

# 冬期の寒冷気候を利用した土壌凍結層の 長期保存とその熱的解析

(研究課題番号 61560254)

昭和61,62,63年度科学研究費補助金(一般研究C)  
研究成果報告書

平成元年3月

土谷 富士夫

(帯広畜産大学畜産学部助教授)

# 冬期の寒冷気候を利用した土壌凍結層の 長期保存とその熱的解析

昭和61,62,63年度科学研究費補助金(一般研究C) 研究課題番号 61560254

## 1. 研究組織

土谷 富士夫 (帯広畜産大学畜産学部助教授)

## 2. 研究経費

昭和61年度	1,400 千円
昭和62年度	500 千円
昭和63年度	100 千円
計	2,000 千円

## 3. 研究発表

### (1)学会誌等

- 1) 土谷富士夫: 農地の土壌凍結の抑制と凍結保存, 第1回寒地シンポジウム, 378-382 (1985年11月)
- 2) 了戒公利、土谷富士夫、福田正己、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, 第2回寒地シンポジウム, 402-412 (1986年11月)
- 3) 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回寒地シンポジウム, 413-416 (1986年11月)
- 4) 了戒公利、福田正己、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), 第3回寒地シンポジウム, 22-26 (1987年11月)

- 5) K.Ryokai, F.Tsuchiya, M.Mochizuki : Frost Expansion Pressure and Displacement of Saturated Soil Analyzed with Couple Heat and Water Flow, 5th International Symposium of Ground Freezing, 115-120 (1988年8月)
- 6) M.Fukuda, F.Tsuchiya, K.Ryokai, M.Mochizuki, K.Mashiko : Development of an Artificial Permafrost Storage using Heat Pipes, 6th International Heat Pipe Congress, 285-289 (1988年9月)
- 7) 土谷富士夫、福田正己、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) , 第4回寒地シンポジウム, 525-529 (1988年11月)
- 8) F.Tsuchiya, K.Ryokai, M.Mochizuki : Utilization of Heat Pipes for an Artificial Permafrost Storage, 2th International Symposium on Cold Region Heat Transfer, (printing 1989年6月)

## (2) 口頭発表

- 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発表会, 1986年10月
- 2) 土谷富士夫, 辻 修, 了戒公利 : 寒冷気候下のヒートパイプによる土壌凍結促進効果, 昭和63年度農業土木学会大会, 1988年7月
- 3) 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, 第37回農業土木学会北海道支部発表会, 1988年10月

## 目 次

I	はじめに	1
II	寒冷環境下の土壌凍結の推移	2
	1. 過去8年間の気象環境	2
	2. 過去8年間の地温の変動	5
	3. 自然積雪下の土壌凍結	10
III	熱伝導理論に基づく凍結深さの推定	57
	1. 熱の定常流に基づく凍結深さの推定	57
	2. 非定常熱伝導	59
	3. 温度の突然変化に対する解析	60
	4. Neumann の解法	61
	5. Stefanの解法	63
IV	凍結土層の保存と凍結深さの数値解析	65
	1. 差分法による凍結深さの数値解析	65
	2. 未凍結、凍結土壌の熱的性質の決定	67
	3. 凍結保存区の凍結推移と推定値の比較	68
V	ヒートパイプを使用した永久凍土低温貯蔵庫	71
	1. はじめに	71
	2. 寒冷地域と寒さ	72
	3. 永久凍土とは	72
	4. ヒートパイプとは	74
	5. ヒートパイプの性能と用途	76
	6. ヒートパイプの寒冷地域の使用例	77
	7. ヒートパイプによる人工永久凍土と低温貯蔵庫	80

## I. はじめに

土壌凍結の研究は、20世紀初期にTaberが凍上の主因が土壌内部のアイスレンズであることを明らかにしてから、本格的に研究が始まった。そして、Beskowが凍上性の土壌分類を初めて試みた。その後、カナダ、ソビエト、アメリカなどで凍上対策の研究が推進された。近年、アメリカのアラスカ地域で北極油田から石油輸送パイプライン建設にともない、凍土の物理性や力学性について多大な成果が得られるようになった。しかし、いずれも永久凍土に関するものが主流であった。

他方、わが国では戦後の食糧増産問題と関連して、北大の中谷らの土壌凍結の研究から開始された。昭和30年代になって北海道開発局や北大の低温科学研究所などで、道路、鉄道などの凍上対策の研究がなされてきた。そして、最近では液化天然ガスの土中での低温貯蔵に関連して、人工凍結の研究および技術が民間レベルで発達してきた。しかし、厳寒な極地や高山の永久凍土や暖地での人工凍結の研究が多いなかで、その中間での季節的凍結に関する研究は比較的少ない。この事は、凍結のメカニズムに融解が加わるため、より複雑化し、さらに時間的要因に支配される非定常的な問題として扱われるためである。

冬期寒冷で比較的積雪の少ない北海道東部地域は、年次や地形によって異なるが土壌は深くまで凍結する。土壌凍結と凍上が農地に及ぼす影響も大きく、農業構造物の水路、擁壁、農業建造物、農道の凍上破壊は今も大きな問題となっている。他方、凍結、凍上は小麦などの越冬作物、アルファルファなどの永年牧草の冬枯れ被害をもたらすことが判明した。こうした凍結・融解のメカニズムを考えると、膨大なエネルギーの流入と放出の繰返しが毎年起こっていることに着目される。

近年、石油備蓄計画が実施されたことから、将来において食糧備蓄計画の推進が必要となると考える。このような場合、従来の冷凍・冷蔵施設や冷凍機械などの電気エネルギーを利用した貯蔵方式では膨大な設備投資と維持費を必要とするため、実現性はほど遠い。省エネルギーで貯蔵できる新しい方式の開発が望まれる。幸いにも、帯広を中心とした北海道東部地域は、冬期寒冷であることから、この自然エネルギーを大いに利用し、土壌を多量に凍結させた後、この凍結土層を長期保存することができるなら、天然の低温貯蔵庫として利用できる。

## II 寒冷環境下の土壌凍結の推移

気温が0℃以下に低下すると、土壌が凍結し始める。土壌凍結作用とは、地温が0℃以下になり、土壌中の水分が氷に変化する現象であり、この時土壌水分分布に変化が生じる。これは温度勾配によるサクシヨンの変化によるもので、下層から、凍結層に向かって緩やかな水分上昇が生じる。この時、土層にアイスレンズと呼ばれる分離水層が形成され、これが発達しながら土粒子を排斥し間隙を膨張させる。そして土層中にレンズ層が幾重にも増加するにつれ、土粒子は上方に押し出され地表面は隆起する。これが、凍上と呼ばれ、凍結現象のなかで最も厄介な問題とされているものである。凍上は土壌凍結深さと関係するため、凍結深さに影響を与える下記の要因が重要となってくる。

- 1) 積算寒度（凍結指数とも呼ぶ）、温度および気候的因子
- 2) 地被状態および地形
- 3) 土の土性および粒度組成
- 4) 土と水系の熱的性質
- 5) 間隙水の性質

これらの要因のなかで温度条件が最も凍結深さに影響をあたえる。そこで、最近7年間の畜産大学実験圃場で観測された凍結推移とその寒冷環境について分析を行うことにする。

### 1. 過去8年間の気象環境

農業工学実験圃場に設置されている総合気象観測装置によると、大型1号百葉箱内には気温測定のため、Pt100Ωの白金抵抗が用いられている。また、露場内には雨量観測のために、転倒杵タイプの雨量計が設置されており、日照時間の測定には地上10mにバイメタル式日照計が取り付けられている。その他、風向、風速、日射、湿度、気圧、蒸発量などのセンサーが設置されている。また、露場内には地温測定用のCC熱電対センサーが50cmまでは5cm毎に、100mまでは10cm毎に計16点の各深さに埋設されている。

各データは土地改良実験室内のデータ集録システムに入力され、アナログ記録

計に連続記録されている。そして、3時間毎にA/D変換され、デジタル記録計から紙テープパンチャーによつて出力され、パーソナルコンピュータで集計される。

## 気 温

気温は年次によつて大きく変動し、1980年の年平均気温は $5.5^{\circ}\text{C}$ であった。他方、81から87の年平均気温は、それぞれ $4.6$ 、 $4.8$ 、 $4.2$ 、 $4.1$ 、 $4.6$ および $3.9^{\circ}\text{C}$ であった。したがって、これらを平均すると帯広畜産大学では年平均気温は $4.5^{\circ}\text{C}$ となり、帯広測候所の平年値、 $6.1^{\circ}\text{C}$ より $1.6^{\circ}\text{C}$ 低いことがわかった。これは、近年測候所が都市気候の影響を受け、冬期間の温暖化が発生して高い値を記録する傾向にあるため、土壌凍結等の基礎データとして計算に用いる場合、過大または過小に評価するのでかなりの注意が必要である。

図1に、各年の日平均気温の変動を5点移動平均法によつて処理した結果を表示した。一般に、気温が最も低い月は1月で平均値で、 $-11.2^{\circ}\text{C}$ となる。他方、12月は $-6.3^{\circ}\text{C}$ 、2月は $-10.6^{\circ}\text{C}$ 、3月は $-4.1^{\circ}\text{C}$ と1月よりは高い気温を示すことがわかる。なかでも、1985年の1月の月平均気温は最も低く、 $-13.5^{\circ}\text{C}$ を記録している。また、1982年の2月の月最低気温は、 $-13.7^{\circ}\text{C}$ と最近8カ年で最も低い値が得られている。図には示さなかったが、日最低気温の一位は、1982年2月2日に $-35.4^{\circ}\text{C}$ であった。第2位は同年2月6日の $-34.4^{\circ}\text{C}$ が記録として得られた。

一般に、凍結した土壌が融解し始めるのは4月であり、この月の月平均気温は $4.0^{\circ}\text{C}$ である。他方、年間最も温度の高い時期は8月であり、平均 $19.1^{\circ}\text{C}$ の月平均気温となつている。しかし、1985年の夏は高温で推移し、 $20.7^{\circ}\text{C}$ の高い値を記録している。他方、8年間には冷夏が出現し、1980年は $16.9$ と近年希な低い月平均値を示している。また、8月の日平均気温の最低では1984年8月20日に $7.8^{\circ}\text{C}$ が記録されている。しかし、この間暑い夏も存在し、1983年8月6日に $35.8^{\circ}\text{C}$ もの最高値を記録している。この事から、寒冷地域といえども、最高で $35.8^{\circ}\text{C}$ 、最低で $-35.4^{\circ}\text{C}$ と $71.2^{\circ}\text{C}$ の温度幅を持つことから、自然エネルギーの変動が大きいことが理解される。

## 降 水 量

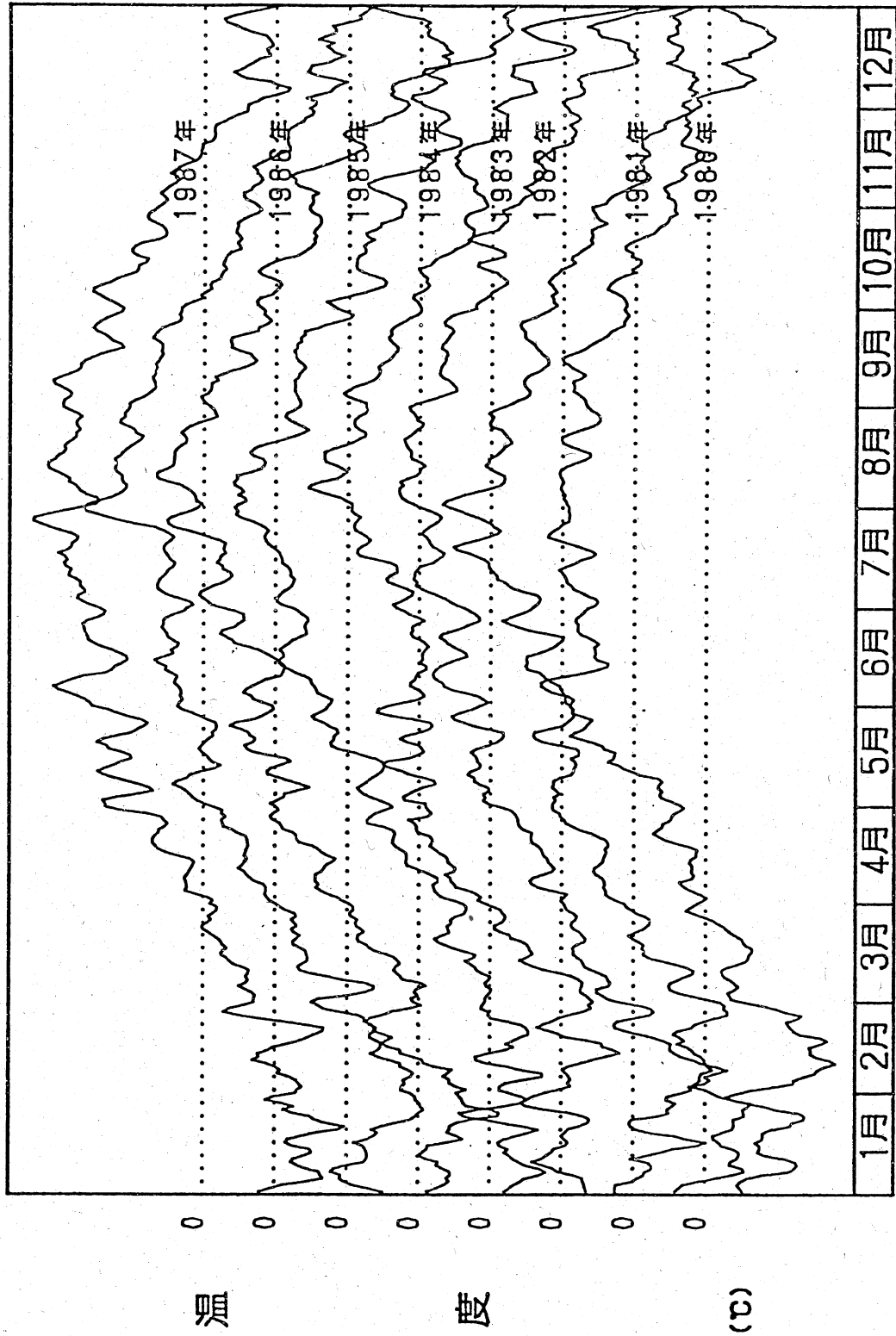


図1 畜産大学における1980～1987年の日平均気温の推移



一般に帯広の年間降水量の平年値は952mmであるが、その季節的分布をみると、冬期間より夏期間の8、9月に多くの降水を記録する。これは、熱帯性の低気圧が日本列島を北上する時、台風の余波と温帯性低気圧の影響によるものである。図2は、8年間の畜産大学で観測した日降雨量の棒線グラフで表示比較したものである。これによると、年による変動が大きく、近年降水量は減少傾向にあり、時折干ばつと呼ばれるほど、水分不足悩まされている。

冬期間は、一般に降雪となって現れ、土壤凍結と密接な関係にある。初冬の12月よりは2月の遅い季節が最も降雪が多く、特に3月後半の豪雪が時折発生する。これは、「台湾坊主」または「どか雪」と呼ばれ、低気圧が本州南岸を急速に北上しながら、異常に発達して各地に豪雪の被害をもたらすものである。ちなみに、1970年3月16日に帯広で102cmの最高記録を達成している。この8年間では1986年3月21日に最深積雪深の78cmが記録されている。冬期間後半の積雪は融解を遅らす働きを有すため、土壤凍結を長期化させる。しかし、ひと度降雪から降雨に変わると、暖かい水温を持つ雨が土壤の融解を促進する機能を発揮する。

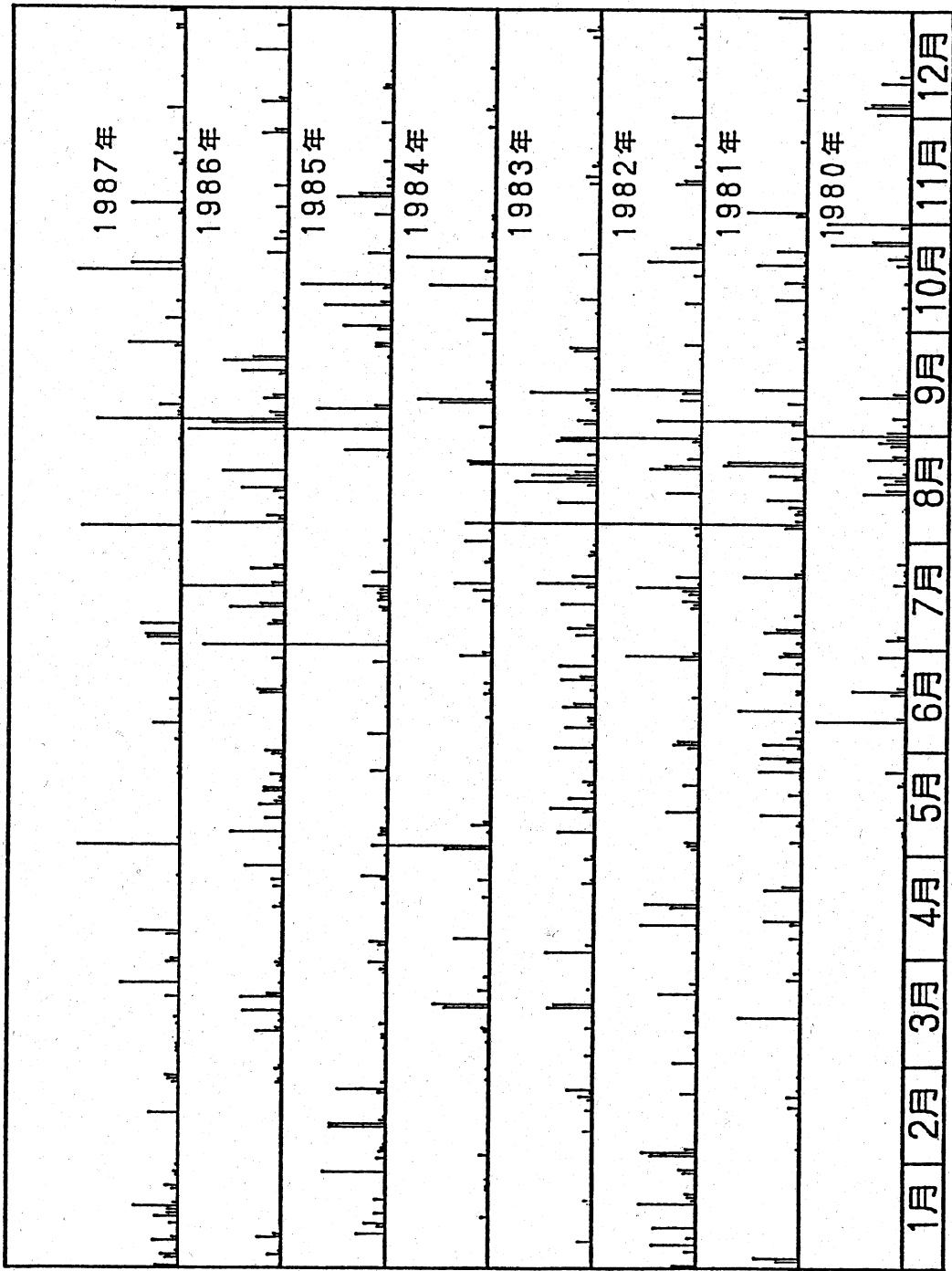
#### 日照時間

日照時間の測定にバイメタル式日照計を用いたが、近年WMD（世界気象機関）では日照時間は「直達日射が $120 \text{ w/m}^2$ 」以上あるときを日照とする定義がなされ、ジョルダン式日照計と比較するときは、0.85の係数を掛けて使用する。図3に過去8年間の日照時間の変動を示す。

一般に、帯広は3～5月に日照時間は増大し、6～8月の夏期に低下する傾向にある。なかでも、1986年の7月はわずか90.7時間と近年希に小さな値となった。他方、日照時間の月最大値は1984年3月に295.8時間を記録した。この事から、3から5月にかけて、凍結した土壤を活発に融解させる能力は十分に大きいことがわかる。

#### 2. 過去8年間の地温の変動

作物栽培上重要な意味を持つ土壤深さは、その作物の種類によって異なるが、一般には地表面下、40～50cmと言われている。そして、冬期間比較的積雪が少な



降 水 量 (mm)

図2 畜産大学における1980～1987年の日降水量の推移

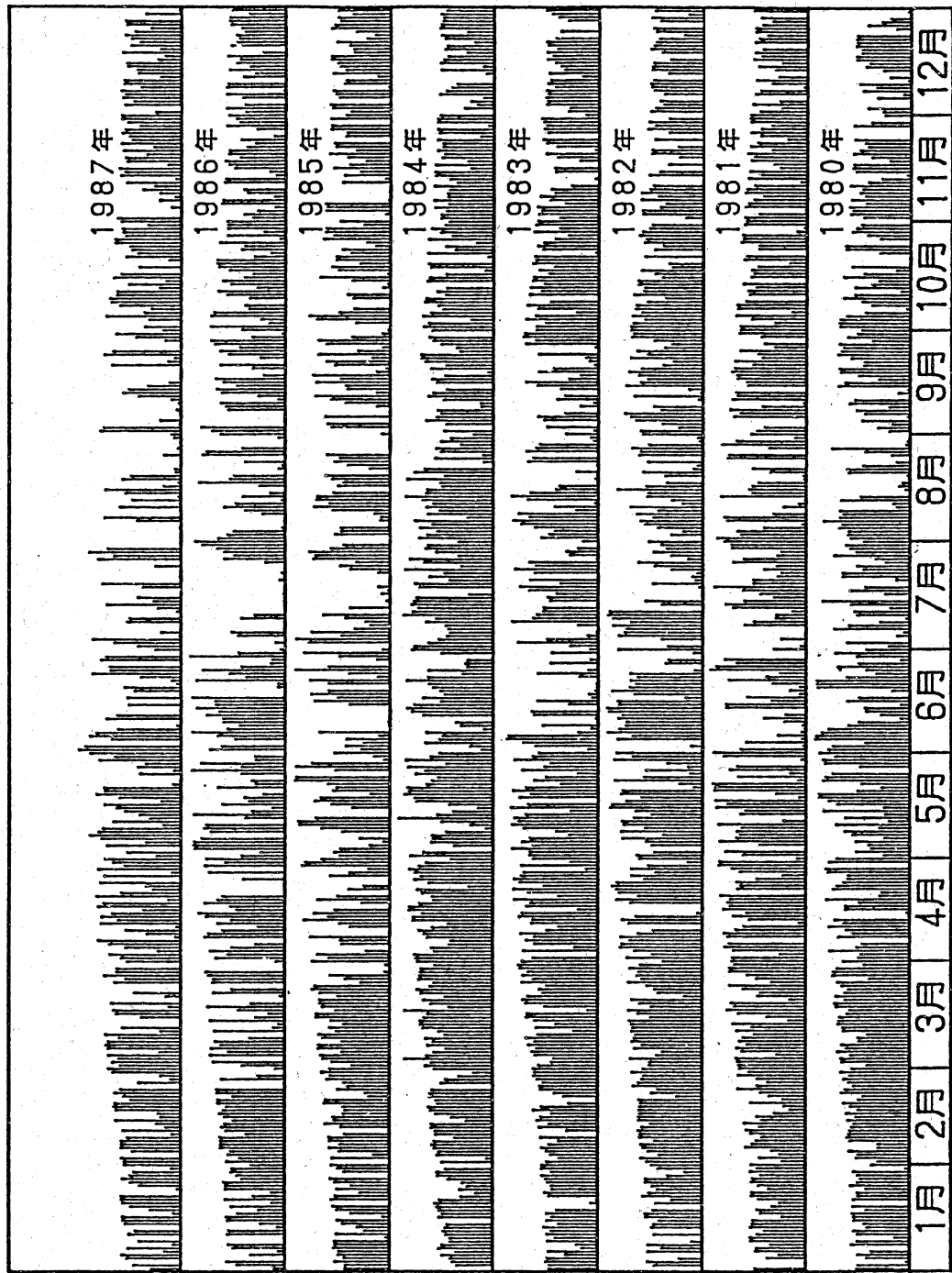
い帯広では、年によっては地面から凍結する深さが丁度この40~50cmに相当する。

寒冷地域では、作物の発芽期から幼苗期にかけての地温の影響は極めて重要であり、気温よりも影響が大きいとも言われている。一般に、地温は太陽放射、風速、土壌水分、地表面の被覆状態などの複合的要因によって影響を受けることは周知の通りである。地温は、地表面での熱エネルギーの授受によって上昇あるいは下降する。主たる熱エネルギーは太陽放射であるが、土壌中で微生物が有機物質を分解する際に遊離される熱エネルギーや地球内部から地表面に流れる熱エネルギーもあるものの、これらは太陽放射に比較するとその量は極めて少ない。

表1に畜産大学圃場で1980~1987年まで、3時間ごとに測定を行った地温を集計して得られた深さ別年平均地温を示す。これによると、深さによる地温の変動はきわめて少なく、いずれも1°C以内である。地表面温度を除くなら、一般に表面下20cmまでは8.7°Cと地下50cmの深い部分の9.2°Cよりわずかに低い傾向がみられた。しかし、全体的には変化は少なく、年変動のほうがわずかに差が現れている。1982年の年平均地温は9.6°Cと高く、1984年の8.4より1.2°Cも高い値となった。この1982年は年間を通じて他の年よりも気温が高かったためである。年次および深さ別の全平均地温は8.9°Cとなり、年平均気温4.5°Cよりも4.4°Cも高い値を示している。この事は、地中深部から表面に向かって伝達される熱エネルギーが大きいことを意味している。

