



Title	着雪の風洞実験 : 着雪周辺の風速分布
Author(s)	藤野, 和夫; FUJINO, Kazuo; 小林, 俊一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 35, 147-156
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18333
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_p147-156.pdf



着雪の風洞実験*

— 着雪周辺の風速分布 —

藤野和夫・小林俊一・若浜五郎

(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

I. ま え が き

気温が融点附近で比較的高い状態の暴風雪の際に起る北海道型着雪は、大規模な災害を起すことが多い。そのためにこの型の着雪の発生、成長機構を明らかにする目的で、低温科学研究所をはじめ色々な研究機関で調査研究が行われて来た^{1)~3)}。今回の報告は、それ等の研究の一環として行われたもので、電線着雪を対象として低温風洞を用いて行った基礎実験の結果である。以下、この報告で用いる着雪は全て北海道型着雪を意味する。

着雪の発生、成長には、風速、気温、降雪強度、霧水量等の巨視的な気象要素と共に、着雪周辺の風速分布、雪粒粒度、付着力等の微視的な要素も重要な関係をもっている。今回、測定した着雪の発生、成長過程での着雪の形状の変化、及びそれに伴う周辺の風速分布の変化は、雪粒の衝突率、捕捉率等に関係するため極めて重要である。

今回の実験では風洞で実際に着雪を起して、発生、成長過程を観察し、それに基づいて着雪のモデルを作り、その周辺の風速分布とその変化を測定した。それ等の結果から、渦巻状に成長する筒雪状着雪の発生、成長機構を明らかにした。

II. 実験方法

実験は、北大低温科学研究所の吹出し口 50 cm 平方のゲッチンゲン型低温風洞を用いて行なった。実験温度は $+4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 、風速は 10 m/sec 及び 20 m/sec であった。雪粒は風洞吹出し口上部から電動の篩によって、積雪の塊を砕きながら風洞内部に一定の降雪強度で、ほぼ一様な大きさの雪粒を供給した。同時に、電動撒水装置により一定強度の霧水を供給した。実験した降雪強度は $1.2\sim 1.6\text{ g/cm}^2\cdot\text{min}$ 、霧水量は $0\sim 0.05\text{ g/cm}^2\cdot\text{min}$ であった。

風洞の吹出し口から約 4 m 風下側に、直径 4.0 cm のアルミ円柱を、両端にベアリングを介して水平に設置した。その円柱に、風上側から供給した雪粒と霧水を衝突させて、着雪を発生、成長させる。円柱の着雪状態を連続してビデオカメラで録画し、それから着雪の成長を測定した。

録画から得た着雪断面の時間変化に基づいて着雪モデルを作り、それを風洞内に設置して模型

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1855 号

周辺の平均風速，及び乱流の垂直分布を熱線風速計を用いて測定した。

模型は録画断面，及び五藤等³⁾の理論模型に基き粘土を加工して作った。録画断面に近い高さ 0.6 cm，底辺 4.0 cm の 3 角柱を，治具を用いて粘土で作製し，それを曲げて円柱表面に張りつけた（第 7 図参照）。着雪が成長した状態を表す模型は，同じ粘土の角柱を頂角を 30° づつ，ずらして重ねて円柱に張りつけた。最終的な筒雪状になる迄，11 層の 3 角柱を張りつけた。

この様な模型について頂角の稜線の前 0.5 cm，円柱の中心，及び円柱の中心より 4.5 cm 後方を通る垂直軸上の平均風速及び乱流を測定した。又，模型をつけない円柱及び 1 層模型の円柱の前面の風速の空間的变化を測定した。

