



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍上力 II : 現場測定結果について
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiti; 大野, 武敏 他
Citation	低温科学. 物理篇, 24, 285-297
Issue Date	1966-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18050
Type	departmental bulletin paper
File Information	24_p285-297.pdf



凍 上 力 II*

現場の測定結果について

木 下 誠 一

(低温科学研究所 凍上学部門)

大 野 武 敏・小 黒 貢

(北見工業短期大学)

(昭和40年10月受理)

I. 緒 言

冬に地面が凍ってもち上げる現象が凍上である。地面が凍っても、上らないようにするには、外から大きな力でおさえなければならない。Beskow¹⁾によると、土にかかる圧力が大きいほど、凍上の速度が減少する。筆者等は全く凍上を止めてしまうのに要する力を凍上力と呼んで、この力を測定するための現場を北見工業短期大学の構内に設けた。測定は、昭和36年12月以来、毎冬行なわれている。第1年度(昭和36~37年冬, 1961~1962)の結果は、「凍上力I」という題目で、低温科学第21輯に発表した²⁾。(以後、本文では論文Iと書く)それを要約すると、

(1) 地面に直径15 cm, 厚さ2 cmの丈夫な鉄の円板をおいて、それを冬中動かないようにおさえておいた。このとき円板にかかる凍上力が、最大5150 kgにも達した。この冬の最大凍結深は57 cmであった。

(2) 円板をおかない自由な地面の凍上量や、凍結深度が、増大を続ける一方であったのに、凍上力の方は、大きな幅をもって増大減少を数回繰返した。これは、凍上力が自由地面の凍上進行の速度に関係するためで、凍上力が減少したのは、自由地面の凍上が暖気のため一時停止したときである。そのときおさえられていた凍土の内部で、応力の緩和が起ったのである。

その後更に、昭和37~38(1962~1963), 38~39(1963~1964), 39~40(1964~1965)年の3冬にわたって、測定をおこなった。この論文でその結果について報告する。

第2年度からは、おさえた地面で、その下の土がどのようになるのかを観察した。すなわち、もう一カ所同じ装置を設け、それを凍上の最盛期に取外して、その下の土の断面を切り出した。この装置には、直径30 cmの大きな円板を用いたのであるが、第4年度には、それにかかる力も測定し、おさえる円板の大きさが、凍上力にどのように影響するかを調べた。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第749号

II. 測定方法

1. 凍上力

地面に円板をおき、それを冬中動かないようにおさえる。このとき円板にかかる力を測定するのであるが、この測定方法の詳細については、既に論文 I の第 III 節に述べたので、ここではごく簡単に紹介する。

地面に厚さ 2 cm の丈夫な鉄の円板をおき、その上にストレンゲージを用いたロードセルをのせる。更に、その上に幅 12 cm、側の高さ 8 cm、長さ 60 cm の鉄のチャンネルを、ロードセルが中央に位置するようにのせる。このチャンネルには、両端部に穴があいていて (間隔 40 cm)、それぞれ地下深くから鉛直に上方に立てられた 2 本の太い鉄棒にはめこまれ、ナットで固定される。鉄棒の下端は地下 170~200 cm のコンクリート塊の中に埋めこまれているので、冬中動くことがない。したがって、チャンネルも、又地面におかれる円板も冬中動くことがない。しかし、円板の外側では、地面が隆起するので、円板の部分はちょうどすり鉢の底ようになる。

第 1 年度には、円板として直径 15 cm のものを用いたが、第 2 年度からは、直径 12 cm のものに変えた。又、ロードセルとして最大 5 トンまで測定可能のものを用いた。

別にもう一カ所同じ方法で、直径 30 cm の大きな円板をおさえる装置を設けた。用いたチャンネルの長さは 110 cm、固定のための 2 本の鉄棒の間隔は 90 cm である。冬の始めに設置した状態を、第 6 図 a の写真に示す。この装置を凍上の最盛期 2 月下旬に外し、その下の土を掘って平らな鉛直断面を作った。そしておさえたために、内部の土がどのような変化を起したかを観察した。第 4 年度には、この大きな円板とチャンネルの間に、50 トンまで測定可能のロードセルを据え、凍上力の測定も出来るようにした。

この他に、凍着凍上力の測定も行なったので附記する。一般に、土中に鉛直に埋められた管は、周囲の凍った上にくっつき、一緒にもち上る。これを上らないようにおさえる力が凍着凍上力である。色々な材質の管類を固定の鉄棒に通し、鉄棒と管との間に力計をはさんで測定した。

2. 地温

カールソン型温度計数個を予め土中に埋めこんで、指定の指示器でそれぞれの温度を測定した。温度計を埋めるときには、その土に半分ほど砂をまぜ、余り凍上しないようにした。従って凍上力測定地点とは、温度表示の深さが多少違う。

3. 凍上量

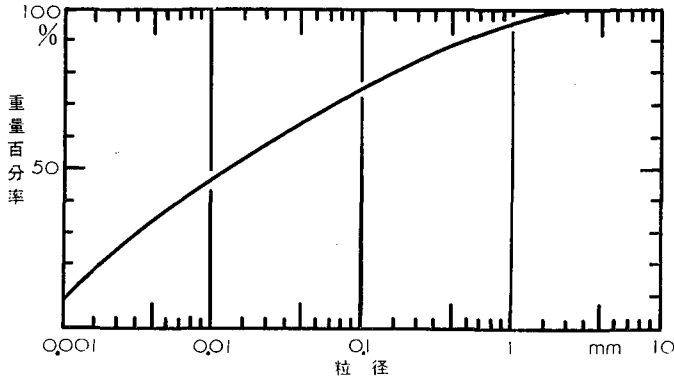
地下深くから鉛直に立てられている鉄棒を、冬中動くことのない基準点として、なにも物をのせない自由な地面の凍上量を、Y レベルを用いて測定した。

