

気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト(プロジェクト研究成果シリーズ559)

誌名	気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
巻/号	559
掲載ページ	p. 1-127
発行年月	2016年3月

気候変動に対応した循環型食料生産等の
確立のためのプロジェクト
—水産分野における温暖化緩和技術の
開発—
—地球温暖化が水産分野に与える影響
評価と適応技術の開発—

Development of mitigation and adaptation technologies to climate change in
the sectors of agriculture, forestry, and fisheries
— Development of mitigation technologies to climate change in the
fisheries sector —
— Development of adaptation technologies to climate change impacts in
the fisheries sector —

農林水産技術会議事務局

気候変動に対応した循環型食料生産等の
確立のためのプロジェクト
—水産分野における温暖化緩和技術の
開発—
—地球温暖化が水産分野に与える影響
評価と適応技術の開発—

Development of mitigation and adaptation technologies to climate change in
the sectors of agriculture, forestry, and fisheries
— Development of mitigation technologies to climate change in the
fisheries sector —
— Development of adaptation technologies to climate change impacts in
the fisheries sector —

2016年3月

序 文

研究成果シリーズは、農林水産省農林水産技術会議が研究機関に委託して推進した研究の成果を、総合的かつ体系的にとりまとめ、研究機関及び行政機関等に報告することにより、今後の研究及び行政の効率的な推進に資することを目的として刊行するものである。

この第559集「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト－水産分野における温暖化緩和技術の開発－、－地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発－」は、農林水産省農林水産技術会議の委託プロジェクト研究として、2010年度から2014年度までの5年間にわたり、独立行政法人水産総合研究センターを中心に実施した研究成果をとりまとめたものである。

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次評価報告書（2014年11月公表）においては、気候システムの温暖化は疑う余地はないとされており、地球温暖化は世界中の自然と社会に深刻な影響を与え、我が国農林水産物の生産にも重大な影響を及ぼすことが懸念されている。そのため、農林水産分野における温室効果ガス発生・吸収メカニズムの解明、温室効果ガスの排出量削減技術・吸収源機能向上技術の開発、地球温暖化の影響の予測と評価及び地球温暖化の進行に適応した中長期的な課題に対応するための生産安定技術の開発等が課題とされている。

本研究は、水産分野における気候変動対応の研究開発として、日本周辺海域における二酸化炭素フラックスの高精度算定と変動機構の解明、日本周辺海域の高解像度炭素・窒素循環モデルの開発、沖合域を回遊する漁業資源への影響評価と適応技術の開発、沿岸域及び内水面における漁業生産への影響評価と適応技術の開発等を実施しており、水産分野における地球温暖化に対する緩和策、適応策に資することを目的とした。

この研究の成果は、今後の農林水産関係の研究開発及び行政を推進する上で有益な知見を与えるものと考え、関係機関に供する次第である。

最後に、本研究を担当し、推進された方々の労に対し、深く感謝の意を表す。

2016年3月

農林水産省農林水産技術会議事務局長
西郷 正道

目 次

研究の要約	1
第1編 水産分野における温暖化緩和技術の開発	27
第1章 日本周辺海域（排他的経済水域）における二酸化炭素フラックスの高精度算定と変動機構の解明	27
1 漁業調査船の活用による日本周辺海域表層二酸化炭素分圧モニタリングシステムの構築	27
2 衛星・再解析データを用いた高時空間分解能二酸化炭素分圧グリッドデータの作成手法の開発	32
第2章 日本周辺海域の高解像度炭素・窒素循環モデルの開発	38
1 日本周辺海域の高解像度炭素・窒素循環モデルの開発	38
第3章 漁獲操業・水揚げ行為における二酸化炭素排出量の推計と削減のための漁港整備条件の解明	47
1 漁船漁業の漁獲・水揚げ過程における二酸化炭素排出量の推計	47
2 漁船漁業における水揚げ地選択の実態と二酸化炭素排出量削減に向けた漁港整備課題の抽出	52
3 亜寒帯域におけるサンマ等の漁場形成に地球温暖化が与える影響の解明	58
第2編 地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発	64
第1章 我が国周辺海域における低次生態系モニタリングと影響評価	64
1 親潮・混合域の低次生態系モニタリングと影響評価	64
2 黒潮域の低次生態系モニタリングと影響評価	70
3 東シナ海域の低次生態系モニタリングと影響評価	75
第2章 沖合域を回遊する漁業資源への影響評価と適応技術の開発	80
1 海洋生態系モデルを用いた餌料環境と浮魚類の温暖化影響評価モデルの開発	80
2 日本系サケ資源への温暖化影響予測と対応技術の開発	86
3 日本海主要漁業資源の海洋生態系モデルによる温暖化影響予測と適応策の開発	94
第3章 沿岸域及び内水面における漁業生産への影響評価と適応技術の開発	101
1 藻場の分布と餌料供給機能に及ぼす温暖化の影響評価	101
2 暖流域の藻場生態系への温暖化の影響評価と適応技術の開発	107
3 高温化の魚類増養殖業に与える影響を低減化する対処技術の開発	112
4 湖沼の漁業生産に対する影響評価と漁業生産安定化を目指した適応技術の開発	118

研究の要約

一般社団法人漁業情報サービスセンター

I 研究年次・予算区分

研究年次：2010年度～2014年度

予算区分：農林水産省農林水産技術会議事務局委託プロジェクト研究 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発

II 主任研究者

チームリーダー（1 水産分野における温暖化緩和技術の開発）：

（独）水産総合研究センター中央水産研究所 海洋・生態系センター
モニタリンググループ長

小埜 恒夫（2010～2013年度）

チームリーダー（2 地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発）：

（独）水産総合研究センター中央水産研究所 海洋生態系センター長
渡邊 朝生（2010～2011年度）

（独）水産総合研究センター日本海区水産研究所 資源管理部
資源管理グループ長

木所 英昭（2012～2014年度）

III 研究担当機関

独立行政法人水産総合研究センター

独立行政法人水産大学校

独立行政法人国立環境研究所

国立大学法人北海道大学

国立大学法人東京大学

国立大学法人東京海洋大学

国立大学法人三重大学

国立大学法人信州大学

公立大学法人滋賀県立大学

国立大学法人愛媛大学

国立大学法人鹿児島大学

学校法人北里研究所北里大学

長崎県総合水産試験場

長野県水産試験場

滋賀県水産試験場

IV 研究目的

1 水産分野における温暖化緩和技術の開発

重要な二酸化炭素吸収域である日本排他的経済水域の二酸化炭素吸収量とその時間的変動を、高密度船舶モニタリングシステムとそのグリッドデータ外挿手法の開発・運用を通じて定量的に明らかにすると同時に、同海域における高解像度炭素・窒素循環モデルの開発・運用を通じて、日本排他的経済水域の二酸化炭素吸収機構とその変動要因を解明する。また水産業における主要な二酸化炭素排出源である漁船の移動・操業時における二酸化炭素排出量を、漁場から主要消費地までの総二酸化炭素排出量を最小化する漁港選択と漁船誘導技術の開発を通じて削減する。以上の、海洋による二酸化炭素吸収と漁船による二酸化炭素排出に関する研究と技術開発を通じて、水産・海洋分野における温暖化緩和への貢献に資する。

2 地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発

我が国周辺海域における海洋環境と低次生態系についてのモニタリングを行い、水産資源の餌料を供給する低次生態系への温暖化の影響を定量的に把握する。沖合域を回遊する水産資源への温暖化の影響を、水温等の海洋の物理環境とともに餌料環境の面から定量的に評価し、水産業における適応技術の開発に貢献する。我が国沿岸域については、磯根資源や沿岸域の魚類生産に重要な役割を果たしている藻場生態系への温暖化の影響評価を行い、磯根資源の持続的利用のための適応策を提示する。養殖魚については温暖化の進行による養殖場の高温化の生理的影響を多角的に捉え、養殖現場に適用可能な高温対処技術を開発する。内水面における漁業生産については、温暖化による環境変化に直接に曝される湖沼の漁業対象種を対象に温暖化の影響を低減し、漁業生産を安定させるための適応技術を開発する。

V 研究方法

1 水産分野における温暖化緩和技術の開発

水産総合研究センター（以下「水研センター」という）の漁業調査船3隻にpCO₂モニタリング装置を搭載し、各船の全航海で自動運転させることで、日本周辺海域における高密度のpCO₂モニタリングを実施した。このデータと国立環境研究所（以下「国環研」という）が取得した篤志貨物船によるpCO₂モニタリングデータを元に、衛星観測及び物理海況モデル再解析値データを説明変数としたニューラルネットによるpCO₂外挿手法を開発し、北太平洋全域及び日本EEZ水域全体をカバーするpCO₂グリッドデータを作製した。得られたグリッドデータから日本周辺海域における大気-海洋間のCO₂フラックスとその経年変動を算定した。

1/4度×1/6度メッシュの空間解像度を持つ、日本周辺海域の高精度炭素・窒素循環モデルCOCO-MEMを開発し、これを上記のpCO₂データと、中課題2の運営する各観測定線上で観測した海洋内部の炭酸系データでチューニングして、日本周辺海域pCO₂分布の高再現性に特に着目した炭素・窒素循環モデルを開発した。このモデル上の海洋表層における炭素・窒素のフラックス解析と、外力・パラメータに関する複数の感度実験を実施し、その挙動から日本周辺海域の二酸化炭素吸機構と、その変動要因を考察した。

サンマ棒受け網漁業の既存資料解析と現地調査から、単位漁獲量当たり二酸化炭素排出量を漁船総トン数階級別に算定し、震災後のサンマ漁船整備においてどのような漁船トン数構成がCO₂排出量削減の観点上最適となるのかを検討可能なサンマ漁業二酸化炭素排出量の予測モデルを開発した。漁業者の漁港選定については、既存漁獲成績報告書の資料解析と現場聞き取り調査等から、二酸化炭素排出量が最も少ない直近漁港への水揚げ比率の変動を、各水揚げ港の属性によって説明するモデルを構築した。また、各水揚げ港から消費地に至る輸送過程を通じて排出される二酸化炭素排出量を原単位法によって推定した。最後に、サンマ資源分布中で具体的なサンマ棒受け網漁場が形成される位置を、水温、クロロフィル、来遊資源状態等によって説明する漁場選定モデルを構築し、海洋環境温暖化予測モデルの出力結果から、温暖化後のサンマ棒受け網漁業の漁場

位置に関する簡易推定を行った。

2 地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発

(1) 我が国周辺海域における低次生態系モニタリングと影響評価

我が国周辺海域の親潮・混合域、黒潮域、東シナ海において海洋物理環境から動植物プランクトンまでの低次生態系についての高精度モニタリング調査を継続実施してデータベースを構築し、温暖化の影響を検出可能な長期時系列データ蓄積に寄与した。これにより時系列データを用いて、季節・経年変動及び長期変動の特性を把握し、我が国周辺海域における低次生態系への温暖化の影響評価を試みた。また、低次生態系モデルの開発課題におけるモデルの高精度化に貢献するとともに、観測データとモデル計算結果の解析により海洋環境及び低次生態系の特性や構造を把握し、温暖化の進行にともなって起こりうる構造の変化などを考察した。

(2) 沖合域を回遊する漁業資源への影響評価と適応技術の開発

我が国周辺海域のサンマ等の小型浮魚類について、その餌料環境を再現する低次生態系モデルを高精度化し、魚類生産モデルの改良を行い、温暖化シナリオを基準にした温暖化実験を行うことにより、資源への影響を定量的に評価した。また、次世代型の日本周辺高解像度物理-低次生態系結合モデルの開発を行い、高解像度モデルを用いた温暖化予測実験を複数のシナリオ・モデルで実施できる体制を整えた。

北日本の漁業にとっての最重要資源である日本系サケについては、統計的手法を用いた回帰予測モデルの開発、生態系モデルを用いた予測手法の高度化を行い、複合的に温暖化の影響予測を行った。また、ふ化放流期への温暖化の影響を解析し、温暖化の影響を軽減するふ化放流技術を提言した。

日本海の水産資源については、海況モデルの高精度化及び低次生態系モデルの開発を行い、プリ・スルメイカを中心とした水産資源の分布回遊及び餌料環境への温暖化の影響評価を試みた。さらに、高次生態系モデルの開発により魚種組成の変化予測を可能にし、日本海主要漁業への影響を具体的に予測し、漁業の適応策を提示した。

(3) 沿岸域及び内水面における漁業生産への影響評価と適応技術の開発

藻場の分布への温暖化の影響については、藻場を構成する海藻・海草の生長及び成熟の限界温度データ等の生理パラメータを高精度に決定し、温暖化シナリオによる水温予測に基づき藻場分布の予測を行った。さらに、藻場における餌料供給機構として重要な葉上の付着藻類群集についてのモニタリング調査を行い、温暖化が付着藻類群集を起点とした藻場の餌料供給機能に及ぼす影響を検討した。

温暖化の影響が顕在化している暖流域藻場生態系については、既往資料やモニタリングデータにより海洋環境変化が藻場とそれを餌料として利用する磯根資源に与える影響を評価するとともに、藻場生態系に関する一次生産力モデルの高度化に取り組み、水温上昇予測に基づく藻場生態系の変化及び磯根資源への影響予測を行った。これにより持続的な磯根資源の利用のための適応策を検討し、提言した。

養殖魚については、高温の生理的影響を魚類生理学、内分泌学などの側面から多角的に捉えることに

より、高温下での摂食抑制機構を解明し、高消化吸収率飼料開発、高温ストレス低減技術開発を進め、高温化の影響を低減する適応技術の開発を試みた。特に北日本で養殖が期待されるマツカワ、西日本での最重要養殖魚であるブリなどをモデル魚種とし、他魚種にも適用可能な新規飼料の開発、個体変異幅を積極的に利用した選別による高温耐性群の作製法の検証及び実用化を目指した。

内水面の漁業生産については、湖沼における温暖化による水温上昇や全循環の遅延などの環境変化を予測するため湖沼水温予測モデルを高度化し、湖沼の温暖化要因抽出、周辺環境整備による水温上昇抑制の可能性を検討した。漁業資源として琵琶湖の固有種であるイサザと諏訪湖の重要漁業種であるワカサギを対象に、生態、資源変動と湖沼環境、餌料環境との関係把握・モデル化し、温暖化の進行にともなう仔魚期に生じる餌動物プランクトン発生とのミスマッチや成魚期に生じる生息環境悪化などが漁業生産へ与える影響を定量的に把握し、影響を軽減するための適応技術を開発した。

研究計画表（研究室別年次計画）

研究課題	研究年度					担当研究機関・研究室	
	10	11	12	13	14	機関	研究室
1 水産分野における温暖化緩和技術の開発 (1) 日本周辺海域（排他的経済水域）における二酸化炭素フラックスの高精度算定と変動機構の解明 1) 漁業調査船の活用による日本周辺海域表層二酸化炭素分圧モニタリングシステムの構築						水産総合研究センター北海道区水産研究所 水産総合研究センター東北区水産研究所 水産総合研究センター中央水産研究所	海洋環境部 資源海洋部 海洋・生態系研究センター

2) 衛星・再解析データを用いた高時空間分解能二酸化炭素分圧グリッドデータの作成手法の開発	←→	国立環境研究所	地球環境研究センター
(2) 日本周辺海域の高解像度炭素・窒素循環モデルの開発			
1) 日本周辺海域の高解像度炭素・窒素循環モデルの開発	←→	北海道大学	地球環境科学研究院
(3) 漁獲操業・水揚げ行為における二酸化炭素排出量の推計と削減のための漁港整備条件の解明			
1) 漁船漁業の漁獲・水揚げ過程における二酸化炭素排出量の推計	←→	水産総合研究センター水産工学研究所	漁業生産工学部
2) 漁船漁業における水揚げ地選択の実態と二酸化炭素排出量削減に向けた漁港整備課題の抽出	←→	水産総合研究センター中央水産研究所	経営・経済研究センター
3) 亜寒帯域におけるサンマ等の漁場形成に地球温暖化が与える影響の解明	←→	漁業情報サービスセンター	事業2課
2 地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発			
(1) 我が国周辺海域における低次生態系モニタリングと影響評価			
1) 親潮・混合域の低次生態系モニタリングと影響評価	←→	水産総合研究センター東北区水産研究所	資源海洋部
	←→	水産総合研究センター北海道区水産研究所	生産環境部
	←→	水産総合研究センター中央水産研究所	海洋・生態系研究センター
2) 黒潮域の低次生態系モニタリングと影響評価	←→	水産総合研究センター中央水産研究所	海洋・生態系研究センター
3) 東シナ海域の低次生態系モニタリングと影響評価	←→	水産総合研究センター西海区水産研究所	資源海洋部

<p>(2) 沖合域を回遊する漁業資源への影響評価と適応技術の開発</p> <p>1) 海洋生態系モデルを用いた餌料環境と浮魚類の温暖化影響評価モデルの開発</p>					水産総合研究センター西海区水産研究所	有明海・八代海漁場環境センター
					水産総合研究センター西海区水産研究所	資源生産部
					水産総合研究センター東北区水産研究所	資源海洋部
					水産総合研究センター西海区水産研究所	亜熱帯研究センター
					水産総合研究センター中央水産研究所	海洋・生態系研究センター
					愛媛大学沿岸環境化学研究センター	環境動態解析部門
					東京大学	大学院新領域創成科学研究科
					漁業情報サービスセンター	事業2課
	<p>2) 日本系サケ資源への温暖化影響予測と対応技術の開発</p>				水産総合研究センター北海道区水産研究所	さけます資源部
					水産総合研究センター北海道区水産研究所	生産環境部
				北海道大学水産科学研究院	海洋生物資源科学部門海洋環境学分野	
<p>3) 日本海主要漁業資源の海洋生態系モデルによる温暖化影響予測と適応策の開発</p>				水産総合研究センター日本海区水産研究所	資源管理部	
				水産総合研究センター日本海区水産研究所	資源環境部	

<p>(3) 沿岸域及び内水面における漁業生産への影響評価と適応技術の開発</p> <p>1) 藻場の分布と餌料供給機能に及ぼす温暖化の影響評価</p> <p>2) 暖流域の藻場生態系への温暖化の影響評価と適応技術の開発</p> <p>3) 高温化の魚類増養殖業に与える影響を低減化する対処技術の開発</p> <p>4) 湖沼の漁業生産に対する影響評価と漁業生産安定化を目指した適応技術の開発</p>																					

						信州大学山岳科学 総合研究所	山地水環境保全学 部門 環境科学部環境生 態学科 諏訪支場
						滋賀県立大学	
						長野県水産試験場	
						滋賀県水産試験場	

注) 文中の図、表に付した番号は、上記研究課題番号と其中の一連番号を組み合わせで表示してある。(例：1-(1)-1)の課題の1番目の図の場合は、図111-1と表示。)

VI 研究結果

1 水産分野における温暖化緩和技術の開発

(1) 日本周辺海域（排他的経済水域）における二酸化炭素フラックスの高精度算定と変動機構の解明
 漁業調査船を用いた日本周辺海域の pCO_2 観測を実施し、延べ3年間分の pCO_2 データを蓄積した。これにより、日本 EEZ 内の pCO_2 観測密度は課題開始前のほぼ3倍に向上した。取得データを国際統合 pCO_2 データベース SOCAT の ver.2 データとして公開するとともに、取得データの解析から日本 EEZ 水域における pCO_2 の小時間スケール変動特性を把握した。また仙台湾、東京湾、伊勢湾の3海域において、陸域における人工林に相当する、陸域栄養塩起源の海域炭素吸収量の算定を行った。各内湾域で炭素固定のために消費される陸域起源の栄養塩量は、各湾への栄養塩負荷量の 11%～69% になる事が判った。陸域栄養塩の湾内における利用効率に大きな差が出る要因を今後解析する事で、沿岸域における陸域栄養塩由来の炭素吸収量を増加させるための方策が導き出される可能性がある。漁業調査船で取得した pCO_2 データと SOCAT 収録データを利用して、JCOPE の水温、塩分、混合層深度データ及び MODIS-Aqua によるクロロフィル濃度分布から、ニューラルネットワーク手法を用いて日本 EEZ 水域における pCO_2 の面的な分布をグリッドデータとして推定する手法を開発した。このグリッドデータに基づき、日本 EEZ 水域の年間 CO_2 吸収量が $51 \pm 6 \text{ TgC/y}$ と極めて正確に見積もられた。この値は先行する農林水産技術会議委託プロジェクト（森林、海洋等における CO_2 収支の評価の高度化：1999～2002年度）で見積もられた

吸収量の 1.7 倍の数値であり、当該海域が炭素循環についてこれまで考えられてきたよりも大きな役割を果たしていることが示された。また pCO_2 グリッドデータの年々変動の解析から、日本 EEZ 水域の CO_2 吸収量が PDO 周期に対応して増減していることが初めて確認された。

(2) 日本周辺海域の高解像度炭素・窒素循環モデルの開発

1/4度×1/6度メッシュの空間解像度を持つ、日本周辺海域の高精度炭素・窒素循環モデル COCO-MEM を開発し、鉄過程の導入・ CO_2 フラックスの風速依存性導入等の改良を行った結果、従来にない高精度で日本近海の炭素循環の再現に成功した。モデルで再現された海表面 pCO_2 の季節変動は、観測課題で得られた pCO_2 グリッドデータと非常に良く一致した。また、開発されたモデルを用いて、 CO_2 ガス交換係数の季節変動が大気海洋間 CO_2 フラックスに与える影響を明らかにした。

(3) 漁獲操業・水揚げ行為における二酸化炭素排出量の推計と削減のための漁港整備条件の解明

さんま棒受網漁業の小型船、中型船及び大型船の航海時・操業時の燃油使用量を定量化し、漁船規模別の CO_2 排出量の算定モデルを確立した。魚倉積載量が多い大型船が単位水揚げ量当たりの CO_2 排出原単位は小さく、航海距離が大きくなるほどトン数クラス間の原単位の違いが大きくなる事を定量的に明らかにした。さんま棒受網漁船の総トン数階層別、季節別の行動パターンを類型化し、水揚げ港選択を規定している社会経済的・技術的諸要素を抽出した。近年のサンマ漁場と海水温の関係を元に、温暖化時に予想されるサンマの漁場位置、漁期の変化

を推定し、その条件下での水揚げ港の選択による二酸化炭素排出量の削減量を試算した。またそのような漁港選択を可能にするために必要な三陸地域における漁港インフラを抽出した。

2 地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発

(1) 我が国周辺海域における低次生態系モニタリングと影響評価

A-line、O-line 及び CK-line において海洋モニタリング調査を継続実施し、データベースを構築した。親潮・混合域である A-line では、親潮域の上部混合層深度は浅化傾向が見られた。また、リン酸塩濃度は約 20 年の周期的な変動を示していた。水産資源の主要な餌料（動物プランクトン）である *Neocalanus* 属カイアシ類の 3 種 (*N. cristatus*、*N. flemingeri*、*N. plumchurs*) らの現存量は、親潮域では *N. flemingeri* と *N. cristatus* の現存量が 1990 年代以降から高水準を維持した一方、*N. plumchurs* は 1980 年代に減少していた。*N. cristatus*、*N. plumchurs* とリン酸塩濃度は有意な正の関係を示しており、一次生産との関連が示唆された。

黒潮域は浮魚類の産卵域を含み、仔稚魚の成長・生残にも重要な海域である。しかし、生態系モデルの再現性、特に餌料となる動物プランクトンの再現性が他海域に比べて悪かった。その一因として現場データの時間解像度が低いことが考えられたため、静岡県を試料を解析して月レベルの季節変動を検討した。その結果、カイアシ類の個体数は 2 月～4 月にかけて各サイズ画分とも 2～4 倍に増えることが明らかとなった。なお、生態系モデル (e-NEMURO の黒潮内側域ボックスモデル) の増加のタイミングは概ね一致していたが、増加率は各年 5 倍程度であり、現場データと比較して過大であることが示された。

東シナ海では、2 μ m 以下の小型の植物プランクトンが優占していた。なお、PS (2 μ m 以下のサイズの植物プランクトン) の割合は、観測結果では 72% であり、低次生態系モデル (eNEMUROver. 3. 2) の出力結果 (50% 程度) よりも高い値であった。

(2) 沖合域を回遊する漁業資源への影響評価と適

応技術の開発

渦解像 3 次元低次生態系モデル CHOPE-eNEMURO (ver. 3. 2) を利用して 2060 年までの地球温暖化影響予測実験を実施した。その結果、餌料プランクトンは混合域、黒潮域、東シナ海陸棚域では減少することが予想されたが、北海道沿岸の親潮域や東シナ海海盆域では増加する可能性が示された。

北西太平洋におけるサンマへの温暖化の影響として、アンサンブル実験の結果から、73% の確率でサンマの体重減少が生じることが示された。一方、サンマの産卵量については 33% の確率で生じる結果が得られた。なお、水温と餌料の影響を分離して評価した結果、水温上昇は幼魚の成長に影響し、特に混合水域の水温が影響することが示されたのに対し、餌料の減少は成魚の体重、そして回遊パターン、産卵量に影響することが示された。

北海道系サケでは、IPCC の A1B シナリオによるシミュレーションでは、2050 年以降に、回帰尾数への悪影響が生じる可能性が高い予測結果が得られた。また、温暖化による影響予測を基に、「放流量増加はマイナス面が強く、対応策としては不相当」「最適な放流サイズやタイミングの地域ごとの見直しが重要」等の適応策を提言できた。

日本海では、MIROC による IPCC の温暖化シナリオ A1B に基づき、渦解像海洋大循環モデルを用いて水温・流動場の予測を行った結果、対馬暖流流量の経年変化の有無に関わりなく、約 4 $^{\circ}$ C 上昇すると予測された。低次生態系モデル (NEMURO) による温暖化予測計算では、温暖化の進行とともに、植物プランクトンの生産量の減少と、小型化が予測された。また、日本海 (対馬暖流域) では、水温が高くなると大型魚の比率が高くなる特徴があることから、温暖化が進行すると、高次捕食者を対象とする漁業 (例えば定置網) にプラスの影響が出ることが予想された。

(3) 沿岸域及び内水面における漁業生産への影響評価と適応技術の開発

日本海沿岸域では、A1B シナリオによる温暖化の藻場への影響を、褐藻コンブ目の温度特性に分散能力も考慮して予測した。その結果、今世紀中には、日本海沿岸での生育が困難になる可能性が示された。特にコンブ目藻類は有性生殖による分散範囲

が狭いため、分布の南限付近では、限界水温帯の高緯度方向への移行に対応できず、地域個体群としては絶滅する可能性が示された。

西日本沿岸域では、水温上昇と共に藻場の構成種が変化し、温帯性コンブ類と温帯性ホンダワラ類の藻場から温帯性ホンダワラ類のみの藻場、さらに小型海藻もしくは温帯性ホンダワラ類の一部と亜熱帯性ホンダワラ類から構成される春藻場へと変化した。西日本沿岸域の藻場に対する温暖化への適応策としては、水温上昇と共に活性化する植食魚の影響が比較的小さい春藻場の造成が提言された。なお、春藻場は冬～春季には、従来の四季藻場と同等の生産量、夏～秋季にも比較的高い生産量を示しており、有効性に関する知見も得られた。

養殖魚では、高水温飼育による影響として、ニジマス(22℃)では成長遅滞、飼料効率及び摂餌率の低下が見られた。ブリでは高水温飼育(30℃)によって成長・飼料効率の低下と肝肥大や脂肪肝様の組織変性が見られた。肝肥大などの生理異常は、高タンパク低脂質の飼料を用いると改善したため、飼料配合の見直しが高水温対策として効果的であることを指摘できた。また、マダイ幼魚にアスコルビン酸(AsA)含有飼料を給餌すると、高温で見られるストレス症状の改善が見られた。しかし、高濃度(17500 ppm)では水温上昇によって悪影響(成長・飼料効率の低下)が顕在化しやすいことが明らかとなった。

内水面では、ふ化時期の水温が4℃上昇するとワカサギ個体群が減少すると予測された。また、琵琶湖のイサザに与える影響として、温暖化の進行に伴う貧酸素化によるイサザ資源の減少が懸念された。温暖化への適応策として、ワカサギでは、水温上昇に伴う餌プランクトンとのふ化時期とのミスマッチを回避する適期放流技術が有効と考えられ、そのための簡易給餌放流技術(鶏糞による施肥で初期餌料のプランクトンを培養する技術)を開発した。また、イサザについては湖底の貧酸素化の影響の少ない北湖南部に新たな産卵場所を造成する技術(人工産卵基質を使用した産卵場造成技術)を開発した。

VII 今後の課題

日本 EEZ 水域における小時間スケールの $p\text{CO}_2$ 変動が、EEZ 全体の CO_2 吸収量の変動に与える影

響について、観測を継続して明らかにする必要がある。沿岸域では解析が行われた3湾以外での陸域栄養塩起源の炭素吸収量推定を進める必要がある。三陸地域のサンマ棒受け網漁業の復興に際し、本課題で得られた知見を踏まえ、燃油効率の増加及び CO_2 排出量削減の観点からも有効なインフラ整備の提言を行っていく必要がある。

温暖化の影響を把握するには、実際の変化をモニタリングしていくことが重要であり、今後も継続した調査が必要である。また、モニタリングによる検証データセットの蓄積は、生態系モデルのパラメータの調整による予測精度向上に不可欠であり、水産資源の影響評価精度向上においても重要となる。また、水産資源(生物)の水温と成長・分布に関するデータも、温暖化予測の精度向上に必要であり、飼育実験等を用いてさらに蓄積していく必要がある。加えて、温暖化による水産業への影響を評価するには、水産資源(生物)の変化が与える漁業現場(産業)への影響を把握する手法を開発・高度化させる必要がある。

沿岸域の藻場においては、仮定した移動範囲の条件によっては地域的に絶滅する予測となったが、仮定した条件の信頼性を今後、検証していく必要がある。また、西日本における藻場の適応策として提言した春藻場造成については、春藻場の形成条件の抽出が、今後の適応策の構築には必要となる。養殖業では、今回得られた情報を元に有効な適応策に発展させると共に、その技術を現場に普及させることが重要な課題として残された。内水面では有効な適応技術が開発されており、この技術をワカサギ及びイサザに留まらず、温暖化によって同様の影響が想定される他の内水面漁業にも応用していくことが求められる。

VIII 研究発表

- 1) 阿見彌典子・瀬戸悠生・天野勝文・高橋明義・安藤忠(2010) オレキシン測定法の確立とマツカワへの応用. 日本水産学会秋季大会講要. pp52.
- 2) 阿見彌典子(2010) 魚類における摂食調節機構の多様性. 第35回日本比較内分分泌学会大会プレイングシンポジウム.
- 3) 阿見彌典子・高橋明義・天野勝文(2010) メダカの摂餌行動と脳内オレキシン量の関連. 第35回

- 日本比較内分泌学会大会.
- 4) Andoh T. et al. (2010) How do we reduce the impact of global warming on aquaculture?. The 39th Scientific Symposium of UJNR Aquaculture Panel.
 - 5) 安藤忠・村上直人・白藤徳夫 (2010) 高温耐性を持った養殖魚を作る. 環境機関連絡会議第8回成果発表会.
 - 6) 東屋知範・永沢亨・斎藤寿彦・黒田寛・阿部祥子 (2013) 海況モデルで推定されたサケ幼稚魚の回遊経路. 日本水産学会北海道支部大会.
 - 7) Bakker, D.C.E. et al. (2014) An update to the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT version 2). *Earth Syst. Sci. Data* 6, 69-90. doi: 10.5194/essd-6-69-2014
 - 8) Ban S. (2015) Top-down control in Lake Biwa zooplankton community. USP-UST Aquatic Biology Symposium.
 - 9) Ban S., Dur G., Doi E., Oomae S., Morita T., and Y. Sakai (2011) Long-term data sets of crustacean zooplankton in Lake Biwa from 1962 to 2010. BioAsia FACICLE Kick-off meeting. Thonon-les-Bains. pp24-26.
 - 10) Ban S., Endoh S., Doi E. and Sakai Y. (2010) Potential effect of top-down control by commercially important fish on long-term trend of zooplankton community in Lake Biwa. International Workshop, Climate change impacts on estuarine and coastal ecosystems: a zooplankton perspective, Boulogne sur Mer, France.
 - 11) Ban S., Endoh S., Ohkawa S., Umekage T., Hirahara F., Doi E. and Sakai Y. (2012) Potential effect of fish predation on crustacean zooplankton community in Lake Biwa. ASLO 2012 summer meeting.
 - 12) 伴真俊・中島歩・飯田真也 (2015) 耳石温度標識放流に基づくサケ稚魚の放流適期とサイズ. 平成 27 年度日本水産学会春期大会.
 - 13) Chiba S. et al. (2010) Status and trends of the Oyashio region, 2003-2008. *Marine Ecosystems of the North Pacific Ocean, 2003-2008*, S. M. McKinnell and M. J. Dagg, Eds., PICES, 300-329.
 - 14) Chiba S., Sugisaki H., Kuwata A., Tadokoro K., Kobari T., Yamaguchi A. and Mackas D. (2012) Pan-North Pacific comparison of long-term variation in *Neocalanus* copepods based on stable isotope analysis. *Prog. Oceanogr.* 97-100: 63-75.
 - 15) Dur G., Ban S., Beyrend-Dur D., Doi E., Xin R., Hsieh CH. and Souissi S. (2013) *Eodiaptomus japonicus* response to changes in trophic status and thermo-regime of Lake Biwa. International Conference on Challenges in Aquatic Sciences.
 - 16) Dur G., Hsieh C.H., Ban S., Souissi S. and Sugihara G. (2012) Zooplankton responses to environmental forcing in Lake Biwa. ASLO 2012 summer meeting.
 - 17) Dur G., Ban S., Souissi S., Doi E., Oomae S., Morita T. and Sakai Y. (2011) Multiscale temporal variability of *Eodiaptomus japonicus* in Lake Biwa. 5th International Zooplankton Production Symposium. pp14-18.
 - 18) Frank A.W., Bograd S., and Ono T. (2012) Ocean deoxygenation and nutrient redistribution: subarctic Pacific perspective, Montreal, Canada.
 - 19) Frank A.W., Bograd S., and Ono T. (2012) Implications of subsurface nutrient increases in the subarctic Pacific Ocean, Yeosu, Korea.
 - 20) 藤井直紀・郭新宇・吉江直樹・小森田智大・武岡英隆 (2011) 宇和海沿岸域における鉛直水温分とその変動. 2011 年度日本海洋学会秋季大会.
 - 21) 藤井直紀・吉江直樹・郭新宇・小森田智大・武岡英隆 (2011) 瀬戸内海西部におけるミズクラゲ発生予測の試み～宇和海水温情報システムから. 九州大学応用力学研究所共同研究集会「沿岸海域の物質循環と環境保全」.
 - 22) 五味泰史・佐々木宏明・西内耕・清本容子・長谷川徹・岡慎一郎 (2011) 東シナ海におけるナノ鞭毛虫の現存量、栄養形式組成および細胞体積の時空間的变化 2011 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集. p162.
 - 23) 花里孝幸・長田貴丸 (2011) 湖水中の生き物の世界とそれに影響を与える地球温暖化. 四万十流域圏学会誌. 10 : 9-12.
 - 24) Hasegawa T., Kasai H., Ono T., Tsuda A. and Ogawa H. (2010) Dynamics of dissolved and

- particulate organic matter during the spring bloom in the Oyashio region of the western subarctic Pacific Ocean. *Aquat. Microb. Ecol.* 60: 127-138.
- 25) Hashioka T. et al. (2010) Potential impact of global warming on North Pacific spring blooms projected by eddy-permitting 3-D ocean ecosystem model International Symposium Climate Change Effects on Fish and Fisheries: Forecasting Impacts, Assessing Ecosystem Responses, and Evaluating Management Strategies. Program and Abstracts. pp.195.
- 26) 長谷川勝男 (2011) さんま棒受網漁船の行動分析と燃油消費. *海洋水産エンジニアリング*. 99 : 51-56.
- 27) 長谷川徹 (2012) 東部東シナ海表層における一次生産の季節変化. 名古屋大学研究集会.
- 28) 長谷川徹・五味泰史・佐々木宏明・清本容子・岡村和磨・西内耕 (2010) 東シナ海 (CK ライン) における夏季の海洋環境および低次生態系モニタリング. 名古屋大学地球水循環研究センター共同研究集会.
- 29) Hasegawa T., Gomi Y., Sasaki H., Kiyomoto Y., Okamura K. and Nishiuchi K. (2012) Seasonal variation of primary production at the surface in the east part of the East China Sea. ASLO Aquatic sciences meeting.
- 30) 長谷川徹・清本容子・五味泰史・佐々木宏明・東博紀・越川海 (2012) 東シナ海の渦鞭毛藻 *Prorocentrum dentatum* の優占化と維持機構: 調査船による観測結果の解析. 2012 年度日本海洋学会春季大会講演要旨.
- 31) 幡野真隆・上野世司 (2015) 琵琶湖固有種イサザ仔魚の鉛直分布様式. 日本水産学会春季大会.
- 32) 廣江豊・塩本明弘・市川忠史・渡邊朝生・安田一郎・小松幸生 (2010) 御前崎沖定線 (O-line: 138E 線) に見られる高栄養塩帯について、2010 年度日本海洋学会秋季大会.
- 33) 廣江豊・市川忠史・塩本明弘・渡邊朝生・安田一郎・小松幸生 (2012) The distribution and the seasonal variability of the nutrient on the O-line (138E-line). PICES 年次会合要旨集.
- 34) 廣江豊・市川忠史・塩本明弘・渡邊朝生・安田一郎・小松幸生 (2012) 御前崎沖定線 (O-line: 138E 線) における栄養塩分布構造の季節・年々変動. 日本海洋学会秋季大会.
- 35) 廣田将仁 (2011) 東日本大震災による主要水産加工集積地被害と今後への課題. 日本フードシステム学会.
- 36) Hidaka, K. and Nakata K. (2010) Interannual variations of the planktonic ecosystem in the slope water and Kuroshio south of Japan in February in the years 1990-2002. *J. Oceanogr.* 66: 741-753.
- 37) 日高清隆・野々村卓美・小松幸生・伊藤幸彦・安田一郎・池谷透・木村伸吾 (2012) Distribution of calanoid copepods of the genus *Paracalanus* around the Izu Ridge, south of Japan, and extent of 'island mass effect' in the region. PICES 年次会合要旨集.
- 38) 日高清隆・野々村卓美・小松幸生・伊藤幸彦・安田一郎・池谷透・木村伸吾 (2012) 伊豆海嶺周辺海域におけるパラカラヌス属カイアシ類の空間分布と島陰効果の影響. 水産海洋学会研究発表大会.
- 39) 日高清隆・杉崎宏哉・市川忠史・森永健司・廣江豊 (2010) 本州南方海域東部における1月の低次生産構造. 2010 年度水産海洋学会.
- 40) 日高清隆・杉崎宏哉・市川忠史・廣江豊・栗山美樹子 (2011) 本州南方海域における春季ブルームの推移と動物プランクトン群集構造. 2011 年度水産海洋学会.
- 41) Hollowed A.B., Barange M, Ito S., Kim S., Leong H. and Peck M.A. (2011) Effects of climate change on fish and fisheries: forecasting impacts, assessing ecosystem responses, and evaluating management strategies. *ICES J. Mar. Sci.* 68: 984-985.
- 42) 星河廣樹・沢本良宏・築坂正美・宮本幸太・河野成実・花里孝幸・君島祥 (2015) 諏訪湖におけるワカサギのふ化日と初期餌料との関係について. ワカサギに学ぶ会.
- 43) Ibe K., Magata T. and Hanazono T. (2011) Experimental analysis of the predation impact of the larvae of pond smelt (*Hypomesus transpacificus*) on zooplankton populations

- established in mesocosmos. *Limnology* 12: 169-174.
- 44) Ichikawa, T. and H. Sugisaki (2010) Long term variations of abundances and size compositions of copepod communities off southern Japan using bench-top Video Plankton Recorder system (B-VPR). PICES 2010 Annual Meeting.
- 45) 市川忠史・日高清隆・杉崎宏哉 (2013) 卓上型 VPR による動物プランクトン標本の大量解析. プランクトン学会シンポジウム.
- 46) 市川忠史・日高清隆・黒田寛・廣田祐一・中田薫 (2011) 黒潮域における餌料プランクトン現存量の長期変動. 2011 年度日本海洋学会秋季大会.
- 47) 市川忠史・日高清隆・杉崎宏哉・廣田祐一・栗山美樹子・中田薫 (2011) 黒潮域における低次生態系の経年変化. 2011 年度資源海洋研究会.
- 48) Ichinomiya, M., S. Yoshikawa, M. Kamiya, K. Ohoki, S. Takaichi, and A. Kuwata, (2010) Isolation and characterization of parmales (heterokonita・heterokontophyta・stramenopiles) from the Oyashio region, western North Pacific. *J. Phycol.* 46, DOI: 10.1111/j. 1529-8817. 2010. 00926. x.
- 49) 一柳昌史・鈴木秀和・南雲保・田中次郎 (2012) 千葉県館山産の紅藻サンゴモ類に付着する珪藻類. 日本珪藻学会第 32 回研究集会 (広島県廿日市).
- 50) Igeta Y., Watanabe T., Kidokoro H. and Yamazaki K. (2012) Effect of in/out flow on inter-annual variation of circulation in the Japan Sea found in numerical experiments based on global warming. Abstract OS21A-1665 presented at 2012 Fall Meeting.
- 51) Ishida Y., Adachi Y., Yagi K., Tadokoro K. and Geiger HJ. (2010) Archeological evidence implies that global warming will shift Japanese chum salmon distributions northward. International Symposium Climate Change Effects on Fish and Fisheries. Program and Abstracts. PP. 225.
- 52) 井上美幸・花里孝幸 (2011) 魚の情報化学物質がミジンコの性質を変える. 日本陸水学会甲信越支部会.
- 53) Ishii O., Suzuki H., Nagumo T. and Tanaka J. (2011) A new brackish diatom, *Pinnularia sakurajimensis* O.Ishii & Ji Tanaka from Japan. *Diatom* 27: 9-16.
- 54) Ito M., Watanabe Y., Tanaka S., Ono T., Nishioka J. and Nakatsuka T. (2010) The estimate of the denitrification using nitrogen gas excess in the Sea of Okhotsk. AGU 2010 Fall Meeting.
- 55) 伊藤進一 (2010) 低次生態系モデル NEMURO の開発の歴史. 水産資源管理談話会報. 44 : 1-20.
- 56) Ito S. (2011) Modelling fish response to climate forcing. 45th CMOS Congress Abstracts.
- 57) 伊藤進一 (2011) 地球温暖化による海洋環境の変化と海洋生態系への影響. 日本付着生物学会シンポジウム「環境変動と付着生物」講演要旨集. pp. 6-8.
- 58) 伊藤進一 (2012) 生活史モデルへの活用. 日本水産学会誌. 78 : 803.
- 59) 伊藤進一 (2012) 黒潮・親潮混合域の環境変動のメカニズムと魚類資源に及ぼす影響に関する研究. 2012 年度 水産海洋学会創立 50 周年記念大会.
- 60) 伊藤進一 (2013) 繁殖パラメータの生活史モデルへの活用. 水産学シリーズ, 恒星社厚生閣 pp. 22-34.
- 61) Ito S. et al. (2010) Application of an automatic approach to calibrate the NEMURO nutrient-phytoplankton-zooplankton food web model in the Oyashio region. *Progr. Oceanogr.* 87: 186-200 (doi: 10. 1016/j. pocean. 2010. 08. 004).
- 62) Ito S. et al. (2011) Application of an automatic approach to calibrate the NEMURO nutrient-phytoplankton-zooplankton food web model in the Oyashio region. PICES-2011 Program & Abstracts. pp. 117.
- 63) Ito S., Okunishi T., Kishi M. and Wang M. (2010) Potential impact of climate change on Pacific saury. Program and Abstracts of International Symposium "Climate Change Effects on Fish and Fisheries: Forecasting Impacts, Assessing Ecosystem Responses, and Evaluating Management Strategies". pp. 57.
- 64) Ito S., Okunishi T., Kishi M.J. and Wang M. (2010) Projection of Pacific saury response to

- future climate change. PICES-2010 Abstracts. pp. 16.
- 65) Ito S., Okunishi T., Kishi M.J. and Wang M (2011) Evaluation of uncertainty of Pacific saury (*Cololabis saira*) responses to future climate change. 2nd ESSAS Open Science Meeting Abstracts. pp. 153.
- 66) Ito S., Shimizu Y., Kakehi S., Wagawa T., Kusaka A. and Sato M. (2010) Seasonal variation of the Oyashio transport compared with the Alaskan Stream. PICES-2010 Program and Abstracts. pp. 144.
- 67) Itoh S., Shimizu Y, Ito S. and I. Yasuda (2011) Evolution and decay of a warm-core ring within the western subarctic gyre of the North Pacific, as observed by profiling floats. *J. Oceanogr.* 67: 281-293.
- 68) Ito S., Sato M., Terui T., Kishi M., Ambe D., Kameda T., Suyama S., Nakagami M. and Ueno Y. (2011) Euler-type and Individual Based modeling approaches for fish migration: an example of Pacific saury. PICES-2011 Program & Abstracts. pp. 102.
- 69) 伊藤進一・清水勇吾・笥茂穂 (2010) 親潮第一分枝の長期変化. *東北底魚研究*. 30 : 73-79.
- 70) 伊藤進一ら (2013) 沖合と沿岸が密接に関係する東北海域での海洋環境モニタリングの有効性と現在の試み. 沿岸環境関連学会連絡協議会第28回ジョイントシンポジウム.
- 71) 伊藤幸彦・清水勇吾・伊藤進一・安田一郎 (2010) 北海道沖を北上する高気圧渦の構造・水塊特性変動. 2010年度日本海洋学会秋季研究発表大会講演要旨.
- 72) 伊澤智博・花里孝幸 (2011) バイオマニピュレーションを行った湖におけるプランクトンに依存したオオクチバスの食性. *日本陸水学会*.
- 73) 亀田卓彦 (2010) 東シナ海の生産力. *水産海洋研究*. 74 : 217-218.
- 74) 亀田卓彦 (2011) 親潮・混合水域における海面クロロフィル a 濃度の季節変動. *日本リモートセンシング学会第51回 (平成23年度秋季) 学術講演会論文集*. pp. 227-228.
- 75) 亀田卓彦 (2012) 海面クロロフィル a 濃度から見たブルージング時期の変遷. *水産海洋研究*. 76 : 215-216.
- 76) 亀田卓彦・増島雅親・瀬藤聡 (2011) 琉球列島周辺海域における海洋環境の経年変動. 2011年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集. pp. 75.
- 77) 亀田卓彦・瀬藤聡 (2010) 琉球列島周辺海域における海洋環境の季節変動. 2010年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集. pp. 96.
- 78) 葛西広海・小埜恒夫 (2012) 水産総合研究センターによるオホーツク海南西部の海洋環境調査. *月刊海洋*. 44(9): 524-530.
- 79) Kenneth R. et al. (2011) Progress on the development of a climate-to-fish-to-fishers model: simulating the long-term population dynamics of anchovies and sardines in the California Current. AMEMR 2011.
- 80) 木所英昭 (2011) 1990年代以降の我が国日本海沿岸域におけるスルメイカ漁獲量の減少について. *水産海洋研究*. 75 : 205-210.
- 81) Kidokoro H., Yamashita N., Goto T. and Tian Y. (2010) Changes in the stock size and lifehistory traits of Japanese common squid *Todarodes pacificus* in relation to climate changes, with special comparison between in the Kuroshio-Oyashio currents region and the Sea of Japan. Program and Abstract of International Symposium on Climate Change Effects on Fish and Fisheries.
- 82) 岸克彦・鈴木秀和・南雲保・田中次郎 (2010) 管状群体を形成する海産珪藻 *Parlibellus* とそれに付着する珪藻類. *日本珪藻学会第30回研究集会 (福岡県福岡市)*.
- 83) Kishi M.J. (2012) Discussions on random walk and behavioral movement models coupled with NEMURO.FISH; case study on chum salmon and saury. PICES 2012 Annual meeting.
- 84) Kishi M.J., Awa K., Miwa T. and Nagasawa T. (2011) Ecosystem approach for management of artificial release of chum salmon from Japan based on a bioenergetic model coupled with NEMURO. NPAFC International Workshop on Explanations for the High Abundance of Pink and Chum Salmon and Future Trends.

- 85) Kishi M.J., Awa K., Miwa T., Ueno H. and Nagasawa T. (2012) Ecosystem approach for management of artificial release of chum salmon from Japan based on a bioenergetic model coupled with NEMURO. NPAFC Technical Report. 8: 117-120.
- 86) Kishi M.J., Ito S., Megrey BA., Rose KA., Werner FE. (2011) A review of the NEMURO and NEMURO.FISH models and their application to marine ecosystem investigations. *J. Oceanogr.* 67: 3-16 (doi 10. 1007/s10872-011-0009-4).
- 87) 岸道郎・三輪剛・上野洋路・永沢亨 (2013) 北海道からシロザケは何尾放流したらよいか、モデルで考える。2013年度日本水産海洋学会発表大会。
- 88) Kiyomoto S. et al. (2012) Decrease of abalone resources with disappearance of macroalgal beds in Ojika Islands, Nagasaki, south-western Japan. The 8th International Abalone Symposium.
- 89) 清本節夫 (2011) 長崎県橘湾沿岸の転石海岸におけるムラサキウニの個体群動態、特に台風が及ぼす影響について。日本ベントス学会誌。66: 48-60.
- 90) 清本節夫・吉村拓・八谷光介・村上恵祐・木村量・丹羽健太郎 (2011) クロアワビとメガイアワビの高水温下における放卵・放精の抑制。平成23年度日本水産学会春季大会。
- 91) 清本節夫・吉村拓・八谷光介・中嶋泰 (2011) 飼育環境下におけるガンガゼ類稚ウニの成長。平成23年度日本水産学会春季大会。
- 92) 清本節夫ら (2011) コレクターによるアワビ類着底初期稚貝の採集時期。日本水産学会秋季大会。
- 93) 清本節夫ら (2011) コレクターによるアワビ類着底初期稚貝の採集数と翌年度の当歳貝密度との関係。日本水産学会秋季大会。
- 94) 清本節夫ら (2012) 異なる飼育水温下でのクロアワビとメガイアワビの成熟と成長。日本水産学会秋季大会。
- 95) 清本節夫ら (2012) 野外実験によるイスズミ類摂餌選択性推定の試み。日本水産学会秋季大会。
- 96) 清本容子・長谷川徹・秋山秀樹・岡村和磨・西内耕・岡慎一郎・五味泰史・佐々木宏明・越川海・東博紀 (2013) 東シナ海長江希釈水影響域における低次生態系の変調と長江からの栄養塩負荷変動との関連把握。水産海洋学会誌。77(1): 26-27.
- 97) 小林宏樹・花里孝幸 (2012) Cyclopoidと温度上昇が動物プランクトン群集に与える複合影響。日本陸水学会第77回大会。
- 98) 児玉武稔・市川忠史・日高清隆・清水勇吾・廣江豊・日下彰・宇田川徹・徳永貴久 (2013) 黒潮周辺海域における栄養塩濃度の季節変動。日本海洋学会春季大会。
- 99) 小松幸生 (2010) 既往データに見られる黒潮流軸に沿った高栄養塩構造について。2010年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集。pp. 35.
- 100) Komatsu K. (2011) Accurate and sustained monitoring of offshore wind-waves using surface drifters with a low-cost GPS wave sensor. Abstract 3527 presented at XXV IUGG General Assembly.
- 101) 小松幸生 (編著) (2011) 自然環境学の創る世界。朝倉書店、東京。pp206.
- 102) Komatus K., Yoshie N., Hasegawa T. and Shimizu. (2011) Relation between the massive transport of giant jellyfish and the lower-trophic-level ecosystem in the East China Sea using an ecosystem model coupled with a data-assimilative OGCM. The 8th China-Japan-Korea International Jellyfish Workshop. pp. 37-38.
- 103) Komatsu K. et al. (2010) Nutrient Stream in the Kuroshio region. AGU 2010 Fall meeting. OS51A-1273.
- 104) Komatsu K. et al. (2010) Interannual variations of 3D structure of lower-trophic-level ecosystems in the western North Pacific using a new marine ecosystem model based on an eddy-resolving data-assimilative OGCM. International Symposium Climate Change Effects on Fish and Fisheries. Program and Abstracts. pp. 190.
- 105) Komatus K. et al. (2010) Dynamics of lower-trophic-level ecosystems in the western North Pacific simulated by a high resolution 3D ecosystem model. International Symposium Climate Change Effects on Fish and Fisheries.
- 106) Komatsu K. et al. (2011) Biogeochemical impacts of the Kuroshio by the synergistic contribution of isopycnal and diapycnal fluxes of

- nutrients. Abstract OS44A-05 presented at 2011 Fall Meeting.
- 107) 駒澤一朗・安藤和人・滝尾健二・川辺勝俊・坂西芳彦・横浜康継 (2011) 伊豆大島における暖海性コンブ目アントクメ群落の純生産量. 藻類 (日本藻類学会和文誌). 58 : 173-178.
- 108) 小森田智大・吉江直樹・藤井直紀・郭新宇・横川太一・濱岡秀樹・磯辺篤彦 (2011) 2011 年夏季に豊後水道で観測した急潮と栄養塩動態. 九州大学応用力学研究所共同研究集会「沿岸海域の物質循環と環境保全」.
- 109) Kume G., Kubo Y., Yoshimura T., Kiriya T. and Yamaguchi A. (2010) Life history characteristics of the protogynous parrotfish *Calotomus japonicus* from northwest Kyushu, Japan. *Ichthyological Research* 57: 113-120.
- 110) 倉島彰 (2011) アラメ・カジメの生態生理的特性. *海洋と生物*. 33(4): 330-336.
- 111) 倉島彰・竹内大介・石川達也・岩尾豊紀・前川行幸 (2014) 三重県尾鷲湾における藻場の衰退. 藻類 (日本藻類学会和文誌). pp. 62.
- 112) 黒田寛 (2012) 高解像度モデルによる北海道周辺海域の海況の季節変動の再現. 平成 24 年度日本水産学会北海道支部大会.
- 113) 黒田寛・阿部祥子・高橋大介・青木一弘・東屋知範・三寺史夫 (2013) 北海道周辺高解像度沿岸モデルのアップグレード. 亜寒帯海洋モニタリング研究会.
- 114) 黒田寛・清水勇吾・葛西広海・東屋知範・高橋大介 (2012) 海面高度に基づいて推定した襟裳岬東沖における沿岸流の季節変動. 2012 年度日本海洋学会秋季大会.
- 115) 日下彰 (2013) Water mass modifications in the continental shelf off the Doto area, Japan in winter and spring. 第 28 回北方圏国際シンポジウム「オホーツク海と流水」.
- 116) Li Y., Suzuki H., Nagumo T. and Tanaka J. (2012) Morphological study of six marine diatom species related to the genus *Fallacia*. 22nd International Diatom Symposium (Ghent, Belgium).
- 117) Liu X., Beyrend-Dur D., Dur G. and Ban S. (2012) Effect of temperature on the development of *Eodiaptomus japonicus* (Copepoda: Calanoida) in Lake Biwa. ASLO 2012 summer meeting.
- 118) Liu X., Beyrend-Dur D., Dur G. and Ban S. (2013) Effects of temperature on life history traits of *Eodiaptomus japonicus* (Copepoda: Calanoida) from Lake Biwa (Japan). *Limnology*. 15(1): 85-97. doi: 10.1007/s10201-013-0417-9.
- 119) 増田良帆 (2011) 全球高解像度 MEM のチューニング. 「海洋生態系研究と科学技術コミュニケーション」セミナー.
- 120) Mikame Y., Suzuki H., Nagumo T. and Tanaka J. (2012) Morphology of marine benthic diatom genus *Hyalosira* Kützing in Japan. 22nd International Diatom Symposium.
- 121) 宮内麻由美・鈴木秀和・南雲保・田中次郎 (2012) 褐藻ホンダワラ類の付着珪藻相. 日本珪藻学会第 32 回研究集会.
- 122) 宮本幸太・沢本良宏・築坂正美・河野成美・花里孝幸・君島祥 (2014) ワカサギ初期減耗要因解明への取り組み. ワカサギに学ぶ会.
- 123) 宮本幸太・沢本良宏・河野成美・星河廣樹・花里孝幸・君島祥・幡野真隆・伴修平 (2014) 湖沼の漁業生産安定化を目指した温暖化適応技術の開発. 地球温暖化による「海」と「さかな」の変化研究成果発表会.
- 124) 宮崎千尋・野尻幸宏・中岡慎一郎 (2010) 西部太平洋における海洋表層 CO₂ 分圧の変動特性. 2010 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集. pp. 83.
- 125) Miyazaki C., Nakaoka S. and Nojiri Y. (2010) Underway pCO₂ measurement of NIES: the composition, QA/QC and recent findings. Surface Ocean CO₂ Atlas Project Equatorial Pacific, North Pacific, and Indian Ocean Regional Workshop. Intergovernmental Oceanographic Commission Workshop Report No. 229. pp. 9-10.
- 126) Miyazaki C., Nakaoka S. and Nojiri Y. (2010) Oceanic CO₂ data over the Equatorial Pacific observed by NIES. Surface Ocean CO₂ Atlas Project Equatorial Pacific, North Pacific, and Indian Ocean Regional Workshop. Intergovernmental Oceanographic Commission Workshop Report No. 229. pp. 14-15.
- 127) 茂木博匡 (2011) 海洋炭素循環モデルを用いた

- 深層域における動物プランクトン現存量の評価. 2011年度海洋理工学会秋季大会講演論文集. pp. 1.
- 128) 森田晃央・倉島彰・前川行幸 (2010) ワカメ属3種の水平分布と温度特性の関係. 海苔と海藻. 78: 12-26.
- 129) Moriya K. et al. (2011) Distributions of archaeal membrane lipid and DNA within the modern coastal shallow marine water column. JPGU 2011.
- 130) Moriya, K. et al (2011) Distributions of crenarchaeal membrane lipids and TEX86 thermometry in the modern enclosed shallow coastal anoxic ocean. AGU Fall meeting 2012.
- 131) 村瀬昇 (2010) 水温 - 高水温の影響の現れ方. 磯焼け対策シリーズ 3 藻場を見守り育てる知恵と技術 (藤田大介・村瀬昇・桑原久実 編). 成山堂書店, 東京. pp. 33-38.
- 132) 村瀬昇 (2011) モニタリングによるノコギリモク群落の分布様式の解析. 海洋と生物 33: 344-349.
- 133) 村瀬昇・野田幹雄 (2010) 潜水観察による食害の検知. 磯焼け対策シリーズ 3 藻場を見守り育てる知恵と技術 (藤田大介・村瀬昇・桑原久実 編). 成山堂書店, 東京. pp. 179-188.
- 134) Murase N., Noda M., Abe M., Yoshida G. and Tarutani K. (2010) Seasonal change in photosynthetic capacity of *Ecklonia kurome* Okamura (Phaeophyta) in the western Seto Inland Sea, Japan. 2010 Korea-Japan, Japan-Korea Joint Symposium on Aquaculture.
- 135) 村瀬昇ら (2012) 長崎県沿岸のキレバモク群落における現存量法による生産量の推定. 日本藻類学会.
- 136) Nagai S., Yoshida G. and Tarutani K. (2011) Changes in species composition and distribution of algae in the coastal waters of western Japan. In: Global Warming Impacts—Case Studies on the Economy, Human Health, and on Urban and Natural Environments (ed. Casalegno, S), InTech, Croatia. pp. 209-236.
- 137) 永沢亨 (2012) 気候変動下でのサケ資源最適管理を目指して. 気候変動に対応下循環型食料生産等の確立のための技術開発 研究成果発表会.
- 138) 永沢亨 (2014) 「さかな」の変化 I サケ - サケを取り巻く環境変化と対応策. 研究成果発表会 地球温暖化による「海」と「さかな」の変化.
- 139) 永沢亨・東屋知範 (2013) 北太平洋におけるさけます類の資源変動. 2013年度日本海洋学会秋季大会.
- 140) Nagasawa T. and Azumaya T. (2011) Fluctuation of Japanese chum salmon returning rate related to the SST along the spawning migration route. NPAFC International Workshop on Explanations for the High Abundance of Pink and Chum Salmon and Future Trends.
- 141) Nagata T., Sakamoto M., Tanaka Y. and Hanazono T. (2011) Egg viability of the rotifer *Bachionus nrceolaris* after ingestion by the predatory cladoceran *Leptodora kindtii*. *Hydrobiologia*, 665: 263-266.
- 142) Nakaoka S. et al. (2010) pCO₂ inter-comparison experiment for underway and buoy systems, Southern and Indian Ocean Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT) workshop, Hobart Australia.
- 143) 中岡慎一郎・Maciej Telszewski・野尻幸宏・宮崎千尋・安中さやか・向井人史・碓井典久 (2011) Self Organizing Map 解析で得られた北太平洋の海洋表層 CO₂ 分圧と大気海洋間 CO₂ 交換量の時空間分布. 日本海洋学会秋季大会.
- 144) Nakaoka S., Telszewski M., Nojiri Y., Yasunaka S., Miyazaki C., Usui N. and Mukai H. (2012) Reconstructing the monthly pCO₂ sea distribution in the North Pacific using Self Organizing Map. SOLAS Open Science Conference 2012.
- 145) 中岡慎一郎・野尻幸宏・小埜恒夫・宮崎千尋・安中さやか・市川忠史・葛西広海・桑田晃・田所和明 (2013) 漁業調査船と貨物船による日本周辺海域における海洋 CO₂ 分圧観測. 海洋学会 2013年度春季大会.
- 146) Nakaoka S., Nojiri Y., Yasunaka S., Telszewski M., and Miyazaki C. (2013) Ocean surface CO₂ mapping and air-sea CO₂ flux estimate in the Pacific Ocean based on in-situ observations and neural networks. 9th ICDC.
- 147) Nakaoka S., Telszewski M., Nojiri Y., Yasunaka S., Miyazaki C., Mukai H. and Usui N. (2013) Estimating temporal and spatial variation of

- ocean surface pCO₂ in the North Pacific using a Self Organizing Map neural network technique. *Biogeosciences*. 10: 6093-6106. doi:10.5194/bg-10-6093-2013.
- 148) 西村一星・杉本亮・廣江豊・市川忠史・石樋由香・笠井亮秀 (2010) 日本南岸域における硝酸態窒素の動態. 2010 年度日本水産学会近畿支部会.
- 149) Nishioka J., Ono T., Saito H., Sakaoka K. and Yoshimura T. (2011) Oceanic iron supply mechanisms which support the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic Pacific. *J. Geophys. Res.* 116. DOI: 10.1029/2010JC006321.
- 150) Nishioka J., Ono T., Saito H., Sasaoka K., Yoshimura T. and Matoba S. (2010) The annual cycle of surface iron and the source of iron supporting the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic Pacific. *AGU 2010 Fall Meeting*.
- 151) 西内耕・長谷川徹 (2011) 東シナ海大陸棚域におけるカイアシ類群集の鉛直分布と水塊構造. 2011 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集. pp. 191.
- 152) 野田幹雄・大原啓史・浦川賢二・村瀬昇・山元憲一 (2011) 響灘蓋井島のガラモ場に出現したアイゴ成魚の餌利用—大型褐藻類の採餌との関連—. *日本水産学会誌*. 77: 1008-1019.
- 153) 野田幹雄・大神賢志・大原啓史・村瀬昇・池田至・田上保博 (2013) アイゴの嗜好性に及ぼすアラメ・カジメ類 5 種 (コンブ目レソニア科) のポリフェノール含有量と藻体の硬さの効果. *水産増殖*. 61(1): 113-117.
- 154) Noguchi A. et al. (2011) Linear relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along simple food chains in marine environments. *J. Plankton Res.* 33: 1629-1642.
- 155) Nojiri Y. (2010) International ocean pCO₂ instrument inter-comparison using indoor seawater pool. *Surface Ocean CO₂ Atlas Project Equatorial Pacific, North Pacific, and Indian Ocean Regional Workshop. Intergovernmental Oceanographic Commission Workshop Report No. 229*. pp. 6-7.
- 156) Nojiri Y., Telszewski M., Nakaoka S. and Miyazaki C. (2011) Ocean surface pCO₂ observation by volunteer observation ships and basin wide estimation of pCO₂ variability in the Pacific. *AOGS 2011 8th Annual Meeting*.
- 157) Nojiri Y. (2012) Basin scale analysis of oceanic pCO₂ variability and results of atmospheric tracers for ocean CO₂ sink variability. *SOLAS Open Science Conference 2012*.
- 158) Nojiri Y., Yasunaka S., Nakaoka S., Ono T., Mukai H. and Usui N. (2013) Variability of carbon cycle and biological production in the North Pacific estimated from mapping of pCO₂, alkalinity, and dissolved inorganic carbon, October 12-21, Hiroshima, Japan.
- 159) 小畑雄大・花里孝幸 (2011) 動物プランクトンと魚の食う—食われる関係に及ぼす殺虫剤影響. *日本環境毒性学会*.
- 160) 小熊幸子・小埜恒夫・齊藤勉・市川忠史 (2011) 日向灘における pCO₂ 分布. *日本海洋学会 2011 年度秋季大会講演要旨集*. pp. 41.
- 161) 小倉和香子・鈴木秀和・坂西芳彦・南雲保・田中次郎 (2011) 新潟県佐渡島産アマモ葉上の付着珪藻相. *日本珪藻学会第 31 回研究集会*.
- 162) Okazaki Y. and Tadokoro K. (2011) Biomass estimates of *Euphausia pacifica* using MOHT in the Oyashio region. *PICES-2011 Program & Abstracts*.
- 163) Oku H., Tokuda M., Matsunari H., Fruita H., Murashita K. and Yamamoto T. (2014) Characterization of differentially expressed genes in liver in response to the rearing temperature of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* and their heritable differences. *Fish Physiol. Biochem.* 40: 1757-1769.
- 164) 奥宏海・徳田雅治・松成宏之・古板博文 (2014) ニジマス飼育水温とストレス指標の関係について. *平成 24 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集*. pp. 106.
- 165) 奥宏海・徳田雅治・松成宏之・古板博文 (2012) ニジマスにおける飼育温度依存的な発現変動遺伝子の同定. *平成 24 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集*. pp. 107.

