Kenji KOJIMI 1954 An Experimental Study on Regelation. *Low Temperature Science, Ser. A, 13.* (With English résumé p. 36)

# 復　氷　に　つ　い　て*

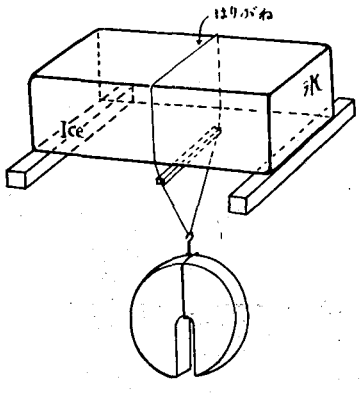
小　島　賢　治

(低溫科學研究所　應用物理學部門)

(昭和28年12月受理)

## I. まえがき

0°C より高い温度の下で融けつつある氷に第1図のように金属の針金をかけ，これに錘を吊しておくと，針金は次第に氷を切るようにして氷の中に入り込み，しまいには完全に氷を通り抜けて下に落ちる。しかし，針金が通つた跡は再び氷でふさがるので，針金が完全に通り抜けたのちも氷は元のままつながつている。この現象は昔からよく知られた復氷の一種で，はじめ J. T. Bottomley[1] により実験され，その原因の説明が報告された。その後，Turpin と Warrington[2] も同様の実験を報告し，H. A. Lorentz[3] もこれに定性的な説明を下した。



第 1 圖

又，鈴木清太郎[4] は熱伝導論による計算を用いて理論的に説明し，更にこれを実験で証明している。これらの説明によると，「針金が氷の中に入り込むのは，圧力による氷の融点降下により針金が下の氷を融かすためであつて，温度の高いまわりの空気から針金を伝つて供給される熱は必ずしも必要でない。又，このようにして針金が下の氷を融かすと，針金の下面の温度は 0°C より低くなり，針金の内部で上から下へ向う熱の流れが生ずる。針金の下の氷がとけて出来た水は針金の上部へ廻つて溜るが，針金の内部の熱の流れによつて，この水から針金の下の氷の融解熱に相当する熱が針金に奪われるのでこの水は再び凍る。」このような復氷の現象は古くから注意されてきたものであるが，最近，実用上の問題に関連して氷の重要な現象の一つとして再び注意を引くようになつた。そして，上に述べたような古典的説明とは違つた立場からも説明が試みられている[5]。筆者は一応従来行われてきた説明を正しいものと見做して，それを確めておくことも必要と考え，次に述べるような実験を行つた。

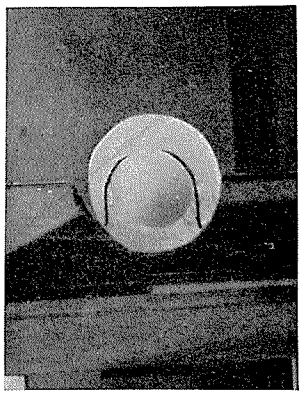
* 北海道大學低溫科學研究所業績　第277號

3 cm 角の木で組んだ枠に直径約 8 cm の円柱形の氷を横にしてかけ渡し，これに針金をかけて 5 kg の錘を吊した。金属の針金ばかりでなく後の項で述べるような非金属の紐或はこれらの組合せを用いて復氷の原因を確める実験を，+18～+23°C の常温の実験室と，0°C±2°C の低温実験室とで行つた。

## II. 常温での実験

1. 金属の針金（直径 0.6 mm のエナメル線）による実験

先ずはじめに，エナメルで被覆した直径 0.6 mm の銅線を用いて実験した。針金をかけると同時にこれに錘を吊し，それから 40 分経た後に，氷の柱の軸（水平）方向から氷の中の針金の位置を写真に撮したのが（写真 1）である。此の場合は針金が氷をとかしながら通過したあとはすぐに完全に氷で埋まる。



