

橋梁各部材に付着する海塩粒子量の 定量評価法について

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

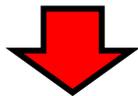
八木知己



研究背景・目的

⇒ 橋梁の**老朽化**が進行している。

⇒ 建設から50年経過する橋梁数が
2006年では6% ⇒ 2026年では**47%**



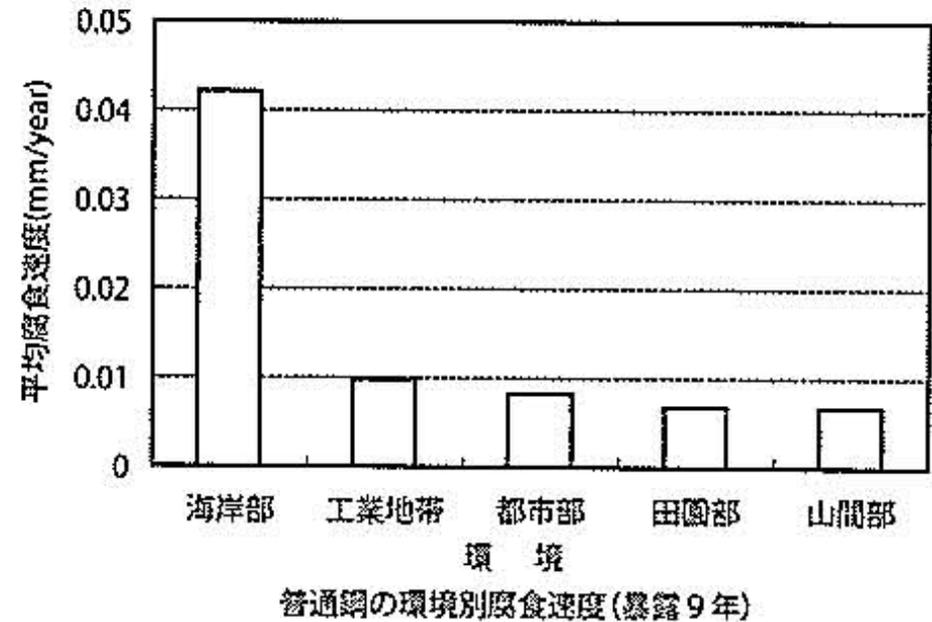
維持管理が最重要検討項目である。

⇒ 橋梁の機能低下の原因
・・・疲労・交通集中・振動などによる損傷
・・・腐食性物質(**飛来塩分**)による劣化

飛来塩分の構造物への**付着機構**を解明し、橋梁各部位への付着塩分量を定量的に推定することを目的とする。

腐食因子

- 水, 酸素
- 降雨, 結露
- 気温
- 日照
- 塩分
 - 海塩粒子, 凍結防止剤
- 排気ガス
- ばい煙
- 火山性ガス
- 塵あい(埃)



図一 I.2.5 環境毎の鋼材腐食量⁵⁾

(社)日本道路協会 鋼道路橋塗装・防食便覧, 平成17年12月

海塩粒子の発生から橋梁の腐食に至るまで

海塩粒子とは:

海から飛来する塩分は、海中の塩分が風波の影響で、空気中に海塩粒子と言われるエアロゾルとして飛び出し、移流や乱流拡散によって構造物のある地上へ輸送されたものです。海塩粒子は、海上の波頭から分離した水滴から生成されるように思われがちですが、そのような水滴は大きく海面に落下してしまいます。実際には、風波によって海水中に取り込まれた気泡が海面で破裂し、その際に放出される小さな水滴が、空中で水分が蒸発してエアロゾル化したものと言われています。

海塩粒子の発生から橋梁の腐食に至るまで

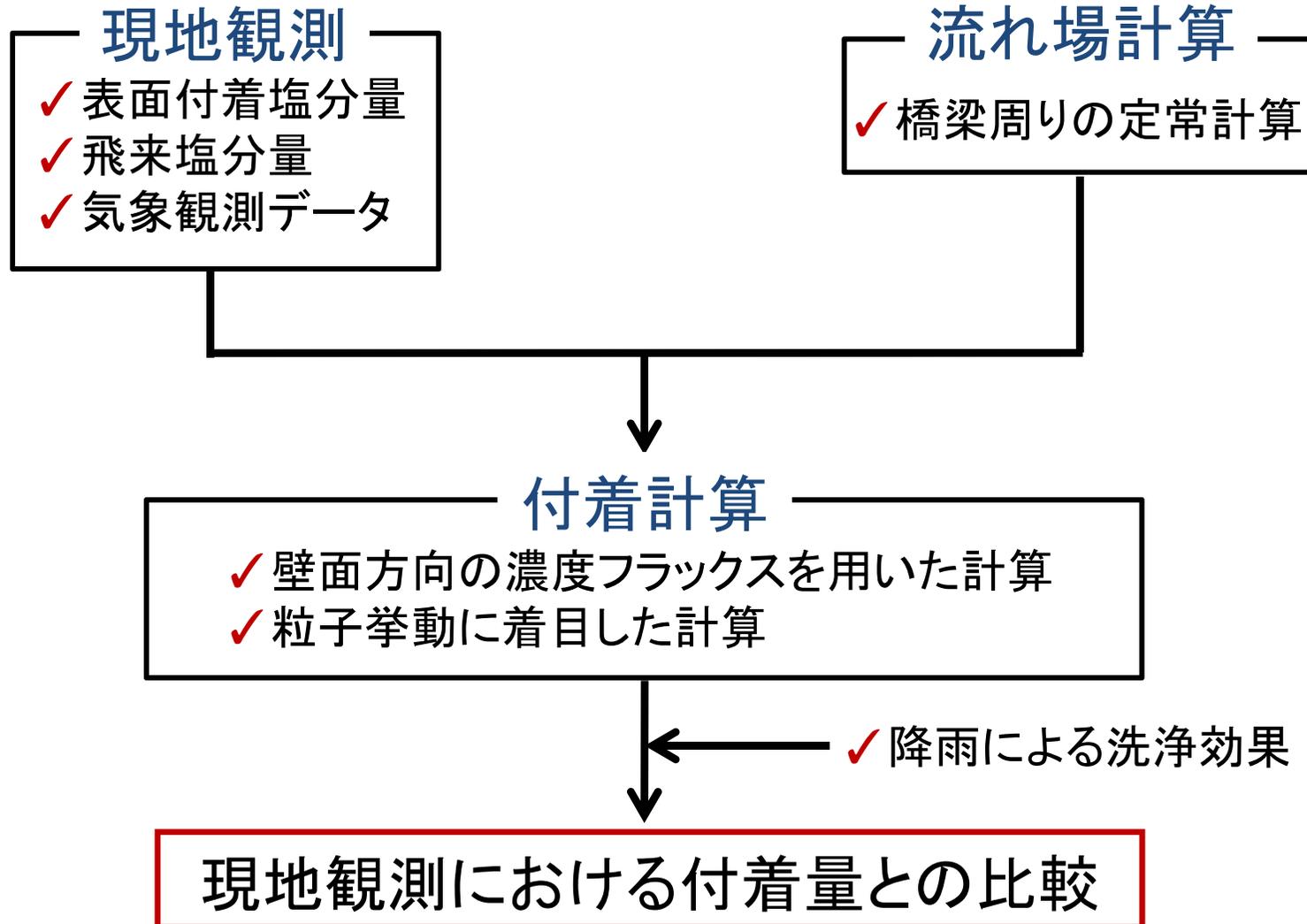
検討すべき項目は:

- 1) 海塩粒子の生成
- 2) 海塩粒子の陸上への輸送
- 3) 橋梁周辺における海塩粒子の濃度
- 4) 海塩粒子の橋梁各部位への付着
- 5) 降雨による付着塩分の洗浄効果
- 6) 橋梁各部位に付着している塩分量
- 7) 塩分量と腐食劣化の関係

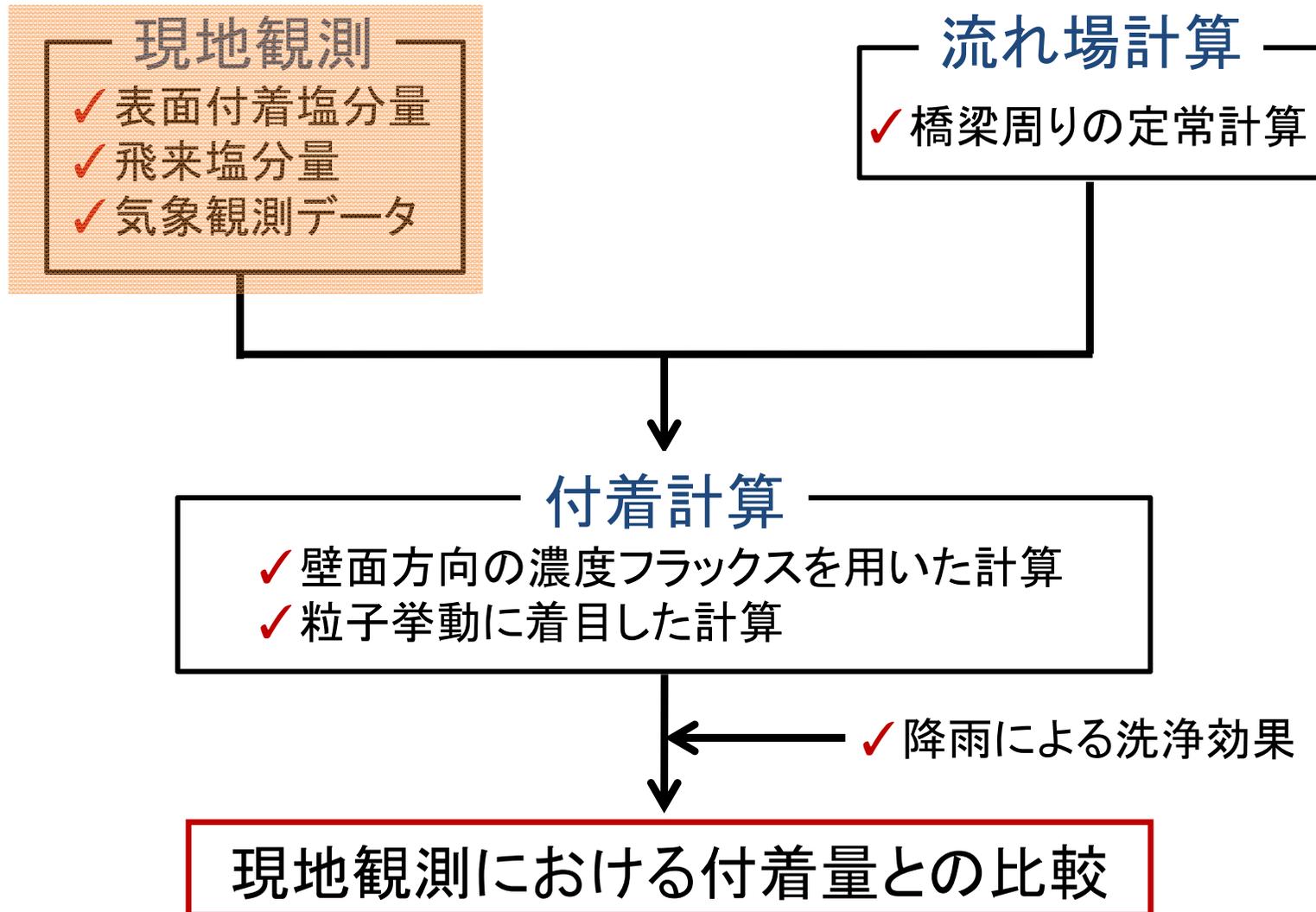
→ 腐食劣化予測システムの構築



研究の流れ

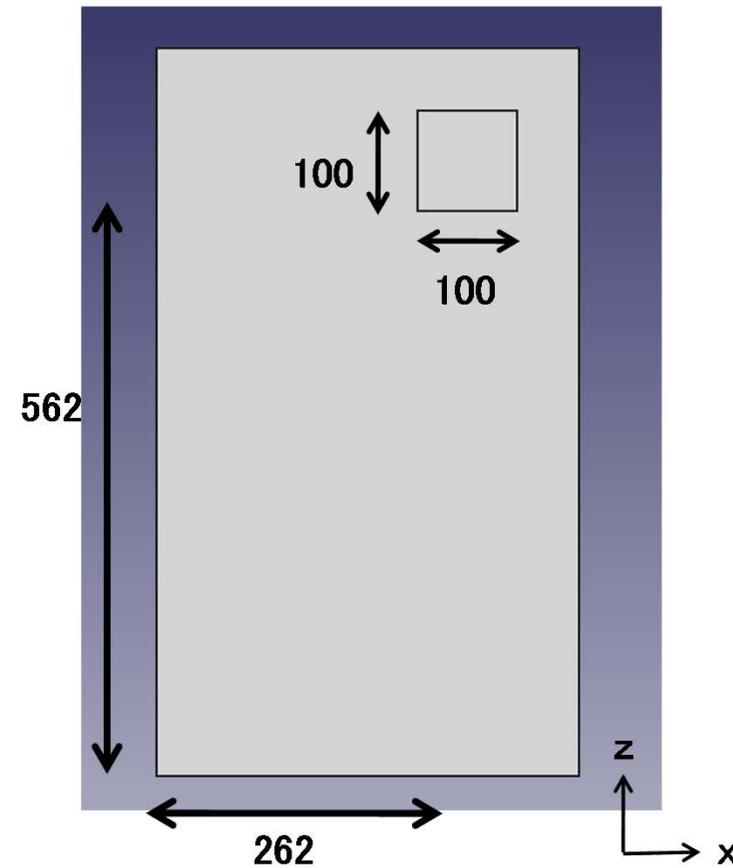
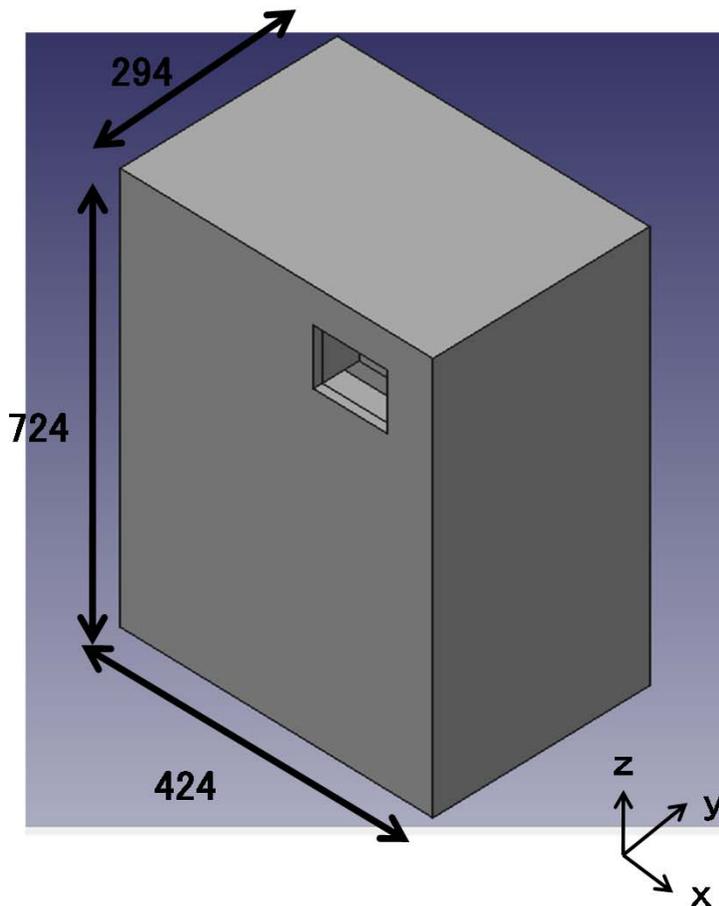


現地観測について



飛来塩分量の測定方法

- ドライガーゼ法
- ウェットキャンドル法
- 土研式タンク法



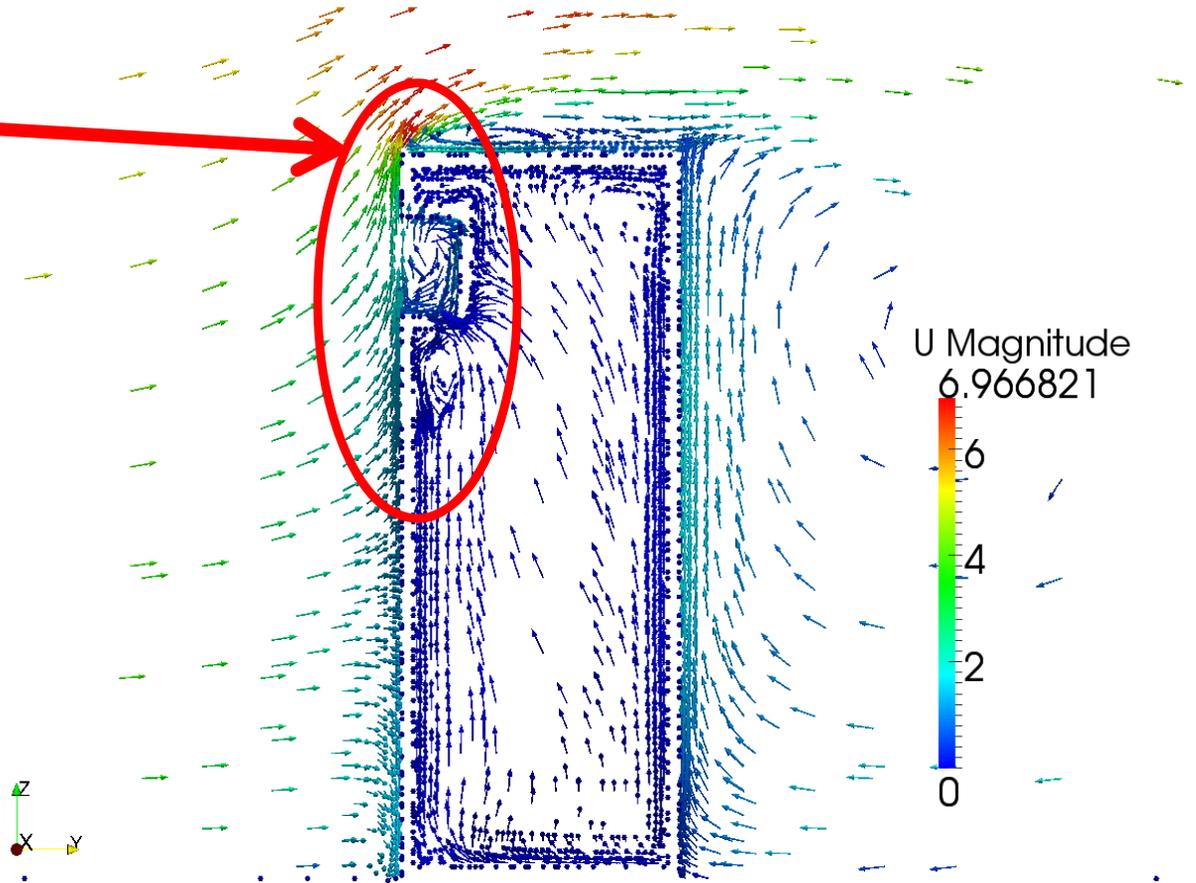
単位: mm

土研式タンク周りの風速ベクトル図

箱体が接近流を攪乱



接近流の海塩粒子濃度
と捕集される塩分量の
対応関係??



