

橋梁断面周辺の飛来塩分の推定に関する一検討

Estimation of marine salt behavior around the bridge section

岩崎英治*・長井正嗣**

Eiji IWASAKI, Masatugu NAGAI

*正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

**正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

The weathering steel has a unique property of preventing rust by rust, and using unpainted weathering steel is important to reduce the life cycle cost of infrastructure. The following condition for unpainted weathering steel should be satisfied to generate a protective rust on the surface of the steel: maximum amount of marine salts density is less than 0.05mdd ($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$). However a state of corrosion is different in the part of the bridge. Accordingly, evaluation for quantity of marine salt is needed at each part of the bridge. This paper discusses a estimation of marine salt around section of the bridge by comparison between numerical result and measurement of marine salt and adhering salt on surface of girder.

Key Words : marine salt, adhering salt, weathering steel, numerical simulation

キーワード : 飛来塩分, 付着塩分, 耐候性鋼, 数値シミュレーション

1. はじめに

鋼橋の建設に際して、メンテナンス費用も含めたライフサイクルコスト(LCC)が選定の条件となりつつあり、LCCを押し上げる原因となっている塗装に伴うメンテナンス費用の縮減を可能とする無塗装耐候性鋼材の採用が多くなっている。これは、鋼材表面に生成する緻密な保護性さびにより、鋼材内部への腐食原因物質の侵入が抑制されることにより、時間の経過とともに腐食量は、維持管理上問題とならない範囲に抑えられることを期待しているためである。通常の腐食環境下では、耐候性鋼は緻密なさびにより以降のさびの生長を抑制することが確認され、多くの使用実績がある。しかし、多くの塩分が飛来する環境や、適度な乾湿の繰り返しにならない環境では、さびは安定化せず生長し続けることがある。

このため、旧建設省土木研究所、旧鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会による耐候性鋼材の暴露試験、飛来塩分調査により、飛来塩分量が $0.05\text{mdd}(\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day})$ 以下の環境下であれば緻密な保護性さびが生長すること。また、全国の海岸線を4地域に分け、それぞれの地域内で飛来塩分量調査を行わなくてもよい離岸距離が示されている¹⁾。

一方、既設の耐候性鋼橋の腐食状況を調べると、桁の部位により腐食状況に大きな違いが現れている。特に、腐食環境の比較的厳しい地域で、そのような影響が顕著に現れている。これは、桁端部や桁内のような部位では、鋼表面に付着した飛来塩分の雨水による洗い流しが期待できないことや、湿潤状態が長時間にわ

たり持続されるためである。

建設前に現地での飛来塩分調査を行うことで橋梁設置地点の飛来塩分量は把握できる。しかし、桁内や桁近傍の飛来塩分量や湿潤時間(ぬれ時間)は、橋梁と桁端や桁下の周囲地形との相互作用によって決まるために、建設前の調査では把握できず、何らかの手法を用いて推定する必要がある。このため、既設の耐候性鋼橋の腐食状況から得られた知見に基づいた、細部構造の設計や施工上留意すべき事項が示されている¹⁾。

耐候性鋼橋の腐食には、前述のように、飛来塩分量とぬれ時間が関係している。橋梁断面周辺のこれらの腐食因子を、橋梁建設前に定量的に推定できると、建設後の耐候性鋼の腐食状況を予測できる可能性がある^{2),3)}。

飛来塩分量を推定する取り組みには数値シミュレーションによる手法が、塩害とも関連し、多方面で研究されている。大別すると、海岸線で発生した海塩粒子の移流沈降過程や拡散過程を対象とした研究^{4)~9)}、構造物周りの飛来塩分の拡散に関する研究^{10)~14)}がある。一方、構造物の局所的な部位のぬれ時間の推定に関する取り組みは見当たらない。

これらの飛来塩分の数値シミュレーションによる推定に関する既往の研究では、塩分濃度を求めることに主眼が置かれている。後述の土研式やドライガーゼ法による飛来塩分の捕集では、一定期間に、一定面積の領域に付着した塩分量を計測していることから、塩分濃度とは物理的次元が異なり、直接の比較は行えない。

そこで、局所的なぬれ時間の推定も重要な問題であるが、本論文は、ある時間内にある点を通る物質



図-1 実測橋梁 (U 橋梁) の周辺地図

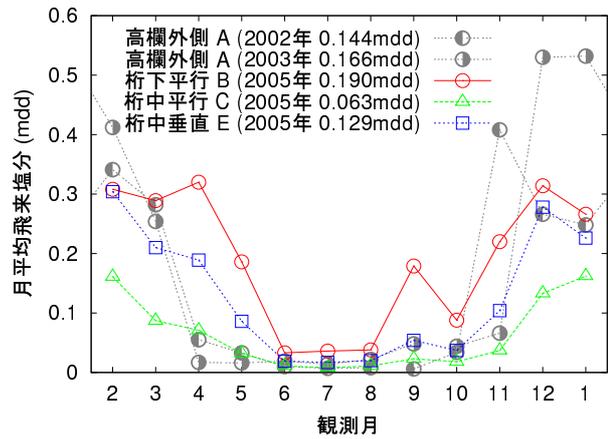


図-3 飛来塩分の計測結果

の累積量に着目し、数値シミュレーションから得られたこの物質通過累積量と、実測により得られた飛来塩分量、鋼表面の付着塩分量との比較により、橋梁断面周辺の飛来塩分の推定の可能性について検討する。

