任意地点橋梁における部位別の飛来塩分量予測

野口 恭平¹・金城 佑紀²・秦 聡一朗³・白土 博通⁴・八木 知己⁵・中西 克佳⁶

¹学生会員 京都大学博士後期課程 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: noguchi.kyohei.62n@kyoto-u.jp

²正会員 東京電力パワーグリッド株式会社(研究当時京都大学修士課程)
(〒108-0023 東京都港区芝浦4-19-1)
E-mail: kaneshiro.yuki@tepcoco.jp

³正会員 株式会社IHIインフラシステム(研究当時京都大学修士課程)
(〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12)
E-mail: soichiro_hata@iis.ihi.co.jp

⁴正会員 京都大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: shirato.hiromichi.8u@kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 京都大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: yagi.tomomi.7a@kyoto-u.ac.jp

⁶正会員 JFEスチール株式会社 スチール研究所(〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1)
E-mail: kat-nakanishi@jfe-steel.co.jp

橋梁の維持管理を進める上で飛来海塩粒子の影響は甚大であり、そのため部位別飛来塩分量の推定が重要である。一方で実務では複数橋梁を広域的かつ同時に管理する必要から、橋梁ごとに観測やモニタリングを行わずに広域的に腐食環境を把握できることが望ましい。本報ではまず、任意地点の風速・風向及び大気中塩分濃度の算出に領域気象モデルWRFを用いた。また、対象橋梁と周辺地形をモデル化し、接近風向別の定常流れ場を算出することで、各部位近傍の風速を評価した。これらと筆者らの提案計算手法により、対象橋梁の部位別飛来塩分量を推定した。本手法にて、観測によらない風速・風向及び大気中塩分濃度の評価、さらに部位別飛来塩分量の評価において一定の成果を示しており、今後の改善及び発展を踏まえてさらなる予測精度を得られると考えている。

Key Words : corrosion, air-borne sea salt, WRF, CFD, maintenance and management

1. はじめに

我が国では高度経済成長期に建設された橋梁の老朽化が進行し、維持管理はますます重要となっている¹⁾。また、日本は四方を海に囲まれており、かつ国土の多くが山地であることから、インフラ構造物の多くは海岸部に集中している。したがって、構造物の維持管理を考える上で、鋼橋の腐食やコンクリート橋の塩害に影響する飛来海塩粒子の存在は無視できない²⁾。加えて、橋梁の部位ごとに飛来塩分量や劣化具合は異なることが知られている³⁾⁵⁾。このような背景のもと、筆者らはCFDで得られた接近風向別の橋梁周りの定常流れ場、及び現地観測による風況や大気中塩分濃度に基づき、部位別の飛来塩分量推定手法を検討してきた⁶⁾⁸⁾。一方で、実務では複

数橋梁を広域的かつ同時に管理する必要があることを踏まえると、手間やコストの観点からも橋梁ごとに観測やモニタリングを行うことなく、広域的に腐食環境を集中監視できることが望ましい。さらに、腐食や塩害は非常に長い時間スケールでの問題ともいえ、長期的な腐食環境の把握も重要と考えられる。

本報では、気象要素や飛来塩分などの観測値が得られない場合や観測を省略したい場合に、そのような任意地点橋梁の腐食環境を評価する手法を検討した。具体的には、筆者らが提案する橋梁周りの接近風向別定常流れ場を用いた部位別飛来塩分量推定手法に加え、領域気象モデルによる気象データ及び大気中塩分濃度算出手法を導入し、高精度かつ観測によらない部位別飛来塩分量推定手法の確立を目指し検討を行った。また、気象要素や部

位別飛来塩分量の長期予測に関して、観測データを用いた確率モデル構築とモンテカルロシミュレーション適用について一部検討済み⁹⁾であり、それらの有効性を示した。ただし、これらの技術と領域気象モデルの結合は本報では今後の課題としたい。本報では、領域気象モデルを用いて気象要素と大気中塩分濃度を算出し、得られた風向・風速を別途計算しておいた接近風向別定常流れ場の入力値とみなすことで、対象橋梁の部位別飛来塩分量を推定した。その上で当該地点での領域気象モデルの適用可能性、及び流れ場計算と部位別飛来塩分推定手法の妥当性を検討した。

ここで、本研究の2種類の計算(領域気象モデル・CFDによる流れ場計算)について、領域気象モデルは広域的な地形や土地利用の影響を勘案しつつ、任意地点の気象・塩分環境を解析することが目的である。一方で、橋梁形状やその周辺地形に影響されるような、領域気象モデルの空間解像度では再現できない細かな流れを、CFDによって評価することを目指している。また、本研究では領域気象モデルとCFDは独立した計算であり、両者の連成計算ではないことを念のため注記しておく。

本研究では苗引橋(新潟県新潟市、図-1)を対象とした。単純支持2主1桁の無塗装耐候性鋼橋梁で、水田地帯を流れる飛落川上に位置する。苗引橋は岩崎ら³⁾が検討を行っており、それによると橋軸は南北線から12°反時計方向に沿っている。離岸距離は約8kmで周囲に障害物はない。本報では岩崎ら³⁾がガーゼ法で観測した橋梁各部位近傍での飛来塩分量も比較対象として利用する。

