



コンクリート構造物の 塩害環境評価の重要性と その手法について

東亜建設工業(株)
羽瀨貴士

2018/5/21
北海道フォーラム2018

自己紹介

名前:羽瀨貴士

所属:東亜建設工業(株)

土木事業本部 エンジニアリング事業部長

主な経歴:建設会社(マリコン)にて、長く研究開発部門を担当

- ・建設材料(主としてコンクリート)
- ・コンクリート施工技術
- ・リニューアール・維持管理技術

これまでの主な学協会活動:

【JCI】コンクリート構造物の長期性能シミュレーションソフト作成委員会

【土木学会】

コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会

塩害環境の定量評価に関する研究小委員会(348委員会)

【日建連】土木工事技術委員会 コンクリート技術部会

【コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会】事務局長

コンクリート構造物における劣化予測の重要性

コンクリート構造物において、
新設構造物には**所要の耐久性確保**が、
既設構造物には**適切かつ効率的な維持管理**が、求められる。

このとき、
(なるべく) **過不足のない適切な耐久性設計と維持管理**が求められる(LCCの最小化)。

このためには、
正確な劣化の進行予測が必要となる。=劣化予測の重要性

塩害を受けるコンクリート構造物の劣化進行は、
コンクリート自体の耐久性(鋼材かぶりを含む)と**劣化外力(主に環境作用)**の組合せで決まる。



塩害環境

塩害環境評価の定義

➤ 塩害環境とは

コンクリート構造物の塩害進行に関わる外的な要因の全て。

即ち、コンクリート表面への塩分供給量といった直接的な要因だけでなく、含水状態などのコンクリートの内部環境を変化させて、その結果として塩害の進行に影響を及ぼす要因も含む。

➤ 塩害環境評価とは

塩害進行に直接的・間接的に関わる要因を(定量的に)把握すること。塩害環境評価には、環境「作用」を評価するほかに、コンクリートの劣化度、即ち、「応答」を評価する方法もある。

塩害劣化予測に必要な塩分浸透予測や鋼材腐食進行予測のための境界条件をあらゆる構造物に対して的確に設定できることが理想である。

↓ (まずは代表的な指標として)

塩化物イオンの供給量

(土木学会348委員会報告書より)



外海に面した橋梁上部工



島陰にある橋梁上部工



海水面に近い棧橋上部工



防波堤ケーソンと上部工



長崎県 端島(軍艦島)
写真家:柿田清英氏 撮影

塩害環境評価の結果の利用

コンクリートへの作用(気象・海象, 飛来塩分)やコンクリートの応答(表面濃度, 塩分浸透量)をもとに塩害環境を評価



塩化物イオンの供給量(表面濃度 C_0 やFlux)を評価

※Fluxとは, 単位時間・単位面積あたりの供給量



コンクリート中の塩化物イオンの移動(拡散)を予測



設計耐用期間における鋼材腐食の発生の有無あるいは鋼材腐食が発生するまでの期間, さらには表面処理工法などの対策の効果を評価

現状の技術レベル(鋼材腐食の照査)

2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{\text{lim}}} \leq 1.0$$

C_d : 鋼材表面における塩化物イオン濃度の設計値

C_{lim} : 鋼材腐食発生限界濃度

γ_i : 構造物係数

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度

c_d : 鋼材かぶりの設計値

D_d : コンクリートの塩化物イオン拡散係数

t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数

γ_{cl} : C_d のばらつきを考慮した安全係数

現状の技術レベル(表面Cl濃度 C_0 の設定)

2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]

コンクリート表面塩化物イオン濃度は、**対象地域の飛来塩分量に応じて設定する。**

【解説】 **過去の類似の構造物の実績や実測データによらない場合、**
構造物の立地する地域区分と海岸からの距離に応じて求めてよい。

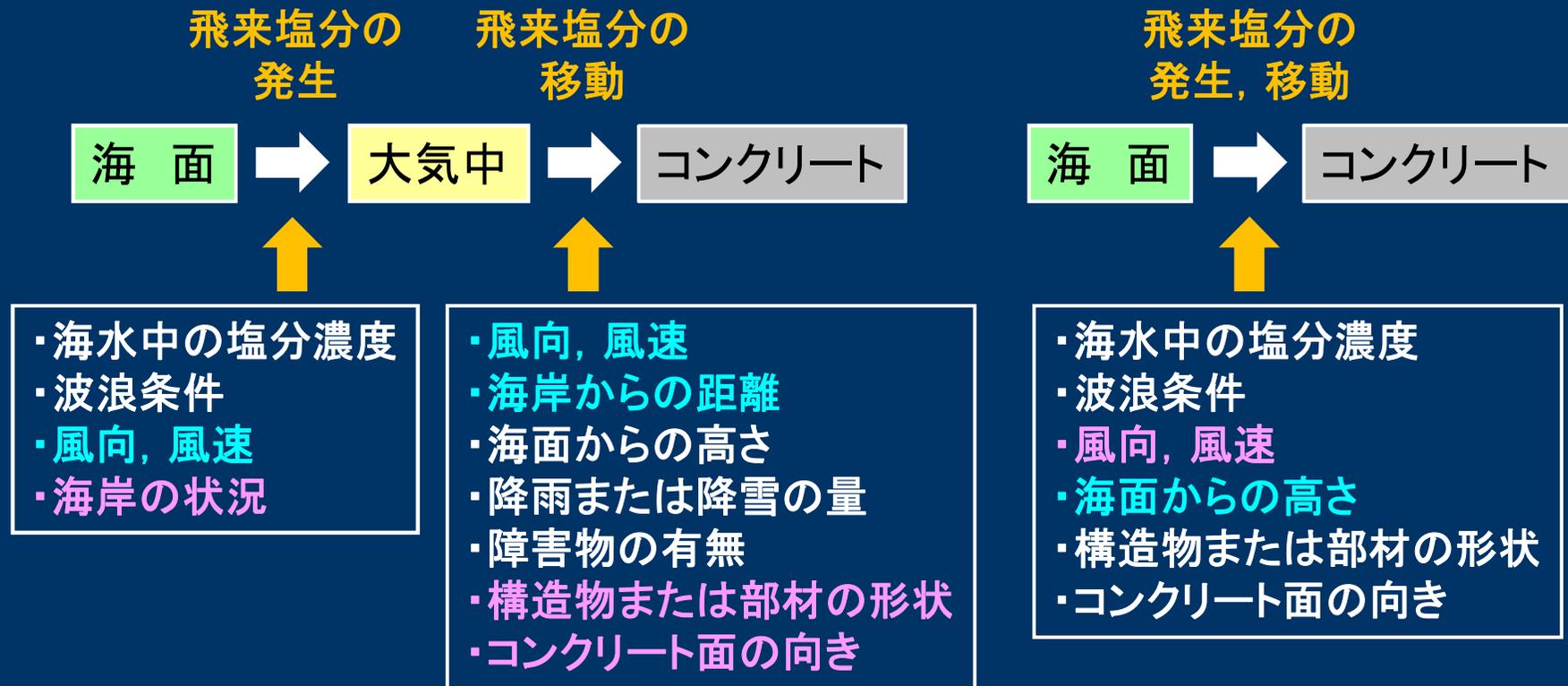
コンクリート表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m ³)		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道, 東北, 北陸, 沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東, 東海, 近畿, 中国, 四国, 九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

一方、**対象構造物の建設地点近傍において、信頼性の高い飛来塩分データが利用可能な場合、**

$$C_0 = -0.016 \times C_{ab}^2 + C_{ab} + 1.7 \quad (C_{ab} \leq 30.0)$$

ここに、 C_{ab} : 飛来塩分量 (mdd, mg/dm²/day)

飛来塩分の発生・移動と影響を与える因子



(a) 陸上の構造物の場合

(b) 海洋構造物の場合

飛来塩分の**発生過程**では海岸の状況(砂礫海岸か, 岩礁海岸か), **移動過程**では構造物の形状やコンクリート面の向きなど, 極めてローカルな条件の影響を受ける。

もちろん, **風向や風速, 海岸からの距離**などの影響は大きい。

橋梁上部工の塩害劣化事例(外来塩分, 1/2)



橋梁上部工の塩害劣化事例(外来塩分, 2/2)



棧橋上部工の塩害劣化事例(外来塩分)



塩害環境評価の意義のまとめ(1/2)

➤ 新設建造物の計画・設計において

一般には、建造物の形状や飛来塩分の発生条件などのローカルな条件を考慮することにより塩害環境評価を詳細かつ適切に行うことができれば、コンクリート建造物あるいは部材の劣化予測(塩害進行予測)の精度を高めることができる。

劣化予測(塩害進行予測)の精度が低いと、予測よりも早く劣化(鋼材腐食)してしまったり、逆に予測よりも長持ちしたり、ということになるので、LCCの観点からはLCC算定の精度が低くなる(LCCが最小ではなくなる)ことになる。

ローカルな条件を考慮して塩害環境を定量評価する予測手法

- 飛来塩分の発生から移動の過程をモデル化する方法
- 建造物周囲の風速場における飛来塩分粒子の移流・拡散・付着をモデル化する方法
- これらを統合した方法, についても検討が進んでいる。

塩害環境評価の意義のまとめ(2/2)

