

# 論文 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

崎原 康平\*1・比嘉 孝之\*2・山田 義智\*3・湯浅 昇\*4

**要旨:** 本研究は、沖縄本島における飛来塩分の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、まず海岸付近における発生飛来塩分量を考慮するため沖縄県国頭村辺野喜海岸で観測された風況(風向・風速)と飛来塩分量との相関を検討し、海岸付近における発生飛来塩分量を推定した。次に、当真らが提案した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、内陸部における飛来塩分の検討を行った。その結果、内陸部への飛来塩分の輸送状況を推定できる可能性が示唆された。また、推定した結果から飛来塩分輸送状況 MAP を作成し、その妥当性を検証した。

**キーワード:** 塩害, 風況, 飛来塩分, 飛来塩分輸送状況 MAP

## 1. はじめに

1986年の建設省(当時)による塩化物総量規制の通達以降に、内部塩化物による塩害の発生する可能性は殆ど無くなったが、海岸付近にて碎波した海塩粒子(以降、飛来塩分と称す)や凍結防止剤等の外来塩分による塩害の発生は近年も確認されている。

飛来塩分は海岸で発生し、風によって内陸部へ輸送される。そのため、飛来塩分の発生と輸送は風況(風向・風速)の作用が大きく影響している。内陸部における飛来塩分の輸送量や分布状況については多くの調査や研究がなされている。例えば国土交通省では、橋梁マネジメントシステム<sup>1)</sup>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。また、宇多ら<sup>2)</sup>は道路橋の全国実態調査データを利用して、海岸域における飛来塩分輸送推定式を提案している。

しかしながら、長期間の実測データ(風況や発生飛来塩分量)を考慮し、海岸での飛来塩分の発生および海岸からの水平距離や標高を用いて飛来塩分の輸送状況を推定した研究は数少ない(例えば文献3))。その中で、当真ら<sup>4,5)</sup>は、飛来塩分の輸送は海岸からの水平距離と標高の積に相関があると仮定した簡便な飛来塩分輸送推定式を提案している。

そこで、本研究では海岸付近における風況に着目し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当真ら、宇多ら、橋梁マネジメントシステムが提案している各飛来塩分輸送推定式を用いて、内陸部への飛来塩分輸送量に関する検討を行った。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、その妥当性を検証した。

## 2. 飛来塩分量の測定について

本研究では、沖縄県内の飛来塩分輸送状況を把握するため、図-1に示す11地点において飛来塩分の観測を行った。なお、飛来塩分の捕集には改良型の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が東西南北に面するように設置した。また、各観測地点における海岸地形の特徴と周辺環境を表-1に示す。

観測地点	最短距離	標高	観測地点	最短距離	標高
那覇A	510.0m	4.0m	辺野喜	37.8m	4.9m
那覇B	361.0m	17.0m	うるまA	151.6m	6.0m
那覇C	750.0m	7.0m	うるまB	529.2m	25.4m
那覇D	1683.0m	1.5m	うるまC	1255.2m	65.4m
那覇E	1850.0m	10.0m	琉球大学	2638.1m	128.3m
那覇F	3650.0m	12.0m			

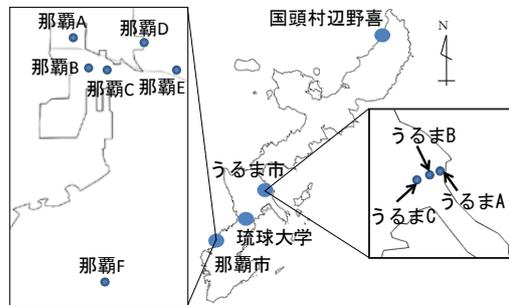


図-1 飛来塩分観測地点

表-1 海岸地形の特徴と周辺環境

観測地点	海岸地形の特徴	周辺環境
辺野喜	砂・小石の堆積した海岸、小さな入り江	西側が海に面しており、障害物は特になし
うるま市	砂浜と消波ブロックあり、リーフ発達、沖防波堤あり	北側は湾となっており、沖合には平安座、宮城、伊計の各離島がある
那覇市	消波ブロックあり、沖防波堤あり	北および南側に港湾があり、障害物は特になし
琉球大学	-	東側が大学構内研究施設で遮られているが、他方位は障害物なし

