

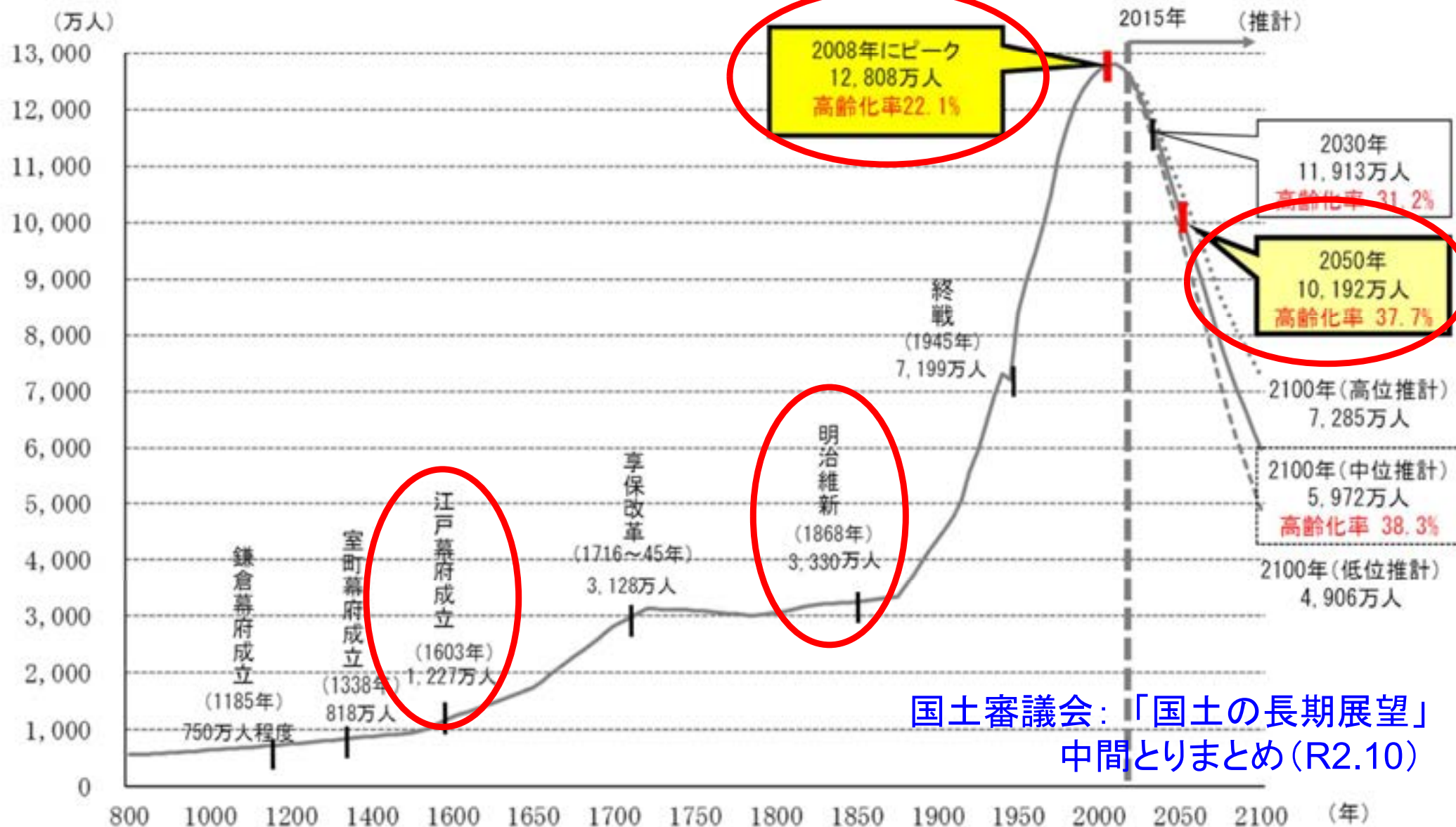
2050年に向けたコンクリート構造物の 維持管理技術のイノベーション

～ 非破壊検査技術を中心として ～

大阪大学大学院 工学研究科 鎌田 敏郎

日本の総人口は2050年には約1億人へ減少

○ 日本の総人口は、2008年をピークに減少傾向にあり、2050年には約1億人にまで減少する見込み。



私は、1962年生まれで「**現在61歳**」です。このまま運良く生き永らえていれば、**2050年には「88歳（米寿）」**ですので、まだ、「**これからの日本の将来のために、皆さんが頑張ってください！**」と無責任に言える立場でもありません。

そこで本日は、コンクリート構造物の維持管理技術に地道なイノベーションを起こすことで、我が国における人口減少の課題に少しでも貢献すべく、非破壊検査技術を中心として、

- ①**内部可視化**による構造物の診断技術の向上
- ②**デジタルツイン**による構造物診断手法の高度化
- ③**検査ロボット**を適用した構造物点検の効率化
- ④**環境モニタリング**を駆使した構造物劣化予測の高度化

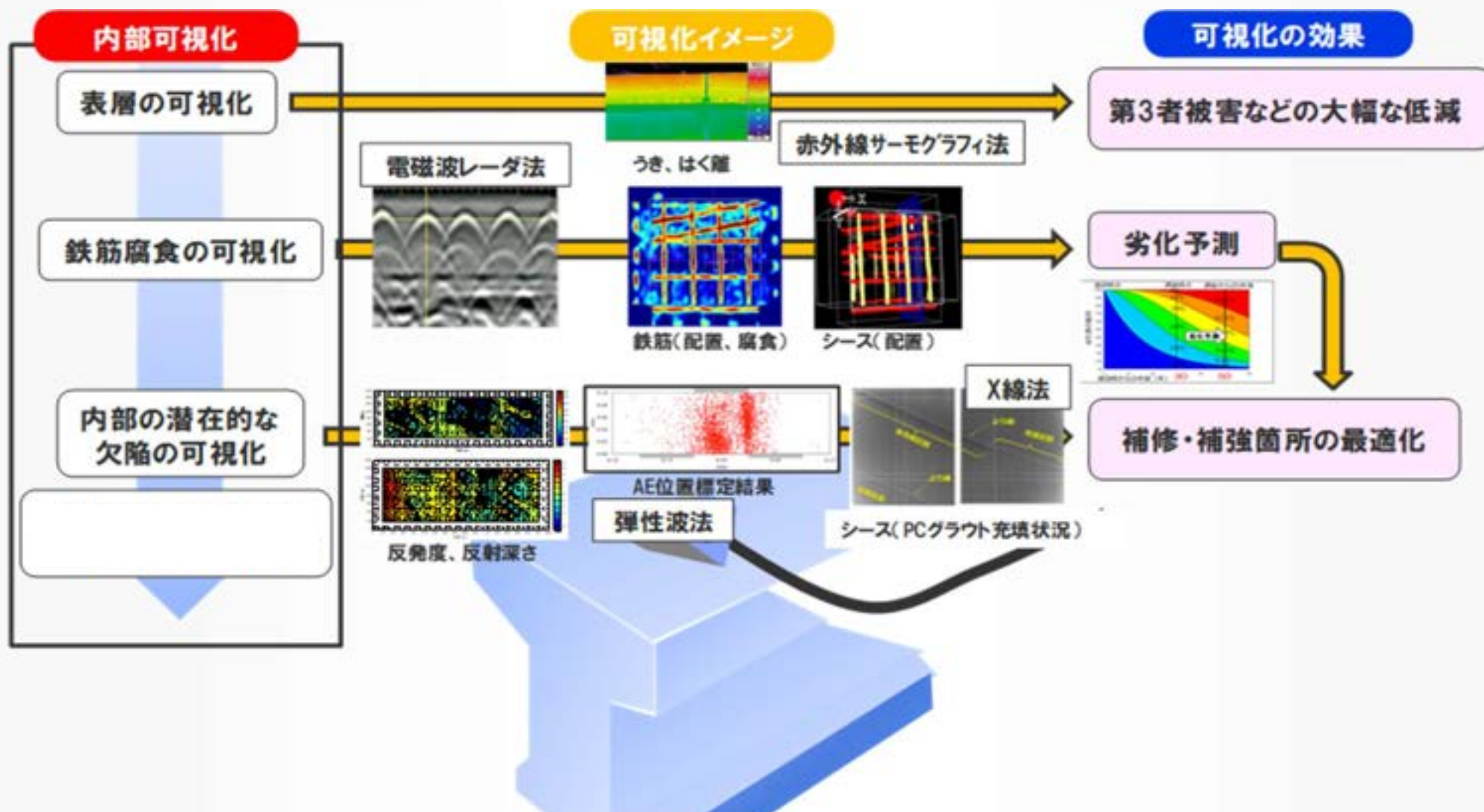
①**内部可視化**による構造物の診断技術の向上

②デジタルツインによる構造物診断手法の高度化

③検査ロボットを適用した構造物点検の効率化

④環境モニタリングを駆使した構造物劣化予測の高度化

内部可視化による構造物の診断技術の向上



日本コンクリート工学会(JCI)イノベーション戦略委員会報告書(2020.10):
「未来を守る・変える・創るコンクリートイノベーション」より

内部可視化の波及効果

- ・未解明の劣化のメカニズムや破壊のプロセスを明らかにできる可能性が高まる。
- ・これまで表面からの目視では確認の難しかった内部の潜在的な欠陥を発見できることから、第3者被害などの大幅な低減に役立ち、より安全・安心な社会の実現につながる。
- ・少子高齢化・人口減少の加速する我が国において、可視化技術の実現は、AIなどの援用により、専門技術者からの技術伝承や生産性向上・省力化に役立つ。
- ・可視化技術の向上により、構造物の置かれている状況を財務担当者や一般市民に説明することが容易となり、メンテナンスにお金を投じる必要性・重要性について理解が得られることになり、予算の確保などに役立つ。



内部可視化へ向けたイノベーションの進展の方向性 (そのために必要な3つの要素)



たとえば、PCグラウト充填不足による変状に対して



横締めPC鋼棒の破断



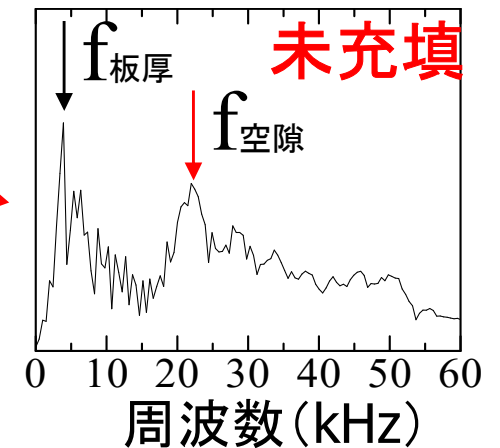
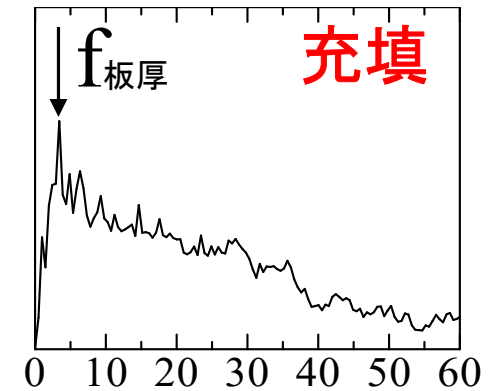
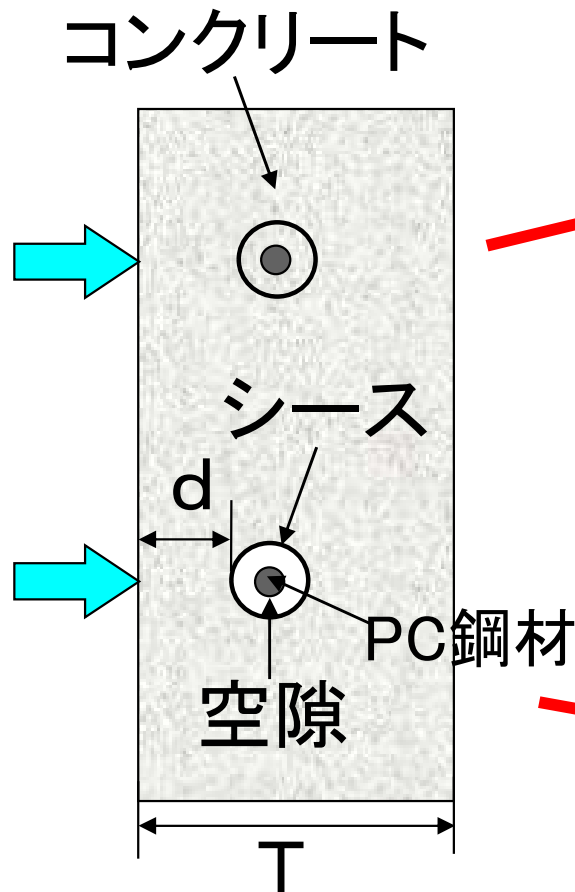
鉛直締めPC鋼棒の破断

グラウト未充填箇所を非破壊で的確に検出したい



シースに沿ったひび割れ, エフロレッセンス

PCグラウト充填状況の非破壊評価方法として、**評価原理が明解な手法の一つにインパクトエコー法**がある。これは、**コンクリートを直接叩いて弾性波で診る**方法であり、適用実績も豊富である。

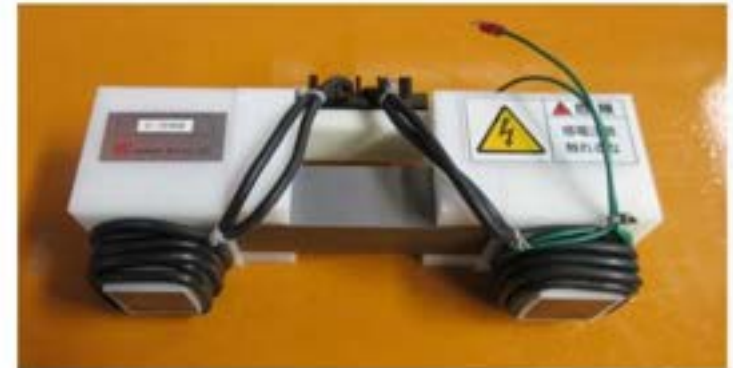
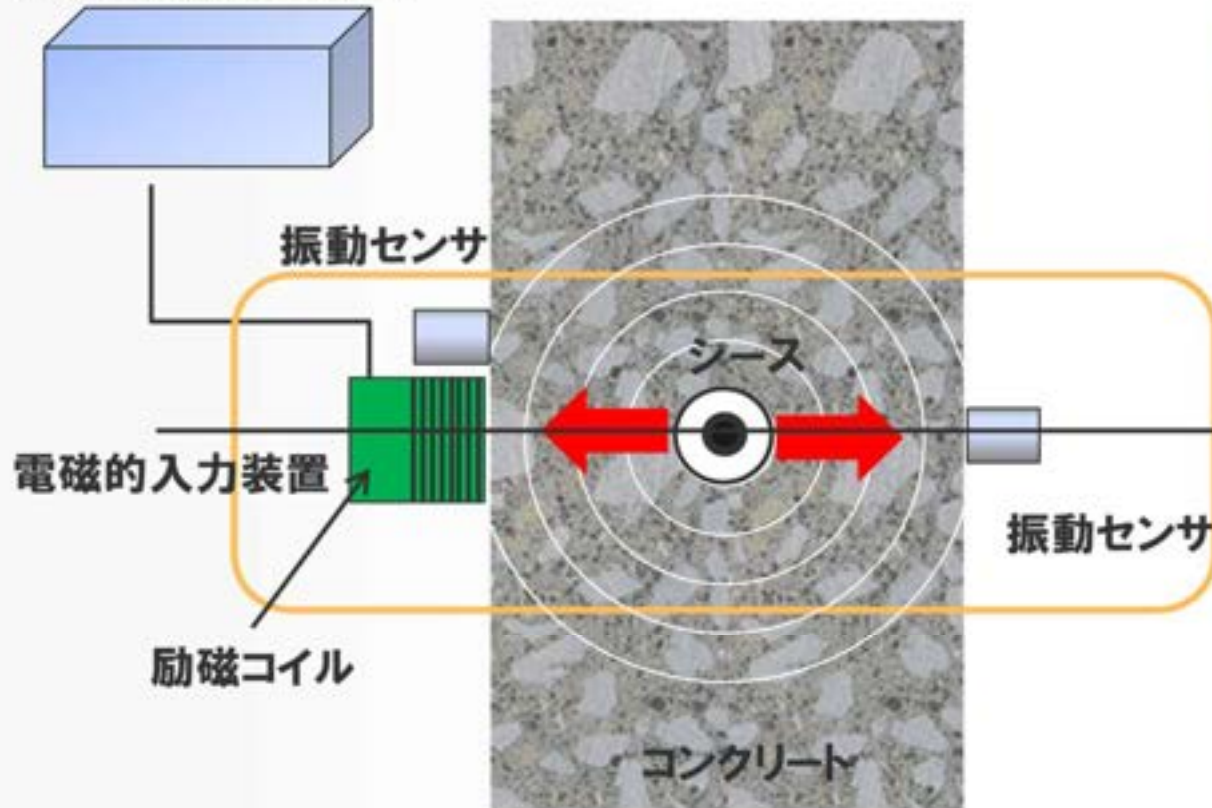


➡ ただし、シース径が小さくかぶりが多い場合、あるいは、コンクリートにひび割れがある場合など、評価が難しくなる場合もある。

課題解決のためのイノベーションの例

電磁パルスにより**非接触**でシースを加振

パルス電流発生装置



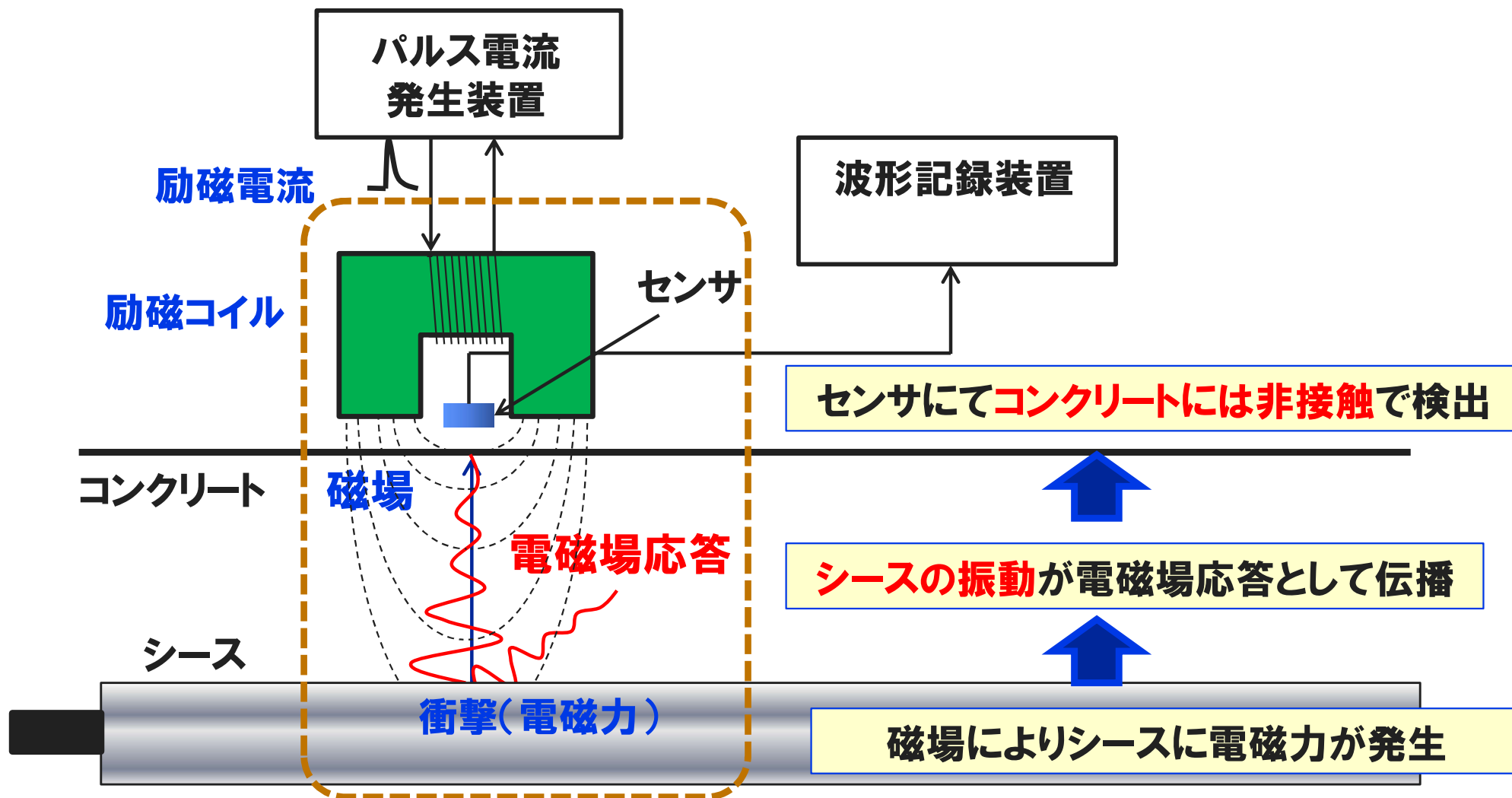
(a) 電磁的入力 装置



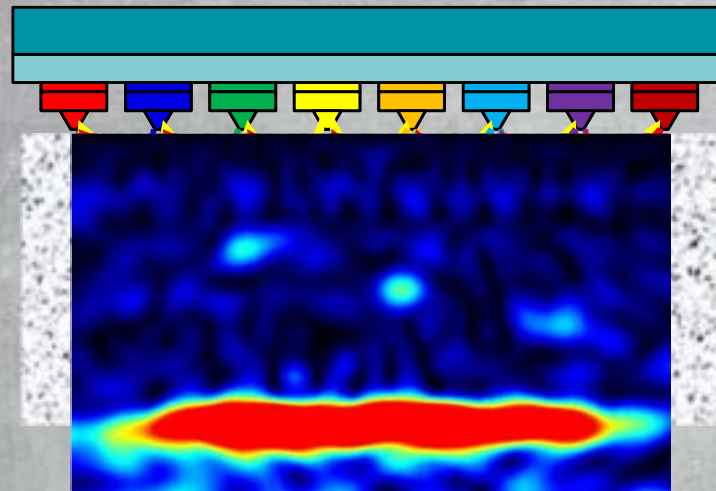
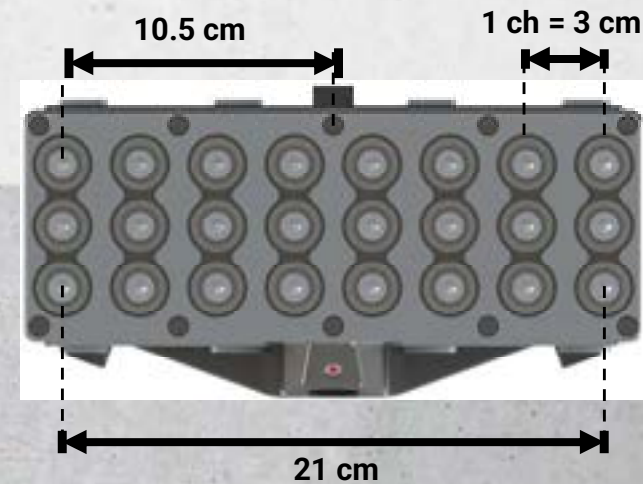
(b) パルス電流発生装置