2. 計算アルゴリズムと本論文の構成

図-2に本研究で採用する部位別飛来塩分量の計算アルゴリズム⁹⁾を示す。時間刻みは10分であり、10分ごとの飛来塩分量を評価する。時間刻みステップごとの計算概要は次の通りである。添え字の i は時間刻みを示す指標である。

まず、接近風速 V_{0i} と風向 D_{0i} および大気中塩分濃度 C_{0i} を決定する。本研究では、これらは領域気象モデルを用いた計算によって与えられる。詳細は3章に記す。

次に、与えられた接近風向に応じて、あらかじめCFDで計算しておいた対象橋梁周りの接近風向別の定常流れ場を参照する。このとき、領域気象モデルで得られた風速が定常流れ場計算領域の流入面での値に相当するとみなすと、流れ場計算に用いた流入風速(2m/s)との比率から、橋梁各部位近傍の風速値 V_{ni} を評価できる。すなわち、CFDで算出される流れ場を2m/sで除すことで無次元化しておき、各ステップで無次元流れ場をオフラインで参照することで、各ステップにおける部位近傍の風速値を特定することが可能である。これは、橋梁部が矩形

図-1 苗引橋

図-2 部位別飛来塩分の計算アルゴリズム

で構成されることから、流れの剥離点が固定されるので、橋梁断面周りに形成される流れ場は、接近風速によらずに一定な分布になると考えられるからである¹⁰⁾。定常流れ場計算については4章で説明する。

その後、領域気象モデルで得られた大気中塩分濃度 C_{0i} と、各部位近傍の風速値 V_{ni} を利用することで、部位ごとの飛来塩分量 Q_i を求められる。塩分量の計算手法は5章で述べる。

なお、筆者らによる先行研究^{9,10)}では部位別飛来塩分量を算出したのちに雨水による塩分洗浄を考えている。しかし、本研究では橋梁外側に位置する評価部位は限りなく床版に近く、そのため実際には雨の影響はほぼないと思われる。したがって、いずれの部位でも雨水による洗浄は考えない。

以上を対象期間に渡って繰り返しかつ合算することで、ある期間の累積飛来塩分量を部位別に評価できる。得られた累積値は観測値と比較し、その妥当性を検討する。

3. 任意地点の気象要素及び大気中塩分濃度算出

対象橋梁地点の腐食環境を考える場合、当該地点に各

図-3 WRFによるシミュレーションの計算領域

表-1 苗引橋と比較地点の詳細

番号	名称	北緯 [°]	東経 [°]	標高 [m]	装置 高さ [m]	平均 風速 [m]	最多 風向 [-]
1	苗引橋	37.78	138.92	3.5	桁下	-	-
2	巻	37.77	138.91	2	10	1.6	S
3	寺泊	37.64	138.77	44	7.9	3.5	ESE
4	三条	37.64	138.96	9	12.5	2.1	SSW
5	新潟	37.89	139.05	0	15.1	3.1	S
6	新津	37.79	139.09	3	10	2.5	SW
7	松浜	37.96	139.11	1	8.4	4.5	S
8	曾和	37.85	138.94	2	2.5	-	-
9	小新	37.87	138.99	0	15	-	-

種装置を導入して観測を行うのが一般的である。しかし、先述の通り、複数橋梁を対象にすることを考えると、観測を行わずに計算によって任意地点の情報を得ることが望ましい。そこで本研究では、観測に代わるデータ獲得手法として、任意地点の気象要素及び大気中塩分濃度の推定に領域気象モデル Weather Research & Forecasting Model (WRF, ver. 3.5)¹¹⁾を用いた。WRFは次世代型のメソ数値気象予測モデルで、数十メートルから数千キロメートルの気象現象を対象とし、大気研究と現業の気象予測の両方に適応できる。実気象場での解析だけではなく、理想化した条件下におけるシミュレーションも実行できる。開発は1990年代後半にアメリカ大気研究センター (NCAR)、アメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration)、空軍気象局 (AFWA)、海軍研究所 (Naval Research Laboratory)、オクラホマ大学 (University of Oklahoma)、連邦航空局 (FAA)によって始められ、現在の利用は130か国以上25,000人以上に至る。

図-4 苗引橋と比較地点の位置(国土地理院地図¹⁵⁾を利用)

表-2 WRFで利用する物理モデルの一覧

項目	使用モデル
Microphysics	WSM5
Cumulus Parametrization	Grell 3D (d01), no model (d02, d03)
Surface Layer	MM5 similarity theory
Land-Surface	Noah Land Surface Model
Planetary Boundary Layer	Yonsei University Scheme (YSU)
Longwave Radiation	Rapid Radiation Transfer
Shortwave Radiation	Dudhia scheme

WRFは地点ごとの標高や土地利用状況に基づき気象要素を計算するので、その精度は対象地点や計算格子の設定によっても異なると考えられる。本章では、WRFの計算精度や算出される値の傾向を確認するために、新潟県内の気象庁アメダスによる風速及び風向の観測データ¹²⁾との比較を行う。比較に際してWRFの計算パラメータや境界条件を適宜変更し、それらが与える影響を調べた。その上で、WRF Atmospheric Chemistry Model (WRF-Chem)¹³⁾パッケージを利用することで大気中塩分濃度の時系列データを算出し、その精度を検証した。大気中塩分濃度の比較対象には全国環境研究協議会(全環研)酸性雨調査研究部会による観測データ¹⁴⁾を用いた。

