



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	電線の着氷防止に関する研究
Author(s)	中谷, 宇吉郎; 小口, 八郎
Citation	低温科学, 2, 85-96
Issue Date	1949-10-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17403
Type	departmental bulletin paper
File Information	2_p85-96.pdf



電線の着氷防止に関する研究*

中谷宇吉郎**, 小口八郎****

緒 言

過冷却水滴による着氷の現象は、航空機の霧中飛行に関連して、その防止は重要な課題となつて居る。冬期寒冷で而も霧の發生の多い地域にあつては、航空機以外に、地上に露出されて居る色々な施設にも着氷が起り種々の危害を及ぼす。電線の着氷もその一つである。

電線着氷の研究は既に二三の人々によつて行はれ、特に大北⁽¹⁾至盛⁽²⁾氏の廣範な報告があるが、未だ現象の記載の域を餘り脱して居ない。本研究は昨年度に引續き札幌遞信局より委嘱され、北大低温科學研究所に於て行つたもので、前年度の豫報⁽³⁾につとくものである。

本年度の研究は着氷によつて生ずる電線の荷重について分析することを試みた。着氷の起る氣象條件を分析し、如何なる氣象條件の場合に危険な着氷が起るかといふこと、及び着氷による電線の荷重がどの程度迄増大して電線を切断するに至るかといふことを研究の主眼とした。

測定は着氷の機會の多い海拔 1300 m のニセコアンヌプリの頂上で行つた。その結果の概要を報告する。

§ 1. 測定装置並に測定法

i) 氣象要素及び着氷量の測定

着氷現象を問題とする場合、着氷が起る時の氣象條件を測定することが第一である。着氷の状態は風速、氣温、霧粒の大きさ、霧水量等の氣象要素の變化につれて變り、その性質が色々異つてくる。それで電線に着氷する場合に於ても、着氷の性質と氣象條件との關係をよく調べておく必要がある。

氣温の測定には無雪百葉箱内に設置された一般氣象觀測用の寒暖計を讀みとると共に、屋外に露出した直徑約 3.3 mm の細長い酒精寒暖計でも測つた。屋外に露出した方は球部に着氷が起るので、測定する前に着氷を除く必要がある。この細長酒精寒暖計は感度がよく、約 20 秒で正

* 北海道大學低温科學研究所業績 第29號。札幌遞信局委託研究。

** 低温科學研究所。

**** 北海道大學理學部物理學教室。

(1) 湯口：雪氷，第5卷，第6號。

(2) 大北：雪氷，第5卷，第1~11號。

(3) 吉田，荒川：低温科學，第2輯。

しい値を指すので、球部の着氷を除いて使用すればかなり速い変化も測ることが出来る。

風速はロビンソン自記風力計の自記紙から読みとつた。又時々手持風速計で着氷現場の風速も測つた。風向も電線の風壓を調べる上に大切なので、着氷時の風の主方向を風信器で測つた。ロビンソン風力計で風速を測る場合、風杯に着氷すると風杯の回轉が著しく鈍り、自記紙に現れた値は實際の風速より餘程小さく出るから、着氷の起る時には出来るだけ着氷に依る誤差を除くやうにした。

霧粒の測定は霧粒を吸入して適當な油膜中に懸濁し、顯微鏡でその大きさを測定した。⁽¹⁾

着氷量としては着氷先端の成長速度を測ると共に、電線の單位長さあたりの着氷の重量の増加をも測定した。それで着氷が成長するにつれて、どの位の重量が荷重されて行くかを明かにすることが出来た。着氷の目方を測る毎に、その着氷の外形や断面の模様をスケッチし、又寫眞に撮

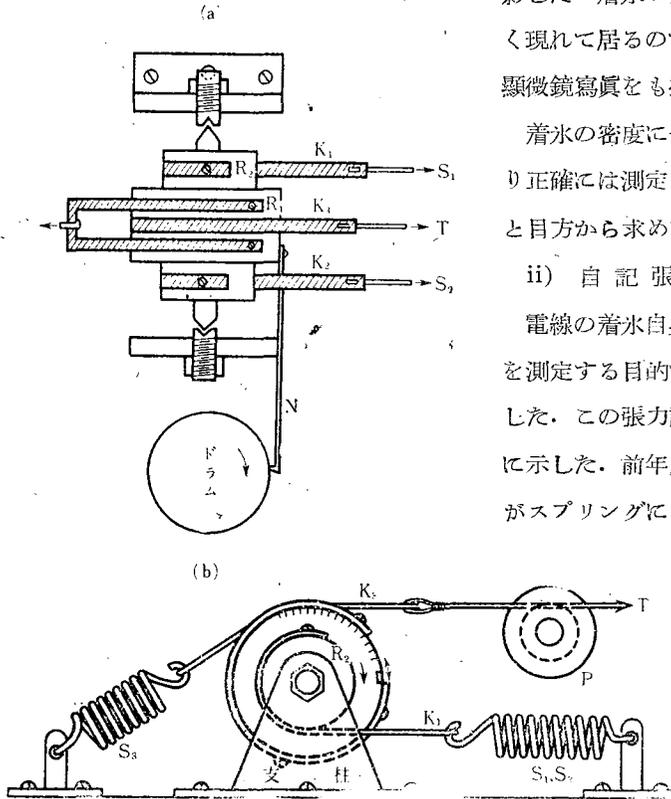
影した。着氷の種類や性質はその顯微鏡組織によく現れて居るので、典型的な着氷についてはその顯微鏡寫眞をも撮影した。

