

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360198

研究課題名(和文) 鋼橋の合理的な腐食対策のための新しい風洞実験方法と飛来塩分シミュレーション

研究課題名(英文) New wind tunnel experimental method and numerical simulation method of airborne salt to support rational corrosion protection of steel bridges

研究代表者

野村 卓史 (NOMURA, Takashi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：50126281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：橋桁まわりの飛来塩分挙動と付着量を評価するために、3つの特色を有する風洞実験法を開発した。[1]粒子発生器を風洞の吸い込み口上流に設置し、ファンで攪拌させることにより、塩分粒子が高い均一度で混合された気流を生成する。[2]高速度カメラで撮影したビデオ画像の1フレームごとに、ピクセルの輝度値を濃度値に換算して、濃度分布の空間的・時間的変化を定量化した。[3]供試体表面の各部位にろ紙を貼付し、ろ紙を精製水の中で攪拌して溶け出した塩化物イオン量を測定する。  
塩分粒子濃度の移流拡散解析を実施し、乱流拡散係数を用いること、移流流速は3次元非定常数値流体解析によって求めること、という知見を得た。

研究成果の概要(英文)：A wind tunnel experimental method has been developed in order to evaluate the advection diffusion behavior of airborne salt and their adhesion to bridge girders. Its three features are: (1) An aerosol generator is placed at the inlet of the wind tunnel to obtain uniform concentration distribution in the air streams; (2) The brightness of each pixel of the digital video is transformed to concentration; (3) Several pieces of filter paper are stuck on the experimental model surface, from which the amount of chloride ion is measured. A numerical method is also developed in which the unsteady advection diffusion equation is solved by means of the finite element method. The comparison of the numerical solution with the experimental data shows importance of the turbulent diffusivity and the three dimensional flow simulation for the advection velocity. These experimental method and the numerical simulation method can provide useful information for the corrosion rate of the bridge surface.

研究分野：風工学

キーワード：飛来塩分 鋼橋 防錆 風洞実験 可視化画像 粒子発生器 塩分ミスト 移流拡散解析

## 1. 研究開始当初の背景

社会基盤施設の長寿命化と合理的な維持管理が求められおり、この要請に応えるためのさまざまな取り組みが推進されている。鋼構造分野における主要な課題のひとつは飛来塩分等に対する鋼橋の防錆である。防錆対策としては塗装や耐候性鋼板の使用等があるが、実際の鋼橋の腐食の状況は橋全体が一様に腐食するわけではなく、特定の部位に集中する傾向がある。腐食進行度の違いに基づいて対策することが合理的であり、その予測・評価のために実況観測と数値解析が行われている。

飛来塩分とその鋼橋への付着に関する数値解析は、対象橋梁の架設地点を含む広範な地域全体の風況シミュレーションと、桁近傍の気流解析の2つの空間スケールの解析が行われる。本研究が対象とする解析は後者の桁近傍の気流解析であるが、報告されている研究には風が乱流であるという本質的な要因が考慮されていないものも見受けられ、信頼性のある腐食予測方法とはいえない。

桁近傍の気流解析に関しては、耐風工学・風工学分野で成果が蓄積されている。しかし風による飛来塩分輸送の解析については研究実績が乏しく、計画的な研究のもとに信頼性の高い予測手法を確立する必要がある。

数値解析の信頼性を実証するためには実験と照合させることが最も有効である。しかし飛来塩分の付着量を定量的に測定する風洞実験は特殊な実験であり、塩分粒子の代替物質を気流に噴霧させる場合を含めても、数値解析の検証に用いることができるデータはきわめて乏しい。飛来塩分付着量の定量的データを求めるための風洞実験の開発も、数値解析法の開発と並行して推進する必要がある。

