

PROJECT **H**ARC

HOKKAIDO
AGRICULTURAL
RESEARCH CENTER (HARC)

広域連携栽培試験による温暖化適応型 水稲栽培シナリオの提示



序 文

この度発刊する北海道農業研究センタープロジェクト研究成果シリーズNo. 8は、当研究所が中心となり、平成20年度から22年度までの3年間、(独)農業・食品産業技術総合研究機構運営費交付金プロジェクト研究「広域連携栽培試験による温暖化適応型水稻栽培シナリオの提示」として実施した成果をとりまとめたものです。

IPCCの第4次報告では気候の温暖化傾向は疑う余地のないものとされ、我が国でも気温の上昇とその農業生産への影響が顕在化しています。食料の安定的な確保、農業生産の持続的発展のためには、温暖化への対応・適応策の策定が急務です。このプロジェクト研究では、日本の主食である米の生産について、温暖化によって水稻栽培が受ける影響を評価するとともに、温暖化に適応した品種や作型（栽培時期）の策定を行いました。

温暖化が水稻に及ぼす影響は、従来より温室や人工気象室を用いた実験、あるいは生育モデルや作物生産モデルを用いたシミュレーションにより評価されており、温暖化適応に向けての貴重な情報が提供されています。しかし、これらの評価結果が実際の屋外の水田に問題なく当てはまるのか、また、評価結果に基づく対応策が実際の圃場で有効かどうかの確証を得る必要があります。温度の異なる、離れた2地点の水稻生育を比較する地域間連携試験では、短日性のあるイネは日長時間の差にも影響を受けます。そこで我々は、低緯度・高温地点の日長を電照によって高緯度・低温の地点に揃えることにより、温度上昇の影響のみを分離評価する実験手法を考案しました。そして、全国各地に拠点を持つ農研機構の特徴を活かし、南北に長い日本列島を巨大な実験装置と見なした地域間連携電照栽培実験を行いました。

3年間の研究期間ではありますが、北海道（札幌）、東北（盛岡）、関東（つくば）、九州（熊本）という寒地から暖地の幅広い地域に関して、温暖化が現行の品種・作型の栽培に及ぼす影響、及び温暖化に適応するための他地域の品種・品種特性の導入の可能性について、栽培実証的に評価することができました。その過程で、水稻が感応する「日長時間」を太陽高度に基づき算出する手法を開発し、また水稻発育への気温と水温の影響を改めて分離評価するとともに、これらの成果に基づき従来の発育モデルの精度をさらに向上させることができました。さらにこの発育モデルを用い、年々の気象変動の影響も考慮した栽培リスク評価に基づく適応作型の評価システムも構築し、各地の温暖化の影響と適応策の評価も試みました。このように所期の目的は十分に達成しておりますが、未だ解決すべき点は残っております。北海道農業研究センターでは、今後もこのプロジェクト研究の成果を活用し、温暖化が水稻・作物栽培に及ぼす影響とその適応策策定に貢献していきたいと考えています。

最後になりましたが、このプロジェクト研究の推進にあたり、多くの関係者の方々のご協力を得ました。特にプロジェクトの推進に有益なご指導を頂きました評価委員の岩手大学・岡田益己教授、福島県農林水産部・荒川市郎研究技術室長、農業環境技術研究所・吉本真由美主任研究員に心より御礼申し上げます。

平成25年3月

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
北海道農業研究センター所長
天野 哲郎

目 次

| | |
|--|----|
| 研究の要約 | 1 |
| 第1章 全国連携栽培試験による温暖化影響実証 | |
| 1. 開放系水温上昇実験 | 11 |
| 2. 開放系日長時間処理実験 | 15 |
| 3. 温度勾配チャンバー（TGC）実験 | |
| (1) 気温・水温および日長の影響の分離評価 | 24 |
| (2) 高温域における水稻発育の温度反応の評価 | 32 |
| 第2章 温暖化模擬実験による温暖化適応型水稻栽培シナリオの提示 | |
| 1. 北海道における温暖化の影響評価 | 35 |
| 2. 東北における温暖化の影響評価 | 40 |
| 3. 関東における温暖化の影響評価 | 46 |
| 4. 九州における温暖化の影響評価 | 50 |
| 5. 連携試験結果に基づく新たな温暖化適応栽培シナリオの策定システムの構築 | |
| (1) 日長時間の再定義による発育モデル適用範囲の拡大および水温入力による精度向上効果の検証 | 53 |
| (2) 温暖化適応型水稻栽培シナリオ策定システムの構築と温暖化影響評価 | 58 |

研究の要約

I. 研究年次・予算区分

研究年次 平成 20～22 年度
予算区分 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構運営費交付金プロジェクト研究

II. 主任研究者

主査：

北海道農業研究センター所長 鈴木 修(平成 20 年度)

北海道農業研究センター所長 折登一隆(平成 21～22 年度)

取りまとめ責任者：

寒地温暖化研究チーム 主任研究員 濱寄孝弘
(平成 20～22 年度)

III. 研究場所

北海道農業研究センター、東北農業研究センター、中央総合研究センター、九州沖縄研究センター、国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼研究拠点(協定研究)

IV. 研究目的

近年、気温上昇の農業への影響が顕在化し始めており、適応技術の開発が急務となっている。水稻栽培では、現在温暖化によるとみられる現象として、九州を中心とした登熟期間の高温化による登熟不良が指摘されている。その中期的な対策(2030年頃を目処)としては、登熟期間が高温期に遭遇しないよう晩生の品種を利用する、移植時期を遅らせる、直播により出穂時期を遅らせる、などが考えられている。一方、北日本(北海道)では、温暖化による問題は顕在化しておらず、むしろ温暖化に伴い中長期(2060年頃)的には収量の増加が見込まれている。しかし、この収量は気候登熟量示数を用いた潜在収量であり、温暖化後の環境に適した品種・作期・栽培法の策定が大前提である。

ところが現行品種では温暖化により生育・登熟期

間短縮することにより、乾物生産量が低下する懸念があり、また現在、相対的に温暖な低緯度の地域で栽培されている品種を単純に北上配置しても、日長反応等による生殖生長開始の遅延により気温上昇から期待されるほど発育が促進されず、登熟に至らない可能性がある。

そこで、本課題では、水稻の開花・登熟時期を評価の対象とし、30年程度の近い将来の温度上昇幅(1℃から最大2℃)を想定し、それに適応するための栽培シナリオを示す。ここで栽培シナリオとは、ある地域のある時期において、ある特性(感光性、感温性等)をもつ品種を栽培すると、どのような生育段階をたどり、生産安定性は期待できるか、ということである。これを、日本列島を縦断する、現地栽培試験の連携実施により提示する。

V. 研究方法

第1章 全国連携栽培試験による温暖化影響実証

温暖化後の水稻栽培シナリオを構築するためには、従来は温暖化後の条件(気温・水温が上昇)を人工気象室や数値モデルシミュレーションで模擬するのが通常であった。ここでは、より実栽培に近い環境で模擬する栽培実験を実施し、水稻の出穂・登熟への影響を明らかにする。

(1) 開放系水温上昇実験

屋外の水田圃場の水底にヒーターを設置し、水温が対照区より常時2℃程度高くなるよう制御することで、温暖化による水温上昇が水稻の生育に及ぼす影響を解明する。

(2) 開放系日長時間処理実験

日本列島が南北に長いことを利用し、緯度が異なる、すなわち温度環境の異なる複数の地点を対象とし、相対的に低緯度な地点は高緯度地点の温暖化後の温度環境を提供すると見なして水稻の栽培試験を実施する。ただし、低緯度地点では日長が短いので電照により日長を高緯度地点に揃える。具体的には、熊本にて筑波の日長を再現し、筑波が現在より2.5℃温暖化した条件とみなし、筑波にて盛岡の日長を再現して盛岡が現在より2.0℃温暖化した条件とみな

し、盛岡にて札幌の日長を再現し、札幌が現在より1.2℃温暖化した条件とみなし、各地の現在の代表的な品種および温暖化環境に適応する可能性のある品種の栽培試験を行う。各品種の葉齢の進行速度、幼穂分化期、出穂期等の生育ステージを把握する。得られた結果を解析し、各地域で安定した生産が行える品種の特徴を明らかにする。

また、当プロジェクトで供試する北海道から九州までの早晩性の異なる水稲品種について、日長感応性試験を行う。試験は、日長処理試験の容易な、すなわち日長の短い冬期でも温暖で水稲の栽培試験が可能な石垣島(国際農林水産業研究センター 熱帯・島嶼研究拠点)で実施する。

(3) 温度勾配チャンバー (TGC) 実験

1) 気温・水温および日長の影響の分離評価

温度勾配チャンバー (TGC:Temperature Gradient Chamber) とは、栽培温室の内部に常時一定の温度差を生じさせた栽培実験装置で、僅かな温度の差が作物生育に及ぼす影響を明らかにできる。現在気温から2℃程度高い気温までを設定できる温度勾配チャンバー実験系を確立し、温暖化条件を再現したTGC環境内で、早晩性(日長・温度感応性)の異なる複数の水稲品種の栽培試験を実施する。試験は札幌、盛岡、熊本の3カ所で実施し、各地域における1～2℃の気温および地温上昇の水稲生育への影響を評価する。

2) 高温域における水稲発育の温度反応の評価(プロジェクト期間中に追加)

水稲の発育(出穂)は、一般的に生育適温の範囲(日平均気温18～28℃程度)では高温によって早まるが、それ以上の極端な高温は水稲の生育を阻害し、発育速度を低下させると予想される。このような高温域における発育速度の変化・反応は、特に中緯度～低緯度地域において温暖化に適応した水稲の栽培シナリオを策定する上で考慮すべき重要な要因である。そこで、高温が水稲の発育速度におよぼす影響をTGC試験に基づいて解析し、高温域における水稲の温度反応を評価する。

第2章 温暖化模擬実験による温暖化適応型水稲栽培シナリオの提示

(1) 北海道における温暖化の影響評価

連携試験は、札幌、盛岡、つくば、熊本、石垣の5カ所で実施するが、特に温暖化後の札幌の気温を再現する盛岡との比較を中心に解析を行う。現在より2℃水温を上げる水温上昇実験・日長時間処理実験および現在気温より2℃程度高い気温までを設定できる温度勾配チャンバー実験を実施する。連携地点のデータも含めて解析し、温暖化後の北海道に適した水稲の栽培シナリオを提示する。

(2) 東北における温暖化の影響評価

水温上昇実験、日長時間処理、TGC実験の3つの温暖化模擬実験およびその連携試験から、30年先の温暖化条件の影響評価を行い、温暖化適応型水稲栽培シナリオの作成を進める。

(3) 関東における温暖化の影響評価

全国で設定を統一した水温上昇実験装置、日長時間処理装置を用い、栽培実験を実施する。温暖化模擬実験で構成した全国規模の連携栽培試験の結果を解析し、30年程度後に関東地方で想定される温暖化に対する水稲生育の影響評価を行い、適応のための栽培シナリオを作成する。

(4) 九州における温暖化の影響評価

TGCおよび圃場における水温上昇試験、日長時間処理試験等の実験系を確立し、作出した温暖化条件にて北海道から九州の品種を栽培する。これらの試験により、九州を対象とし、水稲の生育反応と温暖化に伴う収量の変動および高温登熟障害の発生状況を調査する。

(5) 連携試験結果に基づく新たな温暖化適応栽培シナリオの策定システムの構築

(プロジェクト期間中に追加)

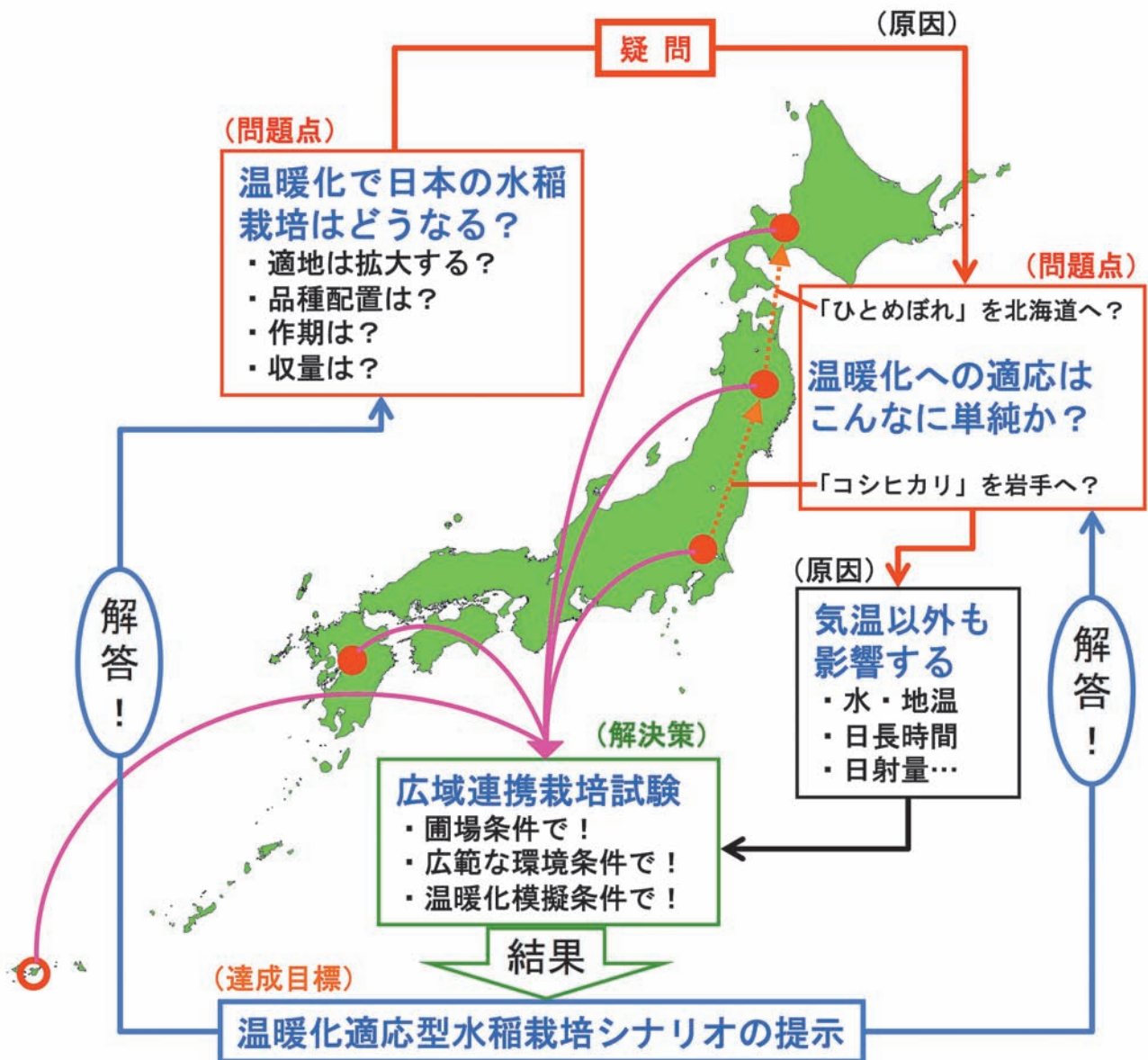
1) 日長時間の再定義による発育モデル適用範囲の拡大および水温入力による精度向上効果の検証
従来の水稲の発育予測モデルでは、日長は天文日長(日の出から日の入りまで)が使われており、また温度データも気温が用いられているが、水稲が感応する日長時間は天文日長とは異なり、また発育は水温にも依存している。そこで、これらを考慮することによる発育モデルの推定精度の向上を図る。

2) 温暖化適応型水稲栽培シナリオ策定システムの

構築と温暖化影響評価

構築したモデルを第2章1～4で得られた幅広い温度・日長条件下での水稻発育データで検証・チューニングする。温暖化予測シナリオに基づく複数年の気象予測値を発育モデルに入力して出穂期を予測し、温暖化に適応した品種・作型等の栽培シナリオを策定するシステムを構築し、各地域における品種・作型の適応性を評価する。

広域連携栽培試験による温暖化適応型水稻栽培シナリオの提示



「広域連携栽培試験による温暖化適応型水稻栽培シナリオの提示」

大課題名「広域連携栽培試験による温暖化適応型水稻栽培シナリオの提示」

(1) 全国連携栽培試験による温暖化影響実証

| | 平成20年度 | 平成21年度 | 平成22年度 |
|--------------------------------|---|--------------------------------------|--|
| 開放系水温上昇実験による水稻への温暖化影響評価 | 水田圃場に設置したヒーターにより、水温が常時対象区比2℃程度高温になるように制御する水温上昇実験装置による栽培実験の実施調整を行なう。 | 引き続き栽培実験を実施し、データを蓄積するとともにデータ解析に着手する。 | 温暖化にともなう水温上昇が、基本栄養成長および幼穂形成期までの生育におよぼす影響を解明する。 |
| 開放系日長時間処理実験による水稻への温暖化影響評価 | 連携試験地点（ペア地点）の水田圃場に設置した補光照明により、他の連携試験地点（元地点）の日長時間を模擬する、日長時間処理による栽培実験の実施調整を行なう。 | 引き続き栽培実験を実施し、データを蓄積するとともにデータ解析に着手する。 | 日長を制御した連携栽培試験の結果から、温暖化にともなう気温および水温の上昇が水稻生育に及ぼす影響を現地実証的に把握する。 |
| 温度勾配チャンパー（TGC）実験による水稻への温暖化影響評価 | 現在気温から、それより2℃程度高い気温までを設定できる温度勾配実験装置による栽培実験の実施調整を行なう。 | 引き続き栽培実験を実施し、データを蓄積するとともにデータ解析に着手する。 | 温暖化条件を再現するTGC環境内の生育データを解析し、気温と水温それぞれの影響を評価する。 |

(2) 温暖化模擬実験による温暖化適応型水稻栽培シナリオの提示

| | 平成20年度 | 平成21年度 | 平成22年度 |
|-----------------|---|----------------------------------|---|
| 北海道における温暖化の影響評価 | 水温上昇実験装置、日長時間処理装置、TGC装置を設置および調整し、栽培実験に着手する。 | 栽培実験を継続し、データを蓄積するとともにデータ解析に着手する。 | 全国規模の連携栽培試験と3つの温暖化模擬実験から30年先の温暖化条件の影響評価を行い、北海道における温暖化適応型水稻栽培シナリオの作成を進める。 |
| 東北における温暖化の影響評価 | 水温上昇実験装置、日長時間処理装置、TGC装置を設置および調整し、栽培実験に着手する。 | 栽培実験を継続し、データを蓄積するとともにデータ解析に着手する。 | 全国規模の連携栽培試験と3つの温暖化模擬実験から30年先の温暖化条件の影響評価を行い、東北地方における温暖化適応型水稻栽培シナリオの作成を進める。 |
| 関東における温暖化の影響評価 | 水温上昇実験装置、日長時間処理装置を設置および調整し、栽培実験に着手する。 | 栽培実験を継続し、データを蓄積するとともにデータ解析に着手する。 | 全国規模の連携栽培試験と3つの温暖化模擬実験から30年先の温暖化条件の影響評価を行い、関東における温暖化適応型水稻栽培シナリオの作成を進める。 |
| 九州における温暖化の影響評価 | 水温上昇実験装置、日長時間処理装置、TGC装置を設置および調整し、栽培実験に着手する。 | 栽培実験を継続し、データを蓄積するとともにデータ解析に着手する。 | 全国規模の連携栽培試験と3つの温暖化模擬実験から30年先の温暖化条件の影響評価を行い、九州における温暖化適応型水稻栽培シナリオの作成を進める。 |

VI. 研究結果

第1章 全国連携栽培試験による温暖化影響

1. 開放系水温上昇実験

屋外水田での水温上昇処理による水温上昇効果に加え、2010年の猛暑条件も利用して、気温上昇効果も併せて解析した結果、寒地・暖地とも水温上昇と気温上昇はともに出穂日を前進させた。どちらが卓越するかは温度条件に依存した。寒地では温暖化による出穂期の前進が大きく、気温、水温ともに影響があった。暖地では温暖化による出穂期の前進は見られず、遅延する場合があることが明らかとなった。

2. 開放系日長時間処理実験

緯度の異なる2地点間で連携した温暖化影響評価実験で必須となる、水稻の明暗期境界照度に基づく日長時間を、太陽高度をベースにして明らかにした。

水稻の明暗期境界照度は、日出時、日没時とも同じであり、太陽高度で -1° ～ -2° の照度に相当すると考えられた。緯度の異なる2地点間で温暖化影響評価実験を行う場合、緯度の高い地点の日長を、日出時の太陽高度が -2.5° ～日没時の太陽高度が -2.0° まで、または日出時 -2.0° ～日没時 -2.0° までとし、緯度の低い地点をこの日長に合わせることで、温暖化影響評価を行うことができると考えられた。供試した品種は南北幅広い地域から集められ、日長感応性も地域間で大きく異なることが確認されたことから、上記日長処理基準は、少なくとも国内品種に対しては汎用性が高いと判断される。

3. 温度勾配チャンバー（TGC）実験

（1）気温・水温および日長の影響の分離評価

開放系水温上昇実験および開放系日長時間処理実験より詳細に水稻の気温・水温・日長反応を分離評価するため、温度勾配チャンバー（TGC）試験を緯度の異なる地点間で連携して実施した。広い温度域での水稻の温度反応と日長反応が解析され、水稻発育への温度上昇の影響が、対象地域の温度条件や日長条件で異なることが示された。

水稻の発育は気温だけではなく水温にも依存し、幼穂形成期前後で水温依存から気温依存へ変わることが示された。積算温度による発育（出穂）の予測評価は、幼穂形成期まで水温を、それ以降気温を積

算することで、気温か水温の一方のみより推定誤差が小さかったことから、出穂予測・評価上、幼穂形成期まで水温を、それ以降は気温を使うことが妥当であることを明らかにした。

（2）高温域における水稻発育の温度反応の評価

関東以西で大きな問題となっている水稻の高温の被害には、登熟不良だけではなく、生育の抑制もあることから、高温域における水稻発育の温度反応を温度勾配チャンバー試験によって調査した。その結果、移植後の高温によって主稈の幼穂形成と出穂が遅れること、並びに移植～出穂までの発育速度が低下し始める温度範囲は日平均気温を基準とした場合で $28\sim 32^{\circ}\text{C}$ の範囲であることを明らかにした。

第2章 温暖化模擬実験による温暖化適応型水稻栽培シナリオの提示

1. 北海道における温暖化の影響評価

北海道の水稻生産は、温暖化により生産性が向上するとされているが、実際に現在の品種・作期で生産性は維持・向上するのか、また、より温暖な地域の品種、あるいは品種特性の導入の可能性について実証的に明らかにした。盛岡と札幌との連携栽培実験にて、北海道～本州の4品種について温暖化後の北海道での適応性と適応作型を検討した結果、現在の北海道品種は温暖化で生育期間が短縮し、生産性が低下する可能性がある一方で、現在の東北の品種の出穂期が現在の北海道の現行品種の出穂期と同等～若干遅い程度となり、栽培可能期間の延長も考えると、現在の東北品種並みの早晩性の導入により、生産性の維持～向上も期待できることが明らかとなった。一方で、コシヒカリは 2°C 程度の温度上昇では栽培できないことが明らかとなった。

2. 東北における温暖化の影響評価

東北地方において、温暖化条件に適応する水稻栽培シナリオを提示する目的で、札幌、盛岡、つくばの3地点で連携して開放系日長時間処理実験を実施した。これにより、例えば、現在の盛岡における栽培実験から、6～7月の年平均気温差が 1.6°C あることを利用して、温暖化した将来の札幌における水稻の生育様相を把握し、将来の栽培シナリオを策定した。コシヒカリについて、盛岡とつくばの日長時間の相違が、10日の出穂の差を生じていた。こ

れは両地点の気温差の影響より大きい。気温が2℃上昇した場合、盛岡では、コシヒカリの栽培に関して次のシナリオが描ける。5月下旬に移植すれば、8月18日に出穂する。出穂後15日間の平均気温は0.9℃上昇し、収量ポテンシャルは現状並みである。5月中旬に移植する場合、8月11日に出穂する。出穂後15日間の平均気温は、現在より1.6℃上昇するが、収量ポテンシャルは9%増加する。

3. 関東における温暖化の影響評価

近年の気温上昇の影響として、かつて九州を中心として問題とされていた高温による水稻の登熟不良が関東・北陸地方でも発生するようになってきた。このため、関東地域でも気温上昇に対する水稻栽培の適応技術開発が急務となっていることから、30年程度の将来に関東地方で予想される気温上昇に適応するための栽培シナリオを提示することを目的に連携試験を実施した。試験の結果、より高温な圃場における出穂日が早く、全国的に1℃の気温上昇につき出穂日が5日程度早まると予想できることが分かった。温暖化に伴って出穂が揃わなくなる品種が存在する可能性があり、このような品種では、登熟期の違いから品質低下が生じる可能性がある。関東では、気温が最も高くなる時期に出穂を迎える作型が多い。これらの地域では、将来、高温登熟障害のリスクが特に高まると予想される。

今後は、関東地方に適した高温登熟耐性品種の選定とともに、高温を回避する作期策定に取り組む必要がある。このために、様々な水稻品種の発育モデルパラメータを正確・迅速に決定する手法の開発が必要である。また、高温な栽培条件で出穂が揃わなくなる現象の解明と評価が必要である。

4. 九州における温暖化の影響評価

近年の気温の上昇に伴い、九州では収量低下や高温登熟障害が多発し、深刻な問題となっている。そこで、九州における温暖化対策に資する有益な情報を提供するため、温暖化に対する水稻の生育反応を水温上昇により明らかにし、またモデルを用いて白未熟粒の発生状況を評価した。水温上昇処理により、収量、外観品質は低下した。また、出穂の遅延が観察された。モデルによる計算では、基白粒は気温の上昇に伴い増加するため、発生を抑えるためには晩期化が必要である。乳白粒についても発生を抑える

ためには、晩期化、収量制御を行う必要のあることが明らかになった。

5. 連携試験結果に基づく新たな温暖化適応栽培シナリオの策定システム

(1) 日長時間の再定義による発育モデル適用範囲の拡大および水温入力による精度向上効果の検証

発育モデルの精度向上および適用範囲（地域）の拡大を目的とし、日長時間の再定義と、モデルへの水温の組み込みを行った。日長を、一日の内で太陽中心の仰角が0°より大きい時間とする定義(Ld00)に代わり、仰角が朝夕とも-2.0°以上である時間を日長とする定義(Ld22)を導入する必要性について検討した。Ld22は、Ld00よりも長くその差は18分から27分程度で、この差は、より高い緯度においてより大きい。本州から九州の範囲であれば、パラメータを再調整することにより、日長の定義を変更しなくても緯度の違いによる推定誤差は最大2日程度で留まるが、北海道においては10日程度になりうる。

Ld22を採用すると、チャンバー等人工日長による栽培試験の結果と自然日長による栽培試験の結果の両方を同程度の精度で推定できる。したがって、適用範囲の広い水稻の発育モデルを開発するには、日長の定義をLd22を変更することが必要であり、これで既存モデルのパラメータを再定義するべきである。

モデルへの水温の導入効果については、今回検証に用いたデータの限りにおいて、出穂期の推定精度の明白な向上は見られなかった。

(2) 温暖化適応型水稻栽培シナリオ策定システムの構築と温暖化影響評価

従来、特に北日本では水稻の適品種・作型を策定するために、気温の平年値から安全出穂期間を求める計画作期策定法が用いられているが、計画作期策定法では年々の気象変動の影響が考慮されていないことや、移植可否判断と安全出穂期間での出穂可否評価が別個に行われる点で問題があった。そこで、温暖化適応栽培シナリオ構築のために、新たな評価システムを構築した。これは従来の計画作期策定法に発育モデルを導入することで、出穂期に関わるリスク評価も全て移植日で評価できるようにし、さら

に気象の経年変動を考慮して、移植日毎に各リスクの発生確率で示すようにしたものである。この新たな評価システムを用いて、全国4地域の栽培適期について検討した。その結果、北海道と東北地方の将来においては、南方の水稻品種を導入できる可能性が示された。関東や九州では遅植により高温リスク発生を回避し収量性の低下も抑えられる可能性が示唆された。

VII. 研究発表

1. 論文発表

濱寄孝弘・根本学・鮫島良次・大野宏之・大原源二・脇山恭行・丸山篤志・小沢聖, 温暖化が水稻の出穂に及ぼす影響評価のための緯度の異なる地点間のTGC比較実験, 農業気象, 66, 193-200, 2010

Maruyama, A. and Kuwagata, T., Coupling land surface and crop growth models to estimate the effects of changes in the growing season on energy balance and water use of rice paddies, Agric. Forest Meteorol., 150, 919-930, 2010

脇山恭行・大原源二・丸山篤志, 水稻白未熟粒発生予測モデル構築のための登熟期の気象条件および生育状態と白未熟粒発生状況の解析., 農業気象, 66, 255-267, 2010

Nemoto, M., Hamasaki, T. and Shimono, H., Extraordinary hot summer in Hokkaido decrease rice yield and satisfy growing of cultivar in Tohoku region "Hitomebore", J. Agric. Meteorol., 67, 269-274., 2011

Nemoto, M., Hamasaki, T., Sameshima, R., Ohno, H., Wakiyama, Y., Maruyama, A. and Ozawa, K., Assessment of paddy rice heading date under projected climate change conditions for Hokkaido region based on the field experiment, J. Agric. Meteorol., 67, 275-284., 2011

Nemoto, M., Hamasaki, T., Sameshima, R., Kumagai, E. Ohno, H., Wakiyama, Y., Maruyama, A., Goto, S. and Ozawa, K., Probabilistic Risk Assessment of the Rice Cropping Schedule for Central Hokkaido, Japan., J.

Appl. Meteor. Clim., 51, 1253-1264, 2012

Sameshima, R., Hamasaki, T., Nemoto, M., Kumagai, E., Ohno, H., Wakiyama, Y., Maruyama, A. and Ozawa, K., Experimental open-field day-length-extension method and estimation of the effective light period using solar altitude, J. Agric. Meteorol., 67, 307-312, 2011

Wakiyama, Y., Sameshima, R., Hamasaki, T., Nemoto, M., Ozawa, K., Ohno, H., and Maruyama, A., Threshold intensity of twilight illumination for photoperiodism of rice based on solar altitude, *Journal of Agricultural Meteorology* (submitted).

2. 学会発表

濱寄孝弘・根本学・廣田知良・鮫島良次, 北海道における温暖化が水稻の出穂時期に及ぼす影響評価のための加温試験, 2008年日本農業気象学会北海道・東北支部合同大会講演要旨集, 48-49, 2008

鮫島良次, 時期別の気温・水温の違いが水稻出穂に及ぼす影響, 2008年日本農業気象学会北海道・東北支部合同大会講演要旨集, 46-47, 2008

濱寄孝弘・根本学・廣田知良・鮫島良次, 緯度の異なる2地点の温度差を利用した温暖化影響評価試験の可能性, 日本農業気象学会北海道支部2009年大会講演要旨集, 26-27, 2009

濱寄孝弘・根本学・鮫島良次・大野宏之・大原源二・脇山恭行・丸山篤志・小沢聖, 温暖化に適応した水稻栽培シナリオの提示を目的とした広域連携栽培試験, 日本農業気象学会2009年全国大会講演要旨集, 116, 2009

Hamasaki, T., Nemoto, M., Sameshima, R., Ohno, H., Ohara, G., Wakiyama, Y., Maruyama, A. and Ozawa, K., Temperature Gradient Chamber (TGC) Experiment to Estimate the Effects of Elevated Air Temperature on the Heading Date of Paddy Rice Grown in Different Climatic Regions in Japan, International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2009) (Proceedings), 68,

Sameshima, R., Hamasaki, T., Nemoto, M., Ohno, H., Ohara, G., Wakiyama, Y., Maruyama, A. and Ozawa, K., Heading time and Leaf age of paddy rice in controled water and air temperature experiments, International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2009) (Proceedings), 69, 2009

Wakiyama, Y., Hamasaki, T., Nemoto, M., Sameshima, R., Ohno, H., Ohara, G., Maruyama, A. and Ozawa, K., A method to test the crop growth in an elevated temperature conditions with day length elongation treatment at a different southern warmer place, International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2009) (Proceedings), 67, 2009

濱寄孝弘・根本学・廣田知良・井上聡, 気温と水温それぞれが水稻の出穂に及ぼす影響の生育時期別評価, 日本農業気象学会北海道支部 2010 年大会講演要旨集, B3-4, 2010

濱寄孝弘, 北海道の温暖化が水稻栽培に及ぼす影響と対策について, 気候情報連絡会第 54 回気候情報連絡会, 32, 2010

濱寄孝弘・根本学・鮫島良次・脇山恭行・丸山篤志・大野宏之, 緯度の異なる地点間のTGC連携試験による水稻出穂の温度・日長反応解析, 日本農業気象学会 2010 年全国大会講演要旨集, 102, 2010

根本学, 濱寄孝弘, 廣田知良, 井上聡, 2010 年の夏季の高温と水田加温試験による早晩性の異なる水稻品種の温度反応解析, 日本農業気象学会北海道支部 2010 年大会講演要旨集, B1-2, 2010

大野宏之・吉田ひろえ・中園江・大原源次, 作況調査結果を利用した主要水稻品種のDVRパラメータ推定, 日本農業気象学会2010年全国大会講演要旨集, 105, 2010

Sameshima, R., Fujimura, S., Suzuki, Y. and Arakawa, I., Heading time of paddy rice grown in a TGC with water temperature treatment., International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2010) (Proceedings), 144, 2010

濱寄孝弘・根本学・鮫島良次・大野宏之・脇山恭行・丸山篤志・小沢聖, 緯度の違いによる温度差を利用した水稻の温暖化模擬実験, 日本農業気象学会 2011 年全国大会講演要旨集, 179, 2011

濱寄孝弘・根本学・鮫島良次・大野宏之・脇山恭行・丸山篤志・小沢聖, 気温と水温が水稻発育に及ぼす影響とその時期について, 日本農業気象学会 2011 年全国大会講演要旨集, 185, 2011

丸山篤志・脇山恭行・佐藤透・瀬尚也・濱寄孝弘・根本学・鮫島良次・大野宏之・小沢聖, 高温域における水稻発育の温度反応について, 日本農業気象学会 2011 年全国大会講演要旨集, 184, 2011

根本学・濱寄孝弘・鮫島良次・大野宏之・脇山恭行・丸山篤志・小沢聖, シミュレーションに基づく適応型栽培シナリオの提案, 日本農業気象学会 2011 年全国大会講演要旨集, 187, 2011

根本学・濱寄孝弘, 北海道における気象の経年変動を考慮した水稻移植期晩限について, 農業気象学会北海道支部大会, B1-2, 2011

大野宏之・濱寄孝弘・根本学・鮫島良次・脇山恭行・丸山篤志・小沢聖, 水温の導入による発育速度推定法の改良, 日本農業気象学会 2011 年全国大会講演要旨集, 186, 2011

鮫島良次, 濱寄孝弘, 根本学, 大野宏之, 脇山恭行, 丸山篤志, 小沢聖, 電照による温暖化模擬実験から推察された水稻生育・収量への温暖化影響, 日本農業気象学会 2011 年全国大会講演要旨集, 183, 2011

脇山恭行・鮫島良次・濱寄孝弘・根本学・小沢聖・大野宏之・丸山篤志, 電照による温暖化模擬実験のための日長処理方法について, 日本農業気象学会 2011 年全国大会講演要旨集, 180, 2011

中川博視・神田英司・大野宏之・吉田ひろえ・菅野洋光・鮫島良次・濱寄孝弘・根本学・中園江・大原源二・近藤始彦・石黒潔・渡邊好昭・長谷川利拓, 生育・収量シミュレーションモデルを活用した水稻移植晩限日の推定, 日本作物学会紀事, 80 (別 2),

184-185, 2011

根本学・濱寄孝弘, 北海道における暑夏年に低下した水稲収量と本州水稲品種の栽培可能性について, 日本農業気象学会 2012 年全国大会講演要旨, 21, 2012

3. 研究成果情報、会議資料（成績会議）等

濱寄孝弘・根本学・鮫島良次・大野宏之・脇山恭行・丸山篤志・小沢聖, 気象変動による栽培リスクの評価に基づく温暖化適応にも有効な水稲作型設計法, 主要研究成果（研究・参考）, 2011

鮫島良次・熊谷悦史・濱寄孝弘・根本学・大野宏之・脇山恭行・丸山篤志・小沢聖, 南の地点の補光処理で北に離れた地点の温暖化条件を模擬できる, 主要研究成果（研究・参考）, 2011

4. 普及誌、商業誌発表等

根本学, 温暖化が水稲の生育に与える影響, 日本農業気象学会北海道支部編著「北海道の気象と農業」, pp. 338-343., 2012

5. 講演、ホームページ、その他

鮫島良次, Cross-Japan field tests to assess the effect of temperature rise, 2009 農研機構国際シンポジウム : International Symposium on Impact of Global Warming on Food and Agriculture 要旨集, 25-26, 2009

中川博視・神田英司・大野宏之・吉田ひろえ・菅野洋光・鮫島良次・濱寄孝弘・根本学・中園江・大原源二・近藤始彦・石黒潔・渡邊好昭・長谷川利拡, 水稲の移植栽培における晩限日の推定について, 中央農研ホームページ, http://www.naro.affrc.go.jp/narc/contents/higashinohon_disaster/, 2011

濱寄孝弘, 「広域連携栽培試験による温暖化適応型水稲栽培シナリオの提示」の概要, 平成 20 年度九州沖縄農業試験研究推進会議 生産環境部会（農業気象成績・設計検討会）重要研究問題, 18-20, 2009

濱寄孝弘, じわり温暖化…変わる農業地図, 北の

大地も予断許さず対応策確立急ぐ, 日本農業新聞, 2,14, 2008

濱寄孝弘, 温暖化で農業が変わる?, 札幌テレビ放送, シリーズそこにある温暖化, 2, 2008

濱寄孝弘, シリーズ環境奇想曲, 温暖化が農業を変える, 温暖化が追い風? 北上する特産物, 北海道文化放送ニュース, 26, 2008

濱寄孝弘, 温暖化で変わる北海道農業, 北海道で作れるかコシヒカリ, テレビ北海道, けいざいナビ 45, 5, 2008

濱寄孝弘, 日本に迫る温暖化, 一等米が出来ない! 気温上昇で生長に異変?, 日本テレビ, NEWSリアルタイム, 7, 2008

濱寄孝弘, 新しい作物の可能性, 札幌テレビ放送, シリーズそこにある温暖化, 6, 2008

森田敏・濱寄孝弘, 温暖化で品質悪化、道内も対策必要に, 北海道新聞 特集はばたく道産米, 1,3, 2009

濱寄孝弘・廣田知良, 道内温暖化で栽培の可能性ひとめぼれ、あきたこまち 北農研 30 年後想定し研究 品質、収量、今後の課題, 北海道新聞 夕刊, 6, 2010

