

海岸からの飛来塩分量の計算モデル

宇多高明*・小 俣 篤**・小西正純***

1. ま え が き

沿岸域では、海岸から飛来する塩分を含んだ飛沫によりしばしば塩害が発生する。特に、近年では沿岸域におけるコンクリート構造物の劣化が問題とされている。こうした沿岸域における塩害の防止手法を検討するには、海岸部での飛沫の発生およびその飛来機構を明らかにすることが是非とも必要とされる。また、海岸部より発生する飛沫量が海岸地形や海岸構造物の設置状況に依存するのであれば、飛沫の発生を極力抑制するよう海岸保全計画においても十分な配慮をしておくことが望まれる。しかしながら海岸部より発生する飛沫の飛散に関する研究はあまり見あたらず、参考資料も不足するのが現状である。一方、塩害についてはいくつかの調査があり、特にコンクリート道路橋に関しては全国実態調査が実施されている（森ほか、1985；片脇ほか、1985；藤原ほか、1988）。そこで、本研究ではこの全国調査データを利用して、飛沫の発生・飛来機構の解明を試み、沿岸域における飛来塩分量の計算モデルを提案するものである。

2. 飛来塩分量の全国調査

飛来塩分量の全国調査は、1984年12月から1987年11月の3年間にわたり266箇所に設けられた観測点において実施された。具体的な調査内容と結果は、森ほか(1985)、片脇ほか(1985)、藤原ほか(1988)に詳述されている。

飛来塩分量は10×10 cm のステンレス製のは集器を持つ土研式塩分収集器（森ほか、1985）により収集された。飛来塩分量の収集間隔は1ヶ月とされ、この間には集器の表面に付着した飛沫を洗い流してポリタンクに回収し、その計量塩分濃度より次式を用いて日平均飛来塩分量が求められた。

日平均飛来塩分量 (mdd)

$$= \frac{\text{計量塩分濃度 (mg/ml)} \times \text{回収水量 (ml)}}{\text{収集期間 (day)} \times \text{収集面積 (dm}^2\text{)}}$$

注) mdd=mg/dm²/day, 1 dm²=100 cm²

観測期間中の風速は、観測点近くのアメダスの観測地点における1時間毎の風向風速データより求められた。解析に用いた風速データは、海岸から観測点方向に吹く風（海風）のみを対象とし、収集期間中の海風の平均風速として整理されている。このときの海風は、観測地点から海岸線に引いた法線の両側45°の範囲に風向を持つ風と定義された。

3. 飛沫の発生・輸送機構に関する考察

3.1 飛沫の発生・輸送機構

飛来塩分の起源は海岸部で発生する飛沫である。飛沫の発生は、①浅海の海面上で風の作用により海水が剥離し飛沫となる場合、②岩礁や消波工、護岸などの構造物に波浪が衝突、遡上する際に跳ね上がった水塊が風の作用により飛沫となる場合とに大別される。また、無風時、護岸や構造物等に入射波浪が衝突する際跳ね上がった海水は、発生時に与えられた慣性力により陸上へ飛散する。このように、無風時に飛沫が飛散する範囲をここでは慣性領域と呼ぶこととするが、この慣性領域は海岸近くのかかなり限られた範囲となるので本研究の対象外とする。

①、②のいずれの発生状況であっても、飛沫の発生は風速と海水の表面張力に支配されるので、飛沫の発生はウェーバー則に従うと考えられる（石田ら、1982）。ウェーバー則に従うなら、飛沫の発生量 ϕ は次式で求められる。

$$\phi = f(\rho, \sigma, d, u^2) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ ：空気密度、 σ ：海水の表面張力、 d ：飛沫の直径、 u ：風速である。空気、海水の特性値である ρ, σ は、現地海岸の条件ではほぼ一定とおくことができるので、飛沫の粒径 d を一定と仮定すれば、飛沫の発生量は風速の2乗に比例する。すなわち、

$$\phi = \beta u^2 \dots\dots\dots (2)$$

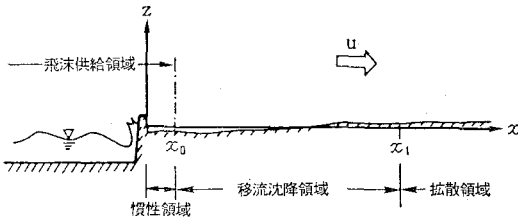
となる。ここに β は係数であり、上記の①、②に示した発生機構の違いや波浪条件、地形条件による発生量の差がこの係数により表わされることになる。

