

B-14 動物プランクトン群集組成の長期変動データに基づく海洋生態系の気候変動応答過程の解明に関する研究

(3) 海洋物理構造変化が低次生物生産に影響を及ぼす機構の解明

独立行政法人水産総合研究センター・東北区水産研究所

齊藤宏明

平成15～17年度合計予算額	7,390千円
(うち、平成17年度予算額	2,006千円)

〔要旨〕 50年にわたる動物プランクトン試料群である小達コレクションの解析によって得られる種組成データベースを用い、気候の長期変動に伴う生態系構造、種毎の生物量の変化を調べると共に、生物ポンプと呼ばれる生物活動に伴う炭素の深層への輸送量の変化について研究を行った。親潮域では、優占する橈脚類のうち、*Eucalanus bungii* コペポディド1期から4期(C1-C4)、*Calanus pacificus* C2-C4、*Metridia pacifica* C2-C4、*Metridia okhotensis* C2-C4の7-8月の個体数豊度に、ほぼ20年周期の長期変動傾向がみられ、混合域でも同様の長期変動傾向が、暖水性種である*C. pacificus*と*Mesocalanus tenuicornis*および*Ctenocalanus vanus*にみられた。7-8月のこれら橈脚類種個体数は、6-7月の基礎生産を反映していると考えられる。1990年付近の極小は、18.6年周期の1日周期潮汐による鉛直混合の変動に伴い、亜表層の磷酸塩の供給が極小となったことおよび夏季の昇温が顕著となって表層への栄養塩供給が低下したことによる海域の生産性の低下によるものと考えられた。動物プランクトン群集組成や生物量変動が海洋炭素循環に与える影響は、動物プランクトンの季節的鉛直移動による炭素輸送量および種による輸送深度の特徴から解析した。その結果、*Neocalanus*属の3種および*Eucalanus bungii*の季節的鉛直移動によって中深層に輸送される炭素量は、 $5.1 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ であると計算された。1960-80年代に得られた北緯40-60度の海域における動物プランクトン分布量を用いて、この海域における炭素輸送量を求めたところ、年間0.12 Gtであった。また、1990年代後半の動物プランクトン増加が、温暖化等による増加トレンドであった場合、季節的鉛直移動による炭素輸送量が1990年以前に比べて100年間で13-68 Gt増加することになり、長期的な炭素循環、海洋の炭素貯蔵量を考慮する際の影響はより大きくなる。本研究によって、動物プランクトンが海洋炭素循環を考える上で重要であることがはじめて確認された。

〔キーワード〕 動物プランクトン、気候変動、カイアシ類、生物ポンプ、炭素循環

1. はじめに

海洋生態系は気候変動に敏感に反応して、その構造や食物網動態および物質循環過程が変化する。一方、その変化は海洋-大気間の二酸化炭素収支や気候効果ガスの発生を通じて、気候変動へのフィードバック効果を持つ。この気候と海洋生態系の相互関係は極めて複雑であるため、気候変動がどのような形で生態系に影響を与え、どの過程を経て気候にフィードバックするかにつ

いての我々の理解は不十分であり、また、現在顕在化しつつある人為的要因による気候変化に対する生態系の応答の予測は困難である。この相互関係の理解のため、過去の海洋生態系の長期変動資料を用いた様々な解析が行われており、また海洋生態系モニタリングの継続の必要性が指摘されている。過去の生態系モニタリングデータの多くは、物理・化学パラメーターおよび海洋生態系における基礎生産者である植物プランクトンに関するものが大半であり、植物プランクトンの捕食者であり、基礎生産を魚類、海産哺乳類、海鳥等高次捕食者に伝える役割を果たしている動物プランクトンに関する長期モニタリングデータは極めて限られている。このことが、海洋生態系の過去の気候変動に対する応答の理解を困難にしている。本研究は、国内で唯一の50年にわたる動物プランクトン試料群である小達コレクションの解析を行い、種組成の長期にわたる変動のデータベースを作成公表するとともに、気候の長期変動に伴い生物種間関係、生態系構造がどのように変遷してきたかを明らかにし、気候変動が生態系変動に及ぼす影響を評価することを目的とする。同等の研究は米国（東部北太平洋）および英国（北大西洋）で進められており、本研究を推進することによりこれまで知見の空白域であった西部北太平洋のプランクトン長期変動情報が提供されるため、気候変動に伴う、全球の海洋生態系応答機構とその予測に関する研究にとっても重要なものとなるであろう。

2. 研究目的

動物プランクトンの生態は直接気象変動などの物理変動からの影響を受けているばかりでなく、物理変動がもたらす栄養塩や植物プランクトンによる基礎生産の変動の影響を強く受ける。この影響を正確に評価し、物理構造変化が低次生物生産に影響を与える機構を解明することを目的とする。また、動物プランクトンによる炭素輸送とその長期変動が、海洋の炭素循環に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究方法

（1）西部亜寒帯太平洋に出現する動物プランクトンで優占する橈脚類について、その分布、生活史（産卵期、摂餌期、休眠期、生活史周期等）、生理・生産特性（産卵頻度、産卵速度に影響する因子、成長速度、成長・産卵可能水温等）に関する知見を、過去の文献・未発表データを収集し、また調査航海によって得られるデータを基にして取り纏め、物理環境変化が動物プランクトンにどのような影響を与えるかを推定する。

（2）推定された物理環境変化が動物プランクトンに与える影響のうち、水温や春季の躍層形成等の影響が顕著に現れると予想される種類について、サブテーマ1「Odate Collectionのデータベース化」で得られる、親潮域動物プランクトンデータベースを用いて解析し、実際に予想される変動が見られるかを確認するとともに、過去の動物プランクトン変動から物理環境変化を推定し、実際の観測物理データとの比較を行う。同様に、混合域の動物プランクトンデータベースを用いて同様の検討を行う。

（3）動物プランクトンによる炭素鉛直輸送量を把握するため、亜寒帯性カイアシ類の生活史と季節的および日周鉛直移動様式、特に、移動時期、日周移動深度、季節的移動による越冬深度に

