

B-11 地球温暖化の高山・森林・農地生態系への影響、適応、脆弱性評価に関する研究

(4) 影響の変動性・地域性を考慮した農業生態系のリスク評価に関する研究

①温暖化影響の変動性・地域性を考慮した農業生態系のリスク評価手法の開発に関する研究

独立行政法人農業環境技術研

地球環境部

横沢正幸・大野宏之・西森基貴・白戸康人・谷山 一郎  
林 陽生(現筑波大学)

京都大学大学院農学研究科

堀江 武・中川博視(現石川県立大学)

<研究協力者>京都大学大学院農学研究科農学専攻作物学分野 吉田ひろえ

平成14~16年度合計予算額 25,662千円  
(うち、平成16年度予算額 7,660千円)

[要旨] 過去の降水量変動及び関連する大気循環場の変動、並びに全球気候モデルによる将来の予測結果から、地球温暖化に伴って中国では黒竜江省など東北部および揚子江中下流域で農作物に対する渇水リスクが高まることが示された。実際に土壌表層付近の水分環境を推定する簡易な水収支モデルを開発し解析した結果、華北平原と東北平原の一部で、過去と将来に有意な乾燥傾向の時空間変動パターンが見られ、土壌水分量は南部で増加、北部畑作地帯では減少すると予測された。さらに水田表層土の培養実験と土壌全炭素・窒素含量の分析により、土壌群タイプと全窒素含量から水田土壌における有機態窒素の無機化量の推定可能性を示した。このほか黒竜江省の積雪水資源の年々変動を解析し、水資源変動量はアムール川上流の大興安嶺東斜面で大きいことを明らかにした。特記すべきことは、上記の現象がいずれも中国の北部・東北部における温暖化時の生産環境に対するせい弱性を示していることである。いっぽう水稲を対象に、品種選択、作期変更及び施肥などの適応技術を考慮して高CO<sub>2</sub>濃度と温暖化の影響予測を可能にする生育収量予測モデルの開発を行った。アジアの代表的なイネ品種について、日本・中国・タイで栽培実験を行って必要なデータを収集し、異なるイネ遺伝子型がアジアの多様な環境の下で示す生育・収量反応を予測するモデルを開発した。このモデルにより大気CO<sub>2</sub>濃度倍増条件下での影響予測を行った結果、CO<sub>2</sub>倍増に対する収量反応は日本型水稲よりもインド型水稲が顕著に高いことが予測された。それゆえ高CO<sub>2</sub>濃度下では籾数の多い品種が有利になるほか、2℃の温暖化によって岩手を除くアジア全地点でCO<sub>2</sub>濃度倍増の効果は認められないこと、及び4℃以上の温暖化は岩手を除く全地点で水稲収量の大幅減少をもたらすことが予測された。特記すべきことは、高温高CO<sub>2</sub>濃度の影響は熱帯の乾期稲作や京都・南京など夏期高温の温帯地域で大きく、予測される地球温暖化は品種・作期による適応策を考慮しても、アジア各地域の稲作に大きな影響を与えることである。

[キーワード] 中国、地球温暖化、積雪水資源、主要穀物、シミュレーションモデル

## 1. はじめに

IPCCの第三次評価報告書<sup>1)</sup>によると、地球の平均地上気温は20世紀に約0.6℃上昇し、このうち最近50年間の昇温傾向は人間活動によることが示された。いっぽう世界の地域ごとに影響の規模を整理した報告<sup>2)</sup>によると、日本を含む北アジア地域で気温上昇の規模が最大であった。この傾向が今後も継続すれば日本列島周辺は世界の中で最も早く温暖化の影響を被ることが懸念されるため、日本および東アジアの農業に、どのような影響が現れるかを明らかにする必要がある。

東アジアにおける最大の生産国であり消費国である中国の農業は、経済発展と人口増加に加え環境変化に伴うリスクにさらされている。主要畑作物(コムギ、トウモロコシ)の生産は、天水に頼った栽培が多くの地域で行われており、年々の気候変動とりわけ降水量変動に対して脆弱である。過去にも干ばつや洪水による被害が頻発し、とくに近年はその生産量変動の頻度ならびに幅も増大する傾向が見え始めている。このような変動の実態を解明し、かつ今後予想される気候変化に伴うさらなる影響およびその対策を評価することは、アジアひいては世界の食料安定供給の観点から重要な課題である。さらにその中国の東北部に位置する黒竜江省は、この国の穀倉地帯の一つであり、水稲およびトウモロコシの栽培が盛んである。この地域の年間降水量は500mm程度であるため、河川水や地下水が農業生産をささえる重要な資源であり、これらの変動特性を知ること、この地域の食糧生産が気候変動に対して持つ脆弱性を評価する上で重要である。さらに気候/水文条件のみならず、土壌中の環境変動も重要である。土壌中の有機物または土壌中に投入される作物残さ/肥料などの有機物は、土壌微生物の働きで分解され含有窒素成分の大部分がアンモニアの形態で無機化される。一般に農耕地土壌中の有機態窒素量は、作物の収量と品質に重要な影響を及ぼすが、この窒素の無機化作用の速さは、温度/pH/水分/土壌種などの条件に左右され、地球温暖化の影響を大きく受けると予測される。

イネの発育・生長・収量形成は、遺伝子型(品種)と環境の相互作用によって決まる。従ってCO<sub>2</sub>濃度の上昇や温暖化など栽培環境の世界的変動がアジアのイネ生産に及ぼす影響は、地域の気候や品種により異なると考えられる。CO<sub>2</sub>濃度上昇がイネの生長に及ぼす影響を明らかにするため、FACE(開放系CO<sub>2</sub>増加)実験など様々な実験的研究が行われているが<sup>3)4)</sup>、温度とCO<sub>2</sub>濃度の複合的影響やその品種間変異などの情報は不十分である。またイネの収量がどのようなプロセスを経て形成され、どのような生理生態的形質が関与しているかを明らかにすることなく、アジアの多様なイネ生産の今後を予測することは不可能であり、現実となっているCO<sub>2</sub>濃度の上昇や温暖化傾向に対し、品種・播種期などの変更を通じた対応策を探ることはできない。そのためイネの生育過程を、生理・生態学的、あるいは物理学的な諸法則に則って論理的に数式化し、実験的に得られた遺伝的諸形質を組み込むことで得られるモデルは、生長・収量形成における遺伝的特性と環境の相互作用を明らかにし、環境条件に応じた高収性支配形質を同定するために有効なであると期待される。既存のモデルとしてSIMRIW<sup>5)</sup>、Oryza1<sup>6)</sup>、Oryza2000<sup>7)</sup>などがあるが、これらを用いて生育をシミュレートすることのできる品種は限られており、また多様な環境条件下で推定を行った場合の精度についての検証が不十分であるため、モデルの適応範囲に限界があり、今後のアジア広域のイネ生産に及ぼす地球環境変化の影響を対応策まで含めて予測し得るには至っていない。それゆえ、温暖化気候の下で多様な遺伝子型に対応し、かつアジア全域にわたる幅広い環境条件下でのイネの生育・収量を予測することのできるイネの生育・収量予測モデルの開発が求められている。

## 2. 研究目的

上記の背景を踏まえ本研究では、主に東アジアを対象として過去と将来の気候と水文環境変化を明らかにするとともに、主要な食糧生産地である中国黒竜江省周辺における積雪水資源の変動特性を解析し農業生産との関係を明らかにする。また主要穀物(コメ、コムギ、トウモロコシ)について、干ばつや洪水による被害と生産量変動との関係を明らかにするとともに生育・成長モデルを用いて生理・生態学的な高温高CO<sub>2</sub>影響を明らかにし、これらの影響をリスクとしてとらえた評価手法の開発を行う。具体的には、以下の通りである。

(1) 気候変化、水資源、および土壌水分/土壌資源環境変動の実体解明とその予測に関しては、まず気温・降水量などの気象要素の過去の変動特性と大気循環場との関連を明らかにし、温暖化時の農業生態系のリスク評価のために気候要素の変化予測を行う。このため降水量の過去の変動特性と大気循環場との関連をもとに、全球気候モデル(GCM)から得られる温暖化時の循環要素の変化量を入力として気候要素の変化を予測する手法を用い、中国を中心とした東アジア域における温暖化時の降水量を予測する。また中国黒竜江省の農業水資源の変動特性を明らかにし、食料生産量の変動との関係を解明する。この場合、農業水資源の重要な要素として、積雪水資源の分布の変動特性と、その河川水への寄与を明らかにする。さらに土壌温度上昇が水田の窒素無機化作用に及ぼす影響を、地域/土壌別に評価する。そして中国における主要穀物の栽培環境と生産量の変動について、影響が大きい生産地域の抽出ならびに変動をもたらす要因の解析を作物の生長過程ならびに生育環境の変化を考慮して行い、影響の緩和策の提示に資する。

(2) 主要穀物生産への影響のうち水稻に関しては、高温不稔過程に及ぼす温度とCO<sub>2</sub>濃度の相互作用を考慮するモデルを開発し、将来の水稻生産においてぜい弱な点を指摘する。また重要な形質の遺伝的変異をパラメータ化し、品種開発や作期変更などの対応技術の効果を評価する。具体的には、イネの主要な遺伝子型がアジア各地域で示す生育・収量反応についてのデータベースを構築し、このデータベースおよび関連情報をもとに、多様な品種がアジアの異なる環境下で示す生育・収量形成動態を説明するモデルを開発したうえで、高CO<sub>2</sub>濃度・温暖化気候がアジア各地の水稻収量に及ぼす影響予測を行う。

