

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

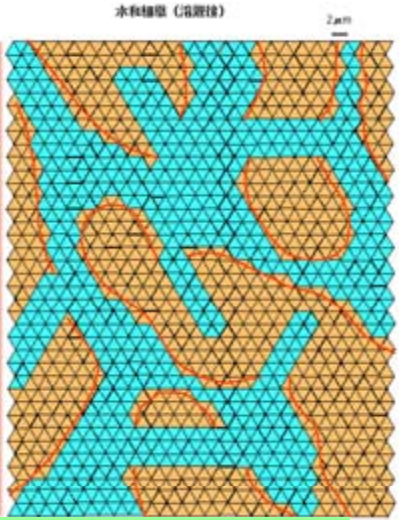


コンクリート

- 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

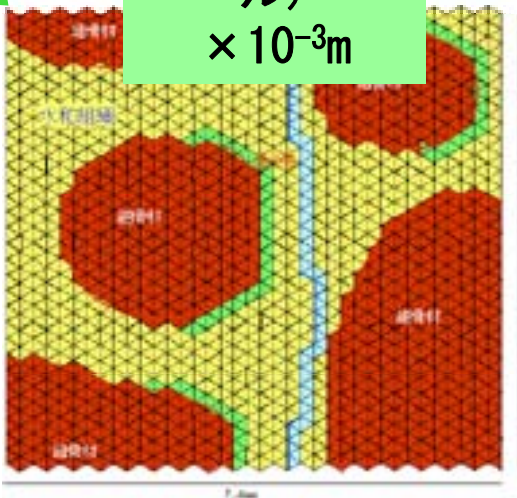
マルチスケールアナリシスが必要



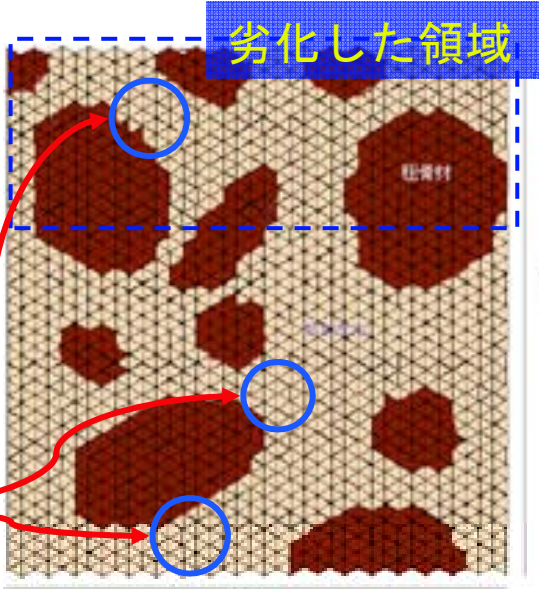
セメント硬化体
(ミクロモデル)
 $\times 10^{-6}m$



モルタル
(メゾモデル)
 $\times 10^{-3}m$



コンクリート
(マクロモデル)



力学性能と
拡散性能との
関係は？

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？

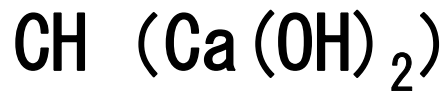
コンクリートはどのような材料か？

セメント＋水＋砂（細骨材）＋岩石（粗骨材）

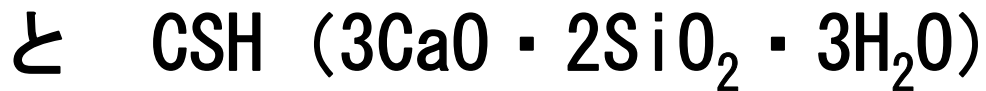
セメント＋水＝セメント硬化体

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) シリカフューム
← 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 :

