

# 社会基盤施設の ライフサイクルを考える

~非破壊試験による鉄筋コンクリート構造物  
の劣化診断について~

香川大学工学部 岡崎慎一郎

# 本日の内容

- **非破壊検査による耐久性能評価の重要性**
- 耐久性能に関するによる劣化診断  
(透気もしくはは吸水性能による評価)
- 埋設センサによる鉄筋腐食検知
- 四国における維持管理に関する取り組み

# 本日の内容

## コンクリート構造物の維持管理は重要



**「コンクリート構造物はメンテナンスフリーで半永久構造物」**

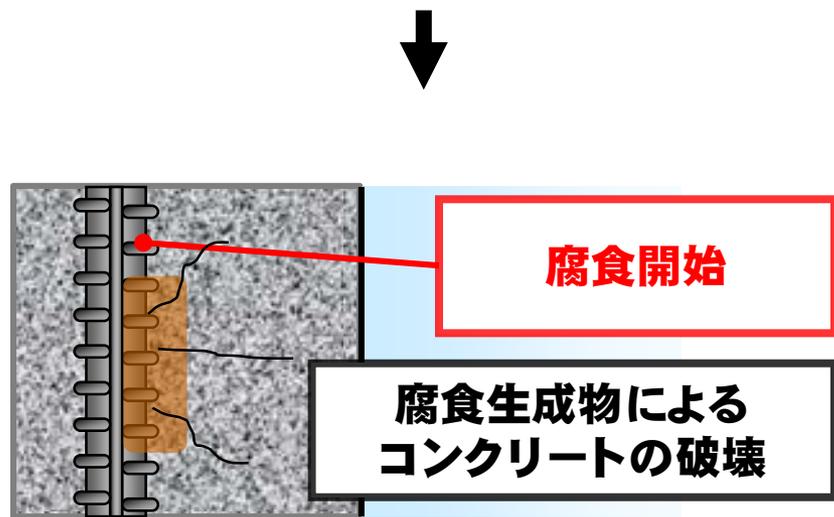
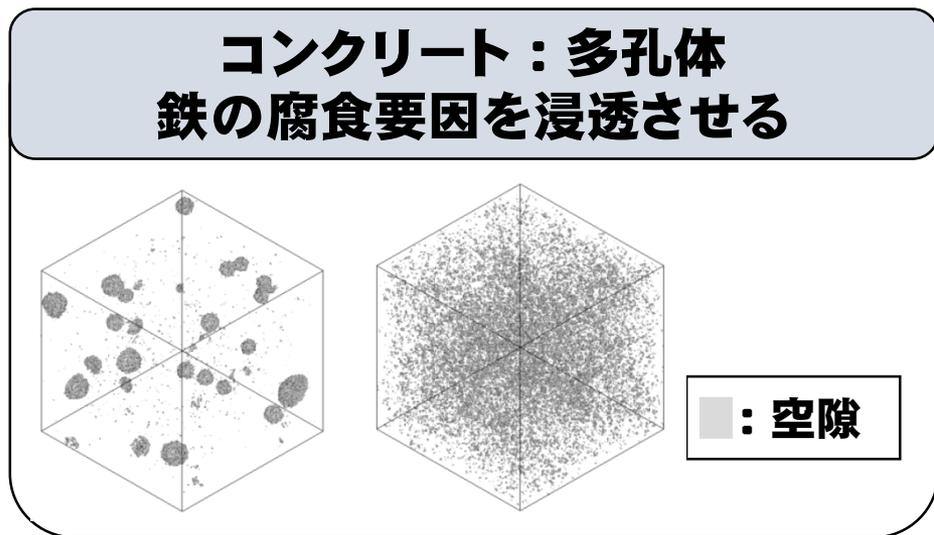
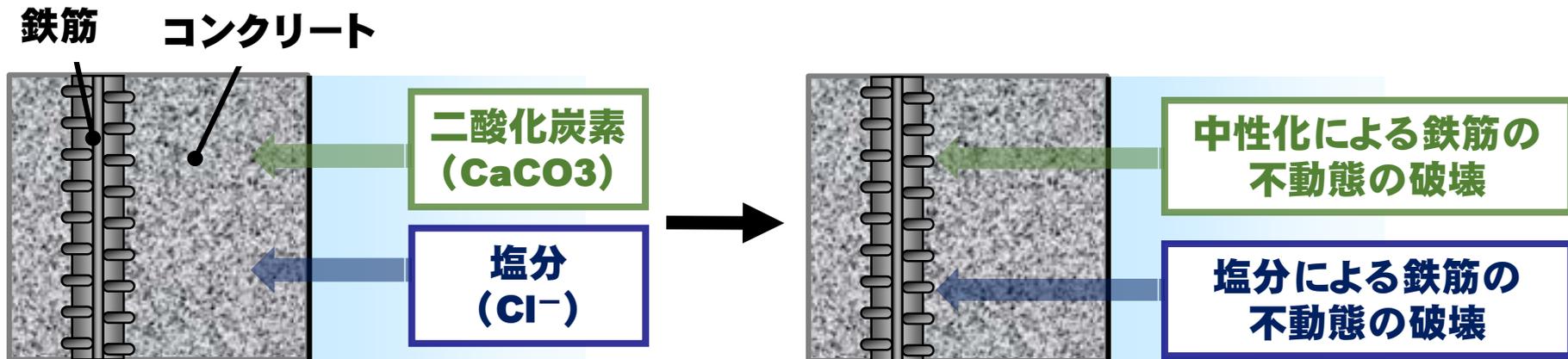


**高度経済成長期に建設された構造物を中心に多くの劣化事例**



**コンクリートのかぶり厚さ、品質の評価の重要性が認識**

# 鉄筋コンクリート構造物の劣化の一例



かぶり厚さの確保，コンクリートの鉄筋保護性能評価が重要

強度，水，イオン，気体（酸素，二酸化炭素）の物質移動抵抗性

# コンクリートの鉄筋保護性能の評価

コンクリートの鉄筋保護性能評価が劣化予測においては重要

→ 強度, 水, イオン, 気体 (酸素, 二酸化炭素) 浸透抵抗性



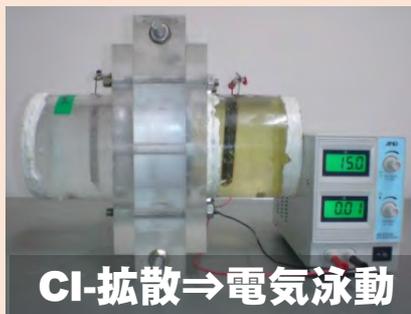
強度性能



圧縮試験



浸透抵抗性



Cl-拡散⇒電気泳動



透気・透水試験

コンクリートの強度性能は現場では  
シュミットハンマにて非破壊で評価



強度性能をもって浸透抵抗性の代替評価は可能か？

# 予備実験

- W/C=65%,水中養生を施した4cm厚の供試体 に2MPa (水頭換算200m)の水圧を加え, 透過量を計測
- 2週間経過も水が1滴も透過せず.  
→強度の割に高い耐久性能を発揮.
- 養生が耐久性能に与える影響は極めて大きいのでは？

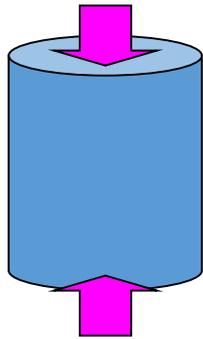
# 実験的検討・・・強度と耐久性能

各種養生を設定し，各種試験を実施

養生：打設後1日で脱型，気中に暴露（気中養生）

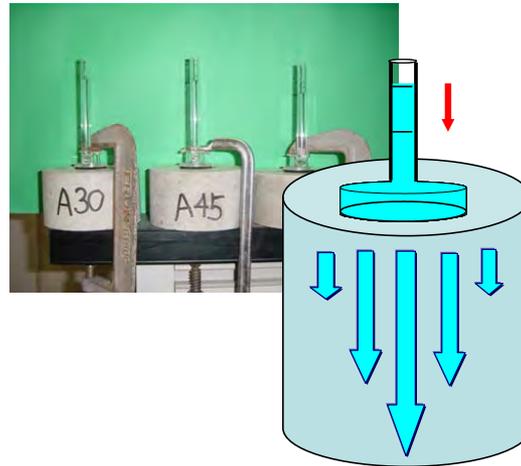
：打設後1日で脱型，水中に浸漬（水中養生）

## 強度

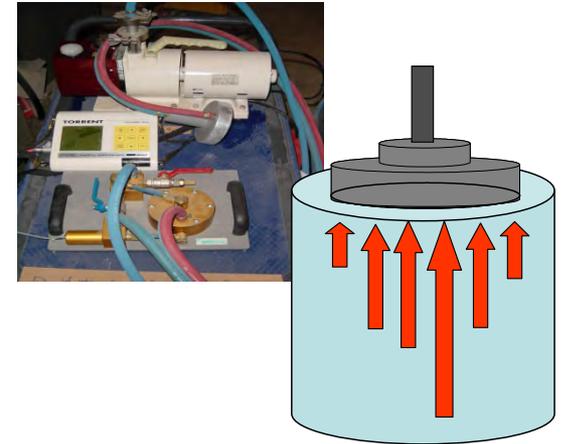


一軸圧縮試験

## 耐久性

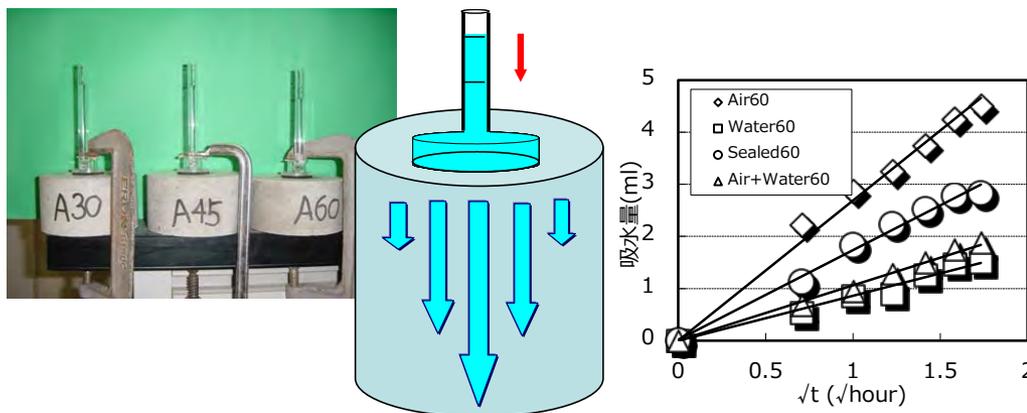


吸水試験



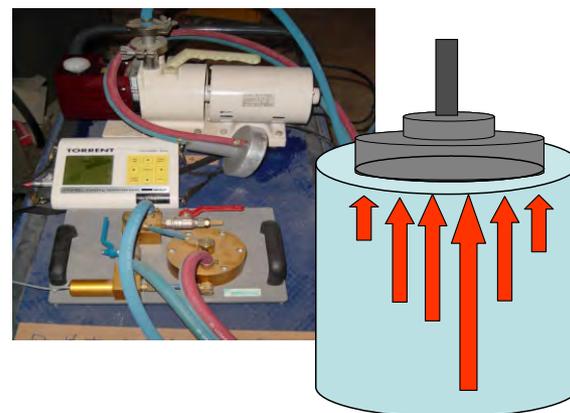
透気試験

## 吸水試験(Water absorption test)



透水性に関する研究は, Powers, Bassat, Reinhardt, Murataが有名.

## 透気試験(Air permeability test)



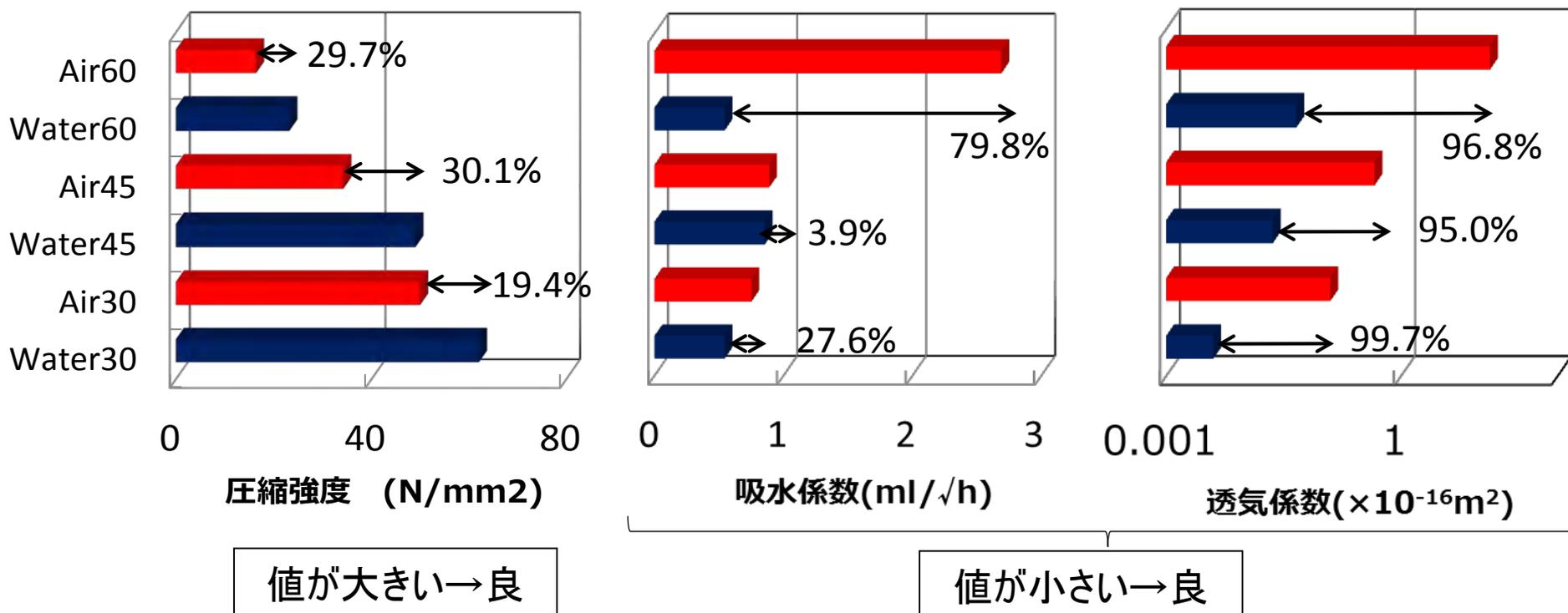
透気性に関する研究は, Dhir, Bamforth, Ujikeが有名.



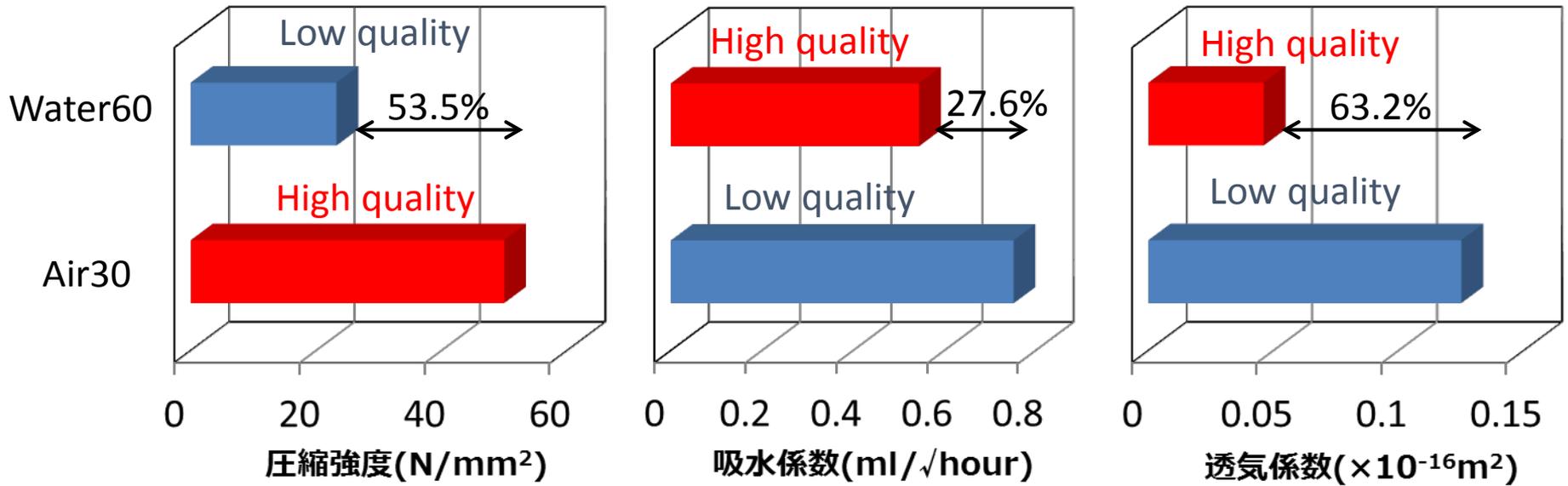
# 実験結果・・・材齢一定シリーズ

- 養生方法に依らず材齢を28日一定として各種試験を実施

Air60 → W/C=60% 打設, 硬化後気中養生28日間



- 圧縮強度 → 養生方法によって約20%-30%の相違
- 吸水係数 → W/Cが高い場合に極めて大きな相違
- 透気係数 → 全てのケースにおいて極めて大きな相違



- “Air30”と“Water60”を比較すると、

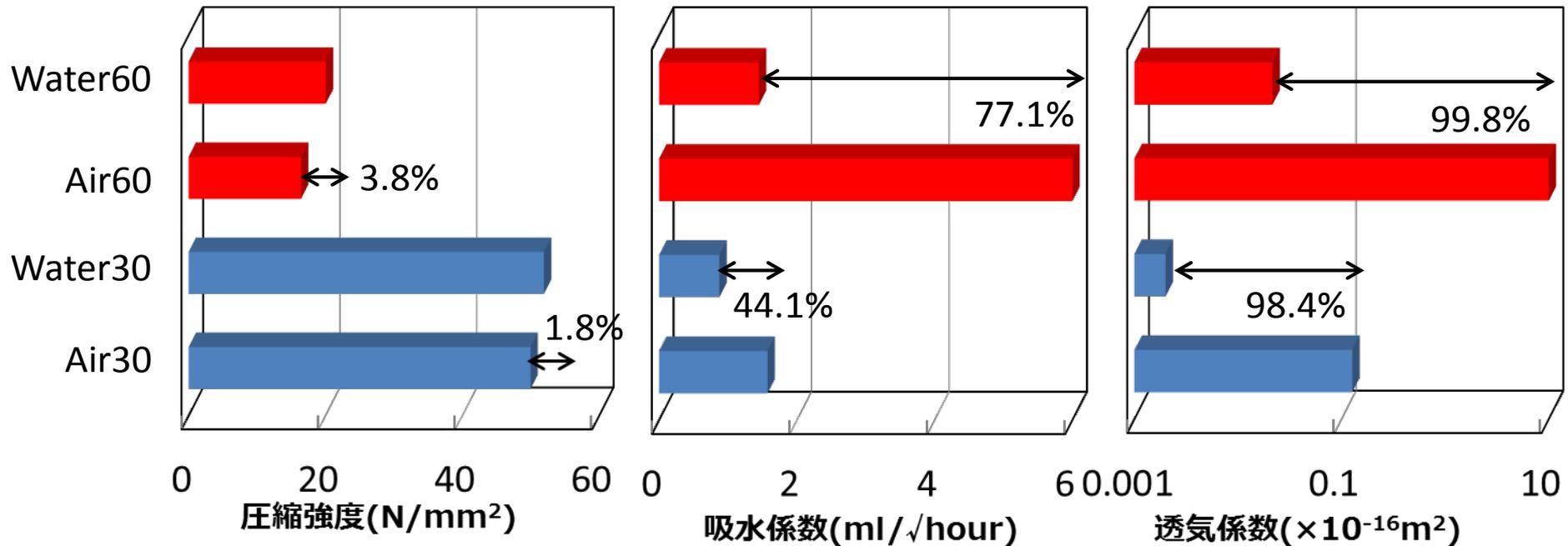
強度品質は  $\text{Air30} > \text{Water60}$   
 物質移動抵抗性に関する品質は  $\text{Water60} > \text{Air30}$

