

論文 数値気候モデルを用いた飛来塩分濃度分布の予測に関する研究

富永 禎秀^{*1}・地濃 茂雄^{*2}・村田 亨^{*3}

要旨:強い季節風が吹く冬季の日本海沿岸部において、飛来塩分量の実態調査を行うとともに、メソスケールの数値気候モデルを用いて、風速等の気象因子や観測点周辺の地形や風向との関連を検討した。数値解析結果は、季節による飛来塩分濃度の分布性状の違い及び距離別の飛来塩分濃度について概ね実測調査結果を再現することが確認され、数値気候モデルを用いることにより詳細な塩害マップを作成できる可能性が見い出せた。

キーワード:数値気候モデル, 飛来塩分濃度, 日本海沿岸部

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において適切な塩害対策を講ずるためには、その地域における塩害の程度を正確に予測・評価することが求められる。すなわち、海岸から内陸への海塩粒子の飛来量を把握することが重要である。飛来海塩粒子量の実態調査の多くは、季節風の影響の少ない太平洋沿岸部で行われたものであり^{1~4)}、冬季の強い季節風の影響を受ける日本海沿岸部における飛来海塩粒子量の実態は明らかでない。

また海岸から飛来する塩分は、当然のことながら風速や風向の影響を強く受ける⁵⁾。従って飛来塩分の局所的な分布を正確に予測するためには、風速・風向の空間的な分布を正しく予測することが重要である。

本研究では、冬期の強い季節風が吹く日本海沿岸部において、飛来塩分量の実態調査を行うとともに、数値流体解析技術に基づくメソスケールの数値気候モデル⁶⁾を用いて、風速等の気象因子や観測点周辺の地形や風向と飛来塩分との関連を検討する。それによって数値気候モデルを比較的広域の飛来塩分濃度分布の予測に適用する可能性について検討することを目的とする。

2. 新潟市周辺における飛来塩分量調査⁷⁾

2.1 測定方法

調査期間は、2003年4月から2004年3月までとした。10×10cmのガーゼを雨がかりのない場所(設置高さ2～5 m)に暴露し、1ヶ月毎に塩分を捕集した。塩分濃度は、塩分検知管で溶液の塩素イオン濃度を測定することにより求めた。測定された塩素イオン濃度(Cl⁻%)から塩化ナトリウム量(mg/dm²)を求める式は次式によった。

$$C = \frac{\text{NaCl分子量}58.5}{\text{Cl}^- \text{原子量}35.45} \times \text{溶液}30(\text{ml}) \times 10 \frac{\text{mg}}{\text{ml}} \\ \times \frac{\text{捕集器の面積}100(\text{dm}^2)}{\text{ガーゼ2枚重ねの面積}200(\text{dm}^2)} \times \text{Cl}^- \times \frac{1}{D}$$

C: 大気中の飛来(捕集)塩分量[mg/dm²/day]

Cl⁻: 塩素イオン[%]

D: 捕集材の暴露日数[日]

2.2 距離別の飛来塩分量測定結果

測定範囲を図-1に示す。測定地点は、海岸からの距離の異なる周辺に障害物等のない更地を5点(A1～A5)と新潟市の東側を流れる阿賀野川岸に3点(B1～B3)とした。海岸線からの距離は、図中に示す通りである。

河川沿い以外の測定点における飛来塩分量と海岸からの距離の関係を図-2に示す。1月の飛来塩分量は、海岸部(汀線から0.2km)で2.91[mg/dm²/

*1 新潟工科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*2 新潟工科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 新潟工科大学大学院 工学研究科

day；以下mdd]，海岸から1.5km隔てた地点では0.49mddに減少している。この傾向は既往の研究結果⁸⁾と同様である。一方，河川部の測定点における飛来塩分量と海岸からの距離の関係を図-3に示す。1月は1.5、4.7km地点でそれぞれ1.08、0.77mddを記録し，2月の9.9km地点では0.60mddが測定された。風に対する遮蔽物の少ない河川上では，通常の平野部に比べてかなり内陸側まで飛来塩分が到達しているものと考えられる。また，海岸から同じく1.5kmの位置において，平野部と河川部の飛来塩分を比較すると，河川上の飛来塩分が約2倍多い結果となった。