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

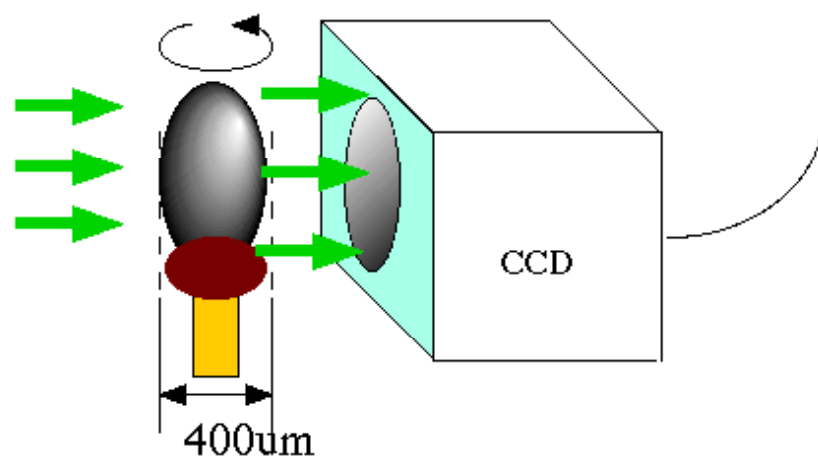
X線CT撮影 - SPring-8

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

CO₂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

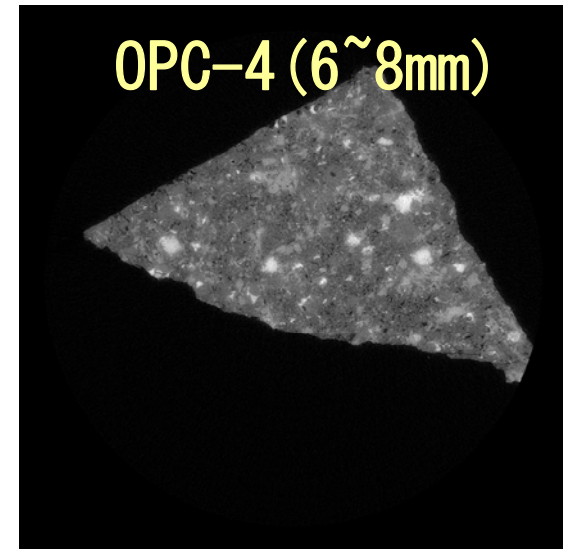
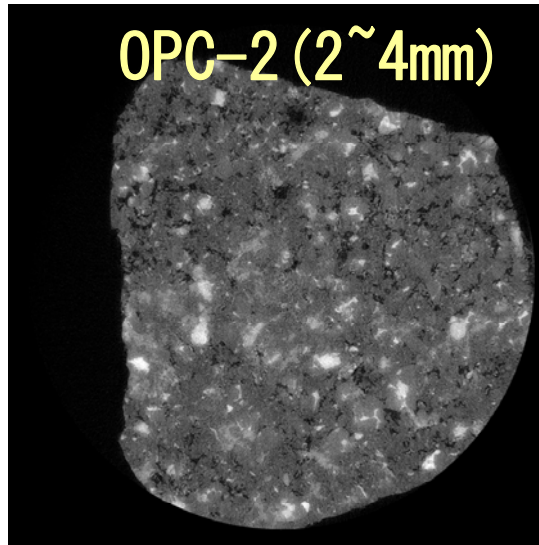
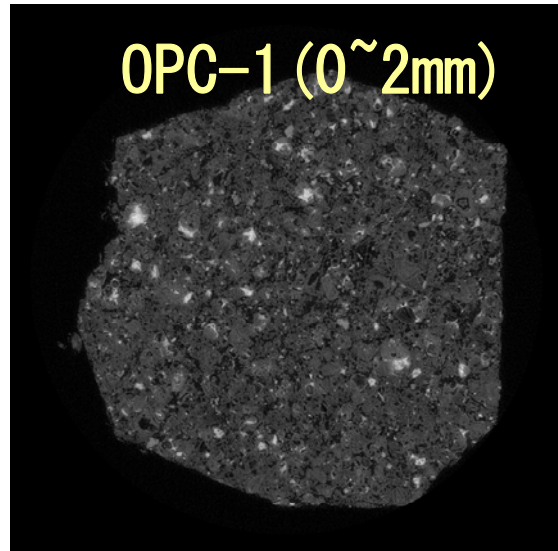
2) 位置決め

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

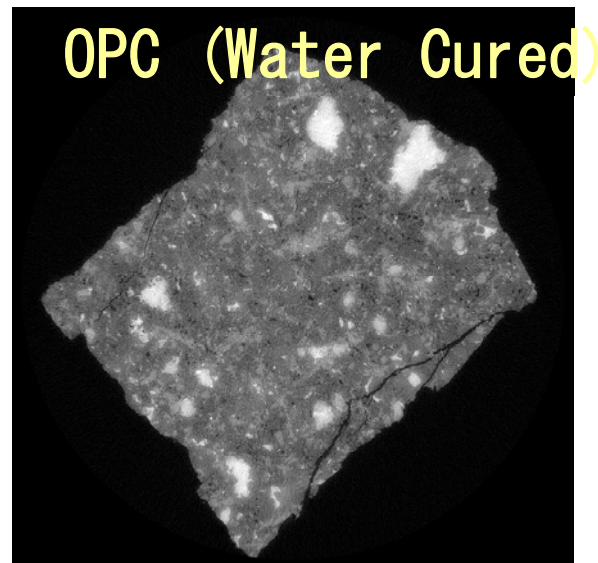
初期の撮像時間(3時間) → 現在(20分:20XU, 3時間:20B2)
ビームのドリフト(冷却系に起因)

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

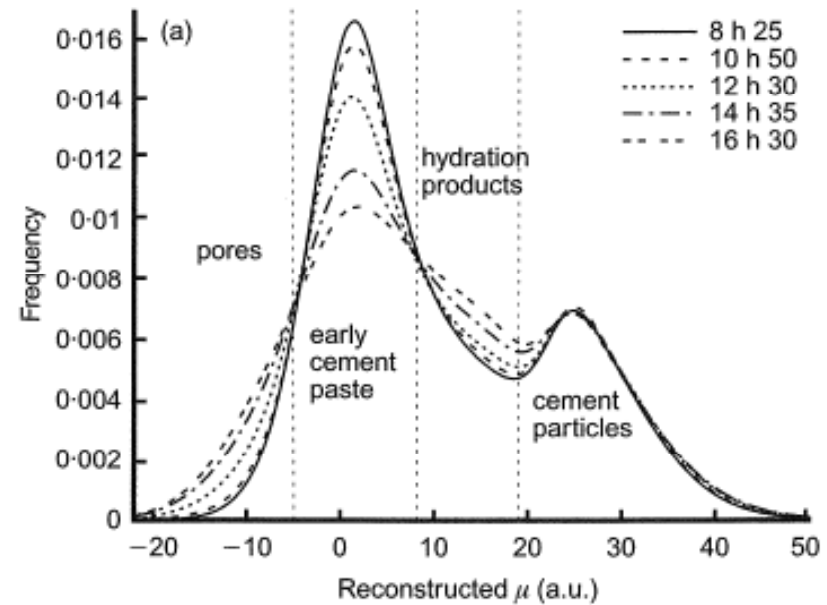
2Dで考えるか, 3Dで考えるか

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)

