



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	「田んぼの稲が白いご飯になるまで」：第3回：自然の寒さを利用した粳の超低温貯蔵
Author(s)	川村，周三；竹倉，憲弘
Citation	精米工業，224，10-15
Issue Date	2007-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/71290
Type	journal article
File Information	Ka2007-3 momi.pdf



連載：「田んぼの稲が白いご飯になるまで」

—第3回：自然の寒さを利用した粳の超低温貯蔵—

北海道大学 農学研究院 食品加工工学研究室

川村 周三

中央農業総合研究センター バイオマス資源循環研究チーム

竹倉 憲弘

キーワード：カントリーエレベータ、氷点下、自然低温エネルギー、品質、食味

1. わが国の米の貯蔵

(1) 玄米貯蔵

わが国では古くから玄米貯蔵、玄米流通が一般的に行われている。玄米貯蔵は、粳を収穫後に乾燥し、ただちに粳摺して玄米を紙袋や樹脂袋に入れて農業倉庫などに貯蔵する。

玄米貯蔵には、常温貯蔵と低温貯蔵とがある。常温貯蔵では、倉庫内の温度制御をおこなわずに玄米を貯蔵する。そのため、春から夏にかけて外気温度が上昇すると庫内温度が高くなり、害虫（コクゾウムシやコクガ）が発生する。害虫が発生すると、必要に応じてポストハーベスト農薬（殺虫剤）を使用することもある。常温貯蔵では害虫や温度上昇のために米の品質劣化が大きい。これに対し低温貯蔵では冷却装置を使い年間通して倉庫内温度を15℃以下に保つ。そのおかげで、害虫の発生や米の品質劣化を抑えることができる。全国各地にある玄米の低温貯蔵倉庫は年々増加しており、最近では玄米低温倉庫の貯蔵能力は748万tとなっている。

(2) 粳貯蔵

玄米ではなく粳で貯蔵をおこなうと、粳殻が玄米を物理的・生物的に保護するため、害虫や微生物の侵入を防ぎ、米の生理活性を抑制する。そのため、粳貯蔵は玄米貯蔵に比べて品質保持効果が高い。そこで近年は粳貯蔵を行うカントリーエレベータが全国的に増加している。国内の粳貯蔵能力は225万トンであるが、玄米貯蔵に比較すると粳貯蔵の割合は少ない。

(3) 氷点下での米の貯蔵（超低温貯蔵）

玄米を-15℃で貯蔵する基礎試験をおこない、氷点下での米の貯蔵が低温貯蔵よりさらに高い品質を保持できることを明らかにした。そこで氷点下で米を貯蔵することを超低温貯蔵と呼ぶこととした。超低温貯蔵は従来から行われている低温貯蔵よりも低い温度で米を貯蔵することから名付けた。

ところが、実用規模のサイロや貯蔵庫では外気温度の季節変化がある。そのため米の温度を常に氷点下に保つことは、貯蔵コストを考慮すると、実用的ではないと思われた。そこで、実用レベルにおける米の超低温貯蔵として、「貯蔵期間中の穀温が1ヵ月以上氷点下である貯蔵方式」と定義した。

(4) 北海道の粳貯蔵

北海道では1965年と1971年にカントリーエレベータが2ヵ所に建設された。しかし当時は、①貯蔵前の粳の精選別技術が確立されておらず、また②貯蔵中のサイロ内空間での結露防止技術が未熟であり、さらに③貯蔵後の粳摺時において穀温の低い粳に対応する技術が不十分であったなどの理由により、やがて数年で粳貯蔵をおこなうことを取りやめた。それ以後、北海道のような寒冷地においてはカントリーエレベータでの粳貯蔵は不適切であるとされてきた。

一方、1995年に食糧管理法が廃止され、新たに新食糧法が施行された。そこで北海道では、米の乾燥調製貯蔵出荷作業の合理化と均質大ロットでかつ高品質な北海道産銘柄米の確立を目指して大規模なカントリーエレベータの建設に着手した。そして1996年秋に北海

