

開放性砂丘沿岸域における飛来塩分分布特性に関する現地観測と数値計算による検討

Field Measurement and Numerical Simulation of Distribution of Sea Salt Particles in the Open Coastal Region

渥美 洋一*・若山 義樹**・國田 淳**・関口 信一郎**・佐藤 勝春***・宮川 譲治****

Youichi Atsumi, Yoshiki Wakayama, Atsushi Kunita, Shin'ichiro Sekiguchi, Katsuharu Sato and Joji Miyakawa

Sea salt particles influence on life environments on coastal regions. And high concentration sea salt particles are influential to the growth of plants.

It is necessary to consider the influences of the sea salt particles on the woods around the coastal region for the planning of waterways in Tomakomai port(Higashi port).

This paper presents a field measurement shows the horizontal and vertical distributions of the sea salt particles from the beach line to the land area, in the open coastal region which has no buildings near the port. In addition, the numerical simulation of the distribution of the sea salt particles is described.

Keywords: Field measurement, Sea salt particles, Numerical simulation, Open coastal Region

1. はじめに

海からの飛来塩分は沿岸域では生活環境に影響を与え、さらにその塩分量によっては植物等の生育に対して阻害影響は大きいものがある。

今日沿岸域では、人々の生活、産業活動、及びレジャー等の場として積極的な開発が行われているため、海からの飛来塩分による影響範囲の把握と、その対策の重要性が増している。

苫小牧港東港区においても今後掘込水路が計画されており、周辺の樹林等に対する飛来塩分の影響範囲の検討を必要とした。

このため、本研究は本港湾近傍の建築物等の障害のない開放性砂丘沿岸域において、飛来塩分の汀線から陸域への水平分布、及び鉛直分布の現地観測を行うとともに、その観測データを基に飛来塩分量分布の数値計算による検討を行った。

2. 現地観測

2.1 現地の状況

現地観測は図-1に示した、建築物等の障害のない開放性砂丘沿岸域に於いて行った。

観測地点は汀線から50m, 100m, 160m, 250m, 360m, 920m, 1400m, 2000m, 3000m, 及び3500mでの10地点とし、ほぼ一直線上に配置した。観測地点名は、汀線からN o. 1とした。

また、観測地点の地形断面を図-2に示した。

観測地点の状況は、N o. 1 (50m)及びN o. 2 (100m)は高さ2~3mの砂丘であった。N o. 3 (160m), N o.

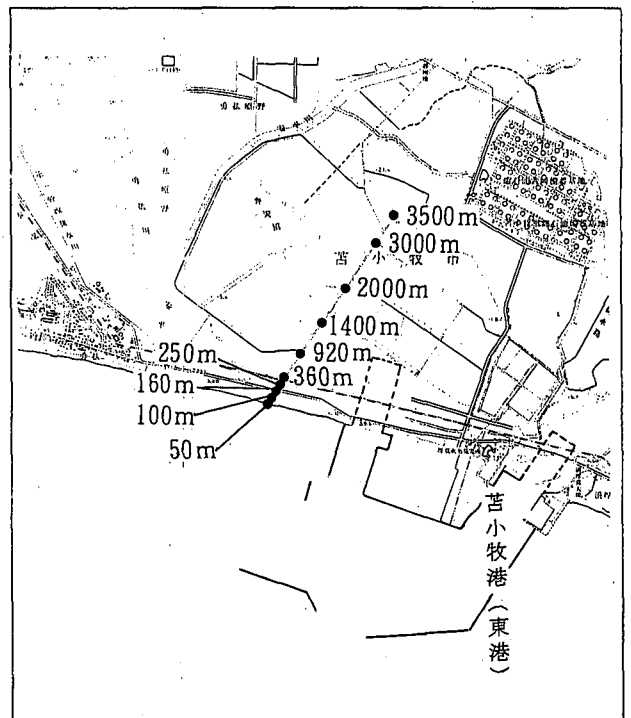


図-1 現地観測地点

4 (250m)及びN o. 5 (360m)の各地点はいずれも低湿地帯で、スゲ、ヨシが密生している。N o. 5 (360m)~N o. 6 (920m)の間には高さ4~5mの灌木が密生する保安林となっている。N o. 7 (1400m), N o. 8 (2000m)及びN o. 9 (3000m)の各地点は草丈 0.5m~1.0mの草原であった。