箱体周辺の流れ場

飛来塩分濃度計測

飛来塩分濃度？ → 円筒型飛来塩分捕集器



外径100mm, 内径96mm, 厚さ20mmのリング10個を連結
前後に400mmの筒, 全長1000mm

円筒を通過する大気中の海塩粒子をガーゼで捕捉

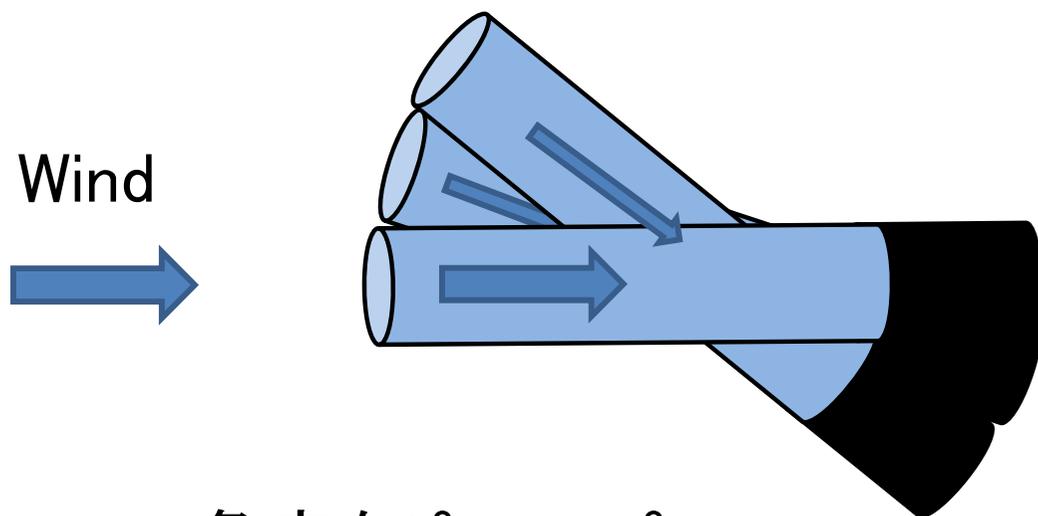
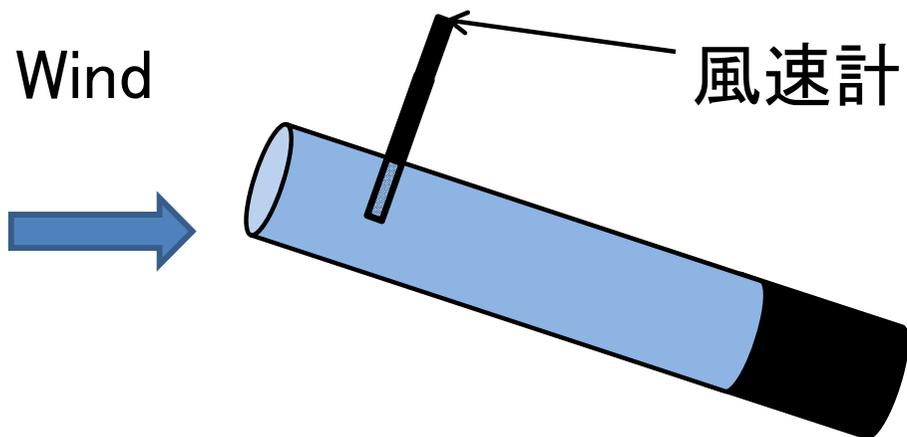
$$\underline{C = M / V}$$

C : 大気中塩分濃度(mg/m^3)

M : 捕集塩分量(mg) V : 円筒内部への流入量(m^3)

捕集性能: 風洞実験による定量的評価

円筒型飛来塩分捕集器の捕集性能

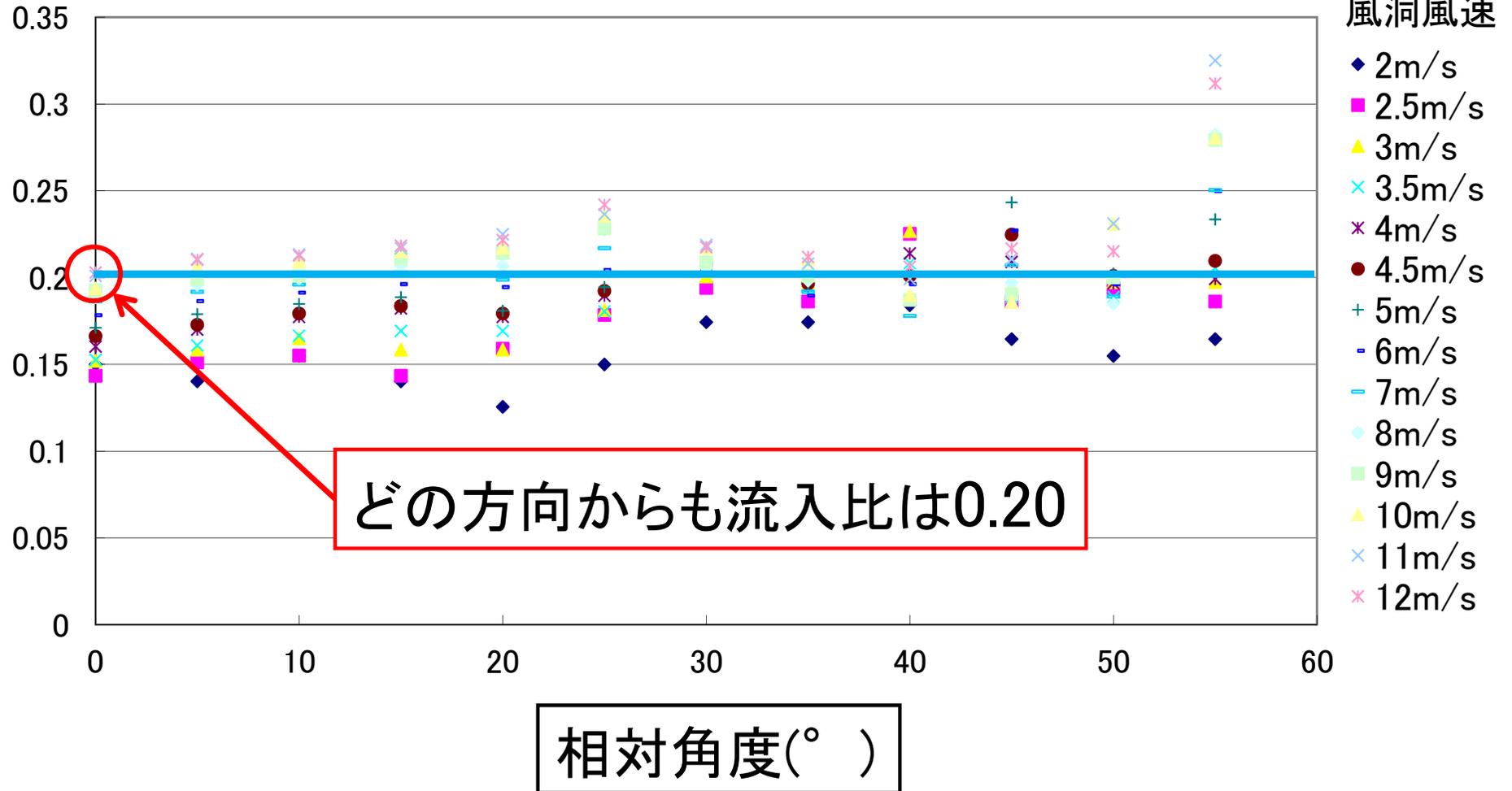


*角度を 0° ~ 55°
5° ピッチで変更

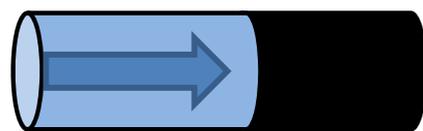
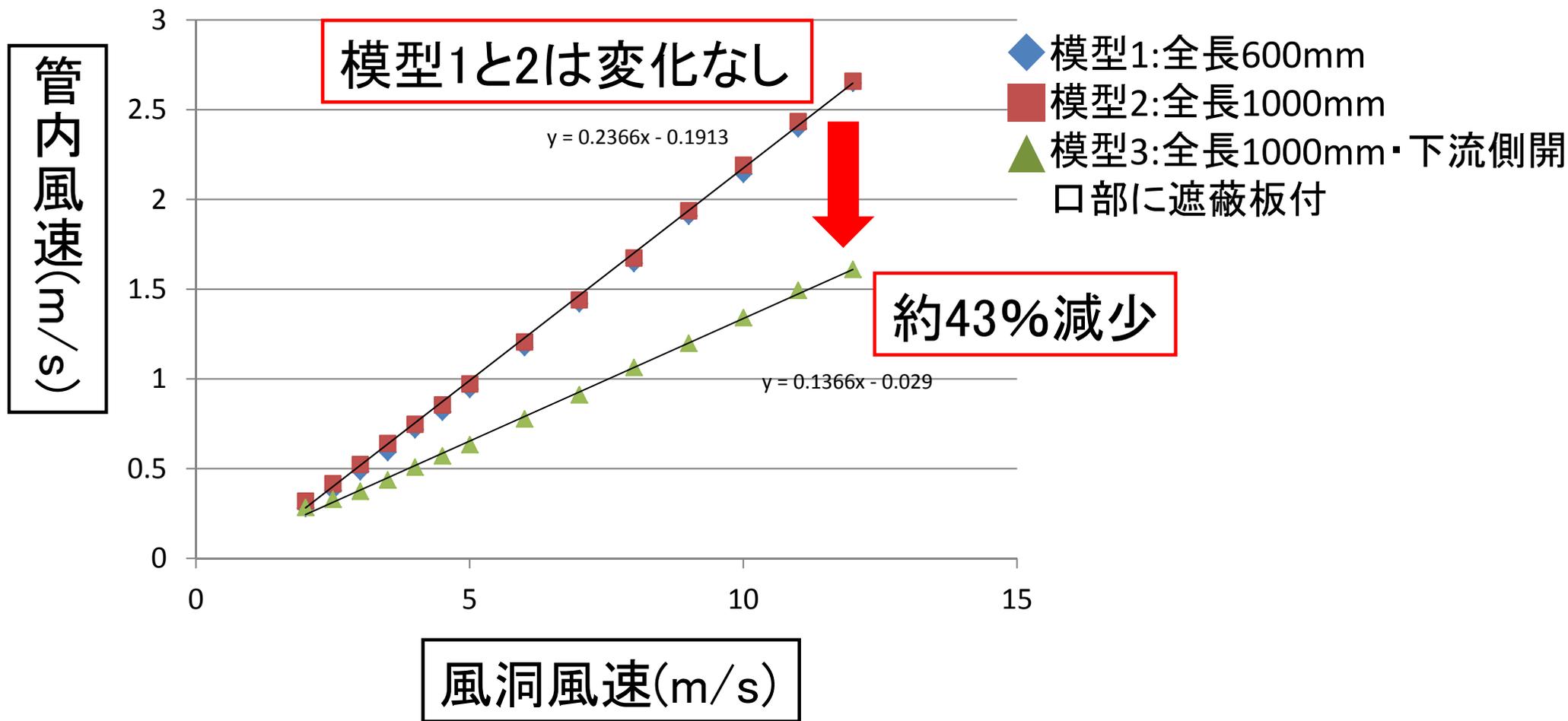


