論文　長崎県軍艦島における飛来塩分輸送状況の推定に関する考察

清水　峻[*1]・崎原　康平[*2]・山田　義智[*3]・濱崎　仁[*4]

要旨：本稿では，長崎県端島（軍艦島）における飛来塩分輸送状況について検討することを目的としている。ここでは，まず軍艦島の風況と海岸付近における発生飛来塩分量の相関を検討した。次に，風況や海岸からの距離と標高を考慮した筆者ら提案の飛来塩分輸送推定式および既往研究の飛来塩分輸送推定式を用いて，軍艦島内陸部における飛来塩分量の推定を行った。その結果，提案式は内陸部へ輸送される飛来塩分を推定できる可能性が示唆された。また，提案式を用いて軍艦島の飛来塩分輸送状況 Map を作成し，飛来塩分輸送状況を可視化した。

キーワード：塩害，飛来塩分，海岸からの距離，標高，減衰係数，飛来塩分輸送推定式

1. はじめに

2009 年 1 月，長崎県端島（以後，軍艦島と称す）は「九州・山口の近代化産業遺産群」の一部として，世界遺産暫定リストに追加記載され，世界遺産の登録に向けて保存が検討されている。軍艦島は四方を海に囲まれている小島であり，塩害環境の非常に厳しい場所である。軍艦島には 1974 年の終堀に至るまでの間に RC 造の高層建築物が 30 棟余り建設されている。そのため，歴史的遺産の保護の観点からも，軍艦島における飛来塩分の飛散状況を把握することは重要である。

飛来塩分は海岸付近で発生し，海風によって内陸部に輸送される。輸送される飛来塩分量は風況や海岸からの距離，標高，周囲の構造物などの様々な要因が影響すると考えられる。

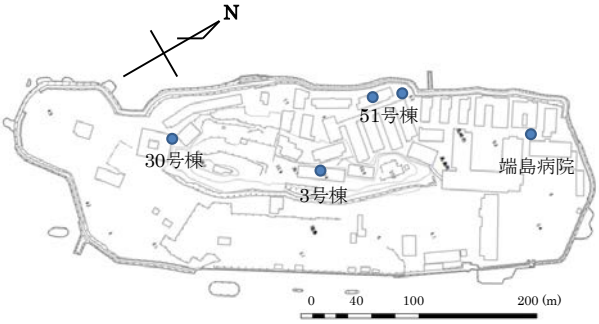
現在，内陸部へ輸送される飛来塩分の輸送量や分布状況については，解析的手法，理論的手法および実験的手法などの様々な研究や調査がなされている[1)~8)]。その中で国土交通省の橋梁マネジメントシステム[5)]は，地域区分や海岸からの距離を考慮した飛来塩分輸送推定式を提案している。一方，筆者らは海岸からの距離（以後，海岸距離と称す）だけではなく，風況や標高の影響も考慮した簡便な飛来塩分輸送推定式[8)]を提案している。

そこで，本研究では飛来塩分の影響が厳しい環境である長崎県の軍艦島において，飛来塩分の発生量を推定し，その発生飛来塩分量をもとに筆者らが提案した飛来塩分輸送推定式を用いて，内陸部へ輸送される飛来塩分量の検討を行い，提案推定式の有効性を検証した。さらに，推定した飛来塩分の輸送状況を地図情報および統計処理ソフトウェアを用いて飛来塩分輸送状況 Map を作成し，飛来塩分の輸送状況を階層的に可視化することを試みた。

2. 飛来塩分の測定について

2.1 飛来塩分の測定

飛来塩分の観測地点は**図－1** に示すように端島病院（以後，病院と称す）付近に 1 箇所，51 号棟の屋上に 1 箇所と同棟付近の地上に 1 箇所，3 号棟の屋上に 1 箇所，30 号棟付近に 1 箇所の計 5 箇所で行った。**表－1** に海岸から観測地点までの距離および標高を併せて示す。飛来塩分の捕集には改良した土研式飛来塩分捕集器を用いた。この飛来塩分捕集器の捕集口はそれぞれ東西南北に面するように設置した。なお，風況および飛来塩分の観測期間は，2011 年 10 月から 2014 年 10 月の 3 年間である。



