



Title	土の凍結時の未凍結土中の水分移動
Author(s)	武田, 一夫; TAKEDA, Kazuo; 鈴木, 義男 他
Citation	低温科学. 物理篇, 35, 287-293
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18345">https://hdl.handle.net/2115/18345</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_p287-293.pdf



## 土の凍結時の未凍結土中内水分移動\*

武田 一夫

(北海道大学大学院 理学研究科)

鈴木 義男

(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

### I. ま え が き

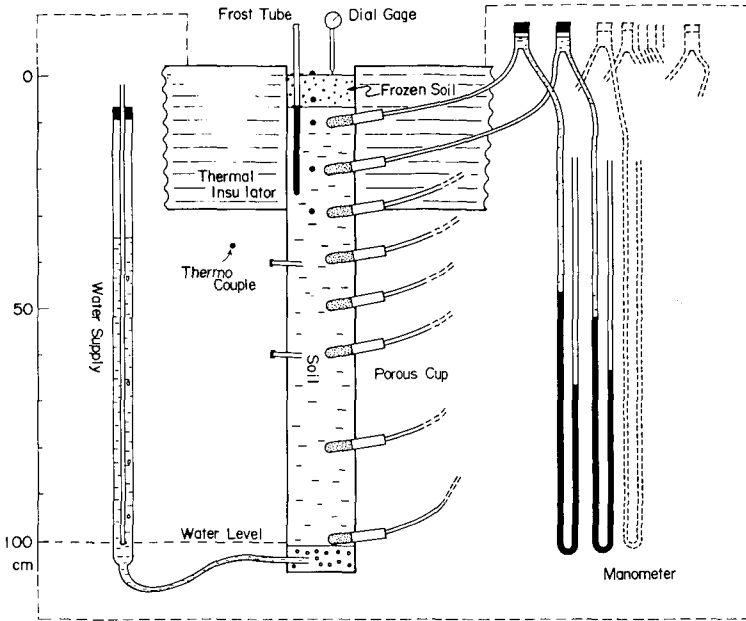
地面の凍結の特徴は、凍結面で未凍結部からの水の出入があることである。ふつうは未凍結部から水が吸収されて凍結面で氷化し、このため凍上が起る。この水の出入は未凍結部に水の移動をひき起すが、逆に未凍結部の水の移動を調べれば凍結面への水の出入が判ることにもなる。未凍結部の水の移動はある微分方程式で記述されるであろう。未凍結部に温度勾配があれば熱の移動も起り、これもまたある微分方程式で記述される。水の移動と熱の移動とは相互に関連するので、この場合は水の移動を記述するには、二つの方程式を連立させねばならない。

ところでこの連立方程式は初期条件と境界条件とが与えられれば原理的にはとける。いま地下水位を一定に保つ開式凍結の場合を考えると、下の境界面は地下水位面にとるのが自然であろう。ここでの境界条件は、熱については、温度を地下水温、水についてはポテンシャル0ととればよい。上の境界面は凍結面をとるとする。まずその進行速度を知らねばならぬがこれは与えられたものとする(これをきめるには凍結部も含めた系で考えねばならない)。さてここでの境界条件は熱については温度を近似的に $0^{\circ}\text{C}$ ととればよからう。水については、水の出入量か水分ポテンシャルかのいずれかがわかればよい。いずれも温度のように常数になるとは考えられないが、外的条件、すなわち凍結面の移動速度、地下水位面との距離、荷重などによって簡単な形に表わされないであろうか。高志らは、地下水位面が凍結面よりも高い場合について、凍上量(これは水の出入量と簡単な関係にある)と凍結面移動速度および荷重とについての実験式を与えた<sup>1)</sup>。一方、凍結面下の水分ポテンシャルについては、いくつかの測定があるが<sup>2~6)</sup>、組織的なものはないようである。著者らは、地下水位面の低い場合の定水位開式凍上実験を行ない未凍結部の水分ポテンシャルの変化を調べてきたが、とくに凍結面近傍の水分ポテンシャルが、地下水位面と冷却温度とにどう依存するかについて重点をおいて報告する。

### II. 実験手順

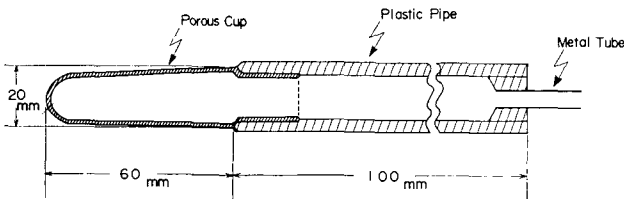
装置を模式的に第1図に示す。試料は凍上性の強い砂質粘土ロームで、砂(粒径2~0.05 mm) 60%, シルト(0.05~0.005 mm) 19%, 粘土(0.005 mm以下) 21%, 比重2.54, 比表面積

