



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	寒冷地における籾貯蔵技術の確立（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
Author(s)	竹倉，憲弘；川村，周三；伊藤，和彦
Citation	農業機械学会誌, 65(4), 65-70 https://doi.org/10.11357/jsam1937.65.4_65
Issue Date	2003
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70949
Rights	© 農業機械学会
Type	journal article
File Information	65_65.pdf



寒冷地における粳貯蔵技術の確立 (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 ——

竹倉憲弘*¹・川村周三*¹・伊藤和彦*¹

要 旨

サイロ全体の粳の穀温を氷点下に低下させてカントリーエレベータで超低温貯蔵を行うことを目的として、冬季通風冷却による粳の貯蔵試験を行った。その結果、冬季に通風冷却を行うことにより、サイロ内の粳の穀温はすべて氷点下となり、実用規模のサイロ貯蔵において超低温貯蔵が可能であることが実証された。また、低温の粳をサイロから排出する際に、乾燥機で常温通風して穀温を上昇させて玄米の胴割発生を防止する技術を確立した。

〔キーワード〕 寒冷気候, 自然エネルギー, 粳貯蔵, 超低温貯蔵, カントリーエレベータ, サイロ, 穀温, 水分, 胴割, 昇温工程

Development of Techniques for Storing Rough Rice in Cold Regions (Part 2)*

—— Super-low-temperature Storage at Country Elevator by Aeration
with Fresh Chilly Air in Winter ——

Kazuhiro TAKEKURA*¹, Shuso KAWAMURA*¹, Kazuhiko ITOH*¹

Abstract

An on-farm experiment in which 378 metric tons of rough rice was stored in a silo from November until August and aerated for 114 h with fresh chilly air in winter was conducted at a country elevator in Hokkaido to develop new techniques for storing rice in cold regions. The overall temperature of the rough rice in the silo decreased to below ice point (minimum temperature of -6.6°C), and the temperature of rough rice in the center of the silo remained below ice point until summer. The rewarming process using an unheated forced-air drier after storage prevented the development of fissures in the brown rice. The results of the experiment indicate that aeration with fresh chilly air in winter enables rough rice in a farm-scale silo to be stored at a temperature below ice point, i.e., super-low-temperature storage.

[Keywords] cold climate, natural energy, storage of rough rice, super-low-temperature storage, country elevator, silo, grain temperature, moisture content, fissure, rewarming process

I 緒 言

寒冷地における粳貯蔵技術の確立を目標として、前報 (Takekura et al., 2003) では、カントリーエレベータのサイロで自然放冷による粳貯蔵を行った。その結果、サイロ内壁付近の粳は自然放冷により冷却され、穀温が氷点下となることを明らかにした。しかし、サイロ中心部

の穀温はわずかに低下したのみであり、氷点下とはならなかった。

氷点下で米を貯蔵する超低温貯蔵は、従来の低温貯蔵より品質保持効果が高いことが基礎試験により明らかになっている (Kawamura, 1996; Kawamura et al., 1997)。そこで、冬季に低温の外気を積極的にサイロ内に通風して粳を氷点下に冷却することを考えた。サイロへ

* 1999年4月 第58回農業機械学会年次大会 (佐賀大学) にて一部講演

*1 会員, 北海道大学大学院農学研究科 (〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目 TEL 011-706-2558)

Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8589 Japan

通風して貯蔵中の穀物を冷却する研究は、過去にいくつか行われている (Zen-noh, 1973 ; Takagi, 1986 ; Nabeshima et al., 1997)。これらの研究では冷却装置が用いられており、コストを抑えるために穀温が 15℃ 以上の場合のみ通風を行っている。しかしながら、本試験で試みる通風冷却は冬季の寒冷な空気という自然エネルギーを利用するものであり、冷却装置は必要としない。すなわち、前報の自然放冷による籾貯蔵に対して、本報では超低温貯蔵を実用施設で実現することを目的に、寒冷外気を用いた通風冷却を行い積極的に籾を冷却した。その上で貯蔵中の籾の穀温や水分の変化を調べ、貯蔵後に低温の籾をサイロから排出する際の胴割防止技術について細かく検討を行った。

