Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 1, 1996

# 論文　海岸から飛来する塩分量の数値解析

山田義智*1・大城武*2・桝田佳寛*3・伊部博*4

**要旨**：本研究は，各種海岸おける飛来塩分発生量を現地での長期にわたる観測結果より定量的に示した。また，海岸における飛来塩分の鉛直分布につても測定を行い，その特性を得た。さらに，本研究では樹木・建物による地表粗度状況や塩分の遮蔽吸収効果も考慮できる飛来塩分の移流拡散方程式を導き，これをF.E.M.にて数値解析を行った。その解析結果と実測値との比較検討を行い本解析手法の有効性を確認した。

**キーワード**：飛来塩分移流拡散方程式，飛来塩分発生量，飛来塩分鉛直分布，F.E.M.

## 1．はじめに

海岸付近に建設される構造物は，海より飛来する塩分によりコンクリート内部の鉄筋や鉄骨部材等の腐食が促進され，耐久性が著しく低下する。この構造物の耐久性低下の促進要因となる飛来塩分量に関する研究が，文献［1-3］において行われている。しかし，各種海岸における飛来塩分の発生量とその鉛直分布の実験的資料を蓄積する必要があるほか，陸上の地表粗度状況や，建物・樹木による塩分遮蔽性を考慮し，内陸部における飛来塩分分布について考察する必要がある。

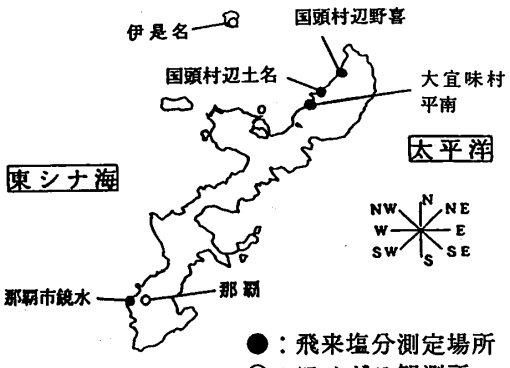
そこで本研究では，まず，各種海岸における飛来塩分の発生量とその鉛直分布の実測結果について考察する。次に，飛来塩分の移流拡散方程式を導き，F.E.M.による数値解析手法を示す。そして，内陸部の飛来塩分分布について，実測値と本解析結果との比較検討も含め考察する。

## 2．飛来塩分測定概略及び海風平均風速の定義

今回データを整理した飛来塩分の測定位置は，図1に示すような沖縄県（本島）内の4地点であり，その海岸地形と陸側地形の特長を表1に示す。飛来塩分量の補集方法は，辺野喜，辺土名，鏡水の各地点では土研式塩分補集器を用い，平南海岸では飛来塩分の鉛直方向分布を測定するのにガーゼ法を用いた。

飛来塩分量に最も影響を及ぼすと考えられる気象要因の風向・風速のデータは図1中に示すアメダス観測所で計測された毎時間観測値を用いる。ここで，地理的条件より伊是名のアメダス観測所は辺野喜，辺土名，平南の風状態を表し，那覇のアメダス観測所は鏡水の風状態を表すものとして採用した。

飛来塩分を内陸部へ運ぶ風は，海から陸に向かって吹く風（以後，海風と記す）である。この海風風速は，




伊是名：$Z_G$=350m，粗度区分II
　　風速計高さ20.5m
那覇　：$Z_G$=450m，粗度区分III
　　風速計高さ47.8m
各海岸：$Z_G$=250m，粗度区分I

図1．飛来塩分測定場所及びアメダス観測所位置

*1 琉球大学助手　工学部環境建設工学科，工修（正会員）
*2 琉球大学教授　工学部環境建設工学科，Ph.D.（正会員）
*3 宇都宮大学教授　工学部建設工学科，工博（正会員）
*4 （株）小野田　リフレッシュ事業部（正会員）



NII-Electronic Library Service

各アメダス観測所と海岸とでは地表粗度の違いにより異なるものと考えられる。そこで本研究では，飛来塩分の補集期間中に吹く海風平均風速を$U_{av}$とし，以下のように求めた。なお，風向はアメダス観測所と海岸とで一致するものとした。