着氷の密度については、測定上種々の困難があり正確には測定出来なかつたが、大略の値は體積と目方から求めた。

ii) 自記張力計

電線の着氷自身の重量と風壓との和による張力を測定する目的で、新たに自記張力計を設計製作した。この張力計の略圖を第1圖の(a)及び(b)に示した。⁽²⁾前年度使用した張力計では電線の張力がスプリングによく傳達されないうらみがあつた

のでその點を改良した。即ち、第1圖(a)及び(b)に示す如く、 R_1 及び R_2 は強固に接合された共軸圓筒で、軸の兩端はピボットで丈夫に支へられ、自由に回轉することが出来る。 R_1 ,



第 1 圖

(1) 小口八郎：霧粒の大きさ及び数の測定法について、低温科學，第2輯。

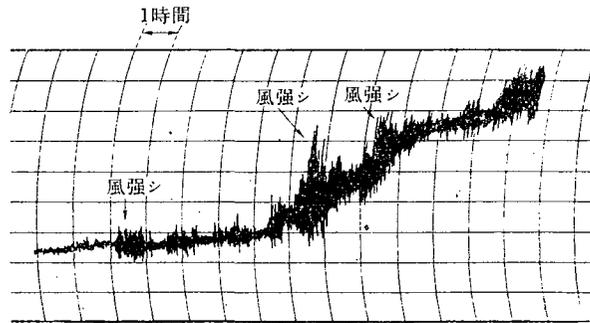
(2) 吉田，荒川：低温科學，第2輯。

R_2 の圓筒になました薄い銅板 K_1 , K_2 及び K_3 を捲き付け、その先にスプリング S_1 , S_2 及び S_3 を取付けた。電線の張力 T が増すと S_1 , S_2 及び S_3 が伸び、 R_1 及び R_2 が回転し、 T と S とが釣合つた所で止まる。従つて R_1 の外周に自記ペン N を取付け時計仕掛のドラム D に自記させれば、着氷時の T の時間的變化を自記させることが出来る。

着氷の場合には一般に風が強くと、電線は激しく不規則に振動する。これ等の不規則な振動を取除くために、プーレー P を用ひ、 P を通して T を測ることとした。この方法では T は P の切線方向の分力だけが自記されることになる。自記紙の讀みの補正は目方の知れた物體を電線に吊してその時生ずる張力から求めた。

着氷による電線の荷重の増加は前に述べた如く、着氷自身の重量の外に風壓による荷重が加はる。殊に電線が切斷されるやうな場合は、着氷が著しく進行して風壓の抵抗面が増大するから、風壓による荷重は大きくなる。それでこの張力計では大體 100 kg の力に耐へるやうに丈夫に設計した。實際に使用した結果からみると、着氷電線には風の息により衝撃的に強大な瞬間荷重が作用するので、今度使用したスプリングでは未だ強度が少し足りないことが分つた。

次にこのやうなスプリング系を使つた張力計では、當然張力計自身の固有振動が問題となつてくる。それで S_3 の固有振動の週期を S_1 及び S_2 より少し異なるやうに作つて、 S_1 及び S_2 の振動を幾分減らすやうにした。然しそれでも S_1 及び S_2 と S_3 を含むスプリング系の固有振動は未だかなり残つてゐる。従つて自記紙に現れた振幅は、風の息の強弱を忠實には現はして居ない。風の息による振動と、張力計の固有振動とを含めた複雑な振動を現して居る。然し電線の荷重をみるには、この自記紙の記録からその傾向は十分よく知ることが出来る。第2圖にその自記紙の記録の一例を示した。張力は激しい振動をし乍らも荷重の増加と共にその平均値が増してゐること、及びその振動の振幅が風が強いとときに著しく大きくなるがよくみられるであらう。



第 2 圖

iii) 試験電線

電線はニセコ山頂に於ける冬期の主風の方向に對してほぼ直角に張つた。工事は札幌逓信局の手によつて行はれた。然し着氷時の風向を實際に測つてみると、電線に直角に吹く場合は割に少く、電線に對して 60° 位の方向から吹く場合が多かつた。このやうな場合は、風の抵抗を問題とするときには、風向による風速の補正をする必要がある。

使用した電線の種類は銅線及びアルミニウム線で、その太さはそれぞれ直径 2.9 mm 及び 2.0 mm の 2 種である。結線の区間は 20 m で線の両端を碍子に結び付けて緊めた。線は 5 本張り、その中の 1 本 2.0 mm のアルミニウム線を張力計に連結して、その張力の切線方向の分力の變化を自記させた。

§ 2. 着氷の種類と氣象條件

電線に着いた自然着氷を肉眼及び顯微鏡で觀察した所によると、大體次の 7 種類に分ける事が出来る。

1. 樹霜型 (Air hoar)