道上川郡鷹栖町に、当時としては北海道で唯一のカントリーエレベータ（上川ライスターミナル）が竣工し、本格的な粳貯蔵が開始された。

2. 粳の超低温貯蔵の開発

(1) 超低温貯蔵の実用化試験

1996年に上川ライスターミナルが完成した時点では、氷点下で粳を貯蔵する技術は実用化されていなかった。その最大の理由は、粳を氷点下で貯蔵するためには冷却装置の設備費や運転経費がかさむ、と予想されたためである。ところが、北海道のような寒冷地では冬の自然の寒さを粳の冷却に利用することができるため、超低温貯蔵が実用的に可能であると考えた。

すなわち、北海道のような寒冷地の特徴を最大限に生かした低コスト省エネルギーで高品質な粳貯蔵をおこなう新技術を確立することを目的に、上川ライスターミナルの建設に合わせて1996年から1998年に超低温貯蔵を実用化するための実証試験をおこなった。さらに新たに建設された雨竜町ライスコンビナート(図1)で1999年から2000年にかけて再度実証試験をおこない、その有効性を確認した。

(2) 貯蔵条件

上川ライスターミナルのサイロを用いて、きらら397の粳378 tを貯蔵した。貯蔵期間は1997年11月から1998年8月までの約9ヵ月間であった。1998年2月2日から2月10日の間に、 -5°C 以下の外気を断続的に

延べ113時間サイロへ通風した。

雨竜町ライスコンビナートでは、きらら397の粳500 tとほしのゆめの粳494 tをそれぞれサイロに貯蔵した。貯蔵期間は1999年11月下旬から2000年7月中旬までの約8ヵ月間であった。2000年1月20日から1月27日の間に、 -7°C 以下の外気を断続的に延べ91時間サイロへ通風した。サイロへの通風は2基同時におこなった。

いずれの貯蔵試験においても、サイロ貯蔵と並行して比較対照のために -5°C 貯蔵（冷凍庫）、低温貯蔵（サイロの近隣にある低温倉庫）、室温貯蔵（大学の実験室）の3条件でそれぞれ約20kgの粳を貯蔵した。

(3) 貯蔵中の温度

図2に1997年から1998年の貯蔵中の粳温度を示した。貯蔵中の外気温度は、最低で -21°C まで低下した。日最低気温が氷点下であったのは、11月下旬から4月上旬にかけての5ヵ月あまりであった。

11月から2月にかけてサイロ内壁付近の粳の穀温は、自然放冷により低下した。しかし、サイロ中心部の粳の穀温は貯蔵開始時とほぼ同じであった。2月上旬にサイロ内へ -5°C 以下の外気を通風することによって、サイロ内すべての粳の穀温が氷点下になった。最低穀温は、2月上旬に内壁付近が約 -7°C であった。サイロ中心部の粳の穀温は、7月中旬まで氷点下であった。サイロ内すべての粳の穀温が氷点下であった期間は、2月上旬から3月下旬にかけての約1.5ヵ月間であっ

