

論文 新潟県佐渡島における構造物の表面塩分量の現地観測とその環境作用が及ぼす影響

中村 文則*1・大原 涼平*2・井野 裕輝*3・下村 匠*4

要旨: 本研究では、新潟県佐渡島を対象として構造物の表面塩分量の現地観測を実施し、その結果について検討を行った。さらに、佐渡島周辺の気象・波浪条件を再現した数値シミュレーションを実施し、個別の構造物に作用する環境条件(気象・波浪)を推定するとともに、表面塩分量との関係について検討を行った。その結果、四方が海で囲まれた地形では、各構造物の表面塩分量が海岸線の方向に応じて異なっており、佐渡島では北から西向きの海岸で塩分量が大きいことが示された。さらに、構造物の表面塩分量は、各地点の波浪条件に影響を受けている傾向が見られ、提案した算定式で概ね塩分量を推定できることが明らかになった。

キーワード: 塩害、表面塩分量、飛来塩分、気象、波浪

1. はじめに

各地域に応じた地形・気象・波浪条件などの環境作用から構造物の表面塩分量を的確に予測することができれば、構造物の塩害劣化対策において有効となる。現在では、地域と海岸からの距離によって構造物の表面塩分量を定める方法がコンクリート標準示方書¹⁾に記載されており、幅広く利用されている。ただし、この方法では、簡易的に表面塩分量を定めることができるが、地形および構造物の設置条件、気象・波浪条件等の環境作用の違いを考慮できないといった問題がある。その結果、構造物周辺の環境条件によっては、実際の値と推定される塩分量が大きく差が生じる場合がある。

既往研究では、塩分量のより精度の高い推定を行うために、海岸からの距離以外にいくつかの環境条件を含めた推定方法が報告されている。例えば、宇多ら²⁾は、飛来塩分の全国調査結果を再整理し、海岸状況を含めた環境作用から飛来塩分量を推定する算定式を提案している。崎原ら³⁾は、海岸近傍の風況を用いた飛来塩分の発生量の推定および海岸形状を分類した係数を考慮した推定を行うことで、その輸送量の推定精度を向上できることを報告している。著者ら⁴⁾は、新潟県沿岸を対象に海岸地形条件と表面塩分量の現地観測を実施し、空中写真から地形条件をパラメータ化して表面塩分量を予測する手法を報告している。

しかしながら、日本全国の地域特性に直接適用できるような汎用的な算定式は十分に確立されていない。特に、沖縄地方以外の四方が海で囲まれている島では、構造物に作用する塩分量を詳細に現地観測した事例は少なく、適用できる算定式も十分に提案されていない。このよう

な地形条件は、日本各地に数多く点在しているとともに、その環境条件から構造物の表面塩分量が大きいことが想定される。そのため、表面塩分量と環境作用の関係を整理し、簡易的に塩分量を推定できるようにしておくことは、構造物の維持管理において重要である。

本研究では、新潟県佐渡島を対象として構造物の表面塩分量の現地観測を実施し、その結果について検討を行った。さらに、佐渡島周辺の気象・波浪条件を再現した数値シミュレーションを実施し、個別の構造物に作用する環境条件(気象・波浪)を推定するとともに、表面塩分量との関係について検討を行った。

2. 構造物の表面塩分量の現地観測

2.1 観測場所および観測期間

現地観測場所は、新潟県西部に位置する佐渡島である。この島は、面積 854.76km²、海岸線長さ 280km、人口 5,9000人(平成 27 年 3 月)である。地形は、図-1 に示すように、北部に標高 1,172m の金北山、南部に標高 645m の大地山が位置しており、島の中央部は平地となっている。

観測期間は、2016 年 12 月 11 日～2017 年 3 月 30 日の約 110 日間である。この地域は日本海沿岸に位置しており、夏季には波浪が穏やかであるが、冬季には季節風の作用により、気象・波浪条件が厳しくなる特徴がある。

2.2 観測方法

観測方法は、2 種類のモルタル供試体を用いて表面塩分量の採取を行った。この方法は、モルタル中に浸透した塩分量を測定することで、コンクリートの表面塩分量を評価するものである。供試体 1 は(株)デンカ製のクロルサーチであり、寸法が縦 40mm、横 40mm、厚さ 5mm

