

第32回気象環境研究会

近年の猛暑による イネ高温不稔の顕在化とその対策

講演要旨集

1. 近年の夏季高温の特徴と高温不稔の発生状況

(1) 近年の気象変動と2018年夏季高温の特徴

石郷岡 康史（農研機構 北海道農業研究センター）

(2) 2018年の関東・東海・近畿8府県におけるイネ高温不稔の調査結果

吉本 真由美（農研機構 農業環境研究部門）

(3) 埼玉県農業技術研究センター玉井試験場（熊谷市）における高温不稔の発生状況

大戸 敦也（埼玉県農業技術研究センター）

2. 高温不稔対策として今後求められる技術開発の動向

(1) 高温不稔の概況速報のための早期調査手法の検討

荻原 均（農研機構 本部）

(2) 早朝開花性を利用した高温不稔の回避

石丸 努（農研機構 中日本農業研究センター）

(3) 葉蒸散の強化による水稻群落の冷涼化

福岡 峰彦（農研機構 農業環境研究部門）

(4) 人工気象室高温不稔検定システムの構築と高温不稔耐性品種の探索

羽方 誠（農研機構 九州沖縄農業研究センター）

近年の気候変動と2018年夏季高温の特徴

○石郷岡康史¹・桑形恒男²・吉本真由美²・西森基貴²・長谷川利拓²
(¹農研機構北海道農業研究センター・²農研機構農業環境研究部門)

1. はじめに

わが国の水稻生産に大きく影響する夏季(6月～8月)の平均気温は、過去100年間に1.01℃(年平均気温は同1.38℃)上昇した(気象庁資料より)。特に1990年代以降の高温傾向は顕著であり、過去121年間における夏季全国平均気温の高い方から10位までの中で、1990年以降が9か年、2000年以降が7か年と近年に集中している。極値の更新も頻繁であり、2007年には埼玉県熊谷と岐阜県多治見の40.9℃、2013年には高知県四万十市(江川崎)の41.0℃、さらにその5年後の2018年には再び熊谷において、41.1℃の最高気温極値が観測された。わが国の水稻生産においても既にこのような高温の影響が顕在化しており、今後影響軽減のための対策を検討する上で、水稻生産に強いストレスを与えるような高温イベント発生の時空間的特性を把握しておくことは必要不可欠である。ここでは、水稻の生育への影響という観点からいくつかの高温に関する指標を設定し、それらを用いて近年の夏季の高温出現の地域的な特徴と年々の変動傾向について考察する。

2. 使用データと高温指標

各種解析には、アメダス日別実況値に基づき作成した全国1kmメッシュ気温データ(日最高・最低・平均値)を使用した。その際、アメダスの日最高・最低気温の公表値は、年代により算定方法が異なるため、ここでは長期気候変動解析用に時別データから算定した日最高・最低気温に基づいて作成した気温メッシュデータを使用した。解析対象期間は、多くの地点でアメダス観測が開始された1978年以降とした。高温指標として、それぞれの気温の平均値の他、猛暑日(日最高気温35℃以上)日数、熱帯夜(日最低気温25℃以上)日数、および3種の暑熱指数(HD_x35:日最高気温35℃以上の積算値、HD_n25:日最低気温25℃以上の積算値、HD_m26:日平均気温26℃以上の積算値)を設定した(積算期間はどれも6月～9月)。

3. 結果

(1) 2018年の猛暑日出現回数は、東日本では過去最多であり、西日本では1994年に次いで2番目に多かった。同様に2018年の熱帯夜の出現回数は、東日本では過去最多であり、西日本では2010年に次いで2番目に多かった。なお、2018年の夏季全国平均気温は、過去121年間で5番目に高かった(気象庁)。猛暑日および熱帯夜出現回数は、何れにも明瞭な増加傾向が見られ、特に1994年以降の増加が顕著である。

(2) 日中の高温ストレスを表すHD_x35の積算値は、2018年には関東地方内陸や東海、近畿地方平野部で高い値が広範囲に表れており、過去の暑夏年(1994年や2010年等)と比較しても広範囲で強い高温ストレスに曝されたことが明らかになった。一方、夜間の高温ストレスを表すHD_n25については、過去には関東や東海、近畿を中心とした都市部において高い値が出現していたが、2018年は出現範囲が都市郊外の農耕地にまで拡大している様子が見られた。