III. 実験結果

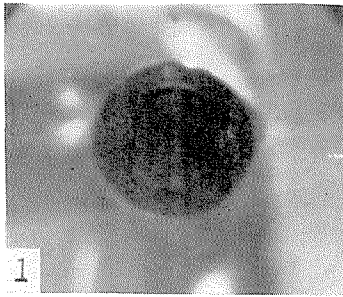
1. 着雪の発生及び成長

着雪の発生及び成長の観察の結果，次のことが明らかとなった。

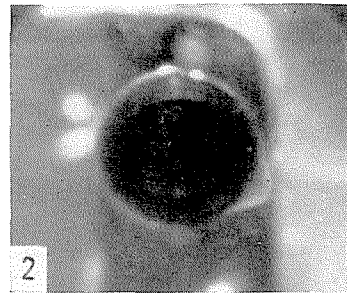
風上から飛来する雪粒で，円柱の射影断面内にあるものは，ほぼ 100% 円柱に衝突する。又，円柱の後面には雪粒はほとんど飛来しない。

着雪は第 1 図の様に円柱前面のよどみ点附近でのみ発生し，円柱の上下側面，及び後面では発生しない。前面のよどみ点附近で発生した着雪は，円柱前面にそって上下にほぼ対称な 3 角柱状に成長する。

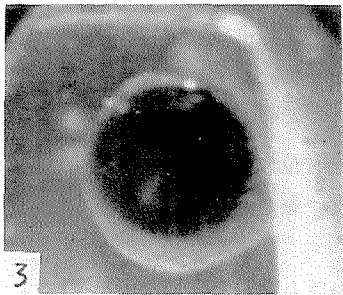
3 角柱状の着雪がある程度の大きさに成長すると，第 2 図の様に円柱表面にそって下方へ



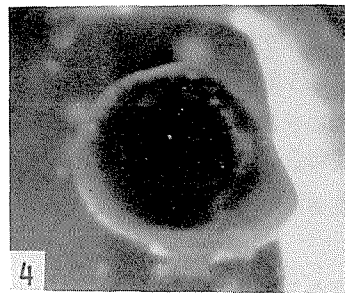
第 1 図 よどみ点附近に成長した 3 角柱状の着雪



第 2 図 よどみ点附近から，下方に回転を始めた 3 角柱状の着雪



第 3 図 回転によって“まが玉状”に成長した着雪



第 4 図 回転によって渦巻状の筒雪に成長した着雪

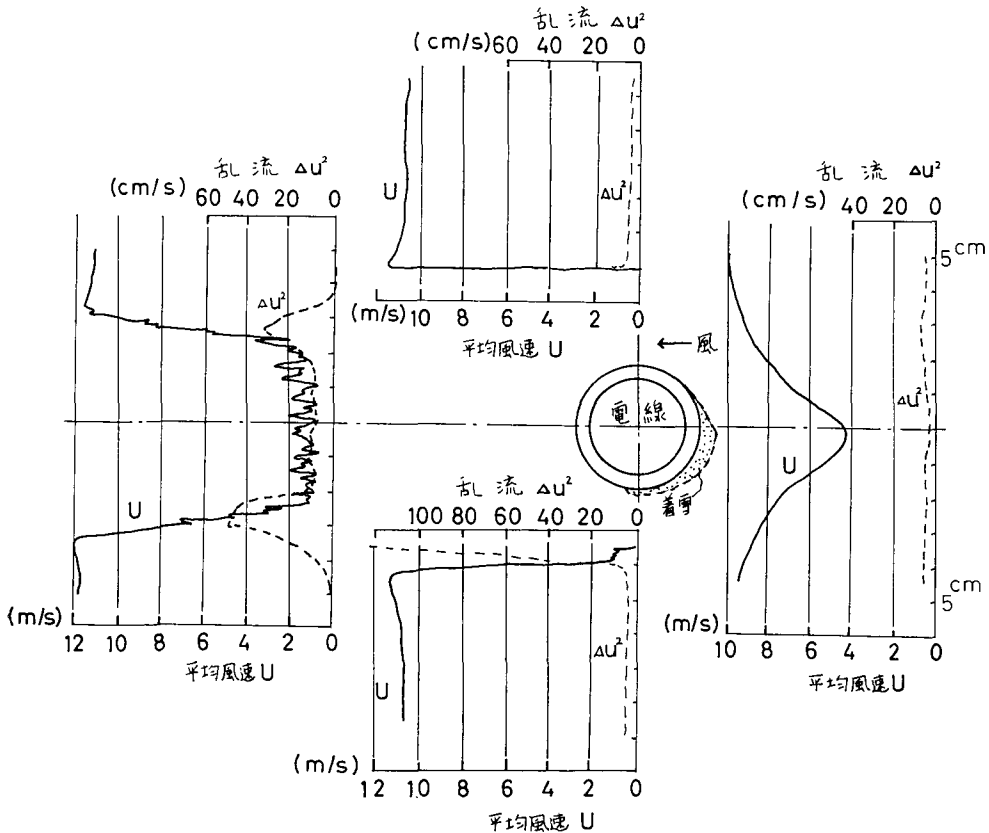
回転を始める。回転は表面にそって着雪自体が滑りながら回転し、円柱が回転したのは5例中の1例のみであった。

