

京都大学	博士（工学）	氏名	坪倉 佑太
論文題目	大気中の飛来塩分量の評価手法と構造物への付着量推定に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>日本国内における橋梁は、その多くが建設から 50 年が経過しており、橋梁の維持管理が喫緊の課題となっている。本研究では、鋼構造物の腐食、コンクリート構造物の塩害の要因である塩分に着目し、従来の計測手法を基にした高精度な大気中の飛来塩分量の評価手法の確立と、構造物へ付着する塩分量の定量的な推定手法を提案することを目的としている。また、塩分の供給源として、海上で生成される海塩粒子に加えて、冬季に路面上に散布される凍結防止剤も想定し、車両通過によって大気中に飛散した凍結防止剤の橋梁主桁への付着特性の解明を行っている。</p> <p>本論文は全 6 章で構成されており、以下に各章の実施内容および主な成果を示す。</p> <p>第 1 章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。橋梁の損傷形態として、塩分による鋼材の腐食が大きな割合を占めていることを示し、適切な維持管理のためには大気中の飛来塩分量の高精度な評価と、それに基づく構造物へ付着する塩分量の定量的な推定が求められると述べている。また、海上で生成される海塩粒子に加えて、冬季に路面上に散布される凍結防止剤も塩分の供給源であり、橋梁の腐食に関与していることを既往の研究をレビューすることで示している。</p> <p>第 2、3 章では、飛来塩分量の観測法の 1 つであるドライガーゼ法（JIS 規格）に着目し、ドライガーゼ法の大気中塩分粒子の捕集効率について数値流体解析（CFD）を用いた検討を行っている。ドライガーゼ法の捕集効率を明らかにするためには、捕集装置周囲のマクロ的な視点とガーゼ繊維周囲のミクロ的な視点、それぞれで風の流れと粒子の挙動を評価する必要があると指摘している。このうち第 2 章では、CFD によってドライガーゼ法捕集装置周囲の風の流れを算出し、得られた流れ場中で粒子の運動方程式を解くことによって、捕集装置周囲での塩分粒子の挙動を接近風速・風向・粒子径別に算出している。ドライガーゼ法捕集装置周囲の流れ場解析においては、多孔質体モデルを用いてガーゼを流体に対する抵抗としてモデル化しており、ガーゼのように空隙率の小さい物体の場合には、法線抵抗に加えて接線抵抗を考慮した 3 次元的なモデリングを行う必要があることを示している。また、粒子飛散解析に基づいて、捕集装置上流より飛来する塩分粒子が、捕集部（ガーゼ部）へ到達する割合は、接近風速・風向・粒子径に大きく依存することを明らかにするとともに、粒子径が比較的小さい場合には、ガーゼ部へ流入する風速から、飛来粒子がガーゼ部へ到達する割合を推定できることを示している。また、捕集効率に対する捕集装置の木枠厚の影響についても検討しており、木枠厚が捕集装置の外径に対して十分に小さい場合には、影響が小さいことを明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、ガーゼ繊維を円柱によってモデル化し、円柱周囲の風の流れと粒子の挙動を CFD によって算出することで、ガーゼ繊維による塩分粒子の捕集効率を算出している。ガーゼ繊維による粒子の捕集効率は、接近風速および塩分粒子径の増大によって上昇するほか、繊維の配置間隔、すなわちガーゼの密度も大きく影響することを明らかにしている。また、ガーゼ繊維による捕集効率を算出する場合には、十字状に組み込まれた実際のガーゼの繊維構造を模擬せずとも、隣接繊維の影響を考慮した単独繊</p>			

維周りでの粒子飛散解析に基づいて捕集効率を評価できることを示している。さらに、得られた知見を基に、ドライガーゼ法の捕集効率を接近風速・風向・塩分粒子径に関して定量的に評価し、ドライガーゼ法による捕集塩分量から真の大気中塩分量を算出する手法を示している。また、実橋梁においてドライガーゼ法による飛来塩分量計測を実施し、本論文によって解析的に得られたドライガーゼ法の捕集効率が妥当なものであることを確認するとともに、ドライガーゼ法で得られた捕集塩分量は、時々刻々変化する捕集効率を考慮した上で解釈する必要があることを明らかにしている。

