



Title	体積差型自記土壤凍結速度計
Author(s)	矢作, 裕; YAHAGI, Hiroshi
Citation	低温科学. 物理篇, 34, 227-236
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18316
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p227-236.pdf



体積差型自記土壤凍結速度計*

矢 作 裕**

(北海道教育大学)

(昭和51年10月受理)

I. ま え が き

土壤の凍結の深さを直接自記する装置は、これまでない。ただ間接的な方法として、地中に埋設した石こうブロックの凍結の際の電気抵抗の変化による凍結の深さを知る方法¹⁾、また一連の熱電対による地温の測定から、0°Cの位置を知る方法などがある。前者では、ブロックが大きいことと数を多くしなければならないこと、後者では、凍上によって埋設位置が変るため、凍結深を精密に測定することは困難である。

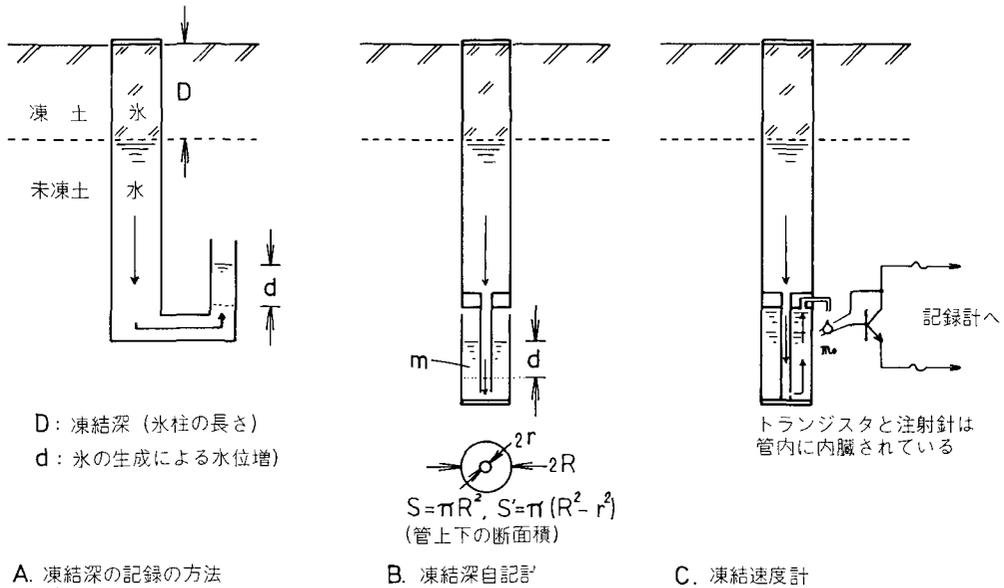
1974年に、著者は、土壤凍結の深さの浸入速度がデジタル的に直接記録される装置を試作して、実用試験²⁾を行なった。この装置は、土中に埋設した透明な管内の水が凍結するさいに生ずる体積増のため、管の下に取り付けた注射針から質量一定の水滴が落下するのを電気信号に変換するものである。記録紙上には、時間軸に沿って水滴の落下に対応する点列が現われ、それから凍結深及び凍結速度が簡単に求められる。このような水の凍結時の体積増を利用する方法によれば、凍結深の増減の自記や、凍結期間を記録する測器など³⁾の作成も容易である。この方法で最大凍結深を現地観測を要しないで測定する測器⁴⁾は、すでに実用化されている。この装置のうち、主として増幅と記録の部分を改良して、1975年11月から1976年3月にかけて低温科学研究所苫小牧凍上観測室実験プールにおいて、他の種々の観測項目と並行して、最大凍結深に到るまで凍結深と凍結進行速度を連続記録した。ここでは苫小牧において設置された凍結速度計の機能と特徴及びその測定結果を報告する。

II. 凍結深の記録の方法

凍結深、凍結速度、最大凍結深など土壤の凍結に関連した量を記録(自記)するのに、第1図Aに模式的に示されるような基本的な方法を適用できる。それは一端を閉じたU字管に、脱気した水を入れたもので(第1図は保護容器などを省略した説明図である)、土中に埋めておくと、土の凍結に伴って、U字管の閉じた方の一方に、凍結深に相当する長さの氷柱が形成される。このとき、凍結時の体積増に比例する量の水が開放端に移動し、水位増 d となってあらわれる。管の断面積が一樣であれば、この d は、氷柱の長さ即ち凍結深 D に比例するので、 d の変位を記録して、 D を求めることができる。又、凍結前にU字管の開放端の上縁まで水を満