図4に80年~87年までの8年間の平均地温の深さ別の変動を示した。この結果をみると、1月から3月末まで表面に近いほど地温が低く、深くなるにつれて地温が高い傾向を示す。4月初旬になると、突然に50cm以下の深い部分の地温が低下する特異な変化がみられた。これは、土壌凍結によつて上部の水分が下方への浸透が妨げられていたのが、凍結層の突然の消失によつて浸透が許され、冷たい上部の融解水が流下して地温の低下をもたらしたためである。これは、土壌凍結地帯特有の現象と思われる。

そして、4月になって土壌は地表面から暖められるため、地表近くの温度は急激に上昇し始める。他方、深部の地温は依然低下を続け、年最低を記録する傾向がある。やがて、全体的に各深さの地温は上昇し続け、7月下旬から8月にかけて最高値となり、気温の低下にともなつて再び低下し始める。そして、9月下旬に、逆に地温は表面に近いほど低下が大きくなる。



日 照 時 間

(hr)

図 3 畜産大学における1980～1987年の日照時間の推移

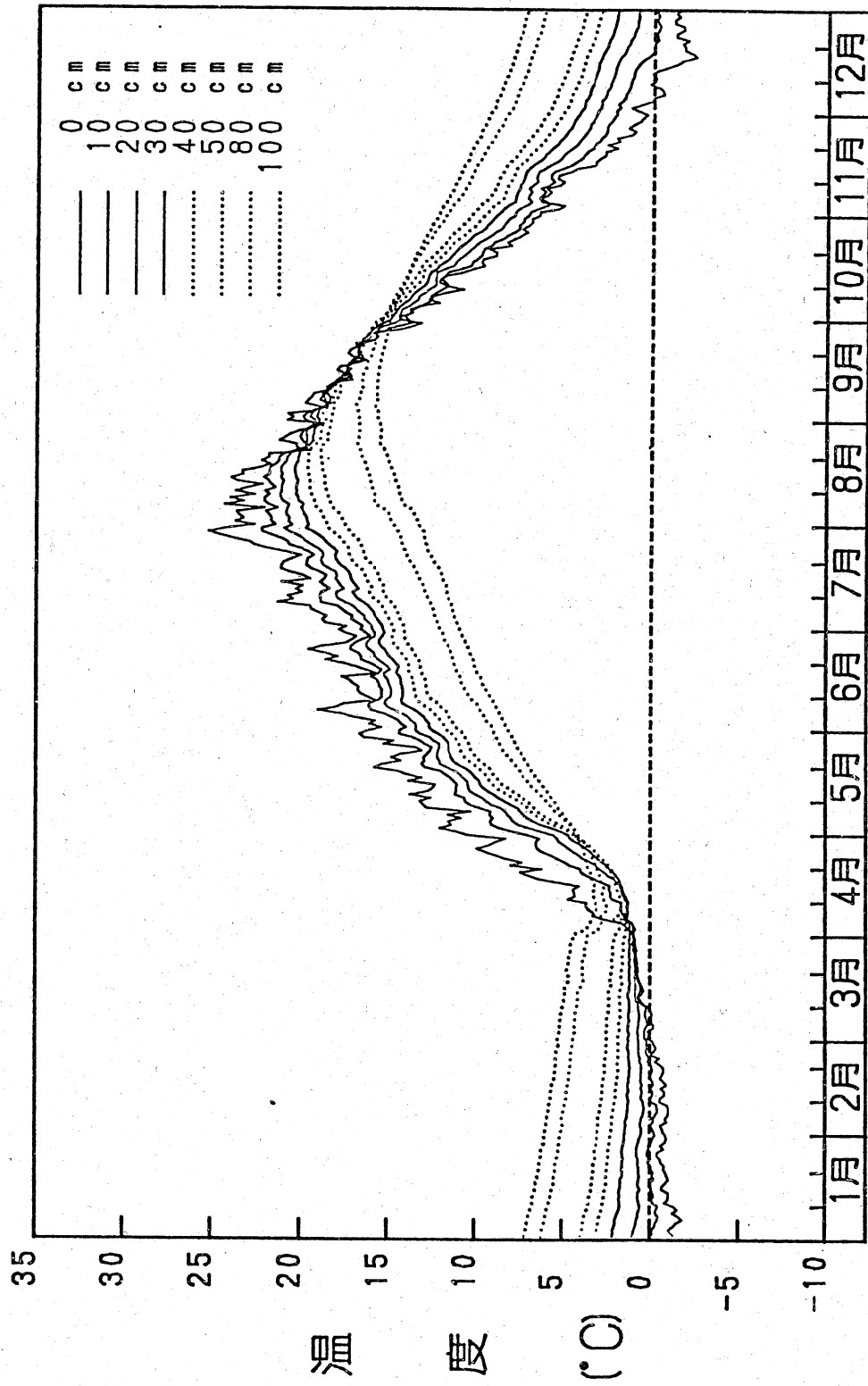


図4 畜産大学における過去8年間平均地温の推移

次に、準平年値（8年以上の平均値）としての月別地温断面を図5に示す。1～3月は深くなるほど地温は高くなるプラスの温度勾配を示すが、4月になって30cmより浅い部分の温度が上昇する温度断面となり、勾配は曲線的形状となる。5月から8月までは表面に近いほど地温は高く、マイナスの温度勾配を示す。再び9月になって温度勾配は減少して年最小になる。そして、10～12月に再びプラスの温度勾配となる。

これらの深さに対する地温の温度勾配は直線に近いことから、直線近似により勾配（ $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ）を計算すると、表2の結果が得られる。4月と9月が最も小さな勾配を示し、季節的変位の月であることが示される。他方、最も勾配の大きな月は9月と12月である。表3は温度勾配を直線とみた場合の相関係数を示すものである。この数値より、4月は最も直線性を示さない事が数値より明白である。

### 3. 自然積雪下の土壌凍結

土壌凍結深さの推定は一般に、固体の熱伝導式から誘導されたStefan式やそれを修正したAldrichらの式を用いて計算されている。これらは、土壌条件（土の熱伝導率と潜熱）が等しければ、積算寒度の平方根に比例して、凍結深さは増大する。そして、道路等の除雪条件での推定式に適しており、最大土壌凍結深さが予測される。

しかし、自然状態では積雪が存在するため、農地の土壌凍結深さの推定は複雑であり、上述したような推定式では計算できない。このため、積雪の深さとその時間的変化が大きな問題となる。すなわち、積雪の熱伝導率は、土壌のそれよりも非常に小さいため、地上部で断熱効果を発揮し、土壌凍結の進行を遅らせ、結果として凍結深さを浅くすることが知られている。

そこで、畜産大学圃場内の同じ位置でメチレンブルー凍結深度計を用いて、1981年11月から毎年観測を継続してきた。自然積雪下での土壌凍結推移の実態を把握する必要があり、過去7年間の観測値を基に自然界で起こる土壌凍結の経年変化について検討を行うものとする。

凍結深さを直接支配する気温と積雪要因は、年次によつて大きく変化しするため、第一に冬期間（寒候期）の日平均気温と、それに基づく積算寒度の詳細な検

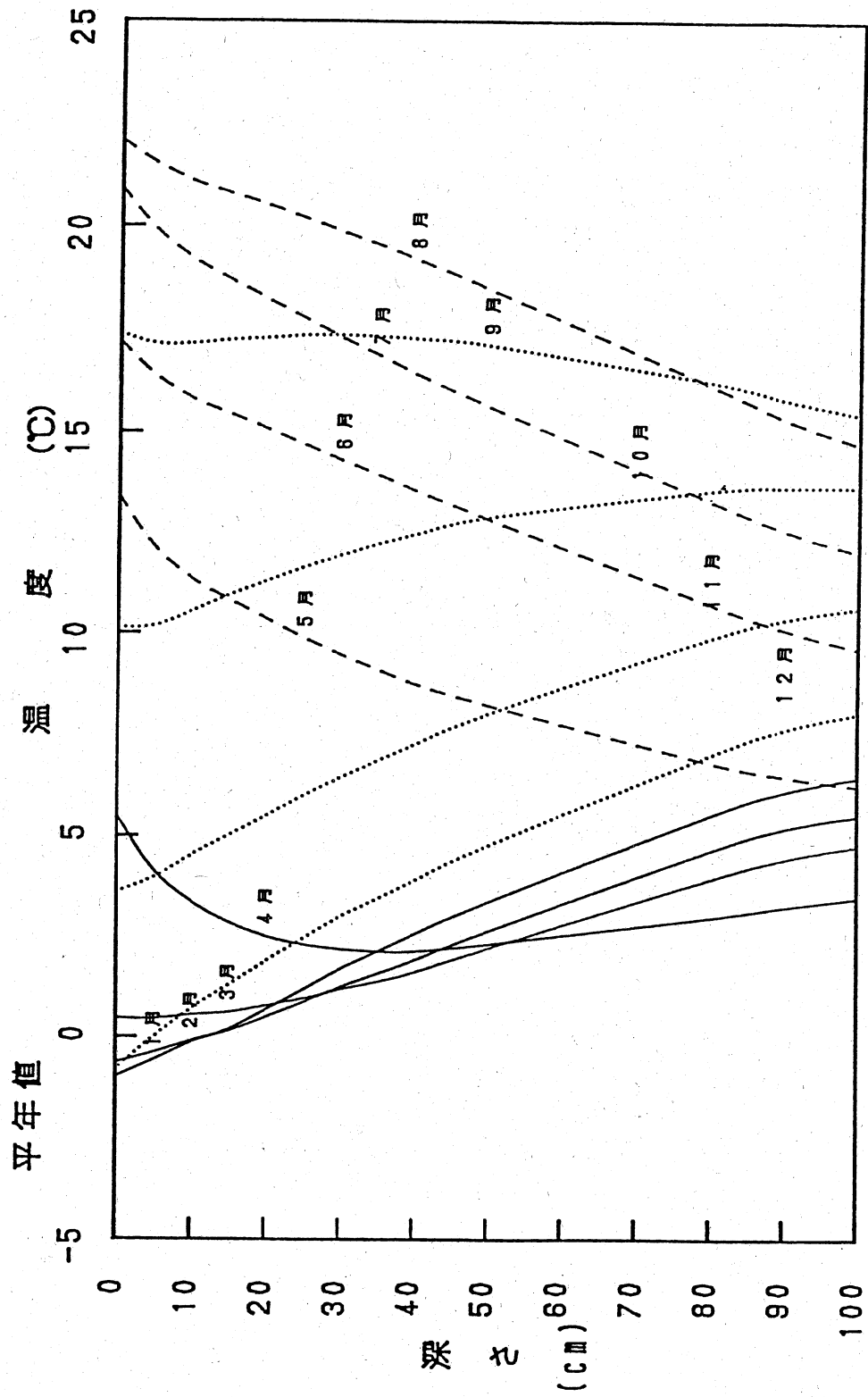


図5 準平年値の月別地温の温度断面

表 1 畜産大学における過去 8 年間深さ別年平均地温

CM	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	準平年値
0	9.1	8.9	10.1	8.4	8.3	8.9	8.8	9.8	9.0
5	9.0	8.8	9.7	8.1	8.1	8.6	8.4	9.3	8.7
10	9.1	8.7	9.5	8.1	8.1	8.5	8.2	9.2	8.7
15	9.1	8.7	9.4	8.1	8.2	8.4	8.2	9.2	8.7
20	9.2	8.8	9.4	8.2	8.3	8.4	8.2	9.2	8.7
25	9.3	8.9	9.5	8.3	8.3	8.5	8.3	9.3	8.8
30	9.3	9.1	9.5	8.3	8.3	8.5	8.4	9.3	8.8
35	9.3	9.2	9.5	8.4	8.4	8.5	8.4	9.4	8.9
40	9.3	9.3	9.5	8.5	8.4	8.5	8.4	9.4	8.9
50	9.5	9.4	9.6	8.7	8.5	8.7	8.8	9.5	9.1
80	9.5	9.7	9.6	9.1	8.7	8.8	9.0	9.5	9.2
90	9.4	9.7	9.6	9.2	8.8	8.9	9.1	9.5	9.3
100	9.4	9.7	9.6	9.2	8.8	8.8	9.0	9.5	9.2
平均	9.3	9.1	9.6	8.5	8.4	8.6	8.6	9.4	8.9



表2. 各月に対する温度勾配 ( $^{\circ}\text{C}/\text{cm} \times 10^{-2}$ )

月	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	平均
1	6.3	6.7	6.7	9.0	9.6	9.5	7.4	6.7	7.7
2	5.2	6.0	5.6	7.9	8.6	5.5	7.5	5.7	6.5
3	4.5	4.9	4.4	5.2	5.1	4.0	5.4	4.6	4.8
4	0.3	-0.3	-1.2	-2.5	0.9	-1.7	0.3	-0.9	-0.6
5	-6.0	-4.4	-6.6	-7.2	-6.8	-7.0	-6.4	-6.6	-6.4
6	-8.6	-5.4	-7.0	-3.6	-9.7	-7.3	-8.4	-8.4	-7.3
7	-7.1	-9.5	-9.7	-7.0	-9.9	-9.1	-6.9	-8.4	-8.5
8	-5.1	-5.0	-8.1	-8.0	-8.4	-9.1	-8.6	-5.8	-7.3
9	-1.7	-0.4	-2.5	-0.9	-2.2	-1.5	-2.2	-3.0	-1.8
10	3.4	3.8	2.2	5.3	4.7	3.9	4.6	2.0	3.7
11	6.2	8.0	6.9	7.0	7.6	6.8	7.9	7.0	7.2
12	7.2	8.6	8.1	9.1	8.9	9.8	8.9	9.2	8.7

表3 各月の深さと地温との相関係数

月	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
1	0.997	0.997	0.997	0.989	0.985	0.994	0.997	0.995
2	0.996	0.997	0.997	0.998	0.992	0.983	0.997	0.995
3	0.995	0.992	0.990	0.984	0.983	0.950	0.988	0.995
4	0.254	-0.163	-0.415	-0.443	0.292	-0.348	0.097	-0.356
5	-0.976	-0.994	-0.987	-0.949	-0.883	-0.964	-0.916	-0.962
6	-0.999	-0.996	-0.999	-0.990	-0.994	-0.983	-0.985	-0.990
7	-0.976	-0.993	-0.972	-0.992	-0.996	-0.993	-0.983	-0.995
8	-0.976	-0.993	-0.999	-0.999	-0.998	-0.998	-0.999	-0.997
9	-0.838	-0.527	-0.959	-0.591	-0.900	-0.814	-0.948	-0.977
10	0.940	0.969	0.931	0.955	0.944	0.948	0.951	0.928
11	0.995	0.995	0.989	0.990	0.985	0.983	0.989	0.988
12	0.992	0.993	0.996	0.987	0.983	0.981	0.988	0.990

討を行うなうことにする。

#### 日平均気温と積算寒度の推移

表4～表9に1981年11月から88年4月までの日平均気温を表示するとともに、その7年間の平均値を示した。さらに、表下部に上旬（First）、中旬（Second）、下旬（Third）および月平均（mean）の各平均値を記載した。

さらに、表10～表15に、同様に積算寒度（Freezing Index）についても表示した。下段の旬、中旬、下旬および月の数値は平均値ではなく、最大値を示すものである。積算寒度は日平均気温がマイナスとなる値の絶対値を累計加算して得られたものである。表中の波線は、日平均気温がプラスのときであり、積算寒度に貢献しない場合を示す。表10に示すように、積算寒度の発生は11月であるが、その起日は年次によって異なる。この数値から本格的な冬のスタート時点が明白に判断できる。したがって、81年と84年の冬の到来が早いことがわかる。次に、表15をみると、波線が連続出現するので冬の終わりを判断することができ、82年と84年が比較的春が遅く到来したことがわかる。積算寒度に関与した日数、すなわち、凍結期間は82年では134日であり、そして83年から87年の凍結期間はそれぞれ123, 137, 132, 130, 133および134日であった。平均すると約132日間となり、年次変動は比較的少ないことがわかった。

次に、表16～表21に毎朝9時に観測した積雪深を表示した。表中の波線は積雪が無い場合もしくは積雪が0 cmの場合を示す。下段の旬値と月の値は平均値を示す。表16によると、11月は86年を例外とすると、ほとんど積雪はないと考えて良い。そして、12月になるとわずかではあるが表17に示すように積雪が存在する。1月は途中で消雪日が発生する85年を例外とすると、平均30 cm程度の積雪深を維持する。そして、4月の初めには84年を除くと完全に消雪状態となることがわかる。

#### 凍結深さと融解深さの推移

表22～表28まで、メチレンブルー凍結深度計で毎朝9時に観測した過去8年間の凍結深さ（cm）の値を示す。表の最下段の旬値や月の値は最大値を示す。表22

表 4 畜産大学における過去7年間の日平均気温(°C)

Air Temperature in Obihro University

11月

	81年	82年	83年	84年	85年	86年	87年	平均
1)	4.2	8.7	-1.5	3.4	6.4	2.4	2.5	3.7
2)	3.0	3.4	0.2	2.0	2.7	5.1	4.4	3.0
3)	1.1	1.3	3.5	1.2	1.8	4.0	7.7	2.9
4)	4.8	6.6	3.2	3.7	5.0	5.9	5.7	5.0
5)	3.0	5.0	0.6	7.8	7.2	3.5	5.9	4.7
6)	0.4	3.3	2.1	7.9	2.6	2.4	4.2	3.3
7)	-2.0	5.9	2.5	8.7	7.6	0.8	1.8	3.6
8)	-2.2	4.9	3.5	5.0	9.2	2.7	5.1	4.0
9)	-0.4	1.4	1.5	4.8	7.6	1.8	2.0	2.7
10)	-2.6	2.6	1.4	2.5	6.7	1.7	3.3	2.2
11)	-1.9	0.5	-6.6	2.2	6.7	3.3	5.1	1.3
12)	-0.1	4.1	6.3	-2.8	3.7	3.1	6.4	3.0
13)	1.9	2.4	4.8	-3.4	1.0	2.9	2.4	1.7
14)	-1.5	4.4	3.1	-1.5	0.8	4.2	-0.9	1.2
15)	-1.6	3.5	2.7	1.1	0.8	-2.0	-1.3	0.5
16)	-0.8	4.9	4.6	-1.0	1.5	-0.8	-0.7	1.1
17)	-2.7	0.0	8.2	-1.3	-1.2	-1.6	4.2	0.8
18)	-2.1	0.0	2.3	-2.6	-3.8	-1.2	0.9	-0.9
19)	0.2	0.8	3.4	-6.3	-3.8	-2.6	-0.8	-1.3
20)	2.0	1.4	-1.4	-8.8	-2.6	-2.1	-2.1	-1.9
21)	-0.6	-3.8	-0.4	-6.2	2.8	0.8	-0.8	-1.2
22)	-2.7	-3.5	-1.6	-1.9	5.2	-1.5	-1.8	-1.1
23)	-4.0	0.9	0.2	-1.5	0.4	-1.6	-0.8	-0.9
24)	-2.0	-1.3	-2.5	-1.0	-1.8	-2.3	-1.1	-1.7
25)	-4.4	0.4	-1.1	-2.5	-4.7	-2.3	-2.0	-2.4
26)	-4.9	-1.9	-4.1	-4.3	-4.1	-1.2	-0.8	-3.0
27)	-2.4	-1.1	-2.0	-4.7	-5.0	-5.4	-2.5	-3.3
28)	-5.6	-3.6	0.5	-4.3	-5.4	-5.9	-6.0	-4.3
29)	-7.8	-4.0	-1.9	-2.3	-3.6	-3.8	-5.3	-4.1
30)	-8.2	2.4	-2.1	-1.7	-10.4	-6.6	-6.6	-4.7
First	0.9	4.3	1.7	4.7	5.7	3.0	4.3	3.5
Second	-0.7	2.2	2.7	-2.4	0.3	0.3	1.3	0.5
Third	-4.3	-1.6	-1.5	-3.0	-2.7	-3.0	-2.8	-2.7
Mean	-1.3	1.7	1.0	-0.3	1.1	0.1	0.9	0.5

表5 畜産大学における過去7年間の日平均気温(°C)

Air Temperature in Obihro University

12月

	81年	82年	83年	84年	85年	86年	87年	平均
1)	-10.0	3.2	0.5	-2.0	-9.1	-2.0	-7.1	-3.8
2)	-5.2	-0.1	2.6	3.5	-7.6	-2.7	-2.1	-1.7
3)	-9.5	-1.5	-3.2	1.1	-7.1	-9.9	-6.5	-5.2
4)	-7.3	-2.4	-5.0	0.9	-2.3	-3.7	-10.7	-4.4
5)	-4.5	-0.5	-6.9	3.0	-3.3	-0.8	-10.5	-3.4
6)	-8.4	-5.3	-8.3	-3.3	-6.1	-8.1	-15.7	-7.9
7)	-8.6	-3.1	-4.5	-6.4	-9.4	-11.3	-9.3	-7.5
8)	-3.8	-0.8	-1.3	-3.1	-5.7	-11.7	-7.8	-4.9
9)	-9.2	-0.5	-4.1	-1.8	-3.1	-6.6	-2.5	-4.0
10)	-5.1	-1.1	-6.8	-1.7	-7.0	-6.7	-6.4	-5.0
11)	-11.9	-2.8	0.1	-0.4	-13.8	0.2	-0.1	-4.1
12)	-5.4	-5.3	-0.2	2.7	-16.3	-0.9	-5.1	-4.4
13)	-4.4	-8.4	-2.6	0.7	-12.6	-6.0	-4.5	-5.4
14)	-2.7	-12.0	-4.6	0.7	-6.1	-8.2	-8.1	-5.9
15)	-1.3	-10.0	-6.3	-3.7	-15.4	-7.3	-9.5	-7.6
16)	-5.2	-9.0	-9.4	-11.5	-13.0	-10.5	-4.0	-8.9
17)	-11.7	-7.2	-12.3	-11.0	-16.3	-4.8	-8.3	-10.2
18)	-4.4	-5.8	-12.3	-8.5	-9.0	-12.1	-11.7	-9.1
19)	-4.8	-12.9	-10.4	-8.7	-12.4	-1.8	-6.7	-8.2
20)	-2.9	-6.7	-8.1	-7.3	-12.2	-5.0	-8.7	-7.3
21)	-4.8	-7.5	-6.6	-11.5	-12.0	-7.7	-8.0	-8.3
22)	-5.8	-7.6	-2.8	-8.2	-14.0	-9.3	-7.4	-7.9
23)	-1.2	0.3	-2.5	-10.5	-4.2	-2.7	-9.6	-4.3
24)	-5.1	-2.2	-6.2	-12.2	-7.3	-5.8	-5.1	-6.3
25)	-8.8	-4.4	-4.2	-10.6	-11.7	-11.3	-0.4	-7.3
26)	-4.6	-7.4	-3.0	-14.8	-13.7	-8.1	-2.2	-7.7
27)	-4.9	-1.2	-7.9	-10.3	-11.1	-7.3	-2.9	-6.5
28)	-3.7	-5.9	-10.8	-7.7	-7.5	-12.0	-3.6	-7.3
29)	-4.0	-11.6	-16.7	-11.4	-3.0	-14.4	-3.2	-9.2
30)	-4.4	-12.1	-20.2	-11.3	1.2	-10.1	-7.1	-9.1
31)	-10.0	-13.9	-17.5	-11.3	-6.2	-11.8	-11.8	-11.8
First	-7.2	-1.2	-3.7	-1.0	-6.1	-6.4	-7.9	-4.8
Second	-5.5	-8.0	-6.6	-4.7	-12.7	-5.6	-6.7	-7.1
Third	-5.2	-6.7	-8.9	-10.9	-8.1	-9.1	-5.6	-7.8
Mean	-5.9	-5.3	-6.5	-5.7	-8.9	-7.1	-6.7	-6.6

表 6 畜産大学における過去7年間の日平均気温(°C)

Air Temperature in Obihro University

1月

	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	-4.1	-13.5	-10.9	-12.3	-12.4	-6.6	-11.3	-10.2
2)	-5.6	-10.9	-14.3	-10.7	-10.7	-11.0	-7.6	-10.1
3)	-14.1	-9.5	-9.3	-12.0	-12.5	-9.5	-16.6	-11.9
4)	-7.5	-16.7	-11.0	-11.1	-10.9	-8.1	-12.6	-11.1
5)	-3.4	-9.9	-15.7	-12.8	-2.7	-15.6	-11.1	-10.2
6)	-14.0	-12.7	-15.1	-16.2	-7.7	-22.0	-11.4	-14.2
7)	-9.0	-10.6	-17.2	-13.4	-7.8	-21.8	-10.6	-12.9
8)	-18.6	-2.2	-17.7	-10.3	-13.1	-7.9	-5.0	-10.7
9)	-8.0	-7.7	-16.0	-13.8	-4.7	-7.3	-7.1	-9.2
10)	-8.1	-6.9	-11.7	-12.3	-4.6	-6.9	-12.5	-9.0
11)	-14.0	-6.0	-6.3	-11.8	-14.7	-16.3	-14.0	-11.9
12)	-5.3	-4.0	-13.0	-8.7	-19.5	-17.9	-11.6	-11.4
13)	-8.6	-9.0	-13.9	-11.6	-14.8	-9.4	-10.0	-11.0
14)	-17.8	-10.7	-13.5	-5.8	-4.9	-14.7	-3.8	-10.2
15)	-17.7	-10.0	-8.3	-8.4	-4.2	-11.8	-2.7	-9.0
16)	-21.2	-7.3	-8.5	-14.4	-14.0	-14.8	-8.1	-12.6
17)	-20.3	-11.5	-7.5	-11.2	-18.0	-5.7	-12.7	-12.4
18)	-15.4	-10.5	-12.7	-12.0	-8.8	-5.9	-11.4	-11.0
19)	-5.7	-7.8	-17.3	-18.9	-13.4	-15.7	-11.9	-13.0
20)	-10.3	-8.4	-16.2	-17.8	-9.0	-21.1	-7.8	-12.9
21)	-4.3	-10.1	-16.9	-10.3	-16.6	-23.6	-4.7	-12.4
22)	-11.7	-13.2	-13.6	-5.5	-14.2	-20.0	0.3	-11.1
23)	-12.1	-18.1	-3.4	-13.6	-14.8	-9.9	-2.4	-10.6
24)	-4.7	-13.2	-3.6	-18.8	-22.5	-3.7	-8.7	-10.7
25)	-11.9	-9.3	-4.4	-22.3	-18.2	-14.4	-8.5	-12.7
26)	-20.7	-6.0	-3.9	-20.6	-19.5	-20.7	-9.8	-14.5
27)	-19.3	-3.2	-11.3	-21.0	-16.5	-8.6	-14.8	-13.5
28)	-10.7	-2.4	-14.4	-14.5	-18.3	-3.6	-14.5	-11.2
29)	-7.6	-2.2	-19.3	-12.6	-20.1	-10.4	-12.9	-12.2
30)	-14.5	-5.4	-16.3	-7.9	-17.9	-6.7	-12.1	-11.5
31)	-14.9	-10.8	-8.4	-18.3	-16.5	-10.5	-14.0	-13.3
First	-9.2	-10.1	-13.9	-12.5	-8.7	-11.7	-10.6	-10.9
Second	-13.6	-8.5	-11.7	-12.1	-12.1	-13.3	-9.4	-11.5
Third	-12.0	-8.5	-10.5	-15.0	-17.7	-12.0	-9.3	-12.2
Mean	-11.6	-9.0	-12.0	-13.3	-13.0	-12.3	-9.7	-11.6