着雪が下方に回転するにつれて、着雪の稜線もやや下方に移動するが、着雪は常に稜線及びその上面附近でのみ成長する。その結果、着雪の形状は第3図の様な“まが玉”状に変化する。すなわち稜線より上面は初期の3角柱に近い形に保たれ、下面では下端は表面にそって下側面から後面へと移動し、ゆがんだ3角柱となる。そのために着雪の全体の形状は第3図の様に“まが玉”状になる。

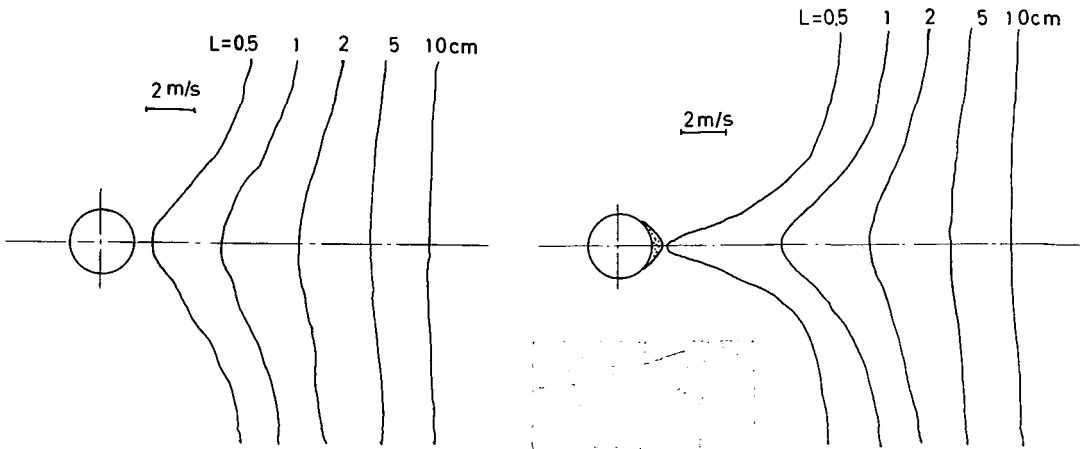
着雪が更に成長すると回転が更に進んで、下端は上側面を廻って再び前面に達する。前面に達した下端の上に、前面に止まっていた上端が上に重なって成長し、第4図の様な渦巻状の筒雪の着雪となる。この間着雪は常に前面の稜線及びその上面附近でのみ成長し、上下側面、及び後面では着雪は起らなかった。

