

平成22年度～平成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に関する研究会

構造物表面の海塩粒子付着量 の定量的予測

京都大学工学研究科社会基盤工学専攻

白土博通

国土交通省近畿地方整備局
国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所
(株)IHIインフラシステム
(株)大林組
(株)オリエンタルコンサルタンツ
鹿島建設(株)
(株)川金コアテック
川田テクノシステム(株)
JFEスチール(株)
(財)電力中央研究所
(株)阪神コンサルタンツ
三井住友建設(株)
三井造船(株)
京都大学

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%**

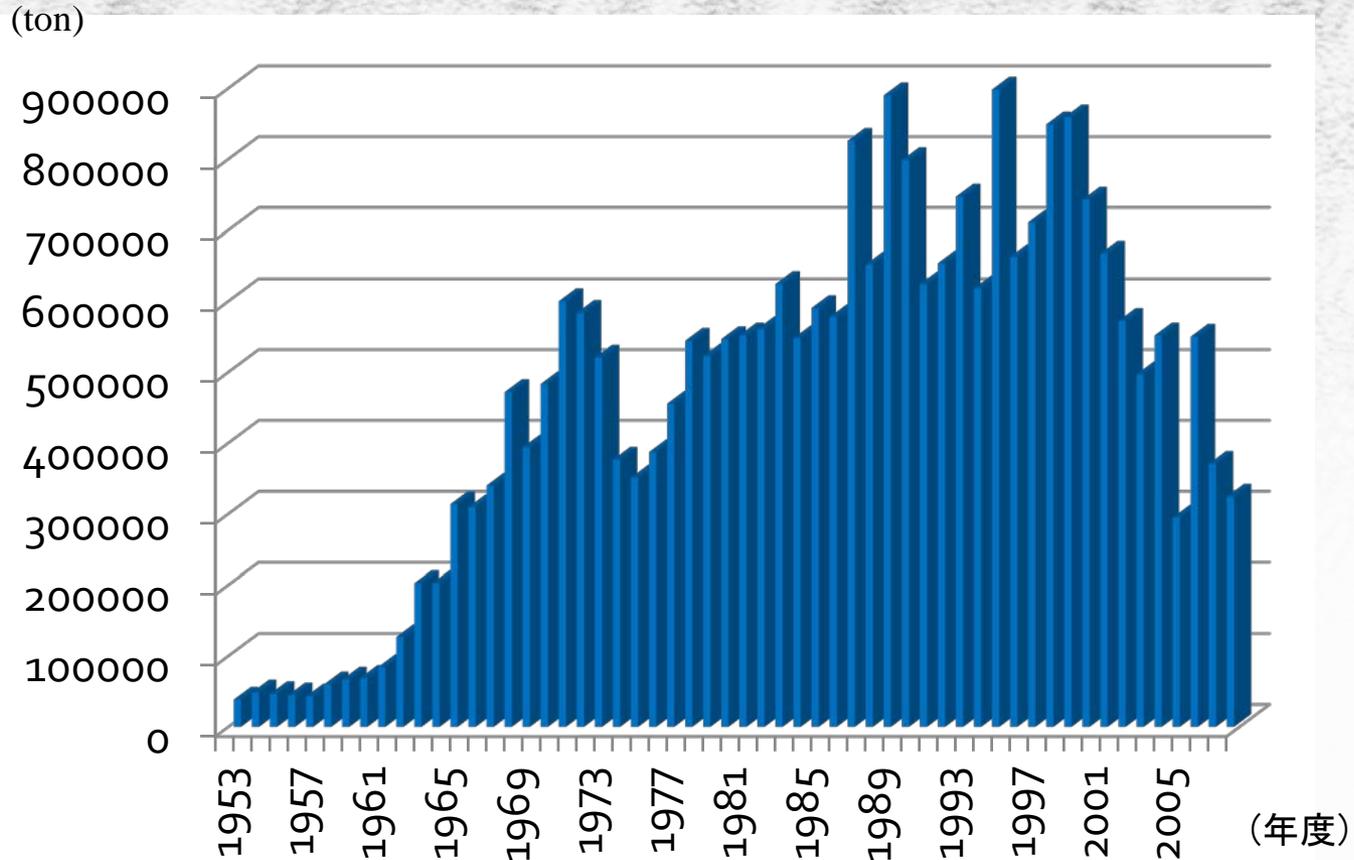


維持管理が最重要検討項目である.

- ➡ 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

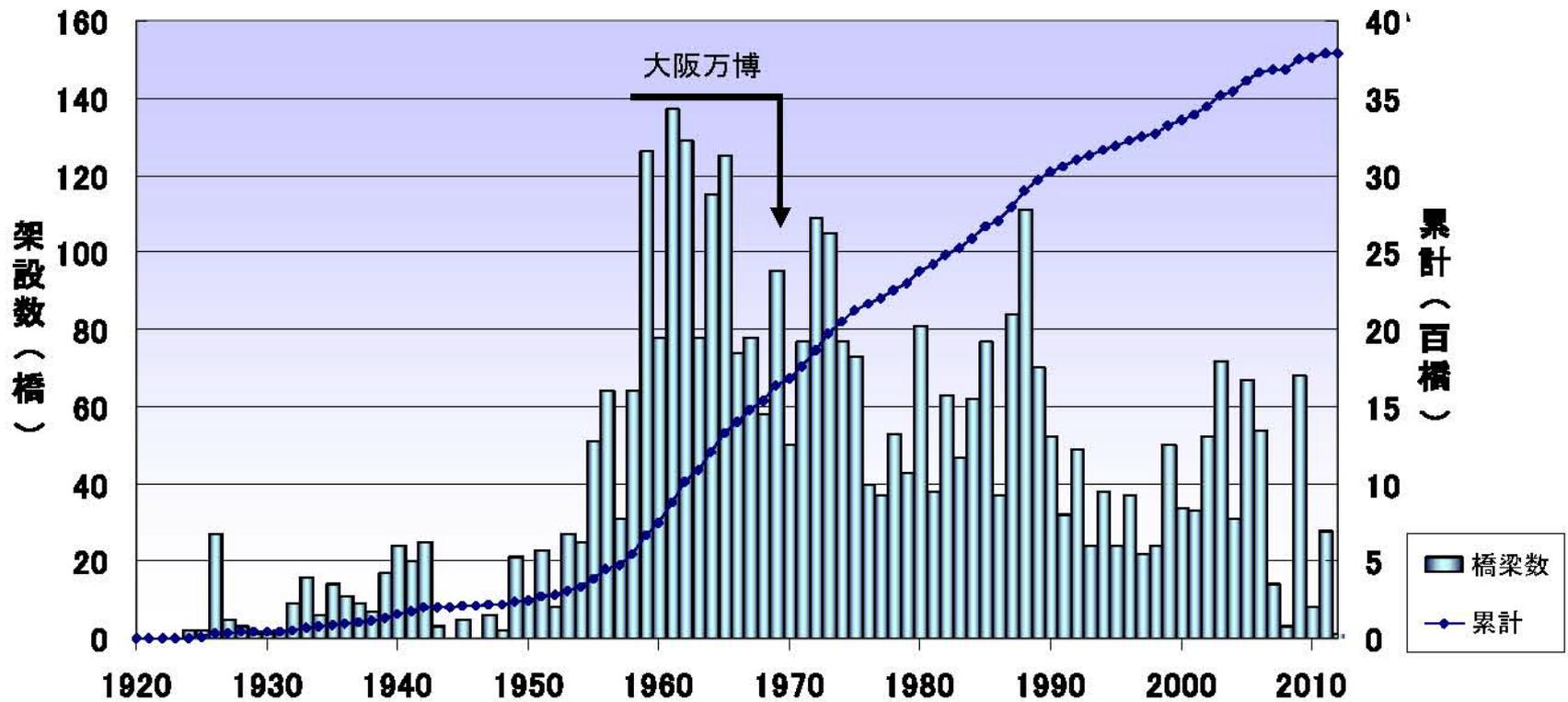
飛来塩分の構造物への**付着機構**を解明し、
構造物表面への付着塩分量を推定することを目的とする。

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>

近畿地方整備局管内 橋梁供用数の推移



国土交通省近畿地方整備局
橋梁の長寿命化修繕計画(平成24年度版)

腐食因子

■水，酸素

■降雨，結露

■気温

■日照

■塩分

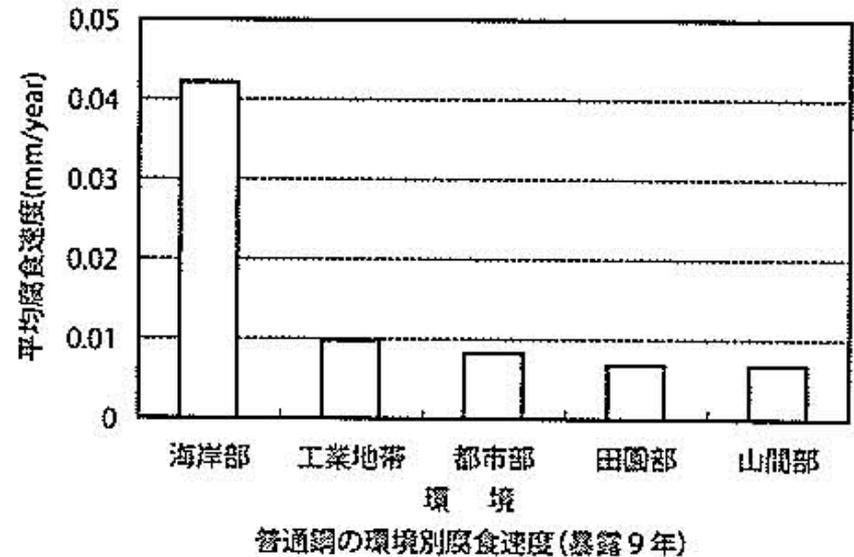
海塩粒子，凍結防止剤

■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⁾

構造部位別付着塩分量の定量的評価——研究手法

大気中塩分濃度を観測から算出
(円筒型飛来塩分捕集器)



対象をモデル化

ガーゼ無捕集器
大鳴門橋
天鳥橋

CFDを用いて流れ場を解析

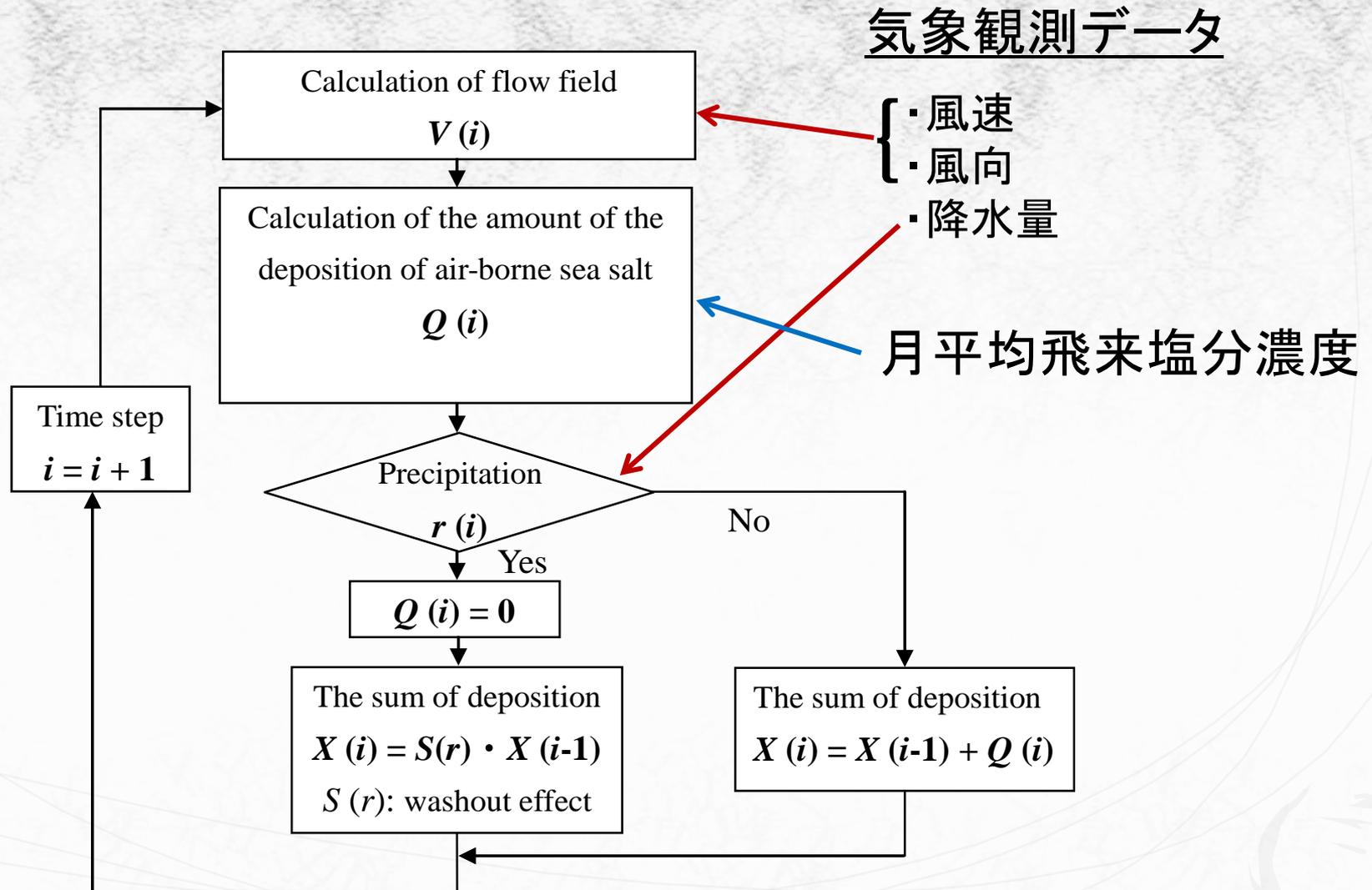
計算領域の塩分濃度は一定

気象データを用いて付着塩分を計算

現地観測で得た付着塩分量
と計算値を比較

実橋梁への付着-大鳴門橋-

計算アルゴリズム



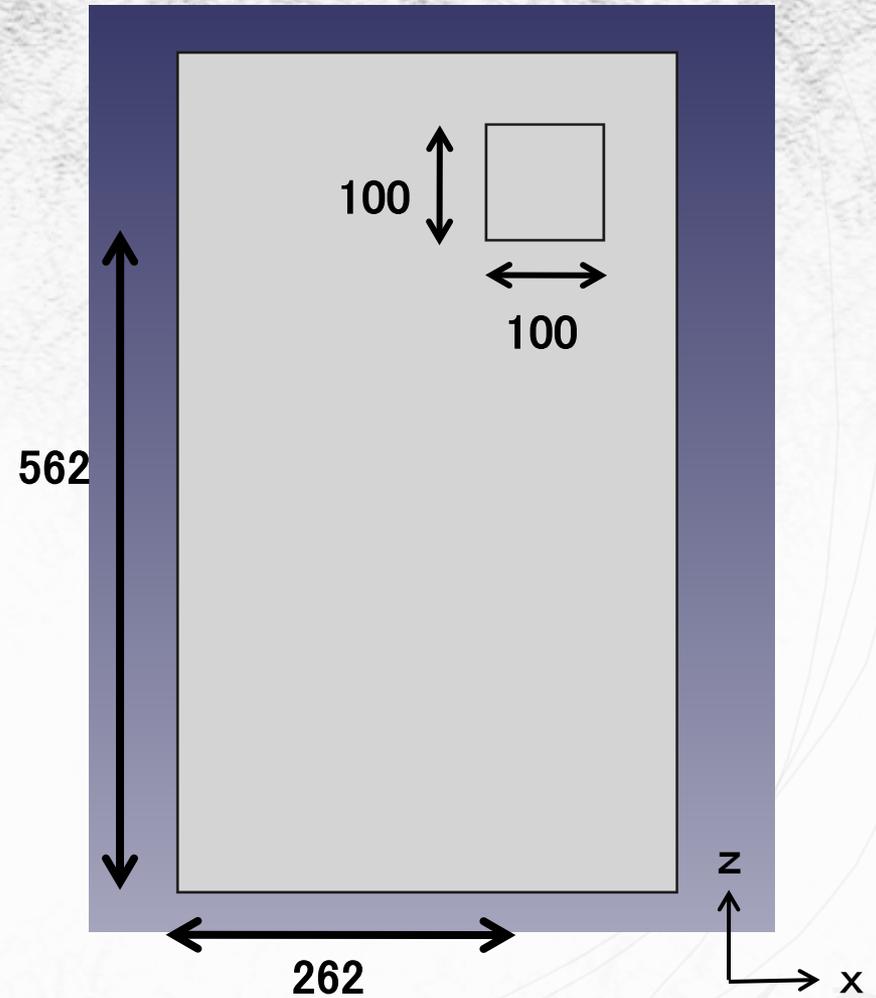
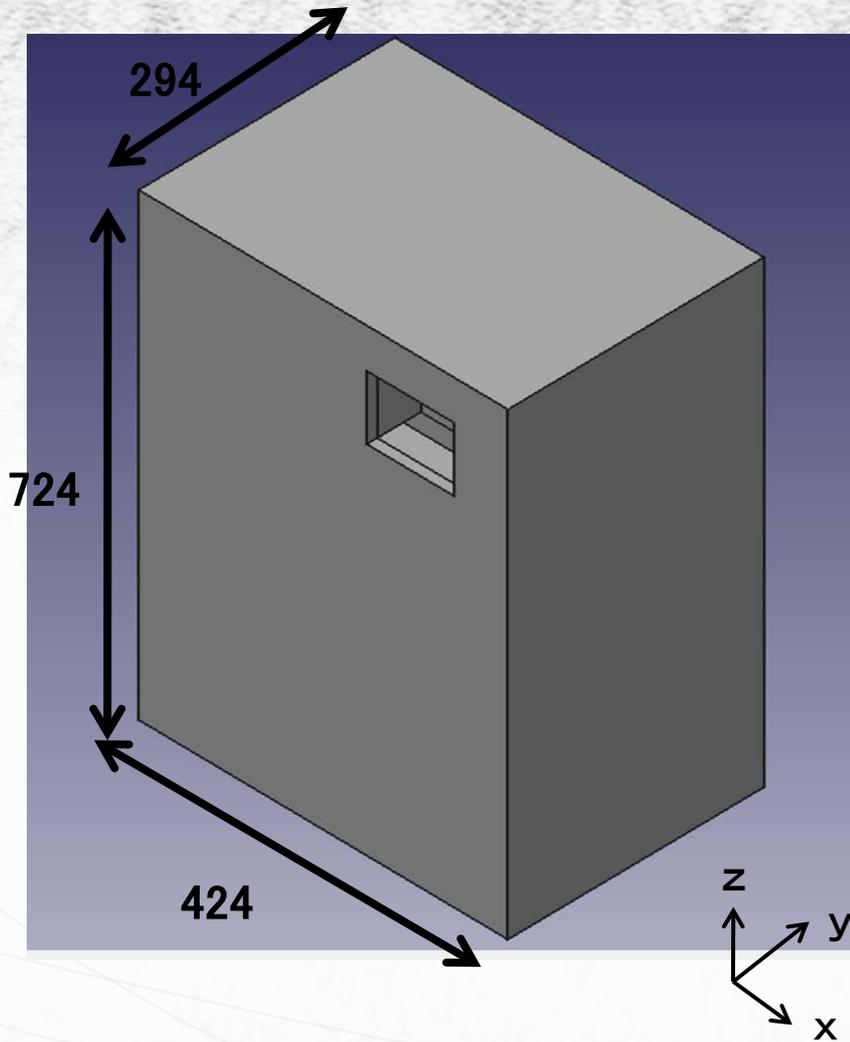
研究内容