\*1 琉球大学 工学部環境建設工学科助教 博士(工学) (正会員)

\*2 那覇市役所 元琉球大学大学院 (会員外)

\*3 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

\*4 日本大学 生産工学部建築工学科教授 博士(工学) (正会員)

## 2.1 飛来塩分の観測地点および分析方法

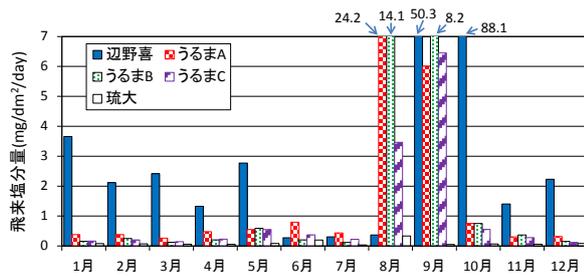
図-1 に示すように、飛来塩分捕集器は国頭村辺野喜に1箇所、うるま市に3箇所、琉球大学構内に1箇所、那覇市に6箇所設置している。また、同図中に、各観測地点の海岸からの最短距離および標高を併せて示す。飛来塩分は月に一度回収し、塩化物イオン選択性電極による電位差滴定法を用いて塩化物イオン量 (Cl<sup>-</sup>) の測定を行った。ただし本論文で示す飛来塩分量については、すべて NaCl 値として表記している。

## 2.2 各月の飛来塩分の傾向

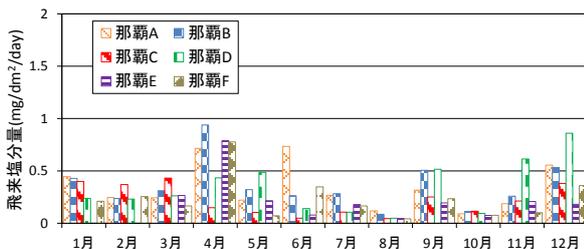
図-2 の (a) に辺野喜、うるま市および琉球大学 (観測期間：2008/1～2013/11)、図-2 の (b) に那覇市 (観測期間：2005/12～2006/12) の各観測地点における各月の平均飛来塩分量を示す。なお、辺野喜および那覇市6地点は海岸に最も近い西側の飛来塩分量を示した。また、うるま市3地点と琉球大学についてはそれぞれの海岸に最も近い東側の飛来塩分量を示している。

図-2 の (a) から、冬場は北西寄りの季節風のため辺野喜の飛来塩分量が多く、また夏場は南東寄りの季節風が吹くため、うるま市で観測された飛来塩分量が多くなっていると推察される。また、8月、9月および10月は観測期間中に台風が沖縄本島を通過したため非常に値が大きくなっている。ただし、海岸からの距離や標高の高い琉球大学では台風による大きな影響は観測されていない。

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飛来塩分量が少ない (図-2 (b) 参照)。この原因については、4.1 にて考察を行う。



(a) 辺野喜、うるま市、琉球大学の飛来塩分量



(b) 那覇市の飛来塩分量

図-2 各観測地点における飛来塩分量

## 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 (図-3 参照)。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交する方位の平均風速に換算し、これを海風の平均風速と定義した。なお、海風の平均風速については文献 6) を参照した。

本研究の飛来塩分量測定地点において、辺野喜および那覇市6地点では西側が海に面しており、うるま市3地点および琉球大学では東側が海側に面している。そこで、辺野喜および那覇市6地点では海風の対象方位を西とし、うるま市3地点および琉球大学は東とした。

### 3.2 海岸付近での風況について

飛来塩分の発生・輸送を知るためには一般に気象庁観測所 (アメダスなど) の風況データを用いることが多いと推察される。しかし、飛来塩分の発生・輸送を推定したい地域の近くに気象観測所がない場合も考えられる。また、対象地点の近くに気象観測所があった場合でも、その観測所と海岸付近の風況を比較した例は少ない。

そこで、本研究では、図-4 に示す辺野喜周辺の4気象観測所および辺野喜海岸に設置した Web 気象観測システム (以後、Web と称す) による現地海岸の各観測風況データの比較を行った。なお、Web の 2013 年のデータがシステムの不具合で取得できなかったため、本研究では 2008 年 1 月～2012 年 10 月の風況データを使用した。

