

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：55201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06482

研究課題名（和文）ICTを活用した社会資本の耐候耐久性向上に関する研究

研究課題名（英文）Study on improvement of weathering and durability of infrastructure using ICT

研究代表者

大屋 誠（Ohya, Makoto）

松江工業高等専門学校・環境・建設工学科・教授

研究者番号：60280442

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、広域な海塩粒子の観測と気象の再現解析技術を組合せて、地形、季節変動や年変動を考慮した腐食マップを作成することを目的とする。山陰地域の広域な飛来塩分調査を2年間実施し、年変動や季節変動、広域的な飛来状況を確認した。風向風速データと飛来塩分量の観測結果を用いて、領域気候モデルの解析精度と海塩粒子の再現性を検証した。検証は、風力エネルギー係数を用いる方法と直接解析する方法で行った。風力エネルギー係数による方法は、ある程度の精度で予測が可能であること、直接領域気候モデルから解析する方法は、推定値が観測値と大きく異なることが確認された。今後、海塩粒子の発生スキームや物理スキームの検討を実施する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本には、AMeDASという世界的にも稀な高度観測システムによって、リアルタイムに長期間、風向や風速などの気象データが蓄積されている。AMeDASのデータは、だれでも容易に利用することができるが、海塩粒子の飛来量については長期的で広域的な観測記録はほとんどなく、これらのデータは社会資本構造物の長期的な耐候耐久性を検討する上で、貴重なデータである。AMeDASの気象データや気象解析の数値シミュレーション技術を用いて飛来塩分などの腐食環境を予測する技術が確立できれば、社会資本構造物の長寿命化や耐候耐久性向上に大きく貢献できるものと思われる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to create a corrosion map that takes into account terrain, seasonal and annual variation by combining the observation of sea salt particle level and weather reproduction analysis techniques. A wide-area sea salt particles level survey of the Sanin area was conducted for two years to confirm annual and seasonal changes, and flying conditions. The analysis accuracy of the region climate model and the reproducibility of sea salt particles level were verified using wind direction and velocity data of the meteorological observation data. The prediction accuracy was verified by using the method of the wind energy coefficient and the method of direct analysis. It was confirmed that the method according to the wind energy coefficient can be predicted with a certain degree of accuracy, and that the other methods have very different estimates from the observations. In the future, we will examine the generation scheme and physical scheme of sea salt particles.

研究分野：構造工学

キーワード：飛来塩分量 WRF/Chem 数値シミュレーション 腐食マップ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

平成 24 年 3 月の道路橋示方書改訂 で、設計の基本理念の中に「維持管理の确实性の考慮」が追加された。社会資本構造物の耐久性を向上させるためには、防せい防食を一定の水準以上に維持するために、腐食環境を適切に判断し、効果的な点検と維持管理（点検、調査、補修等）を行う必要がある。これらを确实に実施するためには、構造物の長期的な使用を考慮して、適切な環境条件の判断とその環境条件に対して必要な耐久性を有する適切な防せい防食法を採用する必要がある。日本には、AMeDAS という世界的にも稀な高度観測システムによって、リアルタイムに長期間、風向や風速などの気象データが蓄積されている。AMeDAS のデータは、だれでも容易に利用することができるが、海塩粒子の飛来量については長期的で広域的な観測記録はほとんどなく、これらのデータは社会資本構造物の長期的な耐候耐久性を検討する上で、貴重なデータである。AMeDAS の気象データと観測された飛来塩分のデータを用いて、腐食環境に関する体系的な資料の作成を行うことができれば、今後社会資本構造物の長寿命化、耐候耐久性の向上を図る上で重要な資料となり得る。