## 3. 研究方法

(1) 気候/水/土壌資源の環境変動の解析と予測に関しては、次の方法によった。

①中国の華北(32.5-42.5N;112.5-120E)および東北部(40-50N;120-130E)を対象とし、既存の全球気候モデル(GCM)の温暖化予測実験結果を比較して、夏季(6~8月)降水量を対象とし、同地域における温暖化時の気候変化/変動の傾向を示した。また中国における夏季降水量に主成分分析を適用し、上位成分の固有ベクトルの空間分布および時間変化から過去の変動特性を明らかにするとともに、地上気圧との相関係数分布から北太平洋高気圧の変動と今後の降水量変動を推察した。そしてそこで得られた地上気圧と降水量との統計的関係をもとに、西森・鬼頭<sup>8)</sup>の手法により、中国を中心とした東アジア域における温暖化時の降水量の年々変動について、約50kmスケールのメッシュサイズのデータベースを作成した。

②中国における穀物生産の脆弱性を畑作物にとって最も重要な土壌水分環境の面から評価するために、作物生育・生長に最も重要な土壌表層付近の水分環境を推定する簡易な水収支モデルを開発した。モデルは作物ごと地域ごとに播種期・生長期・収穫期のフェノロジーを考慮し、日別の

気温、日射量、降水量を入力として、根圏土壌の有効水分量を出力する。これは植被状態を考慮して算出される蒸発散量とその場の降水量との差し引きで算出される。このモデルを用いて主要穀物の栽培期間における土壌水分環境の変動を、過去および将来にわたり広域的に解析した。ただし天水栽培のみを仮定し、かんがいなどによる水分補給は無視した。水分環境変動の長期変化を見積もるために、過去50年間を1946～75年および気温上昇傾向が見られる1976年～95年の2期間に分けて、各地域の作物栽培期間における平均的な土壌水分の比較を行った。さらに将来予想される気候変化に対する影響を評価するために、英国気象局ハドレーセンターの大気・海洋循環結合モデル(HadCM2)の気候変化シナリオに基づいて、0.5度グリッドに直接内挿した局地気候変化シナリオを用いて、2031～2065年間の変動と過去(1961～95)の変動との比較もあわせて行った。

③中国東北部の河道や集水域、標高など、黒龍江省における農業水資源にかかわる基本的な地理情報を入手してGISに入力し、黒龍江省が利用可能な積雪水資源の分布領域やHarbin水文観測所の集水域の確定に用いた。Harbin市郊外にあるSonghua川における1898年から1987年にかけての年間流量、および、1990年から2002年にかけての月別流量をGRDC(Global Runoff Data Center)等から入手した。アメリカの気象衛星DMSPに搭載されたマイクロ波センサSSM/Iのデータを入手し、19GHzと37GHzの輝度温度差から融雪指数(ISM)<sup>9)</sup>および偏波指数(PI)を計算し、北半球全域を一週間の時間分解能でカバーするデータセットを作成した。この他、SPOT-Vegetationデータより、2000-2003年におけるこの地域の平均的な植生指数の空間分布を10日の時間分解能でカバーするデータセットを作成した。これらを統合し、黒龍江省における積雪水資源の分布とその変動特性、ならびに、水稻の生育状況と衛星データとの関連を解析した。なお、黒龍江省周辺地域の1980年から1990年にかけての月別気象要素の分布の推定値には、CRU(Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK)気候データを用いた。

④日本の水田の表層土26点を恒温器において20、25および30°Cで7～123日間湛水培養して窒素無機化量を測定し、杉原ら<sup>10)</sup>の有機態窒素無機化モデルのパラメータを決定した。またそれに関与していると考えられる土壌全炭素・窒素含量をNCアナライザで、粒径組成をピペット法で測定した。さらにつくば市および津市の水田の地温を実測し、桑形・濱寄<sup>11)</sup>モデルによる、気象データから地温の推移を推定するためのデータを収集した。

(2) 主要穀物への影響評価に関しては、次の方法によった。

#### ① 『ARICE\_G×E\_Database』の構築

イネの生育・収量形成過程を遺伝子型と環境の両要因から説明するモデルの構築には、アジアの幅広い環境の下で、多様な遺伝的背景を持つイネ品種の生育・収量反応とそれに関与する生理・生態のプロセスを明らかにする必要がある。そこで2001～2002年に、タイのUbonイネ試験センター・Chaing Mai大学、中国の南京農業大学、島根大学・信州大学、ならびに岩手県農業試験所との共同研究として、イネ13品種についての品種比較栽培実験をアジア8地点で行った。栽培地点はタイのUbon Rachathani・Chaing Mai、中国の南京・雲南、および島根・京都・長野・岩手で、熱帯から冷温帯にいたる幅広い環境条件をカバーしていた。全地点に共通して供試した品種は、indica×japonicaの改良品種であるタカナリ、indicaのIR72、Shanguichao、Ch86、IR65564-44-2-2、japonicaの日本晴、竹成、およびjavanicaのBanten、O. sativa×O. glaberrima交雑品種(NERICA)

であるWAB450-I-B-P-38-HBの9品種であり、他に現地品種として、タイではKDML105、中国ではLiangYouPeiJiu、岩手ではヒトメボレ、日本の他の地点ではコシヒカリをそれぞれ加え、合計13品種を供試した。これらの品種の移植期は栽培地の適期に従ったが、その他の栽培管理は全地点で統一した方法のもとで行った。全地点・年度とも、生育ステージ別の器官別乾物重、窒素濃度、分げつ数、草高、収量構成要素の穎花数、登熟歩合、一粒重、および乾物精粉・粗粒収量などの作物データと、気温、水温、地温、日射量、湿度などの気象データを収集し、これらを統一のフォーマットで集約してデータベースを構築した。以後このデータベースを『ARICE\_G×E\_Database』と表記する。このデータベースは、アジアの主要遺伝子型の生育・収量形成についてはほぼアジア全域の環境条件をカバーできるものであり、本モデルの構築の基礎となった。

表1 モデル構築に用いる共通9品種の各地点・年度における籾乾物収量 ( $\text{gm}^{-2}$ ) と各品種の気孔コンダクタンスならびに吸光係数

品種	地点 (緯度)	岩手 (39° 21')		島根 (35° 30')		京都 (35° 01')		南京 (32° 06')	雲南 (26° )	Ubon (15° 20')	G ( $\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	k
		2001	2002	2001	2002	2001	2002	2002	2002	2001		
タカナリ (TKA)	indica × japonica	581	679	949	790	1002	911	670	1044	160	0.64	0.4
IR72 (IR)	indica	354	392	850	789	904	844	579	977	272	0.57	0.4
三桂草 (SKS)	indica	491	636	838	727	886	729	702	1024	344	0.52	0.35
Ch86 (CH)	indica	397	509	409	533	470	538	384	526	251	0.38	0.55
NPT*	indica × javanica	288	277	727	586	710	658	496	852	38	0.51	0.4
日本晴 (NIP)	japonica	426	598	710	677	725	569	556	899	-	0.40	0.36
竹成 (TKE)	japonica	447	568	719	645	682	610	619	967	-	0.42	0.34
Banten (BAN)	javanica	108	135	502	368	439	473	420	601	186	0.37	0.57
WAB*	glaberrima × sativa	415	543	620	465	601	476	435	638	72	0.44	0.43

\*NPT, WABはそれぞれIR65564-44-2-2, WAB450-I-B-P-38-HBを表す。

## ② パラメータ推定法

本モデルのプログラム開発は、Microsoft社のVisualBasic6.0を用いて行った。モデルの構築はイネの生長の諸過程について実験的に得られた知見をそれぞれ数式化し、これらを論理的に統合することに基づいた。この際に実験からは得られなかった未知のパラメータ値は、モデルによる乾物生長、穎花数および収量の推定値とその実測値の誤差が最小になるように、非線形の最小二乗法の1つであるSimplex法により推定した。またこれらのパラメータのうち、過去の報告から品種特性と考えられるもの、または品種に固有の値を与えることで著しくモデルの推定精度が上昇するものは、品種固有値をもつパラメータであるとした。用いたのは『ARICENET\_G×E\_Database』の各地点の共通供試9品種で、パラメタリゼーションにはこのうち、2001年度の岩手・京都・Ubonならびに2002年度の雲南のデータを用い、モデルのバリデーションには、2002年度の岩手・京都・南京・島根(両年)のデータを用いた。これらの品種の地点・年度の籾乾物収量(表1)は、UbonのIR65564-44-2-2における $38(\text{gm}^{-2})$ から、雲南省タカナリの $1044(\text{gm}^{-2})$ にいたる幅広い変異を示していた。なおChaing Maiと長野のデータは、欠測値が多く生長動態の解析には不十分であったため本解析からは除外した。また成熟に至らなかったUbonの日本晴と竹成も本解析からは除外した。パラメータの決定およびバリデーションには、品種・地点・年度のデータセットそれぞれについて、移植20日後、幼穂分化期(DVI=0.6)、穎花分化後期(DVI=0.8)、出穂期(DVI=1.0)、登熟期(DVI=1.5)ならびに成熟期(DVI=2.0)における各品種・地点の地上部乾物重と、出穂および成熟日、穎花数、籾乾物収量を用いた。従ってパラメタリゼーションにおける自由度は340、バリデーションの自由度は450であった。

#### 4. 結果・考察

(1) 中国の気候／土壌水分の過去の変化傾向と将来予測に関して、以下の結果を得た。

① 中国の各地域別に見た夏季積算降水量の観測値の変化、および既存のGCM温暖化実験予測値(英国ハドレーセンターの全球気候モデルHadCM3のIPCC-A2シナリオによるもの)の変化によると、温暖化時の降水量は中国東北部・北部とも、2040年頃から増加するほか、年々変動が次第に大きくなり、現在の水準よりも少雨の年も頻発していることが分かる(図1)。また過去の統計値から求めた降水量分布とその時の気圧分布の関係づけを行い、気圧分布が同じであれば降水分布も同様と考えられることから、同じHadCM3による温暖化時の地上気圧変化を入力して予測値を得た結果、温暖化時の中国では、低圧帯となる東北地方や華北および高気圧の南縁部に位置する広州などの南部地域で降水が増大するのに対し、北太平洋高気圧の西への張り出しが強まりその勢力下に入る揚子江中下流域では降水量が減少することが明らかになった(図2)。さらに他の複数のGCMによる温暖化時の予測結果を利用して求めた気圧分布には、高気圧の張り出し強化とその北側一帯に現れる低圧部の発現という一致した特徴が現れることが明らかになった。これより解析対象領域では、温暖化時にも従来と同様の、降水量が減少する傾向が現れることが予想された。ただしここで得られた結果は月降水量の変化であるため、温暖化時における集中豪雨や干ばつの期間・程度の変化についての情報は得られない。今後の解析では、日スケールの予測値の開発と、空間スケールを50kmよりも小さくする必要がある。