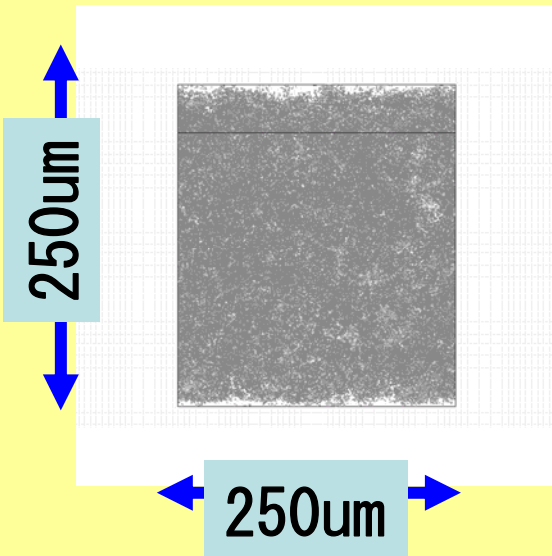


主として, Slice(産総研中野氏ら), ImageJを使用
デジタル化に際してのしきい値

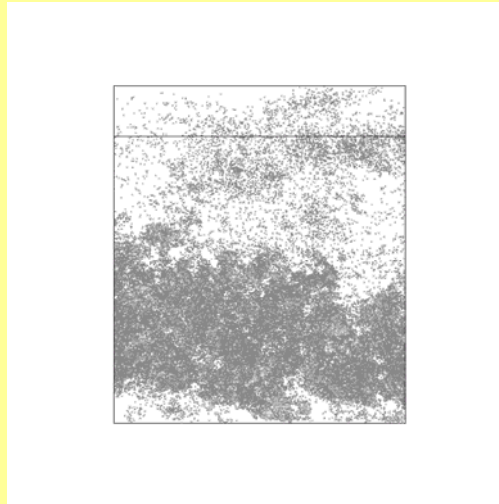
- 1) 輝度の0~ピーク値の半分(産総研中野式:フィルター依存)
- 2) 輝度の立ち上がり部分の変曲点(ローザンヌ工科大式)

Pore 3D imaging

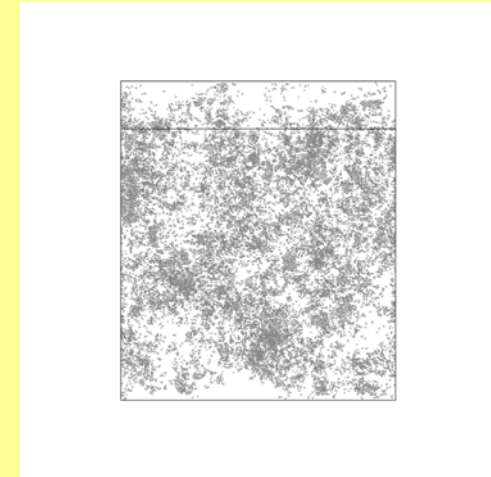
OPC-1 (0~2mm)



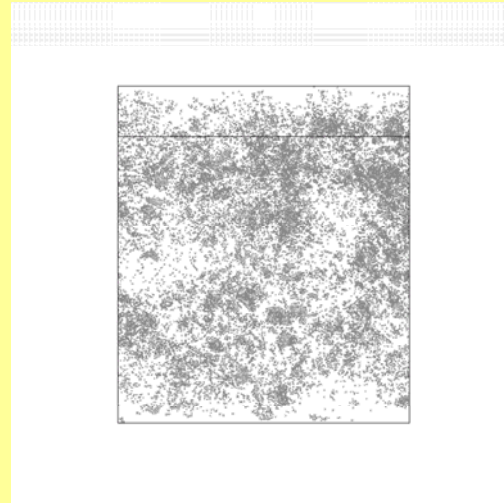
OPC-2 (2~4mm)



OPC-4 (6~8mm)



OPC (Water Cured)

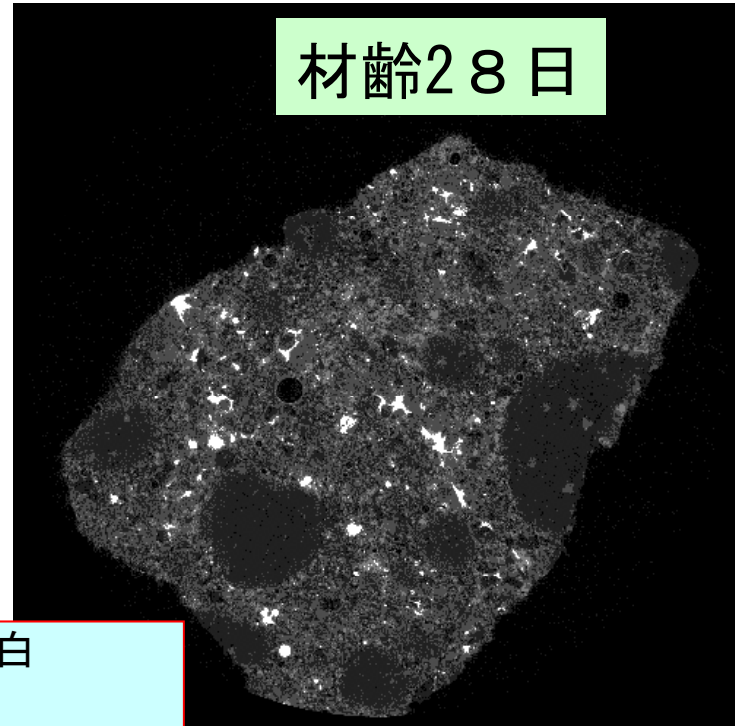
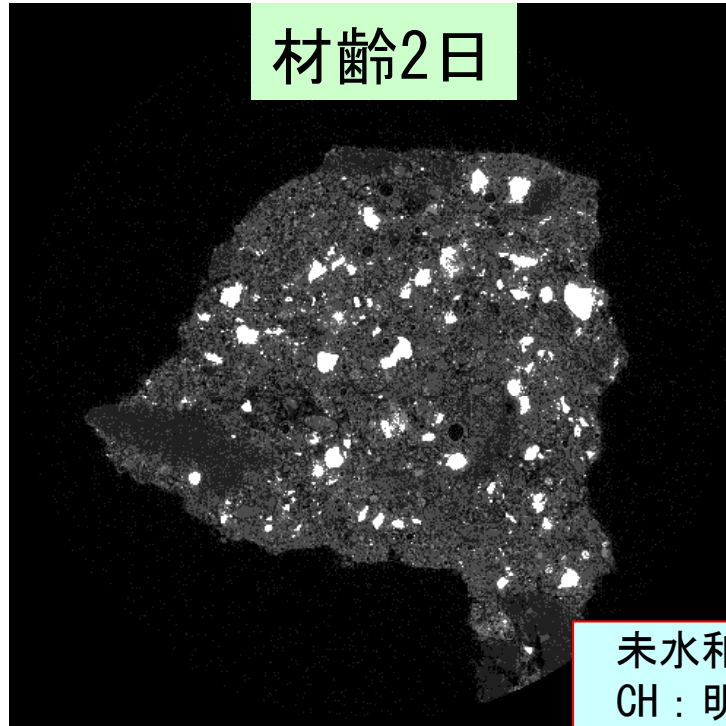