さらに、電磁場応答センサで 非接触での信号受信を可能に！



超音波エコーによるイメージングの事例

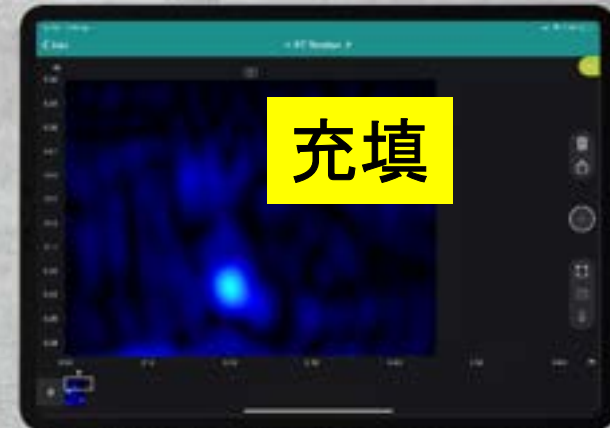
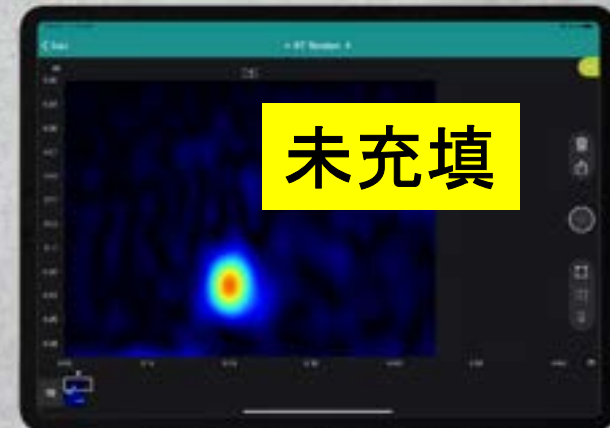
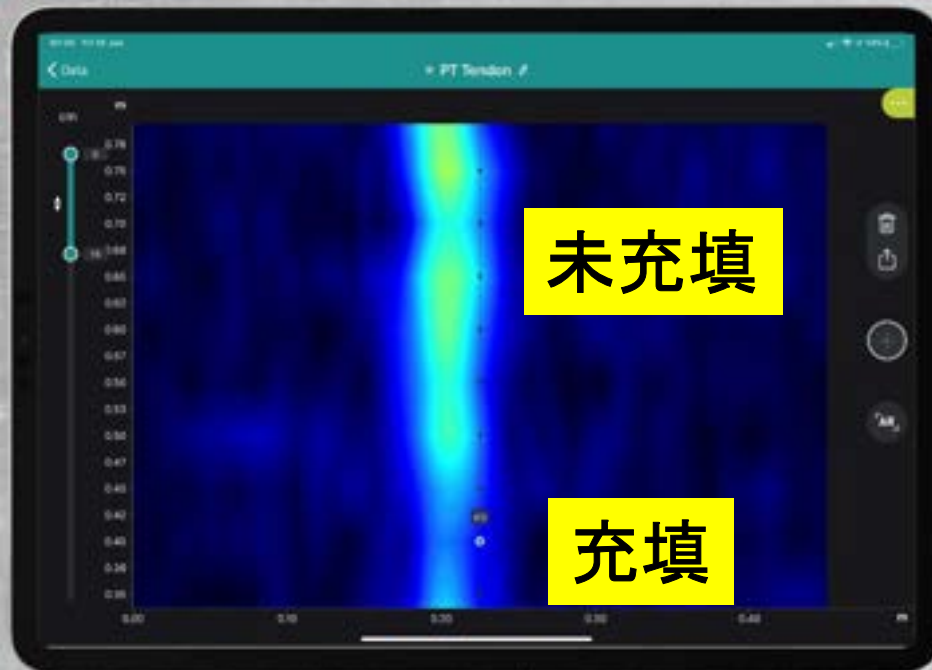


- ・ $3 \times 8 = 24$ の超音波センサを用いて、反射エコーの状況を可視化
- ・ドライカップリング（接触媒質不要）により検査の迅速化が可能

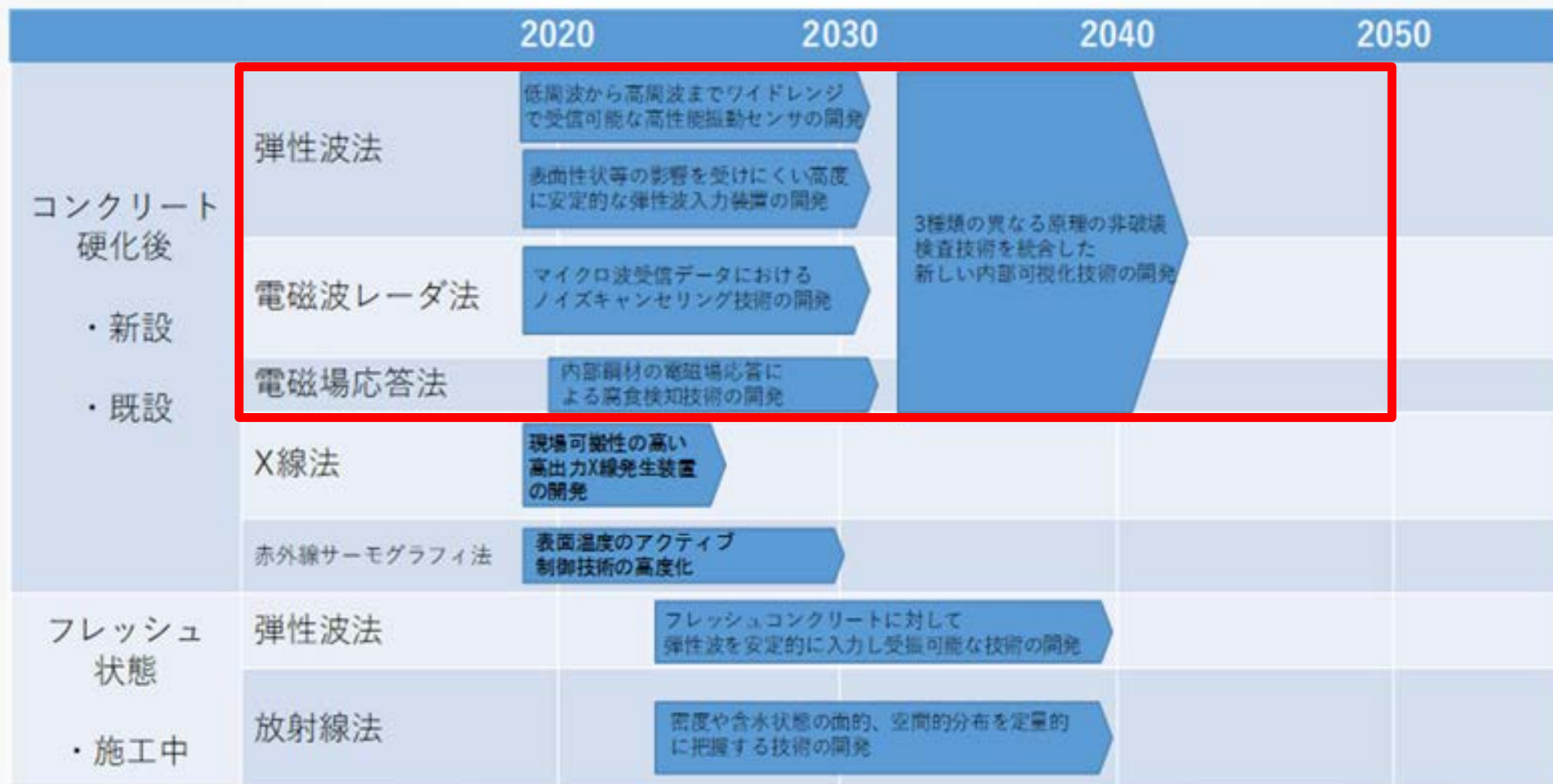
未充填箇所が可視化可能



Ultrasound Pulse Echo (Pundit)

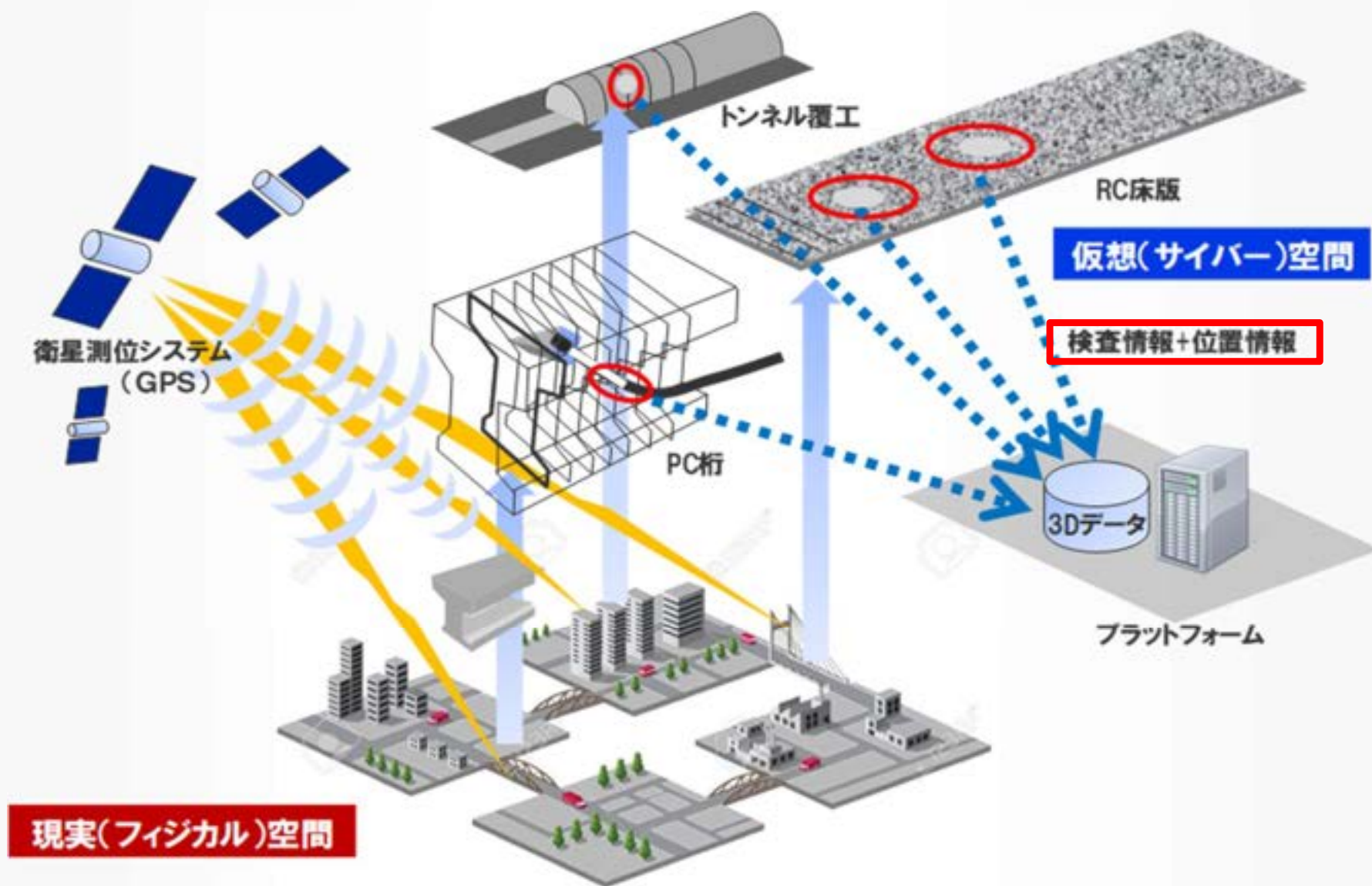


「内部可視化による構造物調査」に関する技術のロードマップ



- ①内部可視化による構造物の診断技術の向上
- ②デジタルツインによる構造物診断手法の高度化
- ③検査ロボットを適用した構造物点検の効率化
- ④環境モニタリングを駆使した構造物劣化予測の高度化

デジタルツインによる構造物群の維持管理の高度化 (構造物群全体でのバランスの取れた維持管理計画の立案)



たとえば、サイバー空間で構造物間で補修の優先度を比較

NEXCO, 阪神高速等
大規模更新・大規模修繕事業
(NEXCO3社: **床版取替のみで1.65兆円**)

これは、叩いても、耳で聞く
「音」ではわかりません！

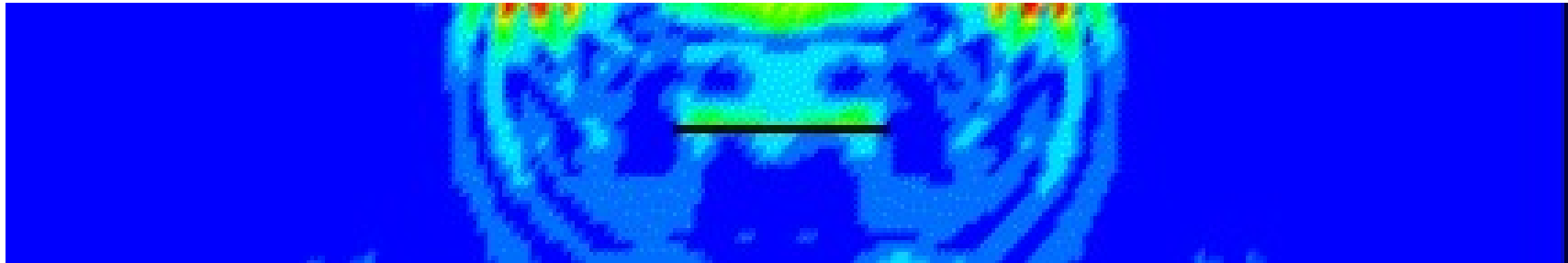
舗装
増厚

既設
床版



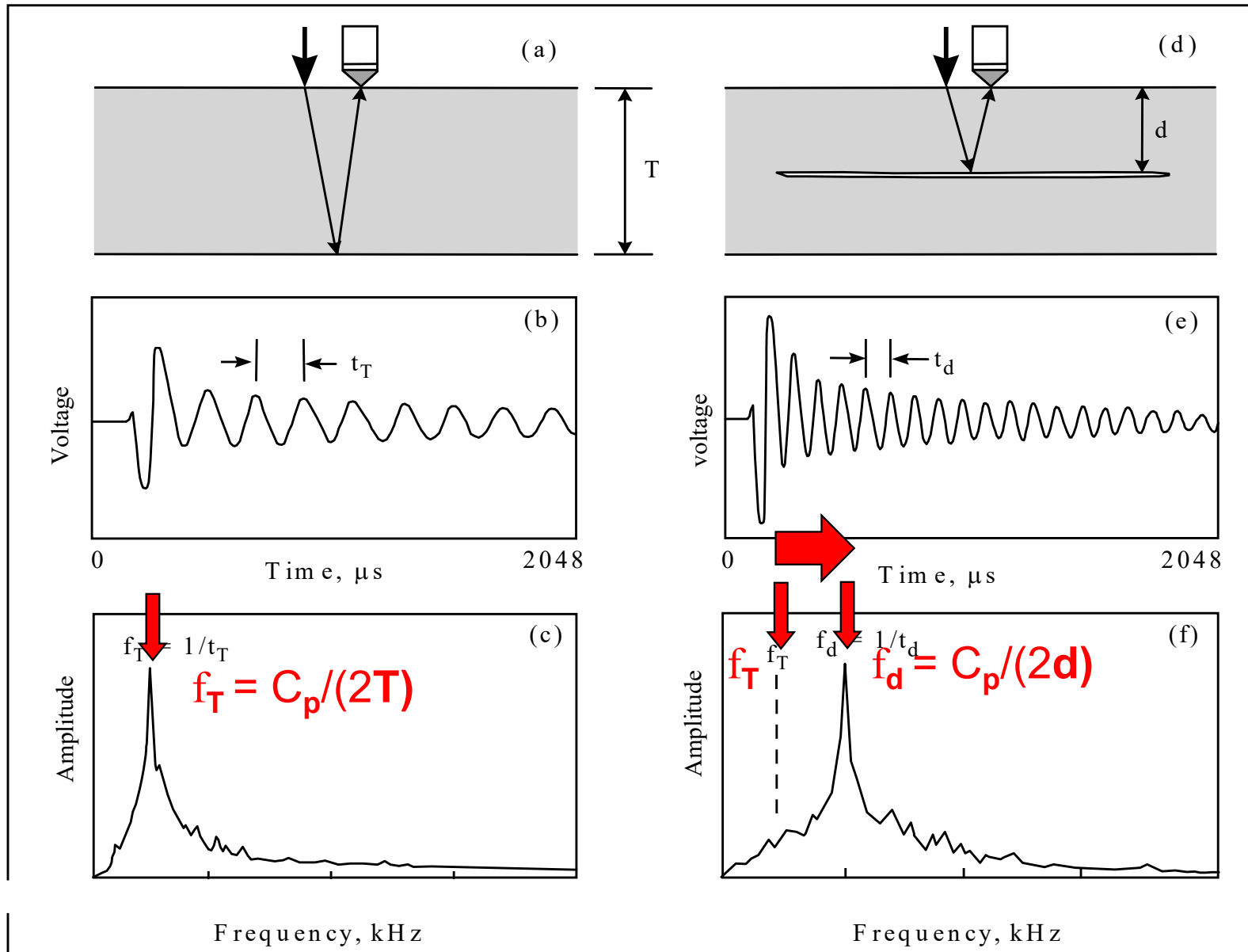
RC床版上面を叩いた時の 弾性波の伝播の様子

水平ひび割れがある場合

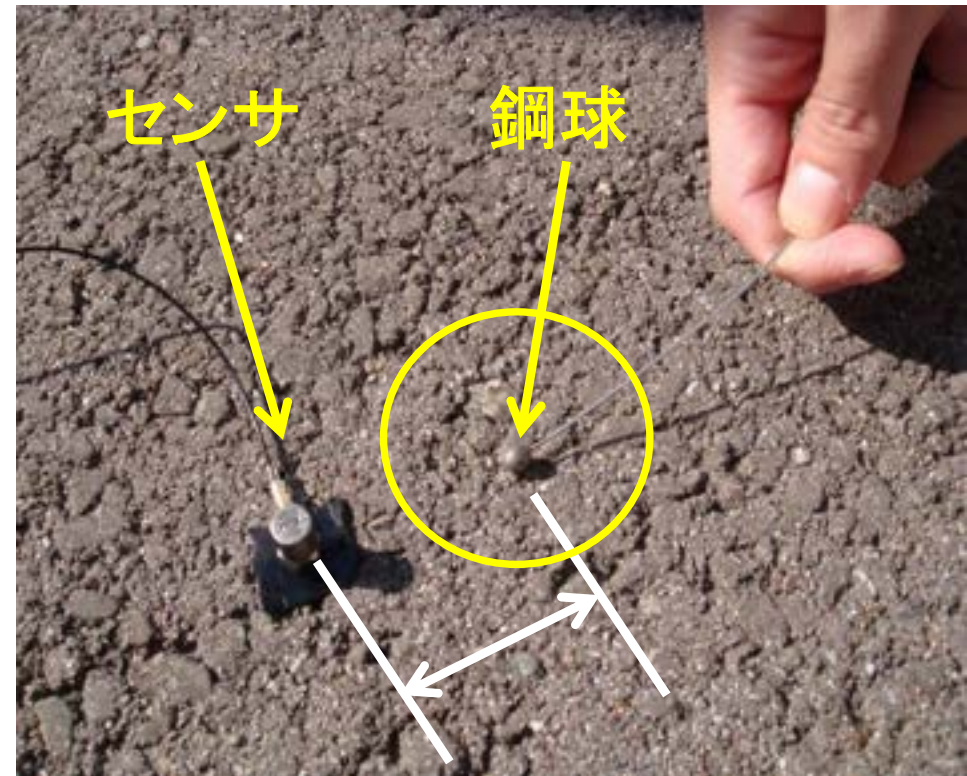


インパクトエコー法

(版厚: T , 欠陥深さ: d , コンクリートの弾性波伝播速度: C_p)



