

低温環境が及ぼす帯電列への影響

Influence of low temperature environment on the charge columns

一本松 聡 竹内 悠翔 堀尾 綾人 八木 駿

Ipponmatsu Satoshi, Takeuchi Yuto, Horio Ryoto, Yagi Takashi

要旨

私たちは当初、氷と氷の摩擦帯電をテーマに設定して実験を行なっていた。最初の実験は氷を帯電させることができるのかを確認することを目的として行なった。しかし、氷の電荷を測定する電荷センサーの値が常に変動し続けるため、どの値を信用したらよいか決められず、帯電を確認することができなかった。そこで、測定機器を箔検電器に変更したが氷を近づけても箔が開かず、帯電は確認できなかった。本実験で必須の条件である氷の帯電の測定ができないと判断し、氷と氷の摩擦帯電の実験は中止した。その後、私たちは『摩擦帯電列への氷の導入に向けた実験的試み』という先行研究の考察より「低温等の条件下では「摩擦帯電列」の並び順自体が入れ替わるのかもしれない」という記述を発見し、低温環境での摩擦帯電列がどのようになるのか知りたいと思い研究を始めた。研究の目的は常温環境と低温環境での帯電列を比較し、その違いについて調べることである。実験は常温環境・低温環境ともに、物質《亜鉛板・アクリル板・エポナイト棒・ポリ塩化ビニルパイプ・紙・ガラス棒・木棒・毛皮・銅板・低密度ポリエチレン（ビニール袋）・ポリエチレンテレフタレート（ペットボトル）・ポリプロピレン（ストロー）》を除電してから摩擦させて、帯電した物質を測定機器に近づけ、電荷の符号を記録していく。実験の結果、得られた常温環境での帯電列と低温環境での帯電列を比較すると、毛皮・ガラス棒では帯電列中の位置が入れ替わった。また、低密度ポリエチレン（ビニール）は帯電列の負の方に移動した。ほかの物質は位置が変わったものの相対的に見た物質同士の順位は変わっていなかった。帯電列を作成する過程に必要な電荷の符号の表から次の5つのことが読み取れる。①金属の帯電が確認できなかったということ②常温環境で帯電が確認できなかった毛皮・木・紙に低温環境で帯電が見られる組み合わせが増えたということ③常温環境では帯電していたガラスやポリエチレンテレフタレート（ペットボトル）が帯電しにくくなったということ④同じ低温環境での表でも帯電の符号が入れ替わっているということ⑤常温環境と低温環境で電荷の符号が入れ替わったところがあるということだ。この5つの結果から考察すると、次のことが言える。私たちの実験では常温環境と低温環境で固定できた外部条件が少なすぎて帯電列に変化が見られたと考えることができる。改善したほうがよいと考えられる要素として、物質の表面状態や空气中に舞った毛皮・結露・湿度などがあるということだ。時間や費用・設備の面で私たちはこれを改善することはできなかったが、改善する方法として、物質を摩擦させる方法を、人間の手が物質に触れないようにするために物質の板の上で物質の粒子を滑らせて摩擦させる方法に変えるということや外から暖かい空気が入らないようにするために冷凍庫内ではなく冷凍室内で実験するということが考えられる。

1. 研究動機

最初は「雷」をキーワードにして研究内容を考え、氷と氷を摩擦帯電させる実験を進めていた。この研究では、氷と氷の接地面積を変えることで氷の帯電量は変わるのかどうかを調べることを目的としていた。予備実験では氷を帯電させることができるのかを確認することを目的として、実験を行なった。準備するものは氷（直方体の形状のものを2つ）・ゴム手袋・電荷センサー（島津理化）・冷凍庫である。ゴム手袋を装着した人が用意した直方体の氷を持ち、冷凍庫内で適当に摩擦させ、電荷センサーで氷の電荷を測定するという実験を行った。結果は、電荷センサーの値が常に変動し続けることで、どの値を信用して帯電しているとするか決められなかった。そこで、測定機器を箔検電器に変えて同じ実験を行ったが、箔が開くことはなかった。この理由として、氷は水からできているので帯電しにくいために、たまった電荷量が小さ過ぎたのではないかと考えられる。また、冷凍庫という空間は狭いため冷凍庫のふたを開けて実験するしかなかったので箔検電器の金属板のところが結露したためでないかとも考えた。研究目的を達成するための実験も考えていたが、氷を帯電させられるか確認する実験から、研究場所（人も入ることができるほどの冷凍室が好ましいと考える）および電荷計測の面で実験できないと判断したのでこのテーマでの研究は中止した。