2. 飛来塩分と付着塩分の実測

飛来塩分の数値シミュレーションの検証のために、新潟市近郊の平野部にある離岸距離 17km の U 橋梁の実測値を用いる。この橋梁は 1983 年に建設されたさび安定化補助処理 (表面処理) された耐候性鋼橋である。海岸線からこの橋梁までの間に、海風を遮るような地形はない。また、図-1 のように北北西の方向に流下する農業用水路上の橋梁であり、海風は下流側から橋梁側面に当たる。

U 橋梁の概略図を図-2 に示す。主桁間隔 2.2m の I 型鋼 5 本からなる支間 21m、幅員 10.5m の橋梁である。桁下端から護岸水平部までほぼ 2m ある。水面高さは、農繁期と農閑期で異なり、護岸水平部より上側になることもある。

この橋梁の支間中央付近の下流側高欄外側に写真-1(a) のように土研式飛来塩分捕集器具を設置し、右岸側桁端から 3.5m の位置の桁内部と桁下に写真-1(b) のようにドライガーゼ法による捕集器具を設置して飛来塩分の計測を行った。なお、土研式捕集器具による計測は、2002 年 8 月 9 日から 1 年間と 2003 年 9 月 18 日から 1 年間であり、ドライガーゼ法による計測は、2005 年 1 月 28 日から 1 年間である。

図-3 に各月毎の飛来塩分の計測結果を示す。また、図中には 1 年間の平均飛来塩分も示している。季節風の卓越する冬季に飛来塩分が多く、南風の卓越する夏季に飛来する塩分は少ないことが分かる。観測月ごとに各飛来塩分を比較すると変動は大きい、高欄外側の A 点の年平均飛来塩分は、2002 年 8 月からの 1 年間が 0.144mdd (mg/dm²/day)、2003 年 9 月からの 1 年間が 0.166mdd であり、大きな違いはない。このこと

から、桁下と桁内の B 点、C 点、E 点の飛来塩分の計測年と A 点の計測年が異なっている、年平均飛来塩分の結果には、観測年による影響は少ないものと考えられる。

飛来塩分の鋼表面への付着状況を調べるために、携帯型の表面塩分計 (SNA-2000) を用いて計測を行った。この表面塩分計は、電気伝導率の変化から塩分濃度を算出するものである。表面塩分計は、本体と検査部により構成され、検査部を鋼材表面に固定し、直径 30mm のセル内に蒸留水を注入し、約 10 秒間セル内部を攪拌することで鋼表面から溶出した塩分により、鋼表面の付着塩分が計測される。したがって、この表面塩分計で計測される付着塩分は、直径 30mm の円内部の平均的な付着塩分を計測していることになる。セル内の水により鋼表面の塩分が洗い流されているために、継続調査では、計測場所をずらして計測を行っている。継続調査は、2002 年 5 月、8 月、12 月、2003 年 4 月、6 月、8 月、2004 年 4 月、8 月の 8 回行っている。

図-4 は、U 橋梁の右岸側、左岸側桁端部から約 4m 離れた各桁ウェブ断面の上部、中央、下部の付着塩分を 8 回計測した結果の平均を表している。桁外面は雨水による洗い流しにより、桁内面に比べて付着塩分は少なく、ウェブ上部に比べて下部が少ないことが分かる。一方、桁内面では、ウェブ上部は中央や下部に比べて少ないことが分かる。ウェブ中央と下部では桁面によっては、下部が多い場合も見受けられるが、総じて中央が多くなっている。また、右岸側と左岸側を比べると、桁面によって変動が見られるが、全体の平均付着塩分量は、右岸で 214mg/m²、左岸で 219mg/m² となり、左右の違いは少ない。

一方、図-3 の点 E のように橋軸方向からの飛来塩分も無視できない量が飛来しているが、付着塩分の計測結果は右岸側、左岸側共に同程度の値になっていることから、短期的には風は多方向から吹いているが、長期的には橋軸直角方向から、時計回りにずれた方向か