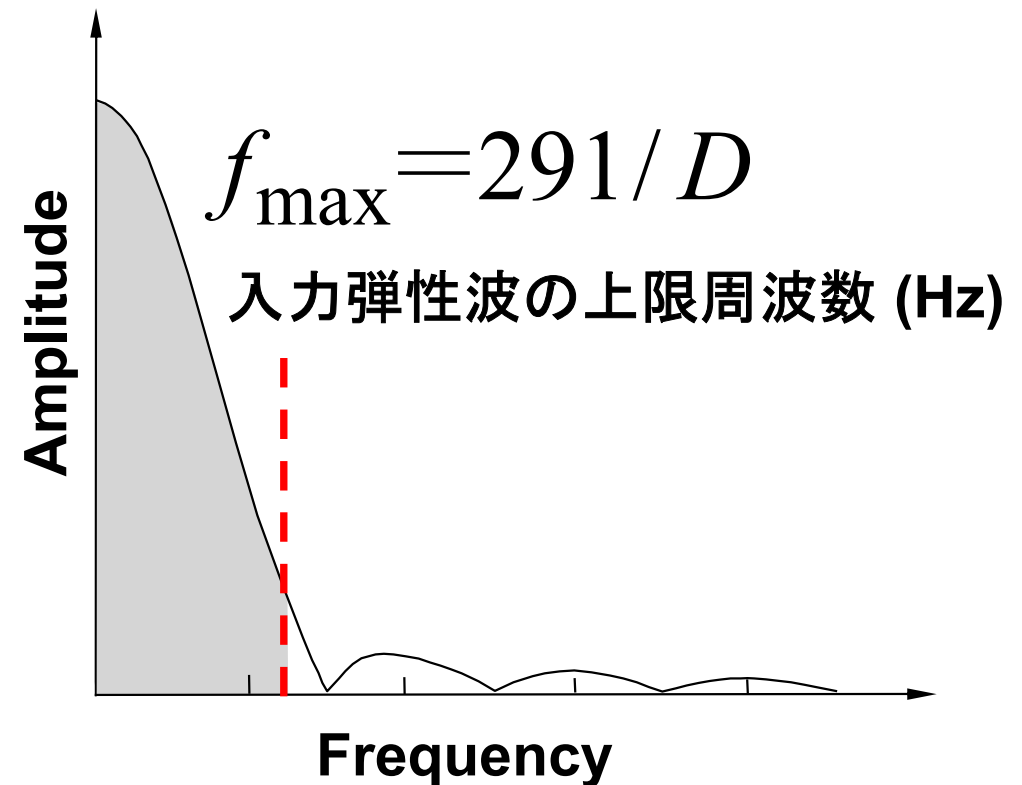
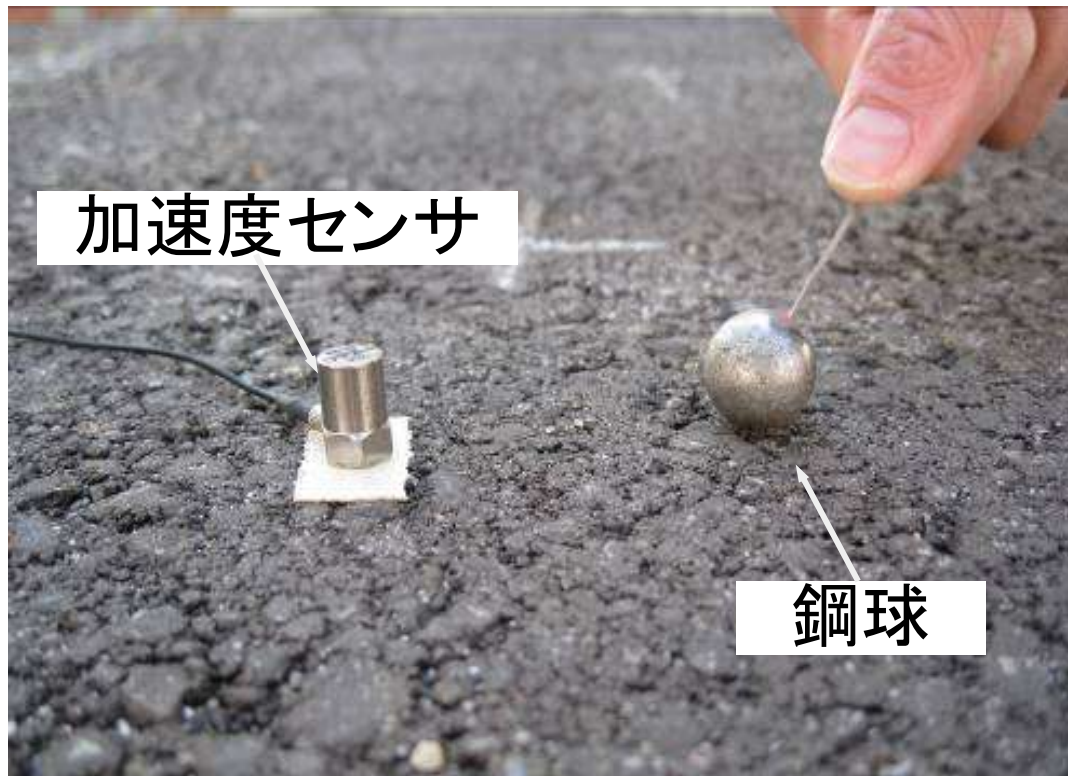
しかし、ただ“叩けば良い”という訳ではない！



鋼球直径により弾性波の周波数範囲が変化

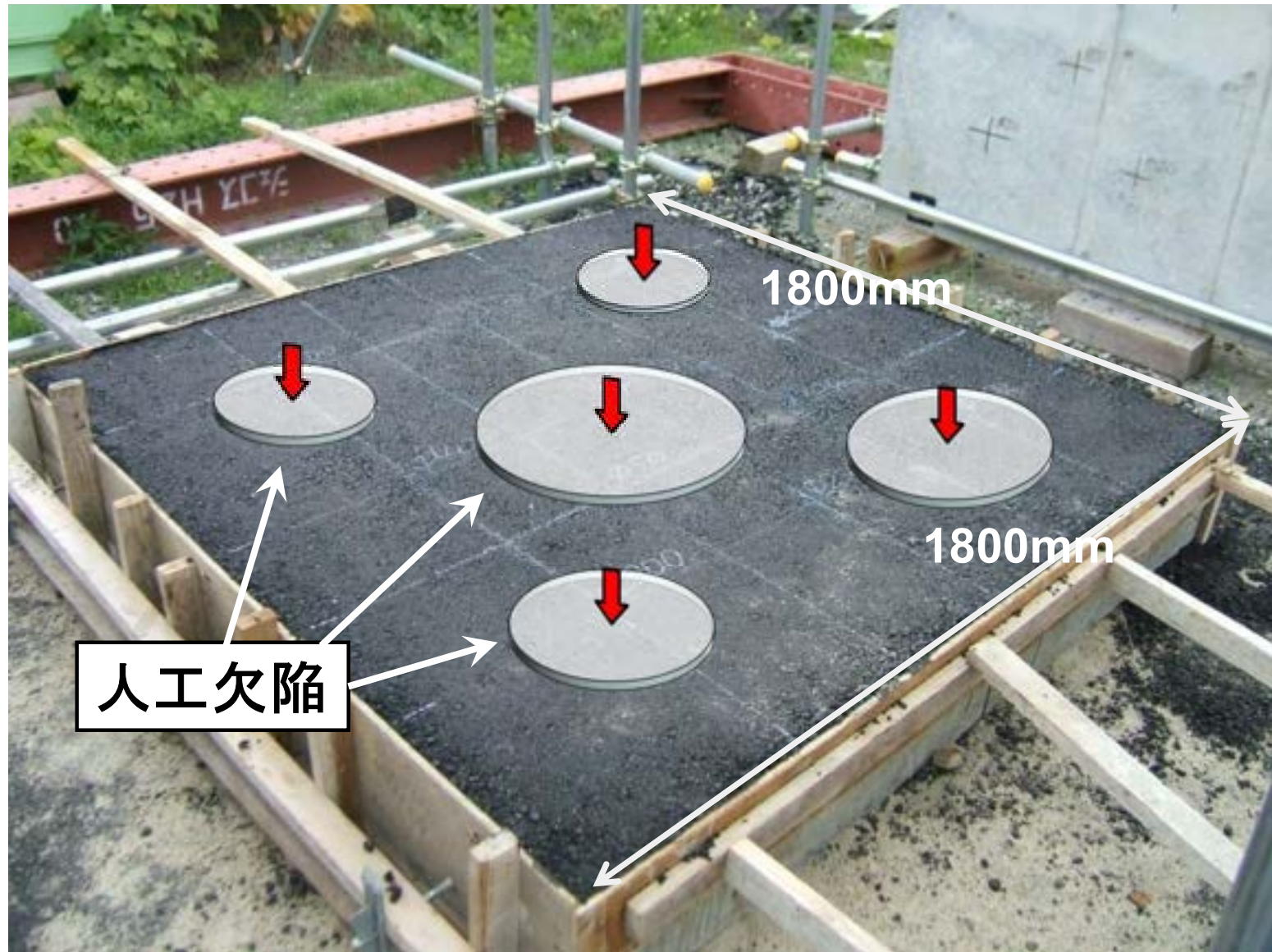
したがって、見たいピーク周波数の大きさに合わせて

鋼球直径をコントロールする必要あり



鋼球直径 D (mm)	4.0	6.4	11.0
上限周波数 (kHz)	72.7	45.4	26.4

供試体を叩いて波形を取ってみよう！

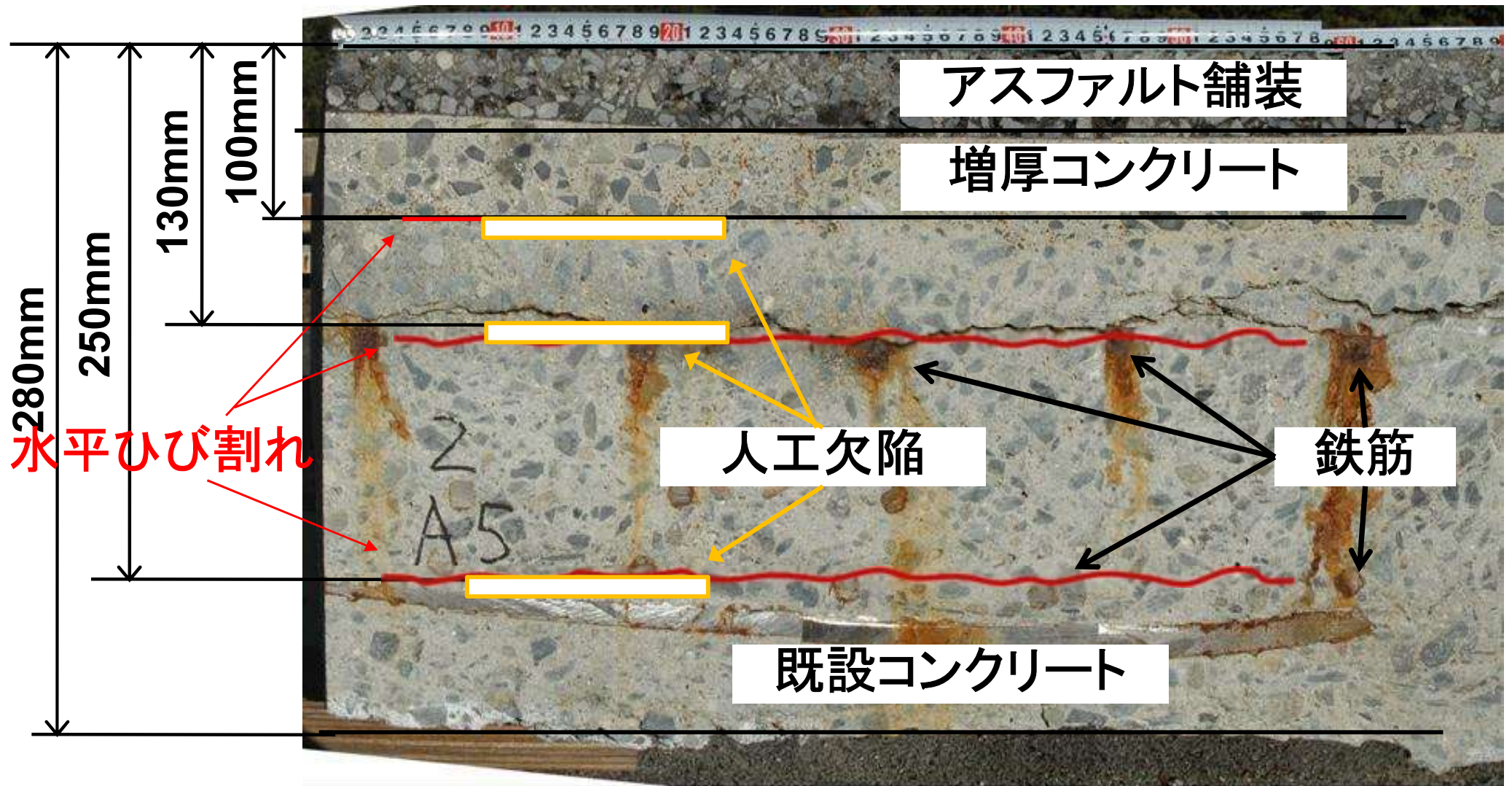


人工欠陥の配置状況

(フィジカル空間で、いろいろと試すのは大変！)



深さ方向の人工欠陥の配置

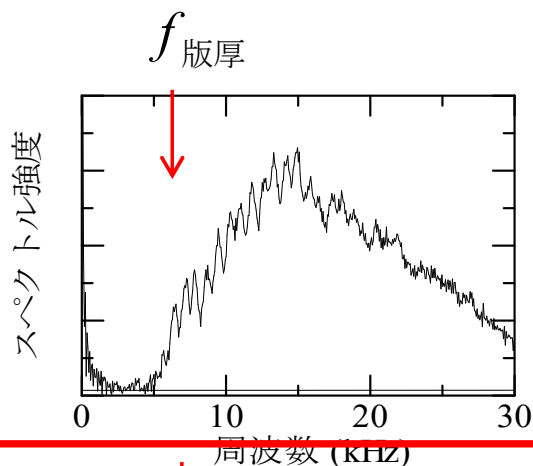


欠陥検出に適した鋼球直径の選定

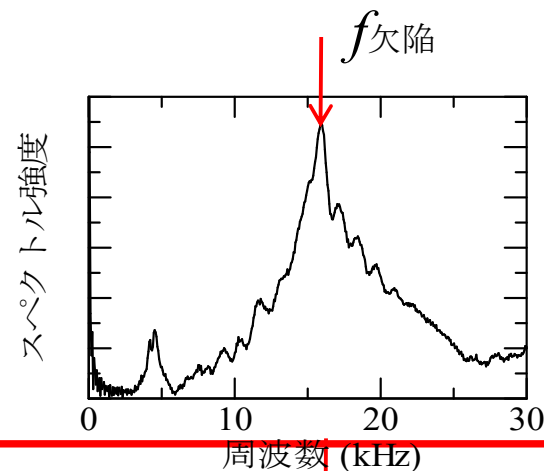
欠陥なし(版厚280mm)

欠陥あり(深さ100mm)

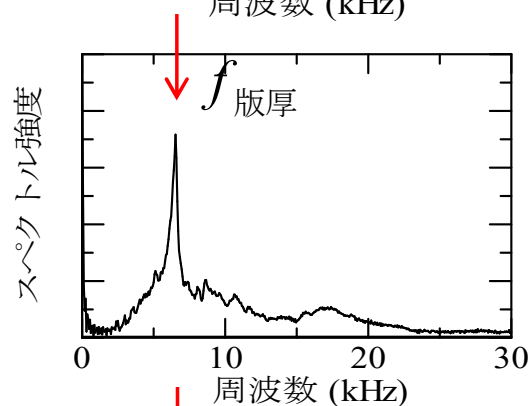
鋼球直径
4.0mm



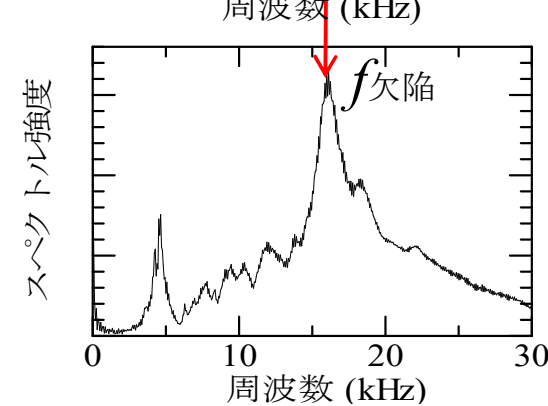
鋼球直径
4.0mm



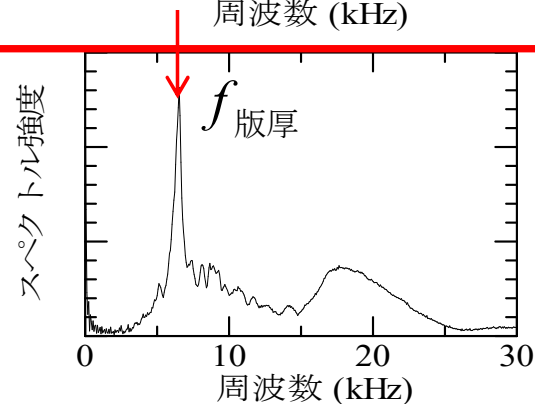
鋼球直径
6.4mm



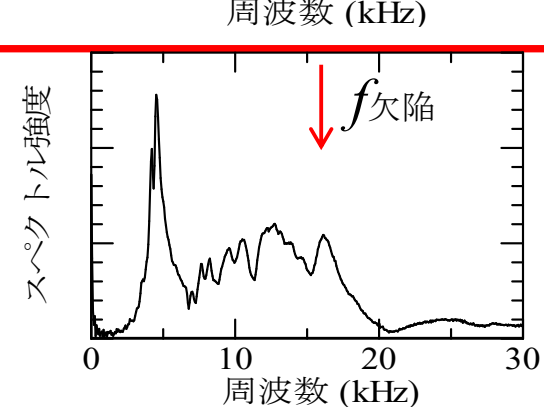
鋼球直径
6.4mm



鋼球直径
11.0mm



鋼球直径
11.0mm



しかし、実際の道路橋RC床版では・・・

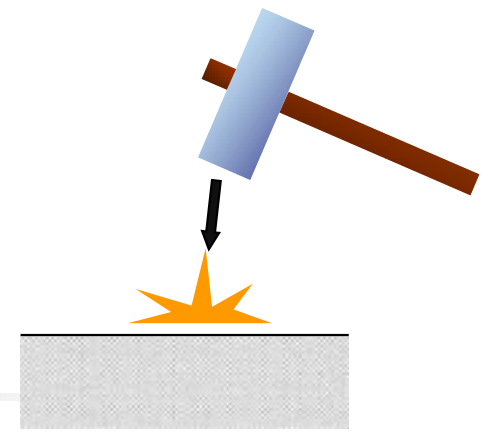
供試体での実験結果のように、必ずしも理想的なピークを得るのが容易ではない場合もある！

計測ごとに試行錯誤を繰り返して、

①入力のための鋼球直径，②弾性波の受信方法／位置，

などを決定するのは非効率的／信頼性にも問題

叩いて入力した 弾性波の特徴



コンクリート中での散乱（骨材界面、微小空隙、鉄筋界面など）等による減衰の影響を受けにくく、伝播距離を長くすることができる。

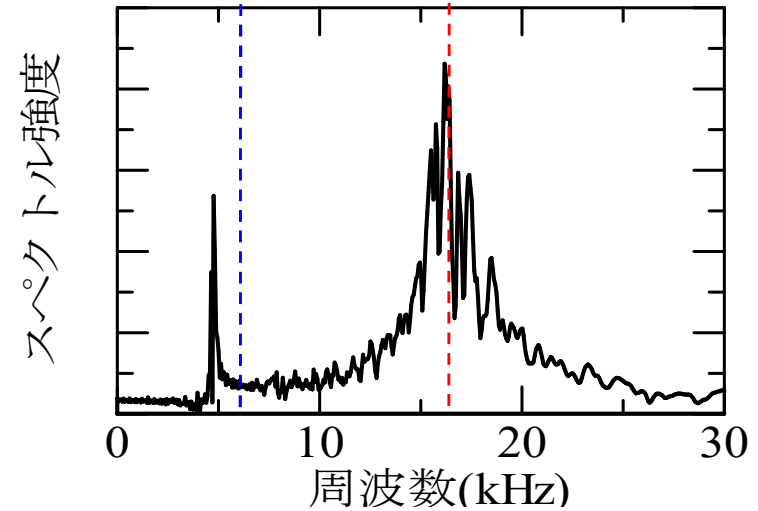
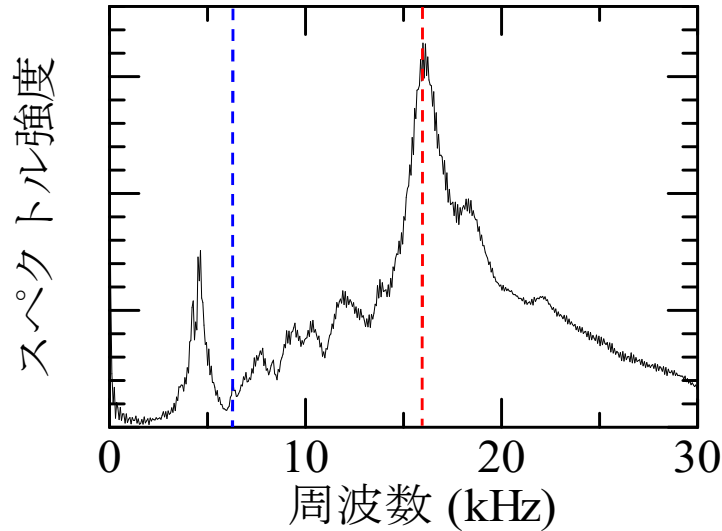
→ 超音波の場合は難しい
コンクリート中での波の
伝播シミュレーションが活用可能
（デジタルツインの活用が可能）