*1 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)

*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 修士(工) (学生会員)

*3 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)

*4 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)

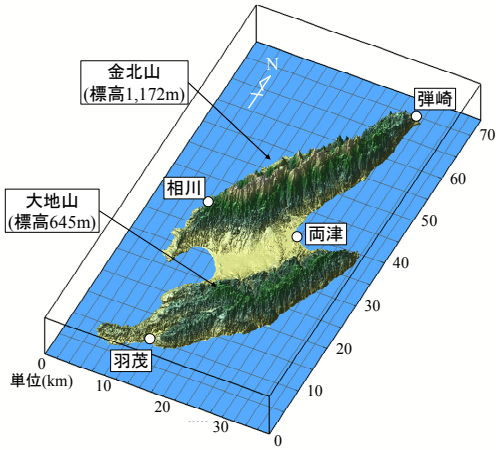


図-1 新潟県佐渡島

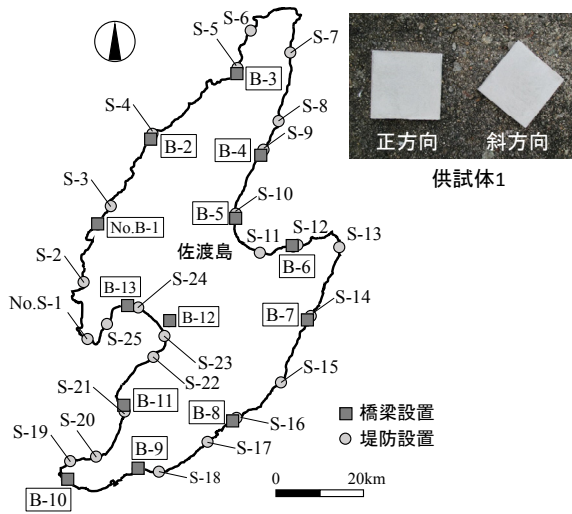


図-2 観測点の配置および供試体

のモルタル製の供試体である。供試体 2 は、寸法が縦 40mm、横 30mm、厚さ 5mm の水セメント比 50% の配合で製作したモルタル製である。供試体は、暴露面以外を防水加工し、両面テープを用いて構造物に設置した。

供試体の暴露終了後は、現地から分析室まで運び、モルタルを粉砕後、塩分量の測定を行った。測定方法は JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に基づき試料の処理を行い、イオン電極により塩化物イオン量の測定を行った。測定は各供試体に対して 3 回実施し、その平均値を整理した。その後、供試体に含まれる単位体積あたりの塩分量として整理した。

各観測点では、供試体の設置高さも合わせて測定を行った。高さの測定は、巻尺およびレーザー距離計(レーザーテクノロジー製)を用いた。

2.3 観測点の配置

観測点は、図-2 のように佐渡島沿岸全体を対象に配置した。供試体を設置した構造物は、海岸近傍に位置する橋梁および海岸堤防であり、橋梁が観測点 No.B-1～B-13 の 13 箇所、堤防が観測点 No.S-1～25 の 25 箇所と

