

地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発(プロジェクト研究成果シリーズ442)

誌名	地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発
巻/号	442
掲載ページ	p. 1-117
発行年月	2008年1月

地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価 及び対策技術の開発

Assessment and mitigation techniques of global warming effects
on the sector of agriculture, forestry and fisheries

農林水産省農林水産技術会議事務局

地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価 及び対策技術の開発

Assessment and mitigation techniques of global warming effects
on the sector of agriculture, forestry and fisheries

2008年1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取りまとめ、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442集「地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発」は、農林水産省農林水産技術会議の環境研究として、2002年度から2005年度までの4年間にわたり、独立行政法人農業環境技術研究所を中心に実施した研究成果を取りまとめたものである。

温室効果ガスの増加による地球温暖化は、既に地域的な気候変動を引き起こしているとの報告があり、今後、他産業と比べて特に天候・気象変動の影響を受けやすい農林水産業において悪影響が懸念されている。また、京都議定書によって、先進国は温室効果ガスを率先して削減していくことが義務づけられ、我が国は温室効果ガス総排出量の6%削減を約束しており、平成14年3月には、この約束を確実に履行するための具体的対策を取りまとめた「地球温暖化対策推進大綱」が決定されている。

本研究は、地球温暖化のモニタリング及び将来予測、地球温暖化の影響及びリスクの解明、温室効果ガスの排出削減・吸収・固定化技術の開発を課題として取り組んだものである。

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。

2008年1月

農林水産省農林水産技術会議事務局長
竹谷 廣之

目 次

研究の要約	1
第1編 陸域系	15
第1章 地球温暖化のモニタリング及び将来予測	15
1 地球温暖化のモニタリング	15
(1) 陸域生態系の温室効果ガス収支の機構解明とモニタリング	15
(2) 陸域植生の純一次生産力の長期変動モニタリング	19
2 地球温暖化についての将来予測	23
(1) 地球温暖化が世界農業へ及ぼす影響の経済的評価	23
(2) 温暖化による応答を組み込んだ農業生産力の変動	27
第2章 地球温暖化の影響及びリスクの解明	34
1 地球温暖化に伴う農業への影響把握	34
(1) 大気CO ₂ の増加が農作物の高温ストレスに及ぼす影響	34
(2) 地球温暖化に伴う水稻の高温障害発生のリスク解明	37
(3) 地球温暖化が我が国の畜肉生産に及ぼす影響評価と予測技術の開発	42
(4) 果樹農業に対する地球温暖化の影響予測モデルの開発とその影響評価	46
(5) 高温ストレス応答機構の解析に基づく地球温暖化による野菜の生産力低下の影響評価	50
2 地球温暖化による森林生態系及び森林資源への影響評価と将来予測	55
(1) 地球温暖化に伴う森林群落動態モデルの開発	55
(2) 地球温暖化とその対応が森林・林業・林産業に与える影響の予測と評価	58
第2編 水域系	63
第1章 地球温暖化のモニタリング及び将来予測	63
1 地球温暖化のモニタリング	63
(1) 親潮域・混合域における低次生態系モニタリング	63
(2) 黒潮域における低次生態系モニタリング	67
(3) 対馬暖流域における低次生態系モニタリング	71
2 地球温暖化の影響及びリスクの解明	75
(1) 温暖化がプランクトン生態系に及ぼす影響の評価と予測技術の開発	75
(2) 温暖化が藻場に及ぼす影響の評価と予測技術の開発	79
(3) 温暖化が魚類の養殖業生産に及ぼす影響の評価と予測技術の開発	83
(4) 温暖化が魚類の漁業生産に及ぼす影響の評価と予測技術の開発	88
第3編 対策系	93
第1章 温室効果ガスの排出削減・吸収・固定化技術の開発	93
1 地球温暖化対策技術の開発	93
(1) 栽培管理技術及び土壌保全技術を利用した温室効果ガスの合理的排出削減技術の開発	93
(2) 畜産業における温室効果ガス排出削減技術の開発	97
(3) 空気膜構造による太陽エネルギー利用ハウスの開発と栽培実証	101

(4) 二酸化炭素吸収能向上のための森林施業システムの開発	105
(5) 地球温暖化に伴う高潮災害による農地海岸への影響評価と対策技術の開発	110
(6) 農林水産業分野における温暖化影響に関する総合評価手法の開発	113

研究の要約

I 研究年次・予算区分

研究年次：2002年度～2005年度

予算区分：農林水産省農林水産技術会議 環境研究

II 主任研究者

主査：(独) 農業環境技術研究所
理事長

陽 捷行 (2002～2004年度)

佐藤洋平 (2005年度)

推進リーダー：(独) 農業環境技術研究所

地球環境部長

林 陽生 (2002～2003年度)

今川俊明 (2004～2005年度)

チームリーダー (陸域系)：

(独) 農業環境技術研究所

地球環境部 気象研究グループ長

野内 勇

サブチームリーダー (陸域系)：

(独) 森林総合研究所

植生生態研究領域 物質生産研究室長

千葉幸弘

サブチームリーダー (陸域系)：

(独) 農業・生物系特定産業技術研究機構 畜産草地研究所

家畜生理栄養部 反すう家畜代謝研究室長

栗原光規 (2002～2004年度)

永西 修 (2005年度)

チームリーダー (水域系)：

(独) 水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所

瀬戸内海海洋環境部長

井関和夫 (2002～2003年度)

(独) 水産総合研究センター 日本海区水産研究所

日本海海洋環境部長

飯泉 仁 (2004～2005年度)

チームリーダー補佐 (水域系)：

(独) 水産総合研究センター 中央水

産研究所

海洋生産部 変動機構研究室長

渡邊朝生

チームリーダー (対策系)：(独) 森林総合研究所

植生生態研究領域長

石塚森吉

サブチームリーダー (対策系)：

(独) 農業・生物系特定産業技術研究機構 畜産草地研究所

畜産環境部 資源化研究室長 (2002～2004年度)

(独) 農業・生物系特定産業技術研究機構 北海道農業研究センター

畜産草地部 畜産環境研究チーム長 (2005年度)

長田 隆

III 研究担当機関

独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構 果樹研究所

独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構 花き研究所

独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構 野菜茶業研究所

独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構 畜産草地研究所

独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構 北海道農業研究センター

独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構 九州沖縄研究センター

(独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構は、現「独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構」のこと。)

独立行政法人農業環境技術研究所

独立行政法人農業工学研究所 (現：独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構)

独立行政法人国際農林水産業研究センター

独立行政法人森林総合研究所

独立行政法人森林総合研究所北海道支所

独立行政法人水産総合研究センター東北水産研

研究所

独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所

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

独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所

独立行政法人水産総合研究センター養殖研究所

独立行政法人水産大学校

(委託先) 国立大学法人北海道大学

(委託先) 国立大学法人東京大学

(委託先) 国立大学法人京都大学

(委託先) 国立大学法人愛媛大学

(委託先) 大学共同利用機関法人人間文化研究機構
総合地球環境学研究所

(委託先) 北海道立畜産試験場

(委託先) 岡山県総合畜産センター

(委託先) 熊本県農業研究センター

(委託先) 株式会社三菱総合研究所

IV 研究目的

地球温暖化に関しては、気候変動枠組み条約に基づいて採択された京都議定書への対応や地球温暖化に関する最新の科学的知見がレビューされるIPCC第4次報告書作成への貢献が求められている。また、地球温暖化は、農林水産業に大きな影響を及ぼすことが予想されるとともに、温室効果ガスの排出削減目標達成のために総合的な取組が求められている。このため、吸収源を主体とした炭素収支のモニタリング及びモデル化等を行い、地球温暖化予測に反映させるとともに、地球温暖化に伴う農業、森林及び漁業への影響評価と予測技術を開発する。さらに、温室効果ガスの排出削減目標達成に資するため、農林業における温室効果ガスの排出削減・吸収・固定化技術を開発する。

1 陸域系

陸域の農業生態系において温室効果ガス収支のモニタリングを行い、湧・吸源機構を解明するとともに、森林植生の純一次生産力に関するモニタリングを行い、総合的データベースを構築し、変動特性などを解明する。また、世界・アジアを対象とした農業生産力の将来予測及び温暖化影響の経済的評価を行う。さらに、水稻の高CO₂濃度及び高温条件での

生育障害予測と収量への影響予測、高温環境が畜肉生産、果樹生産、野菜生産へ及ぼす影響予測及び森林群落動態のモデル化、森林・林業・林産業への影響予測を行う。

2 水域系

日本周辺海域における低次生態系の生産力に関するモニタリングを行い、総合的データベースを構築し、変動特性などを解明する。また、日本周辺海域の漁業と養殖魚資源への影響を解明する。

3 対策系

農耕地からの温室効果ガス発生削減効果の実態解明や林業における温室効果ガスの吸収量評価を行うとともに、ハウスの熱利用の改善に基づいた最適な温室効果ガス排出削減技術、畜産業における温室効果ガス放出の削減技術及び二酸化炭素吸収能向上のための森林施業システムの開発を行う。また、温暖化に伴い予想される農地海岸の高潮被害の影響評価及び対策技術の開発を行う。さらに、温暖化が農林水産業へ及ぼす多様な影響を集約し、総合的な影響の姿を示す。

V 研究方法

1 陸域系

農耕地からの温室効果ガスのモニタリングでは、安定同位体比を用いてフラックスの各素過程を分離評価し、温室効果ガス収支の機構を解明するとともに、フラックスの長期変化を把握する。森林植生の純一次生産力に関するモニタリングでは、過去20年間の地球観測衛星データから、純一次生産力(NPP)推定に利用できる植生指数(NDVI)、表層温度などの時系列データにノイズ除去方法を改良して衛星の10日間合成データを作成、NPPの年変動を解析する。農業生産力の将来予測では、温暖化による応答を組み込んだ農業生産力の変動予測モデルを作成するとともに、水文データから灌漑利用可能水量を計算し、生産力の面的変動を予測する。また、JIRCAS食料需給モデルをベースに温暖化による気温や降水量の変動が単収や収穫可能面積を考慮し、インドまでのアジア地域のコメの需給変動を2030年までの予測を行う。影響解明については、イネの高温不稔を予測するため、開放系大気CO₂増加(FACE)圃場で、対照区とFACE区の穂周辺の微気象・蒸発散の差異を解析し、CO₂濃度上昇に伴う群落熱収支の変化が、イ

ネの穂の微気象を変化させる過程のモデルを作成する。また、イネ開花期の湿度・風速が、イネの受精率に与える影響とそのメカニズムを温度勾配チャンパーで実験的に調べ、不受精発生に対するリスク評価の指標を検討する。家畜では、気候変動シナリオに従った畜肉生産に対する影響予測を行う。果樹では、温暖化の影響予測モデルを開発し、その影響を予測するとともに、実験により影響の実態を明らかにする。野菜では、ホウレンソウとレタスを対象に、高温ストレスによる生理生態的反応の定量的把握を行い、生育モデルを用いて温暖化による野菜の生産力低下の影響を評価する。森林生態系では、温暖化に伴う森林の群落動態モデルを開発するため、スギ林冠光合成モデルの構築、スギ個体ベースの葉量分布の推定、レーザー光の林冠透過率の検証、林冠表面積を算出する手法の開発を行う。また、温暖化が森林・林業・林産業に及ぼす影響の予測では、温暖化防止に対応した施策や森林計画が我が国の森林・林業・林産業に及ぼす影響を長期的に予測するためのモデル（影響予測モデル）を構築し、地域レベルと国レベルの両面から影響評価するとともに、望ましい森林計画・施策を明らかにする。

2 水域系

モニタリングについては、親潮・混合域を横断的に観測する北海道沖のA-line、黒潮域を観測する御前崎ライン及び黒潮続流域、対馬暖流域を対象とする東シナ海及び日本海海域の観測定線において、海洋環境及び低次生態系に関する精度の高い観測手法及び温暖化傾向を検出可能なモニタリング体制を確立する。得られた調査データをもとに季節変動・年変動を明らかにする。また、温暖化の影響の評価と

予測技術の開発では、沖合域の低次生態系モデルの開発、温暖化が低次生態系の変動及び流動構造の変動を介して小型浮魚類の資源量に及ぼす影響の評価と予測、沿岸域の環境変動及び生態系変動の調査を基にした藻場に対する影響評価・予測、及び生理学的研究を基礎にした養殖魚類の生産に及ぼす温暖化の影響評価の技術開発を目指す。

3 対策系

農耕地に関しては、田畑輪換と保全的耕耘技術の有効性について、地球温暖化ポテンシャル（GWP）を用いて温暖化影響を総合的に定量評価し、温室効果ガス発生削減技術として評価する。また、家畜排泄物の各処理から発生するメタンと一酸化二窒素等温室効果ガス発生量を測定し、各処理技術の総合的な環境負荷軽減効果を評価する。ハウスの構造、太陽熱の集熱、蓄熱、放熱、環境制御、及び建設コストのそれぞれの技術を再構築して、システム化を図り、ハウスでの化石エネルギー依存を見直し、太陽エネルギー利用による温室効果ガス発生削減の可能性を検討する。さらに、森林においては、個別の育林システムや間伐放置材の炭素固定量、伐出機械や林道開設に伴うCO₂排出量を評価・算定し、木材生産林の炭素収支が向上する施業システムを明らかにする。温暖化影響については、海面上昇による高潮被害等に対して、農地海岸を中心に台風規模を考慮した被害推定の精度向上を図る。また、温暖化予測や影響評価の過程で生じる不確実性の取扱いも含め、水稻生産を例に20年～30年後の農林水産分野に現れる多様な影響を総合的に評価するための手法開発を目指す。

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	
	02	03	04	05	機関	研究室
1 陸域系						
(1) 地球温暖化のモニタリング及び将来予測						
1) 地球温暖化のモニタリング						
① 陸域生態系の温室効果ガス収支の機構解明とモニタリング	←			→	農業環境技術研究所	フックス変動評価チーム
② 陸域植生の純一次生産力の長期変動モニタリング	←			→	森林総合研究所	森林管理研究領域
2) 地球温暖化の将来予測						
① 地球温暖化が世界農業へ及ぼす影響の経済的評価	←			→	国際農林水産業研究センター	国際情報部
② 温暖化による応答を組み込んだ農業生産力の変動	←			→	農業環境技術研究所	食料生産予測チーム
(2) 地球温暖化の影響及びリスクの解明						
1) 地球温暖化に伴う農業への影響把握						
① 大気CO ₂ の増加が農作物の高温ストレスに及ぼす影響	←			→	農業環境技術研究所	生態系影響ユニット
② 地球温暖化に伴う水稻の高温障害発生のリスク解明	←			→	九州沖縄農業研究センター	気象特性研究室
③ 地球温暖化が我が国の畜肉生産に及ぼす影響評価と予測技術の開発	←			→	畜産草地研究所	反すう家畜代謝研究室
④ 果樹農業に対する地球温暖化の影響予測モデルの開発とその影響評価	←			→	果樹研究所	環境応答研究室
⑤ 高温ストレス応答機構の解析に基づく地球温暖化による野菜の生産力低下の影響評価	←			→	野菜茶業研究所	作型開発研究室
2) 地球温暖化による森林生態系及び森林資源への影響評価と将来予測						
① 地球温暖化に伴う森林群動態モデルの開発	←			→	森林総合研究所	物質生産研究室
② 地球温暖化とその対応が森林・林業・林産業に与える影響の予測と評価	←			→	森林総合研究所	林業システム研究室
2 水域系						
(1) 地球温暖化のモニタリング及び将来予測						
1) 地球温暖化のモニタリング						
① 親潮域・混合域における低次生態系モニタリング	←			→	東北区水産研究所	海洋動態研究室
② 黒潮域における低次生態系モニタリング	←			→	中央水産研究所	海洋生産部
③ 対馬暖流域における低次生態系モニタリング	←			→	西海区水産研究所	生物環境研究室
2) 地球温暖化の影響及びリスクの解明						
① 温暖化がプランクトン生態系に及ぼす影響の評価と予測技術の開発	←			→	中央水産研究所	低次生産研究室
② 温暖化が藻場に及ぼす影響の評価と予測技術の開発	←			→	西海区水産研究所	沿岸資源研究室
③ 温暖化が魚類の養殖業生産に及ぼす影響の評価と予測技術の開発	←			→	北海道区水産研究所	資源培養研究室
④ 温暖化が魚類の漁業生産に及ぼす影響の評価と予測技術の開発	←			→	中央水産研究所	生態特性研究室
3 対策系						
(1) 温室効果ガスの排出削減・吸収・固定化技術の開発						
1) 地球温暖化対策技術の開発						
① 栽培管理技術及び土壌保全技術を利用した温室効果ガスの合理的排出削減技術の開発	←			→	農業環境技術研究所	温室効果ガスチーム
② 畜産業における温室効果ガス排出削減技術の開発	←			→	北海道農業研究センター	畜産環境研究チーム
③ 空気膜構造による太陽エネルギー利用ハウスの開発と栽培実証		←		→	花き研究所	栽培システム研究室
④ 二酸化炭素吸収能向上のための森林施業システムの開発	←			→	森林総合研究所	北海道支所
⑤ 地球温暖化に伴う高潮災害による農地海岸への影響評価と対策技術の開発	←			→	農業工学研究所	河海工水理研究室
⑥ 農林水産業分野における温暖化影響に関する総合評価手法の開発			←	→	農業環境技術研究所	食料生産予測チーム

注) 文中の図、表、写真に付した番号は、課題番号とその中の一連番号を組み合わせて表示してある。
 (例：1-(1)-1)-①の課題の1番目の図の場合は、図1111-1と表示)

VI 研究結果

1 陸域系

温室効果ガスのモニタリングの課題では、茨城県つくば市の慣行栽培水田で、CO₂とCH₄のフラックス観測と同位体測定を行い、年間生態系CO₂純交換量 (NEE) は130~290gCm⁻²y⁻¹と年次変動が大きいこと、生物相純生産量 (NBP) は-87~+29gCm⁻²y⁻¹と小さいため、CH₄放出量は水田の温室効果ガス収支だけでなく、炭素収支上も重要なこと、CH₄の土壌中での酸化割合 (40~65%) とCH₄収支の構成要素の季節変化、湛水生態系である水田でも土壌面を通してのCO₂交換が耕作期間の炭素収支上重要なことなどを明らかにした。陸域植生の課題では、NOAA-Pathfinder (PAL) の10日間合成全球データ (8 kmメッシュ) のノイズを除去するため、既存のLMFを改良し、カルマンフィルタを組み合わせたノイズフィルタ (LMF-KF) を開発した。LMF-KFを用いて補正された約20年間のNDVIと表面温度データから、表面温度5度以上の地域ではNDVIの積算値が年々増加している傾向にあることを示した。また、LMF-KFでスムージングされたNDVIを利用することにより、NPP推定の精度を向上させた。

温暖化が農業に与える経済的影響では、いくつかの温暖化シナリオを用いてアジアを中心とした16の国と地域の水稲単収への影響を予測すると、その影響は国によって異なった。これをベースにコメの需給予測分析を行うと、総合的に1人当たり需要量の減少と生産量の増加が見込まれる国もあり、今後の国際価格は若干上昇するものの、全体的にコメの需給ギャップには、大きな変動が見られないであろうと予測された。将来の農業生産力予測では、個葉の生化学的光合成応答を表すモデルと気孔コンダクタンス・モデル、水分状態を反映するモデルからイネ生長・生産量予測モデルを構築し、圃場実測値をほぼ再現できた。中国華南のイネ収量変動と有意な相関を持つ気象変動を、標準偏差により平年とそれ以外に分け、イネ収量の豊凶年の発生頻度が計算できた。その結果、2071~2090年の収量は全地域で現在より減り、最大6%減収すると予測された。また、年々の変動係数も大きくなると予測できた。

イネへの温暖化の影響では、開放系大気CO₂増加 (FACE) 実験圃場における微気象と穂の蒸散コンダクタンスの観測結果から、イネの穂周辺の群落熱収

支モデルを開発した。FACE実験とモデル解析から高CO₂濃度による穂温の上昇は0.5~1℃であり、高温不稔を増加し得る昇温であることがわかった。また、高CO₂濃度は穂温の上昇に加えて群落内の湿度も低下させる結果、穂の蒸散も促進しており、高CO₂濃度による穂温の上昇と蒸散促進効果は登熟期間全体に及ぶと考えられ、開花時高温不稔だけでなく品質にも影響を及ぼす可能性が示唆された。人工気象室の温度・湿度制御実験から、穂の温度が高いほど蒴における充実花粉の比率は低下すること、蒴における充実花粉の比率が小さいほど穎花の受精率が減少する (雄性不稔) ことがわかった。すなわち、湿度の影響は、穂の温度の違いを通じて蒴の花粉発育に反映され、それが受精率の違いに繋がる間接的な影響であると推察された。また、温度勾配チャンバー実験の結果から、気温及び穂温と受精率との関係を定式化するとともに、CCSRによる温暖化時のメッシュ気候値からイネの不稔率を予測すると、8月上旬に開花する場合、コシヒカリの不稔率は2030年までは全ての地域で3%以下であったが、2060年には3%以上となる地域がみられ、さらに、2090年には筑紫平野、佐賀平野、和歌山平野、濃尾平野の一部の地域で不稔率が5%を超えると予測された。畜肉生産への高温の影響では、鶏に関しては飼料摂取量、増体日量は、いずれの相対湿度 (RH) でも環境温度 (ET) が高いほど低下した。産肉量はいずれのETにおいても、RHの影響が小さく、ET上昇により減少し、23℃の値を100%とすると28℃では93%、33℃では69%となった。温暖化により60年後には8割以上の地域において生産性低下の可能性が示された。豚に関しては増体日量 (g/d) は23℃に対して28℃では17%、30℃では28%、33℃では52%の減少であり、増体日量は環境温度に対して双曲線上に低下した。温暖化により6月では60年後に増体日量が5~15%低下する地域が西日本に広がる程度だが、8月では30年後には15%以上低下する地域が西日本を中心に広がり、60年後には15%以上低下する地域が東日本にまで及ぶことが予測された。牛に関しては、高温の影響は体重が大きくなるとより強く現れ、また、高湿度になるとその影響はさらに、大きく現れることがわかった。果樹の温暖化影響では、将来の気温の分布予測値から、2060年までの栽培適地の移動地図を作成した結果、今世紀半ばまでに、温暖化でリンゴ及びウ

ンシュウミカンの栽培適地が北上し、現在の主な産地の多くが気候的に不利になる可能性が予測された。また、果実生育前期の高温は着色を促す方向に、果実生育後期の高温は着色を遅延させる方向に働くことが示された。デンプンの消失及び糖度の上昇も着色と同様な結果が得られた。野菜の温暖化影響では、温度処理実験と作期移動試験を行い、ホウレンソウとレタスについて、高温が生育に及ぼす影響を評価する生育モデルを開発した。

温暖化に伴う森林群落動態モデルの開発の課題では、スギ苗木を用いた環境制御実験により光合成パラメータの温度、光、窒素、CO₂濃度に対する依存性の定量化、LIDAR計測による樹形及び森林構造とその成長経過のモデル化、さらに、環境要因を変数とする光合成モデルとの統合を図り、森林群落動態モデルができた。これにより、対象とする森林における微気象データを与えることによって、間伐を伴う林分における光合成の季節変動と間伐効果を評価することが可能となった。温暖化が我が国の森林・林業・林産業に及ぼす影響の予測と評価の課題では、全国レベルで森林と住宅を関連づけて炭素蓄積量と変化量を推定する影響予測モデルを構築し、施策シナリオについて、今後、50年間の推移を推定するとともに、施策シナリオごとの評価を行った。炭素吸収量にのみ注目すれば、森林・住宅を合わせた総炭素吸収量を増加させる上で効果的な施策は、林業施策では伐採抑制及び複層林推進、住宅施策では耐久年数向上であることを明らかにした。また、地域レベルの影響予測モデルとして、全国モデルによる推定値を総伐採量と期末蓄積増加量の関係図上にプロットすることにより、その実行可能性を評価する手法を開発した。

2 水域系

親潮域では確実に冬季混合層の浅化及び基礎生産量の減少トレンドが存在し、温暖化の影響と推定された。それ以外に、長期変動においては20年規模の変動が卓越し、その変動が春季の海洋構造の変動に対応するものであることを明らかにした。A-lineはカナダのStation P、ハワイ沖HOTに匹敵する高品質の時系列データが整ったモニタリングサイトと認識されるに至った。

亜熱帯水域を中心に動植物プランクトン現存量の変動を主として担う分類群を明らかにした。具体的

には、亜表層のクロロフィル極大層の植物プランクトンは5 mm以下の微小な植物プランクトンが主体であること、動物プランクトン現存量の変動は小型カイアシ類の変動に依存していることを明らかにした。

東シナ海陸棚沿岸域及び日本海西部において、冬季水温の上昇傾向、東シナ海陸棚沿岸域における夏季の低塩分化傾向を明らかにした。低次生態系については、動物プランクトンが植物プランクトンの変動と半年ずれて同期して変動することを明らかにした。

モニタリング課題群のデータ及び解析結果を基礎に既存の生態系モデルを改良して、亜寒帯から亜熱帯まで活用できる汎用モデル(eNEMURO)を開発した。さらに、eNEMUROを高解像度三次元物理モデル(3D-eNEMURO)に高度化し、また、以下の成果も含めて魚モデルと結合した(eNEMURO.FISH)を作成して温暖化の影響予測するためのツールを開発した。衛星海色データの解析により西部北太平洋のクロロフィル量と基礎生産量の変動を明らかにしモデルの検証データとした。

サンマ、マイワシ、カタクチイワシ、さば類の小型浮魚類の生残と回遊海域の海洋構造との関連を明らかにした。このことから温暖化予測モデルによって小型浮魚類の資源変動の予測が可能となることが示唆された。また、マイワシとカタクチイワシについて成長や産卵等に対する適水温特性の魚種間差が長期資源変動様式の差を説明する可能性が示唆された。

全国の主要な海藻17種及び植食動物7種の分布と沿岸水温との関連を明らかにし、温暖化による数℃の海水温上昇により、短期的には水平・垂直分布構造の変動、長期的には主要な構成種が変化するという定性的な影響を受けることを明らかにした。また、ウニ優占域のアラメ場における水温上昇の影響予測モデルを構築した。

代表的な養殖魚であるマダイを対象に、水温及び養殖密度が成長などに与える生理学的な影響を解明し、水温上昇は29℃までは成長に正の効果が期待できることを明らかにした。しかし、夏季における溶存酸素濃度の低下に対する対策が必要となる。また、水温上昇は産卵生理に影響を与え産卵停止させるため、親魚の飼育環境の整備が必要となることが明らかになった。

3 対策系

温室効果ガス発生制御施設での試験では、 CH_4 、 N_2O 総発生量GWP換算値が、2年間の転換畑栽培及びそれに引き続く2年間の水稲栽培（復元田）によって1/2以下に削減されることを示した。不耕起栽培試験圃場での試験では、不耕起（NT）栽培によって4年間で CO_2 発生量が $1800\text{gCO}_2\text{m}^{-2}$ 程度削減されるとともに、 N_2O 発生量についても、約45%削減されることを示した。簡易耕起栽培試験では、簡易耕起（R）と堆肥施用（M）とを組み合わせた管理体系（RM）が、総GHG発生量を削減する上で最も有効であることを示した。

堆肥化期間中の当該ガス発生速度には大きな変動が認められた。全ての畜種の堆肥化で、アンモニアとメタンは堆肥化初期に高く、一酸化二窒素では堆肥化中期（1～2ヶ月）以降に発生の極大が見られた。日本の家畜ふん尿処理状況を勘案した場合、本課題で行った初発堆積物の水分調整によって、日本の家畜排せつ物の堆肥化処理と乾燥処理で発生する CH_4 の約89%、 N_2O の約26%を削減できることを明らかにした。

空気膜構造は、骨組みを減らすことが可能なため、採光性の高いハウスを設計、試作できた。本ハウスは温度が上昇し易いため、高温対策として大型換気窓や細霧冷房などを講じることにより、夏季においても外気温程度にハウス内温度を維持でき、周年栽培を可能にする。日照がある程度確保でき、日最低気温 0°C の地域では、暖房温度 10°C の場合、80%程度の省エネが達成できた。内部カーテン使用によるモデル計算では、さらに、大幅なエネルギー削減が可能で、補助暖房のヒートポンプの熱源も蓄熱水により、対応できる見通しを得た。

高齢林の成長が予想以上に続いていることを明らかにし、従来の収穫表では高齢林の炭素固定量を過小評価する場合が少なくないことを示した。上木を点状に伐採した複層林では光環境の悪化が早く、群、または、帯状に伐採した複層林の方が下木の炭素固定の促進に適していることを明らかにした。日本産樹種の材分解速度の範囲を明らかにするとともに、スギ・ヒノキの一般的な施業林における林内放置間伐材の炭素貯留量を主林木の4～10%程度と推定した。

有明海全域を対象に2つのモデル台風で高潮シ

ミュレーションした結果、潮位偏差が25～50cm程度大きくなることを明らかにした。解析領域を排水路と道路、堤防で囲まれた区域とに分割し、水路を1次元、氾濫域を2次元でモデル化する高潮氾濫モデルを構築、99年18号台風をもとにモデルを検証した結果、良く再現できた。本モデルにより、堤防内農地の高潮浸水被害の算出を可能とし、高潮が農地・農業水利施設に及ぼす影響を分類、高潮対策シナリオを作成した。八代海を対象としたシミュレーションでは、海岸堤防の適切な維持管理と河川堤防高の低位部を改修することにより、浸水量が約40%低減できた。

農業分野の温暖化影響に関して、従来の研究成果では、日本の水稲生産量は10%減～20%増と幅が広い。この原因として、二酸化炭素濃度や温度の上昇による生理的な影響、害虫、水資源など生育環境の変化が不確実であるとされる。このような状況下で農業分野に現れる総合評価のためには、影響のプロセス、あるいは、シナリオの全体を見据えることのできるモデルと評価手法が必要なことを明らかにした。不確実性を取り入れ、シナリオや全体プロセスの総合化・統合化を図るために、イベントツリーによる温暖化影響記述及び評価手法を採用し、温暖化影響の分析を行った。その結果、温暖化対策として、現在よりも 1.0°C ほど、高温耐性の品種を導入することが有効な手段であることを明らかにした。

VII 今後の課題

陸域系においては、今回用いた食料需給モデルの基本構造が中短期予測用であったため、長期予測への改良が必要である。また、森林と住宅の関係性について、より緊密な関係性を持ったモデルの開発、住宅以外の木材製品の考慮とそれによる物質代替・エネルギー代替の評価に取り組む必要がある。

水域系においては、今後は魚モデルと結合して、高次生態系モデルへと展開するとともに、温暖化シナリオに基づいて粗格子の3次元生態系モデルで得られた予測値を境界条件として、温暖化に伴う日本周辺海域の海況変動を予測し、これによる餌料動物プランクトンと魚類生産への影響を予察する必要がある。

対策系においては、家畜排せつ物処理について、温室効果ガスの発生削減効果がより高いと考えられ

る強制通気型の処理について実規模施設で測定する必要がある。また、一酸化二窒素発生の大きい汚水処理からの発生抑制が期待される間欠曝気法を検討する必要がある。

さらに、京都議定書第1約束期間中における枯死材の炭素蓄積量の全国的な把握や人工林の混交林化や造林放棄による天然林化が徐々に進む森林の炭素固定量の評価を行っていく必要がある。

VIII 研究発表

- 1) Andoh, T. 2005. Development of non-radioisotopic immunoassay systems for measuring flounder IGF-I. *Zool. Sci.* 22:1023-1030.
- 2) 安藤忠 2003. 魚類の成長におけるインスリンの役割とは. *養殖*. 503:88-91
- 3) 安藤忠・伊藤文成2005. マダイ養殖に与える地球温暖化の影響の評価と対応策の検討. *月刊アクアネット*. 28-29
- 4) Awaya, Y. et al. 2004. Estimation of the global net primary productivity using NOAA images and meteorological data: changes between 1988 and 1993. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9):1597-1613
- 5) 栗屋善雄ら 2004. 衛星データを利用した全球一次生産の推定: 陸域生態系の純一次生産量の分布. *地球環境*, 9(2):231-238
- 6) 銭小平 2002. 食料生産と環境変化の定量分析. *農業経営研究*. 40(1):152-155
- 7) Chiba, S. et al. 2004. Increased stratification and decreased lower trophic productivity in the Oya-shio region of the North Pacific - a 30-year retrospective study. *Journal of Oceanography*. 60:149-162
- 8) Chiba Yukihiro 2003. Forestry and CO₂ absorption by forests. *Farming Japan*. 37:18-20
- 9) 千葉幸弘 2003a. 森林の生産力とCO₂収支. *林木の育種*. 208:14-15
- 10) 千葉幸弘 2003b. 地球温暖化を防止するための森林施業の意義と課題. *山林*. 1425:17-24
- 11) 千葉幸弘 2004. CO₂収支評価における森林構造と動態. *地球環境*. 9, 213-220
- 12) Emerson, S. et al. 2004. Temporal trends in apparent oxygen utilization in the upper pycnocline of the North Pacific: 1980-2000. *Journal of Oceanography*. 60:139-148
- 13) Fujii, M. et al. 2005. Simulated biogeochemical responses to iron enrichments in three high nutrient, low chlorophyll (HNLC) regions. *J. Oceanogr.* 61:663-672
- 14) Fukumoto, Y. et al. 2005. Patterns and quantities of NH₃, N₂O and CH₄ emissions during swine manure composting without forced aeration--effect of compost pile scale. *Bioresource Technology*. 89:109-114
- 15) Han G. H. et al. 2005a. Late growing-season CH₄ budget in a rice paddy determined by stable isotope, emission flux, and soil storage measurements. *Organic Geochemistry*. 36:789-801
- 16) Han G. H. et al. 2005b. Concentration and carbon isotope profiles of CH₄ in paddy rice canopy: Isotopic evidence for changes in CH₄ emission pathways upon drainage. *Chemical Geology*. 218.25-40
- 17) 原口展子ら 2005. 山口県沿岸のホンダワラ類の生育適温と上限温度. *藻類*. 53:7-13
- 18) Harrison, P. J. et al. 2004. Nutrient and Plankton Dynamics in the NE and NW Gyres of the Subarctic Pacific Ocean. *Journal of Oceanography*. 60:93-117
- 19) Hattori, H. et al. 2004. Spatial variability of living coccolithophore distribution in the western Subarctic Pacific and the Bering Sea. *Journal of Oceanography*. 60:505-515
- 20) 平田泰雅 2004. 航空機レーザースキャナによる森林の3次元計測. *土木学会誌*. 89(1):28-30
- 21) 平田泰雅 2005a. 航空機レーザースキャナーの森林計測への適用とその可能性. *山林*. 1455:70-75
- 22) 平田泰雅 2005b. 航空機レーザースキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響. *森林計画学会誌*. 39(2):81-95
- 23) Hiroshima T. 2004. Strategy for implementing silvicultural practices in Japanese plantation forests to meet a carbon sequestration goal. *Journal of Forest Research*. 9(2):141-146
- 24) 広嶋卓也ら 2005. 森林部門と住宅部門を合わせた国レベル炭素吸収量の試算. *森林資源管理と*

- 数理モデル. 5:177-186
- 25) Iguchi N. 2004. Spatial/temporal variations in zooplankton biomass and ecological characteristics of major species in the southern part of the Japan Sea : a review. *Prog. Oceanogr.* 61:213-225.
- 26) 稲垣善之ら 2004. 間伐がヒノキ林土壌の二酸化炭素放出とメタン吸収に及ぼす影響. *森林応用研究.* 13:91-96
- 27) Iseki K. et al. 2003. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea. *Deep-Sea Research II.* 50:457-473
- 28) 井関和夫2002. 地球温暖化の本質と水産業等への影響予測. *水産海洋研究.* 67:261-263.
- 29) 石塚森吉 2006. 森林の二酸化炭素収支に関わる研究の現状と課題. *山林.* 1460:70-77
- 30) Itou, M. et al. 2003. Provenance of intermediate waters in the western North Pacific deduced from thermodynamic imprint on $\delta^{13}C(TCO_2)$. *Journal of Geophysical Research.* 108:10. 1029/2002JC001746
- 31) Ito S. et al. 2002. Saury group report and model results. *PICES Scientific Report.* 20:114-119
- 32) Ito S. et al. 2004. Contributions of the VENFISH program: meso-zooplankton, Pacific saury (*Cololabis saira*) and walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the northwestern Pacific. *J. Oceanogr.* 13 (Supple.1):1-9
- 33) Ito, S. et al. 2004. A fish bioenergetics model application to Pacific saury coupled with a lower trophic ecosystem model. *J. Oceanogr.* 13 (Supple.1):111-124
- 34) Kameda, T. and J. Ishizaka 2005. Size-fractionated primary production estimated by the two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. *Prog. Oceanogr.* 64:283-306
- 35) 亀田 卓彦, 石坂 丞二2004. 衛星から見た北西太平洋における基礎生産の時間変動. *水産海洋研究.* 68:258-259
- 36) 葛西広海ら 2002. Aラインにおける低次生産モニタリング. *月刊海洋.* 34. 777-781
- 37) 川崎康寛・日下彰 2003. Aラインにおける亜寒帯水の流量と水塊変動 号外海洋科学. 32:101-107
- 38) Kishi, M. J. et al. 2004. Comparing primary production and vertical flux using different ecosystem models in the western North Pacific. *J. Oceanogr.* 60:63-73
- 39) Kiri, H. et al. 2005. Characteristics of storm surge disaster due to typhoon 9918 in farm-lands in the Yatsushiro Sea coastal area. *J. Agr. Meteor.* 60:359-364
- 40) 桐 博英ら 2005. 地球温暖化後の台風に伴う高潮潮位偏差の変化. *海岸工学論文集.* 51:241-245
- 41) 倉本恵生ら 2005. 間伐がヒノキ林の落葉量と季節性に及ぼす影響. *森林応用研究.* 13:97-102
- 42) 丸山篤志・大場和彦・黒瀬義孝 2004. 高温条件下におけるイネの受精率は湿度が高いほど低下する. *九州沖縄農業研究成果情報.* 19: 609-610
- 43) Liu, H. et al. 2004. The community structure and dynamics of phytoplankton in the western subarctic Pacific Ocean. *Journal of Oceanography.* 60:119-137
- 44) Miyata A. et al. 2005. Seasonal variation of carbon dioxide and methane fluxes at single cropping paddy fields in central and western Japan. *Phyton.* 45(4):89-97
- 45) 中島徹ら 2005京都議定書3条4項林の算定手法の検討—岐阜県を事例として. *日本林学会誌.* (88)3:181-186
- 46) Nakata, K. and Koyama, S 2003. Interannual changes of the winter to early spring biomass and composition of meso-zooplankton in the Kuroshio region in relation to climatic factors. *J. Oceanogr.* 59:225-234
- 47) Nakata, K. and Hidaka, K. 2003. Decadal-scale variability in the Kuroshio marine ecosystem in winter. *Fish. Oceanogr.* 12:234-244
- 48) Nakata, K. et al. 2004. Seasonal changes in the reproduction of three oncaeid copepods in the surface layer of the Kuroshio Extension.. *J. Oceanogr.* 13 (Supple.1):111-124
- 49) 中田薫2002. 黒潮流域におけるメソ動物プランクトン群集の変動とその機構. *月刊海洋 特集号*

- 「黒潮の生物輸送と生産機能」:217-222
- 50) 中田薫 2005. モデルのアイデア1 亜寒帯・亜熱帯汎用モデルの開発. 月刊海洋. 37:614-617
- 51) Nishimura, S. et al. 2005. Development of a system for simultaneous and continuous measurement of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from croplands based on the automated closed chamber method. *Soil Sci. and Plant Nutrition*. 51:557-564
- 52) Nishimura, S. et al. 2005. Continuous, automated nitrous oxide measurements from paddy soils converted to upland crops. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 69:1977-1986
- 53) 野田幹雄ら 2002. 響灘蓋井島の秋季と春季における成魚期のアイゴの食性. *水産工学*. 39:5-13
- 54) 野中最子ら 2004. 気候温暖化が育成牛の生理生産反応に及ぼす影響. 日本畜産学会103回大会講演要旨. 71
- 55) Noto, M. and Yasuda, I. 2003. Empirical biomass model for the Japanese sardine with sea surface temperature in the Kuroshio Extension. *Fisheries Oceanography*. 12:1-9
- 56) 能登正幸・安田一郎 2001. マイワシと気候変動. 月刊海洋. 号外24:218-227
- 57) 能登正幸 2003. 北西太平洋の水温変動とマイワシ資源・分布の関係. 月刊海洋. 35:32-38
- 58) 能登正幸 2005. 定置水温・神戸コレクションの水産への応用. *水産海洋研究*. 63:237-238
- 59) Nouchi, I. and S. Yonemura 2005. CO₂, CH₄ and N₂O fluxes from soybean and barley double-cropping in relation to tillage in Japan. *Phyton*. 45. 327-338
- 60) Ohi, N. et al. 2005. Diel patterns in chlorophyll a specific absorption coefficient and absorption efficiency factor of picoplankton. *Journal of Oceanography*. 61:379-388
- 61) 岡田邦彦・生駒泰基・村上健二 2003. ホウレンソウの生育に対する高温影響評価モデルの開発1. 高温処理が光利用率に及ぼす影響. *園芸学会雑誌*. 72(別1):101
- 62) 岡本勝男ら 2003. 衛星リモートセンシングを用いたアジアの食料生産予測の現状と将来. *システム農学*. 19(3):46-52
- 63) Ono, T. et al. 2002. Multi-decadal decrease of net community production in western subarctic North Pacific. *Geophysical Research Letter*. 29:10.1029/2001GL014332
- 64) Ono, T. et al. 2003. Re-estimation of annual anthropogenic carbon input into North Pacific intermediate Water. *Journal of Oceanography*. 59:883-891
- 65) Ono, T. et al., 2004. Basin-scale extrapolation of shipboard pCO₂ data by using satellite SST and Chla. *International Journal of Remote Sensing*, 25:3803-3815
- 66) Ono, T. et al. 2005. Seasonal and interannual variation of DIC in the Oyashio mixed layer A climatological view. *Journal of Oceanography*. 61:1075-1088.
- 67) 小埜恒夫 2004. 北太平洋の気候変動と炭素循環に関する研究. *海の研究*. 13:347-356
- 68) Oozeki, Y. et al. 2003. Growth rate variability of Pacific saury, *Cololabis saira*, larvae in the Kuroshio waters. *Fisheries Oceanography*. 12:419-424.
- 69) 大関芳沖・木村量 2002. 日本周辺海域の卵稚仔プランクトンモニタリング. *水産海洋研究*. 66:262-264
- 70) Oue, H. et al. 2005. Effects of FACE (Free-Air CO₂ Enrichment) on leaf and panicle temperature of rice at heading and flowering stage. *Phyton*, 45(4):117-124
- 71) Sabine, C. L. et al. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*. 305:367-371
- 72) 齊藤宏明・津田敦 2002. 海洋システム研究における生物モニタリング. 月刊海洋. 34:660-670
- 73) Sakanishi, Y. et al. 2004. Photosynthetic light-response curves in cold water species of Laminariales from the eastern Pacific coast of Hokkaido. *Jpn. J. Phycol.* 52:33-39
- 74) 坂西芳彦・飯泉 仁 2004. 北海道根室半島沿岸の水中光量子量-コンブ目藻類の生育限界水深との関係. *藻類*. 52:141-148
- 75) Shigenaga, H. et al. 2005. The Potential Effect of Climate Change on the Transpiration of

- Sugi(*Cryptomeria japonica* D. Don) Plantations in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*. 60(5): 451-456
- 76) 重田利拓ら 2003. 広島湾における暖海性魚類の出現とこれに伴う新たな問題. *水産海洋研究*. 67:273-277
- 77) 島地英夫ら 2003. 空気膜構造による太陽エネルギー利用ハウスの開発. *関東の農業気象*. 29. 2-5
- 78) Siswanto E. et al. 2005. Estimating Chlorophyll-a vertical profiles from satellite data and implication for primary production in the Kuroshio front of the East China Sea. *J. Oceanography*. 61:575-589.
- 79) 杉崎宏哉 2004. 本州東方海域の動物プランクトン生物量の長期変動—親潮域・混合域・黒潮続流の相違—. *月刊海洋*. 36:733-738
- 80) Sugiura T. et al. 2005. Prediction of Effects of Global Warming on Apple Production Regions in Japan. *Phyton*. 45:419-422
- 81) 杉浦俊彦・横沢正幸 2004. 年平均気温の変動から推定したリンゴおよびウンシュウミカンの栽培環境に対する地球温暖化の影響. *園芸学会雑誌*. 73:72-78
- 82) 杉浦俊彦 2004. 地球温暖化の現状と今後の予測. *果実日本*. 59(6):18-21
- 83) 杉浦俊彦 2005. 地球温暖化の現状と果樹栽培環境の変動予測について. *園芸学雑誌*. 74(別2): 58-59
- 84) Tadokoro, K. et al. 2005. Interannual variations of *Neocalanus* copepods biomass in the Oyashio waters of the western subarctic North Pacific. *Fisheries Oceanography*. 14:210-222.
- 85) Takasuka, A. et al. 2004a. Three synergistic growth-related mechanisms in the short-term survival of larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Sagami Bay. *Marine Ecology Progress Series*. 270:217-228
- 86) Takasuka, A. et al. 2004b. Growth-selective predation hypothesis revisited for larval anchovy in offshore waters: cannibalism by juveniles versus predation by skipjack tunas. *Marine Ecology Progress Series*. 278:297-302
- 87) 竹内郁雄・伊東宏樹 2003. スギ高齢人工林の樹高成長. *日本林学会誌*. 85:121-126
- 88) Tao, F.-L., and Yokozawa, M. 2005. Risk Analysis of Rice Yield to Seasonal Climate Variability in China. *Journal of Agricultural Meteorology*. 60(5):885-887
- 89) Tao, F.-L. et al. 2004. Climatological and agricultural production variability in China in association with East Asia summer monsoon and El Nino southern oscillation. *Climate Research*:28, 23-30
- 90) Tao, F.-L. et al. 2005a. Remote sensing of crop production in China by production efficiency models: models comparisons, estimates and uncertainties. *Ecological Modelling*. 183:385-396
- 91) Tao, F.-L. et al. 2005b. A perspective of water resources in China: Interactions between climate and soil degradation. *Climatic Change*. 68:169-197
- 92) Tao, F.-L. and Yokozawa, M. 2005. Future agricultural water resources and agricultural production in China - Interactions between climate change and soil degradation. *Journal of Agricultural Meteorology*. 60(6):1169-1174
- 93) 寺脇利信ら 2002. 南西日本の磯焼け海域における海底景観の特徴. *水産工学*. 39:29-35
- 94) 寺脇利信ら 2004. 魚の食害対策について. *漁港*. 46:16-21
- 95) Tsuda, A. et al., 2004. Life histories of *Eucalanus bungii* and *Neocalanus cristatus* (Calanoida: Copepoda) in the western subarctic Pacific. *Fisheries Oceanography*. Suppl. 113:10-20
- 96) Tsuda, A. et al. 2005. Responses of diatoms to iron-enrichment(SEEDS) in the western subarctic Pacific, temporal and spatial comparisons. *Progress in Oceanography*. 64:189-205.
- 97) 津田 敦ら 2004. 衛星データを用いた海洋一次生産見積もりのための日本近海Sea-truthデータの集積. *地球環境*. 9:145-152
- 98) Utsugi, H. et al. 2005. Spatial and seasonal variation in leaf morphology in a canopy of a deciduous forest in northern Japan. *Phyton*. 45:245-251
- 99) Wakita, M. et al. 2005. Temporal change of dissolved inorganic carbon in the subsurface water at Station KNOT (44N, 155E) in the western North Pacific subpolar region. *Journal of Oceanography*.

- 61:129-139
- 100) 王秀清・銭小平 2004 .1981-2000年中国農産物価格上昇の波及効果. 中国農村経済. 2:12-16
- 101) Watanabe, Y. et al. 2003a. Synchronous bi-decadal periodic changes of oxygen, phosphate and temperature between the Japan Sea deep water and the North Pacific intermediate water. *Geophysical Research Letter*, 30:10.1029/2003GL018338
- 102) Watanabe, Y. et al. 2003b. Comparison of time-dependent tracer ages in the western North Pacific: Oceanic background levels of SF₆, CFC-11, CFC-12 and CFC-113. *Journal of Oceanography*. 59:719-731
- 104) Watanabe, Y. et al. 2003c. Growth and survival of Pacific saury in the Kuroshio-Oyashio transitional waters. *Journal of Oceanography*. 59: 03-414
- 105) 渡邊朝生・平井光行2002. 水産庁関係定線観測の現状と今後の取り組み. 月刊海洋. 34:721-729
- 106) Yamada K. et al. 2005. Spatial and temporal variability of satellite primary production in the Japan Sea. *J. Oceanography*. 61:857-870.
- 107) Yamanaka, Y. et al. 2004. An ecosystem model coupled with Nitrogen-Silicon-Carbon cycles applied to Station A-7 in the Northwestern Pacific. *J. Oceanogr.* 60:227-241
- 108) Yasuda, I. 2003. Hydrographic structure and variability of the Kuroshio-Oyashio Transition Area. *Journal of Oceanography*. 59:389-402
- 109) 安田一郎ら 2005. 混合層・クロロフィルフロートによる黒潮続流域の観測. 月刊海洋. 37(10):756-762
- 110) Yokozawa, M. et al. 2004. Risk analysis of cropland suitability in China under climatic variability and change. *Crop, Environment and Bioinformatics*. 1:264-271
- 111) Yoshie N. et al. 2003 One dimensional ecosystem model simulation of the effects of vertical dilution by the winter mixing on the spring diatom bloom. *J. Oceanogr.* 59:563-571
- 112) Yoshie, N. et al. 2005. Ecosystem changes with the iron fertilization in the western North Pacific simulated by a one-dimension ecosystem model. *Prog. Oceanogr.* 64:307-324
- 113) Yoshie, N. and Y. Yamanaka 2005. Processes causing the temporal changes in Si/N ratios of nutrient consumptions and export flux during the spring diatom bloom. *J. Oceanogr.* 61:1059-1073
- 114) Yoshimoto, M. et al. 2004. The effects of FACE (Free-Air CO₂ Enrichment) on temperature and transpiration of rice panicles at flowering stage. *Journal of Agricultural Meteorology*. 60(5):597-600

IX 特許取得・申請

- 1) 「魚類のIGF-I濃度の測定方法及びその方法に用いる測定キット」(特許2005-78037) 安藤 忠
- 2) 「屋根用空気膜」(特許第3534861号) 島地英夫、東出忠桐、高市益行、柳 雅之、速見和彦

X 研究担当者

- 1 陸域系
 - 独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構果樹研究所
 - 杉浦俊彦*、朝倉利員、黒田治之、杉浦裕義
 - 独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構野菜茶業研究所
 - 岡田邦彦*、今田成雄、山崎敬亮、浅沼伸吾
 - 独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構畜産草地研究所
 - 野中最子、樋口浩二、田鎖直澄、藪元悠介、永西修*、高田良三、勝俣昌也、石田藍子、山崎 信、中島一喜、阿部啓之、甫立京子、林征幸、栗原光規
 - 独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構九州沖縄研究センター
 - 丸山篤志*、大場和彦、Weerakon W.M.W
 - 独立行政法人農業環境技術研究所
 - 野内 勇、宮田 明*、Gwang Hyun Han、間野正美、山田智康、永井秀幸、小野圭介、吉越恆、岡本勝男*、横澤正幸、長谷川利拓、吉本真由美*、小林和彦
 - 独立行政法人国際農林水産業研究センター
 - 銭 小平*、古家 淳
 - 独立行政法人森林総合研究所
 - 粟屋善雄*、沢田治雄、千葉幸弘*、平田泰雅、重永英年、松本光朗*、田村和也、鹿又秀聡

(委託先) 国立大学法人東京大学
広嶋卓也

(委託先) 国立大学法人京都大学
松井 勤

(委託先) 国立大学法人愛媛大学
大上博基

(委託先) 大学共同利用機関法人人間文化研究機構
総合地球環境学研究所
鄭躍軍

2 水域系

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

小埜恒夫、川崎康寛、日下 彰、葛西広海、
坂西芳彦、安藤 忠*

独立行政法人水産総合研究センター東北区水産研究所

伊藤進一*、清水勇吾、笥 茂穂、齊藤宏明、
桑田 晃、高橋一生、杉崎宏哉、岡崎雄二、
舘澤みゆき、鹿島基彦

独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所

渡邊朝生*、中田 薫*、塩本明弘、広江 豊、
小松幸生、日高清隆、豊川雅哉、市川忠史、
高須賀明典*、大関芳沖、久保田洋、能登正幸

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

飯泉 仁、井口直樹、森本晴之、加藤 修
独立行政法人水産総合研究センター遠洋水産研究所

亀田卓彦

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西海区水産研究所

田中勝久*、西内 耕、横内克巳、清本容子、
岡村和麿、長田 宏、長谷川徹、塚本洋一、
佐々千由紀、吉村 拓*、山田秀秋

独立行政法人水産総合研究センター養殖研究所

奥 宏海、奥澤 公一、伊藤 文成、阿保 勝之、
徳田 雅治、坂見 知子

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、桑原久実

独立行政法人水産大学校

野田幹雄、村瀬 昇

(委託先) 国立大学法人北海道大学

山中康裕、吉江直樹

(委託先) 国立大学法人東京大学

安田一郎

3 対策系

独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構
構花き研究所

島地英夫

独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構
構北海道農業研究センター

古賀伸久、長田 隆*、福本泰之

独立行政法人農業環境技術研究所

八木一行*、西村誠一、米村正一郎、野内 勇、
鳥谷 均*、西森基貴、金 元植

独立行政法人農業工学研究所

丹治 肇、桐 博英*、中矢哲郎

独立行政法人森林総合研究所

佐藤 明、竹内郁雄、川崎達郎、酒井佳美、
岡 勝、梅田修史、陣川雅樹、鈴木秀典

独立行政法人森林総合研究所北海道支所

石塚森吉

独立行政法人森林総合研究所四国支所

稲垣善之、奥田史郎、酒井 武

独立行政法人森林総合研究所多摩森林科学園

岩本宏二郎

(委託先) 北海道立畜産試験場

田村 忠

(委託先) 岡山県総合畜産センター

白石 誠

(委託先) 熊本県農業研究センター

石橋 誠、森 和彦

(委託先) 株式会社三菱総合研究所

吉田直樹、福田 桂、柳川玄永、葦津紗恵、
高木 健、板尾知彦

(※執筆者)

X I 取りまとめ責任者あとがき

産業革命以降、様々な技術革新とともに、工業分野にとどまらず農林水産分野においても、生産性が向上し、私たちに豊かな生活をもたらしてきた。しかしながら、それらの生産過程や生活の場で消費されるエネルギーは膨大で、近年、大気中の二酸化炭素と気温の上昇による地球温暖化の影響が地球レベルで顕在化してきており、その解決が喫緊の課題となっている。特に、自然を生産の場としている農林水産業への影響は甚大で、地球温暖化研究に関しては、農林水産省では、特別研究「農林水産生態系を利用した地球環境変動要因の制御技術の開発」において、平成2年度から8年度にかけて研究を実施してきた。その成果は、IPCC報告書の内容に貢献したのをはじめ、国内では「地球温暖化と日本—自然・人への影響予測—第3次報告書」（古今書院）に取りまとめられ、地球温暖化研究の先駆けとなった。この間、平成4年（1992年）には国連環境開発会議で気候変動枠組み条約が締結され、平成9年（1997年）の第3回締約国会議では、地球温暖化防止に向けて、先進国の温室効果ガスの排出削減量を定めた京都議定書が議決された。

このような背景をもとに、京都議定書への対応や地球温暖化に関する最新の科学的知見がレビューされるIPCC第4次報告書作成への貢献が求められる中、平成14年度に開始した本プロジェクト研究「地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発」は、農林水産業を包括する地球温暖化研究としては最初のプロジェクトであり、農業、林業、水産業に関係する分野の研究者が集まり、地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響の評価と温室効果ガスの排出削減目標達成のための対策技術の開発を目指して、総合的に取り組まれた。また、この研究は第2期科学技術基本計画を推進する目的で、平成13年度に内閣府に設置された総合科学技術会議に所属する地球温暖化研究イニシアティブのもとに位置づけられて推進された。

そして、圃場観測やリモートセンシング解析による温室効果ガス収支や地球温暖化モニタリング、FACEなどの圃場実験、現地観測及びモデリングによる農林水産資源への温暖化の影響評価、森林、農耕地から発生する温室効果ガスの発生抑制技術などに大きな成果をあげた。これらの成果の一部は、IPCC第4次報告書や各国の温室効果ガス発生量の算定基準となるIPCCガイドラインの作成に貢献している。また、平成15年12月12日には、「地球温暖化研究推進のための国内ワークショップ：地球温暖化と農林水産業—研究の最前線」を開催し、一般市民を含めた広範囲の方々に、地球温暖化と農林水産業に関する研究の重要性や役割を理解いただいた。さらに、農業環境技術研究所のWebページに、本プロジェクトのページを設け、プロジェクトの内容や成果を紹介してきた。

一方、京都議定書はアメリカの参加が得られなかったが、ロシアが批准したことにより、平成17年2月16日に発効した。これに伴って、2008～2012年の第一約束期間で日本は温室効果ガス排出量を1990年水準に対して6%減らすことが求められているが、現時点では、温室効果ガス排出量は増加しており、京都議定書の6%削減約束を確実に達成するために、必要な措置を講じる必要がある。さらに、第10回締約国会議（COP10）ではポスト京都議定書（2013年以降）を視野に入れた「政府専門家セミナー」や温暖化による被害を科学的に評価し、対策案を検討するブエノスアイレス行動計画がまとめられた。また、国内では、総合科学技術会議の地球温暖化研究イニシアティブ気候変動研究分野での「気候変動研究の戦略的推進について」がまとめられた。ここで得られた成果は、地球温暖化対策や農林水産業への温暖化影響の緩和に貢献するとともに、ポスト京都議定書に向けた新たな動きにも対応できる研究につながることを期待される。

（推進リーダー：今川 俊明）

第1編 陸域系

第1章 地球温暖化のモニタリング及び将来予測

1 地球温暖化のモニタリング

(1) 陸域生態系の温室効果ガス収支の機構解明とモニタリング

ア 研究目的

本研究では、モンスーンアジアを代表する農業生態系であり、我が国でも広い作付面積を占める水田生態系を対象に、二酸化炭素(CO₂)及びメタン(CH₄)のフラックスのモニタリングと安定同位体の測定を組み合わせた観測を行い、フラックスの素過程を分離評価して温室効果ガス収支の機構を解明するとともに、フラックスの長期的変化を把握し、気候変化に伴うフラックスの変動を予測するための基礎データを得ることを目的とする。



写真1111-1 水田観測点

イ 研究方法

(ア) 観測点

茨城県つくば市真瀬の水田(36° 03' 14" N、140° 01' 37" E、標高15m)で観測を実施した(写真1111-1)。観測対象の圃場では、イネ(品種:コシヒカリ)がこの地域の慣行に従って栽培されており、観測期間中は5月始に移植、9月上・中旬に収穫が行われた。水管理は、4月下旬に灌水開始、6月下旬から7月上旬にかけて中干し、8月中旬に落水が行われ、湛水時の水深は3~5cmであった。2005年を除き、稲藁を含む収穫残さは、収穫後の最初の耕耘時に土壤中にすき込まれた(2005年は焼却)。収穫か

ら翌年4月中旬の灌水開始までは、圃場は落水状態に保たれた。

(イ) CO₂及びCH₄のフラックスの測定

CO₂フラックスは渦相関法により、またCH₄フラックスは傾度法により測定した。CO₂濃度の測定には、オープンパス型赤外線ガス分析計(LI-7500、LI-COR)を用いた(Saitoら、2005)。CH₄濃度は、あらかじめCuO/MnO触媒を用いて非メタン炭化水素を燃焼除去した後、水素炎イオン化検出器型の炭化水素計(APHA360、堀場製作所)で測定した(Hanら、2005a)。傾度法で必要となる渦拡散係数は、超音波風速温度計(DA-600、Kaijo)で測定した摩擦速度及び大気安定度から決定した(Miyataら、2000)。

