

人工永久凍土低温貯蔵庫の開発と その経時変化に対する研究

(研究課題番号02806045)

平成2, 3年度科学研究費補助金(一般研究(C)萌)研究成果報告書

平成4年3月

土 谷 富 士 夫
(帯広畜産大学畜産学部助教授)

は し が き

人工永久凍土低温貯蔵庫の開発とその経時変化に対する研究

研究組織

研究代表者：土谷 富士夫（帯広畜産大学畜産学部助教授）

研究分担者：辻 修（帯広畜産大学畜産学部助手）

研究経費

平成2年度	1, 800千円
平成3年度	400千円
計	2, 200千円

研究発表

(1)学会誌等

福田正巳、了戒公利：ヒートパイプによる凍土造成とその利用（1985）

寒地技術シンポジウム'85、362-367

了戒公利、土谷富士夫、福田正巳、望月正孝：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫（1986）

寒地技術シンポジウム'86、409-413

了戒公利、福田正巳、土谷富士夫、望月正孝：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫（その2）（1987）

寒地技術シンポジウム'87、22-26

土谷富士夫、福田正巳、了戒公利、望月正孝：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫（その3）（1988）

寒地技術シンポジウム'88、525-529

土谷富士夫、福田正巳、了戒公利、町 文治望月正孝：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫（その4）（1989）

寒地技術シンポジウム'89、237-241

M.Fukuda, F.Tsuchiya, K. Ryokai, M.Mochizuki and K.Mashiko: Development of an artificial permafrost storage using heat pipes(1988)

International Heat Pipe Congress 6th, 285-289, Japan

F.Tsuchiya, K.Ryokai and M.Mochizuki: Utilization of heat pipes for an artificial permafrost storage(1989)

International Symposium on Cold Region Heat Transfer 2nd, 279-283, Japan

K.Mashiko, R. Okiai, M.Mochizuki, K.Ryokai, F.Tsuchiya and M. Fukuda:

Development of an artificial permafrost Using heat pipes(1989)

The American Society of Mechanical Engineerings / National Heat Transfer Conference 1989, 89-HT-15, 1-6, U.S.A.

M.Fukuda, F.Tsuchiya, K. Ryokai, S.Yoshida, M.Mochizuki and K.Mashiko:

Artificial permafrost storage system using heat pipes (1991)

Fujikura Technical Review, No.20, 66-71

F.Tsuchiya, K.Ryokai and M.Mochizuki: Application of artificial permafrost using heat pipes for cold storage of agricultural products(1991)

3rd International Symposium on Cold Region Development, 38, Canada

F.Tsuchiya, K.Ryokai and M.Mochizuki: A cold storage of agricultural products surrounded by artificial permafrost using heat pipes (1991)

The sixth International Symposium on Ground Freezing, China(印刷中)

了戒公利、福田正巳：人工永久凍土とその食糧用低温貯蔵庫への応用（1987）

日本冷凍協会論文集、Vol.4 No.1、1-9

土谷富士夫、了戒公利、望月正孝：ヒートパイプを使用した永久凍土低温貯蔵庫（1989） 伝熱研究、Vol.28 No.109、109-116

土谷富士夫、了戒公利：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
(1990)、農業土木学会誌、Vol.58 No.9、881-886

南 清司、了戒公利、土谷富士夫：自然冷熱を利用した低温貯蔵庫－ヒートパイプ
利用－(1990)、農業施設、Vol.22 No.11、31-71

(2)口頭発表

土谷富士夫、辻 修：ヒートパイプによる凍土造成(1986)

第35回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨、22-25

土谷富士夫、辻 修、了戒公利、望月正孝、益子耕一：ヒートパイプを使った人工
永久凍土による低温貯蔵庫の開発(1988)

第37回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨、49-50

土谷富士夫、辻 修、了戒公利、町 文治、望月正孝、益子耕一：人工永久凍土低
温貯蔵庫の経時変化と貯蔵物質の品質(1989)

第38回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨、78-81

目 次

第 1 章	人工永久凍土とその食糧用低温貯蔵庫への応用の意義-----	1
1	はじめに-----	1
2	凍土を利用した貯蔵庫の現状-----	1
3	人工永久凍土による低温貯蔵庫-----	9
4	今後の展望-----	12
5	あとがき-----	14
第 2 章	ヒートパイプ技術の開発普及状況と低温技術への応用-----	15
1	はじめに-----	15
2	ヒートパイプとは-----	15
3	ヒートパイプの性能と用途-----	16
4	ヒートパイプの普及状況-----	17
5	ヒートパイプの寒冷地域での応用-----	18
6	寒冷地域でのヒートパイプ利用技術への展望-----	26
第 3 章	冷熱エネルギー利用と北海道の寒さ-----	28
1	冷熱エネルギー-----	28
2	世界の寒さと北海道の特色-----	28
3	帯広における土壌凍結と積算寒度-----	32
第 4 章	野菜・生花の貯蔵と価格の動向-----	39
1	野菜の生産と価格変動-----	39
2	北海道野菜の市場-----	44
3	野菜の貯蔵-----	44
4	野菜の鮮度と予冷-----	50
5	野菜の貯蔵性に及ぼす条件-----	50
6	北海道主要農産物の生産量、貯蔵需要量および建設状況-----	54
7	フラワービジネス-----	58
8	低温技術利用による生花（切花）の貯蔵-----	58
第 5 章	自然冷熱エネルギー利用した農産物貯蔵方式-----	64
1	冷熱エネルギー利用調査について-----	64
2	自然冷熱を利用した低温貯蔵庫の現状について-----	67
3	冷熱エネルギーを利用した貯蔵方式の概要-----	67
第 6 章	ヒートパイプの熱設計と現地基礎実験-----	74
1	低温貯蔵庫（9 m×50m）の設計-----	74
2	ヒートパイプの現地試験-----	78
	1）鉛直型（スムーズタイプ）ヒートパイプの実験-----	78
	2）傾斜型コルケートヒートパイプの実験-----	94
	3）鉛直型コルゲートヒートパイプの実験-----	94

第7章	人工永久凍土による低温貯蔵庫の建設とその経年変化-----	98
1	はじめに-----	98
2	実験施設と実験地-----	98
3	施 工 法-----	99
4	庫内温度、湿度、ヒートパイプ及び凍土地盤温度の測定----	104
5	貯蔵農産物の品質変化-----	104
6	モデルプラント設置場所の気象環境-----	108
7	建設初年度の凍土造成と融解-----	109
8	1988-89年の地盤温度、庫内温度の変化（水詰めコンテナ）-	109
9	1989-90年の地盤温度と庫内温度の変化（フィン被覆）----	113
10	1990-91の地盤温度、庫内温度の変化（自動水張り装置）---	123
11	ま と め-----	127
第8章	発表主要論文	
1	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----	132
2	Artificial Permafrost Storage System Using Heat Pipes-----	138
3	A cold storage of agricultural products surrounded by artificial permafrost using heat pipes-----	144
第9章	啓発用主要パンフレット-----	150
第10章	報道関係に掲載された主要記事-----	164
	あとがき-----	174

第1章 人工永久凍土とその食糧用低温貯蔵庫への応用の意義

1 はじめに

北海道や東北地方においては、克雪・利雪そして寒さの有効利用が叫ばれている。雪や寒さは、水資源、エネルギー源、建設材料等に利用され始めている。エネルギー源としての利用には、食糧等の低温貯蔵への利用がある。低温下でバレイショが貯蔵されると、低温に順応するために（耐寒性）、糖分が増加する傾向にある。¹⁾そのため、このような低温下で貯蔵されたものは付加価値の高いものとなる。しかも、0℃付近で温度を保持すると呼吸作用が極端に低下するので、発芽を抑制することができる。²⁾

雪の貯蔵方法として、氷室がある。これは、北向きの斜面に穴を掘り、雪を入れて踏み固め、その上におが屑や藁を厚く被せておくと、中の雪は残り、氷室となる。³⁾この氷室の原理を利用して、野菜、バレイショ、タマネギなどの貯蔵は、小規模には昔から行われている。これを最近大規模に行う試みがなされている。^{4), 5), 6)}雪中貯蔵は、冷凍機を使う方法に比較して、優れた点がある。たとえば、天然の雪を利用するので、低温に保持するためのエネルギーが不要である。しかも、その温度は、水の凍結温度である0℃の一定となる。冷凍機による方法は、これほど一定に保持することは非常に困難である。しかも、冷凍機では、庫内が徐々に湿気、湿度が低下して来る。そのため、貯蔵物の水が蒸発し、商品価値が低下してくる。

その他に、天然の雪を利用する方法として、アイスドームによる方法がある。⁷⁾これは、天然の雪を、直径10m程度のドームにシャーベット状の雪を吹きかけ、夜間の冷気を利用して凍結指させる。このようにして、構築されたアイスドームを低温貯蔵庫として利用しようとするものである。庫内の温度は、雪中貯蔵より低く、約-2℃程度である。

以上の方法は雪を冷熱源として低温貯蔵庫に利用した例である。ここでは、自然冷熱を地盤に凍土の状態に貯蔵し、その冷熱により、バレイショ等の貯蔵物を一定の低温に保持する方法と貯蔵庫としての構造体のみならず冷熱源としての機能する凍土の基本的性質について、紹介するものである。

2 凍土を利用した貯蔵庫の現状

2.1 凍土の諸特性

(1) 土の凍上特性

冬期に外気が0℃以下になると、地表面付近の間隙水が凍結し始め、凍結面が徐々に進行する。その際、土質や地下水等の条件により、凍結面に向かって水が移動し、アイスレンズと呼ばれる氷層が水平に、すなわち、熱流に直角方向に形成される場合がある(写真-1)。¹⁰⁾このように、未凍結地盤から凍結面に水を吸水し、自重等の外圧に坑してレンズ状の氷層（アイスレンズ）が析出し、これにより地盤が膨れ上

がる現象が凍上現象である。もともと土中に含まれている水が凍結するだけであれば、たかだか9%が凍結し膨張するだけであるので、土全体として数%の膨張量に過ぎない。しかし、この吸水現象が起こると、膨張量が非常に大きくなる。

このように、吸水現象に伴って、凍結前に土中にある間隙より大きなアイスレンズが生じるのは、一般には粘土やシルト等の細粒土を凍結させた場合に生じる。もともと土に含まれている間隙水のみが氷結が卓越する場合にはコンクリート状の均一な凍土が形成される。

ある初期応力 σ 、間隙水圧 u_{w0} のもとで、土を凍結させた場合、図1に示すように凍結面に凍上力（吸水力） S_f が発生する。

同じ土に対しても凍上量あるいは凍上力は、凍結面の進行速度や凍結面に作用する自重等により変化する。高志ら¹¹⁾は、供試土の一端からの水の出入りを自由にした、いわゆる開式凍上実験装置を用いて、一定上載圧 σ 、および凍結速度 V のもとで、供試体を凍結させ、凍上率 ξ と上載圧 σ との間に次の関係があることを見いだした（図2）。

$$\xi = A + B / \sigma \quad (1)$$

ここに、 A 、 B は定数である。さらに、凍上率と凍上速度との間に次の関係があることを導いた（図3）。¹¹⁾

$$\xi = C + D / \sqrt{V} \quad (2)$$

ここに、 C 、 D は定数である。式(1)、(2)から、 ξ 、 σ 、 V の関係を図4に示す関係から整理し、次の実験式を見いだした。¹¹⁾

$$\xi = \xi_0 + (1 + \sqrt{V_0 / V}) \cdot \sigma_0 / \sigma \quad (3)$$

ここに、 ξ_0 、 V_0 、 σ_0 は実験から求まる土固有の定数である。

(2)力学特性

土は凍結すると非常に硬くなる。土が凍結するということは、土粒子間に存在している重力水や吸着水が氷結することを意味している。このようにしてできた凍土は土粒子、氷、空気および土粒子に吸着している水（ここでは不凍水と呼ぶ）から構成されている。

土が凍結すると、図5に示すように圧縮強度は著しく増加する。特に、砂では未凍結状態では、ほとんど0のものが、 -10°C で7.8~9.8MPa、 -20°C で14.7~19.6MPa、 -30°C で19.6~29.4MPaにもなる。シルトや粘土では、凍結のしかたにより、アイスレンズの含み方が異なるため、圧縮強度も異なる。図5に示すように、急速に凍結させたコンクリート状のものでは、未凍結状態の20~78kPaに対して、 -10°C で4.9~5.9MPa、 -20°C で6.9~9.8MPa、 -30°C で9.8~14.7MPaにもなる。

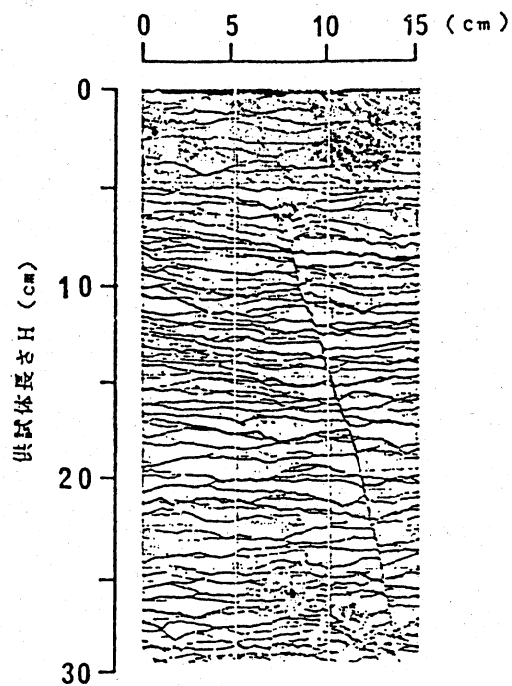


写真-1 凍結土の断面

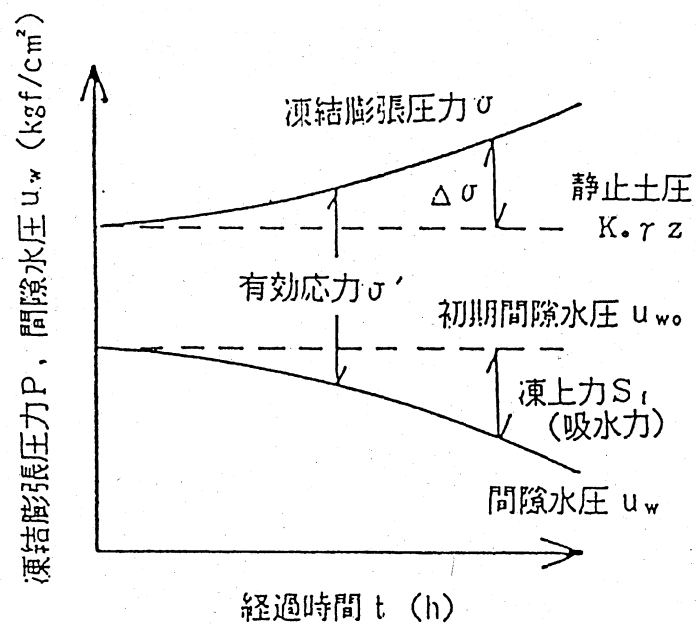


図1 凍結膨張圧及び間隙水圧の経時変化

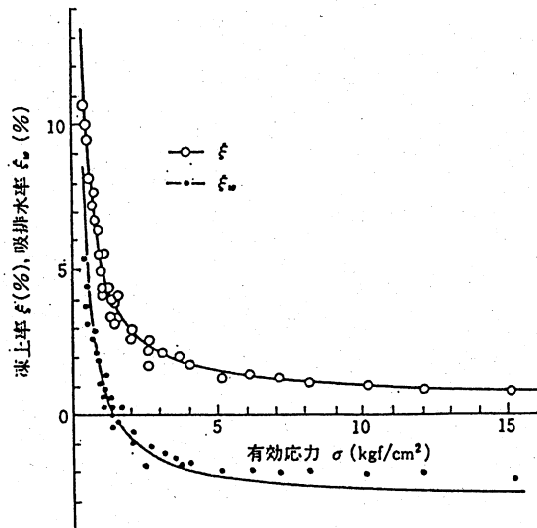


図2 凍上率および吸排水率の上載圧との関係

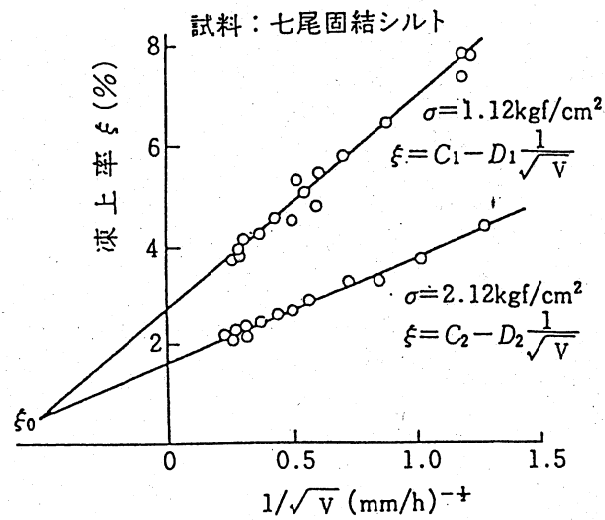


図3 凍上率と凍上速度の関係

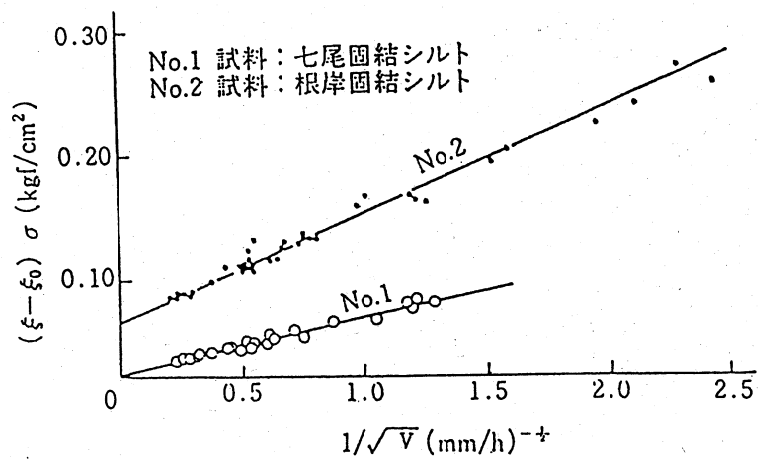


図4 $(\xi - \xi_0) \sigma$ と $1/\sqrt{V}$ の関係

凍土の圧縮強度は、氷の圧縮強度の1.0~2.9MPaに比較し非常に大きい。このように、凍土は貧配合のコンクリート並の強度を有する。

(3) 熱的性質

土の熱常数を推定する方法としては、DeVries¹²⁾、Eucken¹³⁾、Kunii & Smith¹⁴⁾、そして粕淵ら¹⁵⁾の方法がある。通常、土質試験から容易に、しかも簡便に求めることができる土粒子の比重、間隙率から推定する方法としてEuckenによる方法がある。

Euckenは、土の熱常数を土粒子と土粒子の熱橋が完全につながり、その間に水、空気が分散していると考え、次式で未凍土の熱伝導率 λ_2 が与えられるとした。

$$\lambda_2 = \frac{1}{3} \left\{ \lambda_w \frac{1 - \left(1 - \frac{3\lambda_s}{2\lambda_w + \lambda_s}\right) (1 - \phi_w)}{1 + \left(\frac{3\lambda_w}{2\lambda_w + \lambda_s} - 1\right) (1 - \phi_w)} + \lambda_s \frac{1 - \left(1 - \frac{3\lambda_w}{2\lambda_s + \lambda_w}\right) \phi_w}{1 + \left(\frac{3\lambda_s}{2\lambda_s + \lambda_w} - 1\right) \phi_w} + \frac{3\lambda_s \lambda_w}{3\lambda_w + \lambda_s \phi_w} \right\} \quad (4)$$

ここに、 λ_s ：土粒子の熱伝導率

λ_w ：水の熱伝導率

ϕ_w ：体積含水率（飽和土であれば間隙率 n と等しい）

なお、凍土の熱伝導率 λ_1 の算定は、 λ_2 式において水の熱伝導率 λ_w を氷の熱伝導率 λ_i に変えればよい。

凍土および未凍土の密度 ρ_1 、 ρ_2 は、

$$\begin{aligned} \rho_1 &= (1 - n) \rho_s + \phi_w \rho_i \\ \rho_2 &= (1 - n) \rho_s + \phi_w \rho_w \end{aligned} \quad (5)$$

である。土粒子、氷、水の密度を ρ_s 、 ρ_i 、 ρ_w とすると、比熱 c_1 、 c_2 は、

$$\begin{aligned} c_1 &= \{c_s \rho_s (1 - n) + c_i \rho_i \phi_w\} / \rho_1 \\ c_2 &= \{c_s \rho_s (1 - n) + c_w \rho_w \phi_w\} / \rho_2 \end{aligned} \quad (6)$$

で、凍結潜熱 L_s は、

$$L_s = L_w \phi_w \rho_w / \rho_1 \quad (7)$$

である。なお、 L_w は水の凍結潜熱で、 332.9 kJ/kg である。凍土および未凍土の温度伝導率は、

$$\kappa_1 = \lambda_1 / (c_1 \rho_1)$$

$$\kappa_2 = \lambda_2 / (c_2 \rho_2) \quad (8)$$

である。体積含水率 ϕ_w と各熱常数との関係を図6に示す。^{16), 17)}なお、そのとき用いた土粒子、氷、水の熱常数を表1に示す。

このように熱的性質として、熱伝導率、比熱、温度伝導率、凍結潜熱等がある。低温貯蔵庫としてもっとも重要な特性は凍結潜熱である。凍結潜熱は図6より、砂質土のように間隙率 n が0.4で、約 63 kJ/kg であり、粘性土のように間隙率が0.6で約 126 kJ/kg である。このことから、粘性土のように細粒分が多いほど、凍結潜熱が多いので、低温貯蔵庫のエネルギー源としては有利である。しかし、2.1(1)に示したように細粒分が多く含むほど凍上量が大きくなるので、2.1(3)に示す人工的に永久凍土を構築する場合は、凍上量を考慮する必要がある。

2.2 貯蔵庫の現状

北海道では冬期間に広域で、また地中深く地盤凍結が生じる。これに付随して凍上現象が発生し、建物や道路に多大な被害をひきおこす。すなわち寒冷気候による自然災害として地盤凍結をとらえ、その防止あるいは抑止のために多くの研究がなされてきた。ところで、一旦凍結した地盤はコンクリート並の強度を示すことがよく知られている。この特徴を積極的に活かした土木施工法が、人工地盤凍結工法である。この事例が寒冷地における新たな科学技術のあり方を示している。つまり、凍上という害を制して、凍土の強度を活かしす方法である。このように害から益を生み出す立場から、ヒートパイプを利用し、人工的に凍土を構築する試みがおこなわれている。いままで電力による、いわば強制冷却で人工凍土を造成してきたが、最近、冬の寒さをエネルギー源として活用するためにヒートパイプを用いて、冬期の冷熱を地盤内に貯蔵する方法が提案されている。これは寒冷な気候を持つ北海道ならではの手法といえる。このようにして構築した、いわゆる人工永久凍土は冷熱源として食糧の貯蔵庫として利用されようとしている(図7)。^{18), 19), 20), 21)}

夏でも解けない永久凍土層内に食糧を貯蔵することは、シベリヤ、アラスカでは現在でも行われている。その永久凍土はシベリヤ、アラスカ、カナダ北部などに広範に分布し(図8)²²⁾、その面積は $2,100 \text{ 万 km}^2$ 、全陸地の14%にものぼっている。このような永久凍土地帯に食糧の貯蔵基地を建設することにより、食糧の安定供給を図ることが、現在望まれている。

2.3 低温貯蔵庫内の温度および湿度環境

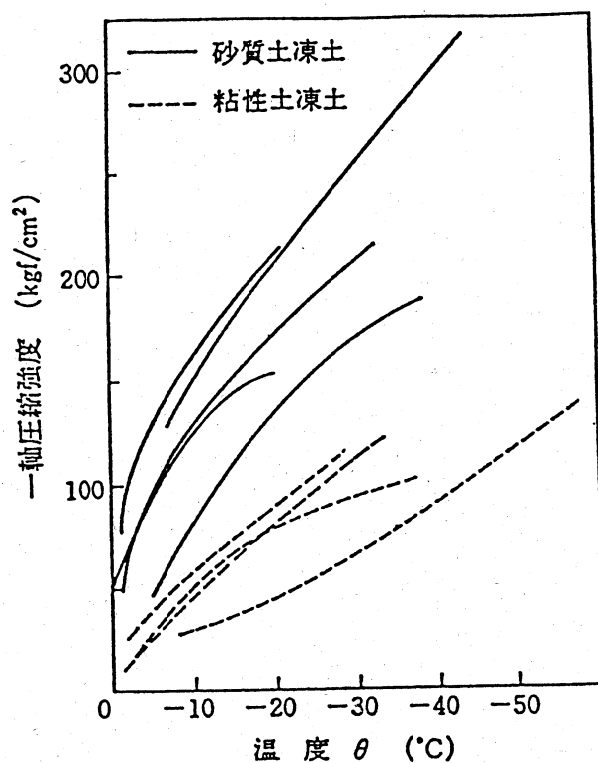


図5 凍土の圧縮強さ

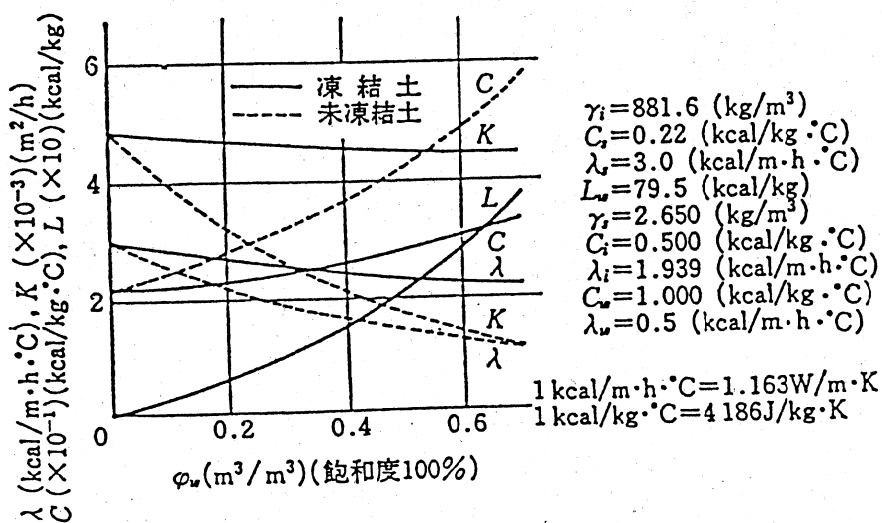


図6 土の熱常数と間隙率

表1 土粒子、氷および水の熱常数

	氷	水	土粒子
密度 ρ (kg/m³)	881.6	1000.0	—
比熱 (kcal/kg·°C)	0.5	1.0	0.22
熱伝導率 (kcal/mh·°C)	1.9	0.5	1.7
凍結潜熱 (kcal/kg)	—	79.5	—

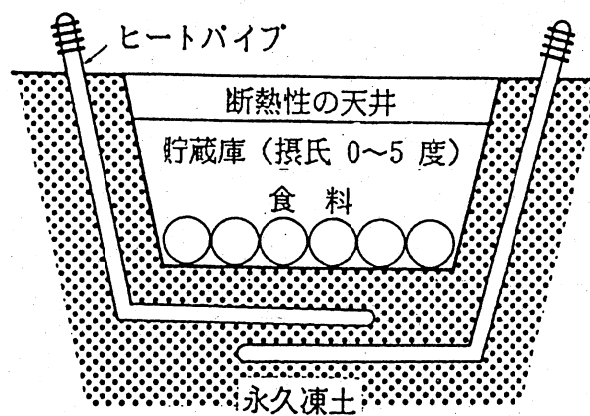


図 7 人工永久凍土を使用した低温貯蔵庫の原理

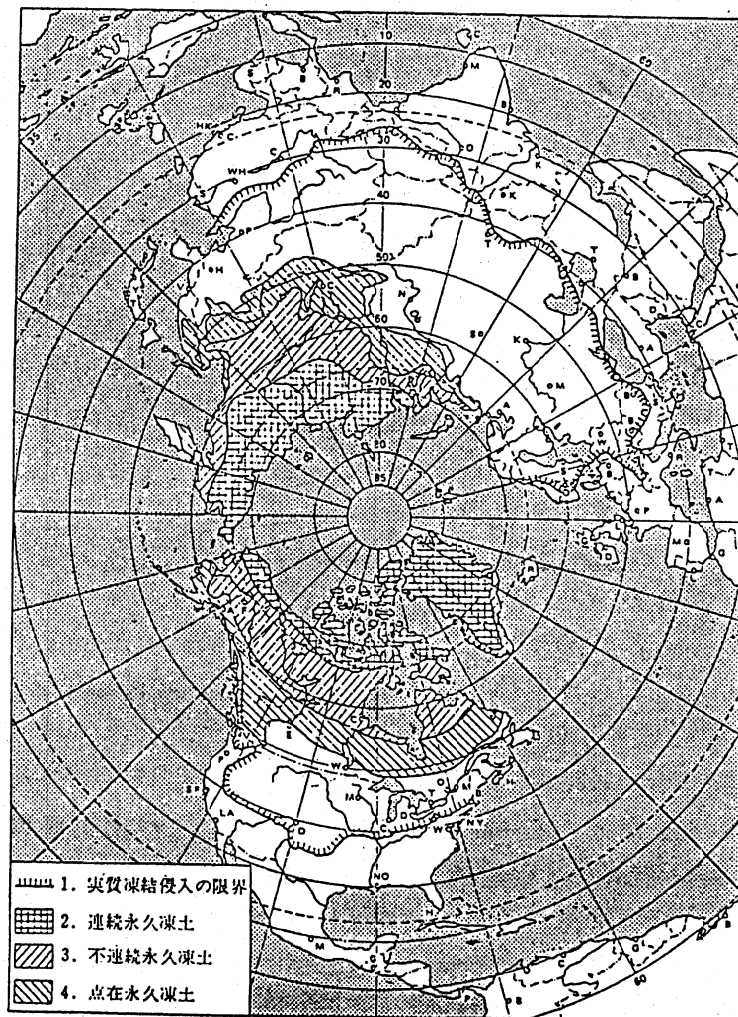


図 8 永久凍土の地理的分布

低温での貯蔵法は、貯蔵するときの温度により次のように分類されている。

①冷蔵 (15℃～氷結温度)

②半凍結冷蔵 (氷結温度～-5℃)

③冷凍 (-15℃以下)

凍土を利用した低温貯蔵庫の庫内温度は、間隙水の凍結温度がほぼ0℃であるので、0～5℃のあいだである。つまり、①の冷蔵状態に相当する。農産物は生のままで消費されることが多いので、貯蔵は冷蔵法が多い。また、農産物の最適貯蔵条件と貯蔵可能期間は表2のとうりである。²³⁾貯蔵物は温度が高くなると、急速に呼吸作用が活発になり、体内の栄養分を消耗して、品質が低下するので低温の方が望ましい。しかし、原産地が南国のものは、温度が低くなり過ぎると変質する。つまり、低温障害を起こすものもある。

青果物(野菜、果物)は、表2に示すように、低温でかつ多湿のほうが望ましい。人工の永久凍土を利用したの青果物の貯蔵結果は、日本では見あたらないが、堂腰²⁴⁾、河本⁵⁾により実験がなされている。堂腰によると、外気温度が-20℃から+20℃に変動しても、庫内の温度は、ほぼ2℃にの一定温度であり、しかも湿度約93%と非常に高い値で一定になっている。その結果、バレイショ、ナガイモの減耗率は約3%以下と、非常に良好な結果となっている。図7のような人工の永久凍土を利用した場合にも、原則的には同様な結果が予想される。

3 人工永久凍土による低温貯蔵庫

3.1 ヒートパイプによる凍土造成原理

ヒートパイプ(熱サイホン)を、図7に示すように、地盤内に埋設せる。冬期の寒気により、ヒートパイプの上部が冷却されると、ヒートパイプ内の蒸気が凝縮し液体となり、管壁を伝わって下りる。その結果、冷熱が下部に運ばれる。そこで加熱され、液体の表面から蒸発が始まる。²⁵⁾発生した蒸気は上部との圧力差により上方へ移動する。このプロセスの繰り返しにより熱移動が自動的に行われ、凍土が形成されることになる。

ヒートパイプの熱輸送量は大気中の冷熱源と地盤との熱抵抗に逆比例し、その間の温度差に比例する。ヒートパイプ一本当たりの熱輸送量 Q は次式で与えられる。

$$Q = (T_a - T_g) / (r_1 + r_2 + r_3) \quad (9)$$

ここに、 T_a : 大気温度

T_g : 地盤温度

r_1 : 地盤とヒートパイプ間の熱抵抗

r_2 : ヒートパイプの熱抵抗

r_3 : フィンの熱抵抗

熱抵抗のうち r_1 は、地盤の熱伝導率、土の凍上特性、ヒートパイプの形状によって、 r_3 はフィンのピッチ、直径などによって決まる。

表 2 最適貯蔵条件と貯蔵可能期間

材 料 名	温 度 (°C)	湿 度 (%)	貯蔵期間	材 料 名	温 度 (°C)	湿 度 (%)	貯蔵期間
イ チ ゴ	-0.5~0	85~90	7~10日	ゴ ボ ウ	0~1	85~90	2~4週
ビ	-0.5~0	85~90	2~4週	バ セ リ	0~1	85~90	2~4週
ブ ド ウ	-0.5~0	85~90	3~6週	アスパラガス	0~1	90~95	3~4週
カ	0~1	85~90	1~2月	ハ ク サ イ	0~1	85~90	1~3月
ナ	-1.5~-0.5	85~90	2~3月	セ ロ リ ー	-0.5~0	90~95	2~3月
リ ン ゴ	-1~0	85~90	2~3月	キ ャ ベ ッ	0~1	90~95	3~4月
グレープフルーツ	0~10	80~85	4~8週	タ マ ネ ギ	-1~0.5	70~75	6~8月
ミ カ ン	2~4	85~90	9~5月	ニ	0~1	85~90	1~3月
バナナ(黄色)	15~22	85~90	5~10日	ゲ イ コ ン	0~1	85~90	4~5月
バナナ(緑色)	12~15	85~90	10~20日	ニ ン ニ ク	-0.5~0	70~75	6~8月
レモン(緑色)	13~15	85~90	1~4月	マ ッ タ ケ	0~5	65~70	7~10日
メ ロ ン	7~10	85~90	5~10日	ビ ー マ ン	7~10	85~90	8~10日
スイートコーン	-0.5~0	85~90	4~8日	エ ダ マ ノ	0~4	85~90	7~13日
ブロッコリー	0~1	90~95	7~10日	ス イ カ	2~4	85~90	2~3週
マッシュルーム	0~2	85~90	3~5日	ジャガイモ	3~10	85~90	2~4月
ハウレンソウ	0~1	90~95	10~14日	カ	-0.5~0	90~95	2~4月
ナ メ コ	0~2	85~90	3~5日	グリーンピース	-0.5~0	85~90	1~2週
カリフラワー	0~1	85~90	2~3週	カボチャ(実)	0~4	85~90	10~14日
メキャベツ	0~1	90~95	2~3組	ト マ ト (実)	7~10	85~90	3~7日
タ ケ ノ コ	0~1	85~90	2~4週	ナ	7~10	85~90	7~10日

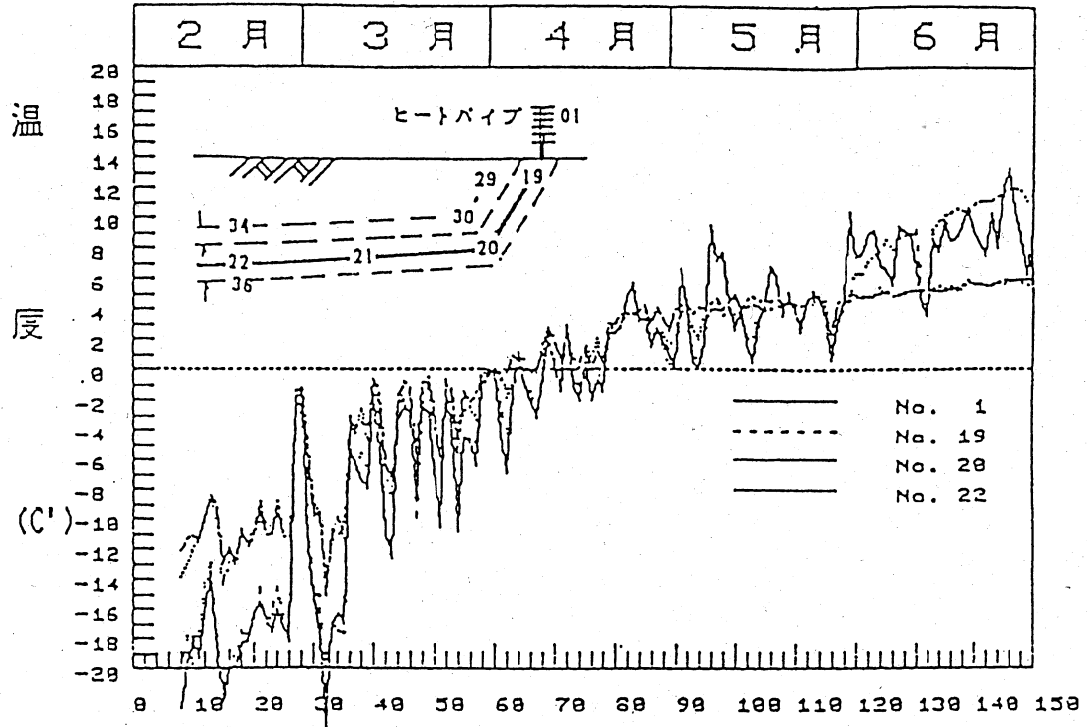


図 9 地盤内のヒートパイプ温度と気温

図9に帯広に設置した12mのヒートパイプの表面温度の経時変化を示す。フィン(No.1)に応答して、地盤内のヒートパイプ温度が非常に良い応答を示している。

3.2 地盤凍結

飽和土が凍結する場合、凍結による膨張率 ξ 、吸水率 ξ_w 、凍結面の進行速度 V 、凍結面での有効応力 σ' との関係として、2.2(1)で示したように次式で与えられる。

$$\xi = \xi_0 + (1 + \sqrt{V_0/V}) \cdot \sigma_0 / \sigma' \quad (10)$$

$$\xi = \xi_0 + n_f \Gamma + (1 + \Gamma) \xi_w \quad (11)$$

ここに、 ξ_0 、 σ_0 、 V_0 は土固有の定数、 n_f は間隙率、 Γ は水の凍結膨張率である。

凍土及び未凍土内の熱移動は、円筒モデルと考えられるので、それぞれ次のように求まる。

凍土内の熱移動

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \kappa_1 \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) \quad (12)$$

未凍土内の熱移動

$$\frac{\partial T_u}{\partial t} = \kappa_2 \left(\frac{\partial^2 T_u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_u}{\partial r} \right) \quad (13)$$

未凍土内の水分移動

$$\frac{\partial U_w}{\partial t} = C_v \left(\frac{\partial^2 U_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_w}{\partial r} \right) \quad (14)$$

ここに、 T_f 、 T_u は凍土および未凍土の温度、 U_w は間隙水圧、 κ_1 、 κ_2 は凍土及び未凍土の温度伝導率、 C_v は圧密係数、 t は時間、 r は位置を表す座標である。

また、凍土と未凍土との境界において、次の関係が成り立たなければならない。

$$\lambda_1 \frac{\partial T_f}{\partial r} - \lambda_2 \frac{\partial T_u}{\partial r} = L_s \rho_s V + L_w \rho_w V_w \quad (15)$$

ここに、 λ_1 、 λ_2 は凍土及び未凍土の熱伝導率、 L_s 、 L_w は地盤及び水の凍結潜熱、 ρ_s 、 ρ_w は地盤及び水の密度、 V 、 V_w は凍結速度及び吸水速度である。凍結面での給水速度 V_w は、ダルシー則により、次式で与えられる。

$$V_w = \frac{k}{\rho_w} \frac{\partial U_w}{\partial r} \quad (16)$$

なる関係が成り立つここに、 k は透水係数である。また式(2)、(3)から、吸水速度は、

$$V_w = \frac{(V + \sqrt{V_0 V}) \sigma_0}{(\sigma - U_{w0} - S_f)(1 + \Gamma)} - \frac{V n_f \Gamma}{1 + \Gamma} \quad (17)$$

で与えられる。

よって、式(16)、(17)から吸水力 S_f を求め、それによる脱水圧密度を差し引いた強制変位による凍結面で応力増分が凍結膨張圧力の増分である。さらに、式(9)、(15)の境界条件のもとに、式(12)～(14)を解き、温度分布、間隙水圧分布、有効応力分布を求める。土質、応力、温度条件により非常に大きな圧力、変位が生じる場合がある。

3.3 凍土の残存状況

低温貯蔵庫として、ヒートパイプにより構築した凍土を利用する場合、その凍土がどの程度残存するかが、重要な問題となる。

生頼ら²⁶⁾は、積算寒度が500ディグリー・ディの場合で凍土が完全には溶けないで残存する厚さについて検討した。その結果、凍土の直径が1.4m以上あれば越年することを明らかにしている。

著者ら²⁰⁾は、凍土の残存状況を帯広市を想定して検討している。貯蔵庫を直径36m、高さ5m(容量が5000m³)、庫内の温度を5℃で一定としたとき、凍土の厚さが1.0mの場合は、8月後に、凍土は消滅するが、1.5m、2.0mの場合は1年後でも凍土は残存するとしている。

このことから、地中からの熱流を防ぐために、断熱材を敷けば、さらに必要とする凍土の厚さは減少する。

4 今後の展望

低温貯蔵庫の発達により、夏期の出荷を激減することなく、安定供給が可能となるばかりでなく、付加価値の高いものとなる。従来の低温貯蔵庫は、冷凍機による方法が一般的であった。しかし、この方法はイニシャルコストが高いばかりではなく、ランニングコストもばかにならない。このため建設費が安く、しかもランニングコストの少ない低温貯蔵庫の開発が望まれた。

小麦、大豆、タマネギ、野菜等の低温貯蔵庫としては、その用途により、規模、あるいは形状が異なる。図10に大規模な貯蔵基地を想定したものを示す。これらは、幅6～9m、奥行き20～100m、高さ4～5mの貯蔵庫を一基あるいは数基群設して構築される。いずれの場合も掘削土量を軽減するために、半地下式にすることが望ましい。

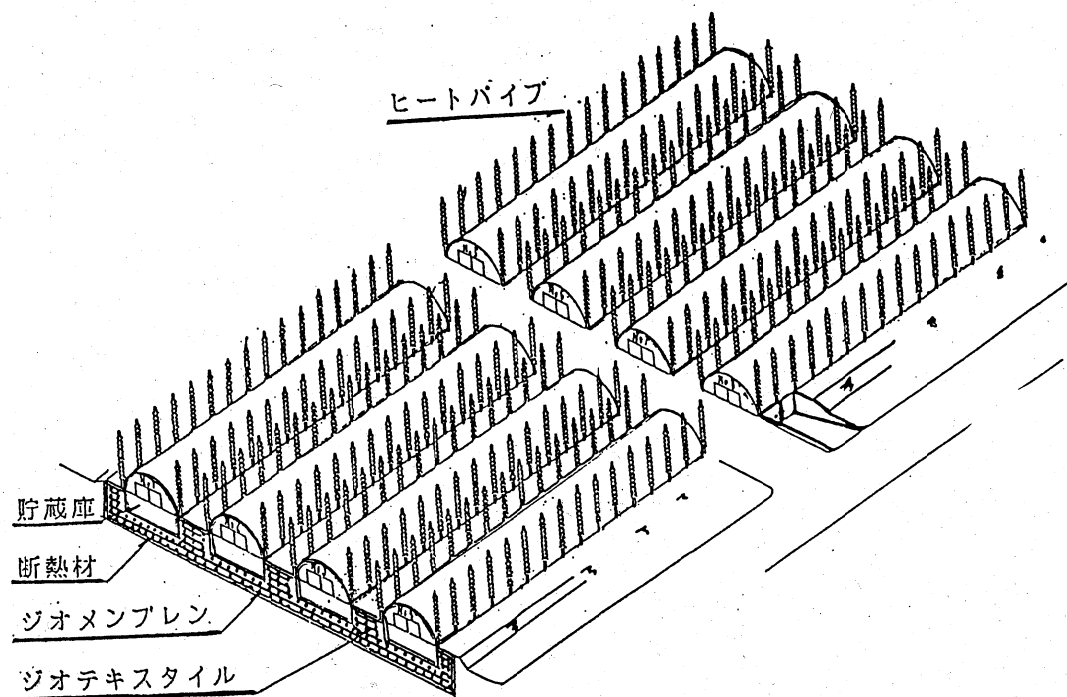


図10 食糧貯蔵のための大規模基地

さらに、凍土の凍結潜熱を大きく期待するために、凍土領域の外側に不透水性のジオメンブレン等を設置し、凍土領域の飽和度を高めることが望ましい。

5. あとがき

ヒートパイプによる永久凍土を低温貯蔵庫へ利用するに当たって、この貯蔵庫に適する農作物を選定し、その品質を評価するための実証実験が必要であろう。いずれにしても、従来は「害」としてとらえていた「寒さ」を「益」としてとらえる有効な手段として、このシステムの持つ意義は大きいものと思われる。

引用文献

- 1) 北海道大学放送教育委員会：低温とくらし、北海道大学図書刊行会。
- 2) 邨田卓夫：青果物の低温障害と保存適性温度、日本冷凍協会論文集, Vol. 3, No. 1 (1986)。
- 3) 若浜五郎：「雪・氷・人」、北海道新聞社。
- 4) 村松謙生：雪を利用した野菜の長期貯蔵に関する研究、日本雪氷学会秋期大会公園予稿集(1986)。
- 5) 河本周朗、堀山政良、橋本良明、冬期冷熱の蓄熱及び利用システム「氷室計画」の概要、寒地技術シンポジウム'86(1986)。
- 6) 福田正己、本山秀明、低温貯蔵を目的とした積雪の融解遅延、寒地技術シンポジウム'86(1986)。
- 7) 中尾信一、粉川牧：アイスシェルによる冬期間野菜氷温貯蔵実験、寒地技術シンポジウム'86(1986)。
- 8) 土質工学会：土の凍結(その制御と応用)(1982)。
- 9) 木下誠一：凍土の物理学、森北出版(1982)。
- 10) 了戒公利：熱と水の流れを結合した飽和土の凍上理論とその応用に関する研究、清水建設研究報告別冊、第15号(1985)。
- 11) 高志勤、益田稔、山本英夫：土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度、有効応力の影響に関する研究、雪氷, 36巻2号(1974)。
- 12) De Vries, D. A.: Analysis of Porous Thermal Insulating Materials, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 49, No. 11, p. 1936 (1957)。
- 13) Eucken, A.: Die Wärmeleitfähigkeit keramischer feuerfester Stoffe, ihre Berechnung aus der Wärmeleitfähigkeit der Bestandteile, VDI-Forsch-Heft 353(1..2)。
- 14) Kunii, D. and Smith, J. M.: Heat Transfer Characteristics of Porous Rocks, A.I. Ch. E. Journal Vol. 6, No. 1, pp. 373~381 (1960)。
- 15) 柏淵辰昭：土壌の熱伝導機構について、農業土木学会誌 Vol. 42, No. 9, pp. 9~30 (1974)。
- 16) 日本ガス協会：LNG地下貯槽指針(1978)。
- 17) 井畔端人、了戒公利：Eucken式による土の熱定数とその凍上試験への応用、有機質土の熱的性質に関するシンポジウム(1985)。
- 18) 沢田正剛、大野武敏、百武欣三：ヒートパイプによる地中凍結の野外実験、雪氷学会秋期大会(1983)。
- 19) 高志勤、生頼孝博：地盤凍結に応用するためのヒートパイプ野外実験、日本雪氷学会秋期大会(1982)。
- 20) 福田正己、土谷富士夫、了戒公利、望月正孝：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫寒地技術シンポジウム'86(1986)。
- 21) 土谷富士夫、辻修：冬期の寒冷気候を利用した凍土の造成と保存、寒地技術シンポジウム'86(1986)。
- 22) 木下誠一：「永久凍土」、古今書院(1980)。
- 23) 岡部次郎：「貯蔵学」、朝倉書店。
- 24) 堂腰純：自然氷の潜熱エネルギー利用に関する研究、寒地技術シンポジウム'86(1986)。
- 25) 高岡、馬渡、坂谷、望月、益子、伊藤：長尺ヒートパイプの開発とヒートパイプの応用製品、藤倉電線技報、第68号, 1984。
- 26) 生頼孝博、松岡啓次：寒さを利用した造成凍土の越年維持の一方法：雪氷学会秋期大会(1983)。

この文章は、了戒公利、福田正己の両氏が1987年、日本凍結協会論文集、Vol. 4, No. 1, pp. 1~9に発表されたものを転記したものである。

第2章 ヒートパイプ技術の開発普及状況と低温技術への応用

1. はじめに

寒冷環境にある地域では、それをデメリットとしないためには寒冷環境を十分に認識し、既存の固定概念にこだわらない自然への対応が必要である。そこで、寒冷自然環境の特質を理解し、その地域社会の要請を組み込む積極的な研究体制が作られることが急務である。

特に冬期間の寒冷地域では、環境保全や省エネルギーに立脚した種々の技術開発が要求され、太陽熱、地熱、冷熱、排熱など地域特有の自然・環境エネルギーの有効利用を積極的に推進することが望まれている。

熱エネルギーの有効利用をはかろうとするとき、熱損失を少なくして効率的に熱を輸送したり、温度を均一的に保ちながら、加熱・冷却を行う手段として優れた伝熱性を持つヒートパイプが注目される。近年、このヒートパイプの有用性が多方面において広く認識され、その応用範囲が拡大されている。

他方、熱エネルギー利用における熱源の問題を考えると、温暖の熱源としての地熱と廃熱が重要な要素となってくる。地域特性に限定されるが、温泉熱利用が古くから注目されている。寒冷な熱源として、雪や氷などの物質や直接的な寒冷温度を利用することが開始された。冬の寒さを冷熱エネルギー源として活用する、伝熱素子のヒートパイプを用いた人工凍結方法などは、寒冷気候を有する地域ならではの効果的な手法と考えられる。

2. ヒートパイプとは

ヒートパイプ (heat pipe) の源流をさかのぼると、1942年、米国オハヨ州にあるG.M.社のR.S.Gauglerが発案して特許出願したHeat Transfer Deviceが文献第1号である。1963年に、G.M.Groverが最初にHeat Pipeという名称を使用し、人工衛星用のヒートパイプの研究を行った。そして、1968年に打ち上げられた人工衛星に、搭載電子通信機の温度制御として、2本のヒートパイプが使用され成功に至った。以後、パイプの理論解析は大きく進展し、米国に続いてイギリス、イタリアで原子炉に使用できる高温用パイプが研究された。

以上のように、初期のヒートパイプは人工衛星、宇宙船あるいは熱電子発電機へ利用されたが、1970年代になって産業機器の放熱と均熱用に用いられた。現在は、

電気装置からの放熱、金属の冷却、空調、熱交換機、均熱炉その他家庭用品などの多方面に実用及び開発化が進行している。

ヒートパイプの原理を説明すると、密閉容器のなかに封じ込まれた液体が、加熱されることにより、蒸発して気体となり容器内に充満する。このとき、他方を冷却す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潜熱が液体に吸収され、冷却部ではその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のと同じように、蒸発部から凝縮部へ熱を輸送するように見える。

蒸発・凝縮は極く小さな温度差でも起こり、冷却部で凝縮した液体は、ウィックと呼ばれる構造を持つ毛管現象によって凝縮液を加熱部に戻すことができる。重力の場合では、上部が冷却部に下部を加熱部という状態にすると、効率良く作動し、このサイクルが無限に継続される。図1にヒートパイプの構造図を示す。内部にウィックを使用しないで重力の作用を用いるタイプを熱サイホン型ヒートパイプと呼ぶ。ウィックを用いるヒートパイプに比べ、ウィックレスヒートパイプは構造が単純なため価格も安くなる利点がある。

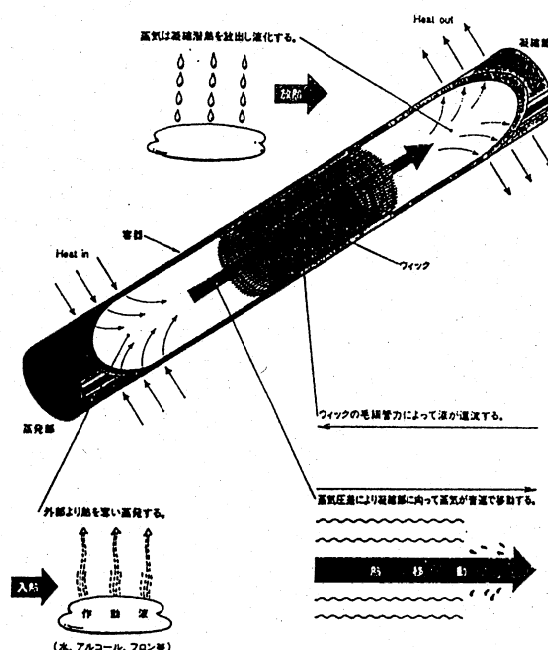


図1 ヒートパイプの構造と原理

3. ヒートパイプの性能と用途

ヒートパイプの容器構成材料を表1に示す。また、作動液体は現在使用されているもので、その主な作動液と使用温度範囲を表2に示す。パイプ材と作動液体との適合性があり、パイプ材との融点が使用温度以上であると、腐食の発生や不凝縮ガスの発生により、作動液体の変質して循環の障害になったり、圧力上昇の危険が生じる。

ヒートパイプの他に見られない長所を要約すると以下に整理される。

(1) 優れた熱伝導性

金属に比べて、数百倍もの多量の熱を輸送できる。

(2) 速い熱応答性

ヒートパイプ内の蒸気は音速に近いスピードで移動する。

(3) 高い温度均一性

温度分布を一様にさせる機能を持っている。

(4) 大きな設計自由度

必ずしも円管でなくともよく、任意の形状でもよく、パイプの外側にフィン等を取り付けられる。

(5) メインテナンスの不要

電氣的または機械的な駆動部を必要としないので無動力で作動する。

(6) 軽量コンパクト

パイプの中が中空なため重量が軽い。

次に、ヒートパイプの利用形態を分類すると、次の5つの特徴を生かした用途が考えられる。

(1) 熱源とヒートシンクとを離しておける。

電子機器、音響機器、モータ、金型の冷却の性能向上、排熱利用、温冷分離の熱交換機などある。

(2) 等温性がある。

人工衛星の外殻、電子部品の等温化、調理用厨房機器に適している。

(3) 熱流束を変換し得る。

原子炉の熱電子発電機に使用される。

(4) 温度制御ができる。

宇宙船用の温度制御に使用される。

(5) 熱ダイオード性と熱スイッチ性

熱の流れが一方向のため逆流が起こらずに、自動停止する。

以上のようにヒートパイプは単なる伝熱素子であり、それ自身は優れた伝熱特性を持っているが、熱源および吸熱源との熱の授受に対しては通常の伝熱特性に従う。問題は、熱源および吸熱源とヒートパイプの接合部分の状態が、全体システムの伝熱性を大きく支配するということである。

表1 ヒートパイプの構成材料

動作液	水、メチルアルコール、エチルアルコール、アセトン、フロン11、ナトリウム、カリウム、リチウムなど
ウィック材	金属性網(銅、ニッケル、ステンレス)、焼結合金など
密閉容器	銅、ステンレス鋼、ニッケル、タングステン、モリブデンなど

表2 おもな動作液と使用温度範囲

動作液	融点(℃)	沸点*(℃)	使用温度範囲(℃)	温度領域
ヘリウム	-272	-269	-271~-269	極低温
窒素	-210	-196	-203~-160	
アンモニア	-78	-33	-60~100	
フロン11	-111	24	-40~120	常温
フロン113	-35	48	-10~100	
アセトン	-95	57	0~120	
メチルアルコール	-98	64	10~130	
エチルアルコール	-112	78	0~130	
水	0	100	30~200	高温
サメックス	12	257	150~395	
水銀	-39	361	250~650	
セシウム	29	670	450~900	
カリウム	62	774	500~1,000	
ナトリウム	98	892	600~1,200	
リチウム	179	1,340	1,000~1,800	
銀	960	2,212	1,800~2,300	

*大気圧での物性値を示す。

4. ヒートパイプの普及現状

ヒートパイプ技術においては米国が最も先行しており、わが国との差はその応用分野の開発においても大きいと言われている。しかし、最近のわが国の研究開発は急速に盛り上がりつつある。表3は、欧米とわが国におけるヒートパイプ利用の広範囲な分野をその使用温度範囲別に列挙したものである。米国のトップヒートパイプメーカーのヒューズ社によると、応用化段階を3段階に分け、△印は実用化段階、○印は開発テストが行われているもの、□印は潜在的分野としている。これらの記号に黒塗したものは、わが国でも実施されているものを示す。たとえば、地熱利用の道路融雪、橋梁路面の凍結防止、交通標識の着氷防止、トンネルのつらら発生防止などかなりのテスト開発が行われている。

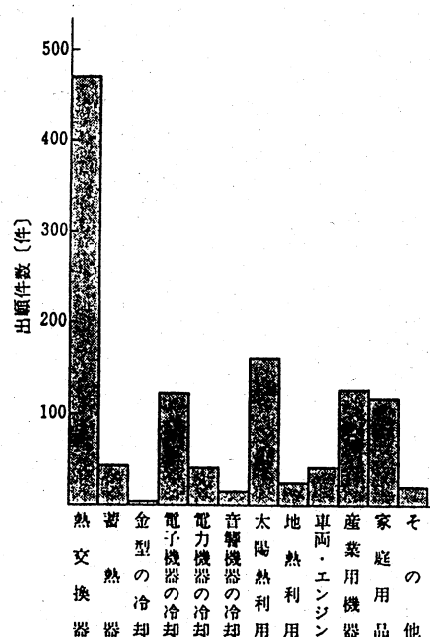


図2 分野別特許出願件数(1971～80)

ヒートパイプの普及現状をみると、特許出願件数から判断される。件数の増加は石油危機の時期にみられ、わが国におけるヒートパイプ技術の勃興期とされている。出願を業種別にみると、電気メーカ、電線・材料メーカ、造船・プラントメーカの順に出願が多い。応用分野別の出願件数をみると、図2に示すように、熱交換器に関するものが最も多く、全体の4割を占めている。次いで太陽熱利用、各種産業用機器、電子機器の冷却、家庭用品の順になっている。しかし、寒冷地域での用途開発や普及は充分とはいえない。

5. ヒートパイプの寒冷地域での応用

冬期の降雪による着氷、凍結、つららの発生など交通、生活面での防止対策に利用願望が多い。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ているのが現状である。この点、建設費は割高でも、自然資源の地熱などの利用システムの開発がなされて、寒冷地域の低温技術への応用はゆっくりではあるが進展方向に向かっている。

1) 道路の融雪・凍結防止

道路の雪害対策として、従来からの機械力による除雪が主として行われているが、

表3 ヒートパイプ応用の現状と将来計画

分野	極低温 -273~-150°C	低温 -150~0°C	常温~中温 0~200°C(ケースにより300°C)	中高温 200~400°C	高温 400~1200°C (実質800°C)	超高温 1200°C以上
医療、調理	△クライオステック	△神経外科 ●氷のう	□暖房毛布 ▲調理運搬車(病院の食食用) ◇動物用検温計			
電子部品の冷却 および重電関係	△赤外線検出器 冷却		▲電子管冷却, ▲ヒートシンクの基盤, ▲トランス冷却, ●出力装置の冷却, ■電気モータ, □ソレノイドとマグネ ット, ▲NC 工作機用モータシャフト, ▲オーディオアンプのヒートシンク, ▲オーディオスピーカ, ▲サーキット ブレーカ, ●パネルヒータ, ●コピー マシンのヒートロール		○燃料バーナの 気化器	
熱関係	△IR 検出器冷却 用のスイッチ形 ヒートパイプ	△半導体試験器の 温度制御 △永久凍結層土壌 安定化	▲プラスチックの射出成形, ▲押し出 し金型, △火災保護衣用屈曲自在ヒ ートパイプ, △熱ダイオード, △IR 標 的板, ▲宇宙用の可変コンダクタンス ヒートパイプ, △ミサイル冷却のため のスイッチ形ヒートパイプ	○伸線ダイス	△結晶の生長炉 △ガラス成形金 型 ○真空炉 ○廃プラスチック 溶解炉	○ガラス溶融炉
エネルギー利用		●道路の融雪, ◆ 軌道の融雪, ●橋 梁路面の凍結防止, ●トンネルのつら ら防止, ○船舶用 航路ブイ	▲ソーラコレクタ(冷却と加熱) ◆軌道凍結防止 ▲排水管の凍結防止 ●温室土壌の保温	△太陽コレクタ (出力発生) △石炭のガス化	○熱電子発電器 ○石炭のガス化 ◇核融合炉ブラ ンケット	◇深層マグマの 利用
食品加工		◆食品解凍	●食品乾燥, □保温オープン, ■給食 テーブル	△調理用グリド ル, △料理なべ, ○対流式オーブ ン炉, ●焼串		
プロセスコン ロール	□空気分離	◆LPG, LNGタン ク基礎の凍結防 止	○乾式コンテナ(蒸気), ▲ダイキャ スト金型, ◆海水淡水化, ▲プラスチ ックフィルムシーラ, ●繊維機械 △プラスチック重合用の VCHP	○乾式コンテナ (蒸気), ○原 子炉(化学上 の), △射出成形 機ノズル	○メタン化 ◆触媒の均熱化 (除熱)	○石炭のガス化
廃エネルギーの回 収			△乾燥がま, ▲空調システム, ▲動物 飼育室	○石油精製工程	○石炭のガス化 ○セメント生産 ▲金属加熱炉	◇セラミックヒ ートパイプ熱交 換器
自動車, 船舶な ど		●船舶ブリッジの 着氷防止	●ガソリンエンジンの気化器, ○エン ジンシリンダの冷却, ■エンジンバル ブの均熱, ○燃料の改質		○スターリング エンジン	○ジェットエン ジン
雑貨, その他			△クッキングビン ▲バターナイフ, ●マドラ			
家電関係			■コーヒーパーコレータ ◆換気扇			

太字: 米国ヒューズ社発表の項目, また, これに海外文献情報により若干プラスしている, VCHP: 制御形ヒートパイプ

△: 実用化されているもの, ○: テストされているものまたはテスト済みであるが実用化されていないもの, □: テストが予定されているもの,

◇: アイデア的なもの, (注) 黒塗りしたものは日本でも行われているもの

機械除雪のおよばない公共施設、病院、福祉施設などの玄関、通路、駐車場に、水を循環する温水パイプ融雪と通電して発熱する電熱融雪などが行われている。しかし、いずれもエネルギー消費量が大きく、維持費が高く耐久性に問題が大きい。

A) 地熱利用型

近年、地熱を利用したヒートパイプ融雪システムが開発された。1975年米国ウェスト・バージニア州のオイラー通りの坂道に1213本のヒートパイプが敷設された。ヒートパイプの地中部の長さは18mで、設計熱量は 140w/m^2 とされ、冬期間の例外的な厳しい条件の日を除いて凍結防止効果を充分発揮している。

わが国では1977年、関東地方建設局、関東技術事務所が企画実施し、フィールド試験を行った。翌1978年に長野市より気象条件の厳しい野尻除雪ステーションで融雪試験を行った。完全な除雪は期待できなかったが、シャーベット状の雪となった。1978年、日本道路公団北陸自動車道・長岡インターチェンジ構内の駐車場でも実験がなされた。融雪は埋設パターンに応じて融雪効果が認められた。図3に地熱利用の融雪・凍結防止の基本型を示す。

しかし、自然の地熱だけでは、融雪エネルギーが不足するため単独地熱利用はほとんど難しいのが現状である。

そこで、地熱の不足分を電熱で補う併用型のヒートパイプ融雪システムが考案され、工業技術院機械技術研究所らで試験されている。図4に示すように、

地中7mにヒートパイプを埋設し、パイプ先端部にセラミックヒータを取り付けた。豪雪時のみ通電することとする。秋田市での実験によると、10cm以下は地熱のみ利用し、シーズンの10%に相当する11cm以上は電熱エネルギーを使用した。

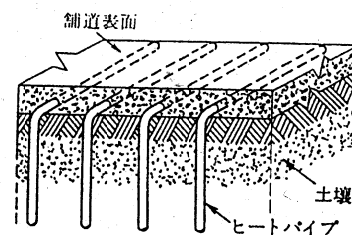


図3 ヒートパイプ融雪・凍結防止基本型

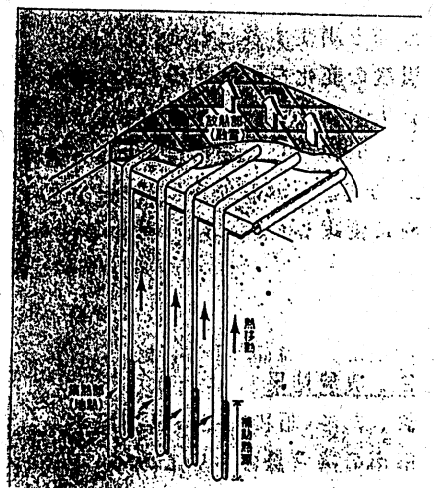


図4 地熱・電熱併用型

B) 太陽蓄熱利用型

春から夏にかけての太陽熱を、のり面や路面直下のヒートパイプで集熱し、その熱を道路盛土内に輸送して放熱・蓄熱をする。そして、冬季にこの熱によって加熱された温水循環パイプの熱水を循環させ、路面直下に配管されているヒートパイプを熱し、路面の融雪を行うシステムである。このシステムは日本道路公団試験所で開発されたもので、1990年東北横断自動車道・秋田線で試験が開始された。

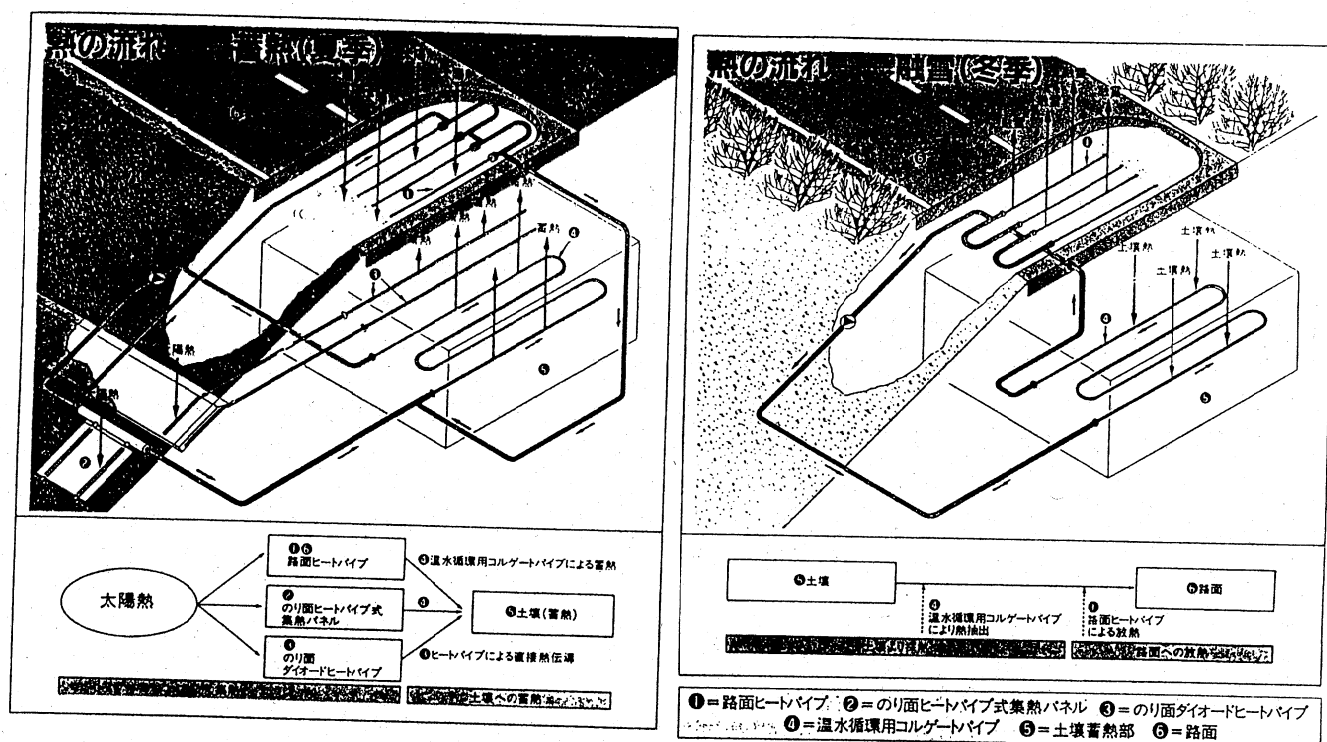


図5 ヒートパイプ利用の太陽熱・蓄熱システムの熱の流れ

蓄熱時のシステムは図5に示すように、3系統がある。1つ目は、路面ヒートパイプが集熱して温水循環パイプの液体を加熱する。2つ目はのり面のヒートパイプが自動的に熱を伝達する。3つ目は、集熱がのり面パネルの裏面のヒートパイプを通じて行われ、その熱が温水循環パイプ内の液体に伝熱される。実験は現在も進行中であるが、3月の中旬でも蓄熱部の地中温度は20℃もあり、十分な融雪能力を有していることが判明している。さらに、日本道路公団では中国自動車道・葦山サービスエリアにおいて、レストランの冷房廃熱・太陽熱結合の蓄熱・融雪システムの実験を初めた。

C) 温泉熱・温泉廃熱利用型

温泉水を熱源としたヒートパイプ道路融雪は、運転エネルギーを必要とせずランニングコストのかからない融雪システムである。しかし、熱源が温泉であることから地域が限定される。

1983年から84年にかけて、札幌市常山溪温泉で、温泉熱源を利用したヒートパイプ式の融雪システムが施工された。復員12.7m、全長311mの道路と38mの月見橋に45mもの長尺ヒートパイプが使用された。これは、当時世界最大規模のヒートパイプ融雪工事とされている。温泉水はポリブテン管に送水し、継ぎ手により取り付けられたヒートパイプの片端を加熱した。厳寒期でも毎時1cmの降雪に対処できる能力を

有する。また、1987年に山形県蔵王温泉街で、旅館の風呂場から24時間排出される30～40℃の温泉廃水の流れる道路側溝から熱を抽出し、道路の融雪をする実験が行われた。温泉水はpH2の強酸性であることから、ステンレス・コレゲートヒートパイプの腐食対策にポリエチレン被覆がなされた。熱源の伝達部のヒートパイプと側溝内の形状を図6に示す。側溝の清掃に問題があるが、底部でコンクリート打設した場合に比べ直接温水に接触させた方が熱効率が良いことが認められた。

D) 温水ボイラー加熱型

ヒートパイプ方式は、伝熱面積が大きく、強度と熱応力に強く、耐久性に富み施工性がよいなど、ロードヒーティングとして注目されている。しかし、温泉熱など高温の熱源を得られない地域では、温水ボイラーを使用せざるを得ない。札幌市では、図7に示すような透水性のコンクリート舗装、透水性アスファルト舗装、透水性のインターロッキング・ブロック舗装そして一般のアスファルト舗装における融雪効果と経済性の試験を行った。所定の融雪能力を発揮することが認められるとともに、灯油ボイラーの方がガス焚きボイラーに比して年間の維持費が1/2以下であることがわかった(864円/m²)。

また、スパイクタイヤの規制などで坂道と交差点の融雪と凍結防止の必要性が増大している。舗装材料には景観

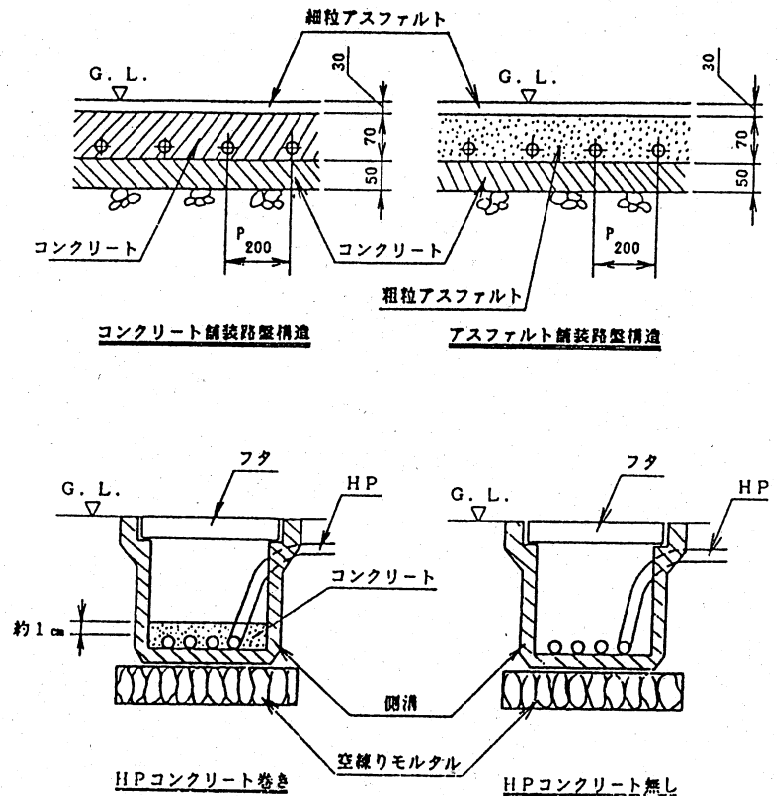


図6 側溝を流れる温泉廃湯利用の道路融雪

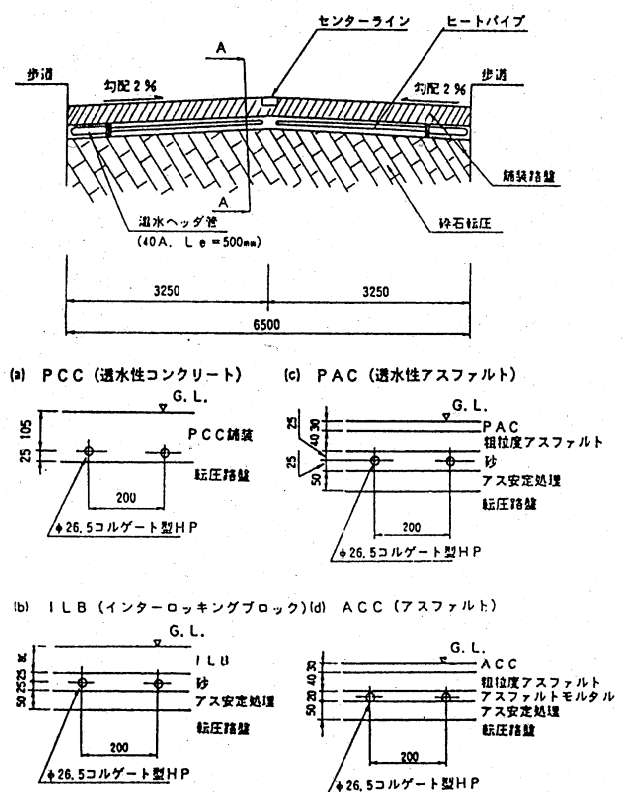


図7 透水性舗装のヒートパイプ融雪

維持ができるインターロッキング・ブ

ロック舗装の採用が増大してきていることから、ヒートパイプ融雪試験が行われた。札幌市の旭山米里線で、歩道部に地下型ガスボイラーを設置し、融雪試験を行った。登り坂の車線は非常に良く融雪され、車両の発進・停止時に安全確保に充分効果を表すことが確認された。維持費は1シーズン1450円/m²と算定された。