VIII. 研究担当者

第 1 章 全国連携栽培試験による温暖化影響実証データの収集

(1) 開放系水温上昇実験

鮫島良次*

濱寄孝弘

根本学

大野宏之

脇山恭行

(2) 開放系日長時間処理実験

脇山恭行*

濱寄孝弘

根本 学
鮫島良次
大野宏之
小沢 聖**
後藤慎吉**

濱寄孝弘
鮫島良次
脇山恭行
丸山篤志

(3) 温度勾配チャンバー (TGC) 実験

1) 気温・水温および日長の影響の分離評価
濱寄孝弘*
根本 学
鮫島良次
丸山篤志
脇山恭行

2) 温暖化適応型水稻栽培シナリオ策定システムの
構築と温暖化影響評価

根本 学*
大野宏之
濱寄孝弘
鮫島良次
脇山恭行
丸山篤志

2) 高温域における水稻発育の温度反応の評価
丸山篤志*
脇山恭行

*は取りまとめ執筆者

**国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼研究拠点
(協定研究)

第2章 温暖化模擬実験による温暖化適応型水稻栽培シナリオの提示

(1) 北海道における温暖化の影響評価

濱寄孝弘*
根本 学
鮫島良次

(2) 東北における温暖化の影響評価

鮫島良次*
大野宏之

(3) 関東における温暖化の影響評価

大野宏之*
脇山恭行
丸山篤志

(4) 九州における温暖化の影響評価

脇山恭行*
丸山篤志

(5) 連携試験結果に基づく新たな温暖化適応栽培シナリオの策定システム

1) 日長時間の再定義による発育モデル適用範囲の
拡大および水温入力による精度向上効果の検証
大野宏之*
根本 学

第1章 全国連携栽培試験による温暖化影響実証

1. 開放系水温上昇実験

ア. 研究目的

温暖化の影響による水稲の生育時期の変化を実証的に評価するためには、圃場条件（開放系）で温暖化処理（気温処理）を行い、水稲の出穂時期の変化を調べることが理想的であるが、開放系での気温処理は極めて困難である。そこで、開放系における代替的な温暖化処理として、赤外線ヒーターによる上方からの加温で、群落温度を上昇させる方法が採用されている(Kimball, 2008)。ところで、穂の分化など発育現象には、茎頂の分裂組織（成長点）の温度が強く影響すると考えられるが、それは地表面近くにあり、水稲の場合は水田水中に位置する。このため、水稲の発育を対象として、開放系で温暖化処理を行う場合、水田水を加温する処理が適当と考えられる。そこで、水田圃場の一部にヒーターによる水温加温区を設置し、加温処理区の水温が常時対象区より一定の高温になるように制御し、出穂期の変動を調査した。

イ. 研究方法

北海道農業研究センター（北海道札幌市）、東北農業研究センター（岩手県盛岡市）、中央農業総合研究センター（茨城県つくば市）、九州沖縄農業研究センター（熊本県合志市）の試験水田圃場において水稲を栽培し、開放系温度水温加温処理を行った（以下、これらの実験地点を、札幌、盛岡、つくば、合志と略称する）。

1) 札幌

20m×50mの試験水田にて試験を行った。処理区の大きさと反復数は次の通りである。2008年は2.5m×3.5mの処理区で、加温区および対照区の2処理×2反復とした。加温区は周囲を波板で囲い（僅かに外部と水が出入りできる隙間を開けた）、150Wのヒーター6本（計900W）で加熱した。2009年は、1.5m×2.1m、2010年は2.4m×2.1mとし、両年とも加温区、電照区および対照区との3処理の3反復とした。加温区については、2009年は150Wのヒーター4本（600W）により、2010年は畦間に配置したパイプに温水ボイラーによる温水を通水して加熱し

た。3カ年とも、各処理区の水底（地表面直上）の水温を白金抵抗温度センサにより10秒間隔で計測し、加温区の水温が対象区より常時2℃高くなるように、ヒーターのon-offおよび温水循環により制御した。計測および制御にはデータロガー（CR1000、Campbell）を使用し、1.5m高の気温も測定した。

供試品種は、2008年は、きらら397、おぼろづき、あきたこまち、ひとめぼれ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、にこまる、レイハウの9品種とし、2009年と2010年は、きらら397、あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリの4品種とした。水田への移植は2008、2009、2010年のそれぞれ5月27日、28日、26日に、条間30cm×株間15cmにて行なった。移植時葉齢は、各年でそれぞれ概ね4.3、4.7、4.8であった。試験区外は、きらら397もしくはひとめぼれを慣行にて栽培した。各品種とも1反復当たり植え付け本数は2008、2009、2010年それぞれで14、9、16個体とし、調査対象個体としてそれぞれ4、5、4個体を選んだ。2008年と2009年は各穂に掛けた出穂日を記した札の集計から、2010年は日々出穂済み穂数の調査から、過半数の穂が出穂した日を出穂日と記録した。

2) 盛岡

6.5m×18mの試験水田圃場を3枚使用し、3反復とした。1枚の圃場内に、2.5m×1.8mの処理区（図I-1-1）を2つ設置した。そのうち1つを加温区、他を無加温の対照区とした。加温区は150Wのヒーター3本（計450W）で加熱した。加温区の設定方法と温度計測、水温制御の設定値は札幌と同じである。

供試品種は、2009年と2010年はあきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴である。2008年はこれら4品種に加えて、きらら397、ササニシキ、にこまる、レイハウも供試した。2008、2009、2010年のそれぞれ5月30日、5月28日、5月26日に、うね間0.3m×株間0.175mで移植した。移植時葉齢は、各年でそれぞれ概ね5.8、5.0、5.0であった。

各品種とも1反復当たり4個体（2008年）、3個体（2009年）、7個体（2010年）を選び、出穂した穂に出穂日を記した札を付け、後に集計して過半数の穂が

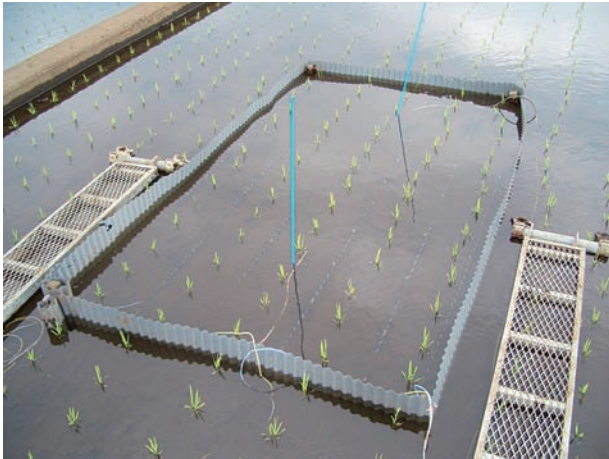


図 I-1-1 水温加温処理装置（盛岡）

出穂した日を出穂日と記録した。

3) つくば

10m×45mの試験水田圃場を使用し、2反復とした。圃場内に、3.35m×1.5mの処理区（図I-1-2）を2つ設置した。そのうち1つを加温区、他を無加温の対照区とした。加温区は150Wのヒーター6本（計900W）で加熱した。加温区の設置方法と温度計測、水温制御の設定値は札幌と同じである。

ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、にこまるを供試した。2009年は5月15日、2010年は5月12日に、畝間0.3m×株間0.15mで1株1個体を移植した。移

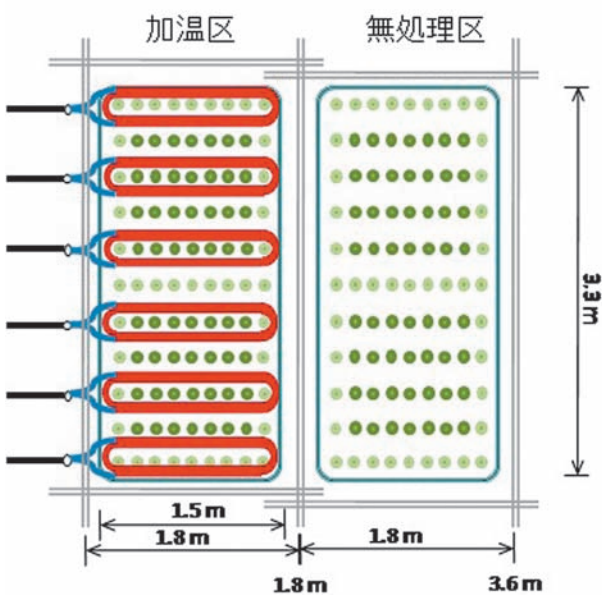


図 I-1-2 処理区見取り図（つくば）

加温区には、長さ5.5メートル、消費電力150Wの電熱線6本を設置し、田面水を加熱した。1畝7株に同じ品種を栽培し、出穂を観察した。



図 I-1-3 試験圃場（つくば、2010年）

試験では、日長を制御する試験も別途実施した。稲の上に設置されているのはそのための電球である。

植時葉齢は、概ね4.0であった。試験区の周囲にはコシヒカリを慣行で栽培した。2010年における試験圃場の風景を（図I-1-3）に示す。

各品種とも1反復当たり7個体(2010年)を選び、出穂した穂に出穂日を記した札を付け、後に集計して過半数の穂が出穂した日を出穂日と記録した。

4) 合志

50m×10mの試験水田圃場を使用した。供試品種は、2009年と2010年は、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、にこまるである。加温区の設置方法と温度計測、水温制御の設定値は札幌と同じである。2009年の6月17日、2010年の6月18日に、うね間0.3m×株間0.15mで移植した。移植時葉齢は、2009年、2010年とも概ね4.0であった。各品種とも1反復当たり5個体を選び、出穂した穂に出穂日を記した札を付け、後に集計して過半数の穂が出穂した日を出穂日と記録した。

なお、本プロジェクトで使用した「日本晴」の種子は愛知県農業試験場に提供頂いた。

ウ. 結果および考察

表 I-1-1 6、7月の平均気温

| 年次 | 札幌 | 盛岡 | つくば | 熊本 |
|------|------|------|------|------|
| 2008 | 17.6 | 20.9 | | |
| 2009 | 17.2 | 20.5 | 23.0 | 25.5 |
| 2010 | 18.9 | 22.5 | 24.5 | 24.8 |

盛岡はアメダス盛岡の値

表 I-1-1 6、7月の平均水温

| 年次 | 札幌 | | 盛岡 | | つくば | | 熊本 | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 対照 | 加温 | 対照 | 加温 | 対照 | 加温 | 対照 | 加温 |
| 2008 | 21.9 | 23.2 | 23.0 | 24.6 | | | | |
| 2009 | 20.8 | 22.4 | 23.0 | 24.7 | 24.5 | 26.5 | 27.9 | 28.8 |
| 2010 | 22.6 | 24.5 | 25.2 | 26.8 | 26.3 | 28.1 | 29.2 | 29.7 |

盛岡は2009年は6月4日、2010年は6月10日から
合志の水温は6月17日(2009)、22日(2010)~7月31日

1) 水温、気温の経過

処理区と対照区の6、7月の平均気温、水温を表 I-1-1 と I-1-2 に示した。2010年の水温は、2008、2009年の加温区よりやや高かった。

札幌では、月々の変動があるが、各年の夏期(6~8月)の気温経過はおおよそ、2008年は平年並み、2009年は僅かに低温(しかし、冷害危険期前後が低温だったため冷害年)、2010年は平年差2.4℃(北海道農研(札幌市羊ヶ丘)所内気象観測露場値)の猛暑となった。水田水温は、2008年はヒーターの容量不足等により加温開始直後は日平均で1℃程度の温度上昇に留まったが、以後徐々に上昇し、7月半ばに2℃の温度差を達成した。2009年は期間として大きなムラは無かったものの、平均して1.6℃程度の昇温に留まり、2010年は概ね安定して1.8℃以上の加温効果が得られた。

盛岡ではヒーター容量がやや不足したため、加温区と対照区の水温差は平均1.6℃であった。6月中下旬の午後2時前後に水温が35℃を超える高温になる時期に、特に加温区と対照区の水温差が縮小した。

つくばでは、2009年、2010年とも、移植から出穂に至る期間、水温は順調に制御された。

合志における2010年の気温と水温は表 I-1-1 と表 I-1-2 に示すとおりであった。

2) 出穂期

各年の出穂期を表 I-1-3 に示した。この表のG、H、I列は水温の加温が出穂期を前進させた効果である(水温上昇効果)。J、K、L、M列は、2010年の猛暑による高気温および水温の効果である(猛暑効果)。2008および2009年の加温区と、2010年の対照区の水温が近い値であったことから、N、O列は猛暑効果のうち高気温の効果のみを抽出した日数であると見なした(気温上昇効果)。水温上昇効果による出穂日の前進日数は、札幌で最も大きく、合志で小さかった(G、H、I列)(ただし、

2008年の札幌では生育初期の水温上昇効果が小さかったため、他年度・他地域よりも小さく現れている)。

猛暑効果は、札幌で盛岡より大であった(J、K列)。猛暑効果は対照区(J、K列)と加温区(L、M列)で大差なかった。

各地点での特徴は、札幌では、きらら397とひとめぼれの水温上昇効果(G、H列)と気温上昇効果(N、O列)が同程度(2008年のきらら397を除く)、コシヒカリは気温上昇効果の方が大であった。O列は、2009年と2010年の6~7月気温差の1.7℃の気温上昇効果であるが、H列の水温上昇効果との比較から、きらら397とひとめぼれでは、気温上昇効果と水温上昇効果は同程度と考えられた。コシヒカリでは水温上昇効果が低かった。なお、2008年は生育初期の水温上昇効果が小さかったため、G列の効果は他年度・他地域よりも小さかった。

盛岡では年次により異なり、いずれの品種も2008年は気温上昇効果が大きかったが、2009年は水温上昇の方が大きかった。2009年の加温区では、猛暑効果が見られなかった。

つくばにおける水温上昇効果による出穂期の前進は2009年より2010年で大きかった(H、I列)。

合志では、加温区における出穂期の反復間の差が大きく、コシヒカリ、日本晴れ、にこまるで、それぞれ3日、9日、9日の反復間差が生じた。反復の値を平均すると加温区で出穂期が遅かった(水温上昇効果が負となった)。一方、気温上昇効果(O列)は正であった。これらから、合志における温度範囲では、水温上昇効果は負、気温上昇効果は正で値が小さいことが明らかとなった。また、コシヒカリとひとめぼれが、ほぼ同時期に出穂した。

以上から、水温上昇効果と、気温上昇効果はともに基本的には出穂日を前進させた。どちらが卓越するかは温度条件に依存した。札幌の低温条件では気温上昇効果と水温上昇効果が同程度であったことから、幼穂が分化し、穂が水面上に出るまでの温度(気温)も出穂時期に大きく影響した。一方、盛岡の2009年と2010年の比較は、小さな気温上昇効果を示した(M列とO列、とくにあきたこまちとひとめぼれ)。寒地では温暖化による出穂期の前進が大きく、気温、水温ともに影響を持つことが示された。寒冷地では温暖化による出穂期の前進が見られたが、寒地ほどには小さくなく、気温の影響は水温

に比して小さかった。暖地では温暖化による出穂期の前進は見られず、遅延する場合があることが明らかとなった。

エ. 今後の課題

生長点が水中に位置する幼穂分化期前後までは、水温が大きく発育に影響すると考えられるが、本実験では、出穂期を用いた評価を行ったため、気温影響も強く現れた。水稻の発育に及ぼす温暖化影響を評価するために必要な温暖化処理として、水温処理だけではなく、気温処理も必要であることが明らかとなった。すでに述べたように開放系での気温処理は困難であることから、気温処理に関しては本報告別項で実施した、開放系日長時間処理実験が適している。開放系日長時間処理と水温加温処理の組み合わせにより、さらに詳しく気温上昇効果と水温上昇効果を分離して評価する研究の実施が必要である。

オ. 要約

圃場条件（開放系）で温暖化処理（水温加温処理）を行い、水温上昇効果による出穂期の変動を調査した。また、2010年の猛暑条件を利用して、気温上昇効果の評価も行った。水温上昇効果と、気温上昇効果はともに基本的に出穂日を前進させた。どちらが卓越するかは温度条件に依存した。寒地では温暖化による出穂期の前進が大きく、気温、水温ともに影響を持っていた。一方で暖地では温暖化による出穂期の前進は見られず、遅延する場合があることが明らかとなった。

カ. 参考文献

Kimball, B. A. et al. (2008) Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology*, 14, 309-320.

執筆担当者（鮫島良次）

表 I - 1 - 3 出穂期および加温処理による出穂期の前進日数

| 品種（地点） | 出穂日 | | | | | | 加温による | | | 2010年との | | 2010年との | | 2010年対照区との | | |
|------------------|-------|------|-------|------|-------|------|----------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|------------|-------|----|
| | 2008年 | | 2009年 | | 2010年 | | 出穂期の前進日数 | | | 出穂日の差 | | 出穂日の差 | | 出穂日の差 | | |
| | 加温区 | 対照区 | 加温区 | 対照区 | 加温区 | 対照区 | 2008年 | 2009年 | 2010年 | （対照区） | （加温区） | 2008年 | 2009年 | 2008年 | 2009年 | |
| | 列 | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O |
| （札幌） | | | | | | | | | | | | | | | | |
| きらら397 | | 8/4 | 8/7 | 8/4 | 8/12 | 7/23 | 7/27 | 3 | 8 | 4 | 11 | 16 | 12 | 12 | 8 | 8 |
| ひとめぼれ | | 8/25 | 9/1 | 8/26 | 9/5 | 8/10 | 8/16 | 7 | 10 | 6 | 16 | 20 | 15 | 16 | 9 | 10 |
| コシヒカリ | | 9/12 | 9/12 | 9/13 | 9/17 | 9/2 | 9/3 | 0 | 4 | 1 | 9 | 14 | 10 | 11 | 9 | 10 |
| 日本晴 | | 9/15 | 9/18 | | | | | 3 | | | | | | | | |
| （盛岡） | | | | | | | | | | | | | | | | |
| きらら397 | | 7/29 | 7/28 | | | | | -1 | | | | | | | | |
| あきたこまち | | 8/7 | 8/9 | 8/5 | 8/7 | 7/29 | 8/3 | 2 | 2 | 4 | 6 | 5 | 8 | 7 | 4 | 2 |
| ひとめぼれ | | 8/14 | 8/16 | 8/9 | 8/14 | 8/5 | 8/8 | 2 | 5 | 2 | 8 | 6 | 8 | 3 | 6 | 1 |
| ササニシキ | | 8/12 | 8/14 | | | | | | | | | | | | | |
| コシヒカリ | | 8/22 | 8/24 | 8/18 | 8/20 | 8/16 | 8/17 | 2 | 2 | 0 | 7 | 3 | 5 | 1 | 5 | 1 |
| 日本晴 | | 9/4 | 9/4 | 8/26 | 8/30 | 8/27 | 8/26 | 0 | 3 | -1 | 8 | 4 | 8 | -1 | 8 | 0 |
| にこまる | | 9/15 | 9/17 | | | | | | | | | | | | | |
| レイホウ | | 9/11 | 9/13 | | | | | | | | | | | | | |
| （つくば） | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ひとめぼれ | | | | 7/23 | 7/26 | 7/21 | 7/27 | | 3 | 6 | | | | | | |
| コシヒカリ | | | | 7/31 | 8/2 | 8/1 | 8/5 | | 2 | 4 | | | | | | |
| 日本晴 | | | | 8/9 | 8/9 | 8/12 | 8/14 | | 0 | 2 | | | | | | |
| にこまる | | | | 8/22 | 8/26 | 8/21 | 8/23 | | 4 | 2 | | | | | | |
| （合志、作期 a） | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ひとめぼれ | | | | 8/14 | 8/13 | 8/15 | 8/13 | | -1 | -2 | 0 | | -1 | | 1 | |
| コシヒカリ | | | | 8/14 | 8/11 | 8/16 | 8/12 | | -3 | -4 | -1 | | -2 | | 2 | |
| 日本晴 | | | | 8/20 | 8/18 | 8/25 | 8/19 | | -2 | -6 | -1 | | -5 | | 1 | |
| にこまる | | | | 8/26 | 8/27 | 8/31 | 8/27 | | 1 | -4 | 0 | | -5 | | -1 | |

2. 開放系日長時間処理実験

ア. 研究目的

緯度の低い地点が緯度の高い地点に比べて気温が高いことを利用して、高緯度側の温暖化影響評価実験を行うためには、夏期日長の短い低緯度側の日長を高緯度に合わせる必要がある。植物にとっての日長は、可照時間や日出から日没までの時間に加え、日出前および日没後の薄明期も含む時間であると考えられている。それは、植物は薄明期の明るさも昼としてとらえていると考えられているためである (IRRI, 1985)。植物の光周性を押さえた正確な日長時間をとらえるためには、薄明期についても考慮する必要がある。

ところで、薄明期は市民薄明期、航海薄明期、天文薄明期に分けられ、太陽高度でそれぞれ $0 \sim -6^\circ$ 、 $-6 \sim -12^\circ$ 、 $-12 \sim -18^\circ$ の照度に相当する (Kimball, 1916)。薄明期の中でも市民薄明期は植物が昼として認識している十分な照度とされている (IRRI, 1985)。

ここでは、水稻を対象として市民薄明期を中心に太陽高度でどれくらいの照度を植物が昼として認識しているのか、すなわち光周性からみた水稻の明暗期境界照度はどれくらいなのか、太陽高度をベースにして明らかにし、緯度の異なる2地点間で温暖化影響評価を行うために必要な日長処理方法についての知見を得ようとした。

イ. 研究方法

1) 水稻の明暗期境界照度解明のための予備実験

Katayama (1964) は、日出時と日没時で同じ太陽高度であっても、照度が異なることを報告している。そこで実験は、日長処理を日出時と日没時に分けて、それぞれ独立させて行った。水稻は短日植物であるため、日長が長くなると花芽分化がおくれ出穂が遅くなる (IRRI, 1985)。補光時間の長さを変えることによって、各処理区間で出穂期のズレが生じる。これを利用して明暗期境界照度を明らかにしようとした。

実験は九州沖縄農業研究センター (緯度 $N32^\circ 52.8'$ 、経度 $E130^\circ 44.6'$ 、高度 81m) において行った。実験に利用した水稻品種は、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、にこまる、である。ポット (1/10000a) に肥料成分を含まない被覆培土 (くみ

あい粒状覆土、北海三供) を充填し、肥料は化成肥料でN、 K_2O 、 P_2O_5 をそれぞれ株当たりで 0.06g (成分量) 施用した。苗は慣行法により育苗し、4.0葉に達した苗をポットに移植した。ポットは水を張ったコンテナ (大きさ: $680 \times 380 \times 230$ mm) に設置した。反復は5反復 (5ポット) とした。

表 I-2-1 には、2009 年に日出時に日長処理を行った実験のスケジュールを示した。日長処理は、例えば処理区 SLM (-8) の場合、太陽高度が -8° の時補光処理を開始し、太陽高度が $+6^\circ$ に達したとき処理を終了する。表 I-2-2 には 2008 年に行った日没時の日長処理実験のスケジュールを示した。日長処理はレフ電球を用いた (RF110V90WH、パナソニック)。電球のオン、オフは、1 分刻みで制御可能なタイマー (KS-1500A, 小泉コンピューター) を用いて行った。図 I-2-1-a および b には、日長処理状況を示した。電球はポット上 1m に設置し、電球下の照度は 1000lx 以上と補光処理に十分な照度であった。日長処理は出穂期まで行った。表 I-2-3 には 2008 年および 2009 年の耕種日程および日長処理開始日、処理開始時の水稻の葉齢を

表 I-2-1 日の出時の日長処理スケジュール

| 処理 | 処理開始時の太陽高度 | 処理終了時の太陽高度 |
|----------|------------|------------|
| NDL | - | - |
| SLM (+4) | $+4^\circ$ | $+6^\circ$ |
| SLM (+2) | $+2^\circ$ | $+6^\circ$ |
| SLM (0) | 0° | $+6^\circ$ |
| SLM (-2) | -2° | $+6^\circ$ |
| SLM (-4) | -4° | $+6^\circ$ |
| SLM (-6) | -6° | $+6^\circ$ |
| SLM (-8) | -8° | $+6^\circ$ |

NDL: 自然日長 (natural day length)

SLM: 処理区名 (supplemental light treatment in the morning)

表 I-2-2 日没時の日長処理スケジュール

| 処理 | 処理開始時の太陽高度 | 処理終了時の太陽高度 |
|----------|------------|------------|
| ND | - | - |
| SLE (+4) | $+6^\circ$ | $+4^\circ$ |
| SLE (+2) | $+6^\circ$ | $+2^\circ$ |
| SLE (0) | $+6^\circ$ | 0° |
| SLE (-2) | $+6^\circ$ | -2° |
| SLE (-4) | $+6^\circ$ | -4° |
| SLE (-6) | $+6^\circ$ | -6° |
| SLE (-8) | $+6^\circ$ | -8° |

NDL: 自然日長 (natural day length)

SLE: 処理区名 (supplemental light treatment in the evening)

表 I-2-3 耕種日程および日長処理開始日等

| | 播種日 | 移植日 | 日長処理開始日 | 日長処理開始時の葉齢 |
|-------|-------|-------|---------|------------|
| 2008年 | 5月28日 | 6月18日 | 7月1日 | 6.0 |
| 2009年 | 6月2日 | 6月19日 | 7月5日 | 6.5 |



図 I-2-1 日長処理実験の状況
(a: 電球の位置、b: 処理風景)

示した。なお、水稻は日長処理を開始するまで自然日長下で生育させた。

各処理区の配置を図 I-2-2 に示した。各処理区は、処理区間の補光処理による干渉効果を避ける

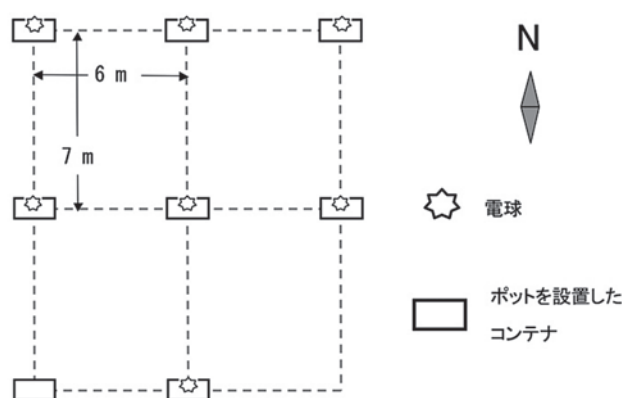


図 I-2-2 予備実験における各日長処理区の配置

表 I-2-4 電球からの距離と照度との関係 (ポット実験)

| 距離(m) | 照度(lx) |
|-------|--------|
| 0 | - |
| 1 | 80.00 |
| 2 | 10.80 |
| 3 | 0.61 |
| 4 | 0.23 |
| 5 | 0.12 |
| 6 | 0.08 |
| 7 | 0.07 |
| 8 | 0.07 |
| 9 | 0.06 |

電球下 120cm

ため図に示した通り、6~7mの間隔を空けた。干渉効果の確認のため、電球からの距離と照度の関係について照度計 (T-10、コニカミノルタ) を用いて調べ、その結果を表 I-2-4 に示した。電球からの距離が 2m の地点で 10.80lx、3m で 0.61lx、4m で 0.23lx、5m で 0.12lx、6m で 0.08lx であった。水稻の花芽形成は 1lx 以上の強さの光で出穂が遅れることが報告されている (IRRI, 1985)。このことから 3m 以上の距離を取れば問題はないと判断されるが、実験結果の精度を保つために 6m 以上の間隔を空けることにした。

出穂期は、株当たりの出穂したすべての茎数に対して出穂した茎数が 50% 以上になった日とした。

表 I-2-5 日の出時および日没時の日長処理スケジュール

| 処理区 | 処理時の太陽高度 (日の出時) | | 処理時の太陽高度 (日没時) | |
|---------|--------------------|-----|-------------------|-----|
| | 開始時 | 終了時 | 開始時 | 終了時 |
| NDL | - | - | - | - |
| SL (0) | 0° | +6° | +6° | 0° |
| SL (-1) | -1° | +6° | +6° | -1° |
| SL (-2) | -2° | +6° | +6° | -2° |
| SL (-3) | -3° | +6° | +6° | -3° |

NDL : 自然日長 (natural day length)
SL : 処理区名 (supplemental light treatment)

表 I-2-6
電球からの距離と照度
との関係 (圃場実験)

| 距離(m) | 照度(lx) |
|-------|---------|
| 0 | 1160.00 |
| 1 | 220.00 |
| 2 | 24.60 |
| 3 | 2.49 |
| 4 | 1.07 |
| 5 | 0.50 |
| 6 | 0.35 |
| 7 | 0.19 |
| 8 | 0.17 |
| 9 | 0.11 |

電球下 120cm

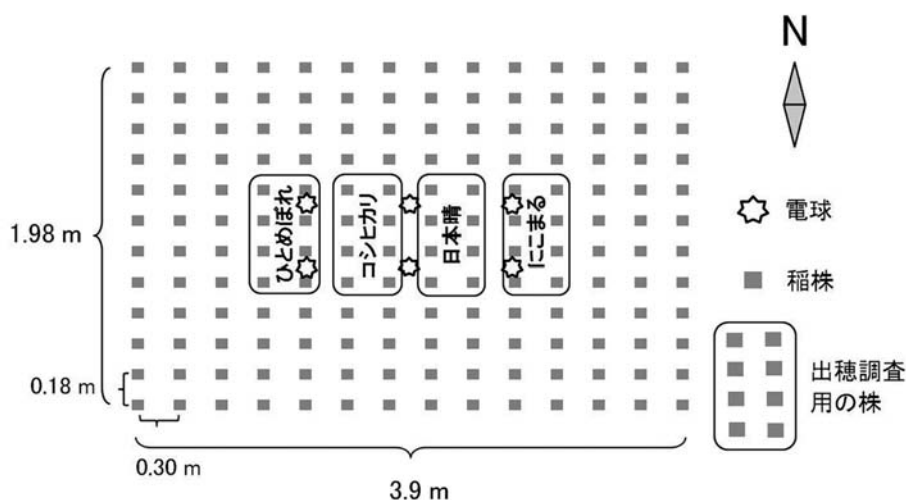


図 I-2-3 圃場実験における各水稻品種と電球の配置

球は各処理区とも水田土壌面からの高さ 1.2m の位置に 6 個設置した。出穂調査を行う株上の照度は 800lx 以上と実験を行うにあたり十分な照度が得られた。処理区は同じ圃場に補光による処理区と処理を行わない自然日長区を合わせて 5 処理区を設けた (表 I-2-5)。補光処理は葉齢がおよそ 5.0 に達した 6 月 22 日より開始した。処理を開始するまでは、水稻は自然

2) 水稻の太陽高度に基づいた明暗期境界照度

1) の実験結果を受けて、圃場で栽培した水稻群落に日出時、日没時に日長処理を行い、さらに詳しい太陽高度に基づく明暗期境界照度を明らかにしようとした。

水稻の品種にはポット実験と同じ、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、にこまるを用いた。各日長処理区の処理スケジュールは表 I-2-5 に示した。処理スケジュールは、例えば SL (-3) の場合、日出時は太陽高度が -3° に達した時に処理を開始し太陽高度が +6° に達したときに処理を終了、日没時は太陽高度 +6° から処理を開始し -3° で終了する。

水稻の育苗は 5 月 31 日に播種し慣行法により育苗した。およそ 3.5 葉に達した苗を 2011 年 6 月 16 日に九州沖縄農業研究センター圃場に株間 18cm、条間 30cm で移植した。圃場での補光処理に用いた電球の配置と移植状態を図 I-2-3 に示した。電

球は各処理区とも水田土壌面からの高さ 1.2m の位置に 6 個設置した。出穂調査を行う株上の照度は 800lx 以上と実験を行うにあたり十分な照度が得られた。処理区は同じ圃場に補光による処理区と処理を行わない自然日長区を合わせて 5 処理区を設けた (表 I-2-5)。補光処理は葉齢がおよそ 5.0 に達した 6 月 22 日より開始した。処理を開始するまでは、水稻は自然

日長下で生育させた。肥料は移植前に化成肥料で N、K₂O、P₂O₅ を成分で 5 kg/10a を、牛ふん堆肥を 1.4t/10a 施用した。
ポット実験と同様に、処理区間の補光処理の干渉効果について検討を行った。表 I-2-6 には電球からの距離と照度との関係を示した。電球から 4m の照度は 1.07lx、5m 0.50lx、6m 0.35lx、7m 0.19lx、8m 0.17lx と 5m 以上で花芽分化への影響が現れる閾値 1.0lx を下回った。圃場実験でも実験結果の精度を保つために、処理区間の間隔を 7m 以上空けることにした。ポット実験と同様に日長処理による出穂期のズレによって明暗期境界照度を明らかにするために、各処理区の出穂期を調査した。

3) 太陽高度による明暗期境界照度に基づいた日長処理の妥当性の検討

2) の実験結果から得られた太陽高度に基づく明暗期境界照度の妥当性を確かめるために、札幌 (北海道農業研究センター : 緯度 N43° 0.5'、経度

E141° 24.7′、高度 70m)、つくば（中央農業総合研究センター：緯度 N36° 0.4′、経度 E140° 1.2′、高度 11m）、熊本（九州沖縄農業研究センター）の圃場において実験を行った。各場所とも慣行法により育苗した苗を、札幌は 2010 年 5 月 26 日、つくば 5 月 26 日、熊本 5 月 12 日に移植した。実験に用いた品種は、札幌が、きらら 397、あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリ、つくばが、にこまる、日本晴、コシヒカリ、ひとめぼれ、あきたこまち、熊本が、にこまる、日本晴、コシヒカリ、ひとめぼれである。

日長処理方法は 2) の実験方法に準じた。日長処理は日出時が太陽高度で $-2.5^{\circ} \sim +6.0^{\circ}$ の間に、日没時が $+6.0^{\circ} \sim -2.0^{\circ}$ に行った。また、熊本では上記の他に、日長処理の時間を短くした、日出時 $-2.0^{\circ} \sim +6.0^{\circ}$ 、日没時 $+6.0^{\circ} \sim -2.0^{\circ}$ の処理区も設けた。日長処理は移植直後から開始した。この実験では、各場所で日長処理区と自然日長条件下で栽培した水稻の出穂期を比べることで、太陽高度による明暗期境界照度に基づいた日長処理の妥当性について検証しようとした。

(補足) 補光処理実験時の各地域における日長および水稻の日長感性について

実験開始時（日長処理開始時）の水稻の日長反応性、また各地の自然日長条件について若干の補足を加える。水稻の栄養生長期は日長に反応しない基本栄養生長相と反応する感光相からなり、基本栄養生長相は、出芽後 21~25 日間とされている（横尾・菊池，1982）。一方で、Sasamura (1960) は葉齢で 5.0 の苗でさえわずかながら光に対する感受性を有していると報告している。また、水稻の光に対する感受性は、生育に伴って高くなるとしている（IRRI, 1985）。今回の実験では、日長処理開始時の葉齢は 5.0~6.5 であった。これまでの報告から、この時点で水稻は光に対する感受性を備えていたと考えられる。図 I-2-4 には札幌、つくば、熊本の日長時間（可照時間）の年変化を示した。図のように緯度の高い地点ほど水稻の生育期間中の日長が長い。

4) 早晚性の異なる水稻品種の日長感性の評価

当プロジェクトでは日本各地の水稻品種を用いており、日長反応性の強弱（限界日長時間の長短、長日条件下での花芽形成抑制の強弱）はそれぞれ異なっている。そこで、太陽高度による明暗境界照度

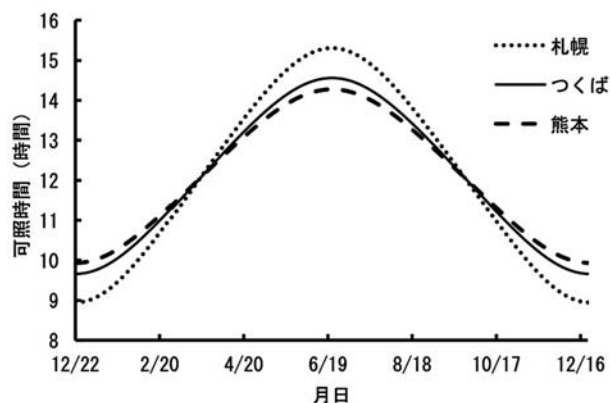


図 I-2-4 各地の可照時間の季節変化

の解析に資するため、今回供試した品種を中心として、早晚性の異なる複数の水稻品種について、以下のとおり日長感性の強弱を調査した。

試験は、石垣島にある国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼研究拠点（緯度 N24° 22.7′、経度 E124° 11.7′、高度 30 m）のガラス温室内にて実施した。朝晩、電照によって日長時間を延ばすことで日長を調整し、日長時間 11 時間から 1 時間刻みにて 16 時間までの 6 段階（6 処理）とした。なお、試験を石垣島で実施したのは、自然日長が短く日長制御が容易で、冬期でも水稻の栽培試験が可能ためである。供試品種は、きらら 397、あきたこまち、ひとめぼれ、こしひかり、日本晴、にこまるとし、参考として熱帯で栽培される IR36、IR74 を加えた。2009 年 10 月 11 日に播種、同 22 日に葉令 2.5~3.0 葉の苗を栽培コンテナ（深さ 23cm×幅 34cm×長さ 50cm）に各品種 4 個体ずつ計 32 個体を移植し、移植と同時に上記日長処理を開始した。コンテナひとつを 1 区と見なし、各処理 2 反復（2 コンテナ）ずつとした。各個体について出穂期を調査した。