Observed domain;
Center Area (no
air)
500 x 500 x 500
voxels
(250 x 250 x 250
um)



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

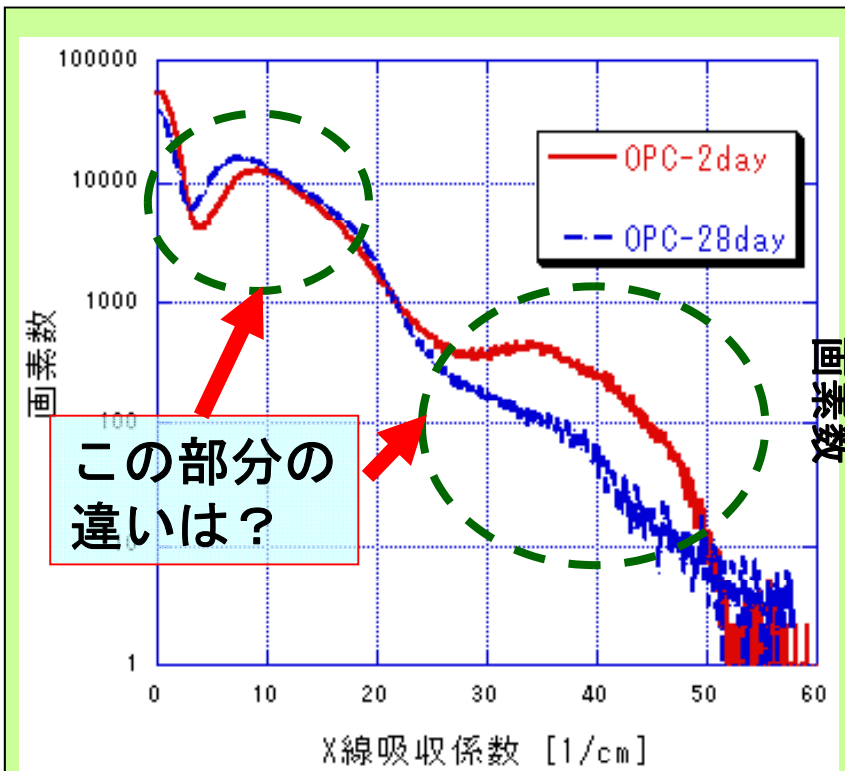


未水和セメント：白
CH：明るい灰色
CSH：中間灰色
その他水和物：暗灰色

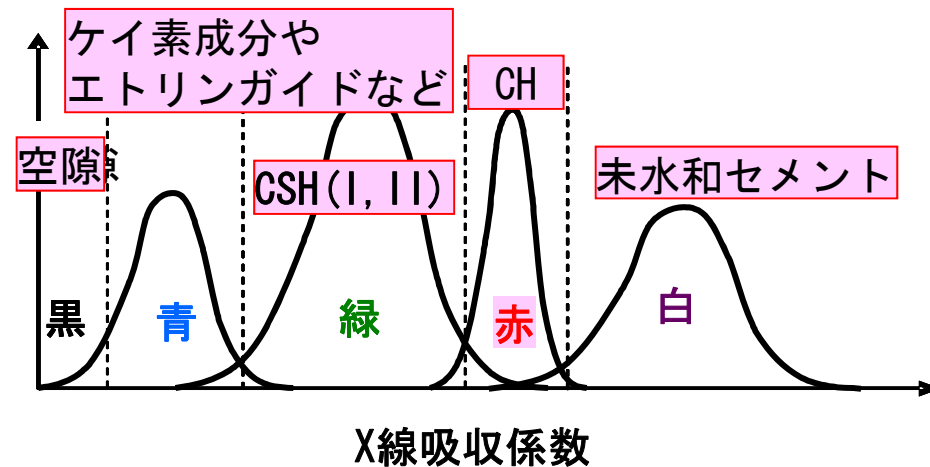
材齢の進行により構成材の割合の変化が見られる