2) 凍土の造成と保存

寒冷地域では、冬季の寒さを積極的に利用すると、地中に凍土を造成することができ、その蓄積した冷熱を夏期のビル空調、低温貯蔵庫に利用できる。凍土造成に最初にヒートパイプを使用したのはアラスカであった。

A) アラスカパイプライン

米国、アラスカ州を全長1,280 kmの石油パイプが、1968年に計画され、約60億ドルをかけて、1977年に完成した。北極海に接するブルドー湾から、永久凍土地帯を横切って、太平洋岸の不凍港バルデールまで、60℃に加熱した原油の圧送が開始した。このとき、この熱が地面に伝達されると、永久凍土は融解し、パイプの支柱は沈下したり、その後の凍結による凍上で破壊される。また、永久凍土の融解はコケ類を死滅させるため、主食とするトナカイの死滅に導くものであった。こうした自然環境の保全のため、図8に示す垂直支持杭の内側にヒートパイプを取り

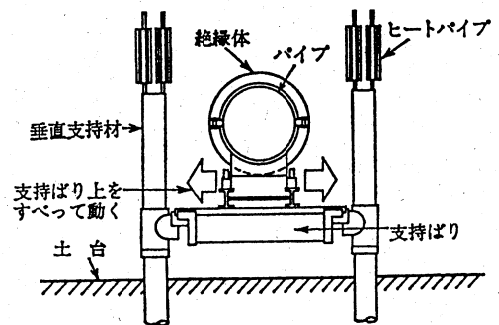


図8 アラスカパイプラインの構造

付け、土壌を冷却し熱が下に伝わらないようにした。このとき、使用したヒートパイプは約13万本といわれ、作動寿命は30年を保証している。

B) 人工永久凍土による低温貯蔵庫

1984年より、ヒートパイプの土壌凍結効果の現地試験と調査を続けてきた。その結果、ヒートパイプは厳寒な冬期の寒冷気温のもとで、作動液圧、パイプ内の構造などの改良により、土中深くまで凍結できることが判明した。そこで1987年12月に帯広畜産大学の構内に、小型の低温貯蔵庫のモデルプラントを構築し、内部に馬鈴薯などを貯蔵し、性能試験を開始した。

地面に鉛直に埋設されたヒートパイプは、地中から熱を吸収し地上のフィンから放熱し、土壌温度を零度以下に低下させる。土壌水は冷却されて氷となってその場に保存される。夏期になって外気温が上昇しても、ヒートパイプの熱ダイオード性により、暖かい熱は地中に伝達されない。その結果、冬期間に形成された凍結土層

は断熱材に取り囲まれているため、容易には融けず低温状態が持続され、その内部の貯蔵物質は保存される。自然換気を利用するため電気やその他の動力を一切必要としないので従来の冷蔵庫と大きな差があり、ランニングコストを必要としない省エネルギータイプの低温貯蔵庫である。図9に示すように貯蔵庫の空間の寸法は、幅3.6m×奥行き6.0m×高さ3.6mであるため、庫

内容積は約70m³からなる。貯蔵空間を囲む形で、216本のヒートパイプが50cm間で4列になるように敷設した。パイプは直径46mmのSUSコルゲート・ステンレ管からなる。1月下旬で2m以上の厚さをもつ凍土が形成された。3月以降の温状態は良好で、完全に永久凍土がつくられ、貯蔵物質を保存するに大きな効果をもたらすことが判明した。外気温が30℃以上にもなった8月でも庫内は3℃の適温を維持したため、年間コンスタントに使用できるシステムで実用できる技術と考える。現在、網走市や十勝地方士幌町にも改良されたプラントが建設されて、農産物の貯蔵に利用されている。

3) 屋根の融雪

多雪地帯にとって雪害は、交通事故の多発、家屋の崩壊などのさまざまな影響を与える。住宅密集地が多く、家屋周辺に土地の余裕が少なく、屋根からの雪下ろししてもその処理に多大な労力、費用を必要とする。また、雪下ろしが全く不可能な場合もある。そして、雪下ろし作業中の負傷事故や死亡事故が発生している。屋根の雪処理である融雪は日本固有の発想ともいわれている。

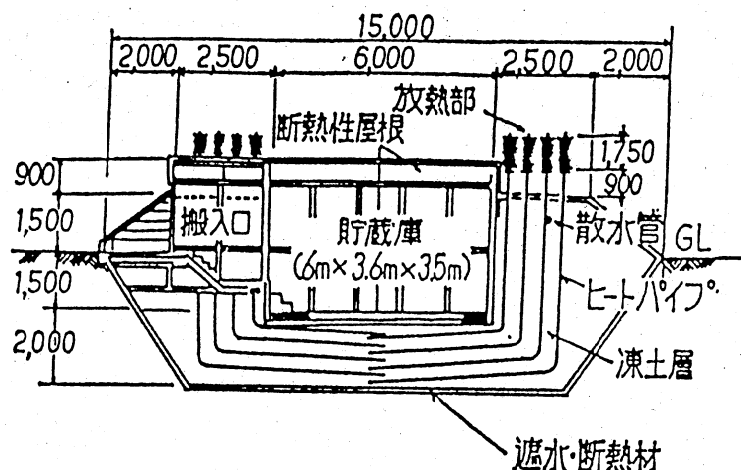


図9 永久凍土低温貯蔵庫の構造

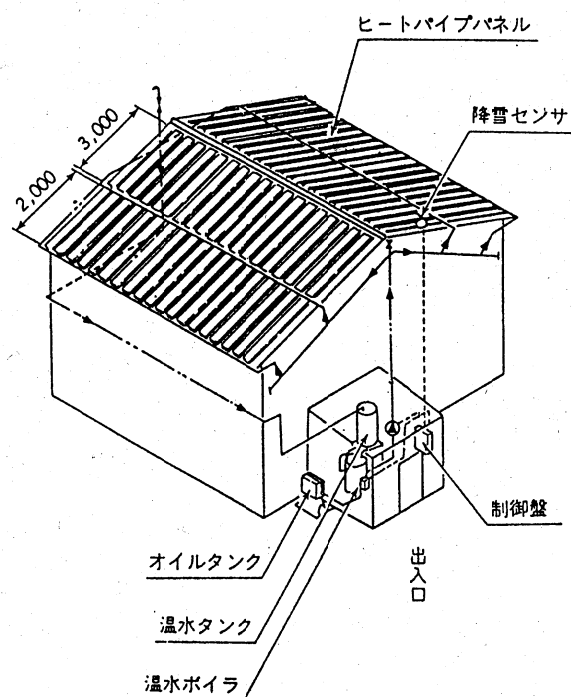


図10 ヒートパイプ型の屋根融雪

ヒートパイプと温水加熱管を一体構造化し、耐久性の優れたカルバニウム鋼材と断熱材を組み合わせたヒートルーフと呼ばれるパネルを使用した、融雪システムが開発されている。図10に示すように、ヒートルーフを既設屋根上に配置し、小型温水ボイラにより加熱し、温水熱がヒートパイプに伝熱されパネル上の雪を溶かす。

新潟、富山、山形の各県での実験で良好な融雪状況が得られ、現在普及されている。燃料費は1シーズン500～700円/m²となり、電熱方式の約1/3に低減できることが実証されている。

4) 電柱支線の融雪

山間豪雪地帯で、雪の沈降力が原因で電柱の折損や支線の切断事故が多発している。支線の周囲の雪を溶かし、雪圧を回避するためにヒートパイプが使用される。比較的浅い表層の地熱(2～6℃)を抽出して、図11に示すように周りの雪を溶かし空洞化して雪圧の影響を取り除くことに成功している。1985年での長野地区で行われた試験以来、断線事故の防止効果が確認されている。

5) 水道管の凍結防止

寒冷地域の水道管の凍結防止として、導電テープを水道管に巻き付けて通電加熱したり、夜間に水を抜いたり、連続に水を流し続ける方法が取られている。これに対抗して、地熱を利用したヒートパイプによる凍結防止方法は、維持や手間を省く上で注目される。長野市水道部などで、成功しているが、厳寒な北海道では難しくまだ実用化に至っていない。

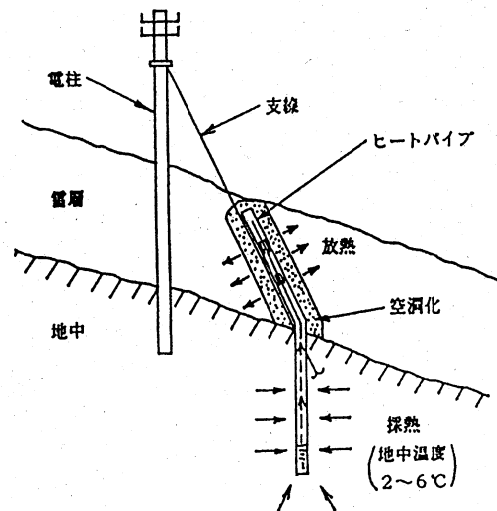


図11 電柱支線のヒートパイプ融雪

6) トンネルのつらら防止

寒冷地域のトンネル内では漏水が凍結して、つららや側壁に氷が発生し、これが発達すると列車運行に影響を及ぼしたり、作業員の歩行を困難にする。トンネル内の漏水箇所に、ヒートパイプを使用して、局部的に0℃以上に熱を加える方法が使用されている。熱源は地熱を利用することから、維持費がかからず、東北新幹線箕輪トンネル坑口付近で採用されている。

7) その他

寒冷地域での排水管の凍結防止のため、北海道新狩勝トンネル内で地熱利用のヒ

ートパイプが使用されている。また、地熱利用した交通標識板の氷着防止等にも使用されている。夕張地区で、石炭層の地中燃焼による高熱（10から25m付近で60～70℃）をヒートパイプで抽出試験が行われたが、実用化に至っていない。

また、石油を消費することなく、太陽熱を地中に長期蓄熱し、温室暖房を行い、冬期に夏型園芸作物（トマト）の栽培環境を作り出すシステムに成功している。いずれも温暖な地域であることから、寒冷地域での温室栽培システムの開発が望まれる。

6. 寒冷地域でのヒートパイプ利用技術への展望

ヒートパイプの優れた伝熱特性は大いに認められるが、単に利用可能性を示すだけでは不十分である。多くの場合代替する技術手段が存在するため、ヒートパイプ使用がこれに対抗する技術や建設費、維持費などの経済的に打ち勝つ必要がある。伝統や風習を重んじる保守的な地域社会がいまだ存在し、新しい技術導入に消極的な姿勢が、ヒートパイプ技術の普及を阻んでいることもある。しかし、自然エネルギー利用法は、現在の化石燃料に比べて多少高価であっても、自然環境保全に有効であるならば大いに取り入れるべきである。

そして、ヒートパイプ技術を導入する際は、自然エネルギーが必ずしも一定でなく年次的に変動する場合が多いため、その傾向を充分調査するとともに、基礎実験や数値シミュレーションの開発をさらに進める必要がある。

農業分野に地熱、温泉熱利用を積極的に取り入れるとともに、従来の温室促成栽培に対抗した、冷熱利用により抑制栽培などが期待される。また、レジャー部門への活用も期待され、人工凍結室内スキー場、屋外スケートリンク、寒地低温植物園などへの技術開発が期待される。

引用文献

- 1) 伊藤謹司訳:ヒートパイプ (P.D.Dun & D.A.Reay著), 学献社, 1978
- 2) 日本ヒートパイプ協会編:実用ヒートパイプ, 日刊工業新聞社, 1975
- 3) 山西哲夫ら:ヒートパイプとその応用, オーム社, 1980
- 4) 池田義雄ら:ユーザーのためのヒートパイプ応用, 学献社, 1981
- 5) 高岡道雄ら:ヒートパイプを利用した道路と屋根の融雪システム, 第1回寒地技術シンポジウム, 314-319, 1985
- 6) 了戒公利ら:自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫, 第2回寒地技術シンポジウム, 409-412, 1986
- 7) 白石正夫ら:夕張におけるヒートパイプ式熱抽出実験とその応用, 第3回寒地技

術シンポジウム, 7-12, 1987

- 8) 了戒公利ら:自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫(その2), 第3回寒地技術シンポジウム, 22-26, 1987
- 9) 白石正夫ら:地熱、伝熱併用ハイブリッドパイプ融雪システムの研究, 第3回寒地技術シンポジウム, 231-235, 1987
- 10) 志部谷一男ら:札幌市におけるヒートパイプ式道路融雪実験, 第3回寒地技術シンポジウム, 219-224, 1987
- 11) 宮沢義和ら:ヒートパイプによる電線支線の融雪, 第4回寒地技術シンポジウム, 349-353, 1988
- 12) 倉前正志:北海道におけるヒートパイプ技術利用のあり方と現状, 第4回寒地技術シンポジウム, 519-524, 1988
- 13) 後藤貞昭ら:温泉廃湯用ヒートパイプ式ロードヒーティングシステム, 第4回寒地技術シンポジウム, 387-392, 1988
- 14) 土谷富士夫ら:自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫(その3), 第4回寒地技術シンポジウム, 525-529, 1988
- 15) 志部谷一男ら:ヒートパイプ式融雪・凍結防止システム, 第6回寒地技術シンポジウム, 307-312, 1990
- 16) 三嶋信雄ら:ヒートパイプによる太陽熱蓄熱・融雪システム, 第7回寒地技術シンポジウム, 269-274, 1991
- 17) 三嶋信雄ら:太陽熱を利用した盛土内蓄熱・融雪システム, 日本道路公団技術情報第107号, 1-13, 1991
- 18) 土谷富士夫ら:自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫(その4), 第5回寒地技術シンポジウム, 237-241, 1989
- 19) 土谷富士夫ら: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, 1990

第3章 冷熱エネルギー利用と北海道の寒さ

1 冷熱エネルギー

世界のエネルギー消費量は昭和46年から増加傾向を示し、昭和55年から減少に転じる57年まで継続した。しかし、昭和58年から再び消費量は増加始め、発展途上国を中心にエネルギー需要の拡大は益々増加かすることが予想される。エネルギー政策は長期的展望で推進されるべきもので、化石燃料の代替エネルギーとしての地域エネルギーの開発利用は、わが国にとって極めて重大な課題である。

北海道のエネルギー供給構造の特徴は、石油依存度が63.7%と全国の57.3%に比べて大きく、エネルギーの多様化が遅れているのが現状である。近年、地球規模での環境問題が議論され、石油代替エネルギーとしてのクリーンな地域自然エネルギーの開発利用を促進する必要があると考えられている。

冬期の寒冷という厳しい自然条件を豊富なエネルギー源として捉えた、農水産および観光等の基幹産業への積極的な活用が可能であり、農業の生産性の向上や水産加工業、観光産業への発展に寄与する考えられる。自然エネルギーが種々な産業分野に応用されるならば、石油代替エネルギーとして開発、利用促進と地球環境保全に貢献できる。

2 世界の寒さと北海道の特色

冬の寒さが厳しいため生産性を妨げる要因となつている場合が多い。しかし、この寒さとは何にでうるか、そしてその程度を十分に認識してみる必要がある。

図1に、世界の1月と7月の月平均気温の等温分布図を示す。北半球では、大陸上が最も低温になりやすく、特にシベリヤ東北部が最低になりやすく、極寒といわれるベルホヤンスクの1月の平均気温は -45°C 度にも達する。ここでは、 -67.8°C の最低気温を観測している。最近では、この近くのオイミヤコン地区では -70°C の新記録を得ている。このように、極寒な大陸には、ごく表面の活動層を除く夏でも解けない永久凍土地帯が分布している。図2に、北半球における永久凍土の分布状況を示す。また、図3に、カナダの永久凍土の厚さの緯度による変化を示す。しかし、北海道では永久凍土は原則的に存在しない。

次に、日本の寒さについて述べると、日本の一番寒いところといえば、北海道の内陸部となる。1902年（明治35年）1月25日に旭川で -41.0°C を記録している。その翌日、帯広で -38.2°C を記録し、実に未曾有といってもよい寒波が北日本を襲った。

しかし、単に最低気温のみでは冬期の寒さや寒冷エネルギーの度合を表すことができない。そこで、マイナスの日平均気温を加算した絶対値を積算寒度（凍結指数とも呼ぶ）と定義し、冬の寒さを表す。冬期寒冷であるからといって、必ずしも夏期に寒いとは限らない。図4に、世界の各主要都市の最暖月の月平均気温と積算寒度と関係を示す。冬の寒さばかりか、夏の暑さも重要となる。なぜならば、低温貯

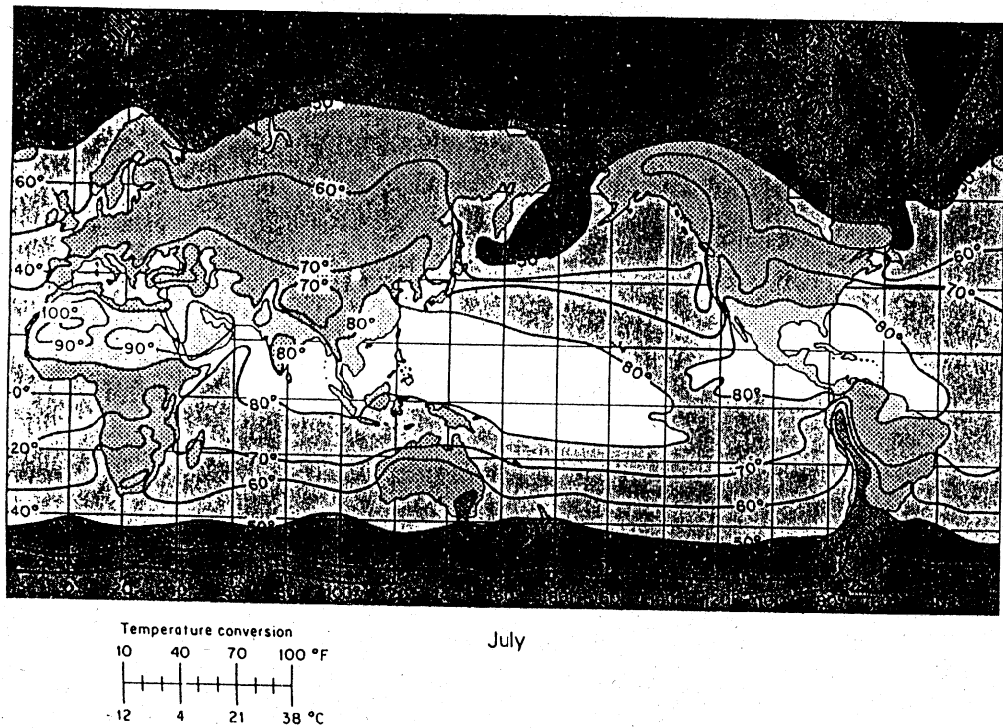
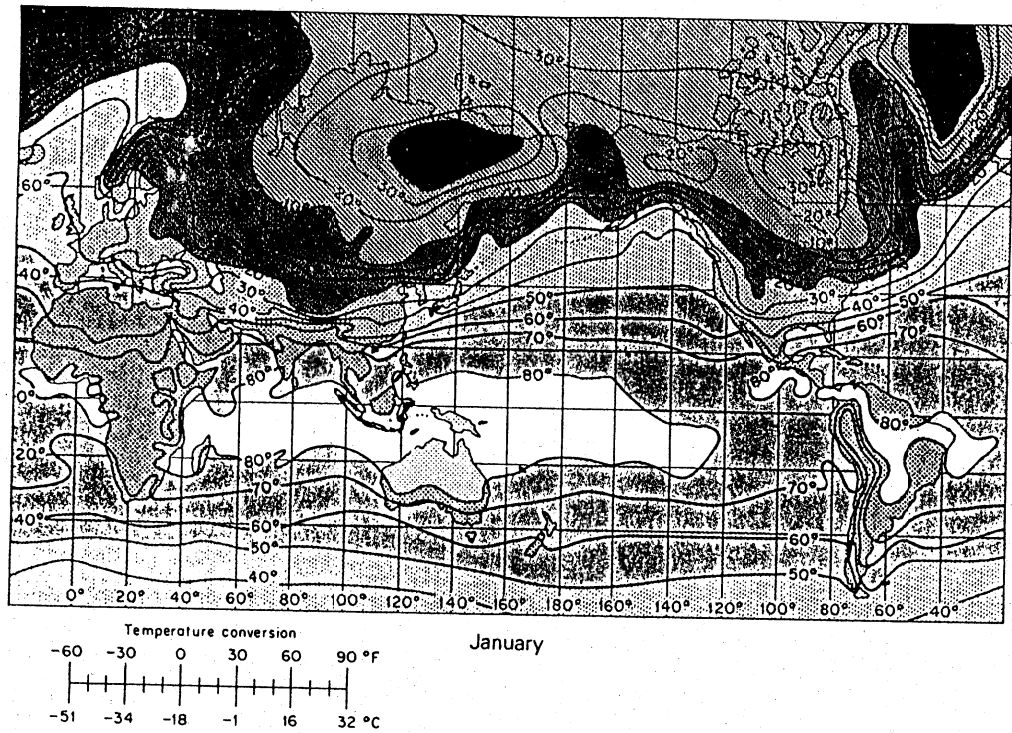
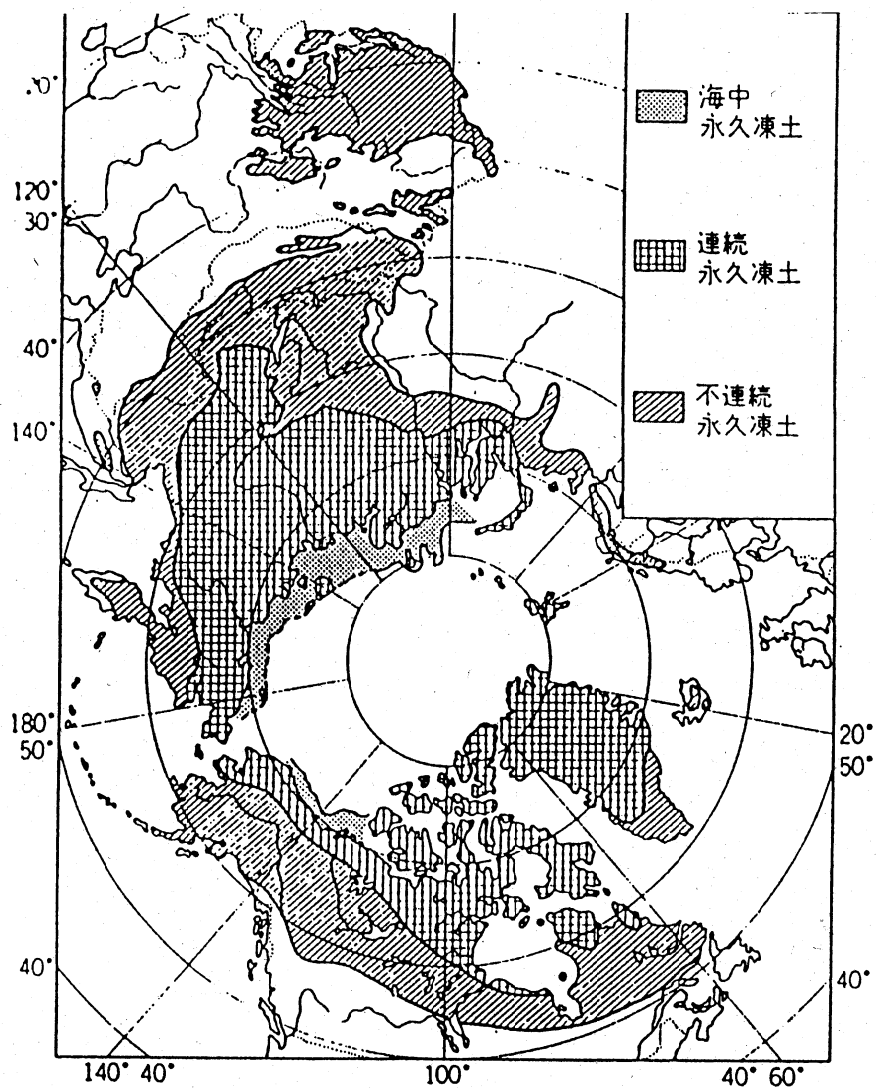
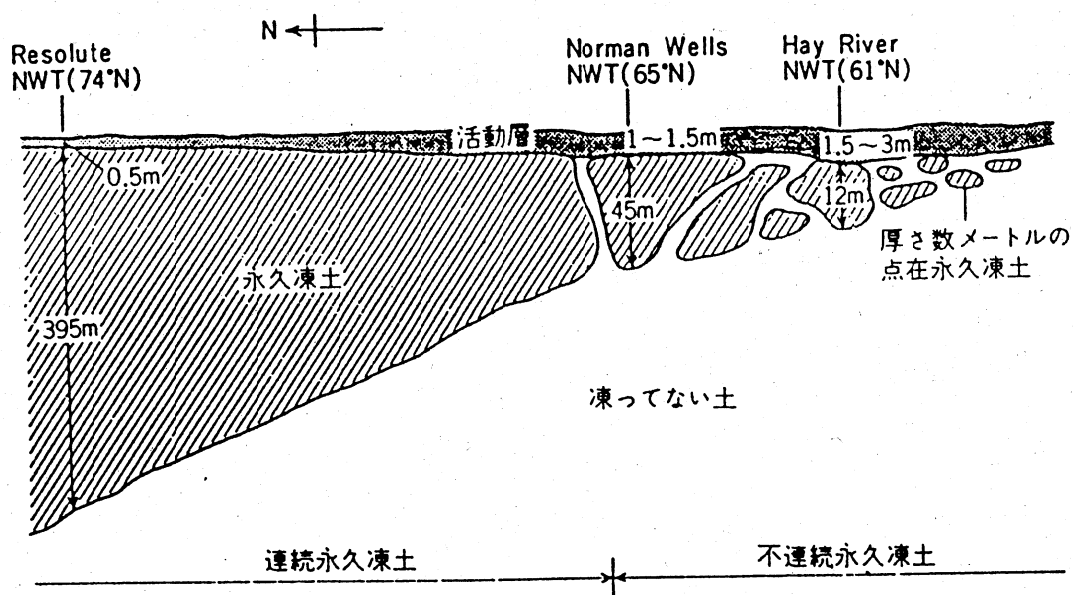


図1 世界の1月と7月の月平均気温の等温線分布図 (° F)



(A. L. Washburn : Geocryology, 1979より).

図2 北半球における永久凍土の分布状況



カナダの永久凍土の厚さ

北から南にかけての断面図 (R. J. E. Brown : Permafrost in Canada, 1970 より).

図3 永久凍土の厚さと緯度

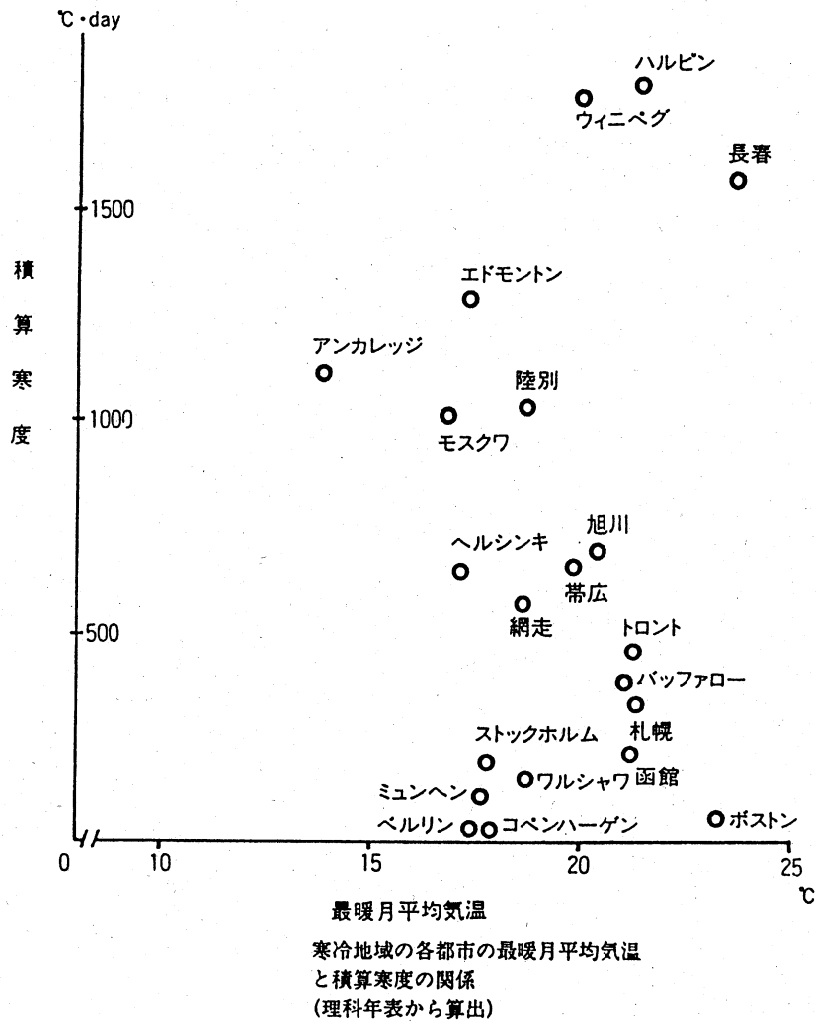


図4 世界の主要都市の最暖月の平均気温と凍結指数

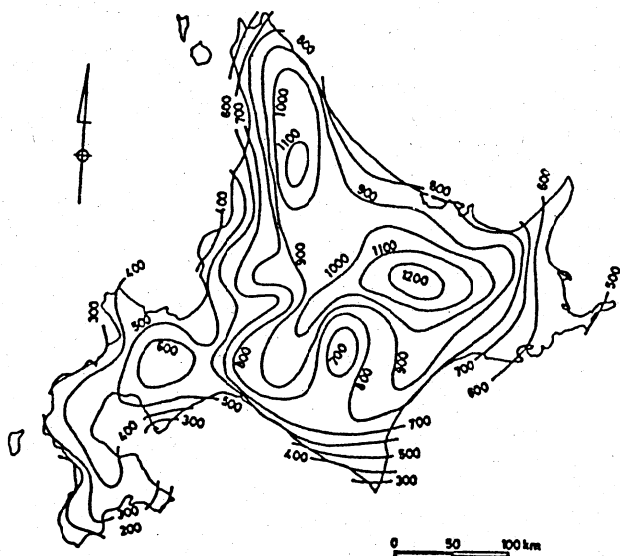


図5 北海道の凍結指数の分布図 (1974-75)

表1 北海道の主要都市の積算寒度

道内主要都市の積算寒度 (°C・day)

地名	積算寒度	地名	積算寒度
函館	327 385	網走	634 744
倶知安	607 691	根室	439 502
小樽	327 396	釧路	527 679
札幌	402 437	帯広	704 840
岩見沢	562 623	旭川	756 854
留萌	456 477	苫小牧	398 441
稚内	521 563	室蘭	217 230

前者は1960-1970の平均、後者は1974-75年

蔵に必要な農作物の生産には、夏の暑さが重要な因子となり、貯蔵システムには冬の寒さが重要になってくるからである。

図5に北海道の積算寒度の等温線の分布図を示す。これによると、十勝、網走および釧路の内陸部、士別を中心として内陸部などが最も寒冷的な地域であることが分かる。積算寒度は、年次によつて変動するが地域的傾向は大きく変化しない。表1は、道内の主要都市の積算寒度を示す。近年、地球温暖化傾向と都市気候による冬の温度上昇傾向が、積算寒度を小さくしていることから、実測による低温貯蔵庫建設地の積算寒度値が必要と考える。

3 帯広における土壌凍結と積算寒度

十勝地方は冬期寒冷で、比較的積雪が少ないため土壌凍結が深い地帯とされている。しかし、一般の農地では積雪があるため、その積雪の程度がその年の土壌凍結深さを大きく支配する要因となっている。図6は著者らが1982年から83年の冬期に十勝、釧路、根室地方の農地の凍結深さを測定したときの分布図である。これによると、十勝地方の内陸部は他の地域に比べて比較的凍結が深いことがわかる。帯広での土壌凍結は、十勝地方の全体からみて平均値に近いといえる。

積雪下では、凍結深さは年次によって異なる。当然、寒さの程度も年次によって異なる。図7は、帯広畜産大学の実験圃場で測定した、1982年から86年の5ヶ年の気温をもとに計算した積算寒度 (Freezing Index) の経時変化を示す。1985-86年は最も寒く、積算寒度 $1236^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ を記録し、他方、1982-83年の暖冬は $944^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ を記録した (しかし、1990-91年は近年稀な暖冬で $576^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ であった)。図7における「OB ハイネ」の曲線は、帯広測候所の平年値 (1961-80年) から求めた値で、 $686^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ に過ぎない。これは、さきに述べたように都市気候の顕著な例である。

つぎに、図8に5年間の積雪の推移と土壌凍結の推移を示す。積雪の深さや積雪の時期が影響することから、積算寒度から単純に土壌凍結深さを推定することはできない。

1月初めに、20cm以上の積雪が存在するかどうか最大凍結深さに大きな影響を与えている。著者の研究によると、自然積雪下の最大凍結深さは、積雪20cmまでの積算寒度へ平方根に比例することが分かっている。

それでは、積雪の深さをコントロールした場合 (凍結抑制区)、自然状態の場合 (自然積雪区)、そして3月中旬まで除雪して、その後200mmの断熱材を被った場合 (凍結保存区) を設定し、凍結深さの推移を比較した。結果は、図9に示すように、積雪を20cm、40cm、60cmとコントロールすると、順に凍結は浅く3月下旬から4月初旬にかけて消失している。他方、断熱材を使用した保存区は、6月中旬まで凍結層が保存されることが分かった。図10は、2ヶ年にわたる凍結保存の実験結果を示す。いずれも、凍結土層は6月中旬までは保存されるが、最大凍結深さが80cmと小さいため、多量の野菜貯蔵には不十分と考えられる。したがって、ヒートパイプのような伝熱素子を用いて、4-5mの深さまで凍土を造成する必要がある。

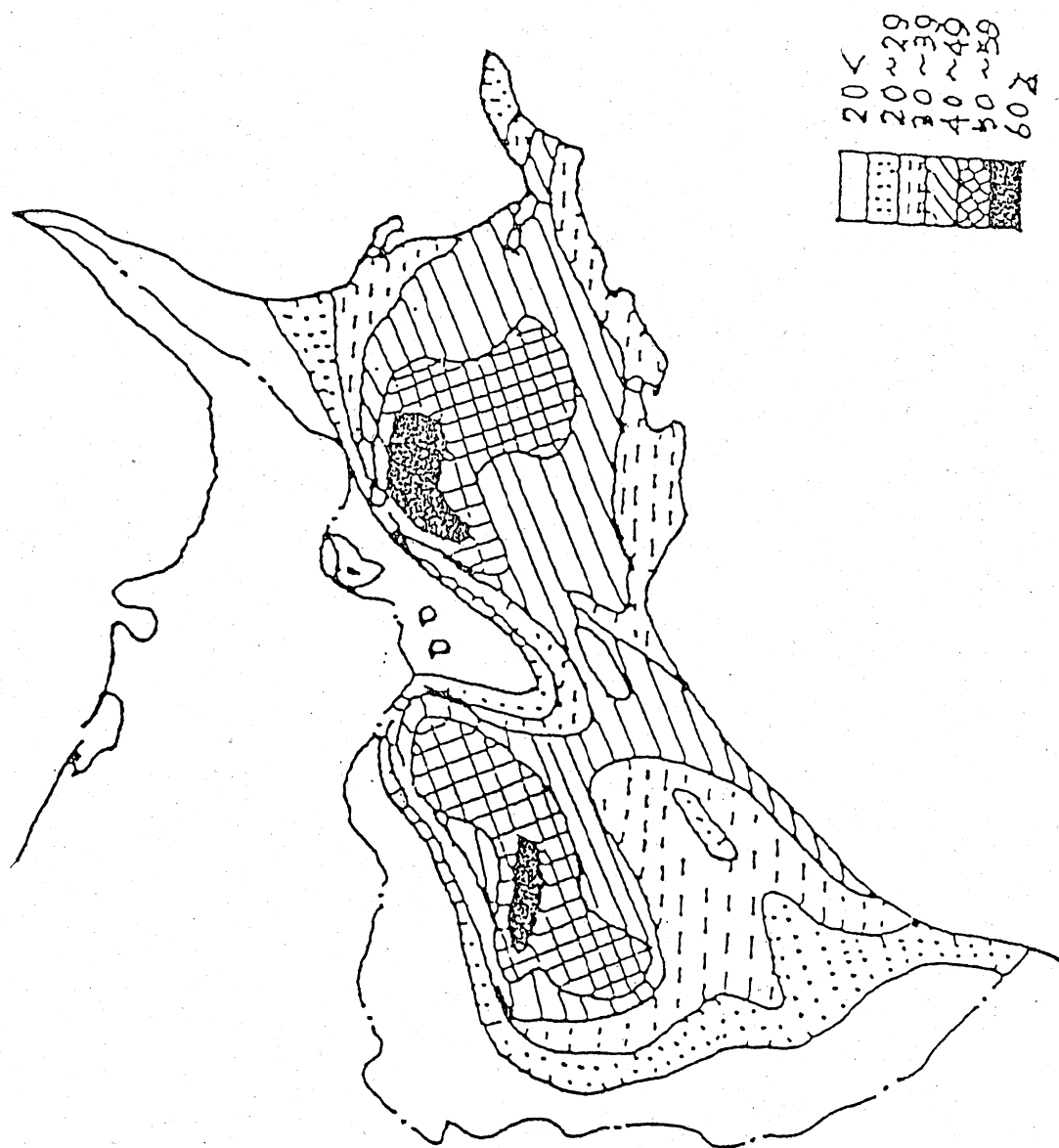


図6 北海道東部の自然積雪下の土壌凍結分布(1982-83)

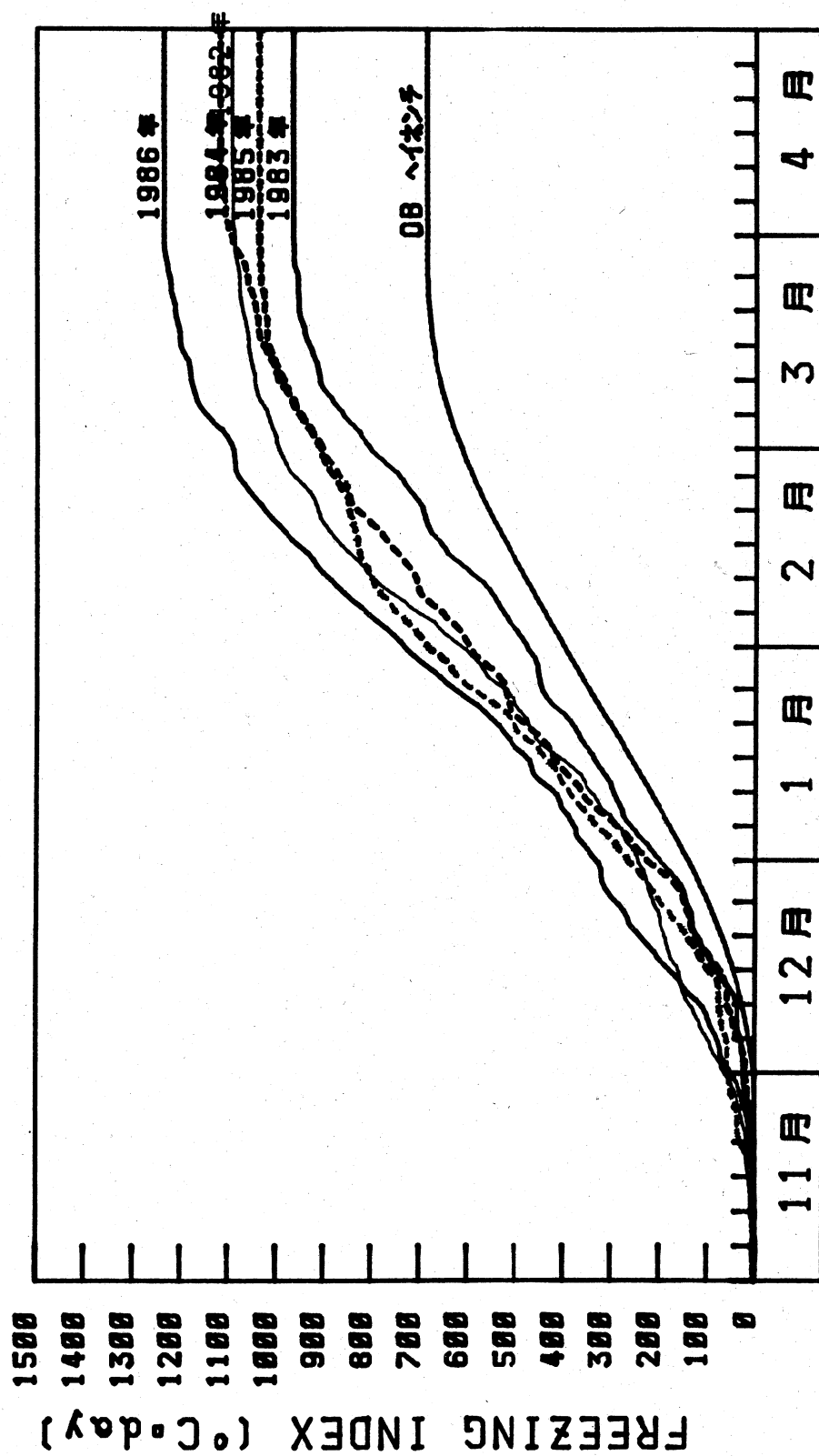


図7 帯広畜産大学の5か年の積算寒度の推移

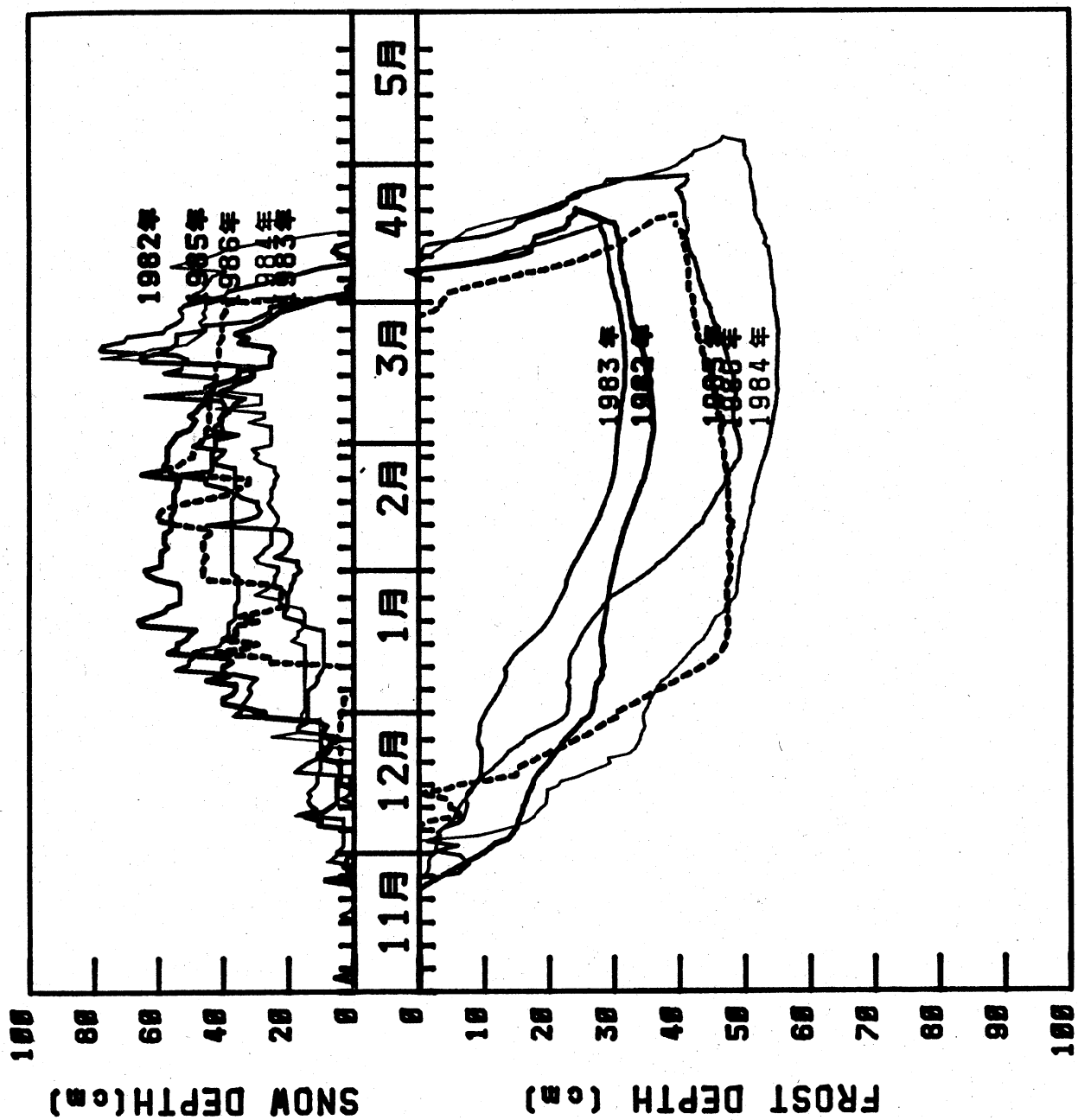


図8 帯広畜産大学の5か年の積雪深と凍結深さの推移

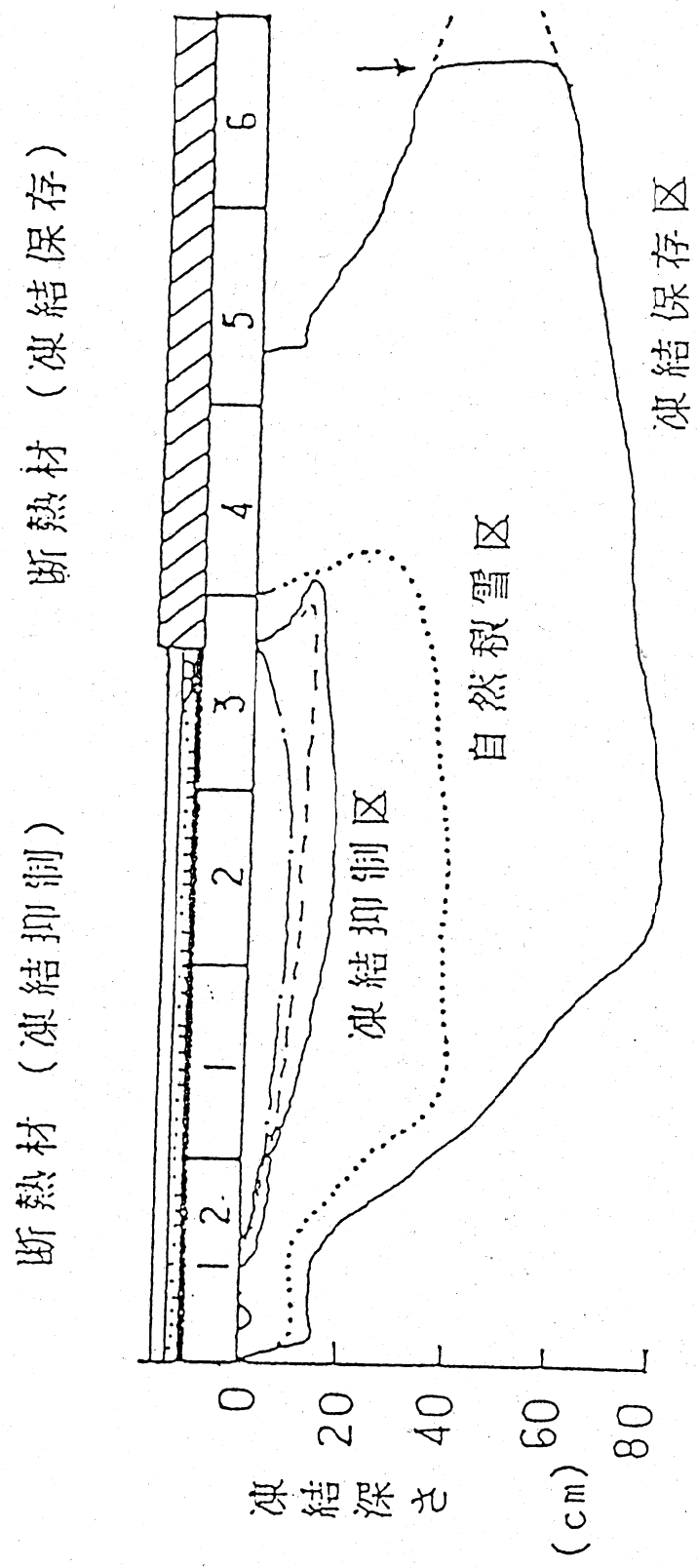


図9 積雪抑制、凍結保存区の土壌凍結推移

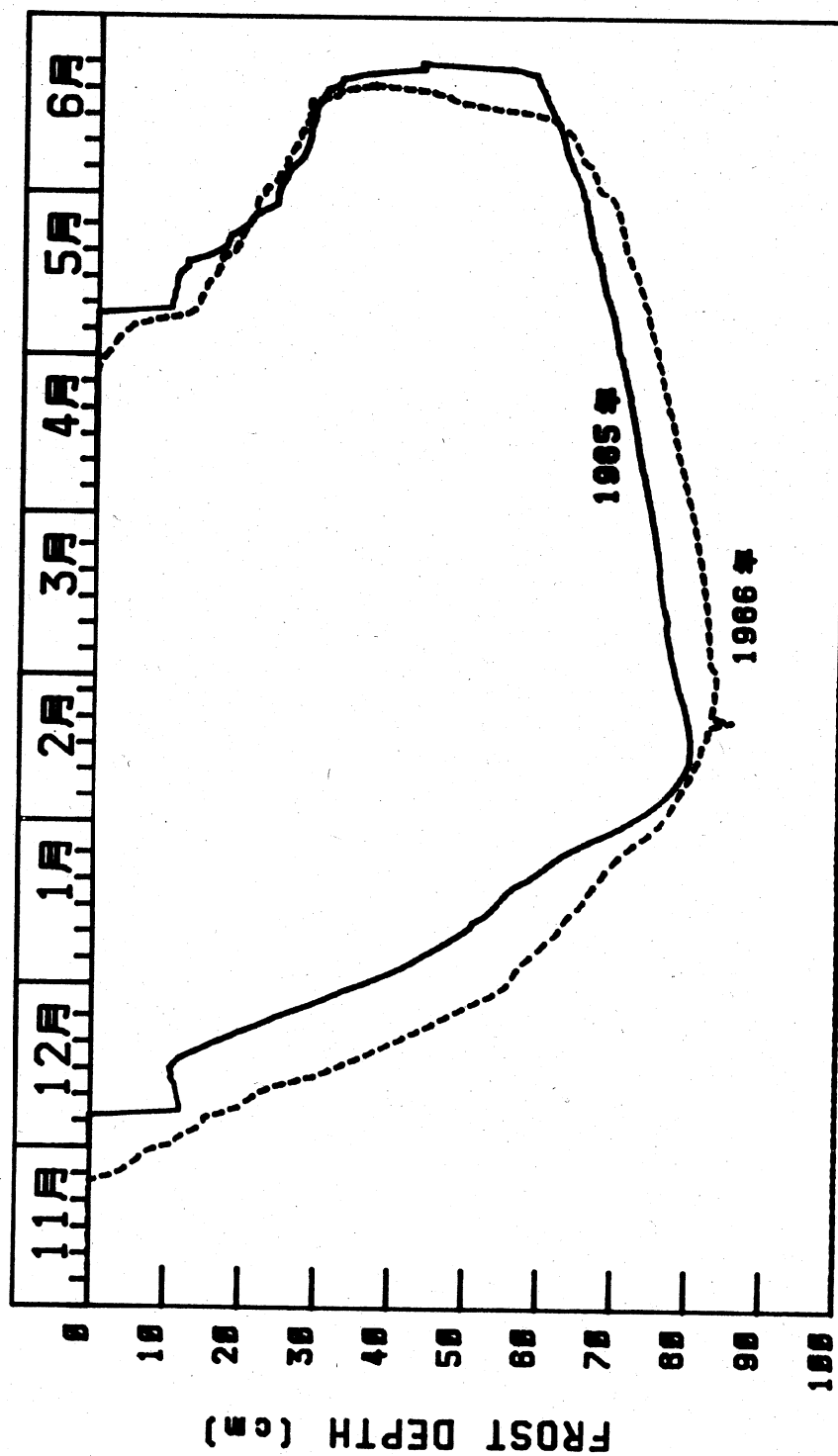


図10 除雪、断熱による凍土層の保存

参考文献

- 1) Linsley R. K. Jr. ほか：Hydrology for engineers(3rd ed.), McGraw-Hill(1982)
- 2) 北海道大学放送教育委員会：低温とくらし、北海道大学図書刊行会(1985)
- 3) 和達清夫ほか：雨・風・寒暑の話、NHKブックス(1974)
- 4) 福田正己ほか：寒冷地域の自然環境、北海道大学図書刊行会(1984)
- 5) 福田正己ほか：北海道における昭和49～50年の積算寒度の分布、低温科学物理編資料集(1975)
- 6) 土谷富士夫：十勝地方における火山灰土壌の凍結・凍上が農地に及ぼす影響に関する研究、北海道大学学位論文(1985)
- 7) 土谷富士夫：農地の土壌凍結作用とその現状、北海道の農業気象35(1973)
- 8) 土谷富士夫ほか：農地の土壌凍結の抑制と凍結保存、寒地技術シンポジウム'85、(1985)

第4章 野菜・生花の貯蔵と価格の動向

1 野菜の生産と価格変動

わが国の野菜の生産は、世界第1位を誇る施設栽培の発展と、産地时期的な移動により、多くの野菜で周年供給が達成されると同時に、自給率の低いわが国の農業生産物のなかでは、米と共に、100%に近い自給率を示すものである。わが国の野菜の需要・消費の特徴は、(1)需要パターンの変化にともなって野菜の種類が多様化してきた（東京都中央卸市場で年間200種以上を扱っている）、(2)地域都市の消費形態が都会的になり、地域間、世帯間で平均化されてきた、(3)野菜の消費品目は、夏のトマト、キュウリを中心とする果菜類が、冬期にはハクサイ、ダイコンなどの葉根菜類が中心となり、最近では根菜類が減少し、果菜類あるいは洋菜類が増加してきている。

次に、野菜の供給・生産の特徴は、(1)自然の影響を受け易く、年次変動がある、(2)機械化一貫体系の確立が難しく、定植、管理、収穫作業は人力に依存する、(3)施設園芸において、ハウス、機械等の資本投資が大きい割に、小規模生産となりがちである、(4)1つの作物のみに依存せず、作付体系のもとで生産される、(5)価格変動があり、事後にしか価格を知ることができないので長期計画が難しい。

これらのことから野菜流通の特徴は、(1)市場の自由競争で価格が成立する、(2)規格化しにくいいため、現物を見て取引し、見本取引や先物取引は行われぬ、(3)大部分の野菜が貯蔵性が低いため、価格の変動を和らげるのが難しいといわれている。

一般に、野菜の価格ならびに入荷量の変動には、年次変動、季節変動および日々変動がある。年次変動は露地野菜が大きいのに対して、施設ものの割合が高いの果菜類は比較的小さい。季節変動も施設野菜では次第に小さくなりつつあると言われている。そこで、北海道の主要作物の価格変動をみることにする。図1に、北海道の主要露地野菜の5か年の単価、数量比、および昭和63年の月別変動を示す。また、表1に、年度別5ヶ年を対比した価格の動向を示す。これによると、ハクサイ、キャベツ、ダイコンの果菜類は、1～3月の冬期間に価格が高く、バレイショ、ゴボウ、の根菜類は、5～6月に高い傾向がある。根菜類のナガイモは、多少時期が遅れて7～9月に高いようである。タマネギはあまり大きな価格変動が見られないようである。

次に、バレイショの全国の入荷量、卸売価格、小売価格の年間の推移を図2に、そして同様にタマネギの年間の推移を図3に示した。バレイショの卸売価格は、入荷量の多い4～6月に高騰し、小売価格は一月遅れて高騰する傾向にある。他方、タマネギは、同様に5～6月に入荷量は増大するが、卸売価格および小売価格とも低下傾向にあることがわかる。

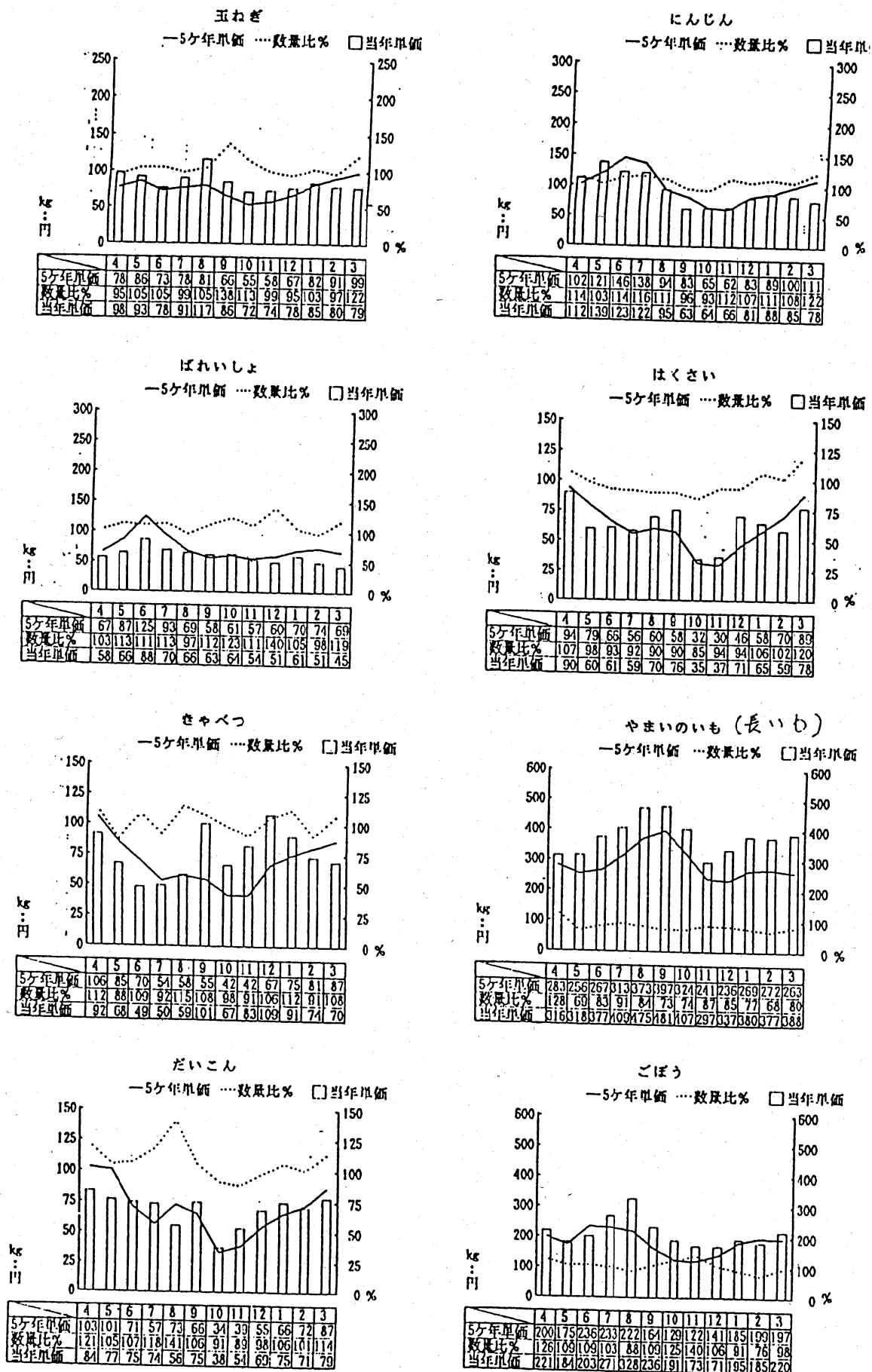


図1 北海道主要野菜の単価、数量比の月別変動

販売員 : 1 人 単 価 : 163円
 枚 数 : 59年度を100%とした比率
 63年度対59年: 59年平均を100%とした比率
 北海道生鮮食料品流通情報センター

肉由主製對面西(第一利路。丸墨安西。丸墨北徑。丸中如防。一益河左)

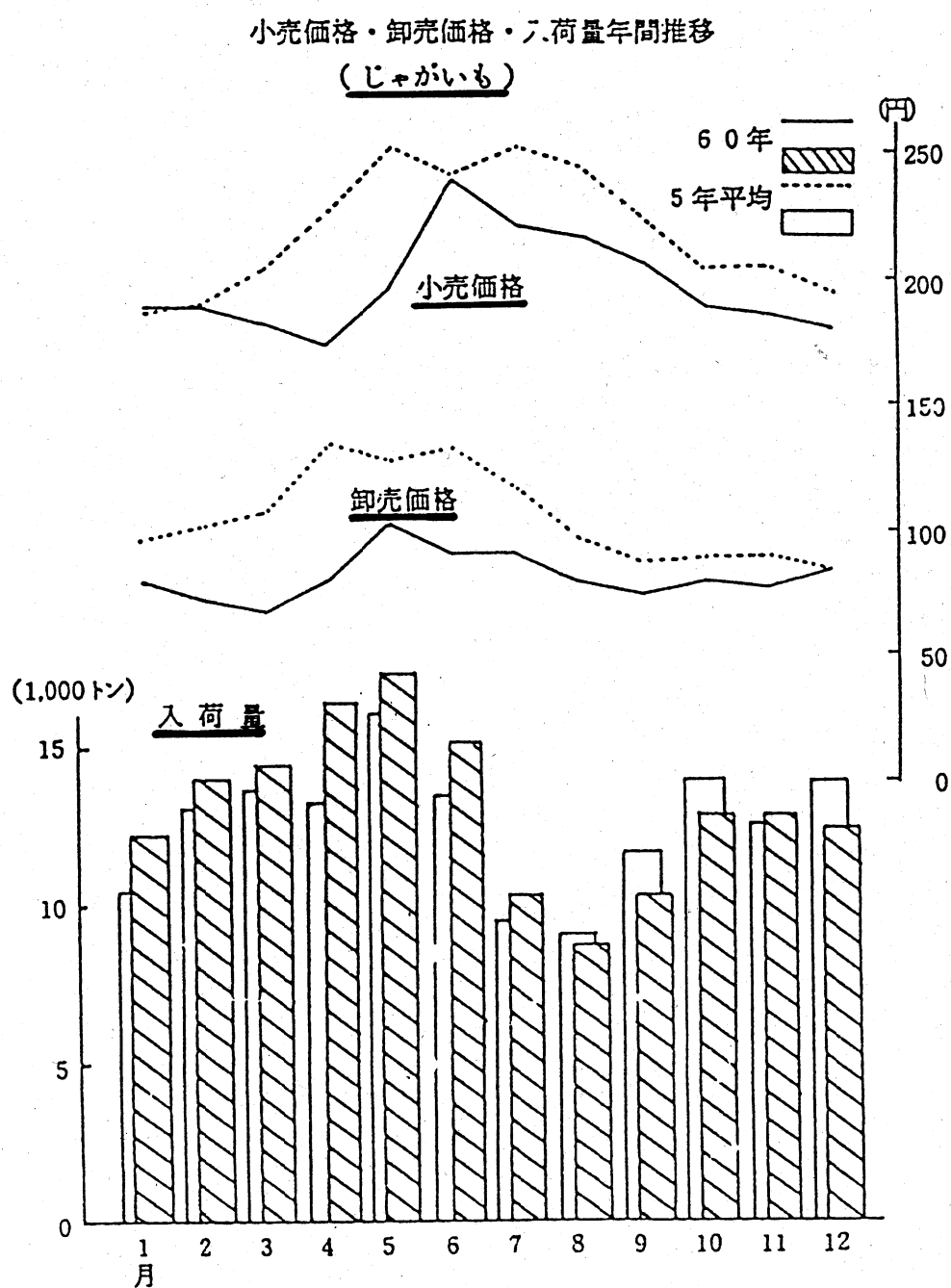


図2 バレイショの小売、卸売価格、入荷量の月別動向

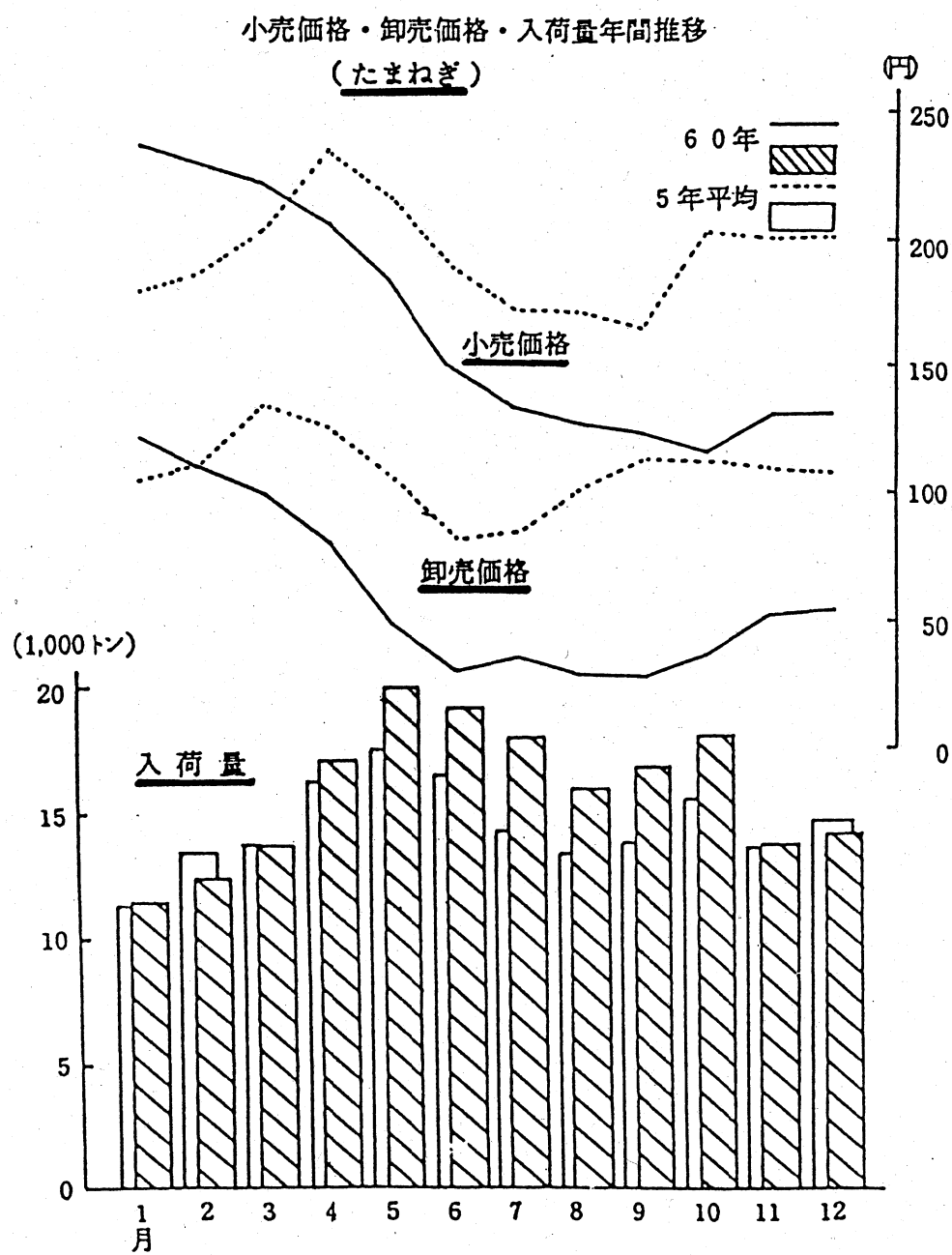


図3 タマネギの小売、卸売価格、入荷量の月別動向

2 北海道野菜の市場

北海道の主要農産物の品目と生産量・出荷量を表2に示す。北海道で最も生産量が多いのは、米を除いてバレイショ240万トン、タマネギの48.2万トン、そして大根の14万トンの順である。他方、北海道のシェアが高いものは、小豆の77%、バレイショの69%、タマネギの46%の順である。

図4に示すように、バレイショの収量350万トンの70%が北海道産である。札幌市場と東京市場での9月～翌4月まで90～100%が北海道産であり、北海道産の入荷がほとんどない4月～8月に価格が上昇するのはなんとも皮肉である。

つぎに、ナガイモであるが、東京・大阪・札幌市場の平均単価の推移を図5に、その数値を表3に示す。これによると、7～8月に最も高価であることが分かる。つぎに、図6に、東京・大阪・札幌の各市場における月別入荷量と単価の変動を示す。7月から8月に入荷量が少なく、特に札幌市場では少なく価格も高騰している。図7には、札幌中央市場の地域別入荷量を示すが、1月から4月にかけて十勝地方からの出荷量が多い傾向が顕著に現れている。

つぎに、タマネギの東京・大阪・札幌市場の平均単価の推移を図8に、そしてその数値を表4に示す。2～3月に最も高価であり、9月を過ぎると札幌市場が最も安価であることが分かる。図9に、東京・大阪・札幌の各市場における月別入荷量と単価の変動を示す。5月から8月に全く入荷量がなく、7月～8月に各市場では高騰している。図10には、札幌中央市場の地域別入荷量を示すが、5月から8月にかけて後志地方から出荷量が多く、10月から4月にかけて石狩地方からの出荷が増大する傾向が顕著に現れている。

したがって、自然エネルギーを利用したランニングコストのかからない低温貯蔵庫による野菜貯蔵の出荷調整を行う必要性と重要性は明白である。

3 野菜の貯蔵

キャベツ、ハクサイなどの重要野菜の価格の乱高下が発生することから、貯蔵の意義が大きい。青果物は貯蔵することにより、品質が向上し収益が増大することもある。このように、価格の乱高下に対応するには出荷調整が大切であり、貯蔵技術が注目される。

野菜の価格動向をみると、昭和48から49年に急騰し、50年から52年は安定した。このように、気候の変動がもろに価格に反映して、激しく上下する。この価格の乱高下を抑え生産者にある程度以上の収入を保証し、消費者に安定した価格で供給するための方策が必要である。価格の補償金制度や出荷奨励金制度は、臨時的な対策療法であるが一過性であることから、計画的な予防措置ではない。好ましい方策は、生育調節など生産時点での対応や、貯蔵による出荷調節による対応が叫ばれている。

野菜の流通を考える場合、輸送の問題を抜きに考えられない。野菜の遠隔地供給を実現する原動力は、道路事情の好転とトラック輸送の発達である。さらに遠隔地輸送を容易に、かつ供給時期の幅を広げる効果を発揮しているのは、産地余冷に代表

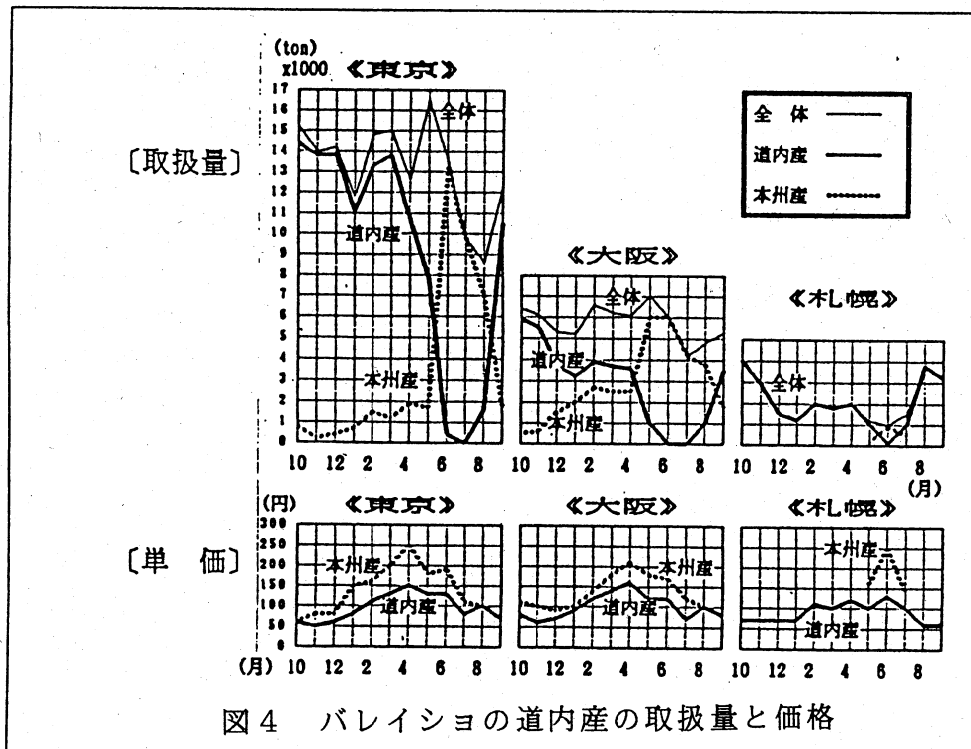
表2 北海道の主要農産物の生産・出荷量

品 目		生産量・出荷量 (1,000 t/年)			
		全 国	北海道 (シェア%)	網走 (H2)	
野菜類	じゃがいも	3,500	2,400	69	126
	たまねぎ	1,058	482	46	1.5
	にんじん	579	140	24	0.012
	長いも	113	17	15	0.247
	大根	1,789	159	9	0.079
	ごぼう	200	13	7	0.669
その他	メロン	326	37	11	—
	小豆	106	82	77	—
	そば	20	5	25	—
	米	10,000	800	8	—

「青果物流通年表」(東京青果物流通センター:1989年)
「平成2年度野菜生産量実績」(網走市:1990年) より

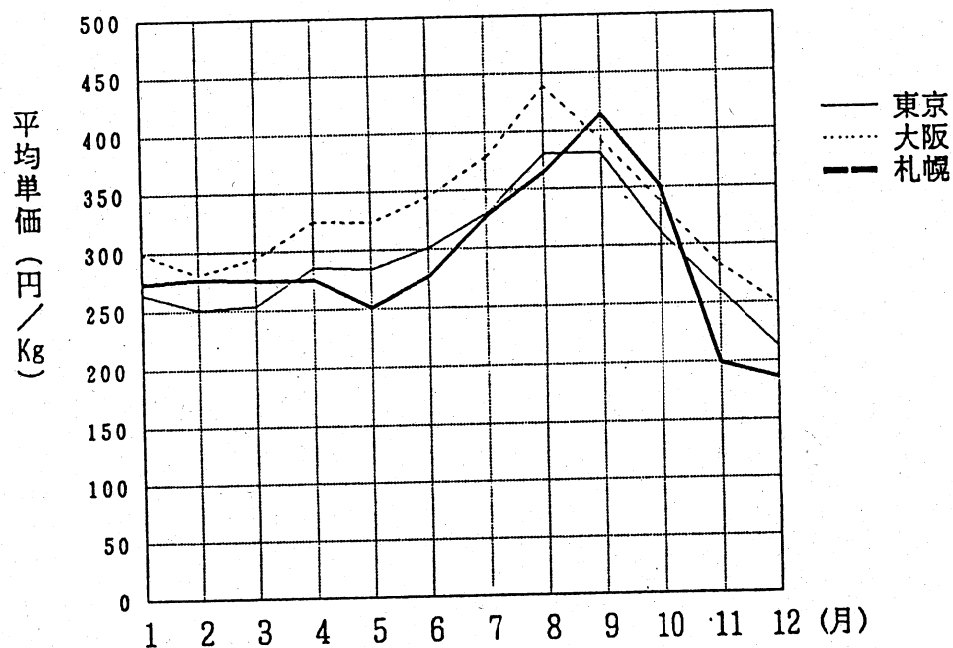
例) じゃがいもの収穫量と価格の関係

全国の収穫量350万tの内70%が北海道産である。札幌市場と東京市場の9月～翌年4月までは90～100%が北海道産で、北海道産の入荷が殆どない4月～8月は価格が上昇する。