- 166) 奥宏海・内田博陽・徳田雅治 (2014) 飼育水温とニジマス栄養生理特性の関係」第 82 回日本動物学会大会講演要旨集 . pp. 147.
- 167) Okunishi T., Ambe D., Ito S., Kuroda H., Setou T. and Yoshie N. (2011) A modeling study of marine ecosystems in the North Pacific. 2012 Ocean Sciences Meeting.
- 168) Okunishi T. et al. (2011) A modeling approach to evaluate growth and movement for recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western Pacific. *Fish. Oceanogr.* 21(1): 44-57.
- 169) Okunishi T. et al. (2012) A modeling approach to evaluate growth and movement for recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western Pacific. *Fish. Oceanogr.* 21: 44-57.
- 170) Okunishi T., Ito S., Hashioka T., Sakamoto T., Yoshie N., Sumata H., Yara Y., Okada N., and Yamanaka Y. (2012) Impacts of climate change on growth, migration and recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific. *Climatic Change* 3-4: 485-503.
- 171) 奥西武・安倍大介・伊藤進一 (2013) マイワシ資源変動機構の理解への数値モデルによる試み . 2012 年度日本海洋学会春季大会 .
- 172) 奥西武・安倍大介・清水勇吾・亀田卓彦 (2012) 黒潮海域におけるクロフィル濃度の変動特性 . 2012 年度日本海洋学会秋季大会 .
- 173) Ono T. (2010) A conceptual explanation for the western North Pacific CO₂ sink: water cooling and nutrient dynamics. Ocean Science Meeting 2010. pp. IT24D-05.
- 174) Ono T. (2010) Oxygen decline in the continental slope waters off-Japan and its potential influence on groundfishes. PICES-2010 Program and Abstracts. pp. 17.
- 175) 小埜恒夫 (2011) 日本周辺海域の温暖化緩和機能の定量評価に向けて . 水産総合研究センター環境報告書 . pp. 16-17.
- 176) Ono T. and K. Tadokoro (2010) Ecosystem responses to ocean stratification and early-bloom occurrence in the future western subarctic North Pacific: A speculation from retrospective analyses」International Symposium Climate Change Effects on Fish and Fisheries, Program and Abstracts. pp. 145.
- 177) Ono T., Kuwata A. and Ichikawa T. (2011) A Japan coastal pCO₂-monitoring program by Fishery Research Vessels. AOGS annual meeting 2011. pp. OS10-17.
- 178) 小埜恒夫・市川忠史・桑田晃・野尻幸宏 (2011) 漁業調査船を用いた日本周辺海域 pCO₂ モニタリングシステムの構築 . 日本海洋学会 2011 年度秋季大会講演要旨集 . pp. 42.
- 179) 小埜恒夫 (2011) 「炭素もめぐる」 . 日本海洋学会編「海はめぐるー人と生命を支える海の科学ー」 地人書館 , 東京 pp. 232
- 180) 小澤拓也・鈴木秀和・南雲保・田中次郎 (2010) 海産付着珪藻 *Mastogloia smithii* Thwaites の形態と分類 . 日本珪藻学会第 30 回研究集会 .
- 181) 小澤拓也・鈴木秀和・南雲保・田中次郎 (2012) 海産底生珪藻の形態と分類 (5), チクビレッケイソウ属 (チクビレッケイソウ科, チクビレッケイソウ目). 植物研究雑誌 87: 253-259.
- 182) Quéré CL. et al. (2015) Global carbon budget 2014. *Earth Syst. Sci. Data* 7, 1-39. doi: 10.5194/essd-7-1-2015
- 183) Quéré CL. et al. (2014) Global carbon budget 2013. *Earth Syst. Sci. Data* 6, 235-263. doi: 10.5194/essd-6-235-2014
- 184) Saba VS. et al. (2010) Challenges of modeling depth-integrated marine primary productivity over multiple decades: A case study at BATS and HOT, *Global Biogeochem. Cycles* 24: 1–21 (doi: 10.1029/2009GB003655).
- 185) 斎藤寿彦・渡邊久爾・小軽米成人・佐々木系 (2012) 北海道日本海におけるサケの資源変動 . 平成 24 年度日本水産学会春季大会 .
- 186) 斎藤寿彦・渡邊久爾・小軽米成人・佐々木系 (2011) 北海道日本海におけるサケ (*Oncorhynchus keta*) 年級群豊度の変動特性 . 平成 23 年度日本水産学会北海道支部大会 .
- 187) 坂西芳彦 (2010) コンブ場の生産力 . 藻場を見守り育てる知恵と技術 (藤田・村瀬・桑原編). 成

- 山堂書店, 東京. pp. 121-124.
- 188) 坂西芳彦 (2010) 光, 温度と関連したコンブの生理生態学. 千葉県立博物館自然史シンポジウム講演要旨集. pp. 4
- 189) 坂西芳彦 (2010) 非定常的な光が大型褐藻の光合成に及ぼす影響. 日本水産学会中部支部大会講演要旨集. pp. 23
- 190) 坂西芳彦 (2011) 光と温度に関連したコンブの生理生態. 海洋と生物. 33(4): 323-329.
- 191) 坂西芳彦・川俣茂・戸瀬太貴・倉島彰 (2015) 日本海沿岸における褐藻コンブ目の分布変化予測. 日本藻類学会第 39 回福岡大会.
- 192) 坂野博之 (2011) ワカサギふ化仔魚と初期餌料のマッチ・ミスマッチにおける水温の影響. 日本水産増殖学会第 10 回大会.
- 193) 坂野博之 (2011) 郵送調査によるワカサギ資源利用の現状把握. 平成 23 年度日本水産学会秋季大会要旨集.
- 194) 坂野博之 (2010) ワカサギふ化仔魚の飢餓耐性. 日本水産増殖学会第 9 回大会.
- 195) 坂野博之 (2010) ワカサギ仔魚のサイズ別・水温別消化速度. 平成 22 年度日本水産学会秋季大会.
- 196) 坂野博之 (2010) ワカサギ仔魚の飼育環境下における消化速度. 第 15 回ワカサギに学ぶ会.
- 197) 坂野博之 (2010) 湖沼の魚類に与える温暖化の影響. 第 8 回環境研究シンポジウム.
- 198) 坂野博之 (2010) 湖沼漁業における温暖化の影響. 農林水産技術研究ジャーナル. 33(7): 5-8.
- 199) 崎山和昭ら (2012) 褐藻クロメ幼体の光合成・呼吸-温度特性. 日本水産学会秋季大会.
- 200) 崎山和昭ら (2012) 山口県馬島沿岸におけるクロメ群落の光合成に基づく生産力推定. 日本藻類学会.
- 201) Salihoglu B. et al. (2013) Bridging marine ecosystem and biogeochemistry research: Lessons and recommendations from comparative studies. *J. of Mar. Systems.* 109-110: 161-175.
- 202) 三瓶ゆりか・鈴木秀和・南雲保・田中次郎 (2010) 沖縄県久米島沿岸の海産付着珪藻類. 日本珪藻学会第 30 回研究集会.
- 203) 佐藤政俊・河野時廣・清水勇吾・西田芳則 (2011) 短期連続 CTD 観測に基づく北海道南東域でのオホーツク系親潮水の短期変動と分布. 日本海洋学会秋季大会講演要旨集.
- 204) 瀬藤聡・亀田卓彦 (2010) 海面クロロフィル a データへの最適内挿法の適用. 日本リモートセンシング学会第 49 回 (平成 22 年度秋季) 学術講演会論文集. 257-258.
- 205) Shigemitsu M. et al. (2012) Development of a one-dimensional ecosystem model including the iron cycle applied to the Oyashio region, western subarctic Pacific. *J. Geophys. Res.*, 117: C06021.
- 206) 清水勇吾・伊藤進一・笈茂穂・和川拓 (2010) 中層フロートに取り付けた「オプトード」の溶存酸素観測精度と観測例. 2010 年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集. pp. 28.
- 207) 清水勇吾・伊藤進一・笈茂穂・日下彰・和川拓・佐藤政俊 (2011) 北海道厚岸沖親潮流量を用いた三陸~常磐近海の親潮系冷水出現の予測. 東北底魚研究第 31 号. 89-92.
- 208) 清水勇吾・伊藤正木・服部努・成松庸二 (2012) 東北水研着底トロール調査 CTD 観測に基づく東北近海域の底層水温変化. 2012 年度水産海洋学会創立 50 周年記念大会.
- 209) 清水勇吾・奥西武・安倍大介・黒田寛・廣江豊・市川忠史・日高清隆・日下彰 (2013) 黒潮強流帯とその周辺域における長期海面昇温率の時空間分布日本海洋学会春季大会.
- 210) Shimizu Y., Talley LD., Ito S., Kakehi S. and Wagawa T. (2010) Spreading pattern and transport of the Okhotsk Sea Intermediate Water to the northwest Pacific revealed by profiling floats with optode and hydrographic observations. *PICES-2010 Program and Abstracts.* pp. 241.
- 211) Shimizu Y., Wagawa T., Ito S., Kakehi S., Kusaka A. and Sato M. (2010) Velocity structure and transport of Oyashio measured by vessel-mounted acoustic Doppler profiler along repeat hydrographic section A-line. *PICES-2010 Program and Abstracts.* pp. 145.
- 212) 清水勇吾・和川拓・伊藤進一・笈茂穂・日下彰・佐藤政俊 (2011) 北海道厚岸沖親潮流量を用いた三陸~常磐近海の親潮系冷水南限緯度の予測. 2011 年度水産海洋学会研究発表大会.
- 213) Shimode S., Takahashi K., Shimizu Y.,

- Nonomura T. and Tsuda A. (2012) Distribution and life history of the planktonic copepod, *Eucalanus californicus*, in the northwestern Pacific: Mechanisms for population maintenance within a high primary production area. *Prog. Oceanogr.* 96(1): 1-13.
- 214) Shimode S., Takahashi K., Shimizu Y., Nonomura T. and Tsuda A. (2012) Distribution and life history of two planktonic copepods, *Rhincalanus nasutus* and *Rhincalanus rostrifrons*, in the northwestern Pacific Ocean. *Deep-Sea Research I.* 65: 133-145.
- 215) Sohrin R., Isaji M., Obara Y., Agostini S., Suzuki Y., Hiroe Y., Ichikawa T. and Hidaka K. (2011) Distribution of *Synechococcus* in the dark ocean. *Aquat. Microbial Ecol.* 64: 1-14.
- 216) 外山義典ら (2014) 高水温がブリ飼料タンパク質消化に及ぼす影響. 平成 26 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集. pp. 47.
- 217) 外山義典ら (2012) 高水温飼育がブリの成長および体組成に及ぼす影響. 平成 24 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集. pp. 43.
- 218) Sugisaki H., Nonaka M., Ishizaki S., Hidaka K., Kameda T., Hirota Y., Oozeki Y., Kubota H. and Takasuka A. (2010) Status and trends of the Kuroshio Current region, 2003-2008. In *Marine Ecosystems of the North Pacific Ocean, 2003-2008*. McKinnell SM. and Dagg MJ. eds. PICES Special Publication vol.4.
- 219) Sumata H., Hashioka T., Okunishi T., Shigemitsu M., Aita MN., Yoshie N., Okada N., Sakamoto TT., Suzuki t., Yamanaka Y. (2010) Effects of climate forcing on the North Pacific Ocean ecosystem simulated using an eddy-permitting marine ecosystem model. *International Symposium Climate Change Effects on Fish and Fisheries: Forecasting Impacts, Assessing Ecosystem Responses, and Evaluating Management Strategies*. Program and Abstracts. pp. 129.
- 220) Sumata H., Hashioka T., Suzuki T., Yoshie N., Okunishi T., Aita MN., Sakamoto TT., Ishida A., Okada N., and Yamanaka Y. (2010) Effect of eddy transport on the nutrient supply into the euphotic zone simulated in an eddy-permitting ocean ecosystem model. *Journal of Marine Systems* 83: 67-87.
- 221) Suzuki K., Kuwata A., Yoshie N., Shibata A., Kawanobe K. and Saito H. (2011) Population dynamics of phytoplankton, heterotrophic bacteria, and viruses during the spring bloom in the western subarctic Pacific. *Deep-Sea Research I.* 58: 575-589.
- 222) 鈴木裕也・倉島彰・前川行幸 (2012) 三重県産褐藻カジメ胞子体の生長と成熟におよぼす温度の影響. *藻類 (日本藻類学会和文誌)*. 60(2): 78.
- 223) Suzuki T. et al. (2012) PACIFICA: Pacific Ocean Interior Carbon Data Synthesis. PICES 2012 Annual Meeting. pp. 181.
- 224) Suzuki T. et al. (2013) PACIFICA Data Synthesis Project. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.
- 225) Tadokoro K. and Okazaki Y. (2010) Overview of the zooplankton from viewpoint of food for fish resources in the western North Pacific. *International Symposium Climate Change Effects on Fish and Fisheries*. Program and Abstracts. pp. 238.
- 226) Tadokoro K. Okazaki Y., Ono Y. and Sugisaki H. (2010) Geographical comparison of the decadal scale variations in marine ecosystems in the North Pacific Ocean. PICES-2010 Program and Abstracts. pp. 84.
- 227) 田所和明・岡崎雄二・小埜恒夫・安田一郎・杉崎宏哉 (2010) 西部北太平洋の低次生態系の数十年スケール変動とオホーツク海との関係. 2010 年日本海洋学会秋季大会.
- 228) Takasuka A., Aoki I. and Oozeki Y. (2012) Biological mechanisms underlying climate impacts on forage fish population dynamics: hypotheses, controversies, and future directions. *ICES/PICES Symposium on Forage Fish Interactions: Creating the tools for ecosystem-based management of marine resources*.

- 229) Takasuka A., Aoki I., Sakai A., Oozeki Y. and Robert D. (2011) Predator-specific growth-selective predation and dynamics of the growth-based survival mechanisms in anchovy larvae. Book of Abstracts of ICES Annual Science Conference 2011. pp. 83-84.
- 230) Takayama K., Igeta Y., Yamazaki K. and Watanabe T. (2012) Marine ecosystem responses to the climate warming simulation in the Japan Sea. 2012 Ocean Sciences Meeting Program and Abstract.
- 231) Takayama K., Watanabe T., Kawamura H. and Tanaka I. (2010) Reproducibility of chlorophyll a and nutrient variability in the Japan Sea by the three dimensional ecosystem-circulation model. PICES-2010 Program and Abstracts. pp. 188-189.
- 232) 高山勝巳・渡邊達郎 (2011) 日本海南部の有光層における硝酸塩濃度の経年変化について. 2011年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集. pp. 140.
- 233) 高山勝巳・渡邊達郎・川村英之 (2010) 日本海3次元生態系モデルにおけるクロロフィル a 濃度の再現性について. 2010年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集. pp. 146.
- 234) Takeoka H., Guo X., Yoshie N., Fujii N. and Komorita T. (2011) Detailed Monitoring of Nutrient Supply through Tidal Front in Seto Inland Sea, Japan. EMECS9 Global Summit on Coastal Seas.
- 235) 田坂行男 (2011) フードシステムと東日本大震災—特に水産業界について—. 日本フードシステム学会.
- 236) Telszewski M., Nojiri Y., Kamachi M., Nakaoka S. and C. Miyazaki (2010) Will the ocean keep soaking up our carbon?. 2010年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集. pp. 84.
- 237) Telszewski M. (2010) Air-sea CO₂ flux in the North Atlantic and the North Pacific estimated by neural network. Surface Ocean CO₂ Atlas Project Equatorial Pacific, North Pacific, and Indian Ocean Regional Workshop. Intergovernmental Oceanographic Commission Workshop Report No. 229. pp. 15-16.
- 238) Tian Y. and Kidokoro H. (2011) Response patterns of the fish community in the Japan Sea to the climate regime shifts and identification of ecosystem indicators. PICES 2011 program and abstracts. pp. 50.
- 239) Tian Y., Kidokoro H. and Goto T. (2010) Long-term changes in the condition factor of small pelagic fishes in the Japan Sea and the impact of the late 1980s regime shift. PICES 19th Annual Meeting Program and Abstract. pp. 92.
- 240) Tian Y., Kidokoro H., Watanabe T., Igeta Y., Sakaji H. and Ino S. (2012) Response of yellowtail, *Seriola quinqueradiata*, a key large predatory fish in the Japan Sea, to sea water temperature over the last century and potential effect of global warming. *Journal of Marine Systems*. 91: 1-10.
- 241) Tian Y., Uchikawa K., Ueda Y. and Cheng J. (2014) Comparison of fluctuations in fish communities and trophic structures of ecosystems from three currents around Japan: synchronies and differences. *ICES J. Mar. Sci.* 71 (1): 19-34.
- 242) 戸田龍太郎・花里孝幸 (2012) 諏訪湖で確認された魚類寄生性ケンミジンコ. 2012年度日本陸水学会甲信越支部会.
- 243) 戸澤隆・渡邊庄一 (2012) 長崎県小値賀地区におけるアワビ資源の減少について. *日本水産学会誌*. 78 : 1202-1204.
- 244) 戸瀬太貴・倉島彰・前川行幸 (2015) 褐藻ツルアラメの生長と繁殖におよぼす温度の影響. 日本藻類学会第 39 回福岡大会.
- 245) Tsuboi T., Iwata H., Wada H., Matsuzaki H., Sohrin R., Hiroe Y., Ichikawa T., Hidaka K. and Watanabe T. (2011) Water Column Profiles of Dissolved Inorganic Radiocarbon for the Kuroshio Region, Offshore of the Southern Japanese Coast. *Radiocarbon*. 53: 679-690.
- 246) 上野康弘 (2011) 東日本大震災が東北地方太平洋岸の水産業に与えた被害とその影響. *環境経済・政策研究*. 14 : 80-86.
- 247) 上野世司・幡野真隆・宮本幸太 (2015) 琵琶湖固有種イサザの資源変動要因. 日本水産学会春季大会.
- 248) Watanabe K., Morita K. and Saito. T. (2013)

- Verification of the immature ratio at age of chum salmon in the Bering Sea and central North Pacific Ocean. NPAFC 3rd International Workshop on Migration and Survival Mechanisms of Juvenile Salmon and Steelhead in Ocean Ecosystems.
- 249) Watanabe T. and Takayama K. (2012) Planktonic ecosystem model in the Japan Sea based on an operational ocean forecast system (ICES CM 2012/R: 21). ICES Annual Science Conference.
- 250) Watanabe T., Takayama K., Kawamura H. and Tanaka I. (2010) One dimensional ecosystem model in the northern Japan Sea based on an operational ocean forecast system. International Symposium of Climate Change Effects on Fish and Fisheries. pp. 195.
- 251) 和川拓・伊藤進一・清水勇吾・笈茂穂 (2010) 流速観測資料に基づく準定常ジェットの流動構造. 2010年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集. pp. 95.
- 252) 和川拓・伊藤進一・笈茂穂・黒田寛・山野目健・加賀新之助 (2012) 岩手県沿岸域における水質の鉛直構造と時間変動. 水産海洋学会創立50周年記念大会.
- 253) 和川拓・吉川裕・磯田豊・岡英太郎・植原量行・中野俊也・久万健志・高木省吾 (2012) 流速観測資料に基づく北太平洋亜寒帯循環に及ぼす天皇海山列の影響. 2012年度日本海洋学会秋季大会.
- 254) 渡邊一功・橋岡豪人・山中康裕・伊藤進一 (2011) 温暖化の影響を組み込んだサンマ来遊量予測モデルの開発. 2011年度水産海洋学会.
- 255) Whitney F., Bograd SJ. and Ono T. (2010) How does expanding hypoxia affect the nutrient budget of the subarctic Pacific? PICES-2010 Program and Abstracts. pp. 16.
- 256) 矢吹崇・安中さやか・中岡慎一郎・野尻幸宏・市川忠史・小埜恒夫 (2013) 船舶連続観測データにみられる海洋 CO₂ 分圧の中規模以下の変動現象. 2013年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集. pp. 403.
- 257) Yamanaka Y., Okunishi T., Hashioka T., Sumata H. and Ito S. (2010) Predicting marine ecosystem responses to climate change by a 3-D high-resolution ecosystem model. PICES-2010 Program and Abstracts. pp. 9.
- 258) 山岡未季・鈴木秀和・A. Witkowski・南雲保・田中次郎 (2012) 海産底生珪藻の形態と分類 (4), ダエンケイソウ属 (フナガタケイソウ科, フナガタケイソウ目). 植物研究雑誌 (The Journal of Japanese Botany). 87(1): 45-54.
- 259) 山口寿史・石坂丞二・Siswanto E.・Yoo SJ.・清本容子 (2011) 航海と東シナ海における衛星クロロフィル a の季節及び秋季経年変動: 懸濁物の影響を少なくした新しいデータセットの結果. 2011年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集. p. 269.
- 260) 山田絢加・鈴木秀和・堀本奈穂・南雲保・田中次郎 (2010) 天神島産アマモ附着珪藻の現存量と種組成の葉齢での比較. 日本珪藻学会第30回研究集会.
- 261) 安中さやか・野尻幸宏・中岡慎一郎・宮崎千尋・向井人史・碓氷典久 (2012) 北太平洋における全炭酸マッピング. 海洋学会 2012年度春季大会.
- 262) Yasunaka, S., Y. Nojiri, S. Nakaoka, H. Mukai and N. Usui (2012) Estimation of sea surface dissolved inorganic carbon (DIC) in the north pacific using pCO₂ mapping. SOLAS Open Science Conference 2012, Cle Elum, WA, May 7-10, USA.
- 263) 安中さやか・野尻幸宏・中岡慎一郎 (2012) 北太平洋における栄養塩の時空間分布特性. 海洋学会 2012年度秋季大会.
- 264) 安中さやか・野尻幸宏・中岡慎一郎・小埜恒夫・稲垣明・F. A. Whitney (2013) 北太平洋における表層栄養塩の時空間マッピング. 海洋学会 2013年度春季大会.
- 265) 安中さやか・野尻幸宏・中岡慎一郎・小埜恒夫・稲垣明・F. A. Whitney (2013) 北太平洋表層栄養塩の季節・経年変動. 海洋学会 2013年度秋季大会.
- 266) Yasunaka S., Nojiri Y., Nakaoka S., Ono T., Mukai H. and Usui N. (2013) Monthly maps of Sea Surface Dissolved Inorganic Carbon in the North Pacific: Basin-wide Distribution and Seasonal Variation. J. Geophys. Res. 118: 3843-

- 3850.
- 267) Yasunaka S., Nojiri Y., Nakaoka S., Mukai H., and Usui N. (2013) Basin-scale Distribution and Seasonal to Inter-annual Variation of Dissolved Inorganic Carbon over the North Pacific. PICES-2013.
- 268) Yasunaka S., Nojiri Y., Nakaoka S., Ono T., Mukai H. and Usui N. (2014) North Pacific dissolved inorganic carbon variations related to the Pacific decadal oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 41: 1005-1011.
- 269) Yasunaka S., Nojiri Y., Nakaoka S., Ono T., Whitney F. and Telszewski, M. (2014) Mapping of Sea Surface Nutrients in the North Pacific: Basin-wide Distribution and Seasonal to Interannual Variability. *J. Geophys. Res. Oceans.* 119: 7756-7771.
- 270) 熊炫睿・増田良帆 (2011) 日本付近に注目した炭素循環モデルの開発. 「海洋生態系研究と科学技術コミュニケーション」セミナー.
- 271) 熊炫睿・増田良帆・橋岡豪人・小埜恒夫・山中康裕 (2013) 西部北太平洋におけるガス交換係数の季節変動による大気海洋間CO₂フラックスへの影響. 海洋気象学会.
- 272) 熊炫睿・増田良帆・橋岡豪人・小埜恒夫・山中康裕 (2013) 西部北太平洋におけるガス交換係数、二酸化炭素分圧及びCO₂フラックスの季節変動に関する研究. 日本海洋学会春季大会.
- 273) 八谷光介・清本節夫・吉田吾郎・吉村拓 (2011) ホンダワラ属 13 種の付着器からの再生能力と高水温耐性. 日本藻類学会第 35 会大会.
- 274) 八谷光介ら (2011) 亜熱帯性ホンダワラ類キレバモクと在来種ノギリモクとの光を巡る競合関係について. 日本応用藻類学会.
- 275) 八谷光介ら (2012) 植食性魚類ノトイスズミの日周移動. 日本水産学会秋季大会.
- 276) 八谷光介ら (2012) 潜水漁業者の取り組む磯焼け域での藻場造成. 日本水産学会秋季大会.
- 277) Yoon S., Sakanishi Y. and Kishi M. (2011) Estimation of particulate organic carbon flux produced from eelgrass, *Zostera marina* L., in a subarctic estuary of Hokkaido, Japan. *Current Development in Oceanography* 3(1): 1-32.
- 278) 吉田吾郎・寺脇利信・山下亜純・新井章吾・樽谷賢治 (2011) 瀬戸内海から豊後水道にみるガラモ場の変化と水温勾配の関係. *海洋と生物*. 33: 337-343.
- 279) 吉田吾郎・樽谷賢治・島袋寛盛・吉村拓・八谷光介・荒武久道・西村大介・村瀬昇 (2011) 西日本のガラモ場の変化は冬季水温の上昇が原因? ~ 文献に見る藻場と水温の関係 ~. 日本藻類学会第 35 会大会.
- 280) 吉田吾郎ら (2013) フタエモク幼体期の生態と伸長開始の trigger としての水温について. 日本藻類学会.
- 281) 吉田野空海・鈴木秀和・南雲保・田中次郎 (2012) 付着珪藻の自然個体群における細胞サイズの分布と増大胞子形成. 日本珪藻学会第 32 回研究集会.
- 282) Yoshie N. (2011) Ecosystem and nutrient dynamics in the western Seto Inland Sea, Japan. *International Symposium on the Sustainability and Productivity of Coastal Resources.*
- 283) Yoshie N. et al. (2010) One dimensional ecosystem model in the northern Japan Sea based on an operational ocean forecast system. *International Symposium Climate Change Effects on Fish and Fisheries.*
- 284) Yoshie N. et al. (2010) Dynamics of lower-trophic-level ecosystems in the western North Pacific simulated by a high resolution 3D ecosystem model. *International Symposium Climate Change Effects on Fish and Fisheries Program and Abstracts.* pp. 196.
- 285) Yoshie N., Fujii N., Guo X., Komorita T. and Isobe A. (2011) Phytoplankton response to the intrusion of oceanic warm water in Bungo Channel, Japan. XXV International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2011.
- 286) 吉江直樹・藤井直紀・奥田悠太・園本拓彬・郭新宇・小森田智大 (2011) 夏季の豊後水道における急潮・底入り潮に伴う低次生態系の応答. 九州大学応用力学研究所共同研究集会「沿岸海域の物質循環と環境保全」.
- 287) 吉江直樹・藤井直紀・郭新宇・小森田智大・磯

- 辺篤彦 (2011) 豊後水道における外洋水侵入に対する低次生態系の応答. 2011 年度日本海洋学会秋季大会.
- 288) Yoshie N., Guo X., Fujii N. and Komorita T. (2011) Ecosystem and nutrient dynamics in the Seto Inland Sea, Japan. In Omori K. et al. (ed.) Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry Vol.5, Modeling and Analysis of Marine Environmental Problems. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, pp. 39-49.
- 289) Yoshie N., Guo X., Fujii N. and Komorita T. (2011) Phytoplankton and nutrient dynamics in the western Seto Inland Sea, Japan based on observation and a modified NEMURO model. PICES 2011 Annual meeting.
- 290) Yoshiki T., Ono t., Shimizu a. and Toda T. (2010) Egg development time and hatching success of deep sea spawning calanoid copepods, genus Neocalanus. PICES-2010 Program and Abstracts. pp. 182.
- 291) Yoshimura T. et al. (2011) Habitat enhancement for early benthic juvenile stages of the Japanese spiny lobster, *P. japonicus*. The 9th International Conference and Workshop on Lobster Biology and Management.
- 292) Yoshimura T. et al. (2011) Impacts of seaweed bed dynamics on early benthic stages of the Japanese spiny lobster, *P. japonicus*, and possible connections with sea warming. The 9th International Conference and Workshop on Lobster Biology and Management.
- 293) 吉村拓 (2011) 春藻場の造成と今後の課題について. 豊かな海づくり水産開発ながさき. 108 : 11-15.
- 294) 吉村拓・松田浩一・伏屋玲子 (2011) 九州西岸におけるサガミイセエビの採集例と本邦での分布に関する一考察. *Cancer* 20 : 13-19.
- 295) 吉村拓ら (2011) イセエビ着底場としての春藻場の機能について. 2011 年度日本水産学会秋季大会.
- 296) 吉村拓ら (2011) 春藻場形成域におけるイセエビ保育礁の適用法について. 2011 年度日本水産学会秋季大会.

- 297) 吉村拓・森永健司・清本節夫・新井章吾 (2010) 果たして温暖化の影響か? - 長崎市における藻場の長期変動. 磯焼け対策シリーズ 3 藻場を見守り育てる知恵と技術 (藤田大介・村瀬昇・桑原久実 編). 成山堂書店, 東京. pp.161-167.
- 298) 陽詩織・鈴木秀和・南雲保・田中次郎 (2011) 海産底生珪藻の形態と分類 (2), ヒメクダズミケイソウ属 (ヒメクダズミケイソウ科, フナガタケイソウ目) (第 1 部). 植物研究雑誌 (The Journal of Japanese Botany). 86(5): 279-286.

X 研究担当者

1 水産分野における温暖化緩和技術の開発

独立行政法人水産総合研究センター

市川忠史、上野康弘、小埜恒夫*、葛西広海、
桑田 晃、田坂行男*、田所和明、長谷川勝男*、
廣田将仁、矢吹 崇

独立行政法人国立環境研究所

中岡慎一郎、野尻幸宏*、宮崎千尋、安中さやか
国立大学法人北海道大学

増田良帆、山中康裕*、熊 炫睿

一般社団法人漁業情報サービスセンター

渡邊一巧*

2 地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発

独立行政法人水産総合研究センター北海道区水産研究所

永澤 亨*、東屋知範、川崎康寛、葛西広海、
黒田 寛、齊藤寿彦、渡邊久爾、伴 真俊、
安藤 忠、中川 亨、村上直人、市川 卓、
白藤徳夫、鶴沼辰哉

独立行政法人水産総合研究センター東北区水産研究所

田所和明*、伊藤進一*、齊藤宏明、桑田 晃、
岡崎雄二、笥 茂穂、奥西 武、大野創介、
和川 拓、佐藤政俊

独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所

日高清隆*、杉崎宏哉、瀬川恭平、岡崎 誠、
市川忠史、広江 豊、齊藤 勉、広田祐一、
清水勇吾、小埜恒夫、日下 彰、高須賀明典、
宇田川徹、豊川雅哉、森永健司

独立行政法人水産総合研究センター日本海区水産研

究所

木所英昭*、坂西芳彦*、井桁庸介、田 永軍、
渡邊達郎、森本晴之、高山勝巳、茂木博匡
独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究
所

長谷川徹*、清本節夫*、亀田卓彦、清本容子、
岡村和麿、岡慎一郎、西内 耕、山田東也、
種子田雄、豊川雅哉、吉村 拓、八谷光介、
伏屋玲子
独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産
研究所

樽谷賢治、吉田吾郎
独立行政法人水産総合研究センター増養殖研究所
奥 宏海*、宮本幸太*、坂野博之、山本剛史、
松成宏之、古板博文、村下幸司、橋本 博、
松田圭史、今泉 均、増田賢嗣、神保忠雄、
矢田 崇、藤本 宏、平井慈恵

独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所
川俣 茂

独立行政法人水産大学校
村瀬 昇、野田幹雄

国立大学法人北海道大学
岸 道郎

国立大学法人東京大学
小松幸生

国立大学法人東京海洋大学
田中次郎、鈴木秀和

国立大学法人三重大学
前川行幸、倉島 彰

国立大学法人信州大学
花里孝幸

公立大学法人滋賀県立大学
伴 修平

国立大学法人愛媛大学
吉江直樹、郭 新宇

国立大学法人鹿児島大学
越塩俊介、横山佐一郎

学校法人北里研究所北里大学
天野勝文、阿見彌典子

長崎県総合水産試験場
塚原淳一郎、西村大介、桐山隆哉、戸澤 隆

長野県水産試験場
沢本良宏、河野成実、星河廣樹、田原偉成、

築坂正美、上島 剛、武居 薫
滋賀県水産試験場
幡野真隆、上野世司
一般社団法人漁業情報サービスセンター
渡邊一功

(*執筆)

XI 取りまとめ責任者あとがき

日本における漁業活動によって排出されるCO₂量の相当部分が漁船の排出で占められている。そのため、この量を削減するための造船技術、漁具漁法技術等に関する研究が進められている。このような背景の基、「水産分野における温暖化緩和技術の開発」では、漁船の改良によらず、漁獲から最終消費地への輸送までの全燃油消費量を最小にする行動学的アプローチからCO₂排出量削減技術の開発に挑戦した。残念なことに、モデル地域として設定した三陸地域が東日本大震災により被害を受け、本研究も2011年度で中断せざるを得なかった。しかし、短期間ながらも行動学的なアプローチによるCO₂排出削減に向けた様々な基礎技術を開発することができたことは重要な成果と考える。

日本EEZ水域全体で海洋が吸収しているCO₂量は炭素換算で30 GtC/y以上と推定され、世界有数のCO₂吸収海域となっている。人為的CO₂排出量の削減と同時に自然のCO₂吸収機構の維持管理も温暖化緩和に重要なのである。そこで、「水産分野における温暖化緩和技術の開発」では、漁業調査船等を利用した高頻度CO₂分圧観測値に基づいた日本EEZ水域のCO₂吸収量の高精度推定と、数値モデルを用いたCO₂吸収機構の解明に関する技術開発も行った。特に、EEZ水域におけるCO₂吸収量のうち、陸域起源の栄養塩消費に起因したCO₂吸収画分を個別に推定する手法の開発を行った。吸収画分とは、陸域における「人工林」に相当する吸収画分であり、人工林と同様に人類活動によりその吸収量が大きく変動する吸収画分のことである。吸収画分の算出は世界的にも初の試みであり、陸域近傍海面のCO₂吸収量管理技術の開発に向けた重要な知見をもたらしたと自負している。なお、「水産分野における温暖化緩和技術の開発」により実施されてきた調査研究の多くは、2014年度から環境省地球環境保全等総合推進費課題「国際統合データベ

スによる海洋表層 CO₂ 分圧と栄養塩類のマッピング」の一部として、観測範囲を更に拡大して継続中である。これらの研究により、海洋による CO₂ 吸収量の将来予測技術と吸収量保全に関する技術開発が更に進展していくことを願ってやまない。

水温上昇による海洋生態系への影響及び漁業生産への影響が近年顕在化すると共に、今後の温暖化の進行による影響が懸念されている。そこで「地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発」では、まず前期プロジェクト「地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響評価と緩和及び適応技術の開発」に引き続き、海洋環境がどのように変化しているかを明らかにするため、日本周辺海域の低次生態系をモニタリングし、海洋生態系の将来予測に必要なデータ収集を行った。これらのモニタリング結果をデータベース化するとともに、前期の成果をさらに発展させた生態系モデルを用いることで、沖合域及び沿岸域の影響評価の精度を向上させることができた。さらに、これらの影響評価結果を基に2013年以降は、高温対策として適応策の開発を重点に取り組むことができた。

適応策の概要として、沖合域の日本系サケでは、温暖化の進行に伴う最適放流数の変化と北海道各地のふ化場の環境特性を基に、温暖化への対応指針を

提示することができた。沿岸域では、コンブ目への温暖化影響評価を行う際に分散能力を考慮する重要性を指摘することができた。養殖魚では、高温飼育下における生理特性の変化に関する知見が得られ、今後の温暖化への適応策を研究する上での貴重なデータが得られた。内水面では、ワカサギの簡易増殖技術、琵琶湖のイサザの産卵場造成技術として、他の内水面漁業へも応用可能な温暖化への適応策を開発することができた。以上の本プロジェクトの成果が今後の温暖化の影響評価の精度向上に貢献するほか、高温対策技術として漁業・養殖業現場へ技術移転していくことを期待する。

なお、「地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発」で実施した低次生態系モニタリング及び漁業への影響評価課題の一部は、2013年度以降は「漁業・養殖業に係る気候変動の影響評価」として、影響評価の高精度化を目指して継続中であり、更なる成果が得られることを期待している。

最後に、本プロジェクト研究の推進にあたり、学識経験者として貴重なご意見と激励を頂いた東京大学・古谷研教授、和歌山大学・井伊博行教授、鹿児島大学・門脇秀策教授に感謝申し上げます。

(チームリーダー：木所 英昭)

第1編 水産分野における温暖化緩和技術の開発

第1章 日本周辺海域（排他的経済水域）における二酸化炭素フラックスの高精度算定と変動機構の解明

1 漁業調査船の活用による日本周辺海域表層二酸化炭素分圧モニタリングシステムの構築

ア 研究目的

日本排他的経済水域の二酸化炭素吸収量とその時間的変動の把握に必要な情報を取得する。また日本周辺海域の炭素・窒素循環モデルの開発に必要な、海洋内部の炭酸系物質の分布と輸送に関わる情報を海洋観測により取得する。

イ 研究方法

(ア) 漁業調査船を用いた日本周辺海域における $p\text{CO}_2$ データの取得

水研センターが保有する3隻の漁業調査船を用いた、日本周辺海域における海洋表層二酸化炭素分圧 ($p\text{CO}_2$) の自動モニタリングシステムを構築する。このシステムを使用して、従来の5倍以上の時空間分解能を持つ、日本周辺海域（特に太平洋岸）の $p\text{CO}_2$ データセットを取得し、一般公開する。

(イ) 日本周辺海域における $p\text{CO}_2$ 変動特性の解析

上記により得られた $p\text{CO}_2$ データの解析から、日本 EEZ 水域における $p\text{CO}_2$ の時空間変動特性を抽出する。特に高時空間分解能データとしての特性を活かし、これまで詳細が不明であった小時空間スケールにおける $p\text{CO}_2$ 変動特性と、その変動要因を海域毎に明らかにする。

(ウ) 海洋内部の炭酸系物質の観測

第2章における炭素・窒素循環モデルの開発に必要な、海洋内部の炭酸系物質の分布と輸送に関わる情報を、海洋観測によって取得し、提供する。

(エ) 日本沿岸域における陸域栄養塩に起因した炭素吸収量の算定

外洋域における二酸化炭素の吸収は海洋内部の栄養塩の循環と大気中二酸化炭素分圧の上昇に伴った無機的な吸収の二つの機構によって主に支えられており、これらの機構は人為的にコントロールする

事はほぼ不可能である。これに対して、沿岸域では陸から供給された栄養塩に起因した生物生産によっても二酸化炭素が吸収されていると考えられ、この機構による CO_2 吸収量は陸域からの栄養塩流出過程を制御する事によってある程度のコントロールが可能である。このため、沿岸域における陸域栄養塩に起因した CO_2 吸収は陸域における人工林の CO_2 吸収と同様に、気候変動枠組み条約における日本のカーボンバジェットに算入できる可能性がある。本課題では日本沿岸の幾つかの内湾域における $p\text{CO}_2$ 観測データを基に、陸域から流入する栄養塩量と、それによって沿岸域で引き起こされている炭素吸収量を推定する手法を開発する。

ウ 研究結果

(ア) 漁業調査船を用いた日本周辺海域における $p\text{CO}_2$ データの取得

水研センターの3隻の漁業調査船（北光丸・若鷹丸・蒼鷹丸）に搭載されている表層環境モニタリングシステムの $p\text{CO}_2$ 計測器に接続する自動キャリブレーションシステムを設計・設置し、全航海で自動運転が可能な形に改良した。この $p\text{CO}_2$ 計について陸上で2回の相互検定試験を行い、実質的な国内標準機である国環研の $p\text{CO}_2$ 計測システムとの機差評価を行った（第1章-2と共同）。これにより、開発した $p\text{CO}_2$ 計が、水研船の標準的な航海日数である2週間程度の期間を通じて ± 2 ppm 以下の測定精度を保持していることが確認された（図 111-1）。

この $p\text{CO}_2$ 観測システムを用いて、漁業調査船を用いた日本周辺海域における $p\text{CO}_2$ の高頻度自動観測を開始した。2013年末までに42航海、のべ500日分の $p\text{CO}_2$ 観測データを取得した（図 111-2）。この事により、日本 EEZ 海域内での $p\text{CO}_2$ 観測密度が従来のほぼ3倍にまで飛躍的に増加した。取得されたデータを国際的な $p\text{CO}_2$ データベース作成プロジェクト SOCAT (Surface Ocean Carbon Atlas

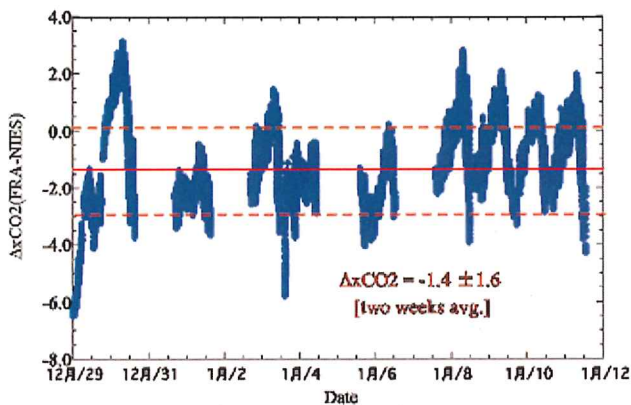


図 111-1 水研センターと国環研の pCO₂ 測定値の系統誤差

2 週間の相互検定結果を時系列表示

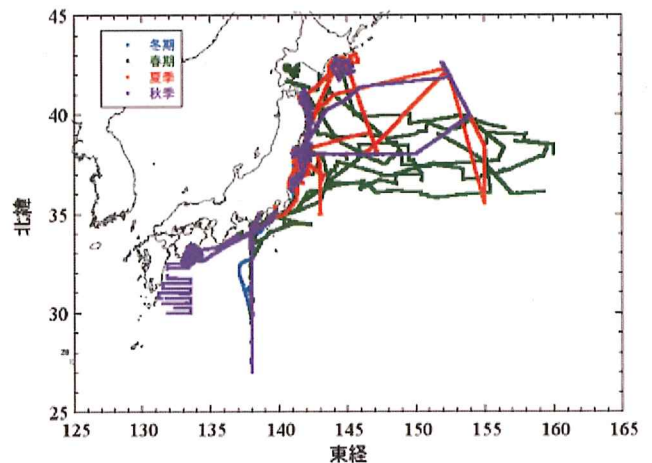


図 111-2 本課題で実施した漁業調査船による pCO₂ 観測の航路図

project) に随時投稿・提供した。2012 年度末までの観測データは SOCATver.2 として 2013 年度に、2013 年度の観測データは SOCAT ver.3 として 2015 年度にそれぞれ公開された (Bakker et al.¹⁾)。更にこれらのデータは、陸域・海域を通じた全球的な炭素収支の推計報告 Global Carbon budget における 2013 年度以降の収支計算にも使用されている (Quere et al.^{2,3)})。

(イ) 日本周辺海域における pCO₂ 変動特性の解析

2011 年 11 月以降の観測により、秋季日向灘海域における pCO₂ 分布を初めて明らかにした。秋季日向灘海域の基本的な分布は第 1 章 -2 による広域推定値 (Nakaoka et al.⁴⁾) にほぼ対応していたが、沿岸域では黒潮流軸より低温の水塊が分布しているにもかかわらず、pCO₂ 値は沿岸部でも黒潮流軸とほぼ同等の値を保持しているという、新たな構造が明らかとなった。また従来比較的一様と思われていた黒潮流軸上に、小空間スケールでは pCO₂ の顕著な変動が生じている事を突き止めた (図 111-3)。この現象について、黒潮統流の下部にサブメソスケールの高塩・高温の亜表層渦 (レンズ) が存在しており、その上部で pCO₂ 値の顕著な増大が起きている事を突き止めた。既存の栄養塩データベースを加えた解析から、栄養塩と全炭酸濃度の高い東シナ海陸棚底層水がサブメソ渦として黒潮上流域の亜表層にとりこまれ、黒潮下部を輸送されながら直上の表層水に全炭酸を供給し、表層に高 pCO₂ パッチを形成

しているという過程が明らかとなった。

親潮・混合域では、メソスケール渦にともなう局地的な pCO₂ 変動について解析を行った。本課題で取得したデータに 2000 年以降の SOCAT 収録データを加えた解析により、混合域で頻繁に発生・消滅している高気圧性渦のおよそ 30% で、冬期には pCO₂ の局地的増大、それ以外の季節では pCO₂ の局地的減少が引き起こされている事が判明した (図 111-4)。高気圧性渦の中心では鉛直混合が活発になる事に起因すると考えられる。春季 - 秋季の低気圧性アノマリは、鉛直混合で下層からもたらされた全炭酸が同時にもたらされる栄養塩を利用した生物生産で全て消費される一方、鉛直混合によって渦内部の表層水温が、渦が形成される前の時点の暖水の表層水温に比べて若干低下する事に起因しているのではないかと思われるが、後者の過程は複雑なため、今後集中観測による実証研究を行う必要がある。

(ウ) 海洋内部の炭酸系物質の観測

pCO₂ 観測と平行して、農林水産技術会議気候変動対策プロジェクト研究「地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発」で水研センターにより実施された親潮・混合域及び黒潮域のモニタリング定線 (A ライン、O ライン) 上の数測点において、全炭酸及びアルカリ度の各層観測を実施し、親潮域及び黒潮域の海洋内部の炭酸系分布に関するデータを取得した。このデータは A ラインにおけるこれまでの 14 年分の既存観測データと共

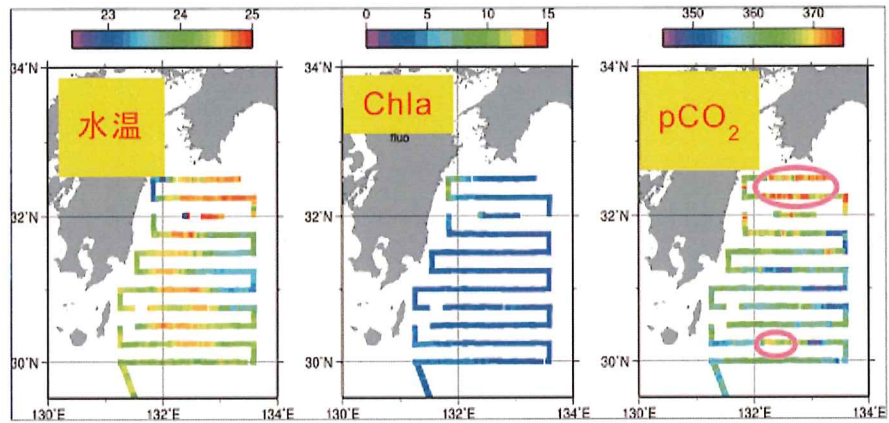


図 111-3 2010 年 11 月の日向灘海域における、水温、Chla と pCO₂ の平面分布

高水温で示される黒潮流軸上の pCO₂ 分布は一様ではなく、局地的な高 pCO₂ パッチ（右図赤丸部分）が散在している事が発見された。

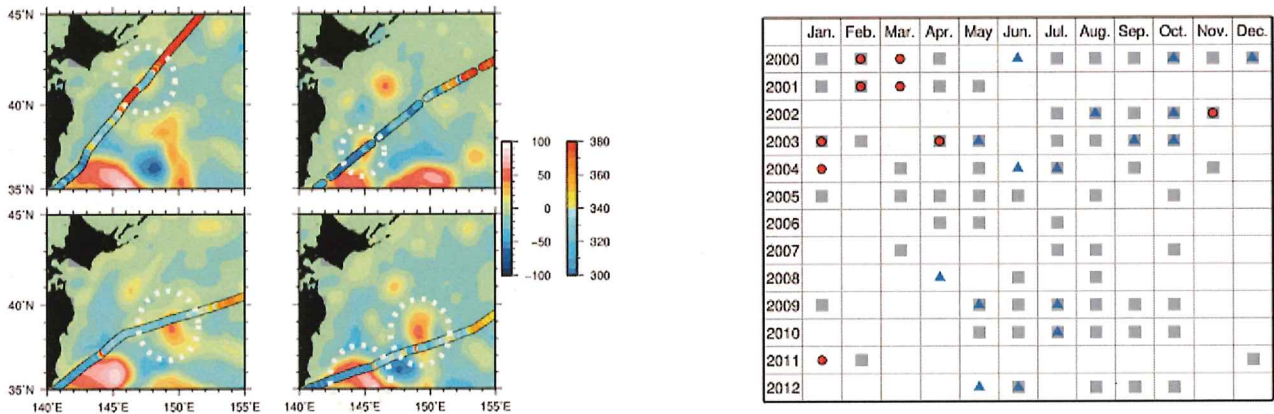


図 111-4 (左) 混合水域において観測された局地的 pCO₂ パッチ（白丸）及び航路上の pCO₂ 分布（色線、スケールは右側）と、同時期に衛星により観測された海面高度の分布（背景カラー、スケールは左側）

本課題実施中に同海域で観測された 67 個の pCO₂ パッチのうち 5 例を例示。(右) SOCATver.2 データベース上で pCO₂ 分布が観測されている、混合水域中の 79 個の高気圧性渦（灰四角）のうち、渦が高 pCO₂ パッチ化していたもの（青三角）と低 pCO₂ パッチ化していたもの（赤四角）の季節分布。1-3 月期に高気圧性渦の 35% が低 pCO₂ パッチ化、5-10 月期に高気圧性渦の 25% が高 pCO₂ パッチ化と、明瞭な季節差を示す事が判明した。

に、第 2 章の炭酸系モデルの出力評価の為に使用された。また水研センターによる日本周辺海域の既存炭酸系観測データ（全炭酸・アルカリ度）をとりまとめ、更に国内外諸機関の北太平洋における炭酸系観測データと統合して、PICES 国際炭酸系データベース（PICES Pacific Ocean Interior Carbon data Base : PACIFICA）として外部公開した（Suzuki et al.⁵⁾）。

(エ) 日本沿岸域における陸域栄養塩に起因した炭素吸収量の算定

仙台湾、東京湾、伊勢湾の三つの湾において、湾外に対する湾内の pCO₂ 低下量を求め、これと湾内海水のアルカリ度から、観測された pCO₂ 低下を算

現するために必要な湾内海水の全炭酸減少量を算出する手法を開発した（図 111-5）。更に、この全炭酸減少を実現するために必要な陸域からの栄養塩負荷量をレッドフィールド比から算出した（表 111-1）。

仙台湾では、震災影響調査に伴う pCO₂ 観測により、2011 年以降の各年の夏 - 秋季における仙台湾の面的 pCO₂ 分布の時系列変化データを取得した。これにより、夏季から秋季にかけての仙台湾の河川影響海域で、毎年 pCO₂ の減少を検出した。また震災年である 2011 年は 2012 年に比べて外洋域から仙台湾沿岸域に向けての pCO₂ 低下量が倍になっており、震災時に陸域から供給された栄養塩が 2011 年の特異的な pCO₂ 低下を引き起こした可能性が示唆

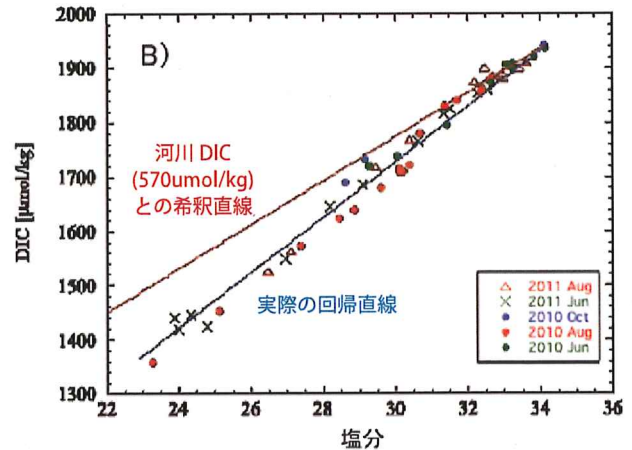
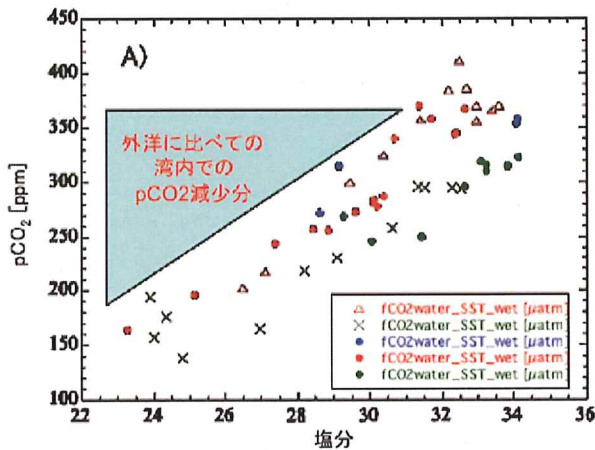


図 11-5 内湾域における陸域栄養塩起源の炭素吸収量の算定手法（伊勢湾の例）

A) 観測された湾内の pCO_2 分布を塩分に対してプロットし、外洋の観測値からの pCO_2 減少量を塩分の関数として求める。
 B) 湾内に流入する主要河川の河口において過去に観測されたアルカリ度（小林 1960, 6）と湾口のアルカリ度観測値から、別に湾内水のアルカリ度を塩分の関数として求めておき、このアルカリ度値を用いて観測された塩分 - pCO_2 直線を塩分 - 全炭酸直線に変換する（青線）。主要河川河口（塩分=0）における全炭酸濃度と外洋域（塩分=34）における全炭酸濃度を結んだ希釈直線（赤線）と実際に観測された塩分 - 全炭酸直線との各塩分範囲における差額が、その塩分範囲において陸域栄養塩を用いて固定された炭素量（単位体積当たり）になる。各塩分範囲における炭素固定量を、その塩分を示す湾内水の面積及び混合層深度に掛け合わせ積算する事により、湾全体の陸域栄養塩による炭素固定量が求められる。

表 11-1 東京湾、伊勢湾、仙台湾における、陸域栄養塩由来の炭素固定量推定値

	仙台湾	東京湾(浦賀水道 含む)	伊勢湾
面積[km ²]		1320	1738
閉鎖度		1.8	1.5
海水の平均滞留時間 [日]	14	50	20
炭素固定量 [tonC/月]	298	1707	5866
消費栄養塩量 [ton/月]	N	P	N
	45	41.6	1032
陸域栄養塩負荷量 [ton/月]	282	381	1500
陸域栄養塩の利用率 [%]	16	11	69

された。平常年である 2012 年の夏季 - 秋季の仙台湾沿岸域における炭素固定量は 298 tC/月と見積もられた。この炭素吸収を実現するために必要となる栄養塩の負荷量は、同季節中に河川経由で仙台湾に付加される栄養塩の 16% に相当する。また東京湾と伊勢湾では、観測値から夏季の各湾の炭素吸収量が、それぞれ 1,707 tonC/月及び 5,866 tonC/月と見積もられた。この炭素固定で消費される栄養塩量が各湾への月間陸域栄養塩負荷量に占める割合は、東京湾で 11%、伊勢湾で 69% だった。

工 考 察

日本周辺海域は世界でも有数の CO_2 吸収海域として知られており、なおかつその吸収機構については未だに議論の対象となっている。こうした吸収機構の細部の解明や吸収量の変動の把握には非常に高い時空間分解能の観測データが必要になる。本課題による観測により、日本周辺海域における pCO_2 データの観測密度が飛躍的に増大したことは、こうした観点から見て非常に意義深い。実際に第 1 章 - 2 及び第 2 章において、本課第の取得データを利

用した $p\text{CO}_2$ 分布の高解像度グリッド化やモデル化が行われ、日本 EEZ 水域における CO_2 吸収量算定値の高精度化やその年変動の把握が大きく進展した。今後更に解析を進展させることにより、本課題で得られた EEZ 水域内における小時間スケールの $p\text{CO}_2$ 変動を積算した結果が、EEZ 水域全体の CO_2 吸収量の年変動といったマクロな現象にどのように関連しているかの理解が進むものと期待される。例えば混合水域で観測された高気圧性渦に伴う $p\text{CO}_2$ の局地的変動を考慮した場合と考慮しなかった場合とで、海域全体の CO_2 吸収量算定値にどのような差が生じるかを検討する等の解析が考えられる。

海洋表層における $p\text{CO}_2$ の分布と並行して、海洋内部における全炭酸とアルカリ度の分布についてもモニタリングの実施とデータの国際統合に貢献できた。 $p\text{CO}_2$ の観測から求められる大気から海洋への炭素吸収量と、同じ海域における海水中の全炭酸量の時間的増加量とを比較する事で、当該海域の炭素吸収量の見積もり精度を更に向上させる事ができる。全炭酸の国際統合データベース PACIFCA を用いた北太平洋の全炭酸増加量の見積もりも現在、国内の複数機関の協力によって進められており、今後全炭酸側の解析結果と本プロジェクトの解析結果を比較・統合した解析が実施できると期待される。

陸域における「人工林」に相当する、陸域栄養塩起源の炭素吸収量の推定は、海洋炭素循環の研究においてはこれまで殆ど行われて居らず、本課題による見積もり値は実質的に世界初の試みである。本課題の実施期間中には日本の沿岸全域における見積もりを実施する事はできなかったが、閉鎖度や栄養塩負荷量の異なる代表的な三つの湾で吸収量算定手法を確立した事により、今後の他の沿岸部への応用が期待される。

陸域から流入した栄養塩は究極的には全て海洋内で消費されるが、一般に内湾では外洋に比べて生産される有機物の C : N 比が高いために、同じ量の栄養塩であれば内湾で消費された方が外洋での消費に比べて固定できる炭素量が多くなる。また外洋の表層で生産された有機物の殆どは比較的浅い水深帯で沈降中に分解され、固定された炭素は比較的短いタイムスケールで無機態として海洋表層に戻ってしまいが、沿岸域では外洋に比べて堆積物中に埋没され

る有機物の割合が高いため、この点でも沿岸における陸域栄養塩消費は炭素固定のうえで有利に働く。本課題による解析の結果、仙台湾、東京湾に比べて、伊勢湾では湾内における陸域栄養塩の使用効率が顕著に高い事が判った。伊勢湾が高い陸域栄養塩効率を示す要因を今後解析する事で、陸域由来の栄養塩を沿岸部において効果的に消費し、炭素吸収量を増加させるための方策が導き出される可能性がある。

オ 今後の課題

EEZ 水域内における小時間スケールの $p\text{CO}_2$ 変動が、マクロな炭素吸収量の変動にどの程度の寄与を与えているかについて、引き続き継続した解析が必要である。混合水域における渦と連動した $p\text{CO}_2$ 変動についてはより多くの事例を集めた上で統計的な解析を行う必要があり、本課題で開発したシステムを用いた $p\text{CO}_2$ モニタリングの継続が重要となる。黒潮海域では、従来は大きな変動がないと考えられていた $p\text{CO}_2$ 分布に局地的な変動が重なっている事が本課題により初めて明らかとなったが、混合水域に比べても更に事例が少ないため、ここでもモニタリングの継続によって引き続き事例の収集に努める必要がある。

本課題においては主に炭素吸収を主眼として $p\text{CO}_2$ データの解析を行ったが、 $p\text{CO}_2$ データそのものは一次生産力の時空間変動の解析にも使用可能である。混合水域や黒潮域に $p\text{CO}_2$ のパッチ上の分布が認められたことは、栄養塩の供給や利用についても同様にパッチ上の変動が存在する事を強く示唆しており、特に貧栄養の黒潮海域においては、このような小時間スケールの栄養塩供給が海域の生態系に大きな影響を与えている可能性もある。今後は $p\text{CO}_2$ に栄養塩の連続モニタリングも加える事により、生産力変動まで含めた $p\text{CO}_2$ データの多面的な利用を図り、観測データの利用価値を高めていく事も必要であると考えられる。

同様に、これまでの $p\text{CO}_2$ 解析は全球的な炭素吸収量推定を主眼としていたため、面積的に小さい沿岸域における $p\text{CO}_2$ の分布やその変動の解析は非常に立ち後れている。陸域栄養塩による炭素吸収量を切り口とした解析を継続する事により、こうした沿岸域における $p\text{CO}_2$ 変動の解析も今後進展させて

いく必要がある。沿岸域の pCO₂ 観測は近年問題となっている海洋酸性化現象を取り扱う上でも必須の情報であり、今後はそうした方面との連携も重要である。

カ 要 約

(ア) 漁業調査船を用いた日本周辺海域における pCO₂ データの取得

水研センターの3隻の漁業調査船を用いた pCO₂ の自動モニタリングシステムを開発し、42 航海、のべ 500 日分の pCO₂ 観測データを取得して国際データベースに提供・公開した。

(イ) 日本周辺海域における pCO₂ 変動特性の解析

取得データの解析により、混合水域において高気圧性渦に伴う局地的な pCO₂ 変動の発生を検出し、その発生頻度と季節性の評価を行った。また従来は小市空間スケールの変動が乏しいと考えられていた黒潮域においても、局地的な pCO₂ 変動が発生している事を確認し、その出現機構を推定した。

(ウ) 海洋内部の炭酸系物質の観測

黒潮域・親潮域における海洋内部の炭酸系モニタリングを実施し、課題「日本周辺海域の高解像度炭素・窒素循環モデルの開発」に提供した。また取得データを国際統合データベース PACIFICA にて公開した。

(エ) 海洋内部の炭酸系物質の観測

仙台湾、東京湾、伊勢湾の三つの海域において、陸域から流入した栄養塩を起源とした炭素固定量を湾内の pCO₂ 分布から推定した。それぞれの湾において、陸域から流入した栄養塩の湾内における固定利用効率率は 11% -69% と湾毎に大きく変動した。

キ 引用文献

- 1) Bakker, D. C. E., et al. (2014) An update to the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT version 2), Earth Syst. Sci. Data 6: 69-90, doi:10.5194/essd-6-69-2014.
- 2) Quéré, C. L., et al. (2014) Global carbon budget 2013, Earth Syst. Sci. Data 6: 235-263, doi:10.5194/essd-6-235-2014.
- 3) Quéré, C. L., et al. (2015) Global carbon budget 2014, Earth Syst. Sci. Data 7: 1-39, doi:10.5194/

essd-7-1-2015.

- 4) Nakaoka et al. (2013) Estimating temporal and spatial variation of ocean surface pCO₂ in the North Pacific using a self-organizing map neural network technique, Biogeosciences 10: 6093-6106, doi:10.5194/bg-10-6093-2013.
- 5) Suzuki, T., et al. (2013) PACIFICA Data Synthesis Project, ORNL/CDIAC-159, NDP-092, doi:10.3334/CDIAC/OTG.PACIFICA_NDP092.
- 6) 小林純 (1960) 日本の平均水質とその特徴に関する研究. 農学研究. 48 : 63-104.

