

# 品質評価を目的とした コンクリート微細構造観察の試み

株式会社大林組 東京本社 技術本部  
技術研究所 生産技術研究部 人見尚

# コンクリートとは？

- 骨材 : 砂と石 (細骨材と粗骨材)
- 接着剤 : セメント 石灰石を焼成  
これらを練混ぜて自然硬化させる

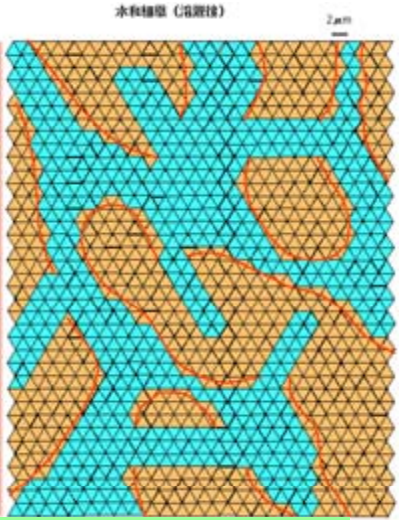


## コンクリート

- コンクリートは様々な材料を混ぜ合わせることができる → 工業材料としては異質
- 誰が作っても (一応は) できる → 自由度の多さ

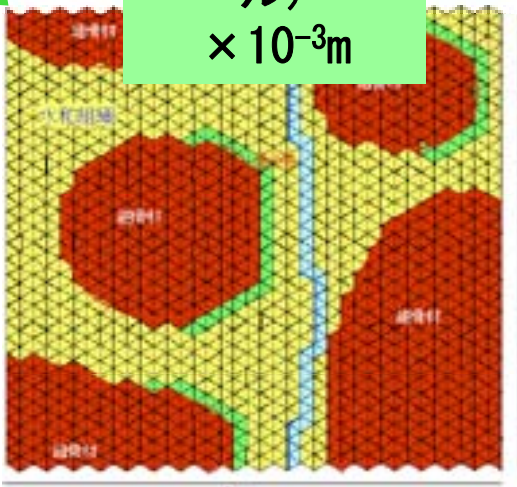
# コンクリートは階層構造をもつ

マルチスケールアナリシスが必要



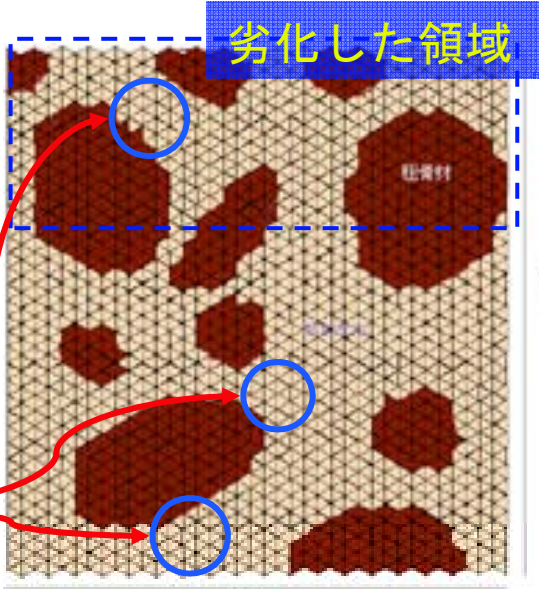
セメント硬化体  
(ミクロモデル)  
 $\times 10^{-6}m$

モルタル  
(メゾモデル)  
 $\times 10^{-3}m$



力学性能と  
拡散性能との  
関係は？

コンクリート  
(マクロモデル)



コンクリート内  
細孔構造・ひび割れ  
を捉える

この部分の  
何がどのように  
変化したか？

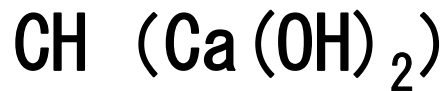
# コンクリートはどのような材料か？

セメント＋水＋砂（細骨材）＋岩石（粗骨材）

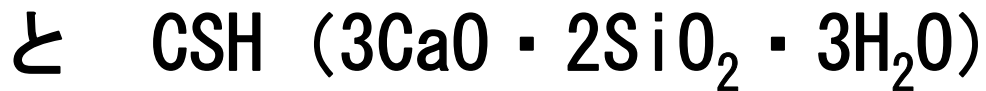
セメント＋水＝セメント硬化体

砂＋岩石で7割程度の容積！

セメント中のカルシウム-シリカ系化合物と反応して



水酸化カルシウム：水溶性



カルシウムシリケート化合物：難溶性

なる化合物を作る

セメント硬化体

- ・セメント硬化体はポーラス
- ・骨材との接着はあまりよくない

# セメントに使われるもの

コンクリートの性質を支配するのはセメント硬化体

セメント硬化体 → 結合材 + 水 + 粘度調整剤

## 結合材

- 1) 普通ポルトランドセメント  
← 石灰石の焼成
- 2) フライアッシュ  
← 火力発電所の石炭灰
- 3) シリカフェーム  
← 電解
- 4) 高炉スラグ微粉末  
←

副産物がコンクリートとして再生されている

# セメントに使われるもの

コンクリートの性質を支配するのはセメント硬化体

## セメント硬化体に副産物を使う理由

→ 大きな恩恵がある

1) 流動性の改善 (FA)

→ 充填性など施工性が良くなる

2) 強度の向上 (SF)

→ 高強度コンクリート

3) 耐久性の向上

→ コンクリートは化学反応で劣化

4) アルカリ性の低下

→ 他の資材への悪影響を抑える

# セメントペーストの化学構成

水酸化カルシウム **CH** :

$\text{Ca(OH)}_2$  強アルカリ : 水溶性

カルシウムシリケート化合物 **C-S-H** :

$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  弱アルカリ 難溶性

モノサルフェート **AFm** :

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

エトリンガイド **AFt** :

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  膨張性

化学的に安定なセメントペーストは

1. ち密であるもの
2. C-S-Hを主成分とするもの  
ケイ素+CHの反応を促進(ポゾラン反応)

# コンクリートの品質を評価する

コンクリートの性質を支配するのはセメント硬化体

評価の指標；

- 1) 空隙構造
- 2) 応力に対する応答(弾性・破壊挙動)
- 3) ひび割れの形状と長期的な変化(自己治癒)