II 方 法

1. 供試施設

供試施設は前報と同じく、北海道上川郡鷹栖町にある上川ライスターミナルのカントリーエレベータで、サイロ 12 基のうちの南東側の角に位置する 1 基を使用した。本報では施設に設置されている通風設備を利用し、冬季にサイロ内へ外気を通風して貯蔵中の籾の冷却を行った。通風設備は送風機 (ターボファン, 11 kW) が 1 機あり、通風ダクトを通じて各サイロの下部から上部へと通風することができる。通風ダクトのダンパの切り替えにより、通風は各サイロに個別ないし並列に行うことが可能である。

2. 供試試料

1997 年北海道旭川産「きらら 397」の籾 378 t を貯蔵した。

3. 貯蔵期間

サイロへの籾投入は 1997 年 11 月 22 日から 11 月 26 日の間に行い、投入終了後そのまま貯蔵を開始した。サイロからの籾排出は、1998 年 8 月 10 日から 8 月 17 日の間に断続的に行った。したがって、サイロでの貯蔵期間は約 9 カ月間であった。

4. サイロへの籾投入

サイロへの籾投入は、籾の精選別と並行して行った。精選別後に籾をサイロへ投入する際の流量は、約 12 t/h であった。サイロへの投入直前の籾を約 1 時間間隔で採取し、穀温と水分を測定した。なお、水分は炉乾法の 10 g 粒 135℃ 24 時間法で測定して湿量基準で表わした。以下の水分測定法も同様である。

5. サイロでの籾貯蔵

貯蔵中のサイロ中心部と内壁付近 (内壁面から約 10 cm) の穀温およびサイロ内上部空間の温度と湿度、外気や外壁表面など周辺環境の温度を測定した。なお、内壁付近の穀温は前報では東側と西側で測定していたが、東側と西側の穀温の差は小さかったことから、本報の試験では西側のみで測定した。また、貯蔵期間中約 1 カ月に 1 回サイロ内の籾を採取し、水分を測定した。

通風設備を用いたサイロ内への外気通風による籾の冷却は、送風機の入気口付近の温度が -5℃ 以下のときに行うこととした。送風機の運転と停止は自動化されておらず、人手で行った。通風時の静圧と風速を測定し、それより送風量と風量比を算出した。

6. サイロからの籾排出

貯蔵後の穀温の低い籾をそのまま籾摺した場合、周辺空気中の水蒸気が玄米表面に結露し、その結果として胴割が発生する可能性がある。したがって、籾摺前に穀温を上昇させる必要がある。前報では、サイロから排出後の籾を乾燥機に通して常温通風し、籾摺前の穀温を常温に戻した。しかし、排出を続けサイロ内の籾の量が少なくなるにつれて排出直後の籾の穀温が上昇したことから、すべての籾を乾燥機で常温通風する必要はないと考えた。実際の施設では貯蔵後のサイロ排出から籾摺までの工程は簡潔な方が望ましい。そこで、排出直後の籾の穀温によって、以下の 3 種類の昇温工程を行った。

1) 乾燥機を通して常温通風し、一時貯留サイロに投入した後、籾摺する。

2) 一時貯留サイロにローテーションした後、籾摺する。

3) そのまま直接籾摺する。

貯蔵後の籾をサイロから排出する際の流量は、約 30 t/h であった。サイロからの籾排出時には、穀温や水分を測定し、周辺環境の温湿度の測定を行った。また、水分吸着による胴割への影響を調べるために、とくに籾摺前の試料について、整粒 500 粒の胴割率を測定した。

III 結果および考察

1. サイロへの籾投入

(1) 穀 温

投入籾全体の平均穀温は 7.8℃ であった。精選別中の外気温度の変化とともに投入籾の穀温は変動したが、温度差は全体で 5.1℃ であった。

(2) 水 分

投入籾全体の平均水分は 15.9% であった。最高水分と最低水分の差は 0.7%、水分の標準偏差は 0.21% であり、水分差の少ない籾が投入されたことが確認された。

