

論文 凍結防止剤が含有した飛沫の大気中への供給とコンクリート構造物への影響

原 良太郎*1・中村 文則*2・大原 涼平*3・下村 匠*4

要旨:本研究では、自動車の走行時に路面から大気中に供給される飛沫量とその粒径について実験を行った。さらに、飛沫粒子の輸送・到達過程の数値シミュレーションを実施し、コンクリート構造物への影響について検討した。その結果、自動車の走行により路面から大気中に供給される飛沫量は、鉛直方向に減衰する指数分布で整理できることが実験結果から示されたとともに、橋桁上で路面から大気中に供給された飛沫粒子は、橋桁形状の影響を受けて周辺の構造物表面に到達していることが数値シミュレーションの結果から明らかになった。

キーワード: 塩害, 凍結防止剤, 飛沫粒子, 飛来塩分, 実験

1. はじめに

北海道から東北地方において、路面の凍結を防止することを目的に、凍結防止剤の路面への散布が行われている。凍結防止剤には、一般的に塩化ナトリウムが使用されており、散布された凍結防止剤は、コンクリート構造物の塩害劣化の要因の一つとなるため問題となっている。

路面上に散布された凍結防止剤は、路面上の水分で溶解し、自動車の走行により路面の水分とともに微小な飛沫として大気中に舞い上げられる。その後、大気中の風により輸送されることで、周辺のコンクリート構造物に到達する。これらの物理過程を把握し、構造物表面に到達する凍結防止剤による塩分量を予測することは、構造物の塩害対策の一つとして重要となる。

既往研究では、凍結防止剤による周辺環境への影響を評価するために、いくつかの研究事例が報告されている。例えば、木村ら¹⁾は、凍結防止剤の散布と沿道環境の評価として、自動車の走行により路面から舞い上がった凍結防止剤に含まれる塩分量についての測定を行っている。岩崎ら²⁾は、凍結防止剤による塩分の橋桁各部位への付着量の測定を実施している。奏ら³⁾は、凍結防止剤の飛沫 h 数値シミュレーションにより予測し、その結果を報告している。これらの研究により、大気中へ供給された凍結防止剤の風による輸送過程および構造物への到達過程が明らかになりつつある。

しかしながら、凍結防止剤を含んだ飛沫の構造物への到達過程に合わせて、その境界条件となる路面から大気中への供給過程を把握することは重要であるが、その報告事例は少ないのが現状である。

本研究では、自動車の走行時に路面から大気中に供給

される飛沫量とその粒径について実験を行った。さらに、飛沫粒子の輸送・到達過程の数値シミュレーションを実施し、コンクリート構造物への影響について検討した。

2. 自動車の走行時に発生する飛沫粒子の実験

2.1 実験施設および実験方法

実験は、長岡技術科学大学の敷地内のアスファルト舗装された道路に図-1のような設備を配置して実施した。凍結防止剤は、路面の水分によって溶解したものが大気中に舞い上がるため、図に示すような散水ホースにより路面に散水を行った。散水は、距離 20m の範囲で路面全体の表面水膜が一定となるように行った。大気中に舞い上がった飛沫は、風によって輸送されるため、図のように送風機 4 台を設置し、高さ 2m 程度までの範囲で自動車の走行方向と垂直な方向に風を作用させた。

実験に使用した自動車は、車長 4.6m, 車幅 1.8m, 車高 1.66m であり、スタットレスタイヤ(幅: 約 0.2m, 外径: 0.652m) を用いた。自動車の走行は、設定速度まで加速するための距離を 200m とした。

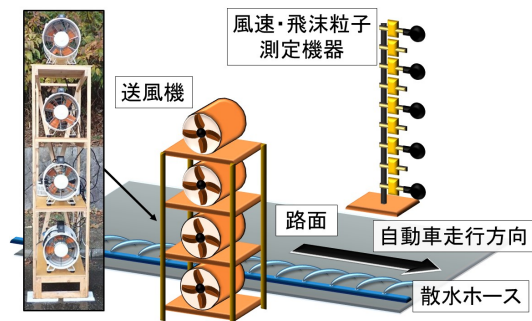


図-1 実験施設

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻 学(工) (学生会員)

