

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 13 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20380011

研究課題名（和文） 高温不稔の発生と耐性のメカニズムに基づく温暖化対策としての耐性イネ作出の評価

研究課題名（英文） Estimation of breeding effect as countermeasure against global warming on the basis of mechanisms in occurrence and tolerance of high temperature induced floret sterility in rice.

研究代表者

松井 勤（MATSUI TSUTOMU）

岐阜大学・応用生物科学部・教授

研究者番号：70238939

研究成果の概要（和文）：イネの開花時の高温耐性にかかわる形質の変異，および，それらの形質と高温耐性との関係を調べた．高温不稔への耐性に密接に関係する葯基部の裂開の長さには， $590\ \mu\text{m}$ の変異が認められた．この変異は 4°C の耐性の差異に相当すると考えられた．穎花の蒸散コンダクタンスには， $340\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ の変異が認められた．解析の結果， $340\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ の蒸散コンダクタンスの差異は 3.8°C の穂温の差異に相当する場合があると考えられた．開花時刻には，3.5時間以上の品種間差異が存在した．

研究成果の概要（英文）：Diversity in characteristics controlling tolerance to heat induced floret sterility in rice and their effects to the tolerance were examined. The observed range of basal dehiscence length was $590\ \mu\text{m}$. The effect of $590\ \mu\text{m}$ of difference in dehiscence on heat tolerance was estimated at 4°C . The observed range of transpiration conductance was $340\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. The effect of difference of $340\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ on panicle temperature was estimated to be 3.8°C in certain case by the simulation model of panicle temperature. Moreover, diversity of 3.5 hrs in Flowering time was observed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農学・作物学・雑草学

キーワード：環境・植物・ストレス

1. 研究開始当初の背景

模擬温暖化条件下でのイネの生育試験と作物モデルによるシミュレーションの結果から，温暖化により日本のような温帯においてもイネの高温不稔の発生が増加することが予測されている（Horie et al. 1996, Nakagawa 2003, IPCC 2007）．実際，1990年代より，中華人民共和国長江中下流域では，

高温不稔の発生頻度が増してきており，2003年には多くの農家圃場で稔実率が50%以下となる事態に至った（Wang et al. 2004）．日本においても，2007年及び2010の猛暑年には高温不稔の発生が確認されており，温暖化によるイネの高温不稔に対する対策は喫緊の課題である．

イネの高温耐性には品種間差異が存在し，

作物モデルのシミュレーションによって、そのような品種間差異が温暖化条件下におけるイネの高温不稔の発生程度に強く関与する可能性が示されている。どのような品種改良によりどの程度の耐性をイネに付与することができるかを明らかにすることは、温暖化対策として品種改良を進める上でも、食糧生産に及ぼす温暖化の影響を正確に見積もるうえでも重要である。

2. 研究の目的

高温不稔耐性に関与するイネ品種の形態的・生態的形質として、これまでに、葯の裂開特性、開花時刻、及び穂の蒸散コンダクタンスが挙げられている。これらに加え、研究代表者らは近年、群落内の穂の位置が高温条件下におけるイネの受精の成否にかかわることを発見した。いずれの形質も高温耐性にかかわっていることが実験的あるいは理論的に示されている。しかしながら、それらの形質が高温耐性に対してどの程度の効果を持つか、そして、イネの遺伝資源がどの程度の変異を含んでいるか、が明らかにされていないために、実際の品種改良によりどの程度の耐性の向上が見込めるかは明らかでない。本研究プロジェクトの目的は、ここに挙げた4つの高温耐性関連形質が、実際にどの程度の効果を持ち、また、どの程度の遺伝的な変異を持つかを明らかにし、それを基に育種による高温耐性の改良がどの程度の効果を持つかを評価することである。

3. 研究の方法

(1) 葯の裂開特性の改善による耐性向上の評価

イネ品種日本晴の染色体の一部をカサラスに置換した染色体断片置換系統群の中から、葯の基部、頂部に生ずる裂開の大きさが異なる7系統を基部と頂部の裂開の大きさに相関関係が生じないように選抜し、材料とした。4Lのポットで栽培し、開花期に人工気象器を用いて3日間3段階の高温処理（昼温35, 37, 39°C, 夜温は25°C）を施し、葯の裂開と稔実との関係を検討した。