(ウ) CO₂及びCH₄の炭素安定同位体比の測定

圃場から定期的に土壌を採取して培養実験を行い、土壌中で生成される(酸化による同位体分別を受ける前の)CH₄の炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$ 値)を決定した。また、イネの茎部から採取した空気サンプルの分析により、稲体を経由して放出されるCH₄の $\delta^{13}\text{C}$ 値を決定した。この二つの同位体比の違いから、土壌中でのCH₄の酸化割合を推定した(Hanら、2005b)。水稻群落内及び群落上の計5高度で空気サンプルを採取して、CO₂とCH₄の濃度及び $\delta^{13}\text{C}$ 値の高度分布を測定し、Keeling plot法を適用することにより、生態系(水田)起源のCO₂及びCH₄の $\delta^{13}\text{C}$ 値を決定した(Hanら、2005a)。また、土壌中や稲体中のガスの $\delta^{13}\text{C}$ 値と、水田起源のガスの $\delta^{13}\text{C}$ 値とから、大気中に放出されるCO₂及びCH₄の放出経路別割合を決定した。各種サンプルの同位体比の分析には、自動燃焼濃縮装置(Precon、Thermoquest)と質量分析計(Mat 252、Finnigan Mat)付きガスクロマトグラフ(5890 Series II、Hewlett-Packard)を用いた。

ウ 研究結果

(ア) CO₂フラックスの季節変化・年々変動

水田のCO₂フラックスは、イネの生育期間は吸収、非生育期間は放出という、明瞭な季節変化を示した。生育期間のCO₂フラックスは、7月下旬から8月上旬

の出穂期に吸収が最大となり、収穫前には放出に転じた。非生育期間のCO₂フラックスは、収穫直後に放出の最大値を示した後、冬季から翌年の湛水前までは約1gCm⁻²d⁻¹の弱い放出が続いた（図1111-1）。年間の純生態系CO₂交換量（NEE）は-130~-290gCm⁻²y⁻¹（負値は水田による吸収）で、その変動幅は

160gCm⁻²y⁻¹に達した。年々変動の主な要因は、1）生育期間の日射量の変動に伴う総光合成量の変動、2）生育期間の中干し・落水日数による土壌呼吸量（根呼吸量と微生物呼吸量の和）の変動、3）非生育期間の日数及び気温の変動による土壌呼吸量の変動であった。

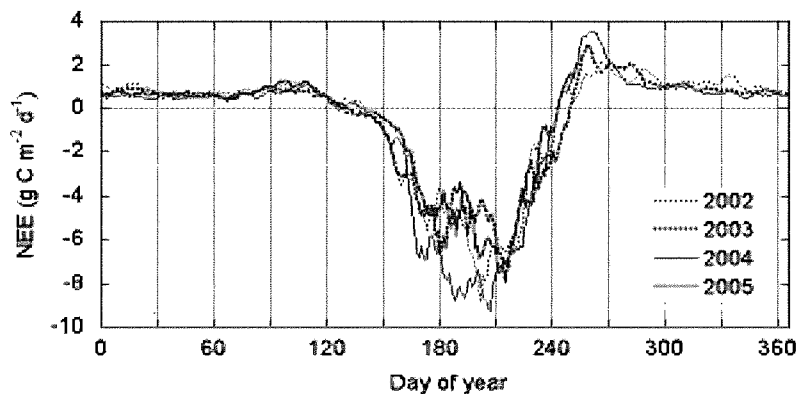


図1111-1 水田の純生態系CO₂交換量（NEE）の季節変化
1）負値は水田による吸収、正值は水田からの放出

（イ）CH₄フラックスの季節変化・年々変動

水田のCH₄フラックスは、移植約1ヶ月後（湛水開始から約40日後）以降、放出量が徐々に増加し、中干し期の一時的な減少を経て、8月中旬の落水期にフラッシュ（土壌中に貯留されたCH₄が一举に大気中に放出される現象）が見られる、という一般的な季節変化を示した。水管理の違いや、降水量の年々変動の影響を受けて、フラッシュが観測される時期や大きさは年によって異なった（図1111-2、上図）。2003年～2005年の生育期間のCH₄の総放出量は、それぞれ、19.9、19.1、11.4gCm⁻²であった。2005年の総放出量が前2年間に比べて少なかったのは、6月下旬から7月中旬にかけて、長期間の中干しが実施されたことが原因である。

（ウ）年間の炭素収支と温室効果ガス収支

収穫物（籾）の搬出に伴う水田からの炭素の流出

量を考慮すると、2002年～2004年の水田の年間炭素収支（純生物相生産量）は、-88～+48gCm⁻²y⁻¹であった（移植日から翌年の移植日前日までの積算値で、正值は水田による吸収。CH₄の放出量は除く。なお、観測水田の溶存態炭素の収支は、生育期間全体では無視できる）。このように、観測水田の炭素収支は、平均的にはほぼ均衡しているが、単年の炭素収支は100gCm⁻²y⁻¹を越える年々変動を示すことがわかった。一方、気候変動に関する政府間パネル（2001年）による地球温暖化指数を考慮すると、2003年～2005年のCH₄の総放出量は、CO₂換算で87～145gCm⁻²y⁻¹に相当する（ただし、今後100年間の積算効果を考える場合）。従って、温室効果ガス収支の観点から観測水田を評価すると、CO₂の吸収源としての作用よりも、CH₄の放出源としての作用が大きかったことがわかった。

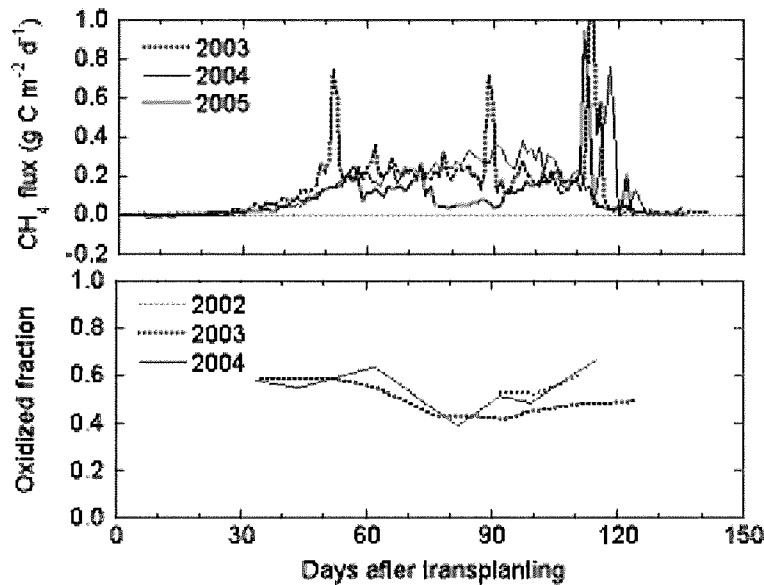


図1111-2 CH₄の大気への放出量と土壌中での酸化割合の季節変化

- 1) 日放出量 (上図)
- 2) 土壌中でのCH₄の酸化割合 (下図)

(エ) 土壌中でのCH₄の酸化割合

生成されたCH₄の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、湛水後日数とともに増加する傾向を示した。これは、CH₄の生成経路の変化、すなわち、CO₂還元によって生成されるCH₄の割合が徐々に増加するため、と推定される。イネの茎中のCH₄の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、生成されたCH₄の $\delta^{13}\text{C}$ 値に比べて約20%重かった。この結果、生成されたCH₄の土壌中での酸化割合は40~65%と算定され、生育中期にやや低下する、弱い季節変化を示した(図1111-2、下図)。イネの生育とともに、根圏でのCH₄の酸化量は増加するが、生育後期にはCH₄の生成量も増加するため、生育初期・中期に比べて酸化割合が急増することはないと考えられる。生育期間の合計では、CH₄の総生成量の約半分が土壌中で酸化されたと推定される。

(オ) 生態系呼吸に占める地下部起源のCO₂の割合

Keeling plot法を適用して決定した夜間に水田から放出されるCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値(δ_R)は、稲体(葉)を構成する有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 値(光合成によって固定されたCO₂の同位体比)とは異なり、稲体の $\delta^{13}\text{C}$ 値と土壌中のCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値の中間の値を示した。また、落水期には δ_R が上昇し、土壌中のCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値に近づく傾向を示した(図1111-3)。この結果は、湛水期でも生態系呼吸量のすべてをイネ地上部の呼吸量が占めるのではなく、地下部(土壌呼吸量)の寄与も無視

できないこと、落水期には土壌呼吸量の割合が上昇することを示している。図1111-3の結果を用いて、イネ地上部の呼吸量と土壌呼吸量とを分離し、さらに、イネの部位別の呼吸量とその乾物重に比例すると仮定して、根呼吸量と微生物呼吸量とを分離した。このようにして推定した微生物呼吸量の割合は、生育期間の総生態系呼吸量の36%(2003年)~37%(2004年)を占めた。この割合は、チャンバー法の結果(2004年が26%、2005年が34%)や、地温と呼吸量との経験式を用いて推定した値(20~27%)に比べてやや高かったが、各手法の測定領域や測定頻度が異なることを考慮すれば、手法による推定結果の違いは小さいと考えられる。

(カ) CO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値の季節変化

イネの生育に伴って気孔コンダクタンスが低下し、光合成に伴う同位体分別効果が弱まるため、稲体の $\delta^{13}\text{C}$ 値は湛水後日数とともに上昇した(図1111-3、上図)。土壌中のCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値も同様に上昇傾向を示したが、土壌中のCH₄の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、対照的に低下傾向を示した(図1111-3、下図)。この結果から、土壌中でのCO₂還元によるCH₄生成過程で同位体分別が起こり、軽いCO₂が選択的に消費されるため、CH₄生成量の増加に伴って土壌中のCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値が上昇したと考えられる。

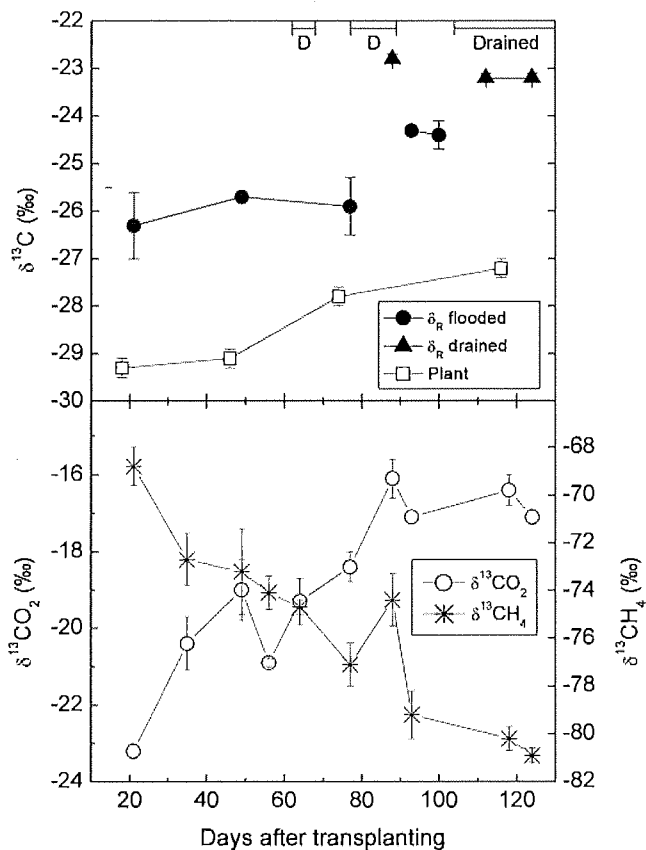


図1111-3 水田から放出されるCO₂の同位体比と、土壌中のCO₂及びCH₄の同位体比の季節変化

- 1) 夜間に水田から放出されるCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値(d_R)と植物体(葉)の $\delta^{13}\text{C}$ 値(上図)
- 2) 土壌中に存在するCO₂及びCH₄の $\delta^{13}\text{C}$ 値(下図)
- 3) 上図のDは中干し・落水期間

エ 考察

(ア) イネ単作田のCO₂とCH₄の年間収支

生育調査とチャンバー法を組み合わせた既往の研究では、水田の年間炭素収支は、ほぼ均衡していると報告されており(小泉ら、1999)、本研究でも同様の結果が得られた。また、本研究では、水田のように管理された生態系であっても、気象条件や圃場管理の年次間差の影響を受けて、単年の炭素収支は100gCm⁻²y⁻¹を越える年々変動を示すことが明らかになった。さらに、水田の炭素収支の絶対値が小さいことから、非生育期間の微生物呼吸や、年次によっては生育期間のCH₄放出量も、年間の炭素収支に無視できない寄与があることがわかった。このように、本研究では、現在のフラックスの標準的手法である渦相関法を中心とした長期観測により、イネ単作田

のCO₂とCH₄の年間収支とその変動を定量的に明らかにすることができた。

(イ) 水田と大気間のCO₂及びCH₄の交換機構

CO₂とCH₄のフラックスと同位体比の同時観測により、生育期間の水田のCO₂収支における土壌呼吸量の重要性、水田土壌中でのCH₄の酸化割合やその季節変化などが明らかになった。CO₂及びCH₄の収支構成要素に関する観測データは十分ではなく、これらの結果は生物地球化学モデルの改良や検証に利用できる。また、水田におけるCH₄生成が土壌中のCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値に影響を与え、光合成・呼吸の同位体不平衡(光合成で固定されるCO₂と呼吸で放出されるCO₂の同位体比が一致しない現象)の一因となっていることは、生物地球化学的に新たな知見であり、自然湿地等の他のタイプの湛水生態系での検証が望まれる。

オ 今後の課題

(ア) 非耕作期間のCO₂収支の測定

イネ単作田では植物の非生育期間が年間の2/3を占めるため、年間のCO₂収支の評価において非生育期間のCO₂フラックスの測定も重要である。現在のオープンパス型渦相関法による測定では、非生育期間の日中に不自然な吸収フラックスが観測される問題が顕在化しており(Miyataら、2005)、早急な対策が求められている。今後、オープンパス型渦相関法の改良とともに、クローズドパス型渦相関法やチャンバー法との組み合わせにより、非生育期間のCO₂フラックスの測定精度を向上させる必要がある。

(イ) 日中のCO₂フラックスの総光合成量と生態系呼吸量への分離

本研究では、Isoflux法(CO₂濃度とその $\delta^{13}\text{C}$ 値との線形関係を利用して、¹³Cを含むCO₂のフラックスを測定する方法)を適用して、日中のCO₂フラックスを生態系呼吸量と総光合成量に分離することを試みたが、生態系呼吸量が午前中に極大値を示すなどの不自然な結果となった。光合成で吸収されるCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値の日変化や、生態系呼吸量の構成要素の日変化などの、分離法に含まれる諸仮定の妥当性を検討し、分離法を改良する必要がある。

(ウ) 異なる作付けの水田の温室効果ガス収支

モンスーンアジアには、本研究で対象としたイネ単作田の他に、イネ・ムギ二毛作田やイネ多期作田

などの、作付け方式の異なる水田も広く分布している。今後はこれらの水田のCO₂及びCH₄の収支を定量化し、イネ単作田との差異を明らかにする予定である。

カ 要 約

慣行栽培のイネ単作田で、CO₂及びCH₄のフラックスと安定同位体比の同時観測を行い、炭素収支は平均的には均衡に近いが、単年の炭素収支は100gCm⁻²y⁻¹を越える年々変動を示すこと、生育期間の土壌呼吸量や非生育期間の微生物呼吸量も、年間炭素収支に重要な役割を果たしていること、大気中に放出されるCH₄量は生成量の約半分であるが、温室効果ガスの収支上はCH₄放出の効果がCO₂吸収の効果を上回り、水田は温室効果ガスの放出源として作用していること、CH₄生成過程での同位体分別が、呼吸によって放出されるCO₂のδ¹³C値に影響を及ぼし、光合成・呼吸の同位体不平衡の一因となっていることなどが明らかになった。

キ 引用文献

Han, G.H. et. al. 2005a. Concentration and carbon isotope profiles of CH₄ in paddy rice canopy: Isotopic evidence for changes in CH₄ emission pathways upon drainage. *Chemical Geology*. 218:25-40.

Han, G.H. et. al. 2005b. Late growing-season CH₄ budget in a rice paddy determined by stable isotope, emission flux, and soil storage measurements. *Organic Geochemistry*. 36:789-801.

小泉博ら 1999. 土壌-作物系における炭素循環過程の動態解明. *研究成果*. 339:55-59.

Miyata, A. et. al. 2000. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agric. Forest Meteorol.* 102(4):287-303.

Miyata, A. et.al. 2005. Seasonal variation of carbon dioxide and methane fluxes at single cropping paddy fields in central and western Japan. *Phyton*. 45(4):89-97.

Saito, M. et. al. 2005. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. *Agric. Forest Meteorol.* 135:93-109.

研究担当者(宮田明*、Gwang Hyun Han、間野正美、山田智康、永井秀幸、小野圭介、吉越恆)

(2) 陸域植生の純一次生産力の長期変動モニタリング

ア 研究目的

約20年間の地球観測衛星データと気象データから、陸域植生の純一次生産力(NPP)を推定する。このため、衛星の正規化植生指数(NDVI)データと表面温度データを収集し、ノイズ除去方法を改良して衛星の10日間隔のノイズ除去データを作成する。気象メッシュデータを整備し、衛星データで観測されるフェノロジーと気候要素の関係解析の結果などに基づいてNPP推定モデルを改良し、全球のNPPを推定して経年変化の傾向を明らかにする。

イ 研究方法

(ア) NOAA衛星Pathfinder (PAL) の10日間合成全球データ(8kmメッシュ)のノイズを除去するため、既存のLMFを改良し、カルマンフィルタを組み込んだノイズフィルタ(LMF-KF)を開発する。PALデータに対してLMF-KFを適用し、オリジナル画像とノイズ除去画像(PAL-KF画像)の適合性を確認する。また、全球レベルでのNDVIのトレンドを確認する。

(イ) メッシュ気象情報として米国環境予測センター大気研究所(NCEP/NCAR)の客観解析データ(Reanalysis-2)から10日間隔データを作成して、8kmメッシュに内挿してPAL-KF画像に重なるデータセットを作成する。

(ウ) 表面温度、気温とNDVIの季節変化を相互に比較して、それぞれの特徴を明らかにするとともに、NPP推定に適した温度データについて検討する。また、PALのNDVIや表面温度に基づいて植生の生育期間を推定する方法を開発し、この生育期間を利用してNPPを推定できるようにアルゴリズムを改良する。

(エ) 光利用効率について検討し見直すとともに、気温と表面温度についてNPP推定への有効性を検証する。温度データと光利用効率の検討結果を踏まえ、表面温度データ、日射量データ、土壌含水率データ及びNDVIを用いて、NDVIから推定された生育期間に基づいてNPPを推定する。NPP推定には光利用効率と温度と土壌水分に対するストレス関数を組み込んだ次式を用いる(Awaya *et al.* 2004)。

$$NPP = \sum (\epsilon \cdot NDVI \cdot SR \cdot f(T) \cdot f(SW)) \dots (1)$$

ここで、 ϵ は光利用効率、SRは全天日射量、Tは表

面温度、SWは土壌水分である。地上観測で得られたNPPデータを収集し、(1)式で推定したNPPの精度を検証する。

ウ 研究結果

(ア) LMFにカルマンフィルタを組み込んだLMF-KFはLMFに比べて実データへの追随性が良く、季節変動を的確に表現できてフィルタリングの精度を向上できた(Sawada *et al.* 2005) (図1112-1)。LMF-KFを利用して20年間のPALのNDVIと表面温度データを補正し、雑音成分除去データを作成した。また、LMF-KFはLMFに比べて処理速度が向上し、約20年間分で約60ギガバイトに及ぶ大容量のデータを農林水産研究センターのOrigin3000 (32CPU並列処理)を用いて1年で補正することが可能になった。表面温度5度以上の画素についてNDVIを積算したところ、NDVIの積算値が年々増加している傾向が示された。

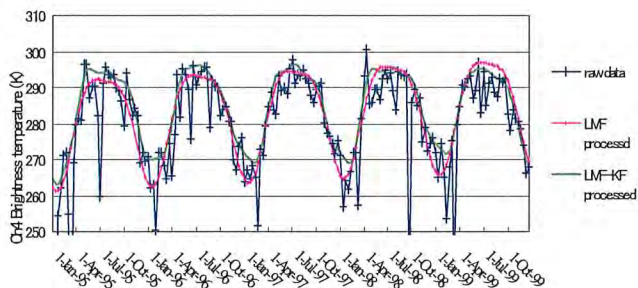


図1112-1 LMF-KFによるノイズ除去効果

- 1) フィルタリングによる平滑化効果がわかる。
- 2) LMF に比べて LMF-KF がオリジナルデータに良く追随している。

(エ) IGBP-DISの全球生産力データセット(GPPDI)に登録されているNPPの地上データを利用して、常緑針葉樹、落葉針葉樹、常緑広葉樹、落葉広葉樹、混交林と草地についてPALデータで推定してNPPとの比を求めた(地上NPP/PAL-NPP)。その結果、NPPの比は上記の植生について順に、1.1、1.0、0.7、1.7、1.1、0.6となった。これらの値は固定の光利用効率に対する植生タイプごとの比率と考えることができる。しかしながら、PALの旬ごとのデータの各画素が、同じ場所、同じ植生を観測しているとは考えにくく、植生タイプごとに光利用効率を設定することが適切

(イ) Reanalysis-2データは6時間ごとに2.5度×2.5度のメッシュデータとして提供される。Reanalysis-2の気温、全天日射量と土壌水分について、旬単位で、それぞれ平均値、積算値と平均値を求めた後、共一次内挿法を用いて赤道でのメッシュサイズを8kmとして内挿処理を行った。1981年から2000年までのデータを変換してNPPの推定に利用できるように整備した。

(ウ) 表面温度の季節変化図を作成し、緯度ごとのプロファイルを描いた。その結果、乾燥地では気温に比べて、AVHRRのチャンネル4(ch4:表面温度)は高かったが、他の地域での差は小さかった。気温と表面温度を用いてNPPを推定してラオスからシベリアに至るプロファイル上で相互関係を比較したところ、表面温度を用いた場合、山岳地の植生でNPPは気温を用いた場合より大きくなったが、他の植生での差は小さかった(図1112-2)。

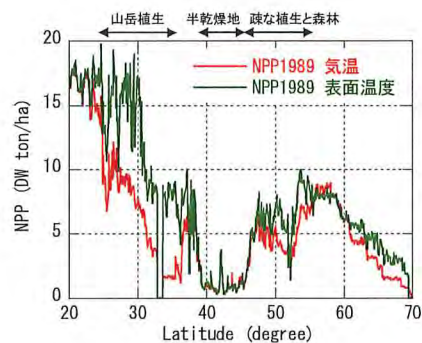


図1112-2 NPP推定値の比較

- 1) 山岳地では表面温度による推定値が大きい。

とは判断できなかった。そこで、気象官署で観測された気温、降水量と全天日射量とPAL-KFのNDVIデータ及び筑後モデルを利用して、光利用効率を推定し直した。その結果、月単位のPALデータに適用していた光利用効率に比べて、約10%高い値が得られた。新しい光利用効率、NDVIから推定した生育期間と気温の代わりに表面温度を利用して10日間ごとのNPPを推定して年間のNPPを算出した(図1112-3)。

GPPDIのNPPの地上データを森林、ツンドラ、乾燥地に類別して5度間隔の緯度帯で集約し、プロット数が7カ所以上のケースについて平均値を検証デー

タとした。これを利用してNPPの推定結果（1987～1990の平均値、全球で59.2Pg炭素/年）を検証したところ、両者の関係は傾きが1に近い直線で回帰でき

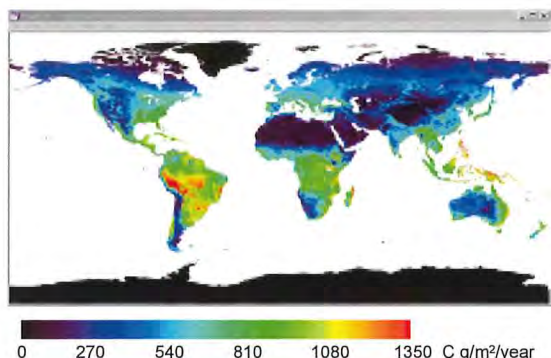


図1112-3 年間のNPPの推定結果(1989年)

- 1) 低緯度で大きく高緯度で小さい傾向だった。
- 2) 湿潤地で大きく乾燥地で小さかった。

1983年から1998年までのNPPを計算して経年変化の傾向を解析したところ、約56Pg炭素/年から63Pg炭素/年の範囲に収まり増加傾向にあったが、年々の変動も大きかった（図1112-5）。回帰分析によって地域ごとの経年変化の傾向を解析すると、熱帯雨林では

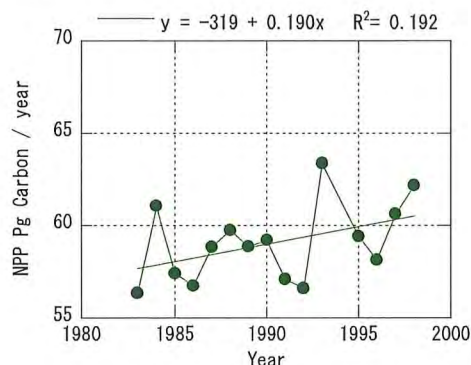


図1112-5 NPPの経年変化（全球）

- 1) NPPは漸増傾向と思われる。

エ 考察

（ア）高頻度観測の衛星データを利用することによって、植生の季節変化の実態をモニタリングすることが可能である。しかしながら、雲がノイズとなって、季節変化のパターンは歪められ、物理量の推定精度が下がる。ノイズを綺麗に除去できれば、季節変化を利用した解析や物理量推定の精度を向上させ

て、推定結果が概ね妥当なことを確認した（図1112-4）。

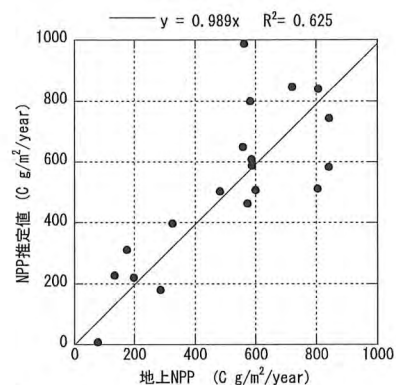


図1112-4 地上NPPを利用した検証結果

- 1) 推定値と地上データは1対1の関係だった。

中央アフリカ東部は増加傾向だったが、東南アジアは減少傾向だった。半乾燥地にNPPの変化の大きい地域が多く、オーストラリア、アンゴラやアルゼンチンなどで減少傾向の地域が現れ、サヘルやインドでは増加傾向の地域が現れた（図1112-6）。

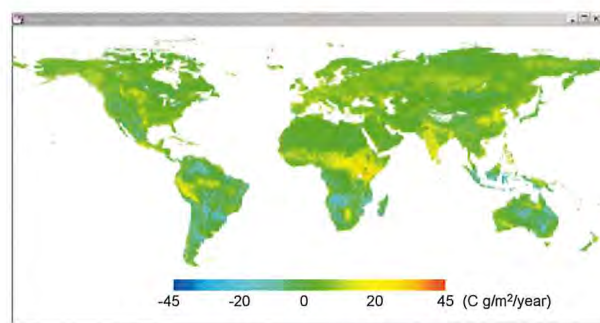


図1112-6 NPPの地域別の変化傾向

- 1) 中央アフリカ東部の増加傾向が目立つ。
- 2) 半乾燥地で減少傾向の地域が多い。

ることが可能で、このような理由でフィルタリング技術が発展してきた。本研究で開発したLMF-KFは、おおむねの季節変化のパターンを維持しながらノイズを除去することが可能であり、ノイズ除去の性能は高い（図1112-1）。大量データを処理するためには高速なフィルタリングが求められるが、LMF-KFはLMFに比べて処理速度が向上しており、高頻度観測

のデータ処理に適したフィルタと言える。

LMF-KFでノイズを除去したNDVIの季節変化に基づいて、植生の成長開始と終了を正確に判定することが可能になった。NPPの季節変化も月単位で編集されたPALデータで推定した場合（栗屋ら 2004）よりも滑らかで、スムージングされた10日間データを利用することでNPPの推定精度が向上したと考えられた。

（イ） 全球の気象データは数値シミュレーションによって作成されている。一方、衛星データは瞬時値ではあるが、実際の地表面の情報を表している。衛星データは地表面の実態を表しているため、様々な波長帯のデータを活用してNPPなどの諸量の推定精度を向上できると期待される。表面温度の密な植生では植物体の温度を表すので、光合成への影響を評価するには気温より適している。Reanalysis-2のデータが2.5度グリッドと粗いので、8 km (0.07度) メッシュで観測された表面温度は気温に比べて非常に詳細な情報と言える。表面温度を用いたNPP推定結果が地上観測の値と比較して妥当な結果だったことから（図1112-4）、推定精度や地域的な特徴抽出の視点からは表面温度は有効だった。

（ウ） NOAA衛星に搭載されたAVHRRセンサは、全球観測モードでは約4 kmメッシュに相当する5カラム×3ラインの範囲の、先頭ラインの4画素の平均値を記録する。PALでは雲を除去して8 kmメッシュにモザイクする過程で、さらに、画素が絞られていくので、PALの画素は8 kmメッシュ全域を代表する情報ではない。時系列でデータを並べた場合に、農地—森林—裸地を表す画素が交互に出現することもあり得る。このような問題と空間分解能が粗いことを勘案すると、植生タイプに分けてNPPを解析することで、解析精度を下げてしまうリスクも大きい。このため、本研究では全球一律のモデルでNPPを推定した。

NPPは時系列的な変化が大きかった。この原因は気候の年々変動だけではなく、ピナツボ火山などの噴火による火山灰が衛星データに及ぼす影響も考えられる。LMF-KFは雲などのノイズは除去できるが、火山灰による長期間の輝度値の変化やセンサの較正エラーを補正しきれていない恐れがある。この点を勘案すると実際のNPPの年々変動は、もう少し小さいかもしれない。全球でのNDVIの積算値が増加していることから、植生域が広がるか生育期間が延びるかし

ていて、長期的にはNPPは増加傾向にあると判断して良さそうである（図1112-5）。

地域的なNPPの変化傾向では、半乾燥地で増減の傾向が比較的是っきりしていることが特徴的である（図1112-6）。温暖化とともに降水パターンが変化することが予測されており、植物にとって厳しい水分環境下の半乾燥地では、降水量の増減が気温の変化以上に大きなインパクトを与えることが予想される。

オ 今後の課題

（ア） 今日、NOAA衛星以外に様々な全球観測衛星が打ち上げられ、高頻度観測によって全球の情報を記録している。Terra衛星やAqua衛星に搭載されたMODISやSPOT衛星のVEGETATIONは高頻度観測のセンサである。2000年以降では、これらのセンサのデータが利用可能であり、各センサ用にアルゴリズムをチューニングして、地球温暖化の影響評価を継続することが課題となってきた。

（イ） 近年の全球観測衛星のデータでは限なく画素が配列されていることから、PALデータとは異なり、植生タイプ別に解析することが有効になってくる。このため、植生タイプごとの特徴に基づいたモデルを構築することが課題である。

カ 要約

NOAA衛星に搭載され、10日単位で編集されたAVHRRセンサのデータ（PAL）を用いて、全球の純一次生産力（NPP）の経年変化を解析した。衛星データ中のノイズを除去して滑らかな季節変化パターンを得るために、局所最大値フィルタにカルマンフィルタを組み込んだノイズ除去フィルタ（LMF-KF）を開発した。LMF-KFを用いてPALの正規化植生指数（NDVI）と表面温度のデータからノイズを除去した。これらのデータと全球の日射量と土壌水分の情報を入力データとしたNPP推定モデルをチューニングしてNPPを推定した。NDVIから生育期間を同定し、気温に換えて表面温度を用いることで、NPPの推定精度を向上できたと考えられた。1983年から1998年までのNPP推定値と地上観測のNPPを比較したところ、両者は原点を通る傾きが、ほぼ1の直線で回帰できることが示された。NPPの推定値は約56Pg炭素/年から63Pg炭素/年で、年々変動は、やや大きいものの全球のNPPは増加傾向にあると思われた。地域的には中央

アフリカ東部でのNPPの増加が目立ち、半乾燥地では増加や減少の傾向が現れている地域が多かった。

キ 引用文献

Awaya, Y. et al. 2004 Estimation of the global net primary productivity using NOAA images and meteorological data: changes between 1988 and 1993. *International Journal of Remote Sensing*, 25-9:1597-1613.

栗屋善雄ら 2004 衛星データを利用した全球一次生産の推定：陸域生態系の純一次生産量の分布. *地球環境*, 9-2 : 231-238.

Sawada, Y., Mitsuzuka, N., Sawada, H. 2005 Development of a Time-series Model Filter for High Revisit Satellite Data. *Proceedings of the 2nd International VEGETATION Users Conference*, 83-89.

研究担当者（栗屋善雄*、沢田治雄）

2 地球温暖化についての将来予測

(1) 地球温暖化が世界農業へ及ぼす影響の経済的評価

ア 研究目的

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の報告（IPCC, 2001）によれば、地球温暖化は一部の水不足地域に降水量の増加をもたらすというプラスの側面がある一方、温暖化が引き起こす洪水の被害、降雨パターンの変化、単収の低下、生産適地の変化など農業へのダメージが大きいというマイナスの側面もあると考えられている。世界穀物生産量のうちコメの生産割合は28%で、その貿易量は2000万トン強であり、生産量の5%程度でしかない。しかし、アジアにおけるコメのシェアは53%と穀物の半分以上を占め、コメはアジアにとって基幹作物である。アジアの主要生産国の需給動向が国際貿易価格に及ぼす影響は極めて大きい。また、生産地域の多くは、熱帯・亜熱帯に位置し、天水に依存する農業を営んでいる地域も多いため、温暖化の影響を受けやすい状況にあるといえる。

本研究では、食料需給モデルをベースとして、最新のデータを用いてアジアの主食であるコメを対象に、異なる温暖化シナリオのもとで、コメの生産量や価格への影響度合を予測分析する。

イ 研究方法

(ア) 本研究で用いた食料需給モデルは、FAOのWorld Food Model及びJIRCASの世界食料モデルをベースにした単品目の多国間モデルであり、気候要因を供給関数に取り入れて2030年までの各国のコメ需給動向と国際価格への影響を予測するものである。温暖化シナリオとしては、気温・降水量が現在の水準で将来も推移する場合（気温上昇なし）をベースラインとして、気温上昇の度合が大きく異なる3つの大気・海洋結合大循環モデルによるシナリオを用いて、コメの需給予測分析を行う。

(イ) 対象国と地域は、日本、中国、韓国、台湾、タイ、ベトナム、インドネシア、フィリピン、マレーシア、バングラディッシュ、インド、パキスタン、スリランカ、アメリカ、オーストラリアの15ヶ国と「その他世界」の計16の国と地域である。

基本的にはFAOSTATから得られたデータを用い、これに関係国の統計及びUSDA、IRRI、IMF、UN等のデータを加えた。供給と需要のパラメータの推計は1960年から2004年までのデータを基にしているが、各国の実情に応じて推定期間は異なる部分もある。中国については、中国政府が公表した2004年までのデータを用いている。

気候データは、世界気候ネットワークで公表されている関係国の気温、降水、日照の1960年からの月別データと2030年までの予測データである。その際、USDAの“Major World Crop Areas and Climatic Profiles”に示されている各国のコメの植え付け期、開花期、収穫期を参考に使用している。

ウ 研究結果

(ア) モデルパラメータの推計結果

収穫面積に関するパラメータについては、コメの生産者価格と代替作物の生産者価格、政策ダミー等を変数とした収穫面積推定式と統計データを用いて、最小2乗法により推計した。コメ栽培面積の価格弾力性は、オーストラリアでは1であり、価格変化に対する栽培面積の反応が非常に敏感であった。また、パキスタン、日本及び韓国では、価格弾力性が0.25を超えたが、それ以外の国や地域では0.1以下であった。すなわち、一部の国を除いて、価格の上昇が必ずしも栽培面積の増加につながらないことが推定された。

気候要因が単収へ及ぼす影響の度合を示すパラメータのうち、日照についてはコメ単収への影響がほとんどなかった。表1121-1に、気温と降水量が単収へ及ぼす影響に関してパラメータを示した。15ヶ国のうち、気温のパラメータがマイナスの値を示したのは10ヶ国におよんでおり、特にコメの輸出国であるオーストラリアにおいて最も大きかった。一方、気温上昇が単収にプラスの効果をもたらす国は日本と韓国等であった。また、降水量については、変動が大きいため有意な値は多く得られなかった。非有意の値を示す国については、弾力性を0としてモデルに適用した。降水量のパラメータは主要輸出国のアメリカと、輸出国でない日本や韓国ではマイナス

であり、降水量の増加で単収の減少が見込まれた。逆に、小さいながらもプラスのインドでは、降水量の増加によって単収の上昇が見込まれた。

さらに、需要の所得弾力性、価格弾力性については、2004年には中国、日本、韓国、マレーシア、スリランカ、台湾及びタイでは、所得弾力性がマイナスとなり、所得の増加に伴って一人当たり需要が減少する傾向にある。一方、インドなどの国は依然プラスの値で需要が増加する傾向にあるが、1990年に比べると値が小さくなっていった。これに対して、コメ需要の価格弾力性はほとんどの国で小さく、コメが自給的食料である一面をうかがい知ることができる。

表1121-1 気温と降水量の米単収に対するパラメーター

国・地域	気温	降水量	国・地域	気温	降水量
オーストラリア	-2.285 *	-	パキスタン	-0.047 ***	-
バングラデシュ	-1.012 **	0.098 *	フィリピー	-1.006 *	0.089 ***
中国	-0.216 ***	-	スリランカ	0.023 ***	-0.047 ***
インド	-0.781 ***	0.263 ***	台湾	0.421 ***	-
インドネシア	-1.101 ***	0.024 ***	タイ	-0.424 ***	-
日本	1.322 ***	-0.302 **	アメリカ	0.323 ***	-0.321 ***
韓国	2.969 ***	-0.254 ***	ベトナム	-0.081 ***	-
マレーシア	-0.037 **	-			

注：表に示すパラメーターは筆者ら推計した結果である。***、**、*はそれぞれ有意水準1%、5%、10%を意味する。

(イ) 需給予測における仮定条件と結果

a 前提と仮定条件

a) 各国の経済構造は今後も変更がないこと。

b) 現在、進行中のWTO新ラウンド交渉や地域の経済統合の影響は特に考慮しない。

c) 各国の農業政策については、例えば、中国の耕地転用制限、直接支持政策など一部の国について継続的なものとして扱っているが、日本等の休耕政策などは、特に、制約条件として入れていない。

d) 世界GDPの成長率は、世界全体で年3%（過去の変動率）として設定する。各国のGDP成長率は、過去の世界GDPの成長率と各国GDP成長率との関係から推計した。

e) 人口予測は国連の中位予測結果を用いる。

f) 為替レートは、中国では年平均1%の元高を設定、他の国は各国の過去の変動率を使用した。なお、為替レートの変動の大きい国は制約の上限を設ける。

g) 世界価格の基準は、タイ・バンコクにおける標準価格（5%破碎米）を使用する。

b 温暖化シナリオ

3つの大気・海洋結合大循環モデルの結果を用いる。また、温室効果ガス排出シナリオはIPCCが2000年に公表したA2シナリオとした。A2シナリオは、経済発展を重視し、かつ、地域ごとの特徴を活かした発展を想定するシナリオである。それぞれのデータの出典は以下の通りである。

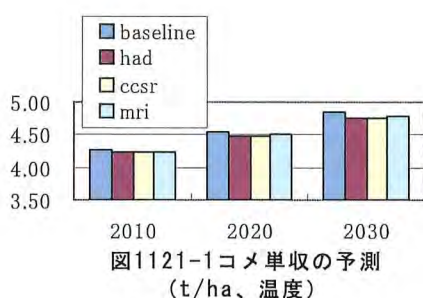
a) HAD: HadCM3/A2はイギリスのハドレー気候センターによるモデルであり、温暖化が中程度進む予測になっている。

b) CCSR: CCSR/A2は東大気候システム研究センターと国立環境研究所によるモデルであり、温暖化が最も進む予測である。

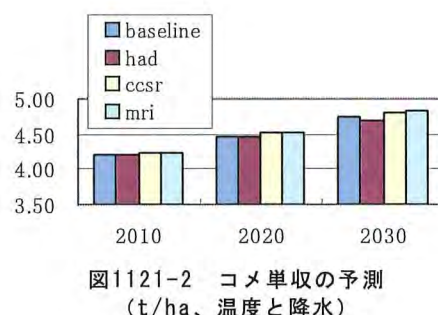
c) MRI: MRI/A2は日本の気象研究所によるモデルであり、他のモデルと比べると気温上昇の程度が一番低くなっている。

以上の条件と温暖化シナリオのもとで得られた結果を、単収への影響、国ごとの影響の違いと国際価格の予測に分けて以下に述べる。

上記の3つ大気・海洋結合大循環モデルに気温上昇なしの場合である「ベースライン」を加えた4つのシナリオで世界のコメ平均単収を予測した。図1121-1は、温度変化だけを考慮した場合、図1121-2は温度と降水量の変化を考慮した場合の単収予測結果である。いずれの場合も、年次を追って単収の増加が期待される。しかし、3つ大気・海洋結合大循環モデルの温度変化だけを考慮して予測した結果



をベースラインと比較すると、温度上昇によるコメ単収への影響のマイナス効果が明らかであり、温度上昇の最も大きいCCSRと温度上昇が中程度のHADモデルでの単収への影響が大きく、温度上昇の程度が最も低いMRIモデルででは単収の減少度合がやや小さいものの、ベースラインよりは低下する結果となった。しかし、温度上昇と同時に降雨量の変化も考慮すると、温度だけを考慮した場合よりも影響は小さくなる。HADでの単収はベースラインシナリオより低い、CCSRとMRIによる単収予測はベースラインの単収よりも高い結果となった。



このように、温度と降水量は、コメの単収に異なる影響を与える。しかしながら、温暖化予測では降水量や降雨パターンの将来予測が最も難しいといわれており、これらに関して統一した見解はなかなか見あたらない。

また、図1121-3は、温度と降水量の影響を2030年の主要国のベースラインとそれらの影響を中程度に受けるHADモデルによる温暖化シナリオとの間で国別の単収予測を比較したものである。温暖化はアジアの主要国のコメ単収にマイナスの効果を与え、インドとベトナムでは影響のマイナスの度合が中国とタイより大きくなった。一方、アメリカとオーストラリアについてはプラスの影響をもたらす結果となっており、国によって受ける影響の度合が大きく異なった。

次に、3つの大気・海洋結合大循環モデルを用いた単収及び面積予測結果に基づいて主要国のコメ生産量予測を行った(表1121-2)。HADによる予測では、15ヶ国のうち影響がマイナスの効果をもたらす国は8ヶ国、CCSRでは国による違いが大きく、中国のような大生産国では影響のマイナス効果が大きくなった。また、MRIの場合でも7割近くの国はマイナスの効果を示し、国別では温暖化によるマイナスの影響

が際だった。一方、南アジアなど予測期間の間に効果に変化する国も計測された。生産量への影響では、価格の変化に対する各国の反応の違いが影響している。

表1121-2 各国コメ生産への影響効果

	生産量予測(温度+降水)		
	HAD	CCSR	MRI
オーストラリア	-	-	-
バングラデシュ	-	-	-
中国	+	--	--
インド	-	-+	-+
インドネシア	-	-	-
日本	+	++	+
韓国	+	++	-
マレーシア	+	-	-
パキスタン	+	++	-
フィリピン	-	-	-
スリランカ	+	+-	+-
台湾	-	-	--
タイ	-	--	--
アメリカ	+	+	+
ベトナム	-	--	--

注:ここでの効果はベースライン予測との比較である。比較期間は予測期間に当たる2005年~2030年まで。「-」はマイナス効果、「--」はマイナス効果が大きい。「+」はプラス効果、「++」はプラス効果が大きい。「-+、+-」は前半と後半の効果の変化。

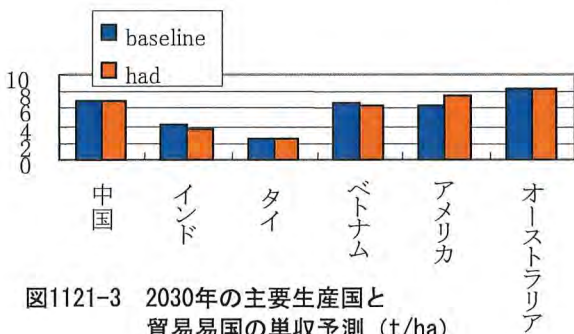


図1121-3 2030年の主要生産国と貿易国の単収予測 (t/ha)

アジアには、世界人口の半分程度が居住しており、その主食はコメである。現在は、所得の向上による食生活の改善によって、多くの国で1人当たりコメ消費量は減少に転じているが、将来的には、人口増加による需要量の増大も無視できない。温暖化によってコメ生産が不安定になる可能性がある中で、多くの国の供給の価格弾力性は小さく、コメ価格の変動による人々の食生活への直接的影響も予想される。

一方、世界のコメ貿易量は、近年増加傾向にあるとはいえ、生産量の5%程度しかなく、コメの国際価格への影響も予想され、国際価格の変化が、各国の需給動向にも影響を与える。

温暖化シナリオによるコメの国際価格への影響は、温度の影響だけを考慮した場合（図1121-4）、2020年くらいまでは変動しながら上昇する傾向にあるが、その後は横ばい状態になると予測された。また、3つの大気・海洋結合大循環モデルによる温暖化予測ともベースラインよりコメの国際価格が上昇し、HADとCCSRがMRIに比較して高い上昇となった。このことは、温度上昇の程度が大きくなればなるほど、コメ供給への影響が大きくなることを示唆している。

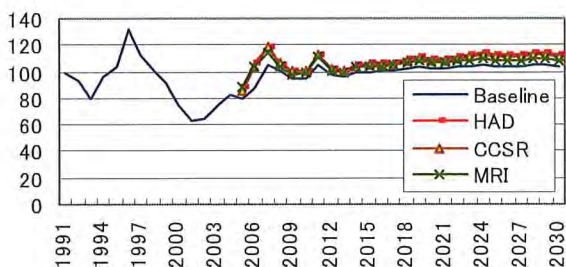


図1121-4 国際価格予測 (1991=100, 温度)

エ 考察

コメ需給予測モデルに気候要因を取り入れること

ができた。温暖化による各国のコメ生産への影響の度合は異なるが、予測されている気温上昇が大きい場合には、コメ単収への影響のマイナス効果が大きい。また、コメの1人当たり消費量が低下傾向にある中でも、温暖化は国際価格の上昇をもたらす可能性があり、貿易量が少ないコメ国際市場においては、その影響は無視できなくなる可能性がある。

オ 今後の課題

本研究では、気候要因を加えてコメ需給動向を検討した。この結果は、経済構造の不変や一定の成長率等の前提および仮定条件を設定している予測分析であることに注意する必要がある。気候データが単収に影響を及ぼすパラメータの精度の問題などは、今後の課題として検討したい。

カ 要約

気候要因を含む世界コメ需給モデルに経済構造の不変や一定の成長率等の前提および仮定条件を設定した上で、温暖化シナリオを適用して、2030年までのコメ生産予測を行った結果、次の結論を得た。

(ア) 世界のコメの平均単収は、年次を追って増加する傾向があるが、気温上昇なしと仮定したベースラインと比較して、温度の上昇だけを考慮したいずれのシナリオを適用しても、減収が予測された。また、温度の上昇とともに降水量の変動も考慮した場合には、ベースラインと比較して、中程度の温度上昇の場合には減収傾向となるが、それ以外の場合には収量は上昇する傾向にあった。このように、単収の減少に関しては、温度の影響が大きいことが予測された。

(イ) 人口変動や経済成長から予測される長期的な需給は、気温と降水量の変動を考慮した場合、必ずしも楽観を許さないものとなる。供給不足が拡大する可能性のある国は、中国、インドネシア、マレーシア、フィリピン、バングラディッシュなどである。供給余剰の可能性の高い国は主要輸出国のベトナム、タイ、アメリカのほかインドも有望な輸出国になる可能性があるが、これらの国に対する温暖化の影響は概ねマイナスである。さらに、日本と韓国への温暖化の影響は、ややプラスであるが、日本の場合には耕地面積の減少などの影響で生産量は減少する。

(ウ) コメの国際価格へ影響は、2020年くらいま

では変動しながら上昇傾向となり、それ以降は横ばい状態になることが予測された。また、ベースラインと比較していずれのシナリオでも価格が上昇し、温度上昇の予測が低いMRIと比較して他の二つのモデルの方が価格上昇が高くなることが予測された。

キ 引用文献

陳永福 2004. 中国食物供給与予測. 中国農業出版社.

FAO 1986. The FAO World Food Model: Model Specification. Supplement to FAO Agricultural Commodity Projections to 1990. FAO.

IPCC 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp.

Keiji Oga and Koji Yanagishima 1996. International Food and Agricultural Policy Simulation Model. Jircas Working Report No.1.

USDA 1996. Major World Crop Areas and Climatic Profiles. Agricultural Handbook No.664. World Agricultural Outlook Board.

銭小平 2005. 穀物供給関数と気候変動の影響分析. 中国農業気象(特集号). 14-19.

研究担当者(銭小平*, 古家淳)

(2) 温暖化による応答を組み込んだ農業生産力の変動

ア 研究目的

人間活動による大気中の温室効果ガス濃度増加は、地球の平均気温を最近100年間で0.3~0.6℃上昇させた。気候変動に伴い、降水パターンも変化すると予測されている。環境変動に応答して、作物は光や水の利用効率を変化させる可能性がある。そこで、環境変化による作物の応答を組み込んだ生産力推定モデルを作成し、東~南アジアを対象に主要作物(イネ、コムギ、トウモロコシ、ダイズ)生産力の面的変動を予測して、長期の食料需給予測の基礎資料とする。

イ 研究方法

(ア) 植物の環境応答を組み込んだ生産力推定モデルの作成

a プロトタイプ of 作成

高温・高CO₂環境下で変化する水・光利用効率に関する資料を収集し、元になるモデルを選定し、個葉レベルの作物生理モデルに、気候変動時の水・光利用効率の変化を組み込んだ。

b 圃場~小流域スケールの水稻生長・生産量予測プロセス・モデルの作成

中国黒竜江省哈爾濱と北京近郊昌平で水稻を栽培し、地上/地下部バイオマス、葉面積と収量を測定した。圃場~小流域スケールの水稻生長・生産量予測プロセス・モデルを作成した。

c コメ収量の時系列解析

中国の主要なコメ生産地について、コメ収量の非線形平滑化によるトレンドからのずれ、気象値(気温、降水、日照時間の日別値)の平年値からのずれ、の時系列を統計的に分類した。

d 国規模の収量・減収率予測モデルの作成

単収と気象値の時系列解析により、収量・減収率予測モデルを構築し、2071~2090年の中国のイネ単収と減収率を予測した。

(イ) 栽培可能地の推定

a プロトタイプ of 作成

国と地域ごとに、典型的な栽培体系と栽培期間を決めた。農業的水利用効率の初期値は、30%とした。グリッド間での水の移動はないとして、栽培可能地域推定モデルを作成した。

b 灌漑可能面積の計算

気候データは、CRU(1961-1990)と東京大学CCSR GCMの結果(1990s, 2050s)を用いた。土地利用データは、USGS: The Global Land Cover Characteristics databaseを用いた。栽培期間はFAO: Country Rice FactsとUSDA: Major World Crop Areas and Climatic Profilesより、温度と水要求量はCui(1994)のWorld Agroclimate and Crop Climateより決めた。東~南アジアのイネを対象とした。Global Water Resource Archive(1995, 2050)の流出水量データを用い、0.5°グリッドでの灌漑可能面積を計算した。

c 精査地域の土地利用・土地被覆面積の推定

中国黒竜江省東部(Path-Row=114-27)のLandsat TM(1988年6月25日)/ETM+(2002年6月24日)デー

タを用い、1988、2002年の水田と畑地を分類した。灌漑容易領域を河川や湖沼のような水資源から500m以内、灌漑可能領域を500-1,000mと定義して、面積を推定した。

d 栽培可能地の推定

現在（1961-1990年平均）と気候シナリオ（CCSR/NIES, Hadley, MRI: A2）の2001~2099年の月別気温と降水量より適地・可能地を推定した。

ウ 研究結果

（ア）植物の環境応答を組み込んだ生産力推定モデルの作成

a プロトタイプの作成

光合成応答を生化学的に表すFarquharタイプのモデルと気孔コンダクタンスのモデルを結合し、土壌水分応答を表すため水分状態で酵素Rubisco活性が変化するモデルを組み込んだ。

b 圃場～小流域スケールの水稲生長・生産量予測プロセス・モデルの作成

水稲の生長・生産量予測モデルは、既存モデルを参考に、フェノロジー予測は気温と日長の関数、バイオマス生産は葉面積、日射量、光乾物変換係数の関数とした。予測値と圃場実測値を比べると、バイオマスの経時変化は、ほぼ再現できた（図1122-1）。

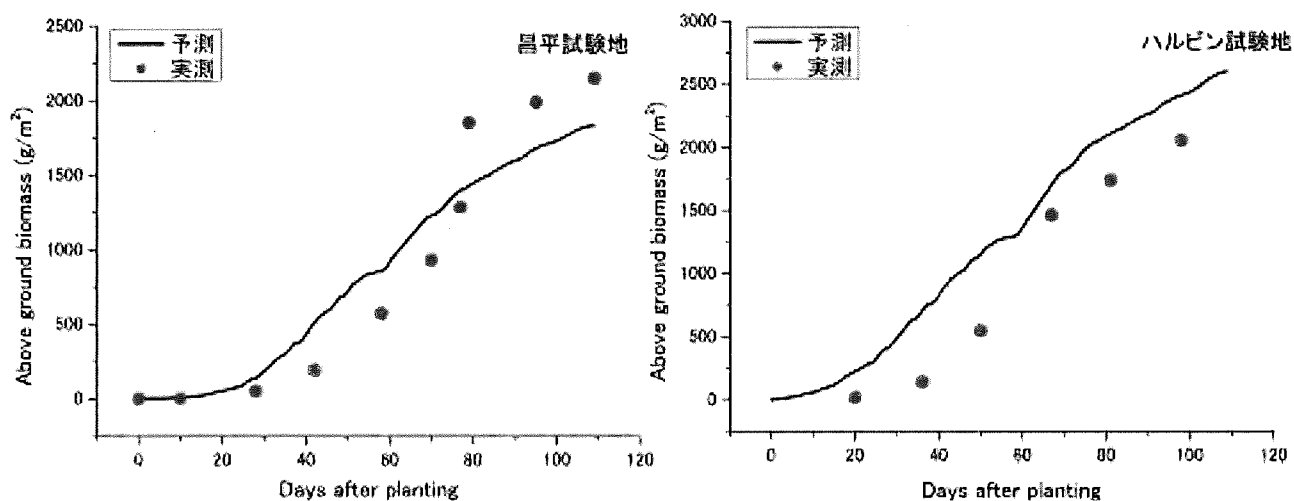


図1122-1 現在の降水量から見たイネ栽培可能地割合図

c コメ収量の時系列解析

表1122-1第2列は、コメ収量変動と有意(p<0.05)な相関を持つ気象変動を示す。安徽省は8-9月の降水量が収量に有意である。気象変動を標準偏差で平年とその他に分け（表1122-1第3列）、コメ収量の豊凶年発生頻度（表1122-1第4-6列）

ずれが-5%以下ならPoor、+5%以上ならGood)を分類した。この気象変動と収量変動の発生頻度との関係によって、経済モデルにおける生産関数の弾力性に気象変動の影響を確率的に取り入れることが可能になる。

表1122-1 黒龍江省、安徽省、湖南省及び四川省におけるコメ収量に
有意な気温、降水量、日照時間の変動と収量変動の関係

省	気象値	平年値からのずれ	Poor	Normal	Good
黒龍江省	降水量 (5-9月)	<-10%	2/5	2/5	1/5
		-10% - +10%	1/8	5/8	2/8
		≥+10%	2/9	6/9	1/9
安徽省	降水量 (8-9月)	<-20%	1/7	2/7	4/7
		-20% - +20%	2/12	9/12	1/12
		≥+20%	1/1	0/1	0/1
湖南省 (1期作目)	降水量 (6月)	<-30%	2/5	1/5	2/5
		-30% - +30%	4/13	4/13	5/13
		≥+30%	1/3	2/3	0/3
湖南省 (2期作目)	降水量 (9-10月)	<-30%	1/4	0/4	3/4
		-30% - +30%	3/10	4/10	3/10
		≥+30%	1/6	4/6	1/6
	気温 (9-10月)	<-0.73 °C	1/2	1/2	0/2
		-0.73 - +0.73 °C	4/13	5/13	4/13
		≥+0.73 °C	0/5	2/5	3/5
四川省	日照時間 (8月)	<-20%	1/9	7/9	1/9
		-20% - +20%	0/10	7/10	3/10
		≥+20%	1/1	0/1	0/1

d 国規模の収量・減収率予測モデルの作成
イネ収量・減収率予測モデルを2071～2090年の中
国華南に適用すると、イネ単収は全地域で現在より

減少して最大6%減になり、年々変動も激しくなる
と予測された(図1122-2)。

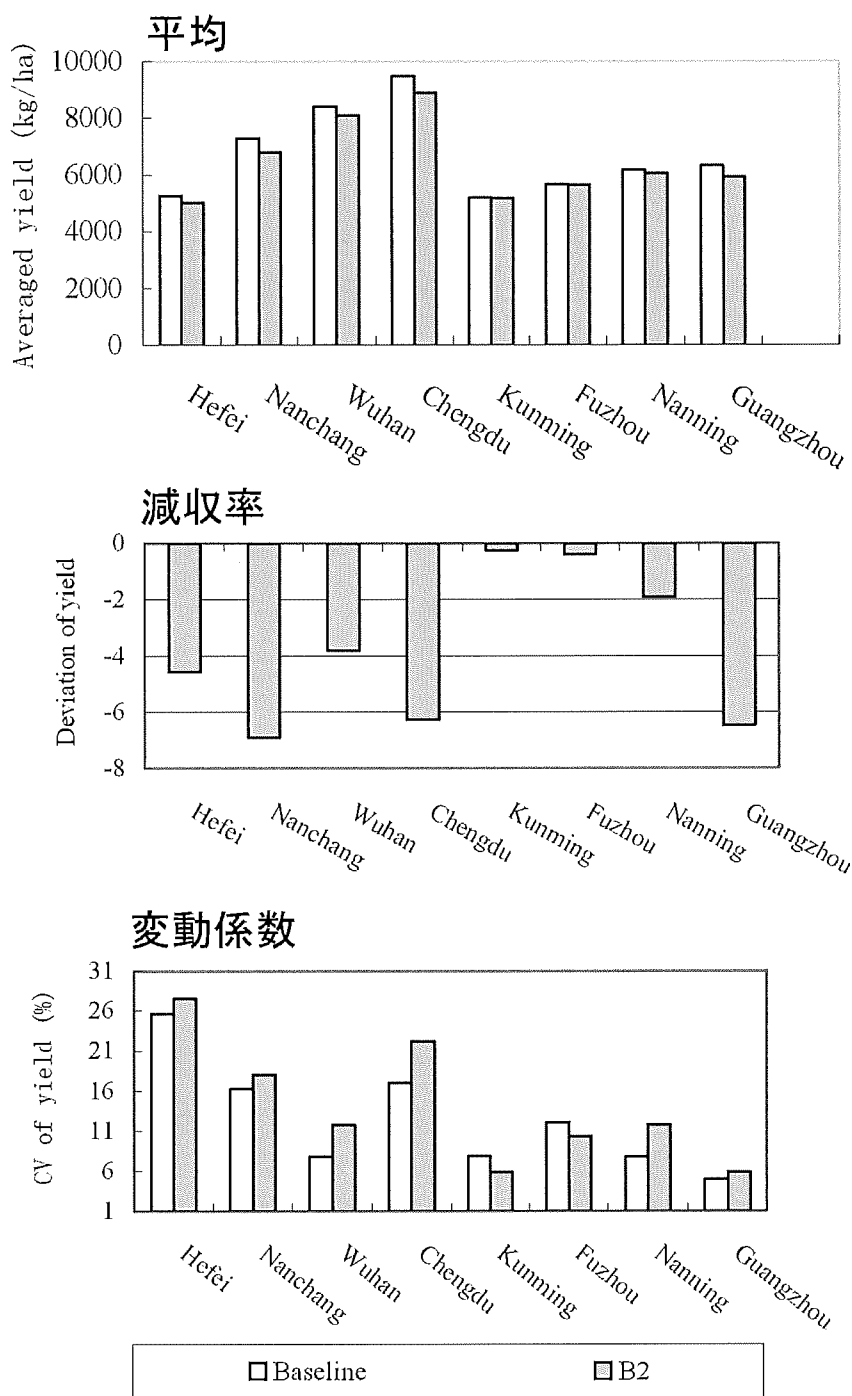


図1122-2 中国華南地域におけるイネ収量の気候変化による影響：Hadley Centre GCMによる気候変化シナリオ (HadCM3/B2) に基づく2071～2090年のシミュレーション結果

