

2025.8.4 令和7年度 農林水産業分科会会合

第2回 S18-2(農林水産業分野を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価)成果活用に向けた勉強会  
【水稻・野菜】

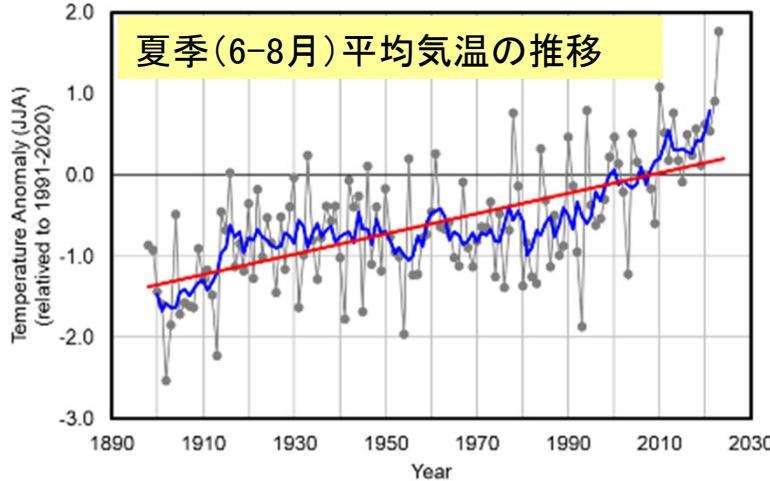
農研機構 Confidential

# 日本の水稻の収量・品質予測と 複数の適応策導入効果

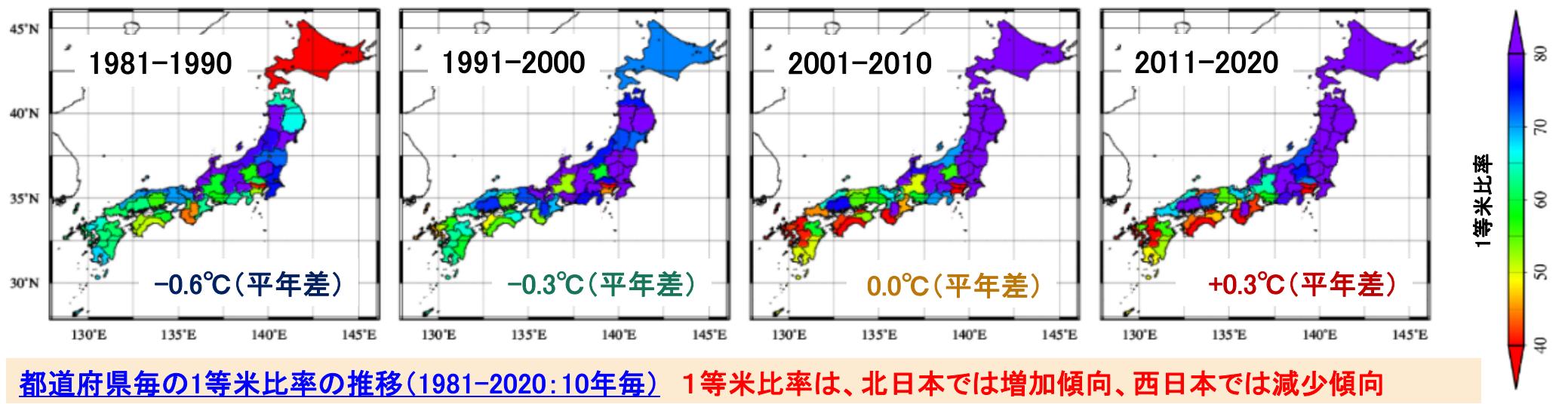
農研機構 農業環境研究部門  
石郷岡 康史

NARO

# 近年の高温傾向と作物への影響



外観品質の低下  
↓  
1等米比率の低下



# 水稻生産影響評価研究の経過（農環研にて実施）



我が国の主食である水稻の生産に対する気候変動影響への関心は高く、継続的に影響評価研究への取り組みがなされている。

|         | ～ 2005           | ～ 2010               | ～ 2015              | ～ 2020                |
|---------|------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
|         |                  |                      |                     |                       |
| 影響評価モデル | 登熟量指数<br>(統計モデル) | PRYSBI<br>(半プロセスモデル) | H/Hモデル<br>(プロセスモデル) | 改良H/Hモデル<br>(プロセスモデル) |
| 気候シナリオ  | IS92a            | SRES                 | SRES, RCP           | RCP                   |
| 影響指標    | 潜在収量             | 収量                   | 収量、品質リスク            | 収量、品質                 |
| 計算単位    | 二次メッシュ(10km)     | 都道府県                 | 二次メッシュ(10km)        | 三次メッシュ(1km)           |
| 適応策     | 作期移動             | 作期移動、高温耐性            | 作期移動、(品種変換、高温耐性)    | 地域のニーズに応じた多様な適応オプション  |

IPCC報告書

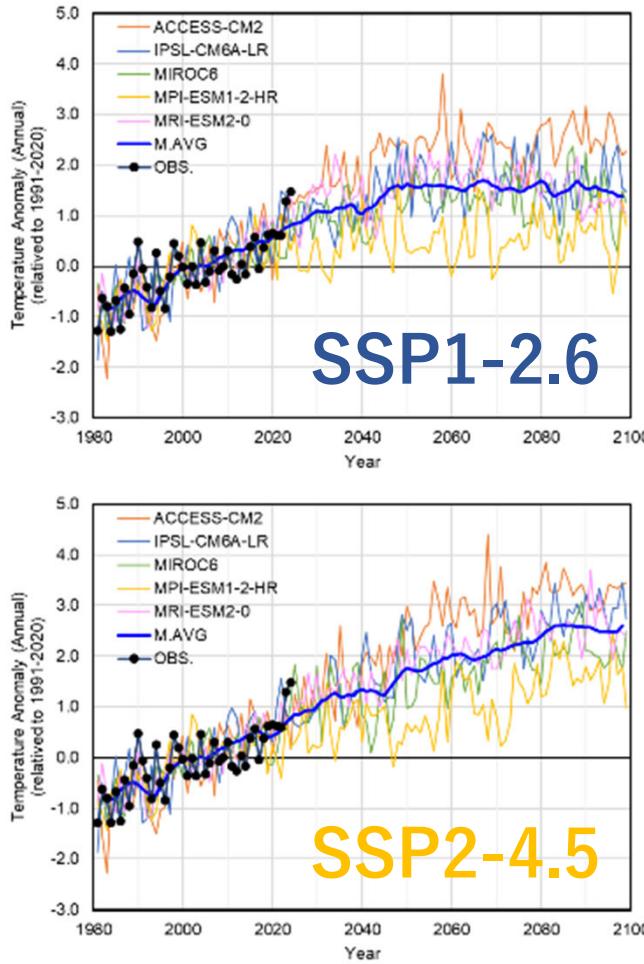
第3次(TAR)

第4次(AR4)

第5次(AR5)

第6次(AR6)

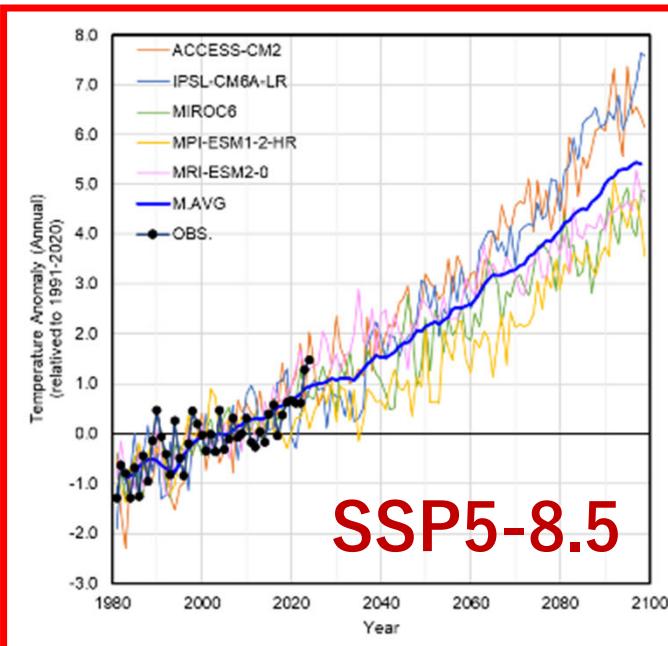
# 気候変動予測 (NIES2020\_CMIP6)



## 日本陸域の年平均気温の推移（1981-2100）

3種のGHG排出経路 (SSP) における5種類の気候モデル (GCM) による予測値、および観測値（気象庁）

石崎 紀子, 2021: CMIP6をベースにしたCDFDM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ(NIES2020) , Ver.1, 国立環境研究所, doi:10.17595/20210501.001.  
(参照: 2021/07/07)