これは水蒸氣の昇華凝縮及び極微小水滴の凝縮⁽¹⁾によるもので、多くの場合風向と反対側の電線面上に觀察される。その構造は結晶質で、その顯微鏡寫眞の一例を寫眞 1 に示す。結晶はコップ型又は六角柱状及び樹枝状に成長する場合が多い。樹霜型の着氷は霧粒による他の型の着氷が起つてゐる場合には、風向と反対側だけしか見られないことが多いが、樹霜だけ發達する時は電線の全面に發生する。稀れには他の型の着氷の上の一部に樹霜が見られることもある。樹霜型の發生する氣象條件は氣温が大體 -5°C 以下で風がかなりあることである。殊に氣温が -10°C 以下に低い時に多い。この型の着氷は或程度成長すると風で吹き千切られてしまふので、電線には殆んど害がない。

2. 樹氷型 (Anraum^{**})

これは雪が過冷却霧粒によつて凝結させられたもので、高山の樹木や建物によく着いて居る。藏王山のモンスターとして有名なのはこれに屬する。電線にも時々この種の着氷が現れることがある。寫眞 2 にその一例を示した。この寫眞は樹氷をこわして顯微鏡で見たところである。この例から樹氷型が雪片を混入して出来ることが分る。電線に樹氷型が發生する氣象條件は、氣温が -5°C 以上で濕雪が降り、風が 2~3 m/sec 程度に弱い時である。これも電線にはあまり害がない。

3. 粗霧氷型 (Soft Rime⁽²⁾)

過冷却した霧粒が電線に凍着すると霧氷になる。この霧氷が天然の着氷に最も多い種類である。これは外觀や顯微鏡組織からみて更に 2 種類に分けることが適當と考へられる。その一つは

* 着氷の種類には中央氣象臺の分類があるが、本研究ではその目的に適合するやう少し形を變へた。

(1) 花島政人：氣象集誌，第 2 輯，第 22 卷（昭和 19 年），125 頁。

** スイスに於て所謂モンスターに名付けられた名稱。

(2) 着氷の種類を soft rime と hard rime の 2 種に分類して居る人もある。Pagliuca : Jour. Aeron. Sci. Vol. 4 (1937), No. 10, p. 399.

本類に掲げた粗霧氷である。寫眞3に示した如き構造をして居て、肉眼では白色不透明で羽毛状の外観を呈してゐる。高倍率の顯微鏡で組織をみると、着氷先端は連珠状をなし、小水滴が凍つて集合したやうな構造になつて居る。その一例を寫眞4に示す。この粗霧氷が出来た時の霧粒は小さく最大頻度は直径で 0.015 mm に過ぎなかつた。即ち、この顯微鏡寫眞にみられる小氷塊は、霧粒ではなく、この氷塊の 1/5 乃至 1/10 程度の小さい霧粒が多數凍りついて出来たのである。断面は粒状組織をなして居て、その組織は粗い。この霧氷は硬度もごく小さく、手で觸れるか軽くたゞげば容易に脱落する。この型は氣温が大體 -10°C 以下で風速が大體 10 m/sec より弱い時に多く現れる。然し風がごく弱く霧粒が少い場合には -10°C 以上でも現れる。この型の比重は 0.1~0.2 で内部に多量の空気を含んで居る。

4. 密霧氷型 (Hard Rime)

この型の霧粒は外観は粗霧氷型に似て居るが羽毛状をなして居ない。内部組織が稠密で固く、附着力も大きい。寫眞5にこの密霧氷の一例を示す。高倍率で先端を見ると寫眞6の如き構造をなして居る。粗霧氷の寫眞4と比較してみると、大體似た構造で、唯この場合は氷粒が稠密に結合し、表面が比較的平らになつて居る。氷部分が多いので比重も増し、0.3 乃至 0.5 となる。断面をみると縞模様をなしてゐる場合が多いが、この縞は粗霧氷と密霧氷とが交互に生成して出来たものである。この型は氣温が -5°C ~ -10°C で霧粒多く風速 10 m/sec 前後の時に多く現れる。風速が更に大であると氣温 -10°C 以下でもこの型が現れる。

以上に述べた粗霧氷型及び密霧氷型は截然と區別出来るわけではなく、氣温、風速及び霧粒の量に依りその中間の各段階のものが現れる。この霧氷は天然に一番起り易く、その中、密型は附着力が大きく組織も固いので電線には有害な着氷である。

5. 粗氷型 (Clear Ice)^{*}

これは乳白色硝子状又は氣泡縞混入の半透明の着氷である。寫眞7に縞状組織を有する粗氷型の一例を示す。この時の着氷は約 12 時間つき、直径約 12 cm~15 cm に發達した。それを取はづし、縦に二つに切つてその断面をみた寫眞である。中央の黒い水平な線が電線の通つて居た痕である。内部は半透明になつて居るが、外側には凹凸があつて白色に見えることが多い。顯微鏡組織をみると、先端の小突起が少く、粒状組織が發達し、その粒が霧氷の場合よりも大粒となつて居る。粗氷先端の表面の顯微鏡寫眞を寫眞8に示す。又縞模様の構造を見る爲に、電線に直角な断面を作つて顯微鏡で見ると寫眞9の如くなつて居る。即ちこの寫眞で黒く見える2本の太い線が肉眼では白い縞の部分であり、白い部分が半透明な氷部分である。氷部分にも氣泡がみら