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1786号

** 昭和50年度低温科学研究所内地研究員



第1図 凍結深 (速度) の記録の方法

しておくと、 d に相当する水量が排出される。こうしておくと、凍結した土が地表から融解しても、氷柱の長さが D のときの水位が保存されるので、最大凍結深を求めることができる⁴⁾。

第1図Bは自記凍結深計の実際の構造に近い図で、矢印で示すように、凍結に伴う水の増分は、細管を通じて下段の容器に導かれる。そして、1) 容器の断面積を一樣にして、水位増 d を測定する、2) 水の質量の増分 m を測定する、3) 空気を残して下部を密閉して圧力を測定する、などの方法で、最終的にはトランスデューサによって電気信号に変換され、記録計に接続される。実際の構造は、保護容器が必要であるなど、それぞれの場合に応じて異なるが、1), 2) の場合は放出水量を水銀に置換することによって、電気的な変換が容易になる。凍結深と、放出水 (水銀) 量の関係は次のようになる。第1図Bで、凍結深、液面上昇高、管の上部、下部の断面積、氷及び水の密度をそれぞれ、 $D, d, S, S', \rho_i, \rho_w$ とすれば、氷柱及びそれが水であったときの体積は、それぞれ $SD, SD \cdot \frac{\rho_i}{\rho_w}$ である。この両者の体積差が、凍結の際の下部の水の体積増 $S'd$ に等しいから凍結深は、

$$D = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i} \cdot \frac{S'}{S} d \quad (1)$$

となる。さらに、 $\rho_w S'd$ は水の質量であるから、水及び置換された水銀の質量を測定する場合の凍結深をあらわす式は、それぞれ次のようになる。

$$D = \frac{1}{(\rho_w - \rho_i) S} \cdot m_w \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{(\rho_w - \rho_i) S} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_{Hg}} \cdot m_{Hg} \quad (3)$$

ここで、 m_w, m_{Hg}, ρ_{Hg} は、それぞれ凍結に伴って放出された水、水銀の質量、そして水銀の密度である。第1表に、管の半径などを与えた場合の数値例を示す。凍結深 D が1 cm進む

第1表 体積差型凍結深計の検出方式の比較

検出量	凍結深の計算式	*の数値を与えて求めた計算式	凍結深1cmを検出するのに要する量	*
変位 (cm)	$\frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i} \frac{S'}{S} d$ (1)	$11.8 d$	0.85 mm/cm	$\left. \begin{array}{l} \rho_w = 1.00 \\ \rho_i = 0.917 \end{array} \right\} \text{g/cm}^3$
③量	水 (g)	$\frac{1}{(\rho_w - \rho_i) S} m_w$ (2)	$3.84 m_w$	
	水銀 (g)	$\frac{1}{(\rho_w \rho_i) S} \frac{\rho_w}{\rho_{\text{Hg}}} m_{\text{Hg}}$ (3)	$0.282 m_{\text{Hg}}$	3.5 g/cm

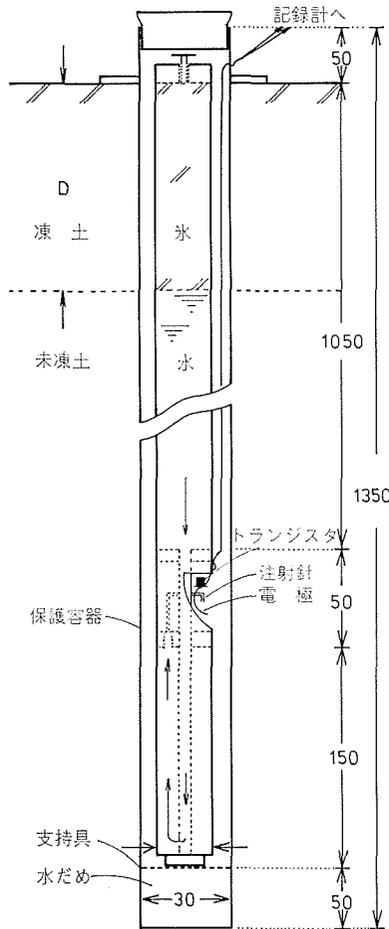
ρ_w : 水の密度, ρ_i : 氷の密度, ρ_{Hg} : 水銀の密度, S : 管の断面積 (上段), S' : 同 (下段), R : 管の半径 (上段), r : 同 (下段)