同図に、各気象観測所の風速計設置標高と辺野喜からの最短距離も併せて示す。

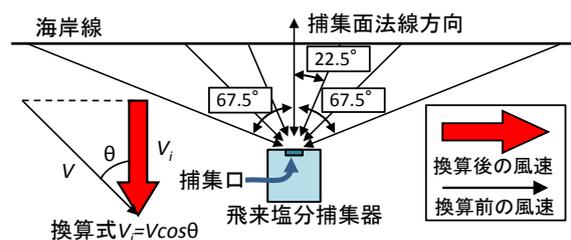


図-3 海風と風速の定義

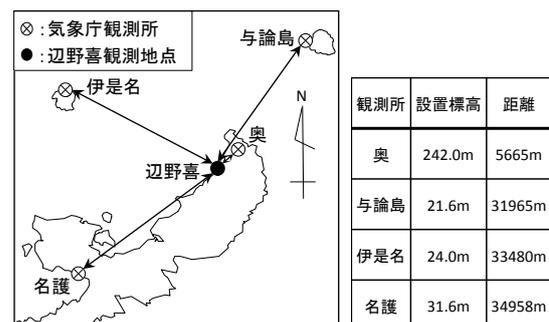


図-4 各気象観測所の位置関係

### 3.3 風況と発生飛来塩分量との相関について

図-5 に、現地観測風況および辺野喜周辺における気象観測所の風況データと発生飛来塩分量  $A_0^{be}$  の関係を示す。ここで、風況については海風の平均風速  $V_a$  による検討を行った。発生飛来塩分量は風速の二乗則に比例する傾向が確認されている<sup>2)</sup>ため、二乗則による近似曲線で相関を検討した。また、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を取り除いている。

図-5 から、飛来塩分は辺野喜 (Web) における現地で観測された風況との相関が高いことがわかる。また、周辺の各気象観測所の風況に関しては、最寄りの気象観測所である奥観測所よりも与論島観測所のデータの相関が高い。これは、奥気象観測所は森の中に設置され海岸地形とは大きく異なるのに対し、与論島観測所は海岸近くの空港内に設置されており、辺野喜の観測地点と設置環境が似ているため相関が高くなったと推察される。

このことから、海岸の風況を精度良く得ることは発生飛来塩分量予測に重要である。図-5 の結果から、海岸付近における発生飛来塩分量は現地観測風況によって推定することが望ましい。上述したように、図-5 の結果から、辺野喜の発生飛来塩分量  $A_0^{be}$  と風況の関係を二乗則近似すると式(1)が得られる。ここで式(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。

$$A_0^{be} = 0.501480 \times (V_a - 1)^2 \quad (1)$$

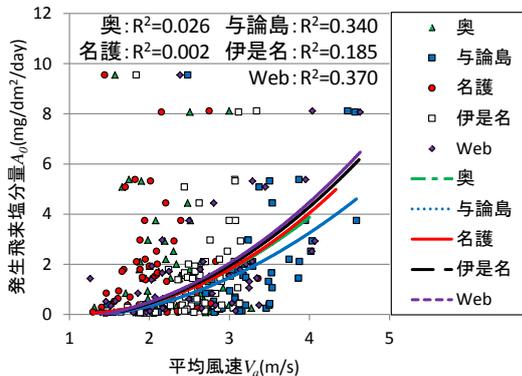


図-5 風況と発生飛来塩分量の相関

### 4. 飛来塩分輸送量の推定

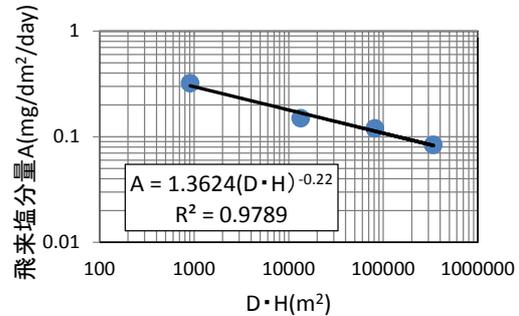
飛来塩分は、海岸からの水平距離や標高が大きくなるにつれて減衰していく。当真らは、飛来塩分が海岸からの水平距離  $D$  (m) と標高  $H$  (m) の積  $D \cdot H$  ( $m^2$ ) に相関があるものと仮定し検討を行っている。そこで、本研究では、当真らの方法に従い飛来塩分輸送量を推定する。