ウ. 結果および考察

1) 水稻の明暗期境界照度解明のための予備実験

図 I-2-5 には日出時に補光処理を行った各処理区の出穂期を示した。日本晴では SLM (+4)、SLM (+2)、SLM (0) の各処理区すなわち補光処理を太陽高度で $+4^{\circ}$ 、 $+2^{\circ}$ 、 0° から $+6^{\circ}$ まで行った処理区の出穂期は、自然日長区である NDL の出穂期との間に差はみられなかった。一方、太陽高度で -2° 、 -4° 、 -6° 、 -8° から処理を開始した SLM (-2)、SLM (-4)、SLM (-6)、SLM (-8) は、NDL との間に出穂期のズレ

が観察され、処理開始時の太陽高度が低いほど（補光処理が長いほど）、出穂が遅れた。統計処理では、SLM（-2）、SLM（-4）、SLM（-6）、SLM（-8）とNDLとの間に有意差がみられたが、SLM（+4）、SLM（+2）、SLM（0）とNDLの出穂期には有意差はみられなかった。他の品種をみると、同じく処理開始時の太陽高度が低いほど、NDLと比べて出穂期が遅れた。統計処理の結果をみると、ひとめ

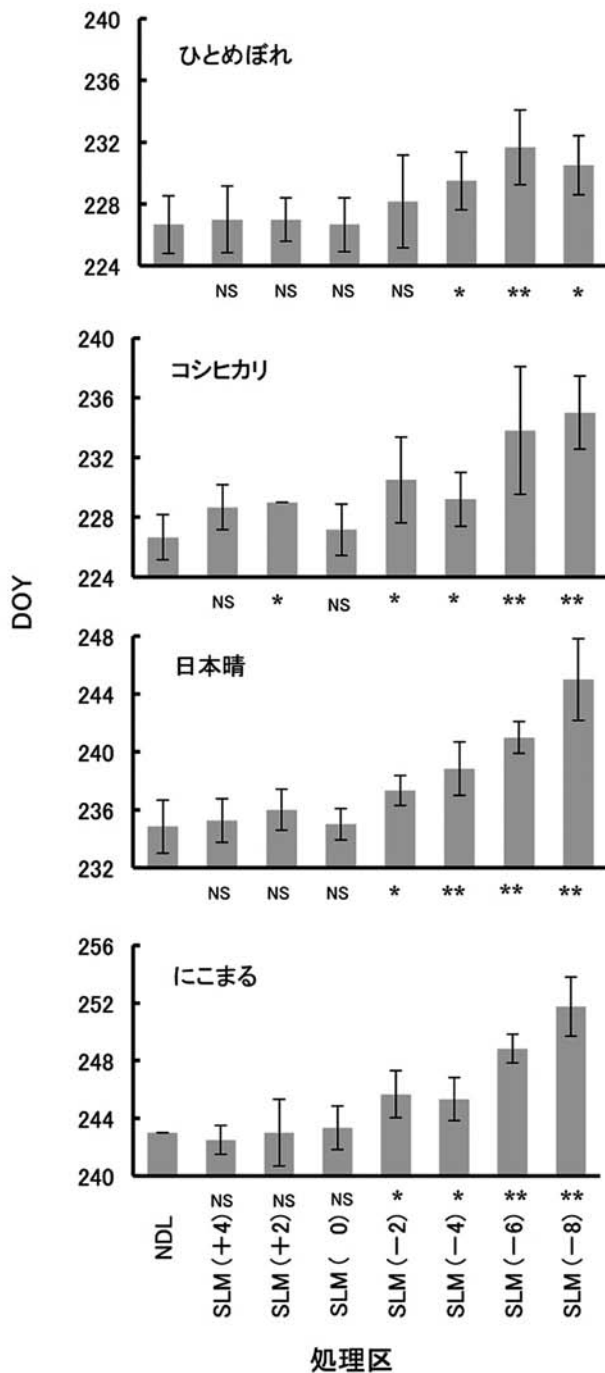


図 I - 2 - 5 日出時の日長処理による水稻の出穂期の変化

ぼれを除いてSLM（-2）、SLM（-4）、SLM（-6）、SLM（-8）の出穂期はNDLの出穂期との間に有意差が認められた。図 I - 2 - 6 には各処理区とNDLの出穂期の差。すべての品種の日長処理反応を総合的に判断すると、SLM（0）とNDLの出穂期に差はみられないが、NDLとSLM（-2）との間に差がみられたことから、明暗期境界照度は太陽高度で -2° から 0° の間に存在すると考えられた。

次に図 I - 2 - 7 には、日没時に日長処理した

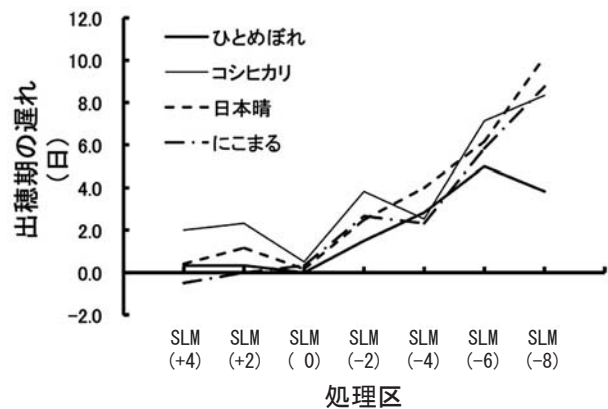


図 I - 2 - 6 日出時の日長処理による自然日長区に対する出穂期の遅れ

場合の各処理区の品種ごとの出穂期を示した。日出時の処理と同じように、日長処理の時間が長いほどNDLに対して出穂期が遅れた。ひとめぼれは、SLE（+4）、SLE（+2）、SLE（0）、SLE（-2）、SLE（-4）とNDLの出穂期に差は認められなかったが、SLE（-6）、SLE（-8）とNDLの間に出穂期に差がみられた。日本晴では、SLE（+4）、SLE（+2）、SLE（0）とNDLの間に出穂期の差はみられないが、SLE（-2）とNDLの間に若干の出穂期の差がみられた（統計的に有意な差はみられなかった）。にこまるでは、SLE（+4）、SLE（+2）、SLE（0）とNDLの間に出穂期に差はみられなかったが、SLE（-2）とNDLの出穂期の間には有意な差が認められた。コシヒカリでは、SLE（+4）、SLE（+2）、SLE（0）、SLE（-2）とNDLを比べると出穂期に差はみられない。一方、図 I - 2 - 8 のコシヒカリの各日長処理区とNDLの出穂期の差をみると、SLE（-2）はSLE（+4）、SLE（+2）、SLE（0）に比べると若干出穂期が遅れているようにみられる。図 I - 2 - 8 中でひとめぼれを除いたすべての品種について日長処理に対する反応を総合的に判断すると、SLE（0）とSLE（-2）の間に出穂

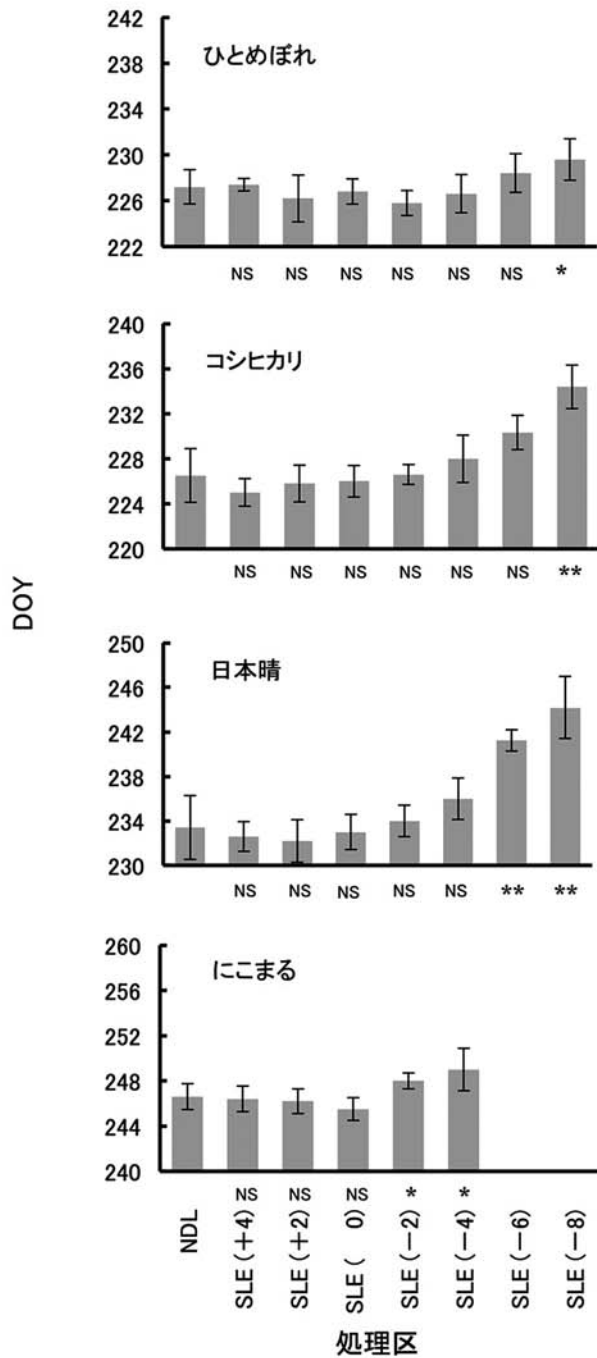


図 I - 2 - 7 日没時の日長処理による水稻の出穂期の変化

期の差が存在するように思われた。

これらの結果から、日没時の日長処理実験でも明暗期境界照度は太陽高度で 0° ~ -2° の間に存在すると考えられた。

Katayama (1964) は、同じ太陽高度であっても日出時と日没時で照度が異なる事を報告している。これは、都市や工業地帯に近いところで実験を行ったため、排気、排煙により大気混濁度が大きく、それ

により日出時と日没時の照度が異なったものと考えられる (岸田, 1986)。本実験は、都市や工業地帯から離れた場所で行ったため、それらの影響はほとんどなく、そのため日没時と日出時の明暗期境界照度に差はみられなかったものと考えられる。

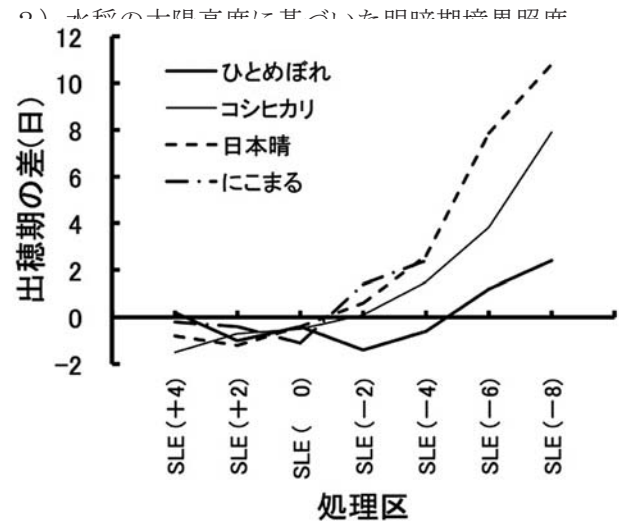


図 I - 2 - 8 日没時の日長処理による自然日長区に対する出穂期の遅れ

図 I - 2 - 9 には予備実験の結果を踏まえて行った圃場実験の結果を示した。予備実験では太陽高度を 2° 刻みで日長処理を行ったが、圃場実験では 1° 刻みで日長処理を行った。結果をみると、コシヒカリと日本晴では SL (0) と SL (-1) の出穂期は NDL の出穂期との間に差はみられなかった。一方で SL (-2) と SL (-3) は NDL の出穂期との間に有意な差が認められた。ひとめぼれとにこまるでは NDL と SL (0) の出穂期との間に有意な差は認められないが、SL (-1)、SL (-2)、SL (-3) と NDL の間には有意な差が認められた。図 I - 2 - 10 には各処理区と NDL の出穂期の差を示した。品種による反応の差はみられるが、すべての品種の反応を総合的に判断して明暗期境界照度の閾値は太陽高度で、 -1° と -2° の間に存在するものと考えた。

薄明期の照度は、天候に左右される。岸田 (1986) は晴天日、曇天日 (上層雲)、曇天日 (下層雲) の太陽高度との関係を報告しており、太陽高度が -1° の時、それぞれ 385lx、230lx、90lx、 -2° で 200lx、110lx、36lx、 -3° で 88lx、46lx、11.8lx と報告している。このように太陽高度が同じであっても天候により照度は変化する。この実験で得られた

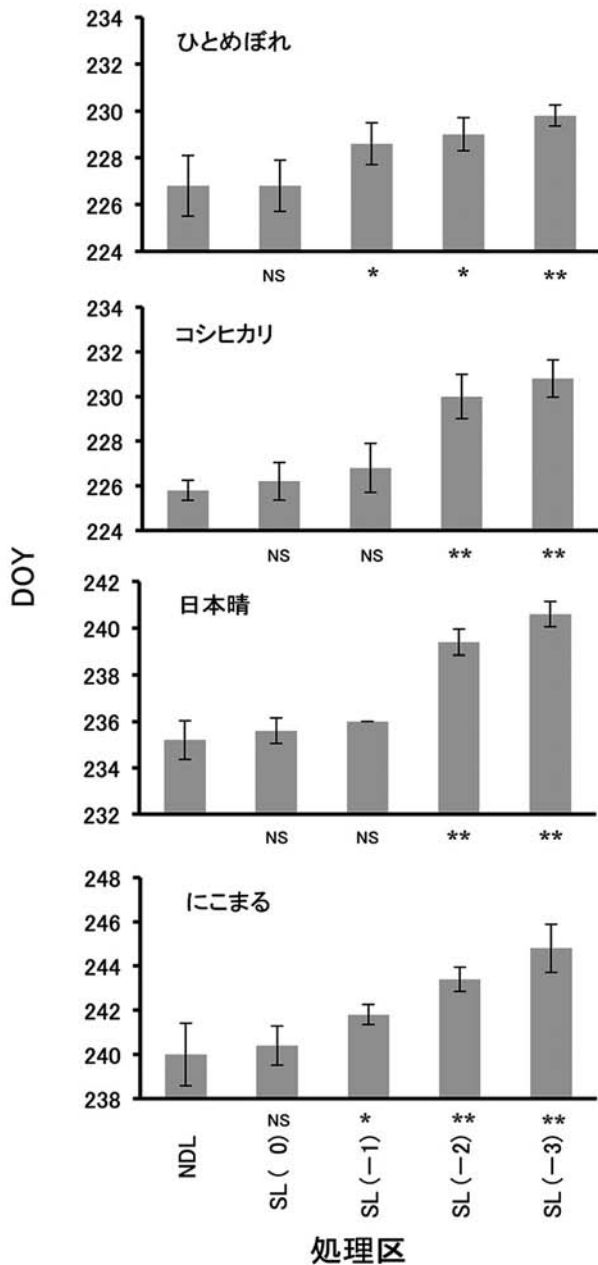


図 I - 2 - 9 日出時および日没時の日長処理による水稻の出穂期の変化

太陽高度に基づく明暗期境界照度の閾値は、水稻が日長に反応する生育ステージにおける明暗期境界照度の平均値を示していると考えられる。池田(1978)は水稻の日長に有効な薄明期は天文学的日没後 10~15 分と報告している。これを太陽高度に換算すると、日没後 -2° ~ -3° に相当する時間と推察された。本研究では日長に有効な期間は日没後 -1° から -2° に相当すると結論した。この両者の違いは、実験実施時期の天候によるものと考えられた。同じ時期でも地域によって太陽高度に基づく明暗期

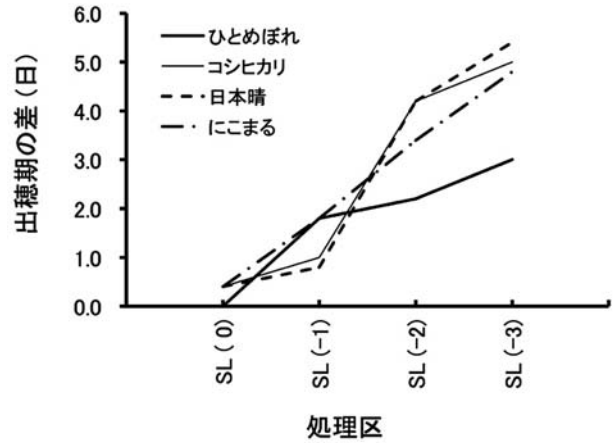


図 I - 2 - 10 日出時および日没時の日長処理による自然日長区に対する出穂期の遅れ

境界照度は異なると考えられる。

また、これら一連の実験で、ひとめぼれは日長処理に対して他の品種と異なった反応を示した。その理由として、ひとめぼれは他の品種に対して早生の品種であり、感光性が低く、限界日長が長いと考えられた (Sakamoto and Toriyama, 1967)。(後述の「5) 早晩性の異なる水稻品種の日長感性の評価」結果参照)。

3) 太陽高度による明暗期境界照度に基づいた日長処理の妥当性の検討

表 I - 2 - 7 には札幌における、本研究で得られた太陽高度に基づく明暗期境界照度を適用して実施した日長処理の妥当性についての検討結果を示した。感光性の低いきさら 397、あきたこまち、ひとめぼれでは、自然日長区との出穂期に差はみられなかったが、コシヒカリでは日長処理区は自然日長区に比べて 3 日の出穂期の遅れがみられた (5%水準で有意差あり)。表 I - 2 - 8 には、つくばにおける実験結果を示した (統計処理は行っていない)。にこまる、日本晴、ひとめぼれ、あきたこまちでは日長処理によって数日の出穂の遅れが、コシヒカリでは 4 日の遅れが観察された。同じく表 I - 2 - 9 には熊本での結果を示した。日出時が -2.5° ~ $+6.0^{\circ}$ 、日没時が $+6.0^{\circ}$ ~ -2.0° の日長処理では、にこまる、ひとめぼれは自然日長区と比べると数日の出穂期の遅れであった。一方、日本晴、コシヒカリは自然日長区より出穂期がそれぞれ 5 日、4 日の遅れが認められた (5%水準で有意差あり)。日出時 -2.0° ~ $+6.0^{\circ}$ 、日没時 $+6.0^{\circ}$ ~ -2.0° の

表 I-2-7 自然日長区と日長処理区の水稲の出穂期（札幌、2010 年）

| | 自然日長区 | 日長処理区 |
|--|----------|----------------|
| きらら 397 | 7 月 26 日 | 7 月 26 日 (±0) |
| あきたこまち | 8 月 10 日 | 8 月 10 日 (±0) |
| ひとめぼれ | 8 月 15 日 | 8 月 15 日 (±0) |
| コシヒカリ | 8 月 31 日 | 9 月 3 日 (+3)** |
| 日出時の日長処理時の太陽高度 $-2.5\sim+6.0^\circ$ 、日没時 $+6.0\sim-2.0^\circ$ ()内は自然日長区の出穂期との差 ** : 1% 水準で自然日長区の出穂期と有意差あり | | |

表 I-2-8 自然日長区と日長処理区の水稲の出穂期（つくば、2010 年）

| | 自然日長区 | 日長処理区 |
|---|----------|---------------|
| にこまる | 8 月 21 日 | 8 月 22 日 (+1) |
| 日本晴 | 8 月 10 日 | 8 月 13 日 (+3) |
| コシヒカリ | 8 月 1 日 | 8 月 5 日 (+4) |
| ひとめぼれ | 7 月 24 日 | 7 月 26 日 (+2) |
| あきたこまち | 7 月 20 日 | 7 月 21 日 (+1) |
| 日出時の日長処理時の太陽高度 $-2.5\sim+6.0^\circ$ 、日没時 $+6.0\sim-2.0^\circ$ ()内は自然日長区の出穂期の差 | | |

表 I-2-9 自然日長区と日長処理区の水稲の出穂期（熊本、2010 年）

| | 自然日長区 | 日長処理区 | |
|-------|----------|-----------------|-----------------|
| | | $-2.5, -2.0^1)$ | $-2.0, -2.0^2)$ |
| にこまる | 8 月 28 日 | 8 月 30 日 (+2) | 8 月 30 日 (+2) |
| 日本晴 | 8 月 21 日 | 8 月 26 日 (+5)* | 8 月 26 日 (+5)* |
| コシヒカリ | 8 月 16 日 | 8 月 20 日 (+4)* | 8 月 17 日 (+1) |
| ひとめぼれ | 8 月 18 日 | 8 月 19 日 (+1) | 8 月 17 日 (-1) |

1) 日出時の日長処理時の太陽高度 $-2.5\sim+6.0^\circ$ 、日没時 $+6.0\sim-2.0^\circ$

2) 日出時の日長処理時の太陽高度 $-2.0\sim+6.0^\circ$ 、日没時 $+6.0\sim-2.0^\circ$

()内は自然日長区の出穂期との差

* : 5% 水準で自然日長区の出穂期と有意差あり

日長処理では、ひとめぼれの日長処理区は、自然日長区に比べて出穂期が 1 日早かった。にこまる、コシヒカリでは、日長処理区の出穂期は、それぞれ 2 日、1 日遅れた。日本晴では、5 日の出穂期の遅れが観察された（5%水準で有意差あり）。日長処理時間を短くすることによって、日出時が $-2.5^\circ\sim+6.0^\circ$ 、日没時が $+6.0^\circ\sim-2.0^\circ$ の処理に比べて、日長処理区と自然日長区の出穂期の差が小さくなる傾向が見られた。

太陽高度による明暗期境界照度に基づいた日長処理の妥当性の検討では、日出時が $-2.5^\circ\sim+6.0^\circ$ 、日没時が $+6.0^\circ\sim-2.0^\circ$ 、および日出時 $-2.0^\circ\sim+6.0^\circ$ 、日没時 $+6.0^\circ\sim-2.0^\circ$ の処理で、日長処理により出穂期の遅れが認められた。自然日長区と日長処理区の出穂期が同じであることが理想で

あるが、日長処理により出穂期が遅れた方が処理の効果が確認できるため、日長処理により出穂期がやや遅れるように処理をしたほうが良いと考えられた。よって、本研究での日長処理スケジュール、日出時が $-2.5^\circ\sim+6.0^\circ$ 、日没時が $+6.0^\circ\sim-2.0^\circ$ 、または日出時 $-2.0^\circ\sim+6.0^\circ$ 、日没時 $+6.0^\circ\sim-2.0^\circ$ は妥当であったと考えられる。

4) 早晚性の異なる水稲品種の日長感応性の評価
各品種の、日長時間と出穂日との関係を図 I-2-11 に示す。きらら 397 は、日長が異なっても出穂日はほとんど影響を受けておらず、日長感応性を持たないことが示された。また、IR36 は日長が長いほど出穂が遅いものの、その変化量は極僅かであることから、日長感応性はごく弱い。一方で短日の 11 時間

日長でも出穂は他品種より遅いことから、IR36 は基本栄養生長期間が他品種よりも長い。あきたこまちとひとめぼれはそれぞれ長日条件で出穂が遅れたが、短日条件と長日条件での出穂日の差は比較的小さく、日長感応性は強くない。また、ひとめぼれは日長時間 13 時間で出穂が遅れたが、あきたこまちの出穂期が遅れるのは日長時間 14 時間以上であることから、ひとめぼれの方が限界日長が短い。IR74 は、13 時間日長でも出穂が遅くなるものの、頭打ちとなる日長は短く、また短日と長日との日長時間差はひとめぼれ・あきたこまちと同程度であった。コシヒカリは、日長時間 13 時間まではひとめぼれと同じ出穂期だが、14 時間以上で直線的に出穂が遅くなるなど、強い日長依存性を示した。日本晴、にこまるは日長時間 13 時間でも出穂期が遅く

なるなど、さらに強い日長感応性を示した。品種の主産地で整理すると、国内品種は南で栽培されるものほど日長感応性が強く、基本栄養生長性には大きな差は無かった。緯度が低いほど夏期の日長が短く、1年を通して日長の変動が少ないが、低緯度で栽培されるIR系統は、日長感応性が低く、基本栄養生長期間が長かった。

石垣島での日長感応実験で、ひとめぼれは、にこまる、日本晴、コシヒカリとは日長反応が異なることが確認できた。この結果は、一連の明暗期境界照度の解明に関する実験で、ひとめぼれが他の品種とは異なった日長反応を示したことを裏付けていると考えられた。

3) で提案された明暗境界照度となる太陽高度の基準は、この様に日長感応性の大きく異なる品種で検討された結果であり、少なくとも国内品種に対しては汎用性が高いと判断される。

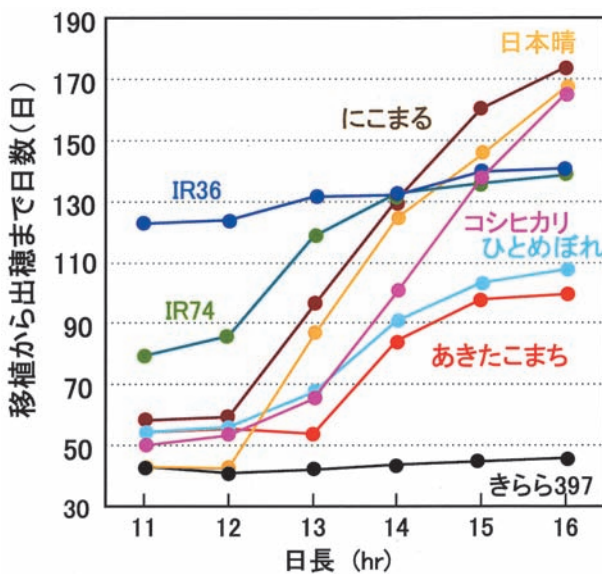


図 I-2-11 各水稻品種の日長感応性

エ. 今後の課題

本研究で明らかになった太陽高度に基づく明暗期境界照度は、池田 (1978) の報告と若干の違いもみられる。これは上にも記したとおり天候によるものと考えられるが、本手法で温暖化影響評価実験を行う各地の日出時、日没時の薄明期の太陽高度と照度の関係を把握する必要があると考えられた。

オ. 要約

水稻の明暗期境界照度は、日出時、日没時とも同

じであり、太陽高度で $-1^{\circ} \sim -2^{\circ}$ の照度に相当すると考えられた。緯度の異なる2地点間で温暖化影響評価実験を行う場合、緯度の高い地点の日長を、日出時の太陽高度が -2.5° ～日没時の太陽高度が -2.0° まで、または日出時 -2.0° ～日没時 -2.0° までとし、緯度の低い地点をこの日長に合わせることで、温暖化影響評価を行うことができると考えられた。供試した品種は南北幅広い地域から集められ、日長感応性も地域間で大きく異なることが確認されたことから、上記日長処理基準は、少なくとも国内品種に対しては汎用性が高いと判断される。

カ. 参考文献

- 池田勝彦 (1978) . 水稻の花成におよぼす薄明の影響. 日作東海支部研究梗概. 81 : 64 - 66.
- IRRI (1985) . The flowering response of the rice plant to photoperiod. International Rice Research Institute. Philippines. 1 - 61.
- Katayama, C. T. (1964). Photoperiodism in the genus oryza. II. Jpn. J. Bot. 18 (3) : 349 - 383.
- Kimball, H. H. (1916) . The duration and intensity of twilight. Monthly Weather Review. 44 : 614 - 620.
- 岸田恭充 (1986) . 自然日長における薄明期の照度. 農業気象. 41 : 359 - 363.
- Sakamoto, S., and Toriyama, K. (1967) . Studies on the breeding of non-seasonal short duration rice varieties with special reference to the heading characteristics. Bull. Chugoku Natl. Agric. Exp. Stn. Ser. A. 14 : 147 - 166.
- Sasamura, S. (1960) . Studies on the relation between the plant age and the degree of sensibility to short daylength in the late paddy rice variety Zuiho. Jpn. J. Crop Sci. 28 : 355 - 358.
- 横尾政雄・菊池文雄 (1982) . イネの基本栄養生長相と感光相の1遺伝子支配. 育雑. 32 : 1 - 8.

執筆担当者 (脇山恭行)

3. 温度勾配チャンバー (TGC) 実験

(1) 気温・水温および日長の影響の分離評価

ア. 研究目的

温度勾配チャンバー (TGC: Temperature Gradient Chamber) とは、細長い栽培温室の一方の妻面を入気口とし、もう一方の妻面から換気扇で排気することにより、温室の棟方向に一定の空気の流れを作り、日射やその他の熱源により棟方向に温度の勾配を作成した栽培実験装置であり (図 I-3(1)-1)、わずかに数°Cの温度幅内での連続的な温度-作物反応データを取得することができる。TGC内の気温の時間変化は外気温の変化を追随し、また日射・日長条件はガラス室等の人工気象室に比べ野外に近いので、わずかな温度上昇の影響を対象とする温暖化影響評価に適した実験装置である。そこで、温度・日長条件の異なる札幌 (北農研)、盛岡 (東北農研)、熊本 (九州農研) の3地点のTGCで水稻の栽培試験を実施し、幅広い温度域での水稻の温度反応を調査する。また、水稻の温度-発育反応は、気温だけではなく水温にも依存しており、水稻の発育段階によって気温と水温 (地温) のどちらにより強く依存するかが異なり、生育初期には水温に、幼形期以降は気温に依存すると報告されている (松島ら, 1964; 柴田ら, 1973 など)。温暖化が水稻の発育に及ぼす影響をより詳細に評価・予測するためには、短日植物である水稻が日長反応を開始する時期の特定と同時に、気温と水温それぞれへの依存度を発育時期別に評価しなければならない。そこで、TGC内で生育時期別の水温処理を行い、水稻の発育 (出穂) に水温・気温が及ぼす影響を生育段階ごとに評

価し、温暖化影響評価のための基礎的なデータを取得する。

イ. 研究方法

試験は、先述の通り札幌 (北農研)、盛岡 (東北農研)、熊本 (九州農研) の3カ所のTGCで実施した。各地点のTGCの概要を表 I-3(1)-1に示す。TGCは構造上、内部の気温は入気口付近であっても外気よりも高くなってしまふ。それを避け、低温区の気温が外気並みとなるよう、札幌と盛岡ではTGC内に導入する前の外気を冷却する工夫 (札幌は散水にて、盛岡はエア-ハンドリングユニットにて) がされている。

表 I-3(1)-1 3地点のTGCの概要

| | 間口×高さ×長さ (m) | 被覆資材 | 加温 | 入気の冷却 |
|----|--------------|---------------------|--|-------------------|
| 札幌 | 3.6×2.0×18 | 0.1 mm厚 ポリエチレン | 2008-2009年: 600W電熱線 2010年: 温風暖房 (ダクト送風) | 散水冷却 |
| 盛岡 | 6.0×3.0×30 | 0.05 mm厚 フッ素フィルム | 温風暖房 (ダクト送風) | エア-ハンドリング ユニット |
| 熊本 | 3.2×3.0×30 | 0.1 mm厚 農PO | なし | なし |

2008年は、品種による温度・日長に対する生育の違いを幅広く明らかにするため、北海道~九州までの早生~極晩生の8品種: きらら397、あきたこまち、ひとめぼれ、ササニシキ、コシヒカリ、日本晴、にこまる、レイホウを、日長・温度条件が異なる3地点で栽培し、それぞれの条件下での気温の上昇が出穂に及ぼす影響を調査した。水稻は株播きポットに播種後、育苗温室にてプール育苗し、1/10000 aポット (深さ14cm、容量1.4リットル) に2品種4個体ずつの8本植えとし、各組み合わせ2ポットずつとした (1処理につき、1品種8個体ずつとなる)。このポットを水を張ったコンテナに沈め、ポット上面の水深が2cm以上となるよう、適宜灌水しながら栽培した。なお、ポットには市販の水稻用無

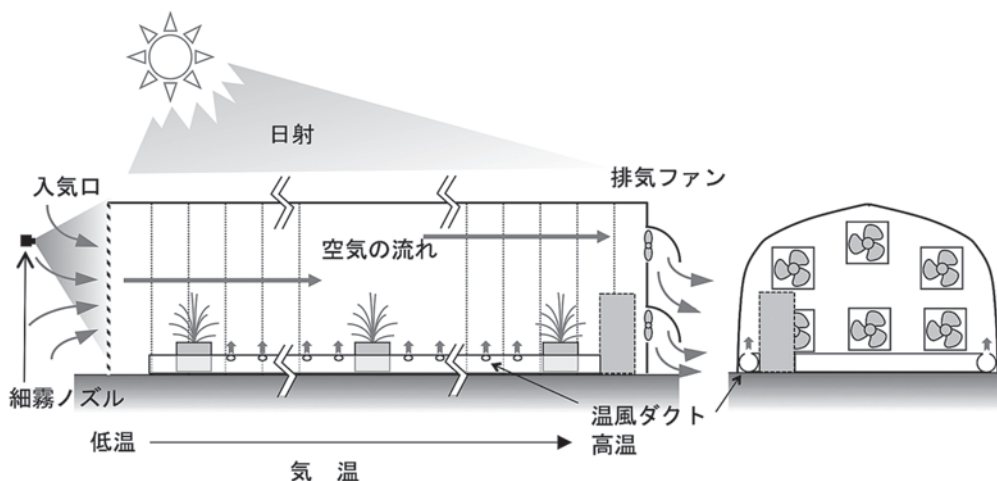


図 I-3(1)-1 TGC模式図 (札幌TGCの例)

肥料育苗培土をつめ、施肥は1ポット当たり成分でN:P₂O₅:K₂O=0.48:1.15:0.77gを全量元肥で施した。TGC内の気温は、2℃の気温勾配を目標に制御し、気温処理は3段階（TGC内の入り口近くの「低温区(L)」、中ほどの「中温区(M)」、奥の「高温区(H)」）とした。札幌と盛岡では、水温上昇の影響も分離評価するため、さらに栽培コンテナを各温度区2基ずつとし、一方のコンテナを「加温区」として、その水温をヒーターによって無加温区の水温+2℃に制御した。なお、屋外に設置した栽培水槽および実験水田との温度条件・出穂の比較も行なった。各個体の葉令（週1度程度）および、出穂日（過半数の穂が出た日）を調査した。

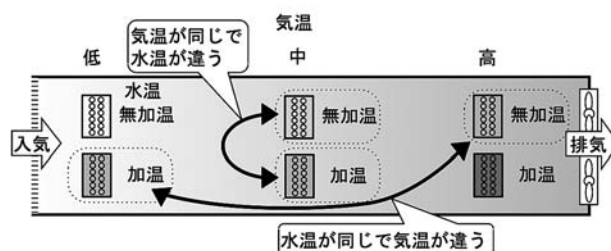
2009年と2010年は、気温と水温それぞれが発育に及ぼす影響を、生育時期別に明らかにするための試験を行った。供試品種は、あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴の4品種に絞り（2009年の熊本のみ、あきたこまちではなく、にこまるを供試）、気温と水温をそれぞれ個別に高・低の2水準設け、それぞれが幼穂形成・出穂日に及ぼす影響を調査するとともに、それぞれの温度処理を開始する時期（葉令）を変え、生育時期別の気温・水温への依存度合いを評価した。なお、播種～育苗～移植までは2008年と同様とし、1ポット当たりの施肥量は2008年の1.5倍、成分でN:P₂O₅:K₂O=0.72:1.78:1.15gを全量元肥で施した。各年の処理の内容は次の通りである。

2009年は、まずポットを3グループに分け、移植直後はTGCではなく、気温が屋外と同じと見なせる同一環境下で栽培し、それぞれ葉令が6、8、10の時にTGC内に移動して気温・水温処理を開始した（熊本は気温処理のみ）。この試験では、処理開始葉令別の温度処理による出穂期の変動の有無で、水稻の発育がどの生育時期までその温度要因（気温あるいは水温）に依存するかを明らかにできる。

2010年は、さらに生育時期を細かく分け、かつ、その温度要因への依存が生育途中から始まるのであればその時期を特定するため、以下の設計にて試験を行った。TGC内の気温勾配の利用と、コンテナに入れたヒーターの制御にて、「水温は同一で気温が2℃異なる（盛岡では3℃）」気温処理対と、「気温は同一で水温が2℃異なる」水温処理対を設けた。1ポットにつき2品種4個体ずつ移植したものを2ポットで1セットとし、各6セット準備した。葉令

4～5の時点で各6セットを各温度区のコンテナに入れ、うち5セットについて葉令がほぼ2増える毎に、気温処理の対・水温処理の対とも、それぞれ低温区と高温区との間でポット1セットずつを入れ替えた。対照として1セットを、栽培期間を通じ同一の温度処理区に置いた。TGC内の処理区の配置と入れ替えの組み合わせの模式図を図I-3(1)-2に示す。また、この試験で想定される試験結果とその解釈の模式図を図I-3(1)-3に示す。

生育中の、ある期間だけ高温で生育が促進される



対となるコンテナ内のポットを、葉令に併せて順次入れ替える

図 I-3(1)-2 TGC内の温度処理区の配置とポット入れ替え処理の組み合わせ

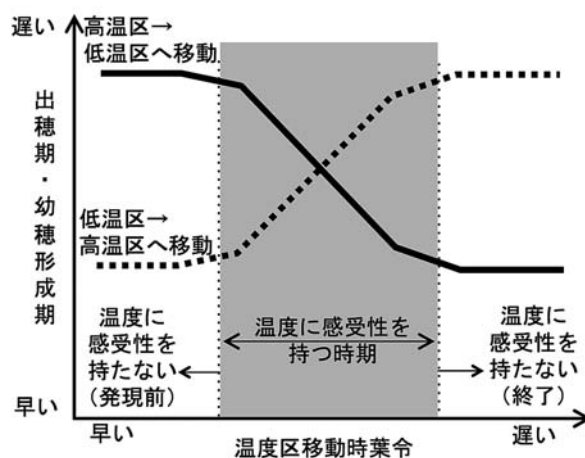


図 I-3(1)-3 時期別温度処理区入れ替え処理の結果の解釈の概念図

場合、それより早い時期に低温区から高温区へ移動した個体は移動時期に関わらず一定の生育促進効果を受ける（温度感受期間は高温下で過ごすため）。温度感受期間中に入れ替えると、高温へ移動した時期が遅れるほど生育促進効果が小さくなり、さらに温度感受期間を過ぎると、高温区に移動しても生育促進効果が見られなくなる。高温区から低温区への移動については、影響は生育抑制の程度として現れるので、上下逆のグラフとなる。この、移動時葉令

によって出穂期や幼穂形成期が変化する期間から、水温と気温それぞれについて、水稻の発育が依存する時期を知ることが出来る。なお、幼穂形成期の判断については、入れ替え用のコンテナとは別途、気温・水温とも低い区と、いずれも高い区を設けて水稻を栽培し、葉令と幼穂長を破壊調査し、葉令から幼穂形成期を推定するための関係式を求め、その式を用いて各入れ替え処理区の葉令から幼穂形成期を推定した。2009年、2010年とも、各個体の葉令(週1度程度)および、主稈出穂日を調査した。

