



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	電線着雪の風洞実験 : 高風速下での着雪の成長
Author(s)	若浜, 五郎; WAKAHAMA, Gorow; 小林, 俊一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 36, 169-180
Issue Date	1979-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18364
Type	departmental bulletin paper
File Information	36_p169-180.pdf



電線着雪の風洞実験*

— 高風速下での着雪の成長 —

若浜五郎・小林俊一

対馬勝年・鈴木重尚

(低温科学研究所)

矢野勝俊

(山形大学理学部)

(昭和53年10月受理)

I. ま え が き

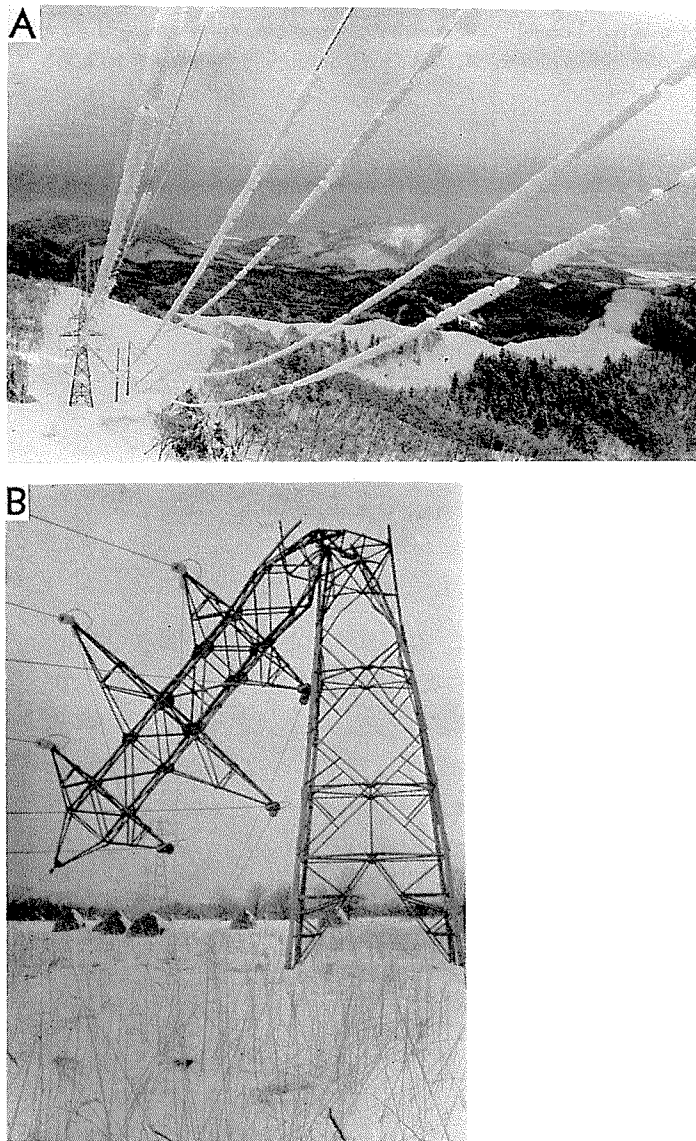
大量のぬれ雪が降ると、しばしば、送電線や配電線に雪が付着する電線着雪の現象がみられる。着雪がひどいときには、電線の周囲に直径が10~20 cm、時には30 cmもの筒雪が発達し、その重みその他の原因で電線が切断したり、送電鉄塔が倒潰して長時間にわたる停電をひき起し、社会全般に大きな被害をもたらす。第1図Aに送電線への着雪を、同図Bには電線着雪で倒潰した送電鉄塔の例を示した。

このような電線着雪の実体やその事故防止対策は古くから北陸地方を中心に、電力・通信関係者や国鉄の研究者によって進められてきた¹⁾。例えば荘田¹⁾は、電線着雪の成長・発達過程をくわしく調べ、その発生条件を経験的に求めた。それによると、着雪は、(1)日本海を渡ってきた季節風が大量の湿雪をもたらし、(2)地上気温が0~+1.5°Cで、(3)風が弱く、風速が3 m/s以下、の三条件が揃ったときによく発達し、着雪事故が起るといふ。

荘田の着雪発生条件はどの地方の着雪にも適用されるものと考えられてきたが、1960年代以来、北海道でしばしば発生した重大な電線着雪事故が風速10~30 m/sの強風を伴う暴風雪のもとで起ったことが北海道電力株式会社によって確認され²⁾、荘田の着雪条件とは全く異なる気象条件下でも着雪が発達しうることが認識された。例えば第1図Bに示した着雪事故は、昭和47年12月1日、強い低気圧が北海道を通過したとき、20 m/s以上の強風下で起ったものである。

このように電線着雪の起りかたに2つの型があるので、これらを区別するため、近年は、(I)北陸地方などで弱い風のもとで発達し、3 m/s以上の風が吹くと脱落するような着雪を「北陸型」、「季節風型」、「I型」などと呼び、(II)北海道などで強風下で発達する着雪を「北海道型」、「低気圧型」、「II型」などと呼ぶ³⁾。前者が発達するのは前記の荘田の条件下であるが、後者が発達するときの気象条件は、(1)強い低気圧が接近して大暴風雪となり、(2)地上気温が

