

イネ高温登熟耐性選抜のための簡便な穂温上昇装置

寺尾富夫・千葉雅大・廣瀬竜郎

(中央農業総合研究センター北陸研究センター)

要旨：登熟時の高温に耐性があるイネ品種・系統を選抜する目的で、穂温を上昇させる装置を開発した。OHP フィルムで作成した透明な筒を穂に被せることにより、昼間の穂温を、10 日間の平均で約 0.8℃ 上昇させることができ、またその中に、幅 2 cm、厚さ 5 mm の黒色ゴムスポンジを接着することにより、昼間の穂温を 2℃ 以上上昇させることができた。この処理による温度上昇に比例して、整粒割合は減少し、白未熟粒割合は増加した。この処理により、夜温は約 0.15℃ 低下するが、白未熟粒の発生割合には影響しなかった。この装置により、高温耐性の基準品種を評価したところ、高温耐性の順位に対応した結果が得られ、他の評価法と同様の耐性の選抜が可能と考えられる。本装置による高温処理は、簡便であり、光合成を阻害せず、1 個体で評価可能であることから、分離系統の高温耐性評価等に利用でき、高温登熟耐性の遺伝解析に有用であると考えられる。

キーワード：イネ、気候温暖化、高温処理、高温登熟、白未熟粒、選抜評価法。

近年、登熟時の高温により、白未熟粒の発生による玄米の外観品質の低下が問題になっている(寺島ら 2001, 松村 2005)。これに対し、回避技術の開発や、耐性品種の選抜が行われつつある(森田 2008)。特に、耐性系統の選抜のためには、登熟期に高温処理を行って、収穫後、玄米品質を調査しなければならない。このための高温処理の方法として、(1) 穂部をビニルハウスで覆う方法(小牧ら 2002, 永畠・黒田 2004)、(2) 温水掛け流し(重山ら 1999, 石崎 2006)、(3) 人工気象器(長戸・江幡 1960, 表野ら 2003, 2004, 山川・神田 2003)、(4) ガラス温室(飯田ら 2002, 福井ら 2004)、(5) プールによる温水処理(石崎 2006)、(6) オープントップチャンバー(千葉・松村 2006)、(7) 温度勾配ビニルハウス(永畠・山元 2005)等の方法が用いられている。このうち、(1) から (5) までの方法のメリットとデメリットは、石崎(2006)により詳細に比較されている。すなわち、(1) では、遮光による光合成の阻害による品質低下との判別が困難であり、また、稈長の違いにより効果が異なる；(2)、(3)、(4) では設備に費用がかかり、加えて(3) では多数の個体が扱えない；(5) は、熱源があれば安価に行えるが、熱源の確保が問題であり、(3) と同様に多数の個体が扱えない等の問題がある。これに加えて、(6) では温度上昇の効果が少ない上に、遮光の影響を受ける可能性もあり；(7) では、温度条件を連続的に変えることができる利点があるが、逆に温度上昇幅が一定の場所は一部しかないため、多数個体の選抜には向かないこと、および、上面をビニルで覆うことによる遮光の可能性、等の問題がある。また、処理間で圃場や施設および個体が異なるため、圃場間差や個体間差の解消のために、相当数の反

復を設けて処理する必要がある。特に、登熟期の高温に対する耐性の遺伝解析を行うためには、分離個体を用いた耐性の検定が必要であるが、遺伝的に未固定の系統では処理を行うために、同質な 2 個体を準備することは困難であり、1 個体で評価できる方法が必要である。また、登熟時の高温に感受する部分は穂であり、茎葉部では無いことが報告されている(森田ら 2004)ため、植物体全体の温度を上昇させる必要は無く、穂部の温度上昇のみで検定が可能と考えられる。なお、穂のみの温度処理は、長戸・江幡(1960)で既に試みられているが、高夜温で糊粉層が厚くなること以外の効果は不明である。そこで、一つの個体の穂を分けて温度処理することにより、個体間差に影響されずに高温登熟耐性の検定が可能なのではないかと考え、以下のような狙いで試作と検討を行った。(1) 低価格で簡便な装置；(2) 葉の光合成を阻害しないよう、穂部のみに装置を装着することにより、穂部の温度のみを昇温させる外気温追従型の装置；(3) 1 個体を二つに分けて処理を行うことより、個体間差や圃場の場所による地力の差等による影響を除くことができ、分離系統 1 個体でも検定可能な装置、の 3 点である。その結果、透明筒で穂を覆うことにより、簡便に検定が可能で、検定結果も良好であったためここに報告する。

