

氷の圧縮と電気*

志 尾 弥**

要旨

純水の帯電現象についての理論として、Latham, Mason (1961) の温度差理論式、 $V=2\Delta T$ (mV) がある。しかしこれは氷柱の両端に仮に $\Delta T=30$ deg の温度差があつても氷の両端には 60mV の電位しか生じないことになる。しかし 2 個の氷塊の不均等な摩擦によつて 2 個の接触面間に温度差を作り、その間に発生する電位を測定した場合 Latham の理論値より 100 倍以上大きな電位が生じたとする論文が多くある、例えば吉田 (1944) は 800mV, Magono, Shio (1966) は 1,000mV 以上、また、織笠 (1972) は 900mV という電位を測定している。したがつて摩擦電気に関しては Latham の温度差理論以外に別の帯電機構が存在すると考えられる。摩擦電気の温度差現象以外に歪が考えられる。そこで、摩擦以外の方法で歪を作るために 2 個の氷に固さの差をつけ圧力を加えることにより歪を作つた。そして同時に電位を測定した。ところが、 -40°C より冷めたい室温でのみ数 mV の電位が生ずることを見出した。

1. 序 論

雷雲の帯電機構の一つに氷どうしの摩擦による電荷分離が考えられる。実験的には吉田 (1944) が 2 本の氷板を不均等に摩擦して、その二つの接触面間に温度差を作る時、接触面の温度の冷めたい方が正に帯電することを発見した。Latham, Mason (1961) はこれとは別に 1 本の氷棒の両端に温度差がある時、寒冷側が正に帯電する現象を見出しこれに理論的裏づけをこころみた。Latham 達は純水の電荷担体はイオン欠陥であるとし、この電荷担体を電子半導体の電子の拡散現象の理論を応用し、この自由電子の代りに H_3O^+ 欠陥を電荷担体としてあつかっている。また、Latham (1963) は摩擦実験として、氷板と氷塊を摩擦しその電荷分離現象を先の理論式で説明した。

しかし Magono, Shio (1966) は 2 本の氷棒を不均等に摩擦し、接触面間に発生する電位を測定した。その結果、摩擦回数の増加と共に電位の符号が逆転することを見出した。

また、この時、温暖氷の摩擦面が多結晶に再結晶していることを見出した。さらに、Shio, Magono (1972) は多結晶氷棒と単結晶氷棒を摩擦する時、電位は接触面間の温度差によって影響を受けるというよりも多結晶氷

の結晶粒の大きさにいちぢるしく影響される、つまり 2 本の氷棒間の温度差とは無関係に多結晶氷棒が単結晶氷棒に対して正に帯電することを見出した。さらに志尾、孫野 (1968) は単結晶氷の側面と基底面を不均等摩擦する時、接触面が側面をした氷棒が接触面が基底面をした氷棒に対して正の電位を生ずることを見出した。さらに、これらの一連の実験結果では、電位の大きさは Latham 達の温度差説による電位より約 100 倍以上大きい値であった。一般に物質を摩擦する時、接触面の温度上昇と接触面に剪断応力が生ずる。

この二つの現象が摩擦電気に関係していると推定される。Latham の説は前者のみをあつかっている。そこで、後者、つまり剪断応力の差が 2 個の氷棒間の電荷分離に関係しているかどうかを調べるために次のような実験をした。

2. 測定方法

i) 摩擦電気実験

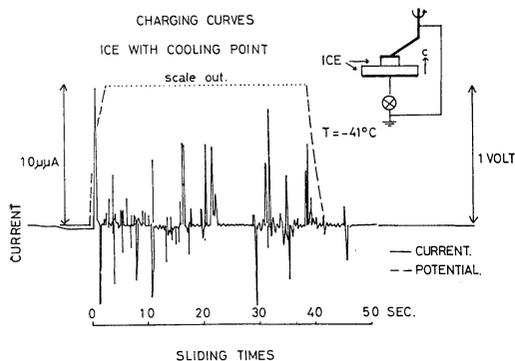
第 1 図右に示すように氷板 (5×5×1cm) の上を他の氷板 (2×2×1cm) が回転することにより 2 個の氷板の表面を摩擦した。この場合、上の氷板の摩擦面は他の氷板のそれより温度が暖かいと考えられる。また、上の氷板は接地されたモータの回転軸に接続されていて、1 秒間に 1 回接触摩擦するように工作されている。また、電位計 (PM 10A) は下の氷板に接続されている。