表-1 供試体の設置条件と観測結果

観測点 (No)	塩分量 (kg/m ³)	設置高さ (m)	離岸距離 (m)	設置向き (度)	観測点 (No)	塩分量 (kg/m ³)	設置高さ (m)	離岸距離 (m)	設置向き (度)
B-1	22.8	3.3	42	286	S-7	3.8	2.7	8	97
B-2	23.6	5.2	33	284	S-8	2.0	2.6	11	102
B-3	22.7	5.3	61	293	S-9	15.2	3.2	0	101
B-4	1.3	6.2	0	100	S-10	0.4	1.2	45	121
B-5	1.0	3.8	109	90	S-11	6.2	3.7	9	25
B-6	4.6	2.9	16	338	S-12	2.2	3.5	22	353
B-7	1.4	3.5	0	105	S-13	欠測	2.0	14	103
B-8	0.8	3.6	23	165	S-14	1.2	3.1	0	107
B-9	0.8	5.4	139	161	S-15	6.5	1.7	14	181
B-10	3.6	31.4	0	165	S-16	0.4	2.0	15	146
B-11	27.4	5.3	0	249	S-17	2.4	2.9	0	153
B-12	0.8	8.0	1349	159	S-18	1.7	1.5	8	179
B-13	1.9	3.6	5	175	S-19	15.7	3.2	0	336
S-1	21.0	5.6	23	211	S-20	15.3	2.1	19	342
S-2	29.1	7.0	0	291	S-21	16.5	4.6	0	278
S-3	18.1	1.7	30	338	S-22	8.6	1.5	6	293
S-4	15.4	3.6	33	287	S-23	6.2	1.4	62	266
S-5	17.6	3.5	27	305	S-24	10.1	1.2	9	213
S-6	23.2	5.8	0	277	S-25	0.6	2.0	9	124

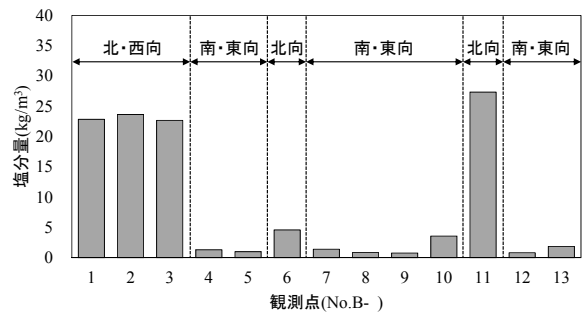


図-3 橋梁に設置した供試体の観測結果

した。橋梁に設置した供試体は、橋桁海側の地覆部または高欄部に設置し、図のように供試体 1 を正方向、斜方向となるように 2 つの方向で設置した。堤防に設置した供試体は、著者ら⁴⁾を参考に堤防の天端部分に設置した。各観測点の海岸からの距離、供試体の設置高さ、設置方向を表-1 に整理した。

2.4 観測結果

(1) 橋梁に設置した表面塩分量

橋梁に設置した供試体で採取した塩分量を整理した結果を図-3 に示す。図は、正方向と斜方向に設置した供試体の塩分量を平均した値である。図に示すように、北から西向きに海岸線に設置した観測点 No.B-1～B-3 供試体で塩分量が大きく、平均値が 23.0kg/m³ である。一方、東から南向きに設置した観測点 No.B-7～B-10 では平均値が 1.6kg/m³ であり、北西側の観測点と比較して 1/10 以下の塩分量となっている。これは、冬季の季節風が北西方向から吹き付けるため、その向きに面している海岸で飛来塩分量が大きくなることが要因であると考えられる。

観測点 No.B-6 では、北向きの海岸線に設置したものであるが、塩分量が少なくなっている。これは、No.B-6 が佐渡島の北東側の張り出た部分の背後に位置しているた

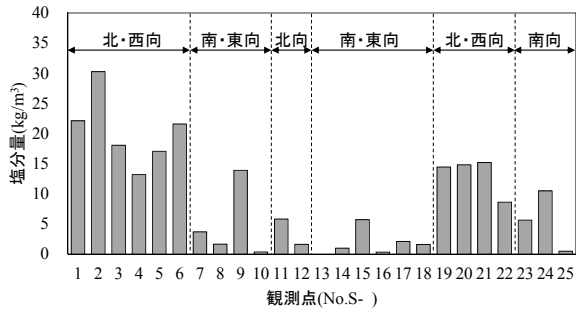


図-4 堤防に設置した供試体の観測結果

め、その影響で構造物に作用する風や波浪が穏やかになり、塩分量が低下したと考えられる。

(2) 堤防に設置した表面塩分量

堤防に設置した供試体で採取した塩分量を整理した結果を図-4に示す。観測結果は、北から西向きに海岸線に設置した観測点で塩分量が大きいことがわかる。北西側に設置した観測点 No.S-1～S-6 の平均値は 20.7kg/m³ であり、橋梁に設置した観測点の塩分量と大きな差は見られなかった。