ごとに放出される水の量 m_w , 又は水銀の量 m_{Hg} を検出できれば, 凍結速度計として応用することができる。その概略図が第1図Cに示される。特に水銀を用いると, 第1表の数値例のように検出感度が高く, 凍結深を打点型の記録計にアナログ量として記録させる目的に有効である。

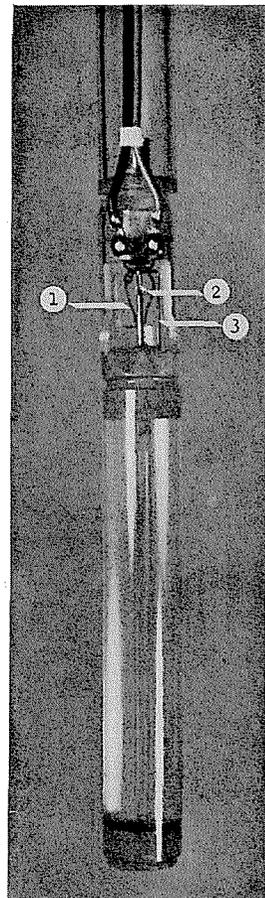
III. 凍結速度計

1. 凍結速度係数

第2図に, 凍結深が最大100 cm までに使われる凍結速度計の詳細を示す。同図及び, 第3図の写真のように, 測器の本体は, 1個のトランジスタを内臓し筒状にまとめられている。そして, 下方に放出される水を收容する水だめをもった保護容器に入れて地中に設置される。凍結が進行する間に下方に押し出される水は, 第1図C, 第2図の矢印の径路を通して, 注射針(0.6×25 mm, 皮内用)の先端から, 水滴として滴下する(第3図③参照)。その水滴の質量は, ほとんど一定(m_0)である。凍結開始後, N 個の水



第2図 凍結速度計 (単位 mm)



第3図 凍結速度計の検出部

- ① 水滴検出用のトランジスタ電極
- ② 落下直前の水滴
- ③ 水排出用の注射針

滴が排出されたとすれば、排出水の全質量は $m_0 N$ であるから、(2) 式によって、凍結深は、

$$D = \frac{m_w}{(\rho_w - \rho_i) S} = \frac{m_0}{(\rho_w - \rho_i) S} \cdot N \equiv kN \quad (4)$$

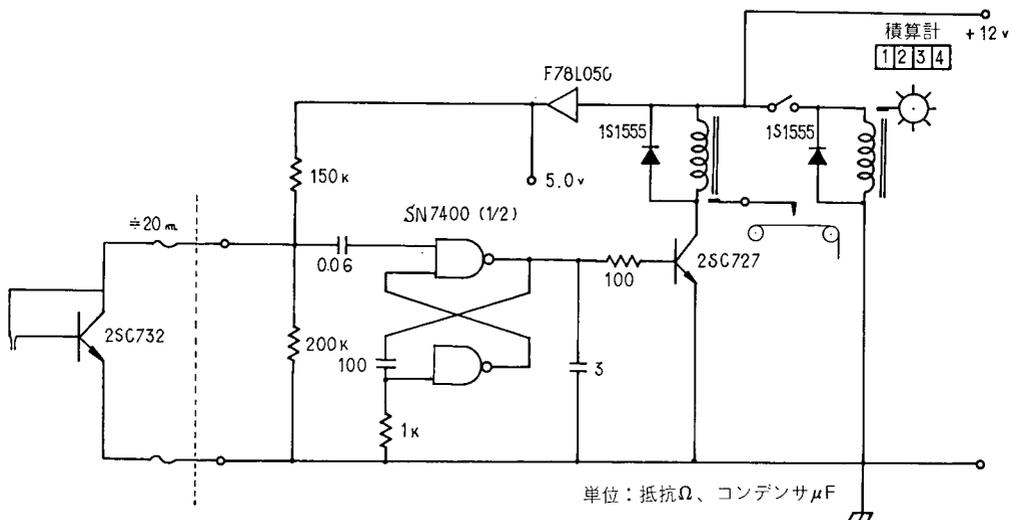
とあらわされ、凍結深は、凍結開始後の水滴数 (積算値) から求められる。さらに、(4) 式を時間で微分することによって、凍結速度は、

$$\frac{dD}{dt} = k \frac{dN}{dt} = \frac{k}{\Delta t} \quad (5)$$

とあらわされる。例えば、24 時間に数えられる水滴数に、定数 k を乗ずると、日平均凍結速度が得られる。また落下の時間間隔 Δt を測ることによって、水滴の落下時間間隔の平均凍結速度が得られる。ここで、(4)、(5) 式に用いた k を凍結速度係数と呼ぶことにする。この係数の値は、室温における水滴の質量の実測値 $m_0 = 8.8 \times 10^{-3}$ g/個、管の半径 1.0 cm を用いて算出すると、 $k = 33.7 \times 10^{-3}$ cm/個 (=0.337 mm/個) が得られる。即ち、水滴 3 個の落下は、凍結深にして、約 1 mm の降下を意味することになる。後に述べるように凍結深の現地観測ができる場合は勿論、観測できない場合でも、使用した凍結速度計自身の示す凍結深又は、最大凍結深の値から、上のような計算によらずに k の値を決定することができる。