1) アメダス観測所での観測高さ，地表粗度を考慮し，風のプロファイルにべき指数則を仮定し上空風高度$Z_G$位置の風速を求める。この風速を海岸の上空風高度$Z_G$位置の風速とし，海岸粗度を考慮したべき指数則より50m高さ位置での各方位風速を求める[4]。ここで，50m高さとしたのは，解析において高さの範囲を地上50mまでとした為である。
2) 飛来塩分補集面法線から±90度範囲で海に面している方位を選択。
3) 2) で選択した各方位方向の海岸50m高さでの風速を補集面と垂直方向の風速に換算し直し，その風速を海風の風速$U_{50}$とする。
4) 飛来塩分を補集した期間中，海風の吹いた時間数で$U_{50}$を平均し，海風平均風速$U_{av}$とする。

## 3．各海岸での飛来塩分の発生及び鉛直分布

### 3.1 飛来塩分の発生量

本研究では，辺野喜，辺土名，鏡水の各海岸で，満潮時の波打ち際より陸側に約20m離れ，海面上より高さ約4.5m位置にセットした土研式塩分補集器に補集された飛来塩分量を海岸基準点での飛来塩分量$q_{ab}$とし，各海岸の飛来塩分発生の基準とした。

海岸での飛来塩分発生量は，波等の海象要因，風等の気象要因，海岸地形による波打ち際砕波状況に影響を受けるものと考えられる。文献[5]では，飛塩の発生が，風速と海水の表面張力に支配されるウェーバー則に従うと仮定し，飛塩の発生量は風速の二乗に比例し，その比例定数は海象要因，海岸地形で決まるとしている。ところで，巨視的観点から，海岸地形と海象要因には何らかの相関があると考えると，海岸地形のみで上述の比例定数は表せる。そこで，本研究では，文献[5]の仮定をさらに拡張し，飛来塩分の発生量は海風平均風速の二乗に比例し，その比例定数は海岸地形のみで決まると仮定した。図2に海風平均風速$U_{av}$で各海岸毎の飛来塩分量を整理する。図より台風

表1.飛来塩分測定地の特長

| 測定地域 | 海岸及び周辺の地形特長 | 係数$\alpha$ |
|---|---|---|
| 国頭村辺野喜 | 砂・小石の堆積した海岸で小さな入江。内陸部は北-西間を除く方向を小山に囲まれた地形。 | 0.735 |
| 国頭村辺土名 | 消波ブロック海岸。 | 1.437 |
| 那覇市鏡水 | 砂浜と消波ブロック。沖防波堤。リーフ発達。海岸より500m区間は障害物はほとんど無し。 | 0.326 |
| 大宜味村平南 | 砂浜海岸 | |