なお、観測地点N o. 1 (50m)~N o. 9 (3000m)は標高

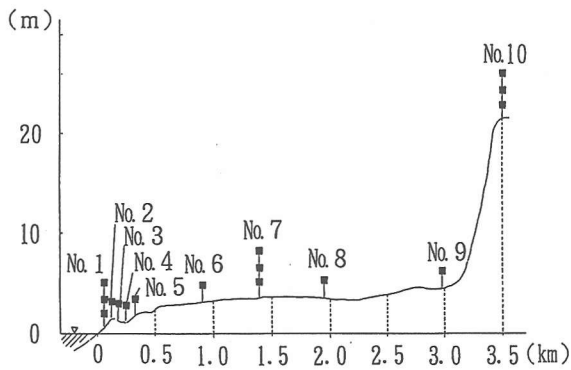
* 正会員 北海道開発局 苫小牧港湾建設事務所 (〒053 苫小牧市末広町1丁目1番1号)

** 北海道開発局 苫小牧港湾建設事務所

*** 正会員 エヌエス環境株式会社

**** 東武計画株式会社

約6 mまでの平坦な地形であるが、No. 10は標高約22 mの丘の端に位置した。



図－2 現地観測地形断面

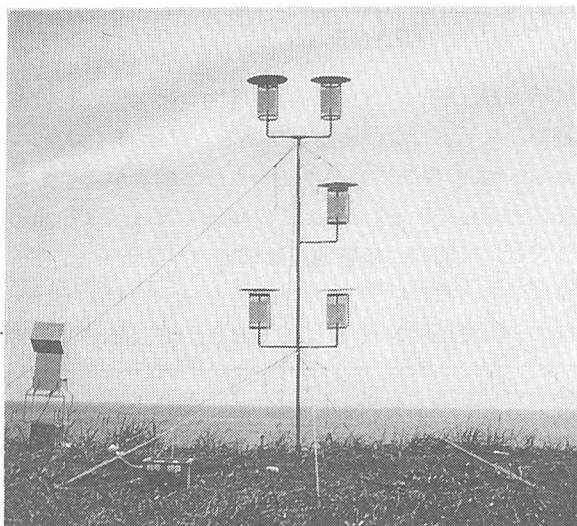
2.2 観測方法

観測地点のうちNo. 1、No. 7、No. 10の3地点については図－3に示した鉛直方向3層（地上高さ2 m、3.5 m、5 m）で、他の7地点においては1層（地上高さ2 m）で観測を行った。

塩分量の観測は直径30 cmの円筒ステンレス籠に30 cm幅2重のガーゼを巻き付け、約4時間暴露するガーゼ捕集法によった。暴露後の回収したガーゼはイオン交換水で溶出し、イオンクロマトグラフ法により塩化物イオン（Cl⁻）の定量を行い、これを塩化ナトリウムに換算し塩分量とし、塩分量の単位は $\text{mg}/100 \text{ cm}^2 \cdot \text{day} = \text{mdd}$ とした。

また、汀線から50m、360m、1400m、3000m、及び3500mでの5地点では塩分量以外に地上高さ1.2 mで風向、風速、温度、湿度も同時に観測した。

現地観測期間はH 6年7月28日からH 6年12月6日であり、その間に12回の観測を行った。調査日は原則として雨が降らず風向は南系の場合とし、調査時間帯は海風が卓越する日中とした。但し、最終回の12回目はバックグランド濃度の把握を目的とし北風で行った。