2.3 季節による飛来塩分量の違い

新潟市海岸（図-1のA1）における月毎の飛来塩分量と風速・風向の関係を検討した結果を図-4に示す。風向・風速については，新潟地方気象台の観測データを基に，日平均風速，全風向にお

ける日最大風速及び日最大瞬間風速，海風（WSW～Nと定義）時の日最大風速及び日最大瞬間風速の5種類の風速の月別値を算出した。図中の棒グラフは，月毎の飛来塩分量，折れ線グラフは5種類の風速を示している。海風時の最大風速(③)の月別の変化が，塩分飛来量と最もよく対応している。飛来塩分量の最も低い月は6月で，最も高い月は12月であった。また12月の飛来塩分量は6月に対して約60倍となっている。

なお1年間の飛来塩分の合計は437mg/d m²であり，冬期4ヶ月（11～2月）の間に年間の78%が飛来していることが分かる。また文献9)によれば太平洋側S市の冬季4ヶ月間（11～2月）の平均値は0.03mddである。これに対して今回計測された新潟市の冬季4ヶ月間の飛来塩分量は平均値が2.85mddであり，太平洋側S市と比較すると新潟市は95倍多い結果となった。

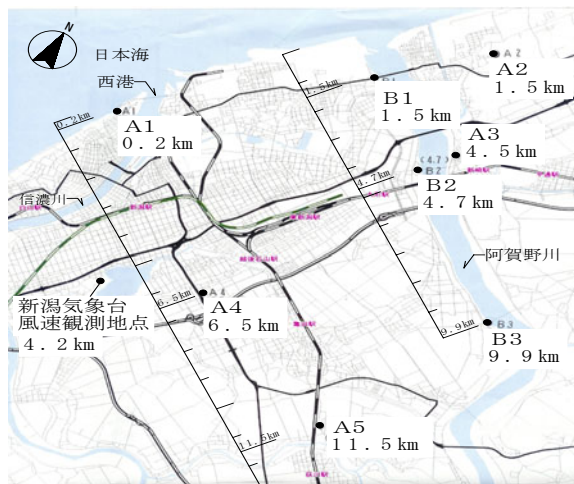


図-1 飛来塩分の測定地点

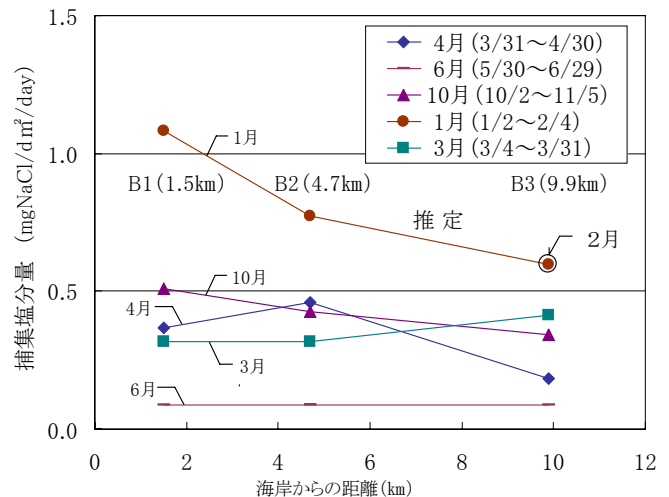


図-3 河川測定点の飛来塩分量

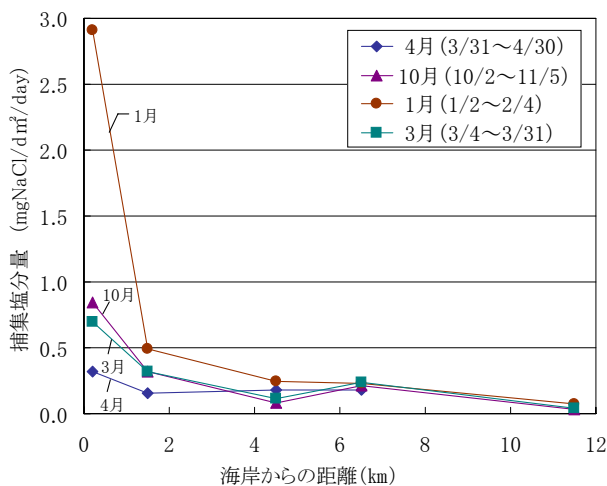


図-2 海岸からの距離と飛来塩分量の関係（河川以外の測定点）

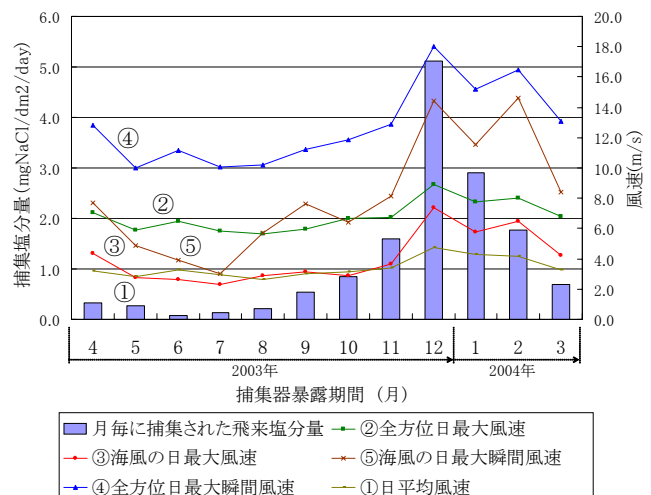


図-4 新潟市海岸の飛来塩分量と風速