(1) 計算領域と計算条件

WRFの計算領域は図-3に示す3段階ネスティング(大領域 d01, 中領域 d02, 小領域 d03)で、領域の格子一辺の長さは大領域(d01)より順に9km, 3km, 1km, 領域一辺あたりの格子数は69個, 69個, 63個, 鉛直層数はいずれも29層である。また、計算の刻み時間は54s(d01), 18s(d02), 6s(d03)とした。苗引橋はこの領域の中心に位置し、比較対象とする新潟県内6地点(巻, 寺泊, 三条,

表-3 WRF の計算ケース一覧

番号	名称	気象	土地利用	標高	鉛直層数	境界層	境界更新*	ナudging*
1	Original	NCEP-FNL	USGS	USGS	29	YSU	X	X
2	GSI landuse	NCEP-FNL	GSI	USGS	29	YSU	X	X
3	GSI elevation	NCEP-FNL	USGS	GSI	29	YSU	X	X
4	Vertical grids +10	NCEP-FNL	USGS	USGS	39	YSU	X	X
5	MSJ for PBL	NCEP-FNL	USGS	USGS	29	MYJ	X	X
6	Update masked surface	NCEP-FNL	USGS	USGS	29	YSU	O	X
7	2+5+6	NCEP-FNL	GSI	USGS	29	MYJ	O	X
8	2+6	NCEP-FNL	GSI	USGS	29	YSU	O	X
9	2+6+nudging	NCEP-FNL	GSI	USGS	29	YSU	O	O
10	9+MSM	MSM	GSI	USGS	29	YSU	O	O
11	JMA Observation	-	-	-	-	-	-	-

* O: Applied, X: Not applied.

図-5 新潟県内6地点における期間別平均風速(横軸: 月/日)

新潟, 新津, 松浜)のアメダスデータと2地点(曾和, 小新)の全環研データは, いずれも WRF の最も内側の高解像領域 (d03) に含まれる. これらの位置を図-4¹⁵⁾に1-9の番号で示し, かつ各地点の詳細を表-1にまとめる^{13), 14)}. 参考に, アメダス6地点は2007年の平均風速と最多風向も示した¹²⁾. このように計算領域を適切に設定すると, 一度の計算で複数地点の情報を得ることもできる. 初期・境界条件は, 気象データに米国立環境予測センターの最終全球解析データ (NCEP-FNL, $1^\circ \times 1^\circ$ 度及び毎6時間)¹⁶⁾, 地形・土地利用データに米国地質研究所 (USGS)

の30秒(約1km)メッシュ¹⁷⁾を用いた. 物理モデルは WRF-Chem のチュートリアル¹⁸⁾に倣い表-2のように設定した. なお, 平面解像度が3km以下である中領域 (d02) と小領域 (d03) では, Cumulus Parametrization のモデルは用いない. また, 地表及び海水面温度の境界値は初期値で固定した.

(2) 気象要素の算出

以上を基準ケースとし, 各パラメータを適宜変えつつ算出される値を検討した. 基準ケースと検討対象各ケー

図-6 新潟県内6地点における風向別平均風速(横軸: 16方位)

図-7 新潟県内6地点における風向別生起頻度(横軸: 16方位)

スの概要を表3に示す。気象要素の比較期間は2006年10月2日～2007年8月16日で、その間の約1か月ごとに平均風速や風向生起頻度を検討した。なお、WRFの風速は地上10m値を用いるので、アメダスの風速値をべき乗則によって地上10m値に変換した。このとき、簡

単のためいずれの地点でもべき指数は1/7とした。

基準ケースの計算結果を図5(期間別平均風速)、図6(風向別平均風速)、図7(風向別生起頻度)に示す(凡例: 1番)。風速の季節変動や風向ごとの風速特性は再現されている。一方で、特に風速がアメダス値と大きく離れて

おり、生起頻度にも差が見られる。以下の項目では各パラメータを適宜変更し、算出される値を図5～図7に併せて示す。

a) 土地利用情報

WRFで利用できる土地利用情報として先に示すUSGSデータが標準で用意されているが、日本の土地利用の実情には即さないことが小畑・村上¹⁹⁾や秋本・日下²⁰⁾によって指摘されている。そこで国土地理院 (Geospatial Information Authority in Japan, GIS) 発行の土地利用情報 (解像度 100 m × 100 m)²¹⁾を導入して計算した (凡例：2 番)。このデータを用いることで寺泊や新潟のように風速が大きく改善する地点もあるが、一方で巻のようにあまり変化のない地点もある。これは変更前のUSGSデータが土地利用をどのように評価しているかに起因している。例えば巻は両データ共に田に囲まれる様子を再現しているが、寺泊や新潟では解像度の低さから陸地であるべき点を水面として扱っている。このように、日本国内を対象とする場合は、国土地理院の土地利用情報を与える必要性が本研究からも確認できた。