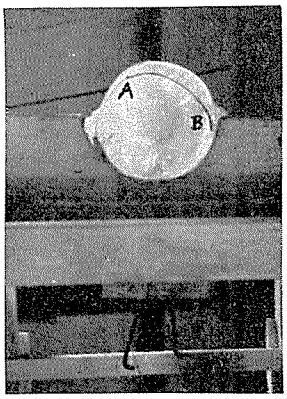
寫眞 1 氷柱の軸方向から見た銅線の位置（荷重後40分）

2. 麻糸（直径約 1 mm）による実験

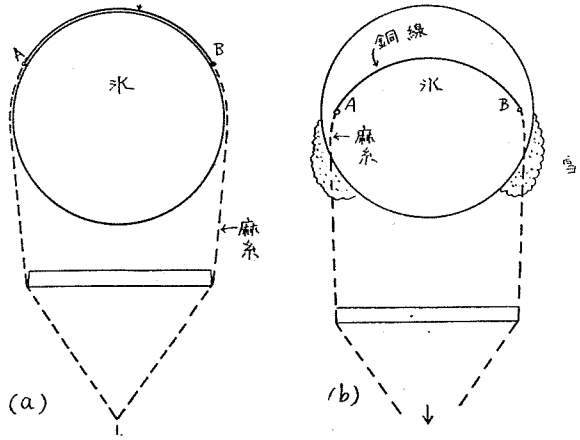
糸が氷をとかして中に入り込む速さは，同じ荷重に対して銅の針金を用いた場合の約 1/10 で，非常におそい。そして糸が氷の中にくい込んだ跡の溝はやはり氷で埋まるが，完全に埋まるには時間がかかる。（はじめは糸の直径の 1/3 ほどの幅の薄い隙間を残している。）

3. 氷の内部だけ金属の針金で，残りの部分に麻糸を用いた場合

§2 で用いた麻糸の中央部 7 cm ほどの長さを，はじめに述べた銅の針金（直径 0.6 mm）に替え第 2 図(a)のように，この銅線の部分を氷の上面にかけて荷重した。（写真 2）は荷重後 40 分経てからの針金の位置を示すもので，第 2 図(b)はこれをわかり易く画いたものである。荷重後しばらくすると，銅線はすつかり氷の中に埋まり，外気に露出しているのは麻糸だけにな




寫眞 2 荷重後40分經た時の銅線（AB間だけ）の位置

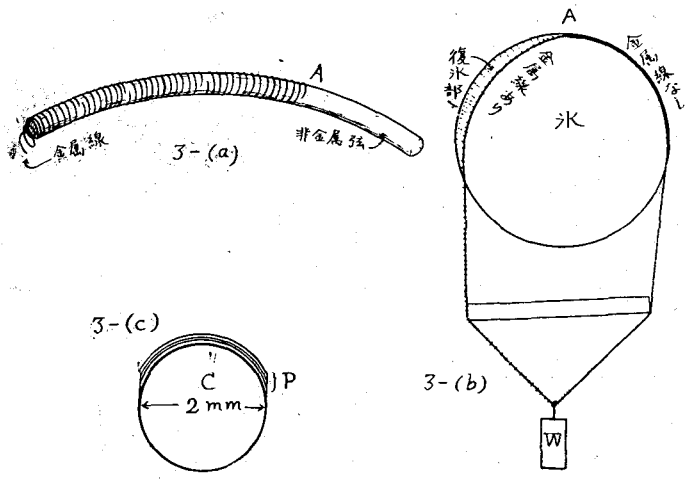



第 2 圖

る。氷から糸が出る部分は第2図(b)のように雪で包んだから，銅の針金の両端に外気から供給される熱は麻糸を通して伝わるだけである。その熱の量は前項の場合と同じ筈で，全部銅の針金を用いた場合にくらべれば著しく小さい。それにも係らず針金が氷を解かして沈んで行く速さは麻糸だけの場合より著しく大きく，全部銅線の場合に近い速さである。この実験は，銅の針金が氷をとかす原因が外気から針金を通して供給される熱による融解でないことを示す一例である。