# コンクリートの内部構造を見る

## 1. 輪切りにして観察する

微小厚さを研磨除去し，平滑面を出し，表面観察を行う。  
この繰り返し

問題点：像からどうやって空隙を判別するか？  
微小研磨や観察面を精度良くそろえられるか？

## 2. 非破壊で観察する

試験体にCT撮影を施す

問題点：線源に何を使うか  
試験体の大きさは？  
そもそもそのような装置はどこに

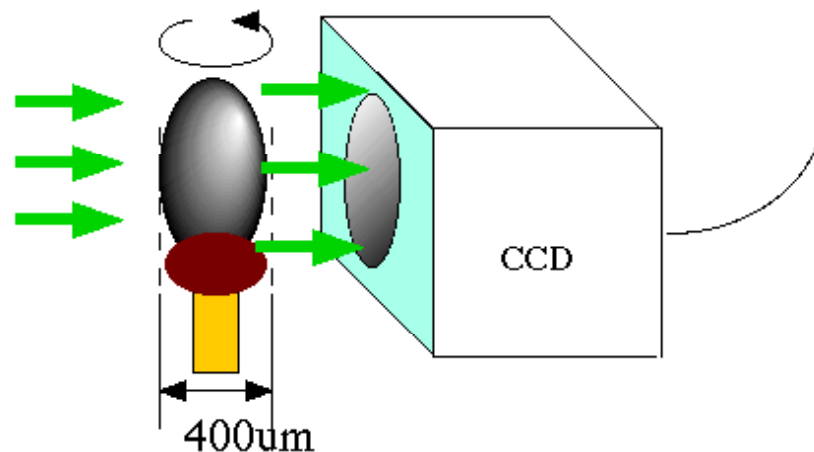
X線CT撮影 - SPring-8

# X線CT撮影の実施

SPring-8で実験を行うことの利点

1. 最適なエネルギーを選択できる
2. 高分解能である

## 試料の撮影



0° ~180° まで、1500枚の透過像  
(レントゲン写真) を撮影し、  
そこから断面図を再構成する

# X線CT撮影での工夫・問題点

## 1) 試料作成

初期は幅0.5mm以下, 現在は1mm以下

CO<sub>2</sub>による炭酸化を避けるため, 現地生産(ビームライン横)  
人工が必要(単純作業に・・・) → パッケージ化

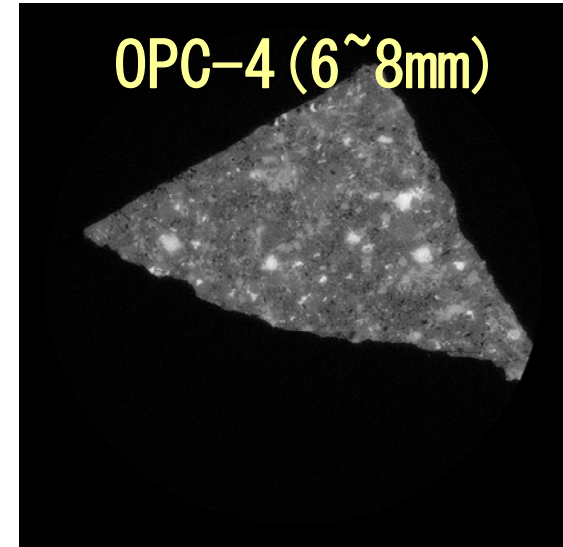
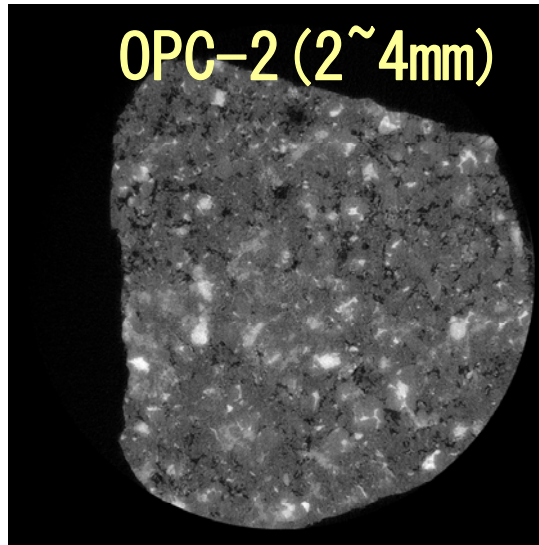
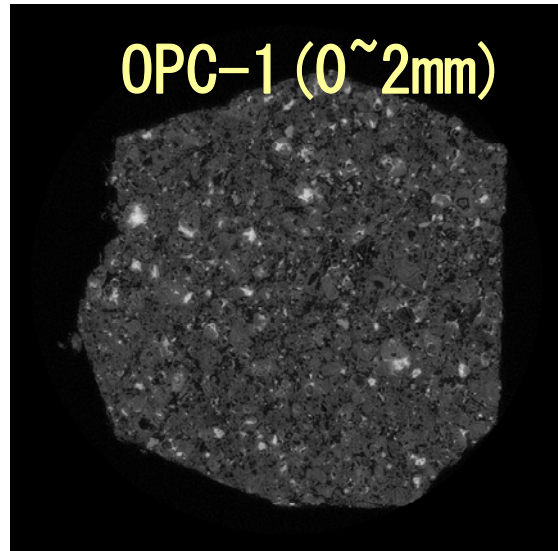
## 2) 位置決め

個別に治具に → 個別に中心決定  
時間のロス(パッケージ化, 支持台などの作製)

## 3) 撮影シーケンスの長さ・タイミング

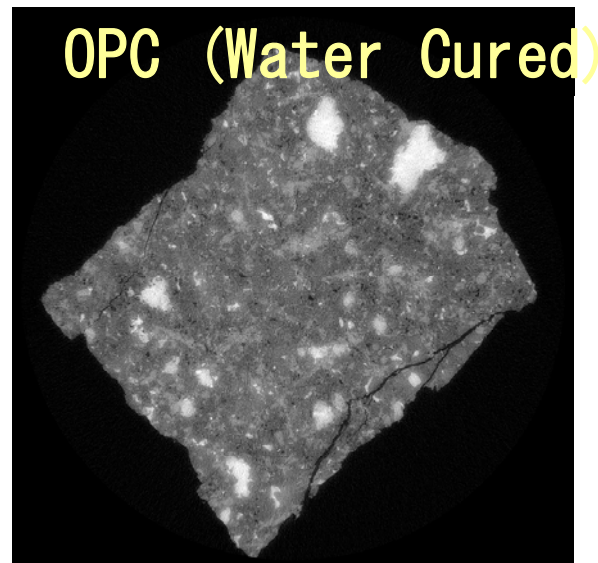
初期の撮像時間(3時間) → 現在(20分:20XU, 3時間:20B2)  
ビームのドリフト(冷却系に起因)