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1959号



第1図 A: 送電線への着雪, 昭和51年3月21~22日, 北海道東部を襲った大雪の際に発生(北海道電力弟子屈幹線92号鉄塔附近)。B: 昭和47年12月1日, 北海道北部に発生した着雪により倒壊した送電線鉄塔(北海道電力株式会社提供)

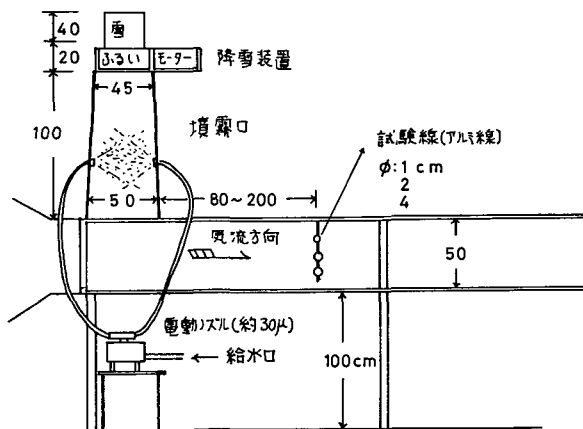
0~+2°Cの範囲で, (3)降雪強度が非常に大きく, 水換算で毎時5mm程度かそれ以上に達し, (4)降雪雪片の含水率が高く15~30%程度であることである²⁾。これらの条件が重なれば, 北海道でなくても大きな着雪事故が起りうるはずだが, 事実, 暴風雪下での着雪事故は東北地方から四国, 中国地方でも発生することが近年確認された。従って強風下で起る着雪を北海道型とよぶのは必ずしも適当ではない。

低気圧が通過する際, 強風下で起る着雪の発達過程を明らかにするための基礎実験や, その対策の研究は, 1970年ころから北海道電力株式会社⁴⁾や本研究所^{5,6)}で始められた。本報告

では、10～20 m/sの高風速下で起る着雪の成長・発達機構を明らかにするため、低温風洞を用いて行なった一連の基礎実験の結果についてのべる。

II. 実験方法

実験は、北海道大学低温科学研究所の測定部の長さが8 m、断面が50 cm 平方のゲッチンゲン型低温風洞を用いて行なった。第2図は実験装置の略図である。風洞の風上側上部に人工の降雪装置を設置し、電動の篩によって、積雪の塊をほぐしながら雪粒を落下させる。降雪装置の壁にとりつけた噴霧装置によって直径が30 μ 程度の水滴を噴霧して落下しつつある雪粒を完全にぬらす。ぬれた雪粒は風洞内に入るや強い風に乗ってほぼ水平に飛ばされ、風洞内に固定した試験線に衝突する。試験線は、直径が1 cm, 2 cm, 4 cmのアルミ管および直径2 cmのより線の計4種類のものを用いた。



第2図 着雪実験装置略図

天然の着雪時になるべく近い状態を再現するため、降らせる雪は新雪層から採取したものをを用いたが、この他、比較のため、低温室に保存してあった古いしまり雪をも使用した。与えた降雪強度もなるべく天然の着雪時に近くして行なった。着雪事故が発生したときの天然の降雪強度は5 mm/hの程度であるが、これは地上に積った雪から求められたもので、降雪フラックスの地表に垂直な成分である。従って、例えば20 m/sの強風下で着雪が起る際は、風に乗って電線にほぼ水平に吹きつけてくる雪の電線に対する降雪強度は地表での測定値の約20倍となる。5 mm/hの降雪強度を電線に対する実質降雪強度に換算すると、約10 g/cm²・hとなる。われわれが実験で主に用いた降雪強度は10～70 g/cm²・hであったので、これは天然のばあいの10 g/cm²・hに比べてやや大きな値である。

風洞内の温度を0.5～4°Cに保ち、降雪の含水率や雪質を変え、0～20 m/sの風を吹かせつつ試験線に発達する着雪の成長過程を観察し、16 mm映画その他に記録し解析した。

III. 実験結果

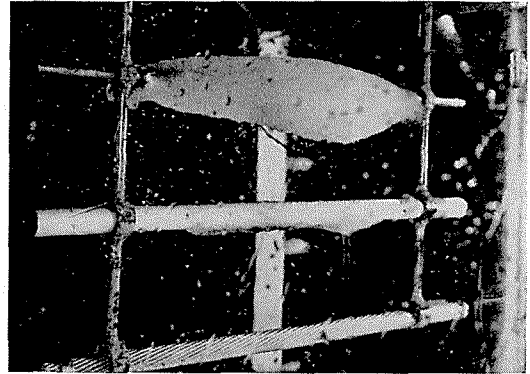
1. 着雪の成長

上記の条件を与えた場合、0～20 m/sのすべての風速下で着雪が成長・発達することがわかった。一例として、風速10 m/s、気温+2°C、降雪強度50 g/cm²・hを与えた場合に発達した着雪を第3図の写真に示した。上段は直径1 cmのアルミ線、中段は同2 cmのアルミパイプ、下段は同2 cmのより線(6.5 kV用ACSR線)である。

