

耐候性鋼橋梁の維持管理の効率化を目的とした 腐食環境予測の高度化

松江工業高等専門学校環境・建設工学科 准教授 広瀬 望

概要：

本研究の概要は 1) 現地観測による腐食環境モニタリングと 2) 数値モデルによる腐食環境予測の二つで構成される。まず、2010 年 3 月から 8 月までの期間で耐候性鋼橋梁建設地において、詳細な現地観測を行った。具体的には、ドライガーゼ法による飛来塩分量、大気中の塩分(Cl⁻イオン)濃度、付着塩分量および気象要素(風向・風速、気温、湿度)を観測した。その結果に基づいて、大気中の塩分(Cl⁻イオン)濃度、付着塩分量、飛来塩分量の物理的な関係を明らかにした。次に、メソスケール気候モデルに大気化学プロセスを組み込んだWRF-Chemを用いた長期の数値実験を行った。その結果、モデルで計算された海塩粒子濃度の季節変化の傾向は飛来塩分量の観測結果とよく一致するものの、海塩粒子濃度の値はJEANETの観測結果と比較し、過大評価であることがわかった。

キーワード: 維持管理, 耐候性鋼橋梁, 腐食環境評価, 現地観測, メソスケール気候モデル

1. 緒言

社会基盤構造物の長寿命化とミニマムメンテナンスの実現には、新しい設計法の課題・体系化に対応するとともに、新形式構造・新規材料の適用により、低コスト化や高耐久性を積極的に推進する必要がある。

耐候性鋼材は表面に緻密な保護性さびを形成し、腐食の進行を抑制するため、構造物の長寿命化やライフサイクルコスト低減に有効である。そのため、鋼橋における耐候性鋼橋梁の比率は一貫して増加傾向である¹⁾。(藤井ら, 2007)。しかしながら、塩分が多く飛来する環境や湿潤状態が継続する環境では、優れた防食性能を發揮できない問題点がある。

(社)日本道路協会 道路橋示方書(2002)では、耐候性鋼材を無塗装で使用できる地域を離岸距離で規定している。しかしながら、実橋梁における腐食の実態調査では、必ずしも離岸距離に応じていないことが明らかとなっている²⁾。そのため、架橋地点における飛来塩分量や気象要素(気温、湿度、風速・風向)を詳細に観測するとともに、鋼材の初年腐食減耗量を計測し、100年後の腐食減耗量を推定することによって、適切な鋼材選定を行うことが推奨されている³⁾。

飛来塩分量は腐食環境を決定づける因子の一つである。海岸部では、波浪によって上空に巻き上げられた海塩粒子が内陸部に輸送される。海塩粒子の輸送量は気象状況

によって大きく変化することから、橋梁の腐食環境を正しく計測するためには、飛来塩分量を1年以上継続して、モニタリングする必要がある。

飛来塩分量を正しく、より簡易に計測するために、土研式やドライガーゼ法を用いた観測手法が検討されている^{4), 5)}。一方、飛来塩分量の予測に関しては、数値モデルによる橋梁の各部位に付着する飛来塩分量予測が行われている^{6), 7)}。さらに、大気化学プロセスが組み込まれた領域気候モデル(WRF/Chem)を適用し、より広域の空間スケールにおける大気中の塩分濃度を予測することができる⁸⁾。

したがって、大気中の塩分濃度、ドライガーゼ法で観測される飛来塩分量、鋼材表面に付着する塩分量(付着塩分量)の三者の関係を明らかにできれば、橋梁周辺における大気中の塩分濃度の予測結果に基づいて、橋梁内部に付着する塩分量を把握すること可能となり、橋梁の腐食環境をより詳細に把握できる^{9), 10), 11)}。

そこで、本研究では、1) 橋梁周辺における詳細な現地観測と 2) 数値モデルを用いたシミュレーションを組み合わせ、腐食環境予測のための基礎的検討を行うことを目的とする。次章では、研究戦略の詳細を記述した。