円筒型飛来塩分捕集器の管内流速

管内流速
風洞流速



円筒型飛来塩分捕集器の管内流速



モデル1



モデル2



モデル3

現地観測の対象橋梁



大鳴門橋

観測期間：
2009年6月~2012年3月



観測期間：
2010年11月~継続中

天鳥橋

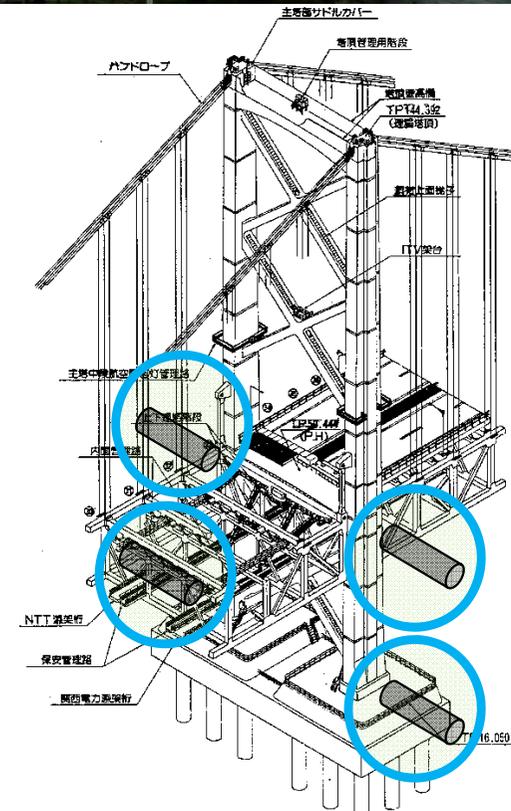


飛来塩分量の観測概要

天鳥橋

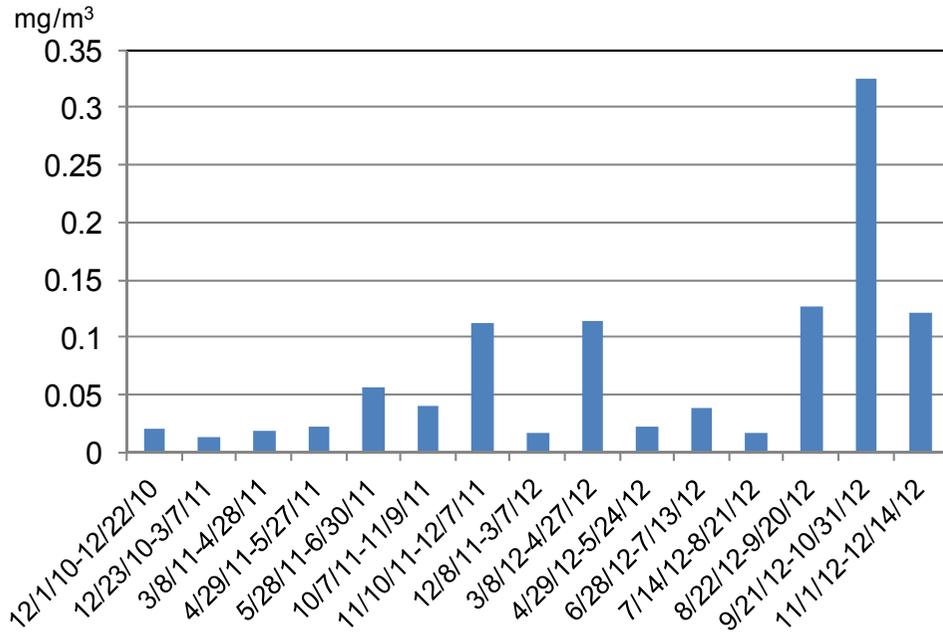


大鳴門橋

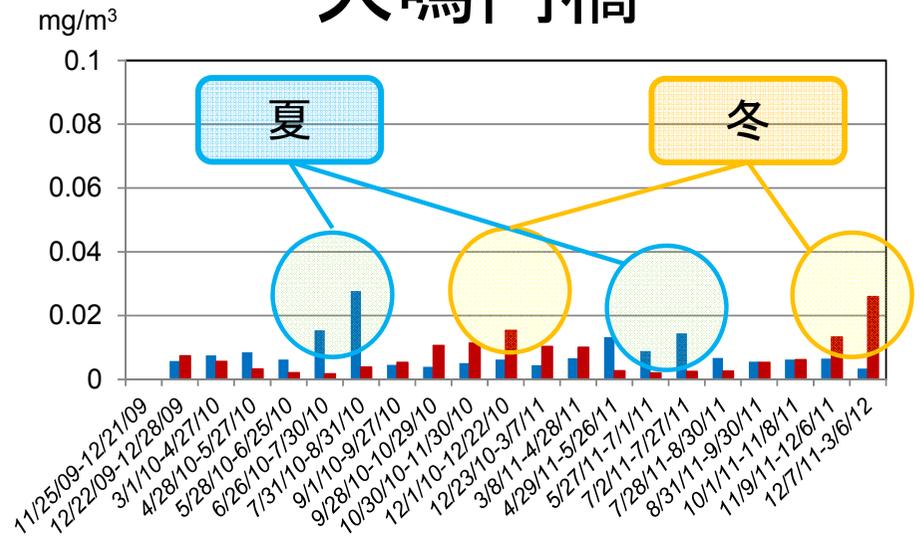


飛来塩分濃度の観測結果

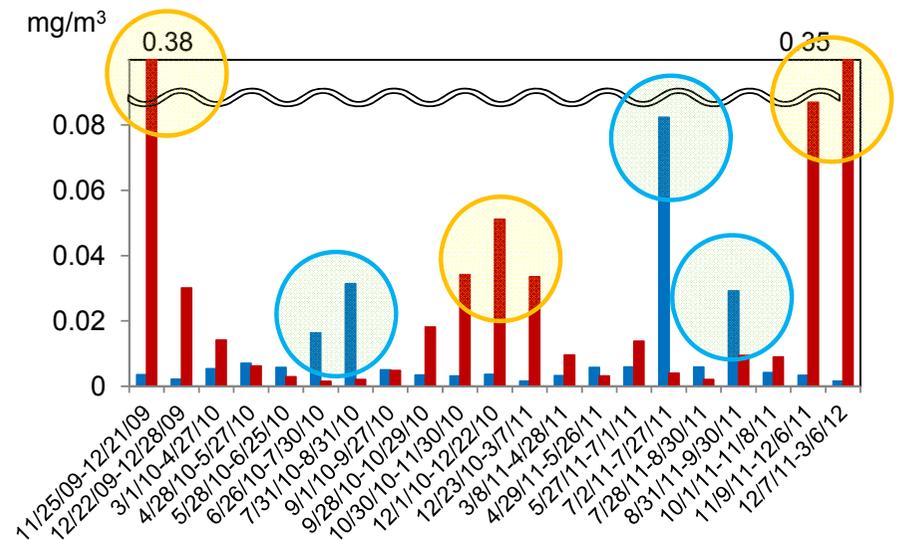
天鳥橋



大鳴門橋



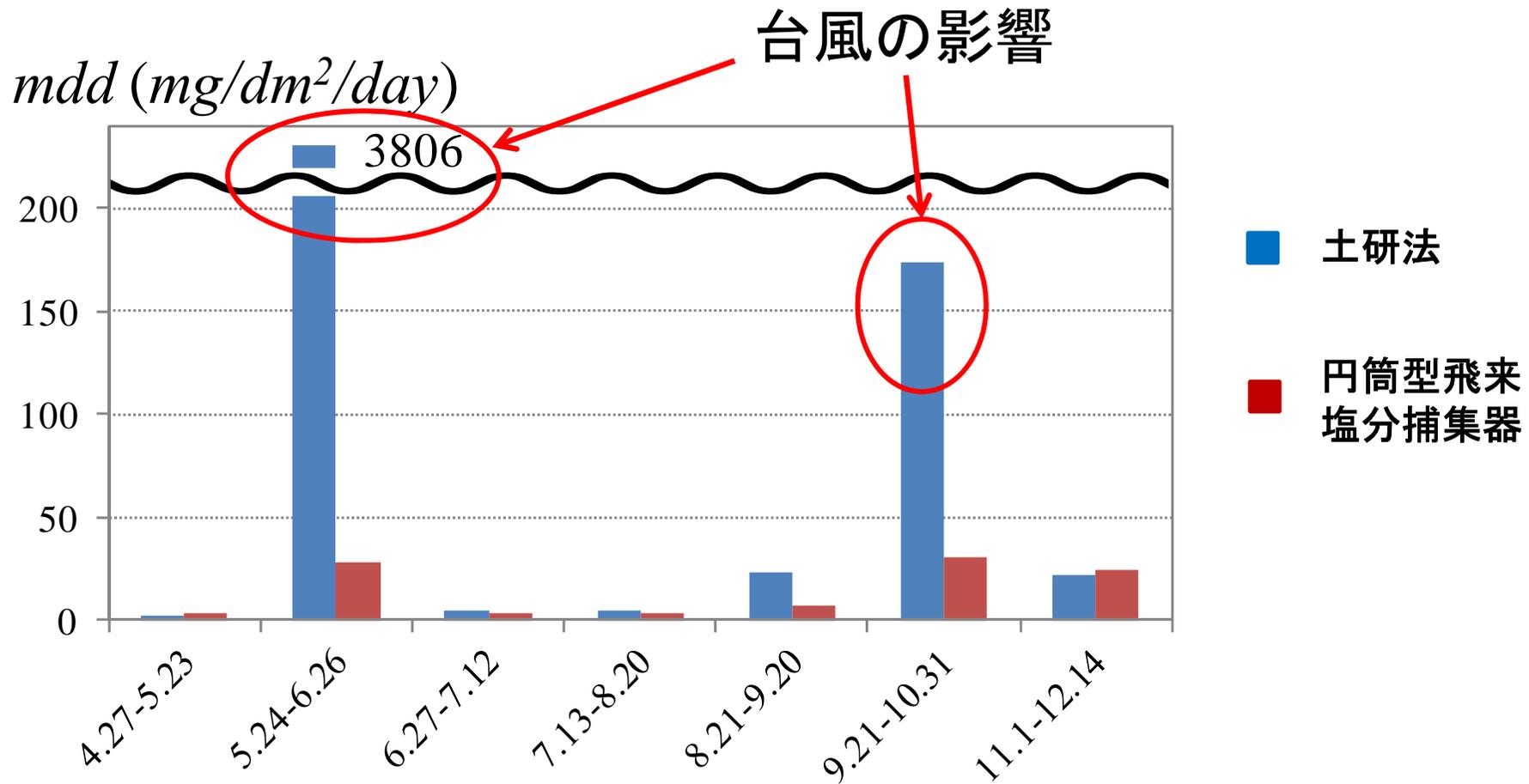
管理用通路 (高度約59.44m)



主塔基礎部 (高度約16.05m)

■ 北風 ■ 南風

土研式タンク法との比較 (mdd値)

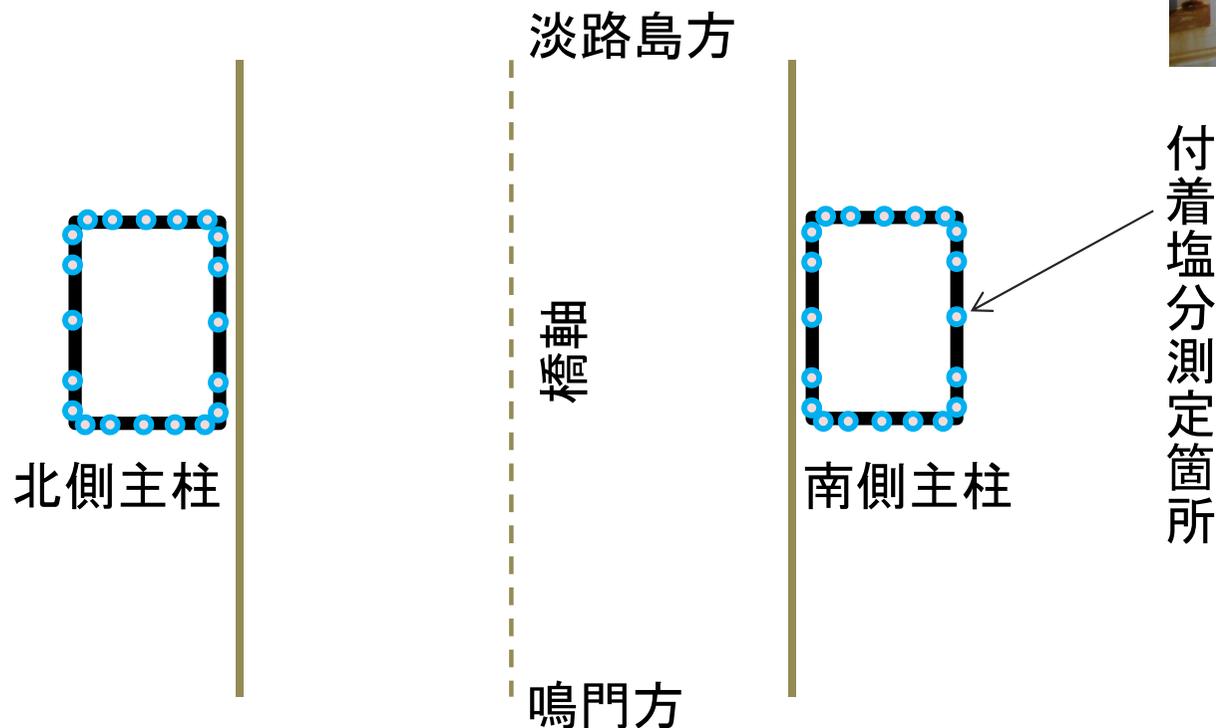


- ・両者から算出された mdd 値はほぼ等しい。
- ・台風のような異常気象時において、円筒型飛来塩分捕集器は海水・雨水の流入除去が期待できる。

構造物の表面付着塩分量の測定

大鳴門橋

3P主塔 北・南塔柱の各面を計測
計測箇所は基礎部下面から800mm上方
合計40か所

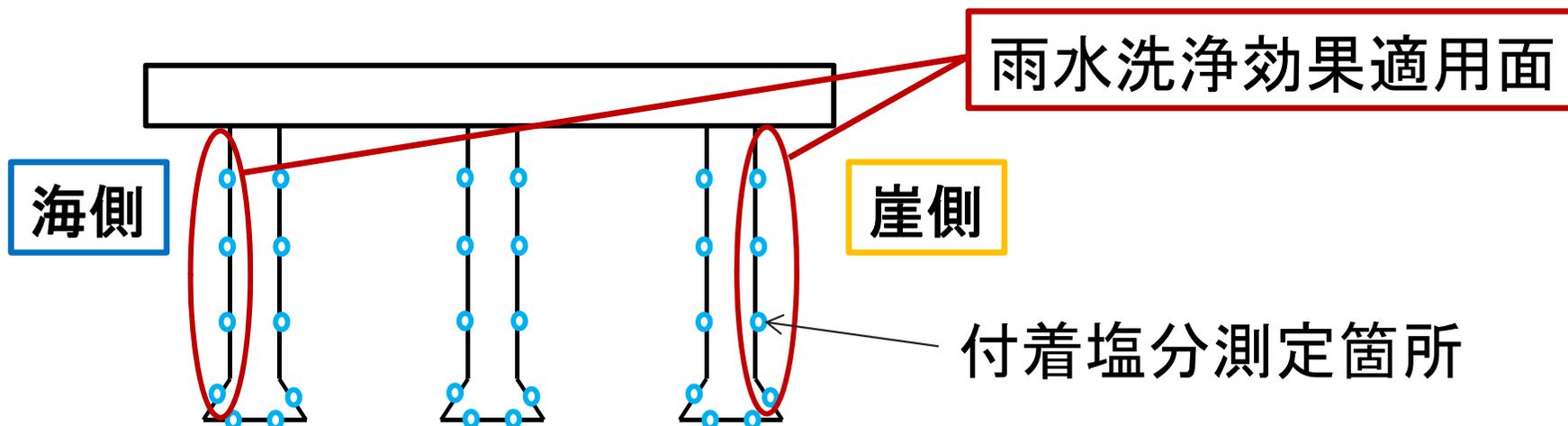


構造物の表面付着塩分量の測定

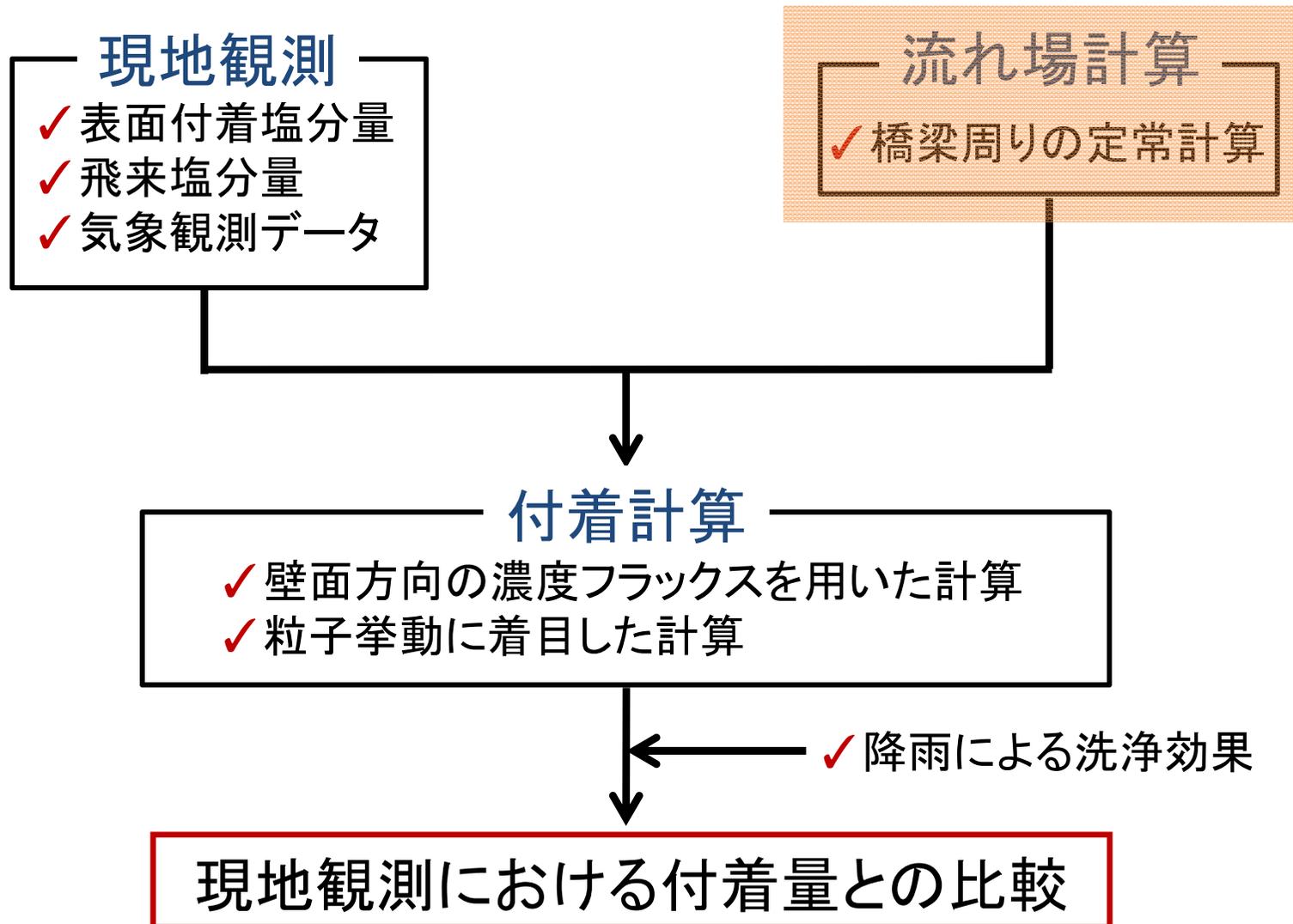
天鳥橋



- 3鋼製主桁(海側・中央・崖側の両面)
 - ウェブ(下端より300mm,900mm,1400mm)
 - フランジ(上面, 下面)
- 合計30か所



構造物周りの流れ場の計算



流れ場の解析手法

- ソフトウェア: OpenFOAM
- Reynolds Averaged Navier–Stokes equation: RANS
- 乱流モデル⇒標準 $k-\varepsilon$ モデル