(イ) 栽培可能地の推定
 a プロトタイプの作成
 現在の降水量から見たイネ栽培可能地面積割合を

図1122-3に示す。図中で、少は各グリッド全域でイネを栽培すると水が不足する場所、多はより多くの水がある場所を示す。

(1) 第1期作目

(2) 第2期作目

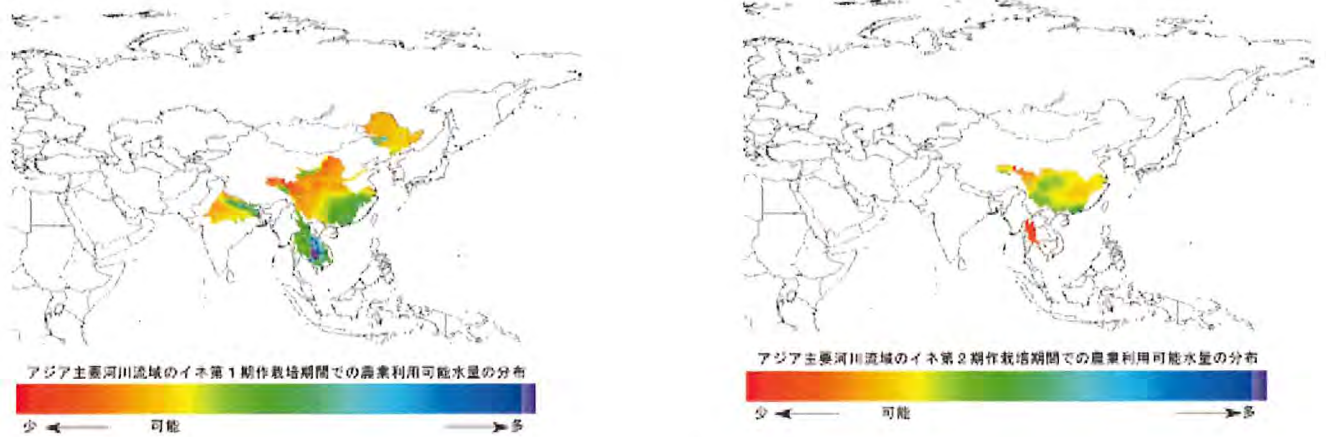


図1122-3 現在の降水量から見たイネ栽培可能地割合図

b 灌漑可能面積の計算

ため池灌漑可能な面積の指標となる年間の降水量可能蒸発散量差 (P-PET) ≥ 0 、400、600mmの面積を比較すると、全体的に2050年代の方が増加するが、地域性があり、インドネシアは減少し、タイは増加

した (表1122-2(a))。河川灌漑可能面積の指標となる年間流出水量 ≥ 1200 mmの面積を比較すると、全体的に2050年の方が増加するが、地域性があった (表1122-2(b))。ここで、1200mmは、年間農業利用水量400mmを全体の1/3とした値である。

表1122-2 1990年代 (または1995年) と2050年代 (または2050年) の面積変化:

(a) 年間降水量可能蒸発散量差 (P-PET) と (b) 年間流出水量。面積の単位は、103km²

Area (x10 ³ km ²)	(a) 1990s						(b) discharge water ≥ 1200 mm		1999 FAOSTAT	
	P-PET ≥ 0 mm	P-PET ≥ 400 mm	P-PET ≥ 600 mm	P-PET ≥ 0 mm	P-PET ≥ 400 mm	P-PET ≥ 600 mm	1995	2050	arable & permanent	land
BANGLADESH	127.1	93.2	67.7	127.1	127.1	127.1	124.0	126.8	84.4	130.2
CAMBODIA	90.4	30.2	15.1	183.8	183.8	183.8	120.5	108.5	38.1	176.5
CHINA	3,302.3	1,207.2	706.9	3,223.0	1,808.5	923.7	1,883.9	1,893.5	1,353.6	9,327.4
INDIA	678.8	445.0	354.0	1,675.0	1,019.9	763.5	1,137.9	1,282.3	1,697.0	2,973.2
INDONESIA	1,545.5	1,502.5	1,447.2	1,557.7	1,514.5	1,437.4	1,214.4	1,202.2	309.9	1,811.6
JAPAN	277.9	277.9	266.9	277.9	252.6	198.6	105.6	108.7	48.7	364.5
KOREA D P RP	101.4	89.9	85.2	101.4	92.2	80.4	26.1	26.1	20.0	120.4
KOREA REP	82.0	82.0	82.0	82.0	72.0	54.5	19.8	32.2	19.0	98.7
LAOS	155.6	59.3	35.7	219.7	219.7	219.7	67.2	58.3	9.6	230.8
MALAYSIA	283.8	283.8	283.8	283.8	283.8	283.8	258.2	218.3	76.1	328.6
MYANMAR	401.9	217.0	154.7	664.2	664.2	652.8	413.4	459.9	101.4	657.6
NEPAL	144.3	133.5	90.1	144.3	144.3	130.8	43.6	46.3	29.7	143.0
PAKISTAN	12.9	0.0	0.0	7.8	0.0	0.0	188.8	198.8	218.8	770.9
PHILIPPINES	162.9	156.8	147.6	162.9	162.9	156.9	65.7	68.7	100.5	298.2
THAILAND	102.7	36.6	21.3	475.8	469.9	416.6	148.7	181.3	180.0	510.9
VIET NAM	248.0	99.0	44.8	273.8	273.8	270.9	108.5	102.7	73.5	325.5
East Asia	3,763.6	1,657.0	1,140.9	3,684.3	2,225.3	1,257.3	2,035.5	2,060.5	1,441.3	9,911.1
Southeast Asia	2,990.9	2,385.1	2,150.2	3,821.6	3,772.5	3,621.9	2,396.7	2,399.8	889.0	4,340.2
South Asia	963.0	671.8	511.9	1,954.2	1,291.3	1,021.5	1,494.4	1,654.3	2,050.5	4,128.9
Asia total	7,717.5	4,713.9	3,803.0	9,460.1	7,289.1	5,900.7	5,926.5	6,114.6	5,538.1	30,823.5

c 精査地域の土地利用・土地被覆面積の推定
表1122-3に1988年と2002年の土地利用・土地被覆面積の比較を示す。表中で、1988年の土地利用・土地被覆の各面積は列方向、2002年は行方向に示す。例えば、1988年の水田（C1）面積は166km²で、その内の97km²が2002年にも水田、26km²が畑地（裸地）に分類されたことを表す。同様に、2002年の水田（C1）面積は3,925km²で、その内の97km²が1988年にも水田、1,740km²が畑地（裸地）に分類されていたことを表す。

水田は166km²（1988年）から3,925km²（2002年）へ増加した。畑地は11,065km²から8,988km²へ減少した。2002年の水田3,925km²のうち、2,523km²は1988年には畑地だった。湿地のうち、9%が水田へ、40%が畑地に転換された。灌漑容易領域の畑地と裸地、草地の面積は10,539km²、灌漑可能領域では5,164km²であった。2002年の水田のうち、2,650km²が灌漑容易領域にあり、690km²が灌漑可能領域であった。

表1122-3 1988～2002年の土地利用面積変化（黒龍江省東部）

単位はkm²。1988年の面積は列方向、2002年は行方向に示す。

2002年のうち、1988年の灌漑容易領域内の畑地・裸地・草地からの面積を列C15に、灌漑可能領域内からの面積を列C16に示す。

2002 \ 1988	C 1	C 3	C 4	C 6	C 7	C 8	C 9	合計	C 15	C 16
C 1: 水田	97	1,740	783	509	485	281	30	3,925	2,650	690
C 3: 畑地（裸地）	26	2,565	1,812	1,480	1,702	1,304	98	8,988	2,871	2,298
C 4: 畑地（植被有）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C 5: 裸地	17	588	547	372	365	492	104	2,485	1,057	448
C 6: 草地	17	902	1,540	2,079	51	1,097	155	5,847	2,288	1,066
C 7: 林地	0	0	0	0	7,600	0	0	7,600	1,152	446
C 8: 湿地	0	0	0	1	2	9	8	21	3	0
C 9: 河川, 湖沼	4	0	0	0	41	0	580	626	27	1
C 10: 市街地	2	219	273	58	96	32	22	701	359	170
合計	166	6,063	5,002	4,556	10,718	3,260	1,014	81,316	10,539	5,164

d 栽培可能地の推定

対象地域全体では、栽培期間中の気温の上昇に伴い、適地・可能地が高緯度方向に広がる（図1122-3）。現在と比べて2001～2099年には、イネは第1期作可能面積が11～19%増加するが、その他は冬コムギが

－15～－3%、春コムギが－76～＋32%、トウモロコシ（主と早期作）が－29～－8%の変動（プラスは増加、マイナスは減少）と予測された。なお、ダイズの栽培好適条件はトウモロコシとほぼ同じなので、トウモロコシで代表した。

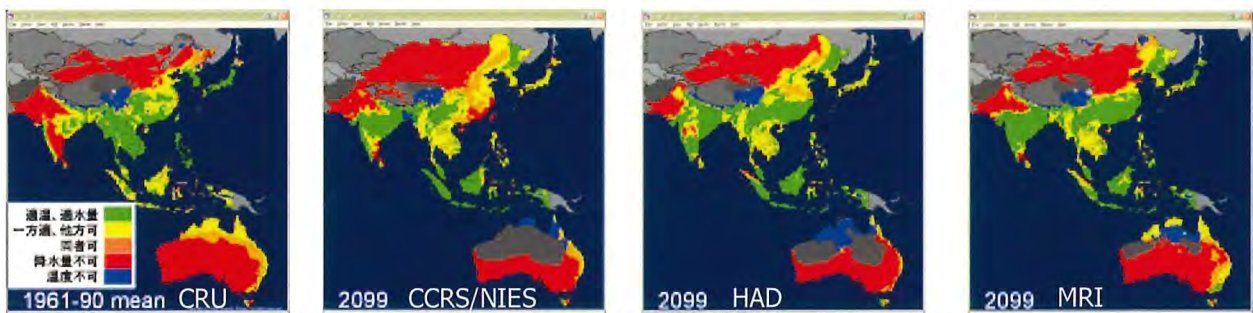


図1122-4 気候変動シナリオ（A2シナリオ）の気候値を用いて推定したイネ栽培適地可能地左から、現在（1961～1990年平均）、CCRS/NIES、Hadley、MRIの2099年の結果。灰色は気温と降水量の両者とも不可及び対象地域外を表す。

エ 考察

(ア) 植物の環境応答を組み込んだ生産力推定モデルの作成

イネ生長・生産量予測モデルは、圃場実測値をほぼ再現できた。中国のイネ収量変動と気象変動から豊凶の発生頻度を計算すると、2071～2090年の収量は全地域で現在より減り、年々の変動係数も大きくなるため、最大で6%の減収が予測された。

(イ) 栽培可能地の推定

精査地域の中国黒龍江省では、水への距離の近い畑地が水田に転換されたため水田面積が増加した。また、冬コムギは2002年には作付けされなくなった。これらは、気候要因よりも、むしろ、経済要因により栽培作物が変更された。東～東南アジアでは、栽培期間中の気温の上昇に伴い、適地・可能地が高緯度方向に広がり、イネは第1期作可能面積が11～19%増加すると予測された。以上より、イネ潜在生産力は4～12%増加する可能性がある。

オ 今後の課題

(ア) 植物の環境応答を組み込んだ生産力推定モデルの作成

構築途上であるイネ収量・減収率予測モデルを完成させる。

(イ) 栽培可能地の推定

コムギとトウモロコシ、ダイズの生産力変動予測が残ったので、引き続き継続を図る。

カ 要約

(ア) 植物の環境応答を組み込んだ生産力推定モデルの作成

個葉の生化学的光合成応答を表すモデルと気孔コンダクタンス・モデル、水分状態を反映するモデルからイネ生長・生産量予測モデルを構築し、圃場実測値をほぼ再現できた。中国のイネ収量変動と気象変動を、標準偏差により平年とその他に分け、イネ収量の豊凶年の発生頻度を計算した。2071～2090年の収量は全地域で現在より減り、最大6%減収し、年々の変動係数も大きくなると予測された。

(イ) 栽培可能地の推定

精査地域では、気候要因より経済要因で栽培作物が変更された。対象地域は、栽培期間中の気温の上昇に伴い、適地・可能地が高緯度方向に広がり、イネは第1期作可能面積が11～19%増加すると予測された。以上より、イネ潜在生産力は4～12%増加する可能性がある。

研究担当者（岡本勝男*、横澤正幸）

第2章 地球温暖化の影響及びリスクの解明

1 地球温暖化に伴う農業への影響把握

(1) 大気CO₂の増加が農作物の高温ストレスに及ぼす影響

ア 研究目的

大気CO₂濃度の上昇は、イネの成長促進と増収効果を持つ一方、気孔開度の減少、蒸散の抑制に伴う群落温度の上昇を通じて、温暖化や高温地域で問題となる開花期不稔を激化させる可能性がある。高温、高CO₂環境下における不稔発生を予測するためには、的確な穂温の予測が必要であるが、穂温は水田の微気象条件に強く依存するため、チャンバー実験などの閉鎖系実験の結果をそのまま圃場に適用することができない。そこで本研究では、開放系大気CO₂増加(FACE)実験水田で微気象観測を行い、穂を取り巻く微気象環境が穂温に影響を及ぼすプロセスを考慮した穂温推定モデルを開発し、大気CO₂濃度上昇に伴う穂温の上昇程度を明らかにする。

イ 研究方法

(ア) FACE実験水田における微気象観測

中国江蘇省のFACE実験水田で、出穂・開花期頃に(2003年8月25日～9月5日)、A-CO₂区(現CO₂濃度区)とE-CO₂区(高CO₂濃度区=現CO₂濃度+200ppm)で微気象観測を行い、群落上の風速や放射収支、群落内外の温湿度を連続測定した。また、両区の葉温、穂温を熱電対($\phi=0.1\text{mm}$)で測定し、穂の蒸散コンダクタンスを定常型ポロメータ(LI-1600)で測定した。

(イ) 穂温推定モデルの開発

FACE実験水田での観測結果を基に、穂温推定モデルを開発した。本モデルでは、穂層への入射エネルギーと穂-大気間の熱フラックス(顕熱・潜熱フラックスと長波放射量)が等しいとし、放射収支と気温・湿度、風速の実測値、穂の蒸散コンダクタンスを代入して熱収支式を解くことにより、穂温と穂の蒸散速度を求めた。

(ウ) 穂温推定モデルの感度解析

穂の蒸散特性の品種間差異を把握するため、農環研の精密水田圃場で、穂の形態特性の異なる15品種のイネの穂の蒸散コンダクタンスをポロメータで測定した。穂の蒸散コンダクタンスの品種間差異や気

象条件の変動幅を穂温推定モデルに適用して感度解析を行い、穂温への影響が大きい要素を抽出した。

ウ 研究結果及び考察

(ア) FACE実験水田における微気象観測

a 高CO₂濃度による群落微気象の変化

高CO₂濃度による気孔開度の低下は個葉の蒸散速度を減少させ、潜熱放出に伴う冷却効果を減らすため、葉温は上昇する。実際、中国FACE圃場で出穂期頃に測定した個葉の気孔コンダクタンスは、E-CO₂区の方が、A-CO₂区よりも約30%小さかった(吉本ら2004)。これに伴い、E-CO₂区はA-CO₂区に比べて、葉温T_lは1～2℃、群落内の気温T_aは0.5～1℃高く、群落内の相対湿度RHは5～8%低かった(図1211-1b)。熱電対で測定した穂温T_pは、E-CO₂区の方がA-CO₂区に比べて0.5～3℃も高く、この差は高CO₂濃度による葉温の上昇度合いよりも大きい場合があった。

b 穂の蒸散特性と穂温

図1211-1aに、ポロメータで測定した穂の蒸散コンダクタンスgpの日変化を示す。

gpは日中小さく早朝と夕方に大きい日変化を示し、一般に日射量に比例して変動する個葉の気孔コンダクタンスとは異なる挙動を示した。日中のgpは、開花日には約1 cm s^{-1} と葉の気孔コンダクタンスに匹敵する大きさであったが、開花後、穂が乾燥するにつれて低下し、開花3日目頃には約0.3 cm s^{-1} まで低下した。A-CO₂区とE-CO₂区では、開花日が異なる(E-CO₂区の方が約5日早い)ためgpの単純な比較はできないが、開花日を基準とすると、その後の日変化傾向に大きな相違は認められなかった。これは、穂の表面には気孔がなく、CO₂濃度の違いが穂の蒸散コンダクタンスに直接影響を及ぼさないためと考えられる。

図1211-2は、開花後日数(Days After Flowering, DAF)ごとにgpと相対湿度の関係を示したものである。gpは相対湿度が低いほど小さく、開花後1～2日目で急激にレベルが低下した。このことから、A-CO₂区とE-CO₂区の穂温の違い(図1211-1b)には、開花日が約5日異なることも、少なからず関与するものと考えられた。穂温と群落内気温の差に着目すると(図1211-1c)、両区とも日中の穂温は、開花日に穂

の蒸散が活発なため気温とほとんど差がないか、または、気温より低い、開花後日数が経つにつれて、穂温が気温より高くなった。同じ日のA-CO₂区とE-CO₂区の穂-気温差は、E-CO₂区の方が大きかった。

これにもA-CO₂区に比べてE-CO₂区の穂の発育ステージ及び乾燥が進んでいたことが、影響したものと推察された。

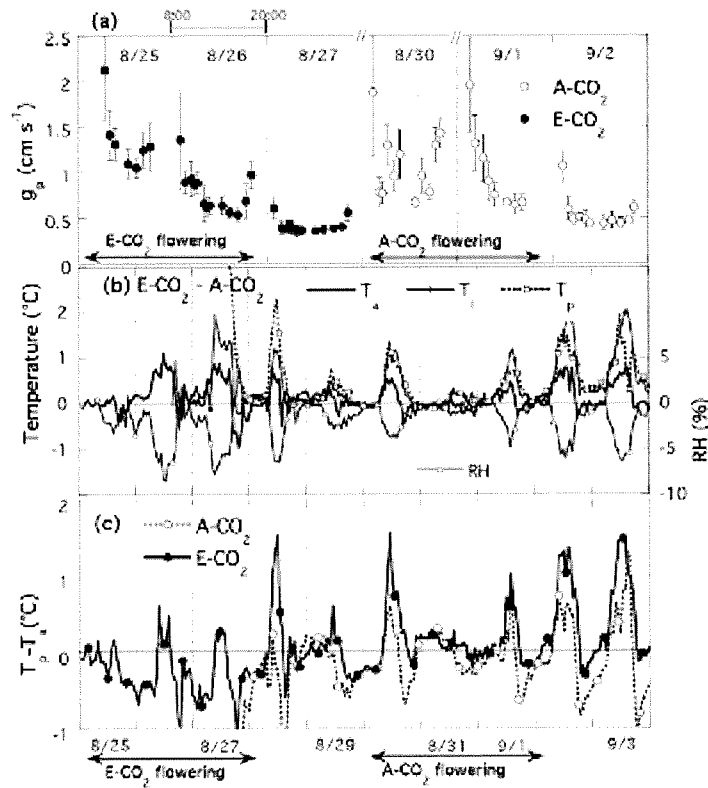


図1211-1 観測された穂周辺の微気象と穂の蒸散コンダクタンスの日変化

(2003. 8. 25～9. 3、中国FACE実験圃場、A-CO₂区とE-CO₂区)

- a) 両区の穂の蒸散コンダクタンス g_p (cm s^{-1})
- b) 気温 T_a 、葉温 T_l 、穂温 T_p 、相対湿度RHの両区の違い (E-CO₂区-A-CO₂区)
- c) 両区の穂-気温差 $T_p - T_a$

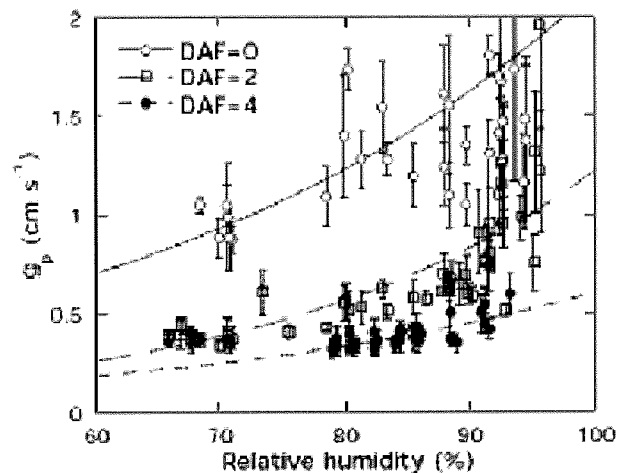


図1211-2 穂の蒸散コンダクタンスと相対湿度の関係 (DAF:開花後日数)

(イ) 穂温推定モデルによる高CO₂濃度が穂温に及ぼす影響の解明

同一発育ステージの穂の温度に及ぼす高CO₂濃度の影響を見積もるため、穂の熱収支を考慮した穂温推定モデルを開発した (Oue et al.2005、吉本ら2005)。A-CO₂区とE-CO₂区の開花日を同じとして、穂の熱収支モデルによるシミュレーションを行った (図1211-3)。この場合の高CO₂濃度による穂温の上昇は開花日頃に0.5~1℃で、開花後日数が経つにつれて1℃以上と穂温の上昇が顕著になった (図1211-3a)。計算された穂温上昇は、実測 (図1211-1b、0.5~3℃)

に比べると小さいが、開花時の高温不稔を増加させる可能性は十分あり得る大きさであった。さらに、穂の蒸散量に着目すると (図1211-3b)、同じ日に開花したにも関わらず、E-CO₂区の穂の方がA-CO₂区に比べて常に蒸散量が大きいことがわかる。これは、E-CO₂区の方がA-CO₂区に比べて常に穂温が高いこと (図1211-3a)、群落内湿度が低いこと (図1211-1b)、従って穂-大気間の飽差が大きいことが要因である。以上のことから、高CO₂濃度は、穂温を上昇させると同時に、穂の乾燥を促進させる可能性が示唆された。

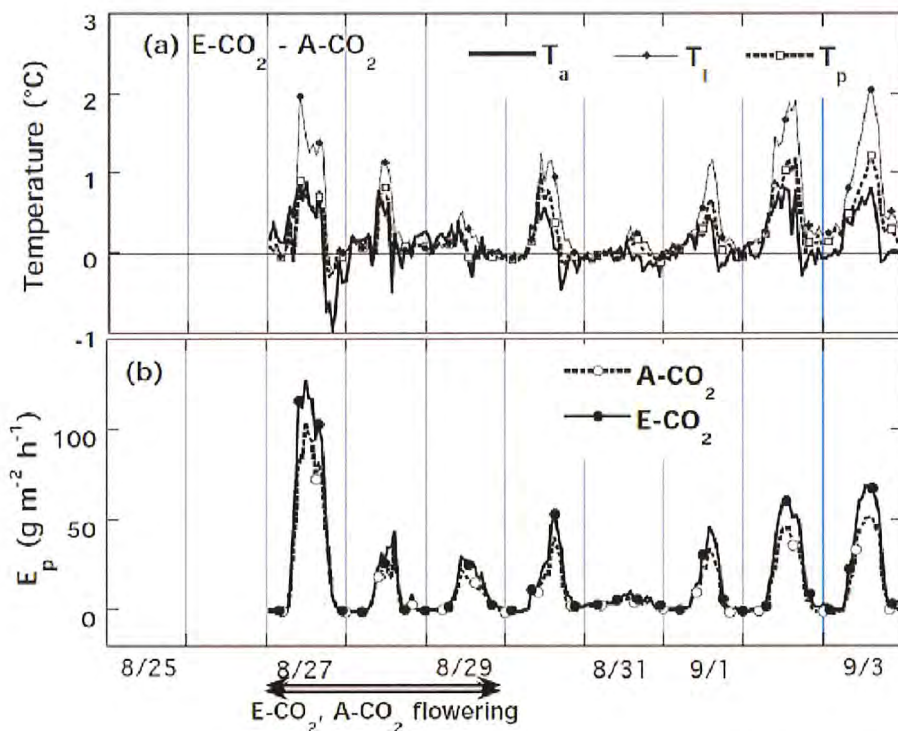


図1211-3 穂温推定モデルで計算された穂の温度と蒸散量の日変化 (2003. 8. 25~9. 3、A-CO₂区とE-CO₂区で開花日を同一とした)
 a) 穂温T_pの両区の差 (E-CO₂区-A-CO₂区)
 b) 両区の穂の蒸散量E_p(g m⁻² h⁻¹)

(ウ) 穂温推定モデルの感度解析

穂の形態特性が異なるイネ15品種の穂の蒸散コンダクタンスをポロメータで測定したところ、穂の蒸散コンダクタンスは、同じ生態型に属する品種間でも0.07~1.19cm s⁻¹にも及ぶ大きな遺伝的変異が認められた。そこで、穂の蒸散コンダクタンスの遺伝的変異や各気象条件の変動範囲を表1211-1のように設定し、穂温推定モデルの感度解析を行った (図1211-4)。ただし、基準条件としては、2005年の農業

環境技術研究所 (茨城県つくば市) の精密水田における出穂時 (8月6日10時~12時) の気象条件、あきたこまちの穂の蒸散コンダクタンスを設定した。

感度解析の結果、高CO₂濃度により気孔コンダクタンスが半減した場合、穂温は約0.5℃上昇するが、さらに、他の植生・気象要素の変動が穂温に影響することがわかった。葉面積指数 (LAI) や開花時の穂の高さなどは穂温に余り影響せず、一方で、風速・相対湿度及び穂の蒸散コンダクタンスが大きく影響し、

穂温は、さらに、 $-2.5\sim+2.5^{\circ}\text{C}$ も変動することが明

らかとなった。

表1211-1 穂温推定モデルの感度解析で適用した各気象・植生条件の基準条件と変動範囲

要素	基準条件	変動範囲
8/6 10:00-12:00		
気象条件		
風速	1 m/s	0.5~3 m/s
相対湿度 (群落内相対湿度)	65 % (79 %)	35~80 % (58~89 %)
植生条件		
葉面積指数	5	3~8
穂の傾き	0.35	0.3~0.4
穂のアルベド	0.35	0.2~0.4
開花時の穂の高さ	0.8 m	0.8~1m
穂の蒸散コンダクタンス	0.3 cm/s	0.07~1.19 cm/s
高CO ₂ による気孔コンダクタンスの閉鎖は、気象条件の変化として反映	葉温+2℃ 群落内気温+1℃ 相対湿度-6%	

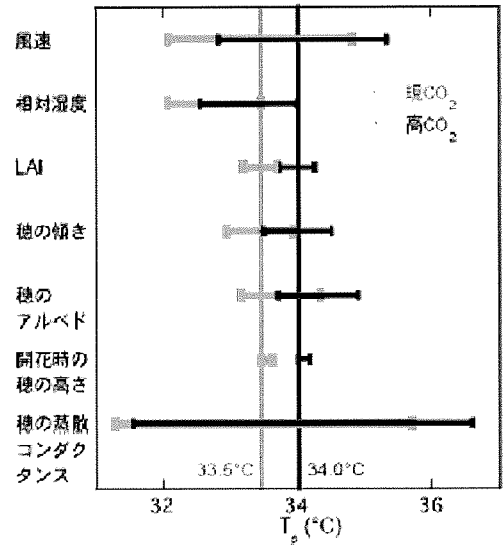


図1211-4 穂温推定モデルの感度解析結果

エ 今後の課題

(ア) 高CO₂濃度による葉の気孔開度の低下とそれに伴う群落微気象の変化は、登熟期間全体にわたり、開花期高温不稔だけでなく登熟不良の発生にも影響を及ぼす可能性がある。温暖化と大気CO₂濃度上昇によるコメの収量・品質への影響予測のためには、穂の各発育ステージにおける熱・水収支の把握が必要である。

(イ) 特に、登熟過程に影響の大きい、穂の形状や通水・蒸散抵抗などの穂の特性と水収支との関連について、品種ごとに把握する必要がある。

オ 要約

(ア) 開放系大気CO₂増加 (FACE) 実験水田で微気象観測を行い、高CO₂濃度による穂周辺の温湿度環境の変化を測定した。高CO₂濃度による葉の気孔開度の低下に伴う個葉の蒸散の減少と葉温の上昇のため、群落内はやや高温・乾燥した微気象環境となった。

(イ) 穂の熱収支モデルを開発し穂温を推定した結果、大気CO₂濃度上昇に伴う群落微気象変化により、開花期の穂温は0.5~1℃上昇し、開花時の高温不稔を増加させるだけでなく、穂の乾燥を促進させる可能性が示唆された。

(ウ) 穂温推定モデルの感度解析の結果、高温不稔を、更に増加させる可能性のある気象・植生要素

として、風速・相対湿度、穂の蒸散特性の品種間差異が抽出された。

カ 引用文献

Oue H., Yoshimoto M., Kobayashi K. 2005. Effects of free-air CO₂ enrichment on leaf and panicle temperatures of rice at heading and flowering stage. *Phyton*.45(4):117-124.

吉本真由美・Luo Weihong・Zhu Jianguo・小林和彦 2004. 中国の水田FACE(Free-Air CO₂ Enrichment)における微気象・エネルギー収支観測研究. *生物と気象*. 4(1):11-16.

Yoshimoto M., Oue H., Takahashi N., Kobayashi, K. 2005. The effects of FACE (Free-Air CO₂ Enrichment) on temperature and transpiration of rice panicles at flowering stage. *J. Agric. Meteorol.*60(5):597-600.

研究担当者(長谷川利拓、吉本真由美*、大上博基、松井勤、小林和彦)

(2) 地球温暖化に伴う水稻の高温障害発生リスクの解明

ア 研究目的

熱帯・亜熱帯地域ではイネの高温障害が度々発生しているが、今後の地球温暖化によって国内でも被

害の発生することが懸念される。中でも出穂開花期の高温は受精を阻害し収量の著しい低下を引き起こすため深刻な問題であり、その発生リスクがどの程度なのか把握することは、今後の各地域（特に西南暖地）における水稻の栽培計画を策定する上で重要である。

高温不受精の発生温度は品種や栽培条件によっても異なるが、概ね気温が32~36℃以上になると受精率が低下することが知られている（Satake and Yoshida, 1978）。しかしながら、気温以外の環境要因（湿度、風速、CO₂濃度）の影響については不明な点が多く、CO₂濃度については高CO₂濃度下で不受精の増加する実験結果（金ら, 1996）が得られているが、湿度については低湿度ほど不受精が増加する実験結果（Osada et.al., 1973）と、逆に、高湿度ほど不稔が増加する実験結果（Matsui et.al., 1997）が混在している。また、高温不稔は通常気温で評価されるが、厳密には受精器官である穎花の温度が重要であることがNishiyama（1981）によって指摘されている。そこで本研究では、これら環境条件による受精率の違いを水稻の穂温の違いによって説明することができないかと考え、検証のためファイトトロンによる高温処理実験を実施した。さらに、温度勾配型チャンバー（TGC）による実験により、水稻各品種の受精率と開花期の穂温との関係を定量化した。また、これら実験結果と既存の地球温暖化シナリオに基づき、国内における水稻の高温障害発生リスク評価を試みた。

イ 研究方法

（ア）ファイトトロンによる実験

九州沖縄農業研究センター（熊本県合志市）においてファイトトロンによる高温処理実験を行った。実験には5Lポットで育成した水稻4品種（ヒノヒカリ、ユメヒカリ、IR24、IR36）を用い、各品種の慣行

法に従って施肥・栽培管理を行った。出穂前まで通気性の高いガラス室で育成し、出穂以降からファイトトロンでの異なる3種類の温湿度条件下（①気温（日中）30℃湿度85%、②気温36℃湿度65%、③気温36℃湿度85%）で育成した。このとき各条件下において、扇風機を用いて風を当てる区（風速3.0-5.0m/s）と当てない区（風速0.1-0.3m/s）を設けた。各区の個体数は18個体とし、出穂期間中の毎日10~11時に、開花2~3日後に相当する穎花を20~30個サンプリングして、柱頭の花粉粒数（及び充実花粉の比率）と葯における充実花粉の比率を計測した。これと同時に各穂に出穂日をラベリングし成熟期に穎花の受精率を計測した。また、各穎花の開花時には放射温度計（MINOLTA, 505）を用いて穂の表面温度を測定した。

（イ）TGCによる実験

同研究センターにおいて2005年にTGCによる高温処理実験を行った。実験には5Lポットで育成した水稻8品種（コシヒカリ、あきたこまち、ヒノヒカリ、西海250号、日本晴、ひとめぼれ、IR24、IR36）を用い、各品種の慣行法に従って施肥・栽培管理を行った。出穂前まで通気性の高いガラス室で育成し、出穂以降からTGC内の異なる5地点で育成した。TGCでは窓面の片側を開放し反対側の窓面に3つのファンを取り付け、複数点で気温を連続測定している（図1212-1）。温室内の温度分布に応じてファンをコントロールすることにより、入口から出口にかけて約5℃の温度勾配を形成させることができる（図1212-2）。そのため、各地点の水稻は屋外よりも段階的に0~5℃高い温度に曝される。各区の個体数は3個体とし、穎花の温度を線径0.025mmの極細熱電対（名古屋科学機器、CC-001）で連続的に測定した。成熟期に穎花の受精率を穂ごとに計測し、開花時の気温、穂温との関係を解析した。

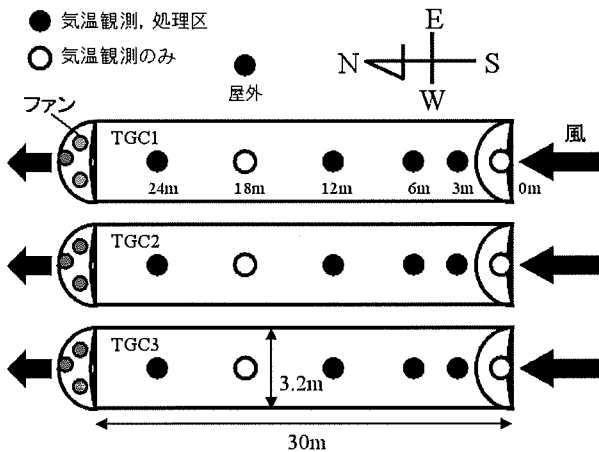


図1212-1 製作した3棟のTGCの模式図

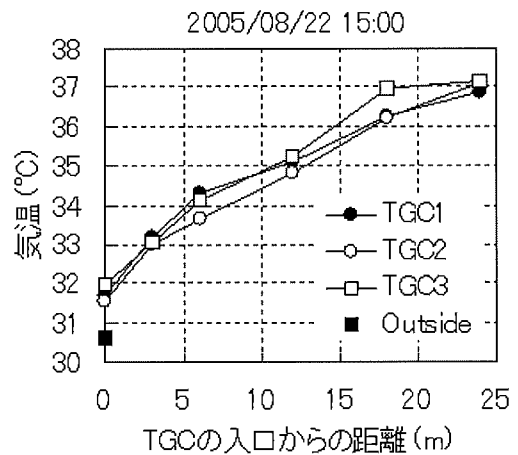


図1212-2 日中におけるTGC内の気温分布の例

ウ 研究結果

(ア) ファイトトロンによる実験

出穂開花期に高気温 (36°C) に曝された水稻の受精率は、全ての品種で通常気温 (30°C) の場合に比べて低下した (図1212-3)。湿度の影響をみると、どの品種も高湿度 (85%) の場合の方が低湿度 (65%) の場合よりも受精率が低かった。また、風の影響については明確な差異は認められなかった。開花期の穂温についても受精率と類似した傾向がみられた (図1212-4)。すなわち、気温が高いほど穂温も高く、気温が同じでも湿度が高いほど穂温が高かった。こ

れは、湿度が高い時には穂や葉における蒸散が減少し、潜熱輸送量が減少したことが理由と考えられる。

穂温と葯における花粉充実との関係を見ると、穂温が高いほど葯における充実花粉の比率は低下する傾向がみられた (図1212-5)。また、葯における充実花粉の比率が小さいほど、雄性不稔によって穎花の受精率は減少していた (図1212-6)。すなわち、湿度の影響は、穂の温度の違いを通じて葯の花粉発育に反映され、それが受精率の違いにつながる間接的な影響であると考えられた。

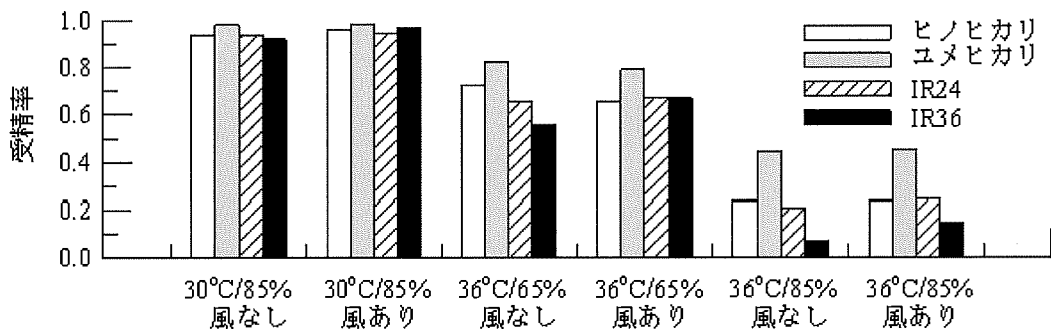


図1212-3 出穂開花期における気温と相対湿度の違いが穎花の受精率に与える影響

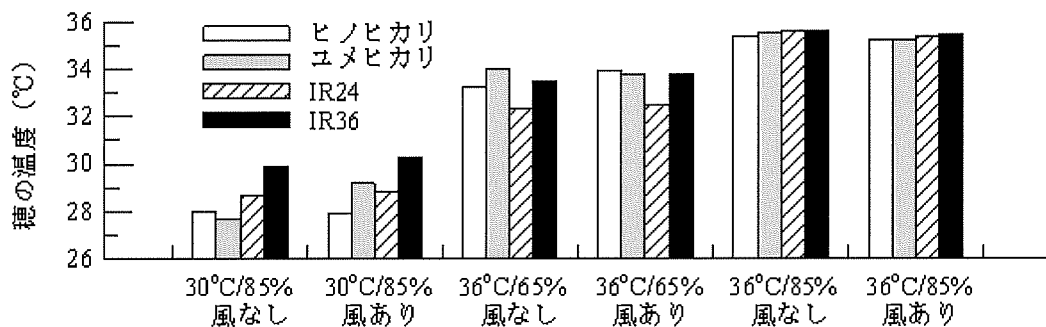


図1212-4 出穂開花期における気温と相対湿度の違いが穂の温度に与える影響

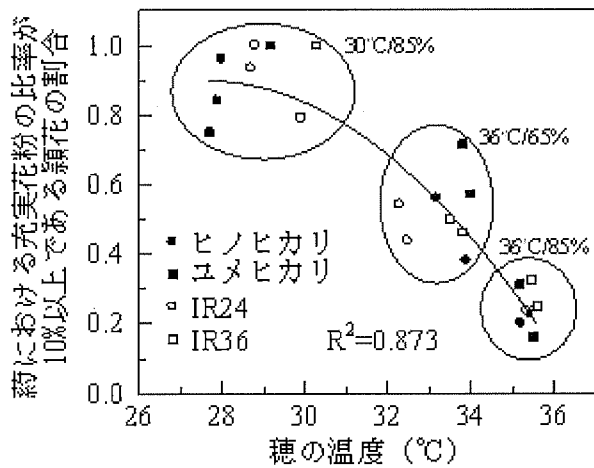


図1212-5 穂温と花粉の充実率の関係

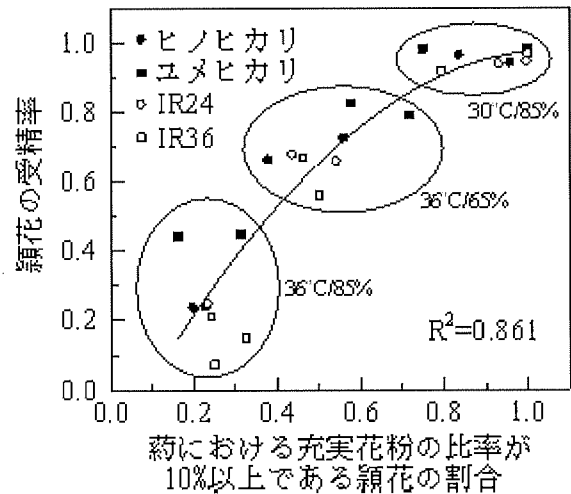


図1212-6 花粉の充実率と穎花の受精率の関係

(イ) TGCによる実験

出穂開花期にTGC内で育成された水稻の個体ごとの受精率は、TGCの入口から出口地点にかけて段階的に減少する傾向がみられた。ただし、品種によって出穂期が異なるため、開花期間中の気温は品種によって異なっていた。また、開花時刻も9時～12時の範囲で品種による差がみられ、さらに、いずれの穂でも穎花が9割ほど開花するのに3日間程度を費やしていた。そこで穂ごとに受精率を集計し、各穂の出穂日から3日間の日最高穂温の平均値との関係を見たのが図1212-7である。どの品種も穂温が高くなるにつれて受精率の減少する傾向がみられたが、その減少傾向には品種間差がみられた。品種による受精率の耐高温性を定量的に把握するため、両者の関係を次式で近似した。

$$F_s = \frac{1}{1 - \exp(T - T_{0.5})}$$

ここで、 F_s は受精率(稔実率)、 T は温度、 $T_{0.5}$ は $F_s=0.5$ となる時の温度である。各品種の $T_{0.5}$ の値を表1212-1に示した。表1212-1には穂温でなく気温(3日間の日最高気温の平均値)を基準とした場合の $T_{0.5}$ の値も併せて示した。ジャポニカ品種の場合、耐高温性については、品種間により、差があることがわかった。また、インディカ品種である「IR24」と「IR36」は気温を基準とした場合には耐高温性が比較的高かった。

(ウ) 温暖化によるリスク評価

得られた日最高気温と受精率との関係式を用いて、

将来の温暖化時における水稻の受精率の評価を試みた。将来の予測気候値には、温暖化シナリオA2(多元化社会シナリオ)でのCCSRによる全球予測値をもとに、地形の影響を考慮して空間補間された国内のメッシュ気候値(Yokozawa et. al., 2003)を用いた。対象品種はコシヒカリで、8月上旬に出穂開花する場合の不稔率を上式から予測した。予測された2030年代、2060年代、2090年代の平均的なコシヒカリの不稔率の地理的分布を図1212-8に示す。不稔率は2030年代は全ての地域で5%以下であるが、2060年代に5%以上となる地域がわずかに出現すると予測された。さらに、2090年代には筑紫平野、佐賀平野、和歌山平野、濃尾平野の一部の地域で不稔率が5%を超えると予測された。

エ 考察

ファイトロンによる実験では、大気湿度が高いほど受精率が低下し、その影響は穂温を通じて反映されることが明らかになった。金ら(1996)やMatsui et.al.(1997)は高 CO_2 濃度下で受精率の低下することを報告しているが、高 CO_2 濃度下では気孔抵抗が増大し穂温が高いこと(Yoshimoto et.al., 2005)から、 CO_2 濃度も同様に穂温を通じて間接的に受精率に影響を与えていることが示唆される。そのため、気候変動等による水稻の不受精発生リスク評価には穂温を指標とすることが望ましい。しかし、今のところ、気温以外の要因(湿度・日射等)の将来変化とそれによる穂温の変化を高い確度で予測することは困難である。本研究では気温から直接的に将来の不稔率

を予測したが、CO₂濃度の増加を考慮した場合、穂温は、更に高くなるため、不稔率も本結果より高くなることが予想される。一方で、今回作成した気温と受精率の関係式はTGC内でのポット実験の結果に基づいており、実際の自然条件下において気温と穂温の関係が異なると考えられる。一般的には、自然条

件下において、水稻が群落を形成しているため、気温が同じでもポットに比べて（群落の蒸散等の影響によって）穂温は低い。すなわち、予測される不稔率も本結果より低いかもしれない。いずれにしても、今後これらの影響を定量的に評価する必要があるだろう。

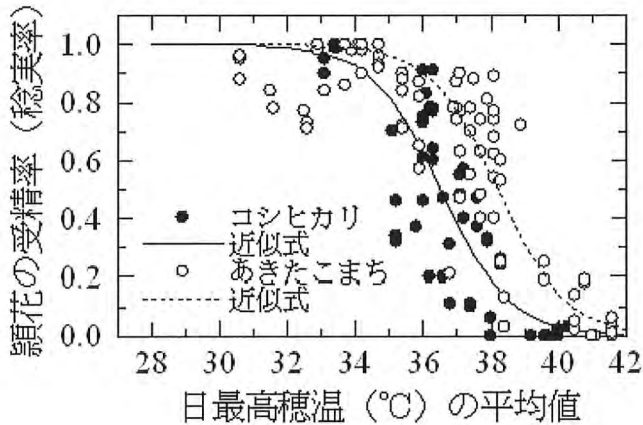


図1212-7 穂温と花粉の充実率の関係

表1212-1 関係式のパラメータ値の品種間差

品種	$T_{0.5}$ (°C)	
	気温の場合	穂温の場合
コシヒカリ	37.8	36.5
あきたこまち	38.8	38.2
ヒノヒカリ	38.0	36.4
西海250号	35.3	33.7
日本晴	37.0	36.7
ひとめぼれ	36.8	36.1
IR24	39.1	36.9
IR36	39.5	37.0

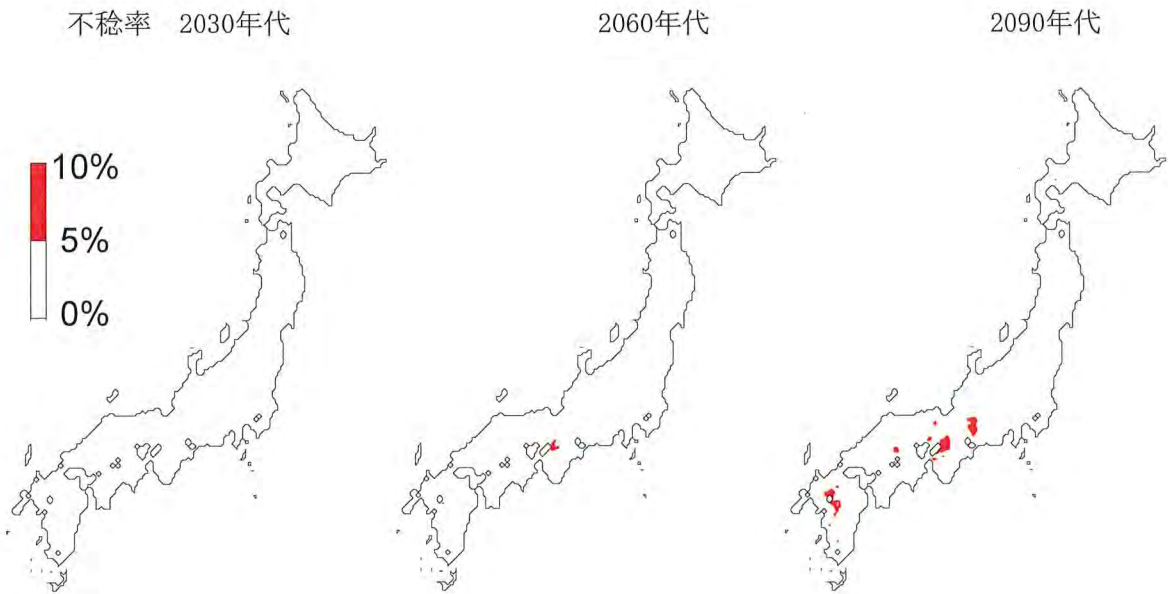


図1212-8 日最高気温による温暖化時の水稻の不稔率の予測値 (※品種：コシヒカリ、出穂期：8月上旬)

オ 今後の課題

将来の気候変動について、今回は平均的な気温（10年間平均値、月平均値）の場合を対象としたが、より現実的な不受精発生のリスク評価を行うためには、暑夏年・冷夏年等の年次間変動、あるいは、月中の毎日の変動を何らかの手法によって考慮する必要がある。

カ 要約

水稻の出穂開花期の高温障害について、大気湿度が穂温の違いを通じて受精率に影響を与えることを明らかにした。水稻8品種についてTGCでの実験結果をもとに、開花期の日最高気温及び日最高穂温と受精率の関係式を作成した。将来の温暖化時におけるコシヒカリの平均的な不稔率の地理的分布を予測した。

キ 引用文献

- 金ら 1996. 高温・高CO₂濃度環境が水稻の生育・収量に及ぼす影響. 日作記. 65:634-651.
- Matsui 1997. High temperature-induced spikelet sterility of Japonica rice at flowering in relation to air temperature, humidity and wind velocity conditions. Jpn. J. Crop. Sci. 66: 449-455.
- Nishiyama et al. 1981. temperature inside the flower of rice plant. Jpn. J. Crop. Sci.50: 54-58.
- Osada et al. 1973. Abnormal occurrence of empty grains of Indica rice plants in the dry, hot season in Thailand. Proc. Crop Sci. Soc. Jpn. 42: 103-109.
- Satake and Yoshida 1978. High temperature induced sterility in Indica rices at flowering. Jpn. J. Crop. Sci. 47: 6-17.
- Yokozawa et al. 2003. Mesh climate change data for evaluation climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO₂ concentration. J. Agric. Meteorol. 59: 117-130.
- Yoshimoto et al. 2005. Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO₂ enrichment. Agric. Forest Meteorol. 133: 226-246.

研究担当者(丸山篤志*, 大場和彦, Weerakon W.M.W)

(3) 地球温暖化が我が国の畜肉生産に及ぼす影響評価と予測技術の開発

ア 研究目的

家畜生産は温室効果ガスの発生に対して大きな位置を占めており、我が国からのメタン発生量に占める家畜生産に由来するものの割合は32%に、一酸化二窒素は6%に達することが報告されている。このため、発生源としての研究は早くから取り組まれている。

一方、家畜生産は環境温度の影響を受け、我が国の気候条件であれば、温暖化による生産性の低下は逃れられないものと考えられる。また、アジアを視野に入れた場合、家畜生産における肉用牛、豚、鶏などの食肉、食鳥生産の分野の比重が大きく、さらに、生産性の低下とともに、品質の低下も予想されるにもかかわらず、この分野ではほとんど地球温暖化の影響評価に関する研究が実施されていない。このため、地球温暖化が畜肉生産に及ぼす影響を検討

し、各種気候変動シナリオに従った畜肉生産に対する影響予測を行う。

イ 研究方法

(ア) 地球温暖化が我が国の肉用鶏の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

4週齢の肉用鶏144羽を環境制御室において6週齢まで飼養し、環境温度3水準: 23、28、33℃、相対湿度(RH) 3水準: 40、60、80%が飼料摂取量、増体日量、飼料効率、産肉量に及ぼす影響を評価した。その結果から、地球温暖化が肉用鶏の産肉量に及ぼす影響を我が国の地域ごとに予測した。すなわち、気候予測データベースである「気候変化メッシュデータ」(Yokozawaら、2003)を用いて、全国約4,500ヶ所の2020、2040及び2060年代の5から10月までの各月の平均気温予測値を推定し、上記の実験で得られた環境温度と産肉量との関係と照らし合わせ、我が国における温暖化による気温上昇が産肉量に及ぼす影響を検討した。

(イ) 地球温暖化が我が国の豚肉の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

12週齢の育成豚21頭を環境制御室において3週間飼養し、環境温度(4水準: 23、28、30、33℃、RH60%)が飼料摂取量、増体日量、飼料効率等の生産性に及ぼす影響を評価した。

(ウ) 地球温暖化が我が国の牛肉の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

ホルスタイン種育成牛12頭(4頭×3回)を環境温度20、28及び33℃の3水準に順次2週間ずつ負荷し、増体日量等の生産性に及ぼす温度と湿度(RH60%と70~80%)、体重(250kgと400kg)の影響を評価した。また、夏期の平均気温上昇(33℃2週間)が育成牛のその後の増体に及ぼす影響を評価した。さらに、黒毛和種肥育牛の増体に及ぼす夏期高温の影響を野外実験(2年間)の結果から評価した。

ウ 研究結果

(ア) 地球温暖化が我が国の肉用鶏の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

山崎ら(2006)の研究において、飼料摂取量、増体日量はいずれのRHでも環境温度が高いほど低下した。産肉量はいずれの環境温湿度においてもRHの影響が小さく環境温湿度の上昇により減少し、23℃の

値を100%とすると28℃では93%、33℃では69%となった。

代謝体重当たりの熱発生量は、いずれのRHにおいても、環境温度の上昇とともに減少した。また、熱発生量は、いずれの環境温度においても、RH60%に比べて80%で約20kcal高い値を示した(表1213-1)

平均気温は、年代の経過とともに上昇し、2060年には6月から9月まで東北以南の広い範囲で産肉量への影響が示唆された。特に、温暖な沿岸部でその

影響が大きい可能性が示された。東日本の8月においては、現在と比べて温暖化により産肉が低下する地域が広がると予想されるのに対し、西日本では温暖化の影響がない地域はほとんどなくなり、2060年以降には15%以上低下する地域も現れ、影響がより明確であることが示され、温暖化により60年後には8割以上の地域において生産性低下の可能性が示された(図1213-1、図1213-2)。

表1213-1 肉用鶏の生産性に及ぼす温湿度の影響

相対湿度 (%)	60			80		
	23	28	33	23	28	33
設定温度 (°C)						
飼料摂取量 (g/14日/羽)	2496 ^a	2255 ^b	1574	2478 ^a	2242 ^b	1837
増体量 (g/14日/羽)	1238 ^a	1035 ^b	564	1317 ^a	1176 ^b	862 ^c
飼料効率 (%)	49.6 ^a	46.0 ^b	35.8 ^c	53.2	52.5	46.6
と殺時体重 (g)	2773 ^a	2618 ^b	2038	3116 ^a	2816 ^b	2281 ^c
肝臓 (g/kg 体重)	16.3	16.4	17.9	16.5	17.4	17.7
腹腔内脂肪 (g/kg 体重)	16.8 ^a	16.1 ^b	13.3 ^c	18.9	17.6	16.8
ムネ肉 (g/kg 体重)	59.8	59.7	56.5	63.4	57.9	57.9
モモ肉 (g/kg 体重)	75.5	80.2	79.5	76.3	79.7	79.7
熱発生量 (kcal/日/kg 体重 ^{0.75})	204	147	94	225	161	119

^{a-c} 異符号間に有意差あり

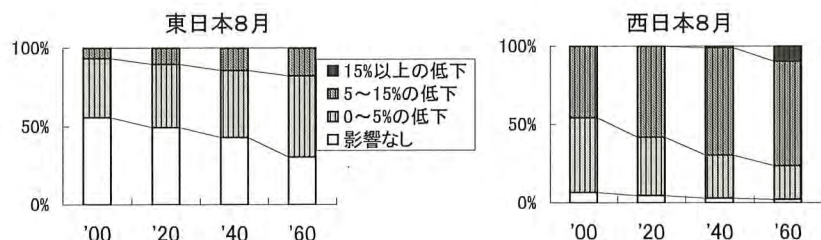


図1213-1 将来の気候温暖化により鶏の産肉低下が表れる地域の割合

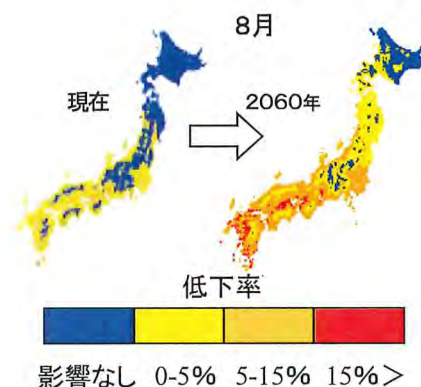


図1213-2 将来の気候温暖化に現れる地域の割合により鶏の産肉低下が現れる地域マップ図

(イ) 地球温暖化が我が国の豚の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

高田ら(2006)らの研究で、飼料摂取量 (g/d) は23℃に対して28℃では10%、30℃では11%、33℃区では48%の減少であり(図1213-3)、増体日量 (g/d) は23℃に対して28℃では17%、30℃では28%、33℃では52%の減少であった(図1213-4)。飼料効率(増体/摂取量)は23℃に対して28℃では8%、30℃では20%、33℃では9%の低下であった(図1213-5)。

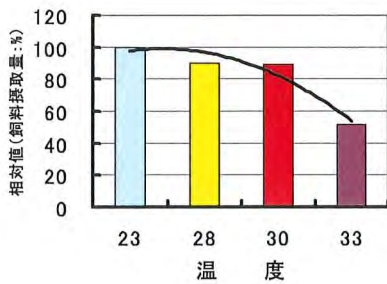


図1213-3 豚の飼料摂取量に及ぼす温度の影響

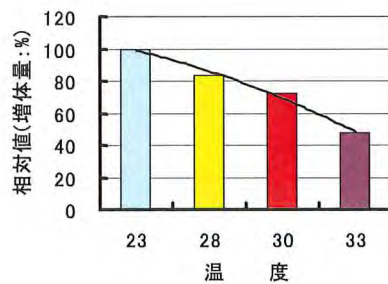


図1213-4 豚の増体量に及ぼす温度の影響

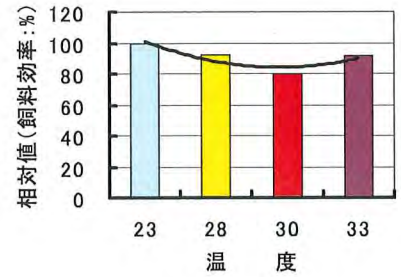


図1213-5 豚の飼料効率に及ぼす温度の影響

(ウ) 地球温暖化が我が国の肉用牛の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

野中ら(2003、2004a、2004b、2005)の研究において、体重250kg程度の育成牛に対する高温の影響は、28°Cでは呼吸数増、体温上昇のみに現れ、33°Cでは増体日量が20°Cの値と比較して8%低下した。体重が400kg程度の場合、28°Cから増体日量は低下し始め、33°Cでは20°Cの値と比較して74%低下した。RH80%の高湿度の場合、28°Cでは20°Cの値と比較して増体日量が16%低下し、33°Cでは湿度の影響が更に大きくなること明らかとなった(図1213-6)

体重400kg程度ホルスタイン種育成牛の増体を環境制御室内と野外データを比較したところ、月平均気温が27.3°C、設定体重0.7kgの場合、増体に及ぼす暑熱の影響は、ほとんど認められなかった(図1213-8)が、体重600kgの黒毛和種肥育牛、月平均気温28.0°Cの場合、増体の低下が若干認められた(図1213-7)。また、夏の平均気温が33°Cまで上昇すると体重400kg程度ホルスタイン種育成牛の体重回復は現状より遅れるが、長期的には追いつくことが明らかになった(図1213-8)。

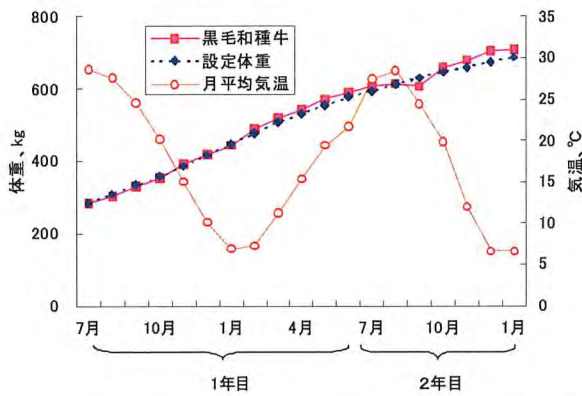


図1213-6 牛の増体量に及ぼす気温と湿度の影響

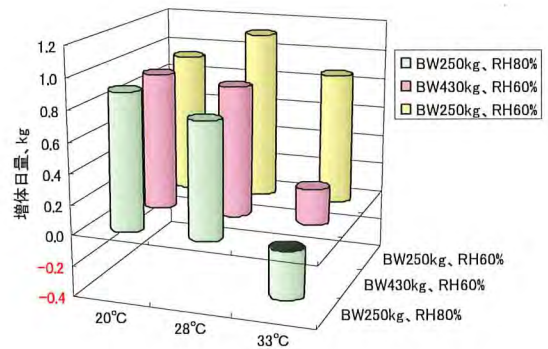


図1213-7 黒毛和種肥育牛の増体成績

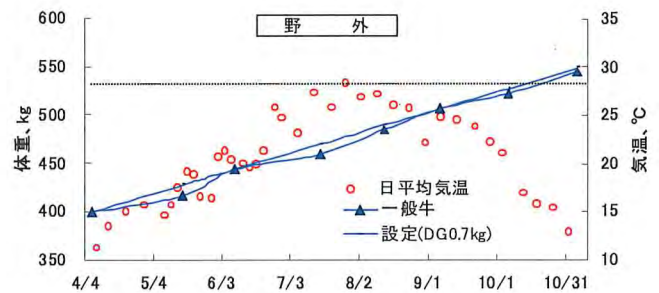
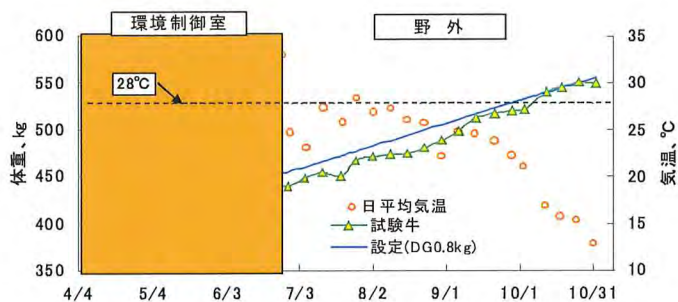


図1213-8 温暖化により夏季の気温が33°Cになった場合の牛の増体成績

エ 考 察

(ア) 地球温暖化が我が国の肉用鶏の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

単位体重当たりの腹腔内脂肪量は、環境温度の上昇とともに減少したが、既往の報告では、体脂肪蓄積は温度上昇とともに増加するとされてきた。しかし、本研究のように湿度一定に制御した場合、環境温度の上昇に伴う飼料摂取量の減少がより大きく、体脂肪蓄積量も減少すると考えられた。今回示した将来の産肉量予測は、気温予測の変動幅が大きいことなどから、精度的には十分とは言えないものの、現時点では妥当な予測であると考えられる。地球温暖化が我が国の鶏肉生産に及ぼす影響は小さくないことから、安定した鶏肉の供給を図るためには、耐暑性育種や高温順化、制限給餌、給与飼料の改善などの高温環境下での飼養管理対策を検討する必要がある。

(イ) 地球温暖化が我が国の豚の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

今回は体重が40kg前後の肥育豚で、わずか3週間という比較的短い期間であったが、温暖化の影響は鶏と比べると豚の方が大きいことがわかった。しかし、肥育後期である体重70kg以降の豚では、恐らく温暖化の影響はより顕著に表れることが推定される。湿度に関しては今回の実験では1水準（60%）でしかできなかったが、湿度の影響が豚に対して、どのような影響を及ぼすかも明らかにする必要がある。

(ウ) 地球温暖化が我が国の肉用牛の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

短期間、過酷な実験室での暑熱試験においては、体重は大きくなるほど、湿度は高くなるほど生産性の低下が大きく認められ、飼料給与法等の暑熱対策が必要であると考えられた。また、一般管理牛舎で飼育している400kg程度の牛の場合、夏季には増体の停滞が認められるものの長期的には回復していることが明らかとなった。しかし、出荷時期が夏季に重なる牛については出荷の遅延、また、繁殖牛については受胎率の低下等が考えられるので、それらの対策を考える必要がある。

オ 今後の課題

(ア) 地球温暖化が我が国の肉用鶏の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

本研究は4から6週齢までの肉用鶏の2週間の飼養試験の結果である。肉用鶏の暑熱に伴う生産性の低下は、加齢とともに大きくなることが示されており、長期飼養での生産性への影響を調べる必要がある。

(イ) 地球温暖化が我が国の豚の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

地球温暖化が肉質に及ぼす影響を検討する目的で脂肪酸合成系酵素活性及び脂肪酸分解系酵素活性脂肪を調べたものの、個体間の変動が大きく一定の傾向が認められなかった。今後、暑熱環境下での良質肉の生産に向け、環境温度と蛋白質や脂肪の合成・分解との関係について検討し、栄養面からの温暖化対策技術に結び付ける必要がある。

(ウ) 地球温暖化が我が国の肉用牛の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

地球温暖化が我が国の肉畜生産へ及ぼす影響については、総合的に評価する必要がある。

カ 要 約

(ア) 地球温暖化が我が国の肉用鶏の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

相対湿度を40、60、80%で、環境温度23℃で測定した産肉量を100とした場合、それぞれの湿度における28℃と33℃の産肉量の相対値を求め以下の式を得た。 $(y = -0.3239X^2 + 15.04X - 74.632; y = 23℃の時を100とした場合の産肉量、X:気温)$ この式から、肉用鶏の産肉量が5%低下する気温は27.2℃、15%低下する気温は30℃と求められた。気候シナリオに基づき求めた平均的な気温上昇速度(0.37℃/10年)から、夏季(7、8、9月)の産肉量は年代の経過とともに減少し、西日本において産肉量が大幅に低下することが予測された。

(イ) 地球温暖化が我が国の豚の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

12週齢の育成豚21頭を環境制御室において3週間飼養し、環境温度(4水準:23、28、30、33℃、RH60%)が飼料摂取量、増体日量、飼料効率等の生産性に及ぼす影響を評価し、飼料摂取量(g/d)は23℃に対して28℃では10%、30℃では11%、33℃では48%の減少、増体日量(g/d)は23℃に対して28℃では17%、30℃では28%、33℃では52%の減少、飼料効率(増体/摂取量)は23℃に対して28℃では8%、30℃では20%、

33℃では9%低下であった。

(ウ) 地球温暖化が我が国の肉用牛の産肉性に及ぼす影響評価と予測技術の開発

体重の異なる育成牛への高温（28及び33℃）の影響は、体重250kg程度の場合33℃から採食量への影響が現れるが、体重400kg程度の場合28℃から体温・呼吸数の増加、採食量・増体日量の低下が現れたことから、体格が大きくなるほど飼料給与法に工夫が必要であると考えられた。また、相対湿度が中庸な場合（RH60%）、28℃では効率的に熱放散を行い、体温上昇・飼料摂取量の低下はほとんどないが、33℃では熱放散機能の亢進では体温の上昇を抑制できず、飼料摂取量が低下した。相対湿度が高い場合（RH70～80%）、28℃でも体温上昇を抑制するような熱放散を行うことができず、飼料摂取量及び増体日量の低下が起り、33℃では、更に体温上昇、摂取量及び増体日量の低下が顕著に現れた。

キ 引用文献

Itoko Nonaka・Naozumi Takusari・Kiyoshi Tajima・Tomoyuki Suzuki・Mitsunori Kurihara 2004b. Effect of environmental temperature on physiological and nutritional status on prepubertal Holstein heifers. Asian-Australasian Association of Animal Production Societies 11th. The Animal Science Congress 3. 520-522.

