 (YAMAMOTO TAMUJI)

広島大学・大学院生物圏科学研究科・教授

研究者番号: 40240105

服部 寛 (HATTORI HIROSHI)

東海大学・生物学部・教授

研究者番号: 60208543