2. 研究戦略

図-1に本研究の枠組みを示した。本研究は①現地観測に基づく腐食環境モニタリング、②領域気候モデルに用

いた腐食環境予測, ③現地観測とモデルの計算結果を組み合わせた腐食減耗量の広域推定の3つで構成される。特に, 腐食環境予測の広域化には, 観測結果に基づいて, ①と②をつなぐ物理メカニズムを明らかにすることが重要である。

そこで, ①では, 詳細な現地観測を行い, 大気中の塩分濃度, 飛来塩分量, 付着塩分量の三者の関係を明らかにする。一方, ②においては, 数値モデルを用いて, 海塩粒子輸送の季節変化の再現を試みる。①と②の結果を比較することにより, 数値モデルを用いた腐食環境評価の広域化の可能性を議論する。

本研究は耐候性鋼橋梁の腐食環境を広域で推定するための基礎研究として, 将来の社会基盤構造物の整備・維持管理を戦略的に進めるための資料として, 有用である。

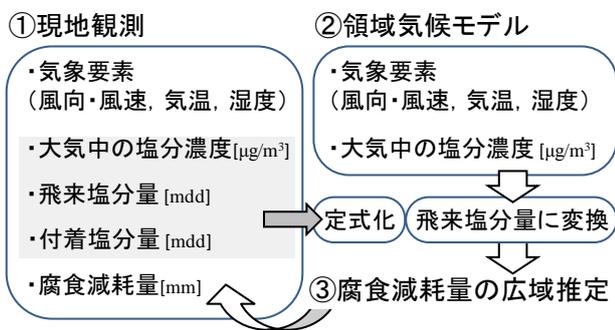


図-1 本研究の枠組み

3. 大気中の塩分濃度と飛来塩分量の関係

橋梁建設地点の腐食環境を把握するために, ガーゼ法などにより飛来塩分量 [$\text{mdd} (\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day})$] を計測する。腐食環境を予測するためには, 沿岸部から輸送される海塩粒子濃度 ($[\mu\text{g}/\text{m}^3]$) と飛来塩分量との関係を明らかにする必要がある。具体的には, 海岸部では, 波浪による巻き上げで, 大気中の海塩粒子濃度が増加し, 大陸からの季節風によって内陸部に輸送される。

この物理プロセスはハワイでの航空機観測で確認されている。高度 1km程度までの海塩粒子濃度の鉛直プロファイルを計測した結果, 海塩粒子濃度は高度とともに地上の半分程度まで減少すること, 上層と下層の海塩粒子濃度の変化は対応することがわかっている¹²⁾。

紀平らは飛来塩分量が大気中の海塩粒子濃度と風速に依存することに着目し, 式(1)のように定式化した¹³⁾。

$$C = 8.64 \times 10^5 \cdot \gamma_x \cdot c \cdot |u_x| \quad (1)$$

ここで, C は飛来塩分量, γ_x は x 軸方向の捕捉率, c は大気中の海塩粒子濃度, u_x は x 軸方向の風速であり, x 軸は観測面に対して垂直に定義される。したがって, 捕捉率 γ_x が分かれば, 大気中の塩分濃度の予測結果に基づき, 飛来塩分量の空間分布を予測することが可能となる。

3. 野外観測による腐食環境の把握

(1) 野外観測の概略

島根県松江市の橋梁建設地点 (図-1) において, 高さ 8m の橋を仮設し, 標準百葉箱を設置した。その中で, 気中塩分計の吸気口を取り付け, 大気中の塩分濃度を計測するとともに, 10cm 四方のガーゼを設置し, ドライガーゼ法による飛来塩分量を観測する。さらに, 百葉箱内に ACM センサー及び温湿度計を設置し, 腐食状況および温湿度を測定した。一方, 百葉箱の外側では, 風向・風速計を設置し, 架橋地点の風況を詳細に計測した。さらに, ACM センサーの付着物を検討するため, 拭き取り調査を行った。具体的には, 2 枚のうち 1 枚の ACM センサーおよび百葉箱内に水平に設置したステンレス鋼板 (縦 0.15m×0.25m) の表面全体をガーゼでの拭き取りにより採取した。採取した塩分をイオン交換水に溶かして, その Cl⁻濃度をイオンクロマトグラフィにより分析し, 付着塩分量 (NaCl 量) に換算した。観測期間は 2010 年 3 月 18 日から 2010 年 7 月 18 日までの 4 ヶ月間である。観測は飛来塩分量に関しては月 1 回である。一方, 大気中の塩分濃度と付着塩分量に関しては, 1 週間に 1 回行った。

