

B-11 地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究

(4) 農業生態系の脆弱性に関する研究

農林水産省独立行政法人農業環境技術研究所

地球環境部

林 陽生

地球環境部気象研究グループ気候資源ユニット

鳥谷 均、石郷岡康史、後藤慎吉

地球環境部気象研究グループ大気保全研究室

井上 聡

地球環境部食糧生産予測チーム

横沢正幸、西森基貴

生物環境安全部昆虫グループ個体群動態ユニット

山村光司、田中幸一

企画調整部

清野 裕

宮崎公立大学

内嶋善兵衛

京都大学農学研究科

堀江 武、中川博視

平成11～13年度合計予算額 29,599千円
(うち、平成13年度予算額 9,291千円)

〔要旨〕地球規模の温暖化は、農業生態系に大きな影響を及ぼすことが考えられる。特に近年、温暖化の予測研究の基盤となる技術開発が進み、従来に増して精度の高い影響評価の研究がスタートした。日本周辺の温暖化の規模は、地球上でも最も大きいことが指摘された。本研究では、グリッド間隔10kmの詳細なメッシュサイズの温暖化シナリオ（気候変化メッシュデータ/日本）を準備しこれを用いて、水稲の潜在収量への影響、害虫の世代数への影響、水稲の高温不稔にあたる影響、積雪量変化が水稲栽培へ及ぼすの影響、さらに日本含む東アジアの農業気候資源と植物生産力への気候変化の影響に対して適用した。その結果、温暖化条件で収量を高く維持するために最適な栽培期間が選択された場合でも、全国平均でみた収量は減少することが明らかになった。原因としてイネの高温不稔が考えられるが、この点に関して実験的研究を行い、特定の生育ステージにおいて高温と高二酸化炭素濃度条件とが干渉し、イネの生育に影響することを明らかにした。この一方、水稲害虫の世代数も増大することから、温暖化時における世代数の地理的分布を予測した。また、温暖化が進行すると、降積雪量の減少および早期の融雪が起こると予測され、河川流量の変化が起こり必要な時期に水資源が逼迫する可能性を指摘した。温暖化時における東アジア気候の比較的長期的な予測から、暖かさの指数が現在の位置より数百キロ北へ移動すること、日本周辺では潜在的純一次生産量が平年の約70%まで変化する可能性を指摘した。最後に、日本の水稲栽培への影響評価のため、脆弱性マップを作成し負の影響の地域を明らかにした。

〔キーワード〕 温暖化シナリオ、脆弱性、農業生態系、影響評価、水稲栽培

1. はじめに

IPCCの第三次評価報告書SPM-I（第一作業部会報告 - 政策決定者向け要約）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起因することが明らかになった。この0.6℃という値は、第二次評価報告書の1994年時点の見積もりより約0.15℃高い値である。このような近年の急激な昇温は、1998年が観測史上最も暖かい年であったこと、1990年代が最も暖かい10年間であったことから裏付けられる。また降水量については、気温ほど系統的な変化は現れなかったが、北半球の中・高緯度地帯を中心として5～10%増加したことが示された。

過去100年間の気温と降水量の変化については、世界の地域ごとに整理した報告¹⁾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(1.0℃)かつ降水量増加の割合が同地域で最大(約12%)であったことが示唆されている。この傾向が今後も継続すれば、日本の農業生態系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。

それでは、日本の農業を考えた場合どのような影響が現れるのだろうか。これまでの研究によると、温暖化により乾物生産量の増大や栽培可能期間の拡大などといった好ましい影響が考えられる一方、高温ストレスの影響、雑草の繁茂や害虫の繁殖による被害の発生など好ましくない影響が及ぶことが予想される。これらの脆弱性の評価が、最終的に食糧生産量の将来予測に貢献することが期待される。

2. 研究目的

温暖化は日本の農業生態系に大きな影響を及ぼすと考えられるため、確度の高い影響予測と脆弱性の評価が求められる。この点に答えるため、気候資源分布への影響と日本において重要な作物である水稲栽培への影響に焦点を絞り、次の5つの細部課題を設定し研究を実施した。すなわち、(1)日本各地における気候変化の予測値の推定、(2)温暖化による潜在的水稲収量変化の地域差の解明、(3)温暖化が害虫の世代数の増加に及ぼす影響の解明、(4)温暖化が水稲の高温不稔に及ぼす影響とその予測、(5)温暖化による積雪量変化が水稲栽培へ及ぼす影響の予測、(6)東アジアの農業気候資源と植物生産力への気候変化の影響の解明、を行う。また日本の水稲栽培への負の影響を評価するため、(7)脆弱性に関するマップの作成、を行い総合的な考察を加える。

3. 研究方法

(1) 気候温暖化シナリオの作成

温暖化の影響の解明には、GCMによる予測結果を合理的な手法で詳細なメッシュ化を施したデータベースが不可欠である。気象要素としては、日本の水稲栽培のように灌漑施設が整備された地域を対象とする場合には、気温および日射量が必要である。ここで問題となるのは、同じ温室効果ガス排出シナリオ(IS92a)に基づいたとしても、GCMによって予測結果が異なる点である。この問題に対処するため、4種のGCM(オーストラリアのCSIRO-Mk2、ドイツのECHAM4、日本のCCSR/NIES、カナダのCGCM1)予測値についてそれぞれグリッド間隔10kmの温暖化シナリオ(気候変化メッシュデータ/日本)に加工し、解析に利用した。

さらに、GCMごとに予測結果が異なる問題点を軽減するため、4種のGCMの予測値に対してダウン

スケール処理を施した後、気象要素ごとに平均値を求めて平均的な温暖化シナリオを作成した。このシナリオは、標準的な条件での検討を行う場合に利用した。

(2) 登熟量指数の算定

従来、SIMRIW²⁾、ORYZA1³⁾、CERES-RICE⁴⁾などの作物モデルを用いた環境変動に対する応答の研究が行われ、特定地域の水稲収量の変化、年次変動、地域間差などが明らかになっている。しかし、これらのモデルには多数のパラメータが必要で、限られた要素を用いて広域での影響評価を行う場合には適さない。一方、GCMが予測の対象としている気象要素は、気温、降水量、日射量である。そこで本報告では気温と日射量のみから算出が可能な気候登熟量指数を利用し、水稲栽培へ及ぼす影響を解析した。

気候登熟量指数は、従来の研究^{5)、6)、7)}により提案されたの概念で、理想的な条件で栽培を行った場合における収量、すなわち潜在的収量である。本研究では、メッシュ気候値やアメダスデータなどの新しいデータセットおよび全国152作柄表示地帯（沖縄県を除く）の水稲栽培データ（品種：コシヒカリ、ササニシキ、日本晴れ）を用いて改めて解析を行い、出穂以降40日間における積算日射量（Sr）当たりの収量の上限值が同期間の日平均気温（ T ）に依存する関係（図1）が明らかになった。この上限値の関係、すなわち気候登熟量指数（ Y ）は次式で表すことができる。

$$Y = Sr \{1.28 - 1.92 \cdot 10^{-2} (21.9 - T)^2\}$$

上式は、登熟期間の日平均気温が21.9℃の場合に最も潜在的収量が多いことを示している。従来の研究では日平均気温が21.4℃で最大の潜在的収量になる結果が示されており、今回求めた値はその値とほぼ等しかった。これより、今回の方法が合理的であることが裏付けられた。

(3) 害虫世代数の推定

地球温暖化によって害虫の発育速度が変化し、最終的に害虫発生量や作物の被害量に影響することが予想される。その影響について、ニカメイガ *Chilo suppressalis* (Walker)、およびイネ縞葉枯病を媒介するヒメトビウンカ *Laodelphax striatellus* (Fallen) を例として取りあげて検討した。

一般に昆虫は、温暖化が進むにつれて、単に受動的にそれに反応するだけではなく、進化あるいは移動という手段によって能動的に温暖化に順応できる可能性も十分に考えられる。このためニカメイガについては、台湾に存在する休眠しない系統（非休眠系統）の発育ゼロ点と有効積算温度定数を用いて世代数を計算し、その端数を切り捨てることにより進化後の世代数を予測した。

イネ縞葉枯病ウイルスに対するイネの感受期は、移植後1ヶ月程度の短期間に限られ、十分に成長したイネはウイルスに感染しない。温暖化が進むにつれてヒメトビウンカの発生時期が早期化するため、イネの感受期とヒメトビウンカの発生時期の同調程度が変化し、その結果としてイネ縞葉枯病の発生危険地帯がシフトする可能性がある。将来にわたって移植時期が変化しない場合を想定し、大雑把な指針として6月1日前後に世代数の境界線が存在した場合にそこは危険地帯であると判断することにより、温暖化に伴う危険地帯を予測することができる。ヒメトビウンカの発生時期の計算においては日射による昆虫の体温上昇の影響も組み込んだ。