ii) 圧縮による電気実験。

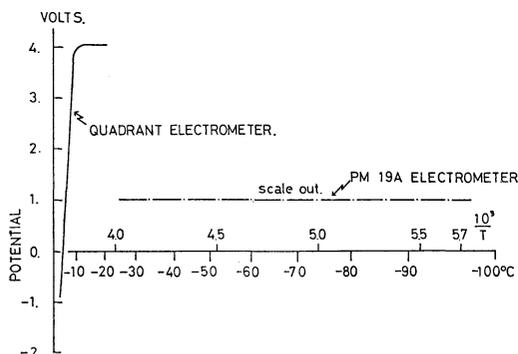
第 3 図右上に示すように 2×2×1cm の氷板と凸面の

* Charge Separation between Two Ice Plank by Compression Stress.

** H. Shio 北海道教育大学
—1974年2月4日受理—



第1図 摩擦による寒冷氷板の帯電。(実線—電流, 破線—電位)



第2図 室温変化に対する寒冷氷板の摩擦電位

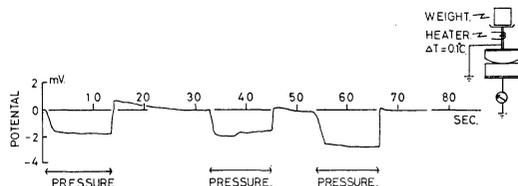
接触面(2個の氷板の接触面が 1mm^2 になるように工夫してある)を持った $2\times 2\times 1\text{cm}$ (中心部)の氷板を接触させ、これに 2kg重/mm^2 の圧力を加えた。2枚の氷の板の固さの相違は一方の氷板を熱する(氷板の接触面間の温度差は 0.1deg)ことにより作られた。また、電極に銅板を使用した。

3. 実験結果

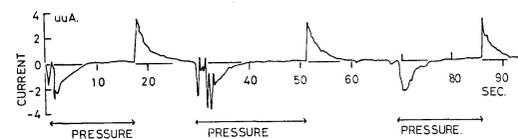
i) 摩擦電気

第1図は寒冷氷側の接地に対する電位(破線)、および電流(実線)を示している。使用した電位計は 1volt 以上の電位では scale out する。したがってこの実験では少なくとも寒冷氷板は温暖氷板に対して 1volt 以上の電位に帯電している。接触面間の温度差を 10deg と仮定すると Latham の理論式 $V=2\Delta T$ (mV) によれば $V=0.02\text{volt}$ となる。実験値は少なくともその50倍以上大きい。これらの実験結果は先の Magono, Shio (1966) と一致する。

次に電流に関しては、電流は正負両方の方向に流れて



第3図 固い氷板の電位



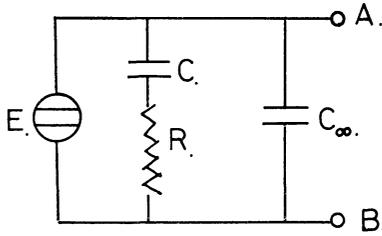
第4図 固い氷板から接地方向に流れる電流。(柔らかい氷板は接地してある)

いる。これは充電電流と吸収電流、さらに放電電流と負の吸収電流が流れていることを意味する。しかし、これが交互に現われていないのは、2枚の氷板が接触していない瞬間があるためである。

第2図は室温変化に対する寒冷氷側の電位を示している。この実験では $-25\sim -95^\circ\text{C}$ の室温でなされたが、すべて、寒冷氷は負に帯電した。このグラフで -21°C より暖かい室温については先の Magono, Shio (1966) の実験結果を示している。以上より摩擦電気に関しては温度差説の結果と仮りに電位符号が同じでも全く別の機構によって電荷分離が起きていると見ることができる。

