

# 高強度コンクリートの内部水分挙動が 爆裂現象に及ぼす影響

---

2024.12.25-26 中性子イメージング専門研究会

西尾 悠平（建築研究所）

兼松 学（東京理科大学）

# 背景と目的

## 高強度コンクリートの爆裂現象

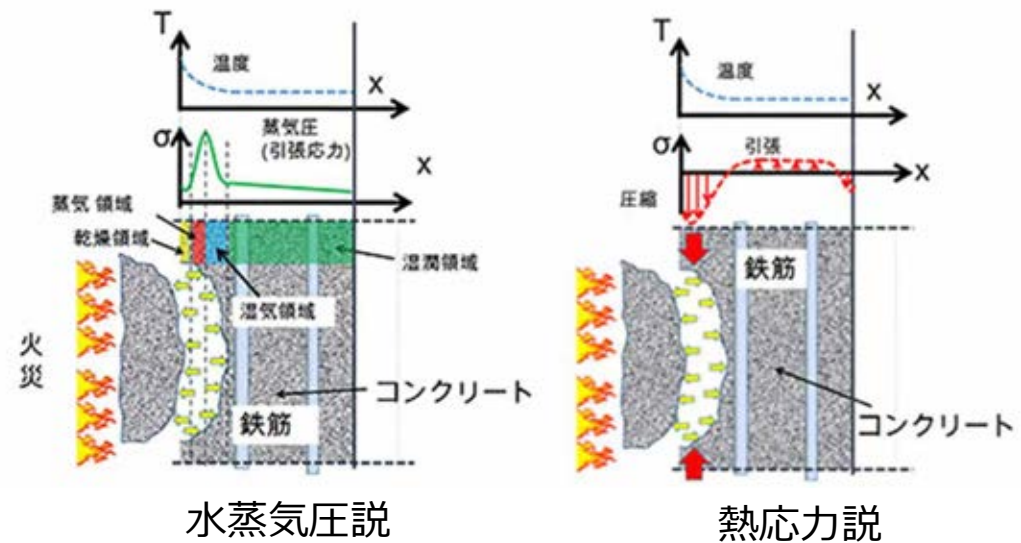
- 火災のような高温環境下でコンクリートの爆裂現象が発生
- 実構造物では、断面欠損や鉄筋の露出などによる部材の耐力低下が懸念  
→爆裂発生メカニズムを把握することが重要

## 爆裂発生メカニズム

- 水蒸気圧説
- 熱応力説
- 複合説（水蒸気圧 + 熱応力）

コンクリート内部の水分量や分布が  
水蒸気圧の増大に寄与

→コンクリート内部の水分と爆裂の  
関係は確認されていない



引用：JCI

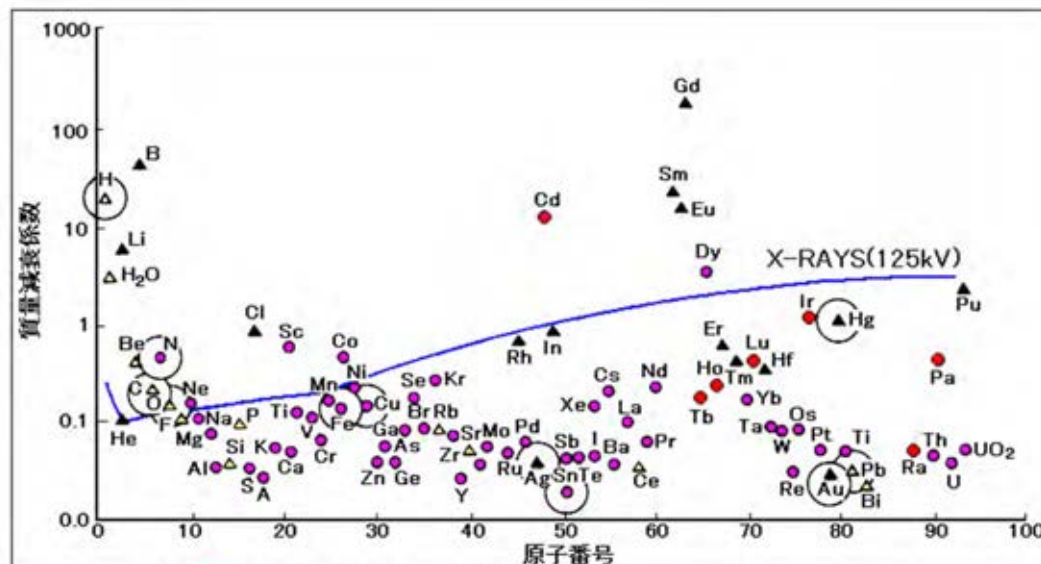
「高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会」

## 目的

- コンクリートを透過する中性子線により内部の水分分布を可視化・定量化
- 加熱中および爆裂時の水分分布より、水蒸気圧が爆裂発生に与える影響を検討

# 中性子ラジオグラフィによる水分量の定量方法

水分の減衰特性を求めることで、**水分強度**として定量可能

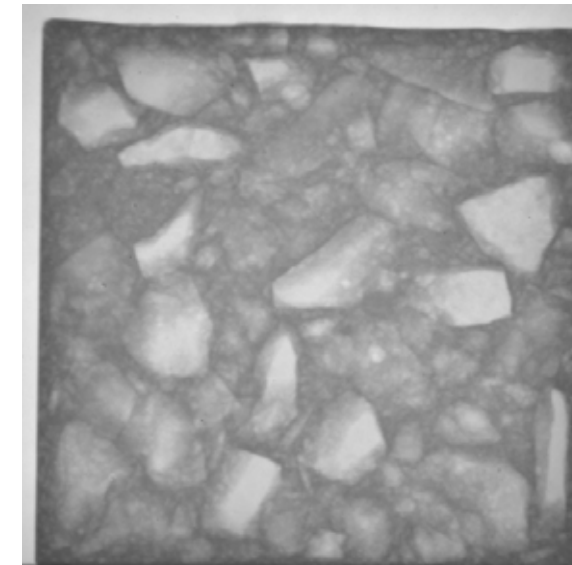


(注) ●: 散乱と吸収による場合、△: 散乱が主の場合  
▲: 吸収が主の場合、●: 吸収のみの場合  
大きい○は有機物を構成する元素と、考古遺物に用いられている金属類

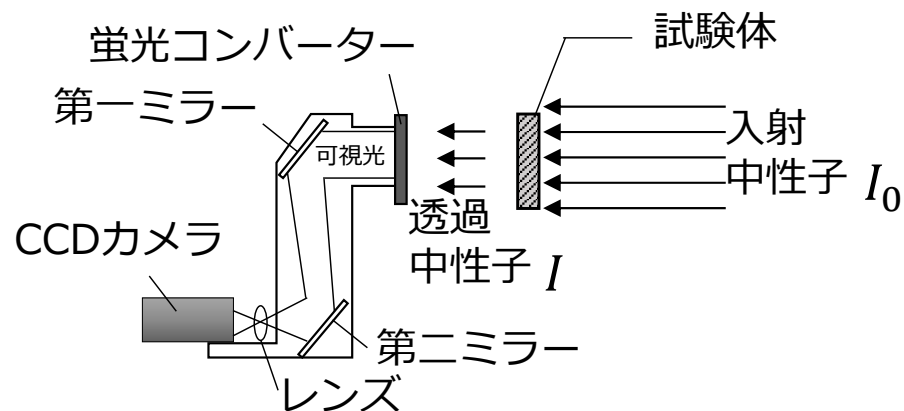
図8 熱中性子とX線の各元素における質量減衰係数

[出典] P.von der Hdt, H.Rottger(editors), Neutron Radiography Handbook (1981)

[https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig\\_pict\\_08-04-01-13-10.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_08-04-01-13-10.html)