2. 計数、記録回路

第 4 図は、計数及び記録のための回路図である。第 1 図 C、第 2 図、そして第 3 図の写真に示すように、本体の下段に、水滴検出用のトランジスタを内蔵し、そのコレクタ、ベースの 2 電極を水滴が短絡して速いパルスが発生する。この信号を、ゲート用のデジタル集積回路⁵⁾ (SN 7400, Quad 2-Input NAND Gate) の 1/2 を使用して、ワンショット・マルチバイブレータを構成し、記録、積算に適するように、パルス幅の延長と増幅をはかっている。第 5 図の写真は、小型リレーを改造した、手製の打点用電磁ペン、第 6 図は、それを記録計に取り付けたところである。写真に見られるように、打点ペンは、2 個ペンレコーダに取り付けられているが、



第 4 図 記録用増幅回路 (1/2)

凍結速度の記録に必要なのは、一定速度の紙送り機構のみで、さらに数個の打点ペンの取付けが可能であり、レコーダ自身のペン（増幅器）とは完全に独立している。記録紙には、第6図の写真②のように、水滴数に応じた点列が記録される。記録計上の測器ケース③には、打点ペン、積算計用の増幅部2組が収められている。この凍結速度計は、本体ですでにトランジスタによって増幅されているので、1地点の凍結速度を記録するのに、平行ビニール線1本ですむ簡易さも、この測器の特徴である。

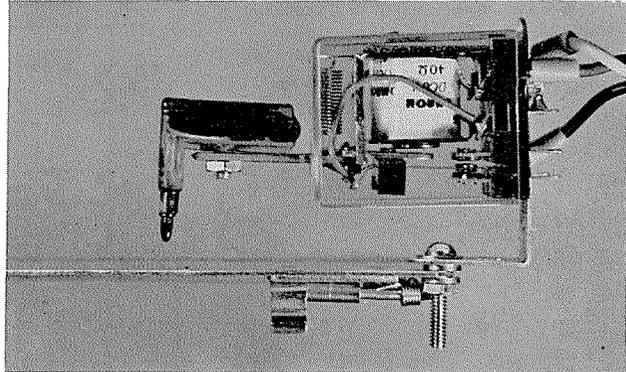
IV. 観測結果

1. 凍結速度係数の決定

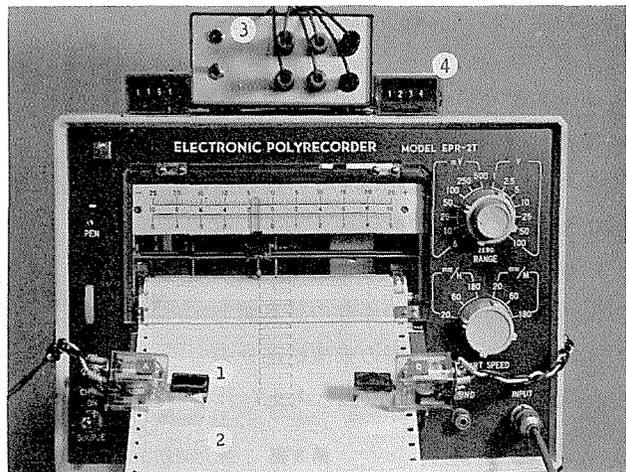
凍上観測室のプールに設置された凍結速度計（管の内径 2.0 cm）の、凍結速度係数 k の計算値は 0.337 mm/個であった。この係数を現地における計測中の状態で求めるには、観測の状況によって、

次の2つの方法がある。凍結速度計の、氷柱の形成される本体の上部は、透明なアクリル樹脂製なので、充填する水をメチレンブルーで、わずかに着色しておくこと、この測器は、現地観測用の凍結深計⁷⁻⁹⁾と全く同じ動作をして、凍結深の実測ができる。凍結深のいくつかの実測値 D と、そのときどきまでに記録されている水滴数（積算値） N とを、第2表のように対比させることによって、 k の実際的な値が得られる。第7図は、第2表をグラフにまとめたものであるが、凍結速度係数は、0.37 mm/個で、凍結深は $D_0 = (0.37N - 0.5)/10$ cm が、最も観測値に近い値を与え、第2表に示すように、実測値との差は最大でも、0.8 cm を越えることはない。実用的には、 $0.37N$ mm が凍結深を示すとしてよいであろう。

