

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

林 陽生・石郷岡 康史・横沢 正幸・鳥谷 均・後藤 慎吉
(独立行政法人農業環境技術研究所地球環境部)

摘 要

地球温暖化が日本の水稻栽培へ及ぼす影響について解析した。代表的な4種のGCMの結果をダウンスケール処理した「気候変化メッシュデータ (日本)」をもとに、それらを平均したデータベースを作成して解析に用いた。水稻の潜在収量を示す指標として、気温と日射量のみで求まる気候登熟量示数を用いた。温暖化により移植可能日が早まる効果、生育期間が短縮する効果を考慮し、収量を高位に保つ条件で最適出穂期の分布を推定した結果、北海道および東北の一部で最適出穂期が早まり、関東以西で遅くなることが明らかになった。このように、全国で水稻栽培期間の二極分化が起こると予想された。最適な栽培期間を選択した場合でも、全国平均の収量は約10%減少することが示された。温暖化の背景にある大気中の二酸化炭素濃度の上昇は、一般に乾物重量を増加させるが、さまざまな付加的要因が加わることによって、必ずしも水稻収量に好適な条件とは限らないことを指摘した。また、害虫による被害の増加、流域水資源の減少、呼吸量増加によるエネルギー損失、肥料効果の割合の低下など、日本の水稻栽培への影響評価に今後加えるべき視点を示した。

キーワード：影響評価、温暖化、収量変動、水稻栽培期間の移動、登熟量示数

1. はじめに

IPCCの第三次評価報告書SPM-I (第一作業部会報告一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よることが明らかになった。また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℃高い値であることが指摘された。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ている。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ものの、北半球の中・高緯度地帯を中心として5~10%増加したことが明らかになった。

過去100年間の気温と降水量の変化を、世界の各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%)であったことが示されている。この傾向が今後も継続すれば、日本の農林業は世界の中で最も早く温暖化に代表される地球規模の環境変動の影響を被ることが懸念される。

では、日本の農業にどのような影響が及ぶと予想されるのだろうか。いわゆる温暖化により乾物生産力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と考えられる。

本報告では、日本(沖縄県は除く)の水稻栽培を対象として、温暖化が栽培期間および収量の変化に及ぼす影響について最近の研究成果を紹介する。

2. GHG排出シナリオ

温暖化影響に研究では、将来の気候条件を予測する基盤となる温室効果ガス(GHG: Greenhouse Gas)発生のシナリオが重要な役割を果たす。そこで、はじめに最近のGHG排出シナリオについて概説する。

IPCCは第三次調査報告書のかなで、新しいGHG排出シナリオを準備した。経済活動、人口、ライフスタイル、社会構造などの将来変化を視野に入れた包括的なもので、経済志向(A)一環境志向(B)と地球主義志向(1)一地域主義志向(2)という二つの軸を設定し、それらの組み合わせで4種のストーリーラインを定義している。各ストーリーラインの概要を表1に示す。こうしたストーリーラインのもとで、細分類も含め合計40種のGHG排出シナリオ(これらを総称してSRESシナリオと呼ぶ)をGCM(Global Climate Model)に組み込み、代表的な年代を対象に将来

表1 IPCC第三次報告書で使用されているストーリーラインの概要
(IPCC Special Report on Emissions Scenarios,
<http://www.usgcrp.gov/ipcc/SRs/emission/001.htm> から引用)

	経済志向 (A)	環境志向 (B)
地球主義志向 (1)	A 1 低い人口増加のもとで高い経済成長が続く。高い技術水準が維持され、地域間の壁は次第に縮小する。社会構造や所得は一定の水準に収束する。エネルギー政策の型により4つに細分類される。そのかなで、A 1 Bは、石炭・ガス・原子力などをバランス良く採用し、A 1の平均的なケースである。	B 1 低人口増加と高経済成長はA 1と同じだが、低資源消費やクリーンエネルギー利用など、持続可能な観点で開発した技術が適用される。経済成長はA 1より劣るが、地球主義の価値観が行き届き、結果として温室効果ガスの排出量は2100年には1990年を下回る。
地域主義志向 (2)	A 2 地域主義が強く、各地域はブロック化し、独自の伝統文化をあまり崩さない。自由貿易に基づく経済発展に重きを置かず、世界人口は約150億人に達する。エネルギーも地域内の資源に依存する割合が高く、技術進歩も相対的に遅い。このため、アジアなどでは石炭への依存度が高く、温室効果ガスの排出も多い。	B 2 地域主義が強いなかで、経済・社会・環境の持続性が追求される。世界は多様性を持つが、A 2ほどではない。人口は国連の中位推計に従って変化する。4つのストーリーラインの中で最も平均的である。