3. 数値気候モデルを用いた都市気候解析 －解析概要と精度の確認－

3.1 数値気候モデル

ブシネスク近似，静水圧平衡を仮定したメソスケール気象モデルを用いた。運動方程式，熱エネルギー保存式，水蒸気保存式、連続の式などの基礎方程式で構成される。乱流モデルは複雑な地形に対応が可能であるMellor-Yamadaモデルのレベル2.5を用いた。標高や地表面熱収支計算のための各種パラメータについては，国土数値情報のデータを与えた。手法の詳細は文献6) 参照。

3.2 解析領域・メッシュ分割

解析領域を図-5に示す。実測を行った範囲が最終ターゲットになるように，Grid1（新潟県スケール）とGrid2（新潟市スケール）の2段階のnested gridを設定した（表-1）。

3.3 解析条件

年間における代表的な気象条件を想定し，夏季は8月の晴天日，冬季は1月の雲天日の2ケースを解析対象とした。ケースごとの解析条件を表-2に示す。これらの解析条件については，夏季・冬季でそれぞれケーススタディを重ね，観測値¹⁰⁾との対応から適切な値を設定した¹¹⁾。

3.4 Grid 1（広域）の気候解析結果

1) 夏季解析結果

①風速ベクトル分布

15時の風速ベクトル分布（地上高さ10m）を図-6に示す。解析結果（図-6(2)）では，この時間は，北からの海風が卓越しており，一部の地域では新潟県境付近まで達している。これは観測値¹²⁾（図-6(1)）の傾向を概ね再現している。新潟市周辺を詳細に解析したGrid2の結果を図-7に示す。ここでは，海風が最も弱い9時と最も強い15時の結果を示した。9時（図-7(1)）は風の状態で，海上の一部を除いて風速は非常に弱い。一方，15時（図-7(2)）では，解析領域全体で，北風となっている。