➤ すでに供用されている既設構造物の維持管理において

例えば薄板モルタル供試体などにより**構造物の供用開始後に部位毎の塩害環境を評価**

⇒**塩害環境の厳しい部位のみに予防保全として対策を実施**(表面処理工法などを適用)

⇒**構造物全体のLCCの低減を図る**, といったことも有効である。

塩害環境評価の手法(1/3)

➤ 現地調査による方法の一例

✓ 土研式塩分捕集器を用いる方法(Flux)

- : 10cm角のステンレス板に付着した飛来塩分をタンクに貯留
- : 大気中に漂う微細な塩分粒子の捕捉が困難？

✓ ドライガーゼ法(JIS Z 2382)(Flux)

- : 10cm角の乾燥ガーゼに付着した飛来塩分を溶解抽出
- : 波しぶきのような粒径の大きい塩分を捕捉しきれない？

✓ 薄板モルタルによる捕集法(Fluxまたは C_0)

- : 例えば, 30mm角×5mm厚のモルタル板に付着・浸透した塩分の量を分析して算定(推定)
- : 海洋環境などの飛来塩分量の多い環境では困難？
- : 評価方法は土木学会348委員会にて検討中

✓ コンクリート試験体を用いる方法(C_0)

- : φ10cm×10cmの試験体に浸透した塩分分布から推定
- : 現状では最も確実な方法ではないか？(コア抜きやドリル法でもOK)

塩害環境評価の手法(2/3)



※いずれも測定期間が重要

塩害環境評価の手法(3/3)

➤ 解析(予測計算)に基づく方法

✓ 飛来塩分の発生から移動の過程をモデル化する方法

(JCI, LECCA2 Lite: 販売中, 宇多モデル)

(参考文献) コンクリート構造物の長期性能シミュレーション委員会: コンクリート構造物の長期性能評価—環境外力の評価手法—, コンクリート工学, Vol.50, No.10, pp.946-950, 2012.10

✓ 構造物周囲の風速場における飛来塩分粒子の移流・拡散・付着をモデル化する方法

(ランダムウォーク法の利用)

(参考文献) 富山: コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.874-879, 2014.6

(参考文献) 富山・羽瀧・宮里・中林: コンクリート橋梁上部工に付着する塩分量分布に関する数値実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.769-774, 2015.6

✓ これらを統合した方法

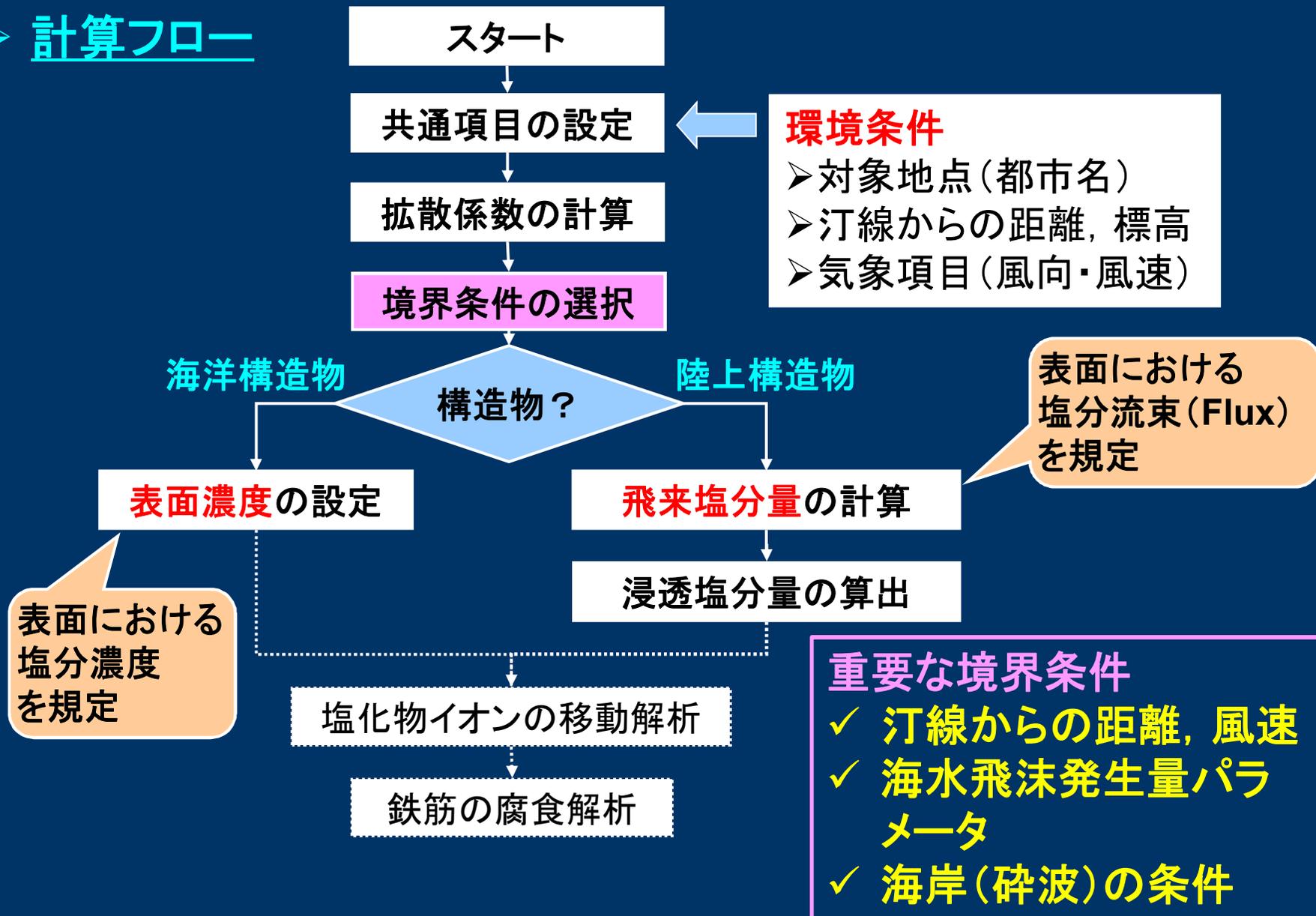
(JCI, LECCA2-RW: 販売中)

(参考文献) 上原子・富山・荒井・羽瀧: 橋梁の部材面における付着塩分量の違いを考慮したコンクリートへの浸透塩分量の評価, コンクリート工学, Vol.54, No.2, pp.164-169, 2016.2

✓ このほか、汀線からの距離や、汀線からの距離と風速に基づく予測モデルなど

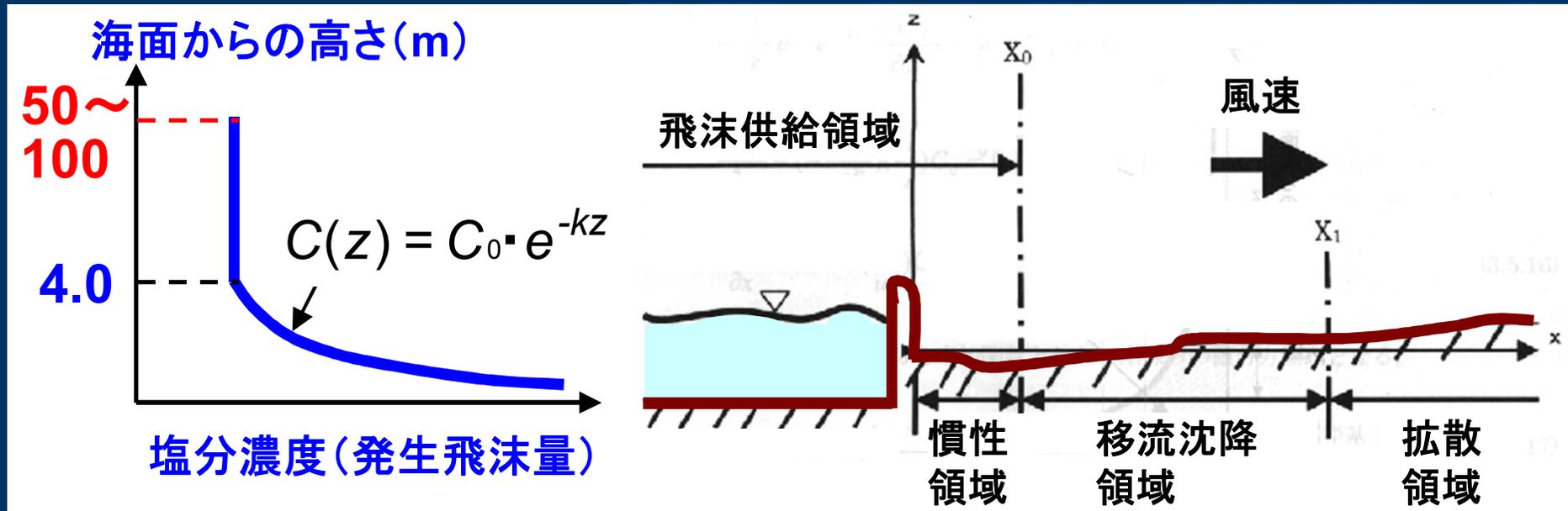
宇多モデル(JCI LECCA2 Lite, 1/4)