の気候変化が予測されている。

ところで本研究では、いわばIPCCにおける1世代前の排出シナリオ、すなわち年率1%で大気中のGHG濃度が増加するIS92aシナリオに基づいたGCM予測結果を解析に利用した。IS92aシナリオは本来中庸の排出シナリオであり、新しいSRESシナリオの中ではB 1に近いといえるだろう。今後は、影響評価の基盤としてSRESシナリオに基づく予測結果を利用することになるだろうが、個別の研究に利用可能な形式に整備されるのは多少先になると考えられる。

3. 気候登熱量示数

従来、SIMRIW²⁾、ORYZA1³⁾、CERES-RICE⁴⁾などの作物モデルを用いて環境変動に対する影響評価が行われている。これらのモデルによって、特定地域の水稲収量の変化、年次変動、地域間差などがかなりよく説明されるようになってきた。しかし、これらのモデルには多様なパラメータが含まれており、固有の規準のもとに広範な地域を対象として影響評価を行う際には、必ずしも適していない。一方、GCMのデータセットが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、気温と日射量のみを用いて求めることができる気候登熱量示数を利用することにした。

気候登熱量示数の概念は、村田⁵⁾、Hanyu *et*

*al.*⁶⁾、内島・羽生⁷⁾により提案された。最近、林ほか⁸⁾は、メッシュ気候値、アメダスデータおよび沖縄県を除く全国152作柄表示地帯の水稲栽培データ（品種：コシヒカリ、ササニシキ、日本晴れ）を用いて再解析を行い、出穂以降40日間における積算日射量当たりの収量の上限值が同期間の日平均気温に依存する関係を明らかにし(図1)、この上限値を、改めて気候登熱量示数(Y: kg/10a)と定義した。気候登熱量示数は、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と考えることができる。

気候登熱量示数の関係は次式で表すことができる。

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

上式は、日本の現在の気候条件と代表的な水稲品種の組み合わせにおいては、登熟期間の日平均気温約21.9℃の場合に最も潜在収量が高いことを示している。従来の研究では、日平均気温21.4℃の場合に気候登熱量示数が最大になることが得られている。今回求めた値21.9℃(上式)は、この値とほぼ等しい。

4. 日本における温暖化の特徴

GCMの予測結果を上式に代入することにより、温暖化時の水稲収量の分布を求めることができる。ここで問題となるのは、どのGCM予測結果を利用したとしても、日本のように狭い国土を対象と