b) 標高データ

標高データにも国土地理院 (GIS) 発行の 250 m メッシュ (昭和 56 年)²²⁾を導入した (凡例：3 番)。しかし、この変更の影響はあまり見られなかった。理由として、USGS 標高データでもある程度の再現ができていたこと、今回は WRF 計算格子の大きさが最小で 1 km 四方のため、高解像度のデータを与えてもその効果が表れにくいことが挙げられる。したがって、計算格子を小さくした領域を用いる場合には再度検討の余地はある。

c) 鉛直方向の格子分割

鉛直方向の計算格子数を初期の 29 層から 39 層へ増やして計算を行ったが、変化はほとんど見られなかった (凡例：4 番)。したがって、今回の計算では 29 層でも十分と考えられるが、地形や他の設定との兼ね合いで影響が生じる可能性も考慮しておくべきである。

d) 境界層スキーム

境界層スキームの差異は金ら²³⁾が詳細に検討しており、本研究ではその報告を参考に、Yonsei University Scheme (YSU) に変えて Mellow, Yamada and Janjic (MYJ) モデルを適用した (凡例：5 番)。大小は地点によるが、基本的に風速を低下させる作用が確認された。

e) 地表面・水面情報の更新

WRF の初期設定では領域下面、つまり地表面及び水面温度が初期値で一定となってしまう。したがって、特に長期間の予測を行う場合には計算結果に与える影響も大きいと思われる。初期・境界条件に用いた NCEP-FNL を用いて、下面境界も 6 時間ごとに更新した場合の計算結果は、風速と風向生起頻度の両方で大きな改善が見られた (凡例：6 番)。表面の温度が地表付近の風況と密接

に関係しているといえ、より高精度なデータを用いることでさらなる改善が期待できる。

f) 検討項目の組み合わせによる算出

以上より、特に計算結果の改善への寄与が大きい土地利用データの変更、境界層スキーム、領域下面の更新の変更を同時に行った計算結果を示す (凡例：7 番)。松浜のように風速はアメダス値と概ね一致する地点も見られ、風向別生起頻度も元のケースに比べるとその傾向をよく捉えている。一方で、土地利用データの変更、領域下面の更新のみを行った計算結果も併せて示すが、こちらの方がより観測値に近い風速値を示した (凡例：8 番)。これは温度場や風速場が互いに密接に関わっているため、パラメータ変更も一つの変数のみではなく、それらの組み合わせを以て検討すべきといえる。

g) ナッジングと気象データの変更

最後に、基準のケースからの土地利用データの変更と領域下面境界の更新に加え、一番外側の第一領域にナッジングを施したケース (凡例：9 番)、さらに初期・境界値として利用するデータを NCEP-FNL から気象庁 Meso-Scale Model (MSM, 0.05° × 0.05° 及び毎 3 時間)²⁴⁾に変更した計算結果を示す (凡例：10 番)。ナッジングとはデータ同化手法の一つであり、観測値や客観解析値との差を修正するもので、例えば義江らが検討している²⁴⁾。また、気象庁 MSM には地表面温度などが含まれないため、NCEP-FNL を用いて補完した。ナッジングによって WRF の計算値はより観測値に近づいており、MSM を用いることでさらに改善が見られる。高解像度のデータを与える必要性や採用した MSM データの精度がよいことが窺える。ただし、いまだ風速が過大評価な地点もあり、風向のピークに差のある地点も存在する。原因として、例えば地点によっては 1 km 四方メッシュでは再現できないような局所的な影響 (地形や家屋など) が考えられる。今後は計算領域の大きさや解像度、初期・境界条件に用いるデータの検討をさらに進める予定である。

(3) 大気中塩分濃度の算出

前節の検討をもとに大気中塩分濃度を算出する。ここでは、比較的良好な計算を行うことができたと思われる凡例10の設定とChemistryパッケージを組み合わせた計算を行う。化学モデルにはGOCART及びMADE/ SORGAMの2種類を用い、それぞれで大気中塩分濃度を算出した。GOCARTは粒径を基準に4つのビン (半径0.1-0.5, 0.5-1.5, 1.5-5.0, 5.0-10.0 μm) に分け、それぞれの範囲の濃度を算出するもので、WRFで利用できる化学モデルの中では比較的軽負荷とされている。一方でMADE/SORGAMでは粒径に応じて3つの対数正規分布を仮定し、その重ね合わせによって全体の塩分濃度を評価する手法である。

大気中塩分濃度は新潟県内の2地点 (曾和, 小新, 詳細

図-8 新潟県内2地点における期間別平均飛来塩分濃度(横軸:年/月)

は先述の図-4と表-1を参照)で算出し、全環研のフィルターパック法²⁾による観測データと比較した(図-8)。フィルターパック法は大気を強制吸引し、含まれる物質を内部のフィルター群が粒径ごとに捕捉する装置である。今回用いたのは塩化物イオン濃度で、全て塩化ナトリウム由来との仮定のもとに塩化ナトリウム濃度に変換して利用した。比較期間は2006年10月～2007年7月であり、この間の月平均値を対象とした。