写真に見られるように、上段の線の着雪が著しかった。着雪の成長にこのような著しい差

があらわれたのは、試験線を設置した場所における降雪強度が風洞内の上部ほど大きかったことと、細い線ほど着雪体の回転が早く起り、筒雪になるまでの時間が短かったこととが相乗して着雪の成長に有利であったためである。このことは、コマどりで撮影した16mm映画の解析によっても確かめられた。今回の一連の風洞実験で得られた結果を第1表にまとめて掲げた。これらの実験で、円断面の試験線について得られた知見をまとめると大略次の通りである。

(1) 乾き雪の場合、つまり雪がぬれないう状態での5 m/s以上の風速下の実験では



第3図 着雪の成長を示す例

上：直径1 cmのアルミ線

中：直径2 cmのアルミ線

下：直径2 cmのより線

(風速10 m/s, 気温+2°C)

第1表 風洞内の着雪実験の条件と結果

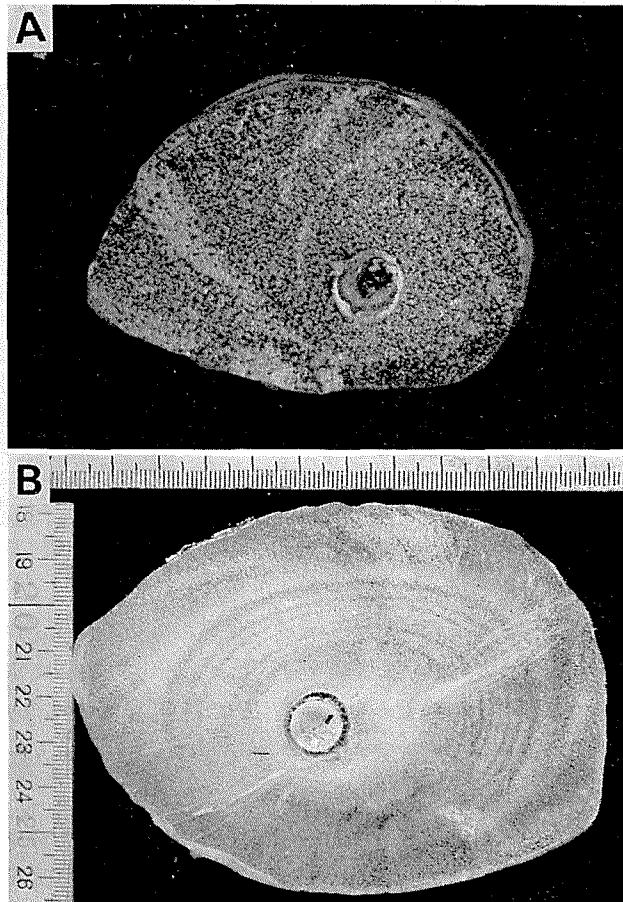
実験番号	実験時間 (min)	降雪強度 (g/cm ² ・h)	風速 (m/s)	気温 (°C)	着雪体の含水率 (%)	試験線直径 (cm)	雪質	着雪状況
1	11	—	0	1.5	—	1	新雪	載雪
2	11	—	0	1.5	—	1	新雪	載雪
3	6	—	0	1.5	—	1	新雪	載雪
4	13	—	0	1.5	—	1	新雪	筒雪
5	6	—	0	1.5	—	1	新雪	筒雪
6	12	1	3	1.0	18	1 & 2	新雪	筒雪, 前面着雪
7	19	2	3	0.8	8	1 & 2	新雪	筒雪
8	18	23	5	1.2	—	1 & 2	新雪	筒雪
9	31	36	7	1.0	—	1 & 2	新雪	筒雪
10	30	76	9	1.0	—	1 & 2	新雪	筒雪
11	20	35	11	1.0	—	1 & 2	新雪	筒雪
12	32	55	13	2.1	—	1 & 2	新雪	筒雪
13	16	146	15	1.4	—	1 & 2	新雪	着雪なし (散水なし)
14	28	50	15	1.5	—	1 & 2	新雪	前面着雪, 風下側つらら状
15	38	45	20	1.5	—	1 & 2	新雪	風下側つらら状着雪
16	13	28	15	2.3	—	1 & 2	旧雪	着雪なし
17	54	30	8	2.0	—	1 & 2	旧雪	筒雪風速0のとき脱落 (前面着雪時)
18	18	14	5	2.4	19	1 & 2	旧雪	筒雪風速0のとき脱落 (前面着雪時)
19	24	38	10	1.2	33	1 & 2	旧雪	前面着雪, 風速0のとき脱落
20	77	21	12~17	2.5	—	1 & 2	新雪, 旧雪	
21	9	46	10.3	4.8	—	4	新雪	前面着雪
22	9	17	10	4.0	—	4	新雪	前面着雪
23	36	50	10	4.0	—	4	新雪	筒雪
24	25	67	10	5.0	—	4	新雪	筒雪
25	5	97	15	1.2	—	4	新雪	前面着雪
26	10	67	10	1.5	—	4	新雪	前面着雪