*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

*3 長野工業高等専門学校 環境都市工学科助教 修(工) (正会員)

*4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

2.2 測定方法

(1) 測定項目

実験の測定項目は、路面から大気中への供給される飛沫状の凍結防止剤の発生量に関する5つの項目とした。

- 路面の表面水膜厚
- 自動車の走行速度
- 路面上の風速
- 飛沫量の鉛直分布
- 飛沫粒子の粒径分布

路面から発生する飛沫量と粒径分布は、高さ方向に変化するため、鉛直方向の飛沫量と粒径の測定を行った。各項目の測定方法を以下に示す。

(2) 路面の表面水膜厚

路面の表面水膜厚は、吸水スポンジ（カレント製）を用いて、路面上の水分を吸水し、その分量から表面水膜厚の算出を行った。実際には、吸水スポンジ（面積 54m²）を路面に押し当て路面上の水を吸水させ、その後、水分の重量を測定した。表面水膜厚は、採取した水分の重量を体積に変換して算出した。

(3) 自動車の走行速度

自動車の走行速度は、デジタルビデオカメラによって撮影した画像とスピードガンを用いて測定を行った。画像からの走行速度の測定は、路面に4m間隔で目印を設置し、その位置を通過する自動車の時刻から算出した。算出した速度は、スピードガンで測定した速度と比較し、その確認を行った。

(4) 路面上の風速

路面上の風速は、風速計（プロペラ式）を鉛直方向に設置することで測定を行った。測定時間間隔は1秒間隔であり、データロガーを用いてデータの収集を行った。

(5) 飛沫量と飛沫粒子の粒径分布

飛沫量および飛沫粒子の粒径は、感水試験紙を用いて、大気中に供給された飛沫を採取し、それを画像解析することで算出した。感水試験紙は、Syngenta製の寸法76mm×52mmである。この試験紙は、大気中の飛沫粒子の粒径50μm程度までの水分に反応するもので、水分が表面に到達すると痕跡が残る仕組みになっている。痕跡は、デジタルカメラ（Canon IXY650, 2020万画素）で撮影し、構築した画像解析システムにより単位面積当たりの飛沫粒子の到達個数と粒径の測定を行った。

画像解析システムは、プログラム言語C++とOpecCVを組み合わせたプログラムで構築した。このシステムは、撮影した画像を2値化し、飛沫の痕跡とそれ以外の部分に区別を行い、その後、各粒子の痕跡を円形として抽出することで、その寸法（直径）と座標を抽出する仕組みとなっている。感水試験紙上で測定した飛沫粒子の痕跡の大きさから大気中の飛沫粒子の粒径の変換には角川ら⁴⁾

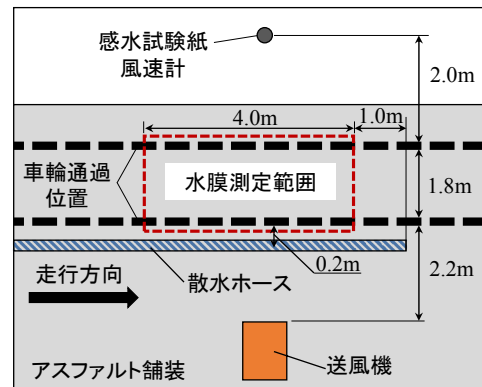


図-2 測定機器の配置と測定範囲

を参考に式(1)により変換を行った。

$$D_d = 1.0334D_s^{0.8787} \quad (1)$$

ここで、 D_d は大気中の飛沫粒子の直径(μm)、 D_s は感水試験紙上の飛沫粒子の痕跡の直径(μm)である。飛沫量への変換は、大気中の飛沫粒子を球形と仮定し、画像解析から得られた飛沫粒子の直径から体積を算出した。

(6) 測定機器の配置および測定範囲

各測定機器の配置を図-2に示す。飛沫粒子の採取するための感水試験紙と風速計は、自動車の車輪通過位置から2.0mの位置に設置した。感水試験紙は、地表面から高さ2.25mまでの範囲に0.25m間隔で9点を設置した。風速計は、高さ0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 2.25mの5点に設置した。路面の表面水膜厚は、走行距離4.0mの範囲で12点を測定した。

