

4. 0-4 気候変動によるコメの収量及び品質への影響に係る影響評価

4.1 概要

4.1.1 背景・目的

近年、気温上昇等によるコメの収量の変動や、品質や食味の低下などの影響が発生しており、栽培方法の変更や高温耐性のあるコメの開発など、適応策が実施されつつある。コメの収量や品質・食味の低下は農家の収入の減少やブランド力の低下等につながる可能性があることから、将来的な気候変動影響に関する予測に基づき、地域の状況に応じた適応策を検討することが望ましい。本業務では、気候変動がもたらすコメの収量及び品質への将来影響を、最新の影響評価モデルや気候シナリオを活用して予測を行った。

4.1.2 実施体制

本調査の実施者： 農研機構・農業環境変動研究センター

アドバイザー： （該当なし。）

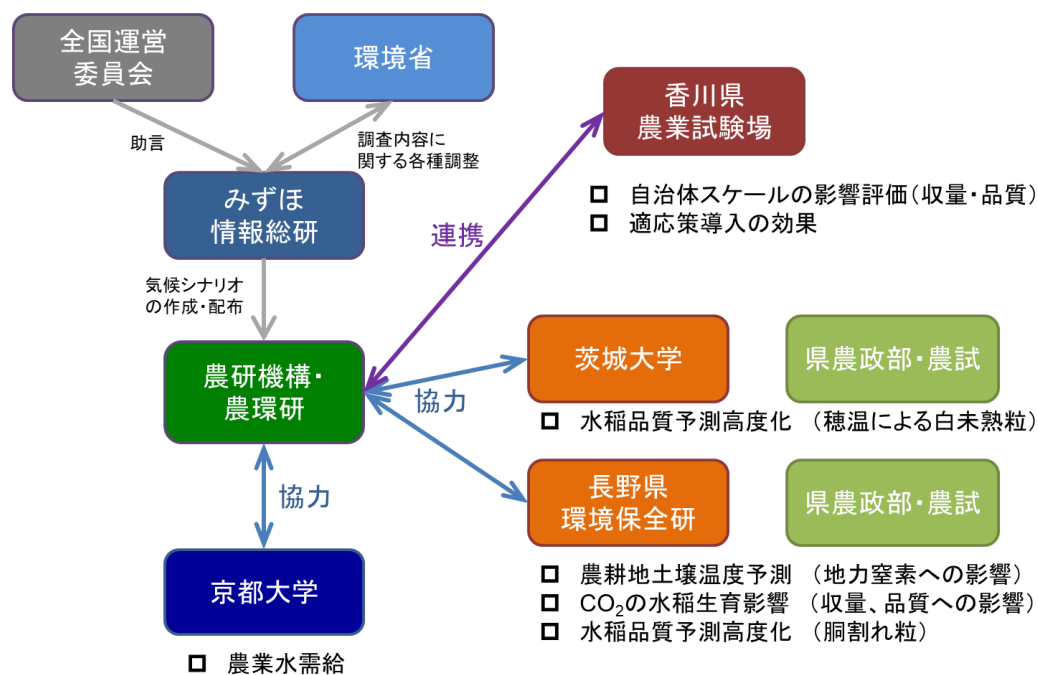


図 4.1-1 実施体制

4.1.3 実施スケジュール（実績）



図 4.1-2 実施スケジュール（実績）

平成30年度は、気候変動影響予測を行うための基礎データとして、全国1km空間解像度で入力気象データ、栽培管理データ、地理・地形情報データを収集し、影響評価モデルの稼働に合わせた形式で整備した。各地域における主要コメ品種を設定し、本事業の共通気候シナリオとして提供された入力データに基づき、予測される気候変動がそれぞれの品種の収量及び品質に及ぼす影響について影響評価を実施し、全国規模の影響評価予測マップを作成した。さらに、代表的な適応策オプションとして、収量および品質への高温影響を回避するための移植時期の移動について、導入による効果とコスト、想定されるリスクについて検討し、試行的に全国規模の予測を実施した。

平成31年度（令和元年度）は、本事業において各分野において横断的に使用する共通気候シナリオ最終版として配布された「農環研データセット by SI-CAT」を入力気象データとして整備し、平成30年度に整備した影響評価プロセスに基づき予測気候変化条件下における水稻収量および品質についてのシミュレーションを行い、影響予測マップの更新を行った。また、モデル自治体として香川県との連携の下、代表的な適応策オプションについて、導入の検討に必要となる定量的な予測情報の作成手法について検討し、試行的に自治体規模の予測を実施した。

4.1.4 気候シナリオ基本情報

項目	コメの収量	コメの品質低下リスク
気候シナリオ名	農環研データセット by SI-CAT	
気候モデル	MIROC5、MRI-CGCM3、GFDL-CM3、 HadGEM2-ES、CSIRO-Mk3-6-0	
気候パラメータ	日最高・最低気温、日積算日射量、日平均相対湿度、日平均風速	
排出シナリオ	RCP2.6、RCP8.5	
予測期間	21 世紀中頃、21 世紀末	
バイアス補正の有無	なし	

4.1.5 気候変動影響予測結果の概要

影響評価モデルとして導入したプロセスベースの水稻生育・収量予測モデルを使用し、気象データ、栽培管理データ、大気 CO₂ 濃度データを入力値として、予測される気候変動によるわが国のコメ生産への影響評価を、収量と品質の両面から実施した。

4.1.5.1 コメの収量

温暖化条件での収量算定においては、増収要因として、主に北日本における減収の主要因であった冷害が温度上昇により軽減されることや CO₂ 濃度上昇による増収効果が現れる一方、減収要因として、温度上昇により発育が早くなることで生育期間が短縮し光合成によるバイオマス生成量が減少することや、高温による受精障害で不稔粒が増加することが挙げられ、最終的にはこれらのバランスで収量の増減が決まる。

図 4.1-3 は算定結果の一例として、比較的溫度上昇が小さい気候モデル MRI-CGCM3 を使用した、21 世紀中頃（2031-2050 年）と 21 世紀末（2081-2100 年）のコメ収量の 20 年平均値（1981-2000 年の平均値を基準とした相対値）、図 4.1-4 は MRI-CGCM3 よりも温度上昇が大きい気候モデル MIROC5 を使用した結果を示したものである。MRI-CGCM3 は将来においても温度上昇が比較的小さく、一方で CO₂ 濃度は上昇するため、全国的に殆どの地域で増収となる。特に CO₂ 濃度上昇の大きい RCP8.5 では 21 世紀末には全国的に大きな増収が算定されている。MIROC5 は温度上昇が大きい RCP8.5 の 21 世紀末には一部地域で大きな減収が認められる。

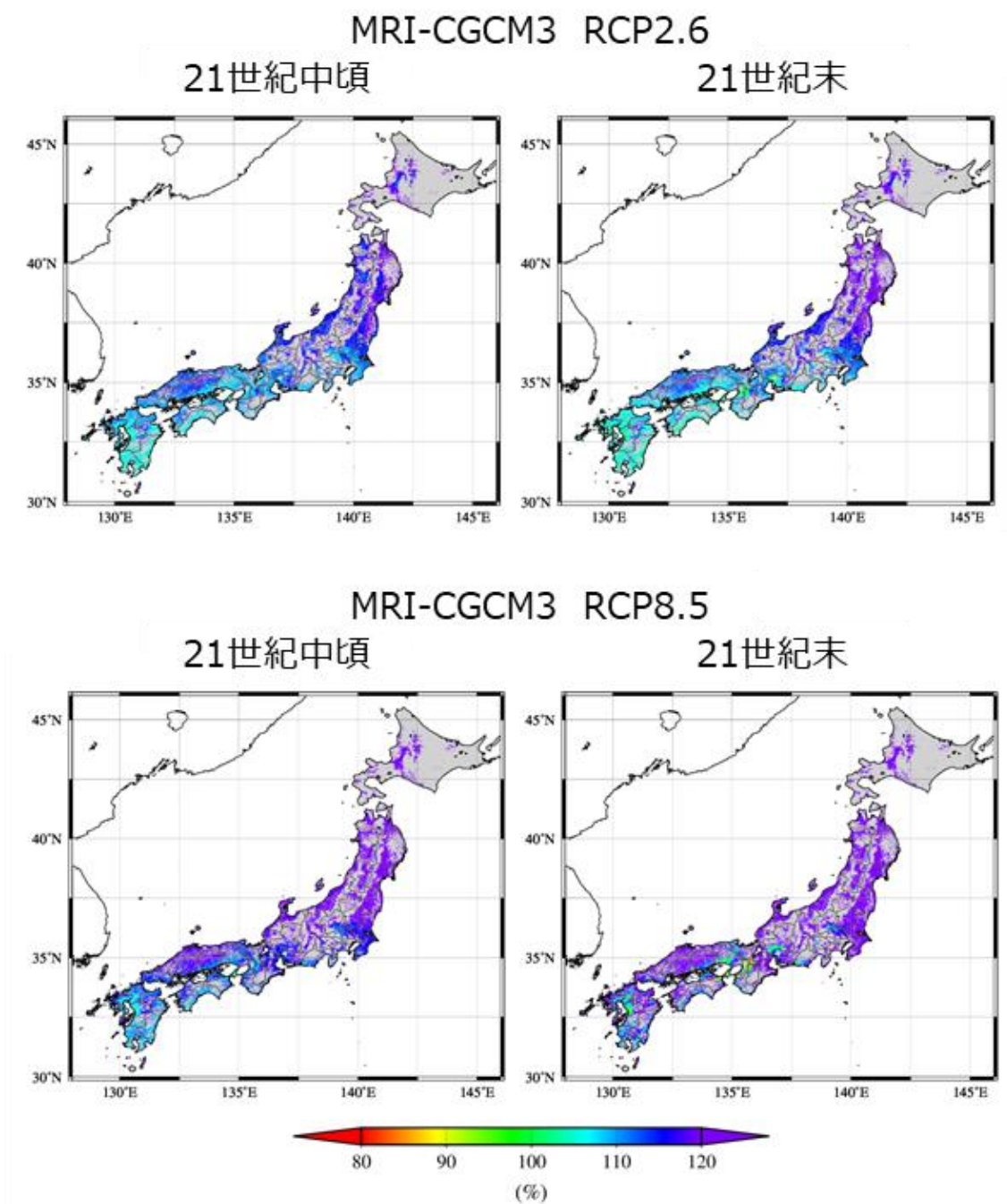


図 4.1-3 MRI-CGCM3 を使用したコメ収量予測値
(現在を基準とした相対値)

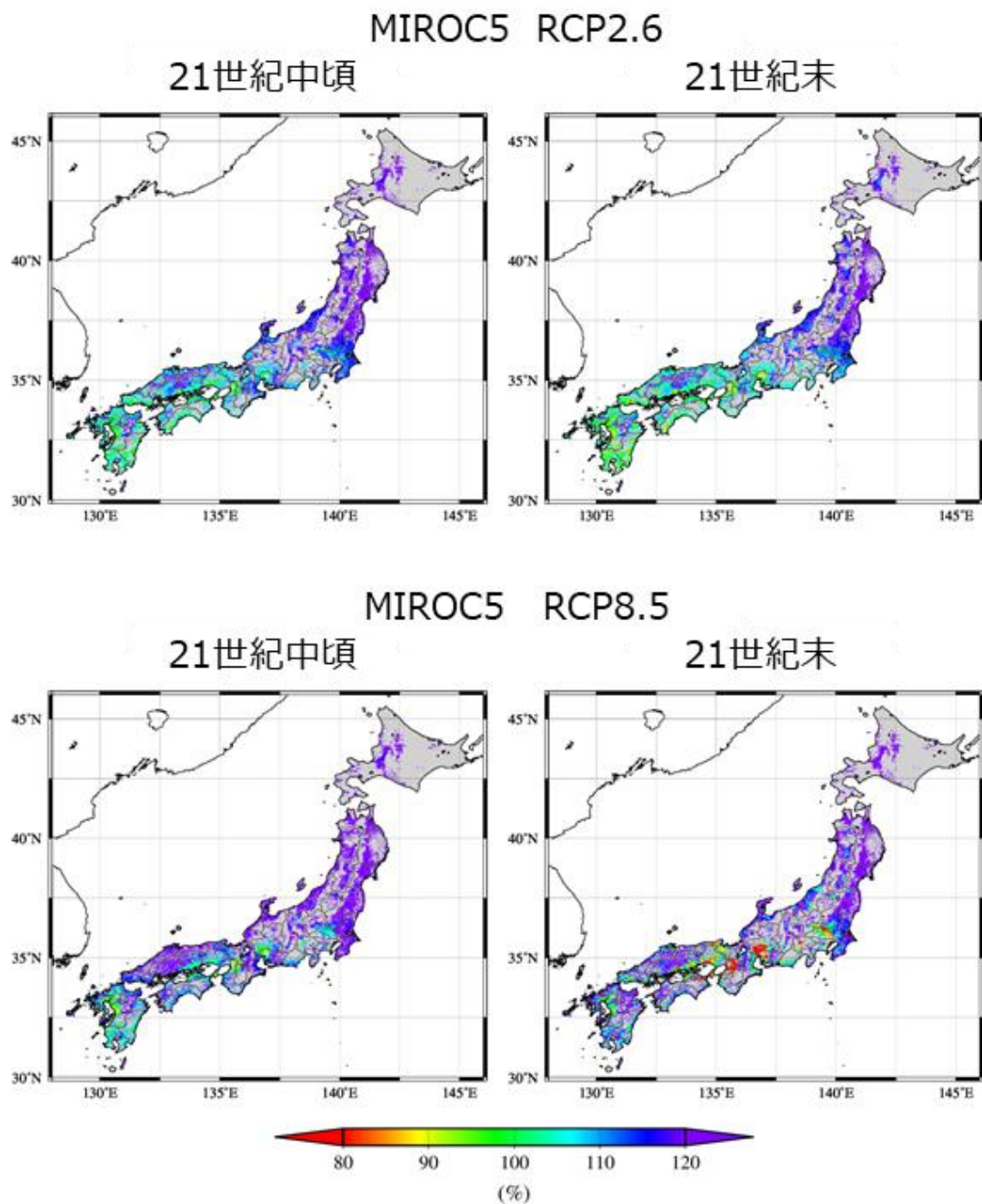


図 4.1-4 MIROC5 を使用したコメ収量予測値
(現在を基準とした相対値)

4.1.5.2 コメの品質

全国評価に利用できる品質予測モデルは未開発であるため、ここでは高温による品質低下リスクを表す指標として、出穂後 20 日間の日平均気温 26℃ 以上の積算値（単位は℃・日、以下 HD_m26 と呼ぶ）を導入した。既往の研究で明らかになっている HD_m26 値と 1 等米比率との関係を参考に、以下に示す基準でリスクの度合いを表すこととした。

$0^{\circ}\text{C} \cdot \text{日} \leq \text{HD_m26} < 20^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$	：	高温による品質低下リスク低
$20^{\circ}\text{C} \cdot \text{日} \leq \text{HD_m26} < 40^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$	：	高温による品質低下リスク中
$40^{\circ}\text{C} \cdot \text{日} \leq \text{HD_m26}$	：	高温による品質低下リスク高

HD_m26 は気温のみにより算定される指標であり、その他の気象要素や CO₂ 濃度が算定値に影響することはない。

図 4.1-5 は、MRI-CGCM3 の RCP2.6 および RCP8.5 による 21 世紀中頃と 21 世紀末の HD_m26 値の 20 年平均値の分布を示したものである。“高温による品質低下リスク高”に相当する 40°C 日以上の領域は、21 世紀中頃には関東、北陸から西の平野部や盆地の一部にのみ出現しているが、気温が大きく上昇する 21 世紀末には、40°C 日以上の出現範囲が東北北部まで大きく拡大し、全国の大半の地域で高温に因る品質低下リスクが高くなる。同様に図 4.1-6 は、MIROC5 による結果を示したものである。特に気温上昇の大きい RCP8.5 の 21 世紀末には、北海道を除く殆どの地域が 40°C 日以上になる。