典型的なコンクリートの  
中性子ラジオグラフィ



中性子ラジオグラフィ概念図

$$I = I_0 e^{-(\Sigma_c \delta_c + \Sigma_w \delta_w)}$$

$$\Sigma = \lambda \cdot \rho$$

$I$ : 透過中性子強度  
 $\Sigma$ : 巨視的断面積  
 $\lambda$ : 質量吸収係数  
添え字 c: コンクリートもしくは試験体マトリクス  
w: 蒸発性水分、p: ペースト、a: 骨材

$I_0$ : 入射中性子強度  
 $\delta$ : 厚さ  
 $\rho$ : 密度

# 中性子ラジオグラフィによる水分量の定量方法

## コンクリート内部の水分量の定量

$$\text{減衰率} : P = -\ln \frac{I}{I_0} = \lambda_c \rho_c \delta_c + \lambda_w \rho_w \delta_w$$

$$\text{減衰率差分} : \Delta P_w = -\ln \frac{I_t}{I_{t=0}} = \lambda_w \rho_w \delta_c$$

$$\text{コンクリートの体積当たりの水重量の変化量} : \Delta W = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c}$$

$I$  : 透過中性子強度

$I_0$  : 入射中性子強度

$\Sigma$  : 巨視的断面積

$\delta$  : 厚さ

$\lambda$  : 質量吸収係数

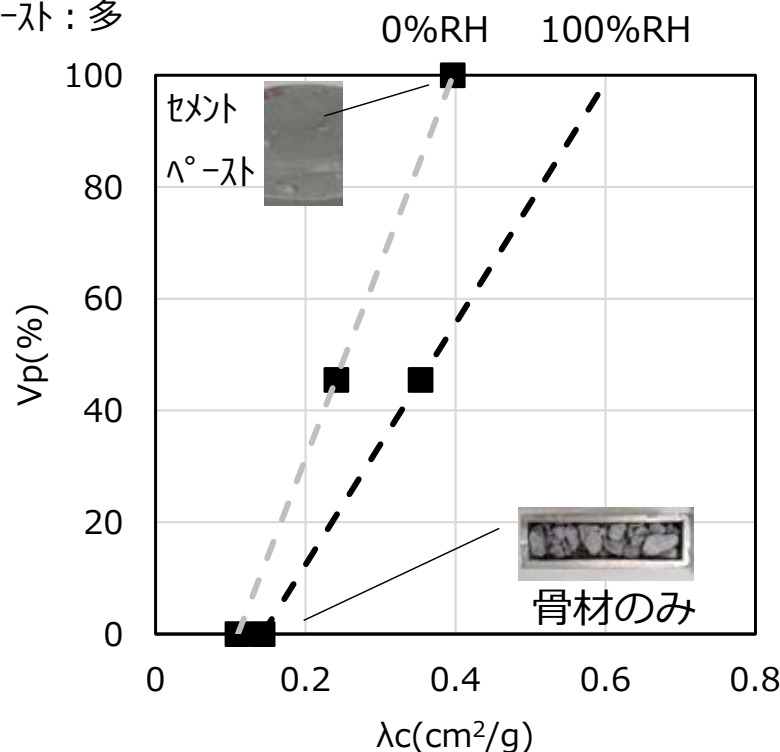
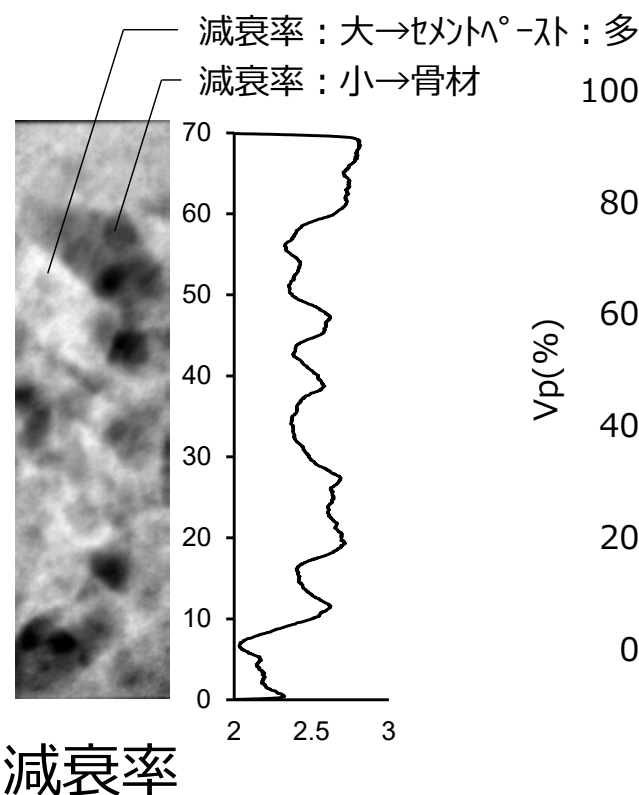
$\rho$  : 密度

$I_t, I_{t=0}$  : 時刻  $t$  における中性子透過強度

添え字  $c$  : コンクリートもしくは試験体マトリクス

$w$  : 蒸発性水分、 $p$  : ペースト、 $a$  : 骨材

## セメントペースト割合の算定



ペースト割合と質量吸収係数

$$\lambda_c \rho_c \delta_c = V_p (\lambda_p \rho_p \delta_p) + (1 - V_p) \lambda_a \rho_a \delta_a$$

$$V_p = a \lambda_c + b$$

$V_p$  : コンクリートに対するペーストの体積割合 [-]

# 中性子ラジオグラフィによる水分量の定量方法

## 相対含水率の算出方法

**差分質量  
吸収係数**

$$\Delta\lambda = \Delta\rho'_s = \frac{\Delta \ln(I/I_0)}{\rho_c \delta_c}$$

**相対含水率**

$$\varphi = \frac{\Delta\rho'}{\Delta\rho'_s} = \frac{\Delta\rho}{\rho_s}$$

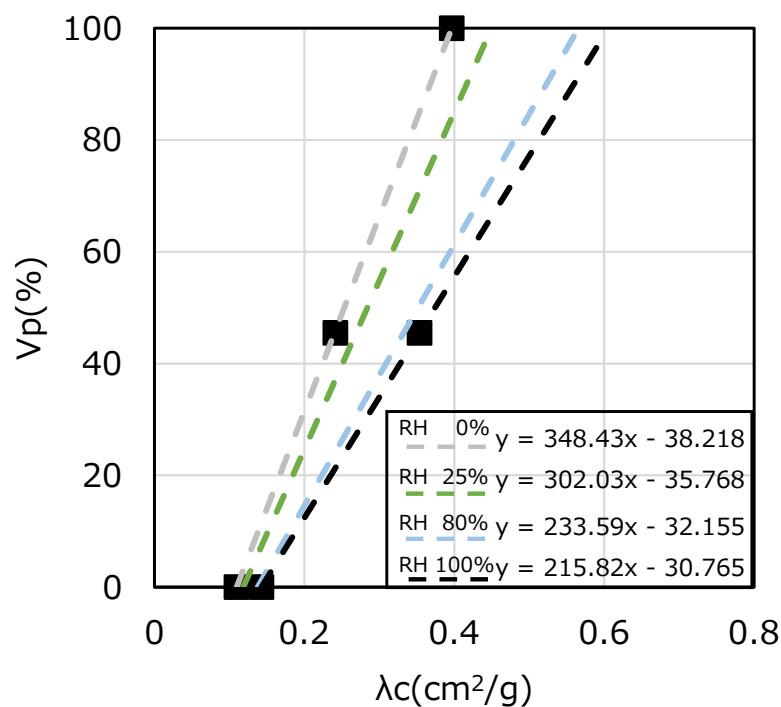
$\Delta\rho'_s$ : 飽水状態及び絶乾状態の質量吸収係数の差分 [cm<sup>2</sup>/g]

$\rho_c$ : 絶乾試験体の密度 [g/cm<sup>3</sup>]