- **現地観測概要**
- 付着塩分量計算概要
- 実橋梁への付着
 - 大鳴門橋
 - 天鳥橋



飛来塩分量計測

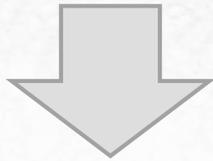
土研式タンク法



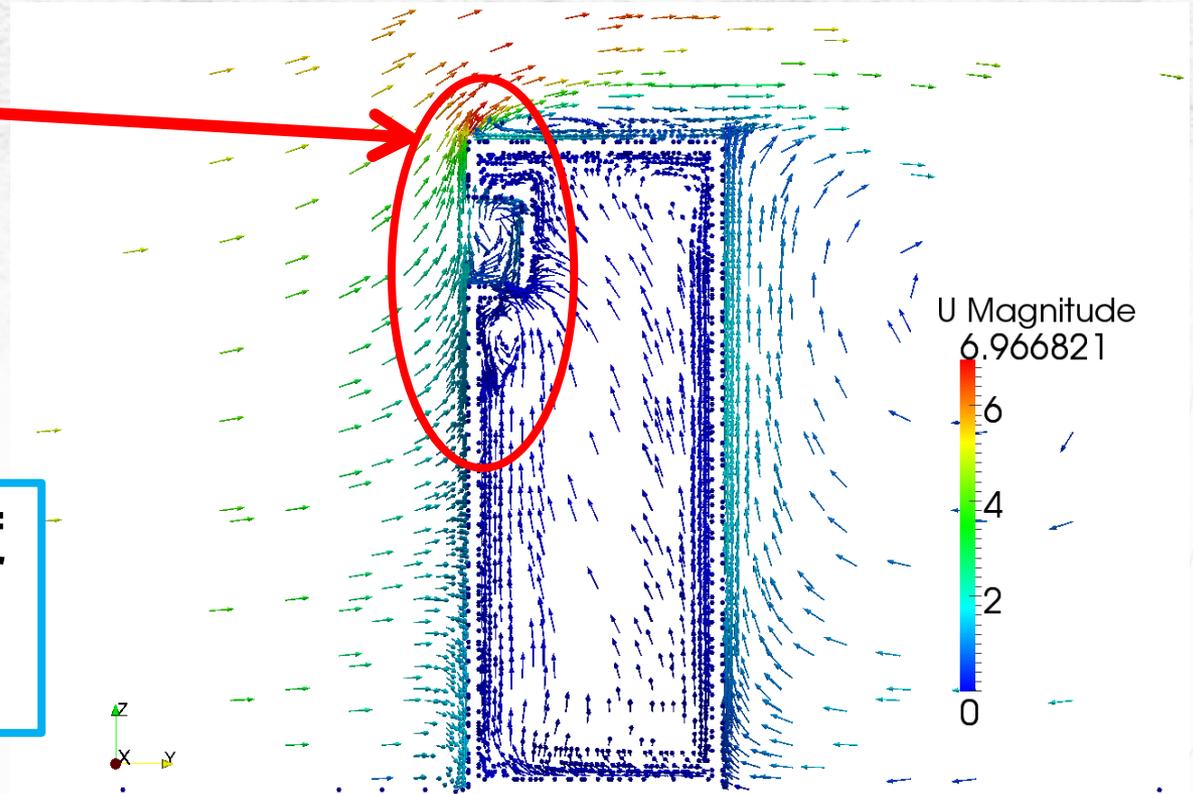
単位: mm

解析例

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

現地観測概要-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

円筒を通過する大気中の海塩粒子をガーゼで捕捉

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

K : 大気中塩分濃度(mg/m^3)

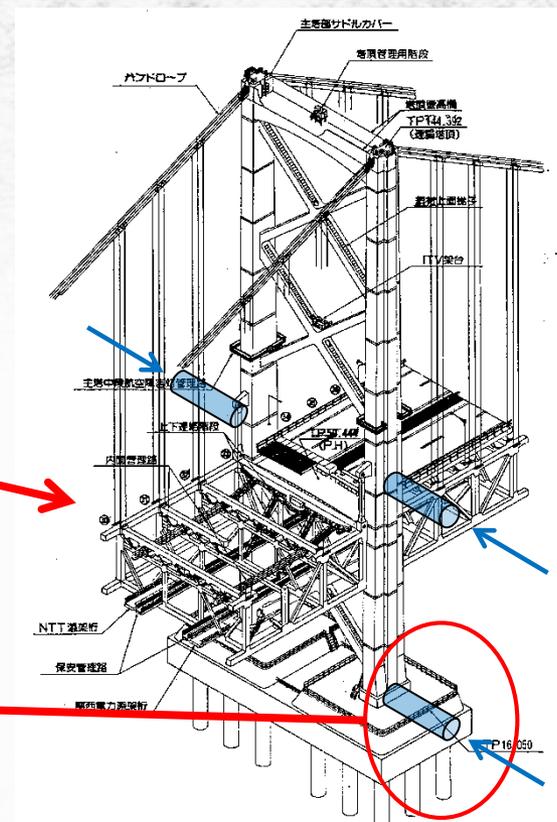
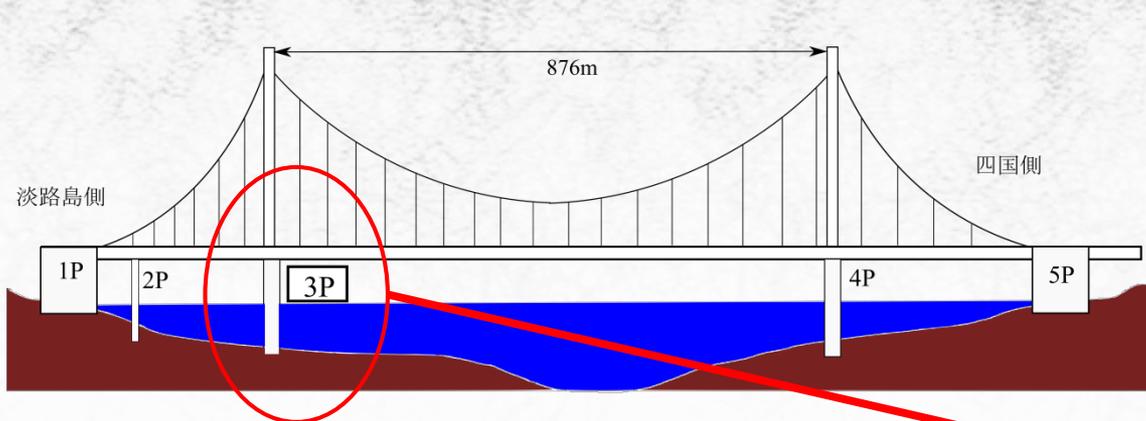
M : 捕集塩分量(mg) V : 円筒内部への流入量(m^3)

捕集性能：風洞実験による定量的評価

現地観測概要-対象橋梁-

対象橋梁: 大鳴門橋

観測期間: 2009年12月~2012年3月(1月毎に計測)



現地観測概要-対象橋梁-

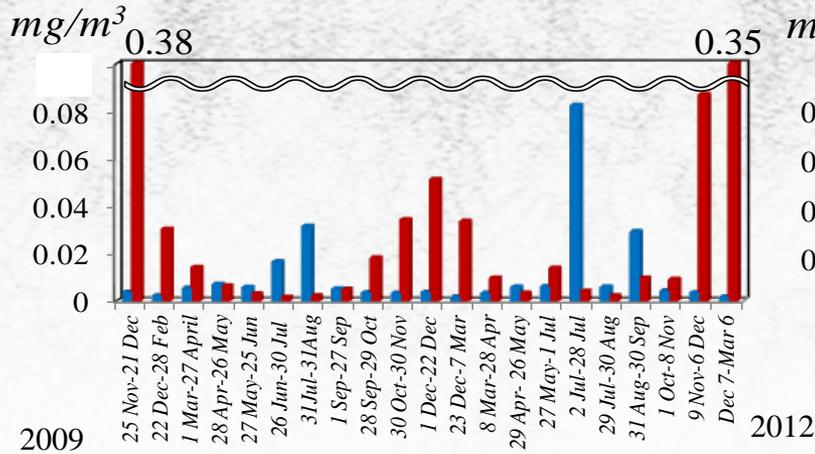
対象橋梁:天鳥橋

観測期間:2010年12月～(1月毎に計測)

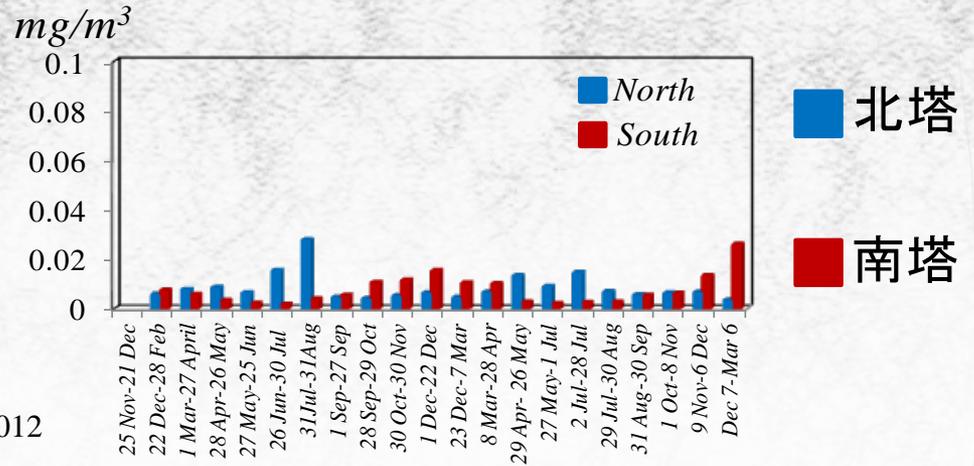


現地観測概要

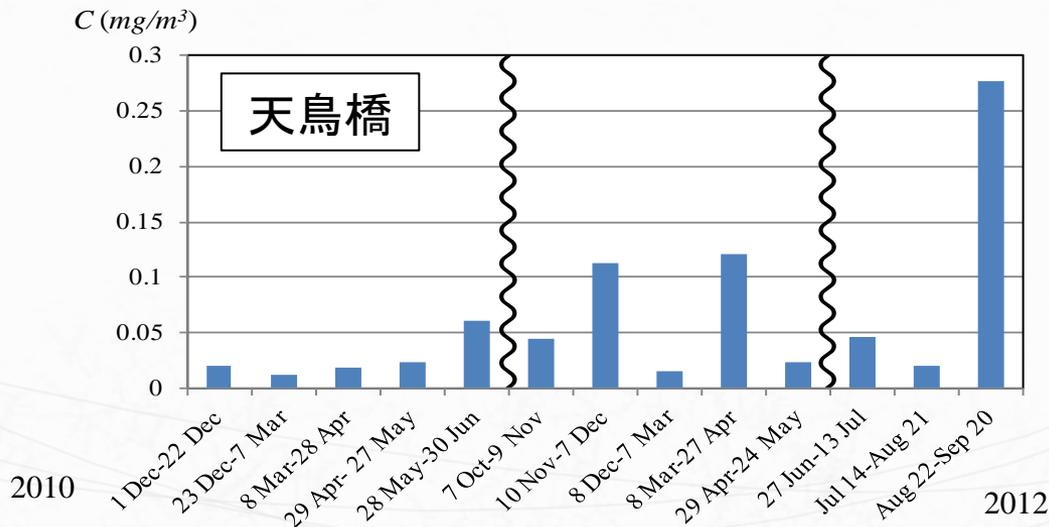
飛来塩分濃度



大鳴門橋主塔基礎部 (TP+16.050)



大鳴門橋管理用通路 (TP+59.440)



研究内容

- 現地観測概要
- **付着塩分量計算概要**
- 実橋梁への付着
 - ・ 大鳴門橋
 - ・ 天鳥橋



付着塩分量計算概要

流れ場の解析

- 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
$$\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (v + v_T) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\}$$

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

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

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

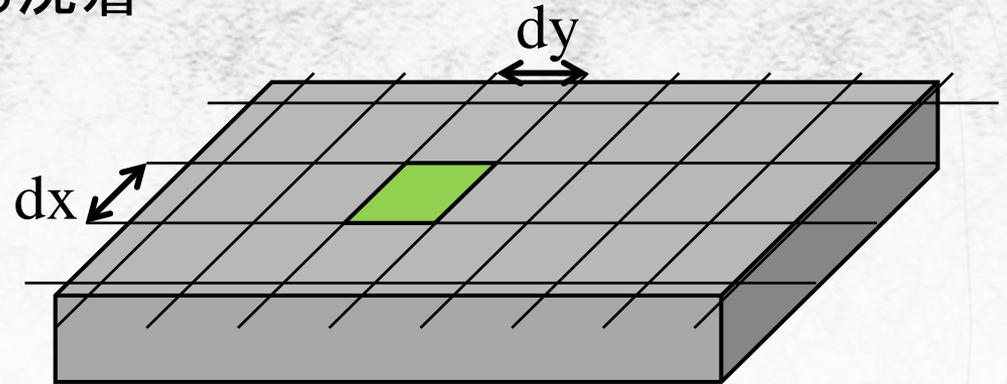
$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

付着塩分量計算概要

付着機構



慣性衝突による付着
拡散による沈着



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

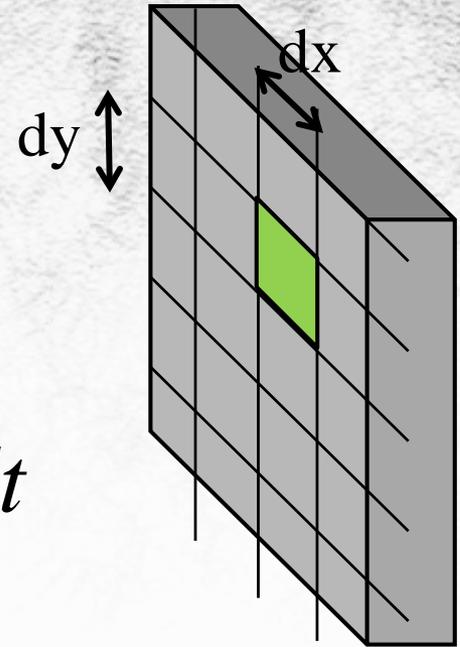
対象への衝突体積

対象への衝突塩分量

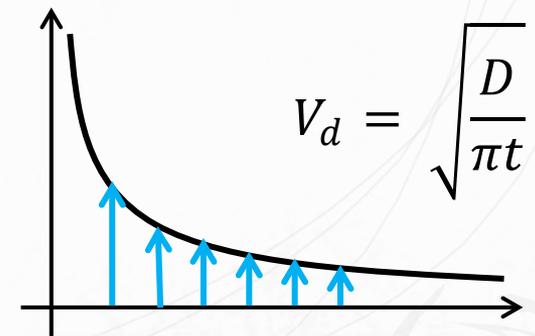
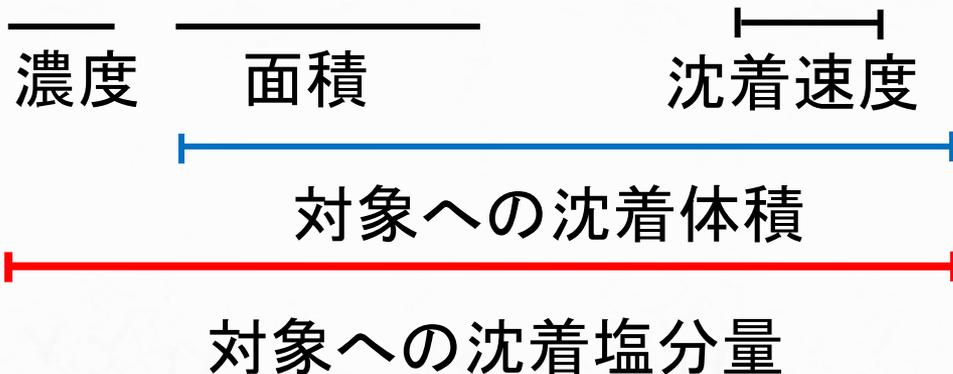
付着塩分量計算概要

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



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



研究内容

- 現地観測概要
- 付着塩分量計算概要
- **実橋梁への付着**
 - ・ 大鳴門橋
 - ・ 天鳥橋

実橋梁への付着

実橋梁では雨水による洗い流し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

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

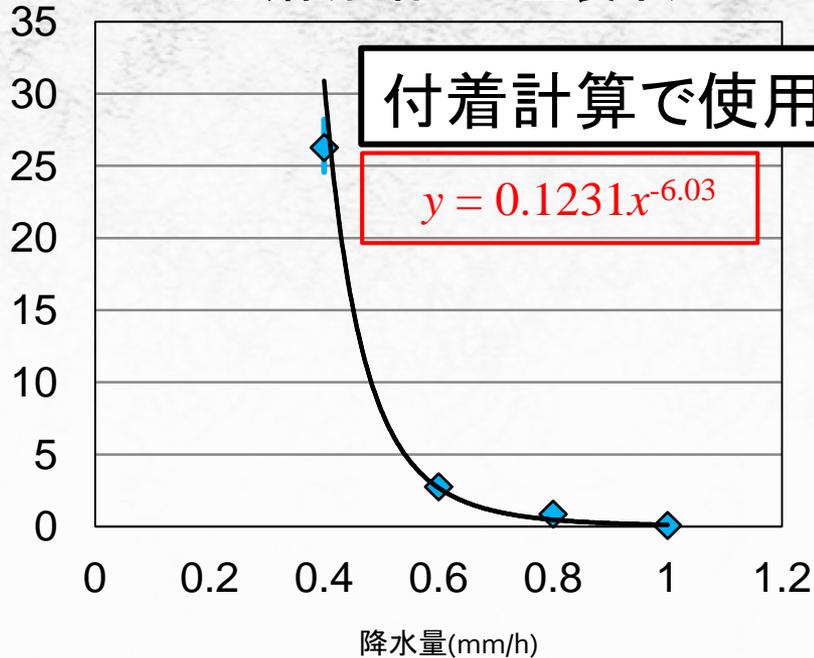
I字鋼, トタン板の2種類

防食塗装(仕様C-5塗装系)