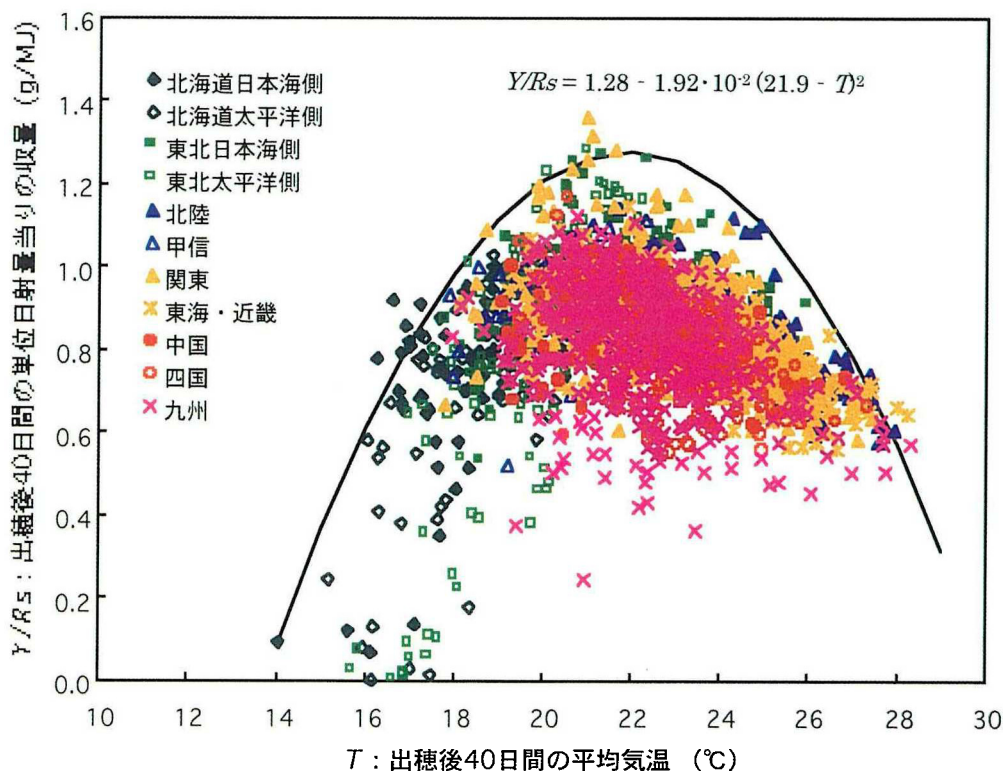


図1 日射量当りの収量と気温との関係

した解析の場合には十分な精度が期待できない点である。Yokozawa *et al.*⁹⁾はこの問題に広く対応する目的で、GCM予測値を約10kmの詳細なグリッド間隔のデータベース（気候変化メッシュデータ/日本）に加工した。本報告では、このデータベースを基にして水稻栽培への影響を解析した。

ところで、同じGHG排出シナリオを使った場合でもGCMによって予測結果は異なる。従ってGCMの特徴を知ったうえで解析に利用することが重要である。本報告では、この難点を軽減するため、GHG排出シナリオ（IS92a）に基づいた4種のGCMの予測結果に前述のダウンスケール処理を施した後に、気象要素ごとに平均値を求めて影響予測のためのデータベースを作成した。利用した4種のGCMは、比較的広く利用されているオーストラリアのCSIRO-Mk2、ドイツのECHAM4、日本のCCSR/NIESおよびカナダのCGCM1である。

本報告では、予測の対象とする年代を2030年代および2060年代とした。沖縄県を除く水稻栽培地域において、生育に重要な期間（5月～9月）の気候は将来どのように変化するであろうか。基準年（1952年～1982年）、2030年代、2060年代について、地方別にまとめた気候値を表2に示す。気温と日射量は期間平均値、降水量は期間積算値を示す。表には後に言及する最適出穂日と気候登熟

量示数も記してある。

表2によると、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最近の九州地方と同程度となる。また2060年代には北海道地方で約3.7℃、九州地方で約3.1℃上昇すると予想される。気温上昇の規模は高緯度地方ほど大きい傾向がある。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い。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。降水量が増加するに伴い、日射量は減少する。

5. 最適出穂日の分布

将来の気候条件における水稻栽培を考える場合、次の点を考慮する必要がある。すなわち、気温上昇により(i)移植早限日が前進する効果、(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^{10), 11)}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指摘されている。

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、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ほぼ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℃日以上であることが明らかになった。この実態は、温暖化による影響予測の際にも有効であると考えられる。

上述の(i)と(ii)の効果を考慮し、最適出穂期(最大の気候登熱量示数を得ることが期待できる出穂期)を表2に示す。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る。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る。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ためである。

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に示す。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った、いわば二極分化が顕在化するものと予想される。

重要な点は、こうした出穂日に合わせてクロープカレンダー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。当面、水稲栽培の脆弱性を評価する際に重要な関連問題として、最適出穂期に応じた栽培期間が設定された場合に、(1)気象条件の変化から推定される害虫の発生時期と水稲被害を受けやすい生育ステージとの同期の問題、(2)融雪時期の早まりによる田

