

課題名 S-8-1(6) 農業・食料生産における温暖化影響と適応策の広域評価

課題代表者名 石郷岡 康史（独立行政法人農業環境技術研究所 大気環境研究領域）

研究実施期間 平成22～26年度

累計予算額 118,455千円（うち26年度21,280千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード コメ、作期移動、果樹、適地、不確実性、野菜、台風、白未熟粒

研究体制

- (1)わが国における温暖化のコメ等穀物生産への影響と適応策（独立行政法人農業環境技術研究所）
- (2)温暖化によるわが国の果樹生産適地移動の幅と適応技術の評価（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所）
- (3)不確実性を考慮した農業影響および適応策の評価（埼玉県環境科学国際センター）

研究協力機関

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構中央農業研究センター、茨城大学

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

今後予測される地球規模での気候変化により、わが国で栽培される主要作物生産が将来どのような影響を受けるのか、また想定される影響を軽減するためにどのような施策が有効であるかという至近の課題に対処するために、影響評価手法の高度化と、それをもとにした「適応」技術選択のオプションを示すことが強く求められている。特に夏季平均気温が観測史上最高となった2010年には我が国の作物生産において様々な高温障害が発生し、温暖化による農業影響が現実に関わりうるものとして認識されるに至っている。わが国の主食であるコメについては、温暖化影響を対象とした広域影響評価モデルの開発も他の作物に先んじて進められてきており、予測される将来気候環境の下での収量の年々変動や長期変化傾向の地域的特徴が明らかにされてきた。しかしながら、現在までに実施されてきた将来予測される温暖化影響評価研究は収量のみを対象としたものが殆どであり、近年深刻化している高温による品質低下を考慮に入れた影響評価や適応策導入効果の評価に関する研究事例は極めて限定される。一方、果樹はライフサイクルが長く栽培可能な気候は品目ごとに限られていることから、気候変動の影響を極めて受けやすい作物であり、将来予測される気候変化による適地移動が推定されている。その全体像を把握するため、果樹の適地移動やその不確実性をシミュレーションし、包括的な評価を行う必要がある。また、2010年には野菜の出荷量が減少したように、気候変化は野菜生産にも影響を及ぼすと考えられる。以上のような、気候変化により起こりうる農業生産への影響軽減のための適応策の立案・検討において、予測の不確実性の低減を図ることは必要不可欠である。不確実性の要因は気候モデルのみならず作物影響評価モデルにも内在し、影響評価モデルの高度化や精緻化による予測の信頼性向上が必要である。特に近年の夏季の高温傾向により国内広範囲で顕在化している玄米の白濁化（白未熟粒）といった品質への影響は未だ取り組みが不十分である。さらに、現状でモデルに組み込まれていない影響要因（台風等の極端現象）を考慮に入れることで、影響予測の不確実性を低減することが期待できると考えられる。

2. 研究開発目的

上記の背景を受け、本研究では日本国内における主要作物を対象として、予測される温暖化とそれに伴う異常気象の出現確率に基づいた作物生産性への影響評価、および影響軽減のための適応策とその効果を、予測の不確実性を考慮に入れて広域的に評価することを目的とする。そのため、対象とする作物ごとに、我が国全体を対象とした広域スケールに適用できる影響予測モデルや適応策評価手法を開発・整備する。以上のような作物ごとの影響予測モデルを使用し、複数の将来気候の予測値を外力として、予測の不確実性を考慮に入れた評価を実施する。本サブ課題は3つのサブサブ課題で構成され、それぞれ目的は以下のとおりである。

サブサブ課題(1)ではコメを中心に、予測される温暖化とそれに伴う異常気象の出現確率に基づいた作物生産性への影響評価、および影響軽減のための適応策とその効果を、予測の不確実性を考慮に入れて広域的に

評価することを目的とする。その際、収量のみではなく品質についても影響評価指標として考慮に入れる。適応策としては作期移動(移植日の移動)について検討し、現行の作期による将来気候条件下でのシミュレーション結果と比較することにより、影響軽減の可否と地域的特徴を明らかにする。以上について、複数の将来気候の予測値を外力として、予測の不確実性を考慮に入れたコメ生産への影響と、適応策の効果と限界についての評価を実施する。

サブサブ課題(2)では、わが国の果樹は、低温地域で栽培されるグループから順に、寒冷地果樹、温帯性落葉果樹、温帯性常緑果樹、亜熱帯果樹と称されることから、各グループで栽培面積が最大の樹種(リンゴ、ニホンナシ、ウンシュウミカン、タンカン)について適地を推定するモデルを開発し、新気候モデル(CMIP5)、RCPシナリオを適用することにより、不確実性を含んだ将来の果樹の適地分布の全貌を明らかにする。

サブサブ課題(3)では、影響予測の不確実性軽減を図るため、以下の3つを目的とした。すなわち、(1):野菜を対象にした温暖化影響評価モデルの構築と不確実性を考慮した影響評価;(2):水稻を対象とした台風の被害面積を推計するモデルの構築;(3):白未熟粒発生率推計モデルの構築と適応策の効果の評価;である。

3. 研究開発の方法

(1)わが国における温暖化のコメ等穀物生産への影響と適応策

影響評価モデルとしては、国内主要15品種に適用可能なプロセスモデルを導入した。品質については、出穂後20日間の日平均気温26℃以上の積算値(HDDm26)と一等米比率との関係が比較的明瞭であることを利用し、HDDm26を高温に因る品質低下リスクを表す指標として用いた。対象期間(1981~2100)の各年について、移植日を現行から±70日間の範囲で移動させ、18種の気候シナリオ(6GCM×3RCP)に基づきシミュレーションを実施し、収量とHDDm26を推計した。現行移植日による結果を「適応なし」、品質低下リスクが「低」に分類された平均収量が最多となる移植日を選択した場合の結果を「適応あり」とし、両者を比較することで適応策実施による温暖化影響軽減の効果を評価した。

(2)温暖化によるわが国の果樹生産適地移動の幅と適応技術の評価

過去の研究事例が著しく少ないタンカンについては寒害発生温度を明らかにするため果実の凍結実験を行った。この結果や「果樹農業振興基本方針」の記述から、各樹種の適温域を決定した。これに平均気温・最低気温の日別値の3次メッシュデータを適用して、現在と将来の適地を判定した。使用したデータベースは、現在値はアメダスメッシュ化データ、将来値は4つのGCM(MIROC5、MRI-CGCM3、GFDL CM3、HadGEM2-ES)の推定値(排出シナリオはRCP8.5、4.5、2.6)とした。

(3)不確実性を考慮した農業影響および適応策の評価

野菜への温暖化影響評価では、それぞれの野菜について影響評価のための重回帰モデルを開発し、これに気候予測情報を入力し、将来の影響を評価した。この際、モデルの不確実性を考慮した。台風被害面積推計モデルの構築では、被害確率を外力の関数で示したフラジリティ曲線を基礎に被害面積を推計するモデルを構築した。白未熟粒発生率推計モデルの構築と適応策の評価では、発生率推計のための統計モデルを構築し、気温上昇とともに発生率がどのように変化するか推計した。また適応策として、移植日の移動と高温耐性品種の導入を考え、不確実性も考慮しつつ、影響低減効果を定量的に評価した。

4. 結果及び考察

(1)わが国における温暖化のコメ等穀物生産への影響と適応策

「適応なし」の算定結果より、収量は温度上昇に伴い一部地域(主に関東以西の平野部)で減少が予測されたが、高温による減収がCO2濃度上昇による施肥効果で相殺され、国全体の生産量では増加傾向となった。一方、生産物中の品質低下リスクが「高」あるいは「中」に分類される割合は、年代が進むに従い継続的に増加した。すなわち、現行移植日で栽培を続けると、国全体の収穫量は減少しなくても品質が大きく低下した収穫物が大半を占めるようになる可能性が高いことが判明した。これに対し、「適応あり」の場合には、国全体の生産量は期間を通して大きくは減少せず、また品質低下リスクの高い生産物の割合も低く抑えられた。しかしながら、一部地域では作期移動の効果が限定的であり、他の適応オプション導入による高温影響回避を図る必要性が示唆された。

(2)温暖化によるわが国の果樹生産適地移動の幅と適応技術の評価

どの樹種も適地は年代を追うごとに北上傾向にあった。今世紀半ばではRCP間の適地分布の差は小さいが、世紀末ではその差はかなり大きくなった。現在の適地の中で適地のまま継続する面積の比率(適地継続率)は、今世紀半ばに、リンゴやウンシュウミカンは70~80%となった。これらは的確な適応策を講じないとダメージを被る

産地が生じる可能性は高いものの、適地予測の不確実性が比較的小さいため、予測に従うことでより効率的な適応策が推進できると考えられた。世紀末には大きく適地移動が移動するため、長期的には、より暖地で栽培されている樹種への改植やとくに、現在の生産量がわずかである、亜熱帯果樹の大幅導入が必要と考えられた。

(3) 不確実性を考慮した農業影響および適応策の評価

野菜への温暖化影響評価ではほとんどすべての野菜について2001-2010年に比べ2031-2040年の平均的な出荷量は減少することがわかった。この結果は、ごく限られた野菜に対し品種改良や産地移動といった適応策を実施するだけでは不十分であり、野菜生産に対する総合的な適応策の必要性を示唆するものである。台風被害面積推計モデルの構築では、開発したモデルが特に被害面積が大きい台風に対しては精度よく被害面積を推計することがわかった。今後このモデルを用いて台風が及ぼす水稲への温暖化影響を評価することにより、今まで考慮してこなかった台風の影響を定量的に推計することができ、予測の不確実性を低減することにつながると思われる。白未熟粒の発生に関しては、今世紀末には白未熟粒発生率が約半分にも達することがわかった。一方で、移植日の移動と高温耐性品種の導入は、影響軽減に向けて大きな効果があることが示された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

我が国のコメに関して、これまで気候変化条件下において収量の維持や増加を目的とした適応策の検討が中心であったのに対し、本研究では収量のみではなく品質も考慮した評価手法を提唱した。また、気候シナリオの違いによる影響と適応策の効果の予測の幅を地域ごとに明示できるようになった。その結果、品質低下を回避することにより大幅な減収となる地域が出現することが示され、地域による適応策策定のための適切な方向性を議論することが可能となった。また、新気候モデル(CMIP5)、RCPシナリオによるリンゴ、ニホンナシ、ウンシュウミカン、タンカンの適地移動の予測結果が示された。さらに、これまでほとんど行われてこなかった野菜や水稲品質への温暖化影響評価を、不確実性を考慮しつつ実施し、また台風被害面積を推計するモデルを構築した。これらは世界的にみても先進的なものである。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

「適応計画」策定に向けたわが国における気候変動影響評価情報を整備することを目的とした環境省の「平成26年度気候変動への理解のための気候変動による将来影響の予測等実施委託業務」における気候変動による将来影響の予測計算に貢献した。また、平成27年3月に策定された中央環境審議会地球環境部会による「日本における気候変動による影響に関する評価報告書」に、適地移動の予測結果が反映された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

複数の気候変化シナリオに基づき、コメの収量や品質、栽培適地への影響と影響軽減のための適応策とその効果と限界を全国スケールで地域別に表すことができるようになり、効果的な適応オプションの選択に関して具体的かつ定量的な知見を提供できる。また、リンゴ、ニホンナシ、ウンシュウミカン、タンカンについて、将来の適地がマップ上に示されたことから、各地域での今後の果樹の適応策策定に利用できる。とくに今世紀半ばでは、不確実性が小さく比較的予測精度が高いため、効果的、効率的な温暖化対策が推進できる。一方、温暖化による大規模な適地移動が見込まれる今世紀末には、どこに何を栽植したらよいかを決める基礎資料が策定された。特に、亜熱帯果樹について現在の自給率は非常に小さいが、将来、適地が九州や本州にも急拡大することから、これらの樹種の生産を促し、自給率向上に向けた取り組みが重要であることが示された。さらに、野菜や水稲品質の影響評価および適応策の評価は今後自治体等の適応策の検討・実施に活用されることが期待される。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) M. OKADA, T. IIZUMI, Y. HAYASHI and M. YOKOZAWA: Environmental Research Letters, 6, 034031 (2011)
“Modeling the multiple effects of temperature and radiation on rice quality “
- 2) Y. ISHIGOOKA, T. KUWAGATA, M. NISHIMORI, T. HASEGAWA and H. OHNO: Journal of Agricultural Meteorology, 67(4), 209-224 (2011)
“Spatial characterization of recent hot summers in Japan with agro-climatic indices related to rice

production“

- 3) Y. MASUTOMI, T. IIZUMI, K. TAKAHASHI and M. YOKOZAWA: Environmental Research Letters, 7, 014020 (2012)
“Estimation of the damage area due to tropical cyclones using fragility curves for paddy rice in Japan”
- 4) Y. MASUTOMI: Impacts World 2013 Conference Proceedings, 522-526 (2013)
“Development of a global climate-crop coupled model for paddy rice”
- 5) T. SUGIURA, D. SAKAMOTO, Y. KOSHITA, H. SUGIURA and T. ASAKURA, J. Jpn. Soc. Hort. Sci., 83, 117-121 (2014)
- 6) Y. MASUTOMI, M. ARAKAWA, T. MINODA, T. YONEKURA and T. SHIMADA: Agricultural and Forest Meteorology, 203, 11-16 (2015).
“Critical air temperature and sensitivity of the incidence of chalky rice kernels for the rice cultivar “Sai-no-kagayaki””
- 7) S. FUKUI, Y. ISHIGOOKA, T. KUWAGATA and T. HASEGAWA: Journal of Agricultural Meteorology, in press (accepted on Jan. 13, 2015)
“A methodology for estimating phenological parameters of rice cultivars utilizing data from common variety trials”
“Predicted changes in locations suitable for tankan cultivation due to global warming in Japan”
- 8) T. SUGIURA, D. SAKAMOTO, Y. KOSHITA, H. SUGIURA and T. ASAKURA, Acta Horticulture,
“Uncertainty of changes in locations suitable for satsuma mandarin and tankan cultivation due to global warming in Japan.” (in press)

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 杉浦俊彦、杉浦裕義、阪本大輔、朝倉利員：園芸学会秋季大会(2011)
「年平均気温および年最低気温の変化推定によるタンカン適地の北上予測」
- 2) T. SUGIURA, D. SAKAMOTO, H. SUGIURA, Y. KOSHITA, T. ASAKURA: The XII International Citrus Congress, València, Spain, 2012
“Prediction of moving northward of favorable regions to cultivate subtropical citrus by estimation of changes in annual mean and minimum air temperature in Japan”
- 3) 増富祐司：統合的陸域圏研究連絡会(2013)
「陸面過程モデル+作物生長モデル」
- 4) Y. ISHIGOOKA, S. FUKUI, T. HASEGAWA, T. KUWAGATA, M. NISHIMORI: ISAM2013 (2013)
“Large scale evaluation of the effects of adaptation to climate change on rice production and quality in Japan”
- 5) 福井眞・石郷岡康史・桑形恒男・長谷川利拓：日本農業気象学会2013年全国大会(2013)
「水稲における地域別適合品種のフェノロジー特性抽出」
- 6) 増富祐司：日本農業気象学会2013年全国大会(2013)
“全球大気-作物結合モデルの開発“
- 7) Y. ISHIGOOKA: AgMIP East Asia Regional Workshop (2013)
“Evaluation of the effects of moving cultivation schedule as adaptation to climate change on rice production and quality in Japan.”
- 8) Y. MASUTOMI, M. ARAKAWA, T. MINODA, T. YONEKURA, T. SHIMADA: AgMIP 4th Global Workshop, New York, U.S., 2013.
“Critical temperature and sensitivity for white immature rice kernels”
- 9) T. YONEKURA, and Y. MASUTOMI: International Conference on Ozone and Plant, Beijing, China, (2014)
“Ozone doses and exposure-response relationships for yield of Japanese rice cultivars”
- 10) Y. MASUTOMI: AgMIP-Rice Annual Meeting, Nanjing, China, (2014)
“MATCRO, regional and global applications”
- 11) T. SUGIURA, D. SAKAMOTO, Y. KOSHITA, H. SUGIURA, T. ASAKURA: 29th International Horticultural Congress, Brisbane, Australia, (2014)
“Uncertainty of changes in locations suitable for satsuma mandarin and tankan cultivation due to global warming in Japan “
- 12) 石郷岡康史、福井眞、桑形恒男、西森基貴、長谷川利拓：日本農業気象学会2014年全国大会(2014)

「気候変動がわが国のコメ生産に与える影響と作期移動による適応」

- 13) 福井真、石郷岡康史、長谷川利拓、桑形恒男：日本農業気象学会2014年全国大会(2014)
「水温を考慮した水稲フェノロジーモデルの精度検証」
- 14) 増富祐司、荒川誠、箕田豊尚、米倉哲志、嶋田知英：日本農業気象学会2014年全国大会(2014)
「白未熟粒発生率推計モデルの開発」
- 15) Y. ISHIGOOKA, S. FUKUI, T. HASEGAWA, T. KUWAGATA, and M. NISHIMORI: International Symposium on Agricultural Meteorology, Tsukuba, Japan, (2015)
“Adaptation to climate change impact on rice productivity by shifting transplanting date in Japan”
- 16) Y. MASUTOMI, M. ARAKAWA, T. MINODA, T. YONEKURA and T. SHIMADA: International Symposium on Agricultural Meteorology, Tsukuba, Japan, (2015)
“Impact of climate change on rice quality in Saitama prefecture”

7. 研究者略歴

課題代表者：石郷岡 康史

北海道大学農学部卒業、博士(農学)、現在、(独)農業環境技術研究所・主任研究員

研究分担者

- 1) 杉浦 俊彦
京都大学農学部卒業、現在、(独)農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所・上席研究員
- 2) 増富祐司
大阪大学理学部卒業、埼玉県環境科学国際センター主任、現在、茨城大学農学部准教授
- 3) 米倉哲志
東京農工大学農学部卒業、現在、埼玉県環境科学国際センター主任