② 過去50年(1946~95年)における土壌水分環境の時空間変動解析の結果を、図3および図4に示す。図3は1946~75年の平均値に対する1976~95年の2期間平均値の比、また図4は2期間の平均値について、両側t検定による有意差を表したものである。これによると、河北省・河南省・山東省を含む華北平原および東北平原の一部において有

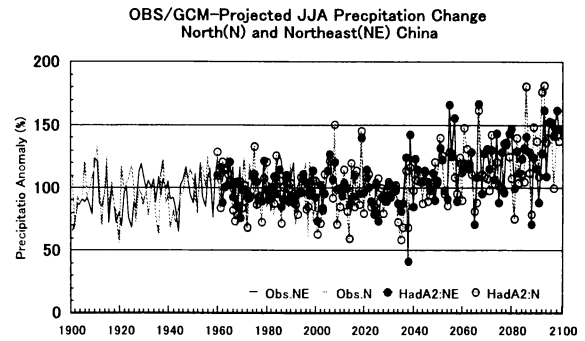


図1 観測値およびHadCM3予測値を用いた温暖化予測結果による中国東北部(NE)および北部(N)の夏季(6~8月)積算降水量の変化

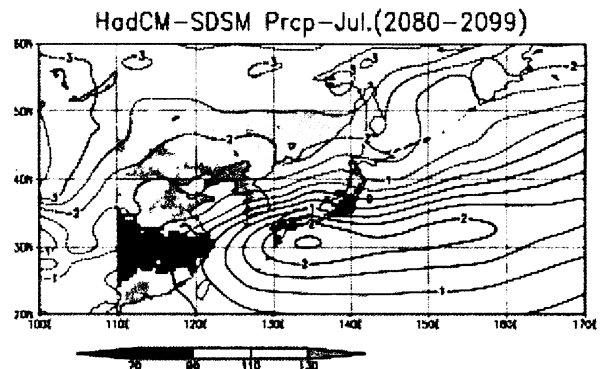


図2 HadCM3の地上気圧を用いた統計的手法によるIPCC-A2シナリオで約90年後の7月降水量の変化(地上気圧変化を併せて示す) 等値線は地上気圧変化(hPa)、陰影域は降水量の変化比(%). いずれも2080~2099年の20年平均値の、1961~1990年平均に対する差または比。等値線の実(点)線は地上気圧の上昇(下降)を、淡(濃)影域は降水量の増加(減少)の偏差域を、それぞれ表す。

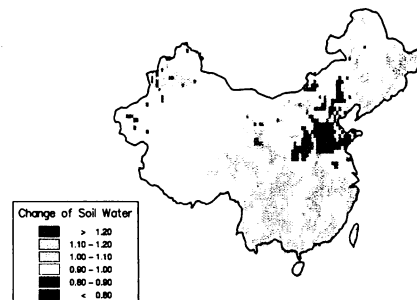


図3 規格化土壌水分(根圏土壌水分保持容量に対する年平均土壌水分の比)の変化 1946~75年の平均値に対する1976~95年の平均値比

意な乾燥傾向が見られ、平均土壌水分が最大で10mm以上減少した地域が存在した。この減少傾向は、気温の上昇とそれに伴う蒸発量の増加のためである。これら乾燥地域では土壌水分の年々変動の幅も増加傾向にあり、また黄河流域の表面流出量も減少傾向である。さらに将来予想される気候変化に対する解析年間(2031~65年)の変動と過去(1961~95年)の変動との比較においても、過去と同傾向の時空間変動パターンが見られ、一般に南部では土壌水分量は増加するが、北部の畑作地帯では乾燥地域の面積が増大する。図2によると中国東北部・北部は将来、平均としては降水量が増加する予測となっているが、図1に示した年々変動が大きくなる将来傾向と併せると、両者の結果は矛盾するものではなく、中国東北部、華北地域が過去および将来ともに気候変化に対してとくにぜい弱であることが示された。

③ 可能蒸発散量と実蒸発散量の比は、最終収量に対するストレスを表す。この比の値の年々変動に対して、過去(1961-1990)と将来(2041-2070)のそれぞれ30年間で比較し、0.5以下になる年の出現頻度を図示すると(図5)、高頻度(黒グリッド)の領域が華北平原や東北部を中心として拡大する傾向がある。華北平原は、春小麦・トウモロコシ・冬小麦の栽培地帯であり、特に山東・河南・河北の各省は全国の約60%を生産する小麦の主要生産地域で、小麦を主食とし地場の消費量も多い。また東北平原ではこれまで春小麦が栽培されてきたが、南部の吉林省・遼寧省などでは耕地条件の整備に伴い換金率の高いトウモロコシ栽培への転換が図られている。しかしながら気候変化による土壌水分環境の悪化は、その収益率を下げる危険性があり、また最近では黒竜江省などで水稻栽培地域が拡大しており、それに必要な水使用量の増加に伴う水資源量の不足も懸念される。湖南・四川・湖北各省を含む長江中下流域は主として水稻の栽培が行われており、裏作で小麦や油菜が栽培されている。水稻の生産量は全国の約70%に達する。この地域には土壌水分量の増加傾向が見えるが、長江上流の降水量増加による表面流出量の増加で下流域での洪水の危険性も増している。したがって今後、安定した穀物生産を維持するためには、脆弱性が高いと評価された地域を中心に小流域スケールの水資源量の変動を考慮して、栽培作物種の選定ならびに水涵養機能を生かした農業生産形態の確立が必要になる。

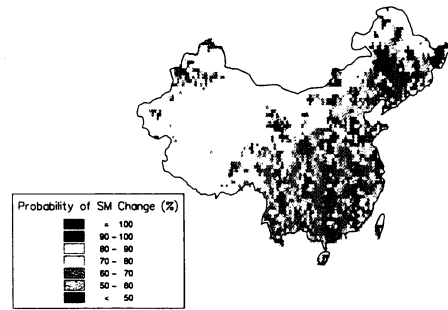


図4 図3の変化の有意差分布  
「1946~75年の平均値と1976~95年の平均値とが等しい」を帰無仮説とした場合の棄却確率を表す。

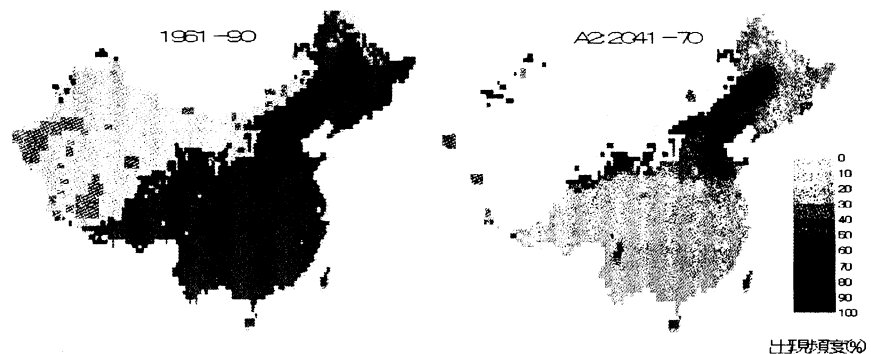


図5 収量に対する水ストレス指標(可能蒸発散量と実蒸発散量の比)が0.5以下になる年の出現頻度の変化

(2) 黒龍江省における水資源変動の変動性に関して、以下の結果を得た。

① 融雪指数 (ISM [K])<sup>9)</sup> は、DMSP搭載のマイクロ波放射計SSM/Iの19GHzと37GHzの輝度温度データから計算されるインデックスであり、積雪の融解の有無を検出できる。積雪が多いほど融雪期間が長いことから、これを全融雪期間にわたって積算したものは、融雪総量、即ち利用可能な積雪水資源の総量を示すと考えられる。そこで黒龍江省で利用可能な集水域における融雪指数の積算値の分布を1989～2002年について計算し、この期間のISMの地理的分布を時間平均した画像を調べた。その結果、アムール河上流部のヤプロノイ山脈・大興安嶺に積雪水資源が多く分布していることがわかった。また平均ISMの年々変動係数の分布は、積雪水資源が豊富な地域では小さく、積雪が少ない東北平原で大きい、特に大興安嶺東斜面一帯で大きいことがわかった。平均ISM分布を黒龍江省に関係する集水域全体で平均した値の年変化から、黒龍江省が利用可能な積雪水資源量は15%程度の年々変動性を持つことが明らかになった(図6)。

② Songhua川は大・小興安嶺に源を発し黒龍江に合流する河川で、黒龍江省の主要都市を流れる。Harbin水文観測所(45.77° N, 126.58° E)はその中間地点に位置し、 $39 \times 10^{10} \text{m}^2$ の集水域をもつ。図7に、この地点における1889～1987年の年流量値および月別平均・最大・最小流量を示した。これによれば、この地点の平均年間流量は $3.8 \times 10^{10} \text{m}^3$ である。この地域の降水量は7月に最大となることを反映し、流量の最大値は通常8月に現れる。6～9月の流量は年間の約60%を占め、年々の変動係数は0.66である。この河川は、夏期流量の年々変動が比較的大きい。これに対し3～4月の河川流量は年間流量の約8%と、流量に占める割合は小さいが、その変動係数は0.25であり、夏期に比較して安定している。図8に、集水域に亘って積算したISMの時間変化を示す。ISMが増加する時期と流量が迅速に増加する時期は一致してお