②気温分布

15時の気温分布（地上高さ10m）を図-8に示す。気温分布は，飛来塩分濃度の性状に直接影響を及ぼすものではないが，解析の総合的な

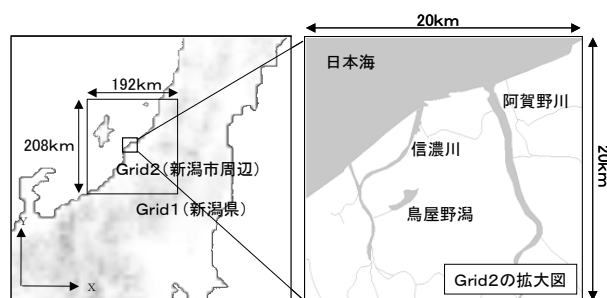


図-5 解析領域

表-1 メッシュ分割

	領域 (X×Y×Z) [km]	メッシュ分割	水平方向 メッシュ幅 [km]
Grid1	192×208×9.6	48×52×49	4
Grid2	20×20×9.6	40×40×49	0.5

表-2 解析条件

	夏季	冬季
解析対象	8月（晴天日）	1月（雲天日）
初期温位	23.0℃	1.5℃
上空風速（風向）	2.0m/s（南）	8.0m/s（南西）
海面温度	25.0℃	5.0℃
雲量（10分比）	3.0	9.5

予測精度を確認するために示す。解析結果（図-8(2)）では，新潟県境の標高の高い地域で気温が低く，平野部では30℃を超える地域が発生しており，他の地域よりもやや気温が高い。一方，沿岸部では，平野部と比較すると気温は低い。沿岸部から平野部にかけて気温が高くなる傾向は，観測値（図-8(1)）でもみられ，気温についても，解析と観測値は概ね対応している。

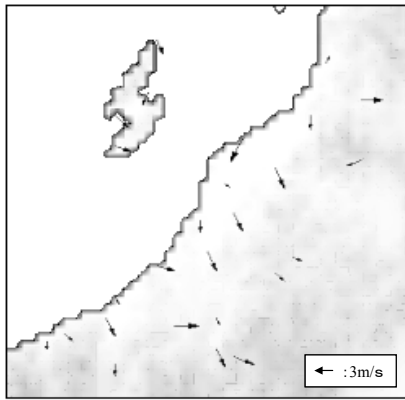
2) 冬季解析結果

①風速ベクトル分布

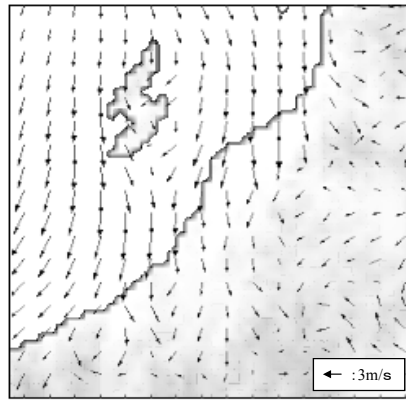
15時の風速ベクトル分布（地上高さ10m）を図-9に示す。解析結果（図-9(2)）では，解析領域西側の海域において，西よりの強い風速を示している。そのため沿岸部および平野部では，北西からの風となり，冬季日本海側特有の季節風を再現しており，観測値（図-9(1)）と概ね対応していると考えられる。新潟市周辺を詳細に解析したGrid2の結果の中で，海風が最も弱い時間（4時）と最も強い時間（15時）の結果を図-10に示す。15時（図-10(2)）には，強い季節風の影響により解析領域全体で強い北西の風が吹いている。