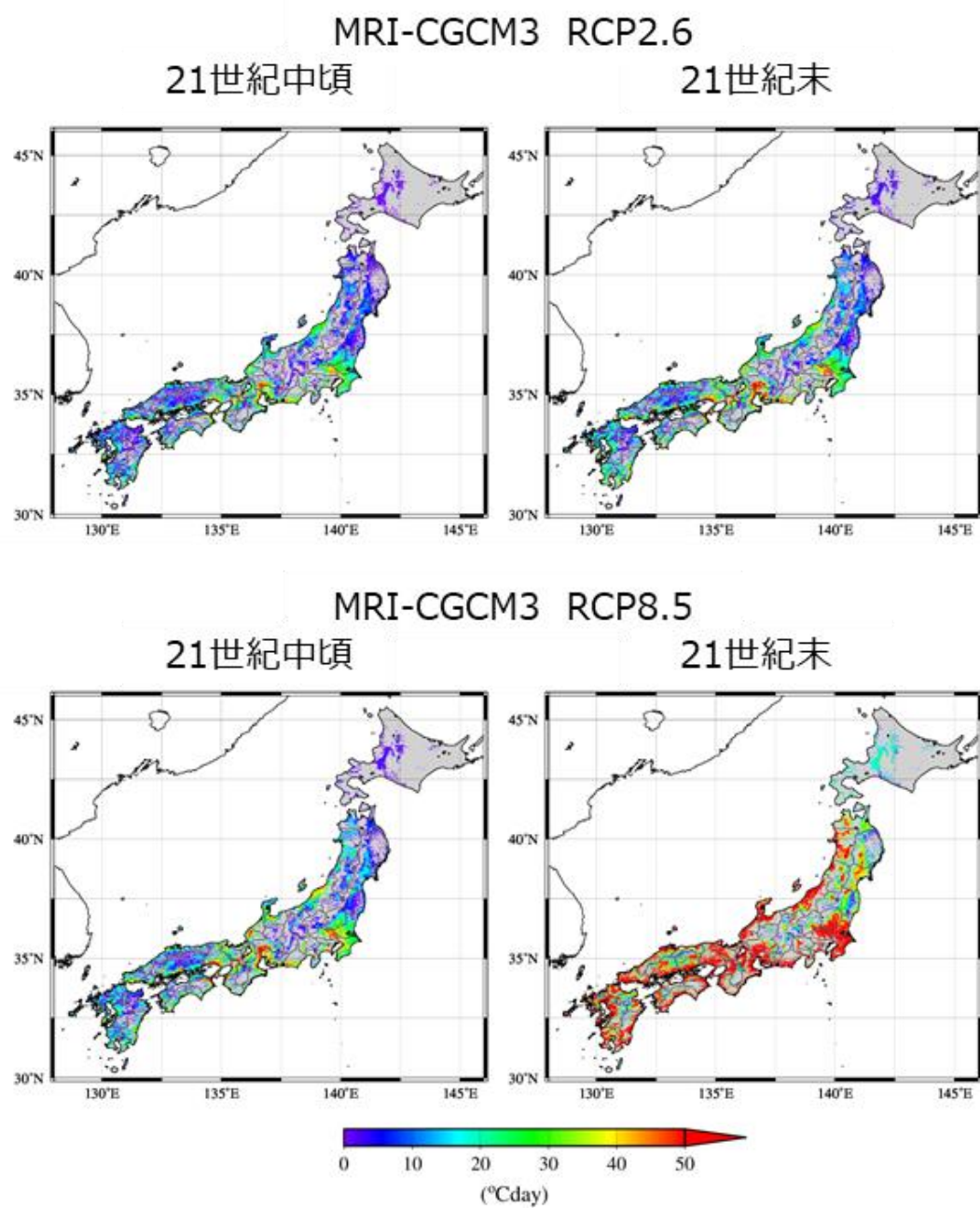


図 4.1-5 MRI-CGCM3 を使用した高温による品質低下リスク指標 (HD_m26) の分布

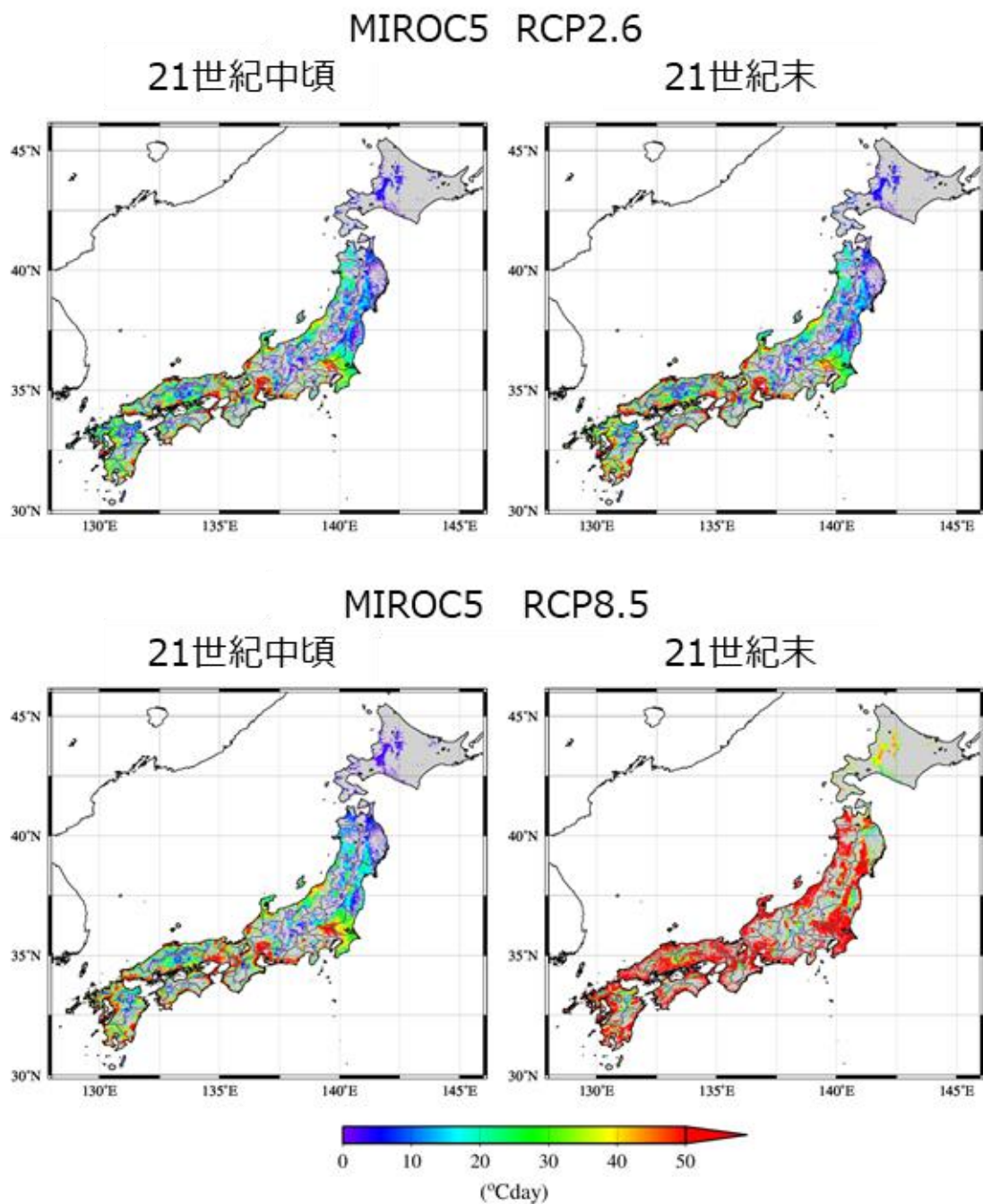


図 4.1-6 MIROC5 を使用した高温による品質低下リスク指標（HD_m26）の分布

4.1.6 活用上の留意点

4.1.6.1 本調査の将来予測対象とした事項

本調査では、影響評価モデルとして導入した水稻生育収量予測モデル（H/H モデル）で再現できる項目について、予測対象とした。最終的な出力値は玄米収量であるが、その計算過程において、フェノロジーやバイオマス生成量が求められる。入力データとしては、気象データ、栽培管理データ、大気 CO₂ 濃度データがあり、これらが変化した場合の影響については評価可能である。

4.1.6.2 本調査の将来予測の対象外とした事項

本調査では、評価対象期間にわたり、品種と栽培地域が変化しないことを条件とした予測を行った。そのため、適応策としての他の品種の導入や、栽培地域の変更等については対象外とした。また、病虫害や台風による洪水、潮風害といった要因を考慮していない。

4.1.6.3 その他、成果を活用する上での制限事項

モデルに基づく予測結果であり、病虫害や台風による洪水、潮風害といった要因を考慮していない点に留意する必要がある。

4.1.7 適応オプション

表 4.1-1 適応オプション一覧

適応 オプション	想定される実施主体			評価結果							
				現状		実現可能性				効果	
	行政	事業者	個人	普及 状況	課題	人的 側面	物的 側面	コスト 面	情報面 (知見/経 験/データ など)	効果発現 までの時 間	期待され る効果の 程度
適期植え付け	●	●	●	普及が進んでいる	労働力の確保、水利権の調整	△	○	○	◎	短期	中
早晩性の異なる品種	●	●	●	一部で普及	栽培方法、食味、耐病性、耐冷性	○	○	◎	○	短期	低
高温耐性品種	●	●	●	普及が進んでいる	栽培方法、食味、耐病性、耐冷性	○	△	N/A	○	長期	高

表 4.1-2 適応オプションの考え方と出典

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
適期植え付け	年により高温ピークを回避できない
早晩性の異なる品種	年により高温ピークを回避できない
高温耐性品種	育種に長期間を要する

4.2 気候シナリオに関する情報

4.2.1 気候シナリオ基本情報

項目	コメの収量	コメの品質低下リスク
気候シナリオ名	農環研データセット by SI-CAT	
気候モデル	MIROC5、MRI-CGCM3、GFDL-CM3、HadGEM2-ES、CSIRO-Mk3-6-0	
気候パラメータ	日最高・最低気温、日積算日射量、日平均相対湿度、日平均風速	
排出シナリオ	RCP2.6、RCP8.5	
予測期間	21 世紀中頃、21 世紀末	
バイアス補正の有無	なし	

4.2.2 使用した気候パラメータに関する情報

入力気象データとして提供された「農環研データセット by SI-CAT」(西森ら, 2019) には、5 種類の気候モデル (MIROC5, MRI-CGCM3, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, CSIRO-Mk3.6.0) および 2 種の RCP (RCP2.6、RCP8.5) による気候予測値が含まれており、過去再現期間 (historical) は 2005 年までで各 RCP 共通、2006 年以降は各 RCP で定義された温室効果ガス排出経路に基づいた予測気候値が算定されている。作成されている期間は各気候モデルとも 1981 年から 2100 年までの 120 年間である。なお、影響評価モデルとして使用する H/H モデルの稼働に必要な要素は、日最高・最低気温 [$^{\circ}\text{C}$]、日積算日射量 [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]、日平均相対湿度 [%]、日平均風速 [m s^{-1}] であり、「農環研データセット by SI-CAT」にはこれらがすべて含まれている。なお、投影法は十進経緯度法 (Geographic)、測地系は世界測地系 (JGD2000) で作成されている。

表 4.2-1 には、各気候シナリオにおける 21 世紀中頃および 21 世紀末における気温上昇量 (1981 年～2000 年の平均値を基準とした相対値) が示されている。気温上昇量は、21 世紀中頃においては、RCP2.6 で 0.6°C から 2.6°C 、RCP8.5 では 0.7°C から 2.8°C 、21 世紀末においては、RCP2.6 で 1.1°C から 3.0°C 、RCP8.5 では 3.8°C から 6.8°C である。このように、気温上昇量は 21 世紀中頃と比較して 21 世紀末の方が顕著に大きい。RCP による違いは、21 世紀中頃では明瞭ではないが、21 世紀末においては非常に大きくなり、RCP の違いによる温度上昇に大きな差が生じる。各時期の RCP ごとの気候モデルによる予測の幅は、21 世紀中頃の RCP2.6 で 2.0°C 、RCP8.5 で 2.1°C 、21 世紀末の RCP2.6 で 1.9°C 、RCP8.5 で 3.0°C となり、温度上昇の大きい 21 世紀末の RCP8.5 で気温予測の幅が特に大きくなっている。

各気候シナリオにおける要素ごと、5 年ごとの 20 年平均値の推移を図 4.2-1～図 4.2-5 に示す。気温については、RCP2.6 においては 21 世紀中頃までは明確な上昇傾向で、その後 21 世紀末にかけて上昇が停止あるいは一部の気候モデルでは若干の下降が認められる。一方、RCP8.5 においては期間を通して一貫した上昇傾向が認められる。降水量 (本業務では未使用) は、どちらの RCP でもやや不明瞭であるが増加傾向が認められる。日射量は、どちらの RCP においても 2030 年頃までは変化が明瞭ではなく、その後 2070 年頃にかけて増加傾向、その後 21 世紀末にかけては変化が小さくなるという特徴が見られる。相対湿度は、どちらの RCP でも期間を通して低下傾向であるが、これは温度上昇に伴うものと考えられる。特に、RCP8.5 における低下傾向が明瞭である。但し、変化量としては比較的小さい。風速については、両 RCP とも期間をとって変化傾向は明瞭ではなく、変化量自体も小さい。

表 4.2-1 気候シナリオ一覧（農環研データセット by SI-CAT）

気候モデル	気温上昇（現在を基準）単位：℃			
	21 世紀中頃		21 世紀末	
	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5
MIROC5	+1.5	+1.8	+1.8	+4.5
MRI-CGCM3	+0.6	+0.7	+1.1	+3.8
GFDL-CM3	+2.6	+2.8	+3.0	+6.8
HadGEM2-ES	+2.1	+2.3	+2.0	+5.6
CSIRO-Mk3-6-0	+1.5	+1.6	+1.9	+5.2

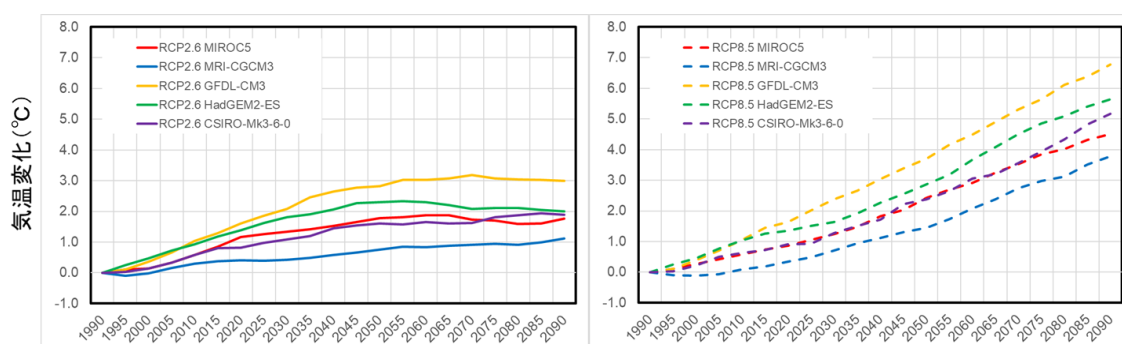


図 4.2-1 気温の 20 年平均値の 5 年ごとの推移（現在を基準とした）

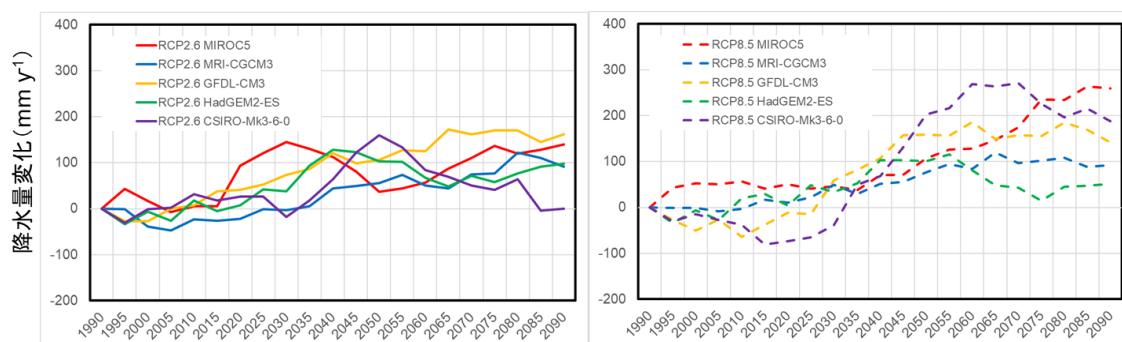


図 4.2-2 降水量の 20 年平均値の 5 年ごとの推移（現在を基準とした）

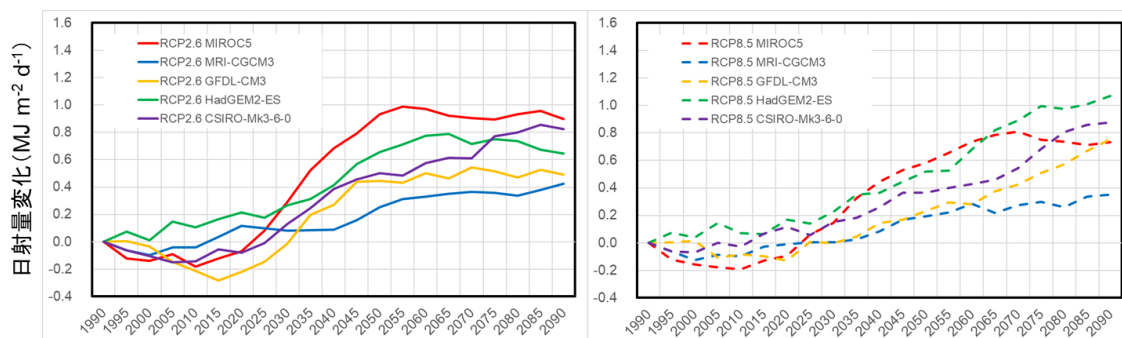


図 4.2-3 日射量の 20 年平均値の 5 年ごとの推移（現在を基準とした）

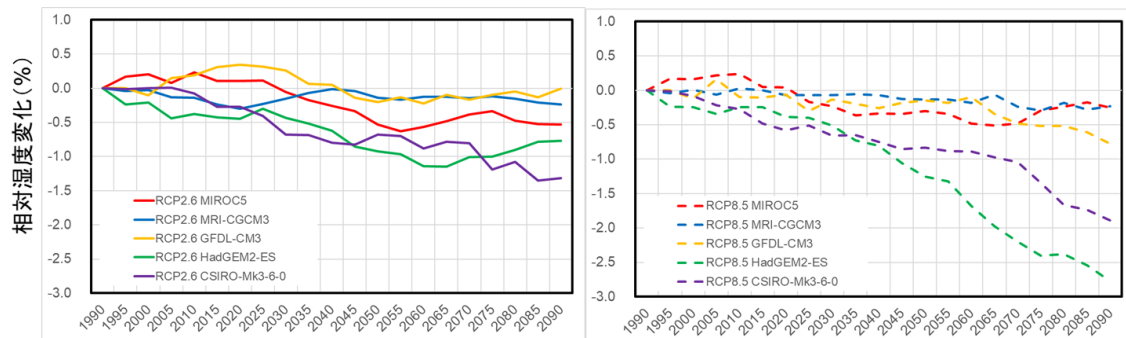


図 4.2-4 相対湿度の 20 年平均値の 5 年ごとの推移（現在を基準とした）

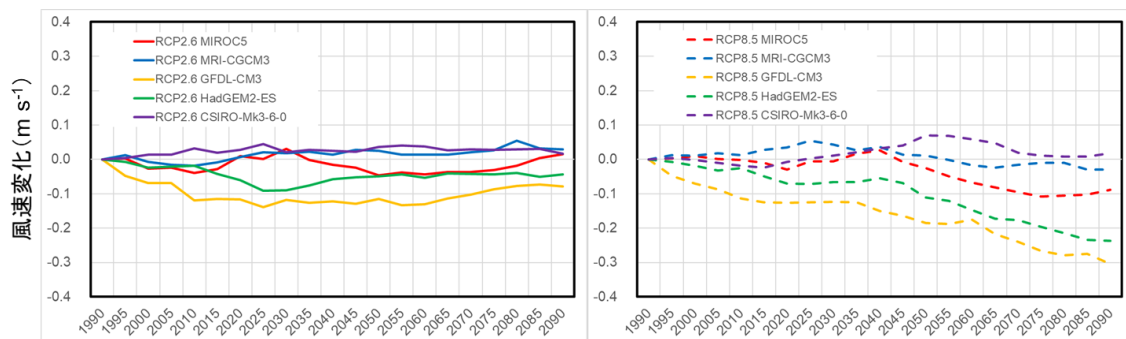


図 4.2-5 風速の 20 年平均値の 5 年ごとの推移（現在を基準とした）

4.2.3 気候シナリオに関する留意事項

本課題で対象とした、気候変動によるわが国の水稻生産への影響評価において、入力データとして使用する農研機構が作成した気候シナリオ「農環研データセット by SI-CAT」の妥当性について、AMeDAS 観測値に基づくメッシュ農業気象データとの比較により検証した。今回使用した 2 種の RCP による 5 種の気候モデルの 10 種の気候シナリオについては、影響評価に重要な全ての気候指標において高い再現性が認められ、影響評価のための入力データとしての妥当性が確認された。

4.2.4 バイアス補正に関する情報

使用した「農環研データセット by SI-CAT」は、開発元において既に適切なバイアス補正が施されており（西森ら, 2019）、本業務において更なる独自のバイアス補正は行っていない。

4.2.5 気候シナリオ選択の理由

本業務で使用した影響評価モデル（H/H モデル）は、稼働のための入力気象データとして日最高・最低気温、日積算日射量、日平均相対湿度、日平均風速を必要とする。また、収量算定において光合成同化産物生成量の計算で各年 CO_2 濃度の情報が必要であり、各データの年次と RCP が明確であることが必要である。さらに、気候シナリオの違いによる予測の幅を示すことが求められるため、複数の気候モデルによる出力値があることが必要である。