* Clear ice と言ふのは不適當な名前で、透明な氷、即ち次の glaze と混合する虞れがあるが、習慣に従つて假りにこの名前を掲げる。

れるが、黒い太線部には気泡が更に多数ある。寫眞では焦點下にある気泡の爲に透過光が散亂して黒く見えるのである。即ち粗氷の縞模様は混入の気泡の粗密によつて出来るのである。此の透明部分を顯微鏡で見ると、雨水の構造寫眞 12 に示すやうな構造がみられる。寫眞は略す。即ち柱状の氷の集合から成つてゐることが多い。この型は氣温が -5°C 前後もしくはそれ以下でも、大氣中の霧粒数が多く且つ風速がかなり大きく $15\text{ m/sec}\sim 20\text{ m/sec}$ 程度の場合にはしばしば現れる。粗氷型は霧氷に較べると、組織は一段と稠密で硬度も極めて固く、又附着力も極めて強大である。従つて電線に着氷すると甚大な危害を與へる。比重は $0.5\sim 0.7$ である。

6. 雨水型 (Glaze)

これは完全透明な着氷である。透明度は普通にみる河川の氷と殆んど變りがないが、外形は凹凸を示すことが多い。その一例を寫眞 8 に示す。組織は着氷中一番稠密で、硬度も大である。表面の顯微鏡寫眞の一例を寫眞 11 に示す。着氷の表面は大粒の滑らかな起伏がある程度で、全體としては平滑である。粗氷の表面寫眞 9 と比較するとその差がよく分る。電線を含む断面を作つてみると、寫眞 12 に示す如く、柱状の氷の集合から出来て居る様子がみられる。これは人造氷などでもよく現れる構造である。比重は氷に近い。雨水型は氣温が -2°C 前後で、霧粒多く且つ風が強い場合に起る。この着氷は固く、電線から剥れても氷の圓筒となつて電線上を滑るだけで、なかなか除去されない。電線には非常に有害な着氷である。

7. 霰型 (Soft Glaze)

氣温が $-0.5\sim -1.0^{\circ}\text{C}$ 位で風が弱く霧粒数が多いと、雨水型に似た着氷になるが、この場合の着氷は氷部分の組織が比較的粗で、附着力も弱い。壓してみると簡単につぶれる程度に軟い。これは着氷組織中に霧水が凍結し切れずに残つて居るためである。このやうな着氷を霰型として新しく追加する。比重は殆んど氷に近い。この霰型は氣温の變化が無ければ電線に左程害を加へないが、少しでも氣温が低下すると雨水型に變るので、注意を要する。

以上電線に着く着氷を、外觀、顯微鏡組織、硬度、附着力、比重等を考慮して7種類に分類した。従來の着氷の分類と根本的に變つたことはなく、唯霧氷を粗密の2種に分け雨水の一部を霰型として別にしたに過ぎない。しかし電線に對する被害の度をみると、この7種に分類するのが適當と考へる。即ち、第1表の如

第 1 表

	種 類	形 状	危 險
1	樹 霜 型	結 晶 形	な し
2	樹 氷 型	白色不定形	殆んどなし
3	粗 霧 氷 型	白色羽毛状	殆んどなし
4	密 霧 氷 型	白色尾鱗状	危 險 あり
5	粗 氷 型	半透明不定形	危 險 あり
6	雨 氷 型	透明不定形	危 險 あり
7	霰 型	透明不定形	やゝ危険あり

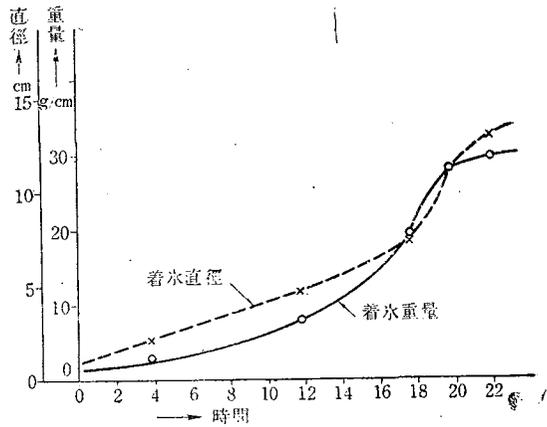
くこれを類別するのが便利である。勿論實際の着氷をみると気温、風速、霧粒等の變化に依り刻刻相異なる着氷が起り、これ等が重疊して全體の着氷を形成する。

着氷が速かな場合は次々と着氷量が増して重量が加はる。初めは風上に着くのであるが、その着氷の爲に電線が回轉して、次第に電線の周りを取捲いた圓柱形に發達する。密霧氷、粗氷及び雨水は一度圓柱形に着氷すると、なかなか脱落しないから着氷は益々増大し、着氷圓柱の半径の増大と共に風壓も著しく作用し、且つ風の息による振れ振動によつて電線が切斷されるに至るのである。