# Cross Sections of X-ray Absorption



Dark :  
Low-density

Bright :  
High-density



Leached  
Cement Hardenings  
→ Darker  
→ Supposed to be porous

# X線CT撮影の結果をどうするか

## 1) 断面図作成

専用の処理ソフト利用可能 → 再構成中心を探す

1000～2000枚程度作成 10時間程度

CUDAを使うと数分 ← プログラミングスキルを要する

## 2) どのような知見を得るか

非常に有用なデータ → 空隙のみならず水和物の情報

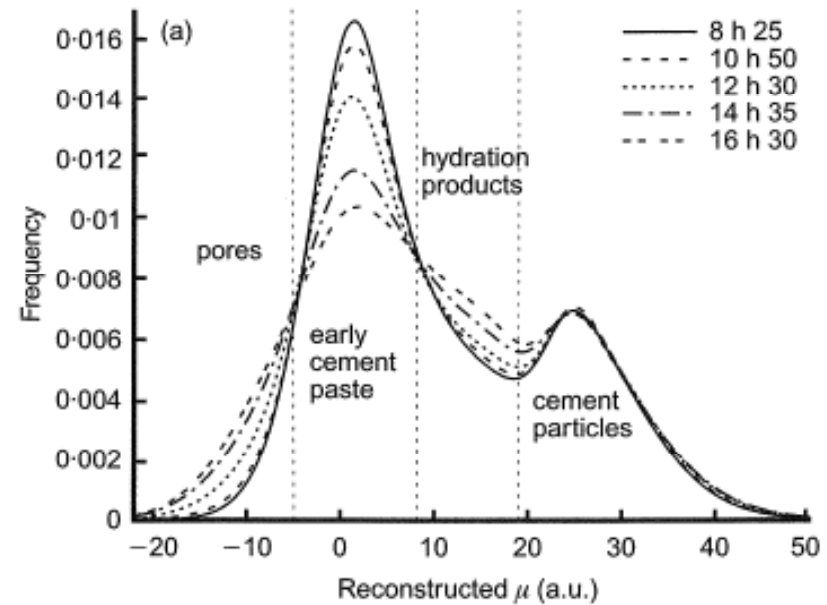
2Dで考えるか, 3Dで考えるか

# 注目領域の抽出

## 注目領域の水和物を抽出

手順)

1. 注目領域の設定
2. 空隙の抽出(デジタル化)
3. 水和物の抽出(デジタル化)
4. 各構成材の合成
5. (アニメーションなどの加工)

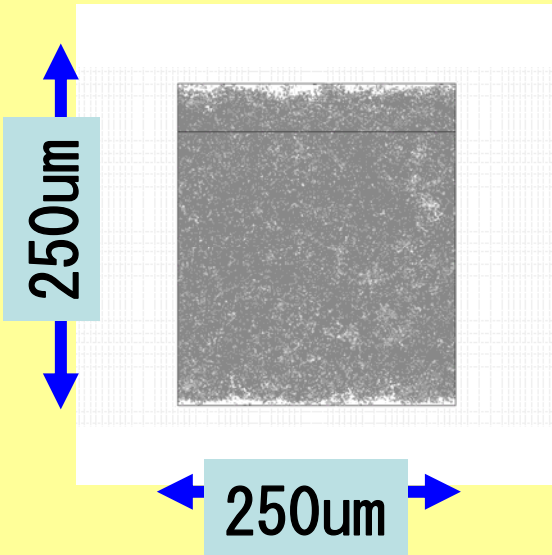


主として, Slice(産総研中野氏ら), ImageJを使用  
デジタル化に際してのしきい値

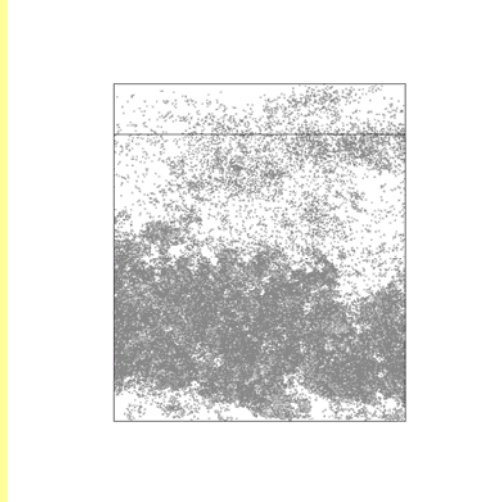
- 1) 輝度の0~ピーク値の半分(産総研中野式:フィルター依存)
- 2) 輝度の立ち上がり部分の変曲点(ローザンヌ工科大式)

# Pore 3D imaging

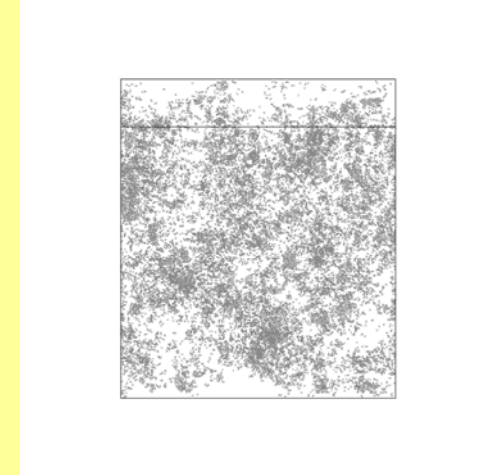
OPC-1 (0~2mm)



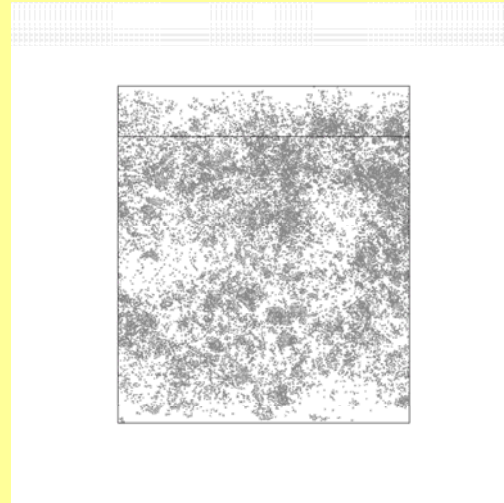
OPC-2 (2~4mm)



OPC-4 (6~8mm)



OPC (Water Cured)