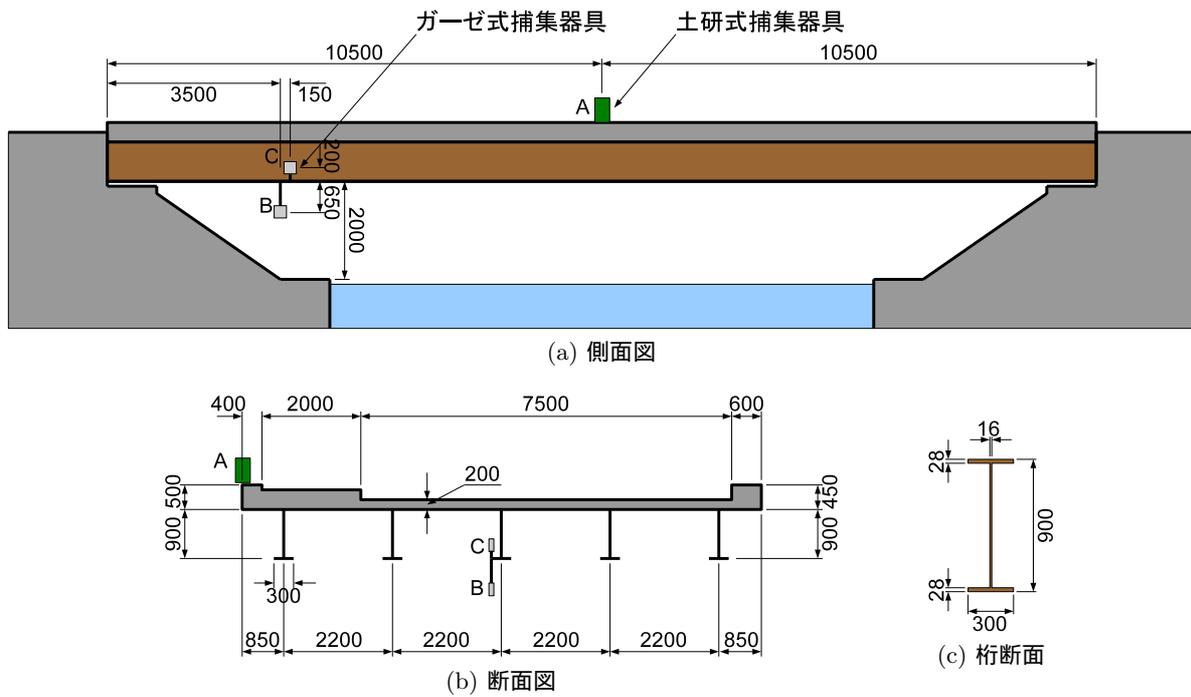
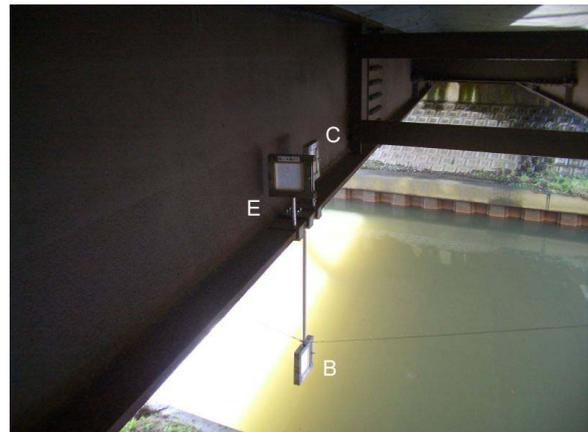


図-2 橋梁概略図と捕集器具設置位置 (単位:mm)



(a) 土研式捕集器具



(b) ドライガーゼ法捕集器具

写真-1 飛来塩分の捕集状況

らの風による飛来塩分と、反時計まわりにずれた方向からの風による飛来塩分はほぼ等しく、平均的には橋軸直角方向からの風による塩分飛来による付着と考えられる。

3. 風の流れと物質拡散の基礎方程式

前述のように実測を行った U 橋梁では、長期的には塩分の飛来や付着状況が 2 次元であるので、風の流れと塩分の拡散解析では、2 次元問題として扱うこととする。

物質の拡散には、物質の濃度差による拡散、流体の移動（移流）による拡散や重力による沈降などが考えられる。自然風の中での現象であることから他の原因

による拡散に比べて、濃度差による影響は少ないものと考えられる。また、耐候性鋼橋の設置場所は、飛来塩分の発生源である海岸線から離れており、U 橋梁では 17km であることから、重力による沈降の影響を受けるような比較的大きな海塩粒子は飛来していないものと考えられる。これらのことから、濃度差と沈降による影響は考慮しない。自然風の中での拡散を対象としていることから、流れは乱流となっているが、本論文では、本来複雑で長期的な現象を数値シミュレーションする上で、単純化を優先して、飛来塩分の推定の可能性を実測値と比較検討することとし、乱流による影響も考慮しないこととする。

以上より、風は 2 次元の非圧縮粘性流体とし、物質の濃度差による拡散、乱流や沈降を無視し、風の層

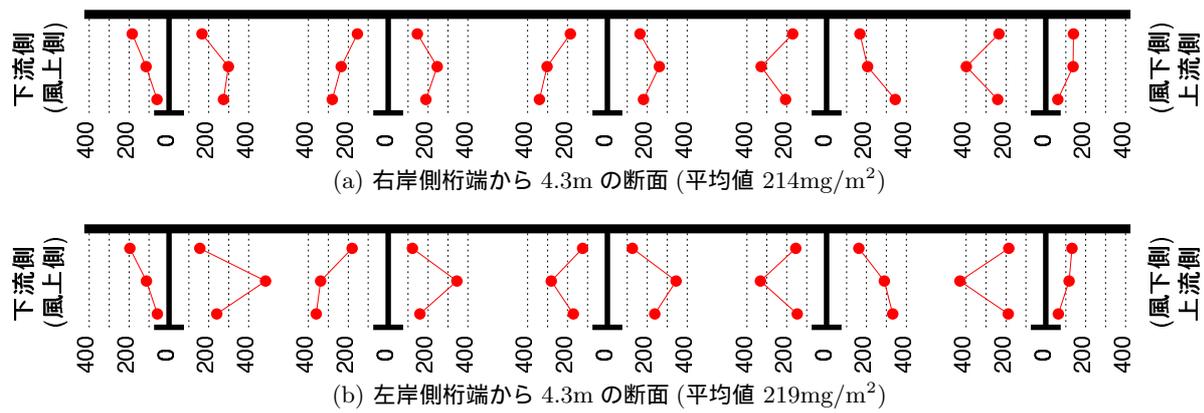


図-4 付着塩分の計測結果 (単位 : mg/m²)