海岸部で発生した飛沫は風による抗力により移流されつつ重力の作用により落下する。さらに、海岸線より十

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 建設省北陸地建金沢工事事務所調査第一課長

*** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室



図一 飛沫の飛来機構に関する領域区分

分離した場所では飛沫は霧状になって拡散すると推定される。そこで、本研究では風による移流と重力による沈降が卓越する領域を移流沈降領域、霧状の飛沫が拡散する領域を拡散領域と呼ぶ。飛沫の飛来状況の領域区分を図一に示す。以下の考察では慣性領域と移流沈降領域の境界を海側境界とし、慣性領域を含めた海岸部を飛沫の供給域と考える。

解析に用いる座標系は、陸上地形がほぼ平坦であるとして、汀線より地表面に沿って内陸方向に x 軸、地表面を基準として鉛直上方に z 軸をとる。また、慣性領域は $0 \leq x < x_0$ 、移流沈降領域は $x_0 \leq x < x_1$ の範囲とする(図一参照)。このとき、陸上地形の傾斜は無視できるほど小さいとして、 z 軸は重力方向と一致させる。

3.2 移流沈降領域における飛来塩分量

陸上に飛来する塩分量を求めるモデルは次の仮定の下で作成する。

- ① 沿岸部における飛沫の運動はほぼ2次元的に扱うことができる。
- ② 飛沫中の塩分濃度は一定である。すなわち、空間中の飛沫量と塩分濃度は比例関係にある。
- ③ 各領域内における飛沫の運動形態は一樣である。
- ④ 陸上風は鉛直方向に一樣に吹き、風速の水平方向の変化はない。時間的に見ても風速の変動は小さく、風の場合は準定常状態とみなすことができる。また、飛沫は風と同じ水平速度で運動する。

モデルの基本式は、支配断面内での飛来塩分量の収支より与えられ、飛来塩分濃度 C の x 軸方向の積分値より求まる総飛来塩分量を C_t とすれば次式で表わされる。

$$u(\partial C_t / \partial x) + wC_0 = 0 \quad (3)$$

ここに、 u ：水平方向風速、 w ：飛沫の沈降速度、 C_t ：鉛直断面を通過する総飛来塩分量、 C_0 ：基準高さにおける飛来塩分濃度である。ここで、飛来塩分濃度 C の鉛直分布は、解析の容易さを考慮して指数分布を仮定する。したがって、塩分濃度 C の分布は次式で与えられる。

$$C = C_0 e^{-kz} \quad (4)$$

ここに、 k は飛沫の鉛直混合の程度を表わす係数である。式(3)、(4)より、空間中の飛来塩分濃度は

$$C = \alpha e^{-(w/u)kx} e^{-kz} \quad (5)$$

と表わされる。ここに、 α は $x = x_0$ における C_0 の値で

ある。式(5)に飛沫中の塩分濃度は一定との仮定を適用して式(2)を代入し、新たな係数 β を導入すると

$$C = \beta u^2 e^{-(w/u)kx} e^{-kz} \quad (6)$$

を得る。この式は、一定風速の条件下における、空間中の飛来塩分の濃度分布を表わしており、約1カ月の測定期間中に測定された観測点の塩分量の推算にそのまま用いることはできない。そこで、準定常の仮定が成立する範囲での風速変動に対しては、式(6)の u を時間の関数とすることにより、飛来塩分濃度の時間変化を表わせると考える。そして、観測期間中に海風が発生した割合を λ として海風以外では飛来塩分は発生しないと考え、風速 u を観測期間中の海風の平均風速と見なせば、ある観測点における総飛来塩分量 D_t は次式で与えられる。

$$D_t = \lambda \varepsilon (t_2 - t_1) \beta u^2 e^{-(w/u)kx} e^{-kz} \quad (7)$$