ついて取りまとめ、鉛直移動による炭素輸送特性解明に利用する。

(4) 季節的鉛直移動を行う、*Neocalanus*属および*Eucalanus*属による炭素輸送量を、越冬前の生物量と越冬中の死亡率から推定する。このデータと、亜寒帯域における動物プランクトン生物量データから、亜寒帯太平洋全域での炭素輸送量を推定する。また、高橋ら(未発表)によって得られた、*Metridia*属の橈脚類による日周鉛直移動による炭素輸送量とその輸送様式から、橈脚類による炭素輸送量の特徴を明らかにする。

(5) 本プロジェクトで得られた長期変動のデータと、季節的鉛直移動による炭素輸送量から、動物プランクトンの鉛直移動による炭素輸送量の長期変動を推定し、中層以深に運ばれる炭素量から、海洋の炭素循環に及ぼす動物プランクトンの影響を推定する。

4. 結果・考察

(1) 橈脚類の生活史、分布、生理の特徴

小達コレクションの解析によって得られる長期データには、種毎および発育段階毎の個体数データがある。橈脚類の個体数は様々な要因によって変化するが、主に産卵量と比捕食量が重要である。産卵量は主に餌生物である植物プランクトンの生産に依存するため、海洋環境の長期変動を反映することが期待される。一方、被捕食量はその捕食者の生物量の推定が、長期的なデータが蓄積している漁獲資料が利用できるマイワシ、サンマ等漁獲対象魚類を除けば困難である。従って、小達コレクションを用いた海洋環境の長期変動の解析のためには、産卵量が直接的に反映するような種のデータ解析がより有効であること予想される。また、小達コレクションは目合い 0.33mm のネットを水深 150m から鉛直曳網して得られた動物プランクトンの資料である。従って、0.33mm の目合いを抜ける可能性のある種、発育段階や、水深 150m 以浅にその個体群の一部のみが分布するような種の解析には注意が必要である。

このような観点に立ち、サブテーマ 1 から提供策されるデータベースを用いた海洋環境変動や生態系の応答に関する解析をより効率的に行うため、文献、小達コレクションの解析によって得られた結果、および航海によって得られたデータから、親潮域で優占する橈脚類について、生活史、分布、生態学的な特徴について取り纏めた(表 1)。

親潮域で最も優占するのは *Neocalanus* 属の橈脚類である。これら 4 種の橈脚類は、春季から夏季にかけて表層で摂餌し、夏季に 500-2000m の深層に沈降して越冬し、表層における摂餌によって蓄えた体成分を用いて産卵するという生活史特性を持つ。従って表層におけるこれらの種の個体数は、1) 前年の春に蓄えられた栄養分、2) 冬季の越冬中の被食等による死亡、3) 春季の表層生態系における生産、4) 春季の被捕食等による死亡、といった要因によって変動する。すなわち、*Neocalanus* 属の個体数のデータは、被捕食者の影響が大きい上、2 年間に亘る表層の生産の影響を受けるといった複雑な過程を経ている。一方、産卵量が表層での摂餌量を反映する種では、若齢個体ほど被捕食の影響が少ないため、表層の生産性の変動をより直接的に反映すると予想される。

表 1. 親潮域の主要カイアシ類の生態的特徴.

Species	Distribution	Life cycle	Spawning season	Feeding season	DVM	Ecological characteristics
<i>Neocalanus cristatus</i>	SP, OKH, OKIF	1 year	9-12 (DSS)	2-7	not obvious	DSS
<i>N. plumchrus</i>	SP, OKH, OKIF	1 year	10-4 (DSS)	5-8	not obvious	DSS
<i>N. flemingeri</i> small form	SP, OKH, OKIF	1 year	12-3 (DSS)	2-5	not obvious	DSS, SP origin, overwinter at C6
<i>N. flemingeri</i> large form	SP, OKH, OKIF	2 year	10-2 (DSS)	4-7	not obvious	DSS, OKH origin, overwinter at C4 and C6
<i>Calanus pacificus</i>	OKIF	<1 to 8 months	summer to autumn	4-10	50-100 m	Overwinter at C5
<i>Mesocalanus tenuicornis</i>	OKIF	?	summer to autumn (?)		?	Warm water species
<i>Eucalanus bungii</i>	SP, OKH, OKIF	1-2 years	4-5	4-8	not obvious	Overwinter at C3-4 and C5
<i>Pseudocalanus minutus</i>	SP, OKH, OKIF	1 year?	spring	3-8	50-100 m	Distributing colder water than <i>P. newmani</i>
<i>P. newmani</i>	SP, OKH, OKIF	1-6 months	spring to summer	year round?	50-100 m	
<i>Paracalanus parvus</i>	OKIF	20-60 days	summer to autumn	5-10	no	
<i>Metridia okhotensis</i>	OKH, SP	1 year (?)	4-7	3-7 (?)	200-500 m	Intensive DVM, distributing colder water than <i>M. pacificus</i>
<i>M. pacifica</i>	SP, OKH, OKIF	2 - 10 months	4-8 (-10)	year round	150-300 m	Intensive DVM
<i>Paraecheta elongata</i>	SP, OKH, OKIF	<1 year	year round	year round	50-150m	Carnivore
<i>Oithona similis</i>	SP, OKH, OKIF	a few months	year round	year round	no	Coprophage

SP: subarctic Pacific, OKH: Okhotsk Sea, OKIF: Oyashio-Kuroshio Interfrontal Zone

DVM: diel vertical migration

DSS: Deep-sea spawner

そこで親潮域においてデータ数が比較的充実している 6 月から 8 月のデータを用いて解析を行った。この時期に表層に若齢個体が多く出現し、かつ、若齢個体が 0.33mm の目合いのネットで採集されるのは以下の種、ステージになる。

- 1) *Eucalanus bungii*
- 2) *Calanus pacificus* (コペポディド 1 期 (C1) は一部がネットから抜けると予想される)
- 3) *Metridia pacifica* (C1 および C2 の一部がネットから抜ける)
- 4) *Metridia okhotensis* (C1 の一部がネットから抜けると予想される)