凍上力、地温、凍上量とも測定は 1 日 1 回冬の初めから地面の融解が始まる春先まで毎日行なわれた。

4. 土質

第 2 年度に、凍上力測定装置を据えた場所の土を埋めかえた。その土の粒度分布を第 1 図

に示す。粒径 0.005 mm 以下の粘土分 (コロイド分を含めて) が 36%, 粒径 0.005~0.05 mm のシルト分が 28%, 粒径 0.05~2 mm の砂分が 36% で, その土質は土質学会規格による粘土である。測定現場は, 周囲の土質状況と同じく, 地下 140 cm より深いところは, 砂地のままにした。従って, 粘土層に含まれる水分の移動だけで凍上が起るわけである。



第1図 測定現場うめたての粘土の粒径加積曲線

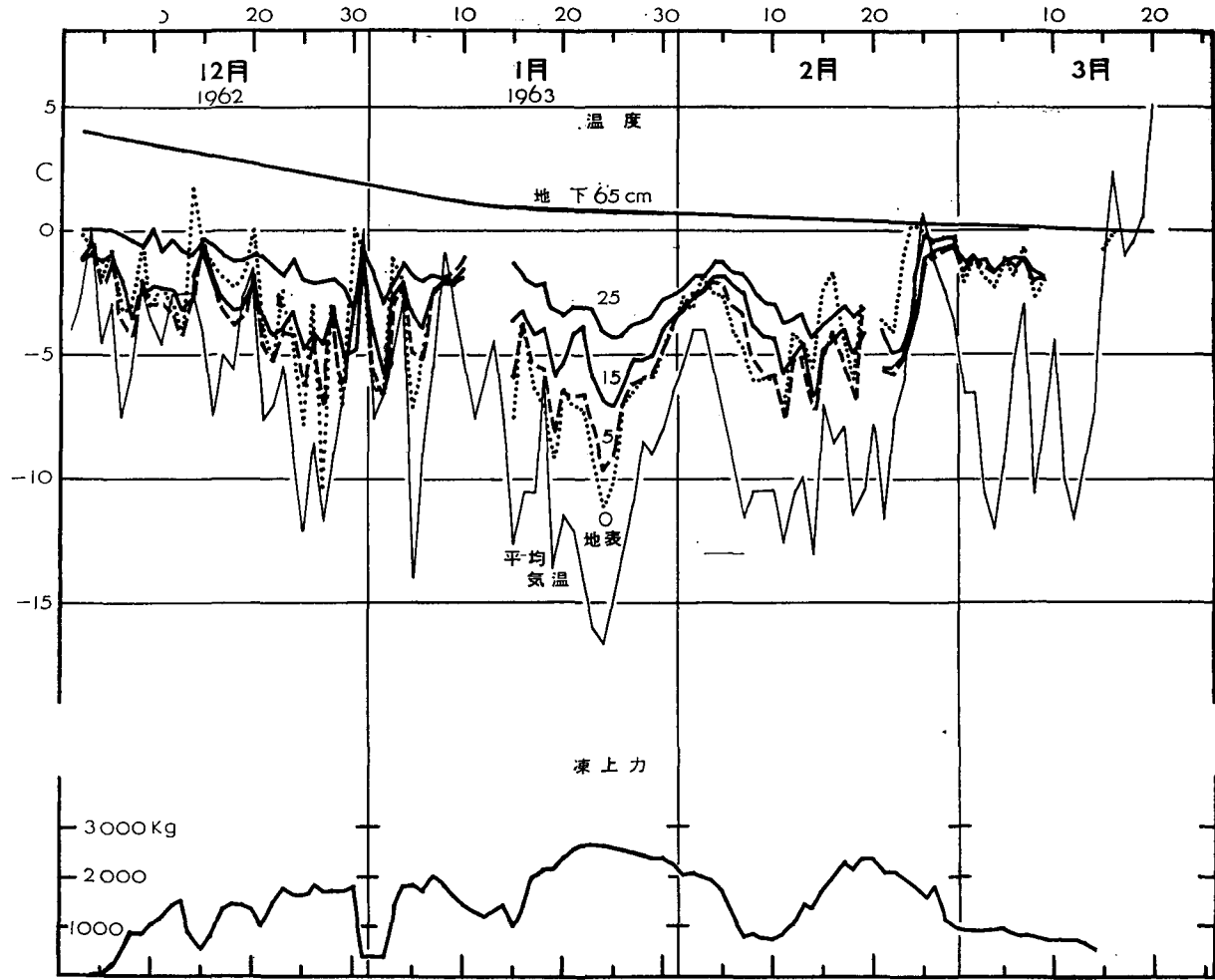
III. 測定結果

1. 概要

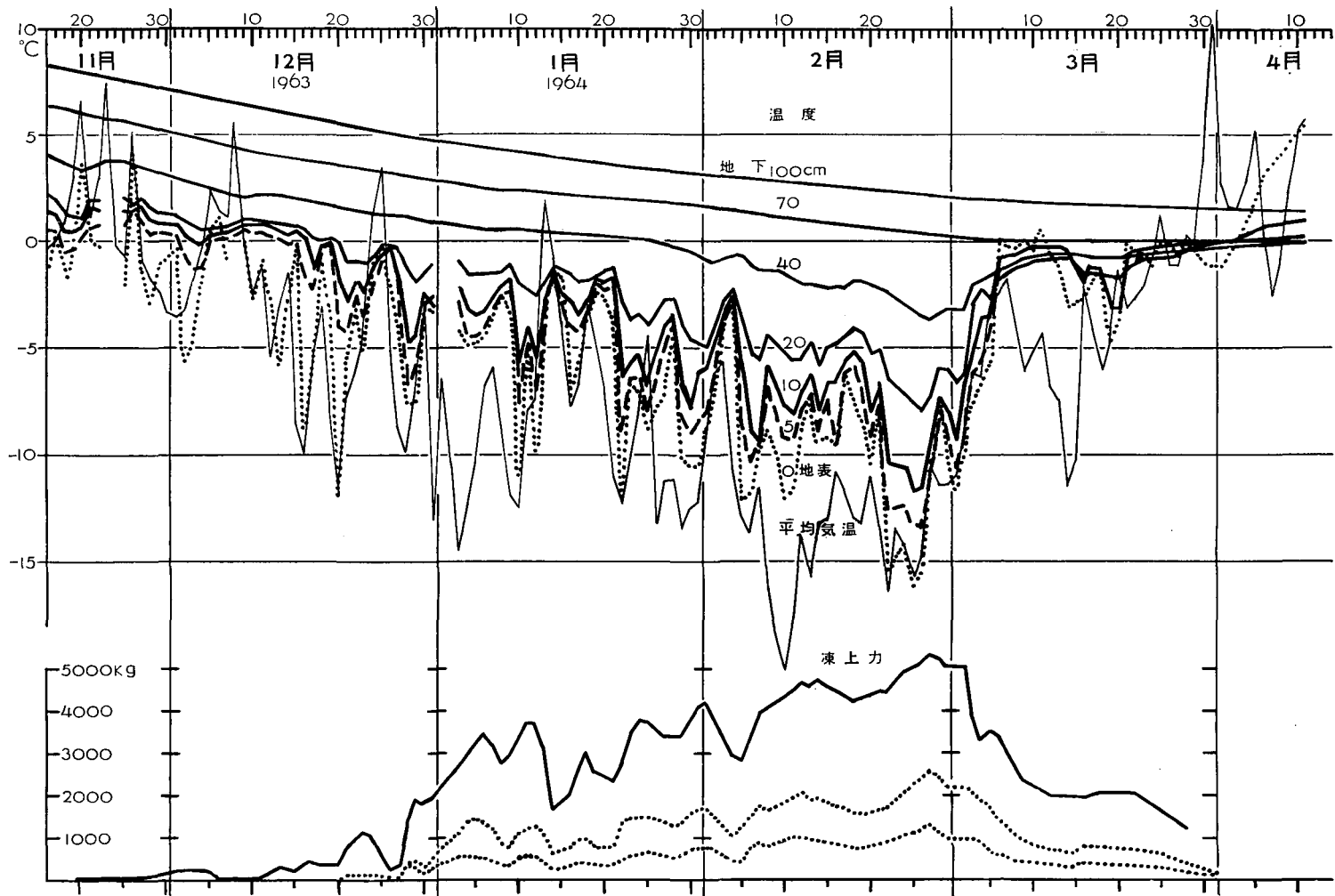
第2, 3, 4図にそれぞれ昭和37~38, 38~39, 39~40年の冬の測定結果を示す。グラフの上段は, 地温と平均気温, 下段は凍上力である。平均気温として現場近くにある北見気象通報所の観測値を用いた。又, 第5図には自由な地面の凍上量と, 地温の分布から推定した凍結深度のグラフを, それぞれ3冬について示した。

地温は, 地下 40 cm より深くでは, 冬の始めから春先まではほぼ直線的に下降して行く。しかし, 浅いところでは地面に近いほど温度の上昇下降の起伏の度合いが激しい。このような温度曲線の凹凸は, 深くなるにつれ少しずつ遅れを示すが, ほぼ平均気温の曲線の凹凸に平行する。グラフには示さなかったが, 各年度に現われた最低の気温は, 昭和38年1月24日 -26°C , 昭和39年2月22日 -29.8°C , 昭和40年3月5日 -26.1°C であった。