左右両者はデジタルツイン

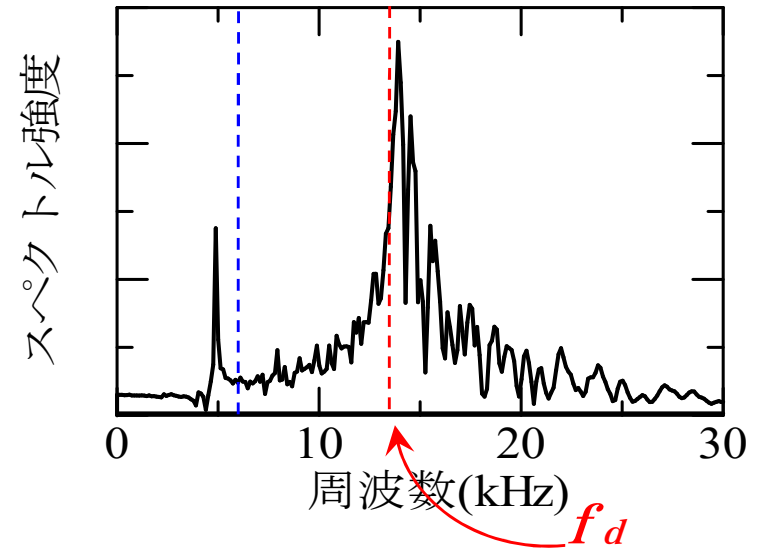
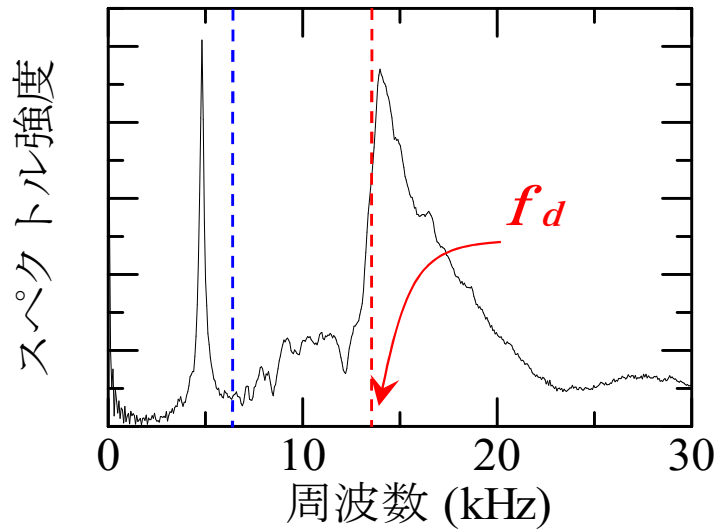
【実際の計測】

【モデルでの計算結果】

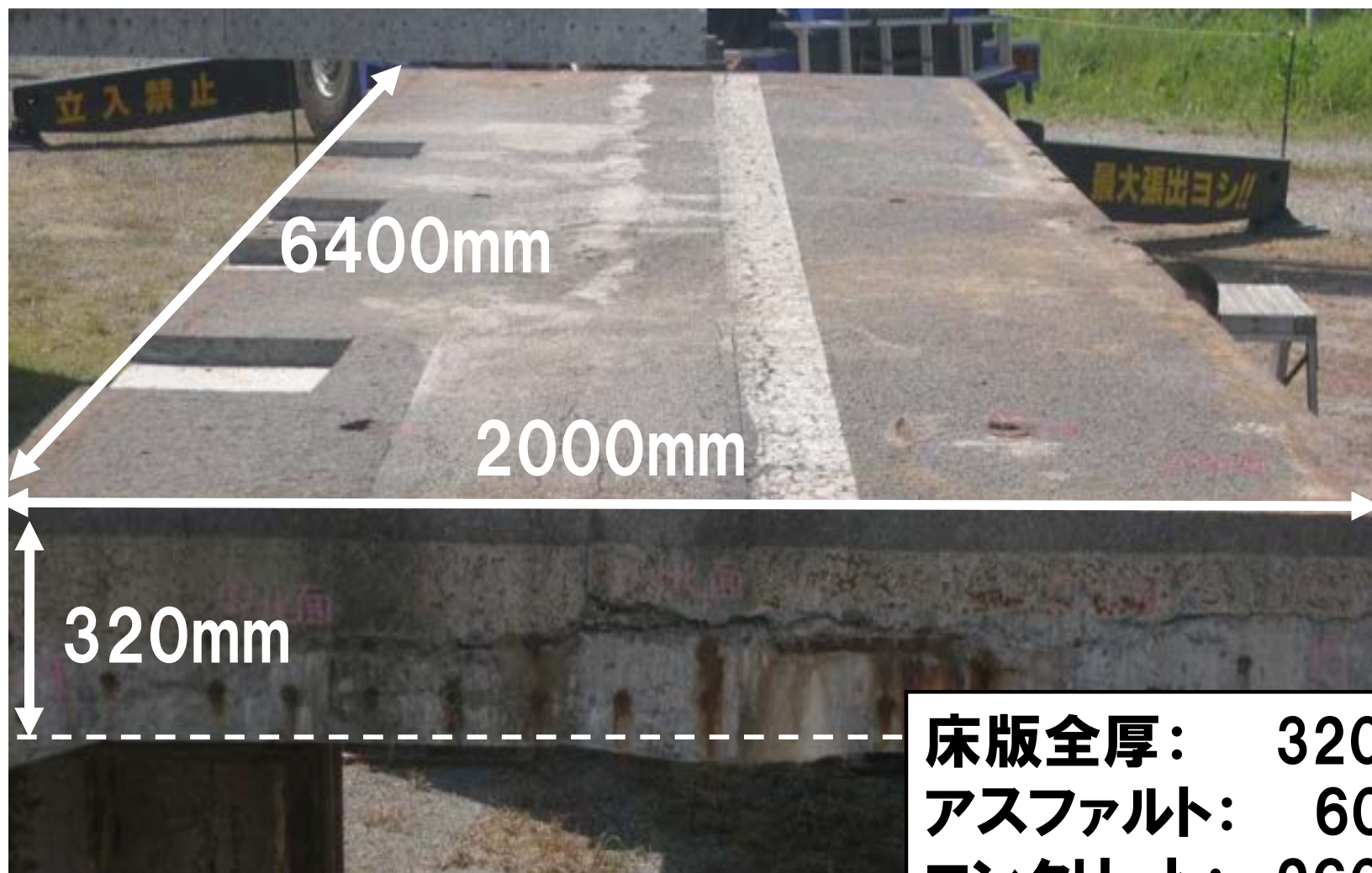
欠陥深さ
100mm



欠陥深さ
130mm



【ケーススタディ】 実橋から切り出したRC床版 (フィジカル空間)



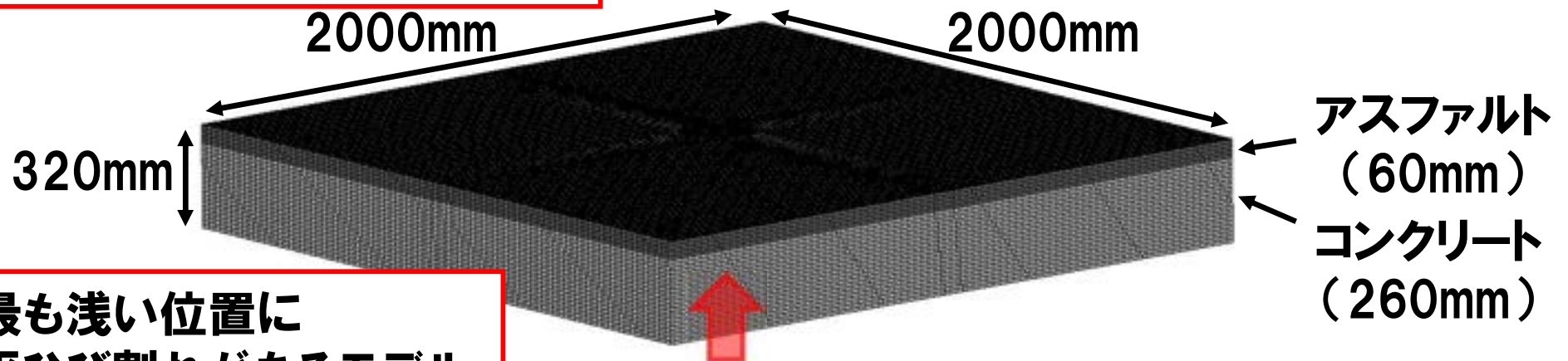
床版全厚:	320mm
アスファルト:	60mm
コンクリート:	260mm

サイバー空間において

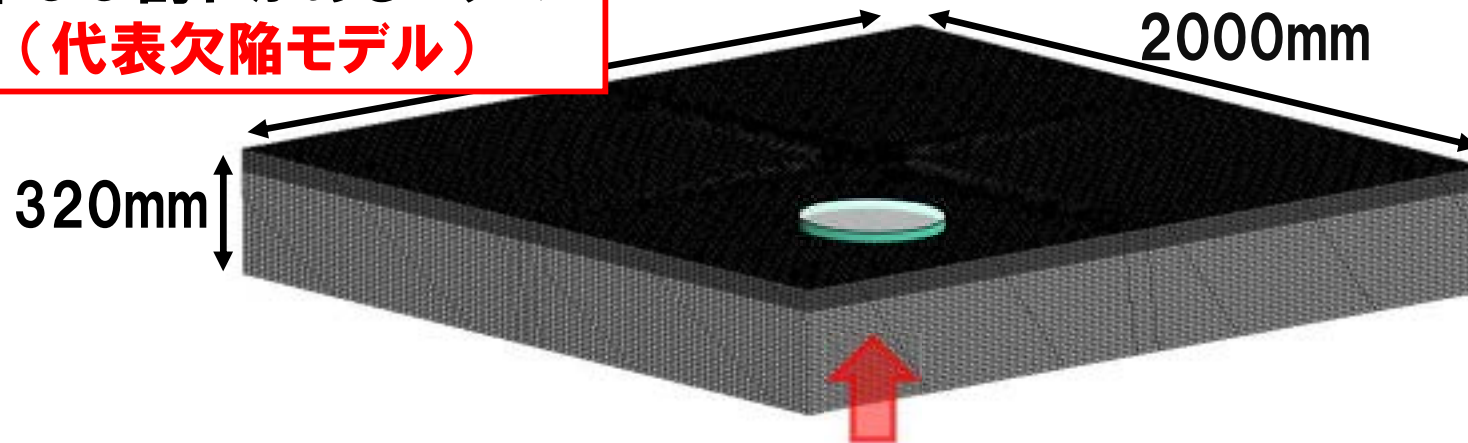
→ 2つのモデルの両方で有意なピークが得られる
測定条件(鋼球直径, 入力／出力間距離)を絞り込む。

① 水平ひび割れがないモデル
(健全モデル)

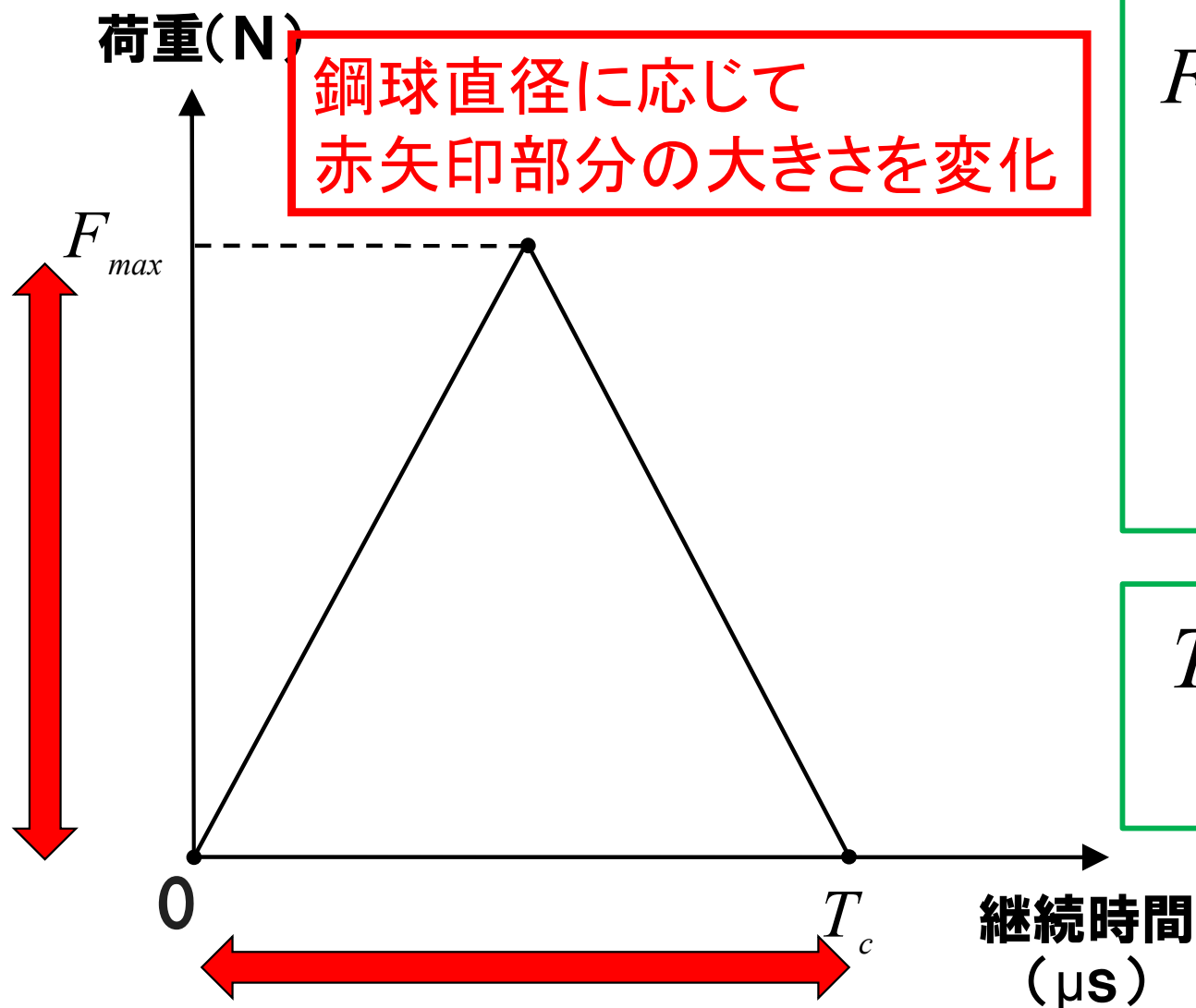
↑ : 叩く位置



② 最も浅い位置に
水平ひび割れがあるモデル
(代表欠陥モデル)



鋼球で叩いた入力波の設定



$$F_{max} = \frac{m\sqrt{2gH}}{0.637T_c}$$

m : 鋼球の質量(kg)

g : 重力加速度(m/s)

H : 鋼球の落下高さ(m)

T_c : 鋼球の接触時間(s)

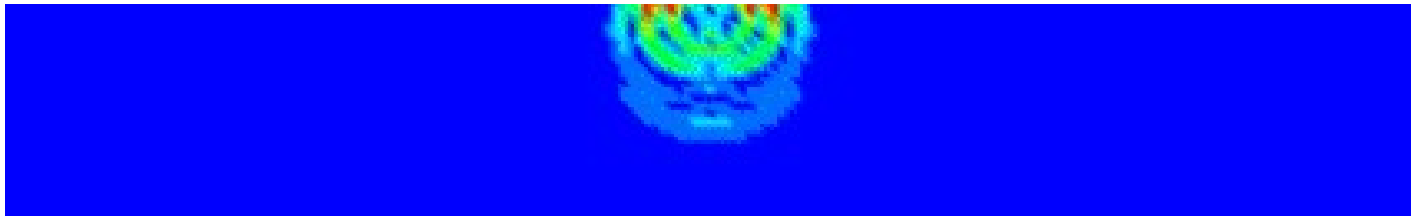
$$T_c = 0.0043 D$$

D : 鋼球直径(m)

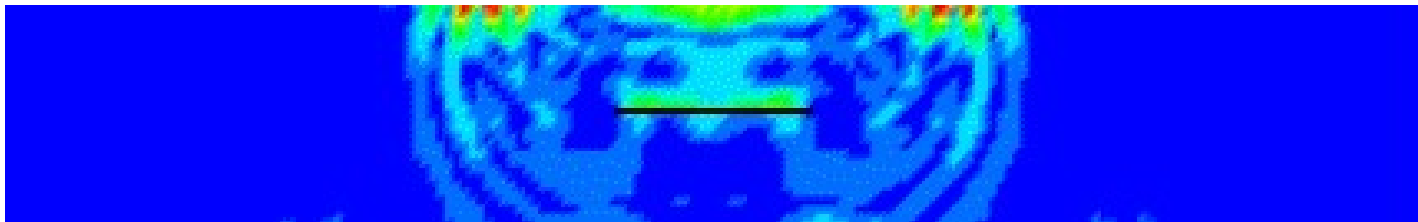
弾性波伝播シミュレーションの実行

(鋼球直径: 3, 6, 12mm / 入力・出力間距離: 20, 50, 80mm)

①健全モデル



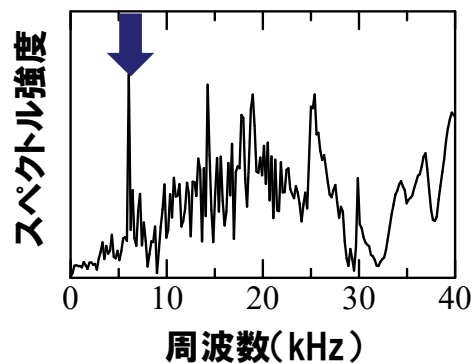
②代表欠陥モデル



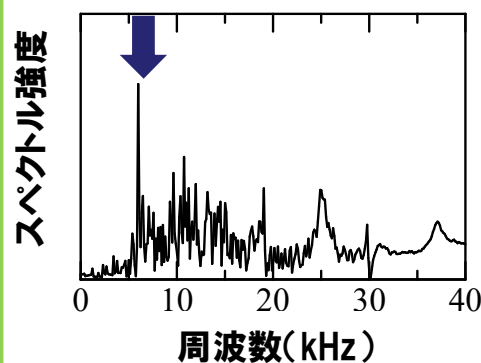
A. 鋼球直径の選定(いずれも解析結果)

①健全モデル

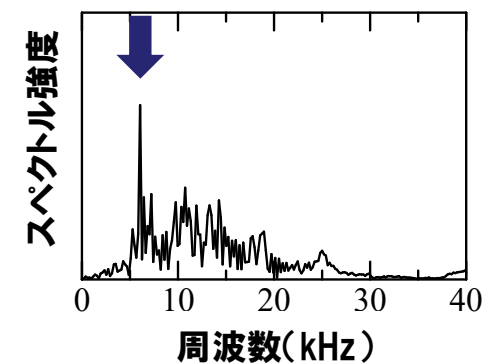
鋼球直径: 3mm



鋼球直径: 6mm

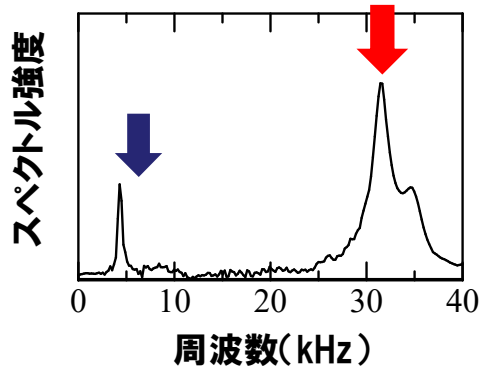


鋼球直径: 12mm

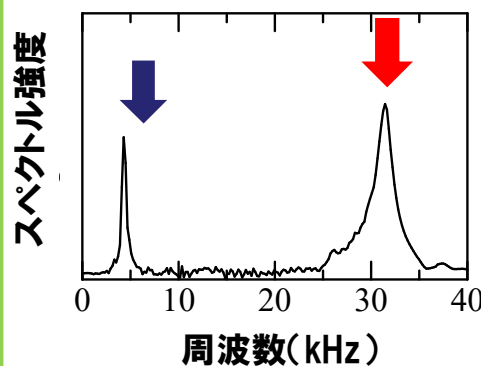


②代表欠陥モデル

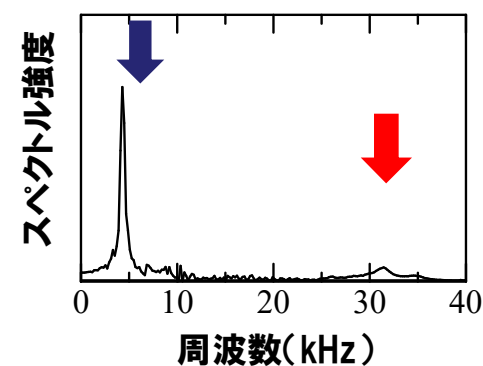
鋼球直径: 3mm



鋼球直径: 6mm

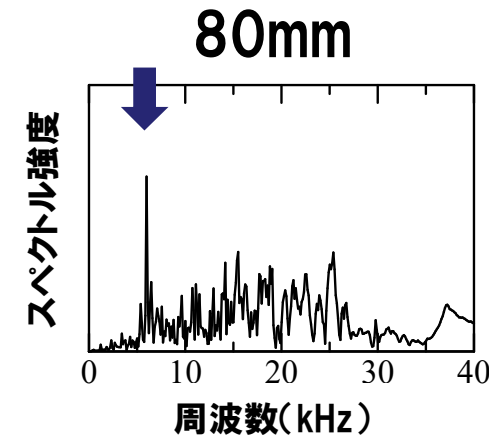
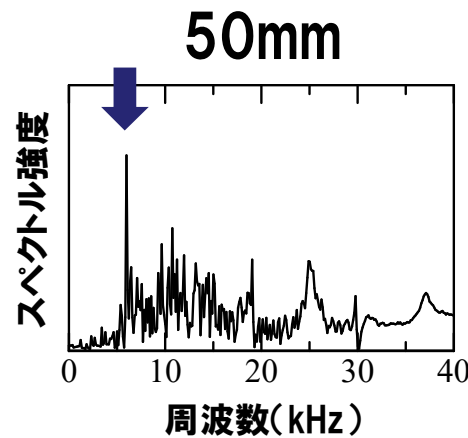
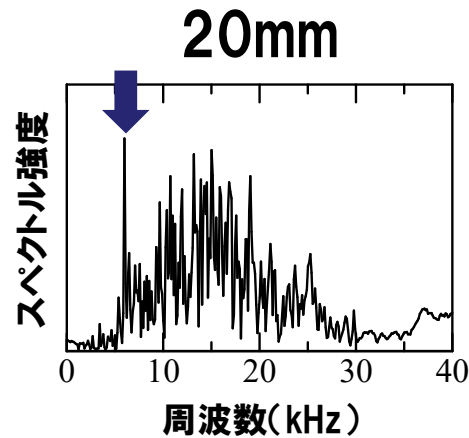