(3) 近年各地で顕在化している水稻品質の低下は、登熟期間前期の高温による白未熟粒の発生の増大が主要因の一つと考えられている。そこで高温による品質低下リスクを見るため、統計資料から得た作柄表示地帯別出穂日を基準として、出穂後20日間のHD_m26の値を水田が存在するメッシュについて算定した。品質低下リスクが高くなる $HD_m26 > 40^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ の出現領域は、2018年には関東や東海に広く分布していたが、過去の暑夏年と比較して出現領域は小さいか同等程度であった。これは、2018年は猛暑のピークが7月中旬から8月上旬までであり、多くの地域の登熟期間前期と重ならなかったためと考えられる。

2018年の関東・東海・近畿8府県におけるイネ高温不稔の調査結果

○吉本真由美¹・酒井英光¹・石郷岡康史²・桑形恒男¹・石丸努³

(¹農研機構農業環境研究部門・²農研機構北海道農業研究センター・

³農研機構中日本農業研究センター)

1. はじめに

温暖化の進行に伴い水稻の高温障害による減収が懸念されている。特に、開花期高温不稔は、開花時に穎花が高温に曝されることにより受粉が阻害されて不稔になる障害で、これまで一部の熱帯地域や中国の長江流域などで被害が報告されているものの、国内の水田での発生の実態を把握した事例は少ない。近年、国内では夏季の異常高温が頻発し、2018年には、7月23日に埼玉県熊谷市で41.1℃と観測史上最高気温を更新するなど、7月中旬から8月にかけて各地で記録的な高温となった。この時期は一般にイネの出穂期にあたり、国内でイネの開花期高温不稔による被害が顕在化する可能性が懸念されたことから、関東・東海・近畿地方の8府県の公設試、農業団体等の協力のもと、高温不稔の広域緊急調査を実施した。これにより国内の水田での高温不稔発生の実態を把握するとともに、その開花期の気象条件との関係のモデル化を試みた。

2. 方法

2018年夏季に高温だった8府県(茨城、千葉、群馬、埼玉、岐阜、愛知、三重、京都)の調査対象水田からコシヒカリの籾サンプルを収集し、水田ごとに不稔籾数の割合(不稔率)を光透過と触診で調べるとともに、各水田における出穂日の情報も集めた。比較のため2019年夏季にも同じ水田を対象に調査を行った。これまでに、開花期の高温不稔には開花が起こる穂の温度が直接影響することが知られていることから、穂温推定モデル(IM²PACT)を使い各水田の開花期における水稻の穂温を計算し、不稔率との関係を調べた。

3. 結果

(1) 2018年、2019年とも、高温の時期に出穂した水田において、通常の温度条件でも見られる不稔率(約5%程度)よりも高い不稔率が認められた。最も不稔率が高かったのは、2018年の猛暑時期に出穂した埼玉県の水田で約15%だったが、2018年ほど高温ではなかった2019年にも、10%程度の高い不稔率が認められた。

(2) 不稔率は、開花期5日間の日中の平均穂温と高い相関があり、両年とも穂温が33℃付近を超えると不稔率が増大し始めた(図1)。この結果から開花期5日間の日中の平均穂温33℃以上の積算値を使用して、不稔率を推定するシミュレーションモデルを開発した。

(3) 開花期の穂温による不稔率推定モデルを用いて、8府県の調査対象水田の夏季全体(7月上旬~9月上旬)の気象条件から推定される不稔率を算定したところ、モデルは調査結果をよく再現していた。また、実際に高い不稔率が認められた2018年7月中下旬の関東の水田の他にも、不稔率が高い場合があったことから、高温の時期と出穂のタイミングによっては、現在の気候条件下でも国内の水田で高温不稔が発生している可能性があることが示唆された。