流れによる物質移動のみを考えると、風の流れと物質拡散の基礎方程式は、以下のように表される。

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial(\rho v_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial s_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (j = 1, 2) \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial(\phi v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1c)$$

ここで、 ρ は空気密度、 v_i ($i=1,2$) は x_i 方向の風速、 p は圧力、 ϕ は物質 (飛来塩分) の濃度、また、 s_{ij} は空気の粘性による偏差応力であり、粘性係数を μ とすると、次式により与えられる。

$$s_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (2)$$

飛来塩分の数値シミュレーションでは、式 (1a),(1b) の流れ解析を行い、得られた風の流れ場を拡散方程式 (1c) に与えて、塩分濃度 ϕ を求める。

風の流れの解析では、差分法、有限体積法や有限要素法、拡散解析ではこれらの他に粒子法を用いた例がある。本論文では、式 (1) に O.C.Zienkiewicz ら¹⁵⁾ の CBS 法による有限要素法の定式化を適用する。この CBS 法は風速と圧力を分離し、圧力に関しては陰解法、速度に関しては陽解法となる分離形解法であり、レイノルズ数の高い流体の解析が可能である。

4. 橋梁断面周辺の飛来塩分の推定

物質の濃度分布は式 (1c) のように、線形性を有していることから、実測値の確認されている領域内の 1 地点での値と等しくなるように、式 (1c) の数値解を係数倍することで、実測値の求められていない位置の塩分濃度が求められる。そこで、上述の U 橋梁の断面細部を単純化した図-5 のような諸元および図-6 のような領域と境界条件のもとで、式 (1c) の解析を行う。このとき、領域内の風速が必要なため、式 (1a),(1b) による風の流れ解析も併せて行う。

自然風は、絶えず風向、風速が変化しているが、本論文では、橋梁周りの年平均飛来塩分を推定することを目的としていることから、時々刻々と変化する風は対象とせず、水平方向の一樣流中に置かれた橋梁周りの風の流れ解析と物質の拡散解析を行う。

解析対象としている U 橋梁は桁下から護岸水平部まで 2m 程度あることから、計算モデルでも桁下から下部境界 PQ まで 2m 設定している。QS 境界、RS 境界、PR 境界は計算の便宜上設けた境界であり、これらの境界は橋梁による風や物質の濃度の乱れの影響を受けない程度に離しておく必要がある。自由流出境界 QS では圧力 $p=0$ とし、RS 境界では風の流れは水平方向流れとして $v_2=0$ としている。流入境界 PR では風の流れの鉛直成分を $v_2=0$ としている。

QS 境界、RS 境界、PR 境界を大きく離すと計算量が増えることから、試算計算として、これらの境界を大きく離しての風の流れ解析を行い、詳細計算での PR 境界は、橋梁風上側の風の流れが水平と見なせる位置に設けている。RS 境界も、橋梁上面の風の流れが水平と見なせる位置に設けている。下流側の QS 境界では、橋梁により風の流れが乱され一樣流にはならないが、上流側と同じ距離の位置に設けている。図-6 に、このようにして決定したそれぞれの境界までの距離を示している。

風上側の流入境界 PR での風速と塩分濃度の入力値の時刻暦は、図-8 のように与える。このとき、風速の入力値は、U 橋梁最寄のアメダス観測所の年平均風速を参考に決める。図-7 に、写真-1(a) による飛来塩分計測を行った 2002 年 8 月から 1 年間の 16 方位毎の年平均風速を示す。気象庁から公表される平均風速は、方位は考慮せず、各風速の計測値の平均により算出されるが、方向に関する情報を有さないこのような平均風速は、飛来塩分のシミュレーションに用いる参考値としては不適切である。そこで、16 方位毎の観測風速の合計を、全方位の観測回数で除した方位別の年平均風速を、図-7 に示している。したがって、これらの 16 方