以上より、これらの条件を満たす気候シナリオセットとしては「農環研データセット by SI-CAT」のみであり、本業務ではこれを選択し、使用した。

4.3 気候変動影響に関する調査手法

4.3.1 手順

本事業において、気候変動による水稻生産影響評価は、図 4.3-1 に示す手順に従い実施した。影響評価モデルとして、プロセスベースの水稻生育収量予測モデル（H/H モデル：Hasegawa and Horie, 1997）を導入した。このモデルの稼働には、品種や移植日といった栽培管理データ、入力気象データとして、日別の平均・最高・最低気温、積算日射量、平均相対湿度、平均風速、各年の大気 CO₂ 濃度が必要となる（詳細後述）。

出力結果を自治体スケールでの詳細な空間分布を示すため、モデル入力値として用いる全てのデータを約 1km×1km の高解像度規格で整備した（詳細後述）。

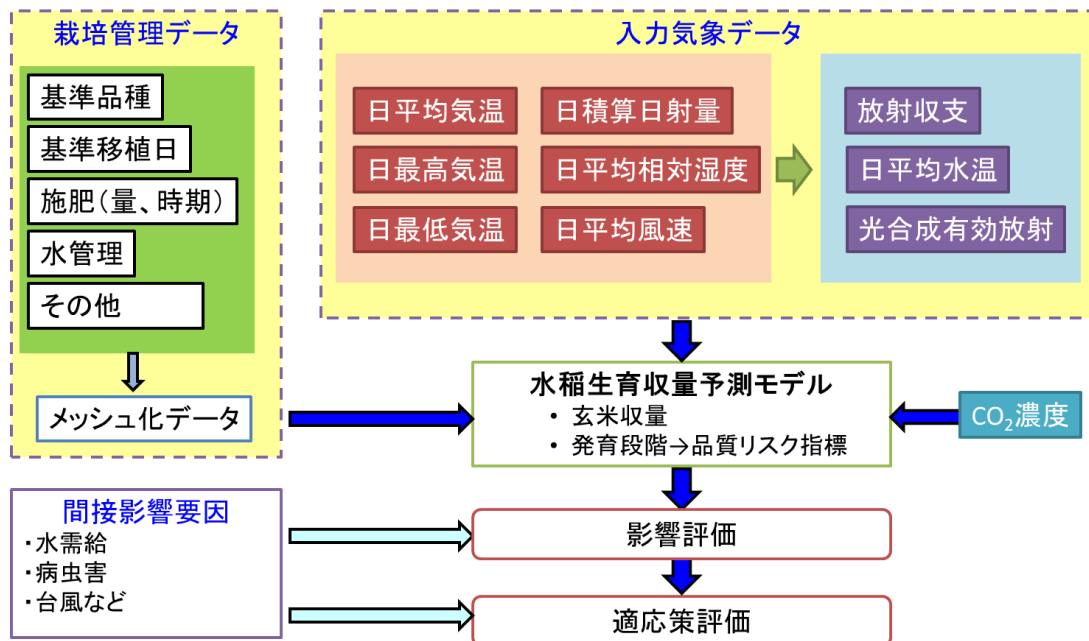


図 4.3-1 影響評価の手順

4.3.2 使用したデータ・文献

本業務においては、我が国のコメ生産に関する全国スケールの評価を実施するが、地域スケールにおける影響評価への適応を目指すため、地域スケールでの使用に耐えうる空間解像度によるマップ化が必要となる。我が国における水稻生産基盤である水田は、比較的広い面積を持つ平野のみならず、地形の複雑な中山間地や山間部の傾斜地にまで分布している。一方、影響評価に使用する栽培管理データおよび入力気象データは、メッシュ形式の分布データを使用することとなる。メッシュごとのデータ値はメッシュ全体を代表する値（多くの場合にはメッシュ全体の平均値）となるため、メッシュ内の地形や土地利用等の空間分布特性が複雑になるほど、対象とする地表状態の代表性が低くなることが危惧される。特に今回対象とする水田は、ある領域において平野や盆地の底部、谷筋等、低標高地域に分布する傾

向を持つため、メッシュサイズが大きくメッシュ内の水田占有面積が小さい場合、特に複雑地形地域では、メッシュ平均標高はメッシュ内水田平均標高より高くなる傾向がある。メッシュ気温データはメッシュ平均標高に基づいて算出されているため、メッシュ平均標高とメッシュ内水田平均標高に差がある場合には、影響評価の入力データであるメッシュ気温データにバイアスが生じることになる。異なる空間解像度の標高データと水田分布データを用いた予備解析によると、メッシュ空間解像度を 1 kmとした場合にはメッシュ標高値とメッシュ内水田平均標高値の間に気温バイアスを生じるような差はあまり認められなかったが、メッシュ空間解像度を 10 kmとした場合には、地形の複雑な地域においてメッシュ標高値とメッシュ内水田平均標高値の間に大きな正の差が生じ、影響評価の際に使用される入力データの低温バイアスが無視できないほど大きくなる可能性が示唆された。そのため、本事業で想定する地域スケールでの影響評価への応用を考慮し、使用する空間解像度は 1km×1km が適当であると判断された (Ishigooka *et al.* in press)。なお、本事業で共通的に使用する気候シナリオとして提供された「農環研データセット by SI-CAT」(詳細後述)は約 1km×1km (標準地域メッシュの 3 次メッシュに準拠) であり、このデータを基準としてモデル入力値として用いる全ての入力データをこの規格に基づき同一空間スケールで整備した。

1) 行政区画データ・土地利用データ

H/H モデルの稼働に最低限必要な栽培管理データは、品種、移植日、窒素肥料投入量である。これらの情報はメッシュごとに与えられているのではなく、各種農業統計資料として行政区画ごと(都道府県等)にまとめられている。そのため、各メッシュでモデルを実行するにあたり、当該メッシュが所属する行政区画の情報が必要となる。上記項目では、品種は都道府県、移植日は作柄表示地帯(農林水産省独自の地域区分で、水稻に関する統計情報を表示する区域として、都道府県を水稻栽培条件により数地域に区分している)、窒素肥料投入量は農業地域(農林水産省独自の地域区分で、全国を 10 の地域に区分している)と、それぞれ異なる区画を単位として取りまとめられている。

本業務では、現状において水田利用による水稻生産が実施されている地域のみを対象とした影響評価を行うため、現状での水田の分布情報が必要となる。ここでは、国土数値情報の土地利用データ(2006 年版)を使用した。このデータには各種土地利用カテゴリについて、標準地域メッシュ(3 次メッシュ: 約 1 km×1 km)における面積割合が与えられている。本業務では、水田が 1%以上存在するメッシュを計算対象メッシュとした。この基準により、全 377,449 個の中で対象となるメッシュ数は 152,927 個である。

図 4.3-2 は、統計情報に使用される行政区画を、水田の分布と併せて示している(黒色線は都道府県境界を、赤色線は作柄表示地帯境界を表す)。作柄表示地帯の区割りは年により変更されることがあり、図は 2010 年時点の区割りである(全国 142 区画)。なお、農業地域の区分は、北海道、東北、北陸、関東・東山、東海、近畿、中国、四国、九州、沖縄である。

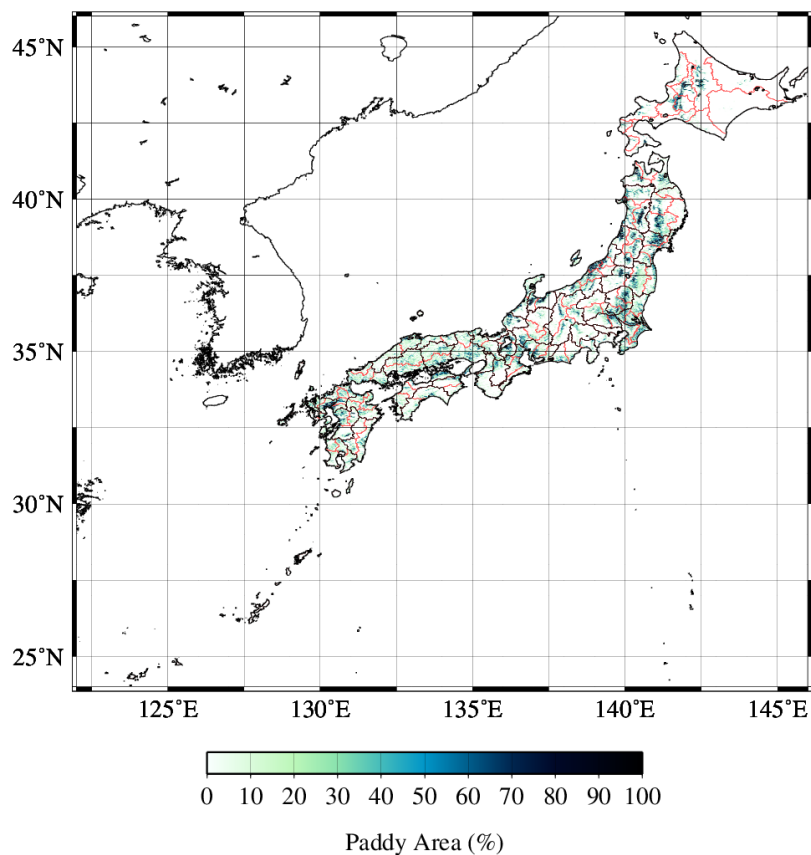


図 4.3-2 水田の分布と都道府県および作柄表示地帯の境界
(黒色線：都道府県、赤色線：作柄表示地帯)

2) 入力気象データ（気候シナリオ）

入力気象データとしては、農環研データセット by SI-CAT を使用した (§ 4.2.2 に詳述)。

3) CO₂ 濃度データ

CO₂ 濃度は、H/H モデル内における光合成速度に直接影響するため、収量算定に大きく影響する。RCP シナリオでは、それぞれの RCP で定義されている放射強制力に対して CO₂ 排出経路が設定されており、各年の CO₂ 濃度は明確に定義されている (図 4.3-3)。RCP シナリオにおける共通期間 (historical) 最終年である 2005 年には 378.8ppm であるが、2050 年には RCP2.6 で 442.7ppm、RCP8.5 では 540.5ppm となり、2100 年にはそれぞれ 420.9ppm、935ppm となる。なお、RCP ごとの CO₂ 濃度年々変動に関するデータは、Potsdam Institute for Climate Impact Research の Website より入手した。モデルへの入力値としての CO₂ 濃度は年間を通して一定とし、実際に観測される季節変化や地理的分布は考慮しないこととした。

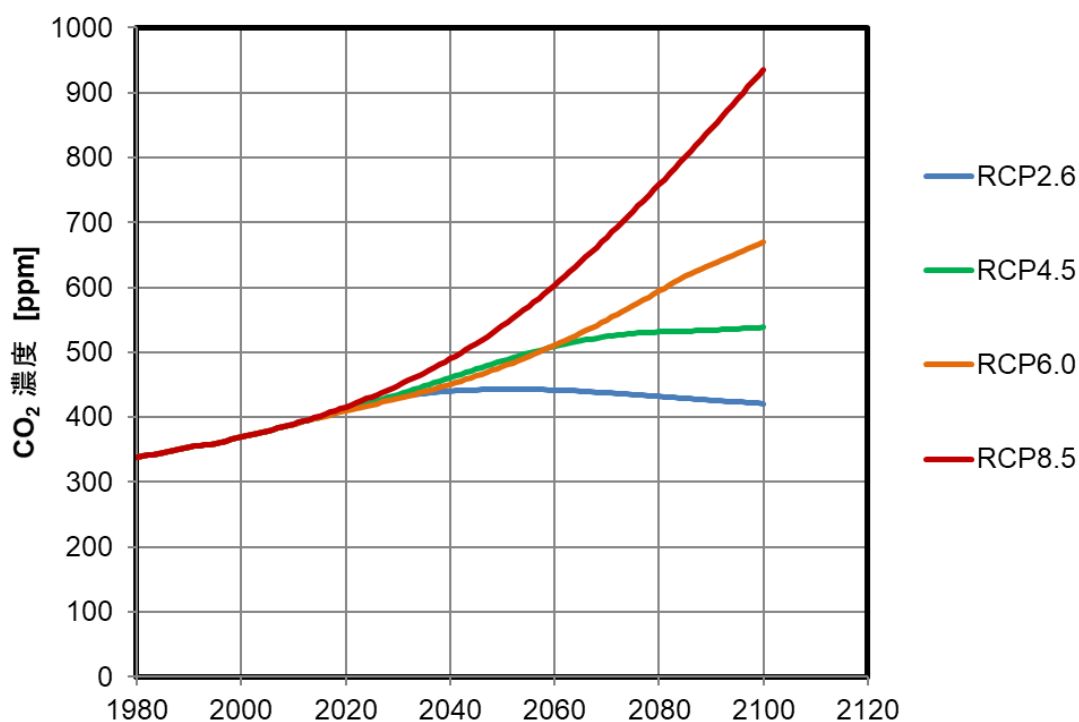


図 4.3-3 各 RCP シナリオにおける CO₂ 濃度変化

4) 各種統計データ

本業務で使用する影響評価モデル（H/H モデル）は、近年国内で広く栽培されている主要 15 品種に対応している。表 4.3-1 に、モデル対応の各品種名と全国における作付面積割合（2009 年時点）を示す。全作付面積に対する品種別の割合では、コシヒカリが 37.3%で圧倒的に多く、全水稲作付面積の 1 / 3 以上を占める。次いで、ひとめぼれ、ヒノヒカリ、あきたこまちがそれぞれ 10.6%、10.3%、7.8%である。これらの品種は、特定の都道府県や地域に限定されず、全国の広範囲にわたり栽培されている。また、あさひの夢、キヌヒカリも比較的他地域での栽培が見られる。一方、栽培地域が限定されている品種は、産地ブランドとして特定都道府県で広範囲に作付されている品種や（山形県：はえぬき、愛知県：あいちのかおり、新潟県：こしいぶき、福岡県：夢つくし）、北海道および青森県の冷涼気候条件に適した品種（北海道：きらら 397、ほしのゆめ、ななつぼし、青森県：まっしぐら、つがるロマン）が見られる。これらの 15 品種の総作付面積は、全作付面積の 85.7%（2009 年）を占める。したがって、H/H モデルの使用により、近年における我が国のコメ生産を概ね評価できると推察される。

表 4.3-1 H/H モデル対応品種（作付面積割合は 2009 年時点のデータ）

品種名	作付面積割合 (%)	主な栽培地域
あいちのかおり	0.9	愛知県、静岡県
あきたこまち	7.8	東北以南
あさひの夢	1.2	関東以西
はえぬき	2.8	山形県
ヒノヒカリ	10.3	東海以西
ひとめぼれ	10.6	東北以南
ほしのゆめ	1.0	北海道
キヌヒカリ	3.3	関東以西
きらら 397	2.4	北海道
コシヒカリ	37.3	南東北以南
こしいぶき	1.1	新潟県
まっしぐら	1.3	青森県
ななつぼし	3.0	北海道
つがるロマン	1.6	青森県
夢つくし	1.1	福岡県

図 4.3-4 は、全作付面積に対する主要 15 品種の品種別作付面積の割合の年々変化を示したものである。この 15 品種の総作付面積割合が最も多いのは 2005 年から 2010 年にかけての時期であり、全体の 80%以上となるのは 2001 年から 2014 年まで、85%以上となるのは 2004 年から 2009 年までである。15 品種の総作付面積割合は、概ね 2000 年までに急激に増加しているが、これは以前の主要品種であった日本晴やササニシキやむつほまれ等が、現在の主要品種に移行したためと推察される。特にササニシキは 1993 年の大冷害をきっかけに多くがひとめぼれに移行したことが大きく影響しているようである。一方、2010 年以降は 15 品種のシェアが漸減しているが、新品種への移行の中でも特に北海道においてきらら 397 やほしのゆめが、ゆめぴりかに代わってきていることが主因と考えられる。

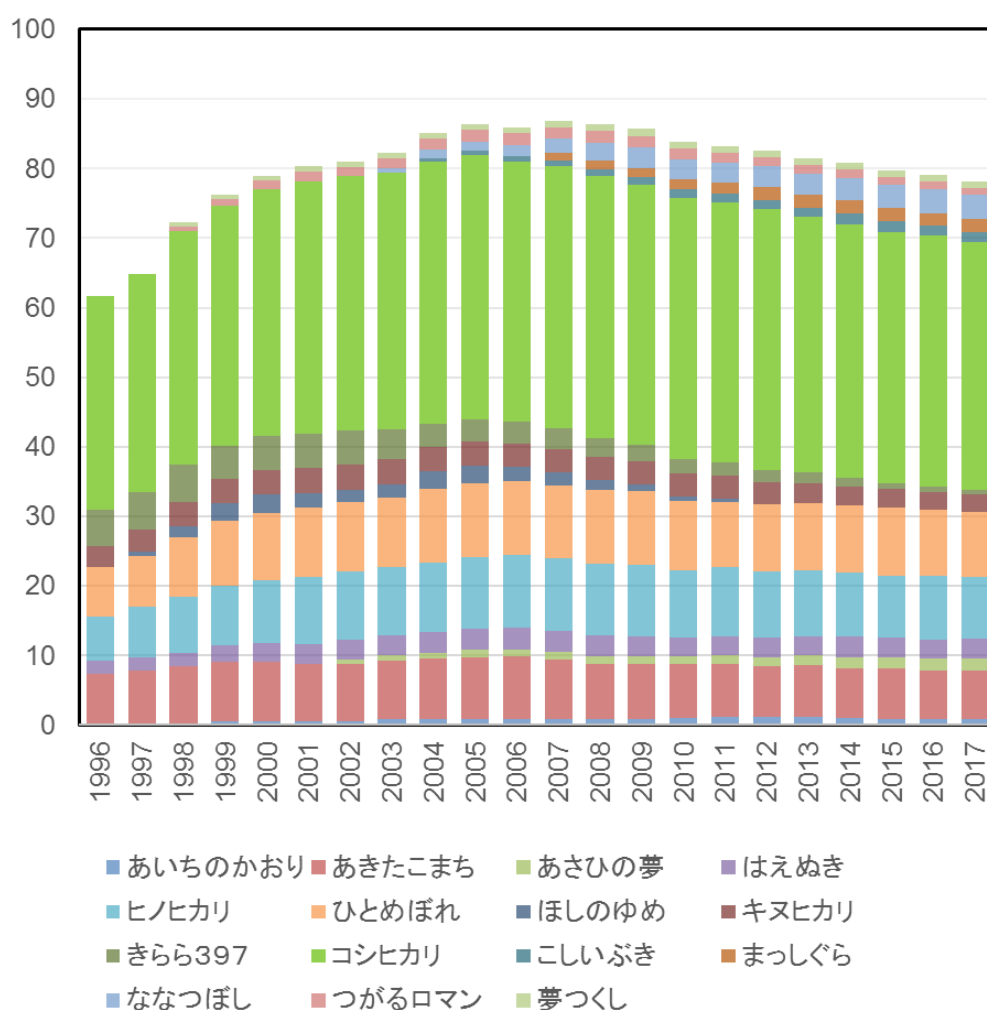


図 4.3-4 主要 15 品種における品種別作付面積の推移

モデル計算においては、各都道府県の作付面積が最大の品種をその都道府県内の全メッシュに割り当てて計算する。図 4.3-5 に、各都道府県の作付面積が最大の品種、表 4.3-2 に、各都道府県の作付面積が第 3 位までの品種の一覧を示す。原則、作付面積が第 1 位である品種をその都道府県の計算に使用する品種とするが、もし第 1 位の品種が影響評価モデルの対応する主要 15 品種に含まれない場合には、第 2 位の品種を使用して計算する。今回のケースでは、群馬県（第 1 位：ゴロピカリ）と岐阜県（第 1 位：ハツシモ）が、第 2 位の品種（どちらもコシヒカリ）を使用することとなった。その結果、コシヒカリを使用する都道府県は 25 都県となり最多であり、次がヒノヒカリで 12 府県、その他はひとめぼれが 3 県、キヌヒカリが 2 県、きらら 397、つがるロマン、あきたこまち、はえぬき、あいちのかおりが 1 県ずつとなった。なお、今回の計算では品種の改変は考慮せず、将来においても同一品種での計算とすることとした。