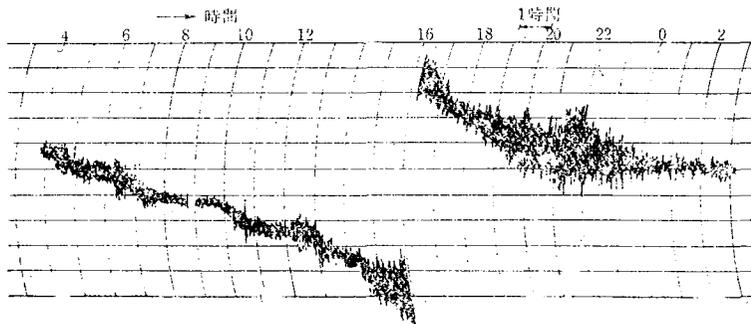
§ 3. 着氷の成長と電線の張力

着氷により電線が切斷された實例に徴すると、電線が切斷する場合は、着氷が急激に且つ連続して起つた場合に限られて居る。毎日數時間宛着氷が起るやうな場合には昇華蒸發が案外盛な爲に着氷は餘り大きくならない。

電線を切斷するやうな場合の着氷がどのやうに成長するかをみる爲に、着氷圓柱直径の増大と電線 1 cm あたりの着氷重量の増加との時間的變化を測定した。直径や重量の測定は電線の數點につき行ひ、その平均をもつてその時刻の値とした。その時間的變化の一例を第 3 圖に示す。第 3 圖に擧げた着氷が起つた場合の張力計の自記記録を第 4 圖に示す。このやうに張力は激しい振動をし乍ら増して行くのであるが、その平均をとつて荷重の増加として、これを第 5 圖に實線で示した。破線で示したのは着氷全重量の

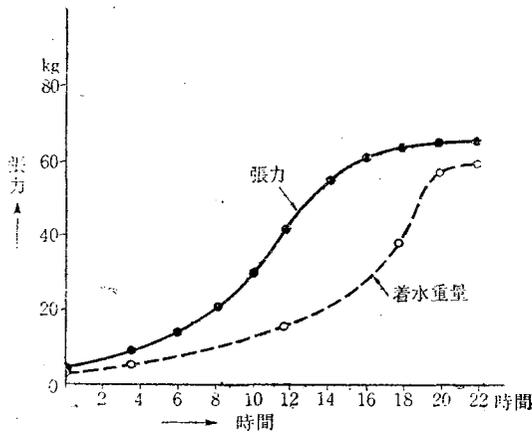


第 3 圖

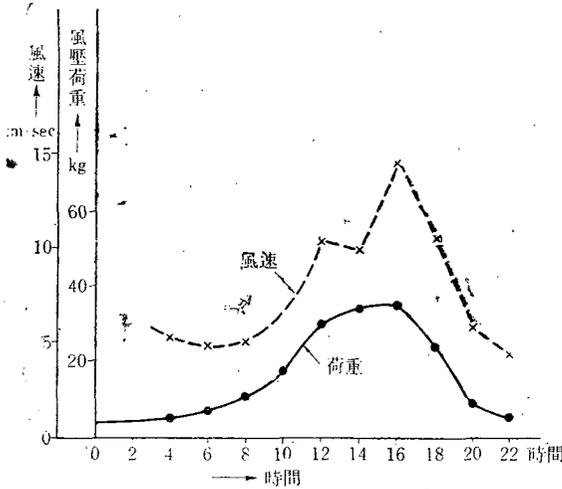


第 4 圖

變化である。これは第3圖から採つたものである。



第 5 圖



第 6 圖

着氷が成長するにつれ、電線に加はる張力は増してゆくが、この張力の増加は二つの要素から成つてゐる。即ち着氷自身の重量の増加と、着氷圓柱による風壓の荷重とである。第5圖で全體の荷重から着氷の重量を差し引いたものが風壓による荷重である。その差を風壓加重として第6圖に實線で示した。第6圖に點線で描いたのはその時の風速の變化であるが、この兩者はよく一致した變化を示して居る。この例に示した着氷は最後の段階で電線を切斷すると共に電柱を倒壊したものである。第5圖で明なやうに、着氷の重量に依る荷重も大きい、風が強い場合には風壓に依る荷重が更に大きいことがよく分る。電線等では風が強いと着氷の成長も速くなるから、電線の着氷の研究には風向及び風速は第一義的の意味をもつ大切な要素である。

以上の議論では電線に加はる荷重を單に着氷の重量と風壓との和であると見た。着氷は電線の全長にわたつてほ

ぼ一様につき、風に依る捻れ振動で 10~50 cm 位の長さに折れて居ることが多い。そこで着氷圓柱全體としては1本の氷柱ではなく自由に曲るやうになつてゐる。従つて着氷した電線はカタナリーの形をなして居て、全着氷重量だけ針金が重くなつたと見て差支へない。勿論張力計の檢定の際に於ける荷重状態とは異つて居るが、その差は現在の目的の範圍内では左程重視するには及ばない。それよりも風の影響が問題である。風が強いと着氷電線は風で斜め上方に吹き上げられる結果、着氷した重量全部が有效な荷重として働かない。しかし第6圖の結果からみても風壓に依る張力増加は全荷重から着氷重量を差し引いた残りとしても大した誤りはない。尤もこの場