連続式
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

運動方程式
$$\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_T) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\}$$

乱流エネルギー k
$$\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\}$$

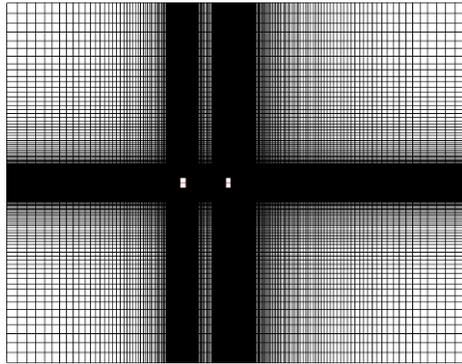
エネルギー散逸率 ε
$$\bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\}$$

$$P_k = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad \nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

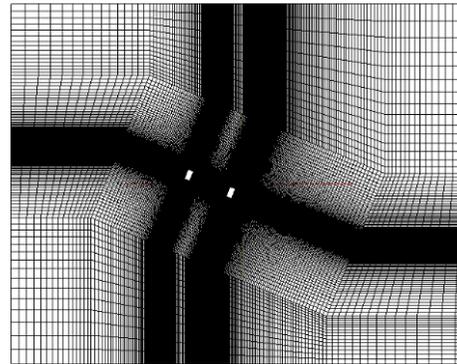
$$C_\mu = 0.09 \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

流れ場の解析手法(大鳴門橋)

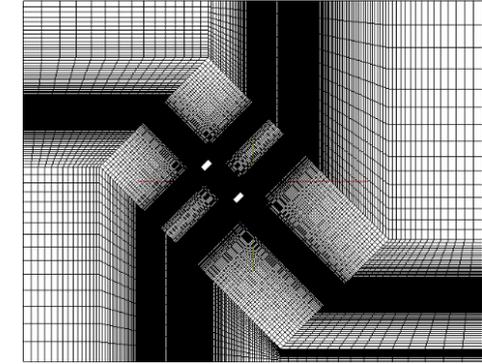
- OpenFOAMで**定常計算**
- 気象データ反映のために角度毎の計算



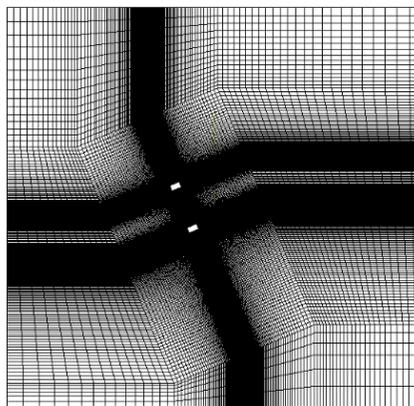
0°



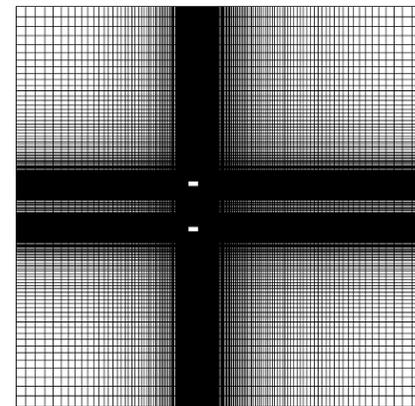
22.5°



45°



67.5°



90°

流れ場の解析手法(天鳥橋)

天鳥橋, 天鳥橋橋台, 周辺地形を
簡易的に模擬

計算領域(22.5°)

風向と橋軸直角方向とのなす角が

0°

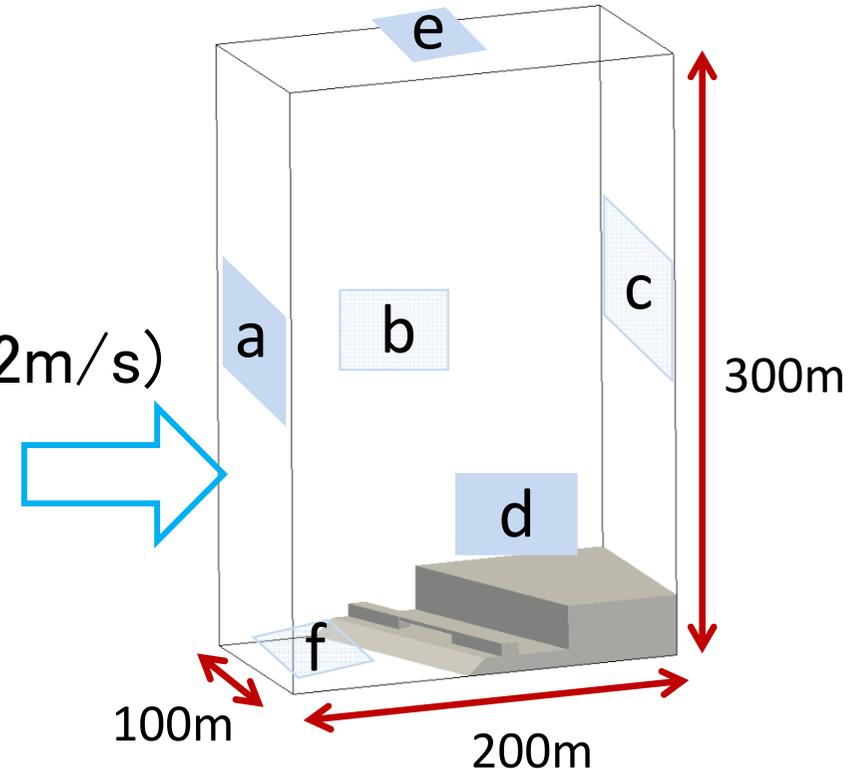
22.5°

45°

67.5°

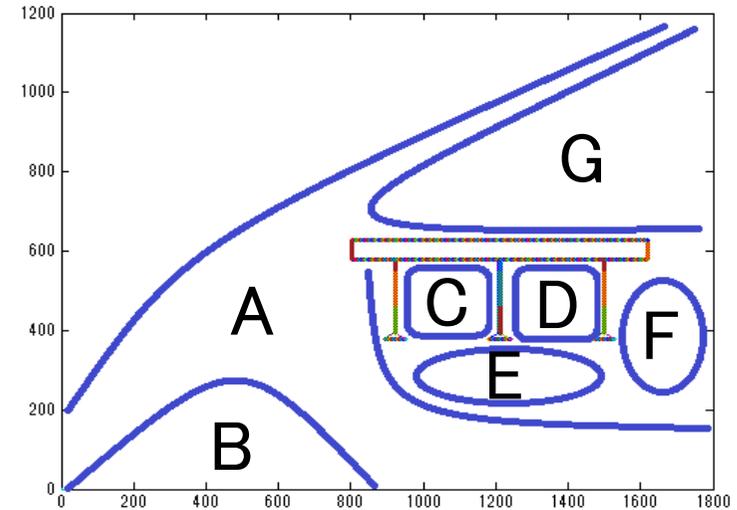
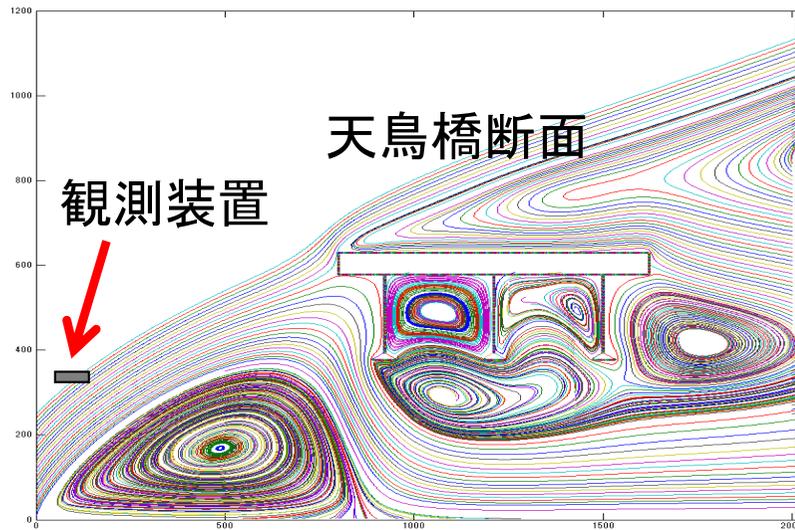
に対応した領域を作成

Wind(2m/s)



	a(流入口)	b	c(流出口)	d	d(流出口)	e	f	固体壁面
V	初期値	$v_x = 0$ $\partial v_y / \partial y = 0$ $\partial v_z / \partial z = 0$	$\partial V / \partial n = 0$	$v_x = 0$ $\partial v_y / \partial y = 0$ $\partial v_z / \partial z = 0$	$\partial V / \partial n = 0$	$\partial v_x / \partial x = 0$ $\partial v_y / \partial y = 0$ $v_z = 0$	$V = 0$	$V = 0$
p	$\partial p / \partial n = 0$	$\partial p / \partial n = 0$	0	$\partial p / \partial n = 0$	0	$\partial p / \partial n = 0$	$\partial p / \partial n = 0$	$\partial p / \partial n = 0$
k	初期値	$\partial k / \partial n = 0$	$\partial k / \partial n = 0$	$\partial k / \partial n = 0$	$\partial k / \partial n = 0$	$\partial k / \partial n = 0$	対数則	対数則
ε	初期値	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$	$\partial \varepsilon / \partial n = 0$	対数則	対数則

天鳥橋周りの流線図(風向:橋軸直角)

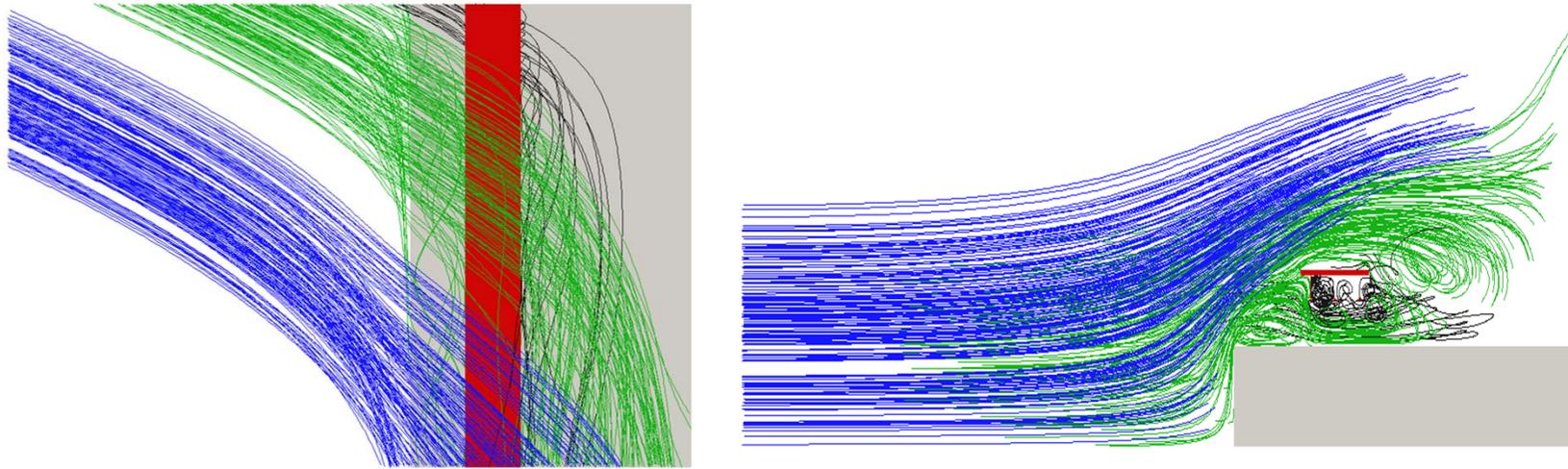


天鳥橋主桁周囲の流線図(0°)

海側から橋梁に接近する流れ⇒橋梁下部及び上部を流下
桁間及び岸壁近傍⇒循環流れが形成

海より橋梁に到達する海塩粒子が
接近することのない部分が存在
⇒場所によって計算領域中に濃度の濃淡が生じる可能性？

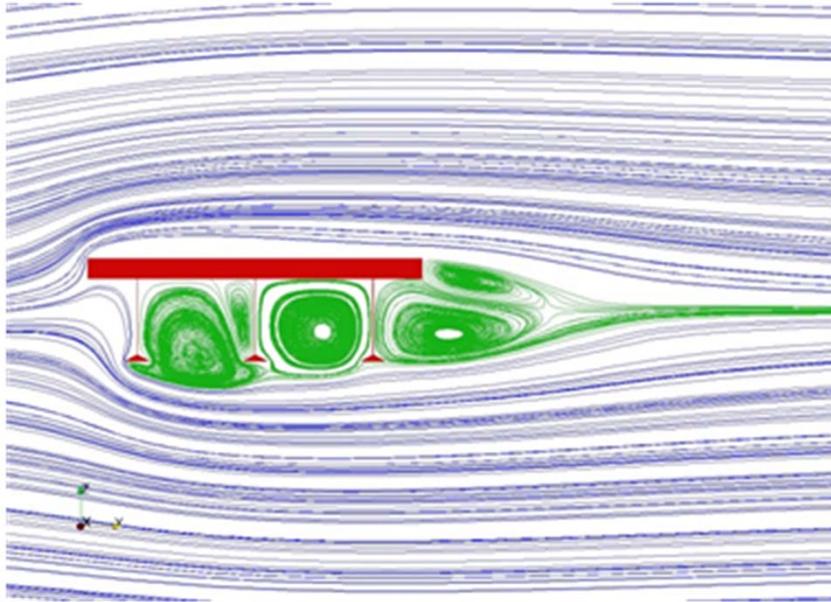
天鳥橋周りの流線図(風向:橋軸直角より 22.5°)



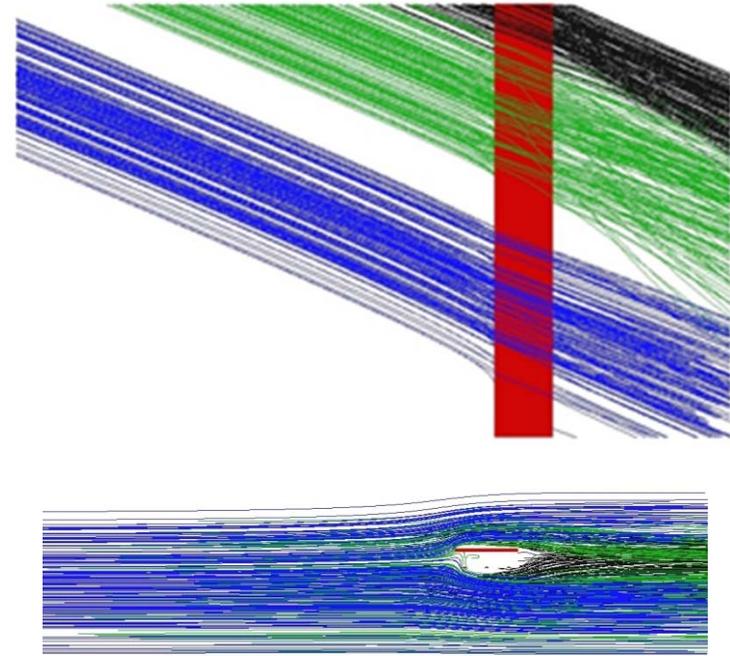
天鳥橋周囲の流線図(22.5°)

橋梁主桁間に流入する流線が確認
⇒主桁間に入り込む流線は、
橋軸に対して斜角を持った風向の方が顕著

天鳥橋周りの流線図(周辺地形の影響)