2. サイロでの籾貯蔵

(1) 通風冷却

1998 年 2 月 2 日から 2 月 10 日の期間で断続的にのべ 114 時間、サイロ内へ外気を通風して籾の冷却を行った。通風条件は、静圧が 270 mmAq、サイロ内堆積籾表面での平均風速が 0.022 m/s、送風量が 43.21 m³/min、風量比が 0.114 m³/min/t であった。通風中の穀温と各部の温度を図 1 と図 2 に示した。図 1 の「中心 1」、「中心 2」とはサイロ内中心部に上下方向約 3.2m 間隔で熱電対を取り付けた位置で、下部から順に番号を付けた。通風中はサイロ入気口の温度が送風機の入気口付近の温度より 4℃～5℃ 上昇していた。この温度上昇は、静圧による温

度上昇、送風機の羽根と空気の摩擦熱、軸受やモータの発熱、通風ダクト周囲の空気からの熱移動などによるものである。この温度上昇のうち、静圧による温度上昇は 2.1°C である。通風はサイロ下部から上部へ行った。したがって、通風中サイロ内の粃はサイロ下部から上部へ向かって徐々に冷却された。通風によりサイロ中心部の穀温は、氷点下（ $-0.7^{\circ}\text{C}\sim-4.7^{\circ}\text{C}$ ）となった。本試験を行った施設では、送風機の運転は自動化されていなかった。通風は送風機の入気口付近の温度が -5°C 以下に行うことにしたが、送風機の運転と停止を手で行っているため、図2を見ると外気温度が -5°C 以下のときでも通風を行っていないときがある。送風機の入気口付近の温度を検知し、それにより送風機の運転と停止を自動化すれば、施設の操作者の手間を軽減するだけでなく、よりの確な通風を行うことができるものと考えられる。

(2) 温度

サイロ内中心部と内壁付近の粃の穀温を上下方向にそれぞれ平均し、図3に貯蔵中の粃の穀温として示した。

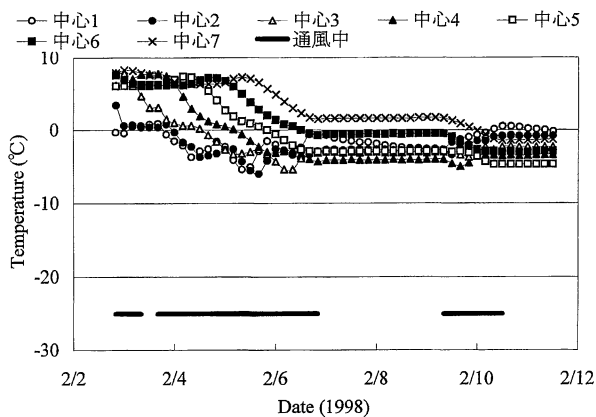


図1 通風中の粃の穀温

Fig. 1 Temperature of rough rice during aeration

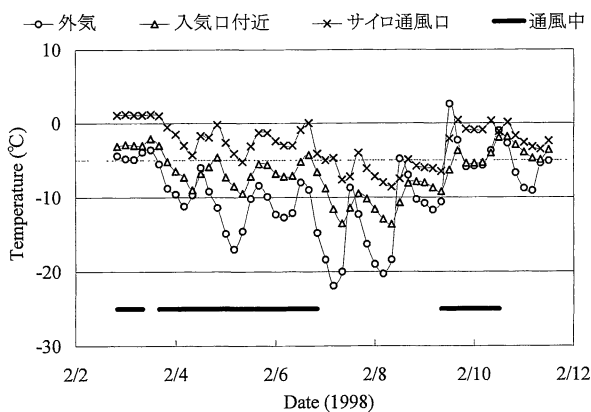


図2 通風中の各部の温度

Fig. 2 Environmental temperature during aeration

また、図4に外気温度を示した。外気温度の日最低値は、貯蔵開始時から4月上旬まで氷点下であった。貯蔵期間中の外気温度の最低値は、2月7日に記録した -21.9°C であった。日最高外気温度は7月中旬以降 30°C を超えることがあり、7月29日に 32.9°C を記録した。