ii) 圧縮電気

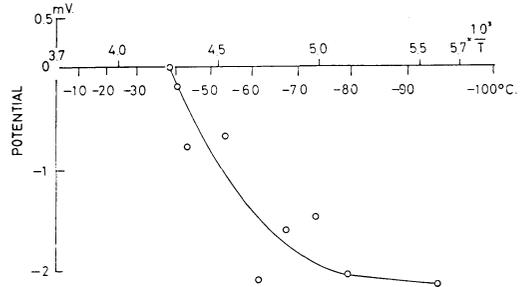
摩擦電気の場合、他の熱電能の実験と別な現象として歪が考えられる。この歪が結晶格子の転位運動を起こさせ、さらに点欠陥の発生、移動に大きな影響をあたえたと推定される。そこでこの仮定の上に立って、次に柔らかい氷と固い氷を接触し、圧力 1kg/mm^2 を加え、接地した柔らかい氷に対する固い氷板の電位、およびそれらの接触面間を流れる電流を測定した。2個の氷板の接触面はそれぞれ(0001)面である。また、固さに差をつけるために接地されている氷板に附着している銅棒にヒータをつけ、 $\Delta T=0.1^\circ\text{C}$ の温度差を氷板の接触面間に作り、接地した氷板が他より柔らかくなるように工夫した。この温度差による接触面電位は理論的には温度説より $V=0.2\text{mV}$ となるが、この実験ではこの電位は測定しえないほど小さい。したがって、本実験では温度差電位の心配はない。第3図は2個の氷板の間に生じた電位の時間変化を示している。室温は -93°C である。圧力は3回加えている。そのたびに電位は -2mV 生じてい



第5図 圧縮による電気現象の等価回路、 C ：吸収電流に関与するコンデンサー、 R ：吸収電流に関与する抵抗、 C_{∞} ：充電電流、及び放電電流に関与するコンデンサー、定常電流は流れない。

る。つまり固い方の氷板は圧力によって負に、柔らかい方は正に帯電することを示している。また、温度差による電位は生じていない。第4図、は電流の時間変化を示している。室温は -100°C である。圧力は3回加えられている。つまり0~18秒間は圧力が加わっており、18~30秒間は圧力は加えられていない。さらに30~52秒まで圧力が加えられ、52~69秒までは圧力がはぶかれ、次に69~86秒まで圧力が加えられている。これらの現象では、氷板に圧力を加えると負の充電電流と続々いて正の吸収電流が流れ（漏れ電流は流れていない）、次に圧力をはぶくと正の放電電流が流れ、さらに負の吸収電流が流れている。この現象中で電位が一定値の時は電流は流れていない。以上の現象は2個の氷板に圧力を加えることによりその接触面間に電気発生機構が生じていることを示している。

これを等価回路に示すと第5図のようになる。 C_{∞} は充電電流および放電電流に関するコンデンサーで、 C, R は吸収電流に関するコンデンサーおよび抵抗である。また、 E は起電力を示す。第6図は以上のような実験で一



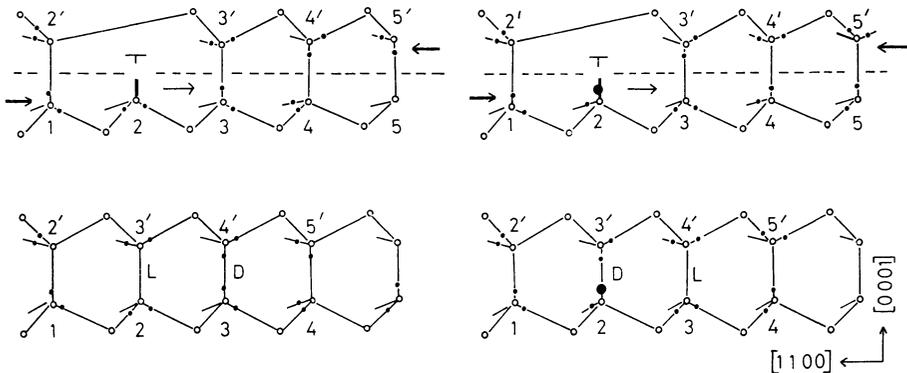
第6図 室温変化に対する寒冷氷板の圧縮電位

定になった電位とその室温の関係を示したグラフである。これからわかるように -45°C より暖かい領域では電位は生じない。また、 -75°C より冷めたい領域では電位は一定になる。したがって氷は -45°C より冷めたい温度領域は他の温度領域と異った電気的性質をしていると考えられる。