### 2. 研究の目的

近年、インフラ構造物において長期耐久性が求められており、腐食は構造物の長期耐久性と経済的な維持管理を実現するために重要である。鋼橋梁において、腐食環境の厳しい地域では期待通りの防食機能が発揮されない場合があるため、適切な環境評価 を行わなければならない。本研究では、飛来塩分量の空間分布予測に向けた基礎資料として、島根県内において同じ期間に広域な飛来塩分調査を実施し、海塩由来の飛来塩分量の特性を把握する。また、大屋らが提案する気象観測データを用いた風力エネルギー係数 と飛来塩分量の観測値の関係を議論し、気象観測データより飛来塩分量が予測可能か検討を行う。さらに、広域な海塩粒子の観測と気象の再現解析技術を組合せて、季節や年変動、地形を考慮した腐食マップを作成することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 広域な飛来塩分量の調査位置と飛来塩分量の推定方法

本研究では、島根県内の既設耐候性鋼橋梁の桁下を対象とし、ドライガーゼ法による飛来塩分調査を実施した。対象橋梁は、古志大橋、三井野大橋、里熊大橋、川下橋、第五大橋（朝酌川橋梁）、灘橋の 6 つである。図 1 に本研究で対象とした橋梁の位置を示す。また、飛来塩分を捕集するガーゼは図 2 に示すように、橋梁の橋軸方向に対して水平方向に設置し、橋梁桁下を流れる飛来塩分量の計測を行った。観測期間は 2017 年 10 月から 2019 年 9 月までの 2 年間、毎月ガーゼの回収を行い、飛来塩分量を分析した。

本研究では、運動エネルギーによる定義を応用した大屋らの研究 を参考として、式(1)で示した風力エネルギー係数  $P_D$  [W/day] による飛来塩分量  $C$  [mdd] の推定式を用いた。

$$C = \alpha P_D \quad (1)$$

なお、風力エネルギー係数  $P_D$  は、運動エネルギーの定義を用いて、風速の 3 乗に比例し、空気密度と断面積に比例する係数である。

$$P_D [\text{W/day}] = \sum_D \frac{1}{2} \rho (V \cdot B)^3 \cdot A \cdot T \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  : 空気密度 [ $\text{kg/m}^3$ ] (約  $1.2 \text{kg/m}^3$ )、 $V$ : 時間平均風速 [ $\text{m/s}$ ]、 $B$ : ガーゼ捕集面にあたる風速の方向成分、 $T$ : 観測時間、 $A$ : 単位面積 [ $\text{m}^2$ ]、 $D$ : 1 日である。また、 $B$  は次式で与えられ、 $\theta$  は観測時間の最多風向とガーゼ捕集面との成す角度である。

$$B = \cos \theta \quad (|\theta| < 90^\circ), \quad B = 0 \quad (|\theta| \geq 90^\circ) \quad (3)$$

ドライガーゼ法による飛来塩分量の観測結果と風力エネルギーの値を比較する際には、ドライガーゼ法は 2 面から飛来塩分を捕集するため、それぞれの面で式(2)を用いて風力エネルギー係数を計算し、2 つの面の足し合わせた値を予測値としている。

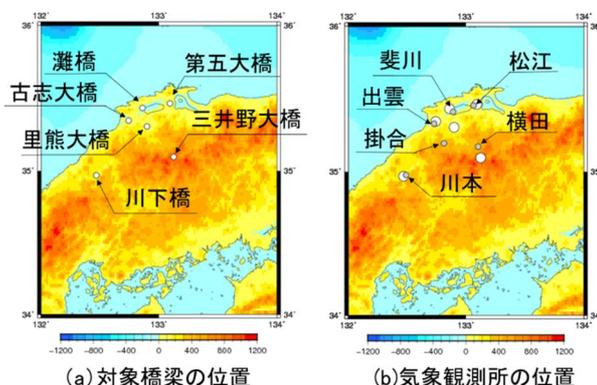


図 1 飛来塩分量の調査対象橋梁位置と AMeDAS の観測位置



図 2 補修ガーゼの設置状況 (古志大橋)