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第1867号

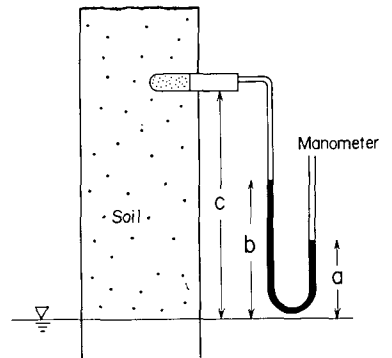


第1図 実験装置模式図

57 m<sup>2</sup>/gである。これに重量含水比 42±5% 程度に水を加え、内径 13 cm、高さ 110 cm の塩ビ容器の底に砂を 5 cm 位つめた上に数 cm ずつできるだけ均質につめる。この時、水分張力計感部を試料表面より、10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 cm に、また熱電対を数点とメチレンブルー溶液を用いた凍結深度棒を同時に埋めこんだ。なお、塩ビ容器の上部内壁には試料の凍着を防ぐためテフロンテープをはった。



第2図 水分張力計感部



第3図 マノメーターの読み方

水分張力計感部は第2図に示す。ここから肉厚チューブ、空気溜を経て水銀マノメーターに至っている。水分張力は第3図に示す  $a, b, c$  の値から、

$$T = 13.6(b - a) + (c - b)$$

で計算した。これは、大気圧と測定点の水圧との差を水柱で表わしたもので、水分ポテンシャル  $\psi$  は、地下水面で 0 として、

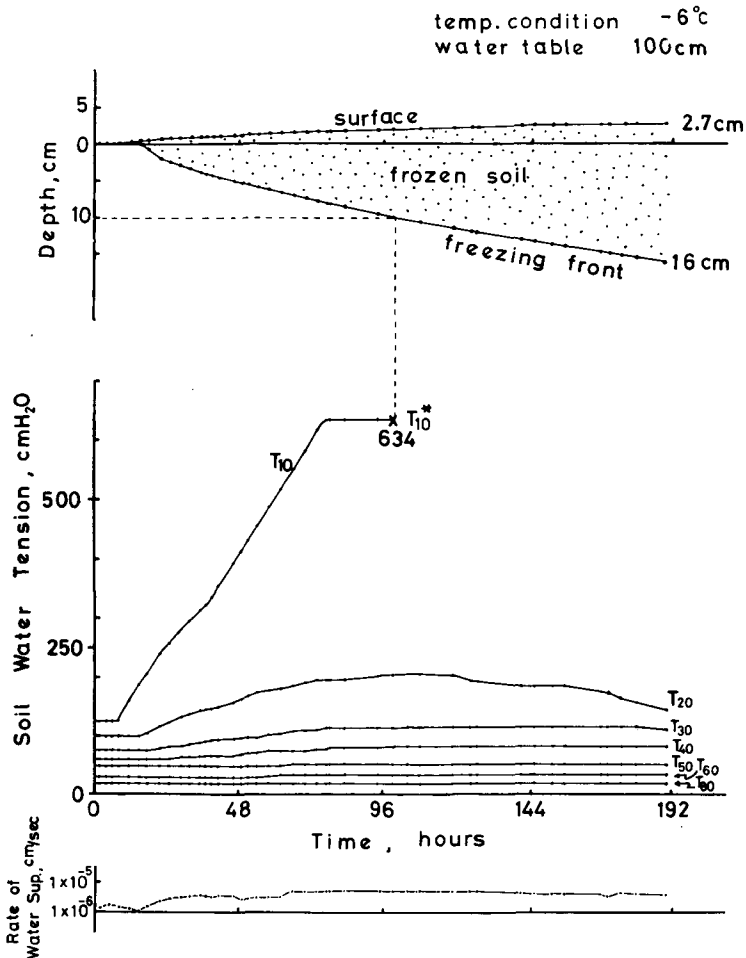
$$\psi = -13.6(b - a) + b$$

となる。

給水はマリOTT給水装置を用いて定水位を保ち、給水量もよみとれる。

試料表面だけを外気にさらすように、塩ビ容器、給水装置、マンメーターはすべて断熱箱に収め、内部温度は $0^{\circ}\text{C}$ に近い正の温度に保つことに努めた。未凍結部の温度勾配を小さくするためだが、給水装置などの凍結をおそれて実際は $+3^{\circ}\text{C}$ にした。試料容器の側面上部約32 cmは、試料の凍結を進めるため断熱材でおおってある。試料表面は乾燥防止のためビニールシートでおおい、凍上量は0.01 mm目盛のダイヤルゲージで測った。