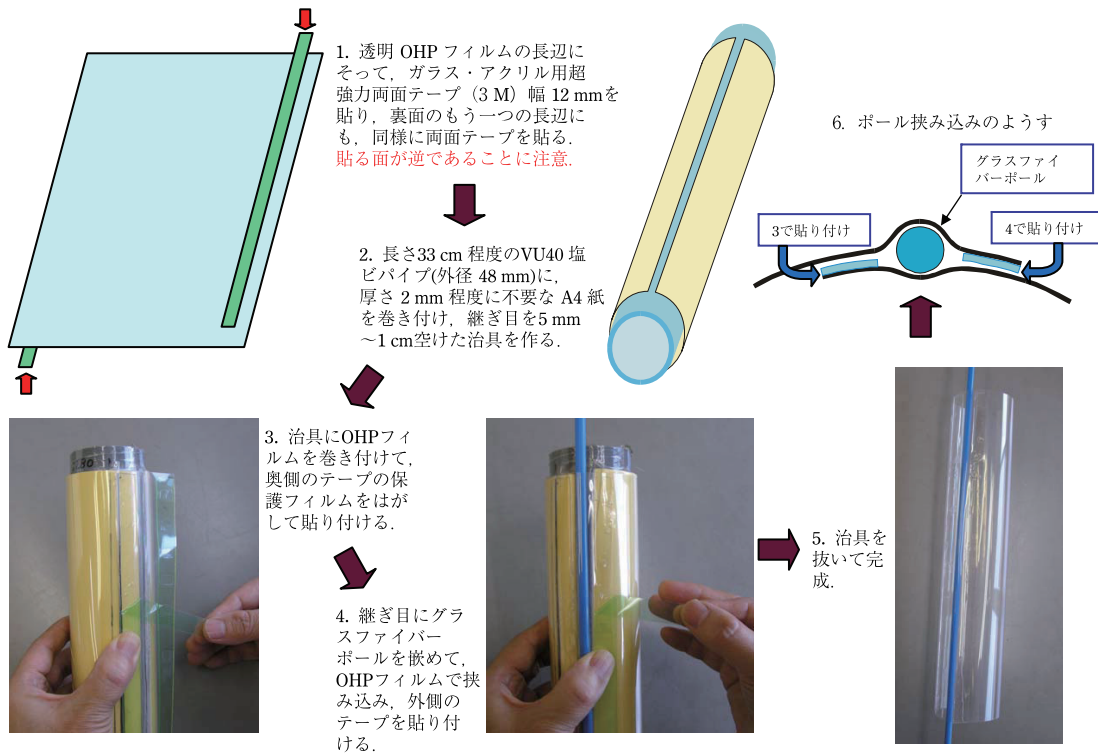
材料と方法

出穂したイネの穂を、透明な筒で覆う穂温上昇装置を作成した。A4 サイズの PPC 用 OHP フィルム (PP2500, 3 M) を筒状に丸めたものを使用し、園芸用グラスファイバー支柱(ダンポール)を合わせ目に挟み込むように透明なガラス・アクリル用の両面テープ(ガラスアクリル用超強力、

2009 年 11 月 12 日受理。連絡責任者：寺尾富夫 〒943-0193 新潟県上越市稲田 1-2-1

TEL 025-526-8300, FAX 025-524-8578, terao@affrc.go.jp

本研究の一部は、農業・食品産業技術総合研究機構交付金プロジェクト「作物及び家畜生産における気候温暖化の影響解明とその制御技術の開発」(3110) および、同交付金プロジェクト「農業生産における中長期的視点に立った温暖化適応基盤技術の開発」(2103) による。



第 1 図 OHP フィルムを用いた簡易高温処理筒の作成法。

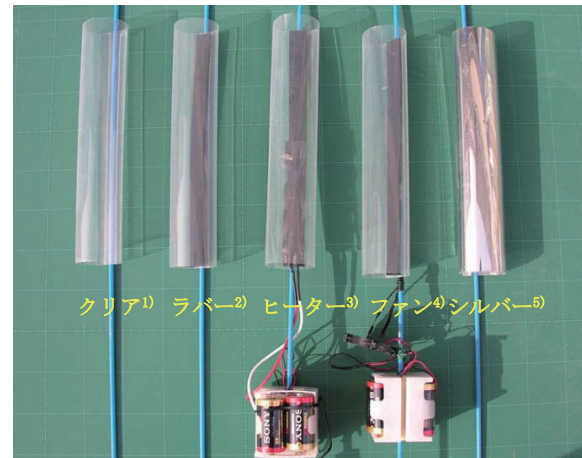
3M) で接着した (クリア処理, 第 1 図)。これにより筒は自由に支柱に沿って動き、穂の位置に合わせて設置可能である。

1. 透明筒素材の検討

PPC 用 OHP フィルムが、透明筒の材質として適当かどうかを検証するために、透明アクリル製パイプ（外径 60 mm, 肉厚 3 mm, 長さ 30 cm）および、農業用軟質塩ビシート（ノービエースミライ, 厚さ 0.1 mm, MKV プラテック株式会社, 東京）で作った筒と比較して、昇温効果を検討した。これらの材質の透明筒を、北陸研究センター内の圃場のササニシキの穂各 1 穂に設置し、穂の上部、中部、下部に熱電対を設置して穂温を測定した。この品種は、2008 年 4 月 28 日に播種、5 月 26 日に移植し、8 月 8 日より処理を開始した。

2. 筒内温度分布の測定

透明筒で覆うことによる物理的な温度上昇効果が筒内の位置によりどの程度異なるかを調べるため、グラスファイバーの支柱に 5 個の温度センサー（RTR-5 W および RTR-53 A, TANDD, 長野）を取り付け、透明筒を被せて圃場に設置し、筒内の位置による温度の差を測定した。半円筒型の白色光沢紙（長さ 29.7 cm, 直径約 2.5 cm）を、センサーの太陽光入射側に、支柱を挟んで取り付け、センサーに直射日光が当たって温度が上昇するのを防いだ。個々のセンサーに笠をつけずに、半円筒型にしたのは、筒内の下



第 2 図 イネの穂の高温処理のための装置。

- 1) クリア処理：透明フィルムの筒（直径 5 cm, 長さ 29.5 cm）を穂に被せる。
- 2) ラバー処理：1) に加えて、幅 2 cm, 厚さ 5 mm の黒ゴムスポンジを内部に貼り付ける。
- 3) ヒーター処理：2) に加えて、ニクロム線ヒーターを取り付ける（100 V, 200 W ヒーターに 6 V を印荷）。
- 4) ファン処理：2) に加えて下部にファン（12 V, 0.1 A 定格のファンに 6 V を印荷）を付けて、強制換気する。
- 5) シルバー処理：光を反射するフィルムの筒を穂に被せる。

から上への空気の流れの阻害を最小限に留めるためである。センサー取り付け位置は、筒上端より約 2.5 cm 下がった位置を A1, さらに 5 cm 下がった位置を A2, 同じく 7 cm 下を A3, 同 7 cm 下を A4, 同 5 cm 下を A5 とし、A5