図－3 現地観測状況

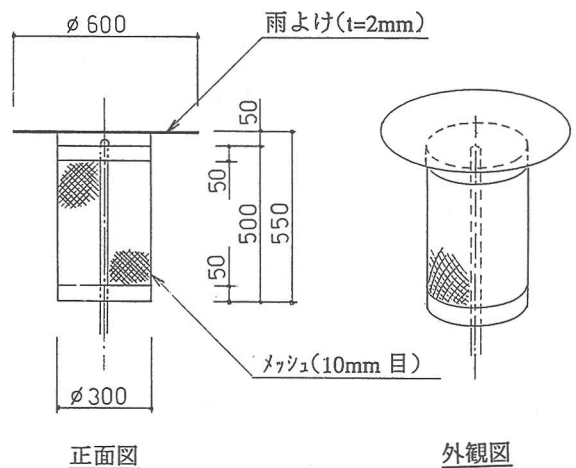
2.3 観測機器

塩分量の観測には図－4に示した直径30 cmの円筒のステンレス籠に10mm目の金網を巻いた観測機器を用いた。

観測機器は、2 m高さでは2個、3.5 m高さでは1個、5 m高さでは2個用い、同一高さで2個用いた場合には観測値をその平均値とした。

円筒形の籠の使用は、風向きによる塩分量付着バラツキを排除することを目的としたものである。

また、上部には直径60 cmの円盤をもうけ、雨よけとしたが、測定中の天候は晴れまたは曇りで、降雨の影響を受けることはなく、その効果を発揮できなかった。



図－4 観測機器

2.4 観測結果

表－1及び、図－5に12回の塩分量(mdd)(地上高さ2 m)の観測結果（水平方向）を示した。

これによると、50m地点での塩分量は、29.8mddから0.64mddと観測時期によって大きな変化を示した。

しかし汀線から離れるにつれて観測時期での変化は小さくなり、360m地点以降では2.17mddから0.06mddの範囲内となっている。

塩分量の汀線からの距離減衰の様子についてみると、塩分量は汀線から約200 m以内で急速に減衰している様子が確認された。また観測地点付近に大きな障害物がないため、一般に言われている指数関数的距離減衰に沿った結果が観測された。

表－2には汀線から50m、1400m、3500m地点での鉛直方向（地上高さ2 m、3.5 m、5 m）の塩分量の観測結果を示した。また、図－6に地上高さ2 mの塩分量と3.5 m、5 mでの塩分量との比を示した。

これによると、汀線近くの50m地点では地上高さ2 mでの塩分量に対して上空に行くに従って塩分量は低くなる傾向が見られた。逆に汀線から遠い1400m地点及び3500m地点では上空に行くに従って、塩分量が高くなる傾向が見られた。

表-1 現地観測結果(水平方向)

回数	年月日	捕集 高	塩 分 濃 度 (m d d)										気温 ℃	湿度 %	風向	風速 (m/s)	天気
			50m	100m	160m	250m	360m	920m	1400m	2000m	3000m	3500m					
1	H6.7.28	2 m	2.68	1.51	0.71	0.51	0.28	0.09	0.28	0.23	0.06	0.18	22.3	93	SW	5.5	曇り
2	H6.7.29	2 m	10.81	6.49	4.33	3.50	2.17	0.63	0.66	0.49	0.21	0.11	24.1	82	SW	5.3	晴れ
3	H6.8.10	2 m	0.86	0.40	0.25	0.31	0.30	0.50	1.08	0.40	0.38	0.40	29.3	80	SSW	2.8	晴れ
4	H6.8.11	2 m	5.25	2.92	2.26	1.92	1.24	0.50	0.61	0.64	0.38	0.43	25.7	88	S	6.5	曇り
5	H6.8.26	2 m	5.58	3.09	2.42	2.62	1.92	1.43	1.59	1.31	1.09	0.84	22.7	89	SE	8.3	曇り
6	H6.8.27	2 m	1.14	0.89	0.71	0.66	0.31	0.25	0.26	0.23	0.20	0.40	23.6	96	SSE	5.3	曇り
7	H6.9.8	2 m	8.41	2.42	1.76	1.38	0.93	0.68	0.68	0.68	0.41	0.36	24.6	84	SSE	5.9	曇り
8	H6.9.9	2 m	29.85	9.57	3.59	3.59	1.49	0.76	0.68	0.78	0.10	0.38	25.1	61	WSW	6.0	晴れ
9	H6.9.28	2 m	6.75	2.92	2.42	1.14	0.66	0.50	0.36	0.38	0.26	0.23	20.5	90	S	4.4	曇り
10	H6.9.29	2 m	1.34	0.51	0.33	0.36	0.25	0.23	0.18	0.25	0.26	0.18	20.2	91	SSE	1.6	曇り
11	H6.11.8	2 m	15.56	6.41	2.42	2.42	1.23	0.58	0.55	0.56	0.09	0.43	12.1	62	WSW	5.0	晴れ
12	H6.12.6	2 m	0.64	0.46	0.35	0.36	0.20	0.30	0.28	0.35	0.20	0.31	4.7	66	N	4.2	曇り
平均値		2 m	7.41	3.13	1.80	1.56	0.92	0.54	0.60	0.53	0.30	0.35	21.2	82	-	5.1	-