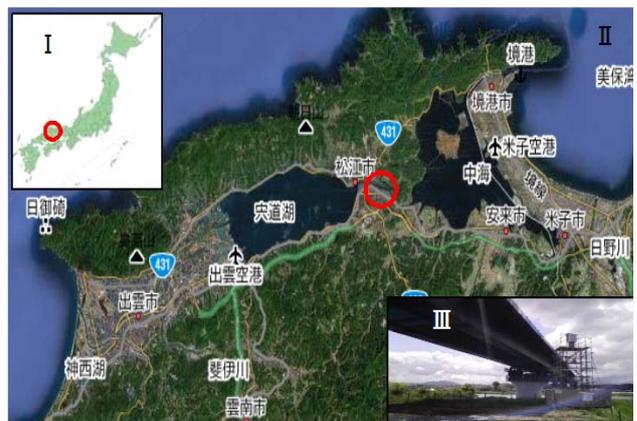


図-1 観測対象地点

(I : 日本地図, II : 島根県東部, III : 橋梁建設地点)

(2) 大気中の塩分濃度の測定

本研究では, (株)電力テクノシステムズによって研究開発された簡易型気中塩分モニタリング装置 (気中塩分計) を用いて, 大気中の塩分濃度を測定した。循環ミキシング方式を採用した気中塩分計には, 吸気管, 吸水管, 捕集管, 排気管の 4 種類の管がある。吸気管で吸い込まれた空気はアクリルボトル製の捕集液槽から吸水管で吸い上げたイオン交換水を噴霧し, 空気中に存在する浮遊物を水に溶かす。その水と空気は捕集管を経て, 捕集液槽内のイオン交換水に捕集される。浮遊物を溶か

し終わった空気は排気管を通して排気される装置である。吸気量は 10L/分である。

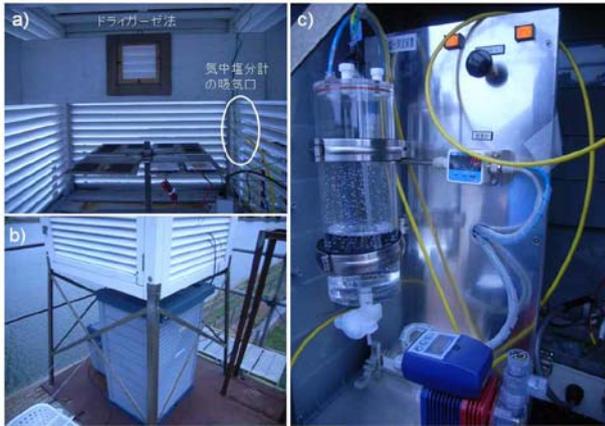


図-2 橋梁建設地点近傍の檜上での観測状況。a)百葉箱内の気中塩分計の吸気口の位置。b)気中塩分計本体を納めた倉庫の位置。c)気中塩分計の本体。

また、大気吸引中は同様の作業を繰り返される。百葉箱内に気中塩分計の吸気口を設置した。また、回収液は捕集管を通じて、気中塩分計の捕集液槽に貯水され、約

一週間ごとに捕集液槽内の捕集液を回収した。回収した捕集液の Cl⁻濃度をイオンクロマトグラフィで分析し、吸気量と積算時間から吸気した体積を求め、大気中の塩分濃度に換算した。

4. 観測結果

(1) 大気中の塩分濃度と上層大気との関係

図-3aに計測した大気中の塩分(Cl⁻イオン)濃度と松江気象台の高層気象観測で得られた 500hPa高度場の風速を示した。大気中の塩分濃度は1週間毎の平均濃度である。まず、500hPa高度場の風速は3月から5月にかけて弱化する。一方、大気中の塩分濃度も3月から5月にかけて減少し、上層風の変化とよく一致する。

