

多雪地域を走行する鉄道車両下部への 着雪のプロセスに関する研究

眞下 伸也[†]

A Study on the Process of Snow adhering to the Railway Vehicle Lower Part,
running in a Heavy Snow Region

MASHIMO Shinya[†]

Abstract

In the winter, a large amount of snow sometimes adheres to the railway vehicle lower part, running in a heavy snow region of Japan. Preventive measures on the vehicle against it are expected and have been studied, but enough effects are not provided until now. It is thought that the more effective measures can be realized by clarifying the process and mechanism of a large amount of snow adhering.

In this study, as the first step for the elucidation, I considered a model of snow accretion process, based on the results of snowfall wind tunnel tests that had been performed so far, and from the result, I suggested the simulation techniques of the basic process of a large amount of snow adhering, described by the simple numerical expression and algorithm. Then I carried out the simulation that applied the technique, and verified the validity of it by comparing with the results of tests.

Key Words: Snow, Adhering, Railway vehicle, Snowfall wind tunnel tests, Simulation,
Model of snow accretion process

キーワード：雪、付着、鉄道車両、降雪風洞試験、シミュレーション、着雪プロセスモデル

[†] 大阪産業大学 工学部 交通機械工学科 准教授

草稿提出日 11月9日

最終原稿提出日 1月18日

1. はじめに

多雪地域を走行する鉄道路線、特に新幹線路線において、冬季の降雪によって雪が積もった線路上を列車が走行した場合には、その走行によって生じる風によって舞い上がった雪が車両、特に車両下部にある台車装置やその近傍に付着する。そのような走行が継続すると新たな雪がさらに付着し続け、塊として次第に大型化した後に走行時の振動等によって落下して地上設備や車両を損壊し、駅ホームの旅客や沿線にも危害を及ぼす可能性がある。多雪地域を走行する北陸新幹線の一部区間を運営する西日本旅客鉄道株式会社（以下JR西日本）はその防止対策として、雪が大量に付着した場合には途中駅での停車時に雪落とし作業を実施しているが作業コストや作業時間確保によるダイヤへの影響、除去後の走行による再付着など多くの課題があり、着雪自体を抑制する車両対策が望まれた⁽¹⁾⁽²⁾。そこで、着雪量が特に多い台車近傍の「端部フサギ板」に対する着雪の最終形状、すなわち「雪庇」形状を模擬した「雪庇ダミー」を着雪防止対策として検討し、その試作品を製作して実車両に設置して積雪時に走行した時の着雪量を調査した結果、その低減を確認して有効性が実証された⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら着雪を完全に防止するものではなく、「雪庇ダミー」の形状最適化等によるさらなる性能向上が望まれており、それは着雪の進行プロセスやその背景となる力学的、あるいは物理的なメカニズムの解明によって可能になると考えられるが、明らかとなっていない。

本研究においては、鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）によってこれまで実施された、降雪風洞試験装置と立方体モデルを用いた試験によって着雪形状の経時変化や着雪プロセスの実態を調査した研究の結果⁽³⁾を参考としながら、着雪形状の経時変化をトレースする簡易なシミュレーション手法について検討した後にこれを実施した。さらに鉄道総研による他の風洞試験の結果、さらには北海道科学大学その他によって実施された、着雪形状の経時変化を同様な降雪風洞試験にて調査した結果⁽⁴⁾に対しても本シミュレーション手法の適用を試みて実施し、それぞれの計算結果を試験結果と比較することによって、その妥当性を検証した。

2. 着雪プロセスの傾向やパターンに関するこれまでの研究について

鉄道総研は鉄道車両に対する着雪状況を数値シミュレーションによって再現することを目的として、着雪の発達条件を明らかにするため人工雪を用いた風洞試験をこれまでに行っている。同試験においては1辺の長さ152mmの立方体モデルを底面が大地と平行になるように設置し、垂直面のうち1面に対してノズルからの気流が直角、あるいはその他一定の角度にてあたるように固定して、気流に人工雪の雪粒子を定期的かつ一様に飛散させてモデルに付着させながら着雪の発達状況を観測し、さらにPIV測定によって模型周辺の気流や飛雪粒子の運動についても調査を行い、以下のような結果を得ている⁽³⁾。

「PIV測定により、空気流は模型近傍で減速し、方向を変えるが、飛雪粒子は風向に沿っ

て減速せずに着雪表面に衝突し、衝突後、着雪表面に沿って流れることがわかった。また、着雪実験により、着雪実験後の着雪形状は風速や模型の回転角によって異なるが、模型が回転しても風向と着雪表面のなす角度は風速毎にほぼ一定となることが分かった。」

3. 着雪プロセスに関するモデルの設定

鉄道総研による試験の以上のような結果から、本研究では力学的作用をある程度考慮した上で、雪粒子を含む様な定常気流が平板に垂直にあたる時の、平板への着雪プロセスのモデルを以下の様に仮定した。ただし、本研究では後述する総研の試験結果で示された着雪形状に対応して、平板形状を正方形としながら、正方形の一对の対辺の midpoint 同士を結ぶ線を含む垂直断面での二次元での形状や変化を対象とし、さらに平板のほぼ全面においてある程度の雪が定着

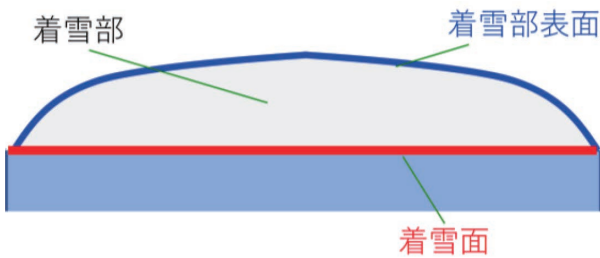


図1 平板や立方体模型の一面とそれに付着した雪の断面

している状態を初期値とした。また垂直断面においては図1に示すように、雪が付着する平板、もしくは試験模型の立方体模型の一面に対応する線分を「着雪面」、雪が定着している領域を「着雪部」、着雪部の着雪面以外の表面外形を示す線を「着雪部表面」と称する。

- ①気流によって移動してきた雪粒子は平板と垂直な方向で着雪部表面と衝突した後、すでに着雪して着雪部の表面となっている雪と、ある大きさの付着力を互いに作用させながらいったん付着する。ただし付着力は統計的分布にてバラツキがあるものとする。付着力としては主として、雪粒子間の直接の接触にて作用する焼結⁽⁵⁾によるものと粒子間に介在する「水」の表面張力によるもの等が考えられるが、本研究では深くは問わない。
- ②着雪部表面と直角方向にて衝突した場合には衝突前の表面平行方向の速度成分は0であり、衝突後も表面に沿った運動はしないことから、付着力の大きさは無関係に付着した状態がそのまま保たれる、すなわち雪粒子は定着するものと考えられる。

着雪部表面と直角とは異なる角度にて衝突した場合には、着雪表面と平行な速度成分に対応する慣性力に起因する力が、雪粒子をいったん付着した着雪部表面から分離させる方向に作用する。衝突角度の直角からの差が大きいほど、すなわち雪粒子が衝突する点における着雪部表面の平板への傾斜角度が大きいほどその慣性力は大きくなり、いったん付着した雪が実際に分離するかどうかは、「付着した雪を分離させる方向の力」と付着力の大小関係によって決定されるので、慣性力と「付着した雪粒子を分離させる方向の力」の大きさに一定の関係がある場合には、慣性力には雪粒子の分離を決定する「臨界値」が存在する。このため、

雪粒子の重量と衝突前の速度が一定の場合には、衝突点における着雪部表面の傾斜角度にも同様な「臨界値」が存在すると考えられる。ただし、①の仮定により付着力には雪粒子ごとにバラツキがあって、それに対応して傾斜角度の「臨界値」にもバラツキがあるため、傾斜角度が0°から徐々に大きくなった場合、ある特定の傾斜角度まですべての雪粒子が定着し、その後はすべてが分離するものではなく、傾斜角度の増大に伴って衝突後に定着する雪粒子の割合が低減していくという傾向を示すものと思われる。鉄道総研の試験結果では「模型が回転しても風向と着雪表面のなす角度は風速毎にほぼ一定となる」傾向が認められているが⁽³⁾、着雪部表面がこの「一定となる角度」にて傾斜した場合に、雪粒子の慣性力による「付着した雪粒子を分離させる方向の力」が「付着力の最大値」と等しくなるため、傾斜角度がこれ以上大きい場合には雪粒子がすべて分離し、定着する雪粒子が存在しない状況になると思われる。