②気温分布

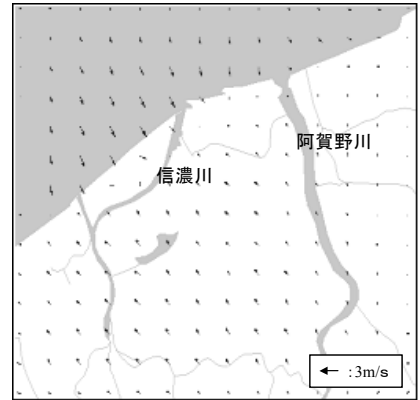
気温分布（15時，地上高さ10m）を図-11に



(1) 観測値^注

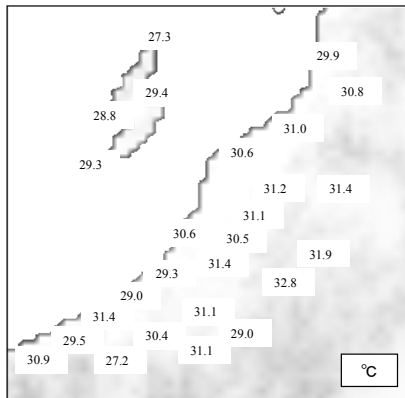


(2) 解析結果(Grid1)

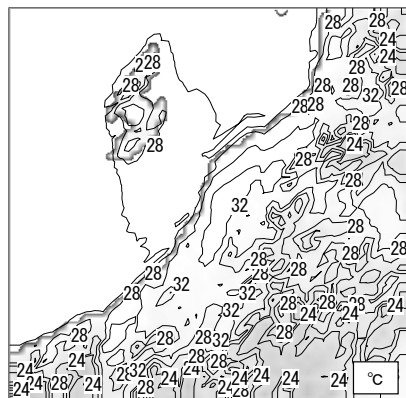


(1) 9時

図-6 夏季の風速ベクトル分布 (15時、地上高さ10m)

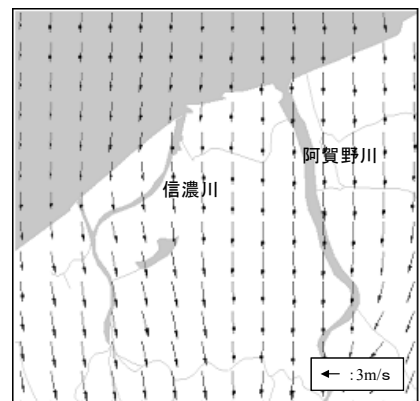


(1) 観測値^注



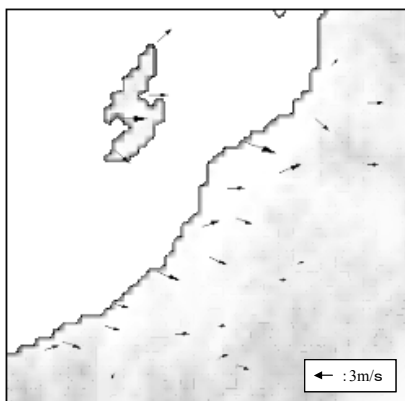
(2) 解析結果(Grid1)

図-8 夏季の気温分布 (15時、地上高さ10m)

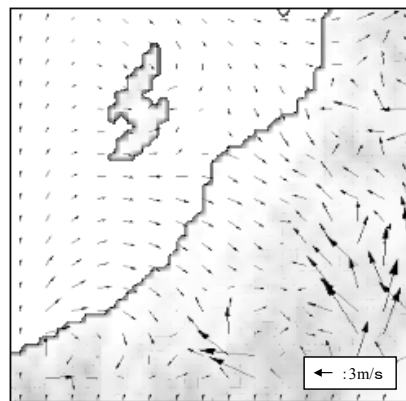


(2) 15時

図-7 夏季の風速ベクトルの
解析結果 (Grid2, 地上10m)