4. 考察

以上の実験結果は圧縮による電位が -45°C より冷めたい領域でのみ生ずることを示している。このことは -45°C を境にして氷の電気的性質に相違がなければならぬ。Bullemer 達(1968)は電気伝導度(σ)~絶対温度(T)の逆数曲線($\sigma \sim 1/T^3$)の勾配が -40°C を境にして小さくなり、 -80°C 以下の超低温領域では逆に温度の低下と共に電気伝導度が增大することを見出した。さらに、これらの変化は低温になるにしたがって氷の電荷担体がイオン欠陥から配向欠陥になるためであると Bullemer は暗示した。

著者の実験結果についても電荷担体が配向欠陥であると仮定すると、氷板間に発生する電気現象が説明できる。



第7図 転位移動によって発生するD欠陥及びL欠陥

一般に柔らかい氷と固い氷を比較すると、柔らかい方は転位を多く含んでいると考えられる。転位には第7図に示すように、hanging bond が水素原子を持ったものと、水素原子を持たないものがある。仮りに上記のような転位を含んだ結晶格子に圧力が加えられると格子間にすべりが生じ、それぞれ下図のように水分子同志が再結合するだろう。ところが圧力により2種類の転位が移動した軌跡に、配向欠陥が生ずる。つまり固い氷と柔らかい氷を接触させて、圧力を加えると柔らかい氷側に多くの配向欠陥が生ずることになる。

Levi (1969) は L-欠陥および D-欠陥の移動度比は $\mu_L/\mu_D \approx 7$ であると暗示した。したがって、柔らかい氷板は D-欠陥、固い氷板は L-欠陥の濃度が高くなる。D-欠陥は正電荷、L-欠陥は負電荷を持っているので柔らかい方は正、固い方は負に荷電するような電荷分離が2個の氷板の接触面間に生ずると考えられる。電荷担体としては移動度比より L-欠陥のみを考えればよい。L-欠陥による伝導電流を I_1 、L-欠陥による拡散電流を I_2 とすれば、定常状態では

$$I_1 + I_2 = 0 \tag{1}$$

ここで L-欠陥の電気量... $q = -0.6e$
 L-欠陥の移動度... μ_L
 L-欠陥の拡散係数... D_L
 電場中の任意の1点の L-欠陥の濃度... n_x
 (x ...電場の方向)
 2枚の氷板の接触面間に生ずる電場...

$$\dots \frac{dV_x}{dx}$$

とすると

$$I_1 = -q \cdot \mu_L \cdot n_x \cdot \frac{dV_x}{dx}$$

$$I_2 = q \cdot D_L \cdot \frac{dn_x}{dx} \tag{2}$$

(1), (2) より

$$dV_x = \frac{D_L}{\mu_L} \cdot \frac{dn_x}{n_x} \tag{3}$$

固い氷側、および柔らかい氷側の電位... V_h, V_s
 固い氷中、および柔らかい氷中の L-欠陥濃度...
 n_h, n_s

とすると、Einstein の関係式

$$\left(\frac{\mu_L}{D_L} = \frac{q}{kT} \right)$$

より

1974年8月

$$V = \int_{V_h}^{V_s} dV_x = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_s}{n_h} \tag{4}$$

固い氷の L-欠陥の活性エネルギー... E_h .
 圧力が加えられることにより転位の移動が起る時の柔らかい氷の L-欠陥の活性エネルギー...
 E_s .

とすると

$$n_h \propto \exp\left(\frac{-E_h}{kT}\right)$$

$$n_s \propto \exp\left(\frac{-E_s}{kT}\right) \tag{5}$$

であるから

$$V = -1.7 \frac{E_h - E_s}{e} \tag{6}$$

Glen (1967) によれば、氷が柔らかいということは転位速度が大きいことを意味する。転位の移動によって配向欠陥が形成されるから、転位速度の増加に配向欠陥の濃度は比例すると考えられる。転位速度 (V) は転位密度が一定の場合、歪速度 (ϵ') と

$$\epsilon' \propto V$$

である。また、Jones, Glen (1969) は、歪速度は

$$\epsilon' \propto \exp\left(\frac{-E_0}{kT}\right)$$

で表わされるので、歪速度の温度依存性から求めた活性エネルギーは $-50 \sim -80^\circ\text{C}$ の温度領域で $0.41 \pm 0.03\text{eV}$ であるとした。