このうち、*E. bungii* は特に C4 以降で摂餌を停止し休眠状態に入る場合があり、その場合はその発育段階における滞留時間が長くなり、より捕食の影響を受けやすいと考えられる。また、深層で越冬した C4 が表層に移動すること、すなわち前年の春に誕生した個体が含まれる可能性があるため、C3 より若齢の個体とその年の生産性の指標としてより適していると考えられる。*C. pacificus* は親潮—黒潮移行域に主に出現し、夏から秋にかけて産卵する。*Metridia* 属の 2 種は、C3 から日周鉛直移動を行うようになり、特に C5 以降は 300m 以上にもおよぶ日周鉛直移動を行う。従って、C4 よりも若い個体を用いるか、夜間のデータのみを解析に用いる必要がある。

また、*Pseudocalanus* 属の橈脚類は、前期発育段階の個体 (C1-C3) は 0.33mm の目合いをすり抜けてしまい、後期発育段階の個体 (C4-C6) のみが採集されるが、発育時間が比較的に短いため、環境変動を反映しやすいことが期待される。

(2) 橈脚類の長期変動

サブテーマ1で分析された小達資料のデータを用いて、1971年以降の橈脚類個体数について、(1)で推定された、特に海洋環境変動が現れやすいことが期待される種、発育段階に関する解析を行った。その結果、7-8月に *Eucalanus bungii* C1-C4、*Calanus pacificus* C2-C4、*Metridia pacifica* C2-C4、*Metridia okhotensis* C2-C4 のそれぞれに、ほぼ20年周期の長期変動傾向がみられた(図1)。しかし、これらの種であっても、5-6月には長期変動傾向が見られなかった。また *Pseudocalanus* 属の橈脚類には長期変動傾向がみられなかった。

同様の解析を、混合域において得られたサンプルを用いてサブテーマ1によって提供されたデータベースを用いて行った。混合域では春季に親潮域と同様の種類が優占するが、夏季にはより小型の多様な種類が出現する(サブテーマ4参照)。これらの小型種はいずれも表層の生産を利用して、産卵、生育し、多くの種は1年間に数回の世代交代を行うものが多い。

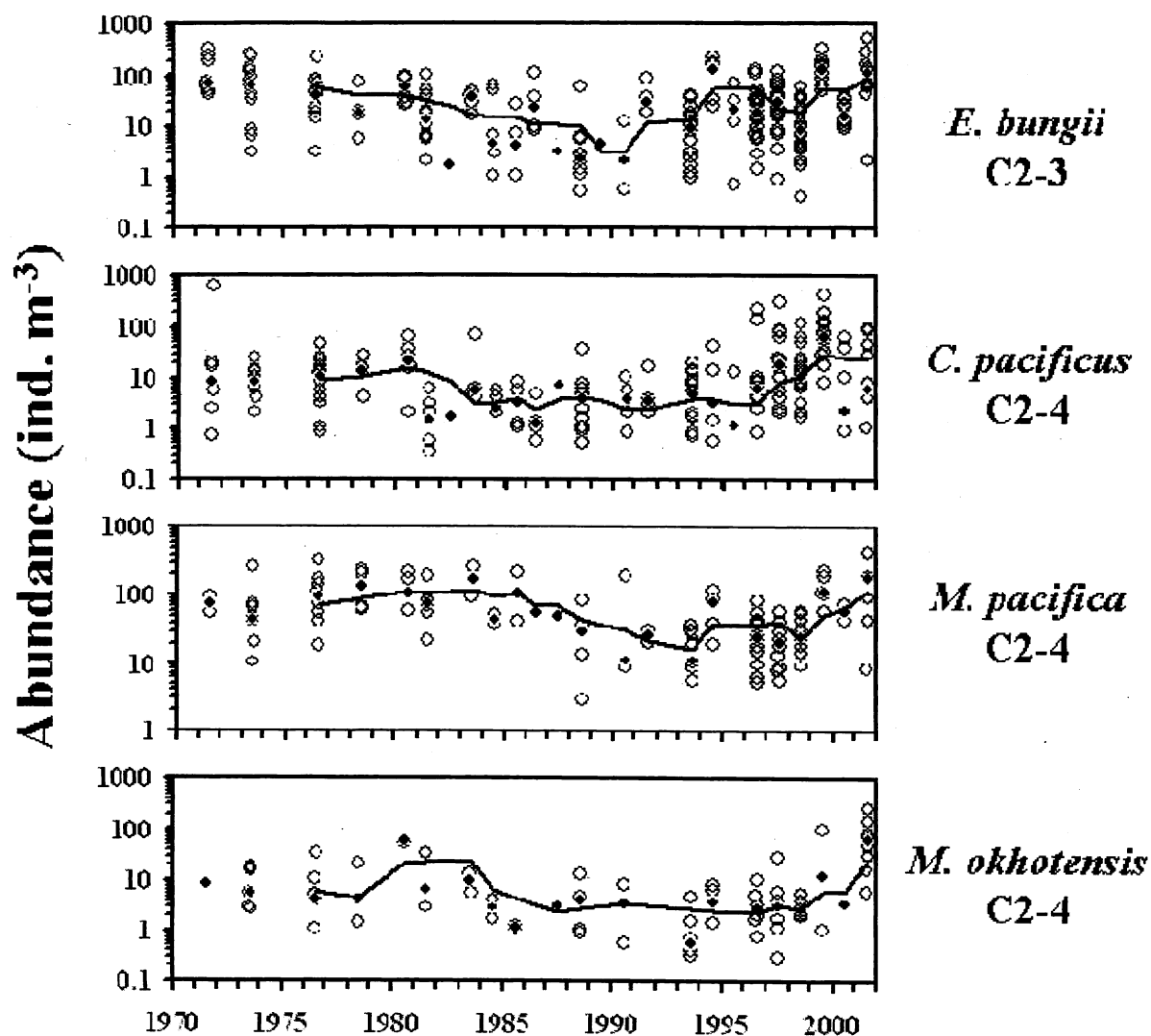


図1. 6-8月の親潮域における主要カイアシ類密度の長期変動。黒丸はそれぞれの年の中間値。折れ線は3年移動平均値。

親潮域で顕著な長期変動傾向が観察された *Eucalanus bungii* C1-C4、*Metridia pacifica* C2-C4、*Metridia okhotensis* C2-C4 には、このような長期変動傾向がみられなかった。しかしながら、*Calanus pacificus* C2-4 では 1980 年代の低レベルおよび 1990 年以降の上昇傾向については親潮域と同様な傾向が見られた。この傾向は、*C. pacificus* と良く似た生態を持つ、*Mesocalanus tenuicornis* および *Ctenocalanus vanus* においても見られた (図 2)。