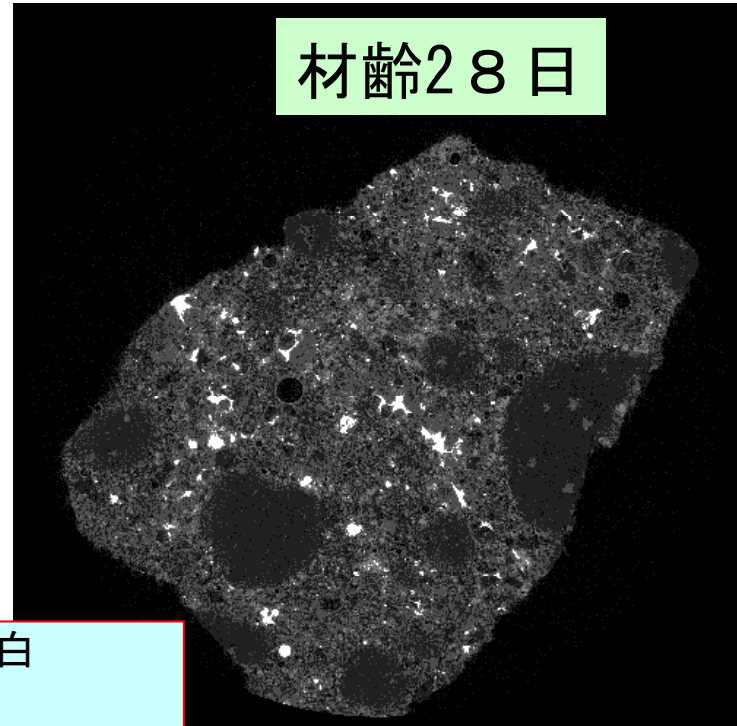
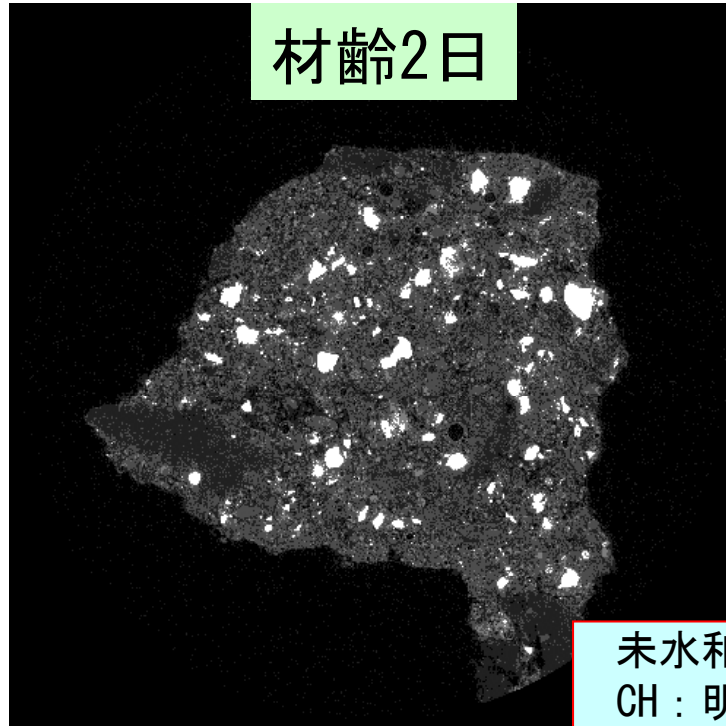
Observed domain;  
Center Area (no  
air)  
500 x 500 x 500  
voxels  
(250 x 250 x 250  
um)





# セメント硬化体の断面

普通ポルトランドセメント硬化体の初期材齢試料の観察



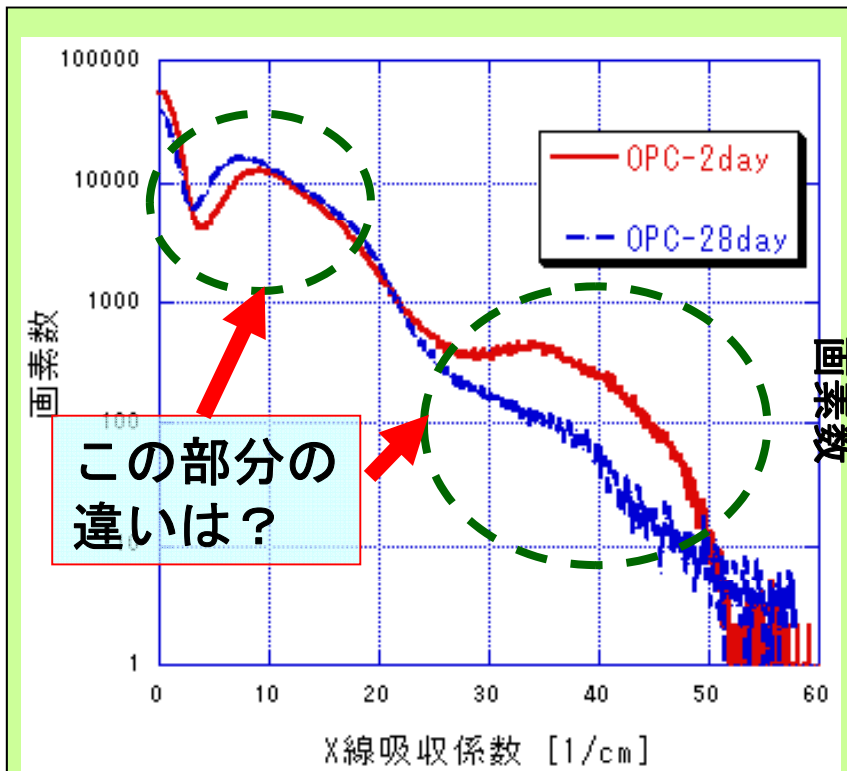
未水和セメント：白  
CH：明るい灰色  
CSH： 中間灰色  
その他水和物： 暗灰色

材齢の進行により構成材の割合の変化が見られる

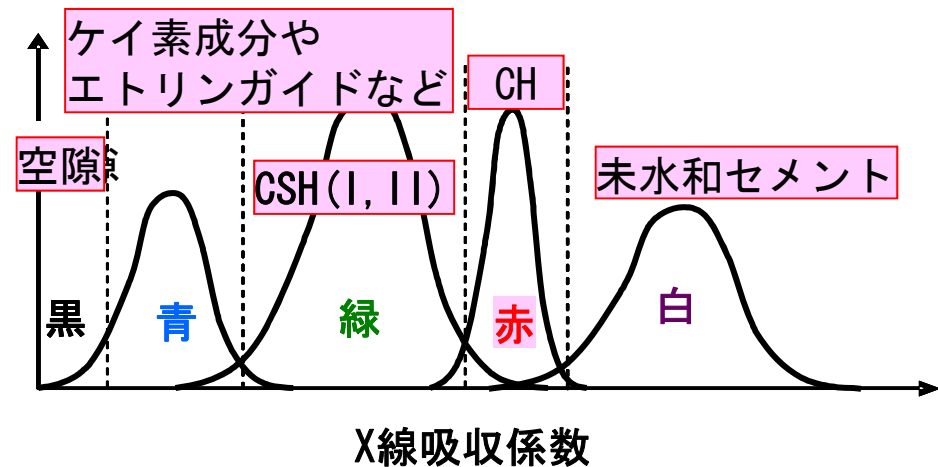


# セメント水和物成分の空間分布

セメントの硬化過程で成分が変わる



X線吸収係数による画素数の  
ヒストグラム(縦軸対数表示)