(4) 不稔歩合の推定

イネは栄養生長過程に比較して生殖生長過程の高温感受性が高く、特に開花期の高温による不稔穎花の発生が、地球温暖化時に収量の低下と生産の不安定化をもたらす要因として危惧されている。そこで、高温・高CO2濃度環境がイネの稔実に及ぼす影響を実験的に解明するとともに、そ

これらの現象をサブモデル化してイネの生長・収量のシミュレーションモデルに組み込み、温暖化環境がイネ生産に及ぼす影響を評価、予測した。

開花期の高温による不稔の品種間差異の実験では、代表的な9品種を野外で栽培した。解析の対象となる出穂期に、6日間連続して温度・湿度処理を与えた。

代表的品種ごとに、不稔歩合予測サブモデルのパラメータを求め、4種の気候シナリオ（気候変化メッシュデータ/日本）と高温不稔予測モデルを用いて、今世紀末に予想される気候条件のもとで水稻品種の不稔歩合を予測した。

4. 結果・考察

表1 日本の各地方における気候変化の予測

5月～9月の平均値(気温、日射量)と積算値(降水量)				
地方	要素	基準年	2030年代	2060年代
北海道	気温(°C)	16.3	18.8	19.9
	降水量(mm)	631	686	659
	日射量(MJ/day)	15.6	15.4	15.5
東北	気温(°C)	19.1	21.3	22.4
	降水量(mm)	735	878	889
	日射量(MJ/day)	15.8	15.3	15.2
関東	気温(°C)	21.9	23.9	25.1
	降水量(mm)	836	1040	1039
	日射量(MJ/day)	15.3	14.5	14.3
甲信越/北陸 /東海	気温(°C)	21.0	23.1	24.3
	降水量(mm)	1078	1351	1369
	日射量(MJ/day)	16.2	15.5	15.2
近畿	気温(°C)	22.3	24.3	25.5
	降水量(mm)	1183	1482	1502
	日射量(MJ/day)	16.4	15.5	15.3
中国/四国	気温(°C)	22.1	24.0	25.2
	降水量(mm)	1225	1489	1592
	日射量(MJ/day)	16.6	15.9	15.6
九州	気温(°C)	22.9	24.8	26.0
	降水量(mm)	1454	1735	2014
	日射量(MJ/day)	16.6	16.0	15.6

(1) 日本各地における気候変化の予測値の推定

温暖化シナリオの特徴を知るため、各地方の水稻栽培地域における主要な栽培期間(5月～9月)の気温、日射量、降水量について、基準年(現在)、2030年代および2060年代の値を表1にまとめた。これより、(i)5～9月の平均気温は年代とともに全国的に上昇し、例えば2030年代の関東地方の気温は現在の九州地方と同程度となる、(ii)2060年代には北海道地方で約3.7℃、九州地方で約3.1℃上昇する、(iii)気温上昇の規模は高緯度地方ほど大

きい傾向がある、(iv)5～9月の積算降水量は各年代とも全国的に増加するが、北海道地方以外で増加の割合が大きく、特に中国・四国地方および九州地方では2060年代に30%程度増加する、(v)降水量が増加するに伴い日射量は減少する、などの地域特性が現れることが明らかになった。

(2) 温暖化による潜在的な水稻収量変化の地域差

① 最適出穂日の変化

将来の気候条件で水稻栽培がどのような影響を受けるかについて考察する場合、次の点が重要

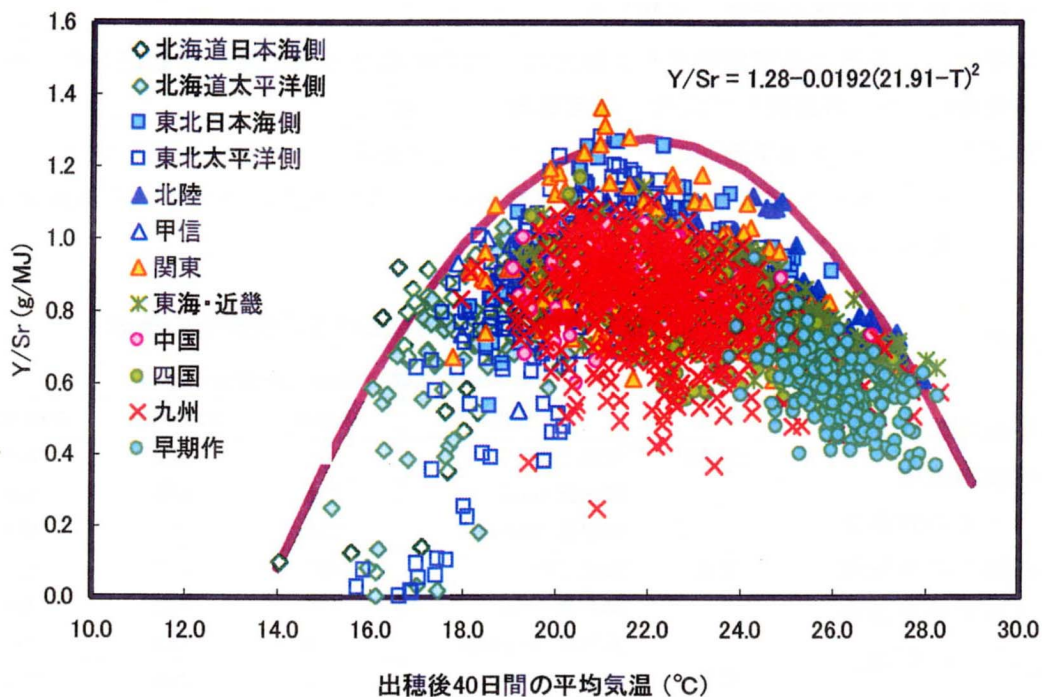


図1 現在の気候条件における気候登熟量指数の関係

である。すなわち、温暖化により (i) 移植早限日 (最も早い移植可能日) が前進する効果、(ii) 移植から出穂までの期間が短縮する効果である。前者は稚苗の耐冷性との関係で決まり、後者は温暖化により移植から出穂までの生育に必要な積算温度が短期間で獲得可能となるために発現する。これまでの研究^{8), 9)}でも、温暖化に伴って最適な栽培期間を選択する自由度が増すことが認められ、生産量を予測するうえで極めて重要であることが指摘されている。

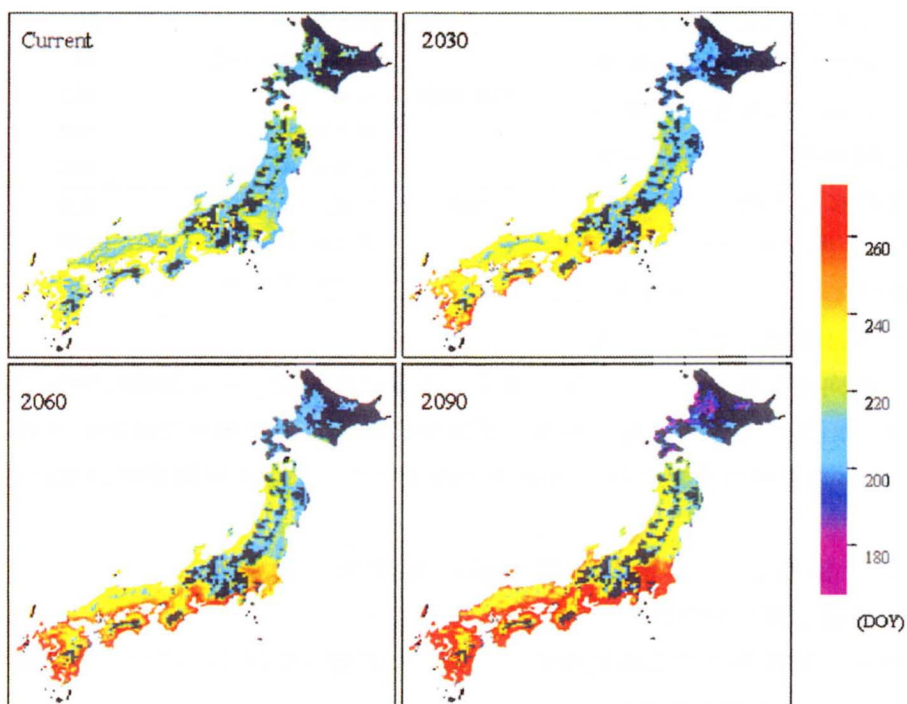


図2 各年代別の最適出穂日(4GCM平均)