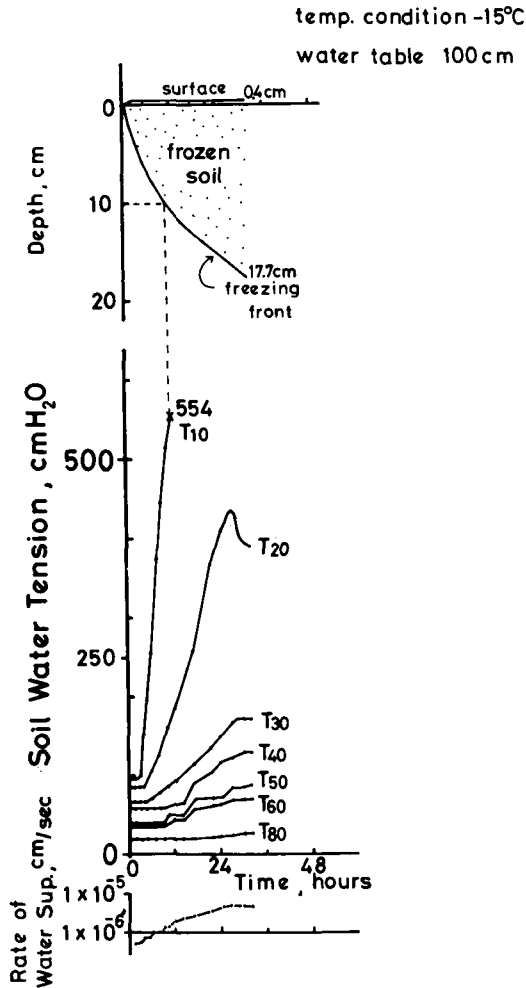
初期条件をできるだけ一定にするため、地下水位設定後、装置を72時間常温におき、その後、 $+3^{\circ}\text{C}$ にした低温室に24時間おいてから低温室の温度を所定温度に下げ実験を開始した。実験開始時、土中水分分布は地下水位面上、50~60 cmまでしか平衡に達しなかった(第6図参照)。冷却開始後24時間は0.5~3時間毎、以後は6~12時間毎に測定を行ない凍結線が12~18 cm侵入した時に実験を止めた。なお試料表面、試料内数点、断熱箱内1点の温度は連続記録させた。