以上から、雪粒子は着雪部の表面にいったん付着した後、衝突時の雪表面に対する雪粒子の衝突角度が0°、すなわち直角に衝突した場合はすべてがそのまま定着し、角度が大きくなるに従ってその後に分離していく雪粒子の量が増大し、ある一定の角度になった時点ですべての雪粒子が分離するものとする。

4. 降雪風洞試験によって得られた着雪部形状の経時変化の特徴や傾向

鉄道総研の風洞試験においては、流速2.5m/s、着雪面に対する角度90°（回転角0°）の気流条件、および湿り気を与えないいわゆる乾雪とした条件にて、単位時間当たり一定量の人工雪による粒子をノズルからの気流によって一様に移送させながら立方体模型の一面に定常的に付着させ、着雪部の状況変化を立方体模型の側面から撮影した動画によって記録し、さらにその動画に記録された着雪部表面形状について、試験開始すなわち着雪のない初期状態からの経時変化を5分毎に調査しており⁽³⁾、その結果が図2⁽³⁾の線図によって開示されている。

同図から、着雪部の表面形状には以下のような特徴や傾向が認められる。

- ・どの時点においてもほぼ対称形となっている。
- ・同図にて示されている「着雪厚み」は試験開始後30分後に79mmに達した後、その後5分間に1mm増加するだけで形状もほとんど差異がないことから、30分後には形状の変化がほぼ停止したと思われる。
- ・開始から5分後の形状を「初期値」とした場合、初期値においては着雪面（同図においては正方形の上辺のラインにて示される）端から中央に向かうにつれて、着雪面を示すラインに対する傾斜がおおむね連続的に小さくなる傾向を示し、端部付近では傾斜が大きいのに対し、それ以外の部分ではかなり小さく、その境界付近での変化が大きい。それから時間が経過した各結果においても概ね同様な傾向を示す。

- ・ 同図にて示されている「着雪厚み」は5分間の差が最後部を除いても10mm～15mmと幅があり、気流により模型に移送される雪粒子の単位時間あたりの量が、経過時間によって実際にはバラツキがあると思われる。
- ・ 雪粒子は模型の着雪面に対して一様に移送される条件であるが、5分間での厚みの増加量は、どの時点でも前の形状の傾斜が小さい位置ほど大きくなる傾向を示す。すなわち、いずれの位置でも傾斜が時間の経過に伴って大きくなる傾向を示す。
- ・ 傾斜がある程度の大きさに達するとそれ以上形状は変化しなくなる。その角度は端部付近においてはほぼ一定の64°程度であると認められる。
- ・ 初期値から端部の方が傾斜は大きいので端部から形状の変化が停止し、形状変化を停止する範囲は端部から中央に向けて次第に拡大している。ただし、中央付近で傾斜が小さい部分を残しながら、30分後以降は全域で形状の変化を停止する。
- ・ 端部付近で形状変化を停止した時の傾斜の大きさはどの位置でもほぼ変わらず、中央付近以外の最終形状はほぼ直線状、あるいは直線に近い形状となる。

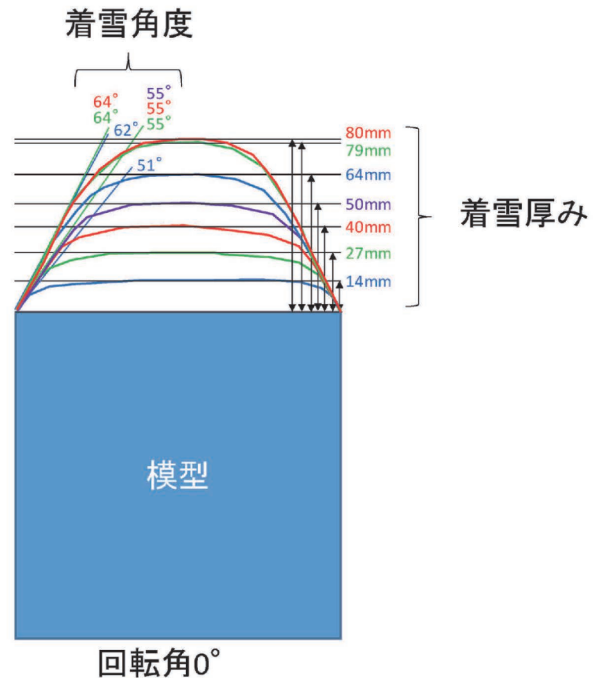


図2 (3) 鉄道総研による着雪試験の結果（回転角0°）

以上の特徴や傾向は、中央付近で傾斜が小さい部分を残しながら新たな形状変化を停止した点を除くと、先に提示した「着雪プロセスのモデル」と概ね整合性があるものと思われる。

5. 着雪プロセスのモデルを用いた簡易な着雪形状の経時シミュレーションについて

本研究においては、先に提示した「着雪プロセスのモデル」の妥当性について検証するため、図2 (3) にて示された降雪風洞試験における着雪部形状の経時変化を対象として、本モデルに基づいた以下の前提や手順によって簡易にシミュレートする手法について検討の上、実施した。

5.1 シミュレーションの前提

①【図3参照】着雪形状が対称形であることを前提にシミュレーションはその半身のみ、すなわち図2⁽³⁾に示される立方体模型着雪面において、中央から左半分の長さ $152/2=76\text{mm}$ までの範囲に対応する領域のみを対象とする。

②【図3参照】長さ76mmのシミュレーション対象範囲に対して2mm間隔で刻んだ各位置を「観測点」とし、各「観測点」における着雪部表面の「着雪面からの距離」（着雪部表面高さと呼ぶ）を1秒ごとに出力する。

③図2⁽³⁾において試験開始から5分後に対応する形状、すなわち最も低い位置にて「着雪厚み」が「14mm」と示された形状をシミュレーションの初期状態とする。なお、試験値をそのまま形状を記述する数値データとして使用すると不必要に煩雑となることが予想されたため、着雪面全体の中央となる観測点からの距離が x (mm)である任意の観測点における着雪部表面高さ h (mm)について、 x を用いて以下の式(1)のような n 次式によって算出し、本式によって示される曲線によって試験値による形状を近似することとした。

$$h = -b \times (x/a)^n + b \quad \text{—式(1)}$$

式(1)において、 b は $x=0$ の観測点における着部雪表面高さ、 a はシミュレーション対象範囲の長さにそれぞれ対応し、本シミュレーションでは $a=76$ 、 $b=14$ とする。また、 n の値については0.5刻みにて最小二乗法によって近似精度を評価しながら試験値に対する最適解を求めた結果、 $n=7.0$ が得られたのでこの値による近似曲線を初期値として用いることとした。

図4に初期状態の着雪部表面の形状について試験値と $n=7.0$ による近似曲線をそれぞれ示す。図4において近似曲線は試験値に対し $x=20\sim 60\text{mm}$ の領域で若干乖離が認められるが、実物での着雪部においては、このような勾配のゆるやかな形状に対して精度の高い測定は非

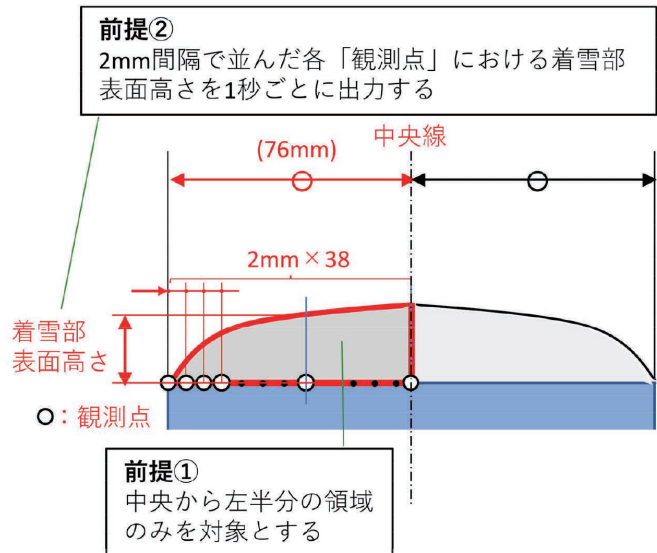


図3 シミュレーションの対象領域と観測点の設定、および出力について（前提①,②）

常に困難であり、試験値は便宜的に直線状にて示されていると想定されることから、この領域を曲線上にて近似するのはある程度は妥当と思われる。他の領域では曲線の試験値による形状からの乖離は少ないこともあり、全体的に曲線は着雪表面形状を精度よく近似していると考えられる。