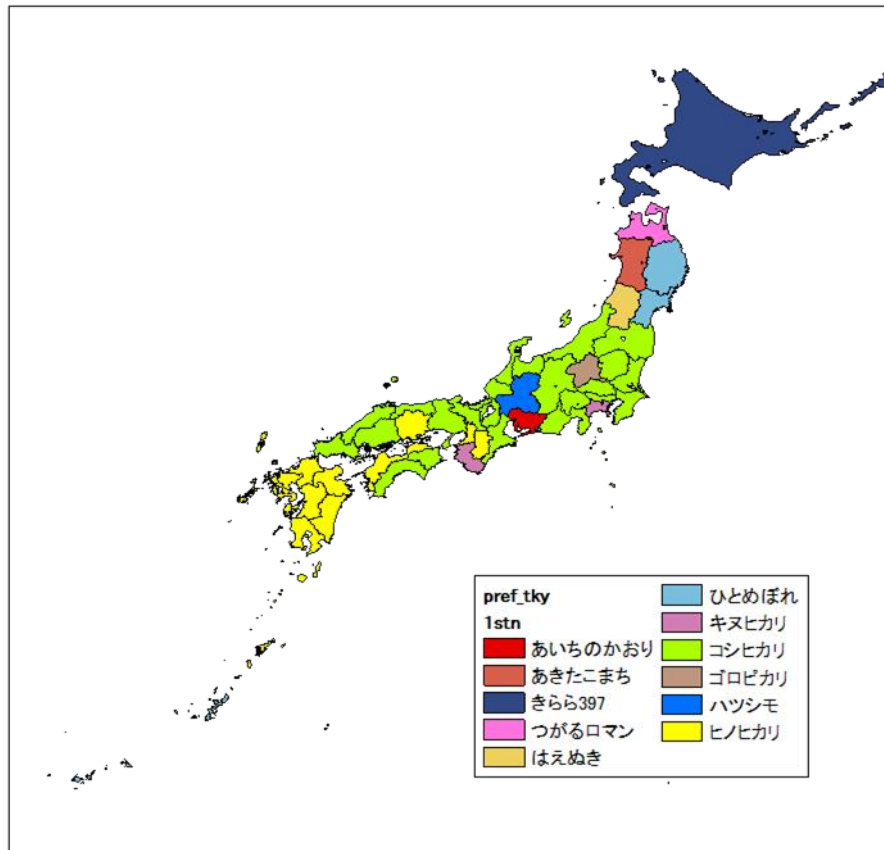


図 4.3-5 都道府県別作付面積最大品種（2003）

表 4.3-2 都道府県別水稻品種作付面積順位 (2003 年)

都道府県名	第 1 位	第 2 位	第 3 位
北海道	きらら 397	ほしのゆめ	ななつぼし
青森	つがるロマン	ゆめあかり	むつほまれ
岩手	ひとめぼれ	あきたこまち	いわてっこ
宮城	ひとめぼれ	ササニシキ	まなむすめ
秋田	あきたこまち	ひとめぼれ	めんこいな
山形	はえぬき	あきたこまち	ひとめぼれ
福島	コシヒカリ	ひとめぼれ	あきたこまち
茨城	コシヒカリ	あきたこまち	ゆめひたち
栃木	コシヒカリ	月の光	あさひの夢
群馬	ゴロピカリ	コシヒカリ	あさひの夢
埼玉	コシヒカリ	キヌヒカリ	朝の光
千葉	コシヒカリ	ふさおとめ	あきたこまち
東京	コシヒカリ	キヌヒカリ	アキニシキ
神奈川	キヌヒカリ	祭り晴	コシヒカリ
新潟	コシヒカリ	こしいぶき	ゆきの精
富山	コシヒカリ	ハナエチゼン	五百万石
石川	コシヒカリ	ほほほの穂	ハナエチゼン
福井	コシヒカリ	ハナエチゼン	五百万石
山梨	コシヒカリ	こいごころ	ひとめぼれ
長野	コシヒカリ	あきたこまち	美山錦
岐阜	ハツシモ	コシヒカリ	ひとめぼれ
静岡	コシヒカリ	あいちのかおり	キヌヒカリ
愛知	あいちのかおり	コシヒカリ	祭り晴
三重	コシヒカリ	キヌヒカリ	みえのえみ
滋賀	コシヒカリ	キヌヒカリ	日本晴
京都	コシヒカリ	キヌヒカリ	ヒノヒカリ
大阪	ヒノヒカリ	祭り晴	キヌヒカリ
兵庫	コシヒカリ	キヌヒカリ	山田錦
奈良	ヒノヒカリ	キヌヒカリ	ひとめぼれ
和歌山	キヌヒカリ	コシヒカリ	日本晴
鳥取	コシヒカリ	ひとめぼれ	日本晴
島根	コシヒカリ	ハナエチゼン	祭り晴
岡山	ヒノヒカリ	アケボノ	コシヒカリ
広島	コシヒカリ	ヒノヒカリ	中生新千本
山口	コシヒカリ	ヒノヒカリ	ひとめぼれ
徳島	コシヒカリ	キヌヒカリ	ヒノヒカリ
香川	ヒノヒカリ	コシヒカリ	コガネマサリ
愛媛	ヒノヒカリ	あきたこまち	コシヒカリ
高知	コシヒカリ	ヒノヒカリ	黄金錦
福岡	ヒノヒカリ	夢つくし	ニシホマレ
佐賀	ヒノヒカリ	夢しずく	コシヒカリ
長崎	ヒノヒカリ	コシヒカリ	あさひの夢
熊本	ヒノヒカリ	森のくまさん	コシヒカリ
大分	ヒノヒカリ	ひとめぼれ	コシヒカリ
宮崎	ヒノヒカリ	コシヒカリ	ユメヒカリ
鹿児島	ヒノヒカリ	コシヒカリ	はなさつま
沖縄	ひとめぼれ	チヨニシキ	

移植日は、2000 年における作柄表示地帯ごとの移植最盛期を、該当する作柄表示地帯に含まれる全メッシュの移植日とした（図 4.3-6）。なお、作柄表示地帯は年ごとに区割りの再編が行われ、また市町村ごとに割り付けられるため平成の大合併時には区割りに大きな変更があったが、統計資料の時空間的均質性を確保するため、本課題では 2010 年時点での区割り（全国 142 地帯）を基準とし、各年統計資料を 2010 年時点の区割りに再集計した。窒素肥料投入量は、2006 年の肥料消費量の農業地域別原単位量データ（農林水産省米生産費調査資料）と肥料区分ごとの窒素比率（ポケット肥料要覧）を使用して、農業地域ごとに算定した（表 4.3-3）。

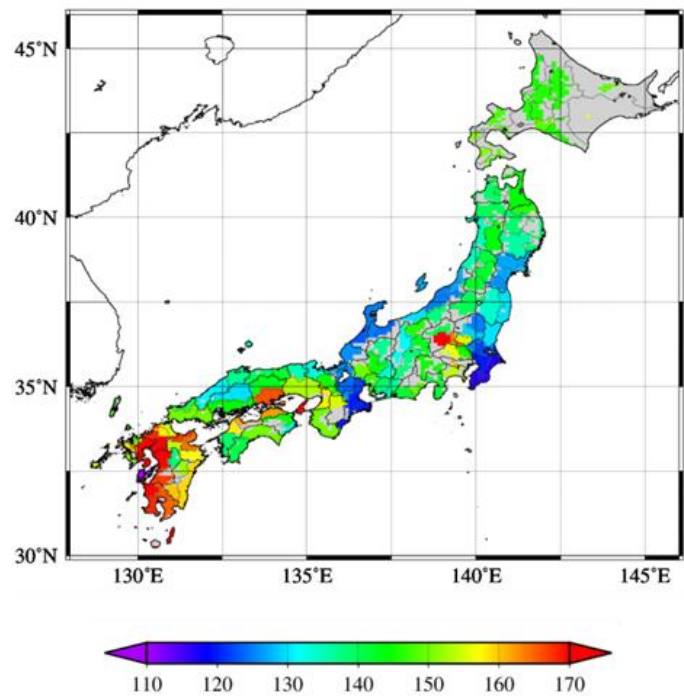


図 4.3-6 作柄表示地帯別水稻移植日（2000）

表 4.3-3 農業地域ごとの窒素肥料投入量（kg/ha）

北海道	東北	北陸	関東東山	東海	近畿	中国	四国	九州
87.3	66.9	47.4	58.8	66.9	80.2	56.3	73.1	61.2

4.3.3 有識者ヒアリング

該当なし。

4.3.4 観測および実証実験

該当なし。

4.3.5 気候変動影響予測手法の検討

気候変動影響予測に使用する影響評価モデルとしては、気候による影響のみではなく適応策の効果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と考えられる。そこで本業務においては、将来予測される気候変動条件下におけるコメ生産および品質に関する影響評価を実施するにあたり、プロセスベースの水稻生育・収量モデル（H/H モデル：Hasegawa and Horie, 1997）を、影響評価モデルとして導入した（§ 4.3.1 にフロー図掲載）。

本課題で取り扱う水稻生産性に関する影響評価指標として、収量と品質の 2 つを考慮する。ここで、収量は H/H モデルにより直接算定されるが、品質については H/H モデルでは算定できず、また全国を対象とした定量的な品質を算定するモデルが現段階では準備できない。そのため本課題では、高温による品質低下リスクを表す指標として、出穂後 20 日間の日平均気温 26°C 以上の積算値（以下、HD_m26 とする）を導入する。HD_m26 は、水稻品質（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（Ishigooka *et al.* 2011）、さらに最近の研究結果では HD_m26 を使用した白未熟粒発生率推定手法が提唱されている（西森ら, 2020）。HD_m26 は、H/H モデルの計算過程で算定される出穂日を基準に、日平均気温データのみから算定される。

4.3.6 影響予測モデルに関する情報

4.3.6.1 水稻生育収量予測モデル（H/H モデル）

H/H モデルによる計算フローを、図 4.3-7 に示す。このモデルは、発育段階、バイオマス生成、収量形成の 3 つのサブモデルにより構成される。発育段階サブモデルでは、与えられた移植日からの日々の気温値と日長から発育段階（幼穂形成期、出穂期、成熟期等）を算定する。発育段階は、発育速度（DVR）の積算値で表される発育指数（DVI）により定量化されており、DVI=1 で幼穂形成期、DVI=2 で出穂期、DVI=3 で成熟期となる。バイオマス生成サブモデルでは、発育段階に応じて日々の気象データ（日最高・最低・平均気温、日積算日射量、日平均相対湿度、日平均風速）からバイオマス生成量（乾物生産量）を算定する。その際、土壌中の窒素肥料吸収過程や CO₂ 濃度上昇による光合成活性の増大（CO₂ 施肥効果）によるバイオマス増加も考慮されている。最終的には、登熟期間の諸条件で決まる収穫指数（稲全体に対する子実部の割合）をバイオマスに乗じることで、収量（玄米収量）が算定される。

実際のモデル計算では、各メッシュに与えられた移植日から計算を開始し、日々の気象条件と日長から求まる発育速度から各発育ステージ（幼穂形成期、出穂期、成熟期）に到達する日を求め、成熟期に達した時点で計算を終了する。一方、低温等により発育が遅延し成熟期に到達する前に低温状態になり計算上発育が進行しなくなる場合（遅延型冷害に相当）を想定し、日平均気温が 5 日連続で 15°C を下回った時点で計算を終了する。収量は、計算終了時点での地上部バイオマスと収穫指数を乗じることで算定される。なお、出穂前後の時期の極端な低温や高温による不稔率の増加（障害型冷害、高温不稔）は、収穫指数の低下により表される。

以上より、温暖化条件での収量算定においては、増収要因として、減収の主要因であった冷害が温度上昇により軽減されることや CO₂ 濃度上昇による施肥効果が現れる一方、減収要因として、温度上昇により発育が早くなることで生育期間が短縮し光合成によるバイオマス生成量が減少することや、高温による受精障害で不稔粒が増加することが挙げられ、最終的にはこれらのバランスで収量の増減が決まる。

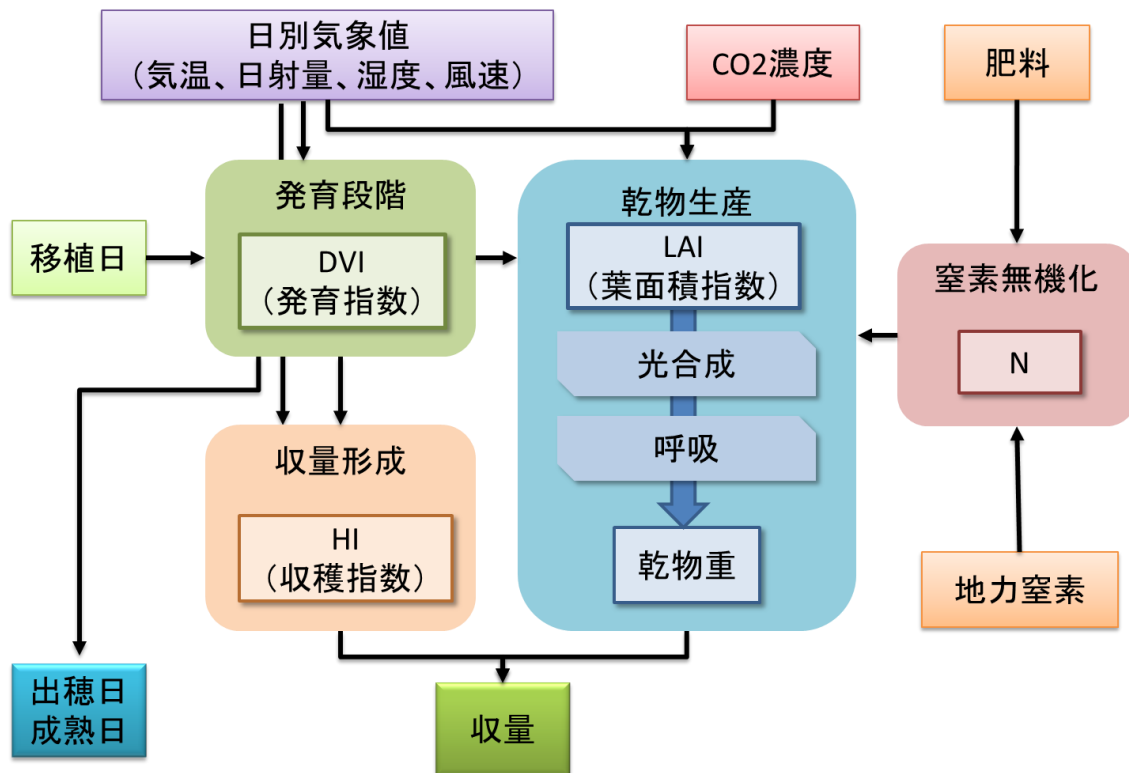


図 4.3-7 H/H モデルによる計算フロー

4.3.6.2 高温による品質低下リスク指標

高温による品質低下リスク指標（HD_m26）は、近年の高温による品質低下（1等米比率の低迷）の主要因である白未熟粒の発生が、登熟期間前半の平均気温が 26～27℃ を超過した場合に多くなる（Morita et al., 2016）という知見に基づいて導入されており、都道府県ごとに集計した HD_m26 値と 1 等米比率との関係（Ishigooka et al. 2011）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。

- | | |
|---|---------------------------|
| $0^{\circ}\text{C} \cdot \text{日} \leq \text{HD_m26} < 20^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$ | : 高温に因る品質低下リスク低 (Class A) |
| $20^{\circ}\text{C} \cdot \text{日} \leq \text{HD_m26} < 40^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$ | : 高温に因る品質低下リスク中 (Class B) |
| $40^{\circ}\text{C} \cdot \text{日} \leq \text{HD_m26}$ | : 高温に因る品質低下リスク高 (Class C) |

4.3.7 影響予測に必要な入力パラメータ

上記の影響予測モデル（水稻生育収量予測モデルと高温に因る品質低下リスク指標）により影響評価を行うにあたり必要な入力データは、入力気象データ（平均・最高・最低気温、日射量、相対湿度、風速）、大気 CO₂ 濃度データ、栽培管理データ（品種、移植日、窒素肥料投入量）である（入力気象データは 1.2.2 に、大気 CO₂ データと栽培管理データは § 4.3.2 に詳述）。

4.3.8 影響予測における留意事項（制限事項）

今回算定した収量は、本業務で導入した影響評価モデルによる算定値であり、モデルに含まれていない減収要因（例えば、病虫害や台風等による風水害や潮風害）は考慮されていない。また、影響評価は現行で栽培されている品種で現行の栽培地域に固定しているため、品種の改変（発育特性や高温耐性の異なる品種の導入等）や栽培地域の変更（水田の改廃）による効果の評価は未実施である。水稻の高温、高 CO₂ 環境での応答特性については現在においても不明な点が多く、鋭意研究実施中の部分も多い。特に高温条件下では高 CO₂ 濃度による増収効果が抑制されるとの研究結果もあり（Hasegawa *et al.* 2015）、後述する今回の結果に見られるような将来における収量増加は見込めない可能性も考えられる。影響評価結果の利用にあたっては、以上の事項について考慮する必要がある。

4.4 調査結果

4.4.1 文献調査結果

該当なし。

4.4.2 有識者ヒアリングの結果

該当なし。

4.4.3 観測や実証実験の結果

該当なし。

4.4.4 気候変動影響予測結果

(i) 全国評価

現行品種、現行移植日により年々の収量をメッシュごとに算定し、5 年間隔で 20 年平均値を求めた。値は全て、基準期間である現在（1981～2000 年）の 20 年平均収量を 100 とした相対値で表している。2 つの気候モデル（MIROC5, MRI-CGCM3）のそれぞれ 2 つの RCP（RCP2.6、RCP8.5）による、10 年ごとの 20 年平均収量の予測結果を、図 4.4-1、図 4.4-2 に示す。