図－1　飛来塩分観測地点

表－1　各観測地点の標高および海岸までの距離

観測地点	各方向の距離D（m）				標高H（m）
	北	西	南	東	
端島病院	33	42	240	98	7
51号棟地上	13	15	284	178	5
51号棟屋上	27	13	268	179	35
30号棟	105	37	98	129	11.5
3号棟	144	90	166	101	48

※ただし，標高には 51 号棟屋上と 3 号棟は建物高さも含む

*1 琉球大学大学院　理工学研究科環境建設工学専攻　（正会員）
*2 琉球大学　工学部環境建設工学科助教　工博　（正会員）
*3 琉球大学　工学部環境建設工学科教授　工博　（正会員）
*4 芝浦工業大学　工学部建築学科准教授　工博　（正会員）

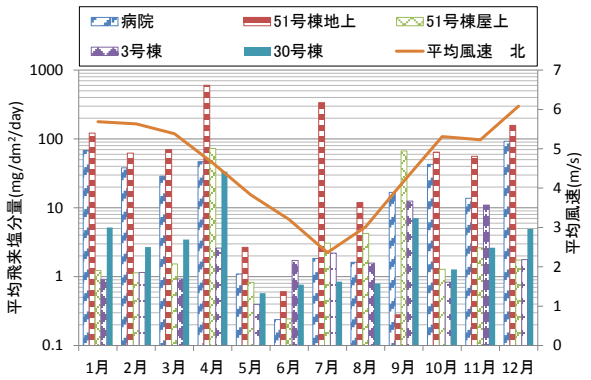
2.2 飛来塩分の分析方法

飛来塩分は月に一度回収し，塩化物イオン選択性電極による電位差滴定法を用いて塩化物イオン量（Cl^-値）の測定を行った。ただし，本稿で示す塩化物量についてはすべて NaCl 値として表記とする。

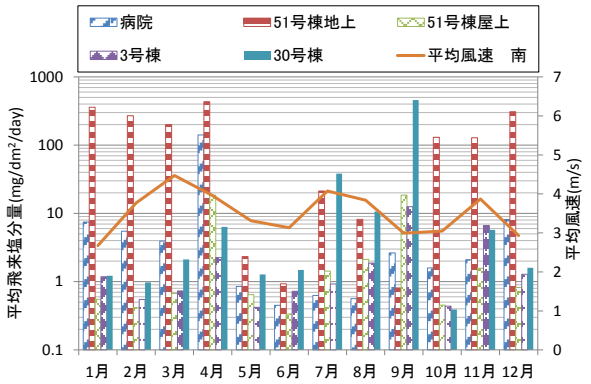
2.3 各月の飛来塩分の傾向

図－2 および**図－3** に軍艦島の各観測地点における各月の平均飛来塩分量と各月の平均風速を示す。なお，**図－2** は北面の飛来塩分量であり，**図－3** は南面の飛来塩分量である。

図－2 から，冬場は北寄りの季節風のため，北方向の平均風速が高くなっており，これに対応して飛来塩分量が多くなっている傾向が確認できる。一方，**図－3** では飛来塩分量と平均風速の相関は低い。これは，3 号棟を除く観測地点の南側には丘や多くの高い建築物が存在し，南側が直接吹き込みにくいことの影響が考えられる。**図－2** および**図－3** において，51 号棟地上付近の飛来塩分量が全体的に高くなっているのは，海岸との距離が非常に近いため，波飛沫が直接捕集器に入り込んでいる可能性が考えられる。また，4 月，7 月および 9 月の飛来塩分量が比較的多い理由は，観測期間中に低気圧や台風が発生し通過したためと考えられる。



