

飛来塩分輸送状況予測システムの構築に関する基礎的研究

BASIC STUDY ON CONSTRUCTION OF THE PREDICTION SYSTEM
FOR TRANSPORTATION OF AIRBORNE CHLORIDE IONS

崎原 康平*, 山田 義智**, 湯浅 昇***, 濱崎 仁****

Kohei SAKIHARA, Yoshitomo YAMADA, Noboru YUASA
and Hitoshi HAMASAKI

This paper presents an estimated equation for prediction of transportation airborne chloride ions. We propose the generated airborne chloride ions estimation equation by using the exponential law. Also we estimated airborne chloride ions to be transported inland by using proposed equation, compared the estimated results with measured results and previous studies. Furthermore, we attempt to construct a simple system that can visualize the spatial distribution of airborne chloride ions.

Keywords : Airborne chloride ions, Salt damage, Altitude, Coastal distance, Attenuation coefficient

飛来塩分量, 塩害, 標高, 海岸からの距離, 減衰係数

1. はじめに

海岸域付近では、海からの風により輸送される飛来塩分が鉄筋コンクリート構造物に付着・浸透することにより、内部の鉄筋を腐食させる、いわゆる外来塩分による塩害が大きな問題となっている。したがって、海岸域から発生する飛来塩分量の検討や内陸部に輸送される飛来塩分量の分布状況を予測することは、さらなる長寿命化が求められている昨今の鉄筋コンクリート構造物において、維持管理や耐久設計の観点からも極めて重要である。さらに、予測された飛来塩分は海岸からの距離や標高に応じて空間的に分布するため、その分布状況を可視化することができれば、塩害環境を評価する上で有益である。このような背景のもと、外来塩分による塩害の劣化進行予測や既設建築物の維持管理計画を策定する上で、上述の可視化技術を含む飛来塩分輸送予測システムの構築が望まれている。

海岸付近で発生する飛来塩分量（以後、発生飛来塩分量と称す）や内陸部への輸送状況予測に関しては、数多くの実験的研究^{1)~13)}が行われている。例えば国土交通省では、橋梁マネジメントシステム¹⁾（Bridge Management System : BMS）を用いた橋梁に対する塩害対象地区および塩害劣化の管理システムを試行している。この方法によれば、飛来塩分を予測するために使用するパラメータは、地域区分毎の 1km 換算飛来塩分量と海岸からの距離であり、比較的簡単に塩害環境を評価することが可能である。しかし、発生飛来塩分量は、波浪条件や海岸地形および風況（風向・風速）、さらに標高や観測地点の周辺環境などに大きく影響を受けるが、それらの影響

は BMS では考慮されていない。一方近年では、上述した飛来塩分が発生する周辺環境や波浪条件を考慮した飛来塩分算定モデルの提案や、数値解析を使用した飛来塩分輸送量の予測に関する解析的研究^{14)~23)}も盛んに行われている。しかし、それらの研究においては、限られた地域のデータを使用することが多いため、周辺環境が異なる複数の地域を対象に解析を実施し、その精度を長期間にわたり確認するには至っていない。また数値解析においては、海岸付近の周辺環境や風況、波浪、構造物の形状を考慮した計算が可能になりつつあるが、数値解析に関する習熟した知識が必要であることや、塩害地域の飛来塩分輸送状況を 3 次元で長期間を対象に解析するには計算負荷が非常に大きいといった課題も挙げられる。

その中で著者らは、異なる海岸地形や風況を有する地域において、長期間観測した飛来塩分や風況の諸データを用いて、海岸からの距離や標高、飛来塩分の減衰効果の影響を考慮した簡便な飛来塩分輸送推定式^{24),25)}を提案している。しかし、文献²⁵⁾では発生飛来塩分量は平均風速の二乗に比例すると仮定した二乗則で検討を行ったため、特殊な海岸形状を有する長崎県端島においては、二乗則による推定値は実測値の傾向を捉えることが難しいといった問題があった。

そこで本論文では、文献²⁴⁾と文献²⁵⁾で示した発生飛来塩分推定式の再検討を行い、新たに提案する発生飛来塩分推定式を用いて内陸部に輸送される飛来塩分を推定し、観測結果と比較検討する。また、それらの検討においては、既往の飛来塩分輸送推定式に関する研究結果とも併せて比較する。さらに、推定される飛来塩分は海岸

本論文の一部は文献²⁴⁾および文献²⁵⁾で発表されたものであり、本論文はその内容に新たな知見を加え、再構成したものである。

* 琉球大学工学部環境建設工学科 助教・博士(工学)

** 琉球大学工学部環境建設工学科 教授・博士(工学)

*** 日本大学生産工学部建築学科 教授・博士(工学)

**** 芝浦工業大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)

Assist. Prof., Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, Dr.Eng.

Prof., Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, Dr.Eng.

Prof., College of Industrial Technology, Nihon University, Dr.Eng.

Assoc. Prof., College of Engineering, Shibaura Institute of Technology, Dr.Eng.

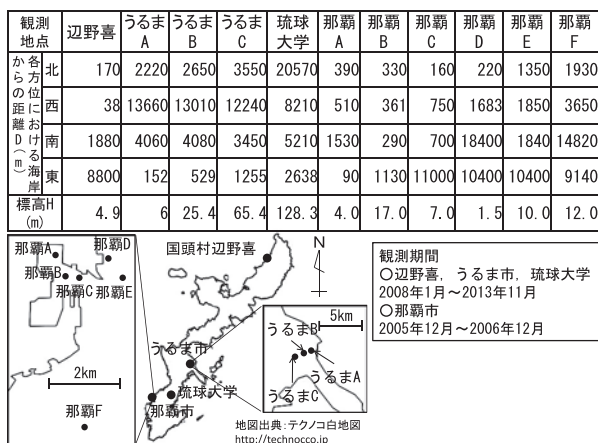


図1 沖縄本島の飛来塩分観測地点

からの距離や標高、建築物の高さに応じて異なるため、その分布状況が空間的に可視化することができ、利用者が塩害環境を理解しやすい一連の簡便な飛来塩分輸送状況予測システムを構築することを試みる。

2. 飛来塩分の測定概要

2.1 飛来塩分の観測地点および分析方法

本研究では、沖縄本島および長崎県端島(以後、端島と略す)にて飛来塩分の測定を行っており、沖縄本島においては、図1に示す4地域11地点、端島においては図2に示す5地点である。なお、各観測地点における飛来塩分の捕集には、改良型土研式飛来塩分捕集器を用い、こ



写真1 改良型土研式飛来塩分捕集器の概要

の飛来塩分捕集器の捕集口は、それぞれが東西南北に面するように設置した(写真1参照)。飛来塩分の分析方法については、捕集器から月に一度試料を回収し、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。但し、本研究で示す飛来塩分量は、すべてNaCl値として表記する²⁶⁾。

2.2 各観測地点における各月の飛来塩分の傾向

図3に辺野喜、うるま市および琉球大学(観測期間:2008年1月から2013年11月)、那覇市(観測期間:2005年12月から2006年12月)の各観測地点における平均飛来塩分量と平均風速を示す。なお、平均飛来塩分量とは観測期間中における各月の平均値である。また図3(a)と(c)は、観測地点から海岸に最も近い西側の平均飛来塩分量を、図3(b)では観測地点から海岸に最も近い東側の平均飛来塩分量をそれぞれ示している。各観測地の風況は、辺野喜では現地に設置したWeb気象観測システム、うるま市では最寄りの宮城島気象観測所、那覇市では最寄りの安次嶺気象観測所の各データを用いた。