4. 針金の長さの方向の熱の流れは少なく，上下の方向の熱の流れをよくした場合

バイオリンの弦のうち最低音に使うG線で，非金属（羊腸）の線のまわりに金属線をコイル状に堅くまきつけてあるものを§3で述べた銅線と同じようにして用いる実験をした。このようなG線では，糸の長さの方向の熱伝導は悪いが，糸の長さに直角な面内で糸の周辺に沿う方向には熱伝導がよい。この特徴を一層増す為に，実験に用いる弦の中央から一方の端までは金属線を少しゆるめて一巻きずつの間隔を離し，しかも，弦の長さにして約1 cmおきに，捲いてある金属線を切断した。そして，中央部から他方の端までは金属線をとり去り非金属部分を露出させた。第3図(a)は上に述べたような弦の一部分を拡大して図示したものである。Aは金属線を捲きつけてある部分とない部分とのさかい目で，Aが氷の頂上部に位置するようにして氷にかけまわし，下に錘を吊した。G線の芯になつている非金属弦は直径0.7 mm，金属線の直径は0.15 mmである。荷重してから15分ほど経つと，金属線を取去つた部分は未だ氷の表面にあるが，金属線を捲きつけてある部分は氷の中に完全に埋まり，弦が通つた跡は再び復氷によつて氷でつまつている。第3図(b)はこのときの弦の位置を図示したものである。




第 3 圖

(a) 實驗に用いたバイオリンのG線の一部を擴大した圖
(b) バイオリンG線による復氷
(c) 上面に和紙の層(P)をはりつけた銅線の斷面

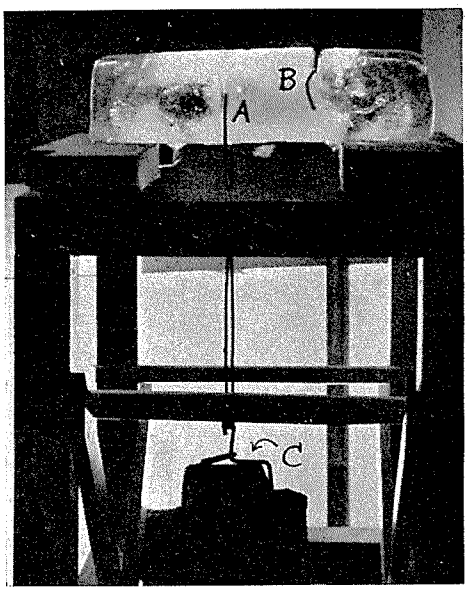
この場合も，非金属部分を通じてまわりの空気から伝えられる熱量はAの左も右も同じであつて非常に少い。金属線は細い上にコイル状にまきつけてあり，しかも所々切断されているのであるから，氷の内部に入つた部分に対して，まわりの空気からの熱伝導は金属線を通してはほとんど行われないとみられる。しかし，弦の長さに直角の方向の熱伝導は，金属線がまきつけてある部分の方が無い部分より余程大きく行われるであろう。そして実験の結果は，金属線がまきつけてある部分だけに，全部銅線を用いた§1の場合と同じように，復氷の現象がみられるのである。従つて§1の場合でも，この現象が起るためには，針金を通して外気から伝えられる熱は必要でなく，針金の長さに直角の方向の熱伝導が復氷の原因になつていたと考えなければならない。

以上のことから考えて，前とは逆に，針金の長さの方向の熱伝導率は大きく，長さに直角な方向の熱伝導率は小さい針金を使えば復氷の現象は起り難い筈である。しかし，そのような細い針金を作ることはむつかしいので，便宜上次のような方法でこの点を確めた。

5. 上下の方向の熱の流れだけを小さくした場合

直径2.0 mmの太い裸銅線の一方の側に第3図(c)のように日本紙を3枚ほど重ねてはりつけ，その上にエナメルを塗つて防水する。紙の層が針金から出張らないように，あらかじめかみそりの刃で針金の太さと同じ幅に削つておき，針金の下半分はよく磨いて銅を露出させる。紙の層を上にして氷にかけ渡し，針金に錘を吊すと，針金は氷を融かしながら次第に氷の中に沈んで行き，とけた水は針金の上にまわる。しかしこの水は凍らず，針金の通つたあとは隙間があいたままである。つまり銅の針金の上面に紙をはつて，上の水から熱が針金に奪われ難くすると，針金は氷をとかすけれども復氷は起らない。