栗原優佳子・野中最子・樋口浩二・田島清・田鎖直澄・栗原光規2005. 高温環境が育成牛の生理状態および生産性に及ぼす影響. 日本畜産学会104回大会. 52.

Mitsunori Kurihara・Shigeru Shioya 2003. Extension Bulletin of Food and Fertilizer technology center

野中最子・栗原光規・林英明・田鎖直澄・鈴木知之・中島一喜・榎木茂彦・寺田文典2003. 暑熱負荷が育成雌牛のエネルギー出納および免疫機能に及ぼす影響. 日本畜産学会101回大会. 47.

野中最子・田鎖直澄・田島清・鈴木知之・栗原光規2004a. 気候温暖化が育成牛の生理生産反応に及ぼす影響. 日本畜産学会103回大会. 71.

野中最子・樋口浩二・田島清・田鎖直澄・竹中昭雄・栗原光規2005. 高温・高湿環境が育成牛の生産反応に及ぼす影響. 日本畜産学会105回大会. 28.

高田良三・大塚誠・勝俣昌也・村上斉2006. 地球

温暖化による豚の生産性に及ぼす影響—将来予測. 第86回日本養豚学会(予定)

山崎 信・村上 斉・中島一喜・阿部啓之・杉浦俊彦・横沢正幸・栗原光規 2006. 日本畜産学会報. 77:231-235.

Yokozawa M, Goto S, Hayashi Y, Seino H. (2003) Journal of Agricultural Meteorology 59:117-130.

研究担当者（野中最子、樋口浩二、田鎖直澄、藪元悠介、永西修*、高田良三、勝俣昌也、石田藍子、山崎信、中島一喜、阿部啓之、甫立京子、林征幸）

(4) 果樹農業に対する地球温暖化の影響予測モデルの開発とその影響評価

ア 研究目的

果樹は気候に対する適応範囲が狭く、北日本のリンゴや暖地のカンキツのように栽培適地は明確に分化している。このことは果樹生産の気候変動に対する脆弱性を端的に示している。また、青森、長野のリンゴのように地域ブランドが確立しており、気候変動があっても容易に作目を変えられないため、この問題を放置すれば地域経済が重大な影響を受けることが懸念されている。そこで、適地移動など温暖化の影響の概要を把握する。さらに、果実生育期の高温は品質低下を起こし、休眠期の低温不足は、自発休眠覚醒が不十分となるため開花不良を発生させる。そこで、果実生育期及び休眠期の両方に顕著な気温の影響が現れると考えられるリンゴにおいて、樹を人工環境下で栽培することにより、自発休眠覚醒や果実品質と高温との関係を明らかにするとともに、これらの関係のモデル化を行い、温暖化による影響評価を行う。

イ 研究方法

(ア) 栽培適地の移動推定

温暖化の影響を把握するため、リンゴは「果樹農業振興基本方針」（農水省、2000）に示されている6～14℃及び現在の主産地の温度により近い7～13℃、ウンシュウミカンは15～18℃を栽培適地の年平均気温として解析した。気候予測値は、「気候変化メッシュデータ」（Yokozawaら、2003）を、現在の値は「メッシュ気候値2000」（気象庁、2002）を用いた。データベース内の気温の値から各メッシュ、年代ごとに4

つの気候モデルによる値を平均し、かつ、12か月の値を平均した。この計算値から所定の温度域に該当するメッシュを抽出し、地図上に図示するプログラムを作成し、解析した。

(イ) 果実生育期の影響

リンゴ‘さんさ’ポット栽培樹を人工気象室に搬入し、果実生育の初期（4月下旬－5月下旬）、中期（6月上旬－7月上旬）及び後期（7月上旬から収穫期）において温度処理を行った。カラーチャートを用いて果実の着色を経時的に測定した。また、収穫期に果実のデンプン指数及び糖度（Brix）を調査した。この実験は3年間行った。

(ウ) 休眠期の影響

a 休眠期の高温と自発休眠覚醒阻害による展葉・開花不良との関係を明らかにするため、リンゴ‘ふじ’のポット栽培樹について、低温室で低温（6℃）を処理した。低温処理時間は720、984、1,200、1,416、1,752時間とした。低温処理後、直ちに人工気象室に配置し、25℃恒温の加温処理を開花するまで行った。全ての花芽にラベルを付け、発芽、展葉、開花調査を毎日行った。

b リンゴ‘さんさ’のポット栽培樹に、10月末から6℃を合計で2,520時間処理し、その処理中に15℃処理を336時間挿入した。15℃処理の時期の違いによる効果の差を調べるため、低温処理を中断した時間を処理区により前後させた。以上の処理後、人工気象室に配置し、15℃恒温処理を展葉するまで行った。

c リンゴ‘ふじ’のポット栽培樹に、10月末から低温（0、3、6、9、12、15℃）を1,368時間、

その後、6℃を1,152時間処理した。処理後、人工気象室に配置し、15℃処理を展葉するまで行った。

d これまでのデータを基にリンゴの自発休眠覚醒モデルを開発し、温暖化の影響評価を行った。併せて、既成のナシ自発休眠覚醒モデルにより、ナシに関する影響評価を行った。

ウ 研究結果

(ア) 栽培適地の移動推定

リンゴ栽培に適する年平均気温6～14℃の地域は、徐々に北上し、2020年代に北海道の平野部全域が6℃以上となる一方、2040年代には東北南部の平野部が、2060年代には東北中部の平野部が14℃以上となった（図1214-1）。上記、温度域は、現在のリンゴの主産地よりもかなり広いと考えられたため、より狭い温度域である7～13℃についても検討した。この温度域は、道南～北関東等で、現在の主産地と概ね一致していたが、2060年代には東北地方の平野部のほぼ全域が13℃以上となり、現在の主産地の多くが、暖地リンゴの産地と同程度の気温になる可能性が示された。ウンシュウミカン栽培に適する年平均気温15～18℃は西南暖地の沿岸部が主に該当し、現在の主産地と概ね一致しているが、2020年代に山陰地方等の日本海沿岸が、2040年代に関東及び北陸の平野部全域が15℃以上となり、2060年代には南東北の沿岸部まで広がった（図1214-2）。一方、18℃以上の地域は現在、南西諸島と九州の南端部のみであるが、2060年代には現在の主産地の多くが18℃以上となり、中晩柑の産地と同等か、より高温になるものと考えられた（杉浦・横沢、2004）。

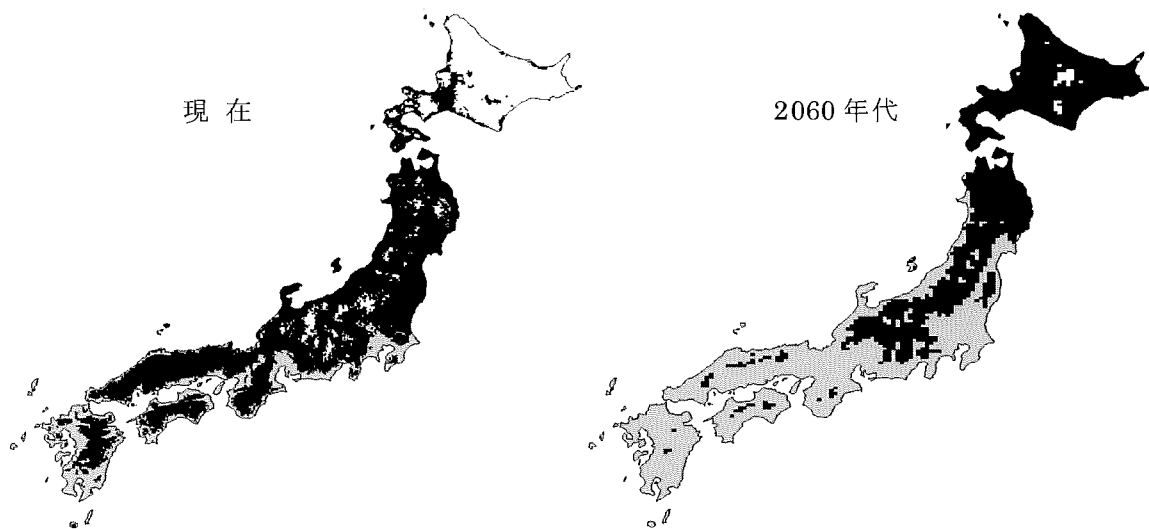


図1214-1 リンゴ栽培に適する年平均気温（6～14℃）の分布の移動
 黒色：適地。白色：より低温の地域。灰色：より高温の地域。現在の値は1971～2000年の平年値。

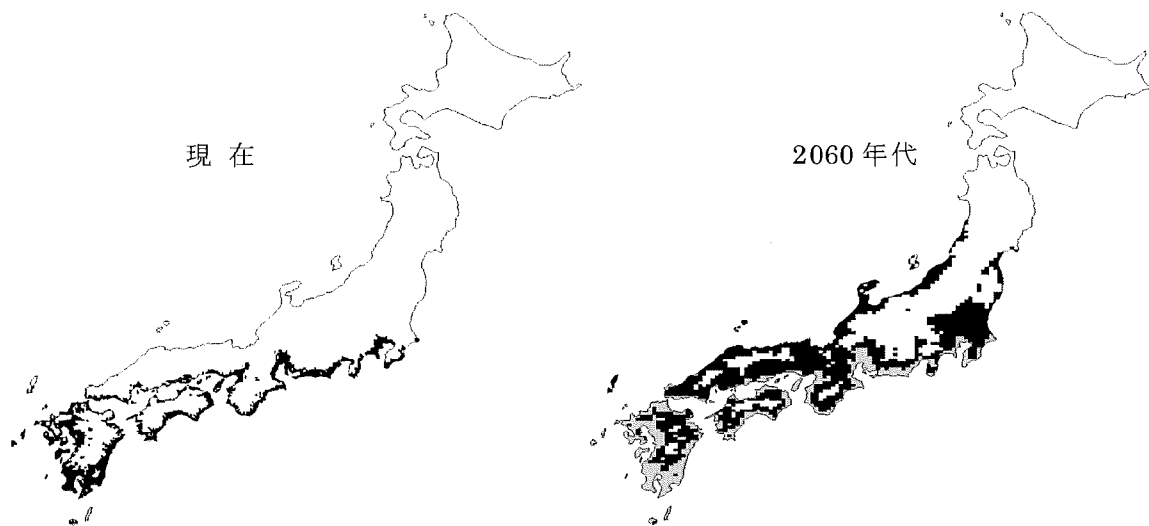


図1214-2 ウンシュウミカン栽培に適する年平均気温（15～18℃）の分布の移動
 黒色：適地。白色：より低温の地域。灰色：より高温の地域。現在の値は1971～2000年の平年値。

（イ）果実生育期の影響

果実の果皮色の変化を表1214-1に示した。数字が大きいほど地色の上に乗った赤色が濃くなっていることを示す。生育初期の温度処理は高温で生育が進んだが、地色の緑色が減少し始め、果皮の色が付き始める直前の6月上旬からの温度処理では低温の方が地色も果皮色も進行が早くなった。地色がほぼ黄色になり、果皮の着色が進む後期の温度処理では

高温は地色の進行を抑制した。高温は生育初期の地色・果皮色の進行を促すが、中期は地色を、後期は果皮色の進行を強く抑制することが示された。生育初期の温度処理では、高温で果実の食味を左右するデンプンの消失も早まる傾向にあった。糖度については明確な影響はなかった。しかし、後期の温度処理では、デンプンの消失は高温ほど遅くなり、糖度の上昇も遅延した。

表1214-1 果実表面色と温度処理。平均値と果皮色5以上の果実割合

		対照	前期処理		後期処理		
			12℃	17℃	17℃	22℃	27℃
果皮色 (平均)	8月10日	4.3			5.3	2.5	0.5
	8月16日	4.9	0.5	3.8	5.3	2.5	0.8
	8月30日	5.3	2.4	5.0	5.3	5.1	2.8
果皮5 (%)	8月10日	50.0			100.0	0.0	0.0
	8月16日	62.5	0.0	50.0	75.0	0.0	0.0
	8月30日	75.0	18.2	63.6	66.7	71.4	0.0

注) 前期温度処理中の対照(無処理)の平均気温19.1℃後期処理中は27.0℃

(ウ) 休眠期の影響

a 低温処理時間が最も長い1,732時間の樹で、発芽、展葉、開花始が最も早く、発芽、展葉、開花率も最も高かった。1,416時間では発芽、開花率が劣ることから、自発休眠覚醒に必要な低温時間は、少なくとも1,416時間以上、1,732時間以下であることが示された。

b 6℃中断時期が1,416時間よりも早いと、展葉までの時間が長くなった。このことは6℃処理が1,416時間では、まだ、自発休眠覚醒しておらず、15℃の効果がなかったことを示す。6℃中断時期が1,632時間より遅いと展葉までの時間が短縮したことから、6℃中断時期が1,632時間以上で自発休眠から覚醒

していると推定された。この結果及びaの結果から、自発休眠覚醒に必要な6℃は約1,500時間と判定された。

c 0～6℃は自発休眠覚醒の効果が高く、6℃以上は12℃まで自発休眠覚醒の効果が低下し、12℃以上は効果がないと考えられた。

d a～cの結果をもとに、リンゴの自発休眠覚醒モデルを発育速度モデルとして作成した(図1214-3)。このモデルにより、リンゴの主産地(青森、長野、福島)と南限に近い産地(富山、鳥取)の自発休眠覚醒期のシミュレーションを行った(図1214-4)。

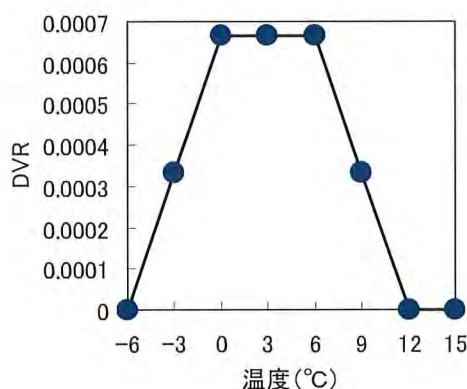


図1214-3 ‘ふじ’の自発休眠覚醒モデル
DVRは発育速度

その結果、主産地では1月中旬～下旬、南の産地は2月上旬～中旬に自発休眠覚醒することがわかった。2004～2005年の気温が3℃上昇したと仮定して、2005年の自発休眠覚醒をみると、気温が高く、自発休眠覚醒が遅い地域ほど遅れがより大きく、最も遅い鳥取では31日遅れて3月になることがわかった。自発休眠覚醒しても、開花率が十分高くなるまでに、さらに、低温が必要なことを考えると、3月の覚醒

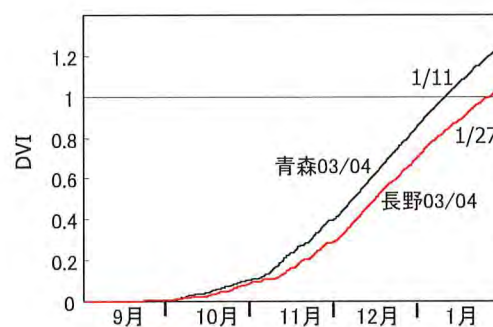


図1214-4 気温の実測値によるシミュレーション
DVI(発育ステージを示す指数)が1の時、自発休眠覚醒。

では開花が不十分で生産が難しいと考えられた。ナシについても、2004～2005年の気温が3℃高いと仮定して自発休眠覚醒期を求めると、主産地の茨城、鳥取では遅れは20日以内となったが、リンゴと同様に気温が高い地域ほど自発休眠覚醒がより大きく遅れ、南限に近い長崎では34日遅れとなり、開花率が十分高くなるには覚醒が遅すぎると考えられた。

エ 考察

栽培適地の移動推定から、地球温暖化により21世紀前半までにリンゴ及びウンシュウミカンの栽培適地が北上し、現在の主な産地の多くが気候的に不利になる可能性が予測された。リンゴについては、現在の適地が不適になる理由として、果実生育期の高温及び休眠期の高温の2つの問題が示された。果実生育期では、特に、生育後期の高温が果実着色とデンプン消失を阻害し、外観や食味を不良とする可能性が示された。休眠期では、現在の栽培南限付近で、将来、発芽・開花不良を起こす可能性が示された。

オ 今後の課題

人工環境下で果樹を栽培することにより、休眠期及び果実生育期の果樹・果実に対する高温の影響を明らかにした。このうち、休眠期に関して、評価モデルの作成と、リンゴとナシについての定量的な温暖化の影響評価を行った。しかし、果実生育期の影響は、実験を行い、定性的な評価はできたが、モデル化に至らなかった。今後、果実生育期のモデルを作成し、影響評価のためのシミュレーションを行う。

カ 要約

(ア) リンゴ栽培に適する年平均気温6～14℃の地域は、徐々に北上し、2020年代に北海道の平野部全域が適温域となる一方、2060年代には東北中部の平野部が不適となる可能性が示された。ウンシュウミカン栽培に適する年平均気温15～18℃は、2060年代には南東北の沿岸部まで広がる一方、現在の主産地の多くが高温で不適になると考えられた。

(イ) 高温はリンゴ果実生育初期の地色・果皮色の進行を促すが、中期は地色を、後期は果皮色の進行を強く抑制することが示された。生育初期の温度処理では、高温で果実の食味を左右するデンプンの消失も早まる傾向にあった。

(ウ) リンゴ‘ふじ’自発休眠覚醒に必要な低温時間は6℃では約1,500時間と判定された。温度別では0～6℃は自発休眠覚醒の効果が高く、6℃以上は12℃まで自発休眠覚醒の効果が低下し、12℃以上は効果がないと考えられた。

(エ) 自発休眠覚醒モデルを作成し、シミュレーションを行うと、リンゴの主産地（青森、長野、福島）では1月中旬～下旬、南の産地（富山、鳥取）

は2月上旬～中旬に自発休眠覚醒することがわかった。気温が3℃上昇したと仮定すると、自発休眠覚醒が遅い地域ほど遅れがより大きく、最も遅い鳥取では30日以上遅れると考えられた。

キ 引用文献

杉浦俊彦・横沢正幸 2004. 年平均気温の変動から推定したリンゴおよびウンシュウミカンの栽培環境に対する地球温暖化の影響. 園学雑. 73: 72-78.

Yokozawa et al. 2003. Mesh climate change data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO2 concentration. J. Agric. Meteorol. 59: 117-130.

研究担当者（杉浦俊彦*、朝倉利員、黒田治之、杉浦裕義）

(5) 高温ストレス応答機構の解析に基づく地球温暖化による野菜の生産力低下の影響評価

ア 研究目的

野菜分野では、気象変動等に対応した定量的影響評価に関する研究が食用作物や果樹類に対して大きく遅れている。そこで、高温下での栽培が難しく地球温暖化の影響を大きく受けるとされ、園芸生産上問題となりつつあるホウレンソウとレタスを対象に、高温ストレスによる応答機構としての生態的反応の定量的解析、さらに、高温影響評価モデルを作成し、地球温暖化が野菜の生産力低下にもたらす影響を評価することを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 高温がホウレンソウの生育に及ぼす影響の評価

供試品種は暖候期栽培向けの「おかめ」（タキイ種苗）とし、個体間の生育を揃えるため、栽培試験は全てセル苗による移植栽培で行った。グロースチャンパー（PPFD：約280 μ mol/sec/m²；株直上）内で1/10000aホワイトポット、もしくは、プランタで、明期／暗期温度試験と小型ガラス室で換気温度設定による高温処理と組み合わせた作期移動試験（4/5播種・4/21定植、4/28播種・5/12定植、5/27播種・6/10定植、6/22播種・7/13定植、7/28播種・8/13定植、8/26播種・9/16定植）を実施した。生育

調査は地上部生体重・乾物重・鉛直投影面積・群落透光率・抽台の有無・抽台長などについて適宜行った。鉛直投影面積はデジタルスチルカメラで個体直上から撮影した画像の画像処理により、群落透光率計測には感光性フィルム（オプトリーフ；株）大成イーアンドエル）を用いた。また、生育調査時ごとの乾物増加量をその期間中に植物体によって遮蔽された日射の積算で除したものを日射利用率としたが、群落透光率計測のない期間については、鉛直投影面積からの群落透光率推定式と鉛直投影面積の直線補間値を用いたほか、人工光下での試験データについては、光強度を日射量に換算し、全ての解析を日射量ベースで行うこととした。これらの結果に基づき、高温がハウレンソウの生育に及ぼす影響を解析・評価する生育モデルを開発した。

また、同じくグロースチャンバー内のプランタで明期時間と明期／暗期温度を組み合わせる栽培を行い、2～3日おきに実体顕微鏡下で花芽形成及び抽台開始を確認した。さらに、ビニルハウス内で光源（蛍光灯）との距離による照度減衰を利用して、日出前・日入り後の薄明期のハウレンソウが明期として認識するための限界照度について検討した。

(イ) 高温がレタスの生育に及ぼす影響の評価

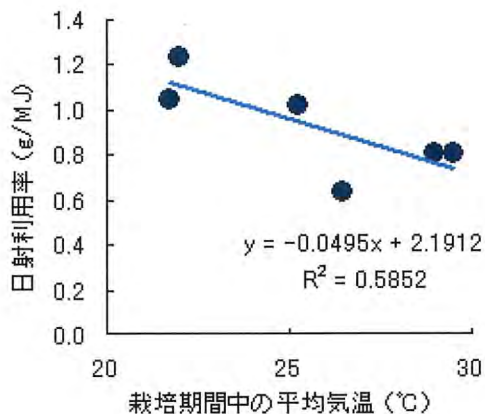


図1215-1 ハウレンソウの光利用率に及ぼす温度の影響

供試品種には晩抽性の「Vレタス」(カネコ種苗)を用い、所内圃場で作期移動試験(定植日；2005年4/28、5/24、6.1、6/28、7/7、7/13、8/1、8/17)を行い、器官別生体重・乾物重・葉面積・鉛直投影面積・抽台長などについて生育調査を行った。また、ハウレンソウと同様に生育調査時ごとの乾物増加量をその期間中に植物体によって遮蔽された日射の積算で除したものを日射利用率とした。その際、遮蔽日射量の計算には鉛直投影面積の直線補間値を用いたが、群落透光率はレタスの場合は0として計算した。その結果に基づいて、高温がレタスの生育に及ぼす影響を解析・評価する生育モデルを開発した。

ウ 研究結果

(ア) 高温がハウレンソウの生育に及ぼす影響の評価

グロースキャビネット内の人工光下及び自然光の小型ガラス室内の試験結果から、温度関数としての日射利用率が得られた(図1215-1；岡田ら2003)。また、温度と受光体勢の間に明らかな傾向は認められなかったため、日射利用率を日平均気温の関数とする生育モデルを開発したところ、実測値とよく一致した(図1215-2、図1215-3；岡田ら、2003、2005)。

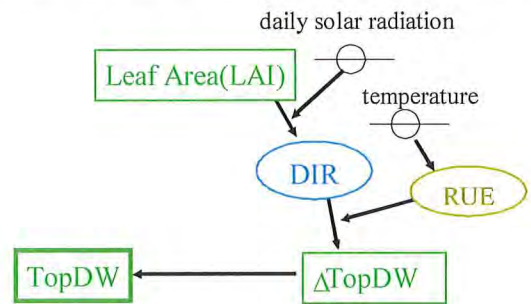


図1215-2 ハウレンソウ高温影響評価モデル
LAI:葉面積指数、DIR:日射遮蔽量
TopDW:地上部乾物重(Δは日増加量)
RUE:日射利用率

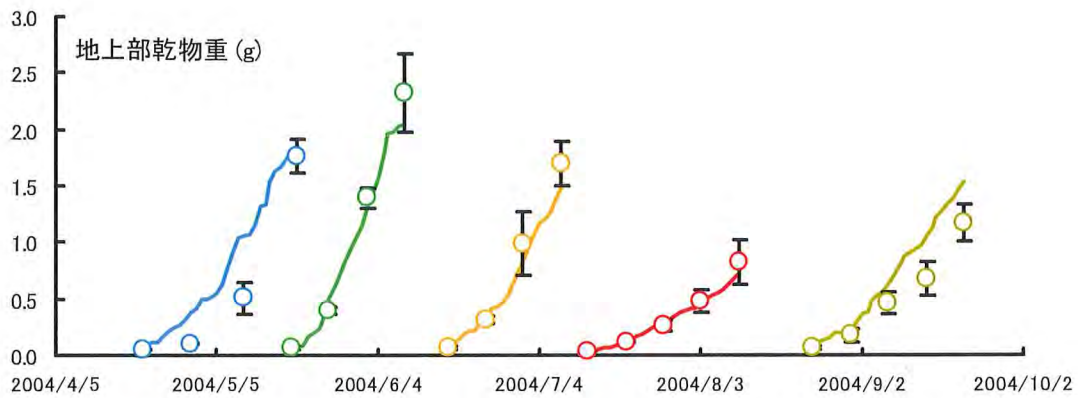


図1215-3 ホウレンソウの高温影響評価モデルによる推定値と実測値

一方、花芽形成は13時間以下の明期条件では高温により、むしろ抑制されることが見出されたが、抽台開始はその条件下でも高温により促進され、かつ、明期時間と高温による影響は独立していることが示唆された(図1215-4; 山崎ら2004)。そこで、明期時間と日平均気温から抽台開始に至る日数を求める推

定式を作成し、自然光下の作期移送試験結果に適用したが、実際の抽台開始日は推定値より遙かに早かった。また、ホウレンソウが明期として認識する限界照度は日の出前では1ルクス程度で十分であるのに対し、日没後では10ルクス前後が閾値となることによることが明らかとなった(山崎ら2005)。

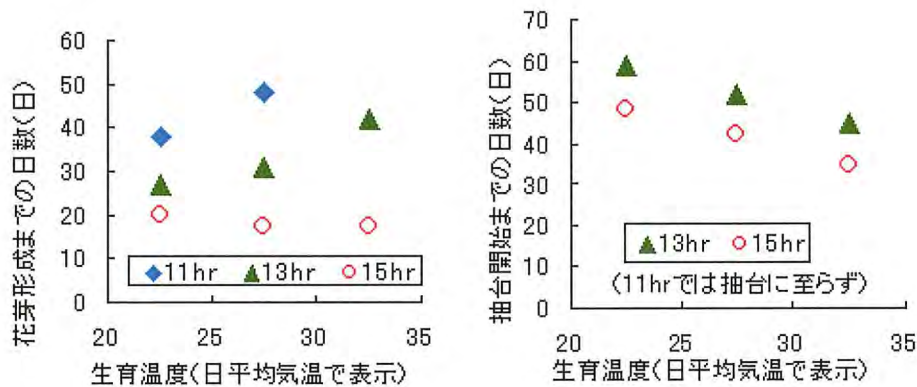
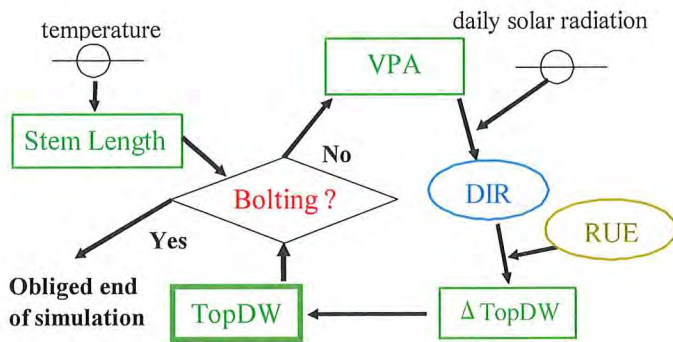


図1215-4 ホウレンソウの花芽形成から抽台開始までに要する日数に明期時間及び生育温度が及ぼす影響(人工光条件)

(イ) 高温がレタスの生育に及ぼす影響の評価
レタスについては、高温期栽培においても抽台するまでの日射利用率は、ほとんど低下していないほか、乾物当たりの葉面積にも大きな違いはなく、レタスの場合物質生産自体は高温によりほとんど影響を受けておらず、また、葉面積増大も顕著な抑制を

受けていないことが示された。そこで、ホウレンソウの場合とは異なり、日射利用率を温度の関数とはせず一定値を取ることとしてモデル化(図1215-5)・シミュレーションを行ったところ、実測値とよく一致した(図1215-6)。

図1215-5 レタス高温影響評価モデル



VPA:鉛直投影面積
 DIR:日射遮蔽量
 TopDW:地上部乾物重(Δは日増加量)
 RUE:日射利用率

温度はRUE、すなわち、物質生産には影響を与えず、茎の伸長を介して早期抽台(Bolting)による生育打ち切り(たとえ未熟でも強制収穫)に影響を及ぼす

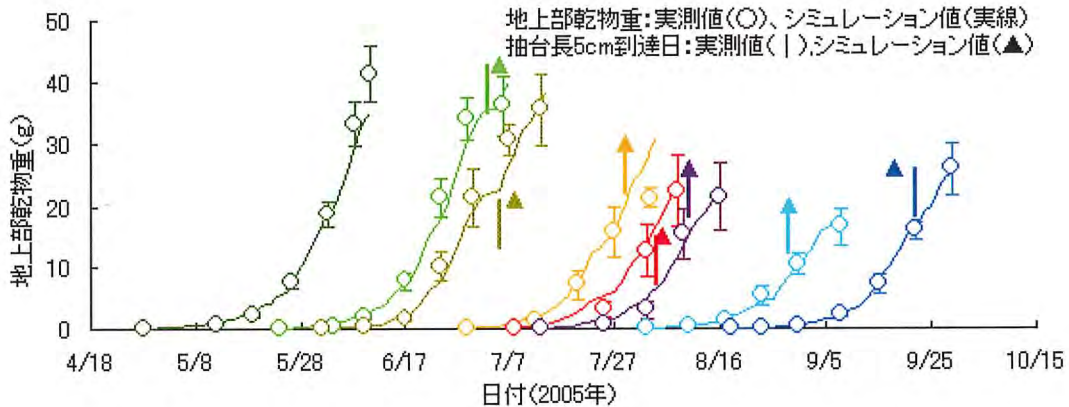


図1215-6 レタス地上部乾物重に対する高温影響評価モデルのシミュレーション値と実測値(矢印は推定抽台長が5cmとなった時期を示す)

また、抽台長と基準温度14℃での積算温度との間に作期間で共通の関係が得られており、抽台茎伸長には温度が支配的であり、日長の寄与率は相対的に低いと考えられ、抽台長を基準温度14℃での積算温度の関数とする推定式を作成した。

エ 考察

(ア) 高温がホウレンソウの生育に及ぼす影響の評価

高温が物質生産に及ぼす影響を定量的に評価するモデルは開発されたが、もう一つの重要な生産制限要因である抽台については、推定値の適合度が極めて低い。これは、明期の開始時・終了時の植物体の

感度の違いによる自然日長下での日長時間推定誤差では到底説明がつかない。人工光条件で長日・高温条件下でも抽台に至らなかったという場合があったほか、長日条件下では生育が良好な適温域で抽台が最も早かったなど、ホウレンソウの場合、抽台に栄養生長程度が大きく関係していることが思われるが、3要因の影響の定量的評価及び抽台開始時期及び抽台長の定量的推定法を得るには至らなかった。そこで、+3℃の温暖化シナリオの下での影響評価も地上部乾物重について行わざるを得なくなったが、シミュレーションの結果、12~18%の生育量減少、特に、高温時における減少程度が大きくなることが予測された(図1215-7)。

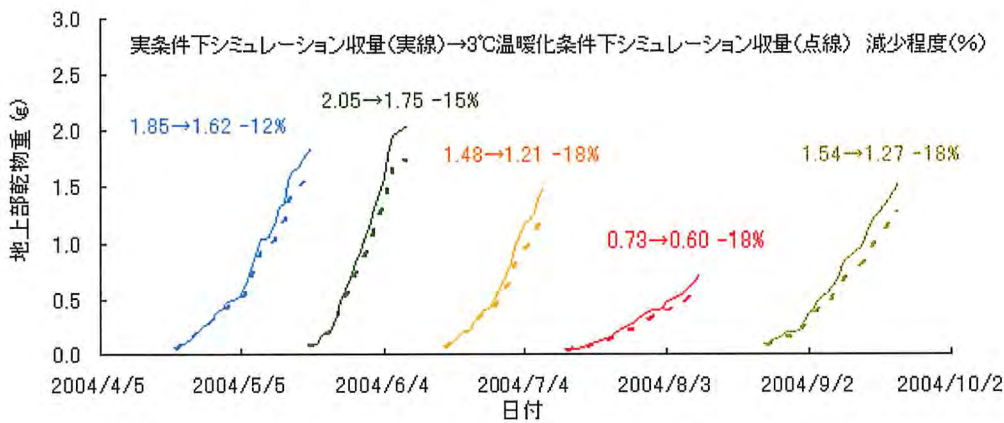


図1215-7 +3℃温暖化シナリオの下でのハウレンソウへの影響評価シミュレーション

(イ) 高温がレタスの生育に及ぼす影響の評価
レタスの場合、ハウレンソウとは異なり、高温の影響は生長そのものに対しては、ほとんどないが、不時抽台促進による生育期間短縮とそれに伴う減収と言う形で現れる。そこで、+3℃の温暖化シナリオの下での影響評価を行ったところ、商品価値を損

なうとされる抽台長5cmに達する日数が5～8日早まることが予想されたが、ハウレンソウの場合とは異なり、元々経済栽培が成り立たない高温期より、経済栽培成立条件周辺の時期に影響が大きいと予測された(図1215-8)。

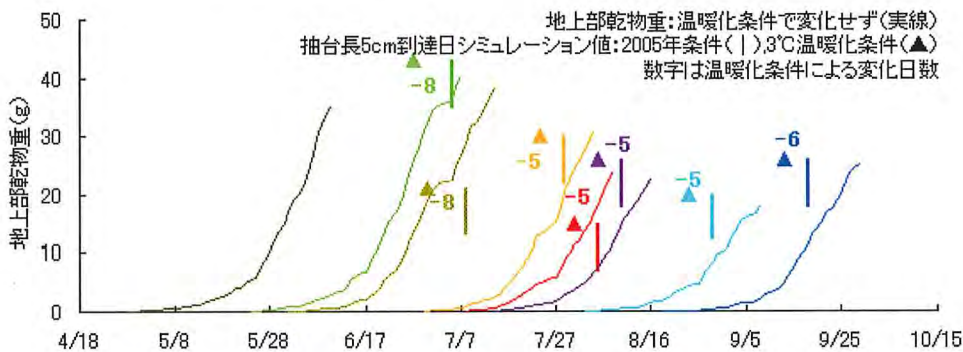


図1215-8 +3℃温暖化シナリオの下でのレタスへの影響評価シミュレーション

オ 今後の課題

(ア) 高温がハウレンソウの生育に及ぼす影響の評価

経済栽培を考える上で、重要な要因である抽台に及ぼす高温の影響が日長・栄養状態との相互関係の中で明らかとなっておらず、今後、更に試験を実施し、解析していく予定である。

(イ) 高温がレタスの生育に及ぼす影響の評価

晩抽性の異なる品種における高温の影響の定量化について、引き続き取り組む予定である。

カ 要約

(ア) 高温がハウレンソウの生育に及ぼす影響の評価

ハウレンソウでは高温の影響が物質生産に直接的に影響しており、+3℃の温暖化シナリオでは12%～18%生長量の減少が予測された。また、商品価値に影響を及ぼす抽台茎伸長にも高温条件は影響しているが、日長・栄養状態も強く関係しており、高温の影響を定量的に評価するには至らなかった。

(イ) 高温がレタスの生育に及ぼす影響の評価

レタスの物質生産は高温に対しても余り影響を受けないが、レタス球の商品価値に関係する抽台茎の伸長は気温の影響を強く受けており、14℃を基準温度とする積算温度により推定された。+3℃の温暖化シナリオでは、生産性そのものは低下しないものの、商品価値を損なうとされる抽台長5cmに達する日数が5～8日早まることにより収量減となること

が予測された。

キ 引用文献

岡田邦彦・生駒泰基・村上健二 2003. ホウレンソウの生育に対する高温影響評価モデルの開発 1. 高温処理が光利用率に及ぼす影響. 園芸学会雑誌 72別1、101.

岡田邦彦・山崎敬亮・村上健二・塚本証子 2005. ホウレンソウの生育に対する高温影響評価モデルの開発 2. 遮蔽日射量に基づく簡易生育モデルの開発と葉面積実測値を用いたシミュレーション. 園芸学会雑誌 74別、322

山崎敬亮・岡田邦彦 2004. ホウレンソウの花芽分化および抽台に及ぼす適温長日条件と短日高温条件の影響. 園芸学会雑誌 73別2、191

山崎敬亮・岡田邦彦 2005. ホウレンソウの抽台に影響する明期開始および終了時の限界照度. 農業環境工学関連7学会2005年合同大会講演要旨、629

研究担当者(岡田邦彦*、今田成雄、山崎敬亮、浅沼伸吾)

2 地球温暖化による森林生態系及び森林資源への影響評価と将来予測

(1) 地球温暖化に伴う森林群落動態モデルの開発

ア 研究目的

地球温暖化に伴う森林群落の炭素固定能を評価するためには、気温だけではなく、大気CO₂濃度や窒素等の養分環境にも支配される光合成活性等を解明しなければならない。また、森林における窒素・水分環境は葉群中の窒素含有量に影響し(Baldocchi & Harley, 1995)、そうした生育環境の違いが個々の林木の成長条件に影響して林冠構造をも規定する。本研究では、気候変動に伴う森林生態系の変動機構を解明するため、林木の成長から、林分構造、環境要因にわたっての一連の相互作用を解明して、温暖化に伴う森林の成長動態予測モデルを開発する。

イ 研究方法

(ア) スギ林の個体サイズ分布及び葉群分布等を

定量化するとともに、人工林の間伐効果を反映させるための林冠動態モデルを開発する。間伐強度を変えた場合の林冠構造と個体サイズ分布等の関係を明らかにするため、航空機搭載のレーザープロファイラで広域の森林構造を計測する。

(イ) スギ林冠内の光合成パラメータ等の季節変化及び日変化を継続測定するとともに、環境制御実験によってこれらパラメータに影響する環境因子を明らかにして、光合成等の生理的諸過程を解明する。これらを定量的に明らかにした上で、林冠構造のモデルに光合成モデルを組み込んで、光合成生産、並びに、葉群の呼吸消費等の季節変化を森林スケールで算出する。

ウ 研究結果

(ア) 林分の成長動態モデルの構成

人工林における樹高、胸高直径、生枝下高等に一般的に認められる相互関係を定式化することによって、個体サイズ分布によって決まる林分構造を定量的に記述した。十分に閉鎖した人工林では、個体サイズにはほぼ無関係に生枝下高が一定と見なすことができる。また、葉群の空間分布を規定する個々の林木の樹冠長は林分密度に強く依存していた。林木の葉、枝、幹の3つの器官の樹形構造に基づいた定量的関係から、樹幹形を決定することにより、枝と葉の垂直分布が得られた。さらに、分枝モデルによる樹冠構造の定式化を行い、現実林分の構造的特徴をモデル化する見通しが得られた(図1221-1)。

一方、人工林の樹高成長は林分密度などよりも立地条件を反映していることが、既に知られており、現存量の成長経過を再現するモデルを開発した。本モデルは、間伐によって変化する林分密度を反映して林木個体の樹冠形が変化するようにより現実的なモデルとなっており、間伐に伴う林分構造の変化を再現できる。バイオマスの推定は林木個体の樹形をベースにしており、間伐効果を反映した葉・枝・幹のバイオマス成長を再現した。様々な間伐履歴を持つ人工林の実測データによってその妥当性を確認した(図1221-2)。

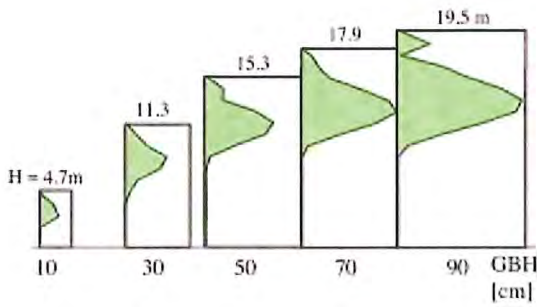


図1221-1 樹形解析による個体サイズごとの葉の垂直分布の推定

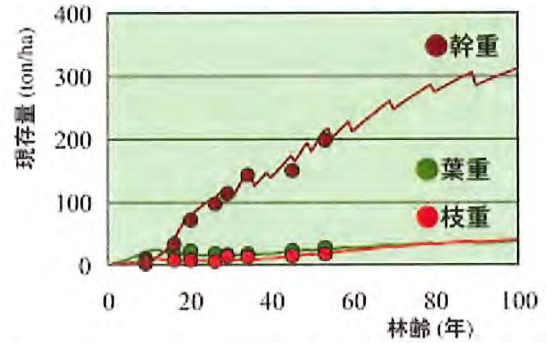


図1221-2 林分構造モデルによる間伐に伴うバイオマス成長の推定

(イ) 航空機搭載レーザープロファイラを用いた陽樹冠表面積の測定

光合成を担う葉群等の森林構造は、地形条件を含めた三次元構造として実現するものである。そのため、人工林では、間伐に伴う構造的変化に関しても、森林域全体の構造を考慮して間伐効果を検討する必要がある。本研究では、航空機搭載レーザープロファイラによって、地形条件を加味した森林の3次元構造の抽出技術を開発した(図1221-3)。林木個体の樹冠頂点を決定しwatershed法によって、間伐による林分密度の違いに左右されることなく、林内全個体の

陽樹冠表面積を計算するアルゴリズムを決定した。光合成に寄与する陽樹冠表面積を推定した結果、その頻度分布は間伐の影響を受け、強度間伐ほど陽樹冠サイズが大きい方へシフトしていることが明らかになり、間伐に伴う樹冠サイズの変化をレーザープロファイラによって森林域全体で効率的に解析できることが示された。樹冠表面積は葉群分布との強い相関があるが、推定された樹冠表面積は強度間伐ほど大きいことが示された。これにより、レーザープロファイラによって広域森林の光合成推定に必要な林冠構造の把握が可能となった(図1221-4)。

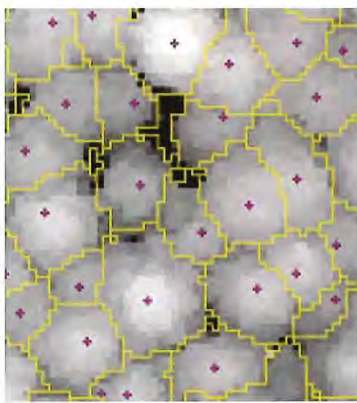


図1221-3 レーザープロファイラによる樹冠形状の抽出

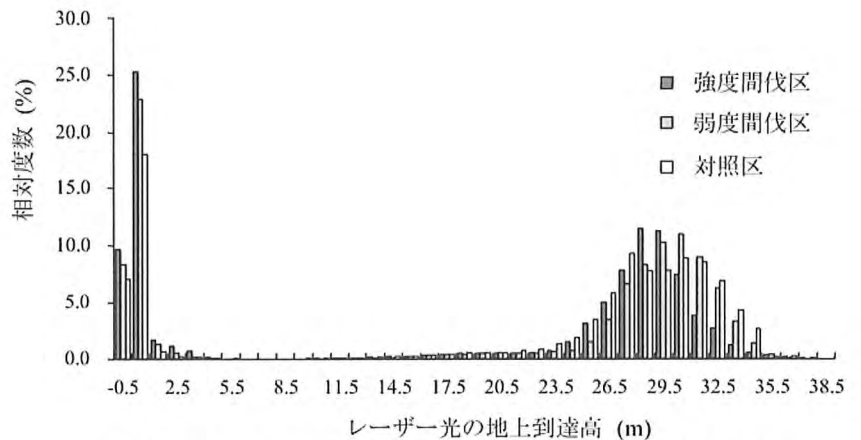


図1221-4 林冠内におけるレーザー光到達頻度の分析

(ウ) 純光合成速度及び剰余生産の季節変化

高CO₂濃度で栽培した苗木では、針葉の窒素含有率が3割程度減少し、窒素含有率に対する光合成能が低下した。栽培時のCO₂濃度が異なっても、気孔コンダクタンスと光合成速度との関係に違いは認められなかった。スギ当年生針葉の光合成速度は、5月、6月に低い値を取り、9月から10月にかけて上昇する傾向がみられた。10月から翌年1月にかけて光合成速度は大きく低下し、冬季には夏季の約半分に

なった。2月から4月では、光合成速度の変化は少ない。図1221-5に示したように光合成モデルによる計算値は実測値とほぼ対応しており、季節を通じた温度環境の変化に対するスギ針葉の光合成速度の応答をモデルによって概ね表現できることが確認された。

スギ林における林冠内での当年生針葉の光合成パラメータの季節性や林冠内位置による空間変動を定量化した上で、スギ林冠レベルにおける光合成を推

定し、季節変動を明らかにした(図1221-6)。全天日射量の増加に対して林分の日純光合成速度は増加するが、 $15\text{Mj m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ 以上では頭打ちとなる。林分の日純光合成速度は増加するが、日平均気温が 20°C 付近

で最大となり、それ以上の高温環境では低下する傾向があった。これらの結果をもとに、2003年7月の気象データからスギ人工林の純光合成速度、並びに、剰余生産の季節変化を試算した。

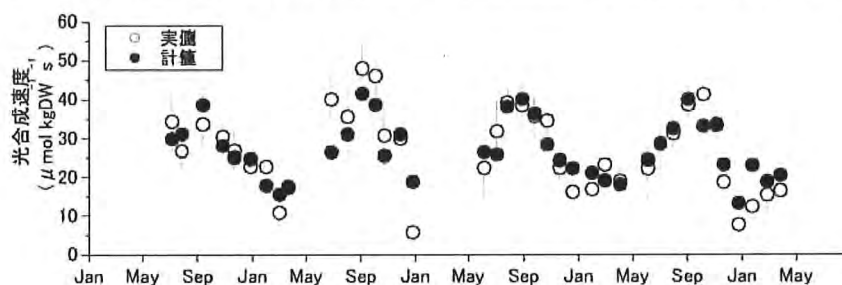


図1221-5 スギ成木当年生針葉の光合成速度の季節変化

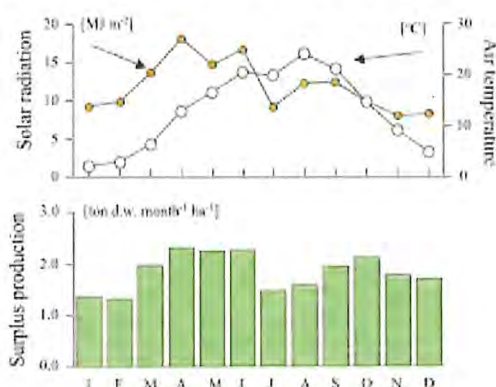


図1221-6 スギ林冠における微気象及び剰余生産の季節変化

エ 考察

地球温暖化等の環境変化が森林群落の成長過程や炭素固定能に及ぼす影響を評価する試みが、多くの研究者によって試みられ、リモートセンシングによる炭素固定能のマッピングを視野に、陸域生態系スケールの評価モデルが開発されている。このような広域生態系を対象とした森林の炭素固定能と温暖化影響の評価においては、群落スケールの詳細なフラックスや森林動態までも考慮することは、農林水産業というレベルで環境変化の影響を明らかにするために不可欠である。また、徐々に効果をもたらす環境変化の影響を検出するためには、広域スケールでの対応は現実的ではない(Baldocchi & Harley 1995)。

本研究では、間伐等の森林施業によって木材生産を目的とする人工林を対象に、森林の動態、生産速度、林分構造、地形条件等を考慮して、炭素固定に密接に関与する現象の解明を進め、炭素固定能の評価モデルの開発を行った(千葉 2004)。従来の経験的な林分成長モデルは、様々な間伐施業に対して再現性が乏しく、今回開発した林木の樹形モデルを組み込んだモデルでは、間伐強度や間伐時期を任意に

設定して、成長予測することが可能となった。しかも、航空機搭載レーザー計測による実証的な解析(平田 2005)により、林分構造、特に光合成を担う葉群の空間分布を再現することも可能となった(千葉 2005)。

光合成プロセスモデルのパラメータについて、環境制御実験や季節変化の継続測定に基づいて、林冠光合成をシミュレートする条件を整え(Shigenagaら 2005)、林冠モデルとリンクさせることによって、スギ若齢林の光合成生産が推定できた。間伐によって変化する林冠構造、光合成等の生理的応答機構に基づいたモデルの統合によって、人工林の環境変化に対する、より現実的なシミュレーションが可能となった。

オ 今後の課題

スギ林動態モデルを改良して、地形条件などの立地環境が生育に大きな影響を及ぼすことから、間伐効果と立地環境を組み合わせることにより、現実的な広域森林の炭素固定モデルへの改良が望まれる。また、呼吸による CO_2 放出プロセスを組み込むことは

必須である。これらが達成されれば、当該林分の立地、並びに、気象環境を変数とした林分の環境応答モデルが得られ、地域スケールの炭素固定機能の評価が可能になる。

カ 要 約

地球温暖化によって、森林のCO₂固定能や成長そのものが影響されるが、その影響の大きさは森林の状態（間伐の強さや林齢等）によっても異なる。本研究では、地球温暖化した場合の森林の成長を予測するため、森林樹木の成長経過や森林の構造をモデル化することにより、環境変化の影響を受ける森林光合成の予測ツールを開発した。

ヘリコプター搭載のレーザー計測機によって、森林域の地形、森林そのものの3次元構造、林木の抽出技術が開発され、樹冠形状や林冠内の透過光等を評価する手法が確立した。さらに、樹形モデルを森林全体に適用して、葉、枝、幹などの成長に対する間伐効果やCO₂固定量への変動を予測する手法が開発され、レーザー計測による成果と併せて、間伐による人工林の構造変化と成長変動の予測が可能となり、光合成モデルを搭載するための葉群構造を再現できるようになった。

若齢スギ林における林冠内での当年生針葉の光合成パラメータの季節性や林冠内位置による空間変動を明らかにした。また、制御環境下でのスギ苗木を用いて、窒素・水ストレス処理した場合の光合成反応、さらに、高CO₂条件下での光合成速度の応答を解明し、個葉レベルの生化学光合成モデルに必要なパラメータ・セットを整備した。

以上の結果から、光合成プロセスに基づく環境応答モデルとスギ林の林冠動態モデルを用いて、調査対象スギ人工林における2003年7月の気象データから、純光合成速度、並びに、剰余生産の季節変化が推定された。今回開発したモデルにより、林分構造と環境要因を反映したスギ人工林の動態・炭素固定能を評価することが可能となった。

キ 引用文献

Baldocchi D.D. & Harley P.C. 1995. Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest. II. Model testing and application. *Plant, Cell and Environment* 18: 1157-1173.

千葉幸弘 2004. CO₂収支評価における森林構造と動態, *地球環境* 9:213-220.

千葉幸弘 2005. 間伐施業に伴って変化する樹冠と樹幹. 第56回日本林学会関東支部大会論文集, 151-153.