観測点 No.S-11 と S-12 では、観測点が配置された海岸線の方向は北であるが、塩分量が小さい傾向にある。これらの観測点は、橋梁に設置した観測点 No.B-6 と同様に、佐渡島の北東側の張り出た部分の背後に位置しているため、塩分量が小さくなっている。逆に、南向きの海岸線に設置した観測点 No.S-9 では、塩分量が 15kg/m³ と大きくなっているが、これは消波ブロックの背後に設置した観測点であり、ブロックから発生した海水しぶきを直接受けていることが影響していると考えられる。

また、設置したモルタル供試体が含有できる最大塩分量は 30kg/m³ 程度であり、観測点 S-2 の塩分量 29.1kg/m³ は限界値まで到達している可能性がある。

(3) 供試体の設置条件と表面塩分量の関係

供試体の設置条件と表面塩分の関係を確認するために、設置高さおよび海岸からの距離に応じた表面塩分量の観測結果について整理した。表面塩分量と設置高さの関係を整理したものを図-5に示す。図では、観測結果の塩分量は北・西向きに設置した供試体で大きく、供試体の設置高さの増加とともに、塩分量が増加している傾向が見られた。これは、大気中の飛来塩分量の鉛直分布が地表面から数 m 程度高い位置で、塩分量が最大となるためであると考えられる。

海岸の汀線からの距離と表面塩分量との関係を図-6に示す。図の汀線からの距離は、空中写真を参考に、供試体の設置位置から最短の距離で測定した値である。図に示すように、汀線からの距離が短い条件でも東向に設置した供試体は塩分量が少なく、西向の供試体で塩分量が大きい傾向が見られる。また、汀線から 30～50m 付近

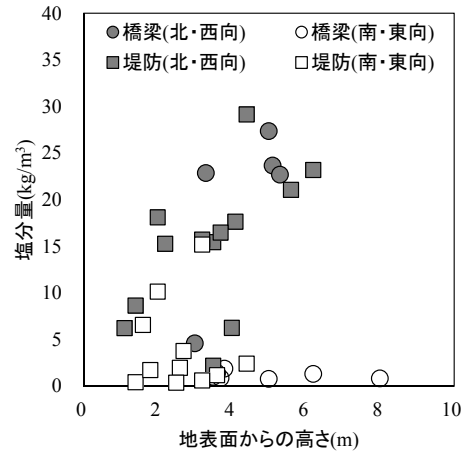


図-5 供試体の設置高さと塩分量

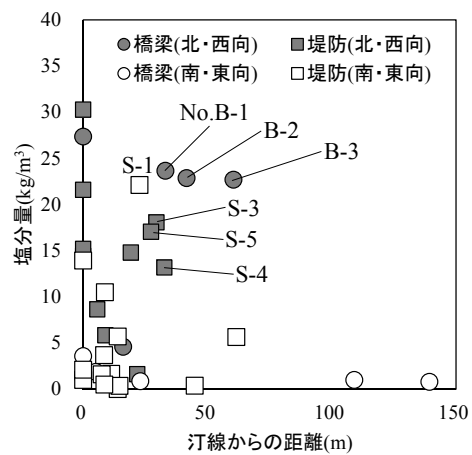


図-6 海岸からの距離と塩分量

の一部の供試体では、塩分量が大きくなっており、汀線からの距離と塩分量に明確な関係が見られなかった。これらの塩分量が大きくなっている観測点は、佐渡島の北西側に設置した観測点である。

以上より、塩分量は供試体の設置した海岸線の向きに大きく影響を受けており、各観測点に作用している気象・波浪条件が塩分量に影響している可能性がある。そのため、塩分量と環境作用の関係について検討を行った。

3. 構造物周辺の環境作用と表面塩分量の関係

3.1 佐渡島に作用する気象条件

佐渡島では、気象庁が公開しているアメダス⁵⁾の観測点が設置されており、相川、弾崎、両津、羽茂の4地点のデータが公開されている。図-7は、2016年12月～2017年3月の4つの地点の風向を整理した結果である。図に示すように、相川および弾崎観測点では、北西または西北西の風向の頻度が高く、海側からの風が卓越している傾向が見られる。羽茂観測点では、北北東の風向の頻度が高くなっており、海岸線に並行となるような風が卓越している。両津観測点では、西からの風が卓越しており、陸側からの風が作用していることがわかる。