図-6 は、上記の関係を示す一例として観測期間中の12月におけるうるま市と琉球大学および那覇市の各観測地点の平均飛来塩分量と  $D \cdot H$  を示している。図-6か

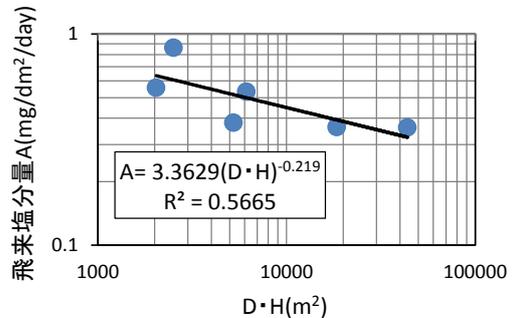
ら、飛来塩分量は  $D \cdot H$  が大きくなるにつれて、べき乗則によって減少していく様子がわかる。

うるま市では、すべての観測月についても同様の関係が確認された (図-6 (a) 参照)。また、那覇市では、2月、4月での相関は低かったがもの、それ以外の観測月では図-6 (b) と同様な相関が認められた。

以上より、当真らの仮定の確からしさが確認された。



(a) うるま市および琉球大学 (4 観測地点)



(b) 那覇市 (6 観測地点)

図-6 飛来塩分と  $D \cdot H$  の関係

### 4.1 当真らの飛来塩分輸送推定式

図-6 に示した関係から、当真ら<sup>4,5)</sup>は任意地点における簡便な飛来塩分輸送推定式 (式(2)) を提案している。

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

ここで、 $A_0^i$  は任意地点での発生飛来塩分量、 $D$  と  $H$  は任意地点における海岸からの水平距離と標高、 $D_0$  と  $H_0$  は辺野喜観測地点の海岸からの水平距離と標高、 $\alpha$  は減衰係数である。式(2)では、辺野喜観測地点を基準として検討を行っているため、各観測地点における  $D \cdot H$  を  $D_0 \cdot H_0$  で除している。

減衰係数  $\alpha$  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。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。なお本検討には、うるま市の各観測地点で実測したデータを用いた。検討方法としては、うるま市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  $H$  および辺野喜の海岸距離  $D_0$  と標高  $H_0$  の各値を式(2)に代入して、非線形最小自乗法によって、発生飛来塩分量  $A_0^i$  と減衰係数  $\alpha$  を同定した。

$$\alpha = 0.246602 \times (A_0^i)^{0.364335} \quad (3)$$

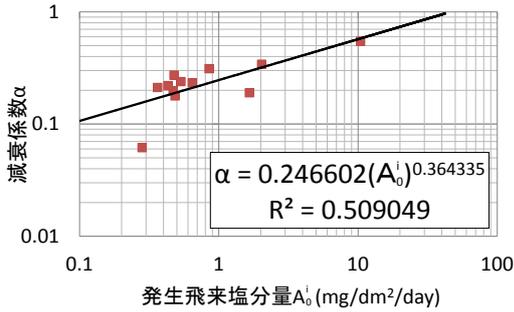


図-7 発生飛来塩分量  $A_0^i$  と減衰係数  $\alpha$  の関係

図-7に、発生飛来塩分量  $A_0^i$  と減衰係数  $\alpha$  との関係を示す。また、同図中の近似曲線から、減衰係数  $\alpha$  は式(3)で表される。図-7および式(3)から、発生飛来塩分量  $A_0^i$  が多くなると減衰係数  $\alpha$  も大きくなることが確認できる。この理由は、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。

次に、式(2)の飛来塩分輸送推定式（以後、当真式と称す）の妥当性を検討する。本検討では、式(2)の  $A_0^i$  は式(1)の  $A_0^{be}$  を用いた。また、式(1)中の平均風速は、辺野喜はWeb、うるま市3地点および琉球大学は最寄り気象観測所である宮城島、那覇市6地点は最寄りかつ観測所周辺に障害物が少ない安次嶺のデータを用いた。なお、減衰係数  $\alpha$  は、発生飛来塩分量  $A_0^i$  によって定まる値である。したがって、那覇市の減衰係数  $\alpha$  は、うるま市と同様に式(3)で決定した。