これらの構成物割合の差が  
ピークとなって現れるのでは？

# X線CT撮影の結果をどうするか

## 1) 空隙の構造をどう解釈するか

- 3D空隙は抽出できた → 独立・連結がありそう
- これらをどう分類するか → 形の科学の領域へ
- 最終的には物質移行経路 → 分解能以下の空隙の解釈
- 既存測定法の再評価 → 水銀圧入法などは何を測定？

## 2) 水和物の分布をどう解釈するか

- 精度に欠ける → 分布にはオーバーラップ：工学的割り切り
- 配合(調合)設計へ → 順列組合せ, 材齢：X線回折と連結
- 劣化の進行 → 材齢, 同一領域, 空隙：劣化促進法
- 応力に対する応答 → その場試験装置, 同一領域

# 大きな問題：コンクリートのひび割れ

## 初期のひび割れ

水和固化時の発熱と冷却における  
各材料の膨張収縮比の差

## 中長期的なひび割れ

CO<sub>2</sub>による炭酸化：  
コンクリートのアルカリ度を減らす  
→ 腐食による鉄筋の膨張

## 根本的な性質

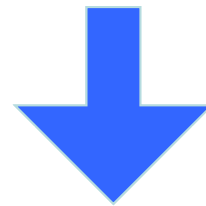
コンクリートは高脆材料である

ひび割れの防止は、コンクリートの最重要課題



# 加力によるセメント硬化体の挙動

- ミッション：1. セメント硬化体の変形挙動の把握  
→ 構成材で伸び挙動をするもの？
2. セメント硬化体の破壊の初期過程の把握  
→ 破壊はどこから発生するか？