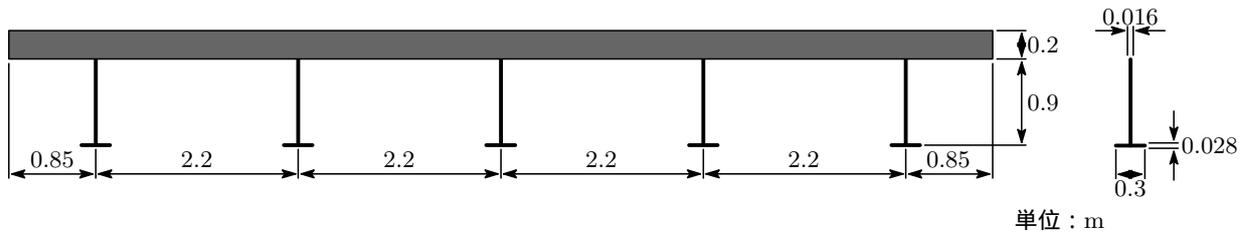


図-5 橋梁断面

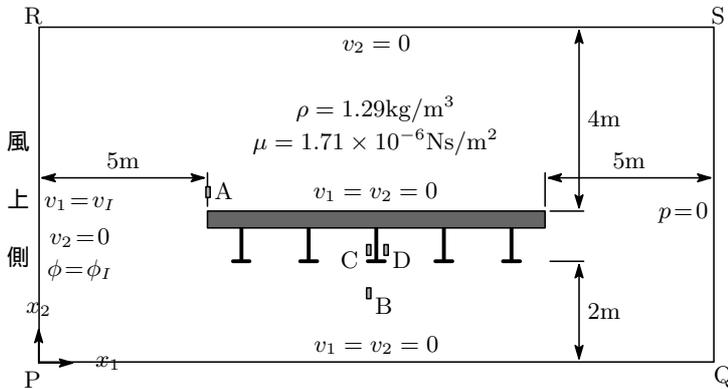


図-6 解析領域と境界条件

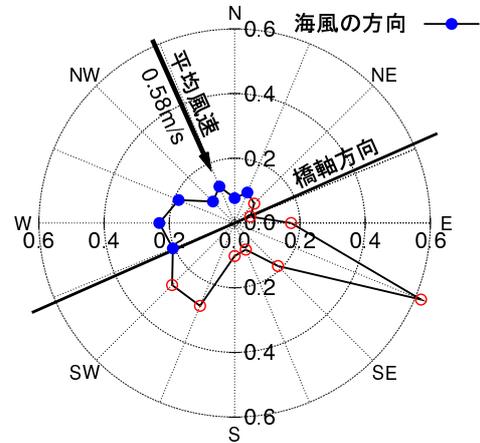


図-7 U 橋梁最寄のアメダス年平均風速 (m/s)

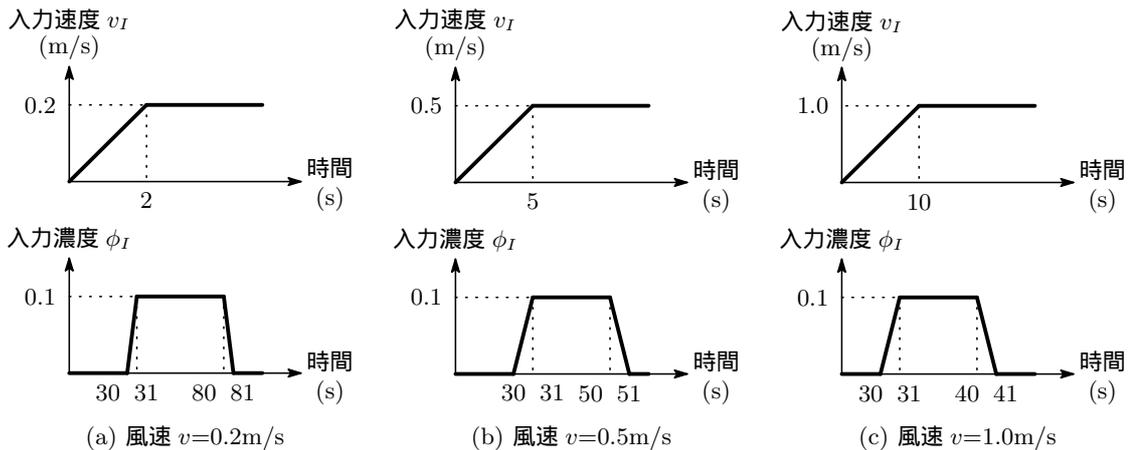


図-8 風速と濃度の入力値

位の平均風速を合計すると、気象庁から公表されている平均風速になる。この図中の青色充実丸印は、海塩粒子が飛来していると予想される海岸線方向を表している。これらの方向からの年平均風速の橋軸直角方向への投影成分の合計は、0.58m/sとなる。この数値をシミュレーションに用いる入力風速の参考値とする。

観測年により平均風速は若干異なるが概ねこのような数値になっている。アメダス観測所とU橋梁は2.2kmほど離れた同じような地形上に設置されていることから、アメダス観測所とU橋梁の風況は同じと考えられるが、観測年による違いや橋梁設置付近の局所的な地形の影響も考えられるので風速の入力値 v_I には、0.2m/s, 0.5m/s, 1.0m/s の3ケースを用いる。

ところで、写真-1による飛来塩分は、一定期間に飛

来した塩分の累積量であるので、数値計算から得られるある瞬間の塩分濃度 ϕ とは直接比較できない。そこで、次式のように定義した、解析時間を通してある点を通過する物質の累計 c を用いる。

$$c = \int_0^T \phi \sqrt{v_1^2 + v_2^2} dt \quad (3)$$

ϕ が質量濃度るとき、この c はある点の近傍を通過する単位面積あたりの物質の質量を表している。物理的な次元は飛来塩分と一致する。このことより、この物質通過累積 c の分布は、飛来塩分量の分布と相似になっていると考えられる。

そこで、塩分濃度の入力値 ϕ_I は、この物質通過累積量が $c = 1.0$ となるように決める。また、図-6の左側での入力風速により、数値計算された領域内全体の風の

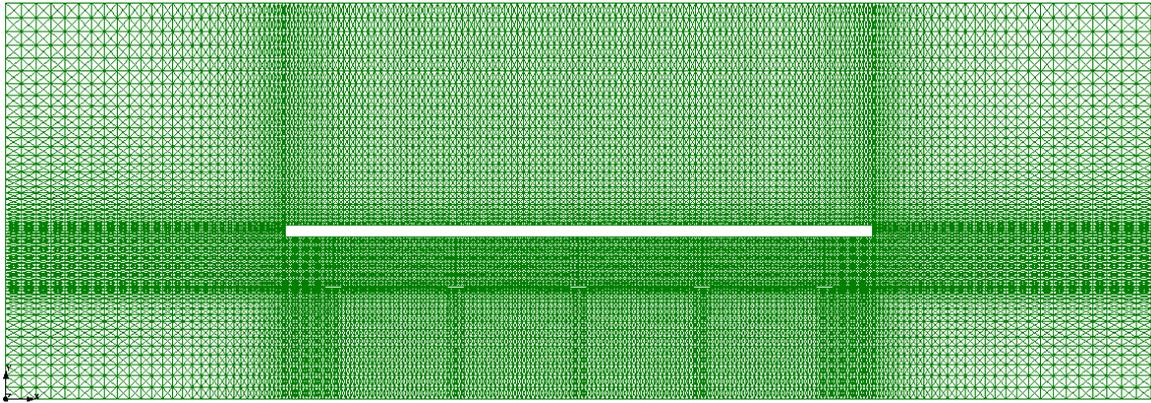


図-9 領域の要素分割

表-1 飛来塩分 (物質通過累積)