辺野喜においては、冬場は北西よりの季節風のため平均飛来塩分量が多くなっている(図3(a)の12月から3月まで参照)。また、辺野喜の9月と10月およびうるま市の8月と9月(図3(b)参照)は観測期間中に台風が沖縄本島を通過したため、平均飛来塩分量が非常に大きい。ここで、辺野喜の10月とうるま市の8月のそれぞれ

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

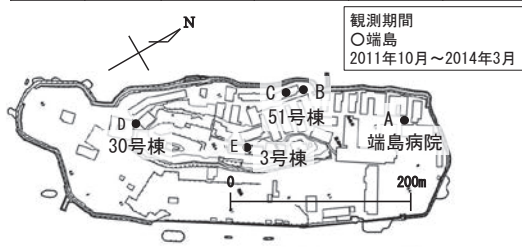


図2 長崎県端島の飛来塩分観測地点

で平均飛来塩分量が多い理由は、辺野喜の10月は2013年の台風23号が太平洋側から沖縄本島と与論島の間を通過し、うるま市の8月では2011年の台風9号が沖縄南方から中国上海方向へ進んだため、台風経路の違いによるものと推察される。このように、沖縄のような四方を海に囲まれた台風の多い地域では、台風の進路によって輸送される飛来塩分に大きな影響を与えることが示唆される。一方那覇市では、辺野喜やうるま市と比較すると、年間を通して観測された平均飛来塩分量が少ない。これは、観測期間中に台風の通過もなく、観測地点周辺の西側に沖防波堤を有する港湾があるため発生飛来塩分が少なくなった可能性が考えられる(図3(c)参照)。

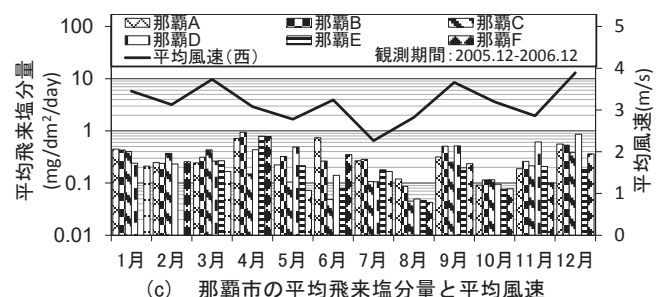
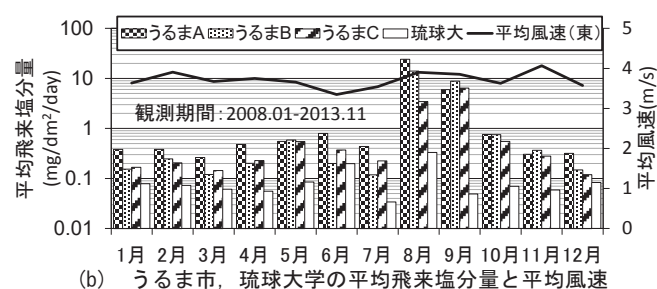
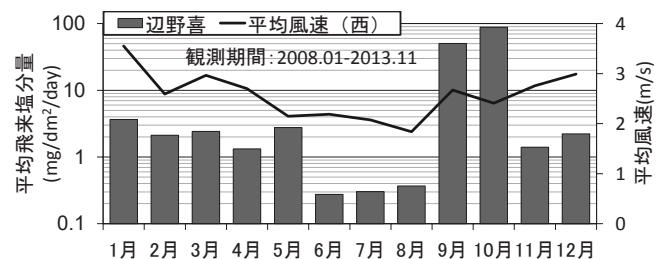


図3 沖縄本島の各観測地点における平均飛来塩分量と平均風速

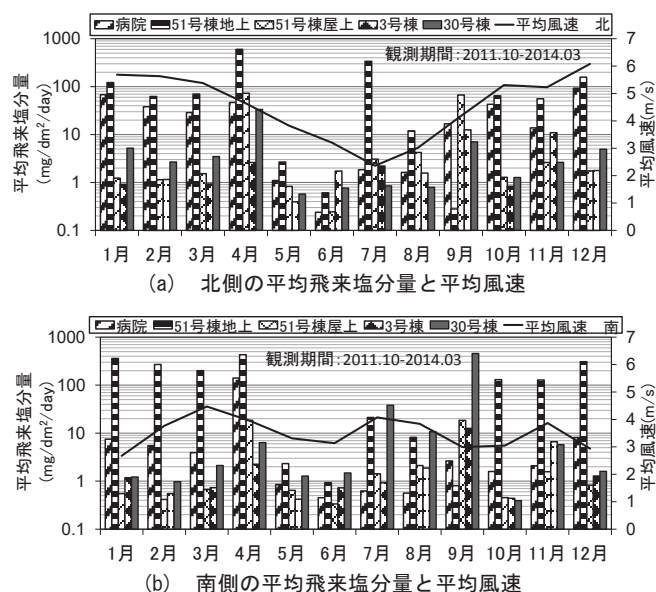


図4 長崎県端島の各観測地点における平均飛来塩分量と平均風速

次に、端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図4に示す(観測期間:2011年10月から2014年3月)。なお、図4(a)は北側の平均飛来塩分量、図4(b)は南側の平均飛来塩分量である。また、端島の風況データについては、最寄りの野母崎気象観測所のデータを使用した。

図4(a)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、これに対応して平均飛来塩分量が多くなっている傾向が確認できる。一方、図4(b)では、平均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急峻な丘が存在し、観測地点に南側からの海風が直接吹き込みにくいことの影響が考えられる。また、図4(a)と(b)において、51号棟地上付近の平均飛来塩分量が全体的に多くなっているのは、海岸から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ある。図4において、4月、7月および9月の平均飛来塩分量が比較的多い理由は、観測期間中に発達した低気圧(2012年4月、2012年7月)や台風(2012年9月台風16号、2013年9月台風17号)が発生し、通過したためと考えられる。

3. 海風の風況について

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て $\pm 67.5^\circ$ 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5参照)。但し、沖縄本島のうるま市と那覇市および端島の各観測地点における平均風速は、最寄りの各気象観測所(うるま市は宮城島、那覇市は安次嶺、端島は野母崎)の標高と地表面の粗度が異なるため、観測地点と気象観測所の平均風速が異なることが予想される。

そこで本研究では、文献27)を参考に、各気象観測所の風速観測装置の設置高さや地表面の粗度を考慮し、各観測地点に対応した平均風速に換算した。また辺野喜については、現地に設置した気象観測システムの不具合により2013年以降のデータが十分に取得でき

なかったため、本研究では2008年1月から2012年10月までの平均風速データを使用した。また風向については、辺野喜では現地の気象観測システム、うるま市は宮城島、那覇市は安次嶺、端島は野母崎の各観測所のデータを使用した。なお、これら風況の観測期間は、先に示した飛来塩分観測期間と一致させている。