両地点においてMADE/SORGAMによる大気中塩分濃度(凡例:2番)が観測値と比較的良好な一致を示す一方で、GOCARTによる値(凡例:1番)はかなりの過大評価となった。これはGOCARTの粒径解像度の低さによると予想される。特に、大気中塩分濃度に影響しやすい径の大きな粒子数を過大に扱っている可能性が考えられる。一方で、MADE/SORGAMでは粒径分布を対数正規分布で表現しているため、より現実に即した計算が可能と思われる。ただし、この結果はひとえにGOCARTよりもMADE/SORGAMが優れていることを示すのではない。例えば、海岸部のような巨大粒子の比率が大きいような場合にはGOCARTでも妥当な計算ができる可能性はあり、適用地点に応じて判断することが求められる。

ここで、MADE/SORGAMを用いた計算についても、小新の11月や4月・5月は過小評価である。小新と曾和では風速や風向の観測値が得られていないため、代わりに両地点の近隣で、離岸距離も同程度である新潟の風向別生起頻度を参照すると、南東に見られるピークは観測値に対し大きく算出されたことがわかる。これらの風向は陸風に相当するので、含まれる塩分量は少ないと考えられ、特定の月において大気中塩分濃度が過小評価された原因と予想される。一方、曾和では6月・7月に、増減の傾向は観測値と一致するものの、大気中塩分濃度は過大に算出された。新潟の風向別平均風速を見ると、海風である西よりの風の風速値が過大評価されていることから、過剰な海塩粒子を陸地に供給している可能性が考えられ

る。このように、大気中塩分濃度を精度良く算出するうえで、風速や風向の計算精度が重要であると考えられる。しかし、曾和・小新における気象データの観測値が得られていないため、原因の特定は慎重に行う必要がある。さらに、観測値に影響を与えた因子が存在することも考えられるので、より広域的な比較を行うことで、大気中塩分濃度の精度検証を行うことが必要である。

また、MADE/SORGAMにおいて湿性沈着(降雨などによって大気中から海塩粒子が取り除かれ、地面や構造物に沈着する現象)を考慮して計算した(凡例:3番)。このとき湿性沈着を有効にするために表-2に示すMicrophysicsをMorrison double-momentに変更したが、風況などに影響のないことは別途確認している。湿性沈着を考慮した計算では、わずかではあるが塩分濃度の低下が認められる。ただし、湿性沈着の効果は今回の検討のような月単位のオーダーよりも、例えば日単位のような短い時間変化の中で顕著に表れると予想され¹⁹⁾、将来的には観測によって比較検討に利用できるデータの確保を考えている。

4. 橋梁周りの定常流れ場計算

筆者らの提案手法では、橋梁部位別の飛来塩分環境を評価するためには、各部位近傍での風速を評価する必要がある。このとき、橋梁断面周りの流れ場は周辺地形の影響を受けるため、苗引橋に加え、周辺地形として飛落川の護岸を簡易的にモデル化し、接近風向別の定常流れ場を算出した。なお、実際の自然風は時々刻々と変化するので、より現実的な飛来塩分量評価のためには、非定常流れ場に基づく検討が必要と考えられる。一方、腐食は非常に長い時間スケールでの現象ともいえる、橋梁部位別飛来塩分量もそのような長期的な風況に支配されるとも予想される。また、橋梁構造や周辺地形も取り入れた複雑形状周りの非定常流れ場計算は、計算コストの観点から容易ではない。そのため、本研究では計算負荷の小

図-9 橋梁断面形状と岩崎ら³⁾による塩分計測位置及び本報での推定箇所(単位: mm)

図-11 橋梁周りの格子分割の様子(接近風向と橋軸直角方向とのなす角が0°の場合)

図-10 定常流れ場計算領域の例

さい定常流れ場を算出し、部位ごとの時間平均的な風況特性に基づき、飛来塩分量の計算に利用することにした。

橋梁断面モデルは図-9のように作成した。計算領域は接近風向と橋軸直角方向とのなす角が0°, 22.5°, 45°, 67.5°となる4つで、図-10に0°と67.5°の領域例を示す。67.5°の領域中のa-fの記号は計算領域の境界面を表しており、後述する境界条件の説明に用いる。いずれの領域も、図-9の断面を有する橋梁部と、その下を流れる飛落川の護岸部から成る。簡単のため橋軸方向の風ではガーゼへの塩分の付着はないと考え、90°の流れ場計算は省略した。領域主流方向(x方向)の長さは0°の領域から順に240 m, 425 m, 240 m, 240 mで、いずれも主流直角方向(z方向)は48 m、鉛直方向(y方向)は80 mとした。定常流れ場はOpenFOAM (ver. 2.1.0)²⁶⁾を利用してReynolds

表-4 定常流れ場計算の初期及び境界条件

	a(流入)	b(側面)	c(流出)	d(側面)
V [m/s]	$v_x=2$ $v_y=0$ $v_z=0$	$\partial v_x/\partial y=0$ $\partial v_y/\partial y=0$ $v_z=0$	$\partial v_x/\partial y=0$ $\partial v_y/\partial y=0$ $\partial v_z/\partial y=0$	$\partial v_x/\partial y=0$ $\partial v_y/\partial y=0$ $v_z=0$
p [m ² /s ²]	$\partial p/\partial n=0$	$\partial p/\partial n=0$	$p=0$	$\partial p/\partial n=0$
k [m ² /s ²]	3.75×10^3	$\partial k/\partial n=0$	$\partial k/\partial n=0$	$\partial k/\partial n=0$
ε [m ² /s ³]	3.93×10^4	$\partial \varepsilon/\partial n=0$	$\partial \varepsilon/\partial n=0$	$\partial \varepsilon/\partial n=0$

