

ヒートパイプによる凍土層の造成効果とその経時変化

土 谷 富士夫

農業工学科開発土木工学研究室

1. 目 的

冬期間の北海道は広域で土壌の凍結が見られ、凍結した地盤が引き起こす道路や建物の凍上は寒冷地における重要な問題で、こうした凍上対策に多大な経費を必要としている。土壌凍結は必ずしも、害的作用ばかりとは言えない。例えば、凍結した土はコンクリート並の強度を発揮したり、凍結土内に多量の氷を集積すること、冬期間の気温変動は大きい、凍土の温度変化は比較的小さい等の特質が見られる。これらを長所として着目すると、凍土の冷熱エネルギー利用が考えられる。

北海道東部では、積算寒度が600度・日以上にも達する地域であることから、自然の冷熱エネルギーに最も恵まれている地域でもある。

永久凍土地帯と異なり、年平均気温がプラスな我が国では、北海道で冬期に凍結した土壌が、春季に融解して消失してしまうため、季節的凍結地帯となる。冬期間に形成される最大の凍土の厚さは、道東地域でも1mから1.5m程度に過ぎないため、自然状態の凍結深さのままでの利用は難しい。多大な凍結土層が形成でき、長期間保存できるなら、これを農畜産物などの低温貯蔵庫に利用することができる。そのためには冬期の寒冷気温を効率よく地面に伝達できる物質が必要となる。そこで、自然の温度差のみで作動し、多量の熱を輸送できる伝熱素子、ヒートパイプを使用して凍土層の造成を行うとともにその経時変化と結果を検討するものである。

2. 実験材料

1942年、R. S. Gauglerによって、ヒートパイプの原理が初めて公表され、1963年にG. M. Goverによって最初にHeat Pipe(ヒートパイプ)と命名された。1968年に打ち上げられた人工衛星の電子通信機器の温度制御に使用されたのが、実用化の成功第1号であった。初期には、人工衛星、宇宙船あるいは熱電子発電器に利用されたが、1970代になって産業機器の放熱と均熱化に用いられ、現在は多方面に実用化されている。

ヒートパイプの原理は、密閉容器に封印された液体が加熱されることにより、蒸発して気体となって充満する。このとき、他方を冷却すると蒸気は凝固して液体に戻る。加熱部で蒸発に必要な潜熱を液体が吸収し、そして冷却部でその熱を放出するため、外部からみると固体の棒の熱伝導によって熱が流れるのと同じようになる。蒸発—凝固はごく小さな温度差でも起こり、上部が冷却部に、下部を加熱部にすると地中の熱は奪われ、このサイクルは無限に繰り返される。ヒートパイプの最大の長所は、優れた伝熱性を有し金属の数百倍もの熱量を輸送し、熱の応答性は速く、音速に近いことである。そして、電気や機械的駆動力を必要としないため、維持作業が全くないことである。

ヒートパイプの構成材料には、内部の作動液との適合性があり、そして使用温度範囲によって作動液の選択性がある。地盤の冷却には耐腐食性の強い金属として、ステンレス鋼やアルミが好ましく、作動温度範囲から、フロンやアンモニアなどが適合している。

凍結した地盤内に農産物の貯蔵を長期的に行うためには、深さ4 m程度の凍結地盤を必要とする。このためにはヒートパイプが不可欠であり、効果的で経済的な形状、材質および素材を見つけないければならない。1984年から、北海道大学低温科学研究所と帯広畜産大学でヒートパイプの地盤凍結効果試験を開始した。この実験結果から、たわみ性のあるステンレスのコルゲートパイプが好ましく、直径46 mm、長さ12 mのL字型のパイプを使用して、その周囲に約80~130 cmの凍土層が発生することが判明した。