ただ，この場合に用いた針金は非常に太いものであるから，外気から針金の長さの方向に沿つて氷の内部にある部分に伝わる熱が多く，紙で断熱しなくても復氷が起らないかもしれない。それで，紙をはらない裸のままの同じ針金を用いて実験した。




寫眞 3 直徑2 mmの裸銅線による復氷
A: 錘Cを吊してある針金
B: 錘を吊さずに載せた針金（復氷していない）

6. 直径2.0 mmの裸銅線による実験

断面9×9 cmの長方形の氷を（写真3）のように木の枠で組んだ台の上に横たえ，直径2.0 mmの裸銅線をかけて5 kgの錘を吊す。一方これと同時に同じ針金を錘をかけずに同じ氷の他の位置に載せる。（写真3）にAと印したの

は錘を吊した針金，Bと印したのは錘を吊さずに氷に載せた針金で，この写真は針金をかけてから1時間後に撮したものである。錘は同じ写真にCと記号をつけて示した。この写真からもわかるように，ここに用いたような太い銅の針金では，錘を吊さなくても針金Bは氷をとかしながら氷の中に沈んで行く。しかしこの針金Bの上部には復氷は起らず，隙間があいたままである。これはまわりの空気から針金を通つて伝導された熱で針金が氷をとかしたためであることはいうまでもない。ところが，錘を吊してある方の針金Aでは，氷の中に針金が沈む速さもBの2倍であり。しかも，針金の上部は復氷によつて氷でつまつている。前項§5の実験では，上に述べたのと同じ針金に同じ錘を吊し，ただ針金の上面に紙をはりつけたことだけがこの実験での針金Aと違う。それにも係らず前者では復氷が起らず，後者では復氷が起つたということは，針金の上面に接触する水から針金に，この水が凍る際の凝固熱が効果的に奪われることが復氷にとつて必要であることを示すものである。又，上の実験から，復氷が起るためには針金による氷の融解が，針金が氷に及ぼす圧力による氷の融点降下に起因するものでなければならないことがわかる。

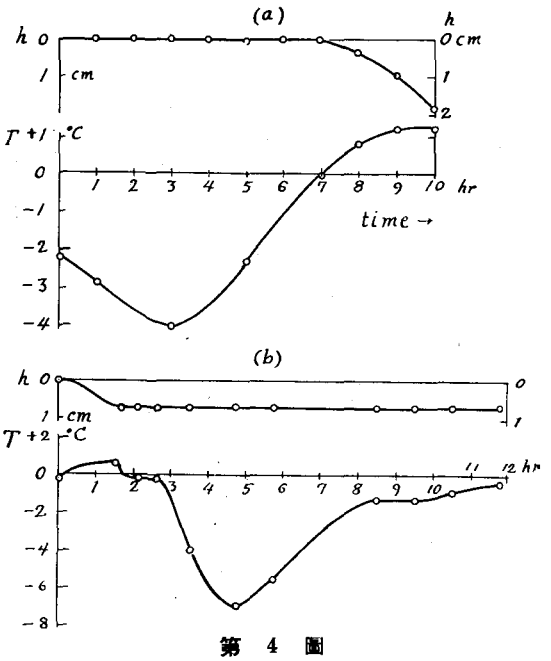
## III. 低温（0°C±2°C）での実験

錘を吊した針金が氷の中に入り込むのは，上に述べたように，圧力による氷の融解と復氷とによるのであるが，なおその他にも，針金が機械的に氷を塑性変形させてその中に入り込むという現象も一応考えられる。若し，このような機械的変形を氷が行うものとすれば，氷の温度が0°C以下であつても針金は氷の中に徐々に沈む筈で，その速度は温度の低下とともに小さくなるであろう。そして又，0°Cの氷についてだけ不連続的に特別に大きい値を示すことはないと考えられる。一方，圧力による氷の融点降下を考えると，1気圧の圧力増加に対する融点降下は0.007°Cである。直径0.6 mmの針金を直径8 cmの氷の柱にかけて5 kgの錘を吊した場合，針金が氷に与える圧力の強さは平均7気圧/cm²より小さく，そのための氷の融点降下は0.05°Cより小さい。従つて氷の温度が−0.1°Cより低いようなときには，針金の圧力による氷の融解は全く起らない筈である。