表2 日本の各地方における気候変化予測と水稲の最適出穂日・気候登熱量示数の変化

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
	最適出穂日(暦日)	7月30日	7月23日	7月20日
	気候登熱量示数(kg/10a)	663.1	743.2	745.2
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
	最適出穂日(暦日)	7月30日	8月2日	8月14日
	気候登熱量示数(kg/10a)	752.7	701.4	672.4
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
	最適出穂日(暦日)	8月1日	8月15日	8月24日
	気候登熱量示数(kg/10a)	671.7	583.5	571.1
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
	最適出穂日(暦日)	8月8日	8月18日	8月25日
	気候登熱量示数(kg/10a)	717.1	651.0	623.3
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
	最適出穂日(暦日)	8月12日	8月29日	9月4日
	気候登熱量示数(kg/10a)	719.9	634.7	612.3
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
	最適出穂日(暦日)	8月12日	8月27日	9月2日
	気候登熱量示数(kg/10a)	741.0	671.2	643.8
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
	最適出穂日(暦日)	8月19日	9月2日	9月10日
	気候登熱量示数(kg/10a)	745.6	681.5	657.0

植え時における河川流域水資源の枯渇の問題が想定される。これらの問題は、すでに現在実施中のプロジェクト研究（環境省地球環境研究総合推進費「地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究」）の中で一部取り組まれている。

6. 気候登熟量示数の分布

気候登熟量示数の計算には気温と日射量の日別値が必要である。本研究では、気候変化メッシュデータ/日本の月別値にスプライン関数を適用して日別値を求めた⁹⁾。

現在、2030年代、2060年代、2090年代における気候登熟量示数の分布を図3に示す。現在の気候条件において気候登熟量示数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することがわかる。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野部周辺に分布している。これに対して、関東地方周辺では広範囲にわたって気候登熟量示数は小さい。これらの地理的分布の特徴は、内

島・羽生⁷⁾が異なる気象要素と代表性を使って定義した気候登熟量示数の分布と非常に良く一致した。

最大の特徴は、北海道を除いて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、最大の潜在的収量をもたらす栽培期間を選択した場合でも、温暖化に伴い出穂後40日間の日平均気温が22℃以上に上昇して高温になる程生育障害が発現する頻度が増すためである。こうして2060年代～2090年代には、中部日本の広い範囲で約600kg/10aといった現在の気候条件では北海道の最北端地域のみで現れる低い気候登熟量示数となる。

2060年代に関して地方別に集計すると、北海道地方でのみ約13%増加するほかは、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%減少することが予想される。