なお、表 I-3(1)-2 に、3年間の各地における播種日・ポット移植日を示す。

表 I-3(1)-2 各地の播種日と移植日

| | | 播種日 | 移植日 |
|-------|----|--------|--------|
| 2008年 | 札幌 | 5月 1日 | 5月 28日 |
| | 盛岡 | 5月 1日 | 5月 30日 |
| | 熊本 | 5月 28日 | 6月 18日 |
| 2009年 | 札幌 | 5月 1日 | 5月 28日 |
| | 盛岡 | 4月 28日 | 5月 27日 |
| | 熊本 | 6月 6日 | 6月 17日 |
| 2010年 | 札幌 | 4月 30日 | 5月 20日 |
| | 盛岡 | 4月 28日 | 5月 21日 |
| | 熊本 | 6月 2日 | 6月 14日 |

ウ. 結果および考察

1) TGC内の温度環境

3地点の各TGCの温度勾配(高温側と低温側の温度差)は平均で1.8~3.4℃であり、3地点間で同じ温度となる条件、すなわち日長が異なるが気温は同じとなる条件は得られなかったものの、ほぼ目標通りの温度性能を示した(図 I-3(1)-4)。とくに、

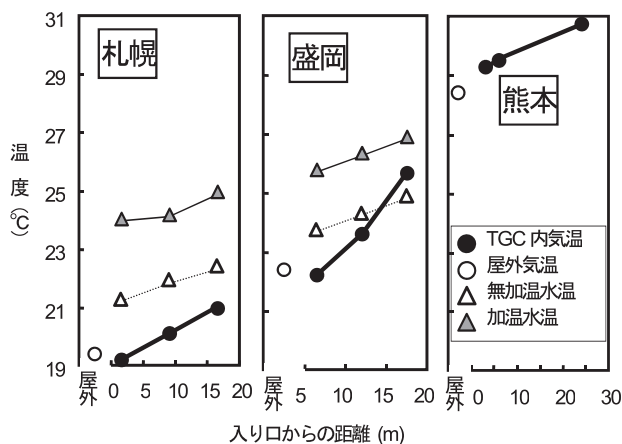


図 I-3(1)-4 3地点におけるTGC内の気温・水温勾配(7・8月平均値)

外気を冷却してからTGC内に導入した札幌と盛岡では、低温側の気温は外気温並み~むしろ若干低めにすることが出来、温暖化の影響を評価するための必要条件である外気温と同等~数℃高温までの温度条件を作り出すことができた。TGC内のコンテナの水温は、気温を基準とすると屋外に設置したコンテナよりも相対的に高く、水田とほぼ同等であった(図 I-3(1)-5)。これは、屋外ではコンテナは側面も風を受けて放熱するのに対し、TGC内は屋外に比べて風速が小さいためコンテナの温度が上昇し易かったことなどにより偶然、水田水温と一致したと考えられるが、一般に栽培温室やチャンパー内の気温-地温バランスは屋外と異なっていることが多いのに対し、このTGC試験では屋外の水田と同じ気温-水温バランスが得られていたことは、生育データの妥当性を検討する上でポイントとなるだろう。

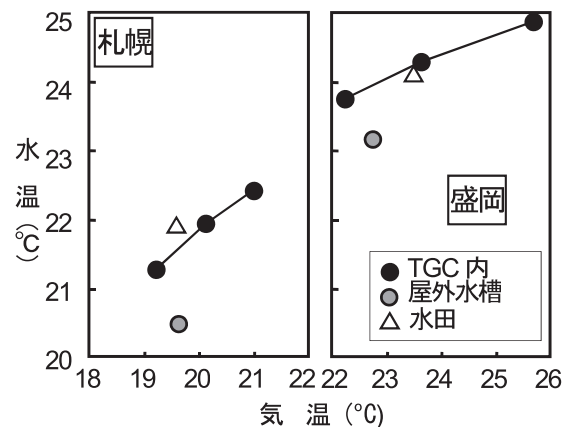


図 I-3(1)-5 TGC内の気温-水温バランスの屋外との比較(7・8月平均値)

2) 異なる日長条件下での水稻発育の温度反応

3地点における各品種の出穂日の温度反応を図 I-3(1)-6 に示す。出穂日の品種間差について、熊本では最も出穂が早かったきらら 397 と最も遅かったレイハウとの差は 35 日程度であったが、盛岡では最大 50 日強となり、札幌ではレイハウは出穂に至らず、にこまるも低温区では十分には出穂せず、出穂に至った品種だけで見ても、最も出穂の早かったきらら 397 との差は 60 日以上となり、品種による出穂日の差は緯度が高いほど拡大した。また、温度上昇による出穂日の短縮程度も札幌で大きく、盛岡で小さくなり、熊本では、にこまるとレイハウを除き、温度上昇によって逆に遅延した。ただし、出穂日の品種間差については、高緯度ほど温

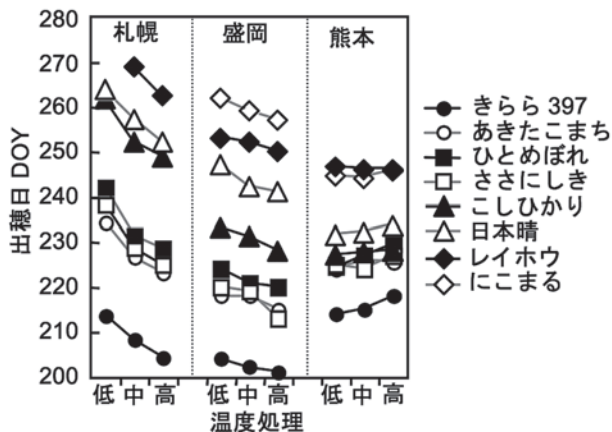


図 I-3(1)-6 各品種の出穂日とその温度反応の3地点間の比較 (無加温水槽のデータのみ示す)

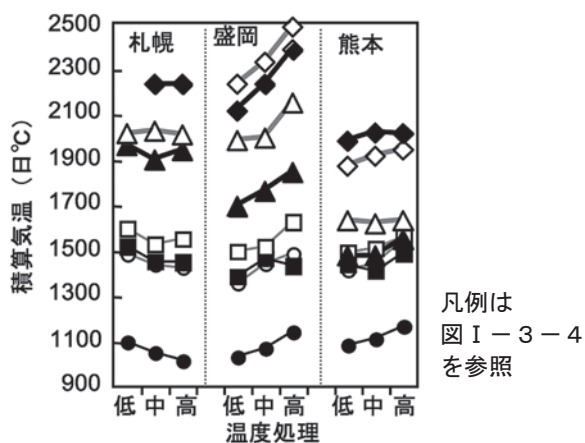


図 I-3(1)-7 各品種の出穂まで積算気温の3地点間の比較 (葉令5.0から出穂まで。無加温水槽のデータのみ示す)

度が低く、単純には出穂に至るまでの日数が長い
ため、出穂日の差が助長されている可能性がある。そ
こで、葉令5から出穂までの積算気温を比較した(図
I-3(1)-7)。きらら397、あきたこまち、ササ
ニシキ、ひとめぼれの出穂まで積算気温は、3地点
でほぼ同じであったが、コシヒカリ、日本晴、にこ
まる、レイホウは高緯度ほど多くの積算気温を要し
た。高緯度でより多くの積算気温を要した品種は日
長感応性が強いとされている品種であり、今回の結
果はそれを裏付けると同時に、緯度の異なる地点間
で連携したTGC試験は、作物の温度反応と日長反
応を分離評価する有効な手段であることが改めて明
らかとなった。なお、盛岡の高温区で、日本晴とレ
イホウの積算温度が札幌よりもより多い積算温度と
なっているが、これは長日により幼穂形成が抑制さ
れている期間中に比較的高温で経過し、温度積算が
進んだためではないかと考えられる。

水温の影響を検討するため、水温処理区を設けた
札幌と盛岡について、水温処理別に出穂までの積算
気温を比較したところ、水温上昇区で出穂までの積
算気温が少なくなり、発育に水温が影響している
ことが明らかとなった(図I-3(1)-8)。一方、
出穂までの積算水温は必ずしも水温上昇区と対照区
とで同一とはならず、水温上昇区では見かけ上、よ
り多くの積算温度が必要であったことから(図I-
3(1)-9)、気温と水温両方が水稻の発育に影響
していることが示唆された。

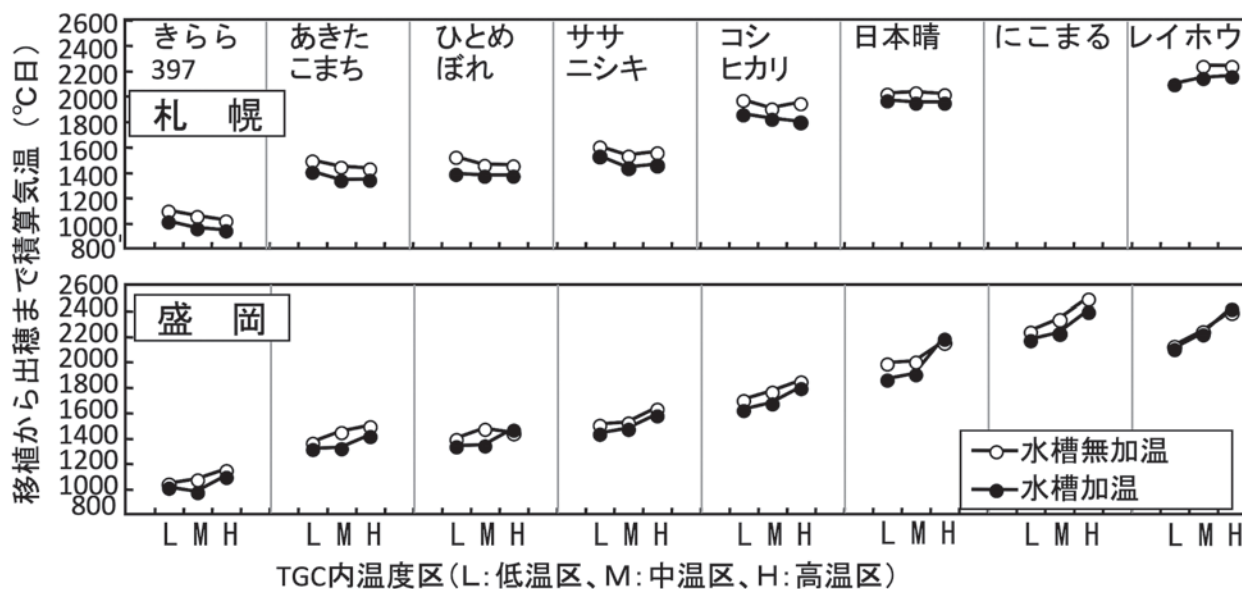


図 I-3(1)-8 札幌と盛岡における各品種の5葉期から出穂までの積算気温

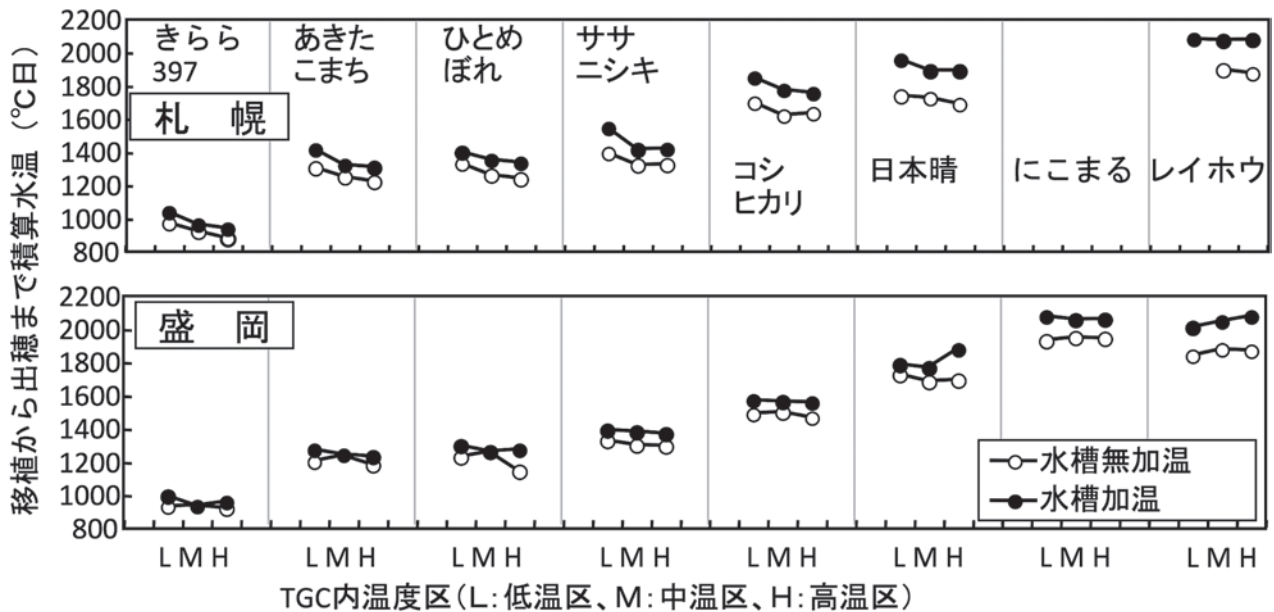


図 I - 3 (1) - 9 札幌と盛岡における各品種の5葉期から出穂までの積算水温

3) 水温と気温それぞれの依存する時期

2009年と2010年とでおおよそ同様の傾向が見られたので、ここでは2010年の結果を中心に述べる。

まず、3地点の各TGCの温度処理は、熊本では低温区の温度が中温区近くまで高かったものの、ほぼ目標通りに制御でき、また、処理開始から2ヶ月間の平均気温は札幌低気温区の17.6℃から、熊本高気温区の30.0℃まで、12℃以上もの幅の温度環境が得られた(図I-3(1)-10)。

出穂への気温の影響について、水温が同一で気温が異なる処理区の比較で評価すると(終始同一の温

度処理区で栽培したポットの比較)、札幌と盛岡では、両地点のひとめぼれと盛岡の日本晴を除き、高気温で出穂が早まった(図I-3(1)-11)。一方、熊本では高気温によって全品種の出穂が遅延した。同様に気温が同一で水温が異なる処理区間の出穂を比較すると、札幌では全品種が高水温で出穂が早ま

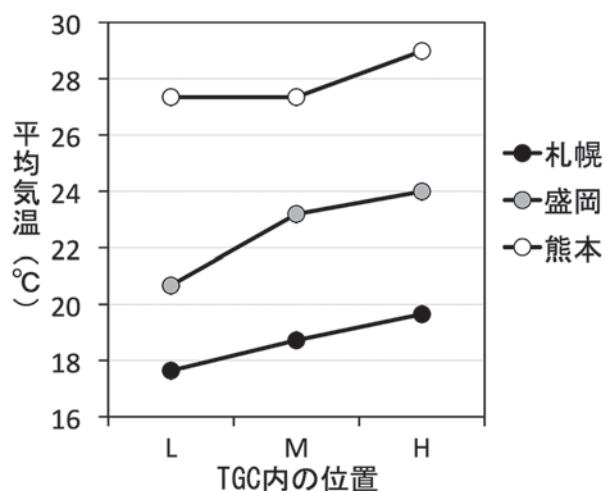


図 I - 3 (1) - 10 3地点における処理開始から2ヶ月間のTGC内平均気温

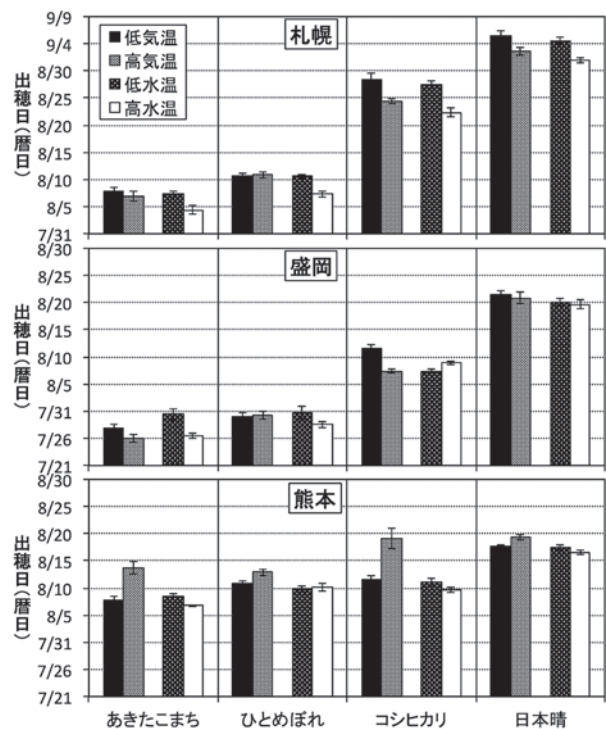


図 I - 3 (1) - 11 気温と水温が出穂日に及ぼす影響

り、盛岡ではあきたこまちとひとめぼれは高水温で出穂が早まったものの、コシヒカリでは高水温で出穂が遅れる逆転が見られた。高気温で出穂が遅延した熊本でも、ひとめぼれは水温の影響が見られなかったものの、他3品種では高水温で出穂が早まっていた。幼穂形成期は、札幌では4品種とも高水温で早まり、気温の影響は比較的小さかったが、あきたこまちを除く3品種で、高気温で幼穂形成が遅れ

る傾向が見られた(図I-3(1)-12)。盛岡でも、幼穂形成が高気温で遅れる傾向が見られ、一方、コシヒカリを除き高水温では幼穂形成が早まった。熊本では高気温・高水温区と低気温・低水温区との比較となるが、あきたこまちを除き、幼穂形成は高気温・高水温区で遅れる傾向が見られた。

これら気温と水温それぞれが出穂・幼穂形成に影響を及ぼす時期を、時期別の温度対間ポット入れ替え処理試験の結果にて解析した。札幌では、いずれの品種も水温の影響は葉令8~11前後まで見られ、晩生の品種ほど遅くまで影響を受けており、一方、気温の影響は水温の影響を受けなくなる前後から表れた(図I-3(1)-13, コシヒカリのみ示す)。幼穂形成期も出穂期とほぼ同じ頃まで水温に依存しており、気温の影響には一定の傾向が見られなかった。逆に、幼穂形成期から出穂期までの日数は、水温には依存せず気温に依存していた。盛岡では、例えばコシヒカリでは出穂は気温に依存していたが、その効果は12葉以上の処理葉令を越える時期で表れているのではないかと考えられ、また水温は札幌より早い7葉程度までで影響しなくなる様子うかがわれた(図I-3(1)-14)。しかし、品種によって反応する時期が大きく異なったり、処理時期別の反応が大きく上下する等、一定の解釈が出来る明確な関係は得られなかった(図、省略)。熊本では逆に、期間を通じて高気温で出穂が遅延する傾向が見られた(図I-3(1)-15, 幼穂形成期の推定困難につきコシヒカリの出穂期のみ示す)。盛岡での温度反応のばらつきや、熊本での高温による出穂遅延は、

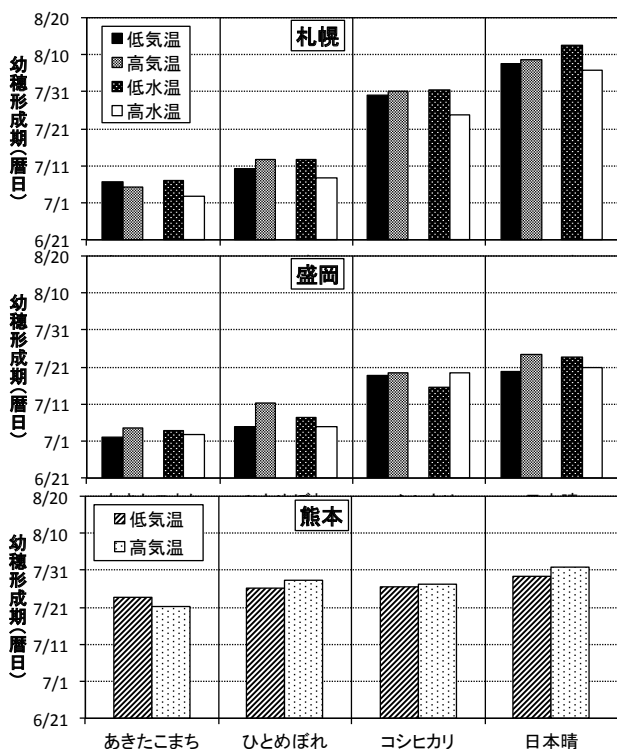


図 I - 3 (1) - 12 気温と水温が幼穂形成期に及ぼす影響

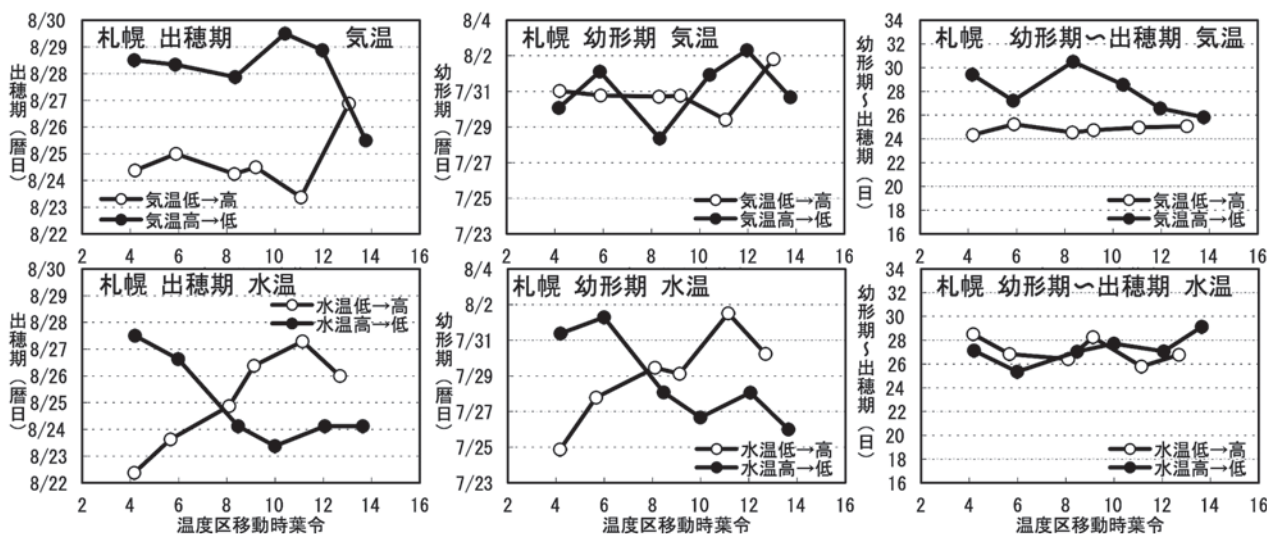


図 I - 3 (1) - 13 気温と地温それぞれが出穂および幼穂形成期に影響を及ぼす時期 (札幌)

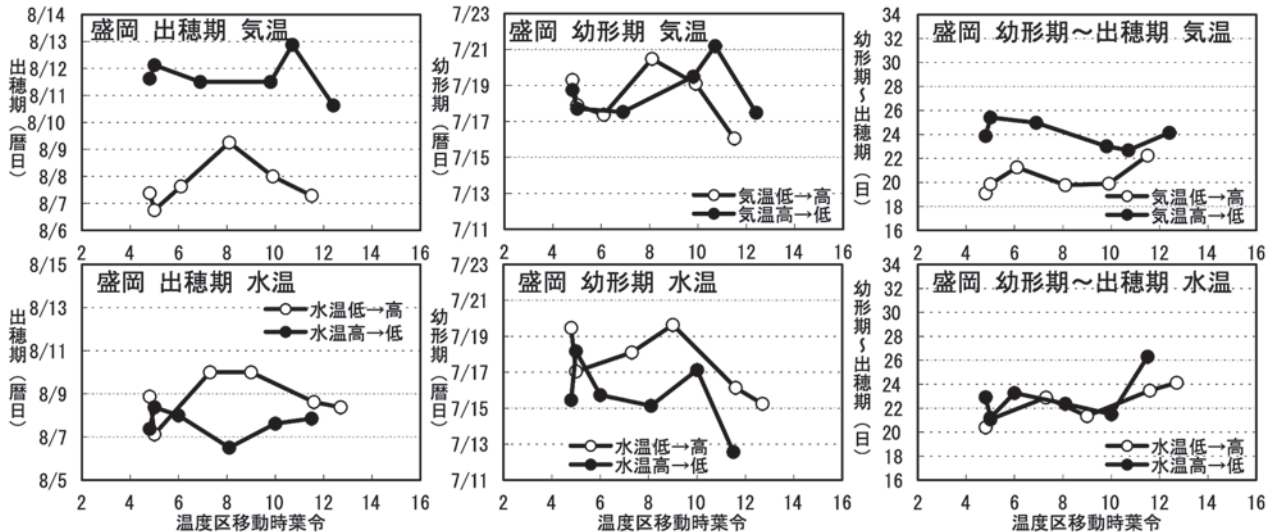


図 I-3(1)-14 気温と地温それぞれが出穂および幼穂形成期に影響を及ぼす時期 (盛岡)

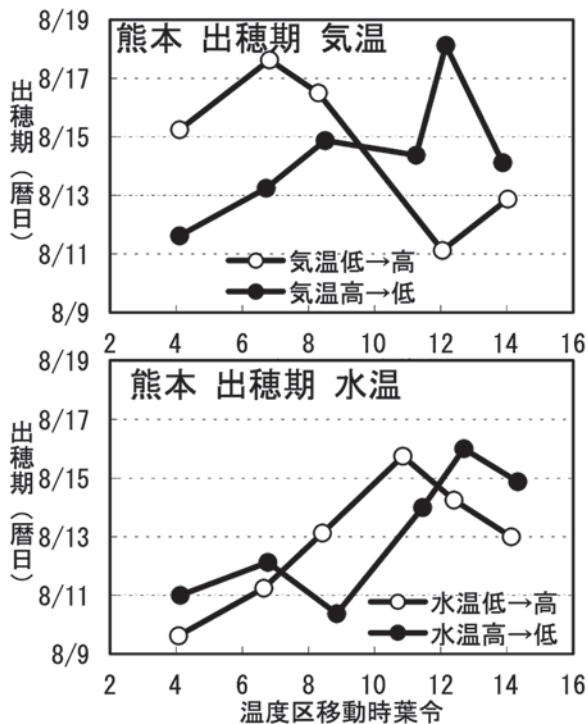


図 I-3(1)-15 気温と地温それぞれが出穂に影響を及ぼす時期 (熊本)

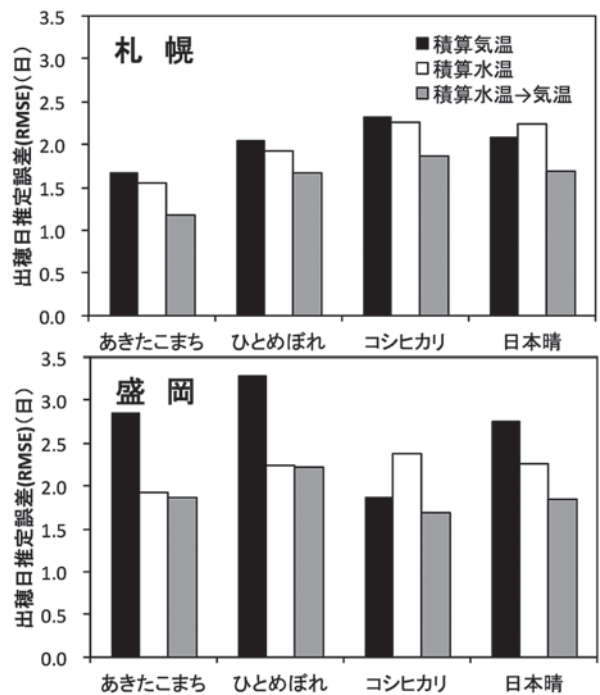


図 I-3(1)-16 積算気温と積算水温および幼穂形成期前積算水温・以後積算金による出穂日推定精度

高気温区の8月の平均気温が盛岡で27.9℃、熊本では31.4℃と非常に高かったため、適温を越えてしまい、発育が抑制されたことが原因ではないかと考えられる(高温の影響は次項で詳述)。

札幌では、水温への依存と気温への依存が葉令8～11あたりで切り替わっていたが、この時期は幼穂形成期～その少し前に相当する。この頃までの発育が水温に依存したのは、従来の報告等(松島ら, 1964; 柴田ら, 1973など)でも指摘されているように、

この時期までは生長点が水面下にあるためと考えられる。気温と水温それぞれが出穂までの発育速度をどの程度説明できるかを検証するため、出穂日を積算気温、積算水温、および、初期は積算水温・幼穂形成期以降は積算気温で推定し、その推定精度を比較した。解析は、時期別温度処理試験での幼穂形成期データがある札幌と盛岡を対象とし、全処理区の出穂まで積算気温、積算水温、および、幼穂形成期までは水温、以降は気温を積算した値を求め、品種

毎にその平均値を求めた。求めた平均値を、その品種の出穂までに要する積算温度と見なし、改めて各処理区の積算温度から出穂日を推定した。その結果、両地点とも全ての品種で、幼穂形成期までは水温、以降は気温を積算した値による出穂日の推定誤差(RMSE)が最も小さくなった(図I-3(1)-16)。この結果は、水稻の発育への温度影響を評価する際には、幼穂形成期以前は水温を、以降は気温を用いて解析する必要があるとともに、出穂の予測評価のモデル化にあたっては、これを踏まえて水温と気温を時期別に切り替えて入力することで、推定精度が向上することを示している。

エ. 今後の課題

緯度の違う地点間での連携したTGC試験により、広い温度域で温度反応を解析でき、また日長の違いが温度反応に影響していることを明らかにできたが、日長反応についてはさらに量的解析が必要である。TGC内の温度上昇幅をさらに大きく設定し、地点間で温度域を重ねることで日長の影響をより正確に分離評価し、温暖化に適応した栽培シナリオ、特に従来栽培されていなかった他地域の品種(特性)の導入についてさらに有益な情報が得られるだろう。

オ. 要約

TGC試験を緯度の異なる地点間で連携して実施するTGC連携試験により、広い温度域での水稻の温度反応と日長反応が解析され、水稻発育への温度上昇の影響が、対象地域の温度条件や日長条件で異なることが示された。

水稻の発育は気温だけではなく水温にも依存し、幼穂形成期前後で水温依存から気温依存へ変わることが示された。積算温度による発育(出穂)の予測評価は、幼穂形成期までは水温を、それ以降は気温を使った積算値を用いることで、気温か水温のどちらか一方のみの積算値を用いるより推定誤差が小さかったことから、出穂予測・評価には、幼穂形成期までは水温を、それ以降は気温を使うことが妥当であることを明らかにした。

カ. 参考文献

松島省ら(1964) 水稻収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究, 第71報 生育各期の気温・

水温の各種組み合わせが水稻の生育およびその他諸形質に及ぼす影響. 日本作物学会記事. 33, 135-140.

柴田ら(1973) 時期別の気温・水温処理が水稻の生育に及ぼす影響第2報. 日本作物学会紀事. 42, 267-274

執筆担当者(濱寄孝弘)

(2) 高温域における水稻発育の温度反応の評価

ア. 研究目的

水稻の発育は一般的に、生育適温の範囲（日平均気温 18～28℃程度）では、高温によって出穂期が早まる（すなわち、移植-出穂相の発育速度が上昇する）ことが知られている。しかしながら、極端な高温は地上部の生長（Wassmann, 2009）や幼穂分化（西山, 1985）、登熟（Morita, 2005）など様々な水稻の生育過程を阻害するため、生育期間中の長期間の高温によって発育速度が低下することも予想される。このような高温域における発育速度の変化・反応は、地球温暖化に適応した水稻の栽培シナリオを策定する上で、最適なシナリオを左右する重要な部分である。そこで、温度勾配チャンバー（TGC）試験を実施した3地点のうち、最も温暖な熊本における測定結果を中心に、高温が水稻の発育速度におよぼす影響を、発育過程への影響も含めて解析し、高温域における水稻の温度反応を評価した。

イ. 研究方法

前述の緯度の異なる3地点（札幌、盛岡、熊本）における2010年のTGC試験により、高温に対する水稻発育の反応を評価した。対象品種は4品種（あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴）で、前項と同様の方法で各個体の葉齢、主稈の出穂日、穂数を継続的に調査した。低緯度で比較的高温の熊本では、登熟期にも出穂が永続的に続く現象がみられたため、各個体の穂数の調査は穂揃い期まで毎日、その後も2～3日ごとに実施した。各処理区各品種で4個体の主稈の出穂日を集計し、そのデータを発育の温度反応の解析に用いた。また、高温が幼穂形

成のタイミングに与える影響を細かく把握するため、熊本では低気温・低水温区（L）と高気温・高水温区（H）を対象に、幼穂形成期前後に3～4日ごとに調査用個体を破壊調査することで、主稈の幼穂長を計測した。各品種で4個体の主稈の幼穂長を計測することで、それぞれの処理区におけるばらつきも同時に調査した。前述した方法により測定されたTGC内の気温のデータと併せて、高温域における発育速度と気温の関係を解析した。

ウ. 研究結果

札幌、盛岡、熊本の3地点における2010年のTGC試験において、水温を制御せずに気温のみが異なる各処理区の出穂日数（ここでは、移植日から主稈の出穂日までの日数とした）を比較した結果を図I-3(2)-1に示す。札幌での出穂は、あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴の順で早く、あきたこまちと日本晴の出穂日数には約30日の違いがみられた。一方で、熊本では出穂日数にそれほど品種間差がみられず、最大でも約10日の違いであった。その結果、地点間の出穂日数の違いは日本晴が最も大きかった。地点間差（温度の影響）に着目すると、どの品種でも低緯度ほど（すなわち気温の高いほど）出穂日数が少ない（発育が速い）傾向がみられた。しかしながら、同地点での処理区間差に着目すると、熊本ではどの品種でもM区よりもH区の出穂日数が多く（発育が遅く）、極端な高温条件で発育が遅れているものと考えられた。

熊本で最も顕著な発育の遅れがみられたコシヒカリを対象に、発育の温度反応をより詳しく知るため、各処理区における移植-出穂相の平均気温と発育速

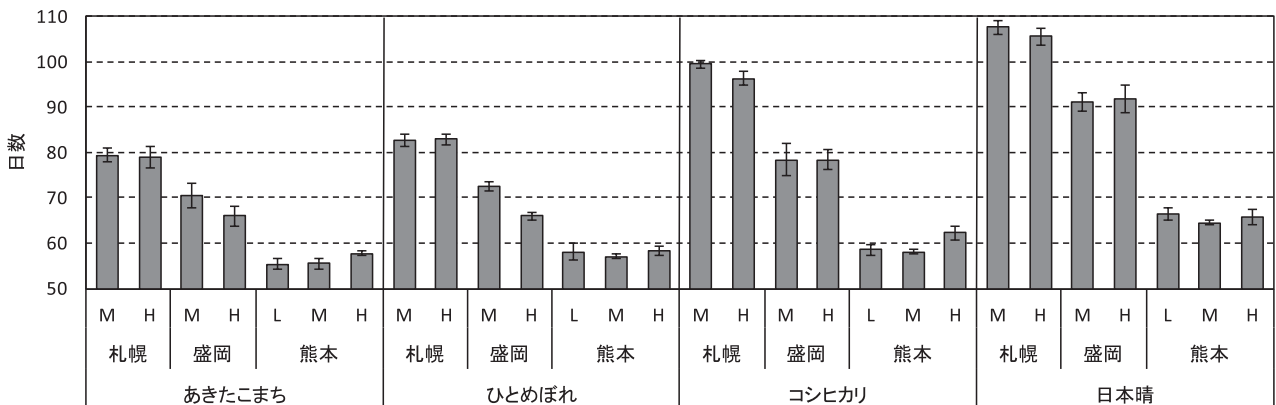


図 I - 3 (2) - 1 緯度の異なる3地点における温度勾配処理による出穂日数の変化 (L:低温区、M:中温区、H:高温区)

度（移植から出穂までの日数の逆数）の関係をみたのが、図 I-3(2)-2 である。水稻の発育は日長にも強く反応し (Nakagawa et al., 2005)、3 地点では緯度が異なるため厳密には地点間を比較できないが、処理区間の違いをみる限り、気温上昇とともに発育速度も増加するが、28℃以上で発育速度が低下していることが伺える。ただし、ここでの温度は期間中の平均値であるため、実際の発育の遅れはこれより高温側で発生しているものと推察される。一方で、熊本のH区における日平均気温の最高値は約32℃であり、少なくともこれより低い日平均気温で発育の遅れが発生したはずである。以上のことから、水稻（コシヒカリ）の移植-出穂相で実際に発育速度が低下し始める温度は、概ね28~32℃の範囲（日平均値の場合）であることが分かった。

高温域での発育速度の低下にともなう出穂の遅れが、移植-出穂相のどの時点において生じていたの

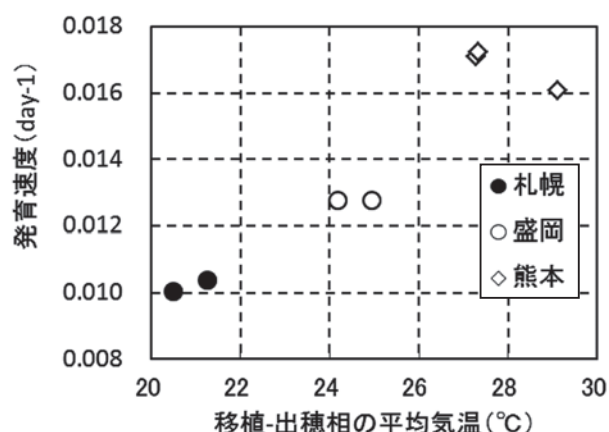


図 I-3(2)-2 平均気温と水稻の発育速度の関係 (コシヒカリ：移植-出穂相)

か検討するため、図 I-3(2)-3 には熊本のTGCにおける幼穂形成直後の葉齢と幼穂長を品種ごとに示した。葉齢は全ての品種で低温区よりも高温区で大きく、目視による観察でも高温区の葉がよく繁茂しており、地上部の生長はむしろ高温区で早かったことが分かる。一方で、幼穂長は全ての品種で低温区よりも高温区で小さく、主稈の出穂日にみられた高温による発育の遅れは、すでに幼穂形成期の時点で生じていたことが分かる。幼穂長の測定は3~4日間隔で行ったが、各品種で幼穂長が10mmに達した日の処理区間差を前後の測定値から換算すると、コシヒカリが約1~2日、あきたこまち、ひとめぼれ、日本晴が約0~1日であった。