	観測値 (mdd)	計算値 (物質通過累積)			計算値 (飛来塩分換算*)		
		0.2m/s	0.5m/s	1.0m/s	0.2m/s	0.5m/s	1.0m/s
A	0.154	1.297	1.339	1.299	0.200	0.206	0.212
B	0.190	1.232	1.233	1.163	0.190*	0.190*	0.190*
C	0.063	0.100	0.272	0.208	0.015	0.042	0.034
D	—	0.021	0.146	0.096	0.003	0.022	0.016
E	0.129	—	—	—	—	—	—

* B 点の飛来塩分量が等しくなるように比例換算

流れが安定した後に塩分濃度を与える必要があるため、計算開始から 30 秒後に図-8 のような濃度 $\phi_I = 0.1$ を与える。濃度を入力する時間は $c = 1.0$ となる条件から決め、 $v=0.2\text{m/s}$ では 50 秒間、 $v=0.5\text{m/s}$ では 20 秒間、 $v=1.0\text{m/s}$ では 10 秒間としている。

3 節点要素を用いて図-9 のような要素分割を行い数値シミュレーションした結果を、表-1 に示している。この表には写真-1 の A, B, C, E 点の飛来塩分量と図-6 の A, B, C, D 点の物質通過累積の値を示している。また、表中右側 3 列は B 点の物質通過累積の値が飛来塩分量の観測値 0.190mdd に等しくなるように比例換算した飛来塩分相当の値を示している。図-6 の解析領域風上側の物質通過累積は $c=1.0$ であるので、A, B 点は橋梁断面の風上より、3 割ほど飛来塩分量が増えること、桁内の C, D 点では、風上での飛来塩分量に比べて、2, 3 割以下に減じた飛来塩分量になることが分かる。また、数値計算から算出した飛来塩分量を観測値と比較すると、計算値は、A 点では 25%程多く、C 点では半分以下の値になっている。

図-10 は、数値解析により得られた橋梁断面周辺の物質通過累積量の分布を表している。これらの図では、青の領域は $c=2.0$ 、緑の領域は $c=1.0$ 、赤の領域は $c=0.0$ を表している。すなわち、青から緑の領域は、入力値より飛来塩分量が多い領域、緑から赤の領域は、入力値より飛来塩分量が少ない領域を表している。これらの図より、桁内の飛来塩分は入力値より小さくなっているが、桁内への飛来塩分の回り込みの状況が風速に

より異なっていることが分かる。すなわち、 $v=0.2\text{m/s}$ の場合には、風上側外桁と隣の内桁の間に回り込み、 $v=0.5\text{m/s}$ 、 1.0m/s の場合には、その隣の桁内に回り込んでいることが分かる。

図-11 は、各風速ごとの下フランジ先端からウェブに平行な直線上の物質通過累積量 c の分布を示している。直接風の当たる風上側外桁付近の飛来塩分量が大きくなっている。また、桁内の飛来塩分量は回り込みの明確な面では他の面に比べて大きいこと。さらに、ウェブ上下部に比べてウェブ中央部の塩分量が大きくなっていることが分かる。これは、付着塩分の計測値 (図-4) と同様の傾向を示している。実際の付着量は雨水による洗い流しの影響があるため、外桁の計算値と実測値には違いがみられるが、桁内面については同様の傾向を示していることから、鋼表面付近の飛来塩分が付着するメカニズムを解明することで、付着量の推定が可能になるものと考えられる。

5. まとめ

本論文は、同一橋梁内の複数の箇所での飛来塩分計測、および桁の付着塩分計測を行った橋梁を対象に、有限要素法による数値シミュレーションにより、飛来塩分量を推定し、実測値との比較を行った。このとき、飛来塩分量の実測値との比較を行うために、数値計算から得られた塩分濃度と風速から物質通過累積を定義した。この数値シミュレーションでは、橋梁付近での一