鋼球直径: 12mm

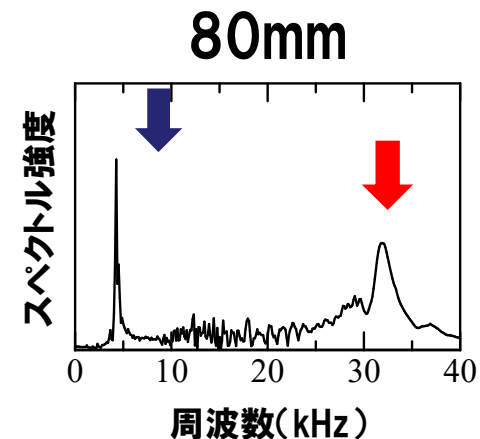
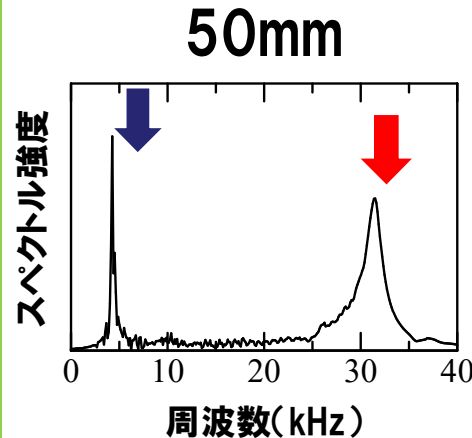
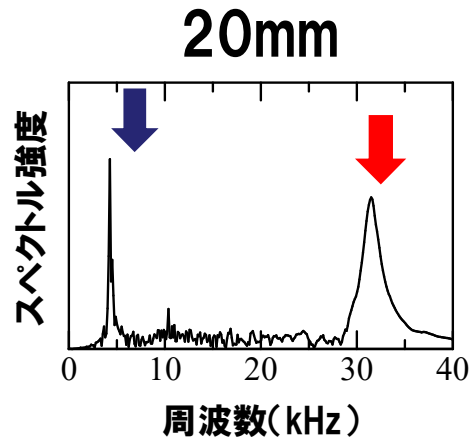


B. 弾性波の入力位置から 受信位置までの距離の選定(いずれも解析結果)

①健全モデル

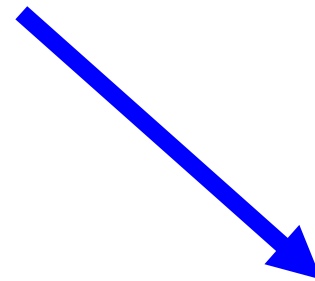
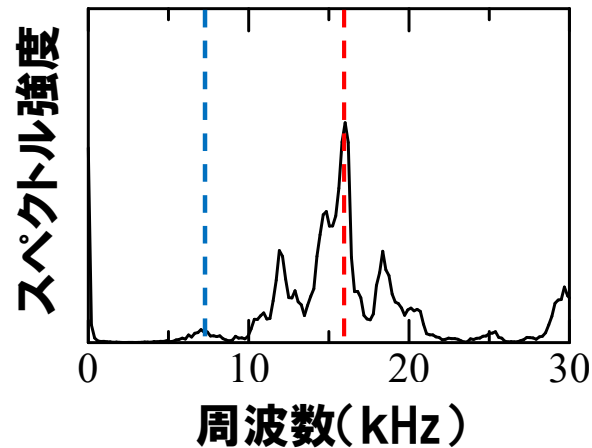


②代表欠陥モデル



直径6mm, 入力ー受信点間距離50mm での推定結果の検証

推定結果:
水平ひび割れあり(深さ125mm)



120mm

舗装表面

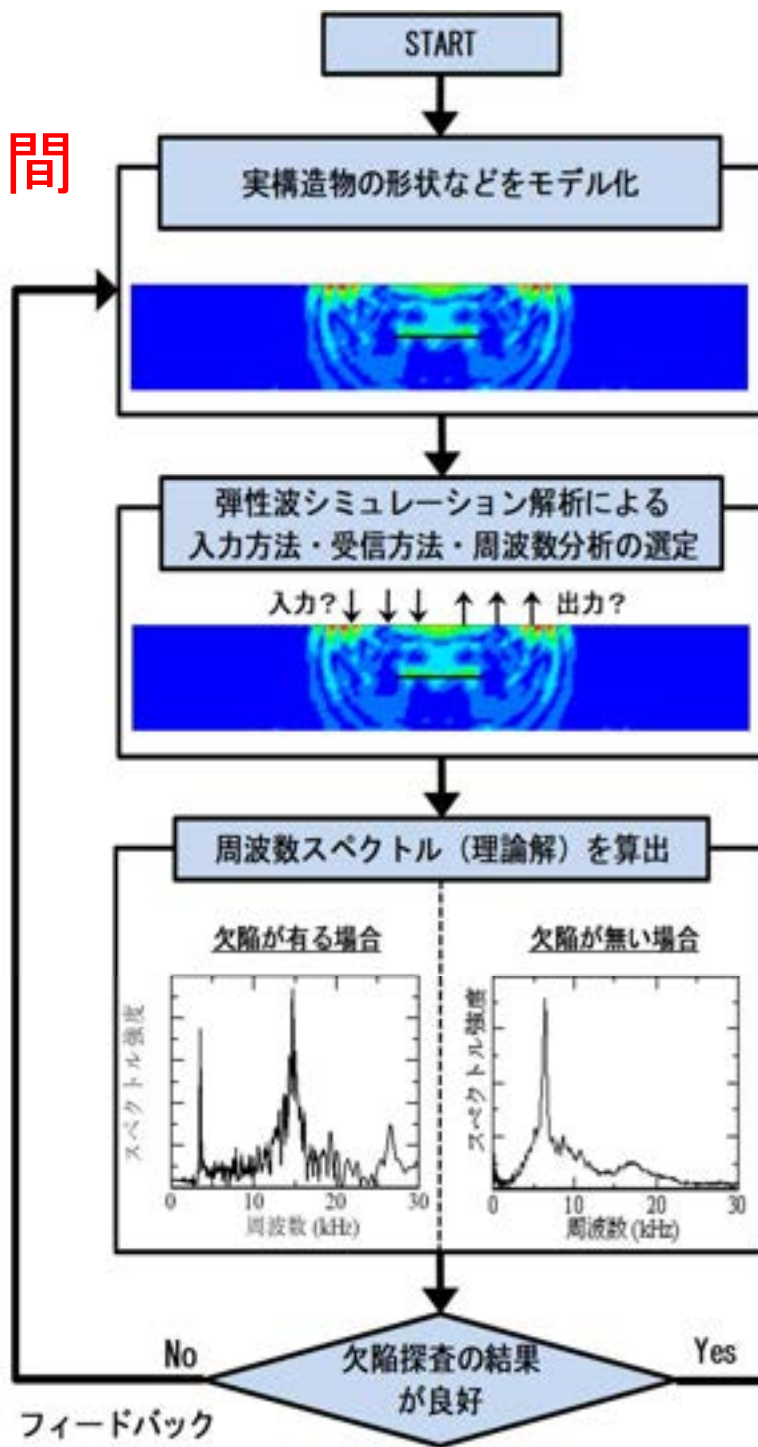
水平ひび割れ

底面

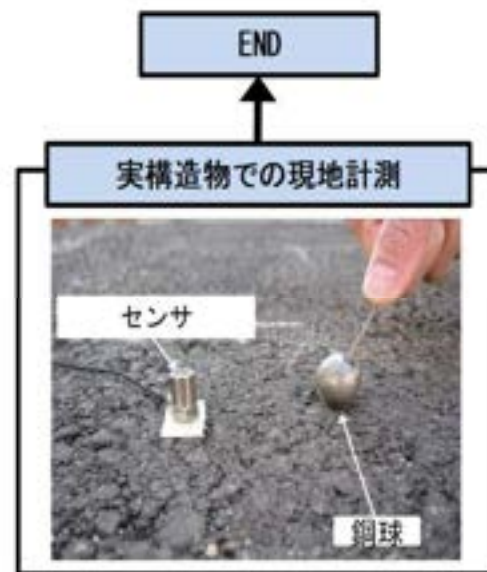


デジタルツインを援用したコンクリート内部欠陥の評価手法

サイバー空間



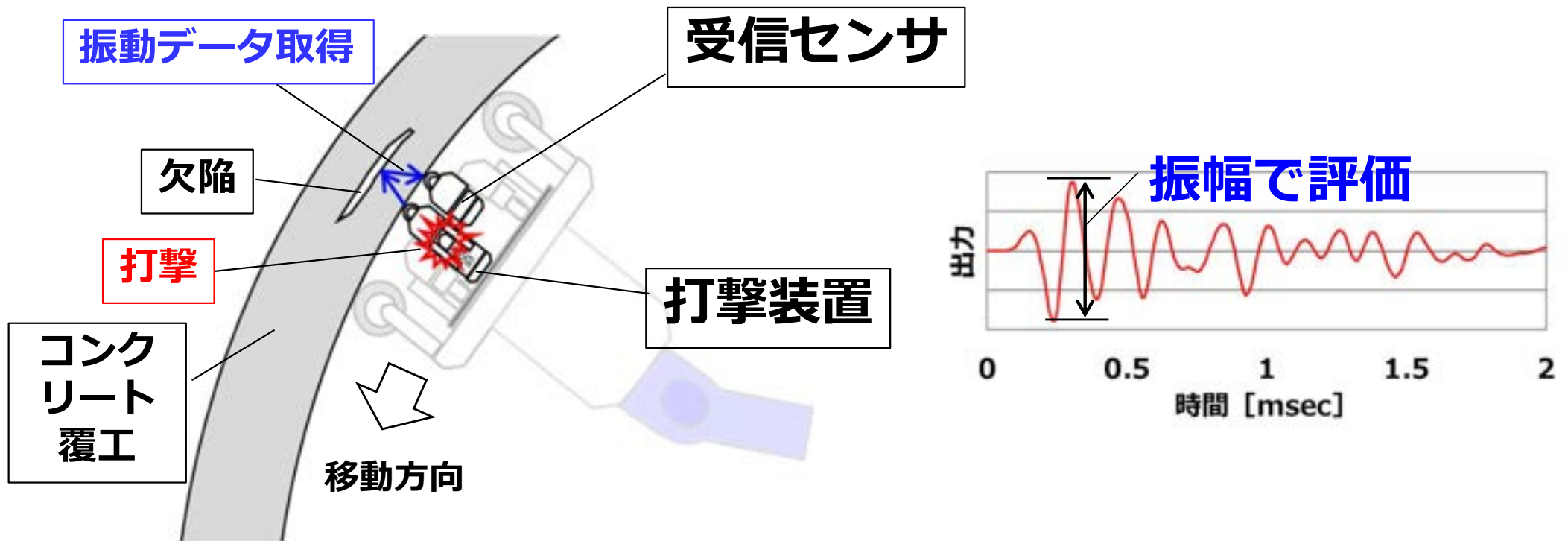
フィジカル空間



- ①内部可視化による構造物の診断技術の向上
- ②デジタルツインによる構造物診断手法の高度化
- ③**検査ロボット**を適用した構造物点検の効率化
- ④環境モニタリングを駆使した構造物劣化予測の高度化

検査対象：トンネル覆工コンクリート

表面を打撃して、**表面振動を直接受信**する方法
(**打音**ではありません。)