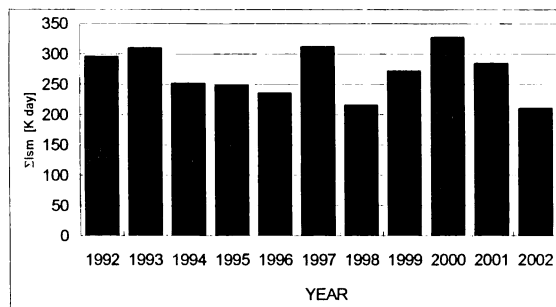


図6 黒龍江省で水資源として利用可能な河川集水域での積雪水資源指標  $\Sigma \text{Ism}$  の変化

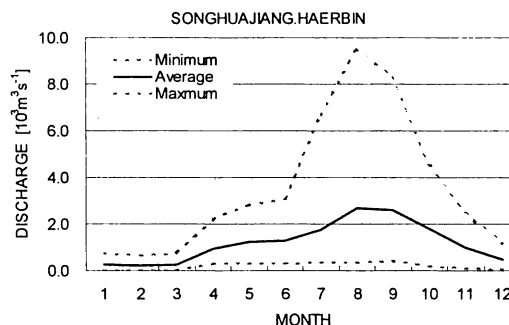


図7 Harbin水文観測所におけるSonghua川における1898年から1987年の河川流量

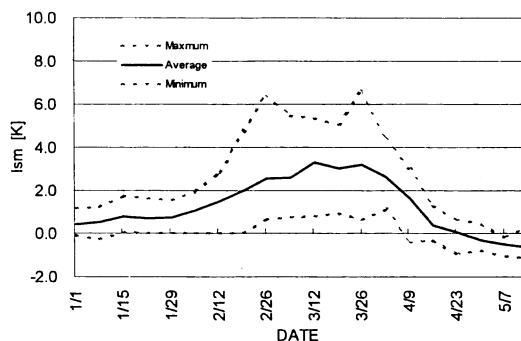


図8 黒龍江省Harbin水文観測所に対応する集水域における融雪指数 (Ism) の変化

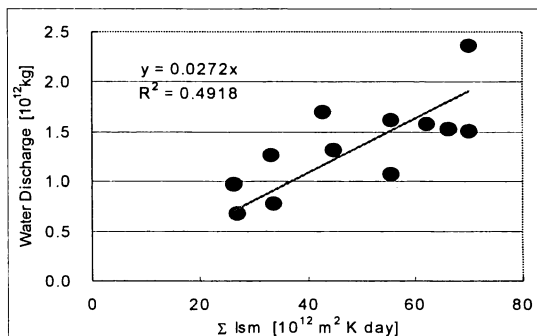


図9 Harbin水文観測所の流量曲線から推定した3, 4月の地表水起源の河川流量と集水域で積算した融雪指数  $\Sigma \text{Ism}$  との関係



り、3~4月の河川水が積雪の融解水によって形成されることが確認された。

③ 集水域で発生した融雪水は、河道網によって集められHarbin水文観測所に到達する。したがって、観測所で測定された融雪期間の流量と、ISMの総和とを比較すれば、ISMと実際の融雪速度とを結びつける関数を明らかにできる。融雪が発生していないと見なせる1月のISMの平均値を基底とし、2月~4月のISMから減じたうえでこの期間で積算し、これを衛星画像より集水域(391000km<sup>2</sup>)について足し合わせたものを $\Sigma$ ISM [m<sup>2</sup> K day]とする。2月の流量基底流量と見なして、3月-4月の流量から減じたうえで積算し、この期間の地表面流出由来の流量Q [m<sup>3</sup>]として求め、図9に1990~2002年にかけての両者の関係を示した。両者には正の相関が認められ、この関数を原点を通る一次式で表現すると、その比例計数は0.027 [mm K<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>]と得られた。この係数を用いることにより、リモートセンシングによって得られる指標ISMから、黒竜江省における融雪速度の面的な分布を推定することができる。

(3) 土壤環境資源の解析において、実験に供試した水田土壤は、有機態窒素無機化における不可逆一次反応モデルの適用が可能であった。その結果、モデルにおける無機化可能窒素量を示すパラメータであるN<sub>0</sub>は84~231 mg/kgの範囲にあり、中山間地の棚田に分布するグライ台地土や灰色台地土で高く、次いで泥炭土や黒ボク土などの有機物含量の高い土壤であり、黄色土や褐色低地土は最も低い84 mg/kgである。また、反応速度を示すkはグライ土で高く0.039 /dayに対し、黄色土、泥炭土および黒ボク土では低く0.02 /day程度であった。初期の無機態窒素含量であるbは灰色低地土が最も高く17 mg/kg、次いでグライ台地土・灰色台地土で黄色土・褐色低地土が最も低かった。活性化エネルギーE<sub>a</sub>は土壤による差はあまりなく、21,000~26,000 cal/moleの範囲にあった(表2)。これらパラメータのうちN<sub>0</sub>

表2 土壤パラメータの平均値

土壤群	n	N <sub>0</sub>	k×10 <sup>-3</sup>	b	E <sub>a</sub> ×10 <sup>3</sup>
		Nmg/kg	1/day	Nmg/kg	cal/mole
多湿黒ボク土・黒ボクグライ土	5	170	23	12	22
グライ台地土・灰色台地土	3	231	33	15	23
黄色土・褐色低地土	3	84	19	6	26
灰色低地土	8	151	32	17	23
グライ土	5	155	39	11	21
泥炭土	2	218	21	13	24

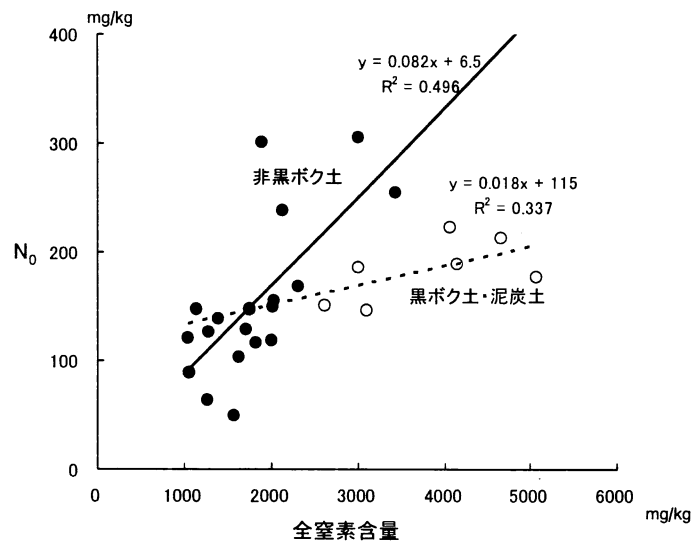


図10 土壤全窒素含量と無機化モデルのN<sub>0</sub>の関係

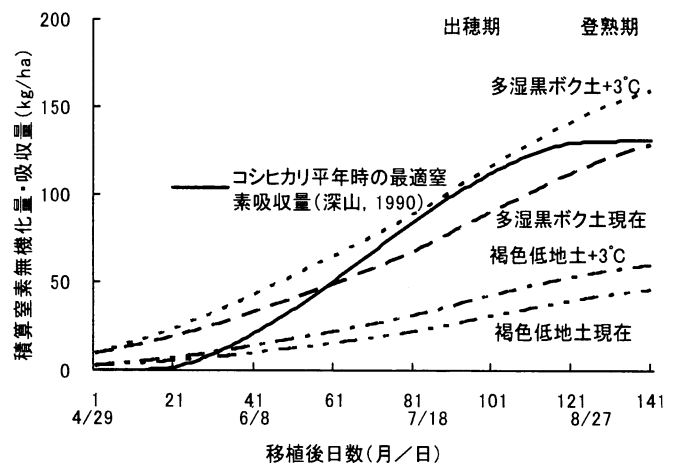


図11 平年と温暖化時の積算土壤窒素無機化量とコシヒカリ平年時の最適窒素吸収量

については土壌全窒素含量と間に直線関係が認められたが、黒ボク土と泥炭土およびそれ以外の土壌では異なる回帰直線が得られた(図10)。また、土壌の粘土含量とパラメータの間には明確な関係は認められなかった。以上の結果より、土壌群のタイプと土壌の全窒素含量から、地温データを用いて日本の水田土壌における有機態窒素の無機化量を用いて推定することが可能である。さらにつくばにおける水田地温の実測値から推定した窒素無機化量の推移から、多湿黒ボク土、泥炭土やグライ台地土などでは地温が $3^{\circ}\text{C}$ 上昇する温暖化時には生育後期に土壌窒素無機化量が水稲(コシヒカリ)の平年時の最適窒素吸収量<sup>12)</sup>を上回る場合があり、水稲登熟期に窒素の過剰吸収が起こる可能性が示された(図11)。このため温暖化に伴って、水稲の倒伏による減収や玄米中のタンパク質含量が高まり、食味の低下等が起こることが考えられる。

#### (4) イネの遺伝子型・環境相互作用を考慮した温暖化影響予測モデルの開発

##### ① モデルの全体構造

本研究で構築した生育・収量形成予測モデルは、発育(DVI)、N吸収、LAI展開、乾物生長、穎花数、不稔歩合を推定する6つのサブモデルから構成されるが、このうち発育予測と穎花数推定はSIMRIW<sup>1)</sup>、中川ほか<sup>13)</sup>に、不稔歩合の推定はSIMRIW<sup>1)</sup>によった。また開発を終えていないLAI展開、葉身N濃度については、それらに及ぼす気温とCO<sub>2</sub>濃度の影響は小さいと考え、ここでは各地点・年度のそれぞれの品種の実測値を用いた。構築した生育・収量形成予測モデル『GEM-RICE』の全体像を表すフローダイアグラムを図12に示した。

図で実線が物質の流れ、破線が情報の流れを表す。また四角の枠内は状態変数、楕円は適時算出し情報として取り込まれる補助変数であり、バルブは物質移動の速度を表す速度変数である。

