

論文 広領域の風環境の予測技術を利用した構造物近傍の塩害環境作用の予測解析

滝 晴信*1・中村 文則*2・下村 匠*3

要旨: 本研究では、個別の構造物周辺に作用する広領域の風環境条件の予測を行い、それを利用した橋桁近傍の風および飛来塩分の3次元空間での予測解析を実施した。さらに、その結果を既往で報告されている現地観測結果と比較し、その再現性について検討を行った。その結果、領域気象モデルおよび空間補間法の計算結果は、個別の構造物周辺の風況を再現できることが確認され、日本海沿岸の冬季の季節風が卓越する地域においても有効であることが明らかになった。さらに、予測された風速・風向を用いて、構造物近傍の風・飛来塩分の予測解析を実施することで、橋桁近傍の3次元的な風況を再現できることが確認できた。

キーワード: 塩害, 飛来塩分, 塩害環境, 領域気象モデル, 飛来塩分シミュレーション

1. はじめに

沿岸域に位置するコンクリート構造物は、海域からの飛来塩分の作用を受けることで、構造物内部の鉄筋が腐食し、耐力が低下するため問題となる。構造物に作用する塩分量を正確に予測するためには、個別の構造物に作用する飛来塩分量とともに、それを左右する風環境や波浪条件などの環境作用を事前に把握することが重要である。

既往研究では、当真ら¹⁾は沖縄県において、風況と飛来塩分量の相関に関する研究成果を報告しており、その中で、任意の海岸の風況の推定を行う方法として空間補間法と領域気象モデルを提案している。野口ら²⁾は、任意地点の橋梁に作用する風速・風向を領域気象モデルによって予測する検討を行い、季節ごとの変動、風速および風向の頻度が再現できることを報告している。さらに、橋梁各部位の飛来塩分量の推定を行い、一定の成果を得ている。これらの報告により、領域気象モデルや空間補間法などを用いて広領域の風環境作用を推定し、個別の構造物に作用する塩分量を予測する方法の有効性が示されている。

しかしながら、広領域の風環境から構造物近傍の風および塩分量までを予測解析し、その結果について詳細な部分まで検証した例は少ない。例えば、構造物の各部位近傍では、風と飛来塩分量が3次元的に変化しているが、風と飛来塩分量の両方を3次元空間で検証した報告事例はない。

本研究では、個別の構造物周辺に作用する広領域の風環境条件の予測を行い、それを利用した橋桁近傍の風および飛来塩分の3次元空間での予測解析を実施した。さらに、その結果を既往で報告されている現地観測結果と比較し、その再現性について検討を行った。

2. 検討方法全体の構成と対象場所

2.1 検討全体の構成

本検討全体の構成を図-1に示す。図に示すように、予測計算①で構造物周辺に作用する広領域の風環境(風速・風向)を予測し、その結果を利用して、予測計算②の橋桁近傍の風と飛来塩分の発生・輸送過程について計算を行った。

予測計算①の風速・風向は、2つの方法で計算を行った。1つは、気象学や海岸工学分野で利用されている領域気象モデルWRF(Weather Research & Forecasting Model)³⁾を用いて、数百km~数百m程度の領域を予測する方法である。もう一方は、気象庁が公開しているアメダス⁴⁾の観測結果から個別の地点に作用する風速・風向を予測する方法である。

予測計算②の橋桁近傍に作用する風と飛来塩分は、中村ら⁵⁾が開発した風・波浪条件を考慮して大気中の飛来塩分量を予測できる飛来塩分シミュレーションを用いた。実際の計算では、予測計算①で広領域の風速・風向を計算し、その結果を境界条件として予測計算②に入力している。このような方法で、広領域から橋桁近傍の小領域までを一連で計算できるようにした。