図－2　各観測地点における飛来塩分量（北）

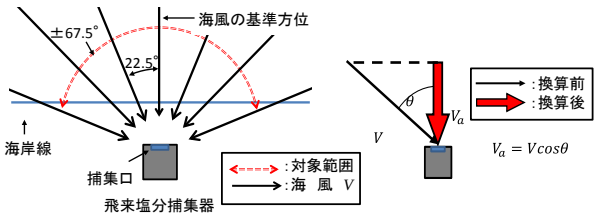


図－3　各観測地点における飛来塩分量（南）

3. 海風の風況と発生飛来塩分量について

3.1 海風および平均風速の定義

ここでは，海風とその平均風速の定義を示す。海風は飛来塩分捕集器が海に面する方位に対し±67.5°の方位の風を対象とした。また，その方位の風速を飛来塩分捕集器の捕集面に直行する方位の風速に変換し，平均することで海風の平均風速 V_a と定義した（**図－4** 参照）。



図－4　海風と風速の定義

3.2 海岸付近での風況について

本研究において，風況の観測データは野母崎気象観測所のデータを使用した。ただし，軍艦島と野母崎気象観測所の標高と地表面の粗度は異なるため，野母崎で観測した風速が異なることが予想される。そこで本研究では，日本建築学会建築物荷重指針 [9]を参考に，野母崎の風速観測装置の設置高さと地表面の粗度を考慮に入れて，観測された風速を軍艦島の地表粗度に対応した風速に換算した。なお，野母崎の風向と軍艦島の風向は同じとした。

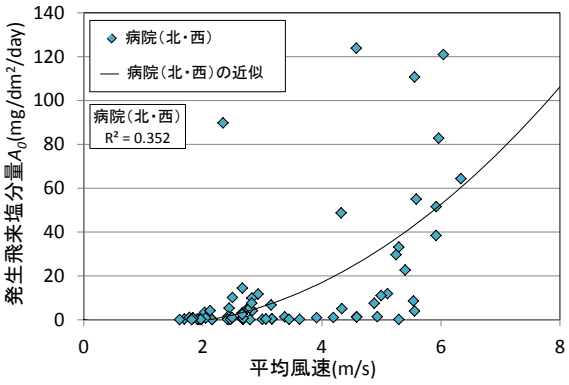
3.3 風況と発生飛来塩分の相関について

ここでは，風況と発生飛来塩分量の関係について検討した。発生飛来塩分量とは，海岸付近での飛来塩分量であり，文献 8)では，海岸距離が約 38m，標高が約 5m での地点で定義している。そこで，本研究においては，上記の条件に近い病院地点での飛来塩分量を発生飛来塩分量 A_0 とした。**図－5** に軍艦島における北および西の平均風速 V_a と病院の北および西の発生飛来塩分量 A_0 の関係を示す。文献 1)において，発生飛来塩分量は平均風速の二乗に比例するとしており，また文献 8)においても発生飛来塩分は平均風速の二乗に比例する傾向が確認されている。そこで本研究でも二乗則による近似曲線で相関を検討した。なお，同図に示す飛来塩分量は，台風によって直接的に波飛沫などの影響を受けた異常に高い数値は取り除いている。

図－5 に示すように，発生飛来塩分量はばらつきはあるものの，全体的な傾向としては，二乗則が確認される。しかし，平均風速が 5m 以上になると二乗則と比べて，発生飛来塩分量は急激に大きくなることがわかる。これは，軍艦島の砕波や波高による影響が考えられる。ところで，小窪ら [6]は発生する飛来塩分量が波高に影響されるとの知見を示している。しかし，本研究ではこれらの要因について検討をしていないため，今後の課題とした

い。**図－5** から軍艦島の海岸付近における発生飛来塩分量 A_0 と平均風速 V_a の関係を二乗則で近似すると式(1)が得られる。なお，式(1)は平均風速が風速 1m/s 以下では，飛来塩分は発生しないとしている。

$$A_0 = 2.03906 \times (V_a - 1)^2 \quad (V_a \geq 1.0m/s) \qquad (1)$$



図－5　風況と発生飛来塩分量の相関

4. 飛来塩分輸送量の推定

筆者らはこれまでに，飛来塩分は海岸からの水平距離（以後，海岸距離と称す）や標高が大きくなるにつれて減衰していくことを示し，また各方位における海岸距離 D（m）と標高 H（m）の積 $D{\cdot}H$（m^2）に相関があるものと仮定し検討を行っている [8]。そこで本研究でも，上記の方法に従い軍艦島の飛来塩分輸送量を推定する。