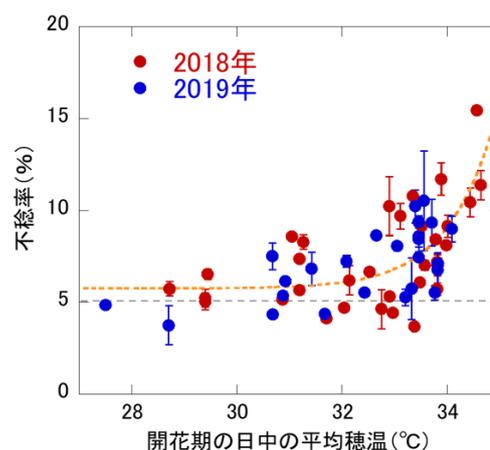


図1. 開花期5日間の日中の平均穂温と不稔率との関係。赤色は2018年、青色は2019年の結果を示す。両年の傾向はほぼ一致し、穂温が33℃付近を超えると不稔率が急激に増大し始めている。

埼玉県農業技術研究センター玉井試験場(熊谷市)における高温不稔の発生状況

○大戸敦也

(埼玉県農業技術研究センター)

1. 背景

2018年の夏は東・西日本で記録的な高温となったが、中でも埼玉県熊谷市の熊谷地方気象台では7月23日に国内歴代最高となる最高気温41.1℃を記録した。全国的に気温の高い埼玉県は、高温による水稻の障害の現状を把握すること及びその対策を講ずることが、今後の地球温暖化の傾向を考慮すると必要不可欠である。埼玉県では従来から登熟期の高温による白未熟粒の発生が問題となっており、「彩のきずな」等の耐性品種の開発に力を注いできた。しかし、高温により発生する不稔についてはデータが少ない。2018年のような記録的高温下における野外での調査データは希少であることから、埼玉県農業技術研究センター玉井試験場(以下玉井試験場)において水稻11品種の不稔率の調査を行った。

2. 調査方法

供試品種は「ふさおとめ」、「あきたこまち」、「初星」、「コシヒカリ」、「笑みの絆」、「あかね空」、「とちぎの星」、「さとじまん」、「なつほのか」、「日本晴」、「彩のかがやき」とした。それぞれ5月8日移植と5月22日移植の2作期栽培した。施肥条件はN:P:K=14:14:14をN成分で3kgの基肥のみ、栽植密度は18.5株/㎡(30×18cm)、1株当たり3本植で行った。不稔率の調査は、生育中庸な5株の全穂について目視で行った。統計解析はExcel 2013(Microsoft社)及びエクセル統計を用い、出穂期の近いものをグループ化してTukey-Kramer法で比較した。

3. 結果

- (1)玉井試験場の2018年7月～8月の気温の推移は図1のとおりであった。不稔は低温でも発生するが、出穂の盛期となった7月中旬～8月上旬には冷害が発生するような低温はなかった。
- (2)高いものでは15%を超える不稔が認められた。出穂日が近く、開花盛期(出穂日～その3日後まで)の最高気温が同じでも、品種間の不稔率に差が認められた。調査期間中、開花盛期の気温が最も高かった早生品種を例に見ると、出穂グループAでは、「あきたこまち」が「ふさおとめ」に比べて有意に不稔率が高かったが、より気温が上昇した出穂グループBでは「ふさおとめ」のみ不稔率が上昇し、「あきたこまち」に比べ有意に不稔率が高くなり、逆転した。(図2)。
- (3)これらの結果から、高温による不稔の発生率や発生の傾向には品種間差があると考えられる。今後、不稔の発生傾向と品種特性の関係を明らかにする必要がある。

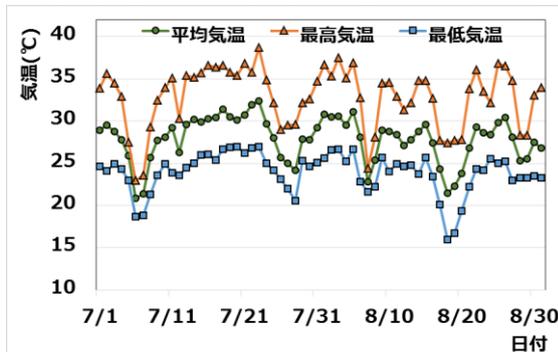


図1.2018年7月～8月の玉井試験場の推移。
(農研機構・農業環境変動研究センター様の計測)