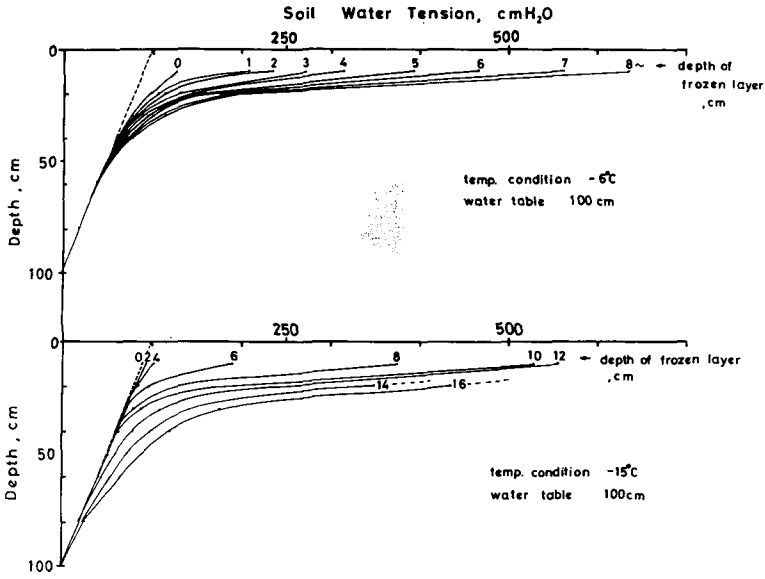
第4図 測定例1.  $T_{10}$ は10 cm深の水分張力を示す

### III. 実験結果と考察

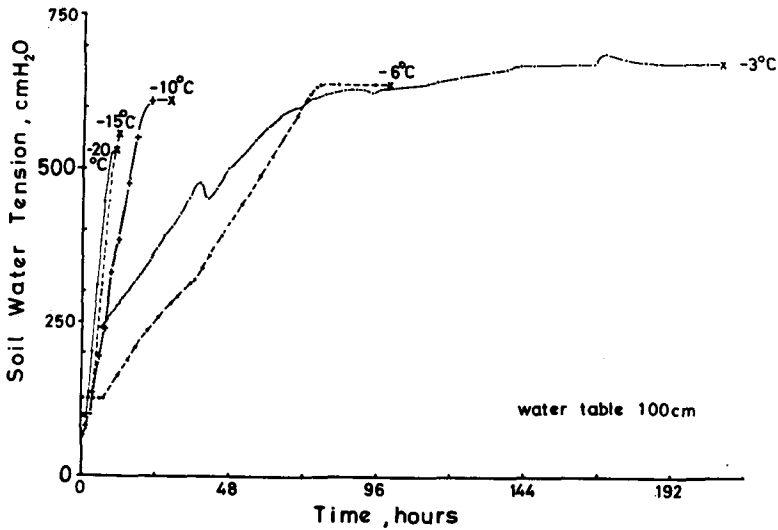
実験は、地下水位表面下 100 cm に対し冷却温度、 $-3$ 、 $-6$ 、 $-10$ 、 $-15$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、30 cm に対し  $-6$ 、 $-15^{\circ}\text{C}$ 、60 cm に対し  $-6^{\circ}\text{C}$ 、40 cm に対し  $-6^{\circ}\text{C}$  の計 9 例行なっている。地下水位 100 cm の場合の 2 例の測定結果を第 4、5 図に示す。冷却温度の低い第 5 図では深い所の張力もかなり変化しているのに第 4 図では 50 cm 以深はほとんど変化していない。凍結深をパラメーターとして張力分布を示した第 6 図をみるとこのことはさらにはっきりする。なお図の点線は平衡分布で、これより傾きが小さいと上方への流れが生ずる。第 6 図を作ったいま一つの理由は、この分布を外挿して凍結面での水分張力を推定することにあつたのだが、これはもう少し測点が多くないと難しい。それで、凍結線直下の水分張力としては、凍結線が 10 cm を通過する時のこの点の張力の値に注目することにした。



第5図 測定例 2.

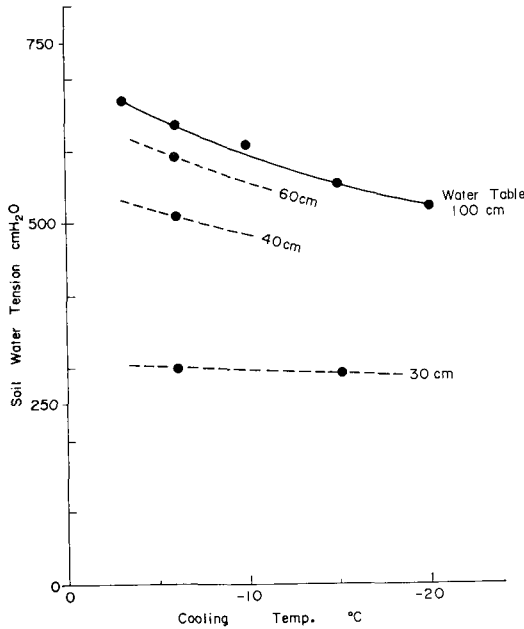
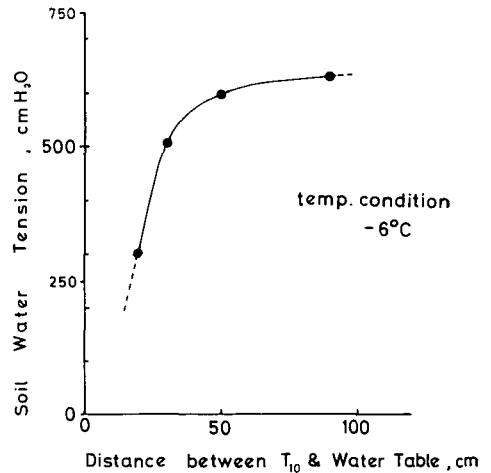


第6図 水分張力分布



第7図 地下水位 100 cm 時の 10 cm 深の水分張力

地下水位 100 cm の時の、10 cm 深の水分張力の変化を 5 例について集めたのが第 7 図である。図の×印が凍結線が 10 cm 深を通る時である。この時の水分張力の値  $T_{10}^*$  を実験例すべてについて第 8 図にまとめた。地下水位 100 cm の場合、冷却温度が低くなるほど  $T_{10}^*$  は小さくなっているが、変化はあまり大きくなりまたほぼ線型である。地下水位依存性をみるため  $-6^{\circ}\text{C}$  の場合だけ抜き出し、横軸を地下水面と張力測定点との距離にしたのが第 9 図である。これから地下水位と凍結面との距離が 40 cm 附近から近くなると、凍結面直下の水分張力が急激にへることがわかる。