品質の逆転現象……つまり、強度は、水和物の量に依存し、  
 物質移動抵抗性は、水和物の量的因子のみならず、空隙の連続性にも依存する？

この仮説を検証するために、水和物の量（空隙量）、つまり養生間で  
 水和率を一定とすることによって再度同じ試験を行う。

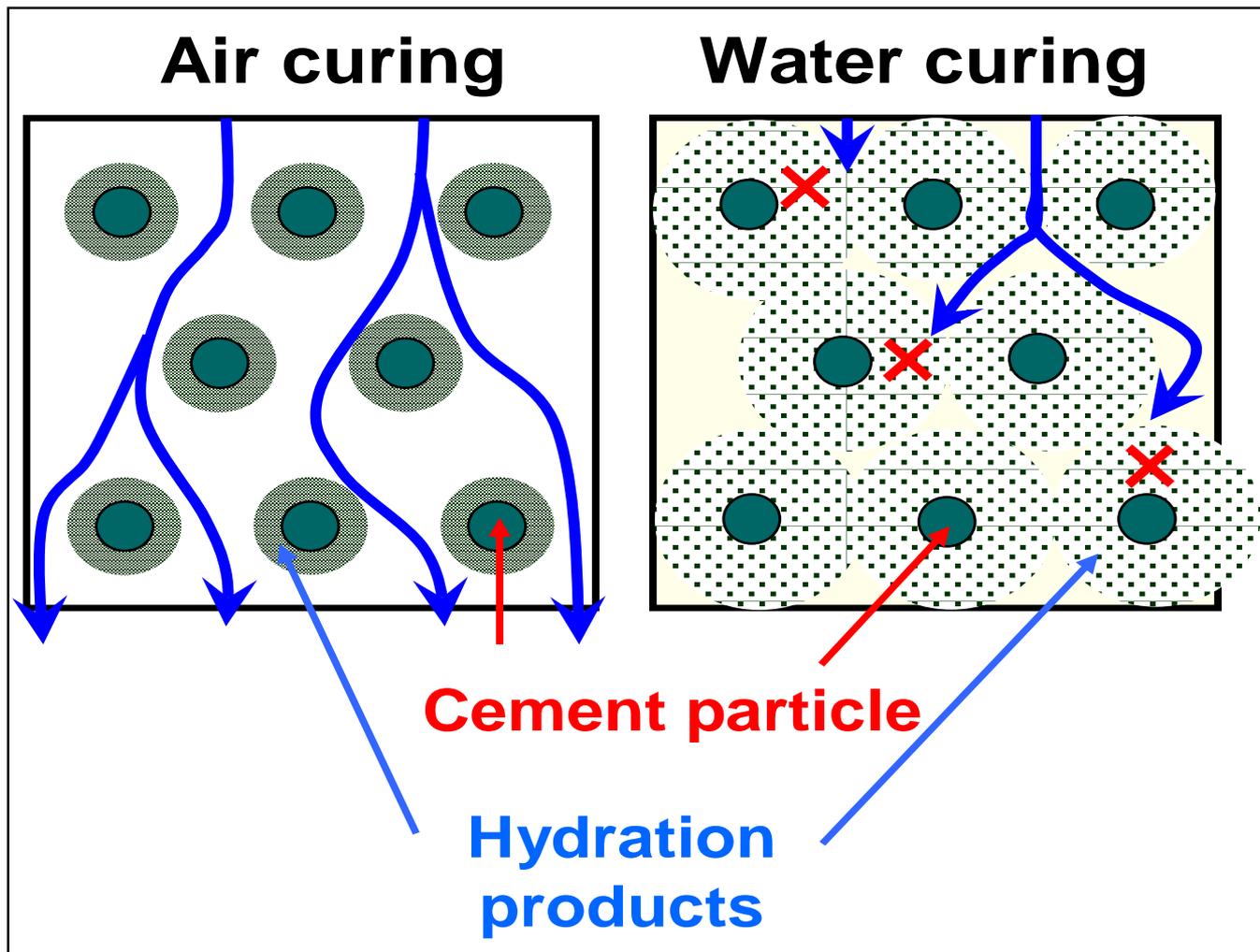
# 実験結果・・・水和率一定シリーズ

W/C=30%,60%において、任意の材齢における水和率を測定した結果、  
両者とも水中養生5日と気中養生28日の水和率(水和物の総量)が一致



- ・ 強度は養生方法によらず同じ値を示す
- ・ 物質移動抵抗性は養生によって大きな値の変化を示す

→圧縮強度は水和物の量(空隙の量)に支配され、  
物質移動抵抗性は水和物の形態(空隙の形態)に支配される。



- ▶ 水和物の量(図中の黒点)は同じ
- ▶ 存在形態の相違により, 物質移動抵抗性が変化
- ▶ 強度○~~↔~~耐久性○

# コンクリートの鉄筋保護性能の評価

コンクリートの鉄筋保護性能評価が劣化予測においては重要

→ 強度, 水, イオン, 気体 (酸素, 二酸化炭素) 浸透抵抗性



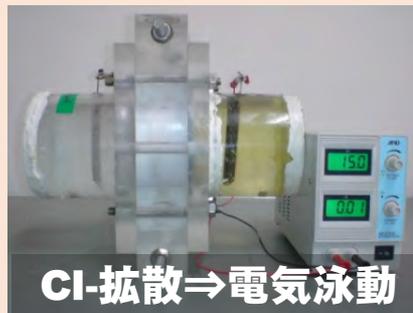
強度性能



圧縮試験



物質移動抵抗性



Cl-拡散⇒電気泳動



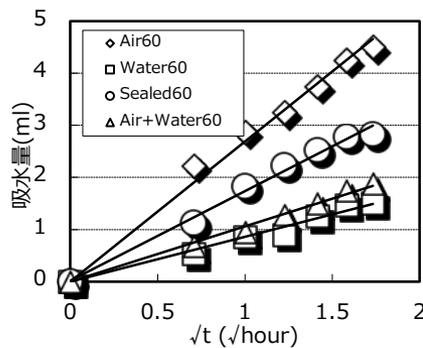
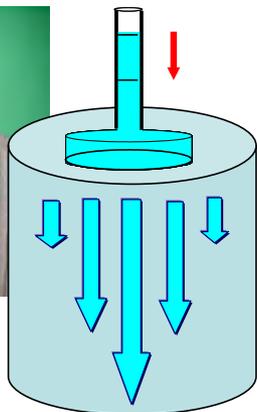
透気・透水試験

強度性能・物質移動抵抗性の両者に対する  
(非破壊) 検査が重要

# 強度・物質移動抵抗性

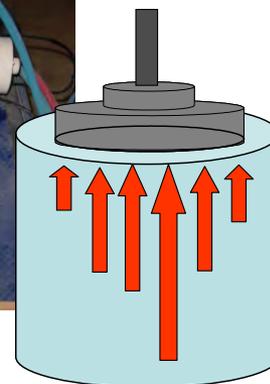
- 非破壊検査による耐久性能評価の重要性
- 耐久性能に関するによる劣化診断  
(透気もしくは吸水性能による評価)
- 埋設センサによる鉄筋腐食検知
- 四国における維持管理に関する取り組み

## 吸水試験(Water absorption test)



透水性に関する研究は, Powers, Bassat, Reinhardt, Murataが有名.

## 透気試験(Air permeability test)

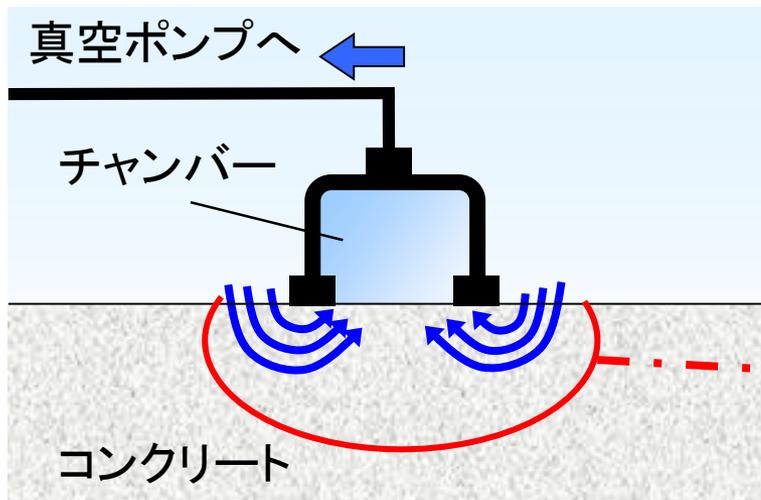


透気性に関する研究は, Dhir, Bamforth, Ujikeが有名.



# 従来の透気試験の問題点

- × 既往のシングルチャンバー，ダブルチャンバー方式  
→ 透気領域が不明



透気領域が単純ではないため  
透気係数 $K$ (透気性の直接的指標)  
による絶対評価がされていない

透気面積  $A = ?$

ダルシー則

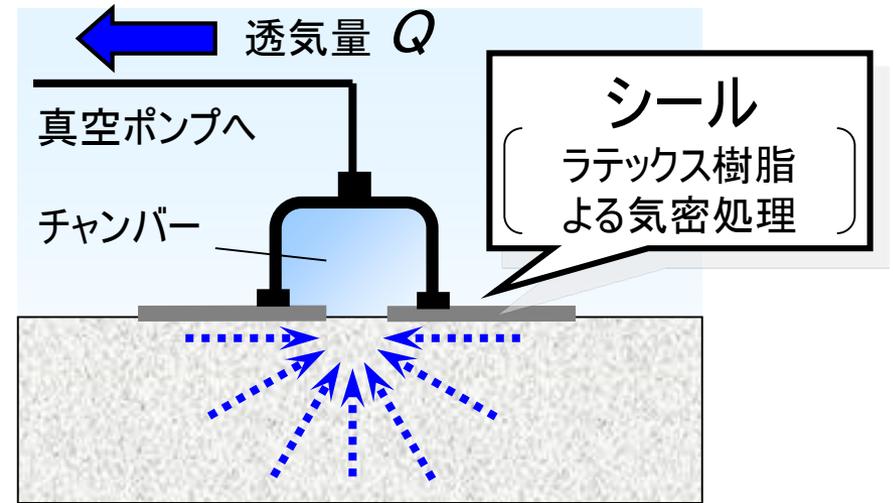
$$\frac{Q}{A} = K \frac{\partial P}{\partial x}$$

→ 氏家・岡崎は，透気領域を明確にし，透気係数を算出できる手法を提案(2008,2009セメントコンクリート論文集など)

# 提案する現場透気試験方法①

## ○シール法

コンクリート表面に**円形のシール**をすることで透気領域を**半球状**に



ダルシー則

$$\frac{Q}{A} = K \frac{\partial P}{\partial x}$$

半球の表面積  $2\pi r^2$

点  $a$  ~ 点  $b$  において両辺を積分

## ■ 透気係数の推定式

$$K = \frac{P_2}{2\pi(P_2^2 - P_1^2)} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) Q$$

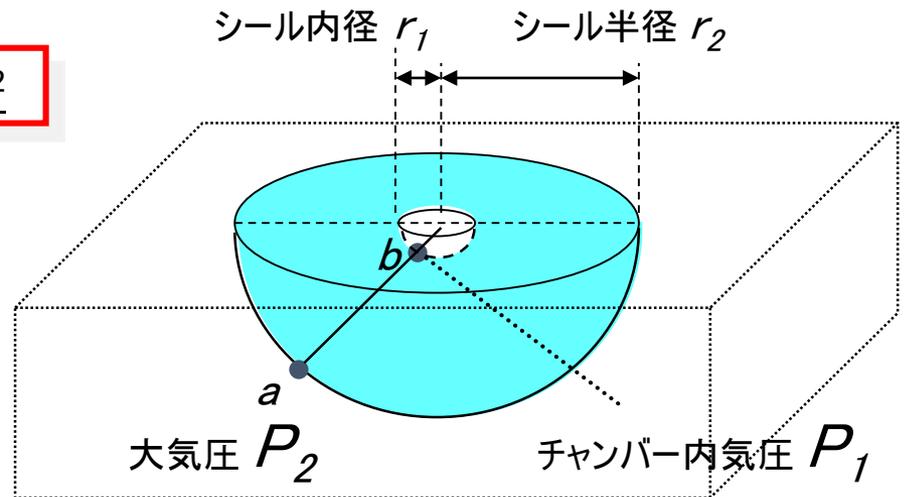


図 シール法の透気領域

# 提案する現場透気試験方法②

## ②シール削孔法

シール法の手法に加えて  
直径1cmの孔を開けることで  
透気領域を中空円柱状に

ダルシー則

$$\frac{Q}{A} = K \frac{\partial P}{\partial x}$$

円柱外周の表面積  $2\pi rH$

点a～点bにおいて両辺を積分

■ 透気係数の推定式 (B)

$$K = \frac{P_2 \log_e (r_2 / r_1)}{2\pi H} \times \frac{Q}{P_2^2 - P_1^2}$$

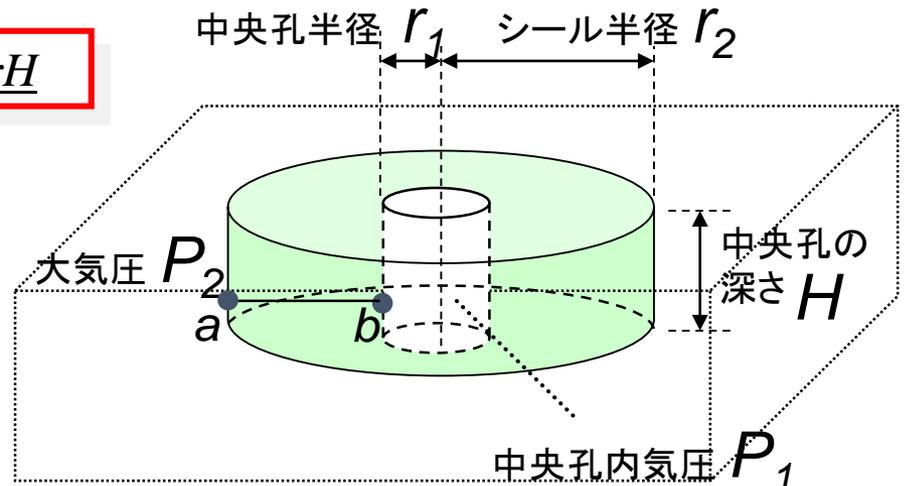
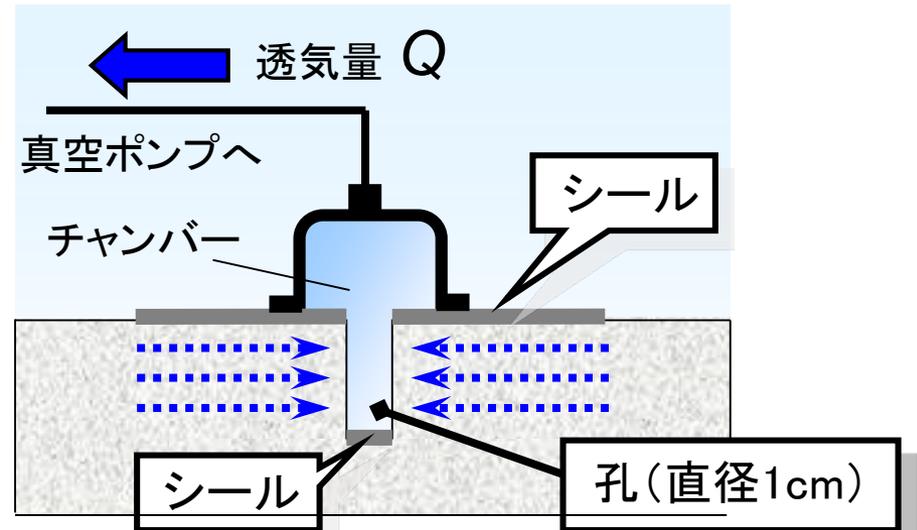


図 シール削孔法の透気領域

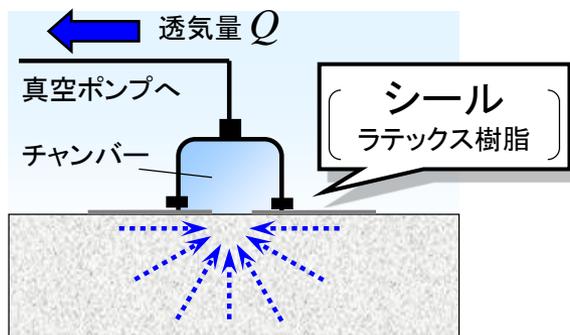
→さらなる特徴として、埋め戻し後も、削孔による再測定が可能。

# 測定の様子

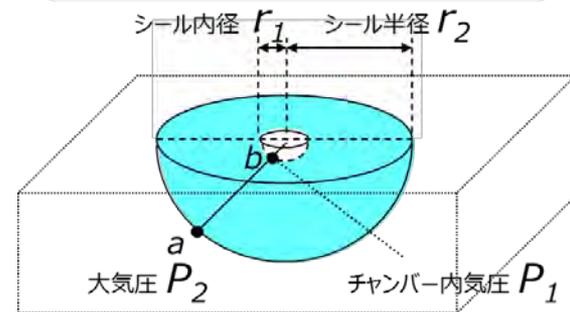


# シール法による透気試験と透気係数算出

- これまでの透気試験では透気領域が不明瞭  
→表面に円形シール  
透気領域を半球状に限定→透気係数算出



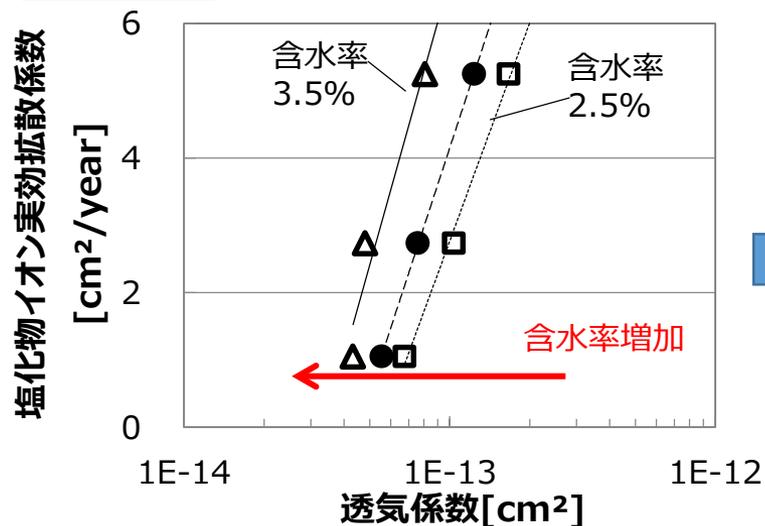
$$K = \frac{P_2}{2\pi(P_2^2 - P_1^2)} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) Q$$