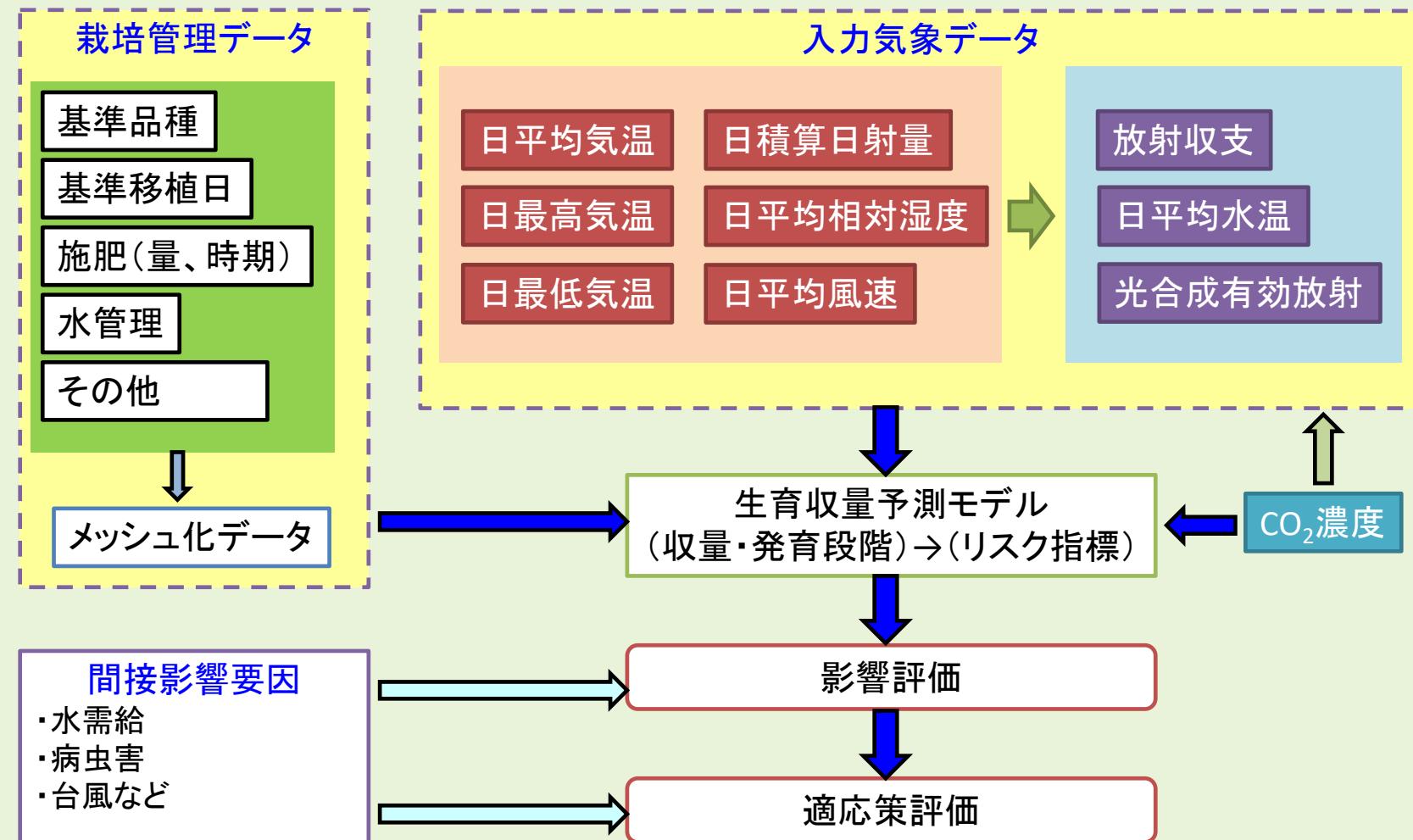
IPCC 第6次評価報告書における  
SSPシナリオとは

| シナリオ     | シナリオの概要  | 近いRCPシナリオ <sup>†</sup><br>代替案シナリオ |
|----------|--|-----------------------------------|
| SSP1-1.9 | 持続可能な発展の下で<br>気温上昇を1.5°C以下におさえるシナリオ<br>21世紀末まで気温上昇(工業化の基準)を<br>1.5°C以下に抑えめる政策を導入<br>21世紀半ばにCO <sub>2</sub> 排出量ゼロの見込み | 該当なし                              |
| SSP1-2.6 | 持続可能な発展の下で<br>気温上昇を2°C未満におさえるシナリオ<br>21世紀末まで気温上昇(工業化の基準)を<br>2°C未満に抑える政策を導入<br>21世紀後半にCO <sub>2</sub> 排出量ゼロの見込み      | RCP2.6                            |
| SSP2-4.5 | 中道的な発展の下で気候政策を導入するシナリオ<br>2030年まで各國の削減目標(INDC)を実現し排出量上昇に逆行位置する   | RCP4.5<br>(RCP2.6より高)             |
| SSP3-7.0 | 地域対立的な発展の下で<br>気候政策を導入しないシナリオ  | RCP6.0と<br>RCP8.5の中間              |
| SSP5-8.5 | 化石燃料依存型の発展の下で<br>気候政策を導入しない最大排出シナリオ  | RCP8.5                            |

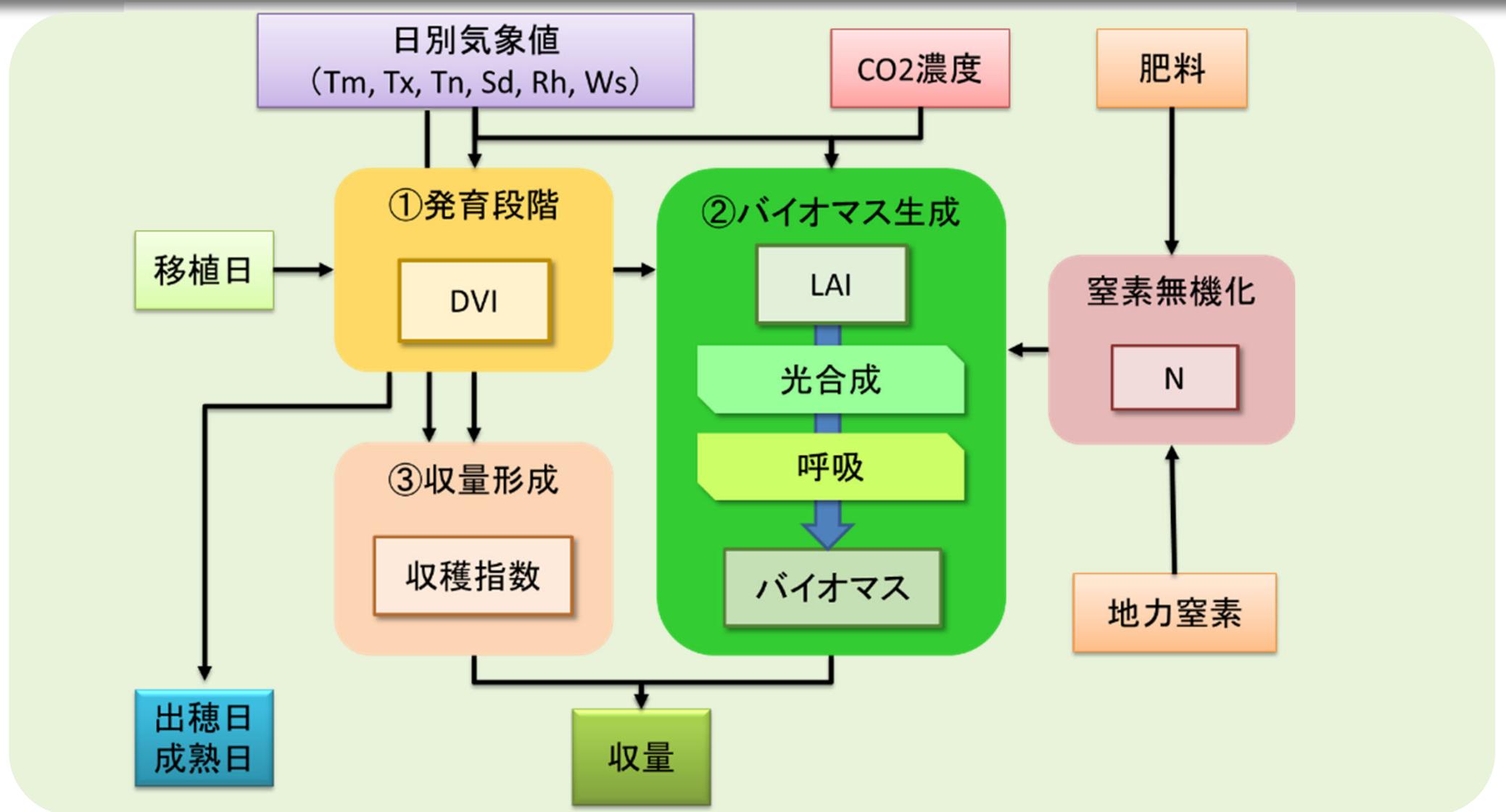
出典:IPCC第6次評価報告書および環境省資料をもとにJCCCDA作成

注) SSP5\_8.5(RCP8.5) : 化石燃料依存型の発展の下で、気候政策を導入しない最大排出シナリオ

# 影響・適応策評価の手順



# 影響予測(水稻生育・収量予測モデル)



# 高温による増収、減収要因のモデル化

$$Y_b = \frac{1}{0.85} HI \cdot W_{ag}$$

$$HI = HI_p \cdot Fd_c \cdot Fd_h \cdot Fd_d$$

$Fd_c = 1 - \gamma_c$  (低温不稔による減収)