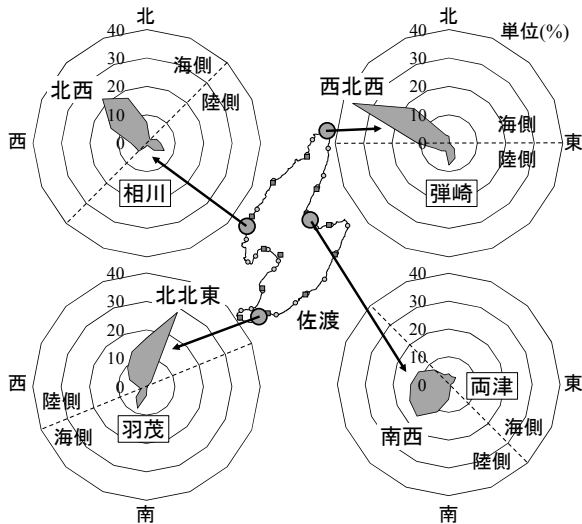


図-7 気象庁の観測点における風向頻度

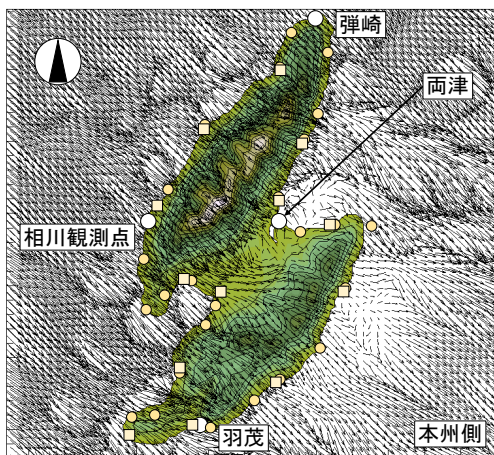


図-8 佐渡島周辺の風速分布(2016年1月21日)

この結果から、佐渡島の風況条件は地形条件の影響を受けて各地点で異なっており、4つの地点の観測結果だけでは、塩分量の各観測点に作用している風速・風向を推定するのは困難である。そのため、新潟県上空を対象に風速分布の数値シミュレーションを行い、各観測点に対応した風速・風向を予測した。

3.2 各観測点の風速・風向と表面塩分量の関係

(1) 計算モデルと計算条件

風速分布の計算は、米国気象センター(NCAR)によって開発されている領域気象モデル WRF(Weather Research & Forecasting Model)⁹⁾を用いた。計算領域は、日本本州列島を中心に東西方向945km、北南方向900kmの範囲であり、4段階のネスティングを行った。佐渡島周辺での計算格子間隔は500mとなるように設定した。計算は、冬季の季節風が卓越した日の平均的な気象条件であった2016年1月21日0:00を再現することとした。

(2) 計算結果

佐渡島周辺の風速・風向分布の計算結果を図-8に示す。図の風速・風向は、地表面から高さ10mの位置の値

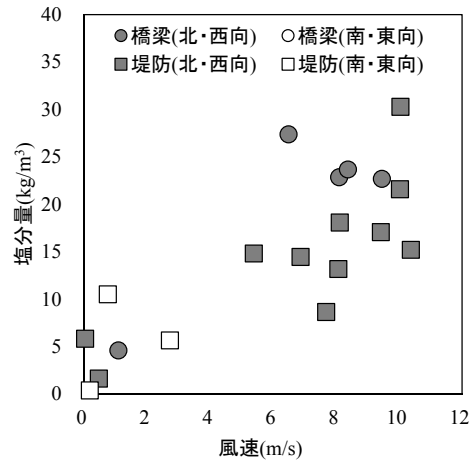


図-9 各観測点の塩分量と風速の関係

であり、2016年1月21日0:00の瞬間的な風の分布である。図に示すように、風は佐渡島に対して北西方向から作用しており、気象庁の観測結果の風向と概ね一致している傾向が見られた。気象庁の両津観測点では、陸からの方向の風が卓越する計算結果となっており、観測結果と概ね一致する傾向が得られた。