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

CO₂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？



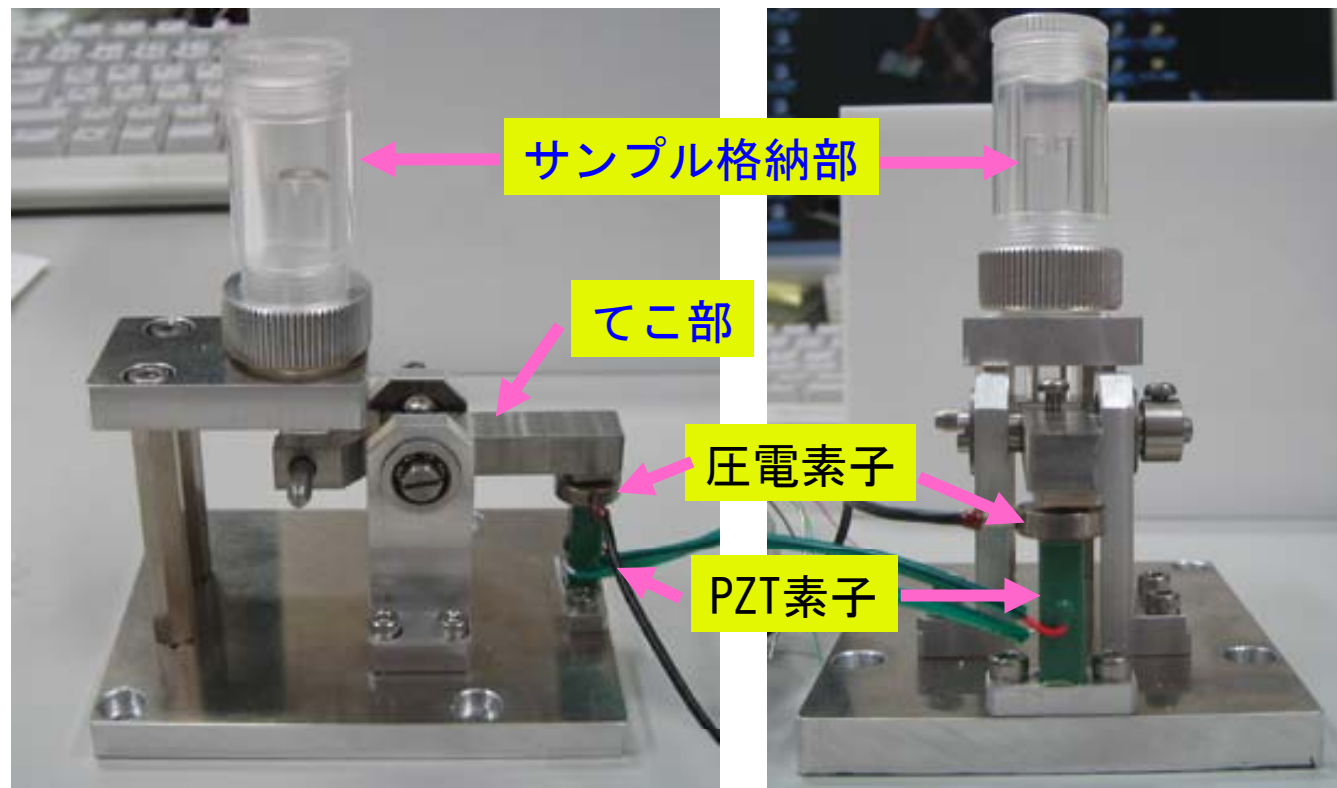
セメント硬化体変形挙動のその場観察

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

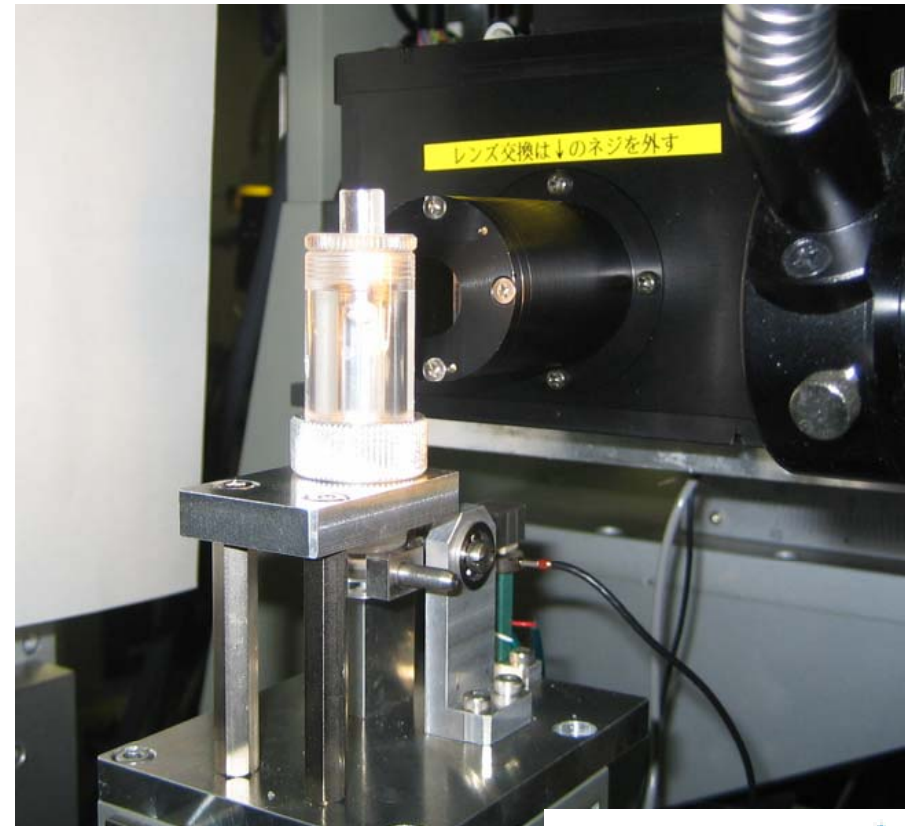
X線CT装置に収まる 引張り試験を行う