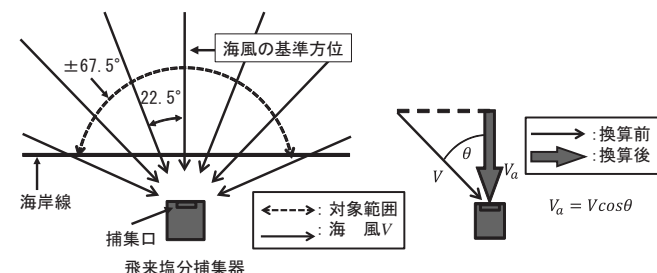


図5 海風と風速の定義

4. 飛来塩分輸送量の推定

著者らはこれまでに、飛来塩分は海岸からの距離 D (m)や標高 H (m)との積 $D \cdot H$ (m^2)に相関があると仮定した飛来塩分輸送推定式(式(1))を提案している。

$$A = A_0 \left(\frac{D \cdot H}{D_0 \cdot H_0} \right)^{-\beta} \quad (1)$$

ここで、 A は任意地点の飛来塩分量($mg/dm^2/day$)、 A_0 は海岸付近における基準地点の発生飛来塩分量($mg/dm^2/day$)、 D と H は任意地点の海岸からの距離(m)および標高(m)、 β は減衰係数である。また、 D_0 と H_0 は海岸付近における基準地点の海岸からの距離(m)と標高(m)である。なお D_0 と H_0 については、沖縄本島においては辺野喜($D_0 = 37.8m$ (西)、 $H_0 = 4.9m$)、端島においては端島病院($D_0 = 42.0m$ (西)、 $H_0 = 7.0m$)を海岸付近における基準地点として設定した(図1、図2参照)。両地点は、多少の違いはあるがほぼ同様な位置である。

ところで、文献25)の検討では、海岸付近から供給される発生飛来塩分量は宇多ら¹⁰⁾が提案する平均風速の二乗に比例すると仮定した二乗則で検討を行っていたが、島全体が防波堤で囲まれた特殊な海岸形状を有する端島においては、平均風速が5m以上になると急激に発生飛来塩分量が大きくなるため、二乗則による推定値は実測値の傾向を捉えることが難しいといった問題があった。

そこで本章では、文献24)および文献25)で示した発生飛来塩分推定式の再検討を行った。また、新たに検討した発生飛来塩分推定式を用いて内陸部に輸送される飛来塩分を推定し、観測結果と比較検討するとともに、既往の研究結果と比較する。

4. 1 発生飛来塩分量の検討

ここでは、発生飛来塩分量と平均風速との関係を二乗則と指数則の2種類の近似式を用いて検討を行った。ここで、文献24)、25)で用いた二乗則に加え、新たに指数則を用いた理由は、二乗則と比較して発生飛来塩分量が急激に大きくなる傾向を捉えやすいと考えたからである。

上述の検討において、発生飛来塩分量の測定データが必要となるが、うるま市と那覇市では、辺野喜のように海岸付近の発生飛来塩分量を測定していない。一方著者らは文献24)中において、うるま市と那覇市それぞれで観測した各月の平均飛来塩分量と、海岸から

の距離 D および標高 H の積 $D \cdot H$ との関係を、12月を例として図6のように示している。そこで本研究では、図6中に示す近似式の $D \cdot H$ に、海岸付近の基準地点である $D_0 \cdot H_0$ ($D_0 = 37.8\text{m}$, $H_0 = 4.9\text{m}$, $D_0 \cdot H_0 = 185.22\text{m}^2$)を代入して、うるま市と那覇市の平均発生飛来塩分量 A_0 を求めた。

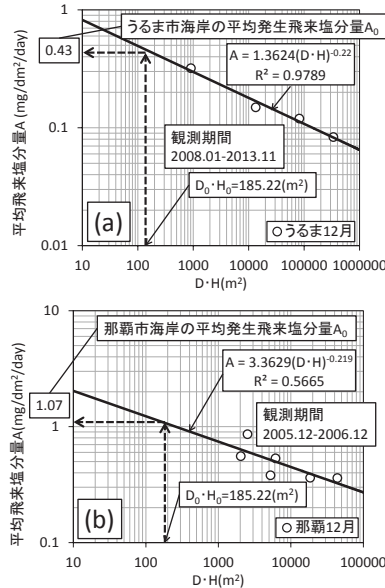


図6 12月の平均飛来塩分量と $D \cdot H$ の関係(例示)

図7に沖縄本島の各観測地点における発生飛来塩分量 A_0 と平均風速 V_a の関係(辺野喜:図7(a),うるま市:図7(b),那覇市:図7(c))を示す。ここで、同図に示す発生飛来塩分量は、台風等による直接的な波飛沫の影響を受けた非常に高い値は取り除いており、観測期間中における各月の平均値(以後、平均発生飛来塩分量と称す)として整理した。また、同図の平均発生飛来塩分量と平均風速の関係を二乗則近似したものを式(2)に、指数則近似したものを式(3)にそれぞれ示す。式(2)および式(3)の係数 α は海岸係数と称し、各海岸の状況に応じて定まる値である。なお式(2)および式(3)では、平均風速が 1m/s 以下では発生飛来塩分は生じないものとした。

$$\text{二乗則: } A_0 = \alpha(V_a - 1)^2 \quad V_a \geq 1\text{m/s} \quad (2)$$

$$\text{指数則: } A_0 = e^{\alpha(V_a - 1)} - 1 \quad V_a \geq 1\text{m/s} \quad (3)$$

同図から、うるま市における平均発生飛来塩分量に若干ばらつきはあるものの(図7(b)参照)、各観測地点における平均発生飛来塩分量と平均風速の関係は、式(2)の二乗則と式(3)の指数則で表せることがわかる。また、二乗則と指数則の近似曲線を比較するとほぼ同様な傾向であった。しかし、同図より平均風速が大きくなるに伴い平均発生飛来塩分量が大きくなる傾向は認められるものの、海岸付近で直接現地観測した辺野喜に比べ、平均発生飛来塩分量を外挿して求めたうるま市と那覇市の相関は低い。この点を改善するためには、今後うるま市と那覇市の海岸付近で現地観測を行う必要がある。

辺野喜、うるま市、那覇市の式(3)による近似曲線と海岸係数を図7(d)にまとめて示す。うるま市と那覇市の海岸係数 α は、辺野喜と比較して小さい。これは、うるま市沖合では平安座、宮城、伊計の各島々が湾を形成するように存在することや、那覇市においては2.2節でも述べたように、観測地点周辺に沖防波堤を有する港湾がある

ことなど、海岸の周辺環境による影響で発生飛来塩分量が少なくなった可能性が考えられる。小窪ら²⁸⁾の研究によれば、岩礁および人工海岸、海浜、海上を係数とした発生飛沫量を検討しており、本研究と同様に、海岸特徴の違いにより発生する飛沫量が異なることを示している。また、山田ら¹⁸⁾も辺野喜および那覇市鏡水(本研究の那覇市観測地点から南西方向に約4km離れた地点)で観測した発生飛来塩分と飛塩風速との関係を二乗則で検討した結果においても、那覇市鏡水の海岸係数は辺野喜より小さくなることを示している。