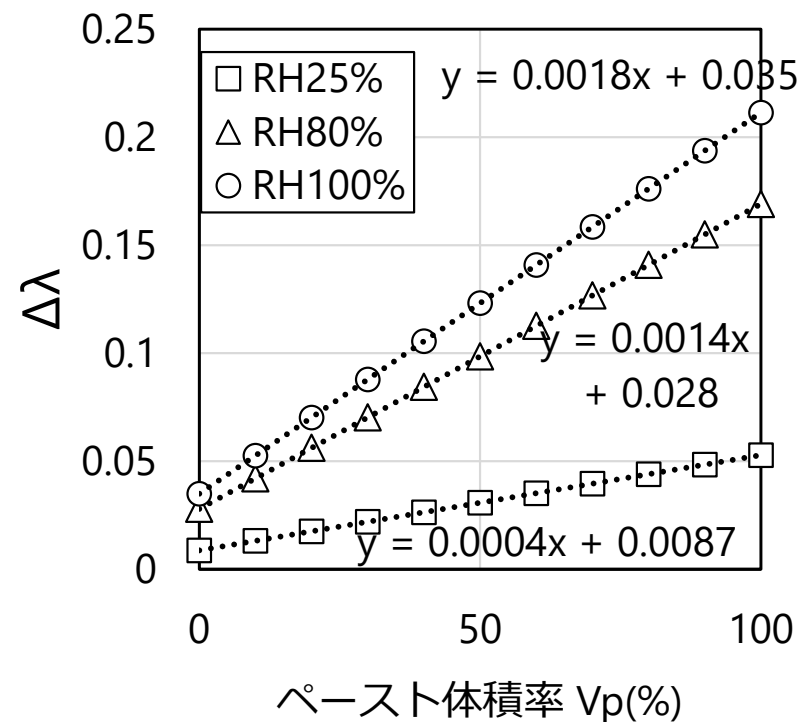
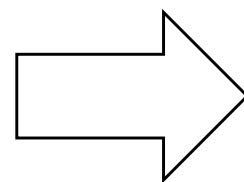
$\rho_s$ : 飽水時の水かさ密度 [g/cm<sup>3</sup>]

$\delta_c$ : コンクリート厚さ (= 水のかさ厚さ) [cm]

$\varphi$ : 相対含水率 [-]



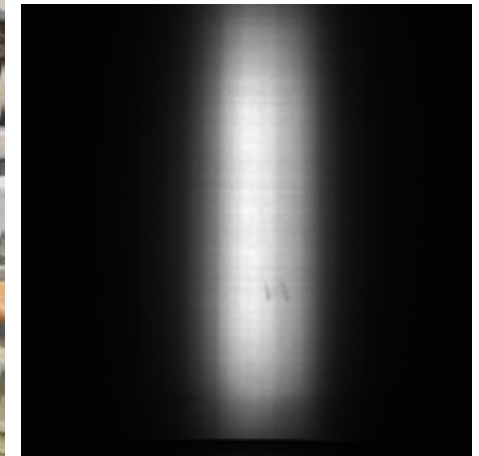
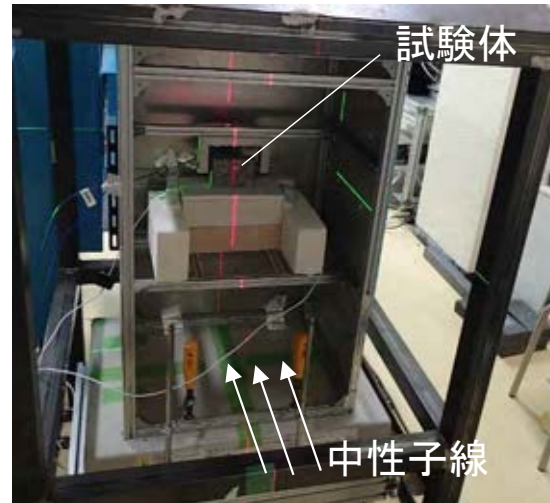
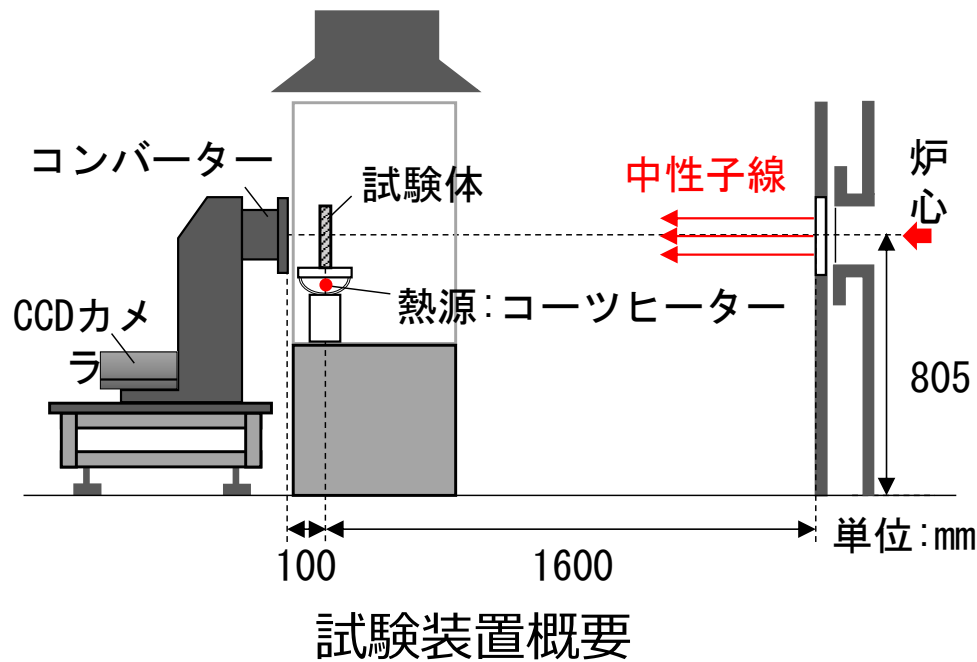
ペースト割合と質量吸収係数



ペースト割合と差分質量吸収係数

# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

京都大学複合原子力科学研究所 KUR B-4ポート



入射中性子画像



## 中性子ラジオグラフィ 撮影条件

|             |                                                                     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|
| 入射中性子束      | $1 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$                                      |
| 空間分解能       | 約 $100 \mu\text{m/pixel}$                                           |
| 取得画像<br>サイズ | $100 \times 100 \text{ mm}$<br>( $1024 \times 1024 \text{ pixel}$ ) |
| 露光時間        | 3.0～5.0秒/枚                                                          |

# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

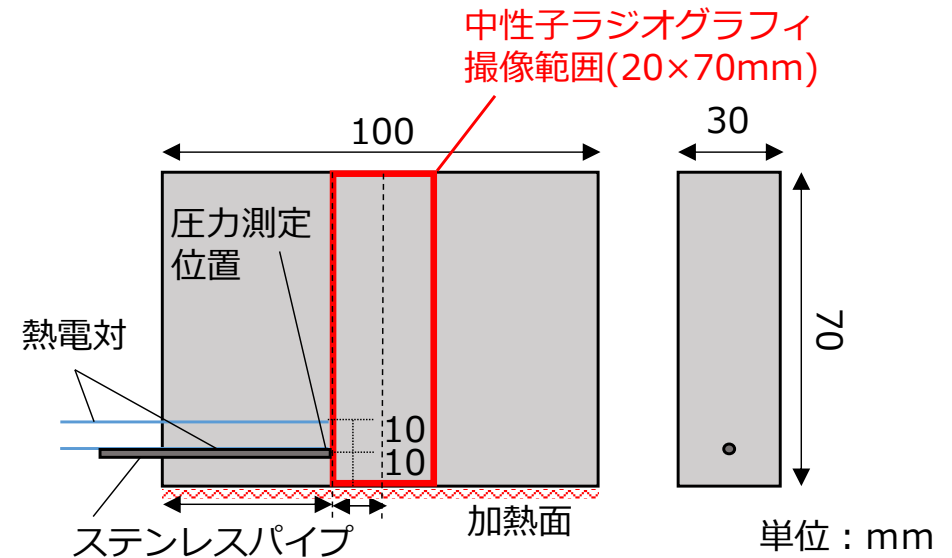
## 実験概要

1. 初期含水率が加熱中のコンクリート内部の水分分布に及ぼす影響  
初期含水率：25%, 49%, 68%, 100%
2. 加熱中および爆裂時の水分分布より、水蒸気圧が爆裂発生に与える影響を検討  
初期含水率：25%, 80%, 100%