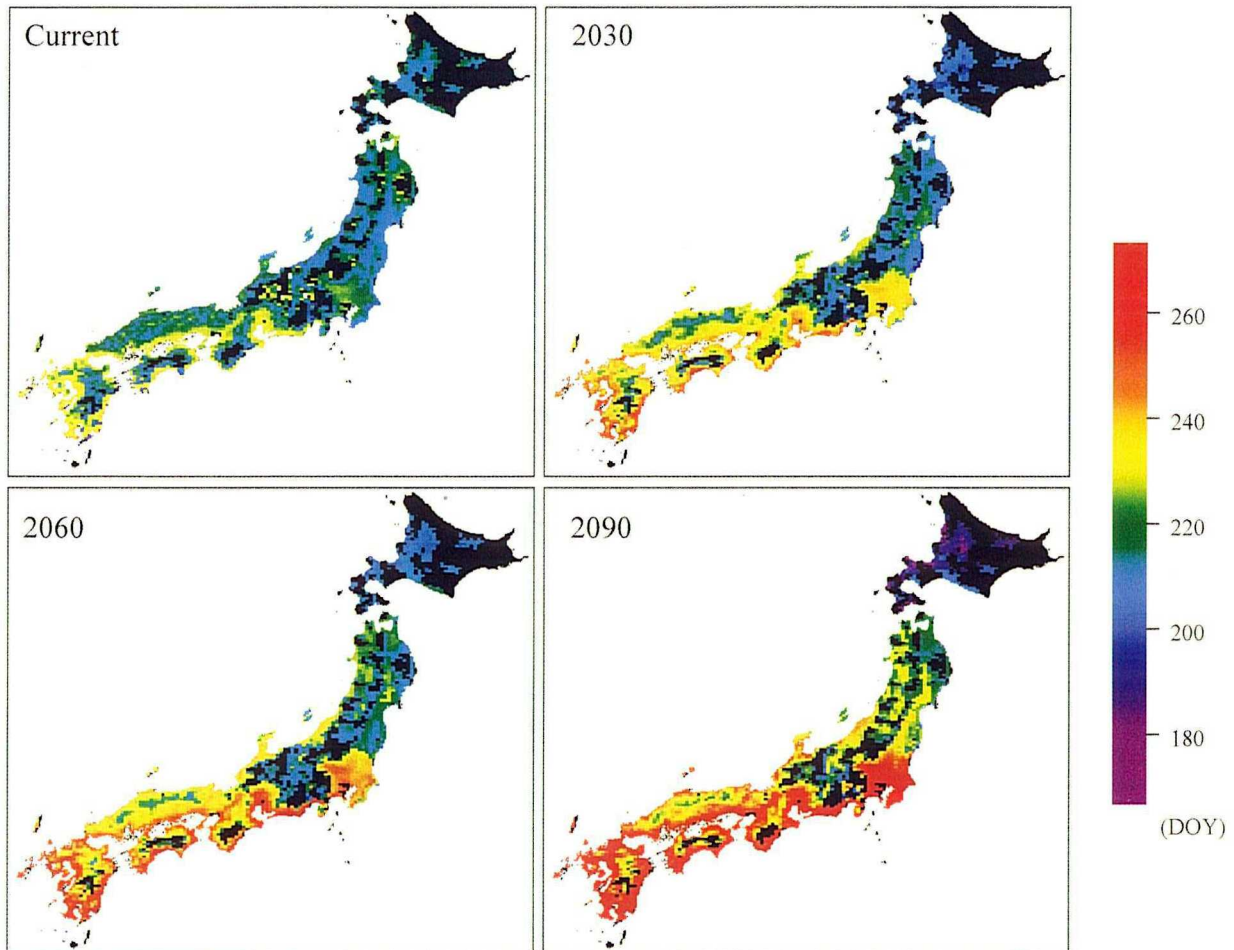


図2 各年代最適出穂日（4 GCM平均）

7. まとめと今後の課題

2060年代には大気中の二酸化炭素濃度が現在の約2倍となり、沖縄県を除く水稲栽培地域の栽培季における日平均気温が3.5℃程度上昇する。昇温の規模は、北海道地方で大きく、九州地方で小さいだろう。同時に日射量も変化し、この結果、収量を高位に維持するためには登熟期の高温による生育障害を避ける必要が生じる。予測によると、北海道地方では栽培期間が早まる一方、関東地方以西では遅延することになる。しかし、こうして最適な栽培期間が選択された場合でも、全国平均でみた潜在的収量は約10%減少すると予測される。

将来の気候条件下で収量を高める手段として、温暖化に調和させ、より南の地帯の栽培品種を北へ移すことが着想されるだろう。しかし、この考えは有効ではない。というのも、図1に示した気候登熟量示数の概念から明らかなように、固有の品種を含む分布領域の上限が一つの曲線で代表できるといった形質を、日本のイネが備えていると

考えることが合理的であるためである。換言すれば、もし品種の北上が有効であれば、地域別にプロットした集団はそれぞれの範囲において固有の局大値を示すはずである。この点に関して、韓国で栽培されたハイブリッドイネの場合には、図1の分布範囲から大きく右に外れた領域にプロットされる現象（韓国農村振興庁農業科学技術院による分析結果、未発表）が明らかになっている。このことは、現在日本で栽培しているジャポニカ系のイネをインディカ系あるいはハイブリッド系に代えるといった基本的に異なる形質のイネを導入して初めて、収量増大が期待できることを示唆している。しかし、この選択枝は、日本において食味の劣るコメの栽培が普及する可能性が極めて低い点で、現実的とは考えられない。

ところで、温暖化の背景にある大気中の二酸化炭素濃度の上昇は、基本的には植物の生育にとって好適な条件である。二酸化炭素濃度上昇の効果は、光合成速度や乾物生産量との関係を解析するなかで明らかにされてきた。それらによると、二

