

帯広市八千代地域におけるヒートパイプを利用した 大型実用低温貯蔵庫の開発

土 谷 富士夫*

Development of Large Storage Facility for Practical Use under Low
Temperature using Heat Pipes in Yachiyo Region in Obihiro, Hokkaido

Fujio TSUCHIYA*

Abstract The new large storage facility for the potato reservation was constructed in Yachiyo Region, the agricultural area of the suburbs from Obihiro City in November, 2006. The 81 heat pipes were used for the cooling effect in this type storage system. The winter coldness was making the frozen ground on the storage wall by the thermal conduction of working heat pipes. So the cost of the maintenance was spent a little because of the natural energy, such as ice and snow. The floor size of the storage room was 109 in square meters and 60t of potatoes (May Queen) were stored from August to next June commercially. The frozen ground around the heat pipes was created to be 50cm thick during one winter and room temperature was kept under 5°C until May. The quality of the preserved potatoes was investigated about the loss of the weight and the sugar contents. As the results, the loss of weight became 1.5% until the next August and the sugar content increased more than 10% during winter.

キーワード：雪氷，冷熱エネルギー，凍土，低温貯蔵，ヒートパイプ

Key words : Snow and Ice, Cold Energy, Ground Freezing, Low Temperature Storage, Heat pipes

1. はじめに

農業を支えるエネルギーは将に太陽エネルギーであり、稲作・畑作などの作物の光合成作用に直接荷担している。太陽エネルギーは代表的な自然エネルギーであり、多くはソーラ発電などに利用されている。しかし、農業利用では作物生産以外の耕作、播種、収穫、運搬、貯蔵などの作業は電気、石油エネルギーに強く依存しているのが現状である。この化石燃料系エネルギー量をいかに軽減するかが、今日の農業のカギとなっており、地球温暖化防止のため一端を担った環境にやさしい農業が望まれる。北海道のような寒冷環境にある地域では、その特質を十

分認識したうえ（北大放送委員会，1985）で冬期の寒さを積極的に自然エネルギーとして利活用することは、環境に配慮した持続的農業にやさしい不可欠な方法のひとつでもある。

他方、寒冷地域は冬季間、広域で土の凍結がみられるが、凍結・凍上被害が道路、建物、水路などに多大な被害をもたらしている（木下，1988）。こうした土の凍結は、被害防止のために莫大な対策経費を使用せざるを得ないのは現状である。

しかし、一度凍結した土はコンクリート並みの強度を示し、難透水性であることから、人工的に凍結させて軟弱な地盤を掘削する人工地盤凍結工法があ

* 帯広畜産大学地域環境学研究部門 Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine

り、凍土の利点を積極的に利用している（土質工学会編，1982）。また、凍土は線熱伝達を付随することから、この状態で冷熱エネルギーを貯蔵していることになる（土谷，1994）。雪室や氷室は歴史的にも古いが、規模が小さく限られた地域に利用されてきたが、貯蔵庫内に雪や氷が貯蔵され野菜の貯蔵空間が狭くなる短所がある。また、冬季に雪をかき集めたり、氷の切出しなどの管理作業が伴う。

化石燃料に依存しない自然エネルギーの活用が推進される中で、平成14年に「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」が制定され、雪氷エネルギー（雪、氷、凍土など）が仲間入りした。食料・農業・農村基本法にある食料自給率の向上のためには農業への雪氷冷熱エネルギー利用促進は有意義であり、食糧備蓄基地の構築には重要である（土谷，2007）。

2. ヒートパイプ

1942年、米国R.S.Gauglerが発案したHeat Transfer Deviceが文献第1号といわれており、その後1963年に、G.M.Groverが初めてHeat Pipeという名称を使