## 2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では数値解析法を検証するためのデータを獲得できる新しい風洞実験法の開発と、数値流体解析法の開発と研究目的とした。

開発する風洞実験法は次の2つのオリジナルな着想を実現することを目的とした。

### [1] 可視化画像のデジタルデータ処理による濃度分布データの獲得

可視化実験によって撮影したデジタル動画の1フレームごとの画像から、ピクセルごとのグレースケール値を読み取ることで濃度の空間分布を得る。これより濃度の空間勾配を評価する。

### [2] 供試体表面に付着する濃度分布の測定

供試体表面に塩分を吸着する用紙を貼る。塩分粒子を発生させた風洞実験を行ったのち、用紙が吸着した塩分の量を計測する。

数値解析法は基本的に有限要素法に基づき、飛来塩分粒子の移流拡散解析法を開発する。移流拡散解析に必要な次の2つの要素を精度よく求める方法を開発することを目的とした。

- [A] 移流項に与える非定常気流変動
- [B] 空間的・時間的に変動する拡散係数

## 3. 研究の方法

### (1) 可視化媒体とその注入方法

図1に本研究で用いた可視化実験の概要を示す。風洞は長さ100 cm、高さ60 cm、奥行き30 cmの測定部を有する押し出し型の風洞を用いた。測定部の風路は透明なアクリル板製である。風路の中央部に角柱等の供試体を設置する。

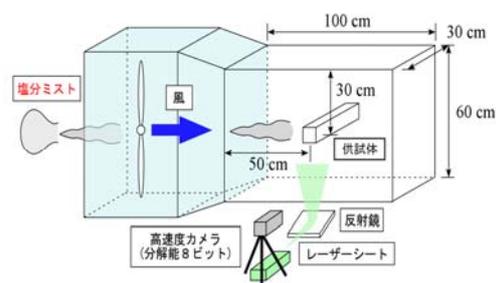


図1 可視化実験装置の概要

初期段階の風洞実験では、煙発生器を用いたが、検討を重ねた結果、煙から塩分ミストに切り替え、最終的にエアロゾル発生器（ATM-226、日本カノマックス）を用いた。エアロゾル発生器を風洞の吸い込み口上流に設置し、風洞のファンで攪拌させてから測定風路内に塩分ミストを送り込む方式によってミスト濃度の均一性が高い気流を生成できた。

### (2) 可視化画像のデジタルデータ処理による濃度分布データの獲得

供試体のスパン中央の断面をレーザーシート（CW532-3W：日本カノマックス株式会社）で照射した。レーザーシートは、図1に示すように、反射鏡を介して照射した。レーザーシートで照射された範囲を、測定部の側面側から高速カメラ（FASTCAM SA3 60K-M2：Photron社）で撮影した。

可視化実験で撮影された可視化画像には、画像の明暗が1ピクセルごと8ビット（ $2^8 = 256$ 段階）の数値情報（輝度値）として記録されている。流れの可視化画像の輝度値を読み取って輝度値分布とし、これを濃度分布とみなす。ただしレーザーはシート状に照射しているため、レーザーの発振孔から遠ざかるにつれシート幅が広がり、上方になるにつれ1ピクセルあたりのレーザーのエネルギーは低下する。そこで実験模型を置かない状態の時間平均画像から輝度の補正倍率の分布を算出した。図2はこのようにして得られた正方形角柱まわりの濃度分布である