その後、「静電気」というキーワードと先生の助言をもとに、研究テーマを「帯電列」に変更した。また、3.2で説明する『摩擦帯電列への氷の導入に向けた実験的試み』という先行研究の考察から「低温等の条件下では「摩擦帯電列」の並び順自体が入れ替わるのかもしれない」という記述を発見した。このことから、低温下での摩擦帯電列が通常の摩擦帯電列と比べて変わるのか知りたいと思い研究を開始した。

2. 研究目的

本研究の研究目的は低温環境と常温環境においてそれぞれ摩擦帯電列を作成し、それらを比較することで低温環境と常温環境において摩擦帯電列の並び順は入れ替わるのかを調べることである。

また、低温環境と常温環境において摩擦帯電列の並び順が入れ替わった場合には、なぜ入れ替わったのかを考察する。

3. 先行研究

3.1 帯電列

帯電列とは2種類の物質を摩擦させたとき正に帯電しやすい物質を+側に負に帯電しやすい物質を-側に並べた序列の表である。

摩擦する2種類の物質が帯電列上で離れているほうが、離れていない場合と比べて、電荷の移動が起こりやすい。また、2種類の物質が近い場合は、電荷の移動が起こらなかつたり、帯電列の示す電荷移動方向とは逆方向の移動が起こったりする場合がある。

傾向として、炭化水素(C-H構造を持つもの)のように分子の外側に水素が多い化合物は、金属のように自由電子が多い物質に比べて、相対的に負に帯電しやすい。ただし、これはあくまでも実験結果から得られたものであり、原理・理論は確立されていない。また、温度や摩擦方法、物質の表面状態の違いによっても順序が前後するとの報告もある。

したがって、絶対的な帯電列は存在しないようである。

『摩擦帯電列への氷の導入に向けた実験的試み』(日本氷雪学会) 参照

3.2 『摩擦帯電列への氷の導入に向けた実験的試み』(日本氷雪学会)

この研究は、様々な物質と氷を摩擦させ、摩擦した後の氷の電荷量を測定し、「摩擦帯電列」における氷の位置を調べたものである。

実験は、防災科学技術研究所・雪氷防災研究センターの低温実験室で行った。図3.2.1に示すように、氷粒子を様々な物質(斜面)上に供給し、転がす事によって摩擦を起こした。電荷測定には、ファラデーケージとエレクトロメーターを用いた。また、氷粒子は、保存しておいた天然のざらめ雪を細かく粉碎して作成した。ガラス・アクリル・木材・紙・ゴム・ポリスチレン・塩化ビニルの7種類の材質を用いて斜面長60cm、斜度30°の実験斜面を作り、気温-20°Cで測定を行った。

それぞれの物質との摩擦によって氷粒子が得た単位重量あたりの電荷量を図3.2.2に示す。なおこれは、斜面への氷粒子供給段階において氷が持っていた電荷量を、実測値から除いたものである。実験結果は、氷がポリスチレンと塩化ビニルの間に位置する事を示している。表3.2.1で示した帯電列に基づくと、表3.2.1の左側に位置する物質と摩擦した時ほど氷は負に帯電しやすいため、図3.2.2の結果は右上がりに移るものと予想された。しかし、随所にて逆転した結果が得られ、特にガラスとの摩擦では帯電しにくかった。これらの結果は確定したのではなく、粒子および斜面表面の汚れや、不純物の濃度等が関与している可能性がある。また、低温等の条件下では「摩擦帯電列」の並び順自体が入れ替わるのかもしれない。今後は、気温や湿度、斜面長等の条件を様々に変えるほか、不純物を極力除いた氷試料を用いて同様の実験を行い、その傾向について比較する予定である。と述べられていた。