用した（DumnおよびReay，1994）。ヒートパイプは、液体の蒸発と凝縮の潜熱を利用した閉ループの伝熱素子で、小さな温度差で大量の熱輸送が可能なものである。人工衛星に搭載した通信機の温度制御として2本のヒートパイプが最初の成功で、その後産業機器の放熱、金属の冷却、空調、熱交換、均熱炉、その他家庭用品などに幅広く使用されている（池田ら，1981）。最近ではノートパソコンのCPUの放熱に利用されている。

ヒートパイプの原理は図-1に示すように密閉容器に封じ込まれた液体が加熱されることにより、蒸発して気体として容器内に充満する。このとき他方が冷却されると蒸気は凝縮して液体に戻る。このとき加熱部では蒸発に必要な液体に吸収され、冷却部では熱が放出されるので、外部からみると固体の棒の熱伝導によって熱が流れると同じように、蒸発部から凝縮部へ熱輸送するようにみえる。

蒸発・凝縮はごく小さな温度差でも起り、冷却部ではフィンと呼ばれる羽根で増強され、凝縮した液体はウィックと呼ばれる構造を持つ毛管現象によって加熱部に戻される。重力の場では上部を冷却部、

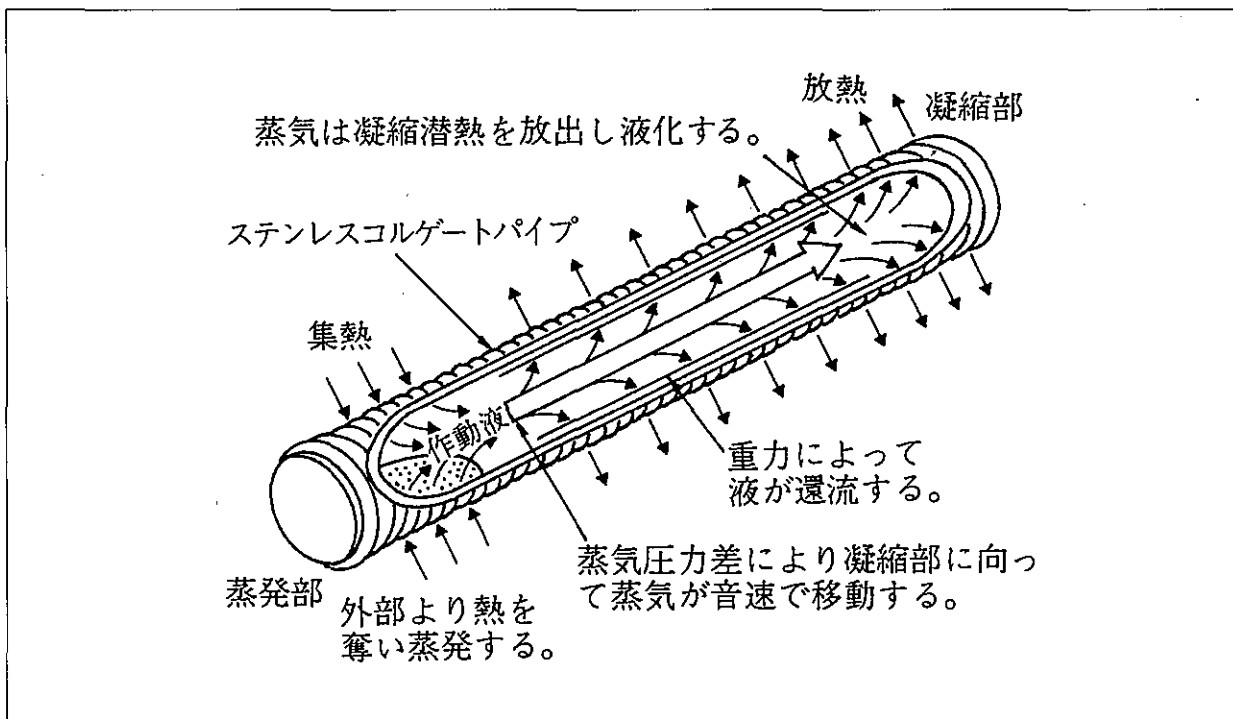


図-1. ヒートパイプのしくみ

下部を加熱部という状態では効率よく作動することから、ウィックを使用しないものもあって、これを熱サイホンと呼んでいる。作動液体は使用温度範囲によって適性が異なり、パイプ材との適合性がある。