「寒地技術シンポジウム'85 講演論文集」(寒地開発研究会:1985年) より

ながいも



東京・大阪・札幌市場 5ヶ年(59~63年) 平均単価

図5 ナガイモの東京・大阪・札幌の月別価格

表3 東京・大阪・札幌市場 5ヶ年(59~63年) 平均単価 [ながいも] (円/Kg)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
東京	264	251	254	286	284	301	330	381	380	312	260	213
大阪	299	281	294	325	324	345	378	439	392	338	283	249
札幌	273	277	275	275	251	277	328	364	415	351	199	186

市場情報参考資料 (網走市提供)

なかにいも

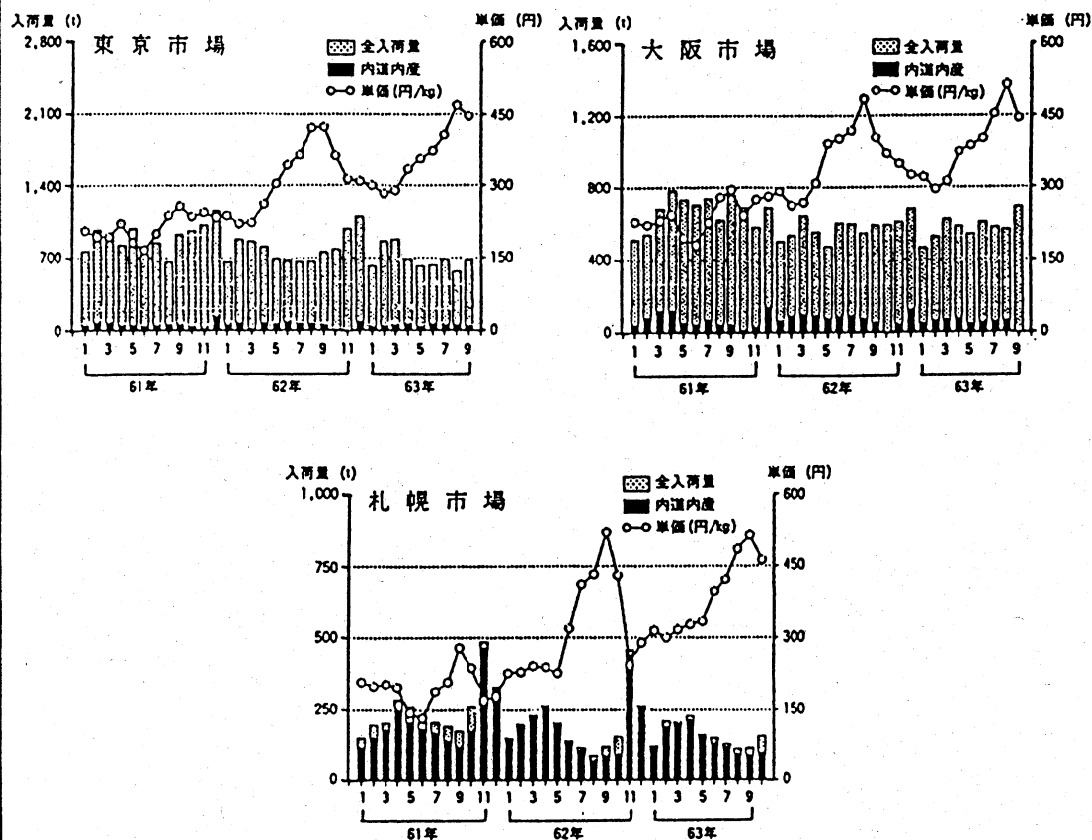


図 6 東京・大阪・札幌市場月別入荷量・単価 (中央卸売市場)

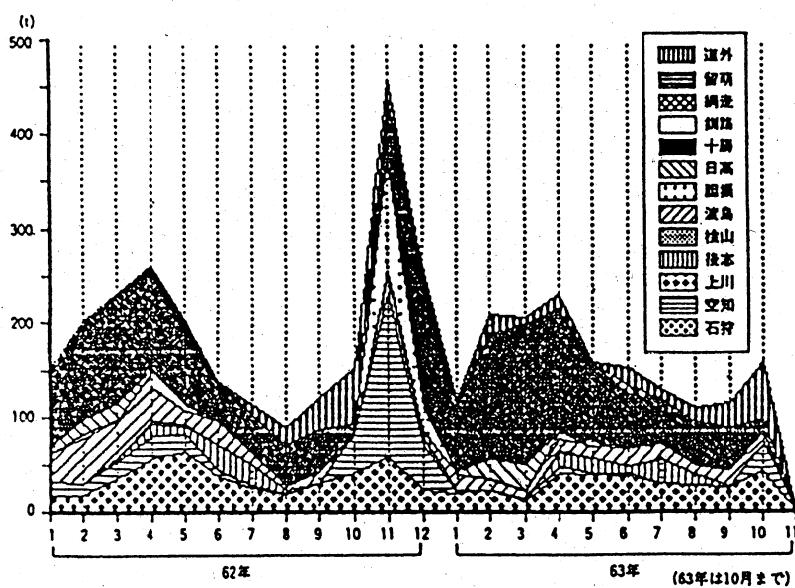


図 7 札幌中央市場地域別入荷量

たまねぎ

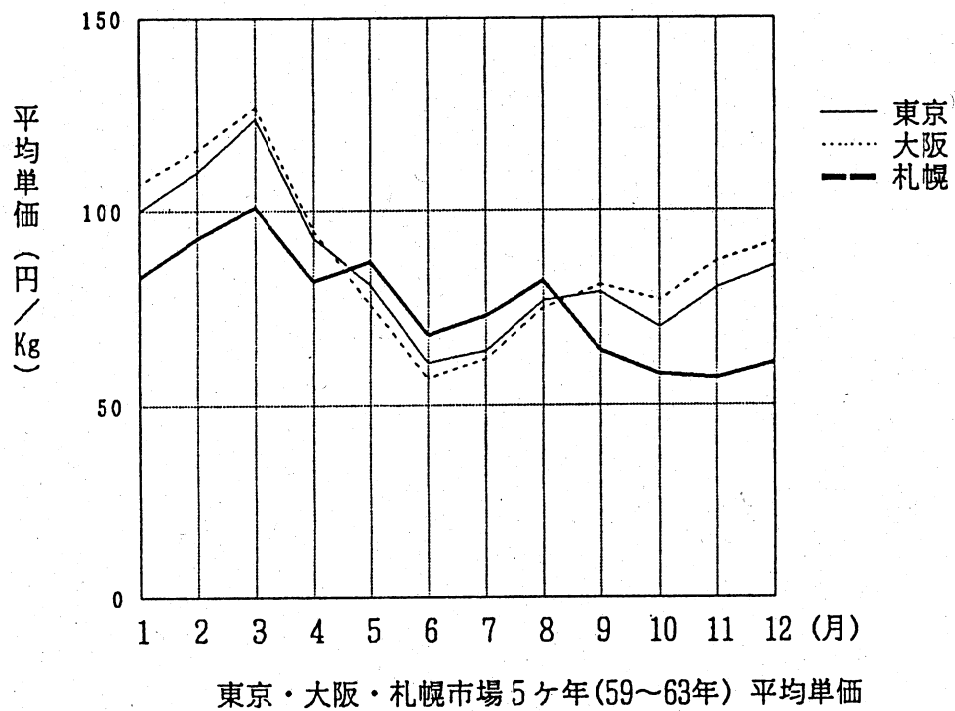


図8 タマネギの東京・大阪・札幌の月別価格

表4 東京・大阪・札幌市場5ヶ年(59~63年) 平均単価 [たまねぎ] (円/Kg)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
東京	100	110	124	93	81	61	64	77	79	70	80	86
大阪	107	116	127	95	76	57	62	75	81	77	87	92
札幌	83	93	101	82	87	68	73	82	64	58	57	61

市場情報参考資料 (網走市提供)

たまねぎ

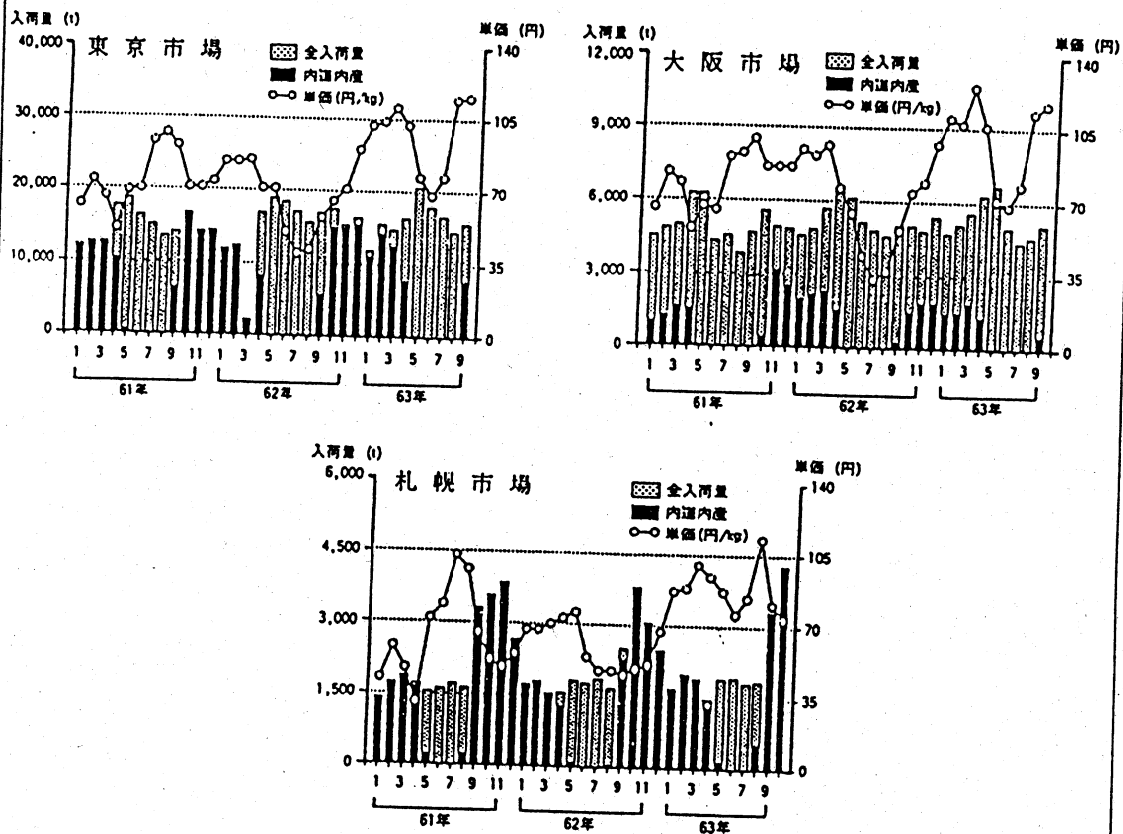


図9 東京・大阪・札幌市場月別入荷量・単価 (中央卸売市場)

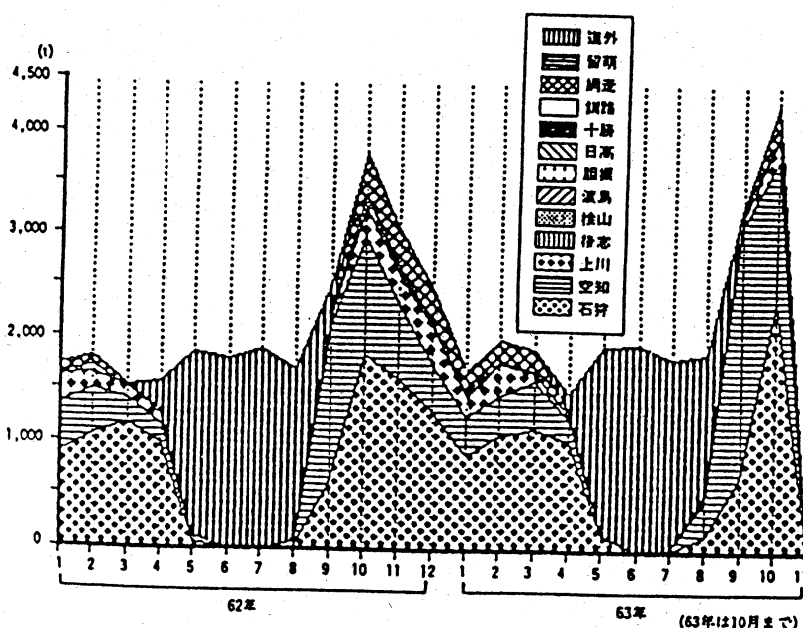


図10 札幌中央市場地域別入荷量

市場情報参考資料 (網走市提供)

される低温流通技術の発展にある。したがって、低温流通体系の整備充実が強く望まれる。

4 野菜の鮮度と予冷

野菜の鮮度とは、広い意味での野菜の品質の一部であると考えてよいが、主婦と生産者では多少意味が異なる。主婦は単純な感覚的なものが中心となるが、生産者は野菜の品質は「規格」という言葉に置き換えて考える。野菜の品質の低下は、呼吸（生活）作用、蒸散作用、微生物作用の3つが原因によって起る。野菜のセールスポイントは、産地で最も呼吸の旺盛である収穫直後のものをなるべく早く冷却して呼吸を抑え、その後も低温流通させることが必要条件である。

野菜の呼吸熱によって温度上昇すると、高温状態が持続される条件下では肉質劣化、異味異臭の発生、味や栄養に関するある成分の損耗などの品質の劣化が起る。流通中の品温上昇に伴う品質劣化を防止するため、野菜や果実を輸送したり貯蔵したりする前に、ある所定の温度（たとえば5℃）まで冷却する操作を「予冷」という。

表5に、野菜および果実の貯蔵発生熱量を示す。これらの生理作用に伴う品質の劣化は低温により抑制されるので、なるべく速やかに品温を下げることが望まれる。予冷後は保冷輸送を行い、市場到着後も保冷库に保管して見本取引をしてなるべく常温にさらさないことが望ましいが、現状の多くの市場では常温流通が一般的である。

5 野菜の貯蔵性に及ぼす条件

同一産地からの同一品種でも生産者が異なることにより、貯蔵性に1ヶ月以上の開きが生じる場合がある。これは、生産条件が貯蔵に影響を与えることがあるからである。品種や栽培法により貯蔵性が異なるので留意しなければならない。一般に、野菜の貯蔵適温、適正湿度、概略の貯蔵期間等が知られている。表6に、主な野菜と果実の貯蔵条件を示す。

多くの野菜の適温は0℃であり、凍結しない限り温度が低いほど貯蔵期間が延長される結果を示している。しかし、キュウリのように適温が13℃付近であり、それ以上低い温度では冷温障害を起す。熱帯、亜熱帯原産のものは適温が7～10℃以上にあり、冷温障害が起る特性を持つ。

野菜貯蔵時の適正湿度は90～95%のものがほとんどといってよい。野菜は水分が90%以上のものがほとんどであるので、5%前後の水分が野菜から失われると商品性を失うと言われている。したがって、蒸散抑制にポリエチレンフィルムを始めとするプラチックフィルム類で包装して貯蔵すると、貯蔵期間が増大されるものもある。有効ポリ袋包装は販売のしやすさから、急速に多くの野菜の販売包装として使用されている。ムレの心配がないが、折角のCA効果の期待できる無孔ポリ包装が敬遠されいる場合もある。

(単位: kcal/ton·hr)

表5 野菜および果実の貯蔵発生熱量

品名	貯 蔵 温 度 (°C)				品名	貯 蔵 温 度 (°C)			
	0	4.4	15.6	20.0		0	4.4	15.6	21.1
Apples	3.15~15.8	6.20~27.0	23.8~82.7		Lettuce	119	168	483	
Asparagus	62.5~137	125~242			Melons, Cantaloupes	13.9	20.6	89.2	
Bananas				87.8~97.0	Mushrooms	64.7			609
Beans Green or Snap	57.8~64.7	96.2~120	337~463		Onions and onion sets	6.93~11.6			
Broccoli sprouting	78.2	116~185	355~525		Oranges	4.41~10.8	13.6~16.4	38.3~54.3	
Brussels sprouts	33.3~875	70.8~117			Peaches	8.92~14.4	15.1~21.3	76.2~97.8	
Cabbage	12.6	17.5	42.8		Pears	6.93~9.24		92.4~139	
Carrots, topped	22.4	36.4	84.8		Peas, Green	85.7~87.8	139~168	412~467	
Celery	17.0	25.4	86.3		Potatoes	4.62~9.24	11.6~18.5		23.1~37.0
Cherries	13.9~18.5		116~139		Spinach	44.5~51.0	82.4~118	388~399	
Cucumbers	17.7	26.8	110		Strawberries	28.7~39.9	37.9~70.9	164~213	
Grape, full	3.88~9.98	7.61~13.6	23.1~41.8		Sweet Potatoes	12.5~25.6	18.0~35.2	44.9~66.2	
Grapes American type	6.32	12.3	36.6		Tomatoes, Mature Green	6.09	11.2	65.4	
Grapes European type	3.15~4.52		23.1~27.7		Tomatoes, Ripe	10.7	13.2	59.2	
Lemons	5.04~9.45	6.51~19.8	24.3~52.0		Turnips	20.37	22.6	55.4	

表 6-① 食品の貯蔵 (野菜および果実の貯蔵発生熱量)

英 名	和 名	貯蔵温度 (°C)	相対湿度 (%)	概略貯蔵期間	含水率 (%)	平均凍結 点 (°C)	凍結上 比 熱	凍結下 比 熱	潜 熱 (kcal/kg)
Apple	リンゴ	-1.1~0.0	85~90	-	84.1	-2.1	0.87	0.45	67.2
Asparagus	アスパラガス	0.6	90~95	3~4週間	93.0	-0.9	0.94	0.48	74.5
Bananas	バナナ	-	85~95	-	74.8	-1.3	0.80	0.42	60.0
Beans (Green or Snap)	豆 (サヤ)	7.2	85~90	8~10日間	88.9	-1.0	0.91	0.47	71.1
Broccoli (Sprouting)	ブロッコリー	0.0	90~95	7~10日間	89.9	-0.9	0.92	0.47	72.2
B russels sprouts	子持ちカンラン	0.0	90~95	3~4週間	84.9	-1.0	0.88	0.46	67.8
Cabbage, late	カンラン晩生	0.0	90~95	3~4ヵ月	92.4	-0.8	0.94	0.47	73.3
Carrots Bunch	ニンジン 葉をつけたまま	0.0	90~95	10~14日間	-	-	-	-	-
Carrots Prepackaged	ニンジン (包装前)	0.0	80~90	3~4週間	-	-	-	-	-
Carrots Topped	ニンジン 葉を切り取る	0.0	90~95	4~5ヵ月	88.2	-1.8	0.90	0.46	67.8
Cauliflower	カリフラワー	0.0	85~90	2~3週間	91.7	-1.0	0.93	0.47	73.3
Celery	セロリ	-0.6~0.0	90~95	2~4ヵ月	93.7	-0.6	0.95	0.48	75.0
Cherries	サクランボ	-0.6~0.0	85~90	10~14日間	83.0	-2.4	0.87	0.45	66.7
Cucumbers	キュウリ	7.2~10.0	90~95	10~14日間	96.1	-0.8	0.97	0.49	76.1
Eggplant	ナス	7.2~10.0	85~90	10日間	92.7	-0.9	0.94	0.48	73.3
Figs Dried	イチジク (乾燥)	0.0~4.4	50~60	9~12ヵ月	24.0	-	0.39	0.27	18.9
Figs Fresh	イチジク (フレッシュ)	-2.2~0.0	85~90	5~7日間	78.0	-2.7	0.82	0.43	62.2
Grape Fruits	グレープフルーツ	0.0~10.0	85~90	4~8週間	88.8	-1.9	0.91	0.46	70.0
Grapes American type	ブドウ (アメリカ風)	-0.6~0.0	85~90	3~8週間	81.9	-1.4	0.86	0.44	64.4
Grapes European type	ブドウ (ヨーロッパ風)	-1.1~0.6	85~90	3~6ヵ月	81.6	-2.7	0.86	0.44	64.4
Leeks, green	ニラ	0.0	90~95	1~3ヵ月	88.2	-0.9	0.90	0.46	70.0
Lemons	レモン	0.0, 12.8~14.4	85~90	1~4ヵ月	89.3	-1.7	0.92	0.46	70.6
Lettuce	レタス	0.0	90~95	3~4週間	94.8	-0.4	0.96	0.48	75.6
Melon, Cantaloupe and Persian	キャンタロープ ペルシアンメロン	7.2~10.0	85~90	1~2週間	92.7	-1.2	0.94	0.48	73.3
Hony Dew and Hony Ball	甘 蕉	7.2~10.0	85~90	2~4週間	92.6	-1.2	0.94	0.48	73.3
Casaba	アスクメロン	7.2~10.0	85~90	4~6週間	92.7	-1.2	0.94	0.48	73.3

表6-② 食品の貯蔵

英名	和名	貯蔵温度 (°C)	相対湿度 (%)	概略貯蔵期間	含水率 (%)	平均凍結点 (°C)	凍結上比	凍結下比	潜熱 (kcal/kg)
Water Melon	スイカ	2.2~4.4	85~90	2~3週間	92.1	-0.8	0.97	0.48	73.3
Mushrooms	キノコ	0.0~1.7	85~90	3~5日間	91.1	-1.1	0.93	0.47	72.2
Nuts	クリ・クルミの実	0.0~10.0	65~75	8~12ヵ月	3~6	-	0.22~0.25	0.21~0.22	2.2~4.4
Okra	オクラ	10.0	85~95	7~10日間	89.8	-1.9	0.92	0.46	71.1
Olives, fresh	オリーブ(フレッシュ)	7.2~10.0	85~90	4~6週間	75.2	-1.9	0.80	0.42	60.0
Onion and Onion sets	玉ネギ	0.0	70~75	6~8ヵ月	87.5	-1.1	0.90	0.46	68.9
Oranges	オレンジ	0.0~1.1	85~90	8~12週間	87.2	-2.2	0.90	0.46	68.9
Papayas	パパイヤ	7.3	85~90	2~3週間	90.8	-1.1	0.82	0.47	72.2
Peaches	モモ	-0.6~0.0	85~90	2~4ヵ月	86.9	-1.3	0.90	0.46	68.9
Pears	ナシ	-1.7~-0.6	85~90	-	82.7	-2.4	0.86	0.45	65.6
Peas, Green	グリーンピース	0.0	85~90	1~2週間	74.3	-1.1	0.79	0.42	58.9
Peppers, sweet	ピーマン	7.2~10.0	85~90	8~10日間	92.4	-0.8	0.94	0.47	73.3
Peppers, chili	カン本性トウガラシ	0.0~4.4	65~75	6~9ヵ月	12.0	-0.6	0.30	0.24	9.4
Persimmons	カキ	-1.1	85~90	2ヵ月	78.2	-2.5	0.84	0.43	62.2
Pineapple Mature Green	パイナップル(緑熟)	10.0~15.6	85~90	3~4週間	-	-1.6	-	-	-
Pineapple Ripe	パイナップル(硬熟)	0.0~4.4	85~90	2~4週間	85.3	-1.3	0.88	0.45	67.8
Pomegranates	ザクロ	1.1~1.7	85~90	2~4ヵ月	-	-3.1	-	-	-
Potatoes Early crop	バレイショ(早生)	10.0~12.8	85~90	-	-	-1.1	-	-	-
Potatoes Late crop	バレイショ(晩生)	3.3~10.0	85~90	-	77.8	-1.2	0.82	0.43	61.7
Radishes Spring bunches	ダイコン(株を摘み取る)	0.0	90~95	10日間	93.6	-1.1	0.95	0.48	74.5
Radishes Winter	ダイコン(株を摘み取る)	0.0	90~95	2~4ヵ月	93.6	-	0.95	0.48	74.5
Spinach	ホウレンソウ	0.0	90~95	10~14日間	92.7	-0.4	0.94	0.48	73.3
Strawberries Fresh	イチゴ	-0.6~0.0	85~90	7~10日間	89.9	-1.0	0.92	-	71.7
Strawberries Frozen	イチゴ(冷凍)	-23.3~-17.8	-	1年	72.0	-	-	0.42	57.2
Sweet Potatoes	サツマイモ	12.8~15.6	90~95	4~6ヵ月	68.5	-1.6	0.75	0.40	53.9
Tangerines	ミカン	-0.6~3.3	90~95	3~4週間	87.3	-1.4	0.90	0.46	69.5
Tomatoes Mature green	トマト(緑熟)	12.8~21.1	85~90	2~5週間	94.7	-0.9	0.95	0.48	74.5
Tomatoes Ripe	トマト(硬熟)	0.0	85~90	7日間	94.1	-0.9	0.95	0.48	74.5
Turnips, roots	カブ	0.0	90~95	4~5ヵ月	90.9	-1.2	0.93	0.47	72.2

6 北海道主要農産物の生産量、貯蔵需要量および建設状況

1) 北海道の市場

北海道の主要農産物の貯蔵温度、貯蔵可能期間及び生産量を表7に示す。これらの品目から、人工永久凍土の低温貯蔵庫（以下A P Sと呼ぶ）の適用農産物を選定し、推定すると以下ようになる。ただし、貯蔵需要量のタマネギは、生産量の約1／4、その他については約1／6に設定し、建設費は3000トン規模を6.2億円に設定した（表8）。

表8 主要農産物の建設需要量の推定

品目	生産量	貯蔵需要量	建設需要量
タマネギ	43.2万トン	10万トン	213億円
ダイコン	13.6万トン	2万トン	43億円
ニンジン	13.1万トン	2万トン	43億円
キャベツ	6.9万トン	1万トン	21億円
ハクサイ	5.7万トン	1万トン	21億円
ナガイモ	1.1万トン	3万トン	6億円
ゴボウ	0.9万トン	2万トン	5億円
合 計	84.5万トン	16.5万トン	352億円

2) 品目別の貯蔵利益の推定

以下に、貯蔵庫を利用して出荷調整を行った場合の貯蔵利益の推定値を示す。ただし、入荷時期は最も単価の安い時期（生産時期）として、出荷時期は貯蔵可能期間と単価変動を考慮して推定を行った（表9）。

表9 主要農産物の貯蔵利益の推定

品目	入荷時期	出荷時期	貯蔵期間	利益(円/kg)
タマネギ	10月	3～4月	5ヵ月	50
ダイコン	10月	1月	3ヵ月	30
ニンジン	11月	4月	5ヵ月	40
キャベツ	11月	2月	3ヵ月	40
ハクサイ	11月	12月	1ヵ月	15
ナガイモ	12月	8～9月	8～9ヵ月	140～160
ゴボウ	11月	1月	2ヵ月	80

また、参考に北海道のバレイショ貯蔵施設の設置状況を示すため、表10に生食用を、表11に加工食品用を、それぞれ農協系と商社系とに分けて示した。

表 7 北海道主要農産物の A P S 適用可能性 (S 60 年農林水産省統計年報参照)

品 目		出 荷 量 (ton)				貯蔵温度 (℃)	貯蔵可能 期 間	評 価
		計	道内向	移出向	加工向			
果 菜 類	な す	3,050	2,958	37	55	7~10	10 D	×
	トマト	15,992	14,966	650	376	13~21	2~5 W	×
	きゅうり	21,607	20,520	206	881	7~10	10~14 D	×
	かぼちゃ	67,569	15,805	33,652	18,112	10~13	2~6 M	×
	えだまめ	2,293	2,062	70	161	0	20~25 D	×
	トモロコシ	143,879	15,137	4,938	123,804	0	4~8 D	×
	青さやいんげん	1,499	1,418	81		8	8~10 D	×
	青さやえんどう	725	533	192		0	20~50 D	×
葉 茎 菜 類	たまねぎ	432,715	39,785	367,820	25,110	0	6~8 M	○
	ね ぎ	20,528	16,013	3,264	1,251		?	
	はくさい	57,380	51,319	2,517	3,544	0	45~75 D	○
	キャベツ	69,263	56,087	10,571	2,605	0	2~3 M	○
	ほうれんそ	13,102	9,185	2,109	1,808	0	10~14 D	×
	食用ゆり	2,996	287	2,718			?	×
果 菜 類	だいこん	136,087	74,326	22,584	39,177	0	2~3 M	○
	にんじん	131,448	18,839	99,806	12,803	0	4~5 M	○
	ごぼう	9,394	5,852	3,473	69	0~1	?	○
	か ぶ	3,261	3,221	40		0	4~5 M	×
	やまいも	11,021	7,967	3,053	1	0	?	○
果 実 類	すいか	24,316	22,713	1,602	1	2~4	2~4 W	×
	いちご	2,751	2,643	69	39	0	7~10 D	×
	露地メロン	26,136	22,263	3,612	261	8~10	15 D	×
洋 菜 類	ピーマン	3,272	2,864	408		10	1~3 M	×
	レタス	11,407	10,175	1,232		0	3~4 W	×
	セロリー	2,038	1,505	533		0	2~4 W	×
	カリフラワー	2,365	2,318	47		0	2~3 W	×
	アスパラガス	14,499	3,562	4,886	6,051	0	3~4 W	×

○適用可

×適用不適

表10

全道の馬鈴薯貯蔵施設の設置状況(生食用)

A 施設数		農 協 系	商 系
断熱構造+空調 ----- 断熱構造 ----- なし	定 温	76 棟	8 棟
	半定温	43	29
	非定温	22	3
	合 計	141 棟	40 棟

B 施設規模の イメージ (1棟当り平均)	定 温	$38\text{ m}^2 \times 38\text{ m}^2$ (2601ト)	$22\text{ m}^2 \times 22\text{ m}^2$ (1244ト)
	半定温	31 × 31 (1477ト)	20 × 20 (744ト)
	非定温	23 × 23 (757ト)	16 × 16 (267ト)
	平均	$34\text{ m}^2 \times 34\text{ m}^2$ (2195ト)	20 × 20 (809ト)

表II (加工食品用)

A 施設数		農 協 系	商 系
断熱構造 + 空調 断熱構造 なし	定 温	25	27
	半定温	6	0
	非定温	0	7 (全て、マシナボテ用)
	合 計	31	34
B 施設規模のイメージ (1棟当り平均)			
	定 温	53 m ² × 53 m ² (5215トン)	41 m ² × 41 m ² (4055トン)
	半定温	36 × 36 (2092トン)	—
	非定温	—	34 × 34 (2097トン)
	平均	50 m ² × 50 m ² (4610トン)	40 m ² × 40 m ² (3623トン)

(出所) 北海道農務部畑作振興課資料より SISCO 作成

7 フラワービジネス

「自然と人間の共生」をテーマに大阪・鶴見緑地で開催された国際花と緑の博覧会は、博覧会市場最多の82カ国、55国際機関が参加、総入場者数も2300万人強と当初目標の2000万人を大幅に上回り、大盛況を収めた。これは地球規模の環境問題から生活レベルの自然保護に至るまで、環境保全に世界の関心が集まる中、「花」と「緑」の持つ「優しく」「ソフトな」イメージが予想以上に国民に受け入れられたと考えられる。

今日、高度経済成長を達成し、物質的には豊かな社会の到来した日本では、生活にゆとりが生まれ、快適な暮らしを求めるようになってきた。従来、快適さを生活の便利さのみに求め過ぎたという反省から、人々は今、違う意味の快適さを求めるようになっており、「花」や「緑」のかもしれない心の安らぎがこの要請に応えているため、花の生産や流通、小売などを扱う仕事「フラワービジネス」が著しい成長を遂げている。そして、この成長を遂げた段階には2つのステップがあるといわれている。

第1のステップは1970～1985年の期間で、理由としては、稲作農家の花き生産への転換や、道路や公園を建設する際の植木需要など、公共用需要の増大などがあげられる。花きには、根をカットした切花類、公園に植樹したりする根巻きにした樹木の花木類などがあるが、第1のステップでは花木類が中心になっていた。第2のステップは1985年から現在に至るものである。第2のステップでは切花類が成長の中心になってきている。切花類の消費は、①生け花などに使われる稽古用の「稽古花」、②各種パーティーやホテルなどの宴会・冠婚葬祭などの催事に使われる「仕事花」、③店頭で売られる「家庭内消費用」、④「ギフト用」の4つに分けられる。従来、消費の中心は「稽古花」や「家庭内消費用」であったが、最近は花を贈ることのファッション化を背景として「仕事花」や「ギフト用」に移行している。この傾向はこれからも続くと思われ、「フラワービジネス」では、これからも切花の安定供給が望まれる。しかし、花は生産できる季節がほぼ決まっており、切花にすると、その寿命は短いため、切花の安定供給はとても難しいといわれているが、もし切花を長期間、新鮮な状態で貯蔵できれば、季節に関係なく安定供給ができ、それによって価格も下げることができる。

8 低温技術利用による生花（切花）の貯蔵

先に述べたように、花卉需要といえば冠婚葬祭や彼岸等に限られていたが、生活のアメニティー化、ファッション化に伴い、用途は多様化している。このような状況下では、花卉市場はここ数年の間に急速に伸び、消費ベースで1億を越えており、異業種からの参入も相次いでおり、5～10倍の成長が見込まれている。しかし、わが国では現在一人あたりの消費量・金額ともヨーロッパ諸国の半数以下である。これらを増大させるには、消費動向にあった花卉を低コスト、高品質で周年供給され

ることが望まれている。

このためには、生産面で年間をとうして種子、球根、株等が生産者に供給でき、いつでも生産出荷調整できることと、切花状態で出荷調整ができることが望まれる。しかし、花卉としては、切花と球根が貯蔵対象となるが、球根類は市場として小さいため（生産額では切花の5%）、対象は切花に限定される。表12に切花の生産量を示す。これによると、キク、カーネーション、バラが全体の約80%、主要10品目が全体の97%を占めている。

表12 切花の出荷量（1988年）

品目	出荷量（1000本）	比率（%）
1 キク	1,668,000	51.0
2 カーネーション	664,100	20.3
3 バラ	355,000	10.8
4 ユリ	106,800	3.3
5 りんどう	94,300	2.9
6 ストック	83,600	2.6
7 フリージア	77,400	2.4
8 グラジオラス	54,600	1.7
9 チューリップ	37,800	1.2
10 アイリス	32,900	1.0
その他	98,100	3.0
合 計	3,273,000	100.0

次に、切花の利用性および将来性に関する市場評価を図11に示す。右上がり程、評価値と将来性が高い。

図11 切り花の利用性及び将来性に関する市場評価

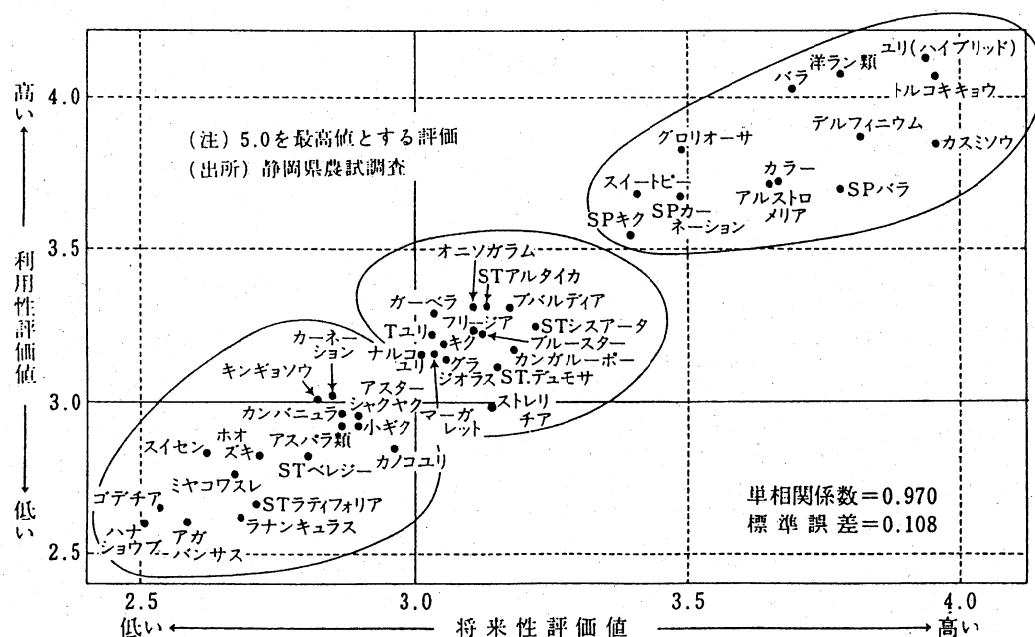


図12に主な切花の、卸売価格および数量の月別推移を示す。これによると、いずれも、平均価格の月別変動は大きく、貯蔵による出荷調整の必要性は十分にあると考えられる。キク、カーネーション、バラはいずれも3月が高価である。

貯蔵温度と貯蔵可能日数を表13に示す。これによると、貯蔵温度は0～5℃が多く、貯蔵日数は長くとも2ヶ月となっている。したがって、貯蔵品目としては、出荷量を考慮すると、ユリ、チューリップ、カーネーション、キク、バラが望ましいと考えられる。

表13 貯蔵温度と貯蔵可能日数

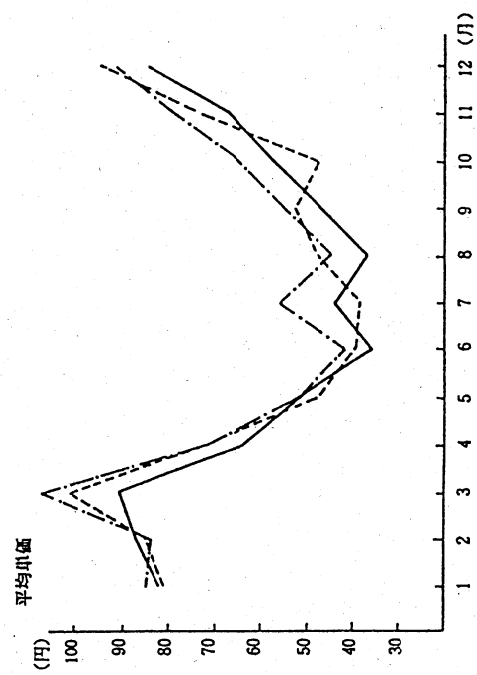
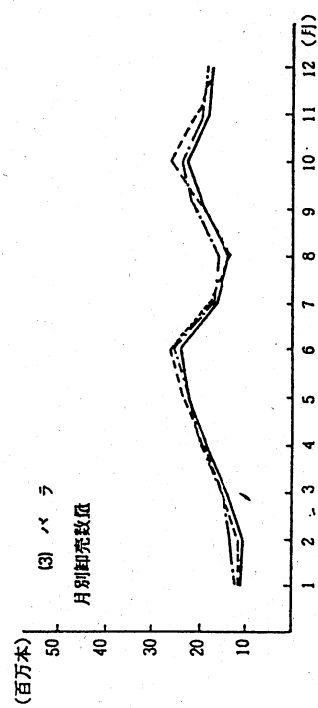
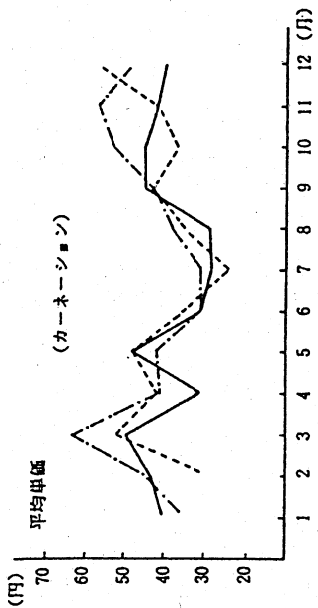
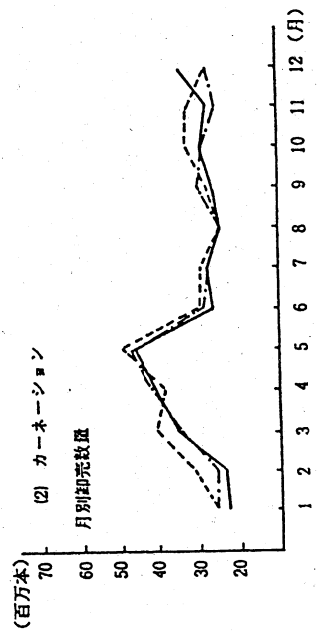
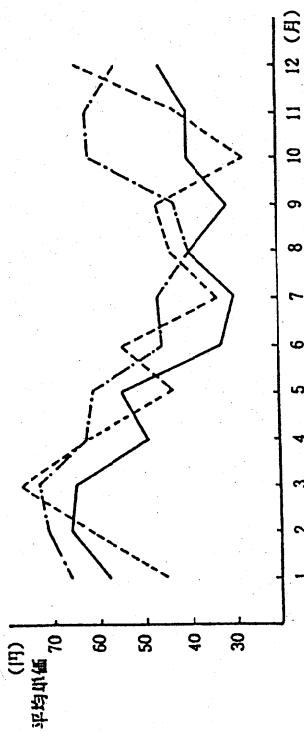
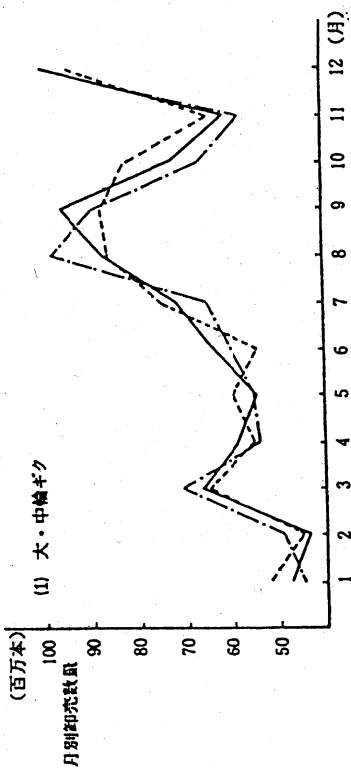
種 類	貯蔵温度①	貯蔵可能日数②	貯蔵温度と日数③
ユ リ	0～1.7	2～3週	1～2°C, 7～10日 (乾式)
球根アイリス	0～1.7	2～4週	1～2°C, 7日(乾式)
チューリップ	0～0.6	4～8週	1～2°C, 7日(乾式)
スイセン	0～0.6	3～7週	1～2°C, 7日(乾式)
カーネーション	0～2.2	3～4週	1～2°C, 5～14日 (乾式)
キ ク	0～1.7	3～6週	1～2°C, 14日(乾式)
ガーベラ	1.7	2週	
ジャクヤク	0～1.7	4～6週	
フリージア	0～0.6	2週	1～2°C, 5～7日 (乾式)
スターチス	1.7	6週	
キンギソウ	0～0.6	3～4週	4～5°C, 3日(湿式)
スイートピー	0～0.6	1～2週	
バ ラ	1.7～4.5 (保存液) 0(乾式)	4～5日 1～2週	4～5°C, 3日(湿式) 2～3°C, 3日(湿式)
ク チ ナ シ	0～0.6	2～3週	
ス ト ッ ク	4.4	3日	1～2°C, } 7日(乾式) 4～5°C, }
ア ス タ ー	4.4	1週	
キンセンカ	4.4	3日	
ヤグルマソウ	4.4	3日	
ジャスターデージー	4.4	1週	
ル ビ ラ ス	4.4	3日	
フナシキユラス	4.4	2～3日	
カ ラ ー	4.4	1週	
ダ リ ア	4.4	3～5日	
グロリオサ	4.4	1週	
ライラック	4.4	4～6日	
アカシア	4.4	3～4日	
ア ネ モ ネ	7.2	1～2日	
ストレリチア	7.2	3～4日	
ツ バ キ	7.2	3～6日	
グラジオラス	1.7～10.0	6～8日	1～2°C, 10日(乾式)
ラ シ ョ ン	7.2～10.0	2週	
アンスリウム	13.3	3～4日	
ジンジャア	13.3	3～4日	
ボインセチア	16.6	2～3日	

USDA Agr. Handbook No.66 より引用

(注) ① ハンドブック, ② 船越

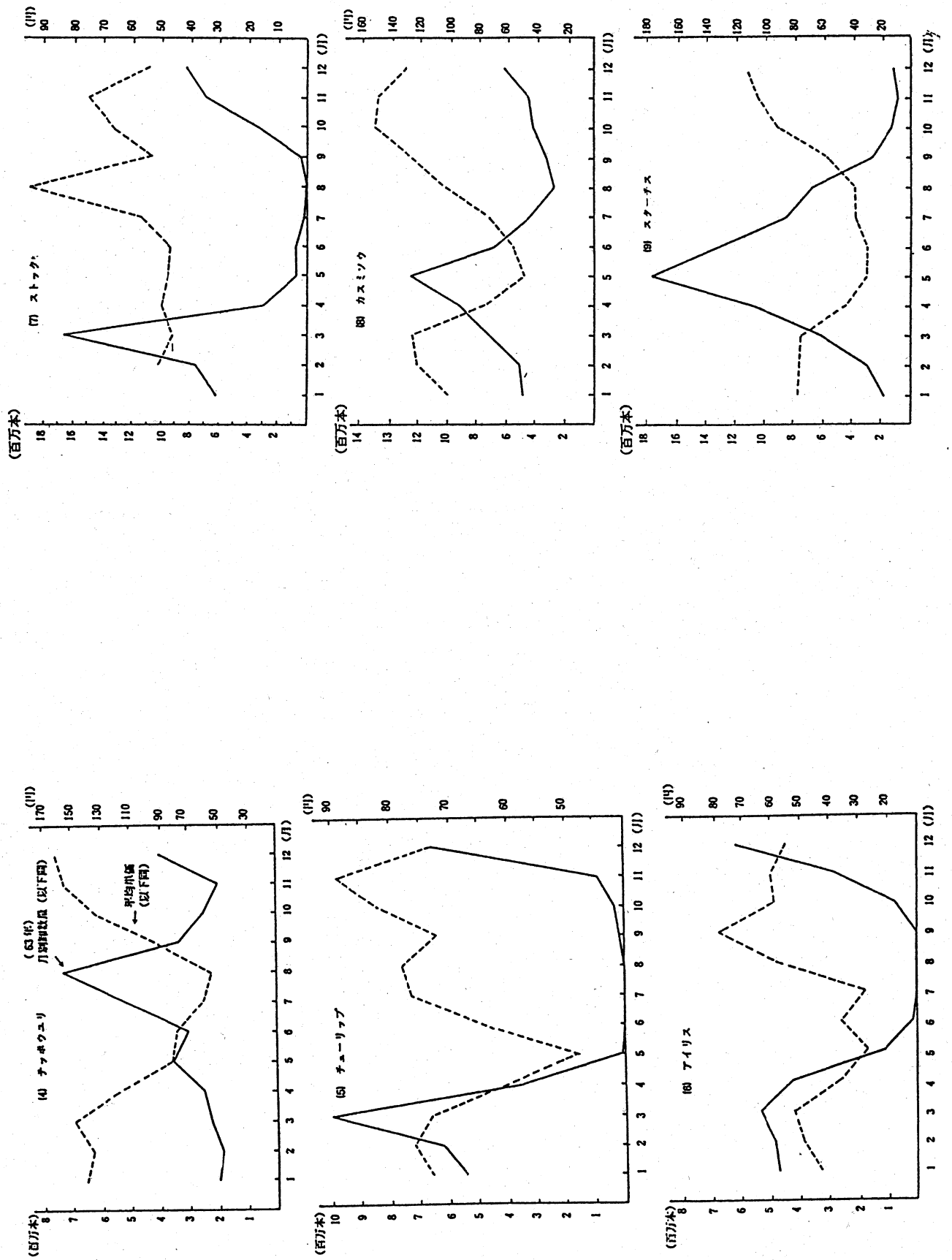
卸売数量と卸売単価の月別推移 (1)~(25)

61年 ———, 62年 - - - - , 63年 - - - -



主要切花の卸売価格と数量の月別推移

図12-①



参考文献

- 1) 大久保増太郎：野菜の鮮度保持、養賢堂（1988）
- 2) 鈴木忠利ほか：野菜の価格形成、明文書房（1978）
- 3) 堂腰純ほか：北海道の農業気象、ニューカントリ（1982）
- 4) 堂腰純：自然氷を利用した野菜の長期貯蔵、寒地技術シンポジウム'85、（1985）
- 5) 網走市：網走市寒冷エネルギー利用システム事業化可能調査報告書（1991）
- 6) 田部井寛：産業の動き－フラワービジネスの現状と展望、I B J ' 9 1 （1991）

第5章 自然冷熱エネルギー利用した農産物貯蔵方式

1. 冷熱エネルギー利用調査について

北海道開発局、局長官房開発調整課は、昭和62年に冷熱エネルギー利用調査を行った。それによると、次の3項目からなる。

1) 「冷熱エネルギー利用目的」

北海道の積雪、寒冷という厳しい自然条件は、一般に開発を妨げる要因とされ、これを克服する手段を過去に幾度なく講じてきた。しかし、この冬期の特性を廉価かつ豊富なエネルギーとして捉え、積極的な活動を行い、地域の活性化を図ることを目的としている。

2) 「調査」の必要性および目的

①冷熱エネルギーを利用する貯蔵技術、雪を氷に変換する技術等の研究開発は、現在、民間企業、大学を中心に進められてきている。また、一方では、氷温域での貯蔵、熟成等により得られるメリットに着目した研究も道内外の各地で行われているところである。

②しかし、これらの研究の位置づけや相互の関連性が明白ではなく、また、ユーザーや消費者のニーズについても十分な調査が行われていないために、このまま民間ベースに委ねるだけでは、氷温流通システムを確立し道内産業を活性化する目的の達成が必要以上に遅れる恐れがある。

③このため、北海道の地域特性に十分な配慮を払い、適切なインセンティブを与えつつ、政策的に何らの橋渡しをすることが必要となっており、北海道に適する貯蔵技術、貯蔵産物等について総合的視野に立った調査を行い、これらの関連性を明確にして整合性のある有機的な冷熱エネルギー利用のあり方について検討する。

3) 冷熱エネルギー利用による効果

①農水産の安定供給の可能

冷熱を利用する氷温貯蔵により、冷凍貯蔵により鮮度が高く、価格的にも安定した産物を年間を通じて出荷することができる。

②農業経済の安定化

道内の農産物は、寒冷地のため生産は夏、出荷は夏から秋にかけて集中し、価格を下落させる原因になっているが、氷温貯蔵によりこれを解消することができる。また、予冷庫としての利用により、供給可能地域が拡大する。株冷の分野に利用することで温室エネルギーの節約が期待される。

③新たな食品加工業の振興

氷温には貯蔵の他、成熟、発酵、乾燥等の利用方があるが、これにより得られる高付加価値を活用した食品産業、バイオ等の新たな産業の可能性がある。

表1 冷熱エネルギー利用実例一覽表

進捗状況 タイプ	基礎研究		貯蔵		流通		問題点						
	研究機関	原理・研究状況	品目	月日	実施者・場所	温度	状況・備考	品目	月日	実施者	送り方	販売者	
人工凍土	北大低温科学研究所 清水建設K.K. 帯広畜大	ヒートパイプにより 冬季の冷気を利用して、 人工的に永久凍土を作 る。 現在凍土の造成試験 中。	-	-	富良野市 帯広市 苫小牧市	-	61年度冬期 全道3ヶ所 で予定	-	-	-	-	-	・凍土の深さに限界がある ・ラジエーターの改良によ るコスト低減
水温貯蔵庫	中道機械K.K. 北大農学部	電源による水温貯蔵 庫。	グリーン アスパラ メロン サヤ エンドウ トマト 夕張メロン イチゴ	50.5 " " " 51.7 51.8 "	富良野農協 " " " 鷹栖町 夕張市 酒田農協	50-85% 8" 0-1" 0-1"	重量、硬度、 色調、糖度、 pH、食味、 包装内の空 気組成 予定 検討中 予定	サケ ホタテ シシヤマ メロン タラコ 長イモ カボチャ スイート コーン 肉 ホタテ	50.10 61	雄武 畜産農協 常呂漁協 帯広能本 水産(広尾) 富良野農協 網走水産 加工組合 西網走農協 " " 雄武 畜産農協 常呂漁協	水温 コンテナ 西武 デパート	・コストと付加価値との関 連	
氷	橋本土木K.K. 室蘭工大 道立中央農試 胆振支庁 日本製鋼所	天然の雪を圧縮して 氷を作り、断熱材で密 閉し、倉庫に冷気を通 す。	長イモ	50.11-	幕別町	0-5°	温度 61.7 シンボン ユムの予定	-	-	-	-	-	・冷熱源の耐久性
アイス シェル	東海大 旭川市国芸 センター	水と雪を利用したド ーム状の水の造型物。	キャベツ リンゴ ホウレン草 大根	51.1.8 ~3.17	旭川市	-2° -6°	ドーム内の 温度、湿度	-	-	-	-	-	・貯蔵期間が限定される ・構造物の安全性

《冷熱エネルギー利用調査》

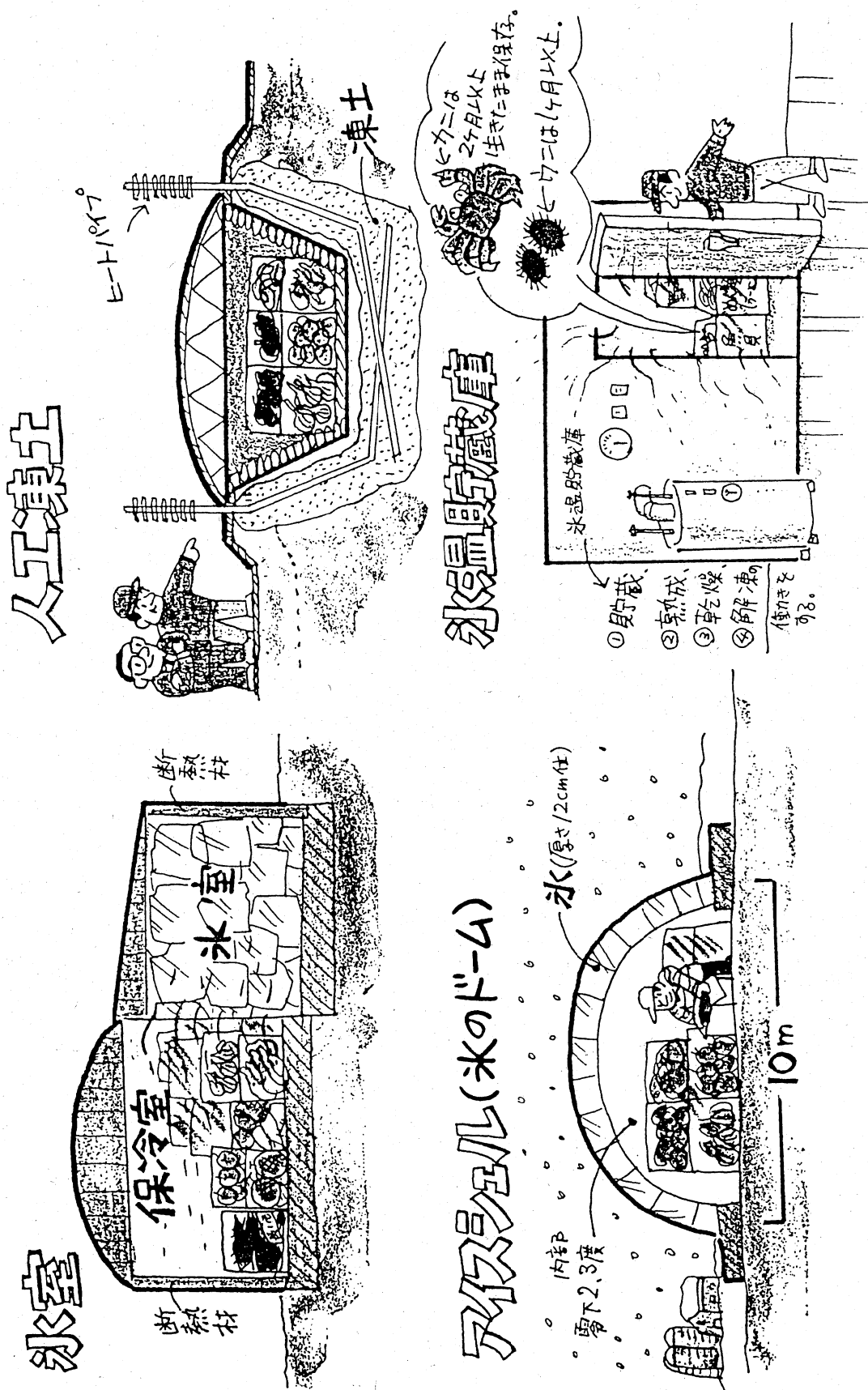


図1 氷室、人工凍土、アイスシェルのイメージ画

④除排雪の軽減

雪を氷に変換することで雪の有効利用とともに、除排雪が効率良く行われる。

⑤レジャー等への利用

廉価で大量の氷が得られるので、これを利用したボブスレーコース、スケートリンク等の施設が容易に設置可能であるため、これを中心に地域の活性化、生活環境の改善が図れる。

表1に冷熱エネルギー利用実例の一覧表を示す。また、氷室、人工凍土、アイスシェル、氷温貯蔵庫のイメージ画を図1に示す。

2. 自然冷熱を利用した低温貯蔵庫の現状について

表2に、自然冷熱を利用した低温貯蔵庫の現状、北海道における低温貯蔵庫の市場性、氷室、アイスシェル、人工永久凍土による低温貯蔵庫などの例を箇条書きにした。そして、表3に、特徴、構造、問題点や課題、建設費やランニングコストなどの貯蔵システム一覧表を示す。

3. 冷熱エネルギーを利用した貯蔵方式の概要

1)はじめに

最近、さまざまな分野で雪や寒さを克服するだけでなく、雪のもつ良い側面を見出し、それを財産として積極的利用していく方策が検討されささある。

農業においても例外でなく、雪や寒さを廉価で豊富な冷熱エネルギーや保温材としてとらえ、農作物を貯蔵したり、生育を抑制する試みが盛んになってきた。しかし、これらの施設は庫内温度を0℃前後、湿度90%以上に保つことができることから、冬期における農業の振興と活性化を図る上で非常に期待される。

ここでは、利雪技術の中から農業分野において雪や寒さなどの冷熱エネルギーを利用した貯蔵方式の概要を示す。

2)利雪の形態

雪や氷のもつ主な利点を上げると以下のとおりである。

①雪は毎年降るため、枯渇することのない膨大な天然の資源であり、融雪を抑制することによって長期保存も可能である。

②融解熱が非常に大きく解けにくい。氷の融解潜熱は0℃の氷1gを0℃の水にするためには80calの熱が必要である。

③雪や氷のままでは0℃以上に上昇しない。

④結合力が非常に大きい。また、集雪や運搬が容易である。

現在まで、これらの利点を活用した農業での利用が図られているが、一例をあげると図2にとおりである。

表 2 自然冷熱を利用した低温貯蔵庫の現状

1. 自然冷熱を利用した低温貯蔵庫の背景

- 1) 自然エネルギーの利用 (地域エネルギー)
- 2) 食料貯蔵の必要性 (世界の人口、穀類需要シミュレーション)
- 3) 日本の雪と寒さの位置づけ (積雪と一月平均気温、積算寒度と最暖月平均気温)
- 4) 克雪、利雪そして寒さの有効利用ムードの高まり (雪氷の工学的利用)
- 5) 自然冷熱を利用した貯蔵庫の開発が活発 (邪魔な雪も使おう)

2. 北海道における低温貯蔵庫の市場性

- 1) 馬鈴薯貯蔵施設の設置状況 (生食用、加工用)
- 2) 各農協の主要な予冷、保冷品目
- 3) 価格、入荷量の年間推移 (馬鈴薯、たまねぎ)

3. 氷室

- 1) 自然雪による氷室 (雪中貯蔵)
- 2) 積雪深分布、融雪状況 (根雪の最終分布、雪山の消耗過程)
- 3) 圧縮した雪による貯蔵庫 (氷室、雪氷変換装置)

4. アイスシェル

- 1) アイスシェルの構造
- 2) アイスシェルの構築方法
- 3) アイスシェルによる実験結果 (気象、鮮度、適合性)

5. 人工永久凍土による低温貯蔵庫 (APS; Artificial Permafrost Storage)

- 1) APS の概要 (凍土の性質、ヒートパイプの原理、APS の構造)
- 2) APS の構築方法 (モデルプラント実験)
- 3) APS の実験結果 (HP の性能実験、モデルプラント実験結果)

6. まとめ

- 1) 各種の自然冷熱を利用した低温貯蔵庫の比較

表 3 貯蔵システム一覧表

方式	目的	特徴	構造	問題点課題	建 設 費 ランニングコスト	貯蔵可能品目
1. 氷室	野菜の年内貯蔵により端境期の出荷を行う。	建設費、維持管理費が安い。	氷を室に貯え、氷の融ける潜熱を利用する。	貯蔵できる品物が限定される。 毎年氷を補給しなければならぬ。	中の 上の 小の 小	リンゴ、イチゴ、スイカ ウドの株、長芋、ユリ根 馬鈴薯、キャベツ、大根 ハクサイ、ホウレンソウ、アスパラ
2. 人工凍土	農水産物の長期貯蔵	敷地がある所では無限に活用できる	冬の寒気を利用して、地下を凍結する。	あまり深くまで凍結できない。 ヒートパイプの耐用年数に限度がある。	大の 中の 小の 小	上 同 備蓄食糧の穀物
3. 氷温貯蔵	食品の貯蔵、熟成、乾燥を行う	生の味が味覚できる。	氷温コンテナによる貯蔵。	電熱を必要とするため、付加価値が高い。 維持費が高む。	大の 中の 大の 中	肉、活魚、魚食品 氷温加工食品 メロン、グリーンアスパラ
4. アイスシエル	貯蔵及び観光開発	光を透すため野の色が変色しない。	冬期に氷のドームを作る。	氷の融ける3月上旬までが貯蔵の限度である。	小の 大の 小の 小	キャベツ、大根 馬鈴薯、ゴボウ 人参、リンゴ、ミカン
5. トンネル	野菜の貯蔵	真冬の温度変化が少ない。	廃道トンネルを利用する。 土地改良施設を利用する。	廃道を利用するため、補修施設費が高む。 季節の制約がある。	小の 小の 小の 小	馬鈴薯、玉ねぎ 長いも
6. 雪中貯蔵	野菜の貯蔵	自然の雪を利用するため、安価である。	雪室の上をアルミ蒸着フィルムで被覆する。	貯蔵期間が制約される。	小の 中の 小の 小	人参、キャベツ 馬鈴薯、ゴボウ イチゴの苗、りんどうの苗

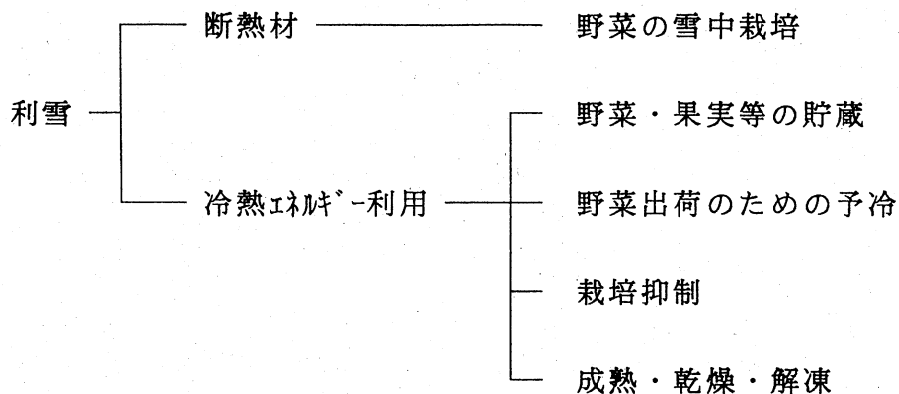


図2 雪の利用形態

3) 北海道農業の現状

北海道は恵まれた土地資源を背景として、地域の営農条件に応じた様々な農業を展開しているが、土地利用型が主体であるため、以下のような問題を抱えている。

①一年に一度の単一収穫であり、しかも短期間に多量に生産されるため、安価で出荷せざるを得ない。

②出荷調整するためには、大規模な貯蔵施設が必要になるが、設備費や維持費に多額の費用を必要とするため、コスト的にペイしない。

③現在、電気を使用した冷蔵庫が一般的であるが、冷蔵機器の小型化と高能率化のために、庫内のファンを回して冷気を対流させている。このため、農産物から水分を奪ってしまうことから、加湿機によって水分を補給しているのが実態であり、農産物にとって好ましい状態で保存されているとはいえない。

これらの問題を解決していくことが、今後の北海道農業を振興させる課題となっており、自然の恵みである雪や氷を利用した廉価な貯蔵技術を確立し、端境期に出荷できる施設に期待がかけられている。

4) 農産物の凍結温度

水は真水の場合 0°C で凍結するが、農産物は 0°C では凍結しない。なぜならば、それぞれに氷結点（凍り始める温度）があり、表4に示すように野菜や果実の種類にもよって異なる。これは、気温がマイナスになると、体内に生産される不凍液（糖、高級アルコール、糖蛋白質等）が自己凍結を防ぐために作用するからである。

その点、雪や氷は極端な温度低下を防ぎ、かつ湿度も保つため生鮮野菜や果実の貯蔵に適している。

5) 貯蔵施設の概要

① 氷 室

氷を冷熱源とした低温貯蔵庫などにより野菜や果実などを貯蔵するものである。

現在、雪氷変換機が開発されており、3000円／m³程度で雪を圧縮して氷に変えることができるため、冷熱源として利用する場合に非常に有利である。農産物の貯蔵実績でほとんどのものが貯蔵可能で、魚や肉類の貯蔵もできる。なお、気象条件から氷室を利用できる地域は、1月の平均最深積雪が50cm以上で、かつ年平均最深積雪深が1m以上あることが目安になっている。

②人工凍土

冬期の自然冷熱をヒートパイプを利用して、地中内を人工的に凍結させ、これを冷熱源として低温貯蔵庫に利用するものである。一度設置するとランニングコストはほとんどかからず、外気温が-20～20℃に変化しても庫内の温度をほぼ2℃前後に保つことができる。貯蔵の実績ではバレイショ、ナガイモなどがあるが、農産物ならほとんどのものが可能と言われている。なお、この施設の可能な範囲は、積算寒度が400度・日以上であることが目安となっている。

③アイスシェル

「かまくら」や「イーグル」を巨大化したような施設で、大きなエアードームの上に雪をまき、さらに水をまいて凍結させてから中の風船を取り除く方法や、鋼板をかまぼこ状に曲げて、その上に雪を堆積させる方法がある。農産物の貯蔵実績ではほとんどのものが貯蔵可能であるが、生酒の貯蔵に適している。この方法の特長は設備費、維持費が安価で、広いスペースを確保できることから、農産物の搬入・搬出の荷傷がないことが上げられる。しかし、シェルの厚さにより庫内の温度が外気の影響で-2～-3℃になる場合があるため、凍結しやすいものには不適といえる。なお、この施設の設置可能範囲は、日最低気温が、-10℃以下の日が10日以上続き、かつ施設構造の強度面から積雪が150cm以下の地域が目安となっている。

④トンネル貯蔵

この施設は、使用しないトンネルや冬期に遊水施設となっている農業用水路などの函渠部分を利用して野菜などを貯蔵するものである。試験結果で、バレイショ、タマネギ、ナガイモなどが良好な状態で保存できることが明らかになっており、貯蔵庫としては極めて有望である。ただ、貯蔵される農産物は呼吸しているため、トンネル内の温度上昇と炭酸ガス濃度を調整するための換気システムが必要である。冷熱源としては、雪氷変換機によって雪氷を作る、寒気を利用して氷を作る、流水を利用する、ヒートパイプによって施設内で氷を作るなどがある。しかし、利用が可能な施設の存在と農業施設の場合は利用できる期間が限定されるのがネックとなっている。

⑤雪中貯蔵

雪の自然特性である低温・多湿を利用した貯蔵方法で、積み上げられた野菜の周りに雪を堆積するという簡単な構造である。北海道ではあまり例はないが、東北の例ではニンジン、バレイショ、キャベツ、ゴボウの貯蔵状況は良好であるが、ダイ

コン、ハクサイ、ホウレン草などは低温障害があったと報告されている。この方法で貯蔵する場合は、大量の雪を必要とすることから、1 m以上の積雪がある地域が目安となっている。また、晩秋に収穫近くまで生育した野菜をそのまま畑に置いて雪の下にし、冬期間積雪の下から堀出して出荷する雪下栽培も雪中貯蔵の一つである。

⑥氷温貯蔵

農産物を含む食品や原材料を氷結点直前の氷温で貯蔵する施設で、鮮度や風味を損なうことなく長期に保存できるとともに、熟成・乾燥・解凍の機能も有している。施設については、電気があればどこでも可能であるが、施設費が高く、一定温度を保つためには電気を使用することから維持費もかさむため、氷室や人工凍土との併用やメロン、切り花などでコストに見合う貯蔵品の選択が必要である。

6)貯蔵施設の優位性の比較

各施設にはそれぞれ一長一短があり、また、地域の気象特性、貯蔵する農産物の種類と量などによっても異なるため、一概には言えないが、表5に示すような項目を総合的に判断して設置する必要がある。

7)あとがき

雪や氷の冷熱エネルギーを利用した場合、従来からの電気冷蔵庫に比べて、湿度が90%に保たれるため、乾燥による重量の減耗が少なく、また、低温馴化により体内の澱粉質の糖化するため甘味が増すとともに、糖化による細胞液の濃度変化により周辺の水分が組織内に取り込こまれるため、貯蔵期間中に生体重が増加する現象がみられるなど、いわゆる「甘くてみずみずしい野菜」になることが明らかになっている。

現在、道内では氷室を主体として実用ないしは試験が行われている（表6）が、まだ未知の部分も多く、貯蔵技術の確立に期待がかけられる。

〔第3節は、北海道開発コンサルタント発行のH E Cレポート、No.120（1990.6）で、農業開発部の岡崎典裕氏が記述した「例熱エネルギーを利用した農産物貯蔵について」を転記しました。〕

表 4 農産物の氷結温度

作物名	氷結温度	作物名	氷結温度
野菜類	キャベツ -0.5~-0.9	野菜類	たまねぎ -0.8~-1.1
	きゅうり -0.5~-0.8		ばれいしょ -0.6~-1.7
	にんじん -1.3~-1.4		ピーマン -0.7
	だいこん -0.7~-1.4	果実類	梨(幸水) -1.48
	かぶ -0.8~-1.1		りんご -1.5~-2.1
	カリフラワー -0.8~-1.1		いちご -0.8~-1.2
	ブロッコリー -0.6~-1.5		さくらんぼ -1.8~-2.4
	ほうれんそう -0.3~-0.8		すいか -0.4~-1.7
	レタス -0.2~-0.3		ぶどう -1.3~-3.5
	セルリー -0.5~-1.0		メロン -0.9~-1.7
	アスパラガス -0.6~-1.2		プラム -0.8~-0.9
	なす -0.8		あんず -1.1
	とまと -0.5~-0.9		くり -4.5
	かぼちゃ -0.8~-0.9		くるみ -6.7
	さやいんげん -0.7~-1.3		

表 5 貯蔵方式別優位性比較一覧表

	氷室	人工凍土	アイスシェル	トンネル貯蔵	雪中貯蔵	氷温貯蔵
冷熱エネルギーの有効利用	○	○	○	○	○	×
通年貯蔵の可能性	○	○	×	△	△	○
建設コスト	○	○	○	△	○	△
ランニングコスト	○	○	○	△	○	△
貯蔵品管理の容易性	○	○	△	○	○	○
貯蔵スペース確保の容易性	○	○	○	○	×	○
温度・湿度の調整の容易性	△	△	×	△	×	○
維持管理の容易性	○	○	△	○	○	○
保守・点検の容易性	○	○	○	○	○	×

○：極めて有利・有効 ○：有利・有効 △：条件により有効 ×：不利

表 6 冷熱エネルギーを利用した農産物貯蔵例

施設名	実施市町村名(実験・計画を含む)
氷室	幕別町、札幌市、壮瞥町、当麻町、留寿都村、室蘭市、長沼町、木古内町、知内町、栗山町、網走市、白滝村、鹿追町、音更町、穂別町、東神楽町、美深町、北村、馴子府町、占冠村、旭川市、上湧別町
人工凍土	帯広市、北見市、網走市
アイスシェル	旭川市、愛別町、北見市、和寒町、当麻町、白滝村
トンネル貯蔵	初山別村、新得町、斜里町、深川市(幹線用水路)
雪中貯蔵	和寒町
氷温貯蔵	富良野市、栗山町、雄武町、網走市、美瑛町、虻田町、(札幌市、釧路市、函館市、旭川市などの運送会社が氷温輸送を実施)

第6章 ヒートパイプの熱設計と現地基礎実験

1. 低温貯蔵庫（9 m×50m）の設計

1) 仕様

① 貯蔵庫サイズ

内空 幅9m×高さ4m×長さ50m

貯蔵量 1440トン （内空の80%が内容積 1800m³）

② ヒートパイプ

外径 46φ SUS304Lのコルゲート型

長さ（平均） 約13m

敷設形状 L型敷設（作動液の分布を良くするため）

底部傾度 5度、 0.5mピッチ

放熱部 アルミ角フィンチューブ

2) ヒートパイプ必要本数と吸熱量

① 本数 n

ヒートパイプピッチを0.5m間隔とし、3列とすると。

50mのスパンにおいてはヒートパイプ（HP）本数nは、

$$n = \frac{50\text{m}}{0.5\text{m}} \times 3 \times 2 + \frac{13\text{m}}{0.5} \times 3 \times 2 = 756 \quad (\text{本}) \quad (1)$$

② 必要輸送熱量Q

外気が-10℃の期間が2ヶ月間として、

$$Q = \frac{\text{全必要冷熱量}}{756 \times 24^{\text{h}} \times 30 \times 2} \quad (2)$$

全必要冷熱量（後述する必要冷熱量から初年度 $19.47 \times 10^7 \text{ cal}$ ）であるから、

$$Q = 179 \text{ Kcal/hr} \quad (3)$$

HPの蒸発部の平均長さL₀は、

（垂直）（5° 傾斜）

L₀ = 5 m + 6 m = 11mであるが、傾斜部は90° のとき40%の能力と仮定して、有効長さ L_{eff} ≒ 7.4 m となり、m当りの吸熱量qは、

$$q = 179 \text{ kcal} / 7.4 \text{ m} = 24.2 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \quad (4)$$