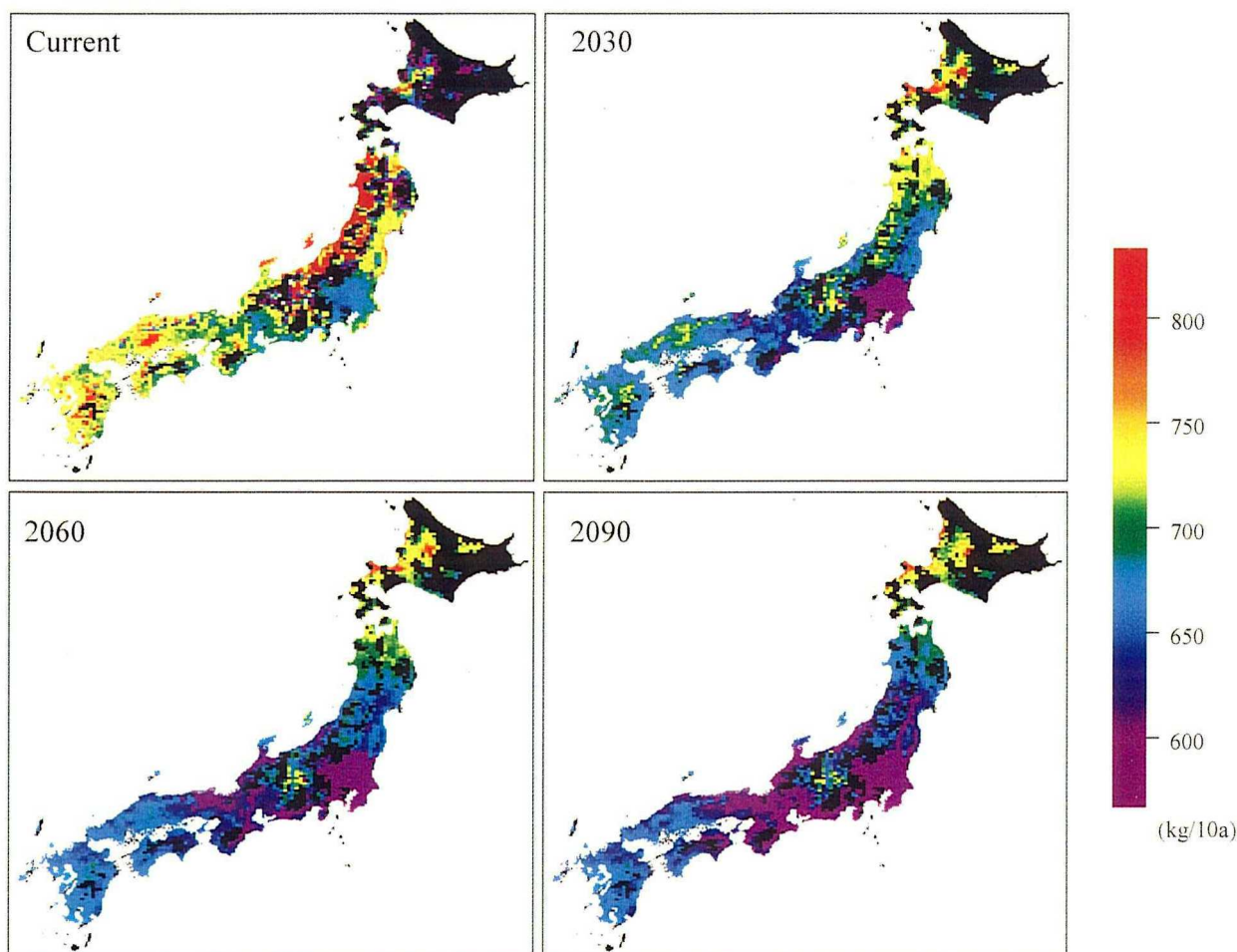


図3 各年代最大登熟量指数（4 GCM平均）

酸化炭素濃度が2倍になった場合に24%あるいは36%効率が増すことが示されている^{12),13)}。さらに最近実施されているFACE (Free Air CO₂ Enrichment) 装置を用いた研究^{14),15)}では、現在より200 ppm高濃度条件で約15%収量が増加することが示唆されている。二酸化炭素濃度上昇の効果は全国一律に及ぶため、高温による障害が顕著な地域であっても、基本的には二酸化炭素濃度の上昇で期待されるプラスの効果が減少分を補償するとも考えられる。

しかし最近の研究によると、上述のような二酸化炭素濃度上昇の好影響を単純に期待することはできない可能性のあることが指摘されている。すなわち、高二酸化炭素濃度条件と高温条件が重なることにより、乾物生産量に負の影響が及ぶ¹⁶⁾、不稔の発生率が増す¹⁷⁾、窒素肥料の効率が低下する¹⁸⁾などが示されている。