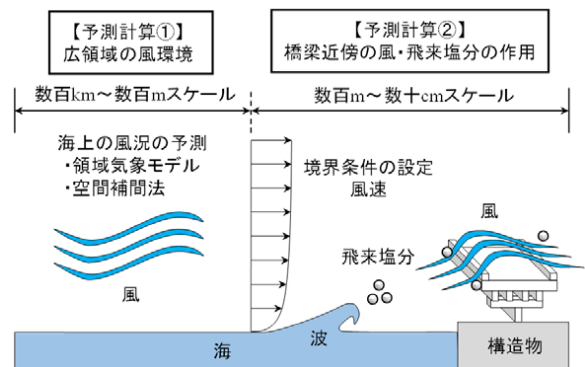


図-1 検討全体の構成

*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 学士(工) (学生会員)

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

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

2.2 対象とした構造物

対象とした構造物は新潟県上越地方の名立川河口部に位置する名立大橋である。この構造物は、橋長 83m、桁幅 30m、桁下高 4m の PC 単純ポストテンションバイプレ方式の構造である。この地点では大原ら⁹⁾の既往研究により飛来塩分の現地調査が実施されており、冬季に大量の飛来塩分が構造物に作用していることが報告されている。また、名立大橋から 50m 程度離れた地点に気象ステーションが設置されており、橋桁に作用している気象条件が測定されている。

3. 広領域の風環境(風速・風向)の予測

3.1 予測方法および計算条件

(1) 領域気象モデルを用いた予測

計算モデルは、領域気象モデル WRF の Advance Research WRF(WRF-ARW, ver. 3.6.1)を用いた。このモデルは、米国気象センター(NCAR)やペンシルバニア州立大学などの組織が共同開発し、一般に公開しているものである。

計算領域は図-2のような範囲であり、対象地点を中心に3つの領域で段階的にネスティングを行った。なお、第1領域は本州全域、第2領域は新潟県全域、第3領域は周辺の半島・島の地形の影響を考慮した計算領域である。表-1に示す物理モデルは野口ら²⁾を参考に選択した。計算に設定した地形データは、米国地質調査所(USGS)の30秒のメッシュ(約1km)である。気象データは、米国環境予測センターの最終客観解析データ(NCEP FNL)を用いた。このデータは、水平格子間隔が1°、時間間隔が6時間である。

領域気象モデルで計算される地表面から高さ10mの位置での風速の結果は、式(1)のようなべき乗則を用いて、各高さの値に変換した。

$$U_K = U_p \left(\frac{z_p}{z_K} \right)^{\alpha_w} \quad (1)$$

ここで、 U_K は推定高度の風速(m/s)、 U_p は基準となる風速(m/s)、 z_p は推定高度(m)、 z_K は基準となる風速の高度(m)、 α_w は係数であり、当真ら¹⁾および建築荷重指針・同解説⁷⁾を参考に障害物が殆どない地域(=0.1)とした。

(2) 空間補間法を用いた予測

気象庁が公開しているアメダスの観測結果から個別の地点での風環境を簡易的に予測する手法として、当真ら¹⁾によって報告されている空間補間法 IDW(Intensive Dimension Weighted)を用いた。この方法は、複数の観測点で測定された風速・風向の観測結果を式(2)および(3)で距離によって重みづけを行う方法である。

$$u(s) = \sum_{i=1}^n \frac{w_i(s)}{\sum_{i=0}^n w_i(s)} u_i \quad (2)$$

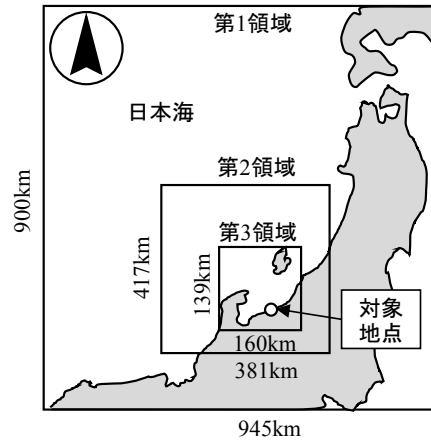


図-2 計算領域(領域気象モデル)

表-1 物理モデル(領域気象モデル)

計算条件			
	第1領域	第2領域	第3領域
水平格子間隔	9km	3km	1km
水平格子数	100×105	139×127	139×160
鉛直層数	32		
初期時刻	(UTC) 00, 06, 12, 18		
物理モデル選択			
雲微物理	WSM3		
放射(短波)	Dudhia		
放射(長波)	RRTM		
大気境界層	MYJ		
地表面過程	Noah-LSM		