S-8-1 我が国全体への温暖化影響の信頼性の高い定量的評価に関する研究

(6) 農業・食料生産における温暖化影響と適応策の広域評価

① わが国における温暖化のコメ等穀物生産への影響と適応策

独立行政法人農業環境技術研究所

大気環境研究領域 石郷岡 康史・桑形 恒男・西森 基貴

独立行政法人農業環境技術研究所

大気環境研究領域 福井 眞<研究協力者>・長谷川 利拡<研究協力者>・
飯泉 仁之直<研究協力者>

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構中央農業研究センター

情報利用研究領域 中川 博視<研究協力者>・大野 宏之<研究協力者>・中園 江<研究協力者>・
吉田 ひろえ<研究協力者>・丸山 篤志<研究協力者>

平成22～26年度累計予算額：51,211千円

(うち、平成26年度予算額：8,870千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

我が国の最も主要な作物であるコメについて、収量と品質の両方を指標とした気候変化影響と、適切な作期移動を実施した場合の効果を、全国を対象として評価した。影響評価モデルとしては、国内主要15品種に適用可能なプロセスモデルを導入した。品質については、出穂後20日間の日平均気温26℃以上の積算値(HDDm26)と一等米比率との関係が比較的明瞭であることを利用し、HDDm26を高温に因る品質低下リスクを表す指標として用いた。対象期間(1981～2100)の各年について、移植日を現行から±70日間の範囲で移動させ、18種の気候シナリオ(6GCM×3RCP)に基づきシミュレーションを実施し、収量とHDDm26を推計した。現行移植日による結果を「適応なし」、品質低下リスクが「低」に分類された平均収量が最多となる移植日を選択した場合の結果を「適応あり」とし、両者を比較することで適応策実施による温暖化影響軽減の効果を評価した。「適応なし」の算定結果より、収量は温度上昇に伴い一部地域(主に関東以西の平野部)で減少が予測されたが、高温による減収がCO₂濃度上昇による施肥効果で相殺され、国全体の生産量では増加傾向となった。一方、生産物中の品質低下リスクが「高」あるいは「中」に分類される割合は、年代が進むに従い継続的に増加した。これに対し、「適応あり」の場合には、国全体の生産量は期間を通して大きくは減少せず、また品質低下リスクの高い生産物の割合も低く抑えられた。しかしながら、一部地域では作期移動の効果が限定的であり、他の適応オプション導入による高温影響回避を図る必要性が示唆された。

コムギについては、国内主要6品種に対応した発育段階算定モデルを導入し、九州地方を対象として気候変動によるフェノロジーへの影響を明らかにした。その結果、予測される冬季の高温化で発育が早期化することにより、凍霜害感受性の高い茎立期前後の温度環境は大きく変化せず、温暖化しても凍霜害リスクは変化しない可能性が示唆された。

[キーワード]

コメ収量、コメ品質、高温障害、作期移動

1. はじめに

予測される地球温暖化の影響が、わが国で栽培される作物に対し、将来どのような影響を及ぼすのか、また想定される影響を軽減するためにどのような施策が有効であるかという至近の課題に対処するために、影響評価手法の高度化と、それをもとにした「適応」技術選択のオプションを示すことが強く求められている。我が国の最も主要な作物であるコメについては、温暖化影響を対象とした広域影響評価モデルの開発も他の作物に先んじて進められてきており、予測される将来気候環境の下での収量の年々変動や長期変化傾向の地域的特徴が明らかにされてきた。その結果、2050年代までは温度上昇による生育期間の短縮とCO₂の施肥効果により、いずれの気候変化シナリオを用いても収量が増加すること、ただしその年々変動は増加するとともに、開花期における日最高気温35℃を越える場合の急激な不稔率（種子を生じない割合）の増加が示されている。

ところで、近年頻発する夏季の極端な高温により、多くの作物に関して種々の高温障害の発生が報告されている。コメについては、登熟期の高温が主な要因である外観品質の低下が深刻である。特に九州地方では、近年1等米比率の低迷が顕著であり、登熟期の平均気温の上昇が主な原因と考えられている。夏季平均気温が観測史上最高となった2010年には、新潟県や群馬県、埼玉県等で1等米比率が最近30年で最低レベルとなった。現状におけるコメ生産への高温影響としては品質の低下が主であり減収となるような極端な高温の出現の事例はまだ多くないが、品質の低下は落等による価格の低下により生産者の収入減に直結するため、今後予測される温暖化を念頭に喫緊に解決すべき重要な課題である。しかしながら、現在までに実施されてきた温暖化影響評価は収量のみを対象としたものが殆どであり、高温による品質低下を考慮に入れた影響評価や適応策導入効果の評価に関する研究事例は極めて限定される。特に、我が国全体を対象とした、収量と品質を指標とした温暖化影響と適応については未だに実施されておらず、これらに関する包括的な研究が必要不可欠となっている。

一方、我が国で栽培されるコメ以外の作物については、影響評価モデル開発の困難さから、現在までに広域スケールでの温暖化影響に関する研究の取り組みは希少である。例えばコムギについては、世界レベルではコメよりも栽培面積は圧倒的に広く、モデル開発も進んでいることから、全球スケールでの温暖化影響評価研究の事例は非常に多い。しかしながら、国外よりも過湿な環境において栽培される我が国のコムギに対して国外で広く使用されるモデルを適用することには限界があり、特に近年の高温傾向により顕在化しつつある諸問題や今後起こりうる影響に対処するためには、国内用の広域モデル導入が不可欠であると考えられる。

2. 研究開発目的

本研究では、我が国の主要作物であるコメを中心に、予測される温暖化とそれに伴う異常気象の出現確率に基づいた作物生産性への影響評価、および影響軽減のための適応策とその効果を、予測の不確実性を考慮に入れて広域的に評価することを目的とする。そのため、我が国全体を対象とした広域スケールに適用でき、且つ個々の影響要因の特定と適応オプションの設定が明確にできる影響予測モデルを導入し、適応策評価手法を開発する。その際、収量のみではなく品質に

についても影響評価指標として考慮に入れる。適応策としては、現在においてもその効果が実証され且つ大規模なインフラ整備を必要とせず比較的 low コストで実施できる作期移動（移植日の移動）について検討する。以上について、複数の将来気候の予測値を外力として、予測の不確実性を考慮に入れたコメ生産への影響と、適応策の効果と限界についての評価を実施する。

3. 研究開発方法

コメについては、収量と品質の両方を指標とした気候変化影響と、適切な作期移動を実施した場合の効果と、全国を対象として評価する。影響評価のみではなく適応策の効果とを評価するためには、個々の影響要因の特定と適応オプションの設定が明確にできるプロセスモデルが適しているため、ここでは都道府県毎の主要品種（最大15品種）に対応できる水稲生育収量予測モデル（Hasegawa and Horie, 1997）を導入した。このモデルは、主に生育プロセスと光合成プロセスにより構成され、前者は発育段階（幼穂形成期、出穂期、成熟期等）をDVI（温度（気温あるいは水温）と日長の関数で算定される日々のDVRを積算することで求められる）という発育指標により算定し、後者は同化産物生成過程（光合成による炭素固定と呼吸による消費の収支）からバイオマス生成量（乾物生産量）を算定する。なお、光合成プロセスにおいては、CO₂施肥効果によるバイオマス増加も考慮されている。このモデルの稼働には、日別の平均気温、積算日射量、平均相対湿度、平均風速が必要となる。

モデルは、日本国土を約10km解像度で格子状に分割した二次メッシュを基盤として実行した。モデル実行に先立ち、国土数値情報（2006年版）から得た水田分布データを参照し、水田が存在するメッシュ（水田メッシュ）を計算対象として抽出した。その際、メッシュ内水田面積比率を集計した。行政区画毎の栽培管理情報（窒素施肥量、移植日等）については、各種統計資料に基づきデータセットを整備し、各メッシュに割り当てた。品種は、都道府県別統計資料（農林水産省）より、2006年の各都道府県において栽培面積が最大である品種を抽出し、当該都道府県内の各水田メッシュの基準栽培品種とした。入力気象データは、CMIP3で配信されている12GCMの3排出シナリオ（SRES）およびCMIP5で配信されている6GCMの3排出経路（RCP）を入手した。いずれも、S8共通シナリオ（第1版、第2版）を含んでいる。入手したGCM出力値（月別値）は、農業環境技術研究所で整備している二次メッシュ平年値（1981～2000）をベースラインとして、要素別に月毎に累積確率密度関数を使用してバイアス補正を施し、その後ウェザージェネレータを使用して、月別値から日別値へ変換した。作成期間は、1981年～2100年とした。CO₂濃度は、各排出シナリオに応じた年毎の濃度を使用し、地域や季節変化は考慮していない。

適応オプションの一つとして作期移動の効果を明らかにするため、統計データから各メッシュに割り当てられた移植日をメッシュ毎の現行移植日とし、この日を基準に-70～+70日の範囲で7日間毎（21パターン）に移動させ、それぞれの移植日について各年のモデル計算を行った。なお、本研究では、気候変化条件下におけるコメ収量および品質への影響に対する適応策として、作期移動の効果のみを明確に示すこととし、品種や施肥条件は行政区画ごとの統計資料から得られた現行条件で固定することとした。

本研究では気候変化影響指標として、収量のみではなく品質も考慮するため、高温による品質低下リスク指標として出穂後20日間の日平均気温26℃以上の積算値（以下、HDDm26とする）を導入する。HDDm26は、コメ品質（1等米比率）との関係が比較的明瞭であることが明らかにされて

おり、上記モデルの計算過程で決定される出穂日を基準に算定される。都道府県毎に集計した HDDm26値と1等米比率との関係を参考に、以下の基準でリスクの度合いを示すこととした。

0°C日 ≤ HDDm26 < 20°C日 : 高温に因る品質低下リスク低 (Class A)

20°C日 ≤ HDDm26 < 40°C日 : 高温に因る品質低下リスク中 (Class B)

40°C日 ≤ HDDm26 : 高温に因る品質低下リスク高 (Class C)

この基準により年々の算定収量を3つに分類し、それぞれの計算条件について20年毎に集計した (1981~2000、2001~2020、2021~2040、2041~2060、2061~2080、2081~2100、および2031-2050 (S8共通シナリオの1つの期間に相当))。各年代について以下の適応タイプに従い最適移植日を決定し、その場合に算定される収量と適応なし (現行移植日) の結果を比較することで、作期移動による適応策の評価を行った。各適応タイプにおける最適移植日選定の基準は、以下の通りとした。

適応(1) 収量を重視する適応策 : 各集計期間において、全収量 (Class A~C) の20年平均値が最大となる移植日。

適応(2) 品質を重視する適応策 : 各集計期間において、リスク低の収量 (Class A のみ) の20年平均値が最大となる移植日。

以上のように、適応策として2つのオプションを設定し、各年代において適応策を実施した場合の、これら指標の分布や全国集計値の推移の特徴を調べた。その際、収量を予め品質低下リスクに応じた3つのクラスに分類することで、各種適応策実施における最適移植日の決定の明確化を図った。

次に、コメ以外の作物としてコムギを対象とし、コムギのフェノロジーに関する既往の研究事例において開発された、我が国で栽培されるコムギ主要品種に対応した発育段階算定モデルを導入した。発育段階はコメと同様に、DVIにより表され、以下の式で算定される (Maruyama *et al.* 2010 ; 中園ほか, 2014)。

$$DVI = \sum DVR$$

$$DVR = \frac{1}{G_1} \times \frac{1 - \exp\{-B(L - L_e)\}}{1 + \exp\{-A_1(T - T_{h1})\}} \quad (0 < DVI < 1)$$

$$DVR = \frac{1}{G_2} \times \frac{1}{1 + \exp\{-A_2(T - T_{h2})\}} \quad (1 < DVI < 2)$$

但し、L : 日長、T : 日平均気温、その他はパラメータであり、作期移動試験により決定される。DVIと発育段階の対応は、DVI=0 : 播種、DVI=1 : 出穂、DVI=2 : 成熟、と定義されている。現在までに、関東以西で主に栽培されている6品種について、パラメータが同定されている。

モデルによる発育段階算定の妥当性を検証するため、九州のコムギ栽培地を対象に、過去の県別統計資料とモデルによる算定値 (農環研メッシュ気象データを使用) との比較を行う。その後、予測気候値 (S8共通シナリオ第2版) により、将来における発育段階の変化傾向を、品種により異なる発育特性 (秋播性程度) による特徴を調べる。また、気候変化に対応する発育段階の変化に伴う、凍霜害発生リスクの変化についても考察する。

4. 結果及び考察

18種の気候シナリオ毎の計算結果について、算定収量を3段階の品質低下リスクに分類し、年代毎に集計した。将来予測気候による影響の度合いと作期移動による適応効果についての地域的特徴と気候シナリオによる相違を見るため、各シナリオ（GCM、RCP）による計算結果をマップ化した。先ず、「適応なし」として現行移植日に基づき算定した結果について、各シナリオにおける2081～2100年の20年間の平均全収量（Class A～C）および同期間の高温に因る品質低下リスク低に分類された収量（Class Aのみ）の分布を図1(6)①-1、2に示す。値は、現行移植日による1981～2000年の平均全収量を100とした相対値で表している。全収量は、気候シナリオ間で相違は見られるが全体として北日本から中部山間部において増加、関東や北陸の平野部から西で大きな変化はなし、あるいは一部シナリオで減少するという特徴が認められる。モデル計算において収量は、気温上昇に伴い寒冷地で冷害による減収が少なくなる一方で生育期間が短縮されることによる減収（総バイオマス生成量の減少に因る）、また出穂開花期の高温不稔による減収、さらにはCO₂増加に伴う増収（施肥効果による総バイオマス生成量の増加に因る）といった環境応答特性が統合的に算定される。この例では、特に現在気候条件で冷害の発生が比較的頻繁な北日本太平洋側でほぼ全ての気候シナリオで増収となっており、温度上昇による冷害の減少に因ると推察される。関東以西の平野部では、生育期間の短縮が減少方向に作用するが、一部気候シナリオを除き大幅な減収とならないのはCO₂施肥効果に因ると考えられる。一方、Class Aのみの収量（図1(6)①-2）は、多くの気候シナリオにおいて、東北地方以南の大半の地域で顕著な減少が算定された。この結果から、将来にわたり現行移植日での栽培を続けると、品質低下への感受性の高い登熟前半（出穂後20日間）が高温期に遭遇することにより品質低下リスクが高くなる可能性が非常に高いことを示している。

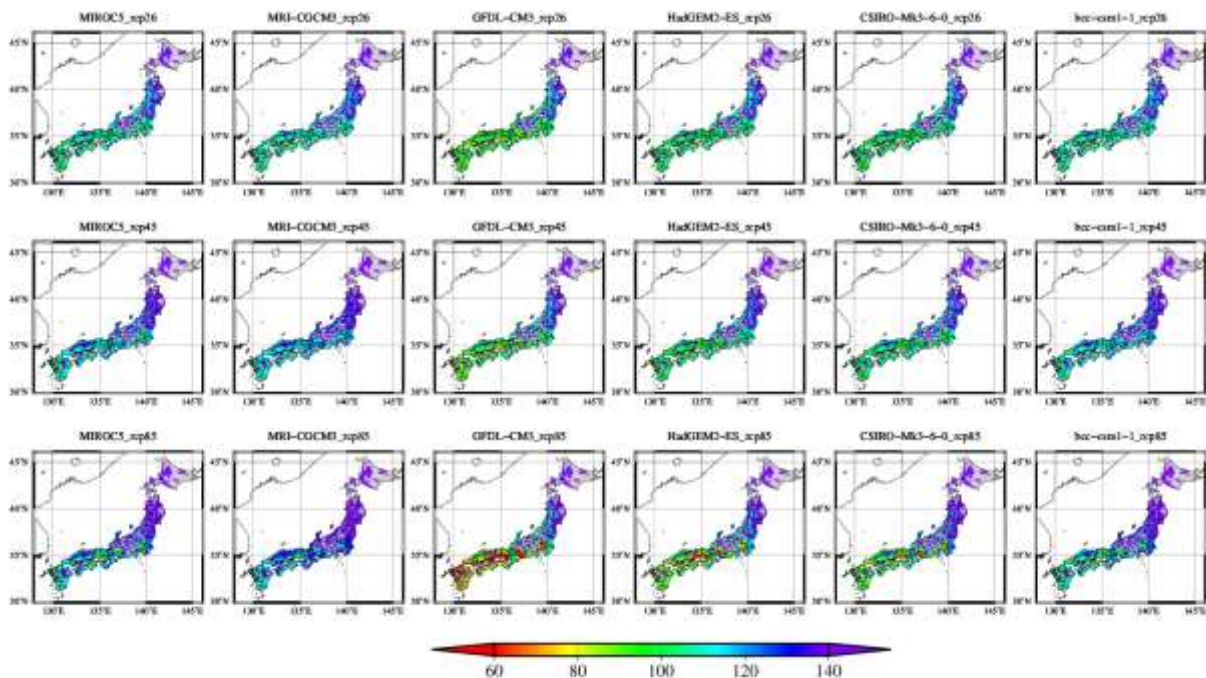


図1(6)①-1 2081-2100における全収量（Class A～C）
（適応なし、1981-2000の値を100とした相対値）

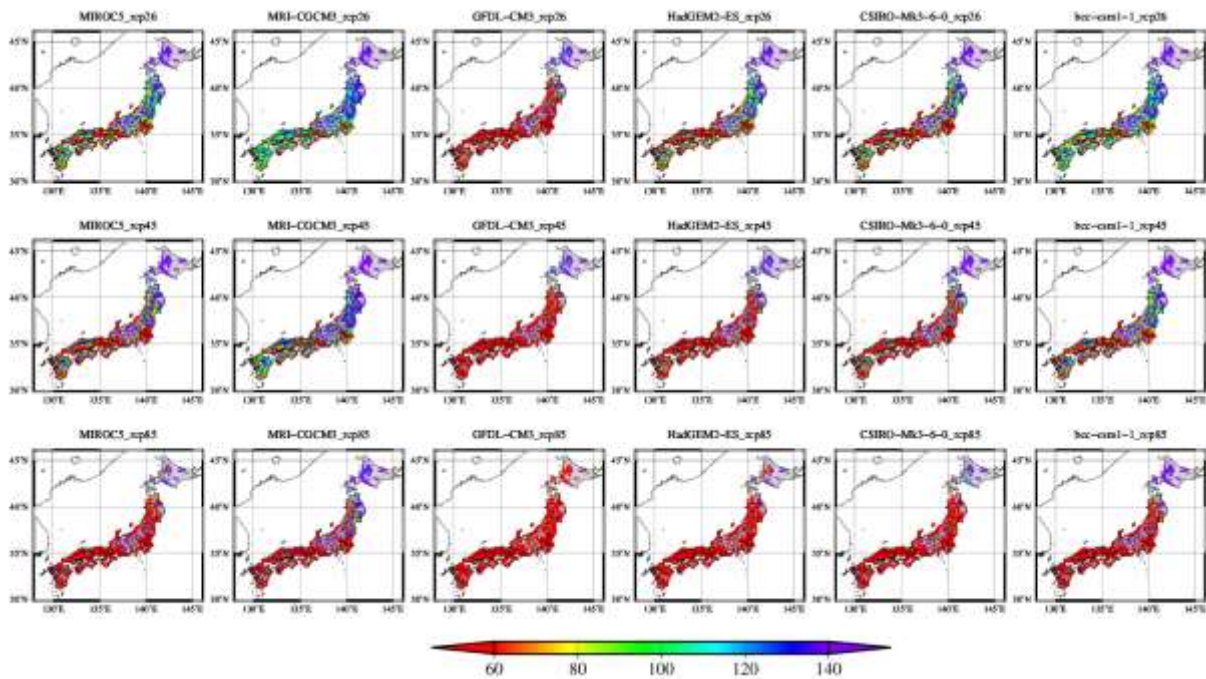


図1(6)①-2 2081-2100における高温に因る品質低下リスクの低い収量 (Class Aのみ)
(適応なし、1981-2000の値を100とした相対値)