(2) 付着塩分量と地上風速との関係

図-3bに付着塩分量と地上風速との関係を示した。点線と実線はそれぞれ10分毎の地上風速と1日毎の移動平均値である。付着塩分量は地上風速の変化とよく一致する。特に、卓越風が多いときに、付着塩分量が増加することがわかった(図-3)。

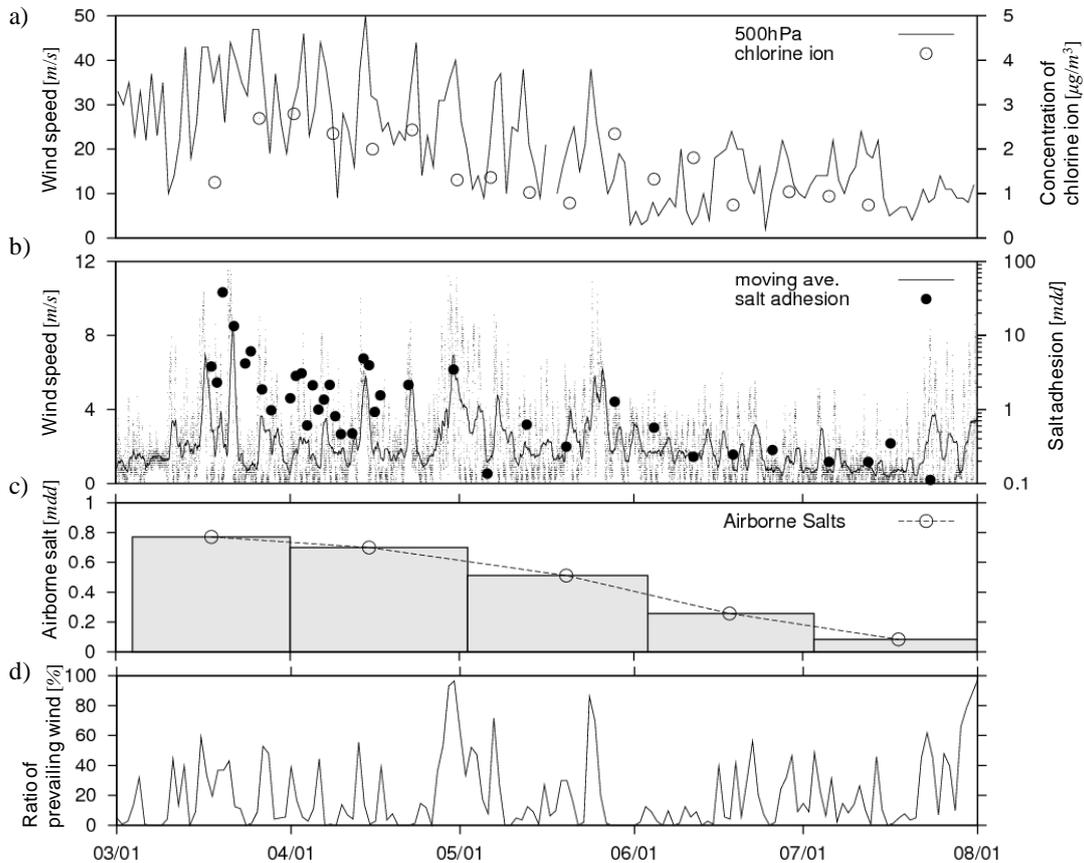


図-3 a)上層風(500hPa高度場)と気中塩分計による大気中の塩分濃度、b)地上風速と付着塩分量、c)ガゼ法による飛来塩分量の観測結果およびd)地上風における卓越風向の発生割合。

(3) 大気中の塩分濃度, 付着塩分量, 飛来塩分量の関係

ドライガゼ法で計測した飛来塩分量は3月から8月にかけて減少していく(図-3c)。これは、大気中の塩分濃度と付着塩分量の傾向を一致する。特に、付着塩分量は飛来塩分量と明瞭な正の相関があり、付着塩分量の2割程度が飛来塩分量として観測されることがわかった。これは、付着塩分量は鋼材の「濡れ」に関する。鋼材の「濡れ」は気温・湿度の影響を直接受けるため、ガゼ法の飛来塩分量より小さくなると考えられる。次に、大気中の塩分濃度と地上風を用いて、飛来塩分量に換算し、捕捉率の推定を試みた。しかし、飛来塩分の観測結果と推定結果の相関性が低く、今後の課題となった。