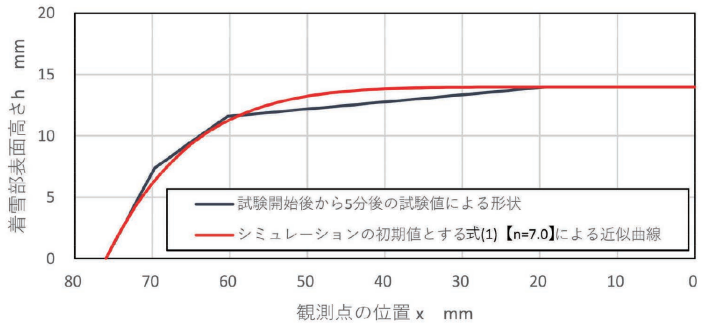


図4 初期状態の試験値表面形状、および $n=7.0$ による近似曲線

- ④【図5参照】気流による移送後に各「観測点」での着雪部表面に衝突する雪粒子はその全てがいったんは着雪部表面に付着するものとし、その量は1秒間あたりで全「観測点」にて同一の値であるとする。ここで図2⁽³⁾の着雪面中央付近での着雪形状に着目すると、着雪面に対する傾斜が非常に小さいことから、この付近でいったん付着した雪粒子はすべて分離することなくそのまま定着しているものと考えられる。ある時間内に付着した雪の量を今後「着雪部表面高さ」の差異にて示すことにすると、中央付近での着雪部表面高さの1秒間の差異に相当する量が、他の観測点でも同様に1秒間でいったんは付着するものと考えられる。図2⁽³⁾において「着雪厚み」として示されている量が中央付近の着雪部表面高さにはほぼ相当することから、同図にて示された5分毎の値から得られる5分間の差が、他の観測点においても5分間で着雪部表面にいったんは付着する雪粒子の量を示すと考えられるので、それをさらに5(分)×60(秒)=300(秒)にて除することによって、(その5分間において)1秒間でいったん付着する量の値が得られる。

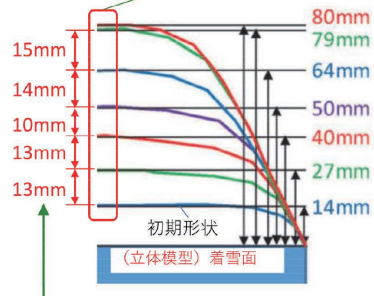
(a)この領域のいずれの表面形状も着雪面にほぼ平行であり、この領域にて付着した雪粒子はすべて分離することなく、そのまま定着しているものと考えられる。

前提④

(b)にて示された値をそれぞれ $5 \times 60 = 30$ にて除した値に対応する量の雪粒子が、すべての観測点における着雪部表面において、1秒間の間にいったんは付着するものとする。

各観測点での積雪部表面にて、初期状態から t 秒経過した後の1秒間に表面に衝突していったん付着する雪粒子の量は、上記の計算の結果得られる、以下に示す1秒間における表面高さの差異 $\delta h(t)(mm)$ にて表される。

t	0~300	300~600	600~900	900~1200	1200~1500
$\delta h(t)$	0.0433	0.0433	0.0333	0.0467	0.0500



(b)これらの値は(a)にて示された領域における5分ごとの着雪部表面高さの差異であり、これらの値に対応する量の雪粒子が他の領域においても着雪部表面にいったんは付着すると考えられる。

図5 1秒間に各観測点にていったん付着する雪粒子の量の、「着雪部表面高さの差異」による設定について(前提④)

すなわち図2⁽³⁾において、例えば形状が初期状態となる試験開始から5分後の時点からさらに5分経過するまでの間、1秒当たりに入ったん付着する雪粒子の量は、「(初期値から5分経過後の着雪厚み27mmm) - (初期値の着雪厚み14mm)」 / (5分×60秒) によって算出される。

⑤【図6参照】 任意の「観測点」において着雪部にいったん付着した後、分離することなくそのまま定着する雪の割合を「定着率 ε (%)」 と称した上で、付着した位置での付着前における着雪部表面の傾斜角度 θ (着雪面に対する角度として定義する) の関数として定義する。

ただし傾斜角度が 0° の場合、すなわち雪粒子が気流主流の方向と同じく着雪面に垂直な方向にて接近してくるという前提において、着雪部表面に対しても垂直に衝突する場合には定着率 ε を「100%」とする。また図2⁽³⁾ から端部付近では傾斜角度が 64° になると形状が変化しなくなる傾向が認められることから、傾斜角度がこの角度になる場合において定着率 ε が「0%」まで低下し、この間の角度においては、すなわち 0° から 64° までに至るまでの間、定着率は連続的に低下し続けるものとする。

より具体的には、雪粒子が着雪部表面に衝突する時の速度ベクトルを表面に垂直な方向と平行な方向に分解した際、各成分は雪粒子の定着に寄与が大きい積雪部表面との中の付着力、および分離に寄与が大きい慣性力に対してそれぞれ影響を及ぼすと考えられることから、その比を示す $\tan \theta$ が定着率を直接的に決定するパラメータであるとの判断から ε について $\tan \theta$ をパラメータとして、以下の式(2)によるN次関数にて示されるものと仮定した。

$$\varepsilon = (\tan \theta_c - \tan \theta)^N / (\tan \theta_c)^N \times 100 \quad (\%) \quad \text{—式(2)}$$

なお、上式において θ_c は試験結果において形状が変化しなくなると認められる積雪部端部での角度であり、本シミュレーションでは 64° とした。

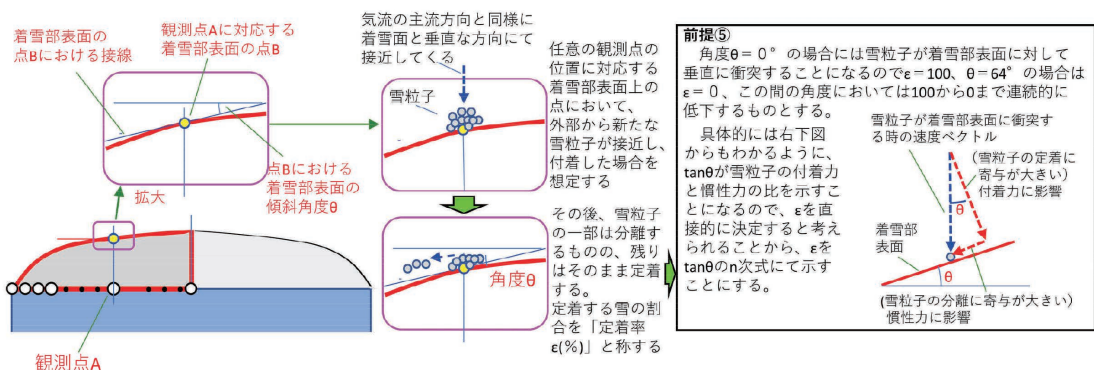


図6 定着率 ε と着雪部表面の傾斜角度 θ 、およびそれらの関係について (前提⑤)

5.2 シミュレーションの手順

①【図7参照】隣接する2

つの「観測点」について、それら2点における「着雪部表面高さの初期値」の平均値を「2点間の midpoint における初期値」として対象範囲全体にわたってそれぞれ算出し、それから算出された「隣接する2 midpoint 間の初期値の差」を「midpoint 間の距離

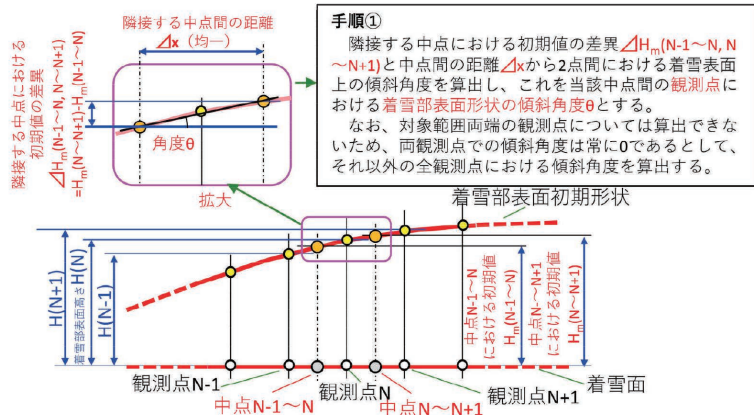


図7 観測点での着雪部表面形状の傾斜角度 θ 算出について (手順①)