表 3.2.1 先行研究で示されていた帯電列

+	人毛・毛皮	ガラス	羊毛	ナイロン	アクリル板	絹	綿	木材	人の皮膚	亜鉛	アルミニウム	紙	エポナイト	鉄	銅	ゴム	ポリスチレン	ポリエステル	アクリル繊維	ポリエチレン	セロハン	塩ビ	-
---	-------	-----	----	------	-------	---	---	----	------	----	--------	---	-------	---	---	----	--------	--------	--------	--------	------	----	---

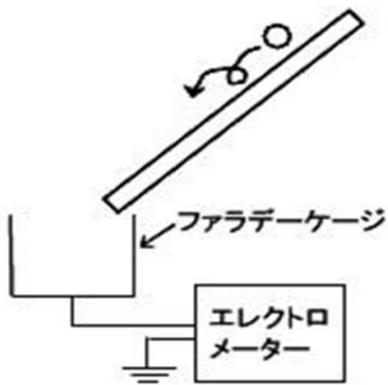


図 3.2.1 実験装置概略図

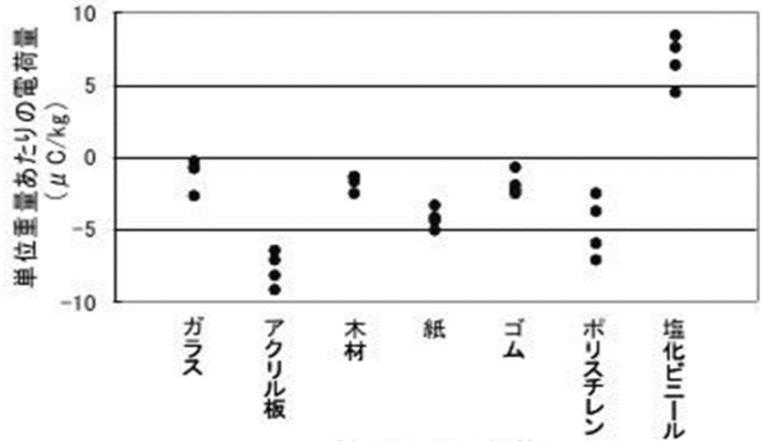


図 3.2.2 摩擦後の氷の電荷量

4. 実験

4.1 仮説

温度が変化することで、電気伝導率が変わるだろう（電気抵抗率が温度で変わるから）が他に変わる要素は思い浮かばない。電気伝導率は帯電のしやすさに影響を与えるだけで、直接電荷の符号に影響があると思えないため低温環境の摩擦帯電列と常温環境の摩擦帯電列は同じになると仮説を立てた。

4.2 準備物

- 箔検電器
図 4.2.1 に示している。
- クーロンメーター(静電量計) (ナリカ)
図 4.2.2 に示している。
カタログ No : B10-1205
表示 : ±1999nC (読取限度 1nC)

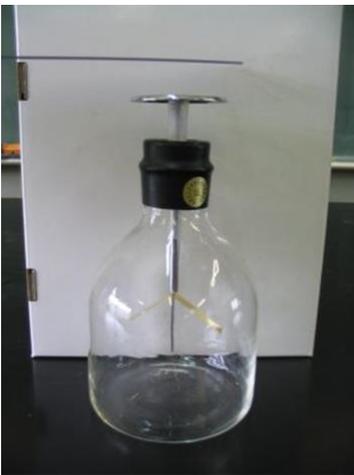


図 4.2.1 箔検電器



図 4.2.2 クーロンメーター

- 冷凍庫
扉が上部にあるタイプの冷凍庫を使用した。
寸法 740×500×775 mm
標準庫内温度-17.4℃
- 静電気除去シート (TRUSCO)
品番 SD2525
サイズ 250 mm×250 mm
JAN コード 49 89999 172201