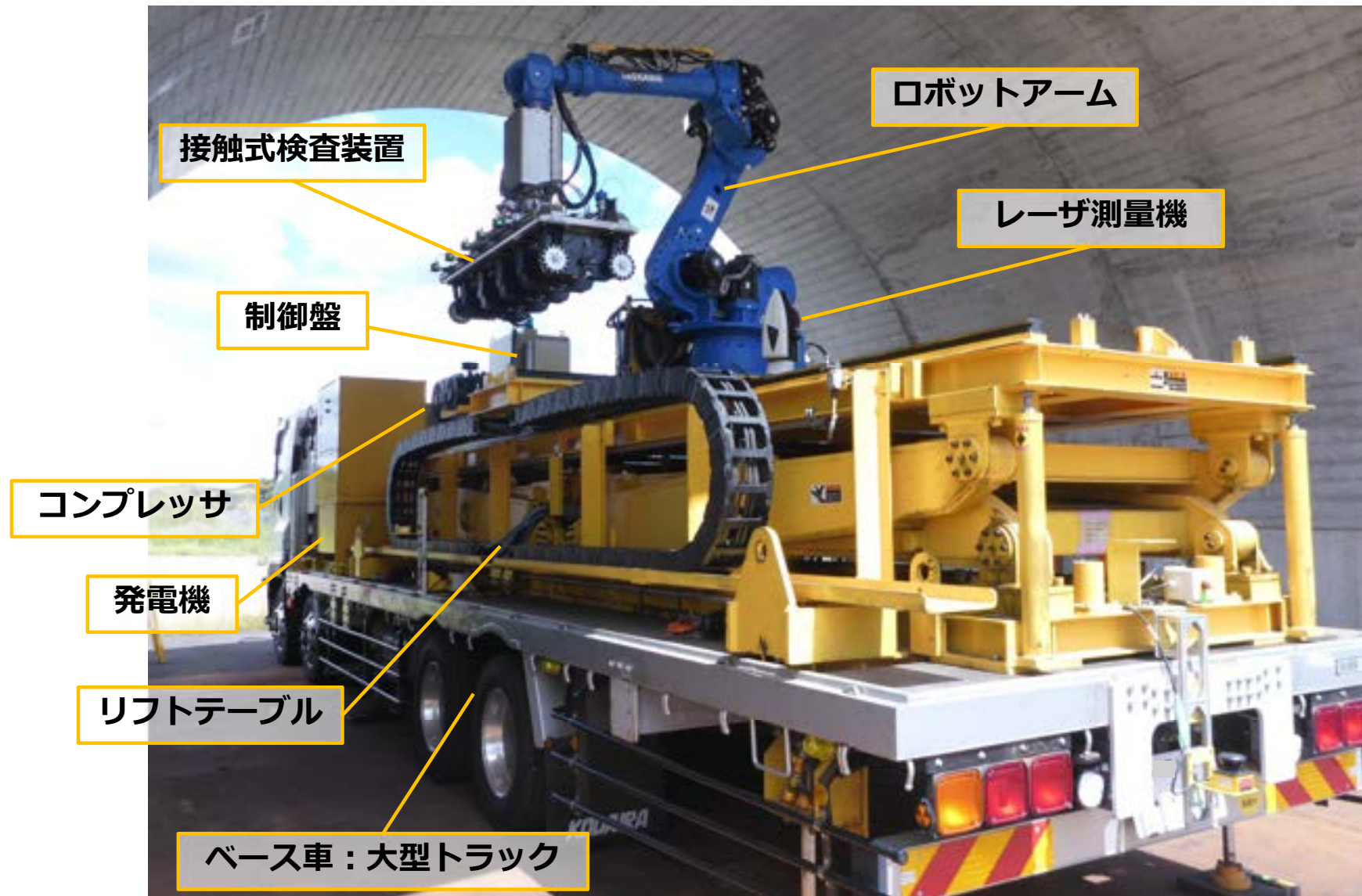
JR東海提供

ローラー型振動センサと
波形判定ソフトを内蔵した
**コンクリート表層部の
健全性評価システム**



**人の判断によらない
客観的(定量的)評価
点検の自動化**

トンネル検査ロボットの構成

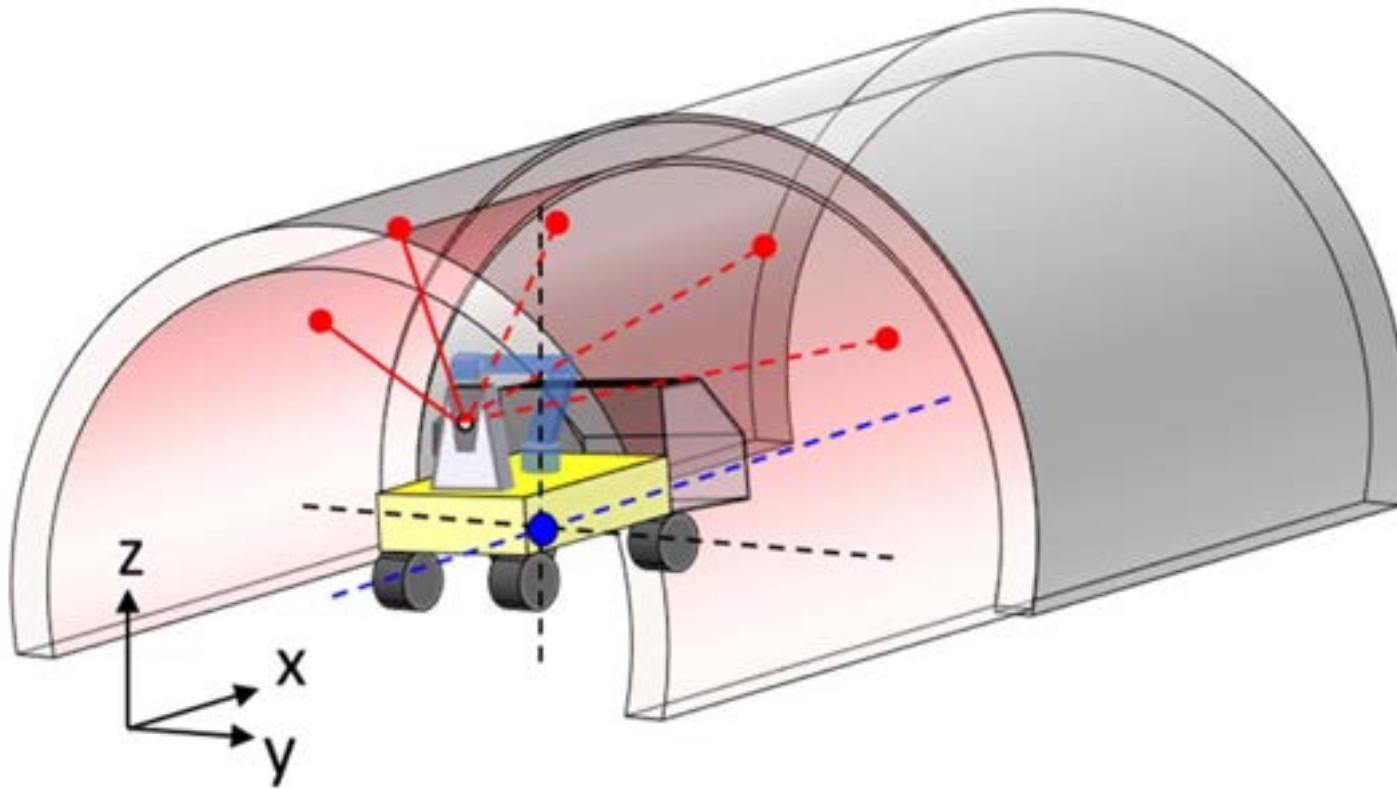


検査箇所へ大型トラックで移動し、そのまま検査が可能

JR東海提供

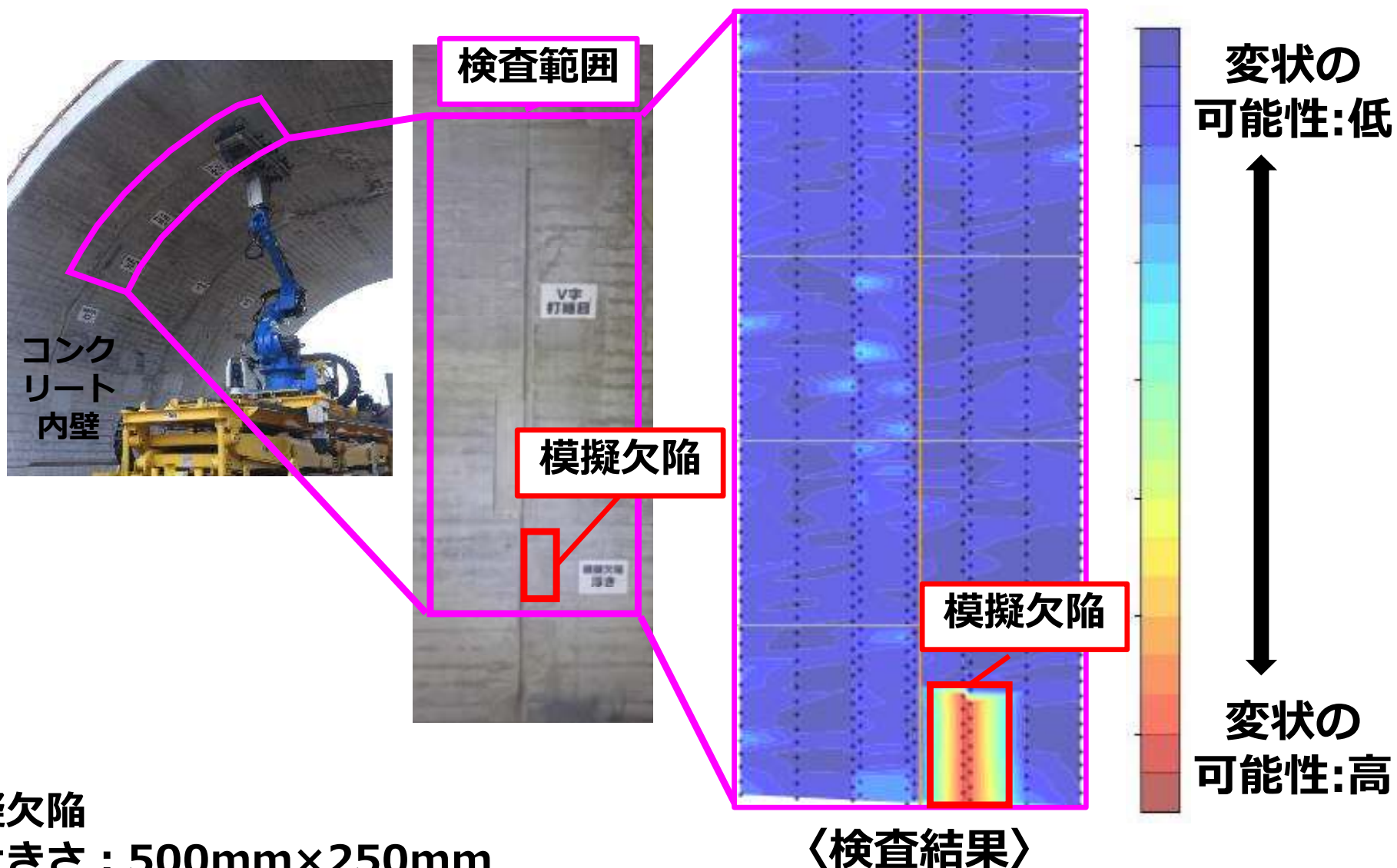
内壁と本装置の位置関係や壁面の状態（ばらつき）を把握

壁面を打撃する前に、
レーザ測量機によるトンネル内壁を自動計測

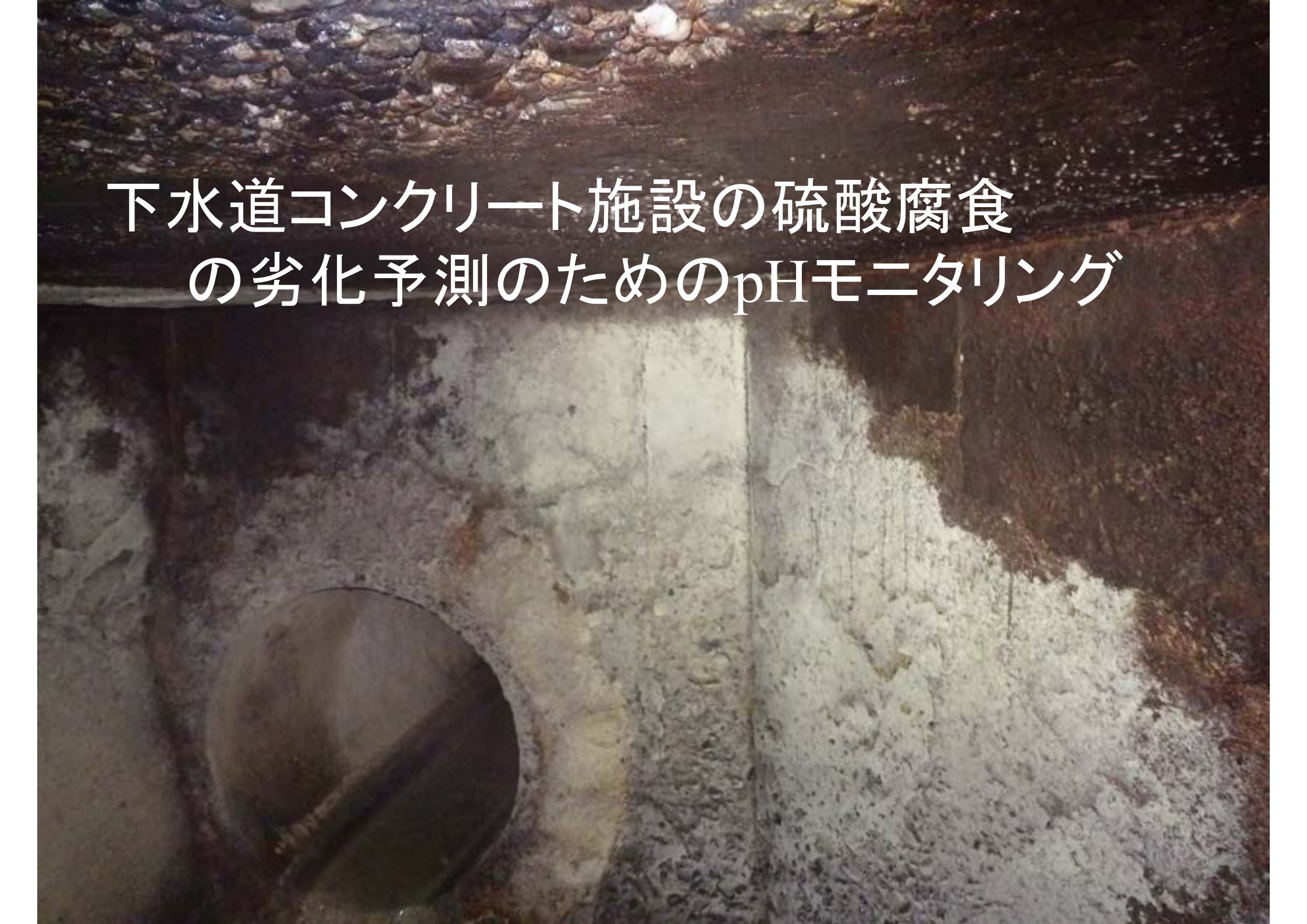


JR東海提供

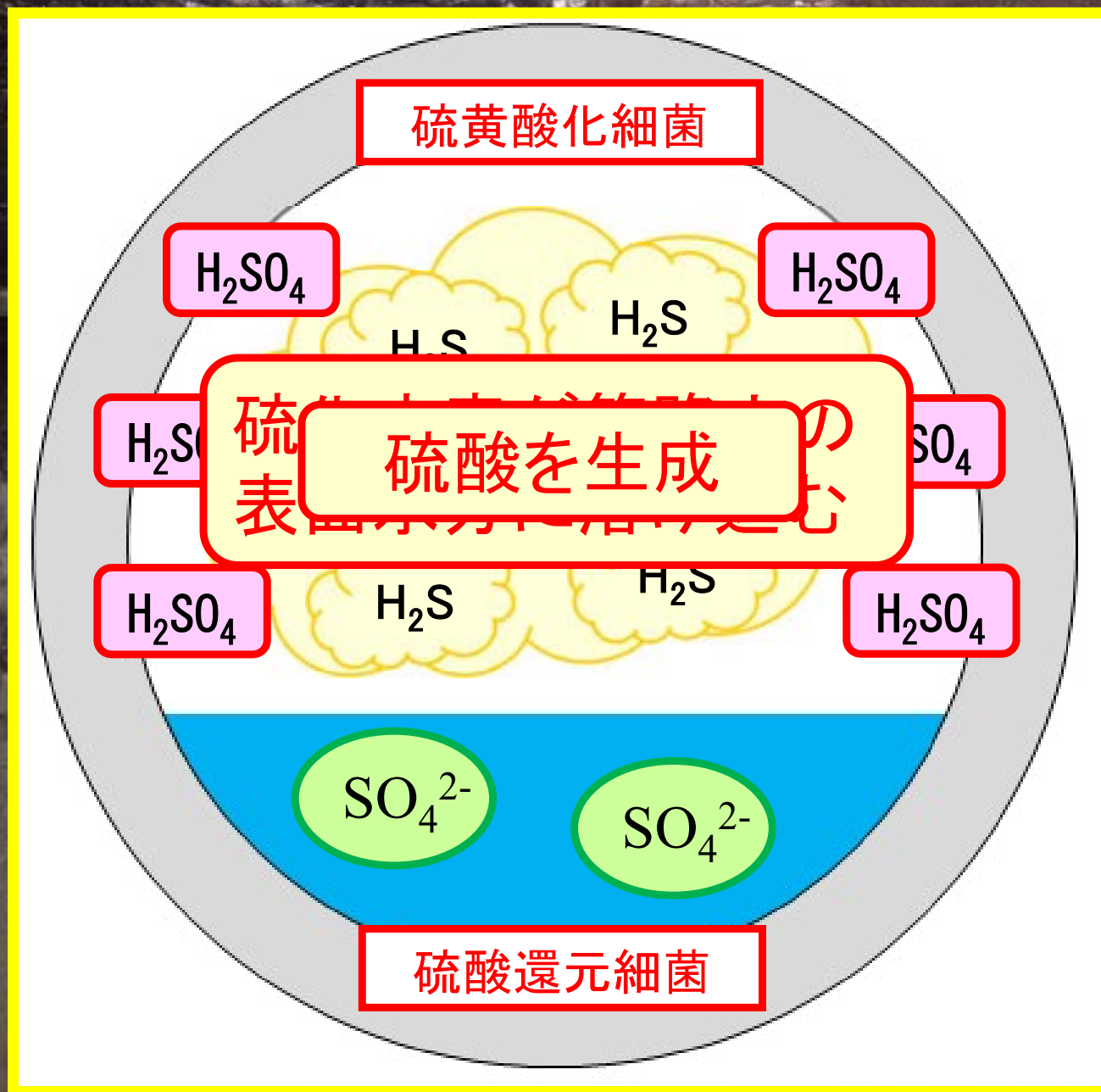
検査結果の可視化



- ①内部可視化による構造物の診断技術の向上
- ②デジタルツインによる構造物診断手法の高度化
- ③検査ロボットを適用した構造物点検の効率化
- ④**環境モニタリング**を駆使した構造物劣化予測の高度化



下水道コンクリート施設の硫酸腐食 の劣化予測のためのpHモニタリング



大阪市内の各所で マンホール内の環境を調査

大阪大学・日本建築総合試験所
パシフィックコンサルタンツ・大阪市
の共同研究

地域別内訳

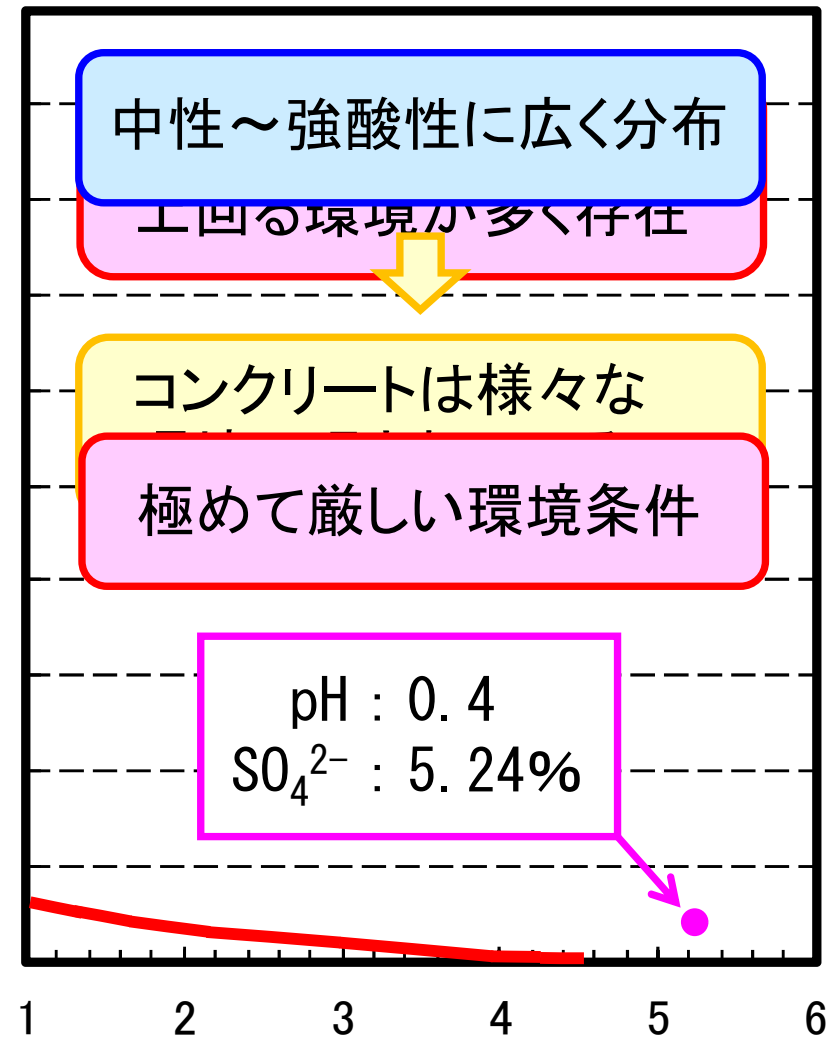
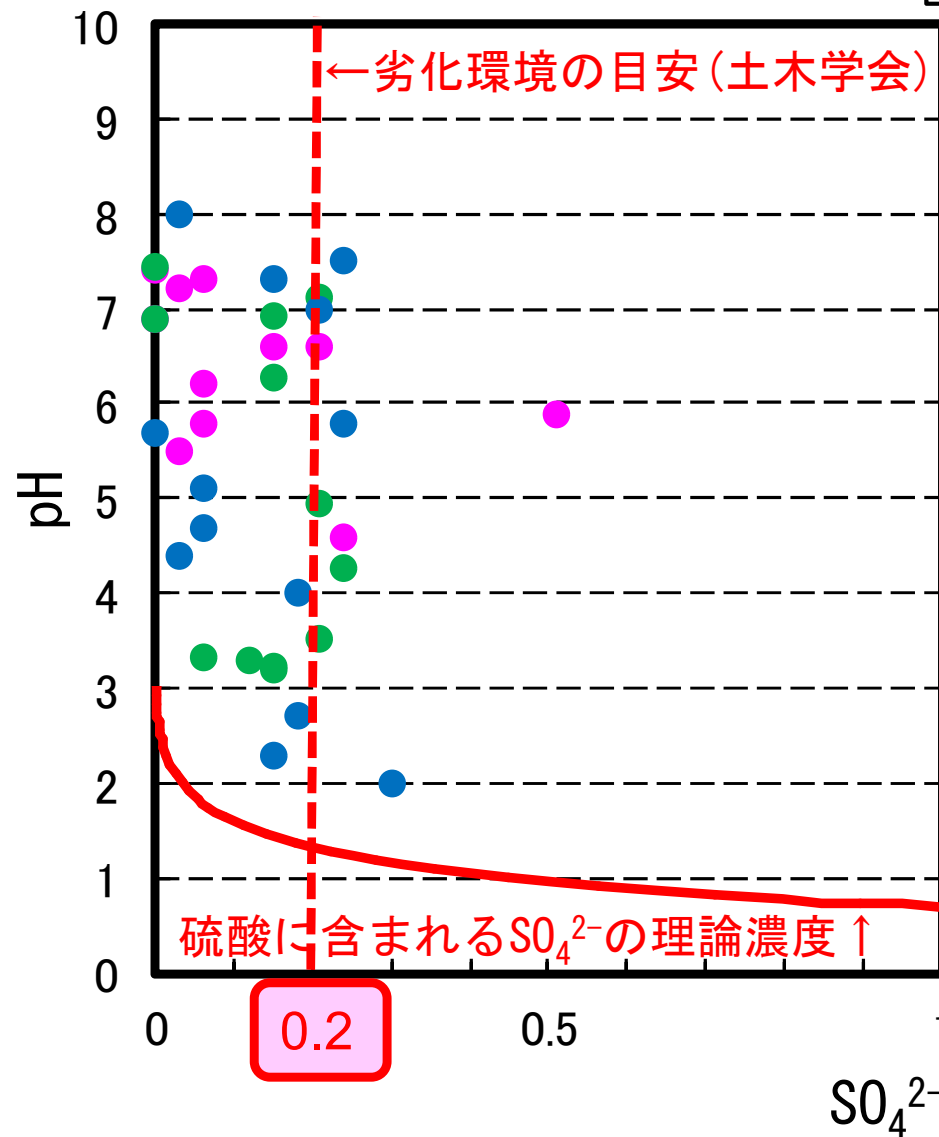
北 区	2箇所
福島区	1箇所
中央区	28箇所
西区	8箇所
港区	3箇所
計42箇所	



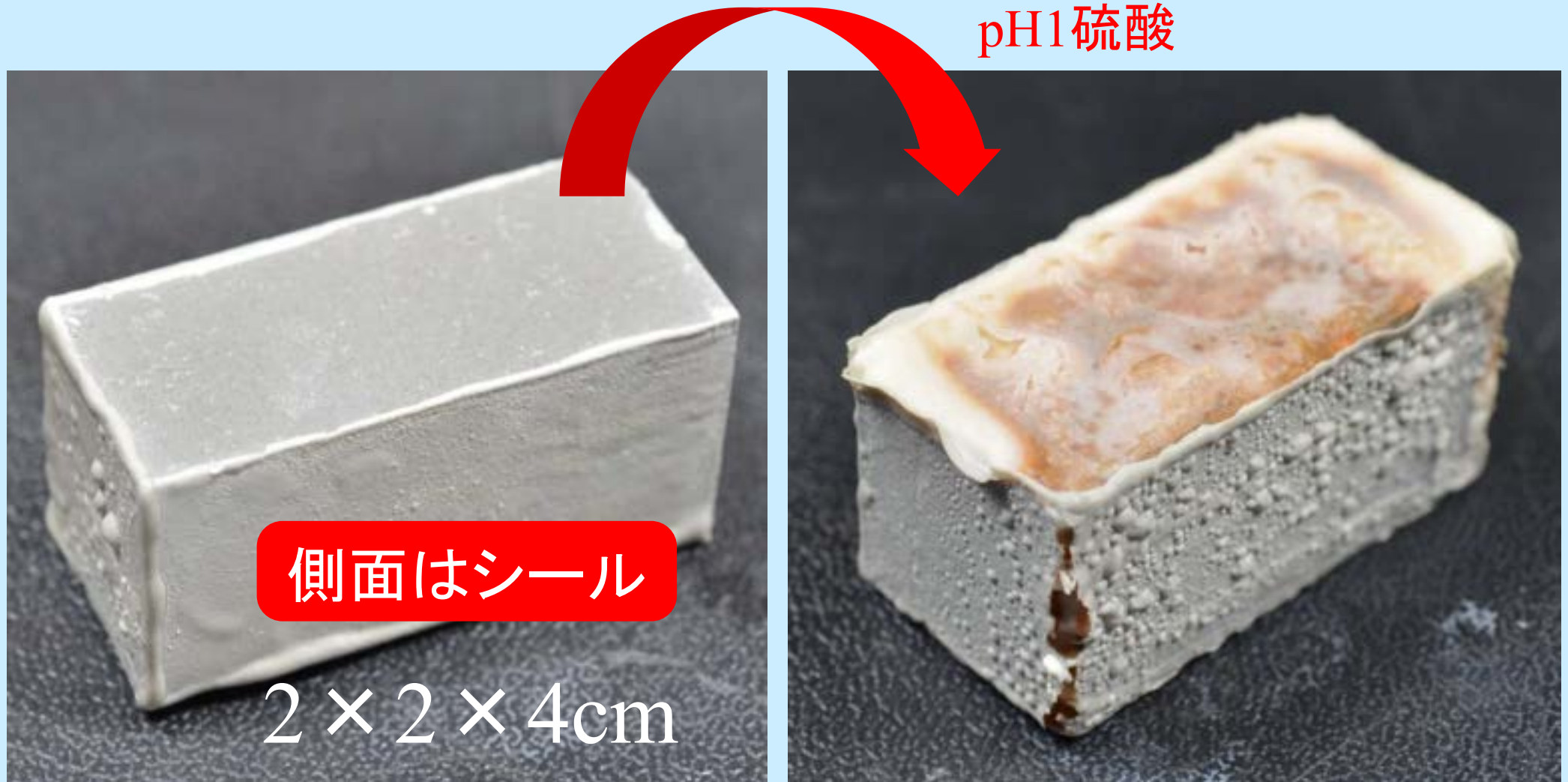
大阪市内の実態は？

pHと SO_4^{2-} 濃度の関係

● 表面水 ● 抽出水 ● 人工水滴



SO_4^{2-} 濃度に加えてpHはどの程度の影響があるのか？



SO_4^{2-} 濃度

pH6			
pH3			
pH2			
pH1			

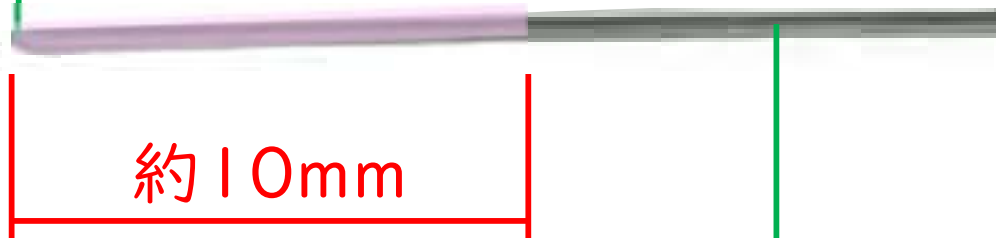
「硫酸イオン濃度」はもちろん、「**pH**」の影響も大きい！

ここまで述べた研究結果から、
下水道の劣化環境の調査として従来から行われて
いる硫化水素(H_2S)濃度に加えて、**pHをモニタリン
グすることの重要性**が示唆された。