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



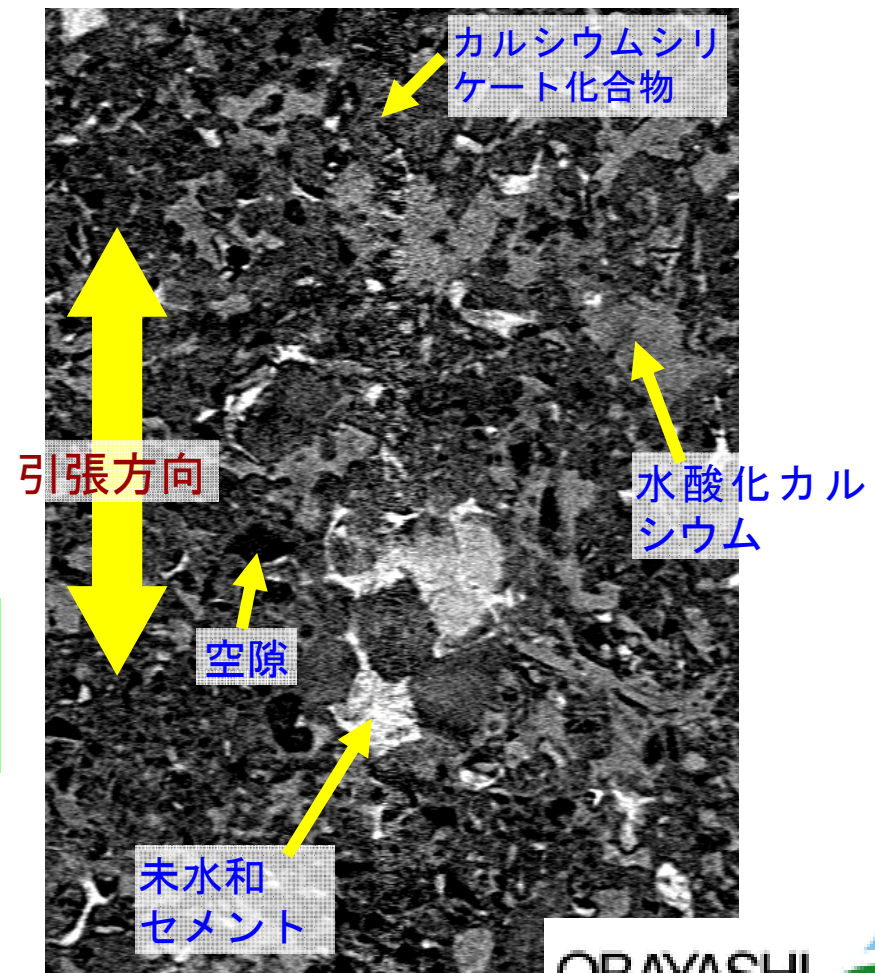
撮影結果の一例

・ 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。

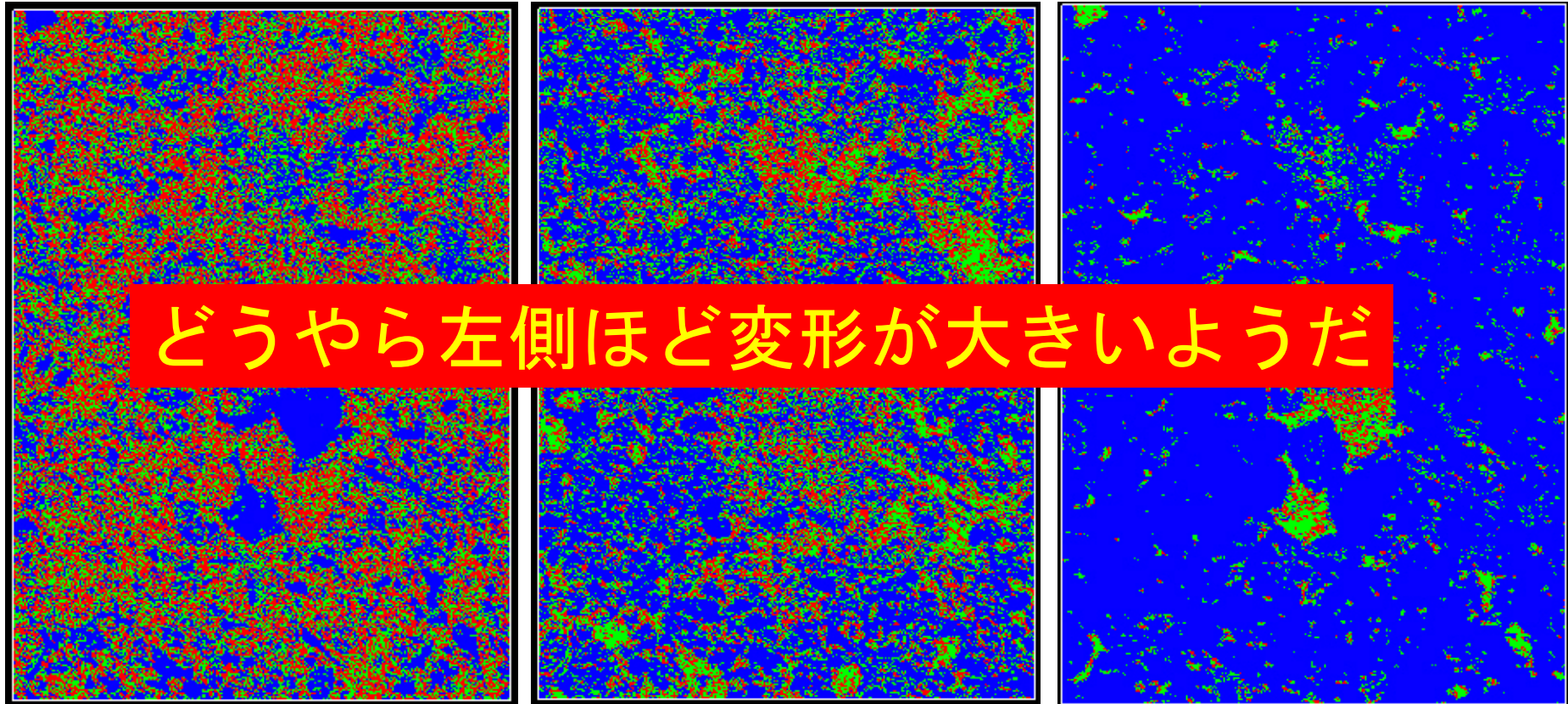
手順

- 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

