

(ご記入日) 令和7年4月30日

公益信託NEXCO関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金
受託者 三菱UFJ信託銀行株式会社 宛

研究概要書

研究課題：高速道路を構成する各種構造物からの落雪危険個所推定技術の開発

研究代表者：京都大学大学院工学研究科 准教授 松宮央登

共同研究者：京都大学大学院工学研究科 助教 野口恭平

京都大学大学院工学研究科 教授 八木知己

はじめに

我が国は、世界的に見ても雪が降りやすい地域であり、冬季の雪害対策が高速道路においても重要となる。その中で、構造物への着雪・落雪被害は、豪雪地域に限らず広範囲の降雪地域で発生し得る。標識・照明柱、交差する道路の桁・橋脚、橋の主塔やケーブル・トラス部材などへ着雪が生じ、その後、落雪することで通行車両や周辺構造物の破損や、車両の通行障害につながる。また、標識の場合には、着雪自体が、視認性の問題を引き起こす場合もある。これらの被害を低減するためには、様々な構造物に対して着雪が発生し易い部位や落雪するタイミングを評価できる技術の開発が必要となり、本研究では、数値流体解析による断面への雪粒子の衝突特性の把握、および、低温実験室を用いた着雪実験手法の検討を実施した。

1. 研究の目的

風に伴って降雪粒子が飛散すると構造物の側面にも着雪が生じ、付着した着雪体は降雪が止み気温の上昇などに伴い付着力を失って落雪する。高速道路を構成する各種構造物に対して着雪が発生しやすい部位を特定し、落雪の危険がある場所やそのタイミングを推定できる技術を開発するためには、着雪から落雪に至るまでには複数の物理プロセスがあり、雪の飛散、衝突、付着、成長、融解、脱落に分けて各現象を解明し、それぞれの評価手法を構築する必要がある。本研究では、数値流体解析を用いて基本的な構造断面（正方形角柱）を対象にした粒子の飛散解析を実施し、雪粒子を対象に断面周りの飛散特性、断面への衝突特性について検討を行った。また、衝突した粒子の全てが付着するのではなく、衝突速度・角度に応じて付着率（着雪率）が異なると考えられる。そのため、着雪率を評価するために、効率的に低温実験室を用いた着雪実験手法の検討を行った。

2. 数値流体解析による雪粒子の構造物への衝突特性評価

正方形角柱周りの雪粒子の飛散挙動と壁面への衝突過程を明らかにするために、ラージエディシミュレーション（LES）による非定常流れ場解析と雪粒子の飛散解析を行った。雪粒子は等価な球状と仮定し、粒子に作用する外力として抗力項やサフマン揚力項（粒子の上下面の流速差によって生じる力）、圧力勾配項、付加質量項を考慮した運動方程式を用いて、断面周りの雪粒子の飛散特性および断面への衝突特性を評価した。微小粒子を想定する場合、抗力係数 C_d は、粒子レイノルズ数 Re_p （ $= d_p U_{rp} / \nu$ 、 d_p ：粒径、 U_{rp} ：粒子に作用する相対風速（風速と粒子速度の差）、 ν ：空気の動粘性係数）の関数として、次式で近似できることが知られている。

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{1}{6} Re_p^{\frac{2}{3}} \right) & Re_p \leq 1000 \\ 0.424 & Re_p > 1000 \end{cases}$$

また、粒子の運動はストークス数と呼ばれる無次元数の影響を大きく受けることが知られている。

ストークス数 Stk は、次式で与えられる無次元数で流体中の粒子の流れに対する追従性を表すパラメータであり、粒子の慣性力と流体の粘性の比である。この値が小さいとき粒子の流れに対する追従性がよく、粒子の軌跡が流線に漸近する。