平田泰雅 2005. 航空機レーザースキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響. *森林計画学会誌*39: 81-95
Shigenaga, H., Matsumoto, Y., Taoda, H., and Takahashi, M. 2005. The potential effect of climate change on the transpiration of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* 60: 451-456

研究担当者（千葉幸弘*、平田泰雅、重永英年）

(2) 地球温暖化とその対応が森林・林業・林産業に与える影響の予測と評価

ア 研究目的

地球温暖化は、その環境変化により森林及び森林資源へ影響を直接及ぼすものであるが、そればかりでなく国際的・国内的な温暖化防止の対応施策を通して、間接的には森林・林業・林産業にも影響が及ぶことが推測される。このことは、実際の森林資源状況を背景に実際の森林管理を担う地域レベルにおいて、より具体的な形で現れるだろう。

本研究は、温暖化防止に対応した施策や森林計画が我が国の森林・林業・林産業に及ぼす影響を長期的に予測するためのモデルを構築し、地域レベル、あるいは、国レベルの森林計画や政策シナリオが森林・林業・林産業に与える影響を評価するとともに、どのような森林計画や政策が炭素吸収・貯留のために望ましいかを明らかにすることを目的とした。

イ 研究方法

(ア) 影響予測モデルの構築と活用手法の開発

森林による炭素蓄積変化と、住宅による炭素蓄積変化を対象とし、温暖化防止に対応した施策や、森林計画が我が国の森林・林業・林産業に及ぼす影響を長期的に予測するための影響予測モデルを構築した。本モデルは全国的な森林資源と木材需給、住宅着工数などを考慮した全国一括の炭素収支予測を行う全国サブモデルと、地域の森林資源を考慮した森

林計画に基づく炭素収支予測を行う地域サブモデルから構成するものとし、これらの関係を活かした全体モデルの活用手法を開発した。

(イ) 全国サブモデルの構築と予測手法の開発

我が国では、これまで森林部門、住宅部門で別々に炭素量を計算した例はあるものの、両者を統合する試みは十分になされてこなかった。これを受け、京都議定書の枠組みにとらわれず、森林・住宅両部門を合わせた炭素吸収量を対象とし、林業施策及び住宅施策が森林・住宅両部門の炭素収支に与える影響を国レベルで長期的に評価することを試みた。

(ウ) 地域サブモデルの構築と予測手法の開発

IPCCで示されている木材伐採を即CO₂排出とする枠組みにおいて両者はトレードオフ関係にあり、温暖化対策と地域林業振興の両目標をともに目指す立場からは、森林蓄積増加と木材伐採の量的関係を長期的視野の下で地域の森林実態に即して把握することが必要である。そのため、具体的な地域として群馬県桐生市を対象として林業経営モデルを作成し、線形計画法を用いて長期的な森林蓄積増加と木材伐採の量的関係を明らかにするとともに、全国森林モデルのシミュレーション結果を地域に対応させる方法を検討した。

ウ 研究結果

(ア) 影響予測モデルの構築と活用手法の開発

森林と住宅が主要な炭素プールとなっている我が国の状況を踏まえ、影響予測モデルを全国サブモデルと地域サブモデルで構成した。全国モデルはシステムダイナミクスモデルであり、地域サブモデルはLPをベースにしたモデルである。

影響評価モデルのフレームワーク及び、それを踏まえてモデルの活用手順を図1222-1にとりまとめた。その手順は以下の通りである。①まず、政策シナリオを設定し、②全国モデルにより森林・林業・住宅に係わる推定値を求める。③それを地域モデルに受け渡し、④制約条件の一つとして取扱い、⑤線形計画による解を求める。⑥その解と全国モデルの推定値を比較し、その実行可能性の判定と解釈を行う。⑦結果によっては、全国モデルにフィードバックしてシナリオや条件を変更して再推定を行い、⑧最終的に得られた推定結果によって、炭素吸収量やその条件を明らかにする。このフレームワークの適用結果については、全国サブモデル、地域サブモデルの成果を紹介したのちに、具体的に示す。

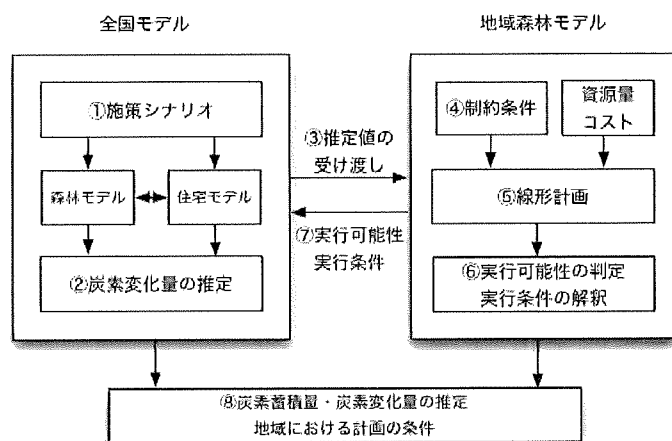


図1222-1 影響予測モデルの構造と推定手順

(イ) 全国サブモデルの構築と予測手法の開発

全国サブモデルは、さらに、森林サブモデルと住宅サブモデルからなり、共通する外生因子である「住宅木造率」を媒介として連携する構造とした。

森林サブモデルは、木材需給均衡モデルを基礎に構築するものとした。このモデルは林野庁の長期予

測で用いられているものであり、人工林を対象とし丸太価格を媒介として国産材の需給量の均衡を図るもので、供給量は減反率を通じて、需要量は構造方程式を通じてそれぞれ計算される。IPCC (2004) の手法に基づき、これに炭素算出の機能を加え、炭素蓄積は人工林蓄積から拡大係数 (松本 2001)、容積

密度（林業試験場 1982）、炭素含有率デフォルト値 0.50（IPCC 2004）を乗ずることにより、また、炭素吸収量は炭素蓄積の 2 時点の差を取る蓄積変化法により求めた。当モデルでは、木材生産の主体となっている人工林を対象とし、天然林は炭素量計算の対象外とした。

住宅サブモデルは、鄭・天野（1999）による年間新設住宅量予測モデル（1）式、有馬（1992）によ

る住宅残存量予測モデル（2）式、住宅蓄積量モデル（3）式からなり、T年の住宅炭素蓄積量、吸収量を推定する。ここで、木材量を炭素量へ換算する際は、新設住宅の床面積に占める木造率を仮定した上で、木材使用量（木造： $0.2\text{m}^3/\text{m}^2$ 非木造： $0.04\text{m}^3/\text{m}^2$ ）、比重（ $0.45\text{t}/\text{m}^3$ ）、炭素含有率0.50を乗ずることにより炭素蓄積を、その 2 時期間の差を取ることにより炭素吸収量を求めた。

$$Y = \text{Exp}\left(9.9161 - \frac{146.76}{(G/P)}\right) \quad (1) \quad S_t = Y \times \frac{\text{Exp}(-r(t-a))}{1 + \text{Exp}(-r(t-a))} \quad (2) \quad HS^T = \sum_{i=1}^{\infty} S_i^T + Y^T \quad (3)$$

Y: 年間新設着工延べ床面積、G: 年間国民支出総額、P: 総人口数、S: 新設着工住宅残存数、t: 着工後年経過年、r: 相対残存率、a: 住宅の平均耐久年数、HS: 住宅蓄積量、T: 予測年

森林サブモデルと住宅サブモデルの接続は、両モデルに共通する外生因子である「新設住宅着工床面積木造率」を媒介として行う。森林サブモデルでは伐採された木材を排出炭素と見なされるが、住宅サブモデルにおける炭素吸収量を加味することにより、伐採木材が住宅資材として利用し、炭素が固定し続ける効果を間接的に評価することができる。

このように開発した全国サブモデルを用い、いくつかの施策シナリオを作成して今後50年間の炭素吸収量の予測を行った。林業施策に関しては、すう勢、伐採推進（林業振興）、伐採抑制、複層林推進といった 4 つシナリオを、住宅施策として住宅木造率が現行の 4 割から 5 割、6 割に上がる 3 つのシナリオと、

住宅耐久年数を現行の40年から50年、60年に延長する 3 つのシナリオを用意した。なお、住宅耐久年数として住宅の年齢ごとの滅失率を考慮した修正値を用いた。

施策シナリオごとに推定された結果を図1222-2、3に示した。これを踏まえて、施策が炭素吸収量に与える影響を表1222-1にまとめた。炭素吸収量にのみ注目すれば、森林・住宅を合わせた総炭素吸収量を増加させる上で効果的な施策は、林業施策では伐採抑制及び複層林推進、住宅施策では耐久年数向上であると言える。なお、ここでは木材の炭素を評価しない現状の京都議定書上のルールには沿っていないことに注意したい。

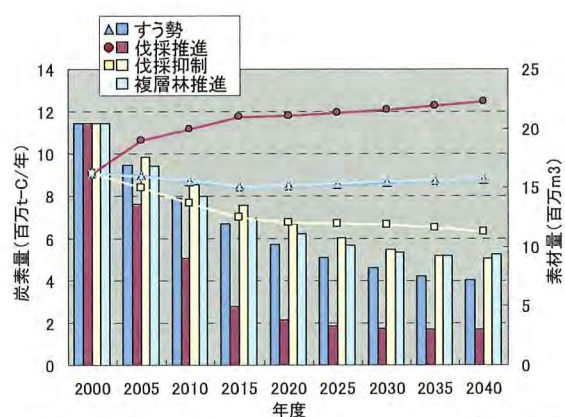


図1222-2 各林業施策による炭素量の予測

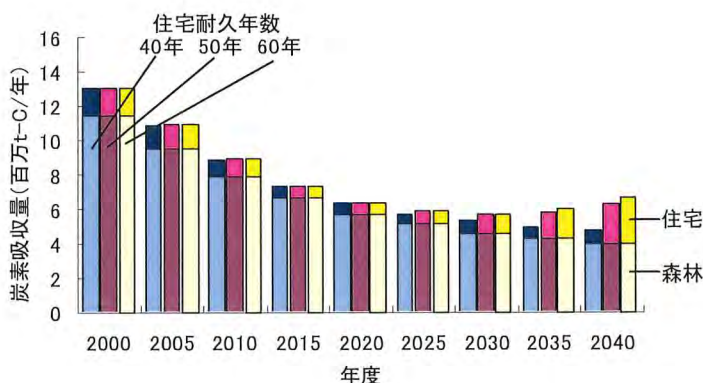


図1222-3 住宅耐久年数の向上と効果

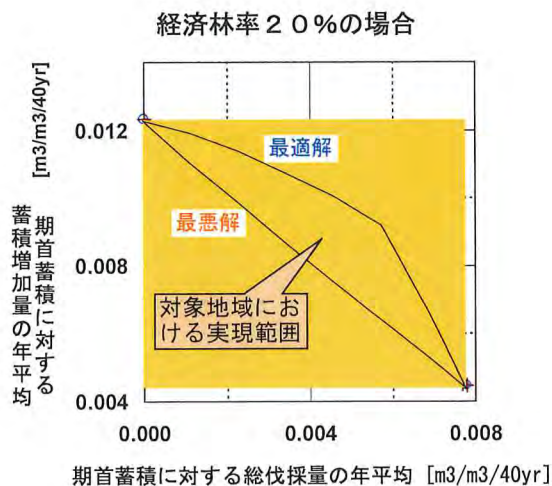


図1222-4 地域モデルによる実行可能性の判定

(ウ) 地域サブモデルの構築と予測手法の開発

具体的な地域の林業経営モデルとして、群馬県桐生市の民有人工林5,200haを対象とする40年間の伐採計画問題を想定し、2003年森林簿に基づき樹種・地位・齢級で区分した各森林グループについて各分期の伐採面積を決定する線形計画問題として定式化した。この地域モデルを用い、いくつかの経営方針の下で計画期末の立木蓄積最大化を目的関数とする伐採計画問題を伐採量水準を変えながら解き、期末蓄積増加量と期間中伐採量の関係を把握するとともに、外部的な経営環境変化を想定してその影響を検討した。また、全国モデルとの対応について、前提となる伐採対象範囲の整合性及び比較方法を検討の上、期末蓄積増加量と期間中伐採量を地域モデルの解と比較検討した。

地域レベルの影響予測モデルとして、伐採に関する線形計画問題を基礎とするモデルを構築するとともに、全国モデルによる推定値を総伐採量と期末蓄

積増加量の関係図上にプロットすることにより、その実行可能性を評価する手法を開発した。図1222-4で示す関係図上では最適解と最悪解に挟まれる領域が両者の実現範囲を表わす。全国モデルでの推定値を林道からの距離に注目して、当該地域に割り当てた推定値をプロットし、実現可能範囲との位置関係を示すことにより、実行可能性を判定するという評価手法を開発した。

先の全国サブモデルの森林に係わる施策シナリオについて、図1222-1で示した影響評価モデルのフレームワークの手順により判定したところ、すう勢・伐採推進・伐採抑制いずれのシナリオでも全国結果の総伐採量・蓄積増加量は地域での実現範囲のわずかに外側に位置していた(図1222-4)。これにより、当該地域においては最適解に従った伐採計画を実行すれば、全国モデルの推定値に近い値は得られると解釈できた。

表1222-1 各種施策が炭素吸収量に与える影響

施策内容	森林による炭素吸収量	住宅による炭素吸収量	森林と住宅による炭素吸収量
林業施策			
伐採推進	--	(+)	(-)
伐採抑制	++	(-)	(+)
複層林推進	++	(n)	(++)
住宅施策			
木造率増加	-	+	n
耐久年数向上	(+)	++	(++)

注 1) +:炭素吸収量増加、-:炭素吸収量減少、n:変化無し。
 2) 記号が多いほど影響大。
 3) ()は間接的に見込まれる影響を表す。

エ 考 察

(ア) 影響予測モデルにより、従来試みられていなかった森林・住宅を合わせた総炭素吸収量を増加させる施策を評価できるようになった。それによれば、炭素吸収量を増加させるために効果的な施策は、林業施策では伐採抑制及び複層林推進、住宅施策では耐久年数向上である。しかしながら、この結果は森林と木材による炭素量変化のみに注目したものであり、木材利用による化石燃料の代替効果を考慮していないことに注意したい。また、伐採抑制は森林からの排出を抑制するものの、その反面木材を生産したいことから木材利用による代替効果をも抑制する恐れもある。このような一面的な評価を避け、森林・林業・木材の温暖化緩和への貢献を総合的に評価するため、さらに、木材利用による代替効果を正當に評価する手法を考案する必要がある。

(イ) 森林の炭素吸収量についての評価は、これまで全国的なものや地域的なもの、別個に扱われてきたが、本研究で開発した影響予測モデルでは、それらに関連づけるとともに整合性を取るフレームワークを提示した。このような試みは初めてのことであり、必ずしも完成されたものを提示するには至らなかったが、全国の評価とともに、地域での施策や実効性の評価は考慮すべきものであることを強調したい。

オ 今後の課題

本研究の発展として、森林と住宅の関係性について、より緊密な関係性を持ったモデルの開発、住宅以外の木材製品の考慮とそれによる物質代替・エネルギー代替の評価といった新たな課題について取り組む必要がある。

カ 要 約

(ア) 目的

森林と木材による温暖化防止機能に注目し、温暖化施策が我が国の森林・林業・林産業に及ぼす影響を長期的に予測するための影響予測モデルを構築し、地域レベルと国レベルの両面から影響評価とともに、望ましい森林計画・政策を明らかにすることを目的とした。

(イ) 成果

全国レベルの影響予測モデルとして、木材の需給均衡モデルを基礎とする森林サブモデルと、新設住宅量と残存量の予測による住宅サブモデルが住宅木

造率を媒介として連携する影響予測モデルを開発した。これを用いて、今後50年間の推移を推定したところ、炭素吸収量にのみ注目すれば、林業施策では伐採抑制及び複層林推進、住宅施策では耐久年数向上であることを明らかにした。

一方、地域レベルの影響予測モデルとして、伐採に関する線形計画問題を基礎とするモデルを構築し、全国モデルによる推定値を総伐採量と期末蓄積増加量の関係図上にプロットすることにより、その実行可能性を評価する手法を開発した。

開発した全国モデルと地域モデルの関係をフレームワークとしてとりまとめた。これは、全国モデルで得られた推定値を、具体的な地域に受け渡して、その実行性を判定し、その結果によっては全国モデルにフィードバックして再推定を行うというものである。先の施策シナリオについて、群馬県桐生市を対象としてこの手順により判定したところ、いずれのシナリオも全国モデルの推定値に近い値は得られると解釈できた。

(ウ) 問題点と残された課題

森林と木材製品がより緊密な関係を持ったモデルの開発や、物質代替・エネルギー代替の評価といった新たな課題について取り組む必要がある。

キ 引用文献

有馬考禮1992. 住宅生産におけるCO₂排出と木材利用による炭素貯蔵. 森林文化研究. 13:109-119.

広嶋卓也・天野正博2000. 森林セクター炭素収支モデルの開発. 天野正博編, 人為活動による森林・木材分野の炭素収支変動評価. 森林総合研究所. 24-28.

IPCC 2004. Good Practice Guidance for Land use and Land-use change and Forestry. IGES.

松本光朗2001. 林業統計を利用した炭素蓄積量推定手法の改善. 天野正博・山形与志樹編, 「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ報告書. 地球環境研究センター/国立環境研究所. 71-80.

林業試験場1982. 木材工業ハンドブック. 丸善.

鄭躍軍・天野正博1999. 住宅ライフサイクルにおける炭素固定機能に関する分析. 環境情報科学. 28(2):45-55.

研究担当者(松本光朗*, 田村和也, 鹿又秀聡, 広嶋卓也, 鄭躍軍)

第2編 水域系

第1章 地球温暖化のモニタリング及び将来予測

1 地球温暖化のモニタリング

(1) 親潮域・混合域における低次生態系モニタリング

ア 研究目的

親潮域・混合域は、高い生産力により、サンマ・いわし類などの浮魚類の未成魚・成魚の索餌場となっている。これは、北太平洋亜寒帯域が偏西風の北側に位置し、低気圧回転の風応力が海面にかかり、湧昇流が発生し、光の届いていない深層から未使用の栄養塩を豊富に含む海水が亜表層に、もたらされるためである。さらに、冬季の大気からの強い冷却によって、海洋上層に密度不安定な対流現象が発生し、鉛直様に混合された混合層が深く形成されることにより、栄養塩豊富な亜表層水を有光層に汲み上げる機能が存在するためである。地球温暖化によって、海洋上の気候が変化し、上記の効率的な栄養塩供給システムが減速されることが危惧されるが、海洋の物理構造と生態系の構造は複雑であり、単純に温暖化によってどのような変化が起きるかを予測することは難しい。このため、本研究では、親潮域・混合域において、周年にわたり総合的なモニタリング観測を実施し、同海域における物理・化学・生物要素の季節・経年変動の特性を把握し、低次生態系の構造を解明することを目的とした。この研究成果によって、将来進行する地球温暖化に対する海洋生態系の応答が推測可能となる。また、モニタリングの測定精度を向上させ、地球温暖化の影響検出が可能な精度のモニタリング体制を整えることを目的とした。

イ 研究方法

(ア) 低次生態系モニタリング体制の設計と実施

1987年から北海道区水産研究所が実施してきた北海道厚岸沖定線（A-line）における観測を基盤とし、温暖化影響を検出可能な親潮域・混合域における低次生態系モニタリング体制の設計を行った。その再設計した体制に基づいて、モニタリングを実施した。

(イ) 海洋構造及び低次生態系の季節変動解析

過去の長期データ及びA-lineモニタリングによって得られたデータを用いて、季節変動の解析を行った。

(ウ) 海洋構造・低次生態系の経年変動及びトレンド解析

過去の長期データ及びA-lineモニタリングによって得られたデータを用いて、経年変動の解析を行った。また、長期トレンドを抜き出し、親潮域・混合域の低次生態系に既に現れている地球温暖化の影響を考察した。

ウ 研究結果

(ア) 低次生態系モニタリング体制の設計と実施

水産総合研究センターが実施してきた親潮域・混合域のモニタリング線として2線あったものを、モニタリングの質と精度を向上させるために、北海道区水産研究所が実施していたA-line（図2111-1）に両研究所の勢力を集中し、かつ、A-lineを混合域に達するよう北緯38度まで延ばし、実施することとした。このことによって、調査船若鷹丸と新船北光丸の2隻の調査船を導入することができた（伊藤・A-line, 2005）。

また、観測項目及び観測層の見直しを図るとともに、観測手法の統一化を図るために、マニュアルの整備を行った。整備されたマニュアルは、表2111-1の通りである。さらに、精度向上のために、最新鋭の観測・分析機器を導入した。これによって、0.0015～0.0043psuの範囲にばらついていた塩分の精度が0.002psu以下に縮小され、WOCE（世界海洋循環実験）基準をクリアできた。また、溶存酸素の測定精度が、0.04～0.47ml/lの範囲から0.10ml/l以下に縮小された。栄養塩については、国内外の機関が参加したIntercomparison Exercise for Reference Material for Nutrients in Seawater in a seawater matrix 2003に参加し、分析精度が世界的に見ても高いレベルにあることを検証した。さらに、冷凍保存による珪酸塩分析値への影響について調べ、解凍直後の分析値は

10%程度(最大20%)過小評価となるため(図2111-2)、解凍後、数日おいてから再分析する必要があることを明らかにした。

そして、より多くの観測項目を測定し、親潮域・混合域の低次生態系の解明を促進するために、A-line

をプラットフォームとして公開し、大学等の他研究機関の研究者が観測に参加できるよう呼びかけた。さらに、解析を促進するために、ホームページ上でモニタリングの実施状況とデータ(<http://www.hnf.affrc.jp/a-line/>)の公開を行った。

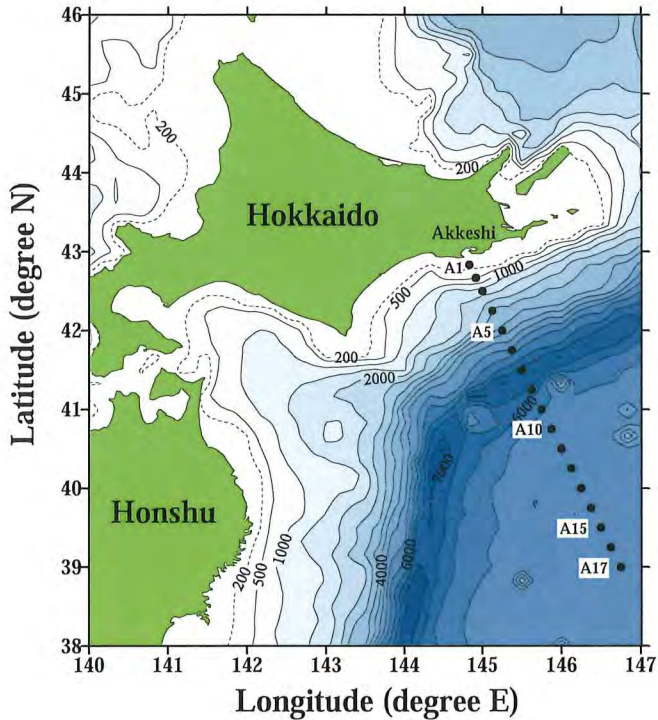


図2111-1 A-lineモニタリング測点

(イ) 海洋構造及び低次生態系の季節変動解析
海洋構造の季節変動として、親潮の流量が冬季に最大、秋季に最小となることが明らかとなった。100m深水温5℃以下の水域が一般的に親潮域と呼ばれているが、その中には上流から直接流れ込む南西流域とリターンフローとなる北東流域が存在している。その南西流域の南端緯度と親潮域の南端緯度を比較した結果、南西流域は地理的に非常に安定していることが明らかとなった(図2111-3)。

植物プランクトンの顕微鏡による同定・計数を行い、珪藻と渦鞭毛藻の季節変動を明らかにした。珪藻は108種が出現し、1) 冬季中心で春季にかけて出現、2) 春季ブルーム期間のみに出現、3) 春季か

表2111-1 整備されたマニュアル一覧

酸素測定マニュアル採水篇
酸素測定マニュアル測定篇
酸素ビン容量測定マニュアル
蛍光法によるクロロフィル分析マニュアル
海洋観測生物化学項目採水分析マニュアル

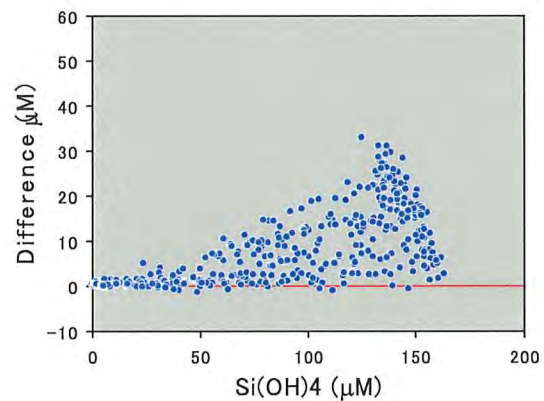


図2111-2 珪酸塩の解凍直後の測定値と解凍後2-4日後の測定値の差

ら秋季にかけて出現、4) 夏季・秋季に出現するグループに分類された。渦鞭毛藻は主要3種が春季に増えることが明らかにされた(図2111-4)。

さらに、0.2-2µmという非常に小さなピコプランクトンの季節変動を明らかにした。春季ブルーム時には珪藻などの大型プランクトンが優占するが、他の季節においては、ピコプランクトンの占める割合が40~70%となり無視できないことが明らかにされた。そして、Synechococcusが夏季・秋季に、Ultraeukaryaotesが春季・冬季に優占することが明らかとなった。さらに、Synechococcusが水温と正相関、珪藻類の分布量と負相関を示し、Ultraeukaryaotesが高水温、低栄養塩環境下で減少することを示した。

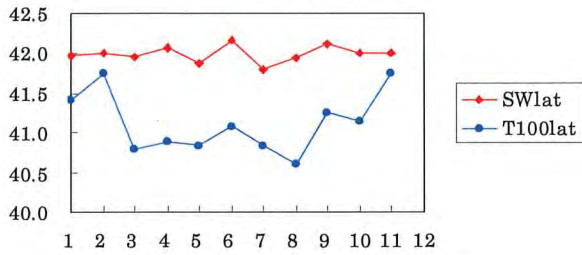


図2111-3 親潮域の南端緯度（青線）と親潮南下流域の南端緯度（赤線）の季節変化

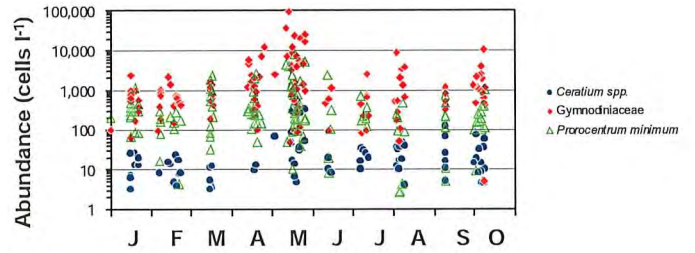


図2111-4 渦鞭毛藻優占3種の季節変動

(ウ) 海洋構造・低次生態系の経年変動及びトレンド解析

親潮域での長期データの解析から、栄養塩濃度、溶存酸素濃度に20年スケールの長期変動が存在することが示された。また、冬季栄養塩濃度に減少トレンドがあることが示された (Ono et al., 2002)。20年スケール変動は春季に、トレンドは冬季に顕著であった。これらの結果、春季と冬季の栄養塩濃度の差から推測される春季ブルームの基礎生産量も、長期変動とトレンドを示した (図2111-5)。

冬季の栄養塩減少は、親潮域における表層低塩化

に伴う混合層の浅化に原因があると推定されたが、A-lineにおける混合層の変化を調べた結果、1994年を境に、さらに、浅化が進んでいることが示された (図2111-6)。この浅化・低塩化トレンドを詳しく調べたところ、親潮南下流域よりもリターンフローとなる北東流域の方が顕著に浅化・低塩化していることが示された。この浅化・低塩化に対応する長期トレンドを調べた結果、親潮が日本沿岸で強く南に張り出す親潮第1分枝の先端緯度の季節的南下時期が2-3月から4-5月に遅れていることがわかった (図2111-7)。

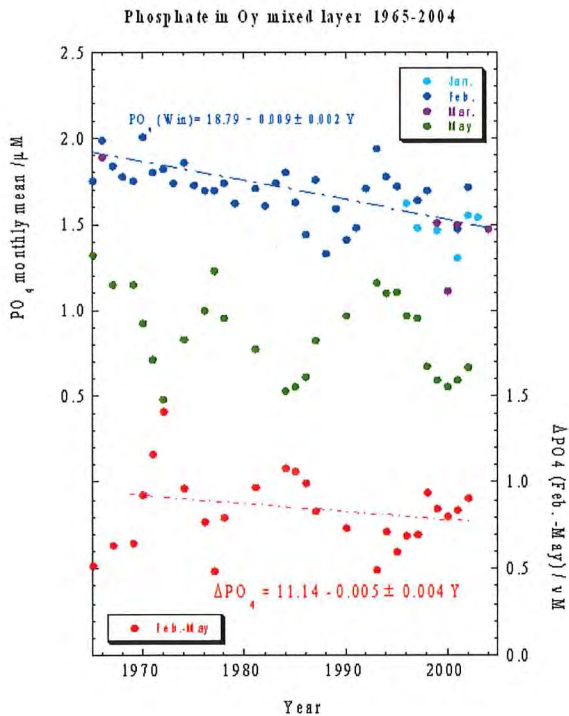


図2111-5 冬季栄養塩（青）、春季栄養塩（緑）、冬季から春季への栄養塩減少（赤）の長期変動

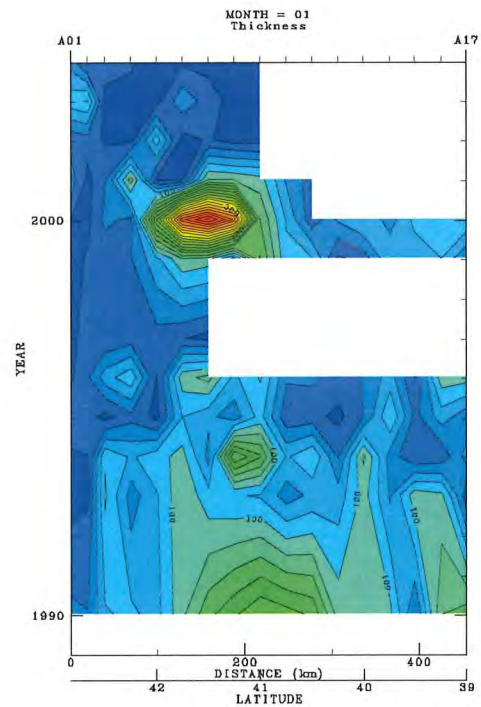


図2111-6 A-line上における1990年から2004年の冬季混合層深度。寒色ほど浅い深度を示す（白抜きは欠測）。

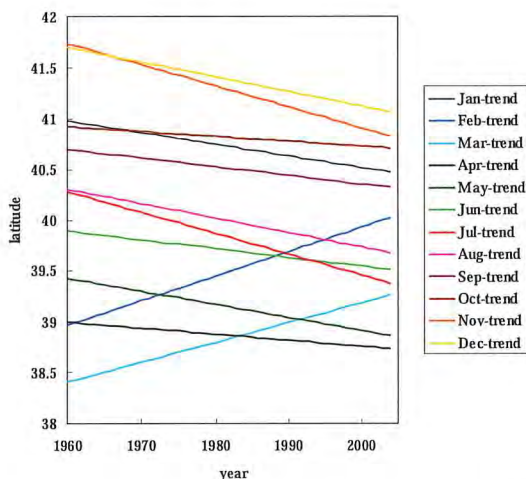


図2111-7 親潮第1分枝南限緯度の月別トレンド

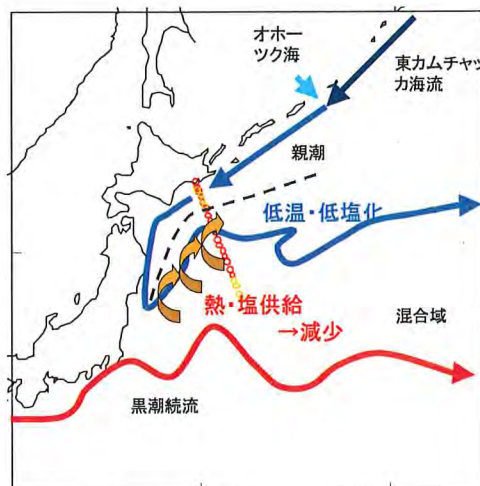


図2111-8 水平混合仮説の模式図

エ 考察

(ア) 海洋構造及び低次生態系の季節変動解析

現状の親潮域においては、春季以外は小型のピコプランクトンの現存量が多いことが明らかとなり、温暖化の進行とともに、その重要度が増すことが推測された。また、ピコプランクトンの中でも、Ultraeukaryaotesなどは高水温に逆に弱いことも示され、温暖化影響下での低次生態系の応答を推定するための、基礎的な知見が集約された。さらに、季節変動の多くの知見は、本研究で開発した低次生態系モデルに取り入れられている。

(イ) 海洋構造・低次生態系の経年変動及びトレンド解析

親潮域での冬季の栄養塩減少とそれに伴う春季ブルーム基礎生産の低下は、基本的に表層の低塩化を起因とする混合層の浅化が原因と推定された。さらに、その浅化傾向は、上流の影響を受ける南下流域よりもリターンフローとなる北東流域で顕著であった。このことから、混合域で黒潮系暖水から水平渦拡散などによって供給される塩分が減少していることが推測される。親潮第1分枝の南下時期が、2-3月中心から4-5月に遅れていることと併せて考えると、南下時期が冬季から春季に変化したために、冬季に黒潮暖水と接する面積が減少し、水平渦拡散などによる塩分供給が減少したとする「水平混合仮説」が提唱される。

オ 今後の課題

本研究で確立された温暖化影響検出可能なモニタリング体制を維持し、長期のデータを蓄積し、より

正確な温暖化影響評価を行う必要がある。特に、親潮域・混合域は、温暖化に伴い表層が低温化している特殊な海域であり、かつ、生物生産の高い海域であるため、地球規模の影響を考える意味でも重要となる。さらに、長期変動が顕著な海域であるため、長期トレンドとともに、長期変動の解析を同時に行う必要がある。特に、冬季栄養塩には線形トレンドが顕著であったのに対し、20年周期の長期変動は春季に顕著であったので、両者の変動メカニズムは全く異なる可能性がある。このため、過去の高水温期に起こっていた現象が、地球温暖化期に起こるという単純な予測は成り立たない可能性がある。今後は、本研究で整備した動物プランクトンのデータも含め、より総合的かつ詳細な解析が必要となる。

カ 要約

地球温暖化影響検出可能なモニタリング体制を確立し、モニタリングを実施した。そのデータを用いて、物理環境、植物プランクトンのサイズ・種別の変動等、基礎的な季節変動が明らかとされた。また、物理、化学環境及び生物の長期変動及び長期トレンドが示され、親潮域では表層の低塩化に伴い、冬季混合層の浅化、冬季表層栄養塩の減少、春季基礎生産の低下が起きていることが示唆された。その原因として、親潮の南下の季節的な遅れに伴い、冬季に黒潮系暖水から水平混合によって供給される塩分が減少するという、「水平混合仮説」が提唱された。

キ 引用文献

Ono T. *et al.* 2002. Multi-decadal change of net

community production in western subarctic North Pacific. Geophysical Research Letter, 29, 10.1029/2001GL014332.

伊藤進一・A-lineチーム. 2005. 北西太平洋亜寒帯域を中心とした海洋環境変動と低次生態系変動. 水産海洋研究, 69, 47-49.

研究担当者(伊藤進一*, 小埜恒夫, 川崎康寛, 日下彰, 葛西広海, 清水勇吾, 笈茂穂, 齊藤宏明, 桑田晃, 高橋一生, 杉崎宏哉, 岡崎雄二, 舘澤みゆき, 鹿島基彦)

(2) 黒潮域における低次生態系モニタリング

ア 研究目的

サンマ・いわし類などの産卵域、稚魚の成育域となっている黒潮域(黒潮及び黒潮続流周辺海域)において、既存の黒潮を横切るモニタリングラインを拡充強化するとともに、黒潮続流域にもモニタリング観測を設定し、低次生態系を構成する物理、化学環境及び動植物プランクトンの調査を定期的に行う。これにより、品質の高い低次生態系データベースを構築し、黒潮域の魚類の餌料環境をコントロールする低次生態系の構造を把握すること、及び季節・経年変動の実態を明らかにすることを目的とした。

イ 研究方法

(ア) 御前崎沖の海域において、黒潮を横切る南北観測定線を設定し、季節毎に海洋環境から低次生産までのモニタリングを継続実施した。観測点を東経138度線上の黒潮を横切る北緯34度から30度までの区間に緯度30分間隔で配置した。観測項目は海洋物理(CTD-D0による水温・塩分・溶存酸素と採水による酸素・塩分測定)、海洋化学(栄養塩:硝酸・亜硝酸・リン酸・珪酸・アンモニア)、生物(クロロフィル a (Chl. a)、植物プランクトン組成、動物プランクトン量、動物プランクトン組成)である。黒潮の北側(内側域)の北緯34度、黒潮流軸位置、黒潮の南側(外側域)の北緯30度では基礎生産の観測点を設け、漂流系を用いた現場法により黒潮域の基礎生産力を把握する観測を行った。なお、動物プランクトン採集用のノルパックネットの目合は通常の335 μ mよりも細かい100 μ mとした。

(イ) 定線モニタリングにより定期的に取得され

た観測データ、及び既存の黒潮域の観測データも用いて低次生態系の構造とその季節、経年変動を解析した。

(ウ) マイワシやサンマなどの小型浮魚類の資源変動に対して重要な海域である冬季の黒潮続流域(Noto and Yasuda, 1999)において、2003/4年冬季から3カ年にわたり海面高度観測衛星の軌道下に観測ラインを設定し、冬季の黒潮続流域の海洋環境と小型浮魚類の仔稚魚の分布に関する調査を実施した。

ウ 研究結果

(ア) 2002年5月に御前崎沖観測ライン(図2112-1)での低次生態系モニタリング観測を開始し、2006年1月までの間に16航海の御前崎沖定線調査を実施した。北緯34度から30度までの緯度30分毎の観測点配置を基本とし、時間的に余裕のある場合には北緯30度から27度までの間で物理観測を主体とした観測を行った(図2112-2)。緯度30分毎の観測定点の総数は194点であった。海洋物理観測データ及び栄養塩、クロロフィル測定データについては、国際的に使用されている海洋観測データ処理ソフトであるOcean DataViewでの閲覧を可能とするデータフォーマットにて整理した。

(イ) 御前崎沖の海洋環境は、沖合を東流する黒潮を境にして岸側の内側域と沖側の外側域に分けられる。黒潮の流路は2002年から2004年夏季までは岸に沿う直進流路、2004年秋季から2005年夏季までは、岸から大きく離れる大蛇行流路となっていた(図2112-2)。本研究では黒潮流路の変化の影響を除くため、1999年4月から2002年1月までの間に行われた観測のデータも含めて、黒潮流軸(300m水温15 $^{\circ}$ C)を基準にした季節毎の合成図を作成し、御前崎沖の海洋構造の季節変化を解析した。本州南方の海洋表層は、春季から夏季にかけて昇温期となり、海面から高温となる。秋季から冬季には、海面からの冷却と風によるかき混ぜの強化により降温するとともに、一様な水温・塩分を持った混合層が発達する。表面水温から0.5 $^{\circ}$ C低下する深度を混合層の厚さとする定義(Monterey and Levitus, 1997)を用いて黒潮外側域での混合層の平均値を求めると、11月では混合層水温が24.5 $^{\circ}$ C、混合層厚が89m、1月にはそれぞれ20.3 $^{\circ}$ C、179mとなった。内側域の平均値は、11月が21.8 $^{\circ}$ C、42m、1月が16.1 $^{\circ}$ C、109mであった。内側域

は表層と亜表層の間の密度差が亜熱帯海域に比べて大きく、混合層が発達しにくいことを反映している。冬季の混合層水温及び厚さの年々の変化を見ると、2003年1月、2004年1月、2005年1月の平均の水温と厚さは20.5℃、169mで年毎のばらつきは小さいが、2006年1月には19.8℃、208mとなり、250mを超える厚さの混合層も観測された。寒冬となった2005/2006冬季の厳しい気象の影響を受けたものと考えられた。表層の塩分構造の季節変化は、梅雨や台風により降水過多となる夏季に表層が低塩分化することを特徴とする。表層の高水温と併せて成層構造が強化され

ることになる。夏季の表層の低塩分水の影響は、秋の表層混合層の発達とともに表層全体に及ぶ。冬季には季節風の吹き出しによる海面からの蒸発のため、表層混合層内の塩分濃度は回復し、春季に表層に高塩分水が分布する構造となる。

本研究で取得された外側域の北緯30度点で観測された水温プロファイルとWorld Ocean Atlas 2001 (Conkright et al. 2002) による気候学的なプロファイルと比較した結果、2002年以降に亜表層において水温躍層位置が深くなっている傾向が認められた。

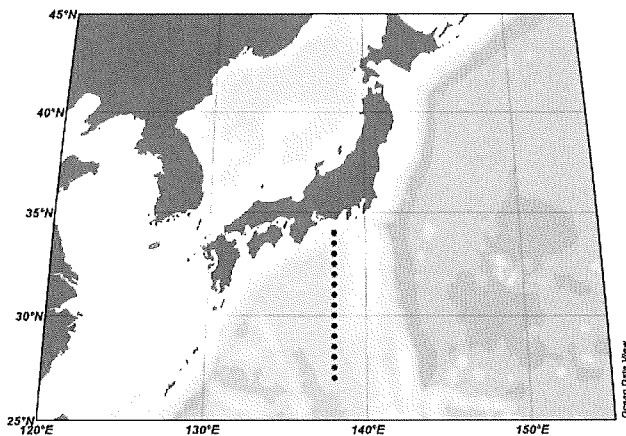


図2112-1 御前崎沖観測ラインの基本的な配置。
東経138度線に沿い、緯度30分毎に配置した。
背景は海底地形。

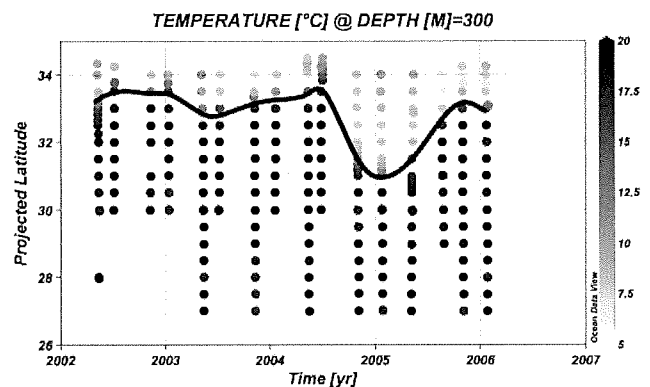


図2112-2 東経138度線の観測点の時間・緯度配置、●の濃淡は深度300mの水温値に対応する。曲線は黒潮流路のおおよその位置を示す。

(ウ) 海洋の基礎生産を担う植物プランクトンについては表層200mまでの採水とGF/Fフィルター濾過によるChl.aの測定、採水サンプルによる種組成の分析と漂流系を用いた基礎生産量の測定実験により実態把握を進めた。東経138度線の黒潮外側域（北緯30度から32度）における表層に成層構造が発達（図2112-3）する春季、夏季のChl.a濃度の深度分布（図2112-4）の特徴は、亜表層の50-100mにChl.aの極大が形成されることであり、表層混合層が発達しつつある秋季にも、この分布形は維持される。表層の混合が進んだ冬季には、表層混合層中でChl.aが鉛直に一樣な分布を示すようになる。御前崎沖の外側域での200mまでの平均のChl.a濃度は春季が0.18mg/m³、夏季が0.13mg/m³、秋季が0.15mg/m³、冬季が0.22mg/m³とな

り、植物プランクトンの現存量が冬季に最大、夏季に最小となることが推測された。植物プランクトンの種組成の分析から、季節的な植物プランクトンの現存量変動は、主として5 μ以下の微小な植物プランクトンの増減に依存することが示唆された。なお、亜熱帯海域の北緯30度点と内側域の北緯34度点での基礎生産量測定実験の結果は、それぞれの海域での基礎生産量は春季と冬季に高い値が見られる傾向にあることを示したが、春季、冬季に観測された最大値は内側域も外側域も400~500mgC/m²/dayの範囲にあり、同じ季節、同じ海域でも得られる値は大きくばらつき、海域による差や冬春季の差は不明瞭であった。観測の継続と海洋物理・化学環境、光の条件との詳細な解析が必要である。

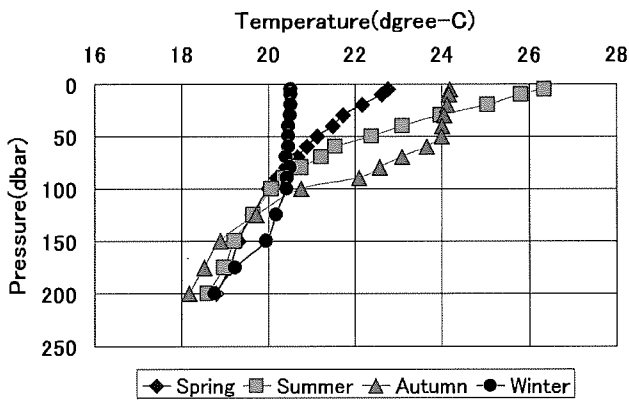


図2112-3 黒潮外側域の各季節の表層水温の鉛直分布

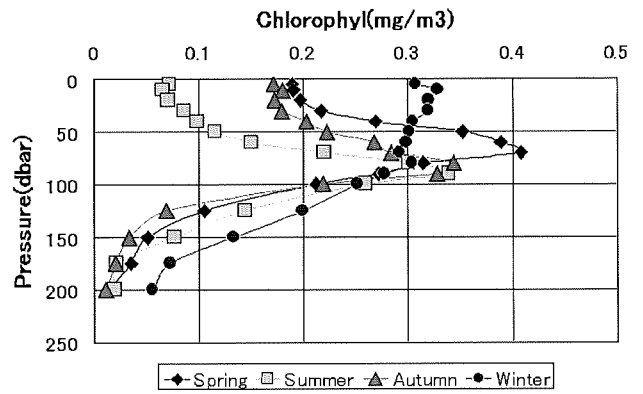


図2112-4 黒潮外側域のクロロフィル a の鉛直分布

(エ) 黒潮域の動物プランクトンの分析により、黒潮域での重要な餌料生物である小型カイアシ類について、小型カイアシ類が周年で優先すること、その種組成の季節変化は小さいことが明らかになった。また、大型カイアシ類のバイオマスが冬季～春季に増加する傾向を持つことなどの季節変化も明らかになった。亜熱帯海域での栄養塩の流れの一端を担う微生物ループの構成要素については、バクテリアが夏と冬に多いこと、これを利用する渦鞭毛虫類が春季に多く冬季に少ないという解析結果が得られた。なお、御前崎沖の亜熱帯海域の動物プランクトン現

存量は植物プランクトン現存量の約 1/2 であり、現存量比は、北太平洋亜寒帯水域 (Taniguchi, 1999) に比べて小さく、亜熱帯海域でメソ動物プランクトンの割合が小さいことを反映した結果となった。

亜熱帯海域のカイアシ類群集現存量の経年変動は主として頭胸部長 0.8mm 以下の小型カイアシ類の変動に依存し (図2112-5)、冬季に水温が低い年の春季に小型カイアシ類のバイオマスが多くなるという関係 (図2112-6) が示唆された。この結果は黒潮流域の長期にわたる既往資料を基にした解析結果 (Nakata and Hidaka, 2003) と基本的に同じ関係である。

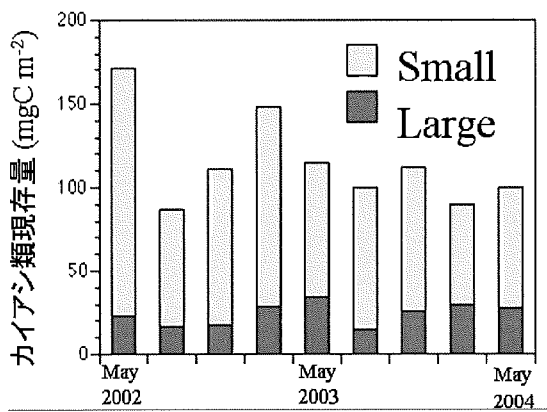


図2112-5 黒潮外側域のカイアシ類現存量の変化

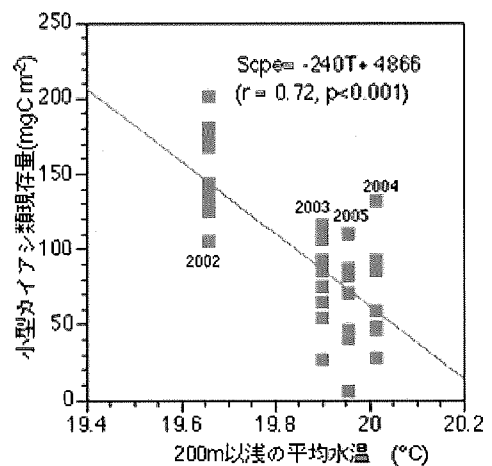


図2112-6 黒潮外側域の春季の小型カイアシ類現存量と冬季の表層水温の関係

(オ) 黒潮続流域の調査を2003/4冬季は4航海、2004/5冬季は2航海実施し、2005/6冬季は東京大学海洋研究所の実施する調査に参加し実施した。これにより、黒潮続流前線及びその南に存在する混合層前線域の海洋構造と冬季の黒潮続流再循環域の海洋

環境を把握し、さらに混合層前線がクロロフィルフロントになっていること、サンマの稚魚やイセエビの幼生の分布が海洋の物理的な前線構造を境界としていることを示す結果を得た。

エ 考察

(ア) 本研究により小型浮魚類の餌料生物として重要な外側域の小型カイアシ類の春季のバイオマスが、冬季の表層水温と明瞭な相関関係を持つことが明らかになった。亜熱帯海域においては、冬季の表層水温と混合層の厚さの間に負の相関関係があり、表層混合層がより深く発達する冬季には、表層がよくかき混ぜられ表層水温が低下する。このため、表層水温が低い冬季には、下層からより多くの栄養塩が供給されることとなり、表層の基礎生産が増大すると考えられる。一方、小型カイアシ類は産卵が始まる餌濃度、産卵速度が飽和に達する餌濃度とともに大型種に比較して低く (Runge, 1988)、バイオマスが基礎生産の増加に敏感に反応する可能性があることから (中田, 2004)、春季の小型カイアシ類のバイオマスの多寡が冬季の表層のかき混ぜの強弱に対応して現れるものと推測された。この関係からは、温暖化の進行に伴い表層のかき混ぜが弱化する事になれば、小型浮魚類の餌料環境が悪化することが示唆される。

(イ) 御前崎沖の亜熱帯観測点の中層水温が気候値に比べ高温化し、躍層の深化が起こっていると推測された。東経137度線の気象庁の観測データにもその傾向が見られ、同海域の亜表層を占める亜熱帯モード水の分布・特性の長期的な変化が躍層の深化に反映されているものと思われる。実際に、東経137度線の亜熱帯モード水は黒潮流量変化の影響を受け、長期的に高温化しているとされている (気象庁, 2005)。温暖化による風系の変化が亜熱帯循環を強化し、黒潮の流量を増大させるとともに、暖冬傾向を維持し表層水温の高温化をもたらすこととなれば、その結果として、暖かい亜熱帯モード水の形成量が増大し、亜熱帯海域での海洋表層の厚みが増加している可能性がある。

オ 今後の課題

(ア) 黒潮外側域での小型カイアシ類バイオマスの変動と表層水温の相関関係のメカニズムを追求し、温暖化に伴う海洋環境変化が亜熱帯海域での小型浮魚類の餌料生物のバイオマスに及ぼす影響の評価につなげること、内側域における海洋環境と低次生態系の関係を把握し、その変動特性を明らかにすることが温暖化の影響解明のため重要である。

(イ) 御前崎沖の観測定線での季節毎の観測態勢を整えたこと、また、黒潮続流域の冬季の総合的な生態系調査を3冬季連続で実施した意義は大きい。貴重な観測資料の整理、解析を進めることと併せて、データベースとして公開することが今後の課題である。

カ 要約

多獲性の小型浮魚類の産卵域、稚魚の成育域となっている黒潮域における魚類の餌料環境をコントロールする低次生態系の構造と変動を把握するため、御前崎沖に黒潮を横切るモニタリングラインを設定し、年4回の低次生態系調査を実施する体制を整えた。モニタリング調査により得られたデータを用いて物理環境、動植物プランクトンの季節変動を把握するとともに、物理環境と餌料生物として重要な小型カイアシ類の経年変動の関係を把握した。小型浮魚類の長期変動に重要な海域である冬季の黒潮続流域について2003/4冬季から3冬季にわたり冬季調査を実施し低次生態系から仔稚魚の分布に関するデータを取得した。

キ 引用文献

- Conkright, M.E., R. A. Locarnini, H.E. Garcia, T.D. O'Brien, T.P. Boyer, C. Stephens, J.I. Antonov, 2002. *World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation*. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 17 pp.
- 気象庁, 2005. 異常気象レポート2005, 383pp.
- Monterey, G. and Levitus, S., 1997. Seasonal Variability of Mixed Layer Depth for the World Ocean.
- NOAA Atlas NESDIS 14, U.S. Gov. Printing Office, Wash., D.C., 96 pp. 87 figs.
- 中田 薫, 2004. 黒潮域のマイワシ餌料プランクトン変動, 「海流と生物資源」(杉本隆成編), 201-207.
- Nakata, K. and Hidaka K. 2003. Decadal scale variability in the Kuroshio Marine ecosystem in winter. *Fish. Oceanogr.*, 12, 234-244.
- Noto, M. and Yasuda, I. 1999. Population decline of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, in relation to sea surface temperature in the Kuroshio Extension. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56, 973-983.

Runge, J. A. 1988. Should we expect a relationship between primary production and fisheries? The role of copepod dynamics as a filter of trophic variability. *Hydrobiologia* 167/168, 61-71.

Taniguchi, A. 1999. Differences in the structure of the lower trophic levels of pelagic ecosystems in the eastern and western subarctic Pacific. *Prog. Oceanogr.*, 43, 285-319.

研究担当者（渡邊朝生*、中田 薫、塩本明弘、広江 豊、小松幸生、日高清隆、豊川雅哉、市川忠史）

(3) 対馬暖流域における低次生態系モニタリング

ア 研究目的

対馬暖流域のマサバ・マアジ・スイルメイカ等の水産資源は東シナ海を産卵場、日本海を生育場としており、対馬暖流域の温暖化の進行に伴う水産資源変動予測手法の開発には、東シナ海対馬暖流源流域及び日本海中部海域の低次生態系の構造を解明する必要がある。このため、両海域において海洋物理・化学環境から動・植物プランクトンを含む総合的なモニタリング観測を実施し、低次生態系の構造解明に資する高品質なデータベースを構築する。また、これにより低次生態系の季節・年変動の特性と長江の影響を強く受ける東シナ海陸棚域の特徴を把握することを目的とする。

イ 研究方法

(ア) データベースの作成

東シナ海・日本海においては気象庁により、日本海中部のPMライン、東シナ海中南部のPNラインにおける調査が1972年から開始され、現在に至るまで年4回程度海洋観測が継続されている（図2113-1）。また、1996年以前には、気象庁では東シナ海北部大陸棚上の32°Nライン（Aライン）においても調査を実施しており、これら日本周辺海域における気象庁海洋観測データのうち、1965年以降のデータについてはデータベースが整備・公開されている。一方、西海区水産研究所では1973～1992年に31°30'Nラインを中心に東シナ海・黄海の海洋観測データが蓄積されており、これらを補完するために本研究では2002年以降31°45'Nライン（CKライン：図2113-1）における定線観測を開始し、従来のデータを合わせてデ

ータベース（1972～2005年：延べ約2400測点）を作成した。

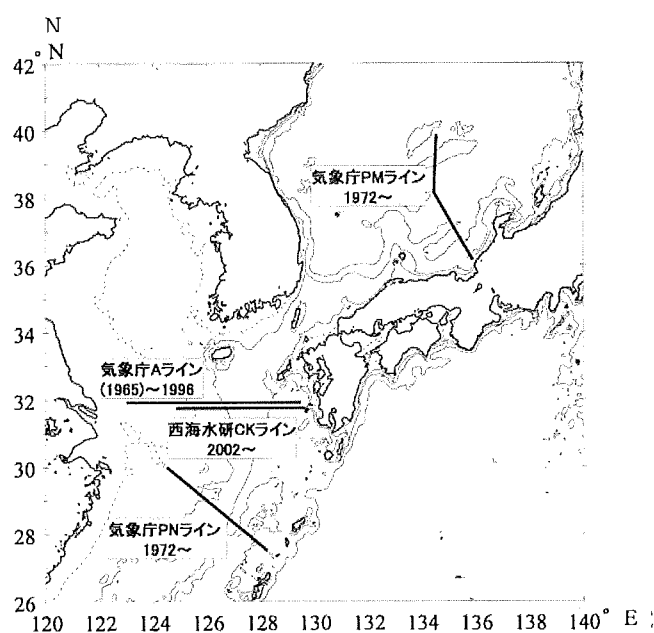


図2113-1 東シナ海及び日本海の観測線図

(イ) 年・季節変動特性と長江起源水の東シナ海低次生態系に及ぼす影響

今回作成した西水研データベース、気象庁データベース、並びに、JODCデータ等を利用し、水温・塩分・栄養塩・クロロフィルa (Chl.a)などの年・季節変動特性を解析するとともに、長江起源水の東シナ海低次生態系に及ぼす影響を検討した。

(ウ) 東シナ海と日本海における動物プランクトンの長期変動

PN線（黒潮系水域）とPM線（対馬暖流域）における動物プランクトン湿重量と水温、Chl.a量の長期変動特性を明らかにした。また、得られた結果から、環境要因と湿重量の関係及び日本海と東シナ海の湿重量変動の関連について検討を行った。

(エ) 日本海における動物プランクトン種組成の年変化

動物プランクトン種組成の年変化について明らかにするため、気象庁PM線（沿岸から沖合に向けPM1～9）試料のうち2002～2004年春季（4月18日～5月1日）動物プランクトン種組成についてクラスター解析、指標種分析、種多様度指数の計算を行った。

ウ 研究結果

(ア) 水温・塩分の長期変動特性

対馬暖流域で最も長期間にわたり多数のデータが得られている31°N~32°Nの表面(0~5m)水中の水温・塩分の長期変動を本研究で得られたデータを

含めて解析し(1965~2005年)、冬季の水温、夏季の塩分の長期変動を図2113-2に示した。東シナ海陸棚沿岸域においては冬季に昇温傾向(127°E以西)、夏季に低塩分化傾向(126°E以西)が認められた。

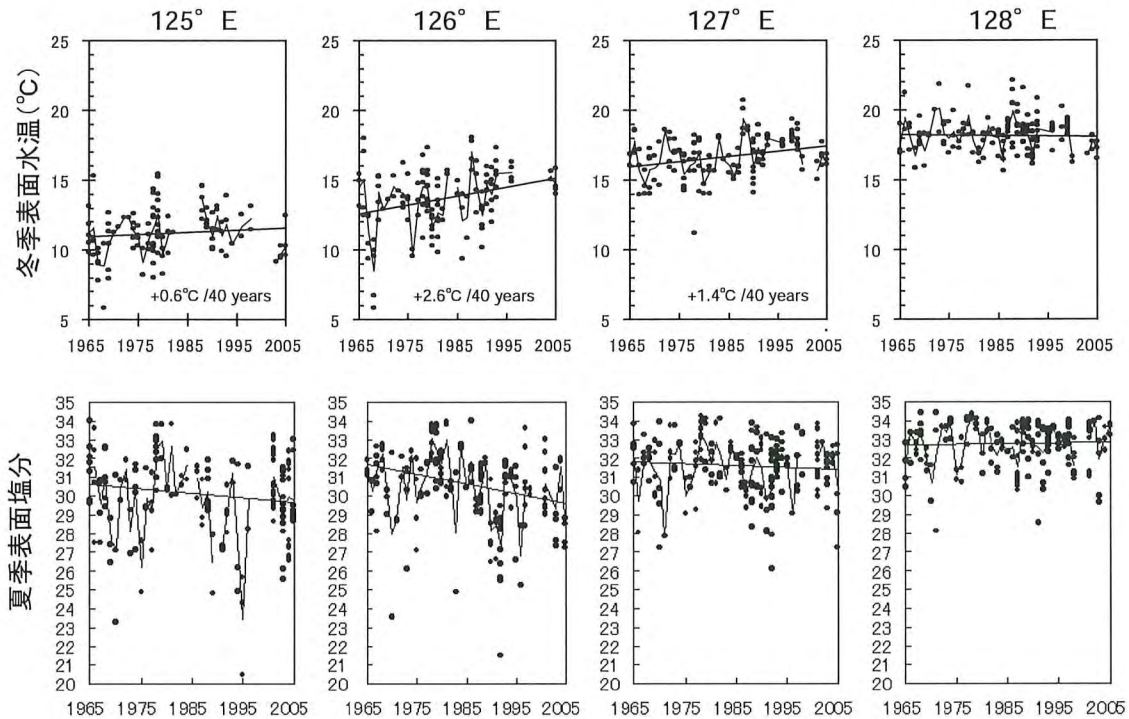


図2113-2 31~32°Nにおける経度別の冬季水温(1~3月、上段)と夏季塩分(7~9月、下段)の長期変動

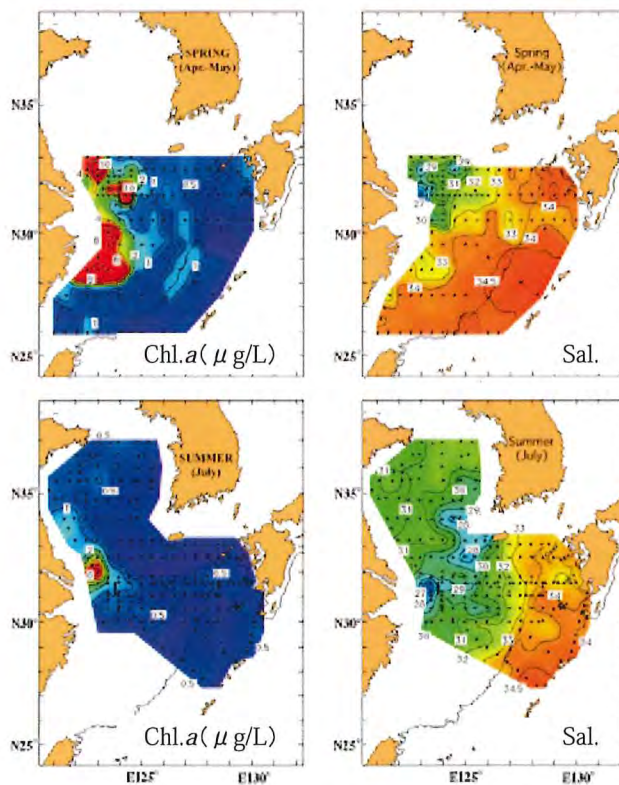


図2113-3 約20年間(1973~1992年)の西水研観測結果を用いた東シナ海・黄海表層における春季(上段)と夏季(下段)のChl.a、塩分の平均値の分布

(イ) 季節変動特性と長江起源水の東シナ海低次生態系に及ぼす影響

気象庁PNライン（図2113-1）の5～10月の観測データ（長崎海洋気象台，1990～2000年）を用い観測月の長江月平均流量（大通）と各観測点の表層塩分との関係を解析した結果、月平均流量と各観測点の表層塩分には黒潮流域のPN3と大陸棚中部域のPN7を除いて有意な直線関係が認められた（田中ら，2005）。図2113-3に約20年間（1973～1992年）の西海区水産研究所観測結果を用いた東シナ海・黄海の春季と夏季の表層のChl.aと塩分の平均的分布状況を示した。長江流量の増大する夏季とともに、春のブルーム期においても長江河口域を中心に低塩分の大陸棚沿岸域で最も高いChl.a濃度を示した。

(ウ) 動物プランクトン湿重量の長期変動と環境要因との関連

東シナ海の黒潮系水域と日本海の対馬暖流域における動物プランクトン湿重量の長期変動に明確な関連は見出せなかったが、それぞれの海域において湿重量の変動と環境要因との関連が示された（図2113-4）。