「適応なし」の条件で各メッシュにおいて算定された収量を、メッシュ水田面積比率により全国集計したものを全生産量とし、各気候シナリオにおける20年毎の全生産量の平均の推移を図1(6)①-3に示す(但し、1981~2000年の平均値を100とした相対値)。ここで、各年代の全生産量は、HDDm26の値によりClass A~Cに色分けして分類されている。全生産量は、21世紀中盤までは全ての気候シナリオにおいて増加する。その後は21世紀末にかけて、CO₂濃度が減少に転じるRCP2.6では温度上昇も鈍化するため全生産量も変化しなくなり、その他のRCPではCO₂濃度上昇により増加傾向が継続するが、一部の温度上昇の大きい気候シナリオにおいては高温不稔の発生により減少に転じるという特徴が見られた。同図からも明らかのように、全生産量の年代毎の平均値については18気候シナリオ全てにおいて、対象期間を通して基準年代(1981~2000年)の平均を下回ることとはなく、本研究における算定結果からは我が国において将来予測される気候変化の影響で継続してコメが不足する事態が発生する可能性は低いといえる。一方品質については、気候シナリオにより程度の違いはあるが、各年代でClass BあるいはClass Cに分類される割合は年代が進むに従い継続的に増加し、一部では期間後半には生産物の大半がClass Cで構成されるようになると算定された。すなわち、適応策を導入せずに現行品種を現行移植日で栽培を続けると、国全体の生産量は十分確保できるものの、気候シナリオによっては高温に因る影響で品質が低下した生産物が大半を占めるようになる可能性があることを示している。

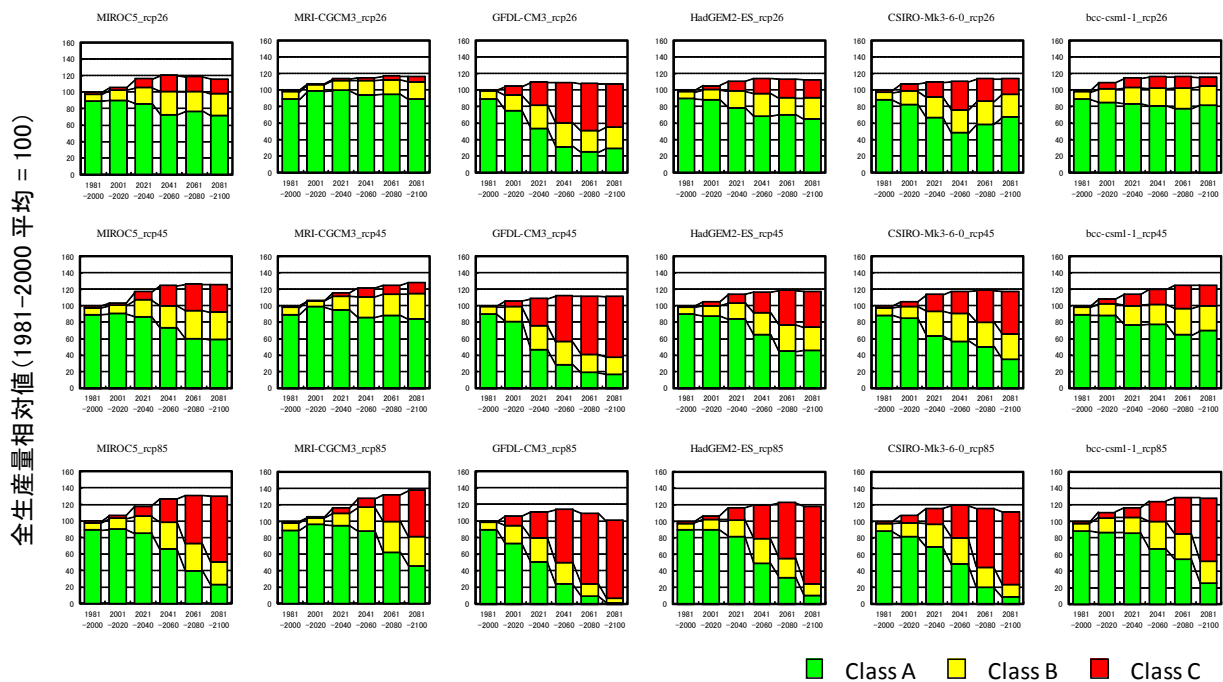


図1(6)①-3 全生産量の20年毎の推移（適応なし）
（1981～2000年の値を100とした相対値）

次に、「適応なし」と同様に、「適応(2)」による最適移植日に基づき算定された各シナリオにおける2081～2100年の20年間の平均全収量（Class A～C）および同期間の高温に因る品質低下リスク低に分類された収量（Class Aのみ）の地理分布を、図1(6)①-4、5に示す。全収量について「適応なし」（図1(6)①-1）と比較したところ、基準年代からの増減の分布の特徴は比較的近似しており、北日本で増加する以外は大きな変化はないかやや減少する。但し、「適応なし」よりも暖色系の色彩がやや強く、全体として減少傾向にある地域が広いといえる。また、「適応なし」において一部シナリオで認められた大きな減収は「適応(2)」では明確には認められないが、これも移植日移動により出穂時期が高温期から外れることで高温不稔による大幅減収が回避されていることが要因と考えられる。Class Aの収量分布（図1(6)①-5）は「適応なし」と比較して顕著に異なり、温度上昇の大きいシナリオ（GFDL-CM3等）を除いて目立った減収領域は認められなかった。また、全収量の分布とほぼ近似していることから、全収量の殆どは高温による品質低下リスクの低いClass Aで構成されていると判断され、全国レベルでは適切な作期移動により、収量、品質両方の観点から高温影響を回避できる可能性が示された。但し、気候シナリオによっては特定の地域でClass Aの顕著な減少が算定され、特に関東東部と東海から北陸にかけての平野部で減収領域が現れやすい傾向が認められる。こういった地域では作期移動のみによって温暖化影響を軽減することは困難であり、早晩性の異なる品種や高温耐性品種の導入等、他の適応技術オプションの適用を検討する必要があると考えられた。

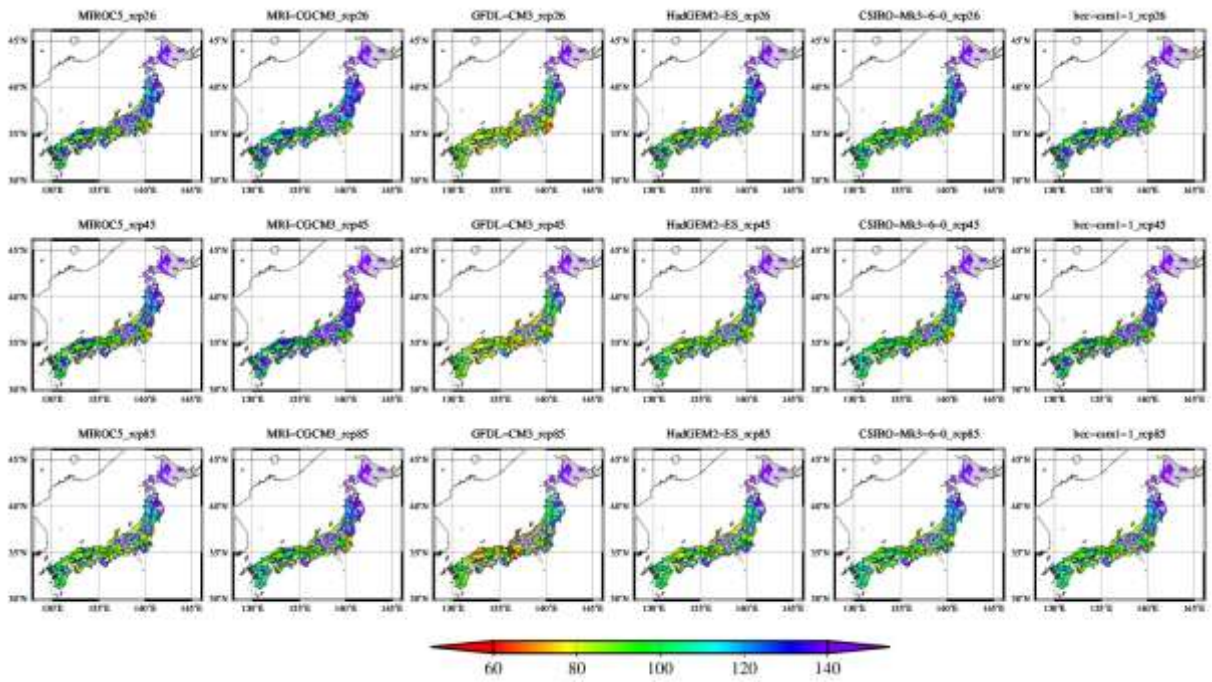


図1(6)①-4 2081-2100における全収量 (Class A~C)
(適応(2)、1981-2000の値を100とした相対値)

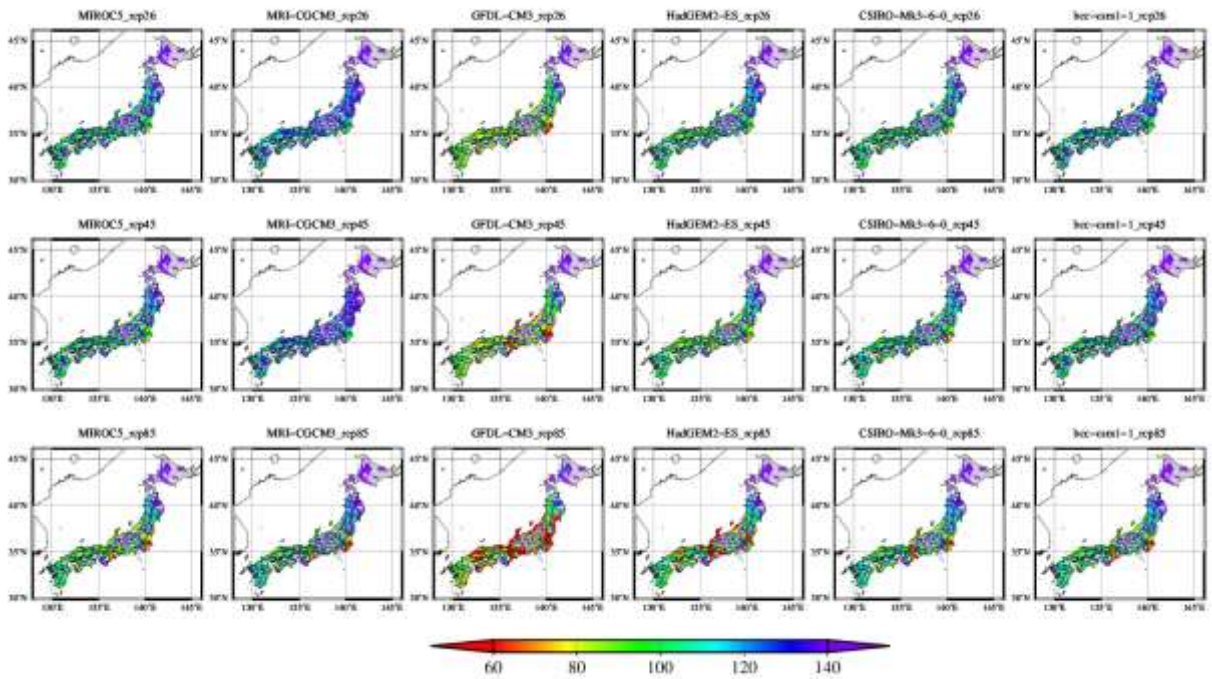


図1(6)①-5 2081-2100における高温に因る品質低下リスクの低い収量 (Class Aのみ)
(適応(2)、1981-2000の値を100とした相対値)

適応(2)においては、各年代でClass A の収量が最も高くなる日を最適移植日として選択している。ここで、高温影響を回避するためにどの程度の作期移動が必要であるかを地域ごとに明らかにするために、気候シナリオ毎の最適移植日の分布図を作成した。図1(6)①-6は一例として、2081-2100年における最適移植日の現行移植日との差を示したものである。全体的な傾向として、温度上昇の大きい気候シナリオほど最適移植日は大きく後退しており（図の赤領域が両者の差分が+であり、すなわち最適移植日は現行より後になる）、晩植により出穂期が盛夏の高温ピーク期のかかなり後に来るような調整が必要であることを示している。しかしながら、移植日が遅くなることで、登熟期間の大部分が夏季後半から秋季の日射量が低下する時期にシフトするため、光合成速度低下によりバイオマス生成量が少なくなり、収量の観点からは不利になるといえる。これは、図1(6)①-4の収量分布にも現れており、晩植となる地域では収量は変化なしやや減少となっている。一方、特に温度上昇の大きい気候シナリオにおいて、一部地域では最適移植日が現行より大きく前進しており、早植により高温影響を回避する、すなわち盛夏の高温ピークの前に成熟することが可能であることを示している。このような地域は面積としては広くないが、生育期間の大半が春季から夏季の日射量が一年中で最も多くなる時期に当たり、収量の観点からも有利になる可能性も考えられる（但し、図1(6)①-4の収量分布では不明瞭である）。

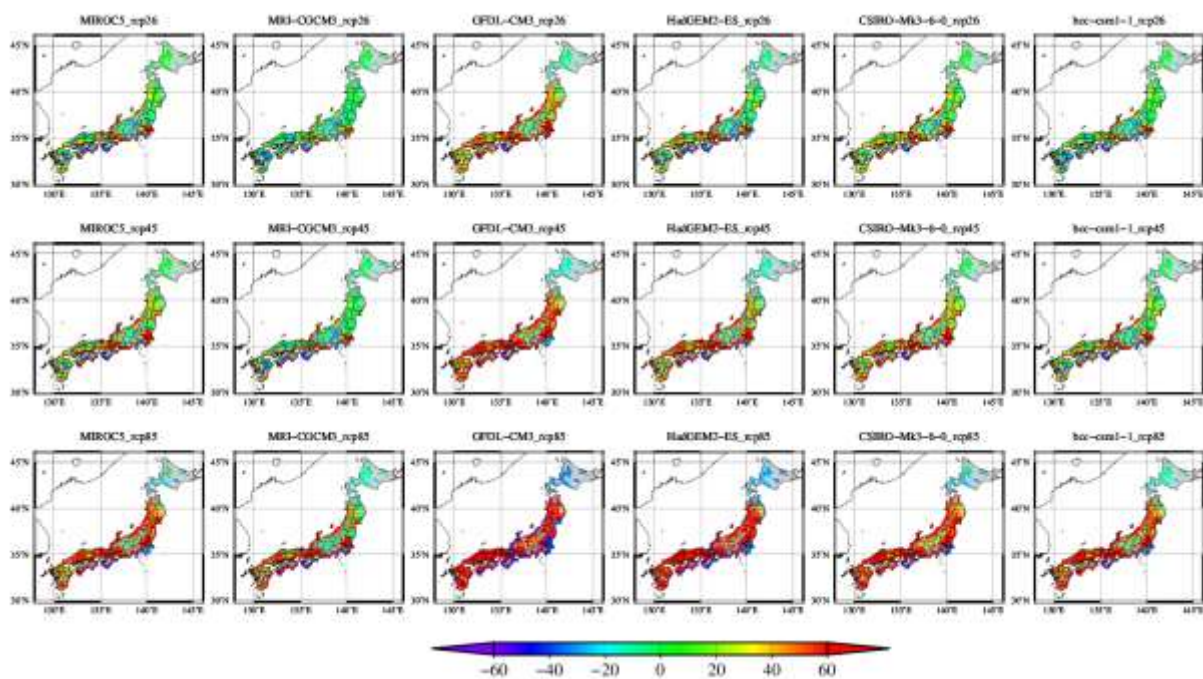


図1(6)①-6 2081-2100における適応(2)による最適移植日
(メッシュ毎の現行移植日からの日数)

図1(6)①-6で示されているように、適応(2)による最適移植日の地理的分布は複雑であり、近接地域で晩植か早植かが顕著に分かれるという特徴が一部の気候シナリオで認められる。そのため、典型的なメッシュを2か所抽出し、特定気候シナリオにおける移植日と収量、品質リスクの関係を調べた。図1(6)①-7は、長岡（新潟県）および焼津（静岡県）における移植日と収量、品質リス

ク構成割合との関係を示したものであり、気候シナリオHadGEM2-ES、RCP8.5による2081-2100年の例である。図1(6)①-6から、長岡は晩植、焼津は早植の領域に属している。現行品種は長岡がコシヒカリ、焼津がキヌヒカリであり、現行移植日はそれぞれ5月4日、5月28日である。これらの図において、適応(1)の場合は品質を考慮せず全収量が最多となる日（すなわち、色に関係なく棒の上端の高さが最高となる日）が最適移植日となる一方、適応(2)では緑色（Class A）の値が最大の日が最適移植日となる。まず長岡では、現行移植日±70日間の範囲においては、全収量では現行より2週間早い4月20日が最多となるが、Class Cの構成割合が殆どを占め、品質低下リスクは高い。そのため、品質を考慮した適応(2)においては、最も遅い7月13日が最適移植日となる。但し、収量相対値は80に満たず、現在よりも減収となる。そのため、適応策として作期移動のみでは影響軽減効果が十分でないことを示している。一方、焼津においては、計算範囲においては適応(1)、適応(2)ともに最適移植日は現行移植日より早くなり、特に適応(2)では最適移植日は3月下旬となる。また、この時期に移植した場合のClass A 収量のレベルは現在と比較して2割ほど多くなることから、作期移動が適応策として有効な地域といえる。両地点の作期移動による効果の相違は、品種の違いもあるが、早春季の気象条件に大きく依存しているといえる。すなわち、焼津においては早春季の気温が現状においても比較的高く、温暖化により移植早限期が大きく早まることで好適な気象条件での栽培が可能になったといえる。一方の長岡は日本海側の気候特性を示す地域であり、気温の年較差が大きく冬季は寒冷湿潤であることにより、温暖化条件でも焼津ほど移植早限が前進せず、そのため移植日選択の幅が限定される。また、移植可能期間のどの時期に移植しても夏季の高温を回避することが困難であり、予測される気候変化によりイネ発育に好適な気象条件は得ることが難しくなる可能性があることを示している。