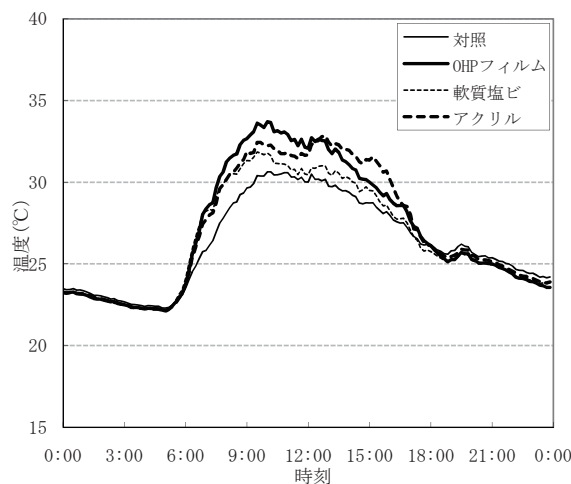
は筒下端より約 2.5 cm 上に位置した。このうち、中位の A2, A3, A4 の 3 位置のセンサーは、同時に並行して測定を行った品種ササニシキの穂の上部、中部、下部の位置に揃えた。また、もう一つのセンサーで外気温を測定した。

これと同時に、実際のイネの穂での温度分布をしらべるため、品種ササニシキ（4月27播種、5月25日移植）の穂の上部、中部、下部の開花後の穎花に、太さ 0.1 mm の銅-コンスタンタン熱電対を挿入し、データロガー（CR10 X, Campbell Scientific, Inc., Lagon, UT）およびマルチプレクサ（AM416, Campbell Scientific, Inc., Lagon, UT）を用いて、穎花の温度を測定した。取り付け位置の平均の間隔は、上部-中部間も中部-下部間も 7 cm だった。これに PPC 用 OHP フィルム製の透明筒を、穂の中部が筒の中央になるように被せた。透明筒を被せた穂を 3 穂、および被せない対照の穂を 3 穂用いて測定した。測定は、2009 年 8 月 16 日から 8 月 19 日に行った。光強度は、LI-250 Light Meter と光量子センサー（LI-COR Biosciences, Lincoln, NE）を用いて測定した。

3. 温度上昇処理

PPC 用 OHP フィルムによるクリア処理に、さらに筒内の温度を上げるための処理を加えた。透明筒の内側に幅 2 cm 厚さ 5 mm の黒色ゴムスポンジ（黒セルスポンジ）を取り付けたものをラバー処理とし、ラバー処理に熱収縮チューブで覆った 100 V, 200 W のニクロム線ヒーターを取り付けて、乾電池で 6 V を印加したヒーター処理、ラバー処理に電動ファン（12 V 0.1 A 定格の DC ファン、シコー株式会社、50 mm × 50 mm × 10 mm に乾電池で 6 V を印加）を取り付けて下から送風するファン処理、また逆に、筒内に入射する光エネルギーを減少させた場合の温度変化を調べるため、クリア処理の外側にアルミ蒸着シートを貼ったシルバー処理の計 5 処理を行った（第 2 図）。シルバー処理のアルミ蒸着シートは単体での光透過率は 20% であったが、上面開口部からの入射光の影響で、設置時の内部の光強度は、外部の約 30% であった（Licor Quantum sensor と LI-2500 Light meter で測定）。また、黒セルスポンジは、緩衝材として市販されている 30 cm × 30 cm × 厚さ 5 mm のものを 2 cm 幅に切断して使用した。

中央農業総合研究センター北陸研究センター（新潟県上越市）の圃場で、品種「ササニシキ」を 2007 年 4 月 16 日播種、5 月 15 日移植し、基肥 $N\ 3\ g\ m^{-2}$, $P_2O_5\ 3\ g\ m^{-2}$, $K_2O\ 3\ g\ m^{-2}$, 堆肥 $1\ kg\ m^{-2}$ を投入し、慣行にしたがって栽培し、出穂後に穂温上昇装置を取り付け、穂温上昇と玄米外観品質への影響を調査した。2007 年 8 月 8 日に、出穂以後 5 日程度経過し抽出が完了した穂から、可能な限り下位の一次分げつ由来の同程度の大きさの穂を選んで、前記各処理の穂温上昇装置を装着した。穂の中央部が装置の中央に来るように装着し、穂軸の伸長にしたがって処理筒の高さを調整した。1 個体で 6 処理全てを行うことは困難だったため、1



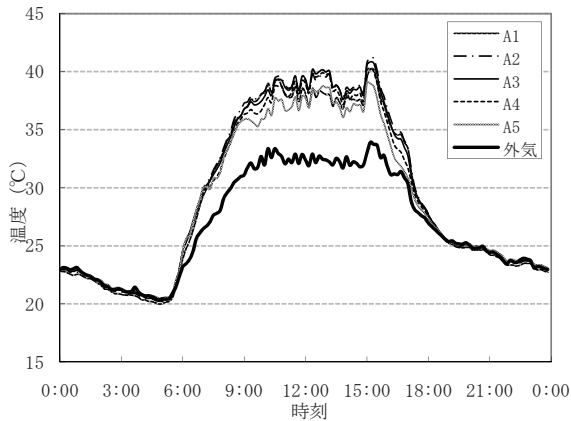
第3図 対照および OHP フィルム筒（クリア処理）、アクリル筒、農業用塩ビシート筒を設置したイネの穂温日変化。