(2) 圃場条件における葯の裂開と高温耐性との関係

中国長江中流に位置する長江大学の実験圃場において、イネ12品種を3反復4作期で作付け、葯の裂開特性と高温不稔耐性との関係を調査した。

(3) 世界のイネコアコレクション・日本のイネコアコレクションにみられる高温耐性関連形質の変異

岐阜大学・島根大学において世界のイネコアコレクション及び日本のイネコアコレクション（農業生物資源ジーンバンク）を栽培し、葯の裂開特性、開花時刻、穂の蒸散コンダク

タンス、止葉からみた穂の深さを調査するとともに、葯の裂開の特性の品種間差異による高温耐性の差異、及びコンダクタンスの違いによる穂温の差異を試算した。

(4) 中国のイネコアコレクションのインディカにみられる高温耐性関連形質の変異と評価

中国湖北省の長江大学において、中国のイネミニコアコレクションの中からインディカを選抜、栽培し、葯の裂開特性、開花時刻、穂の蒸散コンダクタンス、止葉からみた穂の深さを調査するとともに、葯の裂開の特性の品種間差異による高温耐性の差異、及びコンダクタンスの違いによる穂温の差異を試算した。

4. 研究成果

(1) 葯の裂開特性の改善による耐性向上の評価

昼温 35°Cおよび 37°Cで開花した穎花の稔実率とそれぞれの条件で葯の基部に生じた裂開の長さとの間には強い正の相関関係が認められた。葯基部の裂開の長さの 100 μm 拡大は、不稔の発生が数%~35%程度の 35°C区で 10%程度、不稔の発生が 35%~80%の 37°C区で 20%程度の不稔の抑制効果を持つと推定した。稔実の温度反応から求めた、それぞれの系統の稔実率が 75%、および 50%に低下する昼間気温（それぞれ T_{75} 、 T_{50} ）と葯の基部および頂部に生じた裂開の長さにも有意な相関が認められた。特に、 T_{50} は葯基部と頂部の裂開長を説明変数とした重回帰によりよく説明された（ $T_{50} (\text{°C}) = 0.00292X_1 + 0.00676X_2 + 0.00676$, X_1 : 頂部裂開長 (μm), X_2 : 基部裂開長 (μm), $R^2=0.907$, $P=0.0026$)。これらの結果から、葯基部の裂開を 100 μm 長く改良することで、開花期の高温による不稔の発生を最大で 20%程度減少させ、また、同時期の高温不稔耐性を約 0.7°C改善できると見積もった。また、頂部の裂開が耐性に及ぼす影響は基部の裂開に比べると小さいが、100 μm 長くすることで高温耐性を 0.3°C程度改善できると見積もった。

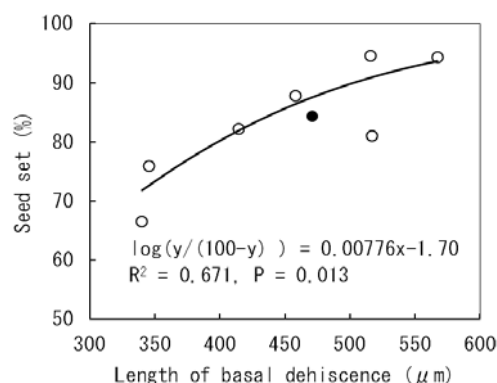


図 1. 昼温（1000 - 1600）35°C条件下で葯の

基部に生じた裂開の長さや稔実率との関係。稔実率をロジット変換した後に統計解析を行った。供試系統：日本晴 (●) および NKC7 系統 (○)。

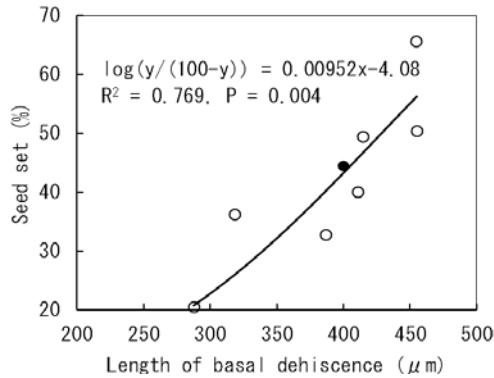


図 2. 昼温 (1000 - 1600) 37°C 条件下で葯の基部に生じた裂開の長さや稔実率との関係。稔実率をロジット変換した後に統計解析を行った。シンボルは図 1 と同じ。