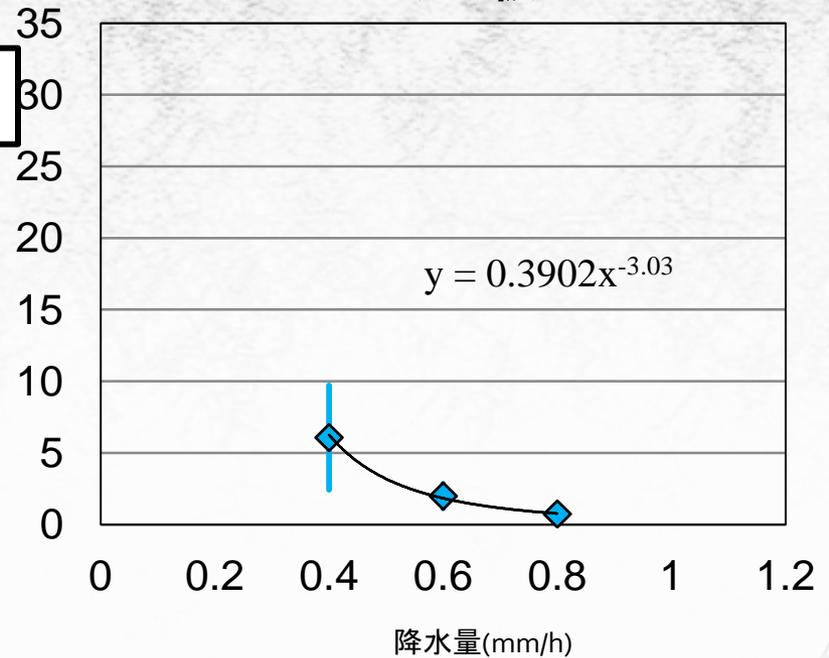
実橋梁への付着

洗い流し効果

残留塩分(%) I字鋼(仕様C-5塗装系)



残留塩分(%) トタン板



- ・時間降水量が増加すると洗い流し効果は大きくなる。
- ・表面粗度が小さいほうが洗い流し効果は大きい。

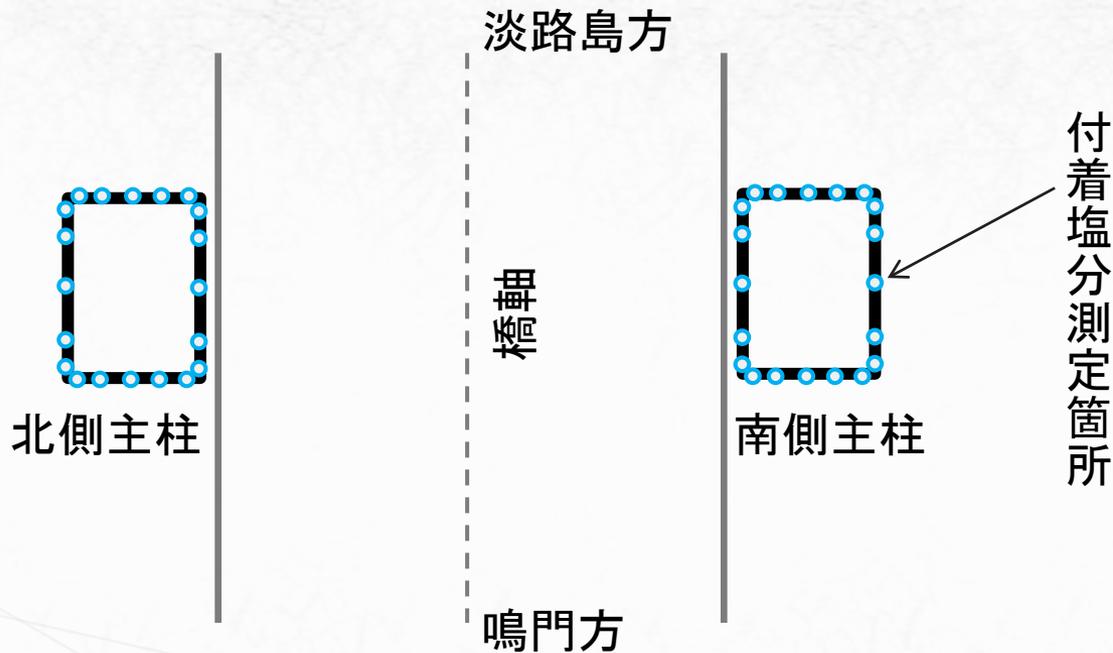
実橋梁への付着-大鳴門橋-

表面付着塩分量の計測

3P主塔 北・南塔柱の各面を計測

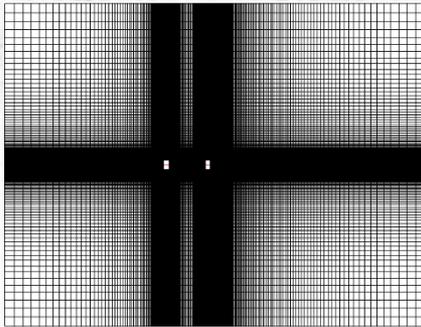
計測箇所は基礎部下面から800mm上方

合計40か所

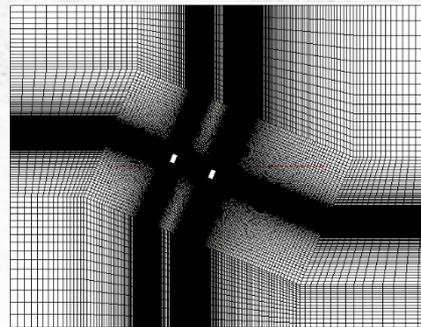


実橋梁への付着-大鳴門橋-

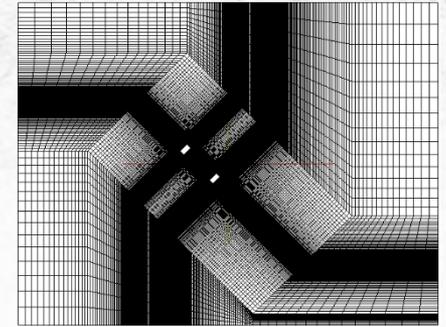
- 流れ場解析
- ・OpenFOAMで**定常計算**
 - ・気象データ反映のために角度毎の計算



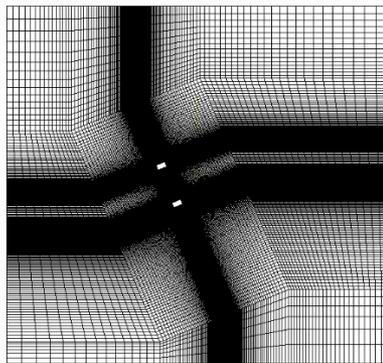
0°



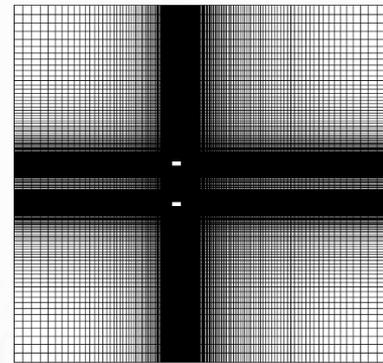
22.5°



45°



67.5°

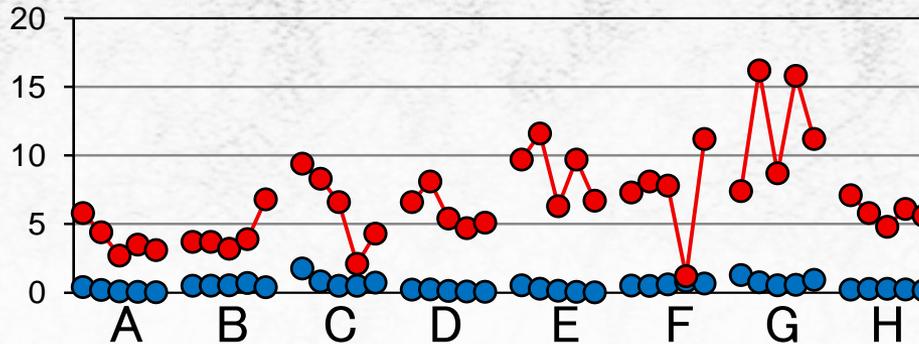


90°

実橋梁への付着-大鳴門橋-

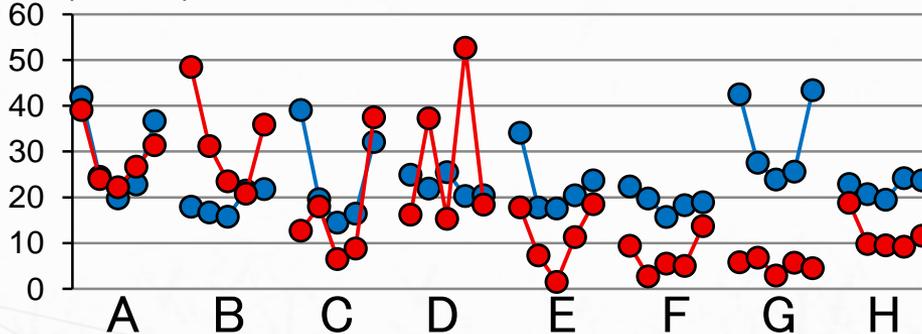
付着量比較

塩分量(mg/m^2)

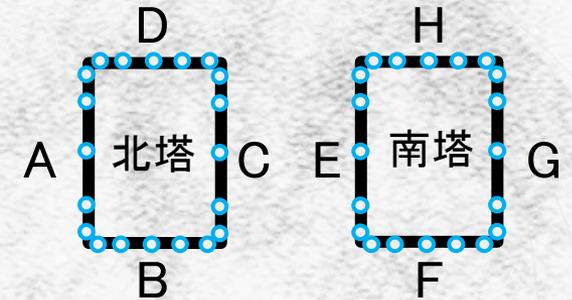


平均風速3.59m/s, 降雨直後

塩分量(mg/m^2)



平均風速2.58m/s, 降雨からの日数5日



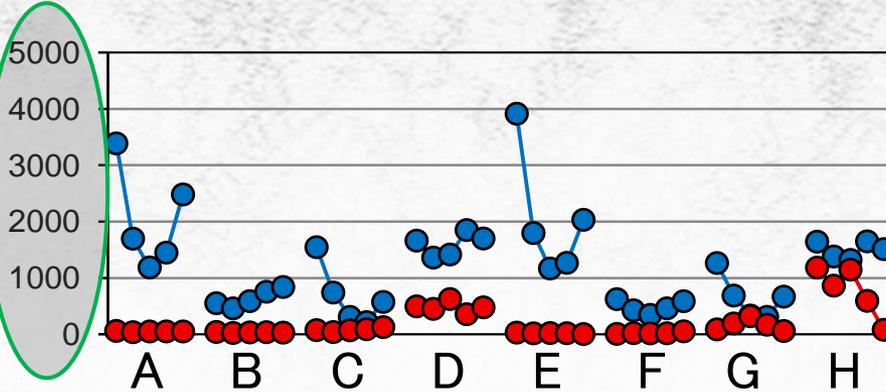
● 観測値
● 計算値

- ・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

実橋梁への付着-大鳴門橋-

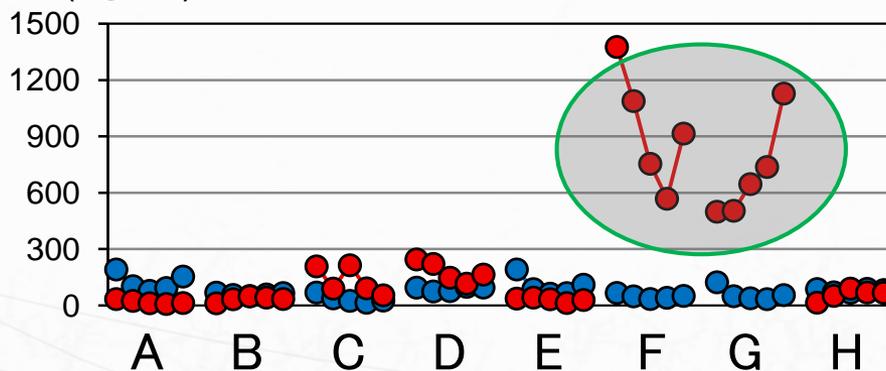
付着量比較

塩分量(mg/m^2)

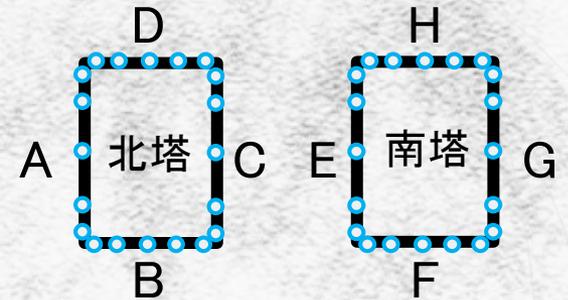


平均風速4.35m/s, 降雨からの日数9日

塩分量(mg/m^2)

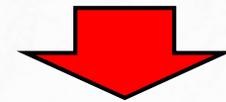


塩が析出



- 観測値
- 計算値

・過剰な評価



円筒と同様の理由

・波の影響は考慮できず

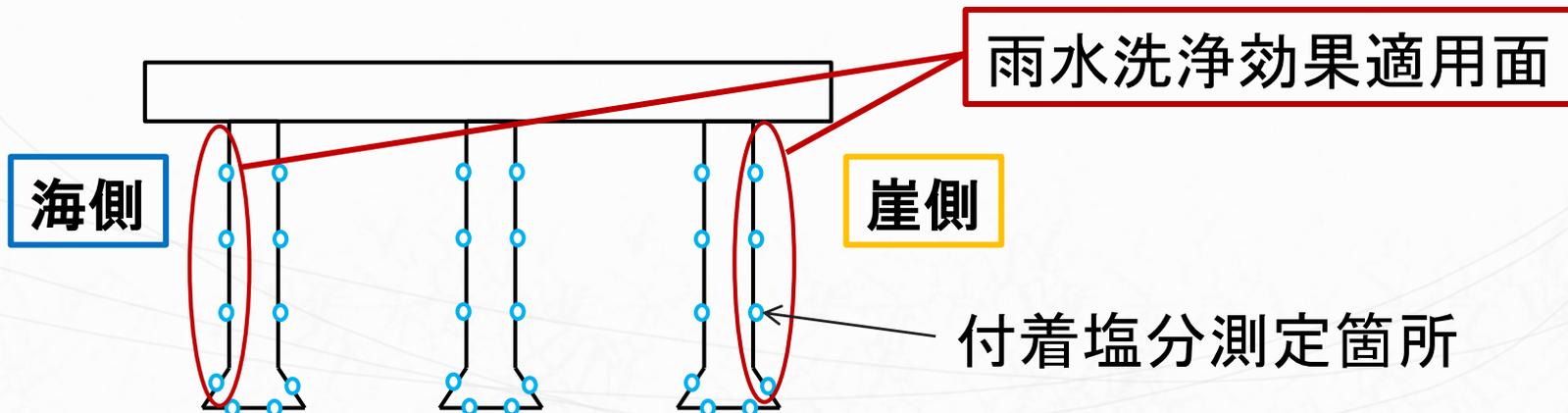
実橋梁への付着-天鳥橋-

表面付着塩分量の計測



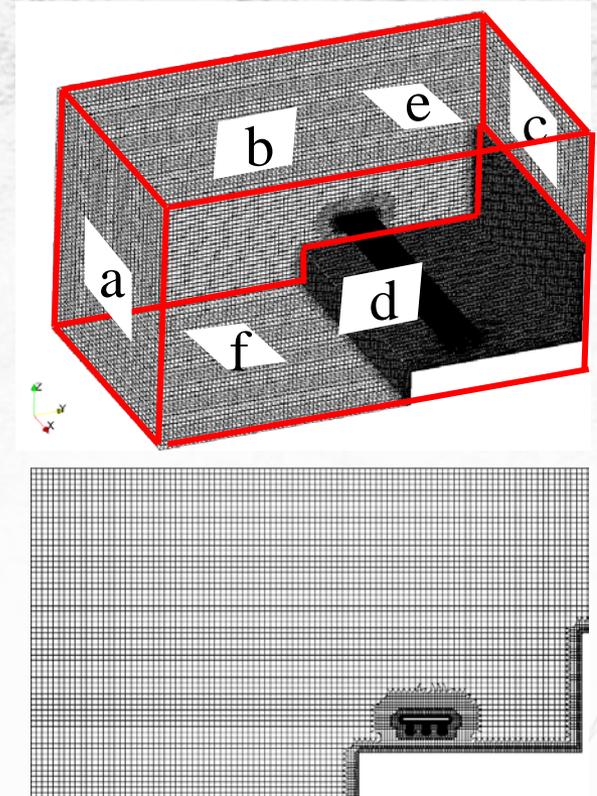
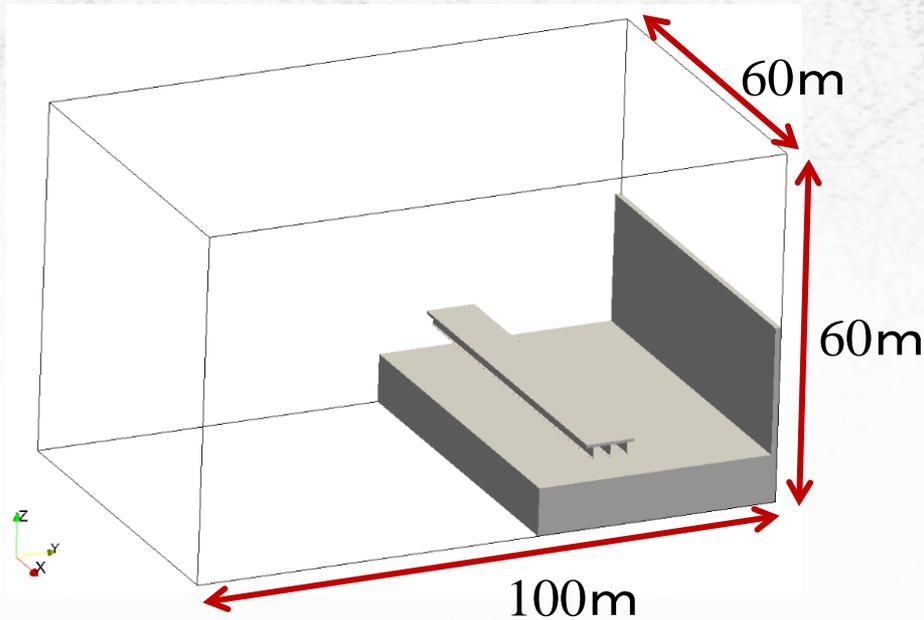
- 3鋼製主桁(海側・中央・崖側の両面)
- ウェブ(下端より300mm,900mm,1400mm)
- フランジ(上面, 下面)

