

新都市社会融合創造研究会

平成22年度～24年度

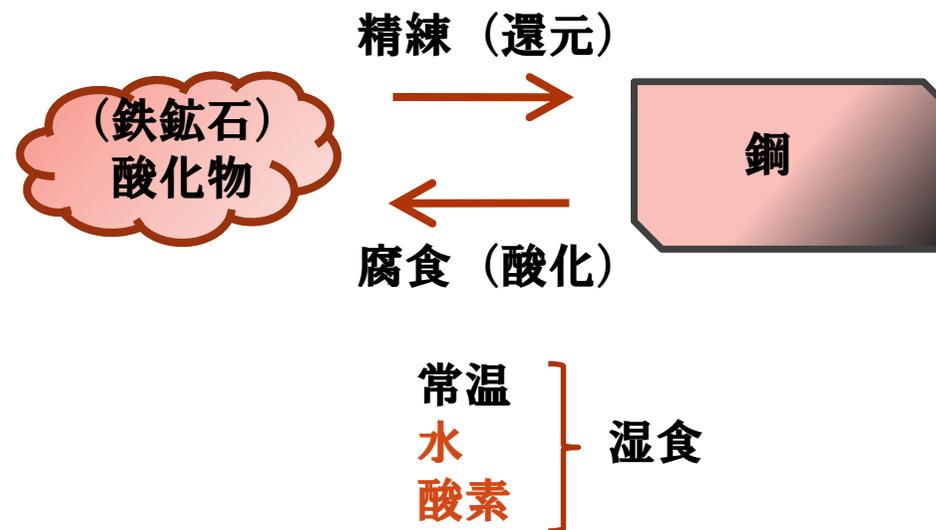
橋梁細部における海塩粒子の付着量推定と  
腐食劣化予測手法の開発

プロジェクトリーダー

京都大学工学研究科社会基盤工学専攻  
白土博通

# 鋼の腐食

- 鋼の腐食は「安定化」



- 全面腐食と局部腐食 ← 腐食速度 大

異種金属接触腐食  
孔食  
すき間腐食

# 腐食因子

## ■水，酸素

■降雨，結露

■気温

■日照

■塩分

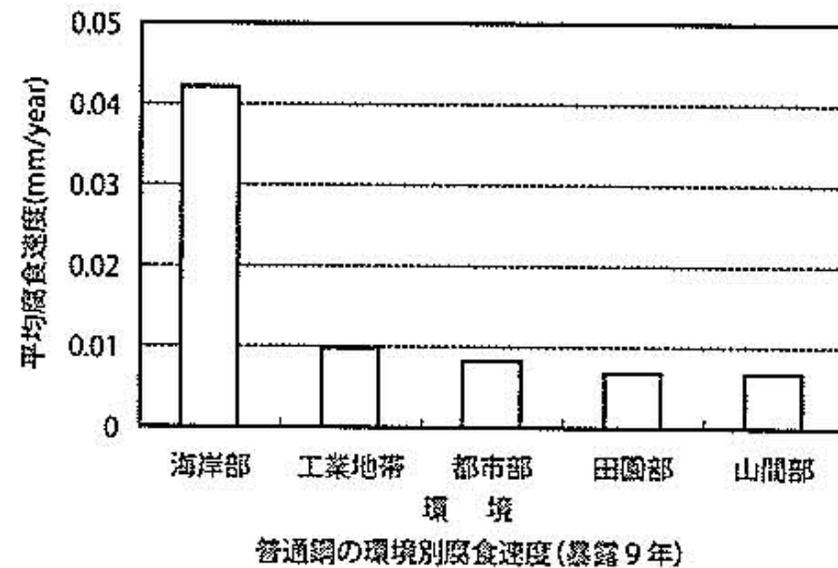
海塩粒子，凍結防止剤

■排気ガス

■ばい煙

■火山性ガス

■塵あい（埃）

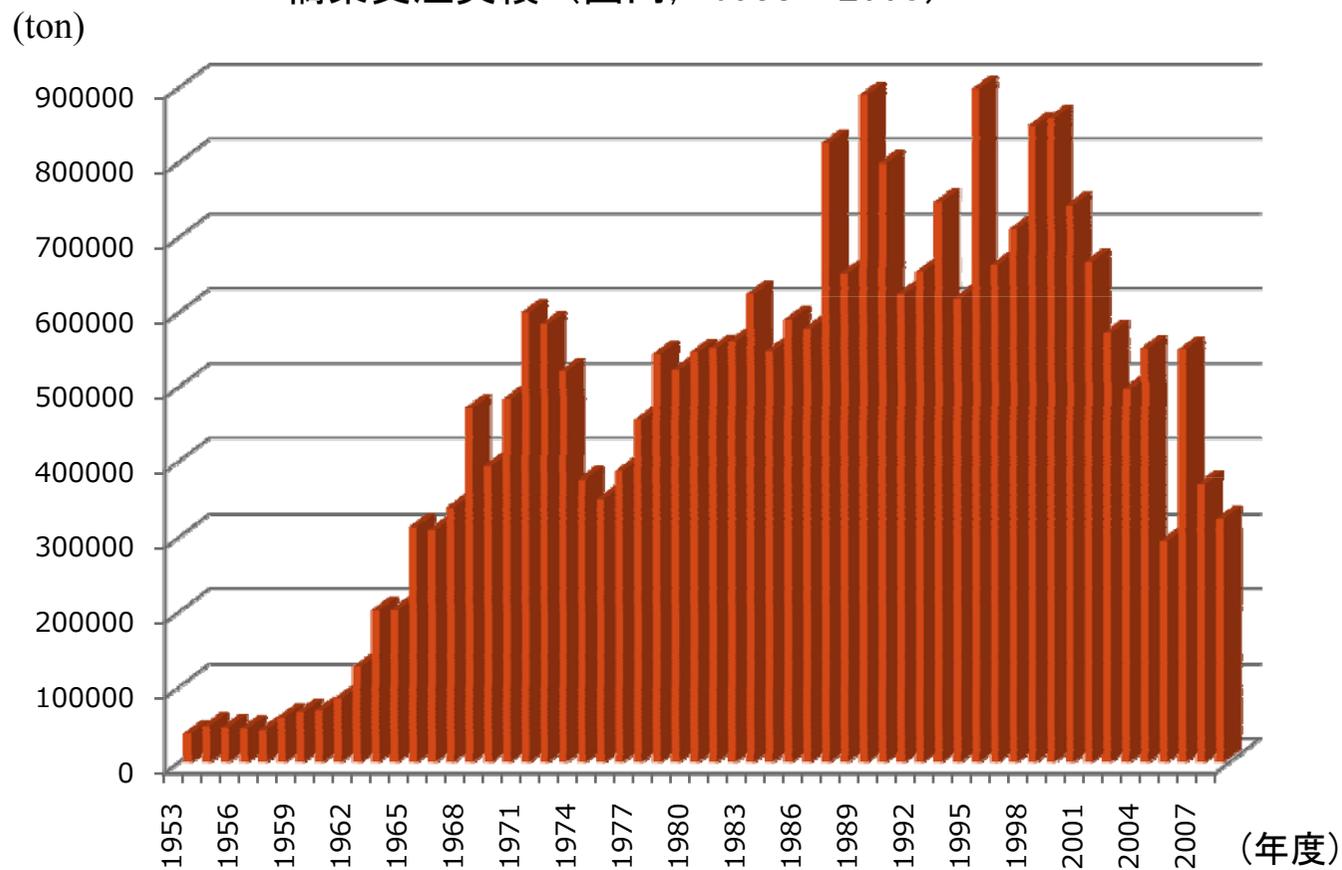


図一 I.2.5 環境毎の鋼材腐食量<sup>5)</sup>

表－1.2.2 腐食の因子と要因

腐食因子	水, 酸素	
腐食促進因子	日照, 気温, 塩分 自動車の排気ガス, 工場からの排出物, 火山性ガス・・・局地的 酸性雨・・・近年影響が懸念	
地理的・地形的要因	塩	風向, 風速, 風道, 遮蔽物, 離岸距離 凍結防止剤の散布
	水	閉塞的な空間（都市部では建築物, 山間田園部では樹木等 に囲まれ湿気が滞留）
	その他（局地的 な要因）	重交通路線（建築物等に囲まれ腐食を促進する物質が滞留） 工業地帯 火山地帯 飛砂
構造的要因	塩	降雨による洗浄作用 凍結防止剤散布路線の並列橋 " の漏水（伸縮装置, 排水装置, 床版ひび割れ部等）
	水	漏水（伸縮装置, 排水装置, 床版ひび割れ部等） 滞水（排水勾配, 水抜き孔, スカラップ等） けた端部等の閉塞部 塵あい（埃）（柵周り, トラスやアーチの格点部等） 桁下空間が少ない

### 橋梁受注実績（国内，1953～2008）



(社) 日本橋梁建設協会 鋼橋の統計データ  
<http://www.jasbc.or.jp/statistics/statistics.php>

## 研究背景（1）

- 建設の時代⇒**維持管理**の時代  
既設橋の**延命化**，新橋の**経済的**設計
- **腐食・塩害**対策
  - 鋼橋：鋼材表面の**腐食**
  - コンクリート橋：内部浸透による**鉄筋腐食**
  - 飛来塩分量**の的確（場所・量）な予測

⇒ 予防保全



# 耐風安定化対策のライフサイクル



## 門崎高架橋

山側フラップから腐食片落下（2005年9月）

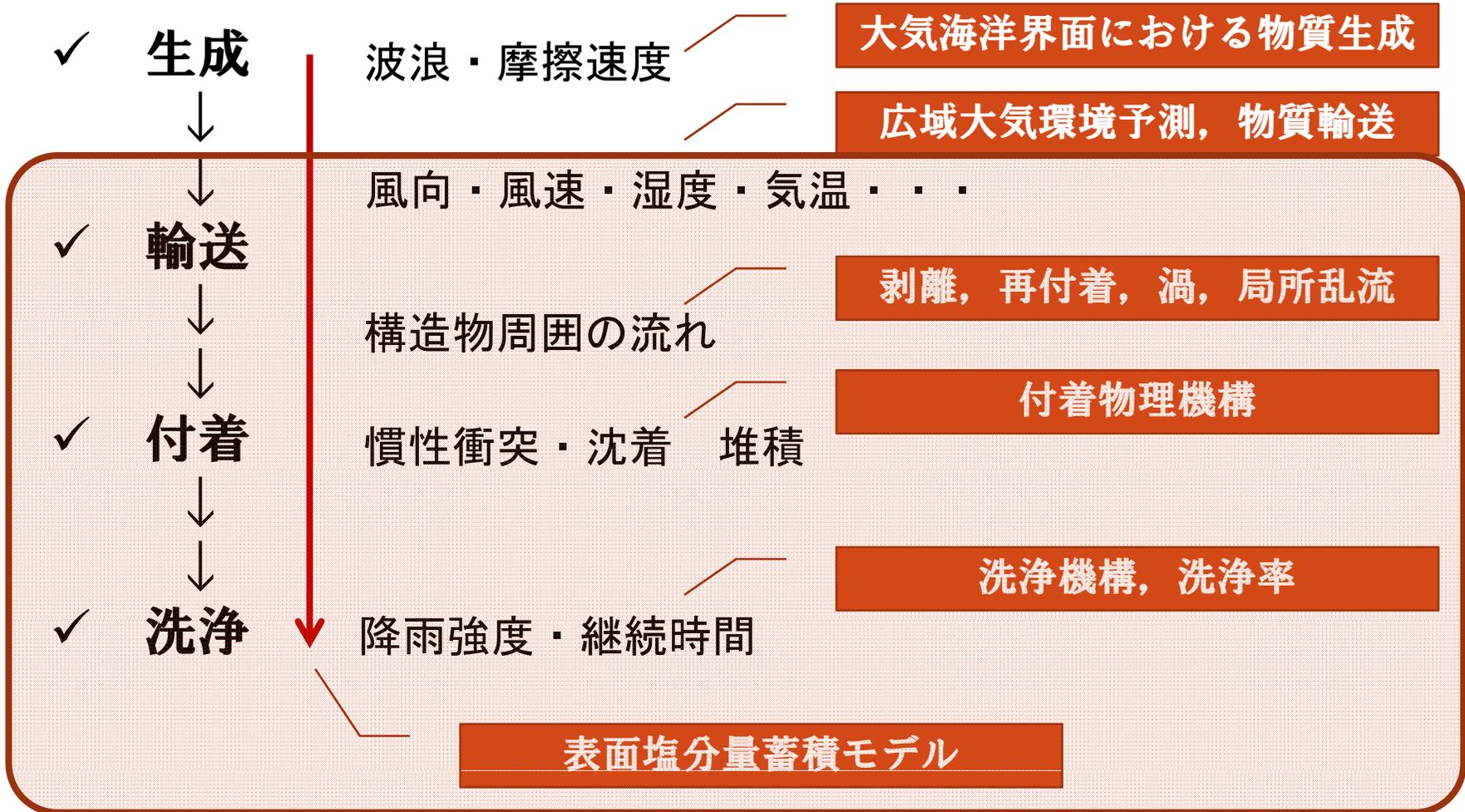
...高架橋の山側に取り付けてある付属物から落下したもので、9月6日～7日に襲来した台風14号の強風（当該地点での平均40m/s、瞬間[推定]60m/s、通行止め16時間）により落下したものと推定...