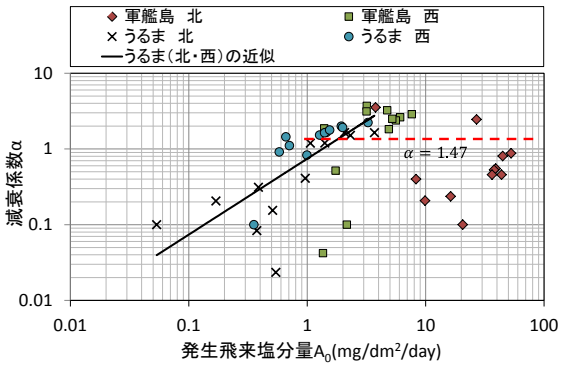
4.1 飛来塩分輸送推定式

筆者らは，海岸距離 D（m）と標高 H（m）の積 $D{\cdot}H$（m^2）に相関があると仮定した飛来塩分輸送推定式（式(2)）を提案している [8]。

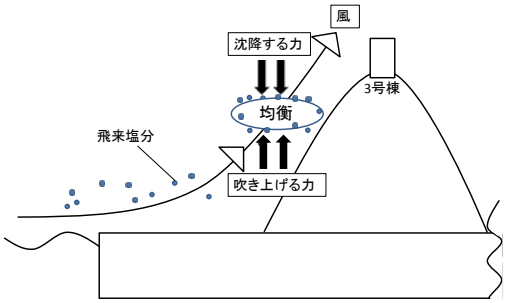
$$A = A_0 \left(\frac{D \cdot H}{D_0 \cdot H_0} \right)^{-\alpha} \qquad (2)$$

ここで，A は任意地点の飛来塩分量（mg/dm²/day），A_0 は任意地点の発生飛来塩分量（mg/dm²/day），D と H は任意地点の海岸距離（m）と標高（m），D_0 と H_0 は病院の海岸距離（m）と標高（m），αは減衰係数である。なお本検討では，病院を基準としているため式(2)においては，$D{\cdot}H$ を $D_0{\cdot}H_0$ で除している。

減衰係数αについては，発生飛来塩分量が異なれば，それに対応して値が変化することが予想される [8]。そこで本研究では，発生飛来塩分量と減衰係数の検討を行った。検討方法としては，軍艦島の各観測地点で実測した観測期間中の月平均毎の飛来塩分量 A，海岸距離 D，標高 H，病院の海岸距離 D_0 と標高 H_0，および式(1)によって求めた発生飛来塩分量 A_0 の各値を式(2)に代入して，非線形最小二乗法によって減衰係数αを算出した。



図－6　発生飛来塩分量 A_0 と減衰係数αの関係



図－7　軍艦島の地形と風況・飛来塩分の関係

図－6 に軍艦島と沖縄県うるま市の発生飛来塩分量 A_0 と減衰係数αの関係を併せて示す。**図－6** から，うるま市の減衰係数αは発生飛来塩分量 A_0 が多くなると大きくなることが確認できる。これは，発生飛来塩分量が多くなると，その平均飛沫粒子径が大きくなり，飛沫粒子の落下速度が速くなることで内陸部における減衰が大きくなるためと推察される。しかし，軍艦島においては必ずしもそのような傾向は見られず，同図に示すように発生飛来塩分量 A_0 と減衰係数αには明確な相関関係が認められない。この理由として，軍艦島の中央部分は南西から北東にかけて小高い丘になっており（**図－12(a)** 参照），海岸からの飛来塩分を輸送する風が丘によって上空に吹き上げられると考えられる。風速がある程度大きくなると，その吹き上げられた風と飛来塩分の沈降する力が均衡し（**図－7** 参照），飛来塩分が内陸部（丘の上の 3 号棟）まで運ばれるため，飛来塩分は海岸距離や標高が大きくなっても減衰せず，その結果，減衰係数αが小さくなると推察される。