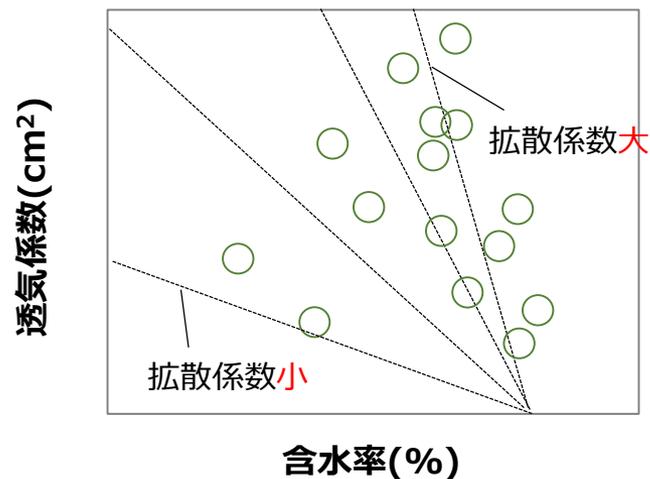
シール法の透気領域

- 安価
- 単純な機構→試験者の技量を問わず

## 実験室



## 評価基準図



透気係数，含水率，Cl拡散係数の関係  
を実験室であらかじめ求める

現場で，含水率と透気係数を計測  
→Cl拡散係数が推定できる！

# 土木学会コンクリート委員会(構造物表層のコンクリート品質と耐久性能 検証システム研究小委員会通試験)共通試験の参加



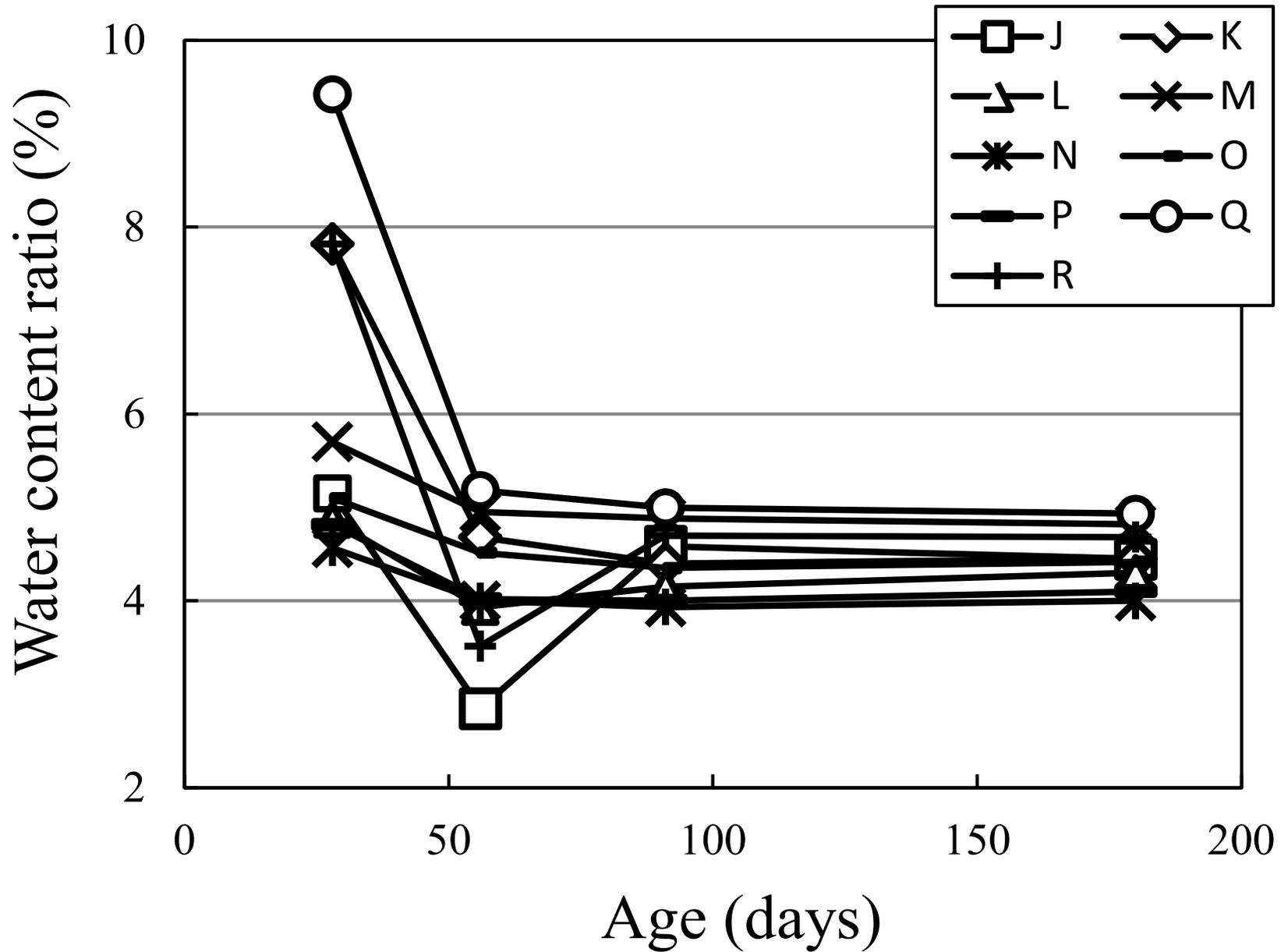
東京大学生産技術研究所千葉実験場トンネル供試体下

○水セメント比:40%, 50%, 60%

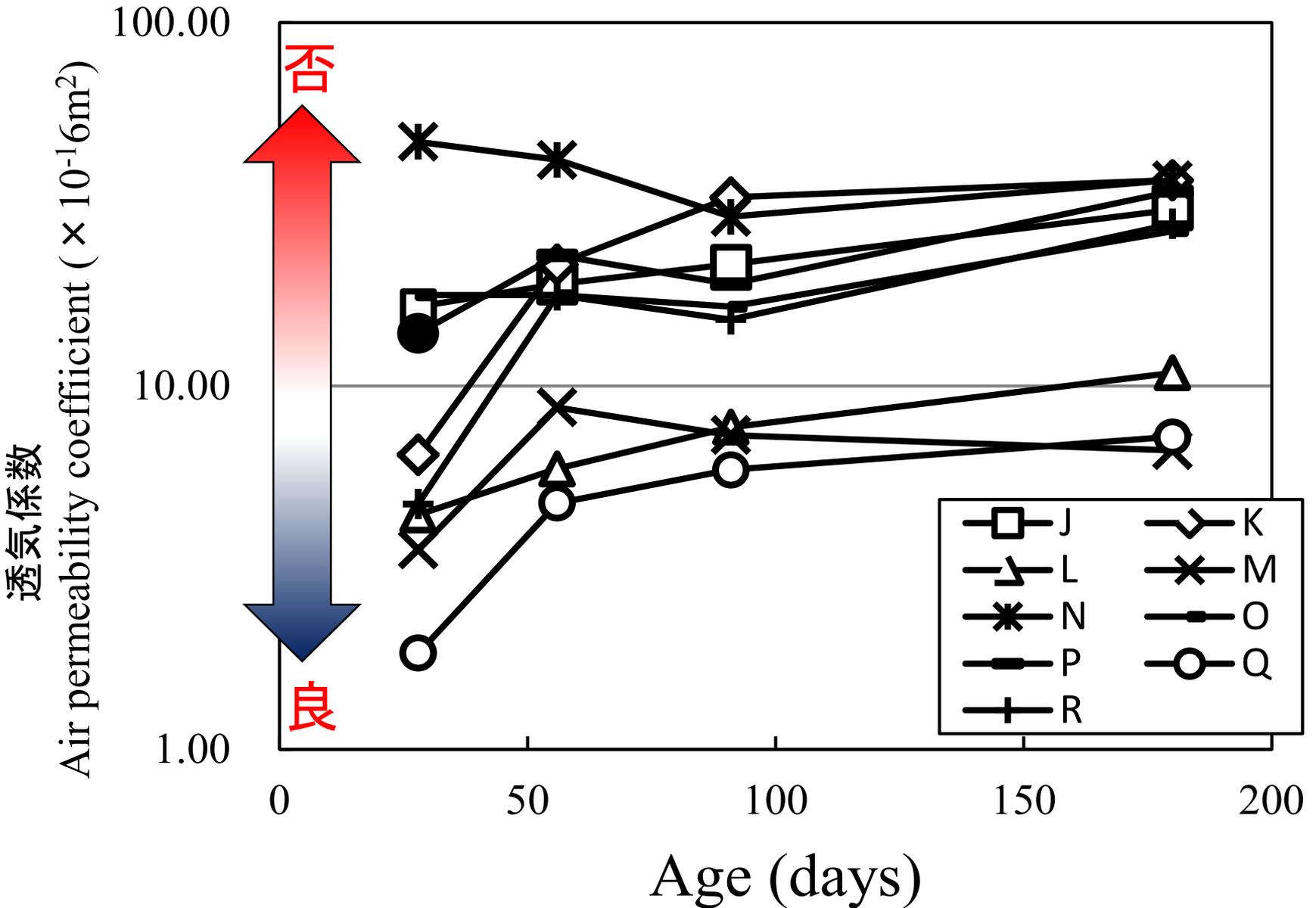
養生:脱型時期1日, 7日, 28日 の9体

○測定者には, 試験体に関する上記以外の情報が  
知らされない

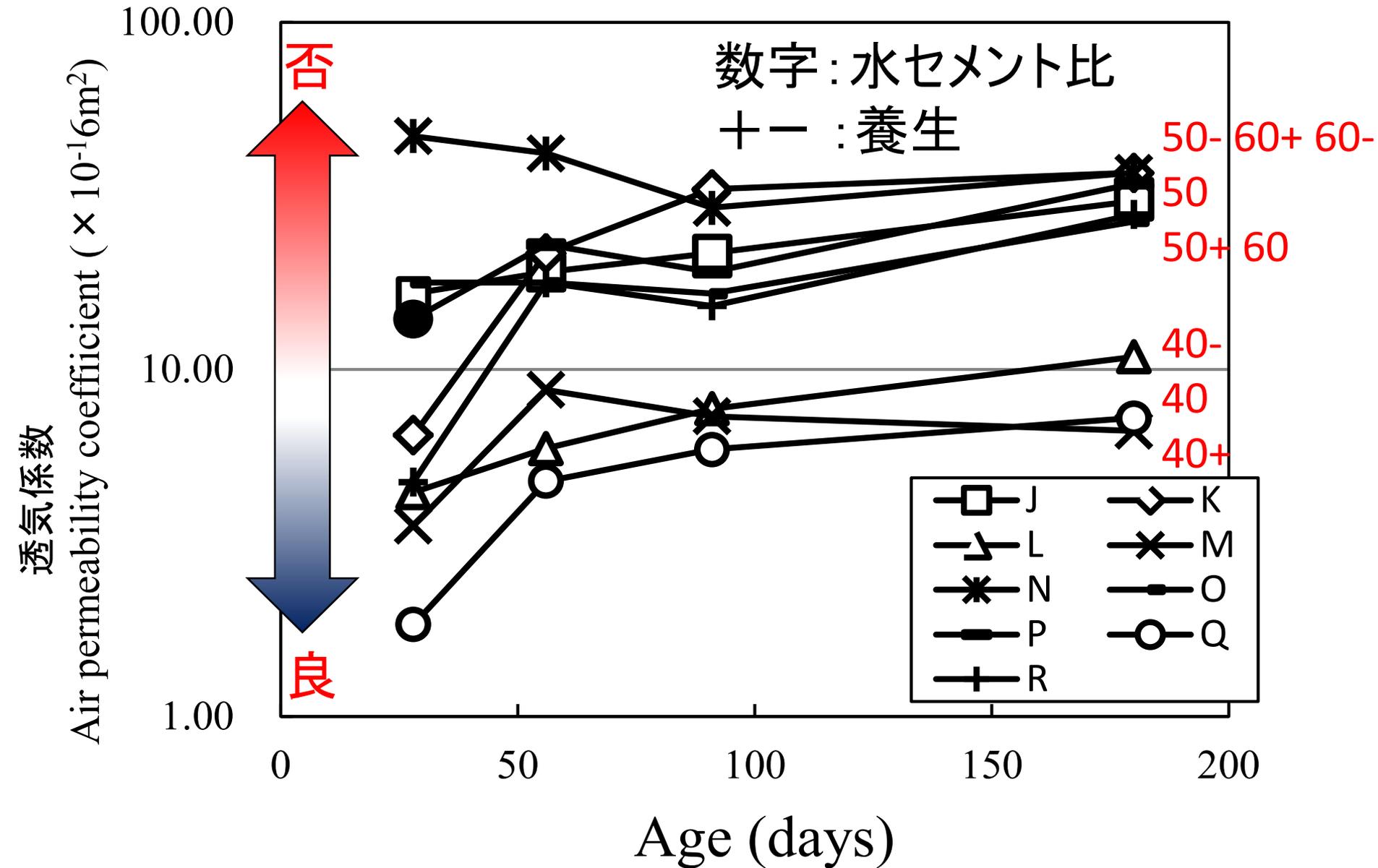
# 測定結果(含水率)



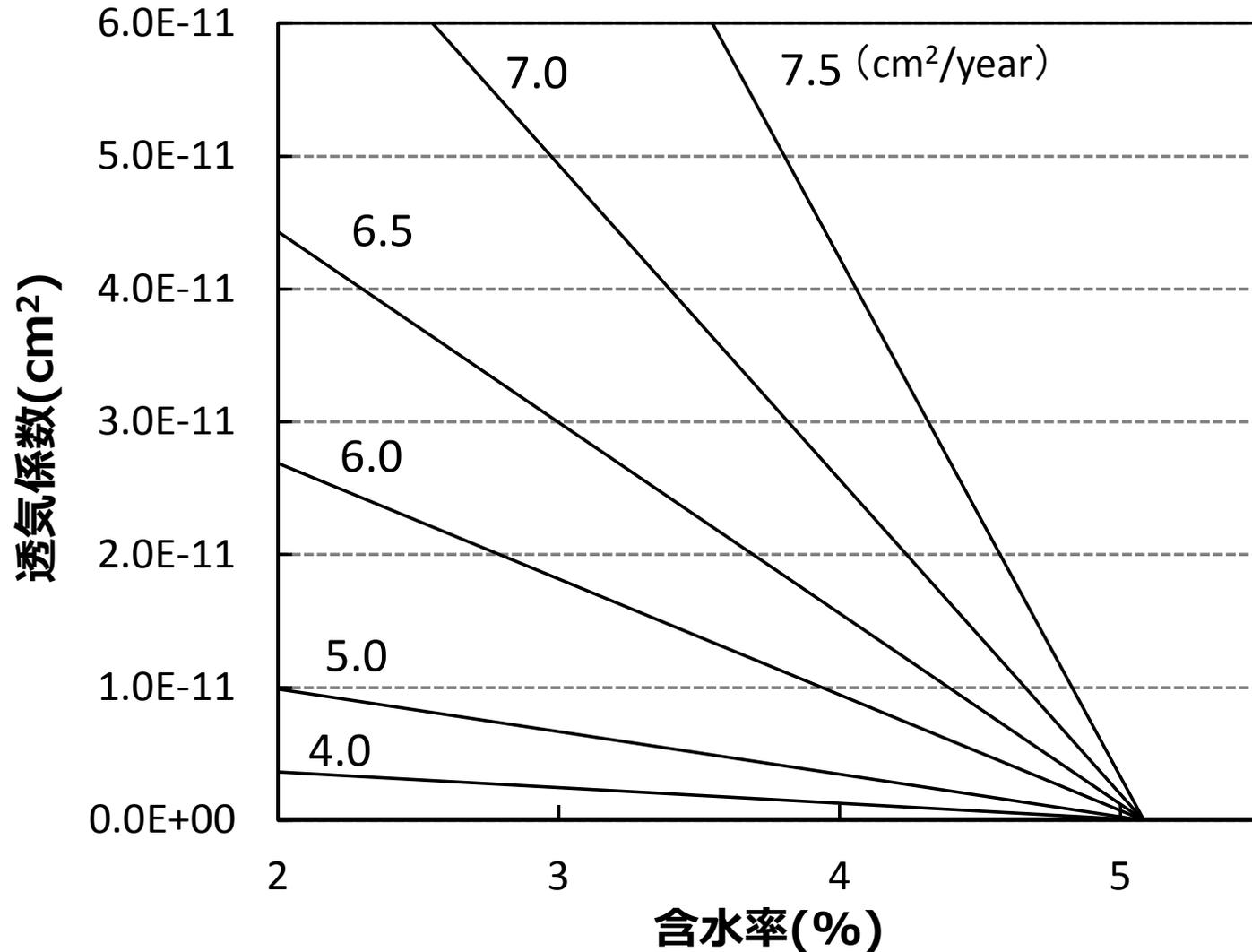
# 測定結果(透気係数)