MIROC5（図 4.4-1）は、今回使用した 5 つの気候モデルの中では平均的温度上昇を示すシナリオである。RCP2.6 においては、収量は年代が進むに従い概略東日本から北日本で大きく増加、関東から西で変化なしに僅かに増加という特徴が認められた。これは、現状で低温がコメ生産の制限要因となっている北日本や東日本山間部においては温度上昇により低

温による減収が解消されることに加えて CO₂ 濃度上昇による施肥効果が顕著な増収をもたらすが、現状で既に高温が制限要因となっている関東から西の地域では更なる高温により減収効果（主に生育期間の短縮による）が助長される一方、CO₂ 濃度上昇による増収効果が現れるため、結果的に収量変化が小さくなったと考えられる。RCP8.5 については、21 世紀中頃以降全国の広い地域で大きな増収となるが、21 世紀末に近くなると一部の平野部で顕著な減収となる地域が現れる。これは、高い CO₂ 濃度による増収効果と、気温が非常に高くなることで局所的に高温不稔が発生することによる著しい減収効果が現れるためである。

MRI-CGCM3（図 4.4-2）は、5 つの気候モデルの中で最も温度上昇が小さいシナリオである。温度上昇が小さく CO₂ 濃度が増加するため、全国的に殆どの地域で増収となる。RCP2.6 について詳細に見ると、相対的に東日本から北日本にかけての地域で増収幅が大きく、西日本では増収幅はやや小さい。また、21 世紀中頃以降は分布に変化が殆どなくなるが、この気候シナリオでは CO₂ 濃度上昇に伴う気温上昇が 21 世紀中頃でほぼ停止するためである。RCP8.5 は CO₂ 濃度上昇が大きく、増収量が特に大きく予測されている。また、地域性が不明瞭であり、全国殆ど全ての地域において大幅な増収が予測されている。なお、RCP2.6、RCP8.5 とも 20 世紀末の一時期に北日本の一部の地域でやや減収が予測されているが、気候予測でこの期間に一時的な温度低下が予測されているためである。

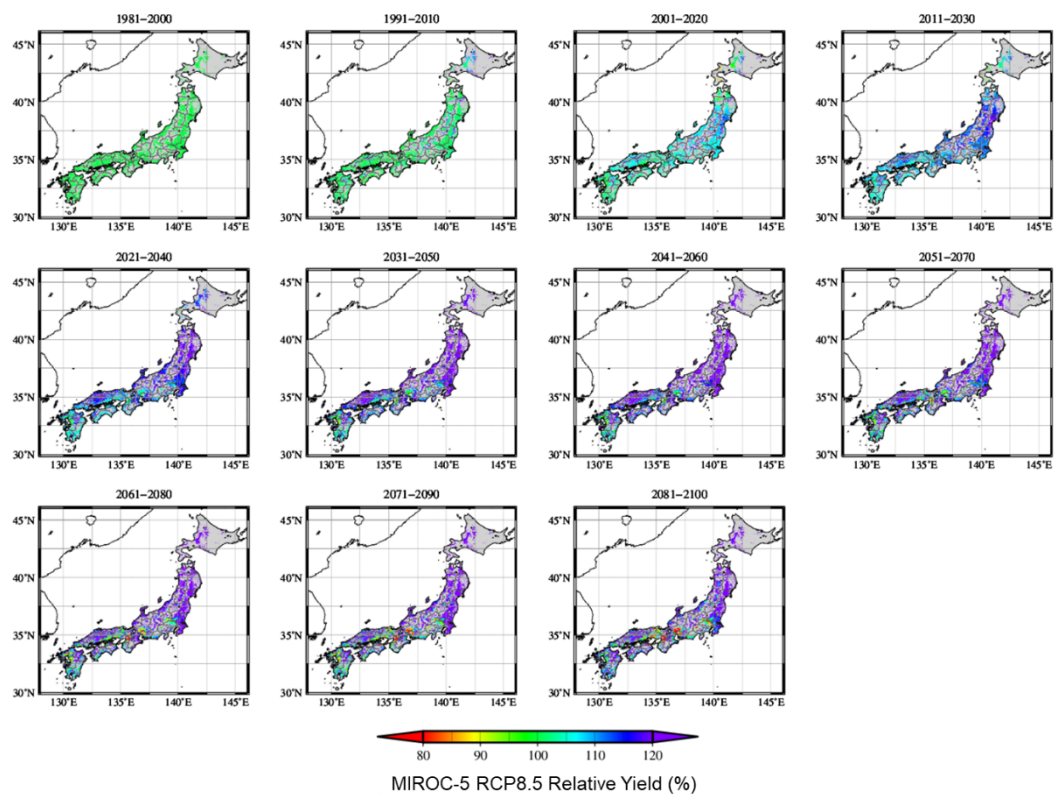
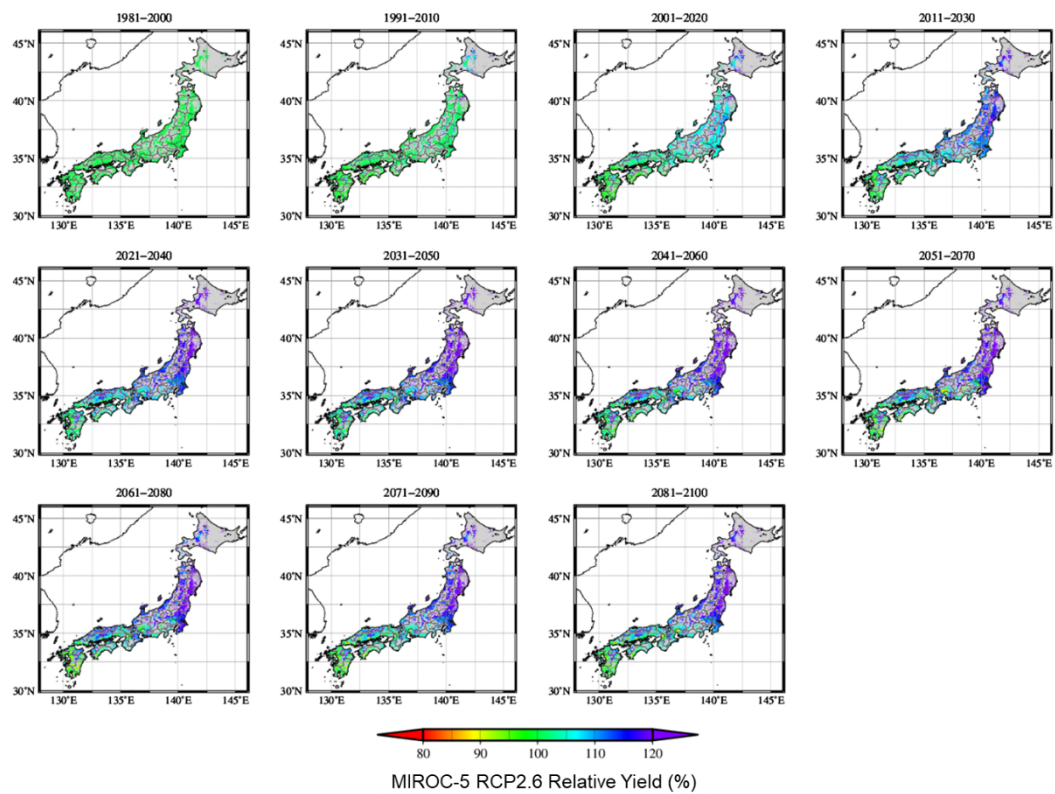


図 4.4-1 10 年ごとの 20 年平均収量（相対値）推移（MIROC-5）
（上：RCP2.6，下：RCP8.5）

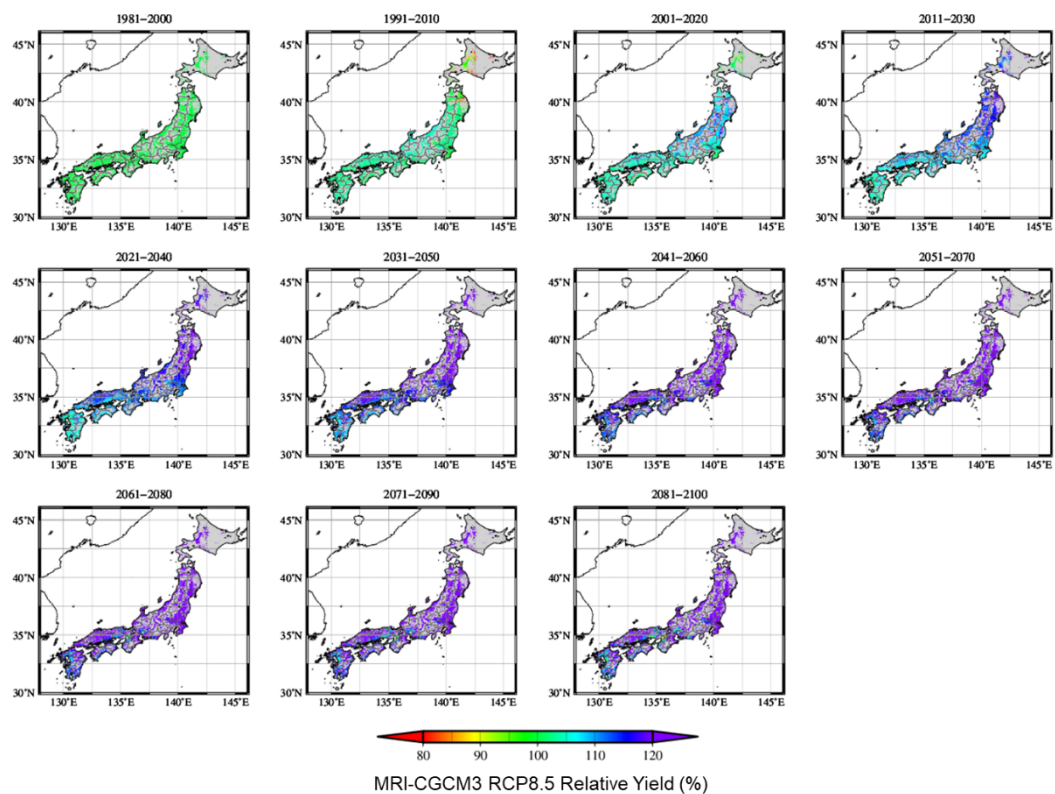
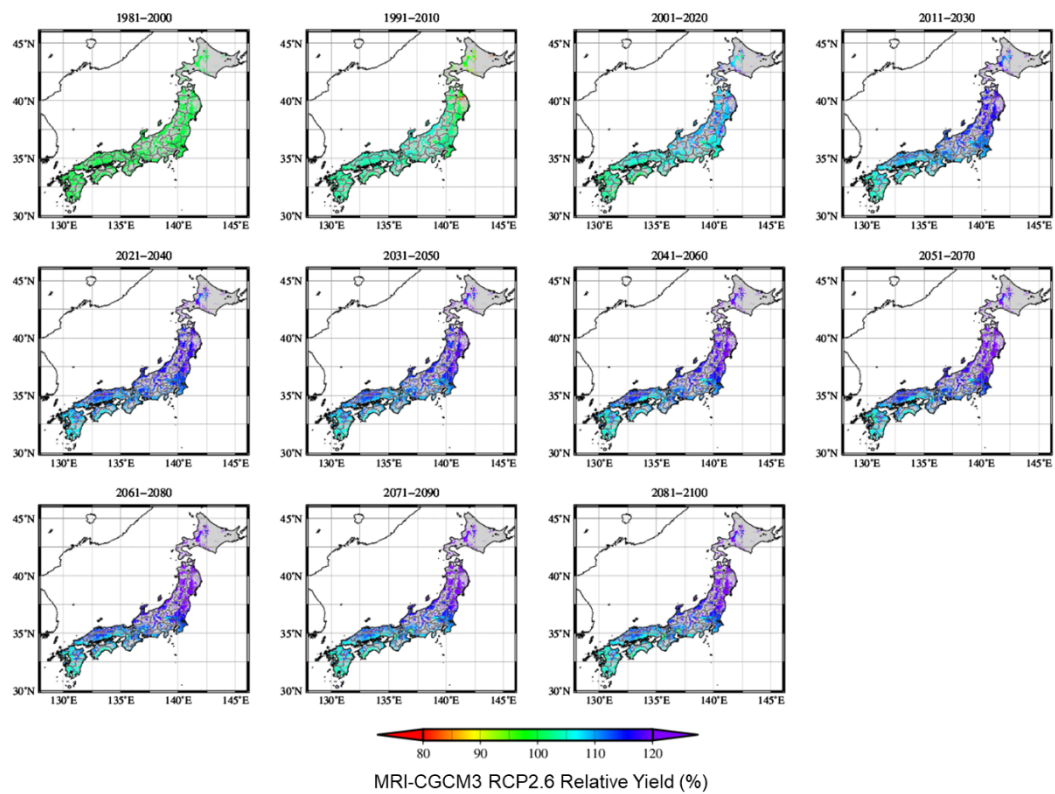


図 4.4-2 10 年ごとの 20 年平均収量（相対値）推移（MRI-CGCM3）
（上：RCP2.6，下：RCP8.5）

品質を表す指標として導入した高温に因る品質低下リスク指標（HD_m26）についても収量と同様に、2GCM×2RCP による、HD_m26 の 10 年ごとの 20 年平均値の分布図を図 4.4-3、図 4.4-4 に示す。なお、HD_m26 は気温のみにより算定される指標であり、その他の気象要素や CO₂ 濃度が算定値に影響することはない。

MIROC5（平均的温度上昇）による算定値（図 4.4-3）では、どちらの RCP においても、年代が進むにつれて HD_m26 が高い値を示す（品質低下において高リスクである）地域が拡大する傾向が認められる。ClassC 相当の 40°C 日以上の領域は、RCP2.6 では、2021～2040 年に東海地方内陸や近畿地方の一部で出現し、21 世紀中頃にかけて関東地方内陸や東海地方沿岸に拡大するが、その後は大きな変化は見られなくなる。一方 RCP8.5 では、21 世紀中頃までは RCP2.6 とほぼ同様な分布特徴を示すが、その後出現範囲は拡大を続け、2051～2070 年には北陸地方から一部東北日本海側まで拡大し、21 世紀末には北海道と山間部高標高地域を除く殆どの地域まで拡大すると算定された。

MRI-CGCM3（最小温度上昇）による算定値（図 4.4-4）では、HD_m26 の値の増加傾向は認められるが、高温による品質低下リスクが高くなる地域は 21 世紀中頃までは両 RCP とも関東、北陸から西の平野部や盆地に限定される。また、平均的に気温が高い九州地方において、HD_m26 の値が想定的に小さい傾向が認められるが、これは九州地方の移植時期が遅いため出穂期も遅いことに加え、感光性品種であるため温度上昇による出穂期の早期化も顕著ではなく、登熟期が高温のピークよりかなり遅くなることが主な理由として考えられる。21 世紀中頃以降、RCP2.6 においては、ClassC 相当の 40°C 日以上の領域の出現は期間を通して非常に少なく、関東地方と東海地方の内陸平野部に限定される。RCP8.5 については、21 世紀中頃以降出現範囲は急激に拡大し、21 世紀末には北海道と東北地方太平洋側の一部を除いた全国の平野部に拡大すると算定された。

なお、HD_m26 は出穂日を起点に算出されるため、同じ温度上昇条件（同一年平均気温）においても出穂のタイミングによって結果が大きく異なる場合がある。特に北日本の品種は感温性が高いため、出穂期までの発育が早まることで出穂以降の登熟期が高温のピーク期を回避できる可能性も考えられる。

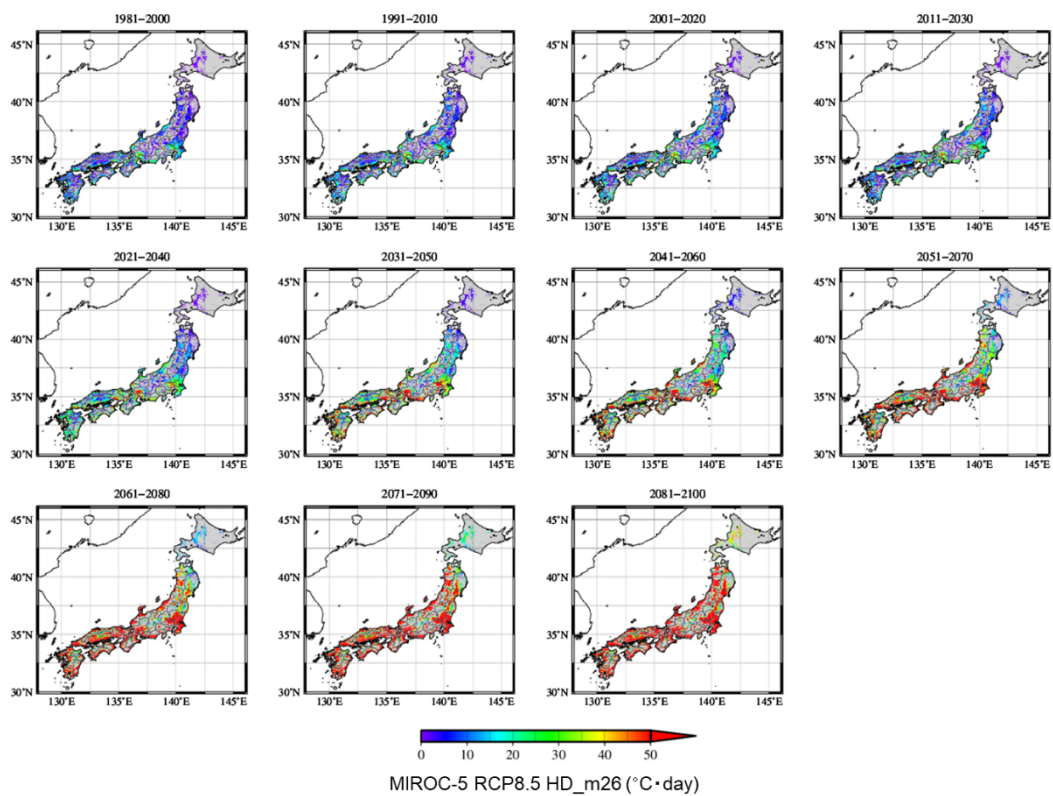
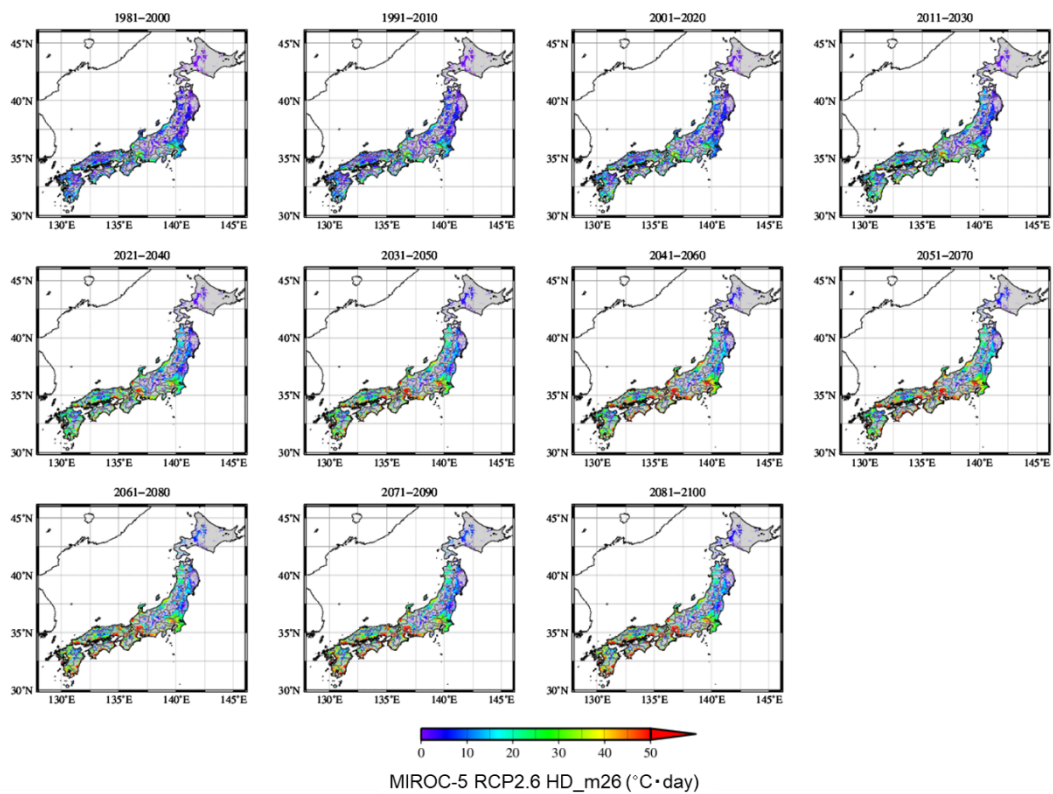