合は風速が 15 m/sec 以下であつたので、それ以上風が強くなるとその影響はもつと著しくなる。

§ 4. 着氷電線の風による抵抗

流體中に置かれた物體の抵抗は、流體の粘性及びその物體の背後に出来る渦による。流速を u 、流體が物體に作用する面を F とすれば、抵抗 W は次の如くなる。

$$\text{粘性による抵抗: } W_{\mu} = C_{\mu} \frac{1}{2} \rho u^2 F, \quad C_{\mu} = f(\mu)$$

$$\text{渦動による抵抗: } W_w = C_w \frac{1}{2} \rho u^2 F, \quad C_w = f(R)^{(1)}$$

此處で C_{μ} は粘性係数の函數で、 C_w は亂流の度を示す Reynolds 數によつてきまる。 W_{μ} と W_w とを比較するに、亂流の激しい場合には、 W_{μ} は全抵抗の 2% 程度に過ぎず、98% が W_w による抵抗である。⁽²⁾ 着氷電線の場合には勿論亂流が著しいので、以下、抵抗は殆んど全部 W_w と考へて差支へない。

電線の着氷は或る程度以上發達すると、略圓柱形になるので、流體中に置かれた圓柱に及ぼす抵抗と比較してみる。圓柱の抵抗については、理論的には ⁽³⁾ Oseen 等の研究があり、實驗的にもよく知られてゐる。 C_w の値は圓柱の直径、長さ、面の粗度によつて異なるが、又 Reynolds 數によつても著しく異なる。⁽⁴⁾ Weselberger の測定によると、滑かな圓柱の直径が約 8 cm で長さが無限大の時、Reynolds 數が $10^6 \sim 10^8$ 程度であると、 C_w の値は 0.6~1.1 となる。もつとも圓柱が少し變形すると此の値は著しく異なるので、楕圓柱では C_w の値は上記の約 1/10 に減ずる。⁽⁵⁾ それで着氷電線との比較は單に大きさの程度を見るに過ぎない。

着氷電線の風による抵抗を、張力計の示す値から着氷重量を引いた残りを見做して、 C_w の値を出してみると、その値は着氷の形や風速によつてまちまちに出て来る。その中から大體圓柱形と見做し得る着氷だけを選び出して風速と C_w との關係を見ると、第 7 圖に實線で示した如き結果となる。この場合は電線の周圍一様に着氷が生長したので略圓柱形と見做して差支へない。點線は電線の一侧に尾鰭狀に發達した着氷についての C_w の値である。この兩曲線から尾鰭狀の C_w は測定風速の範圍内ではいつも圓柱形の場合の約 2 倍になつてゐることが分る。即ち尾鰭狀の着氷は風壓面が同じでも圓柱形の約 2 倍の風壓を受けることを知る。

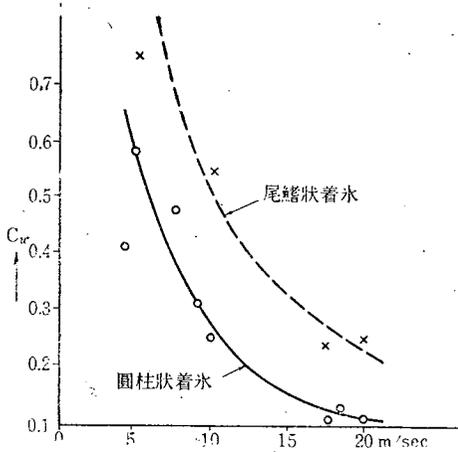
(1) Prandtl: Handb. der Exp. Phys., Bd. IV. Teil. I, S. 33.

(2) 谷一郎: 應用流體力學, 岩波講座, 32 頁.

(3) Oseen: Hydrodynamik, Leipzig, 1927.

(4) Weselberger: Handb. der Exp. Phys., Bd. IV, Teil 2, S. 313.

(5) " : " " " " " S. 307.



第 7 圖

を用ひればよい。

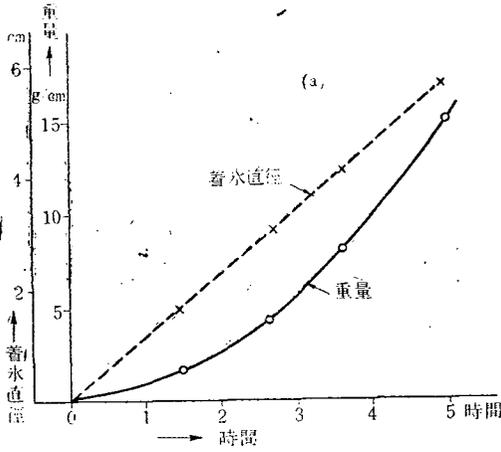
電線上に着氷が発達して行く経過をみると、着氷の初期に於ては前に述べた如く電線の風上側に尾緒状の着氷が起きる。それが成長するにつれ、電線が廻轉し、或は廻轉振動をして、漸時電線の周囲全體に着氷が発達して圓柱形になるのである。その間風には絶えず強弱の變化即ち風の息がある。その爲に着氷電線は絶えず振動する。この振動が電線金屬の疲勞を齎し、切斷を早める結果となるものと考へられる。風の息の週期を測つてみると、強風の時は大體 10~20 秒くらゐであつた。自記紙にも略この程度の振動が現れてゐる。