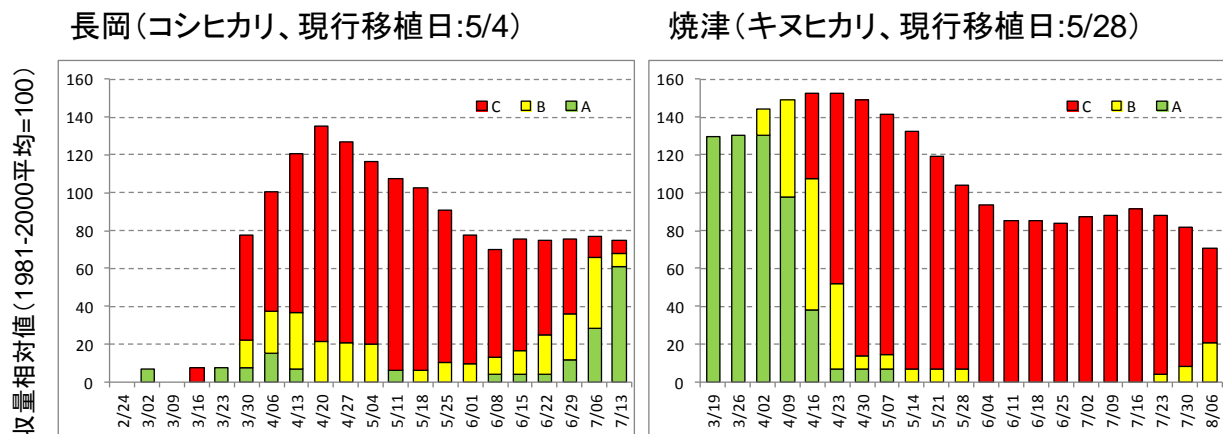


図1(6)①-7 移植日と収量、品質リスク構成割合の関係
(収量は、1981-2000の値を100とした相対値)

導入したコムギ発育予測モデルについて、発育段階の推定の妥当性を検証するため、九州を対象として、年々のコムギ出穂日の県別算定値と統計値の比較を行った。入力気象データは(独)農業環境技術研究所で作成している三次メッシュ気象値を使用した。計算栽培対象メッシュは、同研究所で作成・公表している麦栽培地域分布データ(同じく三次メッシュ)により抽出した。モデル計算開始日である播種日は、作物統計から県別播種日を該当する計算対象メッシュに割り当てた。検証のための計算期間は、統計資料(発育段階、各県品種別栽培面積割合)とメッシュ気象値が利用可能な、1991~2006年とした。なお、九州におけるコムギの主要栽培地域は、福岡、佐賀、長崎、熊本、大分の5県である。計算は6品種すべてについて行い、年々の計算結果を各都道府県における当該年の品種別栽培面積割合に応じて集計した。各県における出穂日のモデル算定値と統計値の年々変動を図1(6)①-8に示す。長崎県においてやや早めに算定、大分県においてやや遅めに算定する等、県により若干のバイアスが見られるが、変動パターンはほぼ一致しており、モデルによる出穂日の推定精度は概ね良好であるといえる。

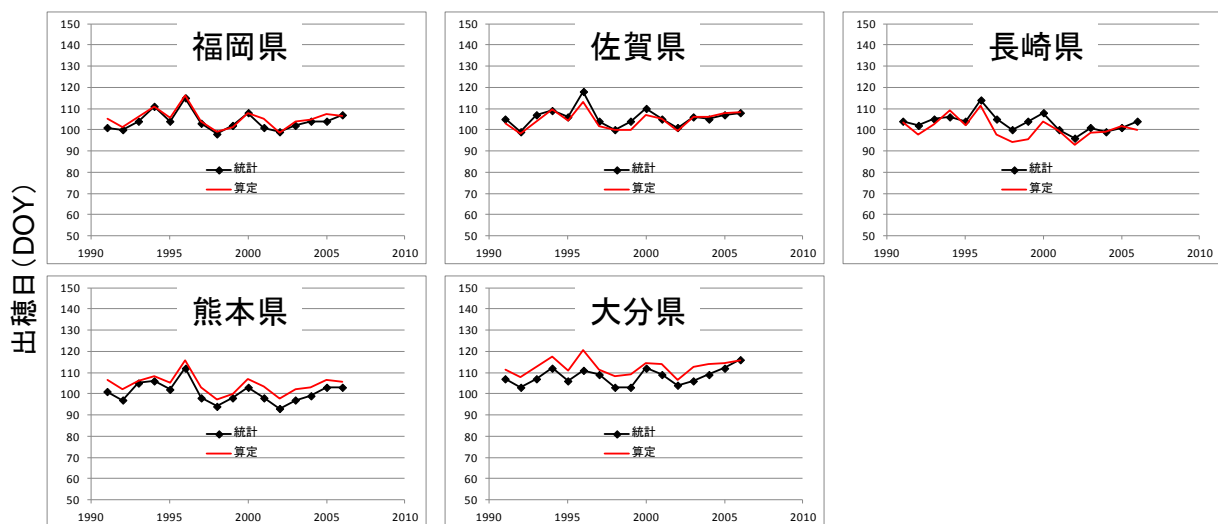


図1(6)①-8 各県出穂日のモデル算定値と統計値の比較

今回導入したモデルは発育段階の算定に特化したものであり、収量予測までは至っていない。そのため、将来気候条件下における収量への影響は評価できない。一方、近年の高温傾向に伴い発育が早期化することにより早春季の低温による凍霜害リスクの増大の可能性が指摘されている等、コムギ栽培における気候変化に伴う種々の生産制限要因の変化の解明の重要性が高まっている。そこで今回は、気候変化による茎立期の変化に伴う凍霜害リスクの変化について考察する。図1(6)①-9は、発育特性の異なる2品種(春播性品種であるチクゴイズミ、秋播性品種であるシロガネコムギ)の茎立期の時系列変化に、同期間の日別日最低気温を重ね合わせたものである。日最低気温には年次が進むにつれて年々変動を繰り返しながら長期的に上昇する傾向が認められ、それに対応して年々変動しつつ長期的に前進傾向を持つ茎立期算定値と良く対応している特徴が明確に認められる。すなわち、温暖化が進行しても茎立期前後の温度環境は現在と比較して大きくは変化せず、凍霜害発生リスクも明確には変化しないと推察される。特に温度感受性の高いチ

クゴイズミでは、暖冬年に茎立期が大きく前進することから、仮にその後低温傾向に転じることとなれば凍霜害発生リスクは高くなる可能性が示唆される。

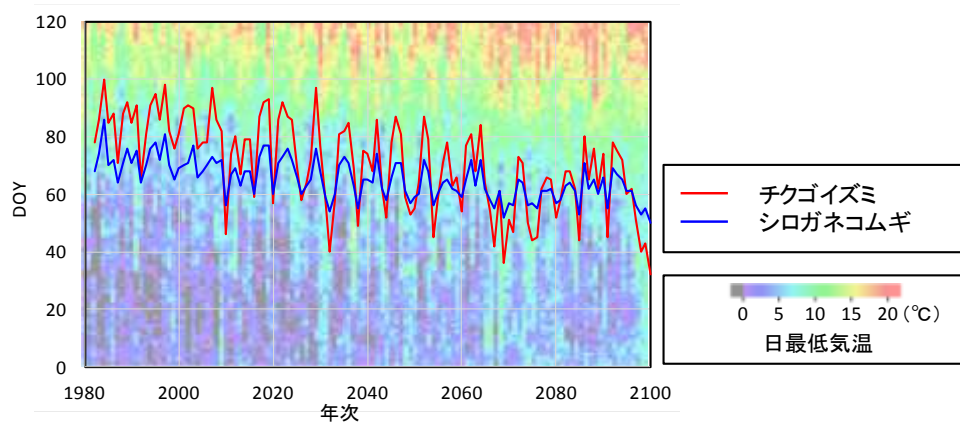


図1(6)①-9 予測気候シナリオ (MIROC5_RCP4.5) によるコムギ茎立期の変化と日最低気温

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

我が国のコメに関して、これまで気候変化条件下において収量の維持や増加を目的とした適応策の検討が中心であったのに対し、本研究では収量のみではなく品質も考慮した評価手法を提唱した。また、気候シナリオの違いによる影響と適応策の効果の予測の幅を地域ごとに明示できるようになった。その結果、品質低下を回避することにより大幅な減収となる地域が出現することが示され、地域による適応策策定のための適切な方向性を議論することが可能となった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

複数の気候変化シナリオに基づき、コメの収量や品質、栽培適地への影響と影響軽減のための適応策とその効果と限界を全国スケールで地域別に表すことができようになり、効果的な適応オプションの選択に関して具体的かつ定量的な知見を提供できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

1) M. OKADA, T. IIZUMI, Y. HAYASHI and M. YOKOZAWA: Environmental Research Letters, 6,

034031 (2011)

“Modeling the multiple effects of temperature and radiation on rice quality”

- 2) Y. ISHIGOOKA, T. KUWAGATA, M. NISHIMORI, T. HASEGAWA and H. OHNO: Journal of Agricultural Meteorology, 67(4), 209-224 (2011)

“Spatial characterization of recent hot summers in Japan with agro-climatic indices related to rice production”

- 3) S. FUKUI, Y. ISHIGOOKA, T. KUWAGATA and T. HASEGAWA: Journal of Agricultural Meteorology, in press (accepted on Jan. 13, 2015)

“A methodology for estimating phenological parameters of rice cultivars utilizing data from common variety trials”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 田中充・白井信雄編、地域適応研究会著：気候変動に適応する社会、技報堂出版、106-110 (2013)
「4-1. 先行する農業分野の適応策（執筆担当：石郷岡康史）」
- 2) 石郷岡康史：環境情報科学、44-1, 18-23 (2015)
「わが国の農業における気候変動の影響と適応」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 石郷岡康史、西森基貴、吉本真由美、桑形恒男、長谷川利拵、齋藤理、内海美砂子、村上雅則、大野宏之、吉田ひろえ、中川博視、近藤始彦：日本農業気象学会2011年全国大会（2011）
「2010年夏季の気象概況と作物生産に関わる農業気候的な特徴」
- 2) 福井眞、石郷岡康史、長谷川利拵、桑形恒男：日本農業気象学会2012年全国大会（2012）
「品種特性を考慮した水稻の高解像度な地域別生育検証」
- 3) 石郷岡康史、桑形恒男、西森基貴、長谷川利拵、福井眞、大野宏之：日本農業気象学会2012年全国大会（2012）
「近年の夏季高温のコメ生産への影響に関する指標とその空間分布特性」
- 4) 福井眞：日本数理生物学会（2012）
「耕作のコストベネフィットと害虫」
- 5) Y. ISHIGOOKA, S. FUKUI, T. HASEGAWA, T. KUWAGATA, M. NISHIMORI: ISAM2013, 2013
“Large scale evaluation of the effects of adaptation to climate change on rice production and quality in Japan”
- 6) 福井眞、石郷岡康史、桑形恒男、長谷川利拵：日本農業気象学会2013年全国大会（2013）
「水稻における地域別適合品種のフェノロジー特性抽出」
- 7) Y. ISHIGOOKA: AgMIP East Asia Regional Workshop, 2013
“Evaluation of the effects of moving cultivation schedule as adaptation to climate change on rice production and quality in Japan.”
- 8) 福井眞：日本生態学会第61回全国大会（2014）
「農業害虫の被害拡大と土地利用戦略：温暖化による侵入害虫を例に」
- 9) 石郷岡康史、福井眞、桑形恒男、西森基貴、長谷川利拵：日本農業気象学会2014年全国大会

(2014)

「気候変動がわが国のコメ生産に与える影響と作期移動による適応」

10) 福井眞、石郷岡康史、長谷川利拓、桑形恒男：日本農業気象学会2014年全国大会（2014）

「水温を考慮した水稻フェノロジーモデルの精度検証」

11) 福井眞、桑形恒男、村井（羽田野）麻理、林 秀洋、石川（櫻井）淳子：日本気象学会2014年度秋季大会（2014）

「植物の水輸送を担うタンパク質・アクアポリンの発現動態の 気象条件依存性」

12) Y. ISHIGOOKA, S. FUKUI, T. HASEGAWA, T. KUWAGATA, M. NISHIMORI: ISAM2015, 2015

“Adaptation to climate change impact on rice productivity by shifting transplanting date in Japan”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) 環境新聞（2014年3月19日、1頁）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

1) T. HASEGAWA and T. HORIE: In: Kropff MJ, Teng PS, Aggarwal PK, Bouma J, Bouman BAM, Jones JW, van Laar HH, eds. Applications of systems approaches at the field level. Dordrecht: Kluwer, 243-257 (1997).

“Modelling the effect of nitrogen on rice growth and development”

2) A. MARUYAMA, Y. KUROSE and K. OHBA: Journal of Agricultural Meteorology, 66(1), 41-50 (2010).

“Modeling of phenological development in winter wheat to estimate the timing of heading and maturity based on daily mean temperature and photoperiod”

3) 中園江、大野宏之、吉田ひろえ、佐々木華織、中川博視：日作紀、83(3), 249-259 (2014).

「コムギの発育段階推定モデル」

S-8-1 我が国全体への温暖化影響の信頼性の高い定量的評価に関する研究

(6) 農業・食料生産における温暖化影響と適応策の広域評価

② 温暖化によるわが国の果樹生産適地移動の幅と適応技術の評価

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 果樹研究所

栽培・流通利用研究領域

ブドウ・カキ研究領域

カンキツ研究領域

杉浦俊彦・阪本大輔

杉浦裕義

藤井 浩

平成22～26年度累計予算額：32,896千円

(うち、平成26年度予算額：5,910千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

気候変動の影響を受けやすい作物である果樹について、その生産地域により、寒冷地果樹、温帯性落葉果樹、温帯性常緑果樹、亜熱帯果樹の4グループ分けた。各グループで最も生産量の多いリンゴ、ニホンナシ、ウンシュウミカン、タンカンの4樹種を代表として、それらの適地を推定するモデルを開発し、新気候モデル(CMIP5)、RCPシナリオを適用することにより、不確実性を含んだ将来の果樹の適地分布を明らかにした。その結果、どの樹種も適地は年代を追うごとに北上傾向にあった。今世紀半ばではRCP間の適地分布の差は比較的小さかったが、世紀末ではRCPによる不確実性はかなり大きくなった。現在の適地の中で適地のまま継続する面積の比率(適地継続率)は、21世紀半ばでは、リンゴやウンシュウミカンで70～80%となった。これらは的確な適応策を講じないとダメージを被る産地が生じる可能性は高いと考えられた。世紀末には、適地継続率は大きく低下したが、RCPによる差が拡大し、とくにウンシュウミカンでは、PCP8.5の場合、0%程度まで低下するが、RCP2.6の場合70%程度にとどまった。また、世紀末の適地継続率は、平均するとリンゴでは50～60%、ニホンナシでは70～80%となった。現在から継続する適地と新たな適地を合わせた将来の適地の総面積は、リンゴ、ニホンナシの場合は、現在と同程度であったが、ウンシュウミカンの適地面積は、現在よりも明らかに広くなり、タンカンは、劇的に増加すると推定された。これらのことから、今世紀半ばにおける温暖化の果樹への影響は明確にあるものの、排出シナリオ間で差が小さいことから、温暖化の影響をある程度正確に予測することによって、より効果的、効率的な温暖化対策が推進できると考えられた。一方、世紀末には排出シナリオ間の差は極めて大きく、これは温室効果ガス排出削減の効果が、今世紀末の果樹産業に大きく現れることを示すといえる。また、長期的には、より暖地で栽培されている樹種への改植やとくに、現在の生産量がわずかである、亜熱帯果樹の大幅導入が必要と考えられた。

[キーワード]

リンゴ、ミカン、タンカン、ナシ、適地

1. はじめに

北のリンゴ、南のミカンといわれるように、果樹は栽培可能な気候は品目ごとに限られており、北海道から沖縄まで栽培される水稻等とは大きく異なる場所である。このため果樹は気候変動の影響を極めて受けやすい作物であり、適地移動が推定されている。わが国は南北に長い国土を活かして、地域ごとに様々な果樹が生産されており、主要な果樹（政令指定樹種）だけで14品目、これに多くのマイナー果樹が加わるため、わが国果樹生産の温暖化影響の全体を調べるのは容易ではない。そこで、各樹種をいくつかのグループに分類し、グループごとの適地の移動を検討するなどにより、全体像を把握する必要がある。一部の樹種については過去に適地移動の評価を行っているが¹⁾、2013年度にはIPCC第5次評価報告書が公表されるなど、気候モデルや排出シナリオも新しい段階に至った。これを機に、過去に評価を行った樹種も含めて果樹の適地移動やその不確実性をシミュレーションし、包括的な評価を行う必要がある。

2. 研究開発目的

わが国の果樹は樹の生態と生産地域によって分類され、気温が低い地域で栽培されるグループから順に、寒冷地果樹、温帯性落葉果樹、温帯性常緑果樹、亜熱帯果樹などと称される（表1(6)②-1）。各グループで栽培面積が最大の樹種を取り上げ、その適地を推定するモデルの開発を行い、新しい気候モデル（CMIP5）や温室効果ガス排出シナリオ（RCP）を適用することにより、不確実性を含んだ将来の果樹の適地分布の全貌を明らかにする。また、それらの結果をもとに、果樹の自給率維持・向上に向けた、適応策の導入に関して検討する。

表1(6)②-1 果樹のグループ分けと研究対象樹種

グループ	主な樹種	定義
寒冷地果樹	リンゴ、オウトウ、セイヨウナシ	寒さに強い落葉果樹
温帯性落葉果樹	ニホンナシ、ブドウ、モモ、カキ、クリ、スモモ、ウメ	寒さに弱い落葉果樹
温帯性常緑果樹	ミカン、デコポン・清見等（亜熱帯性を除く中晩柑）、ピワ	寒さに強い常緑果樹
亜熱帯果樹	タンカン、シーカーサー、アボガド、レイシ	寒さに弱い常緑果樹

太字：グループの代表として研究対象とした樹種（グループ内で最も生産量が多い樹種）

3. 研究開発方法

(1) タンカンの寒害発生温度

日本で栽培されている果樹のうち、亜熱帯果樹は、それ以外の樹種と比較して生産量が少ないため、過去の研究事例が著しく希少である。亜熱帯果樹で最も生産量の多いタンカンにおいても、栽培北限判定の重要な指標となる果実の寒害発生温度は明らかになっていない。そこで、寒害発生限界温度を計測するため、タンカン成熟果を供試して凍結温度を試験した。