	e(天井面)	f(底面)	橋梁・地形表面
V [m/s]	$\partial v_x/\partial x=0$ $v_y=0$ $\partial v_z/\partial y=0$	$v_x=0$ $v_y=0$ $v_z=0$	$v_x=0$ $v_y=0$ $v_z=0$
p [m ² /s ²]	$\partial p/\partial n=0$	$\partial p/\partial n=0$	$\partial p/\partial n=0$
k [m ² /s ²]	$\partial k/\partial n=0$	対数則	対数則
ε [m ² /s ³]	$\partial \varepsilon/\partial n=0$	対数則	対数則

Averaged Navier Stokes (RANS) 方程式を数値的に解いた。計算領域の総格子数は0°の領域から順に約3,000万個、1,500万個、2,900万個、2,900万個である。格子生成にはOpenFOAM付属の自動格子生成ユーティリティを用いた。橋梁周りの格子の様子を0°の領域を例に図-11に示す。乱流モデルは標準k-εモデルで、固体壁面近傍では対数則に基づく壁関数を利用した。表-4に初期・境界条件を示す。表中の記号について、 V : 風速 [m/s], p : 圧力 [m²/s²], k : 乱流エネルギー [m²/s²], ε : エネルギー散逸率 [m²/s³]である。これらは領域によらず共通である。表中の面を表す記号は図-10中のものに対応する。

図-12に桁周りの定常流れ場計算結果の一例をベクトル図で示す。桁間に着目すると、いずれの例でも反時計回りの循環流れが支配的ではあるが、接近風向が0°の場合では風下側の桁付近に別の循環流れが形成されている。このように、苗引橋のような土手に囲まれた橋梁でも、接近風向によって流れの様子は異なることが確認できる。

図-13に右岸側端部から6,500 mm地点における接近風

図-12 桁周りの定常流れ場の例

図-13 部位別及び接近風向別の壁面近傍無次元風速

向別の無次元風速を、図-9に表す部位ごとに示す。点1から点8は全てウェブ部近傍で、部位によって壁面から200 mm前後離れている。これらは岩崎ら³⁾がガーゼ法で塩分捕集を行った位置に相当する。風速値は主流方向を正とした。図-12でも示されたように接近風向による流れ場の変化は明確であり、特に風下側の桁では分布形状が大きく異なる。したがって、部位別に飛来塩分量や鋼材の劣化を考える際にも接近風向に留意すべきといえる。一方で、いずれの接近風向でも部位3と部位6の風速は他の部位に比べて非常に小さいことから、桁間では定常的な循環流れが形成されていると分かる。つまり、定常流れ場に基づく今回の手法では、これらの部位において、ガーゼに塩分が付着しにくいと思われる。流れの非定常性を考慮した際に流れ場の形成、あるいは当該部位への塩分供給にどのような影響があるかは今後の検討が必要である。

5. 部位別の飛来塩分量計算

WRFによる気象データ及び大気中塩分濃度と苗引橋周りの接近風向別定常流れ場を利用して、筆者らが考案した改良濃度フラックス法⁹⁾に基づき、部位別の飛来塩分量を算出した。この方法は式(1)で表され、刻み時間 Δt を10分間とし、各10分間で大気中塩分濃度と風速・風向及び定常流れ場を参照しつつ、ガーゼへの付着塩分量 Q [mg/m²]を決定する。ここで利用するWRFの計算結果は、化学モデルとしてMADE/SORGAMを採用し、かつ湿性沈着を考慮したものである。

$$Q = C(V_n + V_g \cos \theta) \Delta t + C \int_0^{\Delta t} \sqrt{\frac{D}{\pi}} dt \quad (1)$$

C : 大気中塩分濃度 [mg/m³], V_n : 壁面直角方向風速成分 [m/s], V_g : 海塩粒子の終端速度 [m/s], θ : 部材の水平面に対する傾斜角, D : 空気の拡散係数 (1.5×10^{-5} m²/s).

ここで、大気中塩分濃度 C は部位によらずWRFで得られた値に等しいとした。なお、今回は全ての部位が鉛直面のため、部材傾斜角 θ は90度で一定である。また、壁面への付着の際には当該面から35 mm離れた地点の壁面直角方向風速を用いて衝突濃度フラックスを評価するが、ここではガーゼというネット状の物体への付着を考えるため、暫定的にガーゼ位置での風速を用いることにした。この妥当性は別途検証が必要である。また、ガーゼの塩分捕集効率についても併せて議論が必要である^{27)~29)}。

図-14に計算結果を mdd 値で示す。比較対象は岩崎らがガーゼ法で算出した2006年9月15日～2007年9月21日までの平均値³⁾である。ガーゼ法の規格に従い、計算値も200 cm² = 2 dm²当たりの塩分量とした。図中の横軸は計測位