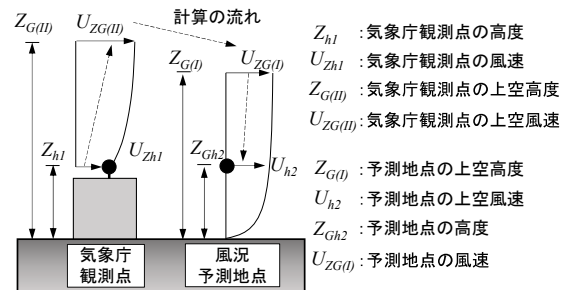


図-3 風速の地表面の粗度および高さの補正

$$w_i(s) = \frac{1}{d(s, s_i)} \quad (3)$$

ここで、 $u(s)$ は任意地点 s の風況の予測値、 $w_i(s)$ は任意地点の重み係数、 u_i は各気象庁観測点の風向・風速値、 $d(s, s_i)$ は任意地点 s から観測点 s_i までの距離である。

この方法で必要となる気象庁の観測結果は、海岸からの距離や高さなどの設置条件がそれぞれ異なる条件で測定されたものである。そのため、設置条件に応じた変換をする必要であり、当真ら¹⁾を参考に、図-3のように風速の変換を行った。図に示すように、観測点で測定された風速 U_{zh1} を式(1)のべき乗則を用いて、陸上の粗度の影響を受けない上空の風速 U_{ZG} に変換し、その値から対象地点の風速を推定した。予測地点では、上風の風速 U_{ZG} からべき乗則の分布に応じて、任意の高さの風速 U_{h2} を算定した。

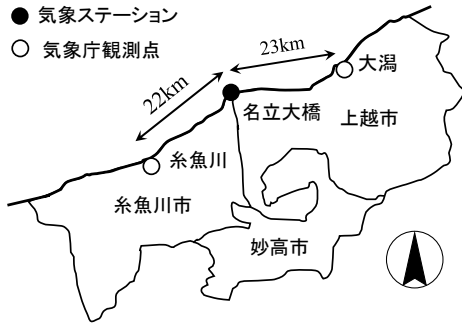


図-4 空間補間法に用いた観測点

対象とした名立大橋周辺で気象庁の観測点は、図-4 の大潟および糸魚川観測点の2つを用いた。図に示すように、各観測点は沿岸域に設置されており、名立大橋の気象ステーションまでの直線距離は大潟および糸魚川でそれぞれ23、22kmである。

3.2 計算ケース

計算ケースは、2017年2月23日および3月3日を再現した2ケースを実施した。この日は、日本海上空で低気圧が発達し、気象・波浪条件が厳しい条件であり、対象とした名立大橋周辺の気象ステーションの測定結果では、2月23日が最大風速18m/s、3月3日が15m/s程度の状況であった。

3.3 計算結果

(1) 風速・風向分布の予測結果

風速・風向分布の予測結果を検証するため、領域気象モデル(WRF)と気象業務技術支援センターが公開しているメソ数値予報モデルGPV(MSM)の計算結果を図-5 および図-6に示した。図は、2017年2月23日15:00の結果である。図に示すとおり、ある時間の瞬間的な値ではあるが、メソ数値予報モデル(GPV)と領域気象モデルの計算結果は、概ね一致している。対象としている名立大橋周辺では、北西から西西北方向の風が卓越していることが確認できる。

(2) 対象地点の風速・風向の計算結果の検証

対象地点の風速・風向の計算結果と気象ステーションによる観測結果を比較した結果を図-7 および図-8に示す。図の下段に示す風向の計算結果は、2つの予測方法で観測結果と概ね一致しており、風向が西となる海側からの風がよく一致している。図-8の3月3日の領域気象モデル(WRF)の風向の計算結果では、3月2日21:00~24:00で観測結果を再現できていないが、これは陸側からの風が卓越しているためである。今回の計算では、領域気象モデルの計算条件となる地表粗度の値を詳細に設定していないため、陸域での風の再現性が低くなったと考えられる。ただし、飛来塩分の解析に必要な海側からの西方向の風は、計算結果と観測結果でよく一致している。