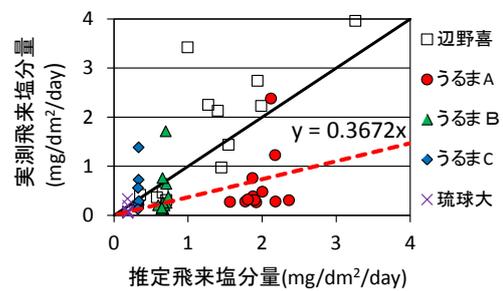
図-8に推定飛来塩分量と実測飛来塩分量との関係を示す。図-8の(a)および(b)において、当真式で推定した、うるま市3地点および那覇市6地点の飛来塩分量は、実測値よりも高い値となった。この理由は、発生飛来塩分量  $A_0^i$ （式(2)参照）に、式(1)の辺野喜における発生飛来塩分量  $A_0^{be}$  を用いたためと考えられる。

ところで、山田ら<sup>7)</sup>の研究によれば海岸形状の違い（海岸係数）によって発生する飛来塩分量が異なることが示されている。そこで、本研究では海岸形状の違いについても検討した。検討結果を図-8の(c)および(d)に示す。同図から、うるま市では式(1)の発生飛来塩分量  $A_0^{be}$  に海岸係数0.275、那覇市では海岸係数0.225を乗じたところ、実測値と推定値の対応がよくなった。

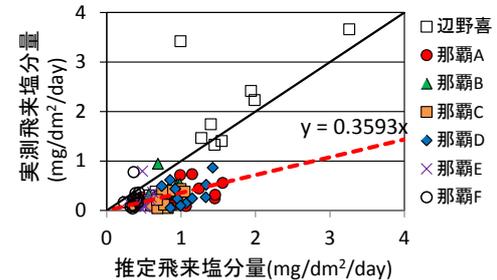
しかしながら、山田らが示した海岸形状の分類では、うるま市および那覇市の各海岸係数は辺野喜海岸の約0.4倍になると考えられるが、うるま市、那覇市ともに既往研究での海岸係数よりも小さな値となった。この理由は、うるま市沖合では平安座、宮城、伊計の各島々が湾

を成すように存在していること、那覇市では南北に港湾があることなど、周辺環境による影響で飛来塩分の発生が少なくなった可能性が考えられる。また、小窪ら<sup>3)</sup>の研究では、岩礁や人工海岸、砂浜等の海岸形状の違いごとに飛沫発生基準点を設定し、波高および周期を考慮した発生飛来塩分推定式を提案しており、本研究と同様に、海岸形状の違いによって発生する飛来塩分が異なることを示している。なお、図-2(b)で示した結果についても、上記の推察と対応している。

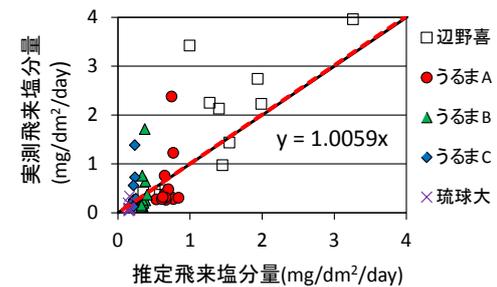
以上のことから、海岸形状を考慮して発生飛来塩分量を推定すれば、当真式はある程度実測結果と対応することが確認できた。



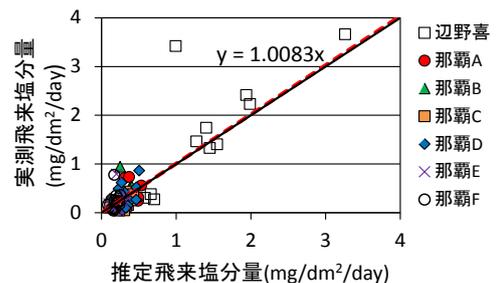
(a) 海岸形状考慮なし（うるま市）



(b) 海岸形状考慮なし（那覇市）



(c) 海岸形状考慮（うるま市、 $A_0^{be} \times 0.275$ ）



(d) 海岸形状考慮（那覇市、 $A_0^{be} \times 0.225$ ）

図-8 当真式を用いた飛来塩分量推定量

#### 4.2 既往の飛来塩分輸送推定式との比較

ここでは、前節で示した当真式と、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<sup>1)</sup> (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) および宇多ら<sup>2)</sup>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) との比較検討を行う。