➤ 計算フロー



宇多モデル(JCI LECCA2 Lite, 2/4)

➤ 基本概念



基本式

➤ 移流沈降領域での飛来塩化物イオン量(mdd)

$$C = \lambda a u^2 \cdot e^{-(b/u)x} e^{cz} \cdot e^{-cz}$$

➤ 拡散領域での飛来塩化物イオン量(mdd)

$$C = \lambda a u^2 \cdot e^{-(b/u)x} e^{cz} \cdot e^{-cz} / (1 + \gamma(x - L))$$

宇多モデル(JCI LECCA2 Lite, 3/4)

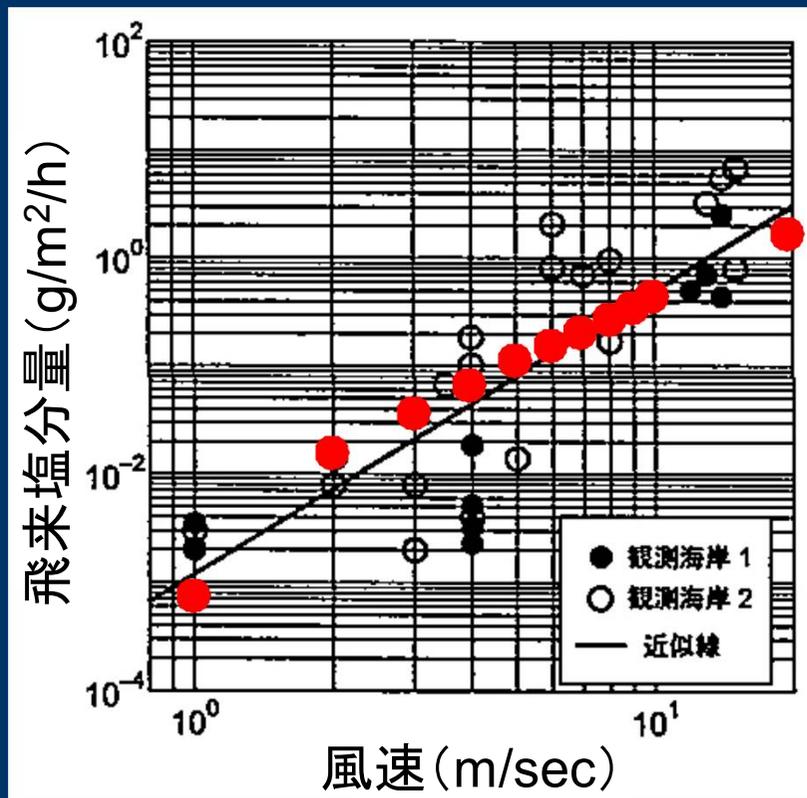
▶ 海水飛沫発生量パラメータ

地域		飛沫発生量 パラメータ	地域		飛沫発生量 パラメータ
北海道	日本海側	13	中国地方	日本海側	13
	太平洋側	3.5		瀬戸内海側	0.13
	オホーツク側	3.5	四国地方	瀬戸内海側	0.13
東北地方	日本海側	13		太平洋側	1.5
	太平洋側	7	九州地方	日本海側	13
関東地方	太平洋側	3.5		太平洋側	3.5
北陸地方	日本海側	13		瀬戸内海側	0.35
中部地方	太平洋側	3.5		東シナ海側	3.5
近畿地方	日本海側	13	沖縄	太平洋側	35
	瀬戸内海側	0.35		東シナ海側	35
	太平洋側	3.5	-	-	-

※ 環境DBの都市名と上記の地域とは自動的に関連付け

宇多モデル(JCI LECCA2 Lite, 4/4)

➤ 飛来塩分量の計算結果と実測値との比較例



● : 計算結果
○● : 実測値
— : 実測値の近似線

宇多モデルの計算条件

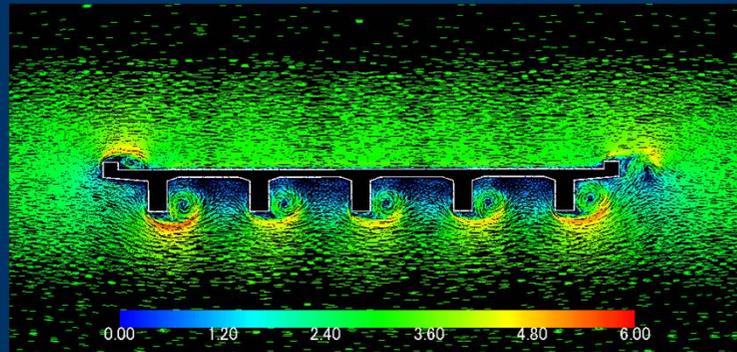
- 日本海側
- 砂礫海岸
- 海風割合1.0
- 標高3m
- 汀線からの距離10m

新潟県日本海沿岸の実測値(山田文則ら)との比較

- ✓ 風速1~20mの範囲において、実測値を比較的よく再現できている。
- ✓ ただし、現場条件や条件設定によっては、予測結果が過大になる場合がある(検討の余地あり)。

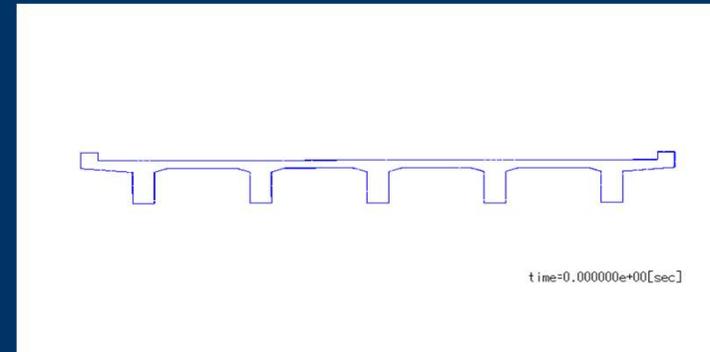
RW法を用いた塩分粒子の付着予測モデル(1/7)

風速場の計算(有限要素法)



風速場

粒子の移流・拡散・付着解析(RW法)