図の上段の風速の計算結果では、実線で示す領域気象モデル

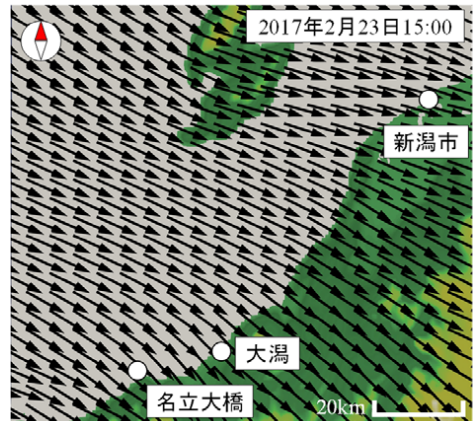


図-5 計算結果(メソ気象予報GPV)

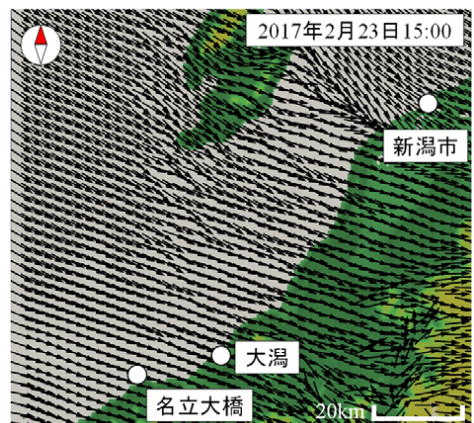


図-6 計算結果(領域気象モデルWRF)

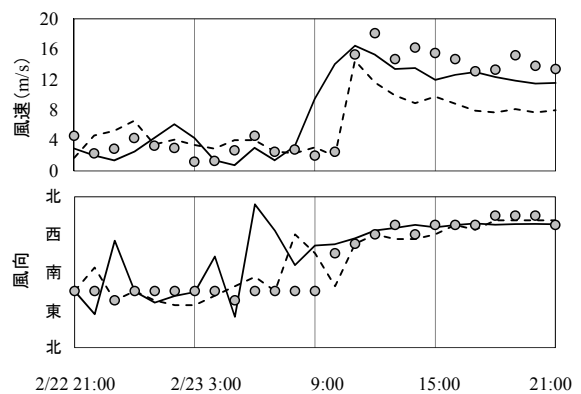


図-7 風速・風向の計算結果(2017年2月22~23日)

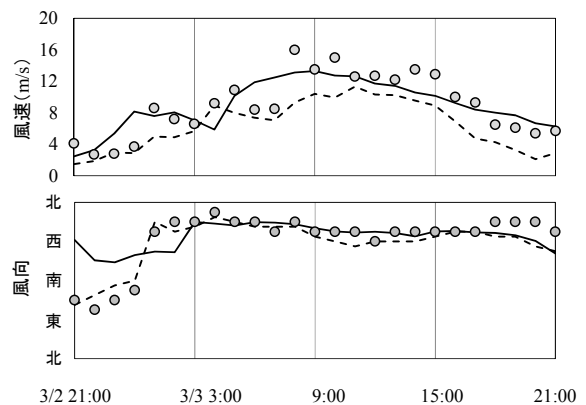


図-8 風速・風向の計算結果(2017年3月2~3日)

ル(WRF)と点線で示す空間補間法(IDW)の予測結果の両方で、各時間の風速の変動傾向を再現できている。ただし、空間補間法の予測結果では、風速が観測結果と比較して、若干過小に示される傾向が見られた。これは、風速の算定に利用した大潟および糸魚川観測点周辺の地形や構造物の影響を受け、風速が減少しているためと考えられる。大潟および糸魚川観測点は、陸側から500~800m程度の位置にあり、海岸から観測点の間に防風林や構造物が多数設置されている。そのため、今回実施した地表面粗度と高さの影響を変換だけでは、風速・風向を十分に表現できていない可能性がある。

以上より、風速が若干過小に示される問題もあるが、領域気象モデルと空間補間法を用いて、対象地点の風速・風向を概ね再現できることが確認された。この結果を利用して、橋桁近傍に作用する風・飛来塩分の境界条件の作成を実施した。