③ HP放熱部の設計

自然対流放熱のとき、必要放熱面積は（HP 1 本当り） a は

$$a = \frac{179 \text{ kcal/hr}}{K \times \Delta T} \quad (5)$$

ここに、 K は熱通過率で、ここでは $8.0 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ を採用し、 ΔT は外気（ -10°C ）と放熱部温度の差、 $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ とすると、

$$a = 179 / 8 \times 3 = 7.46 \text{ m}^2 \quad (6)$$

フィンの構造は、アルミニウム製の角フィンを用いる。フィン効率 ϕf は、次式の u から求まる。（図 1）

$$u = Lc \sqrt{(h / \lambda \cdot y^b)} \quad (7)$$

ここに、 $h = 8 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

$\lambda = 140 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

$y^b = 0.6 / 2 = 3 \times 10^{-4} \text{ m}$

$Lc = 115 \text{ mm} = 0.115 \text{ m}$

$u \approx 1.59$ となるので、図 2 から、フィン効率 ϕf は、 $\phi f = 0.6$ となり
フィンチューブ 1 m 当りの伝熱面積 A は、

$$A = (0.2 \times 0.2 - 0.05^2 \times \pi / 4) \times 2 \times 100 = 7.6 \text{ m}^2 \quad (8)$$

したがって、必要なフィンチューブの長さ L は、

$$L = \frac{7.46 \text{ m}^2}{A \times \phi f} = \frac{7.46}{7.6 \times 0.6} \approx 1.64 \text{ m} \quad (9)$$

したがって、 $L = 1.64 \text{ m}$ が必要となる。

3) 必要冷熱量 S の試算

① 貯蔵物消費冷熱 S_1

貯蔵物発生熱量 $7 \text{ kcal/トン} \cdot \text{hr}$

貯蔵量 1440 m^2

貯蔵期間（冷熱が必要な期間） 4 月～11 月の 8 ヶ月

$$S_1 = 7 \times 1440 \times 24 \times 30 \times 8 = 5.80 \times 10^7 \text{ kcal} \quad (10)$$

② 外部への放熱量 S_2

地中への放熱量 q_1 は、断熱材の熱伝導率 $\lambda = 0.03 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 、厚さ $t =$

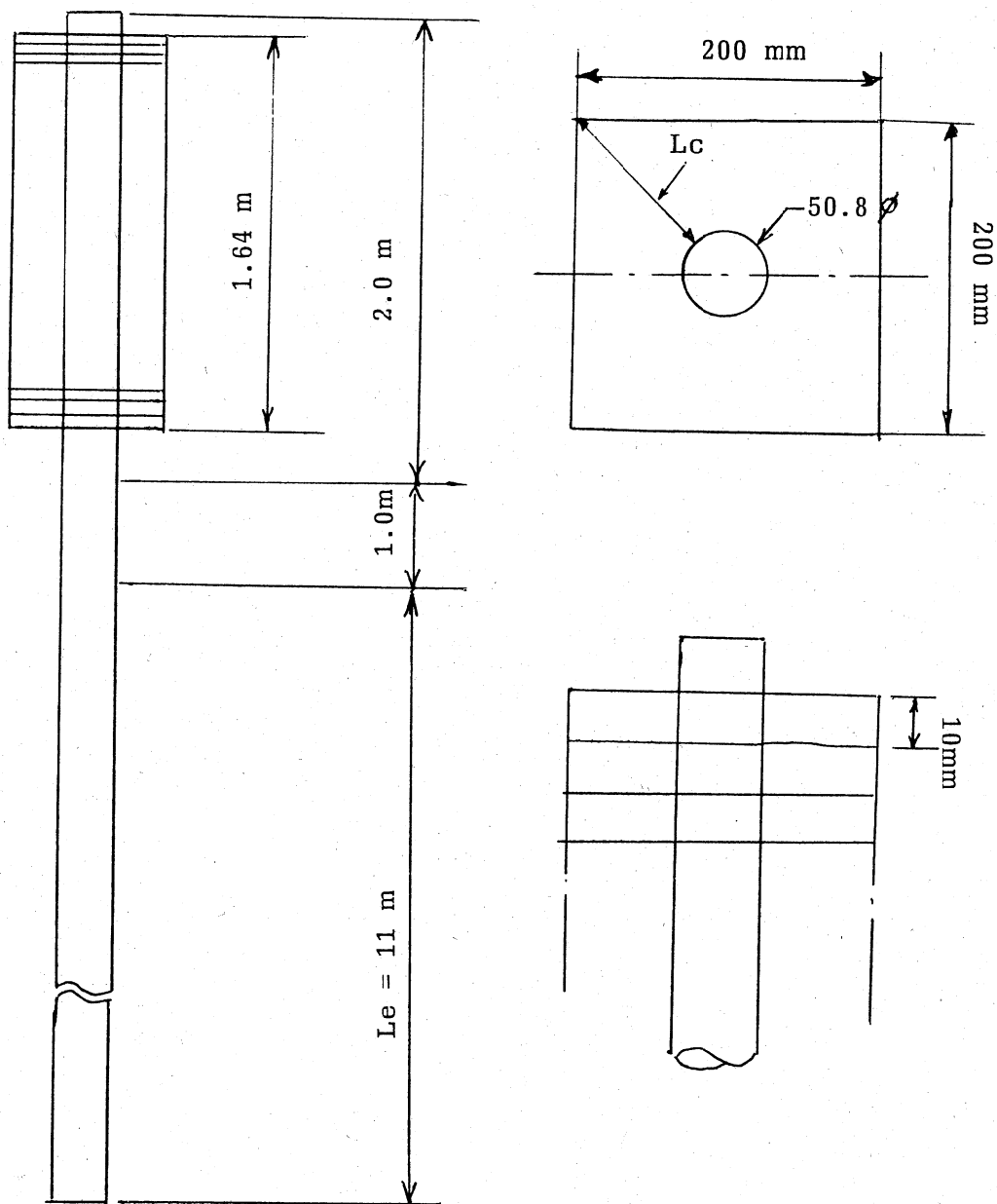


図1 フィンの設計寸法図

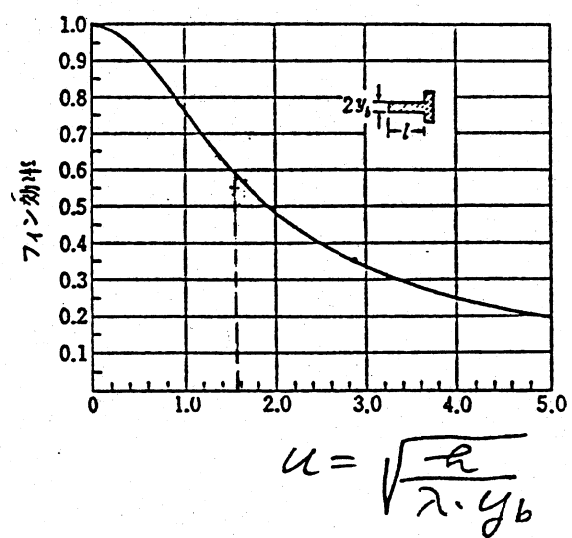


図2 フィン効率

100 mm、幅 $d = 7 + 13 + 7 = 27$ m とすると、50m の長さでは、 q_1 は外部土壌温度 8°C 、内部土壌温度 5°C とすると、

$$q_1 = (t_2 - t_1) / R_1, \quad R_1 = t / (\lambda \times A) \quad (11)$$

$$R_1 = 0.10 / (0.03 \times 50 \times 27) = 2.47 \times 10^{-3}$$

$$q_1 = 3 / 2.47 \times 10^{-3} = 1,215 \text{ kcal/hr}$$

上面（外気）への放熱 q_2 は、屋根の表面積を底面の1.3倍とし、屋根幅は12 m となるから屋根の表面積 A は、 $A = 12 \times 50 = 600 \text{ m}^2$ となる。

$$q_2 = \Delta t / R_2 \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{t_2}{9 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times \lambda} + \frac{1}{A_2 \times \alpha} \quad (13)$$

ここに、 A_2 は 600 m^2 、 t_2 は 0.150 m 、 λ は $0.03 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 、そして α は、 $8 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ （自然対流）であるから、

$$R_2 = 0.15 / (9 \times 50 \times 0.03) + 1 / (600 \times 8) = 0.0113 \text{ kcal/hr となり、}$$

$$q_2 = (20 - 5) / 0.0113 = 1330 \text{ kcal/hr}$$

したがって、 $q_1 + q_2 = 1215 + 1330 = 2,545 \text{ kcal/hr}$ となる。

よって、 $S_2 = (q_1 + q_2) \times 24 \times 30 \times 8 = 1.47 \times 10^7 \text{ kcal}$ が得られる。

③凍土をつくるための冷熱量 S_3

土壌の容積 V は、

$$V = \text{幅} 13 \text{ m} \times \text{高さ} 7 \text{ m} \times (50 + 2 + 2 \text{ m}) - 9 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 50 \text{ m} = 3114 \text{ m}^3$$

土壌を 8°C から 0°C に温度低下し、さらに 0°C の凍土をつくるためには、 1 m^3 当り次の熱量が必要である。ただし、土壌の含水率20%、比熱は 0.44 kcal/kg 、単位体積重量は、 2000 kg/m^3 とする。

$$(8 \times 0.44 + 0.2 \times 80) \times 2000 = 39040 \text{ kcal/m}^3 \quad (14)$$

したがって、 S_3 は、 $S_3 = 39040 \times 3114 = 1.22 \times 10^8 \text{ kcal}$

以上より、必要冷熱量 S は、 $S = S_1 + S_2 + S_3$ から

$$S_3 = 5.81 \times 10^7 + 1.47 \times 10^7 + 12.2 \times 10^7 = 19.47 \times 10^7 \text{ kcal} \quad (15)$$

2 ヒートパイプの現地試験

1) 鉛直型（スムーズタイプ）ヒートパイプの実験

熱輸送量が多くしかも経済的なヒートパイプとを選定するために4種のヒートパイプの実験を行った。容器は、銅製で全長5m、外径2.5cmである。作動液は、フロンR-22で、充填率は15%である。次の4種の仕様を以下に示す。

- (1) S P 単管のみでウィックを持たない。（フィン面積、 1.29m^2 ）
- (2) L W ループ型で蒸気の通路と貫流通路を分離したもので、ウィックを取り付けた。（フィン面積、 1.33m^2 ）
- (3) L P ループ型でウィックをもたないもの。（フィン面積、 1.33m^2 ）
- (4) W P ダブルループ型でL Pを二重にしたもの。（フィン面積、 2.65m^2 ）

パイプは地下3.5mまで鉛直に埋設し、1.5mを地上に露出させた。この露出部に、寸法 $125\text{m} \times 250\text{m} \times$ 厚さ 0.6mm の角型の銅製フィンを取り付けた。S P型には40枚、W P型とL P型にはそれぞれ40枚、そしてW P型には80枚が取り付けられた。実験は1985年2月7日から1988年4月まで、約4年間にわたって行った。温度計測は、CC熱電対を用い、トレンドロガー（アドバンテスト社製）で自動計測を行った。ヒートパイプ設置位置を図3に、温度測定点を図4に示した。また、写真1に設置状況の光景を示した。

①鉛直ヒートパイプと地温の変動

図5から図8に、1987年から翌4月までのS P、W P、L WおよびL Pの各ヒートパイプの日平均温度（地上1m、地下1m、2m、3mの地点）と、各パイプから側方50cmに離れた位置の日平均地温の変化を示す。ヒートパイプは10月から作動を開始し、12月上旬に地下のパイプの温度は 0°C 以下となった。W Pの凝縮部フィン面積が大きいため、パイプ表面温度と地温が他パイプよりも最も低いことが分かった。同じフィン面積を持つL PとL Wを比較すると、L Wの方が温度高いことが分かった。ウィックがない方が、凝縮部で冷却され液化された作動液がスムーズに流下し、効率よく温度を低下させることも判明した。S Pはループ型と大差はないことから、シンプルな構造は、作動液の流下がスムーズに行われたと思われる。この実験年では、W Pのみが1月下旬から3月中旬まで、地下1mの地温がマイナスを記録した。前年（1986-87年）では、1月下旬から4月上旬まで約3ヶ月間、凍土が造成された。これは、前年度との冬の寒さの違いによるもので、積算寒度が $1019^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ から今年 $958^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ と小さくなったためである。

②気温とパイプ温度との相関

次に、気温とヒートパイプの先端温度との関係を見るため、図9に前年度1986-87年のS P、W Pの例を、図10に今年度1987-88年のS P、W Pの例を示す。いずれも直線的関係が得られ、気温の低下に伴ってパイプ先端部の温度も低下する。W P

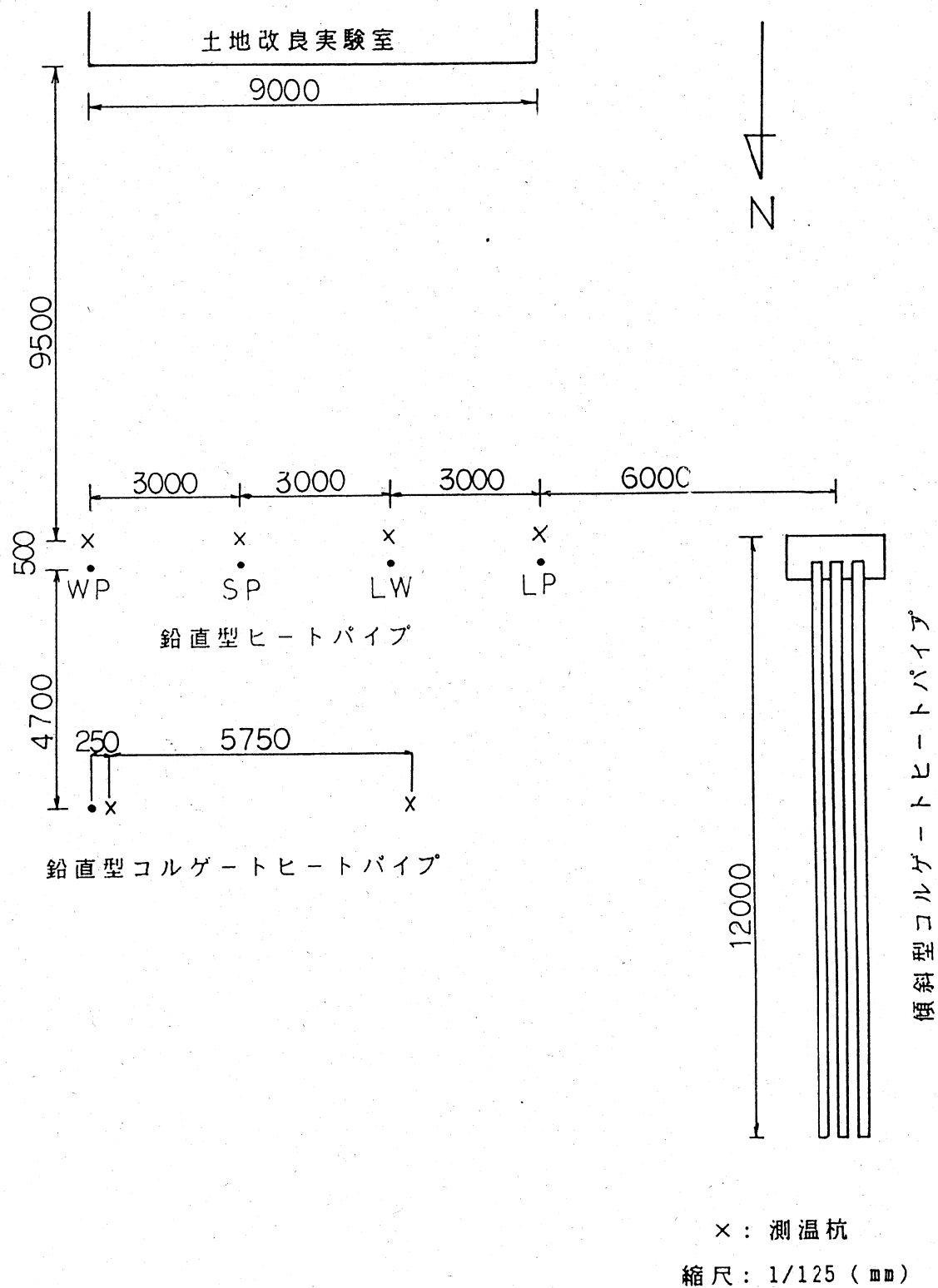


図3 ヒートパイプの設置位置

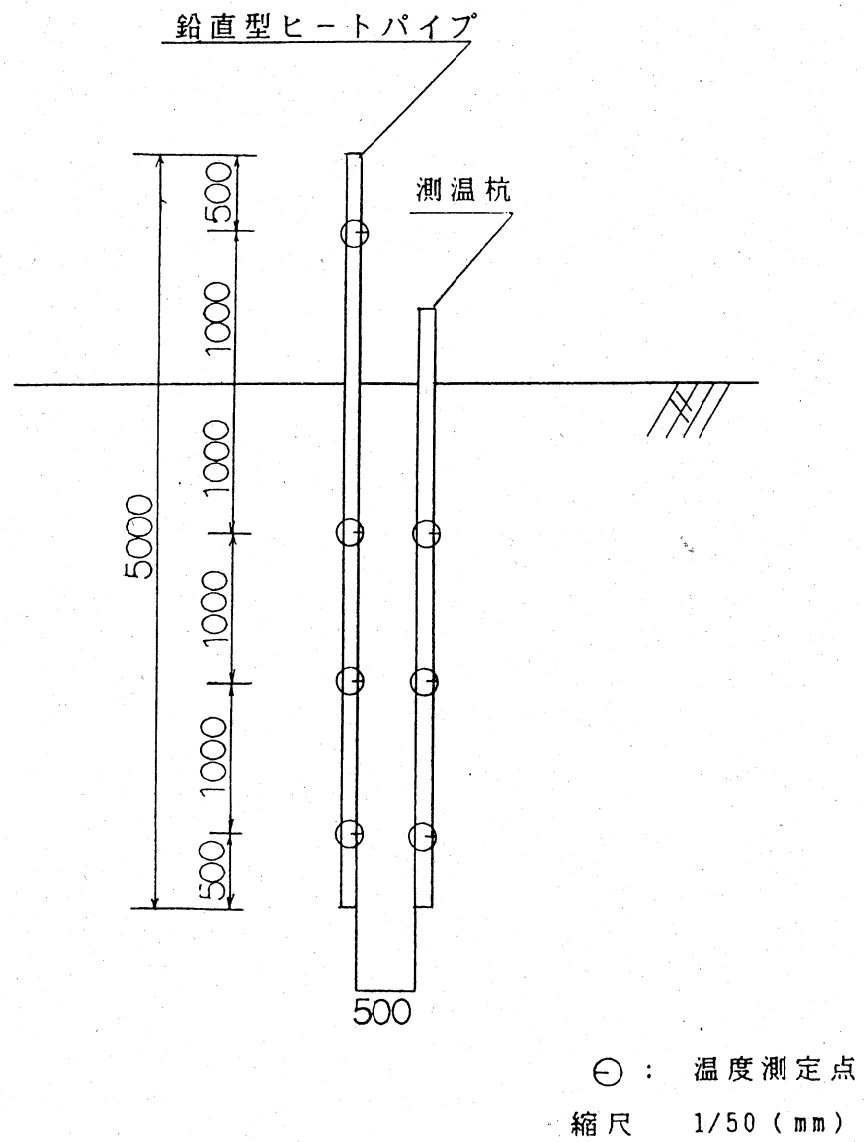


図4 鉛直型ヒートパイプの温度測定点



写真1 鉛直型ヒートパイプの設置状況

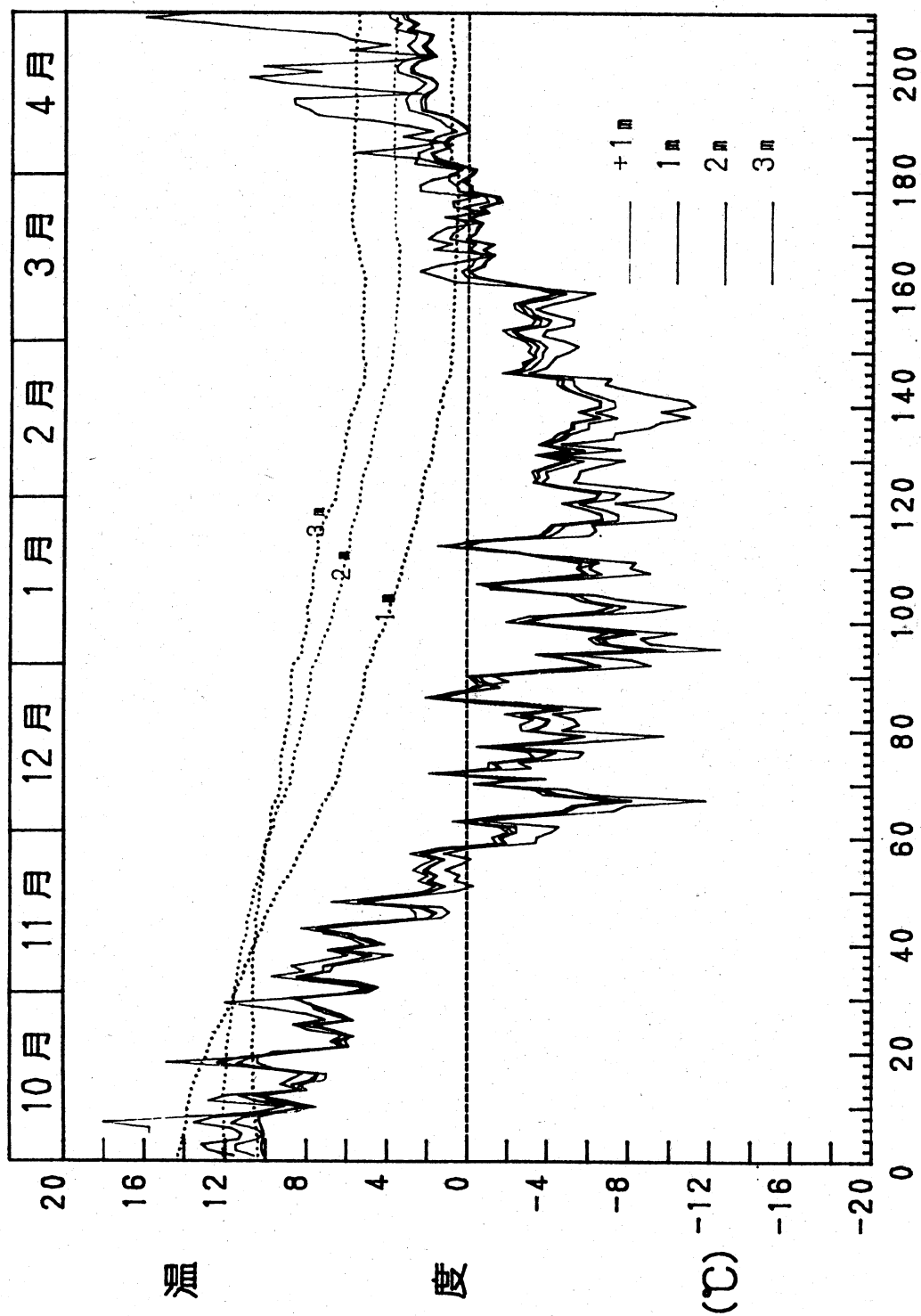


図5 SPのパイプの温度と地温の変化

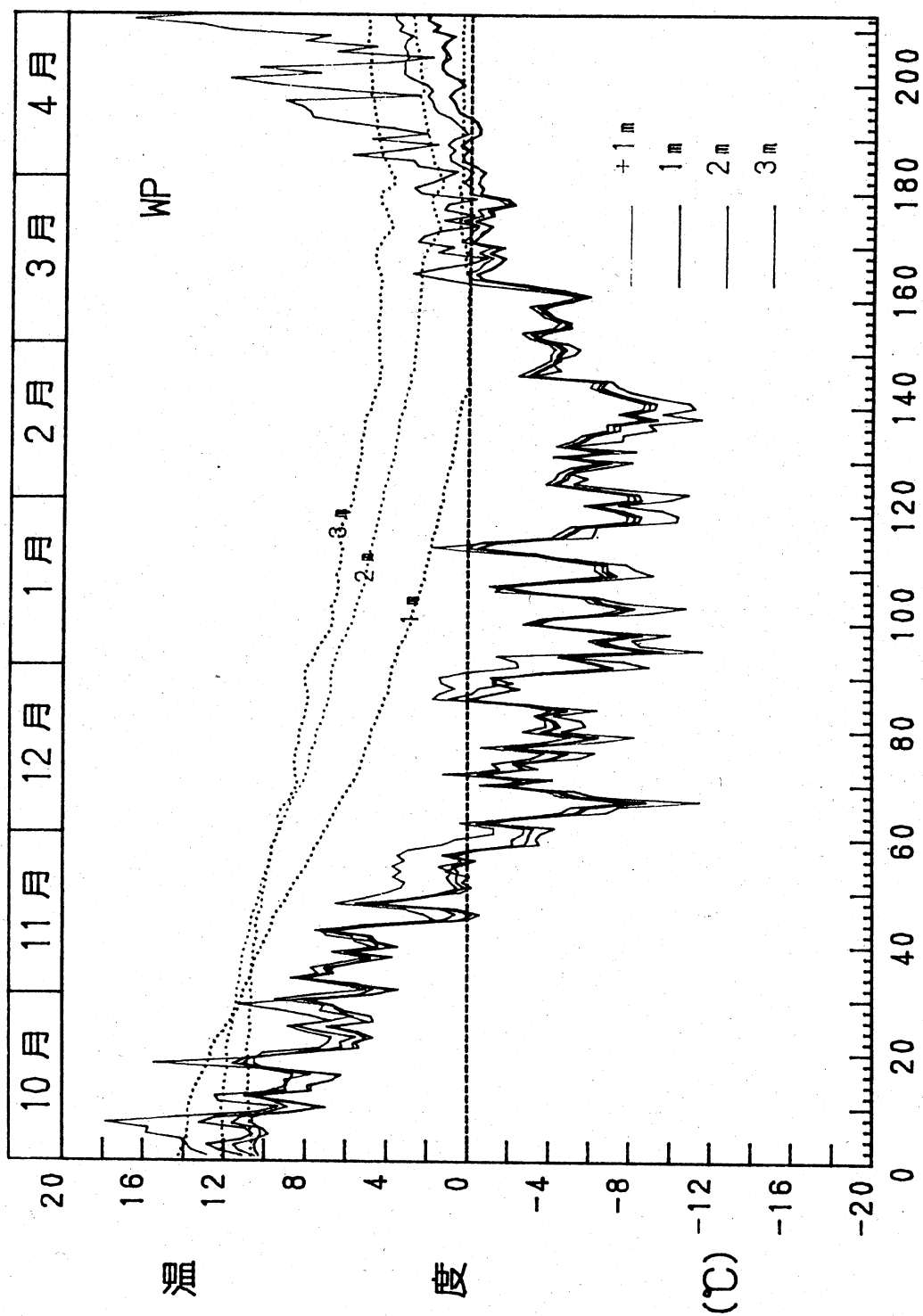


図6 WPのパイプの温度と地温の変化

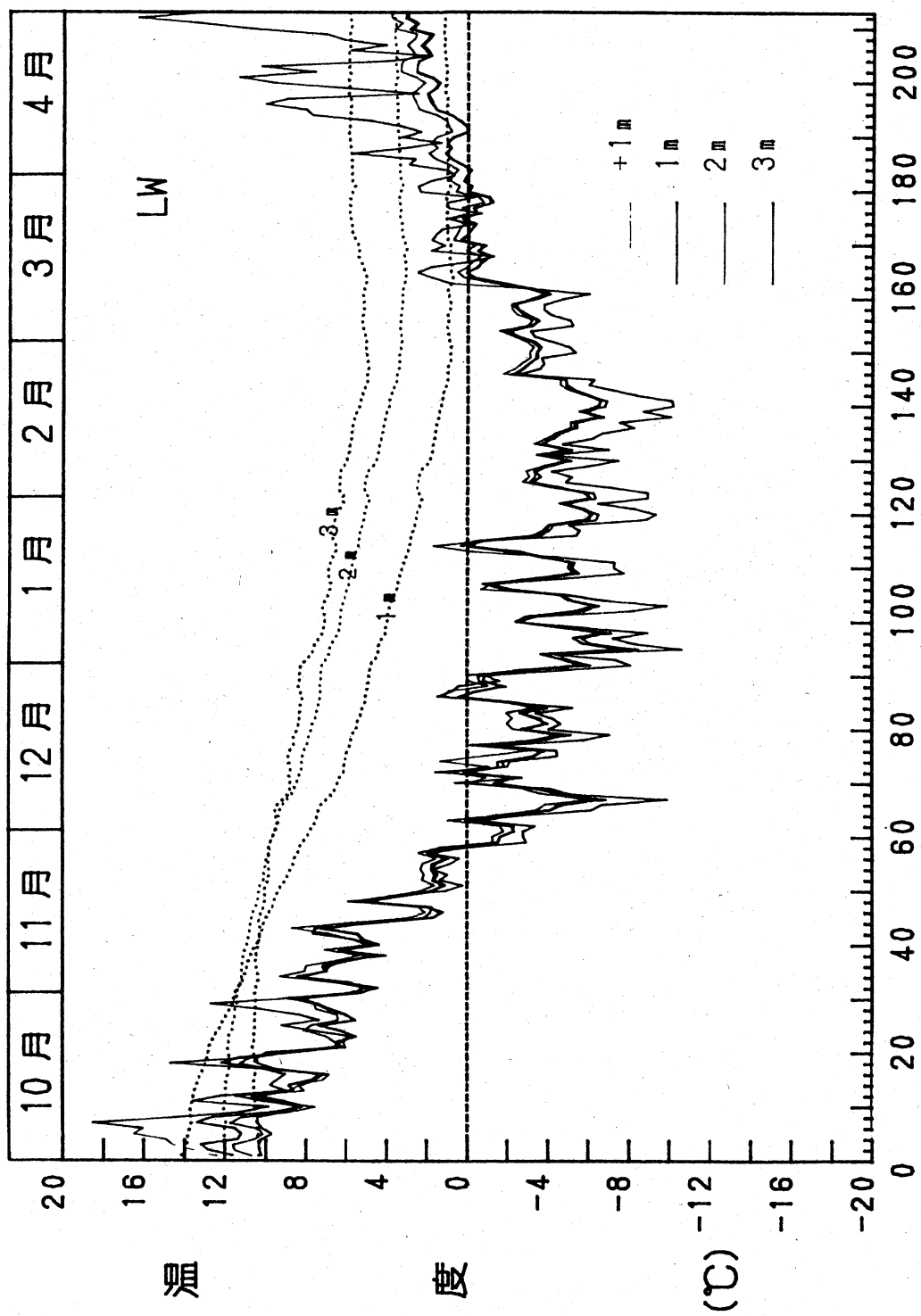


図7 LWのパイプの温度と地温の変化

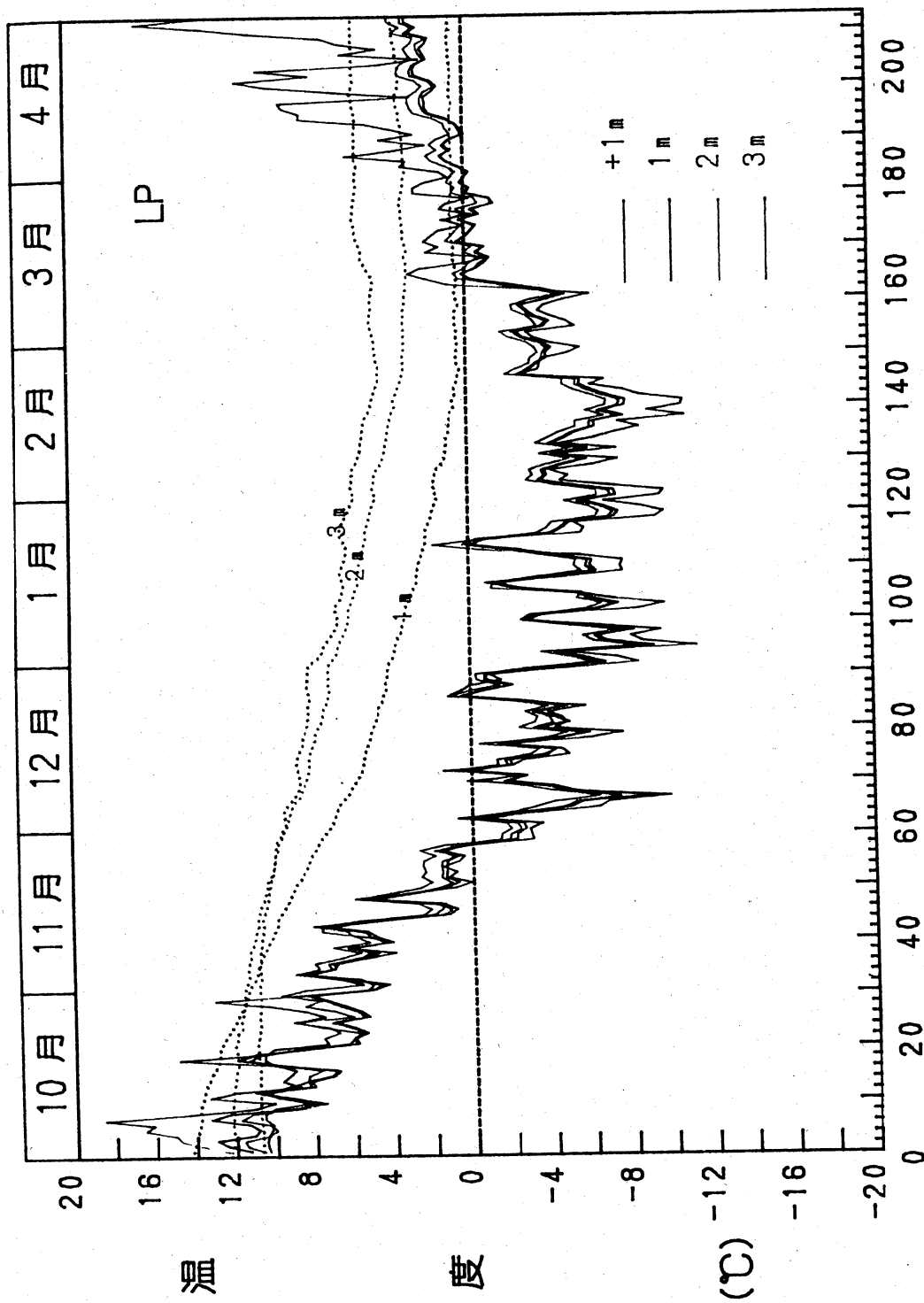
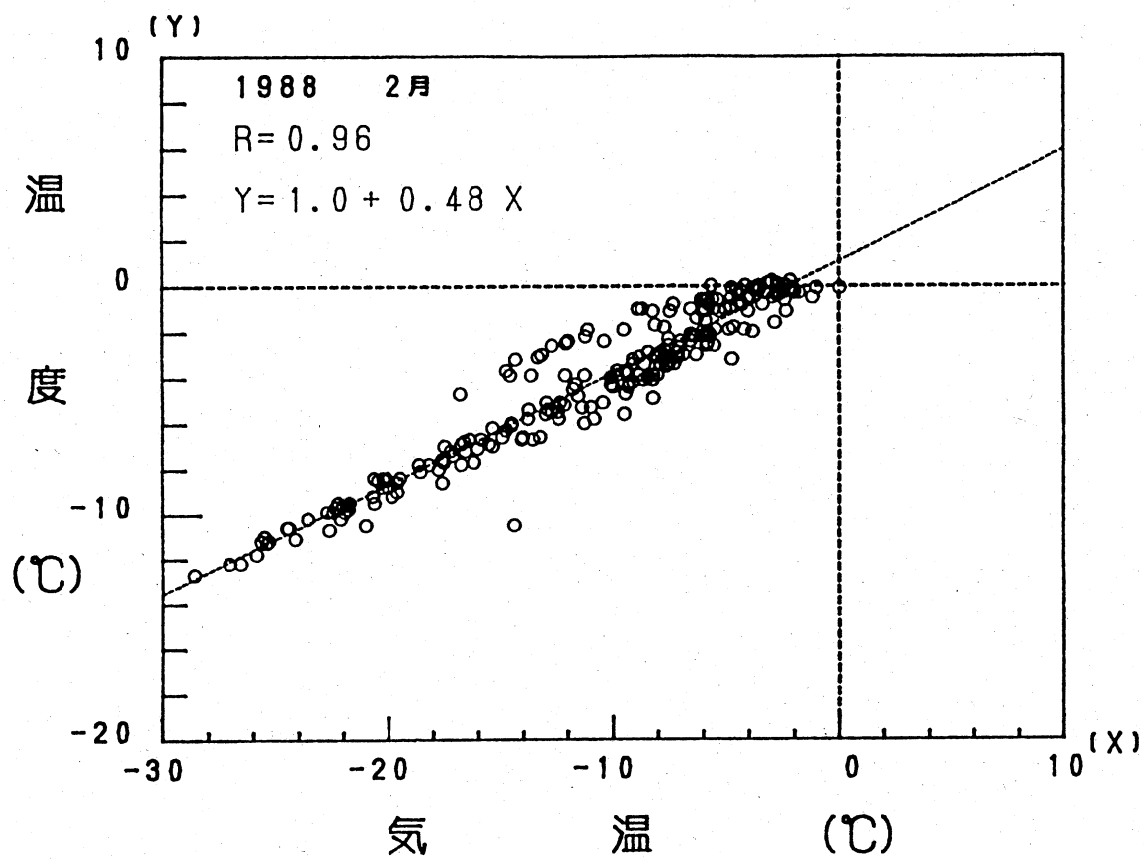
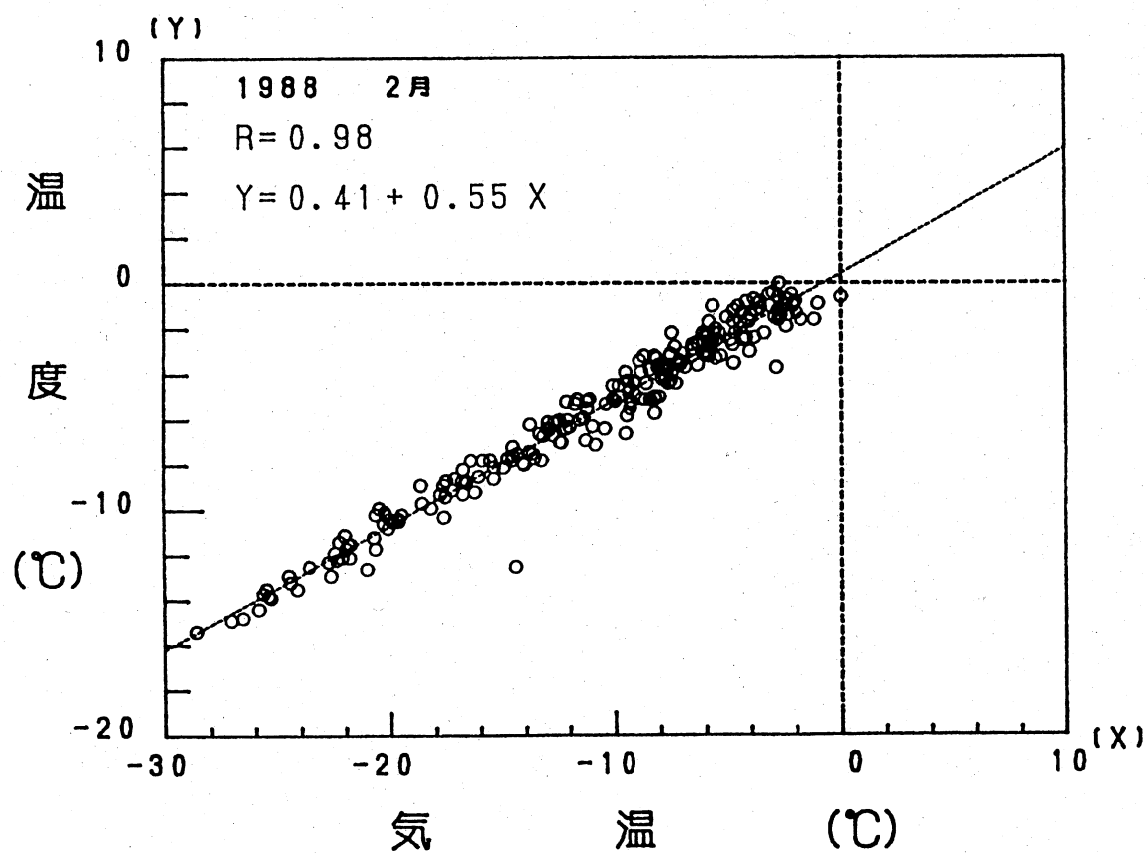


図8 LPのパイプの温度と地温の変化

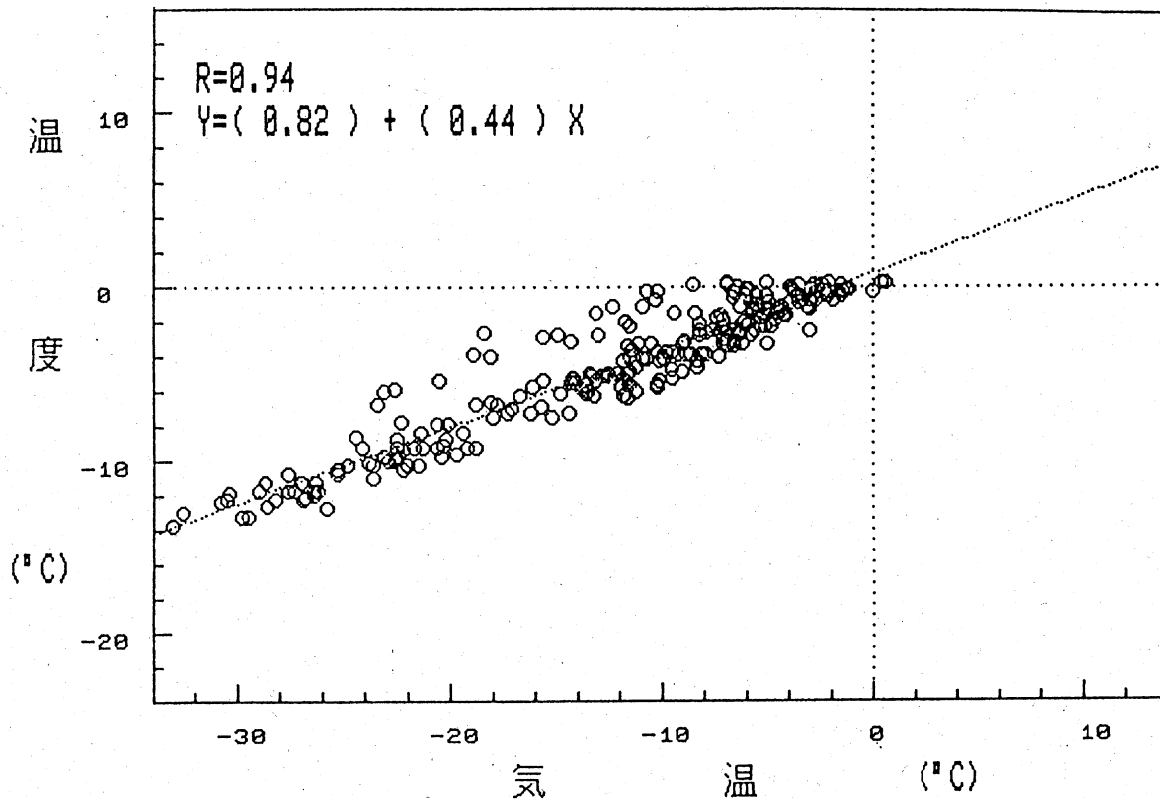


気温とSPのパイプ先端温度の関係（2月）

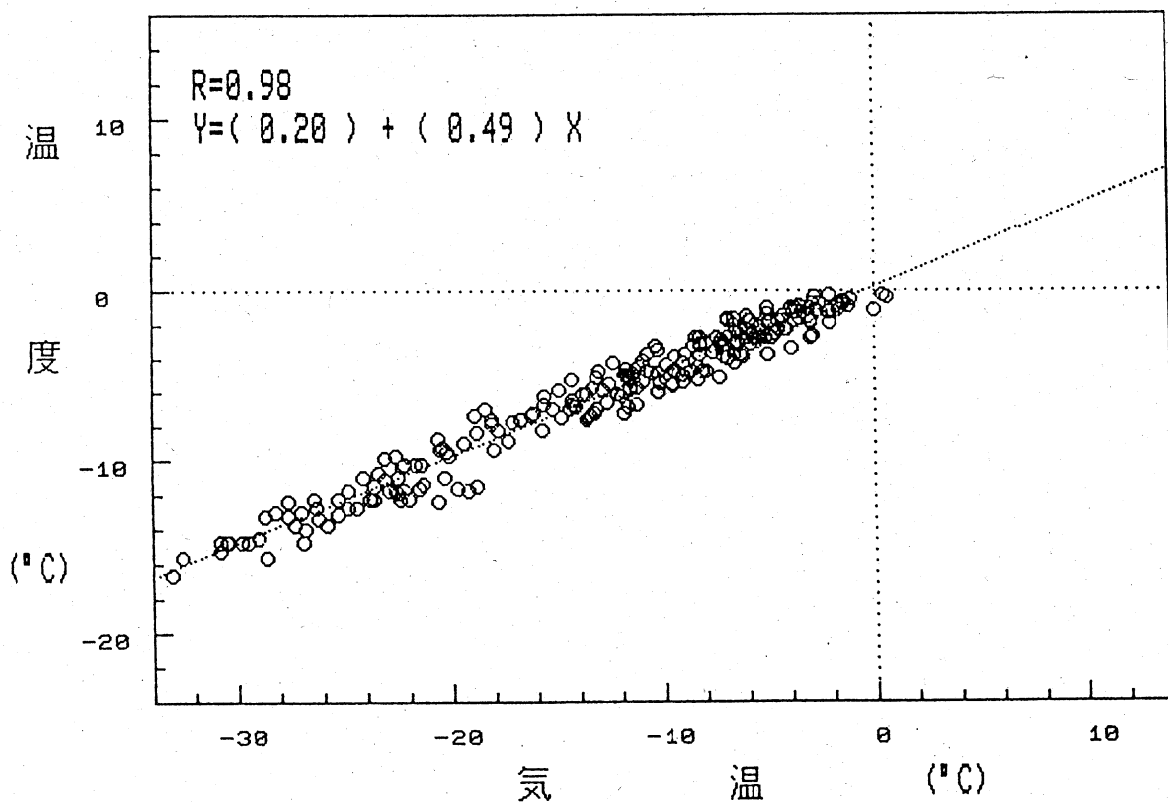


気温とWPのパイプ先端温度の関係（2月）

図9 気温とSP、WPのパイプ先端温度との関係（1988年）



SPのパイプ先端温度と気温の関係（1月）



WPのパイプ先端温度と気温の関係（1月）

図10 気温とSP、WPのパイプ先端温度との関係（1987年）

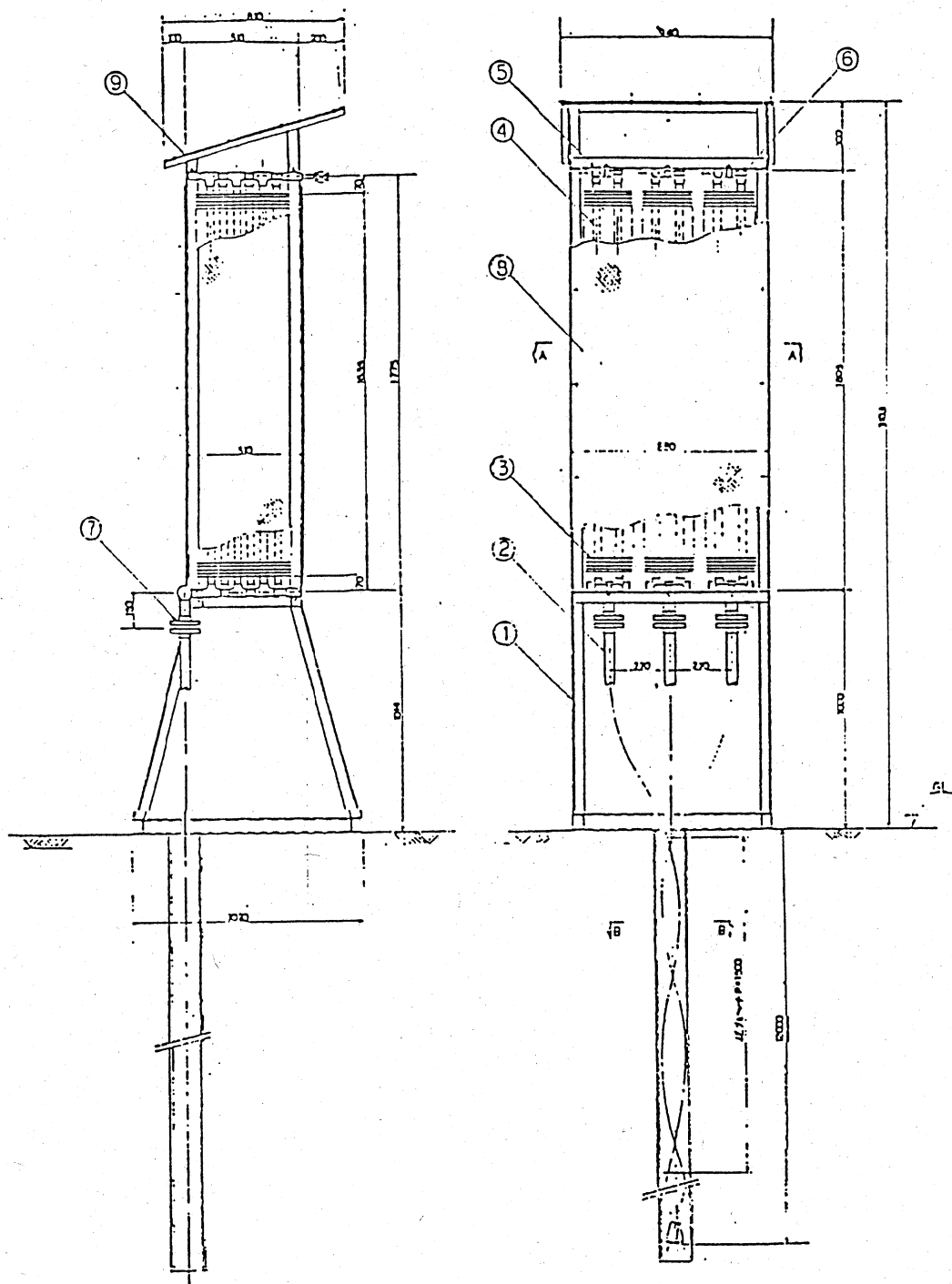


図11 コルゲート型ヒートパイプの冷却器の温度測定点



写真2 傾斜型ヒートパイプのアルミフィン冷却器

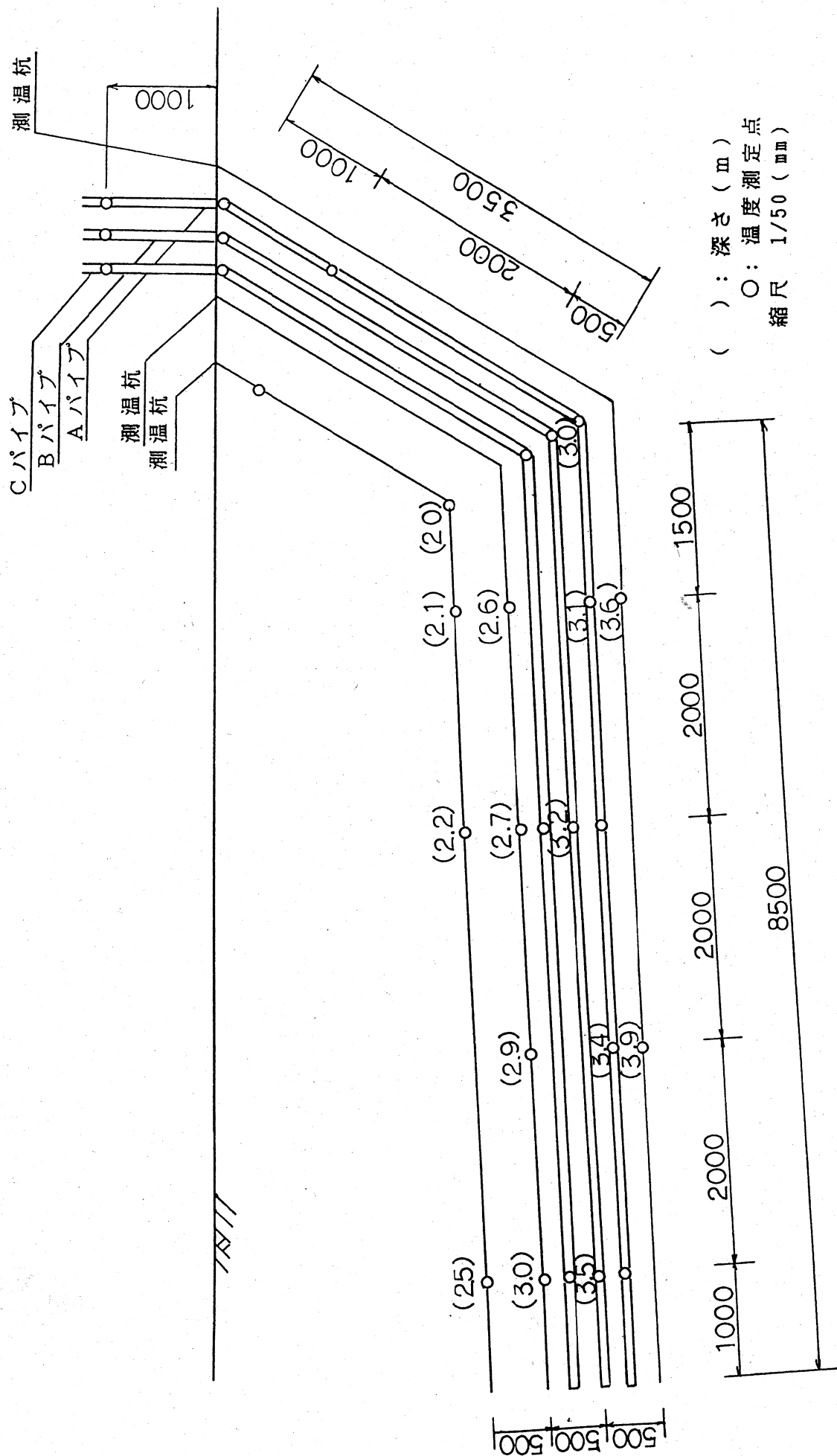


図12 傾斜型コルゲートヒートパイプの温度測定点

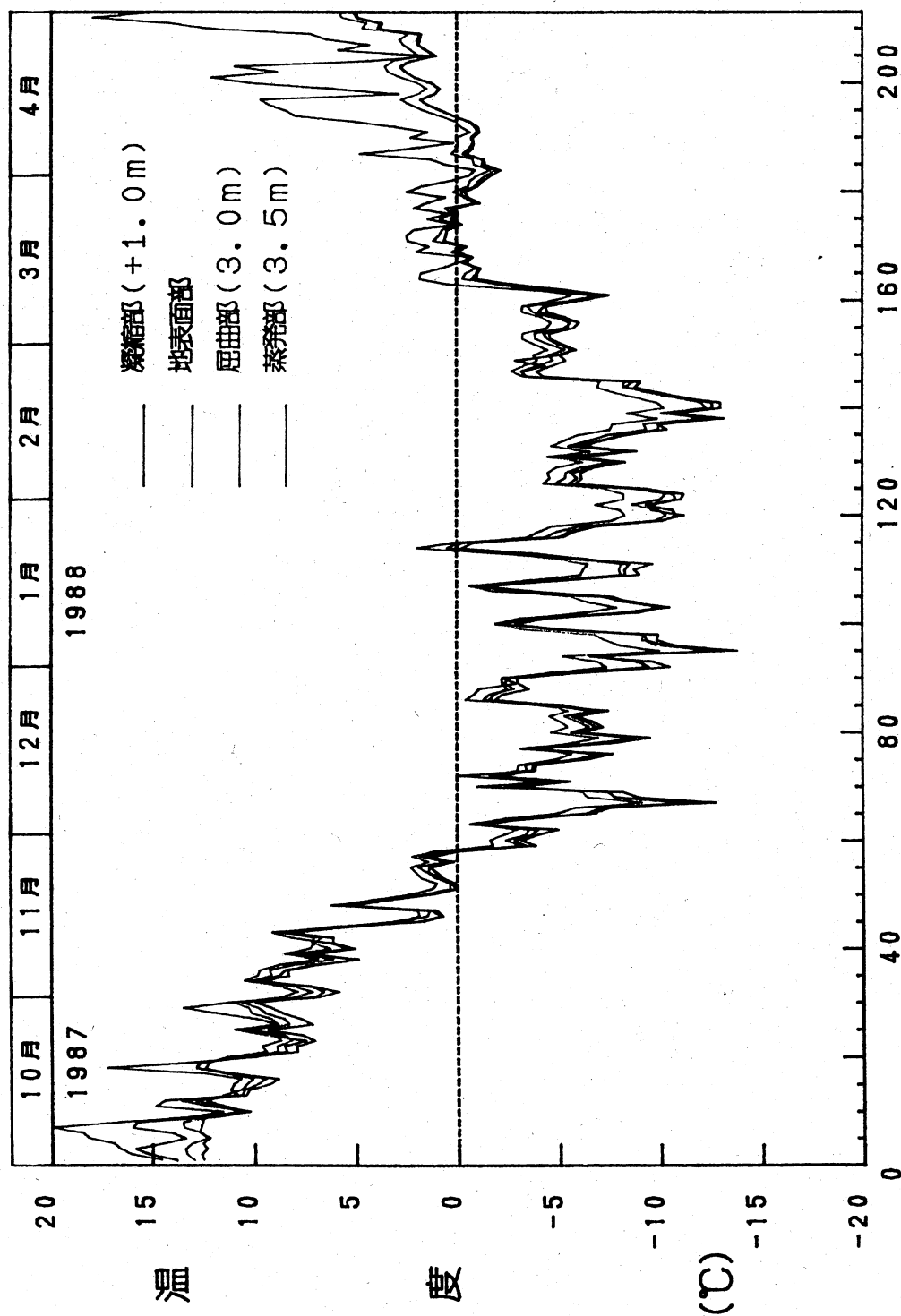
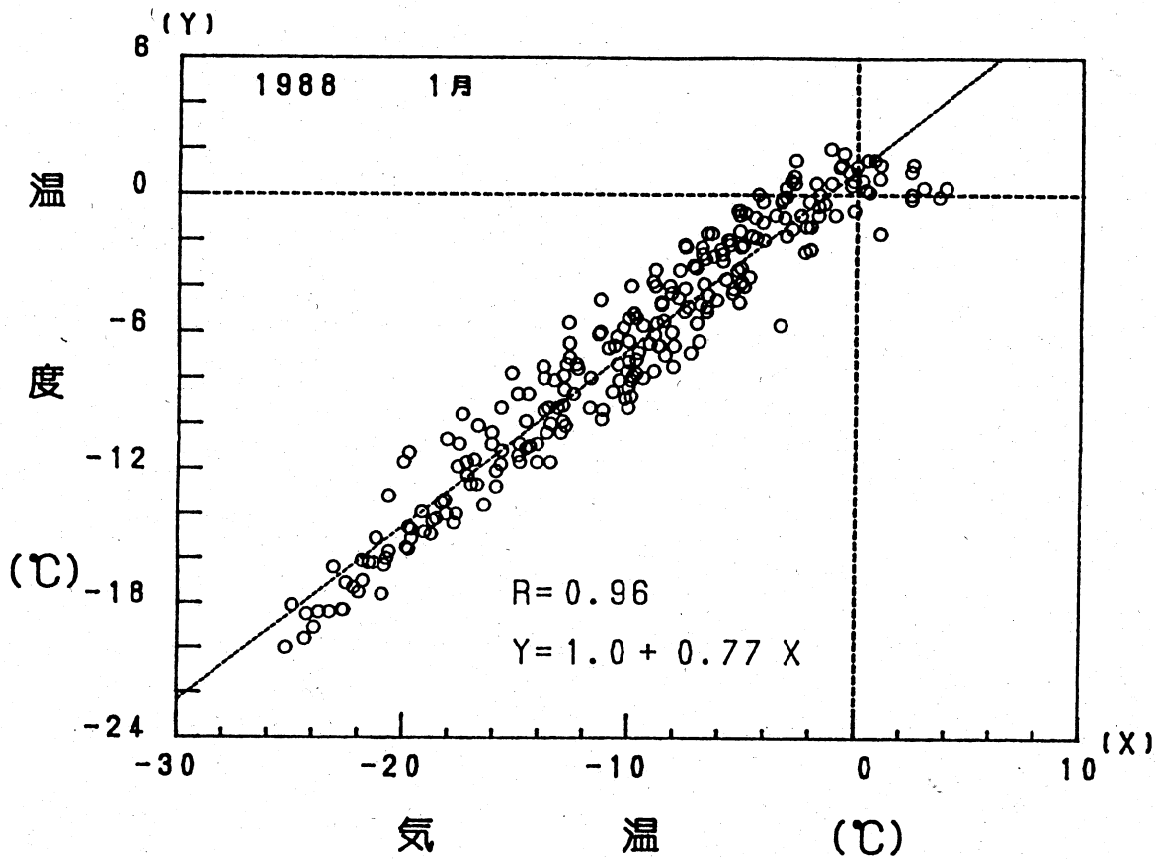
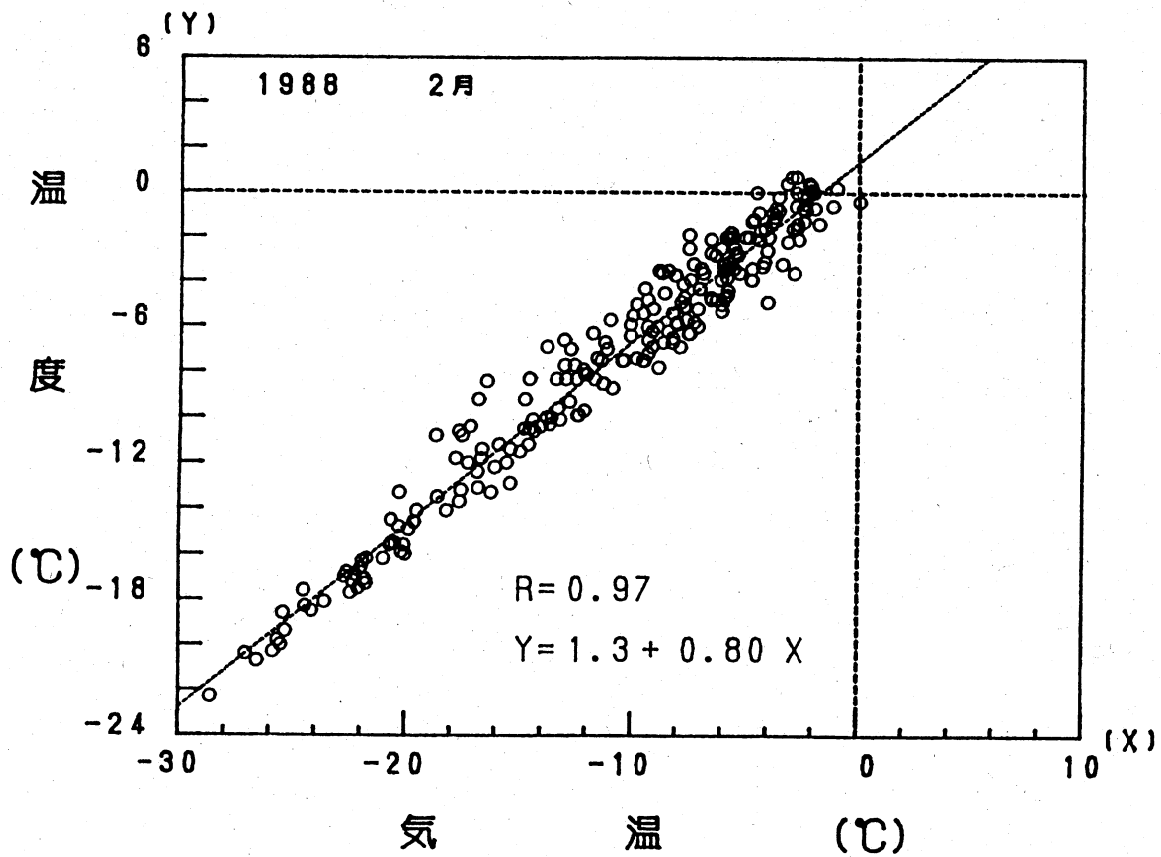


図13 Aパイプ表面の日平均温度の変化

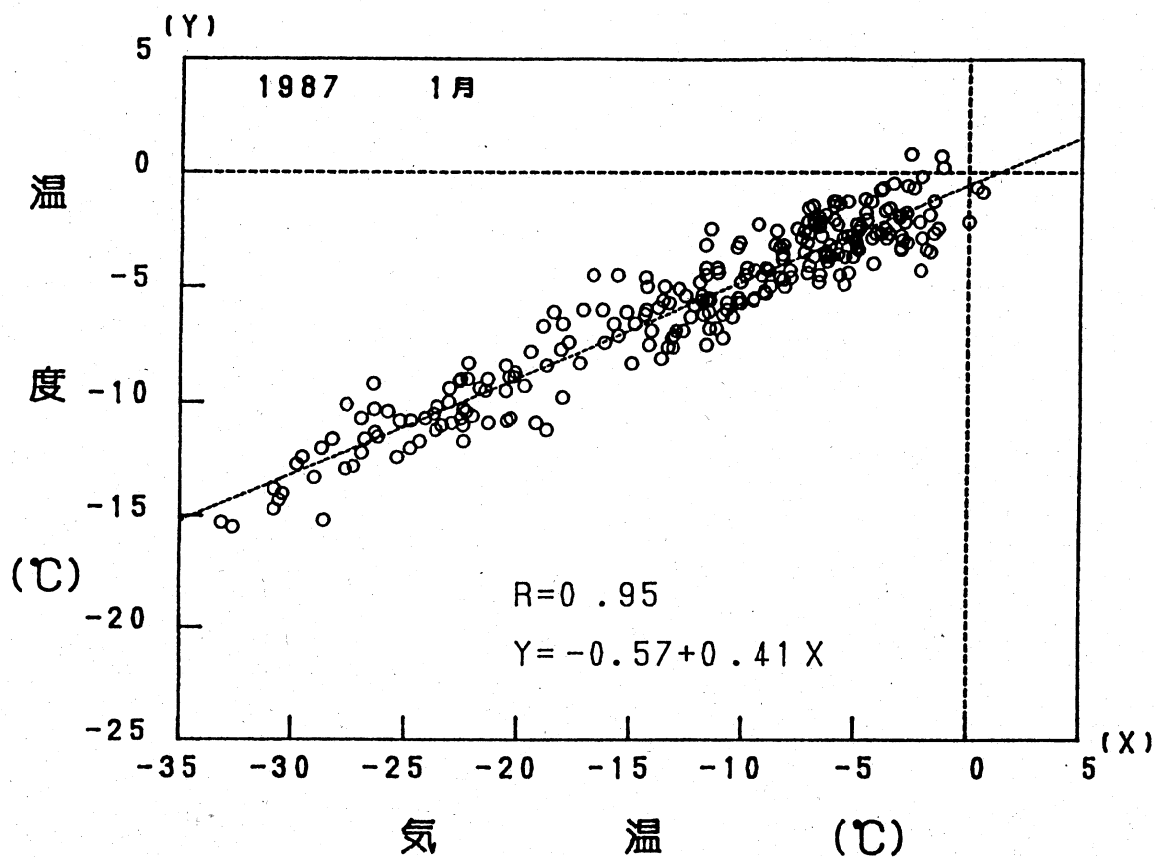


気温とAパイプの先端温度の関係(1988年1月)

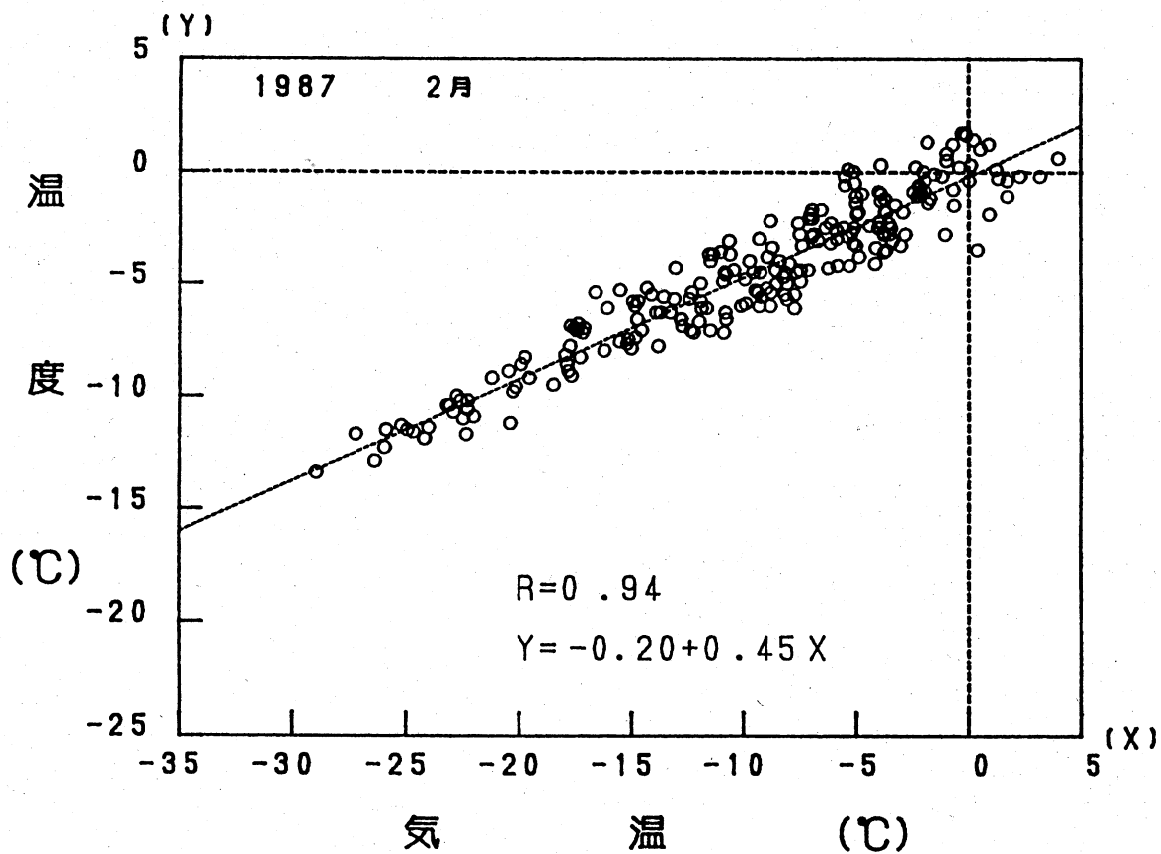


気温とAパイプの先端温度の関係(1988年2月)

図14 1月、2月の気温とAヒートパイプ先端温度との関係(1988年)



気温とAパイプの先端温度の関係(1987年1月)



気温とAパイプの先端温度の関係(1987年2月)

図15 1月、2月の気温とAヒートパイプ先端温度との関係(1987年)

は最も冷却効果が大きく、今年度の2月の直線勾配は、0.55の最高値を得た。

2) 傾斜型コルゲートヒートパイプの実験

パイプを波形状にして管径の表面面積を大きくし、熱輸送量を大きくしたのがコルゲートヒートパイプである。特徴はステンレス製であるので耐食性に優れ、薄肉(0.6mm)であるが、圧縮強度は2mmの鋼管と同等である。熱応力、振動、地盤沈下に強く、自由に曲げて敷設できるので運搬、施工が容易である。容器はステンレス製で全長12m、外径4.6cm、作動液はフロンR-22で充填率は80%である。凝縮部には大型アルミプレートフィン(図11)を取り付けている(写真2)。コルゲートヒートパイプ3本は地中部の全長を12mとし、パイプ長3.5mを地表面に対して60度の急傾斜で、それから先端まで8.5mを地中深さ3.53mまで5%の緩い傾斜で埋設した。図12に傾斜ヒートパイプの埋設形状と温度測定地点を示した。温度はCC熱電対線を使用し、UCAM-5BT(共和電業社製)で3時間毎に自動計測を行った。

①傾斜ヒートパイプの温度と地温の変化

1987年10月から翌年4月まで冬期間のコルゲートヒートパイプのひとつ(Aパイプ)の凝縮部(地上1m)、地表表面、屈曲部(地下3m)、蒸発部(地下3.5m)の4地点の日平均表面温度の温度変化を図13に示す。11月下旬には各パイプ温度はともに0度以下になり、凍土造成が始まった。3月中旬まで0℃以下となり、地中の熱の抽出が十分に行われた。パイプ上下50cmの地温の変化をみると、いずれも2月中旬から3月中旬にかけて0℃以下になったため、凍土造成がなされたと考えるが、その厚さは1m未満と思われる。パイプ下50cmの地温をみると、凍土造成期間は上部より短いため、下方からの地熱の影響が大きいと思われる。したがって、凍土造成を効率良くするためには、断熱材の使用は不可欠と判断される。

②気温と傾斜ヒートパイプ温度との関係

次に、気温とパイプ先端の1m手前のパイプ表面温度と関係を図14に示す。気温の低下に伴いパイプの温度も低下するが、月によって多少傾向が異なるが1月、2月ともに直線的関係が得られる。前年の1986-87年と同様な関係を図15に示す。相関係数および勾配は今年度の方が大きく、パイプ内の作動液の充填率を15%から80%に変更したことが大きな原因である。充填率を80%に増大したことに、蒸発部の実質面積が大きくなり、より多くの熱輸送が可能となるとともに、地中部の5%傾斜部の上下の冷却ムラが減少できることが証明されている。

次に、9時気温の変化とAパイプの圧力との関係を図16に示す。ヒートパイプ内の圧力は、作動温度の飽和圧力を示すもので、パイプが作動すると圧力は低下する。冬期は温度の低下に伴って圧力も低下するが、地上がプラス気温になる夏期は5 kgf/cm²以上となり、ヒートパイプの作動停止がわかる。