表面塩分量の各観測点の塩分量と風速・風向の傾向を整理した結果を図-9に示す。図の風速は、供試体に対して垂直に吹き付ける方向に換算した値であるとともに、べき乗則を用いて供試体の各設置高さの風速に補正した結果である。また、陸からの風が作用するような観測点は除外した。図に示すように、各観測点に作用している風速は5m/s以上の条件では、塩分量が7kg/m³以上になっている。塩分量は、堤防に設置した観測点のほうが橋梁に設置したものより若干小さく、塩分量にばらつきが見られる。塩分量と風速では、風速の増加に合わせて塩分量も大きくなる傾向があり、海岸側からの風が影響を受けて変化していることがわかる。

今回は平均的な日の風速・風向の値で塩分量を整理しているが、観測期間中に作用した風速・風向の頻度を考慮して整理することで、塩分量と風況の関係をより明確に示すことができると考えられる。

3.3 佐渡島に作用する波浪条件

佐渡島の周辺では、国土交通省港湾局のNOWPHAS⁷⁾の新潟沖と直江津観測点の2点が設置されているため、そのデータを整理した。図-10および図-11は波浪観測結果を整理したものである。図は、現地観測を実施した2016年12月~2017年3月までの期間に来襲した波の波高を整理した結果である。図では、全体的な傾向として12~2月までの期間で波高が大きく、3月では減少する傾向が見られる。これは、既往研究⁸⁾で観測されている新潟県の冬季の飛来塩分量の変動傾向とも一致している。表面塩分量の観測期間中では、2017年2月2日に最も高

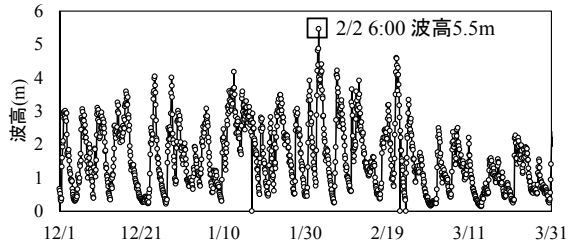


図-10 波浪観測結果(新潟沖観測点)

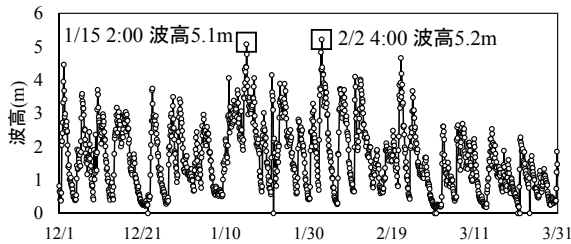


図-11 波浪観測結果(直江津観測点)

い波高が観測されており、新潟沖観測点で有義波高5.5m、直江津で5.2mである。この結果から、新潟沖と直江津観測点の2つの地点で、波高に大きな差がなく、その中間に位置している佐渡島も波浪観測点と同様の傾向であると考えられる。

ただし、佐渡島の形状から南東側では、島によって波が遮蔽される領域ができるため、同時間においても各地点で波浪条件が異なる可能性がある。そのため、新潟県沿岸を対象とした波浪を数値シミュレーションによって推算し、各観測点に作用する波浪条件について推定した。

3.4 各観測点の波浪条件と表面塩分量の関係

(1) 計算モデルと計算条件

波浪推算シミュレーションモデルを構築し、佐渡島周辺の波浪条件について計算を行った。波浪条件の推定は、海岸工学分野で確立されている式(1)のエネルギー・平衡方程式モデルとした。

$$\frac{\partial}{\partial x}(SC_g \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial y}(SC_g \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{SC_g}{C_c} \left(\frac{\partial C_c}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C_c}{\partial y} \cos \theta \right) \right\} = -\frac{\varepsilon_b C_c}{\sqrt{dx \cdot dy}} S \quad (1)$$