さらに、(1)と(2)の結果より、飛来塩分量が表す物理プロセスを検討する。強い上層風によって内陸部に輸送された大気中のCl⁻イオンは地上風の影響を受け、鋼材表面に付着する。ガゼ法による飛来塩分量はこのプロセスを観測している。

5. メソスケール気象モデルを用いた数値実験

(1) 数値実験の概要

本研究では、メソスケール気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting Model) に精緻な大気化学プロセスが組み込まれた WRF-Chem モデルを用いて、海塩粒子濃度の広域予測を行った。WRF は NCAR と The Pennsylvania State University で開発された非静力学モデル MM5 の次世代モデルである。モデルのソースコードが公開されている。このモデルの特徴は3次精度のロング・クッタスキームや5次精度の風上差分など高精度な計算スキームを採用している点である。また、最新の物理モデルやデータ同化システムが採用でき、局地的な気象現象の予測および再現に適している。

WRF-Chem はエアロゾルの直接的および間接的効果を表現することができる。WRF-Chem には、エアロゾルの輸送プロセスを記述したモジュールが複数考慮されており、モデルユーザーが適切なスキームを選択しなければならない。利用可能なエアロゾルの輸送スキームは、a) Modal approach (MADE/SORGAM), b) Sectional approach (MOSAIC), c) GOCART approach の3つに大別できる。

a)はエアロゾルの粒径分布を複数の関数形で近似した方法である。b)はエアロゾルの粒径分布を4つに区分し、それぞれの代表粒径に着目して、エアロゾルの輸送量を求める方法である。a), b)両方とも詳細な化学組成の把握が可能である。一方、c)はb)のapproachと同様の方法で計算するものの、海塩粒子自体の輸送を考えるため、詳細な化学組成を求めることができない¹⁴⁾。

そこで、本研究では、よりシンプルなc)の方法を適用し、海塩粒子輸送の再現を試みた。なお、dust emission などの他の大気化学プロセスを考慮していない。

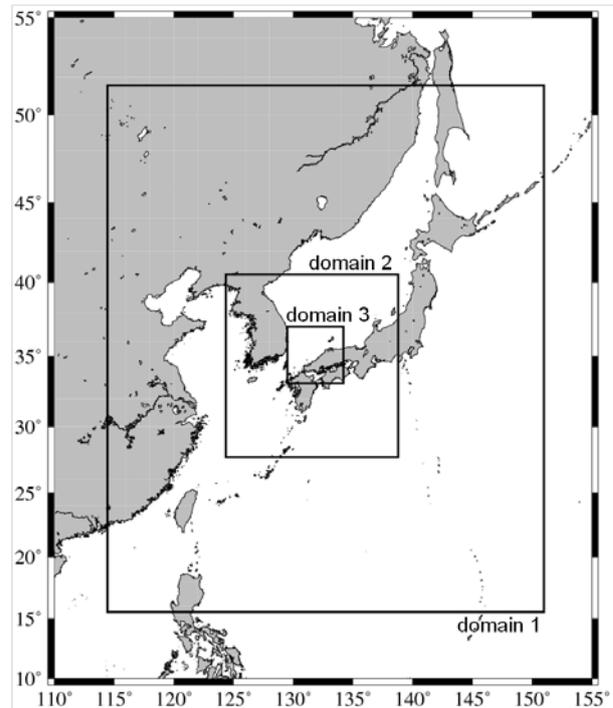


図-3 本研究で対象とした計算領域

表-1 本研究で使用したモデルオプション一覧

境界層乱流	Monin-Obukhov scheme, YSU scheme
陸面過程スキーム	Unified Noah land-surface model
雲微物理スキーム	WSM 3-class simple ice scheme
積雲 パラメタリゼーション	Kain-Fritsch (new Eta) scheme (domain1, domain2), None (domain3)
大気放射スキーム	RRTM scheme(longwave), Dudhia scheme(shortwave)
大気化学スキーム	GOCART simple aerosol scheme GOCART sea salt emissions