注) mdd : mg / 100 cm² · day , 風速は50 m地点

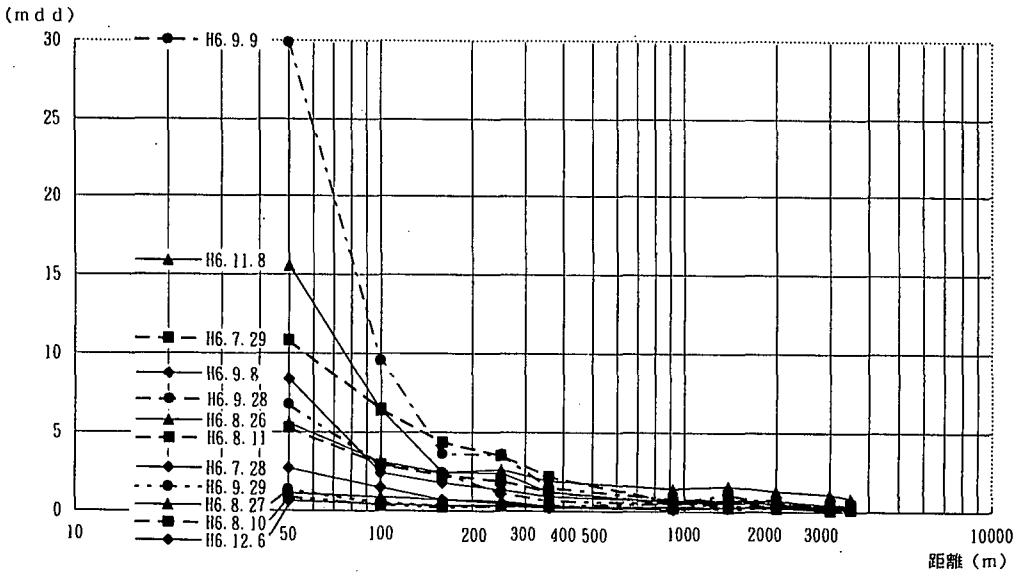


図-5 塩分量の距離減衰

表-2 現地観測結果(鉛直方向)

	捕集 高	塩分濃度(mdd)		
		50m地点	1400m地点	3500m地点
12回の観測 値の平均値	5 m	4.60	0.91	0.72
	3 m	5.99	0.85	0.52
	2 m	7.41	0.60	0.35
2 mの値 との比	5 m	0.62	1.52	2.06
	3 m	0.81	1.42	1.54
	2 m	1.00	1.00	1.00

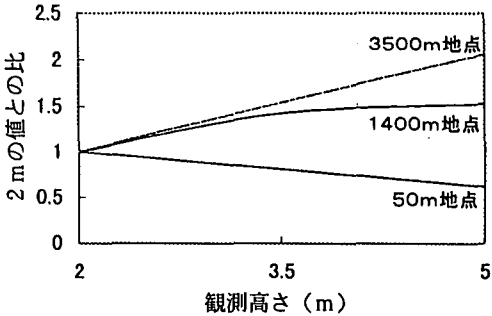


図-6 塩分量の鉛直濃度比

3. 数値計算による検討

海から飛来する塩分量の影響範囲の定量的把握のため、観測データを基に、大気拡散式により塩分量の水平方向、及び鉛直方向分布について検討を行った。

3.1 計算モデル

計算モデルとしての大気拡散式は、汀線から陸域に向かってX軸、鉛直上向きにZ軸 (Z=0のとき地上)

、汀線と平行な方向をY軸として、X軸方向のみに風速uがあり、Y軸方向での濃度は一様 ($\partial C / \partial y = 0$)、Z軸方向のみに拡散があり定常状態 ($\partial C / \partial t = 0$) と仮定すると、以下で与えられる。

$$0 = K \partial^2 C / \partial Z^2 - u \partial C / \partial x$$

ここで、基準点（汀線より 50m地点）での塩分濃度（ mg/m^3 ）を $C_o(50\text{m}, h)$ とし、Z 方向の拡散は標準偏差 σ のガウス分布に従い、地表面で吸収される（反射がない）と仮定すると、点（X, Z）での大気中の塩分濃度 C は以下となる。

$$C = \int_0^\infty C_o(50\text{m}, h) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(Z-h)^2}{2\sigma^2}\right) dh \quad \dots (1)$$