ここで、 S は波の方向スペクトル密度、 C_c は波速(m/s)、 C_g は波の群速度(m/s)、 θ は波向(度)、 ε_b は砕波する波のエネルギーの割合を示した値、 dx 、 dy は x および y 方向の格子間隔(m)である。計算領域は、佐渡島周辺の東西方向131km、北南方向144kmの範囲であり、計算格子間隔は110mである。計算は、風の計算条件に合わせて2016年1月21日を再現した条件で実施した。

(2) 計算結果

佐渡島周辺の波高分布と波向を推算した計算結果を図-12に示す。図の矢印は波向であり、2016年1月21日0:00の瞬間的な値を再現したものである。図に示すよう

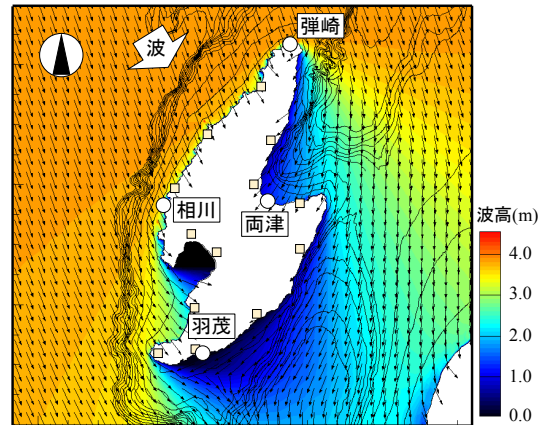


図-12 佐渡島周辺の波高分布(2016年1月21日)

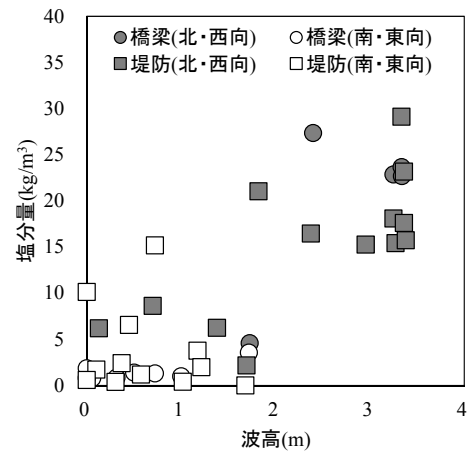


図-13 各観測点の塩分量と波高

に、波は、佐渡島に対して北西方向から来襲しており、島の北西側の沿岸部で波高が大きく、その背後となる地点では減少している傾向が見られる。この傾向は、現地観測で得られた表面塩分量の変動傾向とも一致している。

図-13は、各観測点の表面塩分量と波高を比較したものである。図の値は、各観測点の沖海域水深20m付近の位置で波高を抽出した結果である。図に示すように、波高1~2m程度の条件では、塩分量10kg/m³以下の値が多く、波高が2m以上では塩分量15kg/m³以上に分布している。塩分量は、波高の増加とともに大きくなる傾向が見られ、風況条件だけでなく波浪条件にも影響していることがわかる。

4. 環境作用による各観測点の表面塩分量の推定

4.1 表面塩分量の算定式の提案

環境作用の影響から表面塩分量を推定するための算定式の提案を行った。算定式は、宇多ら²⁾の算定式を参考に式(2)とした。

$$D = D_b \cdot \exp(-c \cdot z) \cdot \exp\{-(b/u) \cdot x\} \quad (2)$$

ここで、 D は表面塩分量(mg/dm²/day)、 z は鉛直高さ(m)、 b は距離による塩分量の減衰に関する係数(=0.018)(1/s)、 u は海岸からの風速(供試体に対して垂直に吹き付ける方

向に換算した風速), x は離岸距離(m)である。係数 c は、高さによる減係数衰係数(1/m)であり、現地観測では塩分量と高さの関係が指数的に減少する結果が得られなかったため、今回の検討では 0.0 とした。