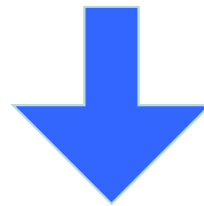
未水和セメント

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

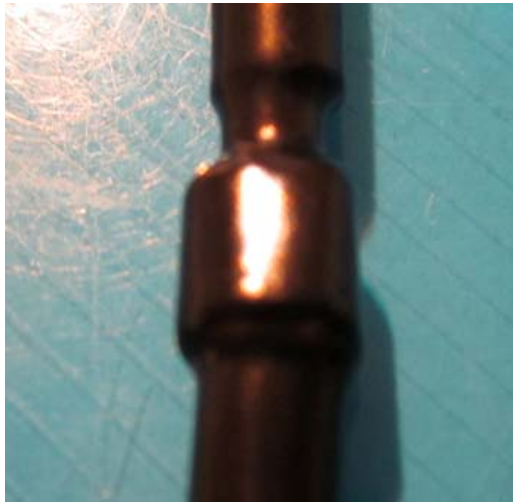


分析に用いた供試体

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

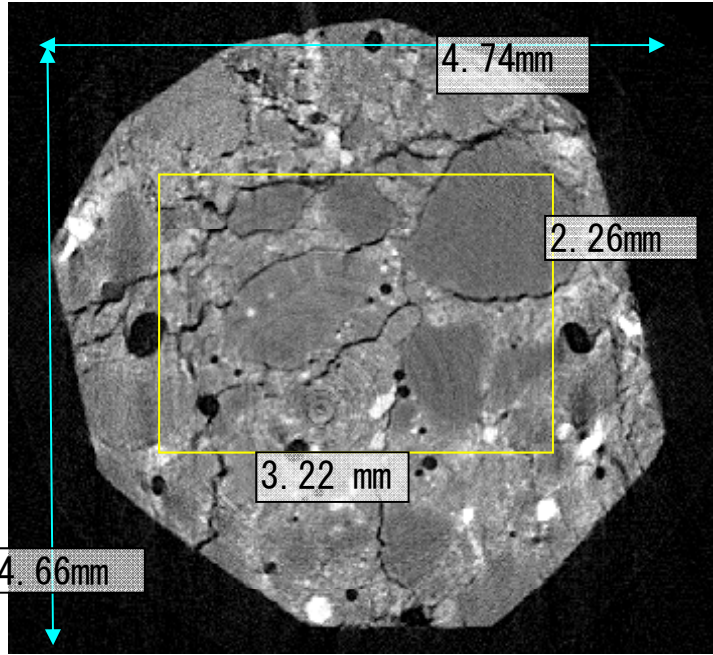
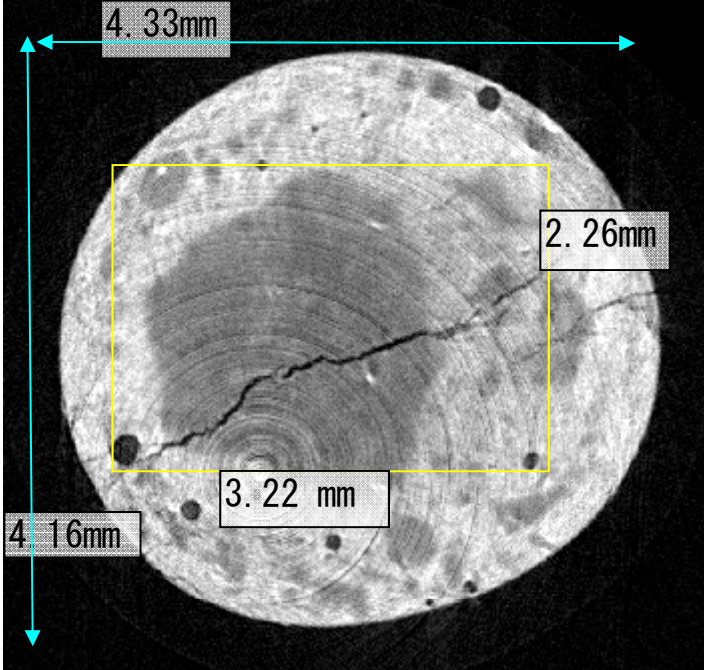