モデルに入力する環境情報は、大気CO<sub>2</sub>濃度、栽培地の緯度、日最高・最低気温および日積算日射量であり、これらから日長および気温と日射量の日変化がサブルーチンにより推定される。イネについての入力情報は、移植日と移植時の乾物重の他に、品種固有値としての気孔コンダクタンス(G)と吸光係数(k)(表1)、および粒重である。Gとkは、京都の圃場実験から得られた値を全地点・生育期間を通じ一定として用いた。粒重は、全地点・年度の平均値を用いた。また本解析で実測値を用いたLAIと葉身N(g/m<sup>2</sup>,%)は、生育期間中に6~7回得た測定データを3次のspline関数で補間し、その日別値を推定して入力した。なお本モデルではCO<sub>2</sub>濃度と温度の水稲生育・収量への影響は次のようにモデル化された

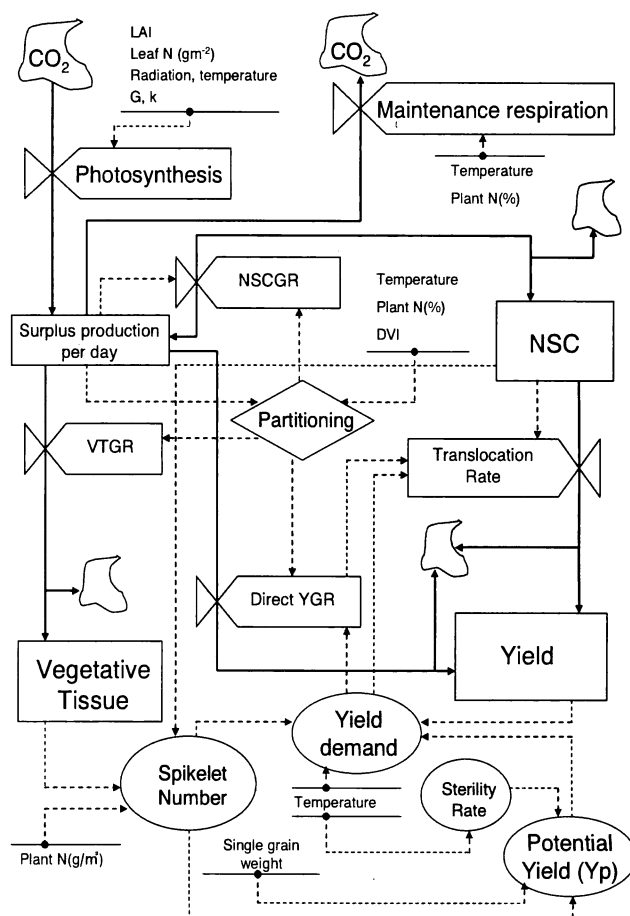


図12 物質生産・収量形成過程のモデルのフローダイアグラム

#### ア 個葉・群落光合成速度

CO<sub>2</sub>が個葉光合成速度に及ぼす影響は、次のように表した：

$$F(Ca) = V_{MAX} \frac{Ca}{Ca + Km} - Pi \quad \dots(1)$$

ここでF(Ca)は、CO<sub>2</sub>と個葉光合成速度の関係式、Caは大気CO<sub>2</sub>(ppm)、V<sub>MAX</sub>=75 (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)、Km=396 (ppm)、Pi=7 (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)とした。

現在のCO<sub>2</sub>条件下における個葉光合成速度 (Pg) を用いて、任意のCO<sub>2</sub>におけるイネの個葉光合成速度 (Pg<sub>CO<sub>2</sub></sub>) は、次のように表される：

$$Pg_{CO_2} = Pg \cdot \frac{F(Ca)}{F(360)} \quad (\mu mol \ CO_2 \ m^{-2} s^{-1}) \dots(2)$$

CO<sub>2</sub>が光-光合成曲線の立ち上がり勾配 (β, μmol CO<sub>2</sub>/J) に及ぼす影響は、次の式で与えられた<sup>14)</sup>：

$$\beta_{CO_2} = \beta_{360} \cdot \frac{Ca_o + 2\Gamma}{Ca_o - \Gamma} \cdot \frac{Ca - \Gamma}{Ca + 2\Gamma} \quad (\mu mol \ CO_2 \ J^{-1}) \dots(3)$$

ここでβ<sub>360</sub>はCO<sub>2</sub>が360ppmの時のβで、Γは光合成のCO<sub>2</sub>補償点である。Γ=48 (μmol mol<sup>-1</sup>)とした<sup>15)</sup>。

#### イ 発育速度

CO<sub>2</sub>の上昇はイネの発育を促進し、到穂日数を減少させることが知られている。本モデルでは発育速度とCO<sub>2</sub>の関係を、出穂前の基本栄養生長性を表す(パラメータG)に、次式で表すCO<sub>2</sub>による制限関数g(CO<sub>2</sub>)を乗じて表した：

$$g(CO_2) = 1 - 1.14 \cdot 10^{-4} (Ca - Ca_o) \quad \dots(4)$$

$$G_{CO_2} = G_{360} \cdot g(CO_2) \quad \dots(5)$$

ここでG<sub>360</sub>は360ppmのときのGである。

#### ウ 高温不稔とCO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>の上昇はイネの高温不稔に対する感受性を高め<sup>16)</sup>、また温度とCO<sub>2</sub>がイネの稔実歩合に及ぼす影響には品種間差異があることが知られている。本モデルでは高温不稔歩合が50%になる温度(パラメータHT<sub>0</sub>(°C))には、indicaもしくはその交雑品種とその他の品種で異なる値(indica系統38.8、その他37.8)を推定し<sup>17)</sup>、CO<sub>2</sub>倍増条件下では、HT<sub>0</sub>はそれぞれ2°C低下するとした。

#### エ N吸収ならびに葉面積拡大

温度勾配チャンバー(TGC)を用いた実験研究のレビュー<sup>18)</sup>に示されたように、CO<sub>2</sub>の上昇がイネのN吸収量および葉面積指数に与える影響は小さい。したがって本研究では、葉身窒素濃度(g m<sup>-2</sup>, %)およびLAIはCO<sub>2</sub>の影響を受けないと考え、360ppm条件下で得られた実測値をそのときの発育指数(DVI)を対応させ、DVIの関数として実測値をシミュレーションに用いた。

#### ② モデルの有効性の検証

モデルにより推定した乾物生長、穎花数、収量とそれぞれの実測値の関係を、パラメータ推定に用いたデータと用いなかったデータの全てについて、図13に示した。乾物生長については、移植20日後、幼穂分化期、穎花分化後期、出穂期、登熟期、成熟期と生育ステージを追ってlplantにつき6点を示している。この結果、この生育・収量予測モデル『GEM-RICE』によって、乾物生長、

穎花数、収量それぞれの品種・環境間の変異を、決定係数 $R^2$ がそれぞれ0.97、0.87、0.86という非常に高い精度で説明できたことが示された。またパラメータ推定に用いなかったデータによる検証の結果、乾物生長・穎花数・収量それぞれについて、決定係数 $R^2$ がそれぞれ0.97、0.69、0.74という高精度でその変異を説明できた。

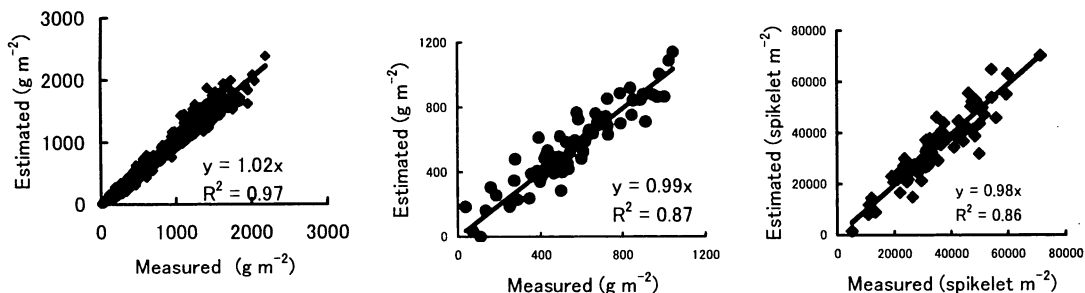


図1.3 モデルによる左から(A)乾物生長、(B)粉乾物収量、(C)面積あたり穎花数の推定値とその実測値の関係(パラメータ推定に用いたデータと用いなかったデータの全てを含む)

図1.4には、タカナリの京都、雲南、Ubonにおける乾物生長について、その移植～成熟までの推定曲線と実測点の関係を示した。モデルにより成育ステージに従う生長速度の変化をよく説明できていることが示された。

### ③ 高CO<sub>2</sub>および温暖化がアジアの水稲収量に及ぼす影響予測

ARICENET試験(表1)が行われたアジア各地域における、同試験に供試されたイネ品種の生長・収量形成を、CO<sub>2</sub>を700ppmとし異なる気温上昇条件(+0℃/+2℃/+4℃)を与えてシミュレーションを行った。現在の基準CO<sub>2</sub>濃度は360ppmとし、ARICENET試験で得られた各地点・年度における気象条件を、それぞれの地点・年度の基本気象条件とした。図1.5にIR72(indica)と日本晴(japonica)の、岩手・京都、南京・雲南、およびUbonにおける収量のシミュレーション結果を、それぞれの地点・品種のCO<sub>2</sub>360ppmのときの収量に対する相対収量増加(%)で示した。現在の気象条件下において岩手のIR72は低温不稔の発生が著しく高かったため解析から除外し、また正常な発育を示さなかったUbonの日本晴も除外した。

この結果、現在の気温条件下(+0℃)で、IR72は全ての地点で日本晴よりもCO<sub>2</sub>の上昇に対し高い収量反応を示した。この結果は、indica品種はjaponica品種に比べ、CO<sub>2</sub>に対し高い収量反応を示すという報告によく一致した。本モデルでは光合成速度