除去（2005年11月）

（本四高速2005年プレスリリースより引用）

<http://www.jb-honshi.co.jp/press/051114press-1.html>

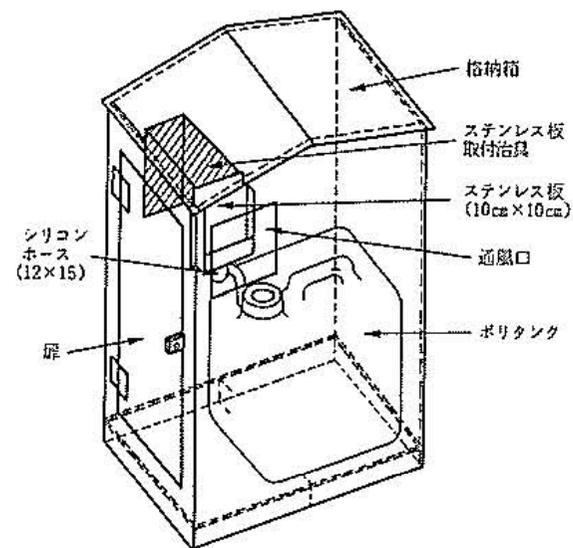
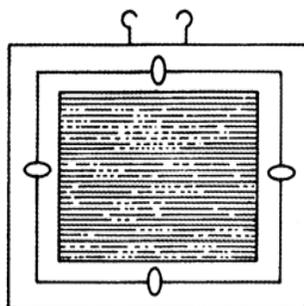
# 海塩粒子の生成から付着まで



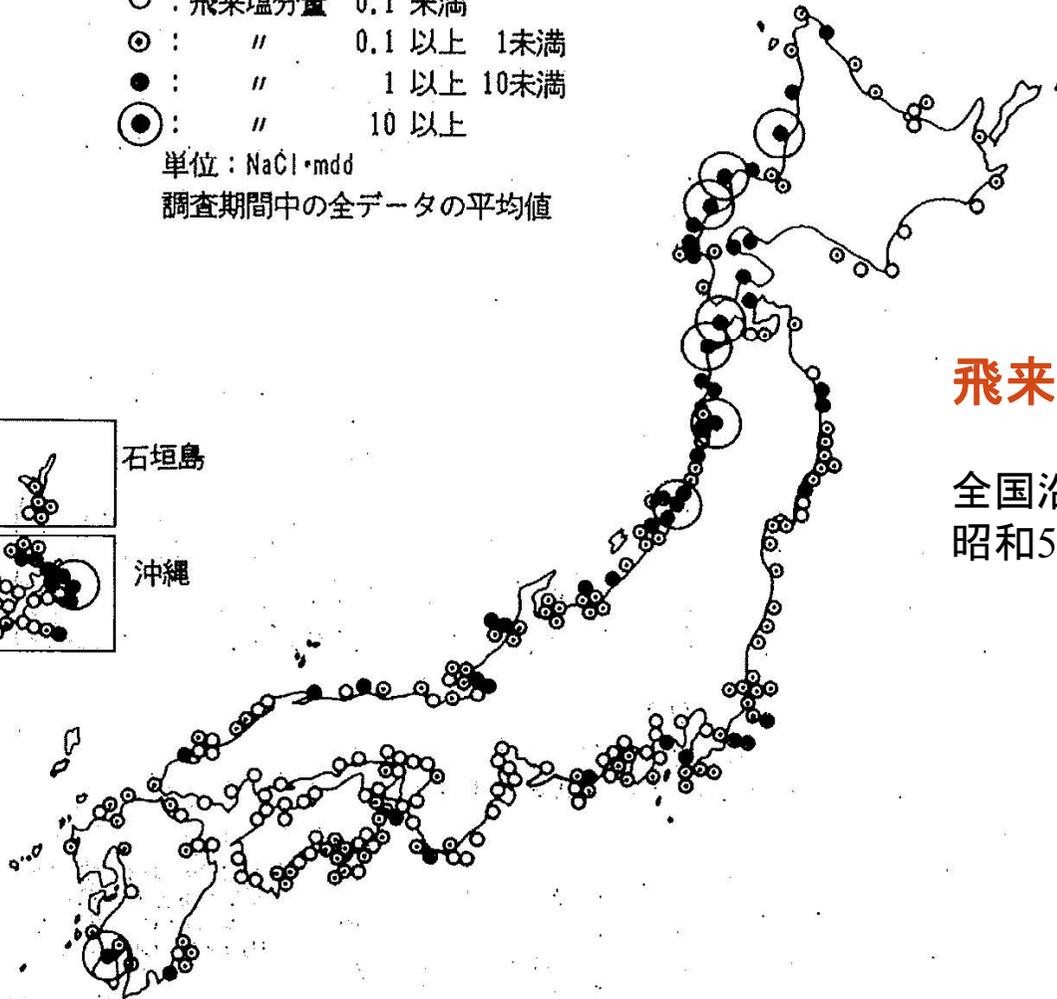
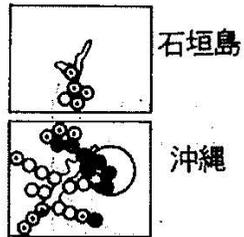


## 飛来塩分量の評価

- 土研法
- ガーゼ法
- ウェットキャンドル法
- . . .



- 凡 例
- : 飛来塩分量 0.1 未満
  - ⊙ : " 0.1 以上 1未満
  - : " 1 以上 10未満
  - ⊙ (with dot) : " 10 以上
- 単位 : NaCl・mdd  
 調査期間中の全データの平均値



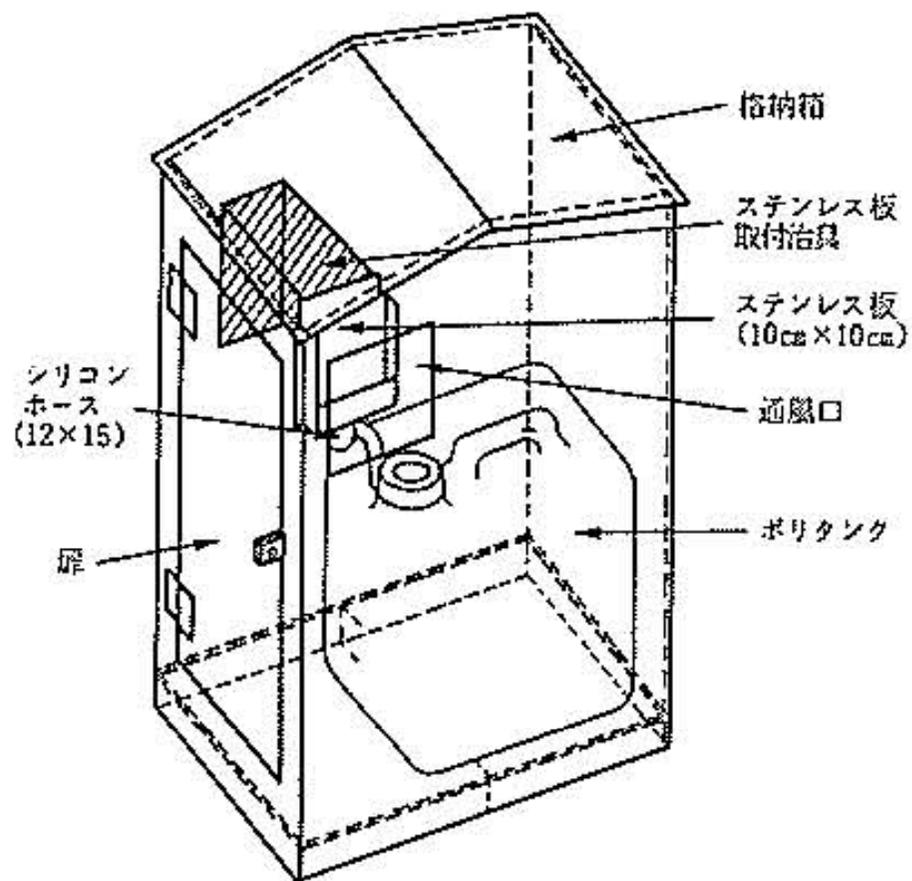
## 飛来塩分量全国調査

全国沿岸部266地点  
 昭和59年12月から3年間

建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室，土木研究所資料  
 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－，平成5年3月

図-2.1 飛来塩分量の全国分布

# 海塩粒子の捕集法 --- mdd (mg/100cm<sup>2</sup>/day)



付図一Ⅲ.3.1 土研式塩分捕集器

社)日本道路協会 鋼道路橋塗装・防食便覧,  
平成17年12月

# 海塩粒子と腐食量（耐候性鋼材）

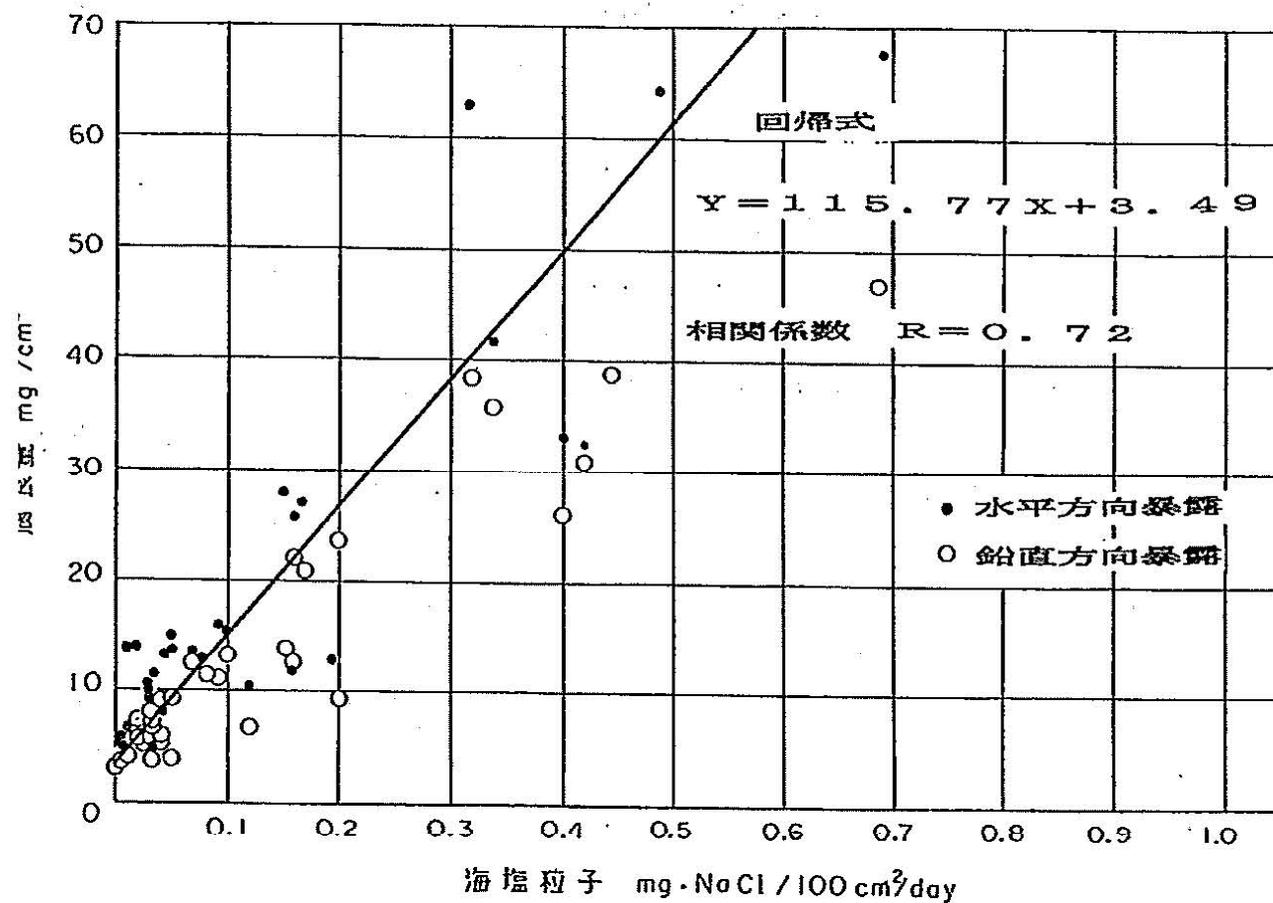


図-5 NaClと腐食量の関係

建設省土木研究所地質化学部化学研究室・構造橋梁部橋梁研究室, 土木研究所資料 飛来塩分量全国調査(I), 昭和60年3月

# 塩分供給量（コンクリート表面塩分量）と飛来塩分量

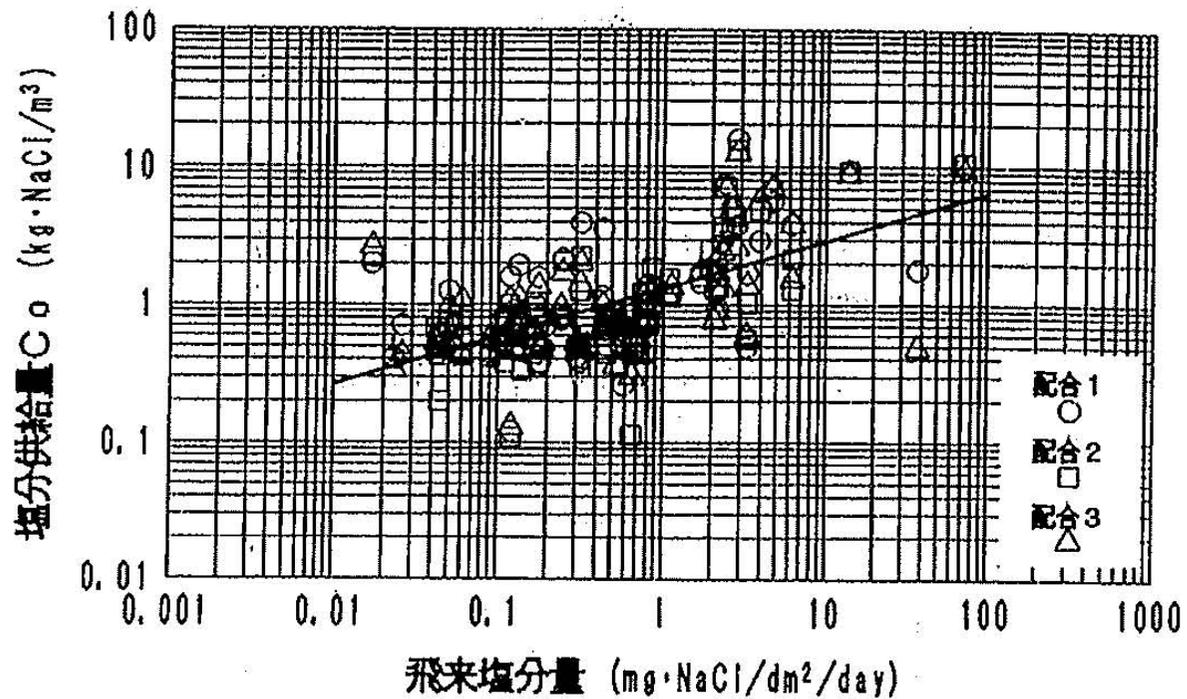
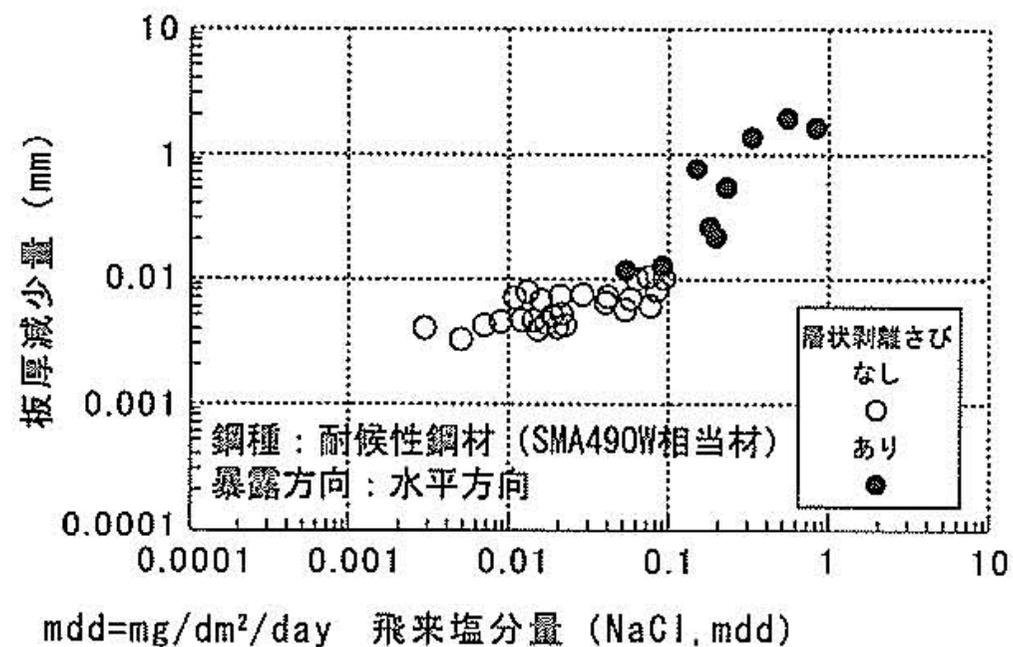


図-3.4 塩分供給量  $C_0$  と飛来塩分量の関係

建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室，土木研究所資料  
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－，平成5年3月