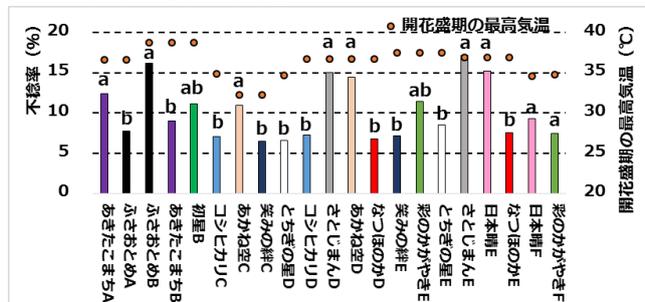


図2.2018年の玉井試験場における不稔の発生状況。
品種名後のアルファベット大文字は出穂グループ。
図中アルファベット小文字はグループ内の同文字間に5%水準で有意な差が認められないことを表す。

高温不稔の概況速報のための早期調査手法の検討

荻原 均
(農研機構本部)

1. はじめに

我が国の稲作には冷害に苦しめられてきた歴史がある。一方、地球温暖化によって盆地や平野の内陸部では最高気温が 35℃を超える猛暑日が頻発するようになってきた。水稻は、開花期に 35℃以上の高温に遭遇すると不稔が発生することが知られている。また、それに先立つ穂ばらみ期にも高温に感受性のある時期があることが示唆されている。

高温不稔の被害発生は、これまで成熟期になって収穫したサンプルの調査によって行われていた。しかし、高温不稔が頻発し、安定生産の脅威となるような状況では、できるだけ早期にその発生を把握する必要がある。これまでに早期警戒などの対応技術が整えられた障害型冷害の場合と同様に、高温不稔でも早期に発生を把握することが可能か、検討した。

2. 結果と考察

水稻の開花は、1 穂の中で 1 週間程度の幅があり、1 株の中で穂ごとに出穂に数日のズレがある。遅く開花した穎果の子房がある程度の大きさまで育つことを考慮すると、出穂後 2 週間程度が早限と考えられた。また、調査時期が遅くなり、早く開花した穎果の胚乳が透明になると、透過光での観察がしにくくなる。そのため、乳熟期から糊熟期が、透過光での観察には適期と判断された(図 1)。

この時期の穂を、1000 倍に希釈した次亜塩素酸ナトリウム液で滅菌し、アルミホイルで包んでビニール袋に密閉することで、冷蔵庫で 2 週間以上保管可能だった。1 株から穂長の長い 6 穂を選んで調査したところ、40 穂程度つまり 7 株分程度で平均値が収束した。しかし、穂ごとの SD は ±4 より小さくならず、穂ごとのバラツキの大きな現象であることが明らかとなった(図 2)。

乳熟期から糊熟期の調査によって、高温不稔の発生を把握し、被害予測を行うことは十分可能と考えられた。しかし、不受精の発生を厳密に把握する点については問題が残った。



図 1. 高温不稔が発生した穂の様子(糊熟期)

1 次枝梗ごとに切断。右が上位、左が下位。登熟している籾は光が透過しない。開花後数日で子房が発育停止したとみられる籾があり、不稔籾調査の障害になった。

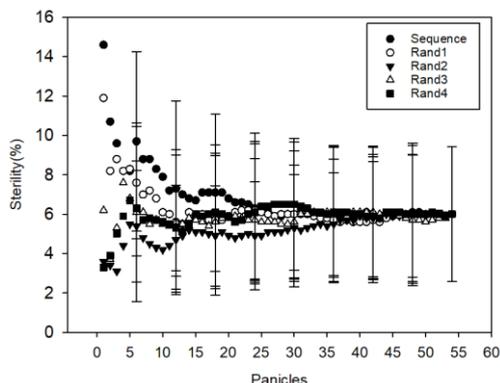


図 2. 調査した穂の不稔率の累積平均値の変化

●(Sequence):測定した順番通り。
Rand1~4: 同じデータセットを乱数で並び替えたシミュレーションの例。

早朝開花性を利用した開花時高温不稔の回避

○石丸 努

(農研機構中日本農業研究センター)