§ 5. 電線切斷狀況の調査

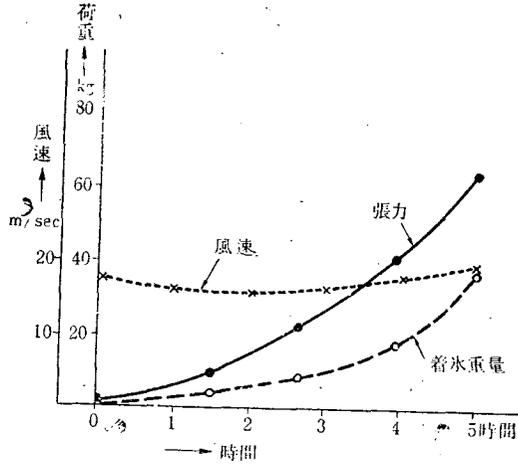
電線の着氷による切斷に關しては、關四郎氏の着氷脱落による電線の跳上り試験報告⁽¹⁾があるが實際の切斷狀況の詳しい記録は餘り無いやうである。

着氷の最も激しかつたのは、昭和 19 年 3 月 20 日及び 21 日の兩日に互つて前後約 20 時間連続した着氷である。氣温は -5°C 乃至 10°C 、風速は 10 乃至 25 m/sec、霧粒の濃度は非常に大きかつた。その間でも着氷の最も激しかつたのは 21 日 0 時より 5 時迄の間でその時の張力計の自記記録を第 8 圖に示す。此の自記紙より平均荷重増加曲線を作り、着氷の成長曲線と共に第 9 圖に掲げた。圖に見られる如く、荷重増加は著しく急激であつた。着氷の種類は密霧氷型と粗氷型との合成で寫眞 7 に示したものは、此の時の着氷の縦斷面である。

(1) 關：雪氷，第 4 卷，第 1 號；第 5 卷，第 1 號。



第 8 圖



第 9 圖

電線は 4 種類共前後して切斷された。その狀況は第 2 表に示す如くである。

第 2 表

電線種類	切斷時の着氷密度	切斷時の全着氷重量	切斷時の着氷直径	摘 要
アルミ 2.0 mm	15~20 g/cm	30~40 kg	6~7 cm	最初に切斷
アルミ 2.9 mm	25~30 "	50~60 "	8~9 "	中 間
銅 2.0 mm	25~30 "	50~60 "	8~9 "	"
銅 2.9 mm	50~60 "	100~120 "	11~12 "	最後に切斷

この結果からみると、銅線の方が強く、アルミの 2.9 mm 線と銅の 2.0 mm 線とが略匹敵することを知った。

以上の數値は着氷重量だけを示すもので、實際荷重としては此の上に更に風壓による荷重が加はつて切斷されたものである。風壓による荷重増加は、風速 20 m/s 程度に於て、略全着氷重量に等しく、従つて電線は第 2 表の値の約 2 倍の荷重で切斷されたものと考へられる。

電線の切斷箇所を調べてみると、兩端の結線點に近い所に多かつた。荷重が結線點に一番強く働くので當然とも言へるが、その外に風の息による電線の振動で此の部分に一番多く材質の疲労が起きることも考へられる。後者の方が實際には重要な原因と思はれる。電線の切斷箇所を調べてみると、線が引き伸ばされて細くなり、舊の太さの略 1/3 位になつて切れてゐることを知つた。

今年度の觀測では電線が切斷される程の激しい着氷は餘り起きず、資料は未だ十分では無いが、銅の 2.9 mm 線程度の電線では、氣温が $-5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ で濃霧があり、風速 10 m/sec 以上といふ氣象條件が 20 時間程度續くと切斷されることが明かになつた。

§ 6. 着氷防止策について

着氷を防止するのに一番良い策は、最初から着氷させない方法であるが、着氷を或る程度以上發達させないことが出来れば、それでも十分である。

着氷の發達は上述の如く、初期に於て電線の一側に尾緒狀に着き、漸時圓柱形になつて電線全體を包む形に發達する、もし着氷を電線の一側にのみ成長させることが出来れば、成る程度成長しても自然風で破壊除去されてしまふ。着氷が圓柱形に發達するのは電線が廻轉する爲であるから、この廻轉を少くする爲に電線を強く張つて試験してみた。その結果霧氷型の着氷には有効であることが分つたが、粗氷型や雨水型の着氷では餘り効果が無かつた。