$$\gamma_c = \min(\gamma_0 + K_q \cdot Q_t^{ac}, 1)$$

$Fd_h = 1 - \gamma_h$  (高温不稔による減収)

$$\gamma_h = \{1 + \exp(-0.853 \cdot (ATx - 36.6))\}^{-1}$$

$Fd_d = [1 + \exp\{-6.2 \cdot (DVI_3 - 2.29)\}]^{-1}$  (発育遅延による減収)

|          |        |
|----------|--------|
| $Y_b$    | 玄米収量   |
| $W_{ag}$ | 地上部乾物重 |
| $HI$     | 収穫指数   |
| $HI_p$   | 最大収穫指数 |

## 増収要因:

- CO<sub>2</sub>濃度上昇によるバイオマス生成量増加
- 低温不稔や発育遅延による減収の抑制

## 減収要因:

- 発育期間短縮によるバイオマス生成量減少
- 高温不稔の増加

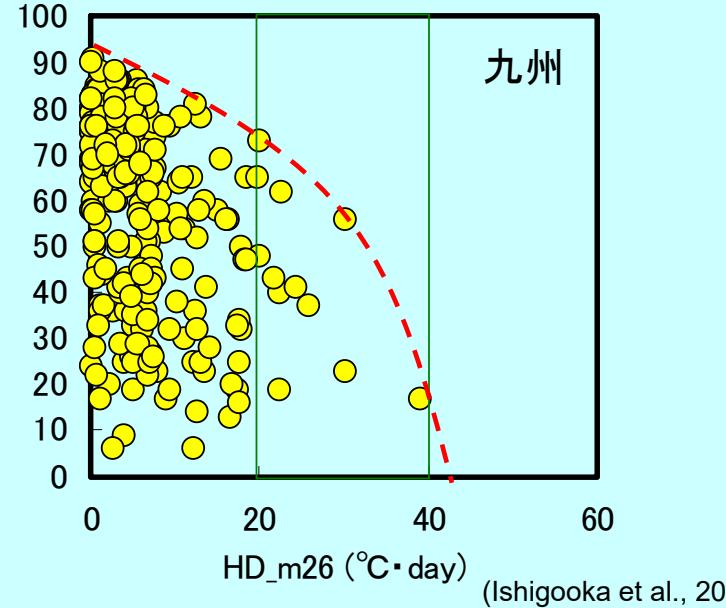
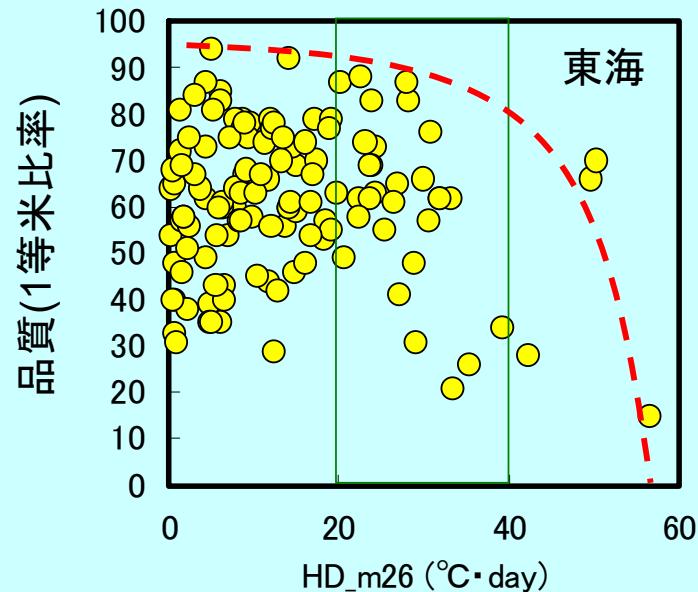
# 品質評価のための指標

## ◎高温による品質低下リスク指標(ヒートドース値:HD\_m26)

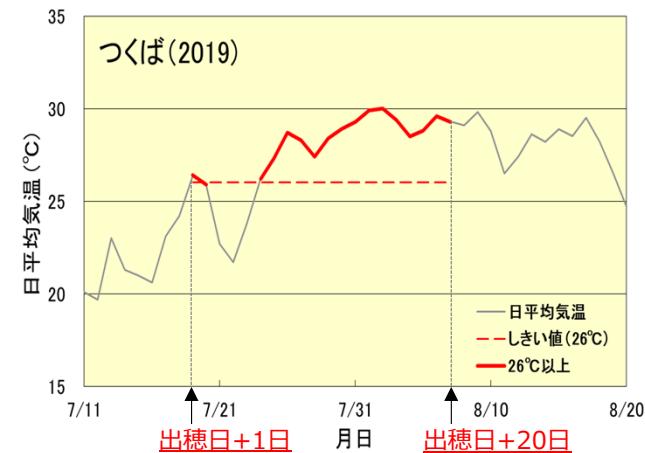
登熟期間前半(出穂後20日間)のHeat dose ( $\sum(T_m - 26)$ )

- HD\_m26 < 20( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ ) : ClassA(高温による品質低下のリスク低い)
- HD\_m26 > 20( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ ) : ClassB(高温による品質低下のリスクあり)
- HD\_m26 > 40( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ ) : ClassC(高温による品質低下のリスク高い)

出穂後20日間の平均気温が $26^{\circ}\text{C}$ を超えると、基部未熟粒や背白粒などの白未熟粒の発生(高温登熟障害)が多くなることから、基準温度を $26^{\circ}\text{C}$ とした。



(Ishigooka et al., 2011)

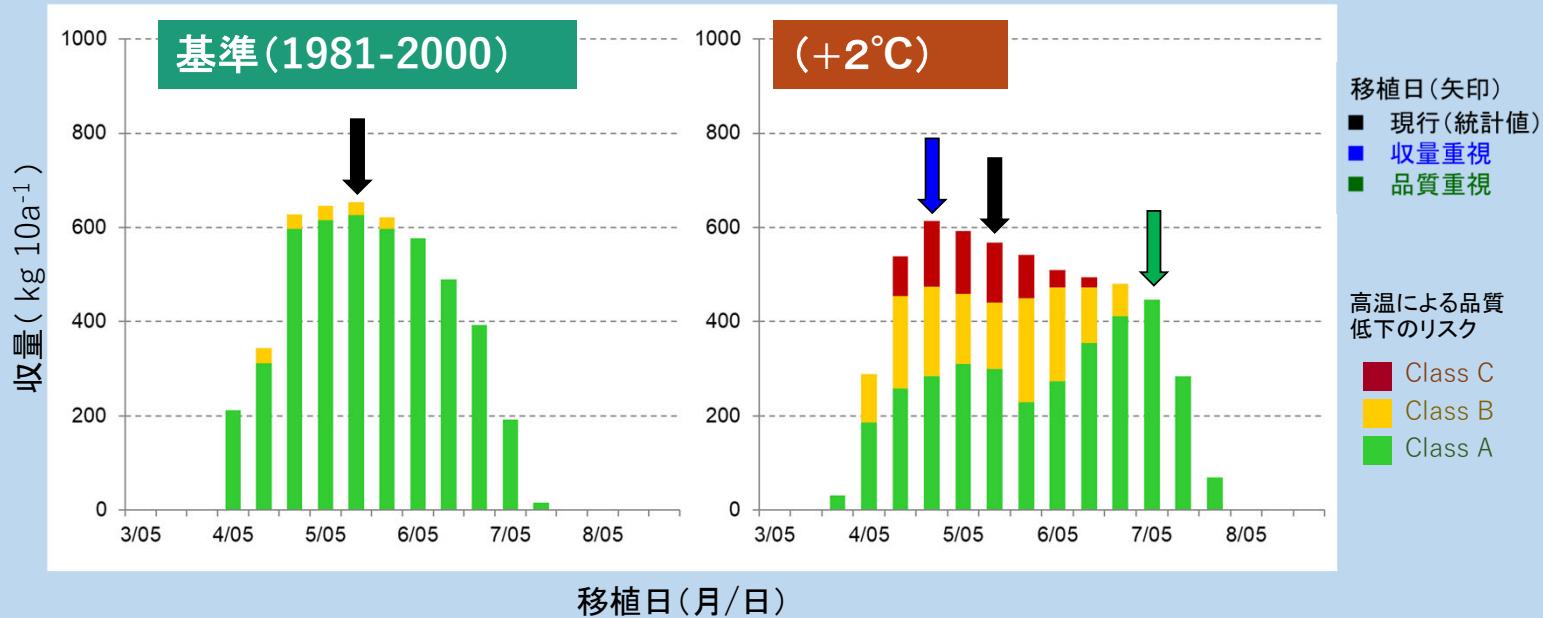


※ 26°Cを下回る低温日が出現しても、白未熟粒発生リスクは低下しない

# 移植日移動による温暖化適応の概念

温度上昇による、移植日と収量、高温リスクの関係の変化

(品種:コシヒカリ; 基準移植日:5月9日)