しかしながら、現場で適用可能なpHセンサは存在せず、
我々独自で試作を行うこととした！

W線 (Φ0.6mm、長さ約100mm)

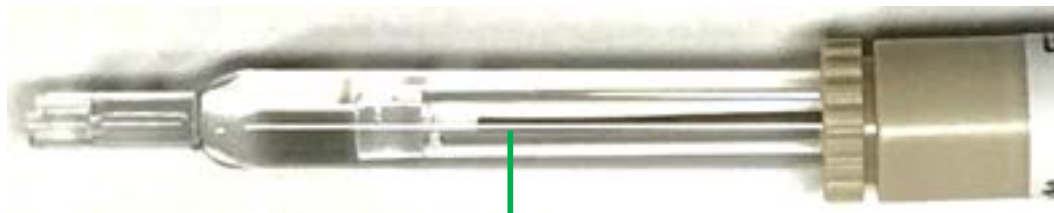
酸化 (王水に約24時間浸せき)



約10mm

熱収縮チューブ

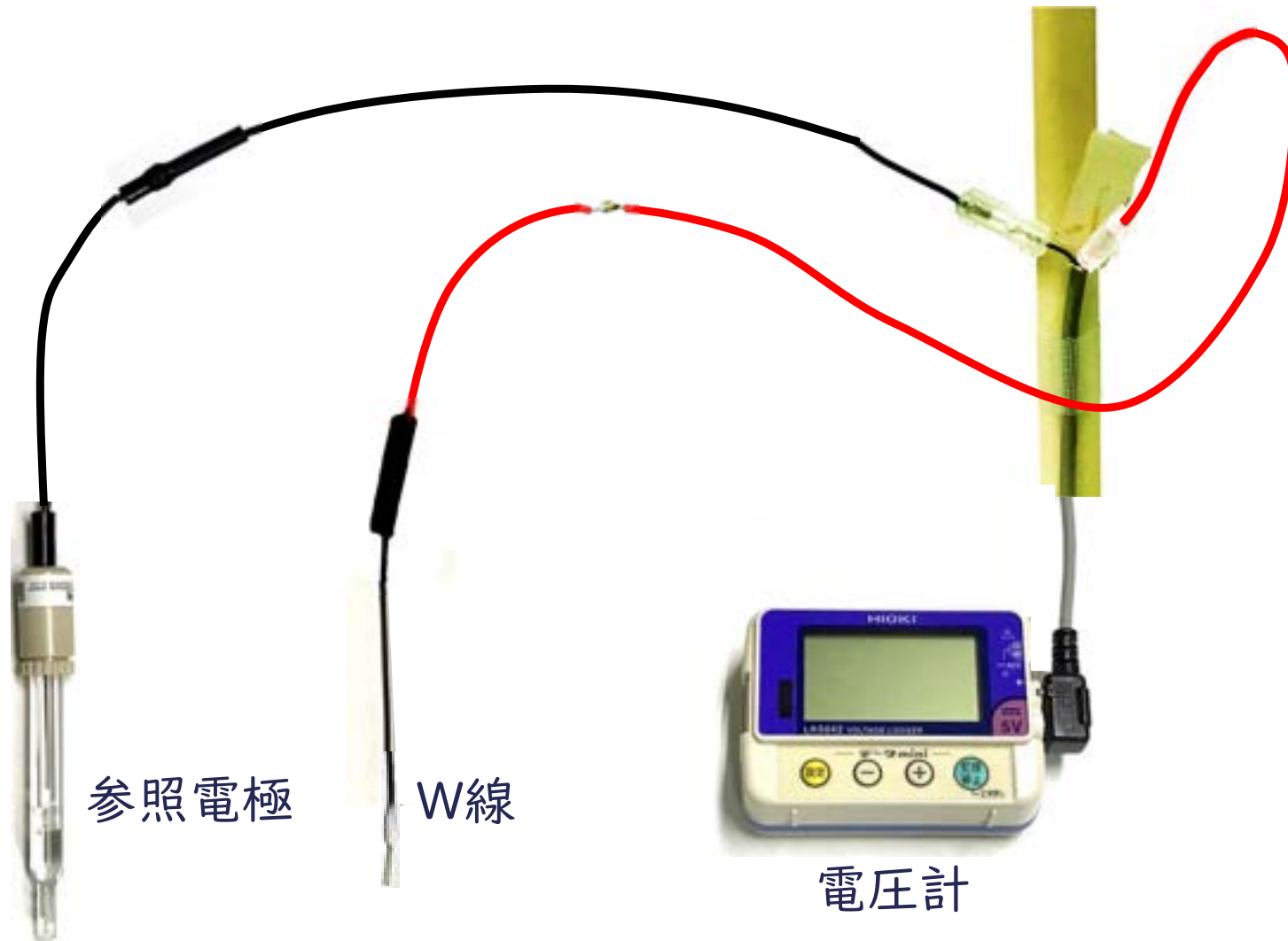
タングステン線 (W線)
(既往の文献を参考)



Ag/AgCl参照電極
(既製品)

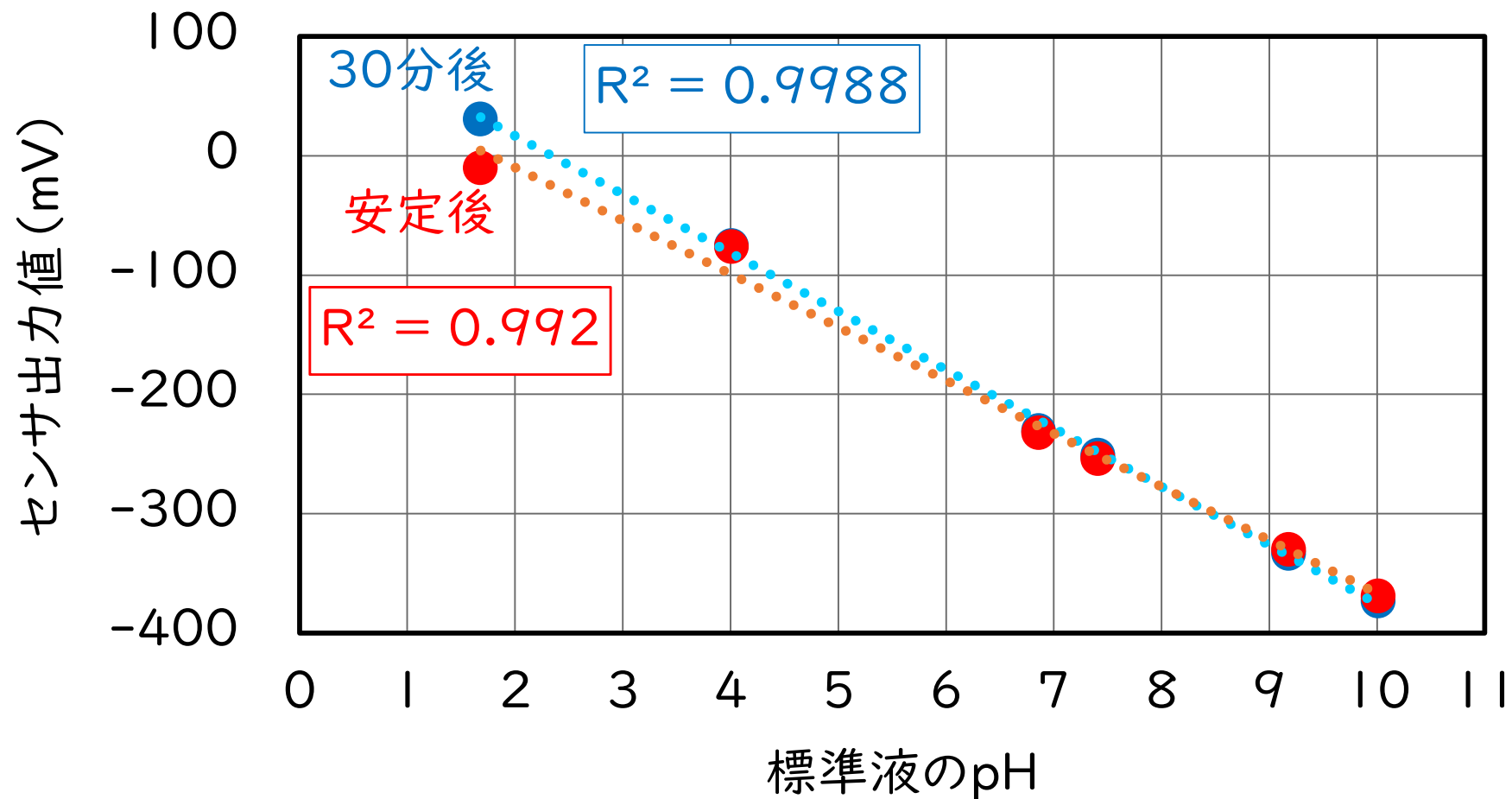
内部液 (3mol/L 塩化カリウム水溶液)

pHセンサによるpH測定精度の確認



pHセンサを現地調査で使用する前に、室内実験において、pHの測定精度を確認した。

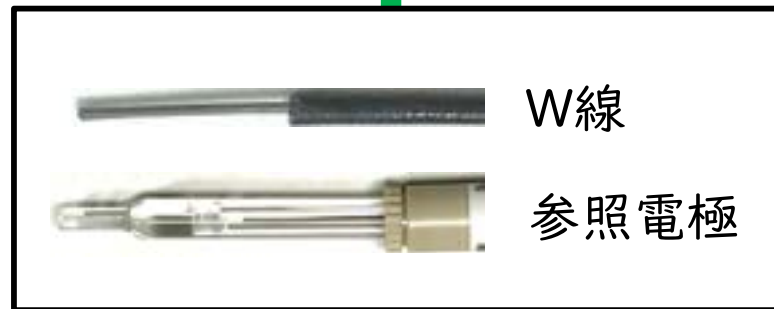
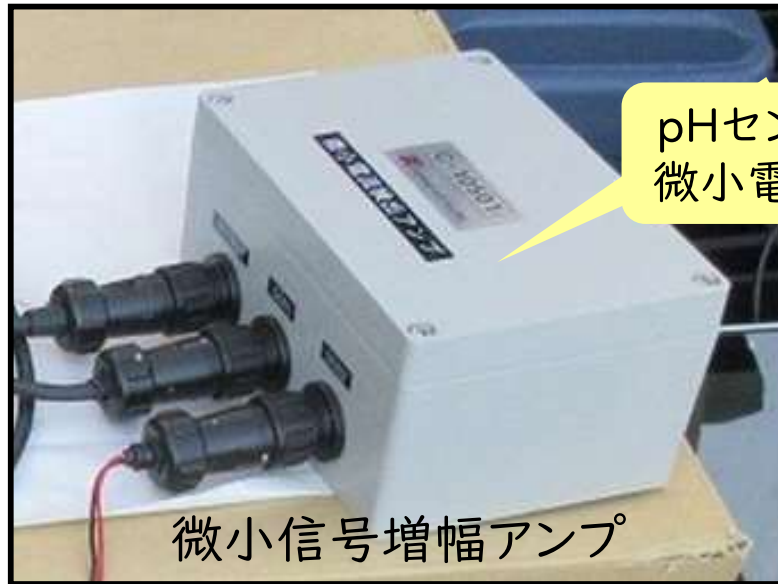
pHセンサによるpH測定精度の確認結果（検量線作成結果）



30分後のセンサ出力値で作成した検量線と安定後（pH1.68は80分後のセンサ出力値）のセンサ出力値で作成した検量線の比較

どちらも直線性の良い検量線を作成することができた。

遠隔pHモニタリングシステムの概要



pHセンサ

約6か月間の
測定が可能

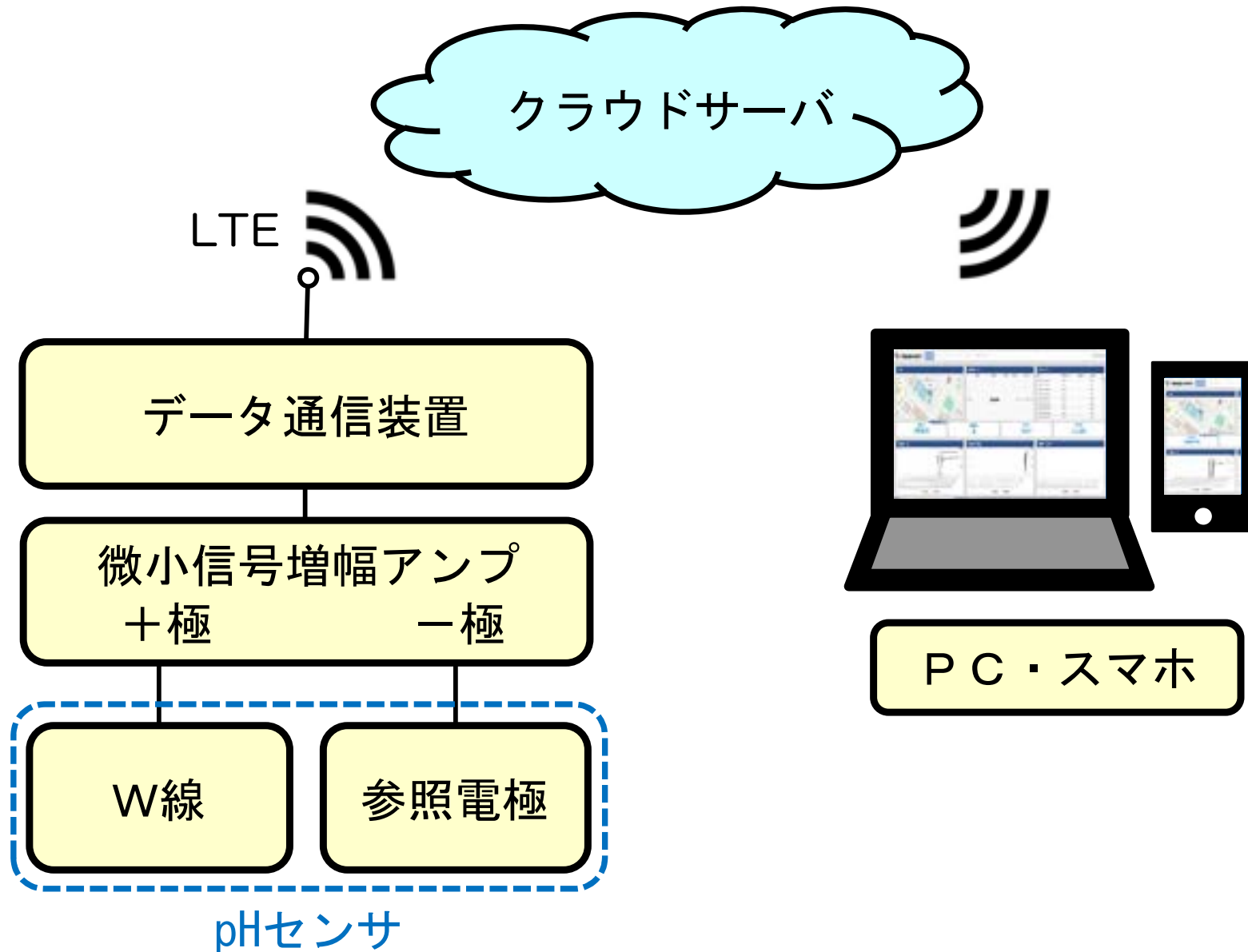
内部



データ通信装置

pHセンサ、微小信号増幅アンプおよびデータ通信装置を接続したシステムを、本研究では「遠隔 pH モニタリングシステム」と呼ぶ。

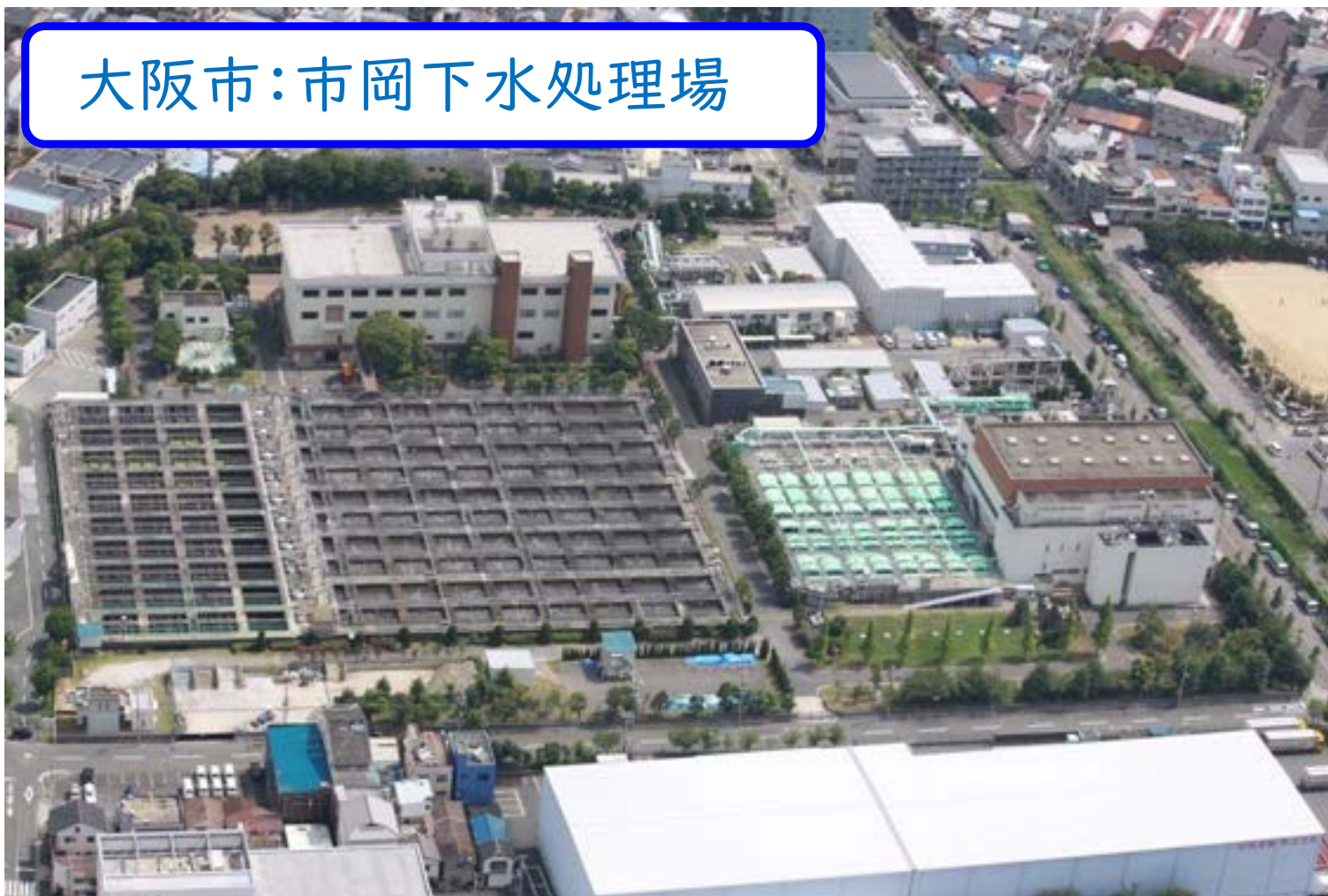
遠隔pHモニタリングシステムの概要（通信方法）



測定場所および測定方法

遠隔pHモニタリングシステムの設置

大阪市:市岡下水処理場



設置期間:2023年2月21日~同年4月27日(65日間)

調査場所



沈砂池

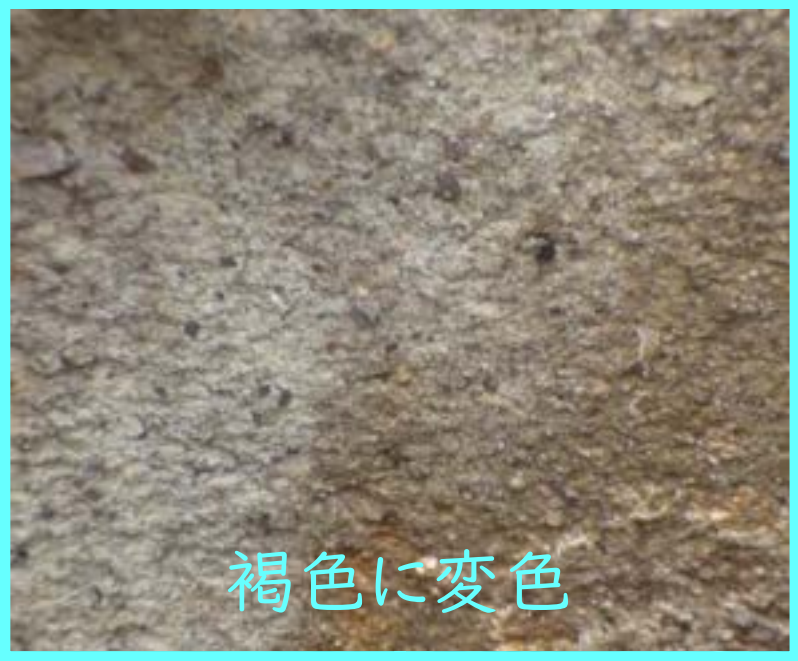
1985年度竣工
補修歴なし

測定箇所

送砂ポンプ
(平常時は、1日に1~2回稼働)