非圧縮性粘性流れの支配方程式

・連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

・Navier-Stokes方程式

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0$$

u : 流速
 ρ : 密度
 σ : 応力

・粒子位置

$$x_{i+1} = x_i + U p_{i+1} \Delta t$$

$$y_{i+1} = y_i + V p_{i+1} \Delta t$$

$$z_{i+1} = z_i + W p_{i+1} \Delta t$$

※ 構造物への付着は完全付着と仮定

・粒子速度

$$U p_{i+1} = \bar{U} + u_{i+1}$$

$$V p_{i+1} = \bar{V} + v_{i+1}$$

$$W p_{i+1} = \bar{W} + w_{i+1}$$

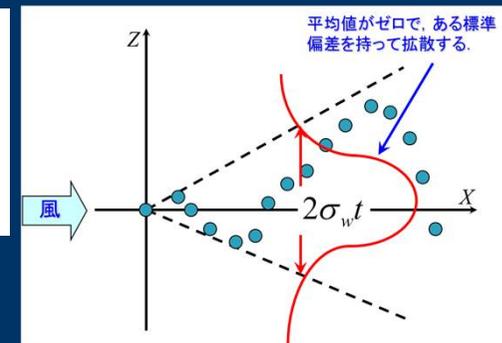
乱流速度

$$\lambda_{i+1} = (1 - \alpha^2)^{1/2} \sigma_u \eta_{i+1}$$

$$\varepsilon_{i+1} = (1 - \alpha^2)^{1/2} \sigma_v \xi_{i+1}$$

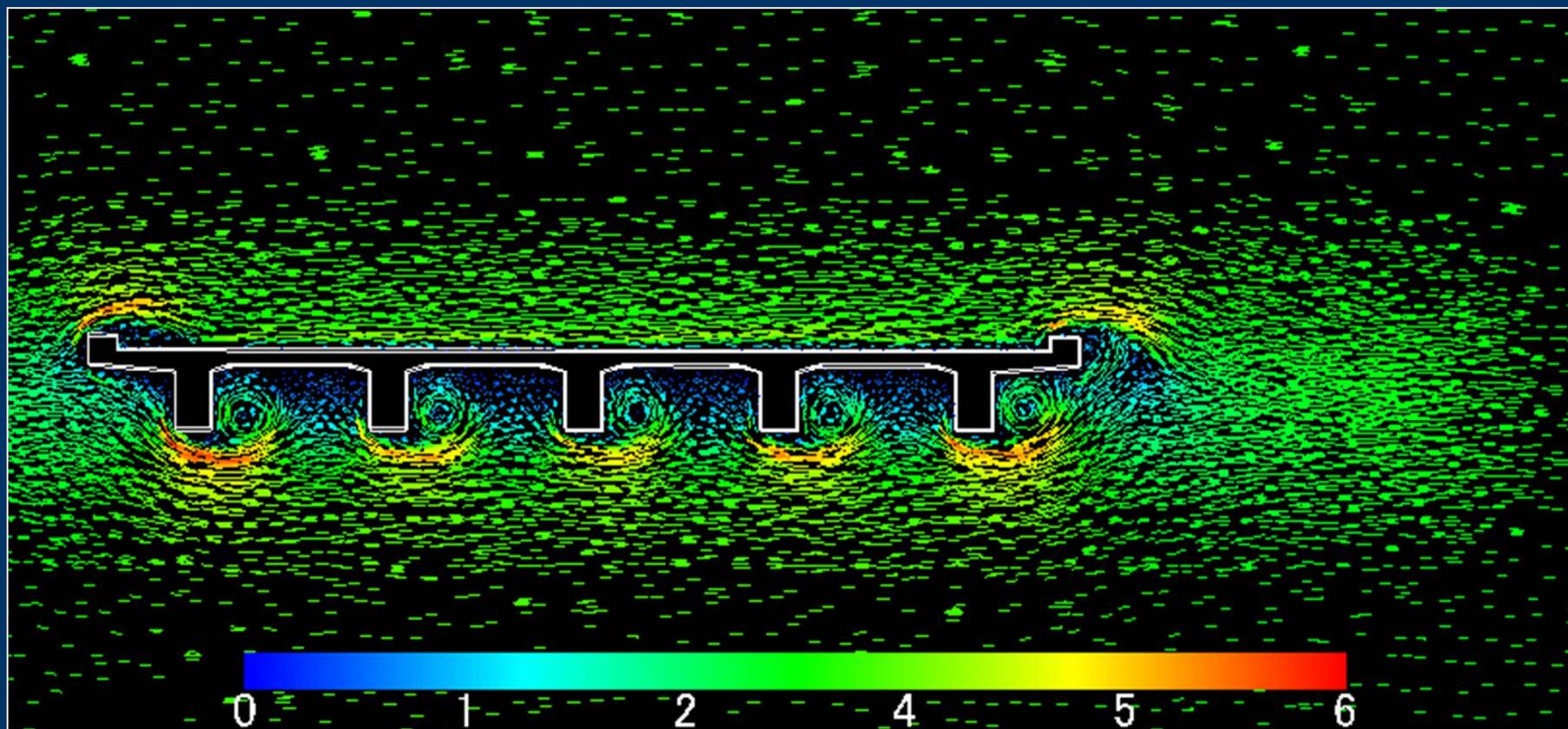
$$\mu_{i+1} = (1 - \alpha^2)^{1/2} \sigma_w \zeta_{i+1}$$

平均風速



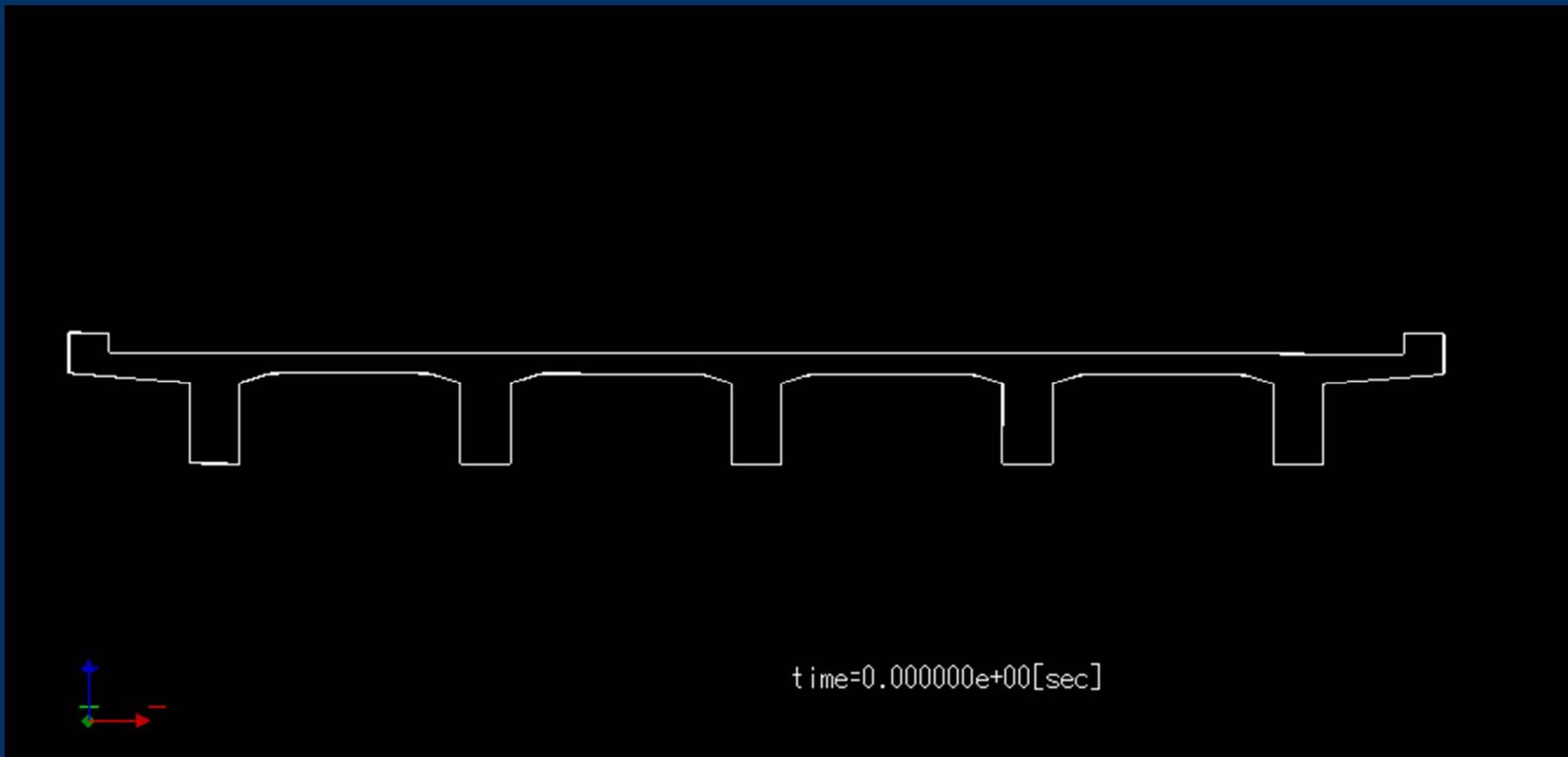
RW法を用いた塩分粒子の付着予測モデル(2/7)

➤ 風速場の計算例



RW法を用いた塩分粒子の付着予測モデル(3/7)

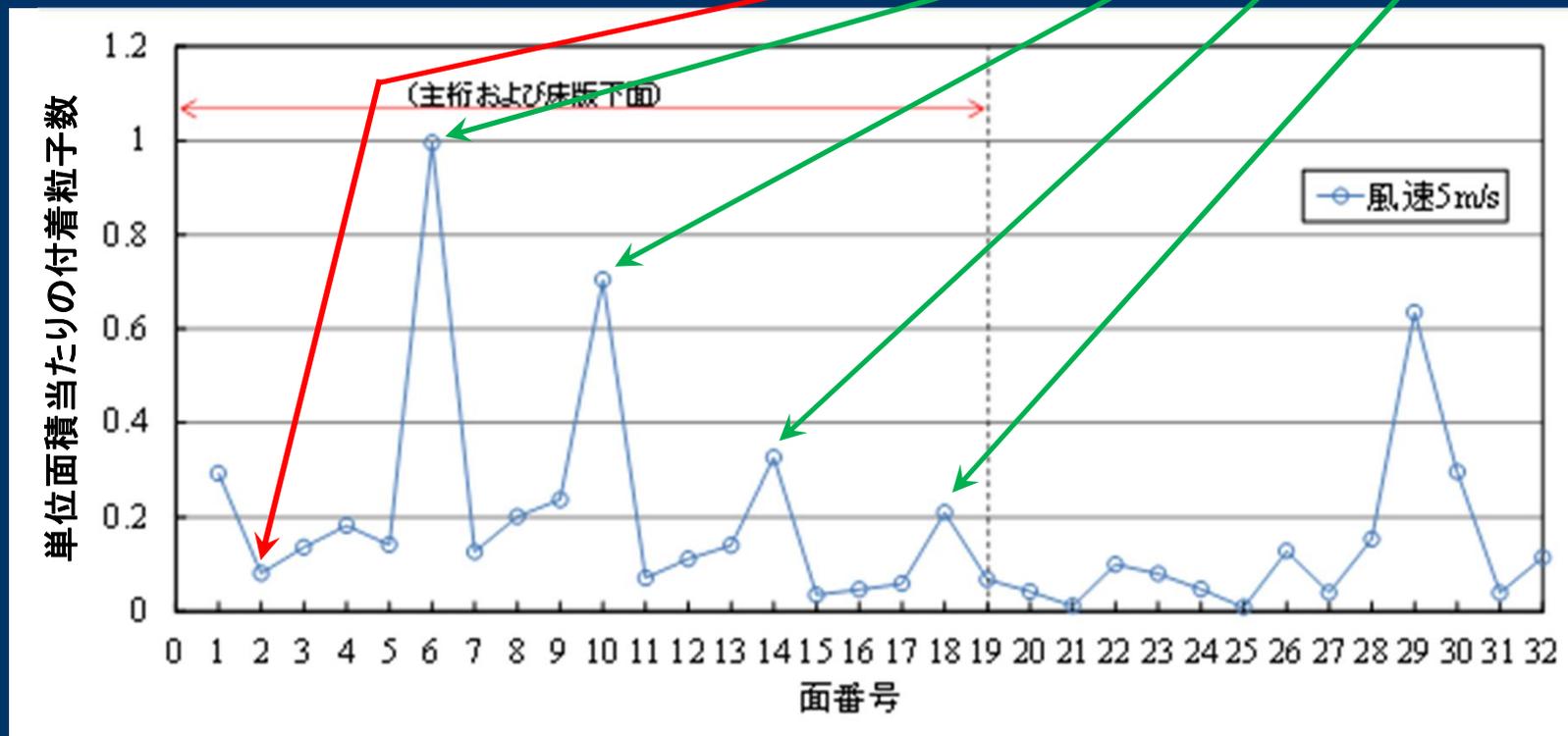
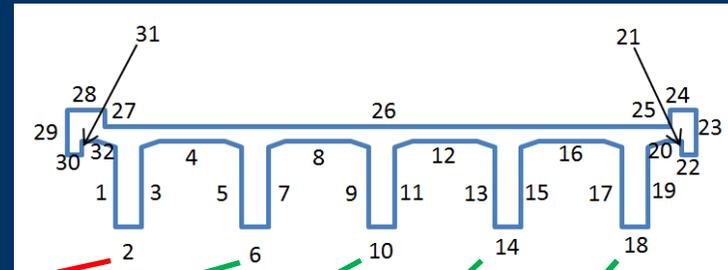
➤ 飛来塩分粒子の移流・拡散・付着の計算例