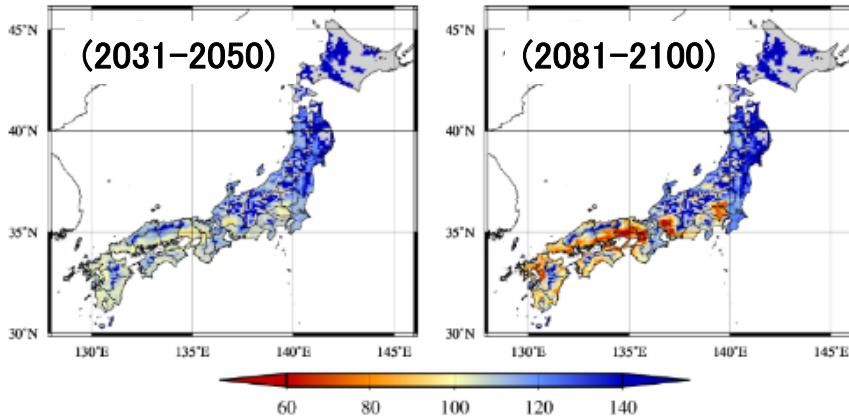
適応1: 収量のみを考慮した最適移植日(全収量が最多)

適応2: 収量と品質を考慮した最適移植日(ClassA 収量が最多)

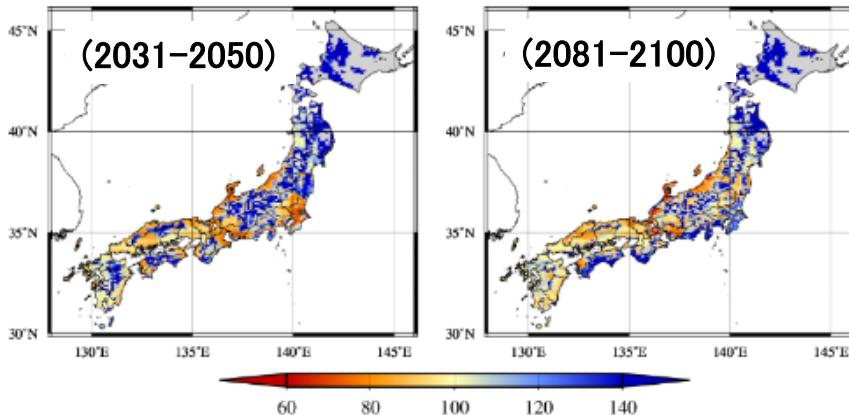
適応なし: 基準移植日(現在)

# 予測収量分布図と全生産量の推移

予測相対収量分布図(基準移植日)

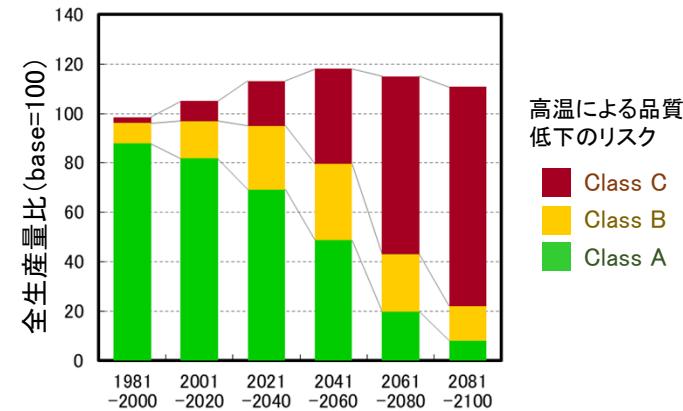


予測相対収量分布図(品質重視移植日)



収量比分布(base:1981-2000を100%とした比率)

全生産量の推移(基準移植日)



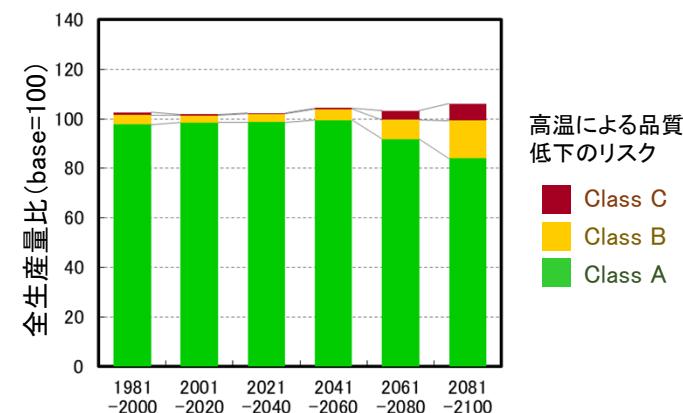
高温による品質低下のリスク  
■ Class C  
■ Class B  
■ Class A

## ◆基準移植日(適応なし)

登熟期間前期に高温ストレスを受ける割合が極めて高くなる。

→ 全生産量は増加するが、品質が大きく低下する可能性がある。

全生産量の推移(品質重視移植日)