2. 模型周辺の風速及び乱流の垂直分布

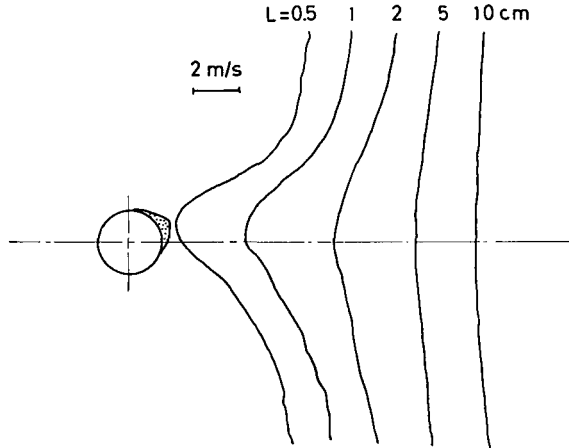
第5図に着雪模型周辺の風速及び乱流の垂直分布の1例を示した。風速及び乱流の分布は風速によらず、円柱も模型も全体の傾向はほぼ同様であった。しかし、着雪模型の風速及び乱流に対する影響は、前面のよどみ点附近及び模型が表面を覆っている下側面に著しく現れた。



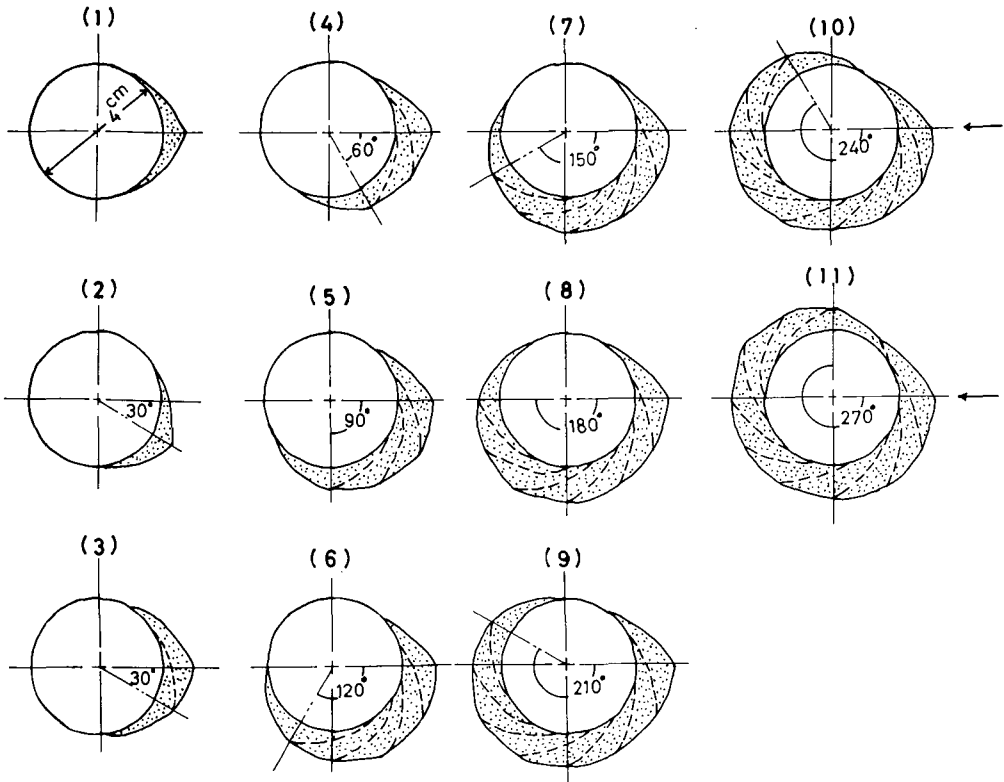
第5図 着雪模型周辺の風速及び乱流の垂直分布



第6図 a) 円柱前面の風速垂直分布

第6図 b) 着雪模型前面の風速垂直分布 ($\theta=0$)第6図 c) 着雪模型前面の風速垂直分布 ($\theta=30^\circ$)