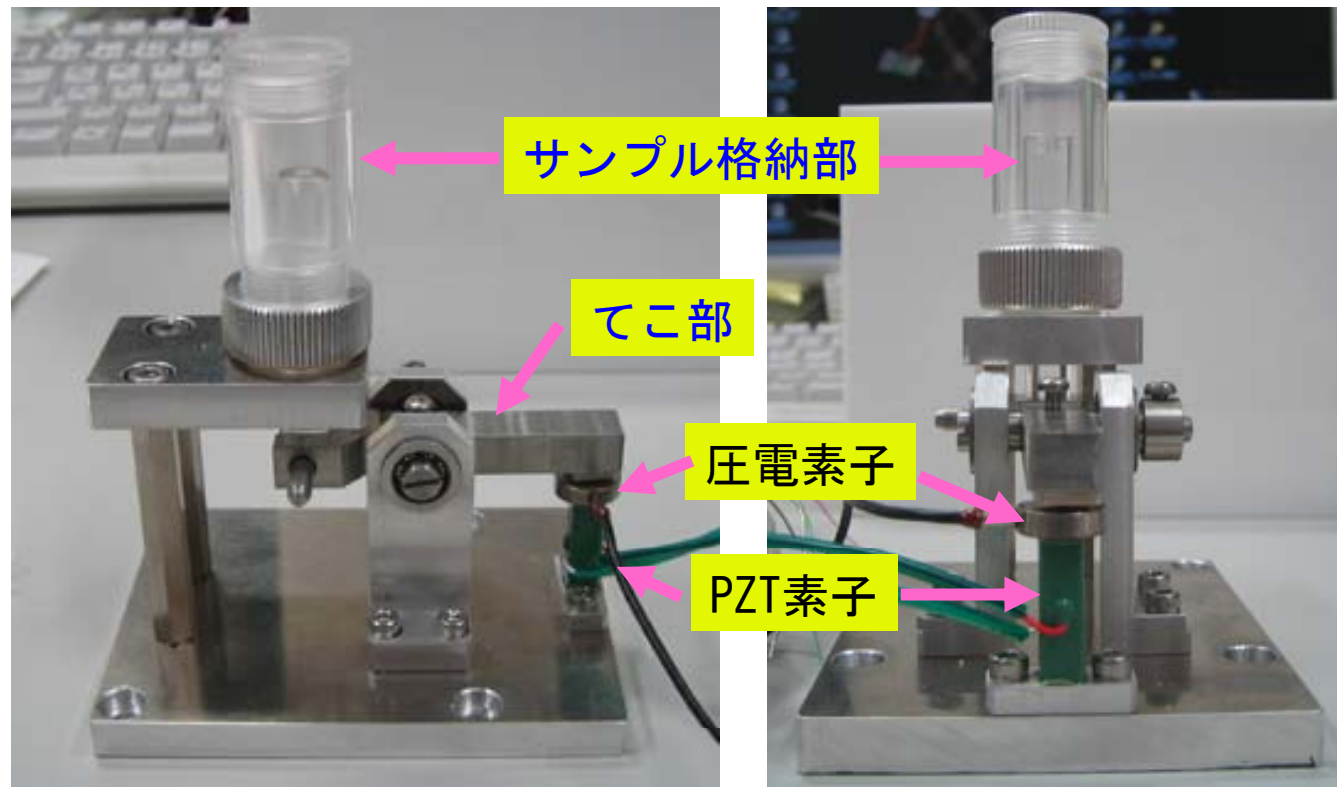
セメント硬化体変形挙動のその場観察

# 加力試験のX線CTによるその場観察：装置の製作

微小加力試験装置を製作

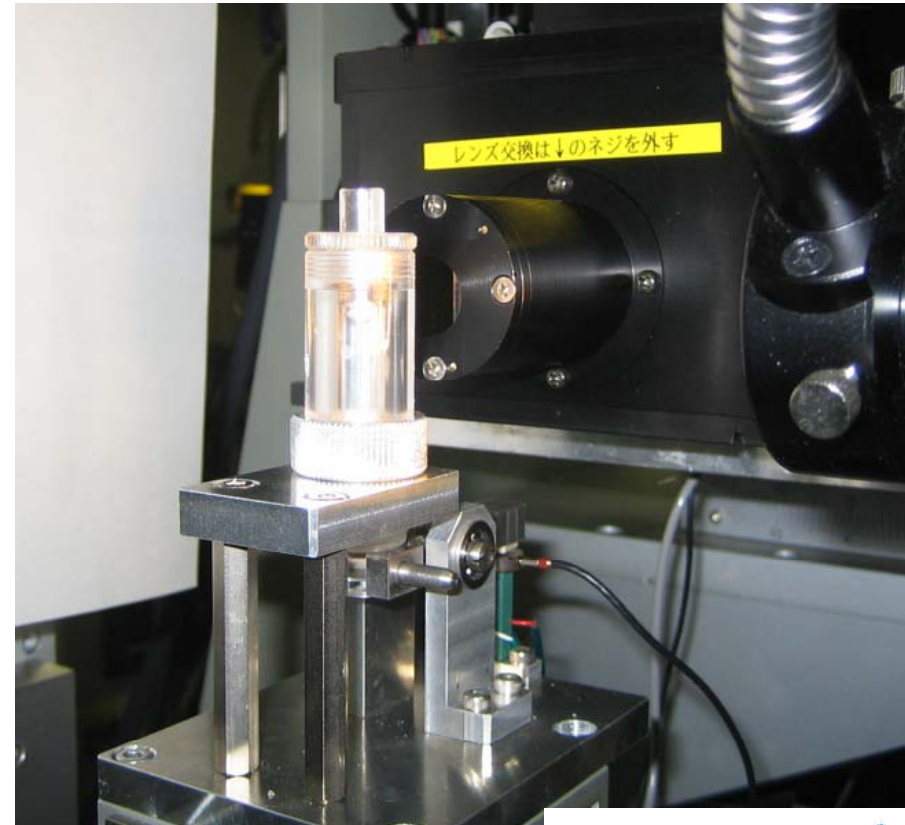
X線CT装置に収まる 引張り試験を行う

ストロークは $10\mu\text{m}$ もあれば十分と考えられた



# 加力試験のX線CTによるその場観察：試験体

- ・ 試験体はセメント硬化体
- ・ CTの視野に収まるように1.0mm角の棒材に加工
- ・ 端部はエポキシで接着



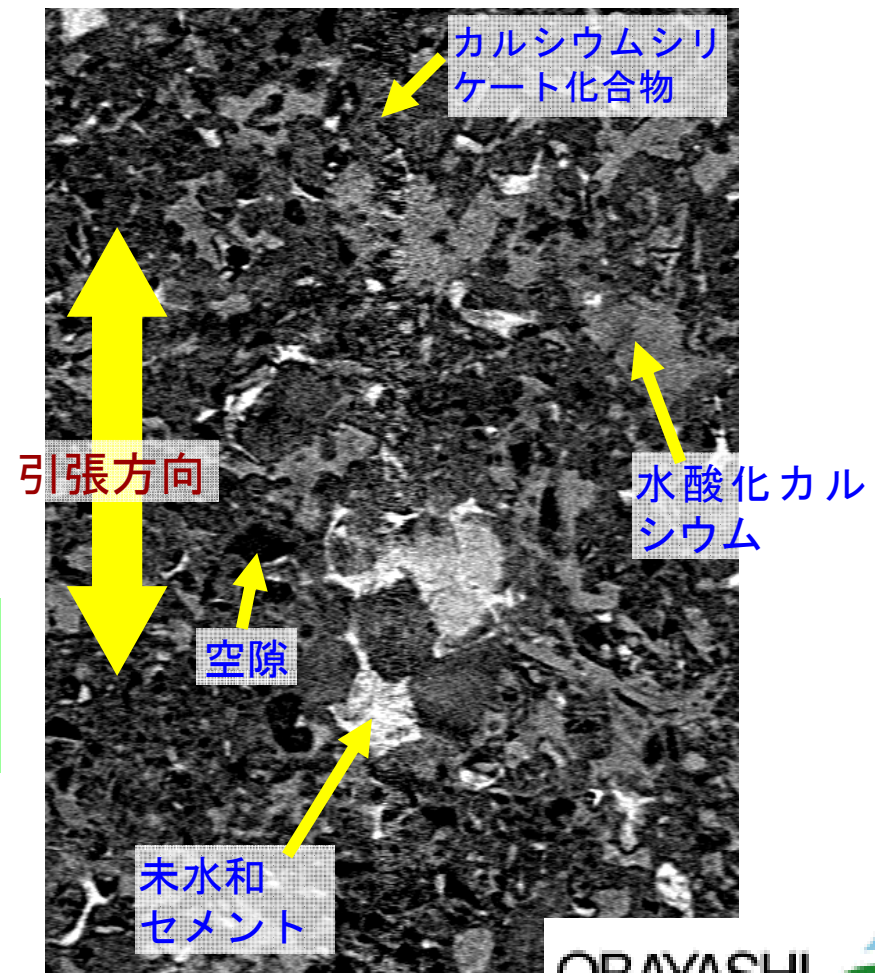
# 撮影結果の一例

・ 結果として…  
試料が破断に至ら  
なかった。

- ・ エポキシの弾性変形？
- ・ ストローク不足？
- ・ PZTの変形はあったはず  
だが. .

撮影した断面に対し  
水和物の推定を行う

普通ポルトランドセメントの  
断面は明瞭に撮影できた



# 画像の比較による変形状況の分析

- ・ 引張り試験によって、内部組織は変化したか？
- ・ 引張り試験前後の同一断面を抽出し、重ねあわせを行うことで、変化を検出
- ・ 幸い、試料の移動はほとんど無かった。

## 手順

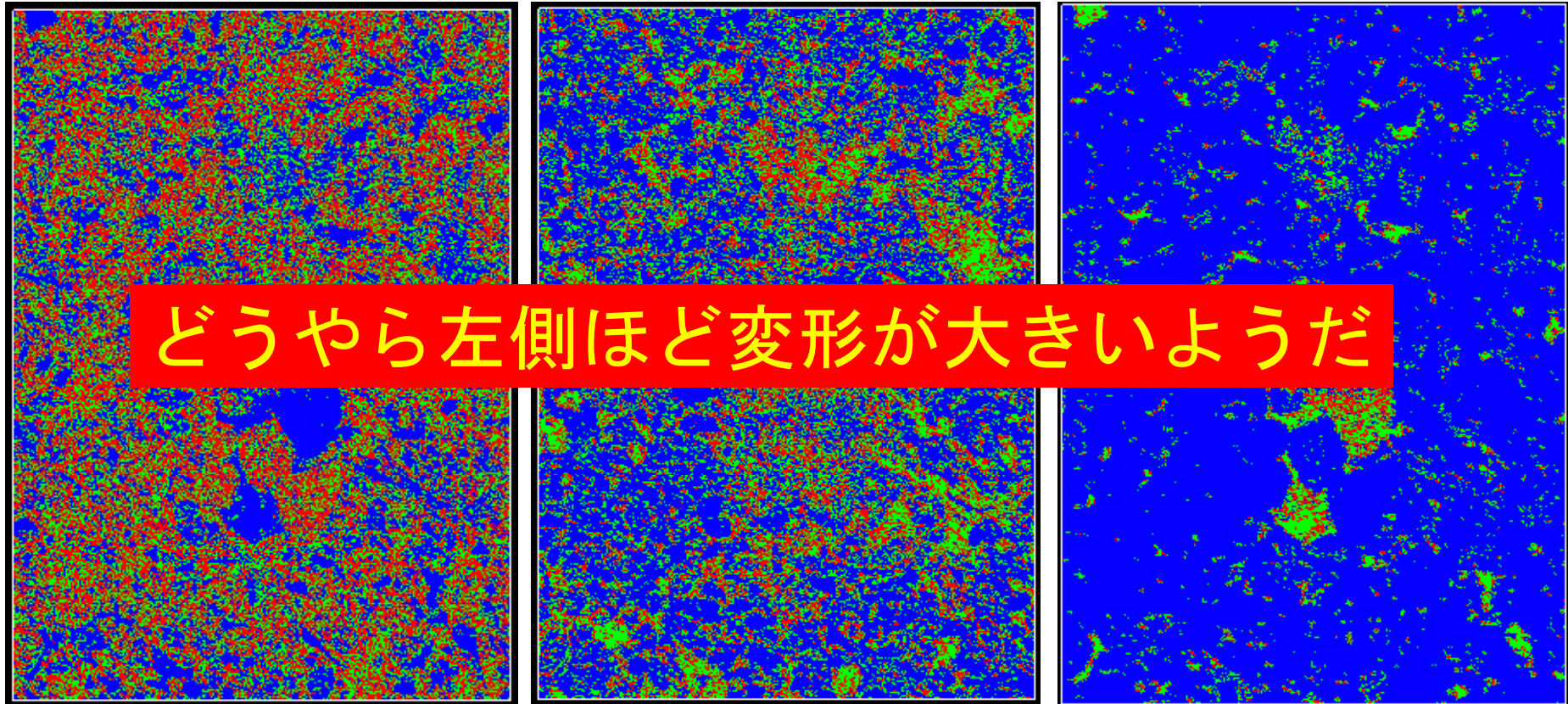
- 1) 同一断面の特定
- 2) 多値化による各物質の抽出
- 3) 数値データへの変換
- 4) 比較
- 5) 可視化