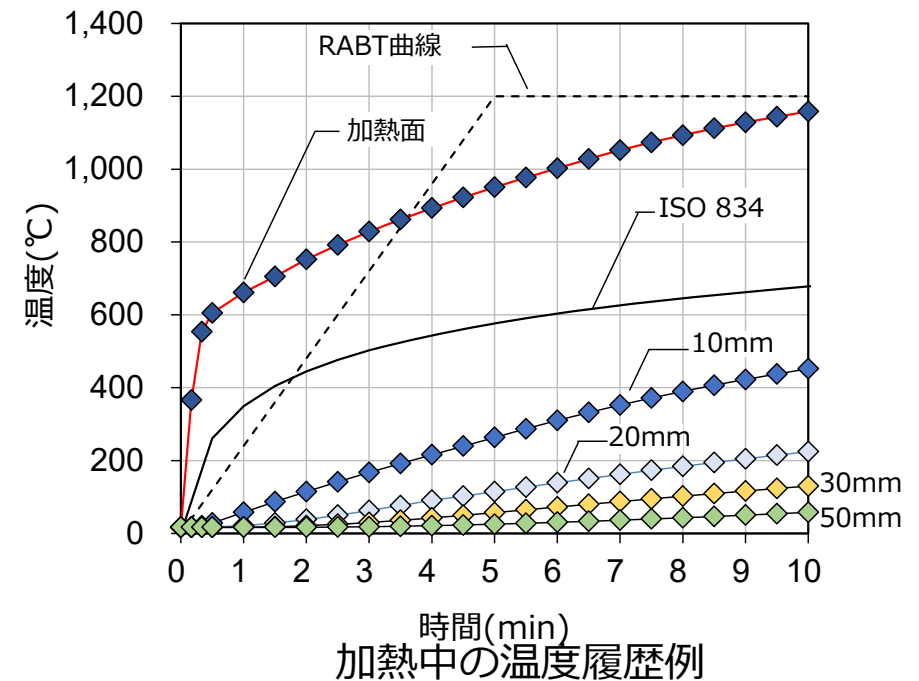
### コンクリート調合

| W/C(%)    | Air(%) | 絶対容積(L/m <sup>3</sup> ) |     |    |     |     |
|-----------|--------|-------------------------|-----|----|-----|-----|
|           |        | W                       | C   | SF | S   | G   |
| <b>18</b> | 1.5    | 160                     | 255 | 40 | 213 | 312 |

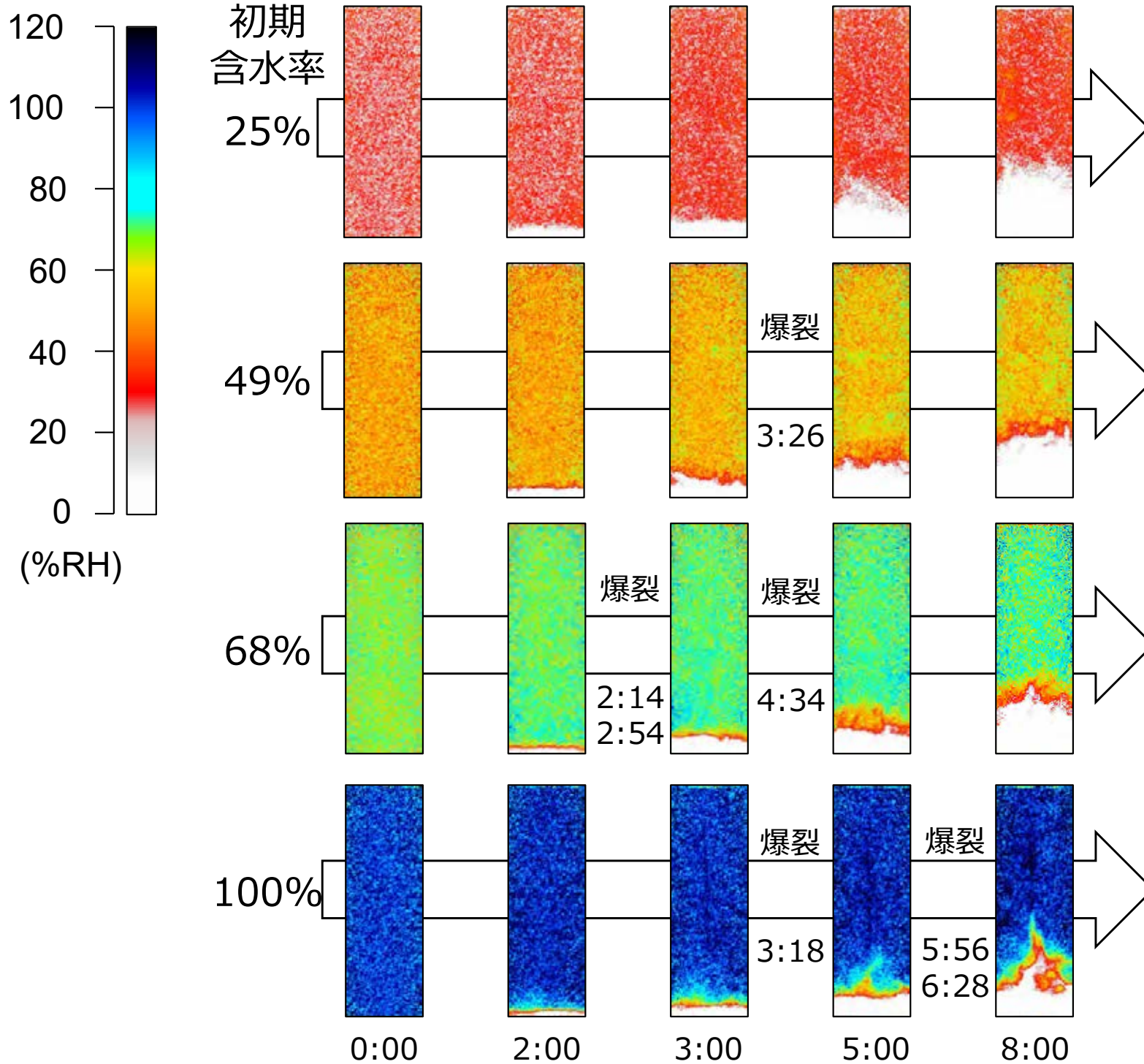
W：水 C：セメント SF：シリカフューム  
S：大井川産陸砂 G：佐野産石灰岩