1. はじめに

近年、温暖化による気温の上昇傾向が顕著となっている。イネは開花時に高温に対する感受性が最も高く、35℃以上の高温に曝されると不稔になる。この現象を「開花時高温不稔(以下、単に高温不稔)」という。開花時の気温だけで考えると、世界では高温不稔が起こっている地域が数多く存在すると推測されているが、その実態は定かではない。また、開花から1時間を経過すると高温に曝されても不稔は誘発されることが知られている。そのため、開花を気温の低い早朝に開花させる「早朝開花性」が高温不稔の回避に有効であることが提唱されてきた。

ここでは、熱帯における高温不稔の実態調査や早朝開花性による高温不稔回避の効果を概説するとともに、早朝開花性を利用した高温不稔回避の育種の方策を示す。

2. データならびに解析方法

実験 1. 熱帯の現地品種を用いた高温不稔の実態調査

ラオス中部のサバナケット県およびインド南部のタミルナドゥ州において、それぞれ現地品種 TDK1 と Coimbatore51(以下、CO51)を実験に供試した。ラオスでは出穂期に5日間の遮光ネット(60%遮光、銀色)を群落上に設置し、遮光区とした。遮光ネットを設置しない区を対照区とした。両区の穂表面温度をIM²PACT(Yoshimoto et al. 2011)により推定した。インドでは2地点で4回の播種時期を設け、出穂期別に計6グループに分類した。そのうちの1グループでは時刻別に異なる色のマッキーペンで開花靱をチェックした。ラオス・インドとも収穫期に穂あるいは開花時刻別の靱をサンプリングし、触診で不稔を識別し、不稔率を算出した。

実験 2. 早朝開花性による高温不稔回避の効果と育種的应用

野生種 *O. officinalis* 由来の早朝開花性 QTL(*qEMF3*)を熱帯のインディカ品種 IR64 に導入した準同質遺伝子系統(IR64+*qEMF3*; Hirabayashi et al. 2015. J. Exp. Bot.)を用い、ミャンマー国ネピドー市近郊のイエジン農業大学実験圃場(19°8'N, 96°3'E)において2015-2019年に早朝開花性による高温不稔回避の実証試験を行った。開花期に開花時刻を調査するとともに、収穫期に収量および収量構成要素を測定した。また10Lポットを用い、フィリピン国ロスバニョス市近郊の国際稲研究所において、熱帯や亜熱帯での主力品種の開花時刻をIR64+*qEMF3*と比較した。

3. 結果と考察

実験 1. ラオスでは遮光区において、対照区よりも不稔率が有意に低かった。遮光区では対照区に比べて、穂表面温度が2℃ほど低かった。またインドでは日最高気温が不稔率と高い相関関係にあった。また開花時刻別の不稔調査により、気温が高くなる午前の遅い時間ほど不稔率が高くなることが示された。

実験 2. IR64+*qEMF3* は IR64 よりも有意に早い時刻に開花した。IR64 の開花時刻は出穂期の日最低気温と密接な関係があるのに対し、IR64+*qEMF3* は日最高気温と密接な関係があった。出穂期の日最高気温が36.1℃を超えるとIR64の稔実率が低下したが、IR64+*qEMF3* では稔実率の低下が36.9℃以上で起こりかつ低下の程度も緩慢であった。その結果、出穂期の日最高気温が36℃を超える酷暑においてIR64+*qEMF3* はIR64よりも高い収量を維持した。また、熱帯や亜熱帯での主力品種の中で、早朝開花性を有する品種は存在しなかった。

以上の実験1と実験2の結果より、早朝開花性は高温不稔を回避する有望な形質であり、早朝開花性系統の育種素材として利用できると考えられた。

葉蒸散の強化による水稲群落の冷涼化

福岡峰彦

(農研機構農業環境研究部門)