2008 年 8 月 9 日から 5 日間の平均値を示す。対照は、無処理のイネの穂に熱電対を設置。

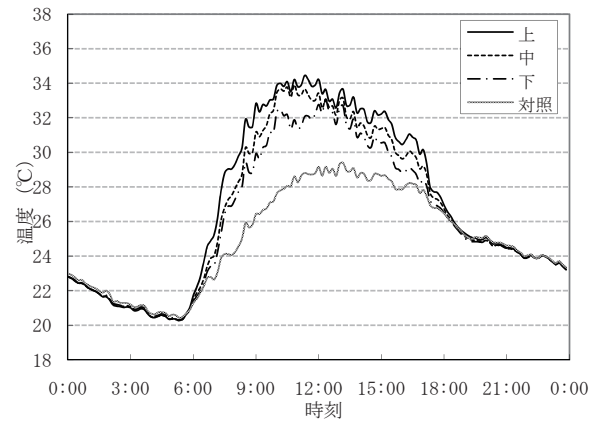
個体につき 2 穂ずつ別の処理を行い、1 処理につき 2 個体を用いた。対照は 4 個体を用いた。穂の最上部の一次枝梗に着生した穎花と最下位の一次枝梗に着生した穎花の 2 カ所に直径 0.1 mm の熱電対（銅-コンスタンタン）を、感温部に直射日光が当たらないよう、穎花に装着し、データロガー（CR10 X）とマルチプレクサ（AM416）を用いて穎花の温度を 1 分毎に測定し、10 分毎の平均値を記録した。温度測定は、出穂後 10 日目に相当する 8 月 13 日より開始し、10 日間測定した。これらの処理を行った穂を、収穫後、穀粒判定機（静岡製機、ES-1000）を用いて粒判定を行った。白未熟粒割合は、同判定機の分類による「乳白」、「腹白」、「基部」と「死米」の割合の合計とした（ES1000 の分類には「背白」は無い）。

4. 基準品種試験

2008 年に、高温登熟耐性検定のための基準品種（石崎 2006）のうち、高温登熟性ランク「強」である「ふさおとめ」、「やや強」である「てんたかく」と「はなひかり」、「越路早生」、「やや弱」である「加賀ひかり」、「弱」である「越の華」、「トドロキワセ」を選び、1 系統につき 2 個体を用い、1 個体から 2 本の穂を選んで、一方にラバー処理の穂温上昇装置を装着し、他方の無装着の穂を対照として比較し、基準通りの品種間の高温登熟耐性が評価できるかどうか検討した。したがって、2 個体の使用は 2 反復の試験となる。これらの品種は、4 月 21 日に播種、5 月 20 日に北陸研究センター内の圃場に移植し、基肥として $N\ 3\ g\ m^{-2}$, $P_2O_5\ 3\ g\ m^{-2}$, $K_2O\ 3\ g\ m^{-2}$, 堆肥 $1\ kg\ m^{-2}$ を投入し、慣行にしたがって栽培した。出穂後の 8 月 2 日より処理を開始し、収穫まで設置を継続した。



第4図 野外で、イネの穂が入っていないOHPフィルム筒（クリア処理）内に温度センサーのみを設置した場合の温度の日変化。センサー取り付け位置は、A1、筒上端より約2.5 cm；A2、同7.5 cm；A3、同14.5 cm；A4、同21.5 cm；A5、同26.5 cm＝筒下端より約2.5 cm。2009年8月17日から19日までの3日間平均を示す。



第5図 OHPフィルム筒処理（クリア処理）を行ったイネの穂に熱電対を取り付けたときの部位別穂温の日変化。熱電対取り付け位置は、穂の上部、中部、下部の開花後の穎花で、7 cm 間隔で取り付けた。穂の中部が筒中央になるようにOHPフィルム筒を取り付けた。2009年8月16日から19日までの4日間平均を示す。3穂の平均値を示す。

結 果

1. 透明筒の素材

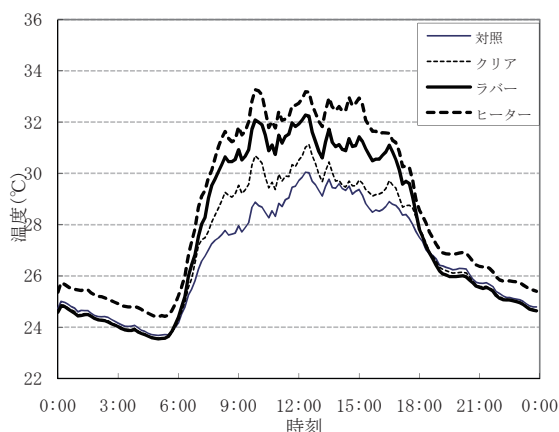
透明筒の材料に適当な素材を探すために、農業用軟質塩ビシートおよび、透明アクリル製のパイプに加えて、PPC用OHPフィルムを用いて透明筒を作成し、イネの穂に被せて、穂温を測定した。その穂温の比較を第3図に示す。透明OHPフィルムは、昼の平均穂温で、対照に比較して2.0℃の上昇を示し、透明アクリルパイプでは1.9℃、農業用軟質塩ビシートでは0.8℃上昇した。農業用軟質塩ビシートは、温度上昇を目的としたビニルハウスに使用されることから、十分な昇温効果を持つと考えられる。また、厚さ3 mmの透明アクリル板も同様に昇温効果を持つと考えられるが、透明OHPフィルムは、これらに比較して同等以上の温度上昇効果があった。OHPフィルムは、十分な温度上昇効果があるに加えて、軽量で操作性が良いため、OHPフィルムの使用が最適と考えられる。

2. 筒内の温度分布

野外で、OHPフィルムを用いたクリア処理の筒内の温度分布を、イネの穂に装着せずに調べた結果を第4図に示す。8月17日～19日の3日間の昼間（8:00～18:00）の筒内の平均温度は、A1、37.3℃；A2、38.0℃；A3、37.8℃；A4、37.3℃；A5、36.3℃であり、外気の31.7℃に較べて、それぞれA1、4.9℃；A2、5.6℃；A3、5.4℃；A4、4.8℃；A5、3.9℃と大きく上昇していた。この間の日射の平均光量子量は、 $806 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、最上部のA1を除いて上の方が高温だった。しかし、穂の最上部であるA2と、穂の最下部であるA4の温度差は、0.7℃であり、筒内の高さによる温度差は比較的小さかった。夜温（0:00～7:00、19:00～24:00）は、外気に較べて、

A1、 -0.29°C ；A2、 -0.11°C ；A3、 -0.02°C ；A4、 $+0.07^\circ\text{C}$ ；A5、 $+0.1^\circ\text{C}$ であり、上部ほど外気より低く、下部では外気より高い傾向がみられた。しかし、その差はわずかで、特に穂位置での差はほとんど無かった。