# 画像の比較による変形状況の分析結果

- 変化の検出結果 (青 : 別物質, 緑 : 変形無, 赤 : 変形)



どうやら左側ほど変形が大きいようだ

カルシウム  
シリケート化合物

水酸化カルシウム

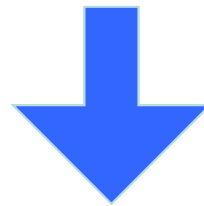
未水和セメント

# 浸漬によるモルタルの自己治癒

ひび割れが自動で治ることは無いのだろうか  
→

モルタルを用いた試験 (20B2)

- ミッション：1. ひび割れ形状の把握  
→ 構成材で変わるもの？
2. セメント硬化体の破壊の初期過程の把握  
→ 破壊はどこから発生するか？



浸漬試験によるモルタル自己治癒の観察

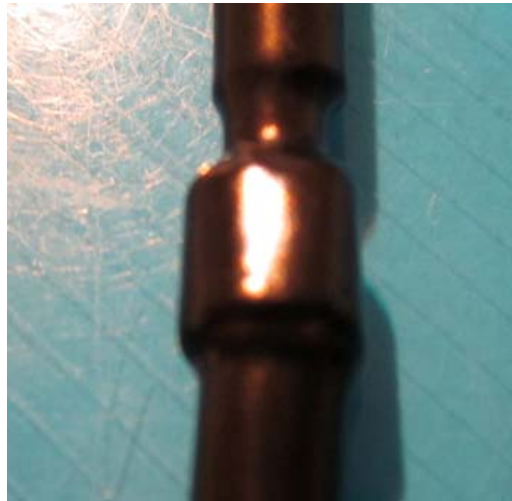


# 分析に用いた供試体

円筒状に加工，熱収縮チューブで固定，ひび割れ導入



幅5mm程度の  
円筒形に加工



通水用のチューブとともに  
熱収縮チューブで固定  
割裂によりひび割れを導入



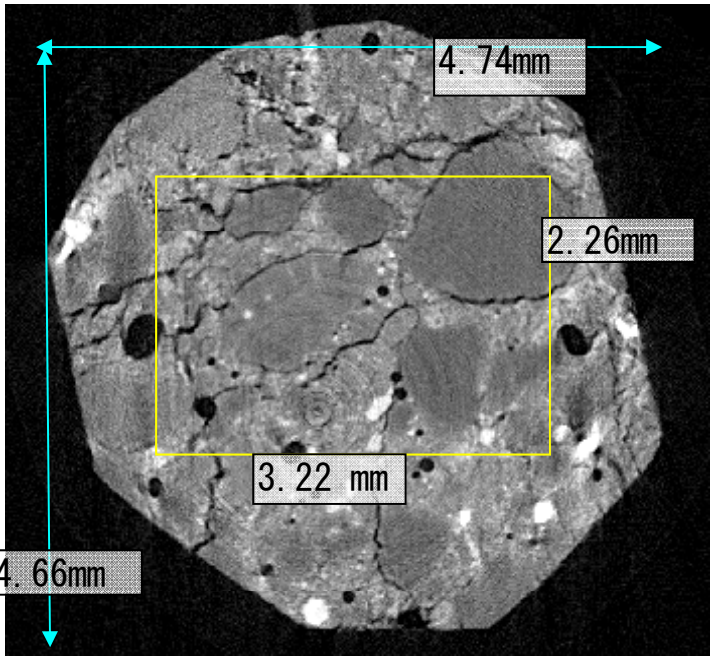
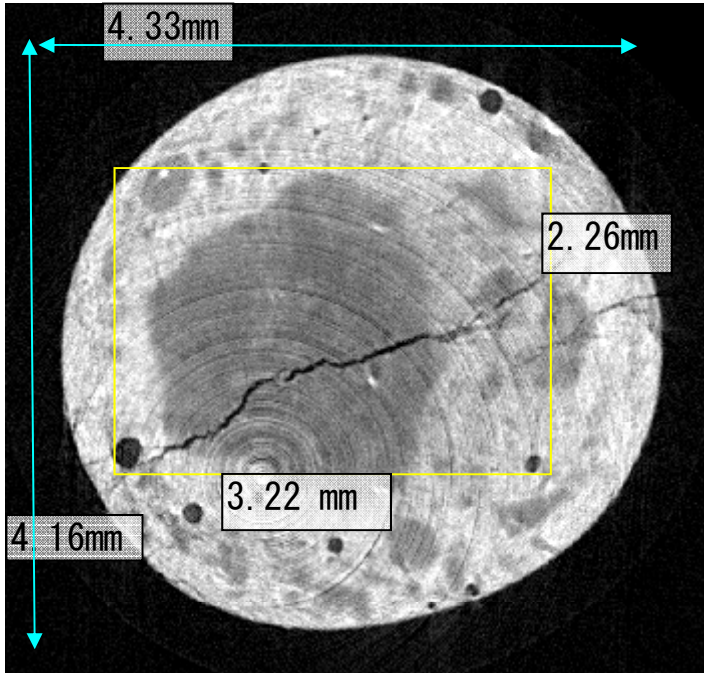
上から静水圧によって  
通水を行う