また、熊本のTGCにおける高温は主稈の出穂日ばかりでなく、その後の個体の出穂数にも影響を与えた。図 I-3(2)-4 には穂数（4個体の合計値）の推移を示したが、両処理区とも、出穂始めから5日間程度は各品種で一定の穂数に達するまで穂数が急激に増加し、その後は緩やかな増加となった。しかしながら、出穂始めから20日以上経過した後、低温区に比べて高温区では遅れ穂が著しく増加した。特に、あきたこまちでその傾向が顕著にみられ、10月1日の時点で低温区の穂数が18であるのに対して、高温区の穂数は60と3倍以上に達した。そのため、同一個体に登熟ステージの異なる穂が混在し（それらの相互作用の可能性があるため）、出穂-成熟相の発育速度を決定することは困難であった。一方で、仮に全ての穂の生理的条件をもとに平均的な成熟期（あるいは収穫適期）を決定した場合には、高温区では明らかに遅れ穂が増加したことか

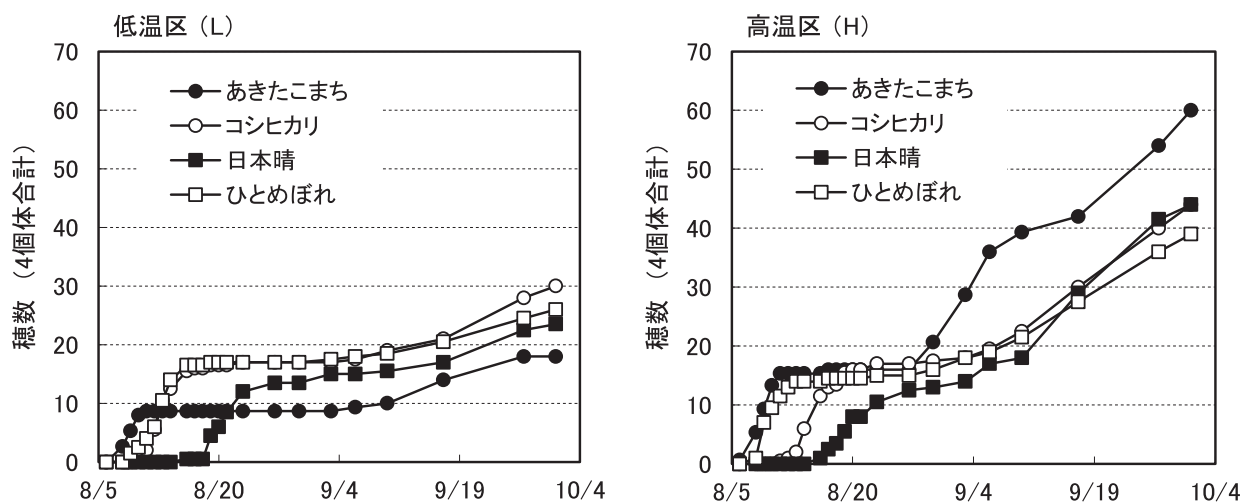


図 I-3(2)-3 温度勾配処理による穂の出現パターンの違い (熊本)

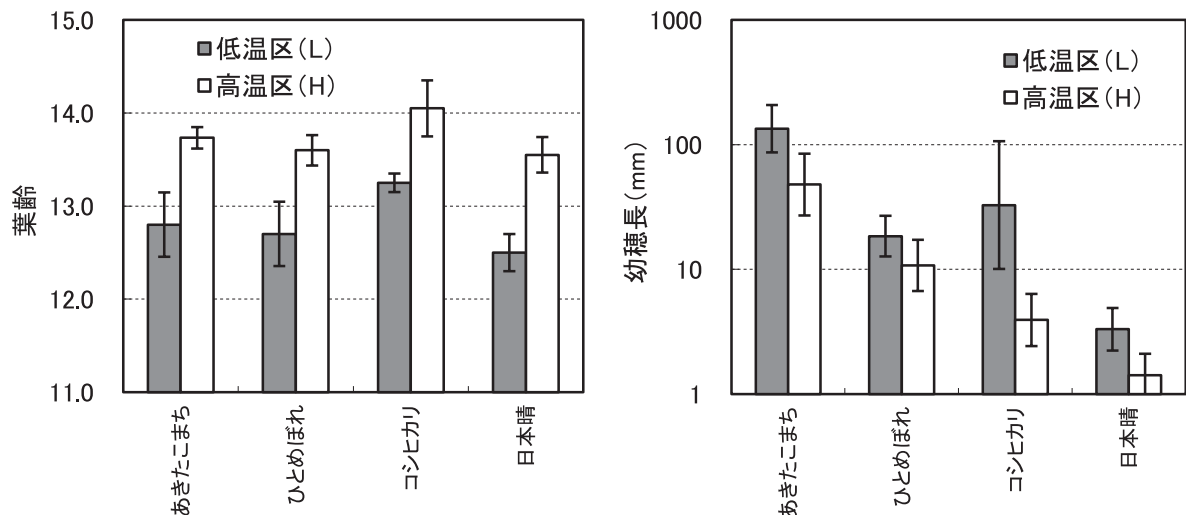


図 1-3 (2)-4 幼穂形成直後における葉齢と幼穂長の比較 (熊本：8月2日)

ら、必然的に成熟期も極端な高温条件下では遅れることが示唆された。

移植後の極端な高温によって、水稻の幼穂形成と出穂が遅延することが確認された一方で、葉齢の進展はむしろ早まることが分かった。この結果からは、高温域での発育速度の低下が、分けつや地上部生長などの長期的な生育過程の変化 (Wassmann, 2009) よりも、幼穂分化や穎花分化の遅延などの短期的な生理障害 (西山, 1985) に起因していることが推察される。一般的に、光合成や酵素活性、細胞の原形質流動などの生理的活性は昇温とともに増加するが、33~38℃以上では逆に低下する (西山, 1985)。本実験から得られた発育速度の低下し始める温度は28~32℃で、上記温度よりも少し低い。これは主に日平均気温を基準としているためと思われる。すなわち、実際には昼間の (日平均値以上の) 高温によって発育に関わる何らかの生理的活性が低下し、これが日単位あるいは長期間の平均的な発育速度を低下させているものと考えられる。ただし、多くの研究では明らかに夜間の高温が種々の生育過程に影響を与えることが知られており (Morita et al., 2005)、温度の日変化が発育に与える影響については今後詳しく調べる必要がある。いずれにしても、高温域での温度反応を考慮したモデル化や再現実験を行うことで、より現実に即した地球温暖化への適応シナリオを作成できることが期待される。

エ. 今後の課題

地球温暖化に適応した水稻の栽培シナリオ決定のための、高温域における気温と発育速度の定量的な

関係については、実際の圃場スケールにおける観測をもとに、モデルの作成やパラメータの決定 (あるいは検証) を行う必要がある。また、登熟過程における高温域の発育速度を評価するには、遅れ穂がどのように影響するのか検討する必要がある。

オ. 要約

高温域における水稻発育の温度反応を温度勾配チャンバー試験によって調べた結果、移植後の高温によって主穂の幼穂形成と出穂が遅れること、並びに移植-出穂相の発育速度が低下し始める温度範囲は日平均気温を基準とした場合で28~32℃の範囲であることを明らかにした。

カ. 参考文献

- Morita S. (2005) Grain Growth and endosperm cell size under high night temperatures in rice (*Oryza sativa* L.). *Ann. Bot.*, 95, 695-701.
- Nakagawa H. et al. (2005) Flowering response of rice to photoperiod and temperature: a QTL analysis using a phenological model. *Theor. Appl. Genet.* 110: 778-786.
- 西山岩男 (1985) イネの冷害生理学. 北海道大学図書刊行会発行. pp313.
- Wassmann, R. et al. (2009) Climate change affecting rice production: the physiological and agronomic basis for possible adaptation strategies. *Adv. Agron.* 101, 59-122.

執筆担当者 (丸山篤志)

第2章 温暖化模擬実験による温暖化適応型水稻栽培シナリオの提示

1. 北海道における温暖化の影響評価

ア. 研究目的

全国的に温暖化が進行し、北海道でもその影響が顕在化している。そこで、早急に対応技術を策定しなければならない30年程度先の比較的近い将来の温暖化（1～2℃を想定）が、北海道の水稻栽培に対し、現行品種の開花・登熟等の生育様相に及ぼす影響を評価する。また、温暖化した環境に適した品種特性（日長感応性、基本栄養生長性）と栽培時期などの温暖化に適応した栽培シナリオを、低緯度の温暖な地域で栽培されている品種を単純に北上させるだけで温暖化後の北海道に適応できるのかも含め、策定する。

イ. 研究方法

北海道農業研究センター（札幌市）と東北農業研究センター（盛岡市）とで連携栽培実験を実施した。盛岡の夏期（6～8月）の平均気温は札幌よりも1.4℃高いことから（札幌管区气象台、盛岡地方气象台平年値より）、盛岡は札幌が1.4℃程度温暖化した時の温度環境にあると見なすことが出来る。この温度差を利用し、かつ、日長時間の差（低緯度の盛岡で短い）を電照で揃えることにより、札幌の温暖化後の水稻生育の様相を、盛岡の屋外水田での栽培実験にて評価した。

電照を利用した連携栽培実験は2009年と2010年の2カ年で実施し、電照処理時間の基準の策定途中であった2008年は、電照処理は行わなかった。

2008年は水稻9品種、それぞれ主な栽培地の北から順に（傾向として基本栄養生長期間が短く、日長感応性が弱い順に）、きらら397、おぼろづき、あきたこまち、ササニシキ、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、レイハウ、にこまるを供試した。育苗および本田の施肥管理その他は慣行に従った。移植日は、札幌は5月27日、盛岡は5月29日とし、移植時の葉令は4.5前後（4.0-5.0）だった。

2009年と2010年は、供試品種をきらら397、あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリの4品種に絞った。移植日は、札幌、盛岡とも2009年は5月28日、2010年は5月26日とした。移植時の葉令は

4.5前後（4.0-5.0）で、苗の条件を揃えるため、札幌で育苗した苗を盛岡へ輸送し、定植した。電照処理には100Wレフランプを用い、2009年は、札幌は5月28日から、盛岡は5月29日から電照を開始し、2010年はそれぞれ5月27日、5月22日から電照を開始し、いずれも出穂が終了するまで電照を続けた。電照時刻は太陽高度を基準として日々算出し、データロガー（Campbell社製、CR1000もしくはCR10X）にて制御した。日長制御について、2009年の日の出時は太陽の高度が-4度から電照を開始し、日没時は太陽高度-2度で消灯した。なお、太陽高度6度以上の日中は消灯した。2010年は、日の出時の太陽高度の基準が低すぎた（点灯が早すぎた）ことから、日の出時は太陽高度-2.5度から電照を開始し、日没時は2009と同じく-2度で消灯した。盛岡で札幌の日長を再現する際、日の出時の電照開始時刻と、日没後の消灯時刻を札幌に合わせ、日中の太陽高度が6度以上の消灯は、盛岡の太陽高度に合わせた。この電照設定時間は、水稻の日長反応を確実に電照でコントロールするために、水稻が実際に感応していると思われる日長よりもわずかに長めに（限界照度よりも若干暗い時間帯まで）設定してある。その影響も評価するため、札幌、盛岡それぞれにおいてそれぞれの地点の日長時間（太陽高度基準）に合わせた電照区も設けた。すなわち、試験処理区は表Ⅱ-1-1の通りである。

表Ⅱ-1-1 試験処理区

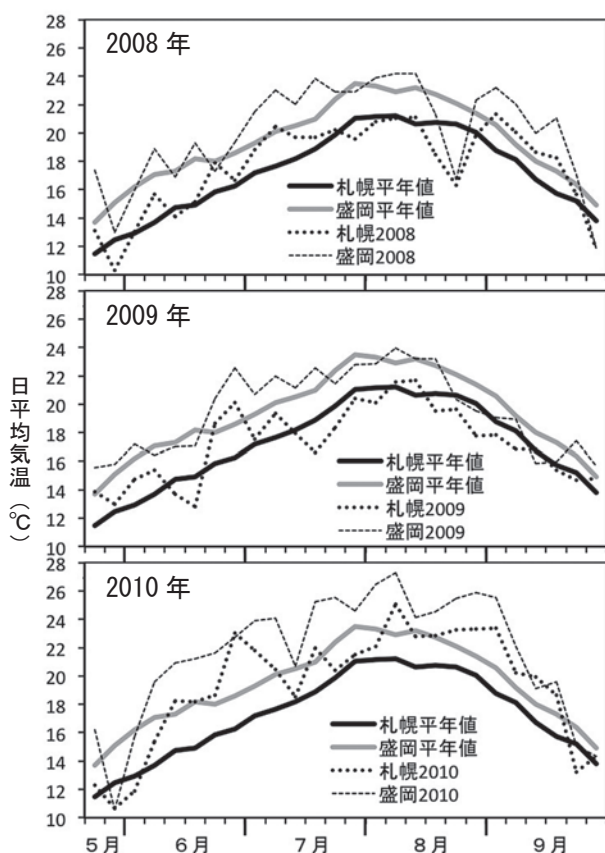
| 地点・処理区名 | 日長 |
|---------|--------------|
| 札幌 | |
| 対照区 | 札幌自然日長（電照無し） |
| 札幌電照区 | 札幌日長電照 |
| 盛岡 | |
| 対照区 | 盛岡自然日長（電照無し） |
| 盛岡電照区 | 盛岡日長電照 |
| 札幌電照区 | 札幌日長電照 |

試験区の大きさは1.5m×2.0m～2.1m×2.4mで、1区1品種9～16（年次や場所で異なる）、反復数は3反復（札幌2008年のみ2反復）とした。主穂出穂日および個体内50%出穂日を調査し、また、水温（水底にて）と気温（高さ1.5m）を測定した。

ウ. 結果および考察

1) 気象経過

3カ年の札幌（北海道農研）と盛岡（東北農研）の日平均気温の経過を図Ⅱ-1-1に、それぞれの所内気象観測露場の5月第5半旬～9月第6半旬までの日平均気温半旬値および平年値にて示す。2008年は、6月以降7月中旬まではほぼ平年並みか高温で、7月下旬に若干低温傾向となり、また、8月下旬にかなりの低温が入ったが、それ以降、8月～9月は高温で経過した。2009年は6月中旬以降7月中旬までは高温に経過したが、7月下旬の北海道地方では一転して低温となり、8月上～中旬は一旦持平年並みに戻ったものの、それ以降、9月上旬まで平年より低く経過した。なお2009年は、7月下旬の低温のため北海道では水稻に冷害が発生した。2010年は6月上旬から9月半ばまでずっと高温で経過し、札幌の気温は盛岡の平年値を上回る日も多く見られた。水稻の出穂に影響するであろう6月～8月の平均気温で見ると、2008年は、札幌はほぼ平年並み、盛岡で若干高め、2009年は札幌、盛岡とも若干低め、2010年度は札幌・盛岡とも2℃



図Ⅱ-1-1 2008 - 2010年の3カ年の札幌と盛岡の日平均気温の経過

以上、高くなっていた（表Ⅱ-1-2）。また、盛岡-札幌の地点間差は、平年値で2.3℃、各年では2.7～2.8℃だった。ここで注目すべきは、2010年の猛暑で札幌の気温が盛岡の2008年並みになっていることである。すなわち、2010年の高温は札幌が盛岡並に温暖化した環境を提供しており、2010年の生育データと比較することで、盛岡での連携栽培実験の有効性の検証が可能である。なお、札幌管区気象台に比べ北海道農研（羊ヶ丘）の気象観測値は都市化の影響を受けておらず、平年気温は札幌管区気象台の露場値より低いため、盛岡（厨川）-札幌（羊ヶ丘）の平年気温差は、気象台同士の平年気温差よりも大きな値となっている。表Ⅱ-1-3に6月～8月の両地点の平均水田水温を示す。水温の平年値はないので、気温が平年並みだった2008年の水温を基準にすると、2009年は札幌では0.4℃低く、盛岡は2008年並み、2010年は札幌では1.2℃、盛岡では1.9℃高かった。また、気温と同様、2010年の札幌の水田水温は、盛岡の平年の水温並みであり、2010年は気温・水温両面から盛岡と同等の環境にあったと見なすことが出来るだろう（図Ⅱ-1-2）。

表Ⅱ-1-2 札幌と盛岡における夏期(6～8月)の平均気温とその平年差および盛岡-札幌間差

| | 平年値 | 年次 | | |
|--------------|------|------|------|------|
| | | 2008 | 2009 | 2010 |
| 札幌 | 18.2 | 18.3 | 18.1 | 20.6 |
| 平年差* | | 0.1 | -0.2 | 2.4 |
| 盛岡 | 20.5 | 21.0 | 20.8 | 23.3 |
| 平年差* | | 0.5 | 0.3 | 2.8 |
| 盛岡-札幌 気温差 | 2.3 | 2.7 | 2.7 | 2.8 |

札幌：羊ヶ丘，盛岡：厨川 *) 年の値-平年値

表Ⅱ-1-3 札幌と盛岡における夏期(6～8月)の平均水田水温とその2008年差および盛岡-札幌間差

| | 年次 | | |
|--------------|------|------|------|
| | 2008 | 2009 | 2010 |
| 札幌 | 21.5 | 21.1 | 22.7 |
| 2008年差* | | -0.4 | 1.2 |
| 盛岡 | 23.0 | 23.0 | 24.9 |
| 2008年差* | | 0.0 | 1.9 |
| 盛岡-札幌 水温差 | 1.5 | 1.9 | 2.3 |

*) 2009年もしくは2010年 - 2008年の値

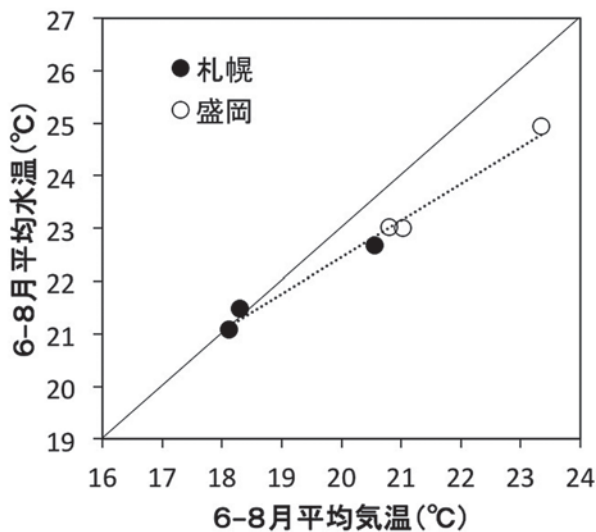


図 II - 1 - 2 札幌と盛岡の夏期（6～8月）の平均気温と水温との関係

2) データ解析の方法

北日本では、短い栽培可能期間で生育・出穂開花・登熟を達成しなければならず、そのためには安全出穂期間に確実に出穂することが必要である。そこで本研究では、安全出穂期間に出穂するか否かを指標として、温暖化後の品種・作型の適応性を判断する。

研究方法で述べた通り、本実験系での日長処理はその確実な効果を得るため実際の日長感応時間よりも若干長めに設定している。そこで、盛岡－札幌間の温度差に基づく出穂日の差、すなわち温暖化による出穂日の変動を次の方法で算出した。盛岡の対照区の出穂日を a、盛岡の「盛岡日長電照」区の出穂日を b、盛岡の「札幌日長区」の出穂日を c とすると、 $b - a$ が長めの電照時間設定に起因する出穂の

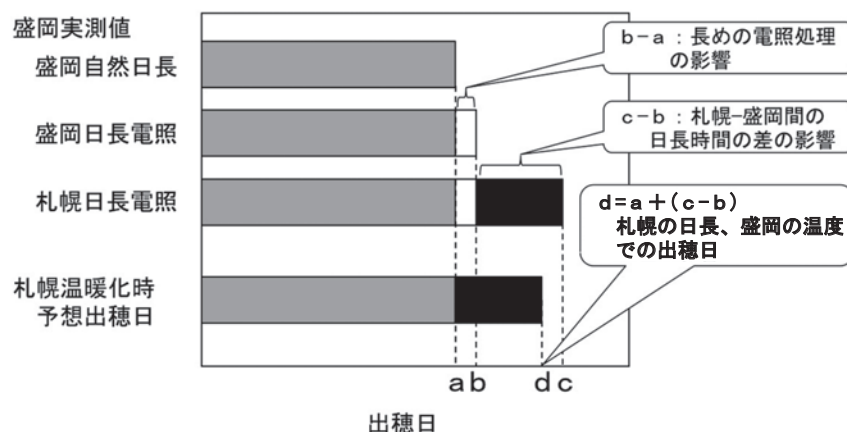


図 II - 1 - 3 連携電照試験の低緯度高温側の出穂日から高緯度低温側の地点の温暖化後の出穂日を算出する方法の模式図

遅れに相当し、札幌－盛岡間の日長時間の差に基づく出穂日の差は、近似的に $c - b$ にて求められ、 $a + (c - b)$ が、温暖化後の札幌の出穂日として評価される（図 II - 1 - 3）。

この方法を用いて盛岡での連携栽培実験から評価した温暖化後の札幌の各品種の出穂日を、札幌の現在の平年出穂日（2008 年を平年と見なした）および実際の温暖化後と見なせる 2010 年の札幌での出穂日と併せて、表 II - 1 - 4 に示した。

表 II - 1 - 4 盛岡での連携栽培実験による温暖化後の札幌の予測出穂日と2010年猛暑での札幌出穂日の比較

| | 平年札幌 2008 | 温暖化評価 盛岡 2009 | 札幌猛暑 2010 |
|---------|--------------|------------------|--------------|
| きらら 397 | 8月7日 | 7月28日 | 7月27日 |
| あきたこまち | 8月19日 | 8月9日 | 8月10日 |
| ひとめぼれ | 9月1日 | 8月17日 | 8月15日 |
| コシヒカリ | 9月15日 | 9月3日 | 9月1日 |

温暖化後の札幌での出穂日は、盛岡の温暖化連携栽培実験の結果によると、平年（2008 年）に比べて、きらら 397 は 10 日、あきたこまちも 10 日、ひとめぼれは 15 日、コシヒカリは 12 日、出穂が前進すると評価された。その結果、温暖化後のあきたこまちが、現在の北海道品種と暦日上ほぼ同等の時期に出穂することになる。この評価結果は、猛暑であった 2010 年の評価結果とよく一致しており、この連携栽培実験の手法が温暖化の影響評価・予測に有効であることが示された。

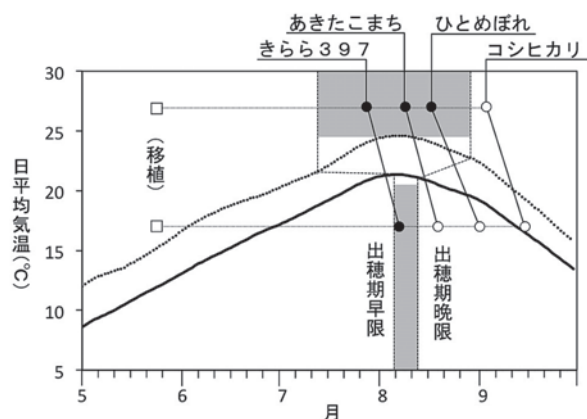
3) 温暖化後の適応策型・品種の検討

北日本において稲作を制限するもっとも大きな要因は低温であり、安定した収穫を得るための作型を策定するために「計画栽培」（八柳, 1960; 内島, 1983）の手法が用いられている。計画栽培法では、出穂の早限と晩限を対象地域の気温の推移から算出し、その間の期間に出穂する作型・品種を、その地域・気候に適していると判断する。北海道における出穂早限および安全出穂早限は、出穂前 24 日以降 30 日間の平均値が 20.5°C およ

び21.5℃とされ、出穂晩限と安全出穂晩限はそれぞれ出穂後40日間の平均気温が18.8℃および20.0℃とされている。札幌および盛岡の平年値から求めたそれぞれの暦日を表Ⅱ-1-5に示す。現在の札幌平年値での出穂早限～出穂晩限は8月5日～8月19日であり、表Ⅱ-1-4の「平年札幌」を見ると十分に適応しているのはきらら397だけである。安全出穂早限は条件に適合する日が存在せず、つまり現在の札幌(羊ヶ丘)では、冷害の心配ない安全出穂期間がないことを示す。温暖化によって札幌の気温が盛岡並みにまで上昇したとすると、出穂早限と晩限は7月12日～8月28日となり、さらに安全出穂期間7月20日～8月22日も確保される。表Ⅱ-1-4の「温暖化評価」および「札幌猛暑」での出穂日から、きらら397に加えて、あきたこまち、ひとめぼれも栽培可能となると考えられ、両者とも安全出穂期間内で出穂する。一方で、コシヒカリは出穂晩限に間に合わない(図Ⅱ-1-4)。関東以西の品種は、北日本品種よりも登熟により多くの積算温度が必要とされることから、出穂晩限は更に早いと考えられ、盛岡並み程度(2℃前後)の温度上昇ではコシヒカリ等、関東以西の品種は安定した栽培は出来ない、と結論される。

表Ⅱ-1-5 札幌(羊ヶ丘)と盛岡における
水稻の出穂期早限と晩限

| | 札幌 (羊ヶ丘) | 盛岡 |
|--------|-------------|-------|
| 出穂早限 | 8月5日 | 7月12日 |
| 安全出穂早限 | — | 7月20日 |
| 安全出穂晩限 | 8月2日 | 8月22日 |
| 出穂晩限 | 8月19日 | 8月28日 |



図Ⅱ-1-4 札幌(羊ヶ丘)における出穂期早晩限と温暖化によるその変動および適応品種の評価

4) 温暖化後の収量性

温暖化による発育促進は、低温による遅延型冷害等の危険を軽減する反面、過度の生育期間の短縮による出穂までの生育不足(茎数不足)をもたらし、収量の低下を招く懸念もある。実際、2010年の猛暑では、北海道内の作況指数は98と、高温年としては初めて平年を下回った(一時的な低温による障害型冷害や台風害は除く)。これは、6月上旬までの低温による生育遅延と、一転しての高温で水稻が茎数不足のまま出穂したためと指摘されている(北海道農政部, 2011)。その一方で、当実験水田で処理区外にて栽培していた東北品種のひとつめぼれが登熟に至り、精玄米(1.9mm篩上)で630kg/10aもの高収量を得た(Nemoto, 2011)。当連携栽培実験では、処理区の大きさの制約があったため収量性についてのデータは取られておらず、このひとつめぼれの結果は別途のデータではあるものの、温暖化後の北海道の適品種・作型策定に対して重要な方向性を示している。そもそも、気温・日射から求められる最大可能収量としては、北海道は温暖化により水稻収量が増加するとされている(林ら, 2001)。一方で、2010年の作況の様に、現在の品種・作型ではそのポテンシャルを活かすことができないばかりか減収の恐れもある。適応策として、基本栄養生長期間が長い、あるいは若干の日長感応性を持ち、現行品種よりも生育期間・生育量を確保することができる品種を育種・導入することで、気候ポテンシャルを十分に活かした生産が可能となると考えられる。温暖化後のあきたこまちの出穂日は現行品種の現在の平年並みとなったが、栽培可能期間自体が温暖化で延長されているので、もう少し晩生の方が気象上のポテンシャルを十分に活用できるだろう。2010年のひとつめぼれの高収は、この推察を強く支持しており、温暖化後の北海道では、ひとつめぼれ程度の早晩性の品種が適応していると考えられる。

Ⅰ. 今後の課題

当実験系は規模が小さく、収量性を直接は評価できなかった。さらに大規模で処理できる実験系(電照装置)の構築が必要である。また、栽培実験では移植時期は現行と同じ場合のみとしているが、実際は移植可能時期も早まることから、移植時期を変えた場合の適応性の検討も進める必要がある。

オ. 要約

盛岡（東北農研）と札幌（北海道農研）との連携栽培実験にて、北海道～本州の4品種について温暖化後の北海道での適応性と適応作型を検討した。現在の北海道品種は温暖化で生育期間が短縮し、生産性が低下する可能性がある一方で、現在の東北の品種の出穂期が現在の北海道の現行品種の出穂期と同等～若干遅い程度となり、栽培可能期間の延長も考えると、現在の東北品種並みの早晩性の導入により、生産性の維持～向上も期待できることが明らかとなった。一方で、コシヒカリは2℃程度の温度上昇では栽培できないことが明らかとなった。

カ. 参考文献

林ら（2001）温暖化が日本の水稲栽培の潜在的特性に及ぼすインパクト. 地球環境. 6, 141-148.

北海道農政部食の安全推進局技術普及課（2011）: II生育の経過と作柄の概要, 1 水稲, 「平成 22 年異常高温・多雨等が農畜産物に与えた影響と今後の対策」, 北海道農政部食の安全推進局技術普及課, p5-13.

Nemoto et al. (2011) Extraordinary hot summer in Hokkaido decrease rice yield and satisfy growing of cultivar in Tohoku region "Hitomebore". *J. Agric. Meteor.*, 67, 269-274.

小田正人 (1992): 気象情報を利用した寒地水稲の計画作期と出穂予測. 「北海道農業における気象情報と先端的利用」, 日本農業気象学会北海道支部, p70-77.

内島立郎 (1983): 北海道, 東北地方における水稲の安全作季に関する農業気象学的研究. 農業技術研究所報告A. 31, 23-113.

執筆担当者（濱崎孝弘）

2. 東北における温暖化の影響評価

ア. 研究目的

東北地方において、温暖化条件に適応する水稻栽培シナリオ（どのような早晩性の品種をどのような作期で栽培すべきか）を提示する目的で、開放系日長時間処理実験を、3地点（札幌市、盛岡市、つくば市）で連携して実施した。これにより、例えば、現在の盛岡市における栽培実験から、温暖化した将来の札幌市における水稻の生育様相を把握し（6、7月の年平均気温差が1.6℃あることを利用する）、将来の栽培シナリオを策定した。

イ. 研究方法

北海道農業研究センター（札幌市）、東北農業研究センター（盛岡市）、中央農業総合研究センター（つくば市）の試験水田圃場において栽培実験を行った（以後、これらの実験地点を、札幌、盛岡、つくばと略称する）。各地点の試験水田で開放系日長処理を実施した。例えば盛岡では、札幌および盛岡の自然日長時間を僅かに超える日長時間となる処理区を設定した。2009年と2010年に、水稻（きらら397、あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴）を5月11日と14日（第Ⅰ作期、つくばのみ）、5月26日と28日（第Ⅱ作期）に移植した。その際、盛岡で札幌の日長時間で栽培する区の苗は札幌と同一、同様につくばで盛岡の日長時間で栽培する区の苗は盛岡と同一とした（それぞれ、札幌と盛岡で育苗した水稻苗を、盛岡とつくばにクール宅配便で輸送した）。

開放系日長処理実験では、次の要領で補光処理を実施した。日の出前に太陽高度が -4° （2009年）、 -2.5° （2010年）になる時から日没後に太陽高度が -2° になるまでの時間を、イネの日長感応性に関する日長時間とした（補光処理はこれより僅かに長くなるように設定した）。2009年は日の出前の設定が低すぎたので2010年はそれを修正するため、補光処理時間を延長した。盛岡では、札幌の日長時間を再現するように補光処理するため、札幌の日長時間季節変化を多項式近似して補光ランプのon-offを制御した（昼間はランプ消灯）。併せて、盛岡における日長時間に補光する区を設定した。同様の補光処理を、札幌、つくばで実施した。水中にヒーターを設置して、周囲より 2°C 水温が高温となる処理区

も設けた。以上の処理内容を表Ⅱ-2-1に示した。

表Ⅱ-2-1 処理内容

| 試験区名 | 補光処理で 再現する地点 | 加温処理 (水温+2℃) | 試験地 | 移植日 |
|----------|-----------------|-----------------|-----|--------------|
| | | | | 2009年, 2010年 |
| CatS | - | - | 札幌 | 5/28, 5/26 |
| CatSE | - | あり | 札幌 | 5/28, 5/26 |
| SatS | 札幌 | - | 札幌 | 5/28, 5/26 |
| CatM | - | - | 盛岡 | 5/28, 5/26 |
| CatME | - | あり | 盛岡 | 5/28, 5/26 |
| SatM | 札幌 | - | 盛岡 | 5/28, 5/26 |
| MatM | 盛岡 | - | 盛岡 | 5/28, 5/26 |
| CatT(I) | - | - | つくば | 5/14, 5/11 |
| TatT(I) | つくば | - | つくば | 5/14, 5/11 |
| MatT(I) | 盛岡 | - | つくば | 5/14, 5/11 |
| CatT(I)E | - | あり | つくば | 5/14, 5/11 |
| CatT(II) | - | - | つくば | 5/28, 5/26 |
| TatT(II) | つくば | - | つくば | 5/28, 5/26 |
| MatT(II) | 盛岡 | - | つくば | 5/28, 5/26 |

※補光処理は、再現を想定する地点における自然日長より僅かに長く設定。

ウ. 結果および考察

1) 開放系日長時間処理実験による日長時間と気温の影響

処理期間中の温度の概略を表Ⅱ-2-2に示した。盛岡では、2010年は2009年より気温が 2.3°C 、水温は 1.8°C 高温であった。2010年の盛岡の気温は、2009年のつくばの気温とほぼ同じであった。3地点における出穂期全データを表Ⅱ-2-3に示した。以下、このデータを検討する。

表Ⅱ-2-4により、補光処理がどの程度自然日長を模擬しているかを確認できる。2009年は補光時間が長く、自然日長に較べて大幅に出穂期が遅れ

表Ⅱ-2-2 移植から出穂期頃までの平均温度

| 地点 | 年次 | 水温 | 気温 |
|-------|------|------|------|
| 札幌*** | 2009 | | 17.8 |
| 札幌 | 2010 | | 20.2 |
| 盛岡* | 2009 | 23.3 | 20.8 |
| 盛岡* | 2010 | 25.1 | 23.1 |
| つくば** | 2009 | | 23.2 |
| つくば** | 2010 | | 25.1 |

6月4日から8月10日までの平均値。

*気温は東北農研気象観測露場、

*水温は試験水田における地上約1cmの値。

**アメダス館野の値。

***北農研気象観測露場

表Ⅱ－２－３ 3地点の出穂日

| 2010年 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------|-------|------|------|------|-------|------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 処理名 | CatM | CatME | SatM | MatM | CatS | CatSE | SatS | CatT(II) | TatT(II) | MatT(II) | CatT(I) | TatT(I) | MatT(I) | CatT(I)E |
| 地点 | 盛岡 | 盛岡 | 盛岡 | 盛岡 | 札幌 | | | つくば (II期) | つくば (II期) | つくば (II期) | つくば (I期) | つくば (I期) | つくば (I期) | つくば (I期) |
| 処理 | 対照 | 加温 | 電照 | 電照 | 対照 | 加温 | 電照 | 対照 | 電照 | 電照 | 対照 | 電照 | 電照 | 加温 |
| 補光時間 | | | 札幌 | 盛岡 | | | | 札幌 | つくば | 盛岡 | つくば | 盛岡 | | |
| きらら397 | | | 7/12 | | 7/22 | 7/17 | 7/22 | | | | | | | |
| あきたこまち | 8/3 | 8/2 | 8/5 | 8/6 | 8/10 | 8/6 | 8/10 | 7/28 | 7/28 | 7/30 | 7/21 | 7/22 | 7/22 | 7/19 |
| ひとめぼれ | 8/8 | 8/6 | 8/9 | 8/9 | 8/15 | 8/10 | 8/15 | 8/2 | 7/31 | 8/3 | 7/24 | 7/26 | 7/26 | 7/22 |
| コシヒカリ | 8/16 | 8/16 | 8/28 | 8/21 | 8/31 | 9/2 | 9/2 | 8/5 | 8/8 | 8/16 | 7/29 | 8/3 | 8/11 | 7/31 |
| 日本晴 | 8/26 | 8/27 | | 9/1 | | | | 8/14 | 8/16 | 8/23 | 8/9 | 8/13 | 8/18 | 8/12 |
| 2009年 | | | | | | | | | | | | | | |
| きらら397 | | | 7/28 | | 8/12 | 8/4 | 8/11 | | | | | | | |
| あきたこまち | 8/8 | 8/5 | 8/12 | 8/11 | 8/24 | 8/15 | 8/25 | | 8/1 | 8/2 | | | | |
| ひとめぼれ | 8/14 | 8/9 | 8/20 | 8/17 | 9/5 | 8/26 | 9/7 | | 8/7 | 8/8 | 7/27 | 7/28 | 7/30 | 7/24 |
| コシヒカリ | 8/20 | 8/18 | 9/10 | 9/3 | 9/18 | 9/13 | 9/26 | | 8/14 | 8/24 | 8/2 | 8/7 | 8/16 | 7/31 |
| 日本晴 | 8/30 | 8/27 | | 9/13 | | | | | 8/28 | 9/3 | 8/9 | 8/19 | 8/28 | 8/9 |

※2010年は主理の出穂日、2009年は50%の穂が出穂した日

※2009年は補光時間がイネの日長感応性に関する日長時間よりも長かったため、電照区の出穂日が遅い。

表Ⅱ－２－４ 自然日長区と、その地点における日長時間を模擬した補光区の出穂期の差

| 試験地、年次 | きらら397 | あきたこまち | ひとめぼれ | コシヒカリ | 日本晴 |
|--------------|--------|--------|-------|-------|-----|
| 札幌、2009年 | -1 | 1 | 2 | 8 | |
| 盛岡、2009年 | | 3 | 3 | 13 | 14 |
| つくば、2009年-I | | | 1 | 5 | 10 |
| 札幌、2010年 | 0 | 0 | 0 | 2 | |
| 盛岡、2010年 | | 3 | 1 | 5 | 6 |
| つくば、2010年-I | | 1 | 2 | 5 | 4 |
| つくば、2010年-II | | 0 | -2 | 3 | 2 |