次に、このクリア処理の筒を実際にイネの穂に装着したときの、8月16日～19日の4日間の温度変化を第5図に示す。8:00～18:00の平均の穂の温度は、穂上部、32.1℃；穂中部、31.2℃；穂下部、30.4℃であり、この間の平均日射光量子量は $1110 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。クリア処理による8:00～18:00の平均の温度上昇は、対照に較べて、穂上部、4.2℃；穂中部、3.3℃；穂下部、2.5℃だった。温度センサーを穂に装着すると、日射量が増加したにもかかわらず、センサーのみの場合よりも、温度が低く、また温度上昇幅も小さくなった。これは、イネの穂からの蒸散により、穂温が低下しているためと考えられる。穂上部と下部の温度差は、1.7℃あり、温度センサーのみの0.7℃に較べてやや拡大した。この温度差は穂上部のクリア処理による温度上昇幅の約40%だった。また、夜温（0:00～5:00、20:00～24:00）は、対照に較べて、穂上部、 -0.42°C ；穂中部、 -0.07°C ；穂下部、 -0.03°C であり、上部ほど夜温の低下が大きかった。また、測定した3個体間の穂温の標準誤差は、穂上部、0.71℃；穂中部、0.40℃；穂下部、0.37℃であり、昇温効果が高い上部ほどばらつきが大きかった。しかし、標準誤差は昇温幅のそれぞれ1/5.9、1/8.4、1/6.7に収まり、比較的小さいばらつきに留まった。籾1粒の温度測定では、穂内の着生位置により光の当たり方も異なり、誤差が大きくなることが予測されるが、それでもこの程度のばらつきに収まっていることから、各位置の平均的状态でみたときの位置間の誤差はより小さくなると考えられる。

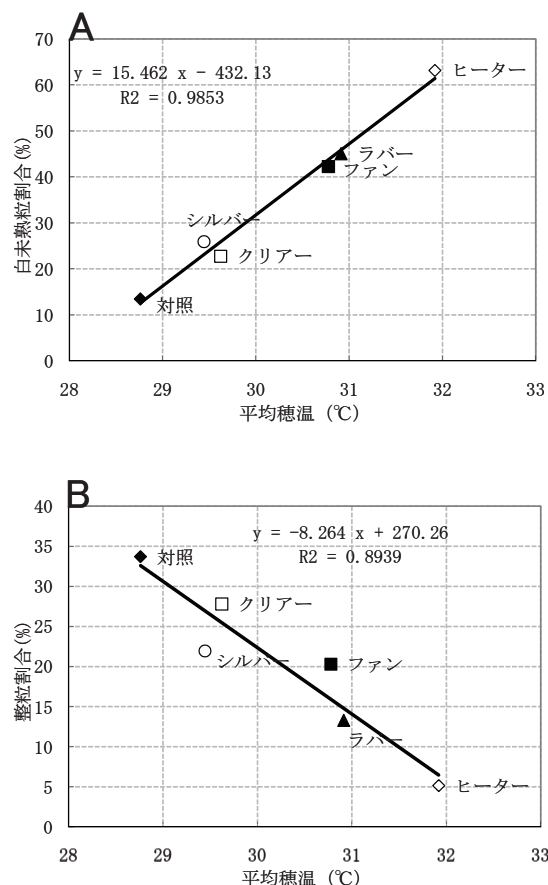


第6図 クリア処理、ラバー処理、ヒーター処理をしたイネの穂温日変化。

穂の最上部の主軸着生穎花と最下位の一次枝梗着生穎花内に設置した熱電対の平均温度を、2007年8月13日から22日までの10日間測定した平均値を示す。対照は第3図と同じ。

3. 圃場での穂温上昇と玄米外観品質への影響

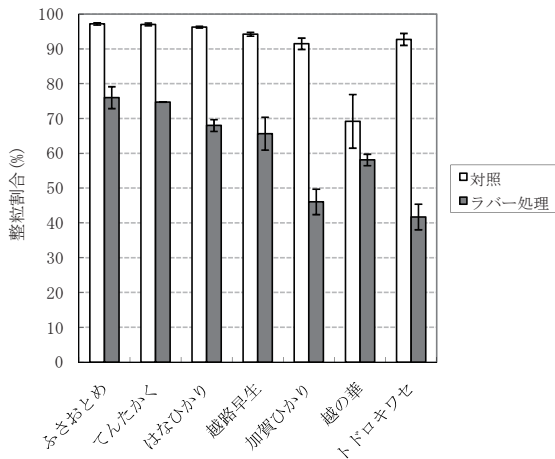
PPC用OHPフィルムによるイネの穂へのクリア処理、および対照に加えて、ラバー処理、ヒーター処理の8月13日から22日までの10日間の平均穂温日変化を第6図に示す。この期間は、高温処理に最も敏感とされる期間を含む出穂後10日から20日に相当する (Tashiro and Wardlaw 1991a, b)。対照に較べて、クリア処理の日中の穂温は上昇し、その上昇幅は8時～18時の平均で約0.8℃であった。ラバー処理では更に効果が高く、同2.1℃上昇した。ヒーター処理では、日中の穂温は更に上昇し同3.0℃高くなり、夜温(20時～5時)も約0.7℃上昇した。クリア処理およびラバー処理区での夜間の穂温は、約0.15℃低下した。ラバー処理で、厚さ5mmの黒色ゴムスポンジを使用したのは、集熱効果に加えて、蓄熱の効果により、夜温の低下が抑えられることを期待したためだが、その効果は認められなかった。また、この試験の温度上昇幅が、上記2試験より小さいのは、測定期間が長く、悪天候時のデータを含んだ平均であるためである。この10日間の気象の内訳は、快晴1日、晴または晴ときどき曇り7日、曇り1日、雨1日であり、日照時間は最高12.7時間、最低0.1時間、平均7.6時間であった (気象庁 2010)。また、ファン処理の昼穂温は、対照に較べて1.9℃上昇し、ラバー処理の2.0℃上昇よりやや低下したが大きな差は無く、ファンを付加した効果は特に見られなかった (第7図)。このことから、ラバー処理による温度の上昇は、温度上昇したゴムスポンジから放射される輻射熱の影響が大きいと考えられる。夜間の穂温は、ファンをつけることにより低下が0.06℃に抑えられた。シルバー処理による昼穂温の上昇は0.6℃であり、クリア処理の0.8℃上昇よりやや低下したものの大きな差は無く、入射光のエネルギーを遮断した効果は少なかった (第7図)。