# 測定結果(透気係数)

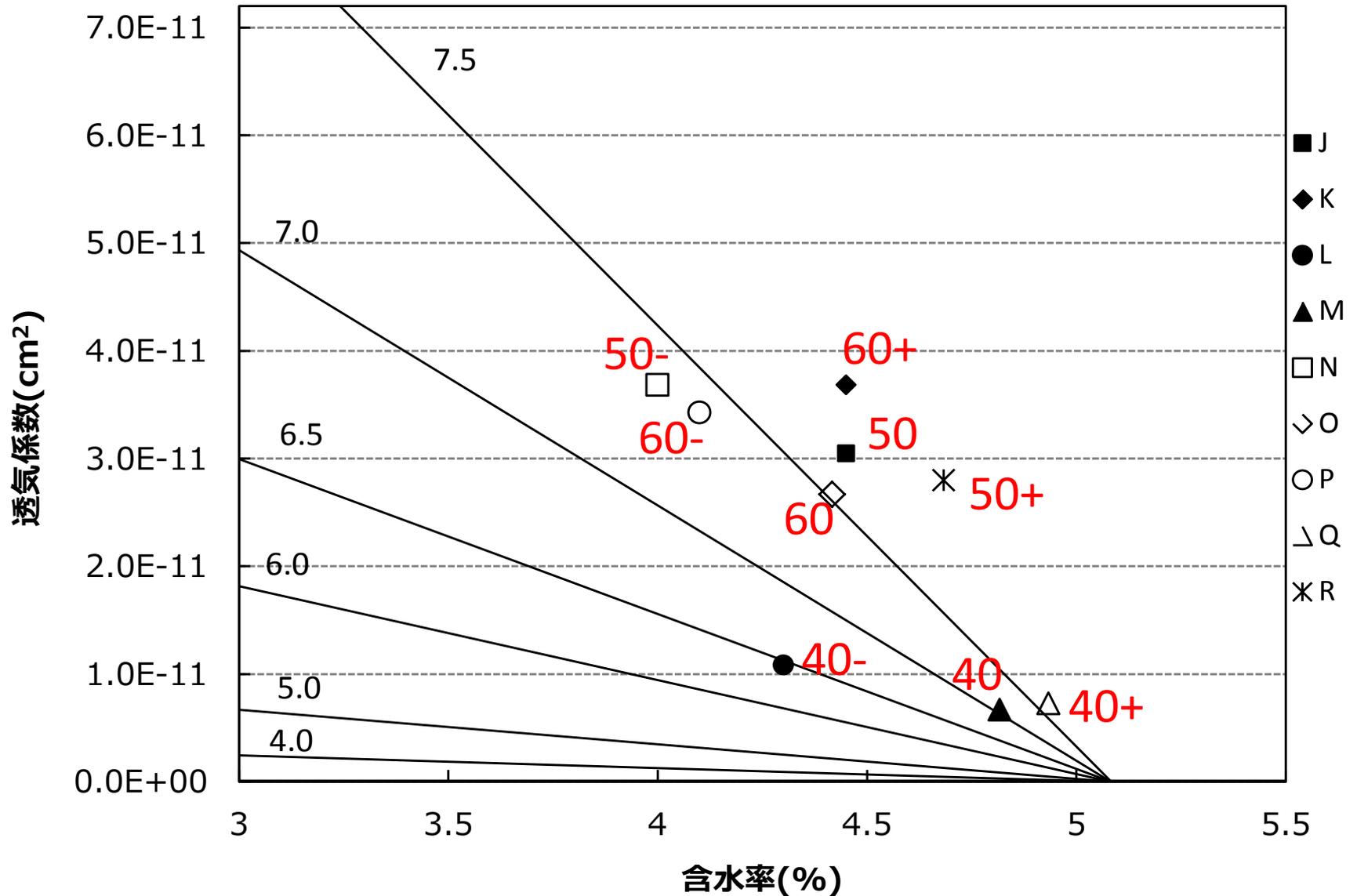


# 実効拡散係数への換算表

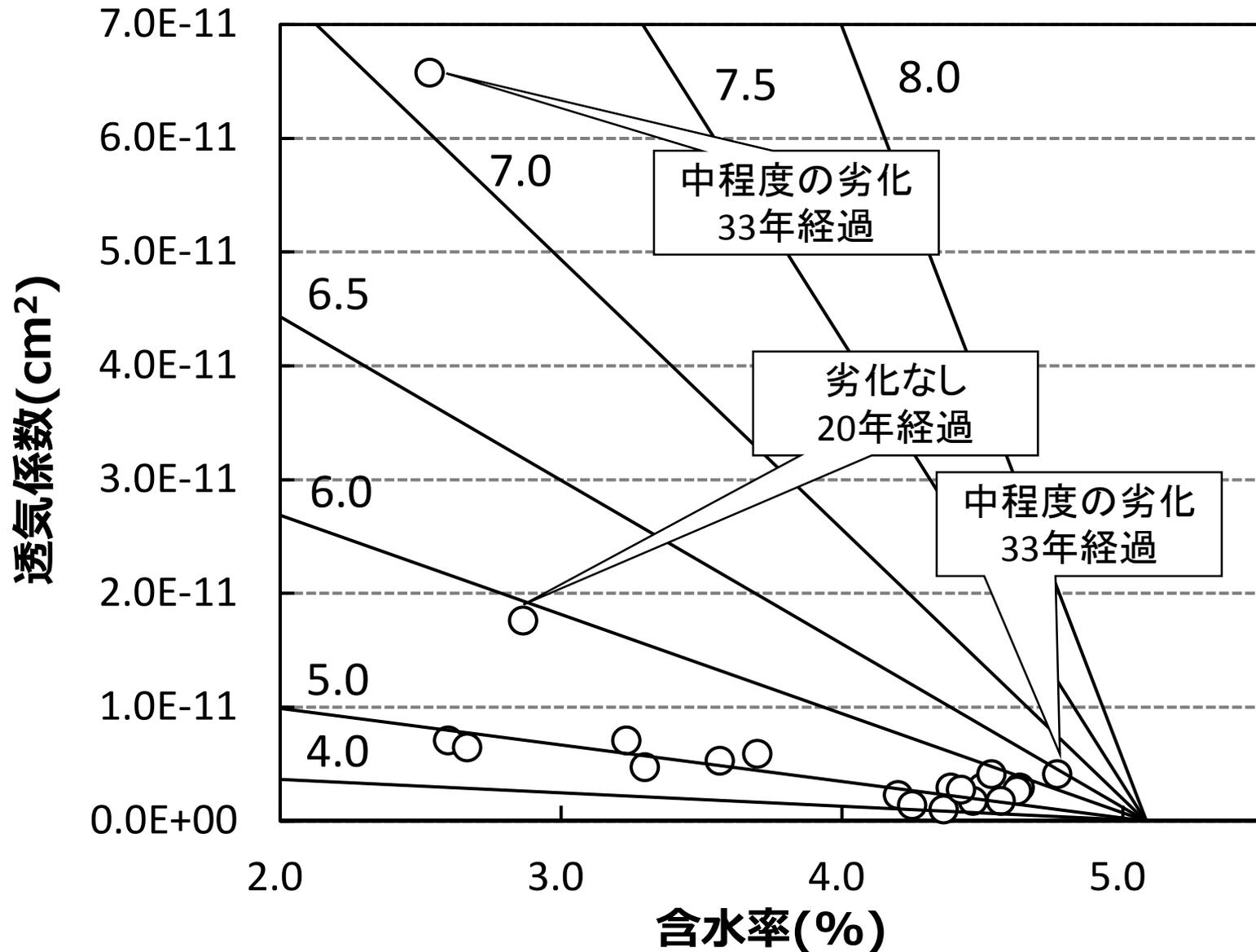


現場で計測した \* 透気係数 と \* 含水率  
から 塩化物イオンの拡散係数へ換算する

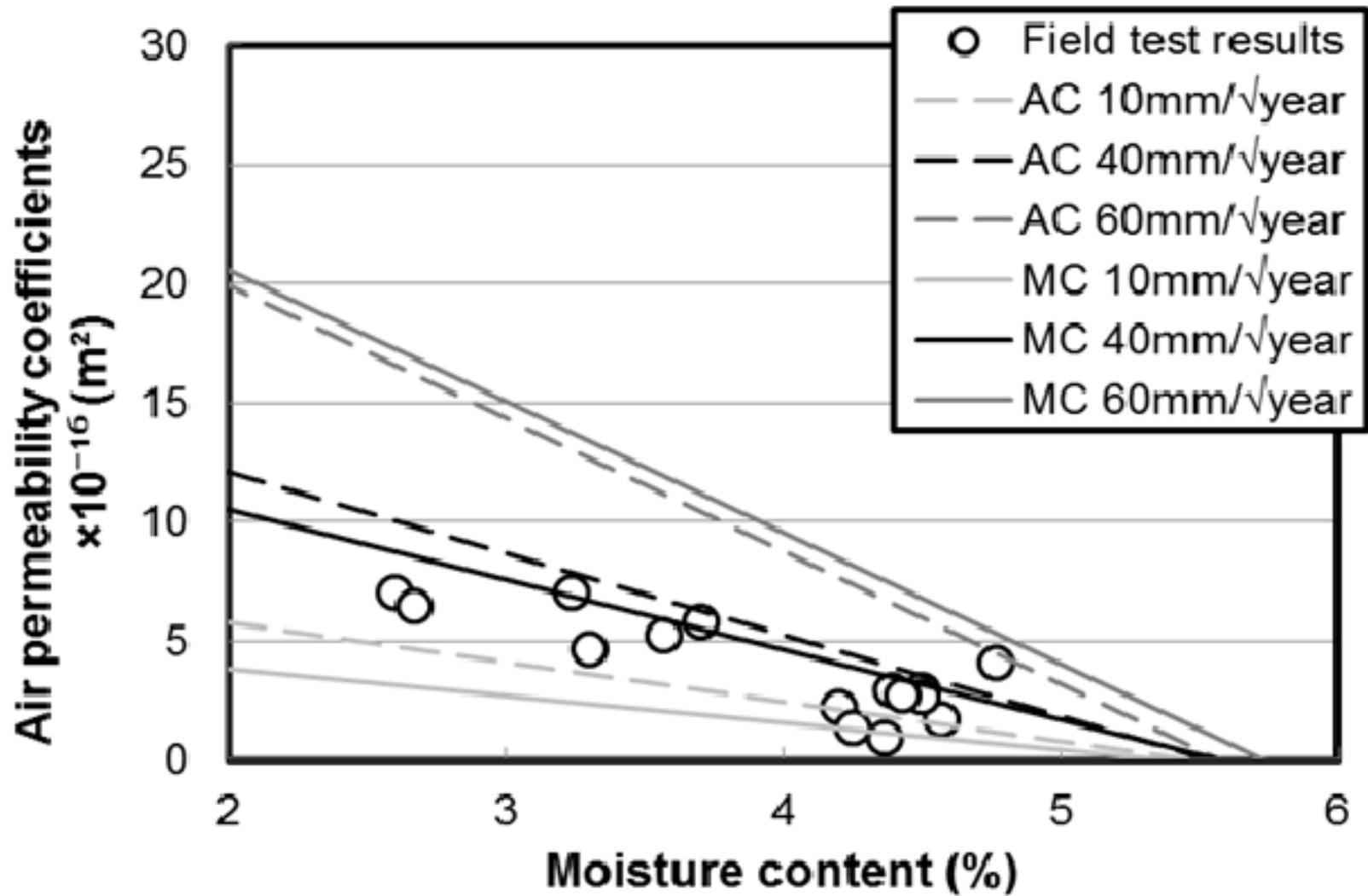
# 実効拡散係数への換算表



# X市橋梁における結果の適用



# 中性化に対する検討



※氏家・河合らの検討結果

# 表面吸水試験

(Surface Water Absorption Test, SWAT)

# コンクリート構造物の劣化と水



# 構造物の緻密さと水の吸いやすさ



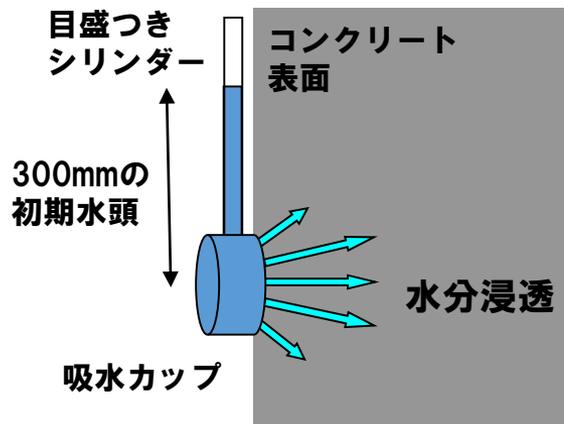
粗なコンクリート  
瞬時に水を吸い、垂れない



密なコンクリート  
水を吸いにくく、表面を流れる

技術者のジャッジを定量化したい

# 表面吸水試験の原理



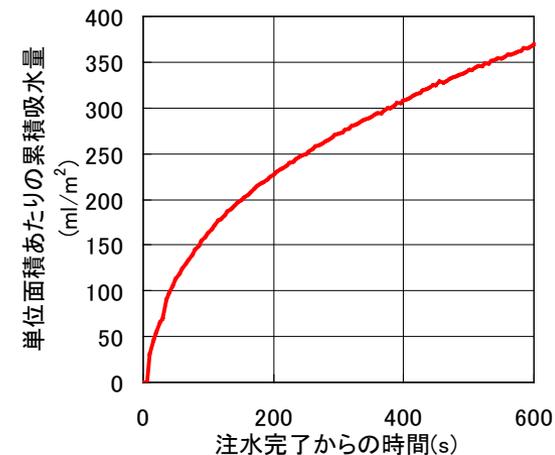
単位面積(直径8cmのカップ)当たりの吸水速度で整理

10分間の測定中の評価深さは10mm前後

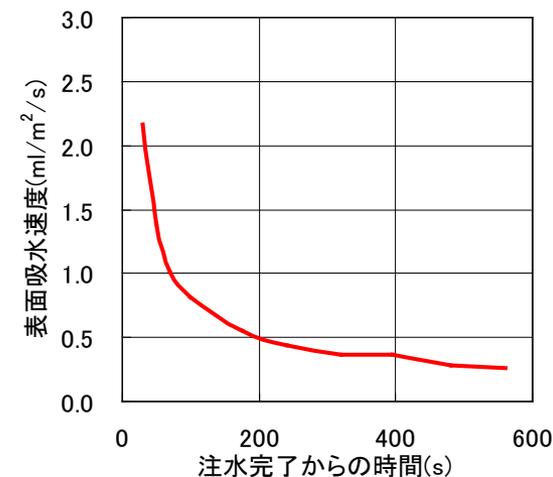
→10分間の測定を行い、10分時点での吸水速度(表面吸水速度)  $p_{600}$  [ml/m<sup>2</sup>/s] で評価する。

Levitt(1971)による品質評価の目安

品質	$p_{600}$ [ml/m <sup>2</sup> /s]
低	> 0.5
中	0.25 - 0.5
高	< 0.25



$$p = \frac{dw}{dt}$$



# 表面吸水試験の開発経緯

※香川高専 林准教授の研究

既往の手法 1960年代～ BS1881  
Initial Surface Absorption Test (ISAT)

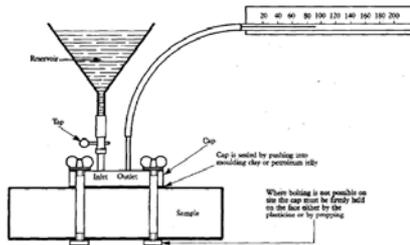


Figure 4. Initial Surface Absorption Test equipment

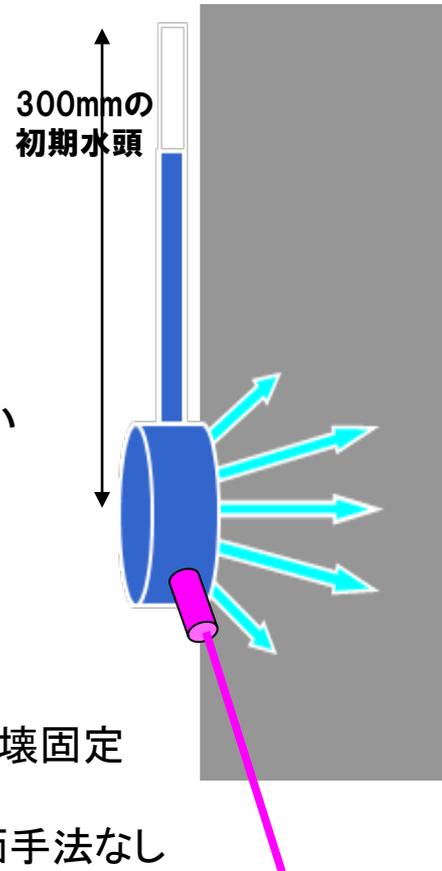
- ・水頭が一定
- ・試験室レベルの測定実績が豊富
- ・現場では非破壊の手法が確立されていない
- ・光学センサによる自動化もあるが煩雑



Porositester

- ・真空ポンプによる非破壊固定
- ・直径の影響
- ・注入時間の規定, 評価手法なし

横浜国大の方法  
Surface Water Absorption Test (SWAT)



・真空パッドで反力を取り、押し付けて固定(既往技術の応用)

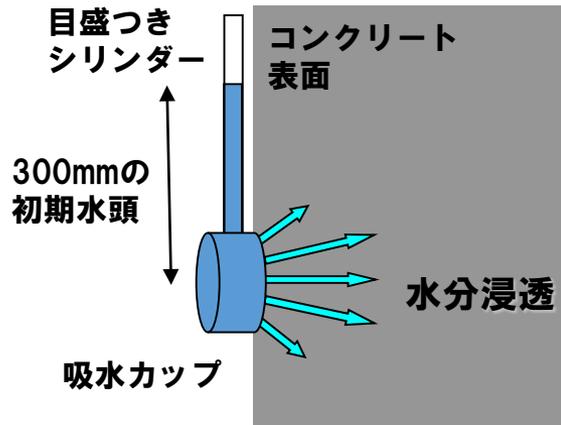
・水量を, 水面の変化で読み取る(既往技術の応用)

・水頭が試験中に減少する特徴がある→影響のないことを確認

・目視読取りおよび  
水圧センサー自動計測  
→水圧が変化することを  
逆手に利用

# 本手法の優位性

※香川高専 林准教授の研究



1. 水を作用させていること。  
塩害, ASR, 凍害, 中性化など, コンクリートの劣化は水の動きと関係。
2. 透水現象と吸水現象が同時に生じているが、圧力は小さいため吸水現象が支配的。  
初期水頭300mmは、激しい降雨時にスラブに作用する圧力よりも大きい程度(ただし壁面への降雨圧力はもっと小さい)。(→組織を壊さない)
3. 目視で水漏れを確認できる。
4. 微細ひび割れも含めた評価。
5. 10分間の測定では、水の作用する深さはコンクリートの品質にもよるが最大で10-15mm程度。鉄筋までのかぶり全体でなく、施工の影響を受けやすい表層を評価している。

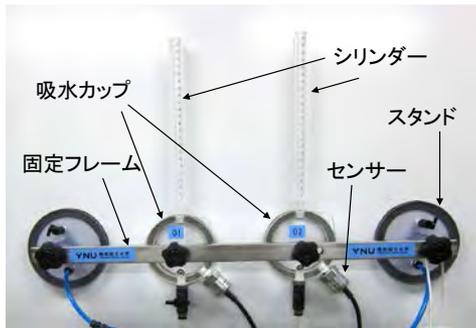


離れた位置から水漏れ

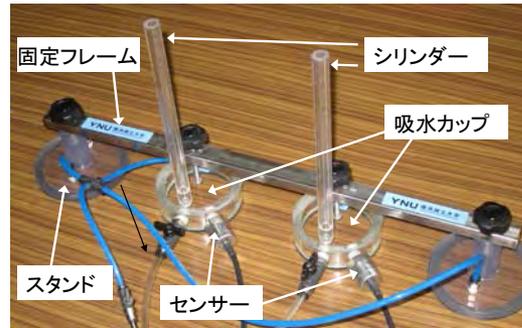
# 設置手法と適用部材



吸水カップの固定・測定時全景カップ下面からの水の注入



鉛直面(壁面, 桁側面)



水平面上部(スラブ面)