研究担当者 (小埜恒夫*、葛西広海、桑田 晃、田所和明、市川忠史)

2 衛星・再解析データを用いた高時空間分解能二酸化炭素分圧グリッドデータの作成手法の開発

ア 研究目的

水研センターと国環研の観測によって得られた pCO₂ モニタリングデータを統合し、面的なグリッドデータを作成する手法を開発する。得られたグリッドデータから、日本周辺海域における大気-海洋間二酸化炭素フラックスの高精度定量化と、その時空間変動特性の把握を行う。

イ 研究方法

(ア) 漁業調査船 pCO₂ データの精度評価・系統誤差評価

第1章-1が構築した pCO₂ 観測システムの測定精度を評価するために、国環研が運用している pCO₂ モニタリングシステムと相互検定を行う。問題があった場合は適宜装置に改良を加えて実運用可能なレベルに調整する。また国環研の所有する日本周辺海域の pCO₂ 観測データと第1章-1による取得データとの比較を行い、系統誤差の有無を評価する。

(イ) 日本周辺海域における pCO₂ グリッドデータの作成

今回の海洋 pCO₂ マッピングに用いたアルゴリズムは自己組織化マップ (SOM) と呼ばれ、与えられた入力情報 (海面水温やクロロフィルなどのト

レーニングデータセットと呼ばれる客観観測データセットとラベリングデータセットと呼ばれる $p\text{CO}_2$ 観測データ) 間の類似度をマップ上での距離で表現するモデルである。すなわちニューロン化されたトレーニングデータセットとラベリングデータセットが類似度によって関連付けられ、それを基にトレーニングデータセットから $p\text{CO}_2$ 分布を再現する。トレーニングデータセットに用いる海面水温 (SST)、海面塩分 (SSS)、混合層深度 (MLD) は、西部北太平洋を $1/12$ 度、1日毎の時空間解像度で再現した JCOPE2^{*1} 再解析データを採用し、クロロフィル濃度 (CHL) は、アメリカ海洋大気局が打ち上げた SeaWiFS と MODIS Aqua の衛星データを使用した。また人為的な海洋の CO_2 増加は、大気 CO_2 増加率と同じであると仮定した。

(ウ) 日本周辺海域の CO_2 フラックスの算定

(イ) で得られた $p\text{CO}_2$ 分布と GLOBAL-VIEW から取得した大気中 CO_2 濃度、Cross Calibrated Multi-Platform (CCMP) 風速データを用いて、日本の経済水域における大気海洋間 CO_2 フラックスを推定した。ガス交換係数は、Sweeney et al.¹⁾ による提案を採用した。

ウ 研究結果

(ア) 漁業調査船 $p\text{CO}_2$ データの精度評価・系統誤差評価

2010年9月14日から16日に国環研と水研センターの CO_2 計を水研センター水産工学研究所に持ち込み、相互比較実験を実施した。実験に用いた国環研側の $p\text{CO}_2$ 計システムは紀本電子工業社製のフロースルー型タンデム平衡器と LICOR6262/7000 赤外分光光度計を搭載した同社製 MOG-501/701 で構成されている。本システムには、フィードバック装置と呼ばれるバブリングガスの CO_2 濃度を直前に測定した平衡器内空気 (平衡空気) の CO_2 濃度になるよう調整する装置が搭載されており、これによって速やかに器内の空気と海水中の気相の CO_2 濃度を平衡状態に到達させることが可能となる。一方、北海道区水産研究所 (以下「北水研」という) の $p\text{CO}_2$ 計はゴアテックチューブ小型平衡器と LICOR840 赤外分光光度計が一体となった離合社製の測定システムを2台用いた。3日間の実験から、国環研-北水研間の $p\text{CO}_2$ 差は時間とともに増加

し、初日に $3\ \mu\text{atm}$ 程度、2日目以降は $5\text{-}9\ \mu\text{atm}$ となった。これは水研センターの海水配管内に生物が付着し、その呼吸活動によって配管内を通る海水中の CO_2 濃度が増加しているためであることが示唆された。この結果を受けて、第1章-1で水研センターの測定システムを改善し、水研センター増養殖研究所横須賀庁舎 (以下、増養殖研究所) にて2回目の相互比較実験を行って、水研センターによる標準的な航海日数である2週間程度の期間であれば測定値のドリフトは生じないことが確認された。

さらに、現場観測において2010年10月の東海沖と2011年6月の房総沖での両機関による観測データを比較した。その結果、有為な差は見られないことが確認できた。

(イ) 日本周辺海域における $p\text{CO}_2$ グリッドデータの作成

本課題では、まず始めに課題担当者によって得られた北太平洋の $p\text{CO}_2$ 分布 (Nakaoka et al.²⁾) から全炭酸濃度分布を推定し、解析を行った (Yasunaka et al.³⁾)。海洋観測定点データとの比較を行った結果、推定値は、定点観測値と非常によく一致し、推定誤差も小さいことから先行研究と比較しても精密な推定ができたと考えられる。このようにして得られた結果から、冬季から夏季までの全炭酸濃度の時間変化を積算し、塩分変化効果と大気海洋間 CO_2 フラックスによって補正を行い、正味群集生産量を算出したところ、衛星海色データに基づく正味基礎生産量の分布と良く似た分布を示した (図 112-1)。更に、全炭酸濃度分布が太平洋10年規模振動 (PDO) と呼ばれる気候変動に伴って年々変化していることを明らかにした (図 112-2, Yasunaka et al.⁴⁾)。

本課題によって水研センターと国環研のデータ統合が進んだため、2012年度から対象海域を日本近海に特化した $p\text{CO}_2$ 分布再現を試み、2002年から2011年の期間について、先行研究よりも詳細な分布を得ることができた。得られた結果を観測値と比較したところ系統誤差はほぼ0であり、平均自乗誤差が $16.2\ \mu\text{atm}$ であった。これは、先行研究である Nakaoka et al.²⁾ 平均自乗誤差 $17.6\ \mu\text{atm}$ と比べてわずかに小さく、推定期間が3年間長いにも関わらず推定誤差について改善したと言える。平均的な2月、5月、8月、11月の $p\text{CO}_2$ 分布を図 112-3 に示

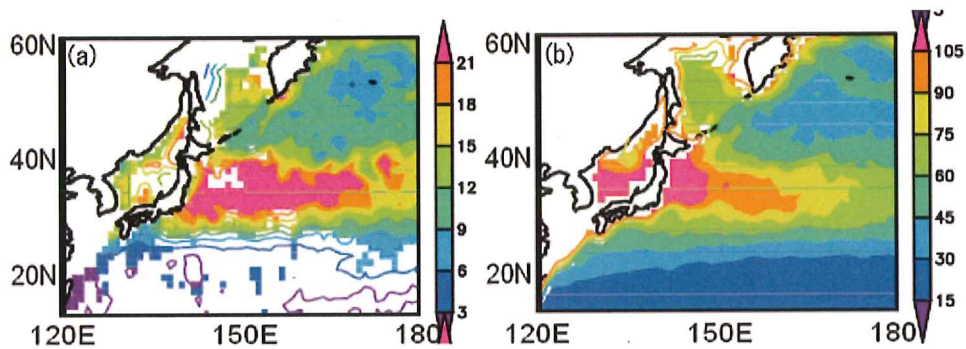


図 112-1 3月から7月にかけての生物生産量 (mmol/m²/day)
 (a) 全炭酸推定値から見積もった正味群集生産量、(b) 衛星海色データによる正味基礎生産量。

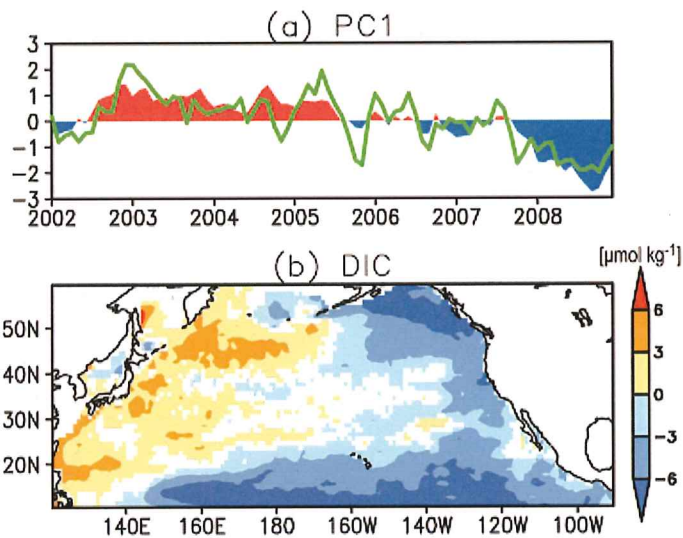


図 112-2 (a) 北太平洋全炭酸 EOF 第1モードの時係数 (赤青) と北太平洋10年規模変動 (PDO) 指数 (緑)。(b) EOF 第1モードに対する全炭酸濃度の回帰係数分布。誤差分散より大きい係数のみに、色を付けてある。

す。得られた pCO₂ 分布は、Nakaoka et al.²⁾ と似た pCO₂ 分布を示した。

(ウ) 日本周辺海域の CO₂ フラックスの算定

(イ) で得られた pCO₂ 分布と、大気 CO₂ 濃度観測値、大気圧データ、風速データ等を用いて大気海洋間 CO₂ 交換量を算出した。図 112-4 は、2002 年から 2011 年の平均的な年間 CO₂ フラックス分布である。日本周辺海域は強い CO₂ の吸収源であり、特に北緯 30 度から 40 度の緯度帯で非常に強い CO₂ 吸収源となっている。また北緯 50 度付近では、強い CO₂ の放出源が見られる。強い CO₂ 吸収や放出は特に冬季に見られ、これは冬季の強い海上風速がガス交換を促進するためである。一方、夏季は生物活動による pCO₂ 低下や、水温上昇に伴う pCO₂ の増加が見られるものの、海上風速が弱いため CO₂

吸収も放出も弱い。

次に、日本の経済水域における大気海洋間 CO₂ 交換量の年々変動を調べるために、季節変化成分を除いた CO₂ 交換量の時間変化を図 112-5 に示す。解析期間における平均的な大気海洋間 CO₂ 吸収量は年間 5.1×10^{-2} PgC/yr であり、年々変動の振幅は 6×10^{-3} PgC/yr であった。

工 考 察

(ア) 漁業調査船 pCO₂ データの精度評価・系統誤差評価

多くの pCO₂ 観測システムは、生物による呼吸や有機物の分解による影響で pCO₂ を真値よりも高めに測定する傾向がある。本課題により、水研センターと国環研の pCO₂ 観測システム間の測定差を評

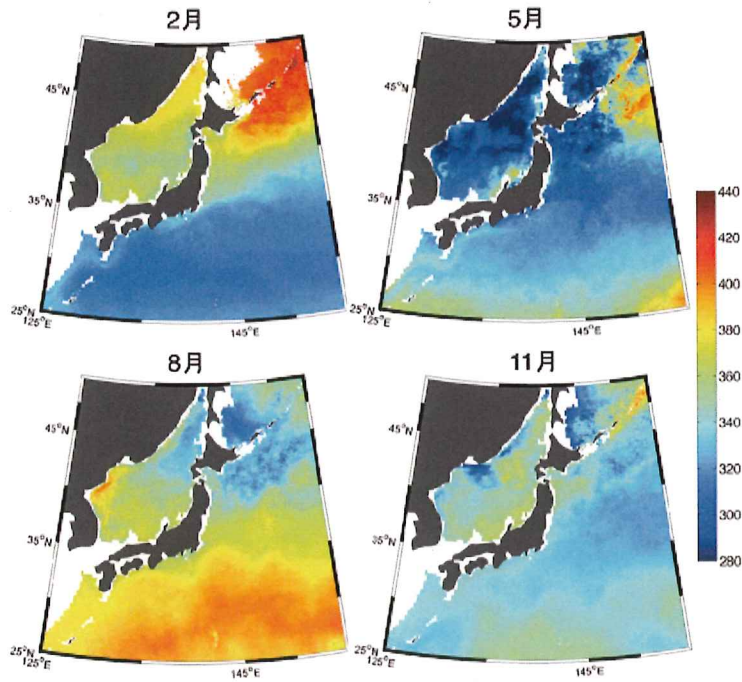


図 112-3 再現された 2002 年～2011 年の 10 年間で平均した 2 月、5 月、8 月、11 月の平均的な pCO₂ 分布 (μatm)

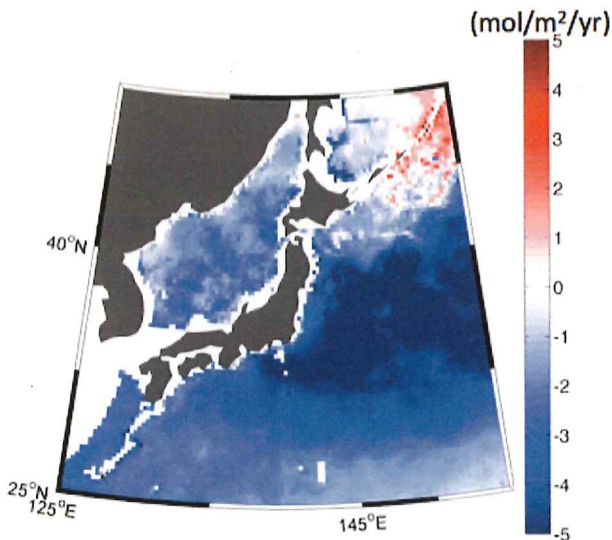


図 112-4 推定された 2002 年～2011 年の平均的な年間 CO₂ フラックス分布 (mol/m²/yr)

正の値が海洋から大気への放出、負の値が大気から海洋への吸収を示す。

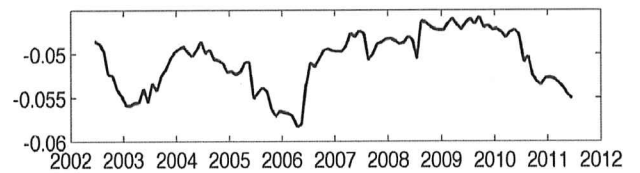


図 112-5 季節変化成分を除いた 2002 年～2011 年の CO₂ 交換量 (PgC/yr) の時間変化

価したことで、水研センターのシステムについて改善点を発見しシステムを改良した。その結果両機関による同一海域での観測データ比較においても有為な差が見られないことを確認した。このことは、単に両機関のデータ統合するためだけでなく、国際的な pCO₂ データ統合プロジェクト SOCAT^{*2} 等で

データを利用する上で非常に意義深い。今後ともこのような相互比較実験を他機関で定期的実施し、測定精度の向上に努めて行くことが重要である。

(イ) 日本周辺海域における pCO₂ グリッドデータの作成

先行研究から推定した全炭酸濃度分布から正味群

集生産量を推定し、日本の周辺海域は $14\text{mmol/m}^2/\text{day}$ を超える高生産海域であることが明らかとなった。さらに、推定された群集生産量が衛星観測で推定された正味基礎生産量の2～3割であった。

全炭酸濃度の長期変化について解析を行い、日本周辺海域はPDOに対して正の相関を持つことが初めて明らかとなった。すなわち、2003年から2005年頃にかけて平年よりも高い全炭酸濃度分布を示し、2008年には平年よりも低い分布を示すことが明らかになった。

本課題で推定された pCO_2 分布では、九州から四国・紀伊半島沖にかけて黒潮の流れに沿って高い pCO_2 が初めて再現できた。これは、亜熱帯域の高 pCO_2 水塊が黒潮によって日本近海に輸送されていることを示唆しているものと考えられる。

(ウ) 日本周辺海域の CO_2 フラックスの算定

本課題で明らかとなった日本の経済水域における年間 CO_2 吸収量 ($5.1 \times 10^{-2} \text{PgC/yr}$) は、農林水産省農林水産技術会議が1999年度～2002年度に実施したプロジェクト研究「森林、海洋等における CO_2 収支の評価の高度化」で報告した $3 \times 10^{-2} \text{PgC/yr}$ よりも大きな吸収を見積もっており、当該海域が炭素循環についてこれまで考えられてきたよりも大きな役割を果たしていることが示唆された。また、その年々変動の振幅は $6 \times 10^{-3} \text{PgC/yr}$ と年間 CO_2 吸収量の1/9程度であり、比較的小さな振幅だったと言える。

オ 今後の課題

本課題では、2002年から2011年の期間で高解像度な pCO_2 分布推定を行い日本周辺海域の大気海洋間 CO_2 交換量の評価を行った。今後は推定精度を向上させるとともに、解析期間をさらに延ばして20世紀最大のエルニーニョと呼ばれた1998年の pCO_2 分布変動や CO_2 交換量の時空間変化についても解析を行い、気候変動が日本周辺海域の海洋炭素循環に与える影響について詳細に検討する必要がある。そのためには、今後も日本周辺海域を中心とした北太平洋での観測網の充実を推進して行くとともに、SOCAT*2に登録されている他研究期間の観測データを利用することも必要であると考えられる。

力 要 約

(ア) 漁業調査船 pCO_2 データの精度評価・系統誤差評価

水研センターと国環研が有する pCO_2 観測システムの相互比較実験を水産工学研究所と増養殖研究所にて実施し、水研センターの pCO_2 観測システムの改良を行った。その結果、両機関の観測差を $\pm 2 \mu\text{atm}$ 程度まで減少させることができた。このことで、観測結果の統合的利用が可能となり、日本近海の pCO_2 観測カバーの強化を少ない投資で実現することが可能となった。

(イ) 日本周辺海域における pCO_2 グリッドデータの作成

先行研究から推定した全炭酸濃度分布から正味群集生産量を推定し、日本の周辺海域が高生産海域であることを明らかにした。また、日本周辺海域の全炭酸濃度は、PDOに対して正の相関を持つことを初めて明らかにした。

本課題で推定された pCO_2 分布は、これまで明らかでなかった九州から四国・紀伊半島沖にかけての黒潮の流れに沿った高 pCO_2 水塊を初めて再現した。これは、亜熱帯域の高 pCO_2 水塊が黒潮によって日本近海に輸送されていることを示唆しているものと考えられる。

(ウ) 日本周辺海域の CO_2 フラックスの算定

日本の経済水域における平年の大気海洋間 CO_2 交換量は $-5.1 \times 10^{-2} \text{PgC/yr}$ であり、年々変動の振幅は $6 \times 10^{-3} \text{PgC/yr}$ であった。このことから、当該海域がこれまで考えられてきたよりも多くの CO_2 を吸収していることが示唆された。

キ 引用文献

- 1) Sweeney et al. (2007) Constraining global air-sea gas exchange for CO_2 with recent bomb ^{14}C measurements, *Global Biogeochem. Cycles* 21, GB2015, doi: 10.1029/2006GB002784.
- 2) Nakaoka et al. (2013) Estimating temporal and spatial variation of ocean surface pCO_2 in the North Pacific using a self-organizing map neural network technique, *Biogeosciences* 10: 6093-6106, doi: 10.5194/bg-10-6093-2013.
- 3) Yasunaka et al. (2013) Monthly maps of sea surface dissolved inorganic carbon in the North

Pacific: Basin-wide distribution and seasonal variation, J. Geophys. Res. 118: 3843-3850, doi:10.1002/jgrc.20279.

Decadal Oscillation, Geophys. Res. Lett. 41: 1005-1011, doi: 10.1002/2013GL058987.

4) Yasunaka et al. (2014) North Pacific dissolved inorganic carbon variations related to the Pacific

研究担当者 (野尻幸宏*, 中岡慎一郎、安中さやか、宮崎千尋)

* 1 : JCOPE2 海洋研究開発機構による日本沿海予測可能性実験 (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment) の改訂版

* 2 : SOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas) 海洋表層の CO₂ 観測データを収拾し、研究機関による品質確認を行った上で公開しているデータベースプロジェクト

第2章 日本周辺海域の高解像度炭素・窒素循環モデルの開発

1 日本周辺海域の高解像度炭素・窒素循環モデルの開発

ア 研究目的

1/4度×1/6度メッシュの空間解像度を持つ、日本周辺海域の高精度炭素・窒素循環モデルを開発し、第1章で取得された日本周辺海域の $p\text{CO}_2$ 分布をモデル上で再現する。完成したモデル上で、日本周辺海域表層の炭素及び窒素の物質収支（他海域からの水平輸送、亜表層からの鉛直輸送、大気-海洋間の CO_2 フラックス等の推定）を解析し、海洋表層に着目した物質循環を明らかにする。

イ 研究方法

(ア) 基本モデルの開発

海洋生態系モデルNEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) をベースとして、1/4度×1/6度メッシュの空間解像度を持つ、日本周辺海域の高精度炭素・窒素循環モデルを開発した。

(イ) 観測との比較に基づいたモデルの改良

観測（第1章）が取得した日本周辺海域の $p\text{CO}_2$ 分布をモデル上で再現された $p\text{CO}_2$ 分布と比較し、モデルの改良を行った。

(ウ) CO_2 ガス交換係数の季節変動が大気海洋間 CO_2 フラックスに与える影響評価

ガス交換係数、 CO_2 フラックスを年平均とそれからのずれに分解した解析を行った。

(エ) $p\text{CO}_2$ の季節変動に対する生物効果、温度効果の影響評価

温度を年平均値で固定する実験によって $p\text{CO}_2$ の季節変動に対する生物効果を同定し、溶存無機炭素DICとアルカリ度を年平均値で固定する実験によって温度効果を同定し、両者の効果を定量化した。

(オ) 中規模渦が $p\text{CO}_2$ に与える影響の評価

中規模渦による擾乱の影響を調べる為、海表面温度、 $p\text{CO}_2$ 、 TCO_2 に関して（5日移動平均-40日移動平均）を計算し、それらの関係を調べた。

ウ 研究結果

(ア) 基本モデルの開発

海洋生態系モデルNEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) に、炭素循環を組み込んだ。NEMUROは、各コンパートメントの元素組成比(C/N = 6.6)は一定値を用いている。このことを利用すると、生態系のコンパートメントの炭素比やそれら間の炭素フラックスを計算する必要がなくなり、生態系への出入り口のやりとり（海水中の栄養塩の取り込みや無機化の部分の窒素フラックス）に注目し、窒素フラックスにC/N比を掛けることで、炭素フラックスの算出ができる。また全アルカリ度は、カルシウムや硝酸塩・アンモニア・ケイ酸塩などの生態系へのフラックスから算出する。

海水中の全炭酸・全アルカリ度の分布は、これらのフラックスを生物過程の生成消滅項として取り扱い、水温や塩分と同様な移流・拡散過程（物理過程）により、求めることができる。さらに、海洋表層では、全アルカリ度・全炭酸及び水温・塩分から二酸化炭素分圧を求める。なお、二酸化炭素分圧を求める際には、海洋炭素循環モデルでの世界的標準として用いられているOCMIP2 (NOCES) で用いられたサブルーチンを用いている。

開発した生物モデルを物理モデルに結合した。物理モデルはCOCOをベースとしたオフラインモデルである。CCSR/NIES/FRCGCのMIROC高解像度モデルによる(IPCC AR4に貢献した)気候モデルデータセットCMIP3の標準実験として行った流速場・水温・塩分分布の物理場(Sakamoto et al.¹⁾)の1日平均を用いている。Global Ocean Data Analysis Project (GLODAP) (Key et al.²⁾)の全炭酸・全アルカリ度を側面境界条件及び初期条件として用いている。モデルの積分計算は20年間行い、後半の10年間を解析に用いている。10年間計算した後は、大きなドリフトはない状態になっている。

(イ) 観測との比較に基づいたモデルの改良

第1章で取得された日本周辺海域の $p\text{CO}_2$ 分布(Nakaoka et al.³⁾)を再現できるようにモデルを改良した。主な改良点は以下の四つである。

① 第1章-1から提供された冬季混合層深度では150m程度であるのに対して、Sakamoto et al.¹⁾

で計算されたものは 250 m ~ 300 m 程度となっており、全炭酸や全アルカリ度などの鉛直分布を検討した結果、海洋物理モデルが冬季の海洋混合層を深く見積もりすぎていることが分かった。そこで、チューニングとして、冬季の混合層深度を 150 m に抑えた。

② 大気海洋間 CO_2 フラックスは CO_2 分圧差のみに依存していた点を改良し、Wanninkhof⁴⁾ で提案された CO_2 フラックスの風速依存性をモデルに実装した。

③ 亜寒帯の鉄制限の効果を間接的に再現するようにモデルに改良を加えた。格子点毎に硝酸塩の濃度の最小値を観測値 (WOA05⁵⁾) より決定し、これを越えて硝酸塩が消費されないように生物生産に制限を掛けた。

④ 従来、炭素循環の初期値・境界値として用いていた GLODAP 3-D データ (Key et al.²⁾) を日本近海の観測データ (JODC⁶⁾) と詳細に比較した結果、GLODAP のアルカリ度に問題があることが判った。よって、アルカリ度をより観測データに近

づけるように変更した。

これらの改良によってモデルの再現性が飛躍的に上昇し、観測に近い精度で海表面 pCO_2 の空間分布、季節変動を再現できるようになった (図 121-1)。

(ウ) CO_2 ガス交換係数の季節変動が大気海洋間 CO_2 フラックスに与える影響評価

大気海洋間 CO_2 フラックスは CO_2 分圧差と交換係数 ε の積であり、 ε は風速等に依存する。本課題で着目している日本周辺海域は冬季の季節風が卓越する海域であり、ガス交換係数の季節変動が重要と予測される。ガス交換係数の大気海洋間 CO_2 フラックスへの影響について詳細な解析を行った。年平均した CO_2 フラックスと分圧差を図 121-2 (a)、(b) に示す。両者の空間分布は必ずしも一致していない。つまり、年平均した海洋の分圧が大気分圧より高い (低い) のにも関わらず、 CO_2 が海洋に吸収 (放出) される海域が存在している。このような海域を図 121-2 (d) の斜線部で示す。このような海域が何故存在するか理解する為に、フラックスを年平均とそれからのずれに分解する。

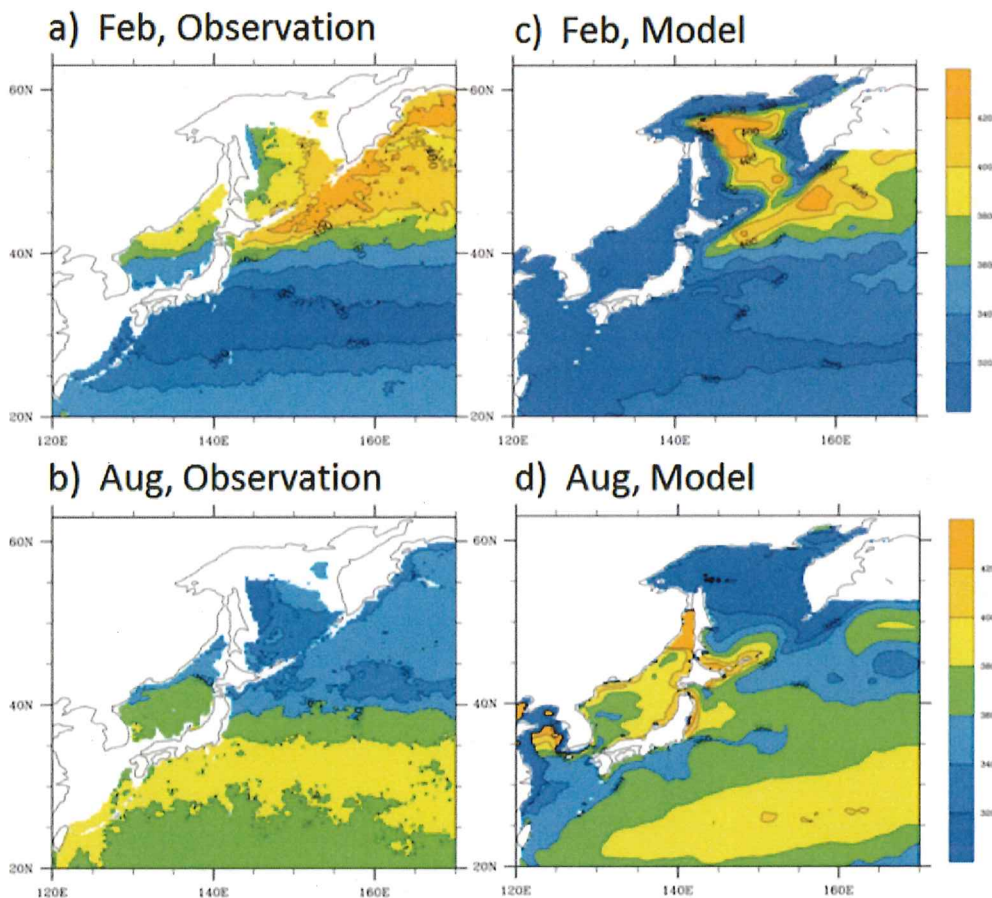


図 121-1 観測、モデルの pCO_2 (μatm)

$$\overline{F} = \overline{\varepsilon \Delta p \text{CO}_2} = \overline{\varepsilon} \overline{\Delta p \text{CO}_2} = \overline{\varepsilon' \Delta p \text{CO}_2'}$$

ここで $\overline{\varepsilon}$ と $\overline{\Delta p \text{CO}_2}$ は年平均のガス交換係数と分圧差である。 $\overline{\varepsilon' \Delta p \text{CO}_2'}$ は CO_2 分圧とガス交換係数の季節変動が相関を持つことによって生じる項である。この項が0でないため、図 121-2 で示されたように年平均した CO_2 フラックスと分圧差の空間分布は一致しない。 $\overline{\varepsilon' \Delta p \text{CO}_2'}$ の空間分布を図 121-3 に示す。この項は亜寒帯では放出を強め、亜熱帯では吸収を強める方向に働く。

亜熱帯、亜寒帯の特定地点における CO_2 分圧差、 CO_2 フラックス、交換係数の季節変動を図 121-4 に示す。交換係数の季節変動の効果を明らかにするため、交換係数を年平均値に固定して CO_2 フラックスを計算する追加実験を行った（図 121-4 の赤線）。交換係数が季節変動する場合、一定の場合と比べて冬季に大気海洋間 CO_2 交換が強まり、夏季に弱まることが判る。亜熱帯では交換係数の季節変動がある場合、交換係数一定の場合に比べて冬季の吸収が強まり夏季の放出が弱まることで、年間で積算すると海洋への吸収が増加している。亜寒帯では交換係

数の季節変動がある場合、冬季の放出が増加し、夏季の吸収が減少するので、年間積算では海洋からの放出が増加する。

(エ) $p\text{CO}_2$ の季節変動に対する生物効果、温度効果の影響評価

海洋の CO_2 分圧は様々な変数に依存しており、以下の式で表される。

$$p\text{CO}_2 = f(\text{Temperature, Salinity, DIC, ALK...})$$

温度を年平均値で固定する実験によって $p\text{CO}_2$ の季節変動に対する生物効果を同定し、溶存無機炭素 DIC とアルカリ度を年平均値で固定する実験によって温度効果を同定することを試みた。海表面 $p\text{CO}_2$ 季節変動の振幅を示す $\Delta = (\text{夏季 } p\text{CO}_2 - \text{冬季 } p\text{CO}_2)$ を導入する。夏季は7月～9月平均、冬季は1月～3月平均とする。標準実験（タイムステップ毎に変化する温度、塩分、DIC、アルカリ度から $p\text{CO}_2$ を計算）における夏季－冬季 $p\text{CO}_2$ 差を Δ_{real} とし（図 121-5）、DIC&アルカリ度固定実験におけるそれを Δ_{temp} （図 121-6a）、温度年平均固定実験におけるそれを $\Delta_{\text{DIC and Alk}}$ とする（図 121-6b）。

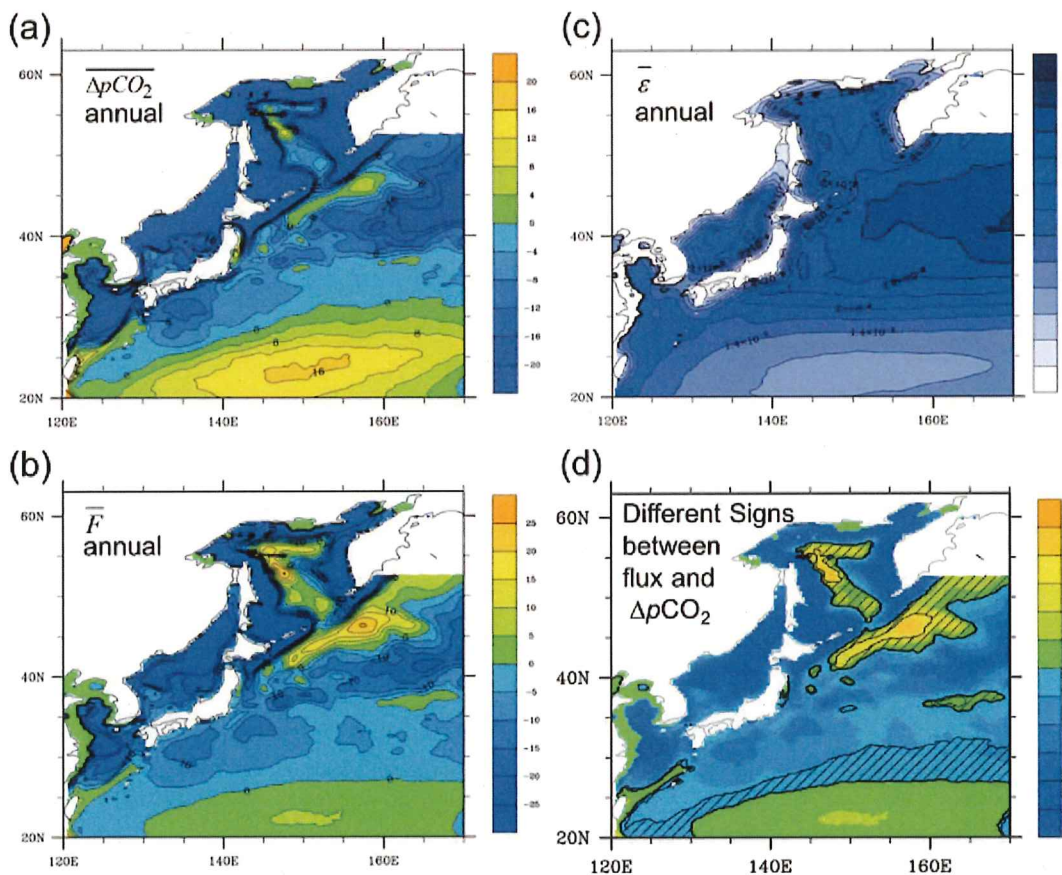


図 121-2 (a) 年平均 $\Delta p\text{CO}_2$ (μatm)、(b) 年間積算した CO_2 フラックス ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)、(c) 年平均 CO_2 ガス交換係数 ($\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$)、(d) 斜線を掛けた領域は年平均 $\Delta p\text{CO}_2$ と年間積算 CO_2 フラックスの符号が異なっている。

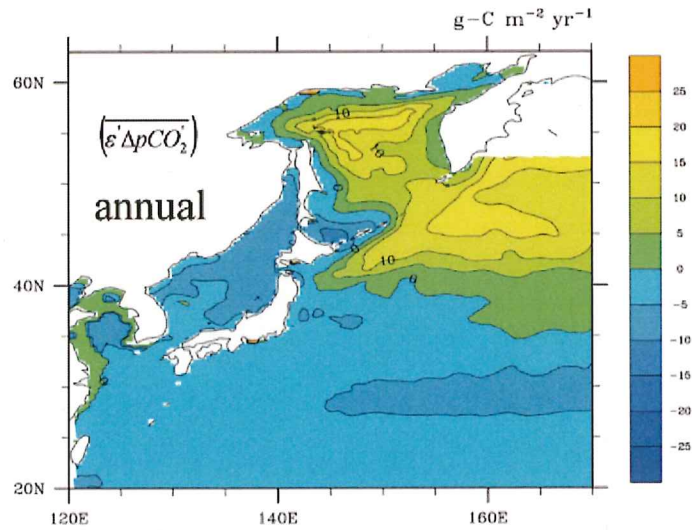


図 121-3 CO₂ 分圧季節変動とガス交換係数季節変動の相関 (gC m⁻² yr⁻¹)。バーは年平均を意味する。

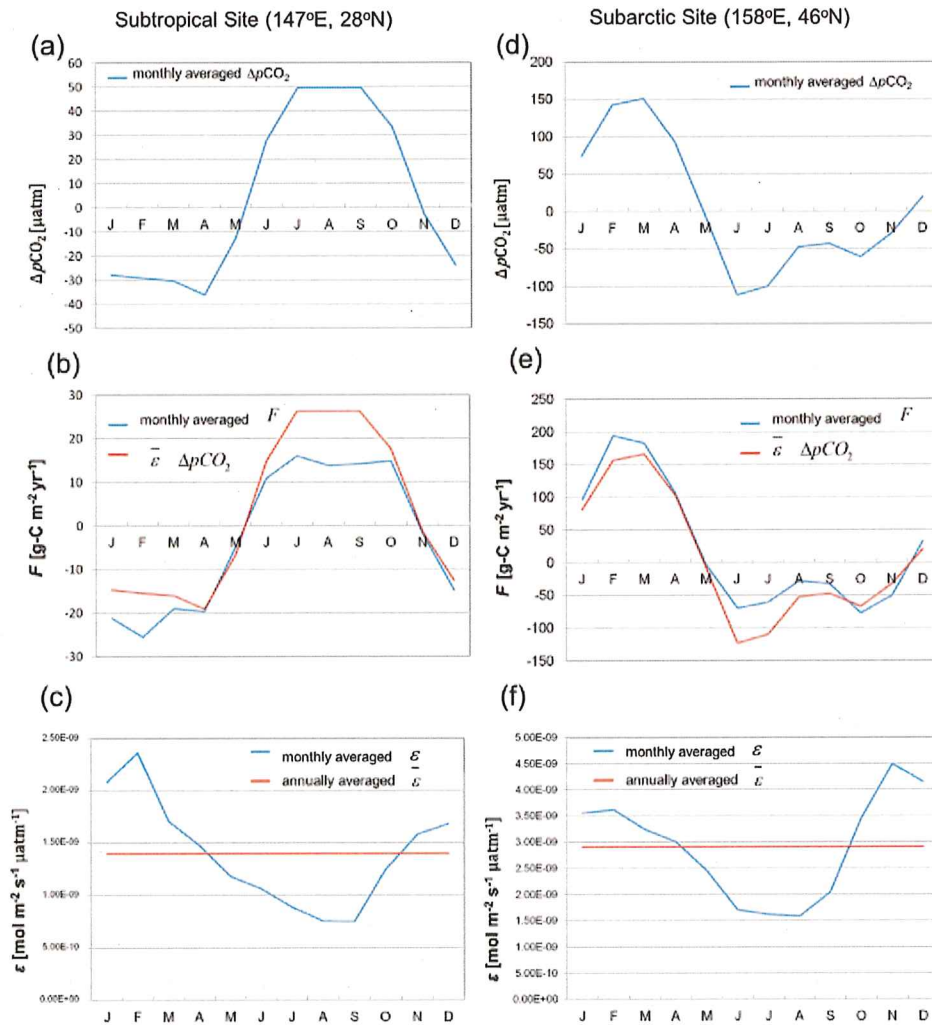


図 121-4 亜熱帯の 1 点 (147E, 28N) における季節変動、(a) ΔpCO_2 (μatm)、(b) CO₂ フラックス ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)、(c) CO₂ 交換係数 ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$)。亜寒帯の 1 点 (158° E, 46° N) における季節変動、(d) ΔpCO_2 (μatm)、(e) CO₂ フラックス ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)、(f) CO₂ 交換係数 ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$)。青線は標準実験 (CO₂ フラックスを計算する際、各タイムステップ毎に計算された CO₂ 交換係数を用いる)、赤線は CO₂ フラックスを計算する際、年平均 CO₂ 交換係数を用いた実験の結果を示す。

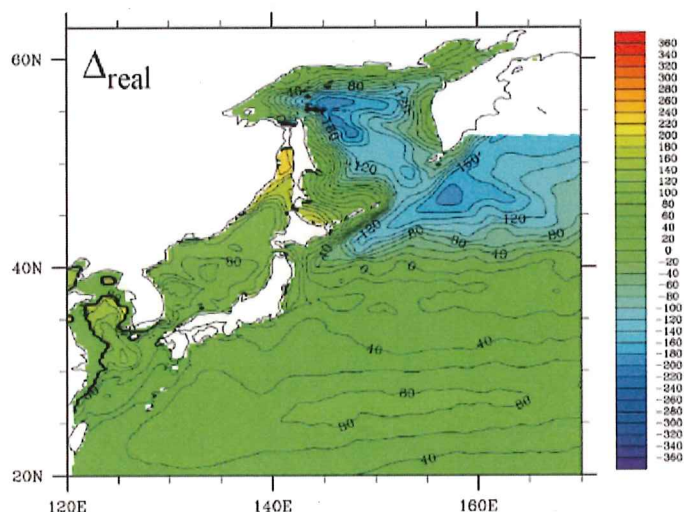


図 121-5 標準実験における pCO₂ 季節変動の振幅 (夏季 pCO₂ - 冬季 pCO₂)

単位は μatm。夏季は 7 月～9 月平均、冬季は 1 月～3 月平均。標準実験ではタイムステップ毎に変化する温度、塩分、DIC、アルカリ度から pCO₂ を計算。

Δtemp は海水温が上昇すると溶解している CO₂ が減る事を反映しており、夏季と冬季で海面温度差が大きい海域ほど大きい。一方、ΔDIC and Alk の分布は亜熱帯では亜寒帯より生物活動による CO₂ 吸収が大きい事を反映している。ここで重要なのは Δtemp - |ΔDIC and Alk| (図 121-6c) が Δreal と良く一致している点である。我々の実験設定は非線形性を考慮していないが、非線形性の影響は相対的に小さいと考えられる。

温度、生物それぞれによる pCO₂ への相対的な影響を定量化する為、以下の量を導入した。

$$\chi = \frac{\Delta_{temp} + \Delta_{DIC\ and\ Alk}}{\Delta_{temp} + |\Delta_{DIC\ and\ Alk}|}$$

この量が +1 に近いほど温度効果が相対的に大きく、-1 に近いほど生物効果が大きい。空間分布を図 121-7 に示す。従来、亜寒帯の pCO₂ 季節変動に対しては生物の影響が支配的であると考えられてきたが、温度効果も大きな寄与をしている事が示された。

(オ) 中規模渦が pCO₂ に与える影響の評価

中規模渦による擾乱の影響を調べる為、海表面温度、pCO₂、TCO₂ に関して (5 日移動平均 - 40 日移動平均) を計算し、それらの関係を調べた。これによって、例えば中規模渦によって海表面温度が平均より上昇している時に、pCO₂ がどのような挙動

をしているか判る。亜寒帯の典型的な場所 (160E、45N) での海表面温度、pCO₂、TCO₂ 擾乱の相関関係を図 121-8、121-9 に示す。冬季には pCO₂ 擾乱と TCO₂ 擾乱の相関が非常に高い。これは海洋混合層が発達している時期には海洋内部の情報が海表面に良く反映されている為だと考えられる。また、夏季には pCO₂ 擾乱と温度擾乱の相関が非常に高く、pCO₂ 擾乱と TCO₂ 擾乱の相関は低い。混合層の浅い時期には温度に依存した大気海洋間フラックスが pCO₂ を支配している為と考えられる。

モデル領域全体で、海表面温度、pCO₂、TCO₂ 擾乱の相関関係を各月毎に調べた結果を図 121-10、121-11 に示す。160° E、45° N で示された結果は亜寒帯全域について共通である事が判る。つまり、冬季には pCO₂ 擾乱と TCO₂ 擾乱の相関が高く、夏季には pCO₂ 擾乱と温度擾乱の相関が非常に高い。一方、亜熱帯では年間を通して pCO₂ 擾乱は温度擾乱に強く依存している。

工 考 察

(ア) 基本モデルの開発、(イ) 観測との比較に基づいたモデルの改良

本課題で構築したモデルは 1/4 度 × 1/6 度メッシュの空間解像度を持ち、海洋の中規模渦をある程度解像することが可能である。このような高解像度の日本近海炭素循環モデルはこれまでに存在して

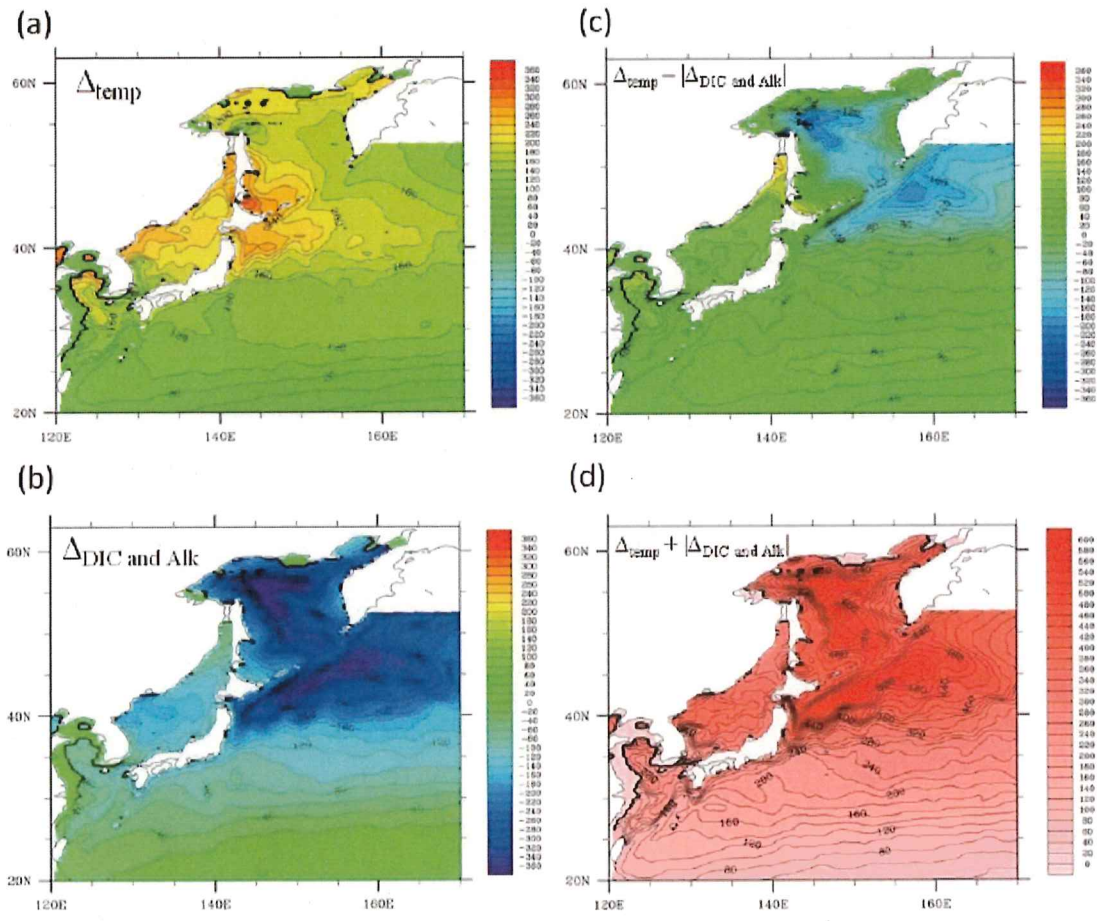


図 121-6 (a) pCO₂ 季節変動の振幅 (夏季 pCO₂ - 冬季 pCO₂)、単位は μatm。pCO₂ 計算において DIC、アルカリ度を年平均で固定した実験の結果 (Δ_{temp})。 (b) (a) と同様。ただし pCO₂ 計算において温度を年平均で固定した実験の結果 (Δ_{DIC and Alk})。 (c) Δ_{temp} - |Δ_{DIC and Alk}|、 (d) Δ_{temp} + |Δ_{DIC and Alk}|。

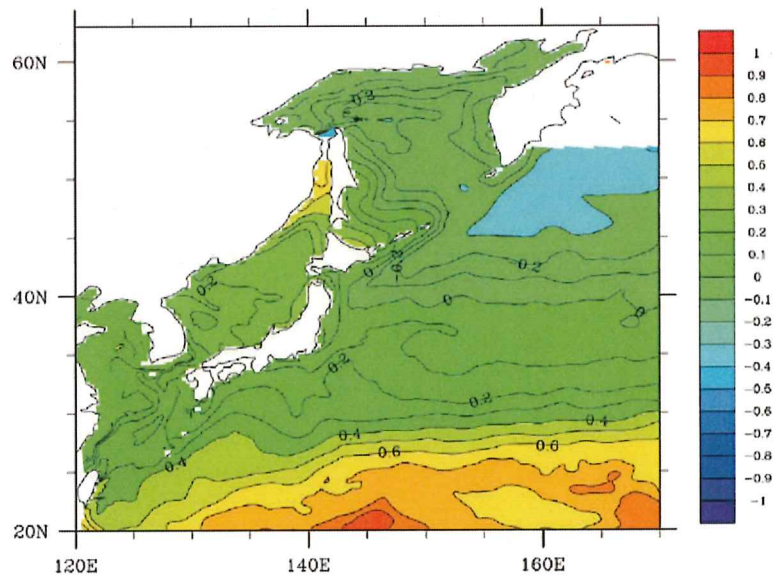


図 121-7 温度、生物それぞれによる pCO₂ への相対的な影響 χ (無次元、定義は本文参照) この量が +1 に近いほど pCO₂ 季節変動に対する温度効果が相対的に大きく、-1 に近いほど生物効果が大きい。

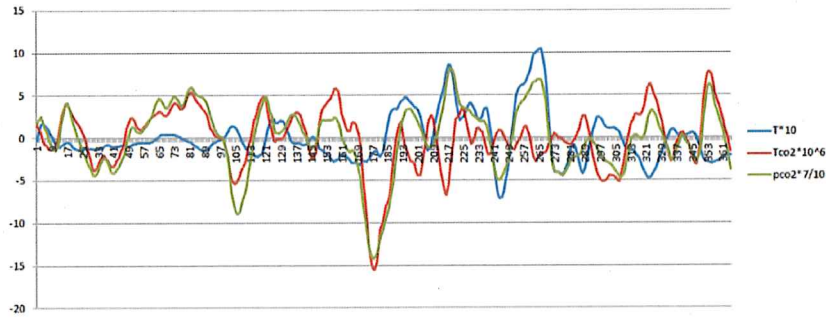


図 121-8 160E、45N における、温度（水色線）、 TCO_2 （赤線）、 pCO_2 （緑線）の（5日移動平均－40日移動平均）。横軸は Julian day。

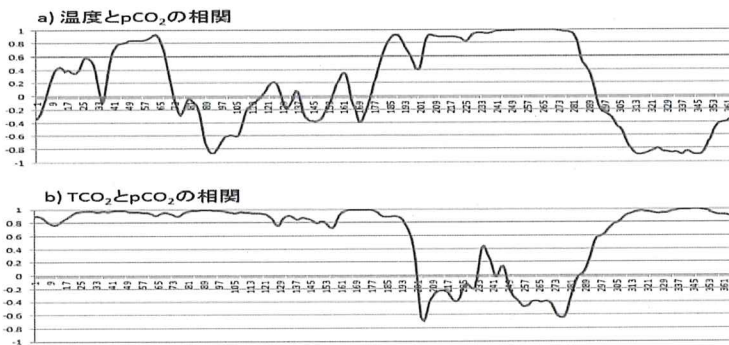


図 121-9 160° E、45° N における、a) 温度擾乱と pCO_2 擾乱（両者とも 5 日移動平均－40 日移動平均）の相関。横軸は Julian day、b) TCO_2 擾乱と pCO_2 擾乱の相関。

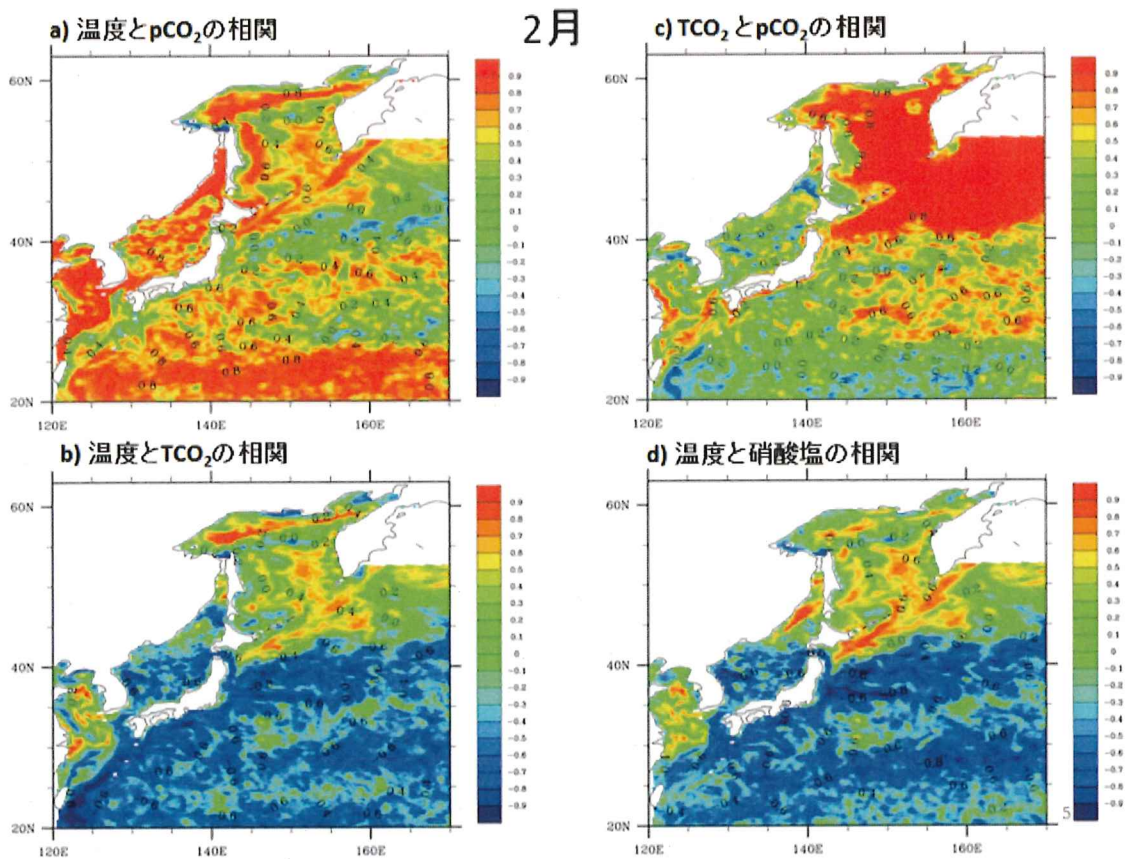


図 121-10 2 月の温度、 pCO_2 、 TCO_2 、硝酸塩擾乱間の相関係数

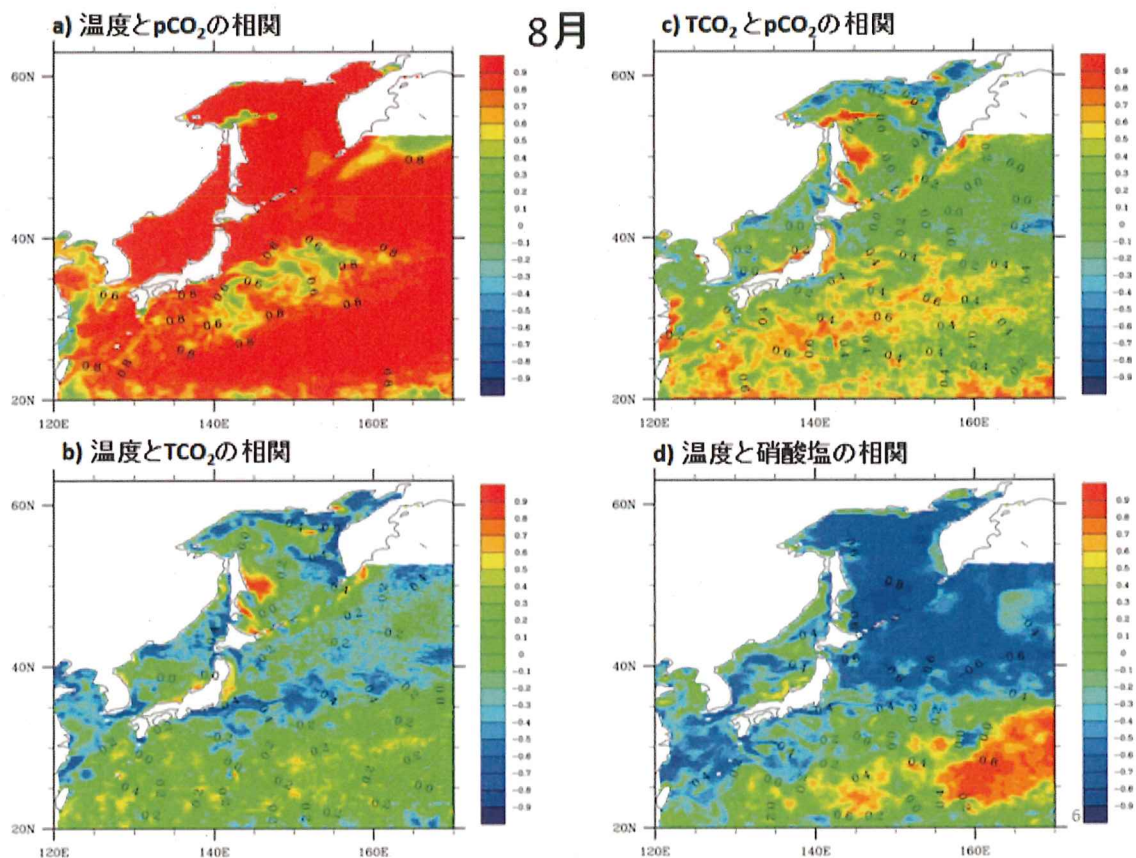


図 121-11 図 121-10 と同じ。ただし 8 月の結果。

おらず、大きなチャレンジであったが、観測による pCO₂ の空間分布、季節変動を高精度で再現することに成功した。モデルの改善に関して観測データのインパクトは大きく、モデルの問題点・改良点を特定するのに大きな役割を果たした。これは大課題「水産分野における温暖化緩和技術の開発」の中課題に対応するグループ設定が適切であり、グループ間の協力が上手く機能した証拠と言える。改めて観測グループの方々にはお礼申し上げます。

(ウ) pCO₂ の季節変動に対する生物効果、温度効果の影響評価

従来、主に船舶による定線観測の結果より、 ΔpCO_2 (大気と海洋の CO₂ 分圧差) の正負と大気海洋間フラックスの吸収・放出に関する空間分布は異なるという事が指摘されてきた。本課題の解析はこの延長であるが、どうしても空間・時間的に限定された観測データに比べて、幅広い時空間を網羅できるというモデルならではのメリットがある。また、定性的で無く定量的に季節変動の効果を示したのが新しい点である。

オ 今後の課題

本研究で開発したモデルを用いて、中規模渦による擾乱が pCO₂ に与える影響評価を行ってきた。第 1 章で取得された船舶観測データを用いた影響評価を同時に行い、結果をモデルによる評価と比較することで、中規模渦の pCO₂ への影響がより詳細に明らかになると期待される。ただし、モデルは時間的な擾乱、観測は空間的な擾乱を主に扱う為、両者の溝を埋める工夫が必要である。

カ 要約

(ア) 基本モデルの開発

1/4 度 × 1/6 度メッシュの空間解像度を持つ、日本周辺海域の高精度炭素・窒素循環モデルを開発した。ベースとなったのは海洋生態系モデル NEMURO (North pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) であり、これに炭素循環を組み込んだ。

(イ) 観測との比較に基づいたモデルの改良

混合層深度の改良、CO₂ フラックス計算における風速依存性の導入、鉄効果の導入、初期値・境界値

に用いられるアルカリ度の改良を行った。これらの改良によってモデルの再現性が飛躍的に上昇し、観測に近い精度で海表面 $p\text{CO}_2$ の空間分布、季節変動を再現できるようになった。

(ウ) CO_2 ガス交換係数の季節変動が大気海洋間 CO_2 フラックスに与える影響評価

ガス交換係数、 CO_2 フラックスを年平均とそれからのずれに分解した解析を行った。亜熱帯では交換係数の季節変動がある場合、交換係数一定の場合に比べて冬季の吸収が強まり夏季の放出が弱まることで、年間で積算すると海洋への吸収が増加している。亜寒帯では交換係数の季節変動がある場合、冬季の放出が増加し、夏季の吸収が減少するので、年間積算では海洋からの放出が増加する。

(エ) CO_2 ガス交換係数の季節変動が大気海洋間 CO_2 フラックスに与える影響評価

温度を年平均値で固定する実験によって $p\text{CO}_2$ の季節変動に対する生物効果を同定し、溶存無機炭素 DIC とアルカリ度を年平均値で固定する実験によって温度効果を同定し、両者の効果を定量化した。従来、亜寒帯の $p\text{CO}_2$ 季節変動に対しては生物の影響が支配的であると考えられてきたが、温度効果も大きな寄与をしている事が示された。

(オ) 中規模渦が $p\text{CO}_2$ に与える影響の評価

亜熱帯・亜寒帯のそれぞれで季節毎に異なる $p\text{CO}_2$ 擾乱と温度擾乱の関係を明らかにした。

キ 引用文献

- 1) Sakamoto, T.T., Hasumi, H., Ishii, M., Emori, S., Suzuki, T., Nishimura, T., Sumi, A. (2005)

Responses of the Kuroshio and the Kuroshio extension to global warming in a high-resolution climate model. *Geophysical Research Letters* 32: L14617.

- 2) Key, R. M., Kozyr, A., Sabine, CL., Lee, K., Wanninkhof, R., Bullister, J. L., Feely, R. A., Millero, F. J., Mordy, C. and Peng, T. H. (2004) A global ocean carbon climatology: Results from Global Data 352 Analysis Project (GLODAP). *Global Biogeochem. Cyc.* 18: GB4031.
- 3) Nakaoka, S., Telszewski, M., Nojiri, Y., Yasunaka, S., Miyazaki, C., Mukai, H., Usui, N. (2013) Estimating temporal and spatial variation of ocean surface $p\text{CO}_2$ in the North Pacific using a Self Organizing Map neural network technique. *Biogeoscience* 10: 6093-6106.
- 4) Wanninkhof, R. (1992) Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. *Journal of Geophysical Research* 97: 7373-7381.
- 5) World Ocean Atlas 2005 (WOA05). http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html. National Oceanographic Data Center, 2015/09/11
- 6) Japan Oceanographic Data Center (JODC). <http://www.jodc.go.jp/index.html>

研究担当者 (山中康裕*、熊 炫睿、増田良帆、重光雅仁、佐藤祐介、干場康博、柴野良太、田中朱美、宮崎千尋)

第3章 漁獲操業・水揚げ行為における二酸化炭素排出量の推計と削減のための漁港整備条件の解明

1 漁船漁業の漁獲・水揚げ過程における二酸化炭素排出量の推計

ア 研究目的

さんま棒受網漁業を対象として、その漁獲・水揚げ過程で排出される二酸化炭素(CO₂)の排出量について、さんま漁船団の総トン数階層別に燃油使用量の算定法を確立し、さんま漁船団の構成シナリオ別にCO₂排出総量を試算し、さんま漁船団の復興に有益な知見を提示する。

イ 研究方法

さんま棒受け網漁船の総トン数階層別、季節別の行動パターンを類型化し、操業海域・水揚げ地選択とCO₂排出総量の関係性を評価する。小型船、中型船、大型船のさんま操業の行動パターンの実態調査等をもとに航海時・操業時の燃油使用量を試算し、漁船規模別のCO₂排出量の算定モデルを確立する。また、被災漁船の復興に向け、漁船団の構成シナリオ別にさんま漁船のCO₂排出総量を推計する。

(ア) 文献調査

既存資料等を活用し、漁船規模別にさんま漁船の行動パターンと燃油使用量の概略を評価する。

(イ) 実船調査

さんま漁船の小型船・大型船の行動パターンと燃油消費を実態調査する。

(ウ) CO₂排出量算定モデルの構築

さんま漁船の燃油使用量予測モデルを構築し、漁船団からのCO₂排出量を算定する。

(エ) CO₂排出量削減方策の提示

モデル試算に基づき、CO₂排出量削減に効果的な具体的方策やさんま漁船団構成シナリオを提示する。

ウ 研究結果

(ア) さんま棒受網漁船の実態調査

根室船籍の19GT型のさんま棒受網漁船(LED集魚灯)の主機関及び補機関の燃料消費量を連続計測し、GPS情報と併せて解析することで、航海距離と燃油使用量の関係を把握した。また、大型漁船

(173GT)の航跡を連続収録し水揚げ港選択等の行動パターンを抽出した(図131-1)。

(イ) さんま漁船の燃油消費量推定法とCO₂排出原単位

水産庁補助事業「省エネルギー技術導入促進事業」のLED集魚灯実証試験報告書を活用して、173GT型のさんま漁船の航海距離と燃油使用量の関係を解析した(図131-2a,b)。航海距離に比例して燃油消費量が増大する傾向にある。実測した19GT型の小型船も同様に燃油使用量を航海距離との関係式で推定可能となる(図131-2c)。白熱灯の集魚灯出力に対応した燃油消費を加算することで、従来灯の場合の燃油使用量を推定した。以上の検討から、さんま操業に係わるCO₂排出原単位(CO₂排出量/さんま水揚げ量)を算定した(図131-3)。CO₂排出量は、小型船、中型船、大型船の順に多くなるが、魚倉積載量が多い大型船がCO₂排出原単位は小さくなる。航海距離が大きくなるほど原単位の違いが明らかである。以下、この船規模別の燃油消費量及びCO₂排出原単位と航海距離の関係式を用いて試算する。

(ウ) 水揚げ地選択行動とCO₂排出量の関係評価

漁獲成績報告書を活用して、2008年度の北太平洋さんま漁業の水揚げ行動等について分析した。当該年度の稼働漁船の内訳を図131-3に示す。100GT以上の大型船が50隻である。入港日別の総水揚げ量の推移を図131-4に示す。盛漁期を迎えた9月22日の水揚げ行動を図131-5に示す。大型船は道東沖漁場から三陸諸港へ水揚げしているが、これを直近漁港への水揚げに改変した場合のCO₂削減効果について以下に考察する。当日の水揚げ隻数は、小型・中型船が46隻、大型船が34隻であり、これらの個々の漁船の操業特性を図131-6に示す。実態では、大型船の航海距離は大きくCO₂排出原単位は0.4近辺であるが、直近港水揚げに改変するとCO₂排出原単位は0.2近辺となる。航海距離を短縮することで、燃油使用量は大きく削減され、結果として大型船34隻からのCO₂排出量は約700t/日の削減

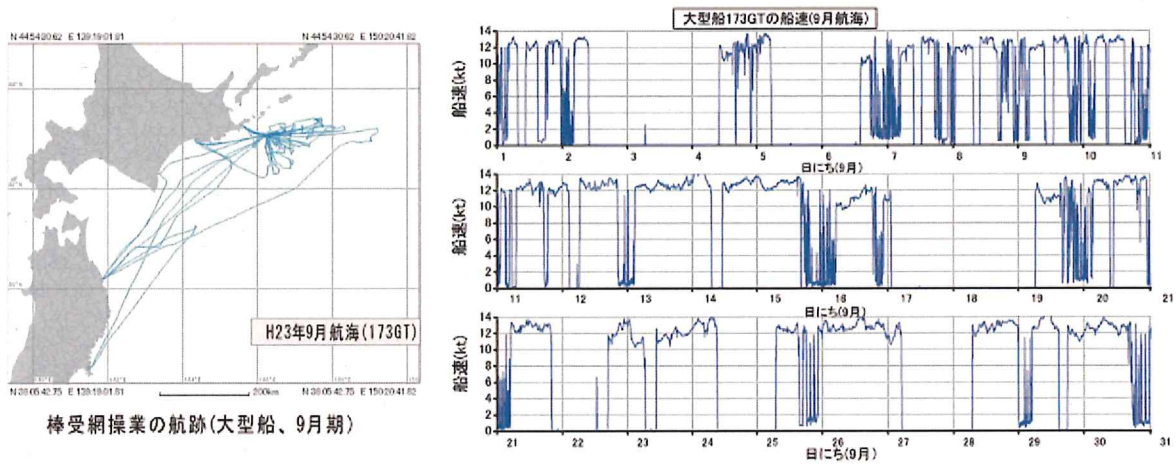


図 131-1 大型漁船の航跡と船速の計測例 (173 GT 型、2011 年 9 月期)
9 月中旬から三陸地区へ水揚げする頻度が増している。

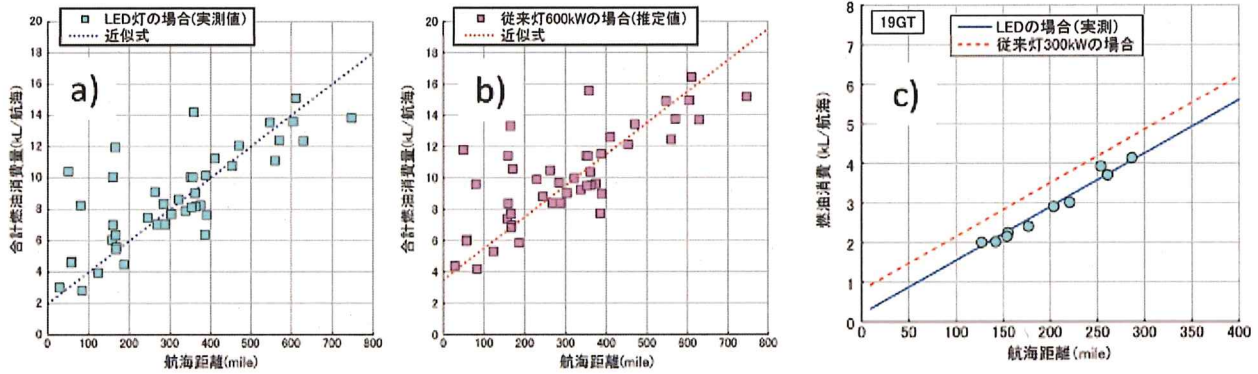
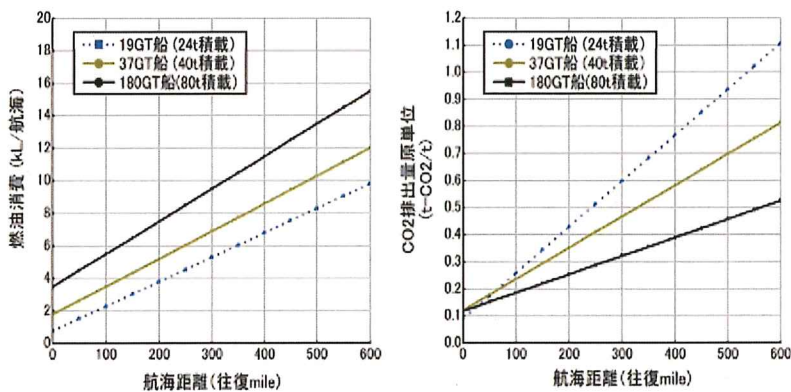


図 131-2 大型漁船 (173 GT 型) の燃油消費

a) LED 灯使用時 b) 従来灯使用時。さんま漁船の LED 導入による実証化試験報告書 (海洋水産システム協会、2009 年度) をもとに作成。c) 小型船 (19 GT 型) の燃油消費特性



漁船種類	船規模	隻数	隻数小計	隻数合計
小型船	10~18 GT	7	69	143
	19 GT	62		
中型船	29 GT	17	24	
	37~39 GT	5		
	50~70 GT	2		
大型船	119~159 GT	7	50	
	160~169 GT	8		
	170~199 GT	35		

図 131-3 漁船規模別の燃油消費量 (左) と CO₂ 排出原単位 (中)。(右) は北太平洋さんま漁業のトン数別従事漁船数 (2008 年度)

2008年度サンマ水揚量

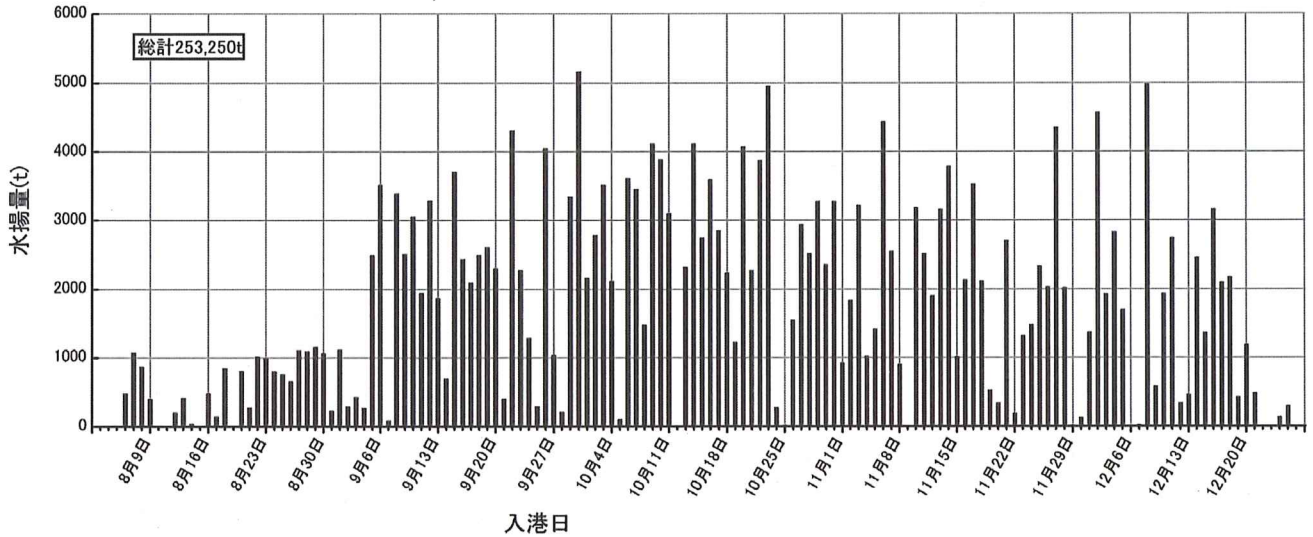
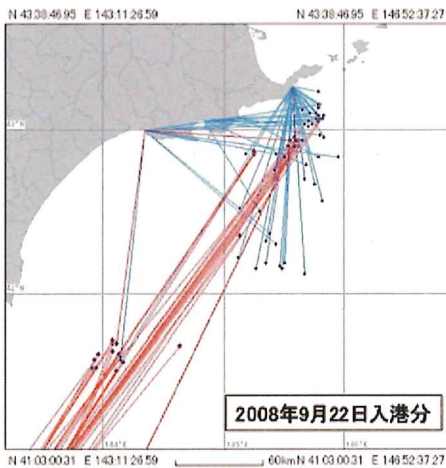