以上から、式(3)で得られた海岸係数は妥当であると考えられる。

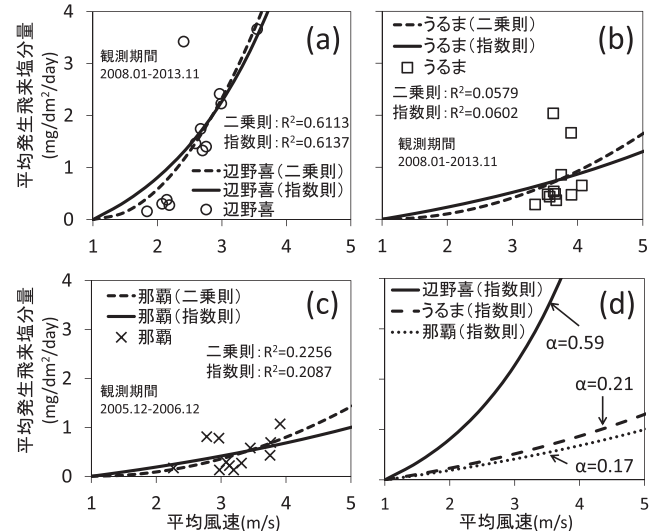


図7 沖縄本島の平均発生飛来塩分量と平均風速の関係

次に、端島における平均発生飛来塩分量と風況との関係について検討する。風況は、端島に最も近い野母崎気象観測所のデータを使用した。平均発生飛来塩分量の基準地点については、海岸からの距離および標高が沖縄本島の辺野喜とほぼ同じ端島病院(以後、病院と称す)とした。また、端島は北西側に海岸線が広がり、北西側の風が卓越することから、本検討では病院の北と西方向で観測された平均発生飛来塩分量および平均風速にて整理した。

図8に端島における平均発生飛来塩分量と平均風速の関係を示す。北方向では、平均風速が 5m/s 以上になると平均発生飛来塩分量が急激に大きくなることわかる(図8(a)参照)。これは、端島海岸の周辺環境や、砕波の影響、波浪条件など様々な要因が考えられるが、本研究では上記要因の検討を行っておらず、今後の課題である。

端島における指数則と二乗則の比較では、北と西方向ともに、指数則の方がより実測結果の傾向を捉えられることが確認された。また、端島北側の海岸係数が西側より大きい理由は、端島西側の護岸が波を遮る形で激しく砕波させるのに対し、北側では船首のような形となり、穏やかな砕波状況となるためだと考えられる(図2参照)。

沖縄本島と端島の海岸係数を比較すると、端島の海岸係数 α (図8参照)は、辺野喜の海岸係数 α (図7(d)参照)より大きいことから、端島は辺野喜と比べて飛来塩分が発生しやすいといえる。これは、海岸を直視した印象とも一致する。

以上の検討から、本研究では二乗則に比べ、指数則の方が発生飛来塩分量を表すのに適当と判断し、平均発生飛来塩分量 A_0 と平均風速 V_a の関係式は、式(3)の指数則を採用することとした。なお、今後は様々な特徴を有する海岸で発生飛来塩分の調査を行い、合理的な

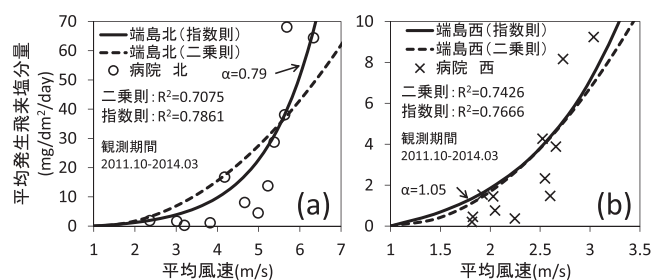


図8 端島の平均発生飛来塩分量と平均風速の関係

海岸係数の決定方法について検討を行う予定である。

4. 2 減衰係数の検討

滝川ら²⁾は、海岸付近で発生した飛来塩分量が内陸部に輸送されるに伴い、減衰することを観測により示している。また、山田¹⁸⁾らは、数値解析により内陸部へ輸送される飛来塩分量を求めており、発生飛来塩分量が多くなると平均飛沫粒子径が大きくなり、その結果、飛沫粒子の沈降速度が速くなり、内陸まで運ばれる飛来塩分量が少なくなるとしている。これらの研究を参考に、本研究では沖縄本島（うるま市、那覇市）及び端島の各観測地において、式(1)中の発生飛来塩分量 A_0 と減衰係数 β の検討を行った。沖縄本島の検討方法としては、うるま市と那覇市で実測した各観測地点の飛来塩分量 A 、4.1節で求めた平均発生飛来塩分量 A_0 、海岸から各観測地点までの距離 D と標高 H 、基準地点における海岸からの距離 $D_0(=37.8m)$ と標高 $H_0(=4.9m)$ の各値を式(1)に代入して、非線形最小自乗法により減衰係数 β を算出した。また、端島の検討では、基準地点となる病院の北と西方向で観測した平均発生飛来塩分量 A_0 、基準地点における海岸からの距離 $D_0(=42.0m)$ と標高 $H_0(=7.0m)$ を用いて、上述と同様な手順で減衰係数 β を求めた。

図9に沖縄本島および端島における平均発生飛来塩分量 A_0 と減衰係数 β との関係を示す。また、同図から得られた沖縄本島における減衰係数の近似式を式(4)に、端島における減衰係数の近似式を式(5)にそれぞれ示す。

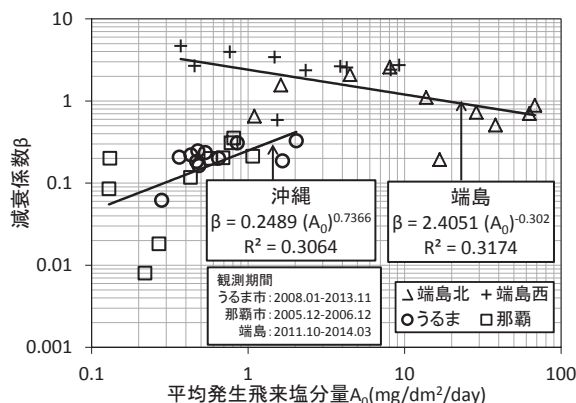


図9 平均発生飛来塩分量と減衰係数の関係

$$\text{沖縄本島の減衰係数: } \beta = 0.2489(A_0)^{0.7366} \quad (4)$$

$$\text{端島の減衰係数: } \beta = 2.4051(A_0)^{-0.302} \quad (5)$$

沖縄本島では、那覇市のデータに若干のばらつきがあるものの、平均発生飛来塩分量が多くなると減衰係数も大きくなるのがわかる。これは、滝川らや山田らが示した結果と同様な傾向である。

一方、端島の平均発生飛来塩分量と減衰係数の関係は、沖縄本島の傾向とは異なり、平均発生飛来塩分量が多くなると減衰係数は小さくなった。この理由は、端島は海岸付近から島中央部にかけて急激に標高が高くなる急峻な地形となっており、その結果、図10に示すように、海岸からの風が地形の影響で吹き上げる風となり、その吹き上げる力が海塩粒子の沈降する力と均衡するために、飛来塩分が沈降せず内陸部まで運び込まれると考えられる。したがって、端島においては風速が大きくなると、すなわち平均発生飛来塩分量が大きくなった時は、減衰係数 β が低下しているものと推察される。

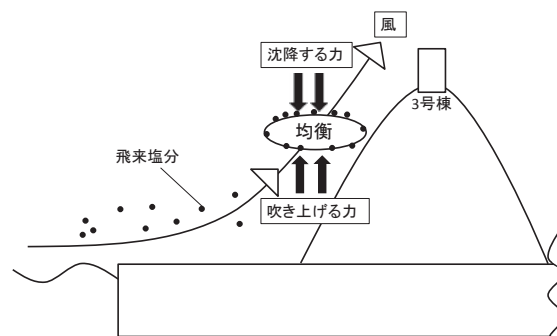


図10 端島の地形と風況・飛来塩分の関係

平均発生飛来塩分量が小さい範囲(2mg/dm²/day以下)において、端島の減衰係数は沖縄本島に比べて大きい。これは、端島においては、構造物が密集しており、その建物による遮蔽の影響により、飛来塩分が内陸部へ運ばれにくくなると考えられる。