実験に用いた果実は沖縄産の市販物で重さは約120gだった。果実が過冷却しにくいように湿らせた脱脂綿を果実の上下2カ所に接触させた。果実の表面温度の変化を計測するため、果実の赤道部において果実に直径2mmの温度センサー（エスペックRT-31S）を貼り付けた。予冷によって果実を約2℃まで冷やした後、果実をゆっくり冷やすために、発砲スチールの容器に入れ、密封した。この容器を1℃の冷蔵庫で30分以上予冷したあと、実験1では-5℃、実験2・3回目は-8℃に設定したフリーザーに14時間入れた。果実表面の温度が上昇したら果実が凍結し始めたと判断し、そ

の温度を寒害発生限界温度とした。

(2) 果樹の栽培適地移動

リンゴ、ニホンナシ、ウンシュウミカン、タンカンの主要4樹の適地変化やその不確実性について、以下の方法でシミュレーションした。日本の気象データのうち、現在値については、アメダスメッシュ化データ²⁾における、1981～2000年の平均気温・最低気温の日別値を、3次メッシュデータとして用いた。また、S-8共通シナリオ（第2版）における4つのGCM（MIROC5、MRI-CGCM3、GFDL CM3、HadGEM2-ES）、3つの排出シナリオ（RCP8.5、4.5、2.6）による将来（温暖化時）の推定値から、平均気温・最低気温の気温上昇量（予測値－再現実験値）の月別値を求めた。すなわち将来の3次メッシュデータからメッシュ毎に温暖化時の予測値と再現実験時（1981～2000年）の月別平均値を読み取り、メッシュ毎の月別の気温上昇量を算定した。温暖化時としては2031～2050、2081～2100年の20年間ずつの2期間を想定した。この月別気温上昇量に現在値を加えることで、温暖化時の各期間（20年間）の日別値とした。上記の結果得られる現在あるいは温暖化時の20年毎の日別値を基に適地判定を行った。

適地判定の基準は以下の通りである。リンゴについては、農水省の「果樹農業振興基本方針」³⁾において、年平均気温6℃以上14℃以下を適温としていることから、それに該当する地域を適地と判定した。ウンシュウミカンも同様に、年平均気温が15℃以上18℃以下でかつ、日最低気温の年間の最低値が-5℃未満となる年が20年間に4年以下となるメッシュを適地と判定した。一方、ニホンナシについて「果樹農業振興基本方針」では北限として年平均気温7℃以上を適温としているが、南限が示されていない。実際のニホンナシ栽培の栽培状況から南限は鹿児島県の内陸部と考えられ、このことから年平均気温17℃以下が適温と考えられるため、7℃以上17℃以下をニホンナシの適地の条件とした。また、タンカンでは「果樹農業振興基本方針」の記述および、本研究の中で実施した寒害発生温度に関する実験の結果により、年平均気温が17.5℃以上でかつ、日最低気温の年間の最低値が-2℃未満となる年が20年間に4年以下となるメッシュを適地と判定した。

4. 結果及び考察

(1) タンカンの寒害発生温度

実験1では果実表面温度は-3.5℃まで低下したが凍結はしなかった（図1(6)②-1）。実験2では-4.5℃まで低下した後に凝固熱で果実表面温度が上昇した。実験3では-4.7℃まで低下した時点で果実表面温度が上昇した。これらのことから果実表面温度が-4.5℃程度になると果実凍結が始まると考えられた。カンキツの果実の寒害は果実の凍結が原因であり、寒害が発生するような気象条件下では放射冷却により品種によらず果実温度は気温よりも、2.5℃程度低いことが知られている⁴⁾。このことからタンカンの寒害発生気温は-2℃と考えられた。したがって低温耐性限界温度を-2℃として、栽培適地の判定をおこなった。

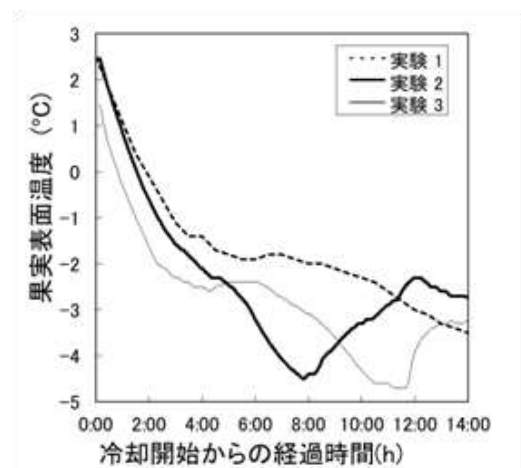


図1(6)②-1 フリーザーで冷却したときのタンカン果実の温度。温度上昇は凝固熱の放出による。

(2) 果樹の栽培適地移動

リンゴ、ニホンナシ、ウンシュウミカン、タンカンについて、4つのGCMによる適地移動のシミュレーションを行った。これらは寒冷地果樹（リンゴ）、温帯性落葉果樹（ニホンナシ）、温帯性常緑果樹（ウンシュウミカン）、亜熱帯果樹（タンカン）の代表であり、わが国で栽培されているほとんどの果樹の適地移動が網羅的に推定できた。推定結果の概要は下記の通りである。

どの樹種においても適地は年代を追うごとに北上する傾向にあった（図1(6)②-2）。北上の程度を適地の重心の位置で評価すると、2031～2050年ではRCP間の適地分布の差は比較的小さかったが、これに対し2081-2100年ではRCPによる不確実性はかなり大きくなることが示された（図1(6)②-3）。このことから、今世紀半ば（2031-2050年）における温暖化の果樹への影響は明確にあるものの、排出シナリオ間で差が小さいことから、温暖化の影響をある程度正確に予測することによって、より効果的、効率的な温暖化対策が推進できると考えられた。一方、世紀末（2081-2100年）には排出シナリオ間の差は極めて大きく、これは温室効果ガス排出削減の効果が、今世紀末の果樹産業に大きく現れることを示すといえる。

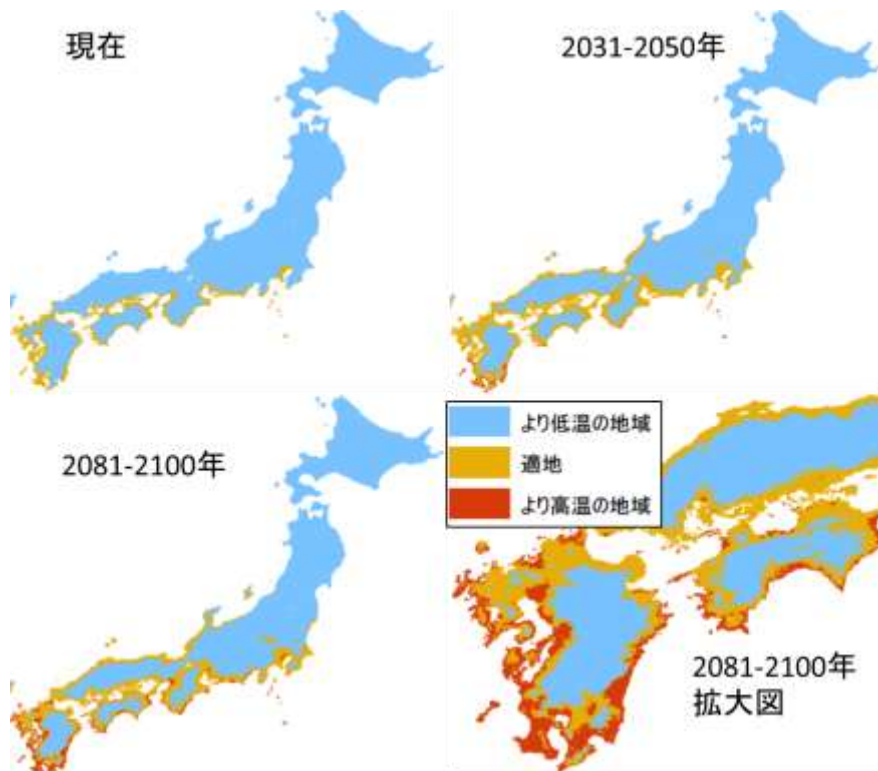


図1(6)②-2 現在の適地分布と将来の適地移動（ウンシュウミカン、MIROC5、RCP4.5における例）

果樹はコメや野菜など一年生の作物と異なり、同一樹で通常40年ほど継続して栽培されるため、現時点だけでなく、新たに樹を植える場合、長期間適地であり続ける必要がある。現在の生産適地が今後も適地として継続するかを考察するため、適地継続の継続状況を調べた（図1(6)②-4）。

この図から判断すると、現在の適地の中で適地のまま継続する面積の比率（適地継続率）は、RCPによらず、21世紀半ばでは、リンゴおよびウンシュウミカンで70～80%となった。ここでの適地は気温のみから判定した潜在的な適地であり、実際に産地があるのは適地の中の極一部にすぎ

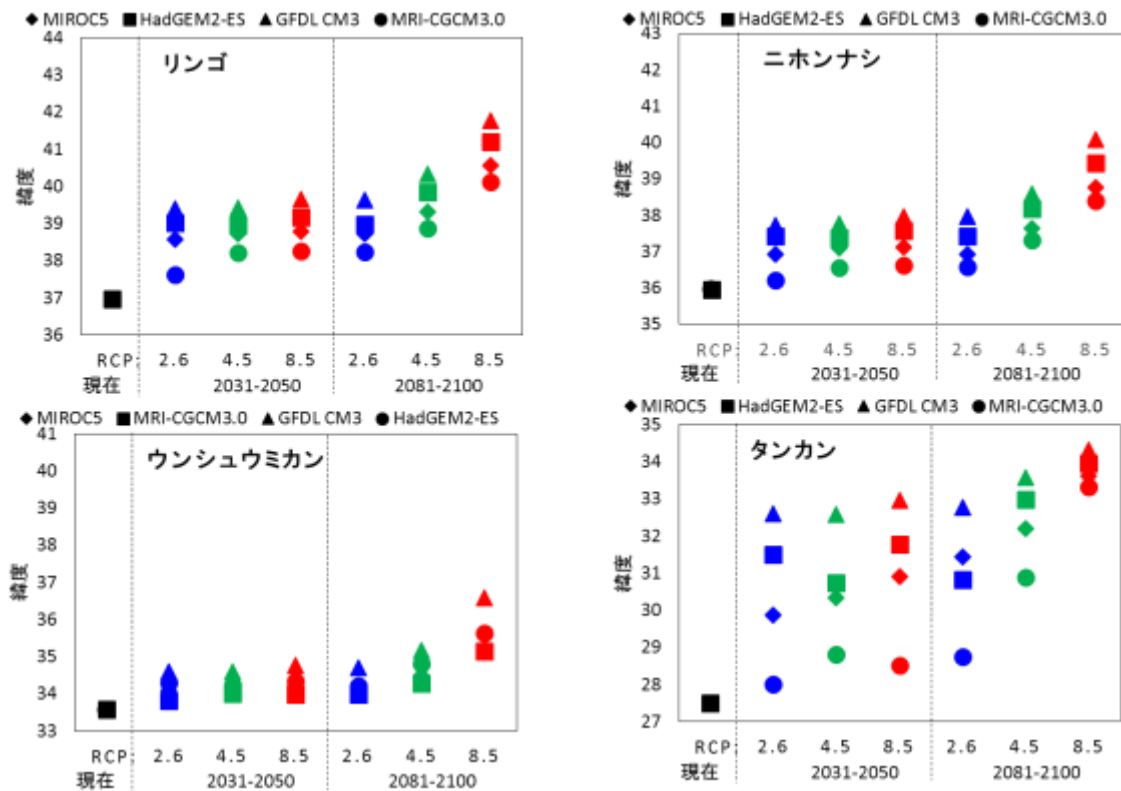


図1(6)②-3 適地分布における重心の緯度の変化

ない。しかし、適地として継続できない地域が現在の適地の20～30%もあることから、リンゴやウンシュウミカンについては的確な適応策を講じないと温暖化のダメージを被る産地が生じる可能性は高い。

一方、ニホンナシの適地継続率は90%程度となった。リンゴやウンシュウミカンに比べ、ニホンナシの継続率は大きいと、比較的影響が小さいものと考えられた。これはニホンナシのような温帯性落葉果樹はわが国の気候に広く適合した樹種であることを反映していると考えられる。タンカンについては本研究では南限を設定していないため、計算上の適地継続率は常時100%となるが、台湾原産のカンキツであり、実際に、温暖化によって日本で栽培が難しくなる地域が生じることが考えにくい。

ウンシュウミカンの適地継続率は、気温上昇とともに低下するが2℃前後の上昇で急減した。21世紀末には、適地継続率はRCPによる差が拡大したこともあり、ウンシュウミカンではPCP8.5の場合、多くのGCMで0%まで低下するが、RCP2.6の場合継続率は70%程度にとどまった。また、21世紀末の適地継続率は、平均するとリンゴでは50～60%、ニホンナシでは70～80%となった。これらのことから、温暖化の影響はウンシュウミカンで特に大きく、リンゴが次ぎ、ニホンナシでは比較的小さいと見積もられた。

一方、現在、気温が低い地域でも、温暖化の進行で新たに適地となる地域も多く存在する（図1(6)②-4）。現在から継続する適地と新たな適地を合わせた将来の適地の総面積は、排出シナリオ間によってばらつきはあるものの、リンゴでは現在の適地面積よりやや狭くなるか、同程度であり、ニホンナシの場合は、現在よりもやや広がる傾向にあったが、ウンシュウミカンの適地は

面積的には、現在よりも明らかに広がると推定された。さらに、タンカンの生産適地は、現状、国土面積の1%程度であるが、本州や四国、九州の一部が亜熱帯化することにより、将来、劇的に増加すると推定された。とくにRCP8.5では今世紀末には適地面積が国土面積の12~34%、現在の適地面積の10~30倍まで急拡大するという結果となった。

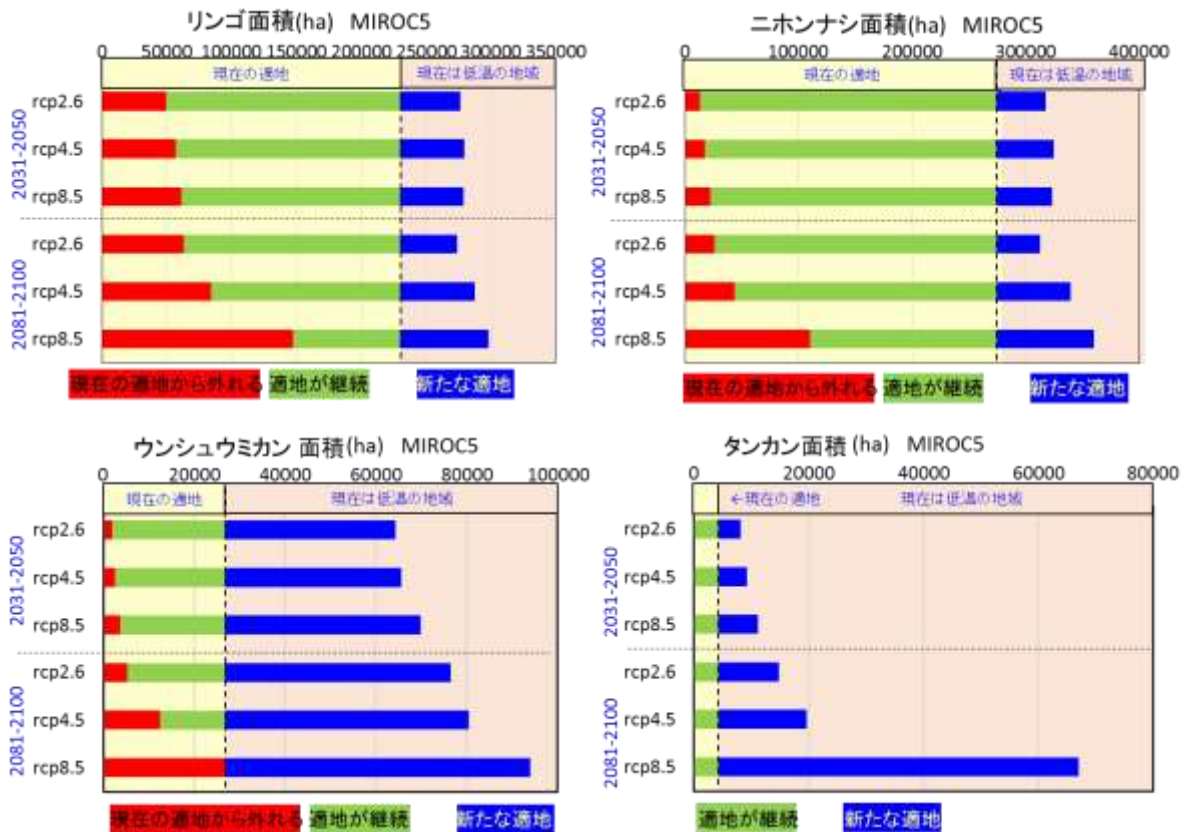


図1(6)②-4 現在の適地（黄色の枠内）が将来適地のまま継続する面積（赤色の棒）と適地から外れる面積（緑色の棒）。また、現在、低温の地域（ピンクの枠内）で将来、新たに適地になる面積（青色の棒）。いずれもMIROC5の場合。

（3）果樹における長期的な温暖化適応に向けて

以上の結果を踏まえ、日本の果樹生産における今後の温暖化適応策を検討する。わが国の果樹は樹の生態により、グループ分けされており、北に植えられているものから、寒冷地果樹、温帯性落葉果樹、温帯性常緑果樹の順であり、これらが日本のほとんどの果樹生産を占める。これらに加えて南西諸島の一部では亜熱帯果樹もわずかに栽培されている。本研究では、それぞれのグループで最も生産量の多い果樹を、グループの代表として、その適地移動についてシミュレーションを行った。その結果、亜熱帯果樹を除けば、現在、果樹の栽培を行っている地域の一部は、今世紀半ばには温暖化の進行により、将来、栽培の継続が難しくなる可能性があることが示された。前項で示したように、今世紀半ばの時点では、排出シナリオ間で適地移動の差が小さく不確実性が比較的低微であるため、温暖化の影響をある程度正確に予測することによって、より効果的、効率的な温暖化対策が推進できると考えられた。この時点ではまだ温暖化の影響も限定的であり、急な改植も難しいことから、高温で栽培が難しい場合は、これまで開発されている様々な

適応技術を組み合わせて、現在栽培している樹での対応も可能であろう。

一方、今世紀末には温暖化による大規模な適地移動が見込まれる。しかしながら、まだ50年以上の余裕があり、また、各グループの適温域は重なりがあるため、温暖化進行後の応策として、寒冷地果樹の栽培が難しくなれば、温帯性落葉果樹に改植し、温帯性落葉果樹の栽培が難しくなれば温帯性常緑果樹に改植するというように、樹種を更新していくことが、抜本的な適応戦略の一つとなる（図1(6)②-5）。現在、果樹栽培が少ない北海道に寒冷地果樹を移し、以下、順次、栽培地を北に移すことで、全体の生産量を維持することが可能と考えられる。