いかなる場合も着雪は生じない。ただし、風速が0の場合には（試験線上に雪粒を自由落下させた場合）、試験線上に単に雪が積る載雪現象が観察されたが、ある程度積ると線から脱落した。しかしこの場合でも霧水をかけて雪粒をぬらすと、試験線上に積った雪は試験線のまわりを回転しながら、脱落することなく筒雪にまで成長した。これは、弱い風のもとで起る北陸型の着雪に対応するものである。

(ロ) 湿雪で、5~10 m/s 程度の風速下では、着雪はまずはじめに風上の方向に伸びはじめる。この際、成長の途中で突然風を止めてみると、多くの場合着雪体は試験線の周囲に沿って下方に回転し、試験線の下面から脱落した。風を途中で止めることなく、風を吹起し続けた場合には、着雪は試験線の周囲を回転しつつ次第に筒雪にまで成長発達した。

従来、莊田¹⁾らによって、強風下では着雪が吹き飛ばされるため、着雪は発生しないとされてきたが、今回の風洞実験でみられたこれらの事実は、強風が着雪体を吹き飛ばすどころか、少くとも着雪の発達の初期の段階では、強風が着雪の成長・発達の一要因になっていることを示している。これは、強風によって着雪体に生ずる揚力が、着雪体の脱落を防ぐためであろうと解釈できる。

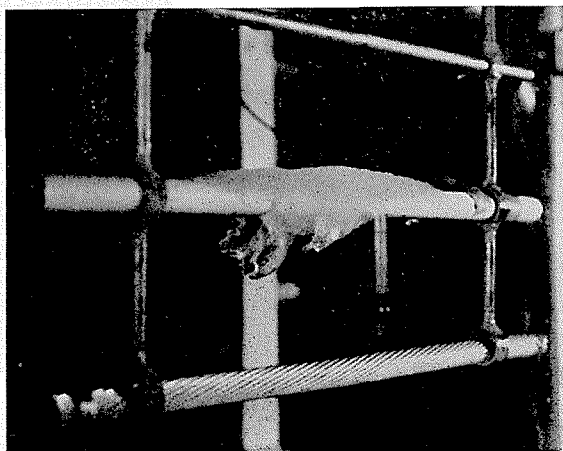
(ハ) 着雪が筒雪になる過程では、初期着雪体の回転が重要である。風速が4~5 m/s 以上になると試験線の前面で着雪が風上に向かって成長し、やがては試験線のまわりを回転しはじめる。直径1cmの試験線では、風速が10 m/s 以下の時は、着雪体は重力に順じて回転（これを次の逆回転に対して、順回転とよぶ）しつつ筒雪に成長した。しかし、風速が10 m/s を越えると、重力に逆って、着雪体が試験線の上面に沿って風下側に回転する場合（これを逆回転とよぶ）がしばしば観察された。これは、10 m/s 以上の強風下では、着雪体の周囲に強い攪乱が起る結果と考えられる。回転方向は必ずしも一定しておらず、順から逆へ、逆か



第4図 試験線の周りに発達した着雪体を輪切りにしたところ。A: 風速が5 m/s のもとで成長した着雪。断続的な回転を示す扇形構造がみられる。B: 風速10~15 m/s のとき、連続回転を示す同心円構造がみられる。

ら順へと転じつつ着雪体は次第に成長発達した。しかし、直径が2 cmと4 cmの試験線の場合には、10 m/s以上の強風下でも順回転だけが観察された。このように回転方向には、風の強さだけでなく、着雪体の形、大きさ、試験線の太さ、断面形状などが関係していて、ある条件下では逆回転をしながら着雪が成長発達しうることがわかった。又着雪体の薄片写真の観察からも回転しながら成長発達したことがはっきりとわかる。そして、風速が5~10 m/sで成長した着雪体は、線のまわりを断続的に回転しながら成長発達した扇形構造を示した(第4図A)。一方、風速が10~15 m/sのときは、着雪体が連続的に回転して成長発達した同心円構造が薄片上に認められた(第4図B)。

(イ) 15 m/s以上の強風下では、着雪は10 m/s以下の風速の場合とはかなり異った形態を示しながら成長した。最初、着雪は風上側に成長するが、ある程度発達すると、強い風の影響でそれ以上風上側に伸びることができなくなる。湿雪片あるいは着雪体の先端部から剝離した雪が、着雪体の表面に沿って風下側へ移動し、あたかも「つらら」が伸びるごとく風下側に発達した(第5図)。このような形状になった着雪は一般に脱落しやすかった。しかし、試験線の上下両面から風下方向に伸び出した雪が結合し、結果として筒雪状になってしまうと、決して脱落することがなく、ついには直径10 cm以上の大きな筒雪にまで成長した。したがって、15~20 m/sの風速の場合にも充分筒雪状の着雪に発達することが実験的に証明されたわけである。