次に、冬期間の現地観測をしない場合は、以下の方法によって、 k を求めることができる。この凍結速度計は、最大凍結深計の機能をもち、最大値 D_{max} まで水滴を放出し続ける。融解後は、最大値に相当する水（位）の減少が見られ、最大凍結深はこの減少から逆算できる。一方、打点数の記録から、水滴数の最大値 N_{max} が得られるので、速度係数 $k = D_{max}/N_{max}$ に



第5図 記録用電磁打点ペン



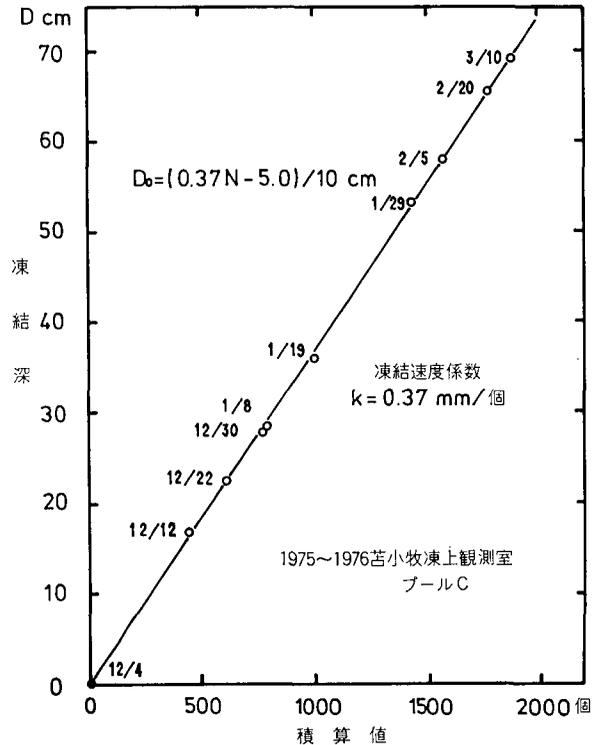
第6図 記録装置 (2回路用)

- ① 電磁打点ペン
- ② 凍結速度の打点記録
- ③ パルス幅延長、増幅装置
- ④ 電磁積算計

第2表 凍結深の計算値と実測値

1975 1976 月 日	積算値	計算値	実測値	差 ($D_0 - D$) cm
	N 個	D_0 cm	D cm	
12 4	0	-0.5	0.0	-0.5
12 12	442	15.9	16.7	-0.8
12 22	607	22.0	22.5	-0.5
12 30	767	27.9	27.8	+0.1
1 8	790	28.7	28.4	+0.3
1 19	1,000	36.5	35.8	+0.7
2 29	1,434	52.6	52.9	-0.3
2 5	1,568	57.5	57.8	-0.3
2 20	1,773	65.1	65.3	-0.2
3 10	1,867	68.6	68.2	+0.4

よって決定できる。この測器を最大凍結深計として使用した場合の誤差は、最悪の場合でも $D_{max.} \pm 2$ cm の範囲内に収まる¹⁰⁾ ので、速度係数として、第3表のように $k=0.355 \sim 0.376$ の範囲の値が得られる。この係数の計算値との差は、主として測器の未凍結部分の温度低下による収縮が原因と考えられる。



第7図 凍結速度係数

第3表 最大凍結深から求めた凍結速度係数

最大凍結深の範囲 (cm)	$D_{max.} - 2$	$D_{max.} - 1$	$D_{max.}$	$D_{max.} + 1$	$D_{max.} + 2$
凍結深 D (cm)	66.2	67.2	68.2	69.2	70.2
速度係数 k (mm/個)	0.335	0.360	0.365	0.371	0.376