2.4 実験ケース

実験ケースは、路面上の風速を2.0m/s, 4.0m/sの2種類、走行速度30km/h, 40km/h, 50km/hの3種類の計6ケースである。1ケースあたり3回の測定を実施した。路面の表面水膜厚は1mmとなるように設定した。

2.5 実験結果および考察

(1) 飛沫量と飛沫粒径の測定方法の妥当性の検証

構築した画像解析システムの測定結果の妥当性を検証するために、飛沫粒径の画像解析結果と実測結果との比較を行った。図-3は、画像解析結果と顕微鏡を用いて実測した結果を比較したものである。図の白色の印は、感水試験紙に到達した飛沫粒子の痕跡を測定とした結果であり、黒色印は顕微鏡用スケール（太陽株式会社製）を測定した結果である。顕微鏡用スケールとは、直径50~1090μmの円形の点が印刷されたものである。

図に示すように、画像解析で測定した飛沫粒子の粒径は、若干のばらつきが見られるが実測による結果と一致していることがわかる。両者の値にばらつきが生じる原因は、今回の解析方法がピクセル数から粒径を測定しているためであり、1ピクセル以下の大きさの範囲で誤差が生じることとなる。画像解析に使用した画像の1ピク

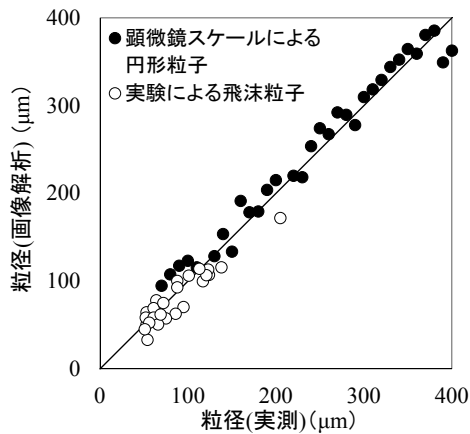


図-3 粒子粒径の画像解析と実測結果の比較

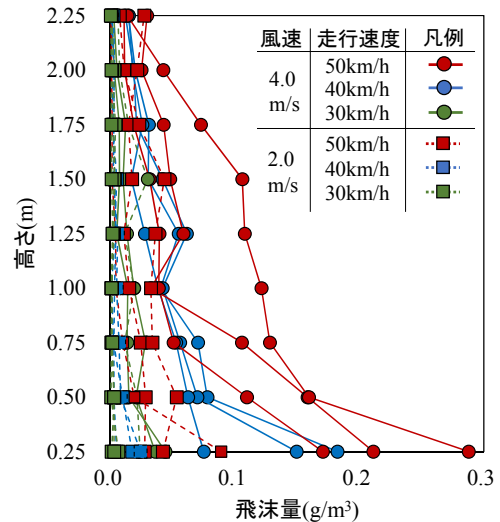


図-5 飛沫量の鉛直分布の実験結果

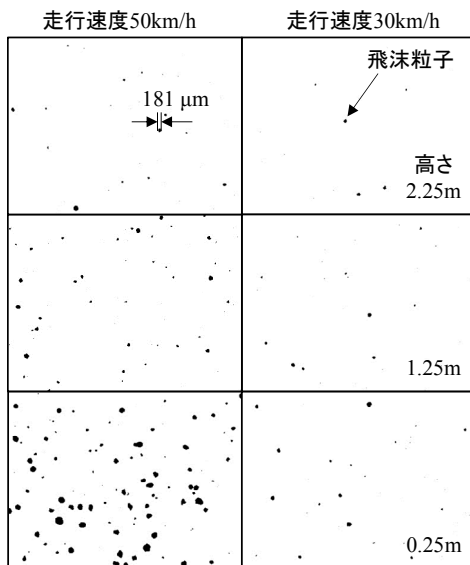


図-4 感水試験紙に到達した飛沫粒子の痕跡

セルの寸法は $30\mu\text{m}$ 程度である。以上より、一定の測定誤差が生じているが、画像解析により飛沫粒子の粒径を測定できることがわかった。

(2) 大気中に供給された飛沫量

図-4 は、風速 4.0m/s の場合の走行速度 30km/h と 50km/h の条件の感水試験紙に到達した飛沫粒子の痕跡を示した実験結果である。図の黒色の点が到達した飛沫粒子の痕跡である。図より、感水試験紙に到達した飛沫粒子は、自動車の走行速度 50km/h より、走行速度 30km/h の条件のほうが減少している傾向が見られる。