そこで，室温が1日の週期で−7°C～+2°Cに変化する低温実験室で，II.§1で述べたのと同じ寸法の氷と針金とにより同様の実験を行つた。そして特に室温が−2°Cから徐々に高くなり0°Cを越えて+2°Cくらいになるまでの間の針金の沈下を水平顕微鏡で測つた。スケール入り接眼レンズと倍率の低い対物レンズとにより，針金の沈下を0.05 mmまでは読むことが出来た。4回の実験の結果，氷のすぐそばの気温が0°Cより低いときには，この測定精度の範囲内で針金の沈下は全く認められず，気温が0°Cを越えると間もなく急に針金は沈下を始め，同時に復氷が認められた。気温は1°C毎に目盛つてある細いアルコール寒暖計で測つた。

第4図(a)の曲線Tは室温の時間的変化で，曲線hは円柱形の氷にかけた針金の頂上部の位置の変化である。第4図(b)は2回目の実験の際のTとhとの変化であるが，このときの気温は

始めの90分間だけ0°Cより高く（最高+0.6°C），それ以後の10時間は−6.9°Cが最低で最後に−0.5°Cになつた。この間，針金の沈下は最初の90分間に0.7 cm認められただけで，温度が0°C以下に下つてからの10時間は全く沈下が見られなかつた。(a)の場合は，はじめの7時間は気温が0°C以下で針金は全然沈まず，気温が0°Cを越えて+1.2°Cに達するまでの3時間に針金の頂上部は氷の中に1.8cm沈んだ。第3回目の実験でも同様の結果が得られ，第4回目の実験では7日間室温の最高が毎日0°Cより僅かに低かつたため，針金の位置の変化はこの間全然認められなかつた。




**第 4 圖**

T： 氷のそばの氣温の時間的變化
h： 圓柱形の氷にかけて錘(5 kg)を吊した針金（直徑0.6 mm）の頂上部の沈下量

以上のような観察の結果から，錘を吊した針金が温度0°Cで融けつつある氷の中にくいこんで行く現象は，針金が氷に及ぼす圧力による氷の融点降下のために針金の下の氷が融けるためであつて，圧力による氷の塑性変形はこれにくらべれば殆んど無視出来る量とみなして差支えないと考えられる。

ただこの場合，圧力によつて融点が下るとしても，氷が融けるためにはそれに必要な融解熱が供給されなければならない。この融解熱はII§1～§6で述べた実験から明らかなように針金の上の水が凍る際に放出する凝固熱が針金を通して下に伝わる事によつて与えられる。従つて針金の上下の間の熱の交換が円滑に行われないような場合には，針金が下の氷を解かす速さが小さくなり，又，針金の上の部分も復氷し難くなるわけである。

最後に，いろいろと有益な助言を賜わつた吉田教授に感謝する。費用は文部省科学研究費によつた。

## 文　献

1) J. T. Bottomley 1872 Nature, **5**, 185.
2) G. S. Turpin and A. W. Warrington 1884 Phil. Mag., (5) **18**, 120.
3) H. A. Lorentz 1906 Lehrbuch der Physik. p. 438.
4) S. Suzuki 1912 On a well-known Experiment in Regelation. 東北大理科報告, **1**, 219.
5) W. A. Weyl 1951 Surface Structure of Water and Some of Its Physical and Chemical Manifestations. J. Colloid Sci., **6**, 389.