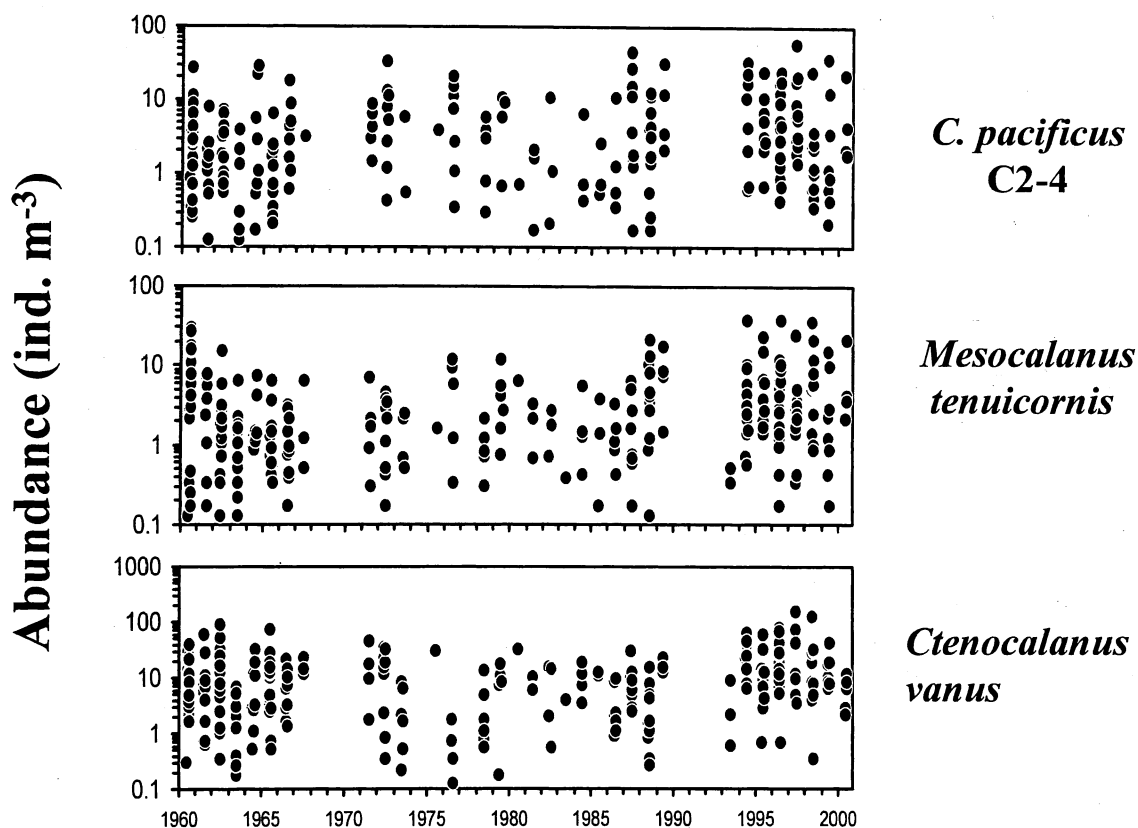


図 2 親潮-黒潮移行域における *Calanus pacificus*, *Mesocalanus tenuicornis*, *Ctenocalanus vanus* の 7-8 月の密度の長期変動。

混合域で最も優占する小型橈脚類は、*Paracalanus* sp., *Clanusoceanus* spp.であるが、これらの種類の解析によっては、明確な長期変動傾向は得られなかった。解析を行ったその他の小型橈脚類では、上記の種と同様の長期変動は見られなかったが、*Lucicutia* ap.および *Oithona longispina* には、1990 年代半ば以降に、急激に増加する傾向が見られた (図 3)。

親潮域及び混合域で観察された橈脚類の長期変動傾向は、種によって多少の違いはあるものの、いずれも 1980 年および 2000 年付近にピークを持ち、1990 年付近に谷を持つ。長期変動傾向がみられた发育段階は、6-7 月生まれであることが推定されるため、この長期変動は、親潮域で 4-5 月に見られる春季ブルームを反映しているのではなく、春季ブルーム終了後の低次生産を反映していることが推定される。