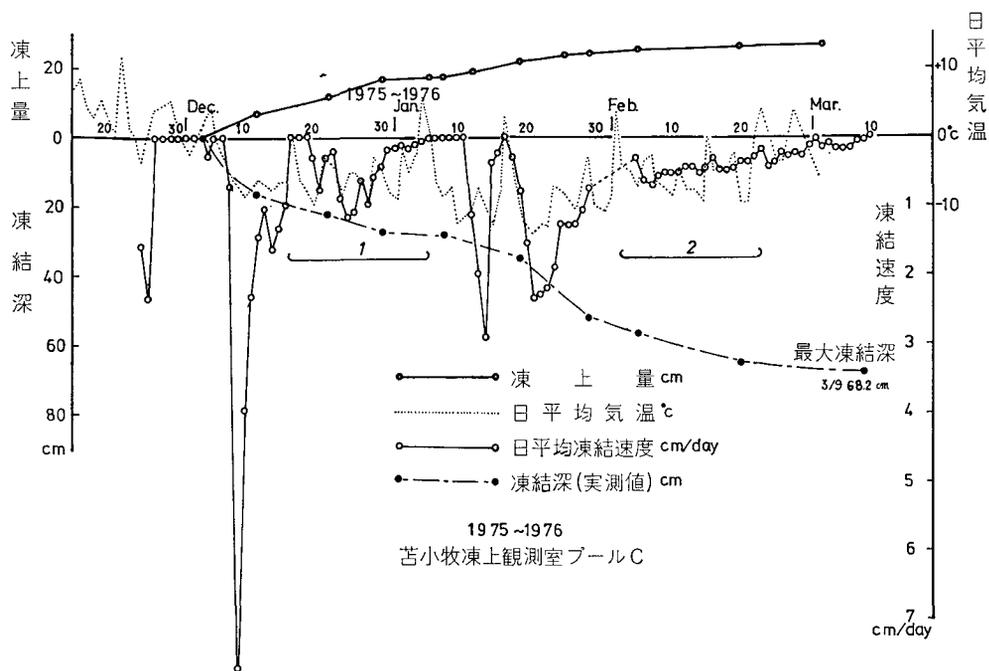
$$D_{max.} = 68.2 \text{ cm}, N_{max.} = 1,867 \text{ 個}$$

2. 日平均凍結速度 (1975年11月~1976年3月, 苫小牧)

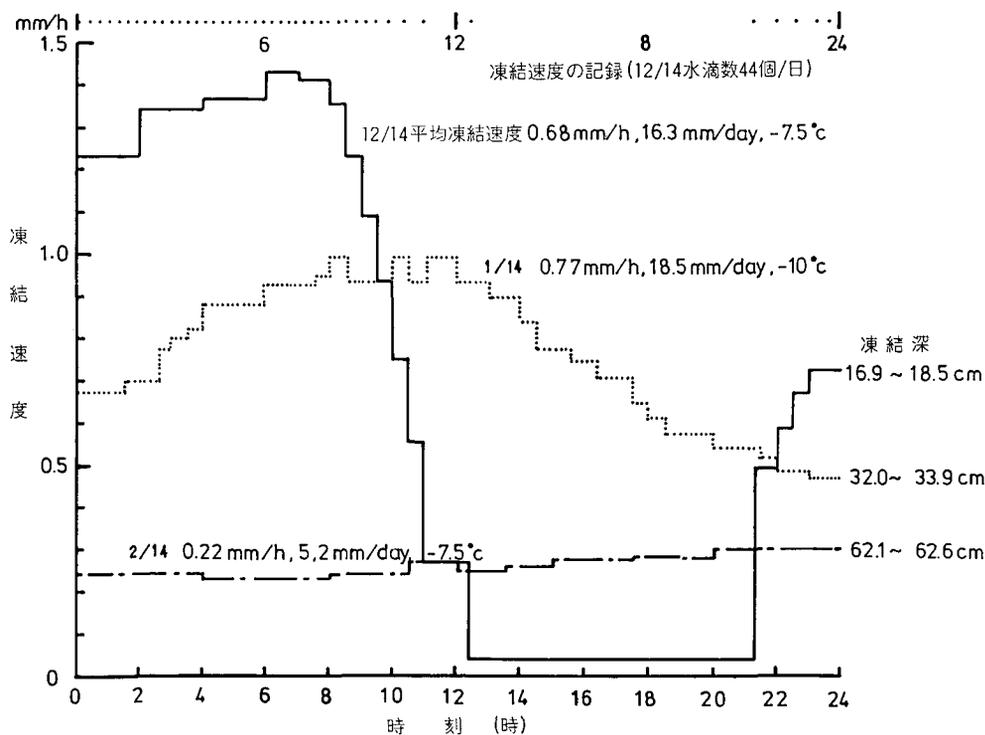
日平均凍結速度は、速度係数 k に、24時間時 (0~24時) の記録紙上の打点数 N_{24} を乗じた $k N_{24}$ によって求められる。第8図は、凍結期間中の平均凍結速度を、日平均気温、凍結深 (実測値)、凍上量と共に示したものである。同図によって、気温が凍結速度に及ぼす効果をみることができる。例えば、図中の1, 2の期間は、ほぼ同様の平均気温の経過を示しているが、前者が気温の昇降と共に凍結速度が大きく変動しているのに対し、後者は凍結深が深いために、平均化された効果しか受けていない。