予備的解析を行った結果、移植早

限日の日平均気温は北海道および東北・甲信越地方では約12℃、関東以西では約16℃であること、

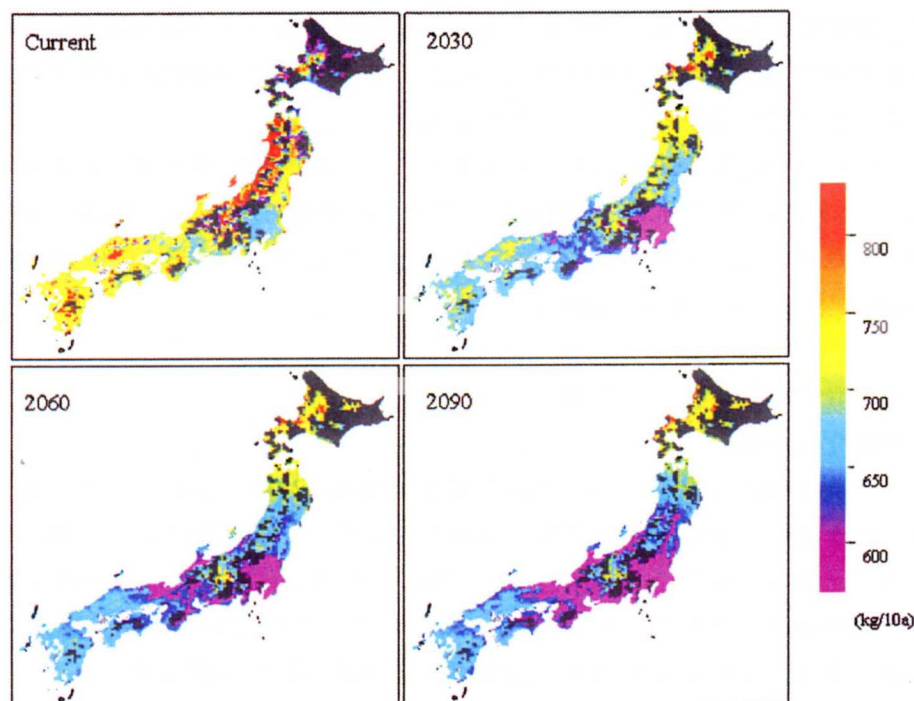


図3 各年代別の最大登熟量指数(4GCM平均)

移植から出穂までの積算気温は北海道地方から東北・甲信越地方では高緯度ほど小さく1200℃日～1600℃日、関東以西の地方では多少ばらつくが緯度に依存せずほぼ1700℃日～1750℃日以上であることが明らかになった。

これらの効果を考慮し、最適出穂日（最大の気候登熟量示数を得ることが期待できる出穂日）を求めた。現在と将来

の最適出穂日を比較すると、北海道地方では基準年から2030年代にかけて7日、さらに2060年代には10日早まると予想された。一方、東北地方以南では年代とともに現在より遅れが拡大し、2060年代ころの最適出穂日は、北海道地方を除き現在よりほぼ2週間～3週間遅延することが予想された。北海道を除く全国の水稲栽培地域で最適出穂日が遅れる理由は、出穂後40日間に遭遇する高温を避けることで高位の収量が確保できるためと考えられた。

現在、2030年代、2060年代、さらに比較のため2090年代の最適出穂日の分布を図2に示した。スケールの数値は1月1日を起日とした日数を、図の黒い地域は水稲栽培が行われていない地域を示す。分布図から明らかな特徴は、北海道および青森県の太平洋側では、最適出穂日が年代とともに徐々に早まる、中部地方から東北地方の山地では2060年代まではあまり変化が無いがその後遅れる、関東地方以西では山地を除き全般的に遅れる傾向が明瞭、などである。特に関東地方では遅延日数の幅が大きい。全国的に北日本で最適出穂日が早まり西南日本で遅延するという、いわば二極分化が顕在化すると予想された。ここで指摘すべき点は、最適出穂日に合わせて栽培期間を変更することが選択されてはじめて、高い収量が確保できることである。

② 潜在的収量変動の地域性

現在、2030年代、2060年代、2090年代における潜在的収量の分布を図3に示した。現在の気候条件において潜在的収量が最も大きい地域は秋田県、山形県、新潟県一帯の東北地方における脊梁山脈の日本海側に分布している。次いで大きい地域は中国地方、九州地方および宮城県の内陸部周辺である。これに対して、関東地方周辺では広範囲にわたって潜在的収量は小さい。これらの地理的分布の特徴は、内島・羽生（1967）が本研究とは異なる方法で定義した気候登熟量示数の分布と非常に良く一致した。

図3で最大の特徴は、北海道を除き年代とともに気候登熟量示数が減少する点である。この理由は、最適な栽培期間を選択した場合でも、温暖化により出穂後40日間の日平均気温が上昇して高温による生育障害が発現する頻度が増すためと考えられた。こうして2060年代～2090年代には、中部日本の広い範囲で低い潜在的収量となることが予想された。

2060年代に関して地方別に予想収量を求めると、北海道地方でのみ約13%増大するほかは、東北地方で8%、関東地方で13%、甲信越/北陸/上越地方で12%、近畿地方で15%、中国/四国地方で13%、九州地方で12%それぞれ減少する。全国平均で見ると、現在の722kg/10aから2060年代の648kg/10aへと、約10%減少することが推定された。

(3) 温暖化が害虫の世代数の増加に及ぼす影響

① ニカメイガの世代数変化の分布

はじめに温暖化前の世代数を推定したところ、日本の多くの地域では年2世代であり、東北地方の北部、北海道地域では1世代、高知の南部では年3世代であることが予想され、これは1970年頃の実際の世代数マップとほぼ一致した(図4左)。2060年代のニカメイガの世代数をオーストラリアの連邦科学産業研究機構(CSIRO)の全球気候モデルのデータを用いて推定したところ、温暖化前と比べて日本全国を通じてほぼ1世代ずつ増加すると予想された(図4右)。

② ヒメトビウンカの世代数変化の分布

現在の気候条件の6月1日には、北海道と関東以南に世代の境界線が存在することから、この付近は発病の危険地域であると予測された(図5左)。東京大学気候システム研究センター/国立環境研究所のGCM(CCSR/NIESモデル)の結果から2060年代の6月1日における世代数を計算したところ、北海道では世代の境界線は消えて危険地帯から外れることが示唆された。しかし、東北、北陸地方には第1世代と第2世代の境界線が現れたことから、これらの地域ではイネ縞葉枯病発生の潜在的な危険性が増加すると予想された。

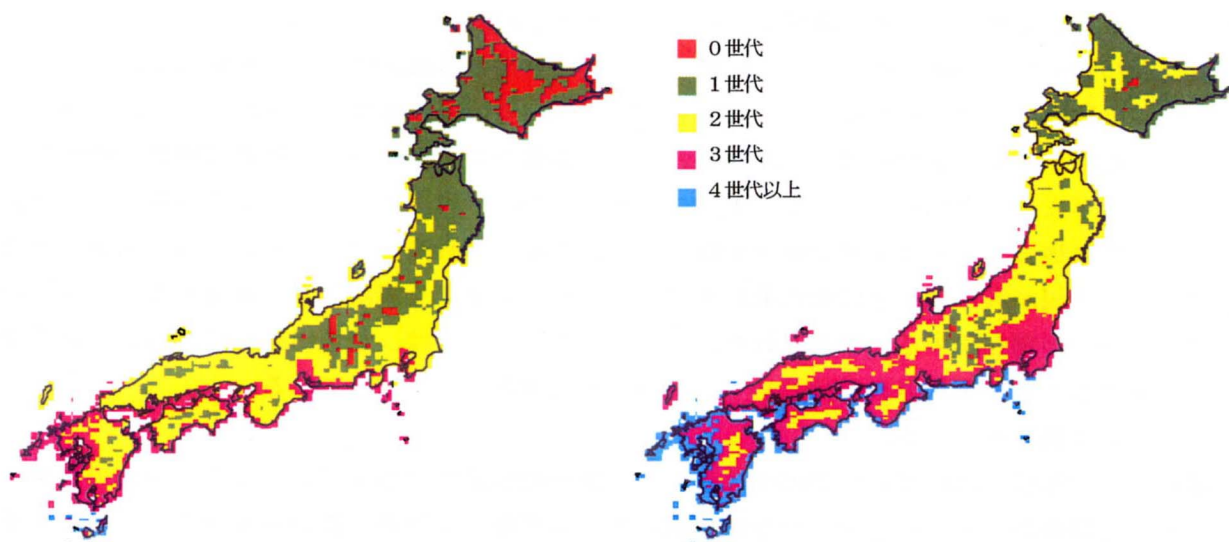


図4 ニカメイガの年間発生世代数の予測値

左：1952～1982年の平均気温データを用いて予測した世代数マップ。日本全体の年平均気温は11.1℃。右：オーストラリアの連邦科学産業研究機構(CSIRO)の全球気候モデルから予測した2060年代の気候に対応する世代数マップ。日本全体の年平均気温は14.0℃。