図 131-4 2008 年度サンマ水揚げ量の推移



各船の水揚げ地選択
青は小型・中型船、赤は大型船

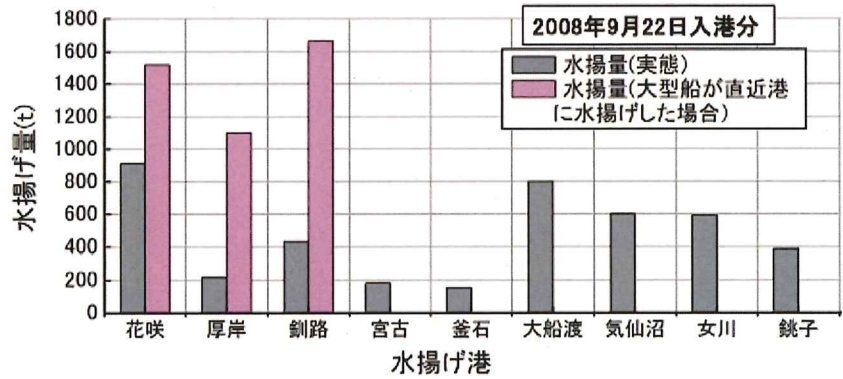


図 131-5 さんま漁船の水揚げ行動 (2008 年 9 月 22 日入港分) 小型・中型船は 46 隻、大型船は 34 隻が水揚げ。

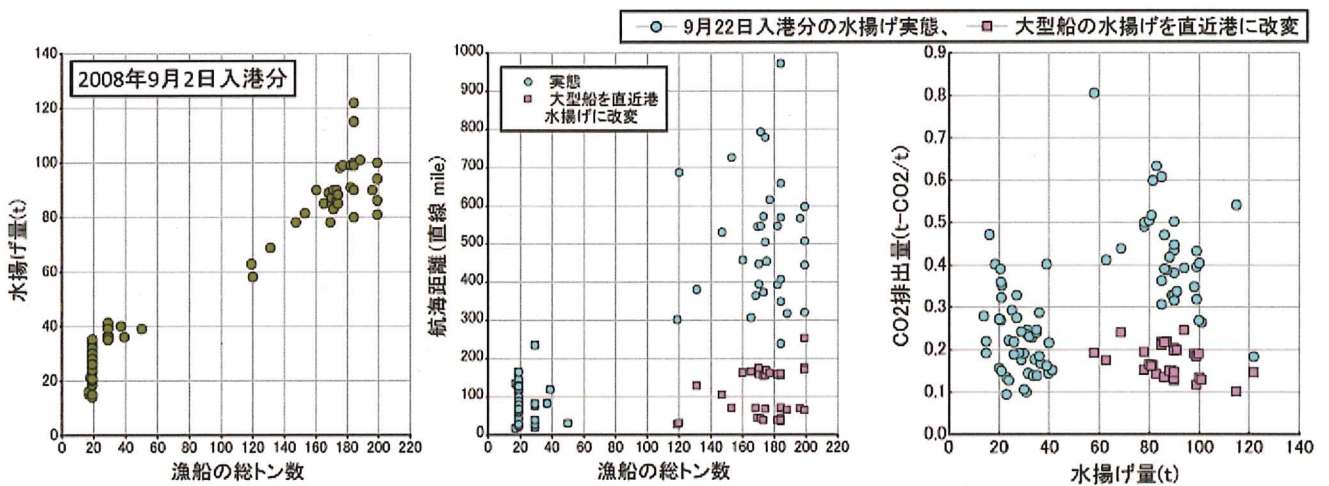


図 131-6 さんま漁船の操業実態 (2008 年 9 月 22 日) 及び水揚げ地改変の効果

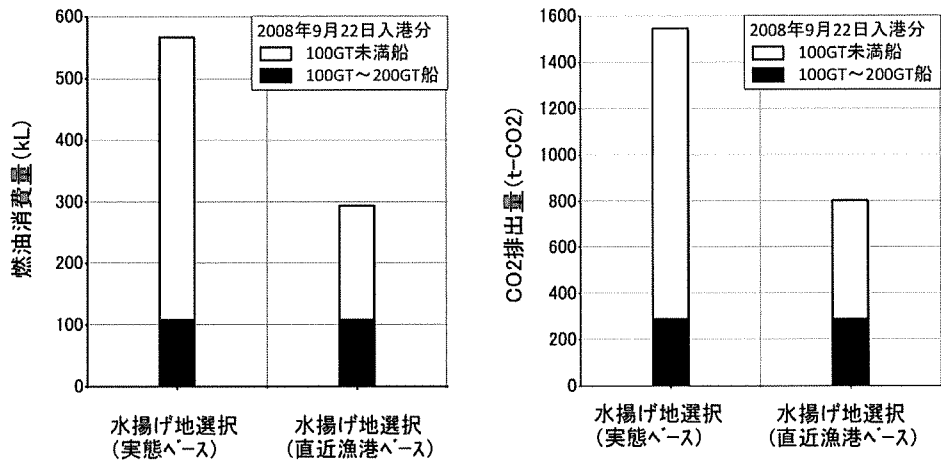


図 131-7 さんま漁船の CO₂ 排出量の実態と水揚げ地変更の影響 (2008 年 9 月 22 日入港分)

が可能となる (図 131-7)。

漁場が三陸沖に形成されている 10 月 31 日の漁船行動を同様に解析すると、実態として三陸主体の直近港の水揚げとなっており、大型船の CO₂ 排出原単位は 0.2 付近にある。従って、漁場が三陸沖に形成される場合には、水揚げ地変更による CO₂ 排出量の削減効果は小さい。

(エ) さんま漁船の行動パターン分析

漁獲成績報告書 (2008 年度) をもとに、さんま漁船の行動を解析した。19 GT 型や 37 GT 型漁船の事例では、漁場の移動に合わせて操業海域に近い水揚げ港が選択されている (図 131-8)。一方、大型漁船は、道東沖漁場から三陸・銚子地区に水揚げをする場合が多い (図 131-9)。水揚げ量当たりの燃油消費量 (kL/t) をみると、小型船では解禁日直後はその値は大きく、その後は減小傾向となる。大型船も同様の傾向ではあるが、解禁後から 10 月初旬にかけて航海距離が大きい。これは、道東沖漁場から三陸への水揚げ行動によるものである。従って、この間に、直近港へ水揚げ地を変更することで燃油使用量を削減でき、結果として CO₂ 排出量の削減が可能となる (図 131-5 参照)。

(オ) 大型冷凍工船の CO₂ 排出量試算

新たな試みとして、サンマ冷凍工船導入による CO₂ 排出量の検討を行った。既存資料として、遠洋トロール型サンマ冷凍工船の試設計 (318 GT 型漁船：海洋水産システム協会) がある (図 131-10 左)。試設計では、中層トロールによるサンマ漁獲 (35 t/日) を想定しているが、ここでは、棒受網操

業 (40 t/日) として試算した。冷凍工船は 1 日に 40 t のサンマを漁獲し、冷水処理した後、パン立てまたは箱だてで急速凍結させる。棒受け網操業と凍結処理が同時進行することから、最低 12 時間は補機関の負荷が高く燃油多消費となるものの、冷凍工船 1 航海で 320 t のサンマを満載して帰港する条件では、現行の大型漁船 (180 GT) が 1 航海 80 t 水揚げを 4 航海行う場合と比べて、CO₂ 排出量が小さくなる可能性がある (図 131-10 右)。漁場・港間の距離 300 マイルよりも遠くなるほど冷凍工船の優位性が顕著となる。

工 考 察

北太平洋さんま漁業に従事する漁船団の CO₂ 排出量算定モデルを構築した。サンマ水揚げに係わる CO₂ 排出量の削減のためには、航海距離が長くなるほど大型船が有利となる (図 131-3 参照)。被災したさんま漁船の復興において、大型船の代船建造を進めることが CO₂ 削減のためにも有効である。

さんま漁船団の行動分析から、大型船は三陸諸港へサンマを安定的に供給する役割を担っている反面、道東沖漁場へ往復航海するための燃油使用量が大きく、CO₂ 排出量削減の観点からは、直近港への水揚げが効果的である (図 131-6、131-7 参照)。

現在は存在しないサンマ冷凍工船を検討した結果、漁場まで 300 マイル以上のケースでは、CO₂ 排出量を削減可能であることを提示した。温暖化の影響で漁場形成がより沖合化する局面では、冷凍工船によるサンマ操業が現実味を増してくる。船上凍結

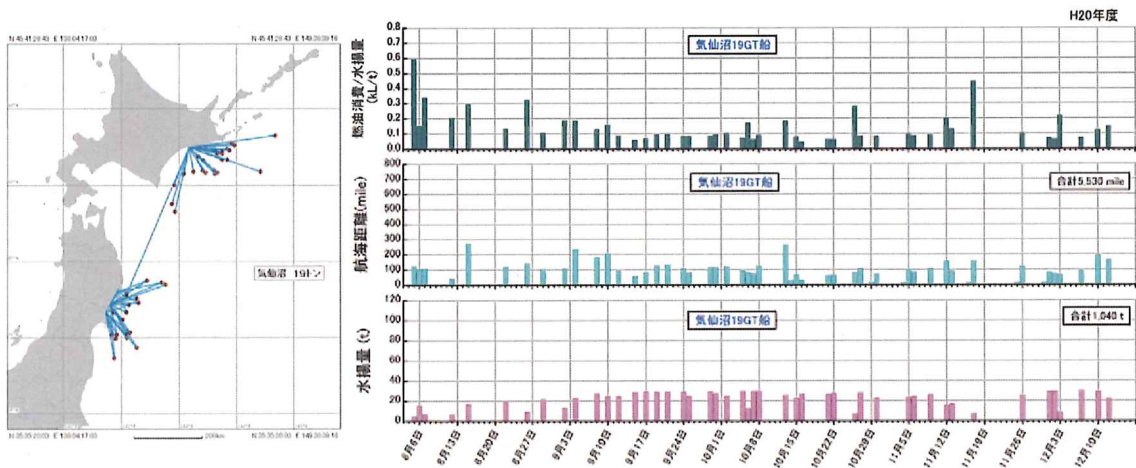


図 131-8 小型さんま漁船の操業行動実態 (19 GT 型、2008 年度)

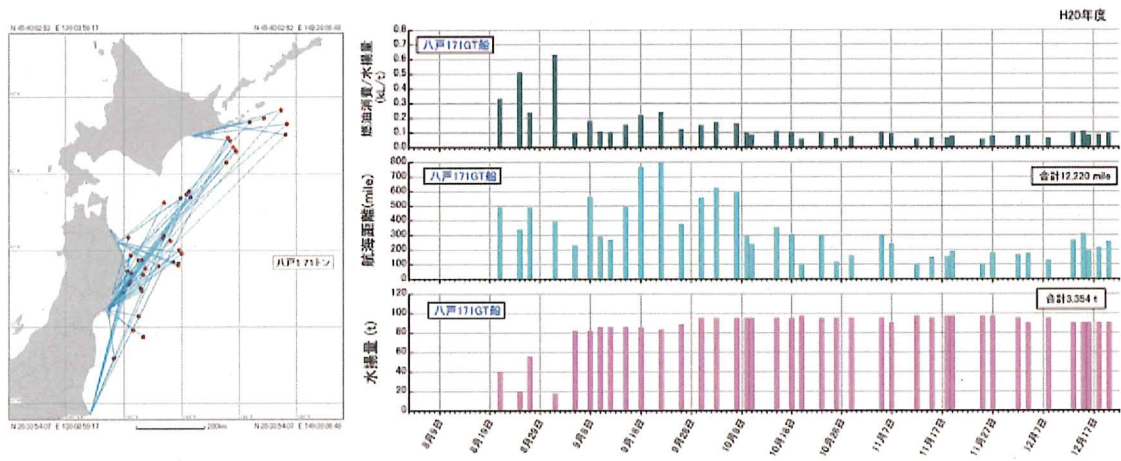


図 131-9 大型さんま漁船の操業行動実態 (171 GT 型、2008 年度)

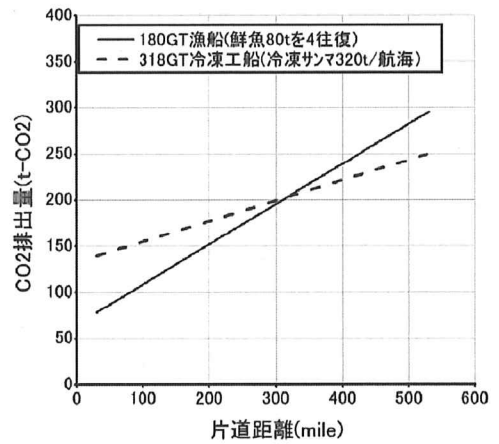
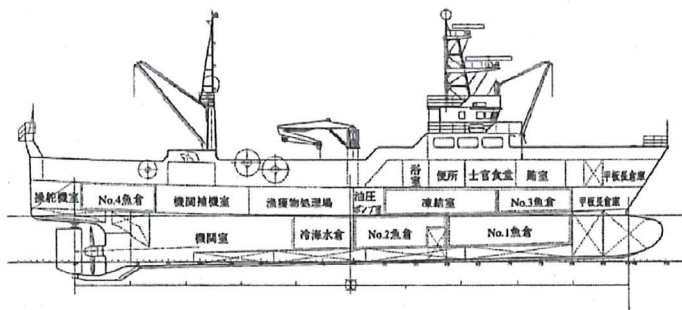


図 131-10 左) サンマ冷凍工船の一般配置 (トロール船の例)。出展：水産学シリーズ、新しい漁業のデザイン、p.125。右) サンマ冷凍工船の CO₂ 排出量の試算。鮮魚水揚げの場合には氷製造と凍結処理に係る CO₂ 排出量を加算している。

品の流通による新たな市場展開も期待される。

2011年度のサンマ漁期前半は、漁場が例年より遠くに形成され、暫くの間、直近港である花咲港へ一極集中も水揚げが続いた。陸揚げが帰港順のため各船は全速力で帰港している。減速航行を可能とする仕組みづくりが速効性のあるCO₂削減方策であろう。

オ 今後の課題

さんま棒受網漁船の行動分析から、小型船及び中型船は漁場に近い水揚げ港に向かうのに対し、漁場が道東沖の時期でも大型船は直近港より遠い三陸地区へ水揚げを行っている。このように、さんま棒受網漁業は三陸地区の水揚げ港に大きく依存していることから、漁港、加工場等の関係施設の復興が不可欠である。2010年度及び2011年度は、漁期序盤のさんまの漁場形成は、道東沖でも遠くかつ薄くなり、漁船の航走距離が大きくなっている。さんま漁船団の構成のあり方を考えるときには、毎年変わる漁場形成の影響を考慮したさんま漁船団の再編シナリオを提示する必要がある。

カ 要約

(ア) さんま漁船の燃油消費量推定法とCO₂排出原単位

サンマ操業に係わるCO₂排出原単位(CO₂排出量/サンマ水揚げ量)を算定したところ、CO₂排出量は、小型船、中型船、大型船の順に多くなるが、魚倉積載量が多い大型船がCO₂排出原単位は小さくなる。航海距離が大きくなるほどこの傾向が明らかである。

(イ) 水揚げ地選択行動とCO₂排出量の関係評価

漁獲成績報告書を活用して、2008年度の北太平洋さんま漁業の水揚げ行動等について分析した。盛漁期を迎えた9月22日の水揚げ行動として、大型船は道東沖漁場から三陸諸港へ水揚げしているが、これを直近漁港への水揚げに改変するとCO₂排出原単位は0.2近辺となる。航海距離を短縮することで、燃油使用量は大きく削減され、結果として大型船34隻からのCO₂排出量は約700t/日の削減が可能となる。

漁場が三陸沖に形成されている10月31日の漁船

行動は、実態として三陸主体の直近港の水揚げとなっており、大型船のCO₂排出原単位は0.2付近にある。従って、漁場が三陸沖に形成される場合には、水揚げ地改変によるCO₂排出量の削減効果は小さい。

キ 引用文献

- 1) 長谷川勝男(2011)さんま棒受網漁船の行動分析と燃油消費. 海洋水産エンジニアリング. 99: 51-56.

研究担当者(長谷川勝男*)

2 漁船漁業における水揚げ地選択の実態と二酸化炭素排出量削減に向けた漁港整備課題の抽出

ア 研究目的

サンマ棒受け網漁業を対象として、漁獲から販売に至る過程で排出される二酸化炭素排出量を推計するとともに、将来に向けて排出量を削減していくための水揚げ港選択行動モデルを開発し、二酸化炭素排出量削減に向けた漁港整備課題を抽出する。

イ 研究方法

サンマ棒受け網漁業における漁獲操業システムと水揚げ港選択を規定している社会経済的・技術的諸要素を分析することにより、二酸化炭素が多く排出される背景を解明する。また、漁獲から水揚げに至る社会経済的・技術的諸要素がいかに変化すれば二酸化炭素排出量が商品化過程総体で削減できるかについてシミュレーション分析を行い、将来に向けて漁業者が二酸化炭素排出量を削減していくための水揚げ港選択行動モデルを開発する。

(ア) 産地～消費地間における輸送環境の精査と二酸化炭素排出原単位の確定

物流過程における二酸化炭素排出量を推計するために、さんま輸送時の代表的な輸送環境を明らかにし、二酸化炭素排出量を推計するためのデータ基礎条件を確定する。また、産地～消費地間の高速道路道のり距離及び下記(ウ)の整備条件として必要となる鉄道コンテナ輸送を想定した場合の鉄道距離から二酸化炭素排出量を求め、トラックとの複合輸

送も視野に入れて二酸化炭素排出量の算出基礎データとする。

(イ) 2008年における実際の水揚げ行為を基礎とする二酸化炭素排出量の推計

第3章-1で推計したさんま棒受け網漁船の2008年における実際の漁獲行為において排出された二酸化炭素排出量に水揚げ後の物流環境も加算して、漁獲～水揚げ～消費地全過程を通じて二酸化炭素がどの程度排出されたかを漁船規模に着目して推定する。その際、さんま漁場は季節によって道東沖から三陸沖、常磐沖へと移動することから、漁期前半と漁期後半からそれぞれ特定日を抽出し、漁獲成績報告書を使用して試算する。また、試算にあたっては、3通りのさんま漁船団復興シナリオを想定して試算する。なお、試算にあたっては大型船による遠隔漁港への水揚げが一般化している漁期前半(10月半ばまで)に特に着目する。想定するシナリオは以下のとおりである。

ケース1：漁期の前半に大型船が三陸5港への水揚げを選択した場合(実際の水揚げ行為)

ケース2：漁期の前半に大型船が現状のように三陸各港への水揚げを選択せず、漁場から直近である道東諸港に水揚げした場合

ケース3：漁期の前半にみられる大型船の三陸諸港への水揚げを銚子と八戸に限定した場合(400トン級の大型船が接岸可能な漁港に水揚げを集中化するようなケース)

ケース4：漁期の前半にみられる大型船の三陸諸港への水揚げを銚子に限定した場合(最大の需要地である首都圏に最も近い大型漁港を水揚げ拠点にするケース)

(ウ) 海水温度上昇を想定した場合の道東水揚げ港の整備条件の検討

地球温暖化に伴う海水温度の上昇は、サンマ魚群の形成時期や漁場の南下を遅らせる可能性がある。漁場がより遠方に形成された場合、日帰り操業が前提となる小型サンマ船の操業が困難になることに加え、大型船も現在のように三陸諸港に水揚げすることは採算の上でも難しくなり、道東諸港に水揚げする必要性も増大する。ただし、今日の道東諸港は生鮮サンマをトラック輸送で効率的に出荷する漁港として整備されてきていることから地域内での冷凍能力は小さく、大量水揚げは価格暴落を生じさせかね

ない。さらに、凍結サンマを原料とする水産加工会社は三陸諸港に集積していることから、いかなる環境条件のもとで凍結サンマを域外移出させるかを検討する必要がある。そこで、ここでは道東地区から需要地に向けて二酸化炭素排出量を抑えつつ移出する手段として冷凍コンテナ輸送を想定し、移出に伴う二酸化炭素排出量を推定するとともにトラック輸送との比較、冷凍コンテナ輸送が具備すべき条件について検討する。

(エ) 大型船上凍結船の導入に伴う漁港整備環境の検討

将来の導入が検討されている大型船上凍結船は、数日沖泊まりして操業した後、拠点港に水揚げするものである。凍結船の導入は、水揚げ後の凍結業務を担っていた従来までの一次加工業者の機能の見直しを求めるものであると同時に、拠点港が具備すべき物流環境にも影響を与えることが予想される。そこで、ここでは大型船上凍結船が接岸可能な漁港整備条件と生産システムに与える影響及び二酸化炭素排出量の削減効果について検討する。

ウ 研究結果

(ア) 産地～消費地間における輸送環境の精査と二酸化炭素排出原単位の確定

関係企業や関係団体への聞き取り調査、メーカー公表資料などを用いて、産地～消費地間輸送時の排出量推計条件を以下のように確定し、試算の基礎とした。

- ① 水揚げ全量が鮮魚出荷されると仮定。
- ② 専用車で着地直行(複数地への配送は想定しない)
- ③ 高速道路 標準走行(スピードリミッター装着)
- ④ 各水揚げ港から中央卸売市場への距離数は高速道路利用を想定。
- ⑤ 荷姿 10 kg 箱(商品重量の 2.5 倍)(サンマ $4k + 氷 3.5k + 水 2.5k = 10k$)
- ⑥ トレーラー仕様
 - ・全長 12メートル、冷蔵車(−2℃)
 - ・最大積載量 2050箱
 - ・積載率 9割(18.45t)
 - ・備車台数に限界がないと仮定。
- ⑦ トラック燃費

・重量車モード燃費値：4.50 km/l (トラックメーカー資料)

・使用燃料：軽油 (超低硫黄軽油)

・CO₂ 排出量：2.62 kg-CO₂/l (1 km 走行で 0.65kg の CO₂ 排出量)

(参考資料)・重量車燃費一覧表

・温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン (2007年3月環境省地球環境局)

⑧ 漁獲物の配分比率 (市場閾人口とサンマ消費量を勘案)

- ・仙台市中央卸売市場 10%
- ・東京都中央卸売市場 (築地) 70%
- ・名古屋市中央卸売市場 (本場) 10%
- ・大阪市中央卸売市場 (本場) 10%

(イ) 2008年における実際の水揚げ行為を基礎とする二酸化炭素排出量の推計

まず、漁期前期における水揚げ行為を基礎とする二酸化炭素排出量を推計した。漁獲成績報告書を資料とした漁獲～水揚げ段階における二酸化炭素排出量及び上記データによる算出結果を合算し、以下の値を得た。漁獲から水揚げに至る過程で最も排出量が少ないのは「ケース2」(前期の水揚げを大型船含め道東諸港に集中化させるもの)であり、次いで「ケース1」(現行の水揚げ行為)、「ケース3」(前期の大型船の水揚げを八戸と銚子に限定するもの)であった。「ケース4」(前期の大型船の水揚げを最大需要地近傍の銚子1港に限定するもの)については、大型船の空荷状態での漁場復帰に重油を大量に消費するため最も二酸化炭素を排出する。逆に、水揚地から消費地に至る物流場面で最も排出量が少ないのは「ケース4」であり、次いで「ケース3」 「ケース1」の順であった。この結果、漁獲から消費地に至るまでの全過程を考慮した場合、最も排出量が少ないのは「ケース2」(1328.3トン/日)であり、次いで「ケース1」(同1858.1トン)、「ケース3」(同2030.3トン)となり、大型船の水揚げを

銚子に集中させる案は最も排出量が少ない「ケース2」の1.85倍の排出量となる。(表132-1)

ケース1：漁期の前半に大型船が三陸5港への水揚げを選択した場合。(実際の水揚げ行為)

【漁獲～水揚げまで】(漁場往復換算)

・小中型船 (46隻)：282.8トン (1隻平均6.1トン)

・大型船 (34隻)：1256.3トン (1隻平均37.0トン)

・合計CO₂排出量：1539.1トン/日 (1隻平均19.2トン)

【水揚げ後～消費地市場まで】CO₂排出量：319.0トン/日

【一日当たりCO₂排出総量】1858.1トン/日

【漁獲前期におけるCO₂排出総量】87,201トン

ケース2：漁期の前半に大型船が現状のように三陸各港への水揚げを選択せず、漁場から直近である道東諸港に水揚げした場合。

【漁獲～水揚げまで】(漁場往復換算)

・小中型船 (46隻)：282.8トン (1隻平均6.1トン)

・大型船 (34隻)：514.0トン (1隻平均15.1トン)

・合計CO₂排出量：796.8トン/日 (1隻平均110.0トン)

【水揚げ後～消費地市場まで】CO₂排出量：531.5トン/日

【一日当たりCO₂排出総量】1328.3トン/日

【漁獲前期におけるCO₂排出総量】62,337トン

ケース3：漁期前半にみられる大型船の三陸諸港への水揚げを銚子と八戸に限定した場合

【漁獲～水揚げまで】(漁場往復換算)

・小中型船 (46隻)：282.8トン (1隻平均6.1トン)

表132-1 漁期前期におけるケース別二酸化炭素排出量推計結果

	漁獲～水揚地	水揚地～消費地	合計値
ケース1	②1539.1t	③319.0t	②1858.1t
ケース2	①796.8t	④531.5t	①1328.3t
ケース3	③1748.7t	②281.6t	②2030.3t
ケース4	④2238.2t	①223.9t	④2462.1t

・大型船（八戸往復）（18隻）：548.7トン（1隻平均30.5トン）

大型船（銚子往復）（16隻）：917.2トン（1隻平均57.3トン）

・合計CO₂排出量：2030.3トン/日（1隻平均25.4トン）

【水揚げ後～消費地市場まで】CO₂排出量：281.6トン/日

【一日当たりCO₂排出総量】2030.3トン/日

【漁獲前期におけるCO₂排出総量】95,282トン

ケース4：小中型船が北海道、大型船が銚子だけに水揚げした場合

【漁獲～水揚げまで】（漁場往復換算）

・小中型船（46隻）：282.8トン（1隻平均6.1トン）

・大型船（銚子往復）（34隻）：1955.4トン（1隻平均57.5トン）

・合計CO₂排出量：2238.2トン/日（1隻平均28.0トン）

【水揚げ後～消費地市場まで】CO₂排出量：223.9トン/日

【一日当たりCO₂排出量総量】2462.1トン/日

【漁獲前期におけるCO₂排出量総量】115,546トン

次に、漁期後期における水揚げ行為による二酸化炭素排出量を推計した。10月半ば以降はサンマ漁場が三陸沖から常磐沖にかけて形成される。また魚体の脂肪率が落ちることから、鮮度維持のために水揚げ後一旦一次加工業者によって凍結されることが多く、その後、随時サンマ加工業者に個別販売されている。この時期の水揚げは基本として直近港への水揚げであり、それを歪める要素としては①各漁場における冷凍庫容量と製氷能力の多寡及び②同時接岸可能隻数の多寡による。ここでは、産地から消費地に至る実際のサンマ取引を想定した場合の二酸化

炭素排出量を推計するとともに、震災以降想定される拠点漁港整備を想定して、特定港へ水揚げを集中させた場合の二酸化炭素排出量を推定する。

推定の結果、現状の水揚げ行為では1日当たり1043.7トンの二酸化炭素が排出されており、そのうち77%が漁獲段階での排出であった。この値を漁獲後期全体に引き伸ばすと、その値は46,257トンであった。また、三陸地方における漁港の拠点化を想定して、特定港3港へ水揚げを集中させたと仮定すると、1日当たり漁獲段階で14.5トン、物流段階で33.9トン、全体では48.4トンの削減効果がある。この値を漁獲後期全体に引き伸ばすと、削減量は2,145トンであった。（表132-2）

ケース1：漁期後期において、大型・中小型船ともに三陸諸港への水揚げが行われた場合（実際の水揚げ行為）

【漁獲～水揚げまで】（漁場往復換算）

・小中型船（60隻）：495.7トン（1隻平均8.3トン）

・大型船（15隻）：312.4トン（1隻平均20.8トン）

・合計CO₂排出量：808.1トン/日（1隻平均10.8トン）

【水揚げ後～消費地市場まで】CO₂排出量：235.6トン/日

【一日当たりCO₂排出量総量】1043.7トン/日

【漁獲後期におけるCO₂排出量総量】46,257トン

ケース2：三陸地方における漁港の拠点化を想定して、特定港3港へ水揚げを集中させた場合

【試算にあたっての仮定】

・漁期後半の水揚げ量141,774トンのうち北海道水揚げ分24,962トンは北海道小型船による水揚げとして試算外とし、本州水揚げ分116,812トンを対象とする。

・三陸沖に漁場が形成される場合の代表位置と

表132-2 三陸諸港への水揚げ集中化に伴う二酸化炭素排出量の削減効果推計結果

	漁獲～水揚地	水揚地～消費地	合計値	漁獲後期全体
現状	808.1t	130.8t	938.9t	41,612t
集中化した場合	793.6t	96.9t	890.5t	39,467t
削減効果	△14.5t	△33.9t	△48.4t	△2145t

して北緯 39 度 30 分、東経 143 度を仮定し、特定 3 港へ水揚げが行われることとする。

・大型船全船（15 隻）と小中型船の 3 分の 2（40 隻）の 55 隻が漁獲することを想定。

・被災地振興の視点から、特定漁港として宮古、女川及び銚子を想定。

・宮古への仮想水揚げ量は釜石、宮古、大船渡の水揚合計値を、女川では気仙沼、女川、石巻の合計値、銚子は小名浜、銚子の合計値とした。

・大型船積載量を 80 トン、小中型船積載量を平均の 30 トンと仮定した。

・銚子は大型船 3 隻、残りの大型船は 2 港に均等入港。大型船積載量を想定した場合の水揚げ残量は小中型船による水揚げとして 2 港への入港隻数とした。

・全量鮮魚出荷を想定し、消費地配分比率も漁獲前期と同様とする。

【漁獲～水揚げまで】（漁場往復換算）

・小中型船（40 隻）：475.2 トン（1 隻平均 11.9 トン）

・大型船（15 隻）：318.4 トン（平均 21.2 トン）

・合計 CO₂ 排出量：793.6 トン/日（集中効果△ 14.5 トン/日）

【水揚げ後～消費地市場まで】CO₂ 排出量：96.9 トン/日

（集中効果△ 33.9 トン/日）

【一日当たり CO₂ 排出量総量】890.5 トン/日（集中効果△ 48.4 トン/日）

【漁獲後期における CO₂ 排出量総量】39,467 トン

（集中効果△ 2,145 トン）

（ウ）海水温度上昇を想定した場合の道東水揚げ港の整備条件の検討

上記ケース 2 を想定した場合でも、道東諸港に水揚げされたさんまを全量生鮮さんまとして出荷することは不可能である。鮮度維持を図りつつ産地価格を維持するためには、三陸各港同様に、急速凍結加工を行う必要がある。また、道東地区には水産加工業が集積していないことから、産地では凍結加工だけではなく需要者が立地する他地区に移出する必要がある。ここでは、JR 釧路駅から主要さんま水揚げ地近傍にコンテナ輸送で移出することを想定し、移出に伴う二酸化炭素排出量を推定した。

冷凍コンテナ輸送における二酸化炭素排出量については、釧路地区の関係企業や団体への聞き取り調査を基に、以下のように推計条件を確定し、試算の基礎とした。

① 1 日当たりの水揚げ量 4307 トンと 1 日当たり生鮮出荷可能量（市場関係者からの聞き取り調査による）から、1 日当たり冷凍保管量を 2000 トンとする。また、倉庫回転率を 1 回/5 日とし、倉庫容量 1 万トンとした（同じ特定第三種漁港である焼津漁港に匹敵）。

② F 級冷凍冷蔵庫における二酸化炭素排出量 300kg-CO₂/トン/年（日本冷蔵庫協会）
（+さんま保管に要する期間を 2 か月とする）
⇒⇒⇒ 1 か月間の二酸化炭素排出量 250 トン×2 か月 = 500 トンが F 級冷凍冷蔵庫新設に伴い加算される。

③ 1 日当たり 2000 トン×60 日×1/2 = 6 万トンの冷凍さんまの移出を二酸化炭素排出量抑制のためにモーダルシフトを導入（鉄道による冷凍コンテナ輸送+冷凍トラック）

④ 道運行距離数は日本交通公社「JR 時刻表」による。

⑤ 冷凍コンテナ輸送による二酸化炭素排出量 0.02 kg-CO₂/トン（日本貨物鉄道資料）
実際に三陸諸港へ水揚げされた量を各港に配分することを想定。水揚量全体を百とした場合の各港の水揚げ比率で按分した物流量を JR 直近駅までコンテナ輸送し、積み替え後冷凍トラックで諸港に搬入したと想定。ただし、積み替え時のエネルギー使用量は考慮しないこととする。

⑥ この結果、銚子を含む 6 漁港への 2 か月間の冷凍さんま移出量は 8520 トンであり、全体の二酸化炭素排出量は 3327.5 トンであった。ただし、このうち 71% は JR 拠点駅から冷凍トラックで三陸諸港へ搬入する際の排出量である。このため漁船漁業による道東地区拠点化に伴う二酸化炭素排出量削減の効果をより得ていくには、道東地区から複合輸送を使って三陸諸港へ搬入するにしても、JR 拠点駅周辺に大型冷蔵庫と水産加工団地を立地させ、域外からの加工原料に対応した生産システムを検討する必要がある。

（エ）大型船上凍結船の導入に伴う漁港整備環境の検討

次世代船型として船上凍結船を想定した場合、以下の点を配慮した整備が必要となる。

① 採算性から見て350～400トン程度の船体規模が想定される。このため、水揚げ地の集中化を図るにあたっては港内の水深が十分確保されていることが条件となる。

② 船上凍結となるため、水揚げ地において凍結業務を担っていた一次加工業者の役割が変化することから、水揚げ地における価格形成方法が変化し、荷捌き所に異なる機能が求められる。

③ 船上凍結品の荷揚げは長時間を要することから、大型船の接岸可能バースを多くとり、荷捌き所から直接大型冷蔵庫に搬入できる環境を整える必要がある。

工 考 察

サンマ棒受け網漁業を対象として、漁獲から販売に至る過程で排出される二酸化炭素排出量を推計するとともに、将来に向けて排出量を削減していくための水揚げ港選択行動モデルを開発し、二酸化炭素排出量削減に向けた漁港整備課題を抽出した。

従来までの漁場に形成に合わせてサンマ漁船が南下しつつ、漁場から最も近い漁港に水揚げする方法では、漁獲段階から消費地に至る輸送段階までを含めると非常に多くの二酸化炭素が排出されている。特に漁期前半の道東沖漁場では加工機能・冷凍機能も十分揃っていない道東地区漁港に大量に水揚げされ、それを鮮魚トラックで遠隔の大消費地に搬出されており、二酸化炭素削減のためには抜本的な代替案の提示が必要である。その場合、既に過去の遺物となりつつある鉄道貨物輸送とトラック輸送との複合一貫輸送など他分野施策との連携が不可欠となることから、国土政策視点からの行政判断が求められる。

また、サンマ棒受け網漁業と密接に関わりのある地域が東日本大震災の被災県である三陸地域であるため、二酸化炭素排出量が最小になる漁獲水揚げモデルが拠点水揚げであるとしても、他地区での地域経済を即刻蔑ろにする方針は取り難い。当該課題は高度に政治的判断が伴う課題であり、地域経済視点に立ったさらなる分析が求められる。

オ 今後の課題

さんま棒受け網漁業は、漁場形成の関係上、三陸地方の漁港に水揚げ行為を大きく依存してきたが、東日本大震災に伴い、インフラ環境、経済活動は一旦すべてが白紙となった。このため、本課題は過去データのみを試算となり、研究期中での中断を余儀なくされた。その後、復興関連予算の執行により復旧・復興作業は、資材費の高騰、工事関係者の不足から遅れがちとはいえ、徐々に進みつつある。ただし、インフラ環境の整備にあたっては、震災前の水揚げ環境に復旧させることは温室効果ガス削減を目指した取り組みからは逆行することになることから、漁獲段階～物流段階に至る総合的視点から二酸化炭素削減量が最大となる漁港の拠点化を目指すことの必要性について情報発信していくことが求められる。

カ 要 約

(ア) 2008年における実際の水揚げ行為を基礎とする二酸化炭素排出量の推計

現状の水揚げ行為による二酸化炭素排出量は1043.7トン/日であり、そのうち77%が漁獲段階での排出であった。この値を漁獲後期全体に引き伸ばすと、その値は46,257トンであった。また、三陸地方における漁港の拠点化を想定して、特定港33港へ水揚げを集中させたと仮定すると、1日当たり漁獲段階で14.5トン、物流段階で33.9トン、全体では48.4トンの削減効果があり、漁獲後期全体に引き伸ばすと、削減量は、145トンとなる。

(イ) 海水温度上昇を想定した場合の道東水揚げ港の整備条件の検討

道東諸港に水揚げされるさんまを全量生鮮さんまとして出荷することは不可能である。鮮度維持を図りつつ産地価格を維持するためには、三陸各港同様に、急速凍結加工を行う必要となる。また、道東地区には水産加工業が集積していないことから、産地では凍結加工だけではなく需要者が立地する他地区に移出する必要性が生じることから、全量をトラック輸送に依存しない出荷環境を整えることも今後必要である。本課題では仮に鉄道コンテナ輸送を使った複合輸送をした場合の効果について試算し、かなりの二酸化炭素削減に結び付くことが検証された。ただし、漁船漁業による道東地区拠点化に伴う二酸化

炭素排出量削減の効果をより得ていくには、道東地区から複合輸送を使って三陸諸港へ搬入するにしても、JR 拠点駅周辺に大型冷蔵庫と水産加工団地を立地させ、域外からの加工原料に対応した生産システムを検討する必要がある。

(ウ) 大型船上凍結船の導入に伴う漁港整備環境の検討

二酸化炭素削減に向けた対策として船上凍結船の導入が考えられるが、漁港整備の視点からは、①400トンクラスの漁船が入港できる十分な水深の確保、②船上凍結となるため、水揚げ地において凍結業務を担っていた一次加工業者の役割と価格形成方法が変化することを想定した荷捌き施設での機能見直し、③船上凍結品の荷揚げは長時間を要することから、大型船の接岸可能バースを多くとり、荷捌き所から直接大型冷蔵庫に搬入できる環境整備、の3点が重要となる。

キ 引用文献

- 1) 廣田将仁 (2011) 東日本大震災による主要水産加工集積地被害と今後への課題. 日本フードシステム学会.
- 2) 田坂行男 (2011) フードシステムと東日本大震災—特に水産業界について—. 日本フードシステム学会.
- 3) 牧野光琢・金子貴臣・廣田将仁 (2011) 北まき受け入れ体制の回復・復興過程. 水産海洋学会 (水産海洋シンポジウム).

研究担当者 (田坂行男*、廣田将仁、上野康弘)

3 亜寒帯域におけるサンマ等の漁場形成に地球温暖化が与える影響の解明

ア 研究目的

亜寒帯域におけるサンマ等の漁場形成の実態を過去の操業データを用いて明らかにする。またこの結果を踏まえて、将来の海水温上昇に伴うサンマ等の漁場形成の変化について推定する。

イ 研究方法

過去数十年間におけるサンマ棒受網に関する操業データを用い、漁場位置などの漁場形成の実態につ

いて解析を行う。さらに漁場形成の実態と海況条件(水温・水塊配置等)、クロロフィル等の条件、来遊資源の状態(来遊資源量や魚体の大きさなど)等との関係について解析を行い、社会経済的・技術的諸要素以外の要因における漁場形成要因を明らかにする。温暖化によるサンマ漁場形成の変化について推定するために、上記解析結果を組み込んだ、海水温上昇にともなう将来のサンマ漁場変動についての簡易予測モデルを構築し、温暖化に伴うサンマ漁場の変化について推定する。

(ア) 漁場位置などの漁場形成の実態解析と漁場形成要因の解析

大型船によるサンマ棒受網操業海域の実態を解明するため、サンマ棒受網漁業のうち100トン以上の大型船における操業海域の年変化について、1977年～2010年までのデータを使用し、整理した。さらにサンマ棒受網に関する操業データ、水温データ等を用いて、漁場形成要因について解析を行った。2010年に発生した夏季における高水温現象に注目し、高水温とサンマの来遊時期について解析を行った。また沖合を南下する群を対象とする操業についても、解析を行った。

(イ) 温暖化の影響を組み込んだサンマ来遊量予測モデルの開発

温暖化実験で使用する水温データとして、大気海洋結合モデルMIROCによる予測結果(人・自然・地球共生プロジェクトの成果)のうち、大気中CO₂濃度年率1%漸増実験の結果と、産業革命前固定実験結果を使用した。大気中CO₂濃度年率1%漸増実験の結果は、大気中CO₂濃度656ppm近傍の10年間のデータを、産業革命前固定実験は、大気中CO₂濃度が1900年の295.9ppmに固定した実験の10年間のデータを使用した結果である。それぞれの実験結果のうち、黒潮の蛇行と非蛇行の期間が同程度入るような10年間を選んだ。次に旬の代表値として5日、15日、25日を選び、漸増実験10年間平均と標準実験10年間平均の差を、温暖化後の水温上昇値とした。これらのデータを使用し、温暖化による水温予測結果の特徴について検討を行うため、温暖化により各海域でどの程度水温が上昇するのか、詳細な解析を行った。さらに、この温暖化の結果を、サンマ来遊量予測モデルに使用できるかどうかの検討を行った。

(ウ) サンマ来遊量予測モデルを使用した温暖化実験

温暖化の影響を組み込んだサンマ来遊量予測モデルを使用し、1996～2001年について比較実験を行った。また年変動の可能性について解析を行った。

(エ) サンマの痩せ具合のデータと漁場形成に関する調査

温暖化にともない、サンマの来遊時期が遅くなる可能性がある。来遊時期が遅くなるとサンマは徐々に痩せていくため、生鮮向けに利用できる割合が減ってくる可能性があるため、サンマの痩せ具合と漁場形成に関する調査を行った。

ウ 研究結果

(ア) 漁場位置などの漁場形成の実態解析と漁場形成要因の解析

1980年代は漁場が沖合まで広がり、沖合を南下するサンマを漁獲する船が多かったが、1990年代～2000年代は沖合で操業する回数は少なくなり、沿岸を南下するサンマを漁獲する船が多かったことが分かった。

サンマ漁場と水温との関係を整理するため、千島海域、道東海域、三陸海域、常磐海域における大型船によるサンマ漁場の水温（サンマ漁船が操業をした際に漁船が計測した表面水温）の推移を解析した。その結果、同一海域内では、時期とともに漁場水温は徐々に低下すること、漁場水温の最高水温に注目すると、南下するほど漁獲する水温が高くなる傾向があること、8月下旬は10℃以下でも漁場ができる可能性があるが、南下がはじまると漁場水温が

上がり、9月中旬以降は10℃以下で漁場ができることはほとんど無いことがわかった。

2010年における高水温現象とサンマ漁場との関係について解析を行った結果、2010年のサンマ不漁の原因として、表面水温が高い、資源量が減少した、北上期の回遊経路が沖合化したなどの影響が考えられた。しかし漁場位置と漁場水温について解析した結果、例年漁場が形成される表面水温14～15℃台の場所でもサンマが漁獲できなかった事から、表面水温が高かった影響よりも、北上期の回遊経路が沖合化した影響の方が大きかったことがわかった。

沖合を南下する群を対象とする操業について、解析を行った。沖合での操業が多かった1983年と1986年について、漁場水温の解析を行った結果、同一海域内では、時期とともに徐々に漁場水温が低下すること、漁場水温の最高水温に注目すると、南下するほど漁獲する水温が高くなる傾向があることがわかった（1986年の例は図133-1参照）。この傾向は、沿岸域における漁場水温の変化の特徴と同じであることから、これまで構築したサンマ来遊量予測モデルと同じ考え方で、沖合域まで組み込んだモデルの構築が可能であることがわかった。

(イ) 温暖化の影響を組み込んだサンマ来遊量予測モデルの開発

大気海洋結合モデルMIROCによる温暖化予測結果を調べた結果、道東～常磐海域の夏～秋における表面水温は、おおよそ1～3℃程度高くなる事が分かった。道東海域では、8月上旬～中旬に、温暖化により表面水温が5～6℃以上上昇する地点もあるが、平均で見ると2～3℃程度高くなる地点が多

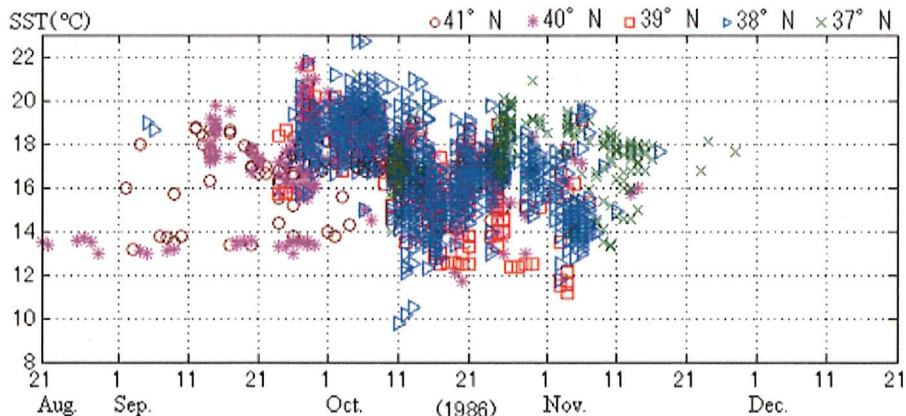


図133-1 大型船による沖合域におけるサンマ漁場水温の推移の例（1986年）

かった(図 133-2 上段)。三陸海域では、10 月下旬に、温暖化により表面水温が 5℃ 以上上昇する地点もあるが、平均で見ると 1～3℃ 程度高くなる地点が多かった(図 133-2 中段)。常磐海域では、温暖化により表面水温が 2～3℃ 程度高くなる地点が多かった(図 133-2 下段)。サンマ来遊量予測モデルでは、移動のパラメータとして使用する表面水温は、ある水温帯の占有割合である。これらのことから、MIROC による結果では温暖化により極端に水温が高くなる地点もあったが、ある水温帯の占有割合というパラメータで使用する点においては、使用できる事がわかった。

(ウ) サンマ来遊量予測モデルを使用した温暖化

実験

1995 年～2001 年までの 7 年について、サンマ来遊量予測モデルを使用して温暖化実験を行い、温暖化によりサンマの来遊資源量がどの程度変化するのか解析を行った。1995 年～2001 年の 7 年間には、温暖で南下が遅かった年や寒冷で南下が早かった年が含まれる。今回の実験では、2010 年度同様、JAFIC が作成した各年の旬別表面水温に、漸増実験 10 年間平均と標準実験 10 年間平均の差を加え、温暖化後の SST データとした。なお陸地に近い部分についてはデータが無いため、データが無い部分については、東西方向に引き延ばしを行ったデータを使用した。計算にあたり、漁期初めの資源量は各

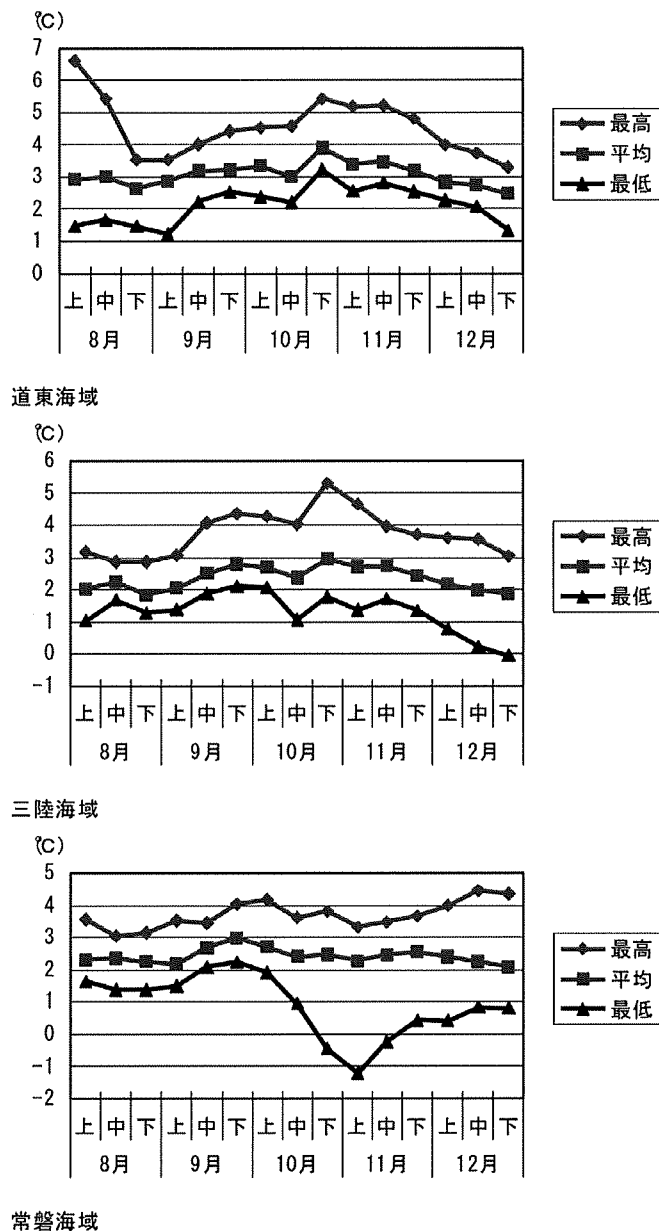
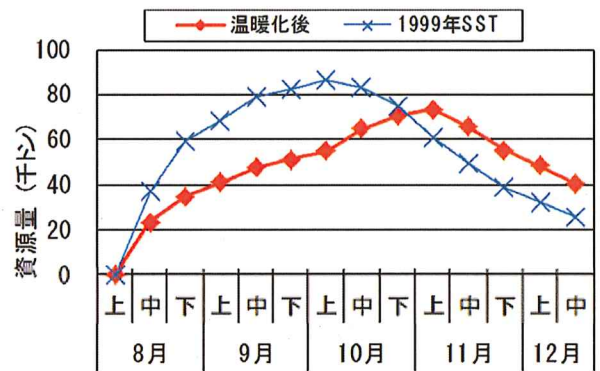
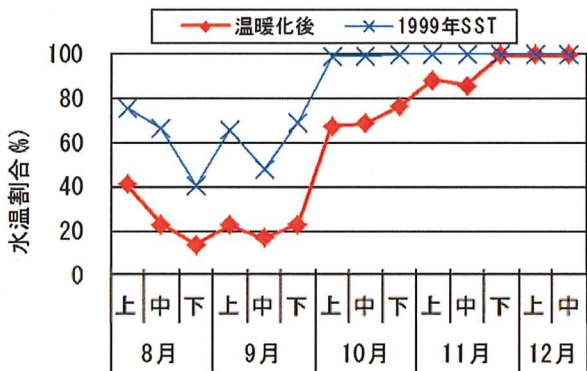


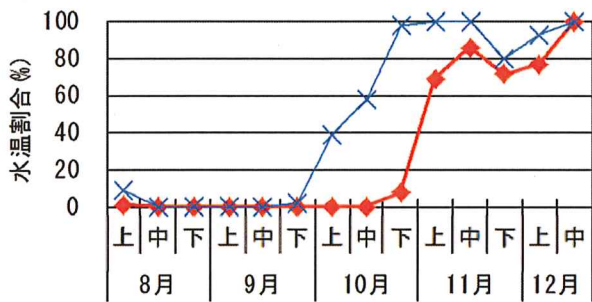
図 133-2 温暖化後の水温上昇値

年のサンマ来遊量予測モデルから計算した推定値を使用した。また漁獲は無いものとした。サンマ来遊量予測モデルで移動のパラメータとして使用する、SST20℃以下の割合（道東海域）、SST20℃以下の割合（三陸海域）、SST23℃以下の割合（常磐海域）について計算を行い、温暖化後と各年のSSTについて比較を行った結果、各年各海域ともに、温暖化によりサンマの南下が遅くなる可能性があることがわかった（1999年の例は図133-3左参照）。また、サンマ来遊予測モデルに温暖化後のSSTデータを組み込んで解析した結果、1996年～2001年の全ての場合において、サンマの来遊がかなり遅くなることわかった（1999年の例は図133-3右参照）。表

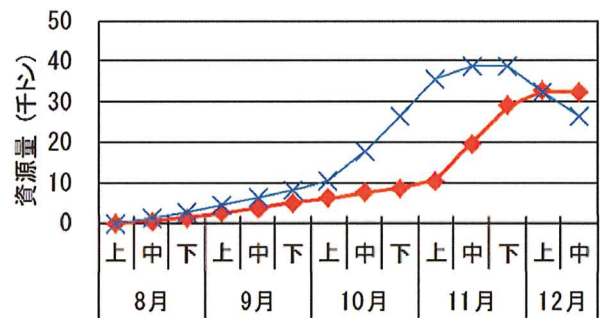
133-1に、道東海域、三陸海域、常磐海域におけるサンマ来遊資源量のピークが、温暖化前後によりどの程度変化したかを示す。道東海域では、9月中旬～10月上旬であったサンマ来遊資源量のピークが、温暖化により1～4旬ほど遅れ、ピークが10月上旬～11月上旬となった。水温が高く南下が遅かった1999年の場合でも、温暖化によりさらに3旬サンマ来遊資源量のピークが遅くなり、11月上旬になってピークが来る結果となった。三陸海域では、10月下旬～11月下旬であったサンマ来遊資源量のピークが、温暖化により1～4旬以上遅れ、ピークが11月中旬～12月中旬以降となった。常磐海域では、11月下旬～12月上旬であったサンマ来遊資源



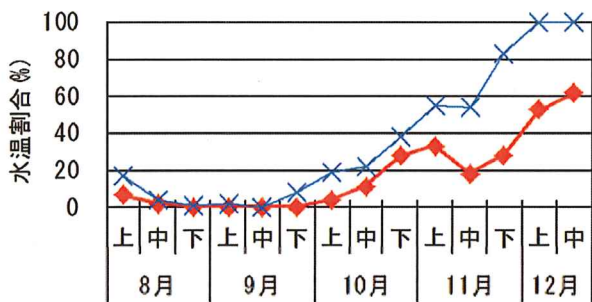
道東海域 SST20℃以下の割合



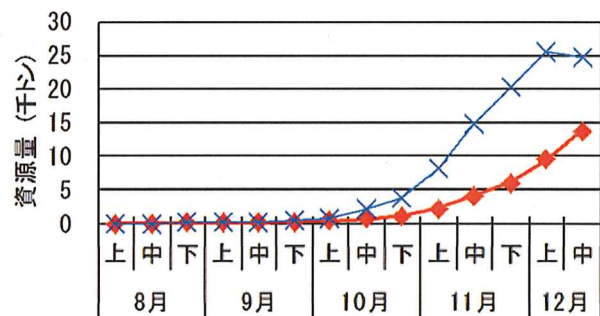
道東海域来遊資源量



三陸海域 SST20℃以下の割合



三陸海域来遊資源量



常磐海域 SST23℃以下の割合

常磐海域来遊資源量

図133-3 (左) 移動に影響を与える水温割合の変化 (右) 海域別資源量推定値の変化 (1999年におけるSSTを使い比較)

量のピークが、温暖化により12月中旬以降となった。

(エ) サンマの痩せ具合のデータと漁場形成に関する調査

温暖化にともない、サンマの来遊時期が遅くなるが、一方で時期が遅くなるとサンマは徐々に痩せていくため、生鮮向けに利用できる割合が減ってくる可能性がある。そのため、花咲港でサンマの痩せ具合のデータと漁場形成に関する調査を行った。具体的には、1週間に1回程度、計7回、体長体重測定を実施し、漁場位置と合わせてデータ収集を行っ

た。図133-4に、体長31cm台サンマの体重組成の推移を示す。この図から、サンマの体重は、徐々に減少している様子がわかる。150g以上を生鮮向けと仮定すると、9月2日では体長31cm台のサンマの多くが生鮮向けとして出荷できるサイズであるが、10月18日では体長31cm台のサンマのほぼ半数が生鮮向けとして出荷できないサイズであることがわかる。図133-5に9月2日、9月19日、10月18日におけるサンマの体長体重関係を示す。これらの図から、時期とともに体長も小さくなり、また体重も少なくなる傾向であることがわかった。また

表 133-1 道東海域、三陸海域、常磐海域におけるサンマ来遊資源量のピーク時期

	道東海域			三陸海域			常磐海域	
	温暖化前	温暖化後	比較	温暖化前	温暖化後	比較	温暖化前	温暖化後
1995年	9月下旬	10月中旬	2旬遅れ	11月上旬	12月上旬	3旬遅れ	11月下旬	12月中旬以降
1996年	9月中旬	10月上旬	2旬遅れ	11月上旬	12月上旬	3旬遅れ	11月下旬	12月中旬以降
1997年	9月下旬	10月上旬	1旬遅れ	10月下旬	11月中旬	2旬遅れ	11月下旬	12月中旬以降
1998年	9月下旬	10月下旬	3旬遅れ	11月上旬	12月中旬以降	4旬以上遅れ	12月上旬	12月中旬以降
1999年	10月上旬	11月上旬	3旬遅れ	11月下旬	12月上旬	1旬遅れ	12月上旬	12月中旬以降
2000年	9月下旬	11月上旬	4旬遅れ	11月中旬	12月中旬以降	3旬以上遅れ	12月上旬	12月中旬以降
2001年	9月中旬	10月中旬	3旬遅れ	11月中旬	12月上旬	2旬遅れ	11月下旬	12月中旬以降

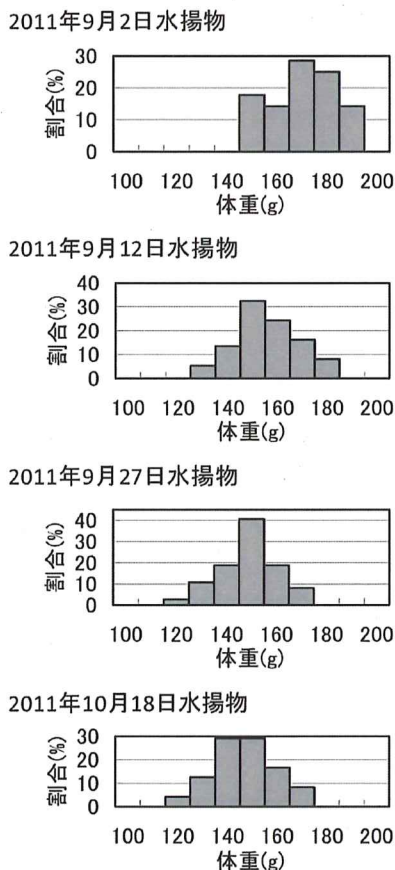


図 133-4 サンマ体重組成の変化 (体長31cm台、花咲港水揚物)

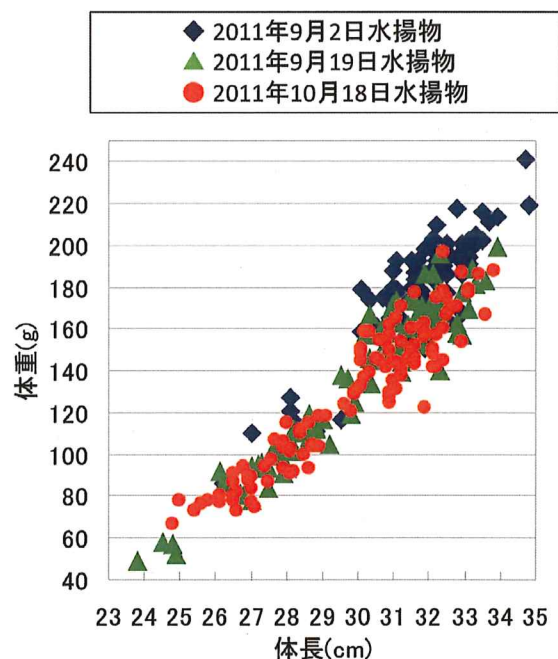


図 133-5 サンマ体長体重関係 (花咲港水揚物)

10月18日においても、体重が190gを超すサンマも混じることもわかった。

工 考 察

1990年代～2000年代は沖合で操業する回数は少なくなり、沿岸を南下するサンマを漁獲する船が多かった。港に近い場所で沢山漁獲できれば、沖合には行かない事を考慮すると1990年代以降沿岸を南下する群が多かったと考える。

道東海域では、温暖化によりサンマ来遊資源量のピークが1～4旬ほど遅れ、ピークが10月上旬～11月上旬となった。これらのことから、8月～9月はピーク前となり、場合によっては8月～9月は道東海域よりも北側まで行って操業を続ける船が多くなる可能性がある。また年によっては、11月に入っても道東海域で十分操業が行えると考え。三陸海域では、温暖化によりサンマ来遊資源量のピークが11月中旬～12月中旬以降となった。これらの結果は、来遊時期は遅くなるものの、三陸海域は温暖化後でも漁期後半において重要な漁場となる事を示していると考え。震災により三陸各港の水揚能力が著しく低下しているが、サンマ漁業にとって、温暖化後も三陸各港は重要な港である事を示している。常磐海域では、温暖化によりサンマ来遊資源量のピークが12月中旬以降となった。現在の漁期をずらさない限り、温暖化により常磐海域では漁場ができにくくなると考える。

オ 今後の課題

サンマの漁場形成時期については、温暖化の影響に加え、北上期の回遊経路が沖合化するかどうか影響を及ぼすと考える。温暖化の影響により、北上期の回遊経路が沖合化しやすくなるのかどうかについては、今後の課題である。さらに温暖化により、漁期前のサンマの資源量やサンマの体長や体重がどのように変化するか組み込む事が必要となる。このため、生態系モデルなどを使用したサンマ成長モデルの結果などと連携を深めて研究を進める必要がある。さらに、サンマの来遊時期が遅くなると、太ったサンマを漁獲しにくくなる可能性がある。漁期前の体長や体重データを使用し、具体的に太ったサンマがどの時期にどの程度来遊するかを予測することが必要である。

また温暖化による水温予測については、道東～常磐海域の沿岸に近い部分についても予測結果が必要となることから、親潮南下位置や北上暖水の再現性についても考慮する必要があると考える。

力 要 約

(ア) 1995年～2001年までの7年について、サンマ来遊予測モデルに大気海洋結合モデルMIROCによる水温予測結果を組み込んで解析した結果、温暖化によりサンマの南下が遅くなる可能性がある。

(イ) 道東海域では、サンマ来遊資源量のピークが、温暖化により1～4旬ほど遅れ、ピークが10月上旬～11月上旬となる。8月～9月は道東海域よりも北側まで行って操業を続ける船が多くなる可能性がある。また年によっては、11月に入っても道東海域で十分操業が行えるようになる。

(ウ) 三陸海域では、サンマ来遊資源量のピークが、温暖化により1～4旬以上遅れ、ピークが11月中旬～12月中旬以降となる。震災により三陸各港の水揚能力が著しく低下しているが、温暖化後も三陸海域は漁期後半において重要な漁場となることから、三陸各港は重要な港である。

(エ) 常磐海域では、サンマ来遊資源量のピークが、温暖化により12月中旬以降となり、現在の漁期をずらさない限り、温暖化により常磐海域では漁場ができにくくなる。

キ 引用文献

- 1) Hashioka, T., Sakamoto, T.T., Yamanaka, Y. (2009) Potential impact of global warming on North Pacific spring blooms projected by an eddy-permitting 3-D ocean ecosystem model. *Geophysical Research Letter* 36, L20604. doi: 10.1029/2009GL038912.
- 2) Sakamoto, T.T., Hasumi, H., Ishii, M., Emori, S., Suzuki, T., Nishimura, T., Sumi, A. (2005) Responses of the Kuroshio and the Kuroshio extension to global warming in a high-resolution climate model. *Geophysical Research Letters* 32, L14617. doi: 10.1029/2005GL023384.