さらに、日平均飛来塩分量 $D = D_t / (t_2 - t_1)$ を導入し、また、 w 、 ε は観測固有の定数なので新たに $a = \varepsilon \beta$ 、 $b = kw$ 、 $c = k$ とおけば、次式が得られる。

$$D = \lambda a u^2 e^{-(b/w)x} e^{-cz} \quad (8)$$

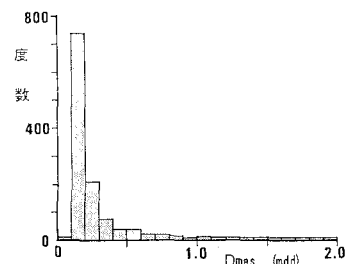
3.4 拡散領域における飛来塩分量

拡散領域では飛沫が $z=0 \sim z_u$ の範囲に一樣に分布するとし、かつ z_u 自身が線形に増大しつつ濃度の低下が生ずると考える。したがって、拡散領域と移流沈降領域の境界 ($x = x_1$) における飛来塩分量を D_{x1} とすると、拡散領域における飛来塩分量 D は

$$D = D_{x1} / \{1 + \gamma(x - x_1)\} \quad (9)$$

と表わされる。ここに γ は z_u の増加率であって、飛沫の拡散に係わる定数である。この場合、飛来塩分の鉛直分布を指数分布とした移流拡散領域との間で塩分量の不連続が生じるが、拡散領域の塩分濃度は小さいので、地表面付近での塩分濃度のみを対象とする限りでは実用上問題ないと考えられる。

式(8)より飛来塩分量を推定する場合、拡散領域と移流沈降領域の境界位置 x_1 を決めておく必要がある。拡散領域は内陸部の測定塩分濃度がかなり低い領域に位置するはずであるから、拡散領域と移流沈降領域の境界位置での塩分量 D_{x1} を定め、その値より境界位置の座標 x_1 を逆算する。そこで、日本道路協会(1984)に示される非塩害対策地域が拡散領域に相当するとして、飛来塩



図二 非塩害対策地域内の測定データ

分量の全国調査より非塩害対策地域内における飛来塩分量 D の観測値を調べた (図-2 参照)。これによると、非塩害対策地域での飛来塩分量はほぼ

$$D \leq 1 \text{ mdd}$$

にあり、 $D_{\text{st}} = 1 \text{ mdd}$ と設定できる。

4. 飛来塩分量の計算モデルの検証

4.1 諸条件から見た観測点の分類

式 (8), (9) 中の係数は、飛沫の発生および陸上での飛沫の混合に係わるものである。前者には主として波浪条件と海岸地形が、後者には陸上地形と地被条件が関与すると考えられる。そこで、波浪条件と海岸地形が反映できるように観測点を分類し、それぞれの分類ごとに係数値を定めることにする。

① 波浪条件：観測点が近接する海岸の位置により、我が国沿岸における波浪条件がほぼ類似した日本海型 (日本海沿岸、東シナ海沿岸)、太平洋型 (太平洋沿岸)、内海・内湾型 (瀬戸内海沿岸、湾内の海岸) の3つに分類した。

② 海岸地形：飛沫の発生量の差違の点から、観測点に近接する海岸の地形条件を砂礫海岸、岩礫性海岸 (岩礁、あるいは消波工・護岸が直接海面と接している海岸) およびサンゴ礁海岸に分類した。

また、本研究で作成した飛来塩分量の計算モデルは、平坦で緩勾配の陸上地形を想定している。そこで、モデルの検証には平坦な地形条件で田畑や野原など粗度の小さな地被条件に該当する観測点を対象とした。

各観測点のデータを見ると、海岸地形ではサンゴ礁海岸で、波浪条件では内海・内湾型で測定塩分量が非常に少なく、実用上からみて飛来塩分量のモデルを作成する意義はない。そこでこれらはモデルの検証対象から除外した。さらに、近接する海岸の地形が沿岸方向に著しく変化する観測点、海側に障害物のある観測点、近接する海岸までの距離が 2 km 以上の観測点等、解析上難のあ

るデータをあらかじめ除外したところ、最終的に使用可能なデータは42観測点の 474 データとなった。

4.2 慣性領域と拡散領域の境界の設定

現地海岸での越波状況の写真によると、越波時に水塊が堤内に落下する範囲は高々4車線の道路幅程度である (宇多ほか, 1991)。そこで、慣性領域を越波時に飛散する水塊の到達範囲より広めにとり、一律に汀線位置から 50 m の範囲までと設定する。また、基準高さは海岸部の平地の平均的な標高である標高 5 m とする。