表7 畜産大学における過去7年間の日平均気温(°C)

Air Temperature in Obihro University								2月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	-19.5	-7.4	-7.9	-20.3	-16.6	-13.7	-14.4	-14.3
2)	-19.3	-9.6	-7.1	-12.9	-14.8	-17.3	-10.9	-13.1
3)	-14.6	-10.6	-11.7	-11.0	-14.6	-12.3	-7.6	-11.8
4)	-12.9	-12.9	-16.9	-14.1	-18.4	-9.7	-7.5	-13.2
5)	-24.6	-8.7	-11.8	-11.2	-18.5	-8.7	-8.4	-13.1
6)	-23.0	-9.5	-18.8	-16.4	-15.5	-11.7	-11.0	-15.1
7)	-15.7	-8.4	-20.2	-12.9	-19.3	-12.7	-12.1	-14.5
8)	-21.9	-8.7	-11.5	-7.4	-16.4	-5.2	-7.6	-11.2
9)	-20.7	-10.7	-3.7	-16.8	-15.2	-11.3	-12.8	-13.0
10)	-16.8	-12.8	-2.9	-13.6	-13.6	-5.0	-8.8	-10.5
11)	-13.7	-17.8	-5.2	-3.9	-15.2	-6.0	-11.3	-10.4
12)	-10.9	-15.9	-13.6	-6.8	-12.4	-3.8	-11.6	-10.7
13)	-14.3	-17.8	-11.1	-6.8	-9.4	-9.7	-14.0	-11.9
14)	-16.8	-18.8	-11.3	-9.8	-10.5	-10.4	-13.4	-13.0
15)	-13.6	-8.6	-12.7	-6.6	-18.0	-11.4	-17.1	-12.6
16)	-13.2	-10.6	-12.4	-4.0	-17.2	-9.6	-14.2	-11.6
17)	-11.9	-15.8	-8.3	1.0	-12.2	-12.7	-16.3	-10.9
18)	-9.1	-7.3	-16.4	-2.8	-13.0	-17.9	-16.3	-11.8
19)	-10.9	-5.2	-15.5	-5.7	-14.3	-15.7	-13.5	-11.5
20)	-4.4	-4.5	-18.1	-2.7	-12.2	-15.7	-12.1	-10.0
21)	-4.2	-3.9	-12.1	-4.4	-11.0	-14.6	-10.7	-8.7
22)	-5.3	-8.8	-6.9	-2.6	-12.8	-12.8	-11.6	-8.7
23)	-8.9	-12.0	-12.9	-3.3	-11.6	-5.4	-5.0	-8.4
24)	-12.7	-11.1	-6.3	-0.4	-8.8	-1.2	-5.4	-6.6
25)	-14.4	-8.3	-7.8	-1.2	-12.1	-0.3	-7.0	-7.3
26)	-14.3	-11.4	-10.3	-7.4	-7.0	-2.8	-7.6	-8.7
27)	-8.6	-17.4	-7.4	-10.8	-1.2	-3.0	-8.0	-8.1
28)	-7.3	-16.7	-7.9	-8.6	-1.7	-9.3	-8.5	-8.6
29)	****	****	-7.1	****	****	****	-7.8	****
First	-18.9	-9.9	-11.3	-13.7	-16.3	-10.8	-10.1	-13.0
Second	-11.9	-12.2	-12.5	-4.8	-13.4	-11.3	-14.0	-11.4
Third	-9.3	-10.2	-10.1	-5.7	-9.6	-6.6	-8.5	-8.6
Mean	-13.5	-10.8	-11.3	-8.1	-13.2	-9.7	-11.0	-11.1

表 8 畜産大学における過去 7 年間の日平均気温 (°C)

Air Temperature in Obihiro University

3月

	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	ハイキ
1)	-4.7	-9.3	-9.8	-11.8	-5.6	-9.8	-6.8	-8.3
2)	-1.7	-11.3	-10.3	-8.9	-8.1	-7.4	-6.4	-7.7
3)	-6.5	-8.7	-8.5	-1.8	-10.7	-3.1	-8.9	-6.9
4)	-5.8	-15.4	-9.8	-9.4	-18.7	-3.7	-8.9	-10.2
5)	-3.8	-13.0	-7.8	-13.2	-12.9	-7.1	-8.1	-9.4
6)	-4.6	-9.3	-6.7	-9.5	-12.4	-5.4	-7.4	-7.9
7)	-9.5	-12.7	-9.4	-10.2	-8.4	-3.6	-6.7	-8.6
8)	-7.4	-9.1	-10.7	-8.1	-3.9	-7.4	-9.0	-7.9
9)	-4.0	-12.1	-10.8	-5.5	-5.1	-5.1	-10.6	-7.6
10)	-2.9	-8.8	-3.0	-2.0	-4.2	-5.9	-6.8	-4.8
11)	-0.7	-1.3	-3.3	-8.1	-1.3	-6.4	-1.8	-3.3
12)	-4.4	-2.5	-8.1	-7.7	-1.5	-4.4	0.9	-4.0
13)	-2.7	-3.1	-8.0	-6.7	-2.3	-2.9	1.3	-3.5
14)	-3.1	-7.0	-7.2	-6.7	-8.4	0.6	-0.8	-4.7
15)	-1.8	-5.2	-8.7	-4.4	-7.4	-4.0	-1.8	-4.8
16)	2.7	-6.1	-4.3	-6.3	-1.3	-3.3	-3.0	-3.1
17)	-1.9	-5.9	-0.6	-5.9	-0.9	-1.5	-0.2	-2.4
18)	-3.3	-1.4	-1.5	-1.7	-2.0	-3.6	-1.2	-2.1
19)	-2.3	-6.2	-2.1	-0.5	-4.9	-2.3	0.0	-2.6
20)	-4.4	-4.0	-3.4	-0.7	-2.5	-1.1	-0.2	-2.3
21)	-2.8	-1.9	-2.2	-3.5	-0.7	-2.6	-0.8	-2.1
22)	-2.3	0.3	-5.6	-1.5	-3.4	0.9	-2.4	-2.0
23)	-1.4	-0.3	-6.6	-0.7	-4.6	-0.4	-1.0	-2.1
24)	-0.5	0.4	-1.2	0.0	-0.3	0.6	-2.6	-0.5
25)	-0.3	-0.6	-3.1	-4.5	-1.2	2.0	-0.8	-1.2
26)	-1.2	-2.1	-4.5	-1.5	-4.6	-1.9	-2.5	-2.6
27)	-2.6	-4.5	-5.4	-1.5	-1.3	-2.6	-3.0	-3.0
28)	-3.9	-2.2	-9.2	-0.5	-3.0	-2.8	0.6	-3.0
29)	-1.5	0.0	-7.1	-0.9	-3.2	2.3	0.1	-1.5
30)	1.9	1.6	-4.0	-0.3	-0.1	-1.0	-0.3	-0.3
31)	3.2	-0.8	-5.0	-0.8	1.7	-4.6	-1.1	-1.1
First	-5.1	-11.0	-8.7	-8.0	-9.0	-5.9	-8.0	-7.9
Second	-2.2	-4.3	-4.7	-4.9	-3.3	-2.9	-0.7	-3.3
Third	-1.0	-0.9	-4.9	-1.4	-1.9	-0.9	-1.3	-1.8
Mean	-2.7	-5.2	-6.1	-4.7	-4.6	-3.1	-3.2	-4.2

表9 畜産大学における過去7年間の日平均気温(°C)

Air Temperature in Obihro University								4月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	-1.7	0.3	-3.2	-0.9	1.8	-2.4	-0.5	-0.9
2)	-2.9	2.7	-3.7	-0.2	0.2	1.7	0.9	-0.2
3)	0.6	4.4	0.1	1.5	0.4	0.5	1.6	1.3
4)	-0.6	-0.4	-0.5	4.2	1.4	2.3	3.9	1.5
5)	1.6	2.3	-2.6	2.1	3.0	3.2	1.3	1.6
6)	7.3	4.9	-2.5	5.2	1.2	4.1	0.3	2.9
7)	6.4	10.5	-2.9	3.8	0.2	0.7	1.1	2.8
8)	4.2	5.9	-3.5	4.5	2.1	0.7	-0.1	2.0
9)	1.3	1.5	-0.2	2.7	7.1	2.9	1.1	2.3
10)	-0.6	2.7	1.3	4.1	5.5	3.8	3.2	2.9
11)	0.9	8.3	1.6	5.1	3.8	2.4	5.9	4.0
12)	0.5	4.6	2.8	3.6	1.3	-0.4	6.6	2.7
13)	2.7	5.3	2.2	1.0	6.0	-0.7	7.6	3.4
14)	3.3	4.0	0.5	0.9	4.6	1.7	6.7	3.1
15)	1.4	4.9	1.0	2.9	3.8	3.1	1.9	2.7
16)	0.2	8.3	1.6	1.3	2.6	5.2	4.4	3.4
17)	3.0	7.4	3.3	1.8	2.9	7.9	4.3	4.4
18)	3.5	9.1	5.8	6.1	5.1	6.0	8.6	6.3
19)	4.4	6.7	3.4	4.5	4.0	7.0	7.0	5.3
20)	3.4	7.7	2.7	4.8	2.8	5.3	8.4	5.0
21)	4.9	6.8	1.1	5.1	3.1	6.9	3.0	4.4
22)	3.7	7.4	3.0	10.1	3.2	8.0	1.2	5.2
23)	3.3	10.9	5.0	7.8	5.8	4.8	4.1	6.0
24)	3.8	13.9	5.4	4.8	9.3	4.1	2.8	6.3
25)	9.0	8.8	8.6	7.0	5.7	4.6	4.1	6.8
26)	7.3	6.8	11.0	11.5	9.6	3.2	5.4	7.8
27)	4.7	8.9	3.7	11.2	3.4	6.4	9.4	6.8
28)	3.5	14.4	2.3	9.1	6.7	7.2	10.5	7.7
29)	4.3	1.8	2.6	9.2	6.4	5.7	14.1	6.3
30)	10.5	6.1	0.0	8.3	8.7	14.7	12.2	8.6
First	1.6	3.5	-1.8	2.7	2.3	1.8	1.3	1.6
Second	2.3	6.6	2.5	3.2	3.7	3.8	6.1	4.0
Third	5.5	8.6	4.3	8.4	6.2	6.6	6.7	6.6
Mean	3.1	6.2	1.7	4.8	4.1	4.0	4.7	4.1



表10 畜産大学における過去7年間の積算寒度 (°C・日)

Freezing Index in Obihiro University

11月

	81年	82年	83年	84年	85年	86年	87年	平均
1)	----	----	2	----	----	----	----	0
2)	----	----	----	----	----	----	----	----
3)	----	----	----	----	----	----	----	----
4)	----	----	----	----	----	----	----	----
5)	----	----	----	----	----	----	----	----
6)	----	----	----	----	----	----	----	----
7)	2	----	----	----	----	----	----	1
8)	4	----	----	----	----	----	----	1
9)	5	----	----	----	----	----	----	1
10)	7	----	----	----	----	----	----	1
11)	9	----	8	----	----	----	----	2
12)	9	----	----	3	----	----	----	3
13)	----	----	----	6	----	----	----	3
14)	11	----	----	8	----	----	1	4
15)	12	----	----	----	----	2	2	5
16)	13	----	----	9	----	3	3	5
17)	16	----	----	10	1	4	----	6
18)	18	----	----	13	5	6	----	7
19)	----	----	----	19	9	8	4	9
20)	----	----	10	28	11	10	6	12
21)	19	4	10	34	----	----	7	13
22)	21	7	12	36	----	12	8	15
23)	25	----	----	37	----	13	9	16
24)	27	9	14	38	13	16	10	18
25)	32	----	15	41	18	18	12	21
26)	37	11	19	45	22	19	13	24
27)	39	12	21	50	27	25	16	27
28)	45	15	----	54	32	31	22	31
29)	52	19	23	56	36	34	27	35
30)	61	----	25	58	46	41	34	41
First	7	----	2	----	----	----	----	1
Second	18	----	10	28	11	10	6	12
Third	61	19	25	58	46	41	34	41
Mean	61	19	25	58	46	41	34	41

表11 畜産大学における過去7年間の積算寒度 (°C・日)

Freezing Index in Obihiro University

12月

	81年	82年	83年	84年	85年	86年	87年	平均
1)	71	----	----	60	56	43	41	45
2)	76	19	----	----	63	46	43	47
3)	85	21	28	----	70	56	49	53
4)	93	23	33	----	73	59	60	57
5)	97	24	40	----	76	60	70	61
6)	105	29	49	63	82	68	86	69
7)	114	32	53	70	91	79	95	76
8)	118	33	54	73	97	91	103	81
9)	127	33	59	75	100	98	106	85
10)	132	35	65	76	107	104	112	90
11)	144	37	----	77	121	----	112	94
12)	149	43	66	----	137	105	117	99
13)	154	51	68	----	150	111	122	105
14)	156	63	73	----	156	120	130	111
15)	158	73	79	81	171	127	139	118
16)	163	82	88	92	184	137	143	127
17)	175	89	101	103	201	142	152	137
18)	179	95	113	112	210	154	163	147
19)	184	108	123	120	222	156	170	155
20)	187	115	132	128	234	161	179	162
21)	192	122	138	139	246	169	187	170
22)	197	130	141	147	260	178	194	178
23)	199	----	143	158	264	181	204	183
24)	204	132	150	170	272	187	209	189
25)	212	136	154	181	283	198	209	196
26)	217	144	157	195	297	206	212	204
27)	222	145	165	206	308	213	214	210
28)	226	151	176	213	316	225	218	218
29)	230	162	192	225	319	240	221	227
30)	234	174	212	236	----	250	228	236
31)	244	188	230	247	325	262	240	248
First	132	35	65	76	107	104	112	90
Second	187	115	132	128	234	161	179	162
Third	244	188	230	247	325	262	240	248
Mean	244	188	230	247	325	262	240	248

表12 畜産大学における過去7年間の積算寒度 (°C・日)

Freezing Index in Obihiro University								1月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	248	202	241	260	337	268	251	258
2)	254	213	255	270	348	279	259	268
3)	268	222	264	282	361	289	276	280
4)	275	239	275	293	371	297	288	291
5)	279	249	291	306	374	312	299	302
6)	293	262	306	322	382	334	311	316
7)	302	272	323	336	390	356	321	329
8)	320	274	341	346	403	364	326	339
9)	328	282	357	360	407	371	333	349
10)	337	289	369	372	412	378	346	358
11)	351	295	375	384	427	395	360	369
12)	356	299	388	393	446	412	372	381
13)	364	308	402	404	461	422	382	392
14)	382	319	416	410	466	437	385	402
15)	400	329	424	418	470	448	388	411
16)	421	336	432	433	484	463	396	424
17)	441	348	440	444	502	469	409	436
18)	457	358	453	456	511	475	420	447
19)	463	366	470	475	524	490	432	460
20)	473	374	486	493	533	512	440	473
21)	477	384	503	503	550	535	445	485
22)	489	398	517	509	564	555	---	496
23)	501	416	520	522	579	565	447	507
24)	506	429	524	541	601	569	456	518
25)	518	438	528	563	620	583	464	531
26)	538	444	532	584	639	604	474	545
27)	558	447	543	605	656	612	489	559
28)	568	450	558	619	674	616	503	570
29)	576	452	577	632	694	626	516	582
30)	590	457	593	640	712	633	528	593
31)	605	468	602	658	728	644	542	607
First	337	289	369	372	412	378	346	358
Second	473	374	486	493	533	512	440	473
Third	605	468	602	658	728	644	542	607
Mean	605	468	602	658	728	644	542	607

表13 畜産大学における過去7年間の積算寒度 (°C・日)

Freezing Index in Obihro University

2月

	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	625	476	609	678	745	657	557	621
2)	644	485	617	691	760	675	568	634
3)	659	496	628	702	774	687	575	646
4)	672	509	645	716	793	697	583	659
5)	696	517	657	728	811	705	591	672
6)	719	527	676	744	827	717	602	687
7)	735	535	696	757	846	730	614	702
8)	757	544	707	764	863	735	622	713
9)	777	555	711	781	878	746	635	726
10)	794	567	714	795	891	751	643	737
11)	808	585	719	799	907	757	655	747
12)	819	601	733	805	919	761	666	758
13)	833	619	744	812	928	771	680	770
14)	850	638	755	822	939	781	694	783
15)	864	646	768	829	957	793	711	795
16)	877	657	780	833	974	802	725	807
17)	889	673	789	----	986	815	741	818
18)	898	680	805	835	999	833	758	830
19)	909	685	821	841	1014	848	771	841
20)	913	690	839	844	1026	864	783	851
21)	917	694	851	848	1037	879	794	860
22)	923	702	858	851	1050	892	805	869
23)	931	714	871	854	1061	897	810	877
24)	944	725	877	855	1070	898	816	884
25)	959	734	885	856	1082	898	823	891
26)	973	745	895	863	1089	901	830	900
27)	981	763	902	874	1090	904	838	908
28)	989	779	910	883	1092	914	847	916
29)	****	****	917	****	****	****	855	****
First	794	567	714	795	891	751	643	737
Second	913	690	839	844	1026	864	783	851
Third	989	779	910	883	1092	914	847	916
Mean	989	779	910	883	1092	914	847	916

表14 畜産大学における過去7年間の積算寒度 (°C・日)

Freezing Index in Obihro University

3月

	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	993	789	927	894	1098	923	862	927
2)	995	800	937	903	1106	931	868	934
3)	1002	809	946	905	1116	934	877	941
4)	1007	824	956	914	1135	938	886	951
5)	1011	837	964	928	1148	945	894	961
6)	1016	846	970	937	1160	950	901	969
7)	1025	859	980	947	1169	954	908	977
8)	1033	868	990	955	1173	961	917	985
9)	1037	880	1001	961	1178	966	928	993
10)	1040	889	1004	963	1182	972	934	998
11)	1040	890	1007	971	1183	978	936	1001
12)	1045	893	1016	979	1185	983	----	1005
13)	1047	896	1024	985	1187	986	----	1009
14)	1051	903	1031	992	1195	----	937	1013
15)	1052	908	1039	997	1203	990	939	1018
16)	----	914	1044	1003	1204	993	942	1022
17)	1054	920	1044	1009	1205	995	942	1024
18)	1058	921	1046	1011	1207	998	943	1026
19)	1060	928	1048	1011	1212	1000	----	1029
20)	1064	932	1051	1012	1214	1002	943	1031
21)	1067	934	1054	1015	1215	1004	944	1033
22)	1069	----	1059	1017	1219	----	947	1035
23)	1071	934	1066	1017	1223	1005	948	1038
24)	1071	----	1067	----	1223	----	950	1038
25)	1072	934	1070	1022	1225	----	951	1040
26)	1073	937	1074	1023	1229	1006	953	1042
27)	1075	941	1080	1025	1231	1009	956	1045
28)	1079	943	1089	1025	1234	1012	----	1048
29)	1081	----	1096	1026	1237	----	----	1050
30)	----	----	1100	1027	1237	1013	957	1051
31)	----	944	1105	1027	----	1017	958	1053
First	1040	889	1004	963	1182	972	934	998
Second	1064	932	1051	1012	1214	1002	943	1031
Third	1081	944	1105	1027	1237	1017	958	1053
Mean	1081	944	1105	1027	1237	1017	958	1053

表15 畜産大学における過去7年間の積算寒度 (°C・日)

Freezing Index in Obihiro University

4月

	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	1082	----	1108	1028	----	1020	958	1054
2)	1085	----	1112	1029	----	----	----	1055
3)	----	----	----	----	----	----	----	----
4)	1086	944	1113	----	----	----	----	1055
5)	----	----	1115	----	----	----	----	1056
6)	----	----	1118	----	----	----	----	1056
7)	----	----	1121	----	----	----	----	1056
8)	----	----	1124	----	----	----	958	1057
9)	----	----	1124	----	----	----	----	1057
10)	1087	----	----	----	----	----	----	1057
11)	----	----	----	----	----	----	----	----
12)	----	----	----	----	----	1020	----	1057
13)	----	----	----	----	----	1021	----	1057
14)	----	----	----	----	----	----	----	----
15)	----	----	----	----	----	----	----	----
16)	----	----	----	----	----	----	----	----
17)	----	----	----	----	----	----	----	----
18)	----	----	----	----	----	----	----	----
19)	----	----	----	----	----	----	----	----
20)	----	----	----	----	----	----	----	----
21)	----	----	----	----	----	----	----	----
22)	----	----	----	----	----	----	----	----
23)	----	----	----	----	----	----	----	----
24)	----	----	----	----	----	----	----	----
25)	----	----	----	----	----	----	----	----
26)	----	----	----	----	----	----	----	----
27)	----	----	----	----	----	----	----	----
28)	----	----	----	----	----	----	----	----
29)	----	----	----	----	----	----	----	----
30)	----	----	----	----	----	----	----	----
First	1087	944	1124	1029	1237	1020	958	1057
Second	----	----	----	----	----	1021	----	1057
Third	----	----	----	----	----	----	----	----
Mean	1087	944	1124	1029	1237	1021	958	1057

表16 畜産大学における過去7年間の積雪深 (cm)

Snow Depth in Obihro University								11月
	81年	82年	83年	84年	85年	86年	87年	ハイキ
1)	----	----	----	----	----	----	----	----
2)	----	----	----	----	----	----	----	----
3)	6	----	----	----	----	----	----	1
4)	----	----	----	----	----	----	----	----
5)	----	----	----	----	----	----	----	----
6)	----	----	----	----	----	----	----	----
7)	----	----	----	----	----	----	----	----
8)	----	----	----	----	----	----	----	----
9)	----	----	----	----	----	----	----	----
10)	----	----	----	----	----	4	----	1
11)	----	----	----	----	----	----	----	----
12)	----	----	----	----	----	----	----	----
13)	----	----	----	----	----	----	----	----
14)	----	----	----	----	----	----	----	----
15)	----	----	----	----	----	----	----	----
16)	----	----	----	----	----	----	----	----
17)	----	----	----	----	4	----	----	1
18)	----	----	----	----	1	----	----	0
19)	----	----	----	----	----	----	----	----
20)	----	----	----	----	----	----	----	----
21)	----	----	----	----	----	----	----	----
22)	----	----	----	----	----	1	----	0
23)	----	1	----	----	----	----	6	1
24)	9	2	----	----	----	----	----	2
25)	----	2	----	----	----	2	----	1
26)	----	2	----	----	----	26	----	4
27)	----	1	----	3	----	22	----	4
28)	----	----	----	3	----	18	----	3
29)	----	----	----	2	8	17	----	4
30)	----	----	----	----	5	17	----	3
First	1	----	----	----	----	0	----	0
Second	----	----	----	----	1	----	----	0
Third	1	1	----	1	1	10	1	2
Mean	1	0	----	0	1	4	0	1

表17 畜産大学における過去7年間の積雪深 (cm)

Snow Depth in Obihro University								12月
	81年	82年	83年	84年	85年	86年	87年	平均
1)	----	----	----	----	5	18	----	3
2)	----	----	----	----	3	16	22	6
3)	----	----	----	----	3	16	20	6
4)	----	----	----	----	3	16	12	4
5)	----	----	----	----	3	30	12	6
6)	11	----	----	----	3	28	12	8
7)	10	----	----	----	3	29	11	8
8)	15	----	----	----	3	27	11	8
9)	9	----	----	----	18	27	11	9
10)	7	----	----	----	11	25	3	7
11)	5	----	----	----	13	26	3	7
12)	5	4	----	----	14	23	3	7
13)	5	1	----	----	13	23	3	6
14)	5	1	----	----	14	22	3	6
15)	5	1	----	4	12	22	1	6
16)	5	1	----	4	11	22	2	6
17)	4	1	----	4	11	21	2	6
18)	4	18	----	4	11	21	2	9
19)	4	16	----	4	10	38	2	11
20)	5	14	----	4	10	38	2	10
21)	11	11	----	4	10	38	2	11
22)	8	11	----	4	10	37	2	10
23)	7	9	----	4	10	35	2	10
24)	7	7	10	6	10	35	3	11
25)	6	7	10	5	10	34	2	11
26)	10	6	25	5	10	46	28	19
27)	9	17	17	4	10	43	25	18
28)	8	17	17	4	10	38	17	16
29)	11	14	16	4	10	38	18	16
30)	27	14	16	4	10	36	24	19
31)	27	14	16	4	37	32	32	23
First	5	----	----	----	6	23	11	6
Second	5	6	----	2	12	26	2	8
Third	12	12	12	4	12	37	14	15
Mean	7	6	4	2	10	29	9	10