3. 実験方法

人工永久凍土の低温貯蔵庫モデルプラントは、1987年12月に、帯広畜産大学構内に建造された。貯蔵庫の大きさは、幅3.6 m、奥行き6.0 m、高さ3.6 m (実容積約70 m³、面積20 m²)の鉄骨構造からなり、側面は鉄骨間に不織布(テンサーSR1)を敷設し、土圧に抵抗させた。約600 m³の地盤が貯蔵空間を囲み、その外側にすべて100 mmの断熱材と防水シートで遮断された。地盤に埋設されたヒートパイプは、先に示した46 mm径のSUSコルゲートのステンレスパイプであり、最長12 mのパイプはL字型に埋設され、貯蔵庫底部では1/10の勾配をもち、その先端は深さ2~3.5 mに達した。厚さ2 mの凍土層を構築するように、216本のヒートパイプが50 cmピッチに4列に配置され、地上2.4 mほど冷却部が突き出している。ここに、正方形のアルミ製のフィン(20×20 cm)が1 cmピッチに170枚が圧着して取り付けられている。1987年より、パイプの表面、フィン部、地盤の各温度そして貯蔵庫内の温湿度の自動計測が、3時間毎にコンピュータを使用して、計測記録が続けられた。

4. 結果と考察

1987年12月のモデルプラント建設と同時にヒートパイプは作動開始し、地盤は冷却され始めた。12月から2月までの3カ月で、3万~9万 kcal/mの熱輸送量に相当した。ヒートパイプの両端の温度差と熱輸送の関係を見ると、5℃程度で500 Wの輸送能力もあることがわかった。使用された作動液は、フロンR-22であるが、鉛直型パイプの充填率は15%で十分であるが、L字型ではパイプ周辺の冷却効果を等しくするためには、充填率80%が必要であることも判明した。最暖月の8月時点でも、庫内温度5℃以下に保持され、凍土地盤は側方の表面と底部表面10 cmないし20 cm程度が融解しただけで、1 m以上の厚さの凍土が残存し、予想どおり人工永久凍土層の構築に成功した。ヒートパイプは熱ダガーオード性があるため、夏期の高温はヒートパイプを通じて地盤に伝達されることはなく、マイナスの温度で保存されることも証明された。

1年目の冬は標準的寒さであり、積算寒度は1,020度・日であったが、2年目の冬は544度・日と近年希な暖冬であった。にもかかわらず、ヒートパイプは順調に作動し、融解部の地盤を凍結させた。最暖月の8月は4.9℃まで上昇した。このことは、熱量の80%以上が貯蔵庫の屋根部から放熱されるため、さらに低温を保持するためには、屋根部の改良の必要がある。

凍土造成時の1~2月は、側面からの冷熱の影響が大き過ぎることから、庫内温度が-4℃まで低下したため、1,000 Wのヒータを使用し温度コントロールを行った。ヒータを使用しない厳寒期における庫内温度の低下対策として、床面を20 cmほどかさ上げし、水深10 cm程度に成るように床面に水を張った。さらに、庫内側壁からの冷却強さを緩和するため、20 kg 詰めの水コンテナを4段に積み上げた。天井から吊り下げられた断熱カーテンでコンテナと貯蔵物と隔離することによって、この問題は解決された。さらに、5月に断熱カーテンは除去され、側面の氷塊がさらに貯蔵物を冷却し、温度上昇を防止しながら良好な庫内温度を維持続けた。

低温貯蔵庫として最も重要なことは、庫内に貯蔵される農産物の品質の低下が少ないことである。1988年10月末から貯蔵された馬鈴薯(メークインと男爵いも、各2トン)の品質の測定と分析を行った。試食方法による5段階アンケート調査によると、6月までのかたさ、新鮮さ、色、香ばしさ、舌ざわり、美味しさのいずれも普通以上の評価を得た。さらに、貯蔵期間の馬鈴薯重量減少率を測定すると、220日間でメークイン2.2%、男爵で1.4%と十分な商品価値を示した。また、デンプン含量、糖分含量、水分率などの貯蔵中の化学分析を行った。このとき、最も変化の大きかった項目は、糖分含量であり、2月までに貯蔵開始時の4~5倍に増加することが分かり、甘味のある美味しい馬鈴薯に変化することも証明された。このシステムで貯蔵すると、電気冷蔵庫内のような脱水もなく、非常に良好な貯蔵状態を示し、十分に実用できる方式であることが立証された。現在は、馬鈴薯以外の野菜類の貯蔵試験を行っており、貯蔵庫の内部の改良、ヒートパイプの作動コントロールなどの試験を続行している。