D_b は汀線位置での塩分量(mg/dm²/day)であり、著者ら⁸⁾を参考に波浪条件を含めた式(3)と仮定した。

$$D_b = \beta \cdot u^p \cdot H_w^q \quad (3)$$

ここで、 H_w は水深 20m の位置での波高(m), p , q は係数であり、それぞれ 1.0 を設定した。 β は海岸係数(=0.365)であり、個別の海岸の状況によって変化する係数である。今回の現地観測では、ほとんどが海岸で岩礁または消波ブロックが設置されているような状況であったため、係数 β は観測結果と一致するような一定値とした。

4.2 表面塩分量の推定結果

表面塩分量の推定結果と観測結果の関係を示した結果を図-14に示す。図の現地調査結果の値は、供試体の厚さが異なるものとして、単位時間当たりの塩分量に単位換算したものである。図より、算定式で現地観測結果の傾向を再現できていることがわかる。塩分量と風・波浪条件の関係をより明確に示すことができれば、推定精度を向上させることができると考えられる。この結果より、風速と波高から飛来塩分の発生量を推定することで、現地観測で得られた塩分量を推定できることがわかった。

ただし、この算定式は、既往研究²⁾の土研式で測定された降雨の洗い流しがない塩分量を参考にしたものである。今回の観測で使用したモルタル供試体では、降雨による洗い流し効果が含まれるため、環境作用の一つとして、算定式にその影響も考慮できるようにする必要がある。

5. 結論

新潟県佐渡島を対象に構造物の表面塩分量の現地調査を実施するとともに、個別の構造物の環境作用と表面塩分量との関係について検討を行った。その結果、四方が海で囲まれた地形では、各構造物の表面塩分量が海岸線の方向に応じて異なり、佐渡島では北から西向きの海岸で塩分量が大きいことが示された。さらに、構造物の表面塩分量は、各地点の風と波浪条件に影響を受けて変動している傾向が見られたとともに、提案した算定式で概ね塩分量を推定できることが明らかになった。

今後は、気象・波浪・地形条件と表面塩分量との関係を定量化するために、現地調査の地点を追加してデータを増加させるとともに、簡易的かつ高精度で表面塩分量を予測できる手法について検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費「環境作用によ

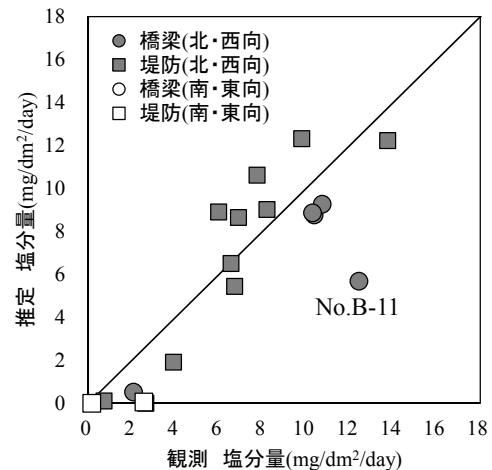


図-14 推定塩分量と観測塩分量

る構造物の環境劣化システムの開発」(若手研究(A), 研究代表者: 中村 文則, 課題番号: 17H04931), 一般財団法人新潟県建設技術支援センター「新潟県の橋梁の塩分自動予測システムの構築」の一環として行ったものである。また、新潟大学佐伯竜彦教授には、モルタル供試体の提供およびその測定方法について助言を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会: 2013 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.172-173, 2013
- 2) 宇多高明, 小俣篤, 小西正純: 海岸からの飛来塩分量の計算モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.1051-1056, 1992.11
- 3) 崎原康平, 比嘉孝之, 山田義智, 湯浅 昇: 沖縄本島における飛来塩分輸送状況の推定に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014.7
- 4) 中村文則・井野裕輝・大原涼平・下村 匠: 空中写真を利用した海岸環境の数値化とそれに応じた飛来塩分量の算定手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.39 No.1, pp.745-750, 2017.7
- 5) 領域気象モデル(Weather Research & Forecasting Model): <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>
- 6) 気象庁: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>
- 7) 国土交通省港湾局: 全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS:NationwideOcean Wave information network for Ports and HarbourS), <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 8) 中村文則, 下村 匠, 生田麻実, 細山田得三: 数値シミュレーションを援用した構造物各部位の到達塩分量の予測手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.37 No.1, pp.775-780, 2015.7