第6図に円柱及び第7図1), 2)の様に模型を付けた場合の前面風軸上の異なる距離での風速の垂直分布を示した。図から明らかな様に、風軸上で前面に近づくにつれて又、垂直方向でよどみ点に近づくにつれて、風速は指数関数的に減少し、よどみ点で最小となる。円柱の場合(第6図 a))及び模型の稜線が風と平行の場合(第6図 b))は風速の減少は、よどみ点に対して上下対称である。しかし、円柱の場合の風速の減少は模型の場合に比べるとゆるやかで、且つその及ぶ領域が幅広くなっている。模型の稜線を風軸に対して 30° 傾けた場合には、第6図 c)の様によどみ点は中心より傾けた側に移動し、よどみ点に対する上下対称性は失なわれている。よどみ点の風上側では風速の減少は円柱の場合同様に、ゆるやかでその領域も幅広いが、風下側では減少は急で影響域も幅狭くなる。このような風速分布の傾向は模型の層数が多くなっても変わらない。模型の層数が多くなるにつれてよどみ点の位置は、更に風下側に移るが第7図10), 11)の様に模型の下端が前面に回り込むと、よどみ点は再び風上側に移動する。前面の乱流は第5図からも明らかな様に、模型の層数によらずほぼ一定で、その値も無視し得る程度であった。



第7図 生長過程を表す着雪模型

上下側面の風速分布は、第5図から明らかな様に、表面に近づくにつれてゆるやかに増加し、表面から7~8mmの付近で最大値に達し、その後、急激に減少して表面付近で零となる。乱流は風速の減少域以外では、前面同様に無視し得る程度だが風速の減少域では、逆比例して急激に増加する。このような風速及び乱流の分布は模型の層数によらず、上下側面とも同様の傾向である。しかし、模型が表面を覆っている側面では、模型の厚さに比例して、影響域の厚さがわずかに増加する。

後面の風速及び乱流の垂直分布も、模型の層数によらず第5図のようになる。風速は上下側面の延長線に近づくにつれゆるやかに増大し、最大値に達し更に中心に近づくると急激に振動しながら減少する。乱流は風速の増加と共に急激に増加し最大値に達した後、風速同様急激に振動しながら減少する。風速及び乱流はほぼ上下対称な分布を示すが、側面同様模型の側面では影響域の厚さが増す傾向が見られた。

IV. 実験結果の考察

1. 着雪の発生及び初期成長

着雪がよどみ点附近から発生成長する機構には、従来から着氷について述べられている流体力学的な機構が基本的には適用し得る⁴⁾。すなわち、水滴は円柱前面迄風の流線にそって運ばれ、円柱前面の形状抵抗によって流線の曲率が大きくなると、水滴は慣性力によって風の流

線からそれて直進し、円柱に衝突する。衝突の際に、水滴の過冷却が破れて表面に凍着したり又、円柱表面の水の表面張力によって付着し着氷となる。特によどみ点附近では流線の曲率が大きいため、水滴の衝突率が大きく、したがってその附近から着氷が発生成長する。

着氷と着雪の根本的な違いは次の点にある。着氷の場合には飛来する水滴は、粒径が高々数十 μ 以下でその慣性力は小さく、円柱の射影断面内の大部分の水滴は、円柱の形状によってきまる風の流線にそって流され、よどみ点附近以外では円柱に衝突しない。よどみ点附近に衝突した水滴は、その大きな凍着力や附着力によって大部分が表面に捕捉される。したがって、着氷の場合には水滴の衝突率と捕捉率はほぼ等しい。

これに対して、着雪の場合には、飛来する雪粒の粒径も0.5~1.0 mm程度で、水滴よりも桁違いに大きくしたがって慣性力も大きい。そのために風の流線の曲率が大きくなっても直進し、円柱の射影断面内のほぼ100%近い雪粒は円柱に衝突する。このことは、Langmuir等⁵⁾の理論式からも又、実験の際の観察からも明らかである。同様の実験を行った若浜等⁶⁾も、このことを観察報告している。しかし、着氷と異なり衝突した雪粒の大部分は、弾性的に反撥して再び表面から離れてしまう。