※2009年は太陽高度明け方-4℃から、夕方-2℃まで、

2010年は明け方-2.5℃から、夕方-2℃までを日長時間と設定した。

たが、2010年はコシヒカリ、日本晴で5日程度の遅れになった。今回の開放形日長時間処理実験では、実験サイトよりやや日長時間の長い北方地点における温暖化影響を再現した結果を得たことになる。この場合、温暖化影響評価を行うためには、影響評価したい地点より南の地点で実験を行う必要がある。ただし、明け方の補光の基準太陽高度を-2℃にすると更に実験サイトにおける自然日長に近い日長時間を再現できると推察される。なお、今回の実験結果だけからでも、後述するように、2地点間における日長時間差による出穂期の差を利用することにより、温暖化後の出穂期を推定することが可能である。

あきたこまちとひとめぼれ（後述するように日長反応性が僅かである）については、2009年のつくばと、2010年の盛岡で出穂期がほぼ同じであった（CatM, MatM, TatT(II), MatT(II)を、日長時間の相

違を無視して比較）。このことから、この連携試験において、地点が相違しても、温度が同じ条件であれば（日長反応性の僅かな品種であれば）、ほぼ同時期が出穂期となることが示された。

次に、表Ⅱ－２－３に示される結果から、温度影響、日長時間影響を抽出するために、処理間および地点間の出穂日の差を求めた（表Ⅱ－２－５～８）。表Ⅱ－２－５から表Ⅱ－２－７は温度影響、表Ⅱ－２－８は日長時間影響を示している。表Ⅱ－２－５から盛岡と札幌およびつくばの気温差の影響を把握できる（日長時間が同一であるので）。札幌～盛岡、および盛岡～つくばの気温差（6～8月平均）は、2009年と2010年で大差ないが（表2から、札幌～盛岡は約3℃、盛岡～つくばは約2.3℃である）、地点間の出穂期差には年次間差が見られた。地点間の出穂期の差（温度に依存すると考えられる）は、

表Ⅱ-2-5 日長時間が同一な2地点間の出穂期の差

| 試験地 vs 試験地(日長時間)年次 | きらら397 | あきたこまち | ひとめぼれ | コシヒカリ | 日本晴 |
|--------------------|--------|--------|-------|-------|-----|
| 札幌 vs 盛岡(札幌)2009年 | 14 | 13 | 18 | | |
| 札幌 vs 盛岡(札幌)2010年 | 10 | 5 | 6 | 5 | |
| 盛岡 vs つくば(盛岡)2009年 | | 9 | 9 | 10 | 10 |
| 盛岡 vs つくば(盛岡)2010年 | | 7 | 6 | 5 | 9 |

※つくばは第II移植期のデータ。

表Ⅱ-2-6 2009年と2010年の出穂期の差

| 処理区 | きらら397 | あきたこまち | ひとめぼれ | コシヒカリ | 日本晴 |
|----------|--------|--------|-------|-------|-----|
| 札幌対照区 | 21 | 14 | 21 | 18 | |
| 札幌加温区 | 18 | 9 | 16 | 11 | |
| 盛岡対照区 | | 5 | 6 | 4 | 4 |
| 盛岡加温区 | | 3 | 3 | 2 | 0 |
| つくば対照区-I | | | 3 | 4 | 0 |
| つくば加温区-I | | | 2 | 0 | -3 |

この2年の気温差(2度強)が、どれだけ出穂を早めたか。低温ほど温度影響が大。

表Ⅱ-2-7 対照区と加温区の出穂期の差

| 試験地、年次 | きらら397 | あきたこまち | ひとめぼれ | コシヒカリ | 日本晴 |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-----|
| 札幌、2009年 | 8 | 9 | 10 | 5 | |
| 札幌、2010年 | 5 | 4 | 5 | 2 | |
| 盛岡、2009年 | | 3 | 5 | 2 | 3 |
| 盛岡、2010年 | | 1 | 2 | 0 | -1 |
| つくば、2009年-I | | | 3 | 2 | 0 |
| つくば、2010年-I | | | 2 | -2 | -3 |

2℃水温が高い影響。低温ほど影響が大。

表Ⅱ-2-8 同一地点での日長時間の異なる処理区の出穂期の差

| 日長時間 vs 日長時間(at 試験地 in年次) | きらら397 | あきたこまち | ひとめぼれ | コシヒカリ | 日本晴 |
|------------------------------|--------|--------|-------|-------|-----|
| 札幌 vs 盛岡(at 盛岡 in 2009) | | 1 | 3 | 7 | |
| 札幌 vs 盛岡(at 盛岡 in 2010) | | -1 | 0 | 7 | |
| 盛岡 vs つくば(at つくば in 2009-I) | | | 2 | 9 | 9 |
| 盛岡 vs つくば(at つくば in 2009-II) | | 1 | 1 | 10 | 6 |
| 盛岡 vs つくば(at つくば in 2010-I) | | 0 | 0 | 8 | 5 |
| 盛岡 vs つくば(at つくば in 2010-II) | | 2 | 3 | 8 | 7 |

その年の温度レベルに依存した。表Ⅱ-2-6は2009年と2010年の気温差が、同一地点における出穂期にどれだけ影響したかを示すが、低温の地点ほど両年の出穂期の差が大であった。表Ⅱ-2-7は水温加温(対照区プラス2℃)の影響であるが、これも低温地点で加温の影響が大であった。このように、気温効果は、気温レベルの影響を受け、低温域で効果が大きかったことから、気温が発育速度に及

ぼす影響が非線形である。その頭打ちが今回の試験で見られた。

2) 開放系日長処理実験の妥当性について

コシヒカリと日本晴のデータを使用して、この装置による実験の妥当性を示すことができるかを検討した。2010年が猛暑であったため、2009年のつくばと2010年の盛岡の気温が同等であったことを利

用する。なお、ここでは、実験データの単純な比較から妥当性を検討しようとしたため、次に示す、日長時間の効果を用いることにした。

表Ⅱ-2-8は日長時間の効果である。これは2009年も2010年も大差なかった。このことから、日長時間の違いによる出穂期の差は安定した値として使用できると考えた。すなわち、つくばの2009年の自然日長における出穂期から、つくばと盛岡の日長時間の差による遅延日数を加えた日が、2010年の盛岡における出穂日と推察できる。この推定を行うためには、盛岡とつくばで移植期を揃えた自然日長の栽培データ(2009年のCatT(Ⅱ)のデータ)が必要であるが、それが得られていないので、次のように推定した。CatT(Ⅰ)の2009年と2010年の出穂日差(4日)がCatT(Ⅱ)における2009年と2010年でも成立していたと仮定すると、CatT(Ⅱ)の2009年の出穂期は8月9日である。一方、2010年のCatT(Ⅱ)とCatT(Ⅰ)の出穂日差(7日)が2009年も成立していたと仮定すると、CatT(Ⅱ)の2009年の出穂期は8月9日となる。このように2種類の推定による両者一致したことから、2009年のCatT(Ⅱ)の出穂日は8月9日と推察できる。これに表Ⅱ-2-8に見られる、日長時間効果(9日)を加えると、2010年の盛岡での出穂期は8月18日と推定できる。一方、2010年の盛岡における実測出穂日は8月16日であり、近い値と言える。

日本晴についても同様の見積もりを行うと、CatT(Ⅰ)の2009年と2010年の出穂日差(0日)からCatT(Ⅱ)の2009年の出穂期は8月14日。一方、2010年のCatT(Ⅱ)とCatT(Ⅰ)の出穂日差(4日)から推定すると、やはり8月14日である。日本晴の日長時間影響は7日である(表Ⅱ-2-8)。したがって、盛岡における2010年の推定値は8月21日となる。実測値は26日である。

以上のように、開放系日長時間処理実験により、2~5日の精度で、温暖化が水稻の出穂期におよぼす影響を推定可能である。

3) 温暖化による出穂期変化の特徴

表Ⅱ-2-5、6、7から、温度上昇による出穂期の前進程度は、温度レベルが低いほど大きい。2009年の札幌の温度レベルから2℃温度上昇した場合の出穂期変化は極めて大きく、2~3週間である。この場合でも、水温を2℃加温すると出穂期前進は

縮小した。一方、札幌より2℃高い気温レベルである盛岡においては2009年と2010年の出穂期の違いは5日程度、水温加温すると3日程度。更に気温レベルの高いつくばにおいては、2009年と2010年で3~4日の差、水温加温すると、差がほとんど無くなり、逆転することもあった(日本晴)。

このように、札幌など寒地においては温暖化(2℃程度の気温上昇)の影響が強く顕れる一方、現在の盛岡程度の気温レベルの地点においては、出穂期の前進程度は小さい。一方、地点間の緯度の違いによる日長時間差の影響は、盛岡とつくば間では、コシヒカリでは9日の出穂日の差に相当する。

なお、表Ⅱ-2-6に示される、2009年と2010年の差は、気温上昇効果と水温上昇効果の和と考えられる。表Ⅱ-2-7には、水温の2℃の上昇単独の効果が示されている。札幌においては、気温上昇の出穂期前進効果が大きい、盛岡、つくばでは水温の影響が大きい。

4) 温暖化条件における出穂期評価について

将来、現在の南方(低緯度)と同じ気温になるからといって、現在そこで栽培される品種の単純な導入はできない。北方地点の夏期の長い日長時間の影響により、気温の上昇のみから期待される出穂期より遅延するからである。

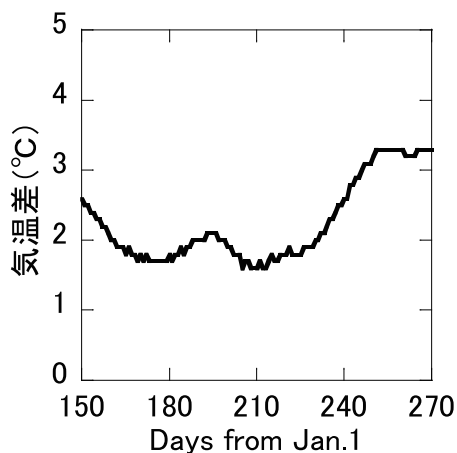
温暖化後の出穂期を、次のように評価可能である。盛岡とつくばの日長時間差の影響による出穂日の差は9日である(表Ⅱ-2-8)。同様に札幌と盛岡では7日である。このことから、温暖化後に参照すべき栽培暦の見方がわかる。すなわち、例えば将来の盛岡が現在のつくばと同じ気温になった場合、現在のつくばと同じ暦で育苗・移植を行うと、出穂期は、現在のつくばの出穂期から9日遅延することになる。現在、つくばにおけるコシヒカリの出穂期は2009年移植期Ⅰの場合、8月2日であるので、将来の盛岡が現在のつくばの気温になった場合の出穂期は、8月11日である。移植期Ⅱの場合のつくばにおける2009年の出穂期は前述のように8月9日であるので、移植期Ⅱに移植すると将来の盛岡では8月18日に収穫する。移植期Ⅱが現在の慣行的な移植期であるが、それより2週間前進しても、出穂期の促進は2日程度である。(2010年のCatT(Ⅱ)とCatT(Ⅰ)は7日違うが)

5) 温暖化条件による品種、作期変更の可能性について

次に、上記の将来の盛岡の出穂期での安全に成熟できるか、収量はどうかを検討した。盛岡が現在のつくば並みの気温になると仮定して、コシヒカリを栽培した場合の様相を予想した。つくばと盛岡の平年気温の差の季節変化を図Ⅱ-2-1に示した。両地点の気温差は8月中旬まではほぼ一定であるが、その後9月になると(DOY244が9月1日)差が拡大する傾向がみられた。そこで、登熟気温が確保できるかを調べた。

表Ⅱ-2-9は出穂後40日間平均気温が19、20、21、22℃を確保できる出穂期上限である。まず、現在の盛岡と同じ移植期で栽培して8月18日出穂する場合について考えると、2℃気温上昇すれば、8月18日出穂でも登熟気温22℃以上を確保できる。出穂後の高温については、出穂後15日間平均気温(図Ⅱ-2-2)は、現在の一般的な出穂期が8月5日とすると、その場合の23.5℃より上昇するものの、24.4℃である。収量ポテンシャル(内島(1967)の気候登熟量示数)については2℃気温上昇した場合の8月18日出穂の場合の値は700(kg/10a)で、現在の8月7日出穂期と同等である(図Ⅱ-2-3)。次に、5月中旬に移植し

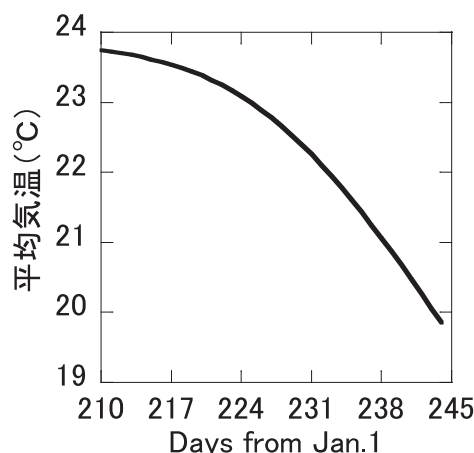
て8月11日出穂する場合については、登熟気温は22℃を確保できるものの、出穂後15日平均気温が25.1℃になるが、収量ポテンシャルは764kg/10aである。以上から、2℃の気温上昇条件においては、温度、日射条件からは盛岡においてコシヒカリが栽培可能と判断される。冷害危険性については、出穂期が遅れること、2℃気温上昇することから、現在よりリスクは増大しないと判断できる。ひとめぼれについては、つくばと盛岡の日長時間の差の影響がほとんど見られなかったことから、2009年のつくばにおける出穂日は8月7日(推定値であるが、2009年のつくばと6~8月平均気温がおなじ2010年の盛岡のひとめぼれ出穂期とほぼ一致)。つくば気温において、ひとめぼれの出穂期は、2009年の盛岡出穂期に較べて7日間前進する。これにより、収量ポテンシャルは745kg/10aから803kg/10aに増加するが、出穂後15日間平均気温は現在の22.9℃から気温上昇後25.5℃となる。



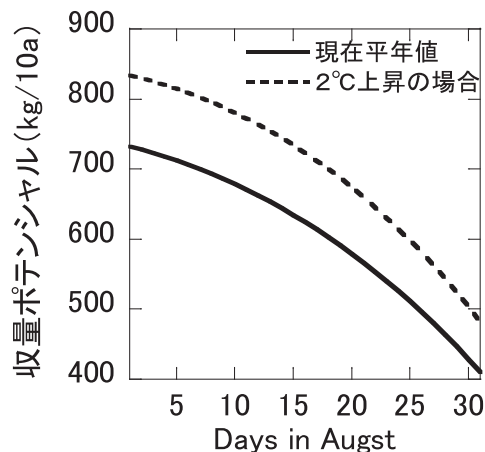
図Ⅱ-2-1 つくばと盛岡の平年気温差

表Ⅱ-2-9 出穂後40日間の平均気温を確保できる出穂期版源

| | 現在 | +1℃ | +2℃ |
|-----|------|------|------|
| 19℃ | 8/23 | 8/28 | 9/2 |
| 20℃ | 8/18 | 8/23 | 8/28 |
| 21℃ | 8/12 | 8/18 | 8/23 |
| 22℃ | 8/6 | 8/12 | 8/18 |



図Ⅱ-2-2 出穂後15日間平均気温(213が8月1日)



図Ⅱ-2-3 収量ポテンシャル

エ. 今後の課題

本研究における開放系日長時間処理実験では、小型の処理装置を用いたため、温暖化が発育進行に及ぼす影響のみを対象としたが、今後はバイオマス量、収量、品質に及ぼす影響を評価できるように処理装置の拡充が望まれる。補光光源のLED化も必要になるが、それにとまなう明け方の補光開始、夕方の補光終了時の太陽高度等の検討も必要である。また、本研究では水稻を供試作物として使用したため、地点間の降水量の差に起因する土壌水分の相違を考慮する必要がなかったが、畑作物を対象にする場合は地点間で土壌水分をそろえる処理が必要である。

オ. 要約

電照、加温処理を含む全国連携栽培試験から、温暖化条件における水稻の栽培様相を評価した。コシヒカリについて、盛岡とつくばの日長時間の相違が、10日の出穂の差を生じていた。これは両地点の気温差の影響より大である。気温が2℃上昇した場合盛岡では、コシヒカリの栽培に関して次のシナリオが描ける。5月下旬の移植期で栽培すれば、8月18日出穂する。出穂後15日平均気温は0.9℃上昇し、収量ポテンシャルは現状である。5月中旬に播種する場合、8月11日出穂する。出穂後15日間の平均気温は、現在8月5日出穂する場合より1.6℃上昇するが、収量ポテンシャルは9%増加する。

カ. 参考文献

Sameshima, R., Hamasaki, T., Nemoto, M., Kumagai, E., Ohno, H., Wakiyama, Y., Maruyama, A., Ozawa, K., 2011, Experimental open-field day-length-extension method and estimation of the effective light period using solar altitude, J. Agric. Meteorol. 67, 307-312

内島立郎・羽生寿郎（1967）本邦における水稻の気候登熟量示数の地域性について．農業気象，22，1-6

執筆担当者（鮫島良次）

3. 関東における温暖化の影響評価

ア. 研究目的

近年、気温上昇の農業への影響が顕在化し始めており、水稻栽培においては、かつて九州を中心として問題とされていた高温による登熟不良が関東・北陸地方でも発生するようになってきた。このため、関東地域でも気温上昇に対する水稻栽培の適応技術開発が急務となっている。

そこで、30年程度将来に予想される気温上昇(1℃～最大2℃)に適応するための栽培シナリオを、つくばと熊本において実施する現地実証的な連携栽培試験をもとに提示することを目的とする。

イ. 研究方法

図Ⅱ-3-1は、5月1日～8月31日における茨城県つくばみらい市(北緯36.01度、東経140.02度:以後「茨城」)と熊本県合志市(北緯32.88度、東経130.74度:以後「熊本」)における日平均気温平年値と日長(太陽高度角0度～0度の時間)である。5月から7月にかけての期間、熊本の気温は茨城のそれよりも2度程度高く、日長は常に短い。したがって、熊本に圃場を設置し、電照を行って茨城における日長を再現すれば、温暖化後の茨城の圃場条件を野外において模擬することができる(Sameshima *et al.*, 2011)。そこで、早朝と夕方に電照を行う試験圃場を茨城と熊本に設置し、連携する水稻の栽培試験を実施した。

試験は、2009年と2010年に実施し、反復は2とした。調査項目は、圃場における日平均気温と出穂日である。出穂日は、茎の過半数が出穂した日と定義した。

1) 電照による日長時間の制御

水稻が明期と受感して日長反応する明度は太陽高度が約-2度(約2度の俯角)であることが明らかになった(Wakiyama *et al.* 投稿中)ので、朝の電照開始時刻は、茨城における太陽高度がこれよりも僅かに小さい-2.5度となる時刻とし、太陽高度が+6度となる時刻を朝の電照終了時刻とした。夕方の電照開始時刻は、茨城における太陽位置が+6度となる時刻とし、終了時刻は-2.0度となるまでの時刻とした。6-8月の期間、茨城より緯度が低い熊本では日の出時刻はより遅く、日の入り時刻はより早い。従って、両地点において上述のように電照す

ることにより、茨城における自然日長よりも僅かに長い同一の日長時間を茨城と熊本の圃場に設定することができる。

2) 耕種概要

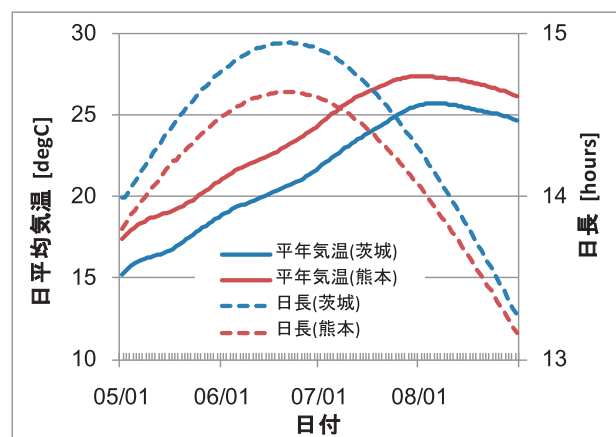
ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、にこまるを供試した。これらの苗は、茨城県つくばみらい市において一括して育苗し、連携する圃場で共通に使用した。熊本への輸送は宅配便の冷蔵サービスを利用して、移植の2日前に行った。

移植は、2009年は5月15日午前中に、2010年は5月12日午前中に連携する圃場で同時に実施した。移植時の葉齢はコシヒカリが4.0、ひとめぼれが4.2、日本晴が3.8、にこまるが3.6である。移植密度は株間15cm条間30cmとし、1株に1個体を移植した。試験区では各品種7個体を栽培し、反復は2とした。試験区の周囲はコシヒカリを慣行にて均一栽培した。

茨城圃場における2009年の連携試験風景を図Ⅱ-3-2に示す。

3) 出穂調査

出穂した茎の計数を毎日実施し、7個体について合計した出穂した茎数が茎数全体の過半数となった日をもって出穂日とした。



図Ⅱ-3-1 茨城県つくばみらい市(北緯36.01度、東経140.02度)と熊本県合志市(北緯32.88度、東経130.74度)における日平均気温平年値と日長(太陽中心高度角0度～0度の時間)の推移。

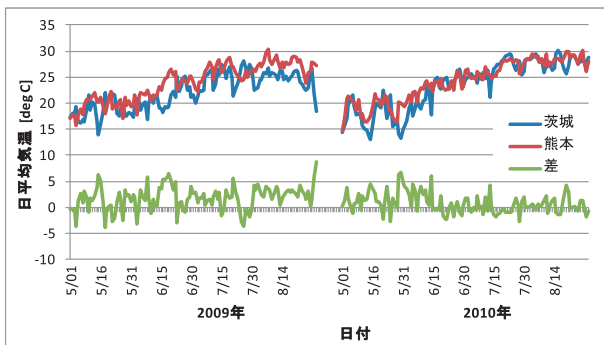


図Ⅱ-3-2 茨城圃場(茨城県つくばみらい市)における2009年の連携試験風景(移植15日後)。

ウ. 結果および考察

1) 気温の経過

図Ⅱ-3-3に、茨城圃場と熊本圃場における5～8月の日平均気温の推移を2009年と2010年について示す。この期間の両地点の温度差は、平年値としては2.7℃であるが、2009年については1.8℃であった。2010年については0.8℃と小さかった。特に、記録的な猛暑となったこの年の6月中旬以降、茨城における気温は熊本におけるそれと、殆ど差が無かった。6月16日～8月30日の気温差の平均値は0.07℃である。



図Ⅱ-3-3 茨城圃場と熊本圃場における5～8月の日平均気温の推移(2009年、2010年)

2) 出穂日の比較

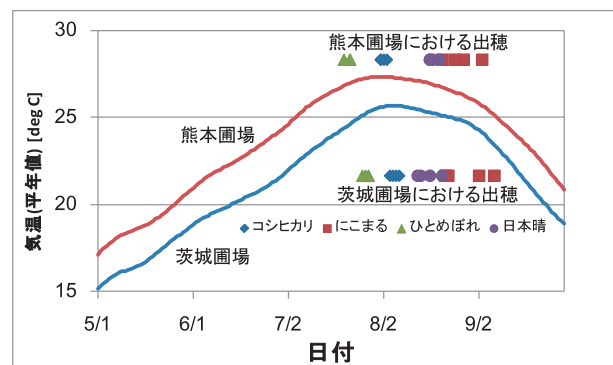
表Ⅱ-3-1に、2009年と2010年の連携試験で観測された各品種の出穂日と移植から出穂に至る期間の日平均気温を示す。

表Ⅱ-3-1 2009年と2010年に実施された茨城熊本における連携試験で観測された出穂日と移植～出穂期間の日平均気温

| 品種名 | 年次 | 圃場 | 平均気温 degC | 移植日 | 出穂日 |
|-------|------|----|-----------|-------|-------|
| コシヒカリ | 2009 | 茨城 | 22.0 | 5月14日 | 8月6日 |
| | 2009 | 熊本 | 23.5 | 5月15日 | 8月2日 |
| | 2010 | 茨城 | 22.6 | 5月11日 | 8月4日 |
| | 2010 | 熊本 | 23.3 | 5月11日 | 8月1日 |
| にこまる | 2009 | 茨城 | 22.6 | 5月14日 | 9月4日 |
| | 2009 | 熊本 | 24.6 | 5月15日 | 8月31日 |
| | 2010 | 茨城 | 23.5 | 5月11日 | 8月22日 |
| | 2010 | 熊本 | 24.4 | 5月11日 | 8月23日 |
| ひとめぼれ | 2009 | 茨城 | 21.7 | 5月14日 | 7月27日 |
| | 2009 | 熊本 | 23.2 | 5月15日 | 7月22日 |
| | 2010 | 茨城 | 22.1 | 5月11日 | 7月27日 |
| | 2010 | 熊本 | 22.6 | 5月11日 | 7月21日 |
| 日本晴 | 2009 | 茨城 | 22.5 | 5月14日 | 8月19日 |
| | 2009 | 熊本 | 24.3 | 5月15日 | 8月19日 |
| | 2010 | 茨城 | 23.1 | 5月11日 | 8月13日 |
| | 2010 | 熊本 | 24.0 | 5月11日 | 8月17日 |

図Ⅱ-3-4に、2009年、2010年における各試験区における出穂日を、5月～9月の平均気温平年値の推移と共に示す。

全般に、茨城圃場よりも熊本圃場における出穂が早まった。また、日本晴やにこまるなど、比較的出穂が遅い品種では、個体による出穂日のばらつきが大きい傾向が見られた。

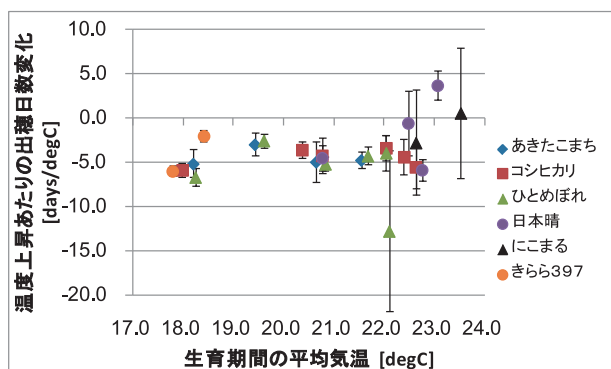


図Ⅱ-3-4 茨城圃場と熊本圃場における5月～9月の日平均気温の平年値の推移と、それぞれの圃場における品種毎の出穂日

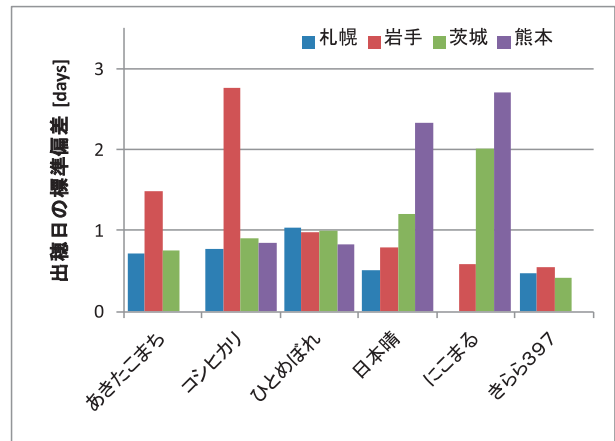
茨城と熊本で実施したのと同様の連携試験は、茨城と岩手県盛岡市(北緯39.75,東経141.14度:以降岩手)、岩手と北海道札幌市(北緯43.01度,東経141.42度:以降札幌)においても同時に実施された。これら3対の連携試験の結果から、連携圃場間の気温差あたりの出穂日の変化と、各圃場における生育

期間の平均気温との関係を図Ⅱ-3-5に示す。各品種の中で、コシヒカリとひとめぼれについては、3対の連携のすべてで試験を実施した。これらの結果から、気温の上昇によって引き起こされる出穂の早期化は、場所によらず気温変化1度Cあたり5日程度であり、生育期間の気温と出穂日の変化には明確な関係がないことが明らかになった。

図Ⅱ-3-4, 5を見ると、日本晴やにこまるなど、一部の品種でより温暖な栽培条件で出穂日のまとまりがより弱くなることが示唆される。本研究では、日長制御や田面水温制御などの試験を複数年次にわたり反復2ないし3で実施しているので、反復に見られる出穂日数の標準偏差が品種、圃場毎に複数得られている。そこで、これらの二乗平均平方根を計算して平均的な出穂日数の標準偏差を品種、圃場毎に推定し、比較した(図Ⅱ-3-6)。この図をみると、にこまると日本晴でより温暖な地域でより出穂日がばらつく傾向が見いだせる。よって、メカニズムについては不明ながら、幾つかの品種では、温暖化に伴って出穂日が分散する可能性があることが明らかになった。出穂日が分散すると、登熟期間が揃わないために、早く出穂した茎で胴割れが多くなる一方で遅く出穂した茎で青未熟粒が多くなるなど品質が低下するので、温暖化に適応した品種の選定や育種において留意する必要がある。



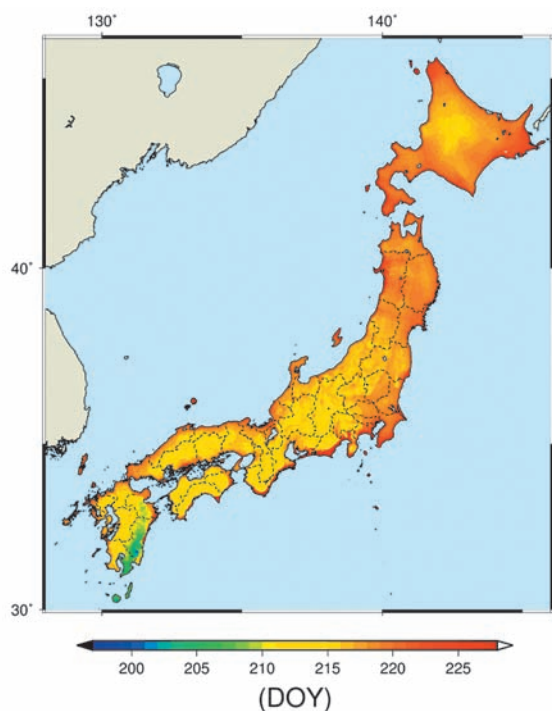
図Ⅱ-3-5 茨城-熊本、茨城-岩手、岩手-札幌において同時に実施した連絡試験で得られた生育期間の温度差1度あたりの出穂日変化と生育期間の温度との関係。各プロットのバーは、出穂日数の差の95%信頼限界範囲を圃場間の温度差で除したもの



図Ⅱ-3-6 連携試験で観測された各品種の出穂日の標準偏差の連携試験圃場による違い

図Ⅱ-3-7に、現在気候(1980-2010年の平年値)における、最高気温の出現日の分布図を示す。この図と図Ⅱ-3-4からわかるとおり、関東地方の平野部では、8月5日(DOY217)前後に気温が最高となる。一方、統計によれば、関東地方各都県における水稻の出穂盛期の平年値は、千葉県7月29日、茨城県8月5日、栃木県8月6日、埼玉県が8月12日、神奈川県8月15日、東京都と8月16日、群馬県が8月20日頃、であり、現在気候下においては、茨城県、栃木県、埼玉県において、気温が最も高くなる時期に出穂を迎えるような作型となっている。

図Ⅱ-3-7からわかるとおり、最高気温の出現日は、全国一様ではなく複雑な分布を示すが、大局的には温暖な地域ほど早い傾向があり、茨城県を含む関東地方に比較して、熊本県周辺では7月31日(DOY213)前後であり6日ほど早い。すなわち、温暖化後もこの傾向が維持されると仮定すると、関東地方の最高気温の出現は6日程度早まると考えられる。一方、図Ⅱ-3-5からは、温暖化により、水稻の出穂は全般的に5日程度早まると予想される。したがって、栃木県や茨城県、埼玉県においては、現在の作型と主力品種を採用し続けた場合、将来的にも、気温が最も高くなる時期と出穂最盛期は温暖化後も一致しつづけることが予想され、高温登熟障害の危険性が顕著に高まると推定される。したがって、この地域では、より出穂が遅くなるような品種選択や作型への変更が必要と考えられる。



図Ⅱ-3-7 現在気候(1980-2009年の平年値)における、最高気温の出現日(DOY)の分布。

エ. 今後の課題

関東地方では、高温による登熟障害を回避する栽培技術が求められることが明らかとなった。今後は、この地方に適した高温登熟耐性品種の選定とこれに適した作期の策定が課題となる。

幾つかの品種で、より高温な栽培条件で出穂が揃わなくなる現象が見いだされていることから、そのメカニズムと、品質への影響の評価の解明が、品種の選定や育種において今後必要である。

作期の策定については、Nemoto *et al.* (2012) によって、温暖化シナリオと発育予測モデルを用いて冷害リスクと高温障害のリスクを同時に評価する手法が開発されているが、これを活用するには検討対象となる水稻品種の発育パラメータが決定される必要があるため、これに取り組む必要がある。

本研究からは、温度上昇に対する出穂日変化の度合いに地域依存性は認められなかったが、最終的な結論を得るために、より検出精度の高い実験を実施することが望まれる。

オ. 要約

30年程度将来に関東地方で予想される気温上昇に適応するための栽培シナリオを提示することを目

的に連携試験を実施した。日長が同じで気温が異なる試験圃場を、茨城と熊本の気候の違いと電照により作り出し、水稻品種ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、にこまるをそれぞれの圃場で同時に栽培して出穂日を比較した。苗は茨城県において同一条件で育苗し共通に使用した。試験は反復を2とし、2009年と2010年に実施した。試験の結果、より高温な圃場における出穂日が早く、全国的に1℃の気温上昇につき出穂日が5日程度早まると予想できることが分かった。温暖化に伴って出穂日が分散する品種が存在する可能性があり、このような品種では、登熟期の違いから品質低下が生じる可能性がある。関東では、気温が最も高くなる時期に出穂を迎える作型が多い。これらの地域では、将来、高温登熟障害のリスクが特に高まると予想される。

今後は、関東地方に適した高温登熟耐性品種の選定とともに、高温を回避する作期策定に取り組む必要がある。このために、様々な水稻品種の発育モデルパラメータを正確・迅速に決定する手法の開発が必要である。また、高温な栽培条件で出穂が揃わなくなる現象の解明と評価が必要である。

カ. 参考文献

Nemoto, M. and Hamasaki, T., 2012, Probabilistic Risk Assessment of the Rice Cropping Schedule for Central Hokkaido, Japan. *J. Appl. Meteor. Clim.*, 51, 1253-1264.

Sameshima, R., Hamasaki, T., Nemoto, M., Kumagai, E., Ohno, H., Wakiyama, Y., Maruyama, A., Ozawa, K., 2011, Experimental open-field day-length-extension method and estimation of the effective light period using solar altitude, *J. Agric. Meteorol.* 67, 307-312

Wakiyama *et al.* (投稿中) Threshold intensity of twilight illumination for photoperiodism of rice based on solar altitude, *Journal of Agricultural Meteorology* (submitted).