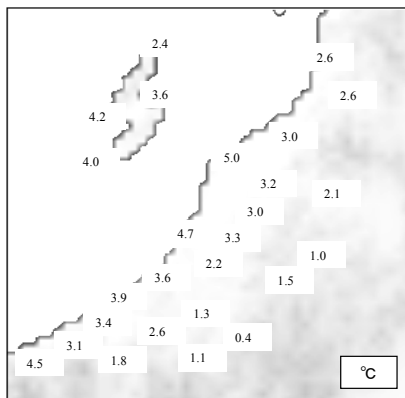


(1) 観測値^注

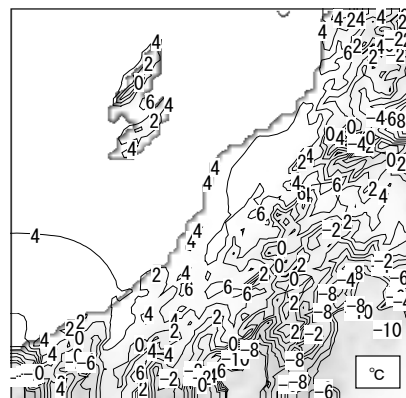


(2) 解析結果(Grid1)

図-9 冬季の風速ベクトル分布 (15時、地上高さ10m)

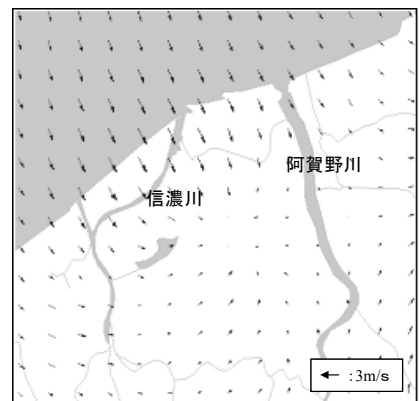


(1) 観測値^注

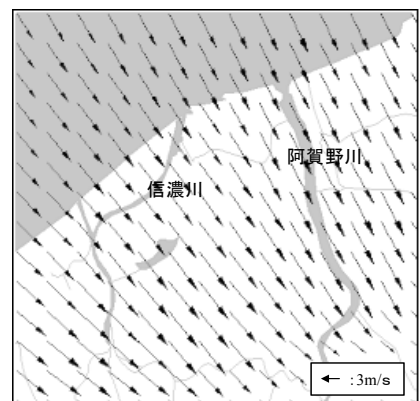


(2) 解析結果(Grid1)

図-11 冬季の気温分布 (15時、地上高さ10m)



(1) 4時



(2) 15時

図-10 冬季の風速ベクトルの
解析結果 (Grid2, 地上10m)

示す。解析結果（図-11(2)）は、観測値（図11(1)）の傾向とほぼ合致している。

4. 数値気候モデルによる飛来塩分濃度の予測

4.1 解析概要

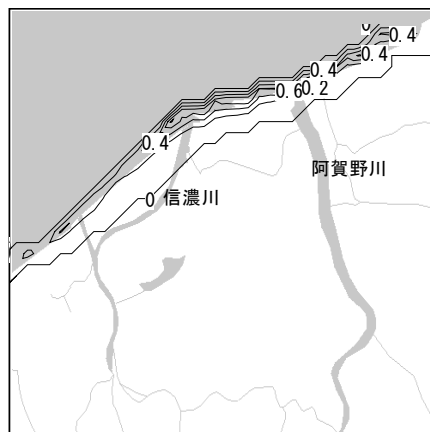
前述の数値気候モデルで計算される風速の3成分及び乱流拡散係数の空間分布を用いて、飛来塩分濃度の空間分布を、海岸線部分で発生させた塩分濃度の移流拡散方程式を3次元的に解き求めた。本研究では、全ての海岸線を含むメッシュにおいて風速の2乗に比例する発生量を与えた。また塩分粒子の落下速度は0.1m/sの一定値を与えた。

なお実測調査より、飛来塩分量は海風の日最大風速との関係が強いという結果が得られているので、飛来塩分の解析については、海風の最も強くなる時間と最も弱くなる時間の2ケースで検討することとした。また飛来塩分濃度については、実測のA1点に対応するメッシュの夏季