3) 鉛直型コルゲートヒートパイプの実験

1987年12月に、構内に構築された低温貯蔵庫のモデルプラントに使用されたヒー

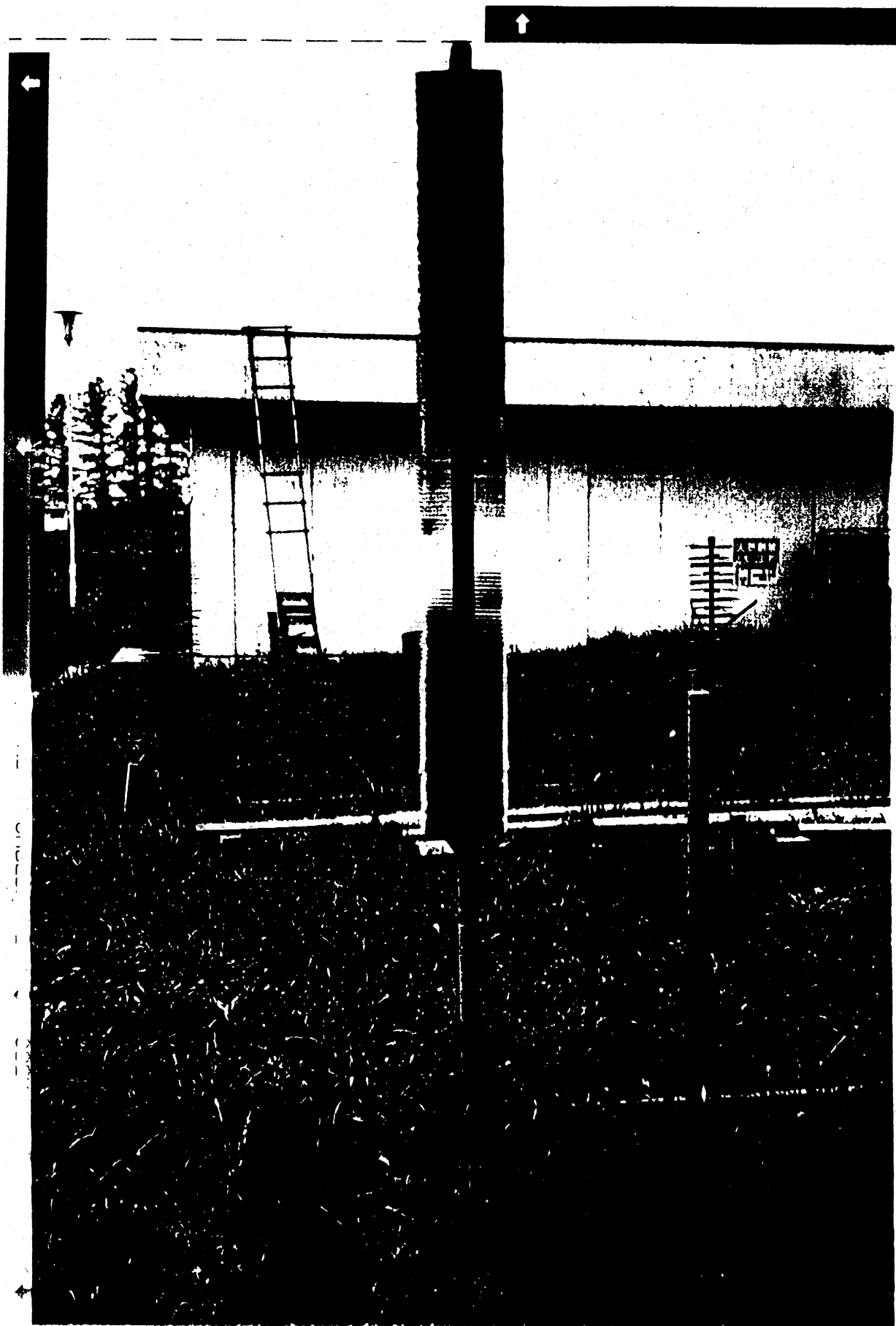


写真3 鉛直型コルゲートヒートパイプの地上部

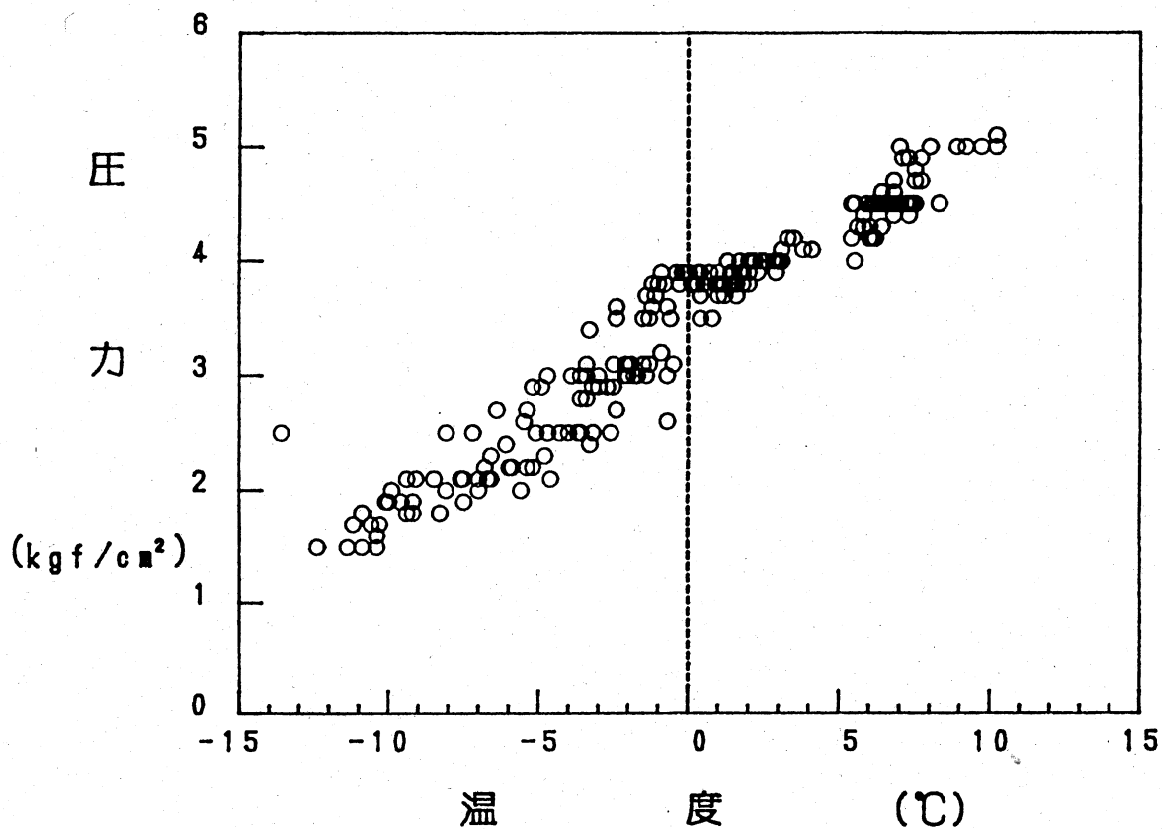


図16 ヒートパイプ表面温度と圧力の関係（11月～5月）

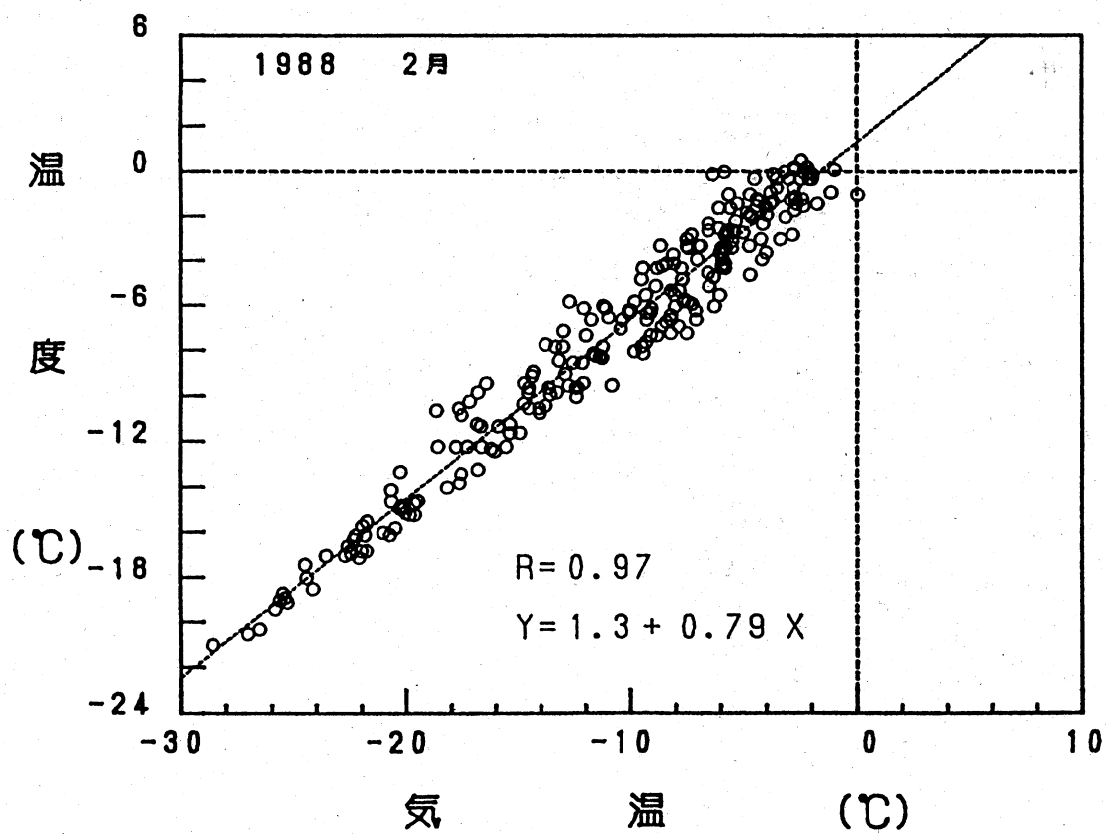


図17 気温とパイプ先端温度の関係（2月）

トパイプの1本を実験圃場に埋設し温度測定を行った。容器はステンレス製コルゲートで、全長は7.7m、外径4.6mmで、作動液はフロンR-22で、充填率15%のパイプである。地上約2.6mほどパイプを露出し、鉛直に埋設した。凝縮部は大きさ20cm×20cmの角型アルミ製フィンが1cmピッチで170枚取り付け付けたものである（写真3）。

図17に、気温とパイプ先端の表面温度との関係を見るため、2月の例を示す。これまで述べてきたように、気温の低下に伴いパイプの先端温度は直線的に低下し、その勾配は0.75と傾斜型ヒートパイプの0.80には及ばないが、充填率15%でありながら大きな冷却能力を持つことが分かった。

これらデータをもとにヒートパイプの熱抵抗Rを計算すると、 $R=0.00017\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{day/kcal}$ が得られた。

参考文献

- 1) 土谷富士夫・辻 修：ヒートパイプによる凍結土層の造成、第35回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集（1986）
- 2) 了戒公利・土谷富士夫ほか：自然冷熱を利用したヒートパイプによる地盤凍結、第24回土質工学研究発表会（1988）
- 3) 土谷富士夫・了戒公利ほか：自然冷熱を利用したヒートパイプによる地盤凍結（その2）、第25回土質工学研究発表会（1989）
- 4) 了戒公利・土谷富士夫ほか：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫、第2回寒地技術シンポジウム（1986）
- 5) 土谷富士夫・辻 修：冬期の寒冷気候を利用した凍土の造成と保存、第2回寒地技術シンポジウム（1986）

第7章 人工永久凍土による低温貯蔵庫の建設とその経年変化

1. はじめに

人工永久凍土低温貯蔵庫(Artificial Permafrost Storage)を使用し、その中に農産物を貯蔵すれば、自然の冷氣だけを利用して5月から8月までの低温貯蔵が可能となり、価格の上昇する端境期に供給することができれば、今まで以上の利益を上げることができる。また、コメの備蓄に利用すれば、半永久的な貯蔵が可能となり、収穫期に十分な量を確保し長期的な需要計画に従って、安定備蓄ができるようになるはずである。それではなぜ現在このような低温備蓄を行なわれていないかというと、低温の貯蔵庫の建設とその運転にコストにがかりすぎて、採算がとれないからである。ところで、このヒートパイプを利用した人工永久凍土低温貯蔵庫では、自然の寒さだけを使っているので、凍土造成や維持にも電気エネルギーなどをほとんど必要としないのが特徴である。

2. 実験施設と実験地

1987年12月に帯広畜産大学の農業工学実験圃場に、人工永久凍土低温貯蔵庫のモデルプラントを建設した。低温貯蔵庫の大きさは、幅3.6m×奥行き6.0m×高さ3.6m(容積70m³、床面積20m²)の鉄骨構造で、半地下式の貯蔵庫とした。庫内側面の鉄骨材の間にジオテキスタイル(テンサーSR1)を敷設し、山留め機能を持たせた。そして、地盤の肌落ちを防ぐため織物(クラフテル土木シート:太陽工業(株)製)を地山側に挿入した。屋根は水および熱の流れを防ぐため、上から防水シート(サンブレシートGS955:三菱化成ビニール(株)製)、発泡断熱材(カネライトフォームFI:鐘淵化学工業(株)製)そして木目セメント板(成井農林(株)製)の順に構成されている。貯蔵庫の周りは、約400m³の土で囲み、そのすべてを100mmの断熱材と防水シートで遮閉した。地盤埋設したヒートパイプは前記の46mmのSUSコルゲートのステンレス製(藤倉電線制作)であり、L字型と直管型の2種を用いた。最長12mのL字型パイプは、貯蔵庫底部で1/10の勾配を持ち、傾斜部は3mにも達した。厚さ2m以上の凍土層を構築するため、総数216本のヒートパイプが50cmピッチで4列に配置された。

1984年から北海道大学低温科学研究所と帯広畜産大学の構内でヒートパイプの土壌凍結効果の現地試験と調査を行い、その結果として、フロンR-22が-10℃前後で圧力差 ΔP に対する温度差 ΔT が小さいため作動流体を充填しても、沸騰による圧力損失の伝熱抵抗は小さく影響は少ないと考えたため、作動流体はフロンR-22とした。その封入率 ϕ は試験結果より、直管型の場合は $\phi_1=15\%$ 、L字型の場合は $\phi_2=80\%$ とした。封入率15%と80%のときのヒートパイプの凝縮部と蒸発部の温度差 ΔT に対する熱抵抗 r と熱輸送量 Q の値を表1に示す。

冷却効果については、直径46mm、長さ12mのL字型パイプを使用すると、ヒートパイプの周方向及び長さ方向の温度は均一となり、-10℃の冷氣で冷却開始後、約

9日間で周囲0.5mの土壌を凍結させることがわかった。

表1 ヒートパイプの温度差 ΔT に対する熱抵抗 r と熱輸送量 Q

封入率 ϕ	温度差 ΔT	熱抵抗 r	熱輸送量 Q
15%	7℃	0.03℃/W	290W
80%	5℃	0.01℃/W	500W

一般的なヒートパイプはパイプの周方向の温度差をなくすためにウイックを用いるが、ウイックレスの方がウイック付より冷却効果が高く安価だったためウイックレスとした。正確には、重力によって凝縮した液体を加熱部へ戻すサーモサイフォンと呼ばれるタイプである。

以上の結果より、使用したヒートパイプは直径46mmのコルゲート型ステンレスパイプ(藤倉電線製)であり、凝縮部には20×20cmの正方形のアルミ製フィンが冷却効果を高めるために取り付けられている。地上には2.4mの冷却部が突出し、正方形のアルミ製のフィンが1cmピッチで170枚が取り付けられている。また、表1には、敷設したヒートパイプの寸法を示す。ヒートパイプはウイックを取り付けずに、作動液はいずれもモノクロロジフルオロメタン(R-22)を用いた。

表2 ヒートパイプの寸法(m)と本数

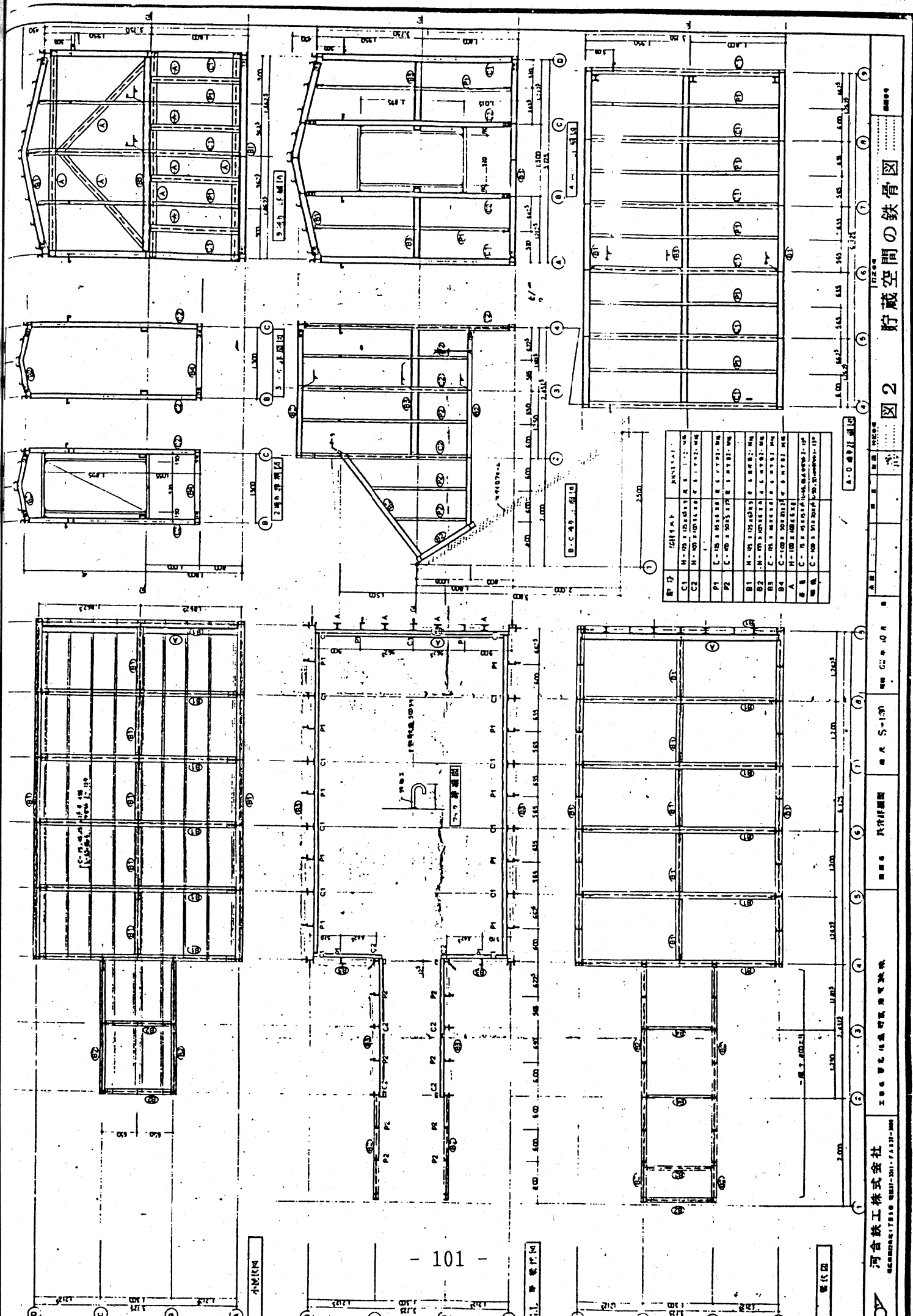
タイプ	フィン直部の長さ	全長	本数
直管型	4.50	7.77	72
L字型	7.80	11.07	48
L字型	8.30	11.57	48
L字型	8.80	12.07	48

実験に使用した土は、含水比約50%、乾燥密度1.90g/cm³、熱伝導率0.74W/m・℃の火山灰土である。図1にモデル貯蔵庫の詳細図を示す。図2に貯蔵空間の鉄骨図を、そして図3にはヒートパイプ敷設配置図を示す。

3. 施工法

表2に施工行程表を示す。施工は1987年11月から以下の手順で実施した。

- (1) 15m×12.6mの幅で掘削する。
- (2) 遮水シートで挟まれた断熱材を敷設する。
- (3) ヒートパイプを釣り下げるためのH鋼を掘削領域を跨ぐ形で設置する。
- (4) L字型にヒートパイプを曲げる
- (5) L字型のヒートパイプを貯蔵庫底部に40cmピッチに土を埋め戻しながら敷設する。なお、その頭はH鋼に固定した。

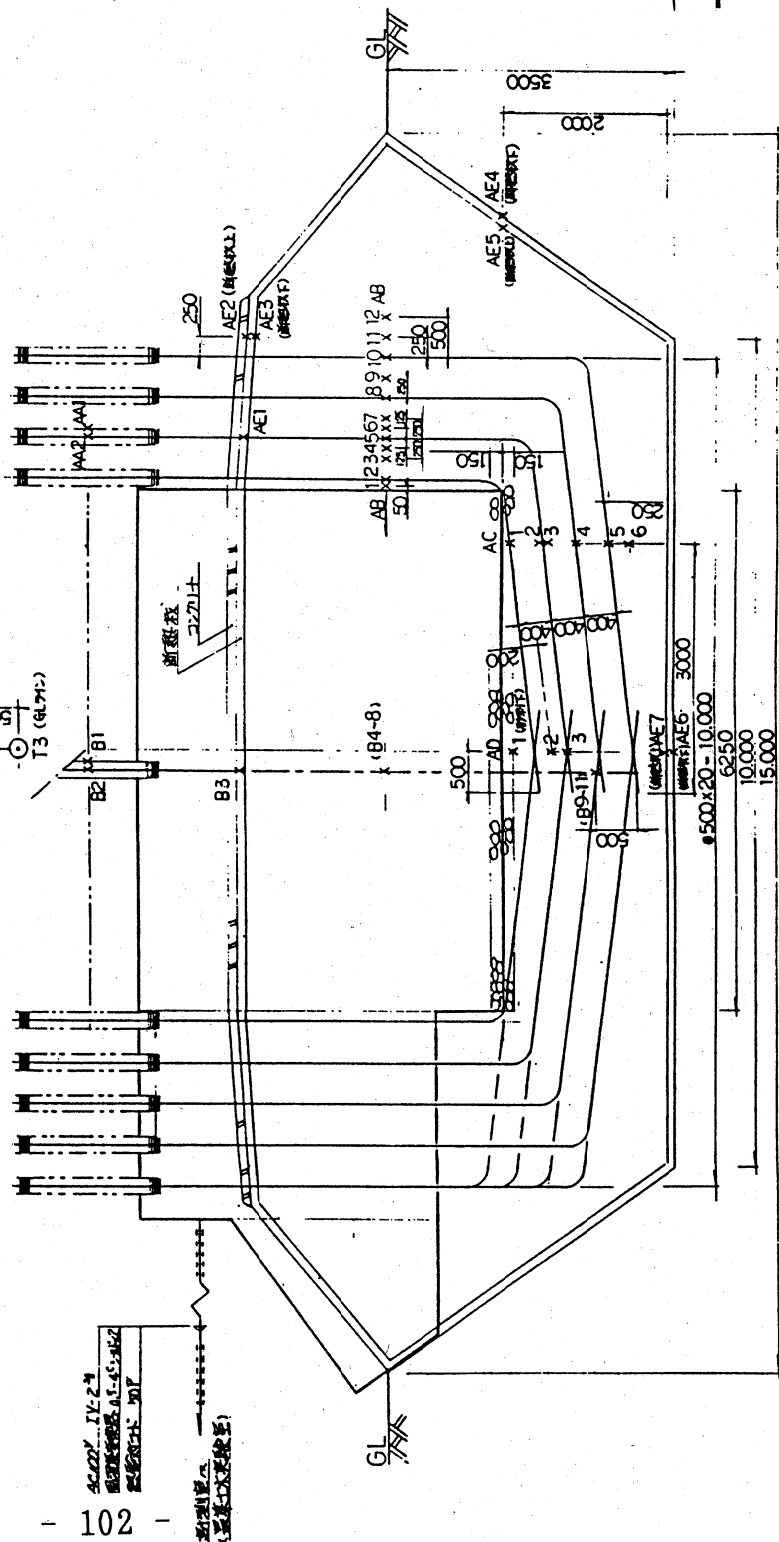


部材	規格	数量	単位	重量
C1	H-150×100×6	1	個	1.2
C2	H-150×100×6	1	個	1.2
P1	C-150×100×6	1	個	1.2
P2	C-150×100×6	1	個	1.2
B1	H-150×100×6	1	個	1.2
B2	H-150×100×6	1	個	1.2
B3	C-150×100×6	1	個	1.2
B4	C-150×100×6	1	個	1.2
A	H-150×100×6	1	個	1.2
壁	C-150×100×6	1	個	1.2
床	C-150×100×6	1	個	1.2
基礎	C-150×100×6	1	個	1.2

図 2 貯蔵空間の鉄骨図

使用機器

記号	名称	型式	メーカー	数量
+	ヒートパイプ(4)		産金電機	72本
+	ヒートパイプ(4)		産金電機	144本
⑤	温度検出器 (AC220V-24V)	THA23(C507) QURJ1000W	SHINYEI	1台
AA, AB, AC, AD, AE, BC	制御弁	CC		2500個
⊕ T1~3	サニタリゾナ	PI-100 Δ 2mA	CHINO	3本
FL40W	蛍光灯	JF42811 FLR40S-MK	松下	2台
CO F	サニタリゾナ	FE-430S4	松下	2台
SW	スイッチ			2台
⊙	温水コネクタ			1台
⊗ L	温度検出器(40W)	40W		1台



機器布設図

埼玉県立大学 低温貯蔵庫の建設

図3 ヒートパイプ敷設位置図

表3. 工程表

[illegible]

- (6) 所定の深さに地盤を盛った後、貯蔵庫の底部位置に碎石を敷く。
- (7) その上に、鉄骨造りの貯蔵庫の外枠を吊り込み、遮水シート、断熱材を屋根に取り付ける。
- (8) 貯蔵庫の側面にジオテキスタイル（テンスー）を巻き付ける。その周りにさらに、地盤の肌落ちを防ぐために、織布を巻き付ける。
- (9) 長手方向に直管のヒートパイプを敷設する。L字型の場合と同様にヒートパイプの頭をH鋼に固定する。
- (10) 地盤の含水比、熱伝導率を測定しながら、土を埋め戻す。
- (11) 所定の盛土形状にした後、遮水シートを外面に張った後、断熱材を盛土表面に敷設する。
- (12) 断熱材の上に覆土する。
- (13) 各ヒートパイプの頂部をワイヤーで固定する。
- (14) 貯蔵庫の中の照明と空気を攪拌するためのファンを取り付ける。
- (15) 貯蔵庫内に貯蔵野菜を搬入する。

4. 庫内温度、湿度、ヒートパイプ及び凍土地盤温度の測定

庫内温度、ヒートパイプ及び凍土地盤温度の測定は直径0.6mmのC-C熱電対線を使用し、温度計測用の50チャンネルのデータロガー（コーナシステム製）とパーソナルコンピュータ（NEC製PC-9801）を結合し、フロッピーディスクユニット内のフロッピーディスクに毎日3時間ごとに49地点、湿度の測定は温湿度変換器（神宮株式会社製）により、温度の測定と同様に1地点、合わせて50地点の測定値を記録した。図4、図5に計測ポイント、表4に熱電対測定位置の名称を示す。

5 貯蔵農産物の品質変化

1989年12月1日にタマネギ（在来種）、ゴボウ（音更農協、吉田青果）、ナガイモ（洗い、土付）、ニンジン、12月5日に士幌農協のバレイショ（男爵1.5t）、12月15日にマメ（小豆、白花豆）をコンテナに入れて貯蔵しその後1ヶ月ごとに重量を測定した。翌年2月2日に新しく吉田青果のバレイショ（男爵とメークイン、各1t）とダイコンを貯蔵した。

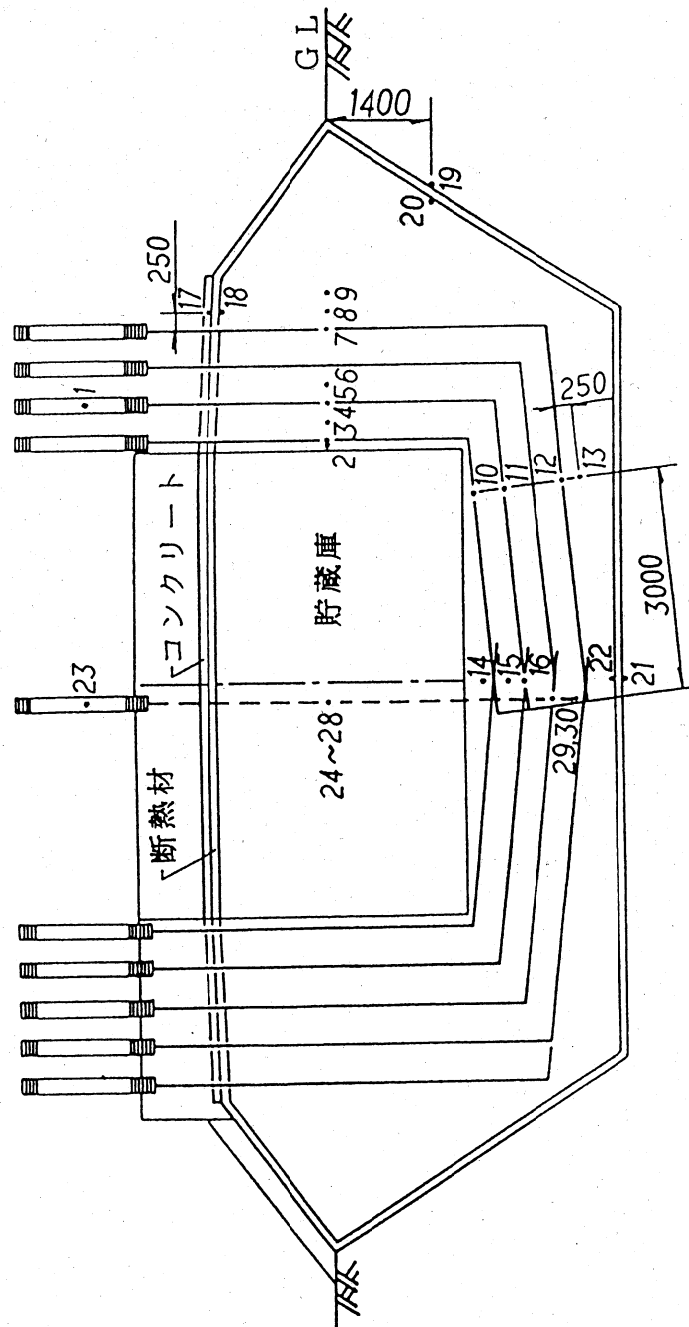
1) 減耗率の測定

品質変化のうちで最も大きいのは、呼吸などによる成分の消耗であり、商品価値の低下をもたらす。そこで、1ヶ月に1回任意に設定したコンテナの重量を測定し、貯蔵開始日からの重量減耗率を求め、その変化の検討を行った。

2) 成分分析

品質変化を定量的に測定するために、2ヶ月に1回、翌年6月までゴボウについては含水率、ナガイモについては含水率と重要な品質特性である粘度、ニンジンについては含水率と4,000~10,000 国際単位含まれているカロチンの中のビタミンAの前駆体（プロビタミンA）として知られている β -カロチン含量を測定し、その変化の検討を行った。

断面図



正面図

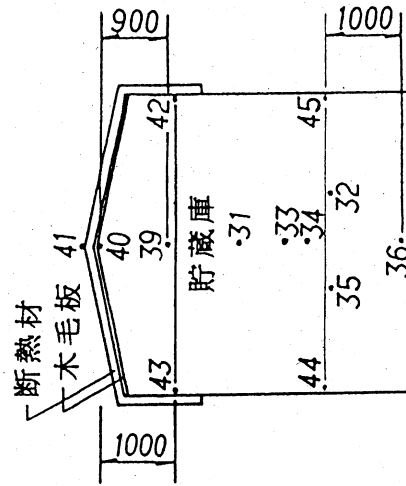


図4 温度及び湿度の計測ポイント（断面図・側面図）

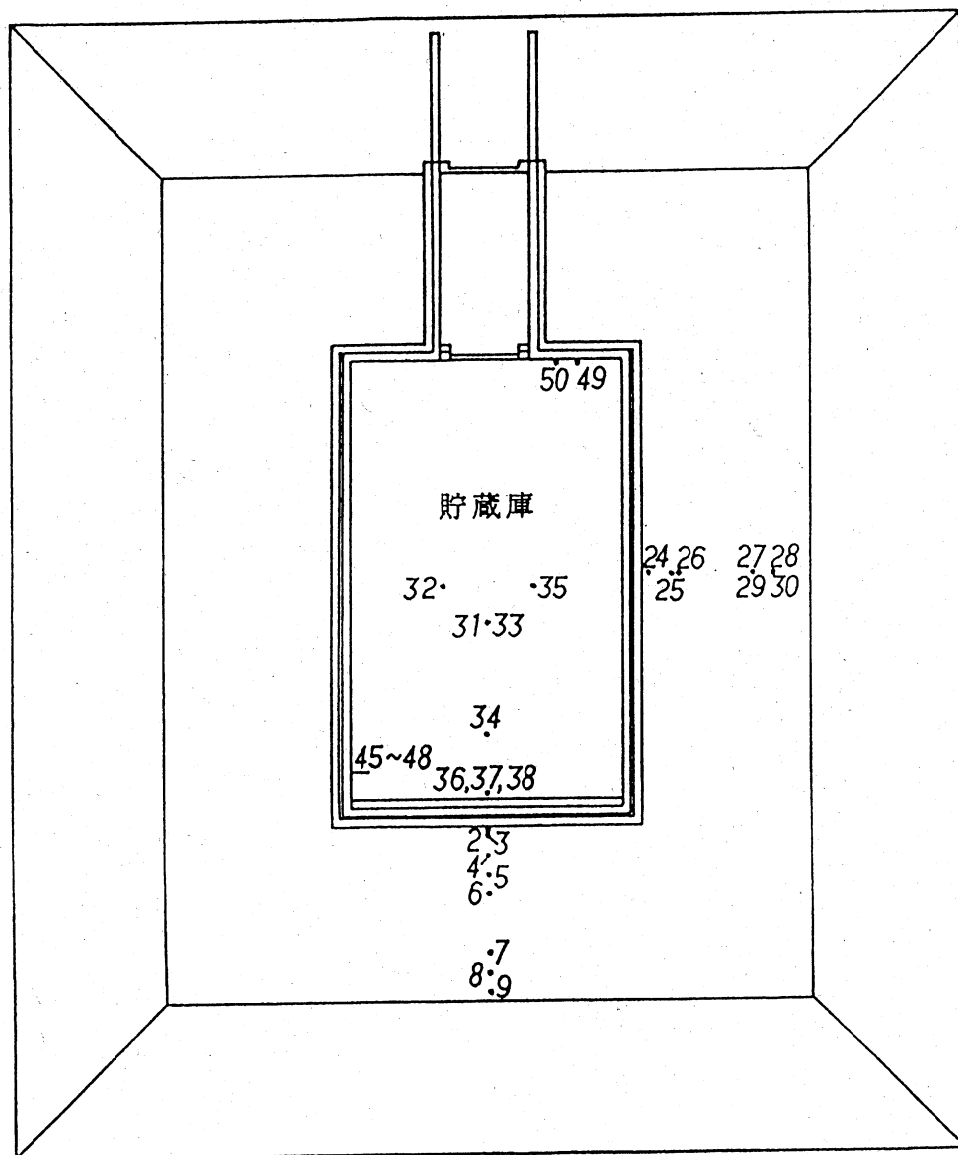


図5 温度及び湿度の計測ポイント（平面図）

表4 低温貯蔵庫の温度および湿度測定位置

No.	名称	測定位置	記号	No.	名称	測定位置	記号
01	フィン	アルミ羽根	SL2	26	パイプ	GL 75cm	EV2
02	地盤	GL 17cm	南壁	27	パイプ	GL 175cm	EV4
03	パイプ	GL 25cm	SL1	28	地盤	GL 200cm	東壁
04	地盤	GL 50cm	南壁	29	パイプ	庫底 130cm	EV4
05	パイプ	GL 75cm	SL2	30	地盤	庫底 130cm	東壁
06	地盤	GL 100cm	南壁	31	庫内	中央馬鈴薯	2.1m
07	パイプ	GL 175cm	SL4	32	庫内	西馬鈴薯	0.9m
08	地盤	GL 200cm	南壁	33	庫内	中央馬鈴薯	1.5m
09	地盤	GL 225cm	南壁	34	庫内	南馬鈴薯	1.2m
10	パイプ	30cm 中央	SL1	35	庫内	東馬鈴薯	0.9m
11	パイプ	70cm 下	SL2	36	庫内	地上 0cm	南壁
12	パイプ	160cm	SL4	37	庫内	地上 10cm	南壁
13	底地盤	25cm 下	底	38	庫内	地上 20cm	南壁
14	底地盤	30cm	底	39	庫内	中央地上 3m	
15	底地盤	70cm	底	40	屋根	断熱材内側	
16	パイプ	庫底 90cm	SL2	41	屋根	断熱材外側	
17	盛土表面	断熱材外側		42	庫内	西壁地上 3m	
18	盛土表面	断熱材内側		43	庫内	東壁地上 3m	
19	切土斜面	断熱材外側		44	庫内	東壁地上 1m	
20	切土斜面	断熱材内側		45	庫内	西壁地上 1m 横	0cm
21	掘削底面	断熱材外側		46	庫内	西壁地上	5cm
22	掘削底面	断熱材内側		47	庫内	西壁地上	10cm
23	フィン	パイプ表面	EV2	48	庫内	西壁地上	20cm
24	地盤	GL 25cm	東壁	49	庫内	温度	
25	地盤	GL 67cm	東壁	50	庫内	湿度	

① 含水率の測定

試料を水洗い、皮を剥いて5mm角に切り、複数の試料がある場合にはよく混ぜ合わせてから前もって恒量化した秤量缶に約10gを精秤し、70℃で24時間加熱乾燥した後、あらかじめ70℃にセットされた真空乾燥器で真空度50mmHg以下の条件で2時間乾燥後、デシケーター中で放冷し試料を秤量し絶乾重量を求め、含水率(%w. b.)を算出する。

② 粘度の測定

試料となるナガイモを水洗い、皮を剥いて5mm角に切る。それを約200 ずつス

ピードカッターを用いてすりおろす。すりおろしたナガイモはビーカーにとり、大きな破片を除去し、20℃の恒温槽につけておく。あらかじめ20℃に保温してあった試料を100 g ビーカーにとり、回転粘度計にB8 M-3型ローターを取り付ける。

③ β -カロチンの定量

試料の前処理として、ニンジン は貯蔵庫から取り出した後3時間室温に放置し、上端から2 cmと4 cmの位置で輪切りにし、皮を剥いて得られる円柱部分の形成層を境として外側の果肉部分を定量に使用する。果肉部分は5 mm以下のサイの目状に細断する。抽出は、細断したニンジン 0.5~1.0 gを精秤し、乳鉢にとり、0.1 gの炭酸マグネシウム、0.3 gの海砂、少量のアセトンを加え、麻酔抽出する。抽出液及び残渣はおよそ80 gのアセトンですべて100 g 共栓三角フラスコに移す。フラスコはアルミホイルで覆い、ウォーターバスインキュベーターを用いて20℃で15時間さらに抽出を行う。抽出終了後、5℃、4000 r.p.m.で20分間遠心分離を行い濾過する。沈澱物は約40 gのアセトンで洗い、再び遠心分離を10分間行い濾過する。残渣が完全に無色になる(3、4回)まで、この操作を繰り返す。

次いで、分液漏斗に石油エーテル50 gをとり、これに色素抽出液を少量ずつ注ぎ、振盪しないで横に倒しながら静かに色素を石油エーテルに移行し、5回蒸留水100 gでクロロフィルを含むアセトンを洗う。その後、あらかじめ約40 gの無水硫酸ナトリウムを入れた三角フラスコ中に分液漏斗内の色素液を移し脱水する。

さらにナス型フラスコに色素液を移す。この際、三角フラスコ内の色素を約50 gの石油エーテルを用いて完全に洗い流し、洗液もまたナス型フラスコに移す。

色素液は真空エバポレーターで40℃以下に保温しながら乾固させこれを50 gの石油エーテルに溶かして試料液とする。

クロマトグラム管はNo.2フィルター封じ込み、コック付、カラム長300 mm、内径20 mmのものを用了。充填剤は、あらかじめ130℃で12時間活性化させた酸化マグネシウムとハイフロスーパーセルを1:2の割合に混合したもので、これを乾式法により10 cmの高さまでカラムに充填する。脱水剤としてその上におよそ2 cmの厚さになるように無水硫酸ナトリウムを充填する。

試料液を分液漏斗に入れ、60~120滴/分で滴下させ色素の分離を行う。この際、常にカラム上部1~2 cmは試料液で満たされるようにする。

分離終了後、すみやかに2%のアセトンを含む石油エーテル 100 gを上部分液漏斗に入れ、分離と同じ要領で β -カロチンの溶出を行う。溶出液は真空エバポレーターで乾固させた後、石油エーテルに溶かし、100 gに定量する。

6. モデルプラント設置場所の気象環境

プラント建設年の1987年12月から、1991年10月までの気温の変化について考察する。建設時は11月19日から平均気温が0℃以下となり、1月下旬には-20℃を下回るようになり、2月15日にはこの冬、最低の-28.5℃を記録した。そして、4月初旬から平均気温が0℃を超えるようになり、その後徐々に気温は上昇した。一般に、冬の寒さはその年の気候や地域により変動しているので、0℃以下の日平均気温を加算し

た、積算寒度(凍結指数)を用いると冬の寒さを量的に表現できる。図6に1987年から91年の4冬の積算寒度を示す。これによると、初年度の積算寒度は $958^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と4年間で最も寒冬であった。これに対し、翌89年はかつてない暖冬であり、 $546^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ であった。90年の冬は $857^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と平年並みの寒さで、91年は $575^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ の暖冬と、1年毎の繰り返しであった。凍結開始日もまちまちで、ときには20日以上ズレが生じ、寒冷エネルギーを利用する際の複雑性を示す。

次に、冬期に造成した凍土の融解に影響を与える暖かさを量的に表すものとして積算温度がある。これは、 0°C 以上の日平均気温を加算したものである。図7に1988年～1991年の4年間の積算温度を示す。これによると、建設年の夏は最も涼しい夏であったことがわかる。90年と91年とはほぼ同様な変化をしているが、最終的には $3000^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ を越える傾向になってきている。

7. 建設初年度の凍土造成と融解

直管型ヒートパイプのフィン部の温度に対して、ヒートパイプ表面温度は10%程度高い温度で保持されていた。最も外側のヒートパイプから50cm離れた点の温度および貯蔵庫内壁の温度は、 -8°C 近くまで低下した。このことから、直管型ヒートパイプにより2m以上の厚さの凍土が構築されたと考える。他方、L字型ヒートパイプはいずれも1月の寒気により、地盤温度は低下し凍土が構築された。一番外側の切り土の位置以外いずれもマイナスを記録した。

貯蔵庫の温度をみると、12月まで積雪がないため、放射冷却現象により温度が低下したが、その後降雪の断熱効果により昇温した。貯蔵庫内の温度は1月初旬までに徐々に低下し、 -6°C まで低下し貯蔵バレイショなどが凍結したため、1000Wのヒーターにより貯蔵庫内を 0°C に保った。貯蔵庫底部の温度は依然と -6°C まで低下しているので、高さ5cmまで水を張る対策をとると、温度は 0°C に上昇することから、水張り方は有効であるが10日程度で無効になった。

庫内温度は5月には 0°C 以上となり、8月下旬には 4.7°C まで上昇したが9月中旬から再び温度低下が始まった。図8に、12月から翌10月までの、気温、ヒートパイプの温度、地盤温度、庫内温度および湿度の変化を示した。湿度は12月中旬から急激に低下し、2月19日には65%にも低下した。ヒーターの影響により、水蒸気が側壁に付着してフロストを形成して空気中の水分を奪うためであり、5月以降は90%以上に回復した。

8. 1988-89年の地盤温度、庫内温度の変化(水詰めコンテナ採用)

1) 地盤と庫内の温度変化

一度永久凍土が完成すると、地盤内の温度は比較的低いため、12月の時点ではほとんどヒートパイプは作動せず、1～3月にかけて作動した。側部の地盤は庫内内壁から100cmと200cmの温度は年間を通してマイナスであるので永久凍土化しており、8～10月にかけて25cm程度融解した。前年度の床面の温度低下を防止するため、砕

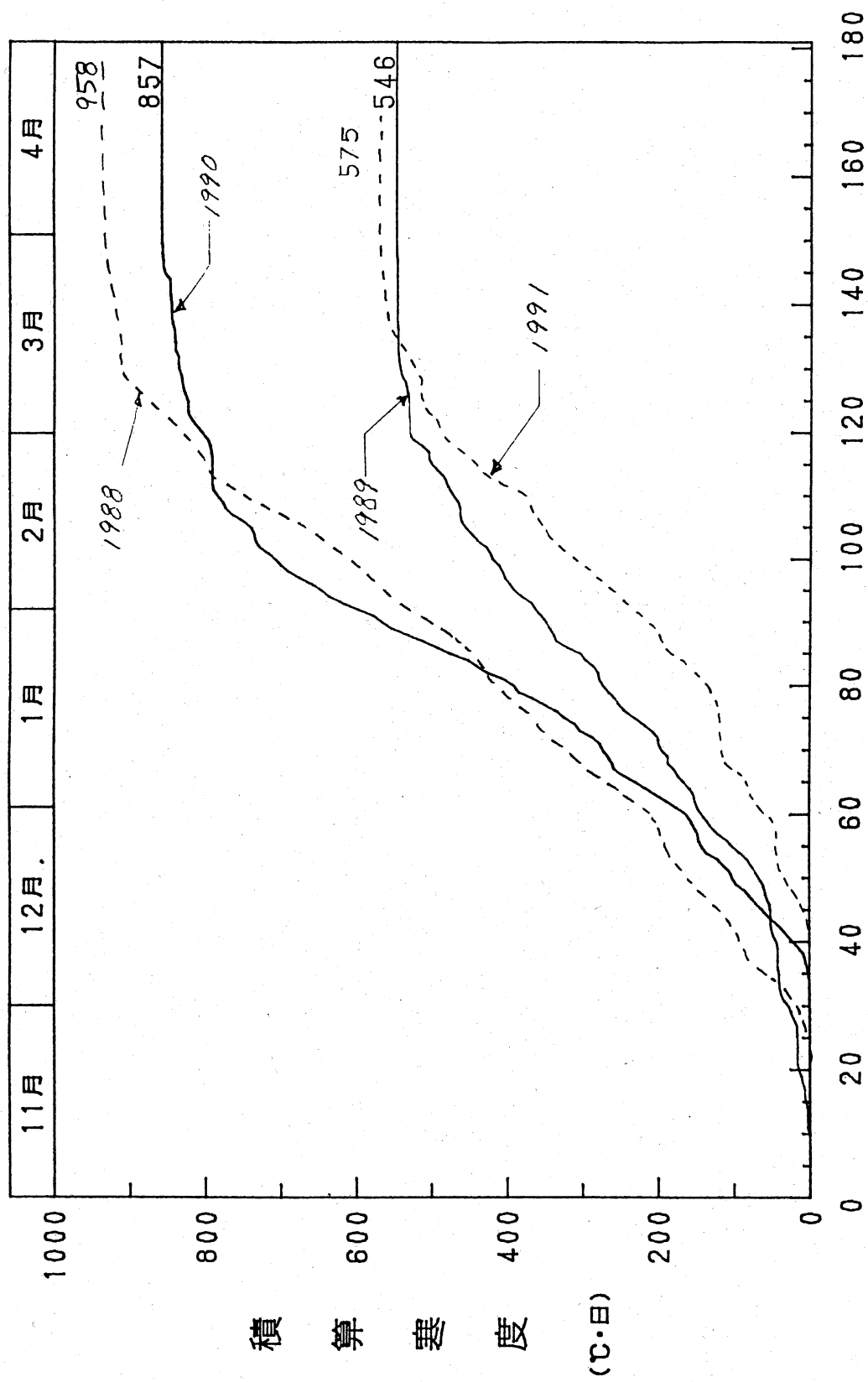


図6 積算寒度

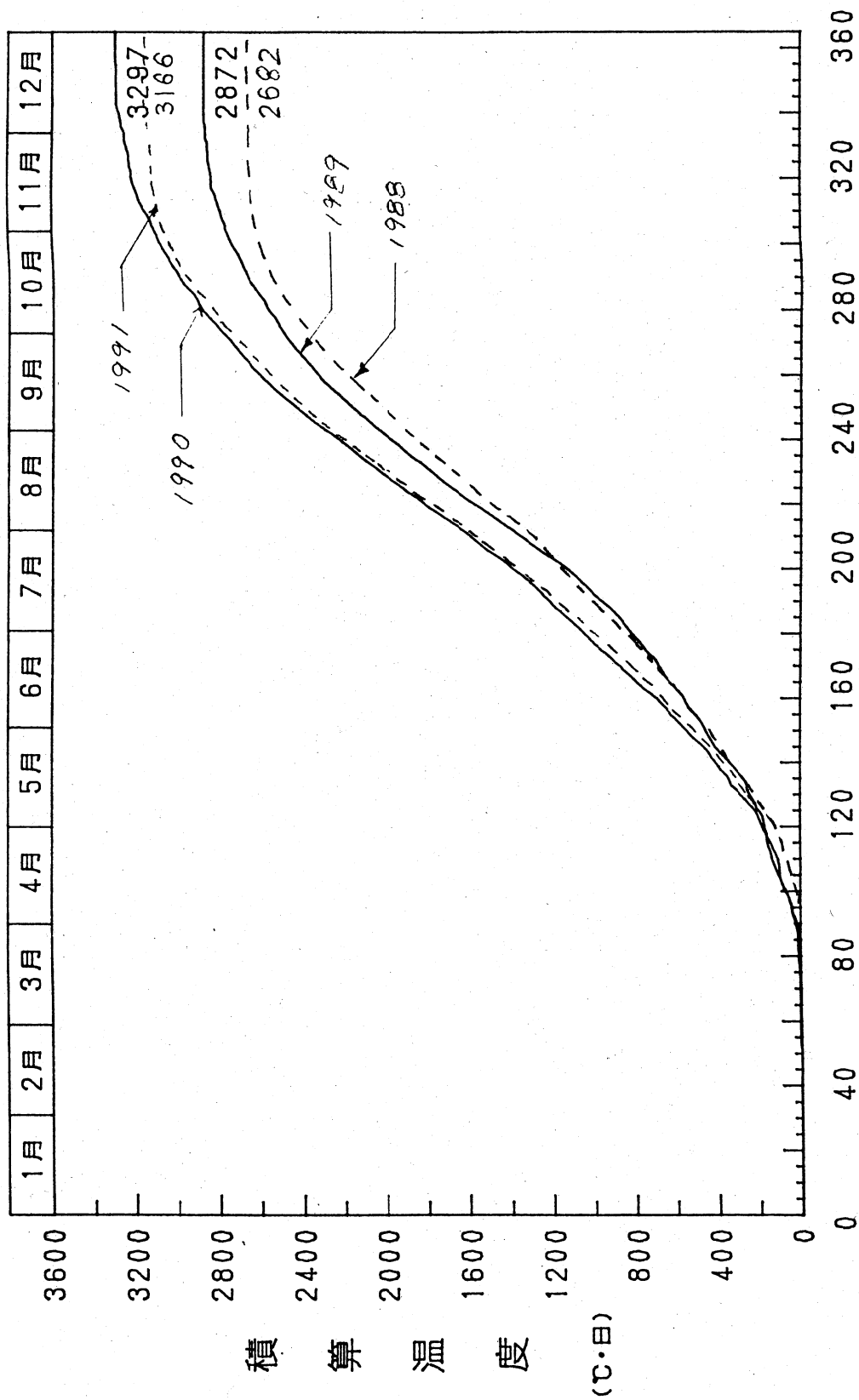


図7 積算温度

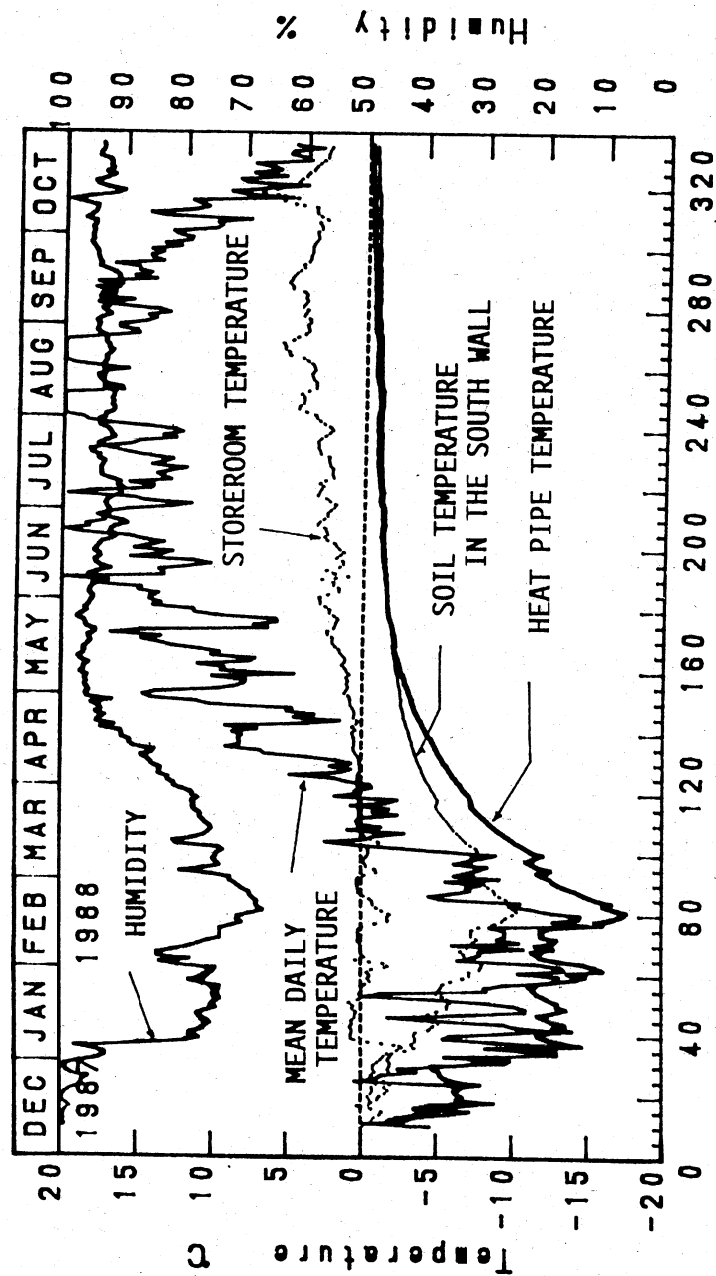


図8 1987～1988の気温、ヒートパイプ温度、地盤温度、庫内温度と湿度

石で20cmほど床をかさ上げし、水深10cmになるように水を張り、潜熱を発生させる方法をとった。その結果、床面の氷は8月上旬まで残存し、その温度は0℃以下を維持した。床面の凍土の融解は20cm程度に過ぎなかった。

さらに、庫内側壁からの冷却を緩和して庫内温度の低下を防止するため、20kg詰めの水コンテナを4段積みにして、壁面四方に並べた。さらに、天井からつり下げて断熱カーテンでコンテナと貯蔵物を隔離した。これによって、庫内の温度低下の問題は解決された。5月になって、カーテンを除去することによって氷塊が庫内を冷却し、貯蔵物の発熱を相殺するため庫内の温度は一定化され、最暖月の8月では4.9℃まで推移した。試算によると、庫内の総熱量の80%が屋根から放出されることが分かり、屋根の断熱材100mmをさらに厚くする必要がある。図9に、11月から翌10月までの1年間の、気温、ヒートパイプの温度、地盤温度、庫内温度および湿度の変化を示した。

2) バレイショの品質変化

10月18日に搬入したバレイショ、男爵とメークインの各2トンから、1カ月毎の重量測定で減耗率を求めると共に、成分分析では液体クロマトグラフィーにより糖含量、ライマン法によりデンプン含量、乾燥法により含水率を求めた。また、20名以上の家庭の主婦を対象に官能試験を行った。図10に還元糖の変化を示す。還元糖は貯蔵後3ヶ月で、約4～5倍に増加し、それ以降わずかながら減少することがわかった。デンプン質の糖化が著しく甘味が増し、付加価値が増大することが分かる。図11にデンプン量の変化を示す。デンプンの変化率は小さく脱水による収縮が少ないことが分かる。次に、アンケート調査による結果より、評価の平均値と普通のバレイショ（評価：3）との全体評価を図12のレーダチャートに示した。この結果、3点以上は男爵では8月まで、他方メークインは6月までとなっている。

9. 1989-90年の地盤温度と庫内温度の変化（フィン被覆による作動抑制）

1) ヒートパイプの作動抑制効果

ある程度の量の永久凍土層が構築されると、夏期に融解した層のみ、冬季に凍結すれば良いから、多量のヒートパイプは必要なくなる。そこで、半分の108本のヒートパイプの冷却効果を抑制する実験を行った。ジオテキスタイルのカバーで被覆されたフィンの温度変化と露出しているフィンの温度変化を比較することにする。これによると、カバーをしたフィンの温度は、被覆効果のため露出しているフィンの温度より常に高い温度を示し、1月下旬には温度差が5℃前後にも達している。表5にフィン温度の月平均値を示す。

表5 フィン温度の月平均値（℃）

測定地点	11月	12月	1月	2月	3月
被覆フィン	4.0	-1.4	-7.5	-3.4	2.6
露出フィン	3.7	-3.1	-10.4	-6.1	-0.8

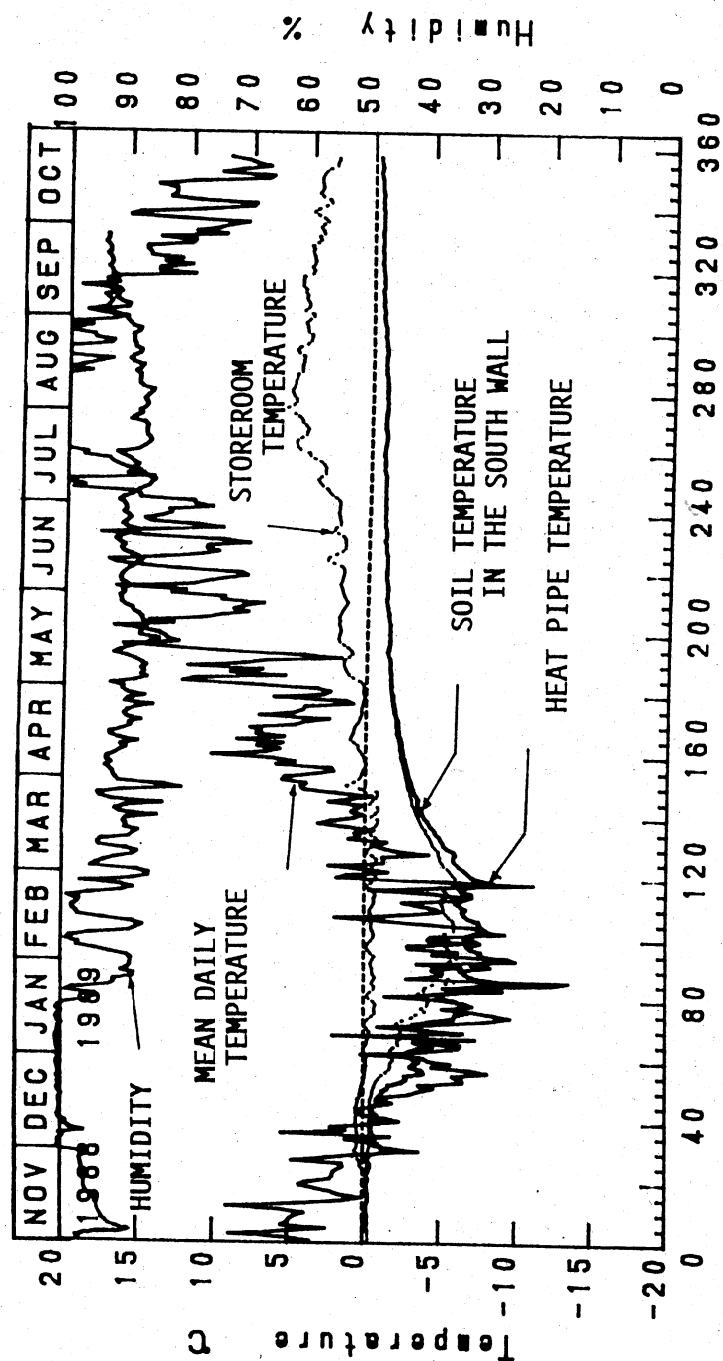


図9 1988～1989の気温、ヒートパイプ温度、地盤温度、庫内温度と湿度

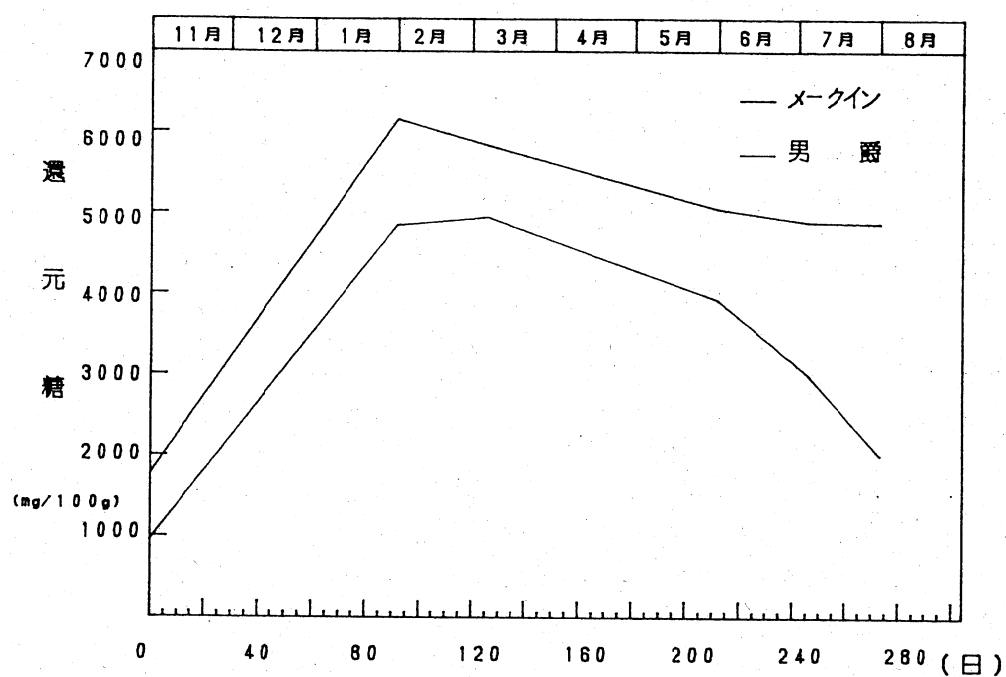


図10 バレイショの還元糖の変化

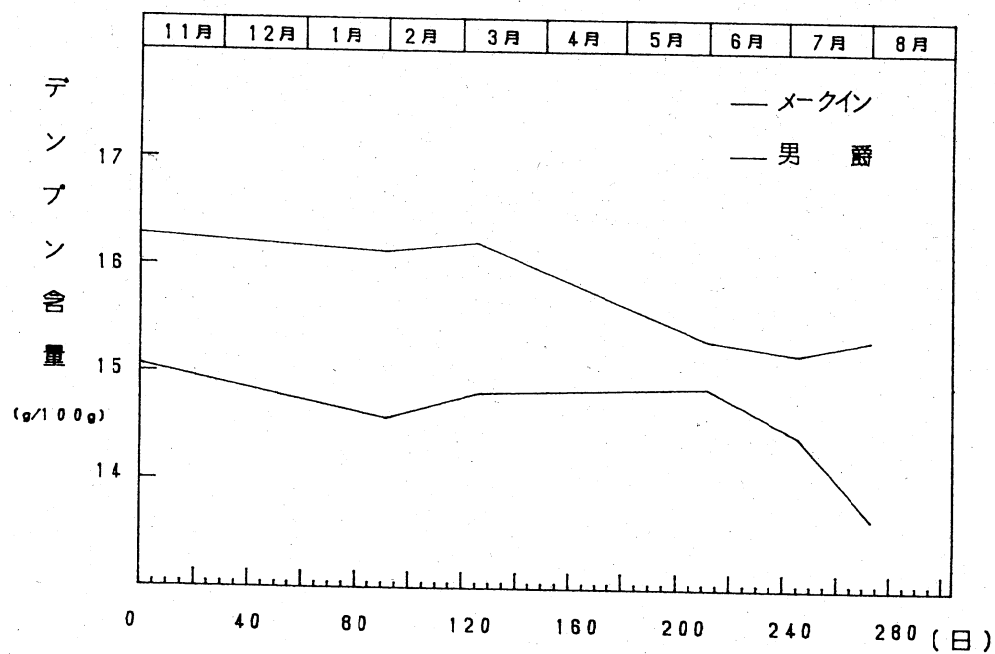


図11 バレイショのデンプン量の変化

〔男 爵〕

香ばしさ

舌触り

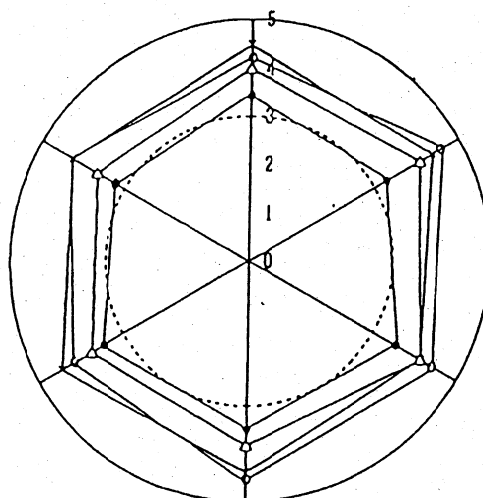
かたさ

美味しさ

新鮮さ

色

×	2月
○	4月
△	6月
●	8月



〔メークイン〕

香ばしさ

舌触り

かたさ

美味しさ

新鮮さ

色

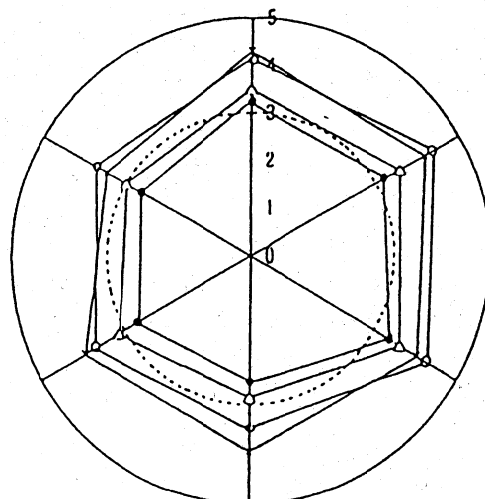


図12 バレイショの試食アンケートによる官能評価

ジオテキスタイルのカバーで凝縮部を被覆したL字型ヒートパイプの冷却効果をみると、1990年1月における気温とヒートパイプ(傾斜部)の温度の関係と前年度の同様な関係から、凝縮部を被覆していないの方が気温の低下とともにヒートパイプの温度も低下していることがわかる。前年度は気温の低下とともに、ヒートパイプ温度も直線的に低下して、気温が -20°C のとき、ヒートパイプ温度は $-12\sim-15^{\circ}\text{C}$ を示している。今年度は前年度より冬の寒さが厳しかったにもかかわらず、気温が低下してもヒートパイプ温度があまり低下せず、気温が -30°C まで低下しても、先端部温度は $-11\sim-14^{\circ}\text{C}$ を示している。以上のことから、ジオテキスタイルのカバーを凝縮部のフィンに被覆することにより、ヒートパイプの作動は抑制され、冷却効果が軽減できたと考えられる。

2) ヒートパイプ及び凍土地盤の温度変化

ヒートパイプ各部の温度変化をみると、12月中旬から2月下旬まで激しく変動し、厳寒期には -15°C 以下にも低下した。そして、4月以降は外気に接するフィンの温度を除いては変動していないことがわかる。ヒートパイプは3月になると気温の上昇に伴い作動回数が減少し、4月に入ると作動を停止してしまうことがわかる。最暖月でもヒートパイプが熱ダイオード性を持っているため、外の高温をヒートパイプを通して地下の凍土地盤に伝えていないことがわかる。このことから、埋設されたヒートパイプが順調に作動し、今年度も厳寒期の1月から2月にさらに凍土を造成したことがわかる。

東壁側部(直管型ヒートパイプ埋設)の今年度の温度変化はをみると、8月10日には壁から25cmの地盤温度がプラスになり、今年度は1ヶ月ほど遅く凍土が融解されたことがわかる。壁から75cmのヒートパイプの温度が年間を通してマイナスを維持していることから、今年度の凍土層の融解は70cm程度であり、前年度より良好に凍土保存がなされたことがわかる。

南壁側部(L字型ヒートパイプ埋設)の温度変化は、今年度は1ヶ月遅れて7月16日に壁から25cmのヒートパイプの温度がプラスへと変化している。従って、南壁側部では、凍土層の融解は50cm以下であり、南壁側部においても良好に凍土を保存できたことがわかる。

今年度夏期の底部凍土層の融解は底地盤30cmの温度が10月13日からプラスになっていることから、30~40cm程度であると考えられる。このように、既に人工の永久凍土が内部に構築されているので、ヒートパイプは建設時のように多量に必要でなく、40本程度で充分であると考えられる。

3) 庫内温度と湿度の変化

今年度は前年度と同様に床面に水を張るとともに、壁に水詰めコンテナを並べ断熱カーテンを天井から吊した。屋根からの放熱対策として11月にウレタンフォームを厚さ約5cm吹き付けた。しかし、1月上旬に庫内温度がマイナスになったので、

1月11日から3月27日までサーモスタットで調節しながら1000Wの電気ヒーターを使用して庫内温度がマイナスにならないように保温した。さらに6月になって断熱カーテンを除去し、その後もコンテナにできた氷塊が庫内を冷却し、庫内温度は前年度より安定し、最暖月の8月でも4.1℃に保たれた。今年度は1月中旬から急激に湿度が低下し、2月1日に70.4%を記録した。その後徐々に上昇し、4月以降は、ほぼ90%以上を維持した。1月中旬からの急激な湿度低下は、庫内温度がマイナスになったため、1000Wの電気ヒーターを使用したのも、庫内の水蒸気がフロストとなり、側壁に付着したために湿度が低下したものと考えられる。図13に、11月から翌10月までの1年間の、気温、ヒートパイプの温度、地盤温度、庫内温度および湿度の変化を示した。

4) 貯蔵農産物の減耗率の変化

1ヶ月ごとに計測を行ったあまり品質の良くない土幌農協のバレイショ(男爵)の重量減耗率の測定結果を表6に、良質の吉田青果のバレイショの測定結果を表6に示す。土幌農協のバレイショは貯蔵開始後1ヶ月ではサンプル1が0.15%、サンプル2が0.22%と減耗率が小さく良好な状態であったが、その後は急激に重量が減少し、貯蔵開始後8ヶ月以降には減耗率が5%を超えている。これは塊茎の表皮が剥がれていたために呼吸を抑えきれず、蒸発を抑制できなかったのとカビの発生によるものと考えられる。吉田青果のバレイショは男爵、メークインは貯蔵期間242日で男爵3.76%、メークイン3.56%といずれも十分な商品価値(5%以内)があることがわかった。

表7にゴボウの重量減耗率の測定結果を示す。これによると、品種の違いによるものと考えられる若干の差はあるものの、音更農協のゴボウ、吉田青果のゴボウともほぼ同様な変化を示し、貯蔵期間207日で音更農協のゴボウが2.56%、吉田青果のゴボウが2.17%と十分な商品価値があることがわかった。

表8にナガイモの重量減耗率の測定結果を示す。これによると、土付ナガイモは3月まで直線的に重量が減少していき、その後の減少量のごくわずかである。これはナガイモに付着している土壌水分が蒸発していたためと考えられる。これにより、土付ナガイモは洗いナガイモよりナガイモ自体としては減耗率は少なかったものと考えられる。最終的には貯蔵期間206日で、洗いナガイモが2.19%、土付ナガイモが2.41%と十分な商品価値があることがわかった。

表9にニンジンの重量減耗率の測定結果を示す。これによると、2つのサンプルともほぼ同様な変化で、貯蔵期間205日で、サンプル1が1.85%サンプル2が1.70%と十分な商品価値があることがわかった。

表10にタマネギ(在来種)の重量減耗率の測定結果を示す。これによると、貯蔵開始後1ヶ月では0.08%しか重量が減少しかなかったが、その後は月当り0.88%前後で減少している。タマネギの最適温度は0℃であり、温度と同様に重要な要因は湿度で、タマネギの最適湿度は65~75%の範囲にある。2月以降に減耗率が大きくなった原因としては、黒褐色の腐敗の症状がみられたことから、この腐敗によるものと思われる。しかし、この腐敗が感染によるものなのか、あるいは庫内湿度の低下

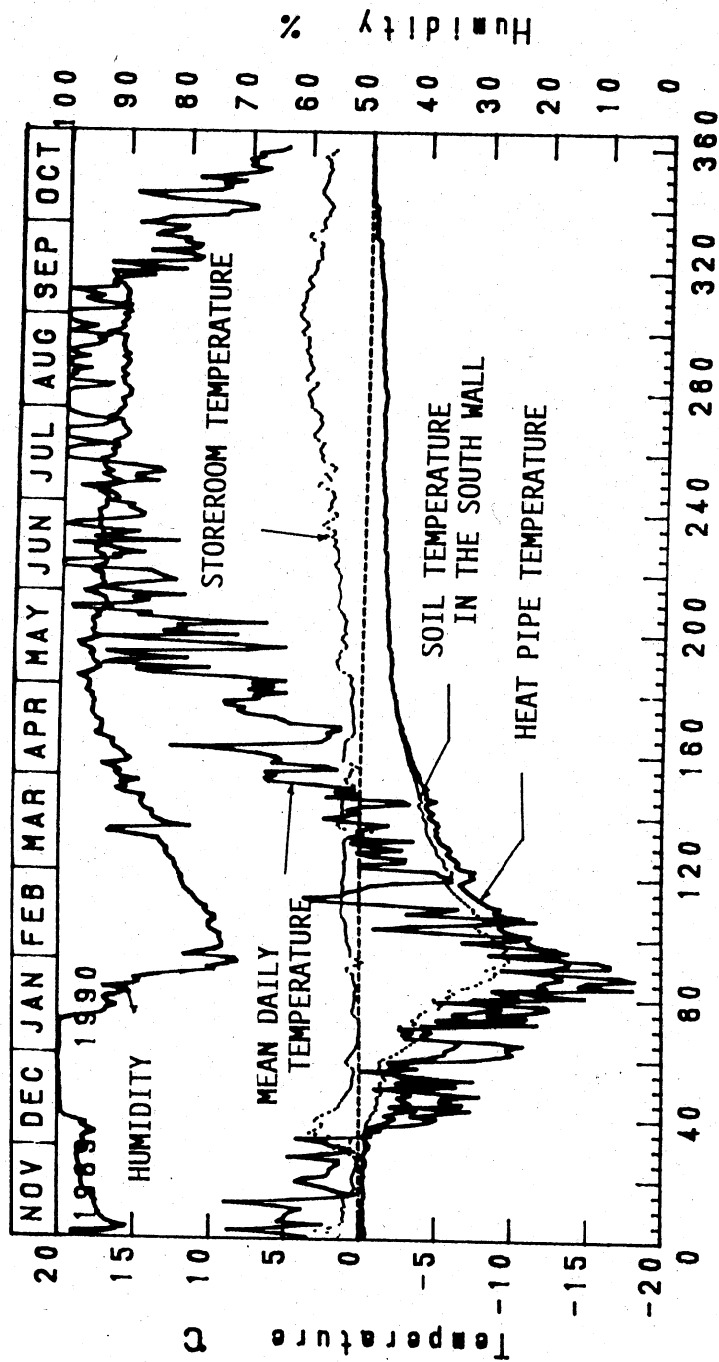


図13 1989～1990の気温、ヒートパイプ温度、地盤温度、庫内温度と湿度

表 6 (1) 土幌農協のパレイショ（男爵）の重量減耗率と貯蔵期間

	31日	62日	91日	121日	151日	182日	212日	243日	274日
サンプル 1	0.15	0.89	2.03	2.85	3.33	3.73	4.18	4.95	5.58
サンプル 2	0.22	0.85	1.91	2.61	2.90	3.38	3.89	4.66	5.69