執筆担当者 (大野宏之)

4. 九州における温暖化の影響評価

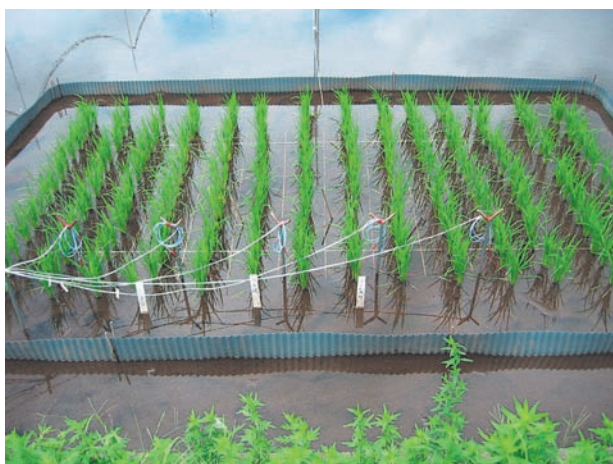
ア. 研究目的

近年の気温の上昇に伴い九州では、収量低下や高温登熟障害が多発している。今後、さらに気温が上昇することが予想されていることから、高温障害の発生が恒常的になることが考えられる。本課題では、九州における温暖化を水温上昇により再現することで水稻の生育反応を明らかにし、またモデルを用いて白未熟粒の発生状況を評価し、温暖化対策に資する有益な情報を提供するために実施する。

イ. 研究方法

1) 水温上昇試験

水温上昇試験は、2009年に九州沖縄農業研究センター圃場において行った。水温上昇処理は、2009年の7月10日から収穫期まで行った。処理方法は、電熱線（防水コードヒーター、東京硝子器機）をグラスファイバーに巻き付け条間に設置し水温を上昇させた。処理は日中夜間を通し連続して行ない、水温の上昇効率を上げるために試験区を波板で囲んだ。処理は2反復とした。また、水温上昇処理を行わない対照区も設けた（2反復）。実験に用いた水稻品種は、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、にこまる、である。播種は6月2日に行い、慣行法により育苗した苗を6月17日に移植した。移植密度は株間15cm、条間30cmであった。水温上昇区の処理状況を図Ⅱ-4-1に示した。肥培管理は耕起前に牛ふん堆肥を1t/10a施用し、また基肥として整地後化成肥料をN、P、K分量でそれぞれ4kg/10a施用した。なお、その後の追肥は行わなかった。調査



図Ⅱ-4-1 水温上昇処理実験の状況

項目は、生育ステージの判定（出穂期）と収量、玄米外観品質である。玄米外観品質は客観性を保つため穀粒判別器（RGQI20A、サタケ）を用いて判定した。また、水温上昇区、対照区の水温を測定するために、温度計（白金測温抵抗体、チノー）を条間に設置し、データロガー（MC-3000、チノー）に記録した。

2) モデルを用いた高温登熟障害の影響評価

モデルを用いた水稻の高温登熟障害の影響評価は、以下の白未熟粒発生予測モデル（脇山ら、2010）を用いて、ヒノヒカリを対象に行った。

$$IWBK = 3.45 \times 10^{-7} \exp(0.607 \times T) \quad (1)$$

$$IMWK = 52.3 \exp(-599.9 \times DMG) \quad (2)$$

(1) 式は基白粒発生予測モデルで、IWBKは基白粒発生率(%), Tは出穂後20日間の平均気温である。
(2) 式は乳白粒発生予測モデルで、IMWKは乳白粒発生率(%), DMGは登熟期の籾あたりの乾物生産量(g/粒)である。また、DMGは以下のように表される。

$$DMG = SR \times \alpha \times RUE / Gr \quad (3)$$

ここで、SRは登熟期の日射量(MJ/m²), α は出穂期の群落の日射吸収率, RUEは気温と葉色に依存する日射利用効率, Grはm²あたりの籾数である。このようにDMGには乳白粒の発生に及ぼす気温、日射、葉色、籾数を用いている。温暖化の影響評価は、熊本における基白粒と乳白粒の発生について、熊本の気温と日射量の平年値(1971~2000年)を用い、気温が0.5℃および1.0℃上昇したときの基白粒および乳白粒の発生状況を調べた。

ウ. 結果および考察

1) 水温上昇試験

水温上昇処理の効果、処理区と対照区の水温の推移を図Ⅱ-4-2に示した。処理を開始した7月10日までは、水温上昇区と対照区の水温に差は見られないが、処理開始以降は水温上昇区は対照区に比べて高く推移した。水温上昇処理開始の7月10日から9月30日までの平均水温は、処理区が29.0℃、対照区が26.7℃と水温上昇処理区が対照区

に比べて2.3℃高く、処理の効果が確認できた。

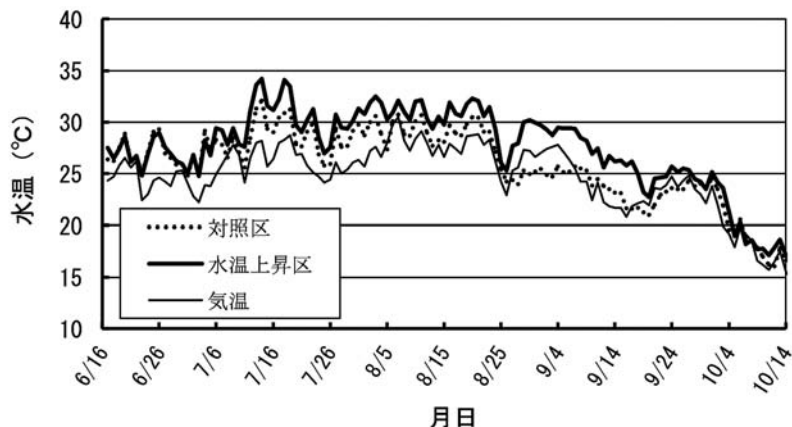
表Ⅱ-4-1には水温上昇処理が出穂、収量に及ぼす影響を示した。水温上昇により、にこまるを除いて出穂期が遅れる傾向が観察された。中でもコシヒカリは、水温上昇処理によって出穂期が3日遅れ、対照区の出穂期との間に5%水準で有意差が認められた。水温上昇処理区の玄米収量は、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、にこまるが、それぞれ266kg/10a、278kg/10a、346kg/10a、510kg/10aであった。対照区の収量との比はそれぞれ67%、77%、83%、77%と収量は水温上昇処理により17~33%低下した。

表Ⅱ-4-2には、水温上昇が玄米外観品質に及ぼす影響について示した。乳白粒、基白粒、腹白粒、その他未熟粒は、水温上昇処理によりいずれの品種においても増加する傾向が見られた。その結果、ひとめぼれでは対照区の整粒割合が66.8%に対し、水温上昇区で59.7%と整粒の割合が減少した。他の品種でも、水温上昇処理により整粒の割合が減少した。一方で、青未熟粒は水温上昇処理区で減少する傾向にあった。

水温上昇処理により、外観品質、収量の低下が認められた。水温上昇処理による結果であるが、今後も気温上昇の傾向が続けば、高温登熟障害により白未熟粒の発生が増加し、外観品質が低下するものと考えられた。

2) モデルを用いた高温登熟障害の影響評価

図Ⅱ-4-3には、(1)式の基白粒発生予測モデ



図Ⅱ-4-2 水温上昇処理区および対照区の水温の推移

表Ⅱ-4-1 水温上昇処理が出穂期および収量に及ぼす影響

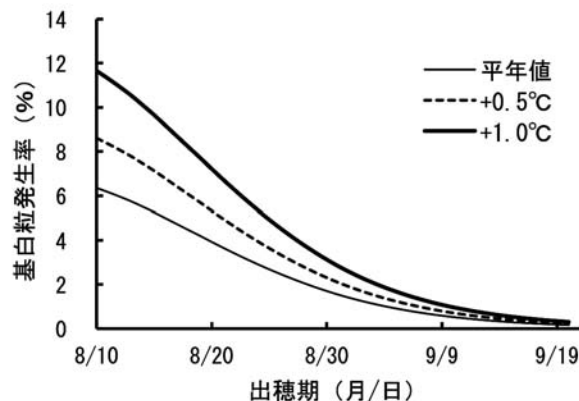
| | 出穂期 | | 玄米収量 (kg/10a, 15%) | |
|-------|-------|--------|--------------------|-----------|
| | 対照区 | 水温上昇区 | 対照区 | 水温上昇区 |
| ひとめぼれ | 8月13日 | 8月14日 | 395 | 266 (67%) |
| コシヒカリ | 8月11日 | 8月14日* | 359 | 278 (77) |
| 日本晴 | 8月18日 | 8月20日 | 415 | 346 (83) |
| にこまる | 8月27日 | 8月26日 | 661 | 510 (77) |

* 5%水準で対照区と有意差あり。()内は対照区の収量に対する割合。

表Ⅱ-4-2 水温上昇処理が玄米外観品質に及ぼす影響

| | ひとめぼれ | | コシヒカリ | | 日本晴 | | にこまる | |
|--------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|
| | C | H | C | H | C | H | C | H |
| 整粒 | 66.8% | 59.7 | 50.4 | 43.4 | 77.5 | 71.5 | 81.5 | 78.2 |
| 乳白粒 | 1.3 | 1.4 | 2.2 | 2.6 | 0.8 | 0.9 | 0.8 | 1.8 |
| 基白粒 | 4.2 | 4.6 | 5.0 | 8.0 | 0.9 | 2.2 | 0.4 | 0.4 |
| 腹白粒 | 0.5 | 1.3 | 1.0 | 1.9 | 0.3 | 0.9 | 0.4 | 0.6 |
| 青未熟粒 | 0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 1.4 | 0.8 |
| その他未熟粒 | 18.5 | 22.3 | 27.9 | 27.5 | 13.9 | 15.2 | 12.4 | 14.7 |

C: 対照区、H: 水温上昇処理区



図Ⅱ-4-3 気温が上昇した場合の出穂期と基白粒発生率の関係

ルによる、熊本における登熟期の気温が平年値で推移した場合、0.5℃、1.0℃上昇した場合の出穂期と基白粒発生率との関係を示した。気温が1.0℃上昇した条件で、発生率を数パーセント以下に抑えたい場合は、現在の平均的な出穂期である8月25日より10日遅い9月4日に収穫させる必要があることが示された。図Ⅱ-4-4には、(2)式のモデルを用いて、熊本における気温が平年値で推移した場合と気温が0.5℃、1.0℃上昇した場合の、出穂期の違いによる粒数と乳白粒発生率との関係を示した。同じ出穂期、粒数でも気温が平年値に比べて0.5℃、1.0℃と上昇するにつれて乳白粒の発生率が増加することが確認できた。気温が平年値で推移した場合、気温が上昇した場合とも出穂期が早いほど、また粒数が多いほど乳白粒の発生が増加することも確認できた。乳白粒の発生を抑えるためには、出穂期を遅らせる、粒数を制限する必要のあることが伺えた。

エ. 今後の課題

水温上昇試験は、単年度の結果であるため、引き続き実験を行い複数年のデータを蓄積する必要がある。収量については、穂数、1穂粒数、登熟歩合、千粒重の収量構成要素についても押さえる必要がある。

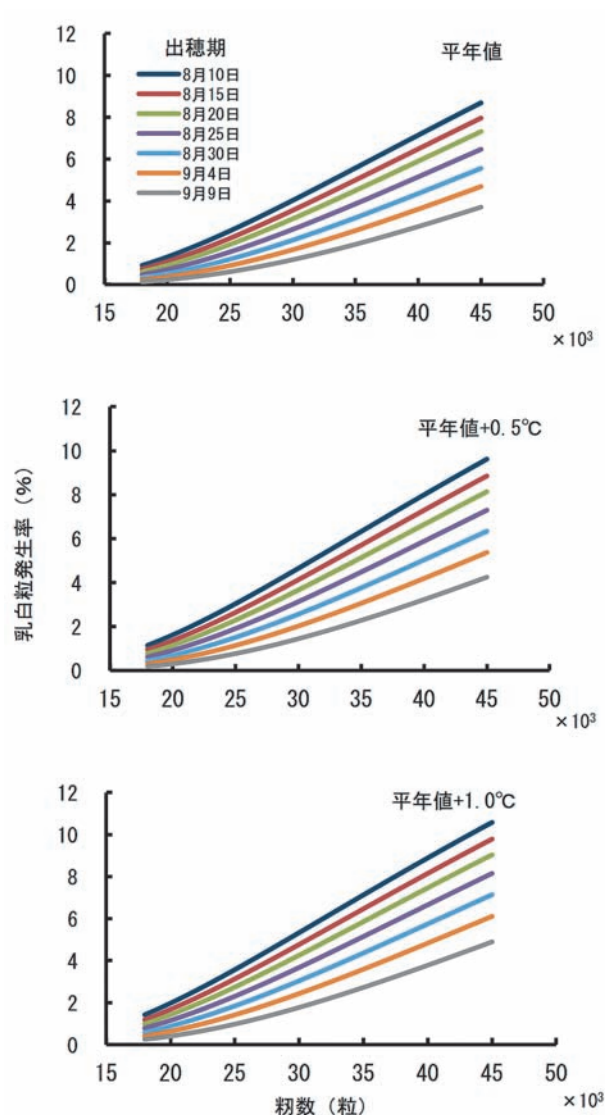
オ. 要約

水温上昇処理により、収量、外観品質は低下した。また、出穂の遅延が観察された。モデルによる計算では、基白粒は気温の上昇に伴い増加するため、発生を抑えるためには晩期化が必要である。乳白粒についても発生を抑えるためには、晩期化、粒数制御を行う必要のあることが明らかになった。

カ. 参考文献

脇山恭行・大原源二・丸山篤志 (2010). 水稻白未熟粒発生予測モデル構築のための登熟期の気象条件および生育状態と白未熟粒発生状況の解析. 農業気象, 66: 255 - 267.

執筆担当者 (脇山恭行)



図Ⅱ-4-4 気温が上昇した場合の出穂期別の粒数と乳白粒発生率の関係

5 連携試験結果に基づく新たな温暖化適応栽培シナリオの策定システムの構築

発育モデルの適用温度範囲は、そのパラメータの決定に使用したデータの温度範囲であり、それを超えると精度が落ちる。温度幅をとるために南北に離れた地点のデータを用いると、日長の影響も受けるので、日長の影響を正確に反映するモデルの構築(チューニング)が必要である。従来の水稻の発育予測モデルでは、日長は天文日長(日の出から日の入りまで)が使われており、また温度データも気温が用いられているが、第1章に示す通り水稻が感応する日長時間は天文日長とは異なり、また発育は水温にも依存している。そこで、これらを考慮することによる発育モデルの推定精度の向上を図る。さらに、品種・作型の温暖化適応栽培シナリオを策定するシステムを構築し、そのシステムに発育モデルを導入し、各地域における品種・作型の適応性を評価する。

(1) 日長時間の再定義による発育モデル適用範囲の拡大および水温入力による精度向上効果の検証

ア. 研究目的

栽培シナリオの策定には、温暖化後の圃場条件における水稻の発育を推定する必要がある。一般に、水稻の発育は気温と日長という二つの環境因子によって決定されるが、両者には共線性が存在するために、現在気候条件における作期移動試験や複数地点における栽培試験の結果から得られた発育モデルは、将来気候条件において発育を正確に表現できない可能性がある。また、Wakiyama *et al.* (印刷中)は、太陽高度角がおよそ -2 度よりも大きい時間帯に対して水稻が明期と感じていることを示した。これは、現在用いられている発育モデルの品種パラメータの地理的な適用範囲に限界があることを示唆する。なぜならば、日の出時刻以前や日の入り時刻以後の明期の時間は緯度により異なるからである。

また、第1章1節、3節で示した通り、水稻の発育は気温だけではなく水温にも依存している。そこで、本研究では、北海道から九州において様々な日長や気温・水温の条件で実施された発育試験結果を基に、広い緯度範囲に適用できるよう発育モデルに改良を加える。

イ. 研究方法

SIMRIW (Horie *et al.* 1995) を始めとする日長を変数に用いる既存の水稻発育モデルは、日長を太陽高度角が 0 度以上である時間帯として定義(Ld00)して用いるが、水稻を含む植物が日出前や日没後の薄明期の明るさも昼としてとらえていることは従来から知られており(IRRI, 1985)、最近、Wakiyama (投稿中)は、水稻の明暗境界照度が太陽高度が -2 度となる時刻の照度に近いことを示したことから、水稻がとらえる日長により近い日長を天文学的に計算することができるようになった。そこで、まず、この定義に基づく日長(Ld22)とLd00とをそれぞれ計算により求め、日本の水田における違いの分布を明らかにする。次に、水稻発育モデルが推定する出穂日が、これら日長の定義の違いによってどの程度変化するかを、SIMRIWを用いて日本の水稻作柄表示地帯別に計算し、日長の定義の重要性を評価する。また、入力する温度要素について、生育の前半(幼穂形成期)までを水温、以降を気温とした場合の、出穂日の推定精度も評価する。そのうえで、熊本、茨城、岩手、札幌における連携試験の結果を用いてSIMRIWを改良し、温暖化後の栽培シナリオの策定に適した汎用性がより高い発育モデルを提案する。なお、ここでは栽培面積も広く日本の主要品種の一つであるコシヒカリを対象とした。

ウ. 結果および考察

1) 定義による日長の違いとその影響の評価

日本の水田における日長の分布を把握するために、水稻の移植盛期から出穂盛期に至る期間の日長を作柄表示地域別に計算した。作柄表示地帯別の移植盛期と出穂盛期の日付には2010年産米についての資料の値を使用した。作柄表示地帯の代表緯度には、作柄表示地帯に含まれる基準国土三次メッシュの中心緯度を、各メッシュにおける水田面積率で加重平均して求めた値を用いた。L00、L22のそれぞれの定義に基づく日長は、長澤(1999)に基づいて作成した数値計算プログラムによって日別に計算し、生育期間について平均した。作柄表示地帯別に計算したLd00とLd22、およびそれらの差の平均値の緯度分布を図II-5(1)-1に示す。

この図から、Ld22はLd00よりも長くその差は18分から27分程度で、より高い緯度においてより大きいことが分かった。なお、ほぼ同一の緯度に位置

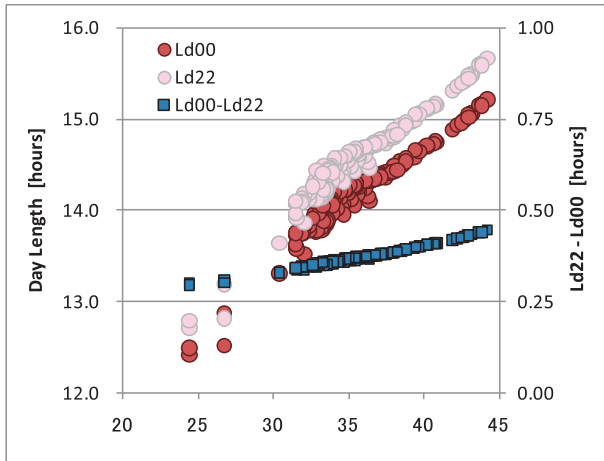


図 II - 5 (1) - 1 作柄表示地帯別に計算した移植～出穂期間の平均日長

Ld00 : 太陽高度角が 0 度以上である期間として定義した日長. Ld22 : 太陽高度角が - 2 度以上である期間として定義した日長.

する作柄表示地帯において必ずしも日長が同一でないのは、作柄表示地帯によって作期が異なることによる。

次に、緯度と同様の方法で作成した作柄表示地帯別の日別の気温(日最高気温と日最低気温の平均値)をSIMRIWに適用して、それぞれにおける出穂日を推定し、日長定義の違いに基づく出穂推定日の違いを計算した。その結果、定義による日長の差、18～27 分の違いによって引き起こされる出穂日の違いは、東北以南の地域では 2 日～14 日程度で、北海道ではさらに大きな差が生じることが分かった。ただし、この差は、電照で日長を制御した栽培試験の結果で決定した発育モデルのパラメータを用いたまま自然光の圃場の出穂日を推定した場合に起こる誤差を評価した値に相当し、差の多くの部分は、発育モデルのパラメータを適切に調整することにより解消することが可能である。

日射の定義の違いに起因し、かつパラメータでは吸収できない推定誤差の大きさは、日長にLd00を与えた場合に推定される出穂日と、 $Ld00 + (Ld22 - Ld00) - (Ld22 - Ld00)_{lat=30N}$ を与えて推定される出穂日の差で見積ることができる。計算の結果を図 II - 5 (2) - 2 に示す。この図から、本州から九州の範囲では差は 2 日程度であることが分かる。すなわち、仮に、日長の定義にLd00を用いて九州の試験結果から決定したパラメータを用いて東北地方のコシヒカリの出穂日を推定しても、推定誤差は 2 日程度で

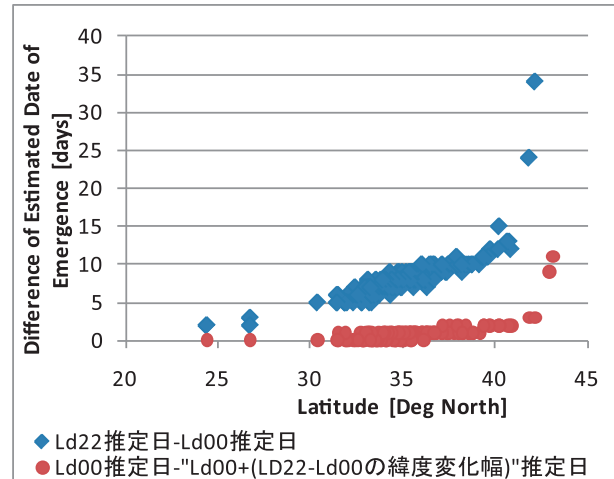


図 II - 5 (1) - 2 日長の定義の違いで引き起こされるSIMRIWによるコシヒカリの出穂日の違いを作柄表示地帯別に推定した図

青 : Ld22 で計算された出穂日とLd00 で計算された出穂日との差. 赤 : Ld00 で計算された出穂日と、 $Ld00 + (Ld22 - Ld00) - (Ld22 - Ld00)_{lat=30N}$ で計算された出穂日との差.

あると見込める。ただし、この誤差は緯度と共に急激に増加し、北海道の出穂日を推定した場合には、10 日程度の誤差が生じると見込まれる。推定日の差が緯度と共に急激に増加するのは、高緯度では、日長が水稻の限界日長に近づくことに起因していると解釈できるため、北海道で生じると推定される誤差の大きさは、品種によっても異なると考えられる。

以上の数値実験から、これまで用いられてきた日長の定義 (Ld00) では、発育期間の日長が限界日長に近い地域において、水稻の発育を精度よく推定することができない可能性があることが示唆された。

そこで、次に、熊本、茨城、岩手、北海道で連携して実施された水稻の栽培試験の結果を用いてこれを検証した。連携試験では、自然日長条件で栽培する実験 (自然日長) と、電照によって明期の長さを確定した実験 (人工日長) が行われたので、これらの出穂日と、SIMRIWを用いて推定し観察された出穂日との差を計算した。この際、自然日長の事例に対してはLd00を用い、人工日長の事例に対しては、確定されている日長を与える。そして、コシヒカリの品種パラメータには、モデルの一部としてHorie *et al.* (1995) が提示する値 (オリジナルパラメータ) を用いる。説明から明らかなように、自然日長の事例の推定は、Horie *et al.* (1995) に沿ってSIMRIW

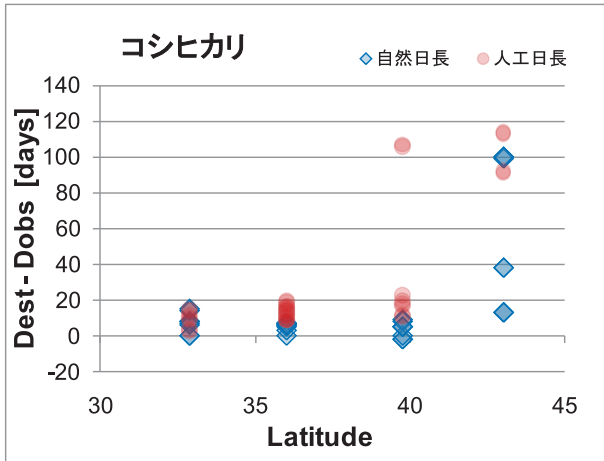


図 II-5(1)-3 SIMRIWで推定したコシヒカリの出穂日と観察された出穂日との日数差と試験圃場の緯度との関係

を正しく適用した結果と等値である。

推定誤差と試験圃場の緯度との関係を図 II-5(1)-3 に示す。自然日長の事例は、熊本から岩手までの範囲誤差標準偏差 4.5 日で推定された。この誤差は実用的な範囲と判断でき、SIMRIWの発育推定が高い完成度を持つことを意味する。しかし、誤差は北海道において極めて大きくなり、適用範囲に限界があることも明らかになった。人工日長の事例については、自然日長の結果よりも 5~10 日ほど出穂が遅く推定され、その差は緯度と共に増大する。これは、図 II-5(1)-2 の結果と極めてよく合致する。この結果からも、コシヒカリは Ld22 に近い日長を感じていることが傍証された。

次に、パラメータの最適化だけで、すなわち、日長の定義を Ld00 のままで、SIMRIW は北海道も含む地域で実用的な成績を得ることが可能かどうか調べた。パラメータの最適化手法にはマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC法) を用い、連携試験で得られた自然日長の事例 38 事例を用いた。最適化によって得られたパラメータを用いた推定誤差と緯度との関係を図 II-5(1)-4 に示す。パラメータを試験結果に対して最適化すると、本来の方法で生じていた北海道での大きな誤差を解消することはできるが、推定日と観察日との差は北ほど負 (北ほど早めの推定) となるトレンドが生じ、全般的に誤差は増大した。これから、コシヒカリが感応する日長と Ld00 との不一致は、パラメータの最適化では吸収できないことが確認された。

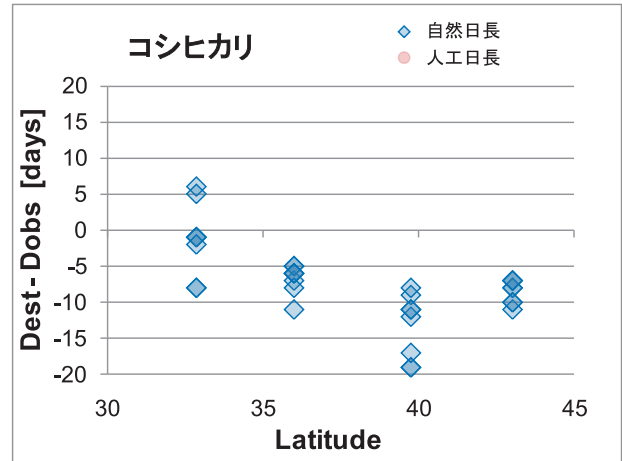


図 II-5(1)-4 Ld00を用いて自然日長の試験結果に対して最適化したパラメータを用いてSIMRIWで推定した出穂日と観察された出穂日との差と緯度との関係

2) 適用範囲がより大きい発育モデルの開発

これまでの解析から、発育モデルの適用範囲は水稻が感じる日長とモデルに変数として与える日長との食い違いによって、制限が加えられていることが明らかになった。これは極めて本質的な点であり、日長を変数にするすべての発育モデルに共通の制限と見なせる。つまり、適用範囲の広い発育モデルを開発するには、モデルの式を改良する以前に、まず日長の食い違いを解消することが必要である。そこで、連携試験の結果から人工日長の事例だけを用いて SIMRIW のパラメータを最適化した。

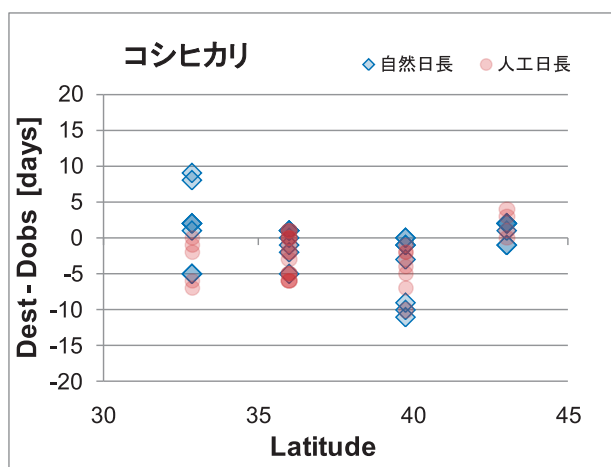
最適化により得られたコシヒカリに対する SIMRIW のパラメータをオリジナルと対比して表 II-5(1)-1 に示す。また、図 II-5(1)-5 に、それらを用いて計算した出穂日と観察されたそれとの差を示した。パラメータの最適化により SIMRIW は人工日長の実験結果に対しすべての緯度域についてトレンドなく良好に出穂日を推定した。図には、Ld22 を与えて同じパラメータで計算した自然日長の結果も示した。Ld22 を与えた結果は人工日長の結果と良く重なり、出穂日の推定誤差はほぼ同じとなった。残差の分散分析を行った結果、Ld22 を採用して品種パラメータを最適化した SIMRIW は、Ld00 を採用してオリジナルパラメータを使用したそれよりも 13% 正確に連携試験結果を説明することが分かった。

以上の結果から、適用範囲の広い水稻の発育モデルを開発するには、日長と温度を変数にする発育式

の中から完成度の高いものを式を変更せずに用い、日長にLd22を用いてパラメータを再定義することが良いと結論できる。

表Ⅱ-5(1)-1 人工日長実験の結果で最適化したコシヒカリに対するSIMRIWのパラメータ(本研究)と、堀江ら(1995)の値

| | Gv0 | Th | A | Lc | B | DVI* |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 本研究 | 51.09 | 17.50 | 0.392 | 16.14 | 0.578 | 0.444 |
| Horie et al. (1995) | 51.30 | 17.80 | 0.365 | 16.00 | 0.566 | 0.230 |



図Ⅱ-5(1)-5 人工日長の事例で最適化したパラメータを用いてSIMRIWで推定した出穂日の残差と緯度との関係。赤は最適化に用いた人工日長の事例、青は日長にLd22を与えた自然日長の事例。

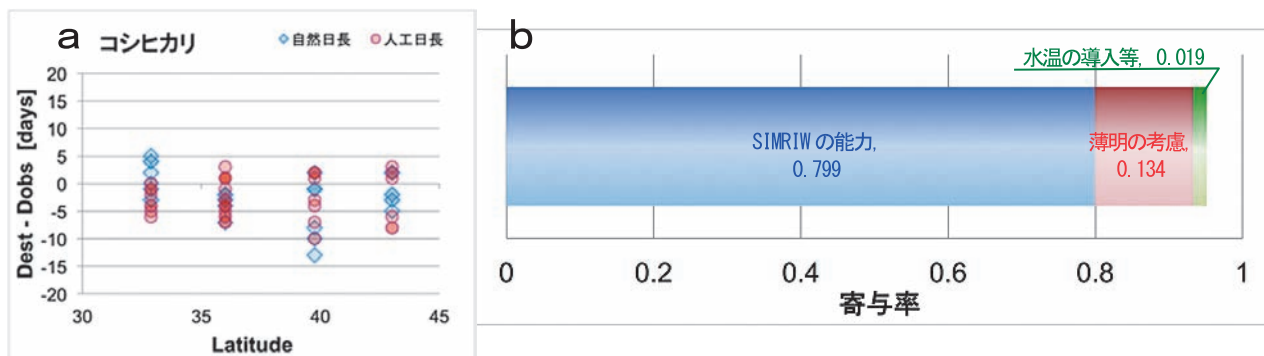
3) 水温の入力による精度向上

1章3節のTGC試験の結果を踏まえ、幼穂形成期

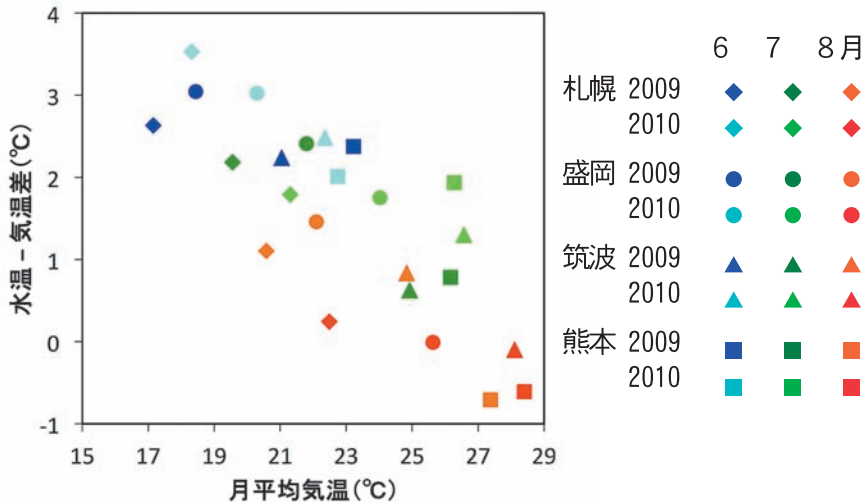
までは温度入力値に水温を、幼形期以降は気温を用いた場合の出穂期の推定精度向上効果を検証した。その結果、水温を入力したことによるはっきりとした推定精度の向上は見られず、また、出穂期予測自体への水温導入の寄与率はごく僅かであった(図Ⅱ-5(1)-6)。検証に用いた連携4地点の2009年と2010年夏期の気温と水温との関係を図Ⅱ-5(1)-7に示す。図Ⅱ-5(1)-7では気温に対して水温-気温差をプロットしたが、同じ月内で比較すると、地点の違いや年次の違いに関わらず、水温と気温は一定の相関を持つことが伺える。すなわち、第1章の栽培実験の結果から水稻発育は水温にも依存していることは明白であるが、発育モデルへの水温の導入によって推定精度が向上しなかったのは、今回の検証に用いたデータの限りにおいて、気温と水温との関係に地域間や年度間で大きな差がなかったため、気温のみでもパラメータの調整によって水温の影響が反映されてしまったためと考えられる。

エ. 今後の課題

本研究で、適用範囲のより大きい発育モデルを開発する方法論が明らかとなったので、今後は、過去の栽培事例を多数収集し、Ld22定義による日長を変数としてコシヒカリ以外の品種についても発育モデルの品種パラメータを再決定する。発育を表現する式も、SIMRIWの他Nakagawa et al. (2005) などについても検討する。本研究では、SIMRIWのDVI*を他のパラメータと同様に数値的に最適化し0.444を得たが、この値は堀江らが定めた値(0.230)よりかなり大きい。SIMRIWに用いられるパラメータDVI*は、水稻の感光性が発現する発育指数と解釈されており、感光性を調査する栽培試験からも推定



図Ⅱ-5(1)-6 発育モデルに水温の影響も組み込んだ場合の推定精度(a)、および日長時間の再定義(薄明の考慮)と水温導入の出穂期予測精度へ寄与率(b)



図Ⅱ(1)－7 連携4地点における2009年および2010年の夏期における気温と水温の関係（水温－気温差と気温の相関）

することができるので、これらの結果も考慮しながらパラメータを決定してゆく必要がある。

オ. 要約

日長を、一日の内で太陽中心の仰角が0より大きい時間とする定義(Ld00)に代わり、仰角が朝夕とも-2.0度以上である時間を日長とする定義(Ld22)を導入する必要性について検討した。Ld22は、Ld00よりも長くその差は18分から27分程度で、この差は、より高い緯度においてより大きい。本州から九州の範囲であれば、パラメータを再調整することにより、日長の定義を変更しなくても緯度の違いによる推定誤差は最大2日程度で留まるが、北海道においては10日程度になりうる。

Ld22を採用すると、チャンパー等人工日長による栽培試験の結果と自然日長による栽培試験の結果の両方を同程度の精度で推定できる。したがって、適用範囲の広い水稻の発育モデルを開発するには、日長の定義をLd22を変更することが必要であり、これで既存モデルのパラメータを再定義するべきである。

モデルへの水温の導入効果については、出穂期の推定精度の明白な向上は見られなかった。その原因は、今回検証に用いたデータの限りにおいて、水温は気温と一定の関係にあることから気温だけでもパラメータの調整で水温影響が反映されているためと考えられる。

カ. 参考文献

Horie, T., H. Nakagawa, H. G. S. Centeno and M. J. Kropff et.al (1995) The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. in (Matthews et al. eds.) *Modelling the Impact of Climate Change on Rice Production*. CAB INTERNATIONAL, p. 51-66.

IRRI (1985) . The flowering response of the rice plant to photoperiod. International Rice Research Institute. Philippines. 1 - 61.

Nakagawa H, Yamagishi J, Miyamoto N, Motoyama M, Yano M, Nemoto K. (2005) Flowering response of rice to photoperiod and temperature: a QTL analysis using a phenological model. *Theoretical and Applied Genetics*, 110, p.778-786.

Wakiyama et al. (投稿中) Threshold intensity of twilight illumination for photoperiodism of rice based on solar altitude, *Journal of Agricultural Meteorology* (submitted) .

長澤 工 (1999) 日の出・日の入りの計算 天体の出没時刻の計算. 地人書館 (東京), 160p.