通水期間：2日間



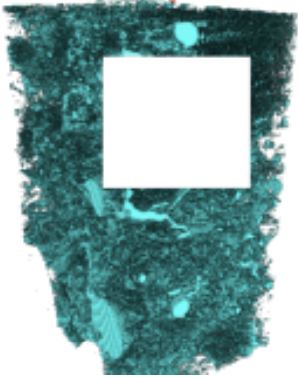
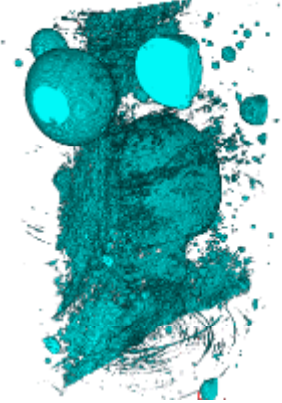
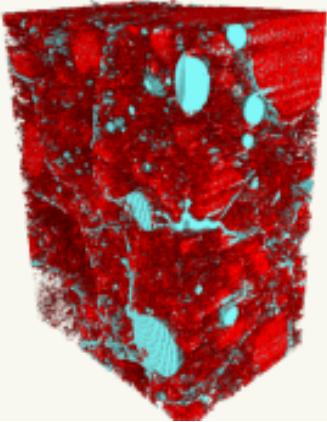
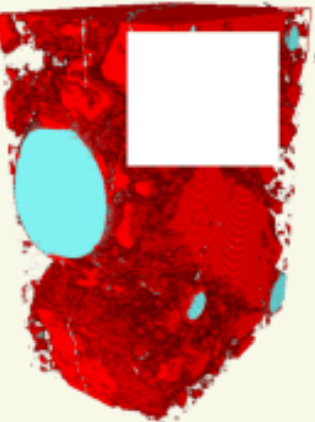
# 断面の観察結果

明るさに着目しそれぞれの材料を抽出：空気，細骨材，セメントペースト

供試体名		OPCモルタル	HSCモルタル
通水前	断面全体		

ひび割れの入りが異なる  
セメントペーストの強度の差

# ひび割れの3次元構造

供試体名		OPCモルタル	HSCモルタル
通水前	空隙 (ひび割れ)		
	空隙と 細骨材		

高さ方向に800枚の断面を集積し立体像を構成

OPCでは細骨材の周囲にひび割れが分布

HSCでは平板状にひび割れが存在する

骨材⇔セメントペースト強度の差に起因する

# 前後というからには比較をしたい

撮影後，試料を取り外し，  
通水試験を行い，再度観察

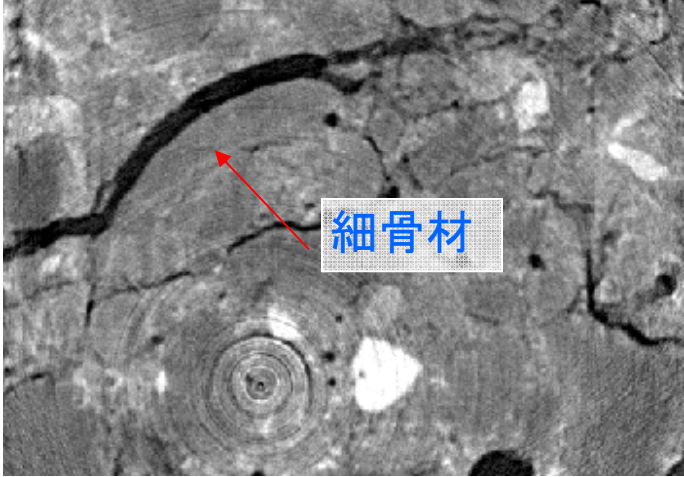
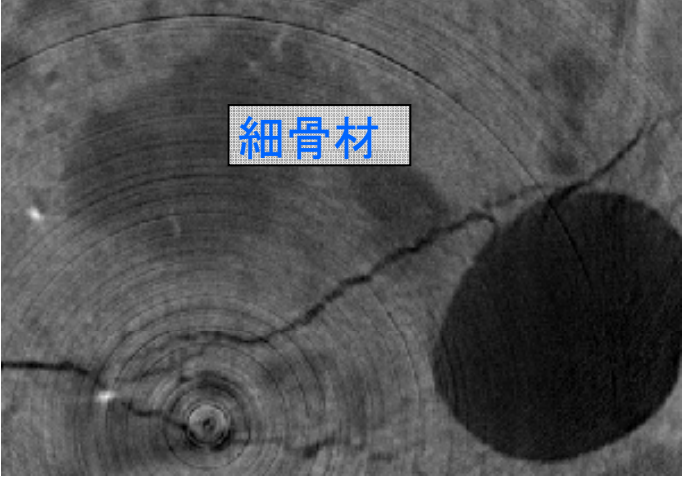

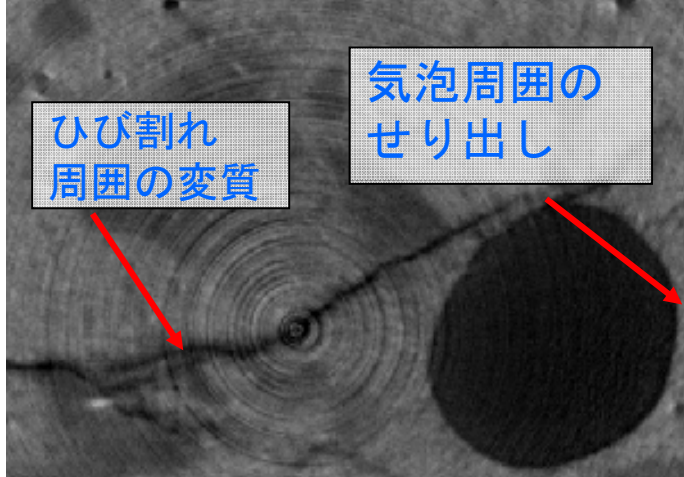
通水前後の画像を重ね合わせる

- 位置合わせを行う必要
  - 1) 撮影時， 2) 画像処理時

試料を同じ位置に固定して撮影：限界が

- 画像処理により位置合わせを
  - 1枚ずつはできるのだけど・・・

# 通水試験前後の変化

供試体名		OPCモルタル	HSCモルタル
R01	通水前		
	通水後		

# まとめ

SPring-8においてコンクリート要素のX線CT観察.

1. 観察を行う
2. 応用に拡張する。様々な開発改善要素
3. 少しずつできることは増えてきている。
4. 色々な知識の総動員(特に画像処理, PCによる)
5. その他の分析技術との連成