以上より、本研究で用いる減衰係数 β は山田ら¹⁸⁾と同様に、平均風速が大きくなると、発生飛来塩分量が多くなり、発生飛来塩分の平均粒子径が大きくなることで、飛沫粒子の沈降速度が速くなる影響のほか、特殊な地形により生じる風況や建物による遮蔽の影響が考慮される係数であることがわかる。

飛来塩分を式(1)で予測する場合、端島のように塩分観測方向に遮蔽物が多い場所や、急峻な標高変化がある地域においては検討の余地を残しているが、うるま市や那覇市のような市街地であっても、塩分観測面が海に対して開けており、遮蔽物がない比較的平坦な地域においては、沖縄本島の減衰係数を適用できると考えられる。

4. 3 飛来塩分量の実測値と各推定式による推定結果との比較および検討

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(BMS)で用いられている飛来塩分輸送推定式(以後、BMS式と称す)および宇多¹⁹⁾らによって提案された飛来塩分輸送推定式(以後、宇多式と称す)の概要を説明するとともに、著者らが提案している式(1)の飛来塩分推定式(以後、提案式と称す)で得られた飛来塩分量の推定値およびBMS式、宇多式で得られた各推定値を観測した飛来塩分量の実測値と比較検討する。

(1) BMS式

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の飛来塩分輸送推定式(BMS式)は次式で定義される。

$$A = C_1 \cdot d^{-0.6} \quad (6)$$

ここで、 A は飛来塩分量(mg/dm²/day)、 C_1 は地域区分毎の1km換

算飛来塩分量 (mg/dm²/day), d は海岸までの距離 (km) である。 C_1 の値については、沖縄本島では0.62, 端島においては最も厳しい塩害環境と仮定し、0.92を用いて A をそれぞれ算出した。

(2) 宇多式

宇多らは、飛来塩分の輸送領域を海岸から塩分を含む飛沫から供給される領域(飛沫供給領域), 海風による移流と重力による沈降が卓越する領域(移流沈降領域), 霧状の飛沫が拡散する領域(拡散領域)の3領域と定義し、各領域における飛来塩分輸送量を次式のように提案している。(図11および式(7)参照)

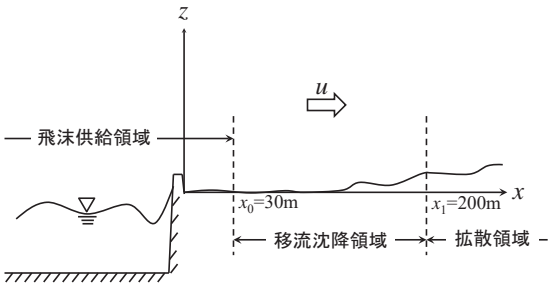


図11 宇多式における各飛来塩分推定の領域区分

$$A = \lambda a u^2 e^{-c z}$$
$$A = \lambda a u^2 e^{-(b/u)x} e^{-c z}$$
$$A = A_{x1} / \{1 + \gamma (x - x1)\}$$

: 飛沫供給領域(汀線~30m)

: 移流沈降領域(30m~200m)

: 拡散領域(200m以降)

(7)

ここで、 A は飛来塩分量 (mg/dm²/day), λ は観測期間中に海風が発生した割合 (表1参照), u は平均風速 (m/s), a は飛沫の供給に関する係数, b は飛沫の沈降速度に関する係数, γ は拡散に関する係数, z は地表面からの高さ (m), x は海岸からの距離 (m), x_1 は海岸からの移流沈降領域と拡散領域の境界までの距離 (m), A_{x1} は移流沈降領域と拡散領域の境界における飛来塩分量である。

表1 沖縄本島における海風が発生した割合 λ

	辺野喜	うるま市	那覇市
1月	0.3523	0.6678	0.1922
2月	0.3010	0.6487	0.1057
3月	0.3529	0.6317	0.2092
4月	0.3422	0.6664	0.2111
5月	0.2789	0.6402	0.2366
6月	0.2351	0.3813	0.5000
7月	0.1884	0.5257	0.3159
8月	0.1862	0.6240	0.3320
9月	0.2507	0.7252	0.3153
10月	0.3151	0.8125	0.0417
11月	0.2824	0.7595	0.1861
12月	0.2050	0.7031	0.1576

宇多らは、波浪条件および海岸地形によって係数 a , b , c , γ を算出しており、その係数一覧を表2のように示している。また、飛来塩分量の全国調査から $A_{x1} = 1$ としており、本研究でも上記の各係数を用いた。なお、 x_1 については、内陸部の測定塩分濃度が低い領域(拡散領域)の位置と定義しているが、具体的な値が不明だったため、本研究では文献(26)に示されている海岸からの距離と海塩粒子濃度の関係から $x_1 = 200\text{m}$ と仮定した。

表2 宇多式の係数一覧

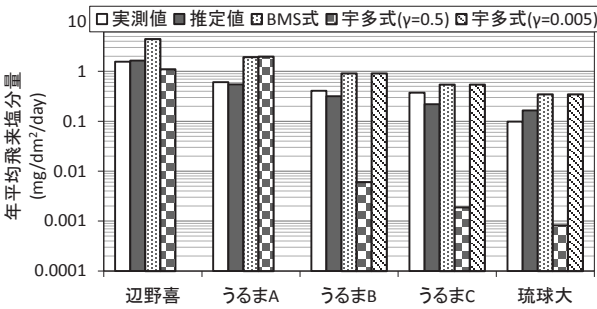
波浪条件	係数	海岸地形条件
		砂礫海岸
太平洋型	a	1.5
	b	0.018
	c	0.2
	γ	0.5

4. 3. 1 沖縄本島における飛来塩分量の推定結果と考察

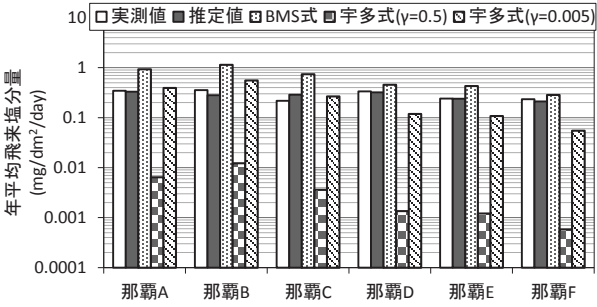
耐久設計や維持管理のように長期間を対象とする場合、年単位で輸送される飛来塩分量を把握することは有益である。そこで本検討で用いる飛来塩分量は、観測期間中における各観測地点の年平均値(以後、年平均飛来塩分量と称す)で整理した。

図12に実測値と各推定式(提案式, BMS式, 宇多式)による推定値との年平均飛来塩分量の比較を示す。ここで、年平均飛来塩分量は、図3と同様に最も海に近い方位を対象としている。なお、沖縄本島の減衰係数は式(4)を使用した。