(2) 入力データと境界条件

本研究では、モデルの入力データとして、アメリカ環境予測センター (NCEP, National Centers for Environmental Prediction) で公開されている NCEP Final Analysis (FNL from GFS) を使用した。GFS-FNL は空間解像度 1 度、時間間隔 6 時間、鉛直 27 層の全球データである。また、モデルの境界条である地形や土地利用などの基盤データは空間解像度 30 秒間隔で与えられている。

本研究で使用した計算領域を図-4に示した. 図のように 3 重ネスティング(2-way)で計算を行った. 第1領域(最外側の領域)は格子点数70×70で水平格子間隔60km, 第2領域(第1領域の内側)は73×73で水平格子点間隔20km, 第3領域(第2領域の内側)は格子点数111×111で水平格子点間隔4kmである. 順に domain1, domain2, domain3 と呼ぶ. いずれの領域も鉛直層数レベルは地表から50hPa面までの28層とした. 計算対象期間は2009年8月から2010年7月までの1年間である.

本研究で使用した雲微物理, 地表面過程, 大気放射過程, 大気境界層に対する物理過程, 陸面過程および大気化学過程の各スキームを表1にまとめた. 各計算領域(図-4)において, 選択した各物理スキームは異なる. 具体的には, domain 1, domain 2は雲物理を用いて積雲を陽に表現できない格子スケールであるため, 積雲パラメタリゼーションを併用した. 一方, domain3は雲物理スキームのみを採用した. また, 本研究では用いたネスティングは双方向である. 親領域で先に計算した結果を子領域の値として与え, 時間ステップにおいて領域間で計算結果を受け渡す手法を用いた. 各領域の時間ステップは

domain 1が240, domain 2が80秒, domain 3が16秒と設定した.

(2) 海塩粒子輸送の季節変化

図-4に領域domain3における海塩粒子濃度の季節変化を示した. 計算対象期間(2009年8月～2010年7月)における最下層の海塩粒子濃度 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ と風向・風速の月平均値を求め, 図示した.

図のように海塩粒子濃度の季節変化が明瞭である. 8月, 9月は内陸部の海塩粒子濃度は低く, 10月から沿岸部の海塩粒子が内陸部に輸送される海塩粒子が増加し, 12月, 1月の冬期にピークを迎え, 3月まで継続する. 春先から弱体化し, 夏に向けて徐々に減少する. これは上層風(500hPa, 200hPa高度場)とよく一致する. 上層風も10月から西風が強まり, 12月, 1月にピークを迎え, 春先に弱体化する.

このように, モデルの計算結果から中国地方全体の海塩粒子濃度の季節変化がわかった. しかしながら, 大気中の塩分濃度の観測結果と比較すると, モデルの計算結果は過大評価であることがわかった.