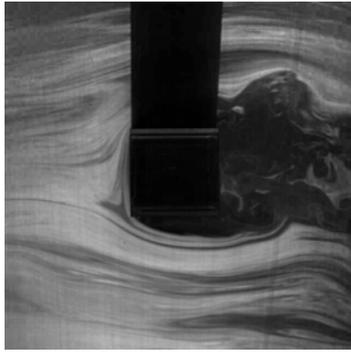


図2 光源距離の影響を補正した画像

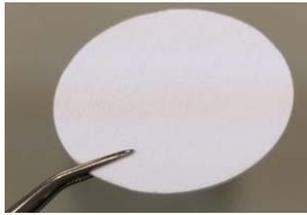


図3 ガラス繊維ろ紙



図4 ポータブルイオン計

(3) 供試体表面に付着する濃度分布の測定  
 塩分付着量を測定するため、実験供試体表面に図3に示すガラス繊維ろ紙 (GF/B 47 mm : Whatman) を貼付した。このろ紙の最小粒子保持機能は  $1.0 \mu\text{m}$  であり、粒子径が  $1.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$  程度と言われる塩分粒子を十分に捕捉できる。ろ紙に吸着した塩分粒子量の測定には、図4に示すポータブルイオン計 (IM-32P : 東亜ディーケーケー) を用い、塩化物イオン量を測定した。具体的には、塩分粒子の付着したろ紙を精製水の中で攪拌し、精製水中に溶解した塩化物イオン量で評価した。

(4) 正方形角柱の塩分付着量の測定

図5に瞬時の可視化画像を示す。供試体上流部の塩分ミストの濃度分布が均一な状態になっていることが明確である。なお、角柱真上の黒い領域は、レーザーを下方から照射したために生じた角柱の影である。角柱左下側の反射が強いため、改善が必要と考えられるが、ミストが角柱の前縁で剥離し、背後で巻き込み、渦を形成する様子が確認できる。

次に、ミストの濃度の時間変化を確認する

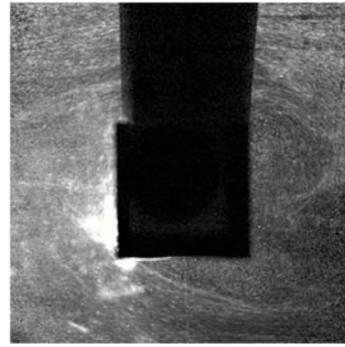


図5 正方形角柱まわりの流れ (瞬時画像)

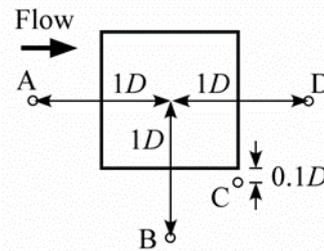


図6 輝度の時系列を求めた4点の位置

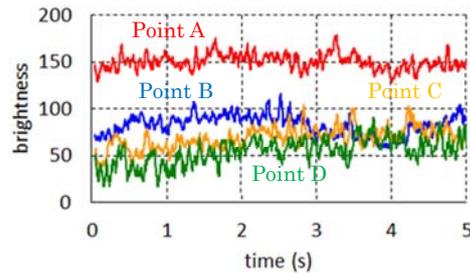


図7 測定した輝度の時系列

表1 正方形角柱の塩化物イオン量

	平均値	標準偏差
前面	9.2	0.05
下面	7.0	0.21
背面	6.8	0.14
ろ紙単体	5.5	0.12

単位: mg/L

ため、図6に示す PointA~D の4点を対象に、(2)で述べた画像処理により得られる可視化画像の輝度の時刻歴を取得した。輝度が高ければミスト濃度が高いことを意味する。輝度の時刻歴を図7に示す。角柱前面のA点は常時輝度が高い。3秒から4.5秒の間、角柱下方を流れるミスト濃度が一時的に低下したため、はく離せん断層外側のB点の輝度が低くなっているが、それ以外の時間帯はC、D点よりも輝度が高い。C、D点を比較すると、角柱直下のC点よりも、背後のD点の方が輝度は若干低い。これはそれぞれの領域の流速差によるものと考えられる。D点は周期的に強い巻き込みが生じる領域であり、流れの巻き

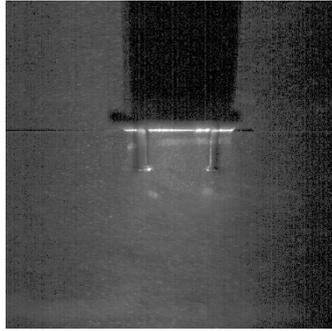


図 8 2 主 I 桁橋モデルまわりの流れ  
(瞬時画像)