合計30か所



実橋梁への付着-天鳥橋-

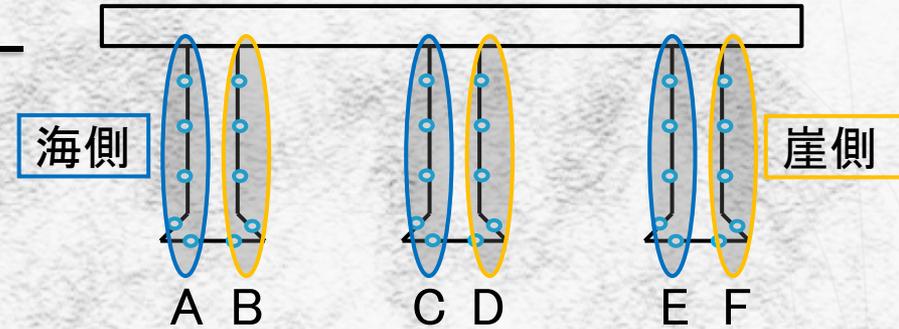
3次元流れ場解析 ・OpenFOAM, 定常計算, 各風向



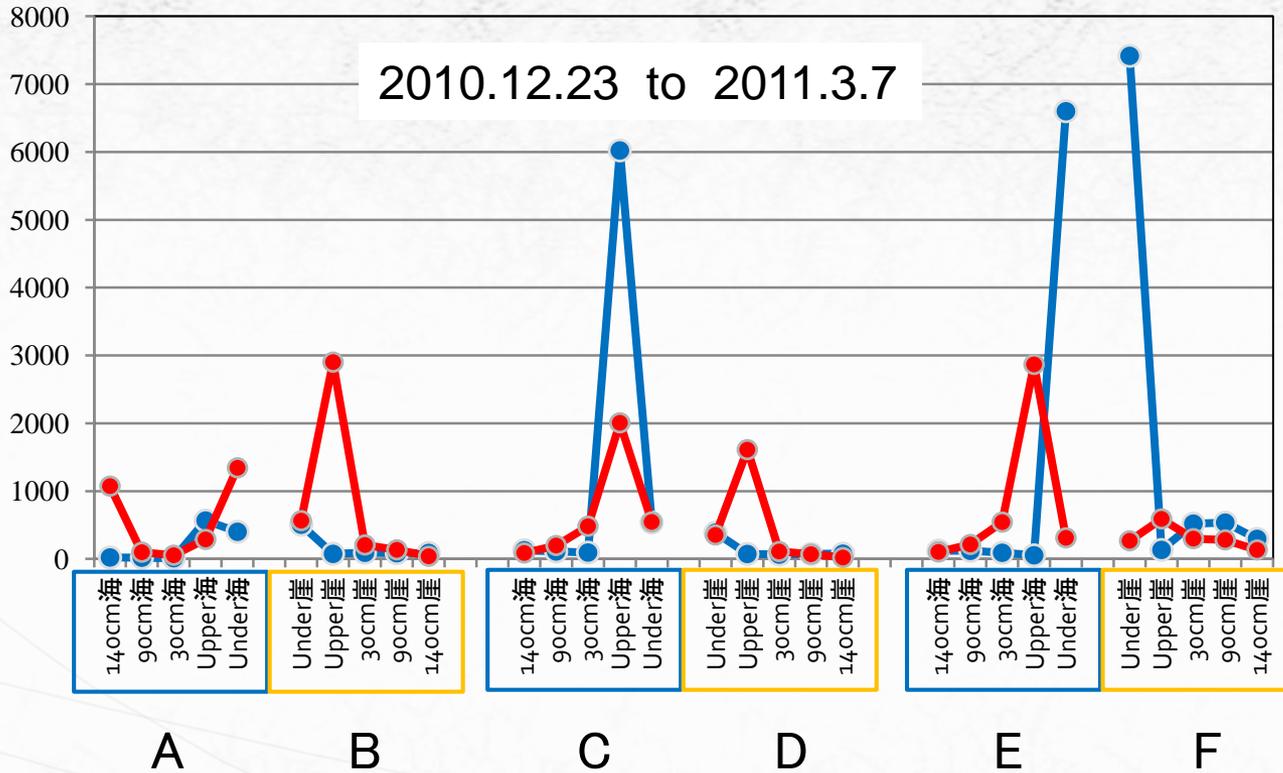
境界面	a	b	c	d	e	f
流入風向 0°	流入口	slip	流出口	slip	slip	non-slip
同 22.5° 45° 67.5°	流入口	流入口	流出口	流出口	slip	non-slip

実橋梁への付着-天鳥橋-

付着量比較



塩分量(mg/m²)



● 観測値
● 計算値

・オーダー

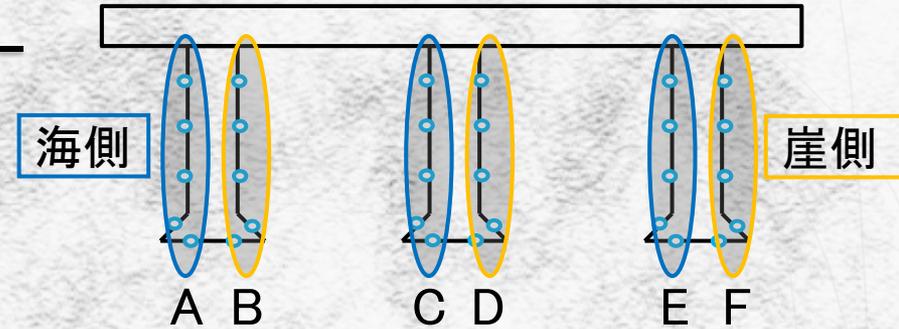
・傾向

Web部は良好

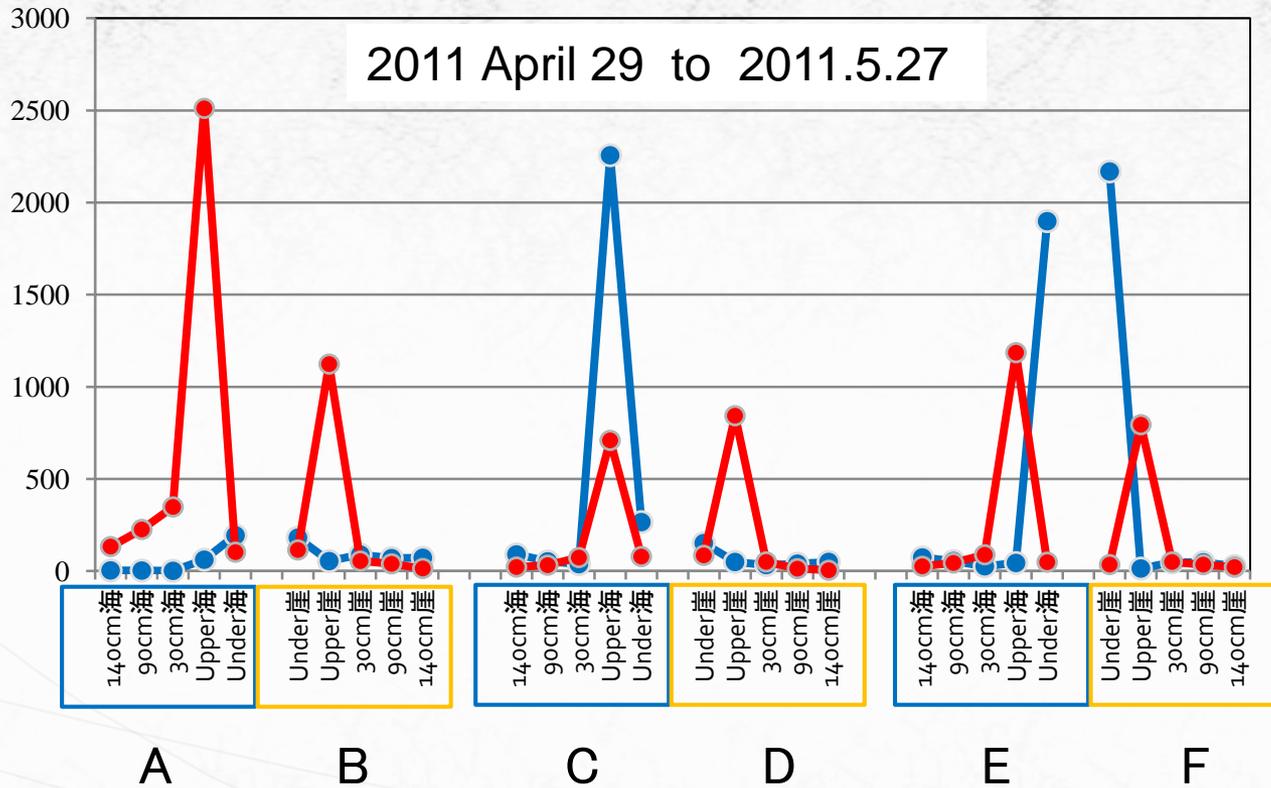
Flange部は要改善

実橋梁への付着-天鳥橋-

付着量比較



塩分量(mg/m²)



● 観測値
● 計算値

・オーダー

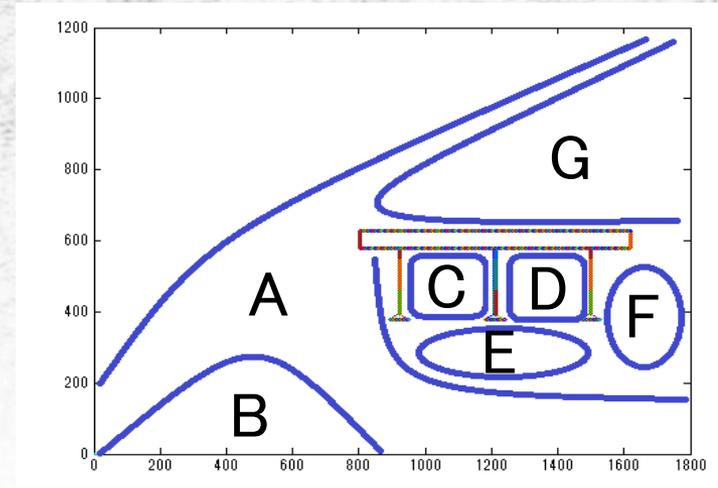
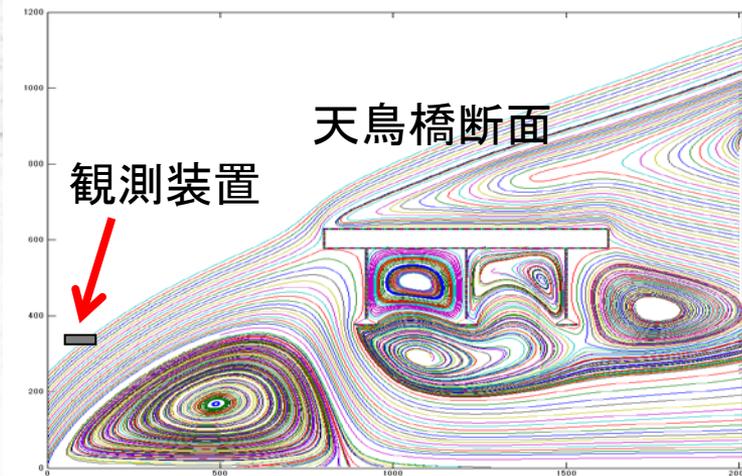
・傾向

Web部は良好

Flange部は要改善

実橋梁への付着-天鳥橋-

風向: 0° (橋軸直角)



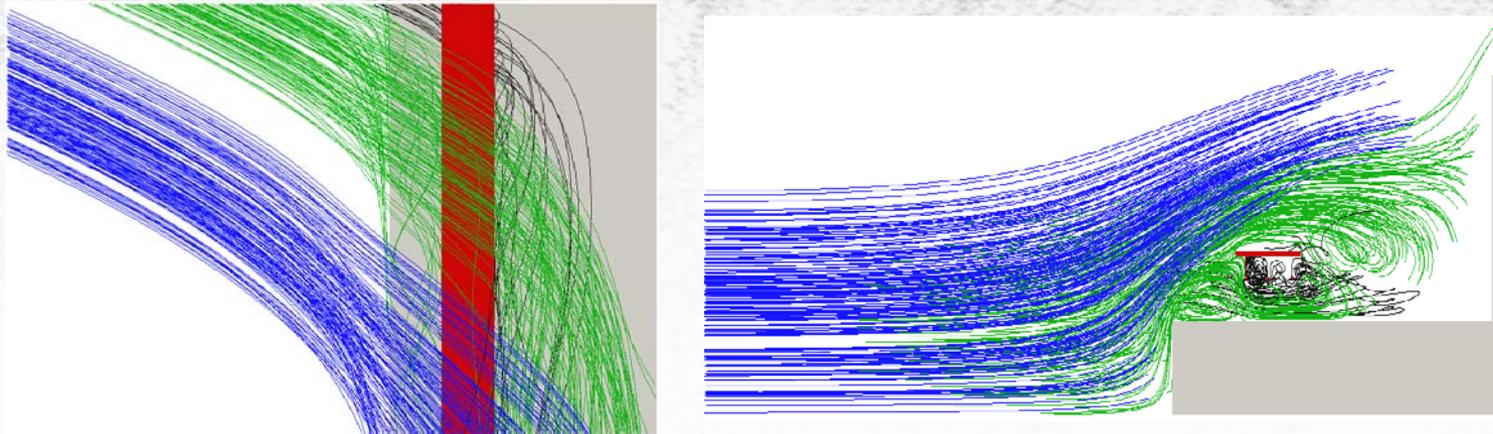
天鳥橋主桁周囲の流線図(0°)

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

実橋梁への付着-天鳥橋-

風向: 橋軸直角より 22.5° 水平偏角



天鳥橋周囲の流線図(22.5°)

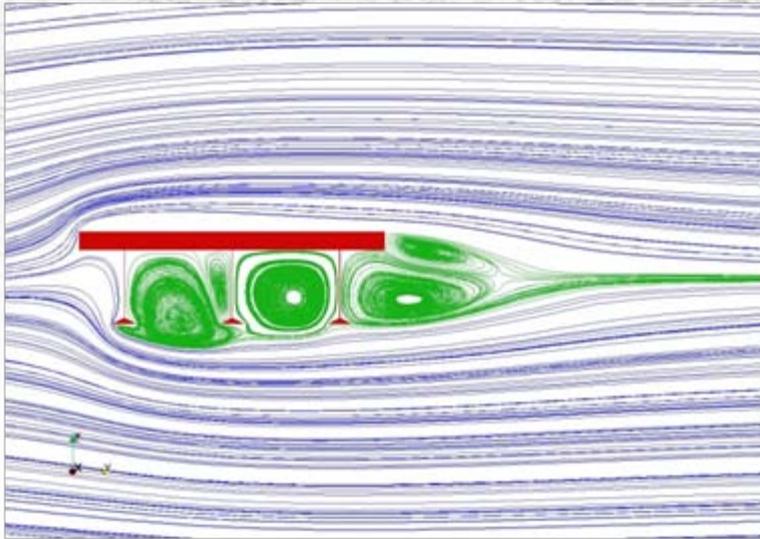
橋梁主桁間に流入する流線が確認

⇒主桁間に入り込む流線は、

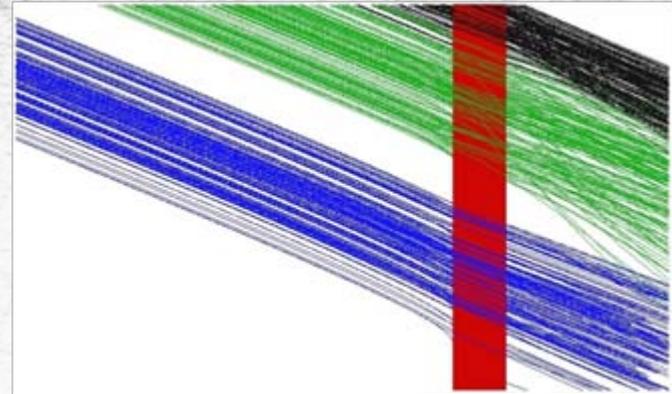
橋軸に対して斜角を持った風向の方が顕著

実橋梁への付着-天鳥橋-

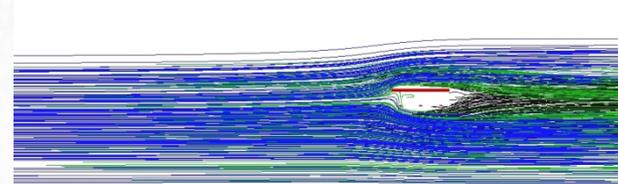
周辺地形の影響



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

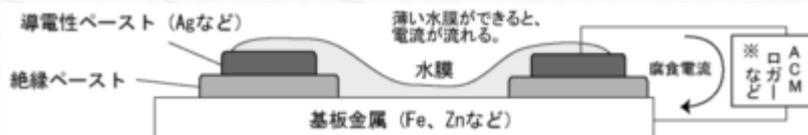
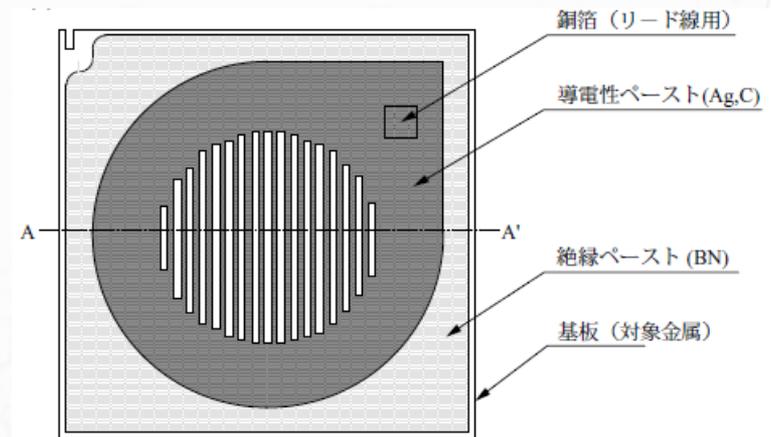
実橋梁への付着

