

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14232

研究課題名（和文）なぜそこに塩が付着するのか？塩分粒子挙動の物理から考える橋梁の腐食環境

研究課題名（英文）Why does salt adhere there? The corrosion environment of bridges from the physics of salt particle behavior

研究代表者

野口 恭平（Noguchi, Kyohei）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：70802685

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：断面辺長比1と6の矩形断面について、数値流体解析を利用することで、断面周りに形成される流れ場のもとで粒子がどのように輸送されて付着に至るのか、詳細に検討した。また、矩形表面の圧力から得られる物理量を利用して、付着量を推定するための手法を提案した。さらに、低温実験室における着雪実験を通じて、壁面に衝突した粒子の付着率に対する粒子速度や衝突角度の影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

橋梁の維持管理の観点からいえば、付着塩分量さらには部材の劣化の程度が重要であり、ある意味では塩分が付着に至る過程はいつでもよい。そのような状況において、あえて付着に至る過程に着目し、そこに潜む物理現象を解明したことに大きな意義がある。また、物体に接近する粒子は、その一部は物体を迂回したり、衝突はしても跳ね返ったりするが、そのような違いが十分に考慮されることは少ない。本研究では様々な手法を利用して厳密な付着率に取り組んでいるという点で大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：Rectangular prisms with the side ratio of 1 and 6 was investigated in detail by using computational fluid dynamics (CFD) to determine how particles are transported and adhered under the flow field formed around the cross section. We also proposed a method for estimating the amount of adhesion using physical quantities obtained from the pressure on the rectangular surface. Furthermore, the effects of particle velocity and angle of impact on the adhesion rate of particles impacting on the wall were clarified through snow deposition experiments in a low-temperature laboratory.

研究分野：風工学，橋梁工学，維持管理工学

キーワード：飛来塩分 維持管理 数値流体解析 風洞実験 着雪 付着率

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

塩分は鋼材の腐食やコンクリート材の塩害を促進するので、橋梁の維持管理に際しては、大気中塩分濃度や橋梁部材への付着塩分量をあらかじめ把握しておくことが望ましい。塩分は耐候性鋼の無塗装利用の可否や、塗膜の種類や厚さの判定に利用されることから、塩分に関する情報の必要性は明らかである。研究例として、飛来塩分量の全国調査(土木研究所資料, 1993)、塩分量や濡れ時間に基づく鋼材腐食量の推定(紀平ら, 土木学会論文集, 2005)、数値計算や風洞実験による橋梁の腐食環境評価(チェンデラら, 構造工学論文集, 2012)が行われている。

このような背景から、申請者らも、主に海塩粒子に着目して研究を行ってきた。具体的には、大気中塩分濃度と橋梁断面周りの気流に基づき、橋梁各部位への付着塩分量を数値計算によって定量的に評価し、観測値を概ね再現することに成功した(Noguchi et al., J. Bridge Eng., 2017)。

このように、塩分環境の把握に関する研究は、供試体や実橋梁の劣化具合の調査と併せて数多く行われている。しかし、「なぜ」その橋梁のその部位にそれだけの量の塩分が付着するのかという問いは、ほぼ触れられることなく残っている。結果としての付着塩分量に注目するだけではなく、塩分粒子が付着に至る過程の物理現象を理解し、この「なぜ」に真摯に取り組むことが、適切な維持管理や塩分付着への効果的な対策を考えるためには重要である。また、この問題は、「気流と粒子、気流と物体(橋梁)、粒子と物体など、異なる場の相互作用」を扱うという点で、風工学や流体力学を始めあらゆる分野に通ずる学術的な問題である。粒子飛散は、雨粒や雪、粉塵、さらにはウイルス等の微粒子にまで関連する重要な研究課題であり、この点からも大いに検討の価値がある。

2. 研究の目的

このような背景から、本研究では、塩分が付着しやすい橋梁の部位を特定するとともに、塩分粒子が風に乗って運ばれて、最終的に橋梁表面に付着するまでのメカニズムを空気力学の観点から詳細に明らかにする。具体的には次の2点にまとめられる。1点目として、橋梁断面周りに形成される気流と、その影響を受けて空気中を運ばれる塩分粒子の挙動との関係を詳細に観察し、付着塩分量を物理的背景に立脚して定量的に評価する方法を開発する(比較的マクロな視点)。2点目として、塩分粒子が橋梁表面に衝突するときに、必ず橋梁表面に付着するのか、それとも条件次第では跳ね返るのか、について明らかにする(比較的ミクロな視点)。