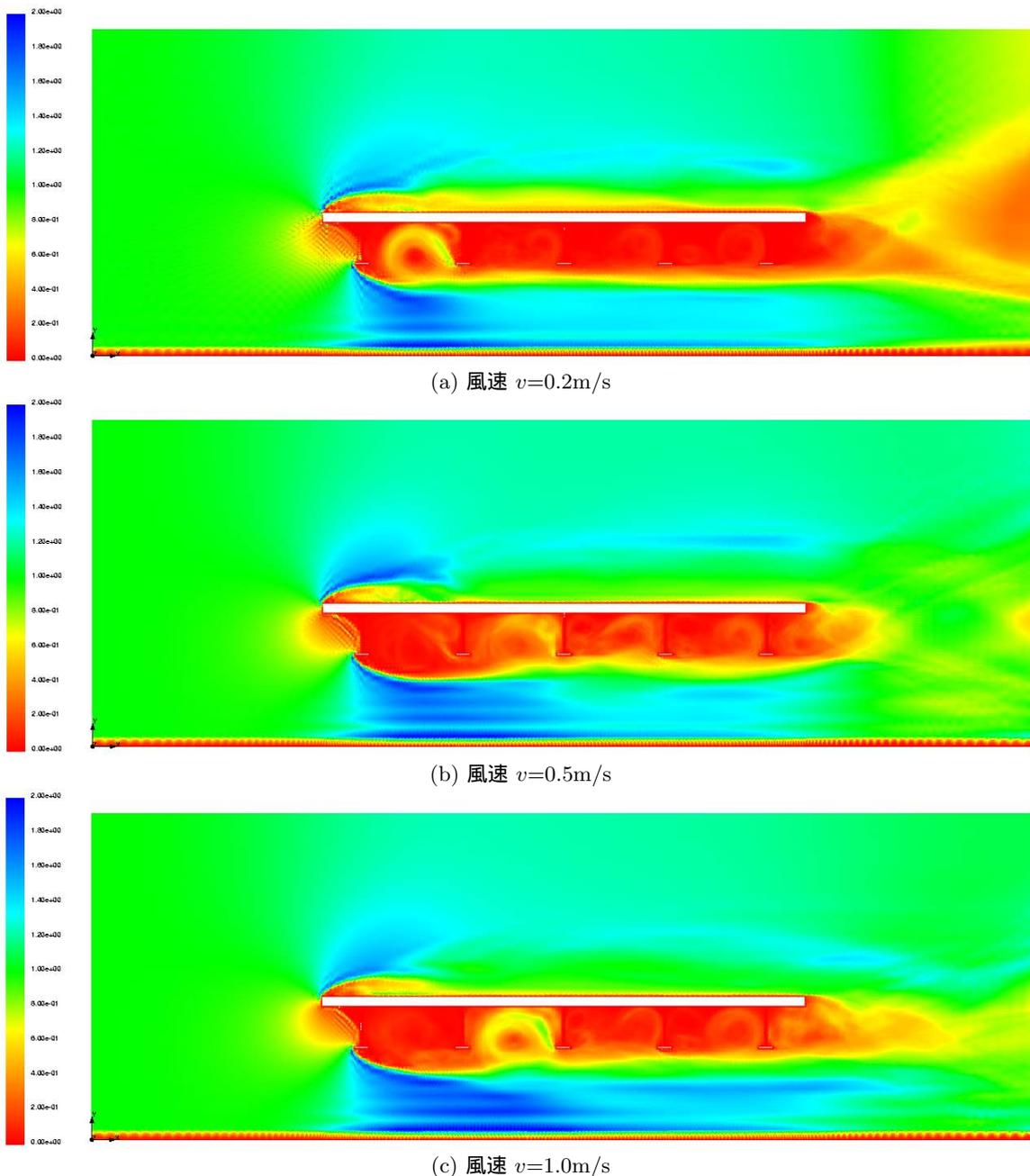


図-10 物質通過累積量の分布

地点での飛来塩分量が計測などで明らかになっていると、他の地点での飛来塩分量を算出することができる。すなわち、橋梁設置予定地点での飛来塩分量を計測しておくことで、与えられた断面形状の橋梁についての数値シミュレーションにより、橋梁内の局所的な位置での飛来塩分量を算出することができる。

実測値と数値シミュレーション結果の比較により、数値計算から得られた値は、桁下での飛来塩分量を基準とすると、実測値に比べて橋梁上部で25%程大きく、桁内で半分以下になった。橋梁上部と桁下では飛来塩分の計測方法や時期が異なることを考えると、概ね満足できる結果と思われる。一方、桁内での違いは大きく、

さらに検討する必要がある。これは、入力風速や流れ解析を行う上での単純化が影響しているものと考えられる。

一方、付着塩分量と数値シミュレーションにより得られた桁付近の物質通過累積量には、ウェブ上部で少なく、中央部で多くなるという同様の傾向が得られていることから、数値シミュレーションによる結果は、定性的な傾向を再現できていると考えられる。

入力風速が異なると図11のように桁付近での物質通過累積量の値が変化していることから風速依存性を有していることがわかる。また、本論文は層流れにより風の流れを計算したが、実際の自然風は乱流状態に