第5図 風速15~20 m/sのとき風下側につらら状に成長した着雪体

(ロ) 雪質の違いが着雪の成長に及ぼす影響は着雪発達の限界風速が異なる点である。これまでのべてきた観測結果は、主に、積ったばかりの新雪を用いて行った実験についてであったが、20 m/sに達

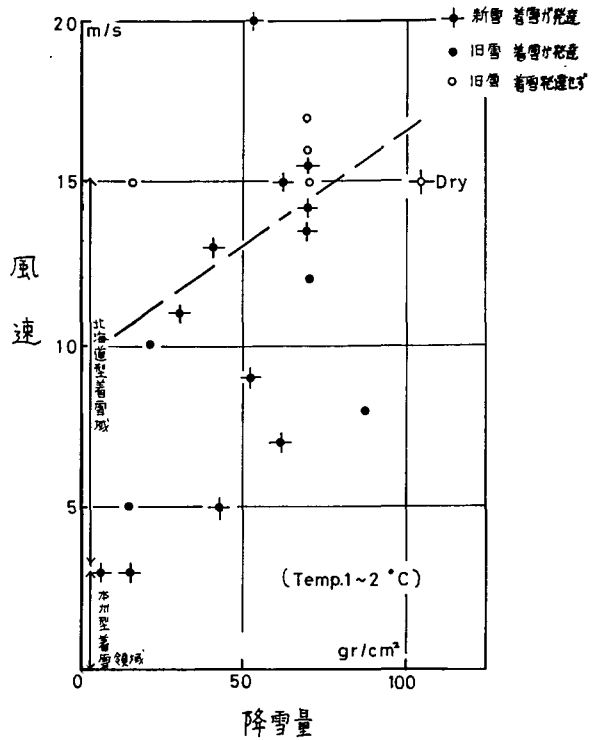
するまでのすべての風速下で着雪の発達が確認された。実験期間中、新雪を入手できない場合には、しまり雪を用いて実験を行った。しまり雪を構成する雪粒は直径が0.3~0.5 mm程度の丸味を帯びた氷の粒だから、新雪(雪の降雪結晶形が部分的に残存している)を用いた場合とは着雪の様相がかなり異なることが予想される。それがどのように違うかは物理的にも興味のあることである。そこで前年に採集して低温室に保存してあった古いしまり雪を用いて着雪実験を行なってみた。第6図は横軸に1時間当りの降雪量を取り、たて軸に風速をとって実験結果を示したものであるが、図中の◆印が新雪の場合であり、●印は旧雪(古いしまり雪)を用いて着雪が生じた場合、○印は旧雪で着雪が生じなかった場合である。旧雪の場合には、風速が15 m/s以下のときには着雪が発達したが、15 m/s以上の風速のもとでは、着雪が起らなかった。10 m/s程度の風速下で着雪を発達させ、実験の途中から風速を15 m/s以上になると、すでに着雪した雪がどんどんちぎれて飛び去り着雪体が小さくなった。すなわち削剝が生じた。

そして風速を再度 10 m/s に弱めると再び着雪が成長し始めた。このように旧雪を用いた場合には、着雪が発達するか否かの限界風速は 15 m/s であった。

2. 試験線への雪粒の衝突と捕捉率

高風速時 (10~20 m/s) の電線着雪の成長を詳しく調べるために、試験線へのぬれ雪の衝突と捕捉現象を高速度映画やストロボ写真撮影を用いて観察した。ぬれ雪を作るために散水で行った。

過冷却水滴が円柱に衝突してほぼ瞬間的に凍結固着してしまう着氷現象の場合には、衝突率と捕捉率が等しいと考えられる。この場合の捕捉率は、円柱のまわりの空気と微小水滴の流体力学的な流線の形と両者の間の相対速度の差できまり、その値は Langmuir と Blodgett⁷⁾ によって理論的に求められている。ちなみに、風速が 10 m/s、雪粒を半径 0.05 cm の球と考え、試験線の直径を 2 cm とし、Langmuir-Blodgett の衝突率の式を使って計算してみると、その値はほぼ 1 に近い。すなわち試験線に向かって進入してくる雪粒はほとんど進路を曲げられることなく直進して試験線に衝突することになる。藤野ら⁶⁾ が行なった試験線の周囲の空気流の測定によると、試験線の前面にはよどみ点が生じ、試験線の後面では渦が発生して乱流が大きくなっている。しかし、われわれの風洞実験の観測では、試験線に近づいた雪粒は、空気の流線に沿って曲げられることが