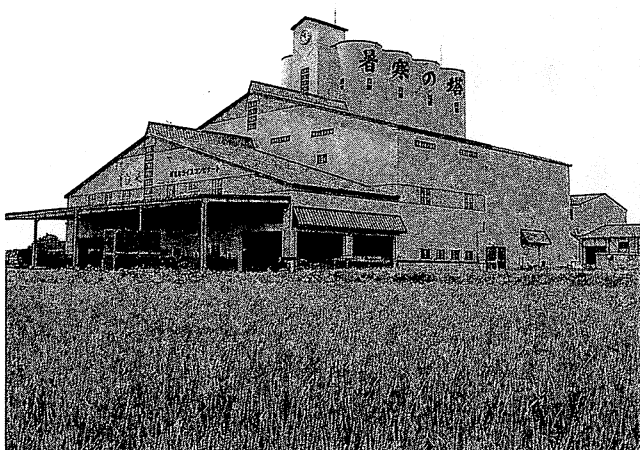


図1 カントリーエレベータ（雨竜町ライスコンビナート、計画粳処理量：8,200 t、粳貯蔵能力：5,760 t）

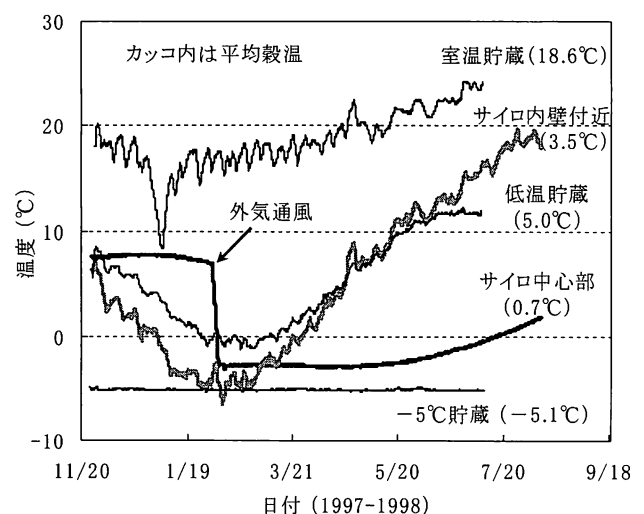


図2 貯蔵中の粳温度の変化と平均粳温度

た。すなわち、自然の寒さを籾の冷却に利用することにより実用的に超低温貯蔵（氷点下での米の貯蔵）が可能であることが実証された。

対照貯蔵の室温貯蔵では穀温は概ね15℃以上であり、7月上旬には約25℃にまで上昇した。低温貯蔵の穀温は最低で-1℃程度であり、夏季に庫内温度が高くなると冷却装置が作動して、穀温は12℃程度に保たれた。貯蔵中の平均穀温は、サイロ貯蔵のサイロ中心部が0.7℃、内壁付近が3.5℃、-5℃貯蔵が-5.1℃、低温貯蔵が5.0℃、室温貯蔵が18.6℃であった。

(4) サイロ内の温度差が品質に与える影響

図2に示したように、冬季の寒冷外気の通風によりサイロ全体の穀温は氷点下となり、その後は籾を静置するだけで、サイロ中心部の穀温は7月中旬まで氷点下に保たれた。しかしサイロ内壁付近の穀温は、3月下旬までは氷点下に保たれるが、その後は外気温の影響により徐々に上昇し、7月中旬には20℃近くとなった。このサイロ内壁近付の穀温上昇が籾の品質に悪影響を与えている懸念があった。そこで、貯蔵終了直前にサイロ内各部から試料を採取し、品質を測定した。試料はサイロ中心部とサイロの東西南北の内壁から約15cm内側の位置で、籾堆積表面から深さ0.1m、0.5m、1.0m、2.0m、4.0mの位置の籾をそれぞれ採取した。

サイロ内各部から採取した試料の発芽率を図3に示した。発芽率は籾の種子としての生命力を測定した値であり、米の鮮度を示す指標ともなる。発芽率が高いと新米と同様な品質の良い状態であることを示している。発芽率はいずれの試料も高く、平均で98.3%であり、新米と同様な発芽率であった。

サイロ内各部から採取した試料の脂肪酸度を図4に示した。脂肪酸度は米の脂質が酵素リパーゼにより加水分解されて生成する遊離脂肪酸の量を測定した値である。米の主成分の中でデンプンやタンパク質に比較して脂質の加水分解が最も早く進み脂肪酸が増加するため、脂肪酸度が品質劣化の指標として広く用いられている。脂肪酸度は、いずれの試料も品質上問題となるような大きな増加はなく、平均で13.2mg.KOHであった。