貯蔵開始時の穀温は 8.2°C であった。内壁付近の粃の穀温は、外気温度の低下とともに自然放冷により冷却された。その結果、貯蔵開始から約1カ月後の12月下旬には、内壁付近の穀温は氷点下となった。内壁付近の穀温は、通風冷却中の2月8日に貯蔵期間中最低の -6.6°C まで低下した。内壁付近の穀温は3月下旬まで氷点下に保たれた後、徐々に上昇して貯蔵終了時の8月上旬には 20°C 近くになった。本試験を行った施設のサイロ全体の外周部には、50 mmのポリスチレンフォーム断熱材が施されている。鋼板の熱伝導率を $47.7\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、ポリスチレンフォーム断熱材の熱伝導率を $0.06\text{ W/m}\cdot\text{K}$ として計算したサイロ外壁の熱通過率は $0.85\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ であった。また、断熱材の厚さを100 mmと仮定した場合の熱通過率は $0.50\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ であった。すなわち、断熱材の厚さをさらに厚くすることによって、夏季の内壁付近の穀温上昇はより抑えることができると考える。

中心部の穀温は外気温度低下の影響を受けることなく、通風冷却を行った2月上旬まで貯蔵開始時の穀温から変化なかった。通風冷却により貯蔵中の粃は冷却され、中心部の穀温は氷点下となった。したがって、通風冷却によりサイロ内すべての粃の穀温が氷点下となった。中心部の穀温は氷点下のまま7月中旬まで保たれ、8月上旬の貯蔵終了時には 1.9°C であった。

前報で報告した通風冷却を行わずに自然放冷で行った粃貯蔵の結果では、6月下旬のサイロ中心部の穀温が約 4°C 、内壁付近の穀温が約 20°C であった。通風冷却を行った本報では、同じ6月下旬のサイロ中心部の穀温が約 -1°C 、内壁付近が約 15°C であった。すなわち、通風冷却を行うことにより、自然放冷の場合よりも約 5°C 低

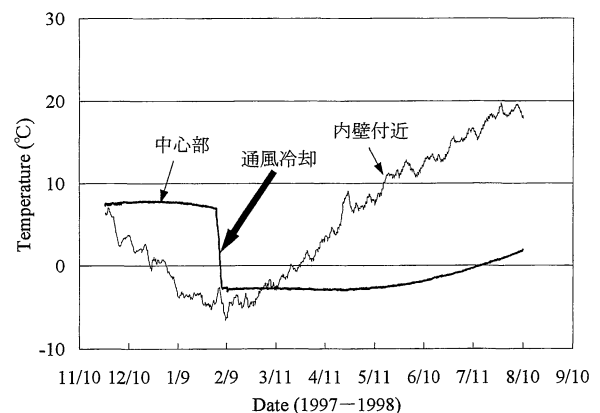


図3 貯蔵中の粃の穀温

Fig. 3 Temperature of rough rice during storage

い温度で籾を貯蔵できたことがわかった。これは、通風冷却によりサイロ内全体の籾が冷却され、外気温度の上昇にともなう穀温の上昇が抑えられたためである。貯蔵中サイロ内のすべての穀温が氷点下であった期間は2月上旬から3月下旬までの約1.5カ月であった。このことは、「貯蔵期間中1カ月以上の期間、穀温が 0°C 以下になる貯蔵方式」という実用レベルにおける超低温貯蔵の定義(Kawamura, 1996)を満たしていた。すなわち、冬季に通風冷却を行うことにより、実用規模のサイロ貯蔵において超低温貯蔵が可能であることが実証された。この通風冷却において利用しているのは、冬季の寒冷な外気という自然エネルギーである。冷却機を使用していないため、かかるコストは送風機を運転するコストのみである。したがって、低コストで穀温を低下させて超低温貯蔵を行うことができる。

水分16%における籾の比熱は $1.5\text{ kJ/kg/K} \sim 2.0\text{ kJ/kg/K}$ である(Morita and Paul Singh, 1979; Yamada, 1984; Murata et al., 1987; Oshita et al., 1992)。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 などと比較しても大きい値である。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 $0.07\text{ W/m/K} \sim 0.10\text{ W/m/K}$ である(Hosokawa and Masumoto, 1971; Seno et al., 1976)。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という籾の物理特性により、いったん氷点下にならで冷却された籾の穀温がそのまま夏季まで保たれ、実用規模のサイロ貯蔵において超低温貯蔵が可能になったものと考えられる。