(3) 橋桁近傍に作用する風・飛来塩分の予測解析の境界条件

橋桁近傍に作用する風・飛来塩分の計算に必要な境界条件となる風速の鉛直分布の作成を行った。橋桁近傍の計算では、橋桁から海域沖側の200m地点が風速の入力境界位置となるため、その位置での風速の鉛直分布を作成することとした。

計算領域の境界位置における風速の鉛直分布を作成した結果を図-9に示す。図の値は、式(1)のべき乗則($\alpha_n=0.1$)に従ってモデル化したものである。図に示すように、風速の鉛直分布は、領域気象モデルの予測結果と比較して、空間補間法のほうが、若干小さくなっている。風向は、対象とした橋桁の近傍に設置されている気象ステーションの観測結果と比較して、大きな差が見られなかった。これらの計算結果を、風・飛来塩分の数値シミュレーションの境界条件として入力し、橋桁各部位近傍の予測計算を実施した。

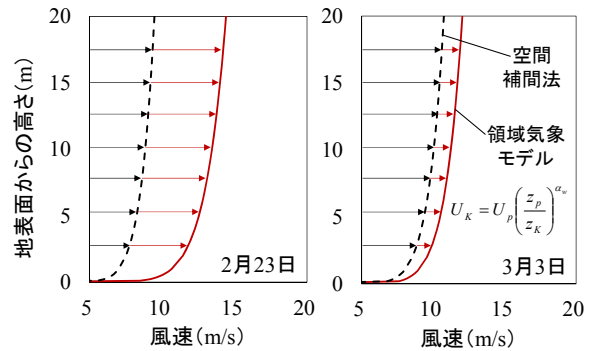


図-9 境界位置での風速の鉛直分布

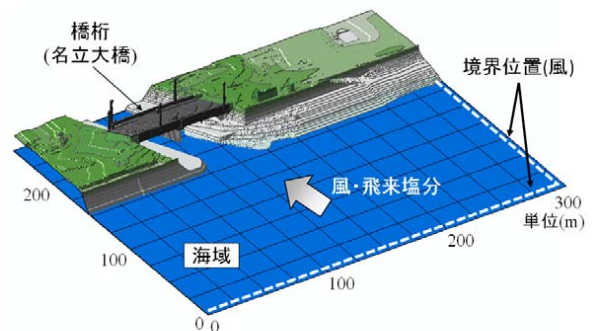


図-10 計算領域(橋桁近傍の風・飛来塩分の予測)

表-2 計算設定パラメータ

項目	計算パラメータ	単位	設定値
計算全体	計算格子間隔(x,y方向)	dx, dy	m 0.50
	計算格子間隔(z方向)	dz	m 0.25
飛来塩分解析	飛来塩分発生量係数	a_g	— 0.145
	発生点での鉛直塩分量減衰係数	A_w	1/m 0.2
	飛来塩分の発生時の沈降速度	w_0	m/s 0.315
	距離による塩分粒子径の減衰係数	β	1/m 0.012
	大気の流れ拡散係数	ν_t	m^2/s 0.0

4. 橋桁近傍に作用する風・飛来塩分の予測

4.1 計算モデル

橋桁近傍に作用する風・飛来塩分の計算は、中村ら⁹⁾の風および波浪条件を考慮した飛来塩分の数値シミュレーションモデルを用いて実施した。このモデルは、波の計算がブシネスク方程式、風の計算がN-S方程式、飛来塩分の輸送過程が移流・拡散方程式に基づいたものであり、差分法を用いて空間および時間を等間隔で離散化している。3次元の地形・構造物形状に応じた風の流れと飛来塩分量を計算することが可能なモデルである。

4.2 計算条件および計算ケース

(1) 計算条件および境界条件

計算領域は、図-10に示すような名立大橋を中心に沿岸方向300m×岸沖方向250m×高さ20mの空間である。図の点線が風速を設定する境界位置であり、それ以外の側面境界は自由流出境界とした。波浪条件は、沿岸方向310m×岸沖方向1060m領域で計算を行っており、沖側境界から不規則波を造