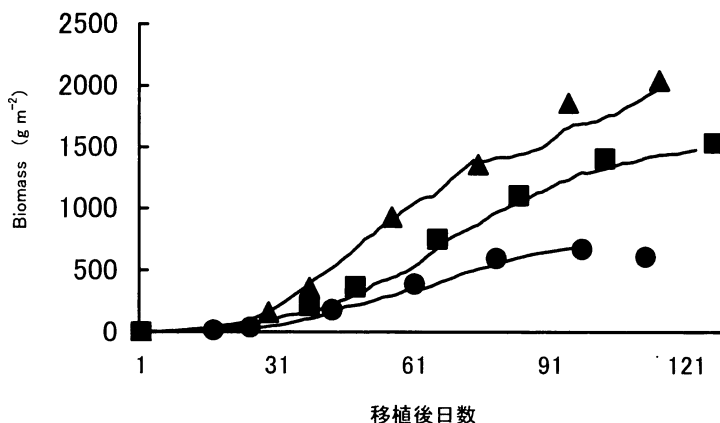


図1.4 モデルにより推定された雲南(▲)、京都(■)、Ubon(●)におけるタカナリのBiomass生長とその実測点の関係

のCO<sub>2</sub>に対する反応には品種間差を与えなかったため、シミュレーションから推定された収量反応の品種間差異は、IR72のsink能が日本晴に比べて高く、現在のCO<sub>2</sub>条件下でIR72は日本晴よりも強いソース制限を受けていたために生じたと考えられた。本モデルによるシミュレーションの結果、気温条件が現在と変わらない場合のCO<sub>2</sub>の倍増は、両品種の収量を20~30%増大させる。しかしながらこのCO<sub>2</sub>倍増による効果は、2℃の気温上昇によって、岩手を除くアジア各地点で減少した。2℃の気温上昇を伴うCO<sub>2</sub>の倍増により、夏の気温が高い京都の日本晴では高温不稔が生じ、現在と比べて著しく収量が低下した。4℃の気温上昇を伴うCO<sub>2</sub>の倍増は、岩手を除くアジア各地域における両品種の収量に、負の影響を与えた。この負の影響は、温帯の京都、南京が、熱帯のUbonのそれよりも大きかった。しかし図15に示したUbonの結果は雨季作についてのものであり、同じく熱帯のタイ、コンケンにおける乾季作のイネ収量は、気温上昇を伴うCO<sub>2</sub>の倍増により著しく減少することが示唆された(図16)。コンケンについてのシミュレーション解析は、Ubonで得られたイネのデータと、1985~1986年のコンケンの気象データを用いて行った。

本シミュレーション解析により、温室効果ガスの増大に伴う地球気候変化は、アジアのイネ生産に大きな、そして地域・品種で異なる影響を与えることが示唆された。モデルにより、2℃以上の気温上昇を伴うCO<sub>2</sub>の倍増は、冷温帯のイネ収量を大きく増大させる一方で、温帯または熱帯の乾季作のイネ収量を著しく減少させることが示された。予測される気候変化がアジア各地域のイネ生産に与える負の影響を軽減するのに必要な栽培管理法を同定することが、今後の大きな研究課題である。

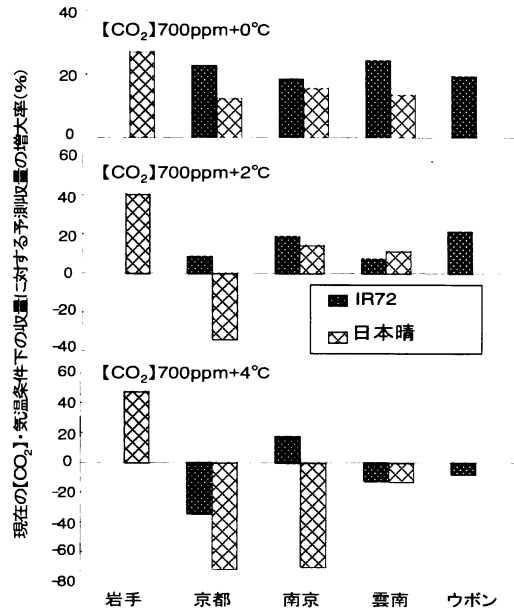


図15 IR72と日本晴の、岩手、京都、南京、雲南、ウボンにおける現在のCO<sub>2</sub>・気温条件下の収量に対する収量の増大率

CO<sub>2</sub>は700ppmとし、気温は現在よりも0℃、+2℃、+4℃上昇の3条件を与えた。標準気温・収量には各地点の2001年と2002年のデータを用い、グラフはその平均値を示す。

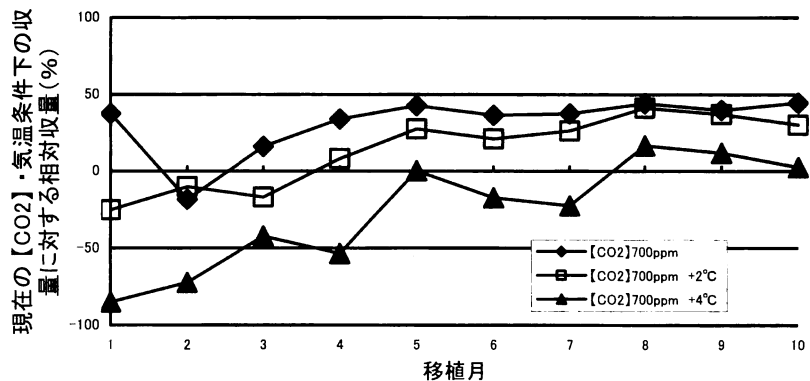


図16 IR72の現在のCO<sub>2</sub>と気温条件の収量に対する、CO<sub>2</sub>700ppmにおける予測収量の相対増加率(%) タイのコンケンにて、1985~1986年の異なる気温上昇条件下で移植月を変えて栽培された場合

## 5. 本研究により得られた成果

(1) 気候／水／土壌資源の過去の変動と将来予測に関して、以下の成果が得られた。

① 将来の気候の特徴として、中国の東北部・北部、華南で降水が増大となるのに対し、揚子江中下流域では降水減となる。ただし東北部・北部では年々変動が大きくなり、地球温暖化とともに揚子江中下流域も含めて渇水リスクが高まる。また中国の河北省・河南省・山東省を含む華北平原および東北平原の一部では有意な乾燥傾向が現れ、平均土壌水分が最大で10mm以上減少しており、この減少傾向は、主に気温の上昇とそれに伴う蒸発量の増加が要因と考えられる。

② 黒竜江省において利用可能な積雪水資源は、アムール河上流部のヤプロノイ山脈や大興安嶺に多く分布しており、大興安嶺東斜面一帯で特に年々変動が大きい。現在の気候条件下では、河川の集水域で15%、行政区域としての黒竜江省の領域で38%の変動係数を持つ。また夏期の河川流量が66%もの大きな変動係数を持つのに対し、春期流出のそれは25%と大幅に安定している。そして中国黒竜江省の積雪水資源量の変動は2月中旬から4月下旬に融解し、黒竜江省最大の都市であるハルビンの河川流量は、4-5月に積雪水に由来する流量が $2.4 \times 10^9 \text{ m}^3$ 増加する。

③ 水田土壌の有機態窒素無機化モデルにおけるパラメータが、土壌群と全窒素含量から推定可能となった。また多湿黒ボク土、泥炭土およびグライ台地土などでは地温が $3^\circ\text{C}$ 上昇するとコシヒカリの窒素吸収量を上回る土壌有機態窒素の無機化が起こり、水稻登熟期に窒素の過剰吸収が起こる可能性がある。

(2) 生育・収量予測モデルによる解析により、以下の成果が得られた。

① イネの主要遺伝子型がアジア各地で示す多様な生育・収量反応についてのデータベース『ARICE\_G×E\_Database』を構築した。またイネの遺伝子型・環境相互作用を考慮した、生育・収量への高 $\text{CO}_2$ 濃度・温暖化影響予測モデル『GEM-RICE』を開発した。新規に開発したGEM-RICEは、イネの多様な遺伝子型について、現行気象のもとでのアジアの多様な環境下の生育・収量を妥当な精度で説明できることを示した。

② GEM-RICEによるシミュレーションから、 $\text{CO}_2$ 濃度倍増に対するイネ収量反応はインド型が日本型よりも顕著に高く、かつそれは両遺伝子型の光合成反応の差異ではなく、シンク形成能の差異によることを明らかにした。これより、高 $\text{CO}_2$ 濃度下で高い収量を示す品種特性として、籾数が多いことが重要であると示唆された。

③  $\text{CO}_2$ 濃度倍増・現行気象下では、調査したアジアのすべての地点で収量は20~30%高まるが、 $2^\circ\text{C}$ の温暖化条件下では岩手を除く全地点で高 $\text{CO}_2$ 濃度のプラスの効果がほぼ消滅すると予測された。それ以上の高温下では岩手を除いて減収し、その影響は特に熱帯の乾期作や夏期高温の京都、南京で大きいことが示唆された。

## 6. 引用文献

- 1) IPCC (2001): *Climate change 2001, The scientific basis*. IPCC Working Group I, Cambridge Univ. Press, 881p.
- 2) 気象庁編(1994): *異常気象レポート'94-その実態と見通し*.(V), 大蔵省印刷局, 444p.
- 3) Bannayan M., K. Kobayashi, H.-Y. Kim, M. Lieffering, M. Okada, and S. Miura (2004): Modeling the interactive effects of atmospheric  $\text{CO}_2$  and N on rice growth and yield. *Field Crops Res.*, (in press)