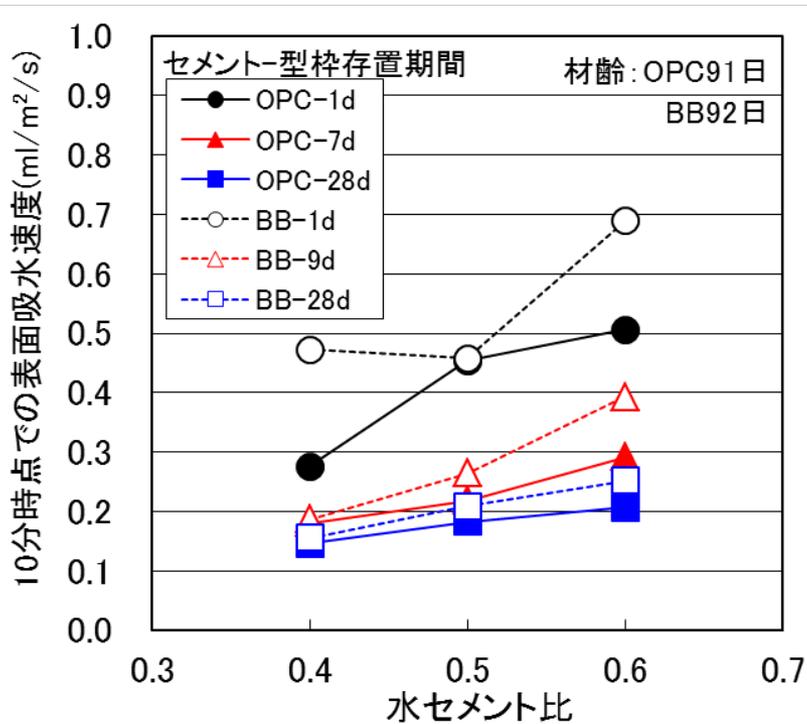
トンネル(天井面)  
にも適用可能

※香川高専 林准教授の研究

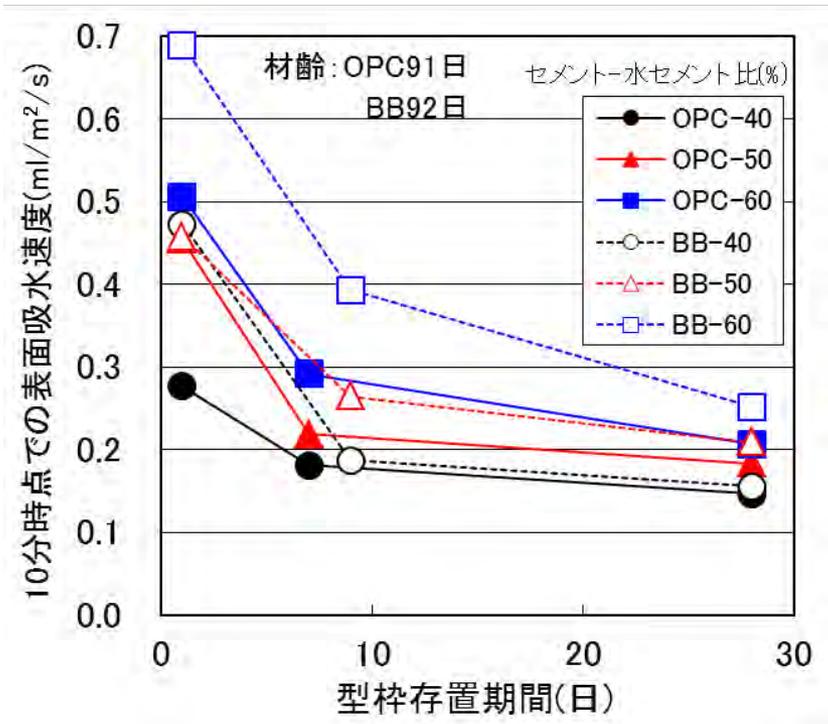
# 養生と水セメント比の感度

※香川高専 林准教授の研究

型枠存置期間別

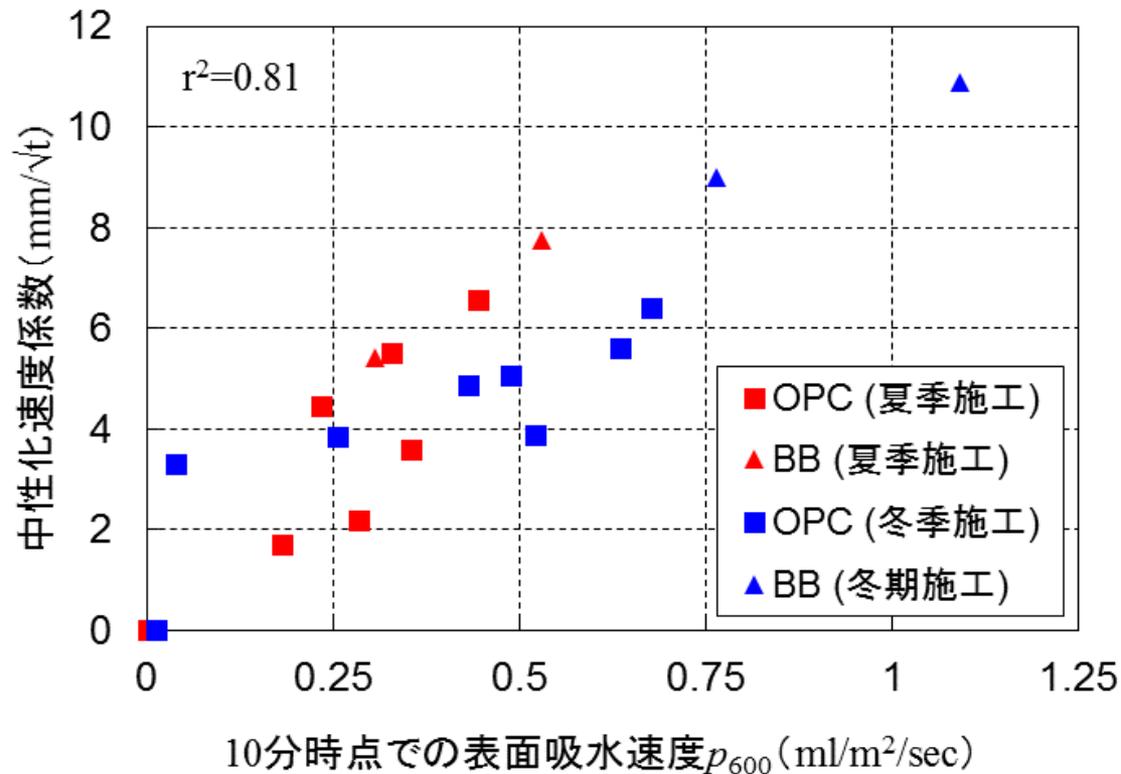


水セメント比別



水セメント比, 養生期間の違いを検知できる。  
→特に養生の違いに敏感で、表層の緻密性を評価。

# 中性化速度係数との対応

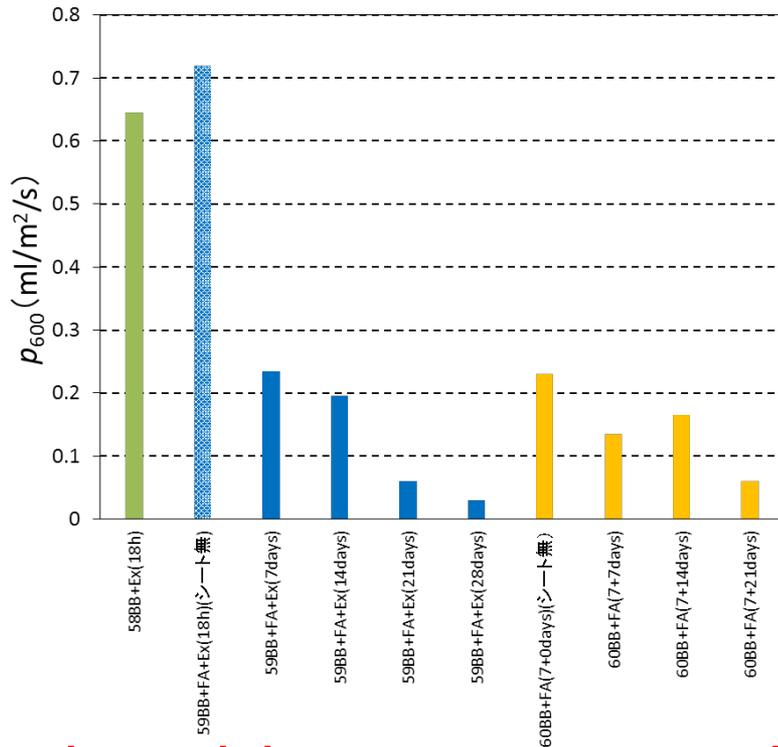


→比較的良好な対応関係を示す。

# 実構造物での養生の効果

東北地方整備局復興道路のトンネル建設において実際に使用され、養生の効果の評価が可能。

→「東北地方整備局コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)」において、「緻密性の評価に使用する非破壊試験手法」として紹介



18時間脱型

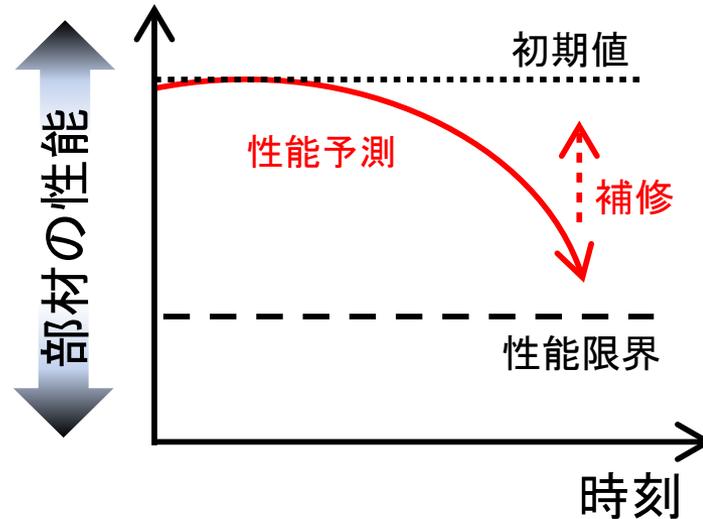
材料の改善または  
湿潤養生の効果

# 本日の内容

- 非破壊検査による耐久性能評価の重要性
- 耐久性能に関するによる劣化診断  
(透気もしくはは吸水性能による評価)
- 埋設センサによる鉄筋腐食検知
- 四国における維持管理に関する取り組み

# 研究背景

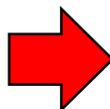
栈橋上部工RC部材の戦略的な維持管理・LCC最小化は重要



- 目視による把握が困難な鉄筋腐食を検知したい
- 点検作業の手間を削減したい

社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会

モニタリング技術の公募：SIP 戦略的イノベーション創造PG



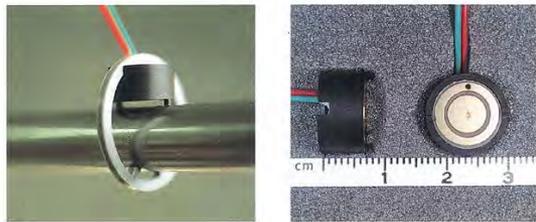
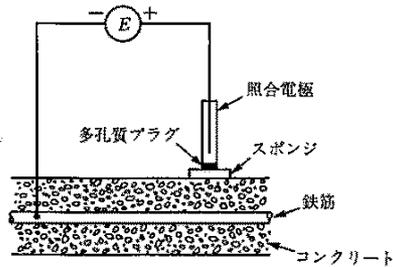
モニタリング診断技術，必要精度  
計測期間，腐食判定

# 研究目的

## モニタリングによる鉄筋腐食判定手法の確立

判定基準・判定タイミング  
離散配置したセンサ⇒部材全体の評価

判定に用いる指標：自然電位（鉄筋と電極の電位差）

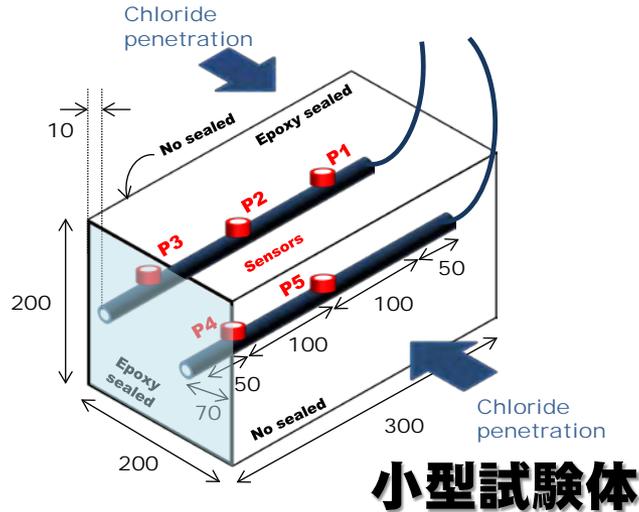


埋設式センサ

### 腐食判定基準(ASTM)

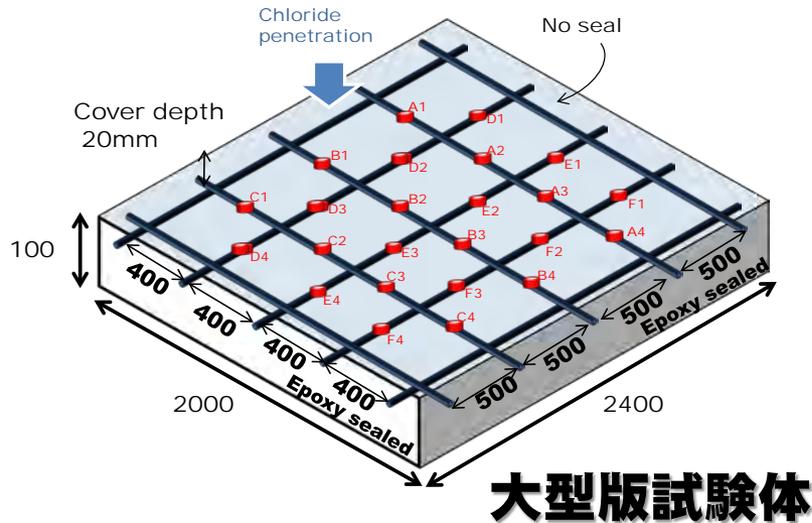
腐食の可能性	自然電位 E (mV vs 海水Ag/AgCl)
90% 以上の確率で 腐食なし	$-135 < E$
不確定	$-285 < E < -135$
90%以上の確率で 腐食	$E < -285$

# 実験概要・検討内容



## 小型試験体（かぶり10mm，70mm）

1. 腐食判定基準の適用性検討
2. 腐食判定タイミングに関する検討



## 大型試験体（かぶり20mm）

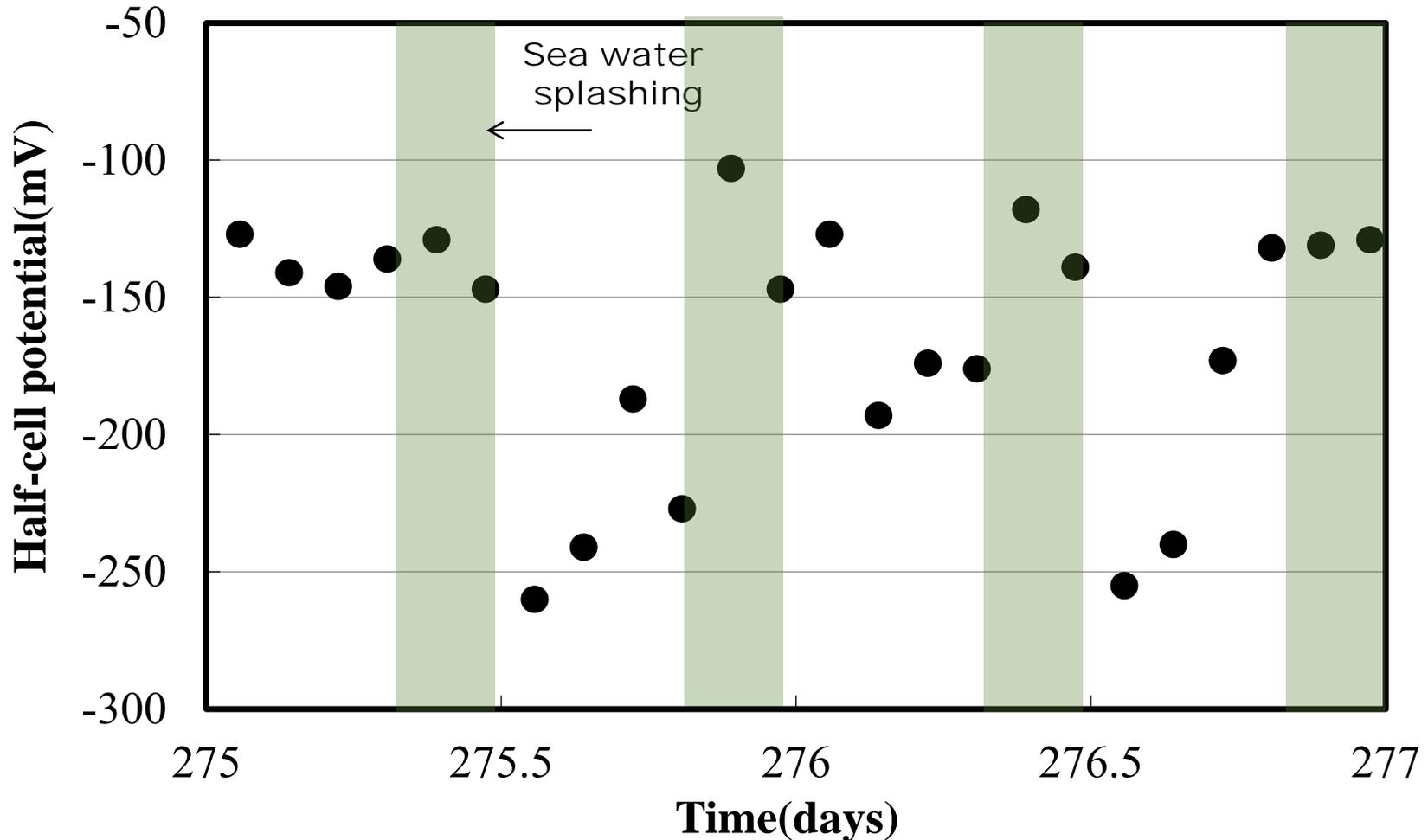
3. 離散情報⇨部材全体の腐食推定
4. 最小センサ個数に関する検討

# 実験概要（曝露環境）



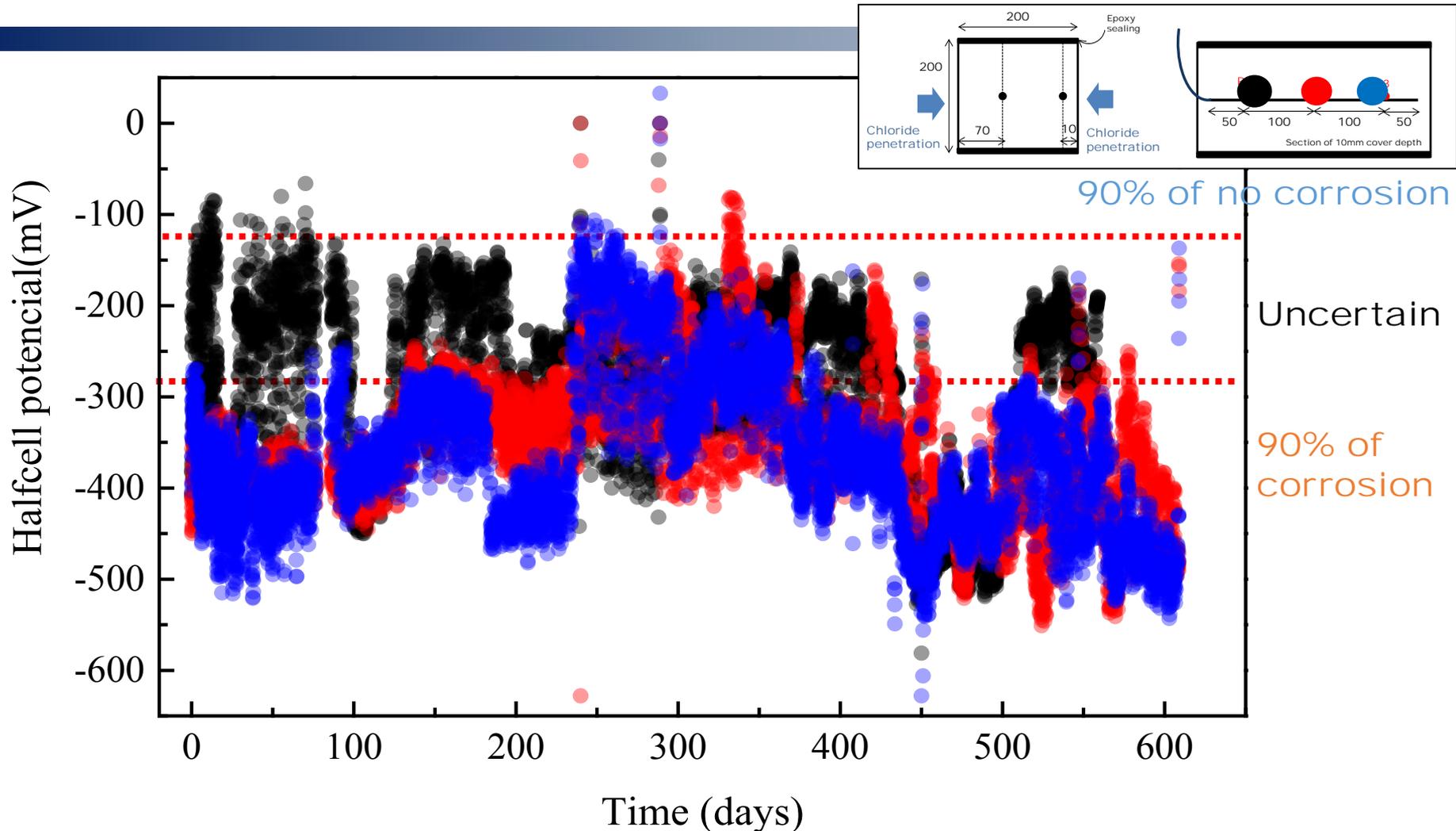
- ・ 長期曝露施設にて2年弱曝露・モニタリング
- ・ 毎日4時間×2度の海水噴霧