2mm」にて除した値から角度を求めて、その2中点に挟まれた「観測点」における着雪部表面形状の傾斜角度 θ とする。

ただし、この手法では対象範囲両端での「観測点」での傾斜角度 θ が求められないので、中央側端での「観測点」に対しては当該観測点および隣接する中点それぞれの各初期値を用いて算出される傾斜角度にて代用し、残りの「観測点」は試験での立方体着雪面の端に対応し図2⁽³⁾でも着雪が認められないことから、本シミュレーションでもここに定着する雪の量は常に0mmであると仮定し、定着する雪の量の算出に必要な傾斜角度の算出はここでは不要とした。

②前項①によって算出された各「観測点」における傾斜角度 θ を「前提⑤」にて定義した式(2)に入力し、その点における定着率 ε (%) をそれぞれ算出する。

Nの値については、任意のNの値を用いて出力される計算値について、図2⁽³⁾に示された試験値のうち明らかに形状が殆ど変化しなくなった時点の結果を除き、試験開始から最も時間が経過した時点での結果で最大外形となる、本シミュレーションにおいては試験開始後30分後の値(図2⁽³⁾において、対応する着雪厚みが79mmと示されている外形線にて示される値)に対する試験値の近似精度を最小二乗法にて評価し、最適となるNの値を用いることとした。また、その評価の際に必要な最大外形の試験値については数値データとしては明示されていないため、図2⁽³⁾から可能な限り詳細に読み取った上で「観測点」に対応する位置での値を線形補完にて数値データ化し、それを用いた。なお、 θ_c の値は前述の通り、本シミュレーションでは図2⁽³⁾の「着雪角度」より64°としている。

③【図8参照】「前提④」により算出された『1秒間で各「観測点」にいったん付着する雪粒子の量』に、前項①にて算出された各点での「定着率 ε 」を乗じて、初期値から1秒の間にいったん付着したまま分離することなく、定着し続ける雪の量を観測点ごとに算出する。

手順③、④
各観測点ごとに手順②にて算出された定着率 ε に手順④にて定められた、いったん付着する雪粒子の量を乗じ、1秒間の間に定着する雪の量を算出する。
その値をそれまでの各観測点における表面高さに加算し、1秒経過後の表面高さとする。
各観測点におけるこれらの値をグラフ化することによって、初期状態から1秒経過後の着雪部表面形状の計算値が得られる。

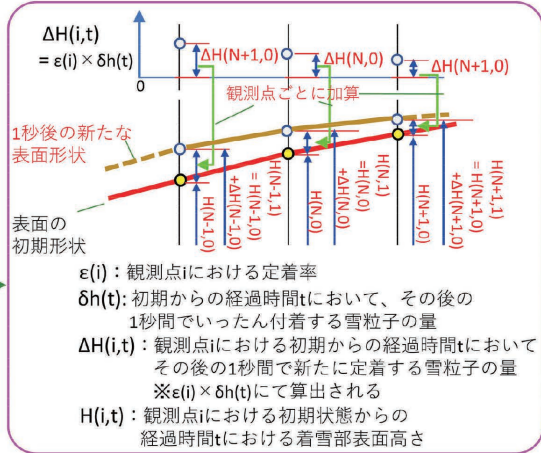
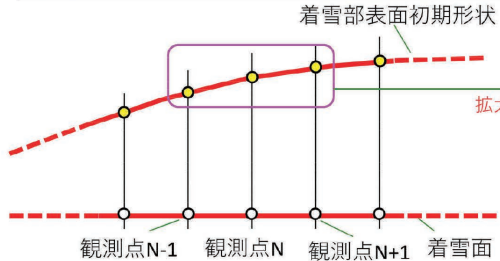


図8 定着率 ε と1秒間でいったん付着する雪粒子の量の積による、新たに定着する雪粒子の量の算出、およびその加算による1秒後の表面高さの算出について(手順③、④)

- ④【図8参照】「観測点」ごとに前項③にて算出された値をそれぞれの初期値に加算し、その結果によって初期値から「1秒後の着雪部表面高さ」が得られる。なお、この計算結果を「観測点」の位置に対するグラフとして視覚化したものが「着雪部表面形状」の計算値となる。
⑤第①項に戻り、以降、「着雪部表面高さ初期値」を「1秒後の着雪部表面高さ」と読み替える等して、初期値から対象とする経過時間までに対応する回数だけ、同様な計算を繰り返す。

5.3 シミュレーションの結果

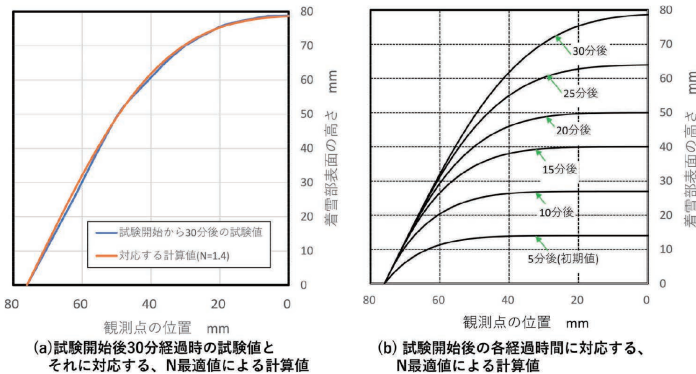


図9 鉄道総研の試験に対するシミュレーション結果

する時点ごとの結果を図9に示す。また、最小二乗法による近似精度の評価を行った試験開始から30分後の試験値との比較図も併せて示す。形状の対称性や端での着雪を常に0mmとしたことなど、計算の前提や手順にあらかじめ織り込まれた事項以外についても、図2⁽³⁾にて認められる形状の特徴は本図(b)にて示される経過時間ごとの計算値の各形状においても共通

定着率 ε のNの値については最小二乗法による評価によって、これを1.4とした場合に近似精度が最も高いと判断したので、これを最適値としながら以上の仮定や手順に基づくシミュレーションを実施した。それらの結果のうち、図2⁽³⁾にて示された結果と同様に、初期値から5分経過

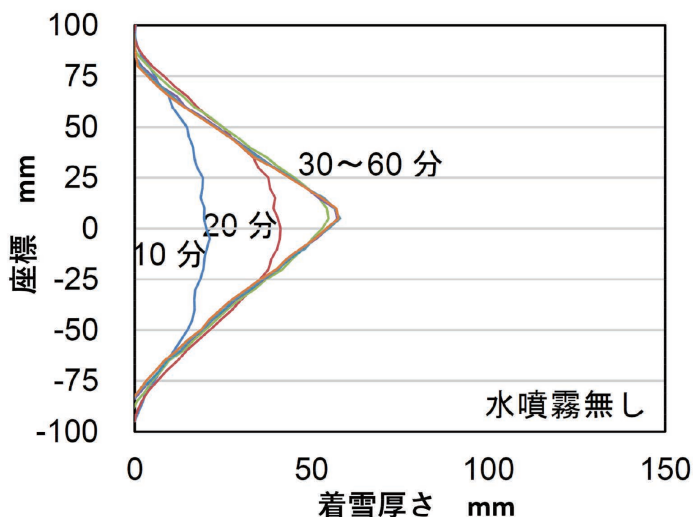


図10⁽⁴⁾ 北海道科学大学その他による着雪試験の結果
(水噴霧無し)

して認められ、特に本図 (a) における直接的な比較によって、定量的にも精度高く近似できていることが認められる。

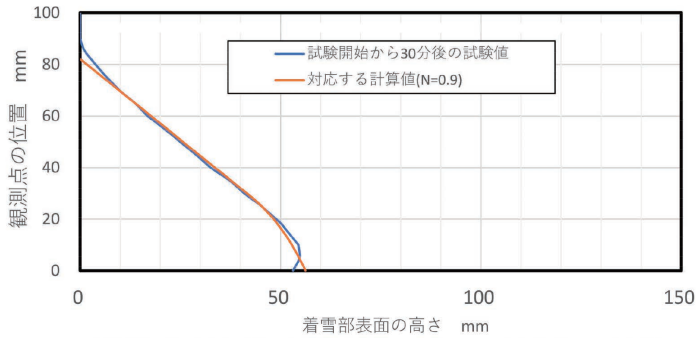
鉄道総研による試験とは別に、北海道科学大学その他によって着雪の発達状況について調査する同様な試験がかつて実施されており⁽⁴⁾、その結果の一部が図10⁽⁴⁾に示す線図によって開示されている。図10⁽⁴⁾での試験は鉄道総研と同様に人工雪を用いた降雪風洞装置