サイロ内壁付近の穀温は、貯蔵終了時の7月下旬で

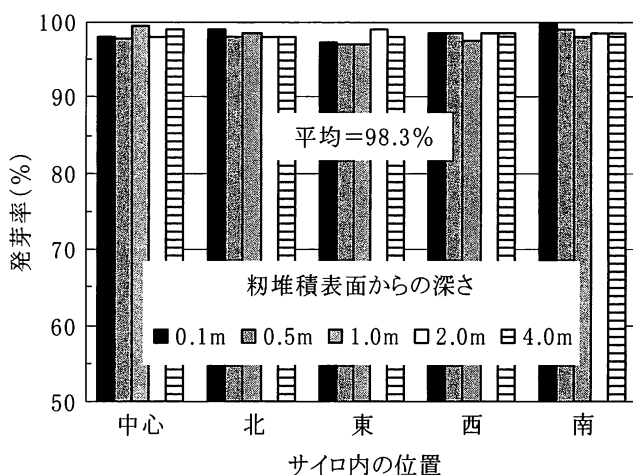


図3 貯蔵終了直前に採取したサイロ内各部試料の発芽率

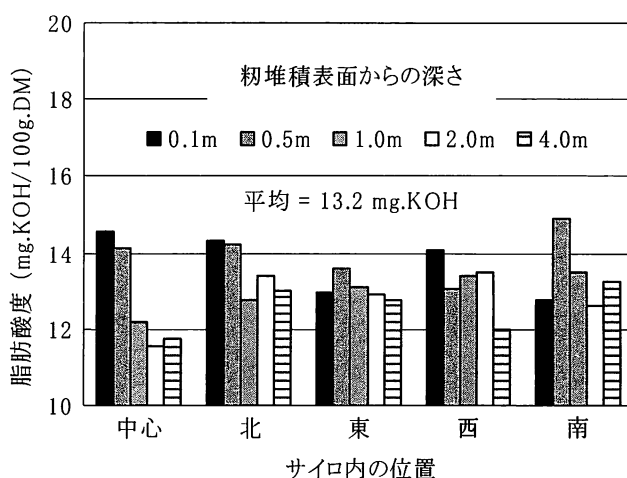


図4 貯蔵終了直前に採取したサイロ内各部試料の脂肪酸度

は20℃程度であるが、冬季は約3ヵ月間氷点下であり、貯蔵期間中の内壁付近の平均穀温は3.5℃と低かった。その結果、サイロ内壁付近の籾の大きな品質劣化はなかったと考えられる。

(5) 貯蔵前後の品質

図5に貯蔵前後の各試料の発芽率を示した。貯蔵前の発芽率は96%であった。貯蔵後の発芽率は-5℃貯蔵が最も高く、次にサイロ貯蔵と低温貯蔵が高く、いずれも貯蔵前の発芽率とほぼ同じく93%以上であり、新米と同様な品質が保持されていた。一方、室温貯蔵の発芽率は大きく低下し、10%となった。