また、塩分量 Q(mdd) は大気中の塩分濃度 C と風速 u の積に比例することから、付着係数を k とし、以下とする。

$$Q = C \cdot u \cdot k \quad \dots (2)$$

3.2 パラメータ

(1) 風速：u

現地での風速測定結果から、風速は汀線から離れるに従い急速に減衰している。また一般に風速は上空に行くに従い大きくなるため、風速を X, Z の関数 $u(x, z)$ として与える。

①汀線から X m、地上高 1.2 m での風速 $u(x, 1.2\text{m})$

風速 $u(x, 1.2\text{m})$ は、汀線より 50m、地上高さ 1.2 m での風速 $u(50\text{m}, 1.2\text{m})$ を基準とし、図-7 に示した実測風速との回帰により以下とした。

$$u(x, 1.2\text{m}) = u(50\text{m}, 1.2\text{m}) \cdot (4.5521 X^{-0.4104}) \quad \dots (3)$$

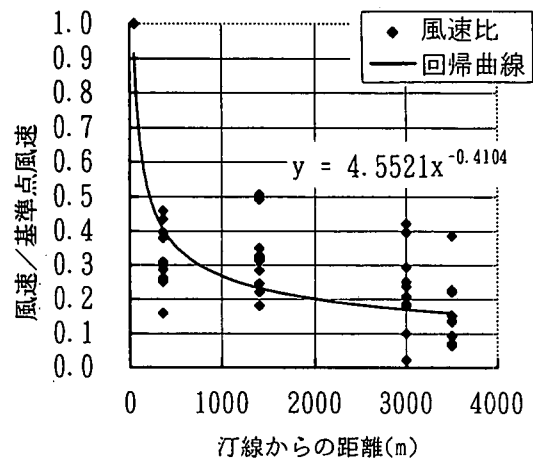


図-7 風速の距離減衰回帰曲線

②汀線から X m、地上高さ Z m での風速 $u(x, z)$

一般的に地上高さ Z_o での風速 u_o 、及び地上高さ Z での風速 u_z は以下の関係で表される。

$$u_z / u_o = (Z / Z_o)^p \quad \dots (4)$$

このため、汀線より 50m、地上高さ 20m での風速 $u(50\text{m}, 20\text{m})$ は、一般的な大気安定度 D に該当する $p = 0.25$ を用い、また地上高さ 20m では汀線からの距離によらず風速は一定と仮定し以下で表わす。

$$u(X, 20\text{m}) = u(50\text{m}, 20\text{m}) \\ = u(50\text{m}, 1.2\text{m}) \cdot (20/1.2)^{0.25}$$

よって、風速 $u(x, z)$ は以下で表される

$$u(x, z) = u(x, 1.2\text{m}) (z/1.2\text{m})^{P'} \quad \dots (5)$$

ここで、 P' は以下で与えられる。

$$P' = \log(u(x, 20\text{m}) / u(x, 1.2\text{m})) / \log(20/1.2)$$

なお、上式 (5) で求めたモデル式による風速と、実測風速との相関は図-8 に示したように 0.94 であった。

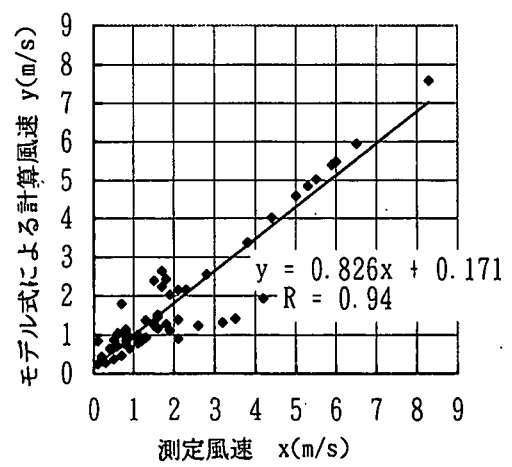


図-8 モデル式による風速と実測値との相関

(2) 基準点(50m地点)での塩分濃度関数：

$$C_o(50\text{m}, h)$$

基準点(50m地点)の地上高さ h での塩分濃度関数 $C_o(50\text{m}, h)$ は (2) 式により以下で与えられる。

$$C_o(50\text{m}, h) = Q_o(50\text{m}, h) / u(50\text{m}, h) / k \quad \dots (6)$$