- ✓ 各部材面の単位面積当たりの付着粒子数を計算(出力)

RW法を用いた塩分粒子の付着予測モデル(4/7)

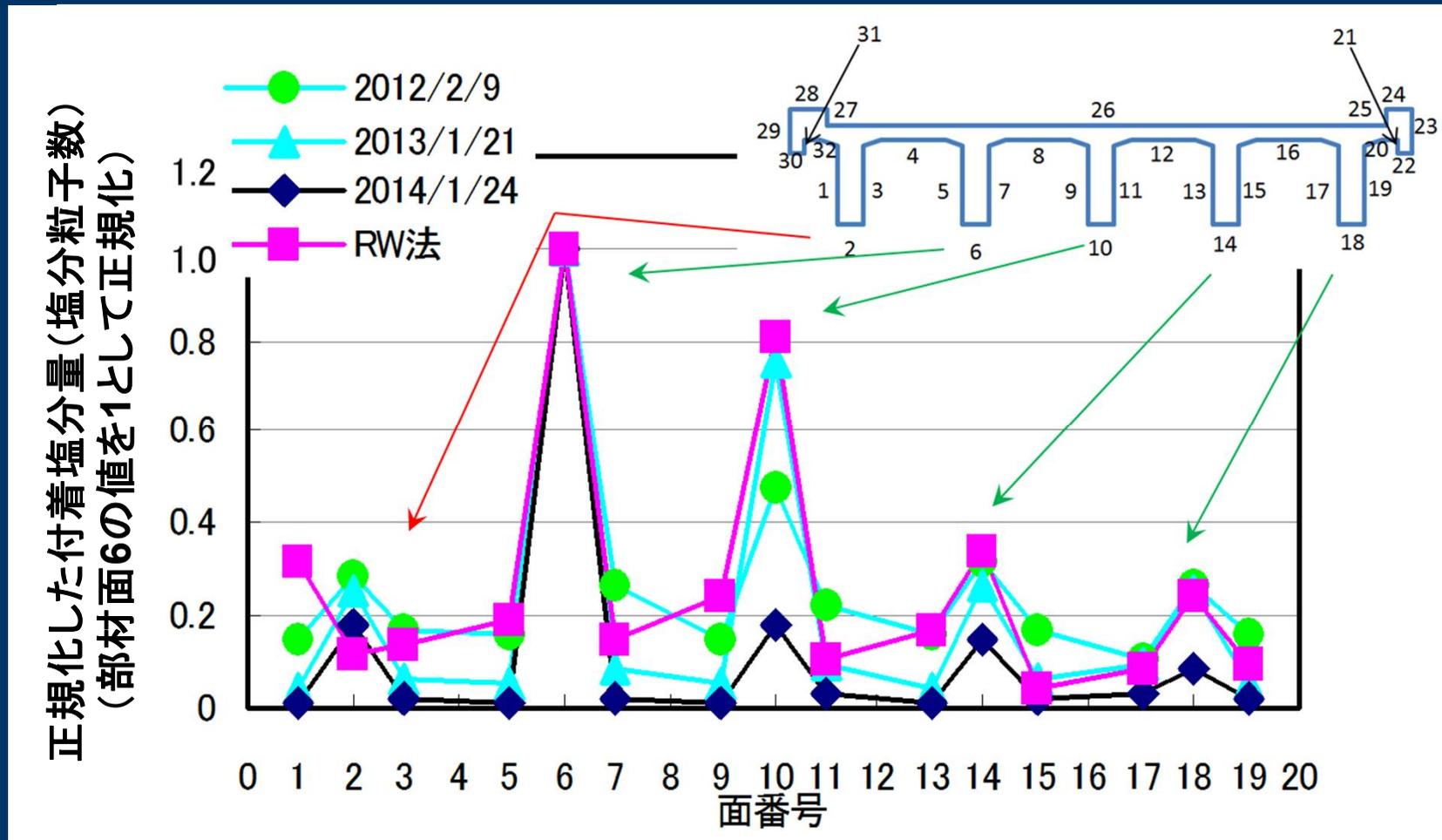
▶ 単位面積当たりの付着粒子数 (計算結果)



沖縄本島のY橋梁での付着粒子数の計算結果

RW法を用いた塩分粒子の付着予測モデル(5/7)

各部材面の付着塩分粒子数の予測結果と実測値との比較例

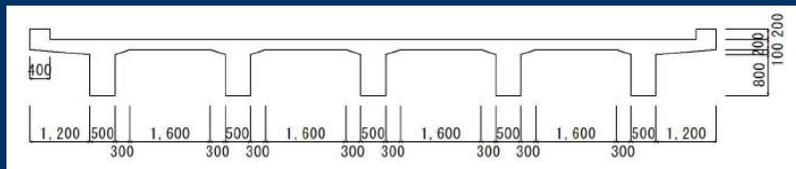


沖縄本島のY橋梁での実測値(ガーゼ拭取り法)との比較

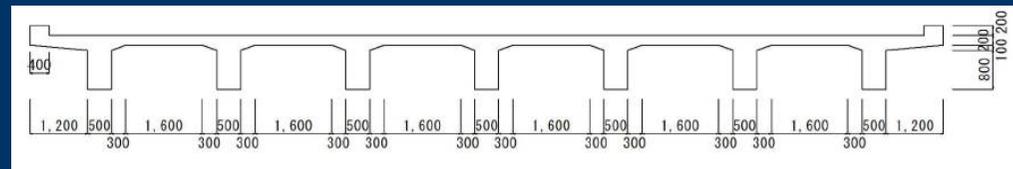
RW法を用いた塩分粒子の付着予測モデル(6/7)

▶ 数値実験の検討ケース

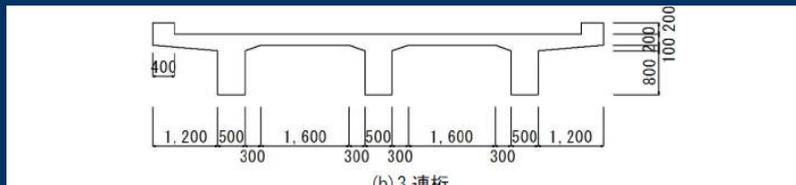
検討ケース	検討課題	主桁数	主桁間長(mm)	風速(m/s)	下フランジ
#1(標準)	風速の影響	5	1,600	1, 3, 5, 7	なし
#2	主桁数の影響	3, 5, 7	1,600	3	なし
#3	主桁間長の影響	5	600, 1600, 2600	3	なし
#4	下フランジの影響	5	1,600	3	あり, なし



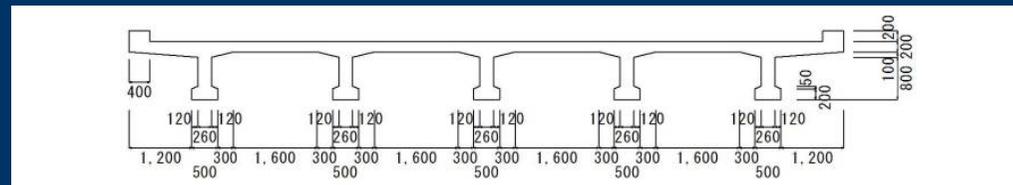
(a) 5連桁
(#3では主桁間長の違いを評価)