温暖化に対する日本の水稻栽培の脆弱性を的確に評価するために今後検討に加えるべき項目は、水稻害虫の世代交代数の増加、積雪量の減少と融雪季の早まりに伴う流域水資源の減少、さらに、CPM-Iにて「可能性がかなり高い (very likely: 実現性が90%~99%)」気候変化として指摘されている「夜間気温の上昇」に起因する呼吸エネルギー損出量の考慮、高温耐性を持った品種の改良と導入の可能性、などと考えられる。

謝 辞

水稻栽培に関する研究情報の一部について、京都大学農学研究科中川博視博士から御教示頂いた。こころより感謝致します。

本研究は、環境省地球環境研究総合推進費「地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究—農業生態系の脆弱性評価に関する研究」の一部である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Horie, T., H. Nakagawa, H. G. S. Centeno and M. Kropff (1995) The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. *In: R.B. Matthews et al., eds., Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia*, CAB International, Oxon, UK, 51-66.
- 3) Kropff, M. J., R. B. Matthews, H. H. van Laar, and H. F. M. ten Berge (1995) The rice model ORYZA1 and its testing. *In: R.B. Matthews et al., eds., Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia*, CAB International, Oxon, UK, 27-50.
- 4) Singh, U. and J. L. Padilla (1995) Simulating rice response to climate change. *In: C. Rosenzweig et al., eds., Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts*. ASA, Madison, 99-122.
- 5) 村田吉男 (1964) わが国の水稻収量の地域性に及ぼす日射と気温の影響について. 日本作物学会紀事, 33, 59-63.
- 6) Hanyu, T., T. Uchijima, S. Sugawara (1966) Study on the agro-climatological method for expressing the paddy rice products. *Bull. Tohoku National. Agric. Experimental Station*, vol.34, 27-36.
- 7) 内島立郎・羽生寿郎 (1967) 本邦における水稻の気候登熟量示数の地域性について. 農業気象, 22, (4), 137-142.
- 8) 林陽生・横沢正幸・鳥谷均・石郷岡康史・後藤慎吉・清野 裕 (2000) 温暖化における日本の水稻栽培に関する脆弱性の評価. 日本農業気象学会2000年度講演予稿集, 400-401.
- 9) Yokozawa, M., S. Goto, Y. Hayashi, and H. Seino (2000) The transient changes in agro-climatic resources under gradually increasing CO₂ in Japan. *Jour. Agric. Meteorol.*, (accepted).
- 10) 清野 裕 (1995) 気候温暖化が我が国の穀物生産に及ぼす影響. 農業気象, 51, 131-135.
- 11) 米村正一郎・矢島正晴・酒井英光・諸隈正裕 (1998) CO₂濃度および温度が変化した条件における日本の水稻収量のメッシュ気候値を用いた推定. 農業気象, 54, 235-245.
- 12) Baker, J. T. and L. H. Jr Allen (1993) Effects of CO₂ and temperature on rice: a summary for five growing seasons. *Jour. Agric. Meteorol.*, 48, 575-582.
- 13) Horie, T. (1993) Predicting the effects of climate variation and elevated CO₂ on rice yield in Japan. *Jour. Agric. Meteorol.*, 48, 567-574.
- 14) Kim, H. Y., M. Lieffering, S. Miura, K. Kobayashi, and M. Okada (2001) Growth and nitrogen uptake of CO₂-enriched rice under field conditions. *New Phytologist*, 150, 223-229.
- 15) Sakai, H., K. Yagi, K. Kobayashi and S. Kawashima (2001) Rice carbon balance under elevated CO₂. *New Phytologist*, 150,

- 241-249.
- 16) Nakagawa, H. and T. Horie (2000) Rice responses to elevated CO₂ and temperature. *Global Environmental Research*, 3, 101-113.
- 17) 金 漢龍・堀江 武・中川博視・和田晋征 (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. 日本作物学会紀事, 65, 634-643.
- 18) Nakagawa, H., T. Horie and H. Y. Kim (1994) Environmental factors affecting rice responses to elevated carbon dioxide concentrations. *Int. Rice Research Note*, 19, 45-46.

(受付2001年9月2日、受理2001年10月9日)