3. 凍結速度の日周変動

凍結速度計の記録紙上には、第6図の写真、第9図最上段の点列のように、時間軸に沿って打点が印される。打点1個は、0.37 mm/個の凍結深の降下に相当するから、凍結が後退して



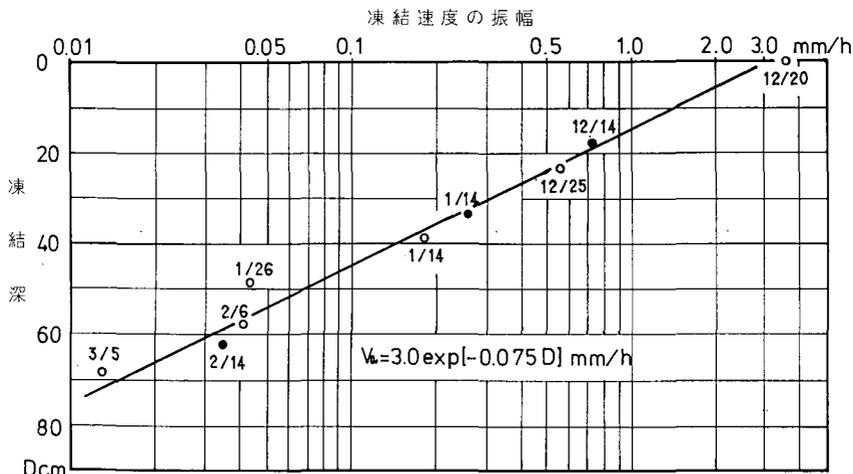
第8図 凍結期間中の記録



第9図 凍結速度の記録と日周変動

いなければ、相連なる2個の点、 $N-1$ 番目と、 N 番目の時間間隔を dt 時間とすれば、 $0.37/dt$ (mm/h) を、その間の平均凍結速度とみることができる。第9図は、このような手続きによって、凍結期間の前期、中期、末期の12月14日、1月14日、2月14日の凍結速度の変動を図示したものである。それぞれの凍結深は、18.5 cm, 33.9 cm, 62.6 cm (いずれも計算値) で、凍結深が増大するに従って、凍結速度の振幅が大幅に減少する。しかし、日平均凍結速度が同様に小さくなるわけでは、必ずしもない。尚、第9図の12月14日の午後の打点記録で、数時間にわたって水滴の落下のない部分があるが、この時期(凍結深18 cm)は、凍結が進行中で、後退しているとは考えにくい。従って、平均的には図の平均凍結速度であったとみなすことができる。

第10図は、凍結速度の振幅 v_a と、凍結深 D の関係をみたものである。同図の黒丸は、上記の3例の値である。この図から、凍結速度の振幅 v_a は、凍結の深さ D と共に、指数関数的に減衰し、関係式 $v_a = 3.0 \exp[-0.075 D]$ (mm/h) によって近似することができる。



第10図 凍結速度の振幅と凍結深、黒丸印は第9図に採用したもの

以上、凍結速度計によって得られた直接的な結果をみてきたが、この測器は、地中温度や凍上量など他の諸量と関連させて、はじめて凍上機構の解明に役立つものである。例えば、凍上力は凍結速度に大きく依存することが知られている¹¹⁾が、この関係の解析に利用することは、この最も直接的な応用であろう。

V. あとがき

これまで、凍結速度計の水柱の長さ、と、土壌の凍部の深さが等しいとして取扱ってきたが、本体と保護管の間にある空気層、管内の未凍結部分の水の対流などによる誤差はまぬがれない。しかし、実用的にはこれらを無視して構わない程度である。測器の問題としては、凍結開始期に、本体頭部の水が、凍結・融解を繰り返すとき、管内に残存するわずかな空気の膨脹、収縮によって不確実な動作をすることがある。そして、この速度計は原理的に、凍結の後退時と最大凍結深に達した後は動作しない。この測器の、室内実験装置用の小型のものは、保護容