そこで本研究では，軍艦島における減衰係数αは，軍艦島で観測されたデータから算出した減衰係数αの平均値（α=1.47）を用いた。

4.2 既往の飛来塩分輸送推定式

ここでは，橋梁の合理的な維持管理を支援する橋梁マネジメントシステム [5]（Bridge Management System：以後，BMS と称す）で用いられている飛来塩分輸送推定式（以後，BMS 式と称す）の概要を説明する。

国土交通省では，道路橋の計画的な維持管理を行う手法として，BMS を提案しており，平成 17 年度から直轄道路橋で運用されている。BMS では，飛来塩分輸送推定式（BMS 式）を次式で定義している。

$$A = C_1 \cdot d^{-0.6} \tag{3}$$

ここで，A は飛来塩分量（mg/dm^2/day），C_1 は地域区分毎の 1km 換算飛来塩分量（mg/dm^2/day），d は海岸までの距離（km）である。軍艦島における C_1 は最も厳しい塩害環境と仮定し，0.92 を用いて A を算出した。

4.3 各推定式による飛来塩分量の推定

ここでは，筆者らが提案している式(2)の飛来塩分輸送推定式[8]（以後，提案式と称す）と BMS 式の比較とその妥当性を検討する。本検討では，軍艦島の観測地点 5 箇所の全方位の飛来塩分量を各推定式を用いて推定した。

図－8 は，全観測地点における各月の平均実測飛来塩分量と平均推定飛来塩分量との関係を示す。なお，同図では北と西，南と東のそれぞれにまとめて示している。

図－8(a)から，北と西方向における推定値および実測値の関係では，約 0.2mg/dm^2/day から約 300mg/dm^2/day の広い範囲において，ばらつきは認められるものの推定値は実測値の傾向をとらえている。一方，**図－8(b)** から，南と東における推定値および実測値の関係では，実測値の方が推定値より高くなる傾向であった。この理由として，**図－1** および **2.3** 節で記したように，捕集器の南および東側には高い建築物がある場合が多く，海岸近くの北と西方向からの海風が捕集器周辺の南および東に位置する建築物にぶつかり，海風が巻き込まれてその飛来塩分が南および東側の値として測定されることで実測値が高くなっていると推察される（**写真－1** 参照）。このように海岸に近く，背後に海風を巻き込む障害物がある場合は，飛来塩分が高くなることが示唆される。

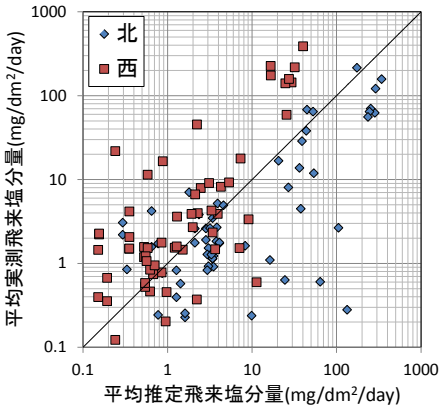
図－9 に各観測地点における年平均実測飛来塩分量と年平均推定飛来塩分量の比較を示す。

同図において，BMS 式の推定値は実測値と比較して低い値であった。また，北方向における病院の BMS の推定値は実測値との差が大きいが，海岸距離が遠い内陸部の BMS の推定値（3 号棟，30 号棟）は，実測値との差は小さくなることが確認された。（**図－9(a)**参照）。

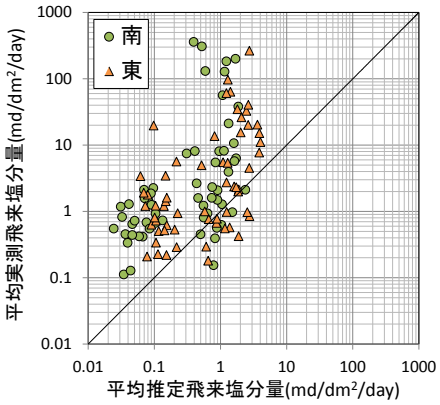
一方，提案式による推定値は，実測値の結果を踏まえているため，全体的に比較的近い値となった。