測定箇所

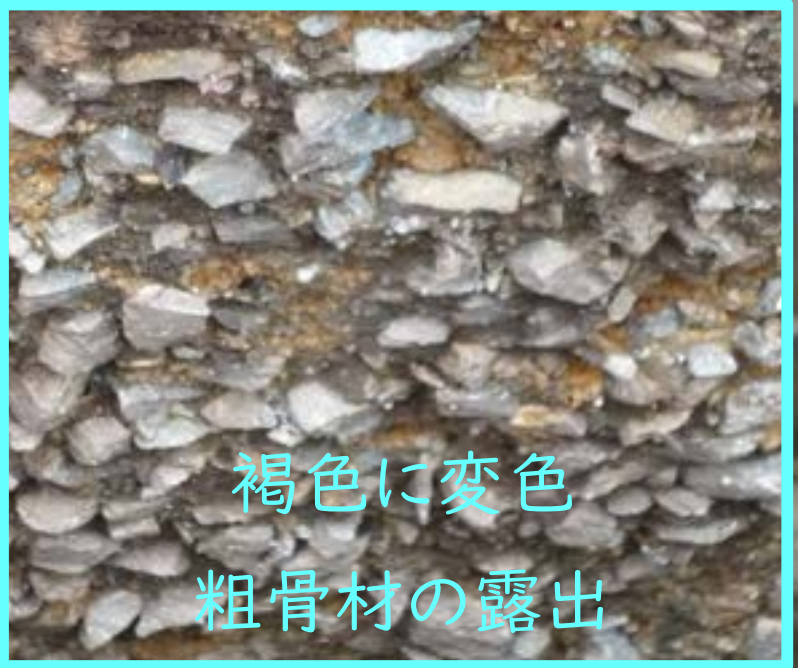




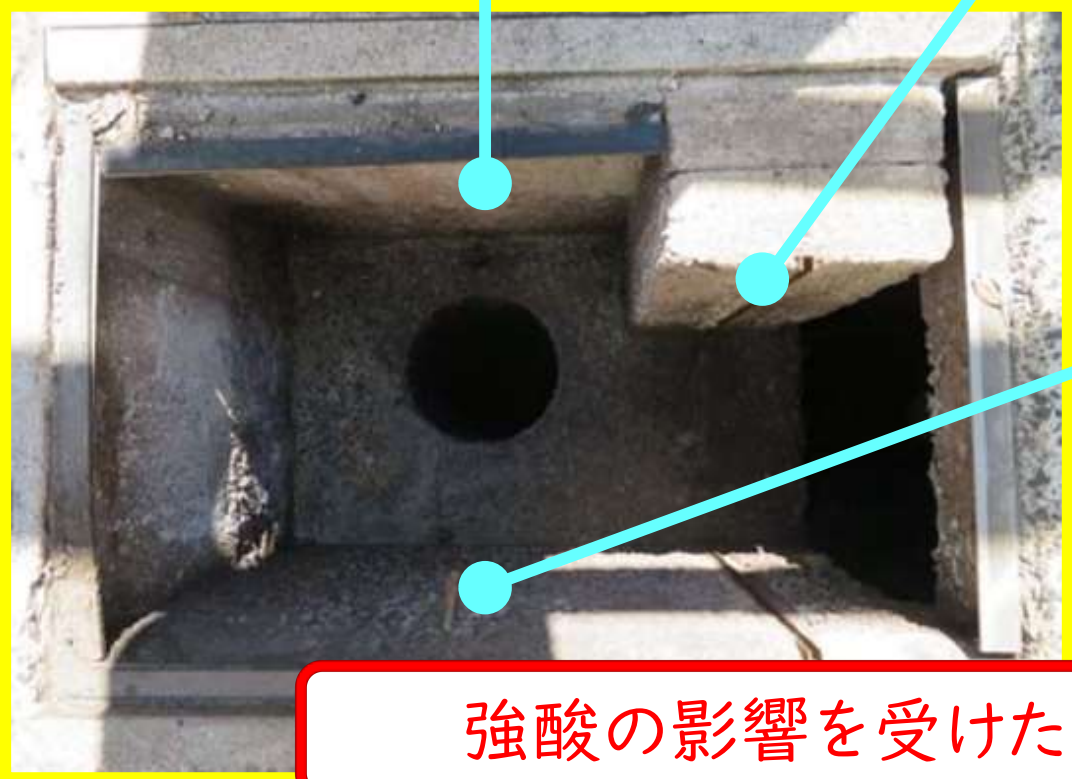
褐色に変色



褐色に変色
粗骨材の露出



褐色に変色
粗骨材の露出



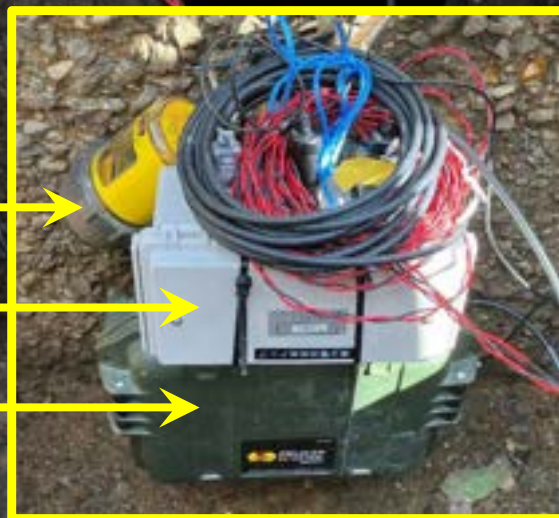
強酸の影響を受けたコンクリートの特徴

設置状況



pHセンサー

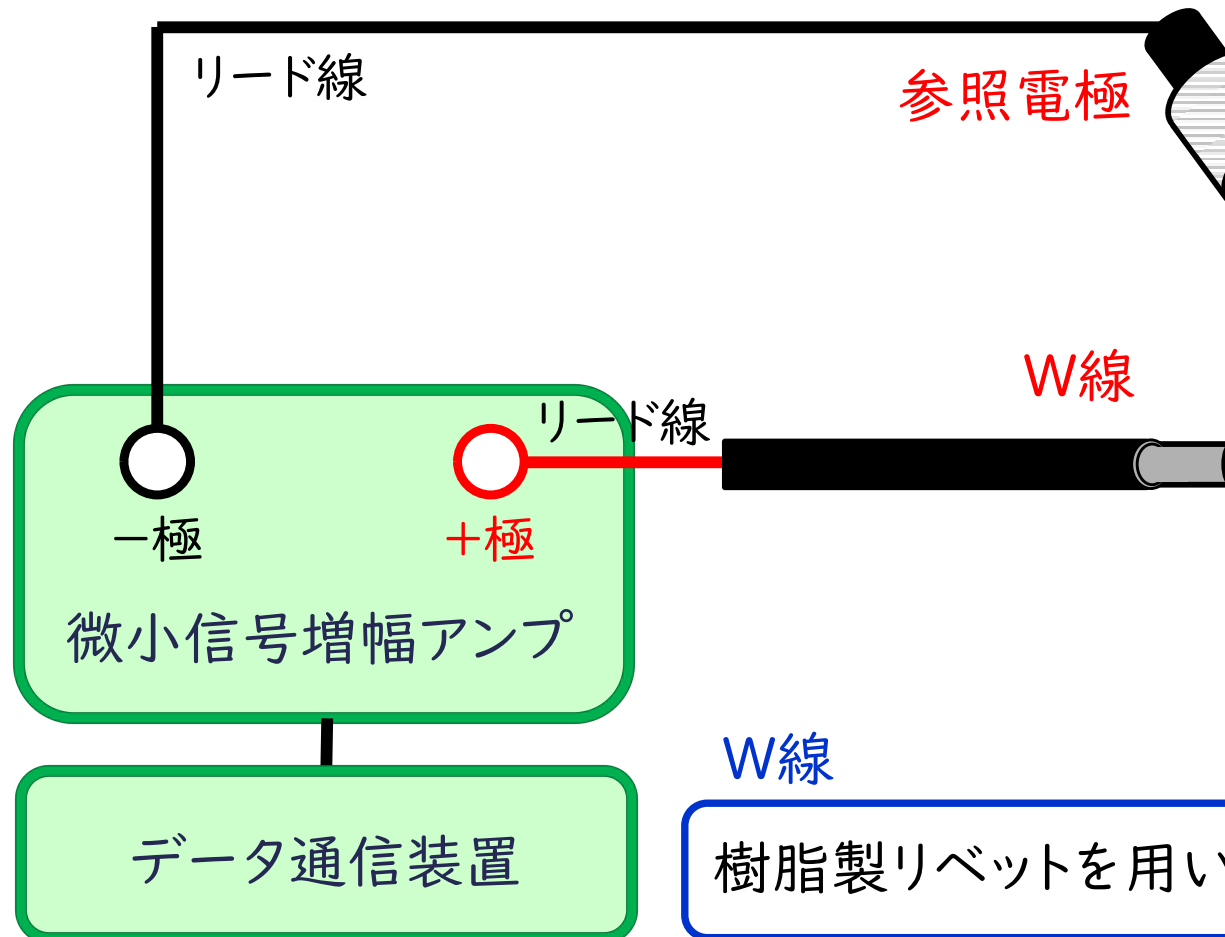
硫化水素計
増幅アンプ
通信装置



pHセンサの設置方法

参照電極

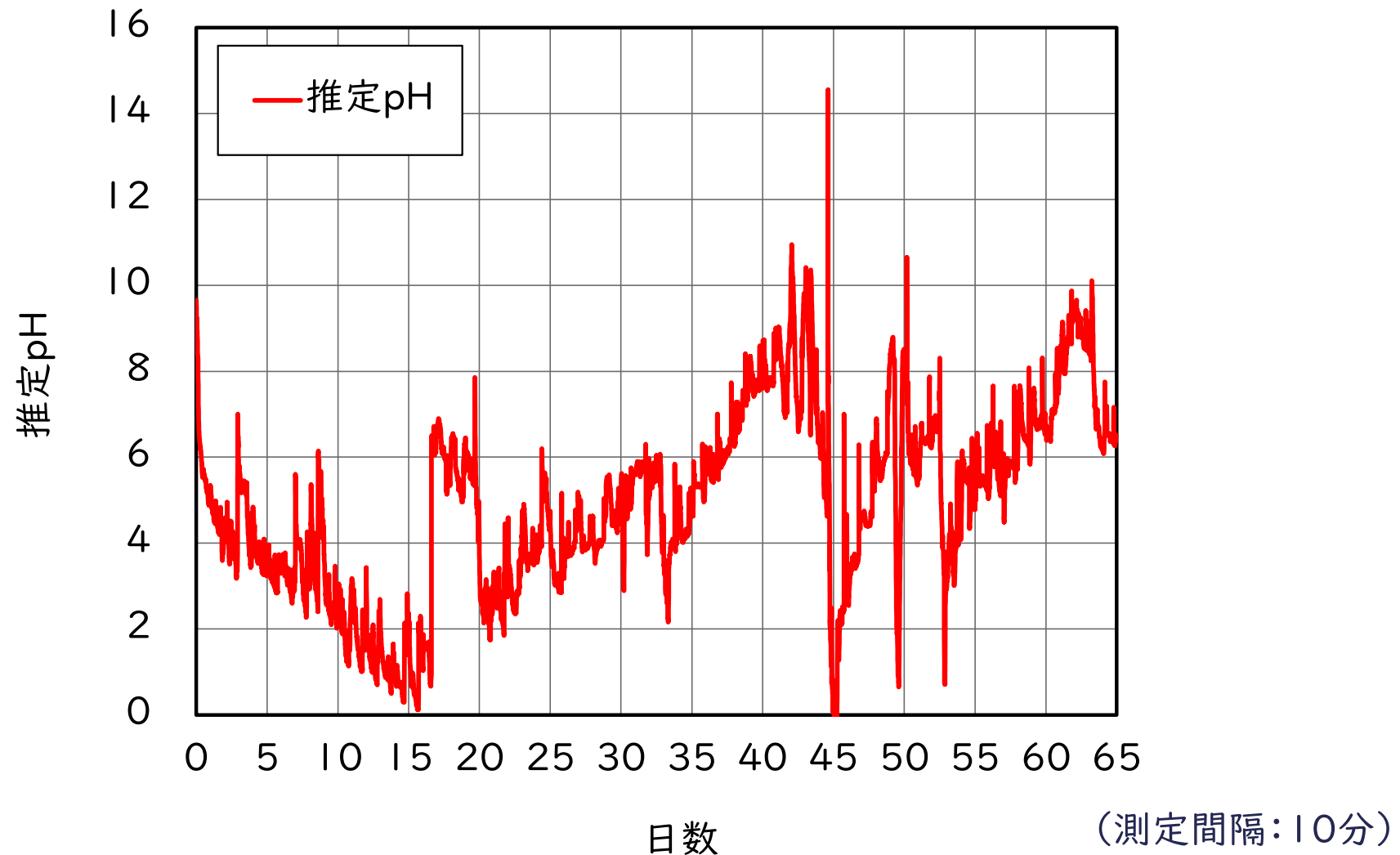
W線近傍の壁面に斜め下方方向の穴を開け、その穴に上水道水を注入して参照電極を挿入



W線

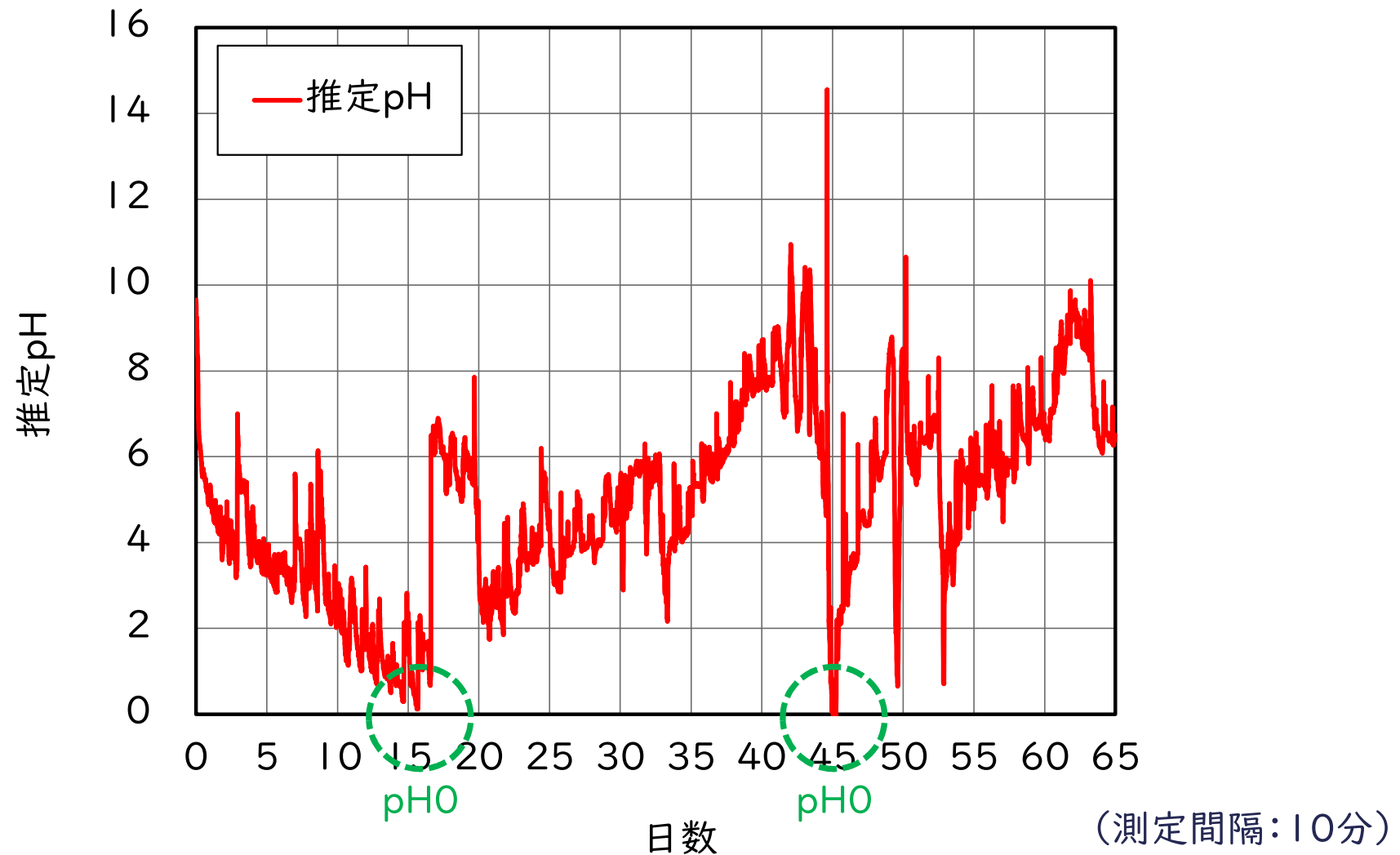
樹脂製リベットを用いて、先端部分を壁面に固定

遠隔pHモニタリングシステムによるpH測定結果



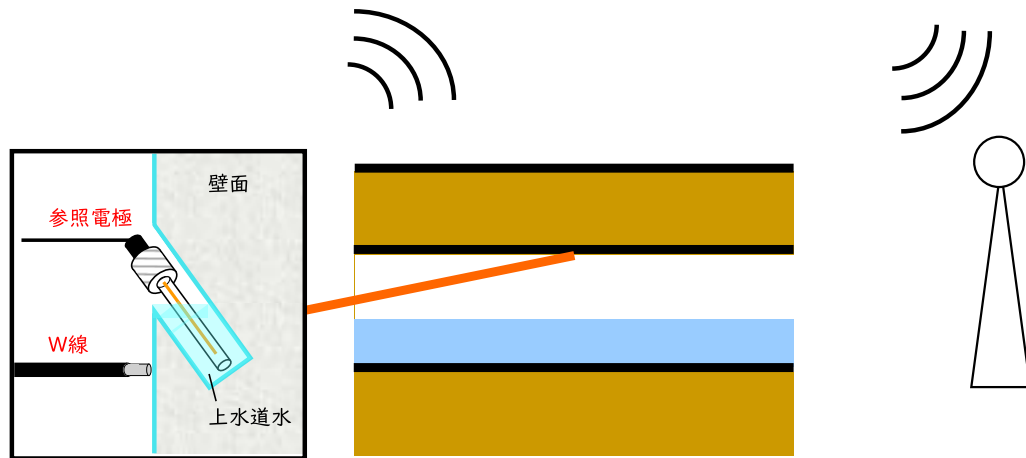
通信状態は良好であり、測定期間中に通信は途切れることなく、pHセンサで測定される微弱な電流を施設外で安定的に受信することができた。

遠隔pHモニタリングシステムによるpH測定結果



最も低いpHは0であり、コンクリートは厳しい劣化環境にあることが分かる。

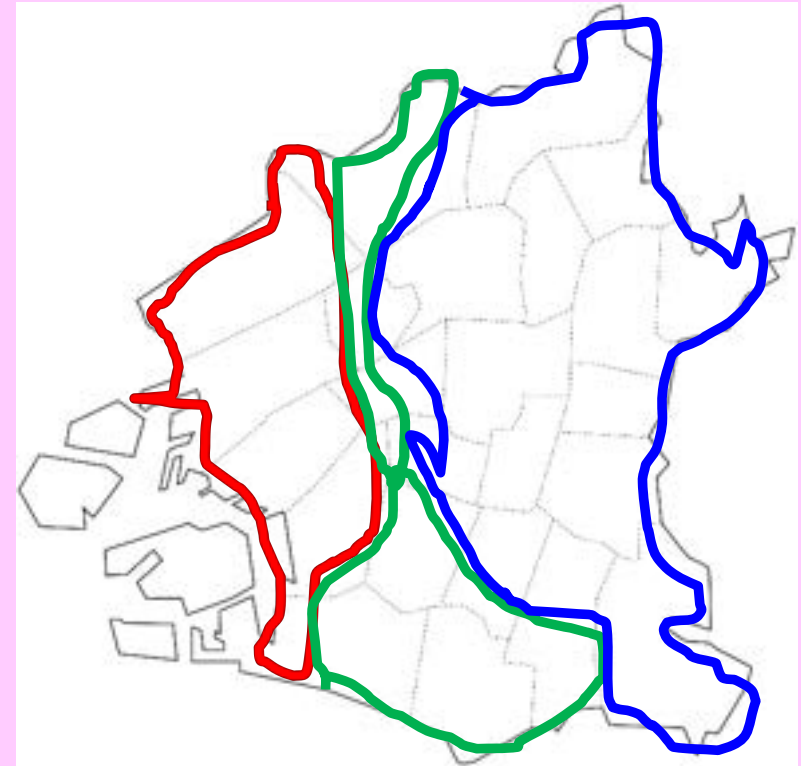
下水道関連施設の劣化予測に適用



pH等と劣化の関係

侵食シミュレーション

構造性能シミュレーション



- 5年以内に改修を要する。
- 10年以内に補修を要する。
- 緊急の対策は必要なし。