橋軸直角方向と
風向がなす角: 0°

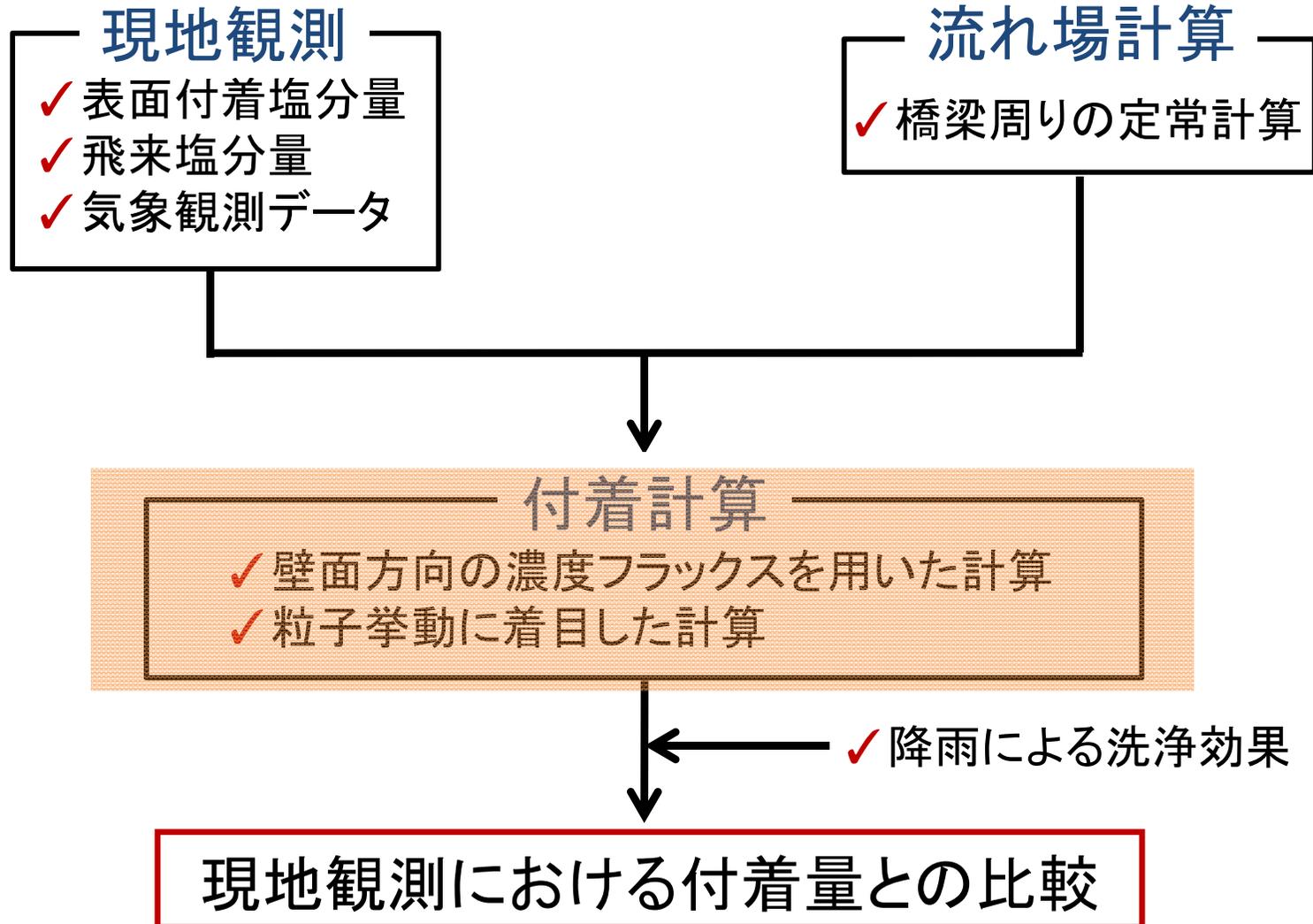


橋軸直角方向と
風向がなす角: 22.5°

計算領域中に天鳥橋のみ存在する時の流線図

周辺地形の影響は非常に重要

付着塩分量の計算



付着塩分量計算の概要

- ・定常風速場を利用
- ・計算領域中の濃度一定 (捕集器から算出された値)

case1

壁面近傍の濃度フラックス

- ・海塩粒子を塩分濃度というスカラー量とみなす
- ・マクロな視点

case2

粒子挙動

- ・海塩粒子個々の挙動を追う
- ・マイクロな視点

両者から算出される付着塩分量計算値



比較

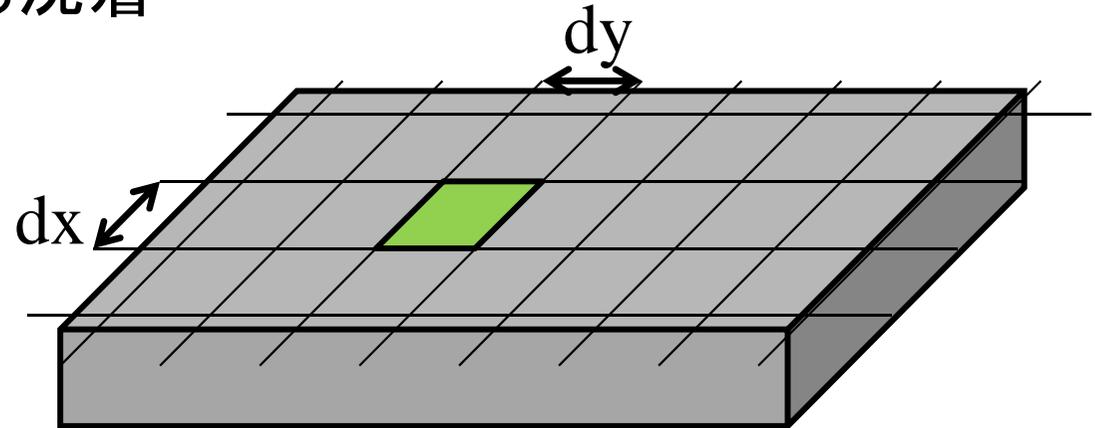
現地観測から得られる付着塩分量観測値

壁面近傍の濃度フラックスによる方法

付着機構



慣性衝突による付着
拡散による沈着



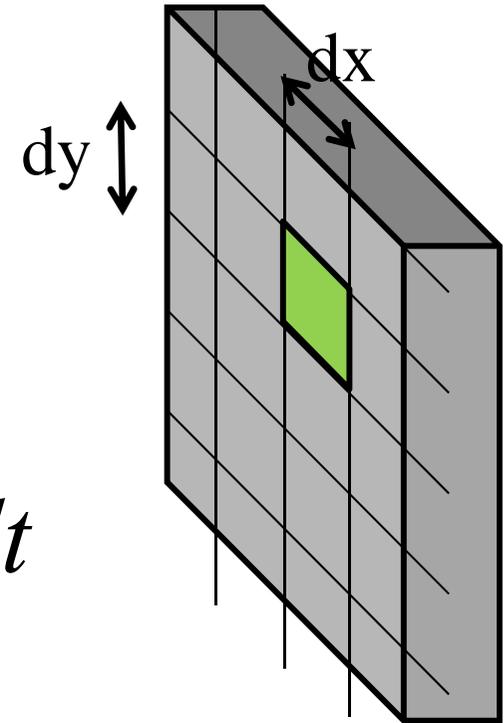
$$Q_{trf} = \underbrace{C}_{\text{濃度}} \cdot \underbrace{dx \cdot dy}_{\text{面積}} \cdot \underbrace{V_n}_{\text{衝突速度}} \cdot \underbrace{dt}_{\text{継続時間}}$$

対象への衝突体積

対象への衝突塩分量

壁面近傍の濃度フラックスによる方法

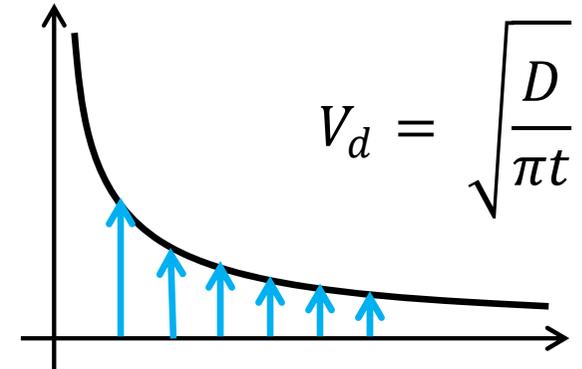
付着機構 → 慣性衝突による付着
拡散による沈着



無限鉛直平面への沈着を仮定

$$Q_{dif} = C \cdot dx \cdot dy \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{D}{\pi t}} dt$$

濃度 面積 沈着速度
対象への沈着体積
対象への沈着塩分量



粒子挙動の追跡による方法

移流過程

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{dv_x}{dt} = F_{D_x} \\ m \frac{dv_y}{dt} = F_{D_y} \\ m \frac{dv_z}{dt} = F_{D_z} - mg \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) \end{array} \right.$$

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_P \frac{\vec{u} - \vec{v}}{|\vec{u} - \vec{v}|} |\vec{u} - \vec{v}|^2$$

F_D : 抵抗力

C_D : 抵抗係数 (レイノルズ数の関数)

A_P : 粒子の流れ方向の投影面積

u : 風速 v : 粒子の速度

ρ : 空気密度 ρ_p : 粒子の単位体積質量

粒子半径 (=10 μ m)

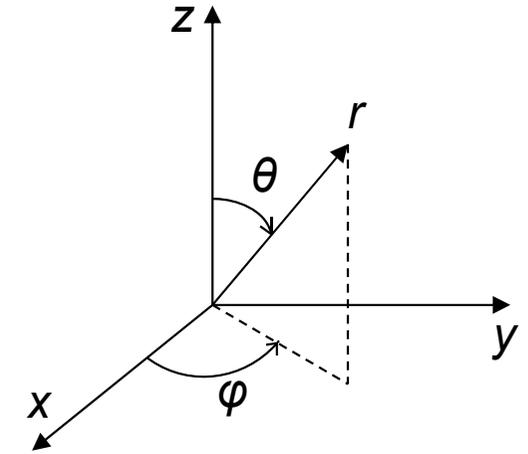
粒子の単位体積質量 (=1110kg/m³)

- ・ 粒子個々の挙動を評価
- ・ **重力**の影響を導入

粒子挙動の追跡による方法

拡散過程

- ・ ランダムウォーク法
 - 拡散を**確率的な挙動**とみなす.
 - 粒子の移動量を乱数で決める.



$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = \frac{4\pi}{(4\pi Dt)^{3/2}} \int_0^{r_i} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) r^2 dr \\ \theta_i = \pi Q_i \\ \varphi_i = 2\pi R_i \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta x = r_i \sin \theta_i \cos \varphi_i \\ \Delta y = r_i \sin \theta_i \sin \varphi_i \\ \Delta z = r_i \cos \theta_i \end{array} \right.$$

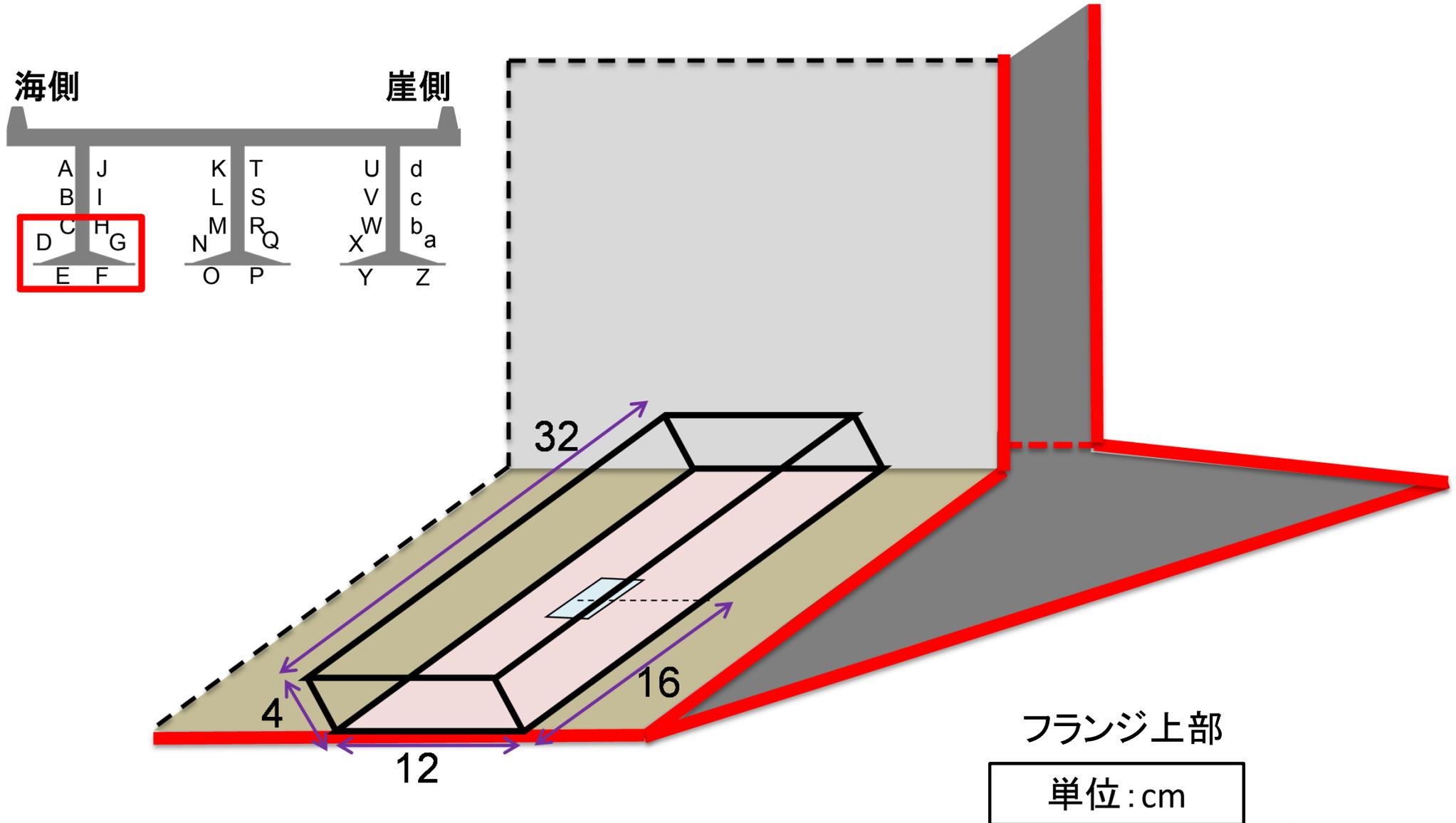
P_i, Q_i, R_i : 乱数

$$0 \leq P_i, Q_i, R_i \leq 1$$

D : 拡散係数
(空気の動粘性係数)