高温による品質低下のリスク  
■ Class C  
■ Class B  
■ Class A

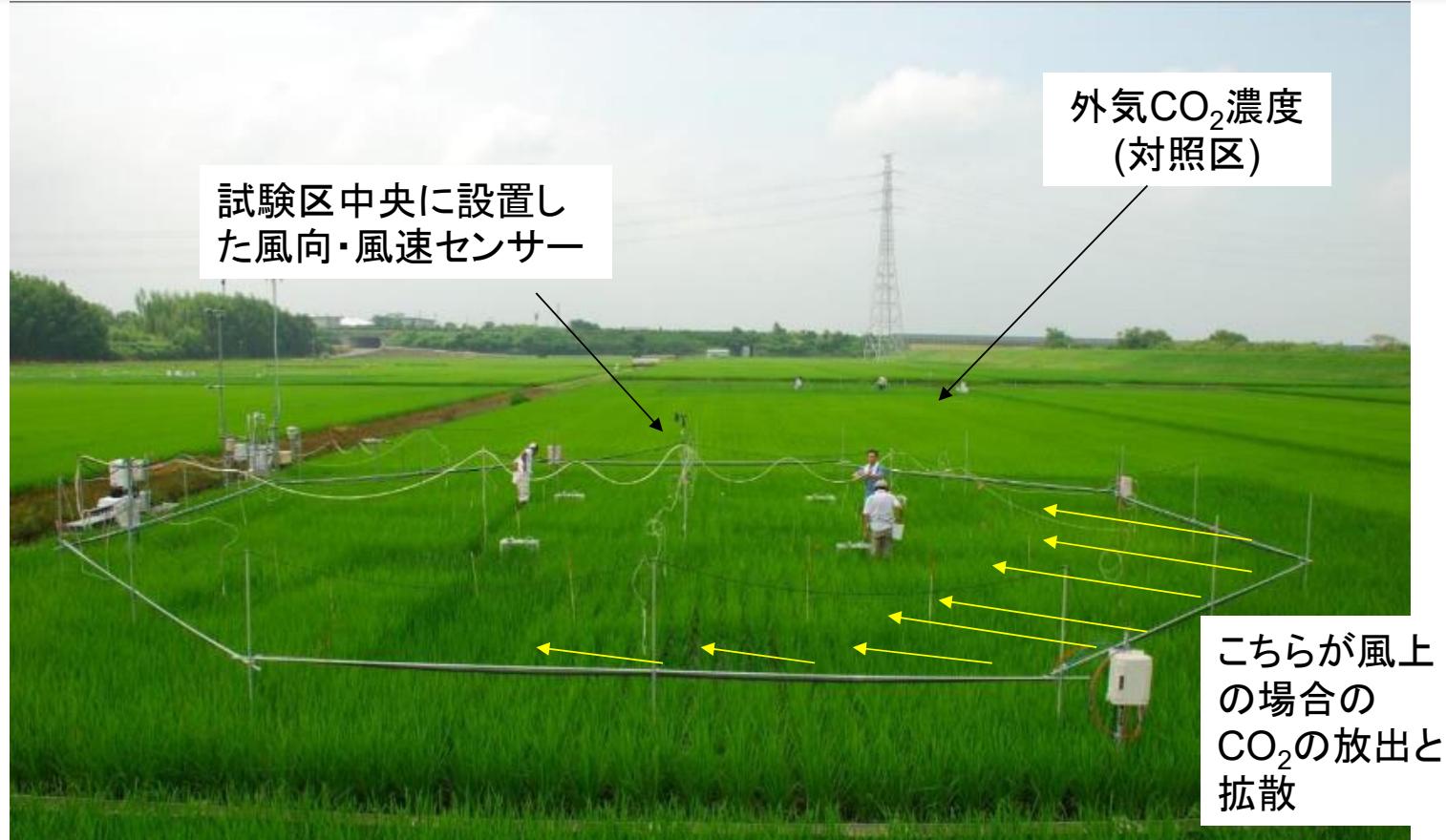
## ◆品質重視移植日

全生産量(収量の全国集計値)は大きく減少しないが、収量の地域的偏りが極めて大きくなる。

→ 耕作適地、不適地の2極分化

注) 化石燃料依存型の発展経路の下で気候政策を導入しない最大排出シナリオによる結果

# 野外での高CO<sub>2</sub>実験 (FACE)

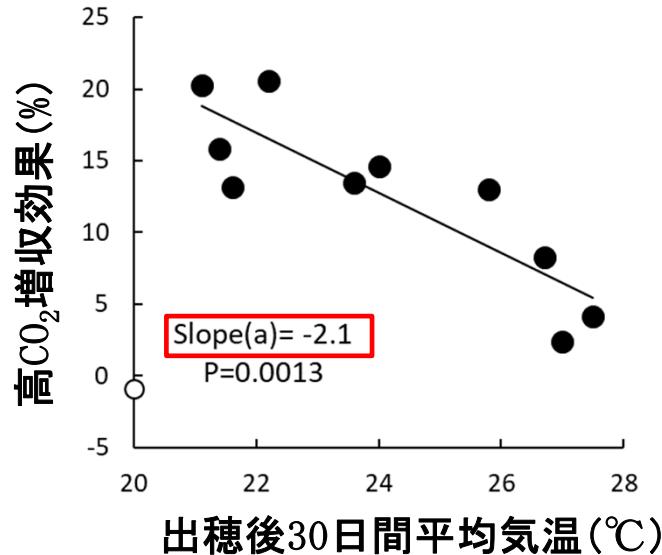


8角形状FACE試験区(差し渡し17m、面積約240m<sup>2</sup>)

各辺に設置したCO<sub>2</sub>放出チューブから、風向・風速および試験区内のCO<sub>2</sub>濃度に応じて、風上側3辺からCO<sub>2</sub>を放出。内部のCO<sub>2</sub>濃度を対照区よりも200ppm高く制御する。

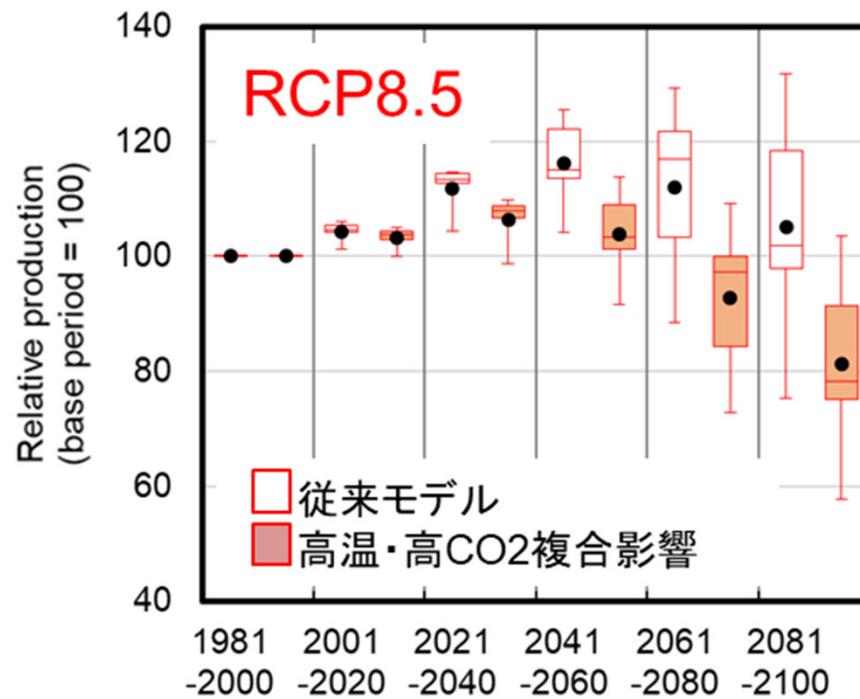
# 収量への高温・高CO<sub>2</sub>複合影響

FACE実験で明らかになった高CO<sub>2</sub>増収効果の温度依存性を、従来のモデルにおける玄米収量算定プロセスに組み込む



出穂後30日間の平均気温と高CO<sub>2</sub>増収効果の関係

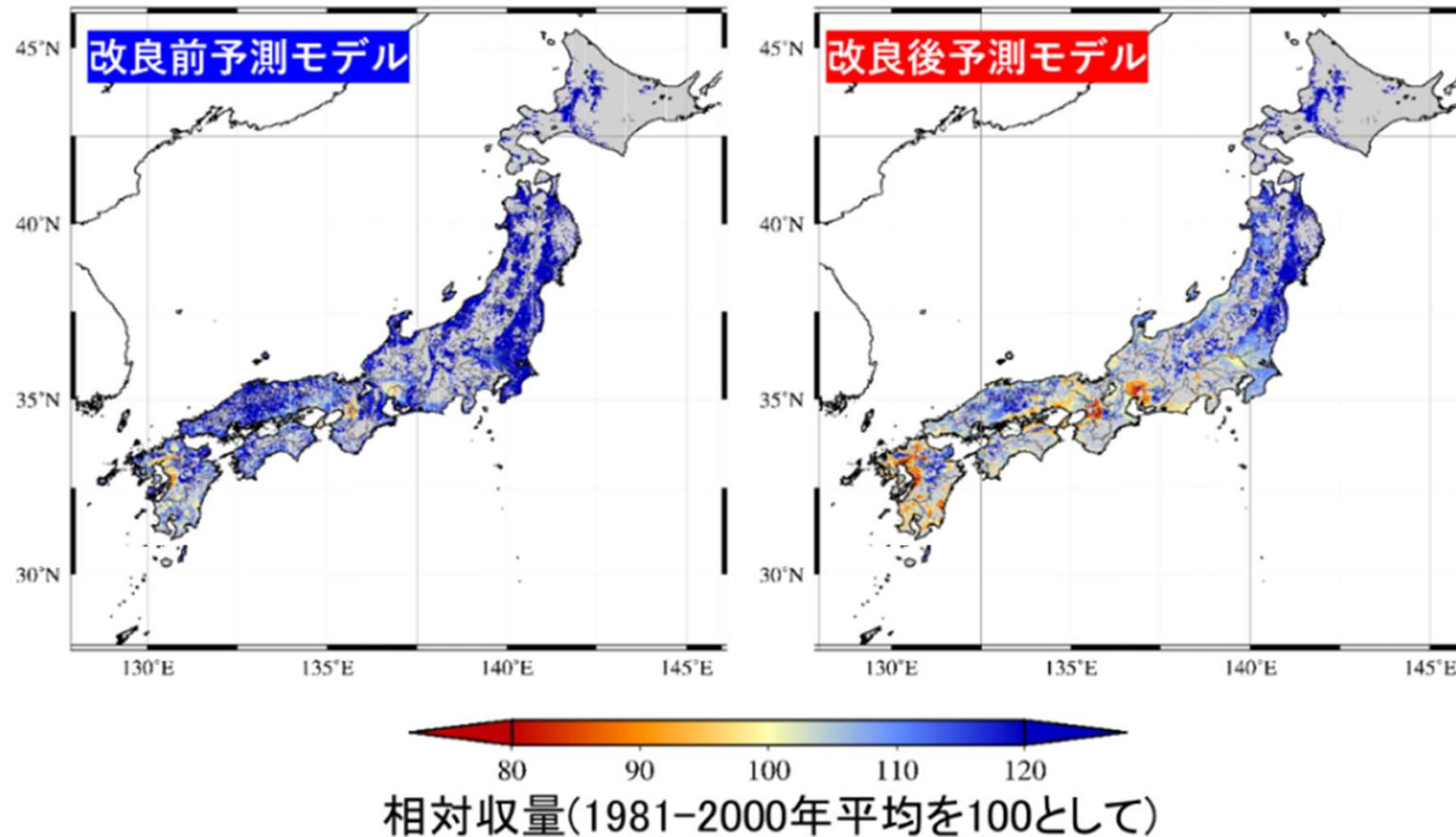
増収効果は低温(20°C付近)で最大であり、温度上昇1°Cあたり約2.1%減少する。高温(30°C付近)で増収効果はほぼ無くなる