表18 畜産大学における過去7年間の積雪深 (cm)

Snow Depth in Obihiro University								1月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	33	14	15	3	34	63	28	27
2)	40	14	15	3	35	56	26	27
3)	40	14	15	3	33	55	25	26
4)	37	14	15	----	32	83	31	30
5)	36	14	15	----	31	74	27	28
6)	36	12	15	----	32	62	24	26
7)	45	11	15	----	31	60	24	27
8)	38	11	15	----	29	65	24	26
9)	40	10	15	----	36	66	24	27
10)	40	9	15	----	55	63	27	30
11)	37	9	14	25	50	62	27	32
12)	39	9	15	25	50	61	26	32
13)	57	9	15	42	48	66	26	38
14)	54	9	15	34	49	66	26	36
15)	54	9	15	29	41	64	27	34
16)	51	9	19	40	40	64	27	36
17)	50	9	17	36	38	64	27	34
18)	48	9	17	36	38	61	26	34
19)	65	15	15	36	38	59	27	36
20)	66	16	15	29	38	58	25	35
21)	62	21	15	35	36	58	23	36
22)	58	21	15	27	36	58	36	36
23)	57	20	16	22	36	58	36	35
24)	53	20	22	22	36	60	30	35
25)	53	20	23	22	35	61	25	34
26)	53	20	30	22	35	61	25	35
27)	53	19	27	21	35	59	25	34
28)	54	19	25	26	35	57	25	34
29)	60	18	24	45	35	58	24	38
30)	63	18	24	46	35	58	24	38
31)	64	16	23	46	37	58	24	38
First	39	12	15	1	35	65	26	27
Second	52	10	16	33	43	63	26	35
Third	57	19	22	30	36	59	27	36
Mean	50	14	18	22	38	62	26	33

表19 畜産大学における過去7年間の積雪深 (cm)

Snow Depth in Obihiro University								2月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	59	17	23	46	37	56	24	37
2)	59	17	29	46	37	55	26	38
3)	59	24	30	45	37	57	35	41
4)	59	21	28	46	37	56	35	40
5)	57	20	27	46	37	56	34	40
6)	58	19	25	46	37	56	36	40
7)	58	19	25	46	37	56	37	40
8)	58	19	25	44	37	57	37	40
9)	56	21	25	44	37	56	37	39
10)	56	45	24	54	37	56	37	44
11)	56	34	23	60	37	55	38	43
12)	56	29	23	60	37	52	38	42
13)	55	28	24	59	37	52	38	42
14)	55	29	25	56	37	63	38	43
15)	55	29	26	49	37	63	38	42
16)	55	34	25	42	37	63	38	42
17)	55	36	25	37	36	56	38	40
18)	54	39	25	35	36	56	38	40
19)	54	45	24	32	36	57	38	41
20)	53	45	24	32	36	57	38	41
21)	65	55	23	54	36	57	38	47
22)	58	43	24	58	36	56	37	45
23)	58	43	24	54	36	58	35	44
24)	57	43	28	52	42	66	31	46
25)	57	43	30	49	42	68	29	45
26)	57	43	29	49	40	61	29	44
27)	57	42	31	48	39	60	28	44
28)	56	42	25	47	49	59	28	44
29)	****	****	25	****	****	****	28	****
First	58	22	26	46	37	56	34	40
Second	55	35	24	46	37	57	38	42
Third	58	41	26	51	39	60	31	44
Mean	57	32	26	48	38	58	34	42

表20 畜産大学における過去7年間の積雪深 (cm)

Snow Depth in Obihiro University								3月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	55	42	25	46	46	59	28	43
2)	54	35	25	45	45	59	30	42
3)	50	43	25	45	39	59	38	43
4)	49	42	32	44	40	58	37	43
5)	48	40	27	44	40	58	36	42
6)	50	40	27	44	41	60	32	42
7)	48	38	42	44	40	58	32	43
8)	47	37	28	44	39	58	34	41
9)	45	36	28	44	39	55	35	40
10)	45	33	28	44	40	55	35	40
11)	44	42	41	43	64	50	34	45
12)	43	38	37	43	45	48	30	41
13)	42	36	32	42	45	48	28	39
14)	37	35	30	42	42	45	26	37
15)	35	31	30	42	42	42	27	36
16)	35	31	30	42	58	40	23	37
17)	25	30	39	42	52	40	20	35
18)	25	65	78	41	52	38	11	44
19)	25	65	66	41	50	36	16	43
20)	24	59	62	41	54	33	2	39
21)	25	56	51	41	78	35	----	41
22)	35	54	49	41	77	32	----	41
23)	32	54	47	40	70	26	32	43
24)	36	54	45	40	69	25	34	43
25)	32	45	46	40	58	23	24	38
26)	28	45	47	40	57	18	16	36
27)	26	31	45	40	54	10	7	30
28)	24	28	46	40	52	----	3	28
29)	22	25	45	39	52	----	----	26
30)	17	25	45	39	53	----	----	26
31)	13	18	39	38	51	1	----	23
First	49	39	29	44	41	58	34	42
Second	34	43	45	42	50	42	22	40
Third	26	40	46	40	61	15	11	34
Mean	36	40	40	42	51	38	22	38

表21 畜産大学における過去7年間の積雪深 (cm)

Snow Depth in Obihiro University								4月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	8	10	49	----	45	----	----	16
2)	----	----	46	----	39	----	----	12
3)	2	----	45	----	38	----	----	12
4)	----	----	44	----	32	----	----	11
5)	----	1	43	----	25	----	----	10
6)	----	----	39	----	20	----	----	8
7)	----	----	56	----	15	----	3	11
8)	----	----	51	----	10	----	2	9
9)	----	----	45	----	----	----	----	6
10)	3	----	41	----	----	----	----	6
11)	6	----	38	----	----	----	----	6
12)	5	----	30	----	----	----	----	5
13)	----	----	20	----	----	----	----	3
14)	----	----	12	----	----	----	----	2
15)	----	----	----	----	----	----	----	----
16)	----	----	----	----	----	----	----	----
17)	----	----	----	----	----	----	----	----
18)	----	----	----	----	----	----	----	----
19)	----	----	----	----	----	----	----	----
20)	----	----	----	----	----	----	----	----
21)	----	----	----	----	----	----	----	----
22)	----	----	----	----	----	----	----	----
23)	----	----	----	----	----	----	----	----
24)	----	----	----	----	----	----	----	----
25)	----	----	----	----	----	----	----	----
26)	----	----	----	----	----	----	----	----
27)	----	----	----	----	----	----	----	----
28)	----	----	----	----	----	----	----	----
29)	----	----	----	----	----	----	----	----
30)	----	----	----	----	----	----	----	----
First	1	1	46	----	22	----	1	10
Second	1	----	10	----	----	----	----	2
Third	----	----	----	----	----	----	----	----
Mean	1	0	19	----	7	----	0	4

に示すように、土壤凍結が開始される期日は年次によって著しく異なり、たとえば、86と87年は凍結開始は早く、いずれも11月17日に起こっている。他方、遅い年では83と84年は12月の初旬に凍結開始が起こっている。一般には、凍結開始時期と凍結深さとは無関係であり、12月末では平均22cmの土壤凍結が起こっている。1月は寒冷な気温の影響を受けて土壤凍結が進行する時期であり、2月になるとほとんど凍結線の進行は停滞する。そして、3月になると凍結線は下方からの熱流が大きくなるため、わずかながら減少し始める。4月になると、凍結の浅い年次は中旬で凍結線は消失する。しかし、最も凍結が深かった84年は5月5日まで凍結線は消失しなかった。

土壤凍結に対して、土壤の融解は春期気温の上昇に伴って地表面から発生し、その結果を表29～表31に示す。表29にみられるように、融解開始の早い年は85年のように3月下旬より開始する。しかし、一般には表30に示すように4月上旬から始まり、約14日間で終了することがわかる。ただし、84年の凍結の深い年次は5月上旬で消失する。

以上の結果から、気象状態は土壤の凍結と融解に極めて大きな影響を及ぼし、最大凍結深さに対しては積雪の発生時期とその大きさが重大になってくることが理解される。ここで、再度冬期間の月別気象状況を要約して表32～表38に示すとする。ここに示す真冬日とは日最高気温がマイナスの日をいう。平均すると、約63日になる。年日最低気温の発生起日はかならずしも一定でなく、2月に出現するほうが多いが、低い温度は長続きしないため凍結深さと直接結びつかない。プラスの日最高気温は厳寒期にはめったに出現しないが、たとえ生じたとしても、期間は短いので土壤凍結深さに影響を与えることはない。積雪の大きさは年次によるバラツキが大きく、予想の範囲を越えているので、次年度にどの程度農地が凍結するか予測できない理由はここにある。

表39に自然積雪下での各年次の凍結開始日、最大凍結深さ(cm)とその起日、融解開始日、凍結の消失深さとその起日、そして融解が開始して終了するまでの日数を要約した。

これによると、平均的に凍結開始は11月下旬であり、最大凍結は3月初旬頃に発生し、その大きさは30～50cmで、例外として20cm以上の積雪が早かった1987年はわずか9.5cmに留まった。融解開始は4月上旬で凍結の消失は約14後の中旬であ

表22 畜産大学における過去7年間の凍結深さ (cm)

Frost Depth in Obihro University

11月

	81年	82年	83年	84年	85年	86年	87年	平均
1)	----	----	----	----	----	----	----	----
2)	----	----	----	----	----	----	----	----
3)	----	----	----	----	----	----	----	----
4)	----	----	----	----	----	----	----	----
5)	----	----	----	----	----	----	----	----
6)	----	----	----	----	----	----	----	----
7)	----	----	----	----	----	----	----	----
8)	----	----	----	----	----	----	----	----
9)	----	----	----	----	----	----	----	----
10)	----	----	----	----	----	----	----	----
11)	----	----	----	----	----	----	----	----
12)	----	----	----	----	----	----	----	----
13)	----	----	----	----	----	----	----	----
14)	----	----	----	----	----	----	----	----
15)	----	----	----	----	----	----	----	----
16)	----	----	----	----	----	----	----	----
17)	----	----	----	----	----	1.5	1.5	0.4
18)	----	----	----	----	----	1.0	1.0	0.3
19)	----	----	----	----	----	2.2	2.2	0.6
20)	----	----	----	----	----	2.9	2.9	0.8
21)	----	----	----	----	----	3.5	----	0.5
22)	----	----	----	----	----	2.2	0.1	0.3
23)	1.0	----	----	----	----	2.3	1.7	0.7
24)	2.2	----	----	----	----	3.4	0.5	0.9
25)	3.4	----	----	----	----	3.8	1.1	1.2
26)	4.6	6.1	----	----	1.1	3.4	2.2	2.5
27)	5.9	6.7	----	----	1.5	3.2	2.3	2.8
28)	7.1	7.8	----	----	1.6	3.7	2.9	3.3
29)	8.6	7.0	----	----	1.5	3.7	4.7	3.6
30)	9.8	6.2	----	----	1.8	4.1	5.4	3.9
First	----	----	----	----	----	----	----	----
Second	----	----	----	----	----	2.9	2.9	0.8
Third	9.8	7.8	----	----	1.8	4.1	5.4	3.9
Mean	9.8	7.8	----	----	1.8	4.1	5.4	3.9

表23 畜産大学における過去7年間の凍結深さ (cm)

Frost Depth in Obihro University								12月
	81年	82年	83年	84年	85年	86年	87年	平均
1)	10.8	2.2	----	----	2.8	4.1	6.1	3.7
2)	11.6	6.0	----	----	2.6	4.1	6.0	4.3
3)	13.6	1.2	----	----	3.0	4.2	5.7	4.0
4)	14.2	3.2	8.7	----	3.2	4.5	5.7	5.6
5)	14.7	2.8	11.8	----	3.2	4.0	5.8	6.0
6)	15.1	3.9	14.3	----	3.5	3.7	6.0	6.6
7)	15.2	6.0	16.3	1.5	4.6	3.8	6.2	7.7
8)	15.5	6.9	17.4	6.0	5.4	3.9	6.4	8.8
9)	15.8	7.1	18.0	6.1	5.7	4.0	6.5	9.0
10)	15.9	7.3	18.7	4.7	5.9	4.0	6.5	9.0
11)	16.3	7.5	19.5	4.7	6.3	4.0	6.8	9.3
12)	16.5	7.2	19.6	3.8	6.8	3.3	6.9	9.2
13)	16.7	7.3	19.7	----	7.5	3.1	7.7	8.9
14)	17.1	7.7	19.7	4.0	8.1	3.5	8.8	9.8
15)	17.4	8.5	21.3	6.0	8.5	3.8	10.9	10.9
16)	17.6	8.9	21.8	10.7	9.0	4.3	12.4	12.1
17)	18.1	9.4	24.3	14.7	9.6	4.5	13.2	13.4
18)	18.7	9.6	25.9	15.0	10.3	4.8	14.2	14.1
19)	19.4	9.6	27.7	15.4	11.3	5.0	15.4	14.8
20)	20.0	9.7	29.5	17.2	11.9	5.0	16.4	15.7
21)	20.5	9.7	29.0	18.6	12.8	4.8	17.5	16.1
22)	21.0	9.7	32.2	20.0	13.4	4.7	18.8	17.1
23)	21.6	9.7	33.1	21.8	13.9	4.7	20.0	17.8
24)	22.0	9.3	33.5	23.1	15.0	4.7	21.5	18.4
25)	22.5	9.1	33.9	24.2	16.0	4.7	23.0	19.1
26)	23.2	9.2	34.0	25.8	16.5	4.8	23.7	19.6
27)	23.9	9.4	34.3	27.0	17.8	4.8	24.1	20.2
28)	24.5	9.4	34.7	27.9	19.2	4.8	24.2	20.7
29)	25.0	9.5	34.5	29.1	20.8	4.7	24.5	21.2
30)	26.1	9.8	34.4	30.5	22.0	4.9	24.5	21.7
31)	26.5	10.2	34.5	30.5	22.7	4.9	24.4	22.0
First	15.9	7.3	18.7	6.1	5.9	4.5	6.5	9.0
Second	20.0	9.7	29.5	17.2	11.9	5.0	16.4	15.7
Third	26.5	10.2	34.7	30.5	22.7	4.9	24.5	22.0
Mean	26.5	10.2	34.7	30.5	22.7	5.0	24.5	22.0

表24 畜産大学における過去7年間の凍結深さ (cm)

Frost Depth in Obihiro University								1月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	26.7	10.5	34.9	31.8	23.0	5.0	24.4	22.3
2)	26.8	11.0	35.3	33.3	23.0	4.9	24.3	22.7
3)	27.0	11.5	35.5	34.5	23.2	4.7	24.1	22.9
4)	27.0	11.9	35.9	35.8	23.2	4.7	24.3	23.3
5)	27.1	12.4	36.3	37.1	23.2	4.5	24.3	23.6
6)	27.2	12.6	36.7	38.5	23.2	4.5	24.3	23.9
7)	27.7	13.1	37.2	39.9	22.8	4.5	24.3	24.2
8)	28.1	13.4	38.2	41.1	23.2	4.7	24.5	24.7
9)	28.0	13.4	38.7	42.5	23.2	4.9	24.6	25.0
10)	28.4	13.2	39.5	43.7	23.2	4.9	24.8	25.4
11)	28.2	13.8	40.2	44.8	23.2	4.9	25.0	25.7
12)	28.2	14.2	40.8	45.7	23.2	4.9	25.1	26.0
13)	28.1	14.7	41.4	46.3	23.4	4.9	25.2	26.3
14)	28.1	15.4	42.0	46.7	23.8	4.9	25.7	26.7
15)	27.9	16.2	42.6	47.0	24.3	4.9	26.3	27.0
16)	27.9	17.0	43.6	47.2	24.6	4.9	26.3	27.4
17)	28.0	17.8	44.0	47.3	24.9	4.9	26.6	27.6
18)	28.2	18.7	44.5	47.5	25.3	4.9	26.8	28.0
19)	28.3	19.3	44.8	47.5	25.8	4.9	27.0	28.2
20)	28.5	19.8	45.2	47.5	26.3	4.9	27.4	28.5
21)	28.6	20.3	45.6	47.4	26.8	5.0	27.6	28.8
22)	28.8	20.7	46.7	47.4	27.4	5.2	28.3	29.2
23)	28.9	21.0	47.2	47.3	28.0	5.5	28.5	29.5
24)	28.9	21.3	47.6	47.4	28.4	5.5	28.8	29.7
25)	29.1	21.7	48.3	47.3	29.2	5.5	28.7	30.0
26)	29.2	22.1	48.7	47.3	29.9	5.8	28.8	30.3
27)	29.3	22.4	48.8	47.3	31.1	6.2	28.9	30.6
28)	29.5	22.7	48.8	47.3	32.1	6.2	29.1	30.8
29)	29.6	22.7	48.9	47.7	33.2	6.2	29.6	31.1
30)	29.8	23.0	49.0	47.7	34.2	6.3	30.0	31.4
31)	30.0	23.3	49.1	47.8	35.2	6.3	30.6	31.8
First	28.4	13.4	39.5	43.7	23.2	5.0	24.8	25.4
Second	28.5	19.8	45.2	47.5	26.3	4.9	27.4	28.5
Third	30.0	23.3	49.1	47.8	35.2	6.3	30.6	31.8
Mean	30.0	23.3	49.1	47.8	35.2	6.3	30.6	31.8



表25 畜産大学における過去7年間の凍結深さ (cm)

Frost Depth in Obihro University								2月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	30.1	23.6	49.1	47.8	36.1	6.5	31.3	32.1
2)	30.3	24.0	49.2	47.7	36.7	6.6	32.0	32.4
3)	30.4	24.5	49.3	47.9	37.8	6.9	33.0	32.8
4)	30.6	24.8	49.6	47.6	38.5	7.1	33.6	33.1
5)	30.8	25.2	49.5	47.7	39.2	7.3	34.5	33.5
6)	31.1	25.6	49.7	47.7	40.0	7.4	35.1	33.8
7)	31.2	26.0	50.0	47.7	40.7	7.6	35.5	34.1
8)	31.4	26.3	50.0	47.7	41.4	7.7	36.0	34.4
9)	31.6	26.7	50.3	47.7	42.0	7.8	36.3	34.6
10)	31.9	27.1	50.5	48.6	42.7	7.9	36.3	35.0
11)	32.1	27.4	50.5	47.6	43.7	8.0	36.9	35.2
12)	32.4	27.8	50.7	47.5	43.9	8.2	37.5	35.4
13)	32.7	28.0	50.9	47.6	44.3	8.0	37.8	35.6
14)	33.0	28.3	51.0	47.5	44.8	8.1	38.1	35.8
15)	33.2	28.6	51.4	47.5	45.2	8.3	39.0	36.2
16)	33.5	28.9	51.3	47.5	45.6	8.2	39.1	36.3
17)	33.8	29.2	51.5	47.5	45.9	8.4	39.3	36.5
18)	34.0	29.5	51.6	47.5	46.5	8.5	39.7	36.8
19)	34.3	29.7	51.8	47.5	47.0	8.5	40.0	37.0
20)	34.7	29.9	52.0	47.3	47.3	8.5	40.5	37.2
21)	34.8	30.1	52.2	47.3	47.7	8.7	40.7	37.4
22)	35.0	30.2	52.4	47.2	47.8	8.8	41.3	37.5
23)	35.2	30.3	52.6	47.1	48.4	8.9	41.9	37.8
24)	35.3	30.4	52.8	47.0	48.7	9.1	42.3	37.9
25)	35.4	30.4	53.1	46.9	49.3	9.1	42.8	38.1
26)	35.5	30.5	53.3	46.9	49.4	9.1	42.8	38.2
27)	35.6	30.5	53.5	46.7	49.5	9.1	43.2	38.3
28)	35.7	30.6	53.7	46.7	49.4	9.2	43.3	38.4
29)	****	****	53.8	****	****	****	43.3	****
First	31.9	27.1	50.5	48.6	42.7	7.9	36.3	35.0
Second	34.7	29.9	52.0	47.6	47.3	8.5	40.5	37.2
Third	35.7	30.6	53.7	47.7	49.5	9.2	43.3	38.4
Mean	35.7	30.6	53.7	48.6	49.5	9.2	43.3	38.4

表26 畜産大学における過去7年間の凍結深さ (cm)

Frost Depth in Obihiro University								3月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	35.9	30.6	54.0	46.5	49.3	9.2	43.5	38.4
2)	36.0	30.7	54.1	46.5	49.1	9.2	43.6	38.5
3)	36.1	30.8	54.2	46.4	48.9	9.0	43.6	38.4
4)	36.1	30.9	54.4	46.4	48.6	9.0	43.7	38.4
5)	36.0	31.0	54.5	46.3	48.5	9.0	43.5	38.4
6)	36.0	31.1	54.6	46.1	48.4	9.0	43.5	38.4
7)	36.0	31.2	54.8	46.0	48.4	9.5	43.2	38.4
8)	35.9	31.2	54.9	45.8	48.4	8.8	42.6	38.2
9)	35.8	31.3	55.0	45.8	48.5	8.8	42.9	38.3
10)	35.8	31.5	55.0	45.6	48.5	8.6	42.8	38.3
11)	35.7	31.5	55.2	45.5	48.8	8.6	42.7	38.3
12)	35.6	31.7	55.0	45.4	48.8	8.5	42.5	38.2
13)	35.4	31.8	55.1	45.2	48.5	8.4	42.6	38.1
14)	35.4	31.8	55.0	45.1	48.6	8.2	42.5	38.1
15)	35.3	31.8	55.0	45.0	48.5	8.0	42.2	38.0
16)	35.1	31.8	55.1	44.9	48.3	8.0	41.8	37.9
17)	35.0	31.9	55.1	44.7	48.0	8.0	41.5	37.7
18)	34.9	31.9	55.1	44.4	47.7	7.9	41.3	37.6
19)	34.7	31.8	55.2	44.1	47.6	7.6	40.9	37.4
20)	34.5	31.8	55.2	43.6	47.4	7.7	41.0	37.3
21)	34.3	31.7	55.2	43.6	47.2	7.4	41.1	37.2
22)	34.1	31.7	55.2	43.4	47.0	7.5	40.9	37.1
23)	33.9	31.7	55.2	43.0	46.7	7.3	40.8	36.9
24)	33.8	31.6	55.3	43.0	46.4	7.3	40.6	36.9
25)	33.2	31.4	55.1	42.9	46.2	7.0	40.6	36.6
26)	32.9	31.4	55.1	42.7	46.0	7.0	40.3	36.5
27)	32.8	31.2	55.0	42.5	45.5	6.8	39.9	36.2
28)	32.6	31.2	54.8	42.4	45.3	6.5	39.7	36.1
29)	32.5	31.0	54.7	42.3	45.0	6.8	39.5	36.0
30)	32.5	30.9	54.6	42.2	45.0	6.7	39.4	35.9
31)	32.3	30.8	54.6	42.3	44.7	6.7	39.1	35.8
First	36.1	31.5	55.0	46.5	49.3	9.5	43.7	38.5
Second	35.7	31.9	55.2	45.5	48.8	8.6	42.7	38.3
Third	34.3	31.7	55.3	43.6	47.2	7.5	41.1	37.2
Mean	36.1	31.9	55.3	46.5	49.3	9.5	43.7	38.5

表27 畜産大学における過去7年間の凍結深さ (cm)

Frost Depth in Obihiro University								4月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	32.2	30.4	54.6	42.2	44.2	6.4	39.9	35.7
2)	32.1	30.3	54.6	41.8	44.1	6.5	38.8	35.5
3)	32.0	30.1	54.4	41.5	43.8	6.4	38.4	35.2
4)	31.7	29.8	54.3	41.5	43.6	----	37.6	34.1
5)	31.6	29.8	54.2	41.4	43.3	----	39.2	34.2
6)	31.5	29.6	54.2	41.5	43.1	----	39.1	34.1
7)	31.2	29.4	54.1	41.5	43.1	----	38.9	34.0
8)	31.2	29.3	54.1	41.5	42.9	----	38.6	33.9
9)	31.0	29.3	54.0	41.3	42.7	----	38.7	33.9
10)	31.0	29.2	53.8	41.2	42.5	----	33.6	33.0
11)	31.1	29.0	53.8	41.0	42.0	----	38.3	33.6
12)	31.1	29.0	53.1	41.0	41.7	----	38.0	33.4
13)	30.9	28.8	53.4	40.8	41.5	----	38.0	33.3
14)	30.8	28.7	53.1	40.6	41.4	----	37.5	33.2
15)	30.5	28.4	52.8	40.6	41.1	----	37.2	32.9
16)	30.5	28.0	52.6	40.0	41.5	----	37.2	32.8
17)	30.2	----	52.2	39.5	41.5	----	26.3	27.1
18)	27.9	----	51.8	----	41.3	----	26.3	21.0
19)	----	----	51.7	----	41.0	----	----	13.2
20)	----	----	51.7	----	41.0	----	----	13.2
21)	----	----	51.7	----	41.0	----	----	13.2
22)	----	----	51.6	----	41.0	----	----	13.2
23)	----	----	51.5	----	40.7	----	----	13.2
24)	----	----	51.3	----	40.5	----	----	13.1
25)	----	----	51.2	----	39.7	----	----	13.0
26)	----	----	51.0	----	41.0	----	----	13.1
27)	----	----	51.0	----	41.5	----	----	13.2
28)	----	----	51.0	----	----	----	----	7.3
29)	----	----	50.8	----	----	----	----	7.3
30)	----	----	50.5	----	----	----	----	7.2
First	32.2	30.4	54.6	42.2	44.2	6.5	39.9	35.7
Second	31.1	29.0	53.8	41.0	42.0	----	38.3	33.6
Third	----	----	51.7	----	41.5	----	----	13.2
Mean	32.2	30.4	54.6	42.2	44.2	6.5	39.9	35.7