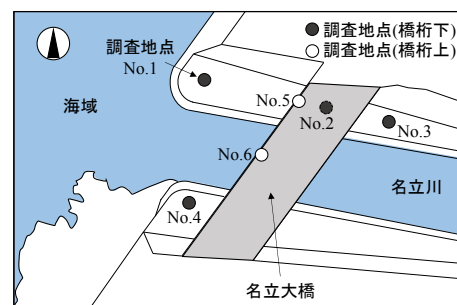


図-11 観測点の配置

波し、側面境界は自由流出および波の減衰境界とした。計算モデルに設定したパラメータを表-2に整理した。飛来塩分発生量係数 a_g および発生時の沈降速度 w_0 、大気の流れ拡散係数 ν_t は現地調査結果との比較から調整を行った。

(2) 検証データの取得

計算結果の妥当性を確認するために、大原ら⁹⁾が実施した現地観測結果を整理し、その結果との比較を行った。現地観

表-3 計算ケース

	境界風速 予測方法	再現日	境界位置				
			風速 (m/s)	風向 (度)	波高 (m)	周期 (s)	潮位 (m)
Case1	領域気象モデル	2017/2/23	13.4	292	2.2	5.5	0.39
Case2	空間補間法	2017/2/23	8.8	281	2.2	5.5	0.39
Case3	領域気象モデル	2017/3/3	11.2	288	2.5	6.3	0.10
Case4	空間補間法	2017/3/3	10.0	270	2.5	6.3	0.10

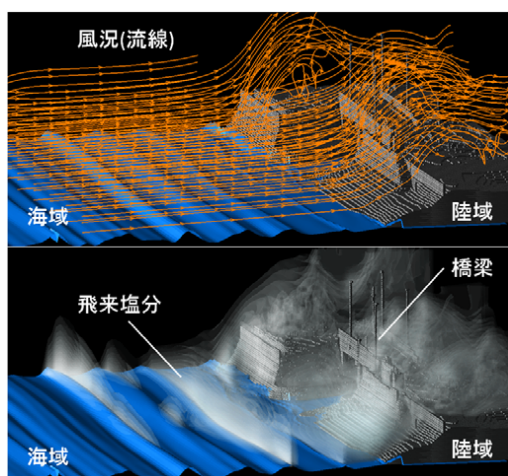


図-12 風況と飛来塩分の空間分布(2017年3月3日)

測は、新潟県名立大橋において、2017年2月23日15:00~17:00および3月3日12:00~14:00に実施された結果である。観測点の配置は図-11の7地点であり、高さ1.0m、1.5m、2.0m、2.5mで風速・風向および飛来塩分量の測定を実施している。

(3) 計算ケース

計算ケースは、現地観測を取得した2017年2月23日および3月3日において、領域気象モデルと空間補間法の2つの方法で予測した風速分布を対象に4ケースとした。表-3は各計算ケースとその設定条件を整理したものである。

4.3 計算結果

(1) 構造物近傍の風・飛来塩分の空間分布

対象とした橋桁周辺の風と飛来塩分の空間分布を示した計算結果を図-12に示す。図は2017年2月23日を再現したCase1の結果であり、上段が風の流線、下段が飛来塩分の輸送過程である。図に示すように、橋桁周辺の形状および周辺地形に応じた風の流れと飛来塩分の輸送過程が計算できている。海域から風と飛来塩分が構造物へ作用している状況が、3次元空間で確認できる。

(2) 構造物近傍の風速の計算結果と観測結果の比較

図-13および図-14は、構造物に作用する風速の計算結果と観測結果を比較した結果である。観測点No.3(2月23日)およびNo.5では、飛来塩分だけの測定であり、風速の測定は実施されていない。図に示すように、2月23日の計算結果は、Case1と2で一致しない結果であり、Case2の空間補間法で風