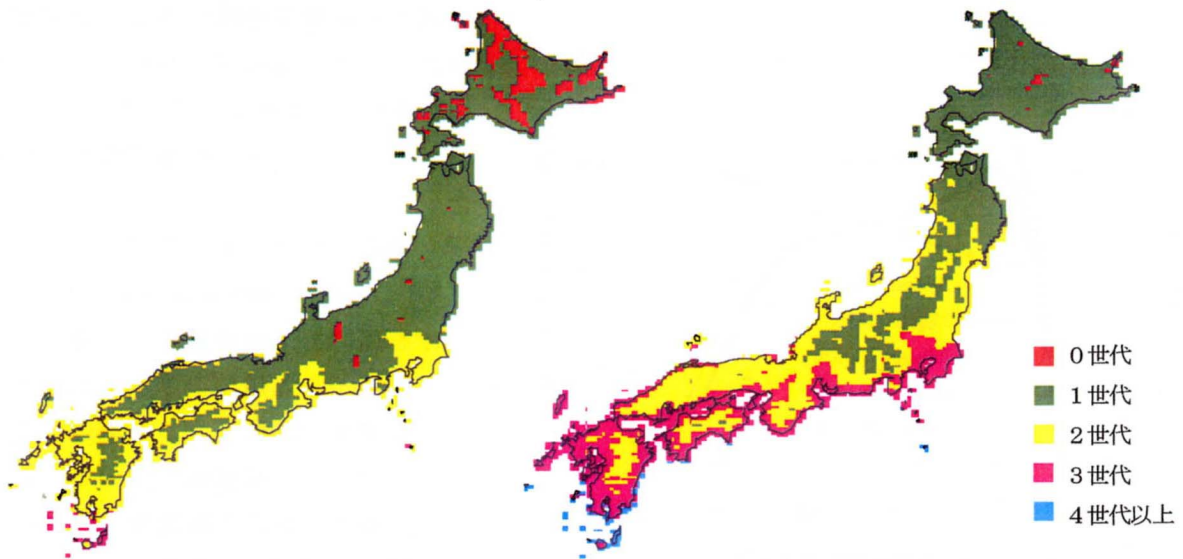


図5 6月1日におけるヒメトビウンカの世代数予測値

イネの感受期とヒメトビウンカ発生と同調性の面から考えて、世代の境界線付近がイネ縞葉枯病の危険地帯であると判断される。左：1952～1982年の平均気温データを用いて予測した世代数マップ。右：東京大学気候システム研究センター/国立環境研究所の全球気候モデルから予測した2060年代の世代数マップ。

(4) 温暖化が水稲の高温不稔に及ぼす影響とその予測

① 高温不稔の特徴

稔実歩合は、各品種ともに35℃では約95%であったが、37.5℃、40.0℃では低下した。供試品種中、高温不稔について最も高温耐性の大きい品種はあきたこまち、最も感受性の大きい品種はヒノヒカリであった(表2)。稔実歩合が50%に低下する温度範囲において、感受性の大きい品種と高温耐性品種の間の品種間差は約3℃であった。

② 異なるCO2濃度条件下での収量の温度依存性

高CO2濃度条件下での結果を、日射-乾物変換効率の温度・CO2濃度反応モデルに適用し、気象-水稲生育モデルS IMRIWに組み込み、水稲生産に及ぼす温度とCO2濃度の相互作用を解析した(図6)。CO2濃度が2倍になるとすべての温度条件で増収すること、その際増収率は温度上昇に伴い増加するがその程度は1℃当たり約1%と極めて小さいこと、平均気温31℃以上ではCO2濃度に依存せず不稔率

表2 37.5℃および40.0℃の日中温度条件下における日本型水稲9品種の稔実歩合

Group	Variety	Place of breeding station*	Percent fertility	
			37.5 °C**	40.0 °C**
Tolerant	Akitakomachi	N	80.0	50.3
	Nipponbare	M	85.3	35.0
Moderate	Aichinokaori	M	78.2	19.8
	Yumehikari	W	74.3	22.9
	Akihikari	N	65.2	22.2
	Kinmaze	M	65.9	13.2
	Aoinokaze	M	58.4	19.9
Susceptible	Minamihikari	W	45.7	19.2
	Hinohikari	W	44.1	13.7

* N: North Japan, M: Middle Japan, W: West Japan

** Day temperature (10:00-16:00)

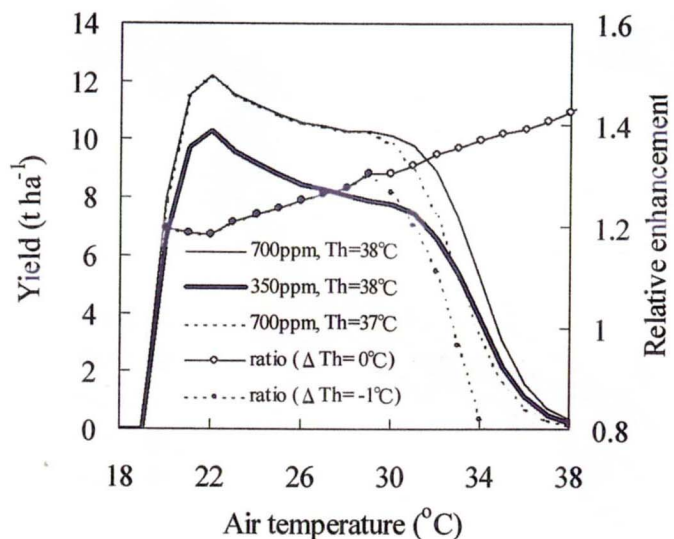


図6 改良型SIMRIW（水稻の気象-生長モデル）によって推定された水稻品種日本晴の収量の温度・CO₂濃度反応
 高温不稔の温度反応は、アキヒカリのものを用いた。環境は定常条件とし、温度日較差を8°C、全天日射量を20 MJ m⁻² day⁻¹、日長を12時間とした。高CO₂濃度条件では、高温によって稔実歩合が最大値の50%となる温度（Th）が自然CO₂濃度条件下に等しい場合、および1°C低下する場合の両者について示した。シンボル付きの曲線は、CO₂濃度が2倍になったときの各温度条件における増収率を示している。

が増大し収量が激減することなどが示された。また、高温域においては、不稔発生温度・CO₂濃度反応のモデル化とパラメタリゼーションの重要性が指摘された。

③ 高温不稔発生率の分布

8月の月平均最高気温が最も高いシナリオを用いて不稔の発生を予測したところ、関東から九州の沿岸部で高温不稔により稔実歩合が低下する可能性が指摘された（図7）。高温耐性弱のヒノヒカリでは、濃尾平野、大阪湾岸、瀬戸内、九州沿岸の一部で、不稔歩合が40%を超える地域が出現すると予測されたが、高温耐性が強いあきたこまちでは、予測された不稔歩合の最大値は約20%であり、大部分が10%以下の不稔歩合であった。