● 物質

- 亜鉛板
- アクリル板
- エボナイト棒
- ポリ塩化ビニルパイプ
- 紙
- ガラス棒
- 木棒
- 毛皮
- 銅板
- ビニール袋 (低密度ポリエチレン LDPE)
- ペットボトル (ポリエチレンテレフタレート PET)
- ストロー (ポリプロピレン PP)

※物質はすべて学校にあるものを使用した。

4.3 常温環境における実験

4.3.1 方法

常温とは特に冷やしたり熱したりしていない温度と定義する。

高松第一高等学校物理実験室で実験を行った。

- I. 物質を除電した。(エタノールを使用して除電した。)
- II. 除電した物質を摩擦させて帯電させた。
- III. 箔検電器に近づけて電荷の符号が正・負のどちらかを確認して表に記録した。

【帯電列の作成方法】

A)

- ① 負に帯電した塩化ビニルを箔検電器に近づけると箔が開いた。
- ② 箔検電器に指を触れて、箔を閉じさせた。
- ③ 塩化ビニルを遠ざけると、箔検電器は正に帯電し箔が開いた。この操作で、箔検電器の電荷は帯電棒の電荷と逆符号になる。

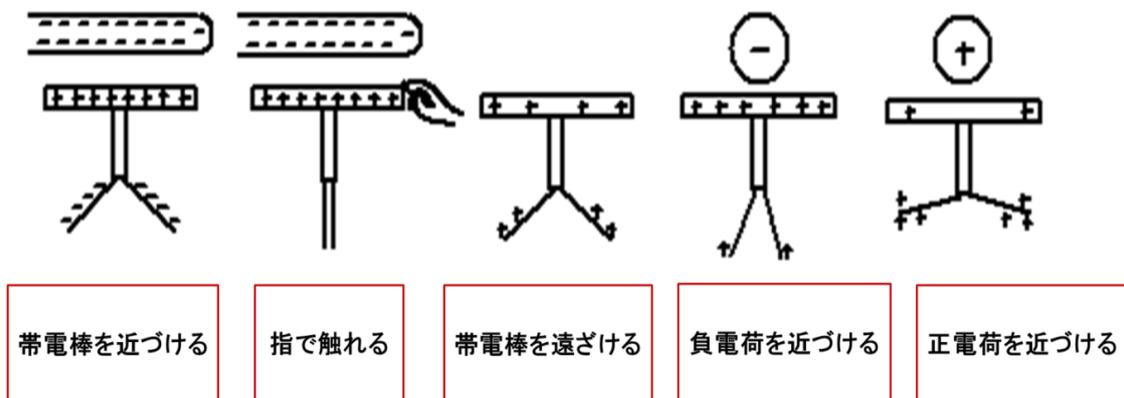


図 4.3.1.1 箔検電器の帯電の様子

- ④ 箔検電器の箔を鉛直方向から 45 度程度の角度に開かせておいて、別の帯電体を上側から静かに近づけたとき、はじめに箔が閉じれば帯電体の電荷は異符号で、負の電荷であることがわかる。
- ⑤ 箔がさらに開けば、帯電体の電荷は同符号の正電荷であることがわかる。

B)

集めた物質名を、表の縦と横の欄に同じ順序で記入した。表 4.3.1.1 は作成した表の様式の例である。

C)

それぞれの物質の組み合わせについて、摩擦させたときの帯電の正負を調べ、表 4.3.1.1 に記入する。記入方法は、左の縦の列にある物質に対して、上の横列の物質で摩擦させたとき、左の列にある物質が正のとき+、負のとき-と記入した。ただし、ここでは表 4.3.1.1 のように正のときにたて縞模様、負のときにドットの塗りつぶしで表している。また、帯電しなかったものは模様を入れていない。たとえば、表 4.3.1.1 のエボナイトの欄を横に見ていくとガラスのところドットの塗りつぶしになっているのでエボナイトをガラスと摩擦させると負に帯電すると読み取ることができる。