# 小型試験体 試験結果の一例（センサ1）



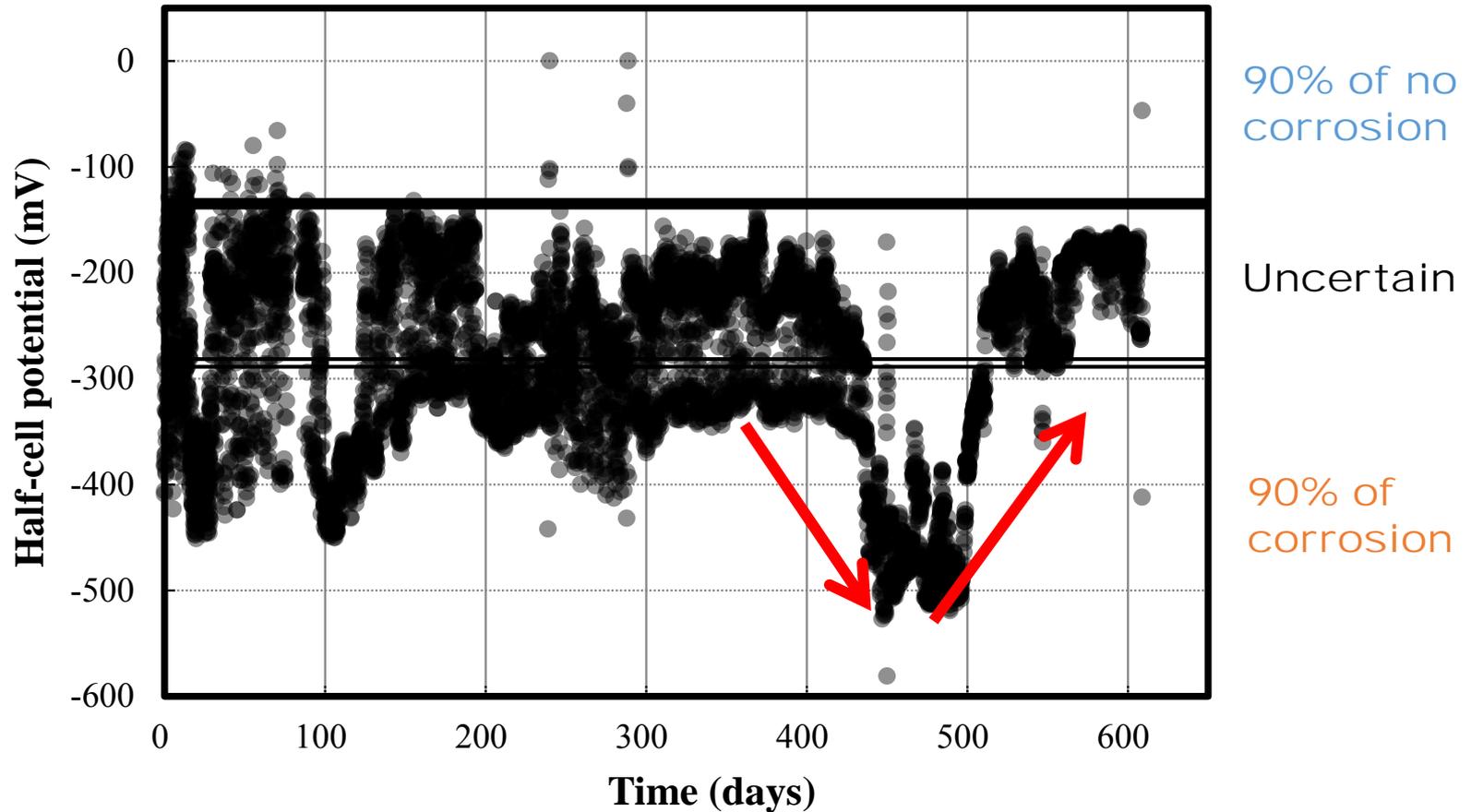
海水噴霧終了直後：最も卑（マイナス寄り，-）  
海水噴霧開始直後：最も貴（プラス寄り，+）

# モニタリング結果（かぶり10mm側）

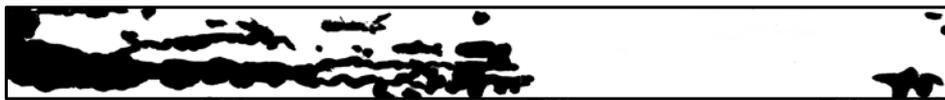


- 最大で300mV程度の日変動，乾湿の影響
- モニタリング開始直後より，不確定～腐食の領域を推移

# モニタリング結果（かぶり10mm側センサ1）



解体した試験体より取り出された鉄筋



P1

P2

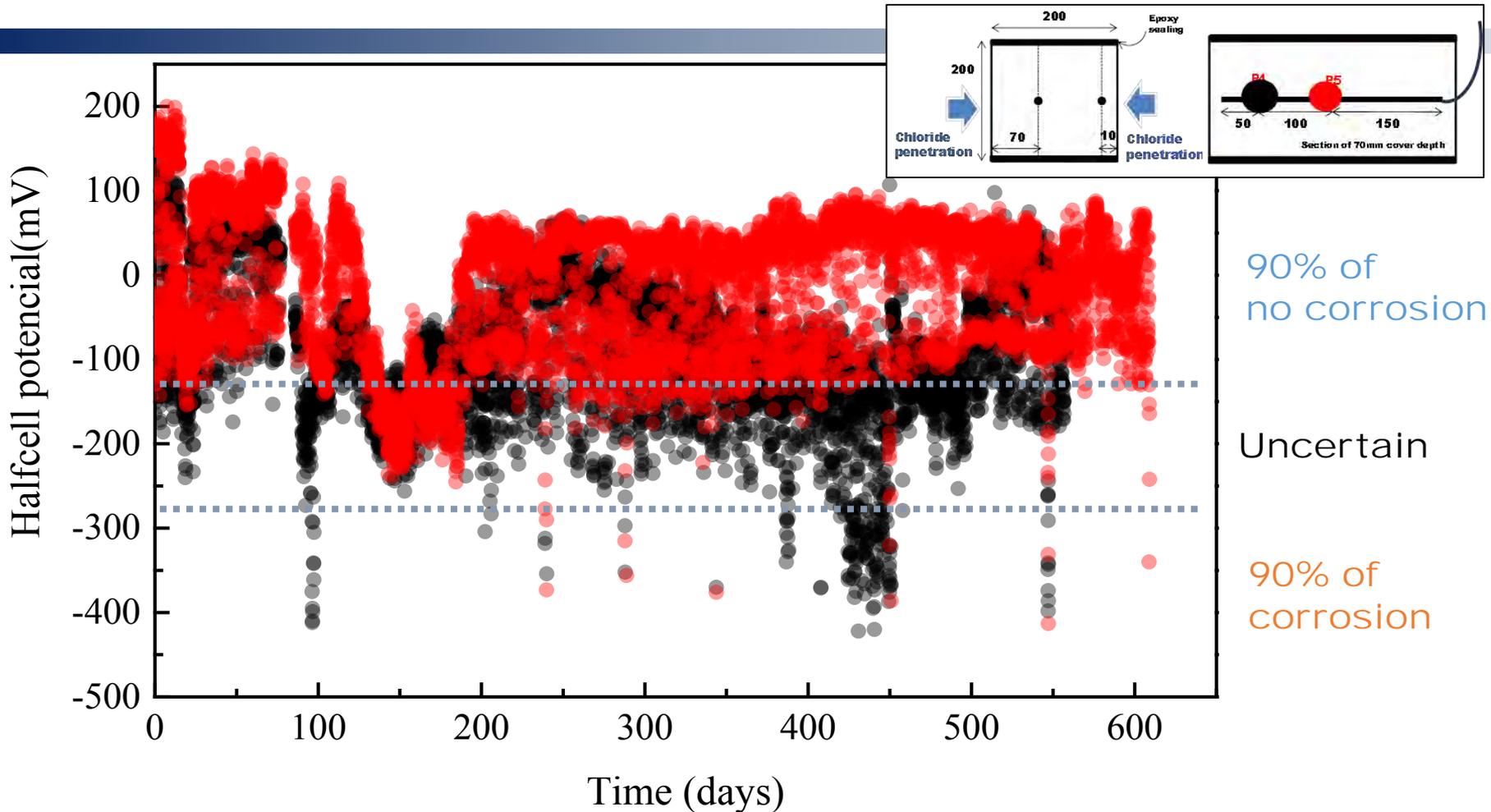
P3

■ :腐食箇所

**アノード分極の影響**

- ・ マクロセル腐食の形成
- ・ 陽極側の電位が貴側に推移

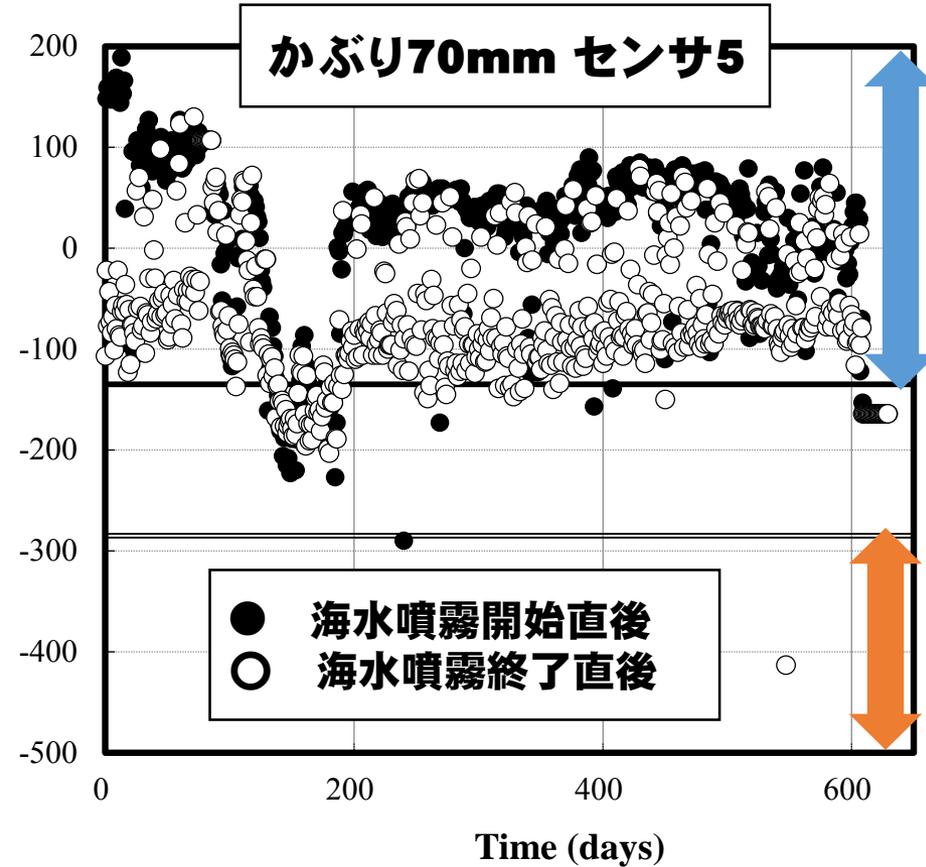
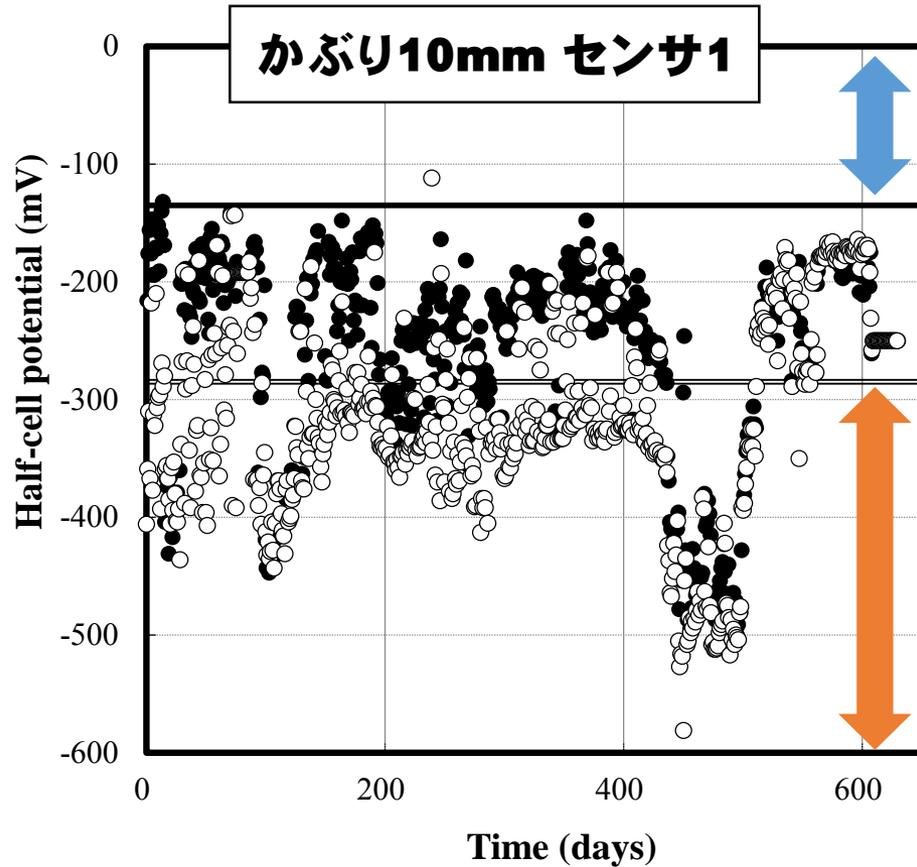
# モニタリング結果（かぶり70mm側）



