



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	復氷の実験的研究
Author(s)	外塚, 信; TOZUKA, Shin; 対馬, 勝年 他
Citation	低温科学. 物理篇, 38, 1-15
Issue Date	1980-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18386
Type	departmental bulletin paper
File Information	38_p1-15.pdf



復氷の実験的研究*

外塚 信

(北海道大学大学院 理学研究科)

対馬勝年・若浜五郎

(低温科学研究所)

(昭和54年10月受理)

I. はじめに

融けつつある氷の塊に重りを吊した針金をかけると、針金は氷の中をゆっくり降下し、ついには氷の下面から抜け落ちる。針金が氷塊中を通過したのだから、氷が二つに切断され、分離されるはずなのであるが、針金の通過面は癒着して、もとの氷に復してしまっている。これがよく知られた復氷の現象である。

1872年、Bottomley¹⁾が初めてこの実験を行なって以来、復氷の現象は多くの物理学者の興味を引き、とくに20世紀の初頭に数多くの実験的、理論的な研究がなされた。その後復氷の研究は、一時やや下火になったが、1957年 Weertman²⁾が氷河の底面すべりの理論に復氷を取り入れてからは、氷河流動における復氷の重要性が認識され、その研究が再び活発になった。

復氷現象は従来次のように説明されてきた。針金を介して氷に力が加わると、針金前面の水は圧力による融点降下が起り、周囲から熱を奪いつつ融解する(圧力融解)。融け水は針金の周囲に沿って後面へ流れ込むがそこで圧力が解放されて再び凍結する(復氷)。この際に発生した潜熱は針金や周囲の水を通過して前面へ輸送されて再び氷を融かすのに使われ、生じた融け水は針金後面に流れ込み、そこで再凍結して潜熱を放出する。このような過程が定常的に起るため、針金が氷を通過しても針金後面では連続的に復氷が起り、針金の通過面は癒着するのである。

Ornstein³⁾は、復氷の問題を初めて理論的に扱った。彼は針金が様な薄い水膜に包まれ、針金の周りの水-氷界面の温度はいたる所、その場所に応じた圧力融解温度にあると仮定した。熱は針金及び氷を通して針金前面の水-氷界面へ流れ、その熱で融けた水は針金の周りの水膜の中を輸送されるとして針金の進行速度(復氷速度と呼ぶ)を求めた。Meerburg⁴⁾はOrnsteinの理論を発展させ水膜の厚さを与える式を導いた。計算で得られた水膜の厚さは圧力に無関係で熱伝導率のよい針金ほど厚い。すなわち、直径が0.15~0.25 mmの針金の周りの水膜の厚さは0.3~0.6 μm で、これは実験結果を用いて計算で求めた値の1.4~7.4倍であった。小島⁵⁾は熱を伝えにくい麻糸を用いると復氷は起るものの水が凍結するのに時間がかかる事やバイオリンG線の上面に和紙をはって熱の流れを悪くすると復氷が起らなくなる事などを実験的に明

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2187号

らかにし、熱輸送が復氷と密接な関係にある事を示した。Nye⁶⁾はOrnsteinの理論を発展させて、復氷を起させる熱輸送が何を媒体として行われるかを針金の熱伝導率と太さによって分類した。その後 Drake and Shreve⁷⁾は熱伝導率の異なる銅線、クロメル線、ナイロン線を用い、広い圧力範囲で復氷実験を行った結果、圧力が1 bar付近で針金の速度が急激に変化する事を見つけた。また、復氷速度の実測値を熱伝導論から求めた値と比較したが、多くの場合、あまり良い一致が得られなかった。

そこで著者らは復氷における従来の圧力融解・再凍結の考えがどの程度成り立っているのかを調べる目的で以下の実験を行った。

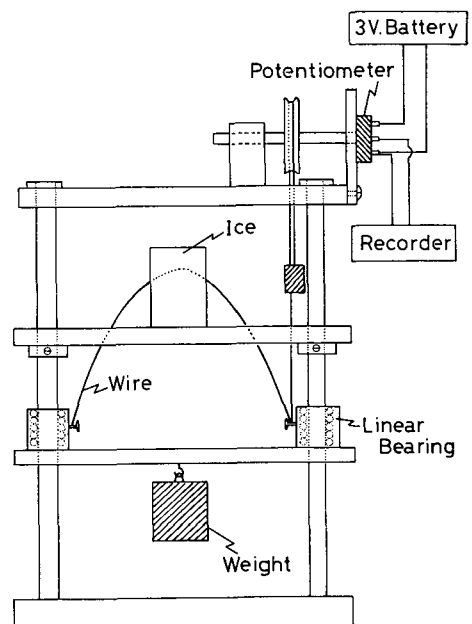
まず復氷速度が針金の熱伝導率、太さ及び加える圧力によってどう変化するのか調べ、復氷理論から期待される値と比較した。次に針金近傍の氷の温度を測定して氷から針金前面へ流れ込む熱量を推定した。また針金上面・下面の温度差はどの程度なのか圧力を変えて測定した。最後に針金の進行速度がなぜ遷移圧力のところで不連続的に変化するのかを知るために、氷に含まれる不純物の濃度が針金の速度に及ぼす影響を調べた。

II. 復氷速度の測定と結果

1. 測定方法

(a) 針金が氷の中を進行する速度(復氷速度)を測定するために第1図に示すような装置を用いた。氷試料にかけられた針金の両端は重りを吊り下げる台に固定される。重りを吊り下げ、針金を介して氷に荷重を加えた時、この吊り下げ台が鉛直下方になめらかに動くように台と支柱(スチール棒)の間にはリア・ベアリングを装填した。一方、この吊り下げ台にはたこ糸を取り付け、滑車を介してその一端にバランス用重り(約300 g)を吊り下げる。この滑車には回転軸を共有させてポテンシオ・メーターが取り付けられている。針金が氷の中を進むと、針金の動きは糸を介して上の滑車に伝えられ、ポテンシオ・メーターの回転に変えられる。ポテンシオ・メーター(3回転, 10 k Ω)の両端には乾電池で3 Vの一定電圧をかけてあるので、回転に伴う抵抗変化は電圧の変化として記録計に示される。記録計の測定レンジを0.1 Vにした時、針金の動き0.1 mmは記録紙上で2 mmに拡大されるので、針金の細かい動きを測定できた。