4.3 モデル式の係数の決定

式 (8), (9) の係数 a , b , c , γ は、現地観測データと計算モデルの値を照合することにより定められる。このとき、塩分量 D 、風速 u および距離 x , z の単位はそれぞれ mdd, m/s および m とする。まず、日本海・岩礫性海岸の飛来塩分量の測定値 D_{mes} と計算値 D_{cal} の関係を図-3, 4 に示す。ばらつきはあるものの計算値と測定値の相関は比較的よい。ここで、データのばらつきの原因には風速の平均化、塩分量と気象の観測点の位置の相違による風速の誤差、観測点周辺の局所地形の影響、観測点ごとの集効率の差などがある。これらのばらつきの要因を考慮すると、図-3, 4 は式 (8), (9) がほぼ妥当であることを示す。

次に、日本海・砂礫海岸の飛来塩分量の測定値 D_{mes} と計算値 D_{cal} の関係を図-5, 6 に示す。日本海・岩礫性海岸に比べると、図中に示した係数のうち a のみが変わっている。すなわち、海岸地形の差による飛沫の発生状況の差のみがモデルに取り込まれた形となっている。陸上における飛沫の移流、沈降、拡散という現象は、陸上地形や地被条件が変わらない限り変化しないはずである。したがって、地形条件、地被条件を固定した場合には、係数 b , c , γ は一定でなければならない。この条件は、次に述べる太平洋沿岸の2つの海岸地形に関する解析においても適用されている。図-5, 6 では塩分量が小さい範囲でのばらつきがかなり大きい。全体として計

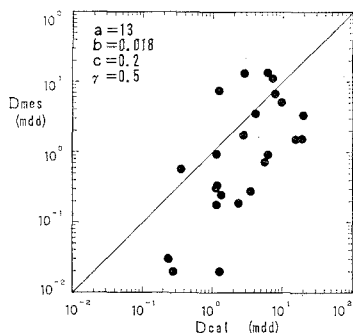


図-3 飛来塩分量の測定値と計算値の比較 (日本海・岩礫性海岸, 1986年)

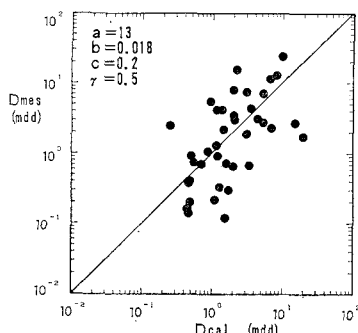


図-4 飛来塩分量の測定値と計算値の比較 (日本海・岩礫性海岸, 1987年)

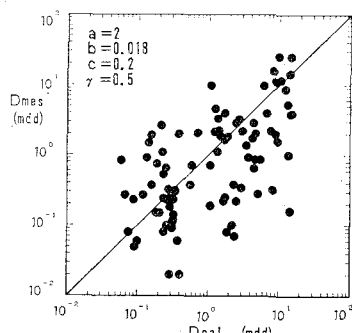


図-5 飛来塩分量の測定値と計算値の比較 (日本海・砂礫海岸, 1986年)

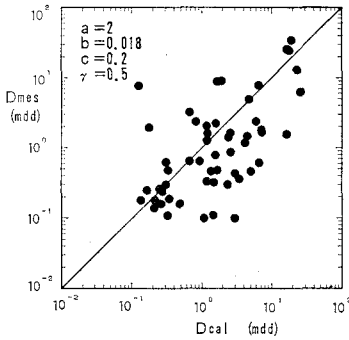


図-6 飛来塩分量の測定値と計算値の比較 (日本海・砂礫海岸, 1987年)

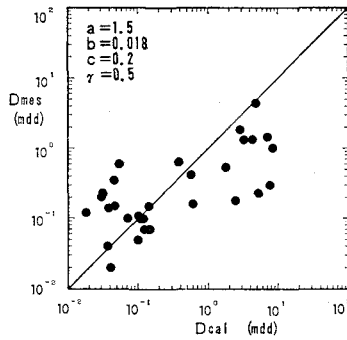


図-7 飛来塩分量の測定値と計算値の比較 (太平洋・岩礫性海岸, 1986年)

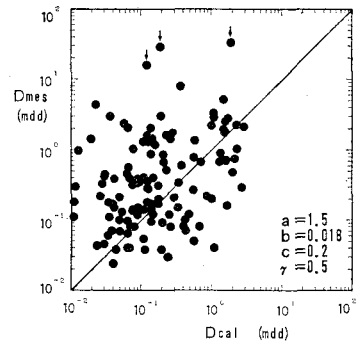


図-8 飛来塩分量の測定値と計算値の比較 (太平洋・砂礫海岸, 1986年)