図12(a)から、辺野喜においては、各推定値は実測値に近い値を示した。また、うるまA, B, C, 琉球大学の順に海岸からの距離が遠くなるに伴い、各推定値は小さくなることが確認できる。なお、提案式では実測値を踏まえた推定であるため、全体的に実測値に近い値となっている。またBMS式では、辺野喜、うるま市、琉球大学の各地点の実測値より推定値が若干大きい。この傾向は、那覇市でも同様である(図12(b)参照)。一方宇多式においては、うるまB, C, 琉球大学および那覇市の全観測地点は式(7)の拡散領域に入っており、その推定値は実測値よりかなり小さい。本研究では、宇多ら¹⁵⁾が示した結果を参考に拡散係数を $\gamma = 0.5$ としたが、今回飛来塩分を測定した範囲では、 γ を低く設定($\gamma = 0.005$)することで拡散領域の飛来塩分が多くなり、宇多式の推定精度が向上することがわかった(図12参照)。



(a) 辺野喜, うるま市, 琉球大学



(b) 那覇市

図12 沖縄本島における各飛来塩分推定式の比較

4. 3. 2 端島における検討結果と考察

前項の沖縄本島での検討では、海に面した方向のみを対象（辺野喜と那覇市は西方向、うるま市は東方向）としていたが、端島は海岸までの距離が近く、四方を海に囲まれていることから、各方位から多くの飛来塩分が内陸部へ輸送されることが予想される。そこで、端島においては、観測地点 5 箇所の全方位の年平均飛来塩分量の検討を行った。また本検討では、沖縄本島の検討において良い評価であった提案式および BMS 式を用いて推定した。なお、各方位における平均発生飛来塩分量 A_0 （式(3)参照）の海岸係数 α は、比較的海岸形状に近いと思われる北と南は図 8(a)中の $\alpha = 0.79$ とした。また、西と東は上述と同様な理由で、図 8(b)中の $\alpha = 1.05$ を使用した。なお、端島の減衰係数は式(5)を使用した。

図 13 に端島の各観測地点における年平均飛来塩分量と各推定式による年平均推定飛来塩分量の比較を示す。

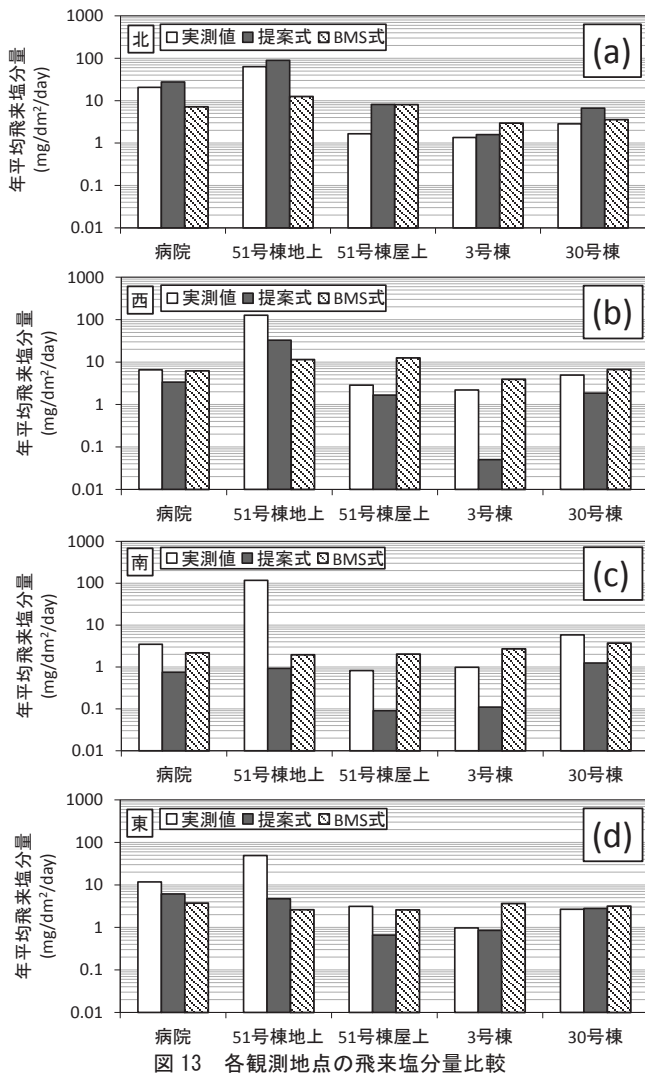


図 13 各観測地点の飛来塩分量比較

北方向においては、51 号棟屋上で提案式、BMS 式ともに若干値が高いものの、実測値の傾向をよく捉えている（図 13 (a)参照）。また、東方向においても、提案式は実測値とよく一致していることが確認できる。しかし、3 号棟の西と南方向では、提案式による推定値は実測値よりもかなり小さい。この原因についてはまだ解明できておらず、今後さらなる検討が必要である。また、51 号棟地上付近における南と東方向の実測値が大きい理由は、海風が南や東側に位

置する建物にぶつかり、巻き込まれて、その海風により運ばれる飛来塩分が南と東の捕集口に入ることによって実測値が高くなると推察される（写真 2 参照）。



写真 2 51 号棟地上付近の海風の巻き込み

図 14 に、全観測地点における各方位の年平均実測飛来塩分量と提案式による年平均推定飛来塩分量の関係を示す。

同図から、若干ばらつきはあるものの、提案式による推定値は実測値の傾向を捉えている。なお図中の丸囲部は、直接的な波飛沫の入り込みや海風の巻き込みにより、実測値が高くなったと考えられる 51 号棟地上のデータである。なお、南側は全て実測値が推定値と比べて高い値となっている。この原因も建物による海風の巻き込みが影響していると考えられる。

図 15 に各観測地点の年平均飛来塩分量と標高の関係を示す。なお、同図に示す年平均飛来塩分量は各方位の合計値である。

同図から、実測値および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。海岸から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 号棟屋上より約 4 倍多いことが確認できる。このことから、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。

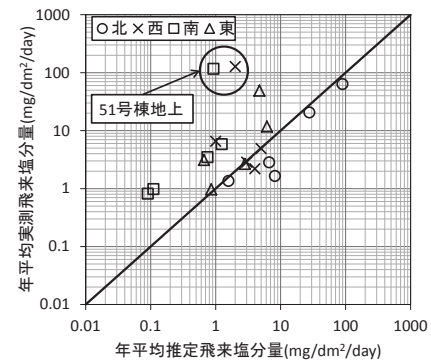


図 14 年平均実測飛来塩分量と年平均推定飛来塩分量の関係

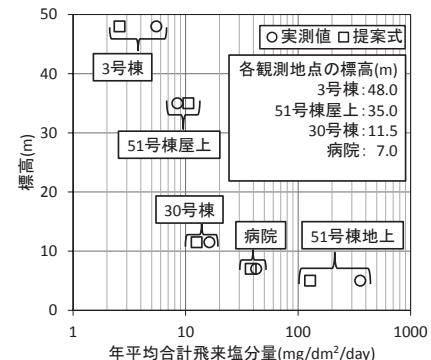


図 15 各観測地点の飛来塩分量と標高の関係

5. 飛来塩分輸送状況の Map 化

近年、GIS システムの普及により、様々な地理情報とそれに付随するデータを Map 上に可視化することで理解を深める試みが盛んに行われている。ここでは、うるま市、那覇市および端島における各飛来塩分量を推定し、その輸送状況を Map 上に可視化した（以後、この可視化を Map 化と称す）。