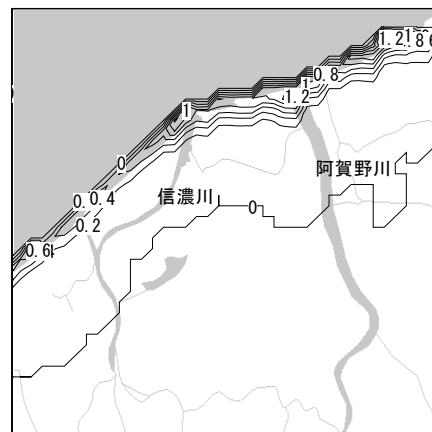
15時の濃度で基準化して示す。

4.2 飛来塩分濃度分布の解析結果

夏季解析における海風の最も弱い9時と最も強い15時の飛来塩分濃度分布を図-12に示す。9時の解析結果では、発生濃度も低く、それほど内陸側に到達していないのに対して、15時の解析結果では、海風によって比較的内陸側まで移流されている。阿賀野川の河口付近で濃度が高くなっている。一方、冬季解析における海風が最も弱い4時と最も強い15時の飛来塩分濃度分布を図-13に示す。4時においても、風速は、夏季15時と同程度であるため、塩分濃度の影響範囲も同程度となっている。15時においては、強い季節風の影響により、解析領域全域に濃度の到達が認められる。海岸線部分においては特に値が大きいが、夏季と同様に阿賀野川河口付近の値が大きく、河川付近で塩分量が多いという実測結果と対応する結果となった。

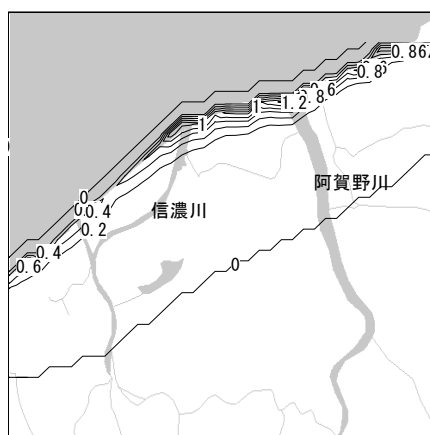


(1) 9時

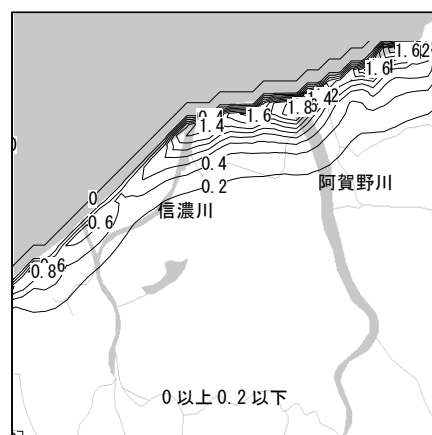


(2) 15時

図-12 飛来塩分濃度分布の解析結果（夏季, Grid 2, 地上5m）



(1) 4時



(2) 15時

図-13 飛来塩分濃度分布の解析結果（冬季, Grid2, 地上5m）

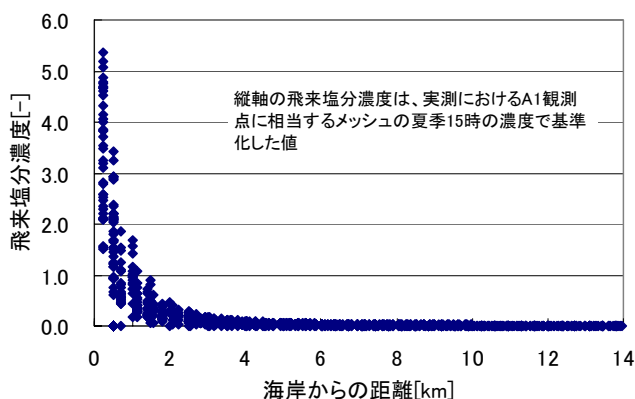


図-14 海岸線からの距離と塩分濃度の関係

4.3 距離別の飛来塩分濃度の予測結果

冬季15時の解析結果より、各メッシュ点における海岸線からの距離と飛来塩分濃度の関係を整理したものを図-14に示す。全体的には実測調査結果（図-2）と同様、海岸から2km付近で濃度が急激に減少する傾向が見られる。しかし、海岸線の近くでは、バラツキも大きく、飛来塩分濃度は地形などの影響を受け、海岸線からの距離だけでは説明できないことが伺える。