研究担当者 (渡邊一功*)

第2編 地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発

第1章 我が国周辺海域における低次生態系モニタリングと影響評価

1 親潮・混合域の低次生態系モニタリングと影響評価

ア 研究目的

IPCCの第4次評価報告で示されたように、地球温暖化は既に海洋環境に様々な影響を与えていることが明らかになっている。世界3大漁場の一つであり、我が国の極めて重要な水産資源の供給水域である“親潮・混合域”でも然りで、さらに海洋環境の変動によって水産資源を下支えしている低次生態系も顕著に変動していることが農林水産技術会議委託の前プロジェクトである「地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響の評価と高度対策技術の開発」の一連の研究から明らかになってきた。しかしながら、その変動のメカニズムについては未だ不明な点も多い。地球温暖化が将来、水産資源に対してどの様な影響を与えるのかについて、正確な予測を行うためには、詳細な変動メカニズムの解明が不可欠である。そこで本課題では、前課題の成果を踏まえた上で、より詳細なメカニズムを解明するために、同海域でより高精度のモニタリングを継続し、より長期の時系列データのモデルの課題への提供、実測データに基づくモデル出力の評価と改良点の提案、データ解析による同海域の海洋環境・低次生態系要素の季節・経年変動特性及び長期変動の特性解明とその変動要素の解明等を行う事を目的とする。

イ 研究方法

(ア) モニタリングの継続及びデータの公開

親潮及び混合水域に位置するモニタリング定線A-line(図211-1)において1987年から開始したモニタリングを継続し、海洋物理環境からプランクトンまでの低次生態系についてのデータを取得し海洋環境・低次生態系の長期変動解析及びモデル課題へ提供した。また、観測項目について必要なものを追加する。収集したデータについては、課題担当者間で円滑に使えるよう整理して共有サーバーに保存すると共に、CTDデータに関しては3年、その他の

化学・生物データに関しては5年を経過したものはA-lineのウェブページ(図211-2)を通じて順次外部へ公開した。

(イ) 親潮・混合域における海洋環境の長期変動及びそのメカニズムの解明

A-lineモニタリングで取得したデータに加え、その他の水研センターが保有するデータ、WOD(World Ocean Database)等を組み合わせることによって、親潮及び混合域における1955年～2010年までの海洋環境データセットを作成した。このデータセットを用いることによって、1987年～2012年までの冬季の上部混合層深度の変動及び1955年～2010年まで栄養塩濃度の長期変動を解析した。

(ウ) 親潮・混合域における低次生態系の長期変動特性の把握

1998年から2010年にA-lineで取得したノルパックネット試料を分析することによって、親潮及び混合域の動物プランクトンの個体数を種レベルで調べた。さらに東北区水産研究所(以下「東北水研」という)が1960年～2000年の収集・分析していたデータを加えることによって1960年～2010年までのデータセットを作成した。これを分析することによって動物プランクトンの長期変動の解析を行った。

ウ 研究結果

(ア) モニタリングの継続及びデータの公開

A-lineでは1987年から調査を開始しており、2013年3月まで継続的にモニタリングを行った結果26年間のモニタリングデータを取得する事ができた。一方で長年に渡り調査を継続する過程で、各種のデータのフォーマット等に変更が生じ、解析の障壁となっていた。従って研究を効率的に進めるためにデータフォーマットの統一化を進めデータセットの一元化を行った。データセットは①1m間隔のCTDデータ、②基準層でのCTD及び化学・生物データから成る。観測時間についてはGMT

(Greenwich Mean Time) と LMT (Local Mean Time) が混在していたため LMT へ統一した。またメタデータを迅速に照会できるようにするために、採水野帳及びブリッジ野帳について可能なものを全て収集し電子化 (PDF) した。さらにこの野帳を活用する事で、未入力もしくは入力ミスがあったメタデータを修正した。収集整理したデータ・電子化した野帳ファイルに関しては全て共用のサーバーに保存した。このように、データの共有体制の効率化に取り組んだ結果、取得したデータを共用サーバーにて共有するまでのタイムラグは概ね 1 年以内となった。データの公開については、以前は北水研が制定した「北海道区水産研究所における研究開発成果物取扱要領」に則って行ってきた。しかしながら、現在データの取得と管理は北水研と東北水研に跨って行われている。一方で現在水研センター全体としては、データの公開は我が国周辺水域資源評価等推進委託事業による「我が国周辺水域資源情報システムの管理・利用規定」に則って行っている。従ってこの規程に則って、現在では A-line に係わるデータをウェブページ (図 211-2、http://tnfri.fra.affrc.go.jp/seika/a-line/a-line_index.html) からデータを順次公開している。なお、この規定では水温・塩分のデータに関しては、取得から 3 年、それ以外のデータ (栄養塩、クロロフィル a、サイズ別のクロロフィル a、溶存酸素濃度) に関しては、取得から 5 年経過後に公開できることになっている。

またモデル課題が開発している低次生態系モデル C-HOPE^{*1} eNEMURO^{*2} の各コンパートメントに取得したデータを提供し出力結果の観測値との比較検討を行った。その上で各モデルのチューニングを行った結果、栄養塩濃度～植物プランクトン現存量に関しては絶対値も含め実測値とモデルの出力値が整合するレベルにまで達した。動物プランクトンに関しては絶対値としては合わないものの、変動パターンは実測値とモデルの出力値で良く合うレベルにまで達した。

(イ) 親潮・混合域における海洋環境の長期変動及びそのメカニズムの解明

地球温暖化に伴って中高緯度域の海洋の表層では水温が上昇、塩分が低下すると考えられている。最近までの約半世紀の観測結果でも、北太平洋中高緯

度海域の表層の水温は上昇し塩分は低下していることが報告されている (IPCC)¹⁾。このような変動によって表層の水の密度が低下し表層と中深層との密度差が大きくなることで、冬季の鉛直混合が弱くなっていると考えられる。そこで A-line において冬季混合層深度の変動を明らかにするために、1990 年から 2012 年までに取得したデータを用いて解析を進めた。A-line では 1 月と 2 月に冬季の調査を行っているが、継続的にデータが揃っている 1 月について解析を行った。その結果、親潮域の上部混合層深度は 1994～95 年以降、浅化傾向が見られた (図 211-3)。

次に実際の栄養塩濃度の経年変動について A-line 及び NODC 等のデータを組み合わせることで 1955 年から 2010 年まで調べた。使用したのは長期的なデータが蓄積されている、リン酸塩濃度データである。その結果リン酸塩濃度は親潮及び混合域共に表層では有意な減少トレンド、中層 (26.7～26.8 $\sigma\theta$) では有意な上昇トレンドが見られた (図 211-4)。このようにリン酸濃度のトレンド成分に関しては表層と中層で逆の変動パターンを示した。さらにリン酸塩濃度は約 20 年の周期的な変動を示した。この周期的な変動はトレンド成分とは異なり表層と中層で類似しており、統計的にも有意な正の相関関係を示した。このことから、周期的な変動成分はトレンド成分とは異なる要因で変動していると推測された。さらに親潮と混合域で同様の変動パターンを示した。

(ウ) 親潮・混合域における低次生態系の長期変動特性の把握

この水域の動物プランクトンとしては *Neocalanus* 属カイアシ類の 3 種 (*N. cristatus*, *N. flemingeri*, *N. plumchurs*) 現存量が非常に高く、またサンマ、サケ及びスケトウダラ等の水産有用種の重要な餌料生物となっている。そのため、これらの現存量の変動について 2009 年までの試料を用いて解析を行った。その結果、親潮域では *N. flemingeri* と *N. cristatus* の現存量は共に 90 年代以降から続く高い水準を 2000 年代にも維持していることが明らかになった (図 211-5)。 *N. plumchurs* は 90 年代後期に一時的に減少したものの、2000 年代に再び増加し同年代の後期まで高い値を維持していることが明らかになった。次に、*Neocalanus* 3

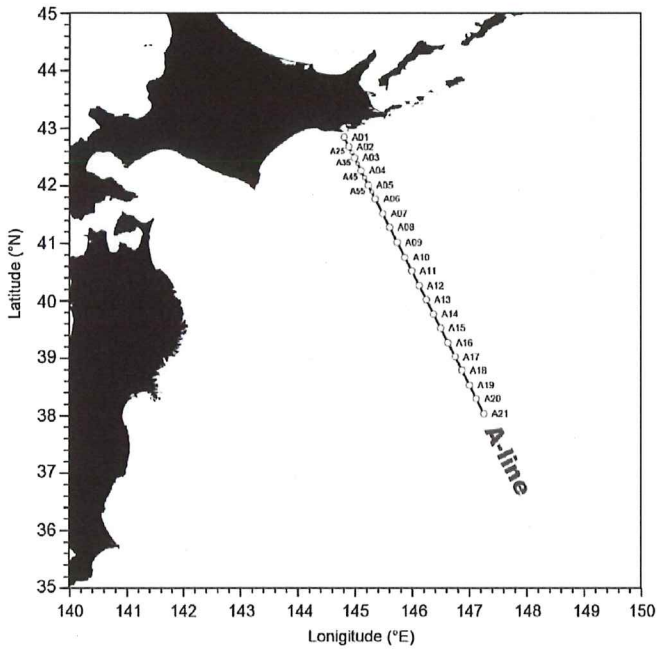


図 211-1 A-line 及びその観測点位置

FRA A-line Monitoring

国立研究開発法人水産総合研究センター
東北区水産研究所
北海道区水産研究所
中央水産研究所

ホーム モニタリングの紹介 観測 データ 観測機 リンク

ニュース&イベント

2013/1/1 (金)
A-line/POMA2013を受賞しました



左: 原田 博士
右: Laura Richards 博士 PICES 運営評議員

メンバー専用

国立研究開発法人 水産総合研究センター 東北区水産研究所 〒985-0001 宮城県塩釜市新浜町 3-27-5
TEL +81-22-365-1191 FAX +81-22-367-1250 / E-mail: www-k2@ml.afric.go.jp

Copyright (C) 国立研究開発法人 水産総合研究センター、東北区水産研究所、北海道区水産研究所、中央水産研究所

図 211-2 A-line のウェブページ
データのタブからデータを公開している。

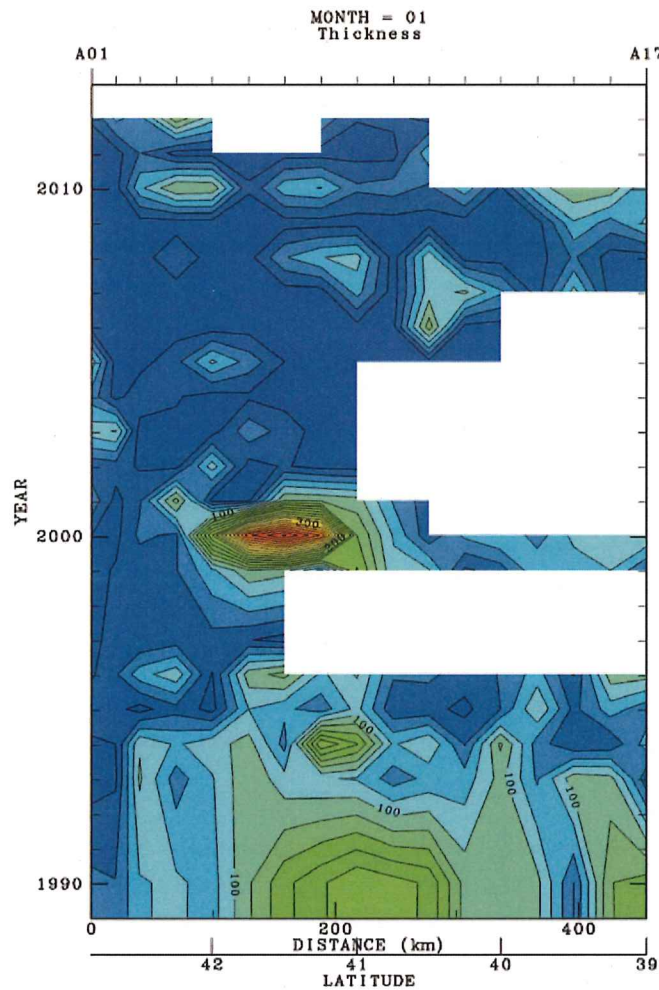


図 211-3 A-line 上における 1990 年～2012 年までの 1 月の混合層深度 (m) の変動
暖色系は深く寒色系は浅い。2000 年に混合層深度が深くなっている部分は暖水塊の影響。

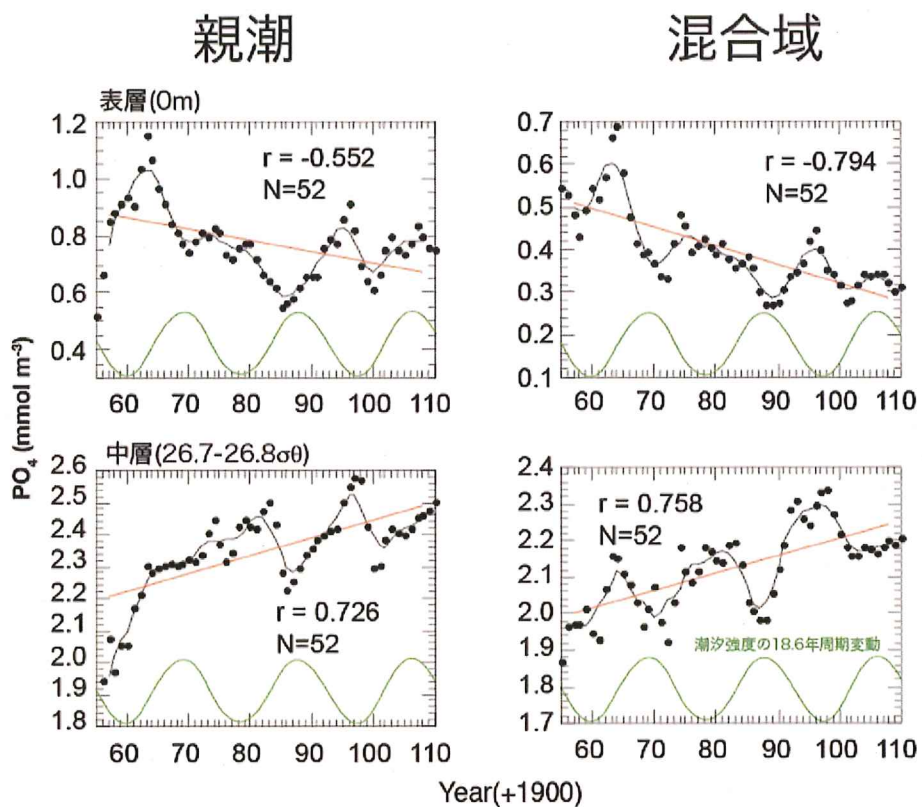


図 211-4 1955 年～2010 年の親潮及び混合域における年平均リン酸塩濃度の変動
 黒線は 5 年移動平均値、赤線は有意なトレンド、緑線は潮汐強度の 18.6 年周期変動の指数を示す。

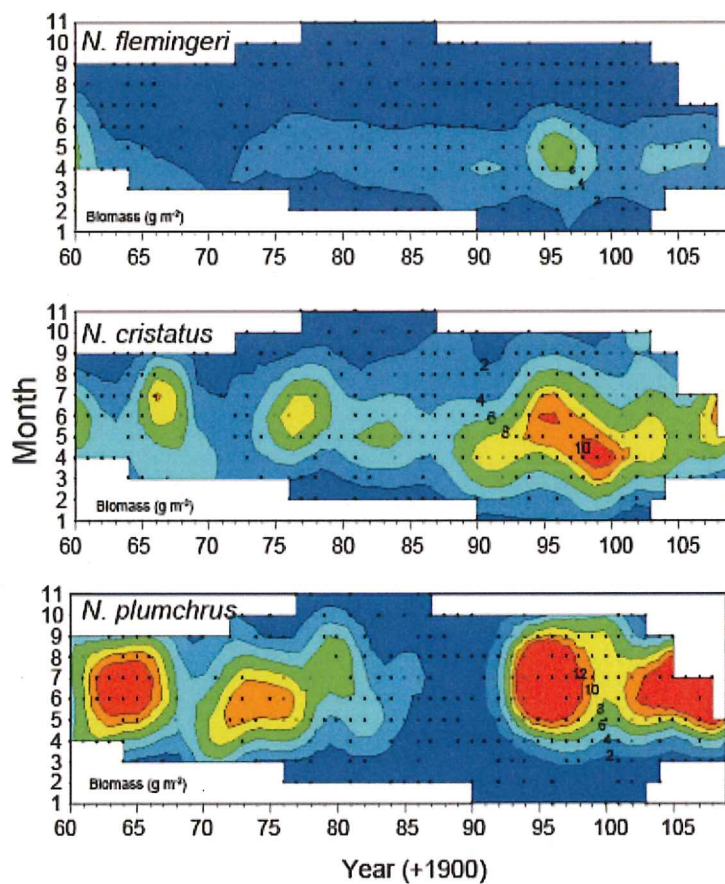


図 211-5 1960 年～2009 年の親潮及び混合域における *Neocalanus* 属カイアシ類 3 種の現存量 (湿重量) の変動

種の現存量が表層で最も高くなる春～夏（4月～8月）の年平均値調べた。その結果 *N. flemingeri* 及び *N. cristatus* では有意な増加トレンドを示していることが明らかとなった（図 211-6）。一方で *N. plumchrus* ではトレンドは見られず、顕著な 10 年規模変動を示していた。

工 考 察

(ア) モニタリングの継続及びデータの公開

2013 年 3 月までモニタリングを継続することによって、26 年間のデータセットを作成する事ができた。そのこのことによって 10 年スケール変動に関しては検出が可能となった。またデータフォーマットの統一化、メタデータの掘り起こし及び修正を行い、ウェブを活用したデータの及びメタデータの共有体制を構築する事によって、以前に比べ飛躍的に解析・研究の効率が上がった。

(イ) 親潮・混合域における海洋環境の長期変動及びそのメカニズムの解明

A-line 上で見られた上部混合層深度の浅化の原因を明らかにするために、混合層内の水温及び塩分の経年変動を調べた結果、水温には上部混合層の浅化に対応した変化は見られなかったが、塩分は 2000 年代以降に低下する傾向が見られた。さらに混合層内の密度を調べた結果、2000 年代の低塩化に伴い密度も軽くなっていることが明らかとなった。これらのことから、2000 年代以降の上部混合層深度の浅化は塩分低下が関係していると推測された。このような塩分の低下の原因としては、親潮と黒潮親潮混合域の水の混合過程の変動が関係していると推測

された。

次に A-line 上で見られた上部混合層深度の栄養塩供給への影響を明らかにするために、1955 年から 2010 年の親潮及び混合域のリン酸塩濃度の変動を調べた。その結果、表層では低下トレンド、中層では上昇トレンドがあることが分かった。このことから上部混合層の浅化によって、表層の栄養塩濃度に低下に最近まで関係している可能性が考えられた。一方で、リン酸濃度は約 20 年スケールの周期的な変動も示しそれは表層と中層で同期していた。この変動は潮汐強度の 18.6 年周期変動のパターンと一致した。潮汐は NPIW（北太平洋中層）の形成に深く関係すると考えられている。NPIW は親潮及び混合域の表層への栄養塩の供給源でもある。従って潮汐強度の 18.6 年周期変動が NPIW の形成過程に影響することで、親潮及び混合域のリン酸濃度の周期的な変動を引き起こしたと推測された。以上の栄養塩のトレンドと周期的な変動は前プロ研で 1955 年～2000 年までの解析結果からも示されていた (Tadokoro et al.)²⁾。今回データを 10 年延伸してもそのパターンが継続していることが本研究から明らかとなった。

(ウ) 親潮・混合域における低次生態系の長期変動特性の把握

現存量に対して最も重要な成長段階（コペポダイト期）を明らかにするために、現存量に対する各コペポダイト期の割合を調べた、その結果、C5 期（表層に分布する最も高齢なステージ）の割合が 3 種共に 5 割以上を占め (*N. flemingeri* : 63%、*N. cristatus* : 83%、*N. plumchrus* : 73%)、このス

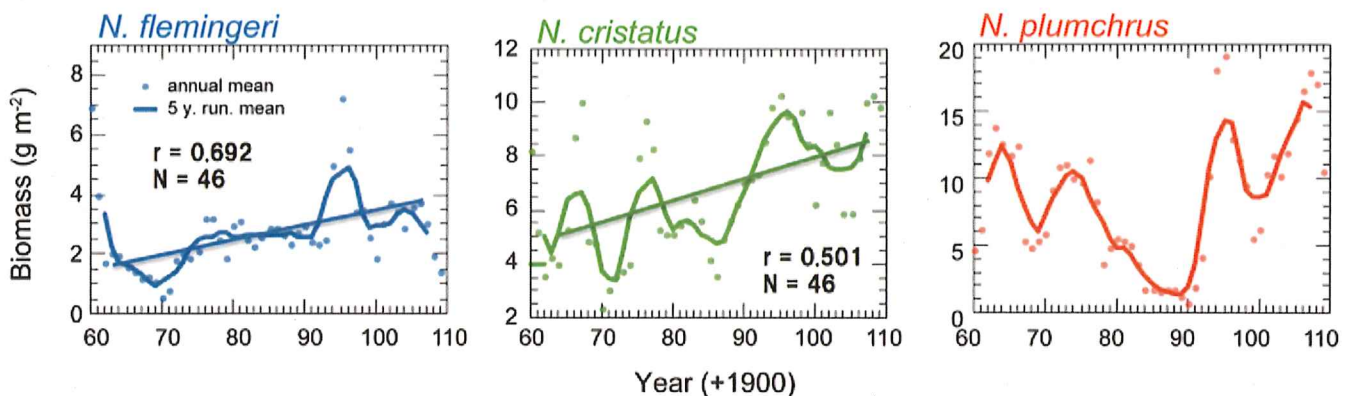


図 211-6 1960 年～2009 年の春～夏における親潮及び混合域における *Neocalanus* 属カイアシ類 3 種の平均現存量（湿重量）の変動

テージが最も重要であることが明らかとなった。このことから、C5期の現存量の変動メカニズムを明らかにすることが、トータル現存量の経年変動の要因を明らかにする上で重要であると考えられた。そこで次にC5期の個体数とそれよりの若齢の成長段階の個体数の経年変動パターンを比較することで、どの成長段階でC5期の個体数の変動が起こったかを調べた。どの成長段階でC5の個体数変動が起きているかを明らかにすることは、C5個体数の変動メカニズムを明らかにする上で重要である。その結果、*N. flemingeri*はC2、*N. cristatus*はC1と比較した成長段階のなかで最も若齢の個体数と最も高い相関関係を示した。一方で*N. plumchrus*はC4と最も高齢の個体数と最も高い相関関係を示した。このことから、前者の2種ではC1期までの加入量がC5期の個体数を決める一方で、*N. plumchrus*ではC4の生残がC5期の個体数を決めると推測された。さらに環境要因（4-8月の表面水温、12-2月のPDO index、4-8月のリン酸濃度、マイワシ資源量）と*Neocalanus*3種の湿重量の関係を相関関係から調べた。その結果、*N. flemingeri*は冬季のPDOと有意な正の関係を示した。このことから、*N. flemingeri*の変動にPDOが関係していることが推測された。ただしそのメカニズムについては現時点ではよく分からなかった。またリン酸塩濃度は*N. cristatus*、*N. plumchrus*と有意な正の関係を示した。このことから栄養塩の供給が一次生産に影響することで、これらの生産に影響した可能性が考えられた。さらに*N. plumchrus*はマイワシ資源量と有意な負の関係を示した。これまでの研究(Tadokoro et al.)³⁾でもマイワシの捕食によるトップダウンコントロールの可能性が指摘されており、マイワシによる捕食圧も*N. plumchrus*の変動に関係している可能性が考えられた。

オ 今後の課題

(ア) モニタリングの継続及びデータの公開

モニタリングの対象となっている項目は多岐にわたり、観測に際しては多大な準備と労力が必要である。一方でモニタリングに携わる研究者の数は減少傾向にあり、1人当たりの負担は大きく増えている。円滑にモニタリングを継続していくためには、今後人員の確保が必要である。また地球温暖化のよ

うな継続的な変動を検出していくためには、今後も長期に渡りモニタリングを行って行くことが重要となる。その体制を維持すると共に、観測の効率化をより進める必要があると思われる。

(イ) 親潮・混合域における海洋環境の長期変動及びそのメカニズムの解明

A-lineで取得した23年間のデータから親潮域の冬季の鉛直今後深度に浅化傾向があることが明らかとなった。これはIPCC(2013)が示した北太平洋の水温・塩分の変化と整合するものであった。一方で親潮では鉛直混合深度の変動に結びつく水温の変動は見られなかった。塩分に関しては、鉛直混合深度の浅化との関係が示唆された。今後も親潮域で塩分の変化によって鉛直混合深度の浅化傾向が続くのか、継続的にモニタリングを行って行く必要がある。

また、リン酸塩濃度に関しては親潮及び混合域において表層で長期的なトレンドが見られた、これが今後も継続するのについてもモニタリングしていく必要がある。

(ウ) 親潮・混合域における低次生態系の長期変動特性の把握

親潮では*N. flemingeri*は冬季のPDOと有意な正の関係を示した。しかしながらそのメカニズムについては現時点ではよく分かっていないである。今後は両者を結ぶ機構についてさらに検討していく必要がある。また*N. cristatus*、*N. plumchrus*はリン酸塩濃度と有意な正の関係を示した。栄養塩の供給が一次生産に影響することで、これらの生産に影響した可能性が考えられた。一方で*N. plumchrus*はマイワシの資源量とも有意な負の関係も示した。このことからボトムアップ、トップダウンいずれの要因がより重要かを今後検討する必要がある。

力 要 約

(ア) モニタリングの継続及びデータの公開

2013年3月まで継続的にモニタリングを行った結果26年間のモニタリングデータを取得した。さらに過去のデータにまで遡り各種のデータのフォーマットやエラーの修正を行い一元的なデータの管理を進めた。その結果より効率的に研究を進める体制が構築できた。また水研センターの規程に則って、外部へのデータの公開も進めた。データは本課題で

の研究のみならず、モデル課題に提供し数値モデルの精度向上にも寄与した。

(イ) 親潮・混合域における海洋環境の長期変動及びそのメカニズムの解明

A-line における冬季混合層深度の変動を明らかにするために、1990年から2012年までに取得したデータを用いて解析を進めた。その結果、親潮域の上部混合層深度は1994～95年以降、浅化傾向が見られた。これは表層の塩分の低下に伴い、表層と中深層の密度差が大きくなっていることと関係していると推測された。

リン酸塩濃度は1955年から2010年の間、親潮及び混合域共に表層では有意な減少トレンド、中層(26.7～26.8σ_θ)では有意な上昇トレンドを示した。トレンドは表層と中層で逆であったため、長期的に二つの層の間の水の交換が衰退していることが推測された。さらにリン酸塩濃度は約20年の周期的な変動を示した。この周期的な変動のパターンは、トレンド成分とは異なり表層と中層で非常に類似し、統計的にも有意な正の相関関係を示した。この周期的な変動の成分は潮汐強度の周期的な変動に関係していると推測された。

(ウ) 親潮・混合域における低次生態系の長期変動特性の把握

主要な動物プランクトンである *Neocalanus* 属カイアシ類の3種 (*N. cristatus*、*N. flemingeri*、*N. plumchurs*) らの現存量の変動について1960年～2009年までの試料を用いて解析を行った。その結果、親潮域では *N. flemingeri* と *N. cristatus* の現存量は共に90年代以降から続く高い水準を2000年代にも維持していることが明らかになった。一方で、*N. plumchurs* は80年代に大きく減少したことが明らかとなった。環境要因と比較すると、*N. flemingeri* は冬季のPDOと有意な正の相関関係を示した。このことから、*N. flemingeri* の変動にPDOが関係していることが推測された。またリン酸塩濃度は *N. cristatus*、*N. plumchurs* と有意な正の関係を示した。このことから栄養塩の供給が一次生産に影響することで、これらの生産に影響した可能性が考えられた。さらに *N. plumchurs* はマイワシ資源量と有意な負の関係を示したことから、マイワシによる捕食圧も *N. plumchurs* の変動に関係していることが推測された。

キ 引用文献

- 1) IPCC (2013) Climate Change 2013: The physical science basis. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wgl/>
- 2) Tadokoro K. *et al.* (2009) Possible mechanisms of decadal-scale variation in PO₄ concentration in the western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.* 36: L08606, doi: 10.1029/2009GL037327.
- 3) Tadokoro K. *et al.* (2005) Interannual variations in *Neocalanus* biomass in the Oyashio waters of the western North Pacific. *Fisheries Oceanography* 14(3): 210-222.

研究担当者(田所和明*、齊藤宏明、桑田 晃、岡崎雄二、清水勇吾、笥 茂穂、東屋知範、川崎康寛、葛西広海、小埜恒夫、日下 彰、黒田 寛)

*1: C-HOPE (Hamburg Ocean Primitive Equation Model) ドイツのマックスプランク研究所で開発された海洋モデル

*2: eNEMURO (extended North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) 北太平洋亜寒帯水域を対象に開発された低次生態系モデル NEMURO の拡張版

2 黒潮域の低次生態系モニタリングと影響評価 ア 研究目的

黒潮域は水産資源の中でも重要なサンマ、イワシ類などの小型浮魚類の産卵場及び生活史初期の生育場であり、この海域の変化は小型浮魚類の資源変動に大きな影響を与えていると考えられている。また、長期的に水温が上昇していることが報告され、温暖化による小型浮魚の仔稚魚期への影響が懸念される。このため、本課題では、御前崎沖の観測定線(“O-line”)並びに土佐湾におけるモニタリングの観測を継続して実施することにより、黒潮域とその内側域の低次生態系構造の特徴を把握すること、これらの観測データに加えて長年蓄積された沿岸域の観測データを整備して長期変動の解析を行い、温暖

化の黒潮域及びその沿岸域への影響を明らかにすることを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 海洋モニタリング：御前崎沖定線調査（5回）及び土佐湾における物理及び低次生産の観測（各月）を行った。

a 御前崎沖定線調査

東経138度線上に設けられた「御前崎沖定線（“O-line”）」において、以下の内容で各年5回の観測を行った。

(a) ライン観測点

① CTD観測（0～3000mまたは海底直上50mまで）、栄養塩（表面から最大深度まで）、クロロフィル（200m深まで）試料を取得

② サイズ別クロロフィル試料及び植物プランクトン検鏡試料（10m深のみ、2011年1月以降の各年1・3・5月）

③ ノルパックネット観測（0～200m及び0～50m）

(b) 昼夜観測点

北緯34度、同30度、黒潮流軸上、これらに加えて黒潮内側域と外側域に1点ずつ、計5点の昼夜観測点を設け、ライン観測点の項目に以下の項目を加えた観測を行った。

① 光観測

② サイズ分画クロロフィル試料（ $>10\mu\text{m}$, $2\sim 10\mu\text{m}$, $0.2\sim 2\mu\text{m}$ ）

③ 植物プランクトン検鏡試料（2010年5月まで）、フローサイトメトリー分析試料（2010年1月まで）、ナノ・マイクロサイズの動物プランクトン検鏡試料（2009年5月まで）

④ ノルパックネット観測（0～200m及び0～50m、昼夜）

b 土佐湾調査

土佐湾の14定点において、各月の定点観測を行い、栄養塩量、クロロフィル濃度、微小動物プランクトン、ネット動物プランクトン用の試料を採取した。このうちStn.A（ $33^{\circ}12'N\sim 133^{\circ}46'N$ ）のクロロフィル濃度及びサイズ別のカイアシ類分布密度について解析を行った。

(イ) 既存の試料及びデータの解析

a 静岡県の産卵調査試料

冬春季の動物プランクトン現存量の季節変動に関する知見について、御前崎沖定線調査よりも時間的な解像度を上げるために、静岡県が各月で行っている観測資料を用いてカイアシ類現存量の分析を行った。静岡県が設けている定点のうち、御前崎沖定線の大観測点である $138^{\circ}E$ 、 $34^{\circ}N$ の近傍の2点については卓上型ビデオプランクトンレコーダー（bVPR）を用いてカイアシ類の計数及び体サイズの測定を行った。

b 物理場の広域再解析値の利用

高時空間解像度の黒潮流軸データを利用し、本州南方海域における黒潮流軸の変動様式についての分析を行った。また、FRA-JCOPE再解析値の物理場を利用し、混合層深度の季節変動を求めた。

ウ 研究結果

(ア) 黒潮流路変動パターンの海域内における違いの分析

黒潮流軸データ（以下「流軸データ」）の妥当性をO-Line調査の観測データを利用して検証した。これまでのO-Line調査で観測された東経138度線上の黒潮流軸緯度（200m深 $15^{\circ}C$ の緯度）は、対応する流軸データでの緯度とよく一致（ $r^2 = 0.87$ ）し、流軸データの再現性が確認された。1993～2012年の流軸データを利用して本州南方の黒潮流軸緯度を東西方向の分布を解析した結果、年平均値及び春季（2月～4月平均）について、潮岬の東西で流軸緯度に負の相関がある「シーソー変動」のパターンが見られた（図212-1）。

また、流軸データに基づいて表面水温の人工衛星データを加工し、黒潮内側域、黒潮流軸位置、黒潮外側域のそれぞれについて、月別平均値を作成した。

(イ) 御前崎沖定線上の栄養塩分布に見られる“nutrient stream”

御前崎沖定線上において、栄養塩の鉛直分布の気候値を各季節について作成した。その結果、等密度面上の栄養塩濃度を定線にそって比較した場合、春季には、黒潮流軸の位置での硝酸塩濃度が陸側及び沖側に比べて高くなるという特有の構造が見られた。この構造は $\sigma\theta$ 23.5から25.5の等密度面上に見られ、その南北に比べ、 $2.0\sim 3.0\mu\text{mol N/kg}$ 程度高い濃度が見られた（図212-2）。同様の構造は西部北

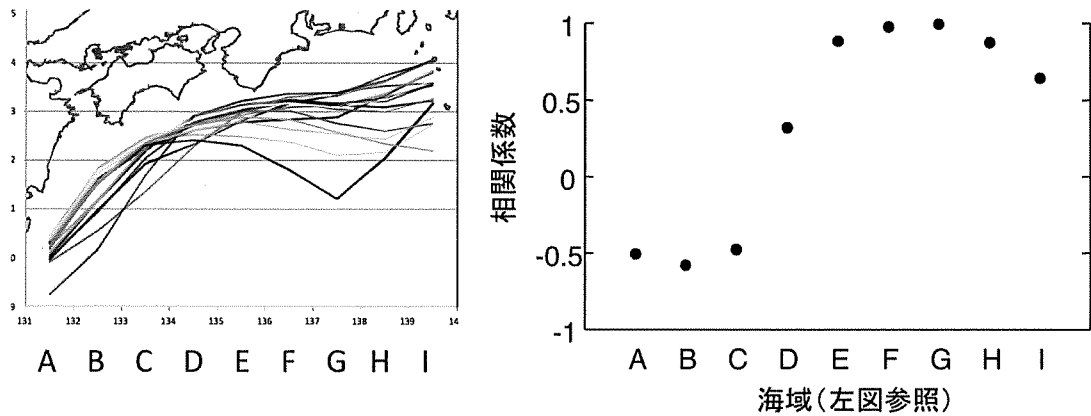


図 212-1 各年 2 月～4 月における、東経 137～138 度（海域 G）の平均黒潮流軸緯度に対する各経度帯の平均黒潮流軸緯度の相関関係

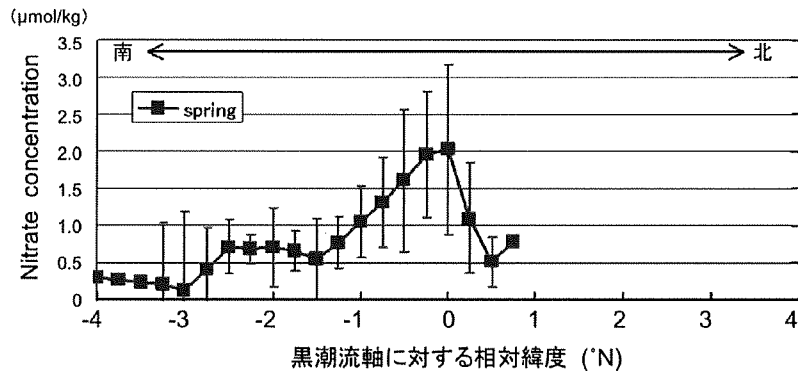


図 212-2 5 月の御前崎沖定線における 24.7σθ 等密度面上の硝酸塩濃度の南北分布

太平洋のメキシコ湾流 (“Gulf-Stream”) で 1990 年代より報告されており (Pelegri・Csanady)¹⁾、黒潮でも御前崎沖定線より上流の東シナ海近辺からの報告がある (Guo ら)²⁾。しかし、夏季と秋季には陸側の測点での栄養塩濃度が高く、冬季には沖側の表層に分布する低密度の海水が陸側に見られなかったため、既存の報告との比較はできなかった。今後は、春季に流軸上で見られるピークについて各年の観測結果を分析し、栄養塩分布のピークの形成要因、ピークの形成に対する黒潮流路の影響及び生物生産への影響等について検討する必要がある。

(ウ) 御前崎沖定線で採集されたプランクトン試料の分析及びモデル課題との連携

黒潮内側域の大観測点 (34° 00' N) において、0～200 m の鉛直曳網によって採集されたカイアシ類群集の冬季から春季にかけての季節変動を解析した。1 月から 5 月にかけて、年によるタイミングの差はあるものの、*Paracalanus* 属が優占する群集か

ら *Oncaea* 属が優占する群集への遷移が見られた。各層採集試料の分析の結果、これらの分類群のうち、魚類仔稚魚の餌となる種については 0～50 m に分布中心があることが確認された (図 212-3)。なお、本課題で得られ近年のサイズ別クロロフィル濃度の観測結果等を「海洋生態系モデルを用いた餌料環境と浮魚類の温暖化影響評価モデルの開発」課題に提供した。

卓上型ビデオプランクトンレコーダー (bVPR) を用いたカイアシ類の分析の結果、当該海域においてカイアシ類は、2 月から 4 月にかけて各サイズ画分で 2～4 倍に個体数が増えることが確認された (図 212-4 上)。生態系モデル (e-NEMURO の黒潮内側域ボックスモデル) 上 (杉崎ら)³⁾ では動物プランクトン生物量の増加のタイミングは概ね一致していたが、増加率は各年 5 倍程度であり、増加の度合いが過大であることが確認された (図 212-4 下)。

(エ) 土佐湾におけるプランクトン分布量の経年

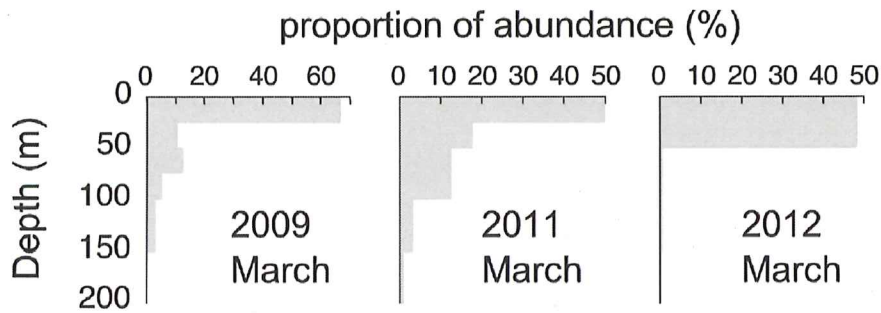


図 212-3 3月の黒潮内側域 (34° N、138° E) における *Paracalanus* 属カイアシ類の鉛直分布

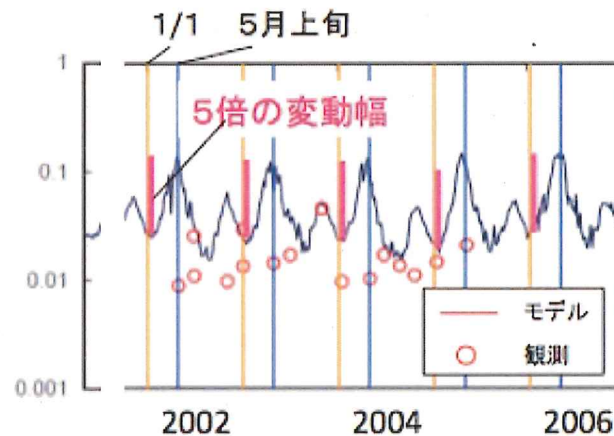
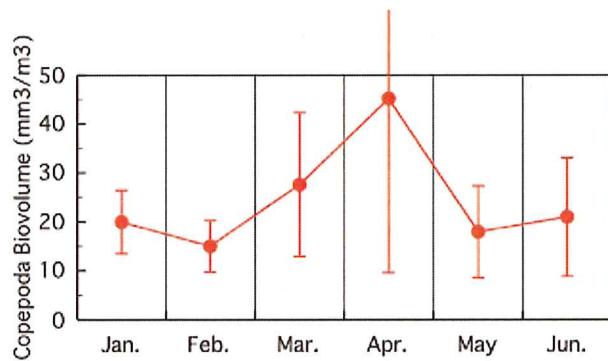


図 212-4 3月の黒潮内側域 (34° N、138° E) における *Paracalanus* 属カイアシ類の鉛直分布

変動パターンの分析

土佐湾 Stn.A での 1991 年～2011 年までに得られたクロロフィル分布量及びカイアシ類のサイズ別分布量の月別データの再解析結果を示す (図 212-5)。気候値において、春季には各分布量がピークをとったが、春季ピークの生じるタイミングや持続時間は異なっていた。クロロフィル分布量と小型カイアシ類 (体幅 100 μm 以下) の分布量は、秋季にも弱いピークを示した。各分布量のピークの出現時期を年ごとに比較すると、各年でクロロフィルのピークの

出現が 3 月と最も早く、クロロフィルのピークから 20-30 日遅れてカイアシ類のピークが現れるパターンが見られた。これまでの報告 (広田ら)⁴⁾ では、クロロフィル分布量及びカイアシ類の分布量の春季ピークの出現時期が早期化しているされていた。しかし、等値線図ではなく各年の実測値によって経年変動を再解析した結果、ピークの出現時期には年々変動が見られたものの、経年的なトレンドは顕著ではなかった。

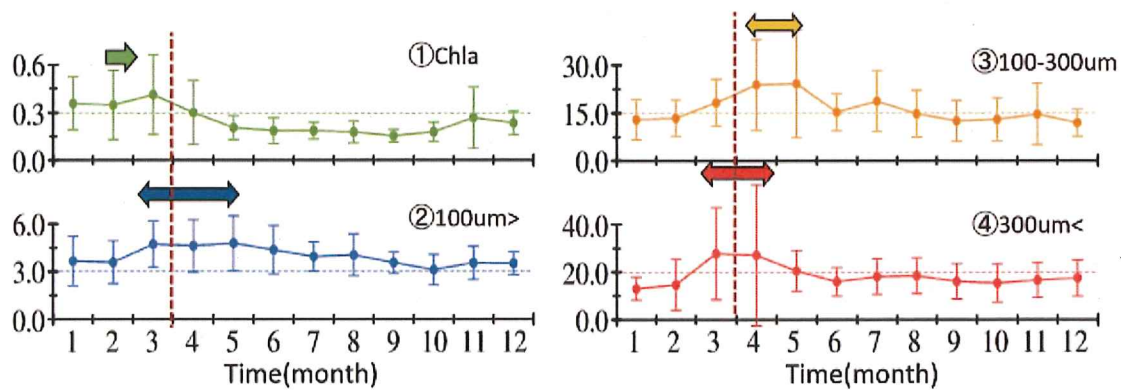


図 212-5 土佐湾における 0-200 m 平均クロロフィル濃度及びカイアシ類各サイズクラスの分布量の季節変動

各図の赤い点線は 4 月 1 日。

工 考 察

(ア) 調査を行った主な海域である土佐湾と御前崎沖定線 (O-line) を黒潮内側域について比較した場合、土佐湾ではクロロフィル濃度の極大が 3 月、カイアシ類分布量の極大も 3 月～4 月であり、ともに O-line と比較して季節的な遷移が早く進んでいた。浮魚類の仔稚魚の餌料環境の適・不適はプランクトン群集の季節変動の位相によって変化すると考えられるが、黒潮周辺海域を輸送されながら成長する仔稚魚が、各海域で季節変動のどの位相を経験するかは、輸送速度の影響を強く受ける。また輸送速度は黒潮の流形や流軸からの距離によって変動すると予想される。これらの条件を踏まえた経年変動解析や将来予測が必要と考えられる。

(イ) O-line 周辺海域 (潮岬以东の本州南方域) の黒潮内側域においては、これまでに知見が得られているクロロフィル濃度に加え、カイアシ類の分布密度においても 4 月がピークとなることが分かった。このピーク期を挟んでカイアシ類の群集組成も *Paracalanus* 属が優占する群集から *Oncaea* 属が優占する群集へと遷移しており、その遷移のタイミングも浮魚類仔稚魚の餌料環境に影響を与えていると考えられる。分布密度のピークである 4 月の観測の実施、環境条件と遷移段階の関係の解明等が必要と考えられる。

オ 今後の課題

(ア) 生態系モデルの検証用のデータセットとして、ボックスモデルの代表点としては質・量ともに十分なデータが蓄積できた。今後は三次元空間での

特徴的な構造や、各要素の経年変動についての再現性が主な検証の対象になると考えられ、そのためのデータセットの蓄積が必要となる。

(イ) 一方、蓄積された観測データの海洋学的な解析が整理途上であり、物理/化学/生物それぞれの側面に関する経年変動や構造等の解析が求められる。

力 要 約

(ア) O-line 調査及び土佐湾における物理及び低次生産の観測を行った。

(イ) 高時空間解像度の黒潮流軸データを利用して本州南方海域における黒潮流軸の変動様式についての分析を行い、潮岬の東西での流軸緯度の負の相関を見出した。

(ウ) 栄養塩分布において、等密度面上で比較した場合、春季に黒潮流軸の位置での硝酸塩濃度が陸側及び沖側に比べて高い構造 (“nutrient stream”) が見られた。

(エ) O-line 調査においては当春季のカイアシ類の群集について解析し、*Paracalanus* 属が優占する群集から *Oncaea* 属が優占する群集への遷移が見られること、仔稚魚の餌料となる種は鉛直的には 0～50 m に分布中心があることが確認された。土佐湾沖調査においては、Stn.A での観測結果を整理し、3 月にクロロフィルのピークが、20～30 日遅れてカイアシ類のピークが現れるパターンを明らかにした。

(オ) 静岡県が各月で行っている観測資料を用いてカイアシ類の現存量を分析し、生態系モデルの再

現性の検証を行った。2月～4月にかけて各サイズ画分で2～4倍に個体数が増えることが確認された(図 212-4 上)。生態系モデル(e-NEMUROの黒潮内側域ボックスモデル)上では動物プランクトン生物量の増加のタイミングは概ね一致していたが、増加率は各年5倍程度であり、増加の度合いが過大であることが確認された。

キ 引用文献

- 1) Pelegri J. L. and Csanady G. T. (1991) Nutrient transport and mixing in the Gulf Stream. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 96 C2: 2577-2583.
- 2) Guo X. et al. (2012) The Kuroshio nutrient stream and its temporal variation in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 117 C1: DOI: 10.1029/2011JC007292.
- 3) 杉崎宏哉ら(2012)「地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発」平成23年度報告書. 農林水産技術会議事務局. 21-24.
- 4) 広田祐一ら(2010)平成22年度資源動向要因分析調査報告書. 水産庁. 42-43.

研究担当者(日高清隆*、杉崎宏哉、市川忠史、日下 彰、宇田川徹、清水勇吾、森永健司、広江 豊、齊藤 勉、広田祐一、瀬川恭平、岡崎 誠、豊川雅哉)

3 東シナ海域の低次生態系モニタリングと影響評価

ア 研究目的

東シナ海域はマアジ・マサバなど重要多獲性浮魚類の主要な産卵域、仔稚魚の育成域、索餌海域となっている。動物プランクトン群集はこれら浮魚類の主要な餌料となっているが、海洋環境の変動によって動物プランクトン群集の動態が顕著に変動することが予想される。温暖化が将来、水産資源に対してどの様な影響を与えるのかを精度良く予測するためには、それらの餌料の動態を把握することが不可欠である。そこで、東シナ海域において物理・化学・生物生産に関する総合的なモニタリング調査を継続実施し、生態系構造と変動を把握できるデータ

を取得し、生態系の中期変動を把握できる継続的なデータセットを作成する。さらに、このモニタリングデータを温暖化予測のために開発する低次生態系モデルの再現性の評価及び将来予測性能向上のために利用する。

イ 研究方法

(ア) 鹿児島県甕島西方の北緯31度45分線に沿って設定した東シナ海温暖化観測線(CK-line)において海洋環境と低次生態系のモニタリングを実施した(図 213-1)。全点でCTD観測を実施し、水温・塩分のデータを得た。奇数番号の調査点では、表面(0m)のバケツ採水及びニスキンボトルを備えたロゼットシステムによる各層採水を行い、硝酸+亜硝酸(NOx)・リン酸(DIP)・ケイ酸(SiO₂)、Chlorophyll a (Chl.a)、植物プランクトン組成について分析を行った。以上の観測・分析結果をデータベース化すると共に、既存のデータベースも利用して夏季の東シナ海域の海洋環境及び低次生態系について解析を行った。

(イ) CK-lineの内、CK11では、上記の観測に加えて一次生産速度の測定及びChl.aのサイズ分画を行った。分析結果についてはデータベース化を行い、これらと既存のデータベースを利用してCK11表面の海洋環境及び低次生態系について解析を行った。

(ウ) CK-lineモニタリングにより取得された観測データと低次生態系モデルeNEMURO(extended North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) ver. 3.2の出力との比較検討を行った。

ウ 研究結果

(ア) CK-lineのCK1～21のモニタリングを2010年度は4月、5月、7月、2011年度は4月、5月、6月、10月、2012年度は2012年10月と2013年2月に実施した。CK1～13のモニタリングは、2010年度は6月と10月、2011年度は7月、2012年度は4月、6月、7月に実施した。

2004年以降のモニタリングデータを利用し、夏季のCK線表面における海洋環境とプランクトン群集との関係の解析を行ったところ、Chl.a濃度と水温との関係は明確でなかったが、一例を除き、Chl.

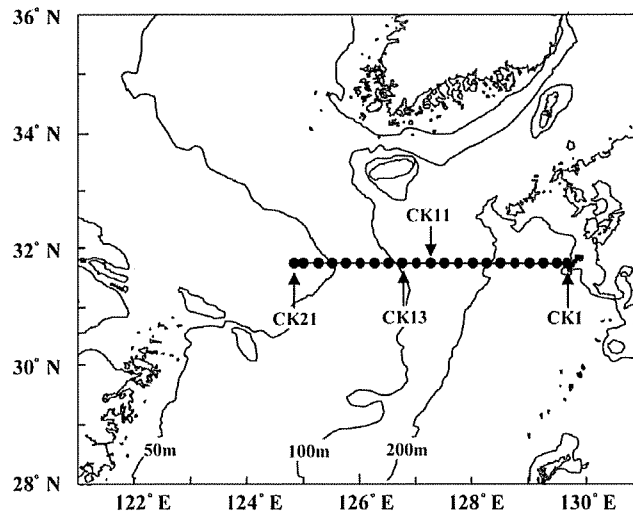


図 213-1 CK-line 上の観測点 (CK1 ~ 21)

a 濃度と塩分との間には負の相関関係が認められた (図 213-2)。低塩分化は CK 線の西側で顕著であるが、年ごとの塩分の最低値は最も西側の観測点である CK21 以外の観測点で記録されることが多かった (図 213-3)。

CK 線表面の栄養塩は、NO_x 濃度あるいは DIP 濃度が検出下限以下となることが多い一方 (図 213-4)、SiO₂ は全ての観測点で 1 μM 以上の比較的高い濃度で存在した (図 213-5)。

CK 線表面の珪藻の細胞数は、2009 年に 6000 細胞 L⁻¹ を超える値を記録したが、1000 細胞 L⁻¹ を超えることは少なく、半数以上の観測で 100 細胞 L⁻¹ 以下であった (図 213-6)。

(イ) 2007 年 1 月～2010 年 2 月の CK11 表面のモニタリングデータを利用して、栄養塩、Chl.a の季節変化について検討を行った。冬季 (Julian day で 35 日前後) の DIP 濃度は平均 0.27 μM であった。その後、徐々に低下し春季 (110 日前後) には平均 0.08 μM、密度成層が最も強くなる夏季 (200 日前後) に極小値 (平均値は検出下限以下) を示した。表面水の冷却による鉛直混合が起こり始める秋季 (285 日前後) には平均 0.06 μM まで回復し (図 213-7)、冬季の表面における NO_x 濃度は平均で 3.5 μM だった。NO_x : DIP ratio は平均で 12.8 だった。

Chl.a 濃度の季節別の平均値は、春季に 0.95 μg L⁻¹ と最大値を示した後、減少し、夏季には 0.21 μg L⁻¹ と最小値を示した (図 213-8)。秋季には 0.48 μg

L⁻¹、冬季には 0.59 μg L⁻¹ と、比較的高い濃度となった。

CK11 表面における Chl.a について、10 μm 以上、10 ~ 2 μm、2 μm 以下の三つのサイズに分画し検討を行ったところ、10 μm 以上、10 ~ 2 μm、2 μm 以下の各分画の全 Chl.a に占める割合の平均値はそれぞれ 16%、20%、65% だった。また、2 μm 以下の分画の全 Chl.a に占める割合の平均値は冬季で 48%、春季では 73%、夏季では 66%、秋季には 70% といずれの季節も三つの分画の中で最も優占していた。

CK11 表面における一次生産について検討を行った (図 213-9)。表面の一次生産速度は冬季に最低値を示し (平均で 5.4 μgC L⁻¹ d⁻¹)、春季には平均 32.9 μgC L⁻¹ d⁻¹ で最大値を示した。夏季及び秋季の平均値はそれぞれ 12.0、14.8 μgC L⁻¹ d⁻¹ であった。一方、Chl.a 当たりの一次生産速度を季節ごとに比較すると、冬季は平均で 11.6 gC gChl.a⁻¹ d⁻¹、春季は平均 42.8 gC gChl.a⁻¹ d⁻¹、夏季には平均で 92.5 gC gChl.a⁻¹ d⁻¹、秋季には平均で 39.6 gC gChl.a⁻¹ d⁻¹ で夏季に最大値を示した (図 213-10)。

(ウ) 調査船によるモニタリング結果と低次生態系モデル eNEMURO ver. 3.2 の出力 (第 2 章 -1 の結果) を比較したところ、モデルの出力では PS (観測の 2 μm 以下の分画に相当) の割合は観測値と比較すると四季を通じて低めであった (図 213-11)。

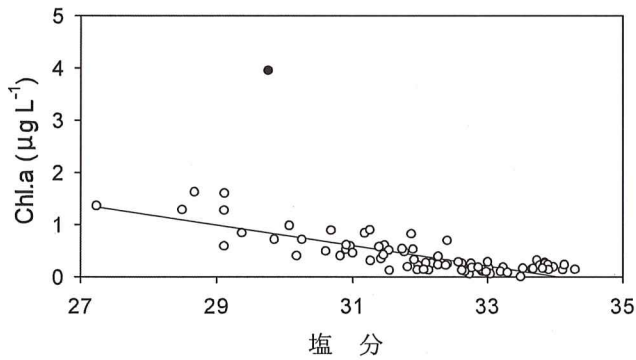


図 213-2 2004年～2010年の7月におけるCK1～21 (奇数点のみ) 表面の塩分とChlorophyll a (Chl.a) 濃度との関係 (黒丸は例外として扱った)

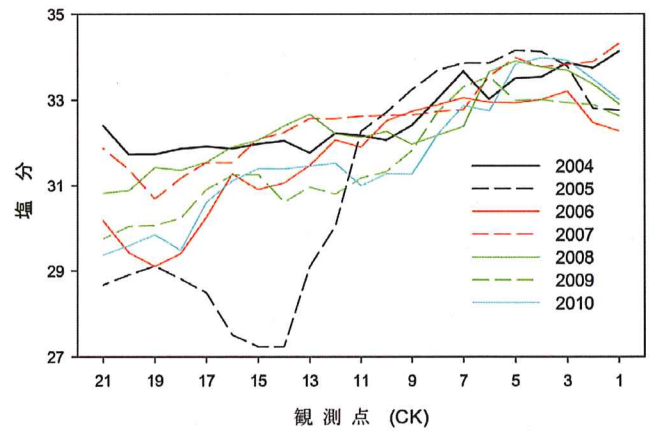


図 213-3 2004年～2010年の7月におけるCK1～21 表面の塩分

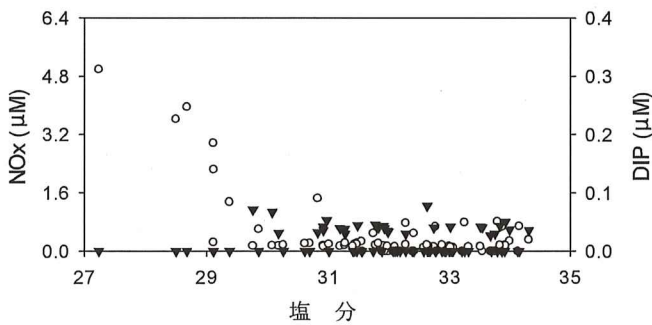


図 213-4 2004年～2010年の7月におけるCK1～21 (奇数点のみ) 表面の塩分と硝酸+亜硝酸 (NOx)、リン酸 (DIP) 濃度との関係

NOx: 白丸, DIP: 黒三角

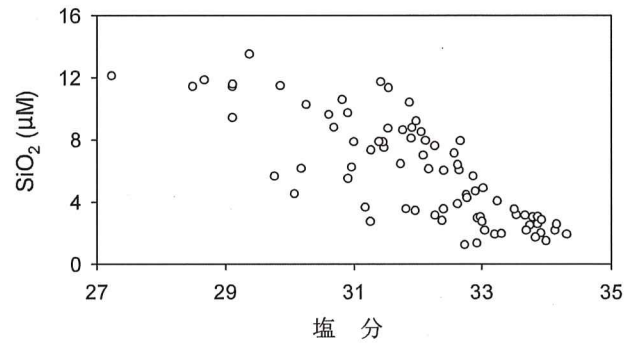


図 213-5 2004年～2010年の7月におけるCK1～21 (奇数点のみ) 表面の塩分とケイ酸 (SiO₂) 濃度との関係

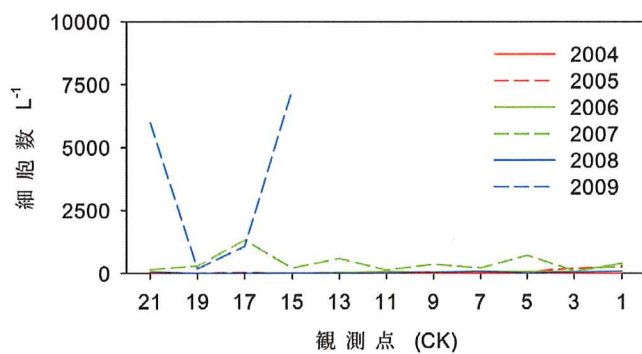


図 213-6 2004年～2010年の7月におけるCK1～21 (奇数点のみ, 2009年はCK15～21) 表面の珪藻の細胞数

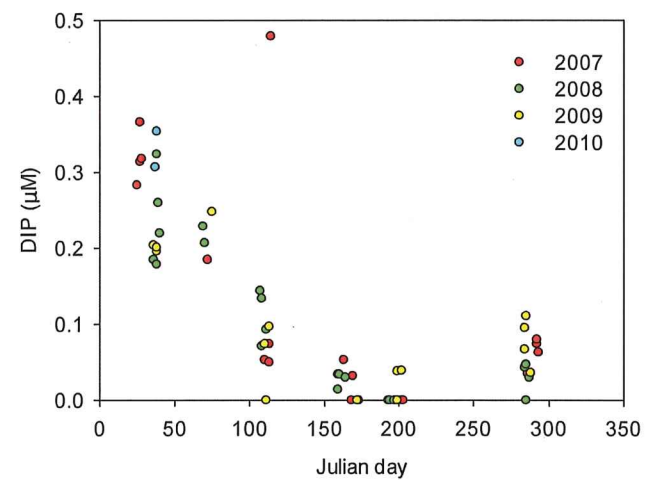


図 213-7 2007年1月～2010年2月のCK11表面におけるリン酸 (DIP) 濃度の季節変化

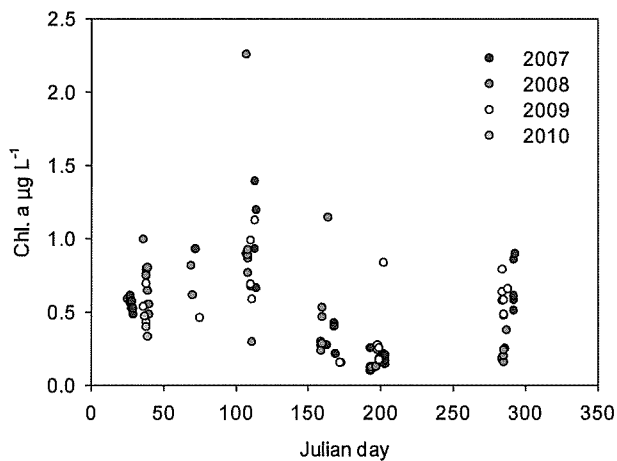


図 213-8 2007 年 1 月～2010 年 2 月の CK11 表面における Chlorophyll a (Chl.a) 濃度の季節変化

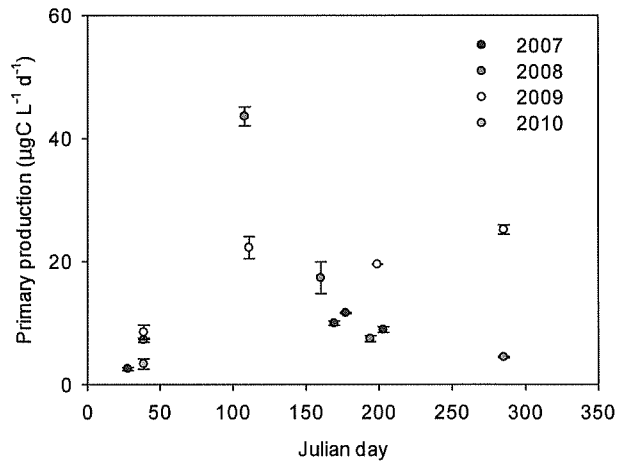


図 213-9 2007 年 1 月～2010 年 2 月の CK11 表面における一次生産速度の季節変化

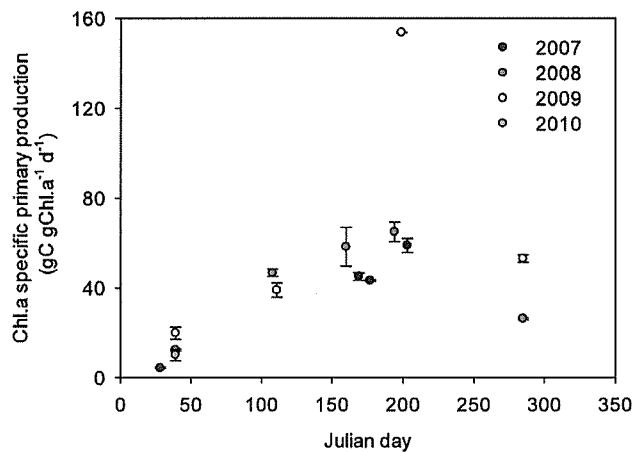


図 213-10 2007 年 1 月～2010 年 2 月の CK11 表面における Chlorophyll a (Chl.a) 当たりの一次生産速度の季節変化

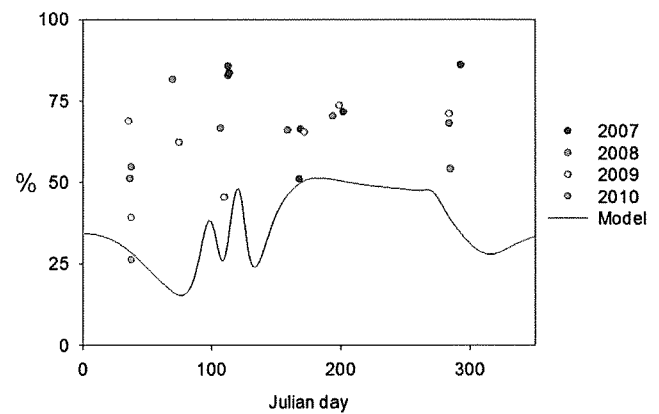


図 213-11 2007 年 4 月～2010 年 2 月の CK11 表面における Chlorophyll a (Chl.a) 濃度の内、 $2\mu\text{m}$ 以下の分画が全体に占める百分率 (%) の季節変化

実線は eNEMURO ver. 3.2 による PS (観測の $2\mu\text{m}$ 以下の分画に相当) が全植物プランクトンに占める割合の出力

工 考 察

(ア) 一例を除き、CK 線の夏季表面における Chl.a 濃度と塩分との間には負の相関関係が認められたことから、低塩分水とともに輸送される栄養塩が夏季の CK 線表面の植物プランクトンの生産に重要であることが示唆された。CK 線表面の栄養塩は NO_x 濃度あるいは DIP 濃度が検出下限以下となることが多い一方で、 SiO_2 は全ての観測点で $1\mu\text{M}$ 以上の比較的高い濃度で存在したことから、CK 線表面の珪藻の生産は NO_x あるいは DIP の供給により律速されていることが示唆された。

(イ) 冬季の CK11 表面で観測された栄養塩の NO_x : DIP ratio は平均で 12.8 であり、一般的な

植物プランクトンの窒素：リンの要求比である 16 (Redfield ratio: Redfield et al.)¹⁾ よりも低い値を示した。このため CK11 表面の植物プランクトンの生産は窒素の供給により律速されることが予想された。

CK11 表面における Chl.a について $10\mu\text{m}$ 以上、 $10\sim 2\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 以下の三つのサイズに分画し検討を行ったところ、 $2\mu\text{m}$ 以下の分画が最も優占していたことが示された。一般的には小型の植物プランクトンは外洋域において優占するが (Agawin et al.)²⁾、東シナ海では、陸棚上の観測点である CK11 においても小型の植物プランクトンが優占していたことが示された。

(ウ) eNEMURO ver. 3.2 は Julian day で 75 日付近及び 315 日付近において、観測では認められない PS の割合の極小値を示した。その原因として、モデルの再現性の問題の他、調査が春季と秋季に起こる大型の植物プランクトンによるブルームの最盛期（相対的に小型の植物プランクトンの優占率が下がることが予想される）に実施できていないため、観測結果として示されていない可能性も考えられる。

オ 今後の課題

(ア) 東シナ海域では、過去 100 年間に約 1.2℃ の昇温傾向にあったことが気象庁 (http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/index_gw.html) 等によって報告されている。しかしながら、当該研究期間の水温は低下傾向を示していたこともあり、温暖化に伴った低次生態系の遷移を抽出するには至らなかった。引き続き東シナ海域でモニタリングを継続することで温暖化が低次生態系に及ぼす影響を評価し、その結果として生じる東シナ海域における水産業への影響を予測していくことが望まれる。

カ 要約

(ア) 2010 年 4 月～2013 年 2 月の期間に、東シナ海に設定した CK 線上の海洋環境及び低次生態系モニタリングを計 15 回実施した。夏季の CK 線表面の Chl.a 濃度と塩分との間には負の相関関係が認められたことから、低塩分水とともに輸送される栄

養塩が夏季の CK 線表面の植物プランクトンの生産に重要であることが示唆された。

(イ) CK11 表面に冬季に供給される栄養塩の NOx : DIP ratio の平均は植物プランクトンの窒素：リンの要求比である 16 より低く、植物プランクトンの生産は窒素の供給により律速されることが予想された。

CK11 表面における Chl.a サイズ分画により、2 μm 以下の分画が最も優占していたことが示された。

(ウ) 調査船によるモニタリング結果と低次生態系モデルの出力とを比較したところ、モデルによる 2 μm 以下の分画の出現割合は四季を通じて観測よりも低めであった。

キ 引用文献

- 1) Redfield A.C. et al. (1963) The influence of organisms on the composition of sea-water. In *The sea* Vol 2. Hill MN (ed). Interscience Publisher, New York. pp.26-77.
- 2) Agawin et al. (2000) Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnol Oceanogr.* 45: 591-600.