によって実施されたが、風速は9.0m/sであり鉄道総研の試験風速2.5m/sよりも大きく、また横幅800mm、高さ200mmの平板を大地に対して垂直に設置し、その片面にノズルからの主流が垂直にあたるように固定された上で実施され、かつ同図における試験結果には「水噴霧無し」との記載があることから、先の鉄道総研による試験と同様な乾雪によって実施されたと想定される。本図には試験開始後10分毎の着雪部表面の側面形状が示されており、試験開始後30分で形状はほぼ変化しなくなっている状況が認められる⁽⁴⁾。図2⁽³⁾に示される鉄道総研の結果では変化を停止した後の最終な着雪形状において、中央付近に傾斜が小さい領域が残っていたのに対し、本図に示された結果では最終形状においては中央まで傾斜が大きくなっており、全体的な形状がほぼ三角形となっている。その点を除けば、本図で認められる形状は鉄道総研の結果と同様な特徴や傾向を示している。

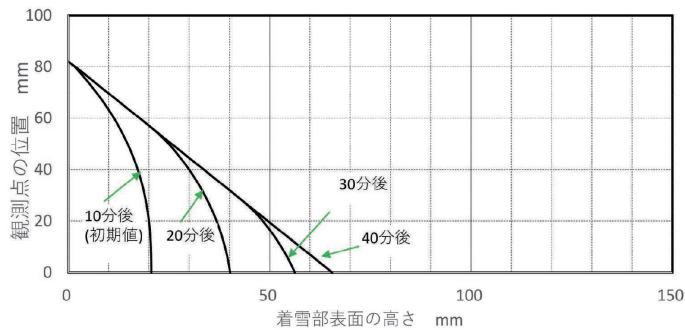
本研究では図10⁽⁴⁾にて示される着雪部形状の経時変化に対しても、シミュレーションの適用を同様に検討して実施した。なお、本シミュレーションにおいては試験開始から10分後の形状を初期形状として、先の鉄道総研の結果に対するシミュレーションと同様、これに式(1)による近似曲線を用いることとし、試験値から $a=82.5$ 、 $b=20.6$ を前提としながら試験値に対する近似精度を最小二乗法によって評価した結果、最適解として得られた $n=2.5$ を適用した式による近似曲線を初期値とした。また、1秒間で着雪部表面へ衝突していったん付着する雪粒子の量については、図10⁽⁴⁾にて示される10、20分後の各形状から図2⁽³⁾にて示された「着雪厚み」に対応する量を読み取り、その差異を用いて算出した。ただし、今回は求められた2つの値が非常に近い値であったので平均値を算出し、時間経過によって変化しない一定の値とした。さらに、式(2)による定着率 ε の算出については、図10⁽⁴⁾から形状が変化しなくなる

傾斜角度を読み取ったところ37.85°であったことからこれを θ_c の値とし、最小二乗法による近似精度の評価からNの値を0.9とした。

以上による計算結果のうち、図10⁽⁴⁾にて示された結果と同様に、初期値から10分経過する時点ごとの結果を図11に示す。ただし、本シミュレーションでは1秒当たりに着雪部表面にいったん付着する量を一定値としたので、形状の変化がほぼ完全に停止することが認められる



(a) 試験開始後30分経過時の試験値とそれに対応する、N最適値による計算値



(b) 試験開始後の各経過時間に対応する、N最適値による計算値

図11 北海道科学大学その他の試験（水噴霧無し）に対するシミュレーションの結果

0 mmと80mmの位置付近では若干の乖離が認められる。いずれも着雪部に向かってくる気流においては流速や風向が不連続的になると想定される箇所であり、その影響が作用していることが考えられる。その間の広い範囲にわたって、試験値と計算値はほぼ一致しており、この領域では定量的に非常に高い精度にて近似できていることが認められる。

図2⁽³⁾や図10⁽⁴⁾では、着雪面の気流方向に対する角度を90°とした条件による試験結果が示されていたが、鉄道総研では着雪面を90°から15°回転させ、気流に対する角度を75°とした条件による試験も実施されており⁽⁴⁾、その結果が図12⁽³⁾に示す線図によって開示されていることから、同図にて示される着雪部形状の5分ごとの経時変化に対しても、シミュレーションの適用を検討して実施した。

ただし、着雪部形状が対称形ではないことから、本シミュレーションはこれまでと異なり

40分後までの計算を実施した結果までを示している。また、最小二乗法による近似精度の評価を行った、試験開始から30分後の試験値との比較図も併せて示す。本図 (b) で示される経過時間ごとの各形状を図10⁽⁴⁾にて示された形状と比較すると、それぞれ精度よく近似していることが確認できる。特に鉄道総研による試験結果では確認できなかった、中央部付近まで傾斜が一定して大きくなった上で、形状が変化しなくなった状況までが近似よく計算されていることが認められる。本図 (a) における直接的な比較では、

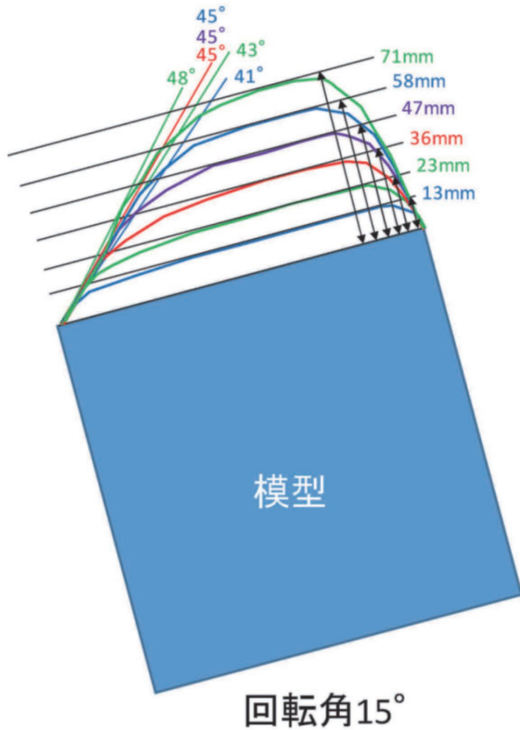


図12 (3) 鉄道総研による着雪試験の結果 (回転角15°)

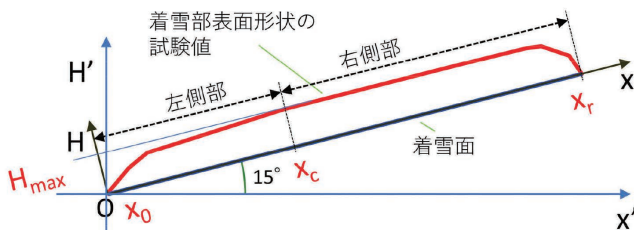


図13 「回転角15°」の着雪試験結果における着雪部表面形状の特徴を示すパラメータ

$x_c < x \leq x_r$ (右側部) の場合

$$h = -H_{\max} \left\{ \frac{(x - x_c)}{(x_r - x_c)} \right\}^{23} + H_{\max}$$

—式 (3-2)

ここで試験値から $x_0=0.00$ 、 $x_c=60.36$ 、 $x_r=151.94$ 、 $H_{\max}=12.49$ である。なお、シミュレーションでは着雪部表面高さの変化を気流の主流方向と同一方向において計算することから、上式からの算出結果をそのままでは用いることができないため、式 (3-1)、(3-2) で得られる値を図13に示す $x'-H'$ 座標系における値に変換してから用いている。また、形状が比較的複雑であることを考慮して観測点の箇所数をこれまでの2倍とするため、観測点間の間隔を着

着雪面全域を対象として、初期形状とする同図にて模型上面からの垂直高さが13mmと示されている試験開始から5分後の形状については、図13に示すような、左端を原点として着雪面をx軸、着雪面に垂直な方向の着雪部の高さをH軸とする直交座標系を試験値に対して設定した上で、この座標系において試験値のHが最大の H_{\max} となる x の位置、すなわち同図における $x=x_c$ の位置の左側の部分 (左側部) と右側の部分 (右側部) に分け、最小二乗法の評価によってそれぞれ個別に近似曲線を求めることとした。その結果得られた、以下の式 (3-1) と (3-2) に示す4次関数および23次関数による近似値を本シミュレーションにおける初期値として用いた。

$x_0 \leq x \leq x_c$ (左側部) の場合

$$h = -H_{\max} \left\{ \frac{(x_c - x)}{x_c} \right\}^4 + H_{\max}$$

—式 (3-1)

雪面上においては1 mm、シミュレーションの対象とする図13のx ‘-H’ 座標系においては $1 \times \cos 15^\circ = 0.966 \text{mm}$ とした。