## (2) 領域気候モデル (WRF/Chem) の概要

本研究では、領域気候モデル (Weather Research & Forecasting Model, WRF) に精緻な大気化学プロセスを組み込んだ数値モデル (WRF Atmospheric Chemistry Model, WRF/Chem) を用いた。計算対象領域は、1 段階ネスティング (空間解像度: 5km, 格子数: 119×119 個) と 2 段階ネスティング (空間解像度: 2km, 500m, 格子数: 89×89 個, 128×140 個) で計算を行った。また、鉛直層数は 1 段階ネスティングで 31 層, 2 段階ネスティングで 37 層とした。初期境界条件に気象庁メソ数値予報モデル MSM (空間解像度: 5km, 3 時間), 地形・土地利用データに IGBP-MODIS (空間解像度: 約 1km) を用いた。なお, 計算期間は 2016 年 10 月, 2018 年 1 月~4 月とした。本研究では, WRF/Chem の予測精度を確認するため, 松江地方気象台の風向・風速の観測データを用いた。また, 海塩粒子濃度については, 松江工業高等専門学校屋上での観測データを用い, 飛来塩分量については, 松江地方気象台付近にある第五大橋の観測データを用いた。なお, 海塩粒子濃度はフィルターパック法, 飛来塩分量はドライガーゼ法により計測した。解析精度については, WRF/Chem の計算対象領域の空間解像度を 5km, 2km, 500m と変更して風速を算出し, 松江気象台の観測結果と比較することにより精度検証を行った。土地利用については, IGBP-MODIS の計算対象領域の初期データを確認したところ, 都市部を森林として扱っているなど, 土地利用データが正しく設定されていなかったため, データを修正し, 解析を行った。

## (3) 領域気候モデルを用いた飛来塩分量の推定

飛来塩分量は, 風向・風速のデータから推定する手法 と, 風速・海塩粒子濃度の予測結果から推定する手法 の二通りの手法で求めることが可能である。WRF/Chem によって得られた気象データを利用して飛来塩分量を推定することを試みる。なお, 本研究では, WRF/Chem による海塩粒子濃度の予測精度が低かったため, 風速・海塩粒子濃度の予測結果から推定する手法は行わないこととした。

## 4. 研究成果

### (1) 飛来塩分量の観測結果と風力エネルギー係数を用いた推定結果の比較

飛来塩分量の調査対象橋梁に隣接する気象観測所の飛来塩分量観測期間 2 年間の年平均風速を図 3 に示す。また, 対象橋梁において, 2017 年から 2019 年までの 2 年間の飛来塩分量の観測結果を図 4 に示す。図 3 より, 風速は 1 年目の方が 2 年目より若干大きい結果となり, 飛来塩分量も 1 年目が大きい結果となった。また, 離岸距離が近いほど飛来塩分量が多く, 約 50km 離れた三井野大橋でもかなりの量の飛来塩分量が 2 年間を通じて観測された。本研究の調査対象橋梁の飛来塩分量の組成は, すべて海塩粒子の組成と同様な組成特性を示した。

本研究では, 対象橋梁における観測結果を用いて, 風力エネルギー係数に基づく飛来塩分量推定式の適用可能性を検討した。図 5 に各橋梁の飛来塩分量の観測結果と近接する気象観測所の風向風速データを用い, 橋梁の橋軸方向と設置したガーゼの捕集面の方向を考慮した風力エネルギー係数  $P_D$  から, 飛来塩分量観測値  $C$  との相関を考慮して推定した飛来塩分量の推定値の月変化を示す。なお, 各橋梁の相関は, 最小二乗法を用いて, 原点を通る予測式を算出し, 予測式と観測値の相関係数を表 1 に示す。図 5 より, 対象橋梁近傍の気象観測所の風向風速データのみにて, 飛来塩分量の飛来特性をかなりの精度で表現することが可能であることを確認した。

表 1 対象橋梁の年平均飛来塩分量の観測値と推定値

| 橋梁名   | 気象観測所 | 離岸距離 | $\alpha$ | 飛来塩分量 [mdd] |       | 相関係数  |
|-------|-------|------|----------|-------------|-------|-------|
|       |       |      |          | 観測値         | 推定値   |       |
| 三井野大橋 | 横田    | 50km | 0.0035   | 0.234       | 0.212 | 0.492 |
| 里熊大橋  | 掛合    | 21km | 0.0022   | 0.217       | 0.194 | -     |
| 川下橋   | 川本    | 18km | 0.0028   | 0.199       | 0.185 | 0.408 |
| 第五大橋  | 松江    | 10km | 0.0005   | 0.637       | 0.683 | 0.839 |
| 灘橋    | 斐川    | 8km  | 0.0003   | 0.488       | 0.508 | 0.638 |
| 古志大橋  | 出雲    | 7km  | 0.0044   | 0.708       | 0.726 | 0.902 |