(c) 7連桁



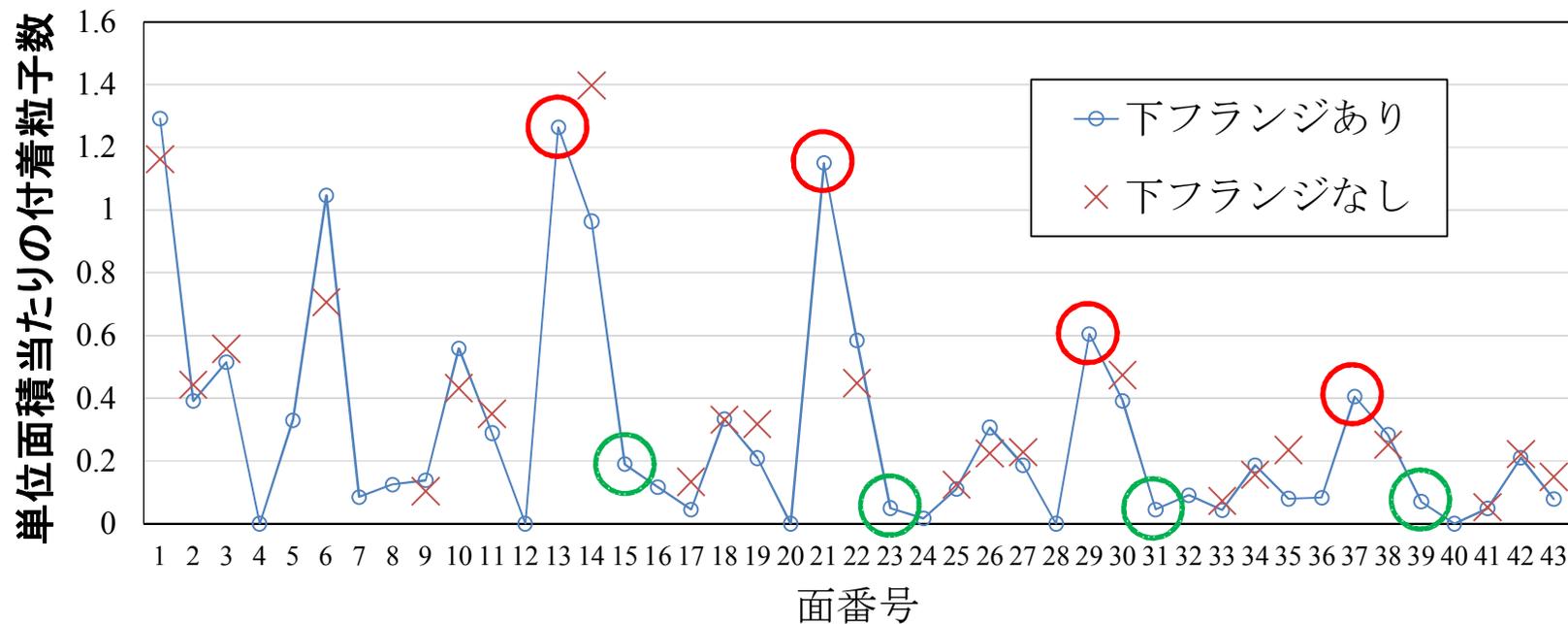
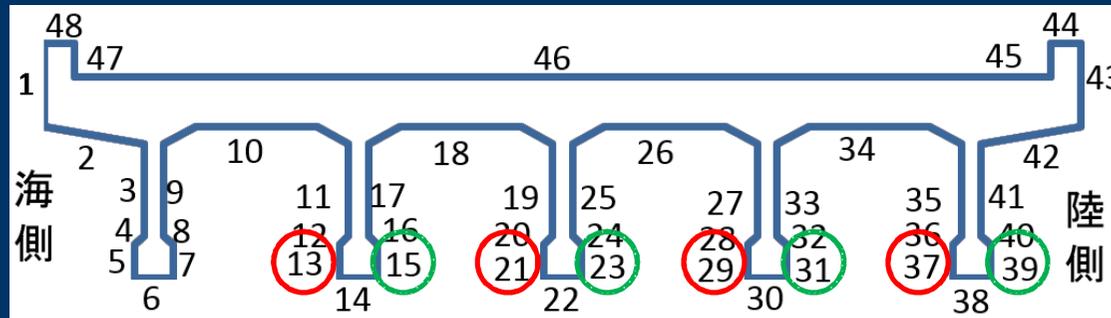
(b) 3連桁



(d) 5連桁(下フランジあり)

RW法を用いた塩分粒子の付着予測モデル(7/7)