表 2 2 主 I 桁橋モデルの塩化物イオン量

測定場所	塩化物イオン増加量
上流側桁の前面	6.4 mg
上流側桁の背面	4.0 mg
下流側桁の前面	3.6 mg
下流側桁の背面	5.0 mg
ろ紙単体	3.5 mg

込みに伴いミストが下流側に移流した。一方、C 点付近ではミストが滞留する様子が確認された。以上のように、流れの状況に応じた輝度（濃度）の差異が確認された。

正方形角柱のスパン方向中央の断面において、前面、下面、背面にろ紙を貼付し、塩分付着量の測定を行った。

供試体を 30 秒間ミストにさらした後、ろ紙を精製水中で攪拌し塩化物イオン量を測定した。3 回の測定結果の平均値と標準偏差を表 1 に示す。表中のろ紙単体とはミストにさらさないろ紙に対する測定結果である。下面や背面に比べ、流れの衝突面である前面の増加量が大きいことがわかる。また、図 7 の輝度の時刻歴から推定した濃度分布と対応する結果となった。ミスト濃度が低いはく離せん断層内の下面や背面には、塩分粒子が付着しにくいことが確認された。

(5) 2 主 I 桁橋モデルの塩分付着量の測定

幅 6 cm、ウェブ高さ 2 cm の 2 主 I 桁橋モデルの、風上側桁の前面（風上側）と背面（風下側）、同じく風下側の桁の前面と背面の計 4 か所にろ紙を貼付して実験を行った。図 8 に流れの可視化結果を示し、表 2 に各面のろ紙の塩化物イオン量を示す。正方形角柱の場合と同様に、供試体の面ごとの付着塩分量に差が見られた。岩崎らの実測結果 [岩崎他, 土木学会論文集 A, Vol.66, pp.297-311, 2010.2] と同様に、桁の内側部分の付着塩分量が少ない結果となった。

(6) 塩分粒子濃度の移流拡散解析

本研究では飛来塩分の挙動を移流拡散現象

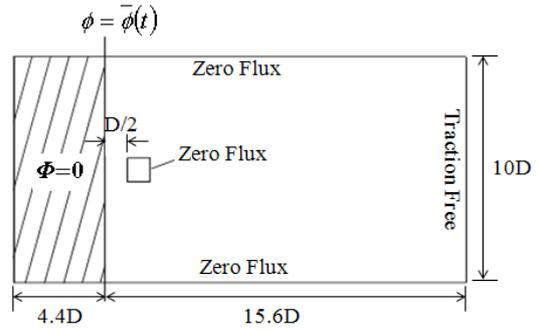


図 9 移流拡散解析の境界条件

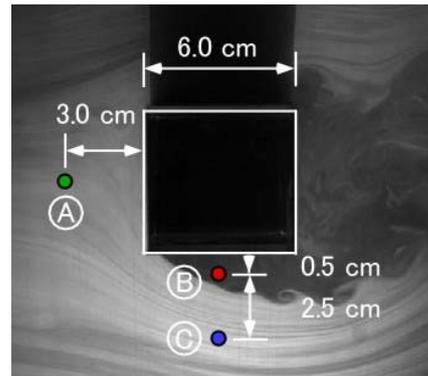


図 10 可視化した正方形角柱周りの流れおよび濃度の時間変化を解析と濃度の時間変化を解析と比較した位置

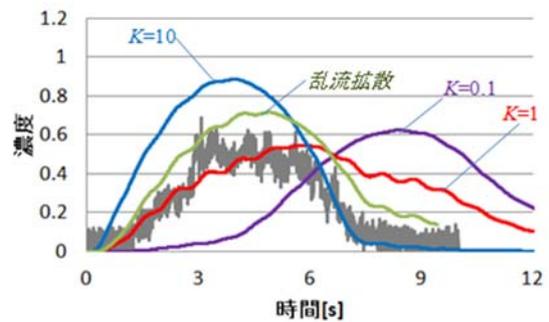


図 11 点 B における濃度の時間変化

であるとみなし、風洞実験に対応する SUPG 有限要素法による解析過程を開発した。

本解析ではあらかじめ正方形角柱周りのレイノルズ数  $Re = 2000$  の乱流解析を  $k-\epsilon$  モデルを用いた有限要素法によって実施し、得られた節点流速の値を節点移流速度ベクトルにステップごとに与えている。