図-14 岩崎ら³⁾による飛来塩分計測値と本報での推定値

置を示し、図-9に対応する。WRFで過大評価された風速が影響し塩分量も大きくなったと考えられるが、風下側の桁周り(部位6以降)では塩分分布の特徴をとらえている。一方で、風上側の桁回りでは大小の傾向に観測値との違いが見られる。また、壁面近傍風速値の小さい部位3及び部位6では、塩分量も周囲の部位に比べてかなり小さい。本手法においては、部位同士の飛来塩分量の傾向には定常流れ場計算の結果が影響しやすいといえる。したがって、予測精度改善に際しては、定常流れ場の計算精度について、周辺地形の再現度や季節ごとの飛落川の水位変動による桁間流れの違い、さらには特に桁間において流れの非定常性について検討が必要と考えられる。塩分量のオーダーの改善については、WRFそのものの精度向上を図るほか、上記とも関連して流れ場計算における周辺地形の再現度などが挙げられる。また、全体的に計算値は観測値に対して過大評価である。この原因として、上述のようにWRFによる風速値の過大評価が考えられるが、さらに観測に用いるガーゼの塩分捕集効率が挙げられる。すなわち、塩分を含んだ接近風の一部分がガーゼの網目を通過してしまうために、ガーゼ位置に到達した塩分の全てを捕集することはできないと考えられる。数値計算によってガーゼで捕集された塩分量を精度よく再現するためには、ガーゼの塩分捕集効率について、実験や計算に基づき検討を行い、計算で得られたガーゼ捕集塩分量を補正することが求められる。

本論文に示す手法によって、予測精度において改善の余地は残るが、観測をせずとも任意地点の橋梁に対して部位別の飛来塩分量を予測することができた。上述した課題に取り組むことで、精度的にも実務に耐えうる段階に至ると考えられる。

6. 結論

本報では高精度かつ観測やモニタリングを必要としな

い、任意地点の橋梁部位別の定量的な飛来塩分量推定を目指し検討を行った。以下にその概要を示すと共に結論を述べる。

- 領域気象モデル WRF 及びその Chemistry パッケージを用いて、複数地点で気象要素及び大気中塩分濃度を算出し、観測値と比較した。季節ごとの変動は概ね再現され、地点によっては風速や風向の生起頻度もよく一致した。一方で、WRF の計算では、気象データや土地利用情報として一定の精度を持つデータを与える必要性や、パラメータの組み合わせをもって精度検証を行う必要性を示した。
- 対象橋梁とその周辺地形を簡易的にモデル化し、接近風向別の定常流れ場を算出した。ベクトル図や壁面近傍の風速値から、桁回りの流れの様子は接近風向によって異なることを示した。また、いずれの接近風向でも循環流れの形成によって壁面直角方向風速値が小さくなる部位が存在することを確認した。したがって、周辺地形のモデル化精度と流れの非定常性の両面で、部位別の飛来塩分量への寄与を検討する必要がある。
- WRF による気象要素・大気中塩分濃度と接近風向別定常流れ場を利用し、筆者らの提案手法に基づき、対象橋梁の部位別飛来塩分量を推定した。ガーゼ法による観測値と比較すると、下流側の桁回りの塩分量の傾向を再現するなど、一定の成果を見せている。WRF による計算、定常流れ場の計算、ガーゼの塩分捕集効率、提案する推定手法のそれぞれで改善及び発展が必要であるが、本手法によって任意地点の橋梁に対して部位別の定量的な飛来塩分量推定が実現できると考えている。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費15H02261及び16J09269、一般財団法人防災研究協会の助成を受けた。WRFの計算に際し京都大学防災研究所の森信人准教授にご教授いただいた。本研究の一部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利用した。

参考文献

- 1) 国土交通省：予防保全の取り組み, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf, 2013.
- 2) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧, pp.1-10-1-11, 2005.
- 3) 岩崎英治, 鹿毛勇, 加藤真志, 中西克佳, 丹羽秀聡：耐候性鋼橋梁の断面部位別の腐食特性とその評価に関する一考察, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 2, pp. 297-311, 2010.
- 4) 小畑誠, 李国泰, 渡辺泰成, 後藤芳顕：局所および広域解析を組み合わせた付着塩分量推定法に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 58A, pp. 668-678, 2012.
- 5) Hasebe, H., Sakakibara, Y., Yamaya, K., Sone, R., Haruki,