(b) 復氷速度の圧力依存性を調べる目的で Drake らの実験方法にならって、半円筒型の氷試料を作成し、その外周上に針金を渡し両端に



第1図 復氷速度(氷の中の針金の進行速度)の測定装置。針金の動きはポテンシオ・メーターの電圧変化として記録できる

同じ重さの重りを吊り下げ、針金間の距離 D をある時間間隔で読み取った⁷⁾。半円筒型氷にかけられた針金は常に半円に保たれたままで氷内部を進むので、復氷速度は次のようにして求められる。実験で得られた D^2 の値を時間 t に対して記入して得られる曲線を数本の線分で分割して近似し、それぞれの線分の傾き m を求める。ある圧力 P のときの針金の速度 V は、その m を使って

$$V = \frac{\pi m d}{8W} P$$

と書ける。ここで W は全荷重、 d は針金の直径、 P は Drake らのいう駆動応力 (driving stress) で $P = \frac{2W}{\pi d D}$ である。

実験に用いた氷試料は、主に市販の多結晶氷である。測定は、温度が $1.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ に制御された精密低温室で行った。氷試料は (a) では幅数 cm、(b) では直径約 20 cm の大きさに成形し 10 時間以上 $+1^\circ\text{C}$ の室内に放置した後、試料が長時間の測定中に昇華しないようにビニールで覆いをして使用した。

実験では、針金の熱伝導率、その太さ及び氷に加わる圧力と復氷速度との関係を調べた。実験に用いた針金は、熱伝導率の大きい方から銅線、アルミニウム線、ピアノ線、アルメル線、コンスタンタン線、クロメル線及び氷より 10 倍も熱伝導率が小さいナイロン線の計 7 種である。また針金の太さの影響を調べるため、銅線では直径 0.1~2 mm の 9 種、またナイロン線では 0.12~0.5 mm の 8 種類の線について実験を行った。

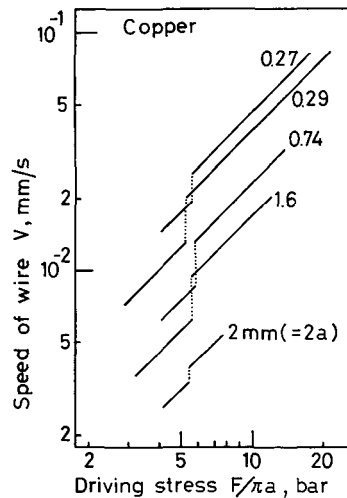
2. 測定結果

(a) の装置で針金の微細な動きを測定した結果、ポテンシオ・メーターの精度内では針金の水中を進む速度はほぼ同様である事がわかった。なお一回ごとの測定にみられた速度のばらつきは $\pm 10\%$ 以内であった。

以下に復氷速度を変化させる要因について得られた結果を項目別に示す。

(a) 圧力の影響

種々の太さの銅線とナイロン線を用いて復氷速度と圧力との関係を調べた (測定法 (b) 使用)。銅線について得られた実験結果を第 2 図に示す。一般に復氷速度は氷に加える圧力に比例して増加しているが、圧力が 5 bar 付近で復氷速度に不連続が見られた。Drake ら⁷⁾ も同様な現象を見出ししているが不連続のおこる遷移圧力が約 1 bar と報告している。また我々の実験で得られた復氷速度の不連続の度合は約 1.5 倍の飛躍に止まり、Drake らの見出したように 60 倍も飛躍するような大きな不連続は見られなかった。一方、ナイロン線を用いた場合、本実験の圧力範囲 (2~15 bar) では遷移点は見い出されなかった。なお、遷移点を除くすべての圧力範囲で復氷速度はほぼ圧力に比例し



第 2 図 いろいろな太さの銅線を使った速度 V と圧力 $F/\pi a$ との関係。 F は氷の単位長さ に働く力、 a は針金の半径である

ているので、以下、理論との比較の便宜上復氷速度を単位圧力当りの速度に換算して用いる。

(b) 針金の太さの影響

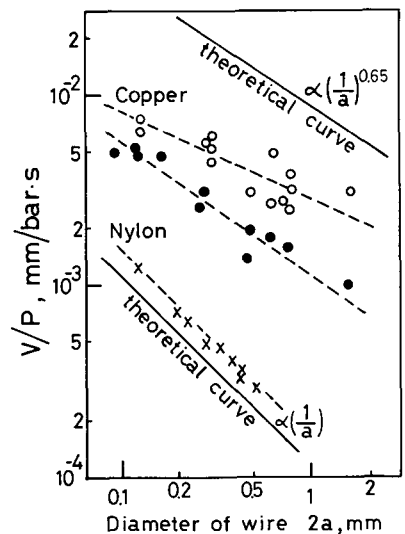
針金が氷に及ぼす圧力が同じでも、針金の太さがちがえば針金内の温度勾配が異なり、従って針金の後面から前面へ輸送される熱量に変化が生じ、そのため復氷速度も変る事が予想される。そこで種々の太さの銅線及びナイロン線について復氷速度を測定した。得られた結果を第3図に示す。ここで復氷速度は単位圧力当りの速度 (V/P) に換算してある。銅線の場合は遷移圧力が5 bar なので、それより高い6.5 bar とそれより低い3.5 bar について得られた結果をそれぞれ白丸と黒丸で区別した。図の右上方の実線は Nye の理論を用いて求めた銅線に対する理論値を示すが、実測値は理論値に比べてかなり小さい。Nye の理論によると、復氷速度は針金の太さの0.65 乗にほぼ反比例するはずであるが、実測値は遷移圧力以上 (6.5 bar の場合) で太さのほぼ0.3 乗に反比例し、太さが増すほど理論値に近づく傾向がみられた。また遷移圧力以下 (3.5 bar の場合) では理論値とほぼ同じ傾きをもつ曲線が得られたが、絶対値は実測値の方がはるかに小さかった。

一方、ナイロン線では圧力が8 bar の時の値を×印で示した。これに対応する理論曲線を図の左下方に実線で示した。実測値はこれと同じ傾き、つまり針金の太さに反比例して減少している。しかし、その絶対値は銅線の時とは逆に理論値よりも約40% 大きかった。また20~70 bar の大きな圧力についても実験を行ったが、これと同様な結果が得られた。