最も温度上昇幅の小さい気候シナリオを用いた予測では、高温感受性品種の場

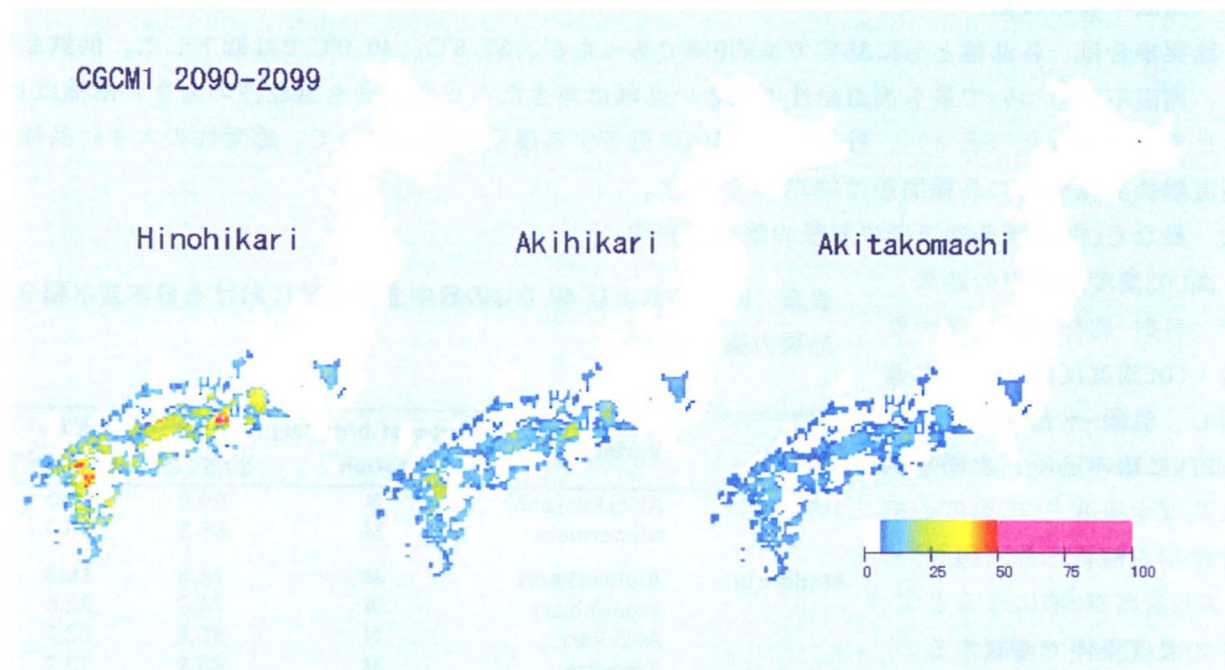


図7 温暖化のもとで発生が予測される水稻の開花期の高温による不稔穎花の発生率（不稔歩合、%）分布

計算には、カナダ気候モデル・解析センターのCGCM1モデルによる2090年代の8月の日最高気温の月間平均値（Yokozawa et al., 2001）とイネの生育予測モデルSIMRIWの高温不稔サブモデルを用いた。高温耐性弱（ヒノヒカリ）、中（アキヒカリ）、強（あきたこまち）の3品種について予測した結果。

合でも、高温不稔の見られる地域はごく限られた範囲であった。今世紀末の温度上昇幅が最も大きなシナリオと小さなシナリオによる、8月の最高気温の差は約1.3℃(0.4℃~2.4℃)と幅が広い。西南暖地では僅かな気温の違いで稔実歩合が大きく変化することが示唆された。これらの予測は、月平均最高気温の平年値に基づいているので、実際に、日変動、年変動が加わるとさらに不稔率が高まることが懸念された。

以上の結果から、高温耐性品種の導入によって、開花期の高温による稔実歩合の低下がかなり緩和されることと同時に、最も気温上昇の厳しいシナリオ通りに気候が変化すれば、西南暖地の一部で収量の低下と不安定化が起こり、安定した生産が困難となる地域が出現する可能性が示唆された。

(5) 温暖化による積雪量変化が水稻栽培へ及ぼす影響

① 降積雪量の変化

日本列島では、地球温暖化にともない降積雪量が減少することが予測されている¹⁰⁾。降積雪減少は、農林生態系のみならず社会に対しても多くの影響を与えると考えられる。そこで降積雪シナリオを作成し、降積雪量の減少による河川流量変化が水稻栽培へ及ぼす影響、および水稻害虫であるツマグロヨコバイの個体数の越冬と降積雪量との関連について検討した。

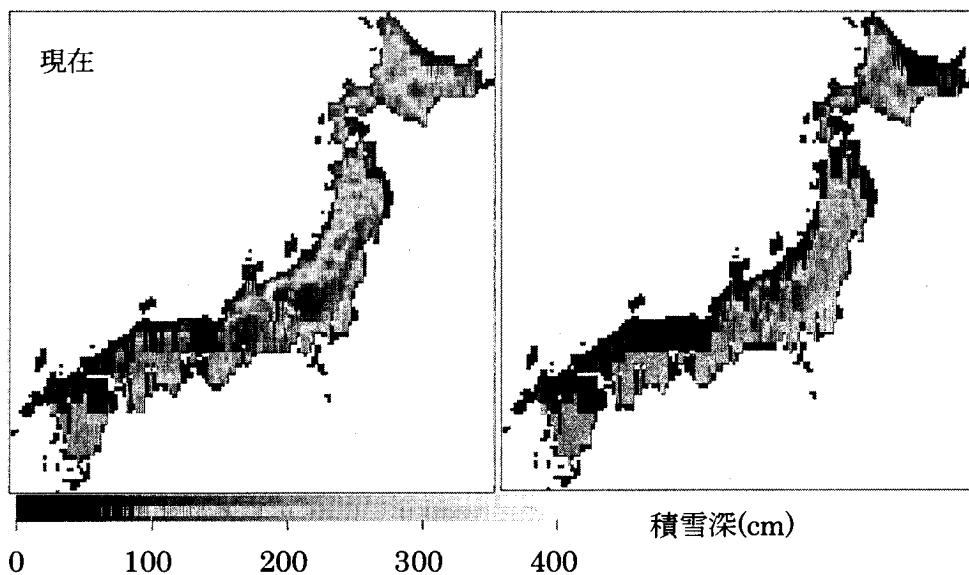


図8 現在と2090年代における降積雪深分布の比較

現在：左図、2090年代：右図

温暖化条件における降積雪環境について、以下のような共通した地域的な特徴が明らかになった。北海道と本州山岳地域で、冬季降雪深は変化しないが、最深積雪が減少する。積雪時の雪質は、乾き雪またはしもざらめのまま変わらない。東北地方では、山岳地域を除き降雪深と最深積雪は減少し、

乾き雪から湿り雪になる。北陸地方以南の日本海側平野部では、降雪や積雪が起こらなくなる。現在降積雪がほとんど発生しない地域では降積雪は増加しない(図8)。

② 河川流量への影響

温暖化により降積雪量が変化し、これが河川の流量変化を介して水稻栽培に必要な農業用水資源の変化に影響が及ぶと考えられる。この問題について以下の解析を行った。対象河川流域のメッシュごとの月融雪水量と月降雨量との和を求め、この和を流域で集計し、賦存係数(年平均降水量に対する平均水資源賦存量の比)を掛けたものを月流量と仮定した。融雪量と降水量に現在と2090年の予測値を入力し、温暖化時における流出特性の変化について解析した。この結果、太

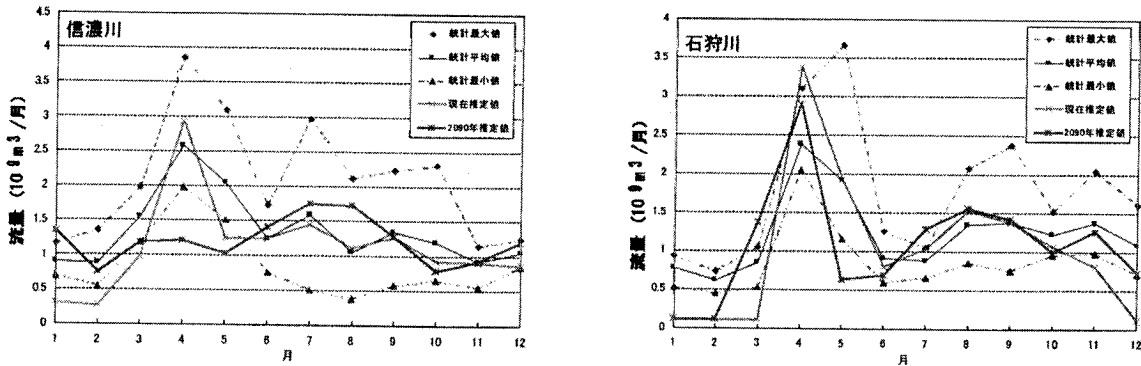


図9 温暖化条件における流出特性の変化（左：信濃川、右：石狩川）
 青色一点鎖線：1989年～1998年の最大であった統計値を繋いだもの、
 青色二点鎖線：同最小値、青色実線：同平均値、
 緑色：現在の推定値、赤色：2090年の推定値

平洋側や西日本の河川では流出特性の変化が小さいことが明らかになった。東北・中部日本海側河川では、降雪水量の減少により4月の流出ピークが消失し、冬季の降雨量の増加により流量が増加することが示された（図9）。水稻栽培への影響で一番重要と考えられるのは、春先の水稲移植期における水田灌漑用水への影響である。この点に関しては、流量が減少したり流量が最大になる時期が現在より1ヶ月程度早まる影響が現れることが示唆された。