現在、牧草地などになっている北海道の耕地の一部に寒冷地果樹を植える必要があるが、本州以南では、現在の果樹園に適正な樹種を植えれば、将来も果樹生産は維持できると考えられる。こうした改植は、理屈では可能であるが、改植直後数年におよぶ未収益期間の存在や、改植に必要なコスト、新たな樹種を栽培するための技術習得など課題も多々あるため、行政による厚い支援等が必要である。また、昨年度示したように、亜熱帯果樹の生産適地は、現状では、国土面積の1%程度であるが、本州や四国、九州の一部が亜熱帯化することにより、激増してゆくと予想される。したがって、果樹自給率の維持にとどまらず向上を目指すならば、アボガド、ライチ、グレープフルーツ、スイートオレンジなど、現在、自給率が低い亜熱帯果樹については、自給率向上に向けて本格的な導入を促す契機となると考えられる。これらの樹種は栽培事例が少なく、新規導入のハードルはかなり高いと推察されるため、長期的な戦略に基づいて時間をかけて取り組む必要があるといえる。

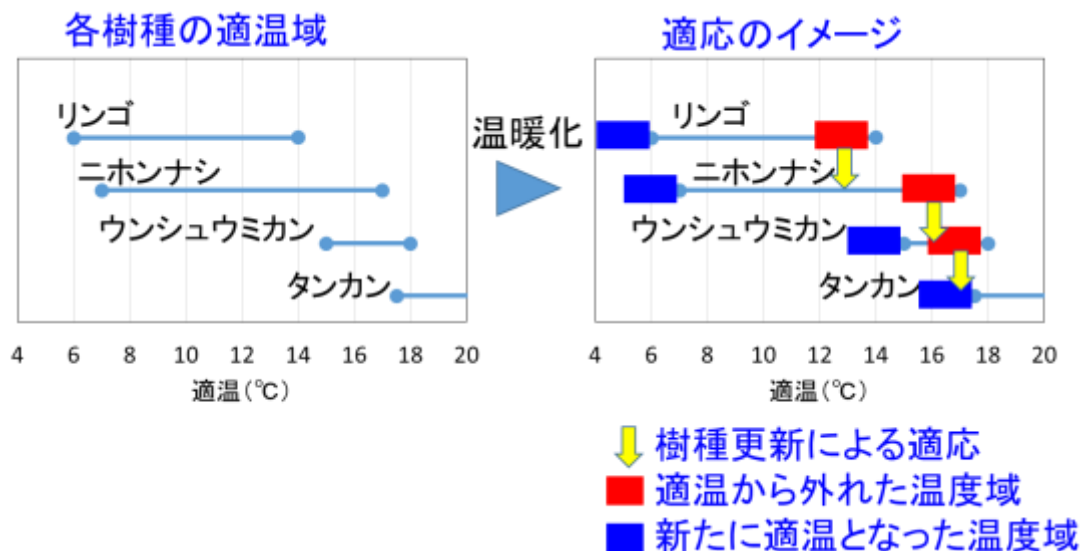


図1(6)②-5 各樹種の適温域の重なり（左図）と温暖化進行後の適応のイメージ（右図）

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで科学的な根拠が希薄だったタンカンの寒害発生温度が明確になった。新気候モデル（CMIP5）、RCPシナリオによるリンゴ、ニホンナシ、ウンシュウミカン、タンカンの適地移動の予測結果が示された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

「適応計画」策定に向けたわが国における気候変動影響評価情報を整備することを目的とした環境省の「平成26年度気候変動への理解のための気候変動による将来影響の予測等実施委託業務」における気候変動による将来影響の予測計算に貢献した。また、平成27年3月に策定された中央環境審議会地球環境部会気候変動影響評価等小委員会による「日本における気候変動による影響に関する評価報告書」に、適地移動の予測結果が反映された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

リンゴ、ニホンナシ、ウンシュウミカン、タンカンについて、将来の適地や、その不可確実性がマップ上に示されたことから、各地域での今後の果樹の適応策策定に利用できる。とくに今世紀半ばでは、不確実性が小さく比較的予測精度が高いため、これまで開発されている様々な適応技術を組み合わせるなどによる、より効果的、効率的な温暖化対策が推進できる。一方、温暖化による大規模な適地移動が見込まれる今世紀末には、どこに何を栽植したらよいかを決める基礎資料が策定された。特に、亜熱帯果樹について現在の自給率は非常に小さいが、将来、適地が九州や本州にも急拡大することから、これらの樹種の生産を促し、自給率向上に向けた取り組みが重要であることが示された。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) T. SUGIURA, D. SAKAMOTO, Y. KOSHITA, H. SUGIURA and T. ASAKURA, J. Jpn. Soc. Hort. Sci., 83, 117-121 (2014).
“Predicted changes in locations suitable for tankan cultivation due to global warming in Japan”
- 2) T. SUGIURA, D. SAKAMOTO, Y. KOSHITA H. SUGIURA and T. ASAKURA: Acta Horticulture, (in press)
“Uncertainty of changes in locations suitable for satsuma mandarin and tankan cultivation due to global warming in Japan”

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 杉浦俊彦、杉浦裕義、阪本大輔、朝倉利員：園芸学会秋季大会(2011)
「年平均気温および年最低気温の変化推定によるタンカン適地の北上予測」

- 2) T. SUGIURA, D. SAKAMOTO, H. SUGIURA, Y. KOSHITA, T. ASAKURA : The XII International Citrus Congress, València, Spain, 2012
 “Prediction of moving northward of favorable regions to cultivate subtropical citrus by estimation of changes in annual mean and minimum air temperature in Japan”
- 3) T. SUGIURA, D. SAKAMOTO, Y. KOSHITA, H. SUGIURA, T. ASAKURA : 29th International Horticultural Congress, Brisbane, Australia, 2014
 “Uncertainty of changes in locations suitable for satsuma mandarin and tankan cultivation due to global warming in Japan”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 関西市場駐在協議会講演会（主催：関西市場駐在協議会、2010年6月29日、参加者25名）
- 2) 第57回全国リンゴ研究大会（主催：長野県、2010年9月28日、参加者663名）
- 3) 公開シンポジウム 「地球温暖化の農業・地域への影響と適応策」（主催：日本学術会議、2011年1月21日、参加者125名）
- 4) 平成22年度 山梨県食の経営者フォーラム（主催：山梨県AFC友の会、2011年2月24日、参加者150名）
- 5) 温暖化対策セミナーin秋葉原（主催：Radixの会、2011年5月15日、参加者40名）
- 6) 果樹研究所一般公開ミニ講演会（2012年4月20日、参加者30名）
- 7) 気候変動の影響と適応策を考える～IPCC第38回総会に向けて in 松山（主催：環境省、2013年12月22日、参加者100名）
- 8) IPCCシンポジウム（主催：環境省、2014年3月26日、参加者200名）
- 9) アグリビジネス創出フェア2014研究・技術プレゼンテーション（主催：農林水産省、2014年11月12日、参加者50名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日本農業新聞（2014年3月27日、19頁、「温州ミカン産地ピンチに」）
- 2) 毎日新聞（2014年3月25日、12頁、「温暖化危険水域に」）
- 3) 朝日新聞（2014年3月18日、3頁、「2050年までに温室ガス40%～70%減必要」）
- 4) 読売新聞（2014年3月18日、38頁、「温暖化報告書 ミカン産地も戸惑い」）
- 5) 朝日新聞（2014年3月17日、1頁、「日本の気温最大6.4度上昇」）
- 6) 読売新聞（2014年3月22日、3頁、「被害軽減へ効率的対応が要る」）
- 7) 毎日新聞（2014年3月17日、1頁、「今世紀末6.4度上昇」）
- 8) 朝日新聞（2014年3月25日、1頁、「天声人語」）
- 9) 毎日新聞（2014年3月18日、「温暖化で世紀末日本6.4度上昇」）
- 10) 日本農業新聞（2014年3月18日、19頁、「気温、最大6.4度上昇」）
- 11) 毎日新聞（2014年3月4日、28頁、「環境省予測」）

- 12) フジテレビスーパーニュース（2014年3月31日、ウンシュウミカンに関する成果）
- 13) NHKニュース（2014年3月25日、ウンシュウミカンに関する成果）
- 14) 公明新聞（2014年3月18日、「地球温暖化の将来影響予測」）
- 15) 赤旗新聞（2014年3月18日、「温暖化 最大6.4度上昇も」）
- 16) 宮崎日日新聞（2014年3月18日 5頁、「平均気温 最大6.4度上昇」）
- 17) フジ産経ビジネス1（2014年3月18日、4頁、「洪水被害 世紀末3倍超」）
- 18) 中国新聞（2014年3月18日、3頁、「洪水被害3倍6800億円」）
- 19) 愛媛新聞（2014年3月18日、「温暖化で砂浜85%消失」）
- 20) 西日本新聞（2014年3月28日、「被害を減らす対策も急げ」）
- 21) 熊本日日新聞（2014年3月18日、「日本の洪水被害3倍に」）
- 22) 熊本新聞（2014年4月4日、「地球の安全保障」）
- 23) 南日本新聞（2014年3月18日、「洪水被害 今世紀末3倍」）
- 24) 南日本新聞（2014年3月25日、「被害軽減へ対策を急げ」）
- 25) 中日新聞（2014年3月29日、1頁、「暑くてリンゴが作れない」）
- 26) 中国新聞（2014年3月19日、「地球の備えをどうする」）
- 27) 愛媛新聞（2014年3月30日、2頁、「過酷な未来回避は人類の責務」）
- 28) 愛媛新聞（2014年3月27日、22頁、「温暖化対応品種 検討進めて」）
- 29) 高知新聞（2014年3月24日、3頁、「具体化する科学の警告」）
- 30) 下野新聞（2014年3月18日、4頁、「洪水損害額、今世紀末3倍」）
- 31) 新潟回報（2014年3月24日、「地球温暖化対策」）
- 32) 岩手日報（2014年3月18日、6頁、「温暖化予測 今世紀末の日本」）
- 33) 産経新聞 大阪（2014年3月18日、2頁、「適応策と原子力で克服を」）
- 34) 秋田さきがけ新聞（2014年3月19日、「秋田はミカン産地となる」）
- 35) 読売新聞（2014年4月1日、「温暖化リスク軽減策列举」）
- 36) 朝日新聞（2014年4月1日、3頁、「温暖化で食糧危機、警告」）

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 杉浦俊彦・横沢正幸（2003）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.
- 2) 清野 裕（1993）アメダスデータのメッシュ化について，農業気象，48，379-383.
- 3) 農水省（2010）果樹農業振興基本方針，農水省.
- 4) 中川行夫・本条均・小中原実（1976）晩生カンキツ果実の凍結によるす上がりの発生限界温度，農業気象，31，195-198.

S-8-1 我が国全体への温暖化影響の信頼性の高い定量的評価に関する研究

(6) 農業・食料生産における温暖化影響と適応策の広域評価

③ 不確実性を考慮した農業影響および適応策の評価

埼玉県環境科学国際センター

地球環境・自然共生研究領域

自然環境担当

米倉哲志・三輪誠

温暖化対策担当

嶋田知英（平成26年度）

増富祐司（平成22-25年度）

平成22～26年度累計予算額：34,338千円

（うち、平成26年度予算額：6,500千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

日本における温暖化の農業生産への影響評価はこれまで水稻を中心に行われてきたが、2010年夏の猛暑により野菜の出荷量が減少したように野菜にも影響があると考えられる。また水稻に関しても収量を対象とした研究はこれまで数多く行われてきたが、台風等の極端現象の影響や、近年、日本の広い地域で問題となってきた玄米の白濁化（白未熟粒）といった品質への影響に関する研究は非常に少ない。上記の背景を受け、本研究課題では、以下の3つを目的とした。それらは(1)：野菜を対象にした温暖化影響評価モデルの構築と不確実性を考慮した影響評価；(2)：水稻を対象とした台風の被害面積を推計するモデルの構築；(3)：白未熟粒発生率推計モデルの構築と適応策の効果の評価である。

計算の結果、野菜への温暖化影響評価ではほとんどすべての野菜について2001-2010年に比べ2031-2040年の平均的な出荷量は減少することがわかった。この結果は、ごく限られた野菜に対し品種改良や産地移動といった適応策を実施するだけでは不十分であり、野菜生産に対する総合的な適応策の必要性を示唆するものである。台風被害面積推計モデルの構築では、開発したモデルが特に被害面積が大きい台風に対しては精度よく被害面積を推計できることがわかった。今後このモデルを用いて台風が及ぼす水稻への温暖化影響を評価することにより、今まで考慮してこなかった台風の影響を定量的に推計することができ、予測の不確実性を低減することにつながると考えられる。白未熟粒の発生に関しては、今世紀末には白未熟粒発生率が約半分にも達することがわかった。一方で、移植日の移動と高温耐性品種の導入は、影響軽減に向けて大きな効果があることが示された。

[キーワード]

不確実性、野菜、台風、白未熟粒

1. はじめに

日本における温暖化の農業生産への影響評価はこれまでコメを中心に行われてきた。これはコメ等の穀物に対しては、モデルを用いた研究が世界的に発達してきており、基本的にはモデルを

用いて予測を行うという手法で実施される温暖化影響研究の下地があったためと考えられる。一方、野菜等のその他の作物に関しては、栽培技術に関する知見は膨大に存在するものの、発育・生長のモデル化に関する研究はこれまでほとんど行われておらず、このため温暖化影響評価研究もほとんど実施されてこなかった。しかしながら、2010年夏、日本は記録的な猛暑にみまわれ、主作物であるコメのみならず多くの野菜に影響が現れた。温暖化により2010年夏のような猛暑が今後頻発し、減産等の野菜生産への悪影響が懸念されるため、事前に温暖化時の影響を定量的に把握しておくことは、適応策の立案・検討において欠かせない。またその際、予測の不確実性も同時に評価することにより、より適切な適応策の実施が可能になると考えられる。

また水稲に関しても、収量を対象とした研究は数多く行われてきたが、台風等の極端現象の影響や、近年、日本の広い地域で問題となってきた玄米の白濁化(白未熟粒)といった品質への影響に関する研究は非常に少ない。台風に関しては、これまでも多くの被害を日本各地にもたらしてきたが、温暖化により台風の強大化が起り、さらに被害を増大する可能性がある。また収量予測において台風被害を考慮することにより予測の不確実性を低減できることも期待できる。白未熟粒の発生に関しては、登熟期の高温化により発生率が高くなることがわかっており、何も対策を打たなければ、今後白未熟粒の発生は増加していくことが容易に想像される。このように今後被害の増大が懸念される台風被害や品質の影響に関して予測の不確実性も含めて定量化し、適応策の検討やその効果を示すことは、今後の日本の安定かつ持続的な水稲栽培の維持に欠かせないと考えられる。

2. 研究開発目的

上記の背景を受け、本研究課題では、以下の3つを目的とした。(1)：野菜を対象にした温暖化影響評価モデルの構築と不確実性を考慮した影響評価；(2)：水稲を対象とした台風の被害面積を推計するモデルの構築；(3)：白未熟粒発生率推計モデルの構築と適応策の効果の評価。(1)の野菜への温暖化影響評価に関しては、指定野菜14品目(ほうれんそう、たまねぎ、にんじん、だいこん、きゅうり、なす、ばれいしょ、キャベツ、はくさい、さといも、トマト、ねぎ、レタス、ピーマン)を対象に、影響評価モデルを新たに開発し、温暖化による将来の夏季(7~9月)の出荷量への影響を、不確実性ととも定量的に評価することが目的である。なお指定野菜14品目とは、野菜生産出荷安定法第2条で「消費量が相対的に多くまたは多くなることが見込まれる野菜」と規定された野菜のことであり、日本人によって消費および生産の面で重要な野菜である。(2)の台風被害面積推計モデルの構築では、これまで水稲収量の推計モデルにおいて考慮されてこなかった台風の被害について、その被害面積を定量的に推計するモデルを構築することが目的である。(3)の白未熟粒発生率推計モデルの構築と適応策の評価では、白未熟粒発生率を定量的に推計するモデルを開発し、これを用いて将来の温暖化影響を明らかにすることが目的である。またモデル推計の不確実性を評価し、これをもとに、適応策によりどの程度、温暖化の影響を軽減できるかを評価する。なお本研究で対象とする米の品種は「彩のかがやき」である。「彩のかがやき」は埼玉県で育成された品種であり、埼玉県では2番目に作付面積が多い品種である。また2009年夏の高温により白未熟粒が多く発生し、その対策が喫緊の課題となっている品種でもある。

3. 研究開発方法

(1) 野菜への温暖化影響評価

それぞれの野菜について影響評価のための重回帰モデルを開発した。農作物への温暖化影響評価研究では重回帰モデルの他、作物の発育・生長プロセスを詳細にモデル化したプロセスモデルが用いられるが、これは実験に基づく詳細なパラメーターの取得など開発に時間を要するため、本研究では開発にそれほど時間を要せず、予測精度が十分に得られる重回帰モデルを開発することとした。開発した重回帰モデルの従属変数は全国中央卸売市場の7月から9月の各月の総出荷量であり、説明変数は月別の気象変数である。ただし、生産に影響を与える気象変数はそれぞれの野菜で異なるため、本研究では、野菜生産に影響を及ぼす可能性のある気象変数（月平均気温・月平均最低気温・月平均最高気温・月降水量とその2乗値）の中からステップワイズ法（Forward）を用いて、それぞれの野菜について説明変数を選択した。ここでステップワイズ法（Forward）とは、変数集合の中から、ある選択基準によって従属変数を選択する手法である。本研究では選択基準としてK-fold Cross Validation法により得られる予測誤差を用いた。K-fold Cross Validation法とは、入力データをK個の集合に分割し、それらのうちK-1個の集合に属するデータを変数選択、それ以外の集合に属するデータをモデルの精度検証に用いて、モデルの予測誤差を、存在する入力データから定量的に推計する手法である。本研究では、モデルを温暖化影響評価という予測に用いるため、予測精度の高い、すなわち予測誤差の小さいモデルを開発する必要があり、この選択基準を用いることとした。上記の重回帰モデル開発に利用した入力データは、全国中央卸売市場の出荷量データ（従属変数）とアメダスの気象データ（説明変数）である。

次に作成したモデルの予測不確実性を定量的に評価するために、重回帰モデルの回帰パラメーターの不確実性を考慮したモデルを作成した。具体的にはまず入力データ（出荷量データ）のリサンプリングを行い、多数の入力データを作成し、次にこの多数の入力データを用いて、多数の重回帰パラメーターを得た。最終的にはこのすべての重回帰パラメーターを用いて、従属変数（出荷量）を推計し、推計値の標準偏差を用いて予測の不確実性を定量的に評価する。なお、入力データのリサンプリングは、重回帰モデルの推計値と統計値との残差に対し、ブートストラップ法を用いて実施した。ここでブートストラップ法とは、一つのサンプルから複数のサンプルを生成する手法の一つで、実際には復元抽出を許したランダムサンプリングを実施し、複数のサンプルを生成する。次に上記のようにして作成した重回帰モデルに全球気候モデルMiroc-3.2-Hiresの将来予測値を入力し、将来の出荷量変化を予測の不確実性ととも評価した。また推計の基準年を2001-2010年とし、将来の推計年を2031-2040年とした。