図 9 に用いた境界条件を示す。図 10 の流れの可視化実験における点 A で取得した濃度の時間変化を放物線に単純化し、角柱前方  $D/2$  の位置に境界条件として一様に与えた。また、この境界より上流の節点濃度は数値解析を安定させるために全面的に  $\phi = 0$  とした。解析は等方拡散係数  $k = 0.1, 1, 10$  および乱流拡散係数  $k_t$  を用いた解析の 4 通り行った。

解析の結果、図 11 に示すように剥離せん断

層内に位置する点 B の濃度の時間変化は等方拡散係数を用いた場合と異なり濃度の立ち上がりから減衰までの過程で実験結果に近い時間変化が得られ、改善された結果になった。

#### (7) VMS 有限要素法による 3 次元流れ解析

可視化実験による流れと移流拡散解析による流れを比較すると、角柱背後の流れの回りこみに差があり、実験に比べて解析では間延びした流れになった。そこでより実験に近い流れを得ることを目的として VMS 法に基づく 3 次元の有限要素法流れ解析を実施した。

その結果得られた正方形角柱周辺の流れは角柱背後の巻き込み領域が小さくなり、実験結果に近くなった。

#### 4. 研究成果

本研究の研究成果は以下のようにまとめられる。

##### [1] 橋桁まわりの飛来塩分挙動とその付着量を評価する風洞実験法

##### (a) 接近流内の可視化媒体分布の均一性を高めることができる注入方法を見出した。

可視化媒体として塩化ナトリウム水溶液を使用し、エアロゾル発生器により塩分ミストを発生させる。エアロゾル発生器を風洞の吸い込み口上流に設置し、風洞のファンで攪拌させてから風路内に塩分ミストを送り込む。この方法によって塩分粒子が高い均一度で混合された気流を生成できることを確認した。

##### (b) 供試体周辺の濃度分布の空間的・時間的変化を定量化する可視化画像処理法を確立した。

ハイスピードカメラで撮影したモノクロビデオ画像の 1 フレームごとに、フレームを構成するピクセルの輝度値を濃度値に換算する。このとき供試体を照射するレーザーシートが光源から放射状に広がっているために光源から遠ざかるに従い輝度が低下する傾向をもっているため、輝度の低下特性に基づく補正倍率分布をあらかじめ求めておき、輝度値を補正する。この方法により、可視化媒体の移流拡散挙動の時間空間変化を定量化できた。

##### (c) 供試体表面に付着する塩分量の濃度分布を測定する方法を開発した。

実験供試体表面にガラス繊維ろ紙を貼付し、風洞実験後、塩分粒子が付着したろ紙を精製水の中で攪拌し、精製水中に溶け出した塩化物イオン量をポータブルイオン計で測定する。この測定方法により、供試体の部位ごとの塩分粒子付着量を定量化できることを実証した。

##### [2] 塩分粒子濃度の移流拡散問題の数値解析法

有限要素法に基づく移流拡散解析を実施し、可視化実験と比較した。その結果、拡散係数には乱流拡散係数を用いること、および移流流速は 3 次元非定常数値流体解析によって求めること、という知見を得た。

以上、本研究の研究成果によって、塩分を含んだ気流にさらされる状況において、橋桁表面に付着する塩分量の多寡を風洞実験および数値解析によって評価、予測することが可能になった。この成果は鋼橋の合理的な防錆対策あるいは防錆計画の策定に貢献できるものである。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

①野村卓史, 本橋拓磨: 空気中を落下する球の数値流体解析, 第 23 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, pp.481-486, 2014.