感水試験紙の設置高さによる比較では、地表面からの高さ 0.25m で飛沫粒子の到達数が最も多くなっており、高さが低い位置で到達数が多くなる傾向であった。また、高さ 2.25m の位置にも、飛沫粒子が到達しており、走行した自動車の高さ 1.66m より高い位置まで飛沫粒子が舞い上がっていることが確認された。

(3) 大気中に供給された飛沫量

大気中に供給された飛沫量の鉛直分布を図-5 に示す。

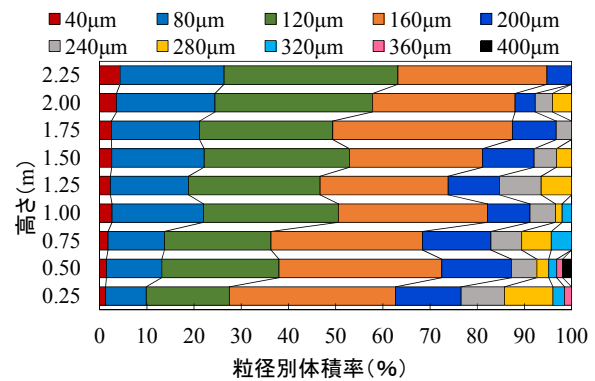


図-6 飛沫粒子の到達体積率(粒径分布)

図の飛沫量は、感水試験紙に到達した飛沫粒子を測定方法で説明した方法で飛沫粒子全体の体積量に変換し、単位体積当たりの量に換算した値である。図より、大気中に供給される飛沫量は、路面上の風速 4.0m/s の条件で大きくなっており、自動車の走行速度の増加に伴い、その量も大きくなる傾向が見られる。また、風速 4.0m/s のケースでは、地表面から離れるに応じて減少する結果となっている。これらの結果より、実験結果の飛沫量にばらつきが見られるが、路面上の風速と自動車の走行速度、地表面からの高さに応じて変化していることがわかった。

(4) 大気中に供給された飛沫粒子の粒径分布

図-6 は、風速 4.0m/s の走行速度 50km/h の条件における飛沫粒子の粒径別の到達体積率である。図の到達体積率は、感水試験紙に到達した各粒径を体積に変換し、各高さに到達した全飛沫量との割合を示した値である。

図から、到達した飛沫粒子の粒径別体積率は各高さで変化しており、高い位置のほうが小さい粒径が占める体積の割合が大きくなっていることがわかる。粒径別の体積率は、粒径 $200\mu\text{m}$ 以下の飛沫粒子が全体の $8\sim 9$ 割程度を占める結果となっている。これより、普通自動車による走行では、路面から大気中に供給される飛沫粒子は

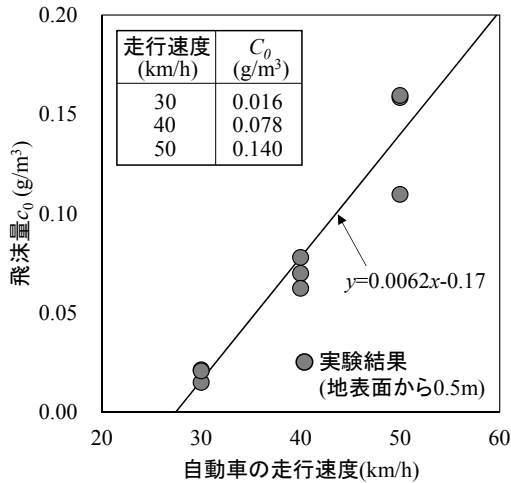


図-7 飛沫量と走行速度の関係

200 μ m 程度までの粒径の割合が大きいことがわかった。また、200 μ m 以下の飛沫粒径の体積率は走行速度 50km/h と 40km/h を比較した結果で同様の傾向であった。