3. 研究の方法

本研究では以下のように大別される課題について取り組んだ。

(1) 塩分粒子の輸送メカニズムの解明と付着量評価手法の開発

簡単のため、橋梁断面の代わりに矩形断面を対象に、数値流体解析(CFD)および風洞実験を利用して検討を行った。数値流体解析には京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを、風洞実験には京都大学桂キャンパスに設置されている設備を利用した。具体的な研究方法としては、矩形断面まわりの時々刻々と変化する流れを数値計算によって算出し、その中を移動する粒子の運動と壁面への付着量を観察した。ここでは壁面に衝突した粒子の全てが付着すると仮定して検討を行った。対象とする矩形断面には、断面辺長比が1と6の2種類の矩形断面を用いた。これら2断面の周りに形成される流れ場は大きく異なることが既往の研究から分かっており、流れが粒子の輸送に与える影響について具体的に調べることができると考えた。なお、風洞を利用した流れの可視化実験に基づいて断面周りの風速分布を算出し、数値計算から得られた流れ場と比較することで、流れ場計算結果の妥当性を確認している。

加えて、このようにして得られた付着塩分量を簡易的に算出するため、数値流体解析によって同時に得られる表面圧力に関する物理量を利用する手法を考案し、その有効性について検討を行った。

(2) 粒子の壁面衝突時の挙動解明

壁面に衝突する時の粒子挙動を解明するため、雪粒子を用いた実験を行った。一般的に雪粒子は塩分粒子よりも大きいのが、その挙動を目視で把握することができるため、粒子の壁面衝突に関する知見を得るのに適していると判断した。雪粒子を用いた実験は、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所の低温風洞施設を利用した。具体的な研究手法としては、風洞内に雪粒子を導入して空気と共に流下させ、風路内に設置した供試体への着雪量を計測した。その際、ネット式飛雪量計によって単位時間当たりの飛雪量を測定することで、接近量に対する着雪量を

評価することが可能である。また、レーザーを用いて粒子挙動を可視化することで、供試体への粒子の衝突速度や衝突角度を計測し、さらに、試験体の設置角度と降雪粒子の衝突角度を考慮することで、供試体への粒子の衝突量を推定した。

4. 研究成果

(1) 塩分粒子の輸送メカニズムの解明と付着量評価手法の開発

図1に、断面辺長比1と6それぞれの矩形断面について、数値流体解析によって得られた時間平均流れ場を示す。向かって左側から流入した気流が矩形断面を迂回するように流下（剥離）しているが、断面辺長比1は物体に再付着しない一方、断面辺長比6では側面に再付着していることが確認できる。このような辺長比の違いによって生じる流れの違いが、断面周りの粒子挙動にも影響すると考えられる。