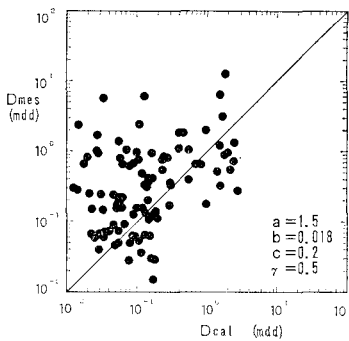


図-9 飛来塩分量の測定値と計算値の比較 (太平洋・砂礫海岸, 1987年)

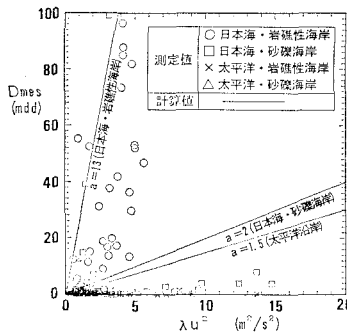


図-10 慣性領域内に位置する観測点の D と λu^2 の関係

算値は測定値の傾向をよく表わしている。

太平洋・岩礫性海岸の飛来塩分量の測定値 D_{mes} と計算値 D_{cal} の関係を図-7 に示す。日本海・岩礫性海岸に比べると、この類型でも図中に示した係数のうち a のみが変わっている。すなわち、この場合には波浪条件が異なることによる日本海・岩礫性海岸との飛沫発生状況の差が取り込まれた形となっている。 D_{mes} が 1 mdd より小さい範囲で散らばりが特に大きい、塩分量の絶対値が小さいので、実用上の問題はあまりないと思われる。

最後に、太平洋・砂礫海岸の飛来塩分量の測定値 D_{mes} と計算値 D_{cal} の関係を図-8, 9 に示す。計算値と測定値の相関はあまりよいとは言えない。特に、計算値が 1 mdd 以下となる場合に測定値がかなり大きい傾向が見られる。これは、風速が小さいにも係わらず測定塩分量が大きいことを表わしている。すなわち、風速の平均化による誤差の可能性が高い。そこで、図-8 に見られる測定塩分量が 10 mdd 以上とかなり大きな 3 データ (図の矢印) について、特に詳しく気象資料を調べた。これらは全て千葉県の外房に位置する観測点で得られたデータであるが、これらのデータの観測期間には

8610 号台風が房総半島を縦断している。この台風時の最大平均風速は 13.7 m/s (鉋子での観測値) であり、計算に用いた各観測点の月平均風速 2.5 ~ 2.7 m/s とは大きく異なることから、平均風速を用いることにより計算塩分量がかなり小さくなったと考えられる。

以上の検討により、モデル式中の係数が求まった。これらの係数のうち、係数 a は波浪条件および海岸地形によって異なる、飛沫の供給に関係した係数である。係数 a が慣性領域と移流沈

降領域の境界における塩分供給量を表わす係数であるなら、移流沈降領域に近い慣性領域の測定塩分量は、式 (8) より近似的に

$$D = \lambda a u^2 e^{-\alpha z} \dots \dots \dots (10)$$

と表わされるはずである。そこで慣性領域内の $x=0 \sim 30$ m に位置する観測点の測定塩分量を用いて D と λu^2 の関係を調べると図-10 となる。図中の実線は各類型の係数を用いた式 (10) による計算値を示す。 a が小さい場合、測定値より計算値の方が大きい。しかし計算値は u^2 による慣性領域内の測定値の変化傾向をほぼ表わしている。このことから、移流沈降領域のデータにより定められた係数値はほぼ妥当と判断できる。

4.4 係数値の比較

表-1 に示した係数 b , c , γ は波浪条件と海岸地形に係わらず一定値として与えられ、飛沫の供給に係わる係数 a は波浪条件と海岸地形により変化する。日本海型では岩礫性海岸で $a=13$, 砂礫海岸で $a=2$ であり、岩礫性海岸では砂礫海岸の 6.5 倍も飛沫の発生量が多い。また、岩礫性海岸と砂礫海岸とで飛沫の発生量が大きく異なる点は、海面から風により離脱して発生する飛沫量より、海岸で岩礫等に衝突し跳ね上がった水塊が風により