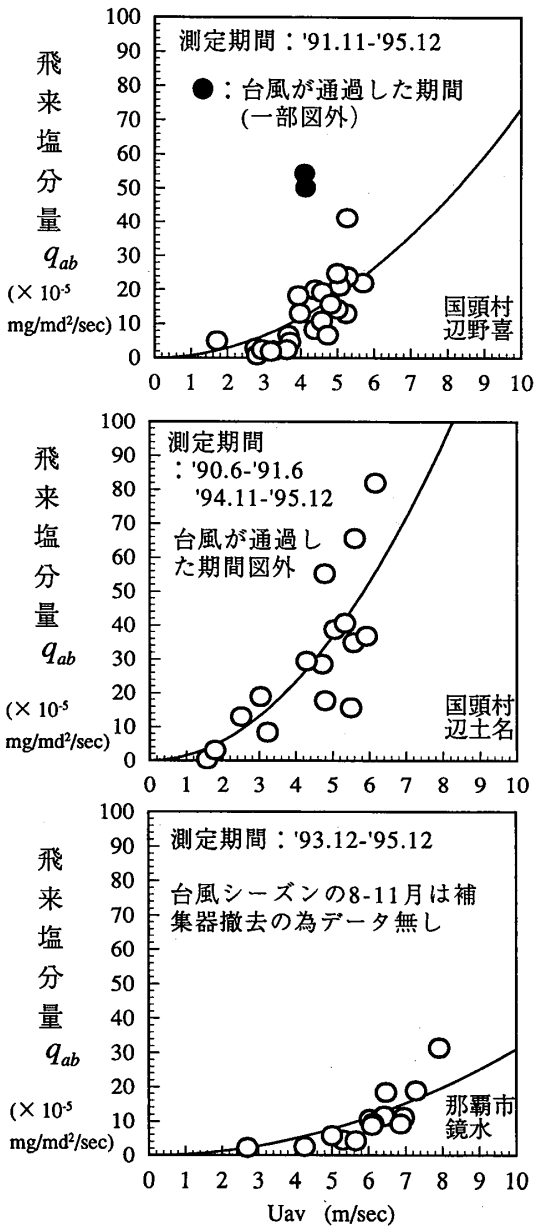



図2. 海岸基準点飛来塩分量と海風平均風速$U_{av}$関係



NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

通過期間を除き，各海岸基準点の飛来塩分量は，次式の海風平均風速の二乗則で表せることが分かる。

$$q_{ab} = \alpha \cdot U_{av}^2 \tag{1}$$

ここで，式 (1) の係数 $\alpha$ を海岸係数と称し，この値が大きいほど飛来塩分が発生しやすい海岸である。$\alpha$ の値を表1にまとめて示すが，消波ブロックの設置された海岸地形で $\alpha$ の値が最も大きく，リーフが発達し且つ沖防波堤の設置された海岸地形で $\alpha$ の値が最も小さくなっている。これは，経験的に感じる飛来塩分の発生しやすさと対応する。

3.2　飛来塩分の鉛直分布

大宜味村平南の砂浜海岸での各海風平均風速時の飛来塩分鉛直分布を図3に示す。横軸は，各高さ位置での飛来塩分量を海上4.5m位置での飛来塩分量で無次元化したもので，縦軸は海上からの高さである。海上4.5m位置で飛来塩分量を無次元化したのは，辺野喜，辺土名，鏡水の各海岸で土研式塩分補集器の設置位置と対応させる為である。ガーゼ板の設置は波打ち際より20m内陸部で，海面上10.5m (地上9.0m) まで1.5m間隔でセットした。

風速が大きくなると上へいくほど飛来塩分割合が減少している。これは，強風時に海上比較的低い場所では，砕波による大粒飛沫が直接補集される為と考えられる。

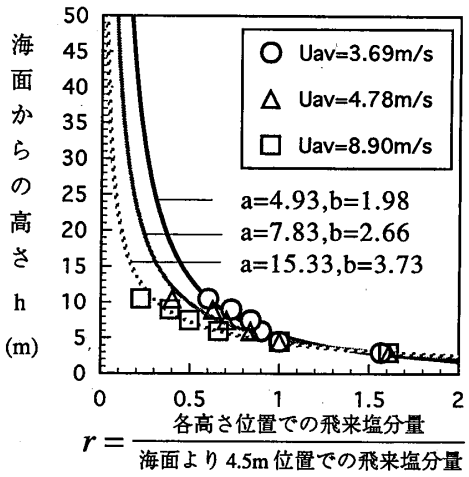



図3.飛来塩分の鉛直分布

測定は，干潮時から満潮時 (逆の場合も有) の6時間で行った。また，当然の事ながら風速が大きいほど各位置での飛来塩分量は高い値となった。

海岸上空部では，沖合で発生した細い海塩粒子が拡散で一様分布し，海岸粗度が小さいため風速勾配も緩やかであり，上空部では塩分分布勾配が緩くなるものと考えられる。これを考慮し，本研究では，塩分分布を上空ほど塩分量の減衰割合が小さい次式にて近似した。図中に各係数値を示す。

$$r = a \cdot \exp(-b \cdot \ln(h+1)) \tag{2}$$

## 4．飛来塩分の移流拡散方程式及び解析

本研究では，塩害の対象範囲を地上より50m高さ，海岸より内陸へ500m程度と設定している。この対象区間を3次元あるいは2次元問題としてモデル化して風速場を計算し，風で移流拡散される飛来塩分量を求めるのは，モデル作成作業の煩雑さ及び計算費用の問題上現実的でないと考える。そこで，本研究では風速場を地表の粗度区分を考慮した対数則で与え，定常問題として樹木や建物の飛来塩分遮蔽吸収効果も考慮可能な飛来塩分の移流拡散方程式を導いた。これを以下に示す。