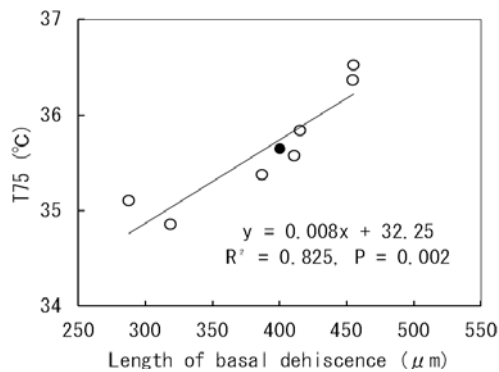


図 3. 昼温 37°C 条件下で葯の基部に生じた裂開の長さや稔実率が 75% まで低下する昼間気温 (T_{75}) との関係。稔実率をロジット変換した後、昼間気温との回帰直線より T_{75} を求めた。シンボルは図 1 と同じ。

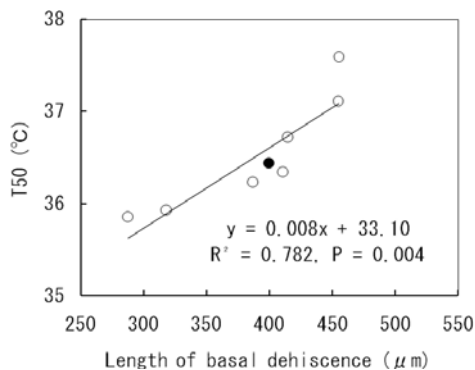


図 4. 昼温 37°C 条件下で葯の基部に生じた裂開の長さや稔実率が 50% まで低下する昼間気温 (T_{50}) との関係。図 3 の T_{75} と同様にして T_{50} を求めた。シンボルは図 1 と同じ。

(2) 圃場条件における葯の裂開と高温耐性との関係

高温期に開花した穎花で、有意な稔実歩合の低下が認められた。調査期間中の最高気温は 35°C 程度であったが、相対湿度は非常に高く、最高気温時でもおよそ 70% で、風は弱く、風速 1 m s^{-1} を下回ることもあった。このような条件で、日射が当たる穂の温度は気温を 4°C も上回る場合があった。一部の品種の葯基部の裂開は短く、裂開の長さや十分に受粉された花の割合および稔実率との間に、品種間で有意な相関が認められた。不稔の発生率は 8% から 48% 程度で、葯基部の裂開の $100 \mu\text{m}$ の品種間差異は、およそ 16% の稔実の品種間差異に相当した。この値は、不稔の発生が少ない 35°C 条件で、 $100 \mu\text{m}$ の裂開長の拡大により 10%、不稔の発生が多い 37°C 条件で 20% の不稔の抑制効果を認めた CSSLs を用いた実験の結果とよく一致した。

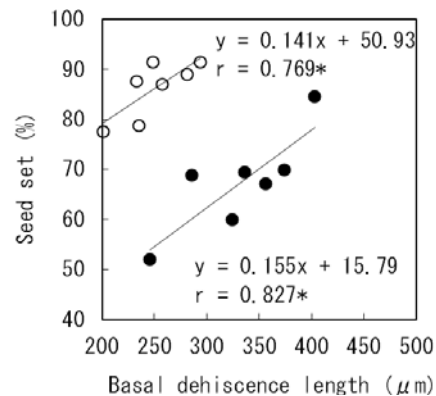


図 5. 葯基部に形成された裂開の長さや稔実率との関係 (中国湖北省荊州大学実験圃場, 材料: 現地で広く栽培されている F1 品種)

(3) 世界のイネコアコレクション・日本のイネコアコレクションにみられる高温耐性関連形質の変異

① 葯の裂開特性

世界のイネコアコレクションでは、高温耐性と密接にかかわる基部の裂開長には約 $790 \mu\text{m}$ ~ 約 $200 \mu\text{m}$ まで、 $590 \mu\text{m}$ の差異が認められた。(1) の結果から、この差異は約 4°C の耐性の差異に相当すると推定した。平均値は $383 \mu\text{m}$ であった。裂開長の地域差に着目すると、フィリピン・インドネシアの島嶼部で短く、東アジアインドシナ半島で長い傾向が認められた。

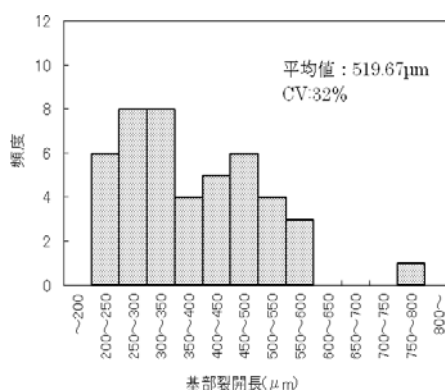


図 6. 世界のイネコアコレクションにおける薬基部の裂開の長さの頻度分布

日本のイネコアコレクションでは、基部裂開長には約 774~322 μm まで 450 μm の品種間差異が認められた。平均値は 520 μm で、世界のイネコアコレクションの平均値よりも 140 μm 長く、世界のイネコアコレクションの最大値との差異は約 270 μm で 1.9°C の耐性の差異に相当すると考えられた。