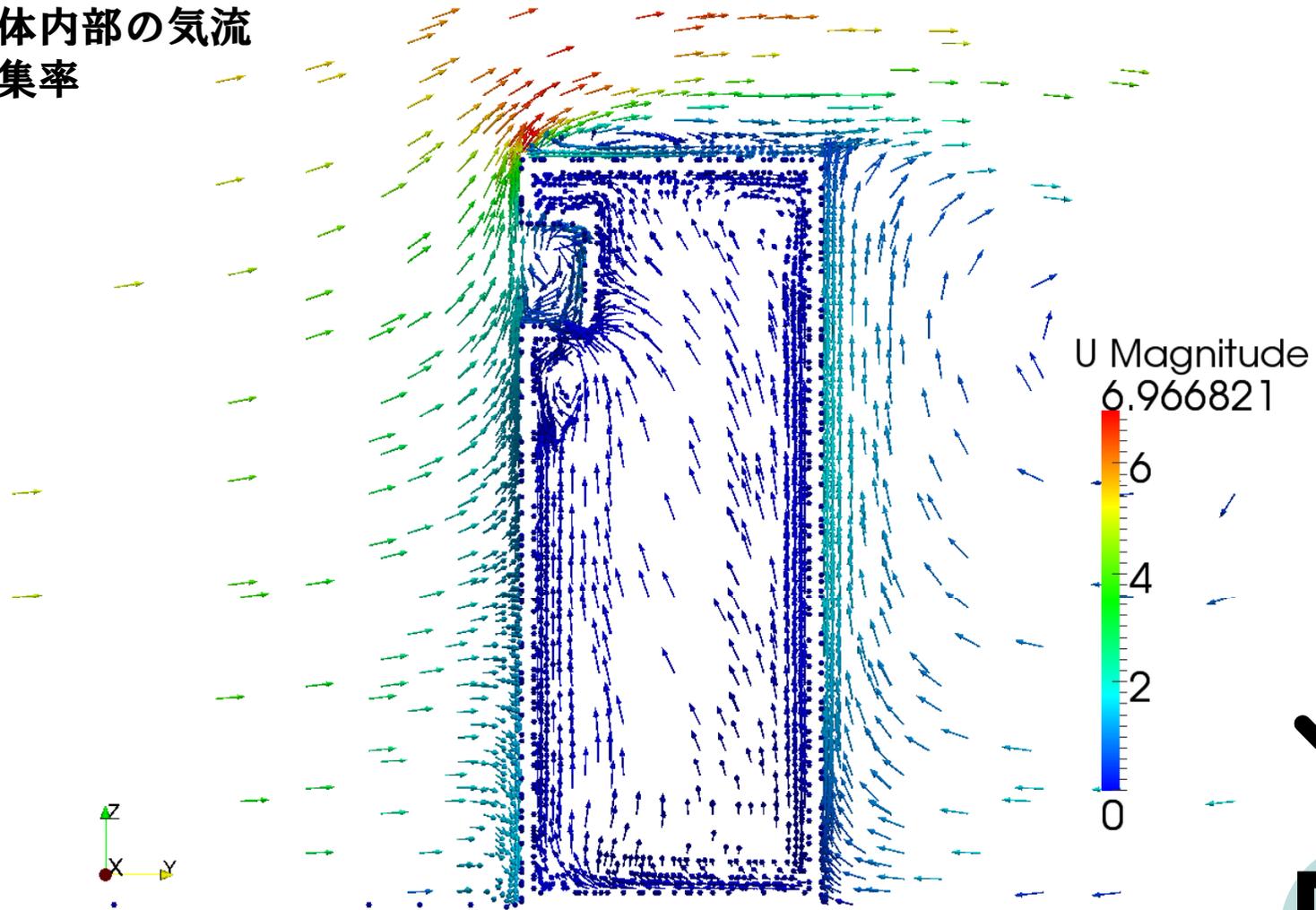
## 海塩粒子と腐食量（耐候性鋼材）



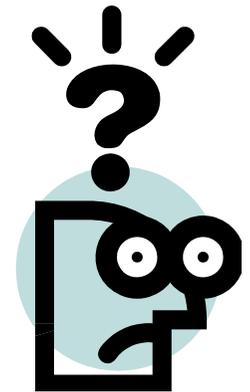
図一Ⅲ.2.6 暴露9年目の片面あたり平均板厚減少量と飛来塩分量との関係<sup>2)</sup>  
(けた内側環境での鋼材暴露試験と飛来塩分量測定)

# 飛来塩分量の絶対値は計測不可能??

- 箱体が気流をかき乱
- 風向の影響
- 箱体内部の気流
- 捕集率



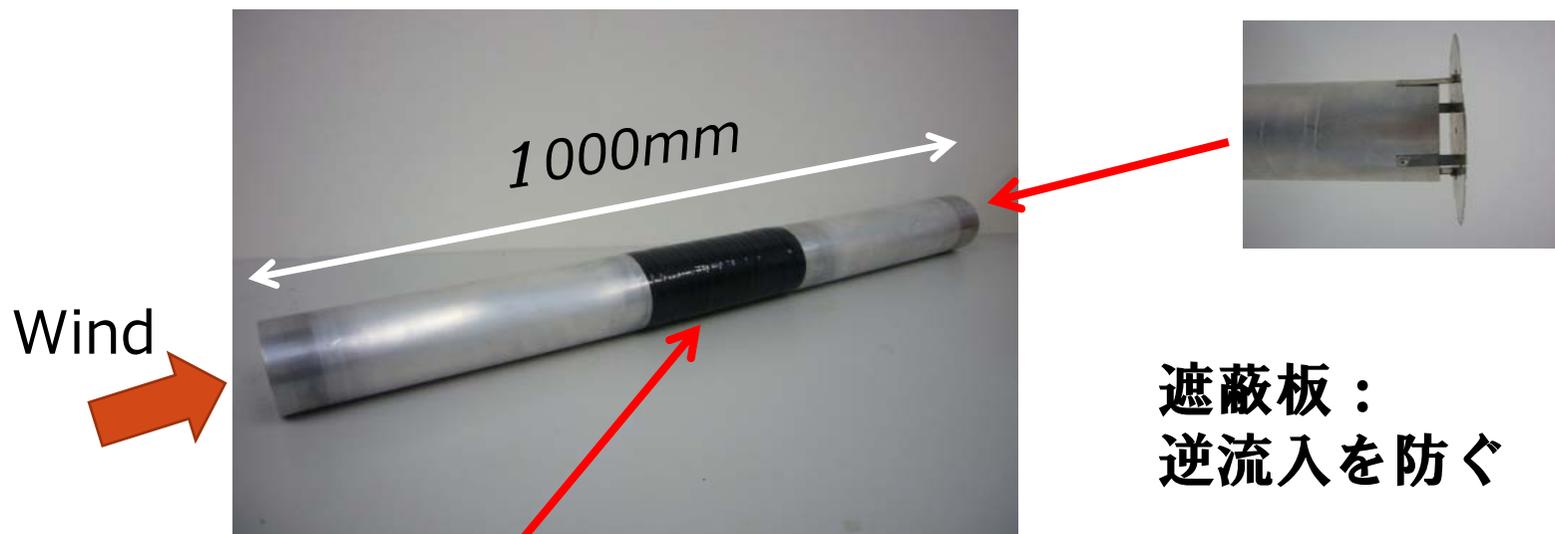
箱体近傍の流れ





## 円筒型飛来塩分捕集器

外径：100mm 内径：96mm 長さ：1000mm



遮蔽板：  
逆流入を防ぐ

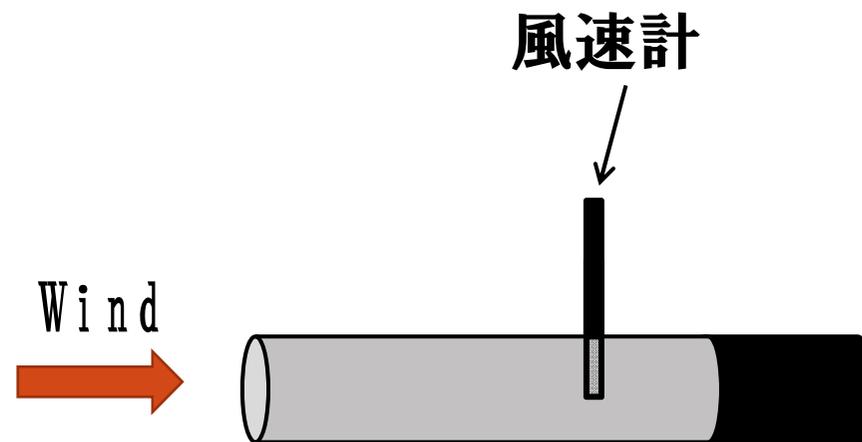
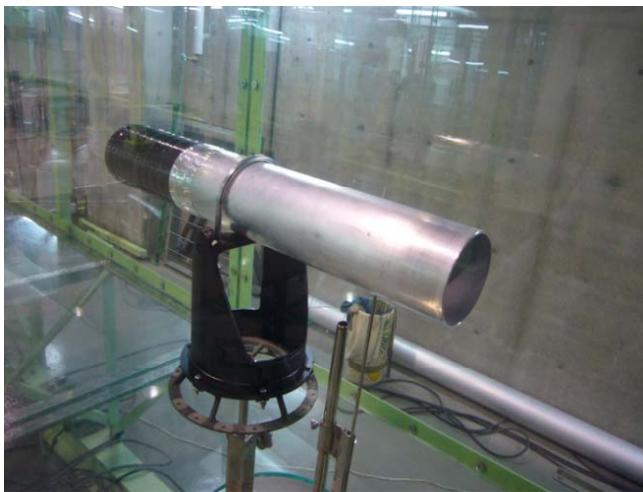


- ・リング10層（厚さ：20mm）
- ・リングにガーゼを装着

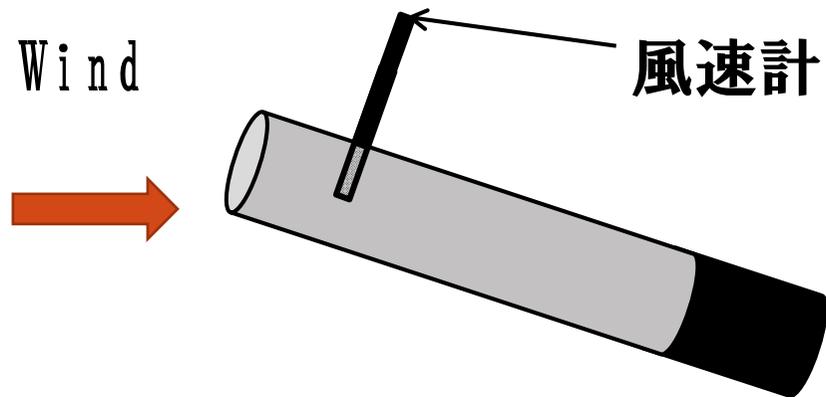
# 管内風速測定実験

接近風速と管内風速の相関を計測

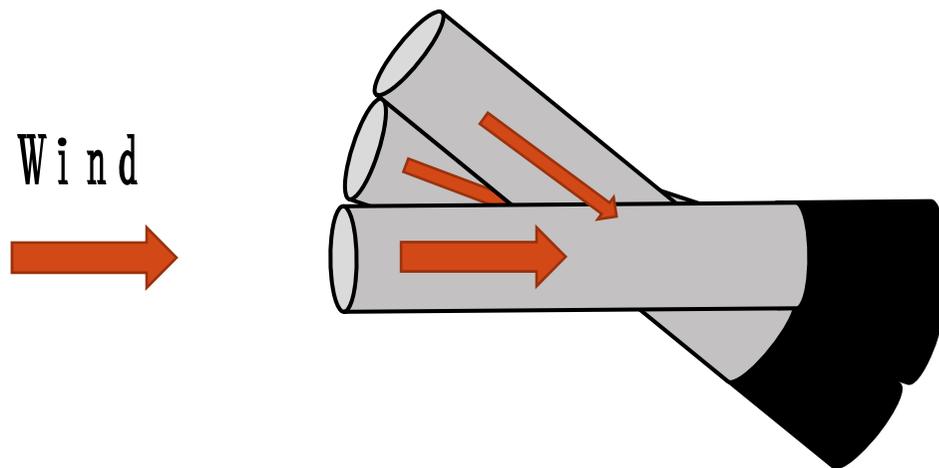
→ 管内流入量 → 飛来塩分濃度の定量的評価



# 管内風速測定実験



\*角度を $0^{\circ}$  ~  $55^{\circ}$   
5° ピッチで変更



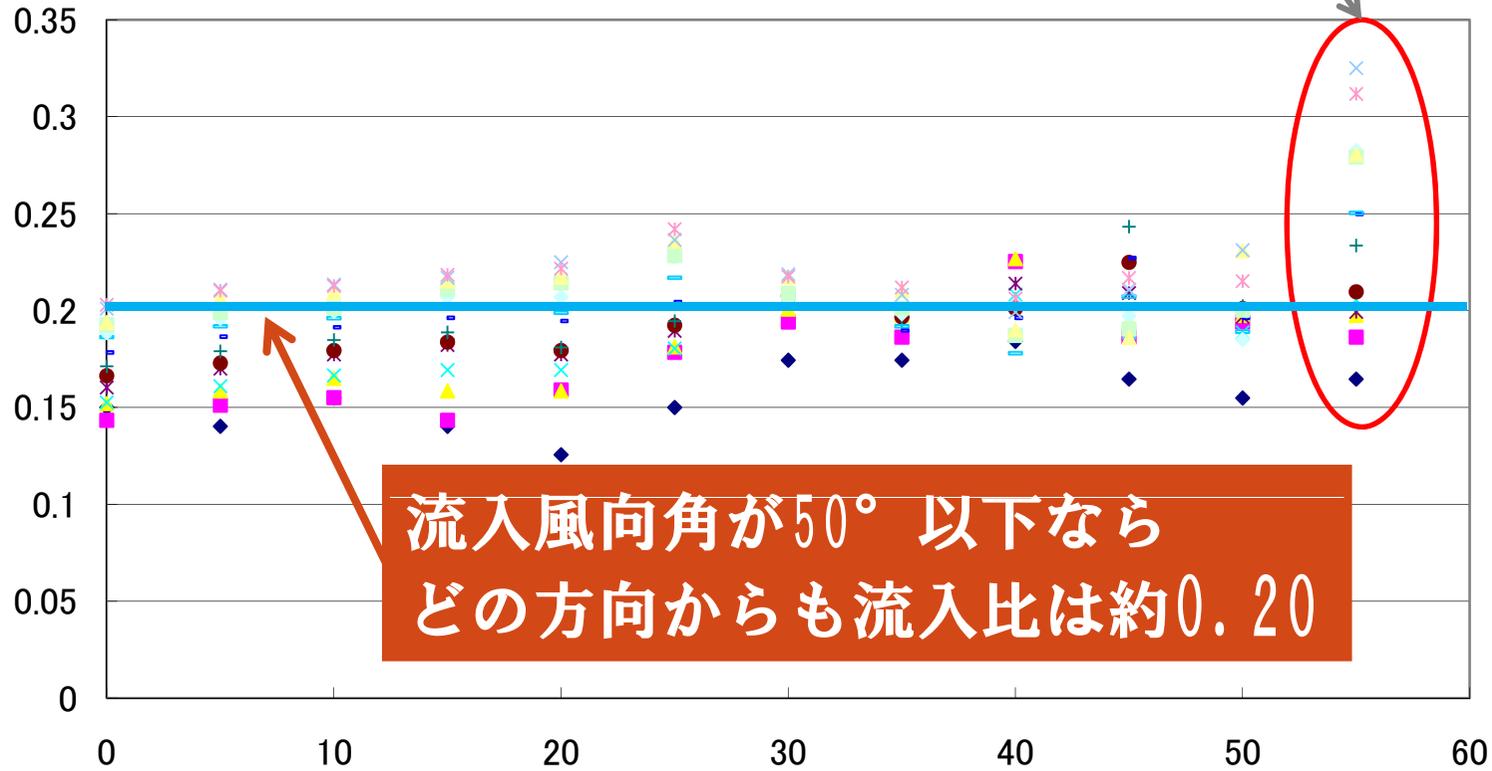
# 管内風速測定実験

強い乱流状態

風洞風速

- ◆ 2m/s
- 2.5m/s
- ▲ 3m/s
- × 3.5m/s
- × 4m/s
- 4.5m/s
- + 5m/s
- 6m/s
- 7m/s
- ◇ 8m/s
- 9m/s
- ▲ 10m/s
- × 11m/s
- × 12m/s