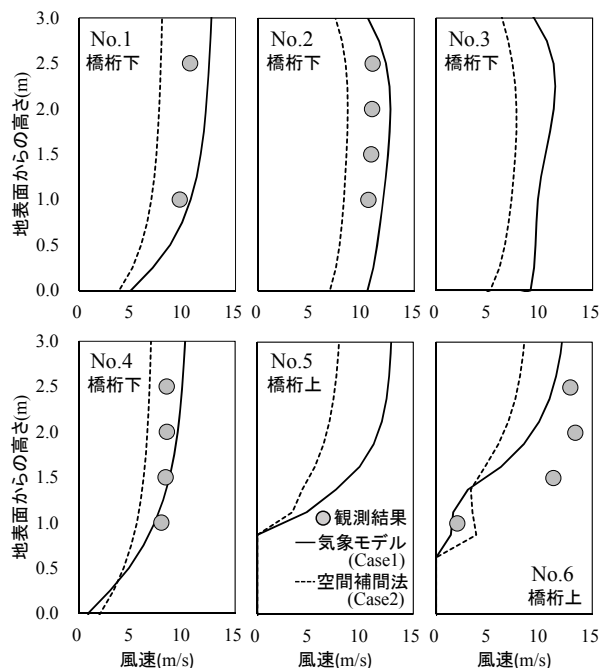


図-13 風速の計算結果(2017年2月23日)

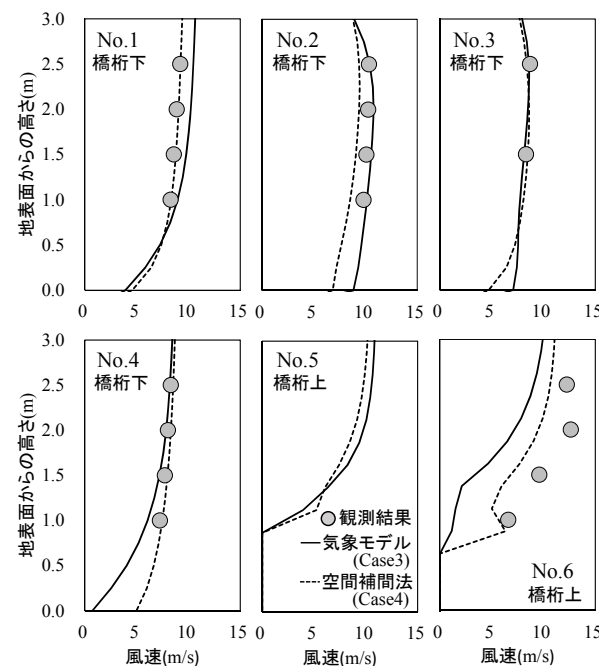


図-14 風速の計算結果(2017年3月3日)

速が過小になっている。Case1の領域気象モデルの結果では、橋桁上の観測点No.6以外では、観測結果と一致する傾向が見られる。図-14のCase3と4の計算結果はほぼ一致しており、橋桁上の観測点No.6以外では、観測結果ともよく一致している。橋桁上の観測点No.6の結果で、風速が過小になる理由としては、今回の数値シミュレーションの計算条件では、計算格子間隔が若干大きく、橋桁形状を十分に再現できていないためであると考えられる。

これらの結果から、検討を行った2つの方法で、橋桁近傍の数値シミュレーションの境界条件として、十分に使用でき

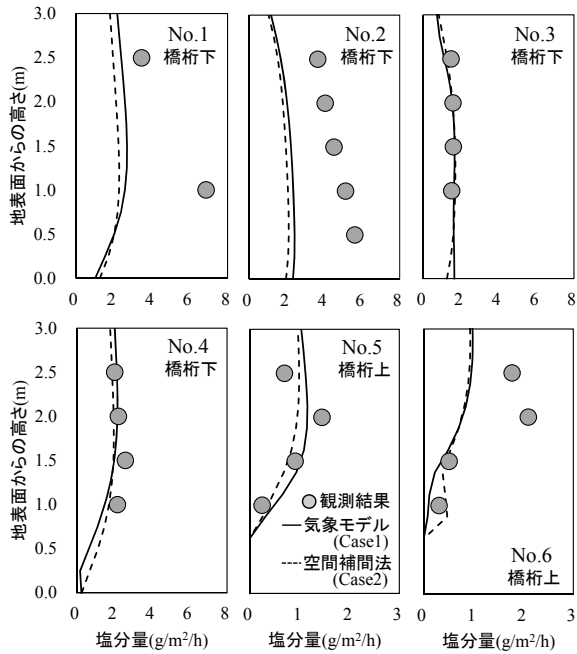


図-15 飛来塩分の計算結果(2017年2月23日)