図6に貯蔵前後の各試料の脂肪酸度を示した。脂肪酸度は貯蔵後にいずれの試料も増加したが、-5℃貯蔵が最も増加が抑制されており、次にサイロ貯蔵、低

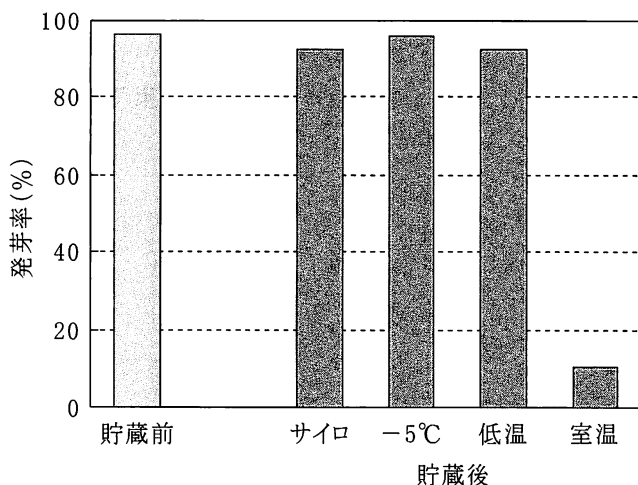


図5 貯蔵前後の発芽率

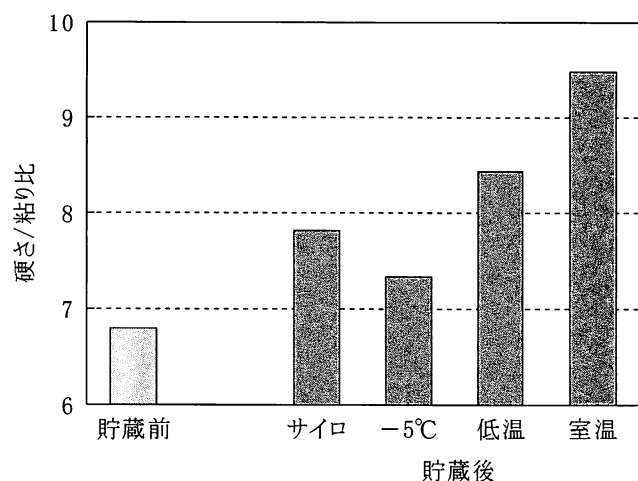


図7 貯蔵前後のテクスチャログラム特性

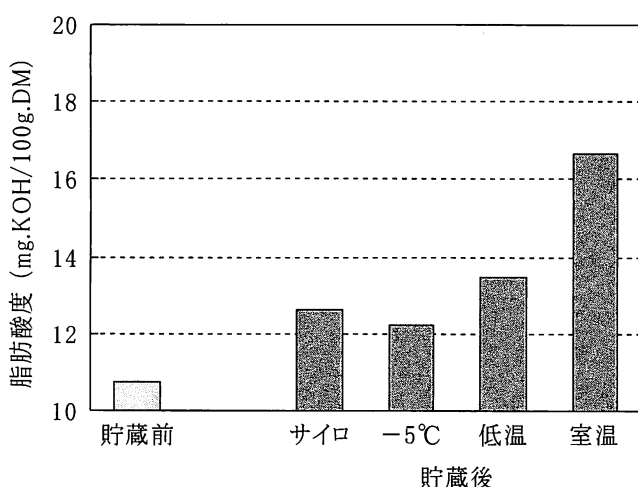


図6 貯蔵前後の脂肪酸度

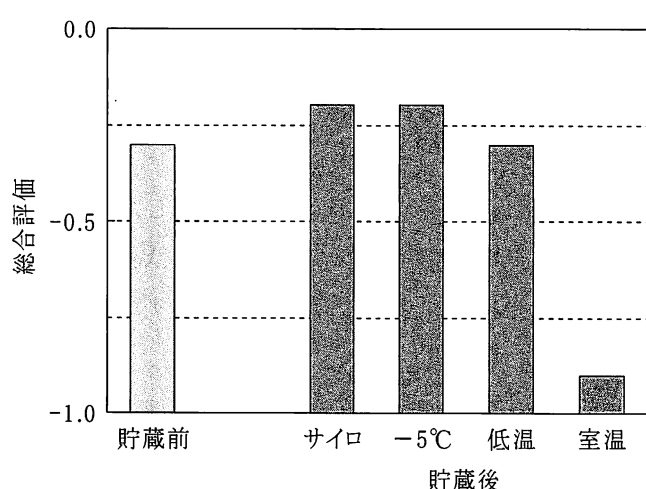


図8 貯蔵前後の食味試験の総合評価

温貯蔵と増加が大きく、室温貯蔵の増加が著しかった。

一般に、貯蔵により古米化が進むと米飯の硬さが増加し、粘りが減少する。したがって、テクスチャログラム特性の硬さ/粘り比が低いほど貯蔵状態が良いと判断される。図7から貯蔵温度が低いほど硬さ/粘り比が低く、古米化が抑制された。

食味試験の総合評価は、貯蔵前に比較してサイロ貯蔵と-5℃貯蔵でわずかに良くなり、室温貯蔵では総合評価が大きく低下した(図8)。通常、米の食味が貯蔵後に良くなることはない。この試験でサイロ貯蔵と-5℃貯蔵の総合評価が貯蔵前に比べて、わずかながらも良くなったのは以下の理由による。