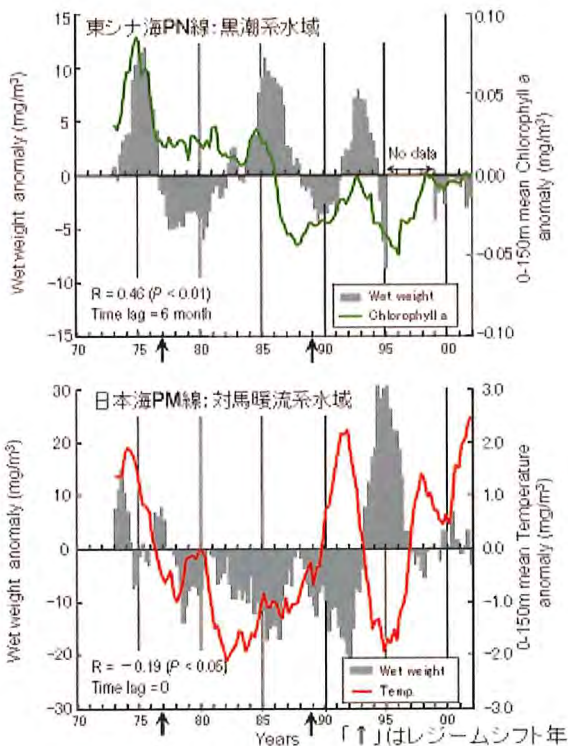


図2113-4 東シナ海（上図）及び日本海（下図）における動物プランクトン湿重量とChl.a量、水温の経年変動

東シナ海の黒潮系水域における動物プランクトン湿重量は5年程度の周期的な増減を繰り返しつつ減少傾向にあり、Chl.a量の変動と約半年遅れのタイムラグで有意な正の相関が認められた（Chl.a量は1986年から急激に減少し、1988年に極小となった後、近年まで低水準で推移していた）。

一方、日本海の対馬暖流域における動物プランクトン湿重量は1977～1992年まで低水準で推移した後、1990年代中旬に顕著なピークを示し、表層水温と有意な負の相関を示した（表層水温は1977～1988年の間は低水準、その後は増減を繰り返した）。これらのことは、日本海域の動物プランクトン群集の生物量が対馬暖流の影響の弱い時に増加することを示唆している。

(エ) 日本海における動物プランクトン種組成の年変化と環境要因との関連

動物プランクトン種組成は3つのクラスターに分かれ（図2113-5）、クラスター1の指標種は*Evadne nordmanni*、*Eucalanus attenuatus*といった沿岸暖水性種、クラスター3は*Neocalanus cristatus*、*Primno abyssalis*といった大型の冷水性種が指標種であった。年変化についてPM4～PM6で見ると、2002年はクラスター2であったのに対して、2003年はクラスター2～3、2004年はクラスター1と同じ定点でも属するクラスターは年により変化していた。動物プランクトンの個体数密度と種多様性指数は、クラスター1では高く、クラスター3では低い傾向が見られ、種多様性指数は水温と関連が強かった（図2113-6）。また、2004年は沖合域までクラスター1が見られた。

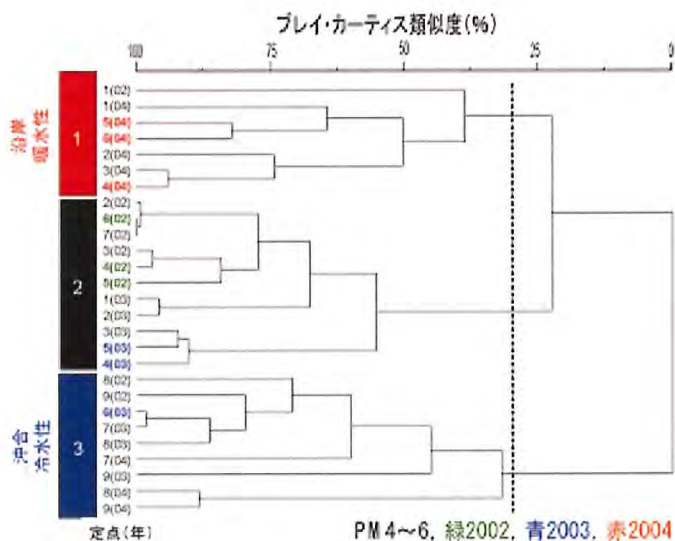


図2113-5 日本海PM線における春季動物プランクトン種組成のクラスター解析

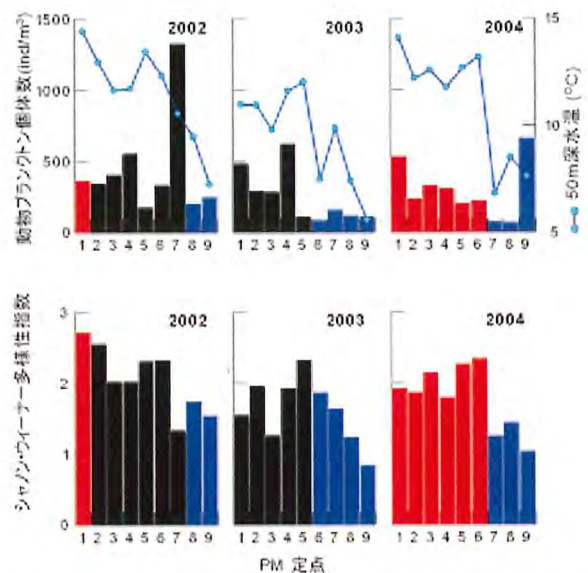


図2113-6 日本海PM線における2002～2004年春季動物プランクトン個体数密度と50m深水温（上図）及び多様指数（下図）

考察

東シナ海大陸棚沿岸域の冬季の昇温傾向（図2113-2：0.6～2.6℃/40年）については、韓国沿岸域においても1968年～2004年の37年間に約0.9℃の平均水温の昇温傾向が報告されている（Jeong *et al.*, 2005）。その原因としては温暖化による冬季の冷却の減少が考えられるが、詳細については今後の検討課題である。

長江からは、流量の増大する夏季を中心に豊富な栄養塩が海域に運ばれるが、CKラインと気象庁Aラインの大陸棚沿岸域では溶存態無機窒素（DIN）濃度の高い長江起源水の影響により、出水年に広範囲にリン制限（DIN過剰）の水域が形成された。また、春季・夏季の平均Chl. *a*、塩分分布（図2113-3）からも夏季及び春季ブルームにおける植物プランクトン分布に及ぼす長江からの低塩分水の影響が非常に大きいことが明らかとなった。地球温暖化により洪水の発生頻度が高くなる危険性が指摘されているが（IPCC, 1995）、長江においても1995年から1999年の5年間に4回の大洪水が発生した（皆川, 2003）。これらの影響は大陸棚沿岸域の夏季の低塩分化傾向（図2113-2）とともに異常低塩分水の観測例として、しばしば九州近海や対馬海峡にまで及んでいる（木谷, 1998）。一方、長江では三峡ダムの建設により、人為的な流量調節の東シナ海への影響についても評価する必要がある。低塩分・低密度の長江起源水に

よる強い成層は、春季から夏季の日射により、さらに、高温・低密度化した表層水を形成し、地球温暖化による水温上昇と生態系の変動にも深い関係が予想される。

東シナ海の黒潮系水域におけるChl. *a*量と湿重量のタイムラグを有した正の相関関係は過去の餌料環境が動物プランクトン生物量に影響することを意味し、東シナ海の黒潮系水域の動物プランクトン群集がボトムアップ制限を受けていることを示唆している。一方、日本海の対馬暖流域における水温と湿重量の負の相関は、対馬暖流の影響が弱い時（すなわち、低水温）には日本海固有水由来の大型動物プランクトンが表層に出現し、生物量が増加することを示唆している（図2113-4）。さらに、日本海PM線の動物プランクトン種組成も水温の影響を強く受けており（図2113-5）、群集構造の変化がPM線動物プランクトン湿重量の長期変動の要因であることを支持していた。2004年には沖合域まで沿岸暖水性種を指標種とするクラスター1が見られたが（図2113-6）、その年の冬季（1～3月）の日本海西部水温は非常に高く（加藤ら, 2006）、この影響によるものと推定される。

本研究の結果から、東シナ海の黒潮系水域においては、低次生態系の変動が動物プランクトン生物量に影響し、日本海においては、水塊構造の変化が生物量に影響していると考えられる。従って、長期的な動物プランクトンの変動機構解明のためには、群

集構造の解析及び、水塊構造との関連についての解析が必要となる。

オ 今後の課題

今後も海洋環境及び低次生態系のモニタリングを継続的に行い、温暖化の影響評価予測モデルの開発する必要がある。また、東シナ海データベースについてはホームページ等を利用して公表する。さらに、基礎生産構造を解析し、東シナ海域での炭素循環過程の理解を深める。一方、長江における三峡ダムの建設による人為的な流量調節が東シナ海の低次生態系に及ぼす影響についても評価する必要がある。

カ 要約

(1) 東シナ海温暖化観測線（CKライン）及び東シナ海における西海区水産研究所既往データの物理・化学環境と動物プランクトンを含む総合的なデータベースを作成し、季節・年変動特性を明らかにした（1972～2005年、延べ約2400測点）。

(2) 東シナ海陸棚沿岸域及び日本海西部において、冬季に昇温傾向、東シナ海陸棚沿岸域において夏季に低塩分化傾向が認められた。

(3) 本研究で作成した総合データベース及び気象庁海洋観測資料による東シナ海データを解析し、長江起源水が塩分・Chl. *a* 分布に及ぼす影響を明らかにした。

(4) 東シナ海のPN線黒潮影響域の動物プランクトン湿重量の長期変動はクロロフィル量と有意な相関（湿重量が半年遅れる正の相関）が認められ、本海域の動物プランクトンが餌料となる植物プランクトンに影響されるボトムアップ制限を受けていることが示された。

(5) 日本海中部の気象庁PM線における動物プランクトン群集と水温の関係から、表層水温の変化による動物プランクトン群集の変化が動物プランクトン現存量の変動に強く影響していることがわかった。

キ 引用文献

IPCC 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate: Scientific Technical Analyses, R. T. Watson et al. eds., Cambridge Univ. Press.

Jeong H-D. et al. 2005. Long-term physical and biochemical investigations around the western channel of

Korea/Tsushima Strait. Proc. of Workshop on the marine environment in the east Asian marginal seas. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 84-93.

加藤ら2006. 沿岸・沖合定線観測データから示される日本海及び対馬海峡における水温の長期変動. 沿岸海洋研究, 44, 19-24.

木谷浩三 1998. 陽光丸が東シナ海で観測した異常低塩分水. 西水研ニュース, 95, 9-11.

皆川昌幸 2003. 中国大陸における近年の降水量及び長江の流量について、「長江大洪水と東シナ海の海洋環境」. 西水研, 1-31.

田中勝久ら 2005. 長江の流量変動と東シナ海表層水の関係ー地球温暖化との関連についてー. 西水研ニュース, 111, 7-8.

研究担当者（田中勝久*、西内 耕、井口直樹、横内克巳、清本容子、岡村和麿、長田 宏、長谷川徹、塚本洋一、佐々千由紀、森本晴之、加藤 修）

2 地球温暖化の影響及びリスクの解明

(1) 温暖化がプランクトン生態系に及ぼす影響の評価と予測技術の開発

ア 研究目的

地球温暖化は海洋の鉛直成層構造を変化させ、水温、光、海洋上層への栄養添加条件への影響を通じて、魚類生産と密接に関わる基礎生産力とプランクトン生態系構造に影響するものと予想される。本研究は、温暖化に伴う環境要因の変化が亜熱帯から亜寒帯にわたる日本周辺海域のプランクトン生態系構造と浮魚類の餌料環境に及ぼす影響予測が可能な生態系モデルを開発することを目的とした。合わせて、開発されたモデルを用いて水温上昇がプランクトン生態系構造へ及ぼす影響予測を試みた。

イ 研究方法

(ア) 既往の亜寒帯海域適応型低次生態系モデル NEMURO を改良し、亜寒帯・亜熱帯汎用低次生態系モデルを開発する。

(イ) 既往の大循環モデルを改良し、日本周辺の海洋構造を高精度で表現可能な物理モデルを開発する。開発された物理モデルと生態系モデルを結合し、生態系モデルの三次元化を図る。

(ウ) 現場観測を行うとともに、過去に蓄積された試料の解析やデータを利用して、生態系モデルのパラメータのチューニングと妥当性検証のためのデータセットを作成する。

(エ) 既往のモデルを改良し、衛星データを利用した日本周辺海域の植物プランクトンの分布と生産力変動を再現できる衛星モデルを開発する。開発されたモデルを用いて、日本周辺海域の植物プランクトン量及び生産力データベースを作成する。

ウ 研究結果

(ア) 亜熱帯亜寒帯汎用低次生態系モデルの開発

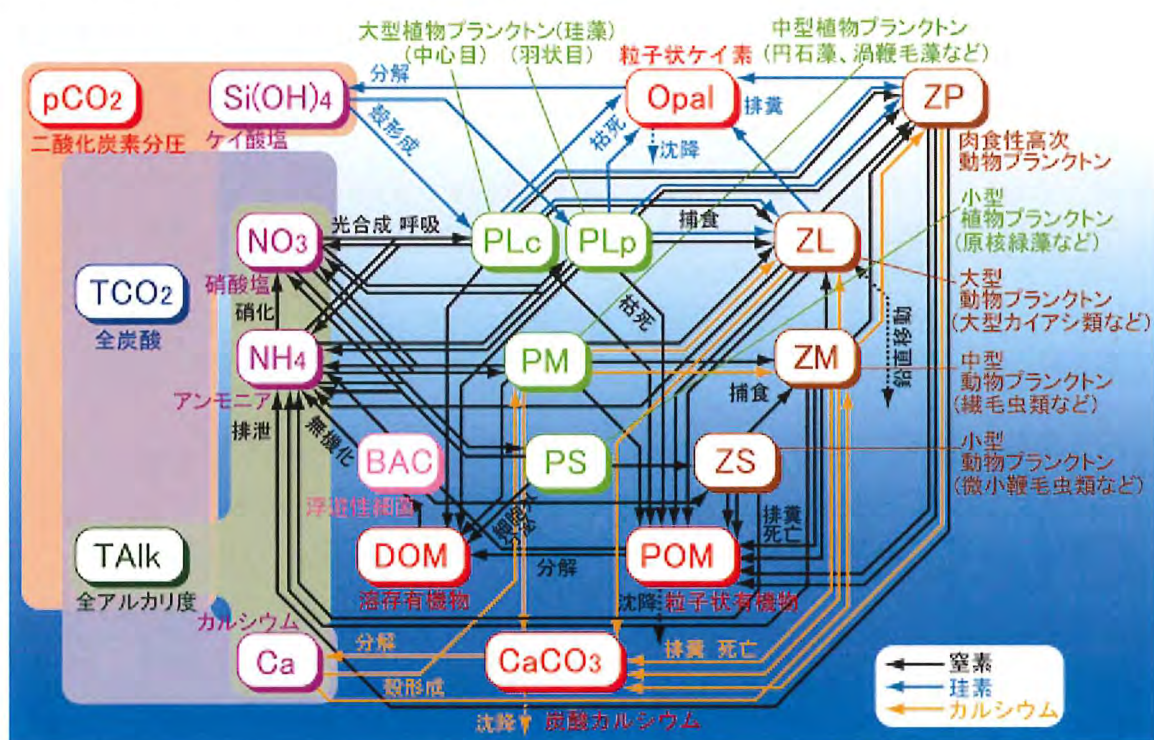


図2121-1 eNEMUROの概念図

(イ) 高精度三次元物理モデルの開発と生態系モデルとの結合

ネスティング法を用いることなく、北太平洋全域を対象としながらも日本周辺海域を1/16°で解像可能で、かつ、黒潮流路を1ヶ月先まで、ほぼ再現できる海況予測システムを構築した。このシステムに亜熱帯海域生態系用にパラメータを調整した従来の“NEMURO”と結合し、生態系モデルの三次元化を図った。このモデルを用いた数値実験により、続流の蛇行の峰の上流側では上昇流によってプランクトンが表層へと輸送され、逆に、峰の下流側では下降

流によって下層へと輸送されるという、これまでの観測事実を再現した (Komatsu and Watanabe, 2004)。

(ウ) eNEMUROの妥当性評価のためのデータセットの作成

eNEMUROの再現性評価に必要なながら、これまでデータ蓄積がなかった、バクテリアや微小植物の主要栄養源である溶存態有機炭素濃度と亜熱帯海域のアンモニア濃度の季節変化を把握した。亜寒帯海域では植物プランクトンの春季増殖の後に、水柱内の溶存態有機炭素濃度が上昇すること、亜熱帯海域では、春から夏にかけてアンモニア濃度が高く、秋か

ら冬にかけて低くなる(図2121-2)ことが明らかとなった。また、過去に蓄積された試料を観察し、多獲性浮魚類の主産卵期における黒潮域の餌料生物量について、約30年間分のデータセットを作成した。この解析により、黒潮域の餌料生物量の長期変動が、主として大型カイアシ類の *Calanus sinicus* と、小型カイアシ類の *Paracalanus* 及び *Oncaea* 科カイアシ類の変動によって起こる (Nakata and Hidaka, 2003) ことが

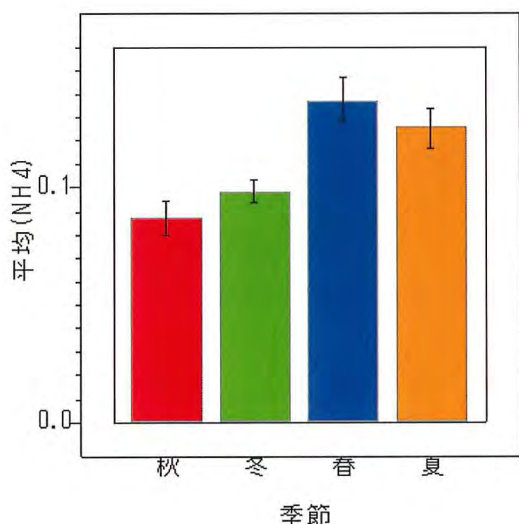


図2121-2 亜熱帯海域におけるアンモニア濃度 (μM) の季節変化

(エ) eNEMUROの再現性

亜寒帯海域、並びに、亜熱帯海域の現場観測で得られた現場観測値でパラメータのチューニングを行い、両海域の低次生態系構造の季節変化が、ほぼ再現できるようになった(図2121-4)。また、eNEMUROを三次元化した3D-eNEMUROについて、モデルの全4種類の植物プランクトン現存量の総和から算出したクロロフィル量と衛星SeaWiFSのクロロフィル量とを比較したところ、モデルはクロロフィル量の時空間変動を良く再現した(図2121-5)。

明らかとなった。さらに、西部北太平洋の基礎生産を推定するモデルを作成し (Kameda and Ishizaka, 2005)、日本周辺の植物プランクトン量と基礎生産力のデータベース化を行うとともに、得られたデータを用いて1998~2004年の亜寒帯海域並びに亜熱帯海域の基礎生産量の経年変動を明らかにした(図2121-3)。

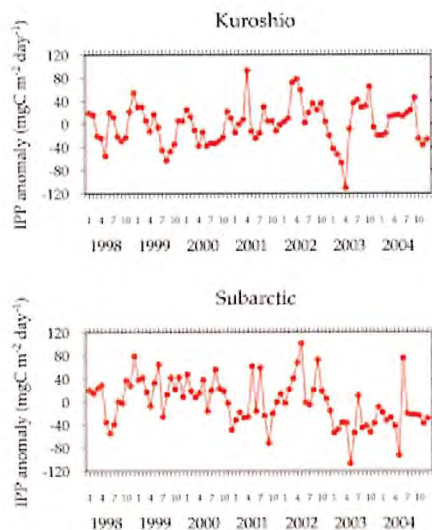


図2121-3 衛星データを利用して見積もった黒潮域並びに亜寒帯海域における基礎生産力アノマリの経年変動

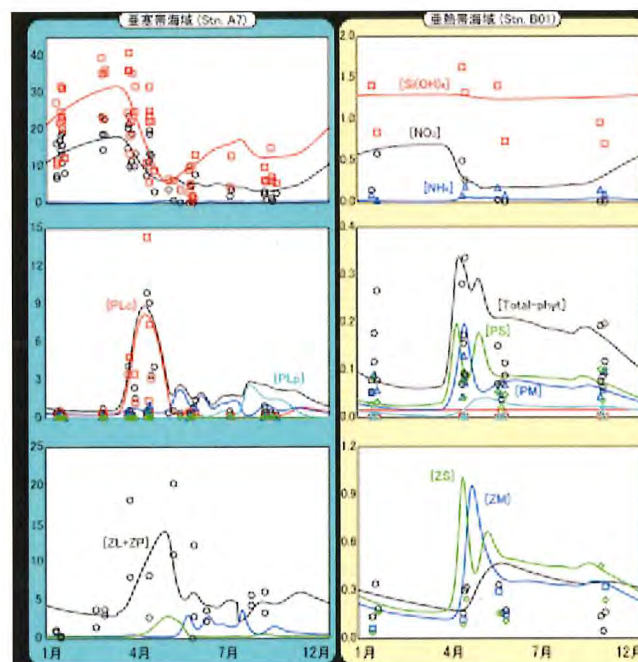


図2121-4 eNEMUROで再現した亜寒帯海域と亜熱帯海域の栄養塩濃度、動植物プランクトン生物量、動物プランクトン生物量の季節変化(線はモデル計算値、点は観測値)

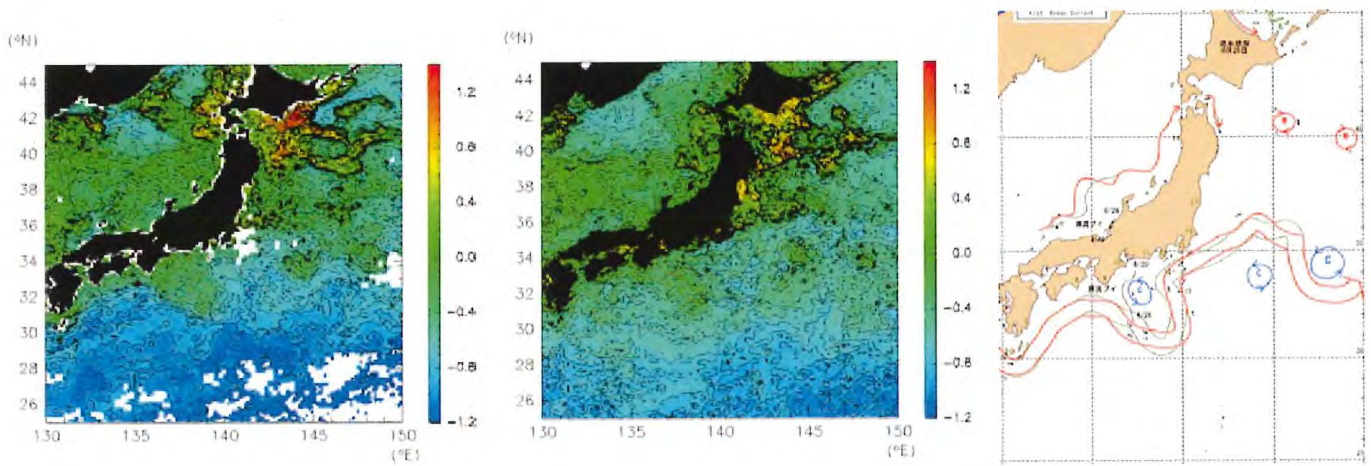


図2121-5 2005年4月22日の海色衛星SeaWifs（左）と3D-eNEMURO（中：eNEMUROによる再現値をC:chl a比=50として算出）による海面クロロフィルの分布、並びに海況図（右）

(オ) eNEMUROによる温暖化実験

eNEMUROを用い、水温・日射量・混合層水深・混合層以下の栄養塩濃度等の境界条件を亜寒帯域のものから亜熱帯域のものに徐々に変化させ、植物プラ

ンクトンの応答について調べた。その結果、亜寒帯で優占する種類から亜熱帯に優占する種類へと、季節的に両者が共存しながら、徐々に切り替わっていくことが示された（図2121-6）。

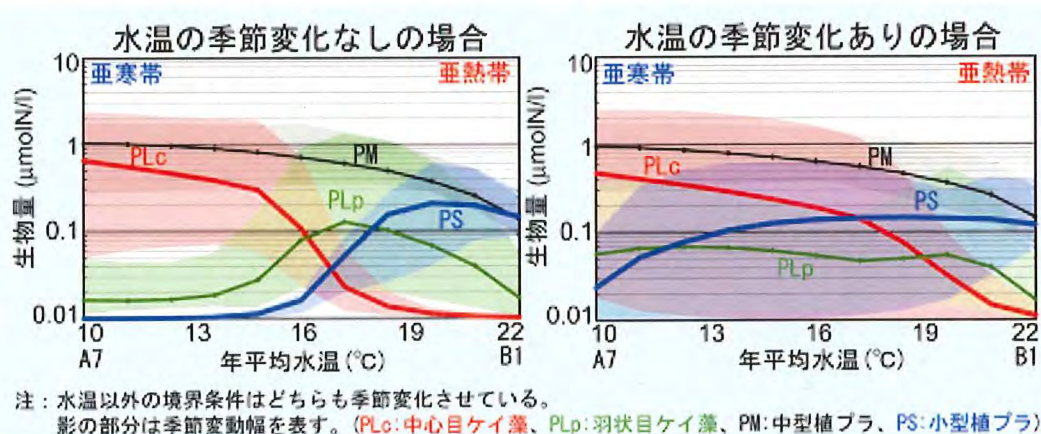


図2121-6 物理・化学的な環境要因を亜寒帯的なものから亜熱帯的なものへと変化させた場合の植物プランクトンの応答。水温の季節変化無し（左）とありの場合（右）

エ 考察

(ア) eNEMURO及び三次元eNEMUROの再現性

温暖化に伴う低次生態系の変化を再現するモデルの妥当性の評価に当たり、重要視されるのは現状の再現性である。従来の亜寒帯適応型低次生態系モデルNEMUROで亜熱帯海域の低次生態系の季節変動を再現した場合、大型植物プランクトン量が不自然に大きく算出されるなどの不都合があった。これに対し、微生物環をメインに扱う形のeNEMUROは、亜寒帯海域と亜熱帯海域で同一の生理パラメータを用いても、亜寒帯海域の春季ブルーミング時の大型珪藻

の卓越や、亜熱帯海域における小型・中型植物プランクトンの卓越などそれぞれの海域の季節変化のパターンが再現された。さらに、現場観測で得られたデータでパラメータのチューニングを行うことにより、定性的な季節変化のパターンだけでなく、栄養塩濃度と動植物プランクトンの現存量水準を良く再現できるようになった。

eNEMUROの三次元化に採用した物理モデルは、単一格子のモデルで取り扱いが簡便であり、境界壁での不自然な擾乱が発生しないなどの利点がある（小松ら, 2004）。モデル結果は植物プランクトンの分布

について、黒潮を挟んで沿岸側の高濃度域と沖合側の低濃度域、黒潮強流域並びに冷水塊内部と暖水塊周辺の高濃度域、親潮・混合域のパッチ状分布を良く再現した(図2121-5)。このことは、植物プランクトンの空間分布が中規模物理構造に規定されることを示す。eNEMUROは各植物プランクトンコンパートメント別の現存量を算出するので、物理場を適切に再現することで、中規模スケールの現象に対応した植物プランクトン組成の変化も十分再現可能であると考えられる。

(イ) 温暖化が植物プランクトン群集構造へ及ぼす影響

eNEMUROを用い、モデルへ与える物理的・化学的な境界条件を様々に変え、気候帯毎に海洋生態系がどのように棲み分けしているかについて調べ、亜寒帯と亜熱帯の間に、植物プランクトン群がはっきりとした棲み分けの境界を示さず、非常になだらかに棲み分けることがわかった(図2121-6)。これは、水温が季節的に変化することにより、例えば、亜寒帯域においても夏には亜熱帯に近い環境に、亜熱帯域においても冬には亜寒帯に近い環境になるためである。得られた結果は、温暖化によって現在の亜寒帯海域が亜熱帯的な環境に変わる時、または、亜熱帯的な環境の海域の面積が増加する時の海洋生態系の変化を予想することにつながる。さらに、水温上昇の影響の程度が海域によって異なり、とりわけ年平均水温が10℃並びに18℃付近の海域では、1～2℃の水温上昇が植物プランクトン組成に大きく影響することが数値実験の結果から示唆された。

オ 今後の課題

(ア) モデルの高度化

魚類成長モデルNEMURO.FISHを導入し、高次生態系モデルへと展開する。

(イ) 温暖化の影響予測

温暖化シナリオに基づいて粗格子の3次元生態系モデルで得られた予測値を境界条件として、温暖化に伴う日本周辺海域の海況変動を予測し、これによる餌料動物プランクトンと魚類生産への影響を予察する。

カ 要約

(ア) 温暖化がプランクトン生態系に及ぼす影響

の予測技術の開発

温暖化がプランクトン生態系に及ぼす影響を予測するモデルとして、亜寒帯・亜熱帯汎用生態系モデル(eNEMURO)を開発した。現場観測データを用いてパラメータのチューニングを行い、両海域におけるプランクトン生態系の季節変化を再現できるようになった。また、1/16°の解像度で日本周辺の物理現象を再現できる高精度物理モデルを開発し、生態系モデルの三次元化を図った。

(イ) 生態系モデルによる温暖化数値実験

eNEMUROによる数値実験で、水温等の環境条件の変化に対する植物プランクトンの応答について調べた。その結果、水温上昇に伴い、亜寒帯で優占する種類から亜熱帯に優占する種類へと、季節的に両者が共存しながら、徐々に切り替わっていくことが示された。

キ 引用文献

小松幸生、渡部朝生、広江豊、2004. 中央ブロック低次生態系予測モデルの開発. 黒潮の資源海洋研究. 中央水産研究所. 9:1-12.

Komatsu, K and T. Watanabe, 2004. Size dependent 4D structures of phyto- and zooplankton biomasses due to advective processes in the Kuroshio region. Eos. Trans. AGU, 85 (47): Fall Meeting Supplement Abstract. OS51A-1291.

Kameda, T. and J. Ishizaka, 2004. Size-fractionated primary production estimated by the two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. J. Oceanogr. 61: 663-672.

Nakata, K. and K. Hidaka, 2003. Decadal-scale variability in the Kuroshio marine ecosystem in winter. Fish. Oceanogr. 12:234-244.

研究担当者(中田 薫*, 日高清隆、小松幸生、塩本明弘、葛西広海、亀田卓彦、山中康裕、吉江直樹)

(2) 温暖化が藻場に及ぼす影響の評価と予測技術の開発

ア 研究目的

藻場は、多種多様な海洋生物が生息し、水産有用魚介類の産卵、発育、摂餌などの場として、極めて重要である。本研究では、日本を代表する特徴的な

藻場（寒流影響域におけるコンブ類の藻場、暖流影響域におけるクロメ類の藻場、内海・内湾域におけるホンダワラ類の藻場）において、物理環境から生物まで含めたモニタリング調査を実施するとともに、室内実験によって主要な対象海藻・動物の水温及び流動反応特性を把握する。これら本研究で収集された情報を活用した影響評価モデルを構築し、温暖化が我が国沿岸域の代表的な藻場に及ぼす影響の評価と予測技術を開発する。

イ 研究方法

(ア) 既存資料の解析から、水温上昇シナリオに基づいた主要海藻草類と藻食性動物等の本邦全域における分布域の変動過程を予測した。

(イ) 現地実測及び室内実験等から、藻場の変動

実態及び海藻と藻食性動物の水温・流動反応特性等を明らかにした。

(ウ) 藻場衰退予測モデルを開発し、藻場の衰退事例を解析するとともに、温暖化が藻場に及ぼす影響の評価を行った。

ウ 研究結果

(ア) 主要な海藻類10種、海草類4種、藻食性動物6種、及び造礁性サンゴ1種の現状分布における北限と南限が、気象庁の8月と2月の現状海表面水温に対する1.0℃(短期)、1.4℃(中期、気象庁シナリオによる2100年までの上昇値)、2.9℃(長期、IPCCシナリオによる2100年までの上昇値)下で、いずれも北方へシフトすることが予測された(図2122-1)。

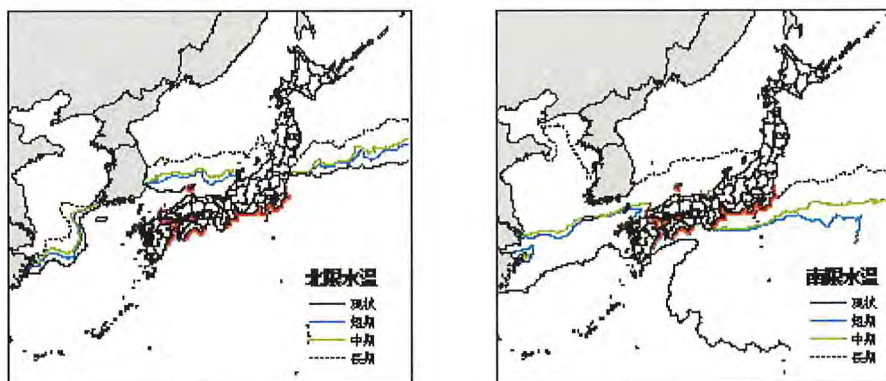


図2122-1 水温上昇に伴う海藻分布域の変動予測例（カジメ）

左：分布北限、右：分布南限

黒実線：現状、青線：短期予測、緑線：中期

点線：長期

(イ) 暖流影響域において、藻食性魚類の海藻に対する食害が秋季の深所で顕著に発生するなどの諸特徴(図2122-2)が明らかになり、高水温と魚の食

害によるクロメの衰退例が確認された。内海域ではアカモク現存量が水温上昇によって減少する傾向が定量的に示された(図2122-3)。

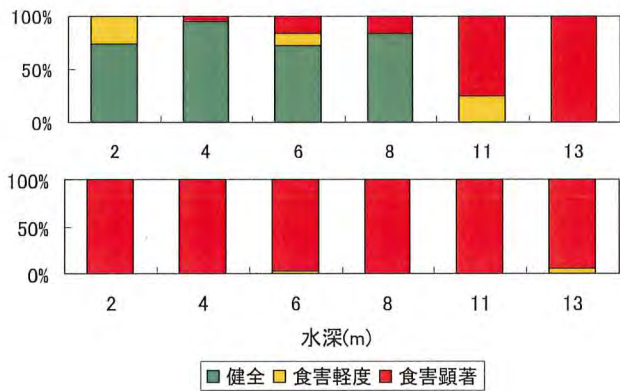


図2122-2 藻食性魚類のクロメ（1歳以上）に対する食害の水深帯・月別の発生状況（上：10月、下：12月）

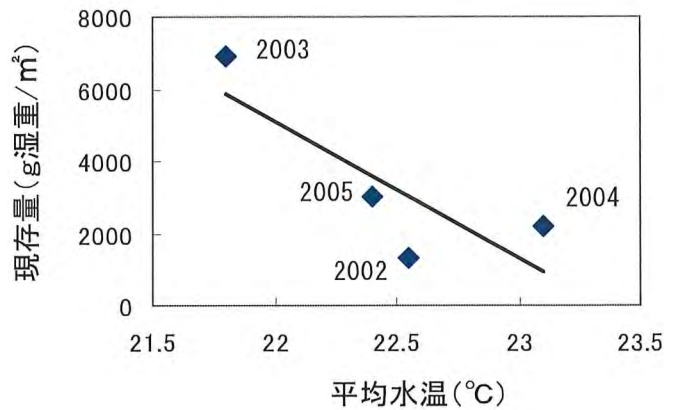


図2122-3 広島湾の伸長期（11月下～12月上）のアカモク現存量と6月～11月の平均水温との関係

(ウ) 内海域のアカモク（図2122-4）と寒流影響域のナガコンブ（図2122-5）で、光・水温－生産量関係が定量的に評価され、深所等の弱光条件下での

水温上昇に伴う生産力はより低下することが判明した。

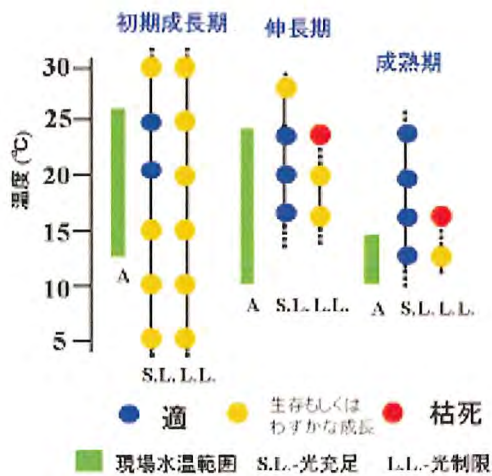


図2122-4 アカモクのステージ別の温度・光条件と成長との関係。異なる温度・光条件下での培養時の成長率に基づく。

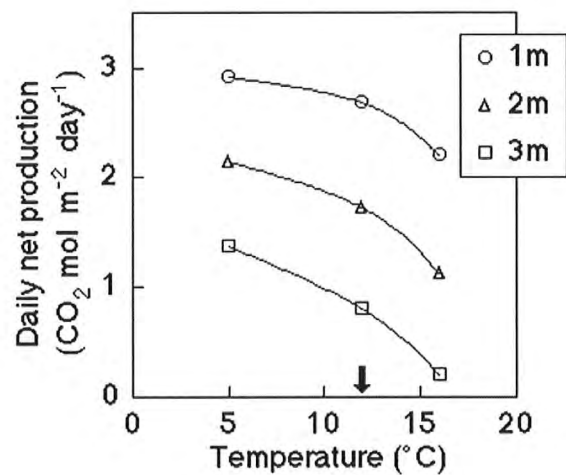


図2122-5 異なる水深（光条件）におけるナガコンブ群落の1日当たりの純正産量（推定値）と温度との関係

(エ) アイゴの大型褐藻類に対する明瞭な採食選択性（図2122-6）と水温－採食量との関係（図2122-7）

が明らかとなり、高度な温暖化影響予測には藻食性魚類の影響評価が不可欠ことが示された。

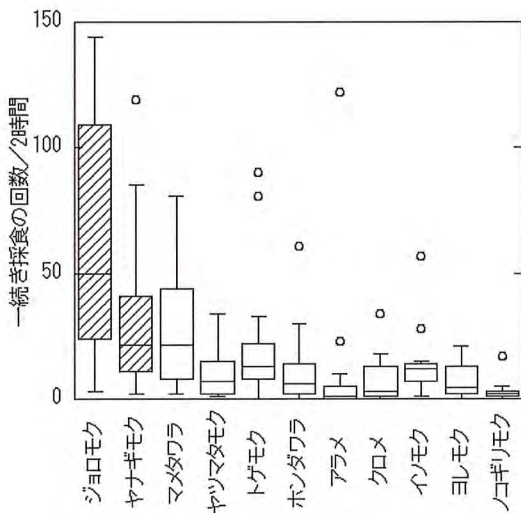


図2122-6 大型褐藻類11種に対するアイゴの採食頻度。箱の中央線は中央値、箱の上下端は四分位数、○は外れ値。ジョロモクの外れ値は図外で値は252。

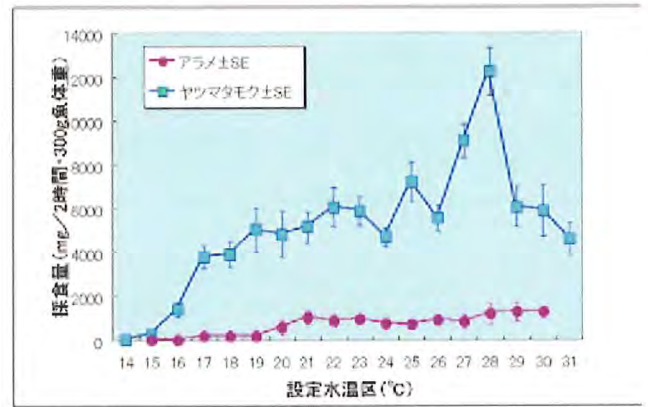


図2122-7 アイゴのアラメとヤツマタモクに対する採食量と水温との関係

(オ) 本州東北部太平洋岸等で適応可能な、水温・波浪データからウニ-アラメ分布水深帯を予測する

モデルを構築し、実用性が実証された (図2122-8)。

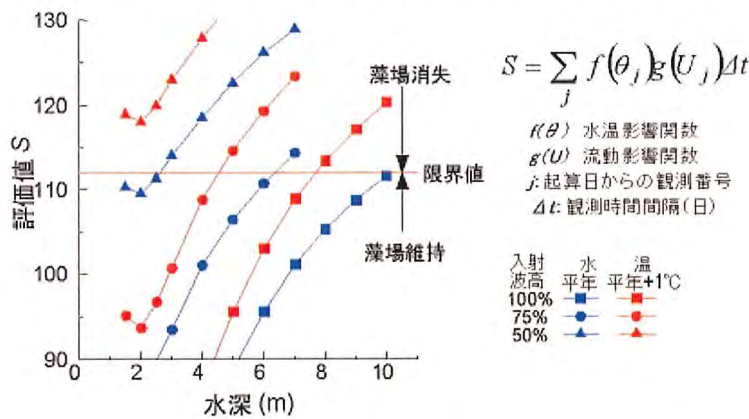


図2122-8 水温上昇に伴う藻場衰退のモデル予測例

エ 考察

(ア) 藻食性魚類の採食活動が、藻場の主要な構成種及び水温上昇によって採食量の増大することが明らかとなったことは、知見の少なかつた、これら魚類の藻場に与える影響を評価する上で貴重な知見である。個体差や季節性などの解明に向けて、今後の更なる検討が必要である。

(イ) 異なる光条件下で水温がナガコンブとアカモクの成長に及ぼす影響が解明され、温暖化の影響による藻場の消滅は、光環境の厳しい深所や海藻群落の中心などから始まることが予測された。同様の検討を様々な海藻種で行うことによって、温暖化に

入射波高は外洋域との相対値で、四角、丸、三角は、それぞれ入射波高の100、75、50%で入射すると仮定。青：鮫浦湾での1995～2004年の平均水温、赤：平年値+1.0°C、沖波：1999年11月から1年間の宮城県江ノ島沿岸毎時観測データ、潮位：同期間の宮城県女川での推算潮位。

伴う藻場の変動過程をより細かく予測することが可能であろう。

(ウ) ウニの採食によって、アラメの分布域が制限されている海域において、水温上昇の影響予測モデルが構築され、水温上昇に伴う藻場の衰退は、採食の妨げとなる流動の弱い内湾域から強い外洋域へ、または、水深の深い方から浅い方へ進行することが実証された。

(オ) 以上より、地先ごとの藻場は、数°Cの海水温上昇により、短期的には垂直分布構造の変化が生じ、長期的には主要な構成種が変化するという定性的な概略評価が得られ、ウニ優占域のアラメ場にお

いては水温と流動の累積的效果を考慮できる水温上昇の影響予測モデルが開発された。

オ 今後の課題

藻食性魚類については、その採食活動が藻場に大きな影響を与えることが明らかになったが、選択性や採食量には地先や季節、個体による差異が大きいという複雑な一面が明らかになり、より詳細な検討が必要と考えられた。さらに、多くの海藻草類と藻食性動物を対象に、光・水温・栄養塩・波浪などの外的環境要因に対する生理・生態的特性や採食行動特性を把握し、モデルに取り込むことによって、より汎用的で精度の高いモデル開発に繋がるであろう。

カ 要約

(ア) 主要な海藻・藻食動物計21種の現状分布域の北限・南限が、気象庁の現状海表面水温（夏と冬）に対する1.0℃、1.4℃（気象庁シナリオ）、2.9℃上昇（IPCCシナリオ）下で、いずれも北方へシフトすることを予測。

(イ) 暖流影響域において、高水温と魚の採食圧増加によるクロメの衰退や、暖海性海藻種の侵入が確認され、内海域ではアカモク現存量が水温上昇によって減少する傾向が定量的に示された。

(ウ) 寒流影響域のナガコンブと内海域のアカモクで光・水温-生産量関係が定量的に評価され、深所等の弱光条件下でこれらの生産力は水温上昇により低下することが判明した。

(エ) 水温上昇に伴う海藻の物質収支の変化から、深所コンブ目のモニタリングやアカモクの含有炭素量の把握が、温暖化の影響の早期発見に有効であることが示された。

(オ) アイゴの大型褐藻類に対する明瞭な採食選択性と水温-採食量との関係が明らかとなり、高度な温暖化影響予測には藻食性魚類の影響評価が不可欠なことが示された。

(カ) 本州東北部太平洋岸等で適応可能な、水温・波浪データからウニ-アラメ分布水深帯を予測するモデルを構築し、実用性が実証された。

キ 引用文献

Sakanishi, Y., Ito, H. and Iizumi, H. 2004. Photosynthetic light-response curves in cold water species of

Laminariales from the eastern Pacific coast of Hokkaido. *Jpn.J.Phycol.* 52: 33-39.

坂西芳彦・飯泉 仁 2004. 北海道根室半島沿岸の水中光量子量-コンブ目藻類の生育限界水深との関係-*藻類*, 52:141-148.

寺脇利信・吉村 拓・井関和夫 2004. 魚の食害対策について.*漁港*, 46: 16-21.

野田幹雄・北山和仁・新井章吾 2002. 響灘蓋井島の秋季と春季における成魚期のアイゴの食性.*水産工学*, 39:5-13.

野田幹雄・長谷川千恵・久野孝章 2002. 水槽内のアイゴ *Siganus fuscescens* 成魚によるアラメ *Eisenia bicyclis* の特異な採食行動.*水大校研報*, 50:151-159.

研究担当者（吉村 拓*、坂西芳彦、野田幹雄、川俣茂、吉田吾郎、桑原久実、村瀬昇、樽谷賢治、山田秀秋）

(3) 温暖化が魚類の養殖業生産に及ぼす影響の評価と予測技術の開発

ア 研究目的

近年の国内海産養殖魚の生産金額は2,136億円であり、国内沿岸漁業生産額（約5,900億円）の半分近くを占める重要な産業である（H15年度）。近年、国内養殖漁場において地球温暖化によると考えられる高水温化が観測されはじめ、今後の高水温化の影響予測や対応策の確立が望まれている。そこで、本研究では、海産養殖対象種の成長特性や繁殖特性に与える水温上昇の影響を評価し、養殖魚類の生産過程に与える地球温暖化の影響を予測するとともに高温化対策技術の検討を行った。モデル種として国内養殖生産金額が500億円以上であるマダイを選択した。

イ 研究方法

(ア) 精密水温制御下における成長と水温の関係（実験1）

水温が異なる5水槽（21.0、24.0、27.0、29.0、30.5℃、各±0.4℃以下）において、近大系マダイの稚魚を飼育密度を2kg/m³以下、1日1回の飽食給餌をととして、厳密な温度管理下において3週間飼育し、成長速度、餌料転換効率、血漿インスリン様成長因子-I（IGF-I）濃度を比較した。なお、IGF-I濃度は新規に開発した時間分解蛍光免疫測定法により測定し

た（安藤、2005；Andoh、2005）。

（イ）加温沿岸水の成長特性に与える影響評価（実験2）

現場実証型実験として、夏期（7月下旬から9月上旬）に三重県の沿岸水を加温して近大系マダイの稚魚を6週間飼育し、温暖化の成長特性に与える影響を評価した。加温段階は+0℃（原海水）、+2℃、+4℃、密度段階をそれぞれ2kg/m³（低密度区）、7kg/m³（高密度区）、1日1回の飽食給餌とした。成長速度、摂餌率、餌料転換効率、生残率、タンパク質含量、脂質含量を実験群間で比較した。設定した密度は実際の養殖現場で行われ、飼育密度の概ね上限と下限にあたる。

（ウ）高水温化によって消費される体成分の解析（実験3）

（イ）と同様に三重県沿岸水を加温して近大系マダイを無給餌で2週間飼育し、高温化による体重減少率、タンパク質含量、脂質含量の変動を実験群間で比較した。

（エ）成熟や産卵に与える水温上昇の影響（実験4）

成熟マダイを17℃（自然水温）で飼育した後、一日に1度ずつ24℃まで上昇させる群（24℃区）と、対照群（17℃区）との間で、毎日の産卵量や成熟に関係する生理的マーカー（生殖腺重量指数、生殖腺

刺激ホルモン放出ホルモンのmRNA量、生殖腺刺激ホルモン放出ホルモン受容体量、エストロゲン）を比較した。なお、各実験区にはそれぞれ2水槽を設定し、10日目と19日目に1水槽内の全数サンプリングを実施し、生理的マーカーの測定に供した。また、各水槽には十分に成熟した雄3個体と雌5個体を収容し、毎日の産卵量は各水槽から排出される卵の湿重量を測定することにより行った。

近大系マダイ：30年以上にわたり近畿大学水産実験所が選抜育種しているマダイの系統。養殖用マダイの系統として養殖業者間で最も多く使用されている。

ウ 研究結果

（ア）マダイの高温側の成長限界温度

成長速度は、水温の上昇に伴い高くなり、29℃区が最も高く、30.5℃区は最も低い成長速度を示した（図2123-1）。餌料転換効率は24℃区が最も高く、27℃以上では低下し、30.5℃区は最も低かった（図2123-2）。IGF-Iは一部の実験区間で有意差が認められたが、水温変化との関係は認められなかった（図2123-3）。特に、30.5℃区は、成長速度が最も低いにも関わらず、IGF-I濃度が24-29℃と同等の高さを示した。

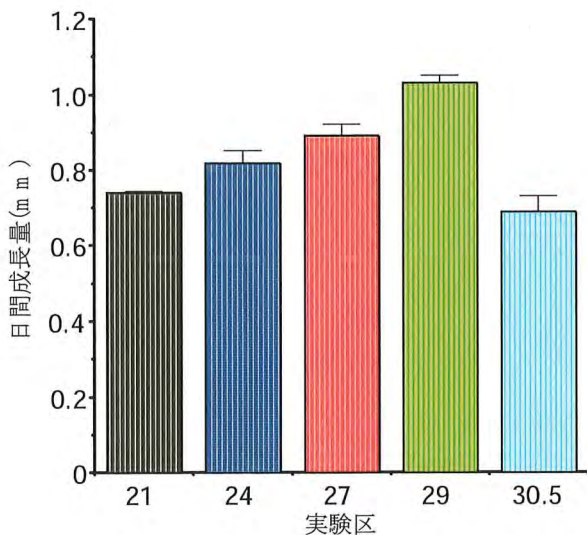


図2123-1 日間成長量と水温の関係

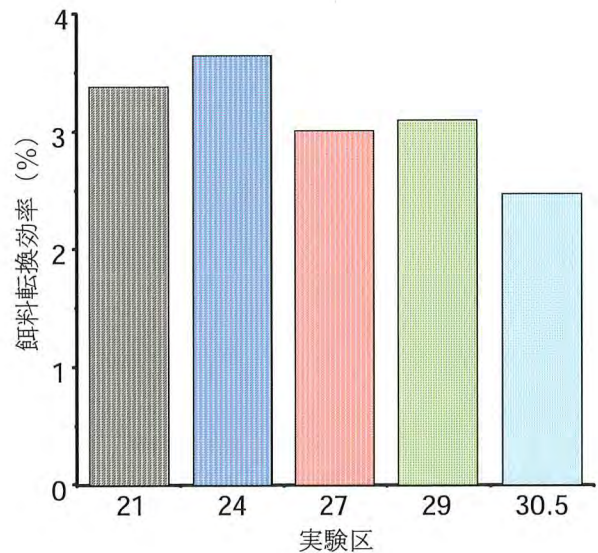


図2123-2 餌料転換効率と水温の関係

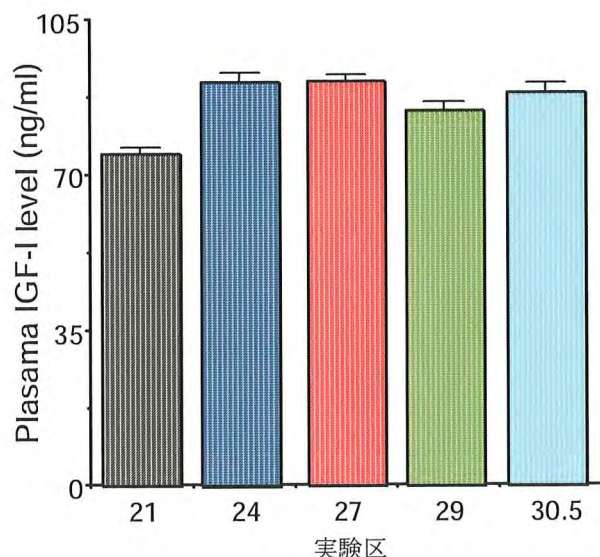


図2123-3 血漿中IGF-I濃度と水温の関係

(イ) 加温夏期沿岸水の成長特性に与える影響

原海水は馴致期間後、22~27℃の間で推移したのに対し、+2℃区は26~28℃、+4℃区は28~30℃であった。成長速度は+4℃の低及び高密度区が最も高く、原海水の低及び高密度区が最も低かった(図2123-4)。平均日間摂餌率は水温の上昇と共に上昇する傾向を示し、餌料転換効率は、逆に、低下する傾向が認められた。密度よりも温度の違いの方が成長

差に与える影響は大きかった。胴体部タンパク質含量、胴体部脂質に実験区間で有意差は認められなかった。生残率は、原海水区では100%であったが、+2℃区及び+4℃区では85~95%であり、+4℃高密度区が最も低かった(図2123-5)。+4℃の高密度区においては、個体間闘争のためと考えられる体側部のスレが多く、個体に観察された(図2123-6)。

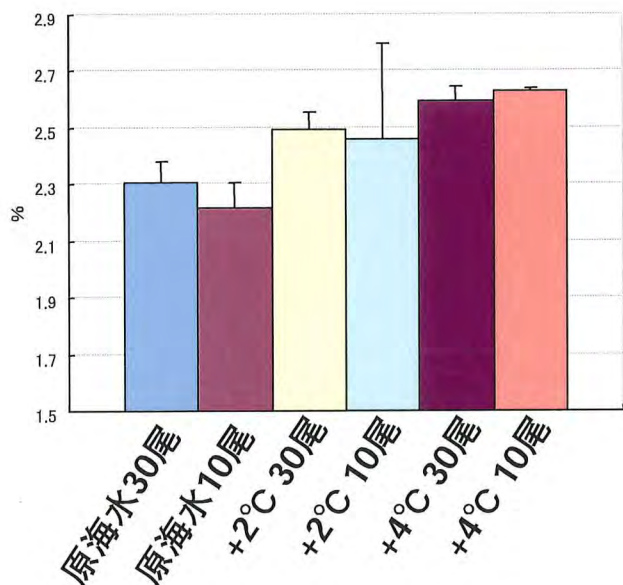


図2123-4 使用した沿岸水の加温の程度、飼育密度と日間成長率の関係

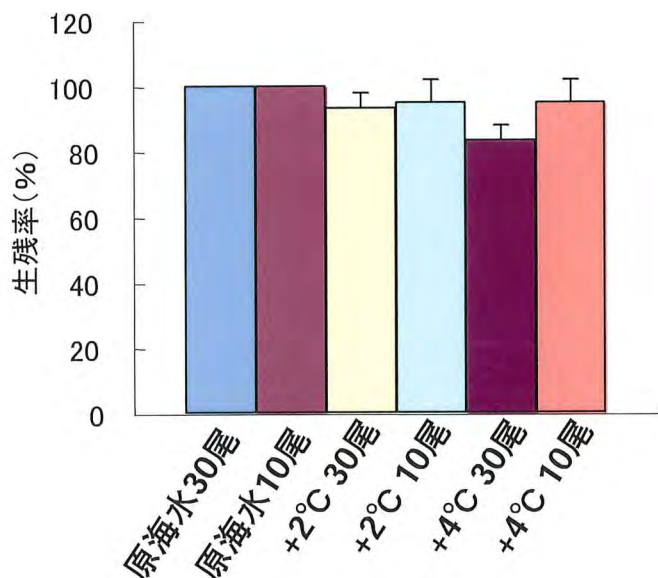


図2123-5 使用した沿岸水の加温の程度と生残率の関係



図2123-6 マダイ体側部のスレの発生状況

(ウ) 高水温化によって消費される体成分の解析
 体重減少率は高水温ほど上昇する傾向が認められ、体全体に占める脂肪の割合が高水温ほど低下することが認められた (図2123-7)。しかし、実験群間で胴体部脂質含量及び胴体部タンパク質含量に変化は認められなかった。

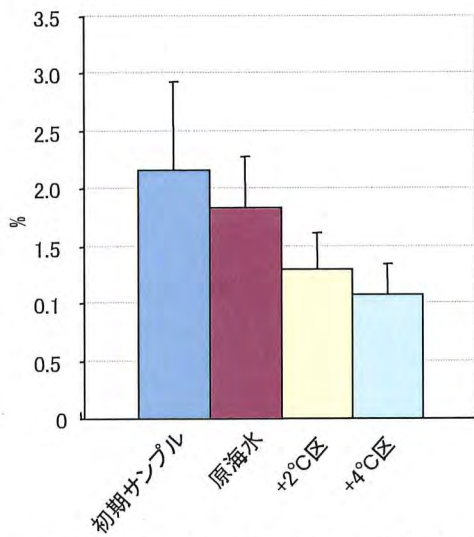


図2123-7 絶食2週間後の体脂肪率

(エ) 成熟特性及び産卵に与える水温上昇の影響
 24°C区では10日以内に生殖腺重量指数、生殖腺刺激ホルモン放出ホルモンのmRNA量、生殖腺刺激ホルモン放出ホルモン受容体量、エストロジェンのいずれもが有意に減少し、生殖腺の退縮が認められ、産卵が停止した (図2123-8)。対照区では少なくとも19日目まで産卵に良好な状態を維持した。

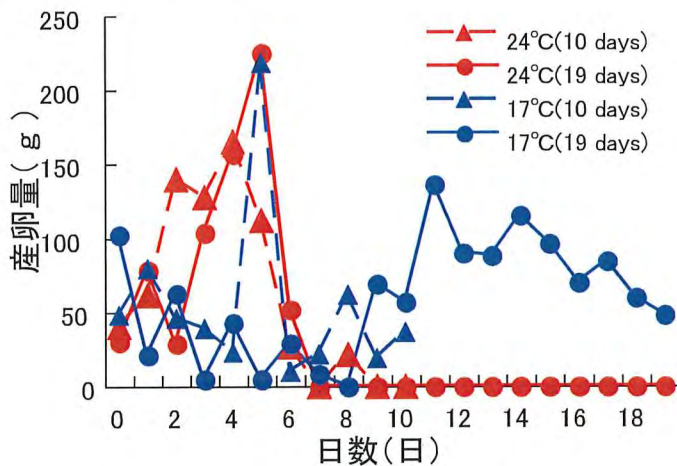


図2123-8 飼育水温と産卵量の関係

エ 考察

(ア) マダイの高温耐性

マダイの成長と温度の関係に関する報告は多くが断片的であり、厳密に温度などの飼育条件を管理した条件下での飼育実験は今回のものが初めてのものと考えられる。従って、これまで、経験や勘に基づく温度管理を行ってきたマダイ養殖において、一定の管理基準に使用されうる結果を得たことは非常に重要である。

実験1において、マダイの成長速度は水温上昇とともに、29℃まで高くなることが示された。マダイの天然の生息域の水温は15～24℃程度と一般的に言われている。そのため、24℃付近で最高成長を示すことが予想されたが、今回の実験では、この予想を5℃も上回った。このことは、マダイが高い高温耐性を有することを示している。国内において、マダイ養殖が可能な海域における夏期の最高水温は概ね28℃以下であり、29℃までは成長速度のみに関しては若干の余裕があると考えられる。特に、夏期の加温沿岸水を使用した実験2では、+4℃区が飼育密度に関わらず最も成長速度が高かったことは、一定水温に限らず、養殖現場における海水温の上昇が起こっても成長速度における悪影響は小さいことを示唆する。

(イ) 海水温上昇がマダイ養殖に与える影響

実験2において飼育水温を上昇させても、マダイの体成分に変化は認められなかった。しかし、餌料転換効率は実験1で高水温ほど低下する傾向が認められ、特に、30.5℃区は約30%低下することが示され、29℃以上の高水温は成長速度及び飼育コストの両面に負の影響を与えることが示唆された。さらに、マダイの市場価格は月毎に大きく変化するため、適切な売値が期待できる月に出荷することが重要であることから、成長速度を制御できることがマダイ養殖を成り立たせる上で必要なポイントになる。高水温化は成長速度に対して正の影響を及ぼすが、出荷時期を調節する上では、必ずしも正の効果を与えるとは言えない。

さらに、実験2において高密度、高水温ほど体側部のスレが増加し、実験中の死亡個体数が増加する傾向が認められた。マダイは排他的個体間闘争が激しい魚種として知られており、高水温化に伴う行動の活発化が、この現象を引き起こしたと考えられる。

このことは、海水温の上昇が養殖の生産効率に負の影響を与えることを示唆する。

実験4において産卵期の高水温化が産卵を停止させる現象が確認され、水温上昇が成熟にストレスを与えることがわかった。マダイの産卵は冬～春にかけての低水温期に行われる。従って、冬期の高水温化は種苗生産には負の影響を及ぼすことが予想される。

(ウ) マダイにおいて高水温化による影響を最小限にするための対策

実験3において、高温化により胴体部脂質は減少しないが、体全体の脂質割合が減少することが認められた。マダイは胴体部以外に内臓脂肪を脂肪の蓄積器官として利用しており、この脂質割合の減少は内臓脂肪の減少によるものと判断できる。このことは、高水温時のエネルギー蓄積器官として内臓脂肪が重要な役割を果たしており、マダイにおいて高水温耐性の獲得に内臓脂肪を蓄積させることが有効であることを示唆している。

種苗生産のための冬期の高水温化対策としては、マダイは一個体の雌から数十万個の卵が得られることから必要最低限の親魚数に絞った陸上水槽における冷却飼育水の使用が最も現実的であろう。

オ 今後の課題

寒海性海産魚類の養殖は、北日本の漁協や地方自治体の切実な要望からようやく近年可能になりつつあるが、現在確立されている飼育技術は海水温が上昇しないという仮定に基づいている。従って、各海域における海水温上昇の程度の将来予測とともに、寒海性魚類についても温帯性魚類と同等の温暖化による影響評価を行い、さらに、対策技術を確立することが重要である。

カ 要約

(ア) マダイの高温側の成長限界温度は29℃であることが明らかになった。この温度は現在マダイ養殖が行われている多くの海域における夏期最高水温よりも2～3℃高いため、地球温暖化による海水温の上昇は成長速度には正の影響を与えると予測される。その一方、制御しにくい成長速度の加速化は出荷時期調整を困難にするため、健全な漁家経営には負の影響を及ぼす。

(イ) 高水温耐性をマダイに獲得させる上で内臓脂肪の重要性が明らかになった。夏期高水温化の程度予測とともに、夏期前の飼育方法の改善による内臓脂肪蓄積が高水温化対策に重要である。

(ウ) 冬期の高水温化は育成に正の影響を及ぼすが、種苗生産は負の影響を及ぼすことが明らかになった。必要親魚数を調整し、冷却可能な陸上水槽における成熟誘導が種苗生産には重要である。

キ 引用文献

Andoh, T. 2005. Development of non-radioisotopic immunoassay systems for measuring flounder IGF-I. Zool. Sci. 22, 1023-1030.