(5) 自動車の走行による飛沫の供給量の定式化

実験結果を整理することで、自動車の走行による大気中への飛沫の供給量の定式化を行った。実験により、大気中への供給量は、自動車の走行速度、路面上の風速、地表面からの高さが影響していたため、これらの影響因子を変数とした算定式を式(2)のように整理した。

$$c_v = c_0 \cdot \alpha \cdot u_w^2 \cdot \exp\{-k(h-h_0)\} \quad (2)$$

ここで、 c_v は大気中に供給される飛沫量 (g/m³)、 α は風速の補正係数(=0.625)(s²/m²)、 u_w は路面上の高さ 0.25~2.25m の平均風速(m/s)、 k は鉛直方向の飛沫量の減衰係数(=1.10)(1/m)、 h は地表面からの高さ(m)、 h_0 は飛沫の発生量 c_0 を求めた基準高さ(=0.5)(m)である。

地表面上の飛沫の発生量 c_0 (g/m³)は、自動車の走行速度に関係していると考えられるため、実験結果から走行速度と飛沫の発生量の関係を図-7のように整理した。図の横軸は自動車の走行速度であり、縦軸は高さ 0.5m 位置の飛沫粒子の発生量である。飛沫粒子の発生量は高さが低い位置では、実験結果のばらつきが大きい傾向があるため、安定して飛沫量を測定できる高さ 0.5m の位置の結果を整理した。図より、飛沫量 c_0 は自動車の走行速度に対して一次式で近似できることが導かれた。また、飛沫の発生量は、路面の水膜の厚さや粗さにも影響を受けると考えられるため、今後、その点についても検討する予定である。

図-8 は、発生量の算定式を用いて飛沫量を算出した結果である。図の横軸の括弧の値は、塩化物イオン量 (mg/m³)に変換したものである。飛沫量から塩化物イオン量への変換は、路面の水分に含まれる塩分濃度を 3%と仮定して行った。図の実験結果は、3 回の測定結果の平均値である。図に示すように、算定式の結果は高さ 0.25m

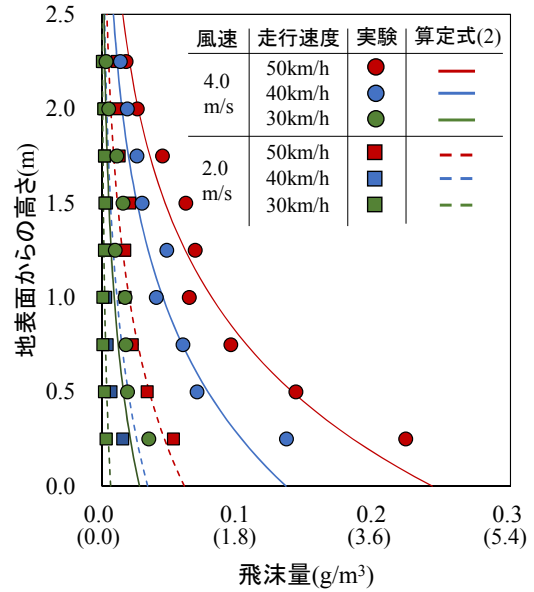


図-8 飛沫量の算定結果と実験結果の比較

と 1.50m 付近で差が見られるが、自動車の走行速度および風の影響に応じた飛沫量を概ね再現できている。この結果から、路面の水分に含まれる凍結防止剤(塩分量)がわかれば、自動車の走行によって大気中に供給される塩化物イオン量が予測できることがわかった。

3. 凍結防止剤のコンクリート構造物への影響

3.1 凍結防止剤を含んだ飛沫粒子の輸送・到達量の予測

路面から発生した凍結防止剤によるコンクリート構造物への影響を評価するために、路面から大気中へ供給された飛沫粒子の大気中の輸送と構造物への到達過程の数値シミュレーションを実施した。