表-1 係数一覧

波浪条件	モデルの係数	海岸地形条件	
		岩礁性海岸	砂礫海岸
日本海型	a	13	2
	b	0.018	0.018
	c	0.2	0.2
	γ	0.5	0.5
太平洋型	a	1.5	1.5
	b	0.018	0.018
	c	0.2	0.2
	γ	0.5	0.5

飛沫となる量の方がかなり多いことを示唆する。太平洋沿岸では岩礁性海岸、砂礫海岸ともに $a=1.5$ と小さく、日本海・岩礁性海岸に比べると太平洋・岩礁性海岸における飛沫の発生量は1オーダー小さい。このことは、同風速の条件であっても太平洋沿岸に比べると日本海沿岸では飛沫の発生量が大いことを示す。すなわち、日本海沿岸では高風速の海風が発生する冬期に高波浪が来襲するので飛沫発生量が多くなるのに対し、太平洋沿岸では高風速の際に必ずしも高波浪になるとは限らず、しかも高波浪の来襲は台風時の短期間に限られるので飛沫の発生量はあまり多くならないと考えられる。

日本海沿岸と太平洋沿岸を比べると、砂礫海岸の a の値はほとんど同様である。岩礁性海岸では両者の波浪条件により飛沫の発生量が著しく異なることから類推すると、砂礫海岸における飛沫の発生量は波浪条件にほとんど依存せず、風速のみにより定まることを示している。

したがって、浅海での波浪変形、碎波、海浜への遡上などの現象は飛沫の供給とは無関係となるので、砂礫海岸では風により沖合の海面から離脱する飛沫の供給が支配的になるといえる。

また、太平洋沿岸では岩礁性海岸と砂礫海岸の係数 a に差を生じないことは、太平洋沿岸における波浪条件では岩礁性海岸であっても飛沫の飛散はあまり生じないことを示している。したがって、太平洋沿岸の波浪条件は、台風による短期間の高波浪時を除いては、飛沫の発生という点から見るとあまり厳しい条件にないことが推察される。

本来であれば、モデル式の係数 a は波高の関数で与え

られるべきである。しかし飛来塩分量のように現地海岸での発生量に種々の条件が複数に関与する物理量を扱う場合には、本研究で示した類型化により実用上は十分と思われる。

5. 結 論

慣性力の作用により水塊が飛散する慣性領域、風による移流と重力による沈降が卓越する移流沈降領域、霧状の飛沫が拡散する拡散領域の3領域を設定し、移流沈降領域と拡散領域における飛来塩分量の計算モデルを作成した。移流沈降領域の計算モデルは式(8)により、拡散領域は式(9)により表わされる。また、式中の係数値は、平坦な陸上地形、田畑や野原のような地被条件のもとで、波浪条件と海岸地形の類型毎に表-1に示す値で与えられる。さらに、これら係数の比較より、日本海・岩礁性海岸では、砂礫海岸の約6.5倍も飛沫の発生量が多いこと、また、風的作用により海面から離脱して発生する飛沫量より、波浪が岩礁等に衝突し跳ね上がった水塊が風により飛沫化する量の方がかなり多いことが示された。

謝辞：飛来塩分量の全国調査に関する資料およびデータは、建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室より貸与していただいた。また、データの解析に当っては同研究室に多くの御協力を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 石田 昭・花田昌彦・細井正延 (1982)：飛沫の発生に関する実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 385-388.
- 宇多高明・小俣 篤・小西正純 (1991)：越波状況の分類および飛来塩分量の計算モデル，土木研究所資料，第3036号，47p.
- 片脇 清・西崎 到・守屋 進・篠原洋司・中野正則・田中良樹・鹿嶋久義 (1985)：飛来塩分量全国調査(Ⅱ)——全体計画見直しに伴う調査実施要領の改訂——，土木研究所資料，第2257号，104p.
- (社)日本道路協会 (1984)：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説，199p.
- 藤原 稔・箕作光一・田中良樹 (1988)：飛来塩分量全国調査(Ⅲ)——調査結果およびデータ集——，土木研究所資料，第2687号，266p.
- 森 芳徳・片脇 清・守屋 進・佐伯彰一・宮田年耕・中野正則・佐藤和徳・田中良樹 (1985)：飛来塩分量全国調査(Ⅰ)，土木研究所資料，第2203号，86p.