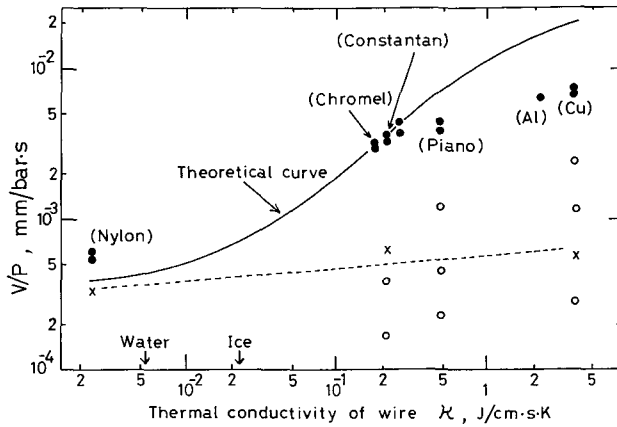
(c) 針金の熱伝導率の影響

圧力融解・再凍結説では、融け水の再凍結により生じた潜熱が針金や水の中を流れて再び針金前面の氷の圧力融解に使われると考えるので、使用する針金の熱伝導率に応じて復氷速度も変化するはずである。そこで直径は同じ (0.3 mm) だが、熱伝導率の異なる前述の7種類の針金を用いて復氷速度を求めた。得られた結果を第4図に示す。ここで、8 bar (黒丸) と2.4 bar (白丸) の時の復氷速度は前と同様に単位圧力当りの速度 (V/P) に換算してある。また図には Nye の理論から期待される値を実線の曲線で示した (2.4 bar の時も8 bar の時も理論上は一本の曲線で示される。また図中の×印と破線については後の考察で述べる)。

まず2.4 bar の時と8 bar の時の速度を比較する。圧力が遷移圧力以下の2.4 bar の場合は理論値よりもはるかに小さい値で、またばらつきが激しい。これに対して遷移圧力より大きい8 bar の場合、クロメル線程度の熱伝導率をもつ線ではほぼ理論値に一致しているが、それより大きい熱伝導率をもつピアノ線、銅線では、熱伝導率の大きいものほど実測値が理論値より



第3図 単位圧力当りの復氷速度 (V/P) と線の太さ $2a$ との関係。○、●印は銅線の場合で、それぞれ圧力6.5 bar, 3.5 bar の時の値。×印はナイロン線, 圧力8 bar の時の値



第4図 熱伝導率 κ の異なる種々の材質の線 (直径 0.3 mm) についての単位圧力当りの速度 (V/P)
 ●, ○印はそれぞれ圧力 8 bar, 2.4 bar の時の値。実曲線は Nye の理論からの予想値を示す。×印は水の塑性変形によって水中を進む時の針金の速度 (圧力 8 bar) で、その回帰曲線を破線で示した

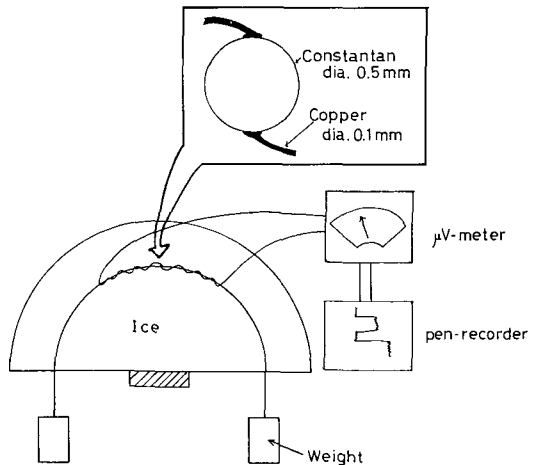
も小さくなっている。一方、逆に熱伝導率が非常に小さいナイロン線では実測値が理論値より 40% ほど大きい。このように針金の熱伝導率によって実測値と理論値との間に大きな食い違いのある事がわかった。

III. 針金上下面間の温度差及び針金近傍の氷温測定と結果

1. 針金の上面・下面間の温度差測定

針金が氷の中を進む時、針金を輸送される熱は、針金の熱伝導率だけでなく針金の上下面間の温度勾配によって決まる。そこで針金が氷の中を進む時の針金の上面と下面の温度差を圧力の関数として直接測定した。

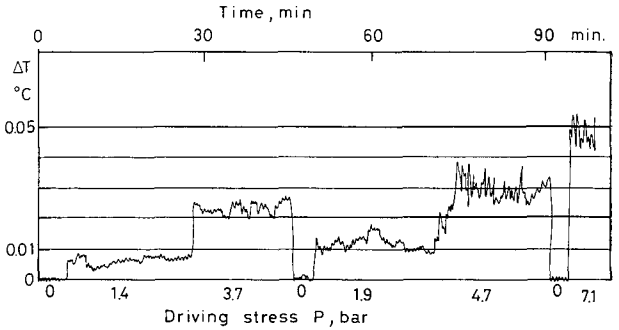
方法としては第5図に示すように 0.5 mm のコンスタンタン線の上面と下面に 0.1 mm の銅線をハンダ付けして、銅・コンスタンタン熱電対を作成した。この際、接点を正確に針金の上面と下面に付ける事と、ハンダ付けによる接点を小さくし表面をなめらかにする事に細心の注意を払った。コンスタンタン線の上下面にハンダ付けされた細いエナメル銅線は、それぞれ反対方向にコンスタンタン線の周囲に 10 cm ほどらせん状に巻き、氷から外に出た所で太い銅線に結び、 μV メーターを介して記録計に接続した。



第5図 コンスタンタン線の上下面間の温度差測定の模式図

このような細工を施したコンスタンタン線の両端に重りを吊して半径10 cmほどの半円筒型氷の中を進行させた。荷重効果を調べるため荷重を変えたり、時々重りを除いて零点検定も行った。コンスタンタン線は表面にエナメル被覆した銅線を巻かれているにもかかわらず氷の中を容易に進み、その後方で融け水の再凍結が観察された。

1.5~7 barの圧力範囲におけるコンスタンタン線上下面間の温度差を測定した結果の例を第6図に示す。圧力が増すほど大きな温度差が測定された。この結果は針金の後面の温度が前面より高いという圧力融解説の最も基本となる考えを事実として裏付けたものである。なお、一定圧力の時でも上下面の温度差はかなり大きく変動している。これは復氷の真実の姿を表わすものなのか、あるいは銅線を巻きつけたために生じた変動なのか、その原因は今のところわからない。しかし、この変動は数分という長い周期を持っているので測定ノイズとは考え難い。また圧力が大きくなるとともに波の振幅も大きくなる傾向がみられた。