4.4 低温環境における実験

4.4.1 方法

低温とは冷凍庫内 (-20~-15℃) と定義する。

高松第一高等学校物理実験室前廊下の冷凍庫で実験を行った。

I. 物質を除電した(静電気除去シートを使用して除電した。)

II. 除電した物質を摩擦して帯電させた。

III. クーロンメーターに近づけて電荷の符号が正・負のどちらかを確認して表に記録した。

低温実験①～低温実験③の実験はすべての物質で試行して測定した。

低温実験④の実験は低密度ポリエチレン(ビニール)とほかのすべての物質と摩擦させて低密度ポリエチレン(ビニール)だけの電荷の符号を測定した。

低温実験⑤の実験は低密度ポリエチレン(ビニール)と銅・ポリエチレンテレフタレート(ペットボトル)・亜鉛・ポリプロピレン(ストロー)、ポリプロピレン(ストロー)と銅・ポリエチレンテレフタレート(ペットボトル)・低密度ポリエチレン(ビニール)・紙の組み合わせで摩擦させて低密度ポリエチレン(ビニール)とポリプロピレン(ストロー)の電荷の符号のみ測定した。

※箔検電器からクーロンメーターに計測機器を変更したが、これは、最初はクーロンメーターを持っていなかったが途中で手に入れたためである。また、同じ帯電体を常温環境で帯電させて箔検電器とクーロンメーターの両方で電荷の符号を数回確認したが同じ符号になり箔検電器からクーロンメーターに計測機器を変更しても問題ないと判断した。

4.4.2 結果

低温環境では実験を3回と一部の物質を抜粋して、そのデータから帯電列を作成した。

低温実験①

低温実験①の結果は表 4.4.1.1 に示す。

実験したときの冷凍庫内の気温は-19.2℃、湿度は測定していなかった。

毛皮・木・紙の繊維質のものにも帯電が見られるようになった。

表 4.4.1.1 結果 低温実験①

	アクリル	ガラス	毛皮	木	紙	エポナイト	ビニール	銅	ペットボトル	亜鉛	ストロー	塩化ビニル
アクリル		縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線
ガラス	縦線		縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線
毛皮	縦線	縦線		縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線
木	縦線	縦線	縦線		縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線
紙	縦線	縦線	縦線	縦線		縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線
エポナイト	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線		縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線
ビニール	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線		縦線	縦線	縦線	縦線	縦線
銅	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線		縦線	縦線	縦線	縦線
ペットボトル	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線		縦線	縦線	縦線
亜鉛	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線		縦線	縦線
ストロー	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線		縦線
塩化ビニル	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	

低温実験②

低温実験②の結果は表 4.4.1.2 に示す。

実験したときの冷凍庫内の気温は-17.8℃、湿度は測定していなかった。

冷凍庫外の気温は 19.4℃、湿度は 40%であった。

毛皮・木・紙の繊維質のものにも帯電が見られるようになった。

表 4.4.1.2 結果 低温実験②

	アクリル	ガラス	毛皮	木	紙	エポナイト	ビニール	銅	ペットボトル	亜鉛	ストロー	塩化ビニル
アクリル		縦線	斜線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線	縦線
ガラス			斜線				縦線					
毛皮	縦線	縦線		縦線	縦線	縦線						縦線
木			斜線									縦線
紙	斜線		斜線									縦線
エポナイト		斜線	斜線	斜線								縦線
ビニール	斜線	斜線	斜線	縦線	縦線	斜線		縦線	縦線	縦線	縦線	縦線
銅												
ペットボトル	斜線						斜線					縦線
亜鉛							斜線					
ストロー	斜線			縦線	縦線		斜線	縦線	縦線			縦線
塩化ビニル	斜線		斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線