第 6 図 1 時間当りの降雪量と着雪の発達

第 2 表 バルクな捕捉率

実験番号	電線直径 (cm)	実験時間 (min)	降雪強度 (g/cm ² ・h)	着雪量 (g)	捕捉率 (%)
9-1	1	31	36	142	8
9-2	2	31	36	116	3
10-1	1	30	76	275	20
10-2	2	30	76	230	8
12	2	32	55	206	10
17	2	54	30	80	3
18	2	18	14	130	20
19	2	24	38	78	7
21	4	9	46	17	3
22	4	9	17	18	3
23	4	36	50	432	10
24	4	25	67	250	6
25	4	5	97	90	5
26	4	10	67	160	6

なく、また乱流の大きい後流の中によびこまれることもなかった (第 7 図)。着氷をひき起す過冷却水滴の質量に比べて、着雪時の雪粒の質量が 10⁵ 倍程度大きく、したがってその慣性が大

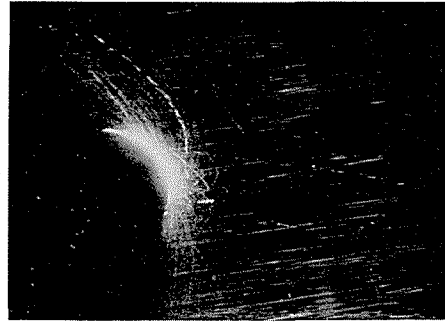
きいことによると考えられる。第7図の写真は、風速が10 m/s、気温が4°Cの時、幅1.5 cmの光のスリット内に入ったぬれ雪が直径4 cmのアルミの試験線に衝突する情況を示す。この写真から明らかなように、着雪の場合には、衝突した雪粒の中で反撓飛散するものが多数あるので、Langmuir-Blodgettの理論が使えない。すなわち、着氷の場合のように衝突率が捕捉率に等しくないのである。着雪の成長に寄与するのは反撓飛散した残りの、付着残存した雪粒だから、着雪の場合の捕捉率は残存率といった方が適当かも知れない。このように着雪の場合の捕捉率は、反撓率によって決まる。この反撓率は、試験線の長さ方向の単位幅と試験線の直径をかけた断面積から反撓飛散する雪粒の数 n_r と、そこに進入衝突する雪粒の数 n_i との比、 n_r/n_i を求めることによって得られる。厳密には、夫々の雪粒の質量は一定でないから個々の雪粒の数に夫々の質量をかけたものの単位面積、単位時間当りの衝突量と反撓量の比で定義しなければならないが近似的には数の比(n_r/n_i)で求めてもよからう。一

例として、第7図の写真上の雪粒の飛跡をトレースした第8図から反撓率を求めてみると(n_r/n_i)の値は0.8を越える。したがって、この場合の捕捉率は0.2以下である。すなわち、試験線に衝突したぬれ雪の80%以上は反撓飛散し、20%以下の雪粒しか着雪に寄与しなかったことになる。

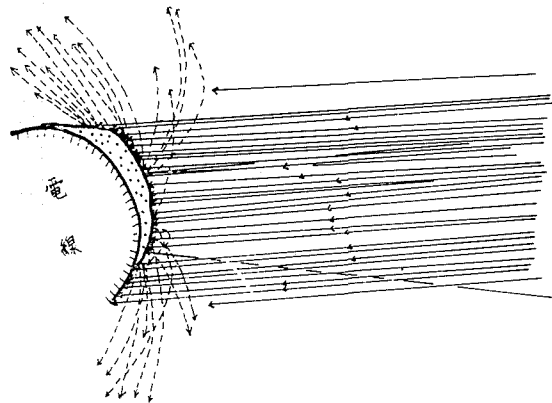
以上は、雪粒の運動の写真から求めた時間スケールの短かいある一瞬時での捕捉率であった。一方、実験中に供給した雪の総質量から推定で求めた雪の空間濃度(降雪強度)と、実際に試験線に着雪した着雪体の質量の比からは、時間スケールの長いときの捕捉率を求めることができる。これらの結果を第2表に示した。写真解析からの結果と同じく、捕捉率は20%以下で両者の値はほぼ一致した。

3. 着雪の付着強度測定

着雪の初期の段階において、雪が電線の回りを回転しても脱落せずに電線の下面に吊り下がっていることが着雪が成長発達することの大きな原因であった。そこで、雪の各種電線材料に



第7図 ぬれ雪の試験線(直径4 cmのアルミ線)への衝突と反撓、白く光ってみえる部分は着雪体(風速10 m/s、気温4°C)



第8図 写真上の雪の飛跡をトレースして衝突した数と反撓した数から捕捉率を求めた例。図の [] 部分は着雪体(捕捉率0.16、風速10 m/s、気温4°C)

第3表 付着強度の測定

試 験 線	2 cm					4 cm					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
載雪の重量 M_c (gr)	39	104	87	105	251	304	229	310	332	338	529
含 水 率 (%)	30	20	25	8	23	28	37	23			
接 触 面 積 A (cm ²)	134	144	147	78	140	151	151	161	183	189	146
付 着 強 度 M_c/A (g/cm ²)	0.3	0.7	0.6	1.3	1.8	2.0	1.5	1.9	1.8	1.8	3.6