器が不要で、本体を直接土壌に接触させることができ、測定期間中、頭部を常時凍結した状態で使用することによって、きわめて安定な動作をする。これは、水銀を使用した重量法による凍結深の自記計と共に注目してよい特性である。また、凍結速度計の本体から発せられる信号が、すでにパルス状なので、電池と数個の部品を附加することによって、100~200 m 程度の到達距離をもつ FM 電波によるコードレス化も容易で、例えば湖沼の水厚測定への応用は、測器の使用状況としては理想的である。

本稿では、主として凍結速度計の機能と特徴について述べた。凍結速度の観測は、低温科学研究所の木下誠一教授の有益な御指導と助言の下に、同研究所凍上學部門凍上観測室(苫小牧北大演習林内)における観測の一つとして行われたものである。同教授をはじめとする凍上學部門の方々に、終始多大の御援助をいただいた。ここに記してお礼申しあげる。また本研究は文部省科学研究費補助金自然災害科学特別研究費によって行なわれた。

文 献

- 1) 石川政幸・鈴木孝雄 1963 石こうブロックを用いた土壌凍結深自記計. 林業試験場北海道支場年報, 1-8.
- 2) 矢作 裕 1974 体積差型自記凍結深度計による野外観測結果. 日本雪氷学会予稿集, 97.
- 3) 矢作 裕 凍結期間計(仮題). 未発表.
- 4) 矢作 裕・佐々木一郎 1974 OVERFLOW 型最大土壌凍結深度計. 日本雪氷学会予稿集, 99.
- 5) Texas Instruments Inc. 1973 The TTL Data Book.
- 6) トランジスタ技術編集部 1972 実用電子回路ハンドブック. 338-339.
- 7) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦男・青田昌秋 1968 北見における凍上観測. 低温科学, 物理篇, 26, 363.
- 8) 矢作 裕 1974 土は何 cm の深さまで凍っているか. 釧路論集, 6, 143-163.
- 9) 矢作 裕 1976 凍結深計及び相対凍上計について. 釧路論集, 8, 印刷中.
- 10) 矢作 裕 体積差型最大凍結深計(仮題). 未発表.
- 11) 木下誠一 1972 凍上力実験. 低温科学, 物理篇, 30, 191-201.

Summary

The author developed a new type of recording device with which the freezing velocity and the depth of frozen ground can be determined directly from an increase in volume caused by freezing process from water to ice in a plastic pipe (Fig. 1-c, 2 and 6). The main parts of this device were composed of four elements: (1) a transparent plastic pipe filled with water (the top part of Fig. 1-c), in which an ice stick is formed when the ground is frozen, (2) a syringe needle which serves as a vent, and is used in obtaining almost uniform-weight water droplets out the increased quantity because of the volume increase due to freezing of water in the pipe (Fig. 3-②③), (3) two droplets-capturing electrodes, the one connected to an emitter pin and the other to a collector pin of a transistor (Fig. 3-①), and (4) a recording unit (Figs 5 and 6). A whole set of instruments needed for measurement in the field excepting the recording unit is shown in the schematic sketch of Fig. 2.

The depth of frozen ground (D) and freezing velocity (v) are recorded as a dotted

line on the chart (Fig. 6-②), and they are expressed by the following theoretical equations respectively :

$$D = \frac{m_0}{(\rho_w - \rho_i) S} \cdot N \equiv kN$$

$$v = k \frac{dN}{dt} = \frac{k}{\Delta t_N}$$

Where ρ_w and ρ_i are respectively the density of water and ice, S is the cross section area of the upper side of the pipe, and m_0 the weight of a droplet, N is the number of falling water droplets. The coefficient k is called "Freezing Velocity Coefficient". The calculated and observed values of k were 0.337 and 0.37 mm per droplet respectively. The observed results of are listed in Fig. 7 and Table 2.

The new device has made it possible to tell directly the depth of frost penetration with the aid of relation $D=0.37 N$ mm, and if N is the whole number of falling droplets from the beginning of a freezing period, D gives the depth, and assuming N to be represented by a number of captured droplets a day, the above expression means the mean daily speed of frost penetration (Fig. 8). As the dropping time interval Δt_N between N -1th and N th is inversely proportional to the freezing velocity, the mean velocity can be expressed as $v_N=k/\Delta t_N$. By using the relation it was made known that the daily amplitude of freezing velocity decreased exponentially with the increasing depth of frozen ground, and observed results gave the following experimetal relation,

$$v_a = 3.0 \exp(-0.075 D),$$

where v_a (mm/h) is the daily amplitude, D (cm) the depth of frozen ground (Fig. 9 and 10).

Most of the present work based on the new recording device was done during the freezing season of 1975 to 1976 at Tomakomai in Hokkaido.