執筆担当者 (大野宏之)

(2) 温暖化適応型水稲栽培シナリオ策定システムの構築と温暖化影響評価

ア. 研究目的

毎年の気象条件は同一ではないため、平年並みの気温経過の年では水稲の生育に適しているが、平年よりも大きく低温や高温に経過する年では、不稔率の増大や、品質低下が生じる。水稲の生育においては、特に低温や高温に弱い生育ステージが存在するため、夏季平均気温の高低だけでは水稲の生産におけるリスク評価を行うことは不十分で、日々の気温経過も重要となってくる。また、北日本ではおよそ5年周期で夏季の気温が大きく変動している(Kanno 2004)。このような気象条件の経年変動を考慮して適した水稲栽培シナリオを考えるためには、温暖化条件に限らず、少なくとも10年以上の期間における気象の経年変動を考慮する必要があるだろう。

寒冷な気候条件下で、常に低温との闘いであった北日本での水稲栽培においては、従来から気候条件的に水稲の栽培適地を判定する計画作期策定法が考案され使用されてきた(八柳 1960a-f、村上ら 1982)。これは、①移植時の活着不良、②冷害危険期の低温遭遇による障害型冷害の発生、③登熟期の低温による遅延型冷害が発生しない気温条件を定め、気温の季節変化から栽培適地の判定や、品種の選定を行うものである。この計画作期策定法は、寒冷地の短い夏の限られた気象資源を有効活用する上で非常に重要な考え方ではあるが、移植期から判定するリスク(①)と、出穂日から判定するリスク(②)と③)の判定がそれぞれ独立しており、同時に判定することに難があった。計画作期策定法を用い、経年変動を考慮する試み(伊達 1963)や、積算気温モデルで移植日と出穂日を結びつける試み(村上ら 1982)などが行われてきたが、本研究ではこれら知見を統合する形で適切な移植時期を決定する方法の枠組みを提示し、温暖化適応栽培シナリオの策定に用いる。

イ. 研究方法

1) 作期策定システムの基本構造

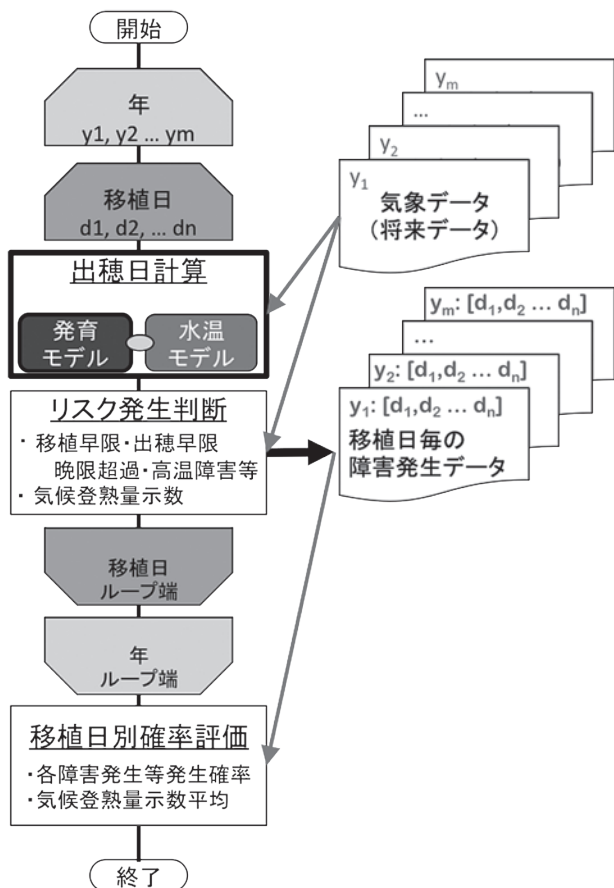
従来の計画作期策定法では、移植期に関するリスクと出穂期に関するリスク判定が独立していた。これに生育モデルを導入することで、出穂期を与えら

れた気象条件にて移植期から推定することが可能となり、出穂期におけるリスク発生有無の判定も、移植日に集約して考えることが可能となる。DVIモデルなどの生育モデルには、日長感応性による生育の遅れを表現することが可能なため、各地域で作られた有効積算気温モデルとは異なり、日長時間の異なる他地域へのモデル適応の拡張性がある。

計算手順のフローを図Ⅱ-5(2)-1に示す。まず、リスク評価の対象とする期間を定める。たとえば20年間を一期間として、1981-2000を対象とする。この20年間の各年の気象データに対し、評価したい移植日の期間において(例えば、4月1日から8月31日まで)、各日を移植日とした場合の出穂日をモデルで推定する。各移植日に対し、その移植日とそれから推定される出穂日と気象データから各リスク発生の条件を満たすか満たさないかの判定を行う(図Ⅱ-5(2)-1 リスク発生判断)。

この計算を、設定した20年の各年について行った後、今度は移植日毎に各リスク(次節に後述)の20年間における発生割合を求める。全てのリスク発生確率は移植日で整理されるため、移植日毎に各リスクの発生割合を比較することができる。詳細はNemoto et al. (2012)を参照のこと。

図Ⅱ-5(2)-2に、リスク評価の例を示す。判定するリスクの詳細は次節で説明する。図Ⅱ-5(2)-2の横軸は移植日で、図Ⅱ-5(2)-2aは、対象とする期間内(例えば1981~2000年の20年間)に移植期早限よりも早い移植日になってしまう確率を示す。この例では移植を4月中に行なった場合、ほぼ100%移植早限基準を満たさず、一方6月以降の移植ではほぼ100%移植早限基準を満たし、5月中は遅い移植日ほど安全に移植が行えることを示す。図Ⅱ-5(2)-2bでは出穂期早限より早く出穂する発生確率を移植日に対して示しているが、移植日から生育モデルによって推定される出穂日に対してリスク判定を行っている。同じく、図Ⅱ-5(2)-2cは出穂期晩限より遅く出穂する発生確率を示している。図Ⅱ-5(2)-2dは、図Ⅱ-5(2)-2a~cを重ね合わせた物である。ある移植日において、鉛直方向に色がグレーで塗りつぶされているほど、なんらかのリスクの発生確率が高く、安定した生産が行えないことを意味する。この場合、5月下旬において、移植期早限、出穂期早限、出穂期晩限のいずれか(もしくは複数)のリスクが発生する可能性

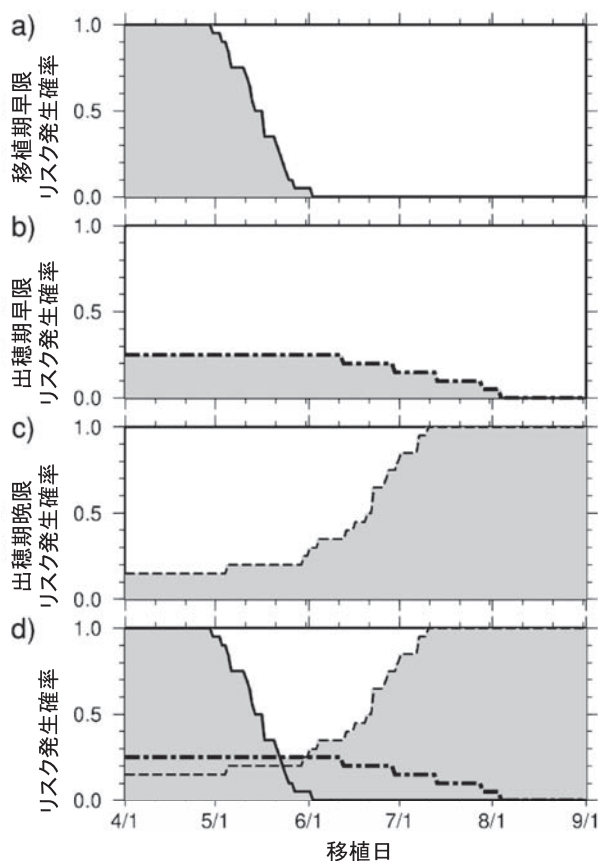


図Ⅱ－５（２）－１ 温暖化適応栽培シナリオ策定システムの構造

が低く、最も適した移植時期であることを示す。一方で、すべてのリスク発生確率がゼロとなる移植日は存在しないため、どの移植日においても、年によっては低温によるなんらかのリスク発生が避けられないことを示す。

2) リスクと収量

本研究では従来の計画作期策定法で使用されていた低温に関する3つのリスク発生基準(移植期早限、出穂期早限、出穂期晩限)に加えて、関東以西で近年問題となってきている、高温条件下で発生する高温不稔と白未熟粒の発生リスクも合わせて考える。移植期早限は移植後5日間の平均気温が12.0℃以上となる最初の日(苗の活着不良回避)、出穂期早限は出穂期の24日前から30日間の平均気温が20.5℃以上となる最初の日(冷害危険期の障害型不稔発生回避)、出穂期晩限は出穂後40日間の平均気温が18.8℃以上となる最後の日(登熟期の低温による遅延型冷害の回避)とした(小田1992)なお、この



図Ⅱ－５（２）－２ リスク評価の図示例

出穂期晩限の基準は、北海道における値であるため、北海道品種である「きらら397」に対して使用した。内島(1983)を参考に、東北品種の「あきたこまち」と「ひとめぼれ」には20℃、関東以南の品種「コシヒカリ」「日本晴」「にこまる」には22℃を出穂期晩限の基準温度として使用した。高温不稔については、出穂後5日間の最高気温の平均が35℃を超える場合に発生するとした(松井2009)。白未熟粒(基白)については、5%発生が出穂後の平均気温が27℃以上で生じるとした(脇山ら2010)。

本研究では、収量性の評価にポテンシャルとしての気候登熟量示数(林ら2001)を用いた。これは稲の登熟期間に相当する出穂後40日間の平均気温と日射量から、以下の式(1)で求めることができる。

$$y/R = 0.128 - 0.00192 (21.9 - T)^2 \quad (1)$$

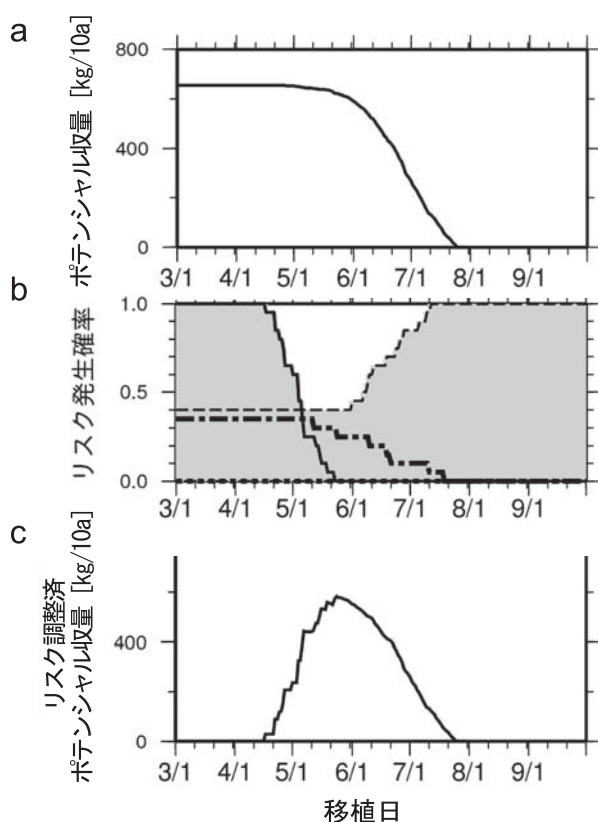
ここで、 y/R は気候登熟量示数、 y はポテンシャル収量(kg ha^{-1})、 R と T はそれぞれ出穂後40日間の日射量(MJ)と平均気温(℃)を表す。

気候登熱量示数は、出穂後の気象条件から求める潜在的な指標であるため、出穂にいたるまでの収量減となる要素（例えば、移植時の活着不良や障害型不稔の発生など）は考慮していない。発育モデルで推定する出穂日と組み合わせて使う場合、実際には活着不良が発生するような早い時期に移植した場合でも、発育モデル内でそのプロセスを取り入れている場合には、早い時期の移植時に非現実的なポテンシャル収量が得られる（図Ⅱ-5(2)-3a）、そこで、ポテンシャル収量にリスク発生確率（図Ⅱ-5(2)-3b）を掛け合わせた、リスク調整済ポテンシャル収量を定義して収量性の評価に使用した。

$$Y_a = y \times \alpha \quad (2)$$

ここで、 Y_a はリスク調整済ポテンシャル収量 (kg ha^{-1})、 α はリスク調整項である。 α は以下の式で表される。

$$\alpha = (1 - R_{EL-TP}) \times (1 - 0.25R_{EL-H}) \times (1 - 0.25R_{HS}) \quad (3)$$



図Ⅱ-5(2)-3 ポテンシャル収量とリスク発生確率を考慮したリスク調整済ポテンシャル収量の例

ここで、 R_{EL-TP} は移植期早限よりも早い移植日となる確率（0-1）、 R_{EL-H} は出穂早限よりも早く出穂する確率（0-1）、 R_{HS} 高温不稔の発生基準を満たす確率（0-1）である。 R_{EL-H} と R_{HS} には0.25をかけてあるが、これは発生した場合においても収量が皆無とはならないため、リスク調整項への影響を小さく与えた。実際の収量性との比較は行っていないが、潜在収量が高く、かつ各種リスクの発生確率が小さい日（図Ⅱ-5(2)-3cのリスク調整済ポテンシャル収量のピークに相当）を抽出するには問題はないと考えられる。なお、出穂期晚限より出穂が遅くなり、遅延型冷害が発生する場合の確率については、ポテンシャル収量の中で考慮されているため、リスク調整項には加えていない。また、白未熟粒の発生は品質に関する問題で収量には影響しないため、やはりリスク調整項には加えていない。

3) 発育モデル

移植日から出穂日を推定する発育モデルは、堀江・中川(1990)のDVIモデルをベースに、(5)-1で調整されたモデルを用いた。

4) 現在と将来の気象データ

現在の気象データとしては、Meteocropデータベース(Kuwagata et al. 2011)を利用した。なお、本研究においては、1981年から2000年の20年間を現在とした。

将来予測データには、気象庁のモデルRCM20によるA2シナリオ予測(Kuriharaら2005)とMIROCによるA1Bシナリオ予測(Hasumi and Emori 2004, Okada et al. 2009)を使用した。ここでは、現在と将来の夏期(6-8月)平均の気温差、および日射量比を求め、これを現在(1981-2000年)に加算および乗算することで、将来評価のための気象データとした。つまり、気象データの季節変化とその経年変動幅は、現在(1981-2000年)と同一である。表Ⅱ-5(2)-1とⅡ-5(2)-2に、評価対象とする4地点の現在値(MeteoCropデータベースより)と将来の変動量(RCM20およびMIROCに基づく)を示す。

表Ⅱ-5(2)-1 現在と将来の気温差
(6-8月平均 単位: °C)

| | 現在 | 50年後(2031-50) | | 100年後(2081-2100) | |
|-----|------|---------------|-------|------------------|-------|
| | | RCM20 | MIROC | RCM20 | MIROC |
| 岩見沢 | 16.1 | +1.5 | +2.6 | +2.4 | +4.7 |
| 盛岡 | 17.4 | +1.9 | +2.5 | +2.1 | +4.4 |
| 筑波 | 19.9 | +1.3 | +2.4 | +1.9 | +4.3 |
| 熊本 | 23.0 | +1.4 | +1.9 | +1.6 | +3.9 |

表Ⅱ-5(2)-2 現在と将来の日射量比
(6-8月平均 単位: Wm⁻²)

| | 現在 | 50年後(2031-50) | | 100年後(2081-2100) | |
|-----|-------|---------------|-------|------------------|-------|
| | | RCM20 | MIROC | RCM20 | MIROC |
| 岩見沢 | 184.2 | -17% | +2% | ±0% | +8% |
| 盛岡 | 174.7 | -14% | +4% | -2% | +4% |
| 筑波 | 182.2 | -7% | +6% | +1% | +6% |
| 熊本 | 187.8 | -7% | +3% | -5% | +4% |

ウ. 結果および考察

新たな評価システムを用いて、北海道（岩見沢）、東北（盛岡）、関東（筑波）、九州（熊本）の4地域における、6水稲品種（きらら397、あきたこまち、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴、にこまる）を対象とした、現在(1981-2000年)、50年後(2031-2050)、および100年後(2081-2100)のリスク評価を行い、栽培適期(移植期)を考察した。

1) 北海道（岩見沢）における試算（図Ⅱ-5(2)-4）

- きらら397：現在の移植期は移植期早限と出穂期晩限との兼ね合いで、5月下旬が最適。ただし、平年より寒い年では出穂期晩限を超える年が40%存在している。50年後、+2°Cほど気温が増加することにより、出穂期早限リスクは10%に低下する。高温不稔、白未熟粒のリスクはまだ小さい。全体的にリスクの少ない移植日が多く、移植適期は現在より拡大。MIROCでの100年後(+4.7°C)の環境下では、白未熟粒のリスクはさらに高まる。RCM20(+2.9°C)では4月末から6月末まで移植適期で高温リスクも少ない。MIROCの場合はさらに7月中旬まで可能。100年後のRCM20の予想における+2.9°Cの温暖化で、きららは収量も現在より高いことが予想される。
- あきたこまち：現在は栽培不適。50年後は5月中旬(RCM20)から6月上旬まで(MIROC)、100年後は6月中下旬の移植で、安定生産可能と考えられる。
- ひとめぼれ：現在は栽培不適。50年後は5月上旬、

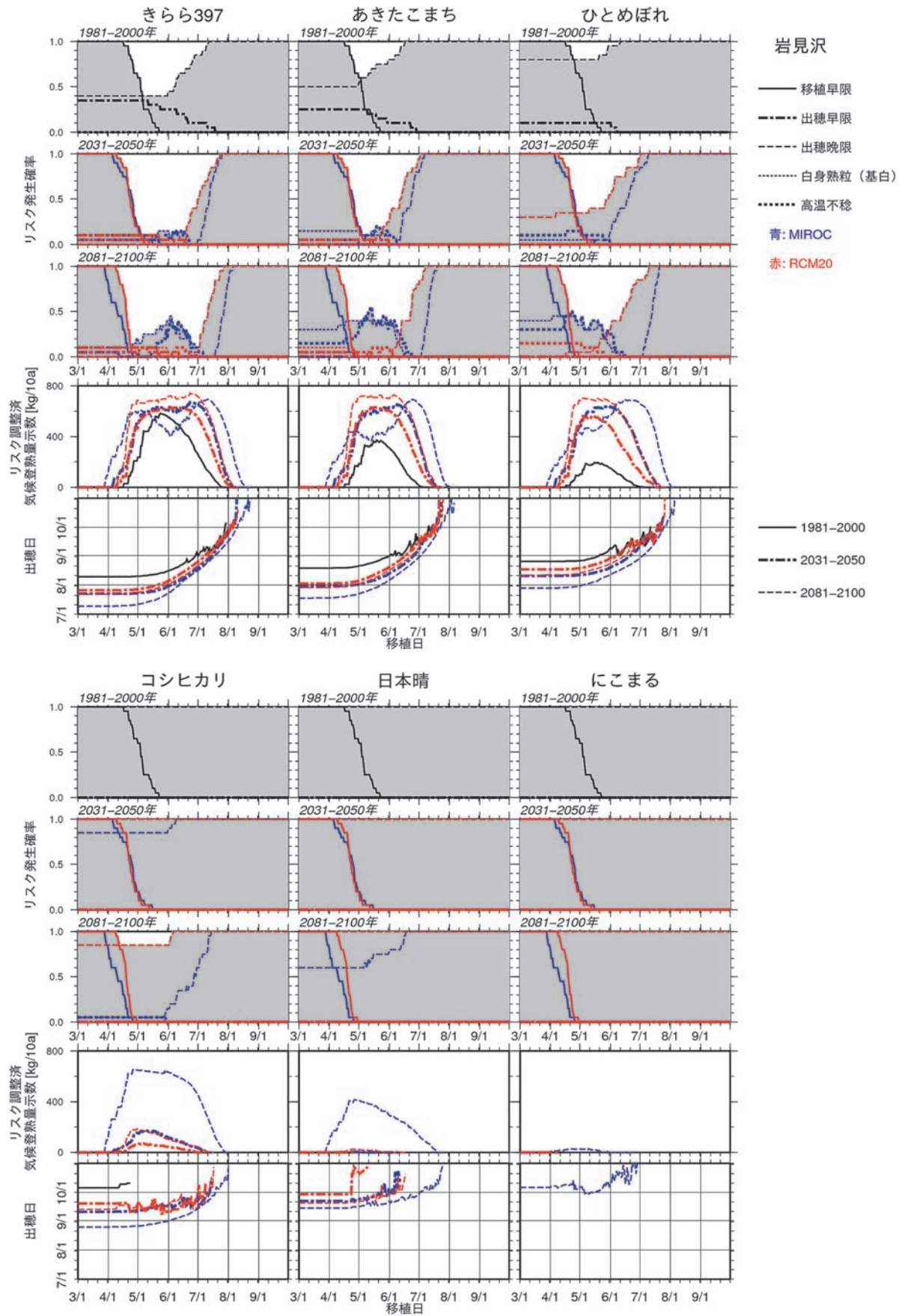
100年後は5月下旬から7月上旬の移植(モデルの予測値による差が大きい)で、安定生産可能。

- コシヒカリ：現在、および50年後も栽培不適。100年後においては、MIROCに基づく計算結果(+4.7°C)において、5月中の移植で栽培可能。
- 日本晴：現在~100年後にわたり、栽培不適
- にこまる：現在~100年後にわたり、栽培不適

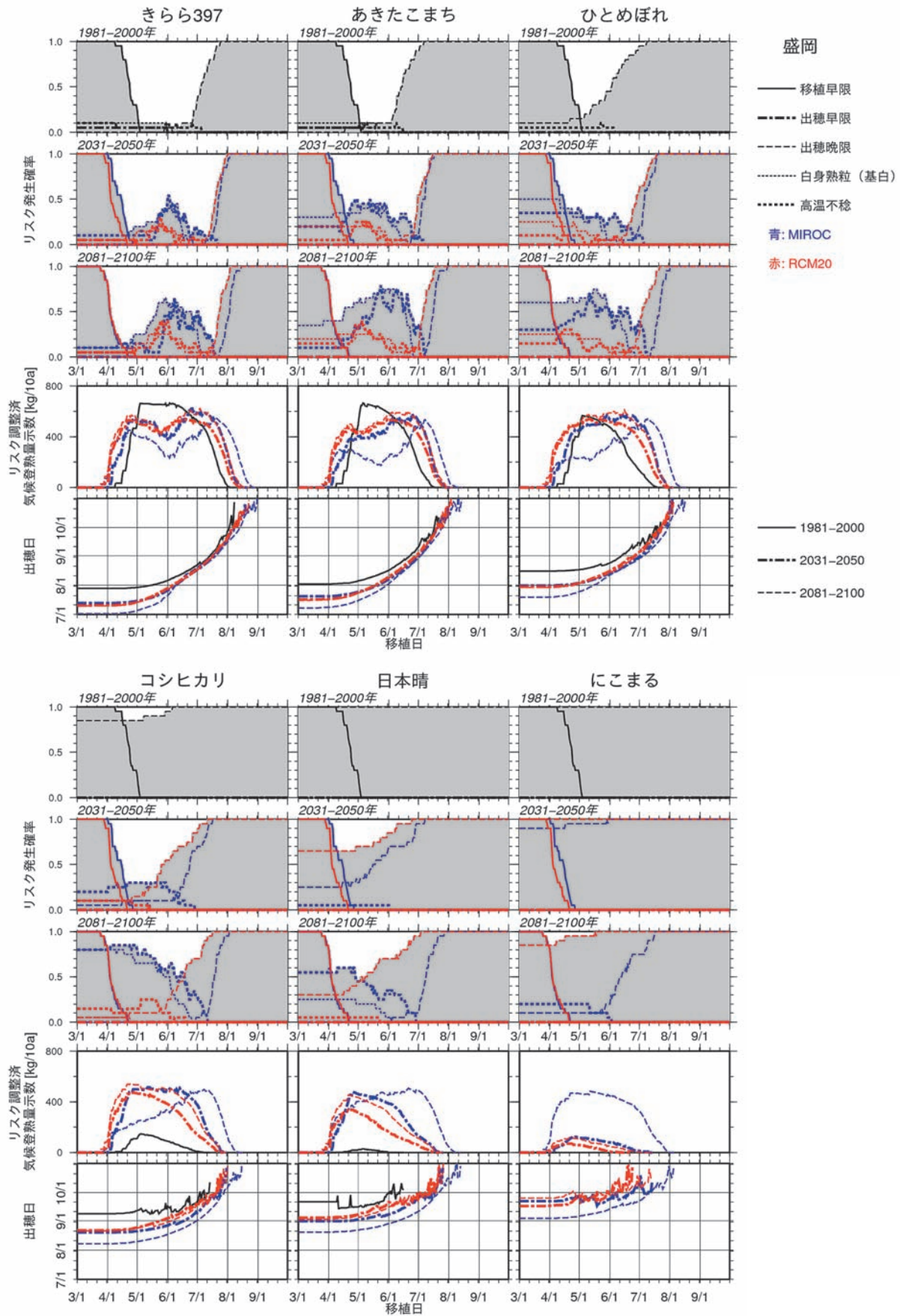
【シナリオ】温暖化進行に伴い、低温による不稔・登熟不良は減少し、一方で現在では0である、高温リスク(高温不稔・白身熟粒)の発生が増大する可能性がある。現在、栽培不適な東北品種(あきたこまち、ひとめぼれ)が50年後には安定生産可能と考えられる。このことは、2010年の北海道の高温年(夏季気温平年偏差+2.2°C)において、ひとめぼれが成熟に至った(Nemoto et al. 2011)ことからも妥当な結果と考えられる。

2) 東北（盛岡）における試算（図Ⅱ-5(2)-5）

- きらら397：現在は5月に移植することで、高収量が見込める。50年後は7月下旬、100年後は8月上旬の移植で高温によるリスクは少ないが、収量は現在と比べて落ちる。
- あきたこまち：現在は5月中下旬が移植適期。50年後、100年後ともに、RCM20においては6月上中旬の移植において総合的にリスクが少ないが、収量は現在よりやや低下する。MIROCにおいては、高温不稔・白未熟粒の発生頻度が高くなると予想される。
- ひとめぼれ：現在は5月上中旬が移植適期。リスク評価においては出穂晩限と移植早限が重なるが、耐冷性が強い品種のため栽培が十分に可能になっていると考えられる。50年後は6月中旬がRCM20とMIROCの両方でリスク発生が少ない。100年後にはRCM20では高温リスクの発生も少なく5月初めから6月末まで移植適期と考えられる。一方MIROCにおいては、7月上旬に移植を行わないと、高温か高温の影響を受けやすく、収量も低下すると考えられる。
- コシヒカリ：現在は栽培不適。50年後は、出穂晩限はクリアできるが、高温不稔や、白未熟粒のリスクが増大してくる。100年後は、RCM20においては5月、MIROCにおいては7月上旬に適期が存在する。



図Ⅱ-5(2)-4 北海道（岩見沢）における、水稻栽培リスク評価の試算結果



図Ⅱ-5(2)-5 東北地方(盛岡)における、水稻栽培リスク評価の試算結果

- ・日本晴：現在および、50年後においても栽培は不適と考えられる。100年後のMIROCにおいては6月下旬に適期が存在する。
- ・にこまる：現在および、50年後においても栽培は不適と考えられる。100年後のMIROCにおいては、高温リスク発生の可能性があるが、4月下旬から5月中旬に適期が存在する。

【シナリオ】あきたこまちは現在の移植期（5月中下旬）において、リスク発生確率が低く、潜在収量も高い。温暖化進行に伴い、現在は希な高温リスクの発生確率が高まってくる。コシヒカリは50年後には栽培可能性があると考えられる。

3) 関東（筑波）における試算（図Ⅱ－5(2)－6)

- ・きらら397：現在の栽培適期は6月下旬から7月中旬。将来は高温リスクが高くなり、早植（4月上旬）か、遅植（8月頭）で栽培しやすいが、早植の方が多収を見込める。
- ・あきたこまち：現在の移植適期は4月下旬から6月下旬まで。50年後には、7月頭の移植で高温リスクを抑えられる。RCM20では、4月上旬の移植の可能性もある。100年後は7月中旬の移植で高温リスクの発生がすくない。
- ・ひとめぼれ：現在の移植適期は6月末まで。50年後、100年後共に、7月中旬でリスク発生確率が少ないが、収量は現在より落ちる。
- ・コシヒカリ：現在では高温リスクが多少あるものの、移植適期が5月上旬から6月中旬と期間が長い。50年後、100年後は高温リスクが高くなり、50年後は7月中旬、100年後はMIROCにおいては7月下旬から8月上旬の移植でリスクを抑えられる。しかし、収量は現在より減少が予想される。
- ・日本晴：現在の移植適期は4月下旬から5月中旬。50年後は温暖化予測データの種類により結果が異なるが、4月下旬から7月上旬にかけて栽培適期があり、栽培しやすい品種になると考えられる。収量はやや低下すると見込まれる。100年後の栽培適期は7月中旬
- ・にこまる：現在は栽培不適。将来は温暖化予測データにより結果が異なるが、栽培可能な期間が出現する。

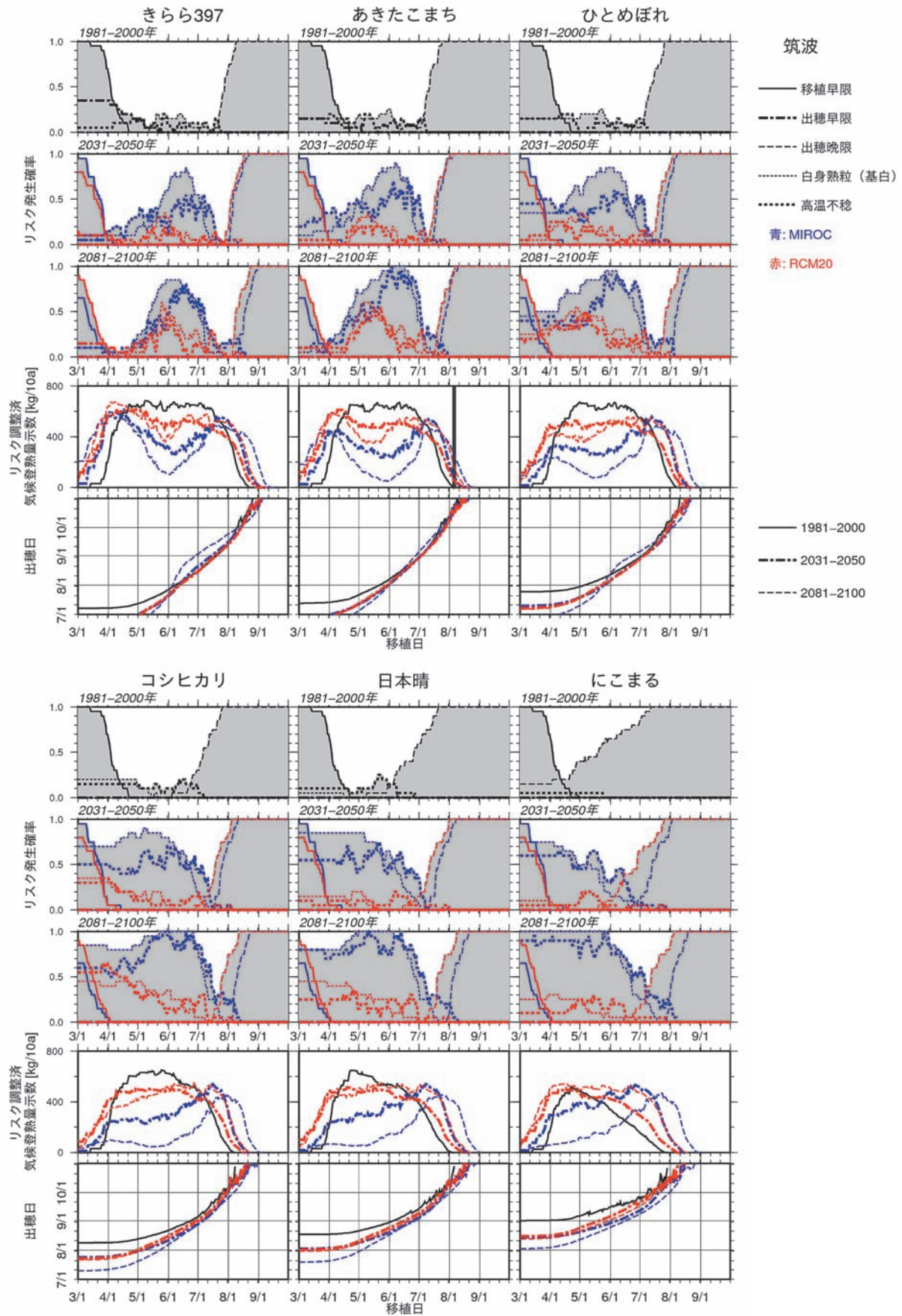
【シナリオ】現在は高温リスクが少なく、あきたこ

まち、ひとめぼれ、コシヒカリ、日本晴は、好適な条件で栽培が行われている。温暖化の進行に伴い、高温リスクが非常に高まる。作期異動だけでは対応しきれず、耐高温特性を持つ品種の導入や、高温障害を回避する栽培管理法による対処が必要であることが示唆される。RCM20の結果においては、50年後に日本晴の栽培適期の拡大が予想されるが、MIROCでの結果とは異なる。（※温暖化シナリオによる結果の差異が大きいので結果の解釈には注意を要する。）

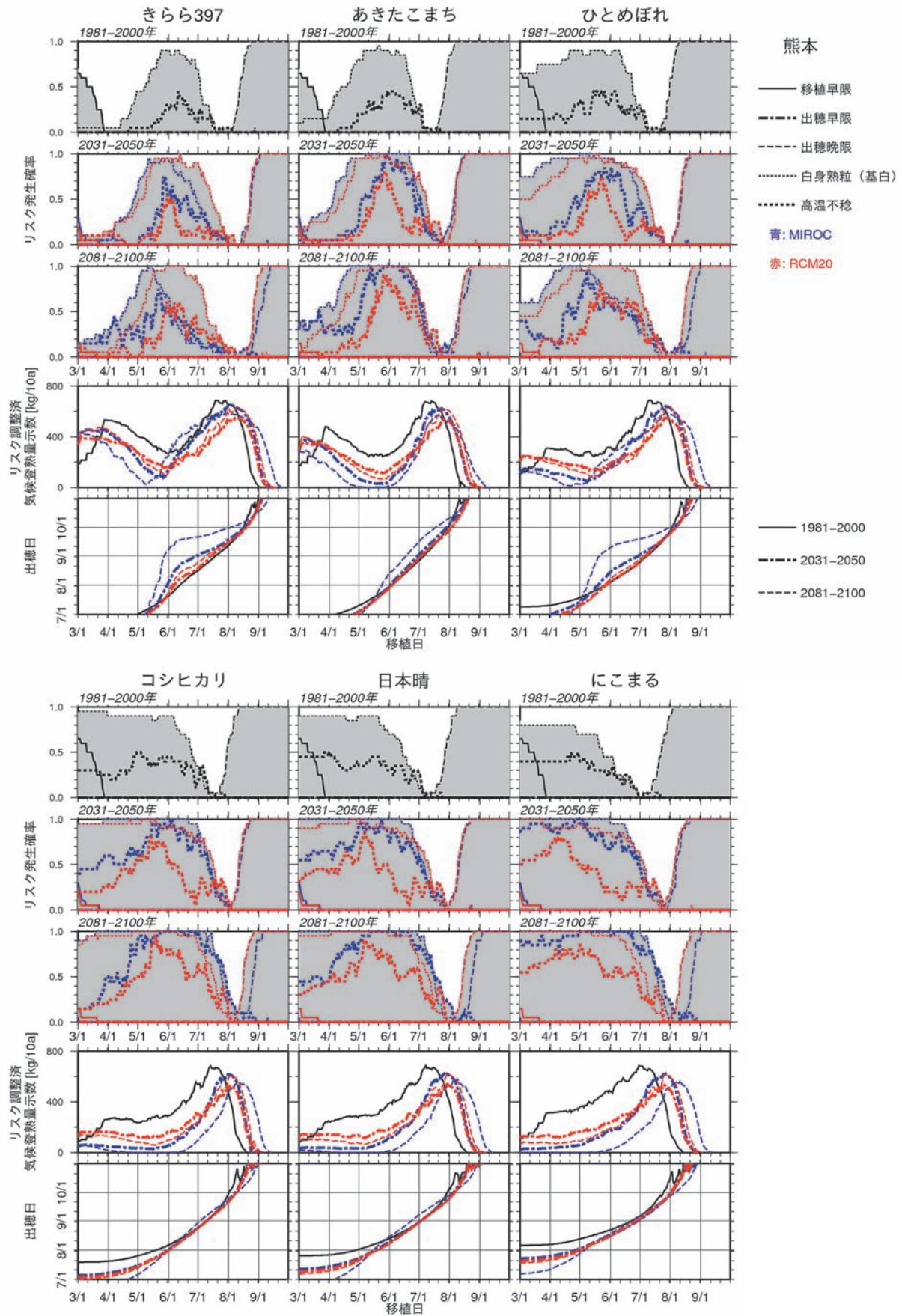
4) 九州（熊本）における試算（図Ⅱ－5(2)－7)

- ・きらら397：4月上旬と7月下旬が移植適期。50年後は8月中旬、100年後は8月下旬の移植で高温リスクを低減できる。
- ・あきたこまち：現在は7月中旬、50年後は7月下旬、100年後は8月上旬が移植適期。
- ・ひとめぼれ：現在は7月中旬、50年後は7月下旬から8月上旬、100年後は8月上旬が栽培適期。
- ・コシヒカリ：現在は7月中下旬、50年後は8月上旬、100年後は8月中旬移植適期。収量性は低下していく。
- ・日本晴：現在は7月中旬、50年後は7月下旬、100年後は8月上旬が移植適期。
- ・にこまる：現在は7月上旬、50年後は7月下旬、100年後は8月上旬が移植適期。

【シナリオ】現在の移植期（6月下旬）において、にこまるは潜在収量的にはほぼ最適と考えられる。温暖化の進行により、潜在収量の最大となる移植時期は遅くなると評価されるが、本プロジェクトの試験設定外の条件のため、評価結果の信頼性は低い。収穫期が遅くなると、台風に遭遇して倒伏する可能性も高くなることが考えられるが、ここではそれを考慮していない。今後、さらなる検討が必要である。作期移動だけでなく、耐高温特性を持つ品種の導入や、高温障害を回避する栽培管理法による対処が必要であることが示唆される。



図Ⅱ-5(2)-6 関東地方(筑波)における、水稻栽培リスク評価の試算結果



図Ⅱ-5(2)-7 九州地方(熊本)における、水稻栽培リスク評価の試算結果

5) 留意点

- ・本プロジェクトの観測結果を用いて調整した発育モデルは、現在の移植期における温暖化には対応しているが、極端な早植（4月以前）、遅植（7月以降）では、実証データではカバーしていない。
- ・現在の発育モデルではCO₂濃度の影響は考慮されていない。

エ. 今後の課題

各地域1地点におけるリスク評価を示したが、実際には各地域内においても地形や標高の違いにより、気象条件がかなり異なる場合がある。メッシュ気象データ等を最大限利用し、リスク評価の広域(高密度)展開を行うことは、生産現場に対して有益な情報を提示できる可能性が高い。

オ. 要約

温暖化適応栽培シナリオ構築のために、新たな評価システムを構築した。これは従来の計画作期策定法に発育モデルを導入することで、出穂期に関わるリスク評価も全て移植日で評価できるようにし、さらに気象の経年変動を考慮して、移植日毎に各リスクの発生確率で示すようにしたものである。この新たな評価システムを用いて、全国4地域（4地点）の栽培適期（移植期）について検討した。その結果、北海道と東北地方の将来においては、南方の水稻品種の導入できる可能性が示された。関東や九州では遅植により高温リスク発生回避し収量性の低下も抑えられる可能性が示唆された。

カ. 参考文献

Hasumi H., and Emori, S., Eds. (2004) K-1 coupled model (MIROC) description. K-1 Tech, Rep. 1, CCSR, University of Tokyo, 34 pp.

Kanno H. (2004) Five-year cycle of north-south pressure difference as an index of summer weather in northern Japan from 1982 onward. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 711-724.

Kurihara et al. (2005) Projection of Climatic Change over Japan Due to Global Warming by High-Resolution Regional Climate Model in MRI. *SOLA*, 1, 97-100.

Kuwagata et al. (2011) MeteoCrop DB: an agro-meteorological database coupled with crop models for studying climate change impacts on rice in Japan. *J.*

Agric. Meteor., 67, 297-306.

Nemoto et al. (2012) Probabilistic Risk Assessment of the Rice Cropping Schedule for Central Hokkaido, Japan. *J. Appl. Meteor. Clim.*, 51, 1253-1264.

Nemoto et al. (2011) Extraordinary hot summer in Hokkaido decrease rice yield and satisfy growing of cultivar in Tohoku region "Hitomebore". *J. Agric. Meteor.*, 67, 269-274.

Okada et al. (2009) Mesh climate data of Japan ver. 2 for climate change impact assessments under IPCC SRES A1B and A2. *J. Agric. Meteor.*, 65, 97-109.

内島立郎 (1983) 北海道、東北地方における水稻の安全作季に関する農業気象学的研究. 農業技術研究所報告A. 31, 23-113.

小田正人 1992: 気象情報を利用した寒地水稻の計画作期と出穂予測. 「北海道農業における気象情報と先端的利用」, 日本農業気象学会北海道支部, 70-77.

伊達 了 (1963) 東北地方の水稻栽培期間の決定方法に関する農業気象学的研究. 東北農業試験場研究報告. 28, 1-41.

林ら (2001) 温暖化が日本の水稻栽培の潜在的特性に及ぼすインパクト. 地球環境. 6, 141-148.

堀江・中川 (1990) イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究 (第1報). 日本作物学会紀事. 59, 687-695.

松井 勤 (2009) 開花期の高温によるイネ (*Oryza sativa* L.) の不稔. 日本作物学会紀事. 78, 303-311.

村上ら (1982) 寒地水稻の計画栽培に関する解析的研究. 北海道農業研究試験場研究報告. 133, 61-100.

八柳三郎 (1980a) 稲作の計画栽培について [1]. 農業及園芸. 35, 931-934.

八柳三郎 (1980b) 稲作の計画栽培について [2]. 農業及園芸. 35, 1095-1098.

八柳三郎 (1980c) 稲作の計画栽培について [3]. 農業及園芸. 35, 1248-1252.

八柳三郎 (1980d) 稲作の計画栽培について [4]. 農業及園芸. 35, 1425-1428.

八柳三郎 (1980e) 稲作の計画栽培について [5]. 農業及園芸. 35, 1565-1569.

八柳三郎 (1980f) 稲作の計画栽培について [6]. 農業及園芸. 35, 1717-1722.

脇山ら（2010）水稻白未熟粒発生予測モデル構築
のための登熟期の気象条件および生育状態と白未熟
粒発生状況の解析．農業気象．66，255-267．

執筆担当者（根本 学）

北海道農研プロジェクト研究成果シリーズ

PROJECT **HARC**

No.8

農研機構 北海道農業研究センター