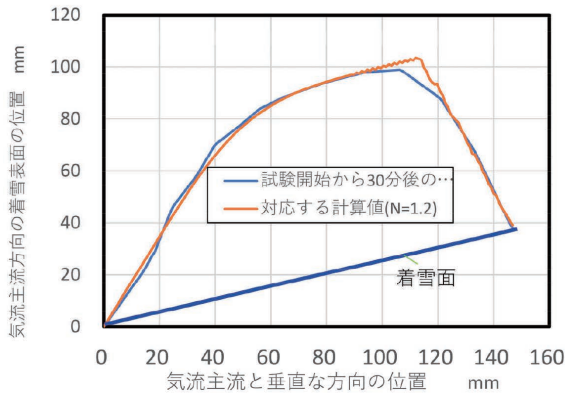
また、1秒間で着雪部表面へ衝突していったん付着する雪粒子の量については、これまでの試験結果においては表面形状がほぼ常時対称形となることから対称軸上にある着雪部表面の傾斜角度は 0° 、すなわち着雪面（あるいは平板）に対して垂直方向に移送されてきた雪粒子に対する着雪部表面の角度は 90° のままであり、それに伴って定着率も100%を保ち続けると想定されたことから、図2⁽³⁾にて「着雪厚み」として示される値から求めることができた。しかしながら表面形状が対称形とはならない図12⁽³⁾においては、移送されてきた雪粒子に対して着雪部表面の角度が 90° となる位置が常時移動しており、図2⁽³⁾における5分毎の「着雪厚み」に対応させて本図にて示されている値からはそのようにして求めることができない。このため、「1秒間あたりにいったん付着する量」をこれまでのように本図にて示される「着雪厚み」に対応する値の差から算出して用いることは避け、それぞれの時間帯における値の間の比を算出して、これのみを反映させることとした。すなわちこの比を反映させる前提にて着雪部表面にいったん付着する雪粒子の量を適当に設定した後に、シミュレーションを実施し、その結果と試験値をグラフ上にて比較の上、視認において乖離ができる限り小さくなるように雪粒子の設定量を変えた上でシミュレーションを繰り返し実施することにした。

シミュレーションにおいて必要となる、形状が変化しなくなる着雪部表面の傾斜角度については、図12⁽³⁾において5分ごとの着雪面に対する角度が示されており、本図に示された角度では 45° が妥当であると判断した。ただし、シミュレーションにおいては気流の主流方向に一致すると想定される、雪粒子の着雪表面への衝突前の運動方向の垂直面に対する角度を必要とするのでこれを換算すると 60° となる。また図12⁽³⁾における着雪表面形状は対称形状ではなく、本図では左側の形状についてのみ角度が記載されているが、右側の形状についても気流の主流方向に対してはほぼ同等の角度であったため、シミュレーションにおいては両側において同じ 60° を式(2)の θ_c の値とした。

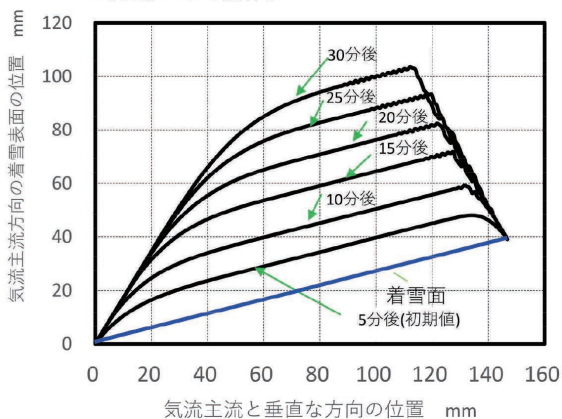
これらの前提にてシミュレーションを実施したところ、1秒あたりに着雪部表面にいったん付着する雪粒子の量を経過時間ごとで以下のようにした場合に、試験値による形状と比較的近似する見込みが得られたので以下の値に固定し、その上で最小二乗法による評価から式(2)のNの値を1.2とした。

試験開始後 経過時間	5分後 ～10分後	10分後 ～15分後	15分後 ～20分後	20分後 ～25分後	25分後 ～30分後
雪粒子の量 (高さ換算mm)	0.044	0.057	0.048	0.048	0.057

以上による計算結果のうち、これまでと同様に初期値から5分経過する時点ごとの結果を図



(a) 試験開始後30分経過時の試験値とそれに対応する、N最適値による計算値



(b) 試験開始後の各経過時間に対応する、N最適値による計算値

図14 鉄道総研の試験(回転角15°)に対するシミュレーション結果

において着雪面に近い位置から傾斜が徐々にゆるやかになる方向に変化しているのに対して、計算値ではいずれも最初からほぼ限界の傾斜角度60°になっており、このため各経過時間での外形線がほぼ重なるなど、大きく異なっている。また、最大外形となる30分後の結果も含め、着雪部表面高さが最大となる、形状としては気流に対して先端となる部位付近では試験値では丸みを帯びており、勾配の変化がゆるやかであるのに対し、試験値では90°に近い角度にて尖った形状であり、勾配が不連続的に変化している点も大きく異なっている。同図(a)での直接的な比較においても、先端部の乖離は明確に認められるが、それ以外の領域については全域にわたって非常に高い精度にて近似できていることが確認できる。

試験値においていずれの経過時間においても前の2つの試験結果と同様な対称形状にならなかったのは、着雪面の形状が気流に対して非対称であり、従って試験開始時の着雪面付近の流れも対称形にならず、それに沿った初期形状が形成され、その後形成される着雪部表面形状に沿った流れも依然として非対称のままとなるので、結果として着雪部の形状は非対称のまま

14に示す。ただし、これまでのシミュレーション結果は着雪面が気流の主流方向に垂直であったため、横軸を着雪面の位置、縦軸を着雪面に対して垂直な方向に定義された着雪部表面高さとしたが、本図では図12⁽³⁾に合わせ、着雪面が横軸に対して15°傾斜した直線にて示され、その着雪面の任意の点における着雪部表面の気流の主流方向での高さを縦軸にて示したグラフにて、着雪部表面の形状を示している。本図(b)で示される経過時間ごとの各形状を図12⁽³⁾にて示された形状と比較すると、0mmから100mm付近までの位置で形状の勾配が正となる領域においては、それぞれ概ね精度よく近似していることが確認できる。一方で100mm以上の位置での形状の勾配が負となる領域においては、最大外形となる30分後の結果を除き、試験値による外形線

であったと考えられる。先端付近の形状における乖離については、図10⁽⁴⁾の試験値に対する図11の計算値の先端部付近における乖離と傾向が同様であり、本件も雪粒子を移送する気流における不連続性が影響していると思われる。また、初期形状において外形線の勾配が負となる位置が130mm以上となる領域はその全域が先端部に近接しており、その影響も受けやすいと思われる。シミュレーションにおいてはそのような気流の影響は考慮されていないため、100mm以上の位置におけるその後の計算値の試験値に対する乖離が生じたとも考えられる。

図10⁽⁴⁾では鉄道総研と同様に、特に湿らせることのない人工雪を使用した試験の結果が示されていたが、北海道科学大学その他では人工雪に水を噴霧して湿らせた上で使用した試験も

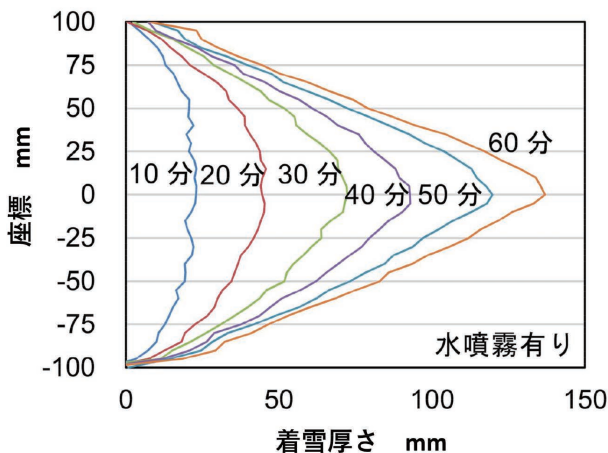
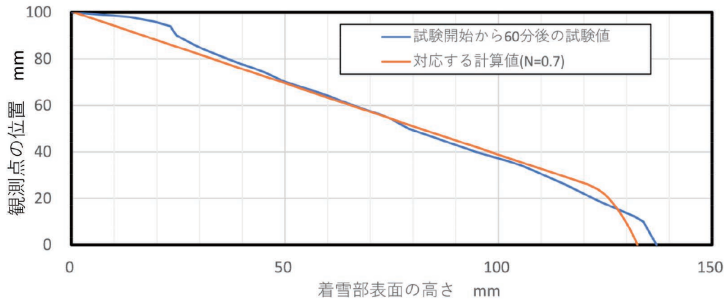