管内風速 / 風洞風速

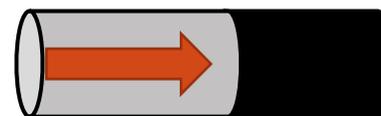
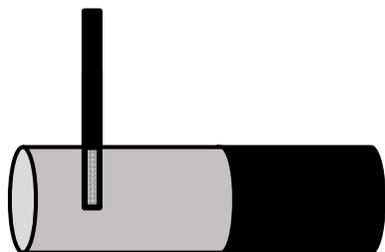


流入風向角が $50^\circ$  以下なら  
どの方向からも流入比は約0.20

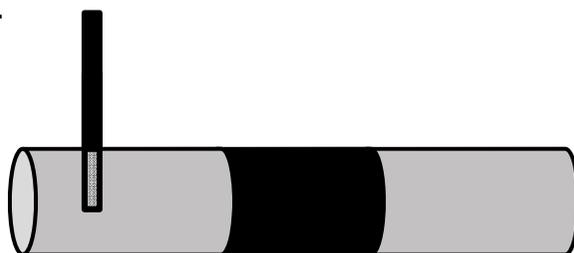
相対角度 ( $^\circ$ )

# 管内風速測定実験

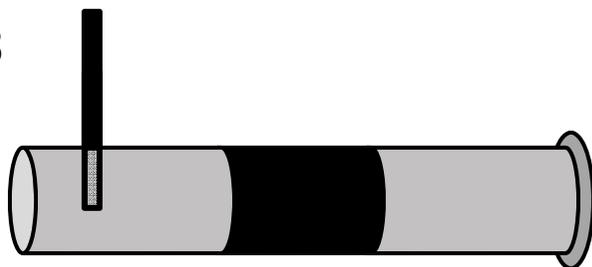
模型1



模型2



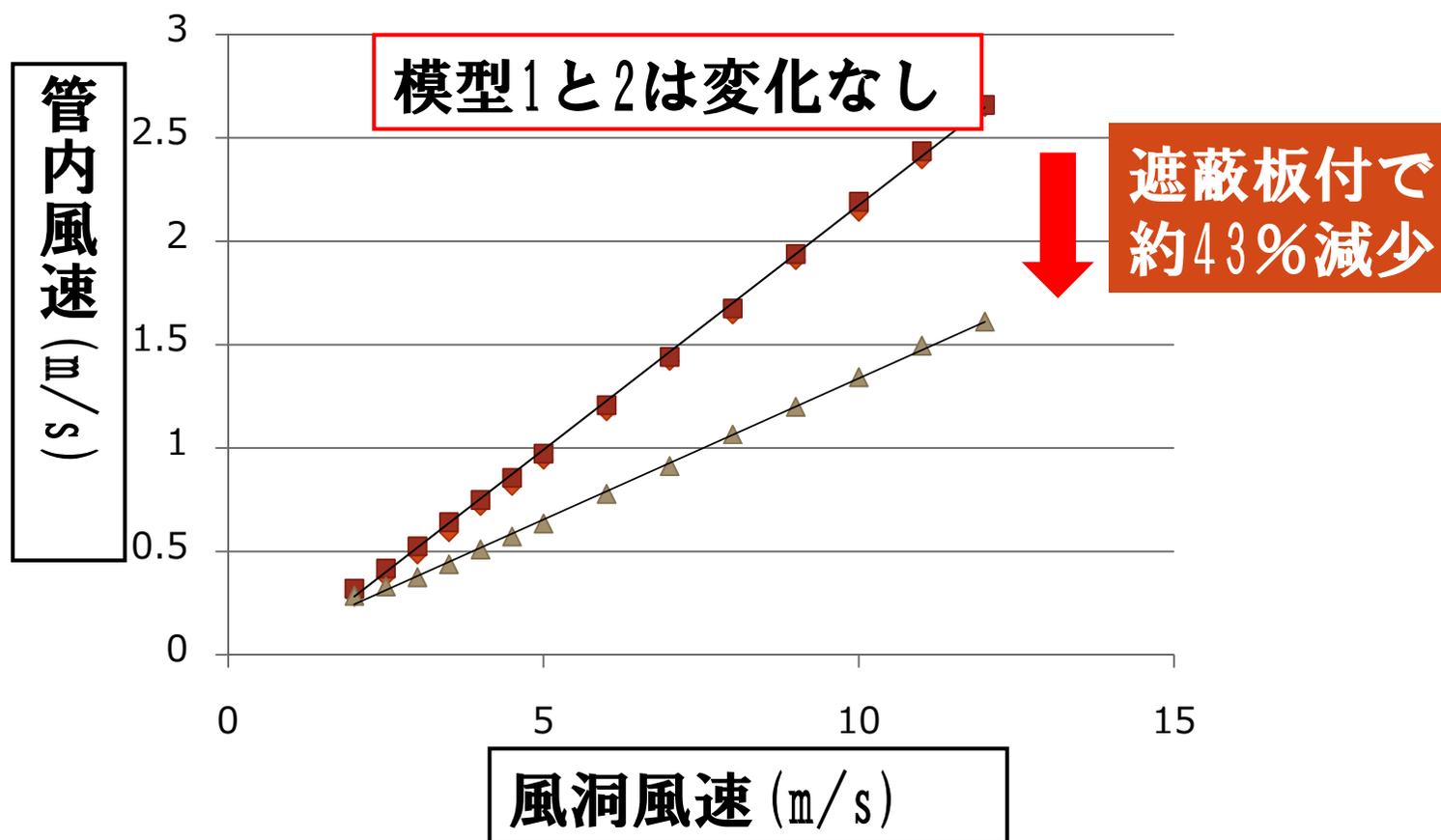
模型3



形状を変更

# 管内風速測定実験

- ◆ 模型1:全長600mm
- 模型2:全長1000mm
- ▲ 模型3:全長1000mm+遮蔽板



# 現地観測



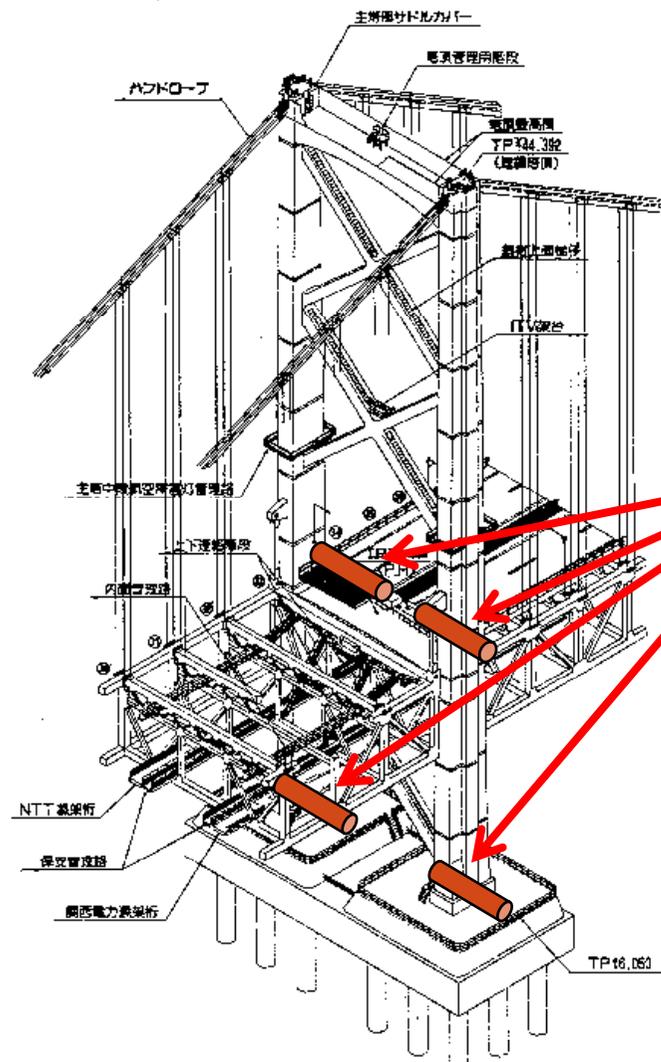
余部橋梁 (2009.10-2009.12)



大鳴門橋 (2009.10-)



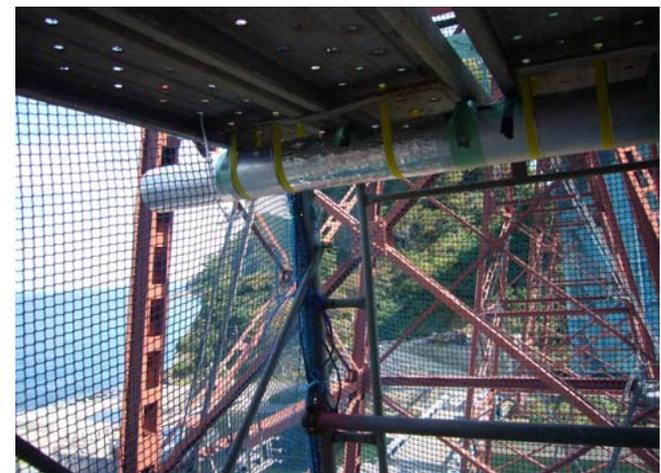
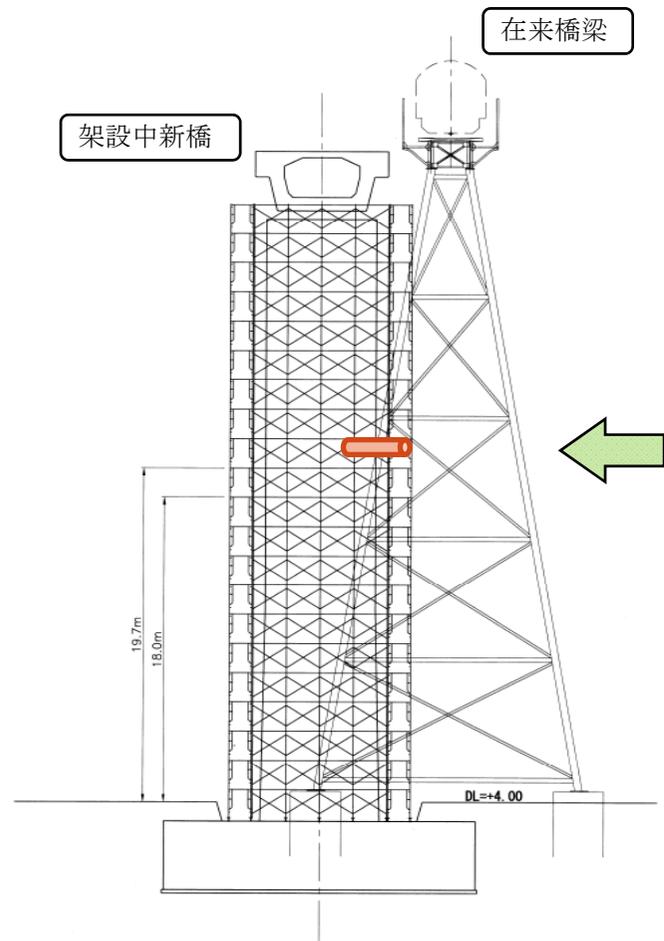
# 大鳴門橋 (2009.10-)



北塔，南塔の  
基礎部，管理用通路  
に計4か所設置



# 余部橋梁 (2009.10-2009.12)

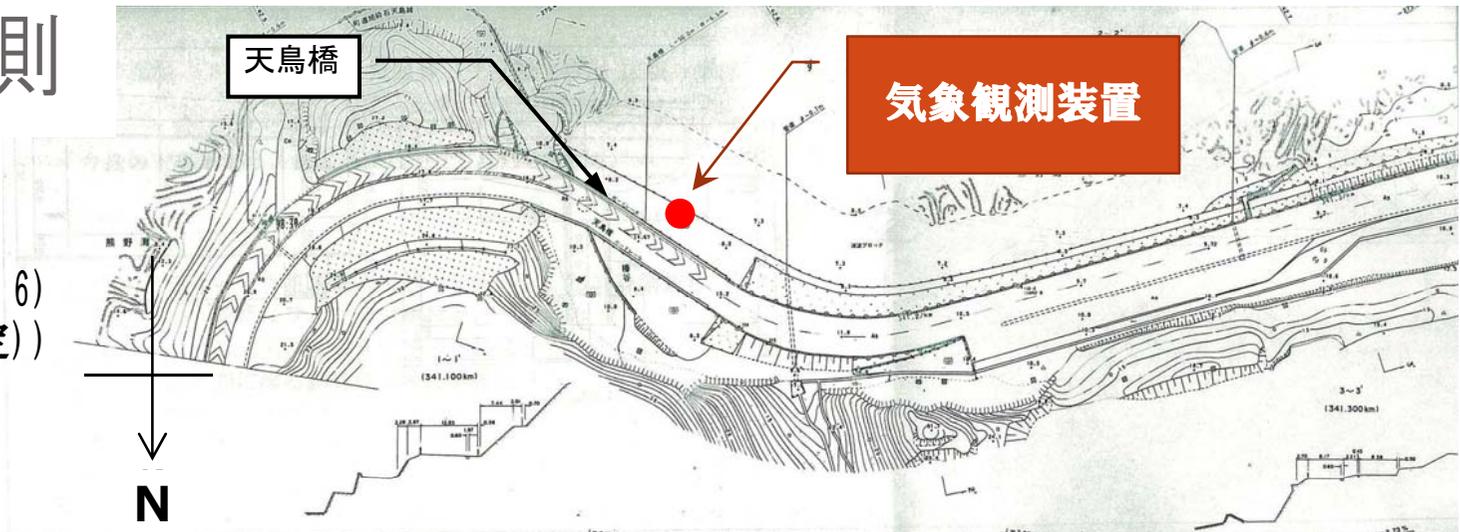


# 現地観測

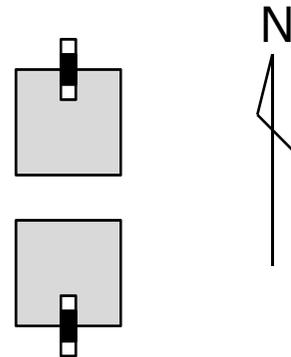
## 天鳥橋

(2010.12-2011.6)