まとめと今後の課題

- 付着量の予測値と実測値は傾向的に類似
 - 予測手法の妥当性
 - 維持管理上の指標, 維持管理戦略・防食対策
- 付着塩分量と実測との差
 - 濃度分布
 - 付着機構
 - 洗浄機構 (降雨曝露時間, 濡れ時間)
- 飛来塩分濃度の真値と円筒型捕集器の捕集性能
- 周辺地形の影響大
- 高い洗浄効果

ACMセンサ

- 降雨や結露などによって両金属間に薄い水膜が形成されることで流れる電流から，表面の濡れ時間，海塩付着量，腐食速度を解析する。
- 出力は μA であり，10分毎に電流値を取得する。
- センサの寿命は18Cといわれている。



ACMセンサ

● 表面の濡れ時間

センサ出力の大きさが降雨時・結露時・乾燥時で異なるという性質を利用して濡れ時間を判定

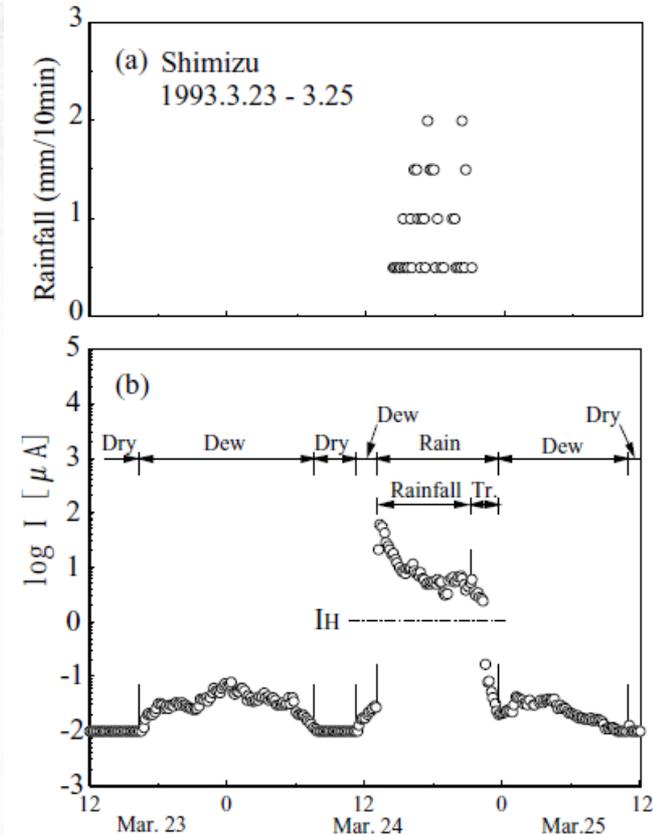
しきい値 $I_H (= 1 \mu A)$ を設ける

$I > I_H$ となった時点からさかのぼり、 I の変化率 ($I_{t+10}/I_t > 2$) が2以上となる最も早い時刻を降雨開始時刻とする

I がほぼ定常となった後、極大値をとるか、 I の変化率が $1/2$ 以下になった時点で降雨が終了したとする

降雨終了後、 I が極小値をとった時点、あるいは $0.1 \mu A$ より小さくなった時点までを、雨滴が存在しその影響が残っている期間（遷移期間）とする

降雨開始時刻から遷移期間終了時刻までを濡れ時間とする



(参考) 第121回防食シンポジウム
海洋性大気環境の腐食性評価

ACMセンサ

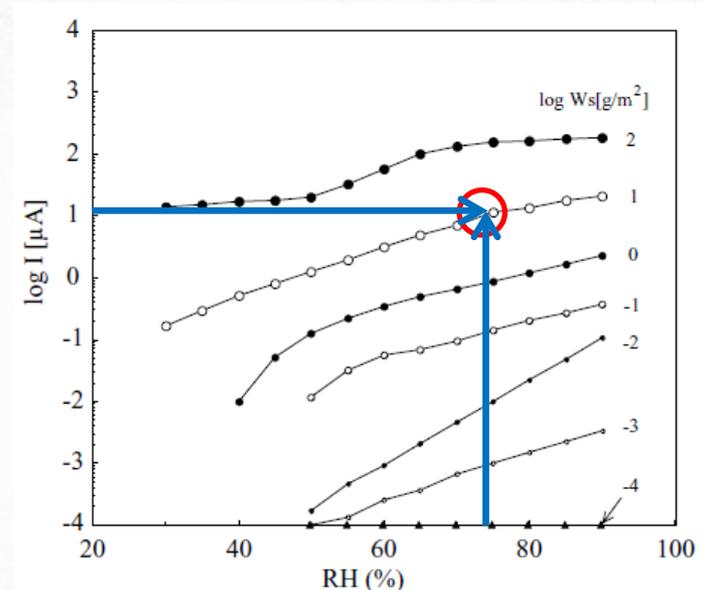
● 海塩付着量

所定の海塩($10^{-4} \sim 10 \text{g/m}^2$)をACMセンサに付着させ、センサ出力 I [μA]および相対湿度 RH [%]間の較正曲線を求める。 I および RH から海塩付着量を求める。

解析ソフトで得られる付着量は半日毎の値

10分毎に取得するセンサ出力から海塩付着量を求め、半日間集計。最頻値を半日間の10分間平均累積付着量とする。

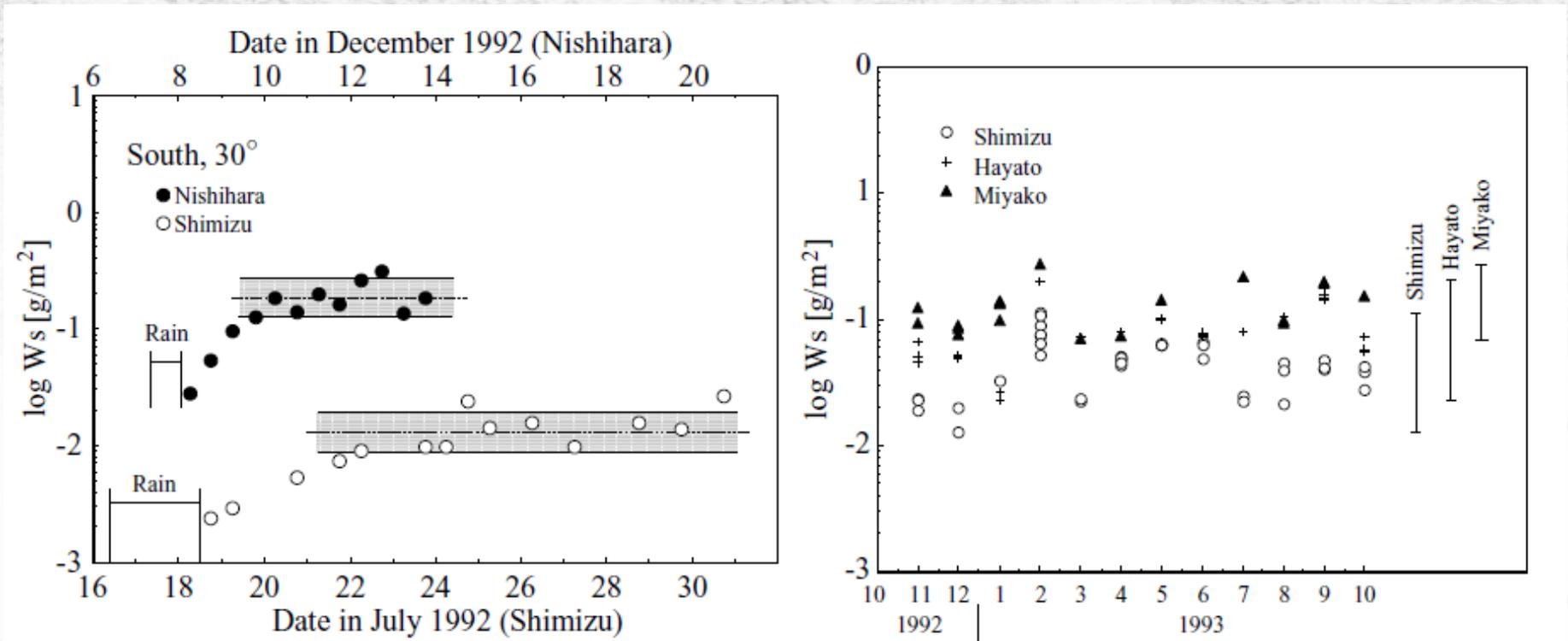
降雨判定の際は、海塩付着量は0とする



(参考) 第121回防食シンポジウム
海洋性大気環境の腐食性評価

ACMセンサ

● 海塩付着量

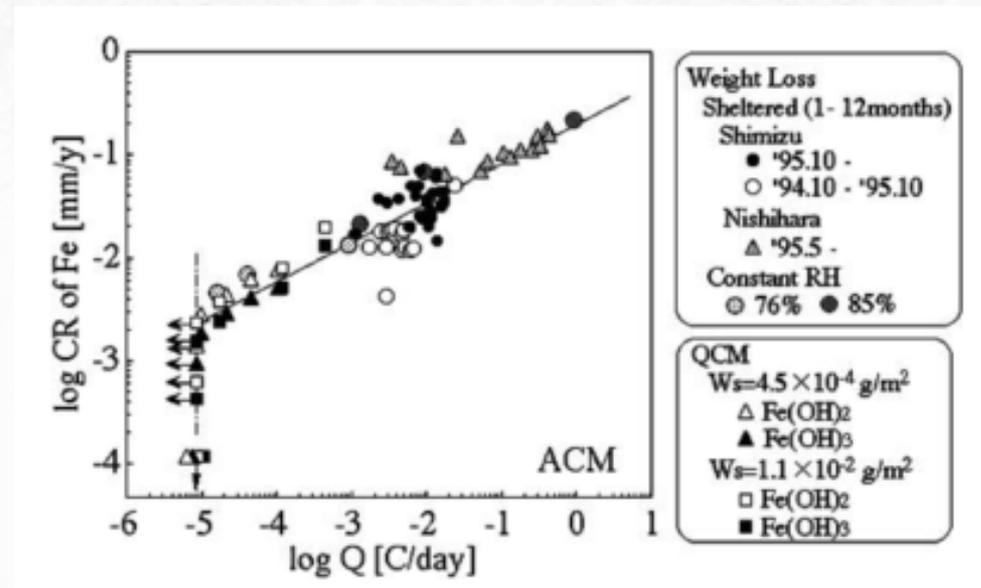


(参考) 第121回防食シンポジウム
海洋性大気環境の腐食性評価

ACMセンサ

- 腐食速度

ACMセンサ電流出力と腐食速度(log CR)は直線関係にあるので日平均電気量(Q)から腐食速度が求まる

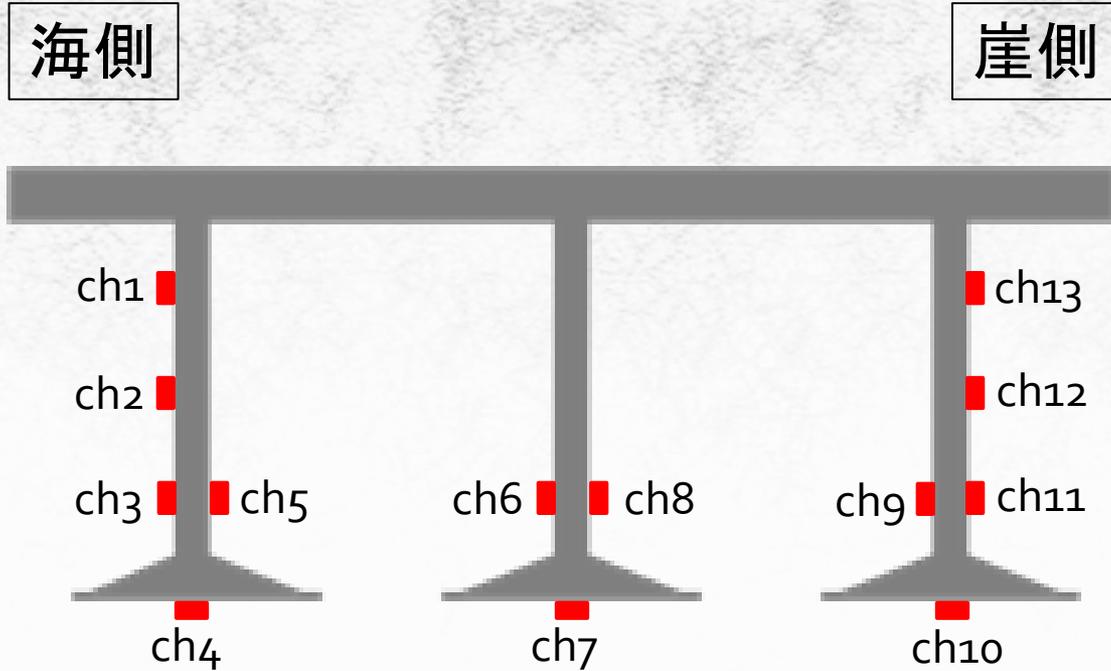


(参考)大気腐食はどこまでわかってきたか
-ACMセンサを利用して-

ACMセンサ

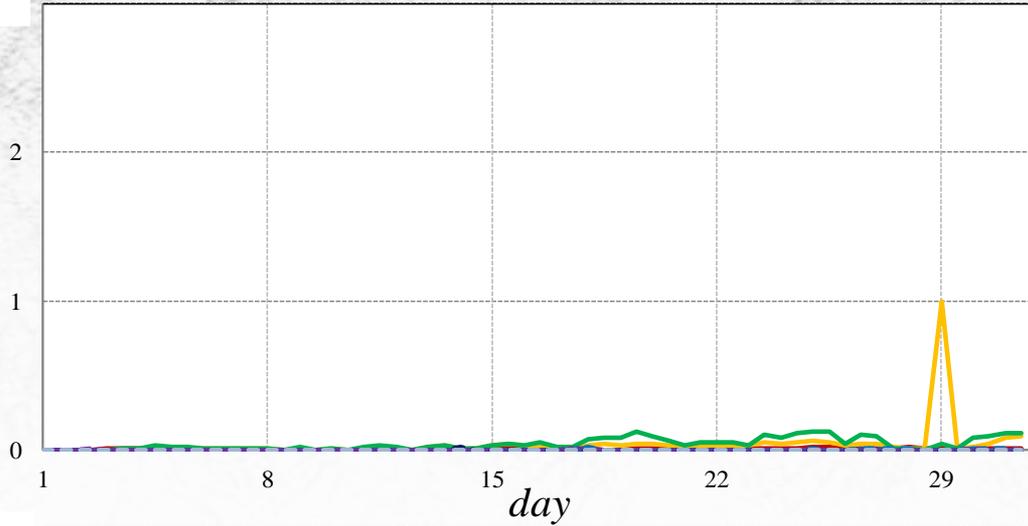


ACMセンサ

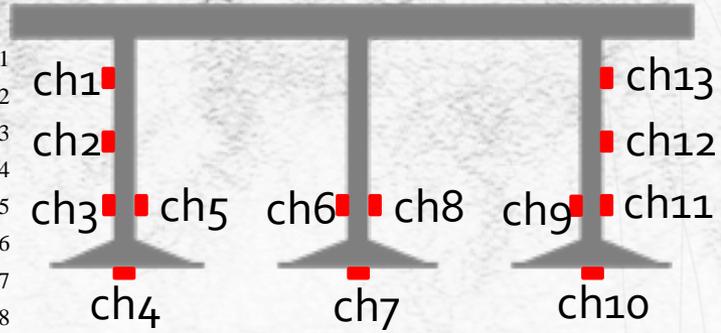


ACMセンサ出力解析結果（5月）

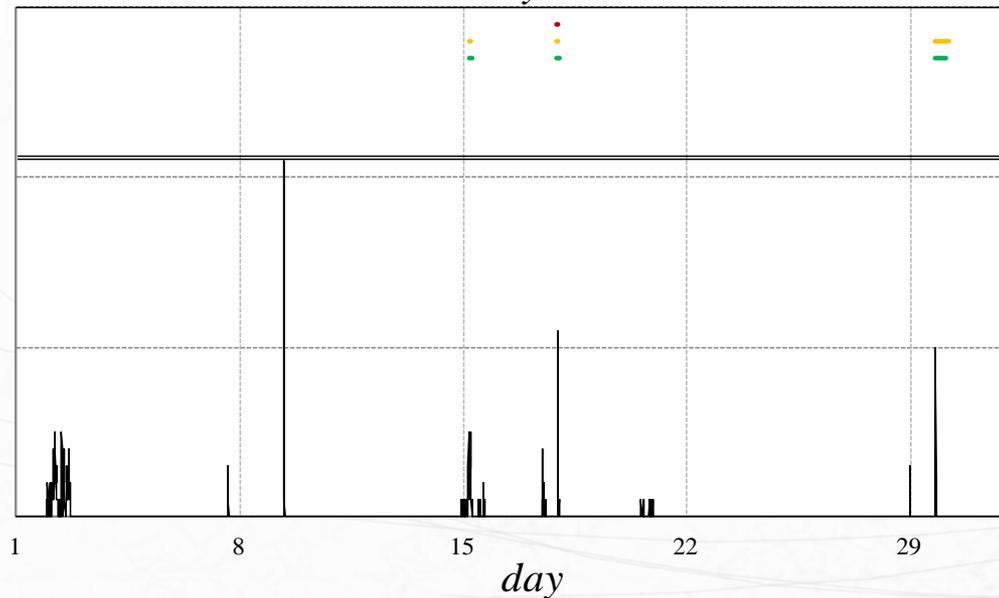
g/m²



— ch1
— ch2
— ch3
— ch4
— ch5
⋯ ch6
⋯ ch7
⋯ ch8
- - ch9
- - ch10
- - ch11
- - ch12
- - ch13