1. はじめに

演者らは、ワックス系蒸散抑制剤の散布による葉蒸散の抑制はイネの群落内気温の上昇を通じて穂温を上昇させ (Yoshimoto *et al.*, 2011)、不稔率が上昇することを報告した (長谷川ら, 2006)。このことは逆に、葉蒸散の強化による群落の冷涼化が、穂周辺の高温を回避するための技術オプションになりうることを示唆している。その検証のため、葉蒸散を遺伝的に強化したイネの変異体系統を作出した。当該変異体系統による圃場条件下での群落内微気象の改変について紹介する。

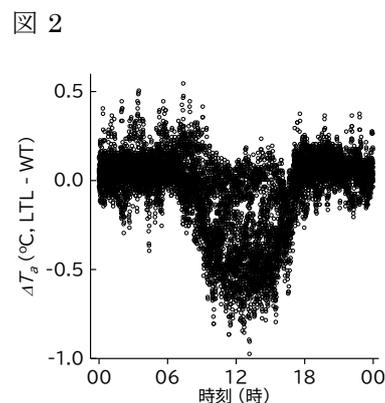
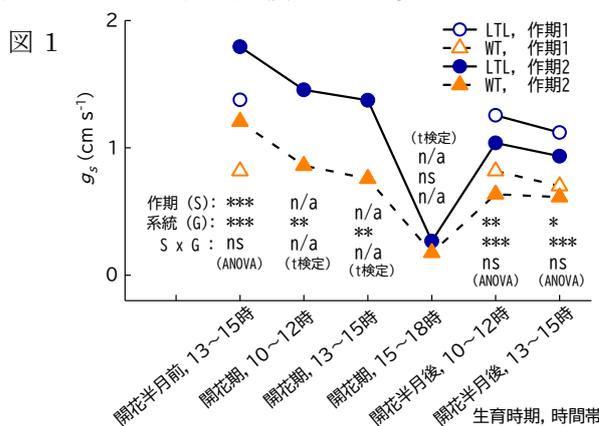
2. 材料および方法

水稲品種ヒノヒカリ (WT) の種子に ^{60}Co 線源からの γ 線 200Gy を照射*することにより変異を誘発した。M₂ 個体群を 2010 年に水田圃場に展開し、開花期に落水して土壌水分ストレスを与えた状態で周囲よりも明らかに低い葉温を示した変異個体 (LTL) を赤外線熱画像により選抜した。増殖を経た 2014 年に、LTL (M₆ 世代) と WT を水田圃場 (つくば市) において 2 作期で供試し、湛水条件下で群落微気象特性を比較した。区制は作期毎に 4 反復の乱塊法とし、1 区は 2.4m×3.0m (8 条×20 株) とした。移植日は作期 1 が 6/3、作期 2 が 6/17 である。

気孔コンダクタンス (g_s) は各区 3 個体の最上位完全展開葉の表裏で測定した。開花期の群落内穂層の気温 (T_a) および相対湿度 (RH) は群落微気象測定装置 MINCER (Fukuoka *et al.*, 2012) を用いて作期 2 の代表 1 反復において測定した。なお、作期 1 の開花期は降雨が続いたため欠測とした。*(独)農業生物資源研究所放射線育種場への依頼による。

3. 結果

作期毎の各系統の開花はほぼ同時期であった。日中の g_s には系統間差が認められ、LTL は WT の 1.5~1.8 倍高い値を示した (図 1)。開花期の T_a の系統間差 (ΔT_a , LTL-WT) は日中に拡大して昼過ぎに極大となった (図 2)。開花期の 10~14 時に観測した RH と ΔT_a との間には有意な線形の相関が認められ ($\Delta T_a = 0.025RH - 2.4$, $R^2 = 0.75$, $p < 0.001$)、 RH が 70% のときに得られる冷却効果は -0.65°C 程度と見積もられた。



高温不稔に関して、群落の冷涼化による回避性の強化は、耐性・逃避性の強化とは機構が重複しないため、相加的な活用が期待される。しかし、圃場条件下において群落を形成しなければその効果は発揮されないため、回避効果を定量的に評価することは容易ではない。ケースの積み重ねによる地道な検証が必要である。

人工気象室高温不稔検定システムの構築と高温不稔耐性品種の探索

羽方 誠

(農研機構九州沖縄農業研究センター)