対する付着強度の測定が必要となるのだが、従来、その実測例は数が少ない⁸⁻¹⁰⁾。

ここでは、予備的な実験としていろいろな含水率をもつ雪を試験線上に積もらせた後に、静かに試験線を回転させる。積らせた雪の量が多すぎると脱落するが、少ないと脱落せずに電線の下面に付着したまま吊り下がる。試行錯誤の末、脱落するかしないかの限界の雪重量 M_c を求め、その時の雪の電線に対する見掛けの接触面積 A を測定して、雪の付着強度 (M_c/A) を求めた。 A の測定は、脱落した着雪体に残る接触面の痕跡から求めたので精度は低い、大よその付着強度を知るには充分と考えられる。外径が2 cmと4 cmのアルミ管について得られた結果を第3表にまとめた。付着強度は、雪の含水率とは明瞭な関係が認められなかったが、電線の太い方が一般に大きな値を示した。直径2 cmの試験線では測定値のばらつきが大きい、直径4 cmの場合は1.8 g/cm²前後に集中している。

着雪体の電線に対する付着は、それらの界面に存在する水の表面張力 σ によってひき起される水の負圧 p によるものと考えられる。界面の水は外に凹の曲面を作っている、その負圧 p は、 $p = -\sigma/r$ で与えられる。ここに r は水のなす凹面の主曲率半径である。今の場合 r は雪粒の大きさ0.3~0.5 mmの程度と考えられるから、負圧 p は4 g/cm²の程度が期待される。これは、われわれが実験で得た1.8 g/cm²とほぼ同程度の値である。

われわれの得た付着強度を、従来求められてきた湿雪の付着強度と比較してみると、井上・本多⁸⁾が得たガラスとぬれ雪の付着強度とほぼ等しいが、水野・若浜¹⁰⁾が求めたアルミ板と湿雪との付着強度よりは約1桁小さい。もともと湿雪の付着強度は、試験片と雪の接触のしかたや、接触面での雪の密度、接触面に存在する水の状態などによって大きく変るといわれる。例えば、前記の水の曲率半径 r が小さくなれば負圧は大きくなり、従って付着強度も増大する。これら実験値の相違も、接触状態の相違に起因するものと思われる。

IV. ま と め

北陸地方などでしばしば発生する「季節風型着雪」は、降雪強度が小さく、また含水率も小さい。このことは高風速に際しては雪が吹き飛ばされてしまうことを意味している。これに比べて北海道で起る「低気圧型着雪」の時は、0.6 g/cm³以上という大きな着雪体の密度からも考えられるように、含水率の大きな湿雪が大きな降雪強度で、しかも多量に降る。このため電線との付着強度も大きく、また風の揚力の効果も作用し、強風下でも着雪が筒雪にまで成長発達することが可能なのであろう。事実、筆者等の実験は天然に起った着雪時とほぼ同程度の大

きな降雪強度を与え、また含水率は10~30%という大きな値を与えたが、風速が10~20 m/sの強風下でも着雪が大きく発達することが実証された。また、着雪した試料を試験線から外し、輪切りにして着雪の内部構造を調べたところ、風速が5~10 m/sのときは着雪体が不連続的に回転したことを示す扇形構造がみられた。また、10~15 m/sの風速下では、ほぼ連続的に回転したことを示す同心円構造が認められた。

このような着雪体の回転が、10~20 m/sといった強風下における着雪の筒雪化に大きな役割を果していることが実験的に確かめられた。しかし、送電線に用いられている太いより線では、円形断面の線よりも一般に回転が起り難い。より線の場合にも、勿論、よりに沿った着雪体のすべり回転は認められるが、風上側に付着した着雪による偏心荷重のため電線自身が振れを起し、結果的には着雪が回転したのと同じ効果をもたらす。北海道電力株式会社の五藤ら⁴⁾は、電線の振れによって着雪が筒雪に発達することを現場で観測し、振れが送電線着雪の発達する大きな要因であることを確かめた。

着雪の成長・発達を論ずる場合に重要な問題として、電線への雪粒の衝突と捕捉がある。われわれの風洞実験における観測では、衝突率は100%、捕捉率は5~20%の範囲であったが、これは自然着雪で観測された捕捉率と一致する値である。しかし、電線に対する雪粒の捕捉には、風速、気温、雪の含水率、降雪強度、電線の太さと表面の性質、電線の走向と風向のなす角度などが複雑に絡んでいて、問題は単純ではない。加えて、着雪が進行すると共に、電線の見掛けの太さ、表面の性質、形状が時々刻々と変化するので、周囲の空気と雪粒の流れの状態が複雑に変化するであろう。このような状況のもとで捕捉率がどのようになるかは、現在まだ不明で、未解決のまま残された。