・ 最大300mVの変動 ・ 概ね-135mVより貴の領域を推移 ・ 腐食なし

・ かぶり10mm側と同様日変動が大きい。腐食判定タイミングを検討。

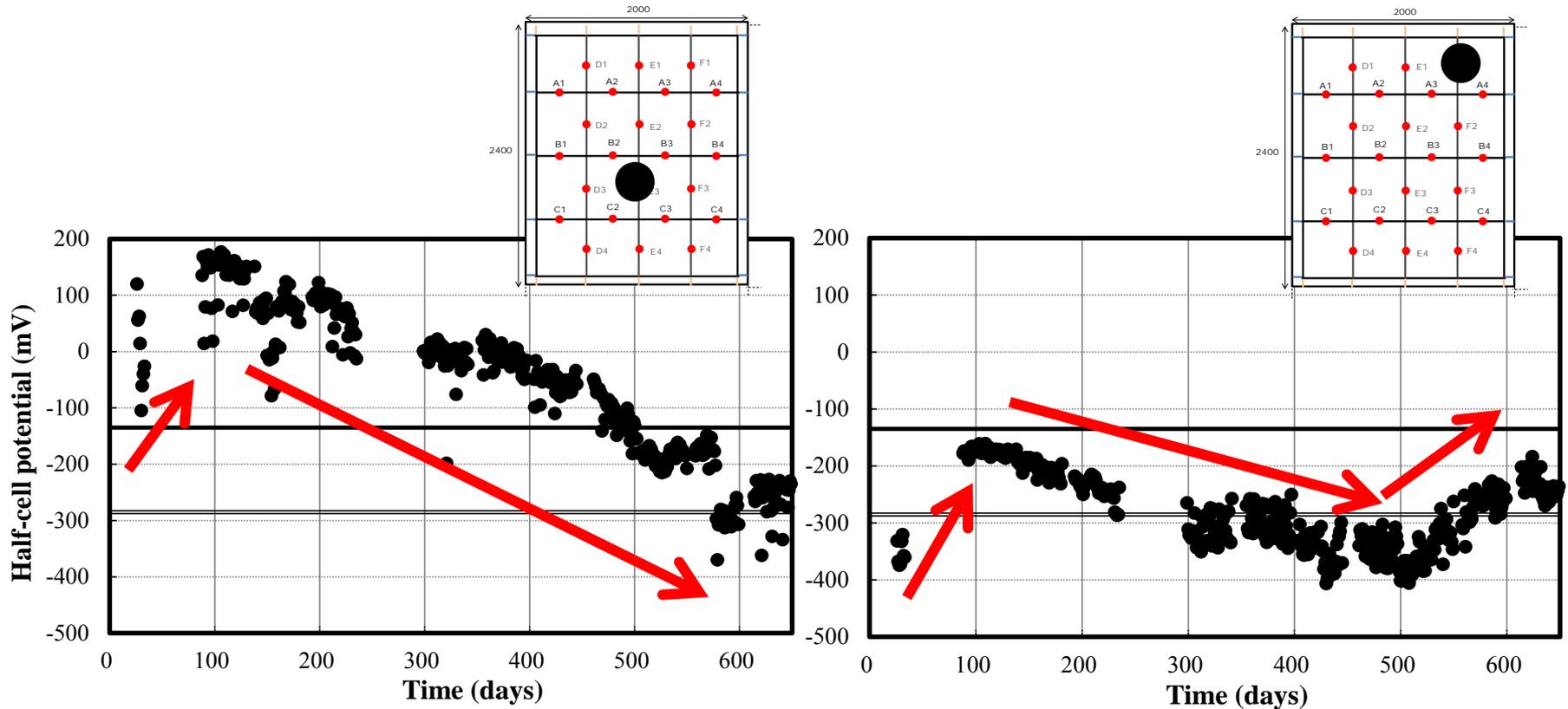
# 腐食評価タイミングの検討



海水噴霧開始直後：上界 海水噴霧終了直後：下界

海水噴霧終了直後が，腐食評価タイミングとして妥当

# 大型版試験体のモニタリング結果

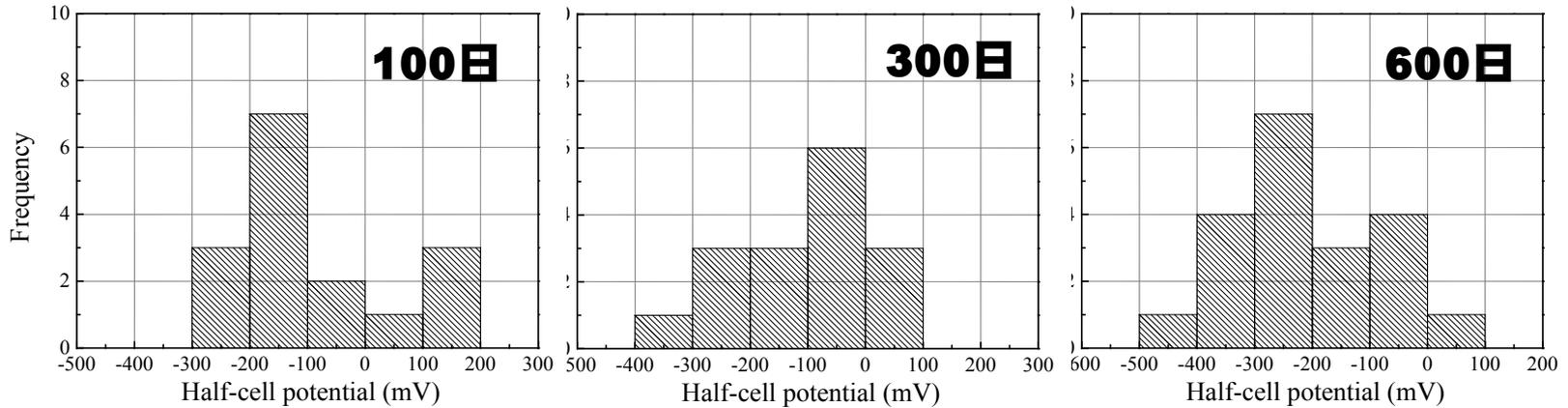


モニタリング開始直後（若材齢）は貴側に推移，その後卑側に推移

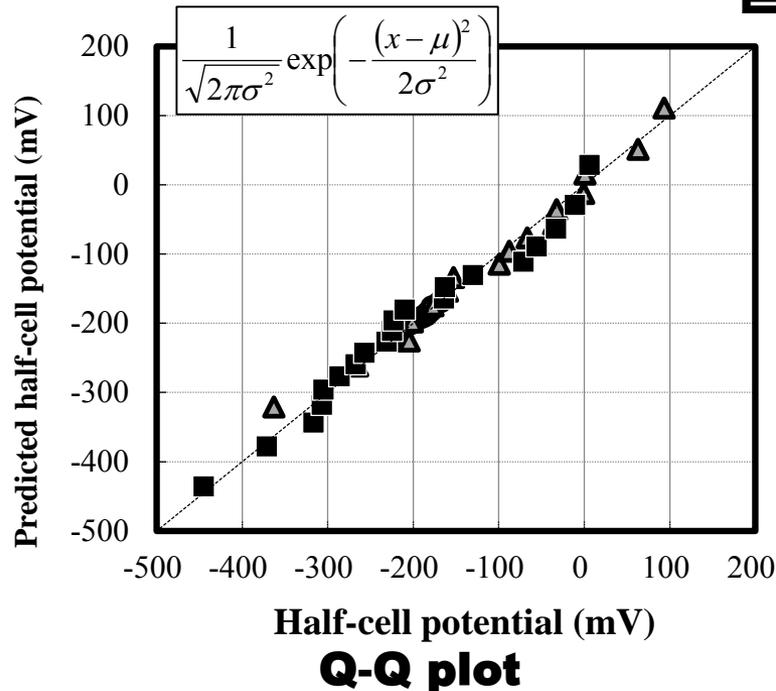
さらにその後，貴側に推移

→ アノード分極の影響

# 計測値と母集団（部材全体）の分布



## 自然電位の度数分布



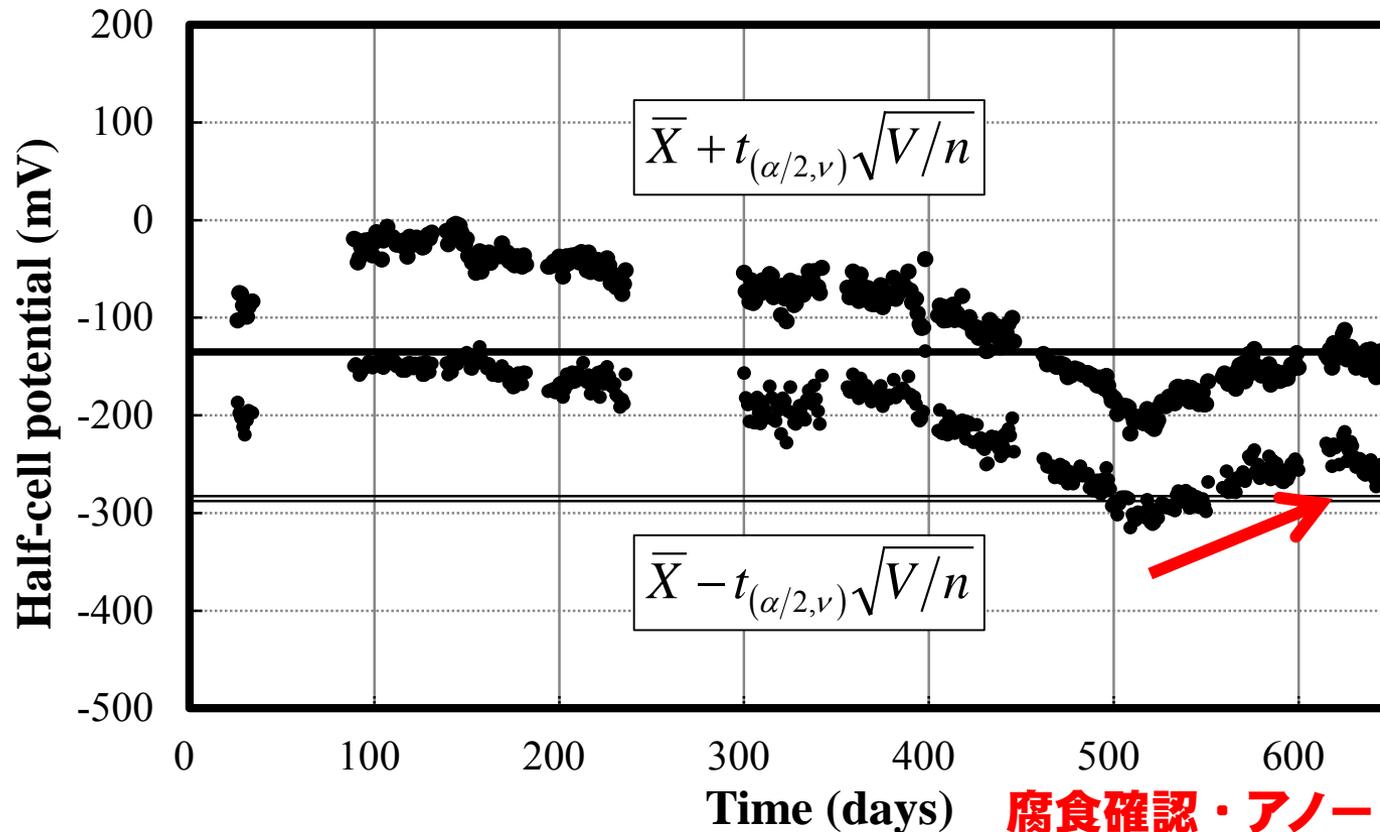
**帰無仮説：母集団は正規分布に従う**  
**対立仮説：母集団は正規分布に従わない**  
**危険率5%で検定**

**結果：母集団は正規分布であることを棄却できない**  
**⇒母集団を正規分布とみなせる。**  
**空間標本の平均値，標準偏差などから母集団の平均値等を推定できる**

# 母集団（部材全体）の平均値の推定

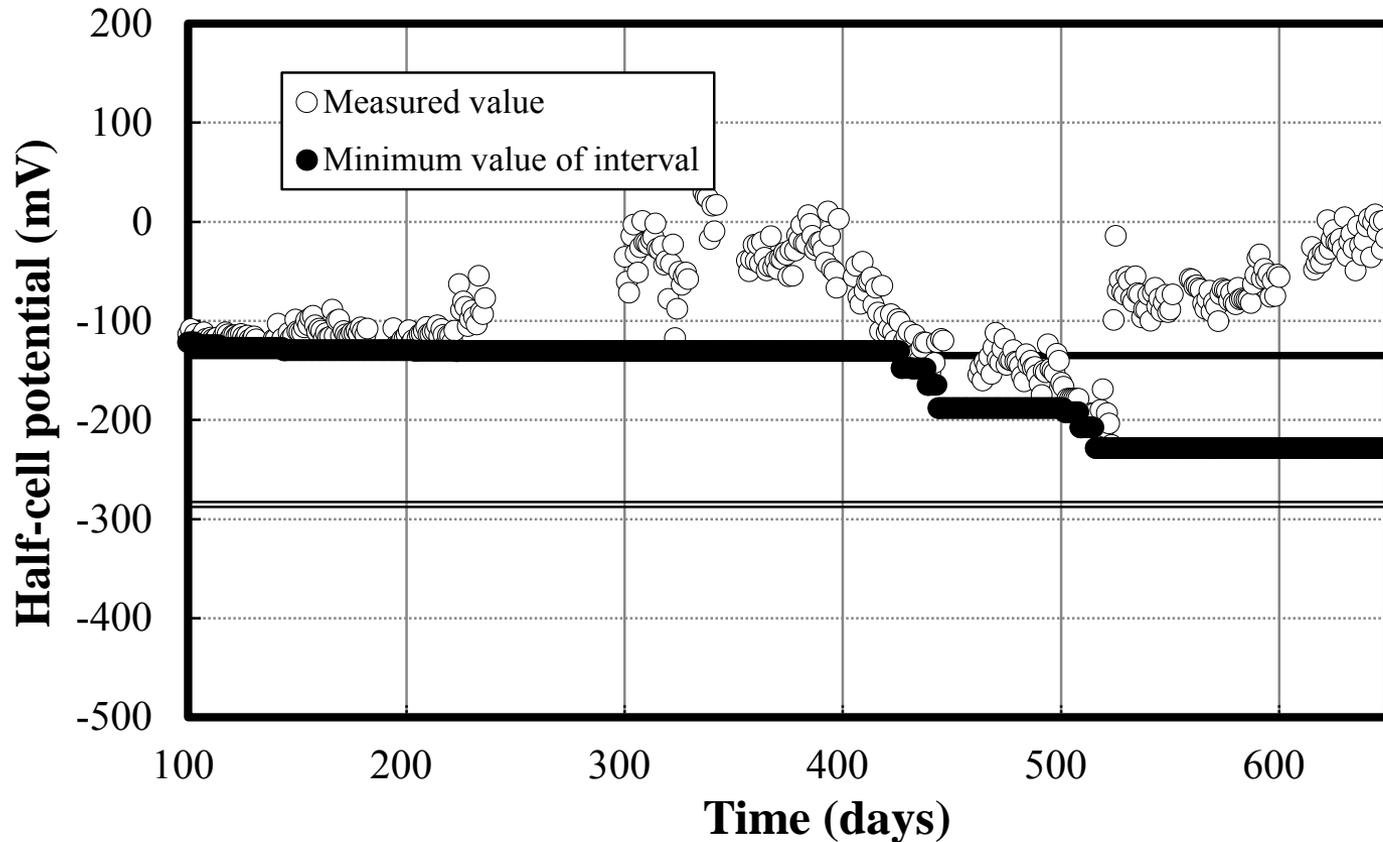
サンプル数 最大24個 ⇒ t分布による母集団の平均値を推定

推定された平均値は信頼区間（幅）を有する。  
平均値の95%信頼区間を取得。



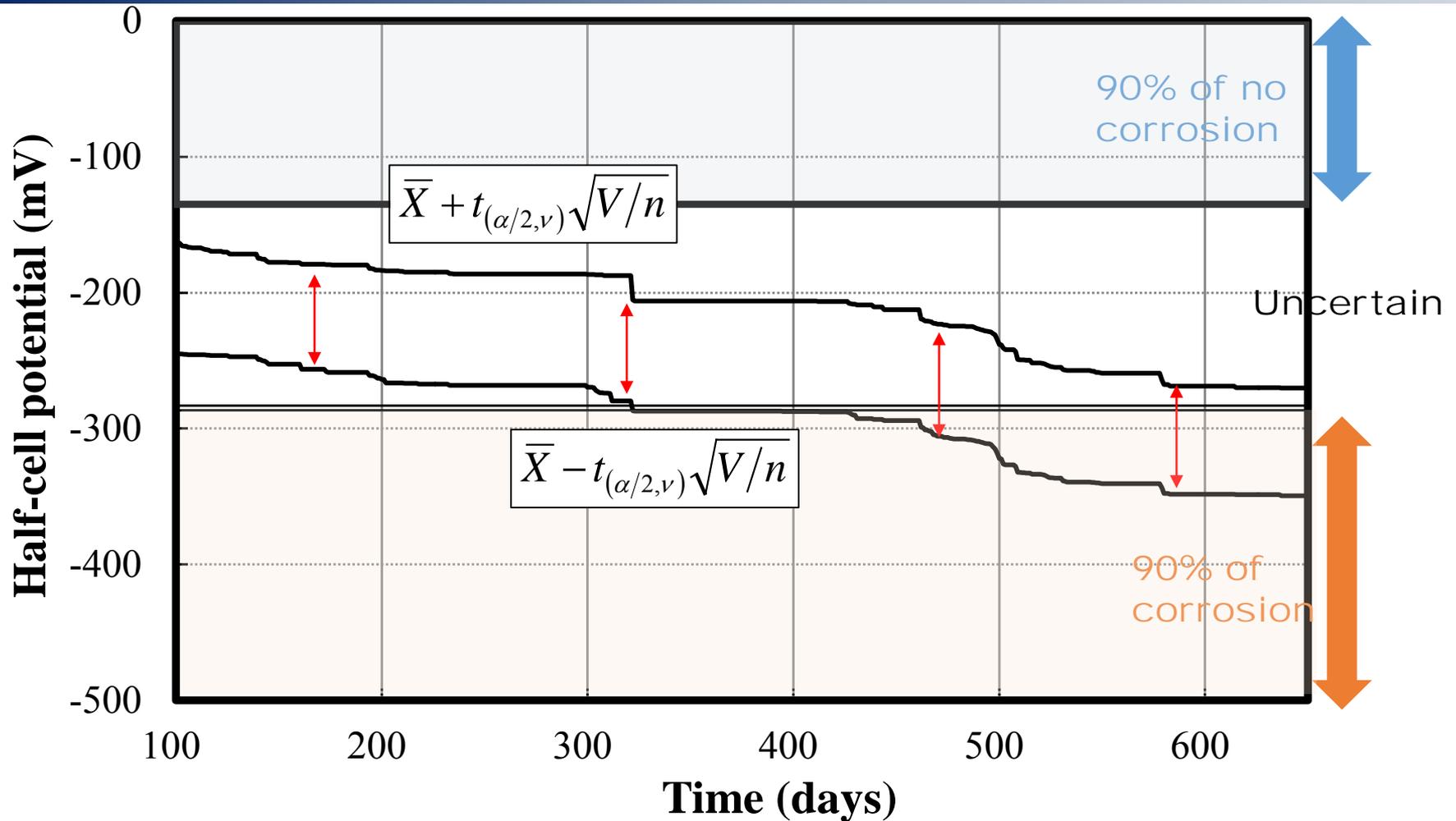
# 区間最小値の取得

腐食発生後、貴側への推移の影響を排除 ⇒ 区間最小値の取得



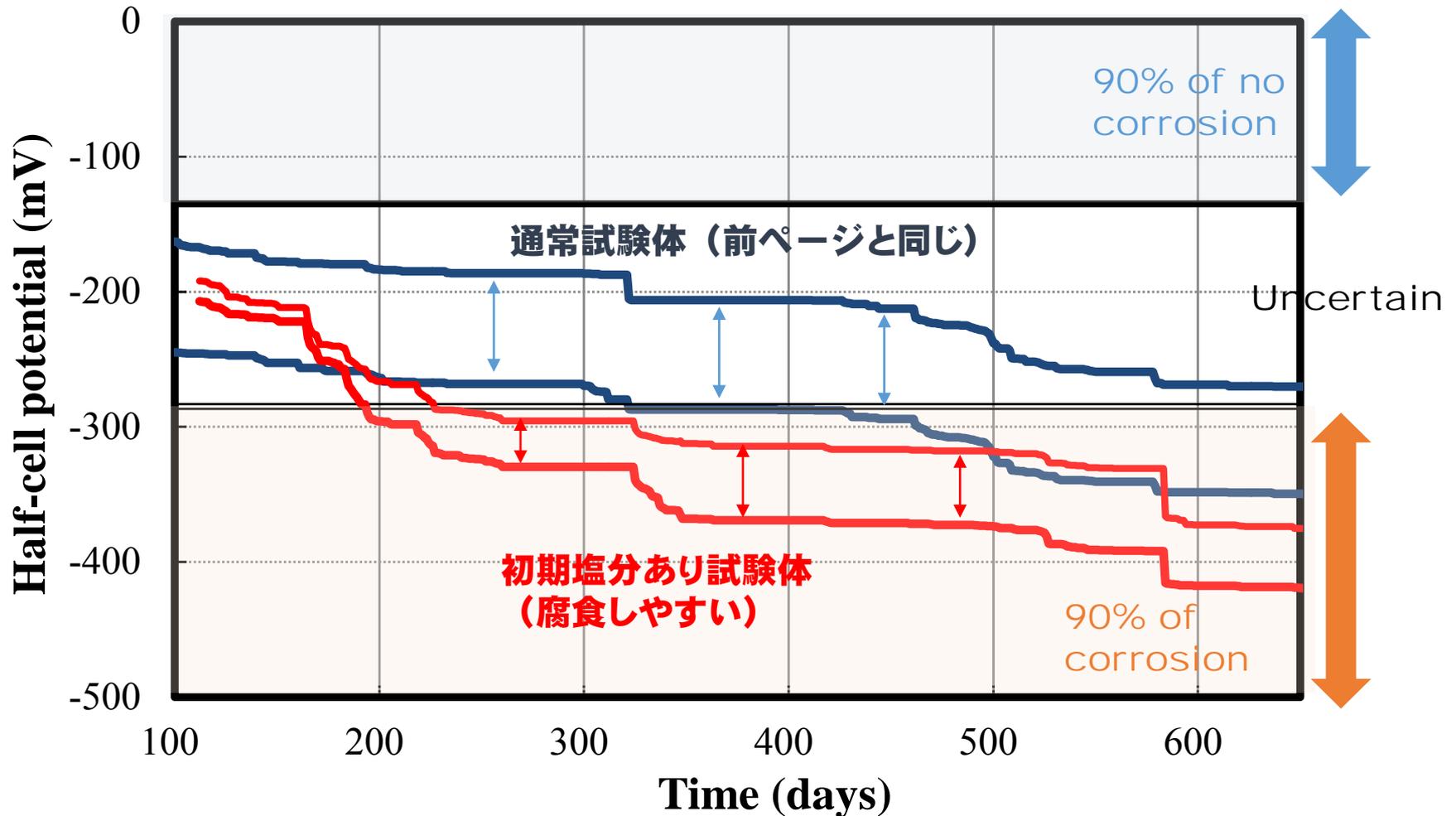
貴側への回復の影響を排除. 区間最小値による母集団は正規分布.