第6図 直径0.5 mmのコンスタンタン線を用いた時の圧力 P と針金上下面間の温度差 ΔT との関係

し、この変動は数分という長い周期を持っているので測定ノイズとは考え難い。また圧力が大きくなるとともに波の振幅も大きくなる傾向がみられた。

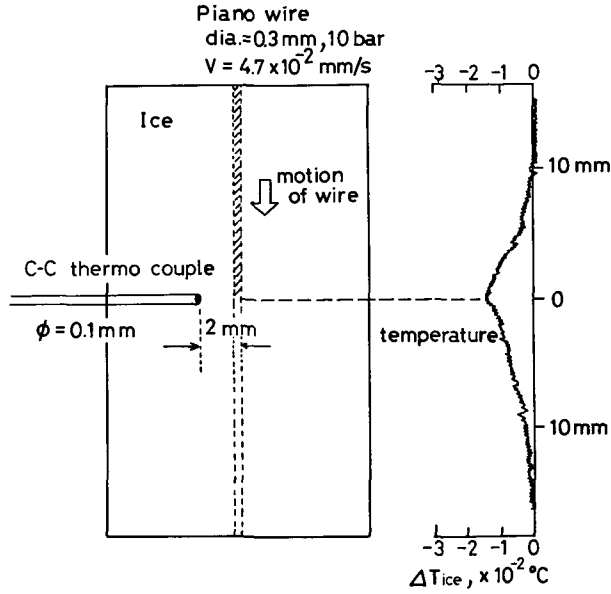
2. 針金近傍の水温測定

復氷を起しながら進む針金付近の氷は、復氷の影響でどのような温度分布になっているか、また氷を通して針金前面の水-氷界面へ流れ込む熱流量はどの程度なのかを見積るために針金近傍の水温測定を行った。

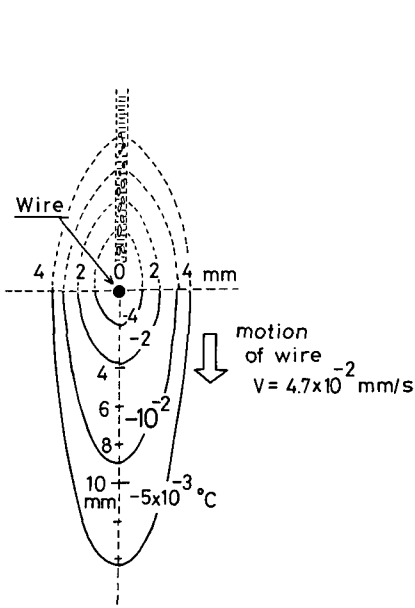
温度測定に用いた熱電対はあらかじめ、次のようにして氷の中に埋め込んだ。市販水に直径2 mm、深さ2 cmほどの穴を開け、0.1 mmの銅・コンスタンタン熱電対を挿入し、すき間に蒸留水を満たし凍らせる。その試料をビニール袋に包んで24時間以上湿り雪に浸し0°Cになった後に実験に用いた。

氷中に埋め込んだ熱電対の感温部の近傍を通過するような位置に1~2 kgの重りを吊り下げたピアノ線をかける。このようにして針金が感温部に近づき、そして遠ざかる時の温度変化を記録した。さらに針金と感温部の距離をいろいろに変えて氷の中を進む針金付近の温度を測定した。温度測定の精度は $\pm 0.005^\circ\text{C}$ であった。

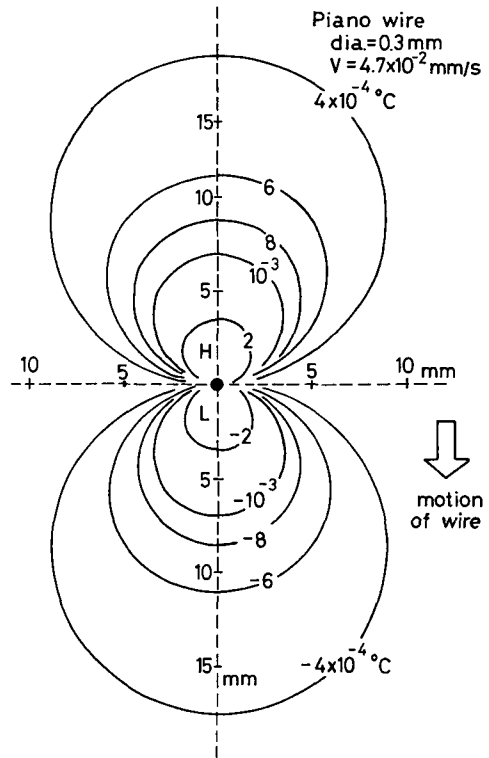
第7図に示すように氷中の感温部付近の温度は、針金が近づくとつれて、しだいに下がり始める。最も近づいた所で最大の温度降下(この場合は $-1.5 \times 10^{-2}^\circ\text{C}$)を示し、その後、針金が遠ざかるにつれて徐々に温度は元通りに回復していく。この測定から推定された針金周辺の氷の温度分布の概略を第8図に示す。この事から針金は常にこのような温度場を伴って氷の中を進行すると考えられる。破線で示した針金後方の氷温分布は必ずしも安定したものではなかった。厳密な事は言えないが、少なくとも我々が実験で得た温度場は従来 Nye などの復氷理論で仮定された2次元双極子型の温度場、すなわち一点荷重による氷の融点降下を表す第9図



第7図 針金(直径0.3 mmのピアノ線)近傍の氷温測定の一例(温度センサーと針金との最短距離が2 mmの場合)



第8図 推定された針金付近の氷温分布(直径0.3 mmのピアノ線, 圧力10 barの時)。針金後方の氷温分布は不安定なため破線で示す



第9図 Nyeの理論で仮定された針金付近の双極子型の氷温分布

の温度場とは、形も絶対値も全く異なるものであった。

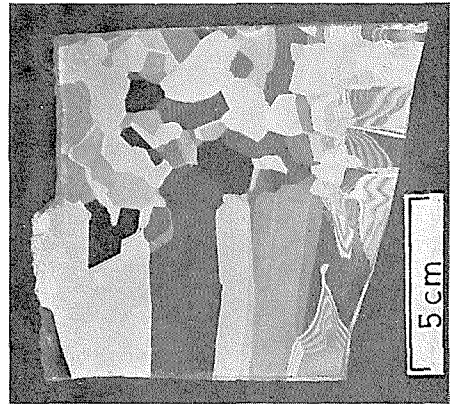
針金が氷の中を貫入する様子を顕微鏡で観察した結果、熱伝導の良い銅線などでは後面に未凍結水の閉じ込められた氷の層が形成され、この未凍結水は針金から離れるにつれて縮小する事がわかった。圧力が解放されても融解水の再凍結には時間的な遅れがあるという観察結果は、針金後方の氷が広い範囲にわたって融点以下の温度である事を示した氷温の測定結果を支持している。