表 6 (2) 吉田青果のパレイショの重量減耗率と貯蔵期間

	28日	59日	89日	120日	150日	181日	212日	242日
男 爵	1.02	1.67	2.04	2.33	2.60	2.87	3.21	3.57
メークイン	1.09	1.75	2.09	2.36	2.51	2.72	3.17	3.76

表 7 ゴボウの重量減耗率と貯蔵期間

	31日	63日	91日	122日	152日	183日	207日
音更農協	0.45	0.90	1.65	2.11	2.31	2.46	2.56
吉田青果	0.22	0.49	1.09	1.63	1.90	2.12	2.17

表 8 ナガイモの重量減耗率と貯蔵期間

	31日	63日	91日	122日	152日	183日	206日
洗 い	0.16	0.57	1.05	1.22	1.54	2.03	2.19
土 付	0.64	1.36	2.01	2.17	2.33	2.41	2.41

表9 ニンジンの重量減耗率と貯蔵期間

	31日	63日	91日	122日	152日	183日	205日
サンプル1	0.26	0.57	0.92	1.23	1.45	1.63	1.85
サンプル2	0.22	0.57	1.01	1.27	1.44	1.57	1.70

表10 タマネギ（在来種）の重量減耗率と貯蔵期間

	31日	63日	91日	122日	152日	183日
タマネギ	0.08	0.80	1.98	2.90	3.57	4.46

表11 ダイコンの重量減耗率と貯蔵期間

	28日	59日	89日	120日
ダイコン	0.08	0.12	0.16	0.28

によるものなのか、はっきり断定はできない。今後在来種はもちろん、ほかの品種についても貯蔵試験を行い、検討していく必要があると思われる。

表11に示すように、ダイコンの重量減耗率は貯蔵期間 120日でわずか0.28%であり、外観的には何も変化がなかった。しかし、内部を調べてみると“す”が入っていたことがわかった。ダイコンの湿度は90～95%が適しており、これより低いとダイコンの水分が蒸発し、外観的にはしなびなどの変化がない場合でも、内部に“す”が入り、商品価値を失ってしまうことがある。これより、厳寒期に庫内湿度が70%付近にまで低下したことが“す”入りの原因のひとつとして考えられるが、今後、湿度の変化とともに定期的に内部を調べてみることにより“す”入りの原因が湿度低下によるものなのか、あるいは別の原因によるものなのかが判明すると思われる。

5) 貯蔵農産物の成分分析

ゴボウ、ナガイモ、ニンジンの含水率の測定結果を表12に示す。これによると、ゴボウ、ナガイモ、ニンジン、すべて微量ながら増加したが、その増加量の少なから、品質への影響はほとんど無視できるものと思われる。

表12 ゴボウ、ナガイモ、ニンジンの含水率と貯蔵期間

	22日	83日	145日	208日
ゴボウ				
音更農協	78.6	77.2	78.6	80.0
吉田青果	79.1	77.5	79.1	81.6
ナガイモ				
洗い	84.0	83.1	85.6	87.0
土付	81.9	84.0	82.5	84.5
ニンジン	88.9	89.8	90.6	91.1

ナガイモの粘度の測定結果を表13に示す。洗いナガイモの1回目のデータが低い値を示しているのはサンプルが傷んでいたためと思われる。またデータのバラツキは、サンプルが少なかったための個体差によるものと思われる。含水率の測定結果が微量ながら増加していることから、洗いナガイモ、土付ナガイモとも減少傾向があるといえる。

表13 ナガイモの粘度と貯蔵期間

	22日	81日	144日	207日
洗い	3.90	5.03	4.26	5.54
土付	6.90	6.57	5.61	5.86

ニンジンの β -カロチン含量の測定結果を表14に示す。ニンジンのカロチンは貯蔵中にはほとんど減少しなく、むしろ増加する場合もみられるほどであるが、この

実験では、個体差による測定結果のバラツキはあるものの、減少傾向はみられなかった。

表14 ニンジンの β -カロチン含量と貯蔵期間

	28日	85日	147日	210日
ニンジン	113.8	93.4	109.8	108.1

10. 1990-91の地盤温度、庫内温度の変化（自動水張り装置を採用）

今年度は4冬中で最も遅く12月中旬頃から、日平均気温が0℃以下となり始めた。前年度の積算寒度は857℃・日と平年並みの寒さであったが、この冬は575℃・日と暖かい冬であった。冬期に造成した凍土の融解に影響を与える暖さ表す積算温度によると、前年を130℃程下回る3166℃・日となった。今年度は冬は暖かく、夏は比較的涼しかったことが分かった。

1) ヒートパイプ及び凍土地盤の温度変化

ヒートパイプの温度は12月中旬から3月上旬まで激しく変動し、厳寒期には-10℃以下にも低下した。そして、4月以降は外気に接しているフィンの温度を除いては、急激な温度変化をしなかった。これによると、前年度のヒートパイプ各部の温度は、今年度に比べて冬に気温が低下したため、11月から1月にかけて大きく低下したが、今年度は前年度とほぼ同じ傾向を示した。このことから、今年度も埋設されたヒートパイプが順調に作動し、厳寒期の1月から2月にかけて融解した土を凍結させたことが分かった。

今年度は貯蔵庫の内壁から距離が75cm、175cm、200cm離れた地盤温度は、今年度の実験を始めた時点ですでにマイナスを記録していた。内壁に近い25cmと67cmの地盤温度も12月中旬にはマイナスとなった。8月28日には壁から25cmの地盤温度がプラスになった。壁から67cmの地盤温度はマイナスを維持した。今年度夏期の東壁側部の凍土地盤の融解は最大でも67cm以下と考えられ、前年度より良好に凍土保存がなされたことが分かった。

南壁側部の壁から225cmの地盤温度を除くと、他の部分はすべてプラスになったので、南壁側部の凍土の融解は200cm以上だと考えられ、今年度の南壁側部での凍土保存状況は前年度と比べると良くなかったことが分かった。

2) 貯蔵庫内の温度・湿度の変化

今年度は自動散水システムにより、温度が下がると水を噴射することによって、庫内温度の低下を防いだ。今年度の庫内温度で、3月にマイナスを記録したが、これは、自動散水システムにより噴射された水が床面にたまり過ぎたため、自動散水システムを停止したためである。その後、側壁の表面に造成された氷壁により、庫内温度はあまり上昇せず、最高でも9月16日の3.6℃だった。よって、今年度の庫

内温度は前年度に比べて良好な結果となり、自動散水システムが有効に作動したと考えられる。

庫内湿度の変化は1月末まで100%近い湿度を保っていたが、その後激しい動きをしながら徐々に落ち込んでいったが、これは自動散水システムによって噴射された水滴が氷に変換することによって、庫内の水蒸気量が大きく変化したためだと考えられる。そして、4月以降湿度計センサーの計測器の劣化により、70~80%付近で推移したが、実際の湿度は、計測された値より15%も高くなると考えられる。

夏期の庫内温度上昇が少なく良好であり、年平均値をみてもすべての地点で、今年度の庫内温度は最も低温に保たれたことが明からになった。図14に、11月から翌10月までの1年間の、気温、ヒートパイプの温度、地盤温度、庫内温度および湿度の変化を示した。

4) 生花の貯蔵性

いままでは野菜の貯蔵を主体としてきたが、個数当りの販売・生産価格が高価な生花に注目するものとする。(株)帯広植物園の協力で4回に分けて生花の貯蔵性の実験を行った。第1回は、実験で使用した生花は、スプレー菊、鉄砲ユリ、黄大菊、アイリス、リアトリス及びバラの6種とした。各生花はいずれも5、6本単位で新聞紙とラップフィルムの2種類で、花びらの上部をわずかに解放して包装した後、1ヶ月間の貯蔵を試みた。12月30日に貯蔵庫より搬出して水揚げし、品質の評価を行った。鉄砲ユリについては水揚げ後開花が行われ、十分に貯蔵可能であることが判明した。菊類はいずれも10日以内は良好であるが、その後葉は一時的に萎れる。しかし、30日後の水揚げで開花し、再び葉は元に戻って良好となる。バラは花びらが貯蔵10日後に黒ずむ問題が生じた。リアトリスは花びらが黒ずみ、水揚げ後は開花せず貯蔵不適であった。アイリスも同様に水揚げ後は開花せず不良であった。

第2回生花貯蔵実験(1991年2月9日)によると、1週間後は何等変化はなかった。2週間後(2月22日)に搬出すると、新聞紙で包んだバラと菊は葉が萎れ、不良であった。しかし、ラップフィルムに包んだバラと菊は外見は搬入時と変わらず、水揚げ後も搬入時と同じ状態で良好だった。新聞紙で包んだチューリップは、搬出時はかなり萎れていたが、水揚げ後活力を回復した。グラジオラス、カーネーション、シンピジュームも同様であった。

3週間後(3月4日)に搬出すると、新聞紙に包んだバラと菊は、前回と同様に葉が萎れ、不良であった。ラップフィルムに包んだバラは葉には変化は見られないが、花びらは多少黒ずみ商品としては不適であった。菊は問題なく良好であった。チューリップ、カーネーション、グラジオラスも問題なく良好であった。シンピジュームは全体的に黒味を帯びてきた。6週間後(3月25日)に搬出すると、ラップ包の菊はほとんど変化なく水揚げ後開花した。グラジオラス、カーネーションは多少開花気味であったが、水揚げ後開花し、商品として問題はなかった。チューリップは花先が黒ずみ貯蔵は不良となった。

第3回生花貯蔵実験(1991年4月19日)では、赤とピンクのカーネーションを100本単位で出荷時の状態で、箱ごと黒色のビニール袋で包み貯蔵を開始した。黄色と

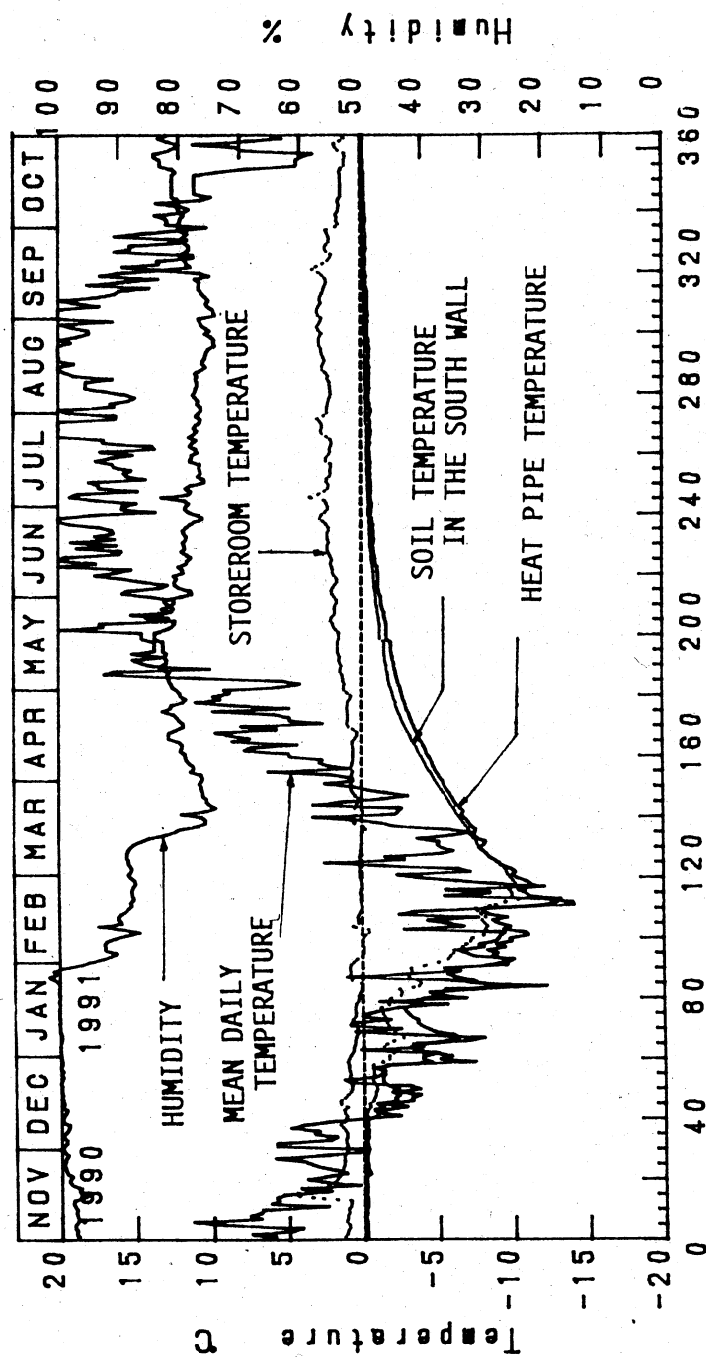


図14 1990～1991の気温、ヒートパイプ温度、地盤温度、庫内温度と湿度

白色の菊も同様に箱ごと袋で包み貯蔵を開始した。5月9日にカーネーションと菊を搬出したが、変化無く水揚げ後開花し、良い貯蔵結果を得た。カーネーションは母の日に商品として販売された。

第4回生花貯蔵実験（1991年7月9日）として、1週間後（7月9日）に搬出したが、状態は非常に良好で、水揚げ後も良好だった。2週間後（7月22日）に搬出したところすべて良好であるが、一輪のカーネーションの花びらにカビが発生した。

3週間後（7月24日）には菊は葉の色に変化が現れた。カーネーションは良好で、スプレー菊は開花後10日間位、貯蔵庫外の室内で日持ちした。かすみ草は搬出後多少黒っぽく見えたが、水揚げ後、色には問題は無かった。しかし、これ位の期間がかすみ草の保存性の限界と判断された。スターチス、スプレー菊、カーネーションはほとんど変化なく貯蔵された。4週間後（8月4日）に菊を搬出したところ、保存状況は良好であるが、花びらの色がわずかに変化していた。しかし、水揚げ後の花びらの状況は良く、商品として使用できた。

この実験において、生花を貯蔵するには、新聞紙などに包むよりもラップフィルムなどの水分を蒸発させないようなものに包む方が、良い貯蔵結果を得られた。また、生花を箱に何本かまとめて入れ、その箱ごとを黒色のビニール袋に包んで貯蔵した場合には、さらに良い貯蔵結果を得られた。よって、この方法が生花貯蔵における一番良い貯蔵方法だと考えられる。

表15 生花貯蔵期間と水揚げ判定結果

生 花	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
スプレー菊	----○		-----○		---○			----○	
黄白菊	----○							----○	
鉄砲ユリ	----○								
アイリス	----×								
リアトリス	----×								
バラ	--△		--○-△						
シロ・ジューム			---×						
カーネーション			-----○		---○			----○	
グラジオラス			-----○						
チューリップ			---○---×						
スターチス								----○	
かすみ草								---○-×	

以上の実験結果を表15にまとめたものを示した。この表において○印は貯蔵結果が良好で、商品価値が認められたもの、×印は貯蔵結果が不良で、商品価値を失ったもの、△印は花びらの色が黒ずんだものを表している。また、線1つを約1週間とした。これによると、菊、カーネーション、鉄砲ユリ、スターチス、グラジオラス

スについては、1カ月以上の長期保存が可能であることが分かった。チューリップとかすみ草については、3週間程度に貯蔵の限界があると考えられる。バラについては、2週間程度の貯蔵では問題はないが、それ以上になると花びらが黒ずみ、商品価値を失うことが分かった。アイリス、リアトリス、シンピジュームは、この実験においては貯蔵不適となった。

この実験により、人工永久凍土低温貯蔵庫による生花貯蔵は、種類によっては充分実用化が可能であることが分かった。

11. ま と め

1987年12月の人工永久凍土低温貯蔵庫のモデルプラントの完成から4年目以上経過した。種々の問題点を解決するため、過去3年間に実用化に向けて色々な実験を行ってきた。それらの実験によって、充分実用化の耐えることが判明した。気候変動に備えるために、新たに、貯蔵庫内の温度が低下すると、自動的に貯蔵庫の内壁に水を噴射して、内壁の表面に氷の壁を構築することを目的とした、自動散水システムを作動させた。その効果とヒートパイプの作動状態及び庫内の状態を調べるとともに、年間の貯蔵庫内、ヒートパイプ及び凍土地盤温度と湿度を測定し、結果の検討を行ってき、十分なデータの蓄積ができた。これら4年間の月平均温度の一覧を表16～表19に示した。

貯蔵物質としての野菜である、バレイショ、ゴボウ、ナガイモ、ニンジン長期貯蔵性とタマネギ、ダイコンの短期貯蔵性が良好であることも明かとなった。さらに、生花の貯蔵実験により、1月程度の貯蔵期が可能であることも立証された。

現在、網走市呼人町に、このモデルプラントの約2.3倍の大きさの小型冷凍機併用のワサビなどの貯蔵プラントが完成している。また、十勝地方の士幌高校に、このモデルプランの半分の大きさ（ヒートパイプはわずか10本）の貯蔵庫が完成している。

近年農業施設に対するエネルギー節減が叫ばれているなかで、化石燃料に依存しない自然エネルギーの活用は大いに推進されるべきである。また、地球環境の保全が叫ばれるなかで、先駆的に利用すべきであり、食糧備蓄問題や農産物のコスト低減と価格の安定化に大きく寄与するものとする。

表16

人工永久凍土低温貯蔵庫の温度 (°C), 湿度 (%) の月平均値 (1987-88年)

測定地点	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
東壁側部地盤												
GL-LINE No34	-2.7	-6.6	-7.0	-3.7	-1.3	-0.4	0.1	0.7	1.9	2.4	2.4	-1.2
35	-2.4	-8.2	-9.3	-5.1	-2.0	-0.9	-0.4	-0.2	0.1	1.0	1.3	-2.2
38	-0.2	-3.5	-6.8	-5.5	-2.9	-1.7	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.3	-2.1
庫底 41	-0.4	-3.1	-7.0	-6.2	-3.3	-1.9	-1.3	-1.0	-0.9	-0.7	-0.5	-2.2
直管型パイプ												
フィン No32	-4.5	-8.7	-9.2	-2.5	5.5	10.4	15.5	14.7	19.8	15.0	8.1	5.3
GL-LINE 36	-2.7	-10.3	-12.5	-7.3	-3.1	-1.5	-0.9	-0.5	-0.3	-0.1	-0.1	-3.3
37	-4.1	-9.0	-11.1	-7.2	-3.3	-1.7	-1.3	-1.0	-0.8	-0.4	-0.1	-3.3
先端部 39	-4.4	-11.5	-13.7	-9.0	-4.3	-2.3	-1.4	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-4.1
40	-3.6	-8.5	-10.6	-7.0	-3.4	-1.9	-1.3	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-3.3
南壁側部地盤												
GL-LINE No 3	-2.3	-5.7	-6.5	-3.5	-1.1	-0.1	0.6	1.2	2.4	2.9	2.8	-0.8
5	-0.9	-8.3	-10.9	-6.6	-2.9	-1.4	-0.9	-0.6	-0.4	0.0	0.4	-2.7
9	-0.8	-9.2	-13.0	-8.6	-4.0	-2.3	-1.5	-1.1	-1.0	-0.7	-0.5	-3.6
11	-1.2	-8.5	-12.2	-8.2	-4.0	-2.3	-1.6	-1.2	-1.0	-0.8	-0.6	-3.5
13	-0.4	-4.6	-8.3	-6.3	-3.3	-2.0	-1.4	-1.1	-1.0	-0.7	-0.5	-2.5
14	0.0	-2.1	-5.9	-5.2	-2.9	-1.9	-1.4	-1.1	-1.0	-0.8	-0.5	-1.9
L字型パイプ												
フィン No 1	-4.5	-8.8	-9.5	-2.7	5.6	10.4	15.4	14.6	19.8	15.0	8.1	5.3
GL-LINE 4	-3.5	-7.8	-9.0	-4.8	-1.6	-0.6	-0.2	0.3	1.4	2.1	2.1	-1.8
7	-2.1	-9.9	-12.9	-8.0	-3.6	-1.9	-1.3	-1.0	-0.8	-0.5	-0.2	-3.5
10	-2.0	-9.7	-13.2	-8.6	-4.0	-2.3	-1.6	-1.2	-1.0	-0.8	-0.5	-3.7
12	-2.0	-7.7	-10.8	-7.3	-3.6	-2.1	-1.5	-1.1	-1.0	-0.7	-0.5	-3.2
傾斜部 15	-5.0	-11.8	-11.2	-7.8	-3.7	-1.5	-0.8	-0.4	-0.3	0.3	0.6	-3.5
17	-4.9	-12.5	-14.2	-9.6	-4.7	-2.3	-1.4	-0.9	-0.8	-0.5	-0.3	-4.3
18	-4.7	-11.9	-14.5	-9.8	-4.8	-2.4	-1.4	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-4.4
19	-3.7	-10.1	-13.4	-9.3	-4.4	-2.1	-1.1	-0.7	-0.6	-0.3	-0.2	-3.8
先端部 23	-5.3	-12.7	-14.2	-9.7	-4.9	-2.3	-1.4	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-4.4
底部地盤												
庫底 30cm	-1.1	-9.5	-5.7	-6.3	-3.1	-0.9	-0.5	0.3	1.4	2.0	1.6	-1.8
70cm	-4.3	-12.0	-12.4	-8.9	-4.5	-2.0	-1.2	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-3.9
盛土表面												
断熱材 外側	-3.8	-7.4	-7.1	-0.7	7.1	11.4	16.3	16.0	20.0	15.6	8.8	6.4
内側	-0.7	-4.7	-7.9	-4.9	-1.0	0.6	2.8	4.1	6.7	6.9	5.0	0.6
切土斜面												
断熱材 外側	5.7	4.9	4.5	3.8	3.1	2.8	3.0	3.9	4.9	6.8	6.9	4.2
内側	2.5	2.3	2.2	1.5	0.9	0.8	0.9	1.4	1.9	2.8	3.1	1.7
掘削底面												
断熱材 外側	5.6	-0.4	-1.5	-1.0	0.8	2.7	3.5	3.5	3.6	4.5	4.7	2.2
内側	0.8	-9.6	-12.5	-9.0	-4.3	-1.8	-0.8	-0.5	-0.4	-0.1	0.1	-3.2
貯蔵庫内												
中央 No47	-1.1	-0.3	-0.4	-0.1	0.5	1.7	2.2	2.6	4.2	4.2	3.9	1.5
天井 43	-1.4	-0.3	0.6	0.9	2.5	4.7	5.8	5.9	7.9	6.6	4.9	3.2
側壁 44	-1.7	-3.3	-3.5	-2.4	-0.9	0.6	1.4	1.7	3.1	3.3	3.1	0.1
床面 48	-1.1	-5.4	-2.8	-3.0	-1.0	1.6	2.2	2.3	4.1	4.2	3.0	0.3
湿度 50	98.6	79.2	73.4	76.7	89.0	96.1	93.5	93.1	93.2	93.8	94.6	81.8

表17

人工永久凍土低温貯蔵庫の温度 (°C), 湿度 (%) の月平均値 (1988-89年)

測定地点	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
東壁側部地盤													
GL-LINE No24	0.5	-0.4	-4.7	-6.4	-3.7	-1.4	-0.7	-0.2	0.5	2.2	2.3	1.8	-0.9
25	0.3	-0.2	-5.1	-7.3	-4.4	-1.8	-1.1	-0.6	-0.2	0.0	0.8	0.9	-1.6
28	-0.1	-0.2	-2.6	-5.1	-3.8	-2.0	-1.4	-1.0	-0.9	-0.8	-0.5	-0.3	-1.6
庫底 30	-0.3	-0.7	-3.0	-4.9	-3.9	-2.0	-1.3	-0.9	-0.8	-0.8	-0.5	-0.4	-1.6
直管型パイプ													
フィン No23	1.1	-2.5	-5.6	-4.9	0.7	5.3	9.8	12.6	18.7	21.0	15.8	10.4	6.9
GL-LINE 26	0.0	-0.7	-6.3	-9.0	-5.6	-2.6	-1.5	-1.0	-0.4	-0.4	-0.2	-0.1	-2.3
27	-0.2	-2.0	-6.2	-7.9	-4.7	-2.2	-1.5	-1.1	-0.8	-0.8	-0.5	-0.3	-2.4
先端部 29	-0.2	-2.3	-6.2	-7.4	-4.6	-2.3	-1.5	-1.0	-0.9	-0.9	-0.6	-0.5	-2.4
南壁側部地盤													
GL-LINE No 2	0.7	-0.8	-5.0	-6.0	-3.3	-1.2	-0.3	1.0	2.6	3.7	3.1	2.5	-0.3
4	0.2	-0.2	-5.9	-8.4	-5.6	-2.5	-1.5	-0.9	-0.6	-0.2	0.2	0.3	-2.1
6	-0.3	-0.9	-6.6	-9.1	-6.1	-2.8	-1.8	-1.3	-1.1	-1.0	-0.6	-0.5	-2.7
8	-0.3	-0.7	-3.4	-5.5	-4.1	-2.1	-1.4	-1.1	-1.0	-0.9	-0.6	-0.5	-1.8
9	-0.2	-0.2	-1.9	-4.1	-3.5	-1.9	-1.4	-1.1	-1.0	-0.9	-0.6	-0.5	-1.4
L字型パイプ													
フィン No 1	1.1	-2.3	-5.6	-5.0	0.5	5.2	9.6	12.3	18.6	20.8	15.7	10.3	6.8
GL-LINE 3	0.1	-1.3	-5.7	-6.8	-3.7	-1.4	-0.6	0.0	1.5	2.8	2.5	1.9	-0.9
5	-0.2	-1.2	-6.9	-9.3	-6.2	-2.8	-1.7	-1.2	-0.9	-0.8	-0.4	-0.2	-2.7
7	-0.6	-1.5	-5.4	-7.2	-4.8	-2.3	-1.5	-1.2	-1.0	-0.9	-0.6	-0.5	-2.3
傾斜部 10	-0.3	-2.0	-6.2	-8.1	-6.1	-3.2	-1.9	-1.1	-0.8	-0.8	-0.4	-0.2	-2.6
11	-0.5	-2.3	-7.8	-9.4	-6.8	-3.5	-2.1	-1.4	-1.1	-1.0	-0.7	-0.6	-3.1
12	-0.6	-2.4	-6.3	-8.6	-6.2	-3.0	-1.7	-1.0	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-2.7
先端部 16	-0.4	-2.2	-7.5	-9.1	-6.7	-3.6	-2.1	-1.3	-1.0	-1.0	-0.7	-0.5	-3.0
底部地盤													
庫底 30cm	0.7	0.2	0.0	-2.8	-4.3	-2.6	-1.5	-0.9	-0.7	-0.7	-0.4	-0.2	-1.1
70cm	0.0	-1.2	-6.0	-8.0	-6.3	-3.4	-2.0	-1.3	-1.0	-1.0	-0.7	-0.5	-2.6
盛土表面													
断熱材 外側	1.6	-1.6	-5.2	-2.9	0.9	7.2	11.1	13.9	19.3	22.0	16.4	11.2	7.8
内側	1.5	0.1	-2.2	-4.6	-2.0	0.2	0.7	2.4	5.5	8.8	8.0	6.4	2.1
切土斜面													
断熱材 外側	6.2	5.2	4.8	4.3	3.8	3.3	3.4	4.0	5.6	5.7	7.0	8.2	5.1
内側	3.0	2.3	2.1	1.8	1.4	1.1	1.1	1.3	2.0	2.2	2.7	3.5	2.0
掘削底面													
断熱材 外側	4.6	5.5	1.6	-1.0	-0.3	1.6	2.8	3.1	3.8	3.3	3.7	2.9	2.6
内側	0.2	0.1	-5.2	-8.2	-6.0	-2.8	-1.3	-0.7	-0.4	-0.4	-0.2	0.0	-2.1
貯蔵庫内													
中 央	1.4	0.3	-0.4	-0.5	-0.5	0.4	1.3	1.9	3.5	4.9	4.2	3.2	1.6
天 井	1.6	0.0	0.8	1.0	4.5	2.9	4.9	5.7	8.4	9.6	7.1	5.1	4.3
東壁地上 3m	0.8	-0.3	-2.7	-3.4	-2.1	-0.8	0.5	1.9	3.3	4.4	3.3	2.5	0.6
西壁地上 3m	0.9	-0.4	-1.3	-1.1	0.7	1.4	2.5	2.9	4.6	5.6	4.5	3.3	2.0
東壁地上 1m	1.0	-0.3	-2.5	-3.8	-3.0	-1.3	-0.5	-0.1	1.7	3.7	3.2	2.4	0.0
西壁地上 1m	1.1	-0.2	-2.7	-3.2	-2.1	-0.8	0.3	1.7	3.2	4.4	3.4	2.5	0.6
床 面	1.2	0.0	0.0	-2.4	-4.2	-1.9	-0.9	-0.4	-0.4	0.8	3.1	2.8	-0.2
湿 度	97.9	99.9	97.2	93.7	89.8	90.4	88.4	90.2	88.6	88.5	92.9	99.9	93.1

表18

人工永久凍土低温貯蔵庫の温度(°C)、湿度(%)の月平均値(1989-90年)

測定地点	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
東壁側部地盤													
GL-LINE No24	0.6	-0.2	-6.3	-7.5	-3.9	-1.9	-1.0	-0.6	-0.3	0.3	1.4	1.3	-1.5
25	0.4	-0.2	-7.4	-9.1	-4.7	-2.4	-1.4	-0.9	-0.6	-0.3	-0.1	0.4	-2.2
28	-0.1	-0.5	-3.9	-7.4	-4.6	-2.7	-1.7	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-2.1
庫底	-0.1	-0.7	-4.2	-7.7	-4.8	-2.6	-1.5	-1.1	-0.9	-0.8	-0.6	-0.3	-2.1
直管型パイプ													
フィン No23	4.0	-1.4	-7.5	-3.4	2.6	7.8	15.0	18.7	20.0	22.1	17.2	11.2	8.9
GL-LINE 26	0.1	-0.6	-8.6	-11.5	-5.9	-3.1	-1.8	-1.3	-0.9	-0.5	-0.3	-0.2	-2.9
27	-0.1	-1.1	-7.0	-9.8	-5.4	-3.0	-1.8	-1.3	-1.0	-0.8	-0.5	-0.3	-2.7
先端部	-0.2	-1.9	-7.4	-9.6	-5.3	-2.9	-1.7	-1.2	-1.0	-0.9	-0.7	-0.6	-2.8
南壁側部地盤													
GL-LINE No 2	0.8	0.3	-4.2	-6.2	-3.0	-1.3	-0.5	0.0	0.9	2.0	2.4	2.2	-0.6
4	0.2	-0.1	-7.3	-11.0	-5.5	-2.9	-1.6	-1.1	-0.8	-0.5	-0.2	0.3	-2.5
6	-0.2	-1.0	-8.5	-12.1	-6.2	-3.4	-1.9	-1.4	-1.1	-1.0	-0.7	-0.1	-3.1
8	-0.2	-0.9	-5.0	-7.9	-4.7	-2.7	-1.7	-1.3	-1.1	-0.9	-0.7	-0.1	-2.3
9	-0.2	-0.4	-2.9	-6.3	-4.1	-2.5	-1.6	-1.3	-1.1	-1.0	-0.7	-0.2	-1.9
L字型パイプ													
フィン No 1	3.7	-3.1	-10.4	-6.1	-0.8	5.7	12.4	16.4	18.1	20.2	15.8	10.1	6.8
GL-LINE 3	0.5	-0.3	-5.3	-7.2	-3.5	-1.6	-0.8	-0.4	0.1	1.2	1.9	1.8	-1.1
5	-0.1	-1.5	-9.5	-12.2	-6.1	-3.2	-1.8	-1.3	-1.0	-0.8	-0.5	0.1	-3.2
7	-0.3	-2.0	-8.1	-9.9	-5.4	-2.9	-1.7	-1.3	-1.1	-0.9	-0.7	-0.1	-2.9
傾斜部	-0.1	-1.4	-7.5	-11.1	-5.8	-3.0	-1.7	-1.2	-0.9	-0.8	-0.6	-0.3	-2.9
11	-0.4	-3.3	-11.4	-13.1	-6.9	-3.6	-2.0	-1.4	-1.1	-1.0	-0.8	-0.4	-3.8
12	-0.3	-2.9	-10.0	-11.9	-6.4	-3.2	-1.6	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	-3.3
先端部	-0.3	-2.9	-10.8	-13.0	-6.8	-3.5	-1.9	-1.3	-1.0	-0.9	-0.7	-0.3	-3.6
底部地盤													
庫底 30cm	0.0	-0.1	-2.4	-7.9	-4.7	-2.4	-1.3	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	0.0	-1.8
70cm	-0.3	-2.0	-8.8	-11.9	-6.4	-3.3	-1.9	-1.3	-1.0	-0.9	-0.7	-0.3	-3.2
盛土表面													
断熱材 外側	4.1	-1.1	-7.1	-4.9	2.2	7.8	13.4	18.1	19.3	21.2	16.9	12.1	8.5
内側	2.9	0.4	-3.2	-6.7	-2.8	-0.3	1.4	3.9	6.4	9.5	9.4	7.3	2.4
切土斜面													
断熱材 外側	6.9	6.1	5.4	4.8	4.0	3.4	3.6	4.1	4.7	5.7	7.0	7.9	5.3
内側	3.1	2.7	2.4	1.9	1.3	0.9	0.9	1.1	1.5	1.9	2.5	2.7	1.9
掘削底面													
断熱材 外側	3.5	4.3	0.1	-2.5	-1.0	2.1	3.1	3.1	3.1	4.1	3.7	4.8	2.4
内側	0.2	-0.1	-7.7	-11.4	-6.1	-2.7	-1.2	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	0.0	-2.6
貯蔵庫内													
中 央	0.9	1.4	0.4	1.0	1.0	0.8	1.3	2.0	2.9	4.1	4.1	3.1	1.9
天 井	2.4	0.4	0.4	2.6	2.4	3.9	6.7	8.5	9.6	11.0	8.7	5.8	5.2
東壁地上 3m	0.9	0.7	-0.7	-2.3	-1.3	-0.6	0.4	1.4	2.3	3.4	3.5	2.6	0.9
西壁地上 3m	1.7	0.3	-1.7	-0.3	0.5	1.5	3.3	4.8	5.9	7.3	6.5	4.5	2.9
東壁地上 1m	0.8	0.8	-1.1	-2.5	-1.4	-0.6	0.3	1.2	1.9	2.9	3.1	2.4	0.7
西壁地上 1m	0.7	0.6	-3.3	-6.9	-4.2	-2.3	-1.2	-0.6	-0.3	0.5	1.6	1.5	-1.2
床 面	0.7	0.7	-0.1	-3.7	-1.6	-0.6	-0.2	0.1	0.3	0.5	1.1	1.3	-0.1
湿 度	94.9	98.4	92.1	75.8	84.7	92.4	94.8	94.0	92.2	90.7	93.2	95.3	91.5

表19

人工永久凍土低温貯蔵庫の温度 (°C), 湿度 (%) の月平均値 (1990-91年)

測定地点	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
東壁側部地盤													
GL-LINE No24	0.5	0.0	-1.5	-5.4	-4.2	-1.9	-0.8	-0.3	-0.2	-0.2	0.3	0.4	-1.1
25	0.2	-0.1	-2.1	-7.1	-5.3	-2.5	-1.2	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-1.6
28	-0.2	-0.4	-1.2	-4.7	-4.9	-2.6	-1.5	-1.0	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-1.6
庫底													
30	-0.1	-0.2	-1.6	-4.4	-4.5	-2.4	-1.2	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-1.4
直管型パイプ													
フィン No23	5.0	0.1	-2.4	-5.2	0.2	7.5	15.5	19.0	18.8	20.3	17.4	10.2	8.9
GL-LINE 26	-0.1	-0.5	-2.6	-8.9	-6.9	-3.2	-1.7	-1.0	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2	-2.2
27	-0.1	-0.5	-2.0	-7.6	-6.2	-3.1	-1.7	-1.2	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-2.0
先端部													
29	-0.6	-1.2	-3.7	-7.6	-6.1	-3.2	-1.9	-1.4	-1.2	-1.1	-0.9	-0.7	-2.5
南壁側部地盤													
GL-LINE No 2	1.2	0.6	-0.1	-3.9	-3.3	-1.1	-0.1	0.3	0.4	0.9	1.3	1.1	-0.2
4	0.4	0.4	-1.1	-7.2	-5.8	-2.4	-1.0	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	-1.4
6	0.1	-0.1	-2.4	-8.6	-6.9	-3.0	-1.4	-0.8	-0.5	-0.3	-0.1	0.0	-2.0
8	0.1	-0.2	-1.5	-5.0	-4.7	-2.3	-1.2	-0.7	-0.5	-0.4	-0.2	0.0	-1.4
9	-0.1	-0.1	-0.8	-3.4	-3.9	-2.2	-1.3	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-1.2
L字型パイプ													
フィン No 1	4.5	-0.6	-4.1	-7.7	-2.4	5.8	13.1	17.2	17.4	18.8	15.9	9.4	7.3
GL-LINE 3	0.9	0.2	-0.6	-4.9	-3.8	-1.4	-0.3	0.1	0.2	0.5	1.0	0.9	-0.6
5	0.2	-0.5	-2.8	-9.0	-6.7	-2.8	-1.3	-0.7	-0.4	-0.2	0.0	0.1	-2.0
7	0.0	-0.8	-3.0	-7.5	-5.7	-2.6	-1.2	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	0.0	-1.9
傾斜部													
10	-0.3	-1.0	-3.6	-8.2	-6.8	-3.5	-1.8	-1.0	-0.6	-0.4	-0.2	-0.1	-2.3
11	-0.4	-1.9	-5.8	-10.9	-8.0	-4.0	-2.1	-1.2	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-3.0
12	-0.3	-1.7	-4.5	-9.5	-7.2	-3.4	-1.5	-0.8	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-2.5
先端部													
16	-0.2	-1.3	-5.1	-10.1	-7.5	-3.9	-1.9	-0.9	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-2.7
底部地盤													
庫底 30cm	0.1	0.0	-0.7	-3.4	-4.6	-3.0	-1.3	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-1.2
70cm	-0.2	-0.9	-4.1	-8.6	-7.1	-3.9	-1.9	-1.1	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-2.5
盛土表面													
断熱材 外側	5.1	0.7	-2.1	-4.1	0.0	7.6	14.0	18.3	18.5	19.8	17.2	10.9	8.8
内側	3.6	0.8	-0.4	-4.3	-3.8	-0.5	1.5	4.8	7.3	9.3	9.2	6.7	2.9
切土斜面													
断熱材 外側	7.4	6.3	5.5	4.8	4.0	3.4	3.7	4.4	5.8	7.7	7.5	7.4	5.7
内側	2.7	2.4	2.1	1.7	1.3	0.9	1.0	1.2	1.4	2.0	2.2	2.5	1.8
掘削底面													
断熱材 外側	5.0	5.2	3.6	-1.4	-1.7	0.9	2.6	2.8	2.8	3.3	2.9	1.3	2.3
内側	0.1	0.1	-1.6	-8.0	-6.9	-3.2	-1.4	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-1.9
貯蔵庫内													
中央	1.7	1.2	0.5	0.1	0.3	0.7	1.5	2.1	2.3	2.4	2.5	1.4	1.4
天井	2.3	0.5	-0.3	1.3	2.8	4.6	7.4	9.3	9.2	9.7	8.2	4.7	5.0
東壁地上 3m	1.1	0.6	-0.4	-3.0	-3.0	-1.3	-0.1	0.2	0.9	1.4	1.6	1.1	-0.1
西壁地上 3m	1.9	0.5	-0.6	-1.4	-0.3	1.5	3.7	5.3	5.6	5.8	5.3	3.2	2.5
東壁地上 1m	1.1	0.6	-0.3	-2.4	-2.9	-1.4	-0.3	0.1	0.8	1.5	1.7	1.2	0.0
西壁地上 1m	1.0	0.5	-0.8	-4.4	-4.4	-2.2	-0.8	0.0	0.3	1.0	1.2	0.9	-0.6
床面	1.3	0.7	0.1	-3.2	-4.1	-2.1	-0.8	-0.3	0.5	0.9	1.0	1.7	-0.4
湿度	98.2	99.7	99.9	89.7	81.7	79.7	82.4	79.2	77.8	76.3	77.6	81.3	85.3

特集-3

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

土 谷 富士夫* 了 戒 公 利**

I. はじめに

北海道のように寒冷環境にある地域では、それをデメリットとしないためには寒冷環境を十分に認識し、既存の固定概念にこだわらない自然への対応が必要である。とくに、寒冷自然環境の特質を理解し、その地域社会の要請を組込む積極的な研究体制が作られることが急務である¹⁾。近年、このような状況のなかで、利雪・克雪、そして寒さの有効利用が叫ばれ始めている²⁾。なかでも農畜産物などの食糧貯蔵のため、エネルギーとして寒さの利用が期待され始めている^{3), 4)}。

冬期間の北海道は広域で土壌の凍結がみられる。このため、土壌凍結が時には凍結・凍上被害を誘発し、建物や道路、水路などに多大な破壊被害をもたらしている。被害は構造物ばかりでなく、作物、牧草、樹木等の冬枯れ被害の問題にもなっている⁵⁾。

こうした寒冷気候による自然災害として土壌凍結をとらえたとき、その防止あるいは抑制のために、莫大な対策の経費を使用せざるを得ないのが現状である。

しかし、一度凍結した土壌はコンクリート並みの強度を示すことから、人工的に土を凍結させて、軟弱な地盤を掘削する人工地盤凍結法があり、凍結土の利点を積極的に利用している⁶⁾。また、凍土は潜熱（水が氷に相変

化する時に発生する熱）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。

経費のかかる電力により冷凍機を動かす強制的冷却に対抗して、ここでは冬の寒さを冷熱エネルギー源として活用し、伝熱素子のヒートパイプを用いた人工凍結土の造成は、寒冷気候を有する北海道ならではの効果的な手法と考えられる。

II. 寒冷地域の寒さと凍土

冬の寒さを知るために、図-1 に世界の最寒月の月平均気温の分布図を示す⁷⁾。北半球では大陸上が最も低温になりやすい。とくにシベリア東北部が最低になりやすく、極寒といわれるベルホフヤンスクの1月の月平均気温は -48°C にも達し、 -67.8°C の世界最低気温を観測している。最近、この近くのオイミヤコンでは -70°C の新記録が出現している。しかし、今までの世界の最低気温となった東シベリアより低温の地域があり、1960年8月24日に、ソ連の南極のポストーク基地で -88.3°C を観測し、世界の最低気温を更新している⁸⁾。

日本の一番寒い所といえば、北海道の内陸部となる。1902（明治35）年1月25日に、旭川で -41.0°C を記録している。その翌日は帯広で -38.2°C を記録し、実に未曾有の寒波が北日本を襲い、日本の寒さの記録となった。

しかし、単に最低気温のみでは冬期間の低温を表すことはできないので、マイナスの日平均気温を加算した積算寒度（凍結指数とも呼ぶ）を用いると、冬期間の寒さを表現できる。図-2 に北海道の寒候期の積算寒度値の分布値を示す⁹⁾。これによると、十勝、網走および釧

Low Temperature Storage Room of Artificial Permafrost Using Heat Pipes.

* 帯広畜産大学畜産学部 (Fujio TSUCHIYA)

** 清水建設技術研究所 (Kimitoshi RYOKAI)

キーワード

地盤凍結、地温、潜熱伝達、貯蔵施設、自然環境の保全、永久凍土、ヒートパイプ

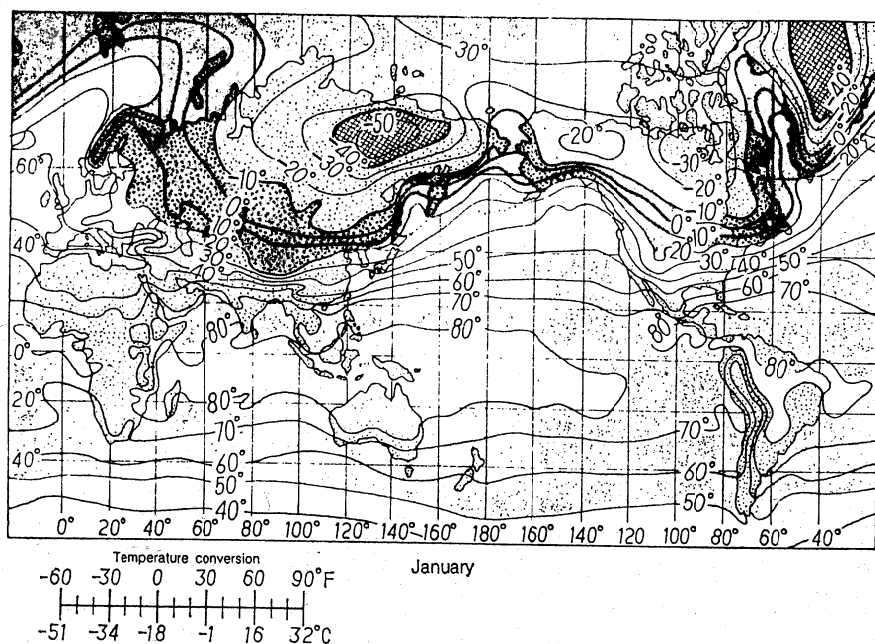


図-1 世界の1月の平均気温(°F)

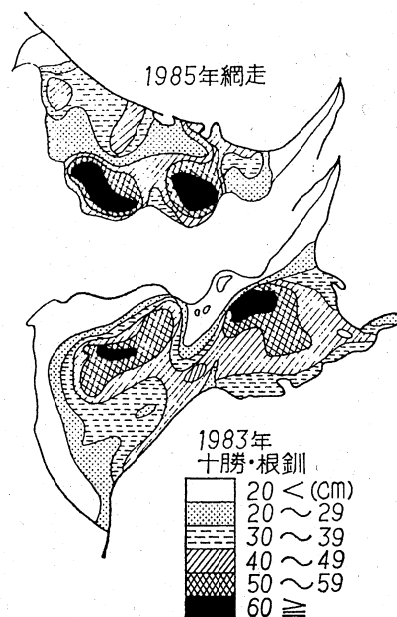


図-3 北海道東部の農地における積雪下の土壌凍結分布

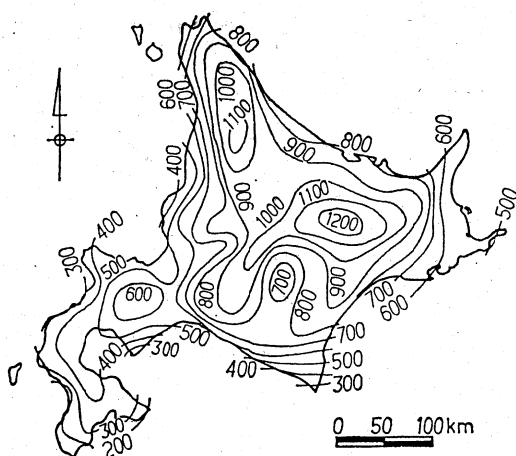


図-2 北海道の積算寒度分布図 (1975年の例)

路の内陸部が最も寒冷な地域であることがわかる。

ところで、永久凍土とは、「寒さのため凍った土が永久に融けない状態の土」の意味であるが、Permafrostと英語では呼ばれており、1945年に、permanently frozen groundを略して名付けられた。この言葉の定義は、「少なくとも相続く2つの冬とその間の1年を含めた期間より長い間、零度以下の温度を持つ土または岩における温度条件」となっている¹⁰⁾。

永久凍土は、世界的にシベリア、アラスカ、カナダ北部、中国奥地、モンゴル等に広く分布し、その面積は地球上の陸地の14%にも及んでいる。日本では、富士山の山頂、大雪山周辺、十勝三股、糠平の一部でごくわずかに発見されている。ソビエトやカナダ北部の部落では、この永久凍土の丘にトンネルを掘って、天然の冷凍庫に

利用している一例が報告されている¹¹⁾。

年平均気温がプラスの北海道では永久凍土はできないが、凍土は冬期間に形成され、春季に融解して消失する。すなわち、季節的凍土と呼ばれる。北海道の最深の土壌凍結深さの分布をみると、道東の内陸部が最も深くまで土壌が凍結する地域である¹²⁾。しかし、実際には積雪があるために凍結は抑制され、これより小さくなる。図-3は、著者らが測定した積雪下における道東地域の凍結深さの分布を示す¹³⁾。寒冷で積雪の比較的小さい内陸部に深い凍結地帯が出現している。

III. 新素材としてのヒートパイプ

ヒートパイプ(heat pipe)の源流をさかのぼると、1942年、米国オハイオ州にあるG. M.社のR. S. Gauglerが発案して特許出願したHeat Transfer Deviceが文献第1号である¹⁴⁾。1963年に、G. M. Groverが最初にHeat Pipeという名称を使用し、人工衛星用のヒートパイプの研究を行った。そして、1968年に打ち上げられた人工衛星に、搭載電子通信機の温度制御として、2本のヒートパイプが使用され成功に至った。以後、パイプの理論解析は大きく進展し、米国に続いて、イギリス、イタリアで原子炉に使用できる高温用パイプが研究された。

以上のように、初期のヒートパイプは人工衛星、宇宙船あるいは熱電子発電機へ利用されたが、1970年代になって産業機器の放熱と均熱用に用いられた。現在は、電気装置からの放熱、金属の冷却、空調、熱交換機、均熱炉その他家庭用品などの多方面にわたる実用化および開

た後、その凍結した土層内に農作物を長期的に貯蔵できることが判明した¹⁷⁾。しかし、単に自然条件のみで完全に土壌を凍結させても、その凍結の深さはせいぜい1m程度であるため、その貯蔵量は限られる。安定して市場に出荷できる量を確保するためには凍結土層を約4mまで増大させる必要があり、そのためには、ヒートパイプの利用は不可欠である¹⁸⁾。

北海道大学低温科学研究所と共に1984年から、ヒートパイプの土壌凍結効果の現地試験と調査を続けてきた¹⁹⁾結果、ヒートパイプは厳寒な冬の寒冷気温のもとで、作動液圧、パイプ内の構造などの改良により、土中深くまで凍結できることが判明した。そこで、1987年12月に帯広畜産大学の構内に、小型の低温貯蔵庫のモデルプラントを構築し、性能試験を開始した(写真-1)。

この低温貯蔵庫モデルプラントの特徴を述べると、

① 地面に埋設されたヒートパイプは、地中から熱を吸収し地上のフィンから放熱して、土壌温度を 0°C 以下に低下させる。

② 土壌水は冷却され氷となってその場に保存され、夏期になって外気温が上昇しても、ヒートパイプの熱ダイオード性により、暖かい熱は地中に伝達されない。

③ 冬期間に形成された凍結土層は断熱材に取囲まれているため容易には融けず、低温状態が持続され、その内部の貯蔵物質は低温保存される。

④ 自然冷気を利用するので電気やその他の動力を一切必要としないため従来の冷蔵庫と大きな差があり、ランニングコストを必要としない省エネルギータイプの低温貯蔵庫である。

⑤ 氷の潜熱を使用するため、貯蔵温度と湿度はほぼ一定に保持される。極めて簡単な構造であることから、貯蔵庫の耐久年数は30年以上と考えられる。

貯蔵庫の構造は、図-5に示すように貯蔵空間からなり、その寸法は、幅3.6m、奥行き6.0m、高さは約3.6mである(床面積 20m^2)。写真-2に示すように、貯蔵室は鉄骨構造、土圧と凍上圧に対抗するジオテキスタイル不織物(テプサーSR1)で造られている。さらに、地盤の肌落ちを防ぐため、不織布の外に織物(クラフト土木シート)を挿入した。屋根は、厚さ25mmの木毛セメント板、100mmの断熱材(カネライトフォームF1)および防水シートの順に構成されている。

貯蔵空間を囲む形で、厚さ約2mの凍土が構築されるように、216本のヒートパイプが50cm間隔で4列になるように敷設した。パイプは、直径46mmのSUSコルゲートのステンレス管(藤倉電線製)からなる。地上に約2.4mほど突き出たヒートパイプの上部には凝縮

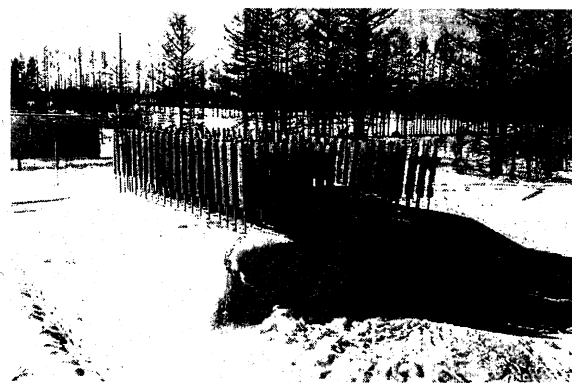


写真-1 人工永久凍土の低温貯蔵庫モデルプラント
(帯広畜産大学構内)

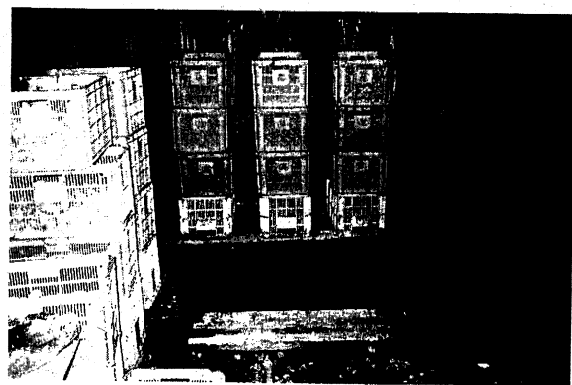


写真-2 低温貯蔵庫内部の鉄骨とセンサー

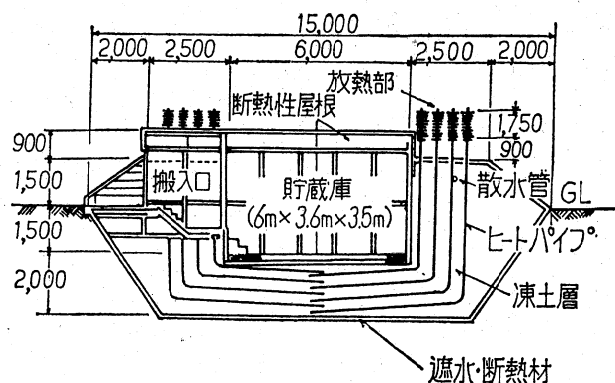


図-5 永久凍土低温貯蔵庫の構造 (帯広畜産大学構内)
部としてアルミ製フィンが、大きさ $20 \times 20\text{cm}$ の正方形が1cmピッチで170枚取付けられている。

凍土、パイプおよび庫内温度の測定は、C-C熱電対を使用し、温度計測用の小型データロガーとパーソナルコンピュータを使用し、毎日3時間ごとに測定を行った。

ここに使用したヒートパイプは直管型とL字型の2種があり、作動液フロンR-22が充填されている。直管型ヒートパイプの充填率は15%で十分であるが、L字型ではパイプ周囲の冷却効果を均等にするため、80%の充填率が必要であることが判明した。ヒートパイプの効率をみると、気温の低下に伴ってパイプ先端部の温度も低下

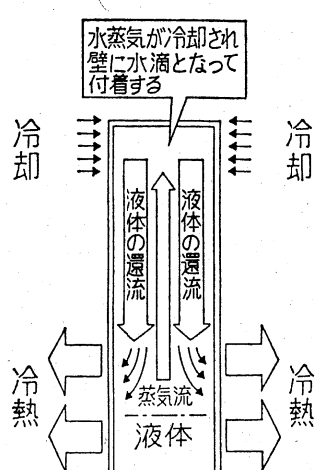


図-4 ヒートパイプの原理と構造

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のと同じように、蒸発部から凝縮部へ熱を輸送するように見える。

蒸発—凝縮はごく小さな温度差でも起こり、冷却部で凝縮した液体は、ウィックと呼ばれる構造を持つ毛管現象によって凝縮液を加熱部に戻すことができる。重力の場では、上部を冷却部に、下部を加熱部という状態にすると、効率よく作動し、このサイクルが無限に継続される。

ヒートパイプの構成材料を表-1に示す。また、作動

表-1 ヒートパイプの構成材料

動作液	水、メチルアルコール、エチルアルコール、アセトン、フロン11、ナトリウム、カリウム、リチウムなど
ウィック材	金属性網（銅、ニッケル、ステンレス）、焼結合金など
密閉容器	銅、ステンレス鋼、ニッケル、タングステン、モリブデンなど

表-2 ヒートパイプの作動液と使用温度範囲

動作液	融点[°C]	沸点*[°C]	使用温度範囲[°C]	温度領域
ヘリウム	-272	-269	-271~-269	極低温
窒素	-210	-196	-203~-160	
フロン11	-78	-33	-60~100	
フロン113	-111	24	-40~120	常温
アセトン	-95	57	0~120	
メチルアルコール	-98	64	10~130	
エチルアルコール	-112	78	0~130	
水	0	100	30~200	
サーメックス	12	257	150~395	高温
水銀	-39	361	250~650	
セシウム	29	670	450~900	
カリウム	62	774	500~1,000	
ナトリウム	98	892	600~1,200	
リチウム	179	1,340	1,000~1,800	
銀	960	2,212	1,800~2,300	

* 大気圧での物性値を示す。

発化が行われている。

ヒートパイプの原理を説明すると、図-4に示すように、密閉容器のなかに封じ込まれた液体が加熱されることにより、蒸発して気体となり容器内に充満する。このとき、他方を冷却す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潜熱が液体に吸収され、冷却部ではその熱が放出されるの

液体は現在使用されているもので、その主な作動液と使用温度範囲を表-2に示す。パイプ材と作動液体との適合性があり、パイプ材との融点が使用温度以上であると、腐食の発生や不凝縮ガスの発生により、作動液体が変質して循環の障害になったり、圧力上昇の危険が生じる。

IV. ヒートパイプの利点と用途

ヒートパイプはこれまでの固体熱伝導に見られない利点があるので、これを以下に要約する。

①優れた熱伝導性：金属に比べて、数百倍もの多量の熱を輸送することができる。

②速い熱応答性：ヒートパイプ内の蒸気は音速に近いスピードで移動する。

③高い温度均一性：温度分布を一様にさせる機能を持っている。

④大きな設計自由度：必ずしも円管ではなく、任意の形状でもよく、パイプの外側にフィン等が取り付けられる。

⑤メンテナンスの不要：電気的または機械的な駆動部を必要としないので無動力で作動する。

⑥軽量コンパクト：パイプの中が中空であるため重量が軽い。

ヒートパイプの寒冷地域での使用例を述べるなら、冬の降雪による着氷、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¹⁶⁾。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ている。この点、建設費は割高でも、自然資源の地熱などの利用システムの開発が期待されている。

とくに土壤凍結用にヒートパイプを使用した実例では、アラスカパイプライン事業がある¹⁵⁾。米国のアラスカ州を全長1,280 kmの石油パイプが、1968年に計画され、約60億ドルをかけて、1977年に完成した。北極海に接するブルドー湾から、永久凍土地帯を横切って、太平洋岸の不凍港バルデールまで、60°Cに加熱した原油の圧送を開始した。このとき、この熱が地面に伝達されると永久凍土は融解し、パイプの支柱が沈下したり、その後の凍結による凍上で破壊が予想され、また、永久凍土の融解は、ツンドラに生えるコケ類が死滅することともなり、これを主食とするトナカイの滅亡を導くものであった。そこで、永久凍土の融解を防止するため、垂直支持杭の内側にヒートパイプを取付け、土壤を冷却し加熱した熱を打ち消す処置がなされた。

V. 人工永久凍土の低温貯蔵庫

冬期間の寒冷気候を利用し、土壤を深くまで凍結させ

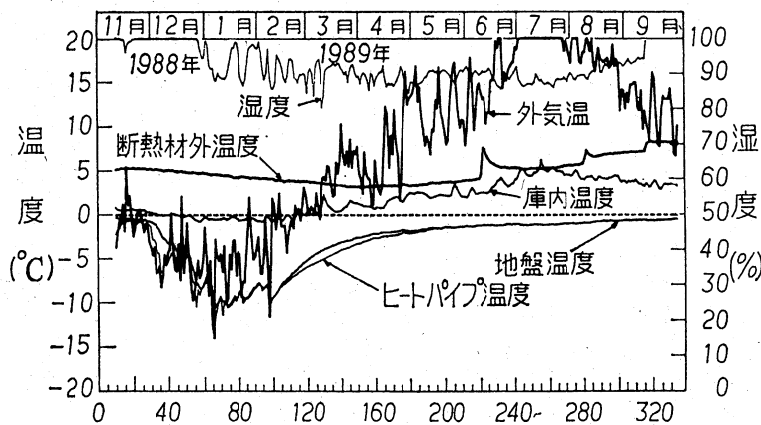


図-6 貯蔵庫の室温、湿度、地盤およびパイプの温度変化

し、気温の0.77～0.80倍に達することが判明した²⁰⁾。地盤内途中のパイプ表面と先端部での温度差がほとんどなく、5°Cの温度差で500 Wの熱輸送力があり、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。

これによって、2 m以上の厚さをもつ凍土が形成された。L型パイプは本格的寒波の到来した2月で急激な温度低下をもたらし、庫内底部の地温は-15°Cにまで達した。この冬の積算寒度は1020°C・日であったことから、平均的な冬の寒さであった。地盤温度は位置によって差異はあるが、ヒートパイプの冷却効果は予想以上に大きく、1月初旬に庫内温度は-4°Cにも低下したため、1000 Wのヒーターを用いて、庫内温度をコントロールせざるを得なかった。4月にはいって気温の上昇とともに、庫内や凍土の温度は徐々に上昇し、8月の最暖月でも庫内温度は約5°C以下に保たれた。10月になっても、地盤内部はマイナスの温度を示したことから、人工の永久凍土が完全に構築されたことが実証された²¹⁾。1988年の秋に、冬期間の庫内温度の低下を防ぐため、床面を砂利20 cmでかさ上げして水深20 cmの水を張るとともに、庫内の壁に約20 kgの水コンテナを4段に積上げた。天井

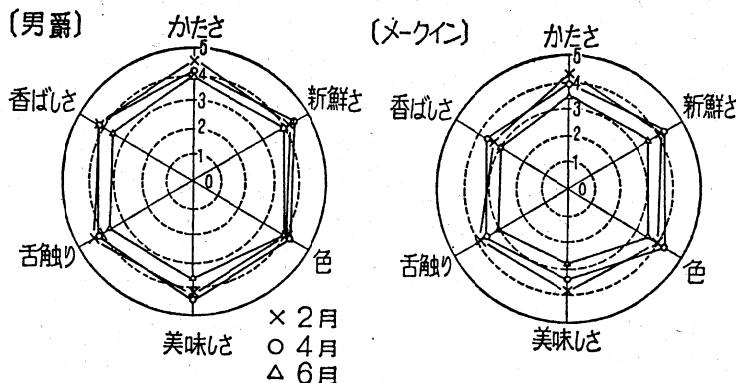


図-7 貯蔵バレイショの試食アンケートによる経時変化

から吊下げた断熱カーテンで貯蔵空間を隔離した。そして、4 tのバレイショは10月18日に、コンテナに約20 kgずつ入れて貯蔵を開始した。図-6は、1988年から89年の温度変化を示す。この冬は積算寒度は544°C・日と、かつてない暖かな冬であった。しかし、2年次は永久凍土が既に内部に造成されているため、解けた地盤を凍結するだけなので、十分な寒さであり、側面からの冷却効果を抑制するために作られた氷は、庫内のバレイショの貯蔵をさらに良好とし、湿度の低下を防ぐ結果となった。

VI. 貯蔵バレイショの品質調査と試験

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を少なくすることである。貯蔵されたバレイショの品質を評価するため、主婦を対象に、外観、味覚、香味について2-カ月ごとに試食アンケート調査を行った²²⁾。試食方法はふかしイモとし、評価基準は、一般に市販されているバレイショを普通3とした5点満点法(最良は5)を用いた。その結果を、男爵とメークインの2種に分けて、図-7のレーダチャートで示す。

2～6月までの結果は、いずれも普通以上の評価を得た。男爵の方がメークインよりよい成績を示し、かたさ、新鮮さ、色に関して好評であった。美味しさなどの味覚は、6月になると多少低下する傾向にあった。

次に、貯蔵庫内のバレイショの重量を1カ月ごとに測定し、重量減耗率を求め、その変化を図-8に示した。5月19日現在、貯蔵期間220日でメークイン2.2%、男爵で1.4%と十分な商品価値(5%以下)があることを示した。バレイショの成分変化を知るため、糖分含量は高速液体クロマトグラフで、デンプン含量はライマン法で、そ

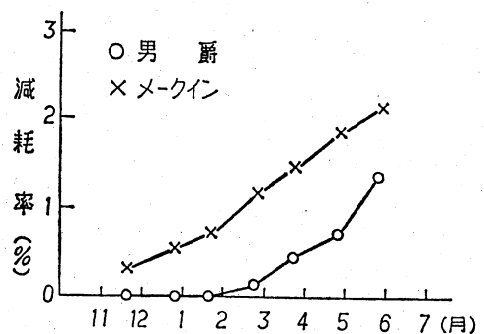


図-8 貯蔵バレイショの減耗率の変化

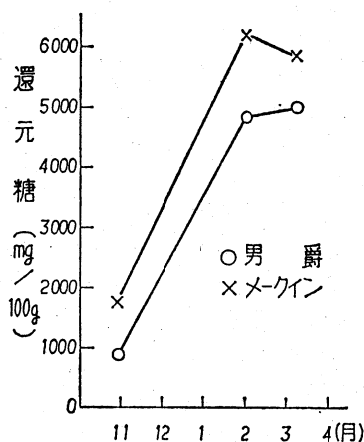


図-9 バレイショ内の還元糖の経時変化

して含水率は乾燥法でおのおのの測定を行った。貯蔵期間でも最も大きく変化したのは、糖分含量であり、図-9に示すように、2月の低温期までに4~5倍に増加することが判明した。このことは、アンケート調査の結果でも甘味が非常に増すことが述べられており、収穫時のバレイショより付加的価値が増すことが明確となった。他方、デンプン含量は多少減少する傾向にあり、含水率は増加する傾向にあった。これは、高湿度で貯蔵されるため、一般の電気冷蔵庫のように脱水されないことを示す。2年目を経過し、以上の結果から、永久凍土の低温貯蔵庫を利用したバレイショの貯蔵は十分に実用化できるシステムであることが立証された。現在は、バレイショ以外の野菜類の貯蔵試験を行っており、貯蔵庫の内部改良、ヒートパイプの削減コントロールなどの試験を継続している。さらに、1989年12月には網走に、同様なシステムを持つ貯蔵面積 36 m² の新たな実証プラントが完成し、同様な試験が開始された。

VII. これからの展望と課題

近年、農業施設に対するエネルギー節減が叫ばれているなかで、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ている。また、地球環境の保全の問題が大きくクローズアップされるなかで、凍土の冷熱を利用するシステムは、食糧備蓄問題や農畜産物のコスト低減と価格安定に大きく寄与するものと考えられる。

ヒートパイプに使用されているフロン R-22 (HCF 22) は、オゾン層に与える影響が少ないことから、現在規制の対象から除外されているが、フロンに替わる作動液体としてアンモニア等でも十分であることと、密閉方式であるので今後の規制に対する不安はない。

このシステムは寒冷地域でなければ使用できず、積算

寒度 400°C・日以上の地域を考慮しており、ヒートパイプのコスト低減と効率化が今後の課題である。自然エネルギーを利用することから、突然の故障が全くない代わりに、微妙なコントロールが難しいことが課題である。

このように、寒冷地環境の特徴を十分に理解することとともに、これを地域社会に積極的に取り入れていくことも重要な課題である。なかでも、凍土に関する基礎的な理解を推し進めることにより、抑制栽培、軟弱地盤対策および人工スキー場などの多方面において、凍土を活用できると考えられる。

引用文献

- 1) 北海道大学放送教育委員会：低温とくらし、北海道大学図書刊行会，pp.1~16 (1985)
- 2) 土木学会：土木工学ハンドブック(第4版)，技報堂出版，pp.1967~1969 (1989)
- 3) 了戒公利ほか：人工永久凍土とその食糧用低温貯蔵庫への応用，日本冷凍協会論集，4(1)，pp.1~9 (1987)
- 4) 了戒公利ほか：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫，寒地技術シンポジウム論集，1986，pp.409~412 (1986)
- 5) Tsuchiya F. : Soil freezing and frost heaving effects on agricultural land in the eastern Hokkaido, International Symposium on Agricultural Technique for Cold Regions, 1st, pp.104~114 (1989)
- 6) 土質工学会編：土の凍結—その制御と応用—，土質工学会，pp.155~196 (1982)
- 7) Linsley R. K. Jr. ほか：Hydrology for engineers (3rd ed.)，McGraw-Hill，p.28 (1982)
- 8) 和達清夫：雨・風・寒暑の話，日本放送出版協会，pp.35~52 (1979)
- 9) 福田正巳ほか：北海道における昭和49~50年冬の積算寒度の分布，低温科学物理編，資料集，33，pp.85~91 (1975)
- 10) 木下誠一：永久凍土，古今書院，pp.127~135 (1980)
- 11) 木下誠一：雪と氷の話，技報堂出版，pp.231~236 (1988)
- 12) 福田正巳ほか：北海道内土壌凍結深分布，日本雪氷学会秋期講演予稿集，昭和50年度，p.281 (1975)
- 13) 小松輝行：アルファルファの冬枯れと刈り取り管理(最新飼料作物のすべて，吉田則人監修)，デイリーマン臨時増刊号，pp.78~88 (1985)
- 14) Dunn P.D. and D. A. Reay : Heat pipes, Pergamon Press, pp.1~7 (1976)
- 15) 山西哲夫ほか：ヒートパイプとその応用，オーム社，pp.180~183 (1980)
- 16) 池田義雄ほか：ユーザのためのヒートパイプ応用，学献社，pp.3~60 (1981)
- 17) 土谷富士夫：農地の土壌凍結の抑制と凍結保存，寒地技術シンポジウム論集，1985，pp.378~382 (1985)
- 18) 土谷富士夫ほか：冬の寒冷気候を利用した凍土の造成，保存，寒地技術シンポジウム論集，1986，pp.413~416 (1986)
- 19) 了戒公利ほか：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫(その2)，寒地技術シンポジウム論集，1987，pp.22~26 (1987)
- 20) Tsuchiya F., K. Ryoukai and M. Mochizuki : Utilization of heat pipes for artificial permafrost storage, International Symposium on Cold Region Heat Transfer, 2nd, pp.279~283 (1989)
- 21) 土谷富士夫ほか：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫(その3)，寒地技術シンポジウム論集，1988，pp.22~26 (1988)
- 22) 土谷富士夫ほか：永久凍土低温貯蔵庫の経時変化と貯蔵物質の品質，第38回農土学会北海道支部研究発表会講演，pp.78~81 (1989)

[1990. 5. 1. 受稿]

Artificial Permafrost Storage System Using Heat Pipes

Masami Fukuda, *¹ Fujio Tsuchiya, *² Kimitoshi Ryokai, *³
Shotaro Yoshida, Masataka Mochizuki and Koichi Mashiko

We have developed a heat pipe type artificial permafrost storage system by utilizing cold energy at winter time. At first, basic tests of forming frozen soil using a 8 m length corrugated heat pipe were carried out. Thereby, it was found that the temperatures of the heat pipe became uniform and the surrounding soil could be frozen uniformly.

In December 1987, an experimental plant for proof tests was constructed in Hokkaido. Around the storage facility, heat pipes were installed into the ground at the intervals of 0.5 meter and the condensing sections were installed in atmosphere. In winter of the year, frozen soil was smoothly formed. At the end of January, 2 m thick frozen soil layer was completed. Even in July, the soil temperature was kept about -1°C and the storeroom temperature was also kept about 3 to 4°C . The similar result was also obtained in the winter of 1988 to 1989 (freezing index: Approx. 550 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$). Moreover, it was found that the cold storage which uses heat pipes is sufficiently applicable since the temperature and humidity inside the storage can maintain the conditions necessary for storage of agricultural products.

1. Introduction

Recently some work has been carried out in order to utilize the natural cold energy of winter. As a cold energy source, cold air and snow can be applied. Snow, in addition to being used at ski slopes and winter carnivals, is also used as a source of cold energy for ice-houses (Himuro). The cold storage utilizing snow such as Himuro is not satisfied for a practical use because man power is necessary due to carrying snow into the chamber in every year. On the contrary, cold air is available everywhere, and is colder than snow. Therefore, it is preferable as the cold energy source. In addition, the heat pipe is the most suitable as the heat transfer element which transfers cold energy to the underground without power. Here, we have devised the technology in which the cold energy is stored for a long period to be used for the cold storage by producing the frozen soil in the ground with the outdoor cold energy in the winter using heat pipes.¹⁾

Nomenclature

A_c	: Inner area of condensing section of a heat pipe	(m^2)
A_e	: Inner area of evaporating section of a heat pipe	(m^2)
A_f	: Heat transfer area of fins	(m^2)
A_s	: Area of frozen soil	(m^2)

C_a	: Specific heat of chilling air at constant volume	($\text{J}/\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
D_f	: Number of days	(day)
d_{hp}	: Diameter of a heat pipe	(m)
d_s	: Diameter of frozen soil	(m)
L	: Latent heat of the frozen soil	(J/kg)
L_c	: Length of condensing section of a heat pipe	(m)
M	: Freezing index	($^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$)
Q_{hp}	: Cold storage heat quantity transferred by heat pipes	(J)
Q_o	: Total cold heat quantity of the cold storage for a year	(J)
Q_1	: Cold heat quantity for freezing soil	(J)
Q_2	: Heat loss to the surrounding	(J)
Q_3	: Outlet heat quantity of store products	(J)
q	: Heat transfer rate of a heat pipe	(W)
R_{hp}	: Thermal resistance of a heat pipe	($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
R_{fa}	: Thermal resistance between fins and atmosphere	($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
R_{hs}	: Thermal resistance between a laid heat pipe and the soil	($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
r	: Radius of frozen soil	(m)
S_a	: The section of flow channel	(m^2)
T_i	: Atmospheric temperature	($^{\circ}\text{C}$)
T_o	: Outlet temperature of chilling air	($^{\circ}\text{C}$)
T_2	: Inlet temperature of chilling air	($^{\circ}\text{C}$)
T_f	: Temperature of the frozen soil	($^{\circ}\text{C}$)

*¹ Hokkaido University

*² Obihiro University

*³ Shimizu Corporation

- T_u : Temperature of the unfrozen soil ($^{\circ}\text{C}$)
 ΔT : Temperature difference between soil and atmosphere ($^{\circ}\text{C}$)
 V : Velocity of freezing front (m/s)
 V_a : Wind velocity of the chilling air (m/s)
 α_c : Coefficient of heat transfer between ambient air and fins ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 α_{hpc} : Coefficient of heat transfer of condensing section of heat pipe ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 α_{hpe} : Coefficient of heat transfer of evaporating section of heat pipe ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 λ_g : Thermal conductivity of the soil ($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 λ_{gf} : Thermal conductivity of the frozen soil ($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 λ_{gu} : Thermal conductivity of the unfrozen soil ($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 γ : Specific weight of the frozen soil (kg/m^3)
 ϕ_f : fin efficiency
 ψ : Filling ratio of working fluid against the volume of the evaporating section (%)
 ω : Water content ratio of the soil (%)

2. Principle and Characteristics

Fig. 1 shows the schematic principle of the artificial permafrost storage using heat pipes. The condensing section of the heat pipe is exposed to the atmosphere and the evaporating section is laid into the ground.