試験体概要（圧力測定用）

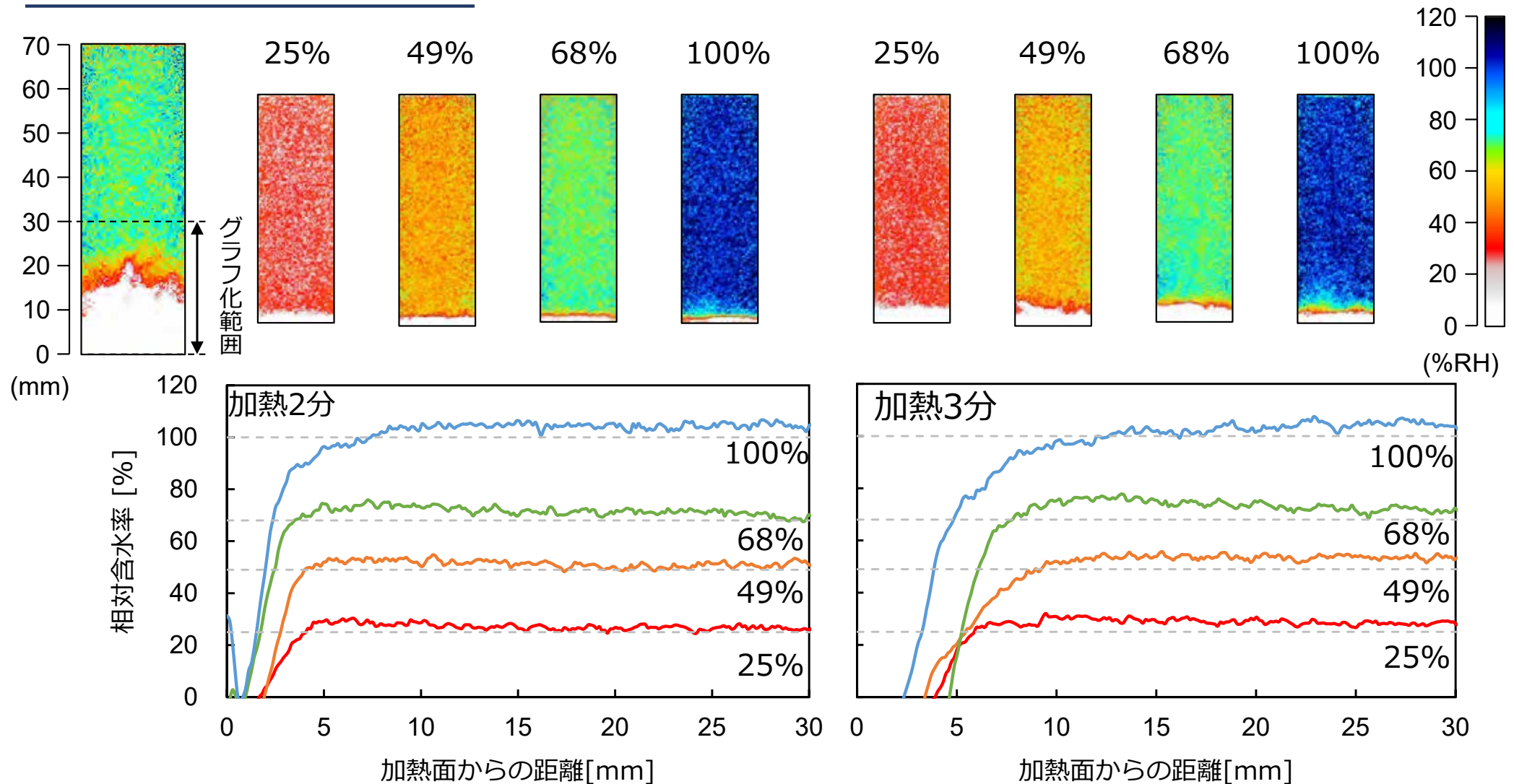


# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動



# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

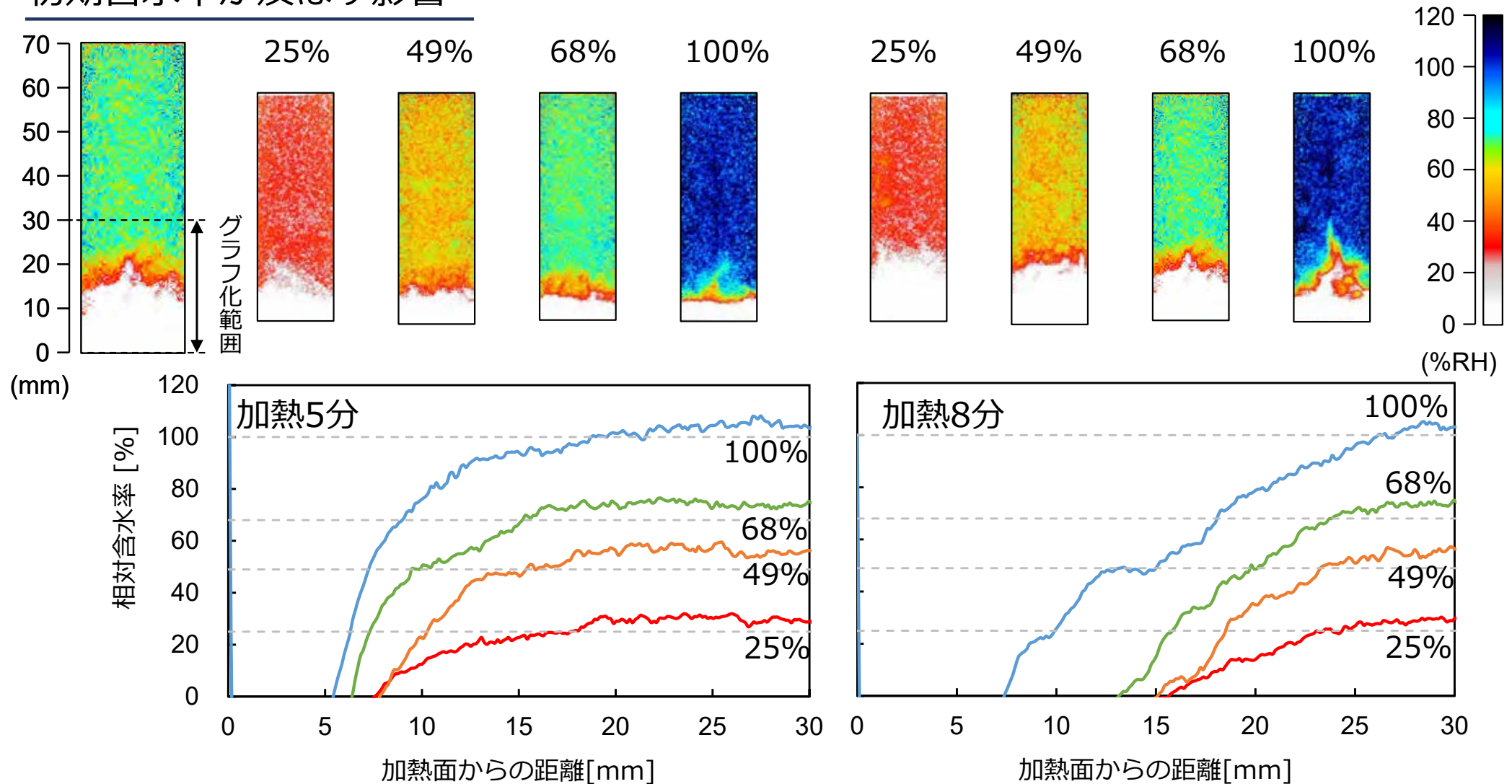
## 初期含水率が及ぼす影響



- 初期含水率が高いほど、含水率の低下が遅い
- 加熱面より5mm以降の深さで、初期よりも若干高い含水率

# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

## 初期含水率が及ぼす影響



- 含水率68%と100%では複数回の爆裂が発生
- 加熱面から20～30mm以降の深さで、初期よりも高い含水率

# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

## 初期含水による爆裂性状の違い



含水率：100%



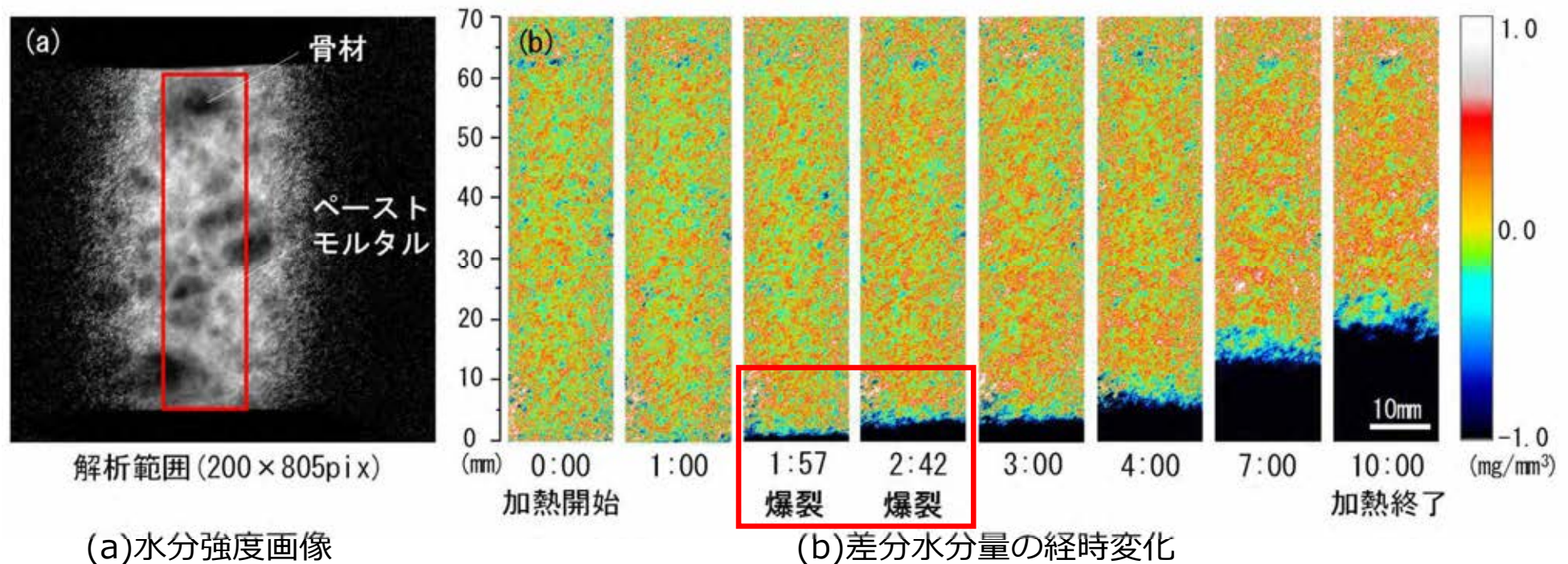
含水率：80%



含水率：25%