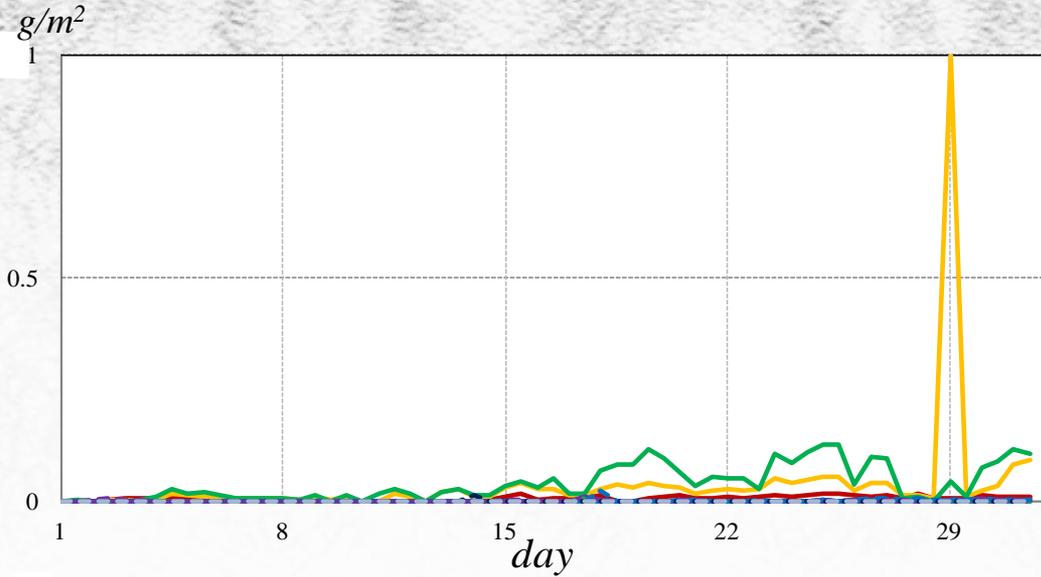
mm/10min



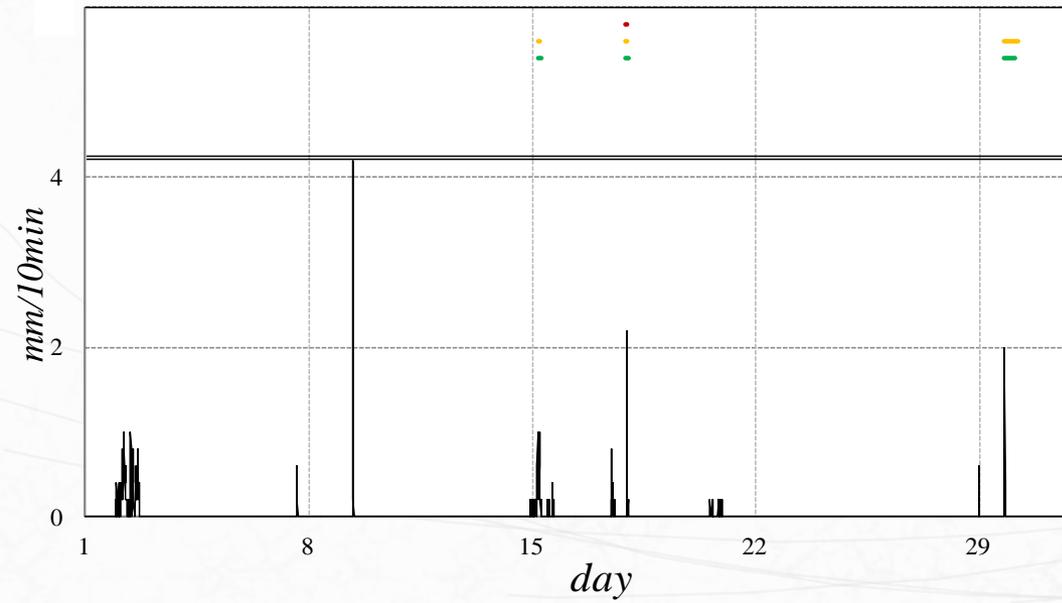
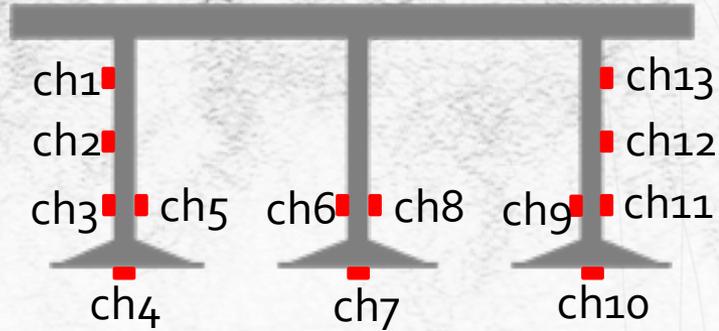
— 雨量
— ch1
— ch2
— ch3
— ch4
— ch5
⋯ ch6
⋯ ch7
⋯ ch8
- - ch9
- - ch10
- - ch11
- - ch12
- - ch13



ACMセンサ出力解析結果（5月）



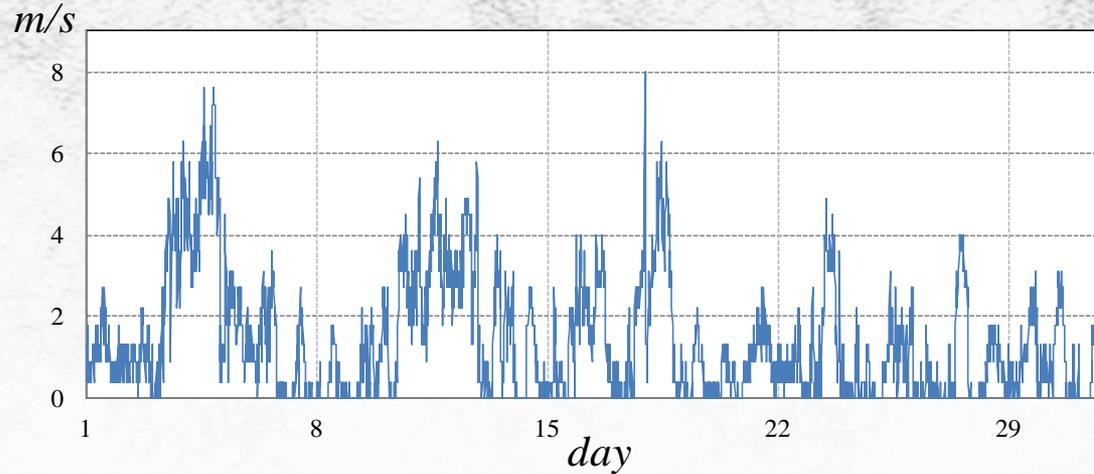
— ch1
— ch2
— ch3
— ch4
— ch5
····· ch6
····· ch7
····· ch8
- - - ch9
- - - ch10
- - - ch11
- - - ch12
- - - ch13



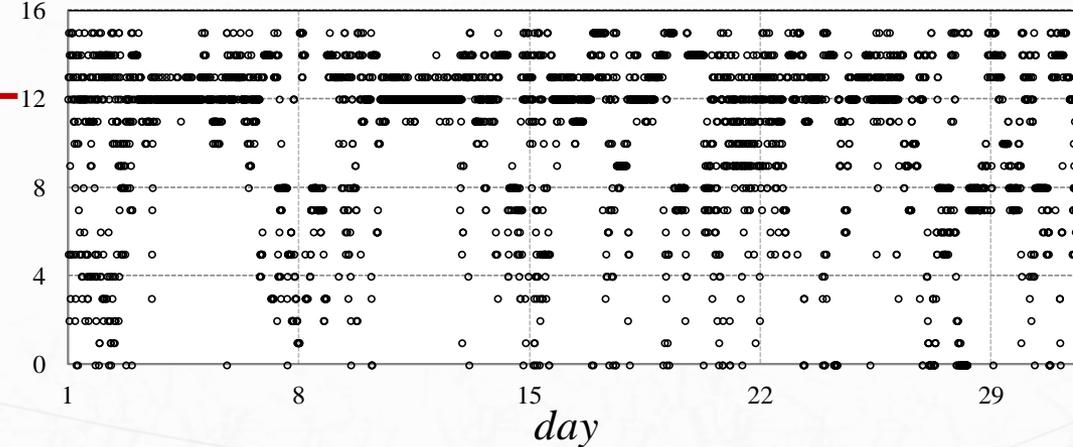
— 雨量
— ch1
— ch2
— ch3
— ch4
— ch5
····· ch6
····· ch7
····· ch8
- - - ch9
- - - ch10
- - - ch11
- - - ch12
- - - ch13



気象観測データ (5月)

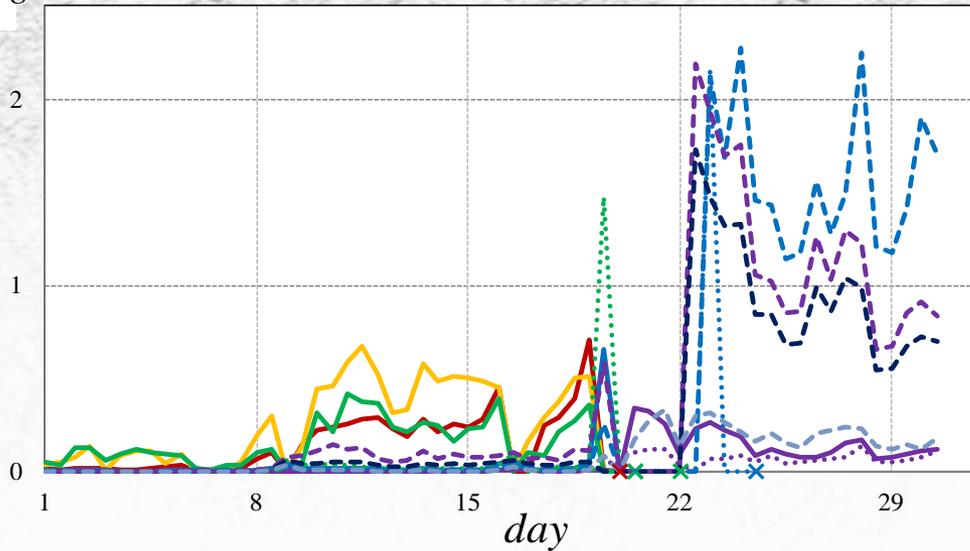


風向 (0 = North, 4 = East, 8 = South, 12 = West)



橋軸直角
方向

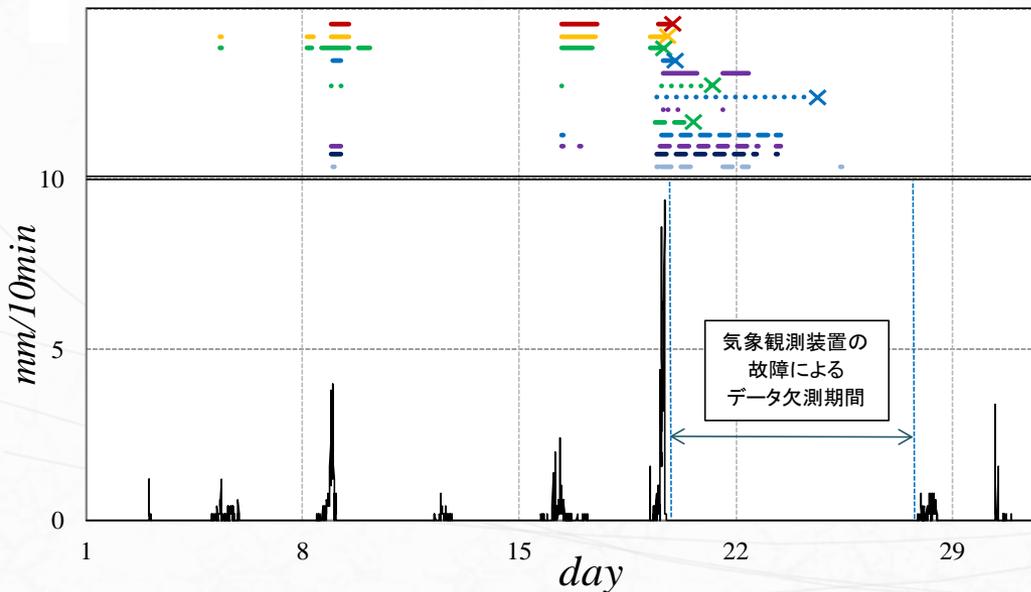
ACMセンサ出力解析結果（6月）

g/m²

— ch1
— ch2
— ch3
— ch4
— ch5
... ch6
... ch7
... ch8
- - ch9
- - ch10
- - ch11
- - ch12
- - ch13

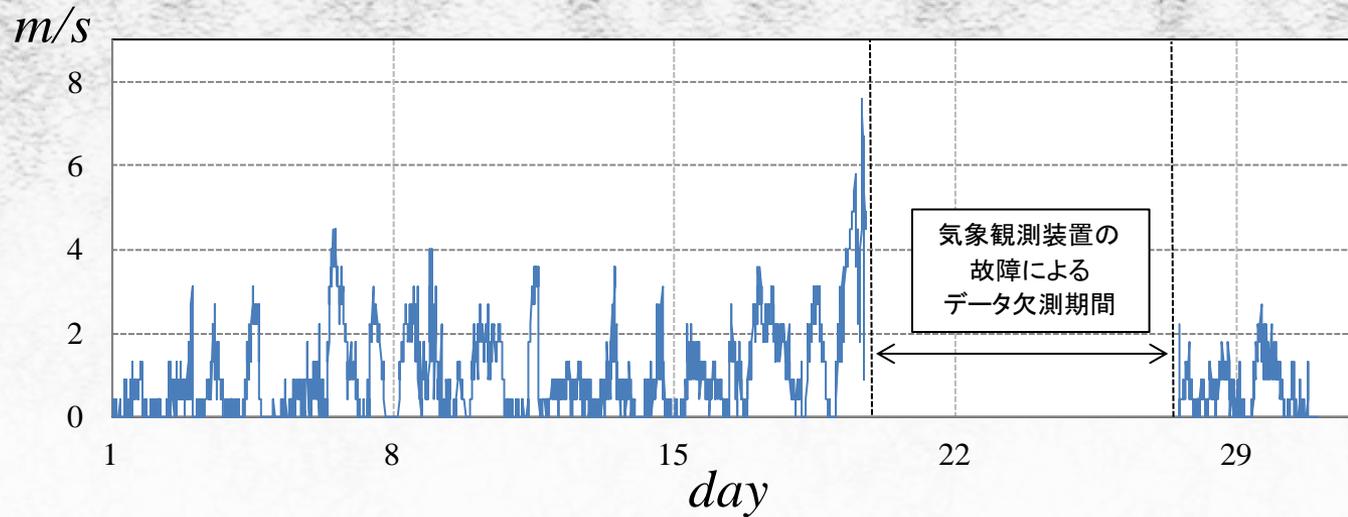
ch1 ■ ch13
ch2 ■ ch12
ch3 ■ ch5 ch6 ■ ch8 ch9 ■ ch11
ch4 ■ ch7 ch10

* ch_{1,2,3,4,6,7,9}について、
電気量が18C以上となった
時点以降のデータは信頼性に
問題があると考えたため、
省略した。

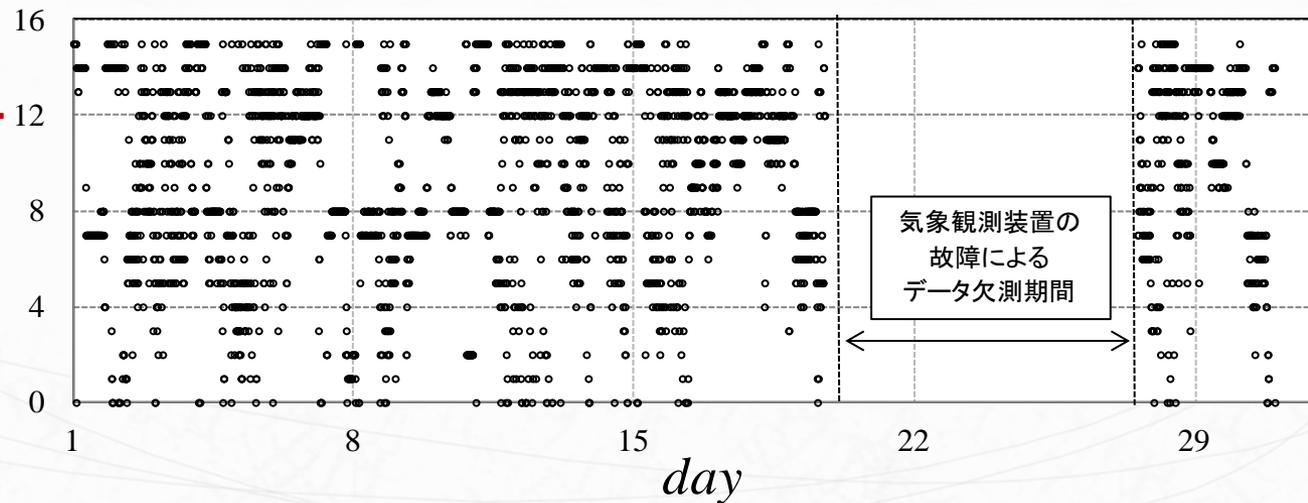


— 雨量
— ch1
— ch2
— ch3
— ch4
— ch5
... ch6
... ch7
... ch8
- - ch9
- - ch10
- - ch11
- - ch12
- - ch13

気象観測データ (6月)



風向 (0 = North, 4=East, 8=South, 12=West)



橋軸直角
方向

- 計算領域の拡張
- 周辺地形の再現
- 海塩粒子個々の移動



計算領域

天鳥橋，橋台，周辺地形を簡易的に模擬

風向と橋軸直角方向とのなす角が

0°

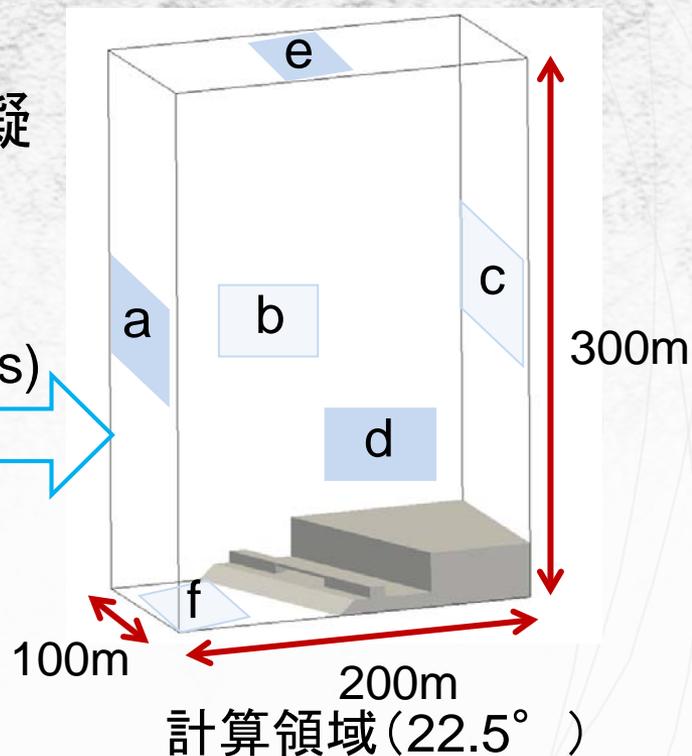
22.5°

45°

67.5°

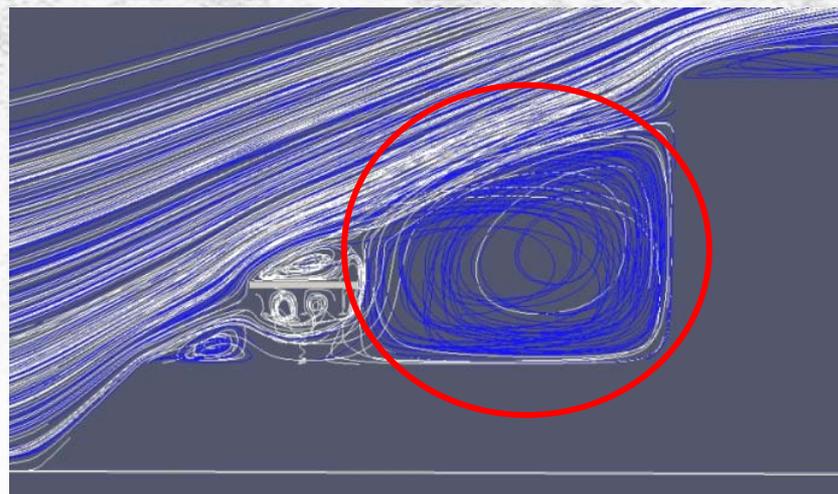
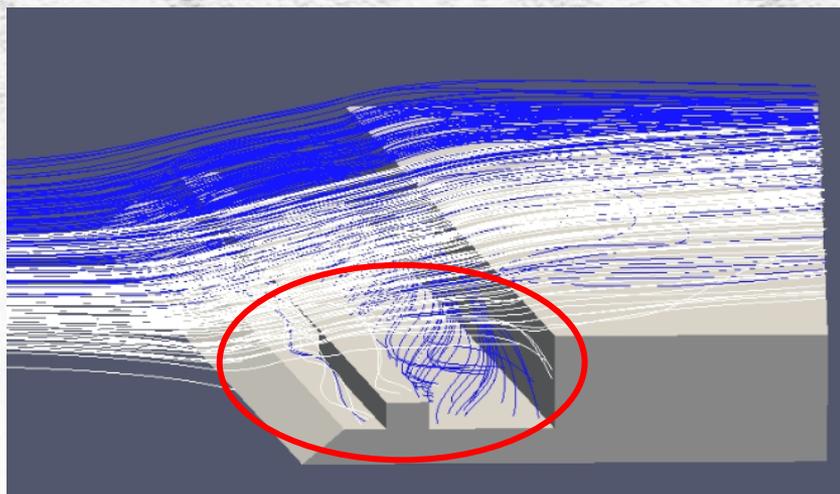
に対応した領域を作成.