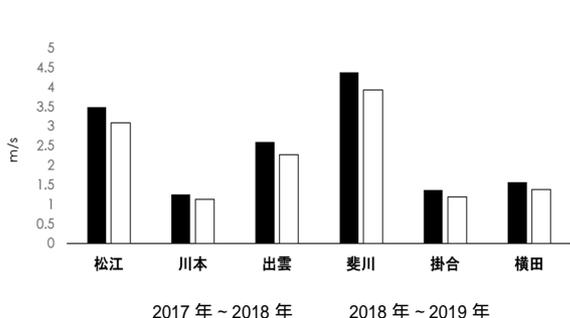


図 3 対象橋梁付近における風速の年平均値

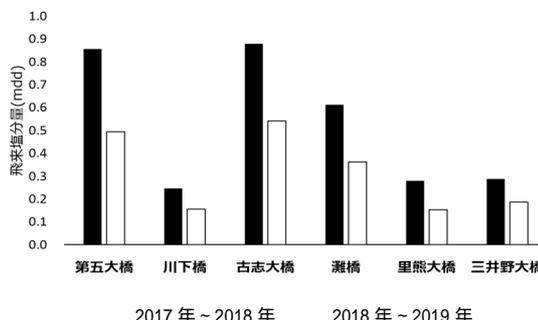


図 4 対象橋梁における飛来塩分の年平均値