表28 畜産大学における過去7年間の凍結深さ (cm)

Frost Depth in Obihiro University								5月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	----	----	50.0	----	----	----	----	7.1
2)	----	----	50.0	----	----	----	----	7.1
3)	----	----	50.0	----	----	----	----	7.1
4)	----	----	49.9	----	----	----	----	7.1
5)	----	----	46.8	----	----	----	----	6.7
6)	----	----	----	----	----	----	----	----
7)	----	----	----	----	----	----	----	----
8)	----	----	----	----	----	----	----	----
9)	----	----	----	----	----	----	----	----
10)	----	----	----	----	----	----	----	----
First	----	----	50.0	----	----	----	----	7.1

表29 畜産大学における過去7年間の融解深さ (cm)

Thawing Depth in Obihiro University							3月	
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	平均
1)	----	----	----	----	----	----	----	----
2)	----	----	----	----	----	----	----	----
3)	----	----	----	----	----	----	----	----
4)	----	----	----	----	----	----	----	----
5)	----	----	----	----	----	----	----	----
6)	----	----	----	----	----	----	----	----
7)	----	----	----	----	----	----	----	----
8)	----	----	----	----	----	----	----	----
9)	----	----	----	----	----	----	----	----
10)	----	----	----	----	----	----	----	----
11)	----	----	----	----	----	----	----	----
12)	----	----	----	----	----	----	----	----
13)	----	----	----	----	----	----	----	----
14)	----	----	----	----	----	----	----	----
15)	----	----	----	----	----	----	----	----
16)	----	----	----	----	----	----	----	----
17)	----	----	----	----	----	----	----	----
18)	----	----	----	----	----	----	----	----
19)	----	----	----	----	----	----	----	----
20)	----	----	----	----	----	----	----	----
21)	----	----	----	----	----	----	----	----
22)	----	----	----	----	----	----	----	----
23)	----	----	----	----	----	----	----	----
24)	----	----	----	----	----	----	----	----
25)	----	----	----	----	----	----	----	----
26)	----	----	----	----	----	----	----	----
27)	----	----	----	----	----	----	----	----
28)	----	----	----	2.2	----	----	----	0.3
29)	----	----	----	3.5	----	----	----	0.5
30)	----	----	----	3.4	----	----	----	0.5
31)	----	----	----	4.0	----	----	----	0.6
First	----	----	----	----	----	----	----	----
Second	----	----	----	----	----	----	----	----
Third	----	----	----	4.0	----	----	----	0.6
Mean	----	----	----	4.0	----	----	----	0.6

表30 畜産大学における過去7年間の融解深さ (cm)

Thawing Depth in Obihiro University								4月
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	ハイキソ
1)	----	----	----	4.5	----	----	----	0.6
2)	----	----	----	7.0	----	----	----	1.0
3)	----	----	----	9.8	----	----	----	1.4
4)	----	----	----	13.0	----	----	6.3	2.8
5)	----	----	----	15.6	----	----	9.0	3.5
6)	0.6	-1.8	----	19.4	----	----	11.6	4.3
7)	6.7	3.9	----	22.0	----	----	11.6	6.3
8)	11.5	9.0	----	24.5	----	----	13.4	8.3
9)	15.2	11.7	----	26.5	----	----	15.2	9.8
10)	17.3	13.5	----	28.0	----	----	16.0	10.7
11)	17.3	16.2	----	30.3	----	----	17.0	11.5
12)	17.7	19.3	----	31.3	1.0	----	18.5	12.5
13)	17.9	21.6	----	32.2	5.5	----	20.5	14.0
14)	20.2	23.7	----	33.0	10.5	----	21.5	15.6
15)	22.4	25.8	7.5	34.3	12.9	----	25.5	18.3
16)	23.1	28.0	9.8	35.3	14.7	----	26.0	19.6
17)	23.1	----	12.5	36.4	15.2	----	26.2	16.2
18)	24.0	----	15.7	39.5	17.2	----	26.3	17.5
19)	24.2	----	18.0	----	19.5	----	----	8.8
20)	----	----	20.2	----	21.8	----	----	6.0
21)	----	----	22.0	----	23.0	----	----	6.4
22)	----	----	24.5	----	23.0	----	----	6.8
23)	----	----	25.1	----	24.0	----	----	7.0
24)	----	----	27.3	----	26.0	----	----	7.6
25)	----	----	30.0	----	28.5	----	----	8.4
26)	----	----	32.2	----	29.0	----	----	8.7
27)	----	----	35.2	----	41.5	----	----	11.0
28)	----	----	38.0	----	----	----	----	5.4
29)	----	----	39.7	----	----	----	----	5.7
30)	----	----	40.7	----	----	----	----	5.8
First	17.3	13.5	----	28.0	----	----	16.0	10.7
Second	24.2	28.0	20.2	39.5	21.8	----	26.3	19.6
Third	----	----	40.7	----	41.5	----	----	11.0
Mean	24.2	28.0	40.7	39.5	41.5	----	26.3	19.6

表31 畜産大学における過去7年間の融解深さ (cm)

Thawing Depth in Obihro University							5月	
	82年	83年	84年	85年	86年	87年	88年	ハイキソ
1)	-----	-----	41.9	-----	-----	-----	-----	6.0
2)	-----	-----	42.5	-----	-----	-----	-----	6.1
3)	-----	-----	44.8	-----	-----	-----	-----	6.4
4)	-----	-----	46.2	-----	-----	-----	-----	6.6
5)	-----	-----	46.8	-----	-----	-----	-----	6.7
6)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
8)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
10)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
First	-----	-----	46.8	-----	-----	-----	-----	6.7

表 32 月別の気象状況 (1981-1982)

項目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
真冬日	3	7	27	21	4	0	0	62
平均気温	-1.3	-5.9	-11.6	-13.7	-2.7	3.1	10.7	-21.4
最低气温 起日	-15.9 11/30	-21.2 12/31	-30.5 1/24	-35.4 2/ 2	-14.4 3/12	-10.4 4/ 5	-0.3 5/24	----- -----
最高气温 起日	13.4 11/ 4	7.8 12/23	2.7 1/21	2.4 2/28	12.0 3/31	19.7 4/ 7	24.9 5/27	----- -----
最高積雪 起日	9 11/24	27 12/31	66 1/20	59 2/ 1	55 3/ 1	8 4/ 1	----- -----	----- -----
積算寒度	61	181	361	376	100	7	0	1087

表 33 月別の気象状況 (1982-1983)

項目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
真冬日	0	7	21	24	7	0	0	59
平均気温	1.7	-5.3	-9.0	-11.1	-5.2	6.2	10.6	-12.1
最低气温 起日	-12.8 11/29	-22.8 12/31	-25.5 1/ 4	-30.9 2/28	-27.6 3/ 4	-9.2 4/ 1	-4.3 5/ 6	----- -----
最高气温 起日	17.4 11/ 4	10.6 12/ 1	7.9 1/29	2.8 2/21	12.0 3/30	25.2 4/28	28.6 5/12	----- -----
最高積雪 起日	2 24	18 11/18	21 1/21	55 2/21	65 3/18	10 4/ 1	----- -----	----- -----
積算寒度	19	169	280	311	165	0	0	944



表 34 月別の気象状況 (1983-1984)

項 目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
真冬日	0	12	23	27	7	0	0	69
平均気温	1.4	-6.5	-12.0	-10.8	-6.1	1.5	8.6	-23.9
最低气温 起日	-10.4 27	-28.4 30	-28.2 30	-32.8 7	-24.2 10	-17.5 1	1.0 1	----- -----
最高气温 起日	15.8 8	8.4 2	1.2 4	1.4 21	4.2 19	23.7 27	25.9 27	----- -----
最高積雪 起日	----- -----	25 26	30 26	31 27	78 18	56 6	----- -----	----- -----
積算寒度	25	205	371	309	214	0	0	1124

表 35 月別の気象状況 (1984-1985)

項 目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
真冬日	0	18	30	16	6	0	0	70
平均気温	-0.2	-6.1	-13.5	-7.7	-4.2	5.1	10.1	-16.5
最低气温 起日	-15.4 11/20	-20.7 12/23	-32.1 1/24	-26.8 2/ 1	-24.0 3/ 4	-7.4 4/ 2	-3.2 5/17	----- -----
最高气温 起日	19.7 11/ 7	10.0 12/ 2	0.4 1/11	4.5 2/17	10.0 3/26	19.8 4/26	33.2 5/24	----- -----
最高積雪 起日	3 11/27	6 12/24	46 1/30	60 2/11	52 3/ 9	----- -----	----- -----	----- -----
積算寒度	53	190	413	225	147	0	0	1028

表 36 月別の気象状況 (1985 - 1986)

項 目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
真冬日	1	20	30	22	8	0	0	81
平均気温	1.1	-8.9	-13.0	-13.0	-4.6	4.1	9.7	-24.6
最低気温 起日	-19.8 11/30	-25.0 12/12	-30.5 1/24	-29.4 2/7	-31.0 3/4	-8.8 4/3	-1.7 5/27	----- -----
最高気温 起日	15.6 11/5	6.8 12/29	2.5 1/5	2.8 2/26	6.1 3/11	18.6 4/30	26.0 5/5	----- -----
最高積雪 起日	8 11/29	37 12/31	55 1/10	49 2/28	78 3/21	45 4/1	----- -----	----- -----
積算寒度	46	279	403	363	145	0	0	1236

表 37 月別の気象状況 (1986 - 1987)

項 目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
真冬日	0	15	29	18	3	0	0	65
平均気温	0.1	-7.1	-12.3	-9.6	-3.1	0.6	11.5	-19.9
最低気温 起日	-18.2 11/28	-25.9 12/29	-32.7 1/21	-28.7 2/20	-20.8 3/2	-12.0 4/1	-0.3 5/6	----- -----
最高気温 起日	15.8 11/14	6.4 12/11	2.0 1/28	5.6 2/24	9.7 3/29	26.8 4/30	5/1 27.4	----- -----
最高積雪 起日	26 11/26	46 12/26	83 1/4	68 2/25	60 3/6	----- -----	----- -----	----- -----
積算寒度	41	220	382	270	106	0	0	1019

表 38 月別の気象状況 (1987-1988)

項目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
真冬日	2	16	21	24	8	0	0	71
平均気温	0.9	-6.7	-9.7	-10.5	-3.4	4.2	9.9	-15.3
最低気温 起日	-13.5 11/30	-23.3 12/ 6	-25.2 1/ 3	-28.5 2/15	-21.3 3/ 8	-6.2 4/ 9	-3.0 5/25	----- -----
最高気温 起日	19.2 11/14	9.2 12/27	5.8 1/14	0.8 2/ 5	9.2 3/11	25.0 4/29	23.8 5/19	----- -----
最高積雪 起日	6 11/23	32 12/31	36 1/22	38 2/11	38 3/ 4	9 4/ 3	----- -----	----- -----
積算寒度	33	207	302	305	111	0	0	958

表 39 各年の凍結、融解の極値とその起日 (1981-1988)

年次	雪系	地区名	地下水位 (cm)	凍結 開始日	最大凍結深さ (cm)	起日	融解 開始日	凍結消失深さ (cm)	起日	融解 日数
1981	雪	圃場	自然状態	11/23	36.1	3/ 3	4/ 7	24.2	4/20	14
1982	雪	圃場	自然状態	11/26	31.9	3/17	4/ 7	28.0	4/16	10
1983	雪	圃場	自然状態	12/ 4	55.3	3/24	4/15	46.8	5/ 5	21
1984	雪	圃場	自然状態	12/ 7	48.6	2/10	3/28	39.5	4/17	21
1985	雪	圃場	自然状態	11/26	49.5	2/27	4/12	41.5	4/27	16
1986	雪	圃場	自然状態	11/27	9.5	3/ 7	4/ 3	6.4	4/ 3	1
1987	雪	圃場	自然状態	11/17	43.7	3/ 4	4/ 4	26.3	4/18	15

るといえる。

このように表に示した数値を図化すると、図6～図12が得られ、実線の凍結深さと積雪深、点線の凍結指数（積算寒度）の推移が容易に理解される。

#### 積雪下の最大凍結深さと積雪20cm積算寒度

積雪の影響のため、最大凍結深さの推定は後に示す熱的解析によつて計算することは、はなはだ難しい。そこで、以前に十勝地方の土壤凍結分布に関する研究で得られた著者の推定式を使用することにする。積雪が20cm以上になると、凍結の進行は比較的少ないという仮定にもとずき、積雪が20cm以上になるまでの積算寒度を計算し、この平方根との関係を求める。図13に最大凍結深さを縦軸に、そして横軸に積雪20cmの積算寒度をとると、次の関係式が得られた。

$$D_{\max} = 2.4 \sqrt{F_{20}} \quad (1)$$

ここに、 $D_{\max}$ は最大凍結深さ(cm)、 $F_{20}$ は積雪20cm積算寒度(°C・日)である。係数の2.4は凍結係数とよばれ、土壤の熱的性質、地表面の状態、積雪の密度などの諸々の要素が含まれるので経験的に決定される。十勝地方のアルファルファ草地で著者が調べた結果、この係数は凍結地帯の平均凍結係数2.1より多少大きかった。

次に、凍結深さが増大すると、融解日数が増加する傾向は推察される。そこで、これらの関係を図14に示した。縦軸に融解日数を、横軸に最大凍結深さをプロットすると、下記に示す直線式が得られた。

$$N = 0.44 D_{\max} - 3.5 \quad (2)$$

ここに、 $N$ は融解日数(日)で  $D_{\max}$ は最大凍結深さ(cm)である。除雪状態での凍結深さの推移についてはデータの蓄積年数が少ないため、これらの分析は次回に行うことにする。

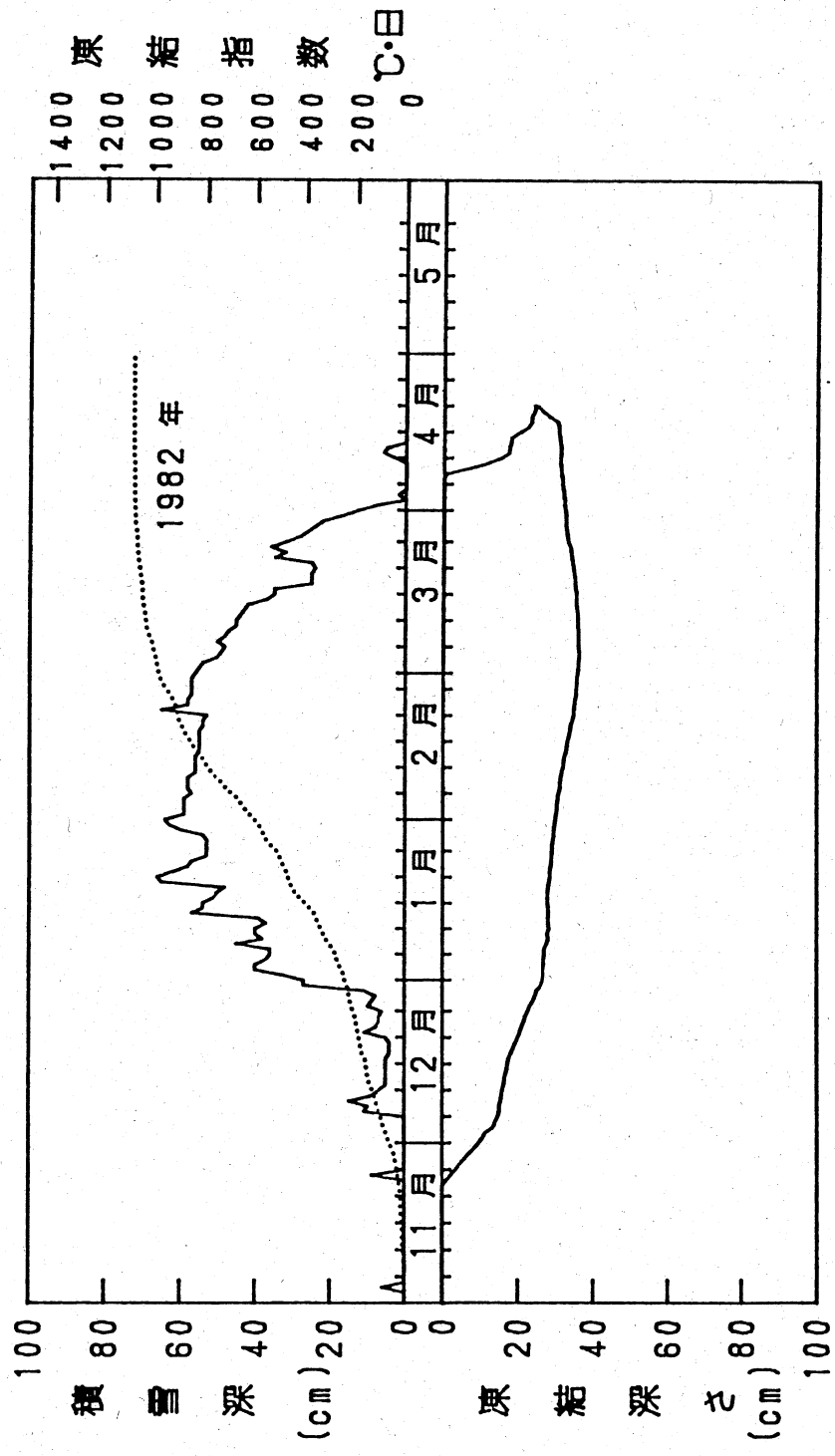
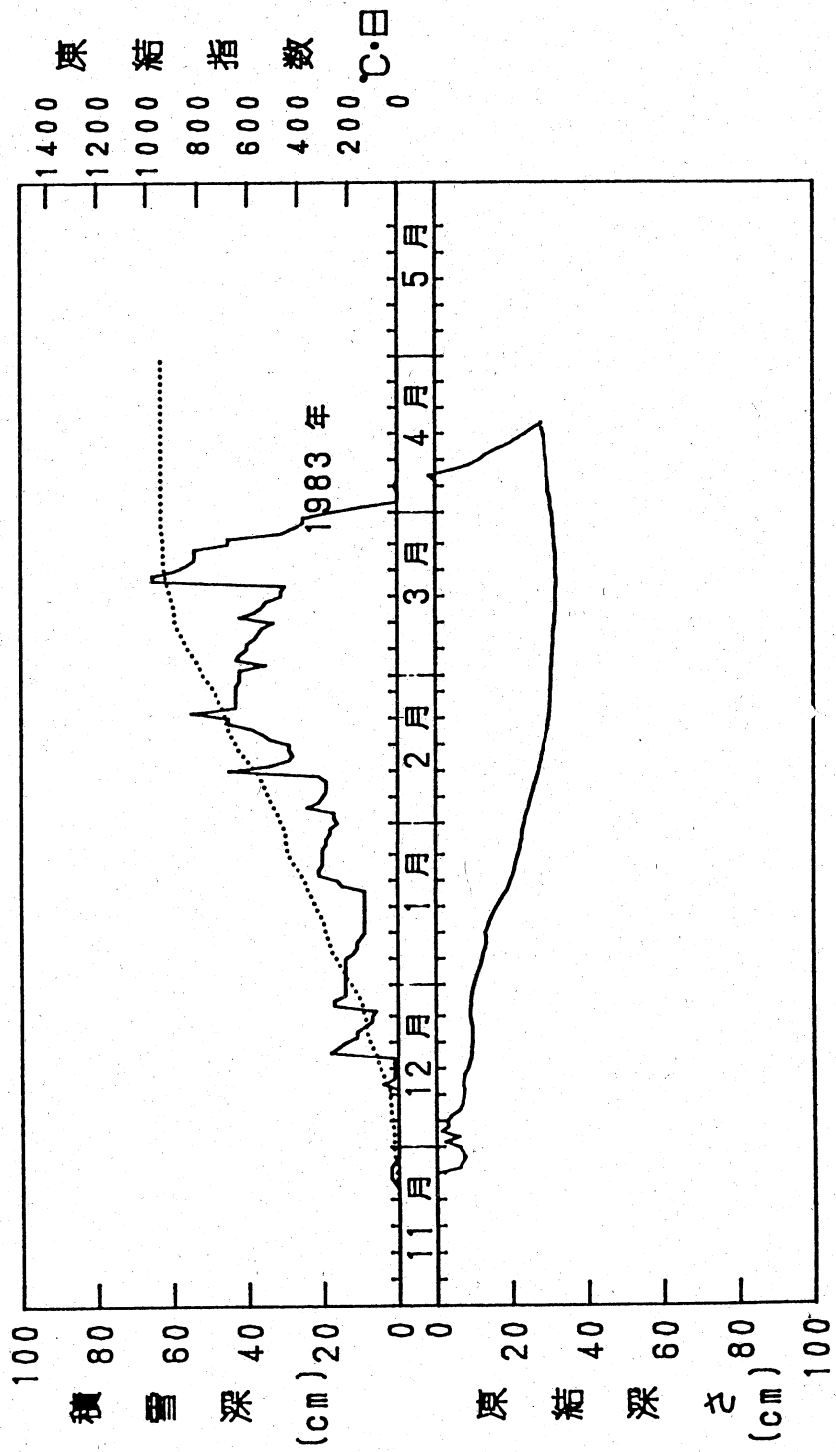