IV. 不純物の影響

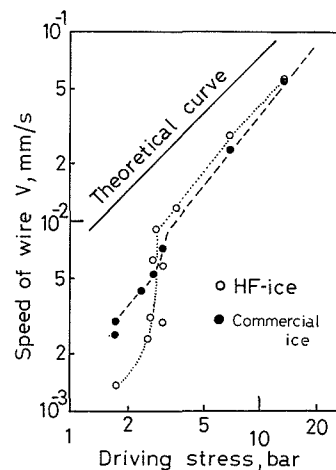
復氷速度が遷移圧力を境にして不連続的に変わる原因が氷に溶け込んだ不純物のためであるとすれば、不純物の濃度によって針金の速度は変化するはずである。Drake⁷⁾もその可能性を指摘している。その事を確かめるために意図的に不純物を含んだ氷を作り、その中の復氷速度を測定した。

不純物としては氷の結晶格子に入り込みやすいと考えられる弗化水素 (HF) を使用した。不純物氷は市販氷を種氷にして引き上げ法で作成した。実験に用いた HF 含有氷は蒸留水 1 l 当り 1 cc の HF (特級 48.5%) を溶かした約 300 ppm の母液の中で成長させた。第 10 図は実験に使用した上半分が市販氷、下半分が HF 含有氷 (共に厚さ約 5 cm) の薄片写真である。なお HF 濃度は水試料を約 50 cc 溶かし電気伝導率の測定から推定した。使用した HF 含有氷の電気伝導率は標準となる蒸留水より 2 桁大きい $6.7 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (25°C 換算) であった。試料中の HF のイオン濃度は約 4×10^{-4} モル/l と計算された。

第 11 図に直径 0.3 mm のピアノ線の場合の市販氷及び HF 含有氷中の復氷速度を圧力に対して示した。市販氷, HF 含有氷ともに 3 bar 付近で復氷速度が不連続的に変化し、さらにその圧力を境にして市販氷 (黒丸) と HF 含有氷 (白丸) 中の速度が逆転する事がわかる。3 bar より低い圧力では市販氷から HF 含有氷へ針金が進むと速度は半分以下に減少した。一方、圧力が 3 bar 以上になると市販氷に比べ HF 含有氷の方が 10% ほど針金の速度が大きくなった。しかし、その差は圧力が高くなるに従ってしだいに小さくなり、20 bar



第 10 図 引き上げ法で作成した水試料 (上半分が市販氷, 下半分が HF 含有氷) の薄片写真

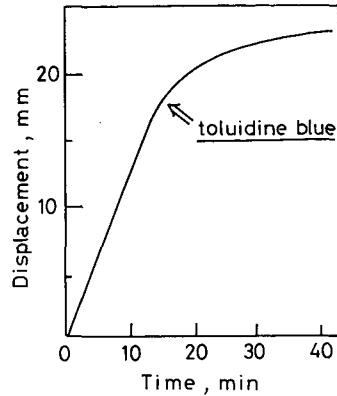


第 11 図 直径 0.3 mm のピアノ線を用いた市販氷 (黒丸) と HF 含有氷 (白丸) 中の速度 V と圧力 P との関係

以上では市販氷と HF 含有氷との間に差異がみられなくなった。

このように、遷移圧力以下の場合、市販氷より不純物濃度の高い HF 含有氷の方が復水速度に大幅な減少をもたらす事は、遷移点での速度不連続の原因が不純物の影響である事を強く示している。HF のほかに HCl を含んだ氷試料でも実験を行ったが、ほぼ同様な結果が得られた。

3 bar といった低い圧力の時ばかりでなく、10 bar 以上の高い圧力でも針面後面に不純物を添加すると復水速度が大幅に減少する事がわかった。一定速度で氷の中を進行中の直径 1.6 mm の鉄線の後面に、氷表面からその通過面に沿ってトルイジン・ブルーの溶液を流し込んだ。その液は結晶粒界や凍結面の隙間を通過して針金後面に蓄積し、第 12 図に示すように針金の動きは添加前に比べて急激に $1/4 \sim 1/5$ に小さくなった。これはトルイジン・ブルー溶液が蓄積したために氷点降下が針金後面で起こり、針金内の熱の流れが小さくなったためであろうと考えられる。



第 12 図 不純物添加によって生じる鉄線 (直径 1.6 mm) の復水速度の変化 (圧力 12 bar の場合)。矢印で示した所で氷表面から鉄線の通過面にトルイジン・ブルーの溶液を添加した

V. 考 察

本実験では第 4 図に示したように遷移点より低い 2.4 bar の時はもちろん、圧力の高い 8 bar の時でも実測値と従来の理論値との間に熱伝導率による大きな食い違いが見つかった。その原因について、融解水の再凍結の遅れ、氷の塑性変形の役割、不純物の影響の面から考察する。さらに、第 8 図の氷温測定の結果を用いて、従来不分明であった針金及びその周辺の熱流量を計算で求めた。

1. 復水速度の実測値と理論値との食い違いについて

従来の復水理論によると、復水速度は次のように与えられる (Ornstein³⁾, Nye⁶⁾, Drake and Shreve⁷⁾)。薄い一様な厚さ d の水膜に包まれた半径 a の針金が氷に単位長さ当たり F の力を及ぼしながら一定速度で進む時、その速度 V と水膜の厚さ d は

$$V = \frac{fF}{12\pi\eta} \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^3 = \frac{fa}{12\eta} \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^3 \cdot P \quad (a)$$

$$\left(\frac{d}{a}\right)^4 + \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^3 - \frac{12f\eta A}{La^2\rho_w} \left\{1 + \frac{\rho}{\rho_i}\right\} = 0 \quad (b)$$

で表される。ここで f は氷と水の密度比、 η は水の粘性係数、 L は氷の融解潜熱、 A は融点降下率、 P は圧力、及び ρ , ρ_i , ρ_w はそれぞれ針金、氷、水の熱抵抗率である。水膜の厚さを与える (b) 式は針金の熱伝導率 $\left(\frac{1}{\rho}\right)$ と太さ a を決めると解く事ができる。そこで、 $A = 7.42 \times 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{dyn}$, $\eta = 1.79 \times 10^{-2} \text{ dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$, $\rho_w = 1.8 \times 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}/\text{J}$, $\rho_i = 4.5 \times 10 \text{ cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}/\text{J}$,

$L=306 \text{ J/cm}^3$ の数値を与えて水膜の厚さ d 及び速度 V を計算した。このようにして求めた復氷速度を第3図、第4図、第11図に実線で示した。

(a) 熱伝導率の大きい針金の場合 (銅線やピアノ線について)