4.1　飛来塩分の移流拡散方程式

海塩粒子の沈降速度wを考慮し，分子拡散を無視すると，定常状態の微小任意断面内の飛来塩分収支式は次式で表される。ここで，uは水平風速，vは鉛直風速，Qは塩分吸収量である。

$$u\frac{\partial c}{\partial x} + v\frac{\partial c}{\partial y} = w\frac{\partial c}{\partial y} - Q \tag{3}$$

流れが乱流状態であれば，各方向風速及び濃度cは統計的平均値と乱れによる変動分の和として表され，式 (3) に連続の式を用いて展開した後，アンサンブル平均をとると次式となる。



NII-Electronic Library Service

$$\bar{u}\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial \bar{c}}{\partial y}+\frac{\partial\left(\overline{u'c'}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\overline{v'c'}\right)}{\partial y}=w\frac{\partial \bar{c}}{\partial y}-Q \tag{4}$$

ここで,乱流運動による輸送フラックスに分子運動による拡散とのアナロジーを考慮し,さらに,統計的平均鉛直風速$\bar{v}$=0とし，水平方向乱流拡散項を無視すると式 (4) は式 (5) で表せる。これが，飛来塩分の移流拡散方程式となる。式 (5) は鳥羽ら［6］が導いた飛来塩分の移流拡散方程式に塩分遮蔽吸収項を加えたものとなっている。ここで，$K_y$は鉛直方向乱流拡散係数である。

$$\bar{u}\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}=w\frac{\partial \bar{c}}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial \bar{c}}{\partial y}\right)-Q \tag{5}$$

なお，鉛直方向乱流拡散係数$K_y$は，次式で仮定した。ここで，kはカルマン定数 (=0.4) であり，$u_*$は摩擦速度である。

$$K_y=\kappa u_* y \tag{6}$$

4.2　数値解析法

本研究では，式 (5) を解く際の境界条件として，地上50m位置に相当する節点では，塩分流束の値を0とし，地面に相当する節点では，海塩粒子沈降速度に塩分濃度を乗じて得られる流束を用いた。また，式 (1) ,式 (2) と風速場より得られる海岸基準位置での塩分濃度鉛直分布も条件とした。

本研究では，飛来塩分の移流拡散方程式を有限要素法を用いて解く。鉛直方向yに関しては上流型有限要素を用い離散化し，水平方向xに関しては差分法にて離散化を行った。差分解法はCrank-Nicolson法によった。これを次式に示す。空間の分割は鉛直，水平方向ともに0.5m刻みとした。

$$\left(\frac{1}{2}[K]+\frac{1}{\Delta x}[C]\right)\{\phi(x+\Delta x)\}=\left(-\frac{1}{2}[K]+\frac{1}{\Delta x}[C]\right)\{\phi(x)\}+\{F\} \tag{7}$$

ここで，[K] は海塩粒子沈降移流項，乱流拡散項，樹木・建物による塩分遮蔽吸収項を加え合わせた行列であり，[C] は非定常拡散方程式を有限要素法で解く際の時間項に相当するものである。また，{F} は既知の流束項である。