図6 1981-82年の土壌凍結、積雪および積算寒度の推移



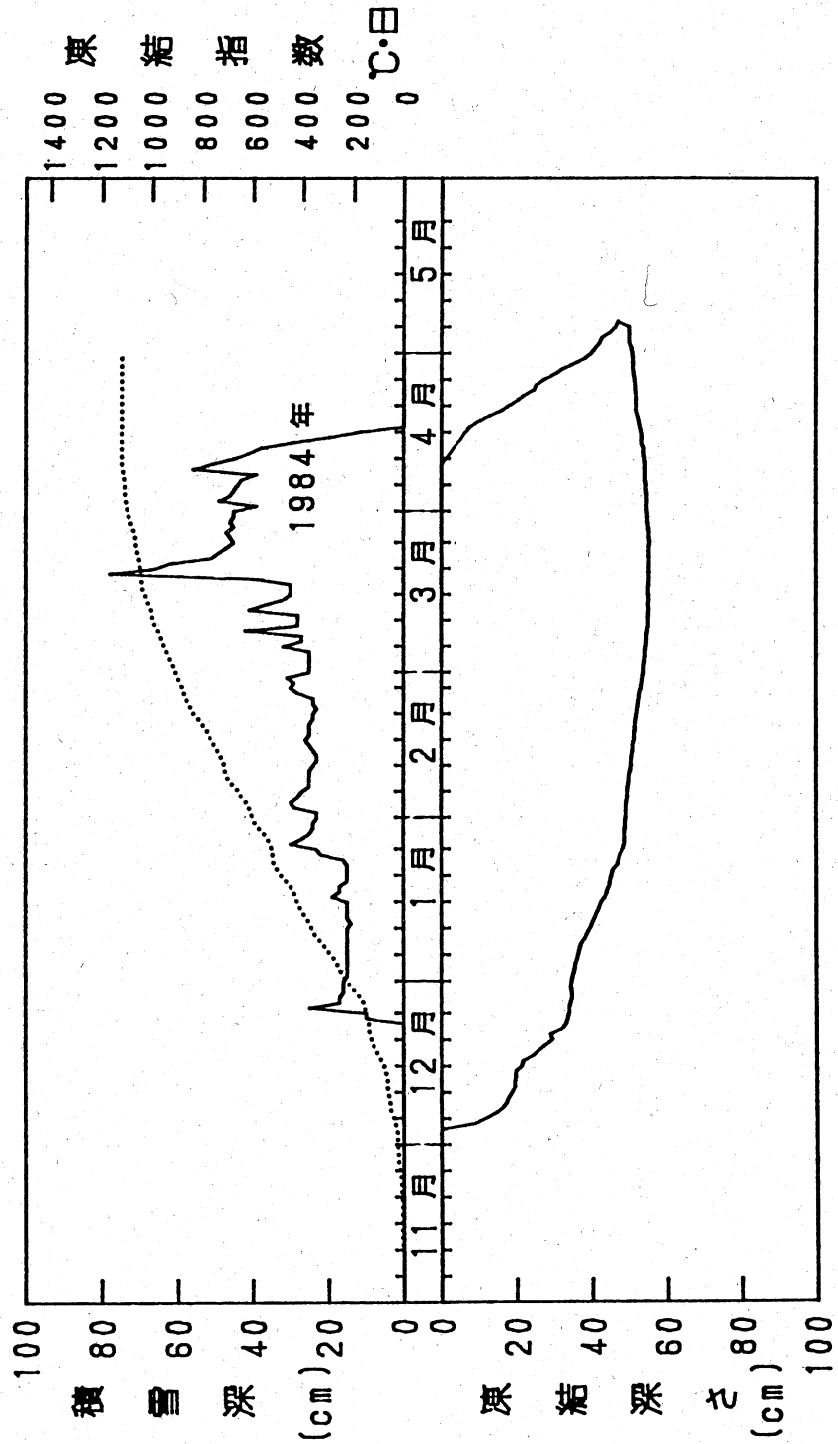


図8 1983-84年の土壌凍結、積雪および積算寒度の推移

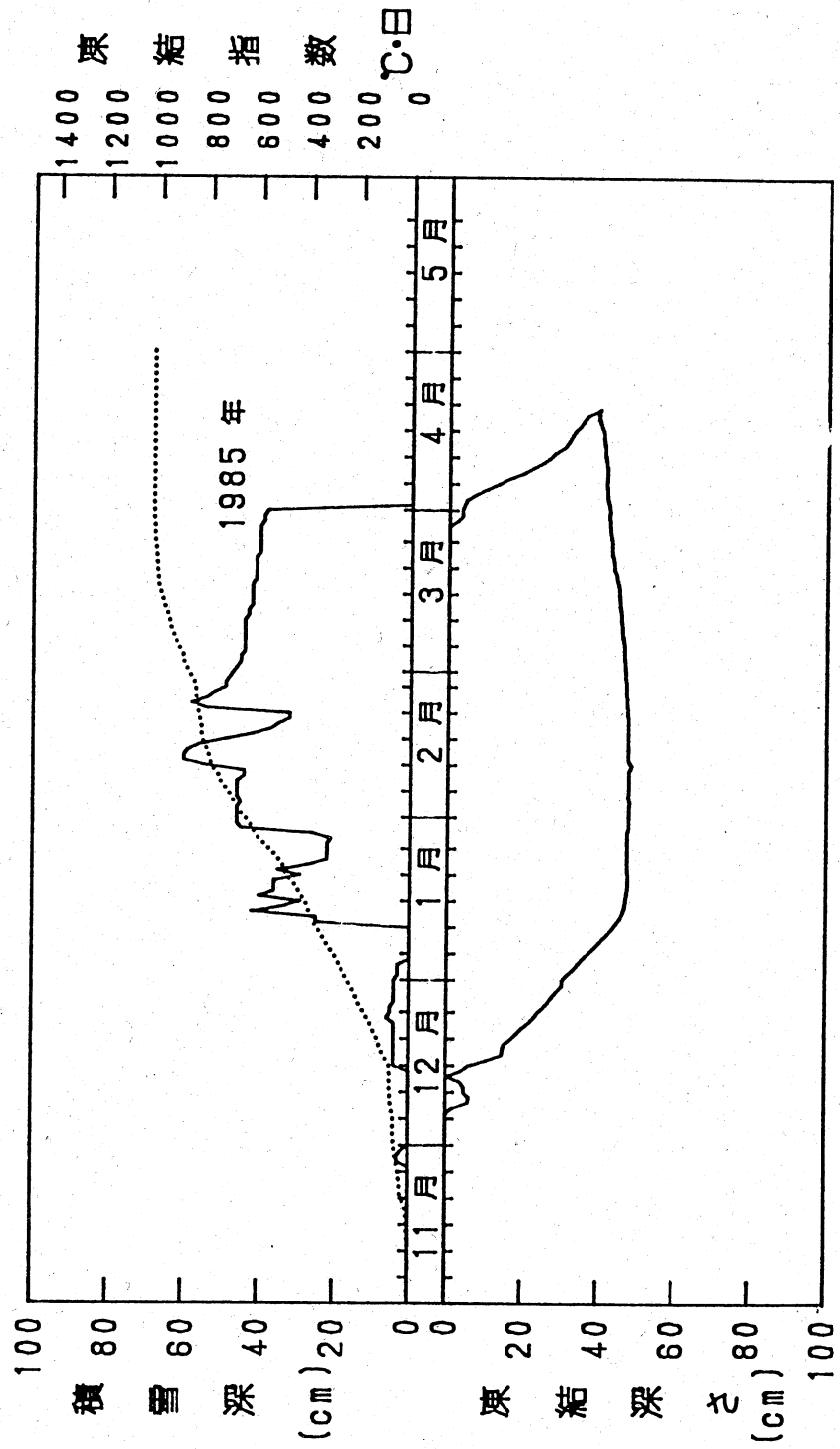


図9 1984-85年の土壌凍結、積雪および積算寒度の推移



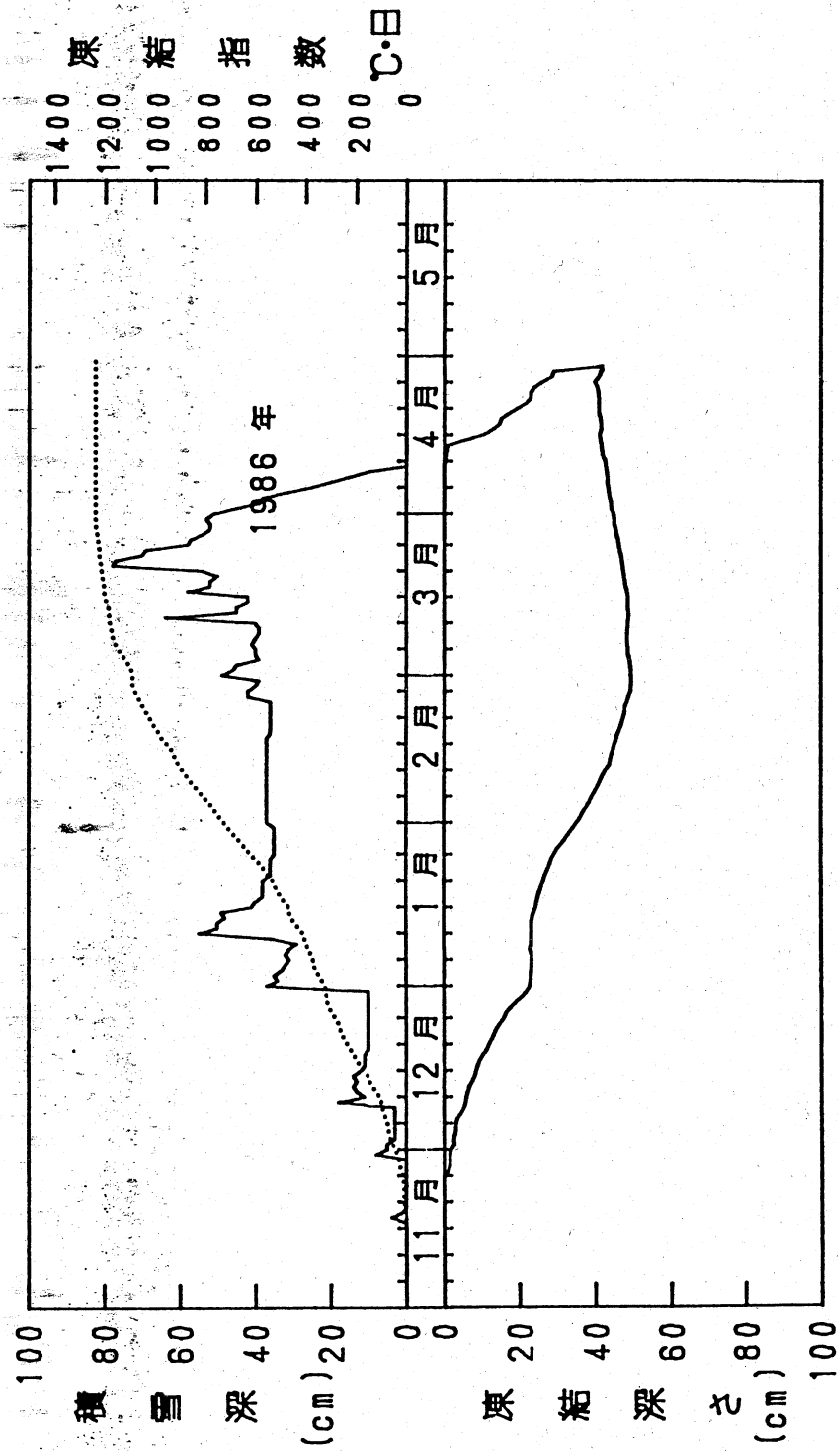


図10 1985-86年の土壌凍結、積雪および積算寒度の推移

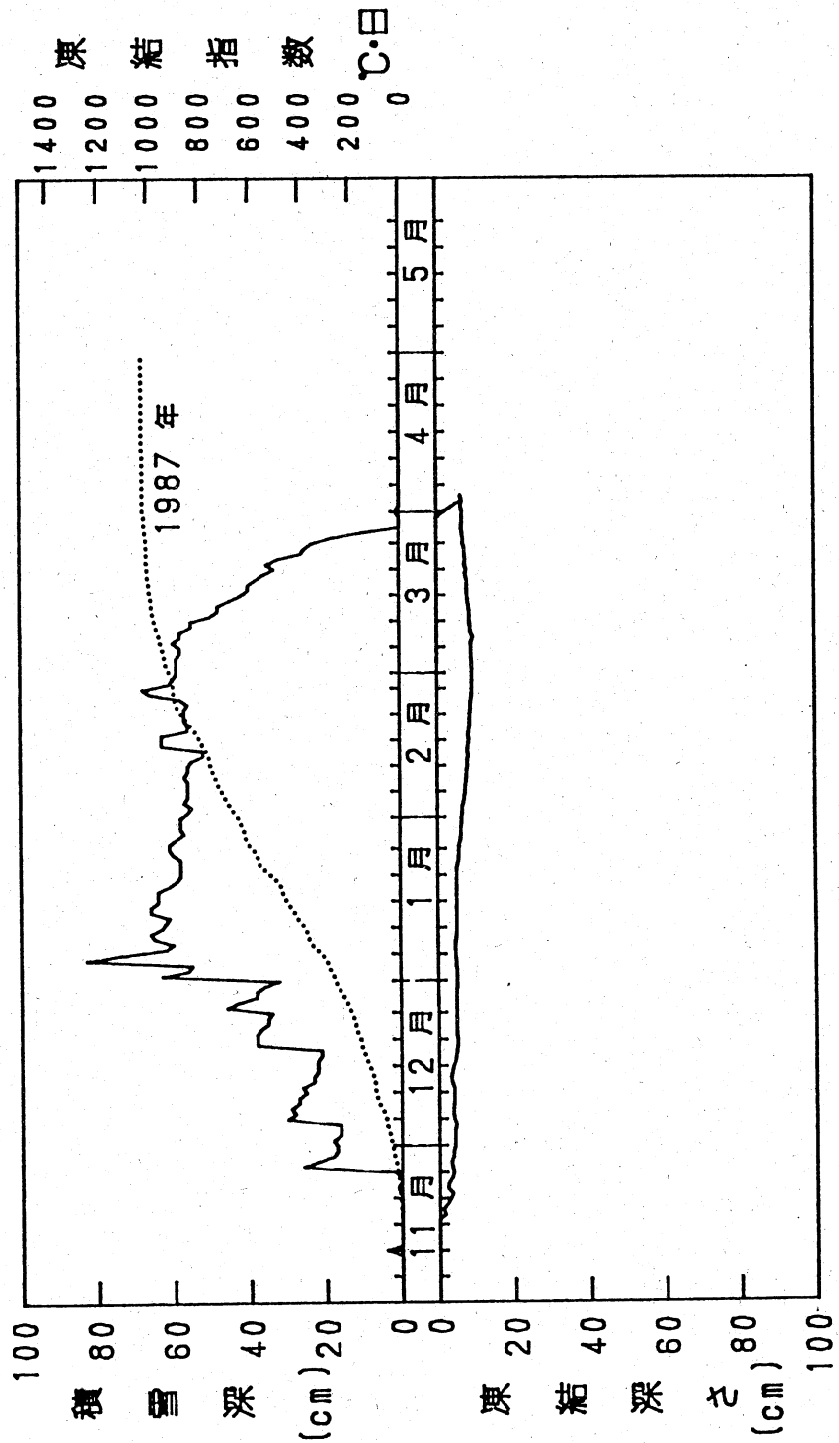


図11 1986-87年の土壌凍結、積雪および積算寒度の推移

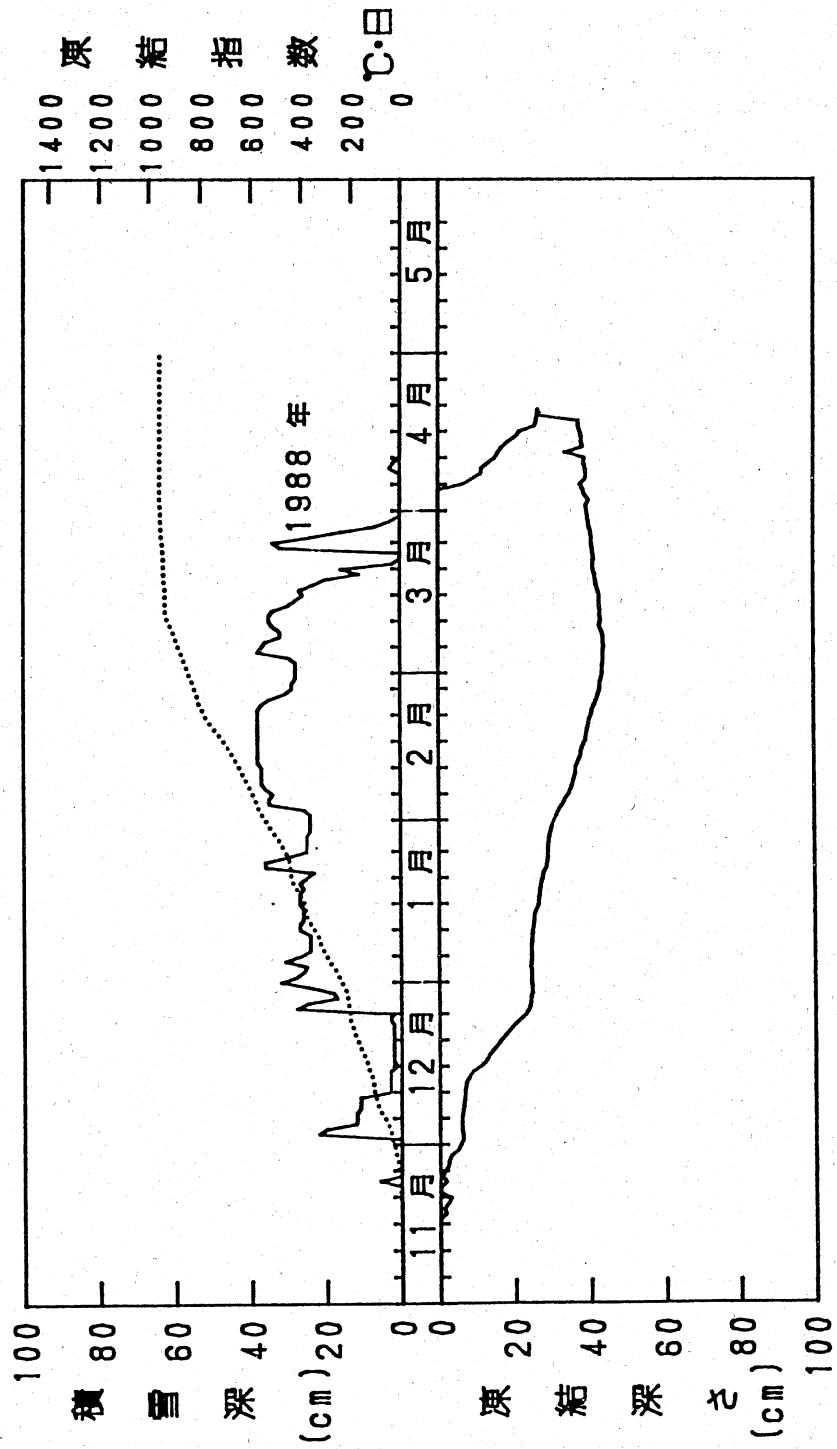


図12 1987-88年の土壌凍結、積雪および積算寒度の推移

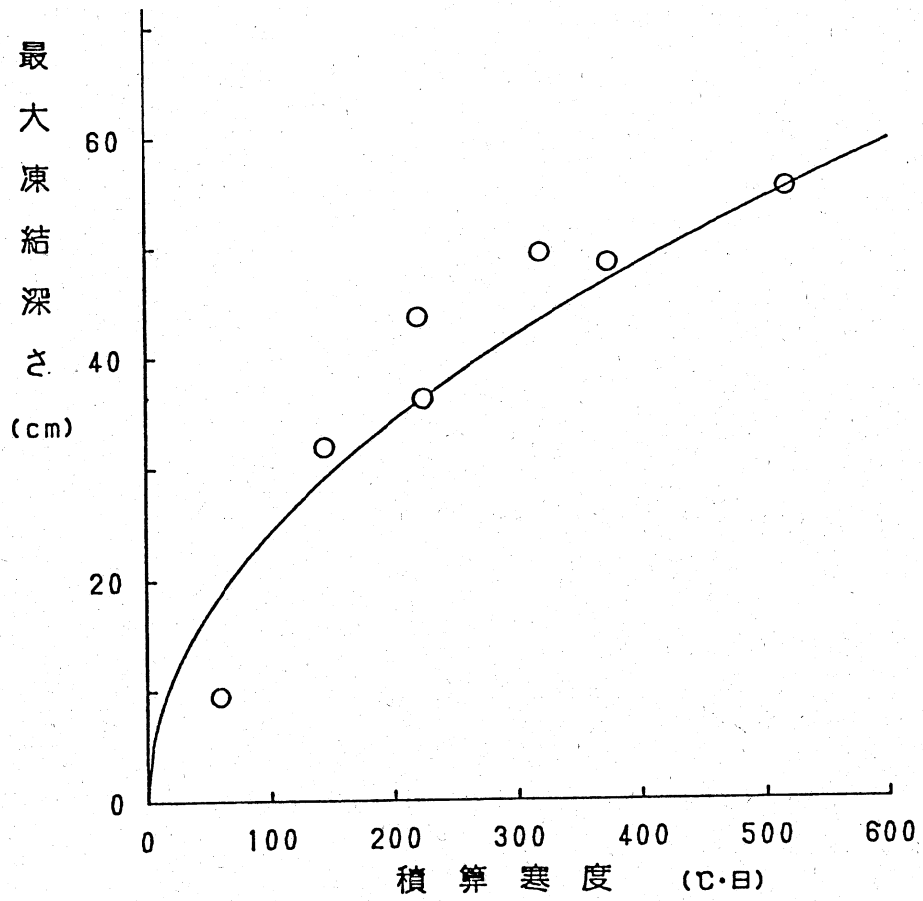


図13 積雪20cm積算寒度と最大凍結深さとの関係

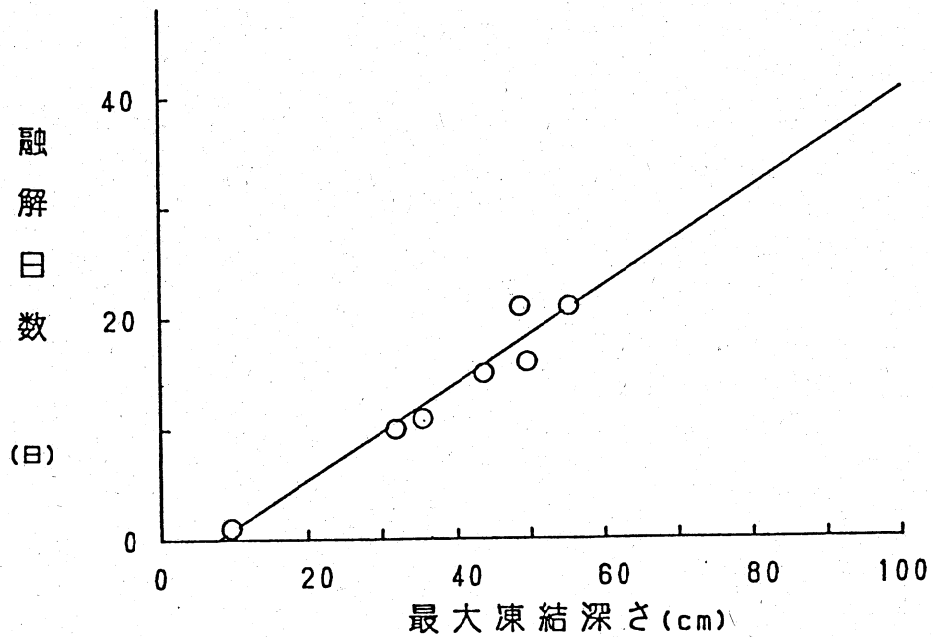


図14 最大凍結深さと融解日数との関係

### Ⅲ. 熱伝導理論に基づく凍結深さの推定

土壌凍結深さを推定するには大きくは2つの方法があり、その第一は直接観測または測定する方法で、掘削および試掘して肉眼で確認するか、凍結深度計などで直読みして決定する。この方法は労力と時間とが多大に消費すると共に経費もかかる。第二の方法は理論的な解析であるが、ある気象状態、ある土壌の熱的性質のみ考慮し、熱輸送理論に基づいて計算するものである。このためには、表面温度（微気象）と土の熱伝導率のデータは不可欠である。

凍結の問題を解法するために、伝導の熱輸送が主要モデルであることを仮定する必要がある。そして、ここに均質な土壌が0℃以下の温度に属すると、水が氷に相変化を起こし、潜熱を放出する。凍結深さの推定式は良く知られた、Fourierの固体内の熱伝導一般式に基礎をおき、凍結問題の解法を1) 熱の定常流、2) 非定常熱流、3) Neumannの理論、および4) Stefanの理論とその応用について段階的に再考する。

#### 1. 熱の定常流に基づく凍結深さの推定

Fourierの熱伝導式は、次式で表現される。

$$dQ/dt = -K \cdot dT/dx = q \quad (3 \cdot 1)$$

ここに、Qは熱量、qは熱流速度、Kは熱伝導率、Tは温度、tは時間そしてxは距離を表す。定常熱流に対して、次の仮定がなされる。1) 土壌は均質で等方性である。2) 土壌の物理性、熱的性質は一定である。3) 凍結は土壌内では0℃で凍結し始める。4) 熱伝導率は温度に依存しない。

図15に示すように、地表面からxの距離にある位置の温度Txは、

$$T_x = T_s - (x/X) \cdot (T_b - T_s) \quad (3 \cdot 2)$$

ここに、Tsは表面温度、Tbは底部の温度、xは表面と底部との距離である。ここで、凍結深さをξは、x=ξ、凍結温度を0℃とするとTx=0となる。

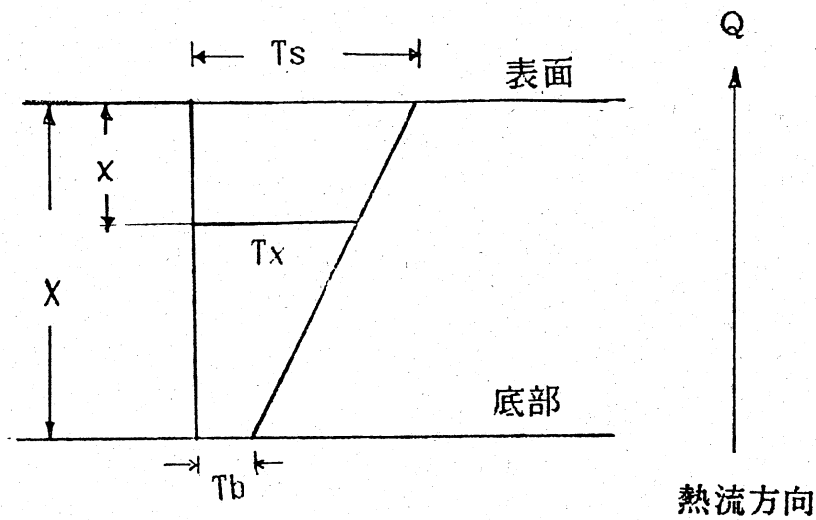


図15 定常熱流断面

$$\xi = T_s / (T_s - T_b) \cdot x \quad (3 \cdot 3)$$

この式は単層系の場合であるので、積雪層やアスファルト層などが存在する多層系の熱伝導を考えると、多層系の熱流は、

$$q_n = K \cdot (T_n - T_{n-1}) / x_n \quad (3 \cdot 4)$$

ここから、温度差を求めると、

$$(T_n - T_{n-1}) = q_n \cdot (x_n / K_n) \quad (3 \cdot 5)$$

第1層から第n層まで加算すると、

$$(T_n - T_s) = q_n \cdot \sum (x_n / K_n) \quad (3 \cdot 6)$$

そして、熱量を求めると  $q_n = q_{n-1} = \dots = q_1 = q$  であるので、

$$q = (T_n - T_s) / \sum (x_n / K_n) \quad (3 \cdot 7)$$

ここに、 $q = K_1 \cdot (dT/dx)$  を 代入すると、

$$T_n = T_s + (dT/dx) \cdot K_1 \cdot \sum (x_n / K_n) \quad (3 \cdot 8)$$

これが、多層系の第n番目の層底部の温度を求める式である。この式を使用して、地面上部の積雪層を第一層、凍結土層を第二層と考えると、 $T_s$ は気温、 $dT/dt$ は温度勾配、 $T_n$ は凍結温度 $T_f=0$ とする。ここに、積雪層の厚さ $x_{sn}$ 、熱伝導率 $K_{sn}$  および 凍結土層の厚さ $\xi = x_1$ 、熱伝導率 $K_1$ とおくと、

$$T_f = T_s + (dT/dx) \cdot K_1 \cdot (\xi / K_1 + x_{sn} / K_{sn}) \quad (3 \cdot 9)$$

これを整理すると、

$$\xi = (T_f - T_s) / (dT/dx) - x_{sn} \cdot (K_1 / K_{sn}) \quad (3 \cdot 10)$$

したがって、積雪下の定常熱流における凍結深さ $\xi$ は上式から計算できる。

## 2. 非定常熱伝導

温度は時間と位置の両方の関数として変化する場合、熱流プロセスは非定常状態の熱伝導と呼ばれ、Fourierの微分形の一般式で表現される。

$$\partial T / \partial t = \alpha \cdot \partial^2 T / \partial x^2 \quad (3 \cdot 11)$$

ここに、 $\alpha$ は温度伝導率と呼ばれ、 $\alpha = K / c \cdot \rho$ で表される。ここに、 $K$ は熱伝導率、 $c$ は体積熱容量、 $\rho$ は単位体積重量である。