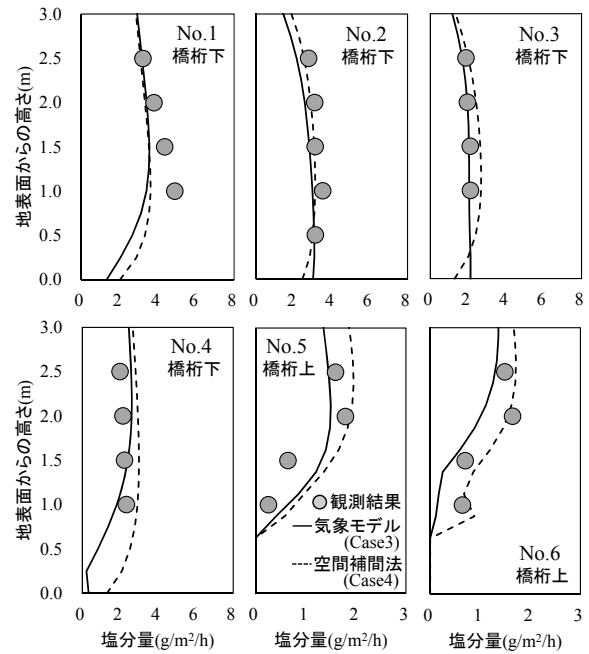


図-16 飛来塩分の計算結果(2017年3月3日)

ることが確認できた。また、日本海沿岸の冬季の季節風が卓越する条件においても有効であることがわかった。

(3) 構造物近傍の飛来塩分の計算結果と観測結果の比較

図-15 および図-16 は、構造物近傍の飛来塩分量の計算結果と観測結果を示したものである。図の値は、大気中の塩分濃度を風速により輸送量に変換したものである。図に示すように、計算結果は、風速の計算結果と同様に、観測結果を概ね再現できている。ただし、図-15 の2月23日では、一部で現地観測結果を再現できない結果となっており、これは海域で発生する飛来塩分の粒径等のパラメータをすべてのケースで一定と仮定したためであると考えられる。また、Case1と2では、設定している風速が異なるが、塩分量の結果に差が見られていない。これは、2つのケースで風向が異なっており、その影響で塩分量が同程度となっている。

以上の結果より、飛来塩分の再現性は、今後も検討を進めていく必要があるが、風況が予測できていることから、飛来塩分の予測も可能であると考えられる。

5. 結論

本研究では、構造物近傍の風・飛来塩分の数値シミュレーションの境界条件となる風況を高精度で予測する方法について検討を行った。その結果、領域気象モデルおよび空間補間法の計算結果は、海岸近傍に設置された個別の構造物周辺の風況を再現できることが確認され、日本海沿岸の冬季の季節風が卓越する地域においても有効であることが明らかになった。さらに、これらの方法で予測された風速・風向を用いて、構造物近傍の風・飛来塩分の数値シミュレーションを実施することで、橋桁各部位近傍の3次元的な風況を再現できるこ

とが確認できた。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費「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開発(若手研究(A), 研究代表者中村文則, 課題番号 17H04931)および一般財団法人新潟県建設技術センター「新潟県における橋梁の飛来塩分の自動予測技術に関する事業」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) 当真嗣竜, 東條良太, 山田義智, 湯浅 昇: 海岸における風況と飛来塩分の相関に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.863-868, 2011.7
- 2) 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 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.2, p364-375, 2017
- 3) 領域気象モデル WRF : <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/>
- 4) 気象庁 : <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etn/>
- 5) 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確立, 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
- 6) 大原涼平, 中村文則, 下村 匠: 構造物周辺における風環境と飛来塩分の空間分布に関する現地観測, 土木学会次学術講演会講演概要集, V-433, pp.865-866, 2017.9
- 7) 日本建築学会: 建築荷重指針・同解説, pp.22, 2004