③ 害虫の越冬への影響

ツマグロヨコバイの個体数と降積雪量の関係については、北陸地方の3地点（高田、富山、金沢）における年間のライトトラップ総誘殺個体数の常用対数値をパラメータとした関係式を作成した。これにより、越冬する個体数は前年の個体数と降積雪深でよく説明できることが明らかになった。

（6）東アジアの農業気候資源と植物生産力への気候変化の影響の解明

巨大人口国であり高度経済成長国である中国を含む東アジアは、近未来の世界の食料需給に大きな影響力をもつ重要な地域である。このため、東アジア地域の植物生産力および食料生産力への影響の評価は、気候温暖化の影響評価および影響の軽減の研究において重要な意義を持っている。本研究では、こうした東アジア地域を対象として、気候温暖化条件が農業気候資源の豊かさへ及ぼす影響を解明した。

100年後を対象として、二酸化炭素濃度が1%/年の割合で増加した条件の予測値から、二酸化炭素濃度上昇が無い条件での予測値を引き、現在の平年気候値に加えて温暖化時の基本的な状態を推定し、これをもとに多様な指標の分布図を作成した。また、典型的な低温湿潤年および高温乾燥年として1993年と1994年を取り上げ、将来の気候変動の影響を予察する場合の参考とした。

次の指標について考察した。(i) 有効積算気温 (ΣT_{10} , degree days)、 $\Sigma T_{10} = \Sigma T_i$: ここで T_i は日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)、上式での積算は連続 $T_i \geq 10^{\circ}\text{C}$ の期間で行う。有効積算気温は、作物栽培の観点から温度資源を評価する場合に使用する。(ii) 暖かさ指数 (WI, degree months)、 $WI = \Sigma T_i$: ここで T_i は月平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)、上式での積算は連続 $T_i \geq 5^{\circ}\text{C}$ の期間で行う。(iii) 純一次生産力 (NPP, t乾物/ (ha・y))、 $NPP = 0.29 [\exp(-0.216 RDI^2)] R_n$: ここで $RDI (=R_n/L_r)$ は放射乾燥度、 R_n は純放射量、 L は水の蒸発潜熱、 r は降水量。(iv) 蒸発散能 (E_o , mm)、 $E_o = [R_n +$

$A \cdot LE / \phi] / L[1 + A / \phi]$: ここで $A (= C_p / 0.622L)$ は乾湿計定数、 ϕ は温度-飽和水蒸気圧曲線の気温での傾度、 E は空気の蒸発力で、 $E = L \rho D w_0 / 0.622(d/P)$ 、である。ここで ρ は空気の密度、 Dw は水蒸気の拡散速度、 P は大気圧、 d は空気の飽差である。

以下の特徴が明らかになった。

① 平年気温と有効積算気温への影響

年平均気温の上昇は高緯度地帯（または高山地帯）ほど大きいことが明らかになった。また、作物栽培帯の分布を決定している有効積算気温への温暖化の影響は、北緯30-40度以北の地帯では、有効積算気温が50年後に15-20%、100年後には20-40%も増大し、作物栽培帯の大幅な北上が予想された（図10）。それゆえ、現在頻繁に冷害に見舞われる中国東北部の稲作域では、冷害の頻度の著しい減少が予測された。

② 暖かさ指数の分布への影響

自然植生とくに樹木種の分布を左右する暖かさ指数の分布への温暖化の影響は、冷温帯 ($45 \leq WI \leq 110$) より北の（または高い）地域では、温暖化により暖かさ指数が著しく増大し、より温暖な地域の自然植生の侵入が可能になることが予想された。

③ 等WI線の移動幅の推定

多くの古花粉学に関する研究から、最終氷期以後の自然的な温暖化による自然植生（樹種）の移動はかなり遅かったことが知られている。中国の平坦な東部季節風帯を対象にして等WI線の移動幅の推定を行った。その結果、2100年頃には、等WI線は現在の位置より熱帯域での約100kmから亜寒帯域での約650-700km北へ移動することが予想された。この結果は、暖温帯 ($110 \leq WI \leq 180$) 以北の地域で

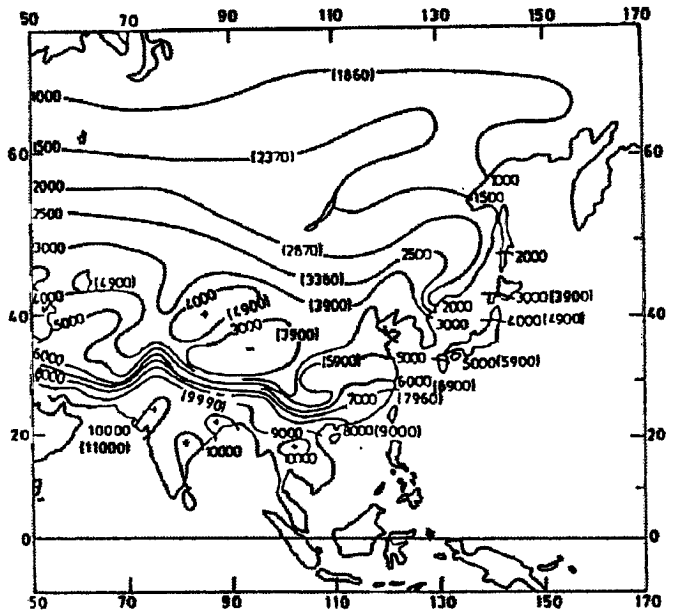


図10 有効積算温度の分布(2100年)への影響
 数値は現在の気候条件における平年値
 カッコ内の数値は、温暖化条件における予測値

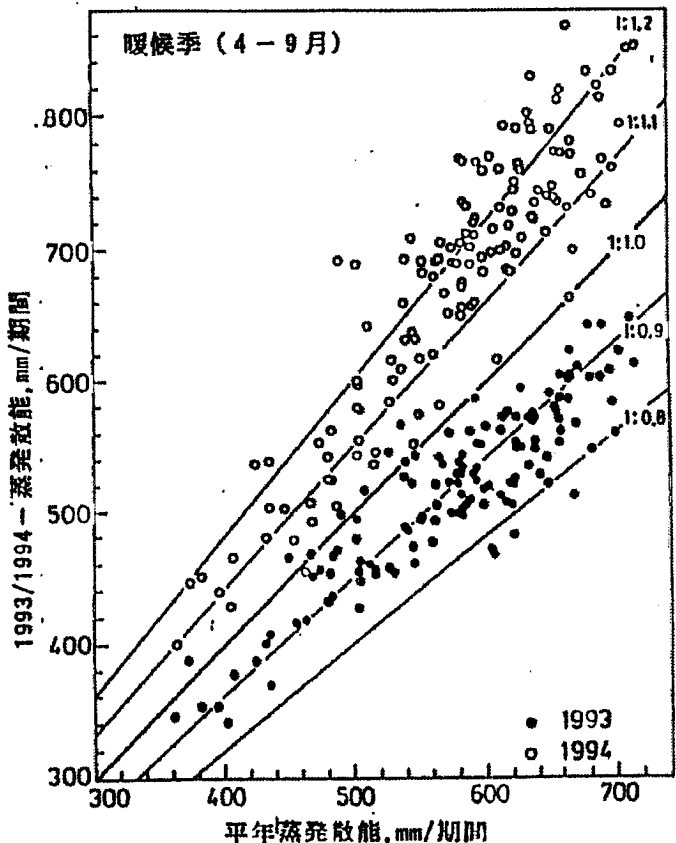


図11 蒸発散能への異常気象の影響
 ● : 1993年、低温多湿な異常年
 ○ : 1994年、高温小雨な異常年

は、温暖化による等WI線の移動速度は35km/10年以上になり、最終氷期以降の温暖化による植生（樹種）の移動速度を大きく上回っていることを示している。すなわち、現存する植生が環境ストレスに遭遇することが予想された。

④ 潜在的純一次生産量への影響

東アジアの自然植生の潜在的純一次生産量（TNP, t乾物/年）への影響として、中国西部の乾燥域では、温暖化による純一次生産量の増加は約40-50%と大きいのが、南部・東部の多湿なアジア域では増加は6-10%と小さいことが示された。