高温・高CO<sub>2</sub>複合影響を考慮した新たなモデルによる算定値は、従来の手法での算定値を下回り、特にRCP8.5では年代が進みにつれて差は拡大する。

# 改良モデルによる推定（収量）

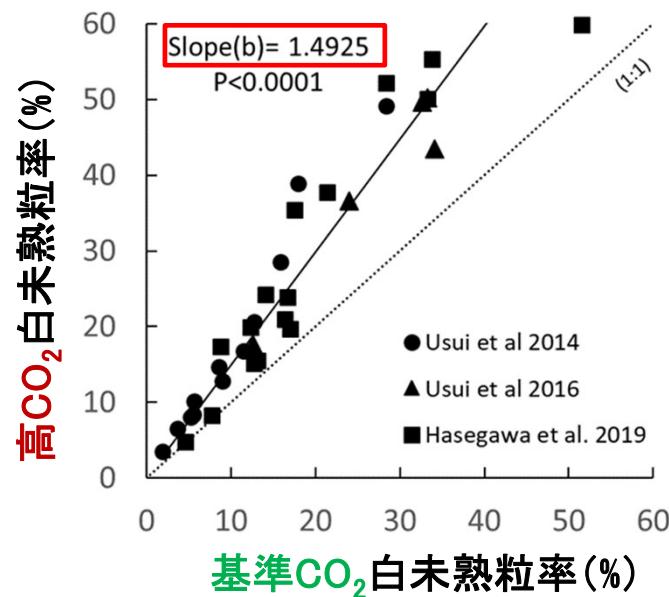
今世紀半ば(MIROC5: RCP8.5)



注) 化石燃料依存型の発展経路の下で気候政策を導入しない最大排出シナリオによる結果

# 水稻外観品質への高CO<sub>2</sub>影響

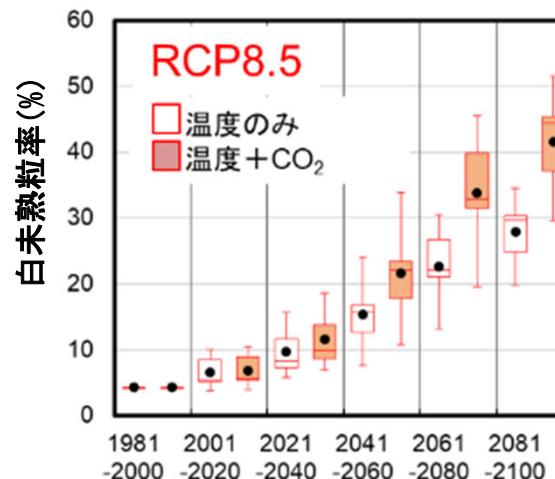
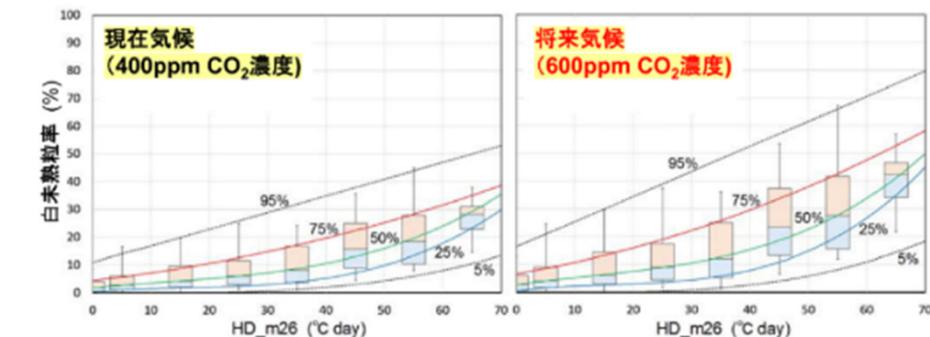
FACE実験で明らかになった高CO<sub>2</sub>による白未熟粒率発生の助長を、従来のモデルにおける白未熟粒率算定プロセスに組み込む



基準CO<sub>2</sub>と高CO<sub>2</sub>における白未熟粒率の比較

白未熟粒率は、品種によらず、高CO<sub>2</sub>濃度(+200ppm)条件において発生率が約1.5倍になる。

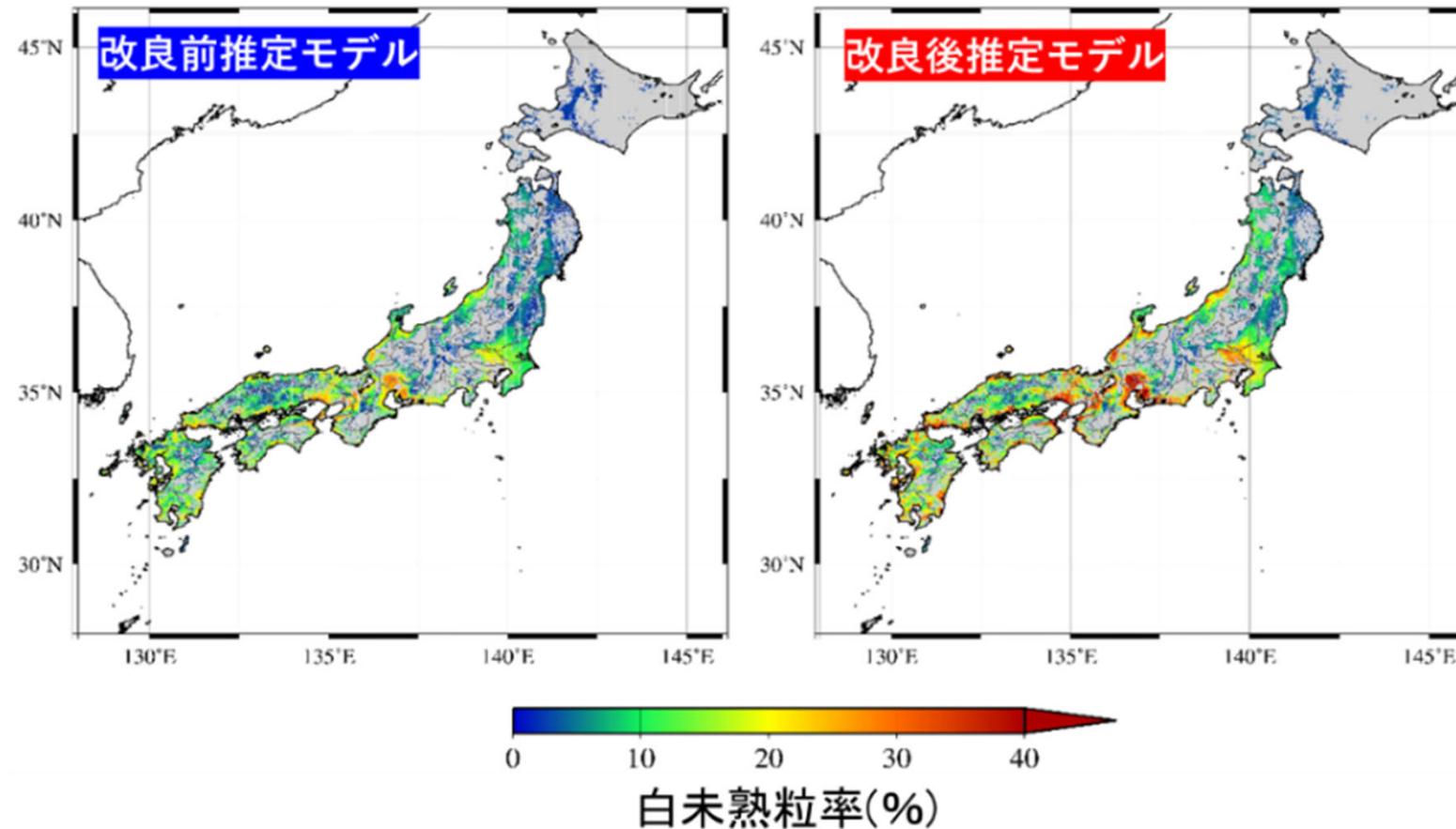
分位点回帰によるHD\_m26と白未熟粒率の関係



高CO<sub>2</sub>影響を考慮した新たなモデルによる白未熟粒率算定値は、従来の手法での算定値よりも高く、特にRCP8.5において年代が進むにつれて差が拡大する。