- 4) Kim H. -Y., M. Lieffering, K. Kobayashi, M. Okada, M. W. Mitchel, and M. Gumpertz (2003): Effect of free-air CO<sub>2</sub> enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. *Field Crops Res.*, 83, 261-270.
- 5) Horie T., H. Nakagawa, H. G. S. Centeno, and M. J. Kropff (1995): The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. In: Matthews P. B., M. J. Kropff, D. Bachelet, and H. H. van Laar (eds), *Modeling the impact of climate change on rice production in Asia*. CAB International, Wallingford, UK, 51-66.
- 6) Kropff M. J., R. B. Matthews, H. H. van Laar, and H. F. M. TenBerge (1995): The rice model oryzal and its testing. In: Matthews P. B., M. J. Kropff, D. Bachelet, and H. H. van Laar (eds), *Modeling the impact of climate change on rice production in Asia*. CAB International, Wallingford, UK, p. 27-50.
- 7) Bouman B. A. M., M. J. Kropff, T. P. Tuong, M. C. S. Wopereis, H. F. M. TenBerg, and H. H. van Laar (2001): *Oryza2000: Modeling Lowland Rice*. IRRI, 235p.
- 8) 西森基貴、鬼頭昭雄(2002): 統計的ダウンスケーリング手法による温暖化時の夏季東アジア域の降水量予測, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集、489-494.
- 9) 大野宏之、矢吹伯裕、大畑哲夫(2001): SSM/1輝度温度差の日変化を利用した融雪域の検出. 2001年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集 23.
- 10) 杉原進、金野隆光、石井和夫(1986): 土壌中における有意態窒素無機化の反応速度論的解析法. 農環研報告, 1, 127-166.
- 11) 桑形恒男、濱寄孝弘(2000): 水稲生育の広域監視等に利用可能な日平均水田水温の推定モデル. 総合農業の新技术, 14, 196-199.
- 12) 深山政治(1988): 水稲の最適窒素保有量に基づく新しい施肥基準策定法に関する研究. 千葉県農業試験場特別報告, 15, 1-92.
- 13) 中川博視、堀江武(1995): イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究. 第2報 幼穂の分化・発達過程の気象的予測モデル. 日本作物学会紀事, 64, 33-42.
- 14) Goudriaan, J. and H. H. van Laar (1994): *Modeling potential crop growth processes*. Kluner Academic Publishers, The Netherlands. 238p.
- 15) Horie, T. (1980): Studies on Photosynthesis and Primary Production of Rice Plants in Relation to Meteorological Environments III. A model for the simulation of net photosynthesis, transpiration and temperature of a leaf and a test of its validity. *J. Agr. Met.*, 35(4), 201-213
- 16) Kim, H. -Y., T. Horie, H. Nakagawa, and W. Wada (1996): Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and high temperature on growth and yield of rice II. The effect on yield and its component of Akihikari rice. *Jap. J. Crop Sci.*, 65, 644-651.
- 17) Ueda, T. H. Nakagawa, K. Okada, and T. Horie (2000): Varietal differences in yield and spikelet fertility of rice in response to elevated CO<sub>2</sub> concentration and high temperature. *Jpn. J. Crop Sci.*, 69, extra issue 1, 112-113
- 18) Horie, T., J. T. Baker, H. Nakagawa, T. Matsui, and H. -Y. Kim (2000). In: Reddy, K. R. and H. F. Hodges (eds.), *Climate change and global crop productivity*. CAB

## 7. 国際共同研究等の状況

中国農業科学院・農業気象研究所ならびに黒竜江省農業科学院・耕作栽培研究所と共同研究を実施し、中国内の気象データ、作物生産統計の収集、現地試験の実施、気候変化シナリオおよび生産量予測モデルの作成をおこなった。また日本側の提供する水稲生長モデルSIMRIWと中国側が提供する中国の気象データおよび作物データを利用した水稲収量モデルに関する共同研究をすすめることを相互に確認した。さらに中国農業気象研究所を訪問した際に、水稲の稔実歩合とみなせる栽培データが多数存在することが判明したため、中国品種の稔実歩合と日最高気温の関係を中国農業気象研究所との間で共同で解析した。さらに中国水稲研究所と協力し、中国の気象データおよび作付体系の変遷についての情報を整理し、今後の研究協力体制の構築に向けての議論を進めた。2005年2月に、中国黒竜江省ハルビン市においてワークショップを開催し、これまでの研究成果と今後の展望について議論を行った。この成果は学術誌「中国農業気象」の特集号として刊行予定である。

作物モデルによる予測は、日本、中国、タイの共同研究として組織されたものである。その成果の一部は世界イネ会議（中国北京市および日本つくば市）などで公表された。その協力者リストは以下のようなものである。

Cao Weixing	Department of Agronomy, Nanjing Agricultural University
Dai Tingbo	College of Agriculture, Nanjing Agricultural University
Nopporn Supapoj	Ubon Rice Research Center
Sakda Jonkaewwattana	Multiple Cropping Center, ChaingMai University

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<学術誌（査読あり）>

- ① 白岩立彦、中川博視、堀江武、松井勤、本間香貴：地球環境、(6), 207-215 (2002)  
「タイ稲作の生産変動実態ならびに降雨量が生産変動に及ぼす影響」
- ② 西森基貴：日本土壌肥料学会誌、73, 6, 789-796 (2002)  
「地球温暖化が農林生態系に及ぼす影響. 1. 気候変化(地球温暖化)の実態とその予測」
- ③ T. Matsui and K. Omasa: Annals of Botany, 89, 683-687 (2002)  
“Rice (*Oryza sativa* L.) cultivars tolerant to high temperature at flowering: Anther characteristics”
- ④ S. Kamara, T. Kuruppuarachchi, E. R. Ranatunge, Y. Hayashi, M. Yokozawa, M. Nishimori, and T. Mikami (2002): Journal of Agricultural Meteorology, 58, 4, 171-184 (2002)  
“Multivariate statistical analysis of the seasonal rainfall regimes of the Guinea-Fouta Djallon Mountains of West Africa”
- ⑤ 大野宏之、石郷岡康史、後藤慎吉、烏谷均、桑形恒男：日本土壌肥料学雑誌、74, 1, 85-92 (2003)



- 「地球温暖化が農林生態系に及ぼす影響 2. 水資源への影響」
- ⑥ 横沢正幸：日本土壤肥料科学雑誌、74、229-236 (2003)  
「地球温暖化が農林生態系に及ぼす影響－ 3. 大気CO<sub>2</sub>濃度、温度および水分環境の変化と作物の応答」
- ⑦ E. Ranatunge, B. A. Malmgren, Y. Hayashi, T. Mikami, W. Morishima, M. Yokozawa, and M. Nishimori: *Paleogeography Paleoclimatology, Paleoecology*, 197, 1-14 (2003)  
“Changes in the southwest monsoon mean daily rainfall intensity in Sri Lanka: relationship to the El Nino-Southern Oscillation”
- ⑧ M. Yokozawa, S. Goto, Y. Hayashi, and H. Seino: *Journal of Agricultural Meteorology*, 59, 117-130 (2003)  
“Mesh climate data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration”
- ⑨ K. Homma, T. Horie, T. Shiraiwa, N. Supapoj, N. Matsumoto, and N. Kabaki: *Plant Production Science*, 6, 147-153 (2003)  
“Toposequential variation in soil fertility and rice productivity of rainfed lowland paddy fields in mini-watershed (Nong) in Northeast Thailand”
- ⑩ T. Matsui and H. Kagata: *Annals of Botany*, 91, 473-477 (2003)  
“Characteristics of floral organs related to reliable self-pollination in rice (*Oryza sativa* L.)”
- ⑪ 杉浦俊彦、横沢正幸：園芸学会雑誌 73、72-78 (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」
- ⑫ M. Yokozawa, F. Tao, T. Sakamoto: *Crop, Environment and Bioinformatics*, 1, 264-271 (2004)  
“Risk analysis of cropland suitability in China under climatic variability and change”
- ⑬ Homma, K., T. Horie, T. Shiraiwa, S. Sripodok and N. Supapoj: *Field Crops Research* 88, 11-19 (2004)  
“Delay of heading date as an index of water stress in rainfed rice in mini-watersheds in Northeast Thailand”
- ⑭ F. Tao and M. Yokozawa: *Journal of Agricultural Meteorology*, 60, 885-887 (2005)  
“Risk Analyses of Rice Yield to Seasonal Climate Variability in China”
- (15) T. Horie, H. Yoshida, S. Kawatsu, and K. Katsura: *Proceedings of World Rice Research Conference, Tsukuba, November 2004, IRRI, in press* (2005)  
“Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and increased temperature on rice; Implications for Asian rice production”
- (16) T. Matsui, K. Kobayasi, H. Kagata, and T. Horie: *Plant Production Science*, in press (2005)  
“Correlation between viability of pollination and length of basal dehiscence of the

theca in rice under a hot and humid condition”

<学術誌（査読なし）>

- ① 谷山 一郎：農業環境技術研究所研究成果発表会資料，11-19（2002）  
「地球温暖化に伴う食料生産変動予測」
- ② 堀江武：世界の農林水産、2002. 4, 2-3（2002）  
「東南アジアの稲作地域にみられる持続性・環境問題」
- ③ T. Horie: Farming Japan, 36, 9-15（2002）  
“Food production and water problems in rainfed farming regions”
- ④ 井上聡、西森基貴、山村光司：日本農業気象学会北陸支部会誌、（28）， 26-32（2003）  
「地球温暖化の北陸農業への影響」
- ⑤ B. A. Malmgren, E. R. Hulugalla, Y. Hayashi, M. Nishimori, M. Yokozawa, and T. Mikami: Newsletter of Japanese Study Group for Climate Impact and Application,（23）， 27-32（2003）  
“Quasi-periods and interdecadal cycles of the monsoon rainfall in Sri Lanka from 1869 to 1998”
- ⑥ B. A. Malmgren, E. R. Hulugalla, Y. Hayashi, M. Nishimori, M. Yokozawa, and T. Mikami: Newsletter of Japanese Study Group for Climate Impact and Application,（23）， 19-26（2003）  
“Spatial fluctuation of seasonal rainfall in Sri Lanka during the late 19th and 20th centuries derived from a factor model”
- ⑦ H. Nakagawa, T. Horie, and T. Matsui: Effects of climate change on rice production and adaptive technologies, In (T. W. Mew, D. S. Brar, S. Peng, D. Dawe and B. Hardy eds.) Rice Science: Innovations and Impact for Livelihood, International Rice Research Institute, 635-658（2003）
- ⑧ 中川博視：環境保全型農業の百科事典，丸善，印刷中（2005）  
「地球温暖化が農業に及ぼす影響」
- ⑨ 気候影響・利用研究会編：日本の気候 I - 最新データでメカニズムを考える -、二宮書店，44-49および55-60（2002）  
「2-3章 東アジアの降水量（執筆担当：西森基貴）」  
「2-5章 東アジアの上層の気温と風の間（執筆担当：西森基貴）」
- ⑩ 原沢英夫・西岡秀三編：地球温暖化と日本 第3次報告 - 自然・人への影響予測、古今書院、7-56（2003）  
「第1章 気候 - 過去の気候変化の解析および気候変化の予測 -（執筆担当：野田彰・磯部英彦・鬼頭昭雄・佐藤康雄・杉正人・西森基貴・松本淳）」
- ⑪ 原沢英夫・西岡秀三編：地球温暖化と日本 第3次報告 - 自然・人への影響予測、古今書院、133-138（2003）  
「第3章 水稲栽培への影響（執筆担当：林 陽生）」
- ⑫ 原沢英夫・西岡秀三編：地球温暖化と日本 第3次報告 - 自然・人への影響予測、古今書