(3) サイロ内上部空間の湿度

サイロ内上部空間の湿度は、前報の自然放冷の場合と同様な傾向を示した。貯蔵期間中を通して、ほぼ40%~80%であった。この湿度のデータと貯蔵期間中約1カ月に1度の頻度で点検したサイロ内の籾の状態から、サイロ内での結露の発生はないことが確認された。したがって、強制換気設備がサイロ内の結露防止に効果を発揮したことがわかった。

(4) 水分

図5、図6に貯蔵中のサイロ中心部と内壁付近の籾水分の変化を示した。貯蔵中の籾水分の変化は、前報の自然放冷の場合とほぼ同じであった。すなわち、冬季は籾水分に大きな変化がなく、春以降サイロ内上部空間の温度上昇と強制換気設備のファンが作動した影響により、堆積表面の籾水分が減少した。また、内壁付近の穀温の上昇にともない、内壁付近の籾水分が減少した。しかし、中心部の堆積表面から0.5mより深い位置の籾水分の変化は小さかった。また、異常な水分上昇は認められな

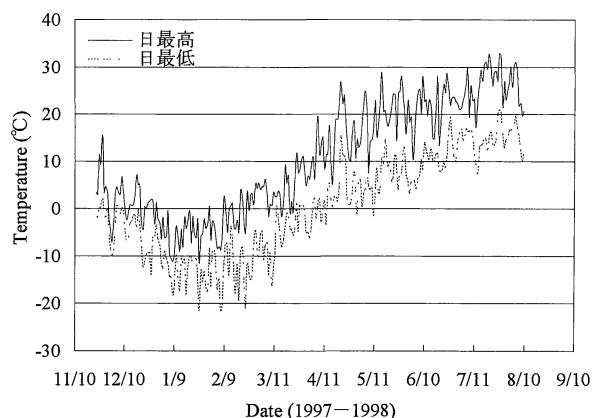


図4 貯蔵中の外気温度

Fig. 4 Ambient temperature during storage

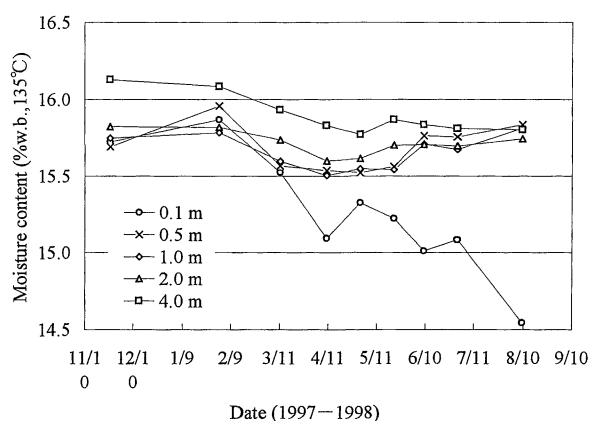


図5 貯蔵中のサイロ中心部の籾水分

Fig. 5 Moisture content of rough rice in the center of silo during storage

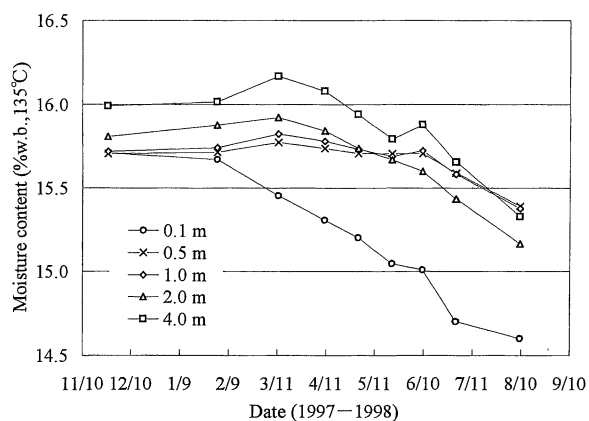


図6 貯蔵中のサイロ内壁付近の籾水分

Fig. 6 Moisture content of rough rice near silo wall during storage

かった。

3. サイロからの籾排出

(1) 温度

図7にサイロ排出から籾摺までの穀温および籾摺機周辺空気の露点温度を示した。サイロからの排出時の穀温は排出を開始した直後がとくに低く、最低で2.5℃であった。籾の排出が進むにともない穀温は上昇し、15℃前後になった。そこで、排出開始直後の穀温が低いときは乾燥機を通して常温通風した後に籾摺した。乾燥機を利用することにより、籾摺前の穀温は通風した空気の温度とほぼ同じとなった。