著者の実験において、固い氷の配向欠陥形成エネルギー (E_h) を Ruepp (1968) の値、 0.433eV ($-55 \sim -73^\circ\text{C}$)。転位移動の起こりやすい柔らかい氷の配向欠陥形成エネルギー (E_s) を Jones 達の値 0.413eV とすると

$$V = 34\text{mV}$$

となる。この理論値は実験値の約10倍大きい。仮りに $E_s = 0.429\text{eV}$ とすれば理論値は実験値に一致する。しかし活性エネルギーは 10^{-3}eV の値までの算出はむずかしい。

5. 結論

氷の熱電能の実験値では温度差1degあたり2mV程度の電位より生じない。つまり温度差10degで20mVである。しかし摩擦実験ではこの値の100倍の電位が発生する。したがって氷の電気発生機構として温度説以外に

別の機構がなければならぬ。この原因を温度説以外の機構で説明するために圧縮実験をした。氷の転位が移動すれば配向欠陥が発生する。したがって転位の移動しやすさにより配向欠陥の活性エネルギーは異った値を持つことになる。従来の温度説では配向欠陥の活性エネルギーを一定なものとしてあつたが、この辺に問題があるように思う。たとえば σ (電気伝導度) $\sim 1/T^3$ (絶対温度 $\cdots T$) 曲線でも Heinmets, Blum (1962) は -7°C に極大値があることを指示した。また, Bullemer 達 (1968) はこの曲線で -75°C に極小値ができることを見出した。したがって活性エネルギーは温度変化に対して無関係に一定にはなりえない。本実験では氷の電荷分離現象を氷の固さの相違による配向欠陥活性エネルギーの差によって説明するための実験的試みである。

文 献

- Bullemer, H., H. Engelhardt, and N. Riehl, 1968: Protonic conduction of ice, International symposium on physics of ice., **33**.
 Glen, J.W., 1968: The effect of hydrogen disorder on dislocation movement and plastic deformation of ice, Phys. Kondens. Materie., **7**, 43-51.
 Heinmets, F., and R. Blum, 1962: Conductivity

- measurements on pure ice, Trans. Faraday Soc., **59**, 1141-1146.
 Jones, S. J., and J.W. Glen, 1969: The mechanical properties of single crystals of pure ice, J. Glaciology., **8**, 463-473.
 Latham, J., and B. J. Mason, 1961: Electric charge transfer associated with temperature gradients in ice, Proc. Roy. Soc. Lond., A, **260**, 523-536.
 Latham, J., 1963: Electrification produced by the asymmetric rubbing of ice on ice, Brit. Jour. Appl. Phys., **14**, 488-490.
 Magono, C., and H. Shio., 1966: Frictional electrification of ice, and change in its contact surface, Physics of Snow and Ice, **I**, 137-150.
 織笠桂太郎, 1972: 氷の非対称まさつ帯電と不純物の影響について, 大気電気研究, **9**, 63-68.
 Ruepp, R., 1968: Dielectric relation, bulk and surface conductivity of ice single crystals, International symposium on physics of ice., **44**.
 志尾弥, 孫野長治, 1968: 単結晶氷の摩擦電気 I, 雪氷, **31**, **I**, 1-6.
 Shio, H., and C. Magono., 1972: Frictional electrification of polycrystalline and single ice crystals, Jour. Met. Soc. Jap., **50**, 159-165.
 吉田順五, 1944: 氷の摩擦破壊によって生ずる電気並びに雷の電気の発生機構, 低温科学, **1**, 149-187.



富士山測候所編

富士山の気象観測90年

昭和49年3月, B 5, 58頁

富士山頂における気象観測は明治13年からはじめられ, すでに90年の歴史を持っている。この間に, どれだけの労苦と困難な道をたどって今日の富士山測候所の新庁舎に到ったかのドキュメントである。

内容は第1章 開設まで

第2章 気象観測用の建物完成

第3章 臨時富士山頂観測所の設立

第4章 常設観測所へ

第5章 苦難の時代

第6章 富士山測候所として独立

第7章 新しい出発

各章の編集や字句の配ばりに少々荒いところが見られるが, この点がかえって富士山頂の労苦をにじみ出しているように思える。

昭和50年の気象庁創立100年記念として100年史の編集がすすめられているが, 本編は同史への原稿をとりまとめたものである。富士山の気象観測の今日までの推移を調べるには最もよき資料である。本編は全国の気象官署に配布されているので, 部外の方にも必要な向きは知らせてほしい。(測候課 三谷一郎)