ここで、海岸付近での鉛直方向の塩分量 $Q_o(50\text{m}, h)$ は指数分布と考えられるため、基準点（50m地点）での地上高さ 2 m の塩分量 $Q_o(50\text{m}, 2\text{m})$ を基準とし、以下とする。

$$Q_o(50\text{m}, h) = A \exp(-B \cdot h) \cdot Q_o(50\text{m}, 2\text{m}) \quad \dots (7)$$

実測値の最小 2 乗法で求めた A, B は以下となり、この A, B を用いた基準点での塩分量 $Q_o(50\text{m}, h)$ と実測値との相関係数は図-9 に示したように 0.98 であった。

$$A = 1.48 \quad B = 0.215$$

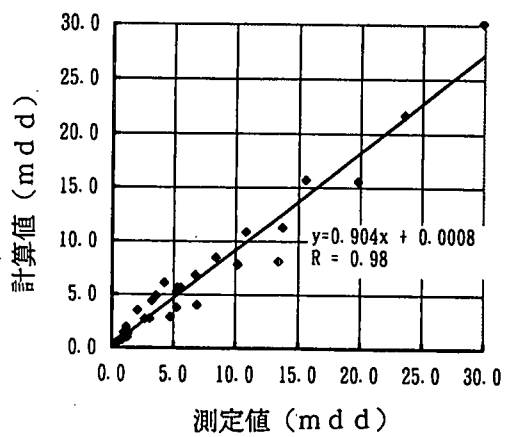


図-9 基準点(50m)での測定値と計算値の相関

(3) 大気拡散係数： σ

風下L距離における大気拡散係数 σ は、拡散実験で求められているPasquill-Gifford図により、大気安定度毎に設定した γ 及び α によって以下とした。

$$\sigma = \gamma L^\alpha$$

(4) 大気安定度

上記の大気拡散係数を求める際の大気安定度は、日射量、雲量、風速から設定した。

風速は現地データを用い、日射、雲量については観測地近くの苫小牧気象台のデータによった。なお観測期間中の大気安定度はDが卓越していた。

(5) 風速の風向による補正： u'

X軸と θ の角度をなす風向の場合には風速 u について以下の補正を行った。

$$u' = u \cdot \cos \theta$$

(6) バックグランド塩分量： Q_B

観測地点でのバックグランド塩分量は、海岸と反対方向の風向（北）であった平成6年12月6日の920m～3500m地点での観測結果の平均値を用い以下とした。

$$Q_B = 0.29 \text{ mdd}$$

3.3 計算式

上記のパラメータ設定と(1)式から、塩分量 $Q(X, Z)$ を求める計算式は以下とした。

$$Q(x, Z) = u(x, Z) \int_0^\infty \frac{Q(h)}{u(50, h) \cos \theta} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \exp\left[-\frac{(Z-h)^2}{2\sigma^2}\right] dh + Q_B$$

3.4 計算検討結果

上式を用いた計算値と測定値との相関を図-10、飛来塩分量の距離減衰を図-11、及び飛来塩分量の鉛直分布を図-12に示した。

これによると、上式を用いた計算値と実測値との相関係数は、図-10に示したように0.96であり、実測の再現が可能であるといえる。

また、図-11に示した飛来塩分量の距離減衰は、実測値と計算値がほぼ一致して汀線から離れるに従って指数関数的に減衰している。

図-12の飛来塩分量の鉛直分布からは、汀線付近での塩分量は地表近くで多く、上空に行くに従って塩分量が減少していることがわかる。一方汀線から約300m以上離れると、塩分量は減少するが、上空に行くに従って塩分量の割合が高くなる傾向が把握できる。