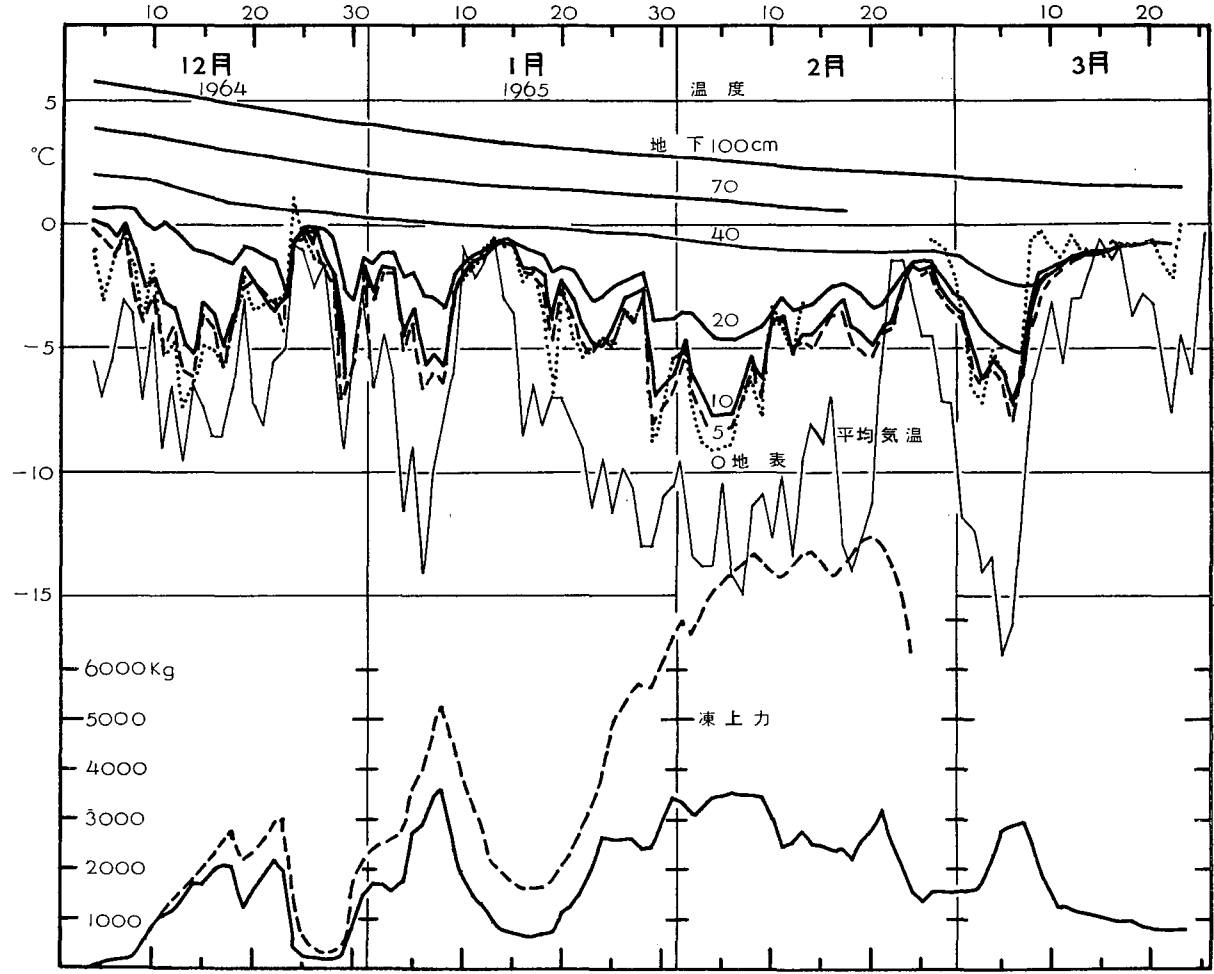
第5図のグラフが示すように, 自由地面の凍上量と凍結深度は, 年により多少の違いはあるが, いずれも冬の始めから春先まで増大を続ける一方で, 途中で大きな減少を示すことはなかった。ところが, 第2, 3, 4図の下段のグラフにみられるように, 凍上力の方は3冬とも大きな幅で増大減少を数回繰返した。凍上力の曲線に現われる一つの山の値は, それに続く谷の値の数倍にもなっていることが多い。そして, 多少のずれはあるが, 凍上力曲線の上昇下降は, 温度曲線の下降上昇に対応する。凍上力曲線に深い谷が現われるところでは, みなその二日か三日前に, 温度曲線に高い山 (極大) がみられる。その顕著な例が, 第2図の昭和37年12月31日, 昭和38年2月7日, 第3図の昭和38年12月26日, 第4図の昭和39年12月26日, 1月17日, 2月25日にみられる。第5図でこれらの日の近くの凍上量と凍結深度をみると, いずれも停滞している。論文Iで述べたように, このことから, 粘弾性の考えを用いて, 凍上力の減



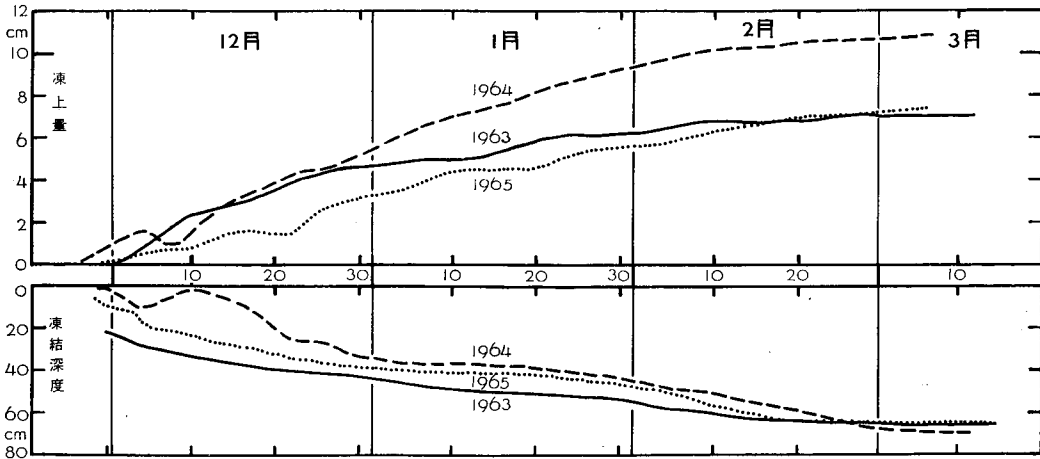
第2図 昭和37~38年(1962~1963)の冬の測定結果



第3図 昭和38~39年(1963~1964)の冬の測定結果. 凍上力のグラフで点線は凍着凍上力を示す. 大きい値がコンクリート管, 小さい値がエポキシ樹脂塗りコンクリート管である