⑤ 潜在的純一次生産力への影響

日本の蒸発散能（ $E0$ ）と潜在的純一次生産力（NPP）への異常気象の影響として、典型的な冷害タイプ気候年（1993）と典型的な早魃気候年（1994）の気象値を用いて蒸発散能と潜在的純一次生産力への異常気象の影響を評価した。冷害気候年および早魃気候年における年間蒸発散能は、平年値の0.8~1.0および1.0~1.2とそれぞれ相当変化することが明らかになった（図11）。自然植生の生産力への早魃気候条件の影響は、冷害気候条件の影響より著しいことが分かった。例えば、植物成長の盛んな4-9月間に高温・少雨条件の卓越した西日本地域では、潜在的純一次生産量は平年のその約75%まで減少したと予想された。

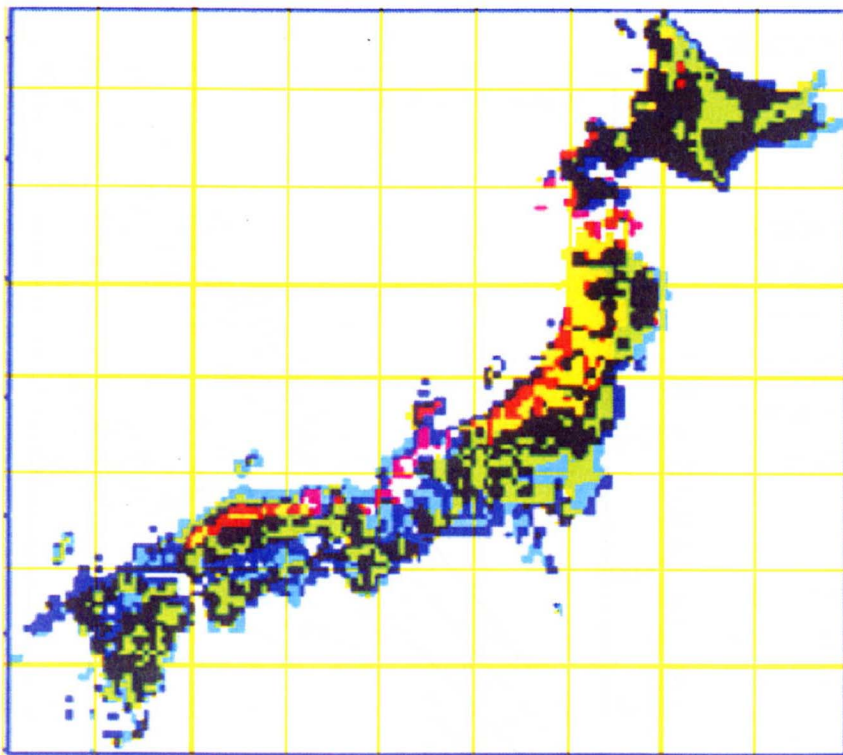


図12 気象、害虫および水資源の3要素から見た脆弱性の分布

- 白：3要素の変化に対して脆弱な地域
- 黄：害虫と水資源の変化に脆弱な地域
- 水色：気象と害虫の変化に脆弱な地域
- ピンク：気象と水資源の変化に脆弱な地域
- 赤：水資源の変化に脆弱な地域
- 緑：害虫の変化に脆弱な地域
- 青：気象の変化に脆弱な地域
- 黒：水稲栽培が行われていない地域

(7) 脆弱性マップの特徴

温暖化と同時に起こる日射量や降水量・降積雪量の変化、さらに害虫の発生などにより、日本の水稲栽培に多様な影響が及ぶことが示された。それら負の要因の組み合わせから、南西諸島の除く全国における水稲栽培の脆弱性を整理した（図12）。

この図から以下の特徴が明らかである。すなわち、(i) 北陸、南関東、四国北部および九州北西部の各地域では、高温障害の危険性が認められた。特にこれらの地域では、気温日較差が小さい条件、すなわち最低気温が高い場合に減収となることが示唆された。

(ii) 現在の気候条件では、北日本では1~2℃、東海~四国南部では0.5~1.5℃上昇しても、栽培期間の移動などに

より収量を増加させる余地があるが、近畿北部～九州にかけては十分な余地がなく、北陸や九州北西部地域などすでに高温限界を超えている地域もある。プロセスモデルに基づいた不稔歩合の発生地域の予測結果（図7）からも、西南団地で高温による不稔の発生が指摘されている。（ii）病害虫（ヒメトビウンカ世代交代数）や水資源（降雪水量減少率）という生育阻害要因の変化による脆弱性を重ねて考えると、北陸地域が3要素に対して脆弱となった。（iv）次に2要素に対して脆弱な地域は、東北日本海側地域（害虫と水資源）および南関東地域（気象と水資源）と考えられた。以上のことから、将来における水稲の安定的生産を考察するうえで、図12に示した脆弱性に関する地域特性は重要と考えられた。

5. 本研究により得られた成果

二酸化炭素濃度が上昇すれば光合成が活発化して植物の生長量は増大する。従来の研究によると、二酸化炭素濃度の倍増がイネの全乾物重増大へ及ぼす効果は25%程度と考えられている¹¹⁾。この効果は全国一律に及ぶため、基本的には二酸化炭素濃度の上昇で見積もられる収量増大の効果が高温による生育障害による減収分を補償することが考えられる。しかし、このように二酸化炭素濃度上昇を収量増大に対する好ましい効果として単純に期待することはできない。というのも、二酸化炭素濃度条件と高温条件が重なる条件を与えた実験結果（図6）において、二酸化炭素濃度が高い条件で相対的に不稔の発生率が増すことが指摘されている。

今後さらに検討を加えるべき点は次の通りである。すなわち、（i）最適出穂期に応じた栽培期間が選択された場合に、水稻害虫の世代数が増大する地帯と被害を受けやすい生育ステージとなる地帯が一致するか否かについて、両要素が相互に干渉するモデルを開発する、（ii）既存の日本稲に2℃～3℃の温度耐性の品種間差が存在することから¹²⁾、ある程度高温耐性を持った品種を導入した場合を想定する、（iii）二酸化炭素濃度が上昇すると窒素施肥が収量に及ぼす効果が変化する現象¹³⁾を、収量の推定の際に考慮する、などである。またすでに言及した通り、気候変化シナリオの予測値の幅が、しばしば現象自体の変化幅を上回る場合がある。こうした場合には、ある程度広い範囲を想定したリスク（発現危険性の確立）の概念を導入し、脆弱性を議論する必要があると考えられる。

最後に、本研究の成果の一部は、「地球温暖化の日本への影響2001」（環境省地球温暖化問題検討委員会温暖化影響評価ワーキンググループ編、2001）に活用された。このほか、本研究の過程で開発した「気候変化シナリオ/日本」および「降積雪予測メッシュデータ」は、多くの大学および研究機関へ配布され、温暖化影響の研究に対して広範に提供した。

6. 引用文献

1) 気象庁編：大蔵省印刷局，444p（1994）

「異常気象レポート'94—その実態と見通し（V）」

2) Horie, T., H. Nakagawa, H.G.S. Centeno and M. Kropff: Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia, CAB International, In: Matthews, R.B. et al. (eds.) Oxon, UK, 51-66 (1995)

“The rice crop simulation model SIMRIW and its testing”

- 3) Kropff, M. J., R. B. Matthews, H. H. van Laar, and H. F. M. ten Berge: Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia. In: Matthews, R. B. et al. (eds.) CAB International, Oxon, UK, 27-50 (1995)

“The rice model ORYZAI and its testing”

- 4) Singh, U. and J. L. Padilla: Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts, In: Rosenzweig, C. et al. (eds.), ASA, Madison, 99-122 (1995)

“Simulating rice response to climate change”

- 5) 村田吉男: 日本作物学会紀事, 33, 59-63 (1964)

「わが国の水稲収量の地域性に及ぼす日射と気温の影響について」

- 6) Hanyu, T., T. Uchijima, S. Sugawara: Bull. Tohoku National. Agric. Experimental Station, vol. 34, 27-36 (1966)

“Study on the agro-climatological method for expressing the paddy rice products”

- 7) 内島立郎・羽生寿郎: 農業気象, 22, (4), 137-142 (1967)

「本邦における水稲の気候登熟量示数の地域性について」

- 8) 清野 豁: 農業気象, 51, 131-135 (1995)

「気候温暖化が我が国の穀物生産に及ぼす影響」

- 9) 米村正一郎・矢島正晴・酒井英光・諸隈正裕: 農業気象, 54, 235-245 (1998)

「CO₂濃度および温度が変化した条件における日本の水稲収量のメッシュ気候値を用いた推定」

- 10) 井上 聡・横山宏太郎: 雪氷, 60, 367-378 (1998)

「地球環境変化時における降積雪の変動予測」

- 11) 金 漢龍・堀江 武・中川博視・和田晋征: 日本作物学会紀事, 65, 634-643 (1996)