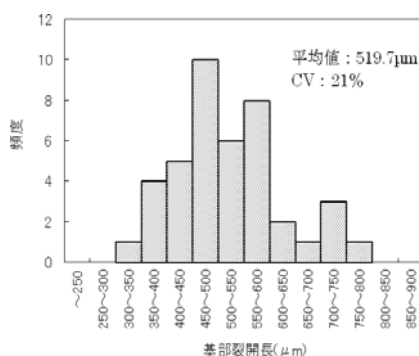


図 7. 日本のイネコアコレクションにおける薬基部の裂開の長さの頻度分布

② 穎花の蒸散コンダクタンス

世界のイネコアコレクションでは、穎花の蒸散コンダクタンスに 33.0~91.4 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の品種間差異が認められた。このコンダクタンスの差異が 37°C の高温条件でも維持されるとすれば、約 1.9 (穂の周囲の湿度 55%時)~0.7°C (同 95%時) に相当すると考えられた (穂の周囲の風速 0.5 ms^{-1} , 太陽放射 700 Wm^{-2} , 気圧 1000 hPa の条件で)。

日本のイネコアコレクションでは、穎花の蒸散コンダクタンスに 28.21~12.4 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の品種間差異が認められた。このコンダクタンスの差異は 2.6 (穂の周囲の湿度 55%時)~0.9 (同 95%時) °C の穂温の品種間差異に

相当すると考えられた (穂の周囲の風速 0.5 ms^{-1} , 太陽放射 700 Wm^{-2} , 気圧 1000 hPa の条件で)。実際には、穂の蒸散コンダクタンスは、植物個体の水分生理に強く影響される。このため、高温条件では、コンダクタンスは低下し、その品種間の変異は小さくなる傾向が認められる。したがって、実際的高温条件では穂温の品種間差異は、これより小さくなる。

③ 開花時刻

世界のイネコアコレクション、日本のイネコアコレクション、および、中国原産の早朝開花性品種の開花時刻には、9時から12.5時まで、3.5時間の差異が観察された。

(4) 中国のイネコアコレクションにみられる薬の裂開特性、開花時刻、穂の蒸散コンダクタンス、止葉からみた穂の深さの変異と評価

① 薬の裂開特性の品種間差異

高温耐性と密接にかかわる基部の裂開長には約 400 μm の品種間差異が認められた。(1)の結果から、この品種間差異は 2.8°C の耐性の際に相当すると推定した。平均値は 390 μm , 変動係数は約 20%であった。平均値は世界のイネコアコレクションとほぼ同じで、変動係数は約 10%小さかった。