②Hiroshi Hasebe, Tsubasa Kosugi, Shion Hatamoto, Taito Kawai, Syunya Nakayama and Takashi Nomura, Image processing technique of smoke flow visualization for the prediction of behavior of airborne sea salt around a bridge girder, The Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 査読有, CD-ROM, 2013.

③長谷部寛, 小杉翼, 畑元詩音, 河合泰斗, 中山駿也, 野村卓史: 橋梁まわりの飛来塩分挙動推定のための流れの可視化画像の画像処理方法, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, pp.353-358, 2012.

[学会発表] (計 13 件)

①長谷部寛, 曾根瞭平, 春木陽平, 野村卓史: 風洞実験による物体へ付着する飛来塩分量推定方法の検討, 平成 27 年度日本風工学会年次研究発表会, 2015.5.28, 徳島大学, 徳島県徳島市

②Takashi Nomura and Takuma Motohashi, Numerical simulation of a falling sphere in air, The 18th International Conference on Finite Element in Flow Problems [FEF2015], 2015.3.18, Taipei (Taiwan).

③Takashi Nomura and Takuya Motohashi, Fluid-structure interaction analysis of a falling object in air, The 3rd China-Japan-Korea International Workshop on Wind Engineering [CJK2014], 2014.9.26, Asahikawa (Japan)

④野村卓史, 本橋琢磨: 気流中を落下する物体の解析, 日本流体力学会年会 2014.9.16, 東北大学, 宮城県仙台市

⑤野村卓史, 本橋拓磨: 自由落下する球の構造流体連成解析, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.9.10, 大阪大学, 大阪府大阪市

⑥長谷部寛, 榊原佑基, 山谷一生, 野村卓史: 塩分を含むミストを利用した橋梁の飛来塩分

付着量予測法の検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.9.10, 大阪大学, 大阪府大阪市

⑦ Takashi Nomura, An attempt of numerical simulation of flying debris, Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems [COMPSAFE2014], 2014.4.14, Sendai (Japan)

⑧ Takashi Nomura, Hiroshi Hasebe and Takehiro Kobayashi, The advection-diffusion analysis of smoke flows around a body, A Conference Celebrating the 60th Birthday of Tayfun E. Tezduyar, 2014.3, Tokyo (Japan)

⑨ 長谷部寛, 小林丈紘, 野村卓史: 有限要素法による正方形角柱まわりの煙濃度の移流拡散に関する解析, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013.9.5, 日本大学, 千葉県習志野市

⑩ 小林丈紘, 野村卓史, 長谷部寛: 正方形角柱周りの煙濃度の移流拡散に関する有限要素解析, 土木学会関東支部 第 40 回技術研究発表会, 2013.3.14, 宇都宮大学, 栃木県宇都宮市

⑪ 小杉翼, 畑元詩音, 長谷部寛, 野村卓史: 可視化画像の画像処理に基づく橋梁まわりの飛来塩分分布予測法の検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集 I-319, 2012.9.5, 名古屋大学, 愛知県名古屋市

⑫ 長谷部寛, 小杉翼, 畑本詩音, 野村卓史: 可視化実験の画像処理に基づく橋梁の飛来塩分濃度分布特性の検討, 第 57 回風に関するシンポジウム, 2012.3.21, 日本学術会議, 東京都港区

⑬ 長谷部寛, 河合泰斗, 中山駿也, 野村卓史: 橋梁まわりの飛来塩分付着分布予測のための可視化実験の画像処理方法, 土木学会第 66 回年次学術講演会 I-298, 2011.9.7, 愛媛大学, 愛媛県松山市

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者 野村 卓史 (NOMURA, Takashi)  
(日本大学・理工学部・教授)

研究者番号: 50126281

(3) 連携研究者 長谷部 寛 (HASEBE, Hiroshi)  
(日本大学・理工学部・専任講師)

研究者番号: 60366565