- 院、140-142 (2003)  
「第3章 水稲栽培への影響 (執筆担当：谷山 一郎)」
- ⑬ 原沢英夫・西岡秀三編：地球温暖化と日本 第3次報告－自然・人への影響予測、古今書院、142-148 (2003)  
「第3章 農林業への影響 (執筆担当：中川博視・堀江武)」
- ⑭ 原沢英夫・西岡秀三編：地球温暖化と日本 第3次報告－自然・人への影響予測、古今書院、148-152 (2003)  
「第3章 農林業への影響 (執筆担当：横沢正幸)」
- ⑮ T. W. Mew, D. S. Brar, S. Peng, D. Dawe and B. Hardy eds. : Rice Science: Innovations and impact for livelihood, 635-636 (2003)  
“Effects of climate change on rice production and adaptive technologies (執筆担当：H. Nakagawa, T. Horie, and T. Matsui)”
- ⑯ 日本作物学会編：温故知新-日本作物学会創立75周年記念総説集、日本作物学会、243-247 (2003)  
「11-3章 大気 (執筆担当：中川博視)」
- ⑰ 気候影響・利用研究会編：日本の気候II－気候気象の災害・影響・利用を探る－、二宮書店、1-6 (2004)  
「集中豪雨 (執筆担当：西森基貴)」
- ⑱ 大政謙次・原沢英夫・(財) 遺伝学普及会編：地球温暖化、裳華房、119-127 (2004)  
「第IV編 温暖化の影響と対策－日本の水稲栽培への影響 (執筆担当：林 陽生)」
- ⑲ 近年の気候変動の状況と気候変動が農作物の生育等に及ぼす影響に関する資料集、農林水産省、19-23 (2002)  
「解説：気候変化の予測の方法とその現状 (西森基貴)」
- ⑳ AESTO News No. 2, 4 (2003)  
「エルニーニョ現象の食糧生産に対する影響 (西森基貴)」
- (21) 平成13年度農業環境技術研究所年報、36-39 (2003)  
「生育阻害要因を考慮した日本の水稲生産の温暖化に対するぜい弱性の評価 (西森基貴)」
- (22) 農環研ニュースNo. 58, 4-5 (2003)  
「研究トピックス 生育阻害要因を考慮して水稲生産のぜい弱性を評価する (西森基貴)」
- (23) NIAES Annual Report 2001/2002, 25 (2003)  
“Impact and Sensitivity of Climate Change and Unusual Weather on Regional Paddy Rice Yield in Japan (M. Nishimori)”
- (24) AESTO News No. 4, 4 (2004)  
「温暖化で水稲栽培適期と収量が変わる？ (林 陽生)」
- (2) 口頭発表 (学会)
- ① 西森基貴、井上聡、山村光司、石郷岡康史、鳥谷均、横沢正幸、林陽生：農業環境工学関連4学会2002年合同大会 (2002)  
「生育阻害要因を考慮した日本の水稲生産の脆弱性の評価」

- ② 横沢正幸, 陶 福祿, 林 陽生, 林 而達: 農業環境工学関連 4 学会2002年合同大会 (2002)  
「中国における農耕地の土壌水分環境の変動と農業生産への影響」
- ③ 西森基貴: シンポジウム ‘気候の影響と利用—日本の気候特性を再考する—’ (2002)  
「日本における気象災害の変遷と今後の見通し」
- ④ 大野宏之、矢吹伯裕、大畑哲夫、水津重雄: 2002年度日本雪氷学会全国大会 (2002)  
「融雪指数の定量的利用に関する研究」
- ⑤ H. Nakagawa: International Rice Research Conference, Tokyo, Japan (2002)  
“Impacts of climate change on rice production and adaptive technologies”
- ⑥ 白岩立彦、中川博視、堀江武、松井勤、本間香貴: 第213回日本作物学会 (2002)  
「タイ稲作の生産変動実態ならびに降雨量が生産変動に及ぼす影響」
- ⑦ 本間香貴、堀江武、白岩立彦、C. Thongthai、N. Supapoj: 第214回日本作物学会 (2002)  
「東北タイ天水田地域におけるイネの出穂遅延から見た水ストレスの地形連鎖分布」
- ⑧ 大野宏之、矢吹伯裕、大畑哲夫: 日本気象学会2003年度春季大会講演予稿集 (2003)  
「融雪速度のリモートセンシング」
- ⑨ 西森基貴: シンポジウム ‘気候変化と健康’ (2003)  
「温暖化影響評価に利用可能な気候変化シナリオについて」
- ⑩ M. Yokozawa, F. Tao: World Climate Change Conference, Beijing, China (2003)  
“Risk analysis of cropland suitability in China under climate variability and change”
- ⑪ 杉浦俊彦、横沢正幸、黒田治之、杉浦裕義: 農業環境工学関連 5 学会2003年合同大会 (2003)  
「年平均気温から推定した地球温暖化によるリンゴ及びウンシュウミカン栽培適地の移動」
- ⑫ 中川博視、岡田邦子、濱崎明博、堀江武: 第216回日本作物学会 (2003)  
「水稻個葉光合成の光・CO<sub>2</sub>濃度反応の品種間差」
- ⑬ 堀江武、吉田ひろえ、白岩立彦、中川博視、黒田榮喜、佐々木忠勝、萩原素之、小葉田亨、大西政夫、小林和広: 第216回日本作物学会 (2003)  
「アジア広域環境下におけるイネの生育・収量形成の遺伝子型・環境相互作用の解析 1. アジアイネネットワーク試験 (ARICENET) での生育・収量の遺伝的・環境的変異」
- ⑭ 本間香貴、堀江武、白岩立彦、N. Supapoj: 第216回日本作物学会 (2003)  
「東北タイ天水田地帯における水稻収量の年次および空間変動に関する研究 第1報 天水田における水稻収量予測モデルの構築」
- ⑮ 本間香貴、堀江武、白岩立彦、N. Supapoj: 第216回日本作物学会 (2003)  
「東北タイ天水田地帯における水稻収量の年次および空間変動に関する研究 第2報 天水田における水稻収量予測モデルのバリデーション」
- ⑯ M. Yokozawa and F. Tao: World Climate Change Conference, Moscow, Russia (2003)  
“Risk analysis of cropland suitability in China under climate variability and change”
- ⑰ 本間香貴、堀江武、白岩立彦: 第218回日本作物学会 (2004)

「モンスーンアジアにおける米の生産変動に関する研究. 1. 不作年における米生産の特徴と気象要因との関連性」

- ⑱ 吉田ひろえ、堀江武、大西政夫、桂圭佑：第218回日本作物学会（2004）  
「アジア広域環境下におけるイネの生育・収量形成の遺伝子型、環境相互作用の解析. 2. 面積あたりの穎花数の遺伝的・環境的支配要因と穎花数推定モデル」
- ⑲ 大角壮弘、吉田ひろえ、濱崎明博、堀江武：第218回日本作物学会（2004）  
「アジア広域環境下におけるイネの生育・収量形成の遺伝子型、環境相互作用の解析. 3. 個々光合成速度の遺伝的変異のモデル解析」
- ⑳ 吉田ひろえ、堀江武：第218回日本作物学会（2004）  
「アジア広域環境下におけるイネの生育・収量形成の遺伝子型、環境相互作用の解析. 4. バイオマス生長のモデル化とシミュレーション」
- (21) 河津俊作、本間香貴、堀江武、白岩立彦：第218回日本作物学会（2004）  
「わが国の稲作温度環境の長期変化について」
- (22) 西森基貴：‘地球温暖化防止フォーラムー地球温暖化は本当に起こっているのかー’（2004）  
「地球温暖化と農業・食料生産の危機」
- (23) M. Yokozawa and F. Tao: International Symposium on Global Climate Change and Agricultural Disasters Mitigation Techniques (2004 GCAD), Taichun, Taiwan (2004)  
“Risk Analysis of Cropland Suitability in China under Climate Variability and Change”
- (24) 吉田ひろえ、堀江武：第219回日本作物学会（2005）  
「アジア広域環境下におけるイネの生育・収量形成の遺伝子型、環境相互作用の解析. 5. イネの生育・収量形成過程のモデル化とシミュレーション」
- (25) 中川博視、朱徳峰、横沢正幸、堀江武：第219回日本作物学会（2005）  
「気候変動が中国の水稲収量に及ぼす影響の予測」
- (26) 西森基貴：第5回ソバ研究会  
「最近の異常気象・気候の変化と作物生産」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後とも、論文発表やIPCC関連の集会などでの発表を通じ、成果の広報・普及に努める。