3. ヒートパイプの利点と凍土

ヒートパイプは固体の熱伝導にみられない利点があり、これを以下に要約する。

- ① 優れた熱伝導性：金属の数百倍の熱輸送
- ② 速い熱応答性：音速に近いスピード
- ③ 高い温度の均一性：温度分布を一様に
- ④ メンテナンス不要：電気機械的駆動部がない
- ⑤ 大きな設計自由度：任意の形状で円以外も可
- ⑥ 軽量コンパクト：中空なために軽い

ヒートパイプの寒冷地での使用はわが国では、冬季の降雪による着氷、凍結、つららの発生など交通・生活面での防止対策への利用願望が多い。しかし資源問題、コスト、保守管理などから普及の制約がなされ、建設費が高価であるなどから利用が少ない。



図-2. アラスカの石油パイプライン

他方、図-2に示すヒートパイプは1977年に完成した米国アラスカで大量に使用された。北極海に接するブルドー湾から永久凍土地帯（木下，1980）を横切って、太平洋岸の不凍港バルデールまでのアラスカパイプライン事業で、約13万本のヒートパイプが垂直支持杭に使用された。60℃に加熱された原油の熱が地面に伝達されると永久凍土が融解しパイプの支柱が沈下とその後の凍結・凍上による破壊を恐れた、また永久凍土の融解はツンドラに生えるコケ類

を死滅させ、これを主食とするトナカイの滅亡の恐れがあった。ヒートパイプの取付けが土壌を冷却し原油熱を侵入を打消した。最近、中国ではチベット高原の永久凍土地帯に鉄道敷設において、軌道の凍土融解沈下の防止にヒートパイプが使用された（土谷，1990）。

4. 実用大型低温貯蔵庫の建設

図-3に示すヒートパイプを利用した人工永久凍土低温貯蔵庫のモデルプラントを1987年に帯広畜産大学構内に構築して（土谷・了戒，1990）20年を経過している。その間、ヒートパイプは冬期間に威力を発揮して貯蔵庫周囲の盛土を永久凍土化して、農産物を長期保存する環境を持続してきた。



図-3. ヒートパイプを利用した人工永久凍土モデルプラント（帯広畜産大学 1987）

2006年11月に帯広市千代地域に農業生産法人テクノファーム社が図-4および図-5に示すようにランニングコストのかからないヒートパイプ型実用凍土低温貯蔵庫を建設した。使用されたヒートパイプは81本で、帯広畜産大学のモデルプラントの216本（土谷・了戒，1996）よりはるかに少ない本数となったが、以下にこの大型凍土低温貯蔵庫の構造と作動状況を示す。

ヒートパイプを利用した大型凍土低温貯蔵庫の平面図および断面図を図-6および図-7に示した。貯蔵庫内の床面積は奥行き15.6m×幅7.0mの約109m²で、平均高さはパレイショ用コンテナが2段積みできるように4.0mとし、コンテナ60基（約パレイショ