表面に付着する雪粒は同時に飛来する霧水や、雪粒及び円柱表面の水の表面張力によって付着すると考える。これ等の付着力に関する報告は数少なく未知の部分が多い。若浜等⁷⁾は雪粒と表面の付着力は含水率と材質の関数で高々1~2 dyne/cm²程度、又、雪粒同志の付着力はそれよりやや大きいと報告している。

雪粒が衝突によってその運動エネルギーを失っても、表面に静止するためにはその付着力が雪粒に働く風の剪断応力を越えるか、又は等しくなければならない。表面の風の剪断応力 τ_0 は、層流境界層の厚さの関数で、 $\tau_0 = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}$ である(μ : 粘性係数)。円柱表面ではよどみ点で $\tau_0 = 0$ 、表面にそって上下側面にかけて指数関数的に増加し、上下側面で最大となる。測定によれば上下側面での境界層の厚さはmmの程度であるから、これ等の値を入れて表面の風の剪断応力を求めると数 dyne/cm²となる。この値は雪粒と表面の付着力よりはやや大きく、雪粒同志の付着力と同程度と考えられる。したがって、よどみ点附近では付着力が風の剪断応力を上回り、雪粒は表面に付着するがよどみ点から離れるにつれて、風の剪断応力が付着力を上回り、雪粒は表面から引き離される。このことは着雪が第1図の様に風の剪断応力が零、又は極めて小さいよどみ点附近のみで発生し、上下側面及び後面では発生しないという実験結果を裏付けている。

よどみ点附近で着雪が発生すると、それ以後その附近に衝突する雪粒は、既に付着している雪粒に衝突して、雪粒同志が付着することになる。雪粒同志の付着力は雪粒と表面との付着力よりも大きいから、より安定に表面に付着することになる。この様に雪粒を介して表面との付着力を増加させて、風の剪断応力の大きな上下側方に着雪部分を拡げて行く。したがって着雪は着雪部分の射影断面と雪粒同志の付着力の関数である安息角とできまる、第1図及び第7図1)の様な3角柱に成長する。

円柱前面に着雪の3角柱が形成されると、前面の流体力学的な形状が変化し、前面の風速分布も変化する。第7図1)の模型の風速分布を示した第6図b)と、円柱の風速分布を示した

第6図 a) とを比較する。両図から明らかな様に、b)の方がa)よりも風速分布は尖鋭となり、風速減少域も狭まっている。このことは定性的に、b)の方がa)よりも、よどみ点の上下側方で風の剪断応力が大きいことを意味している。

雪粒の衝突率を100%とすれば、前面の風の流線の曲率とは無関係に、a)とb)の射影断面が等しいので、衝突する雪粒の個数は等しい。又、雪粒同志及び表面の付着力も等しいから、前面の形状係数の減少によって、上下側方で風の剪断応力の増しているb)の方が、雪粒の捕捉率が小さくなると考えられる。すなわち、着雪が成長してa)の形状からb)の形状に近づくにつれて成長率は減少することになる。

したがって、円柱前面の着雪は、重力を考えず流体力学的な場のみを考えると、最終的に円柱の射影断面に対して、出来るだけ小さな形状係数を持ち、表面で雪粒の付着力と風の剪断応力が、釣り合っている様な平衡形に成長し、以後はその形状を維持して成長しないと考えられる。

2. 着雪の回転をともなう成長機構

前節の着雪の発生及び初期成長では、着雪に働く重力は付着力や風の剪断応力に比べて、無視し得る程度として考察した。しかし、着雪が成長しそれに働く重力が、それ等の値と同等になると、その作用により初期の形状とは異なるものになる。

着雪の3角柱が成長するにつれて、円柱の重心は移動し、円柱の中心のまわりに回転モーメントが働く。表面の付着力が、着氷の凍着力の様に大きな場合には、その回転モーメントによって、円柱自体が回転を起す。しかし、着雪の場合には水の表面張力による付着で、前節で考察した様にそれ程大きなものではない。したがって、回転モーメントが付着力を超えると、着雪は円柱表面をすべりながら、下方に回転し釣り合いの位置に移動する。したがって、着雪は第1図及び第7図1)の初期の平衡位置から、第2図及び第7図2)の状態に回転して移動する。