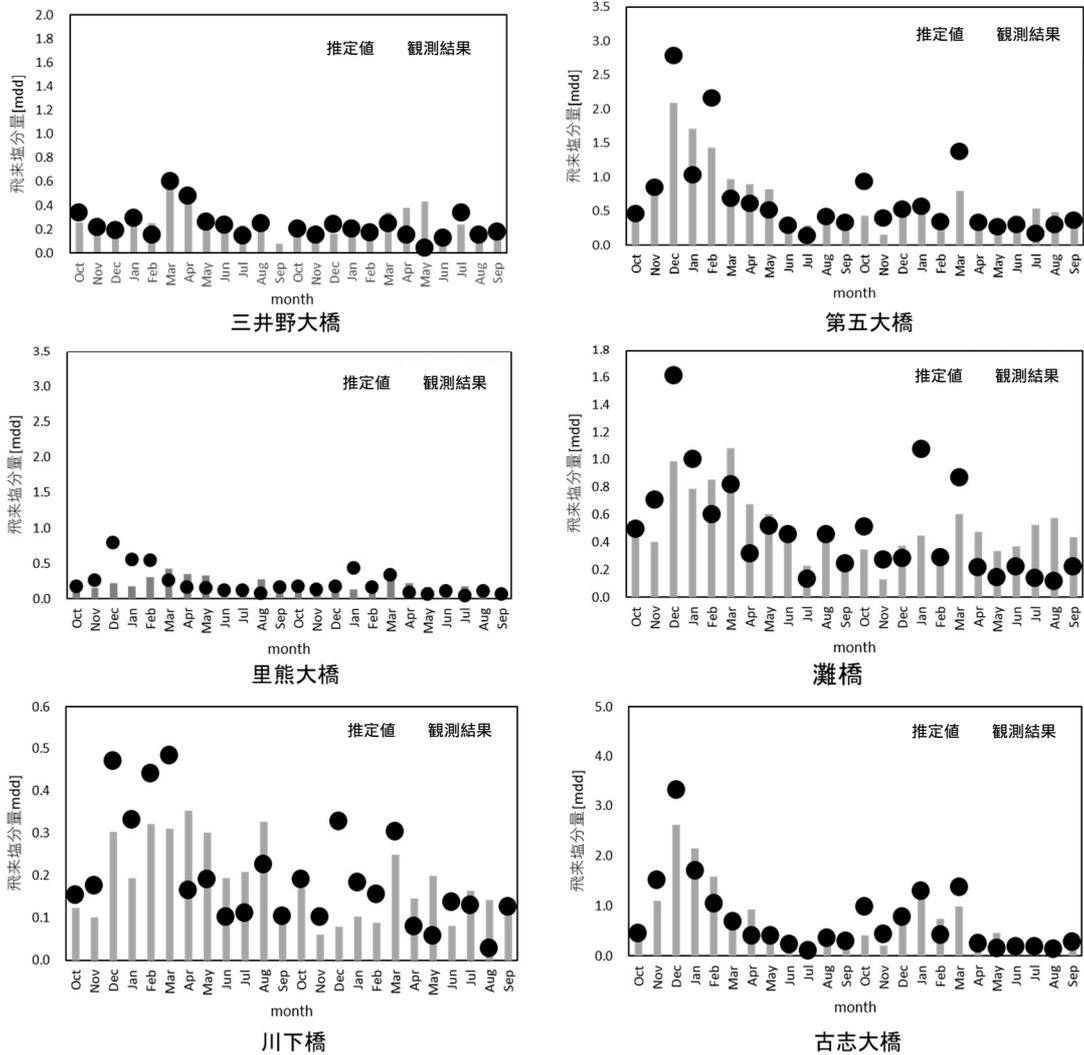


図5 年平均飛来塩分量観測値と推定値の比較

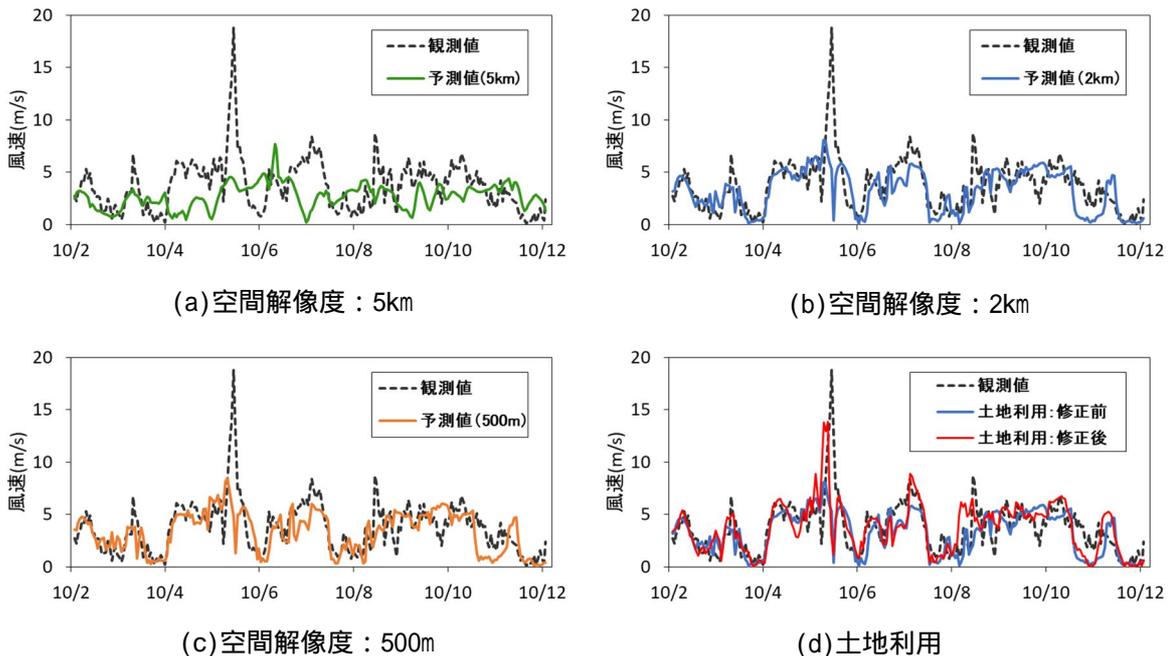


図6 松江地方気象台における風速の観測値と推定値の変化(2016年10月)