図-4. 八千代地区のヒートパイプ型低温貯蔵庫

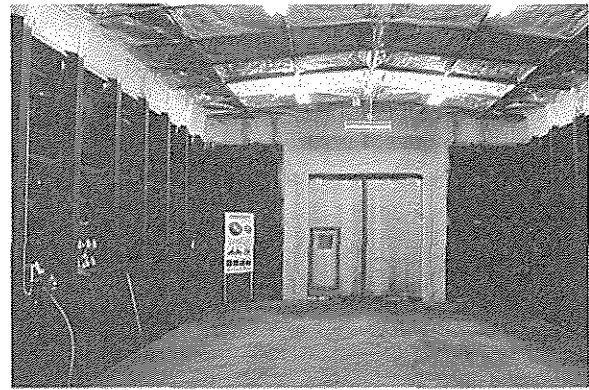


図-5. 八千代地区の低温貯蔵庫の内部

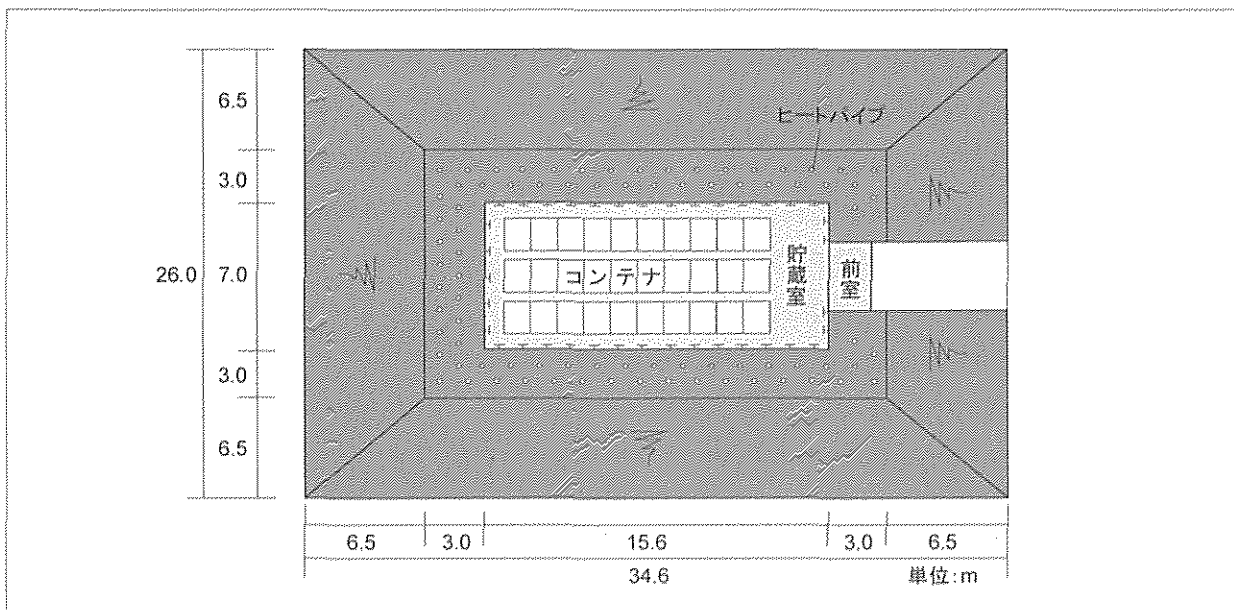


図-6. 凍土低温貯蔵庫の平面図

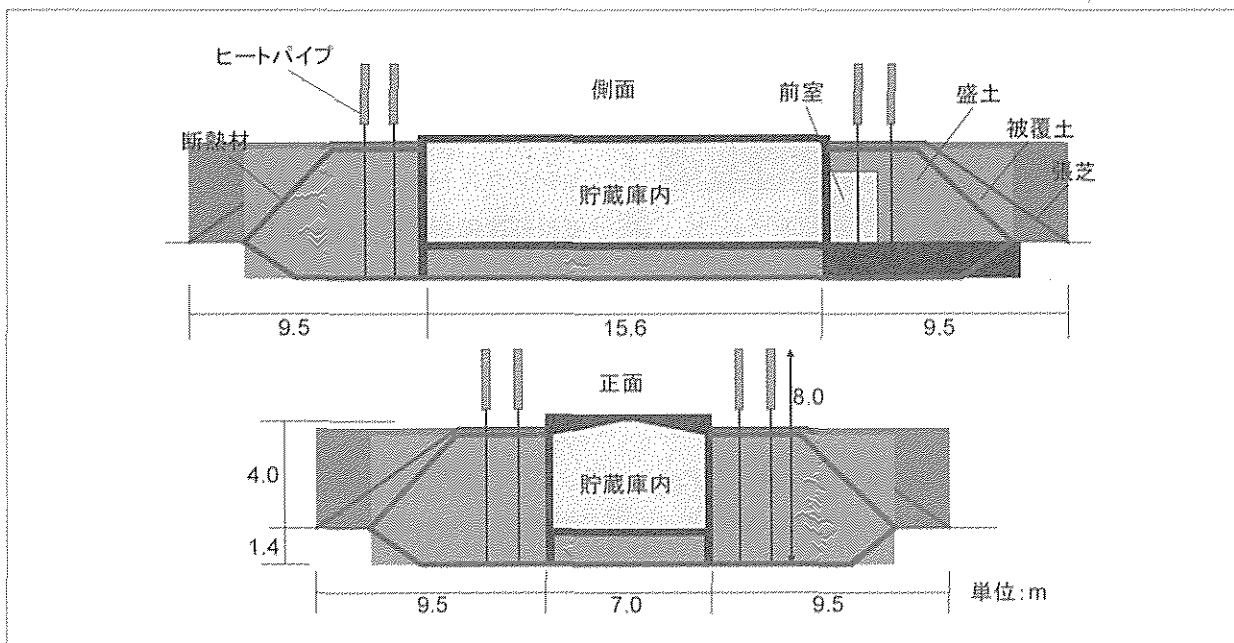


図-7. 凍土低温貯蔵庫の断面

60t) が貯蔵できるように空間設計された。貯蔵空間は鉄骨構造を骨組みとし、これを囲むように現地発生土で盛土された。貯蔵庫内の壁面には盛土の土圧と凍上に対抗するためのセンサーおよびワイヤを配置し、さらに土の肌落ち防止のためクラフト土木シートを挿入した。貯蔵庫内床部は厚さ300mmの切込み砂利および床厚50mmのコンクリートで構成され、壁沿いには融凍水の排水溝を設置した。天井部には12mmのコンパネと遮水アメミ板を利用し、さらに外部からの熱負荷を軽減させるため、内側に150mmのウレタン断熱吹付けを施した。また、搬入口扉と前室にもそれぞれ100mm、50mmのウレタン断熱材を吹き付けた。