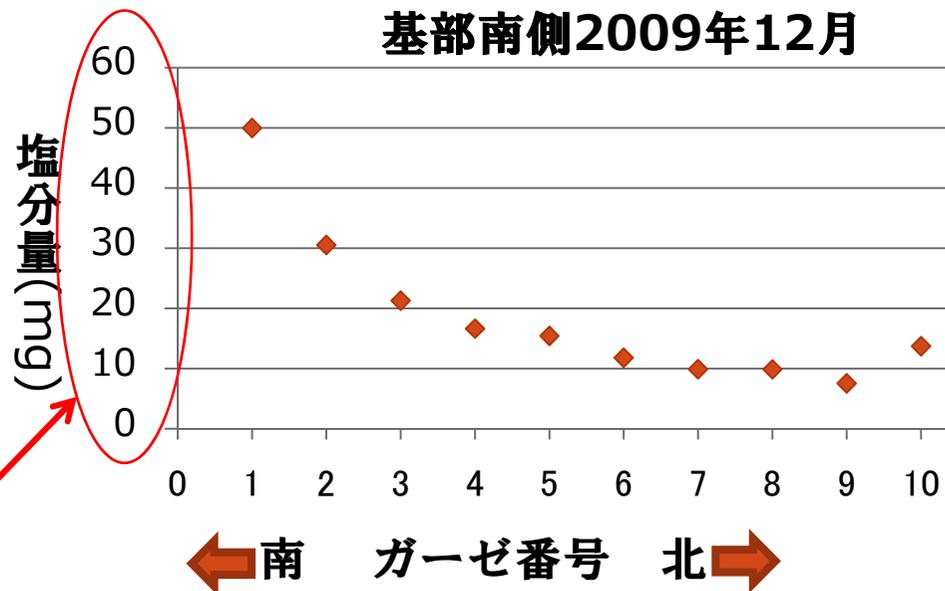
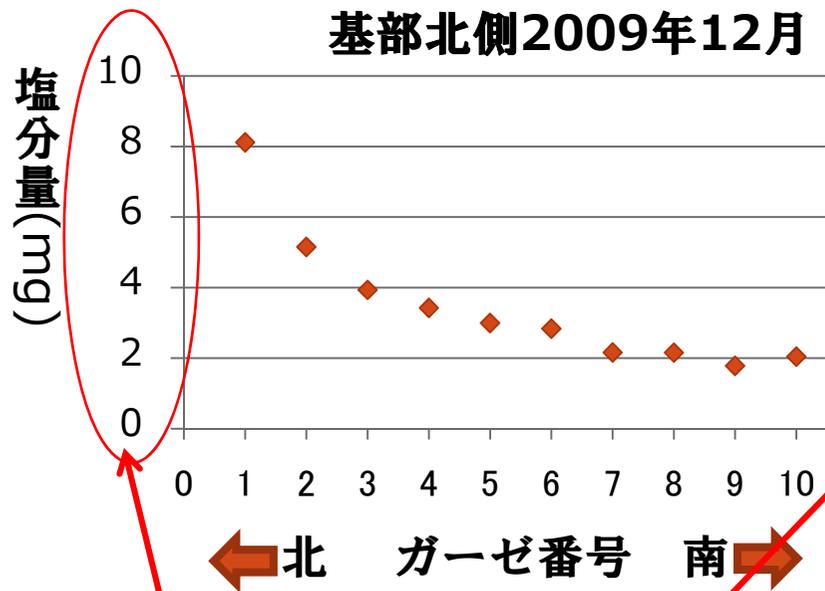
(2011.10-(予定))



# 円筒型飛来塩分捕集器



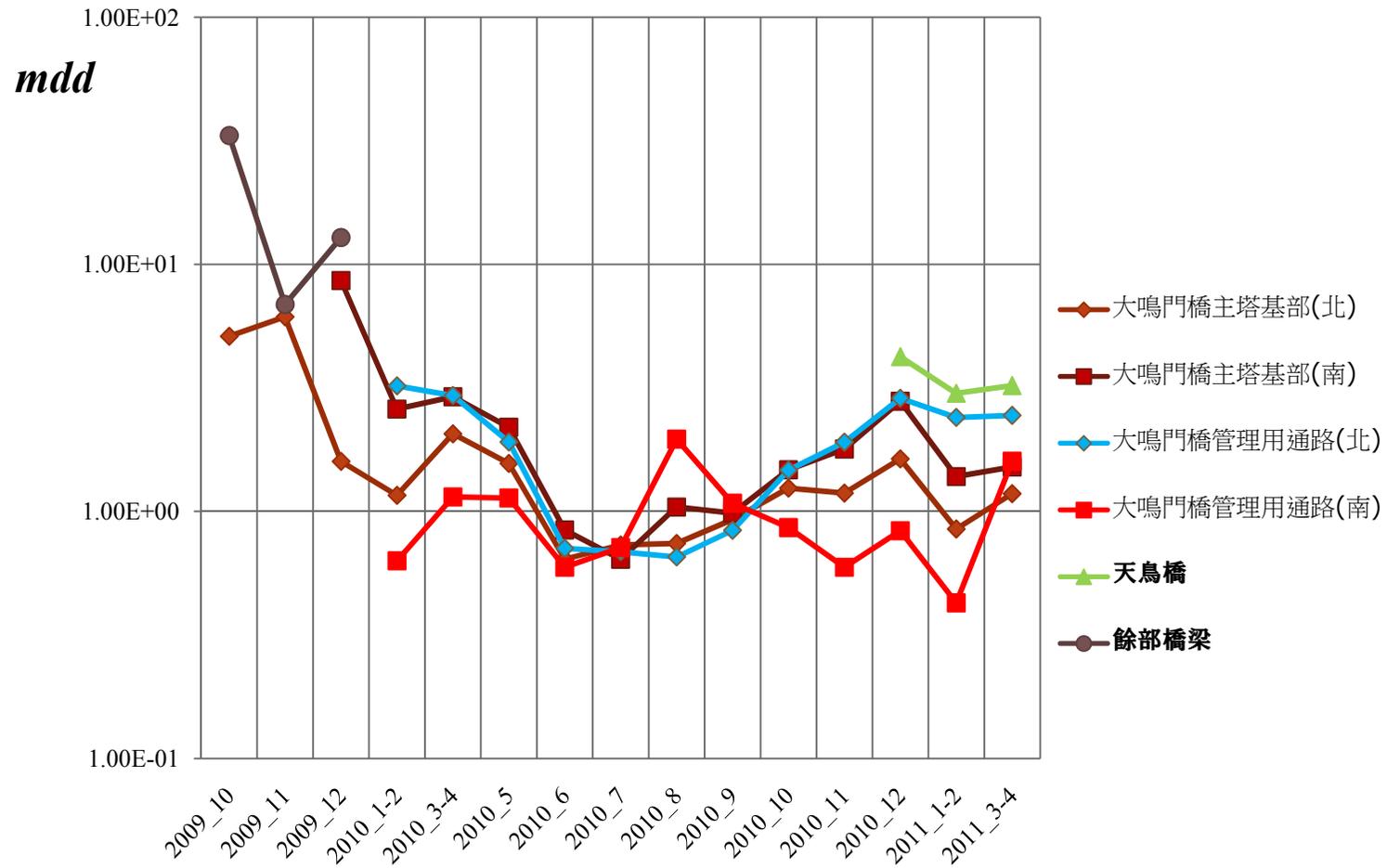
-----大鳴門橋 (遮蔽板あり) -----



南側捕集器の塩分量が多い

風向により流入量に大きな違い

# 現地観測(mdd)



# 現地観測

—土研法と円筒型捕集器の比較—

## \*大鳴門橋

橋脚北	土研法	円筒型捕集器
2009年9月	4.43	
10月	15.46	7.87
11月	24.17	8.51
12月	6.82	3.14
2010年1~2月		1.71

橋脚南	土研法	円筒型捕集器
9月	3.52	
10月	65.34	
11月	30.37	
12月	22.16	34.23
1~2月		4.74

移動用通路北	土研法	円筒型捕集器
9月	1.63	
10月	2.50	
11月	2.00	
12月	1.32	
1~2月		4.10

移動用通路南	土研法	円筒型捕集器
9月	1.27	
10月	5.25	
11月	2.71	
12月	0.71	
1~2月		1.32

## \*余部橋梁

計測月	円筒型捕集器
2009年9月	
10月	
11月	37.34
12月	9.18
1~2月	14.95

単位:mdd

**\*土研法・円筒型捕集器を比較して、オーダー的に大きな差はない**

## 大気中塩分濃度 $c$ [mg/m<sup>3</sup>] の試算

$$c = M / V$$

$M$ : 捕集塩分量 [mg],  $V$ : 円筒内部への流入量 [m<sup>3</sup>]

$$V = I \cdot A \cdot T \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_0^{\infty} p(v, \beta) v dv d\beta$$

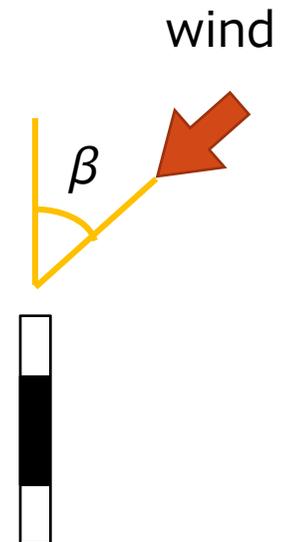
北方向:  $(\beta_1, \beta_2) = \left(-\frac{7\pi}{16}, \frac{7\pi}{16}\right)$  南方向:  $(\beta_1, \beta_2) = \left(\frac{9\pi}{16}, \frac{23\pi}{16}\right)$

$I$ : 流入量比 (いずれの風向からも同じ流入量)

(接近流量):(流入量) = 1: 0.112

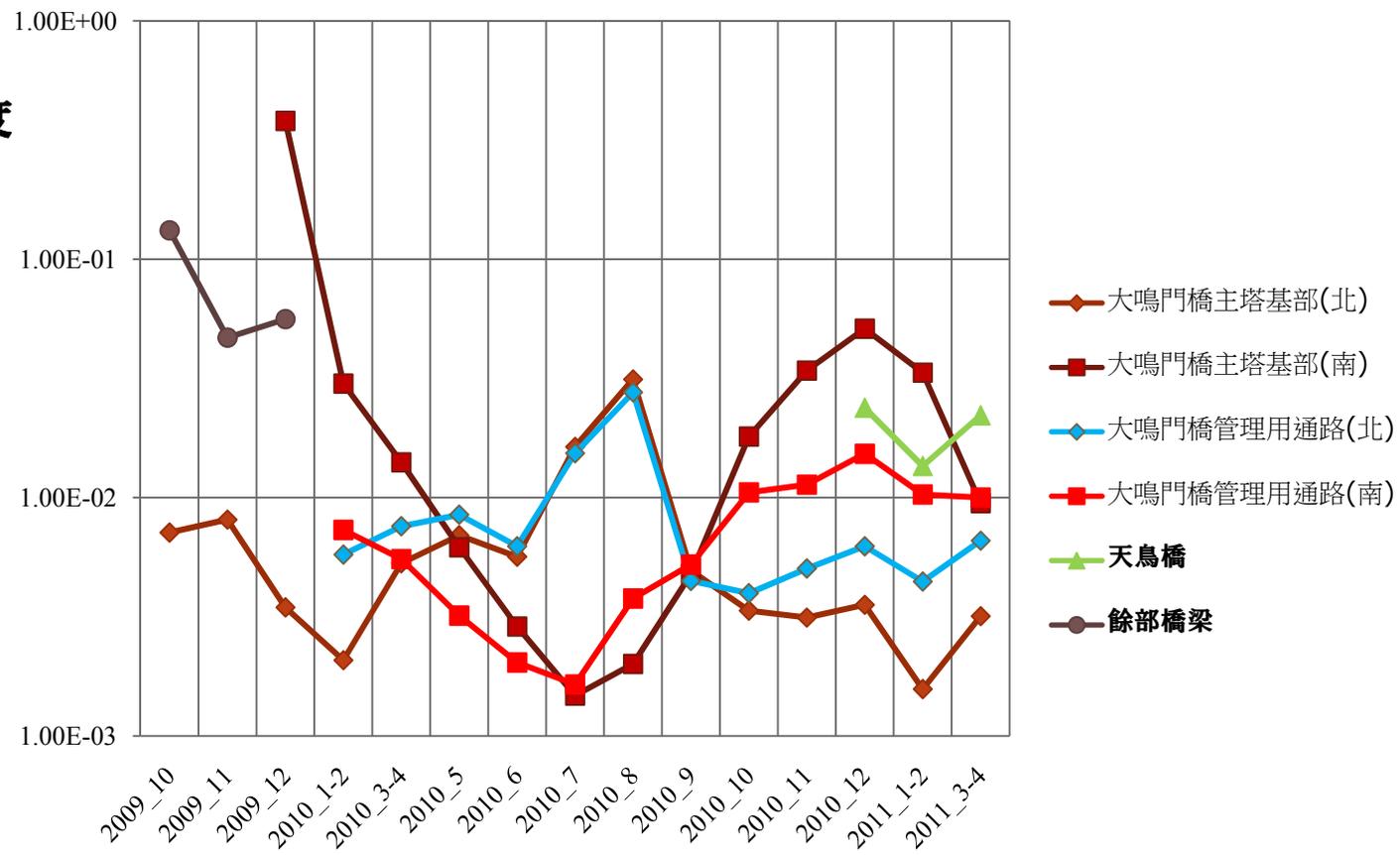
$A$ : ガーゼ面積 [m<sup>2</sup>],  $p(v, \beta)$  風向別風速発生確率密度

$v$ : 1時間平均風速 [m/s],  $T = 3600$  [sec]



# 現地観測(塩分濃度)

飛来塩分濃度  
( $mg/m^3$ )



## 海塩粒子の飛来，表面付着過程

- 飛来塩分濃度，風向・風速 ← 観測データ
- 橋梁周囲の流れのパターン，流速ベクトル場  $u_i(x,y,z,t)$  ← CFD
- 海塩粒子の飛来～橋梁周囲～表面界面の移流拡散過程 ← 数値計算  
← 塩分濃度  $c(x,y,z,t)$  の輸送方程式の数値解

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right)$$

・ 重力沈降，粒子乱流拡散係数，~~再飛散~~

- 沈着フラックス（界面近傍の塩分濃度，移流速度） → 沈着量

- 気温，湿度
- 表面粗度
- 雨水洗浄

時間平均流成分  
+ 乱流成分

拡散作用



付着には拡散係数が関与

## 海塩粒子の拡散係数

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right)$$

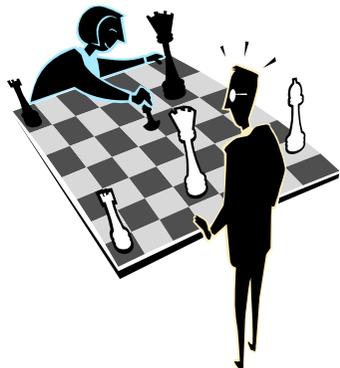
$C$  : 海塩粒子濃度 [ $mg/m^3$ ]

$D$  : 拡散係数 [ $m^2/s$ ]

初期値として

空気の渦動粘性係数を仮定

◎ 円筒型飛来塩分捕集器（ガーゼ無し）  
の内壁付着塩分



1. 流速場を流れの数値解析(CFD)で求め,
2. 得られた流速場を基に塩分濃度の移流拡散方程式 ( $D$ を仮定)を解き,
3. 付着塩分量を推定.
4. 付着塩分量の観測値と比較し, 海塩粒子の $D$ を推定.