安藤忠2005. 特許出願 魚類IGF-I濃度の測定法及びその方法に用いる測定キット 特願2005-78307.

研究担当者 (安藤 忠*, 奥 宏海, 奥澤 公一, 伊藤 文成, 阿保 勝之, 徳田 雅治, 坂見知子)

(4) 温暖化が魚類の漁業生産に及ぼす影響の評価と予測技術の開発

ア 研究目的

温暖化による漁場環境の変化は、餌料プランクトン組成の変化や環境ストレスをもたらし、漁業生産へ影響することが懸念される。本研究では、温暖化が漁業に及ぼす影響を評価・予測するために、小型浮魚類において、餌料選択過程モデル、温暖化に伴う資源の変動過程モデルを構築し、資源の消長過程と回遊経路変化過程の予測を目指す。一般に、浮魚類の卵・仔魚は海流によって輸送され、あるいは発育に従って回遊し、そこで、遭遇した環境の良否によって生残が決定する。本研究では、この一連の過程を追った。

イ 研究方法

(ア) マイワシ輸送・回遊モデルの開発と実験

マイワシ加入と冬季黒潮続流域・南側再循環域の海面水温変動の関係を調べるために、衛星海面高度計データと風応力データを利用した卵稚仔輸送モデルを構築し、マイワシ加入量が大きかった1987年と小さかった1988年について実験した。衛星海面高度計データと漂流ブイデータの統合データセットから、1997~2000年2月に産卵されたマイワシ卵について、

地衡流と吹送流に回遊を考慮した卵稚仔輸送・回遊モデルを構築、実験した。

(イ) 冬季黒潮続流域・南側再循環域環境とマイワシ生残

マイワシやサンマの仔稚魚の回遊経路に相当すると考えられる黒潮続流域・南側再循環域において、冬季の前線構造や混合層の観測をするとともに、同海域での冬季混合層深度とマイワシ死亡係数の関係を調べた。さらに、低次生態系モデルを用いてマイワシ仔稚魚の生残と餌料プランクトンの関係を考察した。

(ウ) 餌料・水温が浮魚類資源変動の魚種間差異に及ぼす影響

沖合域(黒潮・親潮移行域)で採集したマイワシ、カタクチイワシ、サバ属、サンマ仔稚魚の摂餌器官、消化管内容物及びそのサイズを調べた。沿岸域(土佐湾)で同時に採集したカタクチイワシ、マイワシ、ウルメイワシの消化管内容物を比較した。カタクチイワシ及びマイワシの初期生活史における成長速度と水温の関係を調べ、魚種間で比較した。太平洋岸での卵稚仔調査の長期蓄積データから産卵嗜好水温を求め、魚種間で比較した。

(エ) NEMURO.FISHモデルによるサンマ成長経年変動解析

低次生態系モデルNEMUROから拡張したサンマ成長モデルNEMURO.FISH (Ito *et al.* 2004) のパラメータを自動チューニングする方法を確立した。全球低次生態系モデルNEMUROの出力結果を用いて、NEMURO.FISHによるサンマ成長の経年変動数値実験を行い、サンマ湿重量の経年変動に影響を及ぼす海域・環境要因を特定した。

ウ 研究結果

(ア) マイワシ輸送・回遊モデルの開発と実験

海面高度計データを用いて海流場を再現して卵稚仔輸送数値実験を行った結果、1987年と1988年の2年間とも春季に黒潮続流域にマイワシが輸送されることが示された。1997~2000年における80日間の輸送回遊モデル実験からは、単純に海流に受動的に流されると仮定した場合の粒子の軌跡に対して、40日後に北上回遊すると仮定した場合の方が比較的北東沖に移送される傾向があった(図2124-1)。80日後(推定5月4日)の粒子の分布は、5~6月のトロール

調査の仔稚魚分布と良く対応していた。また、年による粒子の到着分布域の違いは、1997年、1998年は黒潮続流域に、1999年、2000年は、輸送・回遊の結

果、黒潮親潮移行域に比較的多く到達していた（図2124-2）。

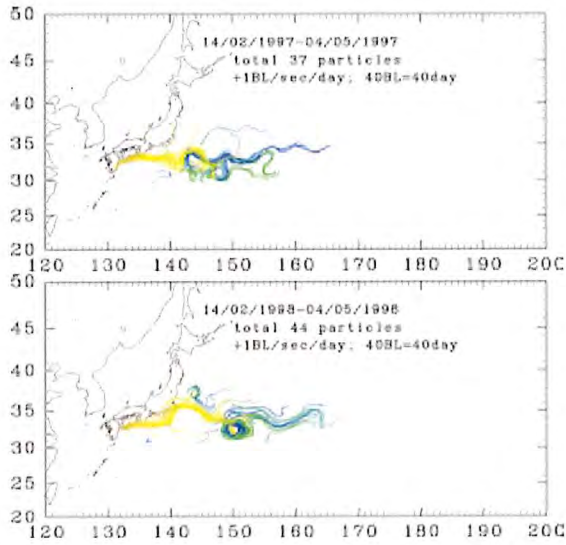


図2124-1 2月産卵場から80日間の粒子の軌跡

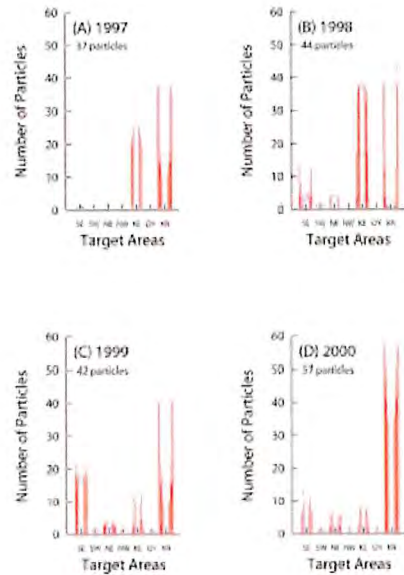


図2124-2 モデル粒子の到着海域とその数
SE: 移行域南西部 KE: 黒潮続流域

(イ) 冬季黒潮続流域・南側再循環域環境とマイワシの生残

黒潮続流域・南側再循環域の冬季混合層深度とマイワシの死亡係数との間に有意な負の相関が認められた（図2124-3）。衛星画像の解析からは、黒潮続流域における春季のクロロフィルaと最大混合層厚と正の相関が認められた。低次生態系モデルを用いて植物プランクトンの変動を推定して混合層深度との

関係を調べた結果、冬季混合層深度が臨界深度より浅くなれば、植物プランクトン発生時期が早期化することが示された（図2124-4）。冬季混合層深度が大きい年は、深層からの栄養塩供給によって、4月の植物プランクトン、5月の動物プランクトンが約3割増加しており、マイワシ生残が良好な年に一致していた。

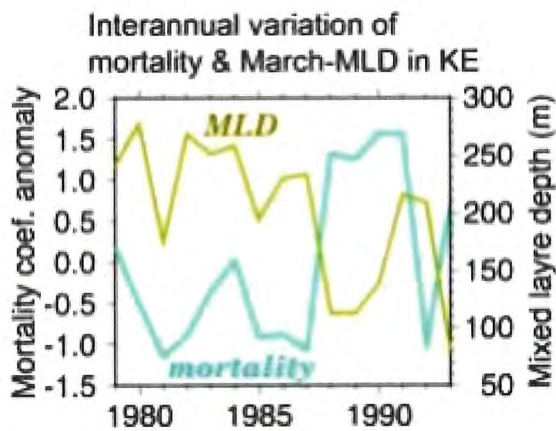


図2124-3 黒潮続流域3月混合層深度とマイワシ死亡係数

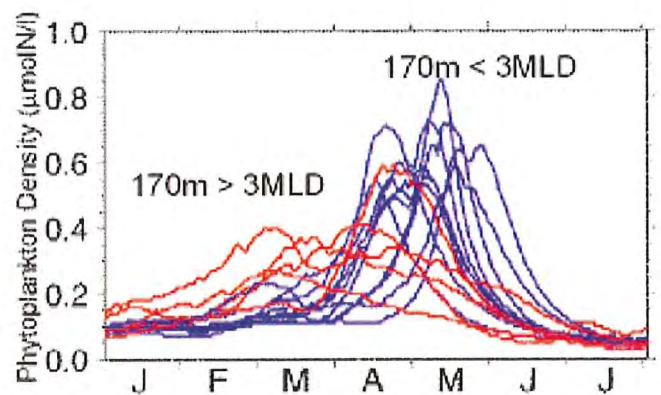


図2124-4 1～7月植物プランクトン経年変動
3MLD: 3月混合層深度

(ウ) 餌料・水温が浮魚類資源変動の魚種間差異に及ぼす影響

黒潮・親潮移行域において採集されたマイワシ、カタクチイワシ、サバ属、サンマ仔稚魚の食性の変化を整理した結果、捕食可能最大餌料サイズは咽頭径によって制限されていた。また、カタクチイワシとマイワシ仔稚魚の消化管内容物組成に顕著な差はなかった。土佐湾で同時に採集されたマイワシ、カタクチイワシ、ウルメイワシでも、消化管内容物組成には魚種間で明瞭な差は見られず、季節変動の方が大きかった(図2124-5)。カタクチイワシ仔魚とマ

イワシ仔魚の成長速度はともに水温に対してドーム型の関係を示し、成長速度最適水温はカタクチイワシ仔魚で22.0°C (Takasuka and Aoki 2006)、マイワシ仔魚で16.2°Cと推定された(図2124-6)。卵・仔魚の出現有無から産卵嗜好水温を調べた結果、高温性かつ広温性のカタクチイワシと低温性かつ狭温性のマイワシの産卵水温特性が明瞭に描出された(図2124-6)。産卵嗜好水温帯は、カタクチイワシで15~28°C、マイワシで13~20°C(16°Cに明瞭なピーク)であった。

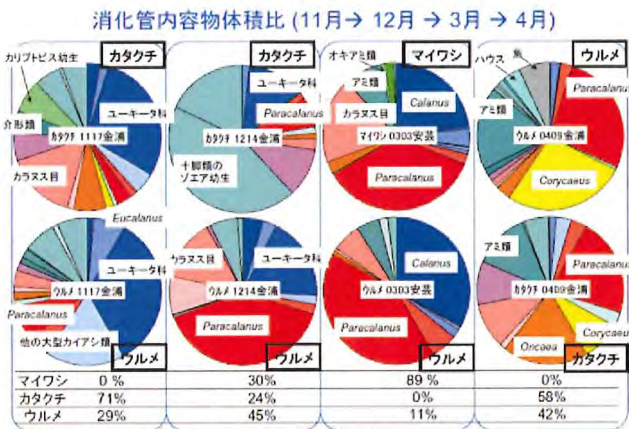


図2124-5 カタクチイワシ、マイワシ、ウルメイワシ仔稚魚の消化管内容物

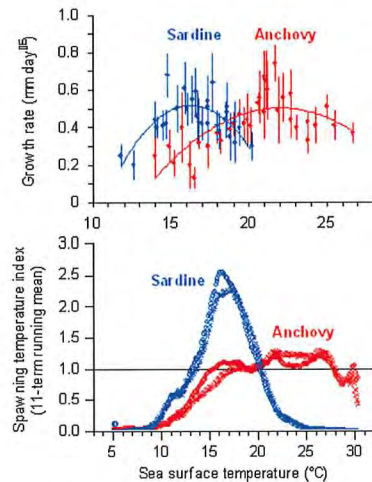


図2124-6 カタクチイワシとマイワシの初期成長速度最適水温と産卵水温様式

(エ) NEMURO.FISHモデルによるサンマ成長経年変動解析

全球低次生態系モデルNEMUROの出力結果を用いて、NEMURO.FISHによるサンマ成長の経年変動数値実験を行った結果、サンマ成長にいくつかのギャップが生じた。これらを生じさせた海域・環境要因を18のケース実験から調べた結果、表面水温では親潮

域の表面水温、動物プランクトン密度では、肉食系動物プランクトン密度、特に混合域のものが大きな影響を及ぼしていた(図2124-7)。過去50年間の実験結果では湿重量減少傾向が見られたが、これは表面水温と餌密度の影響が重なって増幅された結果として現れていた。

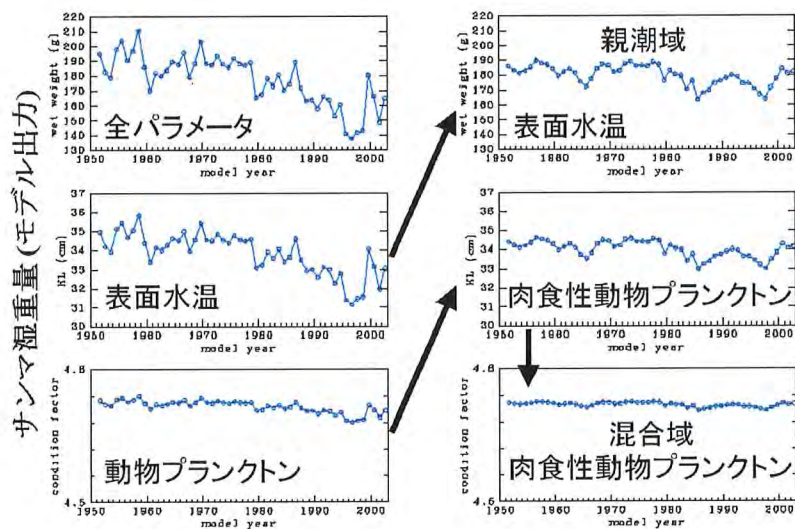


図2124-7 NEMURO.FISHモデルによるサンマ成長経年変動解析各種ケース実験

エ 考 察

(ア) マイワシ輸送・回遊モデルの開発と実験

黒潮続流域・南側再循環域は、冬季表面水温とマイワシ死亡係数間で負の相関があり、水温長期変動と資源変動の関係が示された海域である (Noto and Yasuda 2003)。卵稚仔輸送モデル実験の結果、実際に1987年及び1988年ともに、卵・仔魚は、この海域まで輸送され得ることが示された。回遊経路上の環境変化がマイワシの生残率に影響を及ぼすと考えられる。一方、1997～2000年では年によって到達海域が異なり、回遊生態や黒潮の変動の影響により、マイワシ卵稚仔の移送経路が大きく変化する可能性が示唆された。

(イ) 冬季黒潮続流域・南側再循環域環境とマイワシの生残

冬季黒潮続流域・南側再循環域における混合層深度とマイワシの生残の関係を見出すとともに、混合層深度と植物プランクトン生産時期の関係を明らかにした。冬季混合層深度が大きい場合は、春季プランクトン生産量が増大してマイワシの生残に有利であると考えられ、黒潮続流水温が低い年にマイワシの生残が良いという先行研究と整合的である。逆に、混合層深度が浅化した場合は生物生産が冬季に活発化してサンマに有利であると考えられる。

(ウ) 餌料・水温が浮魚類資源変動の魚種間差異に及ぼす影響

沿岸域でも沖合域でも小型浮魚類仔稚魚の消化管内容物には魚種間で顕著な差は見られなかったことから、浮魚類資源変動の魚種間差の要因としては、

食性の差よりも、仔稚魚と餌料生物の発生の時空間的一致・不一致の方が重要である可能性が示唆された。カタクチイワシとマイワシとの間での、初期生活史における成長速度最適水温及び産卵嗜好水温の違いは、高水温期にカタクチイワシが、低水温期にマイワシが繁栄してきた浮魚類資源変動の魚種間差異の一因であると考えられた。両魚種の産卵水温特性の関係はカリフォルニア海流域とは対照的であり、太平洋の東西で水温レジームが逆であったにもかかわらず浮魚類の資源変動が同期してきた現象に理論上の解を与えると考えられる。

(エ) NEMURO.FISHモデルによるサンマ成長経年変動解析

サンマの成長の経年変動には、親潮域の表面水温と混合域の肉食系動物プランクトン密度の影響が大きいことが示され、サンマの成長変動を引き起こす海域を特定すると同時に、海域によって影響する要因が異なることが示された。

(オ) 総合考察

本研究では、小型浮魚類の輸送・回遊経路、資源変動に影響する海域を特定するとともに、遭遇した環境がどのように仔稚魚の生残に影響を及ぼすかを明らかにした。すなわち、混合層深度、輸送経路、遭遇する餌料環境、水温といった環境要因の変動と浮魚類発生との時空間的な一致・不一致が資源変動において支配的であり、環境要因に対する応答の魚種間差異によって資源変動の魚種間差異が生じると結論できる。

オ 今後の課題

最近年蓄積・整備されつつある現場観測・衛星観測データによって、輸送・回遊モデルや海洋生態系モデルの高精度化を図り、過去に起こった現象の再現性を向上させ、定量的精度を吟味・検証する。さらに、温暖化が漁業生産量全体に及ぼす影響を議論するため、高精度な生物パラメータを得た上で、複数魚種に対応したモデルを開発する必要がある。

カ 要約

マイワシ卵稚仔の輸送・回遊モデルを構築した。回遊生態や黒潮の変動に伴って卵稚仔の輸送経路が大きく移動することがマイワシ生残の成否に影響を及ぼすことが示された。

黒潮続流域及び南側再循環域の冬季混合層深度・水温とマイワシの死亡係数間に負の相関が認められ、この海域の混合層深度・水温が資源変動の指標となることが示唆された。

マイワシ、カタクチイワシ仔稚魚の消化管内容物に明瞭な差は認められず、むしろ季節間差が大きかった。カタクチイワシとマイワシの間では仔魚期の成長速度最適水温及び産卵嗜好水温が異なっており、資源変動の魚種間差異の一因と考えられた。

NEMURO.FISHによる数値実験から、サンマ成長の経年変動には、親潮域の表面水温と混合域の肉食系

プランクトン密度が大きく影響していることが示された。

好適な物理・生物環境と浮魚類発生との時空間的な一致・不一致が資源変動に影響を及ぼし、環境に対する応答の魚種間差異が資源変動の魚種間差異を生じさせると考えられる。

キ 引用文献

Ito, S. et al. 2004. Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model. Fish. Oceanogr.13(Suppl. 1).111-124.

Noto, M. and Yasuda, I. 2003. Empirical biomass model for the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, with sea surface temperature in the Kuroshio Extension. Fish. Oceanogr.12.1-9.

Takasuka, A. and Aoki, I. 2006. Environmental determinants of growth rates for larval Japanese anchovy in different waters. Fish. Oceanogr.15:139-149.

安田一郎 2005. 気候・海洋のレジームシフトと資源変動. 海洋生命系のダイナミクス第4巻 海の生物資源. 東海大学出版会. 225-240.

研究担当者（高須賀明典*、大関芳沖、久保田洋、齊藤宏明、伊藤進一、能登正幸、安田一郎）

第3編 対策系

第1章 温室効果ガスの排出削減・吸収・固定化技術の開発

1 地球温暖化対策技術の開発

(1) 栽培管理技術及び土壌保全技術を利用した温室効果ガスの合理的排出削減技術の開発

ア 研究目的

農地は温室効果ガス（GHG）である二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）及び一酸化二窒素（N₂O）の排出源として重要であることから、既存の栽培管理技術や土壌保全技術の改善や適切な導入によりGHG発生量を削減することが求められている。そこで、田畑輪換と保全的耕耘技術の有効性について、地球温暖化ポテンシャル（GWP）を用いて温暖化影響を総合的に定量評価し、合理的な発生削減技術を開発する。

イ 研究方法

(ア) 田畑輪換がGHG発生量に及ぼす影響

農環研の温室効果ガス発生制御施設（水田圃場、灰色低地土）において、3種類の作付体系で作物栽培を行った。2002～2003年には、水稲単作（PR区）及び2種類の転換畑栽培（陸稲単作（UR区）及び大豆-小麦二毛作（SW区））を、2004～2005年には、全ての区において水稲栽培を行った。自動連続測定システムを用いて、水田及び転換畑におけるCO₂、CH₄、N₂Oフラックスを通年で測定した。

(イ) 不耕起栽培がGHG発生量に及ぼす影響

農環研の柞圃場（淡色黒ボク土）において、2001年から夏作大豆、冬作大麦の作物体系にて不耕起試験区及び慣行耕起区を設置し、試験を行った。通気式チャンバー法にて連続的にCO₂フラックス（土壌呼吸）を、閉鎖式チャンバー法にて1週間に1度CH₄及びN₂Oフラックスを、それぞれ測定した。

(ウ) 十勝の畑圃場における土壌管理法の違いがGHG発生量に及ぼす影響

北農研畑作研究部試験圃場（十勝畑圃場）において、耕起処理、堆肥施用、作物残さ処理を組み合わせ春小麦、てん菜、ばれいしょ、大豆を輪作により栽培し、収穫物の収量や残さの発生量を測定した。CH₄及びN₂Oフラックスを週1回の割合で通年測定するとともに、毎年6月上旬に採取した土壌（0-5、5-10、10-20、20-30cm）について、全炭素濃度及び容積重から土壌全炭素量を計算し、その変化量から土壌由来のCO₂発生量を算出した。

ウ 研究結果

(ア) 田畑輪換がGHG発生量に及ぼす影響

水田と転換畑からのGHGフラックスの推移を図3111-1に示す。CO₂については、作物の光合成による吸収と非栽培期間における耕起等に伴う発生量の増加が顕著であり、水田では若干の土壌への炭素の吸収が示されたのに対して、転換畑からは有意に土壌炭素が放出されていることが示された。一方、水稲単作区での水稲栽培期間中のCH₄発生と転換畑栽培区での夏期と小麦の開花～登熟期のN₂O発生が認められた。水田と転換畑におけるCH₄及びN₂O総発生量のGWP換算値は、同程度の場合が多かったが、水田において中干しが遅れた場合には、顕著に高い値となった。

転換畑から復元後の水田において、連作水田と比べてCH₄発生が顕著に抑制されることが明らかになった（図3111-2）。その割合は、連作水田に比べて、復元1年目は陸稲前歴区及び大豆-小麦前歴区で、それぞれ8%及び47%であったのに対し、復元2年目はそれぞれ87%及び23%であった。4年間のCH₄、N₂O総発生量GWP換算値は、2種類の転換畑区（UR区、SW区）とともに連作水田区（PR区）の1/2以下であった（表3111-1）。

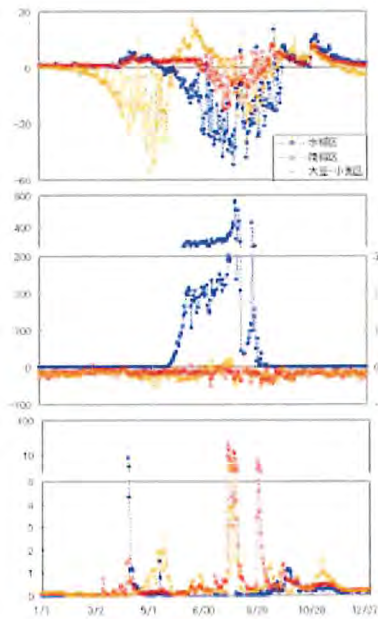


図3111-1 水田と転換畑からのCO₂、CH₄及びN₂Oフラックスの経日変化 (2003年1月～12月)

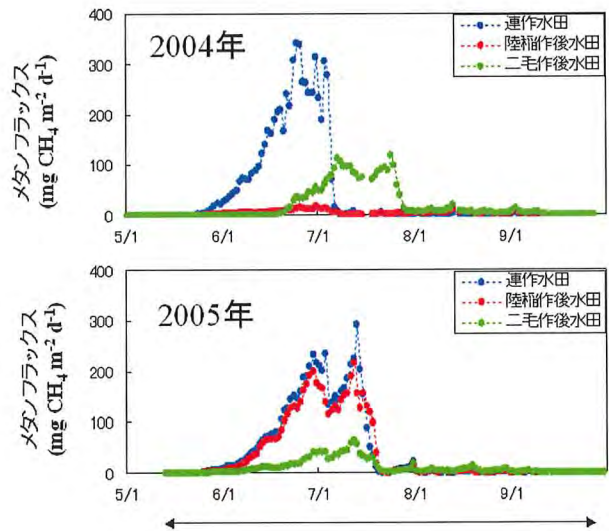


図3111-2 連絡水田及び復元田からのCH₄フラックスの経日変化

表3111-1 田畑輪換栽培試験圃場からのCH₄及びN₂O発生量

期間	PR区				UR区				SW区			
	2002	2003	2004	2005	2002	2003	2004	2005	2002.01-2003.06	2003.06-2004.06	2004.06-2004.12	2005
栽培作物	水稲	水稲	水稲	水稲	陸稲	陸稲	水稲	水稲	大豆-小麦	大豆-小麦	水稲	水稲
CH ₄ [mg CH ₄ m ⁻²]	3128	18080	6092	5893	-92	-64	510	5123	-128	-79	2863	1331
(GWP換算値) [g CO ₂ m ⁻²]	(72)	(416)	(140)	(136)	(-2)	(-1)	(12)	(118)	(-3)	(-2)	(66)	(31)
N ₂ O [mg N m ⁻²]	60	57	55	41	241	223	71	39	353	173	34	57
(GWP換算値) [g CO ₂ m ⁻²]	(28)	(26)	(26)	(19)	(112)	(104)	(33)	(18)	(164)	(81)	(16)	(26)
net GWP [g CO ₂ m ⁻²]	(100)	(442)	(166)	(155)	(110)	(102)	(45)	(136)	(161)	(79)	(81)	(57)
4年間総発生量 [g CO ₂ m ⁻²]	(863)				(393)				(378)			

PR区：連作水田区、UR区：陸稲転換畑区、SW区：大豆-小麦転換畑区

カッコ内の数値は、GWP [gCO₂m⁻²] 換算値を示す。

(イ) 不耕起栽培がGHG発生量に及ぼす影響

不耕起区及び慣行耕起区におけるGHGフラックスの推移(2004年の例)を図3111-3に示す。不耕起区と比べて、慣行耕起区ではCO₂及びN₂Oフラックスが耕起後1ヶ月程度の間、大きな値を示した。一方、CH₄吸収量は慣行耕起区の方が大きかった。4年間の観測データを集計すると、不耕起区でのCO₂フラックス(土壌呼吸量)は、慣行耕起区よりも22%低い値であり、不耕起栽培によって4年間で1800gCO₂m⁻²程度、CO₂発生量が削減できることが明らかになった

(表3111-2)。2003年についてのみ、不耕起区での土壌呼吸量は慣行耕起区と同等であり、不耕起栽培によるCO₂発生量の削減効果は見られなかった。この年は記録的冷夏で夏の休耕期間の降水量が多かったため、表層に蓄積している不耕起区の有機物が比較的分解しやすかったことが関係していると推測される。N₂O発生量は、土壌呼吸量と同様に不耕起栽培によって抑制された(約45%)。CH₄の吸収量は、不耕起栽培により約30%減少した。

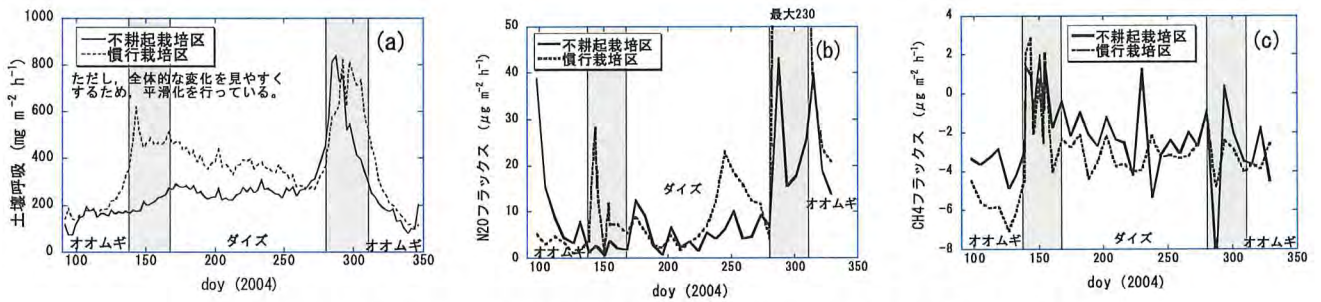


図3111-3 不耕起区及び慣行耕起区におけるGHGフラックスの推移（2004年）
 (a) CO₂、(b) N₂O、(c) CH₄

表3111-2 慣行耕起栽培区及び不耕起栽培区からのGHG発生量

	期間始	期間終	慣行耕起栽培区			不耕起栽培区		
			CO ₂ (g m ⁻²)	N ₂ O (mg m ⁻²)	CH ₄ (mg m ⁻²)	CO ₂ (g m ⁻²)	N ₂ O (mg m ⁻²)	CH ₄ (mg m ⁻²)
初年度	2002年4月	2003年3月	2700	222	-37.2	2069	145	-26.4
2年目	2003年4月	2004年3月	2346	267	-35.2	2332	157	-27.2
3年目	2004年4月	2005年3月	2585	192	-23.0	1792	76	-17.0
4年目	2005年4月	2005年10月	2453	88	-24.4	1678	45	-13.2
平均			2521	192	-29.9	1968	106	-20.9
			(57)	(-1)		(31)	(-0)	

CO₂発生量は、土壤呼吸量を示す。カッコ内の数値は、GWP [g CO₂m⁻²] 換算値を示す。

(ウ) 十勝の畑圃場における土壤管理法の違いがGHG発生量に及ぼす影響

牛ふん堆肥の施用により、作物収量及び収穫残さの乾物生産量は増加し、簡易耕起 (RT) 処理は春小麦及びばれいしょの収量を増加させた。N₂O発生量は、収穫残さの還元により増加し、牛ふん堆肥施用により、さらに、増加した (表3111-3)。起源別のN₂O発生係数については、化学肥料よりも作物残さや牛ふん堆肥において高かった。土壤全炭素の減少量は、

土壤管理法によって大きく異なり、CN区で最も大きく (4.1tCha⁻¹y⁻¹)、RM区で最も小さかった (0.7tCha⁻¹y⁻¹) (図3111-4)。CO₂換算した総温室効果ガス発生量 (土壤全炭素の減少が、全てCO₂として大気へ放出されたと仮定) のほとんどが土壤全炭素の減少による土壤由来のCO₂発生に由来していた (図3111-5)。十勝地域の一般的な土壤管理法であるCR区において総温室効果ガス発生量は13.4tCO₂ha⁻¹y⁻¹であったが、RM区はCR区のそれを79%削減できた。

表3111-3 異なる土壤管理法におけるN₂O発生量及びCH₄吸収量

土壤管理法	耕起法	化学肥料	残さ還元	牛ふん堆肥	N ₂ O発生量 (g N ₂ O-N ha ⁻¹ y ⁻¹)		CH ₄ 吸収量 (g CH ₄ ha ⁻¹ y ⁻¹)	
					2003 (てん菜)	2004 (春小麦)	2003 (てん菜)	2004 (春小麦)
F					51.5	4.8	0.56	2.14
CN	OT	○	×	×	57.3	115.8	1.09	1.76
OR	OT	○	○	×	174.7	358.6	2.46	2.46
OM	OT	○	○	○	1279.1	769.5	1.99	1.93
RN	RT	○	×	×	117.0	96.8	-0.52	0.47
RR	RT	○	○	×	206.4	207.5	0.90	0.81
RM	RT	○	○	○	504.9	573.8	0.10	1.56

F: 無施肥、無作付け

OT: 慣行耕起 (春に整地2回と収穫後に1回プラウ耕起を1回行う耕起体系)、RT: 簡易耕起 (春に整地を1回行う耕起体系)

牛ふん堆肥施用量は 20t ha⁻¹ FW y⁻¹。

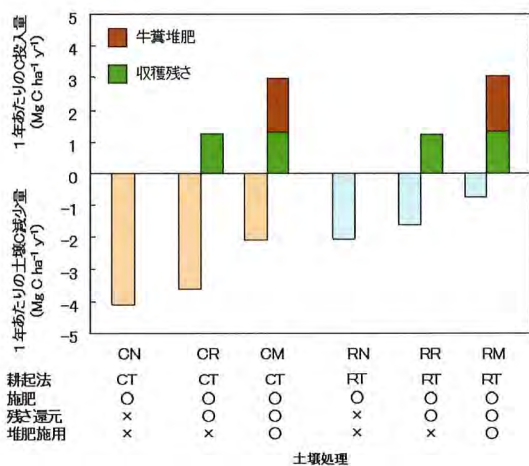


図3111-4 各土壌処理における1年当たりの土壌C減少量及び収穫残さ、牛ふん堆肥からのC投入量

4作物、2003～2005までの3年間の平均値)

CT：慣行耕起（収穫後に約25cmの深耕）

RT：簡易耕起（春の整地のみ）

エ 考察

つくばにおける田畑輪換試験（水稻連作、転換畑栽培→復元田）と不耕起栽培試験（慣行耕起栽培及び不耕起栽培）、十勝畑圃場における簡易耕起栽培試験（栽培耕起法、堆肥施用、作物残さ処理の組み合わせ）を3～4年間行った。それぞれの圃場において、CO₂、CH₄及びN₂Oフラックス及び炭素収支等を通年で測定し、データの取りまとめを行った結果、田畑輪換栽培、不耕起・簡易耕起栽培によるGHG発生量削減の可能性が定量的に評価された。

田畑輪換は、我が国の水田の約30%に適用されており（農林水産省、2003）、本研究の結果は、日本国温室効果ガス発生インベントリー等におけるデータの改訂に寄与するものである。特に、水田と転換畑におけるCH₄とN₂O発生のトレードオフや復元田におけるCH₄発生の低下を定量的に明らかにできたことは新しい知見である。しかし、転換畑における特徴的なN₂O発生や復元田におけるCH₄発生低下のメカニズムには未解明の部分が残されている。さらに、土壌炭素量の変動に伴うCO₂発生量の評価を加えることも必要である。

我が国の農耕地における一般的な土壌管理体系では、土壌全炭素量の急激な減少によるCO₂発生が最大の温室効果ガスの発生源となっていると考えられる

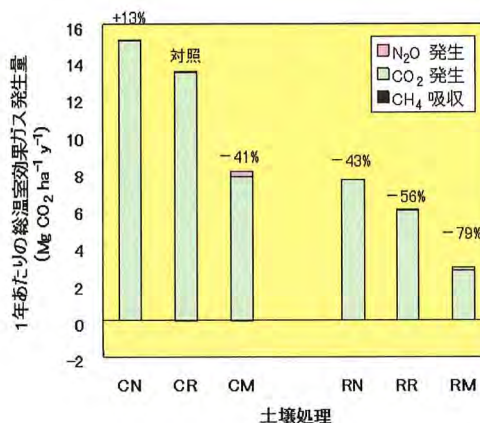


図3111-5 各土壌処理における1年当たりの総温室効果ガス発生量

CO₂：4作物、2003～2005年までの3年間の平均値

N₂O、CH₄：2003（てん菜）、2004年（春小麦）の平均値。地球温暖化係数（GWP；N₂O296倍、CH₄23倍）を用いてCO₂換算。なお、CO₂に比べて極めて発生量が小さい。

RT：簡易耕起（春の整地のみ）

（Koizumi, 2000）。その減少を抑制するための土壌管理法として、不耕起や簡易耕起などの保全型耕起法や有機肥料の施用が知られているが（Paustianら、1997）、つくば及び十勝地域の畑作土壌においても、保全的耕耘技術の有効性が確認された。特に、十勝では簡易耕起と牛ふん堆肥の施用を組み合わせた土壌管理法において、土壌からのCO₂発生量が大きく削減され、実用的な技術の有効性が確認された。十勝におけるN₂O発生の総温室効果ガス発生量に対する寄与は小さかったが、これは今回の測定で得られたN₂O排出係数（投入窒素に対するN₂O態窒素の割合）が小さいことに由来する。同じ黒ボク土壌のつくばにおいても、N₂O排出係数は小さくなる傾向にあり、黒ボク土壌を主体とする畑圃場では、N₂O発生の寄与は比較的小さいと考えられた。

オ 今後の課題

本研究で、これまでに得られた結果に加えて、(1) 転換畑、復元田、不耕起及び簡易栽培圃場等における、GHG発生メカニズムとその制御要因、(2) 農耕地における長期的な炭素動態・収支、(3) 気候や土壌環境の異なる圃場での温室効果ガスの動態等を解明するための研究を行うことにより、更に研究の発展が見込まれる。

カ 要約

温室効果ガス発生制御施設での試験では、CH₄、N₂O総発生量GWP換算値が、2年間の転換畑栽培及びそれに引き続く2年間の水稲栽培（復元田）によって1/2以下に削減されることが示された。不耕起栽培試験圃場での試験では、不耕起栽培によって4年間でCO₂発生量が1,800gCO₂m⁻²程度削減されるとともに、N₂O発生量についても、約45%削減されることが示された。簡易耕起栽培試験では、簡易耕起と堆肥施用とを組み合わせた管理体系が、総GHG発生量を削減する上で最も有効であることが示された。

キ 引用文献

Koizumi, H. 2000. Carbon cycling in croplands. In 'Structure and function in agroecosystem design and management', CRC Press LLC, p. 207-226

農林水産省2003. 統計情報部, 平成14年度耕地及び作付面積統計

Paustian, K. et al. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate greenhouse gas emissions. Soil Use Manage. 13, 230-244

研究担当者（八木一行*、西村誠一、米村正一郎、野内 勇、古賀伸久）

(2) 畜産業における温室効果ガス排出削減技術の開発

ア 研究目的

家畜のふん尿は資源であると同時に、不適切な取り扱いによっては重大な公害問題を引き起こす産業廃棄物である。日本国内における年間発生量は9,000万トンを超える膨大な量であり、国内最大の有機性廃棄物でもあり、近年、「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」によって、法規制が強化されている。

しかし、これに加え、酸性雨原因物質としてアンモニア、地球温暖化の原因物質としてメタンと一酸化二窒素が、新たに畜産系からの環境負荷として対策が求められている。

本研究では、家畜排せつ物処理からの温室効果ガス発生を抑制する手法の検討と削減技術の開発を行った。また、各処理技術の総合的な環境負荷軽減

効果を評価し、費用対効果の高い総合的環境保全技術体系の確立を目的とし、特に、処理量の多い、堆積型堆肥化処理からの温室効果ガス発生抑制について発生源単位と削減技術の効果を、大型チャンバーを用いて検証した。

イ 研究方法

(ア) 堆積型堆肥化処理からの温室効果ガス発生と制御

各処理の開始時から終了までの全期間を評価対象として、開始時の含有有機物量（VS-kg当たり）、または、含有全窒素（TN-kg当たり）で発生率を比較して削減効果を検討した。試験は大型のチャンバーを用いた測定システムを採用、主要畜種のふん尿1m³以上を標準的な処理条件に合わせて管理した。各ふん尿処理の開始時から終了時まで、10分程度のインターバルで当該ガスの発生を連続測定した（図3112-1）。

最も環境負荷ガス発生量が大いといと推定される堆積堆肥化について、1m³程度の各畜種ふん尿を用いて試験を行った。副資材の添加量を増加させることでの含水率低下や、下部からの通気（搾乳牛ふん）のもたらず温室効果ガス削減効果を検討した。また、鶏ふんについては、天日乾燥処理からの発生について検討を行った。

(イ) 搾乳牛のスラリー貯留からの温室効果ガス発生と制御

搾乳牛のスラリー貯留時の発生について、200kg（300L、円筒形容器）の牛ふんと尿を混合して作成した試料を用いて試験を行った。パーラー排水の浄化処理空の温室効果ガス発生量を検討した。

(ウ) 鶏ふん乾燥処理施設からの温室効果ガス発生と制御

鶏ふんの乾燥処理からの発生と脱臭施設からの発生について、190kg/日の採卵鶏ふん乾燥処理施設を用いて検討した。

(エ) 堆積型堆肥化処理からの温室効果ガス発生抑制手法の実規模試験による検証

大型チャンバー内で搾乳牛ふんの初期含水率低下による温室効果ガス発生削減効果を10m³規模で検証した。

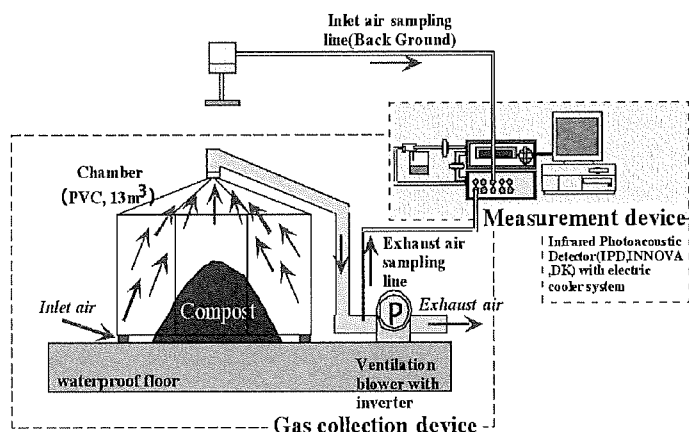


図3112-1 温室効果ガス測定システムの概要

ウ 研究結果

(ア) 堆積型堆肥化处理からの温室効果ガス発生と制御

a 堆肥化期間中の当該ガス発生速度には大きな変動が認められる。全ての畜種の堆肥化で、アンモニアとメタンは堆肥化初期に高く、一酸化二窒素では堆肥化中期（1-2ヶ月）以降に発生の極大が見られる。

b 搾乳牛のふん尿堆肥化からの発生は、アンモニア、一酸化二窒素及びメタンが、それぞれ44-91gN/kgN、6-16gN/kgN、36-40gCH₄/kgVSと算定された。比較的メタン発生が顕著であったが、過去の報告事例ほどの大きな発生がないことが確認された。初発堆積物の含水率を78%程度に調整することで、CH₄の90%、N₂Oの59%を削減できることがわかった（表3112-1）。

c 肥育牛のふん尿堆肥化からの発生は、アンモニア、一酸化二窒素及びメタンが、それぞれ11-36gN/kgN、13-16gN/kgN、0.4-2gCH₄/kgVSと算定

された。初発堆積物の含水率を57%程度に調整することで、CH₄の42%、N₂Oの26%を削減できることがわかった（表3112-1）。

d 肥育豚のふん尿堆肥化からの発生は、アンモニア、一酸化二窒素及びメタンが、それぞれ236-254gN/kgN、12-37gN/kgN、1.5-1.6gCH₄/kgVSであり、比較的一酸化二窒素発生が顕著であった。特に冬期の処理からの大きな一酸化二窒素発生が確認された。初発堆積物の含水率を60%程度に調整することで、CH₄の39%を削減できる。しかし、N₂Oについては、含水率の調整によって、発生量が増大することがわかった（表3112-1）。

e 採卵鶏のふん尿堆肥化からの発生は、アンモニア、一酸化二窒素及びメタンが、それぞれ268-366gN/kgN、0-0.7gN/kgN、1.2-1.5gCH₄/kgVSであり、一酸化二窒素発生が極めて小さいことが確認された。初発堆積物の含水率を55%程度に調整することで、CH₄の29%、N₂Oの15%を削減できることがわかった（表3112-1）。

表3112-1 主要4畜種ふんの堆積堆肥化から発生するアンモニア、メタン、及び一酸化二窒素とその抑制技術
適応による削減効果

対策技術	畜種	堆肥化方式と初発含水率	CH ₄ (g)	N ₂ O-N(g)	NH ₃ -N(g)	備考		
			投入有機物 (kg-VS)に 対する放出	投入窒素 (kg-TN)に 対する放出	投入窒素 (kg-TN)に 対する放出	条件の詳細	堆肥化時期	実施年度
麦桿増		堆積14日毎切返し/85.9%	35.86	16.30	43.60	1230kg堆積	8月~12月	2002
		堆積14日毎切返し/78.8%	3.11	tr	147.30	470kg堆積	8月~12月	2002
下部通気	搾乳牛	堆積20日毎切返し/85.0%	39.80	5.90	90.60	710kg堆積	6月~10月	2003
		堆積20日毎切返し/85.0%	24.70	6.80	160.40	710kg堆積	6月~10月	2003
麦桿増		堆積14日毎切返し/84.7%	40.30	30.80	86.90	980kg堆積	5月~9月	2004
		堆積14日毎切返し/83.1%	33.40	23.60	111.10	710kg堆積	5月~9月	2004
麦桿増		堆積14日毎切返し/81.2%	13.70	3.40	241.60	530kg堆積	5月~9月	2004
オガ増	肥育牛	堆積7日毎切返し/61.6%	2.13	15.86	35.65	300kg堆積	6月~8月	2003
		堆積7日毎切返し/57.6%	1.08	10.21	11.60	380kg堆積	6月~8月	2003
オガ増		堆積7日毎切返し/61.6%	0.38	12.96	10.85	300kg堆積	11月~1月	2003
		堆積7日毎切返し/55.9%	0.23	11.18	1.48	380kg堆積	11月~1月	2003
オガ増	肥育豚	堆積7日毎切返し/63.8%	1.55	12.30	235.78	335kg堆積	8月~10月	2002
		堆積7日毎切返し/57.8%	0.96	21.33	169.25	385kg堆積	8月~10月	2002
オガ増		堆積7日毎切返し/64.8%	1.60	37.20	254.10	327kg堆積	2月~6月	2003
		堆積7日毎切返し/60.9%	1.00	28.00	149.90	401kg堆積	2月~6月	2003
堆肥被覆		堆積7日毎切返し/64.1%	1.64	23.79	123.63	300kg堆積	9月~11月	2002
		堆積7日毎切返し(覆)/65.0%	1.55	35.01	60.38	331kg堆積	9月~11月	2002
オガ増	採卵鶏	堆積7日毎切返し/55.5%	1.54	0.70	267.92	300kg堆積	8月~10月	2002
		堆積7日毎切返し/53.6%	1.43	0.48	189.46	330kg堆積	8月~11月	2002
オガ増		堆積7日毎切返し/60.9%	1.20	tr	366.10	300kg堆積	11月~1月	2003
		堆積7日毎切返し/57.6%	0.60	0.80	399.70	330kg堆積	11月~1月	2003

(イ) 搾乳牛のスラリー貯留からの温室効果ガス発生と制御

搾乳牛スラリーの貯留からは試験規模が小さく、比較するガス濃度が検出限界に近いため追試が必要であるが、単純な貯留時の温室効果ガス発生は比較的小さいと推定される。また、稀釈による温室効果ガス発生削減効果は小さいと考えられた(表3112-2)。

(ウ) 鶏ふん乾燥処理施設からの温室効果ガス発生と制御

鶏ふん乾燥時の環境負荷ガス発生率は、アンモニア、一酸化二窒素及びメタンが、それぞれ135gN/kgN、0.34gN/kgN、0.83gCH₄/kgVSであり、鶏ふん堆積堆

肥化に比べて低かったが、排出ガスを脱臭施設で処理した場合、温室効果ガスが微増する可能性が示された(表3112-3)。

(エ) 堆積型堆肥化処理からの温室効果ガス発生抑制手法の実規模試験による検証

搾乳牛ふん(含水率約80%)の大型堆肥化試験での発生は、アンモニア、一酸化二窒素及びメタンが、それぞれ73gN/kgN、45gN/kgN、26gCH₄/kgVSであり、一酸化二窒素発生が想定より大きかった。初発堆積物の含水率を74%程度に調整することで、CH₄の73%、N₂Oの45%を削減できることがわかった。

表3112-2 搾乳牛のスラリー貯留から発生するアンモニア、メタン、及び一酸化二窒素と対象スラリー稀釈による削減効果

対策技術	畜種	初発固形分	CH ₄ (g)	N ₂ O-N(g)	NH ₃ -N(g)	備考		
			投入有機物 (kg-VS)に 対する放出	投入窒素 (kg-TN)に 対する放出	投入窒素 (kg-TN)に 対する放出	条件の詳細	貯留評価時期	実施年度
スラリー貯留	搾乳牛	TS 10.9% (VS 9.4%, TN 0.33%)	2.40	1.10	44.00	200kgを貯留	7月~11月	2003
希釈		TS 7.7% (VS 6.6%, TN 0.27%)	3.80	0.90	56.80	200kgを貯留	7月~11月	2003
希釈		TS 4.8% (VS 4.1%, TN 0.16%)	3.70	0.40	42.70	200kgを貯留	7月~11月	2003

表3112-3 鶏ふん乾燥処理施設から発生するアンモニア、メタン、及び一酸化二窒素とその脱臭施設適応による削減効果

対策技術	畜種	堆積鶏ふん含水率	CH ₄ (g)	N ₂ O-N(g)	NH ₃ -N(g)	備考		
			投入有機物 (kg-VS)に対する放出	投入窒素 (kg-TN)に対する放出	投入窒素 (kg-TN)に対する放出	条件の詳細	貯留評価時期	実施年度
乾燥処理	採卵鶏	含水率44~72%	0.83	0.34	135.30	173kg/日を乾燥	5月~8月	2004
脱臭装置		土壌脱臭槽 (184m ²)	1.78	0.73	7.40	40日間検討	5月~8月	2004

工 考 察

(ア) 家畜排せつ物は、一般に、含水率が高く、易分解性の有機物に富んでいるためメタンの放出が懸念された。特に、混合堆積物の含水率が80%を超える搾乳牛の堆肥化過程からは多量のメタン放出があると算定された (36-40gCH₄/kgVS)。しかし、初発堆積物の含水率を低下させることで大きな削減効果があることが確認された。また、含水率の低減効果は豚を除く3畜種ふんの堆肥化過程で一酸化二窒素の発生抑制にも効果が認められた。さらに、堆肥化期間中のガス発生を連続的に測定する中で、これらのガス発生が堆肥化の進行とともに大きく変動し、

日間変動なども認められることがわかった。これらの事実は、温室効果ガスのインベントリーの精微化を進める上で貴重な知見と考えられる (図3112-2)。

(イ) 本研究で行った初発堆積物の水分調整を技術適応することによって、日本の家畜排せつ物の主要な処理システムである堆積型堆肥化処理と乾燥処理から発生するCH₄の89%、N₂Oの26%を削減できる可能性があることがわかった (図3112-3)。

また、本成果によって、家畜ふん中の窒素と強熱減量から堆積型堆肥化処理を行った際の各ガス発生量 (NH₃、CH₄、N₂O) を算出できる。

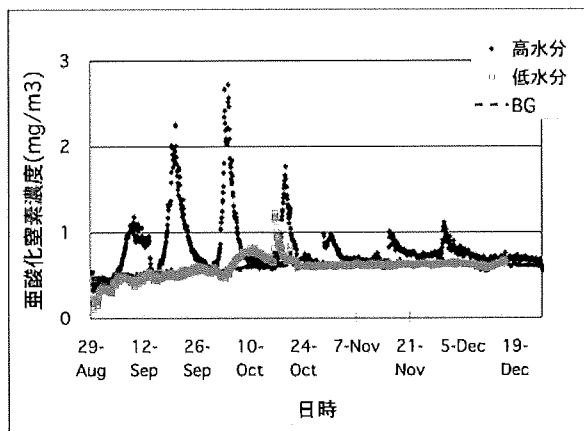
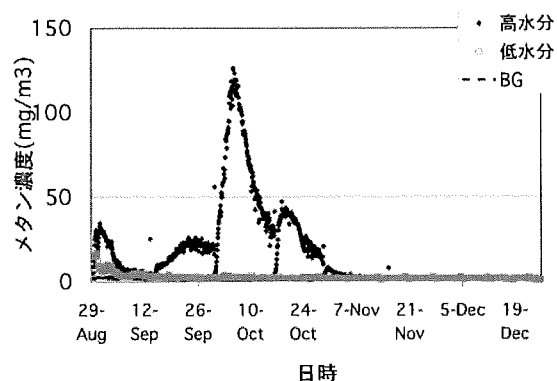


図3112-2 搾乳牛ふんの堆積堆肥化過程から発生する温室効果ガスの消長

(低水分排気の両物質濃度はBGとほぼ同じであり重なっている、表3112-1の搾乳牛ふんの含水率を麦早添加で78.8%に調整したケース)

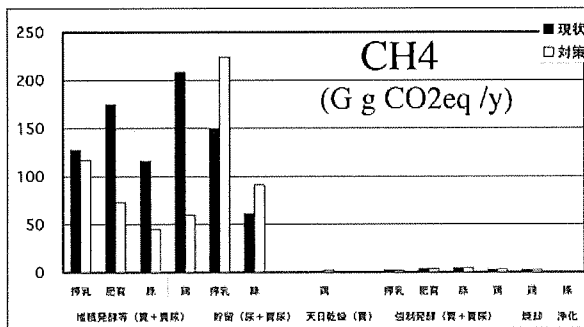
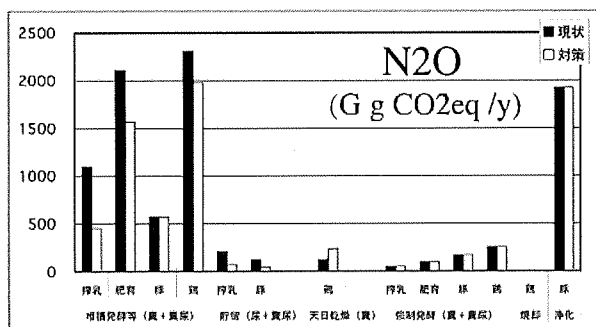


図3112-3 本研究で開発された削減技術を適応した場合の削減効果

オ 今後の課題

家畜排せつ物処理のうち、堆肥化、乾燥処理などについては、初発含水率の調整で大幅に削減できることがわかった。この削減手法の実規模での確認を行うとともに、さらに、削減効果が高いと思われる強制通気型の処理からの温室効果ガス発生量を実施設で測定する必要がある。また、一酸化二窒素発生の大きい污水处理からの発生抑制が期待される間欠曝気法を検討する必要がある。

カ 要約

家畜排せつ物処理のうち、広範に採用されている堆積型堆肥化処理からの環境負荷ガス発生を、ふん尿堆積物中の窒素及び有機物(VS、強熱減量)をベースに算出、その削減効果を評価した。アンモニア発生は肥育豚と採卵鶏から顕著(236~366gNH₃-N/kgN)であり、メタンは搾乳牛で発生が大きく(36~40gCH₄/kgVS)、一酸化二窒素は豚で高く(12~37gN₂O-N/kgN)、鶏で低い(0~0.7gN₂O-N/kgN)。堆肥化、乾燥処理などについては初発含水率の調整で大幅に削減できることがわかった、本研究の目的である温室効果ガスの削減について、初発堆積物の水分調整によって、日本の家畜排せつ物の堆肥化処理と乾燥処理で発生するCH₄の89%、N₂Oの26%を削減できる可能性があることがわかった。

キ 引用文献

財団法人畜産環境整備機構(1997)家畜ふん尿処理・利用の手引き

研究担当者(長田隆*、田村忠、白石誠、石橋誠、森和彦、福本泰之)

(3) 空気膜構造による太陽エネルギー利用ハウスの開発と栽培実証

ア 研究目的

花きや野菜の施設栽培では、冬季において、投入エネルギーの80%が暖房用である。暖房のための化石燃料使用量節減は、二酸化炭素発生削減のために、さらに、ランニングコスト低減の経営的な面からも重要な課題である。化石エネルギーに依存した現在の施設園芸を見直し、太陽エネルギー等の自然エネルギーを利用するために、ハウスの構造、太陽熱の集熱、蓄熱、放熱、環境制御、建設コストのそれぞれの技術を再構築してシステム化を図り、石油暖房を大幅に削減することを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 太陽エネルギー利用の基本構造は図3113-1に示すように、ハウスの被覆として軽量で強度的に優れた空気膜構造を用いる。その構造は3枚の透明プラスチックフィルムから構成され、上層空間は加圧空気により構造的な強度を支える役割を果たし、下層の隙間は流水によって太陽熱の集熱を行う。日中、ハウス内の温度が上昇した時に、ポンプアップした膜内の流水は暖められ、それを地下に埋設したポリエチレンチューブに送水することによって、地中に蓄熱される。夜間、ハウス内温度が低下すると、再び地中の熱を取り出して、空気膜内に流水させて暖房するものである(島地、2004)。

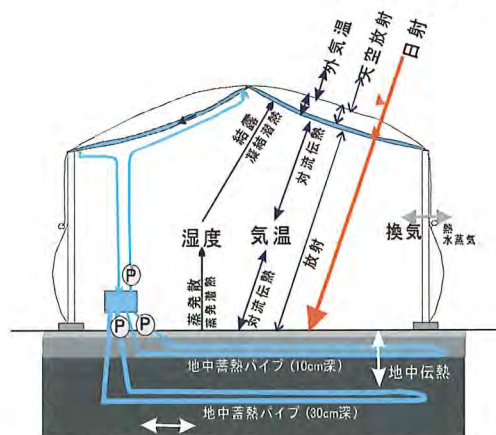


図3113-1 太陽熱利用ハウスの基本構造

屋根面の流水で太陽熱の集熱、夜間の放熱、2段の埋設パイプにより地中蓄熱。現在の蓄熱方法は、地下水槽方式としている。

(イ) 太陽エネルギーを利用する機能を有して、周年的に利用可能な栽培ハウスの基本性能、すなわち、採光性や換気性能など栽培環境を調節できると、耐風性などを配慮した設計と試作を行う。特に、建設コスト低減を考慮した設計を行う。

(ウ) 太陽熱利用のエネルギーフローの計測及びシミュレーションによる解析を行い、補助暖房の必要エネルギーの算出を行い、集熱・蓄熱・放熱等の効率化技術の開発を行う。また、太陽熱の不足分を補うヒートポンプ等の補助暖房導入方式の検討を行う。

ウ 研究結果

(ア) 空気膜ハウスの設計試作

フェンロータイプを基本に設計を行った（図3113-2）。これは、規格化が容易であるために、小規模なハウスから大規模まで対応できる。

空気膜は、流水機構を含んだ3m×2.1mのパネル化したユニットをハウスの鉄骨に直接取り付け方式として、施工費の低減を図っている。ハウスの構造体についても、張弦梁構造として、ハウスの鉄骨を減らし、そのために影が少なく（約20%減）、採光性の高いハウスとなった。空気膜構造ハウスは温度が上昇しやすいために夏季の高温対策として、大型換気窓と細霧冷房の対策を行い、夏季においても外気温程度にハウス内温度を維持でき、周年栽培のニーズに対応できる。その外観を、写真3113-1に示す。

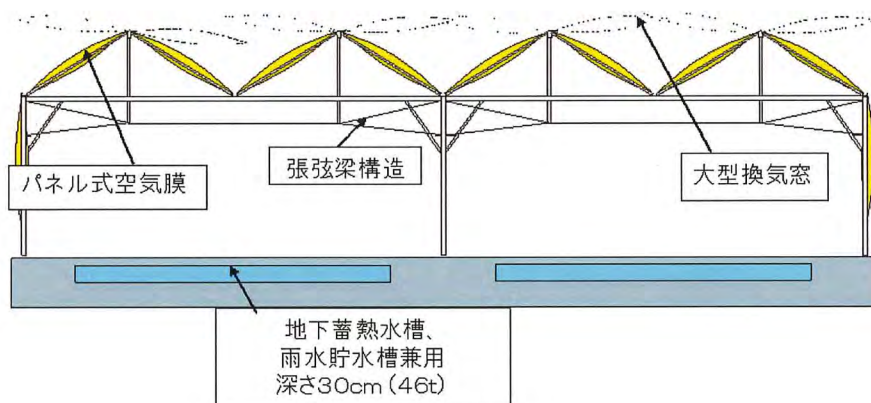


図3113-2 試作ハウスの特徴



写真3113-1 試作ハウスの外観

屋根面（天窓も含む）や側面は3×2.1mの空気膜パネルで構成。チドリに配置した大型天窓。

(イ) 太陽エネルギーの利用

本システムは、太陽エネルギーの日中の集熱と蓄熱、夜間の放熱を行う。

集熱のメカニズムは、図3113-3に示すとおりである。フィルムを透過した日射エネルギーは、植物や地中蓄熱を経由して、ハウス内の気温を上昇させる。蒸発散が多い場合は、気温の上昇は抑えられるが、湿度が上昇して、隙間換気を考慮しなければ、ハウス内空気のエンタルピーは、蒸発散に関わらず変化