食味試験は、滋賀県産の日本晴を基準米として相对比较法でおこなった。貯蔵前の食味試験で基準米とした日本晴を冷蔵庫(3℃~5℃)に玄米で貯蔵し、貯

蔵後の基準米とした。基準米も貯蔵中に品質が低下する。サイロ貯蔵と-5℃貯蔵では貯蔵中の平均温度が冷蔵庫よりも低く、かつ粳貯蔵であったため、貯蔵中の品質低下が基準米よりも抑制された。その結果、貯蔵後の総合評価が貯蔵前よりも相対的に良くなった。これは超低温貯蔵による食味の相対的向上である。

(6) 米の最適な貯蔵温度

図9に、米の貯蔵中の平均温度と貯蔵後品質との関係を表す概念図を示した。米は稲の種子として貯蔵中も生きている。米を低温で貯蔵すると米自身の生理活性や酵素活性が抑制され、貯蔵中の品質劣化も抑えられ、新米に近い食味を保持できる。すなわち、貯蔵中の温度が低ければ低いほど、米は高品質保持が可能である。

温暖地での米の貯蔵は、低温貯蔵であっても貯蔵中

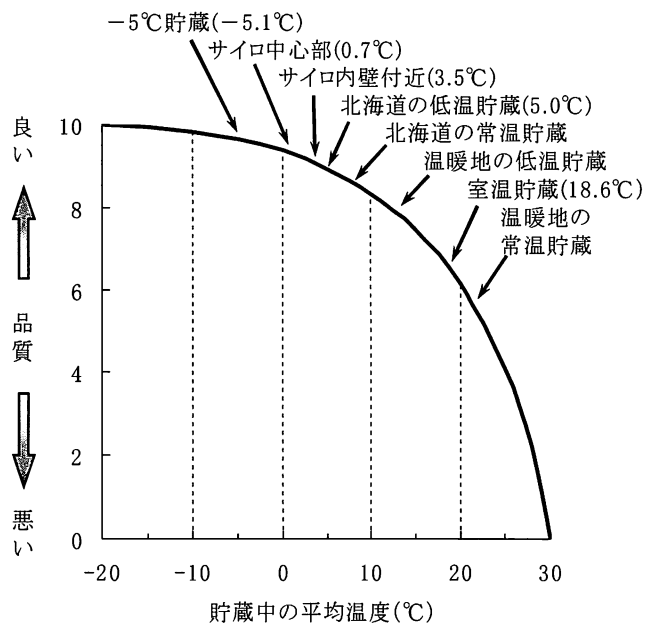


図9 米の貯蔵中の平均温度と貯蔵後品質との関係 (概念図)

平均温度は10℃以上となる場合が多い。したがって、温暖地で貯蔵した米に比べて寒冷地で超低温貯蔵した米は、春から夏にかけて品質の低下がわずかであり、相対的に食味が向上する。

3. 自然の寒さを利用した籾の超低温貯蔵の特徴

米の貯蔵温度は低ければ低いほど良い。しかしながら、米の温度を低下させるために冷却設備と電気エネルギーを使うと貯蔵コストが増加するので、実用的には望ましくない。一方、北海道のような寒冷地では、冬季の寒冷外気という自然低温エネルギーを利用することにより米を氷点下で冷却することが可能である。

この貯蔵技術は、冷却設備や冷却のための電気エネルギーを必要としない。そのうえ、貯蔵温度が低いと貯蔵中の殺虫剤なども不要であり、品質保持効果が高い。すなわち、これは寒冷地の自然環境を有効に利用し、低コスト省エネルギーで高品質米を供給する貯蔵技術である。

わが国の米の主産地は北海道、東北、北陸地域である。これらの地域は冬の気温が氷点下になることが多い。超低温貯蔵はこのような自然環境を有効に活用した貯蔵技術である。北海道では1996年以降、籾貯蔵施設の建設が進み、2007年には籾貯蔵施設は28ヵ所とな