- 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

$$\frac{\partial \bar{a}_i}{\partial x_i} = 0$$

運動量フラックス

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{\rho} \overline{u_i' u_j'} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\mu} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)$$

乱流エネルギー  $k$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \bar{u}_j k + \bar{\rho} \overline{u_j' k} \right) = \bar{\rho} \overline{u_i' \frac{\partial u_i'}{\partial x_i}} + \bar{\rho} \overline{u_i' \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \bar{\rho} \varepsilon$$

エネルギー散逸率  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}}$$

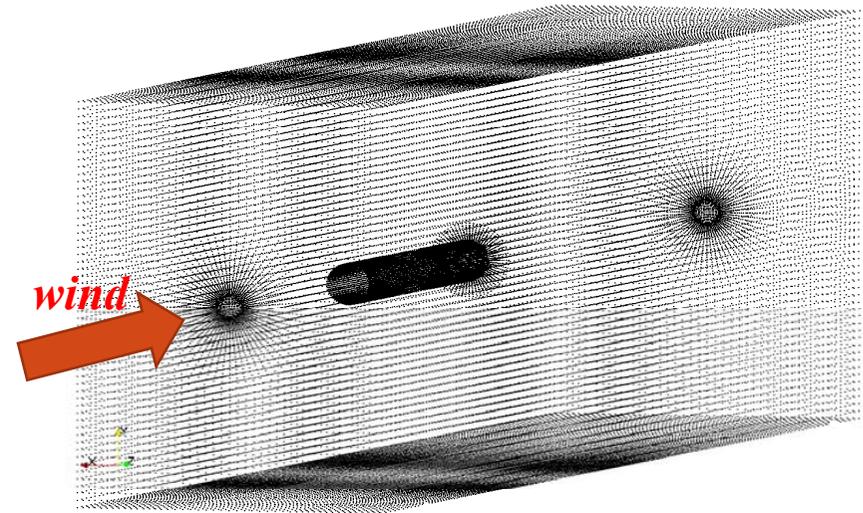
$$P_k = \bar{\rho} \overline{u_i' \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}}$$

$$\nu = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \bar{u}_j k + \bar{\rho} \overline{u_j' k} \right) = P_k - \bar{\rho} \varepsilon$$

# 円筒型捕集器内部流速場の解析

- 総格子数：約1210000個
- コロケート格子境界条件



捕集器の壁面

$\nu_t, k, \varepsilon$  : 壁関数

滑面

アクリル

粗面係数  $C_s: 0.5$

粗面高さ  $K_s: 4.00 \times 10^{-7}$

風洞実験

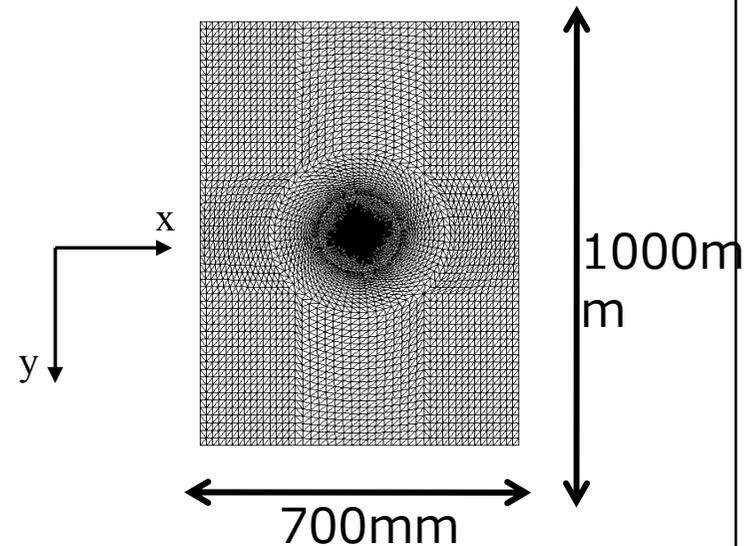
アルミ

$C_s: 0.5$

$K_s: 4.00 \times 10^{-4}$

現地設置

壁面 {風速 : 0(m/s), 圧力勾配 : 0}



# 円筒型捕集器内部流速場の解析

## 境界条件

流入口

圧力勾配:0

$k(m^2/s^2), \epsilon(m^2/s^3)$  初期条件

実験値

風洞実験

道路橋耐風  
設計便覧  
現地観測

流出口

$u$

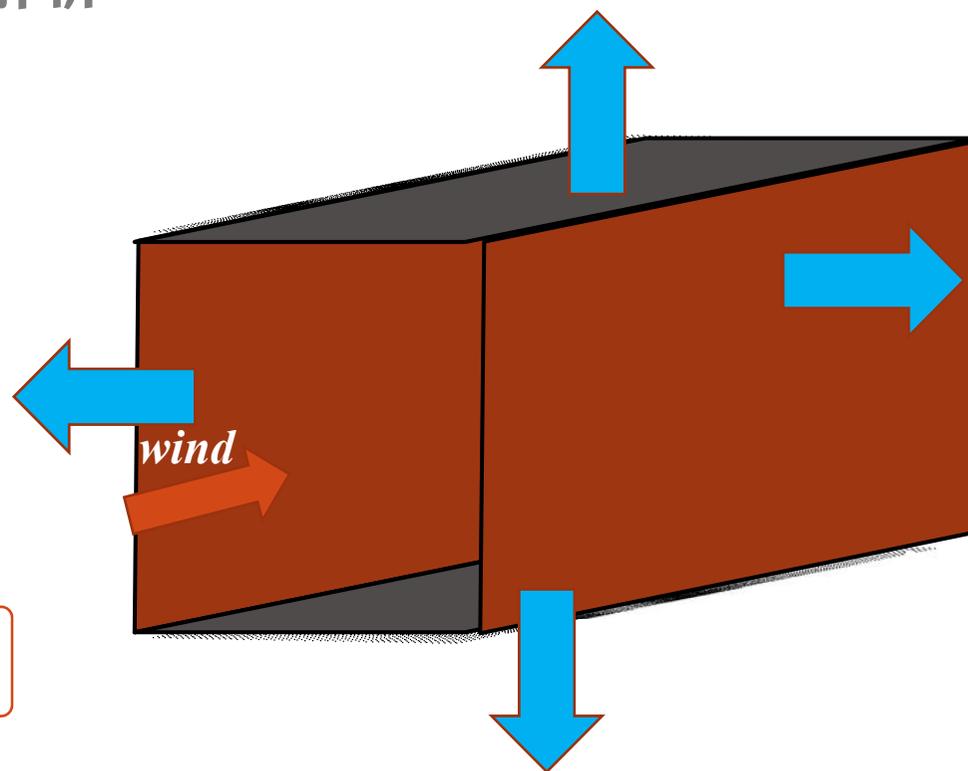
$k$

$\epsilon$

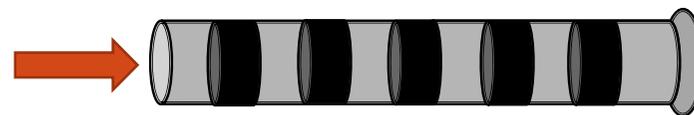
$P$

勾配:0

:0

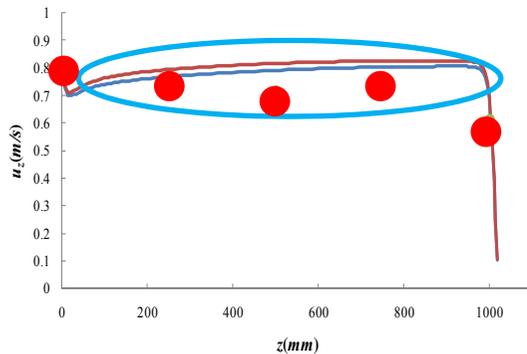
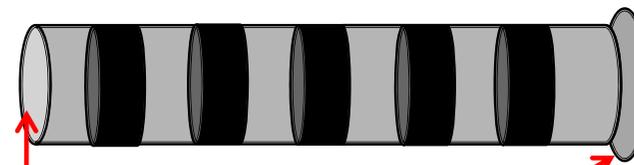


現地観測 流入風速(m/s)

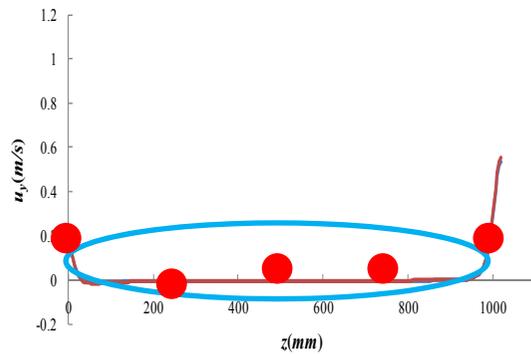


各風向の流入風速の  
月平均値の円筒軸方向成分

$U=1.89(m/s)$



$u_z(m/s)$

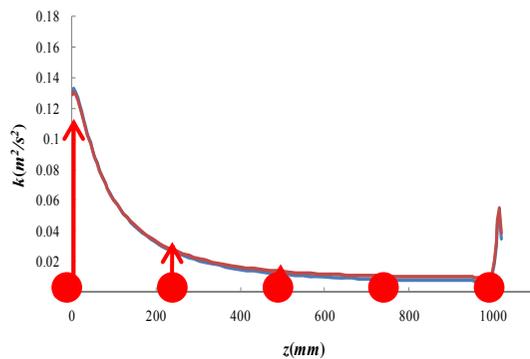


$u_y(m/s)$

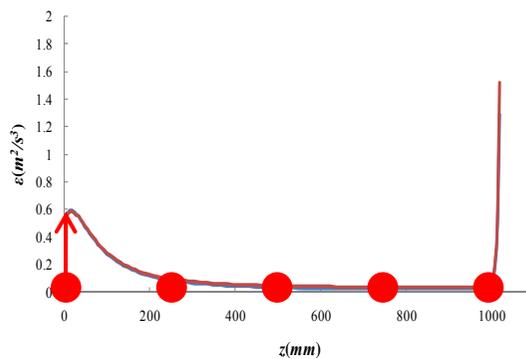
Z=0m  
m

Z=1000m  
m

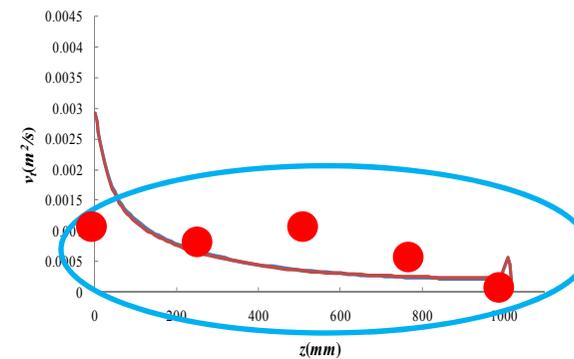
— 滑面  
— 粗度有(アクリル)  
● experimental value