しかし，全方位の 3 号棟と北方向を除く 51 号棟付近では，実測値は提案式の推定値より高い結果となった。特に 51 号棟地上付近では，全体的に実測値が高い。これは，51 号棟は北西側の海岸に面しており，海岸との距離が約 10m と非常に近いため，特に 51 号棟地上付近の西方向では，海からの波飛沫が直接捕集器に入り込んでいる可能性が考えられる。また南および東方向の実測値が高い理由としては，前述したように海風が捕集器周辺の南や東側に位置する建築物にぶつかり，海風が巻き込まれて，海風により輸送される飛来塩分が南や東の捕集口に入ることで，実測値が高くなることが推察される。

3 号棟においては，**図－9** の各方位における実測値は提案式の推定値より高いことが確認できる。この理由として，前述したように 3 号棟は急峻な丘の上に位置しており，吹き上げる風と飛来塩分粒子の沈降する力が均衡することで，輸送される飛来塩分量が減少しないことが考えられる（**図－7** 参照）。そこで，3 号棟における減衰



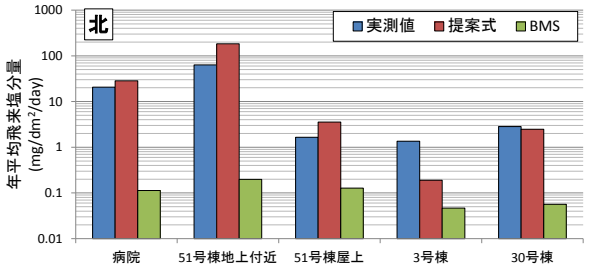
(a)　北・西方向の推定値と実測値の関係



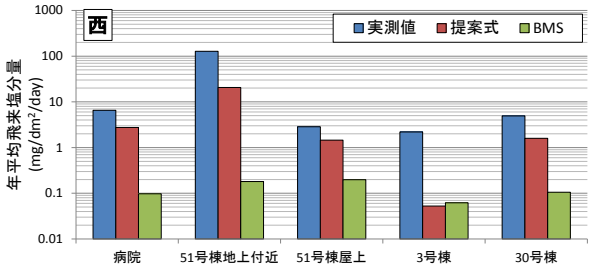
(b)　南・東方向の推定値と実測値の関係

図－8　実測飛来塩分量と推定飛来塩分量の関係

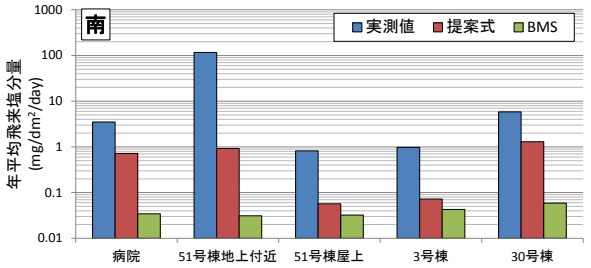
写真－1　51 号棟地上付近の海風の巻き込み



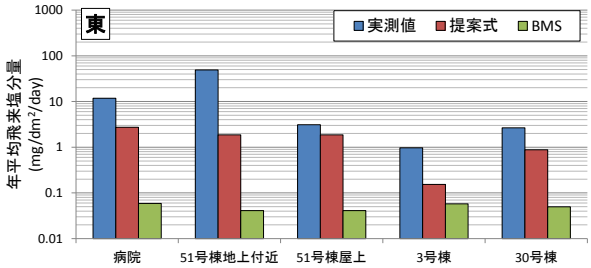
(a)　北方向の飛来塩分量



(b)　西方向の飛来塩分量

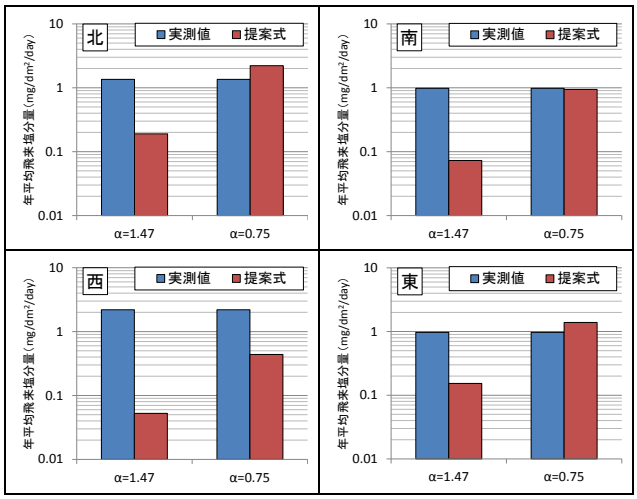


(c)　南方向の飛来塩分量



(d)　東方向の飛来塩分量

図－9　各観測地点の飛来塩分量比較（実測値と推定値）

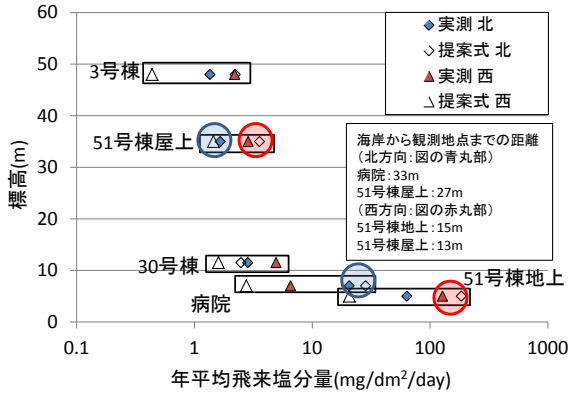


図－10　減衰係数の違いによる飛来塩分の比較（3 号棟）