(2) 台風被害面積推計モデルの構築

被害確率を外力の関数で示したフラジリティ曲線を基礎に被害面積を推計するモデルを構築する。フラジリティ曲線を用いた被害推計は、台風や地震などの外力に対する建物の被害率を計算するために、都市工学や建築工学でよく用いられる手法である。フラジリティ曲線には、様々な種類の分布を仮定することができるが、本研究では都市工学や建築工学でよく用いられるワイブル分布を仮定した。すなわち本研究で用いるフラジリティ曲線は以下ようになる。

$$Pr(I) = 1 - e^{-\left(\frac{I}{I_0}\right)^k} \quad (1)$$

ここで P_r は被害確率で、 I が外力である。また λ は外力に対する脆弱性を特徴づけるパラメーター、 k は分布の形状を決めるパラメーターである。ここで水稻は建物と違い生育時期によって台風による脆弱性が異なること、また出穂期付近で脆弱性が最も大きくなることなどが実験や圃場調査などにより分かっている。したがって、本研究ではパラメーター λ を生育時期の2次関数で示し、時間的に変化するとした。すなわち λ は以下のように表される。

$$I = aT^2 + bT + c \quad (2)$$

ここで T [日]は生育日数を示し、 a 、 b 、 c はパラメーターである。さて、式(1)により被害確率を求めるには外力 I を入力する必要がある、本研究の場合、台風による外力を定量化する必要がある。本研究では、水稻への台風被害が主として強風と洪水により起こることから、外力 I が最大風速と積算降水量の関数で表されるとし、このうち最も簡単な関数として、最大風速と積算降水量の線形結合で表されると仮定した。すなわち以下のようなになる。

$$I = W + mP \quad (3)$$

ここで W は最大風速で、 P は積算降水量である。また m はパラメーターである。以上がフラジリティ曲線を用いた被害面積推計モデルの概要である。以上の定式化でモデルのパラメーターは k 、 a 、 b 、 c 、 m の5つあり、これらを推計しなければならない。本研究では過去の被害面積と推計した被害面積の差が最も小さくなるように、これらのパラメーターを推定した。パラメーター推定に用いた過去の被害面積は1991～2007年までの42個の台風である。なお、このモデルを用いて日本における台風の被害面積推計は以下の手順で行う：①フラジリティ曲線を各都道府県に適用し被害確率を計算する；②：それぞれの都道府県の被害確率に水稻栽培面積を掛け、被害面積を計算する；③：②で計算された各都道府県の被害面積を全国で足し上げる。

(3) 白未熟粒発生率推計モデルの構築と適応策の評価

白未熟粒発生率を推計するためのモデルとして、白未熟粒が発生し始める閾温度 T_{cr} と気温に対する発生率の感度 S_t をパラメーターとしてもつ以下のモデルを提案する。

$$I = \max(S_t(T_{30} - T_{cr}), 0) \quad (4)$$

ここで I は白未熟粒発生率[%]、 T_{30} は出穂後30日間の平均気温[°C]である。式(1)は閾温度 T_{cr} [°C]以上で白未熟粒が発生するように、また T_{cr} 以上で、 T_{30} が1°C上昇したときの白未熟粒発生率の増加分が S_t となるように設計されている。次に、これらのパラメーターを観測データに合うように統計的に決定した。本研究では、埼玉県水田農業研究所で実施された2007年～2012年の3つの圃場実験の全18サンプルで得られた観測データを使用した。最後にこのモデルに気象庁の最新の気候予測情報（今世紀末に夏の気温が2.74°C増加（SRES A1B））を参考に、今世紀末の白未熟粒発生率を予測した。

次にモデル推計値の不確実性を考慮するために、式のパラメーター T_{cr} と S_t の不確実性を定量化する。パラメーターの不確実性の定量化にはブートストラップ法を用いた。そしてこのパラメーターの不確実性を考慮した上で、気温上昇時の影響を評価する。温暖化の影響は発生率の増加と等級が下がる確率（一等でなくなる確率）の2つで評価する。ここで後者は、価格を左右する重要な評価指標である。さらに適応策として、移植日の移動と高温耐性品種の導入を考え、等級が下がる確率がどのように変化するかを推計し、適応策の効果の定量的な評価を行う。

4. 結果及び考察

(1) 野菜への温暖化影響評価

作成したモデルの精度検証結果について記述する。表1(6)③-1に指定野菜14種ごとに作成したモデルの推計誤差 (RMSE ; [%]) と修正済みの寄与率 (Adjusted R²) を示す。ほとんどの種において、推計誤差は6%以下、修正済み寄与率が0.7以下の良好な結果が得られた。

表1(6)③-1 モデルの推計誤差 (RMSE) と修正済み寄与率 (Adjusted R²)

	RMSE [%]	Adjusted R ²
なす	6.4	0.64
ねぎ	4.3	0.79
トマト	4.2	0.84
レタス	5.3	0.62
さといも	5.6	0.87
だいこん	5.2	0.82
はくさい	4.4	0.76
にんじん	5.4	0.75
きゅうり	5.1	0.70
キャベツ	3.7	0.81
ピーマン	4.8	0.72
たまねぎ	6.1	0.54
ばれいしょ	6.0	0.71
ほうれんそう	7.7	0.67

薄灰:RMSE<6%; Adjusted R²>=0.7、濃灰:RMSE>7%; Adjusted R²<=0.6

次に作成したモデルに全球気候モデルMiroc-3.2-Hiresの将来予測値を入力し、出荷量の将来変化を予測の不確実性ととも評価する。図1(6)③-1はトマトの8月の全国出荷量に関して2001-2010年と2031-2040年の出荷量変化率の密度分布を示している。2001-2010年に比べ、2031-2040年の密度分布はマイナス側（左）にシフトし、出荷量が減少する可能性が高いと予測された。その他の野菜についても同様の結果が得られた。表1(6)③-2に2001-2010年と2031-2040年の出荷量推計値の平均値と標準偏差、およびそれらの差を、指定野菜14種について示す。これより、ほとんどすべての野菜について2001-2010年に比べ2031-2040年の平均的な出荷量は減少することがわかった。この結果は、ごく限られた野菜に対し品種改良や産地移動といった適応策を実施するだけでは不十分であり、野菜生産に対する総合的な適応策の必要性を示唆するものである。またほとんどすべての野菜で、2001-2010年に比べ2031-2040年の不確実性の幅（標準偏差）は増大することが分かった。この不確実性の増大は生産の不安定化を示すものであり、このような生

産の不安定的化に対する適応策も今後検討する必要があることがわかった。

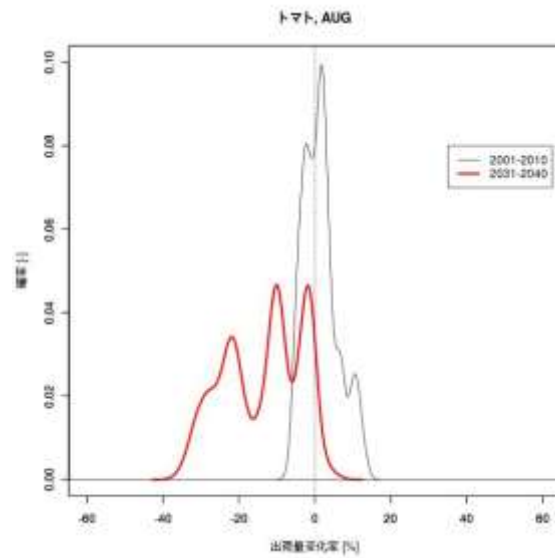


図1(6)③-1 出荷量変化率の確率密度分布

(細線：2001-2010年、太線：2031-2040年；

出荷量変化率の基準は2001-2010年の平均出荷量の報告値)

表1(6)③-2 出荷量推計値の平均値と標準偏差、およびそれらの差

Vegetables	Mon.	2001-2010		2031-2040		差	
		Ave.	S.D.	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.
なす	JUL	-0.6	6.7	-13.5	15.0	-12.9	8.2
	AUG	2.8	7.7	-22.3	13.4	-25.1	5.7
	SEP	5.7	9.7	-25.5	15.2	-31.2	5.5
ねぎ	JUL	0.3	3.3	-13.8	8.7	-14.1	5.3
	AUG	2.2	4.1	-19.4	10.6	-21.6	6.5
	SEP	2.5	4.1	-21.5	11.5	-23.9	7.4
トマト	JUL	-1.2	3.8	-11.5	14.1	-10.4	10.3
	AUG	1.5	4.6	-13.7	10.1	-15.2	5.5
	SEP	1.3	2.9	-16.2	8.9	-17.5	6.0
レタス	JUL	1.0	5.0	-3.7	3.6	-4.7	-1.4
	AUG	1.2	3.9	-5.8	5.6	-7.0	1.7
	SEP	0.9	2.9	-10.2	5.4	-11.1	2.5
さといも	JUL	-2.6	14.4	-1.6	16.0	1.0	1.7
	AUG	-1.2	9.6	-6.6	11.8	-5.4	2.2
	SEP	-3.1	10.7	-23.1	12.7	-20.0	2.0
だいこん	JUL	2.3	4.3	-5.9	7.7	-8.2	3.4
	AUG	1.7	5.1	-10.4	7.8	-12.1	2.7
	SEP	1.2	4.3	-14.5	8.4	-15.7	4.1
はくさい	JUL	0.7	3.0	-5.1	3.9	-5.8	0.9
	AUG	1.3	3.4	-7.6	4.5	-8.9	1.1
	SEP	1.8	1.4	-8.6	4.6	-10.4	3.2
にんじん	JUL	1.9	2.4	-2.7	5.2	-4.6	2.8
	AUG	2.2	3.6	-8.0	7.2	-10.2	3.7
	SEP	2.2	3.6	-7.9	7.9	-10.1	4.3
きゅうり	JUL	-0.1	4.3	-10.8	11.0	-10.7	6.7
	AUG	2.2	4.0	-13.0	12.9	-15.3	8.9
	SEP	2.9	3.1	-18.1	12.8	-21.0	9.6
キャベツ	JUL	0.4	1.9	-3.1	4.9	-3.5	3.0
	AUG	1.1	1.8	-4.6	3.9	-5.7	2.1
	SEP	2.0	2.0	-5.6	3.5	-7.6	1.5
ピーマン	JUL	0.0	2.8	-8.3	9.8	-8.4	7.1
	AUG	1.5	3.3	-10.7	7.4	-12.2	4.1
	SEP	0.5	3.0	-9.3	6.2	-9.8	3.2
たまねぎ	JUL	0.5	4.1	-5.1	4.8	-5.6	0.7
	AUG	3.4	6.6	-12.3	10.8	-15.7	4.2
	SEP	1.1	3.9	-19.3	13.3	-20.4	9.4
ばれいしょ	JUL	3.5	8.4	0.5	10.7	-3.1	2.4
	AUG	5.0	4.9	-12.1	15.5	-17.0	10.6
	SEP	3.0	9.0	-18.4	17.0	-21.4	8.0
ほうれんそう	JUL	0.9	8.6	-20.6	11.6	-21.5	3.0
	AUG	1.4	3.6	-28.1	14.4	-29.5	10.7
	SEP	1.6	4.5	-33.0	13.5	-34.5	9.0

(2) 台風被害面積推計モデルの構築

図1(6)③-2に被害面積の推計値 (EA) と観測値 (RA) の比較を示す。この図より本研究で開発したモデルにより推計した被害面積が観測値に概ね一致していることがわかる。さらに表1(6)③-3に被害面積ごとに区別した推計誤差を示す。これによると、被害面積が大きい台風に対しては、推計誤差が非常に小さく推計精度が高いことがわかる。以上の結果より、本研究で開発したモデルは特に被害面積が大きい台風に対しては精度よく被害面積を推計できることがわかった。今後このモデルを用いて台風が及ぼす水稻への温暖化影響を評価することにより、今まで考慮してこなかった台風の影響を定量的に推計することができ、予測の不確実性を低減することにつながると考えられる。

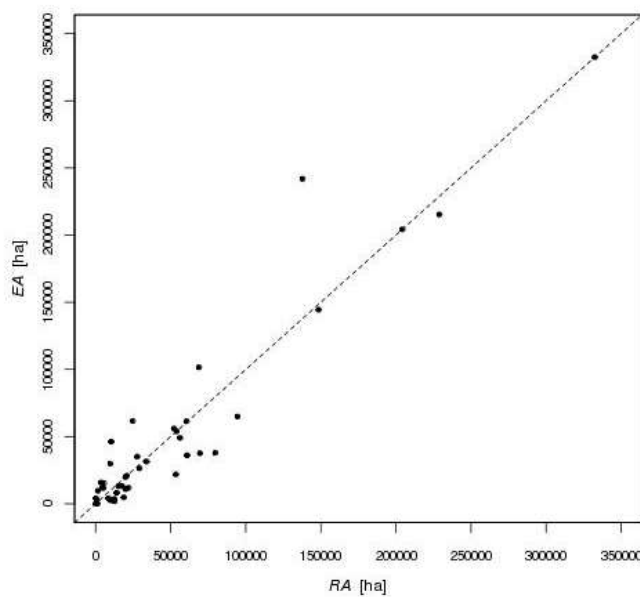


表1(6)③-3 推計誤差

被害面積[ha]	平均誤差 [%]
<5000	327.9
5000-10000	126.5
10000-20000	81.3
20000-50000	40.6
50000-100000	29.9
>100000	16.8

図1(6)③-2 被害面積の推計値 (EA) と観測地 (RA) との比較

次に台風影響に対する適切な適応策の実施・検討に向け、開発したモデルを用いて、生育時期別に水稻の脆弱性評価を行った。図1(6)③-3に生育時期別の脆弱性を示す。これによると、水稻が台風に対して出穂期付近で最も脆弱であることがわかる。これは、既往の実験や実地調査の知見と一致する。本研究では、統計データと開発したモデルを用いることにより、これを示すことに初めて成功した。この結果は、今後、品種変更や改良、植え付け日の変更などにより、台風シーズンと出穂期をずらす対策が台風被害の軽減に向け有効な適応策であることを強く示唆するものと考えられる。

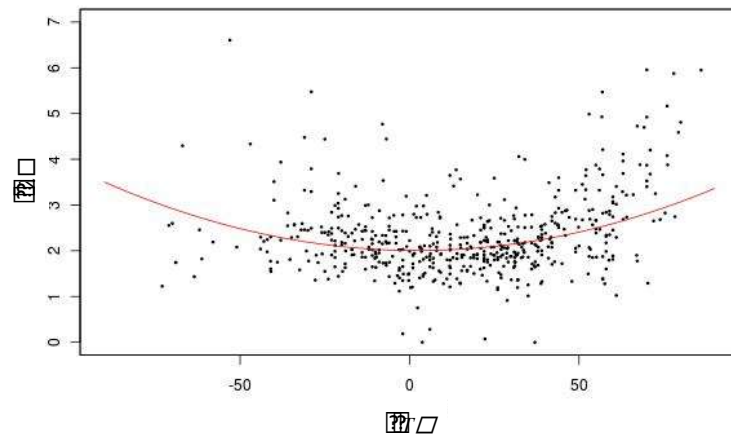


図1(6)③-3 生育時期別の水稻の脆弱性

(ϵ が小さいほど、台風に対して脆弱であることを示す。 T は出穂期を基準にした生育時期。)

(3) 白未熟粒発生率推計モデルの構築と適応策の評価

図1(6)③-4に白未熟粒発生率の観測値とモデル式の比較、図1(6)③-5に観測値と推計値の比較を白未熟粒のタイプ別(MAC: 乳白粒・心白粒; BAB: 腹白粒・背白粒; BSD: 基白粒)に示す。図1(6)③-5中には平均誤差(RMSE)、観測値と推計値の相関係数(Cor)を示し、統計的有意性($P < 0.001$)を持つものには、(***)を付した。これらから推計値と観測値との一致度はよく、モデルが精度よく白未熟粒発生率を推計できることがわかる。

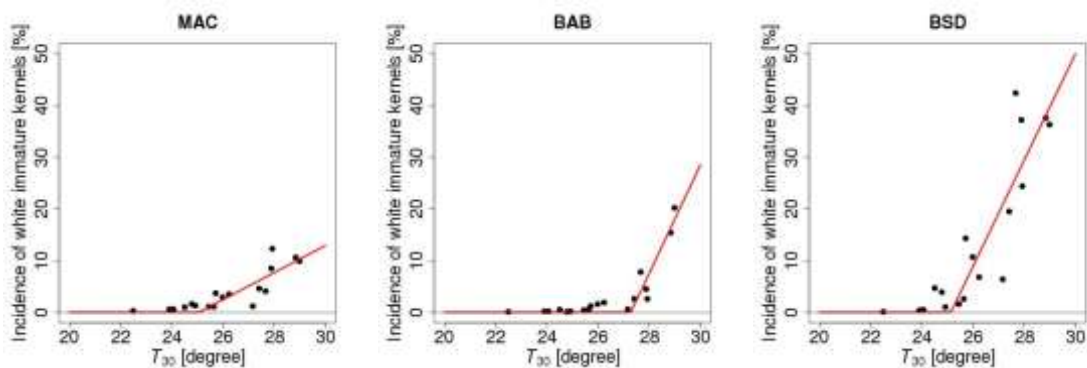


図1(6)③-4 白未熟粒発生率の観測値(黒点)とモデル式(赤線)の比較

(MAC: 乳白粒・心白粒; BAB: 腹白粒・背白粒; BSD: 基白粒)

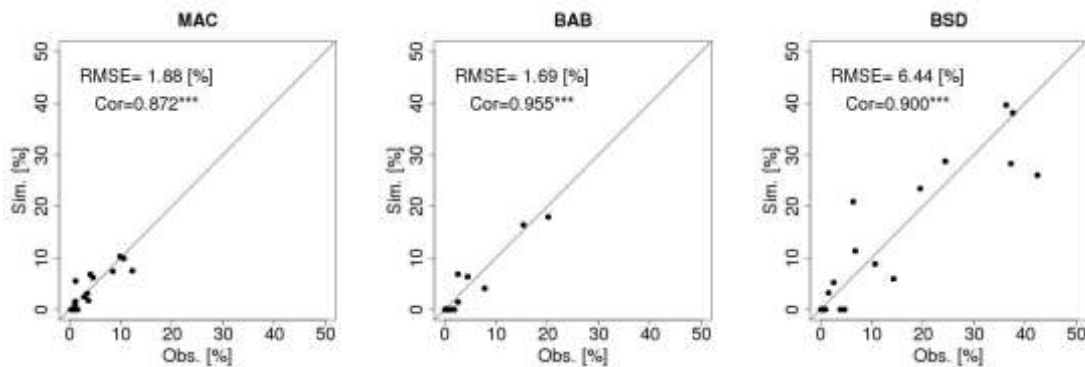


図1(6)③-5 白未熟粒発生率の観測値と推計値の比較

(MAC: 乳白粒・心白粒 ; BAB: 腹白粒・背白粒 ; BSD: 基白粒)