大型凍土低温貯蔵庫に使用されているヒートパイプは長さ8m、外径60.5mmの直管型のステンレス管で、凝縮部には寸法215×215mmの角型アルミ製フィンが1cmピッチで215枚取付けられ、下端から5.2mが埋設された。

ヒートパイプ管内にはウィックが取付けられており、作動液HFC-134aの還流が円滑に起る仕組みとなっている。ヒートパイプは貯蔵空間を囲みこむように庫内壁面から1.0mと2.0mの位置に2列に計81本を埋設した。さらにヒートパイプによって造成される凍土を長期保存するため、盛土部外周に50mmの断熱材(スタイロフォーム)を挿入し、外部の地盤と隔離した。断熱材の上には法勾配1:1.6勾配の被覆土を被せて、張芝による法面保護工によって仕上げた。

5. 低温貯蔵庫の立地と気象条件

大型凍土低温貯蔵庫が新設された八千代地域は帯広市街地から南西約25kmに位置し、大規模な酪農畑作地帯となっている。帯広地区のイモ類の作付面積は3983haで(2000年農業センサスより)、全作物の作付面積の19%を占めるため、パレイシヨの貯蔵施設は不可欠となっている。また、八千代地域は市街地との土地利用の違いから、帯広測候所や帯広畜産