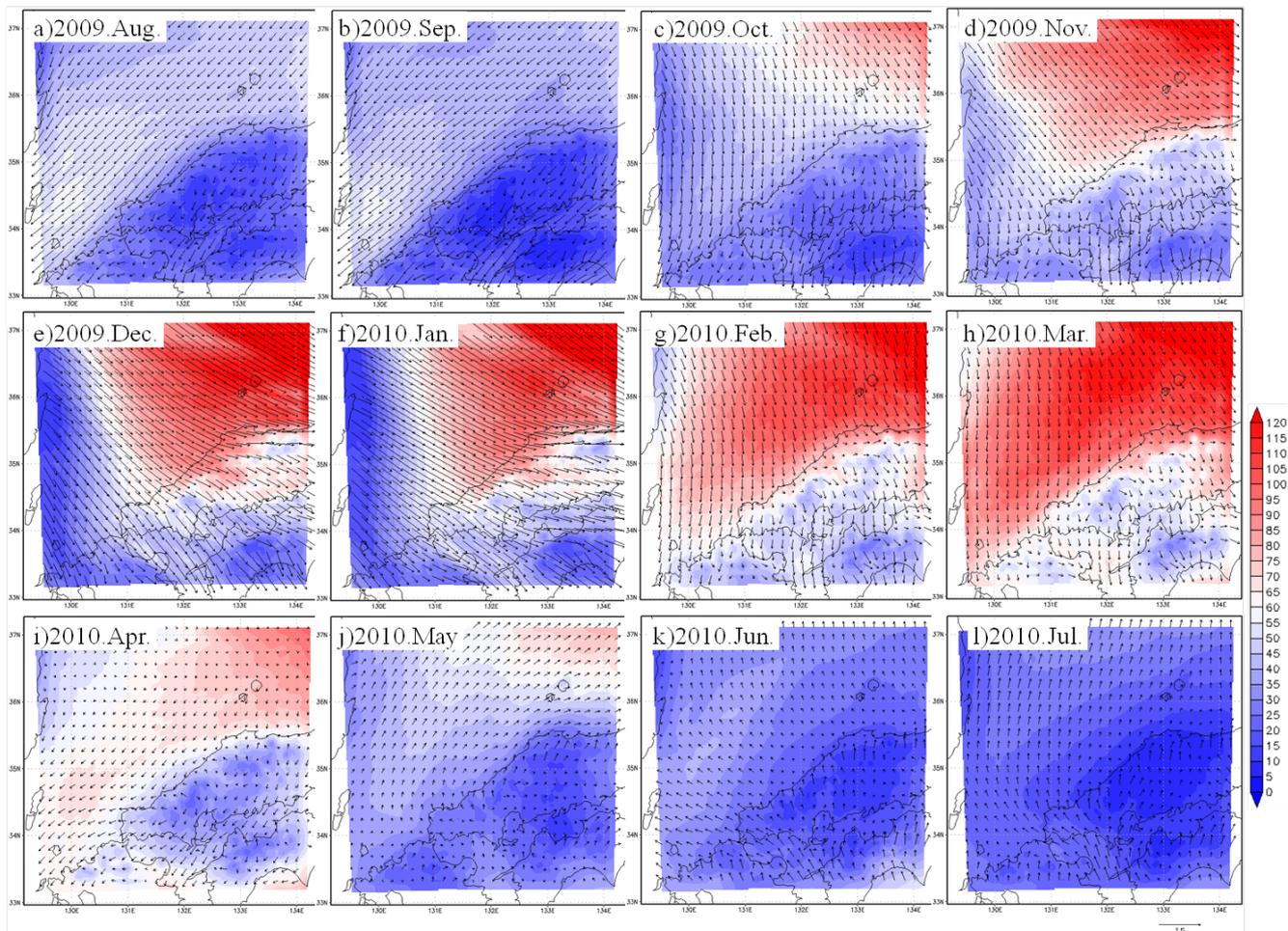


図-4 2009年8月～2010年7月における対象領域 (domain3) の海塩粒子濃度 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ の季節変化. 最下層の風速場(ベクトル)と海塩粒子濃度(濃淡)の各月の平均値を求め, 図示した.

(3) 観測された飛来塩分量との比較

図-5 に計算対象期間における海塩粒子濃度とガーゼ法で求めた飛来塩分量を比較した。図-4 に示した domain3 の計算結果より対象地点に最も近傍のグリッドにおける海塩粒子濃度に着目し、図化した。なお、飛来塩分量は槽上 8m での観測結果である。一方、本研究で用いたモデルの最下層は 50m である。

図に示したように、両者の季節変化はよく一致する。そのため、モデルの計算結果から飛来塩分量を推定することが可能である。しかしながら、島根県益田市蟠竜湖で行われている EANET の観測結果と比較すると、モデルで計算された海塩粒子濃度は過大評価であることがわかった。