着雪の付雪強度が測定され、1~2 g/cm²程度の値が得られたが、この値をそのまま強風下で発達する着雪現象に適用するのは問題があることがわかった。すなわち、10 m/s程度の風を吹かせている時は着雪体が脱落せずに電線に付着しているのに、突然風を止めると電線の周りを回転して脱落してしまう場合が多く観測された。このことは、風による揚力の効果があることを示している。強風下の方が、着電体が電線のまわりを回転しやすく、しかも揚力が働いて雪が脱落し難い事実は、風が着雪の筒雪化にむしろ役立っていることを示すものである。

V. あとがき

以上のべたように、今回の風洞実験により10~20 m/sの強風下でも着雪の発達が可能であること、電線による雪粒の捕捉率が5~20%程度であることなどを確認した。ただ、実験に用いた雪が積雪をふるいにかけてほぐしたもので、天然の場合と異なるおそれがある。そこで現在、天然の降雪粒子を用いた着雪の風洞実験を準備中である。

終りに、実験を手伝ってくれた数多くの大学院生諸兄と、雪を風洞内に供給する装置を考案していただいた本研究所の藤野和夫助教授に心から感謝いたします。又常に本研究に対して適切な助言を寄せられた黒岩大助教授に、また、着雪事故を示す写真や資料を多数提供して下さいました北海道電力株式会社心から謝意をあらわします。

なお、本研究に要した費用の大部分は、文部省科学研究費（自然災害、特別災害(I)代表者若浜五郎）から支出された。

文 献

- 1) 荘田幹夫 1953 着雪の研究. 雪氷の研究, **1**, 50-72 (日本雪氷協会編).
- 2) 栗原正之・五藤員雄・蒔田 孝・中村英夫 1972 最近の電線着雪事故と発生プロセスについて. 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集 (昭和47年), 90.
- 3) 坂本雄吉 1978 電線への着氷雪とその予測. 雪氷, **40**, 71-77.
- 4) 五藤員雄・黒岩大助 1975 北海道における電線着雪とその発達抑止に関する研究. 雪氷, **37**, 182-191.
- 5) Wakahama, G., Kuroiwa, D. and Goto, K. 1977 Snow accretion on electric wires and its prevention. *J. Glaciol.*, **19**, 479-488.
- 6) 藤野和夫・小林俊一・若浜五郎 1977 着雪の風洞実験 —着雪周辺の風速分布—. 低温科学, 物理篇, **35**, 147-156.
- 7) Langmuir, I. and Blodgett, K. 1966 A mathematical investigation of water droplet trajectories. *G. E. Res. Lab. Rep.*, RL **225**.
- 8) 井上力太・本多 正 1955 固体面と積雪の付着力の実験. 雪氷, **17**, 18-20.
- 9) 佐藤篤司・若浜五郎 1974 ぬれ雪の付着力. 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集 (昭和49年), 111.
- 10) 水野悠紀子・若浜五郎 1977 湿雪の付着強度. 低温科学, 物理篇, **35**, 133-145.

Summary

This paper presents the results of wind tunnel experiments concerning the snow accretion of wet snow particles transported by high winds up to 20 m/s on aluminium test wires of 1 cm, 2 cm and 4 cm in diameter. A wind tunnel installed with a device to produce artificial wet snow particles was used to study the growth processes and mechanisms of snow accretion on the wires. A lump of snow collected from a natural snow pack was crushed by vibrating metallic sieves. These disaggregated snow particles were wetted by spraying water at 0°C before they impinged on the wires. The air temperature in the tunnel was controlled between 1.0°C and 5°C. Time-lapse and slow-motion pictures were taken on 16 mm films to observe the growth processes of snow accretion and the trajectories of the snow particles impinging on the wires. A series of experiments was carried out to clarify the effect of wind speed in the tunnel from 0 m/s to 20 m/s. From these experiments it was found that a heavy snow accretion took place at any wind speed up to 20 m/s. When the wind speed was less than 10 m/s, the snow deposit tended to rotate around the wire under gravitation. On the other hand, when the wind speed exceeded 10 m/s, the rotation of snow was sometimes upwards due to an aerodynamic lift force.

Trajectories of snow particles were studied by photographing them when they were just impinging on or rebounding from a wire. In order to determine the coefficients of collision and collection of snow particles on the wire, the number of trajectories of snow particles which rebounded from the surface of the wire and deposited on it was counted from the trajectories as shown in Fig. 7. For instance, the coefficient of rebound exceeded 80% for a wire 4 cm in diameter; hence, the coefficient of collection of snow particles was less than 20%.

Adhesive force between a snow deposit and a wire is very important in the early stage of snow accretion. If the snow deposit falls from the wire after the initial rotation around

the wire, then it cannot develop to a thick cylindrical snow body. In order to measure the adhesive force, wet snow was deposited continuously on to the upper surface of a wire under a windless condition. Next, when a very slow rotation was given to the wire, the snow started turning around the wire. Since the deposited snow was turned over, it sometimes fell from the wire, but sometimes did not, hanging down from the bottom surface of the wire. These values of adhesive force obtained from the contact area and the weight of the deposited snow are summarized in Table 3.