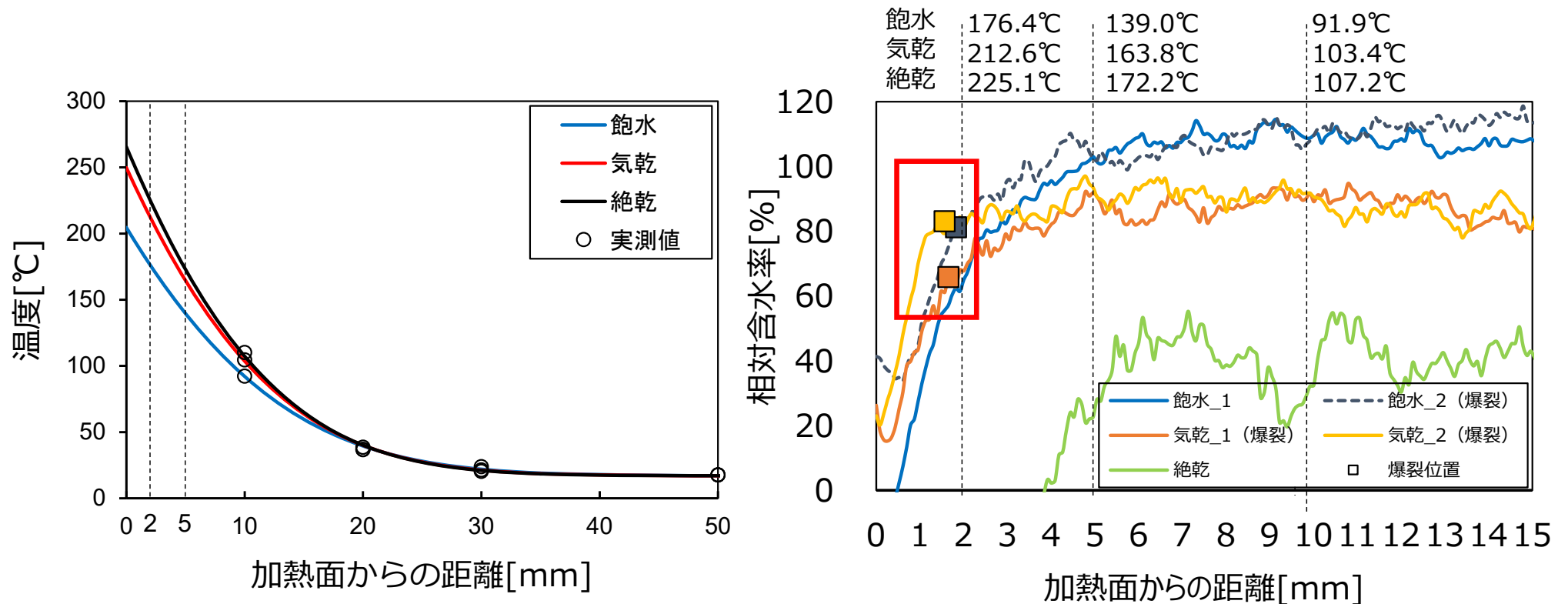
相対含水率80%程度で爆裂が生じやすい傾向

## コンクリート内部における水分分布の定量

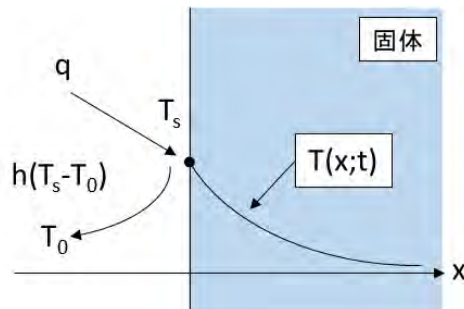


# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

## 加熱1:55後(爆裂直前)における各水準の相対含水率分布



- 試験体を半無限固体の1次元非定常熱伝導として実測値に合わせた感度解析により温度分布を算出



一定の放射熱を受けて周囲へ放射する場合

- 爆裂発生位置付近の相対含水率：  
60～80%程度
- 内部の温度：  
絶乾 > 気乾 > 飽水

# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

加熱1:55後(爆裂直前)における各水準の水蒸気圧分布

コンクリート内部の空隙圧力(=気圧+水蒸気圧)の分圧として算定<sup>1)</sup>

## 水蒸気分圧の算出式

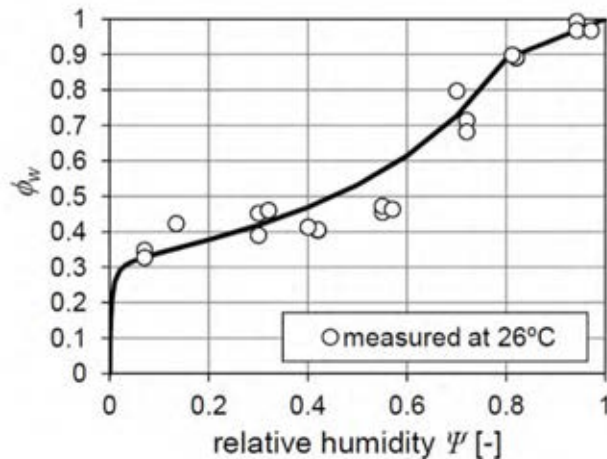
$$P_v = \Psi \times P_{v,SAT}(K)$$

$P_v$ :水蒸気分圧 [hPa]