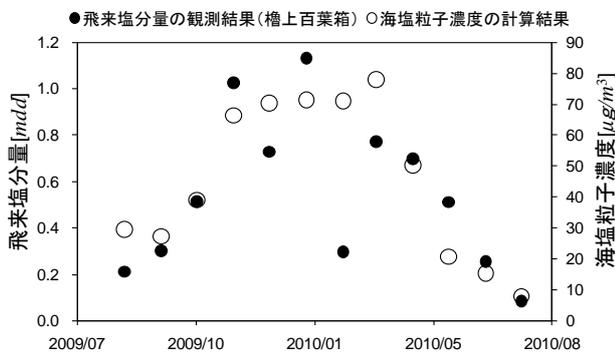


図-5 飛来塩分量と海塩粒子の計算結果との比較

7. まとめと今後の課題

本研究では、腐食環境予測のための基礎的検討として、現地観測による腐食環境モニタリングと数値モデルによる長期の数値実験を行った。

現地観測に基づき、ドライガーゼ法による飛来塩分量、大気中の塩分(Cl⁻イオン)濃度、付着塩分量の物理的な関係を検討した結果、三者は正の相関を示すものの、風向・風速の影響を受け、バラツキが大きくなることがわかった。また、WRF-Chem を用いて長期の数値実験を行った。その結果、モデルで計算された海塩粒子濃度の季節変化の傾向は飛来塩分量の観測結果とよく一致するものの、海塩粒子濃度の値は EANET の観測結果と比較し、過大評価であることがわかった。

今後の課題は海塩粒子濃度の予測精度を向上させ、腐食減耗量の広域予測を行う予定である。そのためには、WRF-Chem における各気象要素の再現性を検討するだけでなく、他の大気化学スキームを用いた比較・検討が不可欠である。

謝辞

簡易型気中塩分計の開発に関しては、(株)電力テクノ

システムズ今城氏、眞田氏に多大なご尽力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤井康盛, 田中睦人, 紀平寛, 松岡和巳, 耐候性鋼橋梁の防食リスクマネジメント技術の開発, 新日鉄技報, Vol.387, pp53-57, 2007.
- 2) 松崎靖彦, 大屋誠, 安食正太, 武邊勝道, 麻生稔彦: 島根県における既設耐候性鋼橋梁の腐食実態, 構造工学論文集, Vol.53A, p.805-816, 2007.
- 3) (社)日本鋼構造協会: 耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防安全, JSSCテクニカルレポート, No.76, 2009.
- 4) 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.
- 5) Masanichi Takebe, Makoto Ohya, Nozomu Hirose, Ryo Adachi, Yu-suke Ago, Koji Doi, Yuzuru Iwatani, Naoki Kitagawa, Yasushi Kimura, Keishi Ochibe, Jun-ya Ota : Difference in precipitation rates of air-borne salts collected by the dry gauze method and the Doken tank method, Corrosion Science, Vol. 52, pp.2928-2935, 2010.
- 6) 伊藤 俊, 岩崎英治, 長井正嗣: 粒状物質の移流拡散による橋梁断面周辺の飛来塩分の数値シミュレーション, 土木学会第 65 回年次学術講演会, I-150, pp.299-300, 2010.
- 7) 岩崎英治, 長井正嗣, 橋梁断面周辺の飛来塩分の推定に関する一検討, 構造工学論文集, Vol.53A, p.739-746, 2007.
- 8) 戸田明良, 李国泰, 小畑誠, 永田和寿: 気象解析プログラムを用いた飛来塩分量予測の適用性に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会, I-152, pp.303-304, 2010.9.
- 9) 木村泰, 広瀬望, 武邊勝道, 大屋誠, 麻生稔彦, 付着塩分量と気象要素に着目した ACM 型腐食センサーの出力電流の応答特性に関する観測的検討, 材料と環境, Vol. 59.No.10, 387-389, 2010.
- 10) 広瀬望, 武邊勝道, 大屋誠, 佐藤誠, 野外観測に基づく飛来塩分量の輸送プロセスに関する基礎的検討, 土木学会中国支部研究発表会, 2011.
- 11) 広瀬望, 武邊勝道, 大屋誠, 佐藤誠, 野外観測に基づく飛来塩分量の輸送プロセスに関する検討, 環境と材料 2011 シンポジウム概要集, 2011.
- 12) Blanchard, D., The vertical distribution of the concentration of sea salt in the marine atmosphere near Hawaii, Tellus, 36B, 118, 1984.
- 13) 紀平寛, 田辺康児, 楠隆, 竹澤博, 安波博道, 田中睦人, 松岡和巳, 原田佳幸: 耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.780, 2005.
- 14) Gong, S., L. A. Barrie, and J.-P. Blanchet: Modeling sea salt aerosols in the atmosphere. 1: Model development. J. Geophys. Res., 102, 3805-3818, 1997