**Résumé**

If a heavy weight is hung on a metal wire which is laid over a horizontal pillar of ice of the temperature 0°C as shown in Fig. 1, the wire intrudes gradually into the pillar while the trace of the wire is immediately filled up with fresh ice. This is the well-known phenomenon of regelation. The cause of this curious phenomenon is explainded as follows. The ice just underneath the wire is melted by the pressure exerted by the wire and the water of melted ice is squeezed up to above the wire. Since the temperature on the lower side of the wire is below 0°C on account of the depression of melting point due to pressure, heat must flow downward through the interior of the wire. This heat is supplied by solidification of the water squeezed up to above the wire. Therefore it is inevitable for the regelation to take place that the wire should have sufficiently large heat conductivity. The above explanation has been proved almost right experimentally by two or three authers. The present auther presents here one more experimental verification for it.

An ice pillar (diameter: 8 cm) was laid horizontally on supports and the following six wires of different kinds loaded with 5 kg weights were hung over it:

(1) copper wire of 0.6 mm diameter,
(2) linen cord,
(3) combination of (1) and (2),
(4) G-string of violin (gut string of 0.7 mm thickness covered with coiled silver wire of 0.15 mm diameter),
(5) copper wire of 2.0 mm diameter,
(6) the same wire as (5), one side of which was covered with paper a few sheets thick as shown in Fig. 3-(C).

The experiments were carried out in duplicate in an atmosphere of ordinary room temperature, 18°C~23°C, and in a cold chamber of the temperature 0°C~±2°C.

## I. Experiment at room temperature

The copper wire (1) began to cut into the ice at a considerable rate as soon as it was laid over the ice. The nonmetal cord (2) did the same but at a rate of cutting as small as about 1/10 of that in the case of copper wire. Wire (3) was made by fastening linen cords on both ends of a copper wire of 10 cm length and it was laid over the ice pillar in such a way that the copper wire part was on its top. The same rate of cutting as in the case of wire (1) was observed. The copper part of the wire was enclosed in the ice for its whole length soon after it was laid in position.

Heat conducted from the surrounding air to the copper wire, therefore, must be very small in this case compared to the case of wire (1). The fact that the cutting rate was the same in both cases in spite of this difference in heat conduction indicates that the heat given from the surrounding air takes no part in the regelation phenomenon. Wire (4)—G-string of violin—is anisotropic in its heat conductive character, being a poor conductor in the direction of the string but a good one in the direction along the periphery of its cross section on account of the fine coiled silver wire. With this string, regelation proceeded in the same way as in the case of wire (1). Wire (6), which is a good conductor in the direction of its length but a poor one in the direction per-

pendicular to it, was found to be effective to cut the ice but the water squeezed up to a position over it did not turn to ice. Since this wire, however, had a considerable thickness, the melting of ice may be caused by heat cnducted along it from the air. But an experiment made using the same wire without paper cap showed that it left a gap filled with no ice when unloaded, but its trace was filled up with ice when loaded with the weight. The results of the above experimnts clearly show that the explanation of regelation phenomenon described above at the beginning is right and correct. Moreover, the results show that heat supplied from the surrounding air by way of conduction along the wire is entirely unnessary to aid the intrusion of the wire into the ice.

## II. Experiment at the the temperature near 0°C

Since the depression of melting point of ice by the pressure exerted by the wire must be very small, intrusion of the wire into ice should be stopped when the temperature of ice is lowered to even slightly below 0°C. But ice is a visco-elastic body and, if its flowing property plays a part in the intruson of wire into ice, the wire will cut the ice even at temperatures below 0°C. An enameled copper wire (diameter: 0.6 mm) loaded with the same weight as in the case of experiment I was hung over an ice pillar in a room whose temperature range was from +2°C to −2°C. The rate at which the wire sank into the ice was measured by an ocular microscope. During 10 hours while the air temperature was kept below 0°C, no change in the level of the wire was observed within an error of 0.05 mm. As soon as the temperature rose above 0°C, the wire began to cut into the ice at a rate of 0.6 cm/hr. Therefore it may be concluded that flow of ice, if any, is insignificant compared to the deformation caused by hhe melting of ice due to pressure in so far as is shown by the pressent experiment on regelation.