4. 植生への飛来塩分の影響

苫小牧港東港区は、太平洋に面する開放性砂丘海岸

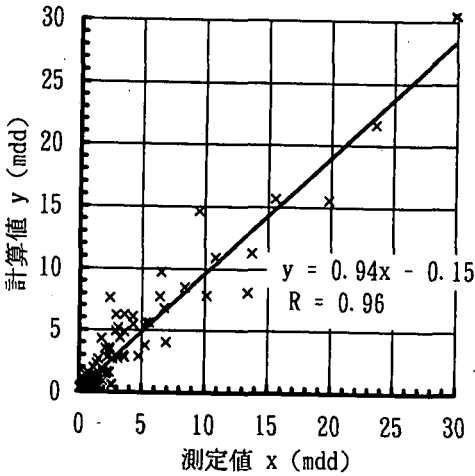


図-10 飛来塩分量の測定値と計算値との相関

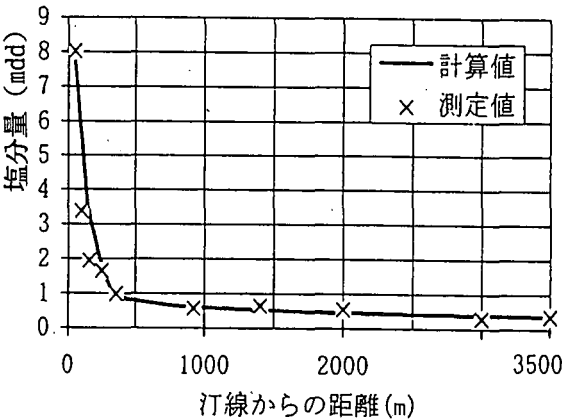


図-11 飛来塩分量の距離減衰

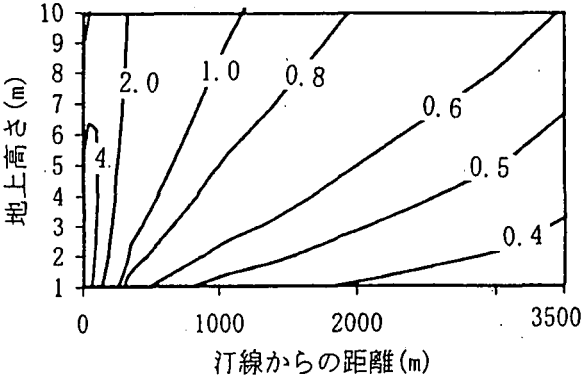


図-12 飛来塩分量の鉛直分布(mdd)

に建設した大規模掘込港湾であり、今後とも掘込水路促進が計画されている。

現在水路背後地には、中央水路から約2 km、東水路から約0.9 kmの各地域にミズナラ・コナラ林及びハンノキ林などの樹林帯が位置している。このため、掘込水路建設による飛来塩分量の変化に伴う植生への影響の検討を必要とした。

本現地観測結果において、汀線から500m以降での塩分量は2 mdd以下であり、このため東水路から約0.9 km

の周辺樹林帯への影響は小さく、また鉛直方向の塩分量も汀線から離れるに従って上空で高い傾向が見られたが濃度的には問題ないことが計算検討結果から把握できた。

また、現地観測地においても、汀線から 360m以降には高さ 4～5 mの灌木が密生しているのが確認された。

なお、港湾計画による飛来塩分の影響範囲の検討には波高の低減による飛来塩分低減についても考慮する必要がある、今後の課題である。

5. まとめ

本研究による、汀線から3500mまでの現地観測結果と、その観測結果に基づいた数値計算検討により得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 海からの飛来塩分量は、汀線から離れるに従って指数関数的に急速に低下する。

(2) 飛来塩分量の鉛直分布は、汀線付近では上空に行くに従い低下し、逆に汀線から約 500 m以降では塩分量は低いものの上空に行くに従い塩分量を増す傾向が見られた。

(3) 大気拡散方程式を用い現地観測結果の再現を試みたところ、現地観測結果と数値計算結果との相関係数は0.96と良く、汀線付近の塩分量の値を用いて飛来塩分量の鉛直分布の把握が可能となった。

なお、計算値と実測値の相関は、観測現地に大きな障害物がなく、また降雨の影響がなかったこと、風向、風速等の気象条件の変動が少ない短時間での観測データを用いたこと等により良好であった。

(4) 数値計算により、鉛直方向の塩分量分布を定量的に再現でき、これにより現地観測で汀線付近と汀線から離れた場合で、鉛直塩分量比が逆転する現象が解明された。

(5) 植生に対する影響範囲を飛来塩分量が 2 mddの範囲と仮定しても、計算結果から、その影響範囲は地上高さ 2 mでは約 200m、地上高さ10mにおいても約 350mであるため、堀込港湾計画地から約 900mに位置する樹林帯への飛来塩分量の影響は微小であるといえる。

参 考 文 献

- 西川和廣・田中良樹(1993)：飛来塩分量全国調査(Ⅳ)
—飛来塩分量の分布特性と風の関係—、建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室 土木研究資料 第3175号, pp.8-9
- 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、建設省土木研究所河川部海岸研究室 土木研究資料 第3036号, pp.14-31
- 薄井五郎(1990)：海岸林の枝の枯死と飛来塩分、光珠内季報 No.81, pp.12-16