研究担当者（長谷川徹*、清本容子、岡村和磨、岡慎一郎、西内 耕、山田東也、種子田雄、豊川雅哉）

第2章 沖合域を回遊する漁業資源への影響評価と適応技術の開発

1 海洋生態系モデルを用いた餌料環境と浮魚類の温暖化影響評価モデルの開発

ア 研究目的

我が国周辺海域における水産資源に関する定量的な温暖化予測を実施するため、水産資源の動態を予測可能なモデルを開発し、様々な温暖化シナリオにより計算される気候モデルによる温暖化シナリオ実験の出力を受け取り、水産資源を対象にした温暖化予測実験を行う。

イ 研究方法

(ア) 低次栄養段階生態系モデルの精度評価を実施するための基礎情報として、衛星データを用いて、日本周辺海域の植物プランクトンの変動特性を調べた。変動特性は、衛星海面クロロフィル濃度の月別平年値をクラスター解析し、クラスターごとの衛星海面クロロフィル濃度の季節変動、特に春季ブルームの開始、極大、終了時期の経年変動を調べた。また、海色センサ SeaWiFS が 2007 年以降データの取得率が下がっているため、Aqua/MODIS データと連結して使用可能か調べた。

(イ) 低次生態系モデルの結果とモニタリングデータを比較し、詳細なモデルの精度評価を行うとともに、モデル中の方程式系・生理パラメータ・想定生物群について文献調査もあわせて実施した。また、生態系モデルの推定精度向上につながる生理パラメータについて検討を行い、当該生理パラメータに対するモデル感度実験を実施した。

(ウ) 2003～2012年2～3月の産卵調査においてニューストーンネットの表層曳網で採集されたサンマ仔稚魚(2012年、2003～2005年を追加、計1,049曳網分)の体長測定データ(計27,927個体)と環境要因データに一般化加法モデルを適用し、サンマ仔稚魚の分布量と表面水温・表層塩分・表層クロロフィル濃度の関係を調べた。

(エ) 渦解像3次元低次生態系モデル CHOPE-eNEMURO (ver.3.2) を利用して 2060 年までの地球温暖化影響予測実験を実施した。手順として、① 2000 年までは人工衛星海面水温・海面高度データを使って 4 次元データ同化を行ってシミュレーシ

ョンのための初期値を作成し、② 2000 年～2010 年の期間は NCEP 再解析値を大気場の外力として同化無しのシミュレーションを実施し、③ 2010 年～2050 年の 40 年間にわたって気候モデル MIROC (ver.3.2) の温暖化シナリオ SRESA1B に基づく出力(高解像度版; 1.125 × 1.125°) を大気場の外力として温暖化予測シミュレーションを実施した。

(オ) サンマ成長-回遊簡易モデルを用いて、複数の温暖化気体排出シナリオ、気候モデル出力を組み合わせたアンサンブル実験を実施し、不確実性を考慮に入れた温暖化実験を実施した。また、餌料と水温の影響を分離した実験を行い、両者の影響を評価した。さらに、渦解像3次元低次生態系モデルにサンマ成長回遊モデルを結合させた CHOPE-eNEMURO.FISH を構築し、サンマの東西回遊を含めた温暖化影響評価を試行した。

(カ) 表面水温 2000～2010 年平均値(温暖化前)と 2050～2060 年平均値(温暖化後)のデータを用いて来遊予測モデルを駆動し、日本周辺海域へのサンマ来遊量に及ぼす温暖化影響を評価した。サンマ来遊量予測モデルについては、沖合に海域区分を拡張し、沖合域を南下する群も組み込んだ。

(キ) 将来の効率的な実験実施のために、次世代型日本周辺高解像度物理-低次生態系結合モデルの開発し、気候値外力実験を実施するとともに、日本周辺の植物プランクトン濃度の季節変動の再現性を検証した。

ウ 研究結果

(ア) 海色衛星データのクラスター解析を行った結果、日本周辺海域は 7 海域に区分された。各海域での季節変動を検討すると、北に行くほどクロロフィル濃度が高く、また春期のブルームが明瞭になる傾向が見られた。特に混合域から親潮域にかけては、海域毎にブルームが極大となる月が異なった。また、1998 年～2006 年にかけて、道東沖、千島列島沖における春季ブルームの開始が遅くなっている傾向が見られた(図 221-1)(亀田)¹⁾。一方、それ以外の海域では特に明瞭な経年変動は見られなかった。また、A-line 上で SeaWiFS と Aqua/MODIS

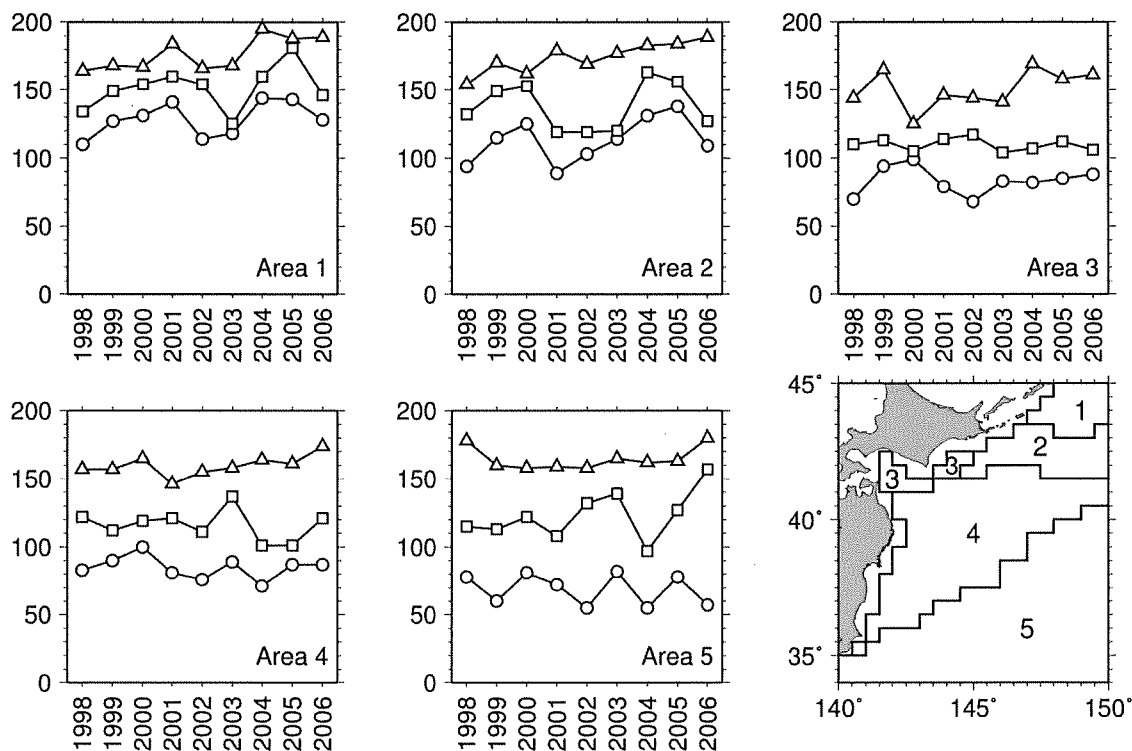


図 221-1 海色衛星データのクラスター解析によって求めた日本周辺の海域区分 (右下) と各クラスター海域における春季ブルームの開始 (丸)、極大 (四角)、終了 (△) 時期の年々変動
縦軸は1月1日からの経過日、横軸は年。

の比較を行ったところ、両者に違いはなく、データとしての継続性が確認できた。

(イ) 日本周辺海域で、亜熱帯・亜寒帯統合低次栄養段階生態系モデルが、栄養塩・クロロフィル濃度については高い精度で再現されていることが示された。その一方、黒潮内測・外側域で大型動物プランクトンが過大評価であることが判明した。原因として、小型動物プランクトンの最大捕食速度が過小評価である可能性、中型動物プランクトンへのエネルギーフローが不適切である可能性、大型動物プランクトンの死亡速度が不適切である可能性が示された。このうち小型動物プランクトンの最大捕食速度について、感度解析を行った結果、小型生物群と溶解有機物の現存量が高い感度を示すのに対し、中・大型生物群の感度は低いことが明らかとなった。また、文献値を採用した場合、小型植物プランクトンが過小評価となることも判明した。

(ウ) サンマ稚仔魚の分布密度は、表面水温 20℃、表層塩分 34.75 付近で最大になった (図 221-2)。また、体長区分ごとに検討した結果、発育に伴い分布水温ピークが低下することを明らかにした

(Takasuka et al.)²⁾。特に仔魚の分布特性から、産卵場の推定が可能となり、将来の産卵場推定を行うための基盤的情報が整った。

(エ) 渦解像 3 次元低次生態系モデル CHOPE-NEMURO の温暖化実験出力の 2000 年から 2060 年までの経年変動傾向を調べたところ、表面水温は $2.0 \sim 6.0 \times 10^{-2} [^{\circ}\text{C} \cdot \text{y}^{-1}]$ で変化し、特に混合水域の温度上昇率が高い結果となった (表 221-1、図 221-3)。塩分は黒潮及びその周辺で低下傾向にあり、他の海域は上昇傾向が見られた。混合層深度は混合域と黒潮域で特に浅化が大きく ($0.4 [\text{m} \cdot \text{y}^{-1}]$)、混合水域表面の硝酸塩濃度の急減は混合層深度の浅化が一因となっている可能性が示唆された。ただし、親潮域では混合層深度が深くなっているにもかかわらず硝酸塩濃度が大きく減少していた。植物プランクトンの現存量は混合水域と東シナ海陸棚域で減少傾向が見られたが、他の海域は増加傾向で、特に親潮域の上昇が顕著であった ($3.3 \times 10^{-2} [\text{mmol} \cdot \text{Nm}^{-3} \cdot \text{y}^{-1}]$)。親潮域では硝酸塩濃度が大きく減少していることから、親潮域の植物プランクトン現存量の増加の要因として、既往研究の指摘のように、

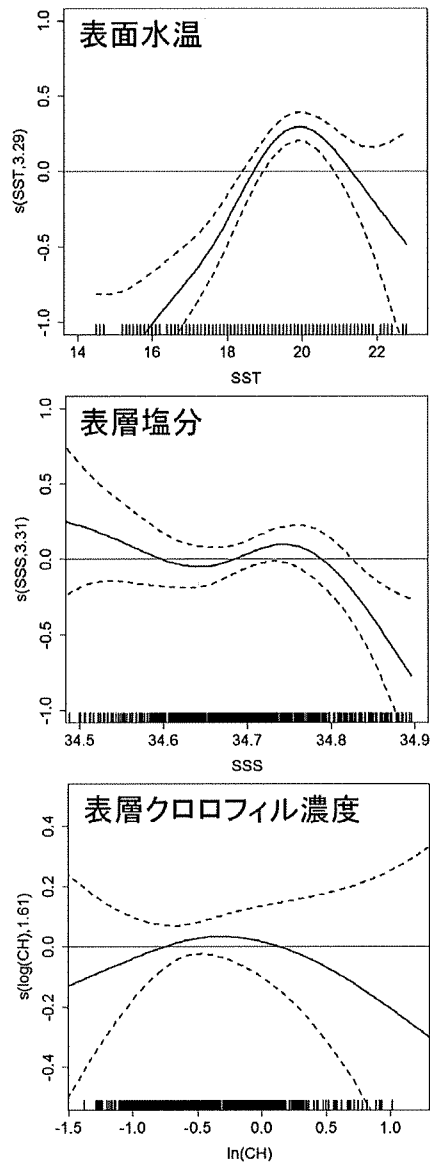


図 221-2 一般化加法モデルで解析したサンマ仔稚魚分布量（採集個体数 / 掃海面積 100 m²）と表面水温、表層塩分、表層クロロフィル濃度の関係

表 221-1 温暖化予測実験から推定された各海域代表点における海面の経年変化

	Latitude	Longitude	Temp.	Salinity	MLD	Nitrate	Phytopl.	Zoopl.
親潮域	42.0°N	145.0°E	4.2x10 ⁻² (R ² =0.61)	2.8x10 ⁻³ (R ² =0.37)	4.3x10 ⁻² (R ² =0.62)	-5.1x10 ⁻² (R ² =0.72)	3.3x10 ⁻² (R ² =0.25)	2.8x10 ⁻³ (R ² =0.28)
混合域	38.0°N	147.0°E	5.7x10 ⁻² (R ² =0.55)	3.4x10 ⁻⁴ (R ² =0.32)	-4.3x10 ⁻¹ (R ² =0.69)	-4.8x10 ⁻² (R ² =0.76)	-3.9x10 ⁻³ (R ² =0.30)	-3.4x10 ⁻⁴ (R ² =0.32)
黒潮域	33.0°N	138.0°E	2.3x10 ⁻² (R ² =0.52)	-1.2x10 ⁻³ (R ² =0.29)	-4.4x10 ⁻¹ (R ² =0.61)	1.6x10 ⁻³ (R ² =0.03)	6.4x10 ⁻³ (R ² =0.28)	5.6x10 ⁻⁴ (R ² =0.34)
黒潮外側域	28.0°N	138.0°E	3.0x10 ⁻² (R ² =0.58)	-1.1x10 ⁻³ (R ² =0.28)	-1.7x10 ⁻¹ (R ² =0.63)	-7.8x10 ⁻⁴ (R ² =0.01)	2.9x10 ⁻⁴ (R ² =0.28)	-3.6x10 ⁻⁴ (R ² =0.60)
東シナ海陸棚	31.8°N	124.0°E	3.7x10 ⁻² (R ² =0.52)	3.1x10 ⁻³ (R ² =0.30)	1.1x10 ⁻³ (R ² =0.72)	-1.5x10 ⁻² (R ² =0.51)	-9.8x10 ⁻³ (R ² =0.32)	-7.8x10 ⁻⁴ (R ² =0.32)
東シナ海九州側	31.8°N	127.0°E	3.3x10 ⁻² (R ² =0.55)	3.2x10 ⁻⁴ (R ² =0.36)	-5.7x10 ⁻² (R ² =0.70)	1.6x10 ⁻³ (R ² =0.03)	6.2x10 ⁻³ (R ² =0.28)	5.3x10 ⁻⁴ (R ² =0.34)
			[°Cy ⁻¹]	[PSUy ⁻¹]	[my ⁻¹]	[mmolNm ⁻³ y ⁻¹]	[mmolNm ⁻³ y ⁻¹]	[mmolNm ⁻³ y ⁻¹]

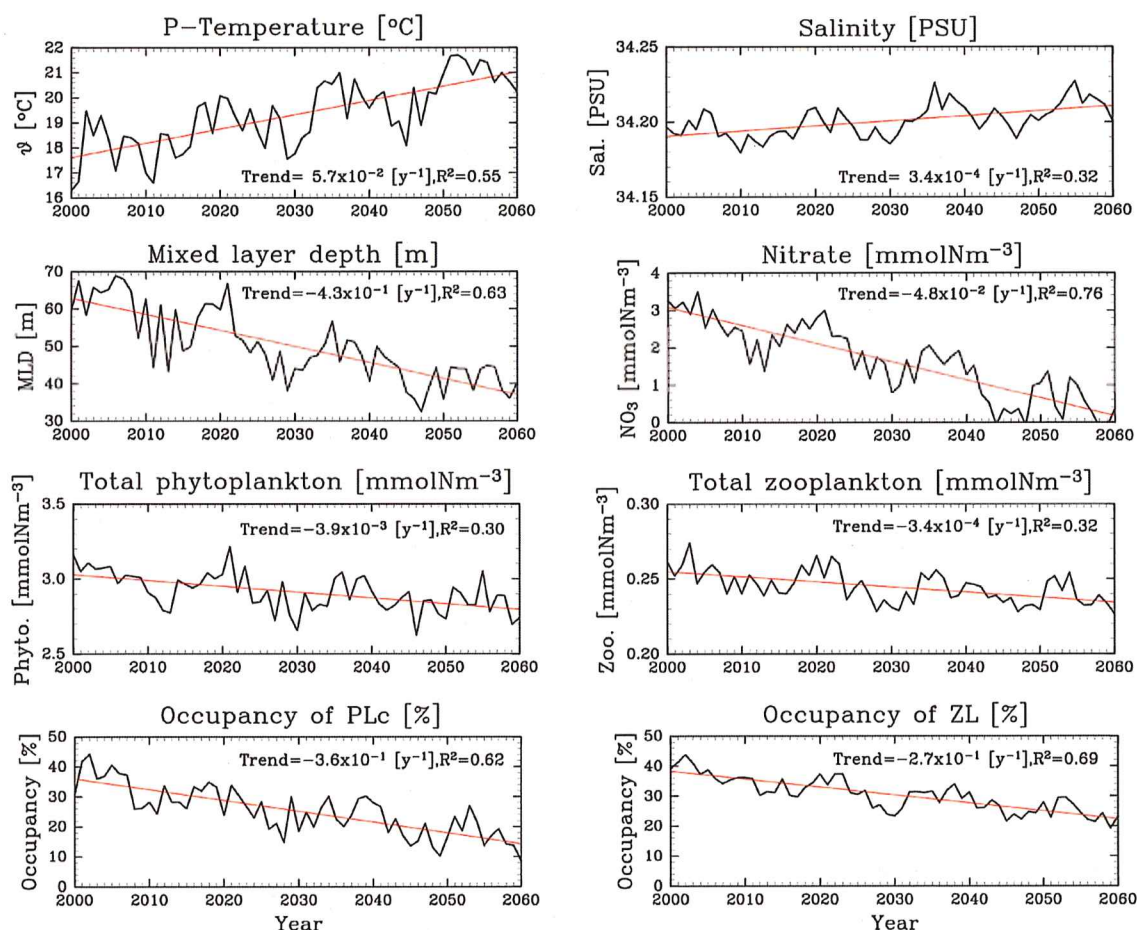


図 221-3 温暖化予測実験から推定された混合水域 (38° N, 147° E) 海面の経年変化 (2060 年まで) 赤線はトレンド成分を示す。

温度上昇による基礎生産の増加効果が栄養塩減少による基礎生産の低減効果を上回っているためと考えられる。動物プランクトンの現存量は、植物プランクトンと同様の変動傾向を示した。

(オ) アンサンブル実験の結果から、73%の確率でサンマの体重減少が生じることが示された (図 221-5)。一方、サンマの産卵量の増加については 33%の確率で生じる結果となり、不確実性が高いことが判明した。また、水温と餌料の影響を分離して評価した結果、水温の上昇は幼魚の成長に影響し、特に混合水域の水温が影響することが示された。一方、餌料の減少は成魚の体重、そして回遊パターン、産卵量に影響することが示された (図 221-4) (Ito et al.)³⁾。サンマの東西回遊を含めた温暖化実験では、高水温のためサンマの南への分布が制限され、黒潮続流に流されるサンマが増加し、分布が沖合化した (図 221-5)。また、成長の分散が小さくなる結果が得られた。

(カ) サンマ来遊予測モデルの温暖化実験から、

千島南沖、道東海域、三陸海域、常磐海域において、温暖化が進行するとサンマの来遊時期が遅くなる結果が得られた。千島南沖におけるサンマ来遊資源量の極大期は9月上旬から9月中旬に、道東海域では9月下旬から10月上旬に、三陸海域では10月中旬から11月上旬に、遅延化した。また、常磐海域では、現在10月中旬にある程度の来遊資源量があるが、2050～2060年では11月上旬にならないとまとまって来遊しない結果となった (図 221-6)。

(キ) 次世代日本周辺高解像度物理モデルを用いて気候値外力実験を行い、日本周辺の植物プランクトン濃度の季節変動の再現性を検証した。その結果、植物プランクトンブルームの季節変動の再現性は、海盆スケールでは整合性があることが分かった。しかし、日本沿岸のブルームの再現性を検証したところ、モデルは亜寒帯域でブルーム規模が過大評価していること等、モデル再現性の問題が明らかになった (図 221-7)。

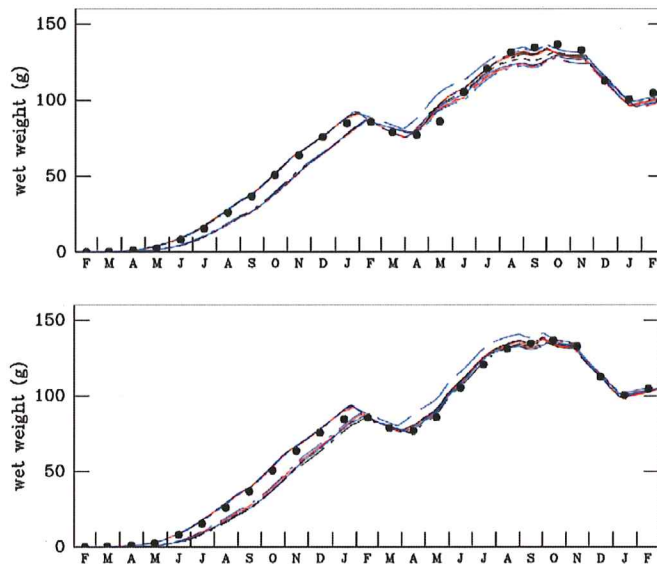


図 221-4 簡易型サンマ成長-回遊モデルを用いた温暖化影響実験によって得られたサンマの体重の変化（線）及び現在条件で得られた結果（黒丸）
 水温及び餌を将来予測値にした場合の結果（上）と水温のみを将来予測値にした結果（下）。

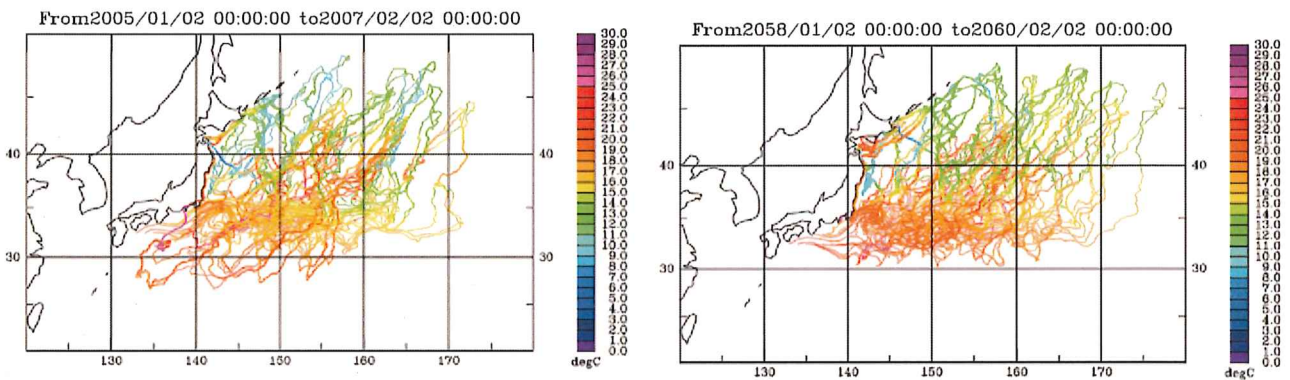


図 221-5 現在気候条件下（左）と将来気候条件下（右）でのサンマ回遊経路軌跡の色はサンマの経験水温を表す。

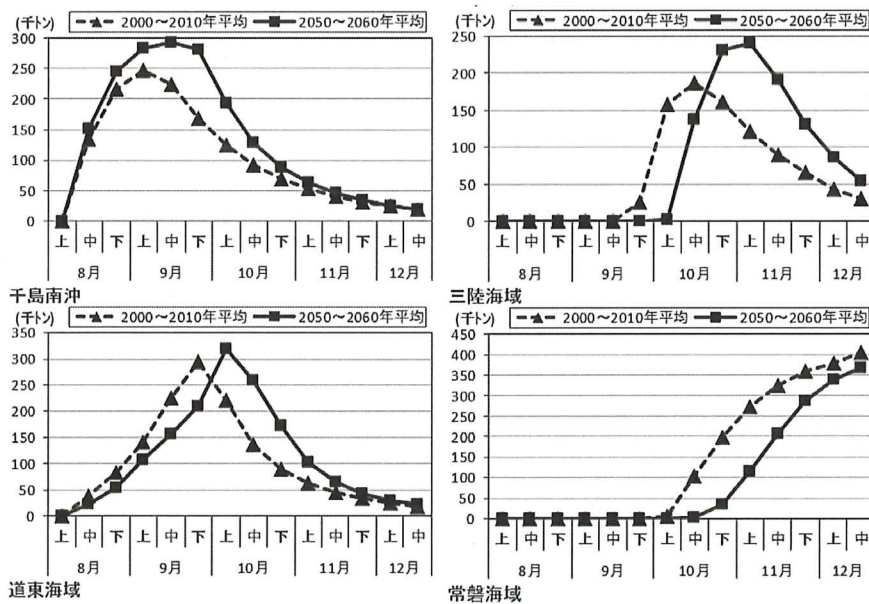


図 221-6 海域別資源量推定値の変化

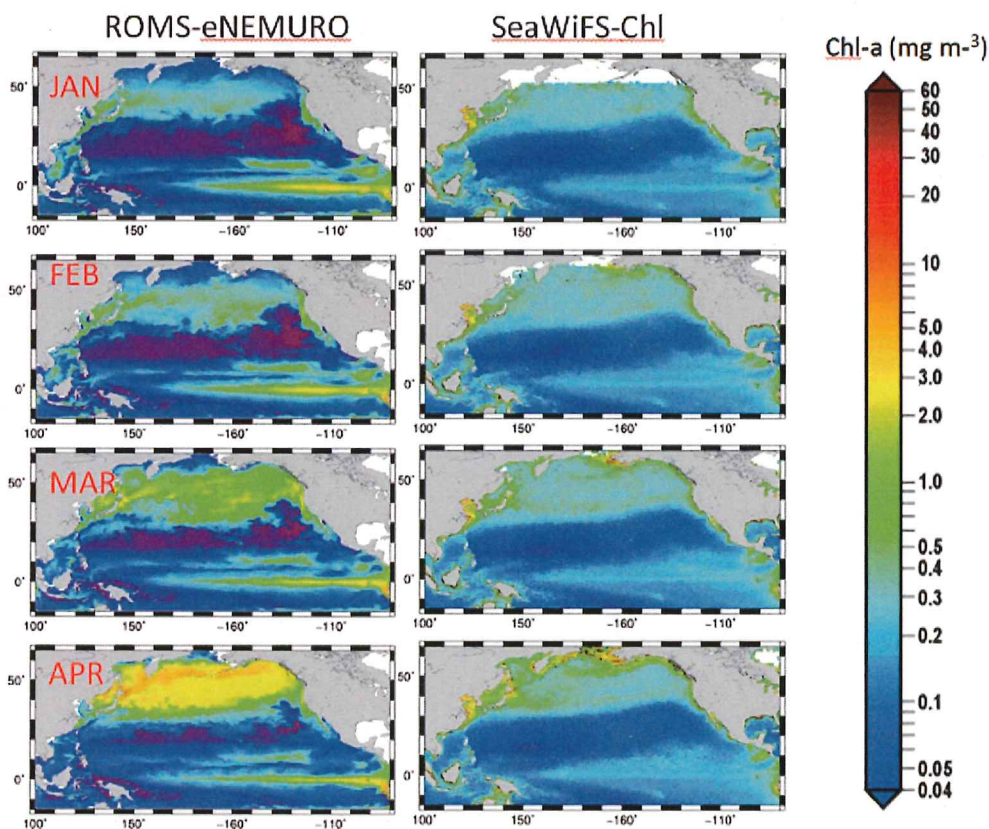


図 221-7 次世代日本周辺高解像度物理-低次生態系結合モデルで計算された海面クロロフィル濃度 (左) と海色衛星観測結果 (右)

工 考 察

(ア) 衛星データから道東沖、千島列島沖における春季ブルーム開始の遅延が確認されたが、この傾向が地球温暖化の影響であるのか、北太平洋十年スケール変動のような長周期変動の一部を捉えたものなのかは現状では判断ができない。時系列を延長した解析が望まれる。

(イ) 低次栄養段階生態系モデルにおいて、植物プランクトンの再現性の精度が高いことが確かめられたが、魚類の重要な餌料である動物プランクトンについては、未だ再現性に問題がある。しかし、既往研究によって、太平洋十年スケール変動のような長周期変動については、動物プランクトンの応答も再現できることが示されており、地球温暖化問題のように時間スケールの長い変化に関しては、動物プランクトンの応答を正しく評価できている可能性が高いものと判断される。

(ウ) 小型浮魚類の代表としてサンマを選定し、簡易モデルを用いたアンサンブル実験からサンマの小型化が高い確度で生じることが示された。しかし、サンマは広域に回遊する魚類であり、北太平洋

全域に分布することから、東西の回遊も陽に取り入れたモデルで再評価する必要がある。現段階では、東西の回遊を取り入れても小型化が進むことは示されているが、アンサンブル実験などの実施も必要とされる。その実施のためには、次世代型日本周辺高解像度物理-低次生態系結合モデルの完成が待たれる。また、来遊予測モデルによって、来遊時期が遅れる結果が示されたが、沖合での加入資源量を現在と同じ値にして計算を実施しているため、この結果については、さらなる検証が必要となる。

(エ) サンマ来遊予測モデルでは、漁期の遅延化が示され、サンマ2次元回遊-成長結合モデルの結果と整合的な結果が得られた。しかし、今回の計算では千島沖の加入量を現在と同程度と仮定して計算しているため、サンマ2次元回遊-成長結合モデルなどから計算される将来の加入量変化も検討する必要がある。

オ 今後の課題

(ア) モデル中の植物及び動物プランクトンの生理パラメータの中には報告値がほとんど無いものも

あり、妥当な値を文献から推定できない場合がある。また、様々な生理パラメータが生物の現存量に及ぼす影響は非線形的であり、複雑な相互作用があるため、観測データにモデルを同化させる条件下で客観的手法を用いて生理パラメータを求める手法(Ito et al.)⁴⁾を取り入れる必要がある。

(イ) サンマの仔稚魚の分布特性が明らかとされてきたため、この結果を用いた将来の産卵場推定を実施し、その推定産卵場を初期値とする温暖化実験を実施する必要がある。

(ウ) 次世代日本周辺高解像度物理-低次生態系結合モデル、サンマ2次元回遊-成長結合モデル、サンマ来遊予測モデルを連動させた統合モデルによる温暖化影響評価の実施が必要である。

(エ) 2010年～2012年にかけてサンマ資源が減少し、北上期に日本沿岸から東経160°付近を北上する資源が少なくなった。その結果、漁期初めに漁場が遠くなり不漁となった。このような特異現象の原因や過去の事例についても整理・検討する必要がある。

カ 要 約

(ア) 餌料プランクトンの温暖化影響は海域によって差異があり、混合域、黒潮域、東シナ海陸棚域では減少することが予想されたが、北海道沿岸の親潮域や東シナ海海盆域では増加する可能性が示された。

(イ) サンマは73%の確率で小型化する一方、33%の確率で産卵量が増大する可能性があり、また漁期盛期が1旬から2旬遅くなることが推定された。

キ 引用文献

- 1) 亀田卓彦 (2012) 海面クロロフィル a 濃度から見たブルーミング時期の変遷. 水産海洋研究. 76: 215-216.
- 2) Takasuka A., Kuroda H., Okunishi T., Shimizu Y., Hirota Y., Kubota H., Kimura R., Ito S. and Oozeki Y. (2014) Occurrence and density of Pacific saury *Cololabis saira* larvae and juveniles in relation to environmental factors during the winter spawning season in the Kuroshio Current system. Fisheries Oceanography 23: 304-321.

3) Ito S., Okunishi T., Kishi M. J. and Wang M. (2013) Modelling ecological responses of Pacific saury (*Cololabis saira*) to future climate change and its uncertainty. ICES Journal of Marine Science 70: 980-990.

4) Ito S., Yoshie N., Okunishi T., Ono T., Okazaki Y., Kuwata A., Hashioka T., Rose K. A., Megrey B. A., Kishi M. J., Nakamachi M., Shimizu Y., Kakehi S., Saito H., Takahashi K., Tadokoro K., Kusaka A. and Kasai H. (2010) Application of an automatic approach to calibrate the NEMURO nutrient-phytoplankton-zooplankton food web model in the Oyashio region. Progress in Oceanography 87: 186-200.

研究担当者 (伊藤進一*、亀田卓彦、奥西 武、高須賀明典、小松幸生、吉江直樹、渡邊一功、郭 新宇、大野創介、和川 拓、佐藤政俊)

2 日本系サケ資源への温暖化影響予測と対応技術の開発

ア 研究目的

北日本の漁業にとっての最重要資源である日本系サケについて、統計的手法を用いた回帰予測モデルの開発、生態系モデルを用いた予測手法の高度化を行い、複合的に温暖化の影響予測を行う。また、ふ化放流期への温暖化の影響を解析し、温暖化の影響を軽減するためにふ化放流様式の改良提言につなげる。

イ 研究方法

(ア) 沿岸及び沖合域における海況変化がサケ生活史に与える影響評価

現在の海洋環境とさけ・ます類の分布を明確にし、地球温暖化時のサケの分布や回帰経路への影響について推定するため、蓄積されてきた「さけます資源調査」資料を用い主要種ごとの分布域水温塩分範囲を求めるとともに、 $Q_c = (\text{各豊度} / \text{全豊度}) / (\text{各調査回数} / \text{全調査回数})$ を用いて種ごとの水温・塩分嗜好性を解析した。なお、水温環境だけでなく塩分環境も考慮し、現在の海面の水温塩分場と地球温暖化シナリオ A1B の 2050 年と 2095 年の海面の

水温塩分場におけるサケの分布面積を試算した。

(イ) 海況変化に対応したサケ回帰量予測モデルの開発

サケ年級群豊度（対数変換）を従属変数に、放流数、平均放流サイズ、1月、5月及び6月の北海道日本海表面海水温、8月及び9月のオホーツク海表面海水温の合計七つの説明変数を候補として一般化加法モデルを用いて回帰量予測モデルを開発した。また、沿岸域の日平均流速を説明変数に用いたサケ資源変動モデルの構築も合わせて検討した。

(ウ) 温暖化にตอบสนองしたサケ回遊分布・成長モデルの開発と最適放流量の評価

サケ（シロザケ）・カラフトマス・北海道サケ漁業者・プランクトンなどの低次栄養段階の生物を含めた生態系を考慮し、生態系モデルを用いて北海道のシロザケ漁業者の収入を最大にする放流数を算出した。生態系モデルについてはNEMURO (Kishi *et al.*)¹⁾ と Kamezawa *et al.*²⁾ で使われている生物エネルギーモデルを結合したもののモデルを用いた。

(エ) 温暖化に対応したふ化放流技術の開発

各地のふ化場水温の経年変化を解析して、温暖化がサケの増殖環境に与えつつある影響を把握するとともに、稚魚を放流するまでの育成期間を飼育水温別に整理した。また、高水温飼育ふ化場と低水温飼育ふ化場でみられる問題点を整理し、高水温でのふ化放流における問題点を抽出し、飼育実験等により問題解決策を探索するとともに、高水温飼育が稚魚の質に与える影響を把握した。抽出された高水温でのふ化放流の問題に対処する新たな増殖技術を検討した。高水温飼育下でのサケのふ化放流技術改良案を作成し、影響軽減策を検討した。

ウ 研究結果

(ア) 沿岸及び沖合域における海況変化がサケ生活史に与える影響評価

各水温に対するベニザケとサケの Q_c のピークはともに6℃付近であった。カラフトマス、ギンザケ、マスノスケの Q_c のピークは8℃付近にあり、全ての魚種で調査回数の頻度分布とは異なった（図 222-1）。ベニザケとサケの水温に対する嗜好はほぼ同じであるものの、塩分に対する嗜好は異なり、カラフトマスやサケはベニザケより高温塩分を嗜好することが示唆された。つまり、分布域の予測には、水温

のみならず塩分の検討も必要なことが明らかとなった。

水温と塩分を分布範囲の条件として、地球温暖化シナリオ A1B におけるサケの分布の面積を推定すると、3月の2050年と2095年の地球温暖化時のサケの分布域は、現在のサケの分布域に比べ北へ広がると予測された（図 222-2）。西部北太平洋において、現在のサケの分布南限は塩分によって規定されるが、2095年には分布南限は水温によって規定される。8月における地球温暖化時のサケの分布域は、現在の分布域に比べかなり縮小し、特に2095年におけるオホーツク海やアラスカ湾は海面においてサケが分布できない海洋環境となった。

同シナリオに基づくサケの分布面積の推測値は1月～5月まで、地球温暖化時の分布面積は現在のそれより拡大し、現在比105～132%となった（図 222-3）。一方、6月～12月までの地球温暖化時の分布面積は、現在比41～96%に縮小する。特に夏季における地球温暖化時の分布面積は、現在比41%～81%にまで縮小すると推定された。

(イ) 海況変化に対応したサケ回帰量予測モデルの開発

七つの説明変数候補から成るデータセットを用いて、合計32モデルを比較した結果、放流数、1月北海道日本海表面海水温、9月オホーツク海表面水温から構成された3変数モデルが最もあてはまりの良いモデルとして選択された（説明変数はいずれも $p < 0.001$ 、 $R^2 = 0.82$ 、 $GCV = 0.0213$ ）。

このモデルでは、放流数の増加は年級群豊度の増加に寄与することが示された（図 222-4）。また、北海道日本海における1月の表面海水温は、4℃付近で豊度が最大となる一方、オホーツク海では表面海水温の上昇に伴い直線的に豊度が低下する関係が見られた（図 222-4）。このモデルによるサケ1976～2011年級群の豊度予測と実測値の関係を見ると年級によっては予測値の95%信頼区間を外れるケースも散見されたが、実測値を比較的精度良く再現できた（図 222-5）。

(ウ) 温暖化にตอบสนองしたサケ回遊分布・成長モデルの開発と最適放流量の評価

IPCCのA1Bシナリオの計算結果による2050年（2046年～2055年の平均）、2095年（2091年～2100年の平均）のSST等をNEMUROモデルに与

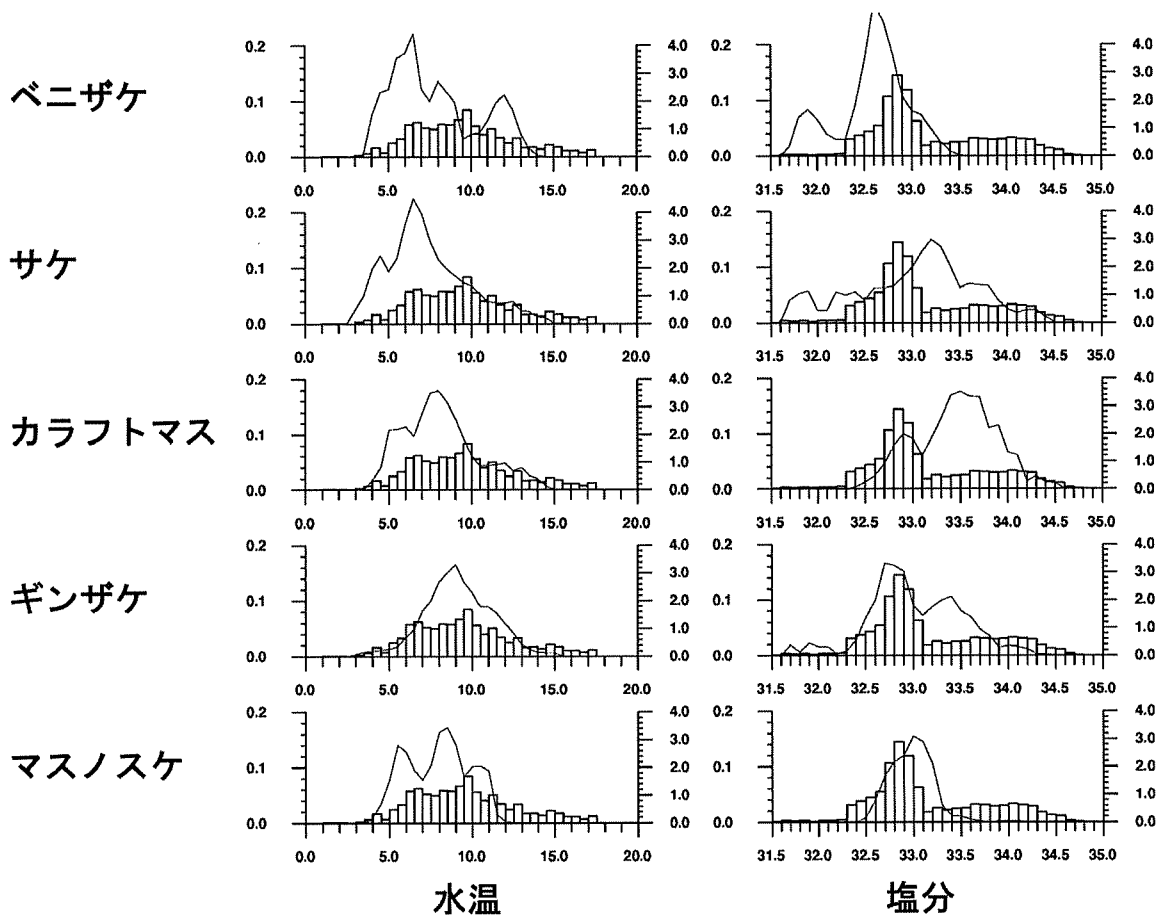


図 222-1 さけ・ます類の分布する水温（左列）・塩分（右列）Qc 値（細線、右メモリ）と観測の相対頻度分布（棒グラフ、左メモリ）

上段からベニザケ、サケ、カラフトマス、ギンザケ、マスノスケ。Qc 値が1を超える環境をその種が嗜好することを示す。

えて、海洋年齢1歳魚から4歳魚の1年間の体重の成長及びその時に経験した水温依存関数と餌密度依存関数を算出した。その結果、計算後の6月1日の海洋年齢4歳魚の最終的な体重は、2050年では現状（2009年）よりも最終的な体重が大き（3251 g wet weight）計算された。一方で2095年では極端に成長が悪い（2224 g wet weight）結果となった（図 222-6）。

また、漁業者の収入に大きな影響を与えるサケの単価はベーリング海における4歳魚の体重と北海道の沿岸漁獲量を用いた重回帰式：予測単価（円/kg）= 0.50 ×（海洋年齢4歳の体重） - 0.53 ×（漁獲量）で精度良く計算された（図 222-7）。そこで、この回帰式を基に、温暖化によるサケの平均体重変化、漁獲量変化から単価を予測し、北海道におけるサケ放流量と定置網1か統当たりの収入を試算した。その結果、2050年においては現状よりも少ない8億尾の放流量で高収入が期待されるものの、

2095年にはサケの小型化により大幅に収入が減少することが試算された（図 222-8）。また、いずれの年においても、最適放流尾数は現状よりも少ない結果となった。

（エ）温暖化に対応したふ化放流技術の開発

現在の稚魚放流は、過去の沿岸調査に基づく魚の生態的特性に基づき、沿岸水温が5℃ - 10℃の間（放流適期）に行われている。しかし、IPCCのA1Bシナリオに基づく2050年と2095年の予測水温から、新潟県沿岸、青森県太平洋側沿岸、北海道石狩沿岸、北海道斜里沿岸における放流適期を予測すると、放流適水温（5 - 10℃）の範囲が、新潟県では消失し、青森県では約1か月早期化・短期化するのに対し、北海道ではむしろ適水温時期が1-1.5か月ほど長期化すると予測された（図 222-9）。

河川別には、天塩川、斜里川、十勝川等の早い採卵群の河川では、現在は、適期前に放流されているものの、温暖化後は適期放流に含まれると予測され

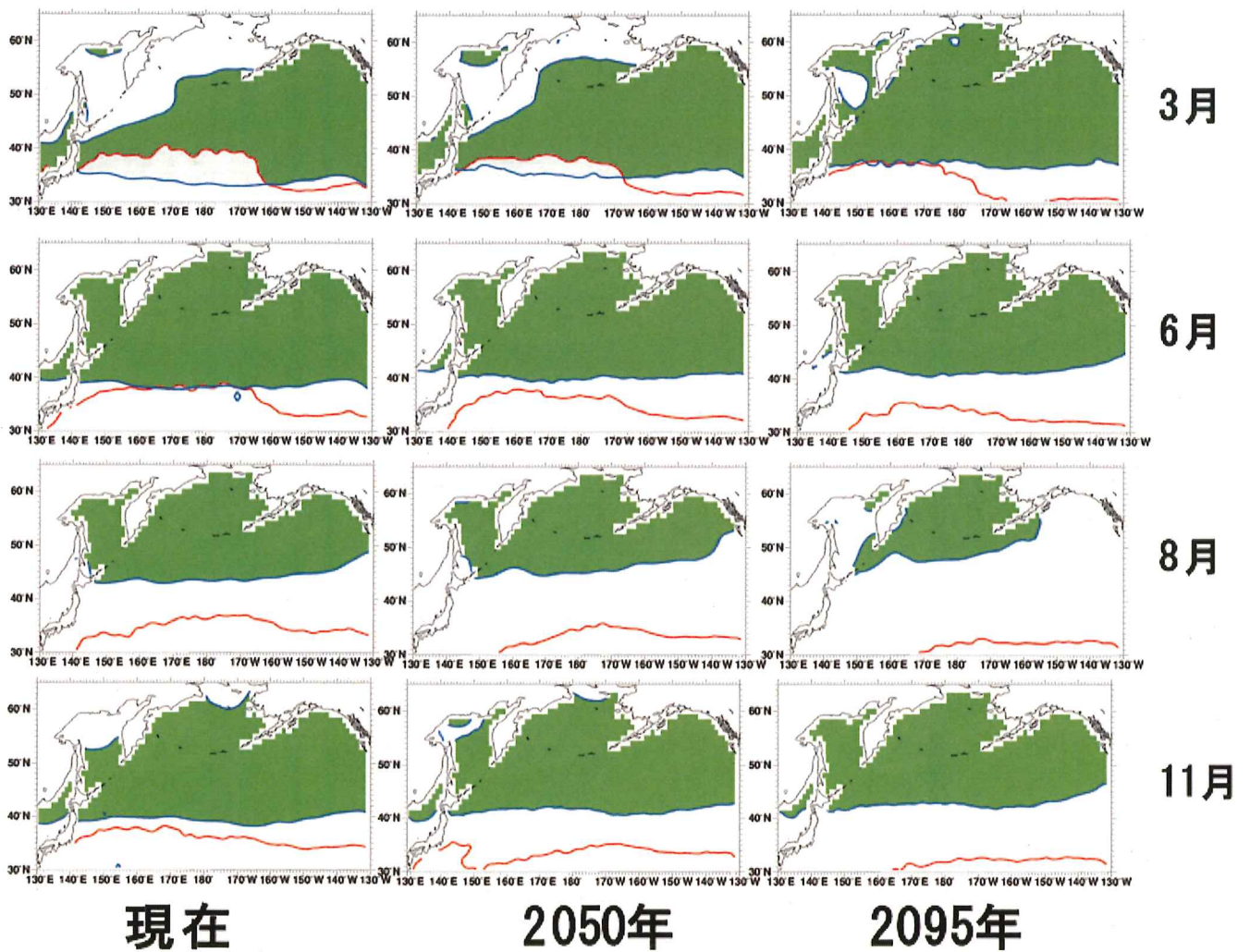


図 222-2 現在のサケの分布域と地球温暖化予測 A1B におけるサケの分布域の比較
 緑の領域がサケの分布域、青線：南限水温赤線：南限塩分。左列：現在の分布、中列：2050年の分布、右列：2095年の分布、
 上段から3月、6月、8月、11月。

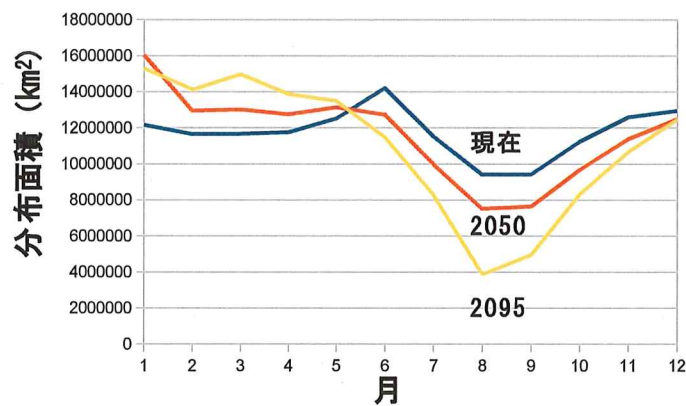


図 222-3 サケの分布面積の季節変化
 青：現在、赤：2050年、黄：2095年

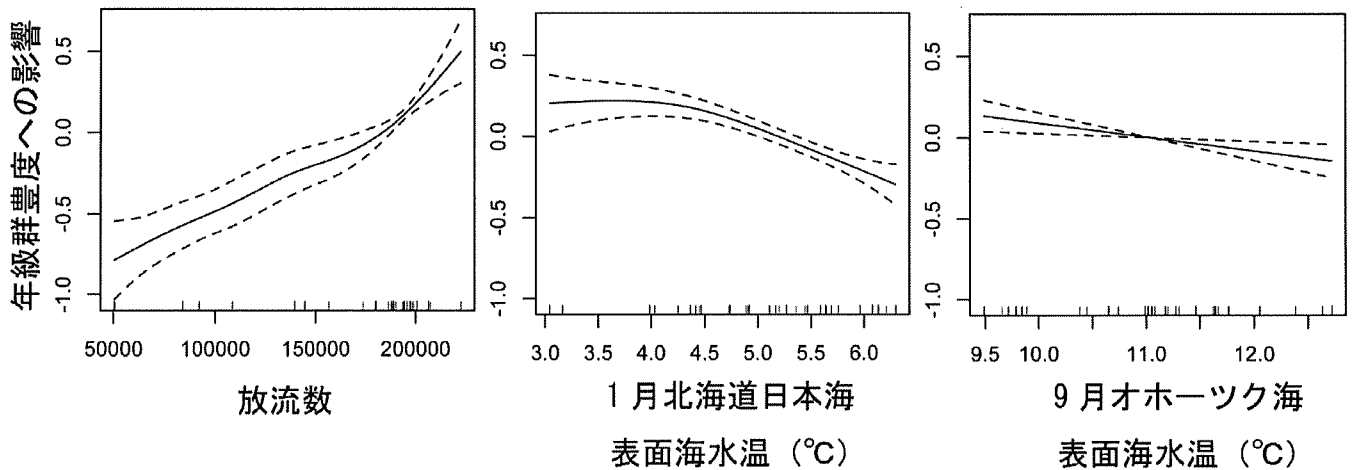


図 222-4 北海道日本海サケの年級群豊度における一般化加法モデルの説明変数（放流数、1月北海道日本海の表面海水温及び9月オホーツク海の表面海水温）と従属変数（年級群豊度）との関係
破線は95%信頼区間を示す。

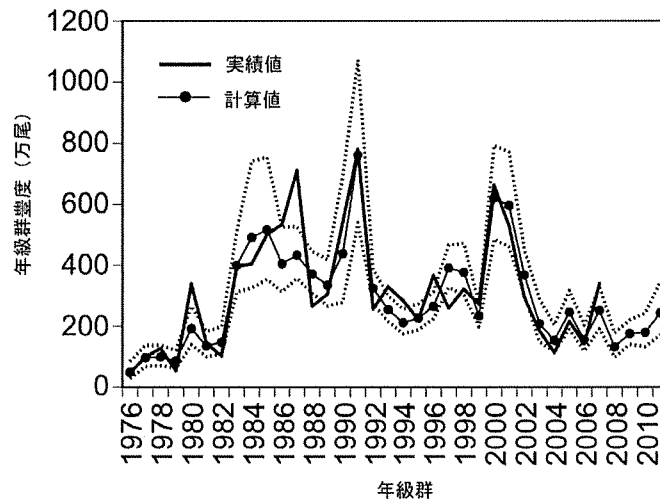


図 222-5 放流数、1月北海道日本海の表面海水温及び9月オホーツク海の表面海水温の3変量を説明変数とする北海道日本海サケの年級群豊度における一般化加法モデルの出力
破線は計算値の95%信頼区間を示す。

た。その反面、遅い時期に放流される群の一部は、適期から外れるか、適期内に放流しても沿岸滞泳期間に離岸サイズの3gに達しない個体が現れる可能性もあった。このような河川では、「水温調節（高水温飼育）により発育・成長を促進させ、放流時期の早期化を図る」及び「高水温耐性魚を選抜し、温暖化に備える」等の適応策が想定される。

上記の適応策に関連し、サケの発育・成長と水温の関係として、4℃、7℃、10℃、13℃、16℃の止水条件で浮上期まで飼育し、ふ化までの日数、ふ化時の体サイズ、死亡率と奇形魚の発生状況を調べた。その結果、通常より高温の10℃、13℃、16℃で飼育すると、7℃で飼育した群に比べ、ふ化までの飼

育期間をそれぞれ30日、35日、38日間短縮できた。また、4℃で飼育すると7℃で飼育した群に比べて39日間延長できた。しかし、ふ化率は4℃と16℃飼育群では85%と87.1%に低下した。

さらに各水温の飼育群のふ化直後の尾叉長と卵黄重量指数（%：卵黄重量/体重*100）を比較したところ。平均尾叉長は、4℃～13℃群では18mm～19mmだったのに対し、16℃群では有意に小さい約17mmであった（図222-9）。卵黄重量指数は、7℃～13℃群が約67%だったのに対し、16℃群は78%、4℃群は53%であった（図222-10）。このことは、16℃飼育群は早期にふ化したために残存卵黄が多い発育不十分な仔魚、4℃飼育群は遅くふ化し

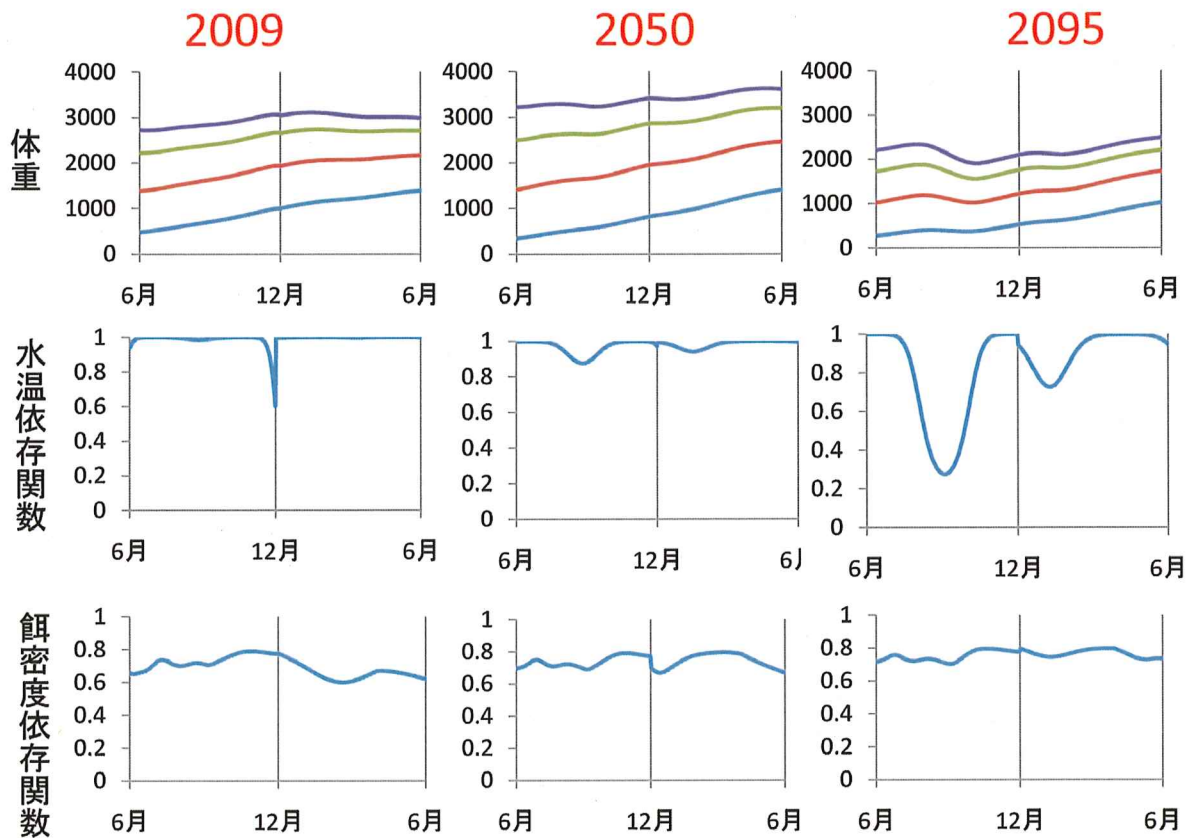


図 222-6 各年の推定体重、水温・餌密度依存関数の推移 (6 - 11月: ベーリング海、12 - 6月: アラスカ湾)

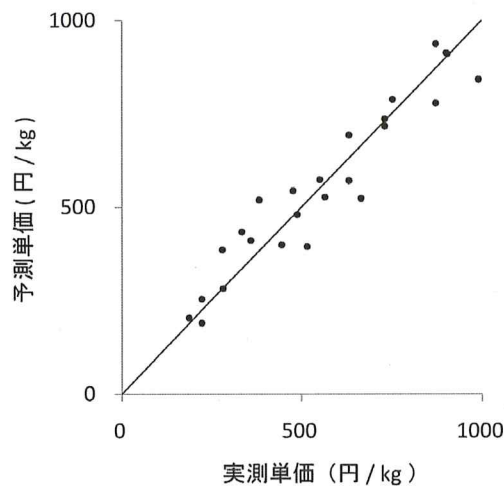


図 222-7 北海道沿岸定置網漁業におけるサケ漁獲量、平均単価及び重回帰による予測単価と実測単価の関係

たために卵黄の残存量が少ない仔魚になったと考えられ、水温調整による成長促進/抑制にも限界があることが示された。

工 考 察

A1B シナリオで想定される 2050 年までの温暖化環境変化はサケにとってマイナス面も多いものの、越冬期における分布可能域の拡大というプラスの面

もあり、影響は小さいと判断された。一方、2095 年にいたると索餌・成長期である夏季の分布域が現在の 40%程度と大幅に減少することが想定され、マイナスの影響が明らかに大きくなると想定される。このような状況を利用し、2050 年の推定環境下のようなサケの適応能力が対応可能な期間内に温暖化を食い止めることが重要と考えられる。

来遊量予測モデルでは、モデル選択の結果、サケ

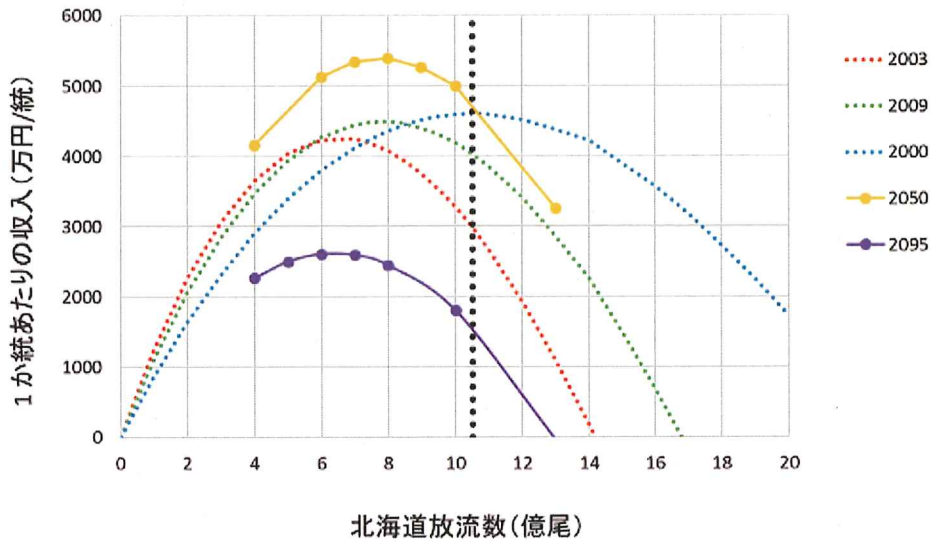


図 222-8 放流量を変化させた場合の北海道沿岸定置網 1 か統当たりの収入試算結果
 2050, 2095 年は、IPCC によるシミュレーションモデル (A1B シナリオ) に基づく試算。点線は、現状の放流尾数 (10.4 億尾) を示す。

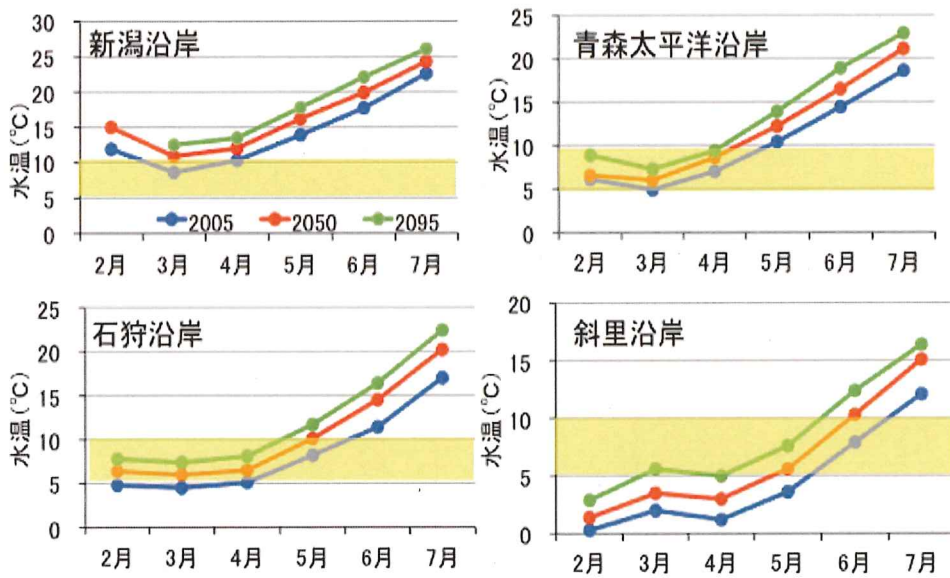


図 222-9 新潟県沿岸、青森県太平洋沿岸、北海道石狩沿岸、北海道斜里沿岸における 2005 年、2050 年、2095 年における 2 月 - 7 月の予想沿岸水温の変化
 黄色の網掛けは現在の放流適期 (5 - 10°C) の範囲を示す。

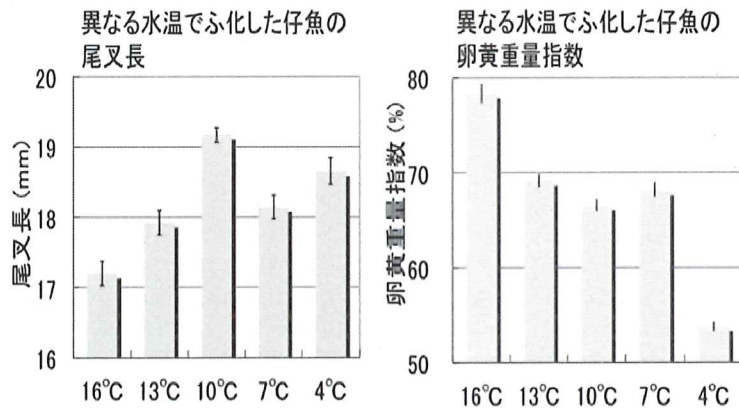


図 222-10 異なる水温で飼育した群のふ化時における仔魚の尾叉長と卵黄重量指数

年級群の放流数、1月の北海道日本海沿岸の表面海水温、9月のオホーツク海の表面海水温がサケ年級群豊度の変動を再現する上で有効な説明変数であることがわかった。2008年以降、日本沿岸にサケが回帰する8月～9月の北日本周辺では毎年のように高水温が話題となっており、高水温による回帰阻害が指摘されるようになってきている（Nagasawa and Azumaya³⁾、宮腰⁴⁾）。海水温の上昇はオホーツク海におけるサケ幼魚の分布海域や餌環境に密接に関係する可能性があることから、今後、オホーツク海におけるサケ幼魚及び回帰親魚に及ぼす影響に関する具体的な影響過程の研究が必要と考えられた。

サケ資源の多くがふ化放流で支えられているため、沿岸への来遊数を維持増大させるためにふ化放流尾数の増大を求める声が強い。しかし、シロザケ・カラフトマス・北海道のシロザケ漁業者・プランクトンなどの低次栄養段階の生物を含めた生態系を考えた上で、北海道のシロザケ漁業者の収入を最大にするシロザケの北海道放流数を求めたところ、放流量の増加が必ずしも漁業者の利益につながらないことを示した。特に温暖化が進んだ場合の北海道における最適放流数は現状の80%程度と試算され、今後のサケ資源管理方策には慎重な対応が必要なきことが示唆された。

サケの増殖事業において、卵から稚魚の飼育環境（増殖用水温）、放流河川環境（河川水温）、及び降海後の沿岸環境（沿岸水温）に温暖化の顕著な影響は、現在のところ認められていない。しかし、今後

は影響が顕在化してくる可能性もあるので、その影響を把握しておくことは重要である。例えば、河川水温が5℃上昇した場合、稚魚の生産時期と放流時期を現在より約1～1.5か月早める必要があることが試算された。その対応策の一つとして、飼育水温を制御し卵仔稚魚の発育と成長を調整することで、上昇する水温に合わせた稚魚生産と適期放流を行うことが考えられる。しかし、今回の結果では、水温を上昇させ卵仔稚魚の発育・成長を促進させる手法は13℃程度までは有効であるものの、それ以上の水温では生残率の低下を招く等の影響が示された。そのため、現在のふ化放流体制で温暖化の影響を緩和・利用するには、地域の海洋環境特性やふ化場の特性に合わせた対応が有効と考えられる（表222-1）。

オ 今後の課題

(ア) これまで行ってきたサケの環境変化への応答解析は、過去に起こった事例解析に基づいている。したがって未経験な環境変化への応答については推定精度が低い。特にサケの回帰ルートをはじめとする回遊経路の変化については不明な点が多く、今後の研究が重要である。

(イ) モデル選択で有効と判断された変数（1月の北海道日本海沿岸の表面海水温、9月のオホーツク海）の具体的な影響過程を明らかにする必要がある。また、統計モデルを使って回帰資源尾数を予測する場合、年齢組成が直近の平均的な組成から乖離

表 222-1 ふ化放流事業の改良による温暖化影響の緩和・利用策例

地域名	水系	ふ化場の用水	春期沿岸環境の特徴	現在取り得る対応	2050年を見据えた対応
オホーツク海	斜里川	湧水・安定	水温上昇遅い	無理をしない飼育（現状維持）	
根室海峡	西別川	湧水・安定 やや高め	水温上昇遅い	後期群育成・成長抑制（実施中）	沿岸の早期水温上昇はプラス、成長抑制解除
北海道日本海	石狩川	水温・標準	水温上昇早め 5月以降急上昇	幅を持たせ前広放流 秋季の高水温に備えた 後期群の増大	早期放流を検討
北海道太平洋	静内川	高温、変動	水温上昇遅い 年変動大	後期群の比率増加・成長抑制	水温上昇はプラス、成長抑制解除と早期放流
本州日本海	月光川	やや高温	常に5℃以上 上昇早い	3月中下旬に幅を持たせて放流	3月上旬放流/成長促進を検討

すると予測が大きく外れることが懸念される。なお、サケの回帰年齢（成熟年齢）の決定には沖合海域におけるサケ未成魚の成長から回帰年齢（成熟年齢）を推定することも重要である。

（ウ）生態系モデルを利用した解析はいくつものパーツを結合させて出力を得る。今回用いたサケの生物エネルギーモデルや資源モデルは過去の経験的データのフィッティングは良いが、予測される環境変化（特に非線形的な応答）についての精度は低い。データを付加することなどにより、この点の改善も必要である。また、最適放流数の計算に単価予測を用いているが、単価予測は社会経済的要因による不確実性が高く、今後、状況に応じて見直していく必要がある。

（エ）サケの放流は90%程度が民間の増殖団体が実施しており、施設や管理体制も様々である。実際の施設に対応した改善策の提案にはきめ細かな対応が必要である。

カ 要 約

（ア）温暖化によってサケの分布面積は、夏季～秋季は現在よりも縮小するのに対し冬季～春季は現在よりも拡大すると推定された。温暖化の負の影響は2050年以降に顕著になる可能性が高い。また、温暖化時の回帰ルートは現在の回帰ルートとは異なる可能性がある。

（イ）一般化加法モデルを用いて年級群予測モデルを構築した。その結果、放流数と1月の北海道日本海の表面海水温及び9月のオホーツク海表面海水温の3変量から構成されるモデルの精度が高かった。

（ウ）プランクトンなどの低次栄養段階の生物を含めた生態系を構築するとともに、単価を体サイズと漁獲量より予測することで、温暖化による北海道における最適放流数を試算した。その結果、IPCCのA1Bシナリオで温暖化が進んだ場合、北海道における最適放流数は現状の80%程度と試算された。

（エ）沿岸水温の上昇は、ふ化・飼育用水の温度が高いふ化場にとっては放流時期を早められる利点がある一方、ふ化・飼育用水の低いふ化場には成長不足等の負の影響が予測された。しかし、温度を調整して高水温での管理を行う上限は、13℃程度と考えられた。そのため、温暖化の影響を緩和にして

ふ化放流魚の回帰を維持するためにはふ化場や放流地域の特性に合わせた管理が重要である。

キ 引用文献

- 1) Kishi M.J., Kashiwai M., Ware D.M., Megrey B.A., Eslinger D.L. and Werner F.E. (2007) NEMURO — A lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecol. Modell.* 202: 12-25.
- 2) Kamezawa Y., Azumaya T., Nagasawa T. and Kishi M.J. (2007) A fish bioenergetics model of Japanese chum salmon (*Oncorhynchus keta*) for studying the influence of environmental factor changes. *Bull. Japan. Soc. Fish. Oceanogr.* 71: 87-96.
- 3) Nagasawa T. and Azumaya T. (2012) Fluctuation of Japanese chum salmon return rate related to sea surface temperatures along the spawning migration route. *NPAFC Tech. Rep.* 8: 20.
- 4) 宮腰靖之 (2013) 秋の沿岸での高水温がサケの来遊時期に与える影響. 北水試だより, 87: 5-8.