第7図 日中(8:00-18:00平均)の平均穂温と白未熟粒割合(A)および整粒割合(B)の関係。

白未熟粒割合は、乳白粒、腹白粒、基部未熟粒、死米の割合合計。回帰直線と寄与率を図中に示す。

日中6時～18時の平均穂温と収穫した玄米の白未熟粒割合、および穂温と整粒割合の関係を調べた(第7図AおよびB)。平均穂温と白未熟粒割合との関係をみると、穂温が対照の28.8℃からヒーター処理の31.9℃に上昇するにつれて、白未熟粒割合も、12%から62%まで、直線的に増加した。このときの回帰の寄与率は0.99だった。白未熟粒割合の増加に伴って、整粒割合は逆に、処理により穂温が上昇するにつれて、対照の35%からヒーター処理の5%まで直線的に減少した。このときの回帰の寄与率は0.89であった。また、シルバー処理の温度上昇幅は29.4℃とクリア処理の29.6℃とほぼ同じだが、白未熟粒の発生は、22.8%から25.9%へとやや増加し、整粒割合も27.8%から22.5%へとやや減少した。また、ファンをつけることにより、穂温は、ラバー処理の30.9℃に較べて30.8℃とほとんど変化は無かったが、整粒割合は、13.3%から21.1%へとやや向上した。したがって、これらの方法で、昼間の穂温上昇幅を選ぶことにより、高温登熟による白未熟粒の発生をコントロールできることが分かった。



第8図 高温登熟耐性の基準品種にラバー処理を行った場合と無処理の整粒割合の比較。
エラーバーは測定2個体の標準誤差。

4. 基準品種への適用

この装置を用いて検定した高温耐性が、他の検定方法によるものと同様かどうかを確認するために、高温登熟耐性検定のための基準品種（石崎 2006）から、7品種を選んでラバー処理を行った（第8図）。その結果、「ふさおとめ」、「てんたかく」はラバー処理時の整粒割合が高く（それぞれ76%と75%）、また、対照との差も少なかった。したがって、これらの品種は耐性が高いと判定される。また、「はなひかり」、「越路早生」は中程度であり（それぞれ68%と66%）、「やや弱」の基準品種の「加賀ひかり」は「弱」の「トドロキワセ」と並んで耐性が低いと判定された（それぞれ46%と42%）。これらの品種の耐性は、基準通りの順序を示した。また、今回分類した耐性が異なる品種群間では、2個体間（2反復間）の標準誤差（最大で越路早生の4.7%、最小はてんたかくの0.4%）よりも大きい整粒割合の差を示し、安定した品質低下程度を示した。しかし、耐性が「弱」の基準品種である「越の華」の整粒割合は58%と、「やや弱」の「加賀ひかり」よりも高い耐性を示した。この品種の対照の整粒割合が他より低いのは、標準誤差が大きいことから判断して、対照の穂の選び方が悪かったためと考えられる。しかし処理区の標準誤差は小さいことから、2個体とも同様の高温耐性を示しており、本方法で検定した場合、この品種の耐性を表していると考えられる。しかしこの品種においても、高温登熟耐性がより上位の品種である「はなひかり」や「越路早生」よりも低い評価であり、おおむね基準値通りの評価であった。

考 察

1. 穂の高温処理と白未熟粒発生

1株中の穂に、透明な筒を被せて温度上昇処理を行うという簡単な装置により、簡便に高温登熟耐性の評価を行うことができた。OHPフィルムを使用して透明筒を作ることにより（クリア処理）、透明アクリル製の筒等に較べて、

同等以上の温度上昇効果が得られ、なおかつ軽量で操作性が良い装置の作成が可能である。集熱のために黒セルスポンジを内部に付加したラバー処理では、更に高い温度上昇効果が得られ、エネルギーの投入なく、10日間の平均で、クリア処理の約0.8℃を2倍程度上回る約2℃の昼間の穂温上昇がみられた。これらの処理を行って穂の温度を上昇させると、それにしがつて玄米の外観品質が低下した。ラバー処理では、黒色の素材で集熱を行うと同時に、スポンジによる蓄熱の効果を期待したが、蓄熱の効果はほとんど無く、他の黒色素材（例えば黒色ビニルテープ）等でも効果が有る可能性があり、これについては、今後検討したい。また、この方法により、1個体中の別の穂を、2段階あるいはそれ以上の異なる温度で登熟させることができ、登熟時の高温による米粒の品質低下を、個体間差や圃場の場所による地力の差等による影響を除いて評価することが可能である。更に、1個体でも検定可能であることから、反復がとれない分離系統の個体選抜や遺伝解析にも使用可能である。ただし、この上昇温度幅は、天候が異なる場合には異なるため、出穂期が異なり、その間に天候が変化した場合には注意が必要である。

この装置を用いて穂の温度を上昇させると、昼間の穂温上昇に伴って直線的に整粒割合が低下し、逆に白未熟粒割合が増加した。したがって、この方法で穂の温度処理を行うことにより、高温登熟耐性の評価に使用可能なことが確認できた。また、森田ら（2004）が示すように、高温登熟による米粒品質の低下には穂温が直接影響することが確認できた。

本方法では、穂の温度のみを上昇させるため、植物体全体の温度を上昇させる他の選抜方法とは評価が異なる可能性がある。石崎（2006）は、様々な方法で品種の検定を行い、多くの方法で一定の耐性を示した品種を基準品種として公表している。そこで、これらの基準品種をラバー処理により検定したところ、石崎（2006）の検定法とほぼ同様の耐性評価ができることが分かった。ただし、「越の華」のように、基準品種とはやや異なる耐性順位を示す品種もあった。穂のみの高温処理と植物体全体を高温にする検定法の差が出やすい品種である可能性があり、検定法あるいは高温処理部位と高温耐性の関係に品種間差異があるかどうか今後検討する必要がある。また、この方法は、使用する個体数が少ない場合に、個体間差や処理による誤差が心配されたが、基準品種の測定に用いた2個体の間では標準誤差も少なく、この方法により、少ない個体での高温登熟耐性検定が可能であることが示された。