次に図 1(6)③-4 に示された関係を用いて、地球温暖化による影響を評価した結果を表 1(6)③-4 に示す(基準年は 2007~2012 年)。ここでは気象庁の推計(今世紀末に夏の気温が 2.74℃ 増加(SRES A1B))をベースに影響を評価した。推計の結果、今世紀末には白未熟粒発生率が約半分(48%)にも達することがわかった。これだけ多くの白未熟粒が平均的に発生すると、水稻生産は経済的にはほぼ不可能であるといつてよい。このように地球温暖化は何も対策をしなければ、水稻の品質(白未熟粒)にも大きな影響が及ぼすことが明らかになった。

表 1(6)③-4 現状(上段)および将来(下段)における白未熟粒発生率

T_{30} [°C]□	乳白・心白[°%]□	腹白・背白[°%]□	基白[°%]□	合計[°%]□
25.47□	0.9□	0□	2.8□	3.7□
28.14□	8.1□	9□	30.9□	48□

次に、開発したモデルの推計の不確実性を評価するために、それぞれのパラメーターの密度分布を図1(6)③-6に示す。密度の高いほうが、そのパラメーター値が現れやすいことを示している。図1(6)③-6より T_{cr} に関しては、BSDとMACは25度となる確率が高く、BABは27度程度であることがわかる。これは、BSDとMACのほうが低い気温で発生し、温暖化によって発生率が高くなりやすいことを示している。ただし、BSDとMACの分布の広がりも大きく、不確実性が高いことがわかる。一方、BABは分布の広がりが小さく、不確実性が低い。 T_{cr} に関しては、MACは2.5%/度となる確率が高く、BABとBSDは10%/度となる確率が高いことがわかる。これは、温度が上がった時に、BABとBSDは発生率が高くなる傾向があることを示している。ただし、BABとBSDは分布の広がりが大きく、不確実性が大きい。一方、MACは分布の広がりが小さく、不確実性が小さいことがわかる。

次に定量化したパラメーターの不確実性を用いて、温暖化時の発生率を推計し、温暖化の影響を評価する。図1(6)③-7に2001年~2010年に対して、気温を0度から4度上昇させた場合の白未熟粒発生率の密度分布を示す。なお、移植日は普通植の6月24日とした。図1(6)③-7より、気温が上昇した場合、発生率が高まる確率が増大することがわかる。まず現状の気温(Cur.)では、発生

率40%で一つのピークがあるが、それ以外については、発生率が低い確率が高い。この40%のピークは2009年の高温により発生した白未熟粒の高い発生率に対応している。次に、例えば、3度気温が上昇した場合、発生率37%程度の確率が最も高くなることがわかる。等級が1等から下がるのは、整粒以外の割合が3割を超えた場合なので、3度上昇では、等級が下がる確率が非常に高く、農家にとって大きな影響を持っていることがわかる。

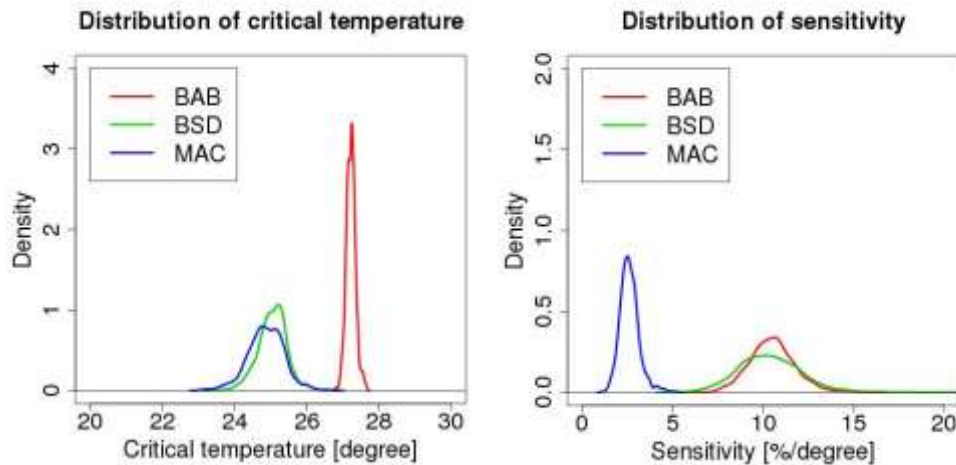


図1(6)③-6 T_{cr} (左) と S_t (右) の密度分布

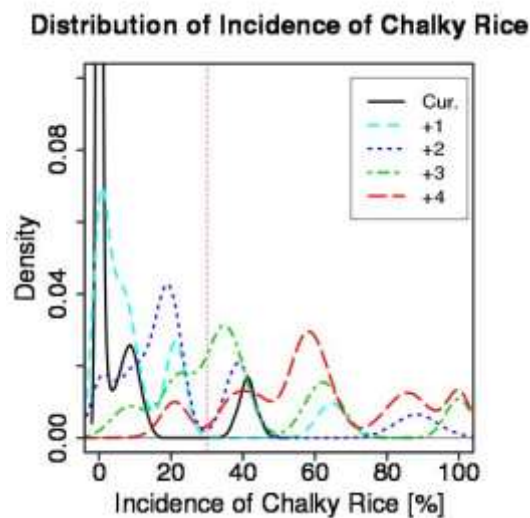


図1(6)③-7 温暖化時の白未熟粒発生率の密度分布

次に価格を左右する等級が1等から下がる確率に着目する。図1(6)③-8に気温上昇(+0度~+4度)に応じて、等級が下がる確率(白未熟粒発生率が30%を超える確率)を示す。この図より気温上昇により、等級が下がる確率が高まっていくのがわかる。例えば、1度程度の上昇であれば、等級が下がる確率は10%である。これは10年に一度程度の等級が下がる年があるということ意味している。この頻度は現状とかわらない。一方、気温上昇が2度になると、確率は30%(10年のうち3年)となり、栽培が厳しくなっていることが予想される。気温上昇が3度になると等級が下がる確率が70%近くとなり、ほぼこの品種の栽培は難しくなることがわかる。

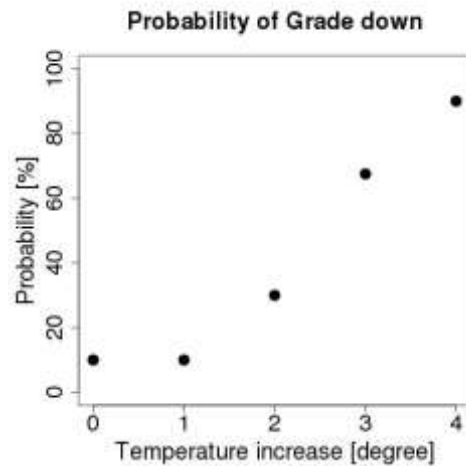


図1(6)③-8 気温上昇と等級が1級から下がる確率の関係

次に適応策を実施したときに、影響をどの程度軽減できるかを推計する。ここで考える適応策は、移植日の変更と高温耐性品種の導入である。移植日の変更では普通植の6月24日より移植日を前に15日から後ろに15日まで5日ずつ変更させて場合を計算する。また高温耐性品種の導入では、 T_{cr} を0度から4度まで上昇させることにより計算する。図1(6)③-9に、これらの適応策を実施したときの等級低下の確率の変化を示す。まず移植日を変更した場合、現在より移植日を遅らすことで、温暖化による等級低下の確率を減少させることができることがわかる。例えば、3度上昇した場合、現状の移植日では、等級低下の確率は70%近く、このままでは栽培は不可能であるが、移植日を半月（15日）遅らせることにより、等級低下の確率をゼロにすることができる。このように移植日の変更は大きな効果を持つことがわかる。ただし、移植日の変更は収量にも影響を及ぼすので、今後は収量推計モデルと組み合わせて影響を評価する必要がある。

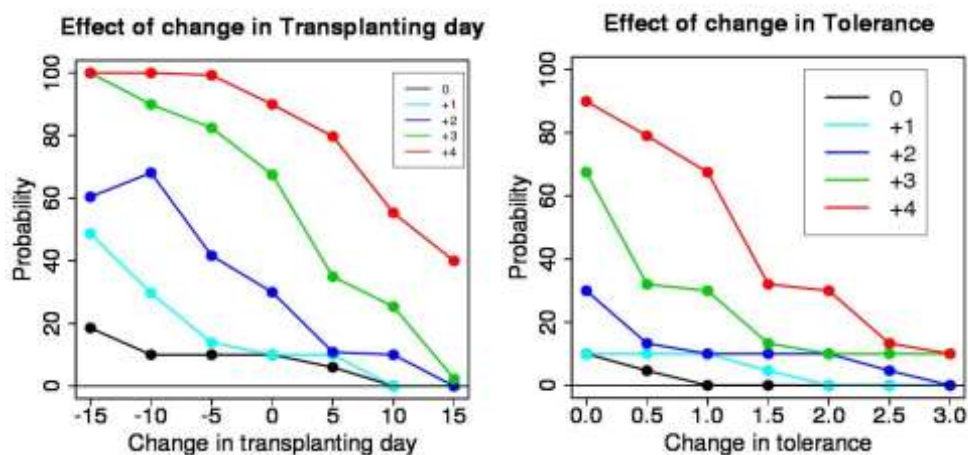


図1(6)③-9 適応策(移植日の変更：左；高温耐性品種の導入：右)を実施した場合の等級低下の確率

次に高温耐性品種の導入では、これは当然であるが、より高温に強い品種を導入することにより、

気温上昇の影響を軽減できる。例えば、1.5度高温に強い品種を導入すれば、等級低下の確率は10%程度となり、現状と同程度にすることができることがわかる。このように高温耐性品種の導入によっても温暖化の影響を効果的に減少できることがわかる。ここでは、仮想的な高温品種の導入を考えたが、これは今後の育種の目標設定に役立てることができると考えられる。例えば、50年後に2度の気温上昇が見込まれており、このときの等級低下の確率を現状と同程度にしたい場合、図1(6)③-9より0.5度から1度高い温度耐性を持った品種を50年後までに開発する必要があることがわかる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで日本における温暖化影響評価研究はコメを中心に行われ、一定の成果を上げてきた。しかしながらその他の穀物や野菜等への影響評価はほとんど行われてこなかった。そもそも野菜への温暖化影響を評価するモデルはほとんど存在せず、今回、本研究では指定野菜14品目を対象に温暖化が及ぼす夏季の出荷量への影響を評価するモデルを新たに作成した。さらにブートストラップ法を用いて、モデルの不確実性も定量的に評価できるモデルという点は、他の影響評価モデルと比べても先進的なものである。

またこれまで水稻収量推計モデルにおいて考慮されてこなかった台風の被害を精度よく推計するモデルを開発した。さらに生育期間別の脆弱性評価により、水稻が台風に対して出穂期付近で最も脆弱であることを統計データとモデルを用いることにより世界で初めて示した。

また作物収量に対する温暖化影響評価はこれまで数多く行われてきたが、近年の夏の高温で問題となってきている品質への影響については、これまでほとんど研究されてこなかった。本研究では、圃場データをもとに白未熟粒発生率を推計するモデルを構築し、将来の影響と適応策の効果を不確実性も含め定量的に評価した先進的な試みである。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究では指定野菜14品目を対象に温暖化が及ぼす夏季の出荷量への影響を評価するモデルを作成し、その影響を評価したところ、ほとんどすべての野菜において出荷量が減少するという結果を得た。また台風被害面積予測モデルでは、出穂期が台風に対して脆弱であることを示した。さらに水稻白未熟粒の発生予測では、適応策として、移植日の変化と高温耐性品種導入により一定の影響軽減効果があることを示した。これらの結果を地方自治体や実際の農業現場へ提供することにより、適応策の検討・実施に有用な情報となることが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

世界各国の作物モデル研究者による国際的なプロジェクトAgMIP(Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project)の水稻モデルチーム (by IRRI, Dr. Tao Li) に参加。

モデル比較実験等を実施。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Y. MASUTOMI, T. IIZUMI, K. TAKAHASHI and M. YOKOZAWA: Environmental Research Letters, 7, 014020 (2012)
“Estimation of the damage area due to tropical cyclones using fragility curves for paddy rice in Japan”
- 2) Y. MASUTOMI: Impacts World 2013 Conference Proceedings, 522-526 (2013)
“Development of a global climate-crop coupled model for paddy rice”
- 3) Y. MASUTOMI, M. ARAKAWA, T. MINODA, T. YONEKURA and T. SHIMADA: Agricultural and Forest Meteorology, 203, 11-16 (2015).
“Critical air temperature and sensitivity of the incidence of chalky rice kernels for the rice cultivar “Sai-no-kagayaki” ”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 増富祐司: 田中充, 白井信雄(編), 気候変動に適応する社会, 技報堂出版, 39-40 (2013).
「気候変動の影響評価手法を解説します」
- 2) 増富祐司: 田中充, 白井信雄(編), 気候変動に適応する社会, 技報堂出版, 111-113 (2013).
「とても低い日本の野菜の産地多様性」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 増富祐司、飯泉仁之直、高橋潔、横沢正幸: 日本気象学会2010年度秋季大会 (2010)
「台風による水稲の被害面積推計モデルの開発」
- 2) Y. MASUTOMI, T. IIZUMI, K. TAKAHASHI, M. YOKOZAWA: AGU fall meeting 2010, San Francisco, 2010
“Area estimation of crop damage due to tropical cyclones using crop fragility curves for paddy rice in Japan”
- 3) 増富祐司: 日本気象学会2011年度秋季大会 (2011)
「気候変動が野菜出荷量に及ぼす影響の評価」
- 4) Y. MASUTOMI: AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, 2011
“Impact assessment of climate change on vegetables in Japan considering uncertainty in an impact model “
- 5) 増富祐司: 地球温暖化を見据えた農業環境予測と農業技術開発のための情報交換会 (2012)
「長野県を対象とした果樹・野菜への温暖化影響予測と産地多様性」
- 6) 増富祐司、間野正美、滝本貴弘、宮田明: 日本気象学会2012年秋季大会 (2012)
「陸面過程モデルMATSIROへの作物生長モデルの組み込み」
- 7) Y. MASUTOMI: AGU Fall Meeting 2012, San Francisco, USA, 2012

“Climatological Diversity of Producing Places for Vegetables in Japan “

- 8) 増富祐司：数学・数理科学と諸科学・産業との連携WS「気候モデルの農業への応用」（2012）
「陸面過程モデルへの作物生長モデルの組み込み」
- 9) 増富祐司：日本農業気象学会2013年全国大会（2013）
「全球大気-作物結合モデルの開発」
- 10) 増富祐司、荒川誠、箕田豊尚、米倉哲志、嶋田知英：日本農業気象学会2014年全国大会（2014）
「白未熟粒発生率推計モデルの開発」
- 11) Y. MASUTOMI, M. ARAKAWA, T. MINODA, T. YONEKURA, T. SHIMADA: AgMIP 4th Global Workshop, New York, U.S., 2013.
“Critical temperature and sensitivity for white immature rice kernels”
- 12) 増富祐司：統合的陸域圏研究連絡会（2013）
「陸面過程モデル+作物生長モデル」
- 13) T. YONEKURA, and Y. MASUTOMI: International Conference on Ozone and Plant, Beijing, China, 2014
“Ozone doses and exposure-response relationships for yield of Japanese rice cultivars”
- 14) Y. MASUTOMI: AgMIP-Rice Annual Meeting, Nanjing, China, 2014
“MATCRO, regional and global applications”
- 15) Y. MASUTOMI, M. ARAKAWA, T. MINODA, T. YONEKURA, T. SHIMADA: International Symposium on Agricultural Meteorology, Tsukuba, Japan, 2015
“Impact of climate change on rice quality in Saitama prefecture”

（3）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（4）「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

Regional Assessment of Climate Change Impacts and Adaptation Measures in Agriculture and Food Production

Principal Investigator: Yasushi ISHIGOOKA

Institution: National Institute for Agro-Environmental Sciences (NIAES)
3-1-3 Kannondai, Tsukuba, 305-8604, JAPAN
Tel: +81-29-838-8202 / Fax: +81-29-838-8202
E-mail: isigo@affrc.go.jp

Cooperated by: National Institute of Fruit Tree Science, National Agriculture and Food Research Organization, Center for Environmental Science in Saitama

[Abstract]

Key Words: Rice, Fruit, Vegetable, Optimum transplanting date, Suitable areas, Uncertainty

Shifting transplanting date is considered to be one of the effective adaptation measures to avoid impact of high temperature on rice yield and quality. This study aimed to reveal the regional characteristics in effectiveness of this under the projected climate scenarios by using the rice growth and yield projection model. The result shows that, under the condition of current cultivation system, the proportion of the products having quality degradation risk may increase along with the temperature increase while the total production may not decrease. Meanwhile, it may be possible to avoid the increase of the quality degradation risk while the total production was maintained, by selecting optimum transplanting date considering both yield and quality. However, large decrease in yield was found in some area.

Ranges of shift in areas suitable for the four fruit tree cultivation were estimated by using new GCMs (CMIP5). Persistence rate of suitable area for apple and satsuma mandarin which denotes if the land stays suitable for many years, was 70-80% in the middle of 21st century regardless of RCP. The difference depending on RCP widely varies by the end of the century, and the persistence rate for satsuma mandarin represents 70% under RCP2.6 whereas 0% under RCP8.5. The persistence rate represents 50-60% for apple and 70-80% for Japanese pear in the end of the century. Suitable area for Citrus tankan, only covers approximately 1 % of Japan's total land area now, but it seemingly increases substantially in the future (the end of 21st century, RCP8.5:12-34%).

The impacts of global warming on vegetables and rice quality were assessed, considering uncertainty in assessment. To achieve the goal, we developed new statistical models with parameter uncertainties. Using the models, we showed that global warming will have significant damages to most vegetables and will increase the incidence of chalky

rice kernels. As for chalky rice kernels, adaptive options like changes in planting date and rice variety have large potential to reduce the impact of global warming.

A new model for estimating paddy rice areas damaged by typhoons was developed. It was shown that the model had a high ability to estimate damage areas due to typhoons. Using the model, we also showed that heading stage is the most vulnerable to typhoons.