係数αをさらに小さく（α=0.75）見積もって検討した結果，**図－10** の結果が得られた。**図－10** から，減衰係数αを小さくした提案式の推定値は，全方位で実測値の 0.1 倍から 10 倍の範囲となり，かつ実測値に近づく結果となった。上記の結果から，提案式の減衰係数は輸送される飛来塩分の推定精度に大きく関わるため，今後は地形を考慮した合理的な減衰係数の決定法についても検討したい。

図－11 に各観測地点で海風の巻き込みの影響が少ない北と西方向の年平均飛来塩分量と標高の関係を示す。

同図から実測値および筆者らの提案式から算出した推定値は，標高が高くなるに伴い，飛来塩分量が減少する傾向が認められた。北方向において，海岸から観測地点までの距離がほぼ等しい 51 号棟屋上と病院の飛来塩分量を比較すると，標高の低い病院の方が 51 号棟屋上と比べて，飛来塩分量が約 10 倍大きいことが確認できる（**図－11** の青丸部参照）。また，西方向における 51 号棟屋上と 51 号棟地上付近の飛来塩分量を比較すると，その差は顕著である（**図－11** の赤丸部参照）。以上のことから，飛来塩分の輸送には標高の影響も大きく関係していることがわかる。



図－11　各観測地点における飛来塩分量と標高の関係

5. 飛来塩分輸送状況 Map の作成

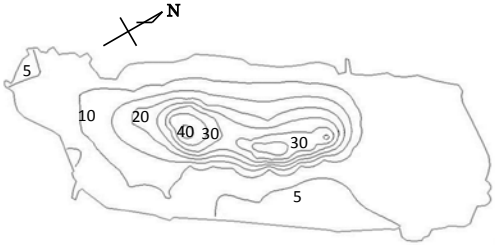
近年，GIS システムの普及により，様々なデータを Map 化することで理解を深める試みが盛んに行われている。そこで，本研究でも軍艦島の飛来塩分量を提案式で推定し，その輸送状況の Map 化を行った。また本研究では Map 化に際して，フリーウェアの統計処理ソフト R を用いた。軍艦島の標高データはクリギング法にて 1m 間隔の連続した値に補間した。また平均風速および海岸距離については，軍艦島は北西側と南東側に広く海岸線があることから，平均風速と海岸距離は北西側と南東側を基準として Map 化を行った。

図－12 に軍艦島の標高と冬季の季節風の影響を最も受ける 12 月の飛来塩分輸送 Map を示す。**図－12(a)** は標高図，**図－12(b)** は地表面（標高）の飛来塩分輸送 Map，**図－12(c)** は地表面からさらに 10m の位置における飛来