上から静水圧によって
通水を行う

通水期間：2日間

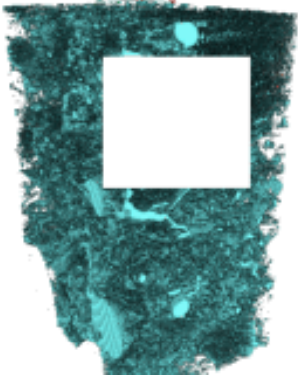
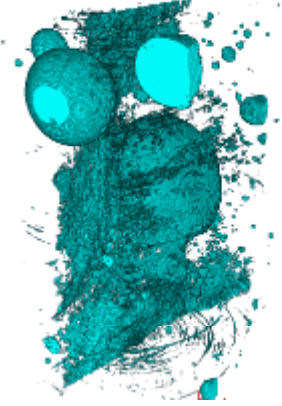
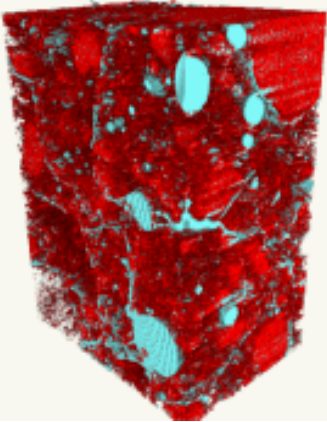
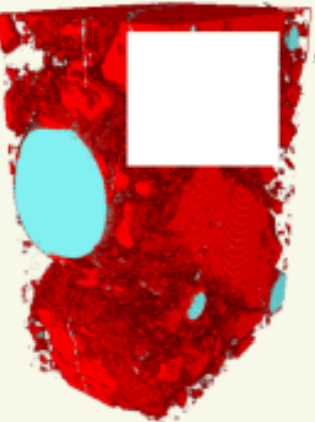
断面の観察結果

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

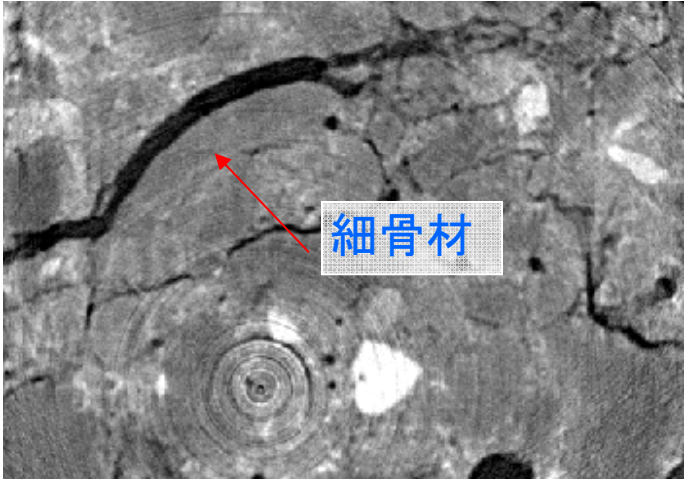
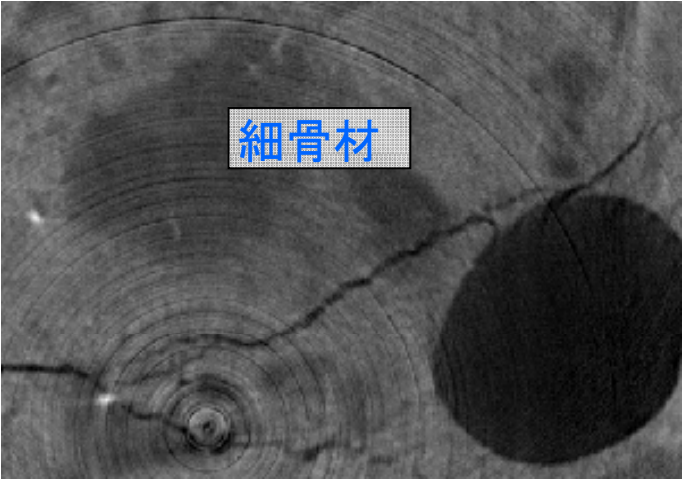
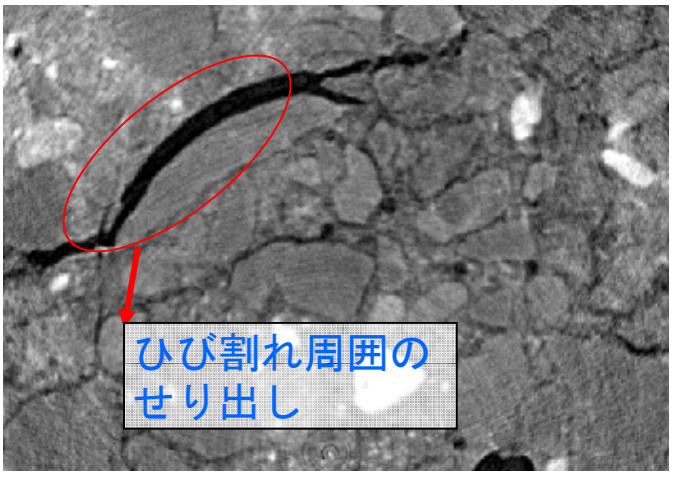
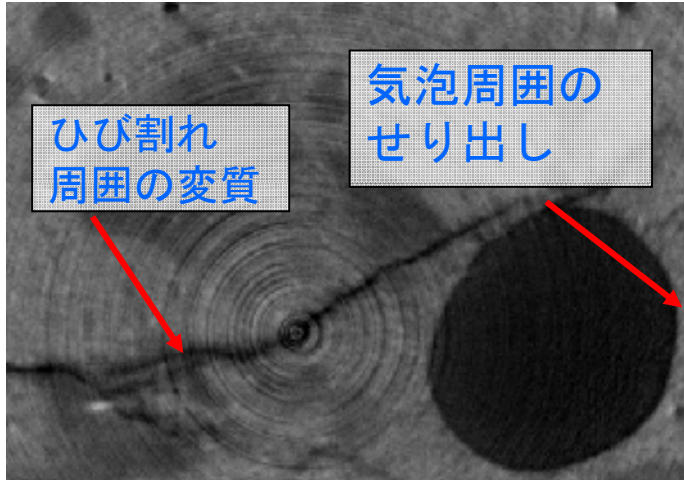
1) 撮影時， 2) 画像処理時

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