When the outdoor temperature is lowered below 0°C in winter, the heat pipe absorbs the heat from the ground and discharges it into the atmosphere via radiator. Consequently, the soil surrounding the heat pipe is cooled off and frozen.

When the atmospheric temperature is raised during spring to summer, the wickless type heat pipe shows the thermal diode characteristics (heat is not transferred from the top to the bottom), and the heat is not transferred from the atmosphere into the ground. In this way, frozen soil is kept all the year and the space

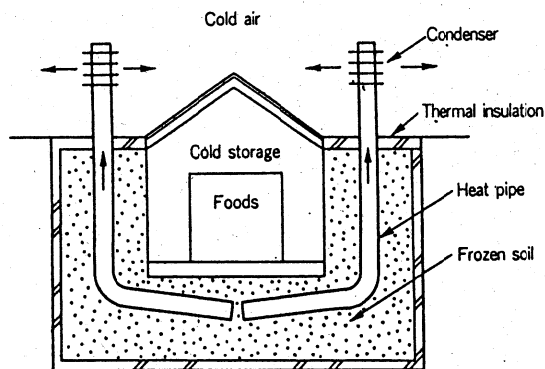


Fig. 1 Schematic Principle of the Cold Energy Storage Using Heat Pipes.

surrounded by such a frozen soil can be utilized as the artificial permafrost storage facility.

The feature of this system is that the natural cold air is utilized via heat pipes and the operation power is hardly needed.

Furthermore, the latent heat of frozen soil is utilized and the storage temperature can be kept constant over a long period. What is more, this system can be more suitably applied in such an area, where atmospheric temperature is lower.

Fig. 2 shows the principle of natural cold energy storage, and the heat transfer rate of heat pipe versus the changing atmospheric temperature. When the atmospheric temperature is T_i ($T_i \leq 0^{\circ}\text{C}$), the heat transfer rate of heat pipe is defined to be q_i .

The storage cold heat quantity Q_{hp} transferred by heat pipes for a term of the D_i days, when the atmospheric temperature is T_i , is shown in the following equation.

$$Q_{hp} = 3600 \times 24 \times \sum (q_i \times D_i) \dots \dots \dots (1)$$

As shown in Fig. 2, if the atmospheric temperature increases over the soil temperature, the operation of heat pipes will naturally stop.

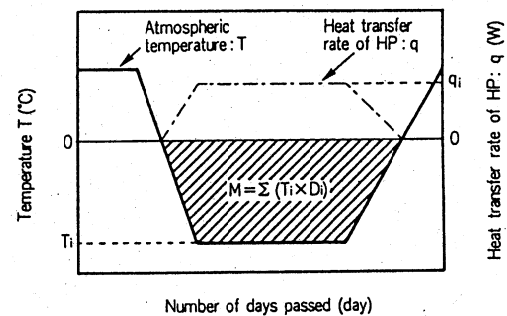


Fig. 2 Storage Method of Natural Cold Energy Using Heat Pipes.

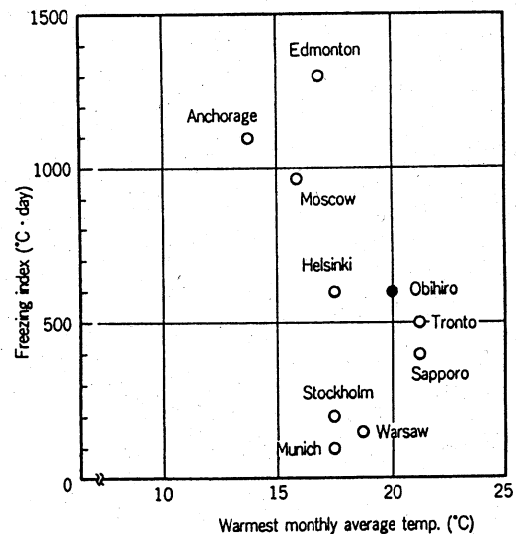


Fig. 3 Freezing Index.

This system can be more suitably applied in such an area, where the atmospheric temperature is lower.

As one of such index of coldness, the freezing index is used in general. The freezing index M is shown in equation (2). Where, T_i means the daily average temperature, where the temperature is below 0°C .

$$M = \sum (T_i \times D_i) \dots \dots \dots (2)$$

Fig. 3 shows the freezing index. Obihiro is located at the eastern area in Hokkaido and has a value of over $600^\circ\text{C} \cdot \text{day}$. This system will be more suitable in areas where the freezing index is higher than $400^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ and warmest monthly average temperature is relatively higher.

The total cold heat quantity which is necessary to the storage for a year Q_0 is given by the following equation (3).

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots \dots \dots (3)$$

Therefore, the cold heat quantity calculated from the freezing index should be more larger than Q_0 at least, as shown in following equation (4).

$$3600 \times 24 \times \sum (q_i \times D_i) \geq Q_0 \dots \dots \dots (4)$$

Heat transfer rate of a heat pipe q is shown in the following equation (5).

$$q = \Delta T / (R_{fa} + R_{hp} + R_{hs}) \dots \dots \dots (5)$$

And each thermal resistance is expressed by following equations.

$$R_{fa} = \frac{1}{\alpha_c \times A_f \times \phi_f} \dots \dots \dots (6)$$

$$R_{hp} = \frac{1}{\alpha_{hpc} \times A_c} + \frac{1}{\alpha_{hpe} \times A_e} \dots \dots \dots (7)$$

$$R_{hs} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_s \cdot L_c} \ln \frac{d_g}{d_{hp}} \dots \dots \dots (8)$$

By the way, the cold heat charged into the soil is equivalent to the heat transfer rate of a heat pipe as shown in equation (9)²⁾.

It is assumed that the component of soil is uniform and that the heat transferred from ground surface and the moving of water are ignored.

$$q = \lambda_s \cdot \frac{\partial T_f}{\partial r} \cdot A_r \dots \dots \dots (9)$$

At the face of freezing, the following boundary condition is formed.

$$\lambda_{gf} \cdot \frac{\partial T_f}{\partial r} - \lambda_{gu} \cdot \frac{\partial T_u}{\partial r} = L \cdot \gamma \cdot V \dots \dots \dots (10)$$

Design of the feasible artificial permafrost storage facility, which has a 2 m thick frozen layer was conducted on the condition of Obihiro, where the value of integral frigid degree is $600^\circ\text{C} \cdot \text{days}$.

As the result, the necessary heat transfer rate of a heat pipe which has a 8 m length of evaporating section was 300 watts at $\Delta T_{hp} = 3^\circ\text{C}$.

Evaporating section temperature of heat pipe $T_{hpe} = -5^\circ\text{C}$

Temperature difference between evaporating section and condensing section $\Delta T_{hp} = 3^\circ\text{C}$

Thermal resistance of a heat pipe $R_{hp} = 0.01^\circ\text{C/W}$

3. Basic Experiment of Forming Frozen Soil Using a Heat Pipe

3.1 Experimental Apparatus

The basic experiment of forming frozen soil using a heat pipe was carried out in order to examine how the soil form in such a following arrangement.

Fig. 4 indicates the experimental apparatus. The heat pipe is composed of corrugated container, having the outer diameter of 46 mm and evaporating section of 8 meter in length. It was laid at 5 degree inclination, because a heat pipe must be laid at inclination under the bottom of the storage, as shown in Fig. 1. And the heat pipe was buried into the center of 500 mm width, 500 mm depth soil.

Soil was surrounded by 100 mm thick insulation. The 1.7 m condensing section of a heat pipe was set in the chilling air room and the chilling was made by use of a refrigerator machine. The condensing section of the heat pipe was provided with plate fins, so that the heat transfer area A_c may become to 13.6m^2 . The area is by about 10 times as large as that of the evaporating section. As the working fluid, Freon R-22, was used.

3.2 Results of Experiments

Fig. 5 shows the result of the experiments, in which

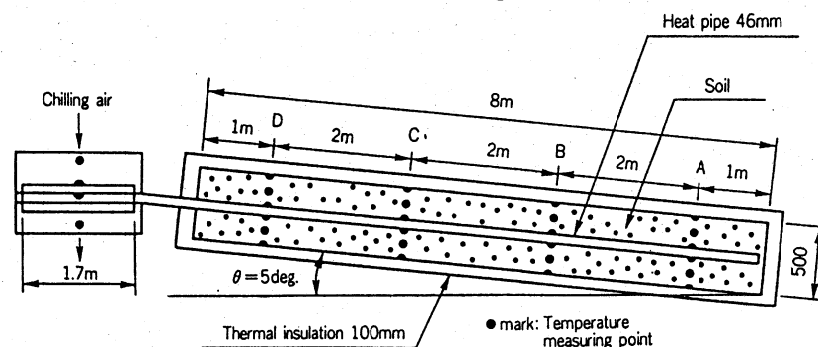


Fig. 4 Basic Experimental Device for Tundra Formations.

the condensing section of the heat pipe was cooled at the wind velocity of 1.5m/s and the chilling temperature was dropped from -10°C to -20°C and -30°C . When the working fluid was 15% at -10°C chilling air, the lower part temperatures of the heat pipe circumferential direction together with each 4 points to longitudinal direction were -4 to -5°C , while the temperatures at the upper part were 3 to 4°C . Thus, a temperature difference was created to the circumferential direction. The soil at the upper part of the heat pipe was not frozen in this case.

Based on the result of the preliminary test, the filling ratio of the working fluid was increased to 80%. As the result, the temperature at the upper and lower sections to heat pipe circumferential direction became to -5 to -6°C . Consequently, the surrounding soil could be frozen uniformly. Nine days after the start of cooling, a 500 mm frozen layer had formed in the soil around the heat pipe.

In the case of the filling ratio $\psi=80\%$, the temperature of the lower and upper parts at the evaporating section was lowered in proportion to the chilling air temperature even when the chilling air temperature was reduced to -30°C .

From the above, it was disclosed that if the temperature difference to the circumferential direction of such corrugate type heat pipe, as has the long evaporating section of 8 meters and the large outer diameter of 46 mm, is to be eliminated, the increase of filled amount is effective.

Generally, wicks are used in order to eliminate temperature difference in the circumferential direction.

Table 1. Thermal Resistance ($T_a = -10^{\circ}\text{C}$)

The filling ratio	ΔT_{hp} ($^{\circ}\text{C}$)	q (W)	R ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
15%	7°C	290	0.024
80%	5°C	500	0.010

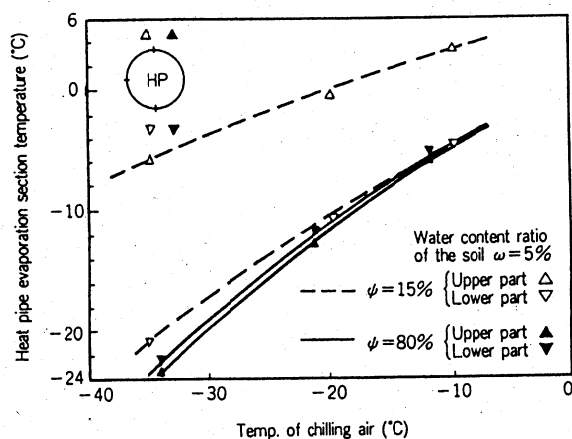


Fig. 5 Temperature of the Heat Pipe Evaporation Section to the Chilling Air Temperature.

However, since pliable fiber wicks closely connected to the corrugated shape were not economical, we could not employ wicks here, and instead increased the filling ratio.

Table 1 shows the heat transfer rate q and the thermal resistance R when the temperature of the chilling air was -10°C , where the thermal resistance is given by the equation (11).

$$R = \Delta T_{hp} / q \quad (11)$$

ΔT_{hp} is the temperature difference between the evaporating section and condensing section of the heat pipe.

The heat transfer rate q (watts) was calculated by the equation (12).

$$q = (T_1 - T_2) \times V_a \times S_a \times C_a \quad (12)$$

Fig. 6 shows the relation between the thermal resistance R and the heat transfer rate q .

When the thermal resistance at the filling ratio $\psi=80\%$ is compared with the case of $\psi=15\%$, it is indicated there that the thermal resistance of a heat pipe was reduced to about $1/3$.

This seems attributable to the fact that in the case of $\psi=15\%$, the working fluid is evaporated only at the lower part of the circumferential direction of the evaporator and not at the whole surface.

On the contrary, in the case of $\psi=80\%$, the evaporating section is realized at the whole surface and no temperature difference is created between the upper and lower parts to the evaporator circumferential direction.

Since the working fluid Freon R-22 has a small temperature difference ΔT relative to the change in pressure difference ΔP at around -10°C , we believe that the thermal resistance of evaporating section is low and has little effect even if the working fluid filled fully.

In case of the heat transfer rate of over 1,000 watts, the thermal resistance is approximately constant, suggesting that the heat transfer limit is not yet reached.

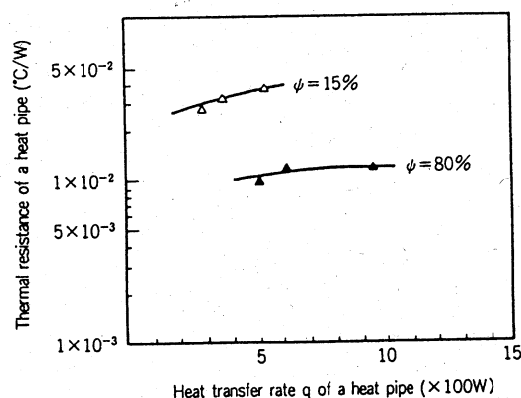


Fig. 6 Thermal Resistance of a Heat Pipe against the Filling Ratio of Working Fluid.

4. Proof Tests of Cold Storage Facility

4.1 Experimental Plant

In December 1987, an experimental plant was built at Obihiro city in Hokkaido. Fig. 7 shows the structure of the experimental plant. The dimensions of the storage facility was length 6 m, width 3.6 m, height 3.5 m. It was surrounded by 2 meter thick frozen soil layer. Furthermore, the outer surface of the frozen soil layer was processed to be waterproof and thermal insulated.

As the heat pipe, 216 pieces of corrugated type were installed, which had the outer diameter of 46 mm, and average length of 12 meters. They were installed at the intervals of 0.5 meters in 4 rows around the storage room. Fig. 8 shows the photograph of the experimental

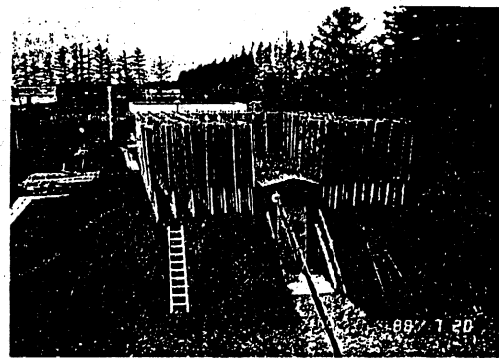


Fig. 8 A Photograph of the Experimental Plant of the Cold Storage.

plant of Artificial Permafrost Storage using heat pipes.

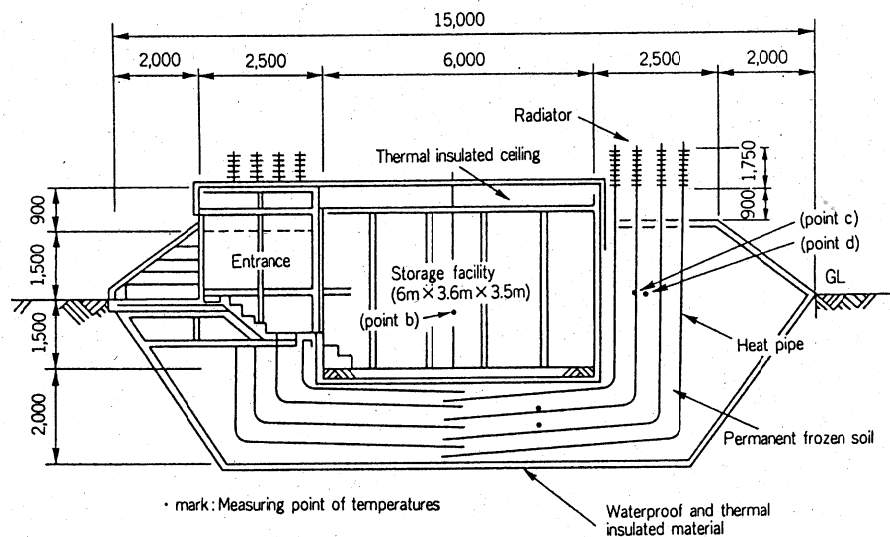


Fig. 7 The Structure of the Cold Storage for Proof Tests.

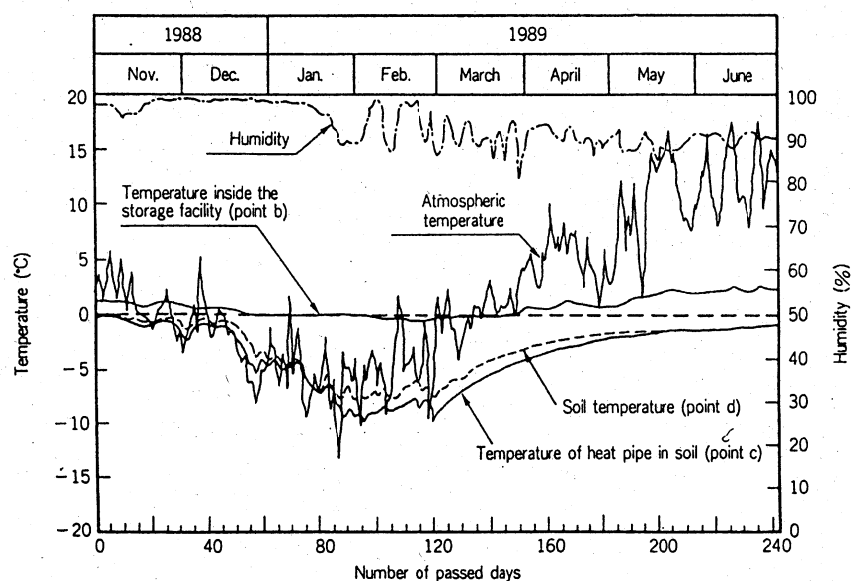


Fig. 9 Temperature Data of the Heat Pipe Type Artificial Permafrost Storage.

4.2 Results of Tests

After the completion of the storage facility, about 7 tons of agricultural products were put in the storage. While giving the thermal load, temperature changes were measured. The data from 1988 to 1989 is shown in Fig. 9. Like the first year of construction, the heat pipes also worked properly in this year. As the outdoor temperature dropped, the surface temperature of the heat pipe in the ground also dropped. The soil had been all frozen till the end of January, and it was approx. -10°C 0.5 m diameter around the heat pipe to produce 2 m thick frozen soil layer. Since it became colder in the first decade of February, water was filled into the floor (gravel layer) of the storage to increase the cold energy content through freezing in order to control the temperature. Moreover, since the test result of the previous year showed that the humidity in the winter sometimes dropped to approx. 70%, the containers filled the water were put in the storage in order to prevent the humidity from dropping. As the result, the humidity was kept at 85% or more.

Even though the temperature rose after March, the frozen soil layer remained. When the outdoor temperature was 15°C at the end of June, the frozen soil layer was -1°C and it was 3 to 4°C in the storage. Moreover, when the quality of the potatoes stored for the test was inspected, it was verified that potatoes tastes sweeter, as shown in Fig. 10.

5. Conclusion

- (1) From the results of these demonstration tests, we confirmed that the heat pipe type underground cold storage utilizing natural cold energy will be technically feasible.
- (2) It was found that when the filling ratio of the working fluid to the content volume of the evaporating section is 80%, evenly frozen soil in the circumferential direction of the inclined heat pipe can be formed.
- (3) Even though the weather varied, the temperature in the storage was maintained at 0 to 5°C throughout the year, and the humidity was maintained at 85% or more. Hereafter, it is planned to establish the technology which allows the accurate control of the temperature and humidity in the storage.

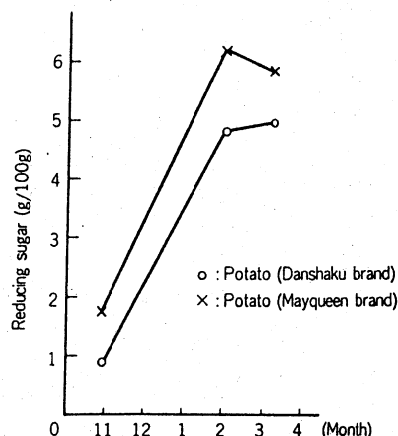


Fig. 10 Aging of Reducing Sugar.

Finally we add the opinion that this type cold storage for foods will be applicable even in the agricultural districts of Northern American continent, Siberia, Northern Europe, etc. in addition to Japan.

Furthermore, the experimental plant for cold storage of horseradish was constructed in Abashiri. The plant is provided with a small auxiliary refrigerator to prove that the system can correspond to the risk of the varying climate. We hope the application of the system will be widened to other districts in addition to the extremely cold district.

References

- 1) M. Fukuda, F. Tsuchiya, K. Ryokai, M. Mochizuki, K. Mashiko: "Development of Artificial Permafrost Storage Using Heat Pipes", The 3rd International Heat Pipe Symposium, Tsukuba, Sept. 1988, pp 285-289.
- 2) F. Tsuchiya, M. Fukuda, K. Ryokai, M. Mochizuki: "Artificial Permafrost Storage Harnessed Cold Climate Using Heat Pipes", Proceeding of Cold Region Technology Conference '88, pp 525-529.

A Cold storage of agricultural products surrounded by artificial permafrost using heat pipes

Fujio Tsuchiya

Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Obihiro, Japan

Kimitoshi Ryokai

Simizu Corporation, Tokyo, Japan

Masataka Mochizuki

Fujikura Ltd., Tokyo, Japan

ABSTRACT: We have developed an Artificial Permafrost Storage System which through using heat pipe utilizes cold energy in the winter season. Then it was found that a corrugated stainless steel heat pipe is more effective to uniformly freeze the surrounding soil. In December, 1987, an experimental plant was constructed in Obihiro in order to test the storable ability of agricultural products on a long-term basis. Around the storeroom, 216 pieces of heat pipe were installed into the ground at the interval of 0.5 m and their condensation section was exposed to the atmosphere. In winter of the year, frozen soil was smoothly created and a 2 m thick frozen soil layer was created which lasted until the end of January. Even in July, soil temperature was kept at -1°C and the storeroom temperature was also kept about 3 to 4°C and the humidity was kept over 85 %. Similar results were obtained in the next year and at that point the artificial permafrost system was completely established. Moreover, it was found that the cold storage using heat pipes is sufficiently applicable as the suitable temperature and high humidity in the room maintained the excellent quality of some vegetables.

KEYWORDS : permafrost, model test, temperature effect, in-situ test

1 INTRODUCTION

In cold regions, it is necessary to comprehend the cold climate and circumstances sufficiently for the purpose of turning its handicaps into benefits. It is, therefore, important to understand the behavior and action of the nature sufficiently without the traditional persistence from the past. More recently, the effective utilization of snow, ice and cold material has been interested for ice

houses, winter festivals and cold storage. More specifically, to use the cold winter air for energy resources is expected in order to store food such as agricultural products and animal products.

In winter, many parts of Hokkaido have much snow and low temperatures. Fig. 1 shows the mean monthly temperature from 1941 to 1970 in January for Eastern Hokkaido, which is called more coldest regions of Japan. Also the greatest annual average of snow depth during the same

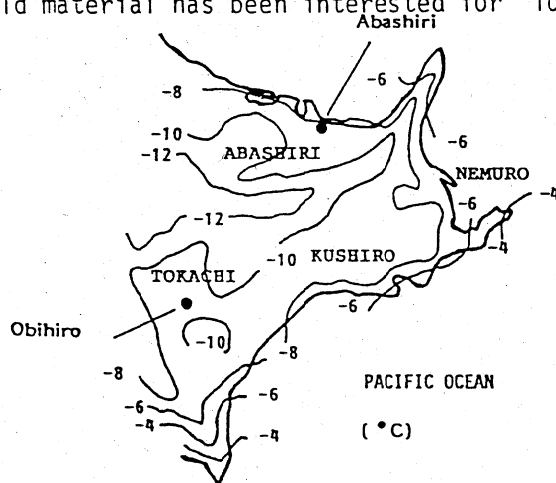


Fig.1 Monthly mean air temperature (1941-1970)

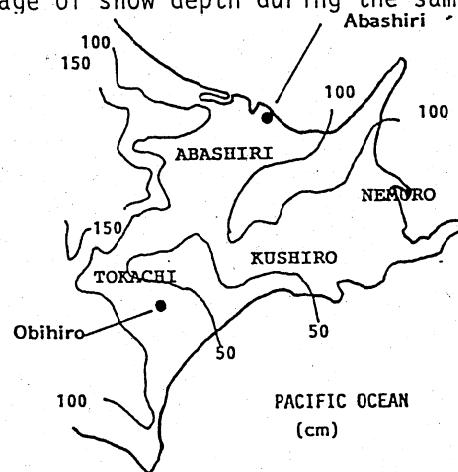


Fig2. Greatest annual average of snow depth (1941-1970)

period in Eastern Hokkaido is shown in Fig.2, and this region is called the least snowfall area of the Hokkaido (Tsuchiya,1989b). We can see the coldest area lies in the middle of Hokkaido, and it is here, at the Obihiro Weather Station, the lowest temperature of Obihiro, -38.2°C on January 26, 1902.

Because the lowest temperature record does not always show the actual amount of winter coldness, the accumulative values or the freezing index should be noticed. Fig. 3 shows the typical distribution of the freezing index during the winter using the isothermal lines(Fukuda,1975). From this figure, the coldest region is located between the Tokachi and Abashiri Districts.

2 SEASONAL SOIL FREEZING AND PERMAFROST

Many parts of Hokkaido have soil freezing in the winter. Soil freezing often leads to considerable damage, specially frost heaving in the winter and thaw weakening of the soil in the spring. These effects often cause damage of such things as the breakage in building foundations, roads, airport runways, chancels and retaining walls. Frost heaving also influences the winter-killing of the crops, glasses and trees as well as it damages plant roots(Tsuchiya,1985). When we considered soil freezing as the natural disaster caused by cold weather, we must consume a tremendous expense nowadays to protect or control the frost heave.

On the other hand, frozen soil has a merit, too. As frozen soil has strength similar to concrete, the ground freezing

method can be applied for caving the weakened or poor-supportable ground (Takashi,1982). As this method is used actively, One can see the merit of frozen soil. In addition, frozen soil causes the latent heat (this heat is generated when liquid water becomes sold ice), and that has a heat storage effect for a cold energy resource in this situation.

Fig. 4 shows the two typical patterns of frost penetration, snow fall and the freezing index, measured in the field of Obihiro University in 1984 and in 1987. From these results, it was found that both depth and duration of snowfall influenced the frost penetration depth remarkably in Hokkaido.

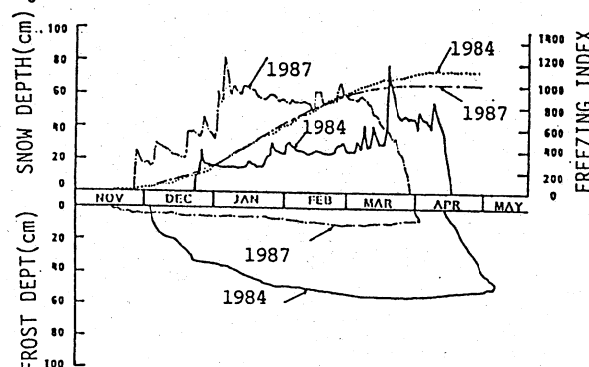


Fig.4 Frost depth, Snow depth and Freezing Index(1984 and 1987)

From this background, we investigated the possibility of utilization of the cold air in winter time. The first attempt was to use cold air for the purpose of freezing the ground as deeply as possible during winter in the experimental field of the university by removing the fallen snow and exposing the ground surface. In the middle of March, we covered the ground surface with an insulation material to prevent soil from thawing on the surface. As a result, we found that the frozen ground was maintained until the last ten days of June, as shown in Fig.5. The potatoes stored in the frozen ground from the previous year were maintained edible, with only a one or two percent reduction in their weight. In this way, frost penetration depth by only one meter seemed to

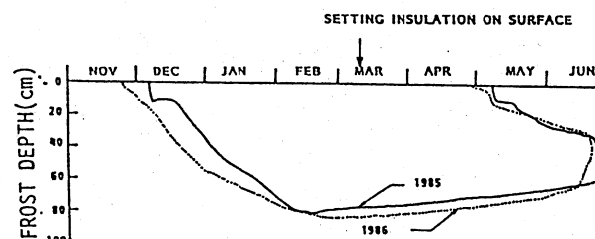


Fig.5 Presevation of frozen soil layer

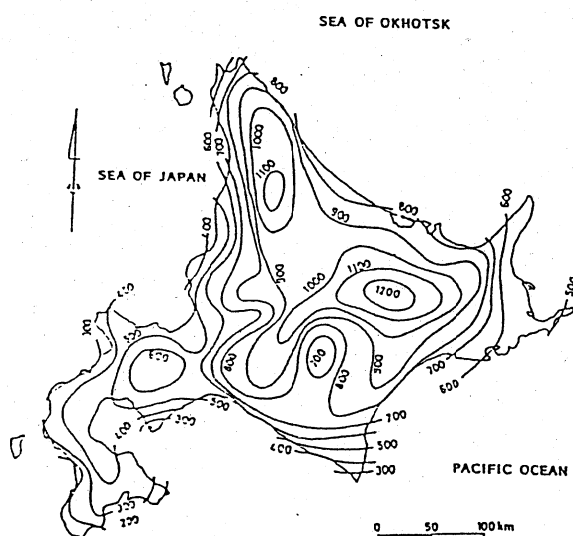


Fig.3 Distribution of the Freezing Index in Hokkaido

restrict the amount of storage and we needed to develop another system to increase the depth of frozen soil. The effective use of heat pipes was considered in order to absorb the heat from the ground in the winter and to create the artificial permafrost remaining during summer.

The term "permafrost" means the ground frozen by cold weather hardly thaws permanently except the active layer and was first defined in 1945 (Kinoshira, 1980). We can see the permafrost zone in the northern countries of the Soviet Union, Canada, Alaska in the U.S. and China. In Japan only little spots of permafrost were discovered in the peak of Mt. Fuji and Mt. Taisetu, and the interior points of the Tokachi District. As the annual mean temperature is above 6°C in Hokkaido, there almost exists a seasonal soil freezing area, which is frozen in winter and dissipated in the spring.

3 HEAT PIPE FOR FREEZING GROUND

The origin of the heat pipe derives from the heat transfer device used in 1942 by R.S. Gaugler who was working in G.M. Company located in the State of Ohio. G.M. Grover first named the device the "heat pipe" and used this heat pipe to control the temperature of the electrical communication equipment in the satellite (Dunn, 1976). Later the heat pipe was used widely for heat release, uniforming of heat, cooling of the metal, air conditioner, heat exchanger and household articles.

As shown in Fig. 6, we will introduce the working principle of the heat pipe. The working fluid filled in the closed container, absorbed the heat and turned it into vaporized gas and the container was filled with the vapor. Otherwise cooling the condenser section of heat pipe made the vapor return into the liquid. Then in the evaporation section, the liquid absorbs the latent heat which is necessary to evaporate, and in the cooling end, the heat was released to the atmosphere. Thus,

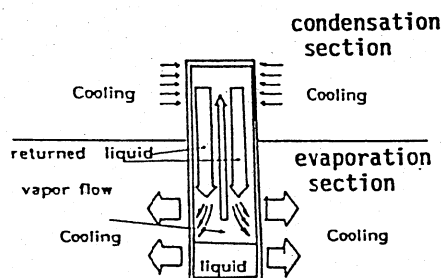


Fig. 6 Principle of heat pipe

we can look at the behavior of the heat transfer from the evaporator to the condenser like the solid thermal conduction.

The cycle of the evaporation and condensation occurs with a little temperature difference between the cold end and the hot end. As long as the temperature difference is maintained, this cycle is repeated forever. There is a certain adaptability between the kind of fluid and container. Here Freon-22 was available for the working fluid and the stainless steel was selected for the container.

4 PRINCIPLE OF PERMAFROST STORAGE SYSTEM

The configuration of the system on the artificial permafrost storage system using heat pipes was shown in Fig. 7. The condensation section of heat pipe was exposed to the atmosphere and the evaporating section was installed into the soil ground. When the air temperature is lowered below 0°C in the winter, the heat pipes absorb the heat from the soil and release it through the radiator on the top parts. Consequent-

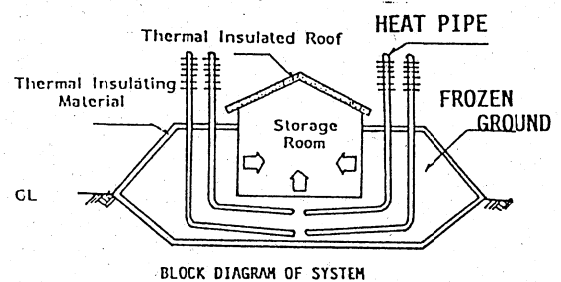


Fig. 7 Permafrost Storage System

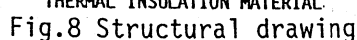
ly the soil layer holding the heat pipe is cooled off and frozen gradually around the heat pipe (Tsuchiya, 1989a).

When the air temperature raised in spring, the wickless type heat pipe showed the thermal diode effect (heat would never be transferred from the top to the bottom of heat pipe), and so the heat during summer is not transferred into the frozen ground.

Frozen ground is therefore kept cool all year round and the space surrounded by the frozen soil is available to use as the low temperature storeroom. This system has many features: (1) it depends on the use of naturally-occurring energy for cooling and reduces the energy requirement such oil. (2) it gives a considerable amount of low temperature and high humidity. (3) it requires hardly any maintenance cost and labor. Therefore we can

While giving thermal load by stocking the agricultural products, the 49 points temperature on the heat pipe and in the ground, and the humidity in the storeroom were measured at the interval of 3 hours

Photograph of Artificial Permafrost
Storage System in Obihiro



The whole soil tended to be frozen at the end of January. As the lower soil temperature of -10°C was measured at the surrounding of heat pipes, frozen soil layers having 2 m thickness were created in early February. We could not help pouring a certain amount of water on the gravel floor to prevent the products from freezing, because the soil temperature became too lower and we expected the increase in the cooling calorie accumulation.

As the air temperature gradually increased after March, the temperature of the soil and the room also became higher. Nevertheless the room temperature was kept at approximately 5 °C as well and the frozen soil layer was maintained in the inner of ground even in the month of August, which is the warmest month of the year in Japan. The soil temperature at some points was below 0 °C in October, thus proving that the artificial permafrost was established perfectly. In the fall of 1988, some procedures were prepared to

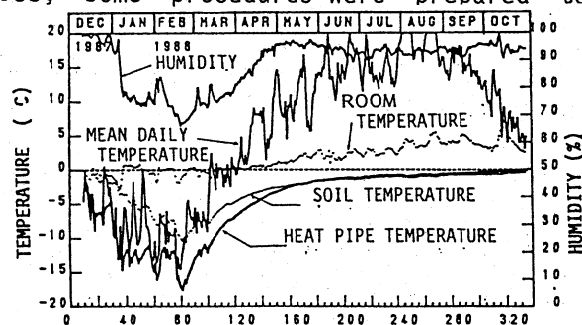


Fig.9 The change of temperature and humidity in the system

The freezing effect caused by the heat pipe used in this test was recognized to be great and was powerful enough to lower the point temperature of the heat pipe buried in the ground by 70 to 80 percent

prevent the storeroom from becoming too cool. One was to spread a 20 cm thick layer of gravel on the floor and to pore much water on it. Another was to mount a 20 kg container of water along the storeroom wall. Also, the stoked materials were separated from the cold wall with the insulating curtain hanging from the ceiling.

From 1989 to 1990, a similar experiment was conducted as well as the previous year. The situation of the storeroom was the same as the first and second year's experiment. The outer surface of permafrost was thawing from summer to fall by only 50 cm thickness. Moreover, the most important thing as the purpose of the storeroom is to reduce the loss of quality in the stored materials to the minimum. To evaluate the changing quality of the stored potatoes, we made a sampling test for thirty housekeepers about the appearance, taste and fragrance, etc. at the interval of two months. The results of the evaluation were showed in Fig.10. If 3 points in the evaluation is assumed for normal potatoes sold in the store or market, most potatoes (brand name; Baron and May Queen) were evaluated ranging from 4 to 5 points.

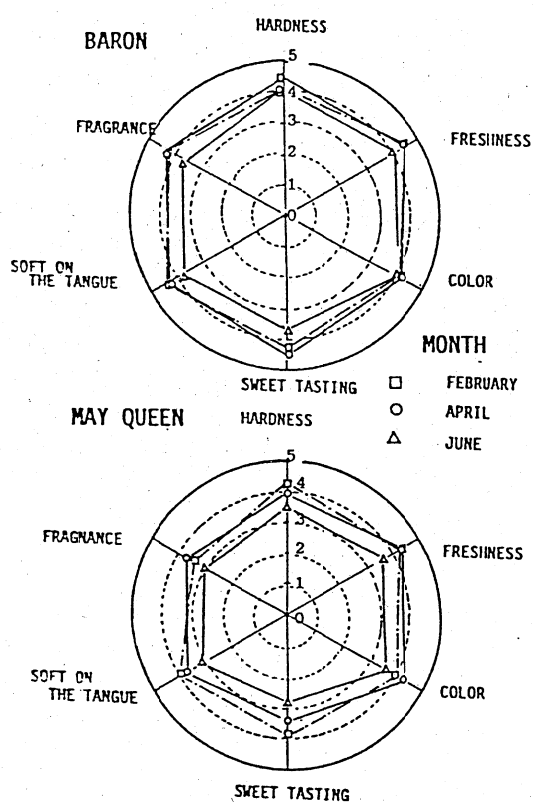


Fig.10 A sampling test for taste, appearance and freshness

The next test was carried out to measure the weight loss in the potatoes in every month and we investigated the storable changing. The result on two brands of potato was shown in Fig.11. After the stored period of 230 days, it found that the rate of weight loss was only 2.2 % for May Queen and 1.4 % for Baron. Also another test was carried out to investigate the changing ingredient of sugar and its sugar content. As shown in Fig.12, there was a significant increment on the amount of reducing sugar during the storage period. In particular, the sweet taste of potatoes was found to be enhanced due to the reducing sugar increasing in February. This matter was very interested in eating boiled potatoes. In the experiment from 1989 to 1990, the weight losses of burdock, Chinese yam, carrot and onion became

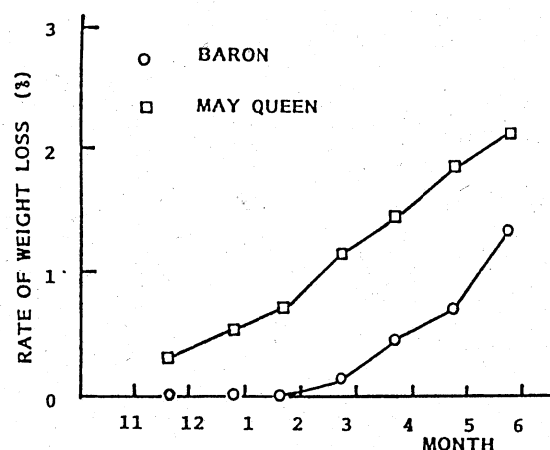


Fig.11 Weight loss of stored potatoes

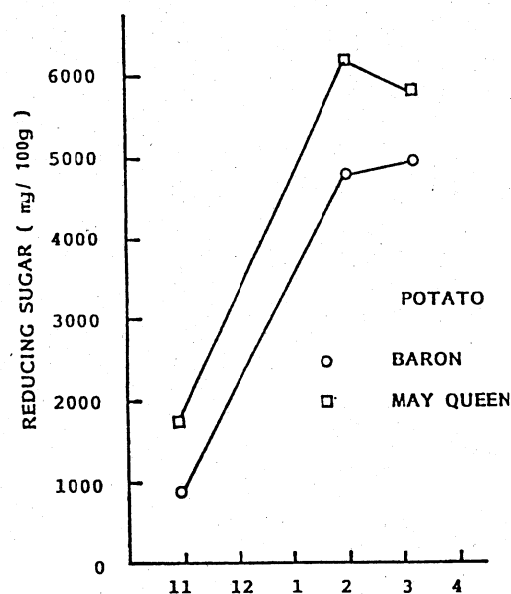


Fig.12 The change of sugar

2.6, 2.4, 1.69 and 4.4 % respectively during the stored period of 200 days, as shown in Fig.13.

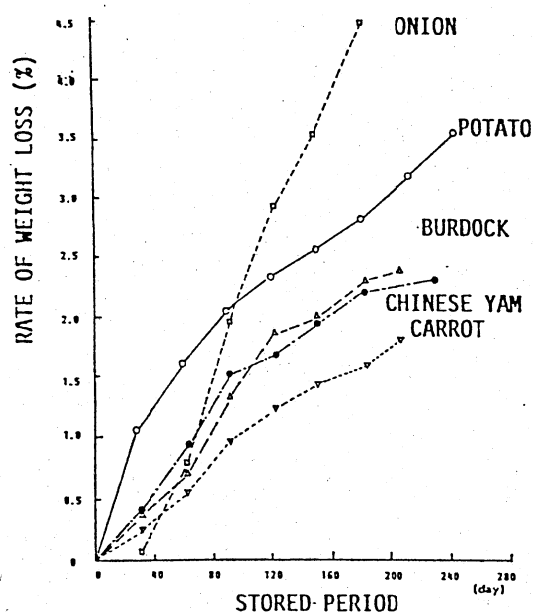


Fig.13 Weight loss of some vegetables

7 CONCLUSION

From the results of these demonstration tests, we can confirm that natural cold air freezes the ground greatly through heat pipes in winter and if the frozen ground is covered by thermal insulation, the artificial permafrost was established perfectly and cold storage surrounded by the permafrost will be technically feasible. Even though atmospheric temperature fluctuates, the storeroom temperature was maintained at 0 to 5°C throughout the year and the humidity in the room was kept above 85 % or more.

As a result of the evaluation tests, the quality of the stored potatoes was found to be excellent until June. The reducing sugar became four or five times as much as the constituent before the storage. After the stored period of 200 days, the weight losses of vegetables were only 1.9 to 4.4 % respectively.

This system can be applied in the region over the freezing index of 400 °C.day due to the economical reason. Instead of no anxiety about the breakdown of cooling system, there exists a problem that it is difficult to control the room temperature freely. Finally this system is thought not only to lower the storage cost and to stabilize the market price, but also to contribute the environment and the conservation of the globe.

REFERENCE

- Dunn P.D. and Reay D.A. 1976. Heat pipes, Pergamon Press, 1-7
- Fukuda M. 1975. Distribution of the accumulative coldness in Hokkaido in 1975. Japanese Society of Snow and Ice
- Kinoshita S. 1980. Permafrost (in Japanese), Kokin-Shoten, 127-135
- Takashi, T., Kiriyama S. and Kato T. 1982. Artificial ground freezing shield work, Third International Symposium on Grand Freezing, U.S.A.
- Tsuchiya F., Maruyama J. and Komatsu T. 1985. Seasonal ground freezing in agricultural land and root breakage of alfalfa. Fourth International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, 77-81.
- Tsuchiya F., Ryoukai and Mochizuki M. 1989a. Utilization of heat pipes for artificial permafrost storage, International Symposium on Cold Heat Transfer 2nd, Sapporo, 279-283
- Tsuchiya F. 1989b. Soil freezing and frost heaving effects on agricultural land in the eastern Hokkaido, International Symposium on Agricultural Technique for Cold Regions, 1st, Obihiro, 104-114

人工永久凍土による低温貯蔵庫

背景

●克雪・利雪そして寒さの有効利用

冬季に雪害・寒害などが多く発生する地域では、それらを克服するだけでなく、積極的に利用することが望まれている。

●害を益とする逆転の発想

害を益とする逆転の発想により、すでに、水資源・エネルギー源・建設材料等に雪や寒さが利用され始めている。

目的

以下の機能を持つ低温貯蔵庫を開発する。

(1)自然冷熱利用により省エネ効果大きい。
冬季の冷熱を、熱伝導性の高いヒートパイプを介して地盤内に輸送し、冷熱を凍土の形で貯蔵する。

(2)品質劣化が少ない。

一定の低温度・高湿度に貯蔵空間を保持するため、馬铃薯等の糖度が増加し、貯蔵物の付加価値が増大する。

(3)トータルコストが少ない。

自然冷熱を利用するため、ランニングコストが不要である。

人工永久凍土の特長

(1)コンクリートのように硬い。

凍結した砂の圧縮強度（温度が -10°C の場合）は、コンクリートのほぼ1/2である。

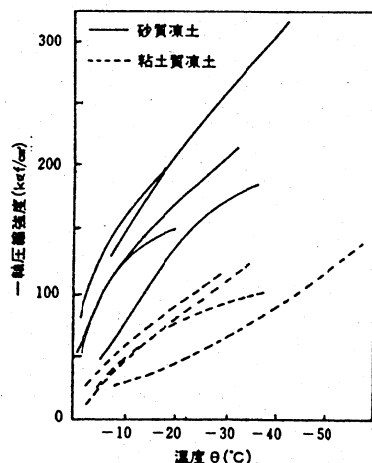
(2)冷熱エネルギー（凍結潜熱）を有する。

凍結潜熱は、砂の場合で水の1/4、粘土の場合で水の1/3である（水の凍結潜熱は80kcal/kg）。

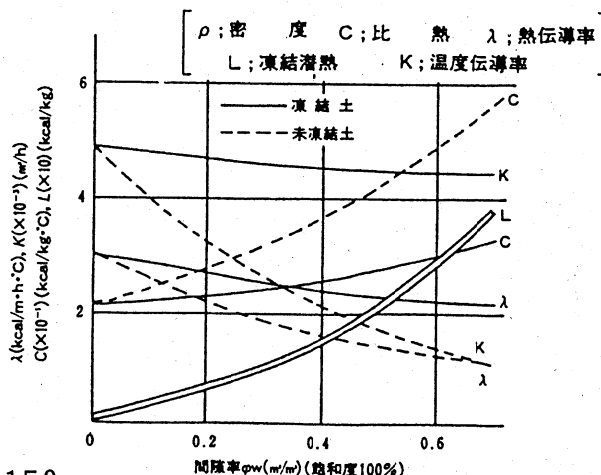
(3) 0°C （水の凍結温度）で一定である。

氷がすべて水になるまで、 0°C の温度に保持されている。

●凍土の強度



●凍土の熱的性質

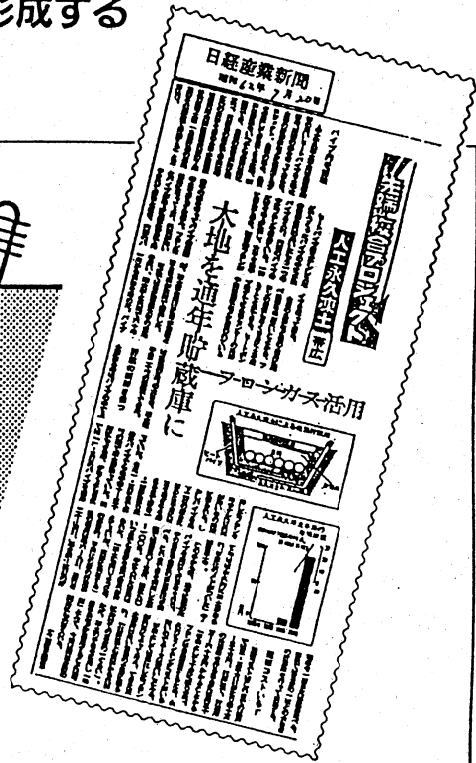
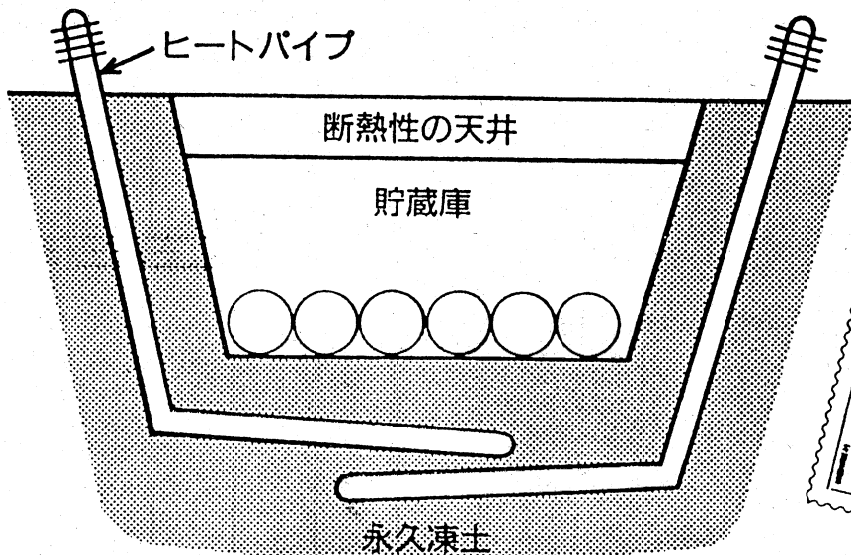


低温貯蔵庫(APS)の原理

(APS; Artificial Permafrost Storage by Shimizu & Fujikura)

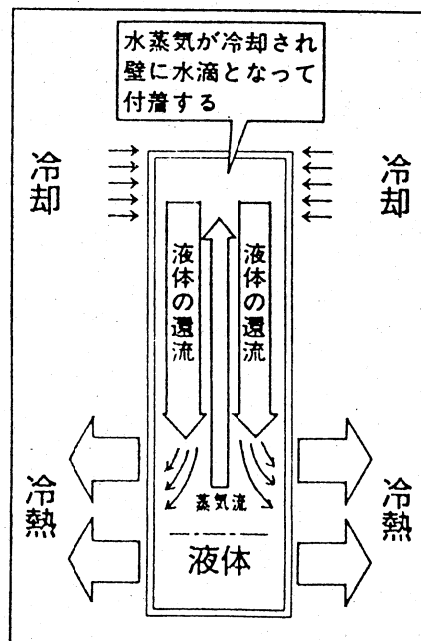
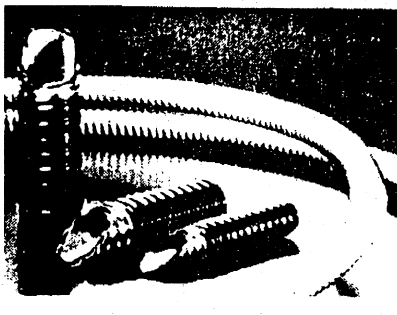
- 熱伝導効率の良いヒートパイプを地盤内に設置する
- 冬季の冷熱を凍土の形で地盤内に蓄える
- 構築された凍土を冷熱源として貯蔵空間を形成する

APSの概要図



● ヒートパイプの特長 ● ヒートパイプの作動原理 ● ヒートパイプの材料と作動液の選定

- (1) 優れた熱伝導性
- (2) 速い熱応答性
- (3) 表面温度の均一性
- (4) メンテナンスフリー
- (5) 熱の流れが一方向



容器材料	作動液	使用温度
銅	フロン	-40~110°C
	メタノール	0~150°C
	水	30~200°C
ステンレス鋼	アンモニア	-80~40°C
	フロン	-40~110°C
	メタノール	0~150°C
アルミ	サームエス	130~400°C
	フロン	-40~110°C
銅	アンモニア	-80~40°C
	フロン	-40~110°C
	メタノール	0~150°C

ヒートパイプによる地盤凍結

1. 熱輸送量

ヒートパイプ1本当りの熱輸送量 $Q = \frac{(T_a - T_g)R}{R}$

(T_a, T_g : 大気及び地盤内のヒートパイプ表面温度)
(R : ヒートパイプの熱抵抗)

2. 土の凍上特性

地盤の凍結膨張率 $\xi = \xi_0 + (1 + \sqrt{\frac{V_0}{V}}) \times \frac{\sigma_0}{\sigma}$

(V : 凍結速度, σ : 土圧の関係)
(ξ_0, σ_0, V_0 : 凍上定数)

3. 境界条件

$$\lambda_1 \frac{\partial T_f}{\partial r} - \lambda_2 \frac{\partial T_u}{\partial r} = L_{s,y} V + L_{w,y} V_w$$

($\lambda_{1,2}$: 凍土及び未凍土の熱伝導率, T_f, u : 凍土及び未凍土の温度)
($L_{s,w}$: 地盤及び水の凍結潜熱, $y_{s,w}$: 地盤及び水の密度)
(V, V_w : 凍結速度と凍結面への吸水速度)

4. 基本式

構築可能な凍土厚さ、及びその経時変化は次式から求まる。

$$\text{凍土内の熱移動} \quad \frac{\partial T_f}{\partial r} = K_1 \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} \right)$$

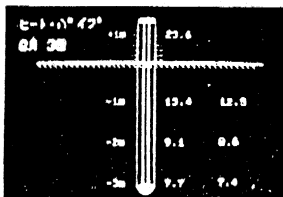
$$\text{未凍土内の熱移動} \quad \frac{\partial T_u}{\partial r} = K_2 \left(\frac{\partial^2 T_u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_u}{\partial r} \right)$$

$$\text{水の移動} \quad \frac{\partial U_w}{\partial r} = C_v \left(\frac{\partial^2 U_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_w}{\partial r} \right)$$

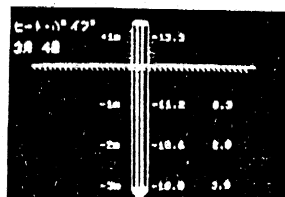
($K_{1,2}$: 凍土及び未凍土の温度伝導率)
(U_w : 間隙水圧)
(C_v : 圧密係数)

●鉛直に敷設したヒートパイプの作動状況

(夏季)

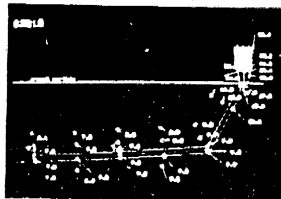


(冬季)

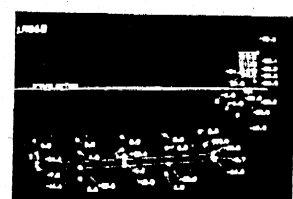


●低温貯蔵庫を想定して敷設したヒートパイプの作動状況

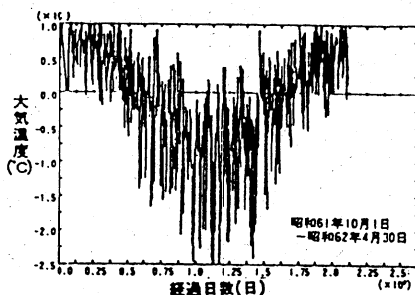
(夏季)



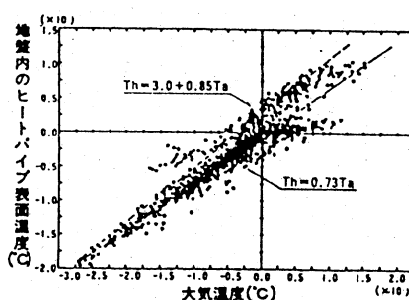
(冬季)



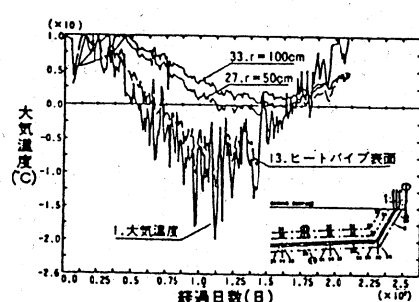
●帯広地区の大気の時経変化



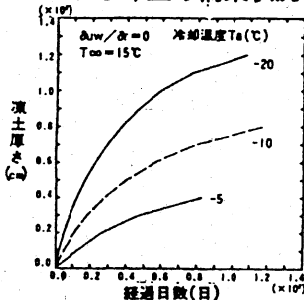
●大気温度と地盤内ヒートパイプの温度



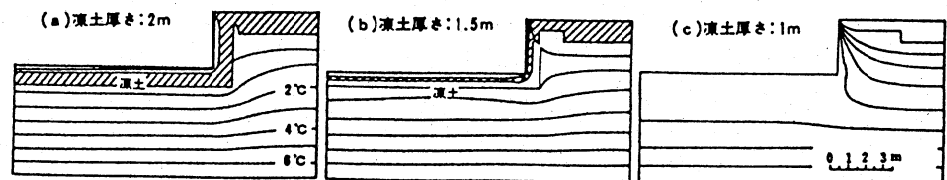
●地盤内ヒートパイプ及び地盤温度の時経変化



●設置したヒートパイプによる凍土の構築状況

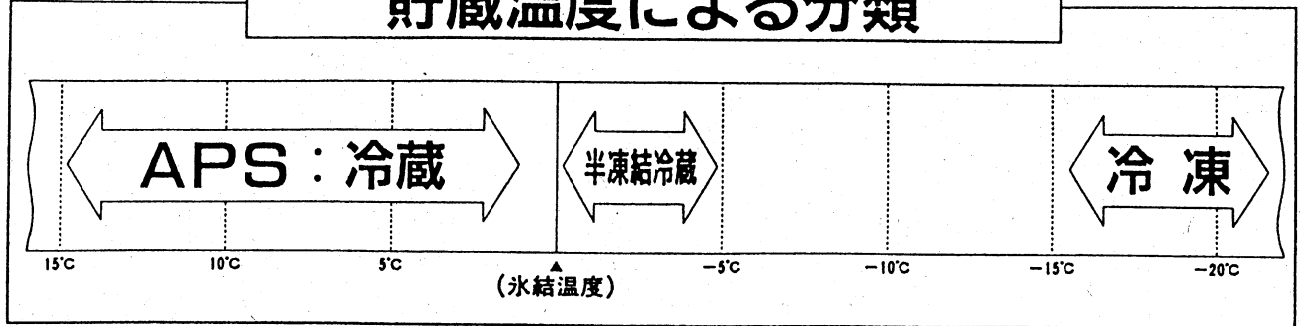


●モデル貯槽における残存凍土(1年後)

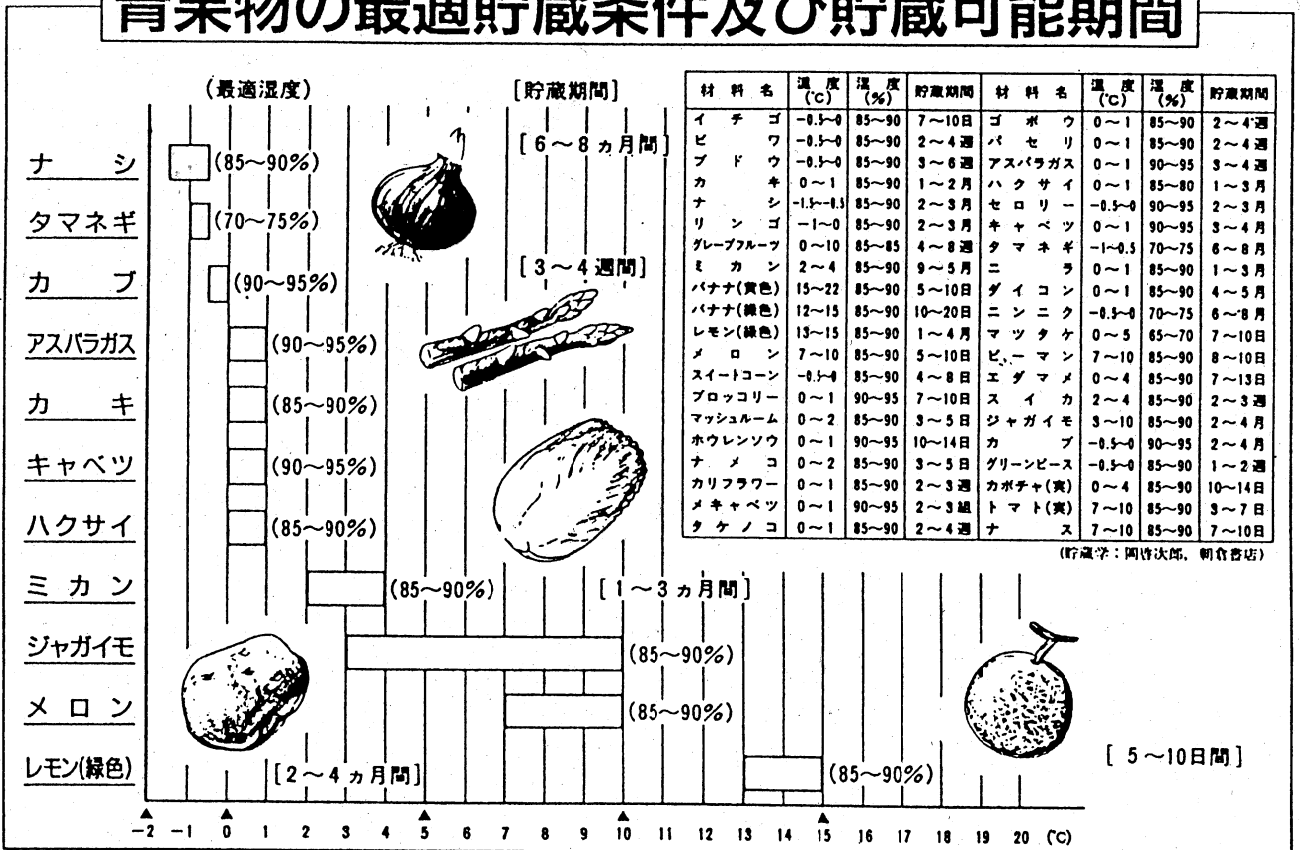


低温貯蔵庫内の温度及び湿度環境

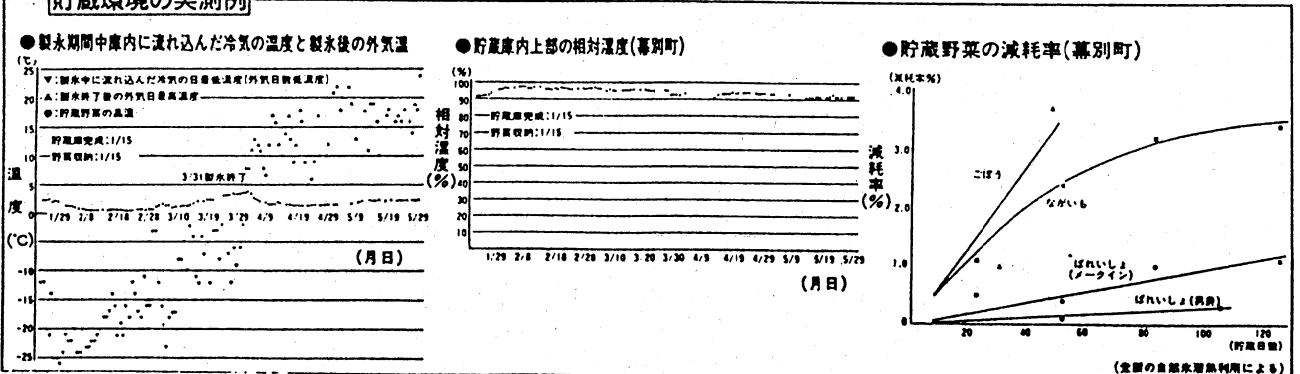
貯蔵温度による分類



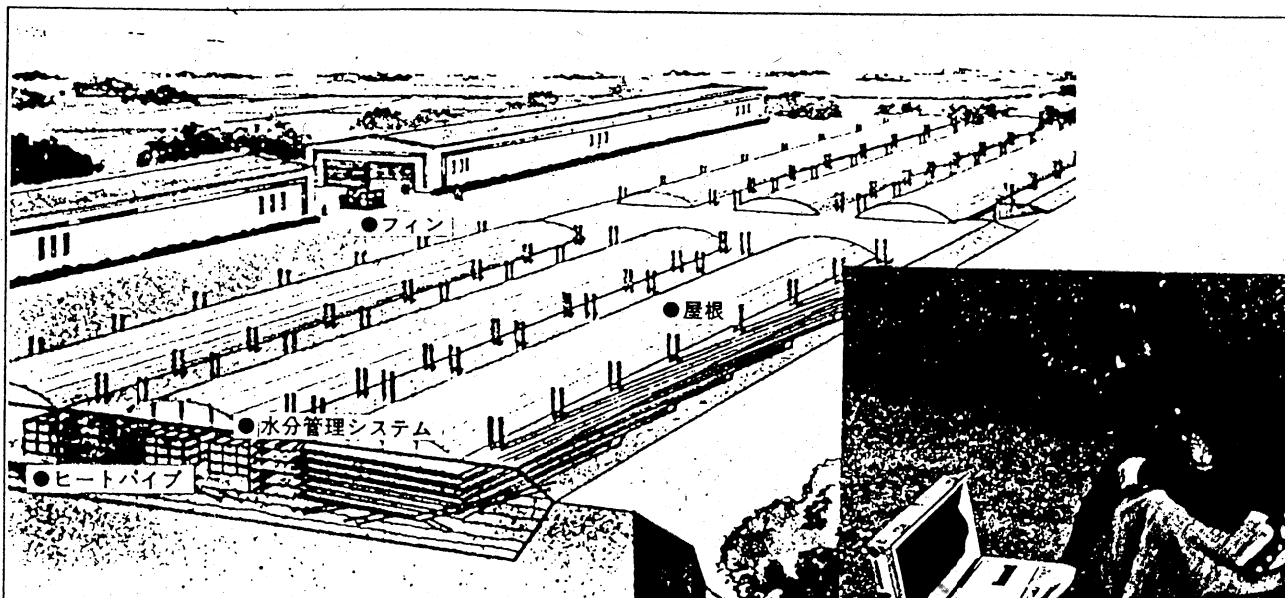
青果物の最適貯蔵条件及び貯蔵可能期間



貯蔵環境の実測例



人工永久凍土による食糧用低温貯蔵庫



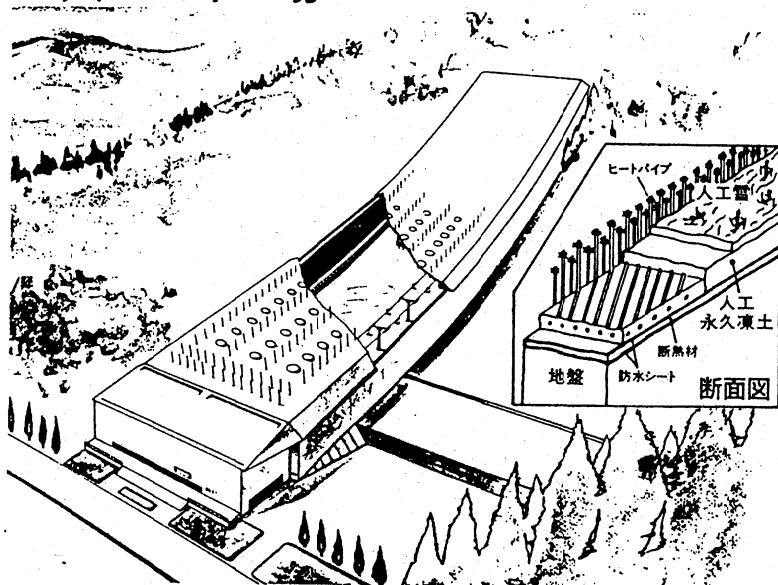
食糧用低温貯蔵庫の特長

1. ランニングコストがほとんどゼロ
2. 一定の低温度・高湿度に保持
3. 品質劣化が少ない

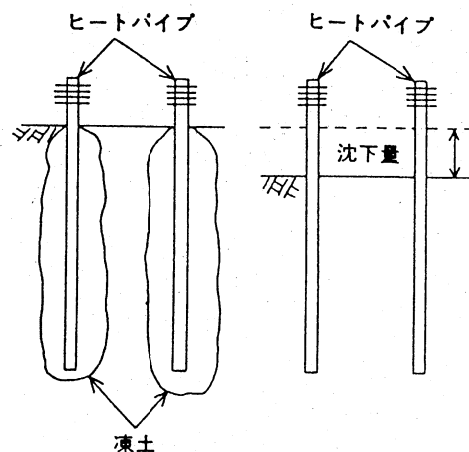
【水分管理システム】

人工永久凍土のその他の応用

●人工スキー場



●軟弱地盤改良



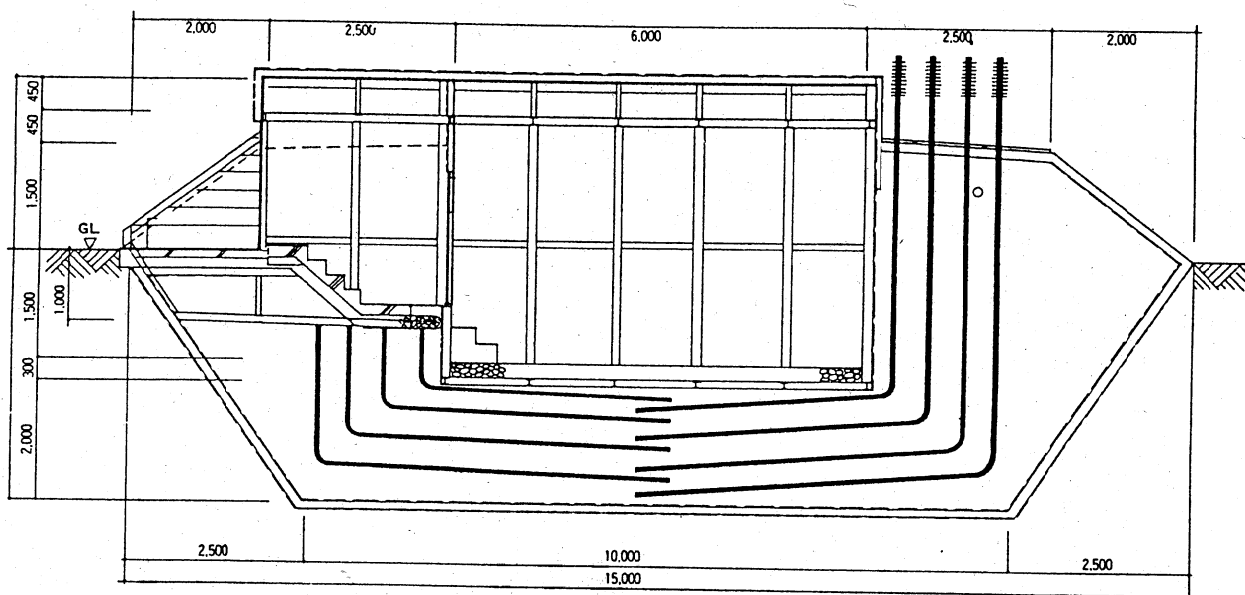
モデルプラント実験

目 的

- 1) 群設したヒートパイプの凍結性能の確認
- 2) 庫内の温度及び湿度環境の把握
- 3) 貯蔵物の品質評価

概 要

●断面図



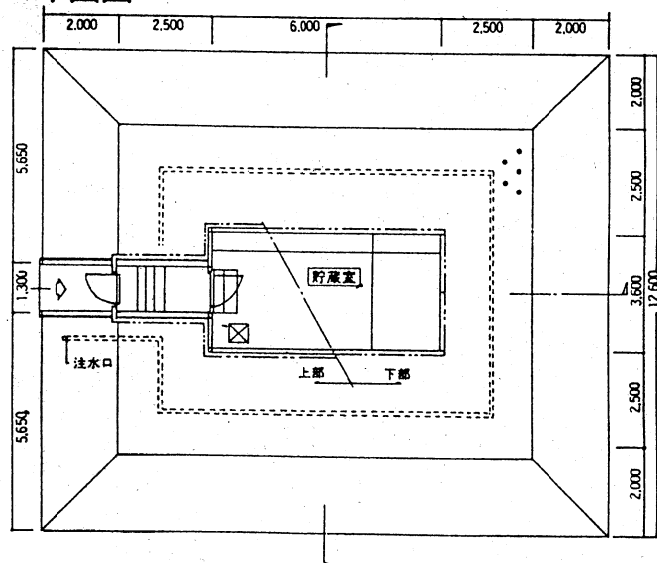
測定項目

- ヒートパイプ温度
- 地盤温度
- 地盤内の水分量
- 貯蔵庫の湿度及び温度
- 貯蔵物の減耗率
- 貯蔵物の官能試験
- 気象情報

実験期間

1987年11月1日～1989年10月30日
(2年間)

●平面図



帯広畜産大学

自然エネルギーを利用した新しい貯蔵

システムの特長

●省エネルギー

自然エネルギーを冷熱源として利用するため、ランニングコストはほとんど必要としません。

●低温度・高湿度

人工永久凍土により、貯蔵空間を一定の低温度・高湿度に保持します。

●メンテナンスフリー

ヒートパイプは駆動部がないのでメンテナンスが不要です。

メリット

●ランニングコストが大幅に軽減出来ます。

●長期貯蔵が可能のため、農水産物の安定供給が出来ます。

●貯蔵のための最適環境が得られるため、品質の保持と歩留りの向上が図れます。

●維持・管理が簡単です。

システムの概要

システム構成

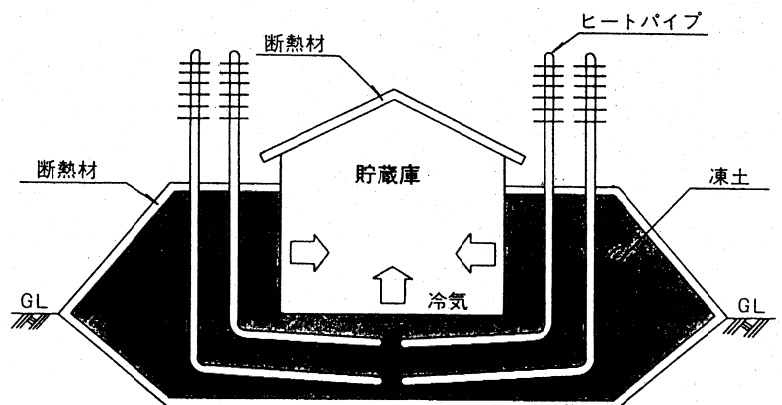
- 当システムは、半地下式の貯蔵空間及び周辺地盤に埋設されたヒートパイプより構成されます。
- ヒートパイプ内部の液体が、冬期の冷熱により、凝縮－蒸発を繰り返し、冷熱を地盤内に伝送します。
- 外気の冷熱が周辺地盤に伝えられ、人工凍土が形成されます。
- 凍土の冷熱エネルギーにより、貯蔵庫内は年間を通じて、低温・高湿度に保持されます。

凍土の特長

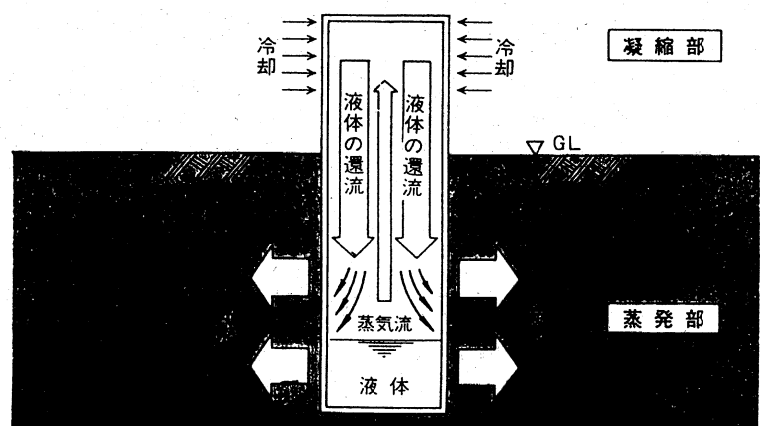
- 凍土が溶ける温度は 0°C で一定
- 蓄熱が可能($30,000\text{Kcal/m}^3$)
- コンクリートの $\frac{1}{2}$ の強度(-10°C)