- Y. and Nomura, T.: Wind tunnel experiment to estimate the amount of airborne sea salt adhering to the surface of a bridge, *Proc. of 14th Int. Conf. on Wind Eng.*, ID_2336, USB flush driver, Porto Alegre, Brazil, 22-26 June, 2015.
- 6) 野口恭平, 姜詠, 奥田慧, 倉田直弥, 白土博通, 八木知己, 森下尊久, 田中雄三: 海塩粒子付着量の予測精度向上に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 585-595, 2013.
- 7) 野口恭平, 金城佑紀, 姜詠, 白土博通, 八木知己, 服部洋, 田中雄三: 海塩粒子の物理挙動と風況に基づく付着塩分量の評価, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 613-621, 2014.
- 8) 金城佑紀, 野口恭平, 秦聡一郎, 姜詠, 白土博通, 八木知己, 服部洋: 数値解析による構造物表面への飛来塩分付着量の予測, 第 23 回風工学シンポジウム論文集, pp. 511-516, 2014.
- 9) 野口恭平, 秦聡一郎, 金城佑紀, 白土博通, 八木知己, 服部洋: 橋梁表面に付着する部位別塩分量の推定(その 2)ー付着量の長期予測に向けてー, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, I-243, 2014.
- 10) 日本風工学会: 風工学ハンドブック, pp. 50-53, 朝倉書店, 2007.
- 11) WRF, <http://www.wrf-model.org/index.php>, 2015.
- 12) 気象庁: 地域気象観測所一覧, http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf, 2015.
気象庁: 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2015.
- 13) WRF working group 11 atmospheric chemistry, <http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/>, 2015.
- 14) 全国環境研協議会酸性雨調査研究部会: 全国環境研究会誌, Vol. 31, No. 3, pp. 118-186, 2006, <http://db.cger.nies.go.jp/dataset/acidrain/ja/04/>
全国環境研協議会酸性雨調査研究部会: 全国環境研究会誌, Vol. 32, No. 3, pp. 78-152, 2007, <http://db.cger.nies.go.jp/dataset/acidrain/ja/04/>
- 15) 国土地理院: 全国ランドサットモザイク画像, <http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>, 2015. (データソース: Landsat 8 画像(GSI, TSIC, GEO Grid/AIST), Landsat 8 画像(courtesy of the U.S. Geological Survey), 海底地形(GEBCO))
- 16) NCEP FNL Operation Model Global Tropospheric Analysis, <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>, 2015.
- 17) USGS Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30), <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>, 2015.
- 18) WRF-Chem Tutorial Web page, <https://ruc.noaa.gov/wrf/wrf-chem/Tutorial.html>, 2017.
- 19) 小畑誠, 村上太郎: 腐食環境評価のための浮遊塩分量調査とその数値予測について, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 596-604, 2014.
- 20) 秋本祐子, 日下博幸: 入力データおよび地上面パラメータの変化に対する領域気象モデル WRF の感度実験ー夏季晴天日の関東平野を対象としてー, 地理学評論, Vol. 88, No. 3, pp. 324-340, 2010.
- 21) 国土地理院国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/>, 2015.
- 22) 金洙列, 松浦智典, 松見吉晴, Tracey H. Tom, 安田誠宏, 間瀬肇, 西野博史: 山陰沿岸気象予測へのメソ気象モデル WRF のパラメータ感度分析に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp.I_1236-I_1240, 2012.
- 23) 一般財団法人気象業務支援センター, メソ数値予報モデル GPV (MSM), <http://www.jmbc.or.jp/hp/online/fonline0c.html>, 2015.
- 24) 義江龍一郎, 三浦翔, 望月政法: 風環境評価のための標準上空風データの整備に向けた領域気象モデル WRF の検証, 日本風工学会論文集, 第 40 巻, 第 4 号 (通算第 145 号), pp. 113-122, 2015.
- 25) 野口泉, 大塚英幸, 秋山雅行, 酒井茂克, 加藤拓紀: フィルターパック法による亜硝酸ガス濃度の測定, 大気環境学会誌, 第 42 巻, 第 3 号, pp. 162-174, 2007.
- 26) OpenCFD Ltd (ESI Group), OpenFOAM, <http://www.openfoam.com/>, 2015.
- 27) 中村英二郎, 安里昌樹, 羽地龍志: 環境に適した製品創生のための腐食環境予測・評価システムの開発(その 1)ー腐食環境因子測定についてー, 沖縄県工業技術センター研究報告書, 第 9 号, pp. 61-70, 2007.
- 28) 武邊勝道, 大屋誠, 安達良, 大田隼也, 落部圭史, 梶谷慧, 北川直樹, 立花裕介, 原貴之: 土研式タンク法とドライガーゼ法で得られる飛来塩分量の比較, *Zairyo-to-Kankyo*, Vol. 57, pp. 500-505, 2008.
- 29) 岩崎英治, 小島靖弘, 高津惣太, 長井正嗣: 塩分捕集器具の設置方向と飛来塩分の関係, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 616-629, 2010.

(2016. 8. 18 受付)

PREDICTION OF SALT DEPOSITION ON EACH MEMBER OF BRIDGE AT ARBITRARY LOCATION

Kyohei NOGUCHI, Yuki KANESHIRO, Soichiro HATA,
Hiromichi SHIRATO, Tomomi YAGI and Katsuyoshi NAKANISHI

It is important to evaluate the amount of airborne sea salt adhered to each member of a bridge accurately and quantitatively for effective maintenance and management, because airborne sea salt have large influence on their durability especially at coastal regions. On the other hand, local governments have to maintenance and manage many bridges simultaneously. Therefore, it is preferable to obtain corrosion environment of each bridge without any on-site observation and/or monitoring to conserve their budget.

First, in this paper, the authors calculated wind speed, wind direction and airborne sea salt concentrations using the meso-scale atmospheric model WRF. Second, the study bridge and the simplified surrounding topography were realized in computational domains to calculate steady flows in each approaching wind direction using the CFD technique. Finally, in addition to these results, on the basis of the proposed quantitative evaluation method of the amount of airborne sea salt on a surface, the authors evaluated the salinity amount in vicinity to each member of the study bridge. The authors achieved a certain result to regard with the WRF simulation and the evaluation of the salt amount, and expect that more accurate estimation will be realized with some improvements.