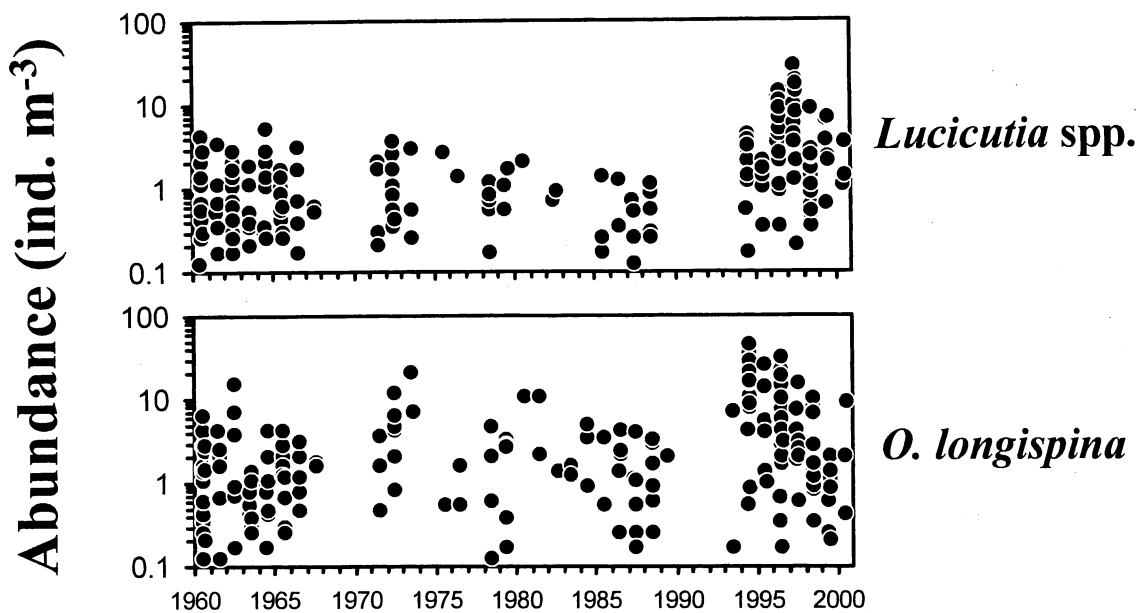


図3 親潮-黒潮移行域における *Lucicutia* spp. と *Oithona longispina* の7-8月の密度の長期変動。

橈脚類個体数が低くなる傾向が見られていた1980年後半から1990年前半は橈脚類の捕食者であるマイワシが大増殖し、親潮域で盛んに摂餌を行っていた時期と一致する。しかしながら、マイワシは一般により大型の動物プランクトンを選択的に捕食する。この期間に、より大型の後期発育段階の個体に減少傾向が見られず、前期発育段階の個体のみ減少傾向が見られたことから、マイワシによる捕食はこの長期変動傾向の原因とはなっていないと推察される。

C. pacificus 等に見られた長期変動は、サブテーマ2および4によって示されたように、夏季に昇温が進んで栄養塩供給が低下して、基礎生産が低下したことに原因すると考えられる。特に1990年付近には、18.6年周期の1日周期潮汐による鉛直混合の変動に伴い、亜表層の燐酸塩の供給が極小となった（サブテーマ2、図9）。すなわち、亜表層の栄養塩の低下および躍層強化に伴って、夏季に表層への栄養塩供給が低下したことによる、海域の生産性の低下によるものと考えられる。

1970年頃は、潮汐18.6年振動と関連して亜表層の栄養塩が少ない時期に当たるが、*C. pacificus* や *Metridia* spp. の生物量には、1990付近ほど明瞭な減少傾向が見られず、また、*E. bungii* ではむしろ増加している。この原因は現時点では不明であり、今後の研究が必用であるが、種による産卵生態、産卵時期および適水温等が影響していることが予想される。

混合域では *Metridia* や *Eucalanus* に親潮域で見られた長期変動傾向がみられなかった。これは、これらの種類は冷水を好むため、水温上昇によって表層を忌避するなどするため、より表面水温の低い親潮域とは異なり、混合域では表面を回避して亜表層以深にまで沈降していた可能性が考えられる。一方、*Lucicutia* sp. および *Oithona longispina* は、生活史や食性には共通点は少なく、なぜ1990年代半ば以降にのみ同様の増加傾向が見られたかについては不明である。

今回の解析においては、親潮域で優占する *Pseudocalanus* spp., および混合域で優占する *Clanus*

ocalanus spp.や*Paracalanus* sp.といった小型で、生活史周期の短い種には、明瞭な長期変動傾向が見られなかった。これらの種は、長期変動傾向が見られた種に比べて、より短い生活史周期を持つため、様々なコーホルトによる産卵が重複して、コーホルト構造が確認しづらい傾向にある。これら小型種の生物量は、より短期の、もしくは水平的な環境の不均一性による再生産・成長の影響を反映している可能性があり、このことが、長期変動傾向の見られなかった、もしくは、気候変動等による環境変動の影響が現われづらい理由であるのかもしれない。

(3) 亜寒帯性カイアシ類の季節的鉛直移動様式

表層の分布時期および越冬深度には種による違いが明確に見られた。表層における植物プランクトンによって取り込まれた二酸化炭素は、3-5月は主に*N. flemingeri*、*N. cristatus*、*E. bungii*によって利用される。*N. flemingeri*は最も早く6月には表層を離れて深層に移動するが、それに代わって*N. plumchrus*が表層に出現する(図4)。初夏から夏季にかけては*N. cristatus*と*N. plumchrus*を中心に表層生産が利用され、遅くとも9月までにはいずれの種も表層を離れ、深層に移動する。従って、3-8月の表層で植物プランクトンによって取り込まれた二酸化炭素が深層に輸送されることになる。

亜寒帯域における海表面の二酸化炭素分圧は、冬季の鉛直混合によって3-4月に400-450 μ molと最も高くなる。その後、生物生産による二酸化炭素取り込みによって、150-300 μ mol低下する。この生物活動による二酸化炭素分圧の低下量は、世界の海洋の中で最も大きなものである。主に粒状有機物となった炭素は、表層で無機化されれば、秋季から冬季の風速増加に伴い大気に再び接することになるが、その一部は動物プランクトンの季節的鉛直移動によって深層に輸送される。動物プランクトンの表層利用時期は、この二酸化炭素分圧が低下した後再び上昇する前に当たっており、動物プランクトン季節的鉛直移動は、炭素を深層に輸送するタイミングとしては、最も効率的な時期であると云える。

越冬深度は、*E. bungii*が最も浅く250-500mであり、次いで*N. flemingeri*は400-800mである。研究によってやや違いはみられるものの、*N. flemingeri*の主要な越冬層は500m以浅であると考えられる。一方、*N. plumchrus*の越冬層は500-1000mであり、*N. cristatus*は最も深く1000-1500mである(図4)。

亜寒帯太平洋の季節混合層深度は100-150m、混合域では100-250m程であるため、いずれの種類による季節的鉛直移動によって鉛直輸送された炭素は、中層循環または深層循環によって輸送されることになる。北太平洋亜寒帯域では、中層循環で問う密度面輸送される炭素は、数年から数十年で表層に戻るのに対し、密度面で27.4 σ_θ (亜寒帯域では水深400-500mに相当)以深に輸送された場合、深層循環に乗って数百年程度表層から隔離される。従って、炭素の海洋中への貯蔵という観点から見れば、*N. cristatus*や*N. plumchrus*によって深層に輸送された後、その層で呼吸または被捕食によって無機化される場合、これらの種による鉛直移動が最も長期間の炭素輸送機能を持つことになる。一方、*N. flemingeri*や*E. bungii*に輸送された有機炭素の場合、たとえ越冬深度で無機化された場合であっても、数年から数十年後には再び大気-海洋境界層に露出することになる。また、*Neocalanus*は、越冬層で産卵し死亡するのに対し、*E. bungii*は再び海表面に移動して産卵後死亡する。従って、*E. bungii*による季節的鉛直移動は、短期間の隔離機能しかがなく、*N. plumchrus*および*N. cristatus*による鉛直移動によって深層へ輸送された炭素