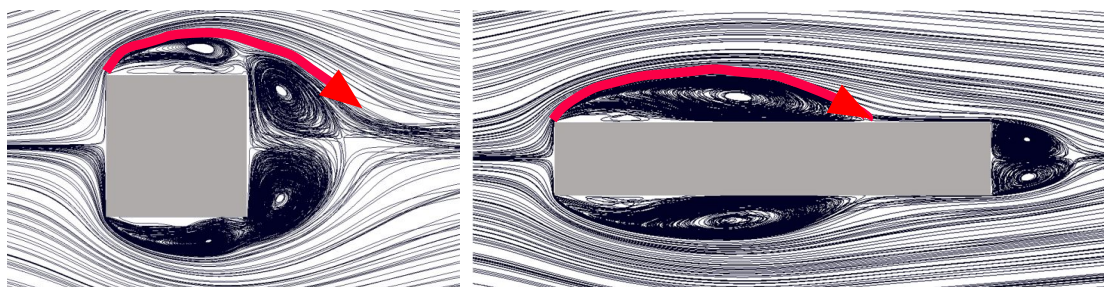


図1 断面周りの時間平均流れ場。左：断面辺長比1，右：断面辺長比6

図2は、断面辺長比1の場合において、ある大きさの粒子が断面後縁付近に到達するメカニズムを模式的に表している。(a)から(f)に向かって時間が経過しており、このような変化が繰り返し起こる。図中の赤線は剥離剪断層を示しており、青い矢印がその移動方向を表している。一方、黒い矢印は粒子の輸送過程を指しており、緑色の領域に粒子が多く付着することを意味する。(a)の剥離剪断層が壁面に最も近づいている状態から離れていく過程で、(c)のときに背面から側面に向かう流れが背面端部に付着を生じさせること、(d)の最も離れているときには背面と側面の両端部で不着が生じること、そして再び剥離剪断層が壁面に近づく(e)ではそれに伴い側面端部に付着が生じることが確認された。このように、粒子の輸送と付着に対しては剥離剪断層の周期的な運動が重要であり、渦放出1周期の中で生じる剥離剪断層の壁面への接近および離脱に応じて付着しやすい部位が変化することが明らかとなった。ただし、粒子の挙動は粒子の大きさや接近風速の大きさに強く依存する。例えば粒子が小さいときには流れによく従うため図2と同様の輸送過程をたどるが、粒子自身の慣性が小さすぎて表面に到達できない、逆に粒子が大きくなるにつれて剥離剪断層の影響で大きくなった慣性の効果で物体背面や側面には近づかず流下したり、剥離剪断層内に直接進入したりするなど、様々な挙動を示すことが確認された。

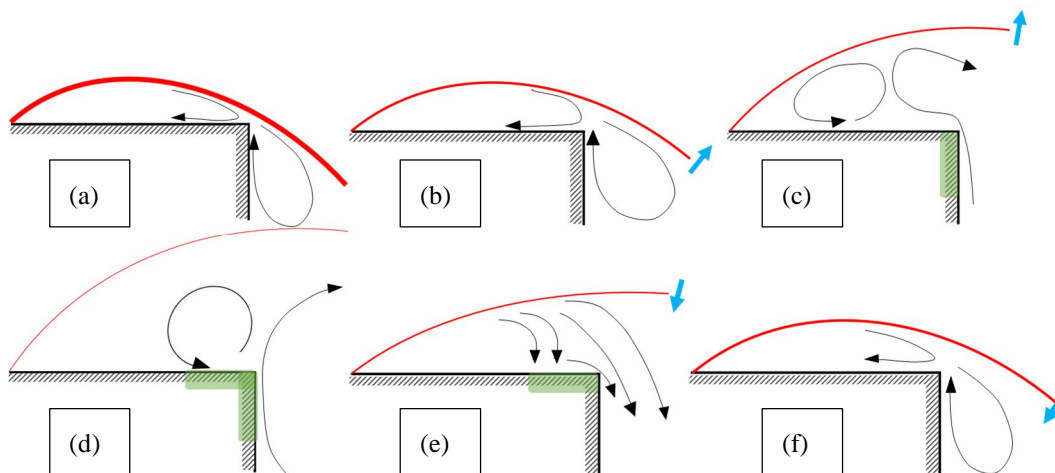


図2 断面辺長比1の矩形断面の後縁付近における剥離剪断層の運動と粒子挙動の一例

次に、粒子飛散解析を行うことなく断面への付着量や付着分布を評価する目的で、表面圧力に基づく付着量推定手法について検討を行った。付着量も表面圧力も断面周りに形成される流れ場の影響を受けているので、付着量と表面圧力の間にも有意な関係があると思われることが検討を行った理由である。表面圧力に係る様々な物理量について付着量や付着分布との相関を調べたところ、表面圧力の時刻歴の標準偏差である変動圧力係数、および平均圧力の周方向勾

配の絶対値の2つが、付着量を良好に予測することができる可能性が示された。図3に、断面辺長比1の場合について、接近流指数に対する付着率とともに、変動圧力係数と平均圧力の周方向勾配から推定した付着率を示す。両物理量とも時間的または空間的に矩形断面表面近傍の局所的な流れの変化を表しているためと考えられる。ただし、表面圧力と付着量の関係は粒子の流れへの追従性を表すストークス数（粒子の大きさや流速などで決まる）とも密接に関係しており、留意する必要がある。