Wind(2m/s)



角度	a	b	c	d	e	f
0	流入	壁面	流出	壁面	壁面	壁面
22.5						
45	流入	壁面	流出	流出	壁面	壁面
67.5						

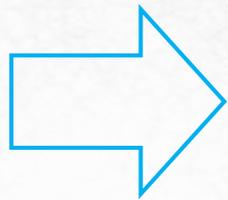
流線図



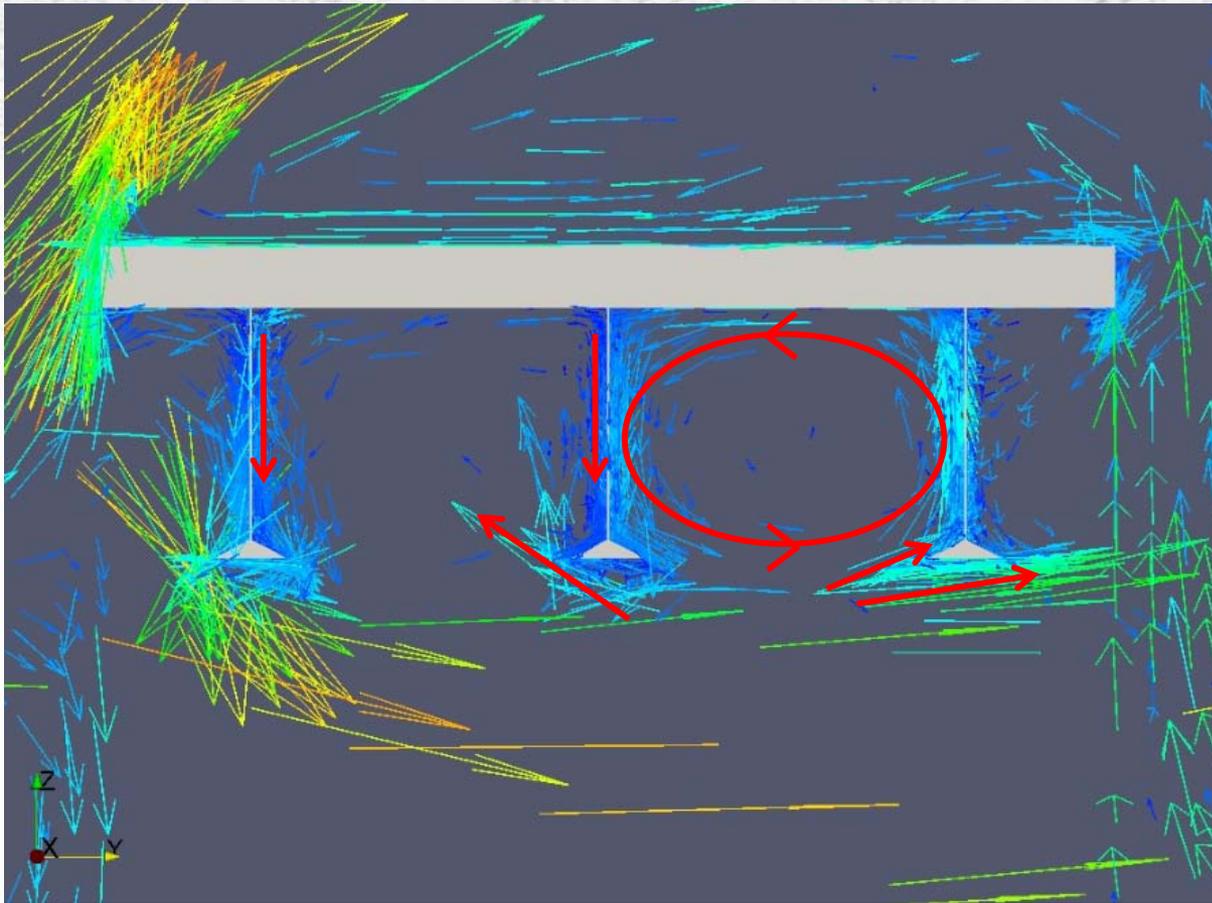
流入風向 22.5°

橋梁と崖の間にらせん状流れの形成が確認できた。
橋台に沿って流下する流れが確認できた。

風速ベクトル図（スパン中央断面）



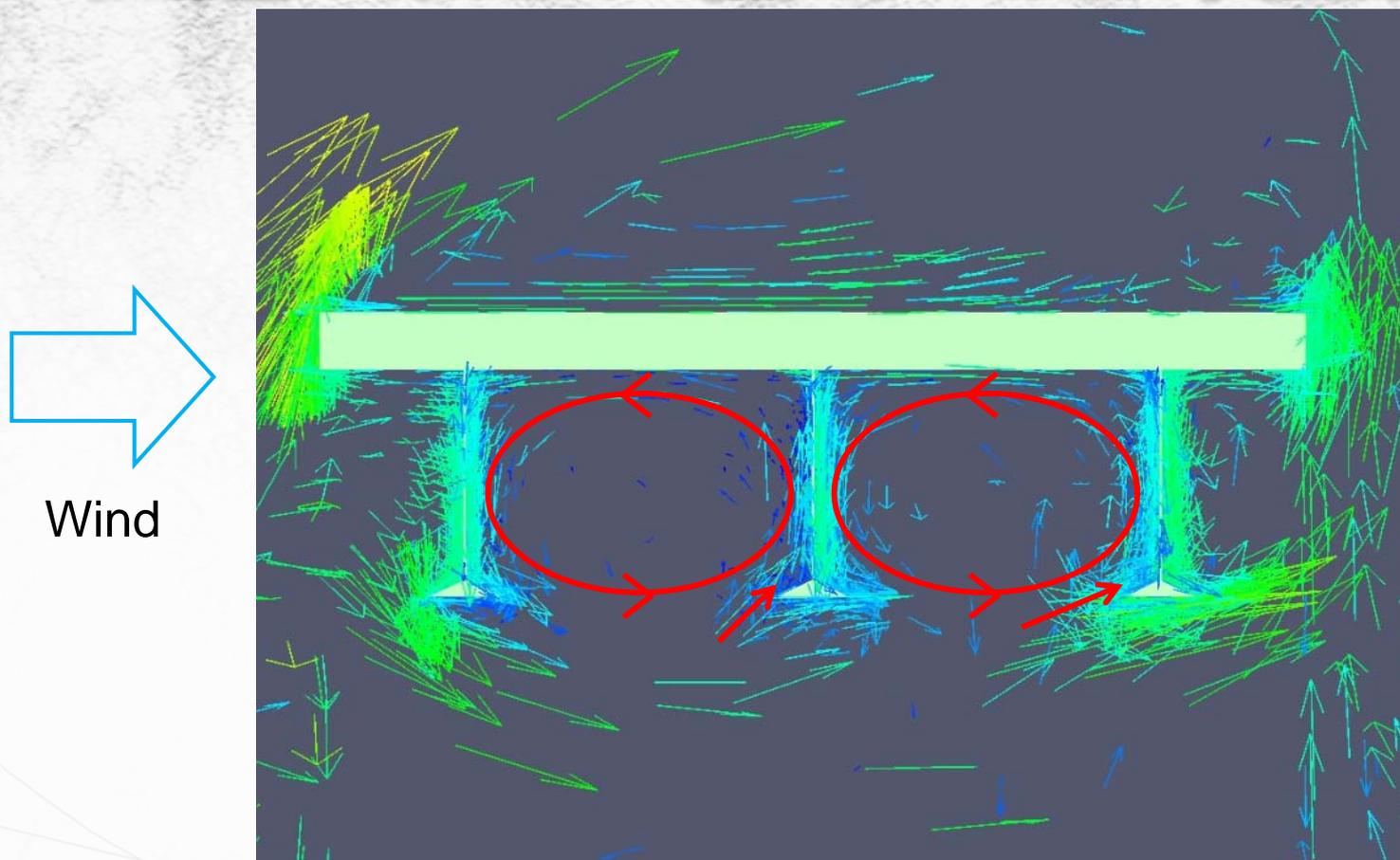
Wind



流入風向 0°



風速ベクトル図（スパン中央断面）



流入風向 22.5°

- ・ 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

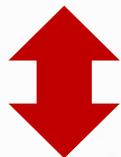
- ・ 海塩粒子を塩分濃度というスカラー量とみなす
- ・ マクロな視点

case2

粒子挙動

- ・ 海塩粒子個々の挙動を追う
- ・ ミクロな視点

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

方法 2 : 粒子追跡

—海塩粒子の輸送過程—

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

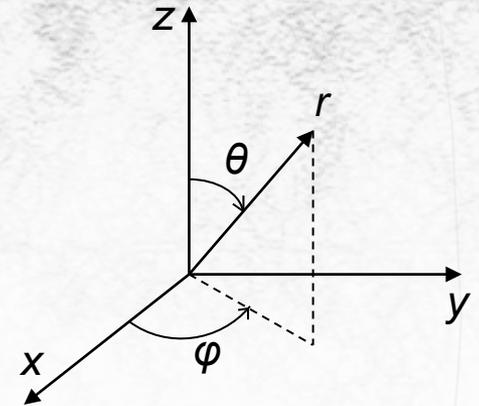
方法 2 : 粒子追跡

—海塩粒子の輸送過程—

拡散過程

・ ランダムウォーク法

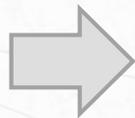
- 拡散を確率的な挙動とみなす.
- 粒子の移動量を乱数で決める.



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

P_i, Q_i, R_i : 乱数

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



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

D : 拡散係数
(空気の動粘性係数)