第8図 凍結面通過時の10 cm 深水分張力  $T_{10}^*$ 第9図  $T_{10}^*$  と地下水位との関係

筆者らのこれまでの実験では、20 cm 深を凍結面が通過するまでの実験を行っていないが、第4図の20 cm 深の水分張力の値  $T_{20}$  の挙動からは、凍結面が20 cm 深を通過する時のその値はきわめて低くなりそうである。この場合地下水面との距離は80 cm であるし、凍結面附近の凍土内の温度分布は、冷却温度  $-3^{\circ}\text{C}$  の時凍結面が10 cm を通過する時のそれに似ていると思われるので、第8図から推測すると、600 cm 位の値を示してもよい筈である。凍土の凍着のため大きな荷重がかかってきたためとも考えられるがこの理由は明らかでない。

筆者らは外部変数として装置の都合上冷却温度をとったが、凍結面進行速度が制御できるなら、その方がよいと思われる。また未凍結上の温度はできるだけ  $0^{\circ}\text{C}$  に保ち、温度勾配をなくするようにすることも必要であろう。今後これらの点に注意した実験をつづけたい。

## 文 献

- 1) 高志 勤・益田 稔・山本英夫 1974 土の凍結膨張に及ぼす凍結速度、有効応力の影響に関する研究. 雪氷, **36**, 2, 1-20.
- 2) Jumikis, A. R. 1962 The soil freezing experiment. *Highway Res. Board Bull.*, **135**, 150-165.
- 3) Önalp, A. 1973 A study of the mechanism of frost heave and stabilization by the use of deflocculating agents. *Frost I Jord*, **2**, 15-30.
- 4) Sutherland, H. B. and Gaskin, P. N. 1973 Pore water and heaving pressures developed in partially frozen soils. In *Permafrost Sec and Internat. Conf.*, 409-419.
- 5) Williams, P. J. 1967 Pore pressures at a penetrating frost line and their prediction. *Norwegian Geotechnical Inst. Publ.*, **72**, 51-72.
- 6) Kane, D. L., Luthin, J. N. and Taylor, G. S. 1975 Heat and mass transfer in cold regions soils. *Inst. Water Res. Univ. Alaska Rep. IWR* **65**, 1-50.

### Summary

The most characteristic feature of frost heave phenomena is that ice segregates at the freezing front sucking water from the underlying unfrozen soil. Because of this suction, water flow is induced in the unfrozen soil. We have carried out soil freezing experiments to study such flow in the case when ground water level is below the freezing front. Emphasis has been laid on the search of the dependency of the value of water tension (atmospheric pressure minus water pressure) just below the freezing on two external conditions, the cooling temperature and the distance between the front and the ground water level.

Experimental arrangement is schematically shown in Fig. 1, where the broken line indicates a thermally insulated box. The sample container is a plastic pipe 13 cm in diameter and 110 cm high. Water is supplied by a Mariott type supplier, which can maintain a constant ground water level. Water tension is measured at several depths by porous cups (Fig. 2) and Hg manometers. Sandy clay loam of the dry density of  $2.54 \text{ g/cm}^3$ , consisting of 60% sand, 19% silt and 21% clay, has been used as the samples throughout. In each experiment, the whole system had been left at a temperature slightly above zero for four days after the setting of water level. Then, with the temperature in the box being unchanged, the surface of the sample was exposed to cooling air until the freezing front reached to 12-18 cm, when the experiment was finished.

Two results of the measurements are shown in Figs. 4 and 5, where  $T_{10}$  etc. mean water tension at 10 cm depth etc. From the data, the distributions of water tension at various stages of freezing are obtained (Fig. 6). One can see that the effect of suction reached deeper in rapid cooling (Fig. 6, below) than in slow cooling (Fig. 6, upper).

It was hoped but turned out difficult to get the values of water tension just below the freezing front by the extrapolation of the curves in Fig. 6. Hence, the only available values of the water tension just below the freezing front are the end values of  $T_{10}$ , which are plotted in Fig. 8 against the cooling temperature. Though the data are scarce, we may conclude that the water tension just below the freezing front decreases gradually with the decrease of cooling temperature while abruptly when the distance between the freezing front and the water level becomes less than 50 cm.