り、その籾貯蔵能力は約12万tとなった。

4. なぜ冬に籾を冷やただけで夏まで氷点下の温度に保てるのか？

自然の寒さを利用した籾の超低温貯蔵では、1月または2月に100時間前後の時間をかけてサイロ全体の籾温度を氷点下で冷却する。その後は、サイロ内に籾を静置しておくだけで、何もしないで夏までサイロ中心部の温度を氷点下に保つことができる。なぜ冬に籾を冷やただけで夏まで氷点下の温度に保てるのか？その理由は籾の比熱と熱伝導率にある。

貯蔵する籾（水分15～16%程度の籾）の比熱は1.5～2.0 kJ/kg/Kである。これは木材の1.3 kJ/kg/Kやコンクリートの0.8 kJ/kg/K、鉄の0.5 kJ/kg/Kなどと比較して大きい。そのため、籾はいったん冷却されると籾そのものが保冷材の役割を果たす。また、籾の熱伝導率は0.07～0.10 W/m/Kである。これは鉄の80 W/m/Kやコンクリートの1 W/m/Kなどと比較して小さく、木材の0.15 W/m/Kやポリスチレンの0.1 W/m/K、グラスウールの0.04 W/m/Kなどと同程度の熱伝導率である。そのため、籾そのものが断熱材の性質を持つ。

このように比熱が大きくて熱伝導率が低い（保冷材であり断熱材である）という籾の物理特性により、いったん冬に氷点下まで冷却された籾の穀温がそのまま夏まで低く保たれ、実用規模のサイロ貯蔵において超低温貯蔵が可能となったものである。

5. なぜ米は氷点下でも凍らないのか？

新鮮な青果物の水分はおよそ80%以上であり、0℃～-2℃程度で凍結する。青果物が凍結すると氷結晶が細胞を破壊するため、青果物としての品質が大きく損なわれる。

米はいったい何℃で凍るのか？そこで、籾の水分と凍結温度および凍結傷害との関係を明らかにするために、水分が異なる籾を調整して示差走査熱量分析により凍結温度を測定した。図10に籾の水分と凍結温度との関係を示した。水分が26.5%の籾は-15～-25℃程度で凍結した。水分が22.1%の籾は-35℃程度で凍結

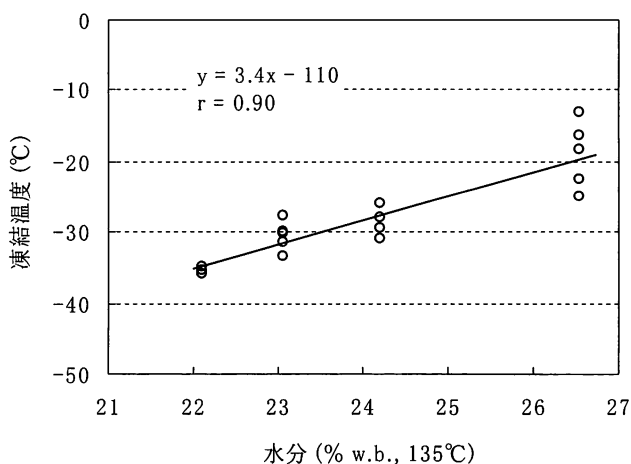


図10 粃の水分と凍結温度 (示差走査熱量分析)

した。水分20%以下の粃は、 -55°C (測定装置の下限温度) まで冷却しても凍結せず、凍結温度は測定できなかった。

米は稲の種子である。一般に種子が凍結すると凍結傷害が発生し発芽能力を失う。そこで水分を調整した粃を、 $2.5\sim-80^{\circ}\text{C}$ の温度でそれぞれ11日間冷却し、その後の発芽率を測定することにより凍結傷害の有無を調べた。図11に示すように、水分が26.5%の粃を -19°C 以下に冷却すると発芽率が0%となり、凍結傷害が発生したことを示した。一方、水分が17.8%以下の粃は -80°C に冷却した場合でも発芽率が低下しなかった。すなわち、水分17.8%以下の粃は -80°C においても凍結傷害は発生しないことが明らかとなった。