# 区間最小値による母集団の平均値の推移



信頼区間の下限が-285mVより卑となるのが約300日  
塩分分析による腐食発生時期は、190日  
⇒95%信頼区間の下限値による腐食判定は概ね妥当。

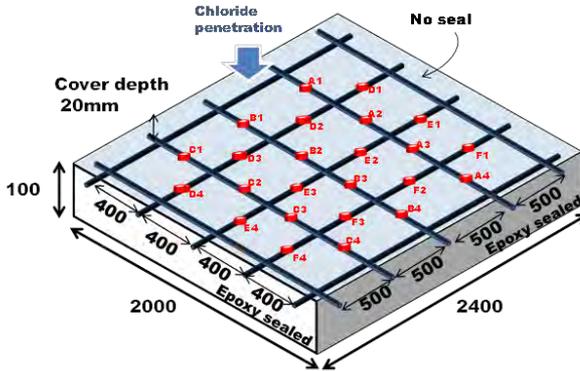
# 初期塩分なし・あり での平均値の推移



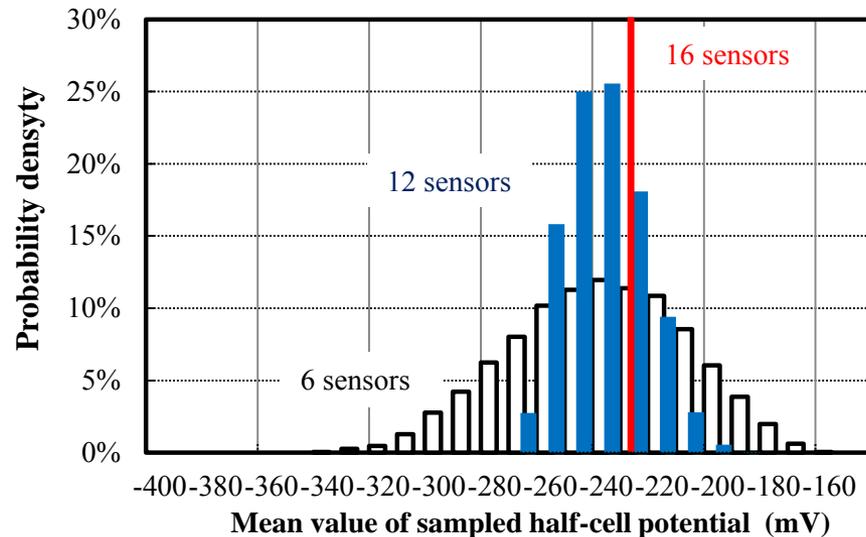
- ・ 初期塩分ありの場合、なし、と比較して卑側に推移
- ・ 下限値の-285mV到達も早い

# センサ最小個数に関する検討

設置した24センサのうち区間最小値を取得できたのは16センサ

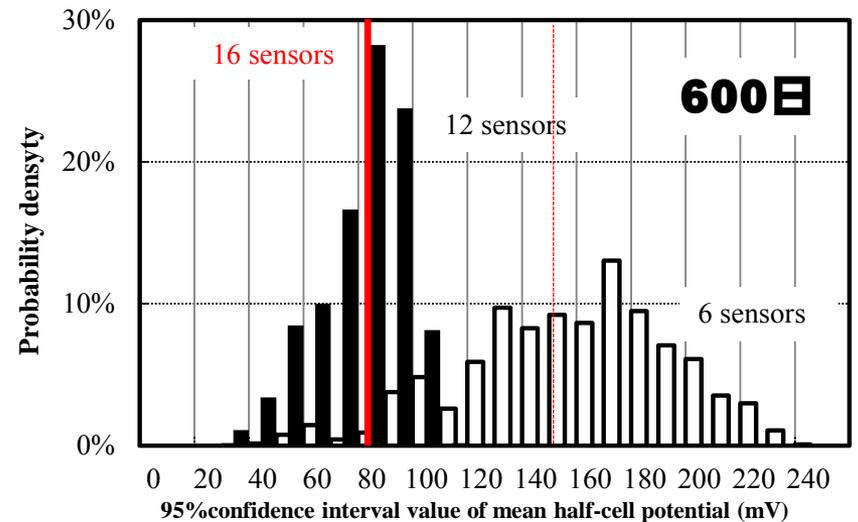
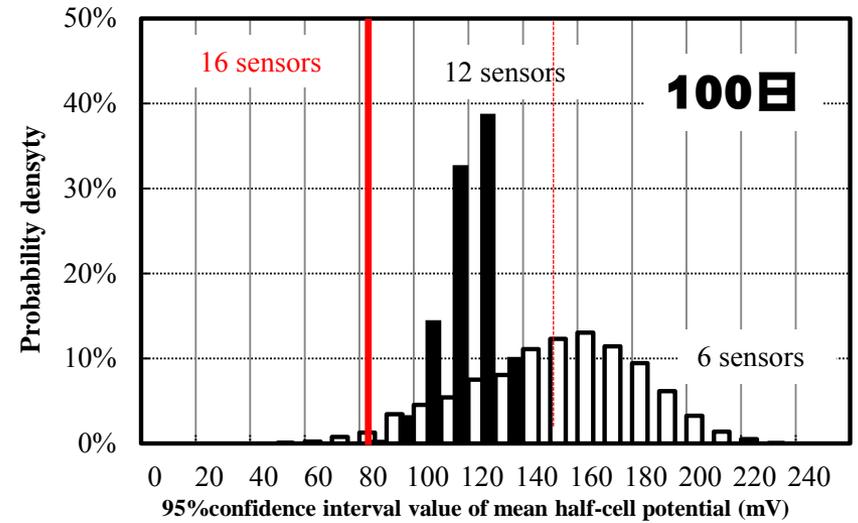
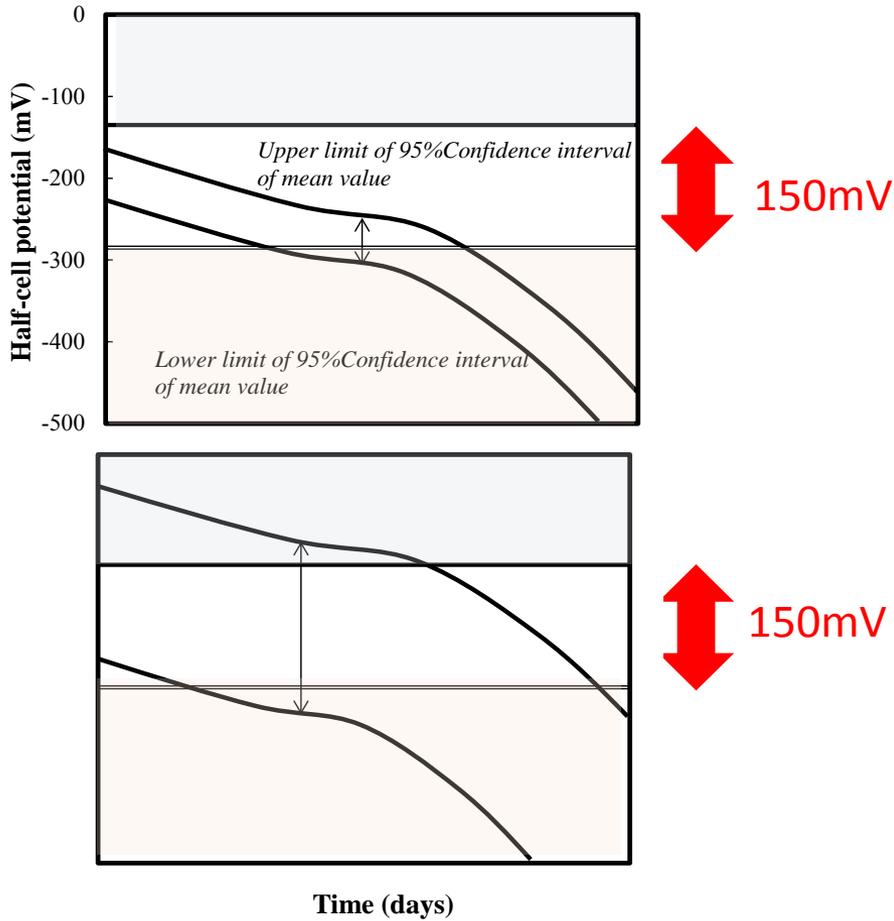


16センサから  
12センサ抽出した1920ケース  
6センサ抽出した8008ケース  
空間標本の平均，母集団の  
平均値の95%信頼区間を得た



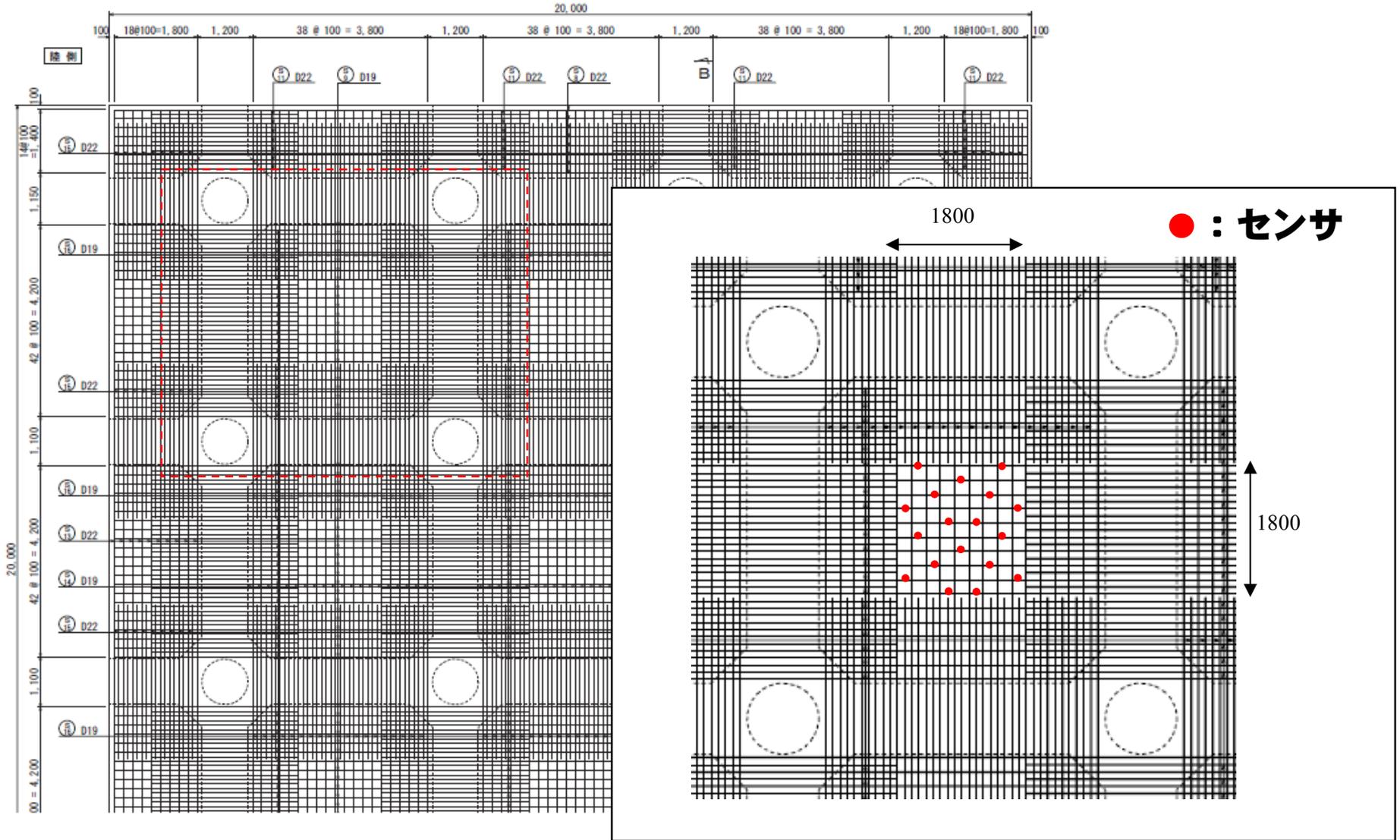
空間標本の自然電位の平均値

# 母集団の平均値の95%信頼区間の幅の分布



試験体中の鉄筋13.2mで  
12センサ⇒ 1個/m

# センサ設置案



# 本日の内容

- 非破壊検査による耐久性能評価の重要性
- 耐久性能に関するによる劣化診断  
(透気もしくはは吸水性能による評価)
- 埋設センサによる鉄筋腐食検知
- 四国における維持管理に関する取り組み

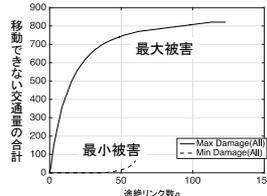
# 研究開発の目的と内容

SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 平成28年度追加公募に係る採択審査  
 研究開発小項目(5)-(C)-a「アセットマネジメントに関わる技術の地域への実装支援」  
 研究開発課題名「重大事故リスクに着目した地方自治体支援システムの開発」  
 研究責任者氏名(所属):全 邦釘(愛媛大学)

## 地方自治体のニーズ



大変形・落橋などの重大事故リスク



孤立・大迂回発生リスクを知りたい

ニーズ解決

## 地方自治体のニーズを解決する本研究開発

自治体での社会実装



- ・県内自治体との連携
- ・点検システムの整備と運用開始

社会実装サポート

技術者教育手法の開発



- ・愛媛ME講座と連携
- ・資格制度整備
- ・全国的連携

運用開始

技術指導・習得

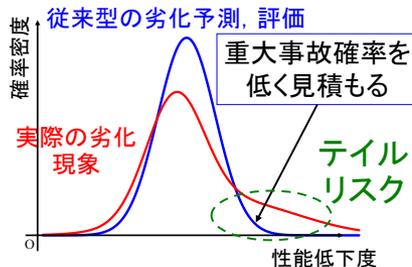
SIP開発技術

学術的支援

学術的支援

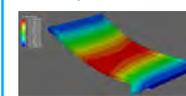
連携

## テイルリスク【稀にしか生じないが影響が深刻なリスク】



重大事故やネットワーク不通は正規分布で表現されない

リスク評価



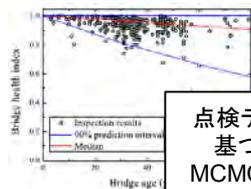
$$f = \frac{\kappa x^{\kappa\alpha-1}}{\beta^{\kappa\alpha} \Gamma(\alpha)} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\kappa}\right\} u(x)$$

- ・データ駆動型アプローチとモデル駆動型アプローチの融合
- ・テイルリスク評価手法

学術的基盤構築

# テイルリスク評価 —学術的な基盤構築—

## ■ 経年変化を考慮したデータベースの構築・詳細調査・統計処理

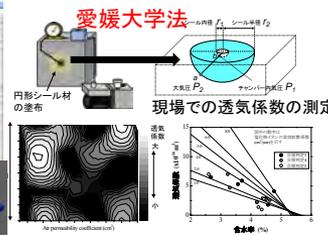
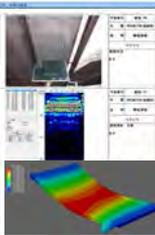
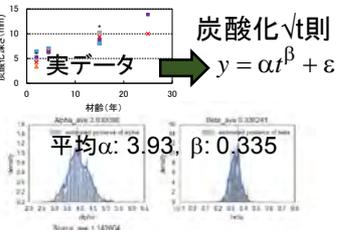


⇔  
SIP開発技術とのリンク



点検の効率化

## ■ 複合要因を考慮した統計処理・非破壊検査・FEM解析による劣化橋梁の詳細分析



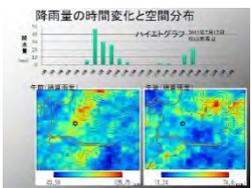
⇔  
SIP開発技術とのリンク



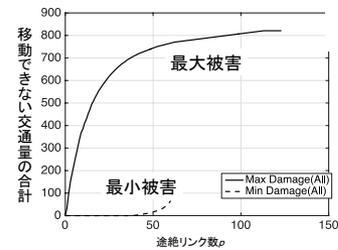
ベイズ統計による劣化分析

精緻な非破壊検査

## ■ 交通ネットワークの被災に伴うリスク評価



交通ネットワーク断絶リスク  
➔



交通ネットワークにおける接続脆弱性評価

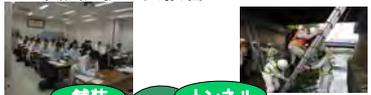


災害シナリオ (地震, 津波, 集中豪雨等)

# システム普及のための技術者教育と社会実装

## 愛媛大学 社会人リカレント教育プログラム メンテナンスエキスパート (ME) 養成講座

- ・履修証明プログラム (120時間)
- ・官民の実務者、受講生200名(6年間)
- ・筆記試験と面接審査



## 大学による ME資格付与



- ・民間資格として国交省の技術者資格登録に申請
- ・職業実践力育成プログラム (BP) 認定 (申請準備中)



愛媛ME  
1期生 26名  
2期生 22名

## ME認定者による インフラ再生・安全安心な国土形成



行政 (国, 県, 市町村)  
業務受注



点検・診断・補修  
長寿命化計画策定

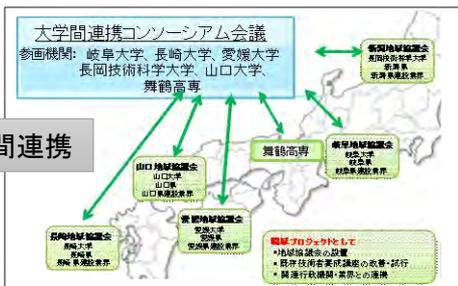
## MEを活用したSIP開発技術の技術者教育と社会実装

SIP技術研修の必修化 (ME講座、資格更新)  
SIP-ME (仮称) 認定によるインセンティブ付与  
SIP-MEによるシステム普及

## 産官学の密な連携



## 地域間連携



## 地域内 (四国) 連携 4県4大学



## SIP開発技術とのリンク



SIP-ME  
目標: 主要な県内コンサル毎にそれぞれ1名は育てる



## 愛媛県道路メンテナンス会議での講習



自治体職員向けにSIP開発技術を指導