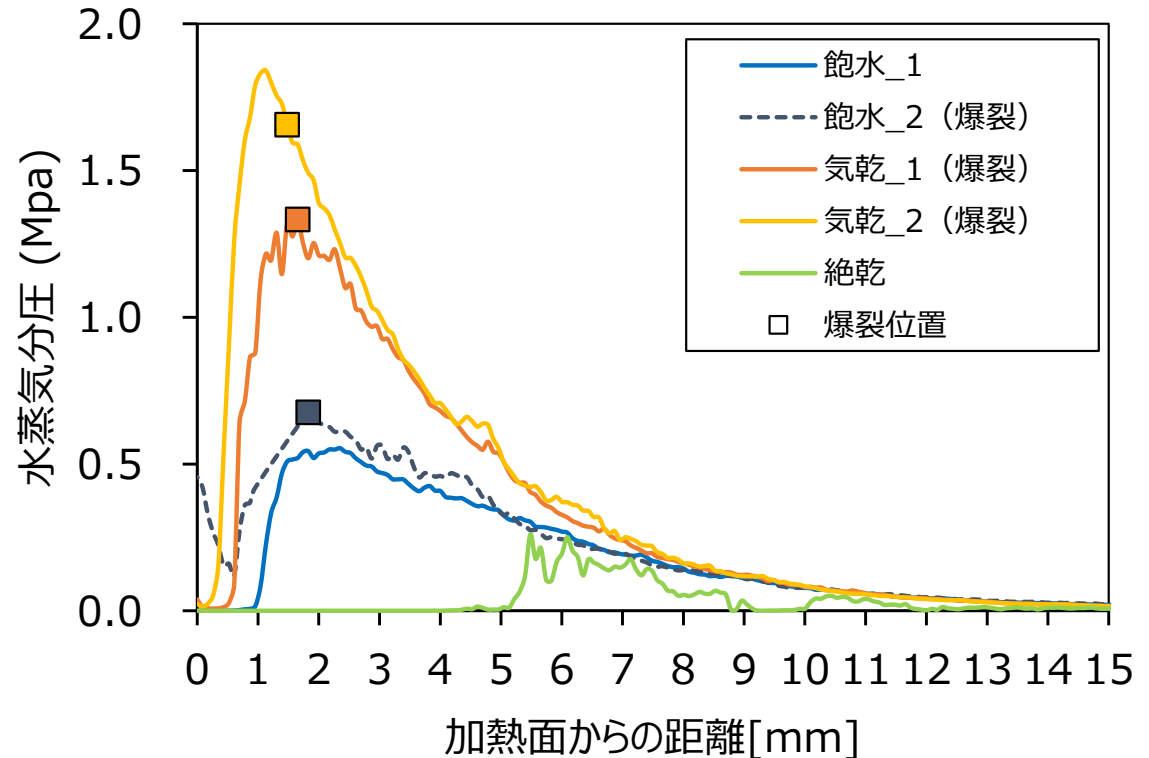
$\Psi$ :相対湿度 [-]

$P_{v,SAT}(K)$ :温度Kにおける空気中の飽和水蒸気圧 [hPa]

- 温度をパラメータとしたW. Wagner<sup>2)</sup>の式より算定(適用範囲: 0~373℃)
- 空隙飽和度 $\phi_w$ =相対湿度として決定



高強度コンクリートの等温吸着線<sup>1)</sup>



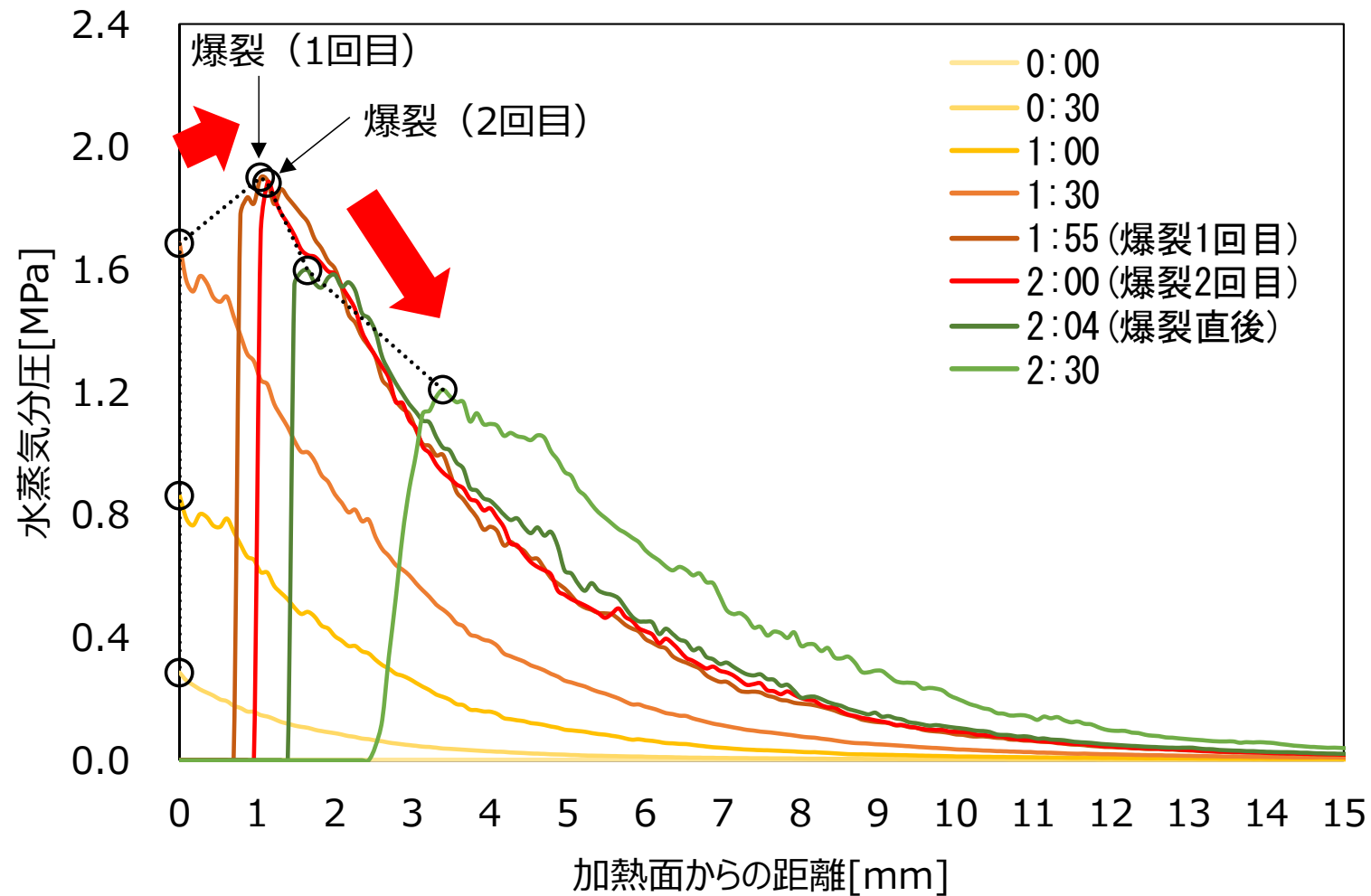
- 爆裂位置付近において気乾試験体で高い水蒸気圧  
→コンクリート内部の温度と含水率の両方が影響