図15⁽⁴⁾ 北海道科学大学その他による着雪試験の結果（水噴霧あり）

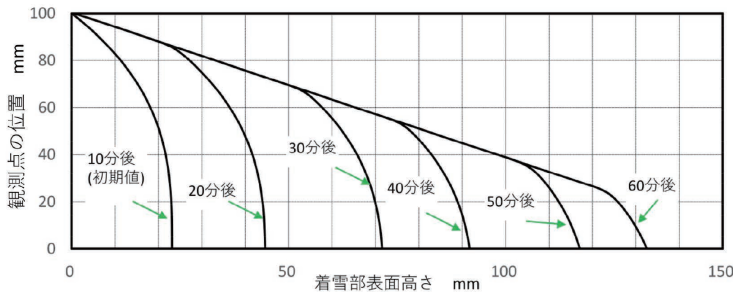
実施されており⁽⁴⁾、その結果が図15⁽⁴⁾に示す線図によって開示されている。本図にて示される着雪部形状の経時変化に対しても、シミュレーションの適用を検討して実施した。なお、本シミュレーションにおいては、試験開始から10分後の形状を初期形状としながら図2⁽³⁾、あるいは図10⁽⁴⁾に示された試験結果に対するのと同様に式(1)による近似曲線を用いることとし、試験値から $a=100.0$ 、 $b=23.12$ を前提としながら、試験値に

に対する近似精度を最小二乗法によって評価した結果、最適解として得られた $n=3.0$ を適用した式による近似曲線を初期値とした。また、1秒間で着雪部表面へ衝突し、いったん付着する雪粒子の量については、本図にて示される各形状から図2⁽³⁾にて示された「着雪厚み」に対応する量を読み取り、10分毎の差異からそれぞれ算出した。ただし、本図による試験結果ではこれまで示してきた試験結果とは異なり形状が変化しなくなる傾斜角度が不明であるため、式(2)の θ_c の値としては最大外形となる60分経過後の形状での対応する角度 55.62° にて代用することとし、最小二乗法による評価から N の値を0.7とした。

以上による計算結果のうち、これまでと同様に初期値から10分経過する時点ごとの結果を図16に示す。また、最小二乗法による近似精度の評価を行った、試験開始から60分後の試験値との比較図も併せて示す。本図(b)で示される形状を図15⁽⁴⁾にて示された形状と比較すると、試験開始から60分後の結果のみについては、0mmおよび100mmの位置付近を除いてかなり高い精度にて近似しており、これは本図(a)による直接的な比較からも明らかである。しかしながら、これと初期値を除くといずれも試験値に対して中央付近から大きく外側にはみ出した



(a)試験開始後30分経過時の試験値とそれに対応する、N最適値による計算値



(b) 試験開始後の各経過時間に対応する、N最適値による計算値

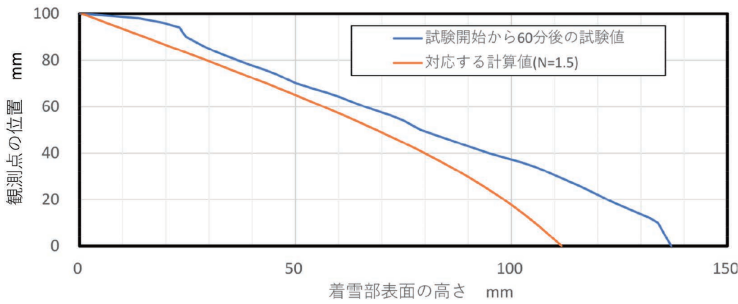
図16 北海道科学大学その他の実験（水噴霧あり）に対するシミュレーションの結果①【N=0.7】

形状となる等、かなり差異があり、その差異は時間が経過した結果ほど大きくなっている。図2⁽³⁾、図10⁽⁴⁾、さらに図12⁽³⁾にて示された、人工雪に対して水を噴霧せずにそのまま用いた時の試験結果では、経過時間が比較的少ない時点から端部からの傾斜の大きい領域においては傾斜がほぼ共通した一定の角度となっている。これに対して、図15⁽⁴⁾にて示された試験結果では50分経過した時点の結果においても、端部からすぐに傾斜角度が低減し

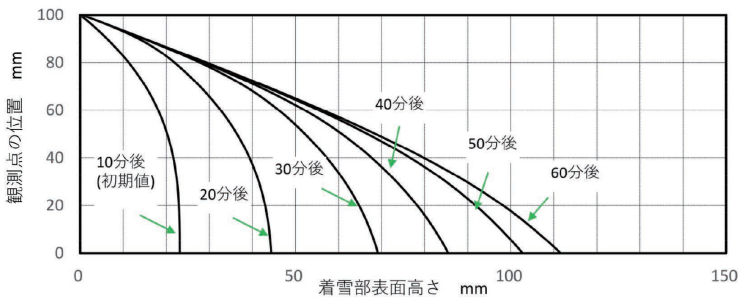
ていく傾向が認められ、40分経過後の結果と重なる部分が殆どないなど、これまでの試験結果にて認められた傾斜角度が共通的に一定化する傾向は、最大外形となる60分後の結果を除くと時間が経過しても明確にはならず、この点で傾向がかなり異なっている。これに対し、図9(b)、図11(b)、図14(b)、さらに図16(b)にて示した計算結果は、いずれも端部からの傾斜角度が経過時間の少ない時点から一定化する傾向を示している。このため図15⁽⁴⁾による試験結果を除くと、少なくとも着雪部の気流に対する先端部付近、および着雪面に近接した部位付近を除く領域に対しては、これまで見てきたように近似精度が高かったものの、図15⁽⁴⁾の試験結果に対しては全体として大きく異なる結果になったと思われる。

端部からの傾斜角度が共通的に一定となる傾向を弱めるような計算結果を与える定着率 ε の関数を検討したところ、Nの値を大きくすることが有効であることが分かったので、近似精度は低くなるものの、参考としてこれを0.7から1.5に代えて計算を行ってみた。

その結果のうち、これまでと同様に10分毎の結果を図17に示す。また、試験開始から60分後の試験値との比較図も併せて示す。本図(b)で示される形状を図16(b)の計算値や図15⁽⁴⁾の試験値と比較すると、図16で認められた端部からの傾斜角度が共通的に一定となる傾向は緩和され、その点においては図15⁽⁴⁾に示された形状の傾向に適合した結果となった。しかしながら傾斜が小さくなる傾向が試験値よりもかなり強くなったため、本図(b)でも明らか



(a) 試験開始後30分経過時の試験値とそれに対応する、N=1.5による計算値



(b) 試験開始後の各経過時間に対応する、N=1.5による計算値

図17 北海道科学大学その他の実験（水噴霧あり）に対するシミュレーションの結果②【N=1.5】

うに、中央（位置 0 mm）での着雪部表面高さの値において時間が経過するほど試験値との差異が大きくなるなど、本図で示される計算結果も試験値との差異が大きい結果となった。

この他にも、定着率の式のNの値や、形状が変化しなくなる傾斜角度などのパラメータを変えた試算を行ったが、図15の経過時間ごとの各形状に対して近似精度の高い計算結果を得ることはできなかった。

9. 考察

シミュレーションの結果と試験結果との比較において、人工雪に水噴霧等による人為的な水分補給を行わない条件にて、鉄道総研、および北海道科学大学その他によってそれぞれ実施された、雪粒子を移送する気流に対して着雪面を垂直方向に設置し、これに雪粒子を附着させた2つの試験のいずれの結果に対しても、着雪部表面形状の経時変化における特徴や傾向を良く再現し、定量的にも近似精度の高い計算値が得られた。また、着雪面を気流に対して15°傾斜させた試験結果に対しても、局所的に気流が大きく変化し、その影響が及ぼされると思われる部位を除き、同様な結果が得られた。以上から、本研究にて提示したシミュレーションのベースとなる「着雪プロセスのモデル」、およびシミュレーション実施にあたっての前提や手順は、ある程度の妥当性をもっているものと思われる。

一方で、人工雪に水噴霧を行った条件での図15⁽⁴⁾に示す試験結果に対しては、本研究で検討した限りにおいて、これに適合するシミュレーション結果を得ることができなかった。シミュレーションの途上にて計算する「定着率」について、他の2つの試験結果に対する場合と同様な、着雪表面形状の傾斜角 θ を用いた「 $\tan \theta$ 」のN次関数による式を用いて、Nの値をパラメータとした最適化に限定して検討したので、関数の形態を抜本的に見直すことによって計算値の精