4.3　沈降速度の同定

沈降速度wは本来ならば，海塩 (飛沫) 粒子の大きさに応じて決まる値である。しかし，粒子径毎の空間分布を求め，その粒径毎の粒子の移流拡散を各々解き，加え合わせるのは困難である。よって，本研究では海岸で鉛直分布する海塩粒子径を同一粒径，即ち同一沈降速度と仮定した。そして，その粒子が内陸に移流拡散されるに伴って水分蒸発や分裂を繰り返し，沈降速度が減衰するものとし，沈降速度を式（8）で与えた［7］。ここで$w_0$は海岸基準位置での初期沈降速度で，$\beta$は沈降減衰係数である。

$$W=w_0\exp(-\beta x) \tag{8}$$

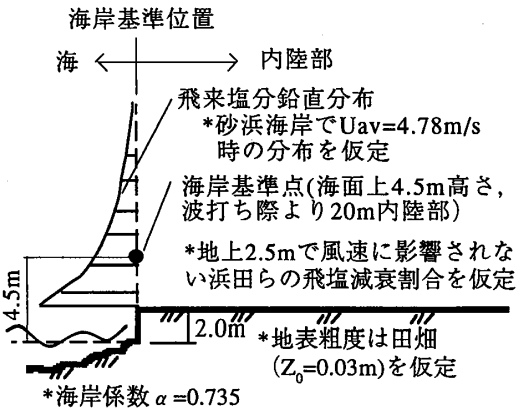



図4.理想海陸断面図



NII-Electronic Library Service

本研究では沈降速度wを同定するにあたり，内陸部での飛来塩分減衰割合いを海岸地形，地表粗度，風速，測定点高さ等を変数とした十分な実測値を得ていない。そこで，沈降速度wを以下の様な条件で決めた。

砂浜海岸で飛塩発生が中程度で地表粗度も中程度の図4に示す様な理想海陸断面を考え，地上2.5m位置での内陸方向の飛来塩分減衰割合が風速に影響されない浜田等［2］の得た分布（図7.参照）になるものとし，式（8）の$w_0$，$\beta$値を未知数としてF.E.M.を解き，修正シンプレックス法［8］にて$w_0$，$\beta$の最適値を求めた。これらを海岸基準点での飛来塩分量で整理し図5に各々示す。式（9），(10）に初期沈降速度及び沈降減衰係数の近似式を示す。これらの式を式（8）に代入し内陸部での飛来塩分の沈降速度が得られる。

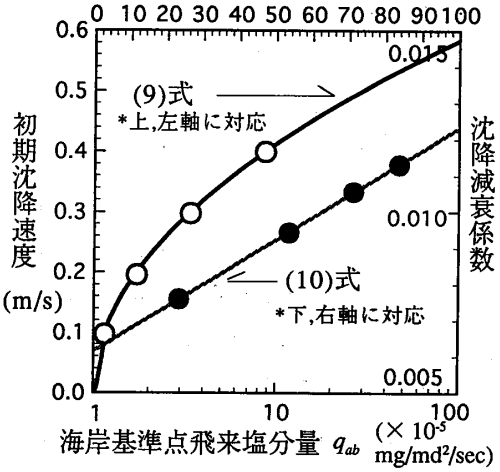



図5.沈降速度及び沈降減衰係数

$$W_0 = 0.05835\sqrt{q_{ab}} \tag{9}$$

$$\beta = 0.001343\ln(q_{ab}) + 0.00614 \tag{10}$$

4.4　解析結果の考察

図6.に海岸係数$\alpha$ =0.735, $U_{av}$=4.0m/s時の飛来塩分移流拡散解析結果を距離毎に示す。図6-a.は地表粗度区分で裸地の場合，図6-b.は田畑，図6-c.は住宅密集地，図6-d,e.は住宅密集地で且つ建物による塩分の遮蔽効果を考慮したものである。ここで，塩分が遮蔽される高さは地上5.0mまでとし，塩分の吸収係数は各々0.05,0.5と仮定した。本来，塩分吸収係数は対象領域内での建物・樹木の存在密度で決まる。しかし，今回はこれに関する知見を得ていないので上記の値をかりに用いた。