(2) WRF/Chemによる気象の再現解析の検討結果

WRF/Chemの解析の再現性を検討するため、松江地方気象台の風速を用いて比較検討を行った。精度検証は、計算対象領域の空間解像度を5km, 2km, 500mと変更した場合と最も解析精度が良い空間解像度2kmにおいて土地利用データを改善したもので検討を行った。図6に予測

値と観測値の風速の変化を示す。図 6 より、空間解像度 5km に比べ空間解像度を上げると再現性が改善されたが、土地利用の空間解像度の関係で、空間解像度 2km が最も良い結果となった。また、土地利用を島根県東部地域の特性に合うように修正した場合、図 6 の (b) と (d) を比較すると、10 月 5 日付近のピーク時の再現性や全体的に風速が急激に増加する傾向を再現することができ、風況の解析精度が向上した。

### (3) 領域気候モデルを用いた飛来塩分量の推定結果

気象解析結果から飛来塩分量を推定するには、風向風速のデータから推定する手法と海塩粒子濃度の解析結果から推定する手法の二通りの手法が考えられる。本研究では海塩粒子濃度の予測精度が低かったため、風向風速のデータから推定する手法の結果のみ報告する。

図 7 に解析で求めた風向風速データから風力エネルギー係数  $P_D$  を計算し、第五大橋の観測値と松江气象台の風向風速データから求めた値  $\alpha = 0.0005$  (表 1 参照) を用いて飛来塩分量の空間分布を推定した 2018 年 1 月～2 月の結果を示す。飛来塩分量は離岸距離の長い山間部において、海岸部と同程度の値を示す結果となった。これは、山間部の気象観測所の風向風速データから風力エネルギー係数を計算すると松江や出雲に比べかなり小さな値となっているが、WRF/Chem の解析により求めた山間部の風力エネルギー係数がかなり高い値を示しているためである。したがって、山間部の解析精度に関し、島根県東部の土地利用データを改善したように、日本にあった山間部の土地利用データの定義について検討を行い、再現解析の精度向上と係数  $\alpha$  の関係について再度検討を行う必要がある。

次に、推定地点を松江に絞り計算期間を 2018 年 1 月～4 月として飛来塩分量の月平均値を求め、飛来塩分量の観測値と推定値の次毎の比較を図 8 に示す。飛来塩分量の推定値は 1 月と 2 月で過大評価となり、3 月と 4 月では過小評価となったが、数値解析を用いて飛来塩分量の傾向をかなりの精度で評価可能である結果を得ることができた。今後解析期間を増やし、数値シミュレーションによる風向風速データから飛来塩分量の推定が可能かどうか検討を進めたい。