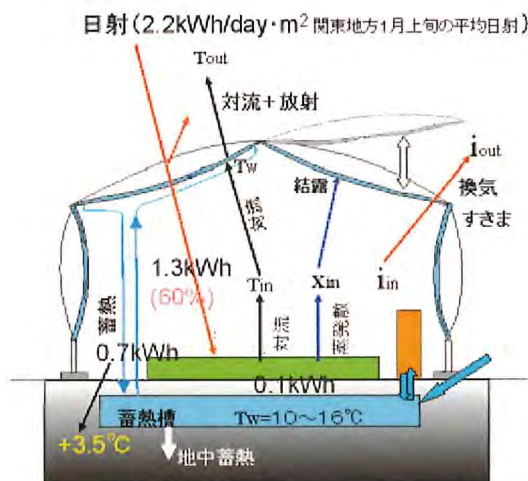


図3113-3 集熱のメカニズム

T_{in} , X_{in} , i_{in} は、それぞれ内部の温度、絶対湿度、エンタルピー。 T_{out} , i_{out} は外部。 T_w は流水温度。

蓄熱槽は、180L/m²あり、冬の晴天日では約3～4℃の温度上昇がある。地中への伝熱蓄熱を含めると、約1,000kcal/m²以上の蓄熱容量があると算定される。

ハウス内の温度変化、熱エネルギー収支の変化の計測例を図3113-4に示す。曇天日(1/16)は、日中でも放熱量が上回り蓄熱水温度は徐々に低下する。一方、晴天日(1/17、1/18)は、日中に蓄熱水温度が上昇して、蓄熱されている。膜流水の入口と出口温度の差と流量を乗じると、集熱・放熱熱量を計測することができる。

(ウ) 暖房効果

夜間の暖房については、流水温度より3～5℃低くなる。これは、ハウス表面の30%以上が流水していないために、そこからの放熱で室内温度が低下する。その分、補助暖房によって補うことになる。補助暖房を用いた時、流水温度より+2℃以内が、効率的な補助暖房の効率で、この範囲内であれば、省

しない。蒸発散がない場合は、気温の上昇に伴って、換気温度に達すると換気窓が早く開くことになる。流水温度 T_w が低い時には、室内温度との温度差が大きいことと、膜面に結露し集熱効率が高くなる。一方、膜流水の集熱は、外部への放熱を差し引いた分だけとなり、実験データからは、ハウス内に入射した太陽エネルギーの約60～70%集熱することができた。

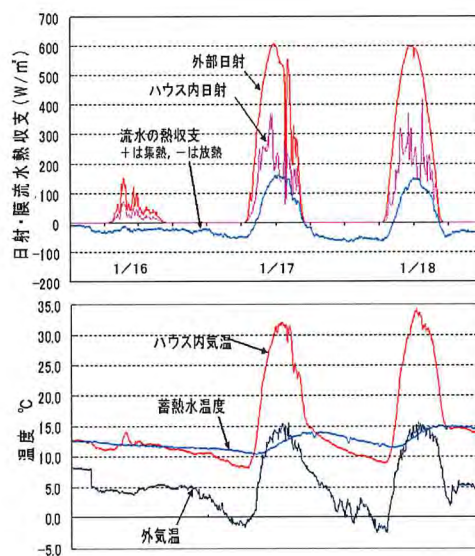


図3113-4 本システムの温度変化及び熱エネルギー収支

エネ率が70%程度を確保できる。しかし、これ以上に温度を上昇させる補助暖房は、流水に吸収される熱量が多く、流水が冷房となってしまふ。この冬の厳冬においては、夜間の蓄熱温度が獲得した熱量よりも、放熱する熱量の方が多く、徐々に蓄熱温度が低下する傾向にあった(12～8℃)。本ハウスでは、内部カーテンを有しないが、この冬のような状況、あるいは、寒冷地では、補助暖房稼働率が高く、効率を良くするためには内部カーテンは必ず必要である。

補助暖房機としてヒートポンプの実験を行った。ヒートポンプは、投入エネルギー(電力)に対して暖房効果が3～4倍(COP=成績係数)あるために、熱源があれば非常に省エネ効果は高い。蓄熱水、あるいは、地下水を熱源とした。

(エ) 寒冷地を想定したシミュレーション

実験で得られたエネルギーフローのデータから、比較的寒冷地(宇都宮)の気象データに適用して、

本システムの効率を解析した。太陽熱の収集効率は、20～35%である。

補助暖房は、流水水温以上にハウス内温度を上げると極端に暖房負荷がかかる。図3113-4では、70%程度の省エネになったものの、12℃にするためには一時的にかなりの暖房が必要である。

2005～2006年にかけての冬は予想以上の寒さで、つくば市は例年の宇都宮と同等である。宇都宮市の気象データを用いて検討を行った。ハウス内温度は集熱以上に放熱が多く蓄熱水温は7℃まで低下し、図3113-5に示すように12℃まで温度を上げるには多大な暖房エネルギーを必要とする。未実施ではあるが、内部カーテンを設置することをシミュレーションによって算定した。この結果、取得した熱量（図3113-5上）と、内部カーテン設置時の補助暖房熱量のバランスがとれ、この熱源を利用すると、ヒートポンプによる暖房が効果的に生かされることがわかった。

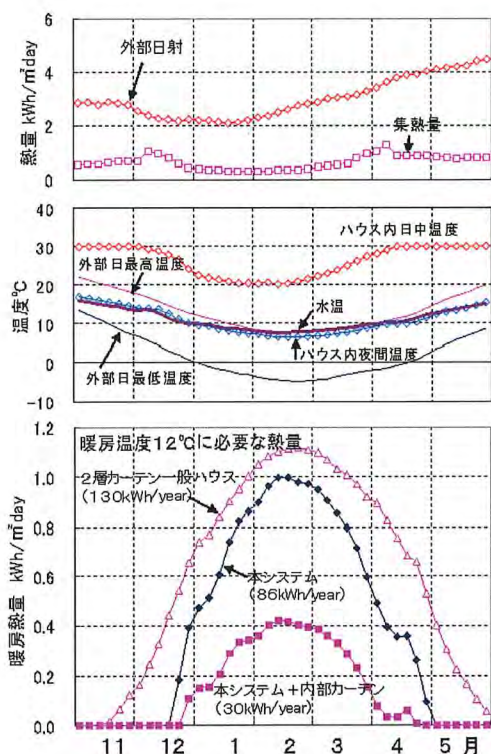


図3113-5 寒冷地を想定したシミュレーション

工 考 察

(ア) 空気膜ハウスの設計試作

空気膜構造という技術を用いて従来のハウス構造の改良を試みた。省エネルギーという本来の目的があるものの、作物栽培をするという基本的な機能を

維持、改善しないと普及技術にはならないと考えた。空気膜は複数枚のフィルムのために光透過率が減少する。しかし、フッ素フィルムという長期に渡って（15年）透明性と耐久性を維持するフィルムを使用したことと、鉄骨を減らした設計によって、日影率を減らし、採光性は確保できた。

空気膜ハウスでは、保温性が高いために日中温度が上がりやすく、本システムでは太陽熱集熱という機能を実現させている一方、夏季には温度が上昇しやすく、高温回避の対策が必要である。その対策として、写真3113-1に示すような大型換気窓を設計に取り入れた。空気膜は軽量であるために、基本パネルユニットのサイズ（3×2m）の大型化が実現可能である。ただし、大型であるために、強風による破壊が危惧されるために、風速計と連動した緊急閉機能が必須である。また、開閉による温度調節においても、従来の換気制御方法では精密な温度調節は問題があり、比例積分方式の調節方法が必要である。さらに、細霧冷房による高温抑制方法を取り入れることによって、ハウス内気温を外気温程度に制御することが可能であった。これは、大型換気窓の換気能力が大きいことが細霧冷房効果を高めていると考えられる。

普及させるための大きな課題は、低コスト化である。太陽熱利用等の複雑な機能を有しているために、そのメリットでコスト高を相殺する必要ある。ここでは、鉄骨の軽量化を考えたことと、空気膜のパネル化による施工コストの削減を配慮した。実際に商品化する時には、更に部材等の細かな検討が必要である。

(イ) 太陽エネルギー利用による省エネ

太陽エネルギーについて本システムは、集熱、蓄熱、放熱の3過程からなる。熱媒体として水を用いている。ハウスの被覆材資材と兼用している集熱部は、可能な限りハウス全面を覆うことが理想であったが、全体の70%であった。これによる、太陽エネルギーの集熱効率は20～35%である。外気温が低いと集熱効率が低下し、また、膜流水の温度が低くいと、効率は上昇する。

地下蓄熱槽を用いた蓄熱方式を行った。蓄熱槽の容量及び、地中伝熱蓄熱に関してはデータ解析を行っているが、おおよそ2～3日程度の蓄熱容量と見込まれる。

膜流水によって暖房を行うのが基本であるが、東海・南関東の比較的暖地では、暖房温度を12℃に維持するために、おおよそ70%の省エネが可能であるが、北関東やその以北では、蓄熱水が7℃まで低下し、省エネを70%に維持して補助暖房を行うと、ハウス内気温が、7～8℃にしかならない。補助暖房を行うことを前提とするならば、内部カーテンが必要で、図3113-5に示すように80%程度の省エネが可能になると見込まれる。

補助暖房としてヒートポンプを用いると、さらに、省エネ効果があり、投入エネルギー削減と二酸化炭素排出量は20%以下になると算定された。

オ 今後の課題

(ア) 普及可能なハウスの開発

ハウスの普及を行うためには、機能に見合ったコストパフォーマンスが得られることで、低コスト化が必要であり、メーカーとの連携による商品化開発を行う必要がある。

(イ) 太陽エネルギーの効率的利用

太陽エネルギーを有効利用するとともに、作物栽培の安定生産のために、省エネ的な環境調節技術の併用が必要である。石油が高値安定している今日、ヒートポンプ等の省エネ技術、また、地下水が利用できる地域では、自然エネルギー利用も大きな課題である。

カ 要約

空気膜構造による省エネハウスを開発した。花きや野菜を生産するための基本性能である、採光性、保温性、換気性能の高い周年栽培可能なハウスを新たに設計試作した。太陽エネルギーの収集効率は20～35%で、これを蓄熱して暖房に利用するが、地域気象条件や暖房温度にもよるが50～80%の石油削減になる。また、計測データをもとにシミュレーションした結果、このシステムにヒートポンプや内部カーテンを設置することにより80%以上の投入エネルギー削減効果があることを示した。

キ 引用文献

島地英夫ら 2004. 屋根用空気膜 特許第3534861号

研究担当者（島地英夫*）

(4) 二酸化炭素吸収能向上のための森林施業システムの開発

ア 研究目的

最近の人工林施業は変貌しつつあり、森林・林業基本計画（平成13年）では、皆伐・新植といった画一的な施業から長伐期化、育成複層林への誘導、さらに、高性能林業機械の導入や林道網の整備が推進されている。また、間伐が推進される一方で、価格の低迷から間伐木の林内放置が増加している状況である。そのため、長伐期林や複層林の炭素固定能、林内放置された間伐木の炭素貯留能、伐出システム、路網開設によるCO₂放出量を評価し、CO₂収支向上のための森林施業システムを開発することを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 多様な育林システムの炭素固定能の評価

a 長伐期林（高齢林）の炭素固定能の評価

近年、高齢人工林の材積が従来の収穫表を上回る例（大住ら，2000など）が報告されており、これを個体の成長から確認するため、長伐期林8林分で標本木の樹幹解析を行った。調査林分は、奈良県川上村民有林の林齢101～223年生の8林分（間伐林分）で、間伐木から樹幹解析のサンプルを採取した。また、高齢林の樹高調査、樹幹解析をもとに、最近修正された長野県民有林の地位別樹高曲線（古川，2002）を用いて、一般的な密度管理における100年伐期の地上部の炭素固定量を推定し、従来の地位別樹高曲線を用いた場合と比較した。幹材積から炭素量の推定は、福田ら（2000）の方法を用いた。

b 複層林の炭素固定能の評価

複層林施業では、下木の成長が著しく抑制されることが問題になることから、下木の成長に適した上木の伐採方法を検討した。茨城県高萩のヒノキ二段林誘導試験地（1913年植栽、80～81年冬誘導伐、A区：群状伐採区、B区：上層木点状伐採区、C区：下層間伐区）において、上木の伐採方法と下木の2004年現在の光環境、並びに、成長量の調査を行った。この調査から下木の光環境（散光透過率）と樹高成長、材積成長の関係を求めるとともに、任意の上木の配置に対応した林内光環境のシミュレーションモデル

を開発し、上木を点状伐採と群状伐採した場合の下木の成長（炭素固定量）をシミュレートした。

(イ) 間伐放置材の炭素貯留機能の評価

a 間伐放置材の分解速度の評価と環境要因の解明

雨量の異なる四国8地域（太平洋側と瀬戸内側）のスギ、ヒノキ林で材・葉の分解試験を行った。葉はリターバックを設置し、半年置きに回収して重量を測定した。材は直径5-15cm、長さ50cmの幹サンプルを林内に設置して、毎年、それぞれの試験地から10個のサンプルを回収して容積重を求めた。さらに、四国のヒノキ林3地域で間伐率を変えて、材の分解試験を行った。サンプリングの方法は8地域の試験と同じである。

b 密度管理と間伐放置木の炭素貯留能の評価

林内に放置された間伐木の炭素貯留量を、異なる密度管理を想定して比較した。スギ間伐材の分解速度は、重量半減期で10.1年（中村ら、1990）と12.1年（稲垣ら、2002）の報告があり、ここでは、両者の平均を取り半減期11年とし、伐採t年後の重量残存率（y）の関係を $y = \exp(-0.063 \cdot t)$ として算出した。収穫予測には、北関東・東山地方スギ林分密度管理図（林野庁、1999）と北関東・阿武隈地方スギ林分収穫表（林野庁・林業試験場、1959）地位2等の樹高曲線を用いた。密度管理は収量比数 R_y が0.7を越えた時に、 R_y 0.6まで間伐する場合（中庸仕立て）と R_y 0.55まで間伐する場合（疎仕立て）の2通りを想定し、40年と80年伐期について主林木と間伐放置木の炭素量を算出した。1回目の間伐は100%放置とし、2回目以降は20%放置（80%利用）と100%放置（0%利用）の2通りとした。炭素量の推定は福田ら（2000）の方法を用いたが、地下部の推定は行わずに、主林木については幹+枝葉の炭素量、間伐木については幹の炭素量のみを推定した。

(ウ) 生産過程におけるCO₂放出量の評価

a 伐出系作業システムのCO₂放出量の比較

我が国に急速に普及しつつある高性能林業機械6種125事例を対象に、事業地における機械運転時間と燃料補給量のデータから時間当たり燃料消費量を求めた。そして、代表的な6タイプの伐出システムを対象に、伐木、集材、造材、桧積の各工程における機械の燃料消費量（ℓ/時）から、建設機械における

燃料消費量とCO₂排出量の関係式を用いて、各システムの時間当たりCO₂排出量を算定した。また、集材距離を変数にしたシステム生産性（m³/時）から、単位材積生産当たりのCO₂排出量を求めた。

b 林道開設に伴うCO₂放出量の評価

路網の開設に伴うCO₂排出量を、設計書と実測により求めた。直接排出源として建設機械の燃料消費、また、間接的な排出源として、擁壁など製品の製造過程、建設機械の減価償却分を考慮した。実際は建設機械の製造過程で排出されるものだが、機械損料分の排出量を当該工事に伴うものとした。環境負荷原単位データには、物質・材料研究機構HPの「予備的LCAのための4000品目の環境負荷」を用いた。

ウ 研究結果

(ア) 多様な育林システムの炭素固定能の評価

a 長伐期林の炭素固定能の評価

スギ高齢林8林分の伐倒調査の結果、101~228年生の林分でも8-11cm/年の樹高成長があることが明らかになった。また、樹幹解析の結果、高齢林分でも大きい個体ほど直径成長量が大きい傾向があり、樹齢が200年に達し胸高直径が1m以上になっても年間数mmの肥大成長が確認された。一方、長野県民有林ヒノキの修正前後の地位別樹高曲線の中位（中心線）を用い、一般的な密度管理で炭素固定速度を比較した結果、50年間の平均では修正前2.54Ct/ha/yr > 修正後2.31Ct/ha/yrであるが、100年間では修正後1.31Ct/ha/yr < 修正前1.54Ct/ha/yrと逆転することが明らかになった（図3114-1）。

b 複層林の炭素固定能の評価

年15-20cm以上の樹高成長を行っている下木の散光透過率は20~30%以上であり、10%以下では枯死する個体が見られた。下木の樹幹解析から、群状伐採区では顕著な成長量の増加、上層木点状伐採区では伐採に伴う成長の好転が確認された。これに対して、下層間伐区では間伐後の成長増加が、ほとんど認められなかった。これらの結果をもとに、上木の伐採法を変え、下木の光環境と樹高成長をシミュレートした結果、点状伐採ではかなり強度な伐採を行っても光環境の悪化が早く、下木の導入には樹高幅以上の群状や列状伐採が適している結果となった（図3114-2）。

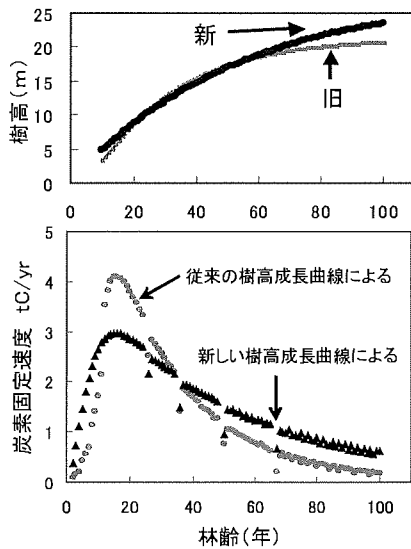


図3114-1 長野県ヒノキ人工林の地位中における新旧の樹高成長曲線(古川 2002)と炭素固定速度の比較

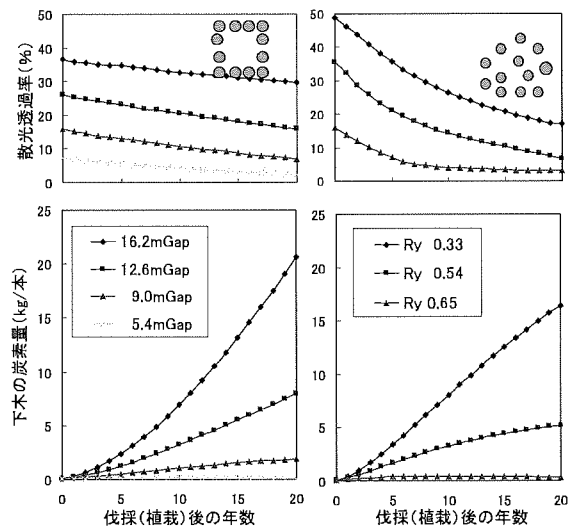


図3114-2 ヒノキ複層林における上木の伐採方法と下木の成長(炭素固定量)のシミュレーション結果

(イ) 間伐放置材の炭素貯留機能の評価

a 間伐放置材の分解速度の評価と環境要因の解明

スギ、ヒノキ間伐材の林内放置試験による2-4年間の葉、幹の重量残存率は、両者ともに太平洋側(年降水量2710~4030mm)と瀬戸内側(1350-1736mm)で差は見い出されなかった。また、3地域のヒノキ林において、間伐率(0~75%)を変えた林分間においても、4年間の幹の重量残存率に差は見られていない。

b 密度管理と間伐放置材の炭素貯留能の評価

スギ人工林で、利用間伐を推進した場合(間伐木の20%を放置)と切り捨て間伐を推進した場合(間伐木100%を放置)の林内の間伐放置木の平均炭素蓄

積量は、40年伐期で1.9(20%放置)~4.4(100%放置)Mg/ha/年、80年伐期で2.3(20%放置)~7.9(100%放置)Mg/ha/年と見積もられた。林分の平均炭素固定速度(炭素蓄積量/伐期年)を見ると、40年までは、この期間に間伐木が増加するため、間伐放置木が固定量にプラスに寄与し、特に、密度管理を中庸仕立てとし間伐回数を多くした方が(例えば、収量比数Ry0.7→0.6で管理)、放置木が連続的に増加するため固定量は大きくなった(図3114-3)。一方、41年生以降(80年伐期)では、累積した間伐放置木の分解が進行し分解量が供給量を上回るため、間伐放置木による炭素固定はマイナスに転じることが明らかになった。

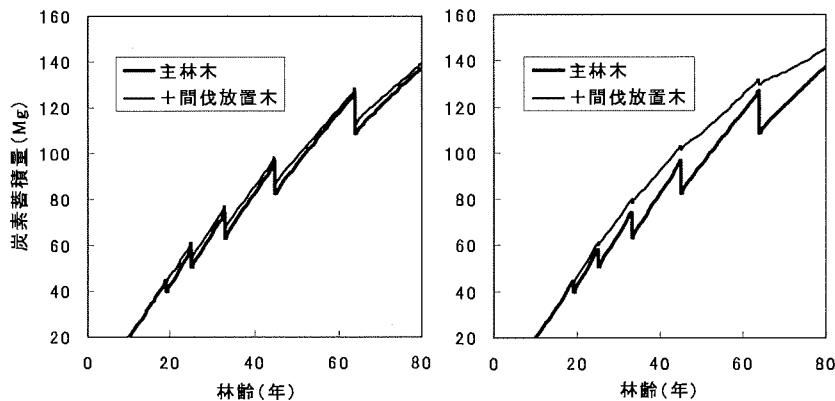


図3114-3 スギ人工林において間伐材を搬出した場合と林内放置した場合の炭素蓄積量の比較
収量比数0.7~0.6になるように間伐を実施した場合を示す。左:間伐1回目は間伐材を100%
放置、2回目以降は80%を搬出した場合、右:すべての間伐において間伐材を100%放置し
た場合。

(ウ) 生産過程におけるCO₂放出量の評価

a 伐出系作業システムのCO₂放出量の比較

高性能林業機械の燃料消費量は、機械の種類や出力によって大きく異なり、時間・機械出力当たり燃料消費量は、ハーベスタ>フェラーバンチャ>スキッド>プロセッサ>タワーヤード>フォワーダであった。システム別に比較した場合、小馬力で工程数やシステムの機械台数が少ない、ハーベスタ+フォワーダ+グラップルローダ (No5) やチェーンソー+林内作業車+小型グラップルローダ (No6) が燃料消費、CO₂排出量が少ない結果が得られた。単位材積生産当たりのCO₂排出量は、集材距離の増加に比例して直線的な増大傾向があった。また、各システムの生産性との関係をみた場合、生産性の増加に伴い累乗的な減少傾向が示された (図3114-4)。

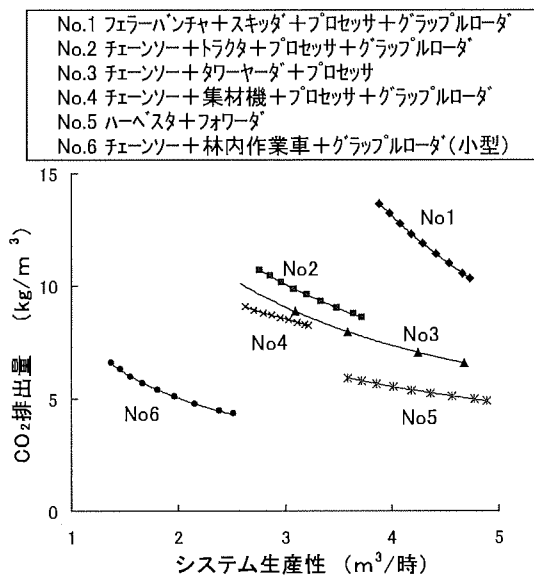


図3114-4 伐出システム別の生産性とCO₂排出量の関係

エ 考察

(ア) 多様な育林システムの炭素固定能の評価

a 長伐期林の炭素固定能の評価

高齢林の林分材積が従来の収穫表の予測を上回ることは、消極的な間伐の結果など本数密度が高めに推移することによっても、あり得ることである。しかし、高齢林の樹高成長が従来の予測を上回っていることは、長伐期化した場合の成長量の予測、すなわち、炭素固定量の予測を見直す必要があることを示している。一般的な収穫予測に用いられている林分成長モデルは樹高成長を基礎にしているため、同

b 林道開設に伴うCO₂放出量の評価

林道開設による排出量の内訳を見ると、間接排出量が92%を占め、中でも製品の製造過程で排出される量が全体の85%と特に多いことが明らかとなった。機械の燃料消費による直接排出量は開設コストが高くなるほど排出量も多くなっており、1級林道では作業道の約5.6倍の216.8kg/mの排出量となっていた。また、作業道では直接排出量は43%となり、林道と比較して間接排出の占める割合が小さいことが明らかとなった。開設延長21,655mの広域基幹林道の事例では、開設工事に伴い合計5,507tのCO₂排出と試算され、排出量が多い工種は、簡易鋼製土留壁が用いられている法面保護・土羽工と、コンクリートブロック及び現場打ちコンクリートが用いられている擁壁工であった (図3114-5)。

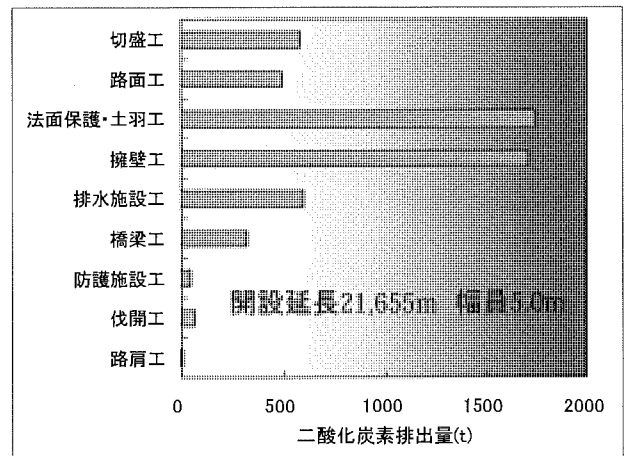


図3114-5 ある広域基幹林道の開設によるCO₂排出量の試算

一の密度管理を行っても樹高成長によって、林分材積成長量や、それをもとにした炭素固定速度は変わってくるからである。そのため、現在、各地方で地位指数曲線や地位別の樹高曲線が見直され、収穫表も修正され始めている。京都議定書では、2008年から5カ年(第一約束期間)の森林の二酸化炭素吸収量を報告することを義務付けているが、我が国の場合、その算定に森林統計情報を用いることが最も現実的である。現在の森林統計情報は収穫表が基礎になっているので、新しい収穫表の早急な普及が望まれる。

b 複層林の炭素固定能の評価

従来、上木の点状伐採による複層林の造成が一般的であったが、本研究の結果から、複層林の下木の導入には樹高幅以上の群状や列状伐採が適していることが明らかである（図3114-2）。頻繁な伐採により集約的な光環境管理が行なわれるならば、点状伐採による複層林の造成も可能であるが、林業経営的に極めて困難であろう。林野庁では平成13年度より「長期育成循環施業の導入事業」を推進しているが、この事業においては樹高幅の2倍程度までを上木伐採の限度として認めており、これを活用した複層林化が望ましいと考えられる。

(イ) 間伐放置材の炭素貯留量の評価

a 間伐放置材の分解速度の評価と環境要因の解明

スギ、ヒノキの幹材の分解速度に関するこれまでの報告と、本研究で四国各地で行った4年間の間伐材の分解試験の結果から重量半減期の範囲を求めると、スギ10.1～14.6年(n=10)、ヒノキ7.6～11.5年(n=19)となり、スギとヒノキの分解速度は重なっているものの、スギの方が半減期の平均値や中央値は若干長くなっている。これらの分解速度に及ぼす、降雨量や標高、さらに、間伐率の影響は現時点（3～4年間）では見い出されていない。環境要因のレンジが狭いのかも知れないが、材の分解速度は温度や水分条件の影響を受けることが知られているため、今後も観測を続ける必要がある。

b 密度管理と間伐放置材の炭素貯留能の評価

スギ人工林で、利用間伐と切り捨て間伐を推進した場合の間伐放置材の平均炭素蓄積量は、40年伐期で1.9～4.4Mg/ha/年、80年伐期で2.3～7.9Mg/ha/年の差があるが、いずれも主林木の10%以下である。平成12年度民有林間伐実施林30.4万ha、間伐材利用量274万m³の統計から推定すると50%以上が放置されている可能性があり、我が国全体で数十万Ct/年レベルの貯留があると考えられる。今回の試算では、利用間伐材の貯留は考慮しなかったが、今後、利用間伐材の耐用年数を明らかにし、放置間伐材の分解速度と比較する必要がある。

(ウ) 生産過程におけるCO₂放出量の評価

a 伐出系作業システムのCO₂放出量の比較

本研究の結果から、CO₂排出量を削減するには、小型機械（低出力）・少工程（少機械台数）のシステム

で、かつ、生産性の高いシステムが有効であることがわかった。また、生産性は集材距離の増加に伴い減少するため、CO₂排出量を少なくするには、集材距離を短くするため路網整備が不可欠となる。

b 林道開設に伴うCO₂放出量の評価

林道開設に伴うCO₂排出量は、開設コストが高い高級林道ほど多く、作業道以外の林道は、製品製造過程の排出が9割近くを占めることが明らかになった。これらの結果から、CO₂排出量の削減には、路網を可能な限り作業道等、低コストな林道にすること、コンクリートを可能な限り使わずに間伐材等を用いた擁壁の普及が効果的であると考えられる。

オ 今後の課題

(ア) 多様な育林システムの炭素固定能の評価

人工林の混交林化（広葉樹の導入）や造林放棄による天然林化が徐々に進んでおり、これらのタイプの森林の炭素固定量の評価の課題が残されている。

(イ) 間伐放置材の炭素貯留機能の評価

間伐材分解試験を継続し、さらに、長期的な観測にもとづいて、分解速度に及ぼす環境要因の影響を解明する必要がある。マラケシュ合意により、第一約束期間においても、林内の枯死材の炭素量の変化（あるいは、枯死材が放出源でないこと）を報告する義務が課せられたため、枯死材の炭素蓄積量の全国的な把握を進めていく必要がある。

(ウ) 生産過程におけるCO₂放出量の評価

伐出機械作業や林道開設による土壌攪乱が原因となるCO₂放出量の評価については、未解明であり、今後の課題として残された。

カ 要約

(ア) 多様な育林システムの炭素固定能の評価

a 長伐期林の炭素固定能の評価

高齢人工林の樹高・直径成長が予想以上に継続していることを明らかにし、従来の収穫予想システムでは高齢林の炭素固定量を過小評価する可能性があることを示した。

b 複層林の炭素固定能の評価

上木を点状に伐採した複層林では光環境の悪化が早く、下木の炭素固定の促進には、上木の幅以上の群または帯状に伐採した複層林が適していることを明らかにした。

(イ) 間伐放置材の炭素貯留量の評価

a 間伐放置材の分解速度の評価と環境要因の
解明

スギ・ヒノキ枯死材の4年間の分解速度と気象条件、間伐率との間には明確な関係は見られなかった。間伐木の重量半減期は、スギ10.1~14.6年(n=10)、ヒノキ7.6~11.5年(n=19)であった。

b 密度管理と間伐放置材の炭素貯留能の評価

スギ人工林で、利用間伐と切り捨て間伐を推進した場合の間伐放置木の平均炭素蓄積量を比較した結果、40年伐期で1.9(20%放置)~4.4(100%放置)Mg/ha/年、80年伐期で2.3(20%放置)~7.9(100%放置)Mg/ha/年で、いずれも主林木の10%以下であった。

(ウ) 生産過程におけるCO₂放出量の評価

a 伐出系作業システムのCO₂放出量の比較

CO₂排出量の少ない伐出機械システムは、小馬力で工程数の少ない車両系システムであり、木材生産性も高いことを明らかにした。

b 林道開設に伴うCO₂放出量の評価

林道開設によるCO₂排出は、擁壁や橋梁などの製品の製造過程によるものが大きく、これらの使用を抑えることがCO₂の削減に効果的であることを明らかにした。

キ 引用文献

稲垣善之ら 2002. 林内における枯死材分解速度の推定. 森林総合研究所四国支所 四国情報 29:5-6

Fukuda, M. et al. 2003. Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan, Forest ecology and management 184:1-16

古川仁 2002. 高齢ヒノキの樹高成長. 中部森林研究50:17-18

中村ら1990. 林地内に放置された間伐木の腐朽・分解. 奈良県林試木材加工資料19:15-19

大住克博ら2000. 秋田地方で記録された高齢なスギ人工林の成長経過. 日林誌 82:179-187

林野庁(監修)1999. 林分密度管理図 全22図(復刻). 日本林業技術協会

林野庁・林業試験場1955. 北関東・阿武隈地方スギ林分収穫表調整説明書

研究担当者(石塚森吉*, 竹内郁雄, 稲垣善之, 奥

田史郎, 酒井武, 川崎達郎, 酒井佳美, 岩本宏二郎, 岡勝, 梅田修史, 陣川雅樹, 鈴木秀典)

(5) 地球温暖化に伴う高潮災害による農地海岸への
影響評価と対策技術の開発

ア 研究目的

IPCCでは地球温暖化に伴い、2100年までに海面が48cm上昇すると試算している。海面上昇による影響には高潮被害の増大などが懸念されるが、これまで温暖化シナリオにおける高潮被害は、平均海面の変化で論じられてきた。本研究では、農地海岸*1の多い有明海を中心に、台風の規模を考慮した被害推定の精度向上を目的とする。この結果を踏まえ、今までの高潮海岸対策として検討されてきた堤防の増強以外に、干潟の再生、堤防内農地の排水悪化の補償などに対する対策を想定し、これに必要な費用の算出を目的とする。

イ 研究方法

(ア) 地球温暖化による高潮危険度の変化

過去の台風資料を元にモデル台風を作成し、高潮シミュレーションにより地球温暖化前後の高潮災害の危険度を比較する。高潮災害の危険度の変化は、地球温暖化前後の高潮に伴う潮位偏差*2の増加量で評価した。

(イ) 高潮氾濫モデルによる沿岸農地の高潮被害
推定

a 高潮に伴う農地の被害推定を行うため、堤防を越水した高潮が農地に浸入する現象を正確に予測する高潮氾濫モデルを構築する。

b 農地に浸入した海水の排除及び被害の軽減策のシナリオを作成し、農地の被害量推定モデルを構築する。

(ウ) 有明海における高潮災害対策費の試算

a 排水施設の整備や堤防の増強など高潮対策の整備水準毎の費用を算出し、その効果を比較する。

b 対策技術として最も費用を要する海岸堤防の整備について、整備を要する海岸線の延長を試算する。

ウ 研究結果

(ア) 地球温暖化による高潮危険度の変化

過去に日本に影響を及ぼした台風から有明海を中

心に高潮の被害が想定される2つのモデル台風を作成した。モデル台風の経路は、図3115-1のとおりである。このうち、モデル1は、有明海の西側を北北東方向に通過するもので、日本に接近する一般的な台風近く、1999年の台風18号*3の経度をシフトさせて有明海内部の高潮による潮位偏差が最大となるものである。一方、モデル2は1942年の台風16号（周防灘台風）を基本とし、有明海湾奥部においても潮位偏差が大きくなると考えられるものである。

地球温暖化後の台風は、これまでの研究では、経路の変化は明らかにはなっていないが、勢力が10～

20%強くなることが予想されている（吉村2002）。このため、本研究では、地球温暖化後の台風では勢力が15%強くなると想定し、2つのモデル台風を用いて有明海全域を対象に地球温暖化に伴い台風の勢力が変化した場合のシミュレーションを行った。シミュレーションで得られた地球温暖化前後における高潮による潮位偏差の変化量を示したのが図3115-2である。この結果から、有明海では、地球温暖化により高潮時には潮位偏差が25～50cm程度大きくなることが明らかになった（桐ら2004a）。

- * 1：農地海岸とは、海岸の背後に農地が広がっている海岸のうち、農林水産省が管轄するものをいい、日本の海岸線は、農地海岸の他に所管省庁別に建設海岸、港湾、漁港に分類される。
- * 2：潮位偏差とは、月の引力やその他の影響からあらかじめ予測された潮位（天文潮位）と実際の潮位との差である。実際の潮位は、気圧や風の吹き寄せなどで変化する。
- * 3：1999年台風18号では、九州から山口県にかけて高潮が発生し、八代海沿岸で12名の犠牲者を出すなど多くの被害をもたらした（久保田ら2002、滝川2000）。



図3115-1 モデル台風の経路

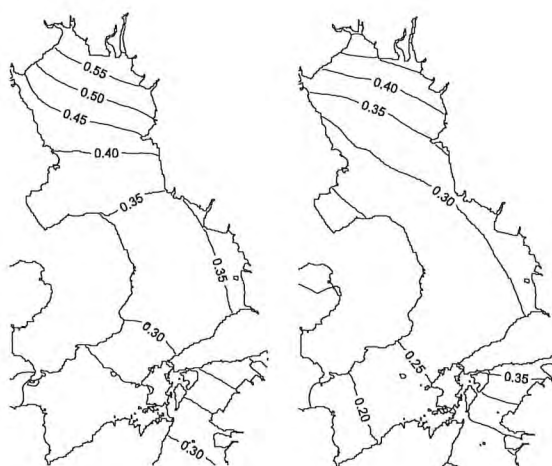


図3115-2 有明海における地球温暖化に伴う高潮時の潮位増加量（単位：m）

（イ）高潮氾濫モデルによる沿岸農地の高潮被害の推定

沿岸農地における高潮被害の被害推定には、数値シミュレーションによることが多いが、従来の解析モデルでは、海岸堤防を越水する状況しか解析できなかった。しかし、これまでの高潮被害の状況を精査すると、高潮による海水の浸入は河川や水路を遡上して越水する場合が多く（Kiri et al.2005）、これらの被害を予測できる解析モデルの開発が求められて

いた。本研究では、解析領域を排水路と道路、堤防で囲まれた領域に分割し、水路を一次元、氾濫域を二次元でモデル化する高潮氾濫モデルを構築した（桐ら2004b）。開発したモデルの概要を図3115-3に示す。本モデルは、氾濫域と水路、道路などを異なるレイヤーとして扱うことが可能なため、地理情報システム（GIS）とのデータの交換が容易で、シミュレーション結果を速やかにマップ化できる。本モデルの検証のため、1999年の台風18号に伴う高潮によ

る八代海沿岸域の農地の湛水域を解析した。現地調査結果との比較により、本モデルにより沿岸農地の高潮浸水被害の算出が可能となった。

高潮による農地・農業水利施設への被害を分類し、各種の高潮対策を行った場合の被害量をシミュレ

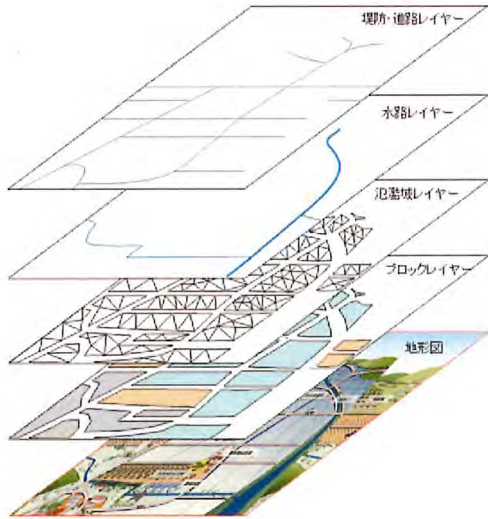


図3115-3 高潮氾濫モデルのイメージ

(ウ) 有明海における高潮対策費の試算

有明海全域において各省庁が管轄する海岸線データと三次元航空測量の結果から、高潮発生時に危険が想定される海岸堤防のデータベースを構築した。本データベースをもとに試算した結果、地球温暖化後の台風に伴う高潮で海岸堤防の余裕高がなくなる海岸線の延長（危険海岸線延長）は63.7km（全海岸線延長の約14.5%）であることがわかった。

一方、海岸堤防の沈下量毎に沈下率（沈下した堤

シジョンした。図3115-4は、八代海を対象としたシミュレーション結果であり、この地区では、海岸堤防の適切な維持管理と河川堤防高の低位部を改修することにより、浸水量が約40%低減できると推定された。

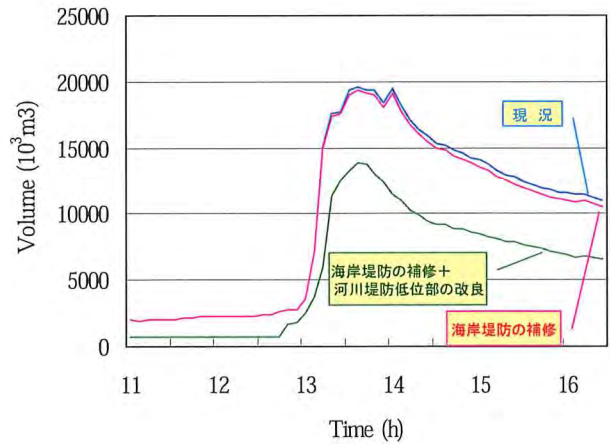


図3115-4 八代海沿岸農地における災害対策別の海水浸入量の変化

防延長／当該地区の堤防延長、%)が変化した場合の危険海岸線延長を整理し（図3115-5）、台風の変化に伴い海岸堤防の防護基準が見直された場合に、早急に改修しなければならない海岸堤防の延長は最大で約90kmであることがわかった。この海岸堤防の改修に要する費用は、概算で945億円と見積もられ、2003年度に高潮対策補助として投入された事業費の1.64倍に相当する。

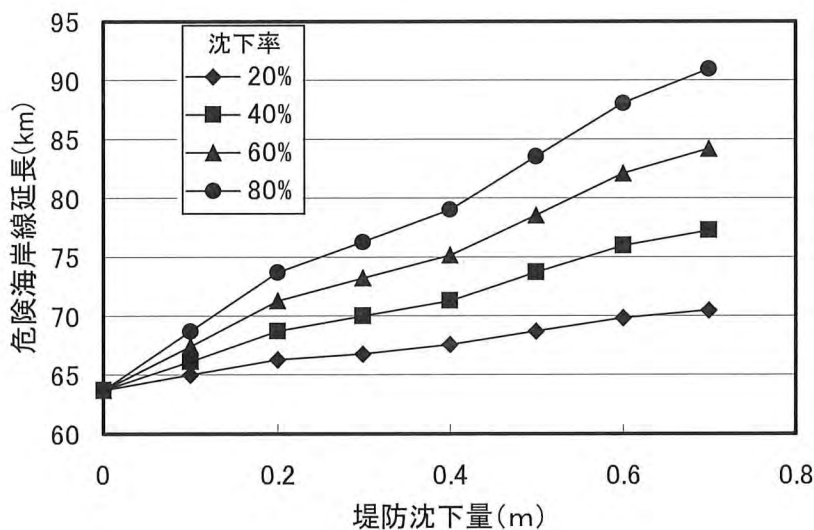


図3115-5 海岸堤防が不等沈下した場合の危険海岸線延長

エ 考察

地球温暖化による沿岸域への影響は海面上昇が予想されているが、台風が変化することによる高潮の危険性の増大は、海面上昇量に匹敵することがわかった。台風の常襲地帯で干拓による地盤標高の低い有明海沿岸の農地では、その影響は深刻であるが、その対策は、海岸堤防の増強以外に河川堤防の低位部の改修など比較的容易に行うものでも効果が高いことがわかった。

オ 今後の課題

本研究の成果により、高潮に伴う被害の推計と対策技術を評価する手法が開発できたので、具体的な地区を選定し、被害推計マップの作成が求められる。

カ 要約

(ア) 地球温暖化による高潮危険度の変化

過去の台風記録から作成した2つのモデル台風をもとに、地球温暖化後に台風の勢力が15%強くなると想定して有明海の高潮による潮位偏差の変化量をシミュレーションした。その結果、有明海では地球温暖化により高潮による潮位偏差が25~50cm程度大きくなることが明らかになった。

(イ) 高潮氾濫モデルによる沿岸農地の高潮被害の推定

河川などを遡上して氾濫する高潮を解析できる高潮氾濫モデルを構築し、八代海沿岸農地における高潮災害を再現した。本モデルを用いることにより、沿岸農地の高潮浸水被害の算出が可能となった。

(ウ) 有明海における高潮対策費の試算

有明海全域の海岸堤防データと高潮シミュレーションの結果から、地球温暖化により高潮時に海岸堤防の余裕高がなくなる海岸線が63.7kmに及ぶことがわかった。また、堤防の沈下量を考慮すると約90kmの海岸線が改修を早期に行う必要があり、その対策費は概算で945億円にのぼる。

キ 引用文献

久保田富次郎・大場和彦・山田正雄 2002. 台風9918号による干拓地の高潮災害と作付への影響. 農業土木学会誌. 70巻5号. 49-52.

滝川 清. 2000. 台風9918号による不知火海高潮災害 その残したもの. 土木学会誌. Vol.85. 41-45.

吉村 純. 2002. 地球温暖化に伴う台風の発生数と強度の変化. 自然災害科学. No. 21-2. 104-108.

Kiri H., Tanji H. and Nakaya T. 2005. Characteristics of storm surge disaster due to typhoon 9918 in farmlands in the Yatsushiro Sea coastal area. Journal of Agricultural Meteorology, vol.60 No.5.

桐 博英・丹治 肇・中矢哲郎 2004a. 地球温暖化後の台風に伴う高潮潮位偏差の変化. 海岸工学論文集. 第51巻. 241-245.

桐 博英・久保田富次郎・登坂宣好・丹治 肇・中矢哲郎 2004b. 有限要素法による小水路を考慮した農地氾濫モデル. 応用力学論文集, 土木学会, Vol.7 No.1, pp. 423-430.

研究担当者(丹治 肇、桐 博英*、中矢哲郎)

(6) 農林水産業分野における温暖化影響に関する総合評価手法の開発

ア 研究目的

温暖化などの地球環境変化により、日本の農林水産業の姿は大きく変貌することが予想される。この農林水産分野に現れる影響には多種多様なものが考えられるが、従来の研究では、個々の現象、あるいは、そのプロセスの解明に主眼が置かれたものが多く、いくつかの現象やプロセスから成り立つシステムが、どのような影響を受けるのかを総合的に解明するための研究が行われていない。また、温暖化シナリオの構築技術が進むにつれて、温暖化予測値の持つ不確実性を考慮した影響評価が求められているのが現状である。そこで、本研究では、温暖化予測や影響評価の過程で生じる不確実性の取扱いも含め、20年~30年後の農林水産分野に現れる多様な影響を総合的に評価するための手法を開発する。

イ 研究方法

(ア) 農林水産業分野に不確実性を取り入れた総合的評価手法を適用する際に生じる問題点を、安全性評価やリスク管理など他分野の事例を参考にして検討しながら、総合的評価に適用可能な手法を選定した。

(イ) 不確実性を取り入れた総合的評価手法として、イベントツリーを用いた評価フレームを選定し、対策効果の経済的影響を考慮しながら、イネ生産の

温暖化影響・対策に関する総合的な評価を行った。また、この評価過程で今後の対策研究の戦略的、効果的推進のための課題などを明らかにした。

ウ 研究結果

(ア) 影響を及ぼす要因とその大きさに不確実性があることを前提に、温暖化による影響を総合的に評価する手法として、その不確実性を表現できること、影響評価プロセスの総合化・統合化が容易にできるという2つの特徴を持つ評価法が望ましい。また、温暖化によって生じる影響の不確実性を表現するためには、影響を受ける主体とその影響の内容を明確にするとともに、それに関するシナリオの記述と、その出現確率の定量化が必要となる。そこで、本研究では安全性評価などの分野で採用されている確率論的リスク評価の考え方とその手法の有効性に着目し、様々な研究結果を総合化して影響評価を行うために、イベントツリーによる確率論的リスク評価フレームを構築した。図3116-1に日本のイネ生産量の温暖化影響に関する、イベントツリーによる確率論的リスク評価フレームを示す。

(イ) この評価フレームを用いて、20～30年後の新潟産コシヒカリにおける温暖化影響リスク及び対策効果の評価を試みた。ここで、影響リスク及び対策効果の評価するために、下記の経済的影響評価対策シナリオを考えた。

シナリオ0：現在（2002年を基準とする）（高温障害なし：コントロール）

移植は5月上旬。平年並みに天候が推移したところから、平年並みの収量と品質を得ることができ、

農家は平年並みの粗収入を得る。

シナリオ1：20～30年後（高温障害発生・無対策）
移植は5月上旬。温暖化の影響を受け、登熟期の気温が上昇し、収量と品質は低下したため、農家の粗収入は減少する。

シナリオ1-1：20～30年後（対策実施：移植時期の変更）

移植を5月中旬にすることで、登熟期をずらす。

シナリオ1-2：20～30年後（対策実施：品種転換）
移植は5月上旬。ただし、高温耐性品種を採用する。

(ウ) 自然的、生理的な事象の検討では、20～30年後の気温として、MRI-CGCM232a（気候研究所大気海洋結合モデル232a）の出力結果から得られた2046～2065年の8月平均気温と出穂後40日平均気温を用いた（図3116-2）。また、高温による収量への影響は、林（2001）の方法を用いて算定した。ここで、

$$Y/Rs = 1.28 - 0.0192 (t_{40} - 21.9)^2$$

ただし、Yは水稻収量（kg/10a）、Rsは出穂後40日の積算日射量（MJ）、 t_{40} は出穂後40日の平均気温（℃）である。さらに、高温による品質への影響は、寺島ら（2001）の推定法に従った。ここで、

$$Q = 1.46 \times (t_{aug} - 25.5)^{2.30} + 82$$

ただし、Qは1等米比率、 t_{aug} は8月の平均気温、また、2等米と3等米・規格外の比率は、山形県の2004年実績より求めた。

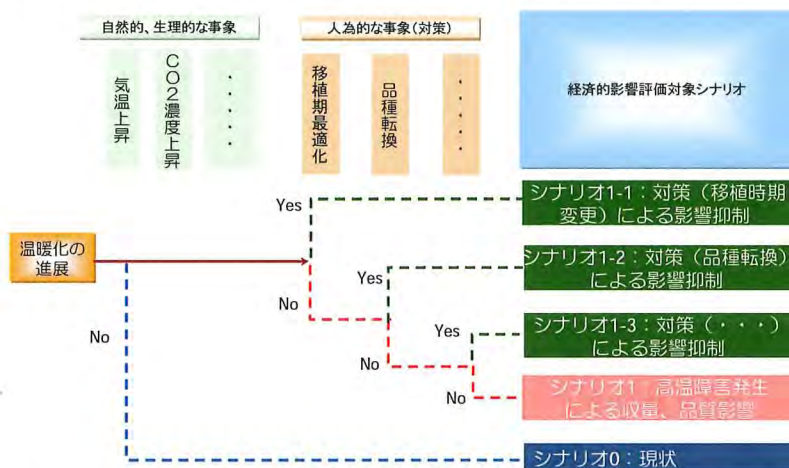


図3116-1 イベントツリーによる温暖化影響及び対策効果の記述

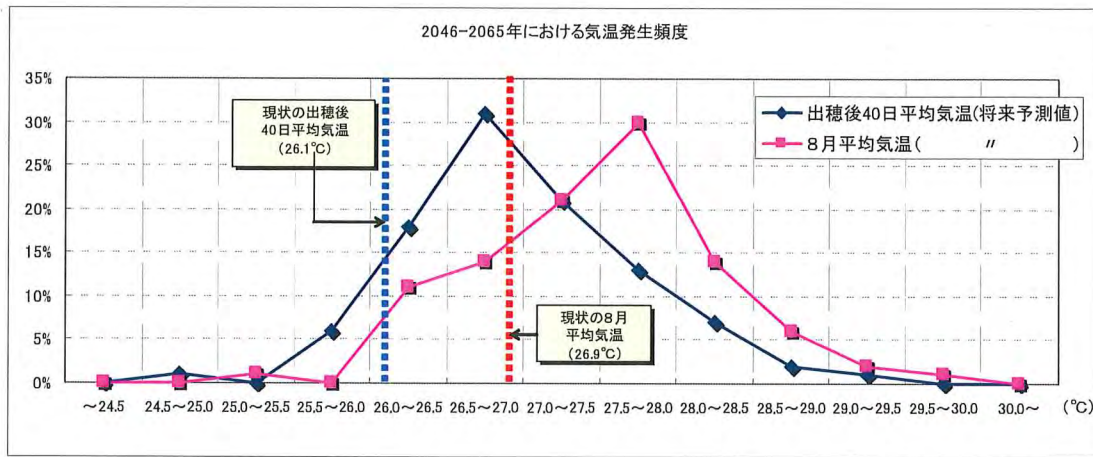


図3116-2 MRI-CGCM232aの出力結果から得られた20～30年後の8月平均気温と出穂後40日平均気温（2046～2065年）

(エ) 人為的な事象の検討では、それぞれの経済 場で経済的リスクを算定した（図3116-3）。的影響評価対策シナリオに関して、下図のような流

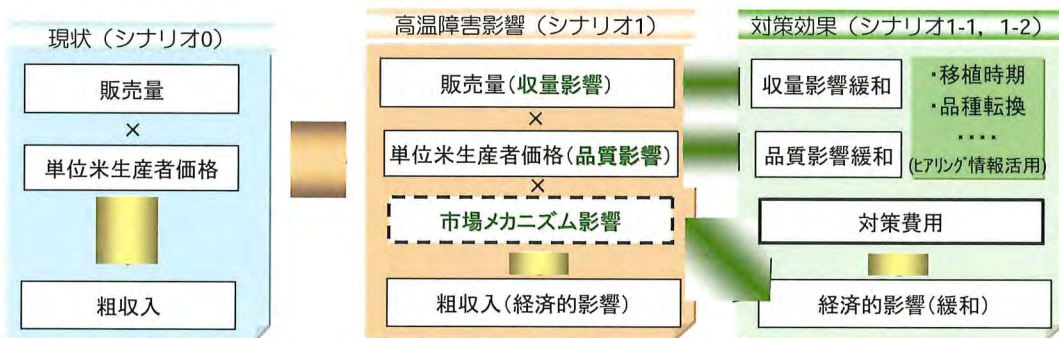


図3116-3 経済的リスク算定のフロー

(オ) シナリオ毎に算定した温暖化による米生産 数（2002年を100とする）で示す（表3116-1）。への影響とその対策の効果をも、10a当たりの粗収入指

表3116-1 10a当たりの粗収入指数（2002年を100とする）で示した温暖化による米生産への影響とその対策の効果

	各シナリオにおける粗収入指数 (2002年度における10a当たりの粗収入を100)			
	粗収入指数	(市場メカニズム未考慮)		市場メカニズム考慮
		収量寄与係数	品質寄与係数	
シナリオ1-1: 移植時期最適化による影響抑制	82	15	1	—
シナリオ1-2: +1℃高温耐性品種転換による影響抑制	95	3	1	—
シナリオ1-x: 対策(・・・)(シナリオオプション)
シナリオ1: 高温障害発生による収量、品質影響	76	23	1	91
シナリオ0: 現状(2002年)	100	—	—	—

※寄与係数: 収量減少、品質低下による粗収入低下への影響の割合を示したもの

(カ) 各シナリオにおける経済的リスクに関して、導入に係わる費用（開発費）とそれによる市場の形成（価格形成など）など（市場メカニズム）を考慮

するかしらないかによって、米生産への影響とその対策の効果がどの様になるのかを図3116-4に示す。

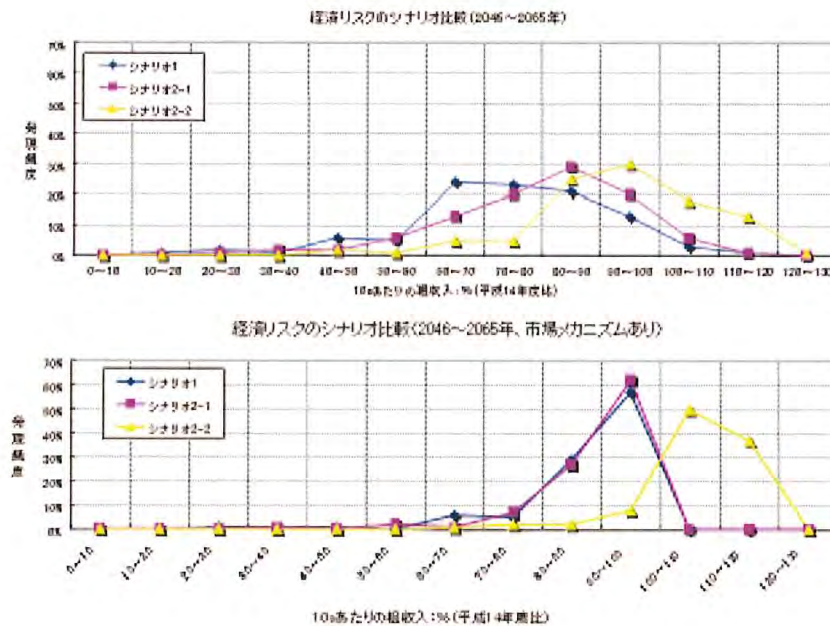


図3116-4 シナリオ毎に示された影響とその対策の効果

(上図：市場メカニズムを考慮しないもの、下図：市場メカニズムを考慮したもの)

(キ) 今回、用いた気候予測値、収量・品質の推定方法、経済リスクの推定方法から、コメ生産の温暖化影響とその対策を経済リスクで評価したところ、2046～2065年の結果では、品種の改良が、最も効果的な対策技術であることがわかった。さらに、市場メカニズムを考慮すると、農家10a当たりの粗収入が2割減以内となる可能性が90%近くなり、その影響が軽減されることが推定された。

エ 考察

(ア) 表3116-1で示されている影響の大きさを示す10a当たりの粗収入指数のうち、収量寄与係数と品質寄与係数を比較すると、その大きさに大きな差がある。この差は、CGCMの出力結果を用いて収量と品質の推定で用いた林(2001)、寺島ら(2001)それぞれの方法の気温感度、あるいは、収量低下・品質低下による価格形成の違いから生じたものである。これには、林(2001)、寺島ら(2001)それぞれの方法が温暖化時の生理的な反応を正しく評価しているか、現在の収量低下・品質低下による価格形成が温暖化時にも適応できるかという問題を含んでいると考えられる。

(イ) 今回の解析では、温暖化時でも現在の市場メカニズムが働き、価格が形成されているということを仮定したところ、図3116-4のように農家10a当たりの粗収入から見た影響が低く見積もられた。この様に、市場メカニズムの影響感度は、他の要因と比較して大きく、2046～2065年の温暖化時に予測される気温領域では、その調整機能の効果が大きい可能性が示唆された。この様に、温暖化時の評価を行うためには市場メカニズムの影響感度を無視できないことから、今後は、温暖化影響に対する市場メカニズム効果の精査とモデル化が必要であると考えられる。

オ 今後の課題

本研究は、自然的事象と社会・経済的事象に関する既存の研究成果の総合化・統合化を行い、影響から対策までを評価する手法の開発が目的であり、イベントツリーを用いた評価方法は有効な手段と考えることが明らかになった。しかしながら、収量・品質の推定、開発費や価格形成など、各イベントの算定に適したデータやモデルが、ほとんどないこと、また、多数の仮定とモデルを用いるため、それから

得た結果の標準化・規格化などに数多くの問題があり、今後、本評価方法で利用可能なデータの収集とモデル開発が必要である。

カ 要 約

不確実性を取り入れ、シナリオや全体プロセスの総合化・統合化を図るために、イベントツリーによる温暖化影響記述及び評価手法を採用し、温暖化影響の分析を行い、その有効性を明らかにした。

キ 引用文献

林 陽生 2001. 温暖化が日本の水稻栽培に及ぼす影響—研究の現状と展望. 農業及び園芸, 75 : 539~544.

寺島一男ら 2001. 1999年の夏期高温が水稻の登熟と米品質に及ぼした影響. 日本作物学会紀事 70 : 449~458.

研究担当者 (鳥谷 均*, 西森基貴, 金 元植, 三菱総合研究所地球環境研究本部サステナビリティ研究部地球温暖化対策研究チーム)