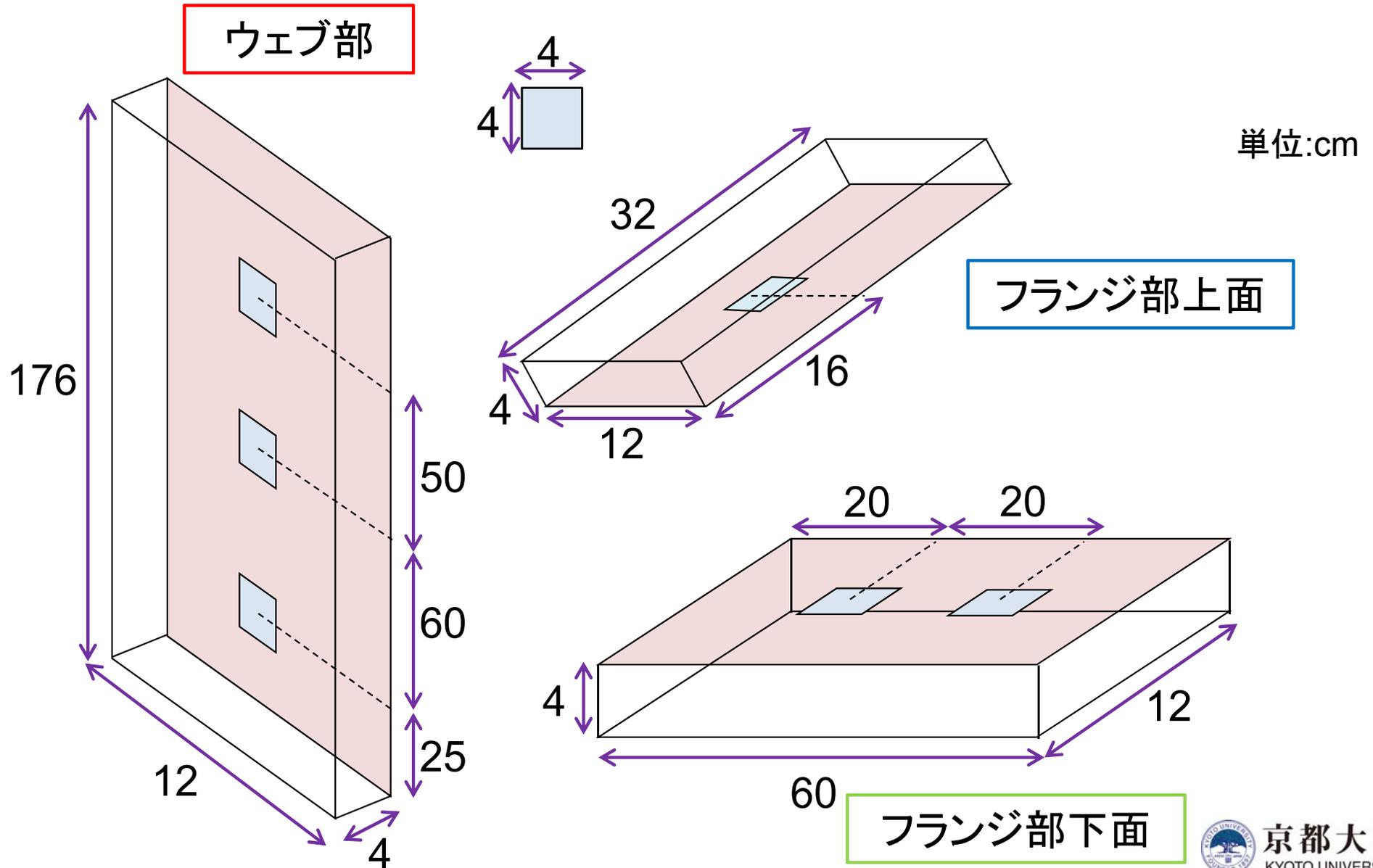
粒子挙動の追跡による方法

計算領域

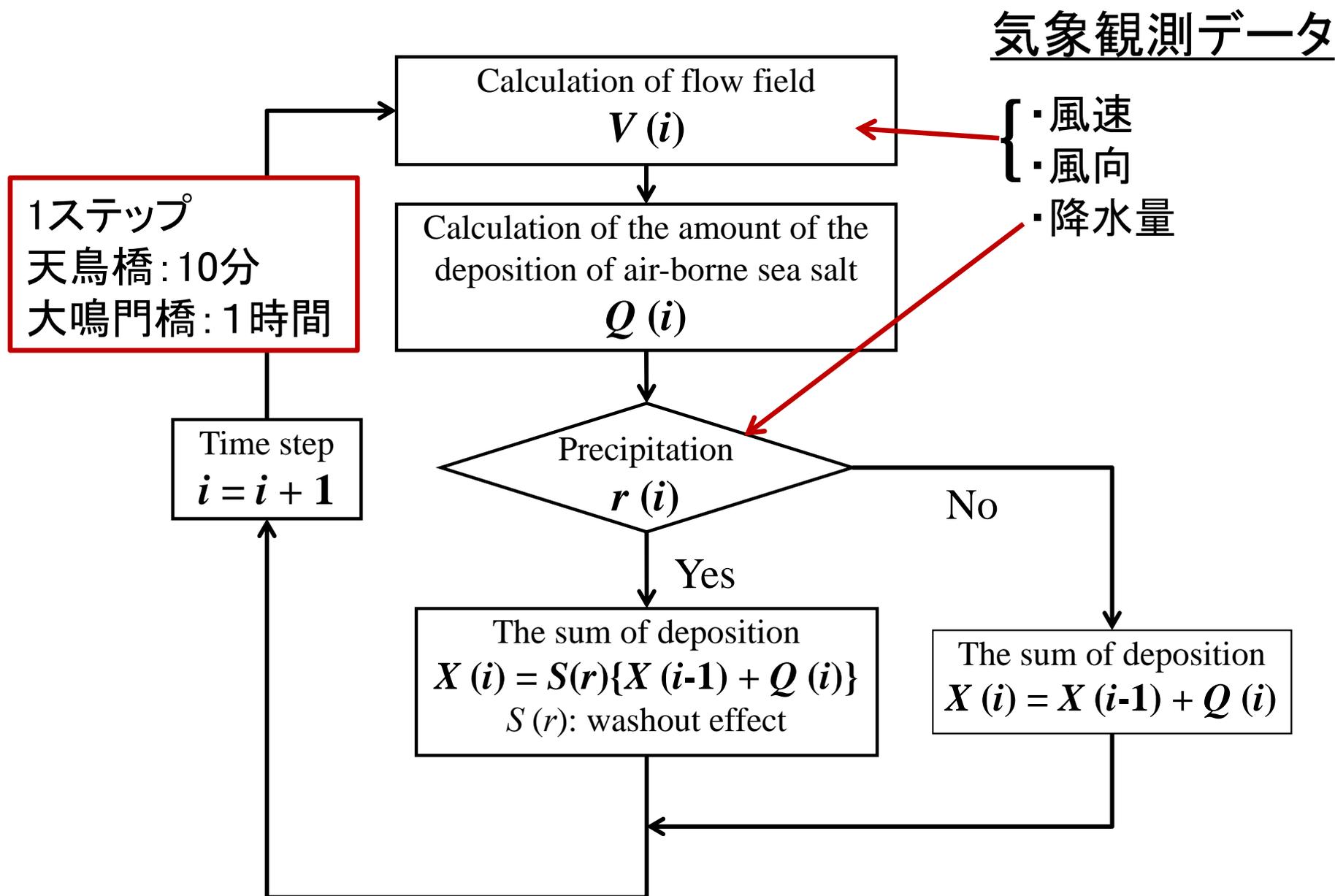


粒子挙動の追跡による方法

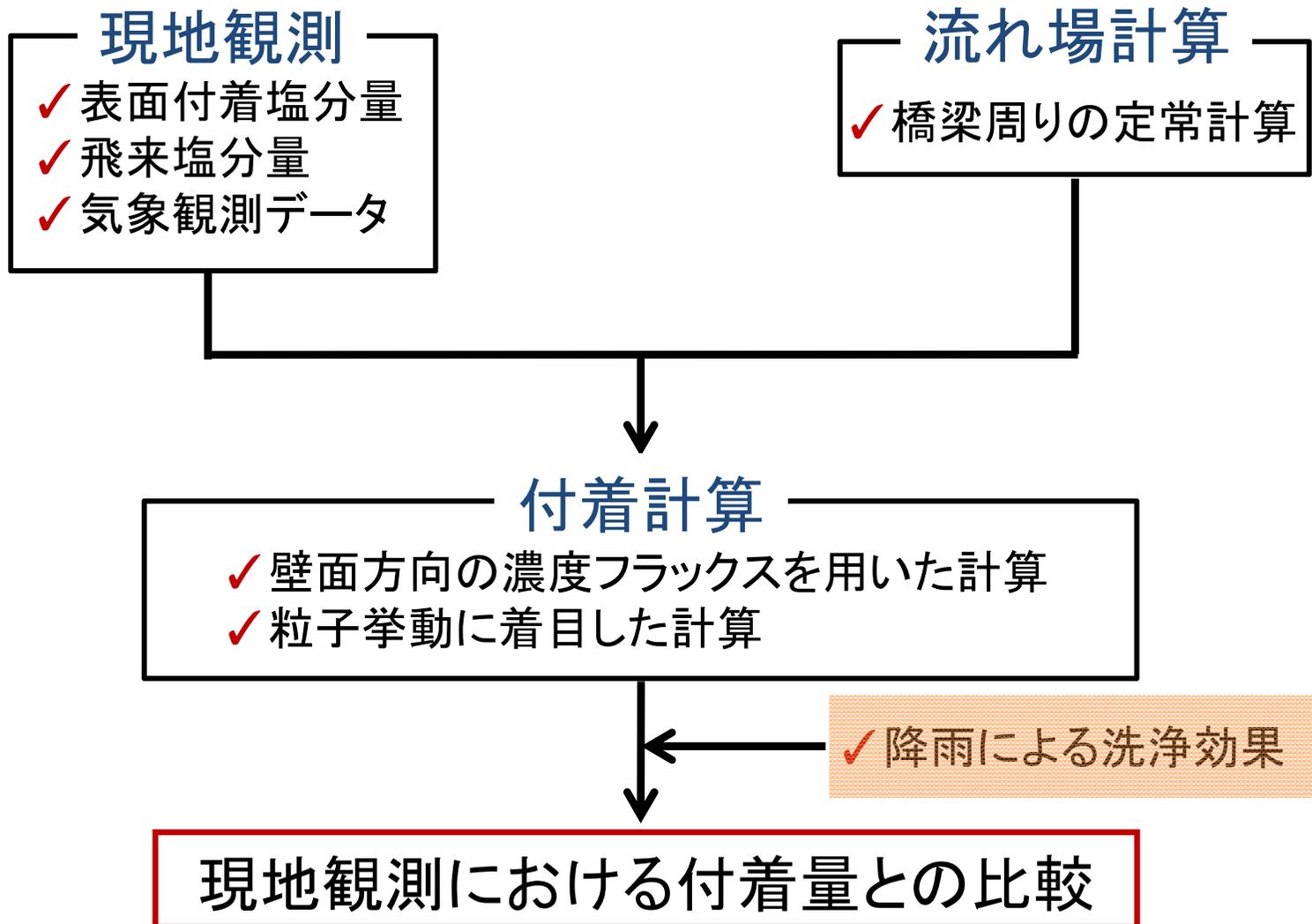
計算領域



付着塩分量計算のアルゴリズム



降雨による塩分の洗浄効果の検討



降雨による洗浄効果の確認実験

実橋梁では雨水による洗浄効果が付着塩分量に大きな影響を及ぼす。⇒模擬実験により評価



高さ3mのノズルから水(12mm/h)を散布

曝露時間: 2分, 3分, 4分, 5分

(時間降水量: 0.4mm/h, 0.6mm/h, 0.8mm/h, 1mm/h)

曝露角度: 60°

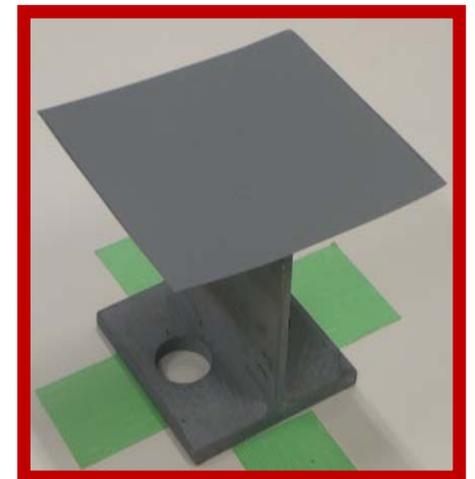
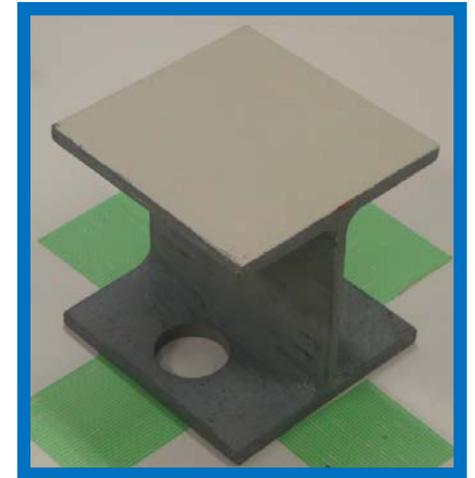
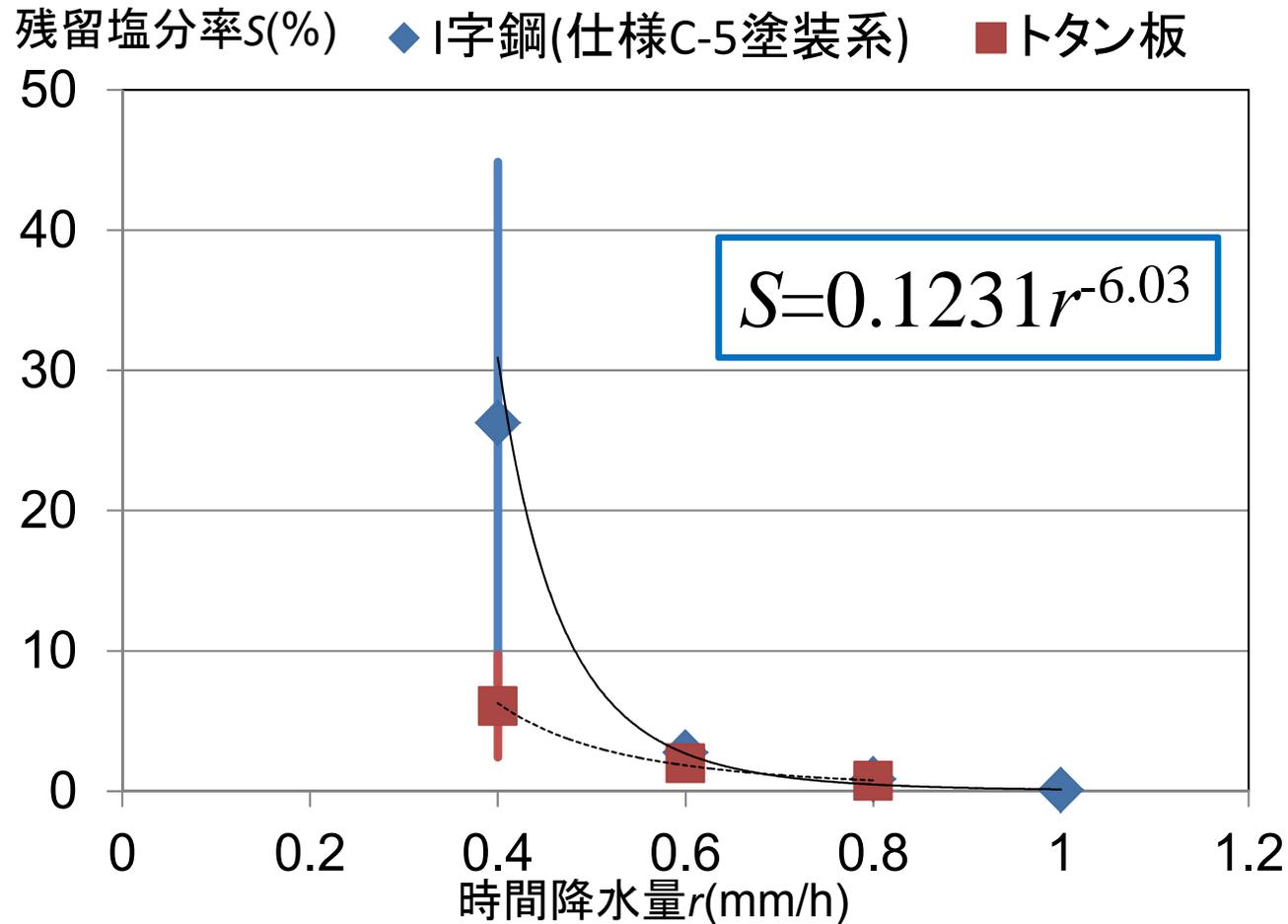
洗い流し効果は残留塩分率で評価

$$\text{残留塩分率} = \frac{\text{実験後の表面塩分濃度}}{\text{初期表面塩分濃度}}$$

I字鋼, トタン板の2種類

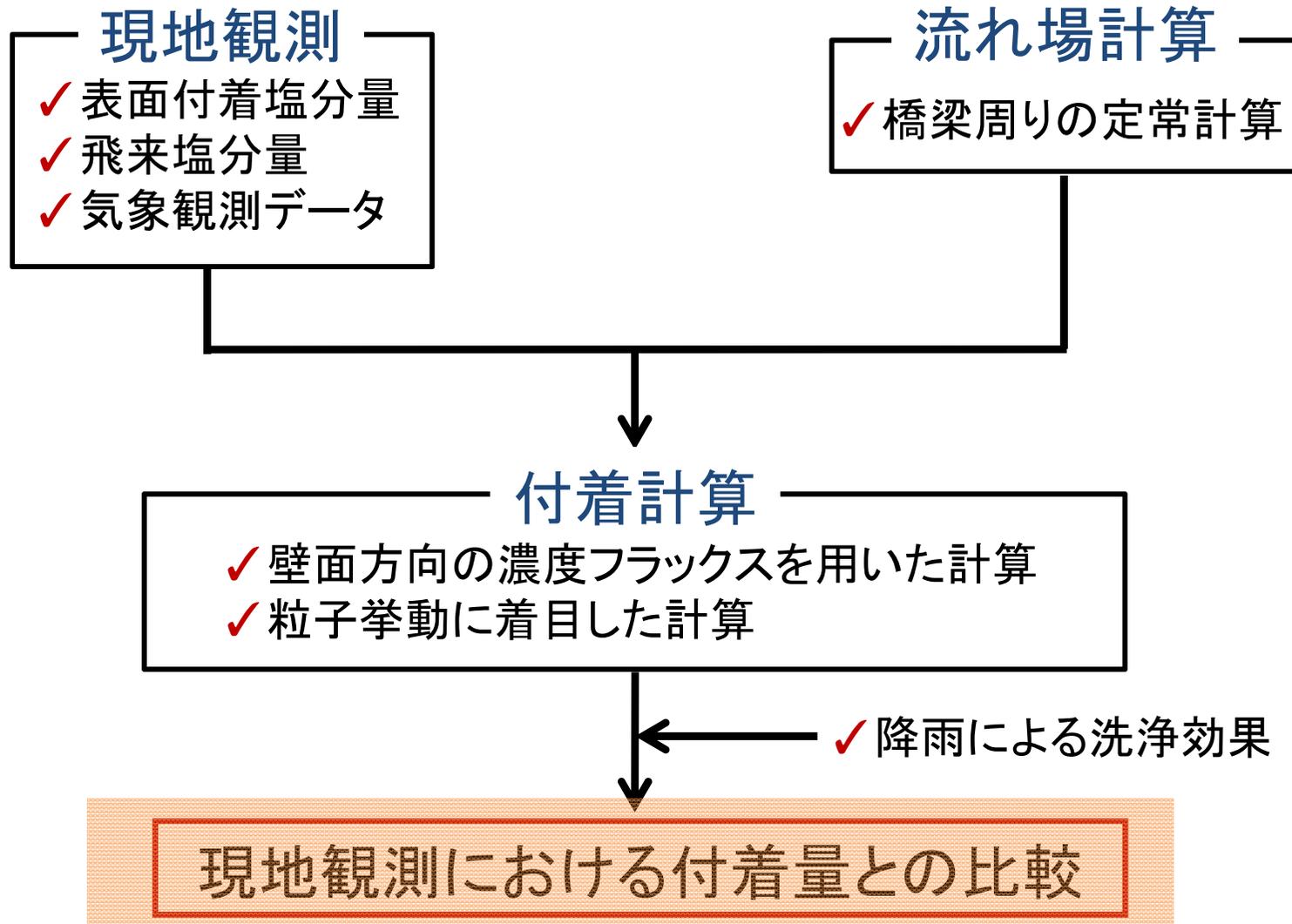
防食塗装(仕様C-5塗装系)