地表面の粗度が上がるに連れて下層部の飛来塩分量の減少が顕著となり，また，飛来塩分が上空

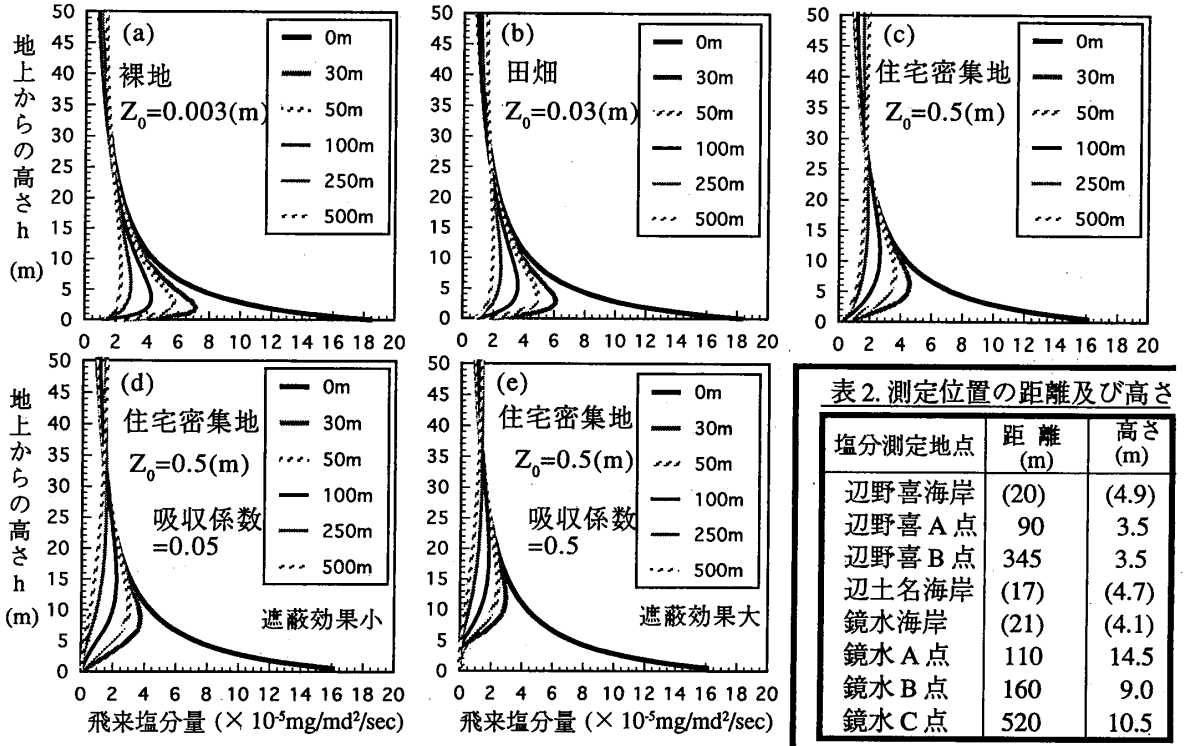



図6.飛来塩分移流拡散解析結果

表2.測定位置の距離及び高さ

| 塩分測定地点 | 距離 (m) | 高さ (m) |
|---|---|---|
| 辺野喜海岸 | (20) | (4.9) |
| 辺野喜A点 | 90 | 3.5 |
| 辺野喜B点 | 345 | 3.5 |
| 辺土名海岸 | (17) | (4.7) |
| 鏡水海岸 | (21) | (4.1) |
| 鏡水A点 | 110 | 14.5 |
| 鏡水B点 | 160 | 9.0 |
| 鏡水C点 | 520 | 10.5 |

*( )以外は海岸基準位置及び地面を起点



NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

に拡散している様子が図より分かる。この内陸部での飛来塩分の鉛直分布は，村上等［9］が測定した分布と類似している。また，建物による塩分遮蔽を考慮すると建物の存在領域で飛来塩分がカットされており，文献［3］で述べられている建物・樹木の塩分遮蔽効果を定性的に示しており，吸収係数が大きい程効果的であることが分かる。この係数値は，今後実測により同定する必要がある。