ヒートパイプの特長

- 優れた熱伝導性
- 速い熱応答性
- 表面温度の均一性
- メンテナンスフリー
- 熱の流れが一方向

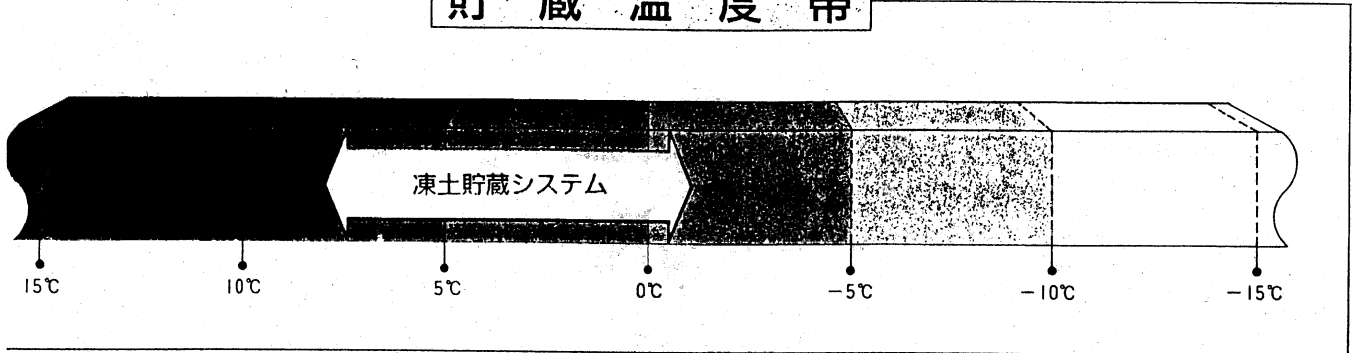


システム構成図



ヒートパイプ原理

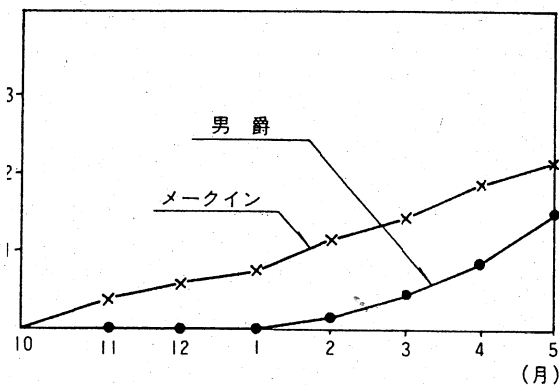
貯 蔵 温 度 帯



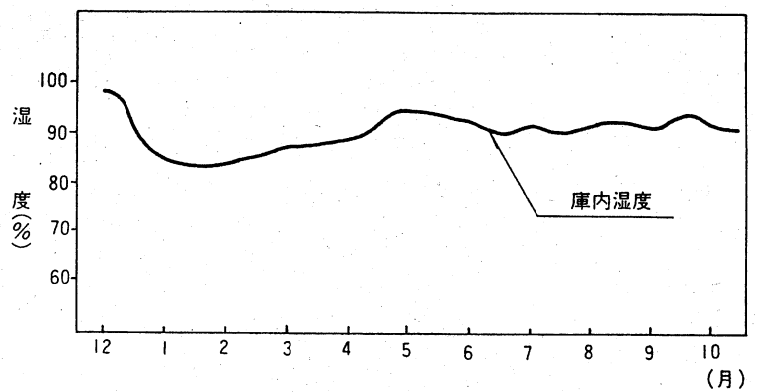
モデル実験結果

●場 所：帯広畜産大学構内

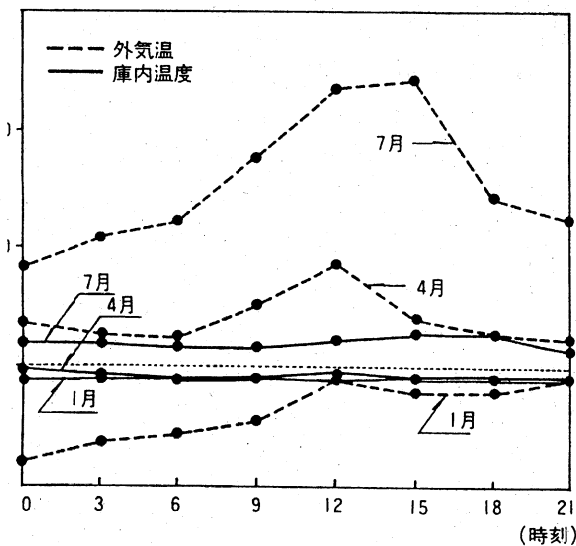
●共同研究：帯広畜産大学、北海道大学



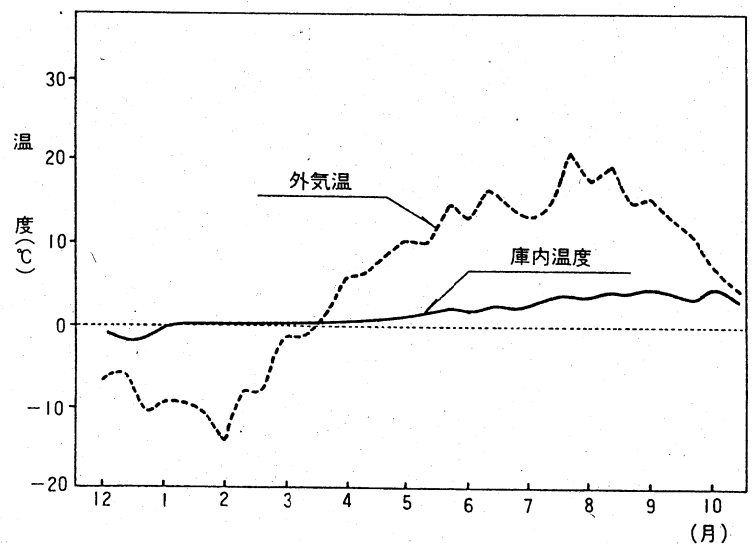
バレシヨの重量変化



年間の庫内湿度変化

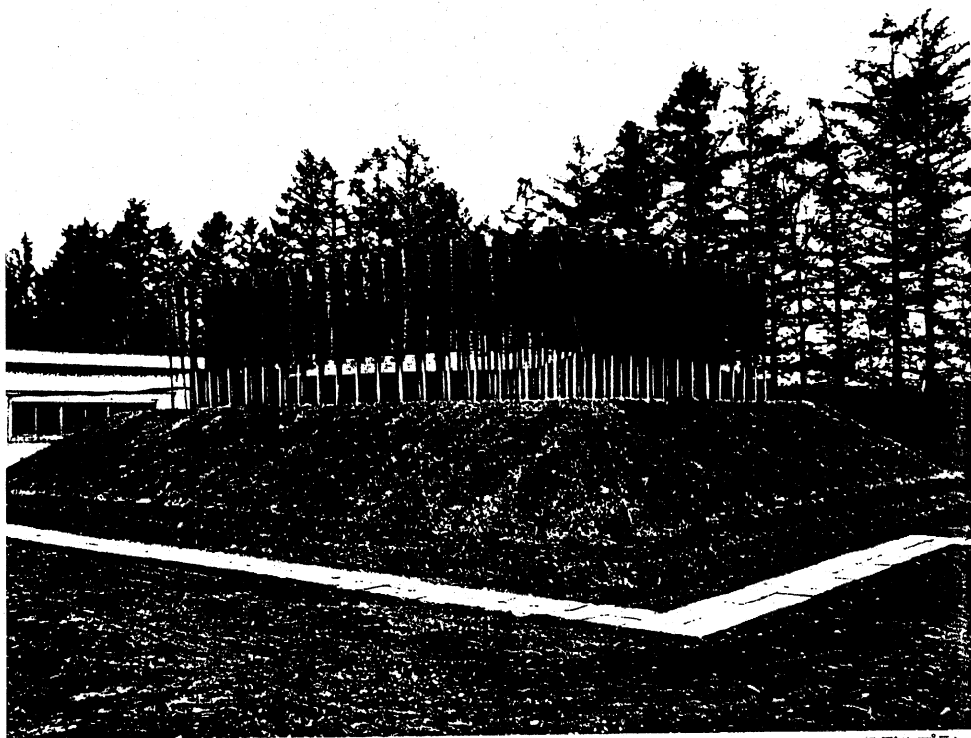


1日の温度変化



年間の庫内温度変化

人工永久凍土貯蔵システム



モデルプラント

自然エネルギーを利用した
新しい貯蔵システム

特長

- 自然エネルギーを冷熱源とした省エネルギー
- 一定の低温度・高湿度
- メンテナンスフリー

メリット

- ランニングコストを大幅に軽減
- 長期貯蔵が可能で農水産物の安定供給を実現
- 最適貯蔵環境による高品質の保持と歩止りの向上
- 維持・管理が簡単

システムの概要

システム構成

- 当システムは、半地下式の貯蔵空間及び周辺地盤に埋設されたヒートパイプより構成されます。
- ヒートパイプ内部の液体が、冬期の冷熱により、凝縮－蒸発を繰り返し、冷熱を地盤内に伝送します。
- 外気の冷熱が周辺地盤に伝えられ、人工凍土が形成されます。
- 凍土の冷熱エネルギーにより、貯蔵庫内は年間を通じて、低温・高湿度に保持されます。

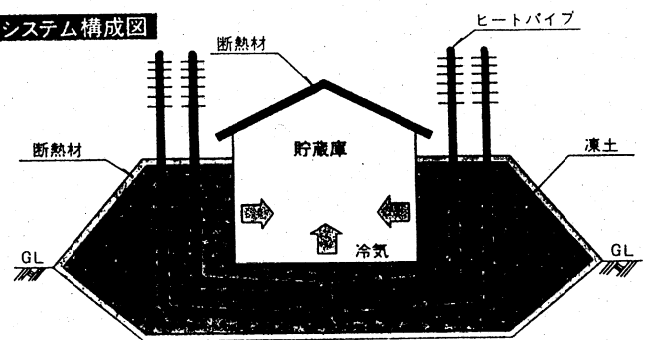
凍土の特長

- 凍土が解ける温度は0℃で一定
- 蓄熱が可能(30,000Kcal/m³)
- コンクリートの1/2の強度(−10℃)

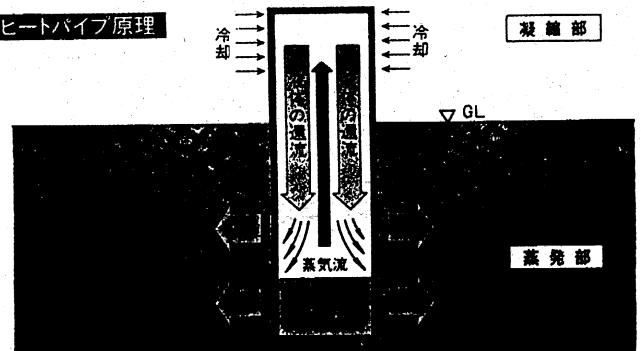
ヒートパイプの特長

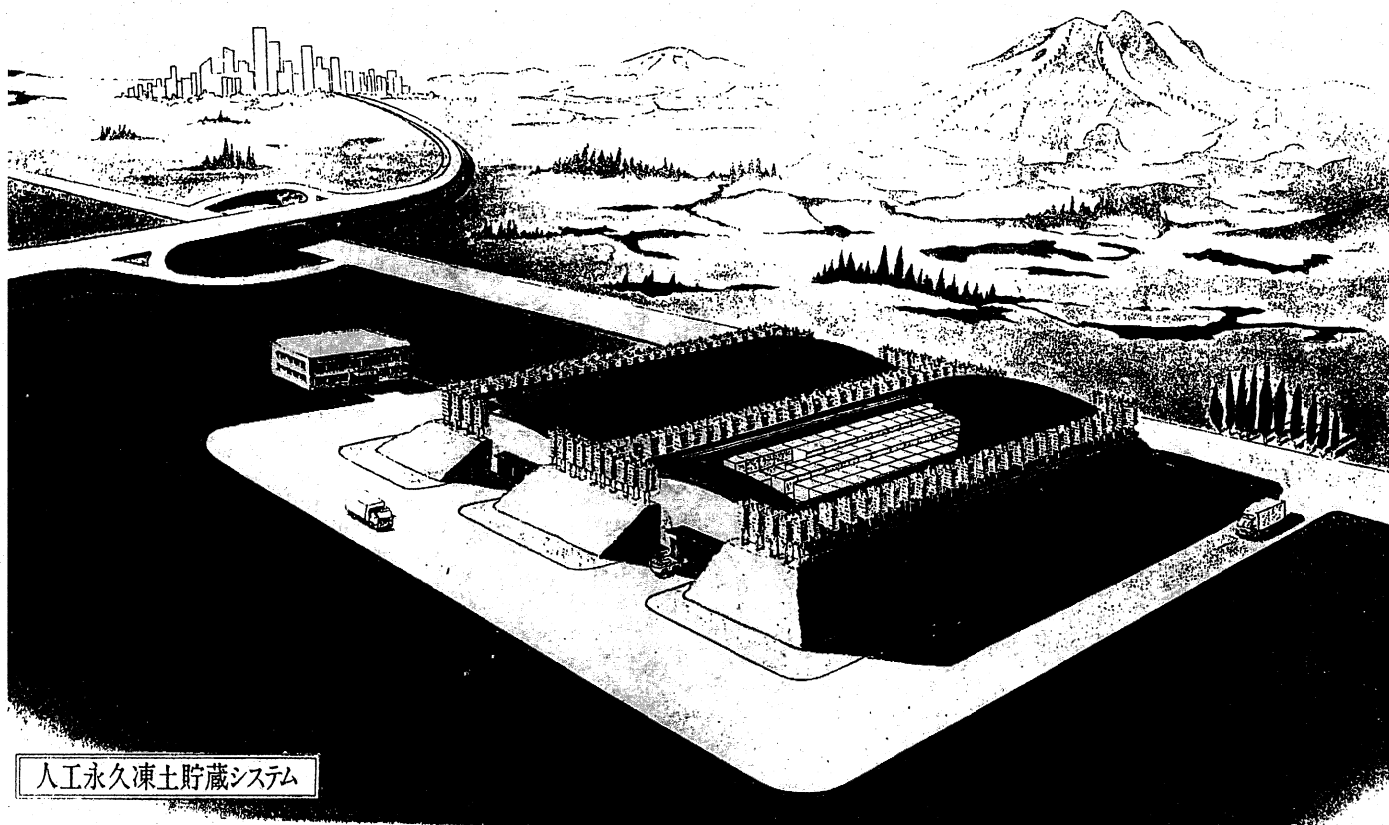
- 優れた熱伝導性 ● 速い熱応答性 ● 表面温度の均一性 ● メンテナンスフリー ● 熱の流れが一方向

システム構成図



ヒートパイプ原理



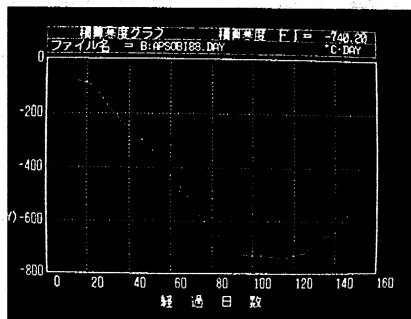


人工永久凍土貯蔵システム

モデル実験結果

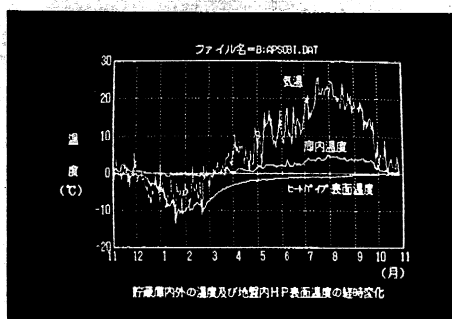
● 場所：帯広畜産大学構内
● 共同研究：帯広畜産大学・北海道大学

積算寒度



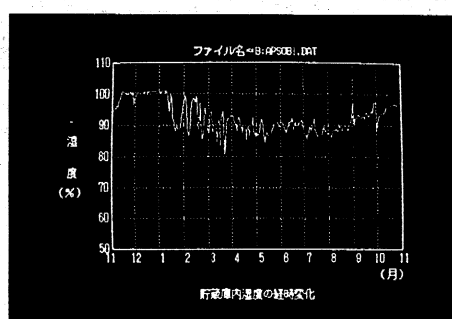
1年度の帯広の積算寒度は740°C day。

貯蔵庫内外の温度の経時変化



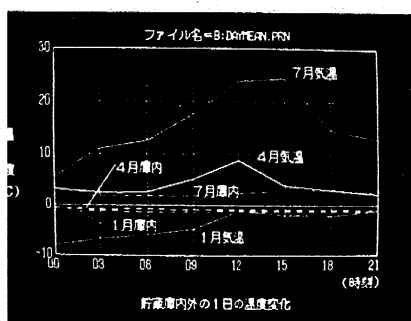
貯蔵庫内には人工永久凍土が残り年間を通して-1°C～5°Cの低温度に保たれている。

貯蔵庫内湿度の経時変化



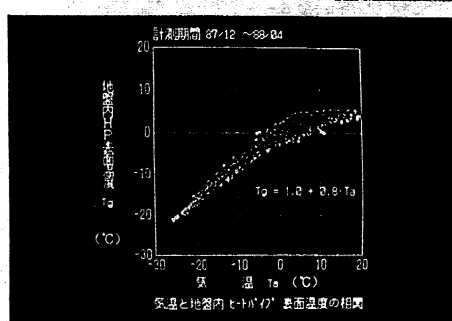
年間を通して約90%の一定の高湿度に保たれている。

貯蔵庫内温度の日変化



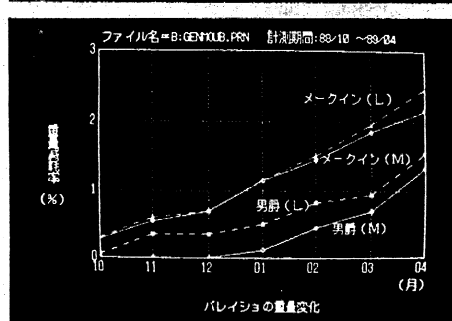
冬とも貯蔵庫内の1日の温度変化は1°C以下に保たれている。

ヒートパイプの冷却能力



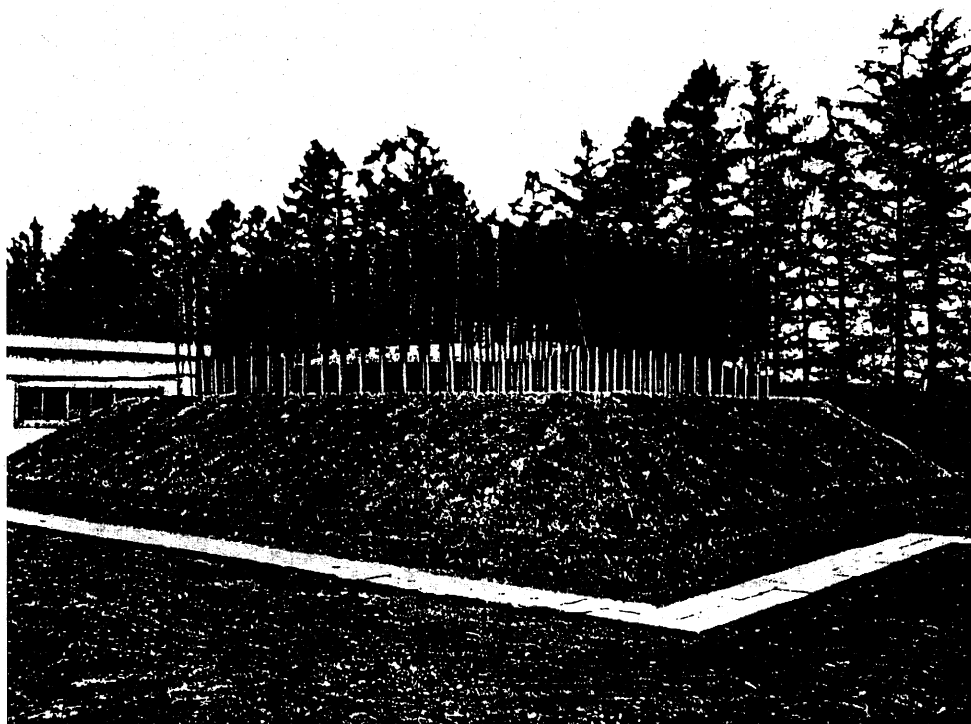
ヒートパイプの熱輸送効率が非常に高いため自然の冷気を効率良く地下に移動できる。

貯蔵物の減耗率



馬鈴薯の水分は保持されており減耗率はわずか2%以下。

ARTIFICIAL PERMAFROST STORAGE SYSTEM



Model plant

A NEW STORAGE SYSTEM THAT
MAKES USE OF NATURALLY-
AVAILABLE ENERGY

FEATURES

- Reduced energy requirements through use of naturally-occurring energy for cooling.
- Uniform low temperature and high humidity.
- Maintenance free.

ADVANTAGES

- Great reduction in running costs.
- Long-term storage is possible, leading to a stable supply of agricultural and fishery products.
- By creating an optimum storage environment, quality is retained and improved yields are attained.
- Simple maintenance and management.

SYSTEM SUMMARY

Configuration of the System

The system consists of a partly underground storage area and heat pipes embedded in the surrounding ground.

The liquid in the heat pipes repeatedly condenses and evaporates due to winter cooling and removes heat of vaporization from the ground.

For cooling power the ambient air is carried into the ground, artificially freezing the soil.

The cooling effect of the frozen soil maintains the storage space at low temperature and high humidity throughout the year.

Features of Frozen Soil

The frozen soil is maintained at uniform 0°C .

Heat storage is possible ($30,000 \text{ kcal/m}^3$)

Strength of frozen soil is $1/2$ that of concrete (at -10°C).

Features of Heat Pipes

Excellent heat conductivity

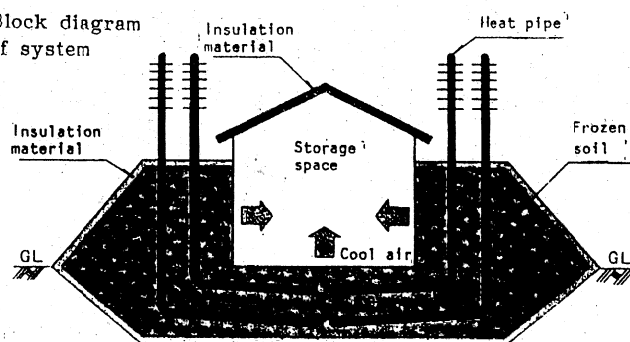
• Rapid response

Uniformity of surface temperature

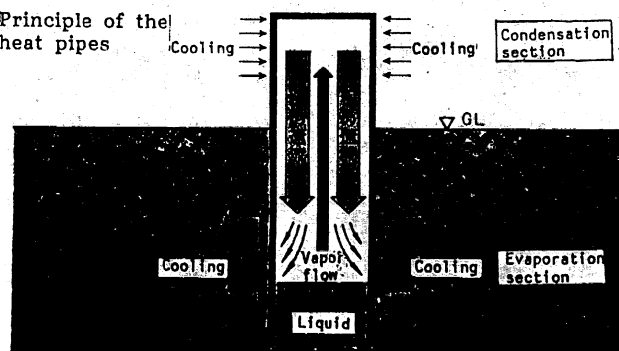
Maintenance free

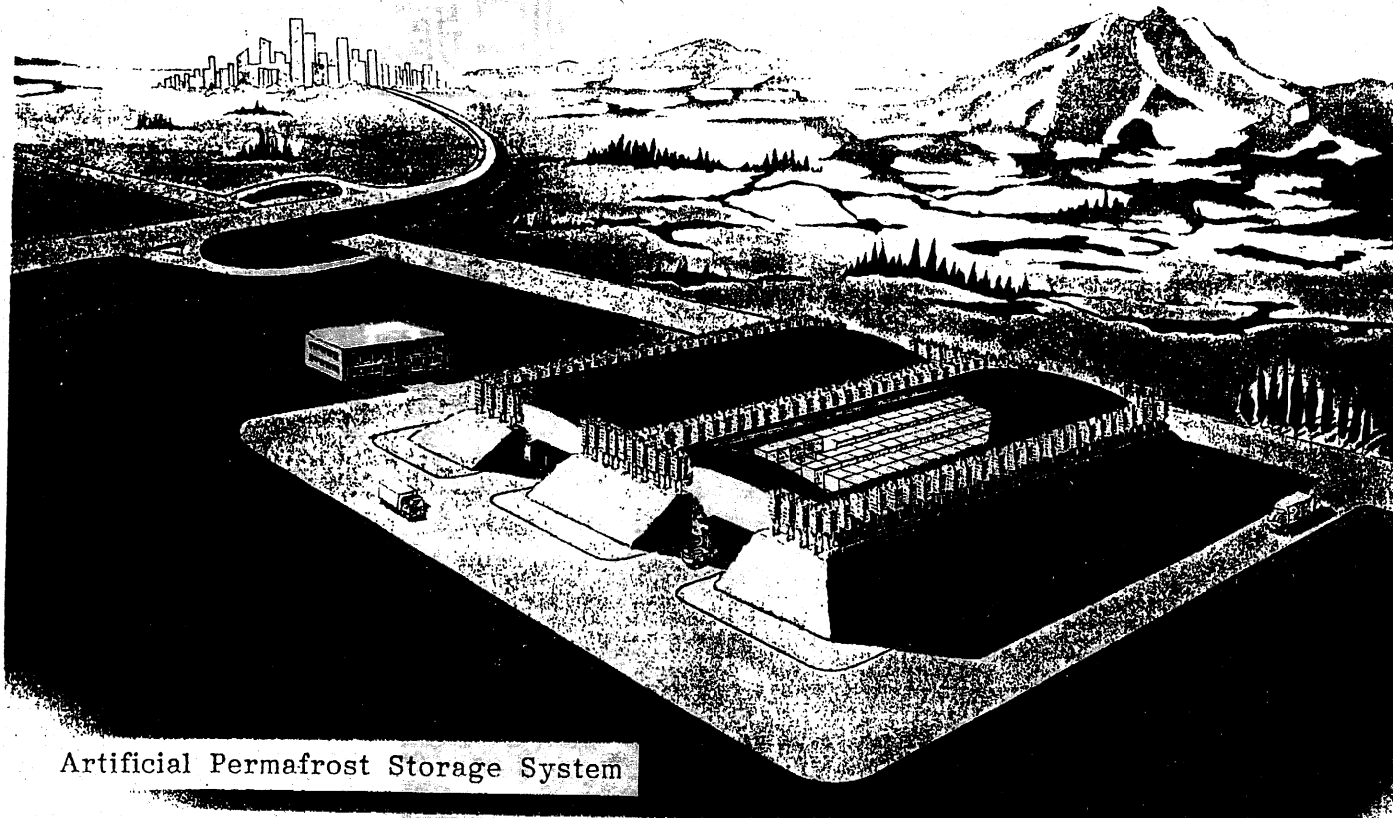
Flow of heat is one direction

Block diagram
of system



Principle of the
heat pipes



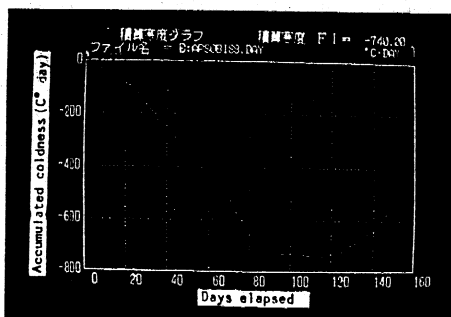


Artificial Permafrost Storage System

RESULTS OF MODEL TESTS

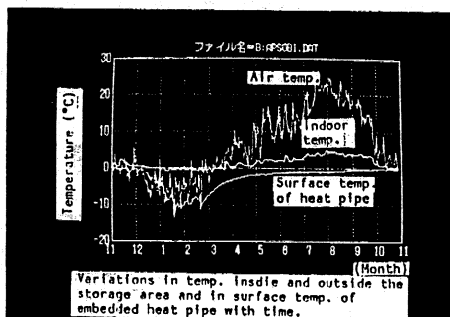
Location: Obihiro Stock Raising University Campus
Joint Research Groups: Obihiro Stock Raising University and Hokkaido University

Accumulated Coldness



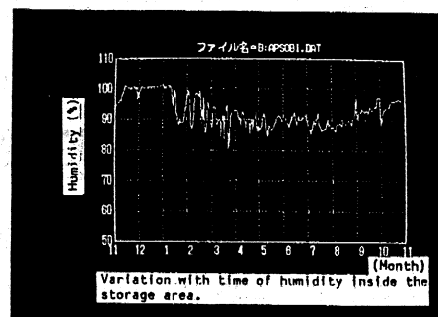
Accumulated coldness of Obihiro in 1987 was 740°C day

Change in temperature in and out of storage area with time



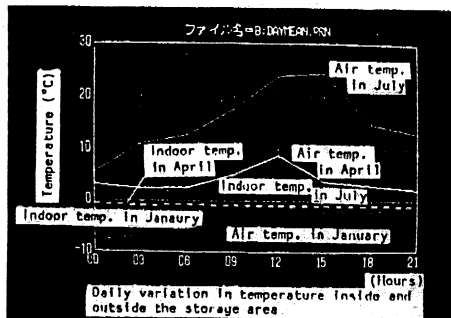
The remainder of the soil around the storage area is maintained at the low temperature of -1°C to -5°C throughout the year.

Change in humidity in storage area with time



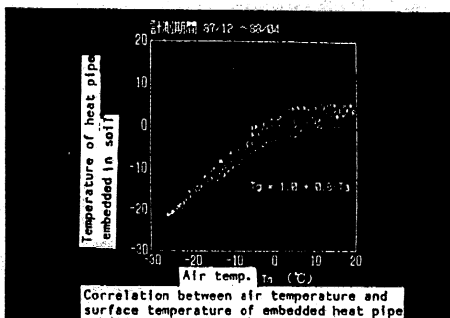
The storage area is kept at a constant high humidity of about 90% throughout the year.

Daily changes in temperature within the storage area



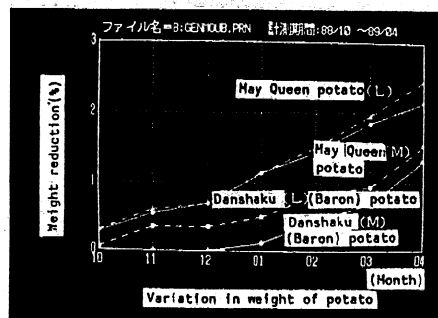
The daily temperature variation in the storage area is held to within 1°C both during summer and winter.

Cooling capacity of heat pipes



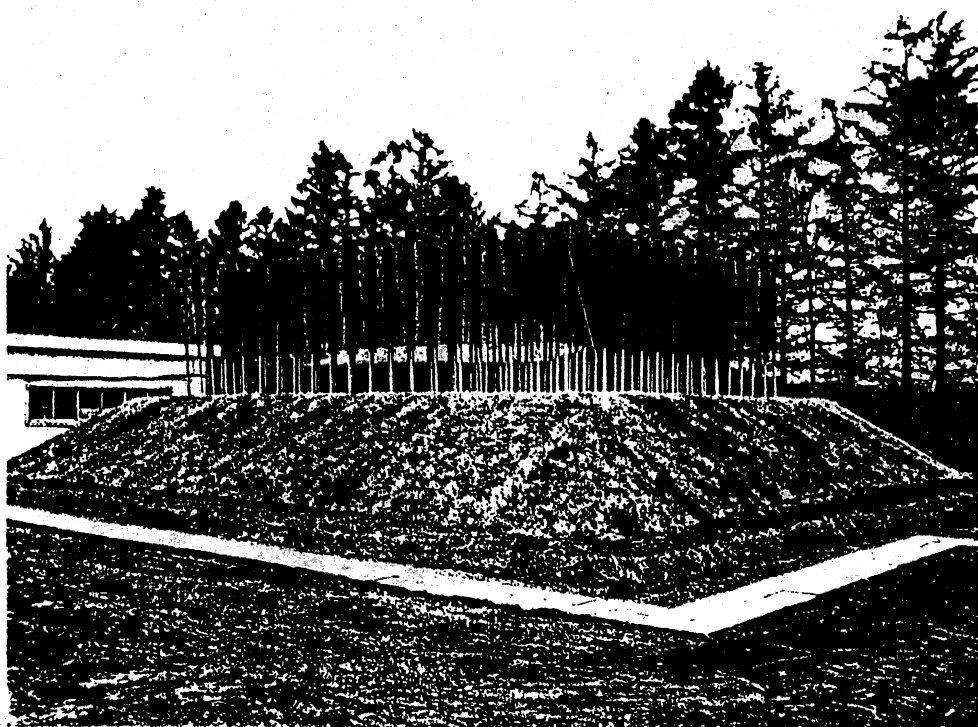
Since the heat transfer efficiency of the heat pipes is extremely high, the coldness of the air is transferred underground efficiently.

Decrement ratio of stored items



The water content of stored potatoes is retained within the decrement ratio of 2%.

人造永久冻土贮藏系统



标准设备

利用自然能的最新贮藏系

特 长

- 将自然能作为冷热源，以资节能
- 一定的低温度·高湿度
- 不需维护工作

优 点

- 可大幅度减轻运转费
- 因可长期贮藏，就实现农水产品的稳定供应
- 简单的维护·管理

系 统 概 要

系统构成

- 本系统，以半地下式贮藏空间及埋设在周围地盘的热管为构成。
- 热管内部的液体，由于冬季的冷热，反复着冷凝—蒸发，将冷热输送到地盘内。
- 由于外界的冷热传导于周围地盘，形成人造冻土。
- 由于冻土的冷热能，贮藏库内通年可维持低温·高湿度。

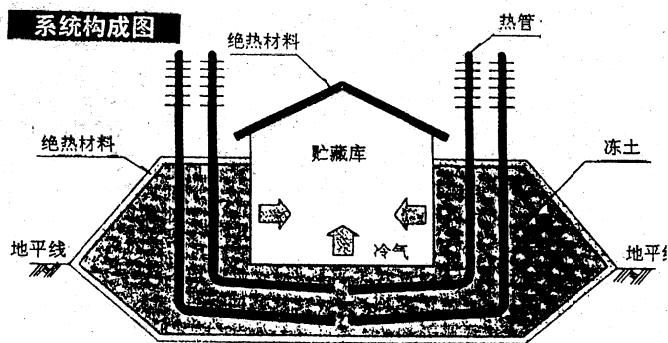
冻土特性

- 冻土的溶化温度，以 0°C 为一定
- 蓄热可能(30,000Kcal/m³)
- 混凝土的 $\frac{1}{2}$ 强度(-10°C)

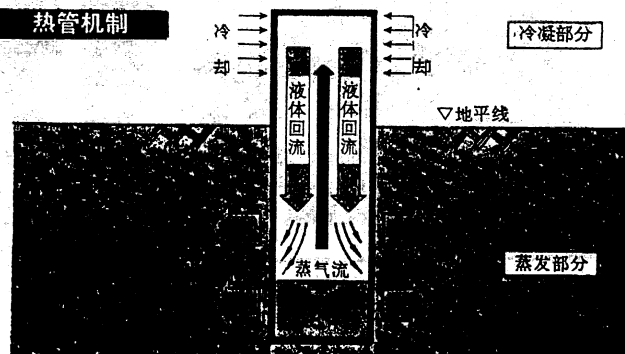
热管特性

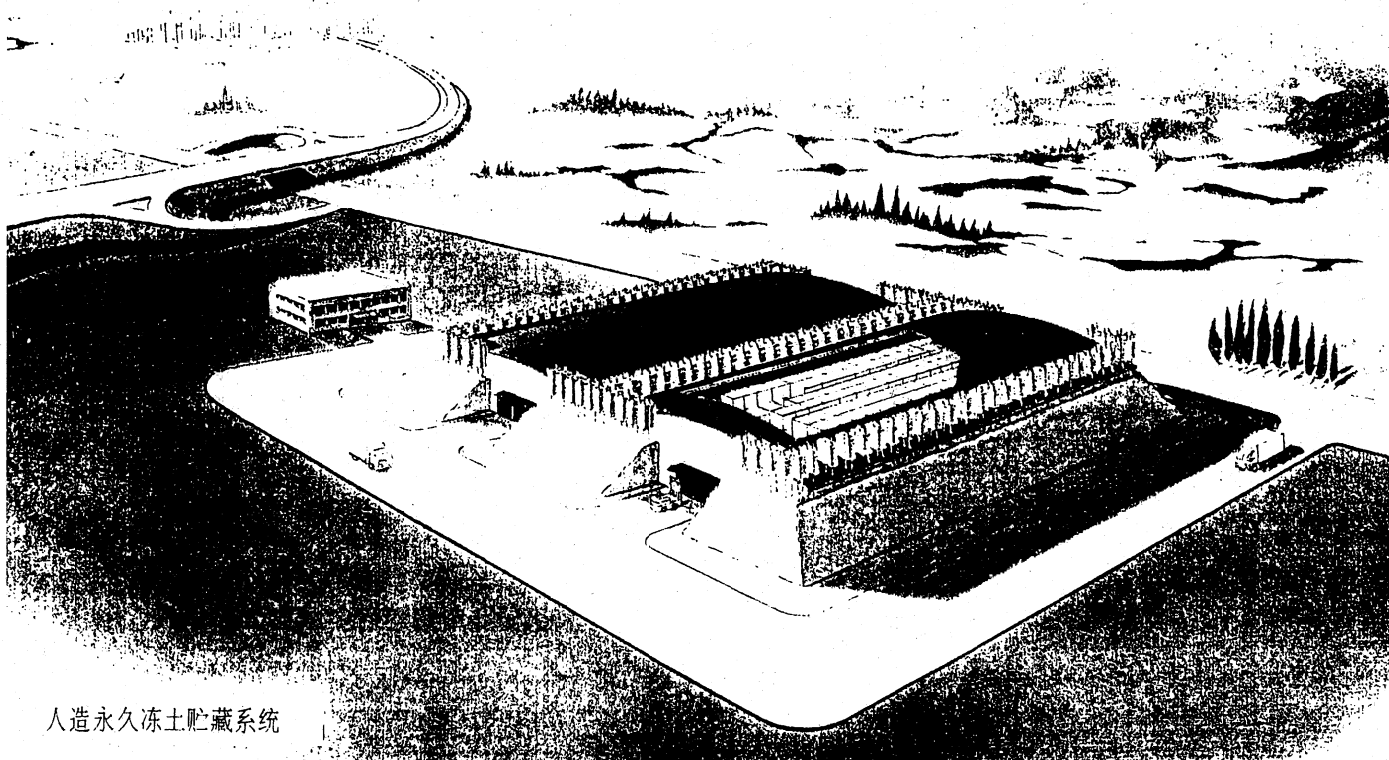
- 优良传热性
- 快速热响应性
- 表面温度的均匀性
- 不需维护工作
- 单一热流向

系统构成图



热管机制





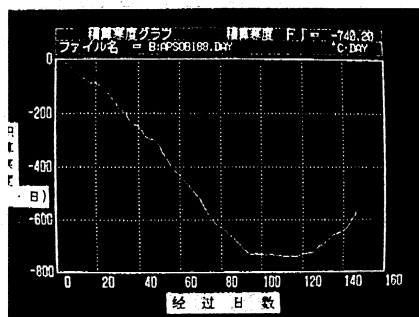
人造永久冻土贮藏系统

示范实验结果

●地点：带广畜产大学场地

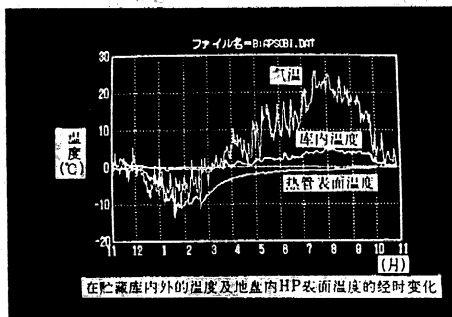
●共同研究：带广畜产大学・北海道大学

积算寒度



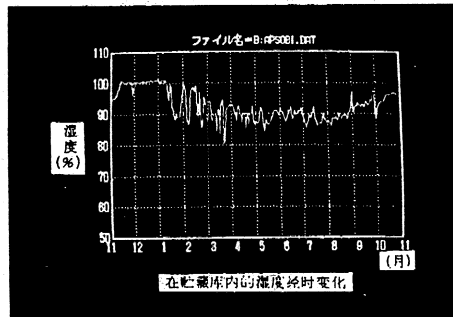
1987年度中带广的积算寒度是740°C

在贮藏库内外的温度经时变化



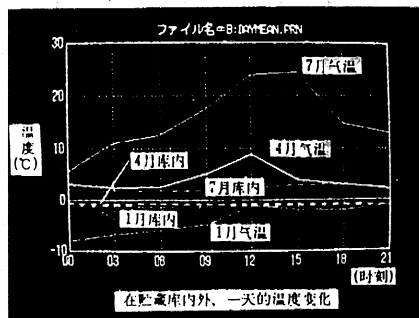
因在贮藏库内残留着人造永久冻土，通年可维持-1°C~5°C的低温度。

在贮藏库内的湿度经时变化



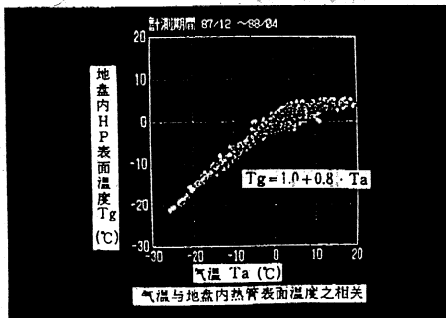
通年可维持约90%的一定高湿度。

在贮藏库内的温度日变化



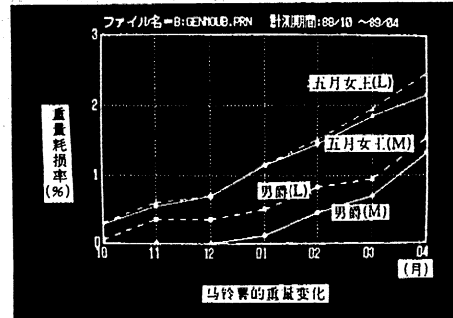
贮藏库内一天的温度变化，夏・冬两都可维持1°C以内。

热管的冷却能力



由于热管的热输送效率非常高，将自然的冷气高效率地可移动到地下。

贮藏物的耗损率



由于可维持马铃薯的水分，其耗损率仅为2%以下。

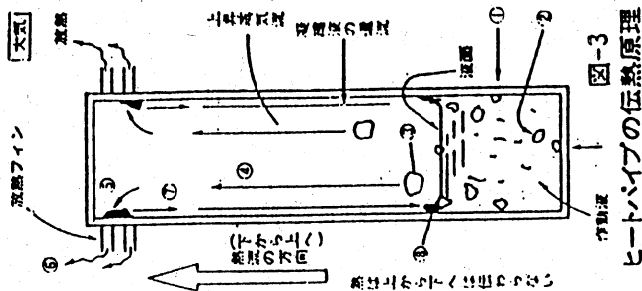
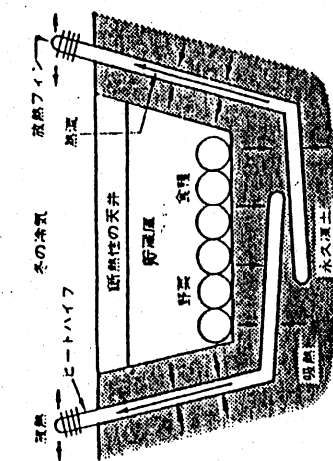
入門講座

優れた伝熱能力



短場人物

① 金に之 (口ハナニノ) 一
 ② 金に之 (口ハナニノ) 一
 ③ 金に之 (口ハナニノ) 一
 ④ 金に之 (口ハナニノ) 一
 ⑤ 金に之 (口ハナニノ) 一
 ⑥ 金に之 (口ハナニノ) 一
 ⑦ 金に之 (口ハナニノ) 一
 ⑧ 金に之 (口ハナニノ) 一
 ⑨ 金に之 (口ハナニノ) 一
 ⑩ 金に之 (口ハナニノ) 一

[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]

冬：土壤の熱をヒートパイプ
 を使って空気中へ放出す
 る（熱源は下から上へ）
 夏：気温が高くなっても熱は
 上から下へは伝わらない
 （一万通行）

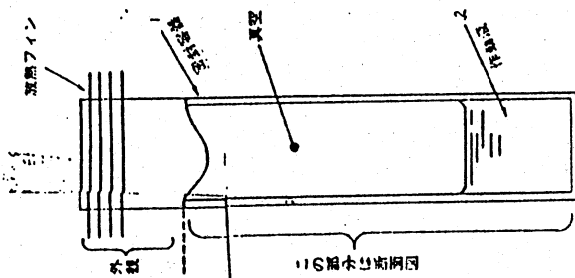


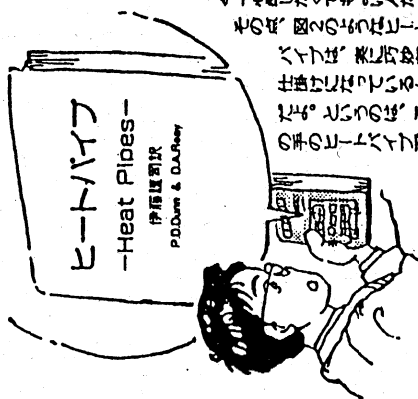
図-2 ヒートパイプの外観と構造の一例

ヒートパイプ

の は な し

入門講座

多様な応用分野



ヒートパイプは、熱伝達率が高く、構造が簡単で、信頼性が高い。また、液体の循環を駆動力とするため、電源やポンプが不要である。この特性により、宇宙空間や極限環境での応用が期待されている。

ヒートパイプの応用分野は、宇宙空間、原子力発電、電子機器の冷却、産業プロセスなど、多岐にわたる。特に、宇宙空間では、重力の影響を受けずに液体を循環させることができるため、重要な役割を果たしている。

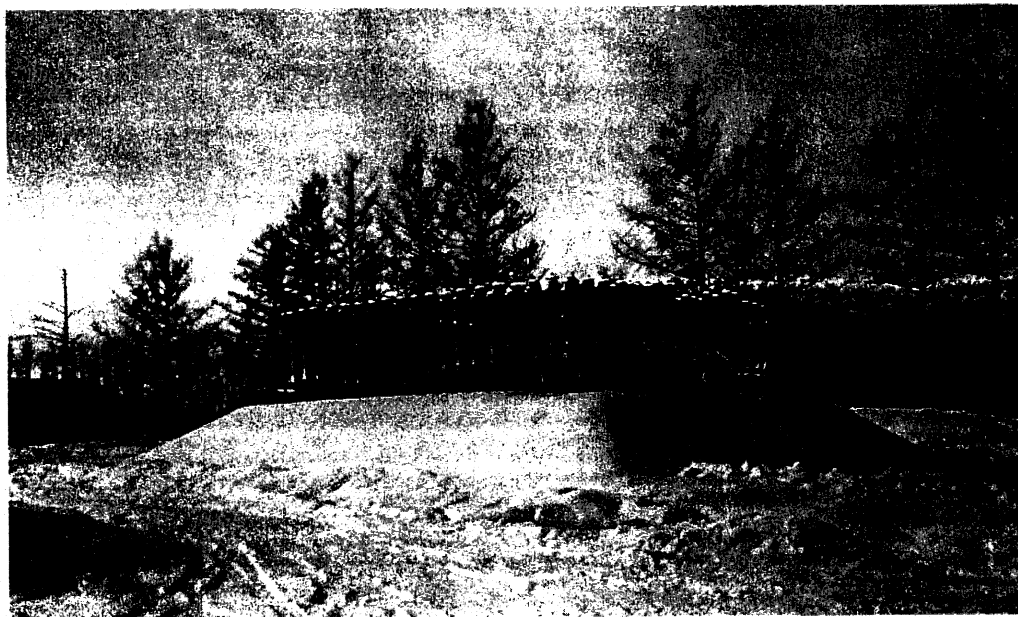
ヒートパイプの構造は、蒸発管、凝縮管、気相管、液相管の4つの部分から構成されている。蒸発管では、液体が加熱されて気化し、気相管を通過して凝縮管で冷却されて液体に戻り、液相管を通過して再び蒸発管に戻るという循環が繰り返される。

ヒートパイプの設計には、液体の沸点、熱伝達率、管径、管長などの要素が関係している。また、液体の循環速度を制御するために、管径や管長を適切に設計することが重要である。

ヒートパイプの応用分野は、宇宙空間、原子力発電、電子機器の冷却、産業プロセスなど、多岐にわたる。特に、宇宙空間では、重力の影響を受けずに液体を循環させることができるため、重要な役割を果たしている。

ヒートパイプ

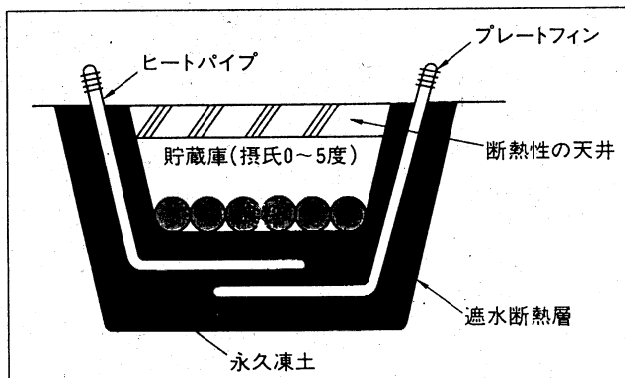
自然冷熱利用のヒートパイプ式 低温貯蔵庫を開発



◀帯広畜産大学の構内に設置されたHP式低温貯蔵庫

■ヒートパイプは、熱交換器、電子機器冷却や融雪に利用されていますが、このほど、自然寒冷エネルギーを有効利用した“ヒートパイプ式地中低温貯蔵庫”を開発しました。

北海道の道東地区は、冬期、 $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$ の寒気でおおわれます。ヒートパイプの一端を地中に埋設し、もう一端を大気中に露出しておきますと、ヒートパイプは、地中の熱を大気中に放散して、土壤を冷却し、人工的な凍土層を形成することができます。また、気温が上昇する春から夏にかけては、ヒートパイプの熱ダイオード特性（熱を下から上には伝えるが、上から下には伝えない）により、大気中から地中には伝熱しないので、凍土を一年中保持できます。貯蔵のための冷熱は、凍土中の氷の融解熱を利用しますので、常に貯蔵温度を一定に維持できるという特徴があります。この研究開発は、帯広畜産大学と北海道大学の協力のもとに、清水建設と共同研究を行ってきました。昭和62年12月に、帯広畜産大学の構内に、縦6m×横3.6m×高さ3.5mの実証プラントが完成し順調に稼働しています。今年の2月には、すでに貯蔵庫の周囲に2mもの凍土層ができていることが確認され、庫内温度も、 0°C に維持されています。ヒートパイプは、（外径：50mm、長さ：12m）コルゲート型で冷却部には、プレー



トフィンが取り付けられ、冷たい空気で冷却されています。また、凍土層の周囲には、土壤中の水分を一定に保つために、遮水層が設けられ、その外側を断熱しています。このシステムの運転には、まったくエネルギーを必要としないので、北海道の外、カナダや北欧などの、農業地帯の食糧貯蔵庫に多くの需要があると考えられます。さらに、核廃棄物や核燃料の貯蔵用として、今後実用化が期待できます。

なお、現在実験用貯蔵庫内には、ジャガイモなどの農産物が約7トン入れられ、その貯蔵状況を観測しています。また、この状況が、2月にNHKテレビで放映され、反響を呼んでいます。

（電力技術開発部）

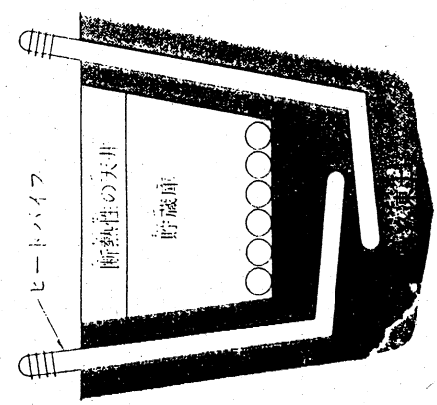
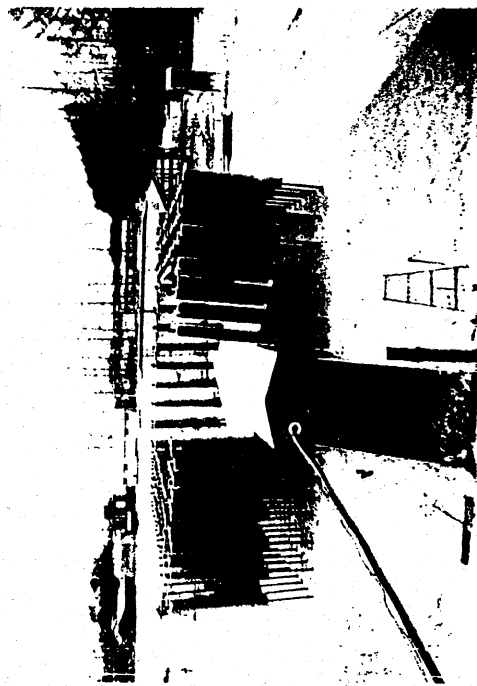
氷の科学① ● 氷の貯蔵庫

氷に関連したさまざまな研究が進んでいます。帯広畜産大学の土谷富士夫先生は、北海道の冬の寒さを利用し、電力を使わない氷の貯蔵庫の開発に取り組んでいます。これは冬の間に凍った土をヒートパイプという装置で一年中保存し、その土に囲まれた空間を農作物貯蔵庫にしようというものです。実用化されれば、電気代のかからない冷蔵庫として大いに活用できると期待されています。

■写真提供：帯広畜産大学 土谷富士夫先生

昭和六十三年十一月一日発行 第四八八号

からみた実験「氷の貯蔵庫」。土に何本もつきささっているのがヒートパイプで、の装置で地中の熱を地上に逃がし、冬の間に凍った土を保存する。



左から「氷の貯蔵庫」の仕組み、じゃがいもなどを保存した貯蔵庫の内部、冬に雪で埋まった貯蔵庫。ヒートパイプは1942年にアメリカで発明されたいわば熱交換機で、当初は人工衛星の通信機の温度制御などに使われていたが、現在では産業用、家庭用と多方面への実用化が進められている。



箱根ピクニックガーデン

週刊 文教ニュース

発行所(株)文教ニュース社

東京都港区西新橋1丁目23番10号 南和ビル
電話 03(503)6931 (代表)
発行日 毎週月曜日 (〒105)
購読料 郵送料共月額 5,500円

00 第946号 (第三種郵便物認可)

文 教 ニ ュ ー ス

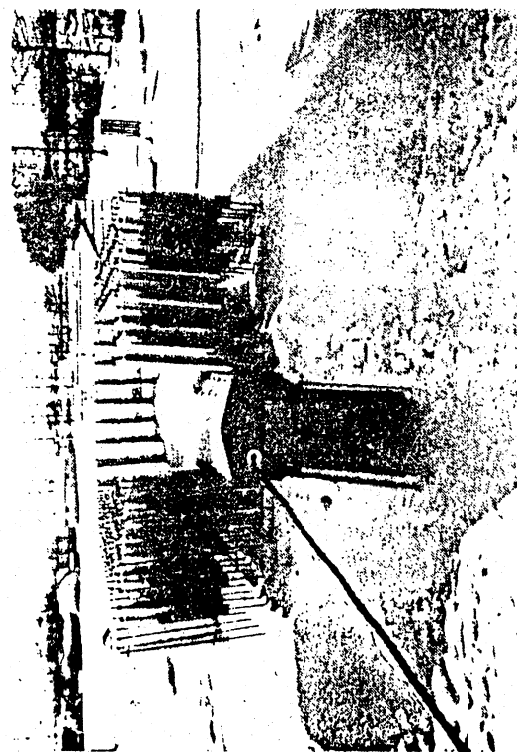
昭和63年2月29日(月曜日)

＝ 臨時E・E会学長・事務局長会議開く ＝

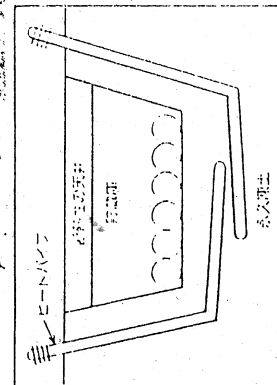


☆：臨時E・E会学長・事務局長会議が15、16の両日、大分大学で開かれ、①昭和64年度入試について②国際交流について③という当面する緊要事項についてつづこんだ協議が行われた。E・E会はEducationとEconomicの字を掲げた「国際大学」が基盤で、異校、異国、異文化、異言語を話し合い、情報交換することによって解決していくというもので、この日は小樽大、福島大、滋賀大、和歌山大、香川大、大分大の関係者が集まった。写真上は大分大学第一会議室で行われた協議の模様。出席者は出列が撮影、前列は局長、事務局長、大分大関係者。

＝ 帯広畜産大学の貯蔵プラントで実証試験 ＝



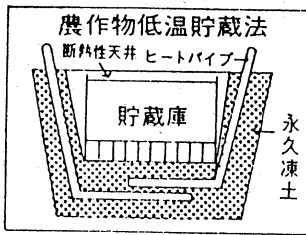
☆：帯広畜産大学でヒートパイプを使用した運転コストゼロの低温貯蔵試験がはじまった。十勝地方の強烈な寒さを逆手にとり、その冷気を農産物の貯蔵庫に活用する実験プラントが昨年末、同大学構内に完成。本格的な実証試験に入っているもの、熱伝導効果の極めて高いヒートパイプで人工的な永久凍土を作り出し、シヤカイモ等の農産物を凍土の冷気によって貯蔵する方法で、ランニングコストは全くかからない。画期的な省エネルギータイプ。農業関係者は、



消費も通界から実果の成果が期待されている。写真上は、実験プラントの貯蔵庫内。写真下はその様子。

人工永久凍土で 農作物低温貯蔵

12月から畜大で実証試験



土谷助教

農作物低温貯蔵法
断熱性天井 ヒートパイプ
貯蔵庫
永久凍土

ヒートパイプは内部にフロンガスの伝熱物質が入ったパイプで、通常の金属の数百倍の熱伝導率を持つ。このパイプを地中に埋設し、冬期間氷点下になった外気の冷熱を地中に伝えることで永久凍土層を作り、この層に閉じ込められた内部空間を貯蔵庫として活用する。上部は断熱材で覆い、夏期間は外気の熱が伝わらない仕組みで、貯蔵庫内を五度

前後に保てる見通し。畜大では農業工学科開発土壌学講座が担当、北大低温科学研究所などと三年前から基礎実験を継続してきており、今回初めて実際に農作物を貯蔵して実証する。建設する貯蔵庫の規模は六メートル×三・六メートル、深さ三・五メートルで、貯蔵庫の周囲の土中に長さ約十二メートル、直径約四十五センチのヒートパイプを二百十六本埋め込み、厚さ約二メートルの永久凍土層をつくる。建設費用は数千万円かかるが、電気代などのランニングコストはほとんどかからない、という。畜大ではこの施設は寒冷地ほど有利。帯広は農産物の生産場所でもあり、条件として最適（土谷畜大開発土壌学講座助教授）としている。

【札幌】帯広畜産大学は北大低温科学研究所、清水建設、藤倉電線と共同で十二月から年内でヒートパイプを利用した農作物の低温貯蔵庫の実証試験をスタートさせる。生産された農産物をどう新鮮なまま貯蔵するかが、生産地・十勝の課題でもあるだけに、実用化が期待される。

北大など
と共同で 実用化、大きな期待

ヒートパイプ利用

十勝毎日新聞

発行所

十勝毎日新聞社

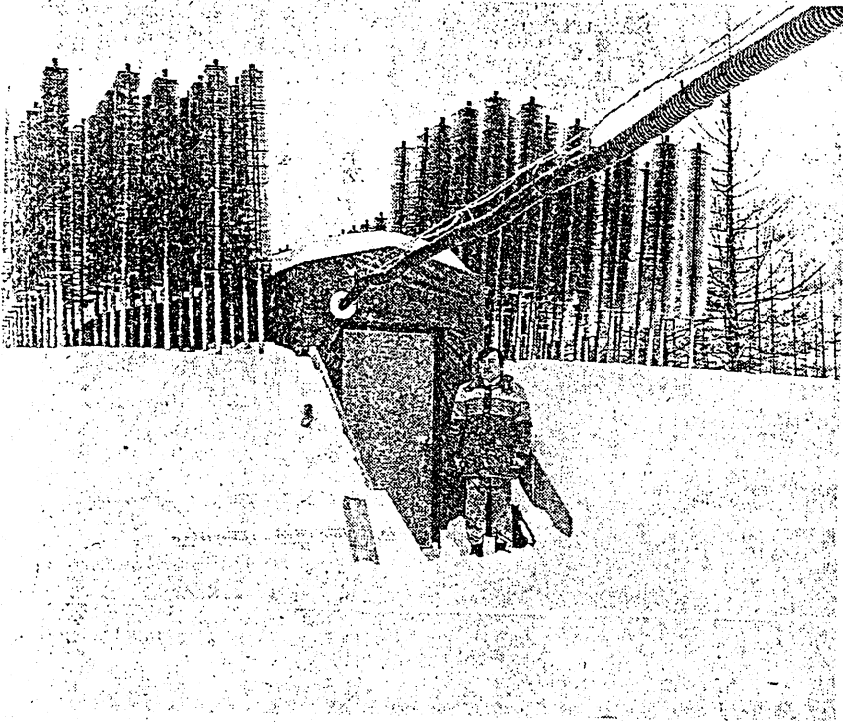
〒080 帯広市東一条南8丁目

電話＝編集②2121、広告

③2323、総務・販売④2222

©十勝毎日新聞社 1987

人工凍土で農作物貯蔵



畜大構内で実証試験が行われている低温貯蔵庫と土谷助教授

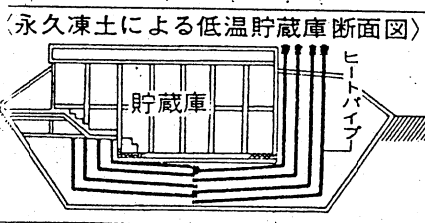
畜大で試験スタート

ヒートパイプ使い 運転コストはゼロ

十勝の強烈な寒さを逆手にとり、その冷気を農作物の貯蔵庫に活用する実験プラントが昨年十二月、帯広畜産大学の構内に完成、本格的な実証試験に入った。ヒートパイプという熱伝導効果の極めて高いパイプで人工的な永久凍土を作り出し、ジャガイモなどの農作物を凍土の冷気によって貯蔵する方法で、ランニングコストは全くかからない画期的な省エネタイプ。農業関係者はもとより消流業界からも実験の成果が期待されている。

この実験は帯広畜産大開発土木工学研究室をはじめ北大低溫科学研究所、民間の清水建設、藤倉電線の研究共同研究によるもの。基礎研究は四年ほど前から続けられ、今回実用化のための実験プラント建設に踏み切った。帯広畜大に設けられたのは、冬期間の強烈な寒さと、周辺の豊富な農産物が利用できるため。

システムは、ヒートパイプという内部にフロンガスの作動液の入ったパイプを地盤内に張り巡らし、冬期間の水点下になった外気の冷気を凍土の形で地盤内に蓄え、人工永久凍土層に囲まれた空間を貯蔵庫として活用する。上部



は百の断熱材で覆い、外気温の上昇する夏期間でも五度前後に保つ仕組み。

実験プラントの規模は縦十一メートル、横五メートル、高さ三メートルで、ジャガイモなら二十トンの貯蔵が可能。この貯蔵スペースの周囲に直経約五センチのヒートパイプ二百本を埋め込み、約二メートルの永久凍土層を作り上げる。現在、六メートルのジャガイモやユリ根などが貯蔵されており、凍土層や貯蔵庫内の温度、湿度をはじめ貯蔵物の減耗率など十数項目の測定結果をマイコンで記録している。

実験期間は来年十月末まで

の二カ年間にわたりヒートパイプの凍結性能、貯蔵物の品質評価などのメドをつけ、実用化したいとしており、実験を手がけている土谷富士夫開発土木工学研究室助教授は「建設費は三・三平方メートルあたり五十万円程度かかるが、実用化されればコストはもっと下がるはず。しかも自然界の冷気を利用するのでランニングコストが全くかからない点に注目してほしい」と話している。

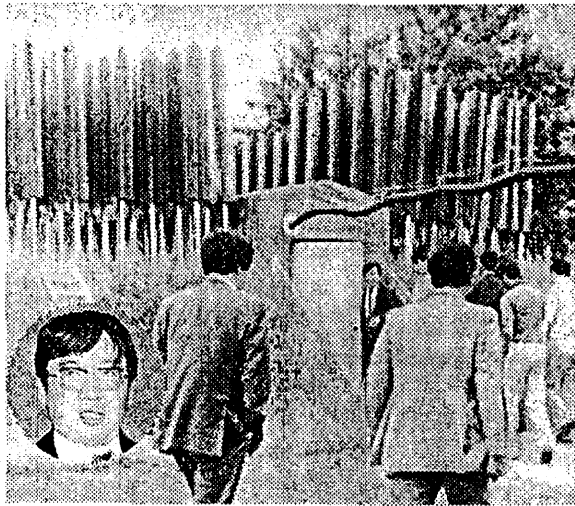
同研究室には管内の農業団体などから問い合わせが相次いでおり、関心は高まる一方。将来は食糧備蓄基地構想の強

実用化にメド

人工凍土の 低温貯蔵庫

夏でも室温5度以下

帯広畜産大の 実験プラント 関係者らが見学会



人工凍土による農作物低温貯蔵庫の実験プラントが昨年十二月、帯広畜産大に建設され、真夏を迎えた現在でも室温五度以下の良好状態を保っている。二十日午後、十勝地方の農業関係者を集めた見学会が開かれ、参加者たちを感心させた。

心させた。

同大学開発土木研究室の土谷富士夫・助教が北大低温科学研究所、清水建設、藤倉電線の協力を得て、四年前から全国初のシステム作りに取り組み、昨年、実験プラントを建設した。今年一月、貯蔵庫に約六メートルのジャガイモとユリ根を運び入れて保管。室内が予想より冷えすぎてジャガイモが一部腐るアクシデントに見舞われたものの、低温と高湿度が維持され、保管状態は全体として良好。土谷助教は「実用化のメドが立った」と自信を得た。

このシステムは、厳寒期にヒートパイプの林立する貯蔵庫へ向かう見学者と円内は土谷助教

は土谷助教

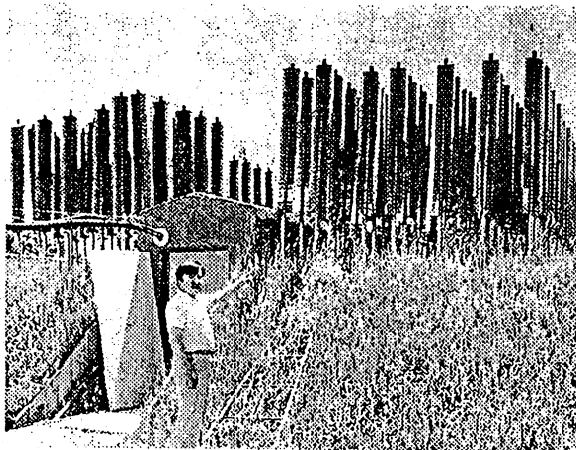
貯蔵庫の周りの土をヒートパイプを利用して凍土化し、貯蔵庫を冷却する仕組み。ヒートパイプはステンレス管にフロンガスを封入したもので、フロンガスが管内で蒸気と液化を繰り返しながら地中の熱を奪って大気に放散し、土を凍結させる。実験プラントでは幅三・六メートル、奥行き六メートル、高さ三・五メートルの半地下式貯蔵庫を作り、その下と周囲に、熱放散用のフィン(百七十枚のアルミ板)が地上に露出し

たヒートパイプを二百十六本埋めた。庫内の温度・湿度と土の温度、フィン周辺の温度を自動測定した結果、貯蔵庫の周囲はねらい通りに凍土化し、夏場を迎えても解凍せず庫内は低温のまま。逆に厳寒期にはヒートパイプが働き過ぎて庫内が氷点下になったため保冷する一幕もあり、ヒートパイプ設置本数が増えたことがわかった。

見学会には約四十人が参加し、土谷助教は「電気代などのランニングコストが全くなからない②施設の保守・管理が不要——などと同システムの特徴をあげ「ジャガイモや玉ネギの保管に適している」と見解を述べた。実験プラントを見た参加者たちは威力に驚いた様子で、電気冷却による貯蔵庫を使っている青森県協会の坂井誠司・振興開発室主任は「非常に有効な貯蔵方法のような。早く実用化してほしい」と話していた。

人工凍土で農産物保存

帯広畜産大 土谷助教 実用試験に成功



ヒートパイプが林立する人工永久凍土利用の低温貯蔵庫と土谷助教

【帯広】冬期間にヒートパイプを使って人工的に作り出した永久凍土を利用し、夏の間も農産物を低温貯蔵する実験が、帯広畜産大開発土木工学の土谷富士夫助教(右)の元で進められている。夏でも貯蔵庫内は四度前後に保たれ、「技術的には実証できた。あとは建設コストが課題」と実用化に自信を深めている。

冬の寒さ蓄え夏に利用

この実験は十勝地方で冬期間見られる土壌凍結の被害などを研究しているうちに、凍土の貯蔵利用を思いつき、四年前から北大低温科学研究所、清水建設、藤倉電線と共同研究で取り組んでいる。

仕組みは貯蔵庫の周囲を覆った土を厳寒期にヒートパイプで夏でも解けない永久凍土化し、冷蔵する。ヒートパイプはステンレス管にフロンガスを詰めた伝熱管で、フロンガスは管内の下部で土の熱を奪って気化し、管内上部で熱を放出して液化、下部に再び戻って循環する。このサイクルを繰り返し、厳冬の北海道なら効果的に冷

この実験は十勝地方で冬期間見られる土壌凍結の被害などを研究しているうちに、凍土の貯蔵利用を思いつき、四年前から北大低温科学研究所、清水建設、藤倉電線と共同研究で取り組んでいる。

却できる。昨年十二月、同大構内にモデルプラントを設け、半地下式で高さ三・五メートル、幅三・六メートル、奥行き六メートルの貯蔵庫を約二百立方メートルの土と断熱材で囲い、上部に熱放射板百七十枚付きのヒートパイプ二百十六本を埋め込んだ。土は順調に凍土化し、ヒートパイプが多すぎて一時冷えすぎたりもしたが、その後は零度から四度前後で維持し、ジャガイモやユリ根は良好な状態で保管されている。もう一シーズン実験し改良する予定で、技術的には大型化も十分可能。また年内にも厳密なコスト計算を行うことになっている。現状では当初の建設費は電気による冷凍冷蔵施設に比べかなりかさむが、その後の電気代など運転費用が一切不要のため、「耐用年数をも考えたら」は「ずっと安上がりなのは確実で、実用性は十分」と自信を見せている。

とがち農業

中東が不安な情勢だ。もし石油の値段が高騰すれば、機械化された十勝農業も大打撃を受ける。ラニンクコストがかさむ低温貯蔵庫を、ヒートパイプと永久凍土を利用して「維持費ゼロ」にしてしまおうと、帯畜人、土谷富士夫助教授(開発土木工学)が成功している。この方法での実用貯蔵庫は網走市でも順調に動いている。十勝の気象を生かした省エネの工夫で、農産物の通年出荷や、食糧備蓄が低コストで実現する。

(横田 光俊記者)

畜大構内にある実験用貯蔵庫に入ってみた。半地下の庫内は広さ二二・六平方メートル。外は真夏の暑さでも、中は四度以下に保たれ、鳥肌が立つほど寒い。「ほら、昨年秋に入れたジャガイモ、長イモ、ニンジン、ゴボウもこの通り」と土谷さんが示した。十カ月近く貯蔵していても低温のために芽が出ない。貯蔵庫の壁は土で、適度な湿度(九〇%以上)が保たれ、鮮度も十分だ。この貯蔵庫の

凍土を生かす

維持費ゼロの冷蔵庫

じゃま者逆利用する知恵

を利用してしまうはいじやないか」と、農産物の冷蔵に利用することを思いついた。

農産物を通年冷蔵するために、土谷さんはヒートパイプで人工的な永久凍土をつくることにした。ヒートパイプは、ステンレスなどの金属パイプの中にフロンガスなど

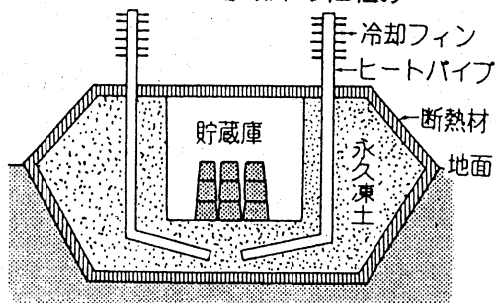
凍土ができてしまう。夏成させた。すでに三回の間は、パイプ内のガスが気化したままなので熱の移動はない。凍土を発生スチロールの断熱材で囲んでおけば、永久凍土として夏でも溶けない仕組みだ。

この方法でつくった実験貯蔵庫を畜大構内に、昭和六十二年十二月に完工させた。土谷さんは、実験も続けられ、「ジャガイモは糖度が増して、味が良くなった。一年は保管できる見込みだ」と土谷さんはいう。

最大の魅力は「電気代がかからないこと。一度つくれば、ほとんど維持費はゼロ」と土谷さん。その秘けつは、壁の永久凍土だ。

十勝農業にとって、凍土は長年、じゃま者でしかなかった。厳寒、少雪の気象で畑の土は地下一メートルまでガチン、ガチンに凍り、春耕の季節を迎えても解けずに作業の障害になることが多かった。この凍害防止の研究を進めていた土谷さんは、六年ほど前、「逆に凍土と自然に

永久凍土低温貯蔵庫の仕組み



「昨年収穫したジャガイモも新鮮な状態です」と実験貯蔵庫内で示す土谷さん

あ と が き

このヒートパイプを使用した人工凍土低温貯蔵庫に関する研究は、帯広畜産大学と清水建設株式会社、藤倉電線株式会社、中道機械株式会社の共同研究体制で行われました。

特に、ヒートパイプの凍土造成実験からモデルプラントの建設にいたるすべての過程で、清水建設技術研究所の主任研究員、了戒公利（工学博士）氏の絶大なる助力によつて行われたことを深く感謝いたします。また、凍土造成と立案にあたり、北海道大学低温科学研究所、福田正己教授（理学博士）の助言を得たことに感謝します。ヒートパイプ開発、施工等に関して、藤倉電線研究開発本部、望月正孝、益子耕一の両氏には多大の助力を得たことに深く感謝いたしまし。また、開発維持、農産物流通に関して、清水建設エンジニアリング本部の町 文治課長をはじめ、佐々木清貴氏、原田 徹氏らの多大な協力に感謝いたします。また、農産物流通や施設に対し中道機械(株)の田口幸夫、杉岡正明の両氏の協力に感謝いたします。生花貯蔵に関しては(株)帯広植物園の杉田氏の協力に感謝致します。

当、帯広畜産大学土地資源利用学講座（旧開発土木工学研究室）、松田 豊教授（農学博士）をはじめ、多数の学生諸君の助力を受けたことに、ここに謝意を表します。

最後に、研究分担者の当研究室の辻 修助手に多種多様の観測、保持、データ整理など雑多の仕事を担当していただいたことに感謝いたします。

（土谷 富士夫 記）