図 16 および図 17 に、うるま市および那覇市の標高と本研究の提案式および BMS 式で推定した飛来塩分輸送状況の Map をそれぞれ示す。なお Map 化には、フリーの統計処理ソフトウェア R²⁹⁾を用いた。また標高データ³⁰⁾については、沖縄本島では 50m、端島では 1m の各間隔で連続した値をクリギング法²⁹⁾にて補間した。沖縄本島における平均風速については、最寄りかつ平均風速が最も大きかった宮城島気象観測所の 11 月の東の風、那覇市気象観測所についても同様に、最寄りかつ平均風速が最も大きかった安次嶺の 12 月の西の風をそれぞれ使用した。端島の平均風速については最寄りの気象観測所である野母崎気象観測所のデータを使用した。海岸からの距離については、端島は北西側と南東側に海岸線が広く面していることから、北西側と南東側を基準として飛来塩分輸送状況の Map 化を行った。

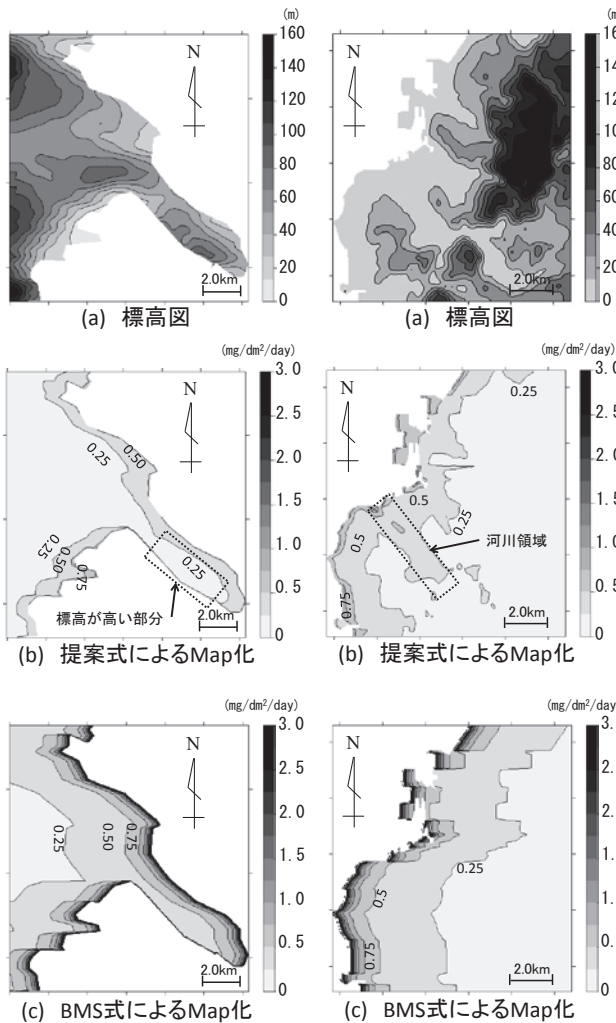


図 16 うるま市の標高と飛来塩分輸送状況 Map

図 17 那覇市の標高と飛来塩分輸送状況 Map

各推定式で求めた飛来塩分輸送状況は、海岸から遠くなるに伴い、飛来塩分の輸送量は少なくなっている様子が確認できる。本研究の提案式による輸送状況に着目すると、海岸からの距離と標高の影響を考慮しているため、標高が急激に上昇する地点では内陸部への飛来塩分の輸送量が少ない（図 16 (b)参照）。また、標高が低いかつほとんど変化しない河川領域においては内陸部まで飛来塩分が輸送されている傾向が認められる（図 17 (b)参照）。一方 BMS では、海岸からの距離のみ考慮しているため、飛来塩分輸送状況は海岸線の形状に応じた内陸部への飛来塩分輸送状況となることが図 16 (c)および図 17 (c)よりわかる。

図 18 に端島の標高と飛来塩分輸送状況を示す。図 18 (a) は標高図、図 18 (b) は地表面（標高）の飛来塩分輸送状況 Map、図 18 (c) は地表面からさらに 10m の高さの位置（建物の 3 階屋上を想定）における飛来塩分輸送状況 Map をそれぞれ示している。なお、同図は東西南北の 4 方位それぞれで推定した飛来塩分量の合計値を Map 化している。

標高の違う端島の北東部と中央部では、海岸からの距離がほぼ同じであっても、標高の高い中央部がより輸送される飛来塩分が少ないことがわかる（図 18 (b)参照）。また、図 18 (c) の建築物の高さを考慮した飛来塩分輸送状況 Map では、地表面高さ位置での飛来塩分量と比べて、少なくなっていることがわかる（図 18 (b) と (c) 参照）。

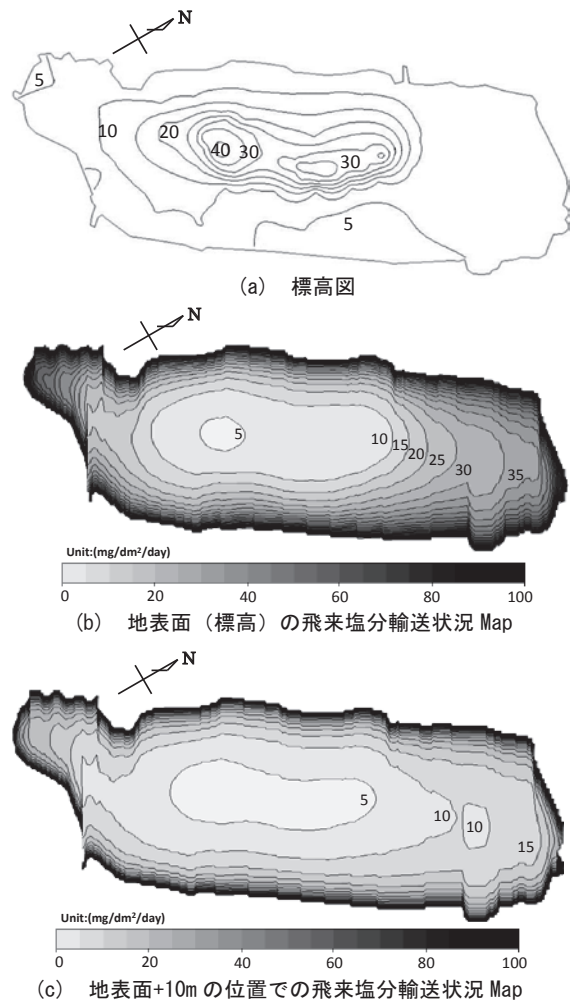


図 18 端島の標高と飛来塩分輸送状況 Map

6. まとめ

本研究では、発生飛来塩分量と平均風速の関係について、文献 24)、文献 25)で使用していた二乗則に加え、新たに指数則を用いて検討した。また、新たに著者らが提案する発生飛来塩分推定式を用いて内陸部に輸送される飛来塩分量を実測や既往研究の各結果と比較検討した。さらに、推定した飛来塩分輸送状況を空間的に可視化する方法を示し、その有用性を確認した。本研究で得られた知見と成果を以下にまとめる。

- (1) 発生飛来塩分量と平均風速の関係についての検討では、沖縄本島では二乗則、指数則による近似はほぼ同程度であった。一方、端島においては、二乗則と比べ、指数則の方がより実測の傾向を捉えることができる。
- (2) 減衰係数 β は、平均風速が大きくなると、発生飛来塩分量が多くなり、発生飛来塩分の平均粒子径が大きくなることで、飛沫粒子の沈降速度が速くなる影響のほか、特殊な地形により生じる風況や建物による遮蔽の影響が考慮されることがわかった。
- (3) 内陸部へ輸送される飛来塩分量の検討においては、沖縄本島では、本研究の提案式と BMS 式による推定値は実測値とよく一致する結果を得た。一方端島では、いくつかの観測地点でばらつきは見られたが、全体的に本研究の提案式(式(1))による推定値は実測値の傾向を捉えることができた。
- (4) 提案式により推定した結果から飛来塩分輸送状況を地図情報として可視化(Map 化)した。作成した飛来塩分輸送状況 Map は、海岸からの距離、標高のみならず、建物の高さを考慮することができ、飛来塩分の輸送状況を空間的に可視化できた。