度向上を図ることも可能であると考えられる。しかしながらある程度の時間が経過した時の端部からの傾斜角度について、水噴霧を行わない条件では認められた「共通的に一定化する傾向」が、水噴霧を行った条件の試験結果においてはかなり弱かったことから、着雪のプロセスに本質的な違いがあり、「着雪プロセスのモデル」そのものを見直す必要があることも考えられる。特に雪粒子間の付着力を「雪粒子の直接的な接触による焼結によるもの」と、「粒子間に介在する水の表面張力によるもの」とで考えた場合には、水噴霧の有無がそれぞれの寄与度に大きな差異をもたらし、これによって適切な「着雪プロセスのモデル」、あるいは「定着率を記述する関数」が大きく異なることも考えられ、今後はこのような力学的あるいは物理的メカニズムまで立ち入って研究する必要があると思われる。

また、各試験結果に対する計算値の算出のため着雪率の計算に用いたNの値については、計算値の最大外形の試験値に対する近似精度を最小二乗法によって評価し、最適解を用いたが、いずれも異なる値となった。図2⁽³⁾と図12⁽³⁾にて示される鉄道総研による試験結果に対する値はそれぞれ1.4と1.2であり、北海道科学大学その他の試験に対しては0.9と0.7であり、実施主体による差異が大きいが、鉄道総研の試験における気流の流速が2.5m/sであるのに対して北海道科学大学その他の試験では9m/sであることから、風速条件の違いによる影響が大きいものと思われる。ある定まった傾斜角度をもつ着雪部表面での衝突においては、定着率は衝突してくる雪粒子の慣性力と付着力の統計的なバランスによって定まるとしたことから、慣性力に影響を及ぼすと思われる雪粒子の密度や衝突時の速度、付着力に影響を及ぼすと思われる雪粒子の形状や構造等がそれぞれの試験ごとに考慮すべきパラメータであると思われるが、その中でも衝突時の速度による寄与がかなり大きいものと想定される。鉄道総研による試験にて認められる、気流に対する着雪面の角度が異なる試験結果に対するNの値の差異については、両試験において雪粒子を移送する気流の状態がかなり異なっている可能性があり、その寄与によることが考えられる。北海道科学大学その他による試験にて認められる水の噴霧条件が異なる試験結果に対するNの値の差異については、付着力に及ぼす水の表面張力の有無による寄与が考えられる。ただし、いずれの試験も同じ低温風洞施設を用いて試験が実施されていることから雪粒子は乾燥しており、水を噴霧等しない限り付着力は主として水を介在しない焼結によるものと推定されるが、それでも試験時の気温については焼結の進行に影響を及ぼすため注意が必要と思われる。

さらに、図2⁽³⁾にて示された試験結果では中央付近に傾斜が小さい部分を残した状態で形状変化が停止しており、ほぼ全体にわたって一定の傾斜角度となった図10⁽⁴⁾の試験結果とこの点において大きく異なった傾向となっている。図10⁽⁴⁾の結果に対応したシミュレーションによる計算値はこの点について試験値をよく近似していたことから、図2⁽³⁾に対するシミュレーションを試験と同じ経過時点で終了させることなくさらに継続させた場合には、同様に中

央付近まで一定の傾斜角度の形状となった後に形状変化を停止するものと思われる。これより、図2⁽³⁾による試験においては、途中までは「着雪プロセスのモデル」と同様な着雪プロセスであったものの、試験開始から30分経過付近になって、そのようなプロセスから大きく逸脱したものと想定される。その原因は定かではないが、両試験の実施条件における差異として風道のノズルからの気流の流速が大きく異なっていることから、雪粒子を移送してくる気流の着雪表面付近での風向等に対する表面形状の影響が、もとの流速の差異によって大きく異なった結果であることも考えられる。

最後に計算値の初期形状の近似に用いたnの値について、気流に対して着雪面を垂直に設置した条件の試験においては、北海道科学大学その他の2つの試験に対しては2.5と3.0に近い値となっているのに対し、鉄道総研の試験に対しては7.0であり、先の2つとの差異が大きい。これは初期形状として近似した試験値での形状が、北海道科学大学その他の試験に対しては試験開始から10分後の形状であったのに対し、鉄道総研の試験に対しては5分後の形状であり、これに気流風速の差異も加わり対象とした試験値による形状が大きく異なっていることによるものと考えられる。気流に対して着雪面を垂直から15°傾斜させた鉄道総研による試験に対しては左側1.4+右側23.0と、同じ総研による試験で近似の対象とする試験値による形状が試験開始から同じ時点での形状であり、初期形状の風速が同じでありながら大きく異なっているが、これも前述のように気流に対する着雪面の角度の相違による気流への影響によって、試験値による初期形状に大きな差異があることによると考えられる。

10. まとめと今後の研究について

本研究では平板にある程度の量の雪が定着した状態を初期値として、単位時間当たり一定の量の雪粒子が平板に直角方向にて着雪部表面に定常的に衝突する際の表面への定着や、それによる表面形状の変化について、あらかじめ実施されていた定置試験の結果をもとに力学的条件をある程度考慮した「着雪プロセスのモデル」を仮定し、そのモデルによるシミュレーション手法を検討して実施したところ、水を噴霧しない条件での試験結果に対しては一部を除き、おおむね高い精度にて近似する結果が得られたが、水を噴霧した条件での試験結果に対しては精度良く近似する結果は得られなかった。比較的気温の高い北陸区間を走行する新幹線車両の床下部への着雪は水分を多く含む雪によると想定されることもあり、水分を含んだ雪粒子による着雪に重点をおいた研究が今後必要であると考えられる。水を噴霧しない条件での着雪に対してはモデルにある程度の妥当性が確認できたことから、このモデルを起点として今後必要な定置試験等を実施しながら、水の関与や影響等を含めた着雪の詳細なメカニズムの解明を進めたい。

また、鉄道総研と北海道科学大学その他による試験結果に対するシミュレーションの間にお

いて、定着率の計算に必要なNの最適値が大きく異なっており、それぞれの試験における気流の風速が大きく異なっていることから、流速も着雪部の表面形状の形成に関する寄与が大きいパラメータであると考えられる。気流の流速のみを変更させた条件での試験も鉄道総研によって実施されており、最大外形については公開されているものの、本研究におけるシミュレーションの実施に必要な初期状態の形状が不明であったことから今回の適用は見送ったため、今後、必要な試験データを何らかの手段にて入手の上、同様の手法によるシミュレーションを実施し、気流風速の着雪プロセスへの影響について明確にしたい。

本研究では「雪庇ダミー」の着雪対策としての効果向上を念頭に、既存の床下形状に対する雪庇形状の予測が可能となることを目標としたが、雪粒子が着雪表面に衝突した後に分離することなく定着するための力学的あるいは物理的な条件が、研究の今後の進展によって明らかになった場合には、「雪庇ダミー」よりも実施が容易でかつ効果的な着雪防止対策の実現も期待できる。

さらに、本研究では着雪のプロセスについて、着雪面の全面においてある程度の量の雪が定着している状況を初期値としたが、いずれは金属製の板にて構成された鉄道車両の床下を想定して固形物表面への着雪からを対象とすることが、抜本的対策にもつながる可能性があることから望ましい。その発生メカニズムは雪粒子間での付着や定着に近似していることも想定されるので、雪粒子間に関する研究がある程度深度化した段階で、それまでの成果を応用する方向にて検討することとしたい。

参考文献

- 1) 土屋良雄、中村哲也、井澤信明：「北陸新幹線車両の着雪対策」, Rollingstock & machinery Vol.27, pp.4-7, (2019.12)
- 2) Nobuaki IZAWA, Tetsuya NAKAMURA, Shinya MASHIMO, Takuya YAMANAKA : "Development of the measures against snow accretion of Hokuriku Shinkansen vehicle" ,WCRR 2019, (2019)
- 3) 鎌田慈、室谷浩平、中出孝次、高橋大介、佐藤研吾、根本征樹：「鉄道車両に用いる着雪シミュレーターの開発（その1）—実験による着雪発達条件の検討—」, 日本雪氷学会誌 雪氷 Vol.83 No.1, pp.79-95, (2021)
- 4) 佐藤雄輝、千葉隆弘、苫米地司、大塚清敏、田畑侑一、佐藤研吾：「構造部材の着雪性状に関する実験的研究 -雪粒子の衝突率・着雪率について-」,北海道科学大学研究紀要 第39号, pp.57-62, (2015)
- 5) 前野紀一、福田正己：「雪氷の構造と物性（基礎雪氷学講座）」, 古今書院, pp.136-140, (1999)