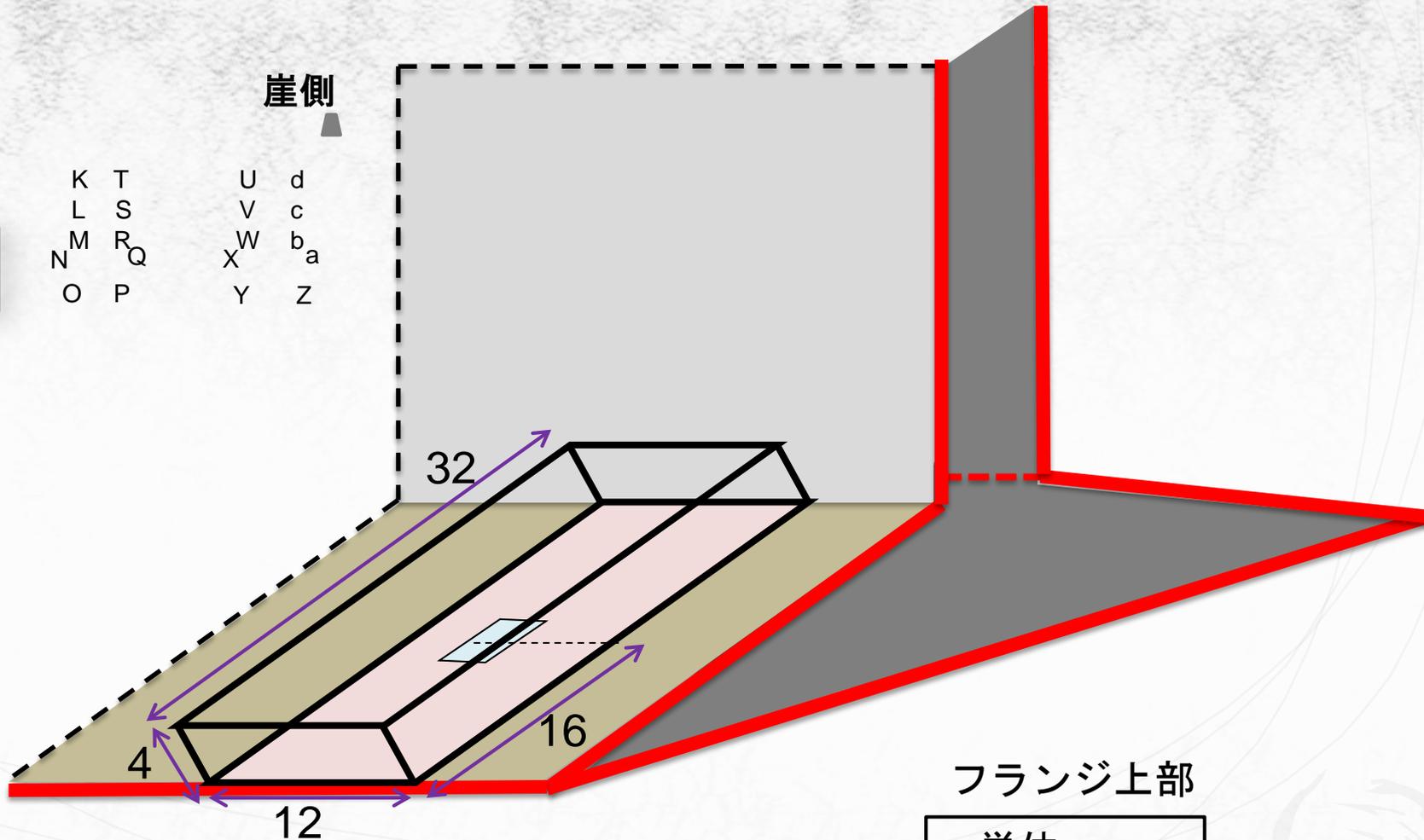
方法 2 : 粒子追跡

—計算領域—

海側

崖側

A	J	K	T	U	d
B	I	L	S	V	c
C	H	M	R	W	b
D	G	N	Q	X	a
E	F	O	P	Y	Z

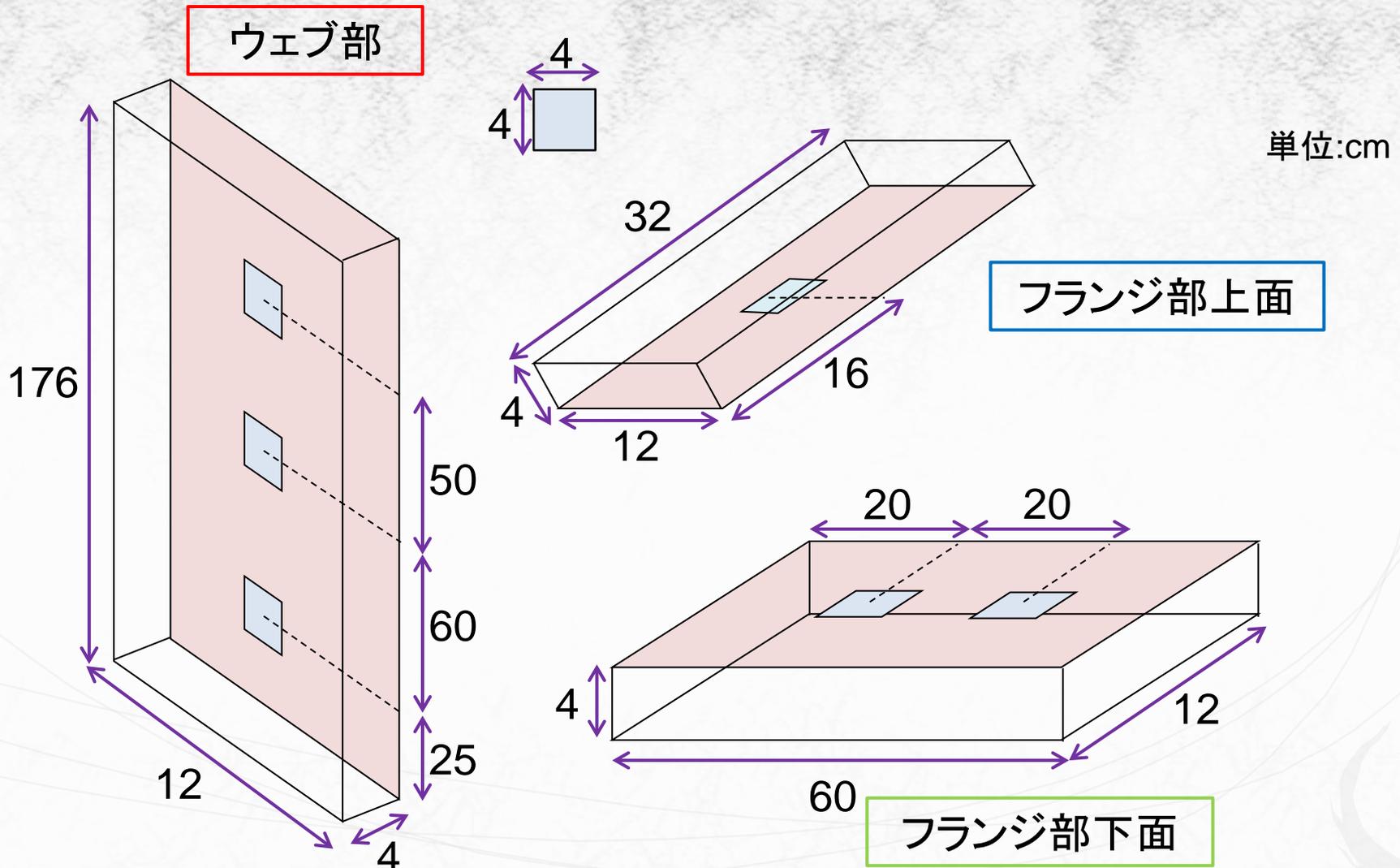


フランジ上部

単位 : cm

方法2：粒子追跡

—計算領域—



方法 2 : 粒子追跡

—計算結果—

2011.3.8-2011.4.28

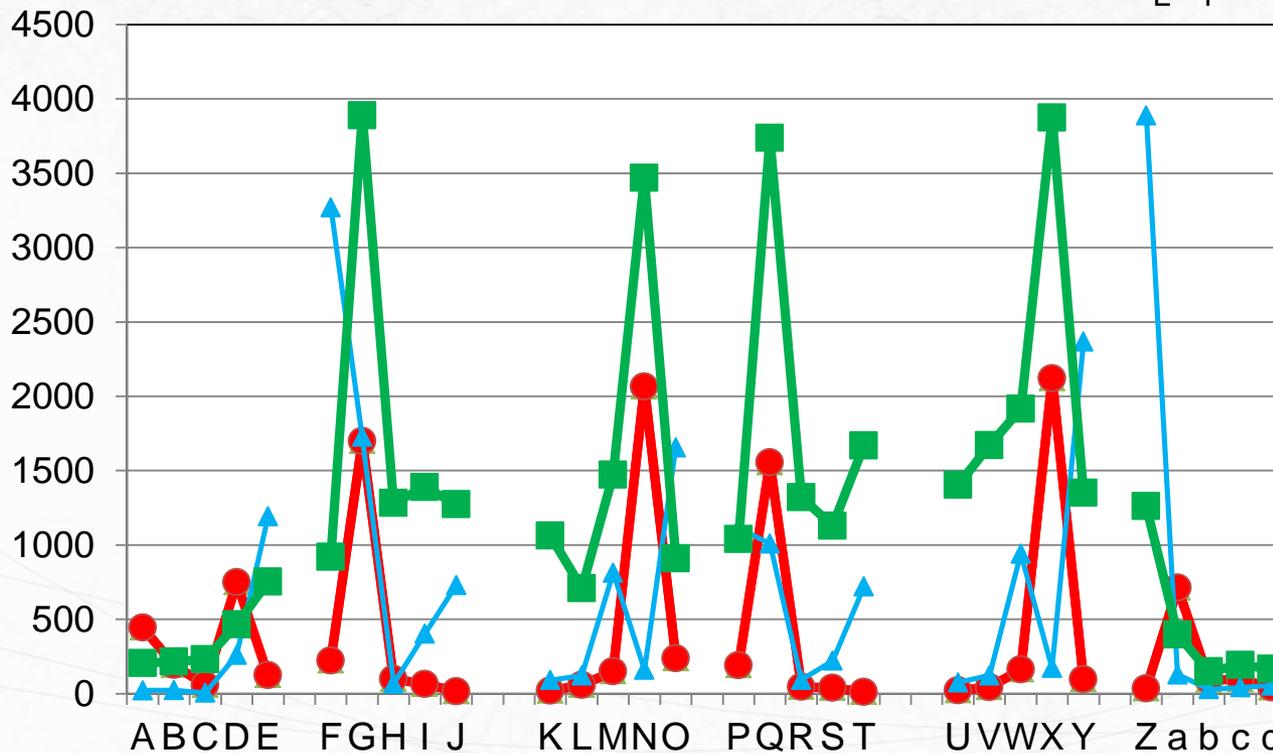
● 観測値 ▲ 方法1 ■ 方法2

海側

崖側

A	J	K	T	U	d						
B	I	L	S	V	c						
D	C	H	G	N	M	R	Q	X	W	b	a
E	F	O	P	Y	Z						

mg/m²

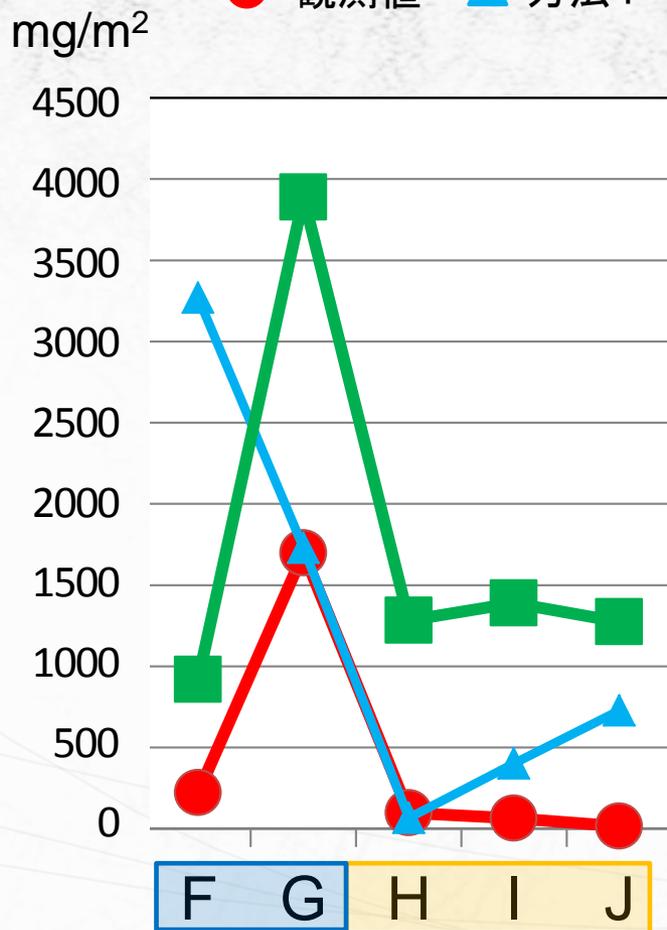


方法2：粒子追跡

—計算結果—

2011.3.8-2011.4.28

● 観測値 ▲ 方法1 ■ 方法2



海側

崖側



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

感度分析(単位体積質量)

横軸:倍率(基準単位体積質量1110kg/m³)

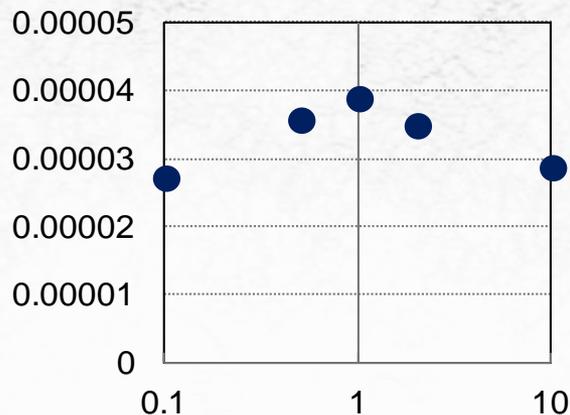
流入風向: 0°

海側

崖側

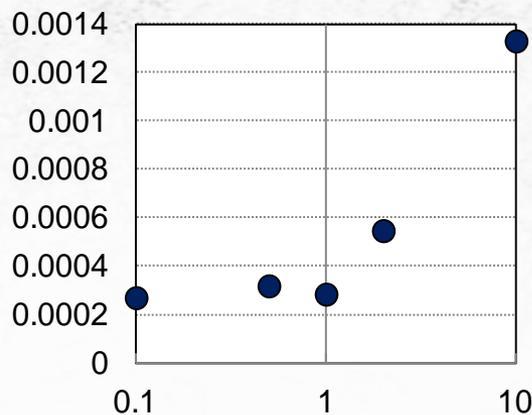
A	J	K	T	U	d
	B	I	L	S	V
D	C	H	G	N	M
				R	Q
E	F	O	P	Y	Z
				X	W
					b
					a

mg/m²/sec



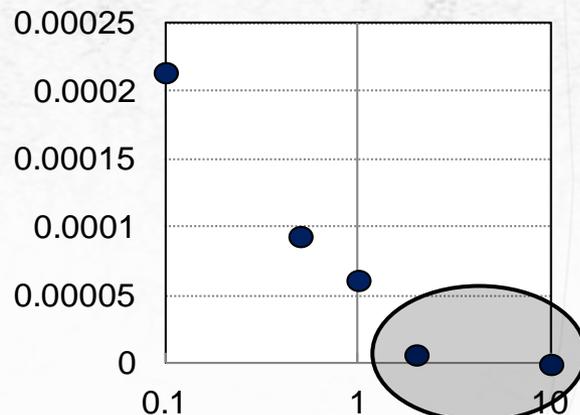
ウェブ部
海側90cm

mg/m²/sec



フランジ部上面
海側

mg/m²/sec



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

感度分析(粒径)

横軸:倍率(基準粒子半径 10 μ m)

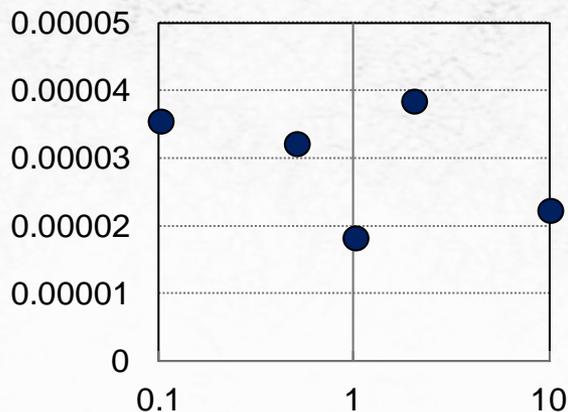
流入風向: 0°

海側

崖側

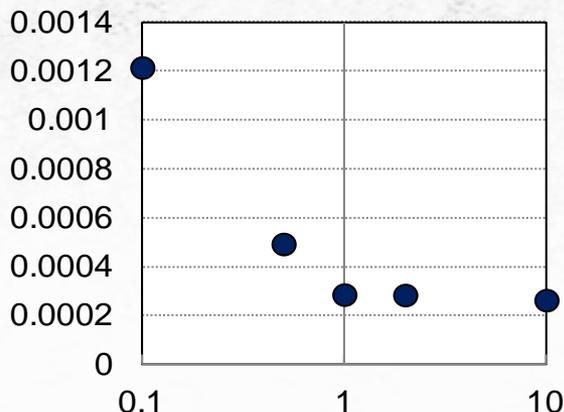
A	J	K	T	U	d
B	I	L	S	V	c
C	H	M	R	W	b
D	G	N	Q	X	a
E	F	O	P	Y	Z

mg/m²/sec



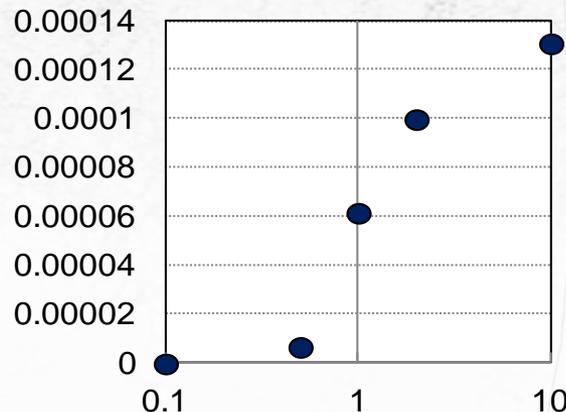
ウェブ部
海側90cm

mg/m²/sec



フランジ部上面
海側

mg/m²/sec



フランジ部下面
海側

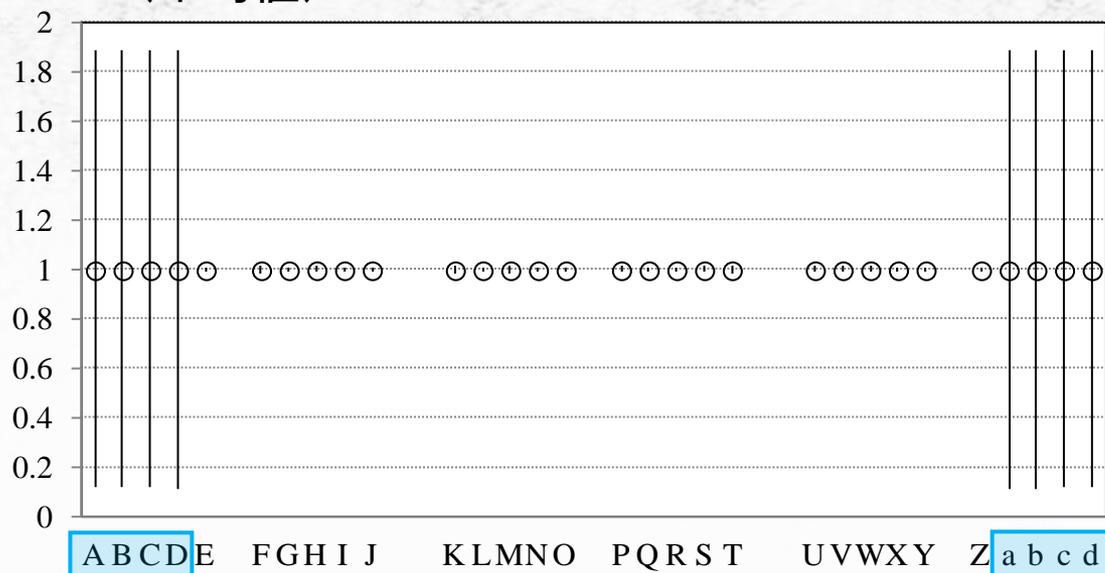
粒径の変化に伴い，粒子に作用する抵抗力が変化
→ **抵抗力と重力の大小関係**に付着量が依存

気象データと付着量の関係

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)

($\text{平均値} \pm \text{標準偏差}$)

(平均値)



海側



A
B
C
D
E

J
I
H
G
F

K
L
M
N
O

T
S
R
Q
P

U
V
W
X
Y

崖側



d
c
b
a
Z

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

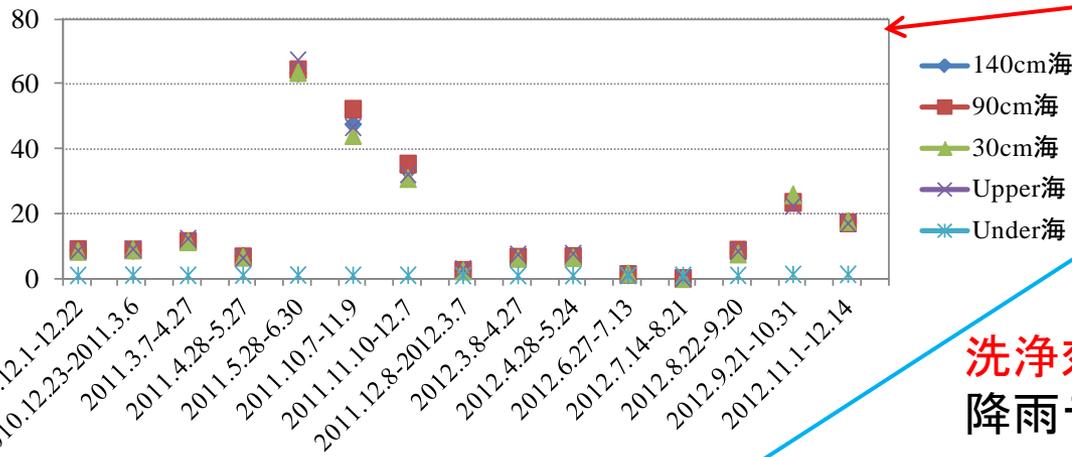
洗浄効果非適用面：ばらつきが非常に小さい

気象データと付着量の関係

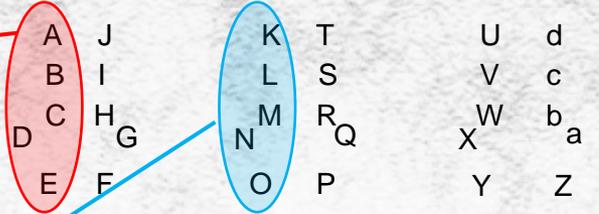
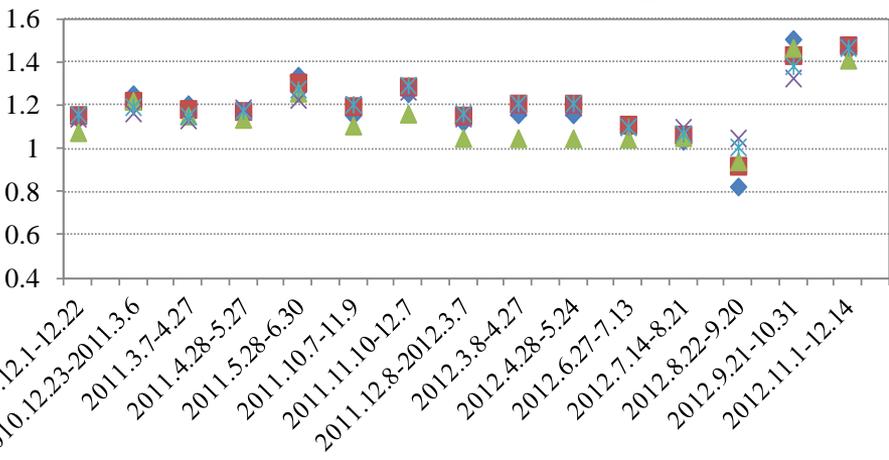
海側

崖側

(case2)/(case3)



(case2)/(case3)



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

- 付着傾向を精度よく再現できた.
- 非定常性の検討を行う.
 - ✓ 塩分濃度の空間的分布
 - ✓ 流れ場の時間変化
- 粒子追跡領域の拡張を行う.

平成22年度～平成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に関する研究会

ご清聴ありがとうございました

国道交通省近畿地方整備局，国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所
(株)IHIインフラシステム，(株)大林組，(株)オリエンタルコンサルタンツ
鹿島建設(株)，(株)川金コアテック，川田テクノシステム(株)
JFEスチール(株)，(財)電力中央研究所，(株)阪神コンサルタンツ
三井住友建設(株)，三井造船(株)
京都大学