第4図 昭和39~40年(1964~1965)の冬の測定結果. 凍上力のグラフで実線は直径12cmの円板, 破線が直径30cmの円板にかかる力である



第5図 自由な地面の凍上量と凍結深度

少を応力の緩和によるものと推定したのである。

ここで各年度の凍上力の最大値を示すと、(論文 I に報告した第 1 年度の値も附記する)

	固定円板 cm	最大力 kg	平均圧力 kg/cm ²	月 日	凍結深度 cm	凍上量 cm
第 1 年 度	直径 15	5,150	29	37. 3. 1	54	
第 2 年 度	12	2,600	23	38. 1. 22	52	6.0
第 3 年 度	12	5,300	47	39. 2. 27	68	10.6
第 4 年 度	12	3,600	32	40. 1. 8	42	4.1
	30	8,700	12	40. 2. 20	64	7.0

第 5 図のグラフから解るように、凍上が最も進行するのは、3 月中旬、つまり気温が上昇し地面の融解が始まって、もはやそれ以後凍結が進行しない時期である。ところが、凍上力の方は、冬の間に幾度も増大減少を繰り返すので、その最大値の現われる時期が一定でない。38 年や 40 年は 1 月のうちであった。これらの年度は、冬のはじめ 11 月下旬から 12 月はじめに、急に気温がさがって、いきなり 20 cm ほど土が凍ってしまった。このような急速凍結のときには、殆んど凍上が起らない³⁾。

第 5 図の凍上量をみると、38 年と 40 年は最高が 7 cm であるが、一方 39 年は最高が 11 cm になっている。又、凍上力の方も、38 年と 40 年は 39 年に比べて小さい。

第 4 年度昭和 39~40 年の冬には、直径 30 cm の大きな円板にかかる力も測定したが、その値を、第 4 図の下段のグラフに破線で示した。曲線の傾向は直径 12 cm の円板の実線とほぼ同じである。1 月中旬までは、12 cm 円板に比べて 2 乃至 3 割大きいにすぎないが、2 月に入ると、2.5 倍にも大きくなる。12 cm 円板の方は、2 月に入っても、1 月に現われた極大値とほぼ同じ値を保つことを考えると、非常に対照的である。

土中に鉛直に立てて埋めた管 (土中に埋っている長さは 1 m) にかかる凍着凍上力も、地面

においた円板にかかる凍上力と全く平行して変化した。昭和38~39年の冬のデータだけを第3図下段のグラフに点線で表わした。大きい値の方がコンクリート管で、小さい値の方がコンクリート管の側面に、すべりよいようにエポキシ樹脂を塗ったものである。ともに、直径94 mm、肉厚23 mmで、重量は14.5 kgである。その他のデータについては、グラフにはのせていないが、最大値だけを取り出して次の表に示す。(鉄管の直径72 mm、肉厚3.5 mm、重量6.6 kg、又ビニール管の直径75 mm、肉厚5 mm、重量1.5 kgである)。

	材 質	最大力 kg	単位面積 当りの力 kg/cm ²	月 日	凍結深度 cm	凍上量 cm
第1年度	鉄	2,450	2.1	37.2.25	52	
	ビニール	1,750	1.65	37.1.27	45	
	コンクリート	1,370	1.16	37.1.17	40	
	塗料ぬりコンクリート	800	0.52	37.2.26	52	
第2年度	ビニール	910	0.4	38.2.12	60	6.7
第3年度	コンクリート	2,560	1.3	39.2.27	68	10.6
	塗料ぬりコンクリート	1,280	0.64	39.2.27	68	10.6
第4年度	塗料ぬりコンクリート	890	0.57	40.2.6	53	6.0