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 U}{18 \rho_f \nu D}$$

ここで、 ρ_p は粒子密度、 U は流入風速、 ρ_f は空気密度、 D は対象断面の代表径である。

はじめに、粒子の運動方程式を変形して無次元化した形で表すことで、粒子レイノルズ数 Re_p 、粒子の密度比 ρ_p/ρ_f 、ストークス数 Stk によって、断面周りでの粒子の飛散特性が定まることを示した。粒子レイノルズ数 Re_p が十分小さい場合には抗力係数 $C_d = 24/Re_p$ と表すことができ、雪粒子の密度が一定であれば粒子の挙動はストークス数 Stk のみで決まることを理論的に示した。一方、粒子レイノルズ数 Re_p が大きい場合でも、断面周りの流れ場特性に影響するレイノルズ数 $Re (= UD/\nu)$ が一定であれば、ストークス数 Stk が同じ条件で粒子の衝突特性が一致することを数値流体解析結果も踏まえて確認した。

つぎに、ストークス数を変えた場合の断面への衝突特性を比較した（図1）。ストークス数の小さい場合（ $Stk = 0.104 \sim 0.416$ ）では、流れへの追従性が高いため粒子は前面を避けやすく、前面への衝突は非常に少ない。前面を避けた粒子は剥離流れに従って流下した後、後方のカルマン渦の影響を受けて背面・側面へ輸送され、その多くは各面端部に衝突した。ストークス数がやや大きい場合（ $Stk = 2.60 \sim 10.4$ ）では、粒子の流れへの追従性が低下することで、前面への衝突が増加した。また、剥離流れによって後方へ流下した粒子がカルマン渦の流れに追従しにくくなることで、背面・側面近傍へ輸送される粒子が減少し、背面・側面の衝突はほとんど生じない。ストークス数がさらに大きい場合（ $Stk = 41.6 \sim 260$ ）では、流れへの追従性が低いためほとんどの粒子が前面へ衝突した。前面に衝突しなかった粒子は、剥離せん断層の外側を流下するのではなく、大きな慣性のために剥離せん断層内へ直接進入することで、側面や背面付近に輸送され、一部が衝突に至った。

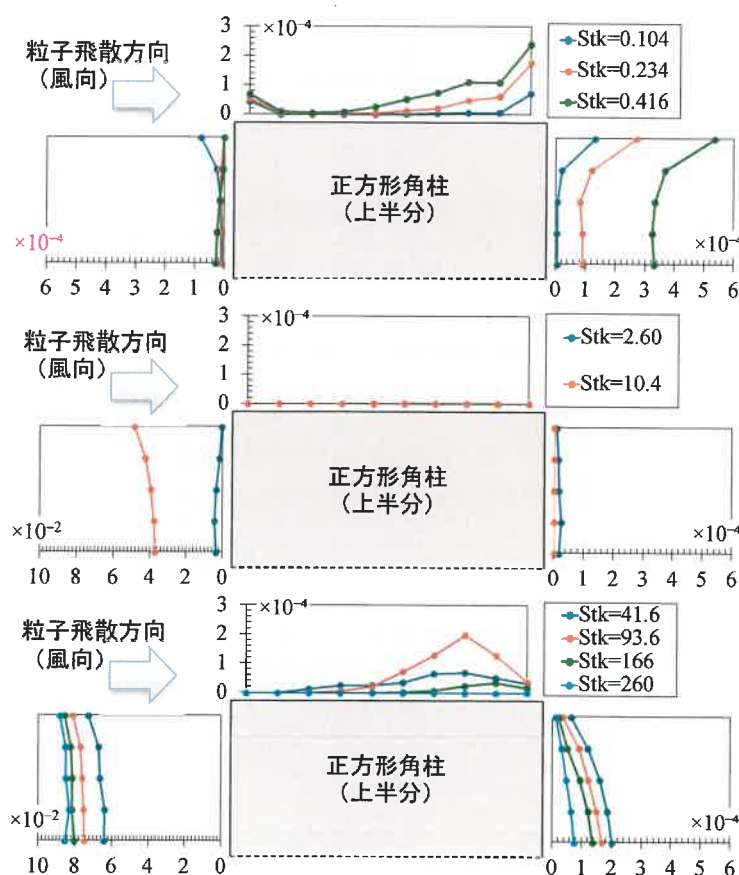


図1 ストークス数に応じた各部位の衝突率の比較
図の左から右側に粒子を飛散させた際に、各面を幅 $D/10$ で分割した各領域への衝突数を、断面上流から放出した粒子の総量で除した値を示した。断面の対称性から図には断面の上下平均値を示した。