大学とは異なった気象状況を示す。ヒートパイプの熱輸送量は気温と地温の差に比例する性質をもつため、凍土低温貯蔵システムの作動には八千代の気温状況に着目する必要がある。図-8に2006年から2008年の228冬の帯広市八千代地区と帯広畜産大学の積算寒度を示した。八千代の凍結指数は679°C・daysで、帯広畜産大学の凍結指数658を若干上回る値を示した。また2007年度は864°C・daysで前年より寒い冬であった。両者の気温はほとんど同じであるといえる。

帯広畜産大学の20年間の凍結指数の平均値が811°C・daysであることから、2006年度は暖冬傾向であり2007年度は平年並みで、ヒートパイプの作動状態は順調であったことが分かる。このように凍土貯蔵システムではヒートパイプの敷設本数の他に、気象変動による変化に注目する必要がある。今後は凍土システムの融解作用に影響を与える積算温度についても検討を加えるため、引き続き気温観測を行っている。

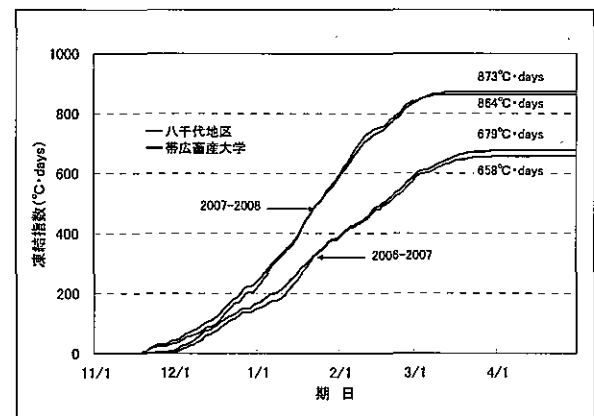


図-8. 八千代地区と帯広畜産大学の凍結指数

6. 凍土低温貯蔵庫の作動状況

ヒートパイプによる盛土部の凍土層形成状況を知るため、貯蔵庫内壁からヒートパイプに向かって10cmごとに地温観測用サーミスター温度センサを埋設して、温度記録計TR-71U(T&D)を用いて計測を行った。図-9にはヒートパイプから20cm、40cm、50cm、100cmの地温変化を示した。

盛土地温は11月当初8℃前後であったが、気温がマイナスになるとヒートパイプ近くから温度低下が始まった。各計測点の地温分布から一環した低下する温度勾配が見られ、ヒートパイプが正常に作動していることが確認された。マイナスの地温状況からヒートパイプの周囲には最大で40cm以上の凍土が形成されたと考えられる。ヒートパイプから10cmの位置では2月、3月において-3℃の最低値を記録したが、5月下旬に温度勾配から外れる急激な温度上昇が生じた。これは1日に約60mmの豪雨の発生によって、地温計測地点上部の被覆土法面が滑落したためである。この影響により、以後ヒートパイプの管壁を伝わって豪雨時に水が流れ込む現象が生じた。そして9月上旬の台風時の豪雨にも顕著に地温が上昇した。2冬目は50cmがマイナスになったので前年より凍土厚は増加した。八千代の貯蔵庫は季節凍土の形態でありシステム全体に影響を与えるため、法面補修対策を講じた結果、2008年には豪雨の影響はなくなった。