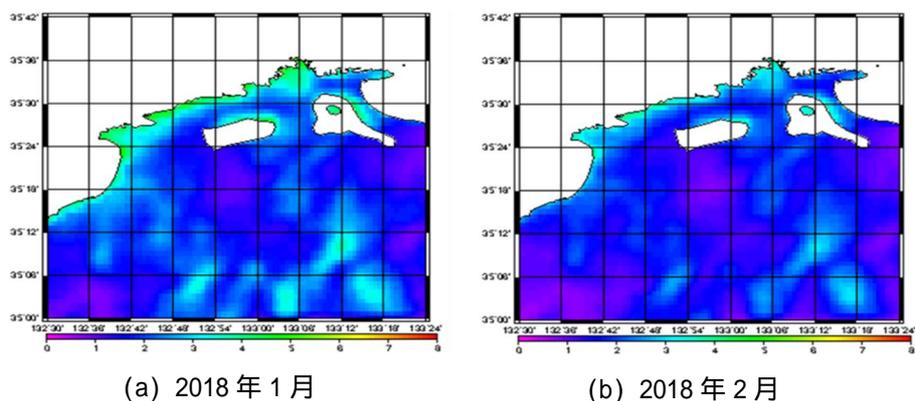


図 7 飛来塩分量[mdd]の空間分布

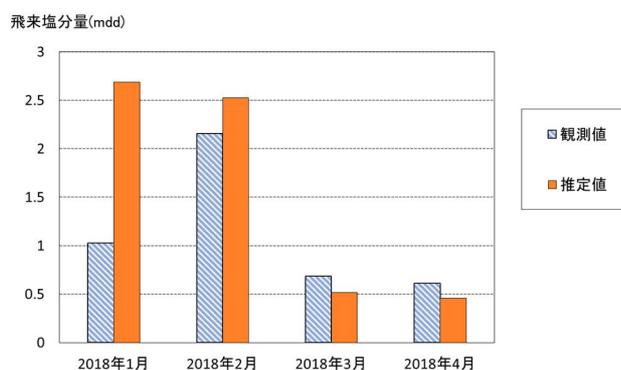


図 8 飛来塩分量の観測値と推定飛来塩分量の比較 (松江)

### < 引用文献 >

- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編・II鋼橋編，pp.188-191，2012.3.
- 日本鋼構造協会，耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術，JSSC テクニカルレポート，No.73，2006.10.
- 日本鋼構造協会，耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全，JSSC テクニカルレポート，No.86，2009.9.
- 大屋誠，武邊勝道，広瀬望，松浦葉月，今井篤実：風向風速データを用いた飛来塩分予測，材料と環境，Vo.62，No.11，pp.430-433，2013.
- 野口恭平，金城佑紀，秦聡一郎，白土博通，八木知己，中西克佳，任意地点橋梁における部位別の飛来塩分量予測，土木学会論文集（構造・地震工学）A1，Vol.73，No.2，pp.364-375，2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>M.Ohya, M.Takebe, N.Hirose, S.AJIKI, T.Aso  | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>ESTIMATION OF AIRBORNE SALT LEVEL FOR BRIDGE CONSTRUCTION                                | 5. 発行年<br>2017年 |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the Ninth International Structural Engineering and Construction Conference | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.14455/ISEC.res.2017.186   | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-       |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Ohya Makoto, Takebe Masamichi, Hirose Nozomu, Itoga Toshiki, Shirako Yoshihiro         | 4. 巻<br>68            |
| 2. 論文標題<br>Spatial Distribution Characteristics and Prediction of Airborne Salt Level in Shimane | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>Zairyo-to-Kankyo   | 6. 最初と最後の頁<br>317～320 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.3323/jcorr.68.317  | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-             |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>N. Hirose, M. Takebe, and M. Ohya                                       |
| 2. 発表標題<br>WRF-Chem simulations of the atmospheric sea salt concentration in Japan |
| 3. 学会等名<br>2018 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (国際学会)               |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>MAKOTO OHYA  |
| 2. 発表標題<br>ESTIMATION OF AIRBORNE SALT LEVEL FOR BRIDGE CONSTRUCTION                                      |
| 3. 学会等名<br>Ninth International Structural Engineering and Construction Conference, Valencia, Spain (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大屋 誠, 武邊勝道, 広瀬 望, 糸賀俊輝, 白子喜悠         |
| 2. 発表標題<br>気象データを用いた飛来塩分量の空間分布予測                |
| 3. 学会等名<br>令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会講演概要集, I-368 |
| 4. 発表年<br>2019年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>広瀬 望, 武邊勝道, 大屋 誠                     |
| 2. 発表標題<br>数値モデルによる大気中の海塩粒子濃度の広域予測とその精度検証       |
| 3. 学会等名<br>令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会講演概要集, I-369 |
| 4. 発表年<br>2019年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>広瀬 望, 武邊勝道, 大屋 誠, 栗原果歩          |
| 2. 発表標題<br>中国地方における大気中の海塩粒子濃度予測の検討         |
| 3. 学会等名<br>2019年度(第71回)土木学会中国支部研究発表会, I-14 |
| 4. 発表年<br>2019年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大屋 誠, 武邊勝道, 広瀬 望, 糸賀俊輝, 白子喜悠 |
| 2. 発表標題<br>島根における海塩粒子の飛来特性とその予測         |
| 3. 学会等名<br>材料と環境2019(東京)                |
| 4. 発表年<br>2019年                         |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|