3. 付着率を考慮した着雪評価手法の構築に向けた検討

前章では、数値流体解析を用いて、断面の各部位への粒子の衝突量を評価可能にするとともに、ストークス数に応じたその衝突特性の変化を述べた。一方、前面端部（角部から $D/10$ の範囲）に衝突した粒子の衝突速度と角度を図2に示す。ストークス数が大きくなると衝突速度・角度ともに大きくなった。既往の実験では、浅い衝突角度では雪粒子はほとんど付着しないという指摘もある。また、衝突速度の増加に伴い付着率（付着量/衝突量）は低下すると考えられる。そのため、断面の各部位への着雪量の評価には、衝突量のみならず、衝突速度・角度などを変数とした雪の付着率、すなわち、着雪率

をモデル化する必要がある。

着雪率のモデルを構築する方法の一つに、低温実験室を用いた着雪実験が考えられる。しかし、自然界の降雪粒子を実験室で再現することの難しさなどから、着雪実験を実施できる機関は少なく、未だその測定方法なども確立されているとは言い難い。そこで、着雪実験に求められる実験設備の性能を改めて整理するとともに、なるべく簡便な実験によりデータ蓄積を進める方法を検討した。着雪現象は様々な物理プロセスが関係しているため、そのすべてをまとめて実験で再現するのは容易ではないが、一つ一つの要素に着目すれば簡便な実験装置・設備でも検討可能である。本研究では、物理プロセス毎の相似則も踏まえて実験装置・設備に求められる性能を整理し、着雪実験による効率的なデータ取得に向けた準備を進めた。

4. 今後の展開

数値流体解析に基づき、断面の各部位への雪粒子の衝突特性を評価可能となり、実験に基づき、着雪率の評価が可能な見通しを得た。今後、様々な雪粒子・風速・気温・湿度などに応じて変化する着雪率のデータを蓄積し、着雪率モデルを構築することで、断面の各部位への着雪量の評価を可能にする。さらに、数値流体解析と低温実験に基づき、着雪体が空気から受ける熱量や融解量（含水率）に応じた付着力変化の評価、を行う。これらの検討により、数値流体解析結果に基づいて、高速道路を構成する各種構造物に対して着雪が発生しやすい部位を特定し、落雪の危険がある場所やそのタイミングを推定できる技術の開発を進める。

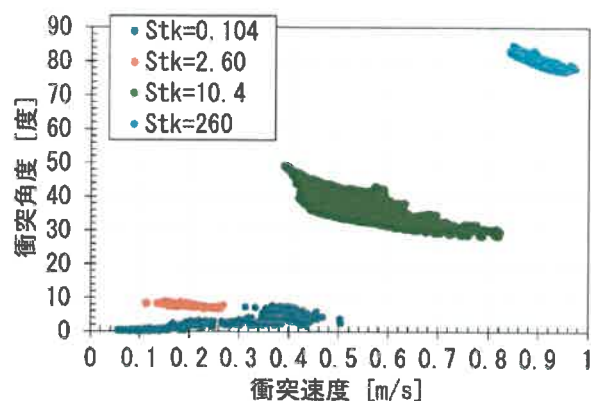


図2 衝突速度・角度の比較（前面端部）
前面の角部から $D/10$ の範囲に衝突した粒子の衝突速度と角度の関係を示した。流入風速は1m/sであり、断面に直交して衝突する角度を90度と定義した。