ローテーションにより、穀温は2℃～3℃上昇した。すなわち、貯蔵サイロから別のサイロへ籾を移動させるローテーションのみでは、そのときの周囲温度にまで籾を昇温させることは困難であることがわかった。ローテーションした後の一時貯留サイロから籾摺機までの工程で、穀温はさらに2℃上昇した。サイロ排出後に直接籾摺した場合、サイロから籾摺機まで籾が移動する間に穀温は2℃～3℃上昇した。

貯蔵後の穀温の低い籾を籾摺するときは、籾摺後の玄米表面に結露を発生させないことが重要である。結露を発生させないためには、籾摺後の玄米の穀温が籾摺機周辺の露点温度より高くなければならない。本研究では籾摺後の玄米の穀温は籾摺機周辺の露点温度よりも高く、したがって結露による問題は発生しなかった。

以上のことから、低温の籾をサイロから排出する際の昇温工程では、穀温が周囲空気の露点温度より低い場合は乾燥機を通して常温通風し、穀温が露点温度とほぼ同じになったら乾燥機を通さず直接籾摺するのが適切であると考ええる。

(2) 水分

図8にサイロからの排出時における排出直後と籾摺前の籾水分を示した。排出開始直後と終了直前の籾水分が、他と比べると1%ほど低かった。これは、サイロへの入気口があるホッパ部の一部の籾水分が通風冷却により低下したと内壁付近の籾水分が低下したことによるものと考えられる。

サイロから排出した籾の平均水分は15.8%であった。投入籾の平均水分は15.9%であり、堆積表面と内壁付近の籾水分は減少したものの、この籾の量がサイロ全体の籾の量に対してわずかであったため、水分減少がサイロ内の籾全体に与える影響は少ないことがわかった。また、通風冷却を行ったことがサイロ内の籾全体の水分に与える影響も少なかった。なお、排出開始直後と終了直前の低い水分の籾は、サイロ全体の籾に比較すると少量であり、かつ排出後の工程で他の籾と混合されるため、玄米出荷時の水分に影響はなかった。

(3) 胴割

貯蔵前の重胴割率は1.0%であった。籾摺前の重胴割率は、乾燥機で通風を行った場合が1.2%、ローテーショ

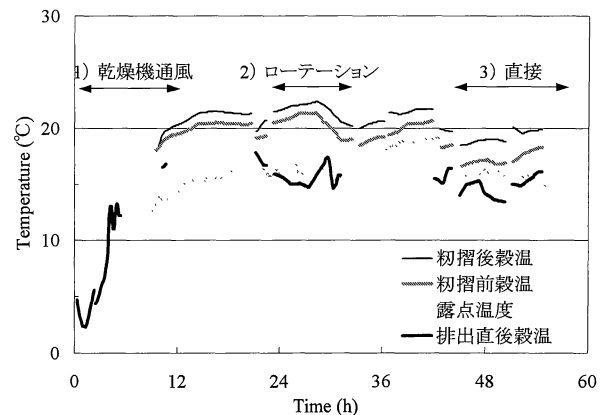


図7 サイロからの籾排出時の各工程の穀温および籾摺機周辺空気の露点温度

Fig. 7 Grain temperature and dew point during unloading and rewarming

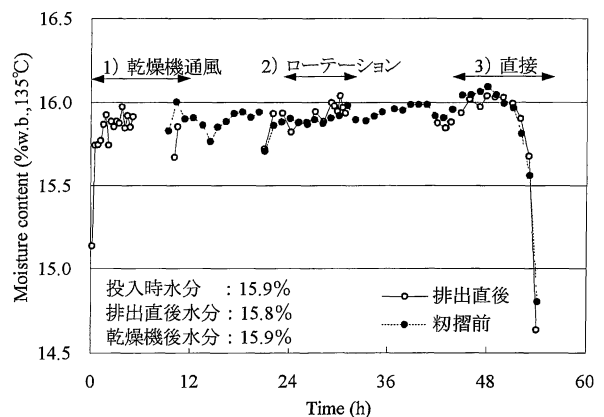


図8 サイロからの籾排出時の籾水分

Fig. 8 Moisture content of rough rice during unloading and rewarming

ンした場合が1.0%、直接籾摺した場合が1.2%であった。すなわち、貯蔵後に穀温の低い籾を排出すると水分吸着により籾水分が上昇する場合があるが、この水分上昇によって胴割の発生には至らないことが確認された。なお、籾摺後出荷された玄米は、食糧事務所の検査において全量一等と格付された。