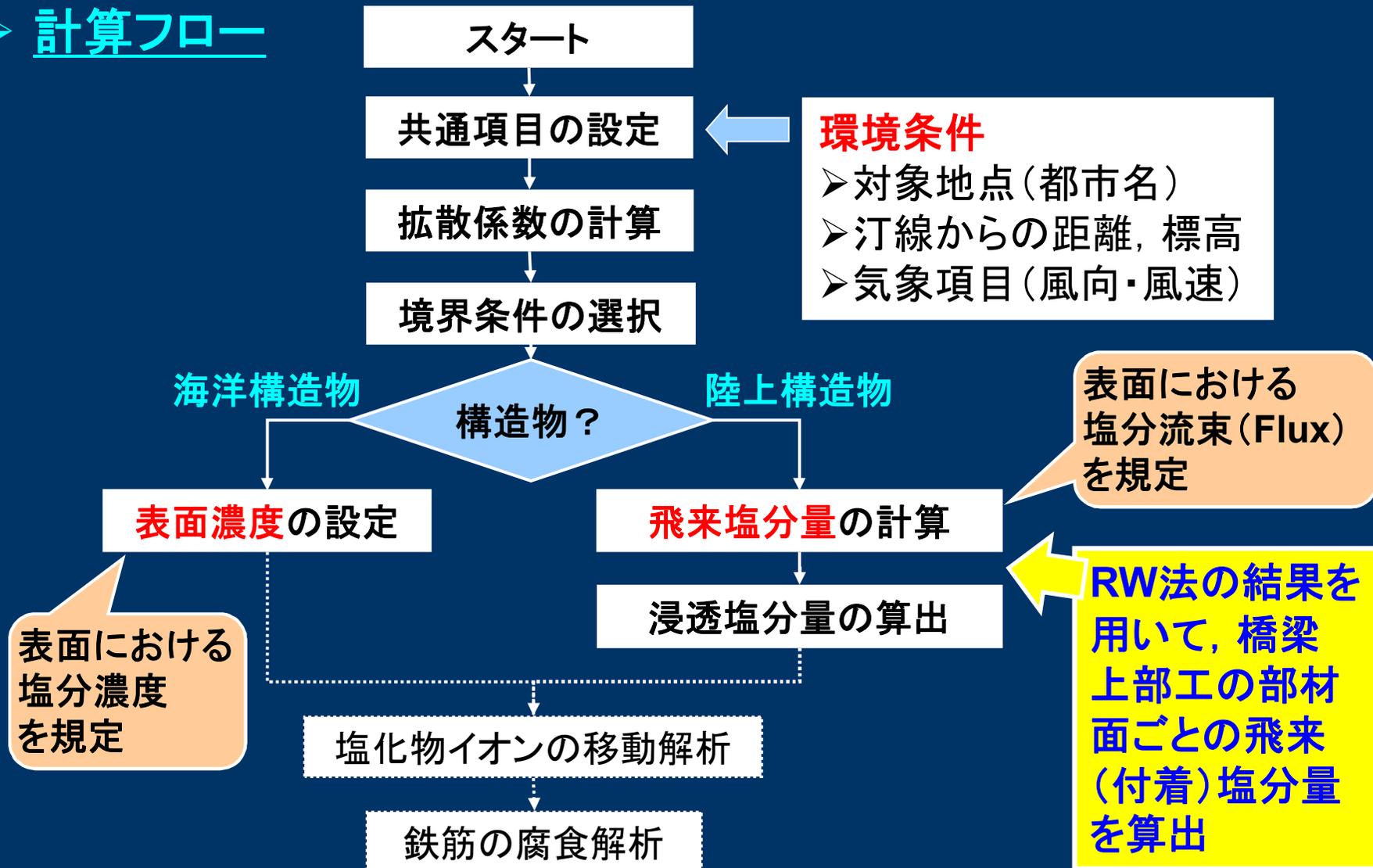
▶ 数値実験の検討結果の一例



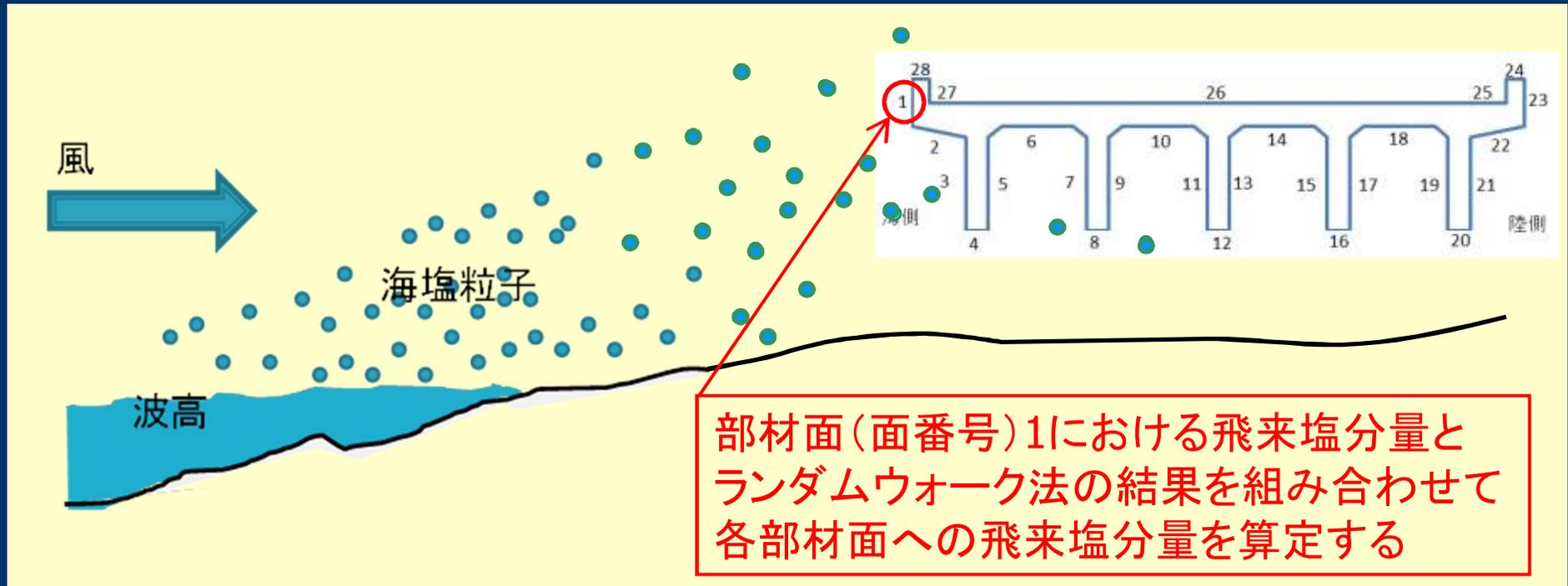
下フランジの有無が付着粒子数(単位面積当たり)に及ぼす影響 32

統合モデル(JCI LECCA2-RW, 1/4)

➤ 計算フロー



統合モデル(JCI LECCA2-RW, 2/4)



宇多モデル

ランダムウォーク法

Input

- 地点名
- 汀線からの距離
- 標高
- 風向・風速

Output -----> Input

- 橋梁周辺までの飛来塩分量

Output

- 各部材面への飛来塩分量 (付着塩分量)

統合モデル(JCI LECCA2-RW, 3/4)

統合モデルによる塩分浸透量の計算結果と実測値との比較例

✓ 宇多モデル

- ・波浪条件: 日本海岩礁型
- ・汀線距離: 10m
- ・標高: 4m
- ・風速: 2.45m (地点選択・環境DBにおける日別平均風速)

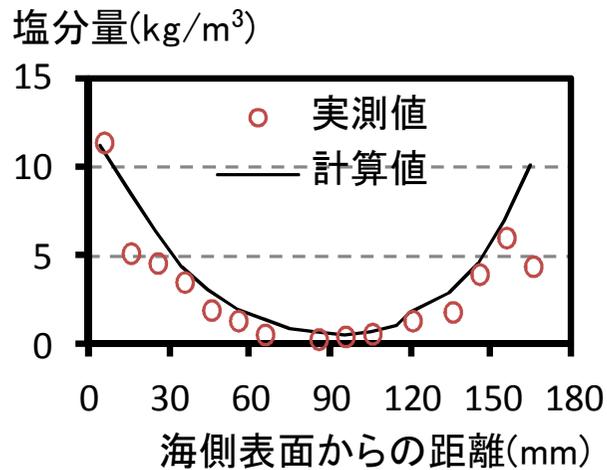
✓ 塩分浸透計算

- ・コンクリートの塩化物イオン拡散係数は実測値を使用

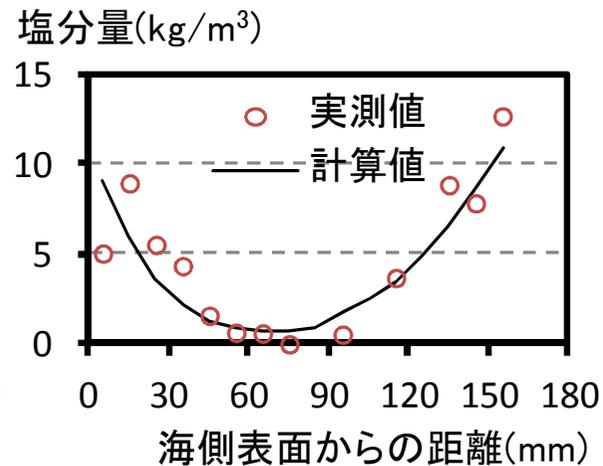


統合モデル(JCI LECCA2-RW, 4/4)

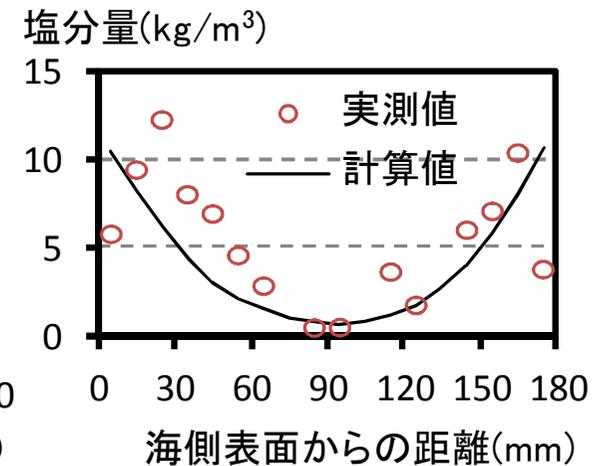
➤ 計算結果と実測値との比較



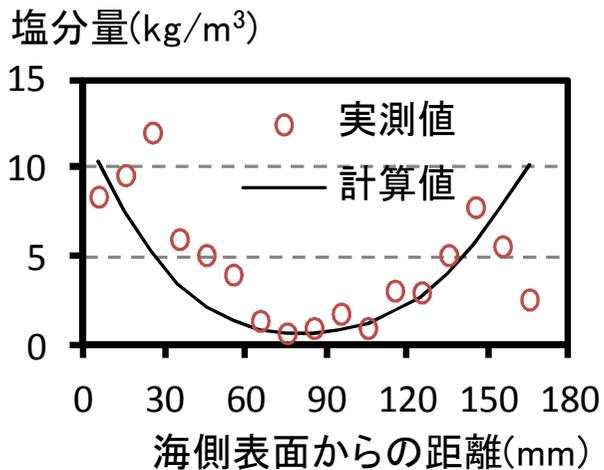
(a) 01桁



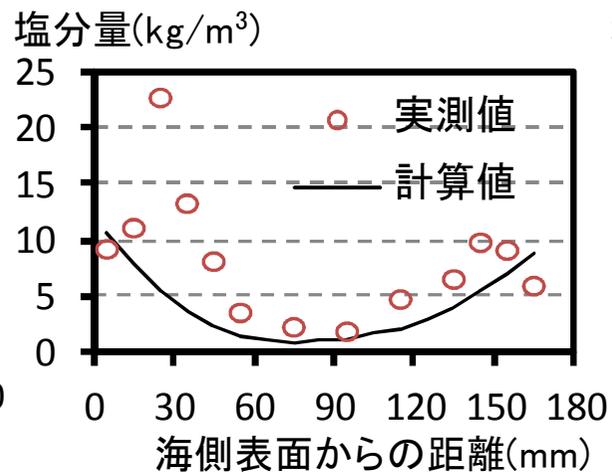
(b) 02桁



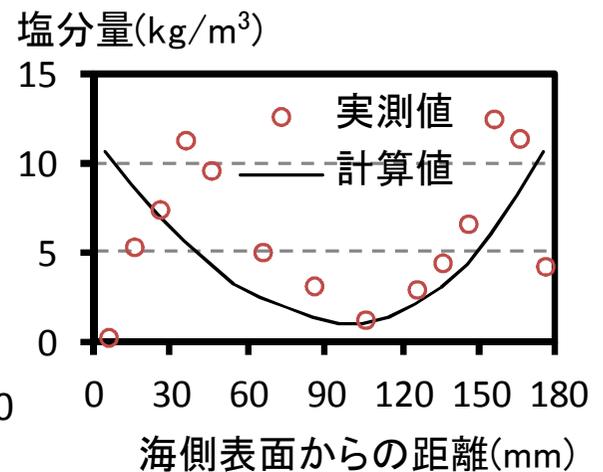
(c) 03桁



(d) 04桁



(e) 05桁



(f) 06桁

適切な塩害環境評価によるLCC低減(1/3)