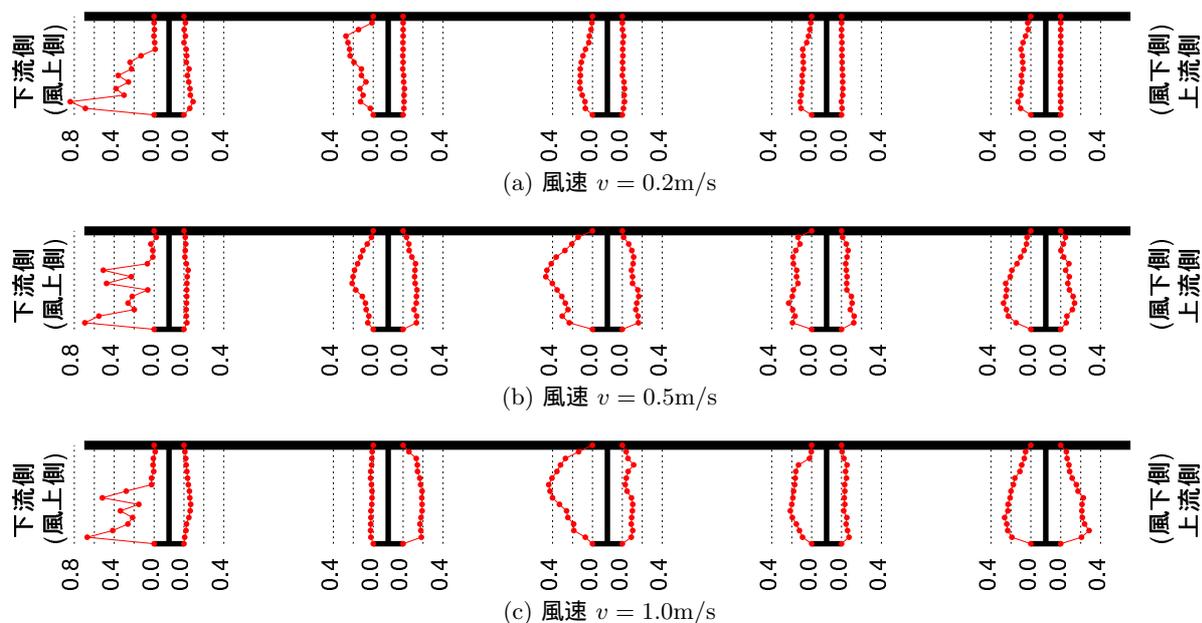


図-11 桁付近の物質通過累積

あり、乱流状態では、層流状態に比べて、物質通過累積量は平均化されることから、本論文の結果より、桁内での値は大きめになると考えられる。

今後、飛来塩分量の推定精度を向上させるために、入力風速、乱流に関する検討、3次元的な流れ場、拡散解析での検討を行う必要があると考えられる。また、付着塩分量を推定する上で、飛来塩分量と付着塩分量の関係について検討する必要がある。

謝辞：ドライガーゼ法による桁下、桁内の飛来塩分計測は、日本鋼構造協会 鋼橋性能向上研究委員会 耐候性鋼橋梁部会（主査：九州工業大学 山口栄輝教授）の研究活動の中で行ったものである。研究当時本学学生 成田英樹君、高橋拓也君、斉藤慎吾君、松岡寛和君、大谷啓誠君、横山友紀君には現地計測、資料整理の労をとって頂いた。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所, 鋼材倶楽部, 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX) 無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領 (改訂案), 共同研究報告書 No.88, 1993.
- 2) 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/I-70, pp.71-86, 2005.1.
- 3) 鹿毛 勇, 塩谷和彦, 竹村誠洋, 小森 務, 古田彰彦, 京野一章: 実暴露試験に基づくニッケル系高耐候性鋼の長期腐食量予測, Zairyo-to-Kankyo, 55, pp.152-158, 2006.
- 4) 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路巧祐, 日野幹雄: 飛塩 (海塩粒子) 拡散の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, Vol.40, pp.1036-1040, 1993.8.

- 5) 滝川 清, 山田文彦, 外村隆臣, 荒木宣博: 飛来塩分特性の数値モデルと防風ネットを用いたその抑制効果に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.45, pp.1181-1185, 1998.
- 6) 荒木宣博, 山田文彦, 田中健路, 外村隆臣, 滝川 清: 温度場を考慮した LES による飛来塩分拡散過程の 3次元数値シミュレーション, 海岸工学論文集, Vol.47, pp.1006-1010, 2000.
- 7) 武田勝昭, 加藤真志, 加賀屋健一, 柴田公博: 秋田県芋川流域地区での飛来塩分シミュレーションの試み, 第 56 回年次学術講演会, CS6-045, pp.344-345, 2001.
- 8) 管 哲夢, 伊良波繁雄, 富山 潤, 吉村 忍, 中林 靖: 海からの飛来塩分シミュレーションに関する研究, 第 58 回年次学術講演会, V-035, pp.69-70, 2003.9.
- 9) 山田文則, 細山田得三: 防風壁による飛来塩分の軽減効果に関する研究, 第 58 回年次学術講演会, II-263, pp.525-526, 2003.9.
- 10) 武田勝昭, 加藤真志: 橋梁断面部位毎飛来塩分量の流れ解析による予測, 第 54 回土木学会年次学術講演会, I-A204, pp.408-409, 1999.
- 11) 加藤真志, 武田勝昭: 飛来塩分の数値解析的評価技術の橋梁への適用 ~ 耐候性鋼材適用地域拡大への試み ~, 鋼構造論文集, 第 7 巻, 第 28 号, pp.45-54, 2000.
- 12) 小川彰一, 江口信三: Lagrange 粒子モデルを用いた PC 橋への海塩粒子付着のシミュレーション, 第 57 回年次学術講演会, V-533, pp.1065-1066, 2002.9.
- 13) 武田勝昭, 加藤真志: 飛来塩分シミュレーション技術の実用化に関する考察, 第 57 回年次学術講演会, I-267, 2004.9.
- 14) 伊良波繁雄, 田中孝和, 大城 勝, 富山 潤, 松原 仁: ランダムウォーク法による構造物周辺の飛来塩分拡散, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 5-135, pp.267-268, 2004.9.
- 15) O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor & P. Nithiarasu: The Finite Element Method for Fluid Dynamics, 6th ed., Elsevier, 2005.

(2006 年 9 月 11 日 受付)