第4章では、橋梁各部位に付着する塩分量の推定モデルの確立を見据え、大気中を飛来する塩分粒子の構造物表面への輸送および付着過程について CFD を用いて検討している。国内の膨大な橋梁数を念頭に置くと、個々の橋梁を現地観測によってモニタリングするのではなく、物理的背景を有する数値モデルによる高精度な付着量予測の実現が期待され、このためには、粒子が構造物近傍へ輸送され、付着するまでの過程を詳細に把握することが必要であると指摘している。矩形断面を対象とした粒子飛散解析の結果、粒子の慣性力の大きさを表す無次元数であるストークス数によって矩形断面周囲での粒子の挙動が変化することを明らかにしている。特に、ストークス数が比較的小さい場合には、粒子は流れに従って運動するため、矩形断面の風上面だけでなく、剥離流れに巻き込まれることで背面や側面に付着するが、ストークス数が比較的大きい場合には粒子の流体に対する追従性が低下し、風上面にのみ付着するようになることを示している。また、断面辺長比によって粒子の輸送機構（粒子が輸送される経路）は異なり、特に剥離流れの再付着の有無が付着分布に大きく影響することを明らかにしている。さらに、構造物に付着する塩分量の推定手法として、構造物の壁面圧力値を用いた予測手法を提案し、風上面や矩形断面前縁での剥離流れに伴い最初に粒子が輸送される面では、付着分布を概ね再現できることを示している。

第5章では、車両通過に伴って橋梁路面上から飛散した凍結防止剤の橋梁主桁への付着特性を、CFD による橋梁周囲の風の流れ場解析と粒子飛散解析に基づいて検討している。周囲に障害物のない単独橋においても、接近風速や粒径等の条件によっては、橋梁後方に生じる渦の影響で凍結防止剤が主桁に付着する可能性があることを明らかにしている。並列橋においては、風上側に位置する橋梁から飛散した比較的粒径の大きな凍結防止剤が、風下側の橋梁主桁へ直接付着することを確認しており、このような粒子の付着が主桁の腐食の要因として最も影響が大きいと考えられると結論付けている。また、様々な位置関係を有する並列橋周りの風の流れ場を、風洞を用いた可視化実験によって算出し、流れのパターンを分類するとともに、それぞれの流れパターンにおいて予想される凍結防止剤の飛散経路を示している。また、腐食環境の改善を目的として、橋梁の高欄に付加部材を設置することで風の流れを強制的に変化させ、主桁への凍結防止剤の付着量を低減させる試みを行っている。CFD を用いた検討の結果、単独橋、並列橋のいずれにおいても、橋梁高欄に付加部材を設けることで、橋梁路面上から橋梁外へ飛散する粒子量や橋梁後方に生じる渦に巻き込まれる粒子量を抑制することが可能であり、結果として主桁への付着量を低減出来ることを示している。

第6章は結論であり、本論文の成果を総括し、今後の課題とともに取りまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、鋼構造物の腐食因子である飛来塩分に関して、従来の計測手法を基にした高精度な大気中の飛来塩分量の評価手法を確立するとともに、橋梁躯体に付着する塩分量の定量的な推定手法を提案することを目的としたものである。得られた主な成果は次の通りである。

1. 飛来塩分量の観測法の1つであるドライガーゼ法に関して、塩分粒子の捕集効率を数値流体解析(CFD)によって算出し、捕集効率が接近風速・風向・塩分粒子径に大きく依存することを明らかにした。また、実橋梁でのドライガーゼ法による飛来塩分量計測を実施し、解析的に得られた捕集効率の妥当性を確認した。さらに、ドライガーゼ法で得られる飛来塩分量から真の塩分量を算出する手法を示した。
2. 矩形断面を対象とした粒子飛散解析により、壁面への粒子の輸送・付着過程は、粒子の慣性力の大きさを表す無次元数であるストークス数と、矩形断面の断面辺長比、特に剥離流れの再付着の有無によって大きく変化することを明らかにした。
3. 塩分粒子の橋梁躯体壁面への付着量評価手法の確立を目指し、壁面の隣接する評価点の圧力差が疑似的に流れ場の時間平均的な粒子輸送力を表すと考え、矩形断面の平均圧力係数の面方向勾配に基づく付着量推定手法を提案した。本手法は、矩形断面の風上面と剥離流れに伴い最初に粒子が輸送される面では、付着分布を精度よく評価できる可能性が示された。
4. 凍結防止剤の主桁への付着に関して、周囲に障害物のない単独橋においても、接近風速や粒径等の条件によっては、車両通過によって大気中に飛散した凍結防止剤由来の塩分が橋梁後方に生じる渦の影響で、主桁に付着する可能性があることをCFDによって明らかにした。並列橋においては、風上側に位置する橋梁から飛散した比較的粒径の大きな凍結防止剤が、風下側の橋梁主桁へ直接付着するが、主桁への付着量は橋梁の高低差によって大きく変化することを示した。
5. 単独橋、並列橋のいずれにおいても、橋梁の形状を工夫することによって、橋梁周囲の風の流れを強制的に変化させ、床板上から飛散した凍結防止剤の主桁への付着量を低減出来ることを示した。

以上より本論文は、構造物の維持管理に資する大気中の飛来塩分量の高精度な評価手法の確立と、構造物へ付着する塩分量の定量的な推定手法を提案しており、学術上、実務上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。