飛来塩分は海岸の周辺環境や風況、建築物による遮蔽効果や海風の吹き上げや巻き込み等に影響されることがわかった。今後は、それらを踏まえて合理的な海岸係数の決定方法の確立や減衰モデルの構築を検討するとともに、より精度の高い飛来塩分輸送推定式に改善することを課題とする。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究(B)課題番号: 15K18157、代表者: 崎原康平)の助成を受けた。端島の飛来塩分調査に関しては、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: 野口貴文東京大学大学院教授)」の一環として実施した。また端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頂いた。関係者各位に記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 玉越隆文, 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, pp. 24-27, 2009. 3
- 2) 滝川清, 山田文彦, 外村隆臣, 松本健作, 坂本鋼治: 内海沿岸域における飛来塩分特性とその対策について, 海岸工学論文集, Vol. 43, pp. 1176-1180, 1996
- 3) 山田文則, 細山田得三: 海岸構造物への飛来塩分の付着過程に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 51, pp. 1126-1130, 2004
- 4) 藤田弘昭, 上原子晶久, 津村浩三, 石澤徹: 青森県日本海沿岸における RC 橋梁の塩害に関する調査, 土木学会論文集 E, Vol. 62, No. 2, pp. 330-340, 2006. 7

- 5) 佐伯竜彦, 堀岡祐介: 新潟県沿岸の飛来塩分環境とコンクリートへの塩分浸透性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 923-928, 2006. 7
- 6) 真喜志和広, 山田義智, 富山潤: 塩害環境下における飛来塩分量特性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 929-934, 2006. 7
- 7) 徳重英信, 木村哲士, 篠村篤史, 川上洵: 秋田県沿岸部の飛来塩分に及ぼす風波の影響と 10 年間暴露した供試体の塩分浸透, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 809-814, 2010. 7
- 8) 青木慶彦, 上浦健司, 福地大樹, 下村匠: 風洞実験による飛来塩分を受けるモルタルの表面塩分量および塩分浸透性状の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 821-826, 2010. 7
- 9) 佐伯竜彦, 竹田光明, 佐々木謙二, 嶋毅: 飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp. 1-20, 2010. 1
- 10) 山下寛生, 下村匠, 山田文則: 飛来塩分の影響を受けるコンクリートの表面塩分に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 1011-1016, 2011. 7
- 11) 中村文則, ほか 5 名: 海岸近傍に設置した透過性構造物の飛来塩分の低減効果に関する現地実証実験, 土木学会論文集 B2, Vol. 67, No. 2, pp. I_1061-I_1065, 2011. 11
- 12) 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量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
- 13) 上原子昌久, 皆川浩, 久田真, 鈴木基行: モルタル円盤供試体による青森県沿岸部の飛来塩分調査, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 757-762, 2015. 6
- 14) 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功祐, 日野幹夫: 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
- 15) 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
- 16) 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, No. 1, pp. 874-879, 2014. 6
- 17) 山田義智, 大城武, 榊田佳寛, 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集, Vol. 18, No. 1, pp. 945-950, 1996
- 18) 山田義智, 大城武, 榊田佳寛: 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, pp. 21-26, 1998. 12
- 19) 山田文則, 下村匠, 細山田得三: 飛来塩分の発生・輸送シミュレータの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 865-870, 2005. 6
- 20) 山田文則, 細山田得三, 下村匠, 佐藤聖介: 構造物周辺における飛来塩分の輸送過程に関する数値解析と現地観測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 1001-1006, 2006. 7
- 21) 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, pp. 1041-1046, 2007. 7
- 22) 中村文則, 生田麻実, 下村匠, 細山田得三: 飛来塩分が到達するコンクリートの表面塩分量に関する現地観測と数値解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 880-885, 2014. 7
- 23) 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, 2014. 7
- 24) 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, pp. 970-975, 2014. 6
- 25) 清水峻, 崎原康平, 山田義智, 濱崎仁: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 763-768, 2015. 6
- 26) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015
- 27) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, pp. 258-263, 1981
- 28) 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
- 29) 統計処理ソフトウェア R 公式 HP: <https://www.r-project.org/>, 2013. 12. 3
- 30) 国土数理情報ダウンロードサービス HP: <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, 2013. 12. 16

BASIC STUDY ON CONSTRUCTION OF THE PREDICTION SYSTEM FOR TRANSPORTATION OF AIRBORNE CHLORIDE IONS

Kohei SAKIHARA^{}, Yoshitomo YAMADA^{**}, Noboru YUASA^{***}
and Hitoshi HAMASAKI^{****}*

^{*} Assist. Prof., Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, Dr.Eng.

^{**} Prof., Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, Dr.Eng.

^{***} Prof., College of Industrial Technology, Nihon University, Dr.Eng.

^{****} Assoc. Prof., College of Engineering, Shibaura Institute of Technology, Dr.Eng.

It is very important to predict the airborne chloride ions to be transported from the sea in order to perform endurance design and maintenance. Furthermore, if it is possible to spatially visualize the distribution of the predicted airborne chloride ions, it is beneficial in helping to assess the chloride attack environment. In the above situation, we have proposed the airborne chloride ions estimation formula that taken into account the distance and altitude from the coast. In addition, the proposed formula takes into account the influence of the attenuation of airborne chloride ions. In the previous study (references 25) and 26)), the proposed formula has been approximated using a square law the relationship between the average wind speed and the generated airborne chloride ions. However, airborne chloride ions of Hashima Island in Nagasaki with special coastal terrain, there was a problem that it is difficult to capture the trend of the measured values in the proposed equation using the square-law.

In this study, we have proposed the generation airborne chloride ions estimation equation using the exponential law. Also we estimated airborne chloride ions to be transported inland by using proposed equation, compared the estimated results with measured results and it was compared to previous studies. Furthermore, we attempt to construct a simple system that can visualize the spatial distribution of airborne chloride ions.

First of all, in the study of the relationship between average wind speed and the generated airborne chloride ions, the approximation both the square-law and the exponential law were almost the same in Okinawa. On the other hand, in Hashima Island, the approximation compared exponential law with square law, it is possible to better the exponential law capture the trend of more measured results.

Secondly, we have examined the attenuation coefficient used in equation (1). As the result, it was confirmed that attenuation coefficient considered the effect of shielding of building, the influence of the wind generated by the special terrain, effect of sedimentation rate of splash particles.

In the study of airborne chloride ions to be transported to the inland, in Okinawa, the estimated value by the proposed formula and the BMS formula of the present study was to obtain a result in good agreement with the measured values. On the one hand, some of the observation points in Hashima Island, it was confirmed that the measured value and the estimated value does not match. However, the proposed equation in the study (Equation (1)) was able to capture the overall trend of the measured values.

Finally, we visualized the airborne salt transport situation by using the estimated results of the proposed formula. In the created map of transportation airborne chloride ions, it is possible to take into account the distance from the coast, altitude, the building height. Also, it can be spatially visualized.

(2015 年 12 月 10 日原稿受理, 2016 年 5 月 26 日採用決定)