2. 温度上昇幅と筒内温度勾配の影響

透明筒内部の温度勾配は、温度センサーのみを入れて測定した場合には、穂の上部で、5℃程度の温度上昇に対して、穂の下部では0.7℃低く、差はそれほど大きくなかった。しかし、実際に透明筒を穂に装着した場合（クリア処理）

の温度上昇は、穂の上部での約4.2℃に対して、穂の下部では上部より約1.7℃低く、上昇割合は上部の60%だった。群落内の蒸散で冷えた空気が筒下部から流入することおよび、穂の蒸散により穂中央部の温度が下がったためと考えられる。この温度差の影響は、同程度の長さの穂を比較する場合には無視できると考えられるが、今後温度差を少なくする処理法を検討する必要がある。

また、穂が無い場合と有る場合で、温度の上昇幅が大きく異なる。これには、穂からの蒸散の影響が大きいと考えられる。穂の大きさが極端に違う品種・系統を比較するのは、蒸散量の違いにより、穂温が変化する可能性があるため、避けた方が無難と考えられる。

3. 夜温の影響

穂に筒を被せると、わずかに夜温が低下する傾向がみられた。しかし、ヒーター処理で夜温を上昇させた場合(約0.7℃)でも、昼温と米粒品質の関係は変わらず、夜温の影響は特に認められなかった。森田ら(2002, 2004)は、高夜温は玄米1粒重と品質を両方低下させることを報告しており、本実験の結果とは異なる。しかし、高温登熟の影響は、気温に比例するわけではなく、一定の限界温度を超えると悪影響が現れると考えられ、その温度は日平均気温26℃付近(近藤ら2005)、あるいは27.3℃(高橋2006)との報告がある。森田ら(2002, 2004)が行った22℃から34℃への夜温上昇では悪影響が顕著だが、本実験のヒーター処理では、夜温24℃~25℃が0.7℃上昇しても、この限界温度以下であったため、大きな影響は無かったと考えられる。ラバー処理時の0.15℃の夜温低下は更に影響が小さく、無視できると考えられる。ファン処理により、夜温の低下を防ぐことができるが、夜温低下の影響が小さいため、不要である。

4. 穂の遮光の影響

シルバー処理では、同程度の温度になるクリア処理よりも整粒割合が低く、白未熟粒割合が高かった。千葉・松村(2005)は、穂の遮光を行うと品質が低下することを報告しており、過度の遮光は品質の低下を引き起こす可能性がある。しかし、シルバー処理による70%の遮光でも、品質の低下はわずかであり、透明フィルムで覆うクリア処理またはラバー処理では、遮光の影響はほとんど無いと考えられる。

5. 飽差の影響

穂を筒で被うことにより、筒内の飽差が低下する可能性があり、その影響を評価する必要がある。ファンをつけることにより、飽差の低下を軽減する効果があると考えられ、それが整粒割合の向上に寄与した可能性がある。しかし、その影響も、温度変化に較べれば小さく、通常の条件では無視できる範囲であると考えられる。

6. 設置時の注意

透明筒の材料として、OHPフィルムは十分な昇温効果があり、それ自身で筒状を保つ丈夫さがあり、軽いのでグラスファイバーの支柱により容易に設置できる。また、グラスファイバーの支柱は柔軟で、土壤に挿しただけで多少の風では倒れず、さらに風によりイネの茎と同様にしなるため、穂首部を破損することも少ない。この装置は出穂後に穂に被せるが、設置後も稈の伸長が止まるまでは、位置の調節が必要である。筒内の温度は、上に行くにしたがって上昇するので、筒内の穂の位置を一定にするように調節することが重要である。また、日印交雑系統のように、止葉の葉鞘から穂が完全に抽出しない系統では、葉鞘を痛めないよう注意が必要である。支柱と黒セルスポンジは、日陰にならないよう、穂の北側に設置する必要がある。

本方法では、グロースチャンバー等のように、面積による制限が無い場合、多数の個体の選抜を行うことが可能である。しかしその場合、多数の筒を用意して、穂ごとに注意して設置する必要がある。先述のビニルハウス(小牧ら2002, 永畠・黒田2004)や温水掛け流し(重山ら1999, 石崎2006)等の、一括して処理できる方法に較べて煩雑で、労力が必要である。それよりもむしろ、個体数が少ない、あるいは分離個体であるために反復がとれない場合にも選抜が可能なのがこの方法の最大の利点である。これに加えて、この方法は、他の高温処理法と併用が可能であり、地温や葉温を変えた処理の中で、更に穂温を変化させるような処理が可能である。また、軽量で持ち運びが可能であり、設置が簡便なため、気象条件や土壌条件が異なる現地圃場等に設置する等様々な場面に応用が可能である。ただし、グロースチャンバー内で使用する場合には、光源からの距離が変化すると、光の強さが大きく変化し、それが温度上昇に敏感に作用するため、筒部での光強度が一定となる位置を、光センサーを用いて選ぶ必要がある。圃場では、穂の高さによる光強度の差は問題無いが、筒の下部が日陰にならないよう注意する必要がある。

この方法では、一株から選んだ穂の間で相対比較するので、穂の選び方が重要であり、出穂日や節位、穂の大きさ等が似たものを慎重に選ぶ必要がある。屋外で太陽光を用いて昇温する選抜法にはすべて当てはまるが、出穂日が大きく異なる場合、特に穂温への感受性が高い時期の天候が異なる場合には、温度上昇幅が異なるため比較は出来ない。逆に、天候が安定していて、気温や日射量の変化が小さい場合には、出穂期が多少異なってもある程度の比較は可能である。出穂日が異なることが予想される場合には、播種・移植日を変えた材料を用意しておくことが望まれる。また、1個体の中での相対比較なので、比較的個体間差の影響を受けにくい、個体間により高温耐性も変動する可能性があるため、反復を取った方が良いことは当然である。分離個体の場合には、後代の検定が必須である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、中央農業総合研究セン