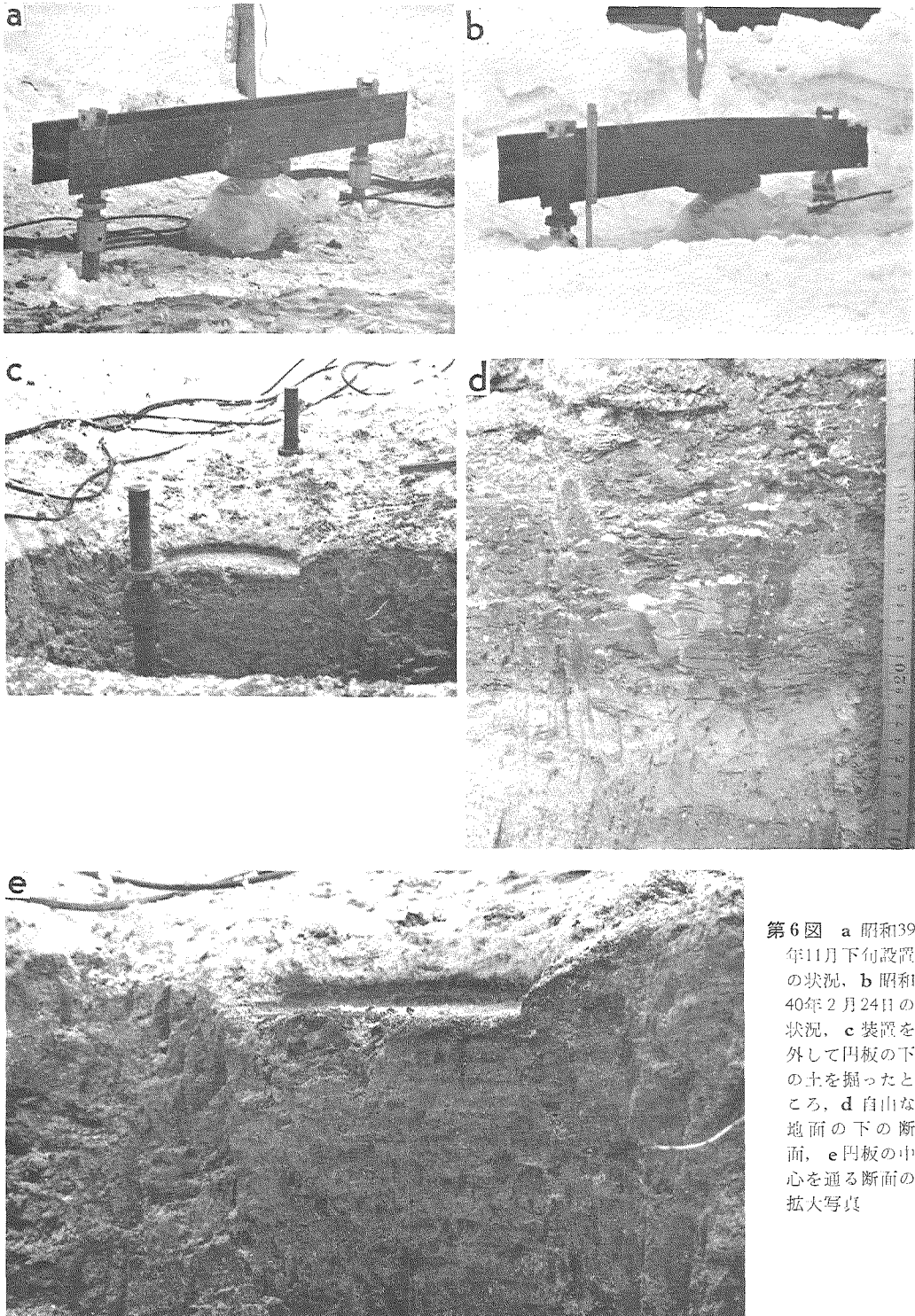
2. 断面観測

2月下旬におさえていた直径30 cmの円板の装置を外し、その下の土を掘って断面を切り出した。その状況の一例を第6図の写真に示す。**a**は、冬の始め(昭和39年11月下旬)に装置を設置したところである。円板の上面と、周囲の地面とが同じ高さになるようにしてある。**b**は、昭和40年2月24日の状態で、円板のまわりの地面が隆起し、おさえていたところがひどく凹んでいる。このときかかっていた力は、第4図下段の破線のグラフから6,300 kgである。チャンネルが曲って、中央で1 cmほども上っていた。**c**は、装置を外して下の土を掘り、断面を切り出したところで、円板のあったところがすり鉢の底のようにになっている。このとき、おさえ円板から十分離れた自由な地面では、7 cm凍上していた。**d**は、その地面の下の鉛直断面で、又**e**は、円板を外した跡の中心を通して作った鉛直断面の拡大写真である。

自由な地面の下の断面をみると、厚さ1~5 mm、長さ1~5 cmの水平に細長い氷の層が沢山みられる。この氷の層は、地面から下30 cmほどの間に多く、それより下では次第に少なくなる。凍結線近くの凍った土の中にはほとんどみられない。これらの氷の層の厚さを総計すると、その地面の凍上量に等しいと云われる³⁾。一方、おさえた円板の下の土の断面をみると、氷の層がほとんどない。僅かにあるものも、水平ではなく斜めに走っている。

含水比を調べた結果、自由な地面の下で氷の層を多数含んでいる凍土が、38%、又、凍結線の下で凍っていない土が、27%であった。現場は、地下140 cmより下が砂であるため、地面から地下140 cmまでの粘土層のなかで、凍上のための水分移動が起る筈である。事実、深くの凍っていない土の方が乾いていた。

又、円板のすぐ下では、凍土の含水比が32%であった。この値は、上記の凍土と未凍土の



第6図 a 昭和39年11月下旬設置の状況, b 昭和40年2月24日の状況, c 装置を外して円板の下の土を掘ったところ, d 自由な地面の下の断面, e 円板の中心を通る断面の拡大写真

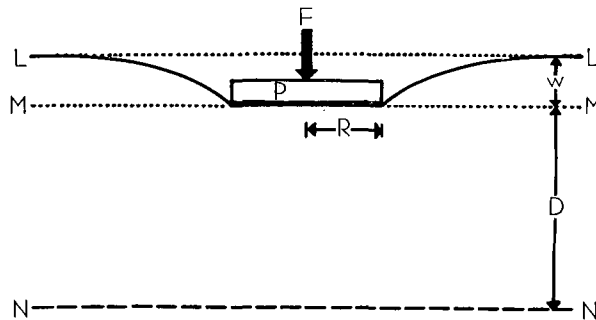
平均の値であるから、恐らく凍る前の値と同じであろう。従って、土中の水分が氷の層として析出しないで、そのまま凍ったいわゆるコンクリート状凍結であることが解る。