3.2 計算モデル

本計算は、以下の a)~c)の物理過程を組み合わせた計算モデルを用いた。

- a) 自動車の走行時の凍結防止剤を含んだ飛沫粒子の大気中への供給過程(本実験結果)
- b) 大気空間における周辺地形と構造物形状を含めた 3次元空間での風況
- c) 路面から供給された飛沫粒子の風による輸送過程と構造物表面への到達過程

物理過程 a)は、自動車の走行による本実験結果から求めた算定式を用いて計算を行った。物理過程 b)および c)は、中村ら⁹⁾を参考に風況と飛沫粒子の輸送・到達過程を統合した計算を実施することとした。

大気中の風況の計算は、3次元の連続式と Navier-Stokes 方程式を用いた計算モデルである。飛沫粒子の輸送過程と構造物への到達過程は、飛沫粒子を球形状の粒子と仮定し、その粒子に作用する風の抗力、飛沫粒子の自重、飛沫粒子の慣性力の釣り合いで計算を行った。

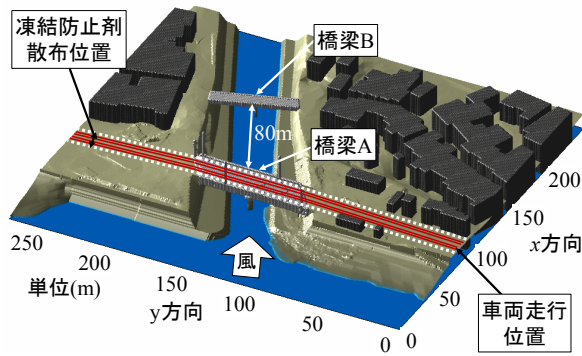


図-9 計算領域

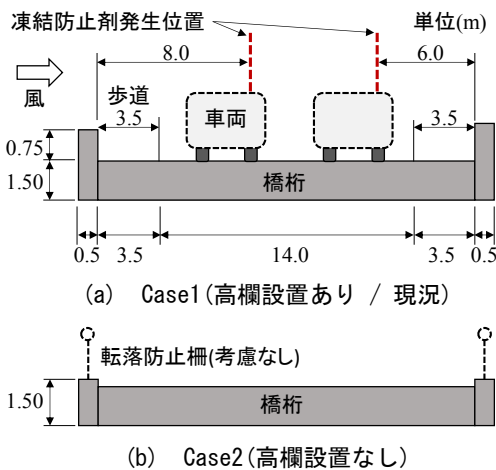


図-10 橋梁 A の橋桁形状

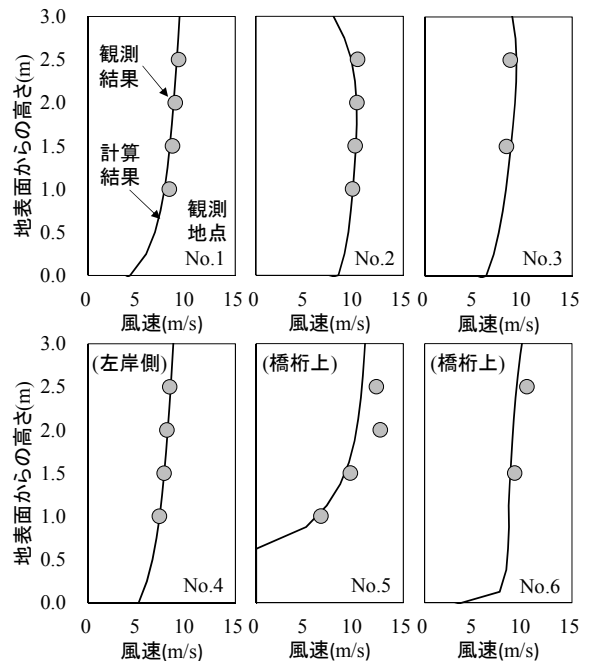
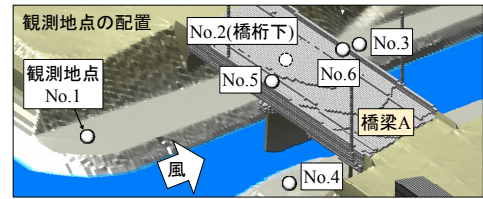


図-11 風速の計算結果と観測結果の比較 (Case1)