➤ 塩害環境(C_0)の精度よい把握によるLCC低減効果の試算

✓ 海岸付近の構造物において、 C_0 が異なる条件でLCCを試算

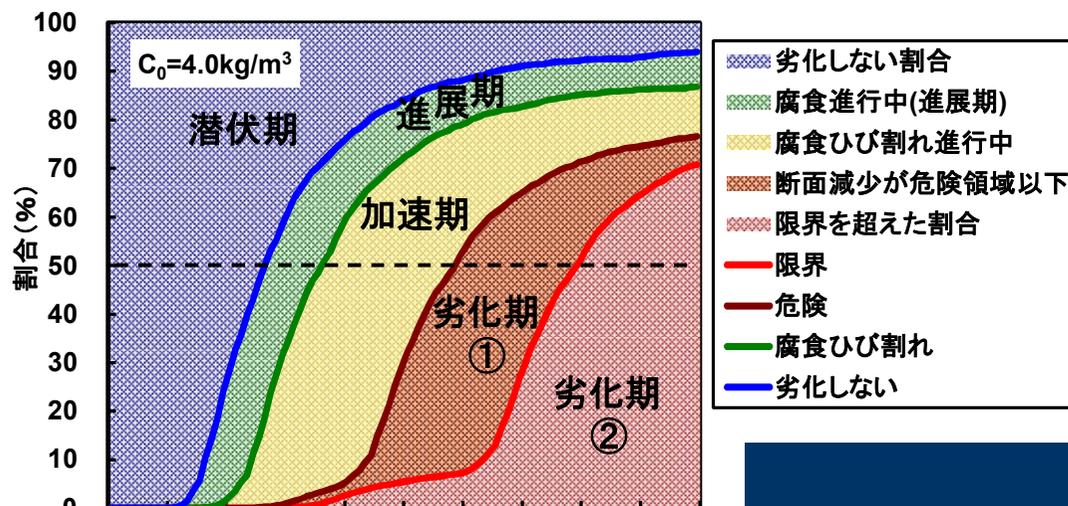
【計算条件】

- $C_0 = 1.6, 2.0, 2.4, 4.0, 6.1, 13.0, 15.1, 16.8, 18.0, 21.0, 25.2\text{kg/m}^3$ (全11ケース)
- Cl拡散係数 = $0.7\text{cm}^2/\text{年}$ (一定)
- 鋼材かぶり = 70mm (一定)
- 腐食発生限界Cl濃度 = 2.0kg/m^3 (一定)
- ひび割れ発生限界腐食量 = 10mg/cm^2
- 鋼材の断面欠損率が5%で劣化期①, 10%で劣化期②と仮定
- C_0 のばらつきを考慮(標準偏差20%)した劣化予測を実施
- 建設10年後以降に対策を実施するとしてLCCを算定
- 対策工法は, 表面塗装, 電気防食, 断面修復, 補強から適切に選定
- 対策工法の単価や耐用年数は文献等により適切に設定

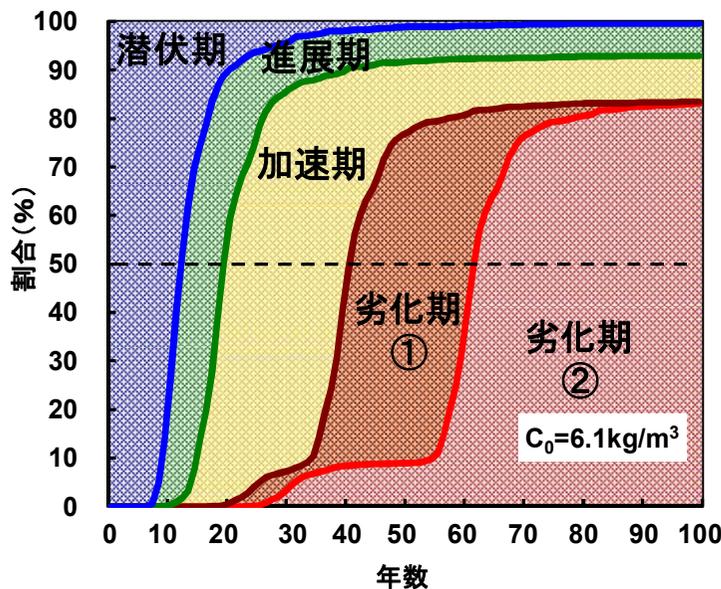
適切な塩害環境評価によるLCC低減(2/3)

➤ C_0 のばらつきを考慮した劣化予測結果の一例

$C_0 = 4.0 \text{ kg/m}^3$



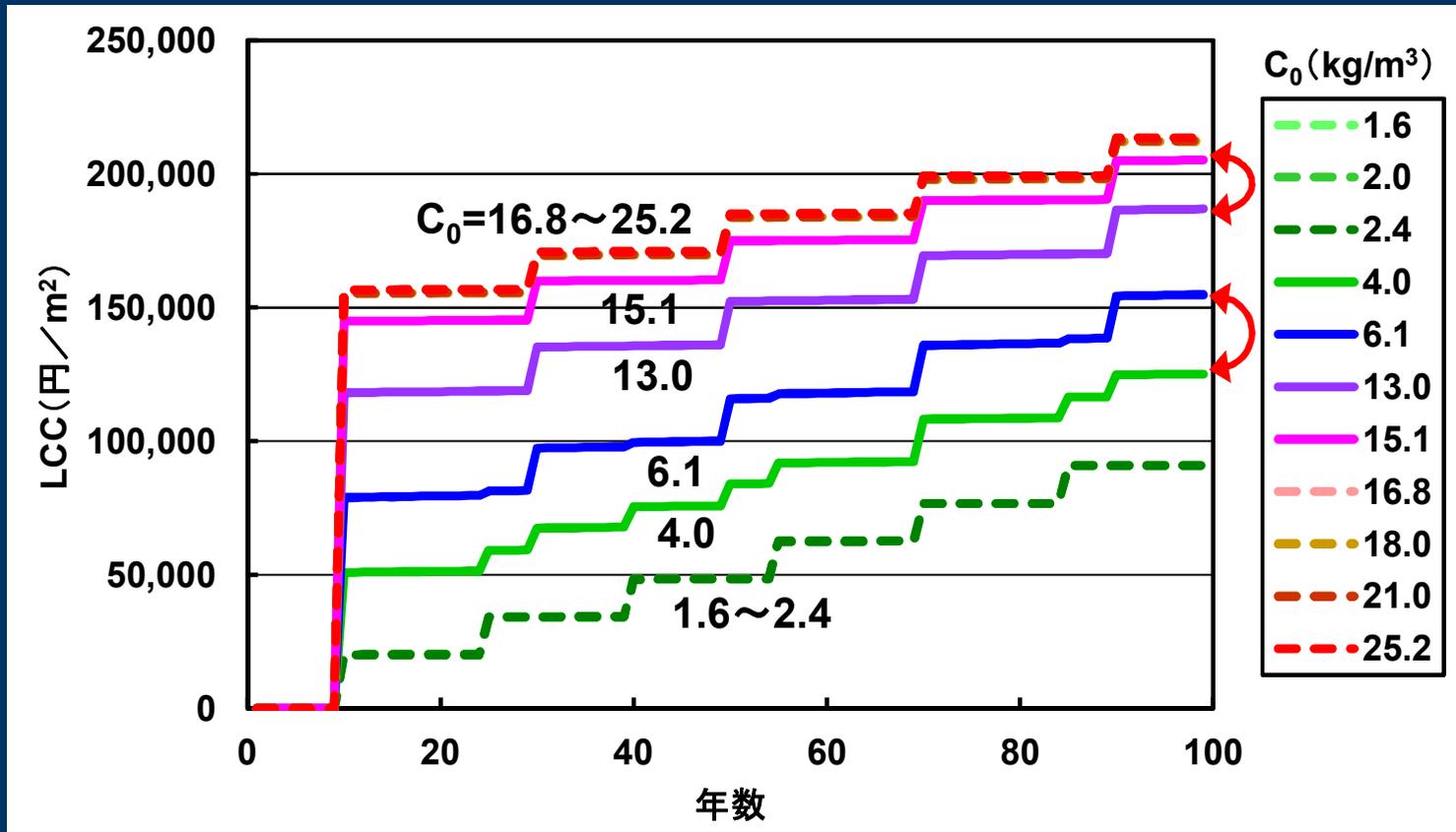
$C_0 = 6.1 \text{ kg/m}^3$



- ✓ C_0 の大きい方が、構造物全体として潜伏期(腐食開始までの期間)が短くなる。
- ✓ C_0 の値が 2 kg/m^3 程度の違いでも、劣化進行の程度はかなり異なる。平均的には、進展期以降は15~20年の差がある。

適切な塩害環境評価によるLCC低減(3/3)

劣化予測に基づくLCC試算結果



- ✓ C_0 が 2.4kg/m^3 以下, 16.8kg/m^3 以上では, それぞれLCCに差はない。
- ✓ C_0 が $4.0 \sim 15.1\text{kg/m}^3$ の範囲では, C_0 が大きいほどLCCも大きくなる。
- ✓ C_0 が 2kg/m^3 程度の差でも, LCCは大きく変わる場合がある(1.1~1.25倍)。
- ✓ よって, C_0 を適切に評価して対策を講じることにより, LCCを低減できる。

おわりに

- 塩害環境評価を適切に行うことにより、コンクリート構造物の劣化予測（塩害進行予測）の精度を高めることができる。さらに、精度の高い劣化予測により、LCCの低減を図ることができる。
- 構造物の設計の際の「地盤調査」と同じように、「飛来塩分量の調査」も当たり前前に実施されて然るべきである（新潟大学佐伯教授）。
- 塩害環境評価は、設計段階での実施は難しい面も多い（まだ信頼度も高くない？）。しかし、解析的手法により塩分供給の多い場所を特定することは有効である。これらを踏まえて、現状では、建設後なるべく早期に現地調査によって実施し、劣化予測および維持管理に反映すべきである。
- 本講演が、コンクリート構造物の適切な維持管理のお役に立てば幸いである。

ご清聴ありがとうございました。