図7.に辺野喜及び鏡水地域の内陸部における5測定点での飛来塩分量を各々の海岸基準点の飛来塩分量で無次元化し，各距離毎に実測値と解析値を合わせて示す。解析は測定された海風平均風速$U_{av}$のほぼ中央値である$U_{av}$=4.0m/sを用い，風速及び砕波状況の違いによる鉛直塩分分布の変化を考慮せず，$U_{av}$=4.78m/s時の砂浜海岸での鉛直塩分分布を用いた。図7中に各地域の推定粗度を示す。

表2.に辺野喜，辺土名，鏡水の各測定点位置を示す。表中の括弧は各海岸基準点の満潮時の波打ち際からの距離，及び海面上からの高さである。

本解析結果は，辺野喜B地点より内陸側である鏡水C地点において飛来塩分量の減衰割合が少ない事や，鏡水A地点とB地点で，海岸からの距離は遠いが飛来塩分測定高さの低いB地点で飛来塩分量が多くなる事実など，本解析の仮定範囲内でも内陸部の飛来塩分布性状に関して実測値と良く対応する結果が得られた。

より詳細な飛来塩分の移流拡散性状を得るには，風速や砕波状況による飛来塩分鉛直分布への影響や，飛来塩分の内陸方向減衰性状への影響を検討し，沈降速度wをより適切に決定した上で解析を行う必要がある。

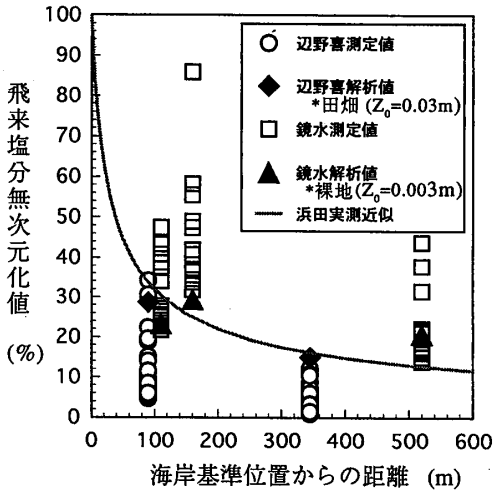



図7. 実測値と解析結果の比較

## 5．まとめ

本研究の結果を以下にまとめる。

1) 各海岸基準点での飛来塩分発生量は，海風平均風速$U_{av}$の二乗則にのる。
2) 風速が大きくなると海岸の飛来塩分鉛直分布は，上空ほど飛来塩分量が減衰する傾向が得られた。
3) 地表面粗度が増すと下層部で飛来塩分量の減衰が大きく，また，飛来塩分が上部へ乱流拡散する結果が得られた。建物・樹木による塩分遮蔽効果を本解析で表す事が出来る。
4) 実測結果より得た内陸部の飛来塩分分布と本解析の仮定範囲内で得られた結果とは，良く対応する。

**謝辞：**解析にあたり，琉球大学工学部助教授 堤純一郎先生から助言頂きました。記して感謝の意を表します。

**【参考文献】**

1) 川上英男：鉄筋コンクリートの環境塩害荷重の推定，第6回コンクリート工学年次講演会論文集， pp217-218,1984
2) 浜田純夫ほか：海岸付近の飛塩調査とコンクリートに浸透する塩分，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp85-88,1986
3) 樫野紀元：鉄筋コンクリート造構造物の耐久性（鉄筋の腐食とその対策），鹿島出版会，1988
4) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説，昭和61年
5) 宇多高明ほか：海岸からの飛来塩分量の計算モデル，海岸工学論文集，第39巻，pp1051-1055,1992
6) 鳥羽良明：海面における気泡の破裂による海水滴の生成についてIII，日本海洋学会誌，Vol.17.No4.pp.169-178,1961
7) 仲座栄三ほか：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，第40巻，pp1036-1040,1993
8) 山田義智ほか：飛来塩分量とコンクリート中への塩分浸透過程に関する一考察，第17回コンクリート工学年次講演会論文集，No1.pp973-978,1995
9) 村上和男ほか：植栽による飛沫（海塩粒子）の軽減に関する現地実験，海岸工学論文集，第42巻，pp1036-1040,1995



NII-Electronic Library Service