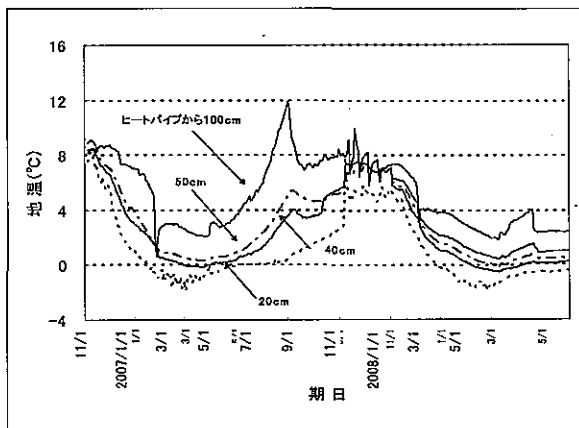


図-9. 凍土低温貯蔵庫の盛土地盤の地温

3月以降は気温上昇に伴い凍土は減少傾向となったが、ヒートパイプ付近の盛土は5月上旬まで確実にマイナス温度が計測された。一方、貯蔵庫内付近の盛土はヒートパイプの作動に加え、作業にともなう庫内温度の影響を強く受けていた。年次が経つにつれ建設時より凍結時の地温は低くなり、凍土厚も増加するものと予想される。

7. 貯蔵バレイシヨの品質

農産物の貯蔵性は温度・湿度環境によって大きく変化し、大部分の農産物は氷結点より少し高い0℃から5℃付近の温度、90～95%の湿度が最適であるとされている(大久保, 1988)。11月の完成直後の大型凍土低温貯蔵庫はヒートパイプによる低温システムが完全に構築されていない中で、秋期に収穫されたバレイシヨ(メークイン、インカノめざめ)を60t貯蔵した。

実用凍土低温貯蔵庫、畜大モデルプラントそして電気冷蔵庫(5℃に設定)にメークインを貯蔵し、減耗率の測定を行った。図-10にこれらの結果を示す。

大型貯蔵庫内の温度は気温低下とヒートパイプの作動とともに下がり始めたが、庫内のバレイシヨの呼吸熱量が大きく(高宮, 1993)、初年度は6～9℃とやや高い温度が続いたが、2年目は貯蔵したバレイシヨは収穫後の予冷処理が十分であったため、予想どおり最適な温度を維持した。予冷は電氣的装置を使用した。貯蔵庫内を4℃以下に低下させると、バレイシヨは休眠状態となった。これ以降、庫内温度も2～3℃の低温で推移し、6月下旬まで5℃以下を保った。永久凍土の畜大モデルプラントはほとんど0℃に近い。重量減耗率が八千代貯蔵庫より大きくなった。電気冷蔵庫では5月過ぎに5%を越すため、貯蔵に適さないことがいえる。

電気冷蔵庫では冬期間に湿度低下が発生しバレイシヨの表面から脱水作用が働き、減耗率を大きくする。湿度管理が重要であり、凍土壁からの水分が滲み、貯蔵湿度を高めていることから5月以降の低温貯蔵が良好であった。

畜大永久凍土低温貯蔵庫は建築から21年以上も経過しており、永久凍土の厚さが増加続けているため、貯蔵庫内の湿度は80%以下になり、貯蔵バレイシヨ表面からの脱水することとなった。

次に、図-11にバレイシヨの糖分含量一種であるBrix値の変化を示す。畜大凍土低温貯蔵での糖分含量

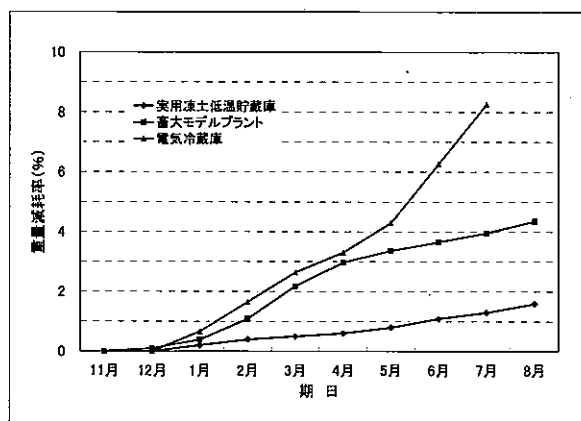


図-10. メークインの重量減耗率の変化

の増加が最も大きいことを示す。12月には永久凍土化した低温貯蔵で急激にBrixが増加するのは3つの型の貯蔵庫では最も低温であるため、一気に増加することがわかる。八千代の低温貯蔵庫ではメークインの糖含量は徐々に増加し約2倍の値となった。他方、電気冷蔵庫は貯蔵開始後、即座に糖分量が増加する傾向にあったが、6%程度と3月以降ほぼ一定値を示した。これらは、貯蔵庫内の平均庫内温度に支配されると思われる。したがって、減耗率の変化は湿度に、そして糖分量は庫内温度に強く依存することが判明した。