図 4.4-3 10年ごとの20年平均高温ストレス指標 (HD_m26) の推移 (MIROC5)
(上 : RCP2.6, 下 : RCP8.5)

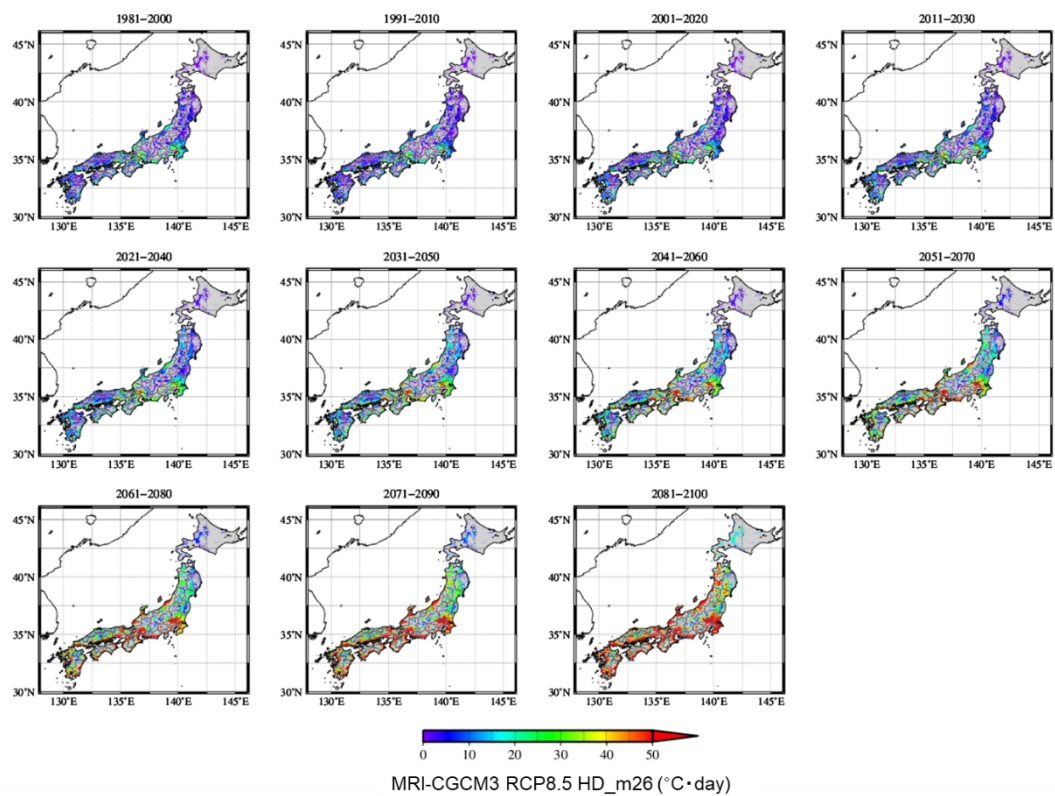
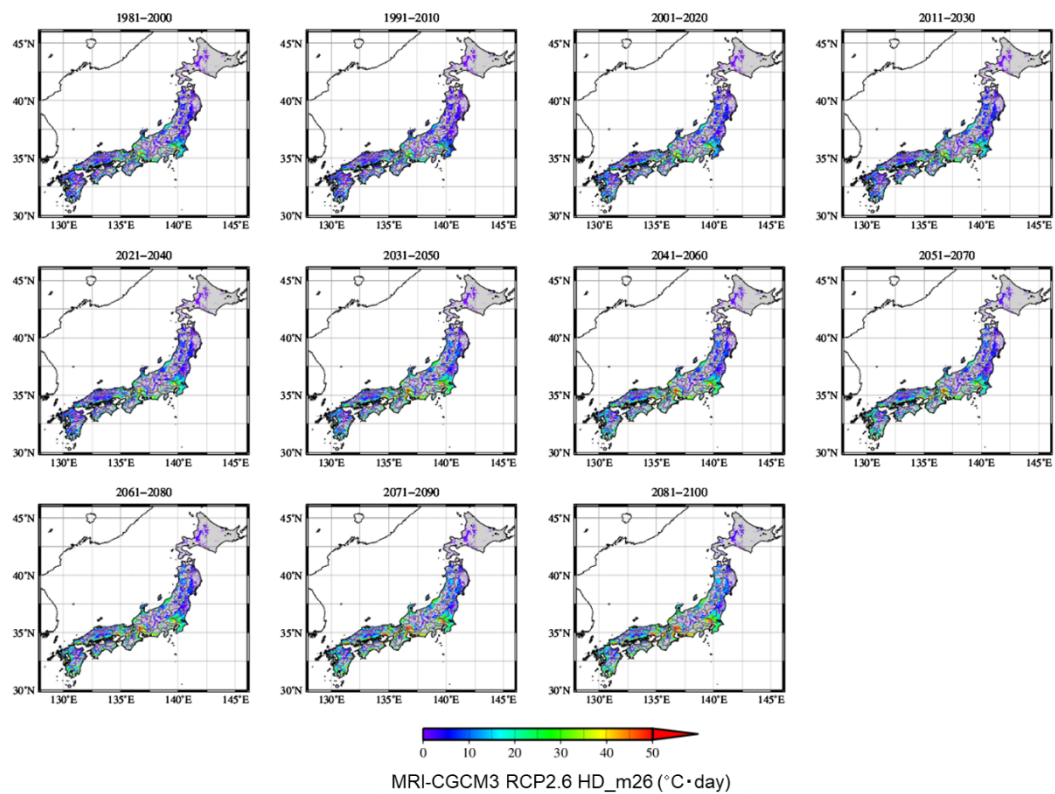


図 4.4-4 10 年ごとの 20 年平均高温ストレス指標 (HD_m26) の推移 (MRI-CGCM3)
(上 : RCP2.6, 下 : RCP8.5)

(ii) モデル自治体（香川県）における影響評価

1) 概要

本事業では、モデル自治体として香川県との連携により、自治体スケールでの影響評価を試行した。香川県は四国の北東部に位置し、北は瀬戸内海に面し、南には讃岐山脈が連なる。標高は北部に広がる讃岐平野で低く、南ほどに向かって標高が高くなる。気候は温暖で降水量が少なく、典型的な瀬戸内式気候に属する。水田は讃岐平野を中心に広く分布するが、水資源に恵まれないため、ため池が数多く点在する。気温は標高に対応し、標高の低い北部ほど高く、標高の高い南部ほど低いという特徴が見られる。

香川県においてコメは全耕地面積の 80%以上を占める主要な作物であり、変動気候条件下における安定生産は重要な課題である。近年（特に 1990 年代以降）の全国的な夏季の高温傾向により、香川県においても影響が既に顕在化している。特に高温に因る品質低下が深刻である。香川県農業試験場提供による資料によると、1990 年代以降の 9 月の平均気温は一貫して上昇傾向にあり、それに伴い香川県産の 1 等米比率が顕著に減少している。1 等米比率の経年変動の要因は、気象災害（冷害、洪水、台風、潮風等）や病虫害、不適切な肥培管理等多種多様であるが、登熟期の高温に因る登熟不良は近年顕著に表れている品質低下の最も主要な要因であるといえる。

香川県の主要作付品種は、直近の令和元年産ではコシヒカリが最も多く、4,800ha で全体の 40%であり、第 2 位がヒノヒカリで 3,750ha (31.3%)、第 3 位がおいでまいで 1,610ha (13.4%)、第 4 位があきさかりで 620ha (5.2%) となっている。おいでまいは香川県のオリジナル育成品種であり、ヒノヒカリが近年高温傾向により白未熟粒が多発していたことへの対策として育成された。おいでまいは高温耐性を持ち且つ良食味であることから、県としてもブランド化に向けた取り組みを強化しており、作付面積は増加傾向にある。また第 4 位のあきさかりは多収品種であり、業務用として最近急激に増加している（以上、香川県農業再生協議会資料「香川県水稻の生産振興方針」より）。

2) 手順

以上の地域的特徴を踏まえ、香川県を対象としたコメの気候変動影響評価を実施することとする。全国評価における香川県の計算条件は、品種は 2000 年時点での最多品種であるヒノヒカリであり、基準移植日は 6 月 10 日としている。ここでは、近年の香川県の作付の実態に合った作型を計算条件として、影響評価を実施することとした。香川県は気候が温暖であり、また二毛作（小麦、野菜）も実施されていることから、コメの作型は比較的多様である。主な作型としては、早期作（主に、コシヒカリ）と普通作（主に、コシヒカリ、ヒノヒカリ、おいでまい）が挙げられる。今回は、香川県農業試験場が実施している水稻作況試験情報を参考に、早期作の移植日を 5 月 1 日に、普通作の移植期を 6 月 20 日とし、それぞれの作型についてモデルによるシミュレーションを実施することとした。各作型は県内全ての水田で同一な栽培が行われることとし、移植日は全県で同一日とした。

ここで、コシヒカリとヒノヒカリについては H/H モデルが対象とする主要 15 品種に含まれているが、おいでまいについてはパラメータセットが現状では得られていない。そのため、作況試験等の統計資料を用いてパラメータの最適化を実施する必要があるが、おいでまい

の栽培実績は比較的短く統計処理に必要な十分な資料が得られないことから、次善の策として、既に得られている主要 15 品種の中で、最も推定誤差が小さいパラメータセットで代用することとした。入手した統計資料（奨励品種決定調査データ）と気象資料（農環研 3 次メッシュ気象値：アメダスメッシュ化データ（清野, 1993））を用い、与えられた移植日から各品種のパラメータセットを使用して出穂日を算定し、実測の出穂日を用いて推定誤差を算出した。その結果、ヒノヒカリのパラメータセットを使用した場合に最も推定誤差が小さくなった。したがって、今回おいでまいの影響評価計算には、ヒノヒカリのパラメータセットを使用することとした。なお、普通作のヒノヒカリについても計算を実施することから、必要に応じてヒノヒカリの計算結果をおいでまいの結果に置き換えることとする。本業務では、以下のとおり 3 種類の作型を設定し、それぞれについて計算を実施した。

- ◆作型 1（早期）： 移植日：5 月 1 日 品種：コシヒカリ
- ◆作型 2（普通期）： 移植日：6 月 20 日 品種：コシヒカリ
- ◆作型 3（普通期）： 移植日：6 月 20 日 品種：ヒノヒカリ（おいでまい）

3) 結果

3-1) 収量および品質の推移

それぞれの作型における計算結果について、品質低下リスクにより区分された生産量の全県集計値の 5 年ごとの 20 年平均値（現在：1981～2000 の全生産量を基準とした相対値）の 21 世紀中頃までの推移を図 4.4-5～図 4.4-7 に示す。作型 1（図 4.4-5：コシヒカリ早期作）については、全ての気候シナリオにおいて、ClassB および ClassC の割合が高く、高温に因る品質低下リスクが高い作型であることがわかる。特に基準期間である現在においても ClassB および ClassC の割合が高いことが特徴であり、現状でも既に強い高温ストレス化にあるといえる。また年次が進むにつれて温度上昇に伴いこれらの割合は増加し、21 世紀中頃には生産物の殆どが ClassC で占められると算定された。なお、収量については期間をとおしてやや増加するケースが多く、大きな減収は予測されていない。次に作型 2（図 4.4-6：コシヒカリ普通作）については、作型 1 の場合と比較して全体的に ClassB および ClassC の割合は小さく、気温上昇が始まる以前の状態においては品質低下に繋がる高温ストレスは大きくないといえる。但し、21 世紀中頃にかけて気温の上昇が大きくなると、それに伴い ClassB および ClassC の割合が大きくなり、21 世紀中頃に達すると気温上昇の大きい気候シナリオでは生産物の殆どが ClassC で占められると算定された。作型 3（図 4.4-7：ヒノヒカリ普通作）においては、全体的に ClassA の割合が高く、また 21 世紀中頃にかけての気温上昇条件においても一部の温度上昇の大きいシナリオを除き ClassB および ClassC の割合はあまり大きくはならない。これは、同一移植日条件においても、発育特性における早晩性が中生であるヒノヒカリは、早生であるコシヒカリと比較して、出穂期は遅くなるため、品質に敏感な登熟期間前期の気温が高温のピークの後になるためである。また、ヒノヒカリは感光性が強く、気温上昇に対する発育期間の短縮が明瞭でないことも原因の一つであると推察される。