が、最も長期間大気から隔離されるということができる。

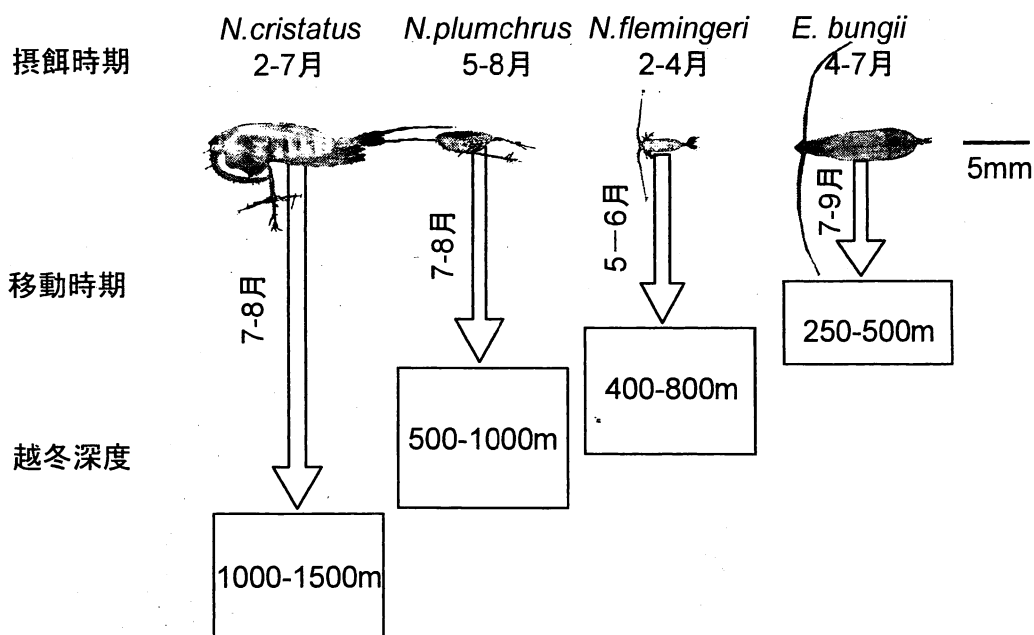


図 4. カイアシ類の季節的鉛直移動の概念図。

(4) *Neocalanus*属による炭素輸送量

炭素輸送量はKobari et al. (2003)の手法を基に、3種の*Neocalanus*および*E. bungii*による生物量と越冬期の死亡率(*Neocalanus*に関してはMackas and Tsuda (2000)、*E. bungii*に関してはTsuda et al. 2004)を用いて計算を行った。

その結果、親潮域では、*Neocalanus*属3種の季節的鉛直移動による200m以深への炭素輸送量は $5.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ であった。そのうち、 $0.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ は卵から孵化したノープリウス幼生として表層に上昇移動するため、ネットの輸送量は $4.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ となる。同様に、*E. bungii*による輸送量は、 $1.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ であり、次の春に表層に移動するのは $0.19 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 、ネットの輸送量は $0.81 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ と推定された。従って、*Neocalanus*と*E. bungii*の季節的鉛直移動によって、合計 $6.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ が200m以深に輸送され、その92%の $5.1 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ が表層に戻ることなく無機化されると計算される。

ここで、動物プランクトンに占める*Neocalanus*と*E. bungii*の割合が亜寒帯太平洋で親潮域と同じであると仮定し、Sugimoto & Tadokoro (1997)による北緯40度から北緯60度の太平洋及びその縁辺海の動物プランクトンバイオマスをを用いて、同海域における*Neocalanus*と*E. bungii*による輸送量を推定した。その結果、年間 0.12 Gt C が200m以深に輸送されると計算された。この輸送量は、大気から海洋へのネットの炭素吸収量である 2.0 Gt y^{-1} の6%に値し、生物活動による表層から中深層への輸送量である 11 Gt y^{-1} の1.1%に値する。また*Neocalanus*によって1000m以深に輸送される炭素量は年間 0.10 Gt C となる。

*Metridia*属の2種の橈脚類、*M. pacifica*と*M. okhotensis*は親潮域において*Neocalanus*属、

*Eucalanus*属に次いで優占する橈脚類である。*Metridia*は昼に深層に分布し、夜間に表層に移動して摂餌する日周鉛直移動を行うことが知られており、生物ポンプの駆動者であると考えられる。高橋ら(未発表)は、*Metridia*属2種の日周鉛直移動様式および生物量のデータから、*Metridia*は昼間は150-300m付近に分布し、夜間は50m以浅に上昇移動することが明らかにした。この日周鉛直移動様式、生物量および水温依存の呼吸量アロメトリー式、およびモデルから推定された死亡率($1\% \text{ d}^{-1}$)から推定した炭素輸送量は、親潮域で年間 3.5 gC m^{-2} であると計算された。この、*Metridia*の日周鉛直移動による炭素輸送量は、*Eucalanus*を凌ぎ、*Neocalanus*の8割に達する。しかし、輸送深度が150-300m程と、*Eucalanus*と同等であるため、炭素隔離期間は*Neocalanus*に比べて短いと考えられる(図5)。