低温実験③

低温実験③の結果は表 4.4.1.3 に示す。

実験したときの冷凍庫内の気温は-15.3℃、湿度は測定していなかった。

冷凍庫外の気温は 24.0℃、湿度は 56%であった。

毛皮・木・紙の繊維質のものにも帯電が見られるようになったことに加えて亜鉛・銅の金属も帯電していたことが確認できる。

表 4.4.1.3 結果 低温実験③

	アクリル	ガラス	毛皮	木	紙	エポナイト	ビニール	銅	ペットボトル	亜鉛	ストロー	塩化ビニル
アクリル		縦線		縦線	縦線		縦線		縦線			縦線
ガラス	斜線					縦線	縦線			縦線		縦線
毛皮	斜線											
木	斜線											
紙							縦線					
エポナイト	斜線	斜線	斜線	斜線			縦線			縦線	縦線	
ビニール	斜線		斜線	斜線	斜線	斜線		斜線	斜線	斜線	斜線	縦線
銅		斜線										
ペットボトル	斜線			斜線	斜線	斜線				縦線		
亜鉛		斜線		斜線								縦線
ストロー	斜線	斜線	斜線		斜線		縦線	斜線	斜線			
塩化ビニル	斜線						斜線		斜線			

- ④ 同じ低温環境での表でも帯電の符号が入れ替わっている（表 4.4.1.1～表 4.4.1.5）
物質の表面状態（表面についた汚れ・表面の劣化など）や摩擦させる人が持っていた電子などが影響した可能性があると考えた。
- ⑤ 常温環境と低温環境で電荷の符号が入れ替わったところがある（表 4.3.1.1、表 4.4.1.6）
物質の表面状態（表面についた汚れ・表面の劣化など）や摩擦させる人が持っていた電子、狭い冷凍庫の中では毛皮の毛が舞ってしまい、毛が帯電していた場合に直接物質に影響を与えたり空気中の電荷の偏りが生まれたりすることで影響したのではないかと考えた。
- ただし、④と⑤はそれぞれで示したことを制御できなかったことで正確なデータを得ることができなかったのではないかと考える。

6. 結論

常温環境と低温環境の帯電列（表 4.3.1.2 と表 4.4.1.7）を比較するとガラス・毛皮・低密度ポリエチレン（ビニール）の位置に変化が見られ、ガラスと毛皮は入れ替わり、低密度ポリエチレン（ビニール）は負のほうに移動したことがわかる。ただ、「摩擦帯電列は経験的法則であり物理的な意味は明らかになっていない。さらに、電荷発生に関与する要素として物体内の電子・表面の汚れによるイオン・熱分解による荷電粒子などを挙げるができる」と応用物理 第 24 巻 第 5 号に記述されており、どの要素が原因で帯電したのか解明することはできないと考えた。そのため、私たちの実験では常温環境と低温環境で固定できた外部条件が少なすぎて帯電列に変化が見られたと考えることができる。改善したほうがよい要素として、物質の表面状態や空気中に舞った毛皮・結露・湿度などを挙げた（結露や湿度は電荷の符号の測定ができていない部分を明確にするため（常温で毛皮・木・紙の帯電が見られていないが湿度がもっと低ければ帯電していた可能性もある））。時間や費用・設備の面で私たちはこれを改善することはできなかったが、実験する場所を人が入れるほどの冷凍室に変更し、毛皮などの強く摩擦させたら毛が落ちるなどして表面状態が変わりやすい物質を除き、人間の手が物質に直接触れないようにするため先行研究の「摩擦帯電列への氷の導入に向けた実験的試み」の実験方法のように物質の板の上を物質の粒子を滑らせて摩擦する方法にして実験することで、より正確にデータを得ることができるのではないかと考えた。

7. 参考文献

- 応用物理 第 24 巻 第 5 号 (1955)
- 橘高重義、葛西昭成 「静電気測定法概論」
- 大宮哲、佐藤篤司 (2010)
「摩擦帯電列への氷の導入に向けた実験的試み」(社) 日本氷雪学会
- 電気の歴史イラスト館 伝導体 (導体)
<<http://www.geocities.jp/hiroyuki0620785/zairyou/conductor.htm>>

2018 年 7 月 23 日アクセス

8. 謝辞

本研究を進めるにあたり、丁寧かつ熱心にご指導をいただいた担当の四茂野志音先生、アドバイスをくださった佐藤哲也先生をはじめとする高松第一高等学校の先生方のご協力により実験を進めることができました。この場をお借りして感謝申し上げます。