1. はじめに

温暖化の進行より、水稻では高温不稔が頻発し、収量の不安定化が懸念されている。高温不稔は開花時の高温により受粉・受精に問題が生じ、米が稔らなくなる現象で、気温が 35℃前後になると発生することが知られている(松井 2009)。日最高気温が 35℃を超える猛暑日が頻繁に観測された 2007 年の関東・東海地方では、調査した圃場の多くで 10%以上の不稔率が確認された(Hasegawa et al. 2011)。温暖化による気温上昇は更に進行することが予測されており、今後の米生産の安定化に向け、耐性品種の育成は喫緊の課題である。これまでに、「N22」等の高温不稔耐性を持つ品種は見出されている(Satake and Yoshida 1978)ものの、耐性を効率良く評価できるシステムがないことが一因となり、耐性品種の育成は進んでいない。そこで本研究では、人工気象室において、育種素材開発や品種育成等に活用できるような出穂期や稈長の異なる多数の品種・系統の高温不稔耐性を、年間を通じて同一条件で再現良く効率的に評価できるシステムの開発を行った。

2. 人工気象室高温不稔検定システムの構築

高温不稔耐性の検定は、出穂した穂の高温処理をいかに統一して正確に行うことができるのかが重要になる。内部に 216 ポットを設置可能な水槽を装備した人工気象室 2 室を常温及び高温に設定した。高温に設定した人工気象室では、光源のメタルハライドランプから放出される赤外線による穂温上昇の影響を排除するため、水槽内のポットに出穂した穂からランプまでの距離を一定にできるように高さ調整機能を付けた(図、Hakata et al. 2017)。評価する水稻は、播種 2 週間後の幼苗を専用ポットに移植した後、常温条件(26℃(昼 13 時間)/22℃(夜 11 時間))の人工気象室内で、生育条件を統一するため、分けつを切除しながら、出穂まで生育させた。全ての水稻は出穂日に高温条件(35℃(昼 13 時間)/29℃(夜 11 時間))の人工気象室に移動させ、穂先の高さを水面から 70cm に調整し、3 日間高温処理を行った。処理後は、常温条件の人工気象室に戻し、40 日間登熟させた後、穂を採取し、稔実率を調査した。水稻9品種の高温不稔耐性を調査した結果、温度勾配型チャンバー(TGC)等を使用した試験において高温不稔耐性を持つとされる「N22」、「IR36」及び「IR24」(Maruyama et al. 2013)は、本システムにおいても、強い耐性を示した。また、耐性結果の再現性も高く(Spearman の順位相関係数 $r = 0.837$ 、1%水準で有意差あり)、安定した評価結果が得られた。このため、本システムは高温不稔耐性品種・系統の検出に年間を通じて利用可能であると考えられる。

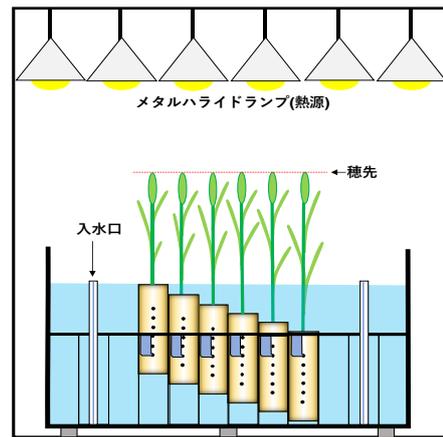


図 高温不稔検定システムの概要

3. 高温不稔耐性品種の探索

構築した検定システムにて、国内外の水稻遺伝資源 118 品種の耐性評価を行った。その結果、「N22」以上の耐性を示した水稻 10 品種(「Kaluheenati」、「Badari Dhan」、「宝満神田稲」、「渡舟」、「Rexmont」、「Ratul」等)を選定することができた。特に、「Kaluheenati」は 77.1%と最高の稔実率を示し、「N22」の 52.1%と比較しても非常に強い耐性を持つことが判明した。

現在、高温不稔耐性と高温登熟耐性を併せ持つ系統を開発すべく、選定した「Kaluheenati」や「宝満神田稲」と高温登熟耐性品種「にこまる」の交配後代の選抜を進めている。