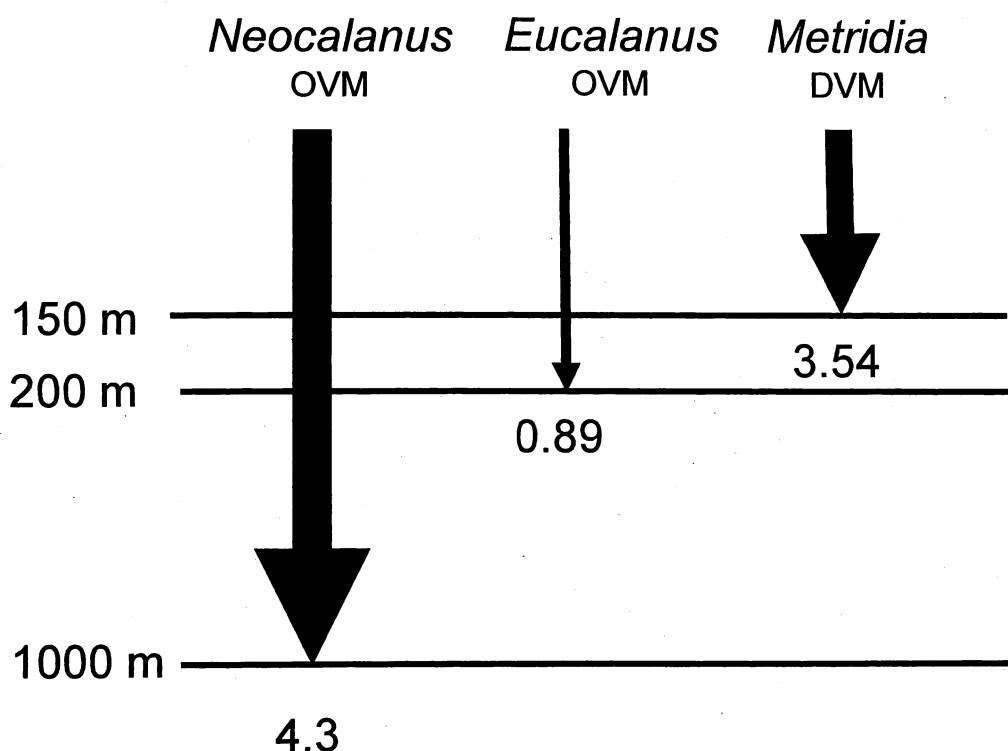


図 5. 日周鉛直移動 (DVM) あるいは生活史に伴う季節的鉛直移動 (OVM) による年間の炭素鉛直輸送量.

(5) *Neocalanus*属による炭素輸送量の長期変動と、炭素循環への影響

サブテーマ1によってまとめられたデータベース解析によって、親潮域の夏季の*Neocalanus*属カイアシ類の生物量は大きな長期変動傾向を示すことが明らかになった。データが比較的多く揃っている1980年代以降で見ると、*Neocalanus*の5年移動平均生物量の最大値は、最小値に比べ、春季に2.4倍、夏季に6.7倍あり、変化は特に夏季に出現する、*N. plumchrus*, *N. cristatus*, *E. bungii*で大きいことが明らかになった(図6)。これらのことは、(4)で得られた、季節的鉛直移動による炭素輸送量が大きく変化することを意味する。ここで、Sugimoto & Tadokoro (1997)による動物プランクトン生物量が、①1980年前半の*Neocalanus*生物量の最低値を反映していた場合、②

1980-2000年の平均*Neocalanus*生物量を反映していた場合、の2通りの仮定で計算すると、1990年以降の、季節的鉛直移動による年間炭素輸送量はそれぞれ、0.80 Gt、0.25 Gtとなり、平均値よりも0.13-0.68Gt多くなる。

*Neocalanus*生物量の多くは*N. plumchrus*と*N. cristatus*であるため、*Neocalanus*によって輸送された炭素は、多くは深層循環によって等密度面輸送されて数百年程度大気から隔離され、一部が中層循環で数十年以内に表層に戻ると考えられる。従って、動物プランクトンによる炭素の中深層への輸送量変動は、海洋の炭素貯蔵量に影響を与えるであろう。(2)で示したように、1990年代後半の動物プランクトン生物量増加が、日周潮汐の18.6年周期変動と同期しているのであれば、動物プランクトンの季節的鉛直移動による炭素輸送量は、10年間で1.2~8.0 Gtの範囲で変動することになる。一方、1990年代後半の増加が、温暖化等による北太平洋生態系の変化に伴うトレンドである場合、海洋の炭素隔離能はそれ以前に比べ、年間0.13-0.68 Gt多くなり、100年間では13-68 Gtとなる。これらの量は、大気から海洋への炭素吸収等、炭素循環を考える上で無視できない数値であり、今後、この変動を引き起こした要因や、種毎の輸送深度およびその層で無機化した炭素の大気からの隔離機関等を検討する必要がある。

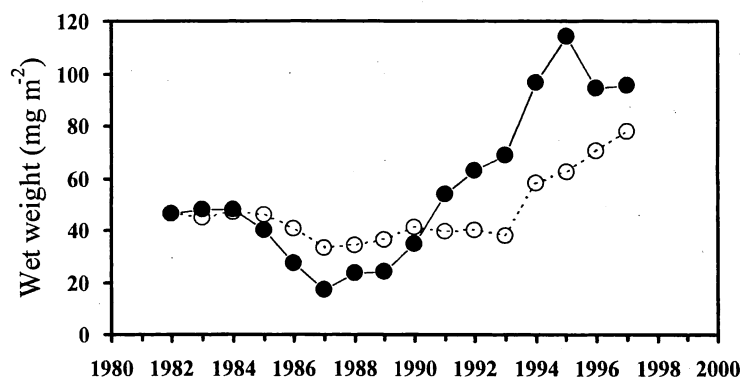


図 6. 親潮域の *Neocalanus* spp. の平均湿重量の経年変動. 白丸は春季、黒丸は夏季.