$k(m^2/s^2)$



$\epsilon(m^2/s^3)$



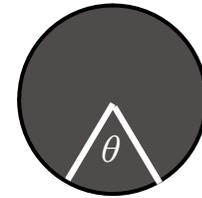
$v_t(m^2/s)$

乱流エネルギーk : 過大評価

$v_t$  : オーダ的に一致

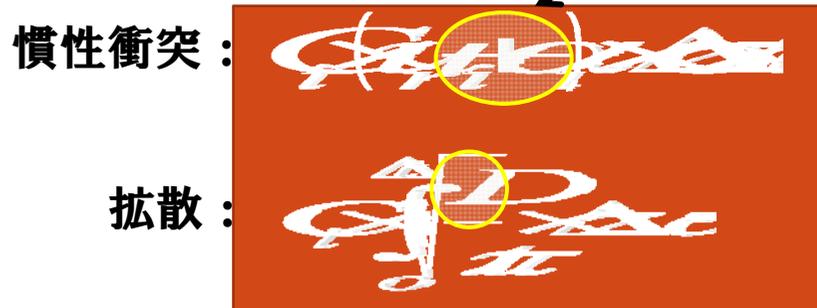
# 塩分濃度に関する移流拡散方程式

## ● 捕集器⇒円柱座標系

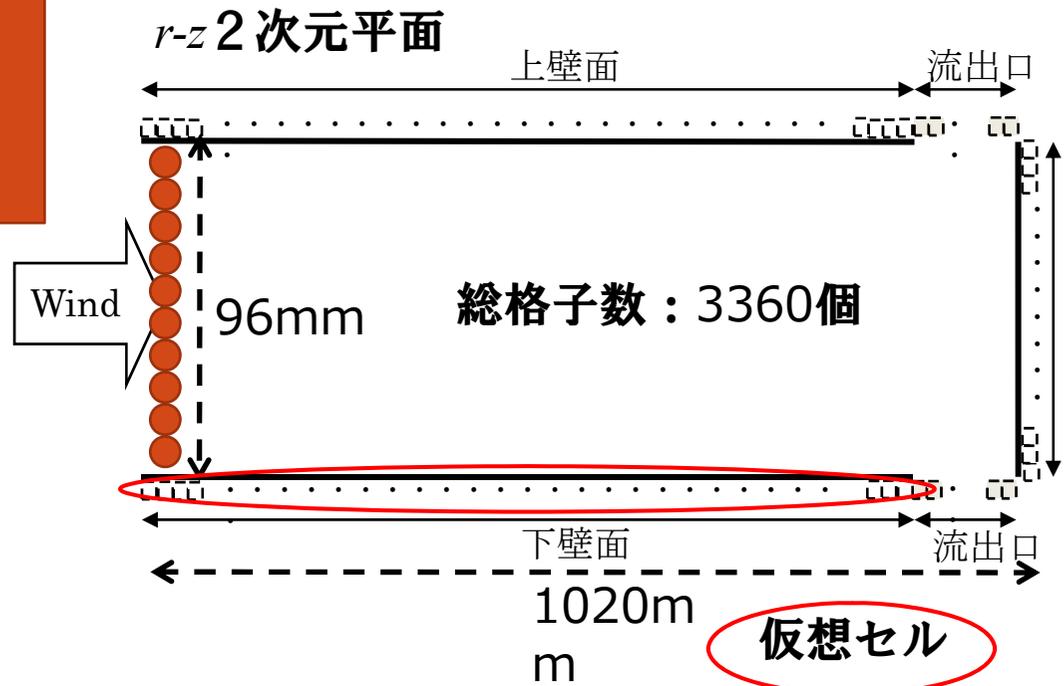


壁面への付着

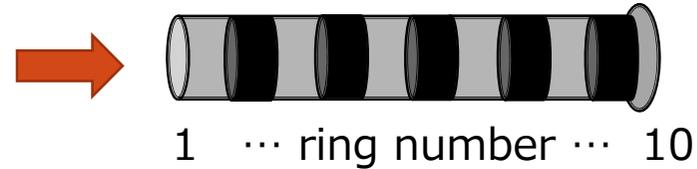
乱れによる付着



算出される円筒型捕集器（ガーゼ層無し）内部の付着塩分量を観測値と比較することにより拡散係数 $D$ を推定

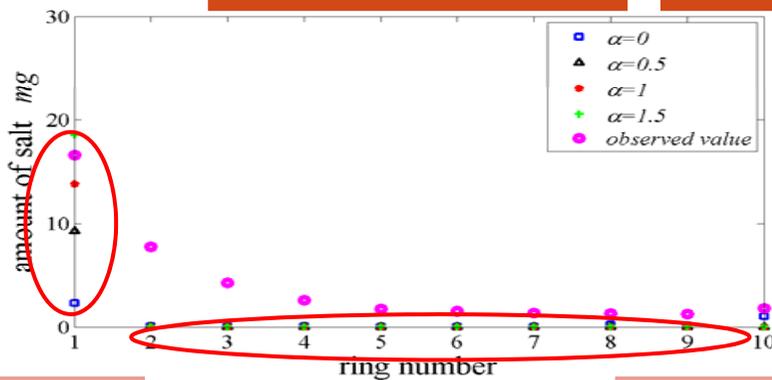


# 円筒型捕集器(ガーゼ無し) 内壁の付着塩分量の試算



流入口付近で付着

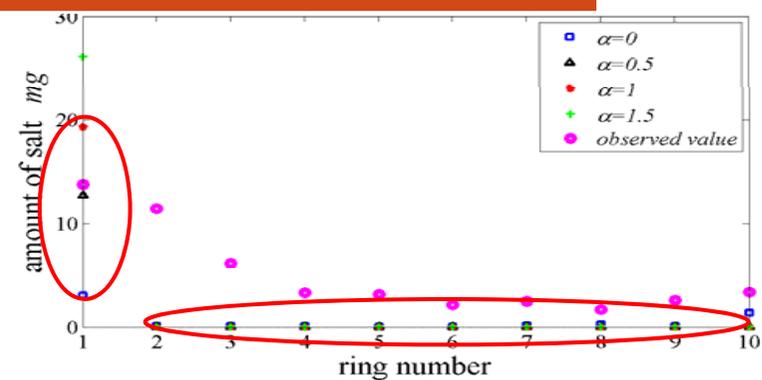
しかし、下流の付着は確認できず



前方

1 Sep 2010—27 Sep  
North  $U_N=1.88(m/s)$

後方



28 Sep 2010—29 Oct  
North  $U_N=3.07(m/s)$

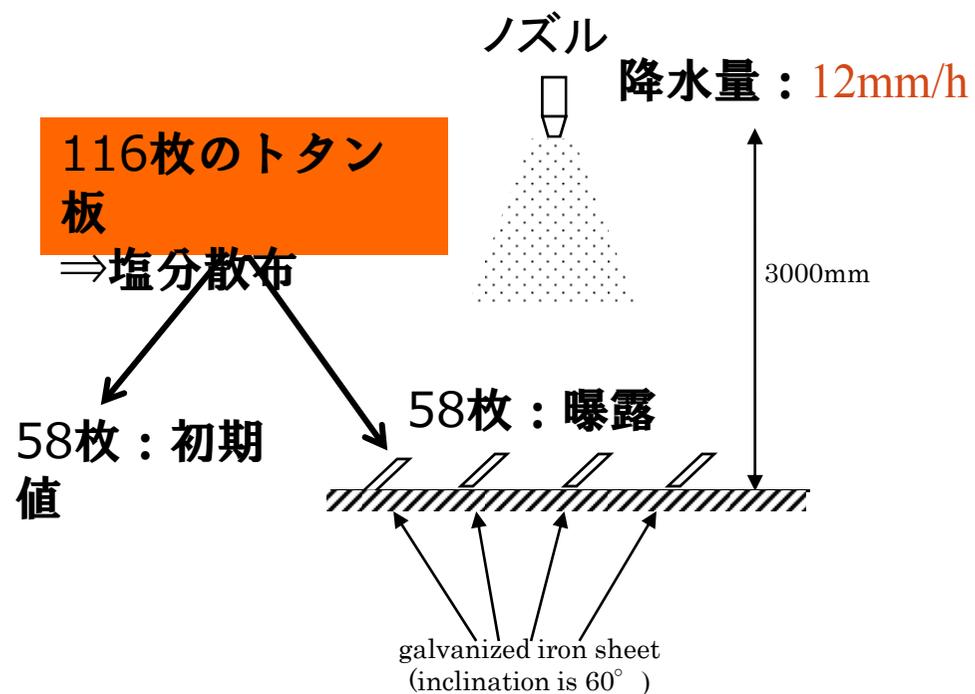
- 流入角の影響
- 乱流エネルギー  $k$  の過大評価

$D$ の精度良い推定は困難





# 雨水による付着塩分の洗浄

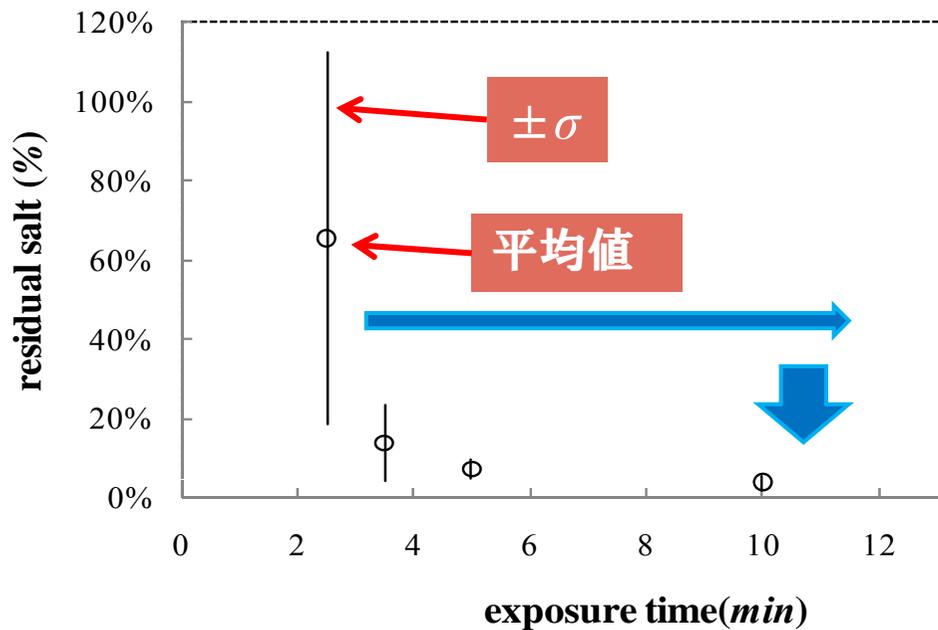


暴露時間: 2.5分, 3.5分, 5分, 10分, 15分  
洗い流し後の**残留塩分**(mg/m<sup>2</sup>)を計測

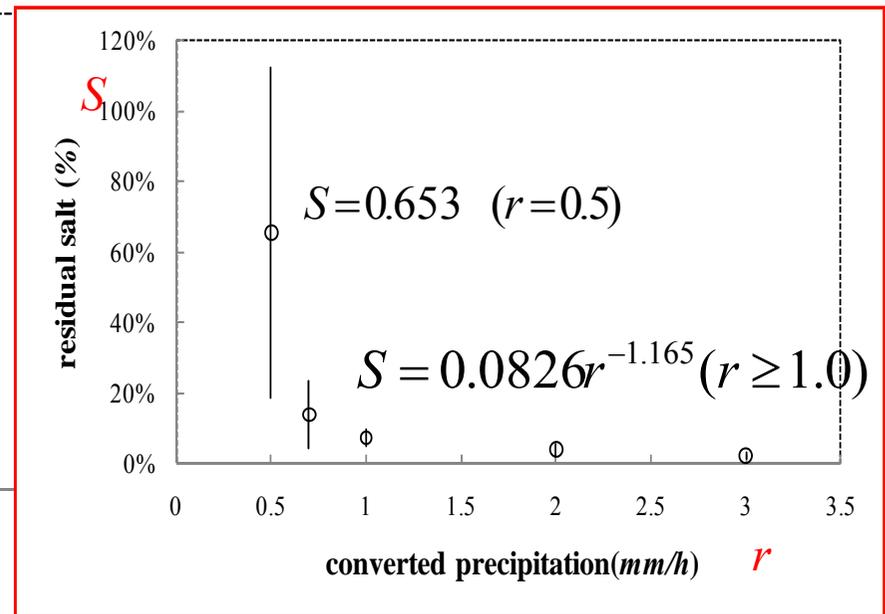


# 雨水洗浄効果 — 残留塩分量と降雨の関係 —

縦軸： { 残留塩分 ( $mg/m^2$ ) / 初期塩分 ( $mg/m^2$ ) } (%)



実験結果



時間降水量換算後

単位面積での水量のみに依存



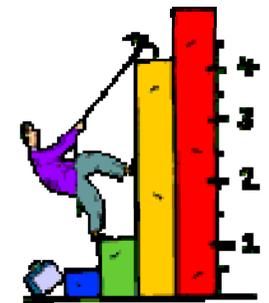


## 表面付着塩分量の推定

大鳴門橋主塔を対象に、

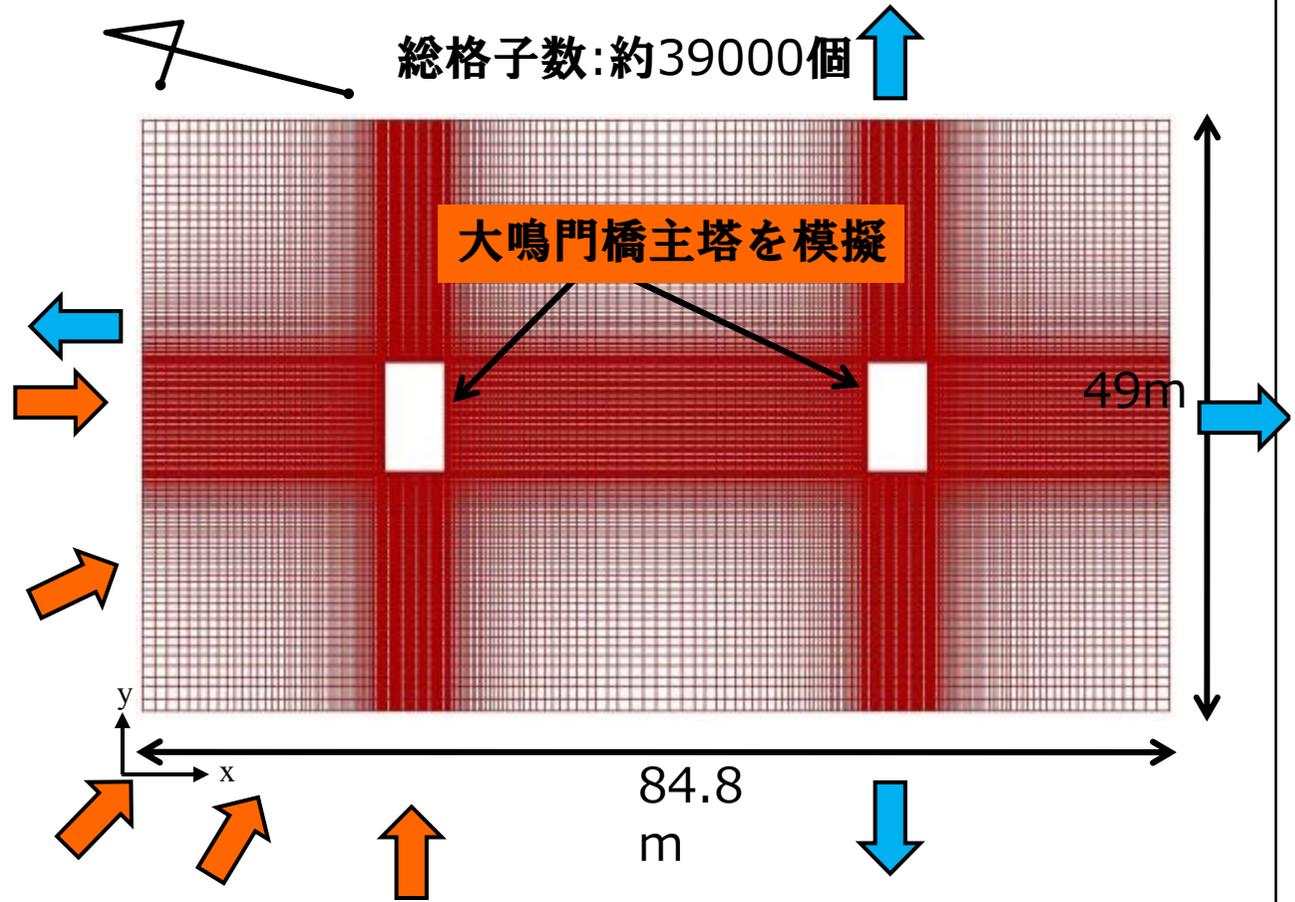
- 気象データ(風向, 風速)
- 飛来塩分濃度(円筒型捕集器による推定値)
- 降雨による洗浄率(実験値)
- 主塔周囲の風速場(CFDによる推定値)
- 付着機構(慣性衝突, 沈着)(CFDによる衝突速度の推定値)

より, 表面付着塩分量を試算.

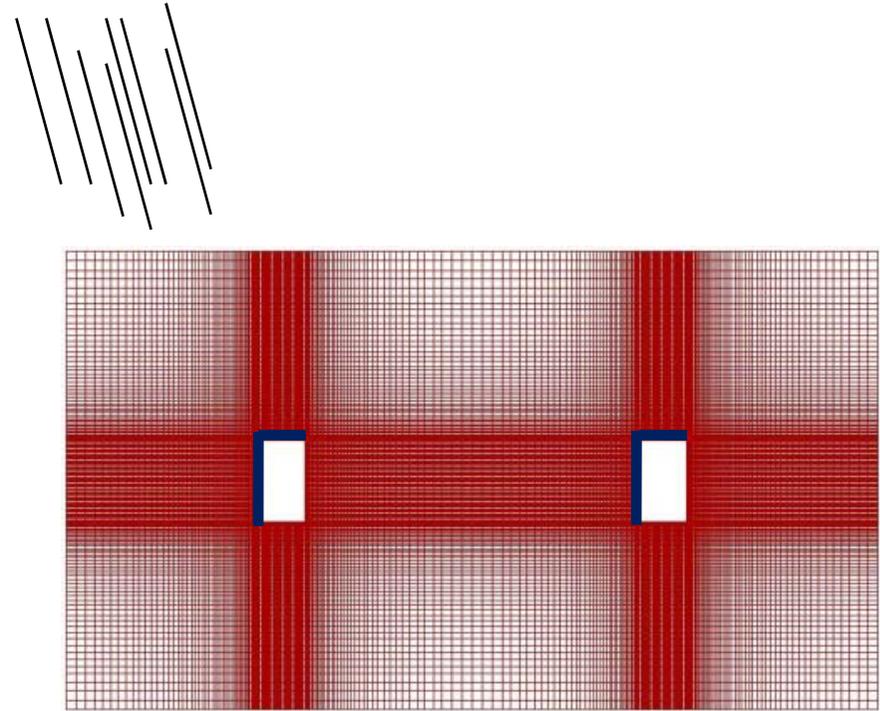
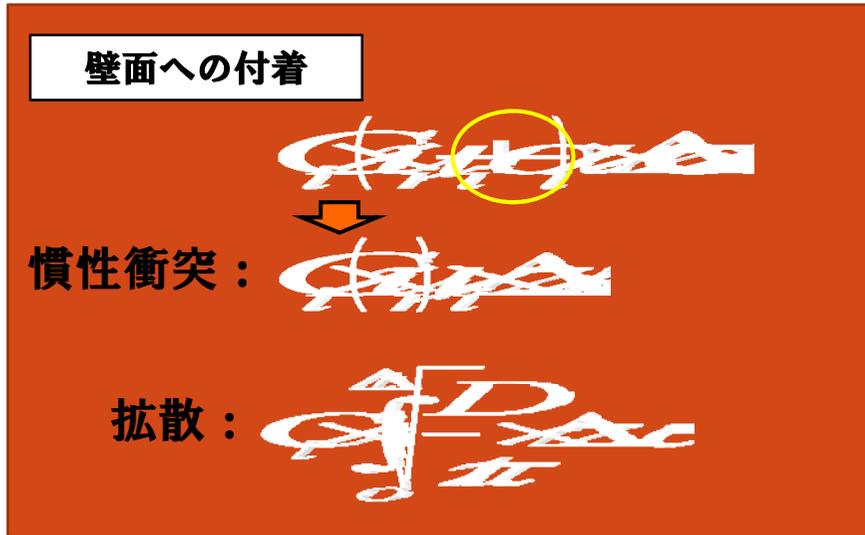