凍上を起すエネルギー源は、土の内部で土粒子と水とが接触していた界面が、土粒子と氷との界面におき変るための自由表面エネルギーの減少分である。このエネルギーで上方の荷重をおし上げ、又下方から水を吸上げる仕事をするわけである。地下深いほど荷重が大きいので、その荷重を上げて氷の層を晶出するためのエネルギーがより多く必要である。又、それだけ下方から水を吸上げる能力も減る。それで、地下深いほど、氷の層の数が少ないのである。特に円板でおさえた地面には大きな圧力が働くので、氷の層が現われないのであろう。

凍った土は非常に硬い。凍上現場で断面を切り出すことは容易でない。更に円板でおさえた地面はなお硬い。木下は、現場で簡単に凍った土の硬度を測れる方法を考案した⁹⁾。それによると、一般の氷の層を含む凍土で、 $50\sim 100\text{ kg/cm}^2$ 、おさえた円板のすぐ下の凍土で、 $100\sim 200\text{ kg/cm}^2$ であった。この値は凍らないときの土の硬度 4.5 kg/cm^2 に比べて非常に大きい値である。なお、この硬度の値は、衝撃で凍った土を圧縮破壊するときの平均圧縮力に相当するものである。

IV. 考 察

この観測を模式的に第7図に示す。MM面が冬の始め凍上が始まらないときの地面で、その面上に円板Pをおいたわけである。凍上が始まると、MM面はPのところを固定にしたままLL面まで上昇する。そのときの凍結線をNN面とする。円板をおかない自由な地面では凍結線NN面より下の土中の水が、NN面まで吸上げられて、そこで氷の層として析出する。そして、LL面が更に上昇するという経過を繰り返して行く。しかし、ここでは円板Pのところ固定であるため、NN面における応力分布も一様ではなく、氷の析出の状況も当然違うであろう。



第7図 凍上力測定の様式図

この問題は、Pのところを固定してNN面で上向きの変位 dw を与える問題であるが、いま、逆にNN面を固定してPの部分に下向きの変位 dw を与える問題として扱う。円板の直径 $2R$ に比べて、MM面とNN面との間の間隔 D の方が大きい場合には、半無限体を円板で押す問題と考えて、一応弾性釣合の状態を適用する。弾性論⁵⁾ から円板にかかる力 F は

$$F = \frac{2E}{1-\nu^2} R w \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 R は円板 P の半径、 w は凹みの深さである。又、鉛直下方に z をとると、法線が z 方向である面 (水平面) に働く垂直応力 σ_z は、

$$(\sigma_z)_{z=0} = \frac{F}{2\pi R \sqrt{R^2 - r^2}} \quad (2)$$

$$(\sigma_z)_{r=0} = \frac{F}{2\pi R^2} \frac{1 + 3\left(\frac{z}{R}\right)^2}{\left\{1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right\}^2} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 r は円板中心から水平にとった距離を示す。(2)、(3) 式の σ_z の値をグラフに示すと、第 8 図のようになる。

$(\sigma_z)_{r=0} = B$ の方は、 z が R に比べて大きくなると、すぐに減少する。従って、凍結深度 D が $3R$ 位より大きい場合には、(1)(2)(3) 式の半無限体の解を使っても大きな違いはない。

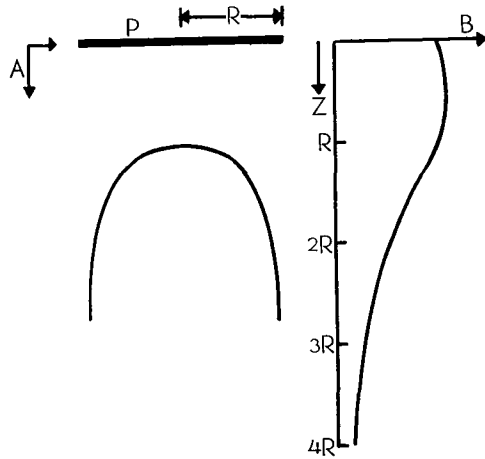
昭和 40 年の結果で、2 月に入って凍結深度が 50 cm を超えたとき、12 cm 円板と 30 cm 円板にかかる力の割合が、ほぼ半径の割合になっていた。このことは (1) 式の力 F が半径 R に比例することに相当する。従って、半無限体の近似で差支えないのであろう。

ここで、 σ_z だけを取り出して議論したが、他の応力成分についても同じことが云える。勿論主軸の方向は鉛直方向からはずれている。

凍結深度 D が円板直径 $2R$ よりも小さいような場合には、半無限体として近似できない。円板 P に近い NN 面が固定という境界条件であるから、NN 面での応力は、さきほどの半無限体のときに現われる応力に比べて、かなり大きいことが予想される。従って、力 F も (1) 式で表されるよりは大きくなることが考えられる。事実、直径 12 cm の小円板で 1 月上旬に既に、2 月に現われるよりも大きな力が現われたが、それは上のことに対応するのであろう。