ター業務第4科の玄蕃徳也氏, 弓名持忍氏, および稲収量性研究北陸サブチームの野崎恵子氏, 林節子氏, 高津戸貴以子氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 千葉雅大・松村修 2005. 穂の遮光処理が米粒の外観品質に与える影響について. 北陸作報 41(別): 9.
- 千葉雅大・松村修 2006. 風の遮断による圃場高温処理法. 日作紀 75(別 1): 228-229.
- 福井清美・桑原浩和・佐藤光徳 2004. 水稻品種系統の高温登熟性について. 九州農業研究 66: 16.
- 飯田彦彦・横田国夫・桐原俊明・須賀立夫 2002. 温室と高温年の圃場で栽培した水稻における玄米品質低下程度の比較. 日作紀 71: 174-177.
- 石崎和彦 2006. 水稻の高温登熟性に関する検定方法の評価と基準品種の選定. 日作紀 75: 502-506.
- 重山博信・伊藤喜美子・阿部聖一・小林和幸・平尾賢一・松井崇晃・星豊一 1999. 新潟県における水稻品種の品質・食味の向上 第16報 水稻の高温水かんがいによる高温登熟性の検定. 北陸作報 34: 21-23.
- 気象庁 2010. 過去の気象データ検索 <http://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php> (2010/1/27閲覧).
- 小牧有三・笹原英樹・上原泰樹 2002. ビニルハウスによる高温登熟条件下での登熟に関する早生水稻の品種間差. 北陸作報 37: 12-16.
- 近藤始彦・石丸努・三王裕見子・梅本貴之 2005. イネの高温登熟研究の今後の方向. 農業技術 60: 462-470.
- 松村修 2005. 高温登熟による米の品質被害 - その背景と対策 -. 農業技術 60: 437-441.
- 森田敏・白土宏之・高梨純一・藤田耕之輔 2002. 高温が水稻の登熟に及ぼす影響 - 高夜温と高昼温の影響の違いの解析 -. 日作紀 71: 102-109.
- 森田敏・白土宏之・高梨純一・藤田耕之輔 2004. 高温が水稻の登熟に及ぼす影響 - 穂・茎葉別の高夜温・高昼温処理による解析 -. 日作紀 73: 77-83.
- 森田敏 2008. イネの高温登熟障害の克服に向けて. 日作紀 77: 1-12.
- 永島秀樹・黒田晃 2004. 高温処理が早生水稻の白未熟粒発生および関連形質に与える影響. 北陸作報 39: 81-84.
- 永島秀樹・山元皓二 2005. 温度勾配ビニルハウスを用いた水稻の高温登熟性の評価. 育種学研究 7: 95-101.
- 長戸一雄・江幡守衛 1960. 登熟期の気温が水稻の稔実に及ぼす影響. 日作紀 28: 275-278.
- 表野元保・小島洋一郎・蛭谷武志・山口琢也・向野尚幸・山本良孝 2003. 人工的高温条件下における水稻の登熟性検定法. 北陸作報 38: 12-14.
- 表野元保・蛭谷武志・山口琢也・宝田研・向野尚幸・山本良孝 2004. 人工的高温条件下における水稻の登熟性検定法 第2報 効率的高温処理期間の検討. 北陸作報 40: 24-27.
- 高橋渉 2006. 気候温暖化条件下におけるコシヒカリの白未熟粒発生軽減技術. 農及園 81: 1012-1018.
- Tashiro, T. and I.F. Wardlaw 1991a. The effect of high temperature on the accumulation of dry matter, carbon and nitrogen in the kernel of rice. Aust. J. Plant Physiol. 18: 259-265.
- Tashiro, T. and I.F. Wardlaw 1991 b. The effect of high temperature on kernel dimensions and the type and occurrence of kernel damage in rice. Aust. J. Agric. Res. 42: 485-496.
- 寺島一男・齋藤祐幸・酒井長雄・渡部富男・尾形武文・秋田重誠 2001. 1999年の夏期高温が水稻の登熟と米品質に及ぼした影響. 日作紀 70: 449-458.
- 山川智大・神田幸英 2003. 水稻高温耐性検定方法の改良と基準品種選定. 日作紀 72(別 1): 100-101.

A Simple Equipment to Screen the Rice Strains Tolerant to High Temperature in the Ripening Processes : Tomio TERAO, Masahiro CHIBA and Tatsuro HIROSE (*Natl. Agr. Res. Cent., Hokuriku Res. Cent., Joetsu 943-0193, Japan*)

Abstract : A simple equipment that rises the panicle temperature of rice in the daytime was developed to screen the strains of rice that were tolerant to high temperatures during the ripening stage. High temperature stress at the ripening stage is the main cause of chalky grains and hence degrades the grain quality. Fitting a clear plastic film tube made with OHP film (3 M, PP2500) around the panicle increased the spikelet temperature by around 0.8°C without any effect on leaf photosynthesis. Attaching a black rubber sponge with a 2 cm width and 5 mm thickness inside the tube further raised the temperature by more than 2°C. The higher the spikelet temperature, the higher was the percentages of chalky grains. Although a slight lowering of night temperature (about 0.15°C) by setting this equipment was observed, its effect on the occurrence of chalky grains seemed to be negligible. Evaluation of standard cultivars with different high temperature ripening tolerance indicated that the result of evaluation by this method well matched that by other evaluation methods. This method makes it possible to evaluate high temperature tolerance with only a single plant, which consequently makes it possible to evaluate the tolerance of segregating populations, although progeny testing might be necessary. Accordingly, it might be useful for the genetic analysis of the high temperature tolerance.

Key words : Chalky grains, Global warming, High temperature ripening, High temperature treatment, Screening methods, Rice (*Oryza sativa* L.).