第4図にみられるように遷移点より高い圧力では、実測値は理論値よりも、ピアノ線で2倍、銅線で3倍程度も小さい。この原因は針金後面での融解水の再凍結に遅れがあるためと考えた。

針金近傍の水温測定の結果から、針金後面に流れ込んだ水は圧力が解放されても直ちに再凍結を起こすのではなく少なくとも一部は未凍結水として存在する可能性がある。事実、針金付近の顕微鏡観察でも氷に閉じ込められた未凍結水が針金から遠ざかるにつれて縮小していく様子を確認した。もし融解水の再凍結速度が一定であるならば、理論上の復氷速度が大きい時ほど実測値との食い違いが増大するであろう。つまり、大きい熱伝導率をもつ細い針金ほどその差は顕著になると考えられる。実際に銅線が細い場合ほど実測値と理論値との差が増大するという測定結果 (第3図) はこの事を裏付けている。

次に塑性変形がどの程度復氷速度に寄与するかについて考えてみよう。圧力が遷移点より高い場合、ピアノ線を用いた時の HF 含有氷の復氷速度は市販氷の場合に比べて約10%大きかった。HF をわずかに含むと氷は力学的に顕著な軟化を示す事は、 $-60 \sim -70^\circ\text{C}$ の低温下で以前から報告されており (Jones and Glen⁸⁾)、また最近は融点近くの -5°C でも同様な結果が見い出された (中村⁹⁾)。従って、この実験で用いた HF 含有氷も軟化して塑性的に変形しやすくなり、針金の進行速度が増加したと考える事ができる。また 20 bar 以上で HF 含有の影響が見られなくなるのは、大応力下で多量に発生した転位が塑性変形を抑制するためであると考えられる事ができる。

次項で述べるナイロン線についての考察から、8 bar の時の塑性変形による速度 (V/P) は $3 \times 10^{-4} \text{ mm/s} \cdot \text{bar}$ 程度 (直径 0.3 mm の針金の場合) と推定される。一方、ピアノ線の単位圧力当りの復氷速度 (V/P) は約 $4 \times 10^{-3} \text{ mm/s} \cdot \text{bar}$ なので塑性変形の復氷に占める割合は大きく見積っても約1割と考えられる。

(b) 熱伝導率の小さい場合 (ナイロン線)

遷移圧力より大きい 8 bar におけるナイロン線の復氷速度は理論値よりも約40%大きかった (第4図)。この違いは氷の塑性変形によって説明できる可能性がある。そこで復氷に占める氷の塑性変形の寄与を調べてみた。

表面を半円形に成形した氷試料を -10°C の低温室に長時間保存しておき、それを $+1^\circ\text{C}$ の部屋に移した直後に重りを吊した針金をかけ、その動きを装置 (a) を用いて測定した。針金は始め、なかなか氷に食い込まないが、20分ないし1時間経った頃から装置で検出できるような速度で動き始めた。第13図に銅線の場合を曲線 (ii) で示した (変位曲線は約1時間後からのものである)。図には参考のため1日以上 $+1^\circ\text{C}$ の温度に放置した氷の中を進む針金の動きを直線 (i) で示してある (便宜上、直線 (i) の時間軸を適当に移動して示してある)。 -10°C に冷やしてあった氷の中を進む針金は、始めの間は動きが緩慢で (図の A から B)、ある時間がたつと急に速い一定速度の動きに変わった (B から C)。水温で言えば、速度の遅い AB 間は氷がまだ圧力

融解点以下にあり、B点で初めて圧力融解点に達して以後速度が増大したものと考えられる。ナイロン線についても同様な結果が得られた。AB間とBC間とでは、ナイロン線で2倍、銅線で10倍ほど速度が増大した。またBC間の速度は、1日以上+1°Cに放置したもの比べ、銅線で約50%、ナイロン線で約10%小さい値が観測された。

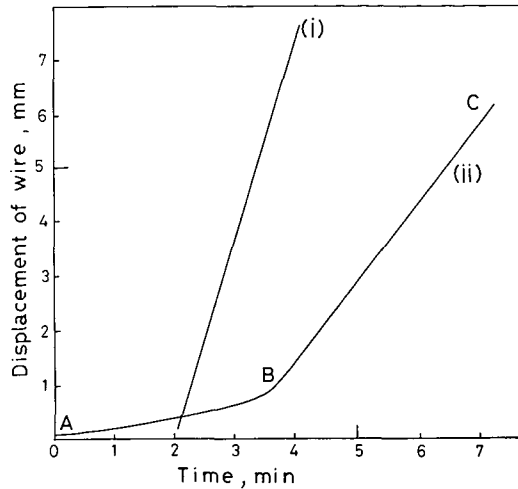
氷がまだ融点以下の温度にあって圧力融解が起こり得ないと思われるAB間における針金の速度(直径0.3mmの針金, 10barの圧力の場合)を第4図に×印で記入した。この時の針金の進行は氷の塑性変形だけによるものと考えられる。単位圧力当りの速度(V/P)は針金の熱伝導率によらずほぼ一定で約 3×10^{-4} mm/s·barであった。この値は+1°Cの室内に長時間放置した氷で実験したナイロン線の速度の約40%に当たり、この差がナイロン線の進行速度に占める塑性変形の寄与の割合と考える事ができる。この事は圧力融解が起こり得ない低温下で行った次の実験ともよい対応がみられた。

圧力が50barであっても融点降下量は -0.37°C だから、 -1°C の低温下では圧力融解によって針金は氷の中を進む事はできない。しかし我々の測定によると -1°C の温度でも直径0.2mmのピアノ線は約 2×10^{-2} mm/sの速さで進む事がわかっている。この結果を用いて10barの場合のクリープ速度を推定してみよう。

氷がクリープを起こす事による針金の進行速度を v_c とすると、氷の中の塑性ひずみ速度は v_c/a (a は針金の半径)の程度と考えられる(Nye⁶⁾)。もし、この場合のクリープがGlenの流動則に従うとすると

$$\frac{v_c}{a} = kP^3$$

となる。定常クリープの時の定数 k は $10^{-8} \sim 10^{-10}$ s⁻¹·bar⁻¹であるが、今の場合にはそのままは適用できない。そこで圧力50barで求めたクリープ速度を用いて定数 k を計算で求めると約 2×10^{-6} s⁻¹·bar⁻¹となる。これから圧力10barの時のクリープ速度(直径0.3mmの針金の場合)は約 3×10^{-4} mm/sと求まる。この値は前述のAB間における速度とほぼ一致する。この事からもナイロン線の場合、実測値が理論値よりも40%程度大きくなったのは氷のクリープの影響と考えられる。なおこの計算にはクリープ速度の温度依存性が入っていない事や、上の実験で氷が定常クリープに達していたかどうかなどの問題がある。しかし -10°C から徐々に氷の温度を上昇させた時の初期の針金の動き(図のAからB)は、氷が圧力融解点に達する