しかし、一方、これら凍上力の出限する根本の原因は、凍結面 NN 面で氷が析出することに他ならない。大きな応力が凍結面に働けば、それに抗して氷を析出することは出来ない。断面観測によると、おさえた円板の下には氷の層がみられない。応力が大きい円板の下の土では、単に土中の水がそのまま凍るだけで、凍上の現象が起らない。直径 30 cm の大円板も、直径 12 cm の小円板も、12 月、1 月には、ほぼ同じ位の力しか現われなかった。その理由は、まだよく解らないが、或いは上のことが関係しているのかも知れない。

氷が析出するときに現われる力、いわゆる結晶力が本当の意味の凍上力である。ここで測っている凍上力も、真の凍上力が原因して現われるものには違いないが、いわば実用的凍上力という意味のものである。自由な地面では、もち上げるべきその上の土の荷重だけが、その力



第 8 図 半無限体内部の応力分布

$$A = (\sigma_z)_{z=0} = \frac{F}{2\pi R \sqrt{R^2 - r^2}}$$

$$B = (\sigma_z)_{r=0} = \frac{F}{2\pi R^2} \frac{1 + 3\left(\frac{z}{R}\right)^2}{\left\{1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right\}^2}$$

に相当するわけで、凍結面に働く圧縮力は高々僅か 100 gr/cm^2 程度のものにすぎない。円板でおさえた場合でも、凍結深度が深くなると、凍結面に働く応力は急に小さくなり、自由な地面の場合に近づく。したがって、凍結深度が深いとき、おさえた円板のすぐ下の土に数十 kg/cm^2 という大きな圧縮力が働いても、それは単に凍土をおさえるという機械的問題にすぎないようである。

凍った土を機械的に押す実験を低温室でおこなって、この凍上力測定の問題に対応させてみた。論文 I にのべたように、凍った土の上に円板をおき、上からその円板を押す実験を行った。実験で得られる押す距離と力との関係が、現場測定で得られる自由地面の凍上量 (第 7 図の w) と凍上力 (F) との関係に短時日の間ではほぼ等しかった。

一方、凍った土は粘弾性的様相を示すもので、ある程度押したところで止め、その状態を保持するにしても、応力の方は直ちに緩和する。すなわち、凍上量 w のふえかたが 0 になると、凍上力 F が減る。III 節の 1. で述べたように、実際の凍上量と凍上力の関係にもこのことがはっきり認められる。論文 I でも述べたが、凍上力の減少が、凍上の停滞による凍土内部の応力の緩和によるものであることは間違いないであろう。

この研究に際し、北見工業短期大学と北見市役所には色々とお便宜をはかっていただいた。又、低温科学研究所の若浜五郎、中村勉、堀口薫、北見工業短期大学の北川啓の諸氏には、観測に御協力いただいた。ここに厚く感謝の意を表わす次第である。

文 献

- 1) Beskow, G. 1935 Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Rail-Roads. *Swedish Geological Society, Ser. C, No. 375*, 1-145.
- 2) 木下誠一・大野武敏 1963 凍上力 I. 主に現場調査について. 低温科学, 物理篇, **21**, 117-139.
- 3) 中谷宇吉郎・孫野長治 1944 凍上の実験的研究. 低温科学, **1**, 37-52.
- 4) 木下誠一 1966 凍土の硬度測定. 低温科学, 物理篇, **24**, 315-317.
- 5) Timoshenko, S. and Goodier, J. N. 1951 Theory of Elasticity. 2nd edition, McGraw-Hill Book Co., New York, 506 pp.

Summary

The height of heave of frozen ground is reduced when a heavy load is applied to the ground. It has been an important problem to know how much load is necessary in order to control the frost heaving. A direct measurement of the force caused by frost heaving has been made since the winter 1961-1962 at the campus of Kitami Technical College, Hokkaido.

A rigid iron disc, 12 cm in diameter, was placed as a receiver of the force caused by the frost heaving on the ground surface, and it was fixed to a rigid beam. The rigid beam is supported horizontally by two iron rods fixed to a large concrete foundation, 2 m deep under the ground. A load cell was mounted on the disc in order to record the force electrically. When the ground freezes, the surface of the ground around the

disc begins to heave gradually, leaving the disc at the original level (Photos. **b** and **c** of Fig. 6). Since the force created by the frost heaving is applied to the load cell mounted on the disc, it can be easily measured and recorded throughout the winter season.

Observational data obtained from 1962 to 1965 are reported in this paper. The maximum value of the force produced by the frost heaving was 5300 kg, and the average pressure applied to the disc was 47 kg/cm² (Feb. 27, 1964). A cyclic change of the heaving force was frequently observed (Figs. 2, 3 and 4) though the heaving of the ground surface and the penetration of the freezing front into soil were continuous during the winter (Fig. 5). A record of the results obtained by the load cell showed that the heaving force decreased with time when the heave ceased increasing. This fact means that the decrease of the heaving force resulted from the stress relaxation in the frozen soil beneath the fixed disc.

The vertical section of the frozen soil was made along the central axis of the fixed disc at the end of winter (Photo. **c** of Fig. 6). No ice layer was observed beneath the disc (Photo. **e** of Fig. 6), while many thin ice layers were found under the heaved ground surface (Photo. **d** of Fig. 6).

Another large disc, 30 cm in diameter, was set in the winter 1964-1965. The force applied to this disc by the frost heaving reached 8700 kg in the middle of February, while the force on the disc of 12 cm diameter was 3500 kg. The force created by the frost action was proportional to the diameter of the disc. Therefore, it is conceivable that the stress distribution in the frozen soil under the disc is similar to that extended in a semi-infinite elastic solid where its boundary is compressed by a rigid disc.