研究担当者（東屋知範、斉藤寿彦、渡邊久爾、岸 道郎、伴 真俊、永沢 亨*）

3 日本海主要漁業資源の海洋生態系モデルによる温暖化影響予測と適応策の開発

ア 研究目的

日本海は過去100年間において最も水温上昇がした海域の一つであり、今後も温暖化の影響が顕著に表れることが想定される。現在、日本海では主にいか釣り、定置網、底曳き網及びまき網漁業等により、ブリ、スルメイカ、ズワイガニ及びカレイ類の主要漁業資源が漁獲されている。しかし、近年の海洋環境の変化（水温上昇）によって漁場・漁獲物の変化も見られており、今後、これらの主要漁業資源への温暖化の影響が懸念されている。そこで、本研究では温暖化によって日本海の海洋環境及び生態系がどのように変化するかを明らかにし、日本海的主要水産資源への影響を予測すること、さらに予測結果からプラスの影響が得られる漁業形態を抽出し、

温暖化への適応策を開発することを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 日本海海洋大循環-生態系モデルの開発とそれを用いた温暖化予測

a MIROCによるIPCCの温暖化シナリオA1Bに基づいた地球温暖化計算結果(K-1 Model Developers)¹⁾を初期条件・境界条件として、日本海の渦解像海洋大循環モデル(RIAMOM、1/12度グリッド、Lee et al.²⁾を10年間スピンアップさせた後、2000～2100年の水温・流動場の予測を行った。対馬暖流流量の経年変化の有無を考慮した2種類の実験を行った。なお、流入量の経年変化はMIROCで計算されたものを使用した。

b 上記海洋モデルに低次生態系モデル(NEMURO)を組み込み、日本海に特化させた3次元日本海低次生態系モデルを開発するとともに、温暖化予測計算を適用して計算を行った。また、低次生態系のモニタリングによる現場データ等により3次元日本海低次生態系モデルの境界条件・モデル出力を検証するためのデータセットを整備した。

(イ) 生態系モデルによる主要漁業資源の影響予測と適応策

a 日本海各海域で漁獲したブリ、スルメイカ及びその餌生物の安定同位体比分析を行い、高次生態系モデルを作成する上で必要となる被食・捕食関係を検討した。

b 分析結果に加えて、これまでに得られたデータ及び文献情報をもとに日本海の主要漁業資源を対象として、栄養段階、被捕食関係及び生物量を基に28の構成要素からなる高次生態系モデル(Ecopath)の構築を10年周期の海洋環境(温暖期・寒冷期)別に行った。

c 物理環境の変化による魚種組成への応答の検討として、漁獲データを用いて日本海(対馬海流)と黒潮及び親潮海域の魚類群集構造を比較し、日本海における漁業資源の群集構造の変動特性を検討した。

ウ 研究結果

(ア) 日本海海洋大循環-生態系モデルの開発とそれを用いた温暖化予測

a 日本海の渦解像海洋大循環モデル

(RIAMOM、1/12度グリッド)を用いて2000～2100年の水温・流動場の予測を行った結果、対馬暖流流量の経年変化の有無に関係なく、2100年には日本海平均で海面水温が約4℃上昇することが示された。共通した傾向として、温暖化の進行には十数年スケールの大きな経年変動を伴うこと(図223-1矢印)及び温暖化が進行すると渦活動が盛んになることが示された。一方、対馬暖流流量の経年変化の有無によって異なる特徴も見られ、考慮した場合には考慮しない場合よりも経年変化が大きくなった。また、経年変化を考慮しないと、温暖化の進行に伴い、対馬暖流第3分枝の離岸位置が北上したが、考慮すると大きく北上しなかった(図223-2)。

2100年の日本海の貯熱量は、2000年に比べて約 2.5×10^{22} J増えていることが示された。また、温暖化の進行に伴う循環構造の変化を調べることを目的に、対馬海峡から日本海へトレーサーを流入させる実験を各年代に対して行った。その結果、2025年までは極前線の発達により対馬暖流系水が東方海域へ効果的に輸送されるが、2050年以降は極前線の弱化と渦活動の活性化及び東韓暖流の北上により、相対的に対馬暖流系水が西方海域に貯まりやすくなることが推測された(図223-3)。

b 流動モデルの結果を適用し得るよう3次元日本海低次生態系モデルを改良し、日本海の低次生態系の変動に関する試行計算を実施した。その結果、温暖化予測計算については、温暖化の進行とともに、植物プランクトンの生産が大きく減少すること、植物プランクトンの小型化が進むことが示された(図223-4、表223-1)。一方で、低次生態系の温暖化予測結果と観測値との比較から、2000年代における大和碓周辺海域での植物プランクトン分布について、現実よりも濃い植物プランクトン濃度が認められた。

(イ) 生態系モデルによる主要漁業資源の影響予測と適応策

a 日本海における高次生態系モデルを作成するための資料として日本海で漁獲されたブリ、スルメイカ、マイワシ、カタクチイワシ、キュウリエソ及び動物プランクトンの安定同位体比を分析した。これらの重要鍵種である $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値はそれぞれ-21～-16と5～13の範囲になり、概ね、

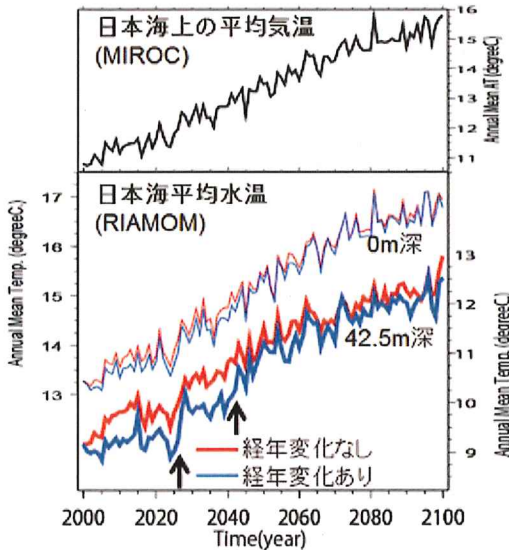


図 223-1 計算領域全体で平均した気温 (上) と水温 (下) の時間変化

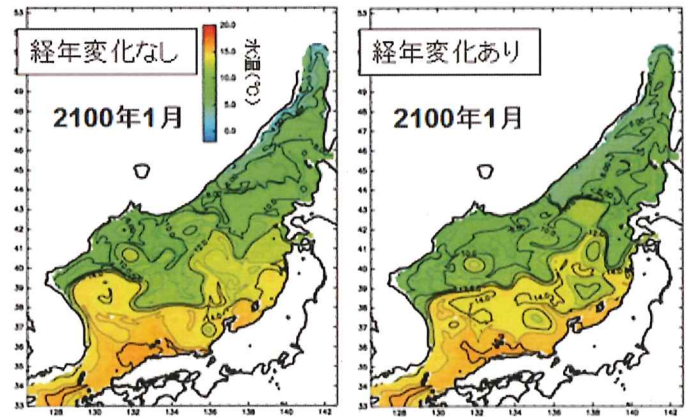


図 223-2 2100年1月の水深42.5mにおける水温分布
IPCCのシナリオA1-Bのもとに、対馬暖流流量の経年変動を考慮しない場合(左)、考慮した場合(右)の予測結果。

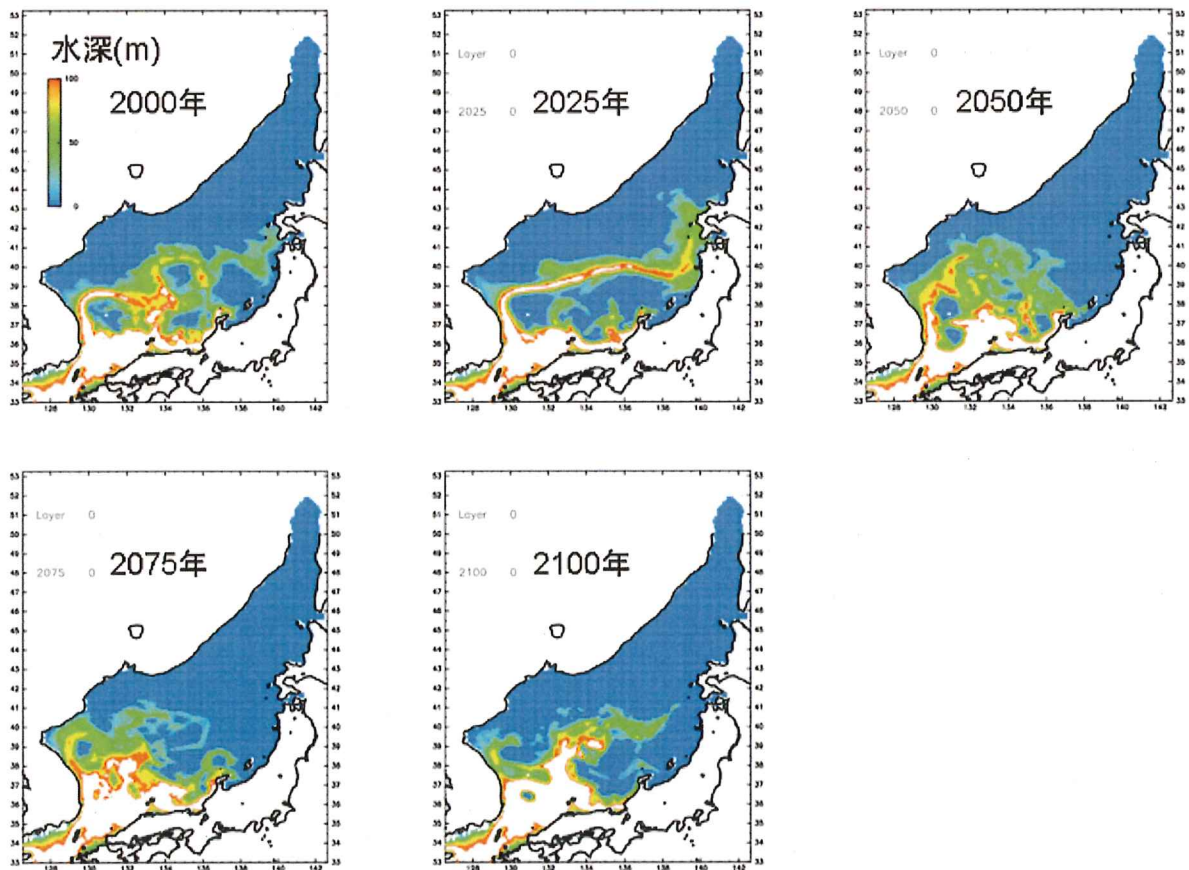


図 223-3 対馬暖流系水が確認された水深の水平分布
示した図はトレーサー流入開始9か月後のもの。白抜きは100m深以上を示す。

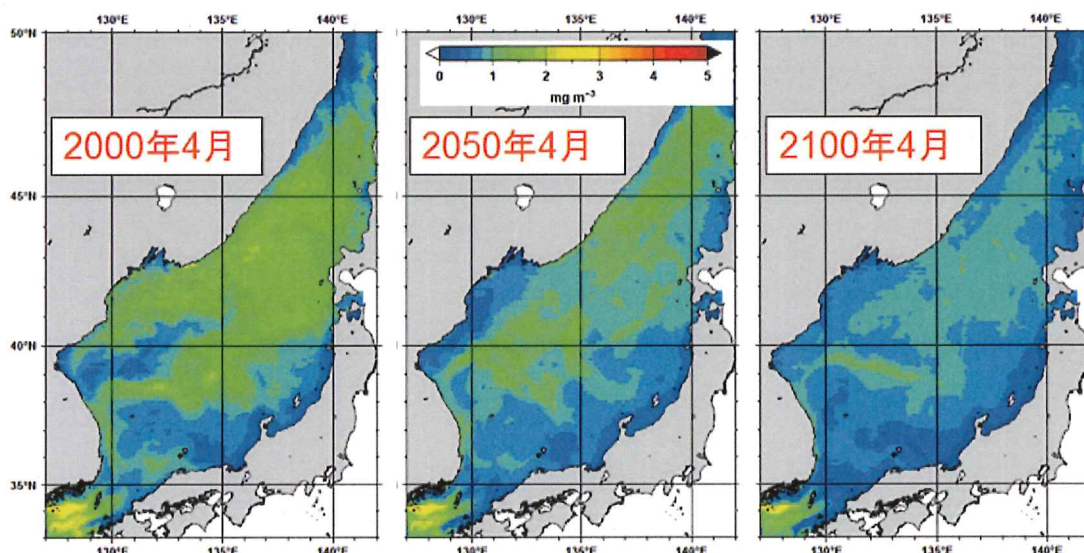


図 223-4 3次元低次生態系モデルによる植物プランクトンの分布予測計算結果（左：2000年4月、中心 2050年4月、右：2100年4月）

表 223-1 計算領域全体で平均した植物プランクトン・全体に対する小型植物プランクトン量の割合・栄養塩量の、各年代間での比較

Year	Chlorophyll-a [mg/m ³]	Small size ratio of phytoplankton [%]	Nutrient [μmol/l]
2000	0.84	61	1.36
2050	0.70[83%]	64	0.81[60%]
2100	0.57[68%]	72	0.66[49%]

Brackets indicate the concentration ratios compared with 2000.

動物プランクトン、キュウリエソ、小型浮魚類、ブリの順に $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる傾向が示され、餌から高次捕食者までの栄養段階を把握できた（図 223-5）。また、ブリとスルメイカのように、海域によって $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ が異なることから、海域（北と西または沿岸と沖合）によって、被捕食関係が異なることが示された。

b 日本海の主要漁業資源は、海洋環境によって大きく変化することが想定されることから、海洋環境が大きく異なる 1980 年代（寒冷期）と 1990 年代（温暖期）における主要漁業資源の生物量や被捕食関係の変化を考慮した高次生態系モデル (Ecopath) をそれぞれ作成した。その結果、図 223-6 で示されるように、寒冷期ではマイワシ・マサバ及びマダラが多いのに対して、温暖期では、

キュウリエソ、ブリ、マアジ、スルメイカの割合が増加する特徴を高次生態系モデルによって再現することができた。

c 漁獲データを用いて日本海（対馬海流）と黒潮及び親潮海域の魚類群集構造を比較し、日本海の変動特徴を把握した (Tian et al.)³⁾。基本的な傾向として、日本海（対馬暖流域）では、水温が高くなった 1990 年以降、平均栄養段階指数 (MTL) や小型浮魚に対する大型魚の比率 (PS/ZS ratio) が黒潮域や親潮域と比較して高くなる特徴が見られた（図 223-7）。

工 考 察

(ア) 温暖化が進むと、日本海内部の循環で最も強力な流れを持つ極前線が維持できなくなり、日本

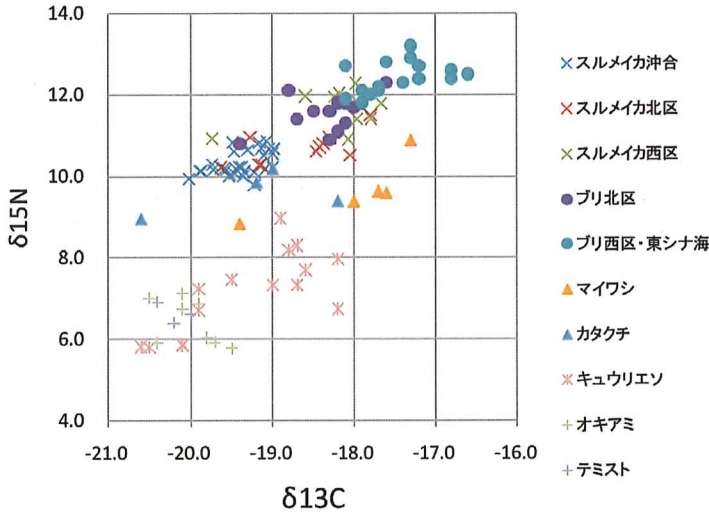


図 223-5 日本海主要回遊性資源及び餌生物の安定同位体比分析結果

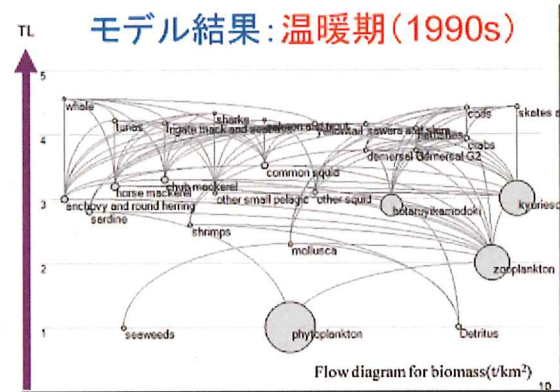
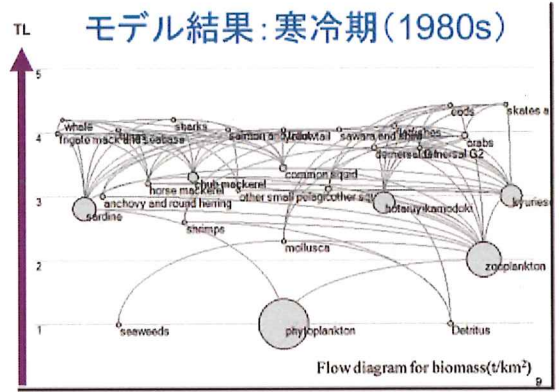


図 223-6 日本海の主要漁業資源の生物量と被捕食関係モデル

モデルでは 28 の構成要素を基に、寒冷期（1980s）と温暖期（1990s）で作成。海洋環境によって主要漁業資源の生物量や被捕食関係が変化することを前提に作成した。

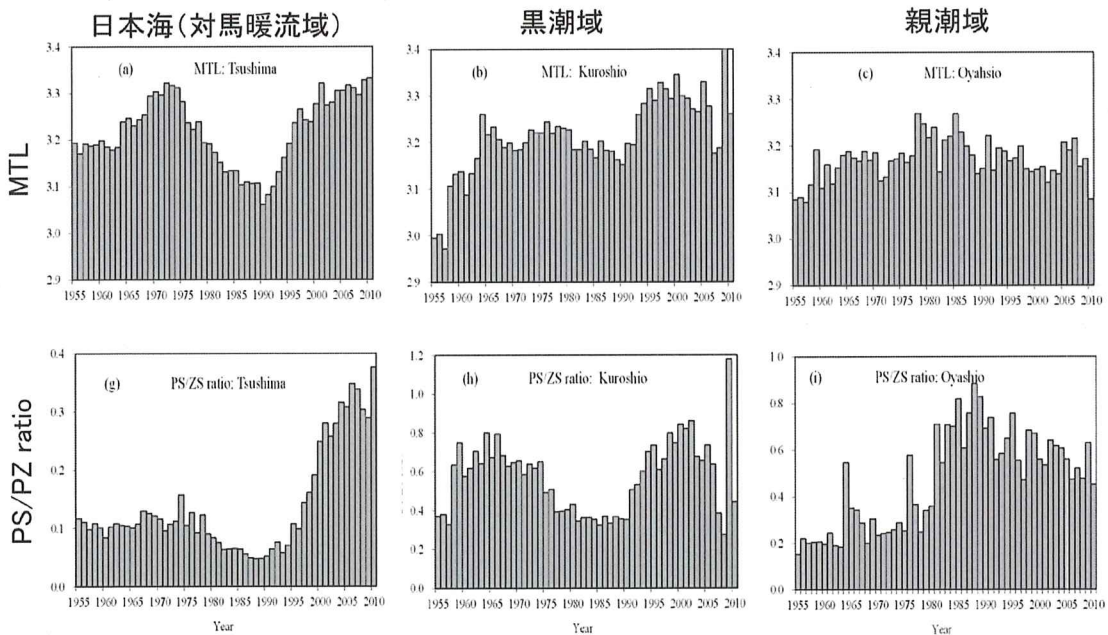


図 223-7 日本海（対馬暖流域）と黒潮及び親潮域における平均栄養段階指数（MTL）と大型魚食魚割合（小型浮魚に対する大型魚の比率、PS/ZS ratio）の変化

海内部での物質拡散速度が鈍くなることが実験的に示された。この結果は、極前線の勢力の維持には日本海における熱の放出が必要であるが、それが温暖化によって弱まる可能性を示している。加えて、海況からの流入出量に変動を与えた場合、与えない場合よりも日本海の水温が低くなり、且つ経年変動が大きくなった結果に関しては、海峡を通じた熱の流出が原因であると考えられる。以上から、極前線の維持過程に代表される日本海循環場の予測には、海峡の通過流量の正しい見積もりが不可欠と考えられる。

(イ) 安定同位体分析の結果ブリ（北区と西区）とスルメイカ（沖合、北区、西区）では海域によって $\delta^{13}C$ と $\delta^{15}N$ が異なっており、栄養段階が海域によって異なることが示された。したがって、高次生態系モデル構築をするにはこのような海域特性を考慮することも重要であることが示された。本研究課題で作成した高次生態系モデル（Ecopath）では、寒冷期1980sと1990sでは、それぞれの海域における生産構造の変化をモデルで示すことができた。しかし、各構成種の栄養段階については情報が少なく、栄養段階を仮定して推定しているによる影響が懸念される。したがって、さらに胃内容物調査結果等のデータを蓄積し、改良していく必要がある。

1980年代における平均栄養段階（MTL）及び小型浮魚に対する大型魚の比率（PS/ZS ratio）が低いのは、栄養段階の低いマイワシの漁獲量が多いためと判断される。水温が上昇した1990年代以降はマイワシ資源の減少によって日本海及び黒潮域においてもMTL及びPS/ZS ratioが上昇している。しかし、太平洋と比較して、日本海で顕著にこれらの指標値が増加しているのは、海域内の生産構造の変化に加えて、東シナ海からブリやサワラ等の大型捕食魚の来遊が多くなったことも影響していると判断される。このような日本海における気候変動と魚種組成の変化の特徴を元にするると、日本海では海水温が上昇すると、高次捕食者の来遊量・資源量が増加することが予想され、これらを対象とした漁業にプラスの要因が現れることが期待される。しかし、栄養段階に関する情報は限定的であり、今後、高次生態系モデルの栄養段階構造に関する精査が必要である。さらに、低次生態系モデルの結果では、温暖化の進展によって基礎生産量が低下しており、漁業絵

の影響を判断するには、貴低次生態系の変化による影響も評価する必要がある。

オ 今後の課題

(ア) 低次生態系の温暖化予測結果と観測値との比較から、2000年代における大和碓周辺海域での植物プランクトン分布について、現実よりも濃い植物プランクトン濃度が認められ、今後のパラメータ調整の課題として残された。今回の報告では、日本海の物理環境の変化予測をMIROCによるIPCCの温暖化シナリオA1Bに基づいた地球温暖化計算結果を元に検討したが、今後、IPCCの第五次報告書に準拠した温暖化シナリオ（複数）による再計算も必要になると考えられる。

(イ) 1990年以降の気候変動（水温上昇）と共に観察された高次捕食者の増加を、温暖化による影響として今後の変化を予測するには、高次生態系モデルで示すとともに、温暖化シナリオに組み込んで予測する手法が必要となる。また、温暖化による漁業への影響を予測するには、近年の高水温による水産資源の変化（分布回遊・資源量）に加えて、漁業への影響（漁獲量、魚種組成、サイズ、漁獲金額）を精査するとともに、温暖化シナリオを用いた影響予測を行う必要がある。これらの影響予測精度の向上が、温暖化による水産業への影響、特に負の影響ばかりでなく正の影響を抽出し、今後の水産業の適応策を図る上では重要となる。

カ 要約

(ア) 日本海の渦解像海洋大循環モデル（RIAMOM、1/12度グリッド）を用いて2000～2100年の水温・流動場の予測を行った。その結果、対馬暖流流量の経年変化の有無に関係なく、2100年には日本海平均で海面水温が約4℃上昇することが示された。さらに、3次元日本海低次生態系モデルを改良し、日本海の低次生態系の変動に関する試行計算を実施した。また、低次生態系モデルによる温暖化予測計算では、温暖化の進行とともに、植物プランクトンの生産が大きく減少することと、植物プランクトンの小型化が進むことが示された。

(イ) 海洋環境が大きく異なる1980年代と1990年代における主要漁業資源の生物量や被捕食関係の変化を考慮した高次生態系モデル（Ecopath）をそ

れぞれ作成した。その結果、寒冷期ではマイワシ・マサバ及びマダラが優占するのに対して、温暖期では、キュウリエソ、ブリ、マアジ、スルメイカの割合が増加することが再現できた。また、日本海（対馬暖流域）では、水温が高くなった1990年以降、平均栄養段階指数（MTL）や小型浮魚に対する大型魚の比率（PS/ZS ratio）が黒潮域や親潮域と比較して高くなる特徴も見られ、これらの特徴から、日本海では温暖化が進行することによって、高次捕食者を対象とした漁業にプラスの要因が現れることが期待された。

キ 引用文献

- 1) K-1 model developers (2004) K-1 coupled GCM (MIROC) description, K-1 technical report. 1, Hasumi, H., Emori, S. (eds.) , Center for Climate

System Research, University of Tokyo, Tokyo, 34pp.

- 2) Lee, H. J., Yoon, J. H., Kawamura, H. and Kang, H.-W. (2003) Comparison of RIAMOM and MOM in modeling the East Sea/Japan Sea circulation, Ocean Polar Research 25: 287-302.
- 3) Tian, Y., K. Uchikawa, Y. Ueda and J. Cheng (2014) Comparison of fluctuations in fish communities and trophic structures of ecosystems from three currents around Japan: synchronies and differences. ICES J. Mar. Sci. 71: 19-34.

研究担当者（木所英昭*、井桁庸介、田 永軍、渡邊達郎、森本晴之、高山勝巳、茂木博匡）

第3章 沿岸域及び内水面における漁業生産への影響評価と適応技術の開発

1 藻場の分布と餌料供給機能に及ぼす温暖化の影響評価

ア 研究目的

磯根資源や沿岸浅海域の漁業生産に重要な役割を果たしている藻場については、すでに温暖化の影響を受けた変化が現れてきており、温暖化進行下での藻場の保全、利用に関する適応策の構築が具体的に求められている。そのため、今後の藻場の分布や藻場生態系による餌料供給機能への温暖化の影響をより高精度に評価する必要がある。本課題では、藻場構成種に関する精度の高い温度特性データと温暖化シナリオに基づいて予測された将来の水温分布から温暖化の進行に伴う藻場の分布変化を精度よく予測するとともに、海藻・海草葉上の付着微細藻類群集の解析から藻場の重要な機能である餌料供給機能に及ぼす温暖化の影響を明らかにすることを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 海藻の温度特性把握と藻場構成種の分布変動予測

0.1℃の精度で水温制御ができる高精度温度勾配培養装置(図 231-1)を用いて、本州中南部に分布する褐藻コンブ目の生長と成熟に及ぼす温度の影響を明らかにした。褐藻コンブ目の培養藻体を $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、12L:12D、10-30℃の光・温度条件で一定期間培養し、成熟率を求めるとともに、個体識別した藻体の葉面積及び投影面積を測定し、相対生長速度を求めた(図 231-2)。

MIROCによるIPCCの温暖化シナリオA1Bに基づいた地球温暖化計算結果(K-1 Model Developers)¹⁾を初期条件・境界条件として、日本海の渦解像海洋大循環モデルRIAMOM(1/12度グリッド)(Lee H.J. et al.)²⁾を10年間スピンアップさせた後、2001~2100年の水温・流動場の予測を行った。計算された2001~2100年の毎月の平均水温データを使い、海岸線の最寄りの格子点(1/12度グリッド)での時系列水温を沿岸の時系列水温とした。海藻の生育可能な範囲については、最高月平

均水温が生育限界温度を超えない条件と、最低月平均水温が植食動物による摂食を制限し、海藻の再加入による藻場の維持を可能にする条件を考え、これら二つの条件のいずれかが満足しない年が2年連続した海域では海藻個体群の局所的絶滅が起こると仮定して予測を行った。

(イ) 藻場の餌料供給機能に及ぼす温暖化の影響評価

藻場を構成する海藻・海草葉上の付着微細藻類群集は有用魚貝類の餌料として重要な存在であり、これらの群集の種組成や水温に関する指標性の解析から、藻場の重要な機能である餌料供給機能に及ぼす温暖化の影響評価を試みた。海産植物の葉上に付着する微細藻類を歯ブラシでこすって試験管に集め、次亜塩素酸塩、水酸化ナトリウムを主たる成分とする市販のパイプ洗浄剤により試料を洗浄³⁾後、作成したプレパラートを検鏡することにより種組成を明らかにした。

ウ 研究結果

(ア) 海藻の温度特性把握と藻場構成種の分布変動予測

高精度温度勾配培養システムを用いて、本州中南部に分布する褐藻コンブ目3種の生長、成熟に及ぼす温度の影響を明らかにした。カジメ(*Ecklonia cava*)、クロメ(*E. kurome*)、ツルアラメ(*E. stolonifera*)配偶体の生長上限温度は全ての雌雄配偶体とも28℃であり、同じく配偶体の成熟(卵形成)上限温度は、それぞれ27℃、25℃、26℃であった。また、3種の胞子体の生長上限温度は、カジメでは28℃、クロメとツルアラメでは27℃であった。日本海の固有種であるツルアラメの生長・成熟に及ぼす温度の影響を図 231-3に示した。

日本海の温暖化予測計算の結果(図 231-4)を用い、表層(0-2.5m)の予測水温と藻場構成種の地理的南限域付近の月平均水温から経験的に決定した生育限界の温度条件に基づき、温暖化に伴う藻場の地理的分布の変化を予測し、GISにより結果を可視化した。褐藻コンブ目のアラメ(*Eisenia*

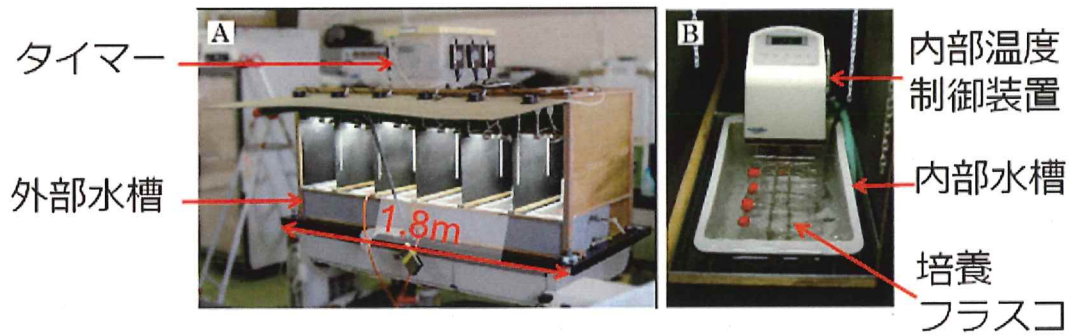


図 231-1 高精度温度勾配培養装置の外観 (A) と内部の様子 (B)

$$RGR = 100 \times (\ln A_t - \ln A_0) / t$$

RGR: 相対生長速度
 A_0 : はじめの葉面積
 A_t : t日後の葉面積

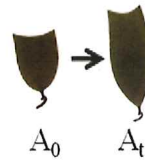


図 231-2 海藻の相対生長速度の求め方

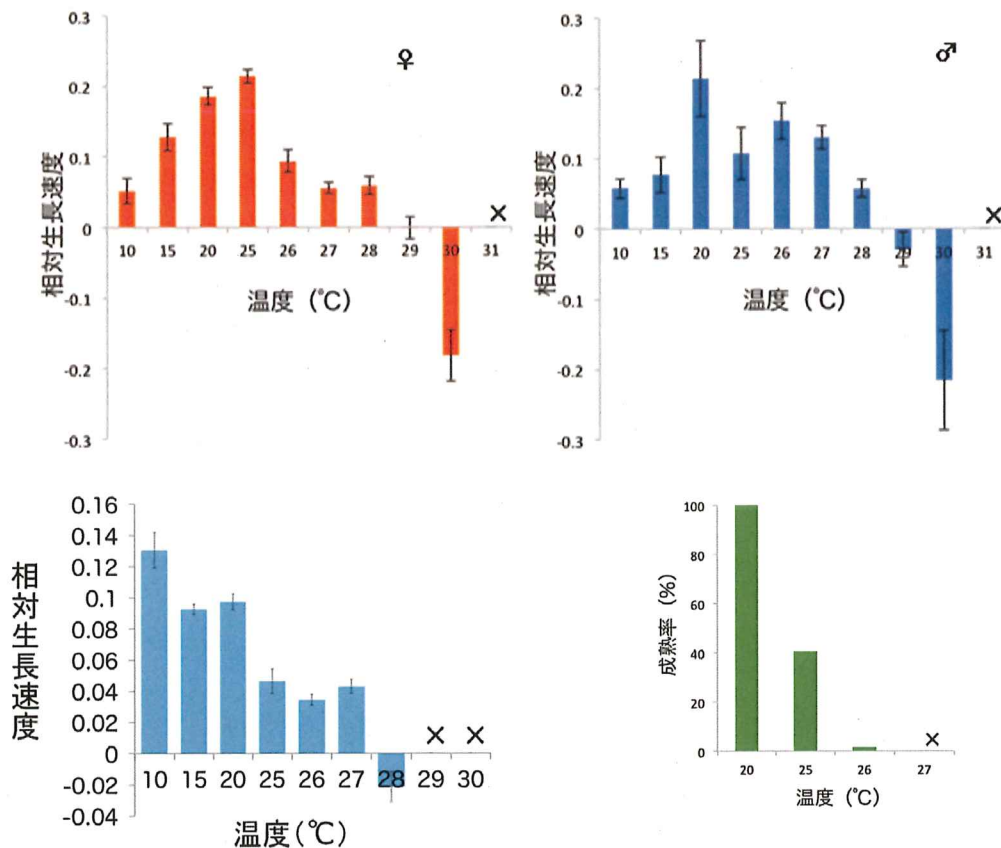


図 231-3 褐藻ツルアラメの生長・成熟に及ぼす温度の影響

雌雄配偶体 (上) と胞子体 (左下) の相対生長速度及び雌性配偶体の成熟率 (右下) に及ぼす温度の影響

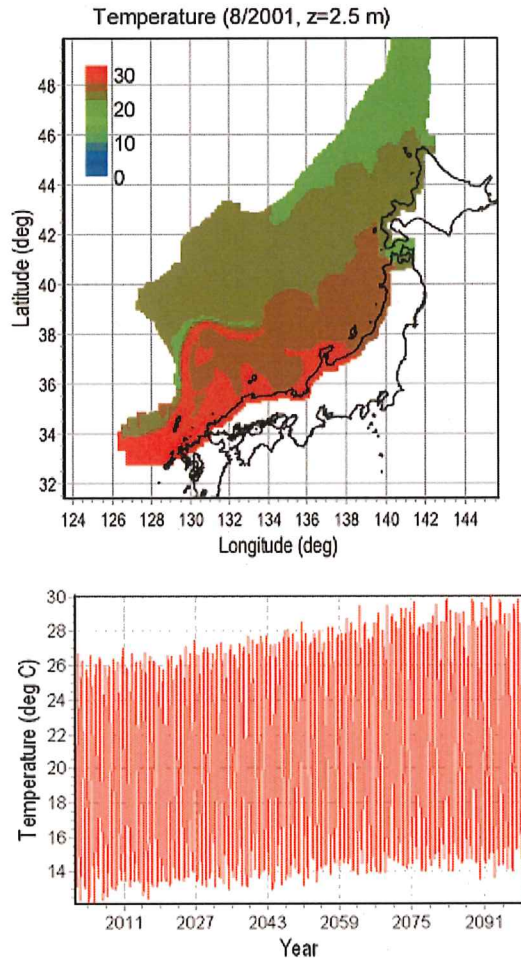


図 231-4 対馬暖流の影響を考慮して計算された日本海の水温（上）とそのデータを使って求めた沿岸（島根県浜田市地先）の時系列水温データ（下）

bicyclis)、クロメ (*Ecklonia kurome*)、ツルアラメ (*Ecklonia stolonifera*) について分布の変化予測を試みた。

鳥取県以西に分布するアラメは、2070 年前後で日本海全域での生育が困難になることが予測された (図 231-5 上段)。クロメについては、2100 年には能登半島よりも西側の日本海沿岸での生育が困難になることが予測された (図 231-6 上段)。北海道を除く日本海沿岸のほぼ全域に分布するツルアラメは、2100 年には能登半島よりも西側の日本海沿岸では生育が困難になることが予測された (図 231-7 上段)。

日本海沿岸は、一般に透明度が高いため、他の海域に比べて深い水深帯まで藻場が形成される。従って、高水温期の表層付近の水温が藻場構成種の生育限界温度を超えるような条件でも水温躍層よりも深い水深帯 (20 m 以深) に形成された藻場では、表層に比べ水温が低く、植物が致命的な高水温に暴露

されずに生き残る可能性が高いと考えられる。そこで、表層付近の予測水温で分布の変化予測を試みた褐藻コンブ目 3 種について、それぞれの種で報告されている深い分布水深帯付近の予測水温データ (クロメ、7.5 - 10 m; ツルアラメ、40 - 42.5 m; アラメ、7.5 - 10 m) を使い、分布の変化予測を行った。その結果、水深 10 m 付近までの生育がみとめられるクロメとアラメでは、表層付近 (0 - 2.5 m) の予測水温を使った予測結果と大きな違いはなかったが (図 231-5 と図 231-6 下段)、30 m 以上の水深帯で生育するツルアラメでは、表層付近の予測結果とは異なり、今世紀末でも能登半島の西側の海域で生育できる可能性が示された (図 231-7 下段)。この結果は、“深所に形成される藻場” が気候変動下でのレフュージアとして機能する可能性が高く、生態系の復元力を理解する上で重要な研究対象であることを示唆している。

(イ) 藻場の餌料供給機能に及ぼす温暖化の影響

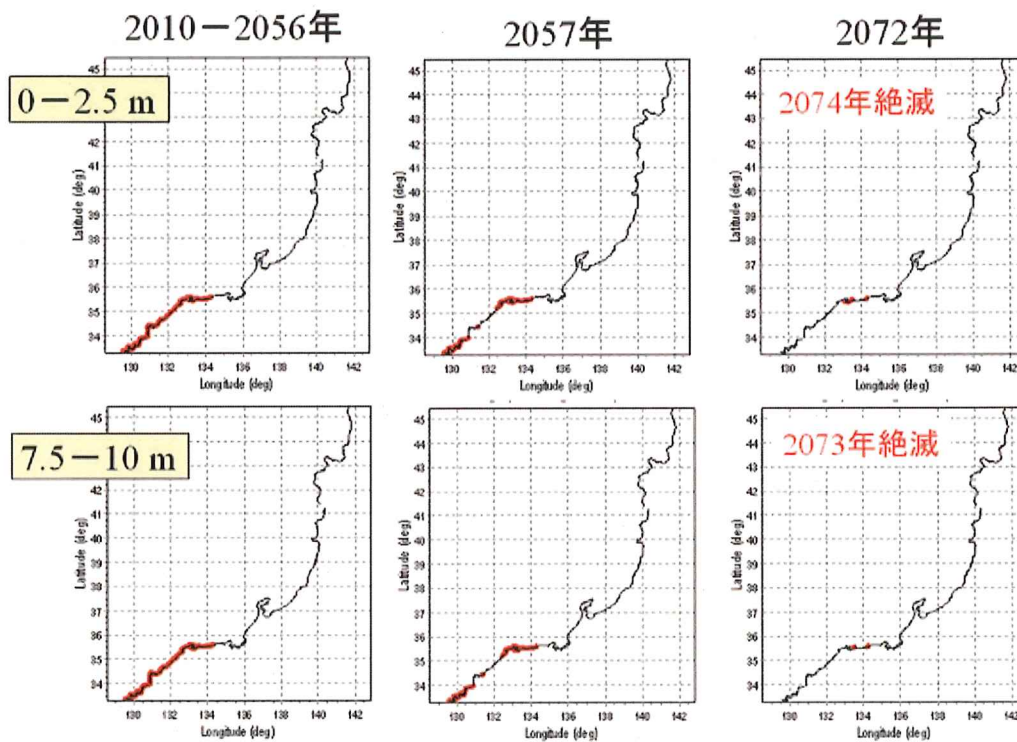


図 231-5 褐藻アラメの水深 0 - 2.5 m 層 (上) と 7.5 - 10 m 層 (下) における予測分布域

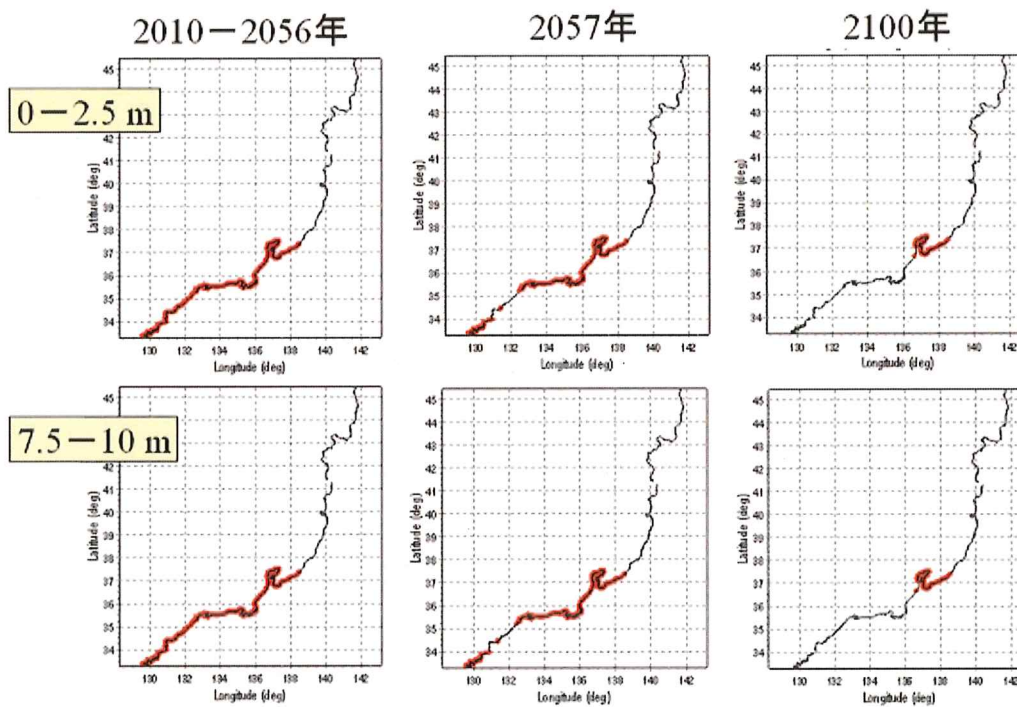


図 231-6 褐藻クロメの水深 0 - 2.5 m 層 (上) と 7.5 - 10 m 層 (下) における予測分布域

評価

佐渡島両津湾のアマモ場の葉上微細藻類群集を 2010 年 12 月～2011 年 5 月まで調べた結果、微細藻類群集は季節的に平面的な構造から立体的なものに変化していくことが明らかになった。12 月には基質にしっかりと単体で付着するタイプの *Cocconeis* 属が、3 月には基質にゆるく付着し、基

質面で活発に滑走する *Navicula* 属がそれぞれ優占し、5 月には粘液柄で細胞を支えて付着する *Rhoicoshenia* 属やジグザグの立体的な群集をつくる *Grammatophora* 属が優先した (図 231-8)。葉上微細藻類群集について貴重な知見が得られたが、温暖化の影響評価を行うための指標性の探索には至らなかった。

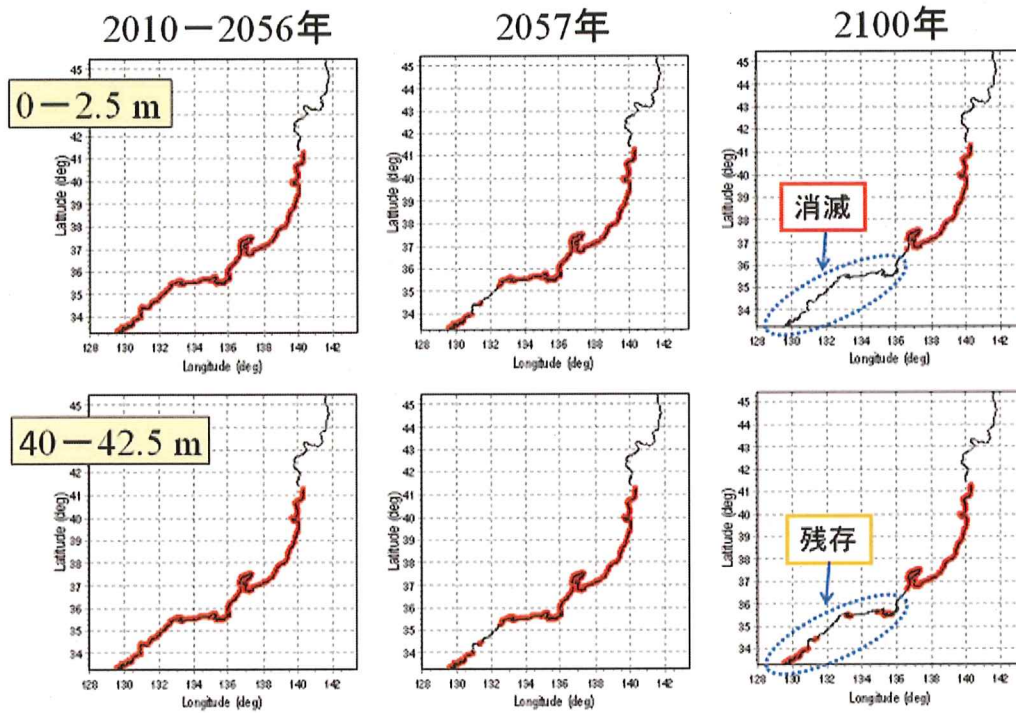


図 231-7 褐藻ツルアラメの 0 - 2.5 m 層 (上) と 40 - 42.5 m 層 (下) における予測分布域

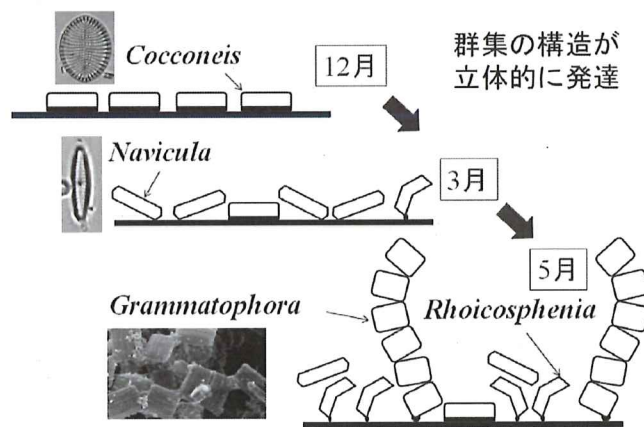


図 231-8 佐渡島両津湾のアマモ葉上における微細藻類群集の構造変化

工 考 察

(ア) 気候変動に起因する水温上昇により、大型藻類については、高緯度海域への分布域の移行が予想されている (伊藤・田所)⁴⁾。しかしながら、藻場を構成する褐藻コンブ目については、遊走子の分散範囲が狭く、有性生殖には高密度の遊走子由来の配偶体が必要であることから、有性生殖を伴った分布域の拡大速度は極めて小さいものと考えられる (Reed, D. et al.)⁵⁾。また、実際に、北半球の褐

藻コンブ目では、明確な分布域の高緯度海域への移行を示すデータは報告されていない (Merzouk and Johnson)⁶⁾。今回の予測結果は、それらの結果を支持するものとなった。日本沿岸における褐藻類の分布変動予測では、長距離の移動分散を前提としている結果も発表されていることから、今後、沿岸水温の観測を伴った藻場のモニタリングを行い、水温変動と植生変化との関係 (Tanaka et al.)⁷⁾ を検討しながら、変動予測の検証・修正を行う必要がある。

分布変動予測で、浅所のツルアラメ地域個体群が局所的絶滅に至るのに対し、深所のそれは生残する可能性が示されたが、このような深所の個体群は、Graham et al.⁸⁾が指摘する気候変動下でのレフュージアとして機能する可能性が高く、気候変動の影響を受けた“藻場生態系のレジリエンス”を理解する上で重要な研究対象である。

(イ) 佐渡島両津湾のアマモ葉上で観察される微細藻類の群集構造の季節変化は、光条件や摂食圧が制限要因とならない典型的な付着珪藻群集の遷移過程(河村 1994⁹⁾)を再現していると考えられる。このような良好な条件で形成された葉上微細藻類群集の解析を、日本海沿岸の複数の海域で温度勾配に沿って行うことにより、水温の指標性に関する知見が集積されるものと考えられる。

オ 今後の課題

(ア) 今後、沿岸水温の観測を伴った藻場の詳細なモニタリングを行い、水温の変化と植生の変化との詳細な関係を検討しながら、変動予測結果の検証・修正を行うべきと考える。分布変動予測では、浅所のツルアラメ地域個体群が局所的絶滅を起こすのに対し、深所のそれは生残する可能性が示された。このような深所の個体群は気候変動下でのレフュージアになる可能性が高く、“藻場生態系のレジリエンス”を理解し、評価する上で重要なことから、モニタリングサイトの設置等を検討すべきである。

(イ) 海流系に沿ったサンプリングを行い、葉上微細藻類群集の種組成や細胞のサイズに着目して水温との関係を検討し、水温に関する指標性についての知見を集積する必要がある。

カ 要約

(ア) 地球温暖化による水温上昇が日本海沿岸の藻場に及ぼす影響を調べたところ、褐藻コンブ目の藻場構成種について、今世紀中に日本海沿岸での生育が困難になる可能性が示された。コンブ目藻類は有性生殖による分散範囲が狭いため、分布の南限付近では、温暖化に伴う限界水温帯の高緯度方向への移行に対応して分布域を移行させることができず、生育が困難な高水温にさらされ、地域個体群としては絶滅する可能性がある。

(イ) 藻場の餌料供給機能として重要なアマモ葉上の微細藻類群集に及ぼす温暖化の影響評価を行うため、アマモ葉上に形成される微細藻類群集の種組成とその季節変化のパターンを明らかにした。得られた知見を基にさらに研究を進めることにより、水温に関する指標性が明らかになり、藻場の餌料供給機能に及ぼす温暖化の影響評価が可能になる。

キ 引用文献

- 1) K-1 Model Developers (2004) K-1 coupled GCM (MIROC) Description. Edited by Hasumi, H. & Emori S. K-1 Technical Report. Cent. For Clim. Syst. Res., Univ. of Tokyo. 1: 1-34.
- 2) Lee H.J. *et al.* (2003) Comparison of RIAMOM and MOM in modeling the East Sea/Japan sea circulation. *Ocean Polar Research* 25: 287-302.
- 3) 南雲保 (1995) 簡単で安全な珪藻被殻の洗浄法. *Diatom*. 10: 88.
- 4) 伊藤進一・田所和明 (2014) 温暖化による海洋生物への影響. *遺伝*. 68: 368-372.
- 5) Reed, D. *et al.* (1988) Variation in algal dispersal and recruitment: The importance of episodic events. *Ecol. Monogr.* 58: 321-325.
- 6) Merzouk, A. & Johnson, L.E. (2011) Kelp distribution in the northwest Atlantic Ocean under a changing climate. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 400: 90-98.
- 7) Tanaka, K. *et al.* (2012) Warming off southwestern Japan linked to distributional shifts of subtidal canopy-forming seaweeds. *Ecol. Evol.* 2: 2854-2865.
- 8) Graham M.H. *et al.* (2007) Deep-water kelp refugia as potential hotspots of tropical marine diversity and productivity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 104: 16576-16580.
- 9) 河村知彦 (1994) 海産付着珪藻の分類と生態. *付着生物研究*. 10: 7-25.

研究担当者(坂西芳彦*、川俣 茂、前川行幸、倉島 彰、田中次郎、鈴木秀和)

2 暖流域の藻場生態系への温暖化の影響評価と適応技術の開発

ア 研究目的

黒潮や対馬海流の影響が及ぶ九州沿岸・本州西部日本海側・四国太平洋側沿岸等の暖流域では、沿岸水温の上昇にともなって藻場の消失や構成種の変化が生じ、アワビやウニなどの藻場に依存する磯根資源に大きな影響が出始めている。本研究では、水温上昇がこれら暖流域における藻場の生産力や磯根資源に及ぼす影響を評価するとともに、地球温暖化に伴い変化する環境下において、磯根漁業を維持していくための適応策を開発することを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 既往の知見の解析

a 藻場の重要な構成要員であるホンダワラ科藻類に関する世界各地の既往知見をレビューし、水温環境とホンダワラ科藻類の生態特性の関係について解析する。

b 既往知見や既存のデータを収集・整理し、九州西岸における藻場のタイプと水温を把握する。

(イ) 現地調査

a 水温勾配が予想される豊後水道で地理的な藻場の構成種の変化と水温を明らかにする。

b 四季藻場^{*1}と春藻場^{*2}の形成域において、藻場と磯根動物のモニタリングを継続し、植食動物の藻場への影響と藻場の変動傾向を把握する。また、両海域の水温を比較するとともに、ビデオカメラやバイオテレメトリーを用いた藻食性魚類の出現や移動範囲に関する調査を実施する。

c 構成種の異なる海藻群落によるアラメの被食状況の比較、主要な植食魚であるアイゴを対象に藻場における胃内容物の把握と採食行動の観察を行う。

d 過去の藻場関連情報を抽出・整理して調査箇所を選定し、ライントランセクトによる藻場・磯根動物調査を秋（藻場衰退期）と春（藻場繁茂期）に実施する。

(ウ) 鍵種の生理・生態特性の解明と数値モデルの開発

a 代表的な四季藻場構成種であるクロメ（温帯性コンブ類）、ノコギリモク（温帯性ホンダワラ類）、1年生のアカモク（温帯性ホンダワラ類）、代

表的な春藻場構成種であるキレバモクとフタエモク（亜熱帯性ホンダワラ類）^{*3}の生産量を、現存量法、光合成法（葉状部の光合成量を測定し、光合成－光関係を基本に1日の日射量、海水の消散係数及び葉群の吸光係数などを加味して生産力を推定する）により求め、生産量の季節変化を明らかにする。

b アイゴを対象とした水槽実験から、ホンダワラ類とクロメを主な餌料として、アイゴの採食量と脱落量に対する嗜好性、水温及び群れの効果を調べる。

c 2006年～2009年のプロジェクト研究で開発した藻場の一次生産力モデルを改良し、他の温帯性種や亜熱帯性種に適用し、その妥当性を確認するとともに、アイゴによる食害過程のモデルへの導入を試みる。

(エ) 漁業への影響評価と適応策の提言

a 野外実験手法によって藻場変化がイセエビの着底量に及ぼす影響を評価する。

b 春藻場を造成対象とした試験を行う。

ウ 研究結果

(ア) 既往知見の解析

a 世界各地の既往知見のレビューから、生育地の年間最低水温で約15℃を境界として、それ以上になるとホンダワラ科海藻の藻体が小型化する傾向が認められ、藻場の生態的な特性が大きく変化することが示唆された。

b 長崎市地先に成立する藻場形成時期の異なる2タイプの多年生海藻藻場を対象に過去の知見の整理と比較を行った。四季を通じて藻場景観が持続する四季藻場にはノコギリモクなどの温帯性ホンダワラ類やクロメなどの温帯性コンブ類が優占し、春を中心とする短期のみ形成される春藻場にはマメタワラ等の温帯性ホンダワラ類とツクシモク等の亜熱帯性ホンダワラ類が混在した。また、両藻場に共通して出現する種は根部越年型（付着器のみで過ごす期間のある多年生種）に限られること、春藻場域は四季藻場域に比べて夏季の高水温期が長く、冬季の低水温期が短いことが明らかになった。九州西岸12地点の水温観測結果と成立している藻場のタイプとを比較したところ、基本的に北部から南部へと水温が上昇し、藻場も四季藻場から春藻場へと変化した。

(イ) 現地調査

a 瀬戸内海の広島湾と伊予灘、豊後水道の佐多岬半島南岸、宇和島市沿岸では温帯性多年生種のノコギリモク等多種のホンダワラ類が、同じく多年生の温帯性コンブ類であるクロメとともに藻場を形成していた。一方、宇和島市から若干南下した愛南町ではサンゴ類が優占し、ガラモ場は相対的に縮小して亜熱帯性ホンダワラ類のフタエモクが主要種であった。これらの調査地間には、特に冬季の最低水温に11～17℃までの勾配があり、15～17℃の間で藻場の植生は大きく変化していた(吉田ら)¹⁾。

b 長崎市の四季藻場形成域(野母崎地先)と春藻場形成域(三重地先)においてモニタリング調査を実施した。野母崎地先では2011年に魚類による食害が発生し、クロメが壊滅状態に陥り、翌年以後、確認されなくなった。2012年秋季にはノコギリモクが極端に短くなる現象が大規模に発生し、主な要因は魚類による食害であったと推定された。海底に置いたノコギリモクの撮影画像からは、ブダイ、アイゴ、ノトイズミが採食者であることが確認できたが、特にブダイは複数の地点で確認され、影響が大きかった可能性が示唆された。春藻場形成域では、調査期間を通して春藻場が形成された。また、春藻場に海藻を設置してビデオカメラによる撮影を行った結果、主要な植食魚はノトイズミとアイゴであり、ノトイズミの採食行動には水温との間に正の相関関係が認められ、水温15℃以下での採食行動は観察されなかった。4～5月に実施したノトイズミを対象としたバイオテレメトリー調査から、日中の群泳場所と夜間の摂餌場所の間を約2kmにわたって移動していると推定された。

c アイゴによる多年生の温帯性コンブ類であるアラメの被食状況をアラメと温帯性ホンダワラ類であるヤナギモクの混生群落とアラメ純群落で比較すると、混生群落では純群落に比較して軽微であった。また、アイゴが藻場で観察される5～11月の胃内容物は、大型褐藻類の割合が高かった(図232-1)(野田ら)²⁾。野外でのラインセンサス法による調査から、アイゴによる積極的な採餌が観察されたのは水温が20℃以上の6～10月であり、その間、藻場に出現するアイゴ成魚の密度は75.8個体/haと推定された。

d 藻場の変動傾向を把握するため、長崎県北

松浦郡小値賀町地先、平戸市度島地先、壱岐市郷ノ浦町地先を調査域に選定し、春と秋の藻場・磯根動物調査を実施し、過去の調査結果と比較した。小値賀地先：1988年には温帯性コンブ類であるアラメ・カジメの藻場が形成され、ホンダワラ類数種が混生していたが、2000～01年にはアラメ・カジメが減少し温帯性ホンダワラ類のノコギリモク主体の藻場へと変化した。2010年には大型褐藻類は消失し、小型海藻のみとなった(図232-2)。また、アワビ類の漁獲量が減少しており(図232-2)、アワビ類の生殖腺指数の低下が顕著であった(戸澤・渡邊)³⁾。度島地先：1992年度には、アラメ、クロメとノコギリモク、ヤツマタモクなど7～9種のホンダワラ類による藻場が形成されていた。2011～12年にはアラメ、クロメが消失し、ノコギリモク主体の藻場へ変化し、被度の低下や出現種数の減少がみられた。一方、日本のコンブ目海藻中で最も低緯度まで分布するアントクメや、亜熱帯性ホンダワラ類であるキレバモク、ツクシモクの分布が新たに確認された。現存量(湿重量)は、1地区では10kg/m²以上から2kg/m²以下に減少したが、他の2地区ではノコギリモクや小型海藻の増加により以前よりやや増加した。2012年6月のアワビ類とサザエの生息密度は、1992年度のそれぞれ40%と20%に低下した。壱岐郷ノ浦地先：1988～89年度にはアラメ、カジメ、クロメと5、6種のホンダワラ類による藻場が形成されていた。2012年には、藻場は維持されていたが、アラメ、カジメが減少してクロメが増加傾向にあり、ホンダワラ類では被度の低下と地区によっては出現種数の減少がみられた。1m²当たりの現存量(湿重量)には大差がなかった。底生生物の出現種数は、1988～89年度には6箇所の調査でそれぞれ4～12種であったが、2012年6月には8箇所の調査で2～7種と減少傾向がみられた。

(ウ) 鍵種の生理・生態特性の解明

a 1年生のアカモク、四季藻場構成種のノコギリモク及びクロメ、春藻場構成種のキレバモクの4種の海藻について光合成法により生産力(日純生産量)を求め、季節変化を推定した。4種とも生産力が最大を示した後に成熟が認められた。また、多年生のノコギリモクでは、成熟期間中でも茎から次年度に伸長する主枝が萌出を始めているため、生産力が増加した。

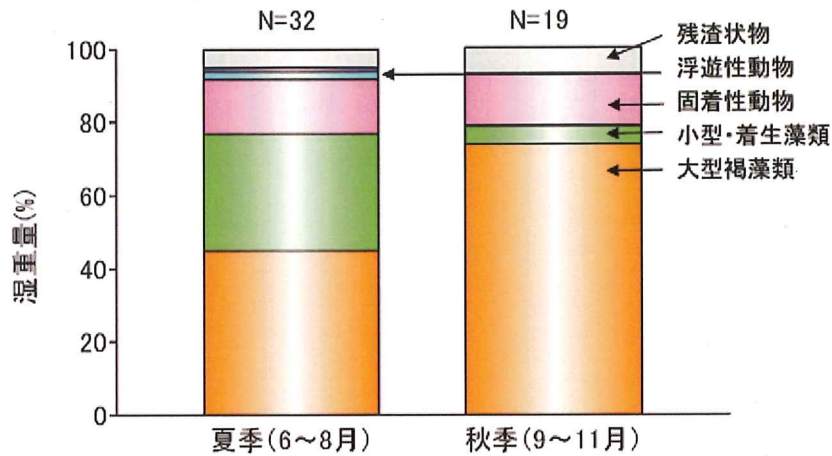


図 232-1 藻場におけるアイゴの胃内容物組成
大型褐藻（アラメ類、ホンダワラ類）の割合が高い。

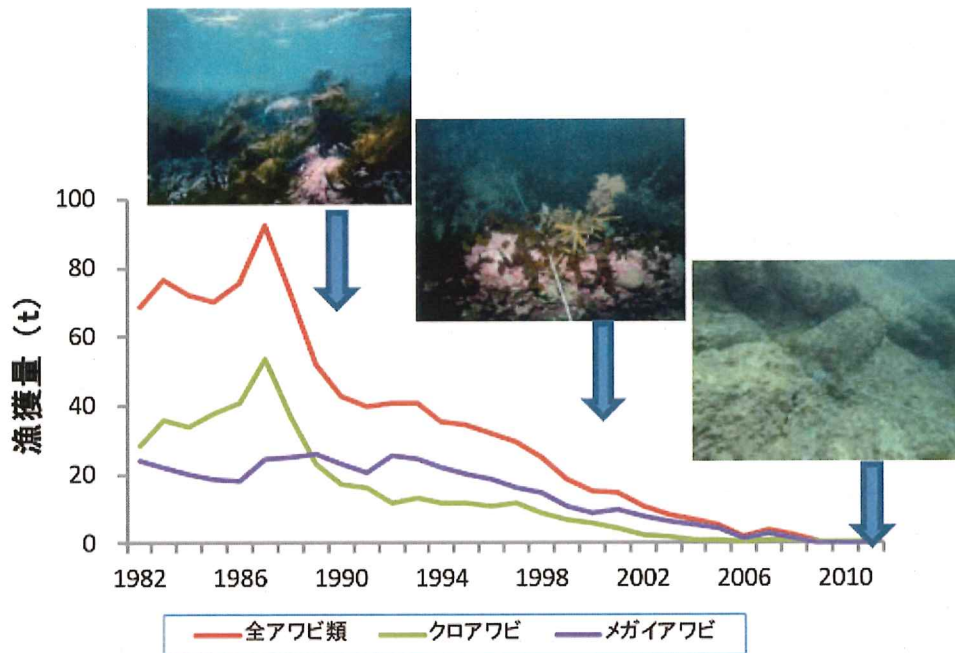


図 232-2 小値賀町地先におけるアワビ漁獲量と藻場の状態の変化

1990年代の減少は乱獲の影響が大きいことが明らかにされている。2000年代の減少は藻場衰退の影響が大きいと考えられる。

春藻場構成種のフタエモク群落において、現存量法による年間生産量の推定を行った。冬～春季の群落形成期のみを試算にもかかわらず、フタエモクの年間生産量は 3.18 kgDW/m^2 と、四季藻場を構成するホンダワラ類とほぼ同等であった。また、夏～秋季の群落消失期にはフタエモクは全長 1 cm 未満の幼体で過ごし、冬季（1月以降）に主枝を形成して伸長を開始し、直立群落を形成した。採集した幼体を用いて、光合成法により夏～秋季（9～12月）の生産量推定を行った。その結果、純生産量は同時期の現存量のおよそ4倍であり、群落が見た目に消

失するにもかかわらず、比較的高い生産量を有することが明らかとなった（図 232-3）。

b 水槽内での水温及び収容尾数を変えてクロメ、ノコギリモク、ジョロモク（温帯性ホンダワラ類）に対するアイゴの採食量を実験した結果、いずれの海藻に対しても 20°C 以上で採餌が活発化し、水温 30°C でも活発な採餌行動を示した。嗜好性の高いジョロモクでは脱落量が少ないのに対し、嗜好性の低いクロメとノコギリモクでは採餌量を上回る脱落量が観察され、特に、収容尾数が多い場合に脱落量が多くなる傾向が見られた。

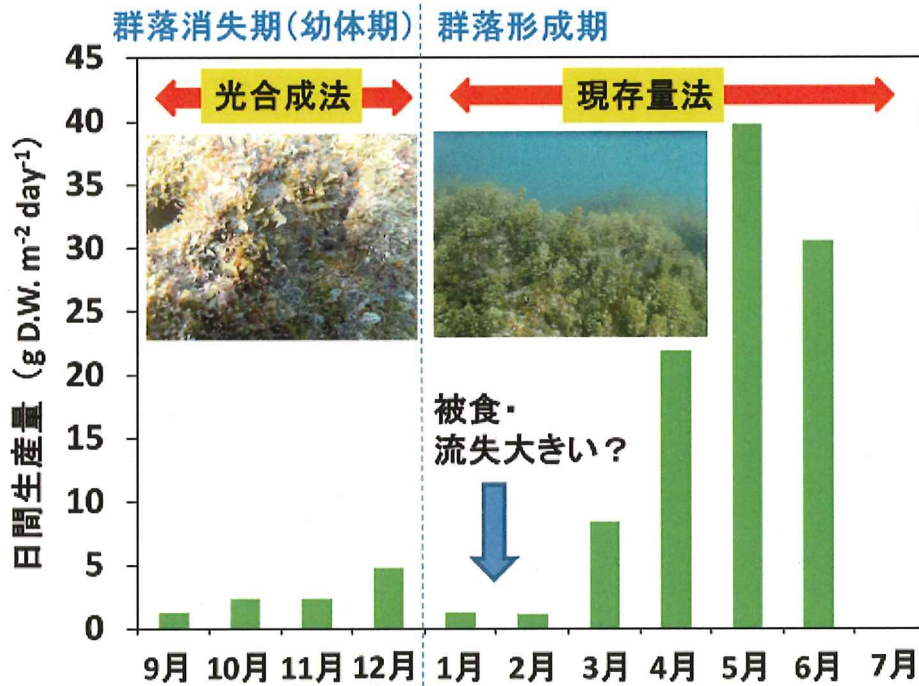


図 232-3 フタエモク群落の推定日間生産量の変化
 群落非形成期は光合成法で、群落形成期は現存量法で推定した。

c 第Ⅱ期温暖化プロ研で開発した数値モデルを改良し、ノコギリモクとクロメの季節変動や水温の変化に対する応答を組み込んだ生物モデルを作成した。また、本モデルによる推定値を瀬戸内海における既往の現場調査結果と比較し、本モデルが現場海域におけるノコギリモク及びクロメの現存量の季節変動を概ね再現可能であることを確認した。クロメの生産力モデルと水槽内での採餌量から1m²中に9個体以上のアイゴが生息する場合には生産力の高い浅所においても採餌量がクロメの生産量を上回り藻場が衰退することが明らかになった。さらに、数値モデルによって、ノコギリモク及びクロメの生長速度と水温及びアイゴによる摂食圧との関係について検討したところ、両種ともに高水温域で生長速度が急激に低下すること、アイゴによる摂食圧が加わると、藻場を維持可能な水温が低水温側に移行することなどが示唆された。

(エ) 漁業への影響評価と適応策の提言

a 複数年にわたる野外調査で得られた結果から、イセエビポストラバの加入期間は四季藻場と春藻場で異なり、後者の場合は磯焼け様の環境に転ずる9月以降の加入は生じないことが示された。この結果から、春藻場もイセエビの資源加入に一定の効果果たすものの、着底期間が短縮されることで、

その効果は四季藻場よりも劣るものと考えられた。

b 春藻場造成の技術的な検討を行うため、ムラサキウニの高密度分布が持続要因と考えられる磯焼け地において、ウニ類の除去と根部越年型ホンダワラ類及び小型海藻の母藻設置を2011年7月に実施した。11月以降、岩礁表面の色彩が周辺の非除去区と明瞭に異なり、春には小型海藻の被度が増加したが、母藻投入したホンダワラ類の藻体は密度が低く藻長も短い状態にあり、春藻場は形成されなかった。しかし、小型海藻の増加に伴い、ムラサキウニの生殖腺重量が増大したため、ムラサキウニ漁場として機能するようになった。

工 考 察

(ア) 九州西岸域における知見の整理と瀬戸内海から豊後水道域における現地調査から、これらの海域に存在する地理的な水温勾配に沿って多年生の温帯性コンブ類及びホンダワラ類を中心とする藻場から、亜熱帯性ホンダワラ類が存在する藻場へと変化することが認められた。このことから地球温暖化による水温の上昇に伴い温帯性種からなる藻場から亜熱帯性ホンダワラ類を含む藻場へと変化すると予測された。長崎市で見られた、周年藻場が存在する四季藻場と春から初夏にかけてのみ藻場が形成される

春藻場について、構成する海藻種と水温環境の比較から、春藻場の方がその生育地における水温が高く、植食魚の採食圧にさらされやすい場所に成立していることが明らかになった。一方で、四季藻場が形成されていた野母崎では調査期間中に温帯性コンブ類であるクロメ及び温帯性ホンダワラ類であるノコギリモクが消失し、小型海藻とアントクメが優占する状態へと変化した。長崎県の2地点でも藻場の変化が把握され、温暖化による影響が顕在化していることが示された。

長崎県沿岸の調査結果から、四季藻場が衰退し小型海藻が優占する海域ではアワビ類の漁獲量が極端に減少し、生殖腺の発達も悪化していることが示された。また、藻場の衰退はイセエビの着底量を減少させ、漁獲量の減少をもたらすと推測された。これらのことから、温暖化による藻場の衰退は磯根漁業に大きな影響を与えると考えられる。

(イ) 四季藻場が衰退し、春藻場しか形成できなくなる要因の一つとして植食魚の影響が考えられた。主要な植食魚の一つであるアイゴについて、現場での潜水観察と水槽実験から、その採食は水温20℃を超えると活発になり、30℃でも維持され、さらに群れになることで嗜好性の低いクロメ、ノコギリモクでは採食量よりも脱落量が増大することが明らかになった。このため、水温の上昇はアイゴによる海藻への食害を増大させ、群れを形成するような場合にはさらに影響が大きくなることが推定された。一方、ノトイズズミでは15℃以上で採食活動が観察され、バイオテレメトリー調査から2km以上に及ぶ日周活動が明らかにされたことから、藻場に与える影響はアイゴよりも長期かつ広範囲に及ぶものと考えられる。

(ウ) 海藻の生産力の測定結果より、四季藻場のように多様な種で構成された藻場が存在する海域では、1年を通じて一次生産力が安定的に維持されていることが明らかになった。しかし、これまで報告されているように秋季に魚類などによる顕著な食害が起こると、多年生のノコギリモクやクロメなどの生産力が激減しその後繁茂できないこと、フタエモクやキレバモクは秋季に食害に遭いにくい微小なサイズで過ごすため生残でき、毎年春に繁茂できることが推察された。また、春藻場において見た目には群落が消失する夏～秋季においても、比較的高い一

次生産量を示すこと、またその一次生産はほとんど被食等で活用されていることが示唆され、同時期においても春藻場が一定の生態系機能を有していることが明らかになった。

クロメとノコギリモクを生産力モデルにアイゴによる摂食圧を加えると、藻場を維持できる水温が低水温側に移行することが示唆された。藻食性魚類の影響が顕在化した海域では過去に藻場が維持できた水温であっても藻場が衰退する危険がある。

(エ) 春藻場を構成するホンダワラ類は温帯性、亜熱帯性ともに根部越年型であり、植食魚の採食圧に対する耐性が強いと考えられる。長崎市におけるモニタリング調査では調査期間中、植食魚の採食が確認されているにも関わらず、安定して春藻場が形成され、植食魚の影響が大きく四季藻場を形成できない海域であっても藻場が形成できる可能性がある⁴⁾。磯焼け域における春藻場造成の試みはホンダワラ類の藻長が短く密度も低い状態に留まった。また、野母崎のモニタリングと小値賀町における調査においても、四季藻場構成種であるアラメ、クロメ、ノコギリモクが消失した後、春藻場ではなく小型海藻が優占した。したがって、春藻場が形成される海域と小型海藻になる海域に何らかの環境条件の違いがあるものと考えられるが現状では不明である。

ウニ除去により形成された小型海藻の海域ではムラサキウニの身入りが改善し、漁場として利用されるようになった。今後、小型海藻のみの海域でも可能な漁業の形態について検討していく必要がある。

オ 今後の課題

(ア) 本課題の結果から、西日本沿岸域では水温上昇にともなって藻場の生態的特性が大きく変化していることが明らかになった。今後もモニタリングを継続して実施するとともに、藻場の変化と水温上昇との関連及びその機構を解明し、今後の温暖化進行にともなう沿岸生態系の変化を予測可能とする技術を開発する必要がある。

(イ) 本課題の調査期間中に野母崎においては四季藻場を構成するクロメとノコギリモクが消失した。このうちノコギリモクが大きく衰退した2012年の夏季は高水温ではなく、台風あるいは植食魚の影響もあったと考えられるが、衰退に至ったプロセ

スは不明である。また、小値賀町や野母崎では四季藻場衰退後、春藻場に移行していないことから、春藻場が形成されるのに必要な何らかの環境条件が欠けていると考えられる。植食魚の影響のある海域でも藻場造成が可能であると期待される春藻場ではあるが、藻場形成に必要な環境条件を明らかにすることが今後の春藻場造成の推進のために必要である。

(ウ) 本課題の最終的な目的は地球温暖化に伴い変化する環境下において、磯根漁業を維持していくための適応策を開発することであったが、調査域の藻場の状況が著しく変化したこともあり、十分な検討は行えなかった。その中で、春藻場造成の試みにおいて、春藻場は形成されなかったものの小型海藻が繁茂するようになり、ムラサキウニの漁場として利用されるようになったことは一つの成果といえる。今後、春藻場や小型海藻が磯根資源に対して有する機能を明らかにし、漁場としての可能性と限界を明らかにする必要がある。

カ 要 約

(ア) 豊後水道及び九州西岸の藻場は基本的に北から南に水温が上昇し、温帯性のコンブ類とホンダワラ類から構成される藻場から亜熱帯性ホンダワラ類を含む藻場に変化した。この2タイプの藻場は季節変化が異なっており、前者は周年藻場が維持されるが、後者は多年生種から構成されるにもかかわらず夏から冬は磯焼け様の景観となった。また、藻場が消失し小型海藻のみとなった海域では、アワビ類の漁獲量が減少し、成熟状態も悪化した。

(イ) 代表的な5種の藻場構成種について生産力の周年変化を明らかにし、生産力モデルを作成した。主要な植食魚であるアイゴの水温による採食量の変化、現場での密度から、植食魚の存在は、クロメとノコギリモクの藻場が維持可能な水温を低水温側に移行させると推定された。

(ウ) ウニ除去により小型海藻が繁茂した海域はムラサキウニ漁場として利用されるようになった。

キ 引用文献

- 1) 吉田吾郎・寺脇利信・山下亜純・新井章吾・樽谷賢治 (2011) 瀬戸内海から豊後水道に見るガラモ場の変化と水温勾配の関係. 海洋と生物. 33 : 337-343.