3.3 計算条件および計算ケース

(1) 計算条件および境界条件

凍結防止剤のコンクリート構造物への影響を評価するために、実際に凍結防止剤が散布されている実橋梁を対象に計算を行った。対象としたコンクリート構造物は、新潟県に位置する橋梁 A とその風下側に位置する橋梁 B である。橋梁 A では、凍結防止剤の散布が実施されており、橋梁 A から B 方向に強風が吹き付けるような場所である。

計算領域は、図-9 のような x 方向 250m、 y 方向 270m、 z 方向 20m の 3 次元空間である。計算格子は水平(x および y) 方向が 0.5m、鉛直(z) 方向が 0.25m である。図の橋梁 A の赤色の実線部分が車両の走行位置である。飛沫の発生量は、本実験で得られた算定式(2)の鉛直分布を車両走行位置に設定した。発生する飛沫粒径は直径 40, 80, 120, 160, 200 μm とした。大気中の飛沫粒子の拡散係数は、風況の計算で求められた風の乱れに応じた乱流拡散係数を設定した。

風況の計算モデルに設定する境界条件は、橋梁 A 周辺で実施された既往研究⁹⁾による風速の観測結果を再現するように、 x 方向の風速 $u_0=10.1\text{m/s}$ 、 y 方向の風速 $v_0=4.1\text{m/s}$ を設定した。計算境界に設定した風速の鉛直分布はべき剰則である。

(2) 計算ケース

計算ケースは、橋梁形状を変化させた図-10 のような 2 ケースを実施した。図(a)の Case1 は現況の橋桁形状を設定した条件であり、橋桁には高さ 0.75m の高欄が設置されている。Case2 は橋桁の高欄がない条件であり、転落防止のための手すり等は考慮しないこととした。凍結防止剤の発生位置は、供給量の式(2)が左右両輪での飛沫発生量を示しているため、車両の風下側のみに設定した。

3.4 計算結果および考察

(1) 橋梁 A 周辺における風速分布

対象とした計算領域において風況の計算を実施し、その結果を既往研究⁹⁾による観測結果と比較を行った。図-11 に、風速の計算結果と観測結果を比較したものを示す。図の丸印で示す観測結果は、橋梁 A 周辺の風速の測定結果であり、観測期間が 2017 年 3 月 3 日 13:00~15:00 である。図に示すように、橋桁上の観測点 No.5 で、風速の計算結果は若干過小となっている部分が見られるが、その他の観測点では風速の観測結果を再現できていることがわかる。

(2) 飛沫粒子の輸送と構造物表面への到達過程

図-12 は、Case1 における橋梁 A から発生した飛沫粒子の輸送・到達過程を示した計算結果である。飛沫粒径は 120 μm である。図より、橋梁 A を通過する車両から

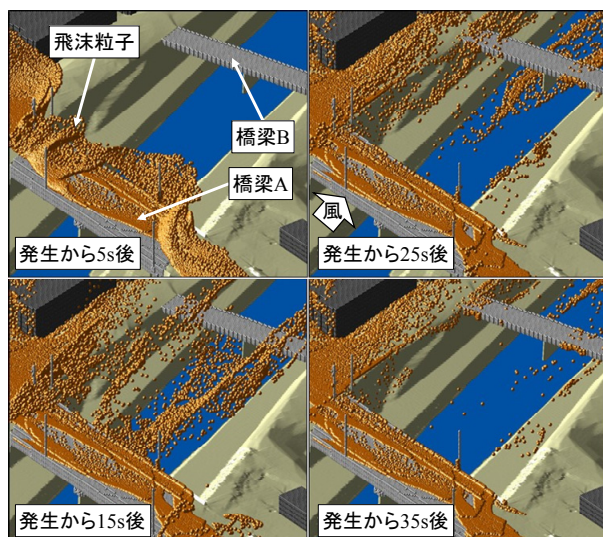


図-12 飛沫粒子の輸送・到達過程 (Case1)