降雨による洗浄効果の実験結果



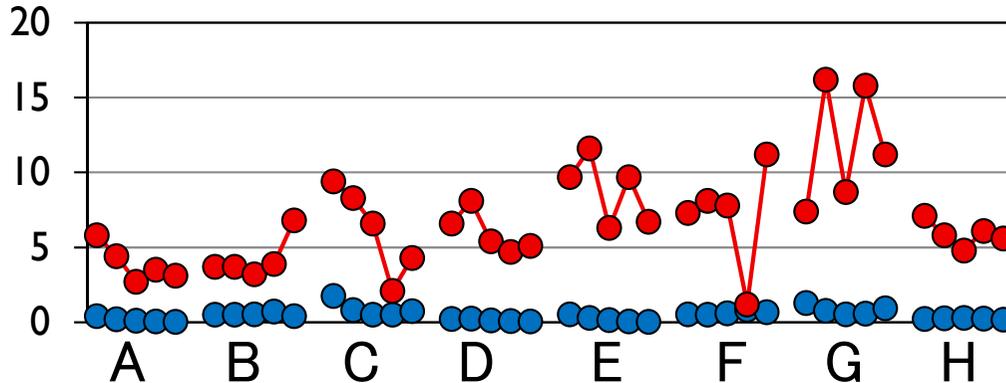
- 時間降水量が増加すると洗浄効果は大きくなる。
- 表面粗度が小さいほう(トタン板)が洗浄効果は大きい。

付着塩分量の現地観測結果と数値計算結果の比較



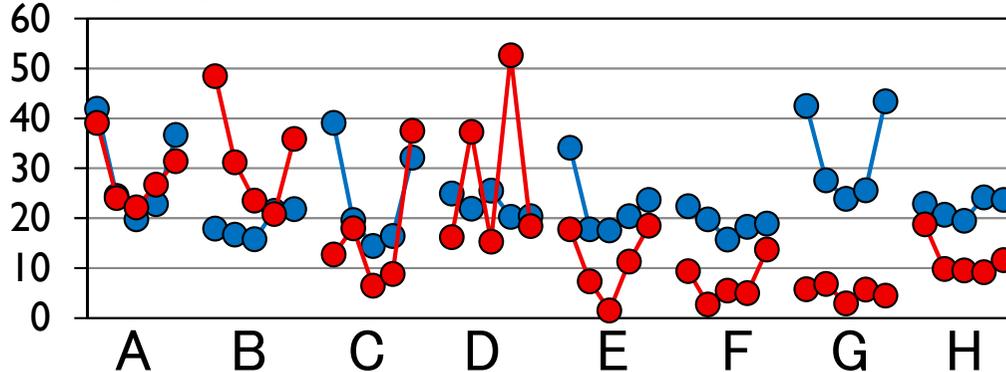
大鳴門橋の結果（濃度フラックスによる方法のみ）

塩分量(mg/m^2)

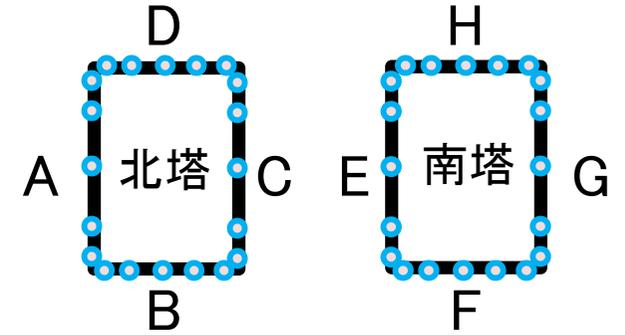


平均風速3.59m/s, 降雨直後

塩分量(mg/m^2)



平均風速2.58m/s, 降雨からの日数5日

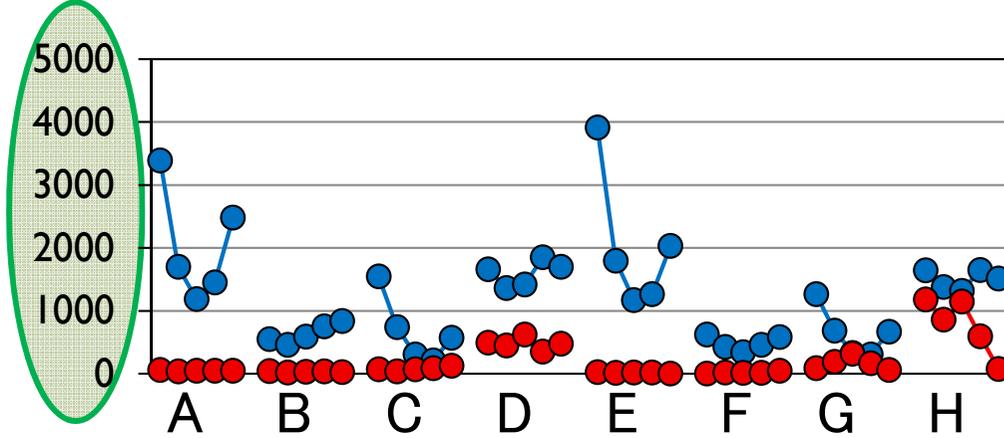


● 観測値
● 計算値

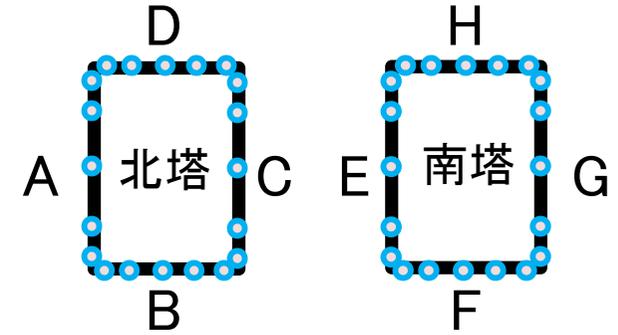
- ・洗い流しを反映
- ・付着傾向の反映
(端部が大きくなる等)
- ・オーダーの一致

大鳴門橋の結果（濃度フラックスによる方法のみ）

塩分量(mg/m^2)



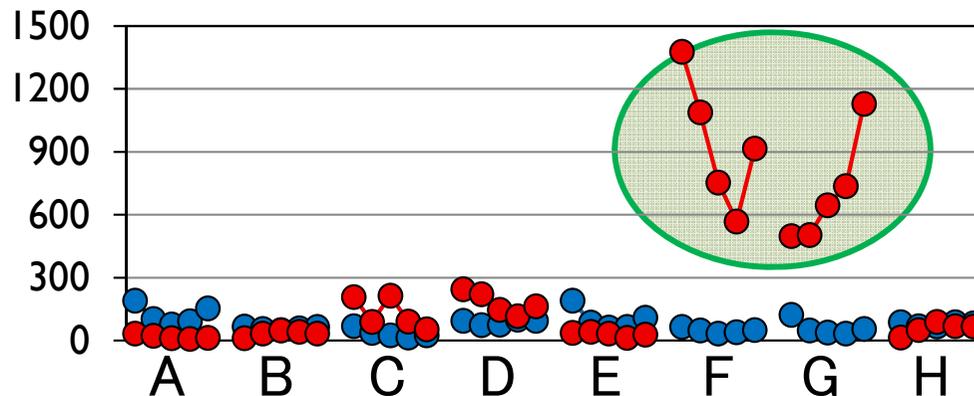
平均風速4.35m/s, 降雨からの日数9日



● 観測値
● 計算値

・過剰な評価

塩分量(mg/m^2)



塩が析出

・波の影響は考慮できず

天鳥橋の結果

2011.3.8-2011.4.28

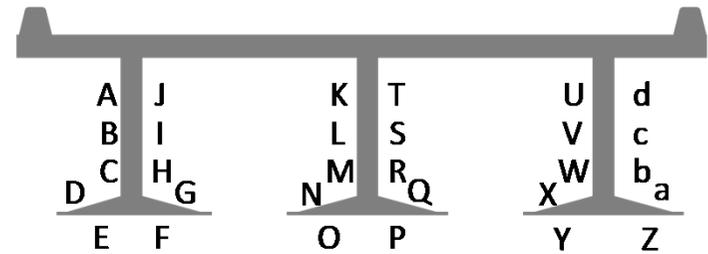
Sea Side

Cliff Side

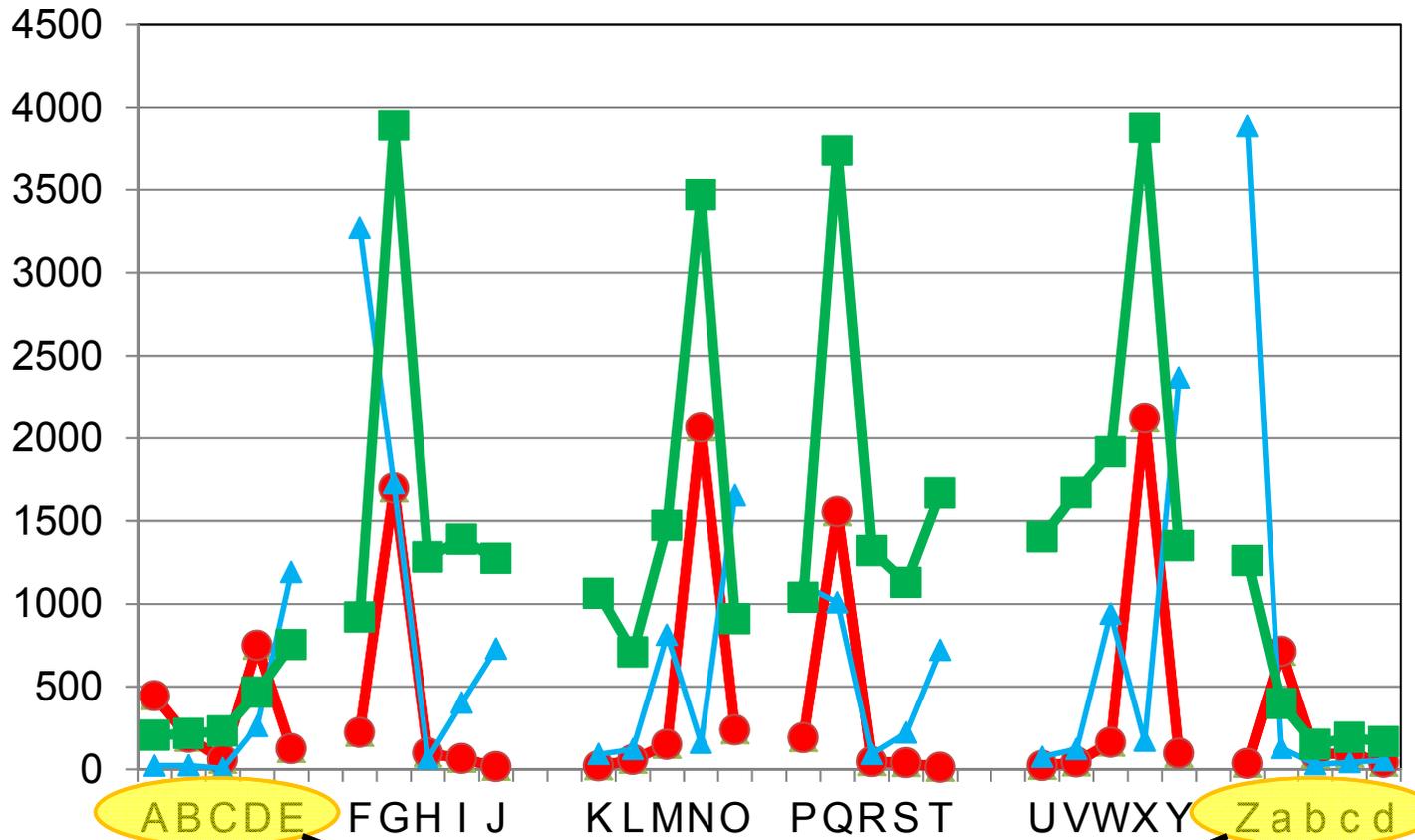
● 観測値

▲ 方法1
壁面方向の
濃度フラックス

■ 方法2
粒子挙動



mg/m²



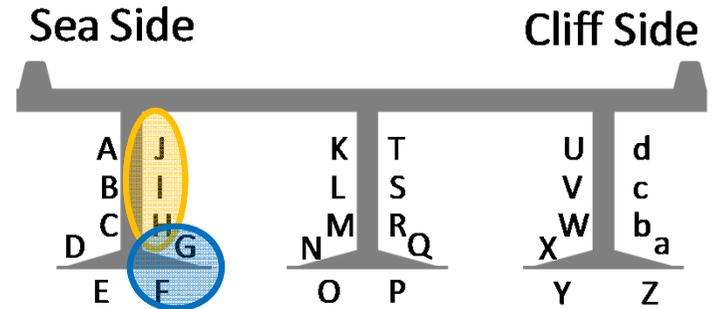
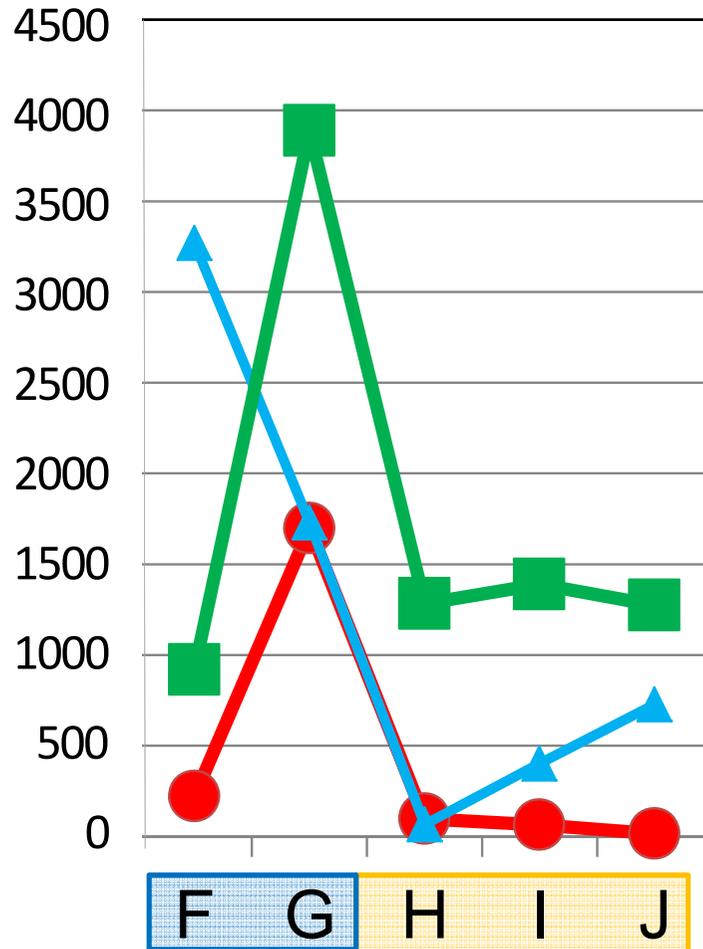
Washing Out Effect

天鳥橋の結果

2011.3.8-2011.4.28

● 観測値
▲ 方法1
壁面方向の
濃度フラックス
■ 方法2
粒子挙動

mg/m²



方法1

付着量を **濃度 × 風速** で定義

- ・オーダーが一致する部位あり
- ・フランジ部上面(G)で卓越する傾向を再現出来ていない

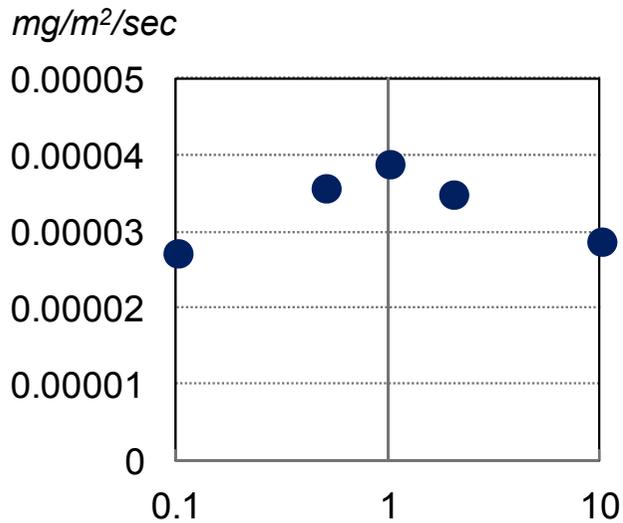
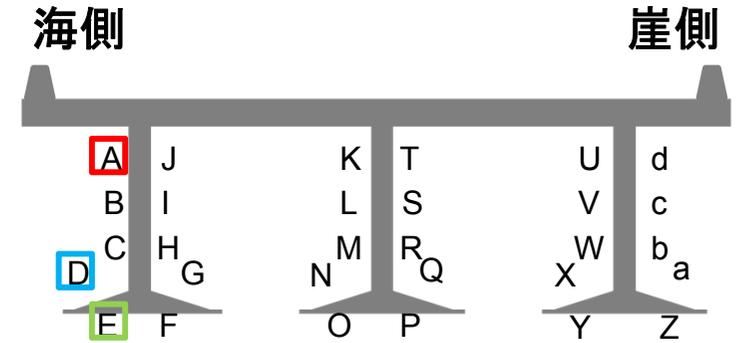
方法2