- 2) 野田幹雄・大原啓史・浦川賢二・村瀬昇・山元憲一 (2011) 響灘蓋井島のガラモ場に出現したアイゴ成魚の餌利用 - 大型褐藻類の採餌との関連 -. 日本水産学会誌. 77 : 1008-1019.
- 3) 戸澤隆・渡邊庄一 (2012) 長崎県小値賀町におけるアワビ資源の減少について. 日本水産学会誌. 78 : 1202-1204.
- 4) 吉村拓 (2011) 「春藻場」の造成と今後の課題について. 豊かな海づくり水産開発ながさき. 108 : 11-15.

研究担当者 (清本節夫*、樽谷賢治、吉田吾郎、吉村 拓、八谷光介、伏屋玲子、種子田雄、村瀬 昇、野田幹雄、塚原淳一郎、西村大介、桐山隆哉、戸澤 隆)

*1: 四季藻場とは、季節的に多寡があるものの周年に亘り維持される藻場のことであり、温帯性のコンブ類、ホンダワラ類から構成される。

*2: 春藻場とは、多年生のホンダワラ類から構成されるにも関わらず、藻場の景観を示すのは春から初夏までで、それ以外は磯焼け状の景観を示す藻場のことであり、亜熱帯性ホンダワラ類と温帯性ホンダワラ類の一部から構成される。

*3: 亜熱帯性ホンダワラ類とは本来の分布域が亜熱帯・熱帯海域にある種で、分類学的には多くが *Sargassum* 亜属に属する。

3 高温化の魚類増養殖業に与える影響を低減化する対処技術の開発

ア 研究目的

温暖化の進行に伴う養殖場の高水温化は養殖魚の成長不良、飼料効率の低下などによる生産性の低下の原因になるとともに、高温ストレスは代謝異常や疾病による斃死を招く可能性がある。夏場の一過性の高水温は現在でもすでに発生しており、現場への適応可能な高水温対策技術の開発は急務である。養殖魚への高水温対策としては様々な手法が考えられるが、極力現場への労力・経済的負担がかからない形で開発・普及を進めることが望ましい。この課題

では飼料作成など養殖産業の基幹部門への適応可能な技術開発を目的に、高温下での魚類の生理特性を解明し、その知見に立脚した飼料組成や飼養技術について検討した。

イ 研究方法

(ア) 冷水性魚類ニジマスにおける高水温化の影響評価

代表的な冷水性淡水養殖魚であるニジマス幼魚を用いて、高水温時の魚体の生理変化や成長指標への影響を解析した。ニジマスは市販飼料を給餌し、10、14、18及び22℃にて5週間飼育し、成長指標への影響を解析した。また Differential Display法 (DD法) により肝臓での遺伝子発現の変動を解析し、水温の魚体生理に及ぼす影響を調べた (Oku et al.)¹⁾。

(イ) 海産魚ブリにおける高温化の影響評価と栄養学的特性

主要な海産養殖魚であるブリ幼魚を用い、7-8月の三重県沿岸の自然水 (20 - 27℃) 及び高水温 (30℃) で4週間飼育し、成長、体成分及び消化吸収への高水温化の影響を調べた。また、魚粉・魚油の配合バランスを変えた2種類の飼料 (対照: 粗タンパク (CP) 45% 及び粗脂肪 (CF) 12%, 高魚粉: CP51% 及び CF7%) を作成し、適水温 25℃ 及び高水温 30℃ にて4週間飼育し、飼料配合バランスと飼育成績の関係を検討した。

(ウ) 飼料へのアスコルビン酸添加による高温ストレス軽減効果

夏季の水温上昇に備えた事前対策として、ストレス軽減作用が報告されているアスコルビン酸 (AsA) について、マダイを用いて高温ストレス軽減効果を検討した。マダイ幼魚に10日間、3種のAsA含量の異なる飼料 (175、1750及び17500 ppm) を事前給餌し、体内へのAsA蓄積を誘導した。その後、昇温処理を実施し、23日間の成長やストレス指標への影響を検討した。昇温期間中はそれぞれ事前給餌と同じものを継続給餌し、給餌量は魚体重の3%以下の制限給餌とした。

(エ) 内分泌特性を利用した飼養技術改良の試み
高水温による飼料効率低下対策への予備検討として、水温、給餌リズム及び内分泌の関係について調べた。内分泌への影響評価として覚醒や行動の活性

化を司る視床下部ホルモンであるオレキシン (桜井)²⁾ を解析対象とし、ブリを用いて飼育条件による行動抑制、すなわちエネルギー消費抑制の可能性について検討した。まず、はじめに水温、日周リズムとオレキシンの関係を明らかにするため、適水温 (23℃) または高水温 (30℃) において10日間1日1回朝10:00給餌にて馴致したのち、24時間のタイムコース試験を行い、給餌後の時間経過と視床下部オレキシン濃度の関係を調べた。次に給餌とオレキシンとの関係を明らかにするため、7月の三重県沿岸の自然水 (20 - 22℃) で10日間1日1回朝10:00給餌の条件で同様に馴致した後、朝10:00絶食・夕方18:00給餌を行い、日周リズムを崩すことにより給餌リズムのオレキシン濃度に及ぼす影響を調べた。

ウ 研究結果

(ア) 水温ごとの成長特性を比較すると、ニジマス幼魚は飼育水温が14-18℃で成長は良く、至適水温を超える22℃では飼料効率、摂餌率とも低下し、成長は遅滞した (図233-1)。また、DD法による遺伝子発現解析では、高水温では免疫応答 (complement C1q) やタンパク合成 (ribosomal protein) の遺伝子発現が上昇し、組織損傷の発生やタンパク代謝回転の亢進などが予想された (表233-1)。また、栄養代謝関連の遺伝子 (betain homocysteine methyltransferase、triosephosphate isomerase、glucose-6-phosphatase) はいずれも発現低下が見られ、高温下では栄養代謝機能が抑制されていると考えられた (表233-1)。

(イ) ブリ幼魚について、自然水 (20 - 27℃) と高水温 (30℃) での4週間の飼育成績を比較すると、高水温では飼料効率は低下し、成長遅滞が見られたが、ニジマスの場合と異なり、摂餌率は増加した (図233-2)。また、高水温区では肝臓の肥大や脂質含量の増加が認められ、検鏡上は脂肪肝様の組織像が観察された (図233-3)。飼料栄養素の消化吸収率を測定すると、飼料脂質の消化吸収には影響はなかったが、飼料タンパク質の消化吸収率は高水温化により低下する傾向が見られ、栄養素の利用性に不均衡が生じていると考えられた (図233-4)。魚粉・魚油の配合バランスを変えた飼料を用いて高水温の影響を調べたところ、高魚粉飼料 (高タンパク低脂

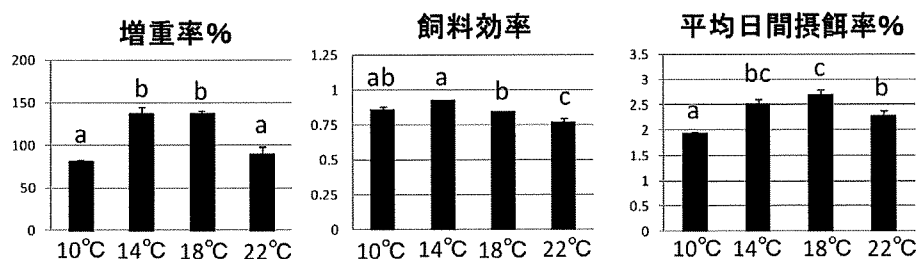


図 233-1 ニジマス 5 週間飼育成績 (増重率、飼料効率及び平均日間摂餌率) と飼育水温の関係 (Oku et al.¹⁾ より改変)

表 233-1 ニジマス肝臓において高水温化に伴い発現変動が確認された遺伝子 (Oku et al.¹⁾ より改変)

遺伝子	主な機能	予想される生理応答
(水温上昇に伴い発現が有意に上昇)		
・complementC1q	免疫応答	組織損傷の発生・修復
・60S ribosomal protein L8	タンパク合成	体タンパク質代謝回転
・ribosomal protein L9	タンパク合成	(turnover)の亢進
(水温上昇に伴い発現が有意に低下)		
・betain homocystein methyltransferase	アミノ酸合成	栄養代謝機能の抑制
・triosephosphate isomerase	解糖系	
・glucose-6-phosphatase	糖新生	

肪)では、対照飼料(通常型)と比較して、成長には改善が見られなかったものの、肝肥大や肝臓への脂肪蓄積は改善された(図 233-5)。こうしたことから、高水温による生理異常を防除するためには飼料配合バランスを現行のものから各栄養素の利用性に即して見直す必要があることが示唆された。

(ウ) 成長から見たマダイの至適水温は 29°C までとされているが(安藤・奥)³⁾、AsA 蓄積を誘導したマダイ幼魚に適水温を上回る昇温処理(図 233-6)を行い、成長や生理状態への影響を調べた。飼料 AsA 含量は生残率には影響しなかったが、高濃度(17500 ppm)区では高水温により増重率・飼料効率が低下した(図 233-7)。中程度(1750 ppm)の添加では増重率・飼料効率とも高水温でも良好に維持されたほか、血液性状では GOT、GPT 活性(いずれも肝障害の指標)及びグルコース濃度(ストレス指標)に改善傾向が見られ(図 233-8)、AsA は適切に使用すれば高温ストレス軽減に有効であると考えられた。

(エ) 23°C または 30°C で馴致したブリでは、視床下部オレキシン濃度の変動パターンに飼育温度に

よる明確な差は見られず、いずれも給餌(10:00)以降にオレキシン濃度が上昇した(図 233-9)。このことから、オレキシン濃度の上昇(自発行動の活性化)は水温の影響を受けにくく、また摂餌刺激あるいは給餌にあわせた日周リズムによって引き起こされると考えられた。給餌時刻を馴致条件(10:00)から変更(18:00)し、日周リズムを崩してみると、オレキシンへの応答は見られなくなった(図 233-10)。追加検討は必要であるが、給餌条件など軽微な飼養技術の変更により、自発行動の抑制、すなわちエネルギー消費を抑制できる可能性が示された。

工 考 察

(ア) 高水温の影響評価

変温動物である魚類の生理状態は環境水温の影響を受ける。飼育水温が適水温を超えると様々な生理異常の発生が予想される。ニジマスを用いた試験では水温上昇に伴い、摂餌率の低下が見られたが、ブリではニジマスの場合と異なり、30°C において摂餌率は増加し、またニジマスでは見られなかった肝肥

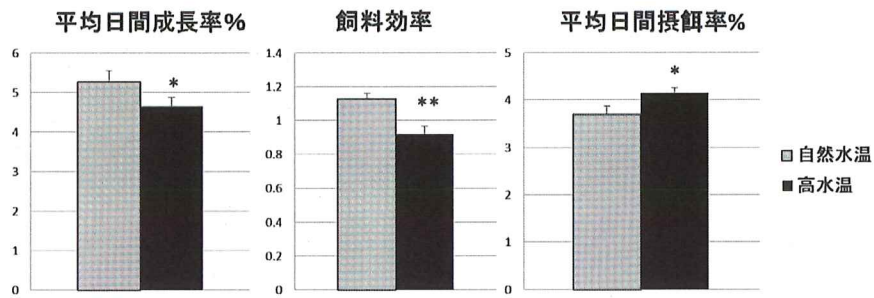


図 233-2 ブリ飼育水温の上昇に伴う成長指標（成長率、飼料効率及び平均日間摂餌率）への影響

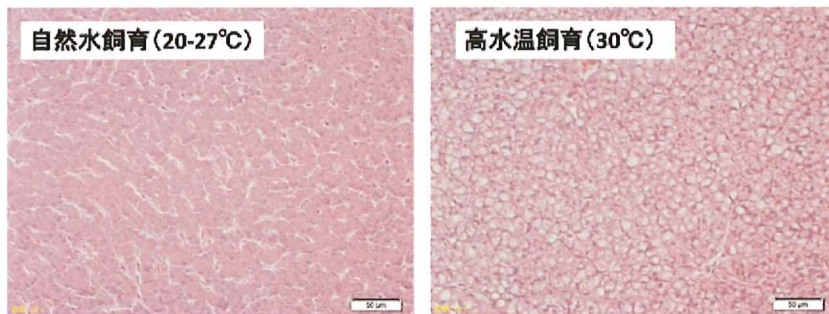


図 233-3 自然水温及び高水温飼育したブリの肝組織像（HE 染色）

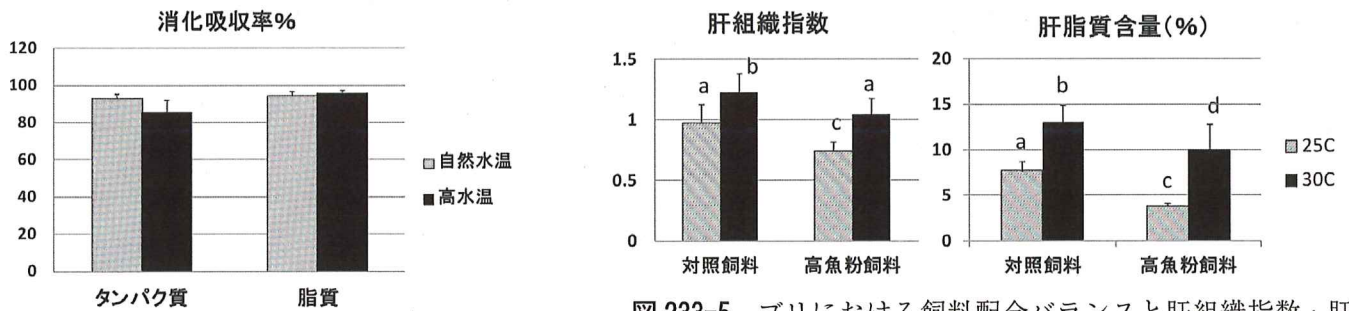


図 233-4 自然水温及び高水温飼育したブリにおける飼料タンパク質及び脂質の消化吸収率

図 233-5 ブリにおける飼料配合バランスと肝組織指数・肝脂質含量への高水温の影響

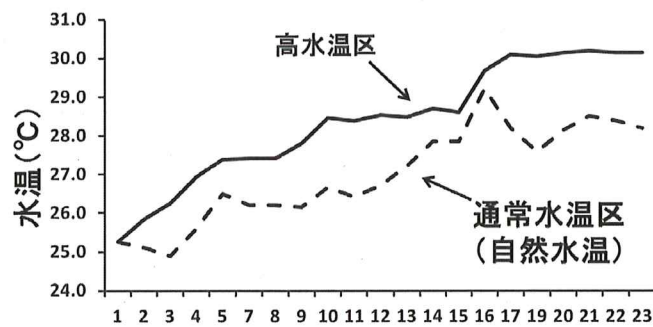


図 233-6 マダイ飼育期間中（23日間）の水温変動
自然水温は夏季の鹿児島県の沿岸水を使用し、加温することにより高水温区を設定した。

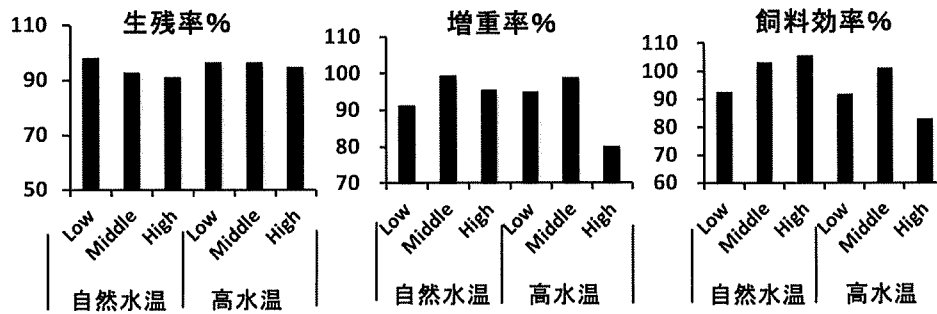


図 233-7 マダイ飼育期間中の生残率、増重率、飼料効率への飼料 AsA 添加の影響
AsA 添加量は Low (175 ppm)、Middle (1750 ppm)、High (17500 ppm) を示す。

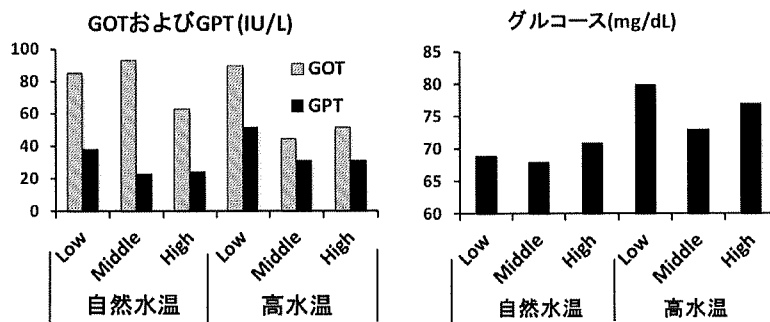


図 233-8 マダイ飼育試験終了時の血液成分 (GOT、GPT 及びグルコース) への飼料 AsA 添加の影響
AsA 添加量は Low (175 ppm)、Middle (1750 ppm)、High (17500 ppm) を示す。

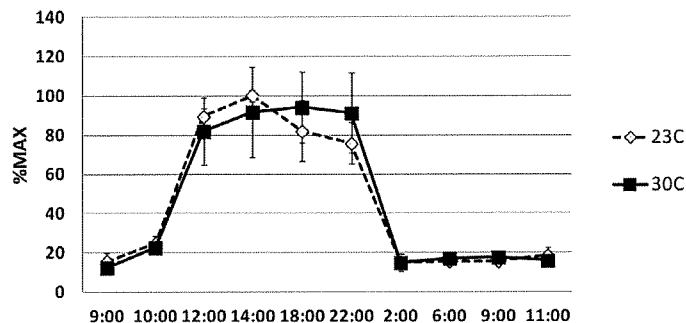


図 233-9 ブリ視床下部におけるオレキシン濃度の変動 1: 水温と日周リズム
破線は 23°C、実線は 30°C での飼育。矢印 (10:00) は給餌時刻を示す。

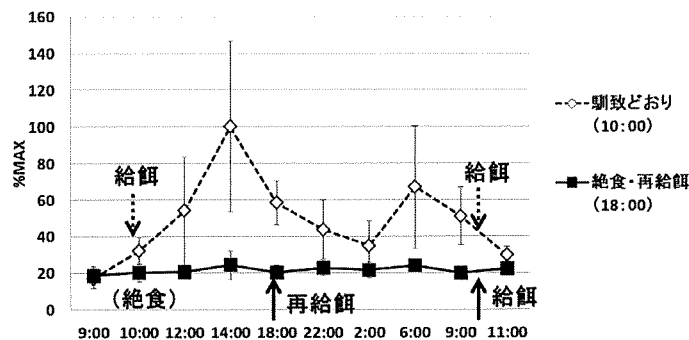


図 233-10 ブリ視床下部におけるオレキシン濃度の変動 2: 給餌リズム変更の影響
破線は馴致条件 (10:00 給餌)、実線は給餌時刻を変更 (18:00) し、日周リズムを崩したもの。矢印は給餌時刻を示す。

大が見られた。高水温への応答性は魚種や想定温度により異なると考えられ、養殖魚の高水温対策を考える上では対象種や養殖水面の特性も踏まえておく必要がある。

マダイを用いた AsA 試験では、高濃度 17500 ppm までの AsA の飼料添加の効果を検討した。この濃度は通常の市販飼料の十倍以上であるが、それでも適水温飼育では特に影響が見られなかった一方、適水温を上回る高水温下では成長や飼料効率の低下が見られた。AsA などの水溶性ビタミン類では本来過剰症は出にくいとされているが、高水温下では悪影響が顕在化しやすくなると考えられ、添加時には注意を要する。

(イ) 高水温対策

水温上昇に伴い、タンパク合成遺伝子発現の亢進（ニジマス）やタンパク質消化吸収の低下（ブリ）が見られ、またブリでは飼料配合バランスを高タンパク低脂質にすることにより高水温下で発生する肝肥大や脂肪蓄積は抑制された。これらのことから水温に依存して栄養素の利用性が変化することが考えられ、特にタンパク質の強化や利用改善について今後も検討していく必要がある。また、高水温化を想定した AsA の給餌試験では、1750 ppm の添加で血液性状は改善され、適切に使用すれば AsA は高温ストレス対策として有効であると考えられる。

また、予備的検討ではあるが、給餌条件の変更により、視床下部のオレキシン濃度の変動を抑制することができた。オレキシンは覚醒や行動の活性化を司るホルモンであり、その抑制は遊泳などの自発行動量、すなわち成長以外のエネルギー消費の節約につながる可能性がある。オレキシンと実際の行動量や飼料効率との関係など不明な点も多く、追加検討が必要であるが、内分泌動態も含めた今回の検討は今後、新しい視点から見た飼養技術向上に資するものと期待される。

オ 今後の課題

本研究では夏季の一過性の高水温期を想定し、成長遅滞や摂餌低下を起こす飼育条件（水温及び期間）を用いて試験を行った。本研究で設定した水温を上回る条件下では、摂餌停止、平衡性喪失、死亡、と症状が悪化していくものと予想され、過度の水温上昇の場合を想定した対策についても別途検討

が必要である。

養殖魚の生理状態は飼料履歴の影響を受ける。本研究ではいずれの飼育試験においても現在一般に使われている魚粉主体の飼料をもとに魚類生理への影響を検討した。近年の輸入魚粉の価格高騰や供給不安から植物性などへの飼料原料の切り替えが急がれているが、今後、温暖化の進行に伴い飼料原料魚の資源状況が悪化すれば、さらに養魚飼料の低魚粉化を余儀なくされることも予想される。そうしたことも踏まえ、将来的には低魚粉飼料開発とあわせて、低魚粉飼料飼育を前提とした魚類生理の既往知見の再検討や高水温対策技術の開発が必要となる。

力 要 約

(ア) ニジマスにおいては高水温飼育（22℃）により、成長遅滞、飼料効率及び摂餌率の低下が見られた。また、DD 法による肝臓における遺伝子発現変動の解析から、高水温化による生理変動として組織損傷の発生、タンパク合成の亢進、栄養代謝機能の抑制、などが予想された。

(イ) ブリにおいては高水温飼育（30℃）により、成長・飼料効率は低下したが、ニジマスとは異なり摂餌率は増加し、またニジマスでは見られなかった肝肥大や脂肪肝様の組織変性が見られた。高水温への応答性は魚種や想定水温のより異なると考えられる。また、高水温下では飼料タンパク質の消化吸収の低下が見られ、飼料配合バランスを高タンパク低脂質に変更すると、肝肥大などの生理異常は改善された。こうしたことから、高水温化による生理異常防除のためには栄養素の利用性に即した飼料配合の見直しが必要であることが示唆された。

(ウ) マダイ幼魚に 175, 1750, 17500 ppm のアスコルビン酸（AsA）含有飼料を給餌し、高温飼育を行うと、適温飼育と比べて 17500 ppm では成長・飼料効率の低下が見られたが、1750 ppm では高温で見られるストレス症状の改善が見られた。このことから、飼料 AsA は高濃度では水温上昇により悪影響が顕在化しやすいものの、適切な濃度で使用すれば高温ストレス軽減に有効であると考えられた。

(エ) ブリを用いて視床下部ホルモンであるオレキシン濃度における水温・日周リズムの影響を調べたところ、水温の影響は見られなかったが、給餌時刻または日周リズムに合わせた濃度上昇と日内変動

が観察された。給餌時刻を馴致条件から変更し日周リズムを崩してみるとオレキシン濃度の上昇は見られなくなった。オレキシンは覚醒や自発行動の活性化を司るホルモンであり、給餌条件によるオレキシン濃度上昇の抑制は飼養条件による自発行動の抑制、すなわちエネルギー消費節約の可能性を示していると考えられる。

キ 引用文献

- 1) Oku H., Tokuda M., Matsunari H., Fruita H., Murashita K., Yamamoto T. (2014) Characterization of differentially expressed genes in liver in response to the rearing temperature of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* and their heritable differences. *Fish Physiol. Biochem.* 40: 1757-1769.
- 2) 桜井武 (2003) 視床下部オレキシン神経の機能: エネルギーバランスに応じた適応行動の制御. 肥満の科学. 第 124 回日本医学会シンポジウム記録集. 53-59.
- 3) 安藤忠・奥宏海 (2009) マダイ養殖が高温化を克服するには. 水産総合研究センター叢書 地球温暖化とさかな. 成山堂書店. 東京. pp. 109-120.

研究担当者 (奥 宏海*, 安藤 忠, 山本剛史, 松成宏之, 古板博文, 村下幸司, 越塩俊介, 横山佐一郎, 天野勝文, 阿見彌典子, 中川 亨, 村上直人, 市川 卓, 白藤徳夫, 橋本 博, 松田圭史, 今泉 均, 増田賢嗣, 神保忠雄, 矢田 崇)

4 湖沼の漁業生産に対する影響評価と漁業生産安定化を目指した適応技術の開発

ア 研究目的

温暖化が湖沼の生態系に及ぼす直接的な影響として、湖沼水温の上昇による生物の季節的消長や生活史スケジュールの季節パターンの変化が挙げられる¹⁾。この変化は、個体群間の競争や捕食-被食関係を通して、群集の動態に大きな影響を与えると予想される²⁾。さらに間接的な影響として、水温上昇による成層期間の延長あるいは成層の強化が、湖底の貧酸素化・無酸素化を招くことで生物の生存に重

大な影響を及ぼす可能性がある³⁾。そこで本研究では、温暖化に伴う気温上昇が湖沼水温へ及ぼす影響を把握するため、気温・気象のデータから湖沼水温予測経験式を作成するとともに、湖沼水温と気温・気象との因果関係を明らかにすることとした。そして、諏訪湖のワカサギと琵琶湖のイサザを対象に、温暖化が湖沼漁業対象種へ与える影響を調査し、温暖化に対応するための適応策の開発を行った。

イ 研究方法

(ア) 湖沼の温暖化影響評価と影響評価モデル

a 水温予測経験式の作成

水温予測経験式を作成するため、日本各地の 74 湖沼を対象に近隣のアメダス観測地点で得られた日別気象データ (降雨量、最大風速及び日照時間) を収集し、気温・気象データの月平均と湖沼水温との関係を重回帰分析によって解析した。

b 春期湖沼水温と気象及び気温との関係

イサザ及びワカサギの初期減耗に大きく影響すると予想された春期湖沼水温について、諏訪湖と琵琶湖を対象にアメダス観測地点で得られた気温・気象データを用いて、湖沼水温との関係を共分散構造分析により解析した。

(イ) 湖沼漁業生産への影響

a 水温上昇がワカサギ仔魚へ与える影響

温暖化により湖沼水温が上昇すると、ワカサギ仔魚のふ化時期と餌プランクトンの発生時期にズレ (ミスマッチ) が生じ、ワカサギ仔魚の生残率が低下すると予想された。この影響を評価するため、ワカサギ仔魚を用いて水温と飢餓耐性日数との関係を調べた。次に飢餓状態から餌を食べ始めても生き残ることのできなくなる日数 (回復不可能な飢餓日数; PNR) と水温との関係を調査した。

b ワカサギの産卵期への影響評価

湖沼水温が上昇するとワカサギの産卵時期が晩期化し、ワカサギ仔魚の飢餓耐性の低下やふ化時期の短期化を招くと予想された。そこで湖沼水温と魚体重がワカサギの産卵時期へ及ぼす影響を把握するため、従属変数を産卵時期、独立変数を湖水温と魚体重とした重回帰分析を行った。

c ワカサギ資源への影響評価

諏訪湖に生息するワカサギの生態学的情報⁴⁾と野外実験で得られた水温上昇に伴う仔魚の死亡率の

データ⁵⁾を用いて、個体ベースモデルによる個体群存続可能性分析を行い、水温上昇に伴うワカサギ個体群の動態をシミュレーションした。なおシナリオには4年に1度の水温上昇を仮定した。

d イサザの貧酸素耐性

湖沼水温の上昇に伴う湖底の貧酸素化によって、イサザ資源が減少することが危惧されている⁵⁾。これを検証するため、水槽内で異なる酸素濃度に対するイサザの逃避行動を調査した。

e 湖底の貧酸素化によるイサザ死亡個体数の推定

湖底の貧酸素化がイサザ資源へ及ぼす影響を評価するため、琵琶湖で曳き網調査を行ってイサザ死亡個体の分布と底層DOとの関係を調べた。さらにこの採集結果と実験池での採集効率実験結果を用いて、面積密度法により琵琶湖90m水域のイサザ死亡個体数を推定した。

(ウ) 温暖化適応技術の開発

a ワカサギの適期放流技術の開発

温暖化により湖沼水温が上昇すると、ワカサギ仔魚のふ化時期と餌プランクトンの発生時期にズレ(ミスマッチ)が生じ、ワカサギ仔魚の生残率が低下すると予想された。この適応策として、ワカサギの適期放流技術の開発を行うため、漁協から放流された卵と湖内で採集した稚魚のふ化日を推定し、それぞれのふ化期間と個体数を比較することで、生残の良いまたは悪いふ化期間の特定を行った。なお、ワカサギ稚魚のふ化日推定には耳石の日輪解析を行った。

b ワカサギの簡易給餌放流技術開発

湖沼水温が上昇するとワカサギ仔魚の飢餓耐性の低下することが予想された。この適応策として、ワカサギの簡易給餌放流技術の開発を行うため、淡水と安価な農業用肥料を用いた仔稚魚の飼育技術の開発に取り組んだ。具体的には湖水、鶏糞、化学肥料及び両者を組み合わせたものを使用して水槽内にプランクトンを発生させ、ワカサギ仔稚魚の餌料とする実験を行った。

c イサザの人工産卵床造成技術の開発

湖底の貧酸素化に伴うイサザ資源の減少を緩和するため、貧酸素化の生じにくい北湖の南湖盆に新たなイサザの産卵場所を造成する技術開発に取り組んだ。本事業で開発した人工産卵基質を琵琶湖沿岸に

設置し、産卵状況を調べて人工産卵基質の効果を検証した。また、人工産卵基質の効果の持続性を確認するため、設置1年経過後の人工産卵基質40枚の残存及び移動状況を確認した。

ウ 研究結果

(ア) 湖沼の温暖化影響評価と影響評価モデル

a 水温予測経験式の作成

アメダス850点と気象観測所150点から得られた気象データと74湖沼で得られた湖沼水温データから水温予測経験式を作成した結果、予測式の平均決定係数は平均0.93となった(図234-1)。

b 春期湖沼水温と気象及び気温との関係

春期の湖水温は気象よりも気温の影響を強く受け、諏訪湖の水温は当月の気温、琵琶湖の水温は当月と前月の気温が水温に強く影響していた(図234-2)。

(イ) 湖沼漁業生産への影響

a 水温上昇がワカサギ仔魚へ与える影響

水温10度から22度までの飼育環境において、ワカサギ仔魚の飢餓耐性日数と水温との関係を調べた結果、飢餓耐性日数は水温の上昇とともに短縮することが明らかとなった(図234-3)。ワカサギ仔魚と餌料プランクトンの発生時期との適合・不適合に及ぼす水温の影響を明らかにするため、異なる水温環境下で五つの給餌条件(完全給餌(HF)、不完全給餌(HF-LF)、不完全給餌(LF-HF)、少量給餌(LF)及び無給餌(NF))における生残率と成長量を比較した。その結果、完全・不完全給餌条件では水温が高いほど生残率は低下した(図234-4)。

b ワカサギの産卵期への影響評価

産卵のために河川へまとまった遡上が認められた日は、直近の体重が重く、成長期間の水温が高いほど遅れる傾向が示された。また、遡上が最も多くなる日も直近の体重が重く、成長期間の水温が高いほど遅れる傾向があったが、産卵期直前の水温が高いと早まる傾向も示された。それらの要因で構成された重回帰式から求められた予測値は実測値の変動を比較的良く再現した(図234-5)。

c ワカサギ資源への影響評価

ワカサギのふ化から3旬後に該当する湖水温が4年に1度の頻度で4℃上昇するシナリオでワカサギ個体群が減少する傾向が認められた(図234-6)。

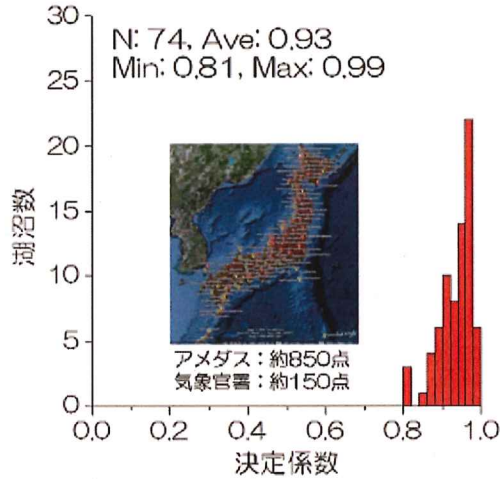


図 234-1 74 湖沼で得られた水温予測経験式の決定係数の分布

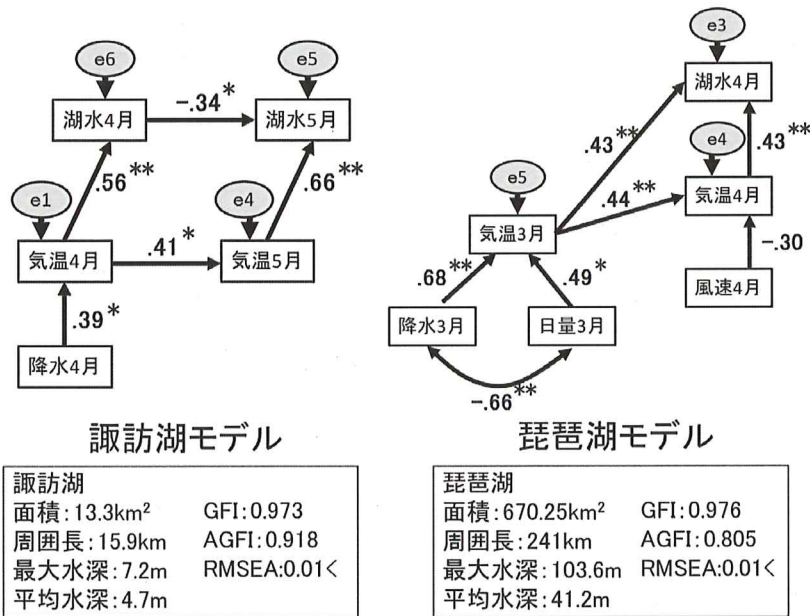


図 234-2 諏訪湖と琵琶湖の春期湖沼水温と気温及び気象との関係

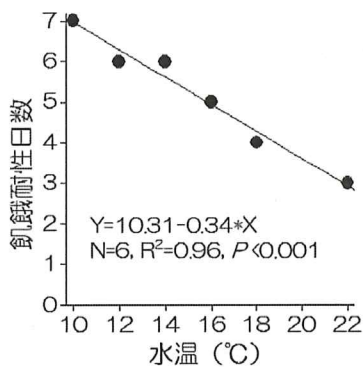


図 234-3 ワカサギ仔魚の回復不可能な飢餓日数と水温の関係

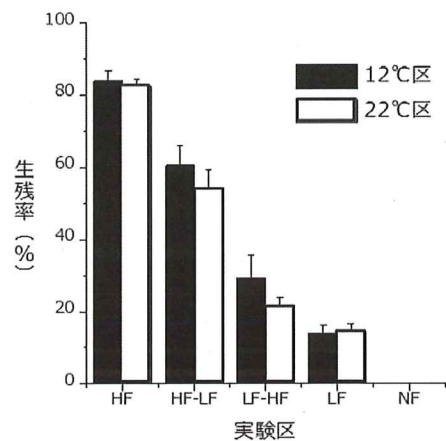


図 234-4 五つの給餌条件におけるワカサギ仔魚の生存率

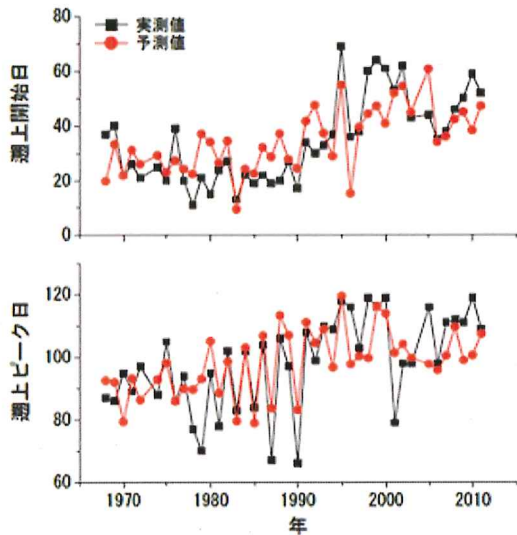


図 234-5 諏訪湖のワカサギの河川への遡上開始日と遡上ピーク時の重回帰予測結果と実測値の比較

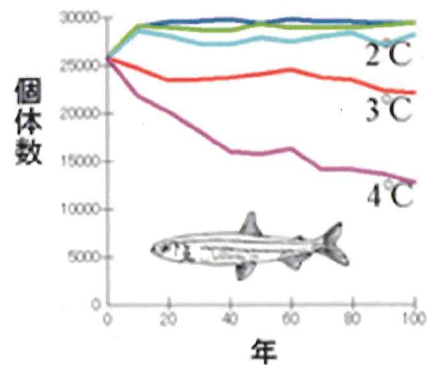


図 234-6 ワカサギを対象とした個体ベースモデルによる個体群存続可能性分析の結果

d イサザの貧酸素耐性

異なる酸素濃度に対するイサザの逃避率を測定した結果、酸素濃度 0.8 mg/L (Low) で $41.1 \pm 4.2\%$ 、1.8 mg/L (Medium) で $6.7 \pm 11.5\%$ 、3.0 mg/L (High) で $0.0 \pm 0.0\%$ であり、酸素濃度の差はイサザの逃避率に影響を与えた (図 234-7)。中でも酸素濃度 0.8 mg/L に対して、60% 程度の個体が逃避行動を示さず、その場で静止もしくは横転した。なお逃避時の行動は非常に緩慢であった。

e 湖底の貧酸素化によるイサザ死亡個体数の推定

琵琶湖野外調査の結果、イサザの死亡個体と生存個体の出現傾向は酸素濃度によって差があり、貧酸素水塊が発達する北湖北部において大量のイサザ死亡個体が採集された (図 234-8)。湖内の死亡個体数を推定した結果、最大で資源の 10% 程度が貧酸素水塊の発生により死亡したと推定された (表 234-1)。

(ウ) 温暖化適応技術の開発

a ワカサギの適期放流技術の開発

本調査の結果から、3月下旬にふ化したワカサギ仔魚は湖内での生残が悪く、4月下旬にふ化した仔魚は生残が良いことが明らかとなった。また、ワカサギ仔稚魚の初期餌料であるツボワムシの発生期間についても、仔魚の生残の良いふ化期間と同調する傾向が見られた (図 234-9)。

b ワカサギの簡易給餌放流技術の開発

鶏糞と湖水を使用して、プランクトンを培養した結果、鶏糞の施肥によりツボワムシが多量に発生し、これを餌料として使用した場合、ワカサギの生残率が向上した。また従来使用されてきたシオミズツボワムシと給餌効果を比べても同等の高生残率が得られた (図 234-10)。

c イサザの人工産卵床造成技術の開発

琵琶湖にて人工産卵床造成の実証実験を行った結果、人工産卵基質の利用率は産卵最盛期で自然石の4倍以上となり、人工産卵床造成の効果が明らかとなった (図 234-11、234-12)。さらに長期モニタリングにより人工産卵床の機能の持続性を確認したところ、波浪により基質は若干移動するものの、複数年にわたり産卵床としての機能を有することが確認された。

工 考 察

(ア) 湖沼の温暖化影響評価と影響評価モデル

a 水温予測経験式の作成

気温・気象データで湖沼水温を十分に説明できたことから、温暖化による気温・気象の変化が予想可能となれば、湖沼水温の予測も可能になると考えられた。

b 春期湖沼水温と気象及び気温との関係

本調査の結果から、春期湖沼水温は気温の影響を受けやすく、特に諏訪湖のように水深の浅い湖では気温の変化が短期間のうちに湖沼水温として反映さ

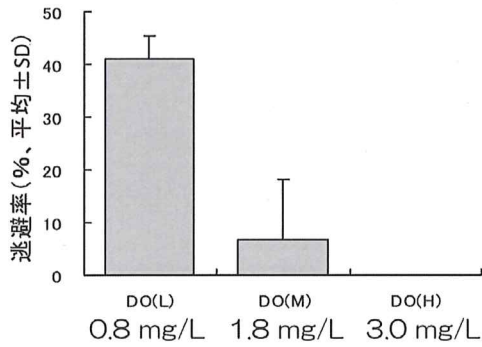


図 234-7 異なる溶存酸素濃度下でのイサザの逃避率

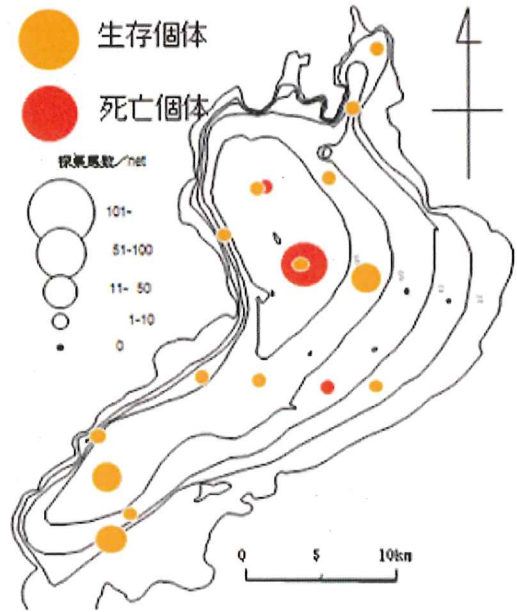


図 234-8 曳き網調査で採集されたイサザ生残個体の分布

表 234-1 曳き網調査と採集効率実験の結果をもとに算出された琵琶湖 90 m 水域の推定イサザ死亡個体

年	10月時 全数	90m水域死亡数		計	(%)
		10月時	12月時		
'08年	22,009,486	376,891	179,449	556,341	2.5%
'09年	11,972,583	1,173,055	0	1,173,055	9.8%
'10年	7,588,273	147,759	0	147,759	1.9%

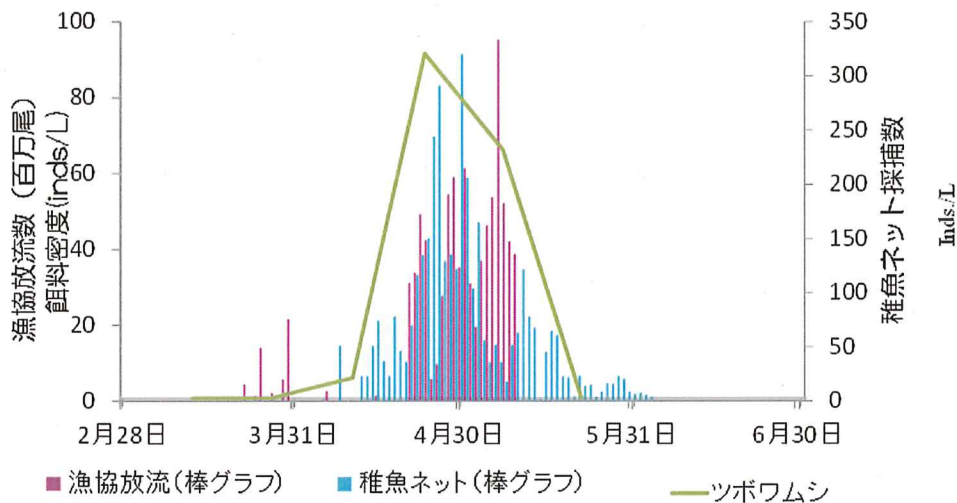


図 234-9 ワカサギ放流卵と湖内採集した稚魚の推定ふ化日及び諏訪湖内のツボワムシの発生期間

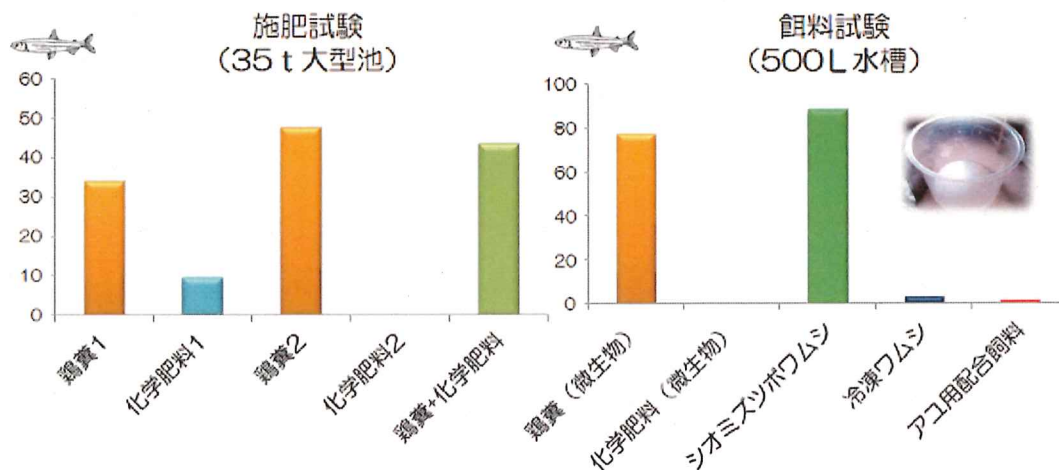


図 234-10 各施肥試験区 (左) 各餌料試験区 (右) でのワカサギ稚魚の生残率



図 234-11 人工産卵基質 (左) と基質に産み付けられたイサザ卵 (右)

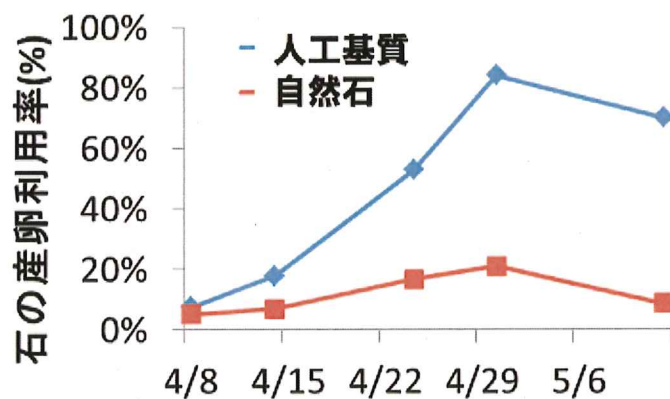


図 234-12 人工産卵基質と自然石でのイサザの産卵利用率

れやすいと考えられた。

(イ) 湖沼漁業生産への影響

a 水温上昇がワカサギ仔魚へ与える影響

ワカサギ仔魚はふ化後、短期間のうちに摂餌ができなければ、餓死することが報告されている⁶⁾。高水温環境下では仔魚期の飢餓耐性が低下したことから、温暖化により春期湖沼水温が上昇すると餓死に

より死亡するワカサギ仔魚が増加すると考えられた。

b ワカサギの産卵期への影響評価

解析の結果、ワカサギの産卵親魚の遡上開始日と遡上ピーク日には成長期間中の水温が関係していると考えられた。このため成長期間中の水温が上昇するとワカサギ親魚の産卵時期が遅れ、卵のふ化期間

が変化することで、ふ化仔魚と餌料プランクトンとの mismatches のリスクが高くなるもしくは、ふ化仔魚の飢餓耐性が低下すると予想された。

c ワカサギ資源への影響評価

湖沼水温の上昇によるふ化仔魚の生残率低下により、ワカサギ個体群が減少する可能性が示唆された。しかし、本解析では水温上昇の変化が連続的ではないことに加え、解析可能な個体数が実際の資源量と比較して極めて小さいため、個体数の確率的ゆらぎの影響を過大に受けた恐れがある。

d イサザの貧酸素耐性

本事業のこれまでの研究から、0.8 mg/L 環境下でのイサザの致死率は 90% 近いことが明らかとなり、今回の結果から貧酸素に対するイサザの脆弱性が明らかとなった。このため、温暖化の進行に伴い湖底の貧酸素化が進行すると貧酸素により死亡するイサザが増加すると予想された。

e 湖底の貧酸素化によるイサザ死亡個体数の推定

本調査の結果、湖底の貧酸素化により死亡するイサザが数多く存在することが明らかとなり、今後、温暖化に伴い湖底の貧酸素化がさらに進行すれば、イサザ資源の減少が深刻化すると考えられた。

(ウ) 温暖化適応技術の開発

a ワカサギの適期放流技術の開発

調査の結果から、ワカサギ仔魚の生残には初期餌料であるツボウムシとの発生期間のマッチが重要と考えられた。本事業では、これまでに諏訪湖内において湖沼水温が 10 - 18℃ の範囲内でツボウムシが大量に発生し、18℃ 以上で急激に減少することが明らかとなっている。このため、ツボウムシ発生の適水温期間内にふ化する卵を積極的に湖へ放流し、それ以外の時期にふ化する卵を他湖へ出荷するよう調整することで、餌プランクトンとの mismatches を回避した適期放流を行うことができると考えられた。

b ワカサギの簡易給餌放流技術開発

鶏糞による施肥でプランクトンを増殖させ、これを餌料として用いれば、零細な漁協でも安価で簡易に飢餓耐性の高い種苗を湖へ放流できるため、温暖化に伴う餌料プランクトンとの mismatches に対応したワカサギ増殖が可能になると考えられた。

c イサザの人工産卵床造成技術開発

本事業で開発した人工産卵基質を使用して、貧酸

素化の影響の少ない北湖南部に新たな産卵場所を造成することにより、貧酸素化によるイサザ資源の減少を緩和できると考えられた。

オ 今後の課題

(ア) 湖沼の温暖化影響評価と影響評価モデル

温暖化が漁業対象種へ与える影響は主に春期に生じると予想されたが、ワカサギでは成長期間の水温上昇が産卵期と関連していることもあり、春期以外の湖沼水温と気象及び気温との関係についても今後研究してゆく必要がある。

(イ) 湖沼漁業生産への影響

ワカサギについては、温暖化の進行に伴うプランクトンの種組成や生物量の変化を明らかにし、 mismatches の際の資源への影響評価をさらに詳しく研究する必要がある。また、水温上昇に伴うワカサギの産卵時期の遅延化についても水槽実験等で検証を行うべきと考える。イサザでは、湖底の貧酸素化による死亡に注目して調査を行ったが、春期湖沼水温の上昇が仔稚魚の死亡率を上昇させることも報告されているため⁷⁾、これらの影響評価が今後は必要と考えられる。

(ウ) 温暖化適応技術の開発

ワカサギの適期放流技術の開発では、水温のみではなく、クロロフィルや物理的環境要因等を含めて、より正確に放流適期を予測できる技術の開発が必要と考える。ワカサギの簡易給餌放流技術開発では、粗放的種苗生産手法の有用性が明らかとなったものの、種苗生産や餌料プランクトン培養の大量・安定化については今後に残された課題である。イサザの人工産卵床造成技術開発については、人工産卵基質の低コスト化や設置の効率化等を検討する必要がある。また産卵床造成による資源への寄与についても評価する必要があると考えられる。

カ 要約

(ア) 湖沼の温暖化影響評価と影響評価モデル

全国の湖沼について、気温・気象データで湖沼水温を高精度に予測できると考えられた。また、春期湖沼水温は気温の影響を受けやすく、温暖化に伴い気温が上昇すると春期湖沼水温も同様に上昇すると予想された。

(イ) 湖沼漁業生産への影響

温暖化に伴う水温上昇がワカサギに与える影響として、春期湖沼水温の上昇によるワカサギ仔魚の飢餓耐性低下と餌プランクトンとの mismatch による生残率の低下や、成長期間中の水温上昇による親魚の産卵期の遅延化が予想された。野外調査で得られた水温とふ化仔魚の死亡率データから、ワカサギ個体群の動態をシミュレーションした結果、ふ化時期の水温が4℃上昇すると個体群が減少する結果が得られた。温暖化に伴う湖底の貧酸素化が琵琶湖のイサザに与える影響を評価した結果、イサザの貧酸素に対する反応は鈍く、現段階でも琵琶湖で数多くのイサザが湖底の貧酸素により死亡していた。このため、温暖化の進行に伴うイサザ資源のさらなる減少が懸念された。

(ウ) 温暖化適応技術の開発

ワカサギ仔稚魚の生残は初期餌料であるツボワムシの発生と深く関係するため、湖内で餌料プランクトンが発生する時期にふ化するワカサギ卵を積極的に湖に放流することで、水温上昇に伴う餌プランクトンとの mismatch を回避する適期放流技術が有効と考えられた。さらに、仔魚の飢餓耐性低下による死亡を防ぐため、鶏糞による施肥でプランクトンを培養し、これを初期餌料とする簡易給餌放流技術の開発を行った。これにより、零細な漁協でも飢餓耐性の高い種苗を湖へ放流ができると期待された。イサザについては本事業で開発した人工産卵基質を使用して、湖底の貧酸素化の影響の少ない北湖南部に新たな産卵場所を造成することで、温暖化に伴い深刻化する湖底の貧酸素化によるイサザ資源の減少を緩和することが可能と考えられた。

キ 引用文献

- 1) Winder M. & Schindler D.E. (2004) Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. *Ecology* 85: 2100-2106.
- 2) Durant, J.M., Hjermmann, D.Ø., Ottersen, G. & Stenseth, N.C. (2007) Climate and the match or mismatch between predator requirements and resource availability. *Clin. Res.* 33: 271-283.
- 3) 永田俊ら (2012) 温暖化の湖沼学. 京都大学学術出版会. 178-182.
- 4) 白石芳一 (1961) ワカサギの水産生物学的ならびに資源学的研究. 淡水区水産研究所研究報告. 10(3) : 1-263.
- 5) 坂野博之・花里孝幸・伴修平・武居薫・上野世司 (2011) 7 季節的な水温変動の変化が湖沼漁業生産に与える影響の評価. 「地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響評価と緩和及び適応技術の開発」, 農林水産省農林水産技術会議事務局. 研究成果. 483 : 267-272.
- 6) 岩井寿夫・柘植隆行 (1986) ワカサギ孵化仔魚の生残・成長に及ぼす給餌開始時期の影響. *水産増殖*. 34(2) : 103-106.
- 7) 上野世司・幡野真隆・宮本幸太 (2015) 琵琶湖固有種イサザの資源変動要因, 平成 27 年度日本水産学会春季大会講演要旨集. 153.

研究担当者 (宮本幸太*, 花里孝幸, 伴修平, 沢本良宏, 河野成実, 星河廣樹, 幡野真隆, 坂野博之, 武居薫, 田原偉成, 築坂正美, 上島剛, 上野世司)

既刊行抜粋（最新号より70号）

489.	粗飼料多給による日本型家畜飼養技術の開発 4系 地域先導技術の実証・解析	(25年 1月)
490.	粗飼料多給による日本型家畜飼養技術の開発 5系 飼料用米の低コスト生産・調製・給与技術の開発	(/)
491.	安全で信頼性、機能性が高い食品・農産物供給のための評価・管理技術の開発	(/)
492.	安全で信頼性、機能性が高い食品・農産物供給のための評価・管理技術の開発	(/)
493.	安全で信頼性、機能性が高い食品・農産物供給のための評価・管理技術の開発	(/)
494.	495.	(/)
496.	動物ゲノムを活用した新市場創出のための技術開発 －動物ゲノム情報を活用した新需要創造のための研究－	(/)
497.	動物ゲノムを活用した新市場創出のための技術開発 －昆虫ゲノム情報を活用した新需要創造のための研究－	(/)
498.	地域活性化のためのバイオマスの利用技術の開発① (国産バイオマス燃料への利用に向けた資源作物の育成と低コスト栽培技術の開発)	(26年 3月)
499.	地域活性化のためのバイオマスの利用技術の開発② (稲わら等の作物の未利用部分や資源作物・木質バイオマスを効率的にエタノール等に変換する技術の開発)	(/)
500.	地域活性化のためのバイオマスの利用技術の開発③ (バイオマス利用モデルの構築・実証・評価)	(/)
501.	地域活性化のためのバイオマスの利用技術の開発④ (バイオマス・マテリアルの製造技術の開発)	(/)
502.	地域活性化のためのバイオマスの利用技術の開発⑤ (革新的なCO ₂ 高吸収バイオマスの利用技術、バイオ炭化水素製造技術及びバイオオイルの製造技術の開発)	(/)
503.	担い手の育成に資するIT等を活用した新しい生産システムの開発	(/)
504.	水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発 超低コスト作物生産技術の開発	(/)
505.	農作業の軽労化に向けた農業自動化・アシストシステムの開発	(/)
506.	農業に有用な生物多様性の指標及び評価手法の開発	(/)
507.	ウナギの種苗生産技術の開発	(/)
508.	環境変動に伴う海洋生物大発生の予測・制御技術の開発－魚種交替の予測・利用技術の開発－	(/)
509.	環境変動に伴う海洋生物大発生の予測・制御技術の開発 －クラゲ類の大発生予測・抑制技術の開発－	(/)
510.	新農業展開ゲノムプロジェクト－GMO領域－	(/)
511.	新農業展開ゲノムプロジェクト－重要性質領域－	(/)
512.	新農業展開ゲノムプロジェクト－QTL領域－	(/)
513.	新農業展開ゲノムプロジェクト－多様性領域－	(/)
514.	新農業展開ゲノムプロジェクト－他作物マーカー領域－	(/)
515.	新農業展開ゲノムプロジェクト－リソース領域－	(/)
516.	新農業展開ゲノムプロジェクト－マーカー育種領域－	(/)
517.	新農業展開ゲノムプロジェクト－GMO評価・管理領域－	(/)
518.	新農業展開ゲノムプロジェクト －DREB遺伝子等を活用した環境ストレスに強い作物の開発－	(/)
519.	鳥インフルエンザ、口蹄疫等の効率的なリスク低減技術の開発	(/)
520.	牛海綿状脳症 (BSE) の効率的なリスク低減技術の開発	(/)
521.	生産・流通・加工工程における体系的な危害要因の特性解明とリスク低減技術の開発 [化学物質 (第1編)]	(/)
522.	生産・流通・加工工程における体系的な危害要因の特性解明とリスク低減技術の開発 [かび毒・病原微生物 (第2編)]	(/)
523.	自給飼料を基盤とした国産畜産物の高付加価値化技術の開発 －自給飼料の簡易・迅速品質評価技術の確立－	(/)
524.	自給飼料を基盤とした国産畜産物の高付加価値化技術の開発 －広域流通に向けた自給飼料の高品質化及び安定化技術の開発－	(/)
525.	農地・森林等の放射性物質の除去・低減技術の開発	(/)
526.	気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発－有機農業の生産技術体系の確立－	(/)
527.	水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発 －冬作物の高品質化に資する基盤技術の開発－	(/)
528.	水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発 －土壌養水分制御技術を活用した水田高度化技術の開発－	(/)
529.	農林水産資源を活用した新需要創出プロジェクト	(27年 2月)
530.	水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発 －戦略作物等の省力・多収生産技術の開発－	(/)
531.	水田の潜在能力発揮等による農地周年有効活用技術の開発 －冬期の水田活用を促進する高品質な冬作物品種の開発－	(/)
532.	野菜等の光応答メカニズムの解明及び高度利用技術の開発	(/)
533.	花きの光応答メカニズムの解明及び高度利用技術の開発	(/)
534.	キノコの光応答メカニズムの解明及び高度利用技術の開発	(/)
535.	害虫の光応答メカニズムの解明及び高度利用技術の開発	(/)
536.	有用水産生物の光応答メカニズムの解明と高度利用技術の開発	(/)

537. 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 土壌病害虫診断技術等の開発 - (27年 2月)
538. 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 低投入型農業のための生物農薬等新資材及びその利用技術の開発 - ()
539. 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 農業環境における物質循環促進のための微生物による処理技術の開発 - ()
540. 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 循環型農業のための有機資材とその利用技術の開発 (B-1系) - ()
541. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発
 - 稲麦大豆作等土地利用型農業における自動農作業体系化技術の開発 - (28年 3月)
542. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発
 - 小型ロボットによる畦畔除草等自動化技術の開発 - ()
543. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発
 - 農家の作業技術の数値化及びデータマイニング手法の開発 - ()
544. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発 - 施設園芸における高度環境制御技術の開発 - ()
545. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発
 - 自給飼料を基盤とした国産畜産物の高付加価値化技術の開発 (育種) - ()
546. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発
 - 自給飼料を基盤とした国産畜産物の高付加価値化技術の開発 (飼料生産) - ()
547. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発
 - 自給飼料を基盤とした国産畜産物の高付加価値化技術の開発 (牛) - ()
548. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発
 - 自給飼料を基盤とした国産畜産物の高付加価値化技術の開発 (豚) - ()
549. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発
 - 自給飼料を基盤とした国産畜産物の高付加価値化技術の開発 (鶏) - ()
550. 低コスト・省力化、軽労化技術等の開発
 - 水田最大限活用のための低コストな用排水機能管理・最適化技術の開発 - ()
551. 農地等の放射性物質の除去・低減技術の開発
 - 高濃度汚染地域における農地土壌除染技術体系の確立 - ()
552. 農地等の放射性物質の除去・低減技術の開発
 - 大豆、そば等における放射性物質移行低減対策技術の開発及び植物における放射性セシウム吸収メカニズムの解明 - ()
553. 農地等の放射性物質の除去・低減技術の開発
 - 農地土壌における放射性セシウム動態予測技術および拡散防止技術の開発 - ()
554. 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 気候変動に適応したイネ科作物品種・系統の開発 - ()
555. 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 気候変動に適応した大豆品種・系統の開発 - ()
556. 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 気候変動に適応した野菜品種・系統および果樹系統の開発 - ()
557. 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 農業分野における温暖化緩和技術の開発 - ()
 - 地球温暖化が農業分野に与える影響評価と適応技術の開発 - ()
 - 地球温暖化が農林水産分野に与える経済的影響評価 - ()
558. 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 森林及び林業分野における温暖化対策 - ()
 - 地球温暖化が森林及び林業分野に与える影響評価と適応技術の開発 - ()

AgriKnowledge のホームページ (http://agriknowledge.affrc.go.jp/search/article/orglist/maff/project_2010)
 において、研究成果 (全文) をご覧いただけます。

- 研究成果第559集 「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト
 - 水産分野における温暖化緩和技術の開発 -
 - 地球温暖化が水産分野に与える影響評価と適応技術の開発 -」
- Kenkyuseika559 “Development of mitigation and adaptation technologies to climate change in
 the sectors of agriculture, forestry, and fisheries
 - Development of mitigation technologies to climate change in the Fisheries sector - ;
 - Development of adaptation technologies to climate
 change impacts in the Fisheries sector -”

平成28年3月31日 発行

編集・発行 農林水産省農林水産技術会議事務局

〔研究所管：研究開発官 (基礎・基盤、環境) 室〕
 〔発行管理：研究調整課広報班〕

〒100-8950 東京都千代田区霞が関1-2-1

印刷 株式会社 福田印刷