着雪の回転が起ると、第6図 b), c)から明らかな様に、前面の風速分布に変化が現れる。すなわち、c)では稜線の風下側への回転により、よどみ点も風下側に移動し、よどみ点に対する対称性も失われている。又、b)よりもよどみ点風上側の風速の減少がゆるやかになり、減少域も広がっている。このことはc)の方がb)よりも、よどみ点風上側では風の剪断応力が小さく、又風下側ではb)とほぼ等しいことを意味している。

したがって、着雪が下方に回転を起して第2図及び第7図2)の様になると、前節で考察した様によどみ点附近及びその上側面で、雪粒の捕捉が増加して成長する。しかし、よどみ点の下側面では風の剪断応力が平衡形とほぼ等しいために、更に成長が起ることはなく、その形を保っていると考えられる。この様な成長によって、重心の移動による回転モーメントが生じ、着雪は更に回転し、その結果、第3図及び第7図4)~8)の様な“まが玉”状に成長して行く。更に成長が続き回転が進むと、着雪は第7図10)の様に前面に達し、その表面上に重なって、着雪が成長し第4図及び第7図11)の様な渦巻状の筒雪になって行く。

模型による風速及び乱流の測定で、円柱表面が模型に覆われるにつれて、表面粗度の影響と考えられる乱流の増加が、上下側面で測定された。このことは着雪表面で、乱流による剪断

応力が増加することを意味し、表面での雪粒の捕捉率が、それにより減少する可能性を示す。しかし、観測によれば、全体の着雪の成長率は、初期のそれよりは大きく、明らかにこの時期に雪粒の捕捉率が増加していることを示している。このことは、着雪の回転によって有効捕捉領域が増大し、付着する雪粒の数が増加して、乱流の剪断応力による減少分を補って余りあることを示すと考える。

したがって、この段階の成長機構では着雪が回転を始めると、その着雪の成長は平衡に達することがなく、原理的には無限に進行する。筒雪になる以前の段階で、着雪の重量が円柱表面の付着力を超えた場合には、着雪は脱落し、再び初期の発生、成長段階を繰り返す。筒雪になってしまうと、着雪の上側面の破断強度を超えて、着雪が切断し脱落する迄回転しながら成長し、その重量を増加させて行く。

V. ま と め

低温風洞を用いて、電線着雪の発生、成長過程の形状の変化を観察した。又着雪模型を用いて、着雪の形状の変化による周辺の風速、及び乱流の分布の変化を測定した。

実験結果の考察から着雪の発生及び成長について、以下のことが明らかとなった。

着雪の場合には着氷と異なり、雪粒の衝突率はほぼ100%に近いが、衝突した雪粒は弾性的に反撥して、表面に捕捉されるものは高々10%以下で初期捕捉率は極めて小さい。

表面に衝突して、運動エネルギーを失った雪粒は表面に付着するが、風の剪断応力の大きい所では、それによって再び表面から引き離される。したがって、風の剪断応力の小さなよどみ点附近から着雪が発生する。円柱の上下側面では風の剪断応力が大きいため、又、後面では雪粒の衝突が起らないために着雪は発生しない。

着雪が発生するとそれ以後に衝突する雪粒は、雪粒を介して表面と付着し、付着力が増加しその結果、風の剪断応力の大きな領域に迄着雪域を拡大することが出来る。

着雪は成長の初期段階では、着雪部分の射影断面と、雪粒の付着力の関数である安息角によってきまる3角柱を形成して成長する。回転が起らなければ、着雪は円柱の射影断面に対して最も小さな形状係数を持ち、且つ風の剪断応力と付着力との釣り合いが保たれている平衡形になり、その形状を維持して以後は成長しない。