次に防水塗料を塗つた結果をみると、陸軍式ペーストでは着氷量が約半分となり、その點では効果が認められたが、粗氷型の着氷にはやはり効果が無かつた。氣象臺式ペーストはかなり有効のやうであつたが、本年度の研究ではその入手がおくれた爲に確認するには到らなかつた。

結局以上のやうな方法では、完全な防水は期待出来ない。もし出来たとしても長距離に亙る電線については技術的に困難である。残る方法は熱式であつて、多量の電流を流してジュール熱によつて電線を温める方法である。此の方法は既に我が國に於て試用されてゐるが、熱式を採用するとすると、問題は着氷氣象の豫報と初期着氷遠隔指示装置の考案と氣象條件と加熱電流との關係を求めることに歸するであらう。

終に臨み本報告の發表を認容せられた札幌逓信當局の好意を謝す。同時に寫眞撮影に御援助を載いた日本映畫社の湯川正彦氏に深く感謝する次第である。

低 温 科 学 第 二 輯 (第 一 刷) 正 誤 表

(頁)	(行)	(誤)	(正)	(頁)	(行)	(誤)	(正)
目次	20	福島	福富	90	13	写真 12	写真No.30
3	12	α	αd	94	28	" 7	" No.25
6	第6圖	5 cm	0.5 cm	99	16	示すと	みると
"	20	$\frac{3}{\text{kg/cm}}$	$\frac{3}{\text{kg/cm}^2}$	"	"	写真No.1の如く	トル
24	22	相対温度	相対湿度	"	22,23	写真1に見られる	トル
26	第1表の5	<105	>105	100	2	写真と同様に	トル
27	4	写真 2	写真No.2	101	27,28	写真No.2に示す様に	トル
"	10	" 1	" No.1	101,102	30,1	写真に示す如く	トル
"	14	" 3	" No.3	102	13	第1表及び写真No.2を	第1表を
"	19	F	下	108	26	写真 1	写真No.31
"	30	写真 4,5	写真No.4,5	"	29	" 4	" No.34
28	4	T_c	T_a	"	29	" 4	" No.34
"	5	T_c	T_a	109	3	" 4	" No.34
"	23	写真 6,7,8	写真No.6,7,8	"	"	" 5	" No.35
"	29	" 8	" No.8	"	"	" 2	" No.32
29	2	" 9,10,11	" No.9,10,11	112	3	" 3	" No.33
34	10	鐵線があるが	鐵線であるが	113	17	" 6	" No.36
59	第13圖	---細土含有量	---細土含有量	"	18	" 7	" No.37
"	"	-x-粘土含有量	-x-粘土含有量	"	29	" 8	" No.38
70	24	b c	b : c	115	27	" 9	" No.39
71	3	写真No.1	写真No.12	116	4	" 9	" No.39
"	3	" No.2	" No.22,13	120	13	$1.0 \times 10^{-7} V$	$1.0 \times 10^{-2} V$
"	16	" No.1	" No.21,12	121	7	30cm	130cm
74	6	第2圖(A)	" No.14	128	14	3m	4.8m
"	"	" (B)	" No.15	136	第1表の1	左右對線	左右對稱
"	"	" (C)	" No.16	142	1	打點式によつて	自記的に
"	8	写真 (A)	" No.14	159	6	Ag	Aq
"	10	写真 (B)	" No.15	164	25	$\Delta t'g > t_w$	$\Delta t'g > \Delta t_w$
"	18	" (C)	" No.16	166	27	0.001N	0.001/N
"	20	" (A)	" No.14	171	3	9桁	6桁
75	9	第4圖(D)及(E)	" No.17, No.18	"	16	$\frac{T_l}{T_a} Vt$	$\frac{T_l}{T_t} Vt$
"	11	写真 (D)	" No.17	172	2	$R-I = \frac{e}{e_{sat}} 100$	$RH = \frac{e}{e_{sat}} 100$
"	12	" (E)	" No.18	"	22	a), b)	写真No.40, No.41
77	脚註3	Seron	Screen	174	第3表	相対温度	相対湿度
80	11	$\int_0^\infty \varphi(r) d^2(r) pr$	$\int_0^\infty \varphi(r) p^2(r) dr$	180	6	$B_{nap} s$	B_{napus}
88	10	写真 1	写真No.19	181	2	<i>Faphanobras-sica</i>	<i>Raphanobras-sica</i>
"	20	" 2	" No.20	182	4	<i>Horde m</i>	<i>Hordecum</i>
89	1	" 3	" No.21	183	13	<i>nap s</i>	<i>napus</i>
"	3	" 4	" No.22	244	19	單位生殖	單爲生殖
"	12	" 5	" No.23	248	15,16	溫度氏はでも	湿度でも
"	"	" 6	" No.24	"	16	尙松島	尙松島氏は
"	14	" 4	" No.22	252	13	Schwarkinowa	Schkwarnikow
"	22	" 7	" No.25	257	6	写真1-5	写真No.56の1-5
"	27	" 8	" No.26	259	8	写真4-5	写真No.56の4-5
"	28	" 9	" No.27	260	6	" 6	" No.56の6
90	3	" 12	" No.30				
"	10	" 8	" No.26				
"	11	" 11	" No.29				
"	12	" 9	" No.27				