8. おわりに

大型の実用化されたヒートパイプによる凍土低温貯蔵庫の性能調査によって、初年度からのシステム作動が順調であることが明らかとなった。初年度に形成された盛土の初期温度が高かったことや2006年度の暖冬を考慮すると、凍土層の形成は2年目以降さらに拡大することが判明した。豪雨による被覆土法面が滑落による盛土の水分増加は、補修より2年目は防止された。

60tのバレイショを貯蔵開始した時点で、バレイショの貯蔵品質を調べるために、減耗率や糖分量の変化、色彩の変化などの調査をした結果、良好な貯蔵品質を示した。畜大の永久凍土貯蔵や電気冷蔵庫と比較すると、バレイショの貯蔵品質が最も良好であることも判明した。ランニングコストのかから

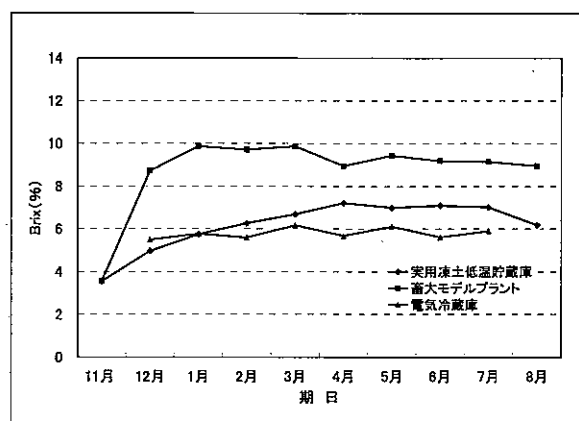


図-11. メークインのBrix (糖含量) の変化

ない長期的な貯蔵有用性を明らかにする更なる実証試験を継続している。

この実験を行うにあたり、農業生産法人テクノ・ファーム社の多大な協力を得ましたことを感謝します。

引用文献

- 土質工学会編 (1982) 土の凍結—その制御と応用土質基礎工学ライブラリ-23, 土質工学会, 155-196
- Dunn P.D. and Reay D.A. (1976) : Heat pipes, Pergamon Press, 1-7
- 北海道大学放送教育委員会 (1985) : 低温とくらし, 北海道大学図書刊行会, 1-16
- 池田義雄ほか (1981) ユーザのためのヒートパイプとその応用, 学献社, 3-60
- 木下誠一 (1980) 永久凍土, 古今書院, 127-135
- 木下誠一 (1988) 雪と氷の話, 技報堂出版, 231-236
- 大久保増太郎 (1988) 野菜の鮮度保持, 養賢堂, 40
- 高宮和彦 (1993) 野菜の科学, 朝倉書店, 149
- 土谷富士夫・了戒公利 (1990) ヒートパイプを利用した人工永久凍土による低温貯蔵庫, 農業土木学会誌, 58(9), 881-886
- 土谷富士夫 (1994) 寒冷エネルギーを利用した農産物の利用, 太陽エネルギー, 20(1), 46-52
- 土谷富士夫・了戒公利 (1996) 冷熱エネルギーを利用した凍土低温貯蔵システム, 農業土木学会誌,

64(3), 19-23

土谷富士夫 (2004) ヒートパイプによる人工永久凍

土低温貯蔵庫, 雪氷, 66(2), 251-257

土谷富士夫 (2007) 食料危機と雪氷エネルギー, 雪

氷69(3), 393-397