5. 本研究により得られた成果

- (1) 生物・生態学的特性から、小達コレクションの種組成、個体数のデータベースを用いた過去の海洋環境の解析には、春季から夏季に表層で摂餌し、産卵する種の初期発生個体を用いることが有効であると考えられた。
- (2) 親潮域において、7-8月に*Eucalanus bungii* C1-C4、*Calanus pacificus* C2-C4、*Metridia pacifica* C2-C4、*Metridia okhotensis* C2-C4のそれぞれに、ほぼ20年周期の長期変動傾向がみられた。これらの長期変動は、18.6年周期の日周潮汐変動と同期する亜表層への栄養塩の供給および夏季の水温躍層強度によって変化する、夏季の基礎生産変化を反映すると考えられる。
- (3) 季節移動する動物プランクトンの、移動深度、移動時期、表層生産の利用時期等、季節的鉛直移動に関する知見を取り纏め、炭素の中深層への隔離機構としての鉛直移動の評価を種毎に行ったところ、動物プランクトンによる炭素鉛直輸送量は、親潮域では*Neocalaus*属によって $4.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 、*E. bungii*によって $0.81 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ であった。北緯40-60度の北太平洋および縁

辺海における輸送量は年間0.12GtCであると推定された。

(4) *Neocalanus*属カイアシ類生物量は、春季に2.4倍、夏季に6.7倍の幅で変化することが明らかになった。このことから、北部北太平洋の動物プランクトンの季節的鉛直移動による炭素輸送量は年間0.12~0.8 Gtの範囲で大きく変動する。また、1990年代後半の動物プランクトン増加が、温暖化等による増加トレンドであった場合、季節的鉛直移動による炭素輸送量が1990年以前に比べて100年間で13-68 Gt増加することになり、長期的な炭素循環、海洋の炭素貯蔵量を考慮する際の影響はより大きくなる。本研究によって、動物プランクトンが海洋炭素循環を考える上で重要であることがはじめて確認された。

6. 引用文献

- (1) T. Kobari, A. Shinada, and A. Tsuda: Prog. Oceanogr. 57, 279-298 (2003) "Functional roles of interzonal migrating mesozooplankton in the western subarctic Pacific"
- (2) D. L. Mackas and A. Tsuda: Prog. Oceanogr. 43, 335-363 (1999) "Mesozooplankton in the eastern and western subarctic Pacific: community structure, seasonal life histories, and interannual variability"
- (3) T. Sugimoto and K. Tadokoro: Fish. Oceanogr., 6, 74-93 (1997) "Interannual-interdecadal variations in zooplankton biomass, chlorophyll concentration and physical environments in the subarctic Pacific and Bering Sea."
- (4) A. Tsuda, H. Saito and H. Kasai: Fisheries Oceanography 13, 10-20 (2004) "Life histories of *Eucalanus bungii* and *Neocalanus cristatus* (Copepoda: Calanoida) in the western subarctic Pacific Ocean"

7. 国際共同研究等の状況

海洋生態系と生物地球科学的物質循環が、地球温暖化によってどのような影響を受け、応答するかに関する国際的な科学計画であるIMBER(海洋生物地球化学生態系統統合研究)の科学運営委員会において、本プロジェクトの紹介を行い、地球温暖化の影響予測に重要であることを確認し、同様の動物プランクトン長期データも含めたレトロスペクティブ解析推進の推奨を科学計画・実行戦略として盛り込んで、相互比較を推進することとした。

生物ポンプによる炭素の海洋中深層への輸送機構を解明しようとしている米国のプロジェクト研究VERTIGO(全海洋鉛直輸送研究)の研究代表者らと会議を持ち、本プロジェクトで得られる、動物プランクトン生物量長期変動データと、VERTIGOで得られる鉛直輸送機構の成果を合わせることによって、より正確な生物ポンプによる炭素輸送量推定およびその長期変動評価に繋がることを確認し、両者の成果を持ち寄って検討した。

2005年10月に海洋研究開発機構において開催された日米地球変動ワークショップ「生物多様性、生態系機能、人間-自然相関システム」において、東部北太平洋のCalCOFIプロジェクトにおける生物データの長期変動研究を行っている研究者グループと、現場データの取得法および解析法に関する互いのデータを互換的に解析できる標準的なプラットフォームの必要性が認識された。これをうけて、2006年10月に横浜において、海洋観測の東西太平洋比較検証に関するワークショップを予定している。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- ① P. J. Harrison, F.A. Whitney, A. Tsuda, H. Saito, and K. Tadokoro : J. Oceanogr. 60, 93-117 (2004) “Nutrient and Plankton Dynamics in the NE and NW Gyres of the Subarctic Pacific Ocean “

<その他誌上発表(査読なし)>

- ① 齊藤宏明・中町美和. 東北ブロック水産海洋連絡会報, 36, 20-21 (2006)
「親潮および黒潮—親潮前線間域におけるウルトラ植物プランクトンの分布と変動要因」

(2) 口頭発表(学会)

- ① 齊藤宏明、津田敦：2004年度日本海洋学会年春季大会，つくば，2004. 「海洋物質循環過程における橈脚類 *Oithona similis* の役割」
- ② K. Tadokoro, H. Sugisaki, H. Saito, and T. Saino : PICES 13th Annual Meeting. Honolulu, U.S.A., 2004. 「Interannual variations in biomass and developmental timing of *Neocalanus* copepod populations in the Oyashio waters of western subarctic North Pacific」
- ③ 田所和明、杉崎宏哉、齊藤宏明：2005年度海洋学会春季大会，東京，2005. 「親潮域における *Neocalanus* 属カイアシ類現存量の10年スケール変動」
- ④ Tadokoro, H. Sugisaki, and H. Saito : GLOBEC Symposium, Climate Variability and Sub-arctic Marine Ecosystems, Victoria, Canada, 2005. 「Interdecadal variability in *Neocalanus* copepods biomass in the Oyashio waters from 1970 to 2002」
- ⑤ 齊藤宏明、太田尚志、鈴木光次、西岡純、津田敦：日本海洋学会春季大会、横浜、2006. 「珪藻ブルームに対する従属栄養渦鞭毛虫 *Gyrodinium* の応答と食物網動態および物質循環に果たす役割」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

炭素循環や温暖化予測には、海洋における炭素循環過程の精度向上が欠かせないが、本研究で明らかになった動物プランクトンによる炭素深層輸送量は、従来全く見落とされていた部分であり、特に長期的な中層への蓄積を考える場合や、大気二酸化炭素圧の年々変動を考慮する場合には、重要な影響を与える可能性がある。今後得られる動物プランクトンデータ解析を含めて、その炭素循環に及ぼす影響を精査し、大気から海洋への二酸化炭素取り込みと貯蔵に果たす役割について、成果の広報・普及に努め、炭素循環精度向上に資する。