##### (1) BMS 式<sup>1)</sup>

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。

$$A = C_1 \cdot d^{-0.6} \quad (4)$$

ここで、 $A$  は飛来塩分量 ( $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ )、 $C_1$  は地域区分毎の 1km 換算飛来塩分量 ( $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ )、 $d$  は海岸までの距離 (km) であり、沖縄県における  $C_1$  は、台風の影響を考慮する場合は  $C_1=1.0$ 、考慮しない場合は  $C_1=0.62$  である。本研究では、台風の影響については考慮しないものとし、 $A$  を算出した。

##### (2) 宇多式<sup>2)</sup>

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 領域を定義し (図-9 参照)、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。

$$\left. \begin{aligned} A &= \lambda u^2 e^{-cz} && \text{: 飛沫供給領域} \\ A &= \lambda u^2 e^{-(b/u)x} e^{-cz} && \text{: 移流沈降領域} \\ A &= A_{x1} / \{1 + \gamma(x - x1)\} && \text{: 拡散領域} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $A$  は飛来塩分量 ( $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ )、 $\lambda$  は観測期間中に海風が発生した割合、 $u$  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、 $c$  は飛沫の地表面からの高さに関する係数、 $\gamma$  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)、 $x1$  は海岸から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 ( $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ ) である。

宇多らは、波浪条件および海岸地形条件によって係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $\gamma$  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、 $A_{x1}$  は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、 $x1$  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 8) に示されている海岸距離と海塩粒子濃度の関係から  $x1=200$  (m) と仮定した。

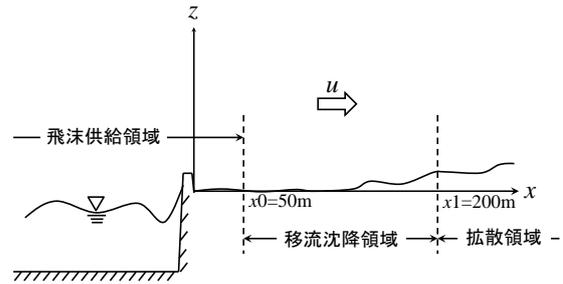


図-9 宇多式における飛来塩分推定の領域区分

表-2 宇多式に用いられる係数一覧

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
	$\gamma$	0.5

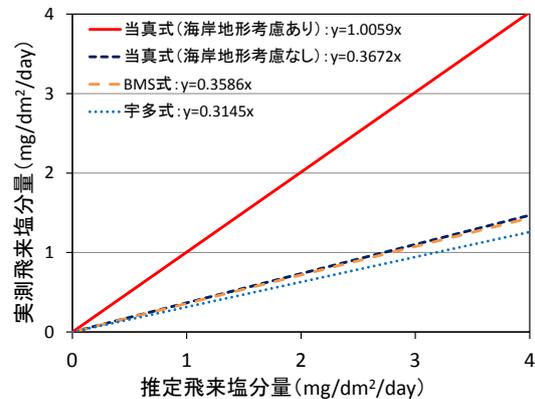


図-10 実測飛来塩分に対する各飛来塩分推定の相関

図-10 に、うるま市 3 地点における実測飛来塩分量に対する各飛来塩分輸送推定式で算出した推定飛来塩分との相関を示す。海岸形状を考慮しない場合においては、当真式、BMS 式、宇多式は同様な傾向を示し、推定量は実測量よりも大きく見積もられた。また、図-8(c) に示した海岸形状を考慮した当真式では、実測量と良い相関が得られた。ここで上記の結果を踏まえると、BMS 式および宇多式においても海岸形状を考量した適切な値 (BMS 式では  $C_1$ 、宇多式では飛沫の供給に関する係数  $a$ ) を設定すれば実測量と近い結果が得られる可能性がある。したがって、各飛来塩分輸送推定式の精度を高めるためには、海岸形状を考慮した上記の各係数を決定することが重要であると考えられる。

#### 4.3 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、得られた諸データ (実測量や推定量など) を可視化する試みが盛んに行われている。そこで、本研究では一例として、うるま市海岸および那覇市海岸における飛来塩分量を、海岸形状を考慮した当真式にて推定し輸送状況を MAP 化した。