作型1

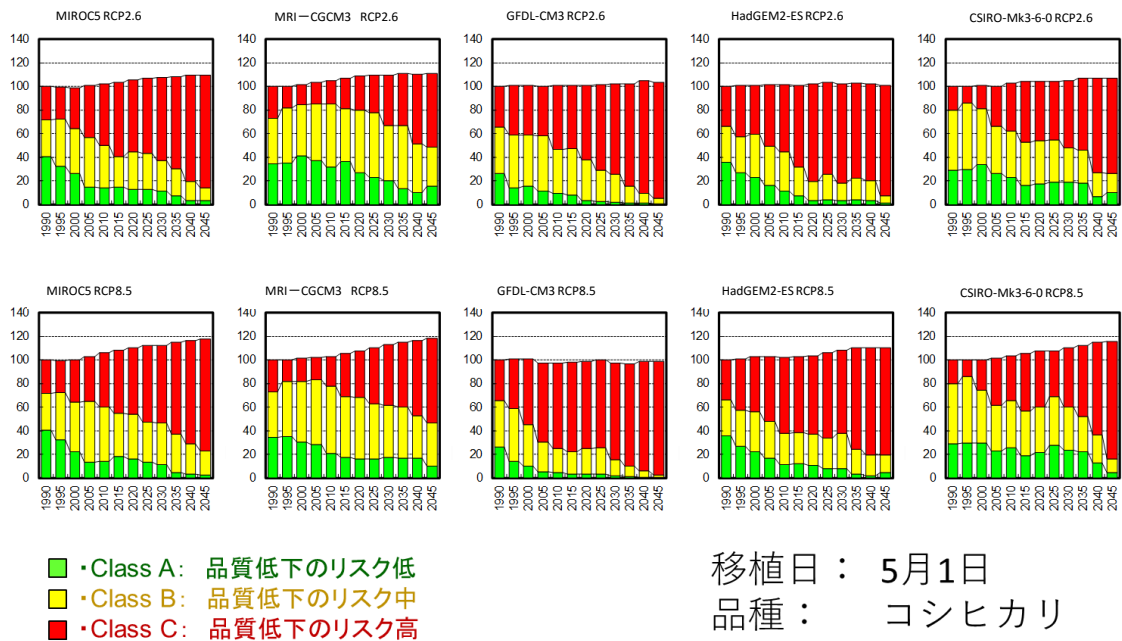


図 4.4-5 各気候シナリオによる5年ごとの20年平均生産量（現在を基準とした相対値）と品質低下リスクにより区分された生産量割合の推移（作型1）

作型2

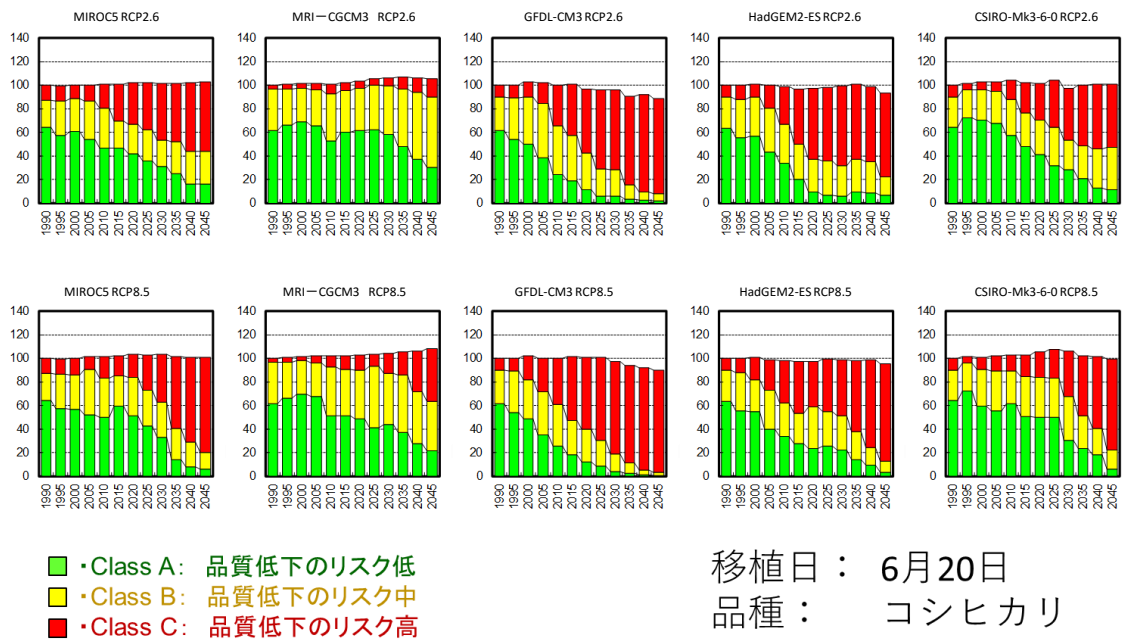


図 4.4-6 各気候シナリオによる5年ごとの20年平均生産量（現在を基準とした相対値）と品質低下リスクにより区分された生産量割合の推移（作型2）

作型3

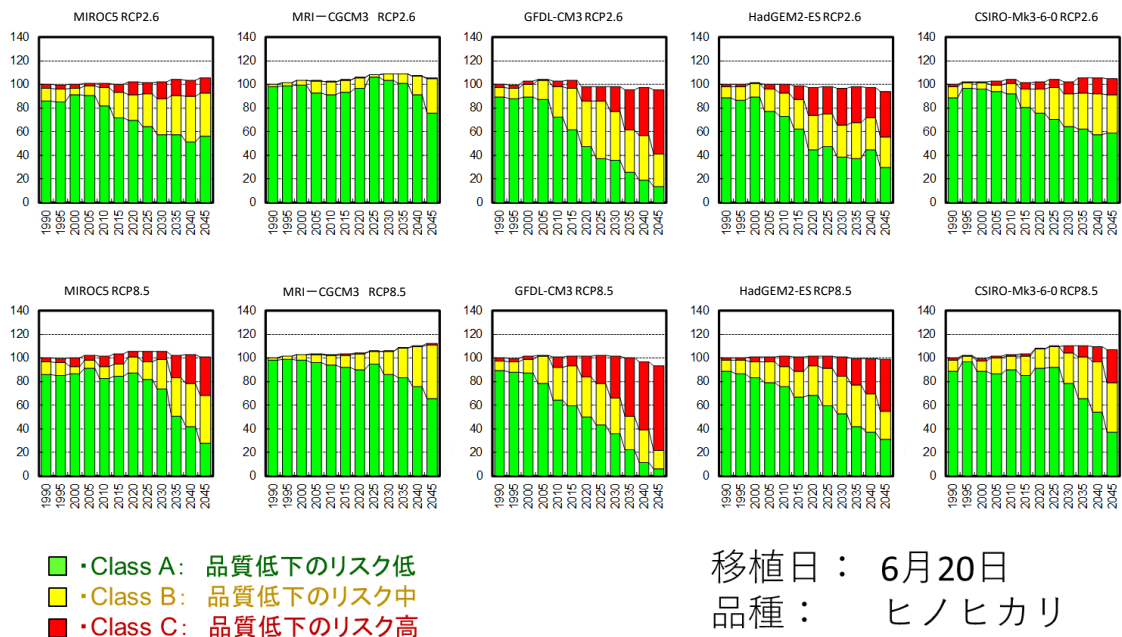


図 4.4-7 各気候シナリオによる5年ごとの20年平均生産量（現在を基準とした相対値）と品質低下リスクにより区分された生産量割合の推移（作型3）

3-2) 気候シナリオによる算定幅

各作型について入力気象データの幅による生産量予測の不確実性を見るため、異なる5種の気候モデルによるRCPごとの生産量算定値（右：全生産量、左：ClassAのみの生産量）の幅とその推移（21世紀末まで）を図に示す（上段の箱ひげ図は、最小値、第1四分位値、中央値、第3四分位値、最大値を表す）。作型1（図4.4-8：コシヒカリ早期作）では、全生産量は21世紀中頃までは増加傾向であり、特にRCP8.5で顕著である。その後21世紀末にかけては減少傾向となるが、RCP8.5では気候シナリオごとの算定幅が非常に大きくなった。特に温度上昇の大きい気候シナリオ（GFDL-CM3およびHadGEM2-ES）で、21世紀中頃に生産量が大きく減少すると予測された。ClassAの生産量は、21世紀初頭から既に極めて少なく、両RCPとも21世紀中頃以降は殆ど0に近くなると予測され、期間を通して気候シナリオによる算定幅は小さく不確実性は小さいといえる。作型2（図4.4-9：コシヒカリ普通作）の場合、全生産量はRCP2.6で期間を通して変化は小さく算定幅も小さいが、RCP8.5では21世紀中頃以降多くの気候シナリオで減収が予測され、また算定幅が大きく予測の不確実性は大きいといえる。ClassAの生産量は、全ての気候シナリオにおいて21世紀初頭から21世紀中頃にかけて大きく減少するが、気候シナリオによる算定幅は大きく予測の不確実性は大きい。21世紀中頃以降は非常に少なくなり、特にRCP8.5では0に近い値となる。作型3（図4.4-10：ヒノヒカリ普通作）では、全生産量については作型2とほぼ同様な特徴を示し、RCP2.6で変化と算定幅が小さく、RCP8.5で21世紀中頃以降に減少し算定幅は大きい。ClassAの生産量は、21世紀初頭ではどの気候シナリオでも多く算定され、算定幅も小さい。その後21世紀中頃にかけて減少するが算定幅は非常に大きく予測の不確実性は非

常に大きい。その後 21 世紀末にかけては、RCP2.6 ではそれまでの傾向が継続するが、RCP8.5 では急激に減少し世紀末には全ての気候シナリオによる予測で 0 に近くなる。

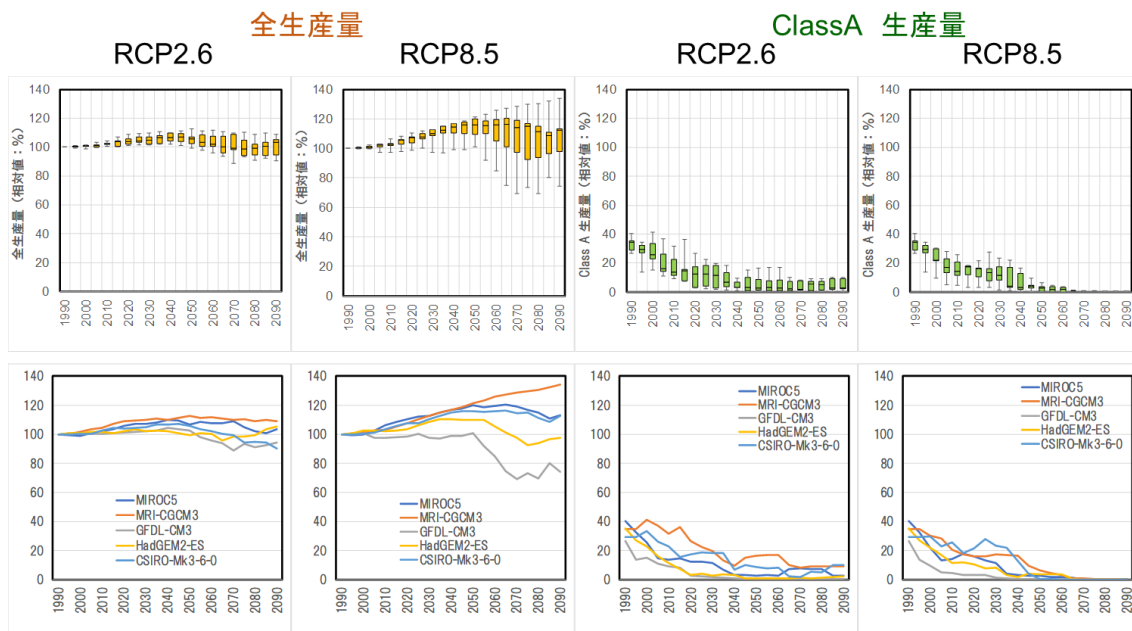


図 4.4-8 作型 1 における、5 年毎の 20 年平均全生産量（左）および ClassA の生産量（右）の推移と 5 種類の気候モデルによる算定幅（値は現在の全生産量を 100 とした相対値、箱ひげは最小値、第 1 四分位値、中央値、第 3 四分位値、最大値を表す）

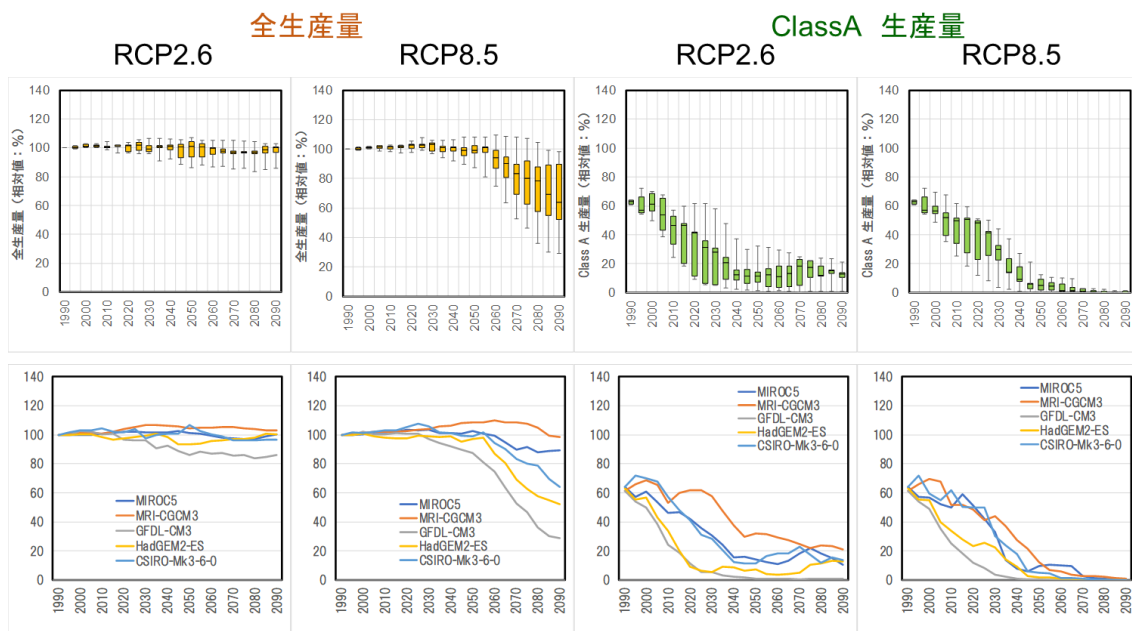


図 4.4-9 作型 2 における、5 年ごとの 20 年平均全生産量（左）および ClassA の生産量（右）の推移と 5 種類の気候モデルによる算定幅（値は現在の全生産量を 100 とした相対値、箱ひげは最小値、第 1 四分位値、中央値、第 3 四分位値、最大値を表す）

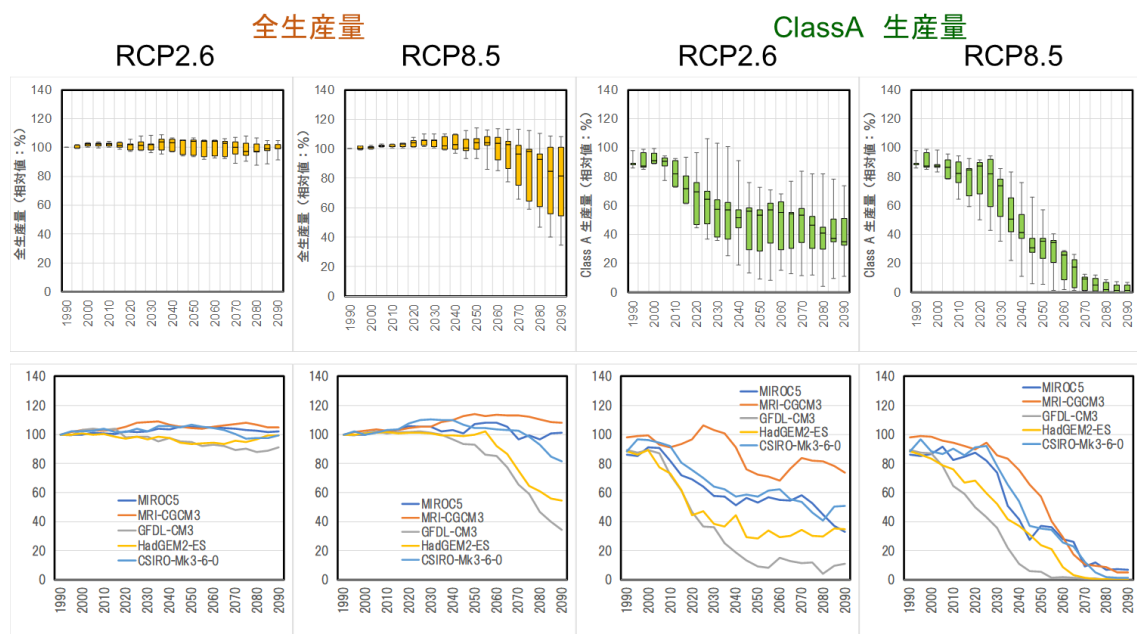


図 4.4-10 作型 3 における、5 年ごとの 20 年平均全生産量（左）および ClassA の生産量（右）の推移と 5 種類の気候モデルによる算定幅（値は現在の全生産量を 100 とした相対値、箱ひげは最小値、第 1 四分位値、中央値、第 3 四分位値、最大値を表す）

3-3) 予測マップ

H/H モデルにより算定された、各作型における基準期間（現在：1981-2000）の収量（玄米収量）の香川県内の分布の例として、気候モデル MIROC-5 による玄米収量算定結果を、図 4.4-11 に示す。3 つの作型において、作型 1（コシヒカリ早期作）が最も多収であり、概ね 600～650 kg/10a の範囲である。地域分布をみると、海岸沿いや島しょ部で比較的多い特徴がみられる。作型 2（コシヒカリ普通作）および作型 3（ヒノヒカリ普通作）においては作型 1 と比較してやや少なく、概ね 500～550 kg/10a の範囲である。作型 1 の場合には生育初期から栄養成長期までの気温が低いいため生育期間が長く、光合成によるバイオマス生成が十分であることに加え、出穂後成熟までの期間において日射が多いため、収量は比較的多くなる。一方、作型 2 の場合には生育初期から気温が高いため発育が早く、バイオマスが十分に生成される前に出穂期に達してしまうため、収量が比較的小さくなる。作型 3 の場合には、ヒノヒカリは感光性が強く温度が高くても発育期間はあまり短縮しないが、出穂期が 9 月以降になることもあり、登熟期間の日射量が十分でないことが低収量の要因である可能性が考えられた。なお、他の気候モデルによる基準期間の玄米収量算定値もほぼ同値である。

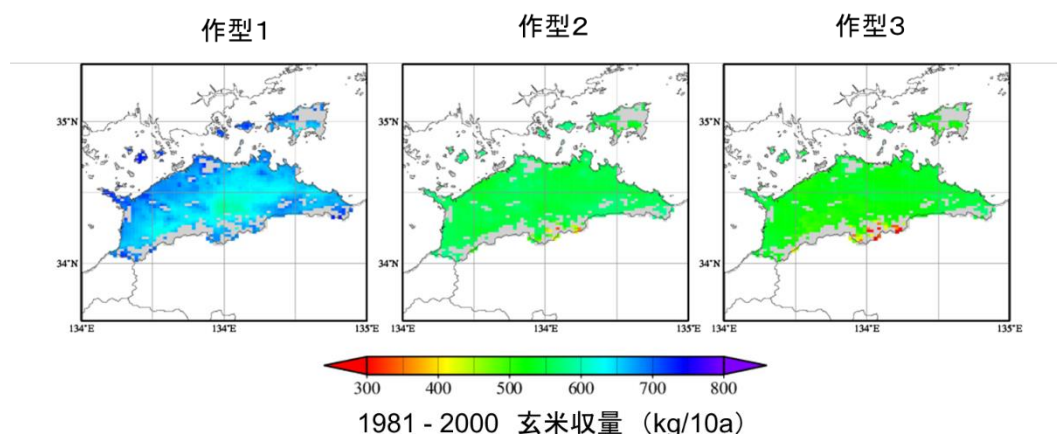


図 4.4-11 基準期間の玄米収量平均値 (MIROC-5 現在)

各作型において、モデル計算により得られた各気候シナリオによる各年の収量算定値から5年ごとに20年平均値を算出し、図 4.4-11 に示される作型ごとの基準期間（現在：1981-2000 年）の平均収量を基準とした相対収量を算定した。例として、MIROC-5 の RCP2.6 および RCP8.5 による各作型における相対収量について、図 4.4-12 に 2011～2030 年、図 4.4-13 に 2031～2050 年（以後、“21 世紀中頃”）の算定結果を示す。図 4.4-12 より、2011～2030 年においては現在と比較して、全体的に収量はやや増加した傾向が認められる。これは、僅かではあるが現在より CO₂ 濃度が上昇したことが主要因と考えられる。なお、作型 2 および作型 3 において南部の山間部の一部で収量が大きく増加しているが、この地域は地形が複雑でありメッシュ標高値とメッシュ内水田標高に差があることで入力気温データに低温バイアスがあり、基準期間における平均収量が低目に算定されていることが原因である可能性が高い。図 4.4-13 の 21 世紀中頃における結果では、収量の増加はさらに進行し、特に作型 1 において RCP8.5 による増収が顕著にみられる。

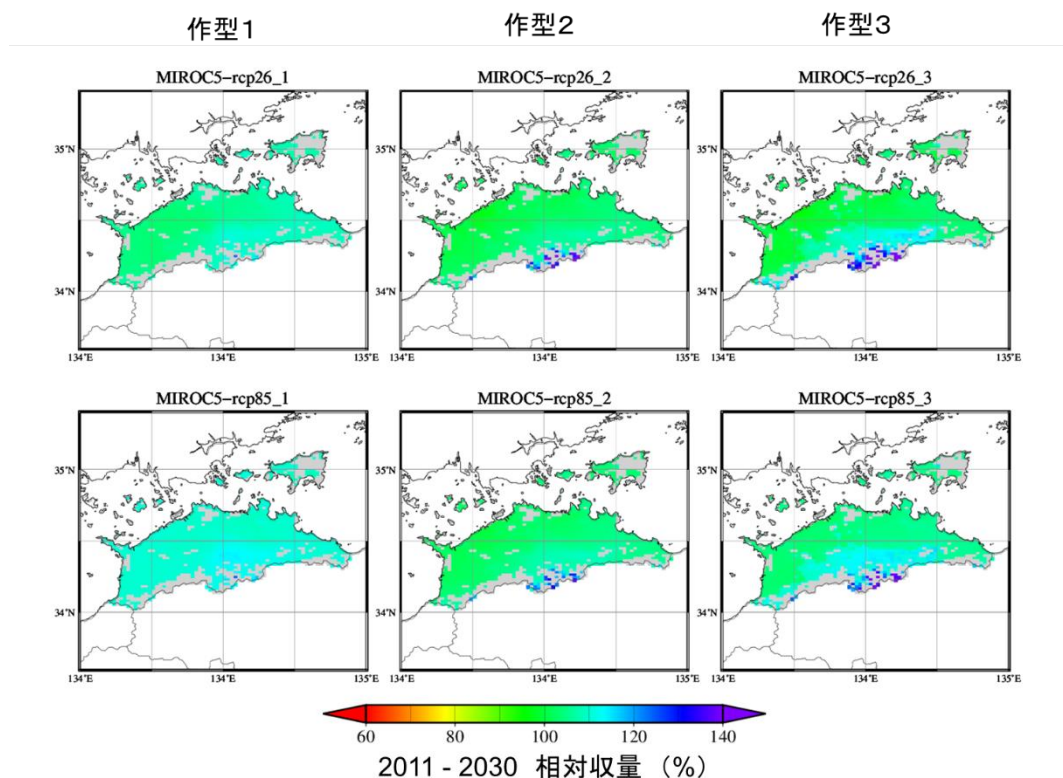


図 4.4-12 各作型における 20 年平均相対収量分布図 (MIROC-5 2011-2030 年)
基準期間 (現在) の平均に対する相対値 (%)