粒子追跡 を実施

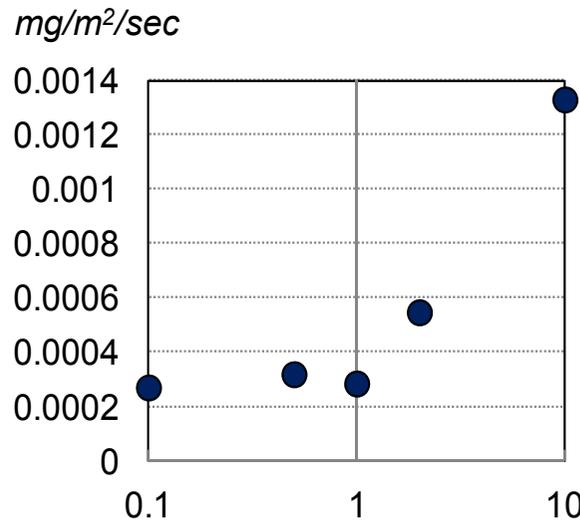
- ・大小の傾向をよく再現
- ・フランジ上部(G) > 下部(F) ⇒ **重力**
- ・全体的に過大評価

粒子追跡法の感度分析(単位体積質量)

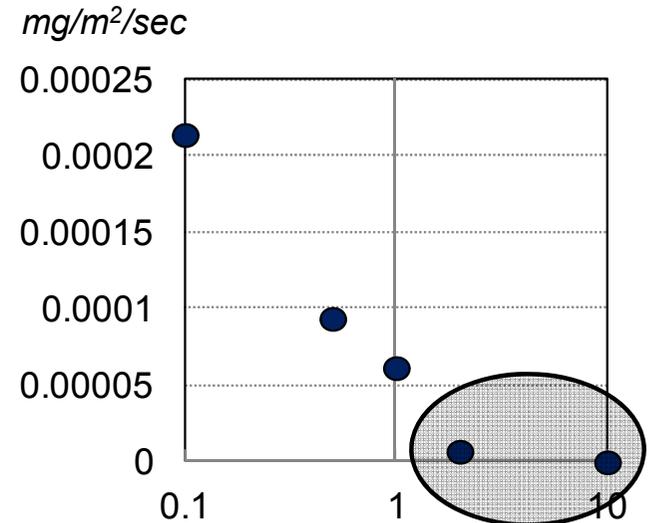
横軸:倍率(基準単位体積質量 1110kg/m^3)
 流入風向: 0°



ウェブ部
海側90cm



フランジ部上面
海側



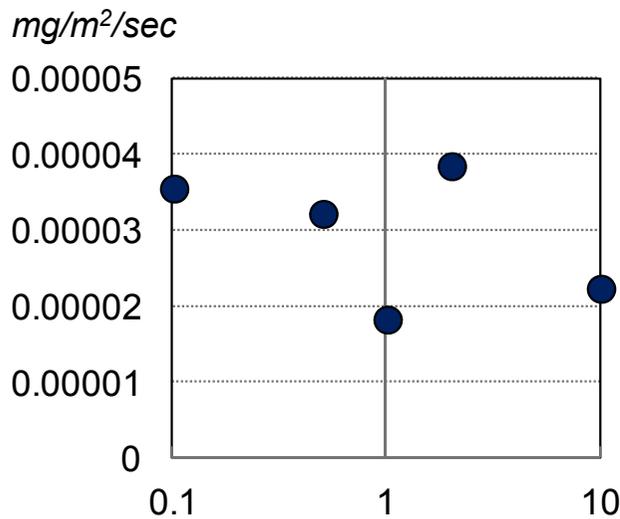
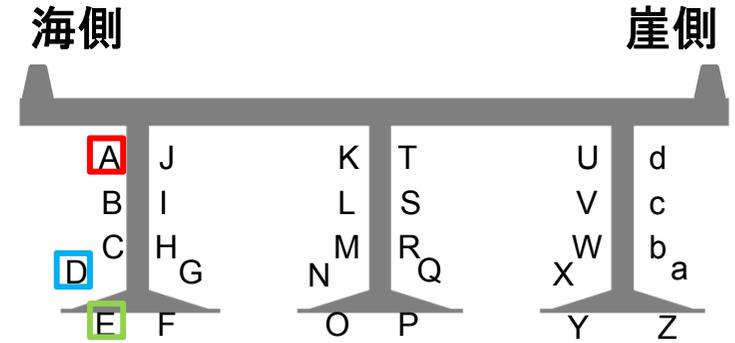
フランジ部下面
海側

鉛直方向下向き面: 付着量が単位体積質量に対して敏感

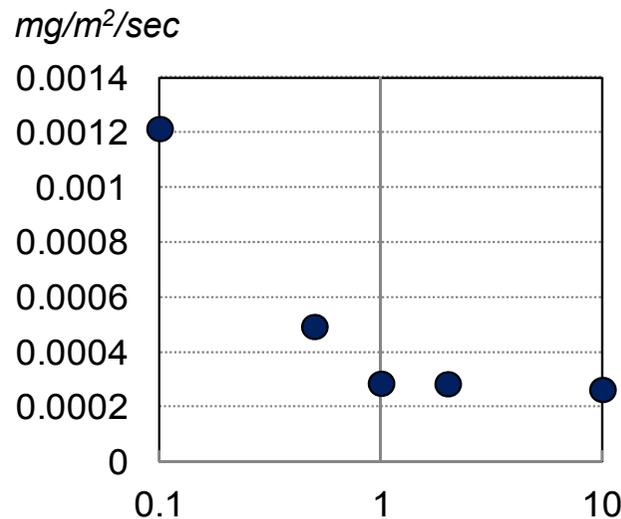
→ **重力の影響**

粒子追跡法の感度分析(粒径)

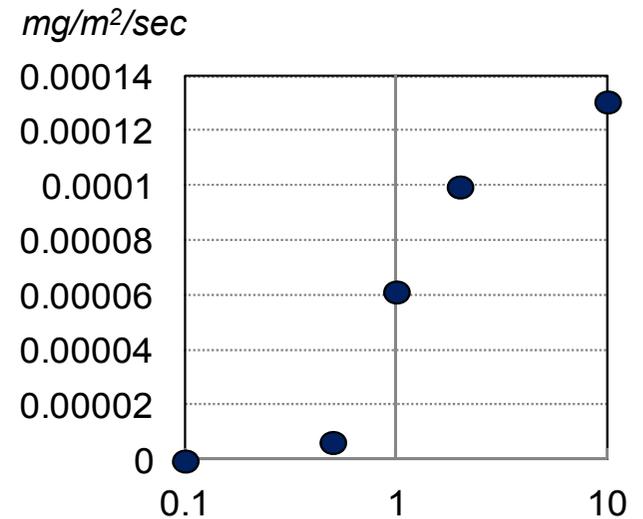
横軸:倍率(基準粒子半径 10 μ m)
 流入風向: 0°



ウェブ部
海側90cm



フランジ部上面
海側



フランジ部下面
海側

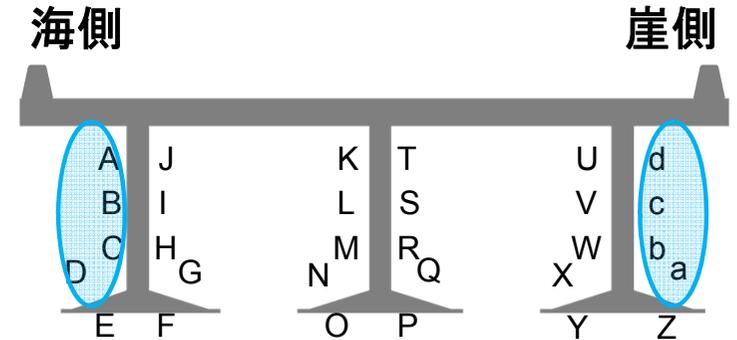
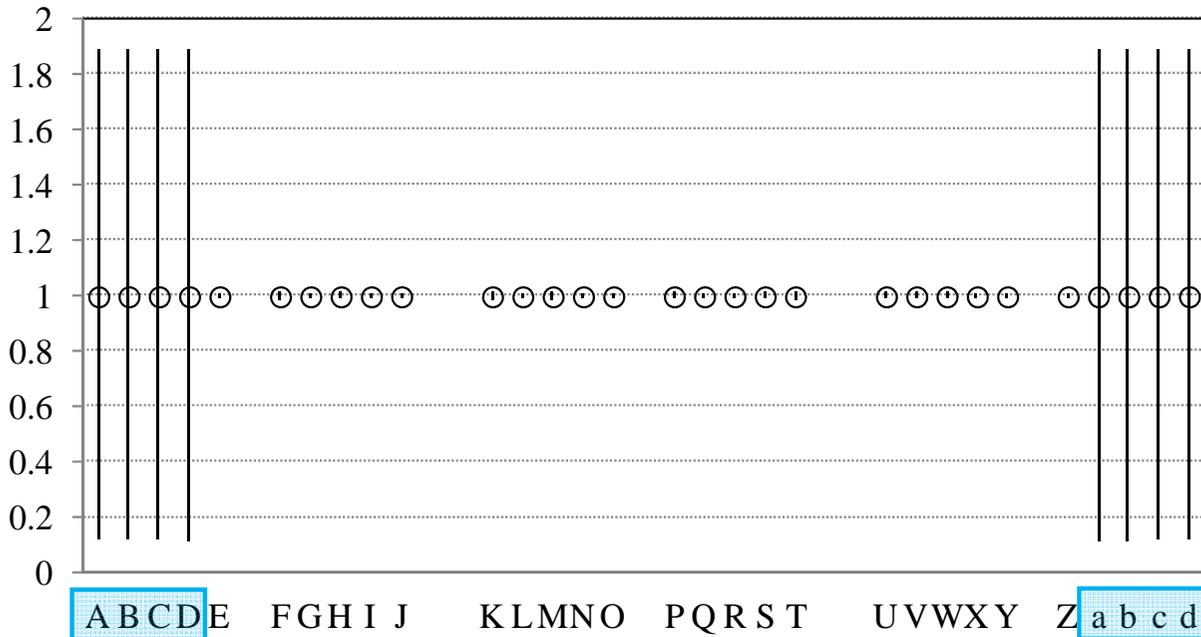
粒径の変化に伴い, 粒子に作用する抵抗力が変化
 → **抵抗力と重力の大小関係**に付着量が依存

気象データと付着量の関係(粒子追跡法)

期間中の気象データをランダムに入れ替えて付着計算を行う(case3)

(平均値±標準偏差)

(平均値)

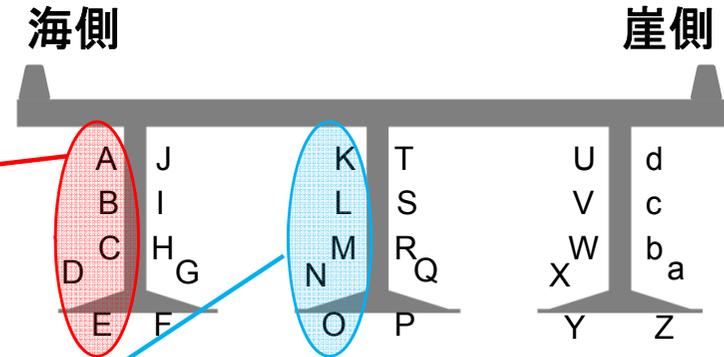
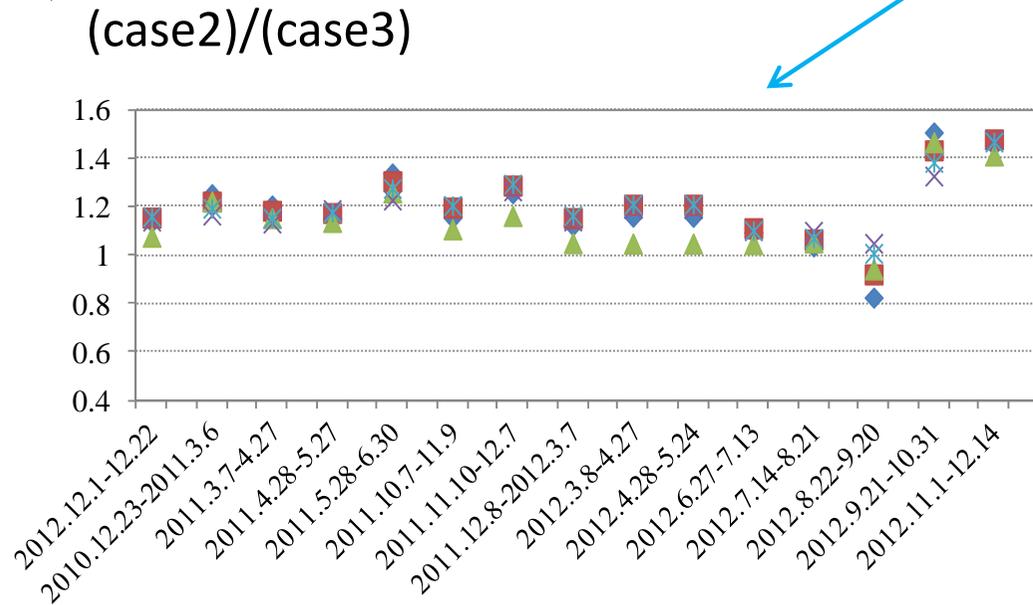
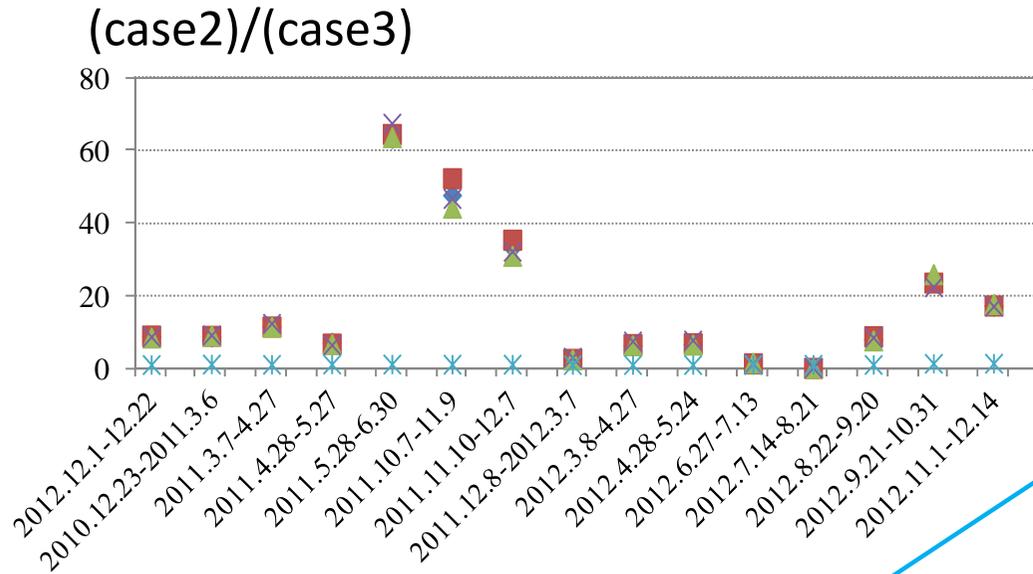


100回の試行のアンサンブル平均

洗浄効果適用面: ばらつきが大きい → 降雨データのばらつき

洗浄効果非適用面: ばらつきが非常に小さい

気象データと付着量の関係(粒子追跡法)



洗浄効果適用面

降雨データが離散することで
case3では洗浄効果の適用頻度が上昇

洗浄効果非適用面

気象データの影響は小さい
→過去に蓄積された気象データから
必要数のデータを抽出し、**任意の時点の**
付着量予測が可能ではないか？

まとめ

- 塩分の付着傾向を精度よく再現できた。
 - 予測手法の妥当性を確認
 - 周辺地形の影響が大
 - 降雨による洗浄効果が大
- 今後の課題
 - 海岸における飛来塩分濃度
 - 塩分濃度の空間的分布
 - 流れ場の時間変化(非定常流れ)
 - 粒子追跡領域の拡張
 - 腐食劣化予測システムの構築

謝 辞

本研究は、京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の白土博通教授を中心としたグループの研究成果である。

本研究の一部は、本州四国連絡高速道路株式会社及び国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所との共同研究によって行われた。ここに記して謝意を表す。