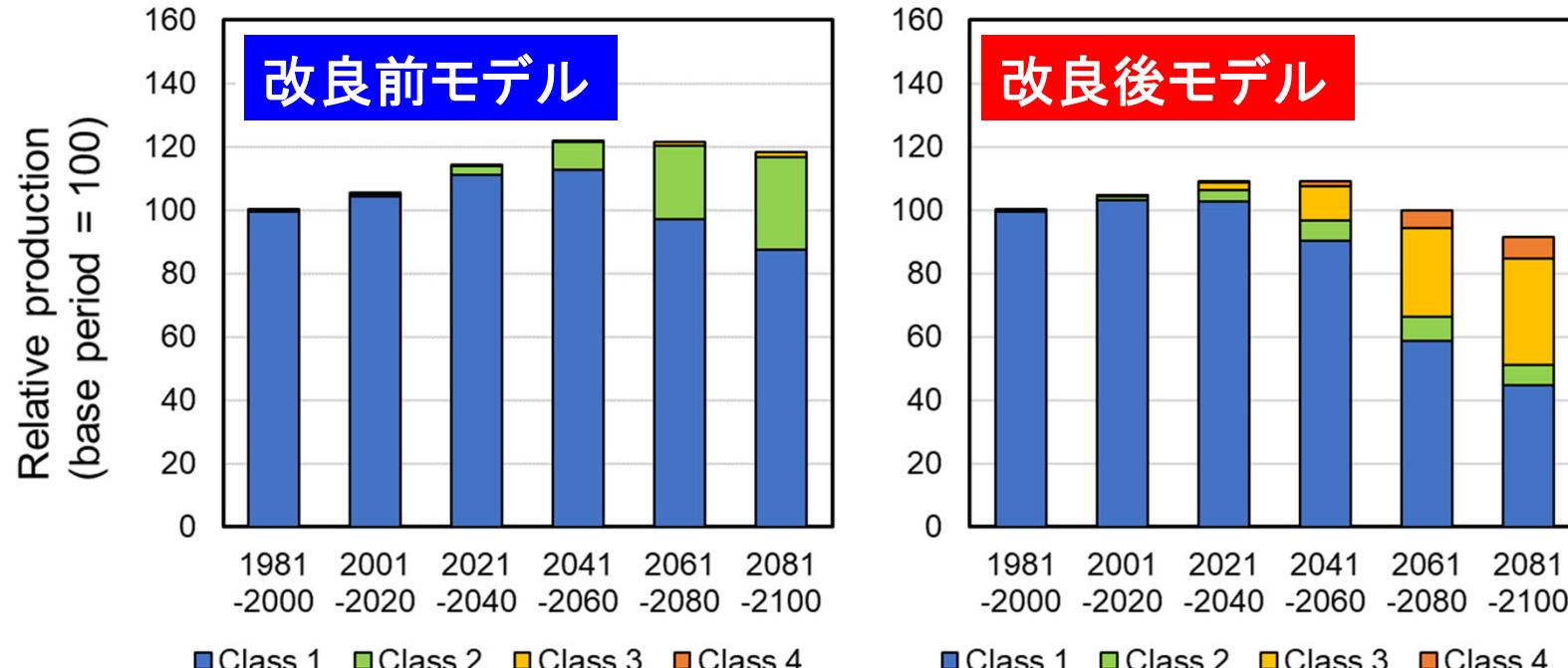
# 改良モデルによる推定（外観品質）

今世紀半ば(MIROC5: RCP8.5)



注) 化石燃料依存型の発展経路の下で気候政策を導入しない最大排出シナリオによる結果

# 改良モデルによる収量および品質の経年変化



Class 1: PCG < 30%  
 Class 2: 30% ≤ PCG < 40%

Class 3: 40% ≤ PCG < 55%  
 Class 4: 55% ≤ PCG

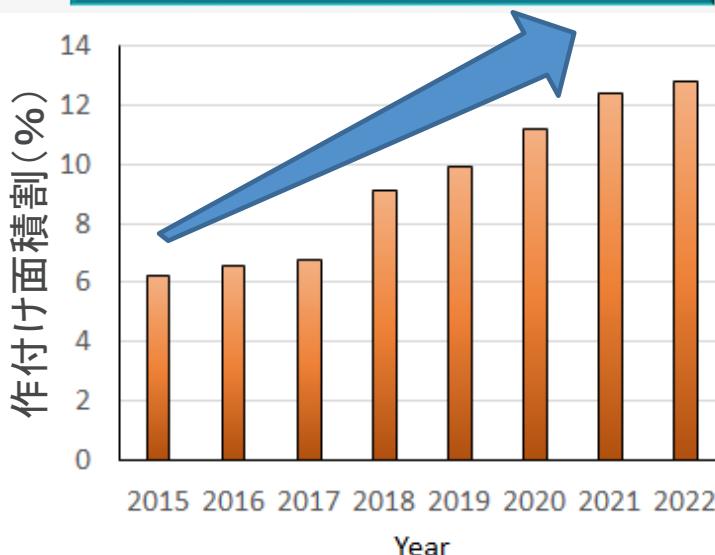
**MIROC5\_RCP8.5**

- ✓ 白未熟粒率(Percentage of Chalky Grain: PCG)により4つのクラスに分類、20年毎(1981-2000を100とした相対値)と各クラス(等級ではない)の構成割合。
- ✓ 今世紀末の20年間において、改良モデルによる全生産量は従来モデルより 27% 少なく算定され、同様にClass-1に分類される生産量の割合は43% 少なく算定された。

# 高温耐性(登熟性)品種導入を考慮した白未熟粒率推定方法



## 高温耐性品種の導入



農林水産省地球温暖化影響調査レポート  
(<https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/report.html>) から

高温耐性向上による白未熟抑制効果の定量化が必要

高温耐性品種ランク別白未熟粒発生  
モデル構築

表 1 各地域における作期・品種別の高温登熟性分類

| 地域区分                  | 生长期    | 高温登熟性           |       |                          |                         |               |
|-----------------------|--------|-----------------|-------|--------------------------|-------------------------|---------------|
|                       |        | 弱               | やや弱   | 中                        | やや強                     | 強             |
| 寒冷地北部・中部<br>(東北地方)    | 極早生・早生 | 駒の舞<br>初星       |       | むつほまれ<br>あきたこまち          | ふ系227号<br>里のうた<br>こころまち | ふさおとめ         |
|                       | 中生     | ササニシキ           |       | ひとめぼれ<br>はえぬき            | みねはるか                   |               |
|                       | 晩生・極晩生 |                 |       | コシヒカリ                    | つや姫                     | 笑みの幹          |
| 寒冷地南部<br>(北陸地方)       | 極早生・早生 | 初星              |       | あきたこまち<br>ひとめぼれ          | ハナエチゼン                  |               |
|                       | 中生     | ともほなみ           | コシヒカリ |                          |                         | 笑みの幹          |
|                       | 晩生・極晩生 | 祭り晴             |       | 日本晴<br>みずほの舞き            | あきさかり                   |               |
| 温暖地東部<br>(関東・東山・東海地方) | 極早生・早生 | 初星<br>あかね空      |       | あきたこまち<br>コシヒカリ          | どちぎの星                   | ふさおとめ<br>笑みの幹 |
|                       | 中生     | 彩のかがやき<br>さとじまん |       | 日本晴                      | なつほのか                   |               |
|                       | 晩生・極晩生 | 美の風<br>ヒノヒカリ    |       | シンレイ                     | コガネマサリ                  |               |
| 温暖地西部<br>(近畿・中国・四国地方) | 極早生・早生 |                 | キヌヒカリ | あきたこまち<br>ひとめぼれ<br>コシヒカリ | ハナエチゼン<br>つや姫           | ふさおとめ         |
|                       | 中生     | 祭り晴             |       | 日本晴                      |                         |               |
|                       | 晩生・極晩生 | 美の風<br>ヒノヒカリ    |       |                          | コガネマサリ                  |               |
| 暖地<br>(九州地方)          | 極早生・早生 | 初星<br>祭り晴       | 黄金晴   | 日本晴                      | みねはるか                   | なつほのか         |
|                       | 中生     | ヒノヒカリ           | シンレイ  | にこまる                     | コガネマサリ                  | おてんとぞだち       |
|                       | 晩生・極晩生 | あきさやか           | たちはるか |                          | ニシヒカリ                   |               |

(令和2年度現在、产地品種銘柄に指定されていないものを含む。)

農研機構2017年研究成果情報「北海道を除く全国の水稻高温登熟性標準品種の選定  
([https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/4th\\_laboratory/nics/2017/17\\_038.html](https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/4th_laboratory/nics/2017/17_038.html))」を農林水産省「農業生産における気候変動適応ガイド 水稲編」で改変  
(<https://www.maff.go.jp/i/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-102.pdf>)