この微分形の解は、 $x=0$ の時の表面境界条件を満足させると、

$$T = T_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (3 \cdot 12)$$

ここに、 $T_0$ は振幅で、 $\omega$ は角周波数と呼ばれるパラメータである。(3・12)式の解法はCarslawとKeränenによって得られた特別解を参照する。すなわち、

$$T = T_0 \cdot \exp(-x \cdot \sqrt{\omega / 2\alpha}) \cdot \sin(\omega t - x \cdot \sqrt{\omega / 2\alpha}) \quad (3 \cdot 13)$$

水平軸が原点からある量 $T_m$ だけ鉛直に水平移動した場合、表面から距離  $x$ 離れた地点の温度は、

$$T = T_m \pm T_0 \cdot \exp(-x \cdot \sqrt{\omega / 2\alpha}) \cdot \sin(\omega t - x \cdot \sqrt{\omega / 2\alpha}) \quad (3 \cdot 13)$$

凍結深さ  $\xi = x$  と表示すると、

$$\xi = (1/\sqrt{\omega / 2\alpha}) \cdot \ln [T_0 / (T_m - T) \cdot \sin(\omega t - x \cdot \sqrt{\omega / 2\alpha})] \quad (3 \cdot 14)$$

凍結深さを考える時、 $x$ は $\sin(\omega t - x \cdot \sqrt{\omega / 2\alpha}) = 1$ が最大であるので、最大凍結深さが温度 $T=0$ のときに

$$\xi = (\sqrt{2\alpha/\omega}) \cdot \ln [T_0 / (T_m - 0)] \quad (3 \cdot 15)$$

で計算できる。しかし、多層系については解法できない。

### 3. 温度の突然変化に対する解析

ある時間的な期間での凍結深さは、次のことを仮定する。1) 土壌は半無限媒体であり、2) 熱流は一次元(鉛直方向)であり、3) 初期温度分布は一定の $T_0$ の熱を持っており、4) 媒体の表面温度(境界面)が一定の温度 $T_s$ に突然になったとする。

この問題の解は、



$$T = T_s + (T_0 - T_s) \cdot (2/\sqrt{\pi}) \cdot \int [\exp(-\beta)] \cdot d\beta \quad (3 \cdot 16)$$

となり、ここにGaussの誤差関数が使用される。誤差関数は次のように表現される。

$$\text{erf}(x \cdot \eta) = \text{erf}(X) = (2/\sqrt{\pi}) \cdot \int [\exp(-\beta)] \cdot d\beta \quad (3 \cdot 17)$$

ここに、 $X = x \cdot \eta = x/2\sqrt{\alpha \cdot t}$ 、そして、 $t = x^2/(4\alpha X^2)$ である。他方、熱量式は

$$q = (2K/\sqrt{\pi}) \cdot ((T_s - T_0)/2\sqrt{t\alpha}) \cdot [\exp(-x^2/4\alpha t)] \quad (3 \cdot 18)$$

表面を流れる全熱量Qは、

$$Q = \int_0^t q \cdot dt = 2K \cdot [(T_s - T_0)/(\sqrt{\alpha \cdot \pi})] \cdot \sqrt{t} \quad (3 \cdot 19)$$

#### 4. Neumannの解法

Neumannは静水の凍結時に、氷が形成する過程を研究し、この式を開発した。しかし、この式に土壤の物理的定数を適切に適合すると、土壤の凍結問題に適合できる。

氷と水に対して2つの微分方程式を与え、初期温度 $T_0$ を仮定する。そして、突然に表面温度 $T_s$ に温度低下をあたえると、凍結プロセスが開始される。次式に添え字1は凍結した土壤を、添え字2は未凍結土壤を参照する。

1) 凍結土 ( $0 < x < \xi$ )

$$\partial T_1 / \partial t = \alpha_1 \cdot \partial^2 T_1 / \partial x^2 \quad (3 \cdot 20)$$

2) 未凍結土 ( $x > \xi$ )

$$\partial T_2 / \partial t = \alpha_2 \cdot \partial^2 T_2 / \partial x^2 \quad (3 \cdot 21)$$

この境界条件は、1) 初期条件  $x > 0, t = 0, T_1 = t_0 = \text{一定}$ 、2) 固定条件は、a)  $x = 0, t > 0, t_1 = T_s$ 、b)  $x \rightarrow \infty$  のとき、 $t > 0, T_2 \rightarrow T_0 = \text{一定}$ 、c) 凍結進行面での条件は  $x = \xi, t > 0, T_1 = T_2 = T_f$  となる。

このとき、熱平衡を考えると、熱の連続性によって未凍結土からの熱量は凍結境界を通過して凍結土の上方へ伝達される。ここに、断面積を  $A$  とする

$$\begin{aligned} & -K_1 \cdot (\partial T_1 / \partial x) \cdot A \cdot dt \\ & = -L \cdot \rho \cdot \omega \cdot A \cdot d\xi - K_2 \cdot [(\partial T_2 / \partial x) \cdot A \cdot dt] \end{aligned} \quad (3 \cdot 22)$$

この式から凍結深さ  $\xi$  が求まる。これを解法すると誤差関数とパラメータを使用して解を得るが、非常に複雑になる。

$$\begin{aligned} \frac{L \cdot \rho \cdot \sqrt{\omega} \cdot m}{2} & = b_1 (T_f - T_s) \cdot \frac{\exp(-m^2/4\alpha)}{\operatorname{erf}(m/2\sqrt{\alpha_1})} \\ & - b_2 (T_0 - T_f) \cdot \frac{\exp(-m^2/4\alpha)}{1 - \operatorname{erf}(m/2\sqrt{\alpha_2})} \end{aligned} \quad (3 \cdot 23)$$

ここに、

$$b_1 = K_1 / \sqrt{\alpha_1} = \sqrt{K_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1} \quad (3 \cdot 24)$$

$$b_2 = K_2 / \sqrt{\alpha_2} = \sqrt{K_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2}$$

凍結深さの解法は、次の2個の変数  $m$  との関係式の交点から  $m$  の値を求めて解を得る。

$$Y_1 = C \cdot m = 0.5 \cdot L \cdot \gamma \cdot \omega \cdot \sqrt{\pi} \cdot (m) \quad (3 \cdot 25)$$

$$Y_2 = F(m) \quad (3 \cdot 26)$$

## 5. Stefanの解法

Stefanは時間の関数として凍結深さを計算するため、氷の形成を単純化した公式を示した。これは次の仮定のもとで誘導される。

- 1) 凍結部と未凍結部の境界の水温 $T_0$ は $0^\circ\text{C}$ である。
- 2) 表面温度は気温に等しく、 $T_s$ は一定である。
- 3) 凍結部の温度は直線的に変化する。
- 4) 氷の密度は水のそれと同じである。

凍結部のみの微分式は、(  $0 < x < \xi$  )

$$\partial T_1 / \partial t = \alpha_1 \cdot \partial^2 T_1 / \partial x^2 \quad (3 \cdot 27)$$

境界条件はこの場合、1) $x=0$ で、 $T_1 = T_s$ 、2) $x=\xi$ で、 $T_1 = T_f = 0$ 、3)熱流に対して連続である。そこで、

$$d\xi/dt = (1/L \cdot \gamma) [K \cdot \partial T_1 / \partial x] \quad (3 \cdot 28)$$

ここに、 $\gamma$ は氷の単位体積質量、 $L$ は氷の潜熱である。この解は、

$$\xi = \sqrt{(2c_1/L) \cdot (T_f - T_s) \cdot \alpha \cdot t} \quad (3 \cdot 29)$$

これを凍結深さ $\xi$ に変換すると、

$$\xi = \sqrt{(2Kf_1/L \cdot \omega \cdot \gamma) \cdot (T_f - T_s) \cdot t} \quad (3 \cdot 40)$$

次に、Stefan解の多層系について検討すると、 $N=(\Delta T \cdot t)$ を凍結指数とすると、

$$N_n = [(QL_n \cdot x_n) / 24] \cdot [\Sigma(R) + R_n / 2] \quad (3 \cdot 41)$$

この式から $N+1$ 番目の土層に入る凍結深さ $\xi_{n+1}$ は、次の2次式が計算される。

$$(\xi_{n+1})^2 + 2K_{n+1} \cdot \Sigma(R) \cdot \xi_{n+1} - (48N_{n+1} \cdot K_{n+1} / QL_{n+1}) = 0 \quad (3 \cdot 42)$$

そして、

$$\xi_{n+1} = -K_{n+1} \cdot \Sigma(R) + \sqrt{(K_{n+1})^2 \cdot \Sigma(R)^2 + 48K_{n+1} \cdot N_{n+1} / QL_{n+1}} \quad (3 \cdot 43)$$

ここに、第1層が積雪層で厚さは $x_{sn}$ 、熱伝導率 $K_{sn}$ として、その下部の第2層目が凍結土層とすると、その厚さ $\xi$ 、熱伝導率を $K_f$ として、

$$\xi = \sqrt{48K_f \cdot N / QL_f + (x_{sn} \cdot K_f / K_{sn})^2} - x_{sn} \cdot (K_f / K_{sn}) \quad (3 \cdot 44)$$

となる。

第2章で得られたデータをもとにして、自然積雪下の凍結深さの最大値を求めるために、(3・12)式と(3・44)式を使用して、推定を試みた。その結果は推定値と実測値と一致はみられなかった。積雪深さが時間的に変化するため、以上の推定式での予測は難しいと判断される。時間を変数と考える推定式を考える必要がある。そこで、次の章で示す差分式による数値計算を試みるとする。

#### IV. 凍結土層の保存と凍結深さの数値解析

##### 1. 差分法による凍結深さの数値解析

先に示したように、Fourierの熱伝導方程式の微分形一般式は、

$$\partial T / \partial t = \alpha \cdot \partial^2 T / \partial x^2 \quad (4 \cdot 1)$$

である。いま、(4・1)式に示された熱伝導一般式を数値解析法によつて解くために、 $t$ 、 $x$ の代わりに、無次元化した $t' = \alpha \cdot t / L^2$ と $x' = x / L$ を導入すると、(4・1)式は、

$$\partial T / \partial t' = \partial^2 T / \partial x'^2 \quad (4 \cdot 2)$$

となる。これを、差分形で近似して置き換えると、

$$\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{k} = \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{h^2} \quad (4 \cdot 3)$$

となる。ここに、 $k$ は時間軸の格子間隔、 $h$ は空間軸の格子間隔とする。ここに添え字 $j$ は、時間の増分を示し、添え字 $i$ は空間における増分を示す。これを $T_{j+1}$ について解法すると、

$$T_i^{j+1} - T_i^j = r (T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j) \quad (4 \cdot 4)$$

となる。ここで $r = k / h^2$ である。この式は格子点 $(i, j+1)$ の未知の温度を表すので、一般に陽公式(前進差分)と呼ばれるものである。

しかし、陽公式は計算ルーチンは簡単であるが、 $0 < r \leq 1/2$ の場合でないと、解は収束しない欠点がある。そこで、すべての $r$ に対して有効なCrank-Nicolsonの方法によつて解法することにする。(3)式は次のような差分近似式に置き換える

と、

$$\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{k} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}}{h^2} + \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{h^2} \right\} \quad (4 \cdot 5)$$

となり、この式を整理すると、

$$\begin{aligned} -r T_{i-1}^{j+1} + 2(1+r) T_i^{j+1} - r T_{i+1}^{j+1} &= r T_{i-1}^j + 2(1-r) T_i^j + r T_{i+1}^j \end{aligned} \quad (4 \cdot 6)$$

と変形できる。簡単化するため、 $r=1$ 、 $x'=1$ として仮に格子番号が4までとすると、

$$-T_{i-1}^{j+1} + 4T_i^{j+1} - T_{i+1}^{j+1} = T_{i-1}^j + T_{i+1}^j \quad (4 \cdot 7)$$

となり、ここに $i=1, 2, \dots, 4$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} -T_0^{j+1} + 4T_1^{j+1} - T_2^{j+1} &= T_0^j + T_2^j \\ -T_1^{j+1} + 4T_2^{j+1} - T_3^{j+1} &= T_1^j + T_3^j \\ -T_2^{j+1} + 4T_3^{j+1} - T_4^{j+1} &= T_2^j + T_4^j \end{aligned} \right\} (4 \cdot 8)$$

となる。ここで $T_0$ と $T_4$ は境界条件より、また右辺は前ステップで計算済みで既知の値となる。よって、(7)式の三項対角連立方程式を解くことによって、次のステップの $J+1$ 行の値を求めることができる。このように、未知の格子点の計算に連立方程式を解法する方法を陰解法と呼ばれ、繰り返すし計算によって漸次各時間の、各深さの温度が得られる。

ここでは、時間きざみ $k$ を1日(24時間)、空間きざみを1cmとし、境界条件として上限値に深さ0cmの実測地温を与え、下限値に深さ500cmの地温、 $9.2^\circ\text{C}$ を与え、年間一定と仮定した。

## 2. 未凍結、凍結土壌の熱的性質の決定

凍結土壌の深さの推定には土壌の熱伝導率と熱容量の数値が必要である。表40に示す実測値または計算値を使用した。

次に、下記に示す仮定を行った。

- 1) 凍結した土壌の熱伝導率は、著者の過去の研究に基に、未凍結土壌の1.3~1.5程度であり、その値のオーダーはおおよそ $10^{-3}$  (cal/cm·s·°C)である。
- 2) 凍結線では水分の凍結に伴う潜熱の発生があり、一般的に潜熱の発生温度範囲は $0^{\circ}\text{C}\sim-1^{\circ}\text{C}$ である。ここに、 $0^{\circ}\text{C}$ 以上のときの体積熱容量、温度伝導率を $C_u$ 、 $\alpha_u$ とする。他方、凍結線周辺の $0^{\circ}\text{C}\sim-1^{\circ}\text{C}$ のときの体積熱容量、温度伝導率を $C_l$ 、 $\alpha_l$ とする。そして、温度 $-1^{\circ}\text{C}$ 以下の体積熱容量、温度伝導率を $C_f$ 、 $\alpha_f$ とする。

それぞれの値は次の式から計算される。

$$C_u = 0.5S + 1.00W \quad (4 \cdot 9)$$

$$C_f = 0.5S + 0.45W \quad (4 \cdot 10)$$

$$C_l = 80 + (C_u + C_f) / 2 \quad (4 \cdot 11)$$

ここに、 $S$ は土壌の固相率、 $W$ は液相率である。また(10)式の右辺の80 (cal/cm<sup>3</sup>)は水の潜熱である。

凍結した土壌の温度伝導率は、未凍結土壌の1.5倍と仮定した。水が氷に変化する時、潜熱を発生するが実際の土壌は $0^{\circ}\text{C}$ では凍結しない。そこで、この推定プロセスでは、凍結過程では $0^{\circ}\text{C}\sim-0.2^{\circ}\text{C}$ の範囲での温度伝導率は未凍結土壌の1/30倍、融解過程では $0^{\circ}\text{C}\sim-0.5^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で1/60倍と仮定した。

また、100cm以上の深さの熱伝導率は測定していないので、90~100cmの値と同じで一定と考え、温度伝導率は $0.0015(\text{cm}^2/\text{s})$ の値とした。

表40 凍結保存区の初期条件と土壌の物理性

深さ cm	固相率	液相率	気相率	熱伝導率 $\times 10^{-3}$ cal/cm $\cdot$ s $\cdot$ °C	体積熱容量 cal/cm $^3$ $\cdot$ °C	温度伝導率 $\times 10^{-3}$ cm $^2$ /s
0~ 10	0.352	0.375	0.273	1.25	0.551	2.27
10~ 20	0.329	0.478	0.193	1.32	0.642	2.06
20~ 30	0.350	0.492	0.158	1.72	0.667	2.58
30~ 40	0.397	0.551	0.052	1.51	0.749	2.01
40~ 50	0.228	0.380	0.392	0.57	0.494	1.15
50~ 60	0.204	0.273	0.523	0.36	0.375	0.96
60~ 70	0.223	0.275	0.502	0.44	0.387	1.13
70~ 80	0.208	0.328	0.464	0.47	0.432	1.08
80~ 90	0.321	0.348	0.331	0.63	0.509	1.24
90~ 100	0.342	0.302	0.356	0.70	0.473	1.49

### 3. 凍結保存区の凍結推移と推定値の比較

寒冷な自然条件を冷熱エネルギーと考え、これを貯蔵庫等に利用するためには、できるだけ土壌凍結層を長期に保存し、融解を抑制することによって上記の目的を達成できる。そのためには、厳寒期に除雪を行い、その後断熱材で地表を覆って凍結土層を長期に保存する必要がある。

畜産大学工学実験圃場に、2m $\times$ 2mの大きさの凍結保存区を設定した。凍結深さをできるだけ大きくするため、3月上旬まで完全に除雪を行い、その後表面からの融解を防止するため、厚さ200mmの断熱材を敷設し、日光による劣化を防ぐために、さらにその上をグランドシートで覆った。凍結深さの推移を測定するため、中央に凍結深度計を埋設し、さらに温度測定のためにC-C熱電対センサーを設定した。

凍結保存区の土壌凍結深さと融解深さの推移を図16に示した。さらに、上記の差分形の凍結推定式で計算した結果も表示した。また、凍結開始日、凍結速度、最大凍結深さと起日、融解開始日、融解速度および凍結消失日の実測値と推定値を表41に示した。

これらによると、凍結開始日、凍結深さおよび融解開始日は実測値と推定値とが良く一致することがわかった。そして、差分法による推定値は11月から12月までの凍結推移、2月から5月までの融解推移の実測値に極めて近い結果を得た。

しかし、推定値には1月に凍結の戻りがみられ、実測値にはこうした変化が見



られず、地表面での微妙な温度変化が計算値に影響を与えたためと思われる。また、5月以降の融解推移に関して、融解速度、凍結消失深さおよび消失起日で実測値と推定値との一致がみられなかった。これは、保存区では横方向の熱流の影響を受けたため、推定値と異なる結果を示したと考えられる。

表41 凍結保存区の実測値と推定値との比較

項目	凍結開始日	凍結速度	最大凍結		融解開始日	融解速度		凍結消失	
			深さ	起日		上部	下部	深さ	起日
単位	-----	cm/day	cm	----	-----	cm/day		cm	----
実測	11/25	0.86	83.5	3/ 1	4/27	1.12	0.34	36.8	6/21
推定	11/25	0.86	83.3	3/ 2	4/29	0.87	0.10	68.1	7/16

保存区では気温の上昇に伴い、2m×2mの小さな断熱部分では凍結土層の側面からの熱量は増加するため、急速に融解が起こると考える。したがって、断熱材を保存区の周辺を囲むように鉛直に深さ1m程度埋設すると、この推定値により接近したものと判断される。

凍結および融解の深さを推定する際、土壌内で水分移動が発生するため、水分移動に伴う熱的性質の変化を考慮する必要がある。ここで使用したモデル推定式は、地下水が存在する条件では水分移動が大きいため、実測値と推定値と異なった結果を示している。したがって、凍結土壌の吸水速度の算定を含めた推定式への改良が必要である。

また、推定式で一番問題となるのは潜熱の発生温度範囲と発生時の温度伝導率の数値の決定である。ここでは凍結過程では $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq -0.2^{\circ}\text{C}$ で、この時の温度伝導率を未凍結時の1/60倍、融解過程では $0 \geq T \geq -0.5^{\circ}\text{C}$ で、温度伝導率を1/60倍と仮定したが、理論的根拠はない。この値がどの程度の数値になるかは実測によつて決定する必要があるが、技術的な方法に問題もあって、かなりの困難性も伴う。いずれにせよ、この数値は推定結果に大きな影響を与えることは確かである。他方、5mの地温を $9.2^{\circ}\text{C}$ で一定と考えたが、計算結果に与える影響はほとんどないことも判明した。

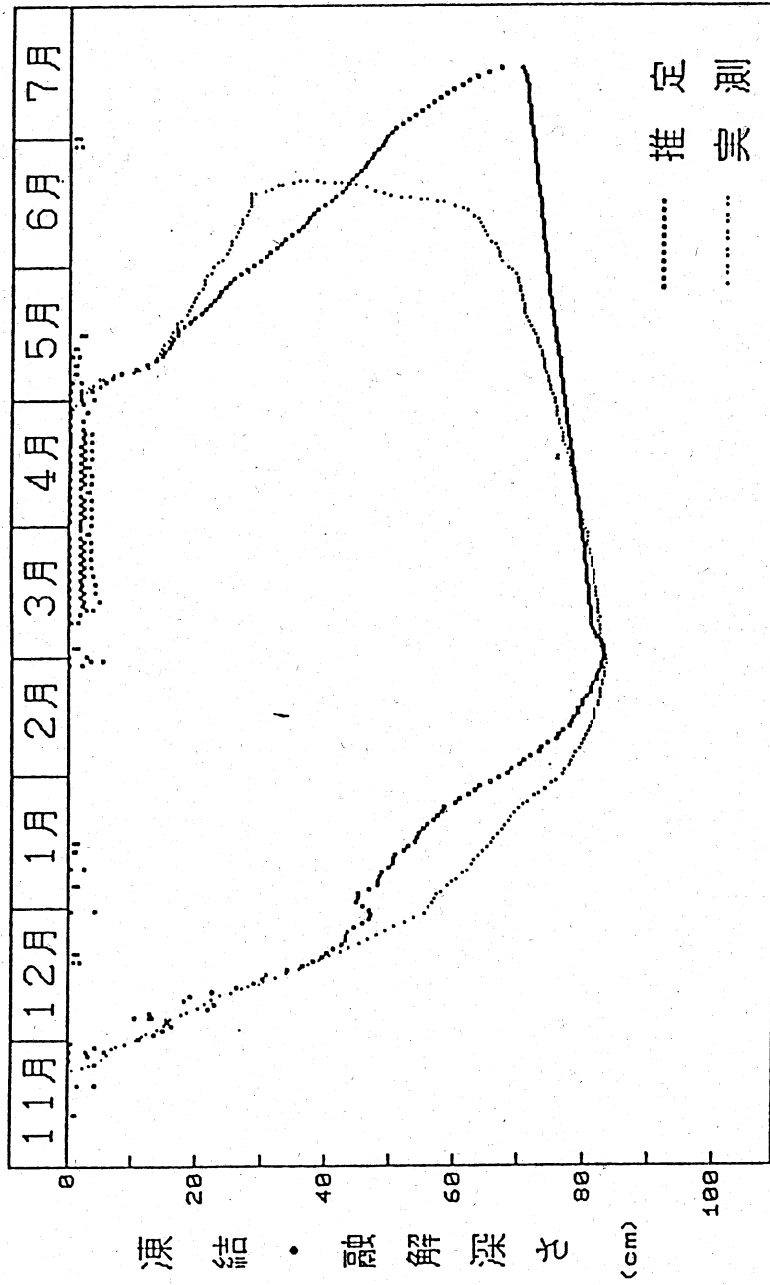


図16 凍結保存区の凍結推移の実測と推定

## V. ヒートパイプを使用した永久凍土低温貯蔵庫

### 1. 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。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。

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。また、こうした被害は構造物ばかりでなく、作物、牧草、樹木等の冬枯れ問題にもなっている。

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、多くの研究を推進し、莫大な対策の経費を使用せざるを得ない現状である。土壌が凍結すると、地中から大量の水分を吸引し、土中にアイスレンズと呼ばれる分離氷晶を形成し、体積を膨張させ巨大な凍上圧を発生する。このため、地面上部の構造物を持ち上げ構造破壊を導く。さらに、春季の融解により、沈下が起こり構造破壊を助長する。また、凍結が深く地面に侵入すると地温の低下が大きくなり、地中の植物根の細胞が凍死する被害を大きくしている。

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工法があり、凍結土の性質を積極的に利用している。また、凍土は潜熱（水が氷に相変化する時に発生する熱）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。

いままで、電力により冷凍機を動かす強制的冷却で人工凍土を造成してきたが、ここでは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。

## 2. 寒冷地域と寒さ

それでは冬の寒さを知るため、図17に世界の最寒月の月平均気温の分布図を示す。北半球では大陸上が最も低温になりやすく、特にシベリア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月の月平均気温は $-48^{\circ}\text{C}$ にも達する。ここでは、 $-67.8^{\circ}\text{C}$ 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では $-70^{\circ}\text{C}$ の新記録を出している。しかし、今までの世界の最低気温を出し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 $-88.3^{\circ}\text{C}$ を観測し、世界の最低気温となっている。

次に日本の寒さについて述べると、表42に最低気温のベスト20を示す。これによると、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（明治35）年1月25日に $-41.0^{\circ}\text{C}$ を記録している。その翌日は帯広で $-38.2^{\circ}\text{C}$ を記録し、実に未曾有と言ってもよい寒波が北日本を襲い相当の寒さとなった。

しかし、単に最低気温のみでは冬期間の低温を表わ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18に北海道の寒候期の積算寒度値の分布と表43に主要都市の積算寒度の値を示す。これによると、十勝、網走および釧路の内陸部が最も寒冷的な地域であることがわかる。

## 3. 永久凍土とは

ここに、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、英語ではPermafrostと呼ばれ、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。

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。図19に北半球における永久凍土の分布状況を示す。海中にも永久凍土が存在し、