# 表面付着塩分量の推定

- $x$ - $y$ 平面, 定常解析
- 気象データ: 16方位
- 流入角度:  $22.5^\circ$  ピッチ
- 流入口, 流出口:  
風向ごとに対応
- 境界条件, 支配方程式  
⇒円筒型捕集器の  
ケースと同一
- 壁面⇒滑面



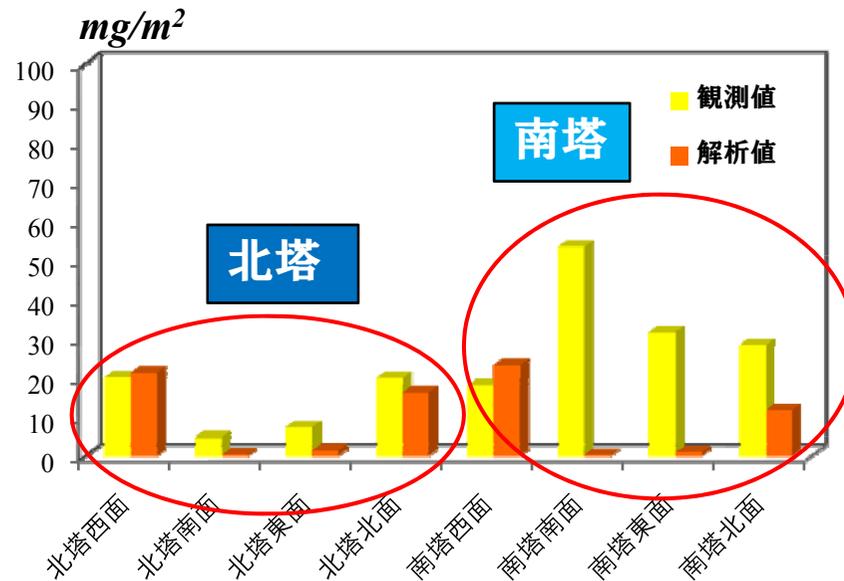
# 表面付着塩分量の推定



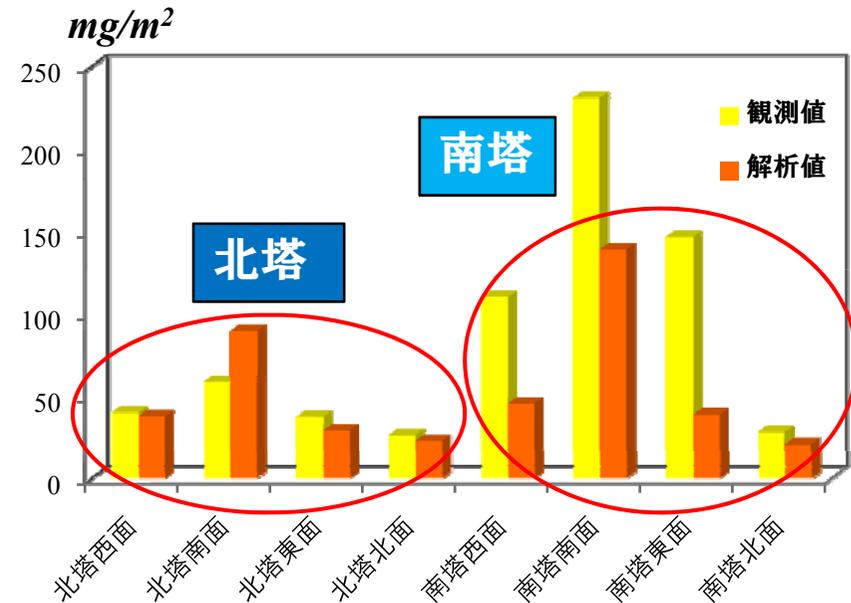
- 洗い流し効果  
⇒ 風向と面が対応

•  $x$ - $y$ 平面, 定常解析

# 表面付着塩分量の推定



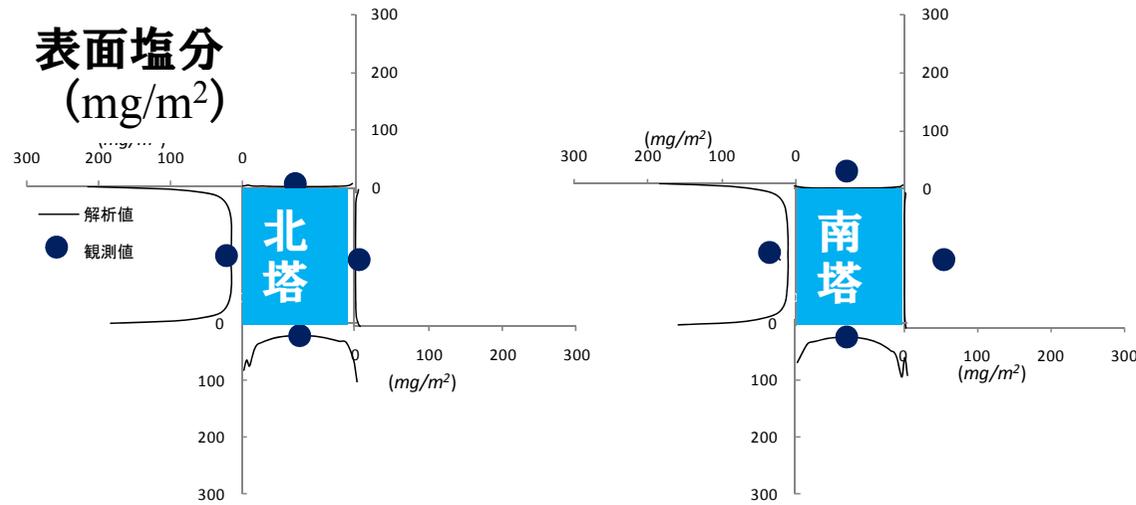
1 Mar 2010—27 April, 2010



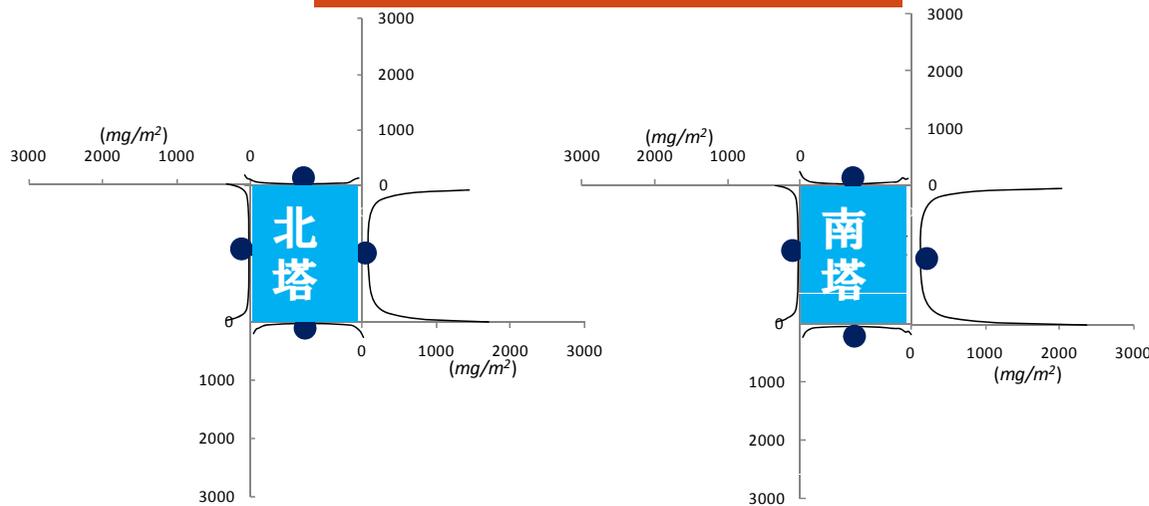
30 Oct 2010—30 Nov, 2010

- 北塔：観測値，解析値⇒大小の傾向，オーダー：概ね一致
- 南塔：観測値が比較的大きい ⇒ 波しぶきの影響？

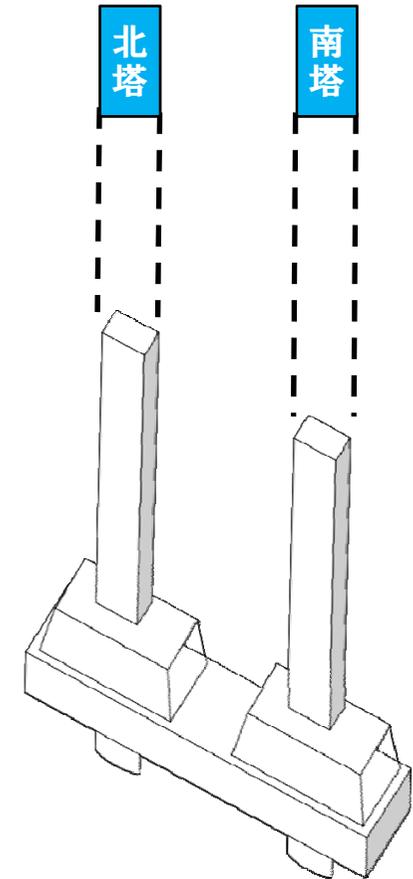
# 表面付着塩分量の推定



1 Mar 2010—27 April, 2010



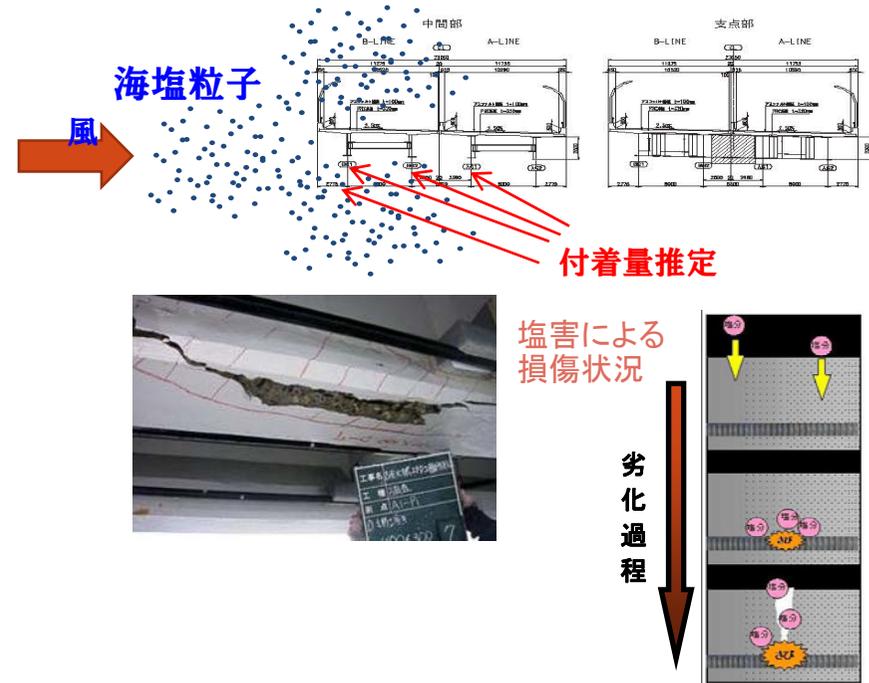
30 Oct 2010—30 Nov, 2010



# 橋梁細部における海塩粒子の付着量推定と腐食劣化予測

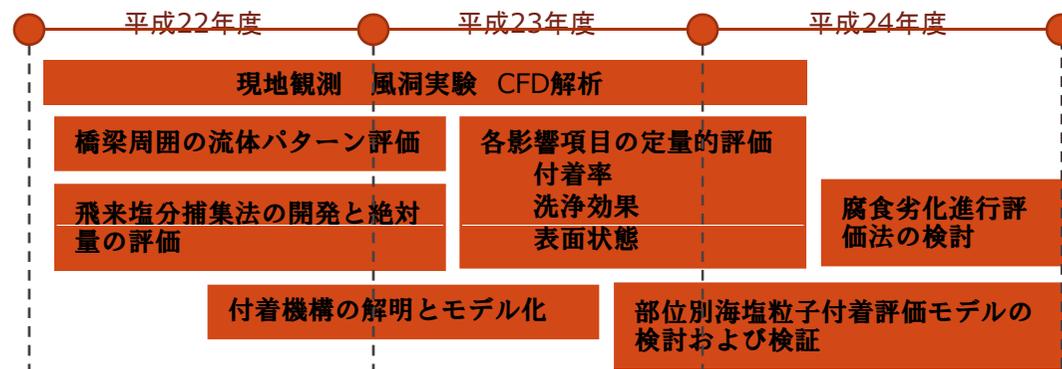
## ■調査の内容

- ①現地観測による海岸部の橋梁各部位別の飛来塩分付着量ならびに腐食の進行状況等の調査，ならびに風向・風速，降水量，飛来塩分量の調査
- ②CFD解析による橋梁周囲の流体パターンの推定
- ③現地観測結果，CFD解析結果に基づく，空気の流れと飛来塩分の付着量の関係の解明
- ④風洞実験もしくは屋外実験による海塩粒子の付着メカニズムの解明
- ⑤降水による洗浄効果，表面状態による付着率の評価
- ⑥橋梁各部位における海塩粒子の付着量の評価モデルの構築，および腐食劣化の進行評価する方法の検討



## ■平成23年度調査の目標

- 現地観測による飛来塩分付着量，腐食進行状況，気象データの計測(天鳥橋)
- CFDによる橋梁周囲の流体パターンの推定
- 飛来塩分付着機構に関する調査検討
- 表面粗度の影響



## 「橋梁細部における海塩粒子の付着量推定と腐食劣化予測研究会」

委員長	白土博通	京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻	
委員	神谷 毅	国土交通省近畿地方整備局道路部道路管理課	(平成23年4月より)
	小丸博司	国土交通省近畿地方整備局道路部道路管理課	(平成23年3月まで)
	竹内智明	国土交通省近畿地方整備局道路部	(平成23年7月より)
	橋本拓己	国土交通省近畿地方整備局道路部	
	宮井達也	国土交通省近畿地方整備局道路部	(平成23年6月まで)
	井口善史	紀南河川国道事務所串本国道維持出張所	
	今西栄二	紀南河川国道事務所道路管理課	
	小野 武	紀南河川国道事務所	(平成23年3月まで)
	久野伊津佳	紀南河川国道事務所道路管理課修繕係	
	田中雄三	紀南河川国道事務所	(平成23年4月より)
	鳥奥博良	紀南河川国道事務所	
	守田景敬	紀南河川国道事務所道路管理課修繕係	
	石原修二	三井造船株式会社技術本部玉野技術開発センター	(第2回より)
	上野勝敏	川田テクノシステム株式会社	
	大窪一正	鹿島建設株式会社技術研究所	
	大村恵治	鹿島建設株式会社関西支店土木部	
	大畑和夫	株式会社IHIインフラシステム開発部研究開発課	
	黒石浩介	株式会社大林組大阪本店土木事業部	
	佐々木亘	三井住友建設株式会社技術開発センター	
	新名 裕	株式会社川金コアテック本社技術部	
	中西克佳	JFEスチール株式会社スチール研究所	
	永元直樹	三井住友建設株式会社土木本部土木設計部	
	村上恭一	株式会社阪神コンサルタンツ	(第3回より)
	服部 洋	京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻	
	八木知己	京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻	
	山本貴士	京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻	
話題提供者			
	鹿毛 勇	JFEスチール株式会社スチール研究所	(第2回)
	新村 亮	株式会社大林組本社生産技術本部基盤技術部	(第1回)
	戸田勝哉	株式会社IHIインフラシステム開発部研究開発課	(第3回)
	中村善彦	株式会社IHIインフラシステム開発部研究開発課	(第3回)