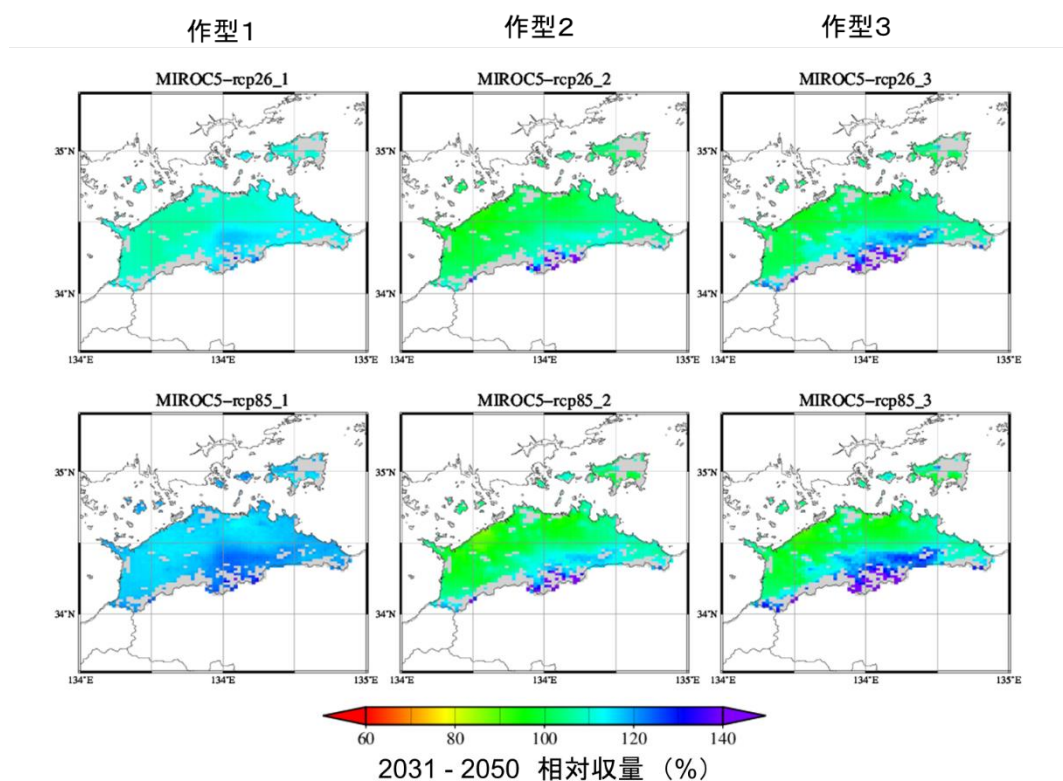


図 4.4-13 各作型における 20 年平均相対収量分布図 (MIROC-5 2031-2050 年)
基準期間 (現在) の平均に対する相対値 (%)

同様に、各作型において、高温に因る品質低下リスク指標として導入した HD_m26 の、

MIROC-5 を使用した基準期間（現在）における 20 年平均値の分布図を図 4.4-14 に示す。算定された値は作型 1 が最も高く、次に作型 2、作型 3 と低くなる。これは、各作型における出穂期が、それぞれ概ね 7 月中～下旬、8 月中旬、8 月下旬～9 月上旬であり、気温の季節変化に対応して登熟期間前期の温度に差が出たためである。特に作型 1 については、基準期間において既に海岸沿いの一部で ClassC に相当する 40℃ 日以上の高い値が出現しており、これらの地域では 20 世紀末から強い高温ストレスを受けていたと推察される。一方作型 3 においては全ての地域が 20℃ 日以下であり、20 世紀末の段階では平均的には高温ストレスを受けていなかったと言える。

次に、2011-2030 年および 21 世紀中頃の各作型における HD_m26 の分布の状況について、それぞれ図 4.4-15 と図 4.4-16 に示す。図 4.4-15 より、現在においては、作型 1 では両 RCP とも 40℃ 日以上の高い値が平野部全体に広がっており、高温による品質低下リスクは深刻な状況にあると推察される。また、作型 2 においても北部の海岸に近い平野部の一部で値が高くなっている。作型 3 においては ClassC に相当する値はまだ出現していないが、ClassB 相当の 20℃ 日以上の値は平野部に広く出現している。図 4.4-16 より、21 世紀中頃においては作型 1 および作型 2 では平野部の殆どが ClassC 相当の 40℃ 日以上の値になることが予測され、これらの作型では品質を重視したコメ生産を行うことは困難になると推察される。作型 3 についても、RCP8.5 においては北部の海岸沿いにおいて高い値が出現するが、その他の広い地域では ClassB 相当のリスクで留まることから、適切な適応技術を導入することで品質低下を回避することが可能であると考えられる。

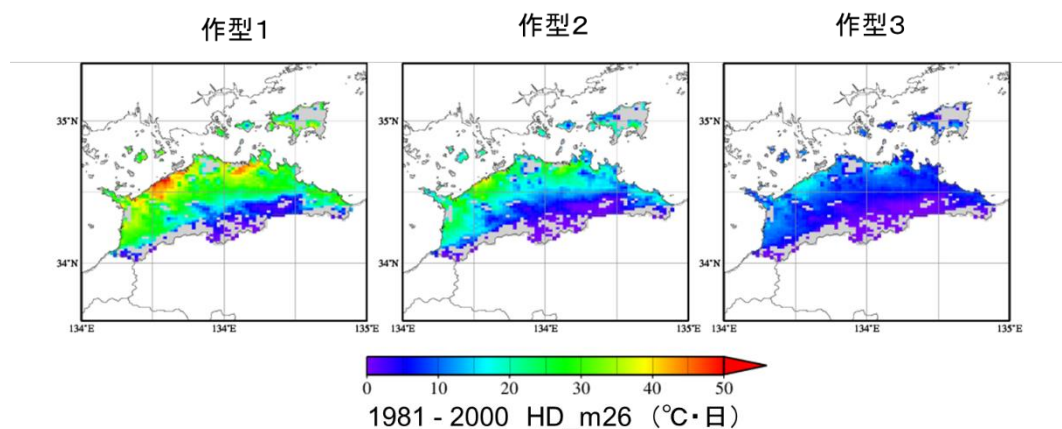


図 4.4-14 各作型における 20 年平均 HD_m26 分布図 (MIROC-5 現在)

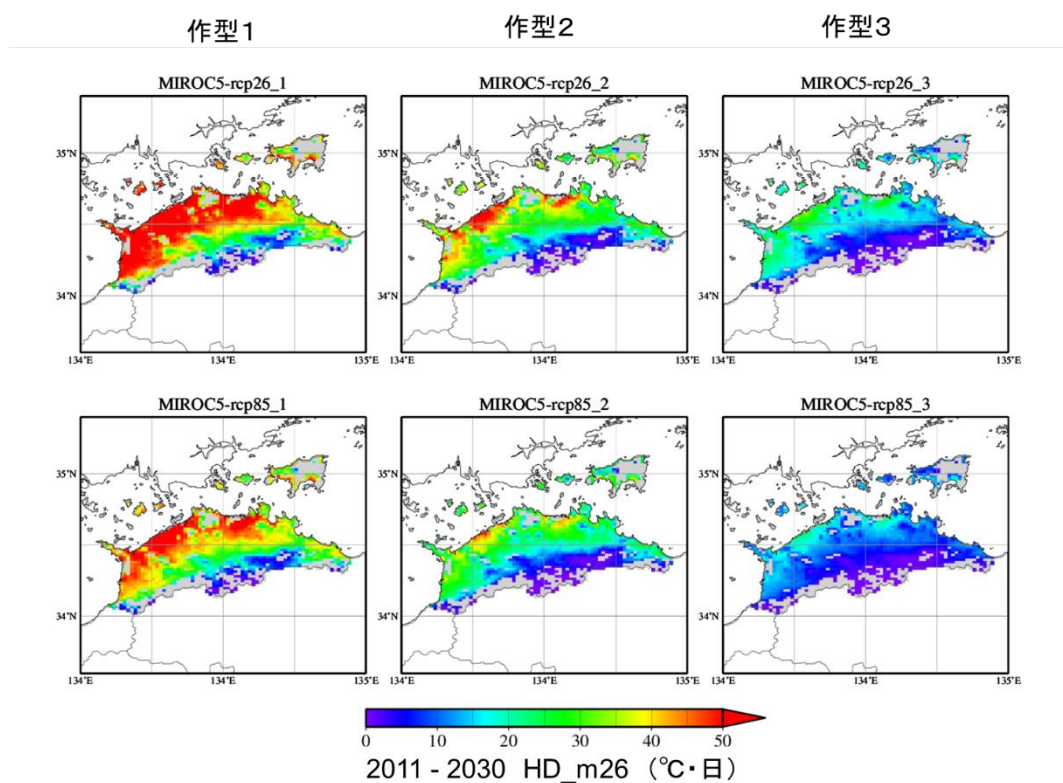


図 4.4-15 各作型における 20 年平均 HD_m26 分布図 (MIROC-5 2011-2030 年)

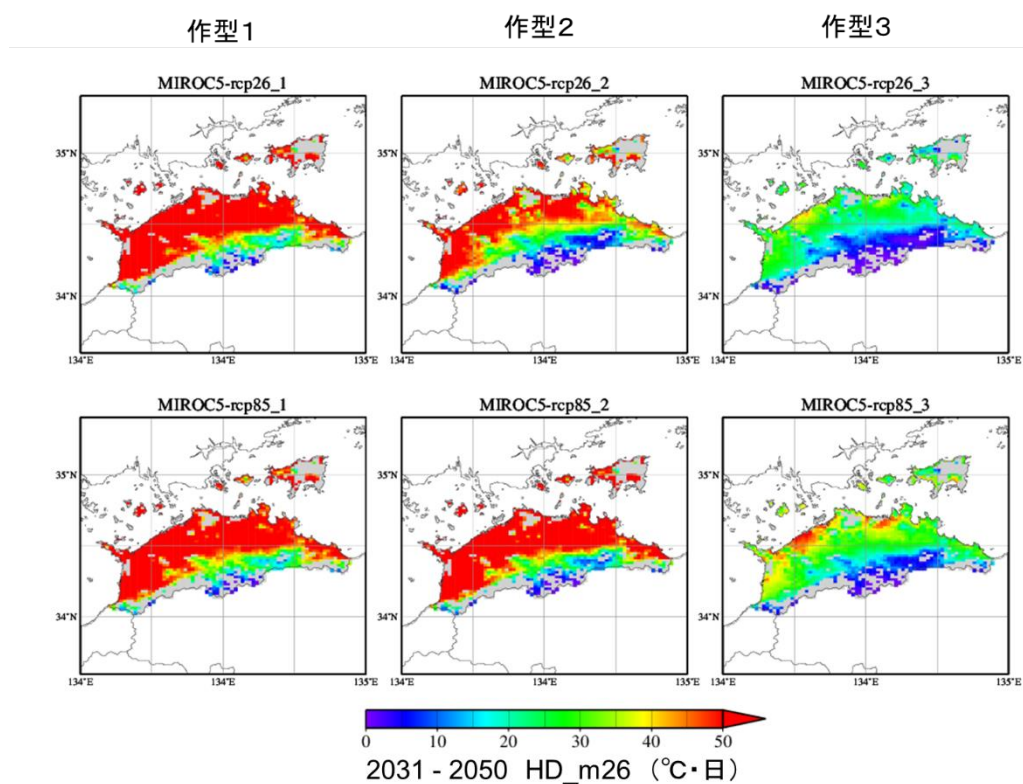


図 4.4-16 各作型における 20 年平均 HD_m26 分布図 (MIROC-5 2031-2050 年)

4.4.5 結果を活用する上での留意点・制限事項

今回算定した収量は、本業務で導入した影響評価モデルによる算定値であり、モデルに含まれていない減収要因（例えば、病虫害や台風等による風水害や潮風害）は考慮されていない。また、影響評価は現行で栽培されている品種で現行の栽培地域に固定しているため、品種の改変（発育特性や高温耐性の異なる品種の導入等）や栽培地域の変更（水田の改廃）による効果の評価は未実施である。水稻の高温、高 CO₂ 環境での応答特性については現在においても不明な点が多く、鋭意研究実施中の部分も多い。特に高温条件下では高 CO₂ 濃度による増収効果が抑制されるとの研究結果もあり（Hasegawa *et al.* 2015）、今回の結果に見られるような将来における収量増加は見込めない可能性も考えられる。影響評価結果の利用にあたっては、以上の事項について考慮する必要がある。

4.5 適応オプション

4.5.1 手順

該当なし。

4.5.2 概要

我が国のコメ生産に対する気候変動影響を回避するための適応技術オプションとして、Morita *et al.* (2016) 等を参考に、以下に示す 3 種の方法について検討した。

表 4.5-1 適応オプション一覧

適応 オプション	想定される実施主体			評価結果							
				現状		実現可能性				効果	
	行政	事業者	個人	普及 状況	課題	人的 側面	物的 側面	コスト 面	情報面 (知見/経 験/データ など)	効果発現 までの時 間	期待され る効果の 程度
適期植え付け	●	●	●	普及が進んでいる	労働力の確保、水利権の調整	△	○	○	◎	短期	中
早晩性の異なる品種	●	●	●	一部で普及	栽培方法、食味、耐病性、耐冷性	○	○	◎	○	短期	低
高温耐性品種	●	●	●	普及が進んでいる	栽培方法、食味、耐病性、耐冷性	○	△	N/A	○	長期	高

表 4.5-2 適応オプションの考え方と出典

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
適期植え付け	年により高温ピークを回避できない
早晩性の異なる品種	年により高温ピークを回避できない
高温耐性品種	育種に長期間を要する

4.5.3 個々の適応オプションに関する説明

①適期植え付け

収量および品質に関して高温に対する感受性の高い時期が、気温の季節変化による高温のピークの時期と重ならないよう、田植えの時期を調整することで高温リスクを回避する方法であり、比較的 low コストで実施できる適応オプションである。収量と品質のどちらを重視するかによって、最適移植日の選定方法が異なる。現状では、高温による品質低下が各地で深刻な問題として顕在化しており、品質に大きく影響する登熟期前半の発育ステージの高温を回避するため、移植時期を現状より遅くする遅植えが奨励されており、一部では既に実施され、一定の成果を上げている。西日本の暖地では、早植え（早期栽培）による高温回避の方法も有効な適応策として考えられている。元々早期栽培は、早い時期の田植えが可能な比較的温暖な地域において、秋の台風や長雨を回避するために行われてきた。また、概ね 8 月中に収穫が完了するため、普通作に先んじて新米を出荷できるというメリットもある。今後予測される温度上昇に対応した適応策として、有効性の検証が必要といえる。

この方法の問題点として、高温ピークの出現期は年により変動するため、必ず高温が回避できるという保証はない。また、高温のピークが遅い年や冷夏年には逆効果になるリスクもある。季節が遅くなるほど登熟期後半に低温の影響を受けやすく、日射量の減少による登熟不良の懸念がある、遅植えの場合には台風被害に遭遇する可能性も高くなる等、別のリスクが増大することにも注意が必要である。

この方法を実施するにあたり、労働力の確保や水利慣行も考慮すべき事項である。特に兼業農家の多い地域では、人手が集まるゴールデンウィーク中に田植えを行っている場合が多く、田植えの時期を変更することが困難な場合もある。適応策の実装を考えるに当たり、導入にかかるコストと生じうるリスクを踏まえ、それぞれの地域特有の実情に即して進めていくことが重要である。

②早晩性の異なる品種

水利権や人手の確保の問題で移植時期の移動が難しい場合、現行品種とは発育特性（早晩性）が異なる品種を導入することで高温を回避できる可能性が考えられる。但し、高温感受性が高い時期をどの程度移動できるかは個々の品種の発育特性のみに依存するため、効果は限定的であると考えられる。また、「適期植え付け」と同様、年により高温が回避できない等のリスクが存在する。

③高温耐性品種

高温環境における栽培においても品質低下等の影響を受けない高温耐性品種への転換は、わが国のコメ生産への高温影響を回避するための最も注目されている適応オプションといえる。現在までに高温耐性と良食味の両方を併せ持つ品種がいくつか開発されており、新しいブランド米として多くの府県で導入が進められている。主な例としては、九州沖縄農研で育成された「にこまる」、山形県の「つや姫」、富山県の「てんたかく」、福岡県の「元気つくし」、熊本県の「くまさんの力」、千葉県の「ふさおとめ」などがあり、高温年においてその耐性が実証されている。これらの新品種の社会認知度も徐々に高まりつつあり、今後普及

拡大が大いに期待される。

他方、いくつかの品種においては病虫害への耐性が不十分との指摘もあり、また低温耐性が弱いと今後も発生が予測されている冷害年に大きな減収となる懸念もあり、安定生産性のための改良の余地は残されている。高温耐性品種の育成には長い時間と手間がかかり、品種の育成が予測される気候変動（気温上昇）のスピードに追いつけるかどうかポイントとなる。また、導入後に産地ブランドとして確立できるかどうか普及にとって重要である。

引用文献一覧

- Ishigooka Y, Kuwagata T, Nishimori M, Hasegawa T, Ohno H (2011) Spatial characterization of recent hot summers in Japan with agro-climatic indices related to rice production. *Journal of Agricultural Meteorology* 67(4): 209–224.
- Ishigooka Y, Fukui S, Hasegawa T, Kuwagata T, Nishimori M, Kondo M (2017) Large-scale evaluation of the effects of adaptation to climate change by shifting transplanting date on rice production and quality in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* 73(4): 156–173.
- Ishigooka Y, Hasegawa T, Kuwagata T, Nishimori M (2020) Evaluation of the most appropriate spatial resolution of input data for assessing the impact of climate change on rice productivity in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* (in press).
- Hasegawa T and Horie T (1997) Modelling the effect of nitrogen on rice growth and development. In *Applications of systems approaches at the field level*. (ed. by Kropff MJ, Teng PS, Aggarwal PK, Bouma J, Bouman BAM, Jones JW, van Laar HH). Kluwer, Dordrecht, pp. 243–257.
- Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Yoshimoto M, Fukuoka M, Nakamura H, Shimono H, Okada M (2015) Rice free-air carbon dioxide enrichment studies to improve assessment of climate change effects on rice agriculture. In *Improving Modeling Tools to Assess Climate Change Effects on Crop Response* (ed. by Hatfield JL, Fleisher D). American Society of Agronomy, Madison, WI USA.
- 西森基貴・石郷岡康史・桑形恒男・滝本貴弘・遠藤伸彦 (2019) 農業利用のための SI-CAT 日本全国 1km 地域気候予測シナリオデータセット (農研機構シナリオ 2017) について. 日本シミュレーション学会誌、38, 150-154.
- 西森基貴・石郷岡康史・若月ひとみ・桑形恒男・長谷川利拡・吉田ひろえ・滝本貴弘・近藤始彦 (2020) 作況基準筆データを用いた近年の日本のコメ品質に対する気候影響の統計解析. 生物と気象、20, 1-8.
- Morita S, Wada H, Matsue Y, 2016: Countermeasures for heat damage in rice grain quality under climate change. *Plant Production Science* 19(1), 1–11.