第13図 直線(i); 1日以上+1°Cに放置した氷の中を進む針金(直径0.3mmの銅線)の動き。曲線(ii); -10°C から+1°Cに徐々に温度を上昇させた氷の中の針金の動き(実験を始めてから約1時間後からの変位を示す)。圧力は(i)(ii)の場合とも8bar

以前のものなので、氷の塑性変形によるものと考えてよからう。

2. 復氷速度の圧力依存性の不連続について

前項 1. では遷移圧力以上の場合の復氷速度の実測値と理論値との食い違いの原因を考えた。一方、圧力が 3 bar 以下になると第 11 図にみられるように実測値が理論値よりもはるかに小さくなる事は前述の通りである。我々は HF を含んだ不純物水中を進む針金の速度がより純粋な市販氷に比べて半分以下に小さくなる事を見出し、理論と実験の不一致の原因が不純物による氷点降下にある事を実験的に示したのである。

遷移点より高い圧力では針金の後方に融け水が水滴として存在する事を顕微鏡観察で認めたが、遷移点以下の圧力の時はこうした未凍結の水がほとんど見られなかった。遷移圧力以上では針金の進行速度が速いため、不純物を含む融け水が針金後面から逸脱し、針金後面に未凍結水滴としてとり残される。これに対して、遷移圧力以下では針金の進行が遅いので、水膜に溶け込んだ不純物が針金後面に蓄積・濃縮されるため、針金後面の温度が氷点降下分だけ低下する。すると、針金の前面と後面での温度差が減少し、針金の中を通る熱流量が減り、従って針金の進行速度が減少すると考えられる。

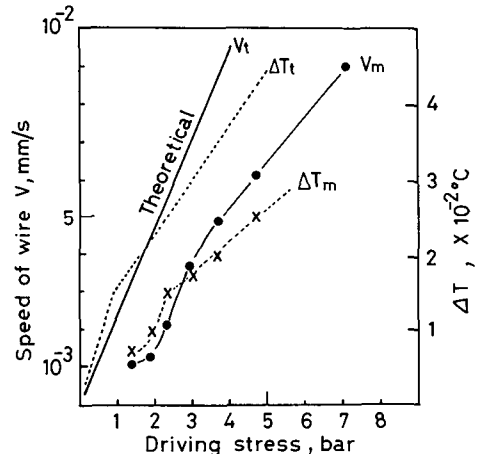
この推察は、実際に針金上下面間の温度差 ΔT を測定した結果 (第 III 節) からも支持された。第 14 図に直径 0.5 mm のコンスタンタン線について、実測された針金の速度 V_m と温度差 ΔT_m を圧力に対して示した。圧力が 3 bar 以下になると、針金の速度 V_m も ΔT_m も共に急激に減少しているのがみられる。これは不純物の蓄積による ΔT の減少が針金速度の減少を引き起こしたものと解釈する事ができる。

ところで針金後面の温度が不純物の影響で仮に 10^{-2}°C だけ氷点降下するためには、後面の不純物濃度が約 5×10^{-3} モル/l でなければならない。一方、本実験で使用した HF 含有水の平均イオン濃度は 4×10^{-4} モル/l なので約 10 倍の濃縮が針金後面で起こった事になる。この程度の不純物の濃縮は実際に充分可能と考える事ができる。

不純物の影響は復氷速度を減少させる方向に作用する事は確かだが、別な要因が速度の減少をひき起こす事も考えられる。最近、Gilpin¹⁰⁾ は遷移圧力以下では水膜の中の粘性抵抗が増加するために針金の速度が大幅に減少すると説明している。不純物の影響の度合を調べるためには、今後、不純物の濃度の影響、特に不純物の含まない純水中の針金の速度を測定する事が必要であろう。

3. 針金近傍の温度場と熱流量について

第 III 節で述べた針金近傍の氷温の実測値を、従来の理論から予想される値と比較してみ



第 14 図 直径 0.5 mm の針金 (直径 0.1 mm の銅線を巻いたコンスタンタン線) で測定された速度 V_m 及び針金上下面間の温度差 ΔT_m と圧力との関係。 V_t , ΔT_t は従来の理論から予想される速度及び温度差

よう。Nye は針金付近の氷の温度 θ_i を次のように仮定した。

$$\theta_i = \frac{c}{r} \cos \phi, \quad \text{但し } c = Lv\rho^*a^2$$

ここで r は針金中心からの距離, ϕ は針金下端からの角度, L は氷の融解潜熱, v は針金の速度, a は針金の半径である。また平均熱抵抗率 ρ^* は

$$\frac{1}{\rho^*} = \frac{1}{\rho + \rho_w \cdot \left(\frac{d}{a}\right)} + \frac{1}{\rho_i}$$

で表わされ, ρ , ρ_i , ρ_w はそれぞれ針金, 氷, 水の熱抵抗率 (熱伝導率の逆数), d は針金を包む水膜の厚さである。 $L=80 \text{ cal/cm}^3$, $v=4.5 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$, $a=0.15 \text{ mm}$ (本実験で用いたピアノ線の場合), $d=0.3 \mu\text{m}$ (前述の水膜の厚さを求める式からの予想値) を与えると定数 c は $7 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}$ となり, 針金下面の前方 1 mm の氷の温度の計算値は $-7 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ となる。これは実験で得られた温度の実測値 $-5 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ と比べてほぼ 1 桁小さい値である。

次に測定で求めた温度場を用い, 氷を通して針金前面の水-氷界面へ輸送される熱量を推定してみよう。氷を融かして針金を進ませるために必要な熱量 Q は単位時間, 単位長さ当り

$$Q = 2av\sigma_{ice}L = 1.9 \times 10^{-2} \text{ J/cm}\cdot\text{s}$$

である。ここで σ_{ice} は氷の密度である。

一方針金前面で温度降下が起こるために氷を通して水-氷界面へ流れ込む熱量 Q_i は, 推定された温度場から概算して

$$Q_i = 2\kappa_{ice} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\partial \theta_i}{\partial r} r d\phi = 1.6 \times 10^{-3} \text{ J/cm}\cdot\text{s}$$

であった。以上の事から, 圧力 10 bar をかけたピアノ線の場合, 氷から水-氷界面へ流れ込む熱は針金の進行に必要な熱量全体のわずか 8% にしかすぎない事がわかった。