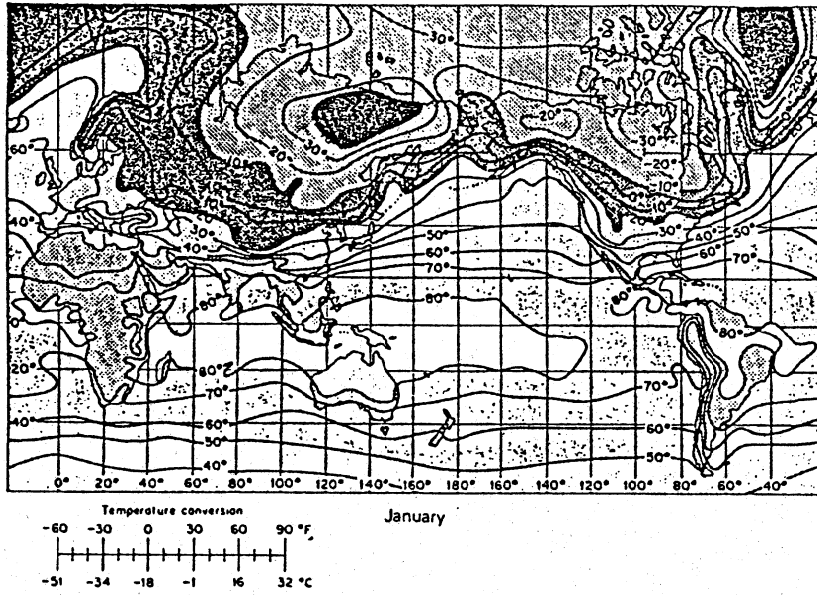


図17 世界の1月の月平均気温の分布

表42 日本の寒さのベスト20

順位	地名	最低気温	年月日
1	旭川(上川)	※ -41.0°C	1902(明35) 1.25
2	帯広(十勝)	△ ※ -38.2	1902(明35) 1.26
3	倶知安(後志)	※ -35.7	1945(昭20) 1.27
4	千歳(石狩)	※ -30.7	1966(昭41) 1.19
5	網走(網走)	※ -29.2	1902(明35) 1.25
6	札幌(石狩)	△ ※ -28.5	1929(昭4) 2.1
7	釧路(釧路)	※ -28.3	1922(大11) 1.28
8	雄武(網走)	※ -27.5	1978(昭53) 2.18
9	北見枝幸(宗谷)	※ -26.4	1947(昭22) 2.12
10	羽幌(留萌)	※ -26.4	1923(大12) 1.27
11	高山(岐阜)	※ -25.5	1939(昭14) 2.11
12	松本(長野)	△ -24.8	1900(明33) 1.27
13	紋別(留萌)	※ -24.7	1977(昭52) 2.14
14	青森(青森)	△ -24.7	1931(昭6) 2.23
15	秋田(秋田)	△ ※ -24.6	1888(明21) 2.5
16	岩見沢(空知)	※ -24.3	1957(昭32) 1.8
17	諏訪(長野)	※ -23.1	1947(昭22) 2.18
18	根室(根室)	※ -22.9	1931(昭6) 2.18
19	留萌(留萌)	※ -22.8	1977(昭52) 1.29
20	むつ(青森)	-22.1	1938(昭13) 1.4

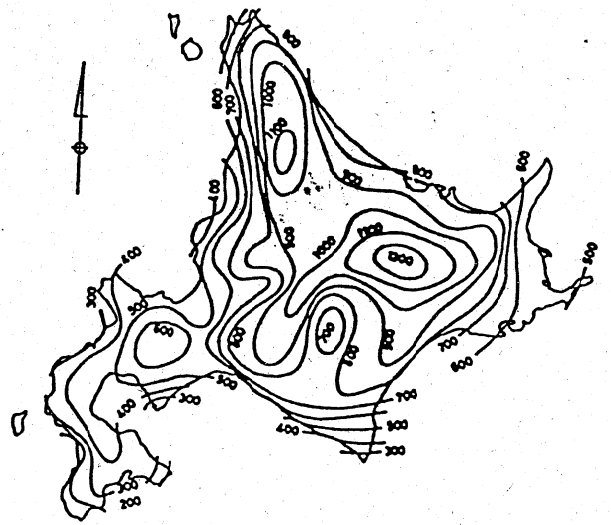


図18 北海道の積算寒度の分布

海水の氷結温度が $-1.8^{\circ}\text{C}$ であることから、これより低い温度の地点は海底に存在する。連続帯とは永久凍土層が水平方向にも鉛直方向にも連続している地帯で深いところでは400 mにも及んでいる。点在帯は地形因子、地下水、植性などにより一部だけに存在するタイプである。

カナダ北部のエスキモー部落ではこの永久凍土の丘にトンネルを掘って、天然の冷蔵庫に利用している。

さて、北海道では永久凍土はできないが、季節的凍土は冬期間に形成され、春季に融解して消失する。図20は除雪下における北海道の最深の土壤凍結深さの分布を示す。これによると、十勝と北見の内陸部が深くまで凍結する地域である。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21は積雪下における道東地域の凍結深さの分布を示す。寒冷で積雪の比較的少ない内陸部に深い凍結地帯が出現している。

#### 4. 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行われている。

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

表43 北海道主要都市の積算寒度 (°C・日)

地名		積算寒度	
函 知	館	327	385
	安	607	691
小 見	樽	327	396
	幌	402	437
岩 留	沢	562	623
	萌	456	477
稚 網	内	521	563
	走	634	744
根 釧	室	439	502
	路	527	679
帯 旭	広	704	840
	川	756	854
苦 小	牧	398	441
	蘭	217	230

前者は1960-1970の平均、後者は1974-75年

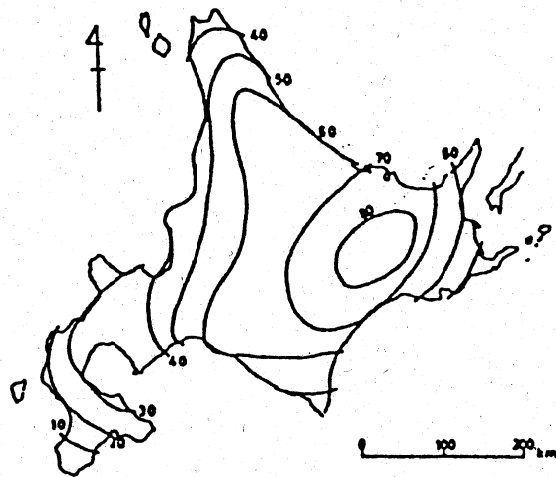


図20 北海道の最深凍結分布 (福田)

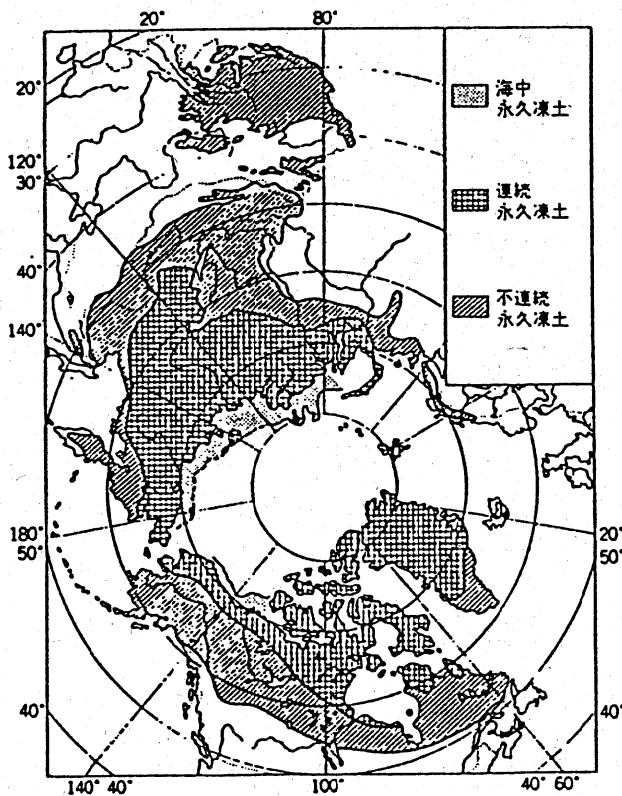


図19 北半球における永久凍土の分布

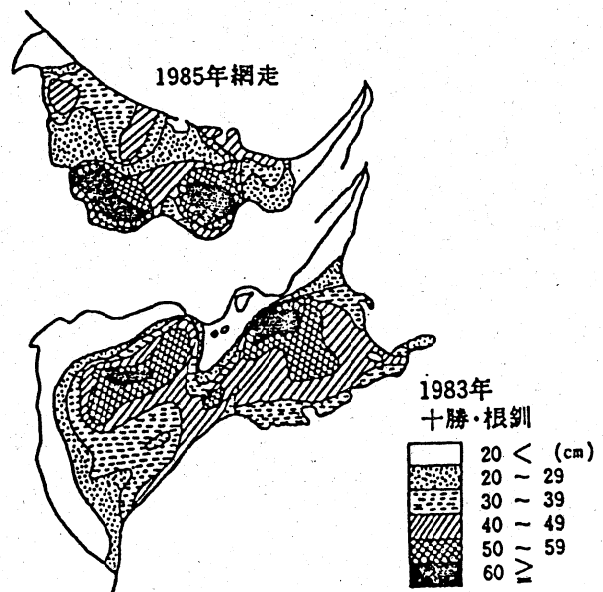


図21 北海道東部における積雪下の土壌凍結分布

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22にヒートパイプの構造図と図23にヒートパイプの断面図を示す。

## 5. ヒートパイプの性能と用途

ヒートパイプの構成材料を表44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45に示した。パイプ材と作動液体との適合性があり、パイプ材との融点の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。

ヒートパイプは次に要約するように、他に見られない長所がある。

### (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。図24に現在の利用状態を示す。

(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。

(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

(3) 熱流束を変換し得る。

原子炉の熱電子発電機

(4) 温度制御ができる。

宇宙船用の温度制御

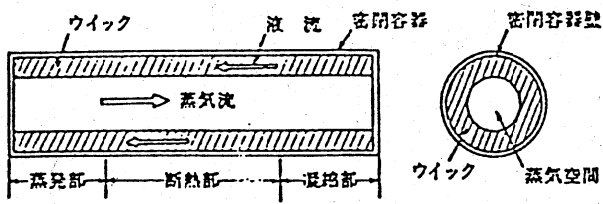
(5) 熱ダイオード性と熱スイッチ性

## 6. ヒートパイプの寒冷地域での使用例

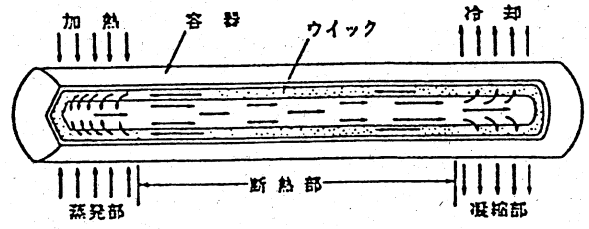
冬期の降雪による着氷、凍結、つららの発生など交通、生活面での防止対策に利用願望が多い。しかし、資源問題、コスト、保守管理などから普及の制約がなされているのが現状である。この点、建設費は割高でも、自然資源の地熱などの利用システムの開発がなされてきた。特に土壤凍結用に使用した、アラスカパイプラインの例について述べるとする。

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°C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25に示す垂直支持杭の内側にヒートパイプを取り付け、土壤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。

我が国では、道路の融雪を目的として、地熱や温泉などの排熱を利用して図26に示すように、ヒートパイプの放熱部を舗装表面に埋め込み、冬期間の融雪に成



ヒートパイプの構造図



ヒートパイプの断面図

図22 ヒートパイプの構造断面

図23 ヒートパイプの断面図

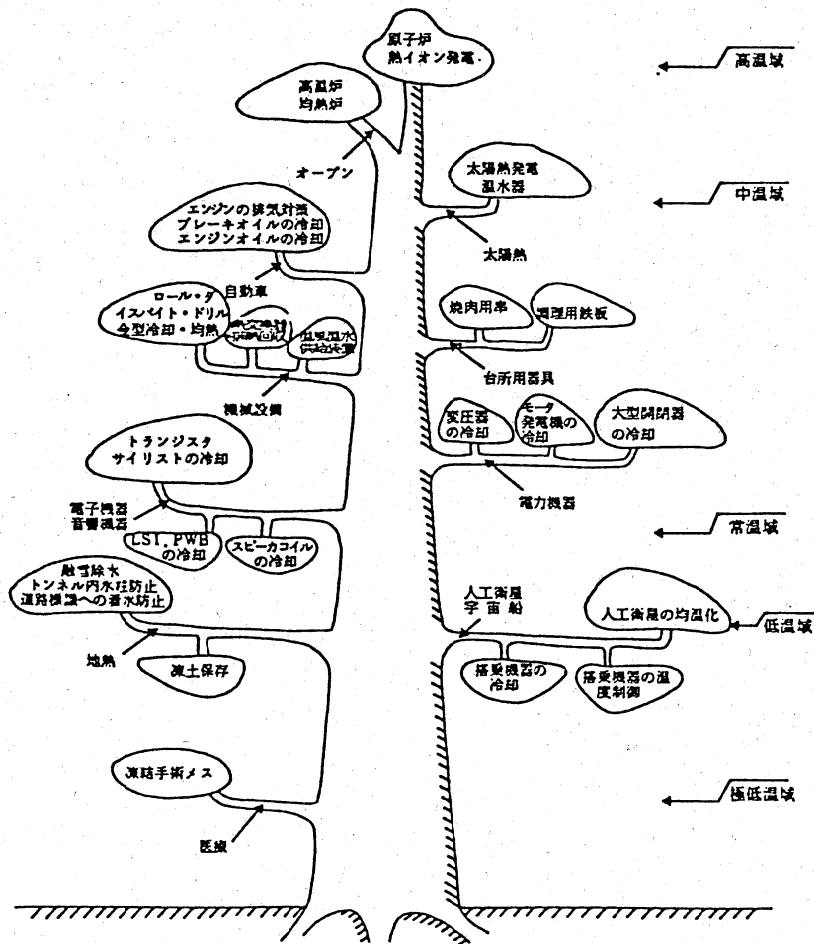


図24 ヒートパイプの利用用途

表44 ヒートパイプの材料構成

動作液	水, メチルアルコール, エチルアルコール, アセトン, フレオン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45 主な作動液体の使用温度範囲

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	
アンモニア	-78	-33	-60 ~ 100	常温
フレオン11	-111	24	-40 ~ 120	
フレオン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
サーメックス	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。

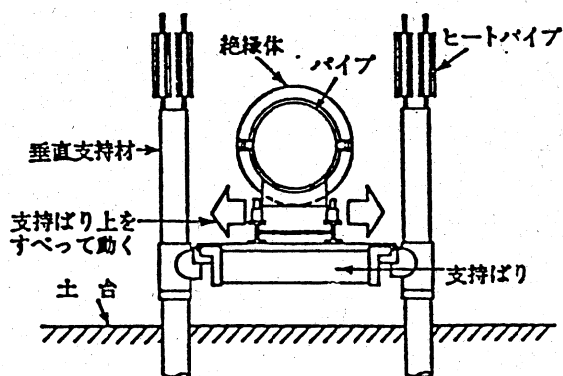
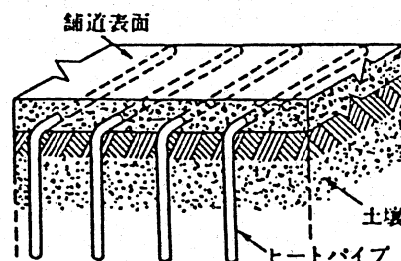


図25 アラスカパイプラインに使用されているヒートパイプ



地熱利用のヒートパイプ融雪・凍結防止システム

図26 ロードヒーティング用ヒートパイプ

功している。その他、公共施設の玄関先、歩道および駐車場の融雪にも利用されている。

## 7. ヒートパイプによる人工永久凍土と低温貯蔵庫

冬期間の寒冷気候を利用し、土壌を深くまで凍結させた後、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。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1 m程度であるため、その貯蔵量は限られ、安定して市場に出荷できる程ではない。凍結土層を4 mまで増大させるためには、熱伝素子であるヒートパイプの利用が不可欠である。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。

### 低温貯蔵庫の原理と特徴

すでにヒートパイプの原理と特徴は述べたので詳しくは説明しないが、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。そして、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。

### 貯蔵庫の構造とヒートパイプの形状

図11に示すように貯蔵庫の空間の寸法は、幅3.6 m、奥行き6.0 m、高さは約3.6 mであるため、庫内容積は約70m<sup>3</sup>からなり鉄骨、ジオテキスタイル不織物（テンサーSR1）で造られている。さらに、地盤の肌落ちを防ぐためその外に織物（クラフトル土木シート）を挿入した。屋根は木毛セメント板、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2 m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、ステンレス管からなる。12.07 mの最長パイプはL字型に1/10勾配で貯蔵庫底部の長手方向に平行に2.0～3.5 m深さに埋設した。7.8 mの最短パイプは貯蔵庫長手方向に鉛直に敷設した。地上に約2.4 mほど突き出たヒートパイプの上部には凝縮部としてアルミ製フィンが、大きさ20×20cmの正方形で1cmピッチで170枚取り付けている。（写真aと写真b）

凍土、パイプおよび庫内温度の測定は、C-C熱電対線を使用し、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結合し、フロッピーディスクユニットで毎日3時間毎に、50点の測定値を記録した。測定位置は、L字型でフィン部、地盤内3断面を、そして直管型でフィン部、地盤内2断面とした。貯蔵庫内は底部、側壁、中央、天井部そして屋根の6箇所とし、その他に厚さ10cmの地盤断熱材の表裏3箇所とした。

直管型はフィン温度に対してパイプの先端でわずか10%程度の温度差しかなく、この低温で土を凍結させることが分かった。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1月で急激な温度低下をもたらし、底面では-8℃まで達した。図28に気温、庫内中央温度、ヒートパイプと地盤の温度の経時変化を示す。また、表4に代表的な各地点の月平均温度を示す。冬期の2月までは庫内温度はマイナスとなって冷え過ぎの傾向がみられ、パイプの数が予想より多かったため、今後は多少の対策を考慮する必要性が生じた。他方、3月以降の温度状態は良好で、完全に永久凍土がつくられ、貯蔵物質に大きな効果をもたらすことが判明した。最暖月の8月でも庫内は4.2℃の適温を維持したため、2～3の問題はあるものの十分に実用できる技術と考える。

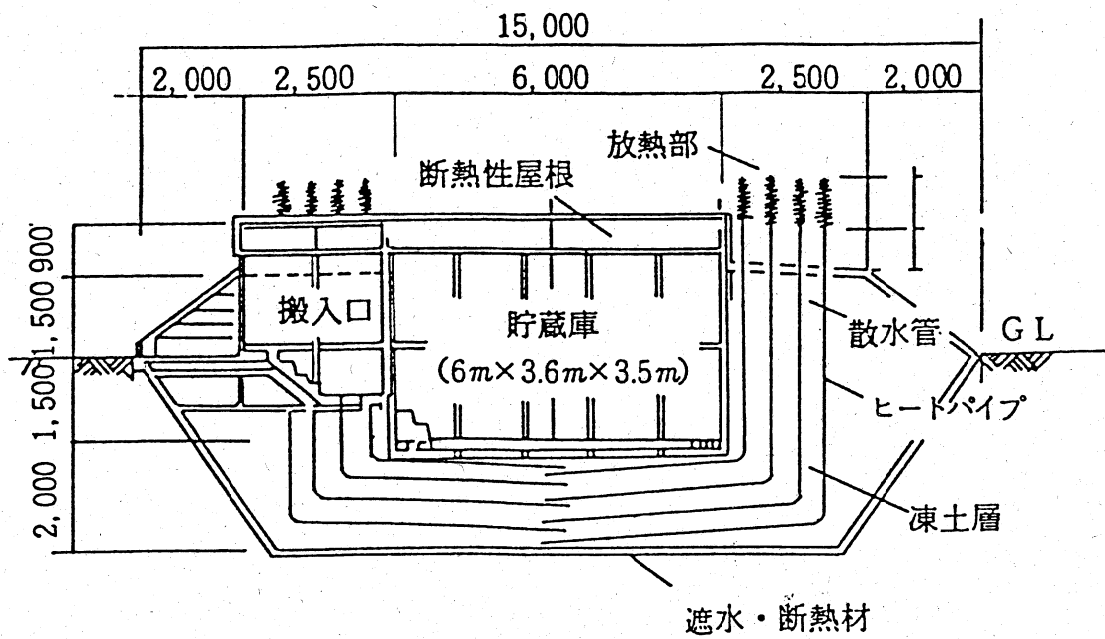


図27 低温貯蔵庫のモデルプラント構造図

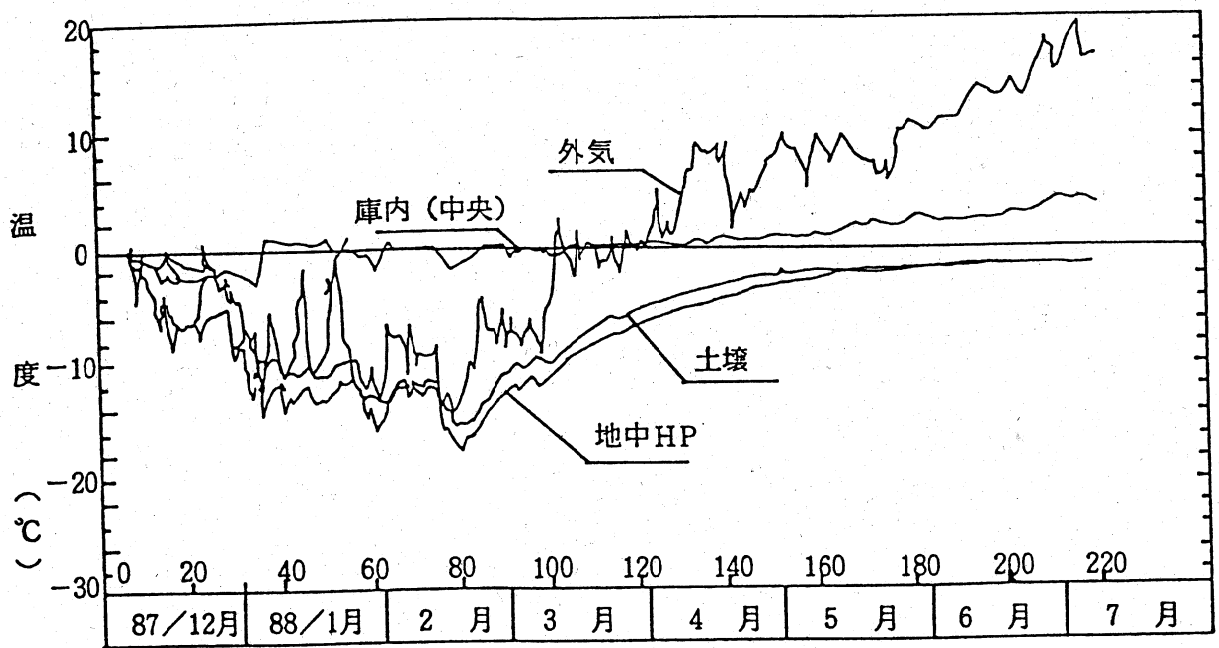


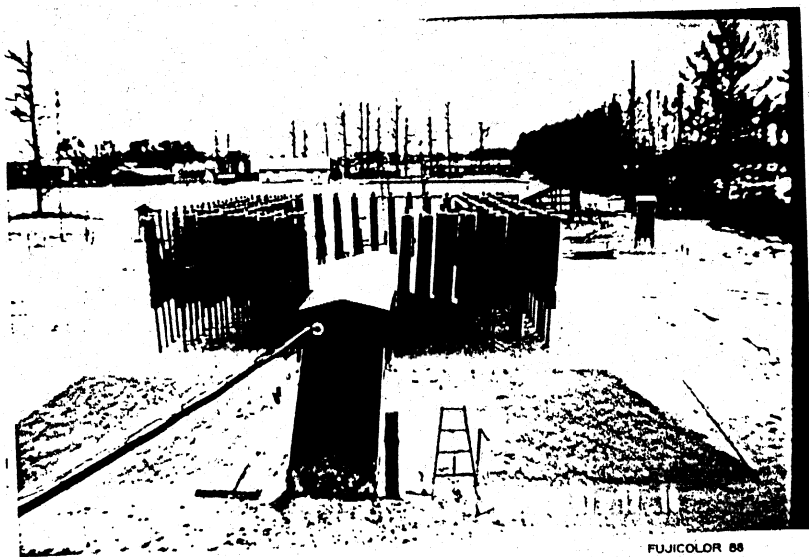
図28 低温貯蔵庫の温度データと経過時間

表46 永久凍土低温貯蔵庫の月平均温度と湿度

測定地点	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
気 温	-6.7	-9.7	-10.8	-3.2	4.7	9.9	15.0	14.2	19.5	14.7
フィン温度	-6.5	-10.0	-9.4	-2.7	5.6	10.4	15.4	14.6	19.8	15.0
庫内湿度	97.9	90.0	73.3	76.7	89.0	96.1	93.6	93.1	93.2	93.8
庫内天井	-1.5	-0.5	0.6	0.9	2.5	4.7	5.8	6.6	7.9	5.9
庫内中央	-1.2	-0.3	-0.3	-0.1	0.5	1.7	2.2	2.6	4.2	4.2
側壁温度	-1.8	-3.8	-3.5	-2.4	-0.9	0.6	1.4	1.7	3.1	3.3
床面温度	-1.1	-6.2	-2.8	-3.0	-1.0	1.6	2.2	2.3	4.1	4.2
ヒートパイプ										
GLライン3	-2.3	-6.5	-6.4	-3.5	-1.1	-0.1	0.6	1.2	2.4	2.9
12	-2.2	-8.7	-10.7	-7.3	-3.6	-2.1	-1.5	-1.1	-1.0	-0.7
直管 GL33	-5.4	-13.3	-13.6	-4.7	3.0	7.9	12.9	12.6	17.2	13.4
35	-0.2	-8.9	-6.8	-5.5	-2.9	-1.7	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6
L 型 底21	-1.1	-10.9	-5.3	-6.3	-3.1	-0.9	-0.5	0.3	1.4	2.0
23	-5.4	-13.1	-14.2	-9.7	-4.9	-2.3	-1.4	-1.0	-0.8	-0.6



写真a 種々のヒートパイプによる土壌凍結促進試験



写真b ヒートパイプを使用した低温貯蔵庫