着雪量が増加し、円柱の重心の移動が起り、回転モーメントが働くと、着雪は表面をすべって釣り合う位置迄回転する。着雪の回転によってよどみ点は下方に移動し、よどみ点の上側方の風の剪断応力が減少し、その部分で雪粒の捕捉率が増加し着雪は更に成長する。又、よどみ点下側面では風の剪断応力が、回転によって変らないから着雪の成長は起らない。よどみ点上側面の着雪の増加により更に回転が促進される。回転によって前面に達した初期着雪の下端の表面に、更に着雪が成長して渦巻状の筒雪が形成される。

この様な回転をともなう成長では、回転によって着雪の成長が促進されるため、原理的には無限に着雪が成長する。着雪の重量が、円柱表面との付着力を超えて脱落するか、又は上側面の着雪の破断強度を超えて、着雪が切断されて脱落する迄、回転しながら渦巻状に成長を続ける。

着雪の発生及び成長過程について、実験結果に基づいてその発生、初期成長及び回転をともなう成長機構を定性的に明らかにした。今後は、これ等の機構に関与する微視的要素の定量的解析をすすめる考えである。

この実験に際して、低温科学研究所大学院生高橋修平君に、計測器材の御便宜をいただいた。又、高橋君を始め多数の大学院学生の御協力を得たことを感謝する。

なお実験の費用の一部は文部省科学研究費（自然災害，I，代表者若浜五郎）より支出した。

文 献

- 1) 若浜五郎・黒岩大助 1975 北海道における電線着雪，着氷災害．第12回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，383-384.
- 2) Wakahama, G., Kuroiwa, D. and Goto, K. 1977 Snow accretion on electric wires and its prevention. *J. Glaciol.* **19** (in press).
- 3) 五藤員雄 1976 捻れ回転による難着雪電線の着雪発達過程のシミュレーション計算法．雪氷，**38**，127-137.
- 4) Kuroiwa, D. 1958 Icing and snow accretion. Microwave propagation in snowy district [Ed. Asami, Y.] Monograph Ser. of the Res. Inst. of Applied Electricity, Hokkaido Univ. **6**，1-30.
- 5) Langmuir, I. and Blodgett, K. B. 1946 Mathematical investigation of water droplet trajectories. G.E. Res. Lab. Report No. RL 225.
- 6) 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，111.

Summary

Experimental studies were carried out of the snow accretion on a power line using a Göttingen type wind tunnel in the cold room.

Observations were made precisely of the growth processes, especially their initial stage, together with measurements of wind speed and turbulence around the snow accreted on the line as shown in Fig. 5.

From the results obtained for the snow accretion, the equilibrium prism and the spiral growth mechanism have been confirmed as follows:

The coefficient of collision of snow particles against the trajectory of the line was nearly 100%, but the snow particles which collided against the surface of the line, rebounded from it, reducing the coefficient of collection to less than 10%.

Snow particles which collided against and stayed at around the stagnant point of the front, formed an equilibrium triangular prism of snow, wherein the prism was defined by the repose angle of snow particles, which is the function of the adhesive force and the shear stress of a wind, as well as the trajectory of the accretion as shown in Figs. 1. and 7-1).

When the mass of the triangular prism exceeded a critical weight, which was defined by the adhesive force of the surface, the prism began to rotate around the line by its own weight as shown in Figs. 2 and 7-2). Then, the distribution of wind speed around the accretion changed as a result of the drag effect of the rotating prism as shown in Figs. 6-b, 6-c. This change of the wind suggests that the shear stress of the wind around the upper side of the prism decreased, then the snow particles could deposit more easily on this effective stagnant

region.

By this continuous deposition of snow particles on the upper side of the prism, the whole snow accretion rotated again and repeated this processes as shown in Fig. 7.

Finally, by this rotation, the snow accretion grew to a cylindrical snow mass which had a spiral face of growth as shown in Figs. 4 and 7-11) and enveloped the entire line.