「高温・高CO₂濃度環境が水稲の生育・収量に及ぼす影響—第1報 発育, 乾物生産および生長諸形質について」

- 12) 上田恭史・中川博視・岡田邦子・堀江 武: 日本作物学会記事, 69, 112-113 (2000)

「イネの収量および稔実歩合の高温・高CO₂濃度反応の品種間差」

- 13) Kim, H. Y., Horie, T., Nakagawa, H., Wada, K. and Seo, T.: Proc. 1st Asian Crop Science Conference: Crop Production and Improvement Technology in Asia, KSCS, Korea, 243-249 (1993)

“Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and nitrogen use efficiency of rice”

[国際共同研究等の状況]

とくになし

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① Y. Hayashi: Global Environmental Research, 3(2), 129-137 (1999)

“Paddy rice production under possible temperature fluctuation in East Asia”

- ②堀江 武、J.T. Baker、中川博視、松井 勤：気候変化と世界の作物生産性，CAB International, 81～106 (2000)
「気候変化に対する作物生態系の反応：イネ (K.R. Reddy, H.F. Hodges編)」
- ③中川博視、堀江 武：Global Environmental Research, 3, 101～113 (2000)
「高CO₂濃度と温度に対するイネの反応」
- ④Z. Uchijima and S. Ohta: Global Environ. Res. 3(2):89-99 (2000)
“Effects of climate and population density on forest areas-Global and continental View”
- ⑤T. Matusi, K. Omasa and T. Horie: Plant Production Science 3, 430-434 (2000)
“High temperature at flowering inhibits swelling of pollen grains, a driving force for thecae dehiscence in rice (*Oryza sativa* L.)”
- ⑥T. Horie, J.T. Baker, H. Nakagawa, T. Matsui and H.Y. Kim, : CAB International, UK, 81-106 (2000)
“Crop ecosystem responses to climate change: Rice., in Climate Change and Global Crop Productivity, ed. by Reddy K.R. and Hodges, H.F.”
- ⑦林 陽生：農業および園芸，養賢堂，76(5)，544 (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-」
- ⑧林 陽生：農林水産技術研究ジャーナル，24(10)，5-13 (2001)
「温暖化は我が国の農林業にどのような影響を及ぼすか-最近の研究成果から-」
- ⑨林 陽生、石郷岡康史、横沢正幸、鳥谷 均、後藤慎吉：地球環境，6(2)，141-148 (2001)
「温暖化が日本の水稻栽培の潜在的特性に及ぼすインパクト」
- ⑩林 陽生：びれっじ、(財)都市農山村交流活性化機構、39，50-52 (2001)
「温暖化と農業」
- ⑪井上 聡、横山宏太郎、大野宏之、川島茂人：雪氷，63(6)，489-499 (2001)
「地球環境変化時における降積雪の変動予測 (続報) -国内主要河川流域における降雪水量の変動」
- ⑫井上 聡、横山宏太郎、大野宏之、川島茂人：地球環境，6(2)，259-266 (2001)
「地球温暖化にともなう国内の降雪量減少の河川への影響. 」
- ⑬西村格、佐々木寛幸、浦野豊、小森谷祥明、井上聡、西村由紀：日本草地学会誌，47(1)，102-106 (2001)
「日本における自然草原の気候要因から見た植生帯区分とその温暖化による影響 4. 気候環境から見た日本の自然草原の植生帯区分とその温暖化による変化予測」
- ⑭T. Matsui, K. Omasa & T. Horie: Plant Production Science, 4, 90-93 (2001)
“The difference in sterility due to high temperatures during flowering period among Japonica-Rice Varieties”
- ⑮中川博視、堀江武：地球温暖化の日本への影響 2001(環境省地球温暖化問題検討委員会温暖化影響評価ワーキンググループ編). 150-157 (2001)
「水稻栽培への影響. 」
- ⑯中川博視：農林水産技術研究ジャーナル，24，14-22 (2001)

「温暖化による水稲収量と栽培地の変化」

⑰西森基貴、横沢正幸：地球環境，6(2)，149-158 (2001)

「気候変動・異常気象による日本；の水稲単収変動の地域的变化」

⑱Z. Uchijima: Proc. of International Workshop on the Responses of Tropical Forest Ecosystem to Long Term Cyclic Climate Changes, Kanchanaburi-2000, 217-225 (2001)

“Response of forests to population density and climate changes”

⑲内嶋 善兵衛：太陽エネルギー、27(6)，25-33 (2001)

「バイオマス生産と地球環境変化」

⑳内嶋 善兵衛：農土誌，69(12)，15-18 (2001)

「食料生産システムのエネルギー分析」

(21)山村光司：地球環境，6(2)，251-257 (2001)

「温暖化に伴う水稲害虫の増加」

(22)山村光司：研究ジャーナル，24(10)，36-43 (2001)

「温暖化と害虫発生」

(23)K. Yamamura, and M. Yokozawa: *Laodelphax striatellus* (Fallen). *Appl. Entomol. Zoo* 1., 37(1), 181-190 (2002)

“Prediction of the geographical shift in the prevalence of rice stripe disease transmitted by the small brown planthopper (Hemiptera: Delphacidae under global warming”

(2) 口頭発表

①Y. Hayashi: Proc. of the Workshop on Environmental Change and Food in Monsoon Asia, 2nd IGBP Congress, IGBP, 7 (1999)

“Projection of paddy rice production in Northeast Asia under possible climatic fluctuation”

②鳥谷 均、横沢正幸、林 陽生、後藤慎吉：日本農業気象学会、A09, 36-37 (1999)

「東、東南アジアにおける農業気候資源の分布とその特徴」

③横山宏太郎、井上 聡：国際雪氷シンポジウム'99 - 地球温暖化時代の雪氷対策を考える - , 日本雪氷学会ほか, 45~49 (1999)

「地球温暖化と我が国の降積雪の変動」

④井上 聡、横山宏太郎：平成11年度気象環境研究会後援資料，農業環境技術研究所，43~49 (2000)

「温暖化と降雪量変化」

⑤上田恭史、中川博視。岡田邦子、堀江 武：日本作物学会記事，63 (別1)，112~113 (2000)

「イネの収量および稔実歩合の高温・高CO₂濃度反応の品種間差異」

⑥林 陽生、横沢正幸、鳥谷 均、石郷岡康史、後藤慎吉、清野 豁：日本農業気象学会予稿集、400-401 (2000)

「温暖化における日本の水稲栽培に関する脆弱性の評価」

⑦井上 聡・横山宏太郎・大野宏之・川島茂人：8th JIRCAS International Symposium poster

session (2001)

“Estimating Water Equivalent of Snowfall in Major Japanese Catchments under Global Warming”

⑧西森基貴、横沢正幸：農業環境工学関連4学会2001年合同大会予稿集，38-39（2001）

「水稲単収変動の地域性に対する気候変動・異常気象の影響」

⑨M. Nishimori, and M. Yokozawa: Proc. of International Workshop on Crop Monitoring and Prediction at Regional Scales, 253-256, (2001)

“Impact and sensitivity of climate change and unusual weather on regional paddy rice yield in Japan”

⑩林陽生、鳥谷均、石郷岡康史、後藤慎吉、横沢正幸、西森基貴、山村光司、桐谷圭治：農業気象学会予稿集、41（2001）

「温暖化による水稲作期の移動と害虫発生時期の同期の可能性」

⑪Z. Uchijima: Proc. of the International Workshop on the Population and Food held at Auckland(New Zealand)in 2001 (2001)

“Carrying capacity of Asia as influenced by environmental resources”

⑫Z. Uchijima: Proc. of the Korean National Workshop on the Water Resources and Its Changes held at Seoul(Korea)in 2001 (2001)

“Hydrological characteristics of East Asia in relation to environment”

⑬内嶋善兵衛：電力中央研究所－環境講演会にて発表（2002）

「地球環境－食料－人類,持続的な共生を目指して」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

国土交通省土地・水資源局水資源部編：日本の水資源（平成13年度版）図I-2-14 地球温暖化による豪雪地帯への影響（推計），p.25（2001）

環境省地球温暖化問題検討委員会温暖化影響評価ワーキンググループ編，地球温暖化の日本への影響2001，459p（2001）

農林水産省大臣官房編：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，190p（2002）

朝日新聞（2000年4月30日、全国版、「異常気象の被害急増－食糧安保 高まる関心」で本研究の成果に基づいた知見を紹介）

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

農林水産省大臣官房編集の「平成13年産水稲作における高温の影響について－現場データ等を利用した解析について－」の作成にあたり、本研究で得られた基礎的な情報を提供した。