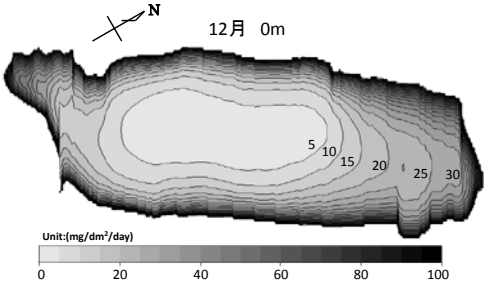
塩分輸送 Map をそれぞれ示している。

図－12(b)から，標高の違う軍艦島の北東部（同図右側）と中央部では，海岸距離がほぼ同じであっても，標高の高い中央部の方がより輸送される飛来塩分量が少ないことがわかる。また，**図－12(b)**の建築物の高さを考慮した Map では，同じ地点でも輸送される飛来塩分量が少なくなっている。また飛来塩分量が少ない領域は，**図－12(a)**と比べて島北東部まで広がっていることが確認された。

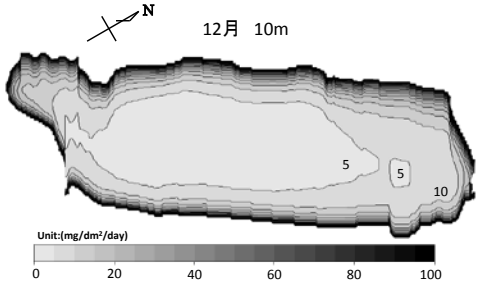
しかし，本研究では建築物による飛来塩分の遮蔽や海風の巻き込みを考慮できていないため，それらの影響については今後，検討を行う予定である。



(a)　標高図(m)



(b)　地表面（標高）の飛来塩分輸送推定 Map



(c)　地表面＋10m の位置での飛来塩分輸送推定 Map

図－12　標高と飛来塩分輸送推定 Map

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 平均風速の二乗則を用いることで軍艦島における発生飛来塩分量の推定ができることを確認した。

(2) 提案式で推定飛来塩分量を検討した結果，いくつかの地点では，ばらつきは見られたが，推定値は実測値の傾向をとらえることができた。また，地形の影響を受ける 3 号棟では，減衰係数αを小さくすることで実測値と推定値の対応が確認できた。

(3) 実測値および提案式かの推定値は，標高が高くなるに伴い，内陸部へ輸送される飛来塩分量が減少する傾向が認められた。

(4) 推定した飛来塩分量から飛来塩分輸送推定 Map を作成した。作成した Map は，海岸距離に加え，標高や建物高さも考慮した飛来塩分輸送状況を可視化できた。

謝辞

本研究は，長崎市から特別の許可を得て実施したものであり，日本建築学会に設置された軍艦島コンクリート構造物劣化調査 WG（主査：東京大学野口貴文教授）の一環として実施したものである。本研究を遂行するにあたり，湯浅昇日本大学教授のご協力を頂きました。また，軍艦島の飛来塩分回収では，長崎市役所の栗脇善朗氏にご協力を頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 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，海洋工学論文集，Vol.39，pp.1051-1055，1992.11

2) 山田義智，大城武，桝田佳寛：海岸付近における飛来塩分量に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，No.514，pp21-26，1998.12

3) 佐伯竜彦，竹田光明，佐々木謙二，嶋毅：飛来塩分環境の定量法化に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.66，No.1，pp1-20，2010.1

4) 山田文則，細山田得三，下村匠：構造物表面に到達する飛来塩分量の数値解析による予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，2007

5) 玉越隆史，大久保雅憲，渡辺陽太：道路橋の計画的管理に関する調査研究－橋梁マネジメントシステム（BMS）－，国土技術政策総合研究所資料，2009.3

6) 小窪幸恵，岡本甫：海水飛沫の発生過程に着目した飛来塩化物イオン量の算定モデル，土木学会論文集 B，Vol.65，No.4，pp.259-268，2009.10

7) 富山潤：コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，pp.874-879，2014.6

8) 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，pp970-975，2014.6

9) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，pp258-263，1981