収穫時の粃の水分は、天候や収穫時期に左右されるが、およそ25~30%程度である。収穫後の粃はただち

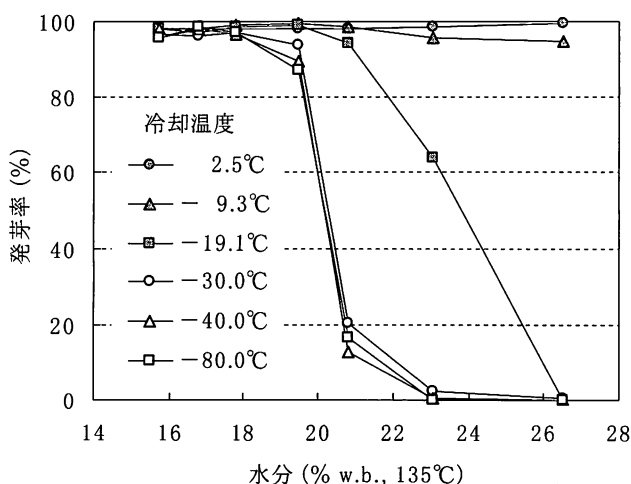


図11 水分の異なる粃を11日間冷却した後の発芽率 (凍結傷害)

に乾燥され、貯蔵を行う際の粃水分は15~16%程度である。したがって、乾燥後の粃は水分が低い (氷結晶となる自由水がない) ために -80°C でも凍ることはない。

参考文献

- 川村周三, 夏賀元康, 河野慎一, 谷口健雄, 藤倉潤治. 1996. 北海道産米の品質向上を目指してーポストハーベストテクノロジーの新しい試みとその応用ー. 農機北支報, 36, 65-71.
- 川村周三, 小河健伸, 藤川清三, 竹倉憲弘, 伊藤和彦. 2003. 水分が異なる粃の凍結温度および凍結傷害. 低温生工誌, 49(2), 97-102.
- 竹倉憲弘, 川村周三, 伊藤和彦. 2003. 寒冷地における粃貯蔵技術の確立 第1報カントリーエレベータでの自然放冷による粃貯蔵. 農機誌, 65(4), 57-64.
- 竹倉憲弘, 川村周三, 伊藤和彦. 2003. 寒冷地における粃貯蔵技術の確立 第2報カントリーエレベータでの冬季通風冷却による超低温貯蔵. 農機誌, 65(4), 65-70.
- 竹倉憲弘, 川村周三, 伊藤和彦. 2003. 寒冷地における粃貯蔵技術の確立 第3報カントリーエレベータで貯蔵した粃の品質. 農機誌, 65(5), 40-47.
- 竹倉憲弘, 川村周三, 伊藤和彦. 2003. 寒冷地における粃貯蔵技術の確立 第4報貯蔵中の粃の穀温差が品質に与える影響. 農機誌, 65(5), 48-54.
- Kawamura, S., K. Takekura, K. Itoh. 2004. Development of an on-farm rice storage technique using fresh chilly air and preservation of high-quality rice (寒冷外気を利用した米の貯蔵技術の開発と高品質保持). Proceedings of the World Rice Research Conference, Tsukuba, Japan. CD-ROM, ISBN: 971-22-0204-6, 310-312.
- 川村周三, 稲津脩, 夏賀元康, 竹倉憲弘. 2005. 特集: 高品質米の生産技術. 農機誌, 67(1), 3-23.
- 川村周三. 2006. 農業技術体系, 作物編, イネ (基本技術編), 冬の寒さを活用した高品質貯蔵技術. 農山漁村文化協会, 第2-①巻, 追録28号, 402, 177, 10-19.
- 川村周三, 夏賀元康. 田んぼの稲が白いご飯になるまでー粃の自動品質検査ー. 精米工業, 222, 10-14, 2007.
- 川村周三, 竹倉憲弘. 田んぼの稲が白いご飯になるまでー貯蔵のための粃の精選別ー. 精米工業, 223, 9-12, 2007.