発生した飛沫粒子は、飛沫発生から5秒後に橋桁上で一度上空へ舞い上がり、その後、橋梁Bの方向へ輸送されていることがわかる。発生から35秒後には、風下側に設置されている橋梁Bの地覆部分に飛沫粒子が到達している。この結果から、橋桁上で発生した飛沫が、大気中の風によって輸送され、周辺に設置されている構造物表面に到達していることが示された。

(3) 橋桁形状の違いと飛沫粒子の到達量の関係

橋梁Bに到達した飛沫粒子の計算結果を図-13に示す。図に示すように、橋梁Bに到達する飛沫量は、橋梁Aの形状に影響を受けており、Case1の高欄が設置されている条件のほうが少なくなっている。これは、高欄背後に形成された風の渦により橋桁上の飛沫が上空へ舞い上がり、その後、橋梁Bの方向とは異なる方向に輸送されるためである。この結果から、飛沫の発生位置となる橋桁の形状に応じて、周辺の構造物に到達する飛沫量が変化することが明らかになった。

4. 結論

凍結防止剤を含んだ飛沫粒子の路面から大気中への供給量の定式化とその構造物への到達過程に関する数値シミュレーションを実施した。その結果、自動車の走行により路面から大気中に供給される飛沫量は、鉛直方向に減衰する指数分布で整理できることが示された。さらに、橋桁上で路面から大気中に供給された飛沫粒子は、橋桁形状の影響を受けて周辺の構造物表面に到達していることが明らかになった。

今後は、自動車の車種および路面上の風速の条件の異なるケースの実験を追加で実施するとともに、現地観測により路面からの飛沫の発生量と構造物への到達量を確認する予定である。

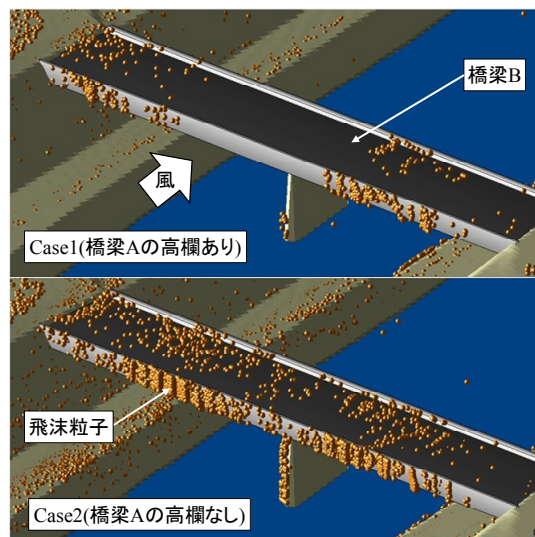


図-13 橋梁Bに到達する飛沫粒子の計算結果

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費(若手研究A)「高度な環境作用を統合したコンクリート構造物の環境劣化予測システムの構築」(研究代表者:中村文則, 課題番号:17H04931), 公益社団法人日本コンクリート工学会「2017年度研究助成」(研究代表者:中村文則)の一環として行ったものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木村恵子, 曾根真里, 並河良治, 桑原正明, 角湯克典: 凍結防止剤散布と沿道環境, 国土技術政策総合研究所資料, No.412, 128.p, 2007.7
- 2) 岩崎英治, 永藤壽宮, 湯浅 昭, 西 剛広: 凍結防止剤の飛散と鋼橋の腐食, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.655-667, 2012.
- 3) 秦聡一郎, 白土博通, 野口恭平, 八木知己: 車両走行による凍結防止剤の飛散特性, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.1, pp.195-205, 2017.
- 4) 角川 修, 深山大介, 荒木琢也: 感水紙を用いた茶園における農薬散布時のドリフトの評価, 茶業研究報告, No.106, pp.21-38, 2008.
- 5) 中村文則, 井野裕輝, 大原涼平, 下村 匠: 橋桁表面に到達する海水飛沫粒子の到達量および粒径分布の現地観測と数値解析, 日本材料学会コンクリート構造物の補強, 補修, アップグレード論文報告集, 第18巻, pp.323-328, 2018.10
- 6) 中村文則, 大原涼平, 井野裕輝, 山口貴幸, 下村匠: 構造物周辺の地形・風況・飛来塩分の詳細調査とその予測技術の基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第17巻, pp.615-620, 2017.10