IV 摘 要

本試験では、カントリーエレベータで超低温貯蔵を行うことを目的として、カントリーエレベータのサイロを用いて冬季通風冷却による籾の貯蔵試験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 冬季に通風冷却を行うことにより、サイロ内の籾の穀温はすべて氷点下となり、実用規模のサイロ貯蔵において超低温貯蔵が可能であることが実証された。

2) 比熱が大きくて熱伝導率が低いという籾の物理特性が、実用規模のサイロ貯蔵において超低温貯蔵を可能

とした。

3) 低温の粳をサイロから排出する際に、乾燥機で常温通風して穀温を上昇させて胴割を防止する昇温技術を確立した。

References

- Hosokawa, A., Masumoto, H., 1971. Bulk thermal conductivity of grains. *Journal of JSAM*, 32(4), 302-305.
- Kawamura, S., 1996. Promise of improving quality of Hokkaido-grown rice —New post-harvest technology and its application—. *Journal of Hokkaido Branch of JSAM*, 36, 65-71.
- Kawamura, S., Natsuga, M., Kouno, S., Itoh, K., 1997. Super-low temperature storage for preserving rice quality. *Proceedings of Joint International Conference on Agricultural Engineering & Technology*, Dhaka, Bangladesh, Vol. 3, 820-824.
- Morita, T., Paul Singh, R., 1979. Physical and thermal properties of short-grain rough rice. *Transactions of the ASAE*, 22, 630-636.
- Murata, S., Tagawa, A., Ishibashi, S., 1987. The effect of moisture content and temperature on specific heat of cereal measured by DSC. *Journal of JSAM*, 46(6), 547-554.
- Nabeshima, M., Iwai, S., Numada, M., 1997. Drying and storage of rice using grain cooler (in Japanese). *Agriculture and Horticulture*, 72(7), 789-793.
- Oshita, S., Shimizu, H., Kameoka, T., 1992. Specific heat of rice and its prediction. *Journal of JSAM*, 54(2), 67-74.
- Seno, T., Yamaguchi, T., Aihara, Y., Kohara, S., 1976. Studies on grain storage by steel silo (2) —On the physical properties of grains—. *Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan*, 6(1), 10-18.
- Takagi, F., 1986. Applications of low temperature grain storage in a silo —Grain cooling in a 1 ton silo—. *Journal of JSAM*, 48(1), 58-66.
- Takekura, K., Kawamura, S., Itoh, K., 2003. Development of techniques for storing rough rice in cold regions (Part 1) —Storage of rough rice at country elevator with natural heat radiation in winter—. *Journal of JSAM*, 65(4), 57-64.
- Yamada, T., 1984. Specific heat of rice. *Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan*, 58(1), 31-33.
- Zen-noh, 1973. *Country Elevator Manual* (in Japanese). Zen-noh, Tokyo, 212-225.

(原稿受理: 2002年8月1日・質問期限: 2003年9月30日)

コ メ ン ト

[読者のコメント]

穀温を下げる方法の一つとして、ローテーションは不利であると説いているが、排出時に穀温を上げる行程にローテーションを取り入れた理由を教えてください。その行程では穀温がどんな条件になったときに切り換えるのでしょうか。

[コメントに対する著者の見解]

本試験では排出時の昇温工程でローテーションを行いましたが、これはあくまでも試験条件の1つです。試験の結果、ローテーションでは穀温が2℃～3℃上昇するのみであり、周囲空気の温度まで粳が昇温しませんでした。すなわち、ローテーションのみでは十分な昇温効果をえられず、ローテーションは昇温工程には適さないと判断しました。