VI. ま と め

復氷における従来の圧力融解・再凍結の考えが実際にどの程度成り立っているのかを実験的に調べて次の結果を得た。

(1) 銅線では圧力 5 bar 付近に針金の速度が不連続的に約 1.5 倍変化する遷移点がみつかったが, ナイロン線では今回実験を行った $2\sim 15 \text{ bar}$ の圧力範囲では遷移点は見られなかった。

(2) ナイロン線では復氷速度が針金の太さにほぼ反比例し, 銅線では遷移圧力以上で太さのほぼ 0.3 乗に反比例した。

(3) 遷移圧力より大きい圧力の場合, クロメル線程度の熱伝導率をもつ針金では復氷速度の実測値はほぼ理論値に一致した。しかし, それより大きい熱伝導率をもつ銅線では, 実測値が理論値より 3 倍小さく, 一方氷より熱伝導率の小さいナイロン線では逆に実測値が 40% 程度大きかった。

(4) 遷移圧力以下で HF を含んだ不純物水中を進む針金の速度が, より純粋な市販氷に比

べて半分以下に小さくなる事を実測で示し、遷移点で復氷速度が不連続的に変化する原因が氷に溶けた不純物によるものである事を確かめた。

(5) 氷の中を進む針金の前面と後面の温度を測定した。氷に加える圧力が増すほど針金の上下面間に大きな温度差が検出された。この実験によって針金後面の温度が前面より高いという圧力融解・再凍結説の最も基本となる事実が確かめられた。

(6) 氷の中を進む針金付近の氷温を測定した。推定された針金近傍の氷温分布は、従来の復氷理論で仮定された双極子型の温度分布と比べ、形や絶対値に大きな違いが認められた。氷温測定から、(i) 針金下面の前方側の温度は実測値の方が1桁大きい事、(ii) 圧力 10 bar をかけたピアノ線の場合、氷から針金前面の水-氷界面へ流れ込む熱は針金の進行に必要な熱量全体の約 8% である事がわかった。

本研究は筆者の一人、外塚信が北海道大学大学院理学研究科修士課程地球物理学専攻の修了研究として行ったものである。

研究を行うに当って、本研究所応用物理学部門の方々和黑岩大助教授から多くの助言や激励をいただいた。水中の HF 濃度測定は気象学部門前野紀一助教授の指導の下に行った。ここに心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) Bottomley, J. T. 1872 Melting and regelation of ice. *Nature*, **5**, 185.
- 2) Weertman, J. 1957 On the sliding of glacier. *J. Glaciol.*, **3**, 33-38.
- 3) Ornstein, L. S. 1906 On the motion of a metal wire through a lump of ice. *Proc. K. ned. Akad. Wet.*, **8**, 653-659.
- 4) Meerburg, J. H. 1907 On the motion of a metal wire through a piece of ice. *Proc. K. ned. Akad. Wet.*, **9**, 718-726.
- 5) 小島賢治 1954 復氷について. 低温科学, 物理篇, **13**, 29-36.
- 6) Nye, J. F. 1967 Theory of regelation. *Phil. Mag.*, **16**, 1249-1266.
- 7) Drake, L. D. and Shreve, R. L. 1973 Pressure melting and regelation of ice by round wire. *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, **332**, 57-83.
- 8) Jones, J. S. and Glen, J. W. 1969 The effect of dissolved impurities on the mechanical properties of ice crystals. *Phil. Mag.*, **19**, 13-24.
- 9) 中村 勉 1978 不純物氷の高温における力学的特性. 国立防災科学技術センター研究報告, 第 20 号, 293-324.
- 10) Gilpin, R. R. 1979 A model of the "liquid-like" layer between ice and a substrate with applications to wire regelation and particle migration. *J. Colloid. Interface Sci.*, **68**, 235-251.

Summary

The motion through an ice mass of a weighted wire at a melting point perpendicularly to the direction of the wire has been explained in terms of pressure-melting at the front of the wire and refreezing, or regelation, behind it, which constitutes the theory of pressure-induced regelation. Experiments were carried out in a cold room controlled at +1°C by using an apparatus schematically shown in Fig. 1 for a quantitative examination of the theory.

(1) Effect of driving stress on speed

An experiment using copper wires with a large thermal conductivity disclosed a sharp jump in wire speed at a pressure around 5 bars, where the speed changed discontinuously. In case of nylon wires which have a thermal conductivity 10 times smaller than that of ice, the transition pressure has never been observed in our experiments.

(2) Effect of radius of a wire on speed

As shown in Fig. 3, nylon wires showed speeds nearly proportionate to the inverse radius, $(1/a)$, as expected from the theory, while copper wires showed speeds in proportion to $(1/a)^{0.3}$. It was proved that the effect of radius of a wire on wire speed was such that the speed was proportionate to the value much smaller than $(1/a)^{0.65}$ which is expected from the theory.

(3) Effect of thermal conductivity on speed

At a pressure below the transition point, such as at 2.4 bars, measured speeds per unit pressure, (V/P) , were much smaller than those expected from the theory and had a large scatter regardless of thermal conductivity. While at a pressure above the transition, such as at 8 bars, speeds of medium conductive wires (about $0.2 \text{ J/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$), such as chromel and constantan, were about the same as predicted from the theory. But in case of copper wires having a thermal conductivity much larger than $0.2 \text{ J/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$, the expected value was 3 times larger than the measured one. On the contrary, as for nylon wire, which is a poor conductor, the measured speed was larger than the expected one by approximately 40%.

(4) Effect of impurity on speed

Figure 11 shows the speeds of a piano wire (0.3 mm in diameter), both in commercial ice and HF-doped ice (about $2 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$). The speeds in both of them decreased discontinuously at a pressure less than around 3 bars, and those in the latter having a high concentration of impurity showed a much larger change. This implies that such an abrupt change in wire speed at the transition point is mainly caused by impurities contained in ice. This was also supported by direct measurements of a temperature difference between the top and the back side of a wire.

(5) Measurements of a temperature difference between the top and the back side of a wire

A larger temperature difference was observed as the driving stress increased (using a constantan wire 0.5 mm in diameter). It was also verified that the temperature at the back side of wire was higher than at the top, which is the fundamental assumption in the theory based on pressure-melting and refreezing.

(6) Measurements of temperature in ice near a wire

A temperature distribution obtained from measurements is shown in Fig. 8. It is very different from values predicted from other theories proposed currently concerning regelation. It should be noticed that a negative temperature was observed in the area far from the back side of the wire, where delayed refreezing of meltwater was confirmed by microscopic observations.