地域分布に着目すると、雲南の周辺省の品種では薬基部・頂部の裂開の長さが短く、薬長が長い傾向が認められた。

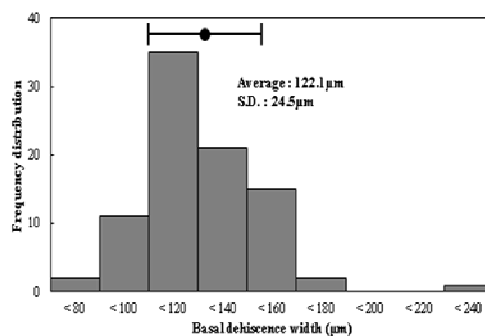


図 8. 中国のイネコアコレクションにおける薬基部の裂開の長さの頻度分布

② 穎花の蒸散コンダクタンス

期間中に計測された蒸散コンダクタンスの最大値は 413.5 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で最小値は 72.3 であった。340 μm のコンダクタンスの差異が、37°C の条件で維持されたとすれば、3.8 (穂の周囲の相対湿度 55%時)~1.7 (同 95%時) °C に相当すると推定された (穂の周囲の風速 0.5 ms^{-1} , 太陽放射 700 Wm^{-2} , 気圧 1000 hPa の条件で)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Yoshimoto, M., Fukuoka, M., Hasegawa, T., Matsui, T., Tian, X., Vijayalakshmi, C., Singh, M.P., Tin Tin Myint, Weerakoon, WMW, Lafarge, T., Lur, H.S., and Tarpley, L. 2011: MINCERNet: A global research alliance to support the fight against heat stress in rice. J. Agric. Meteorol., 68, in press.
- ② Mayumi YOSHIMOTO, Minehiko FUKUOKA, Toshihiro HASEGAWA, Misako UTSUMI, Yasushi ISHIGOOKA, Tsuneo KUWAGATA (2011) Integrated micrometeorology model for panicle and canopy temperature (IM2PACT) for rice heat stress studies under climate change, JOURNAL OF AGRICULTURAL METEOROLOGY, 67(4), 233-247.
- ③ Yoshimoto, M., M. Fukuoka, T. Hasegawa, X. Tian, M. Pal Singh, T. T. Myint Daw, W.M.W. Weerakoon, T. Lafarge, H.S. Lur, L. Tarpley, T. Matsui, K. Kobayashi, T. Kuwagata (2010) Multi-site monitoring of heat stresses and micrometeorological conditions in rice plant communities under various climates, Texas Rice , AgriLIFE RESEARCH, 10(6), 3-6 (査読なし)
- ④ Kobayasi, K., Matsui, T., Yoshimoto, M. and Hasegawa, T. (2010) Effects of temperature, solar radiation, and vapor-pressure deficit on flower opening time in rice. Plant Prod. Sci. 13:21-28
- ⑤ Kobayasi, K. and Atsuta, Y. (2010) Sterility and poor pollination due to early flower opening induced by methyl jasmonate. Plant Prod. Sci. 13:29-36
- ⑥ Zhao, L., Kobayasi, K., Hasegawa, T., Wang, C., Yoshimoto, M., Wan, J., & Matsui, T. (2010) Traits responsible for variation in pollination and seed set among six rice cultivars grown in a miniature paddy field with free air at a hot, humid spot in China. Agriculture Ecosystems & Environment 139:110-115.
- ⑦ Tian, X., Matsui, T., Li, S., Yoshimoto, M., Kobayasi, K. & Hasegawa, T. (2010) Heat-induced floret sterility of hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under humid and low wind conditions in the field of Jiangnan Basin, China. Plant Production Science 13: 243-251.

- ⑧ 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. (総説)
- ⑨ Mayumi Yoshimoto, Minehiko Fukuoka, Toshihiro Hasegawa, Xiaohai Tian, Madan Pal Singh, Tin Tin Myint Daw, WMW Weerakoon, Tanguy Lafarge, Huu Sheng Lur, Lee Tarpley, Tsutomu Matsui, Kazuhiro Kobayashi, Tsuneo Kuwagata (2009) Multi-site monitoring of heat stresses and micrometeorological conditions in the rice plants communities under various climates -The micrometeorological measurements system for a common measure of the paddy environments -. Crop Production under Heat Stress: Monitoring, Impact Assessment and Adaptation, Proceedings of the MARCO Symposium 2009 (Oct., 2009), W2-09 (査読なし)
- ⑩ Mayumi Yoshimoto, Tsutomu Matsui, Kazuhiro Kobayashi, Hiroshi Nakagawa, Minehiko Fukuoka, Toshihiro Hasegawa (2009) Canopy micrometeorological model for climate change impact study. Crop Production under Heat Stress: Monitoring, Impact Assessment and Adaptation, Proceedings of the MARCO Symposium 2009 (Oct., 2009), W2-22 (査読なし)
- ⑪ Kobayasi, K., Matsui, H., Atsuta, Y., Matsui, T., Yoshimoto, M. and Hasegawa, T. (2009) Flower opening time in rice—Cultivar difference and effect of weather factors—. Crop Production under Heat Stress: Monitoring, Impact Assessment and Adaptation, Proceedings of the MARCO Symposium 2009 (査読なし)

[学会発表] (計 1 件)

- ① Matsui T. Rice anther tolerant to high temperatures at flowering period. Hasegawa T. and Sakai H. (eds.) Crop Production under heat stress: monitoring, impact assessment and adaptation. Proceedings of the MARCO Symposium 2009, Tsukuba, 5-9, October 2009. P.67

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 勤 (MATSUI TSUTOMU)
岐阜大学・応用生物科学部・教授
研究者番号: 70238939

(2) 研究分担者

長谷川利拡 (HASEGAWA TOSHIHIRO)
独立行政法人農業環境技術研究所・大気環境研究領域・上席研究員
研究者番号：10228455

(3) 連携研究者

吉本真由美 (YOSHIMOTO MAYUMI)
独立行政法人農業環境技術研究所・大気環境研究領域・主任研究員
研究者番号：40343826

小林和広 (KOBAYASHI KAZUHIRO)
島根大学・生物資源科学部・准教授
研究者番号：90234814