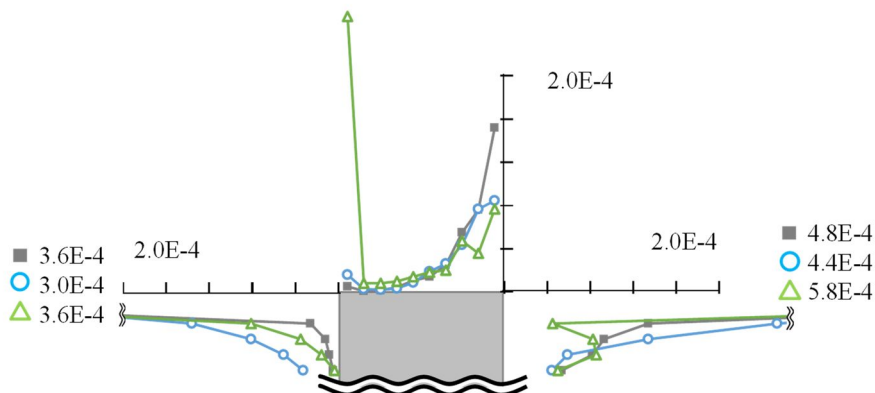


図3 断面辺長比1の矩形断面における付着率（ ）と変動圧力係数（ ）および平均圧力の周方向勾配（ ）に基づく付着量の推測値

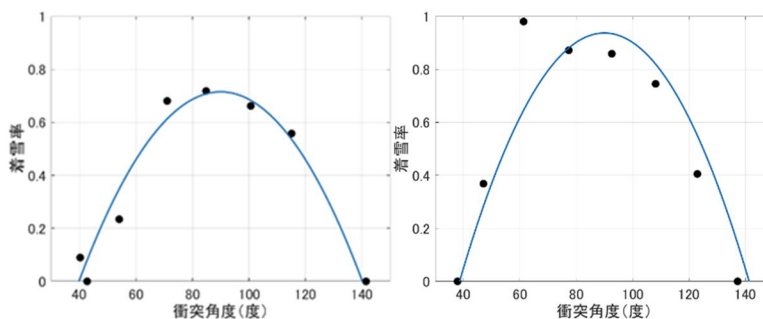
(2) 粒子の壁面衝突時の挙動説明

図4に低温実験室で行った着雪実験の様子を示す。高さ10cm×幅60cmの供試体を上下に2つ並べ、9分間の降雪中に得られたそれぞれへの付着量を計測した。風洞風速は7.5m/sと10m/sの2通り、供試体の迎角は鉛直状態を90°とすると30°~105°を15°刻みで設定した。



図4 着雪実験の様子

なお、降雪中の着雪形状の変化を調べたところ、着雪形状は台形になること、着雪が成長しなくなる限界の角度が存在することが明らかとなった。また、着雪率をより厳密に表すため、降雪中の供試体近傍の画像から、実際に供試体に粒子が衝突するときの速度と角度を調べ、適当な補正を行った結果得られたのが、図5である。この図には、上述の着雪限界角度も反映されている。このように、着雪率は衝突角度の2次関数で良好に近似できることを明らかにした。



(a) 衝突速度 8.25m/s, 上段部材 (b) 衝突速度 7.96m/s, 下段部材

図5 着雪率と衝突角度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 坪倉佑太, 野口恭平, 大森隼汰, 宇野将平, 八木知己
2. 発表標題 矩形断面における粒子の飛散・付着特性と壁面圧力値に基づく付着量評価手法に関する研究
3. 学会等名 2022年度日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大森隼汰, 野口恭平, 坪倉佑太, 宇野将平, 八木知己
2. 発表標題 矩形断面を対象とした海塩粒子の付着特性に関する研究
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大森隼汰, 野口恭平, 坪倉佑太, 宇野将平, 八木知己
2. 発表標題 矩形断面における粒子の付着機構と付着分布推定モデルに関する研究
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hayata Omori, Kyohei Noguchi, Yuta Tsubokura, Tomomi Yagi
2. 発表標題 Adhesion mechanism of salt particles to rectangular cylinders and estimation model of salt distribution on their surfaces
3. 学会等名 33rd KKHTCNN Symposium on Civil Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野口恭平, 津田悠希, 坪倉佑太, 八木知己
2. 発表標題 矩形断面周りの塩分粒子の輸送ならびに付着と表面圧力を利用した評価手法に関する研究
3. 学会等名 2021年度日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口恭平, 津田悠希, 坪倉佑太, 八木知己
2. 発表標題 矩形断面周りの飛来塩分の挙動と表面圧力に基づいた付着量評価に関する研究
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 春名健太郎, 松宮央登, 野口恭平, 大森隼汰, 梶山千穂, 八木知己, 佐藤研吾, 富樫数馬
2. 発表標題 低温風洞における雪粒子の衝突速度・角度に応じた着雪率評価方法の検討
3. 学会等名 土木学会第79回年次学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------