# 高温耐性ランクと対象品種

|       | 高温耐性 | n    | 対象品種   |
|-------|------|------|--|
| HTR3  | 弱    | 296  | あかね空、あきさやか、葵の風、ヒノヒカリ、初星、祭り晴、彩のかがやき、さとじまん   |
| HTR4  | やや弱  | 83   | キヌヒカリ、黄金晴、恋初めし、シンレイ、たちはるか、ゆみあずさ  |
| HTR5  | 中    | 540  | あきたこまち、ちほみのり、えみだわら、はえぬき、はるもに、ひとめぼれ、いなほっこり、歓喜の風、コシヒカリ、むつほまれ、にこまる、日本晴                          |
| HTR6  | やや強  | 159  | 秋はるか、あきさかり、ふ系277号、ハナエチゼン、コガネマサリ、恋の予感、こころまち、みねはるか、にじのきらめき、ニシヒカリ、しふくのみのり、とちぎの星、つきあかり、つや姫、つやきらり |
| HTR7  | 強    | 224  | 笑みの絆、ふさおとめ、元気つくし、ナツヒカリ、なつほのか、おてんとそだちよさ恋美人  |
| Total |      | 1302 |  |

出典：北海道を除く全国の水稻高温登熟性標準品種の選定  
(農研機構, 2017 普及成果情報より)

高温登熟性：高温による白未熟粒発生に伴う玄米品質低下

# 高温耐性品種ランク別白未熟発生率のモデル化



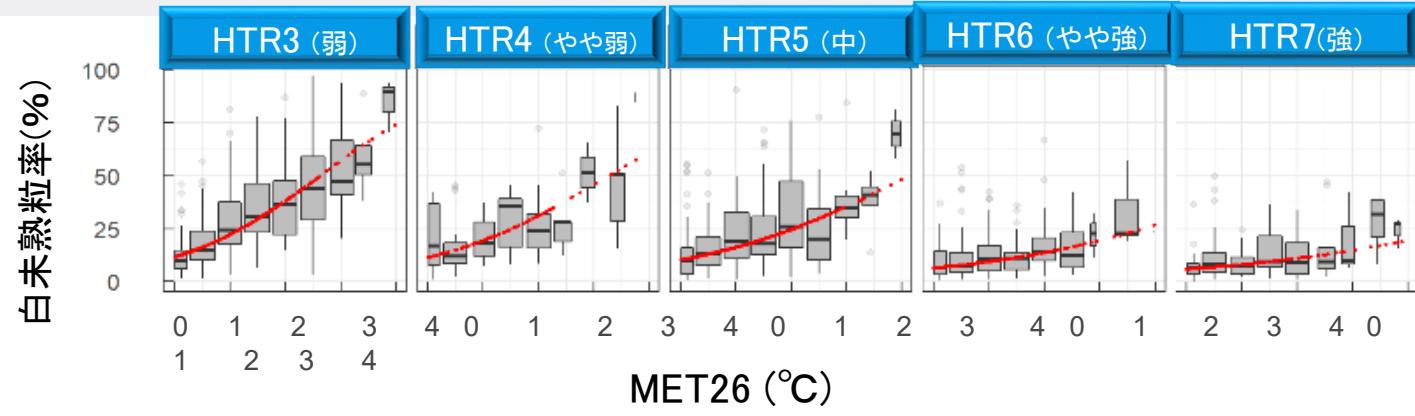
## 系統的レビューによるデータベース構築

44 試験地  
33 県  
 $n = 1302$   
48品種



## メタ解析

## モデル構築



高温耐性品種ランク別に温度・日射・湿度による品質低下をモデル化

$$\text{Logit}(CG_{ijk}) = B_1 \times HTR_i + B_2 \times MET26_i \times HTR_i + B_3 SR + B_4 RH + v_i + E_{ijk}$$

- $B_1 \sim B_4$  are fixed parameters
- $v_i + E_{ijk}$  are errors (random effects)

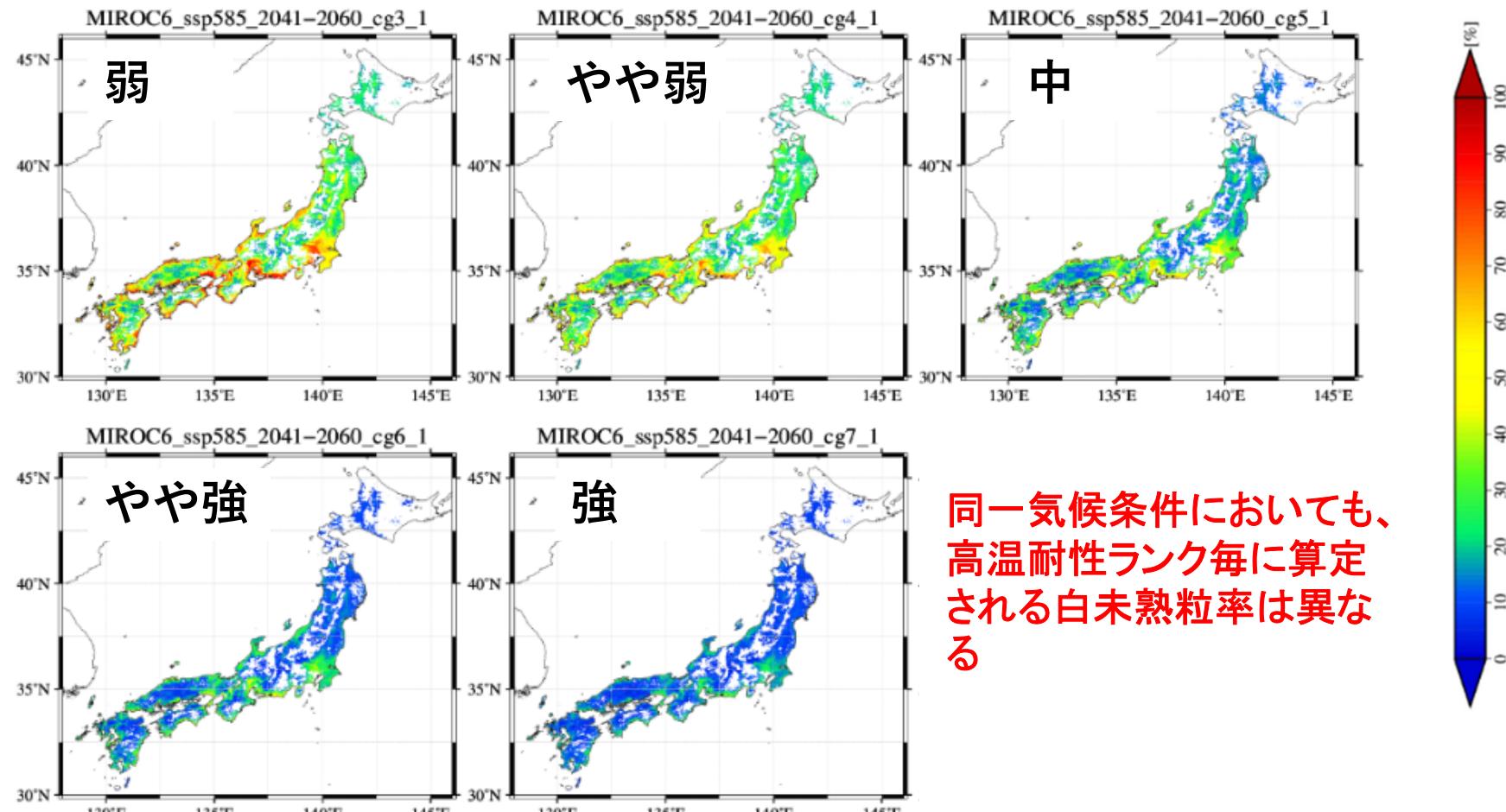
温度指標 日射 湿度

(Wakatsuki et al. 2024, Field Crops Research)

# 高温耐性ランク毎の白未熟粒率算定例

**MIROC6\_SSP5\_8.5(※)による、今世紀中盤(2041-2060)における算定例**

※SSP5\_8.5(気候政策を導入しない最大排出シナリオ)によるシミュレーション結果



# まとめ

- 高温・高CO<sub>2</sub>複合影響を考慮した新たなモデルによる収量算定値は、従来の手法での算定値を下回り、特にRCP8.5では年代が進みにつれて差は拡大した。
- 高CO<sub>2</sub>影響を考慮した新たなモデルによる白未熟粒率算定値は、従来の手法での算定値よりも高く、特にRCP8.5において年代が進むにつれて差が拡大した。
- 「高温耐性ランク別白未熟粒発生モデル」を導入し、高温耐性品種の導入の効果の評価手法を検討するとともに、従来の移植期移動との組み合わせによる複数適応策導入効果の評価を試みた。
  - ✓ 基準品種（高温耐性“中”）では、移植日の移動により品質向上を図るために大幅に早期化あるいは晚期化する必要があるが、高温耐性を1ランク上の“やや強”に変えた場合には、同じ移植日での高品質米は21.8%から57.2%、2ランク上の“強”的場合には77.8%となり、移植日の移動をしなくても品質は大きく向上した。
  - ✓ 高温耐性品種の導入と、適切な移植日の選択という適応策を単独で導入した場合、2つの適応策を組み合わせることで、減収となる地域を大幅に減らすことが可能になると期待された。

*Thank you.*

谢谢

감사합니다

ឧបករណ៍ ការបរិបទ

ありがとうございました



十勝の酒米  
水田