5. まとめ

強い季節風が吹く冬季の日本海沿岸部において、飛来塩分量の測定を行うとともに、メソスケールの数値気候モデルを用いて、風速等の気象因子や観測点周辺の地形や風向と飛来塩分の関連を検討し、以下の知見を得た。

- 1) 実測調査の結果より、海岸からの距離別飛来塩分量は減少する傾向にあり、とりわけ海岸から1.5km地点で激減する傾向にあった。また海岸から1.5km地点の平野部及び河川部の飛来塩分量は、平野部に対して河川部はおよそ2倍であった。さらに冬季11月～2月の4ヶ月間で飛来する塩分量は年間の78%にあたる。
- 2) メソスケール数値気候モデルを用いた数値解析による風・気温の予測結果は、夏季及び冬季の解析結果ともに、全体的には観測値の傾向を概ね再現していることが確認された。
- 3) 数値気候モデルの結果から、飛来塩分濃度の予測を試みた。その結果、季節による飛来塩分濃度の分布性状の違いを表現することが可能であることが確認できた。さらに距離別の飛来塩分濃度についても概ね実測調査結果を再現することができた。これらの結果から、

メソスケールの数値気候モデルを用いることにより詳細な塩害マップを作成する可能性を見出した。

謝辞 実測調査については、仲村友夫氏（㈱シグマ設計・当時新潟工科大学大学院修士課程）の労を多くした。記して謝意を表す。

注） 観測値は、拡張アメダス気象データ¹⁰⁾の標準年の各月のデータを用いた。夏季は晴天日を対象としているため、1日あたりの全天日射量が20 MJ/m²以上、日照時間が8.0 h以上の日を選定し平均し、冬季は季節風の影響が強く、風向が1日を通じて西よりで安定している1日を冬季の代表的な日として採用した。

参考文献

- 1) 浜田純夫他：海岸付近の飛塩調査とコンクリートに浸透する塩分，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp85-88，1986
- 2) 本橋健二，樫野紀元，富板崇：清水市における海塩粒子に関する研究，日本建築学会論文報告集，第366号，pp. 1-10，1986. 8
- 3) 富板崇，樫野紀元，高根由充：海塩粒子捕集量におよぼす気象因子の影響，日本建築学会論文報告集，第384号，pp. 34-41，1988. 2
- 4) 依田浩敏：臨海部居住地域における塩害と空气中海塩粒子濃度の実態調査，第522号，pp. 115-121，日本建築学会計画系論文集，1999. 8
- 5) 山田義智，大城武，梶田佳寛，伊部博：海岸から飛来する塩分量の数値解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 1, pp. 945-950，1996
- 6) 近藤裕昭，村上周三，持田灯 他：ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合的評価のためのsoftware Platformの開発（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1101-1102，2000
- 7) 仲村友夫，地濃茂雄：建築構造物の塩害に関する調査；日本建築学会北陸支部研究報告集，48, pp. 73-76，2005, 7
- 8) 樫野紀元，海塩粒子による鉄筋の腐食，セメント・コンクリート，NO, 469, 1986
- 9) 岸谷孝一，西澤紀昭他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ，塩害（I）（II），技報堂出版
- 10) 日本建築学会：拡張アメダス気象データ，日本建築学会，2000
- 11) 村田亨，富永禎秀：数値気候モデルによる冬季の屋外環境評価に関する研究（その1）新潟県を対象とした解析精度の検証，日本建築学会北陸支部研究報告集，pp. 120-123，2004. 7