1) 高強度コンクリートの火災時の爆裂現象における空隙圧力と熱応力に関する実験的研究,2016

2) The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use,2002

# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

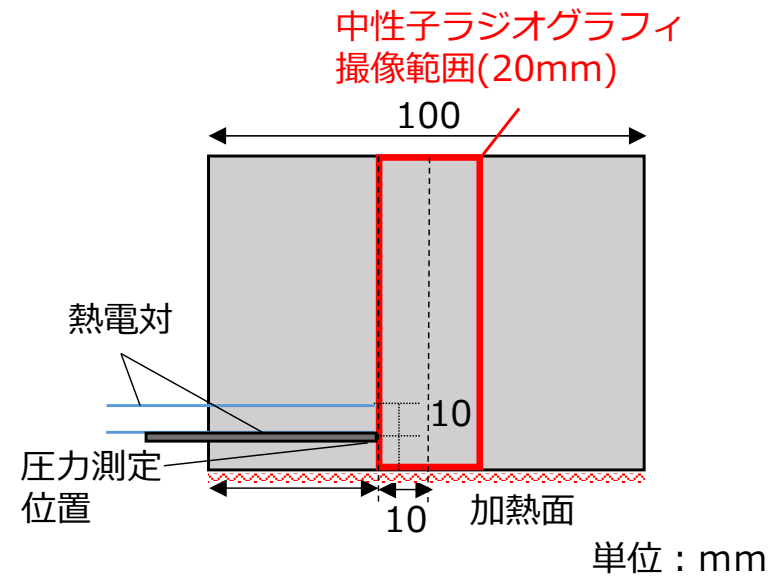
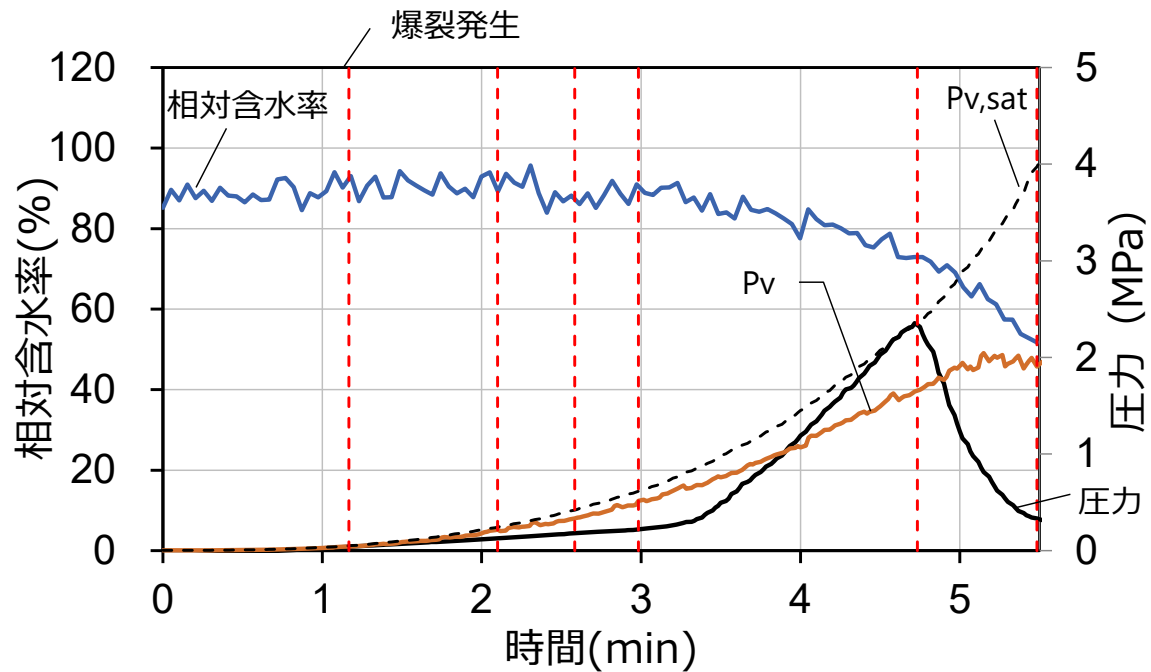
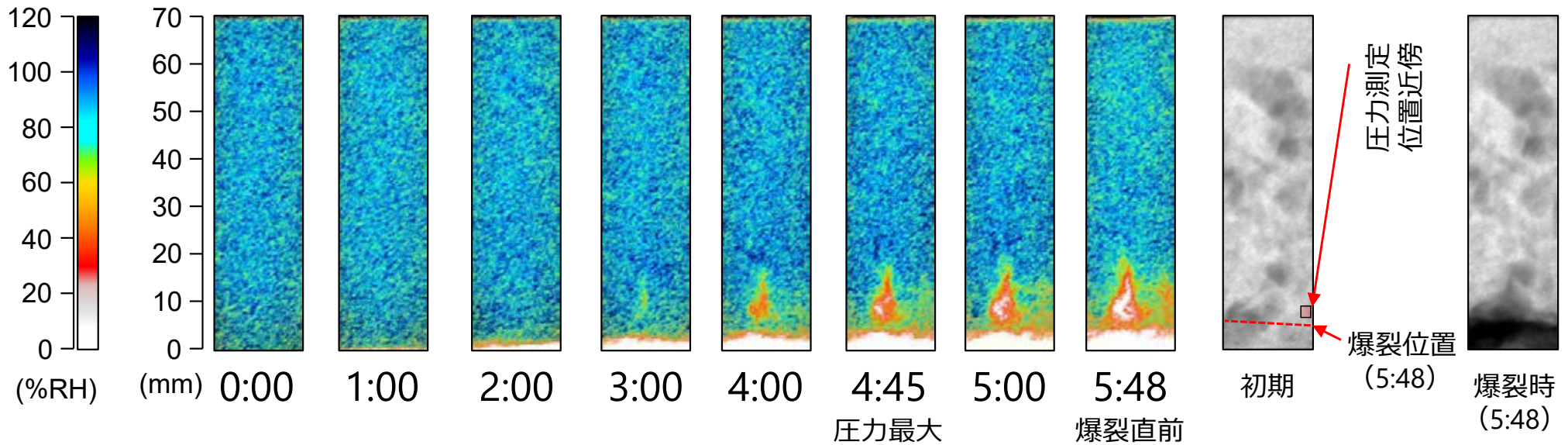
## 気乾試験体における最大水蒸気圧の変化



爆裂直前まで増加した最大水蒸気圧が爆裂後に低下する傾向を示した  
→コンクリート内部における水蒸気圧の発達が爆裂の要因となった可能性

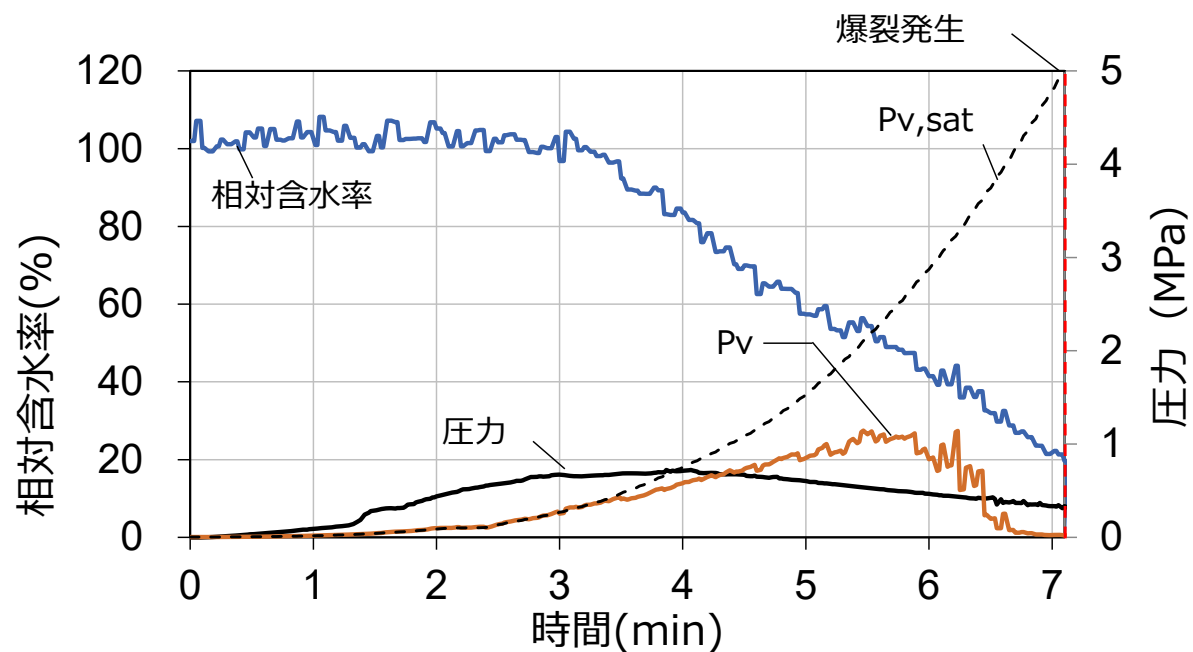
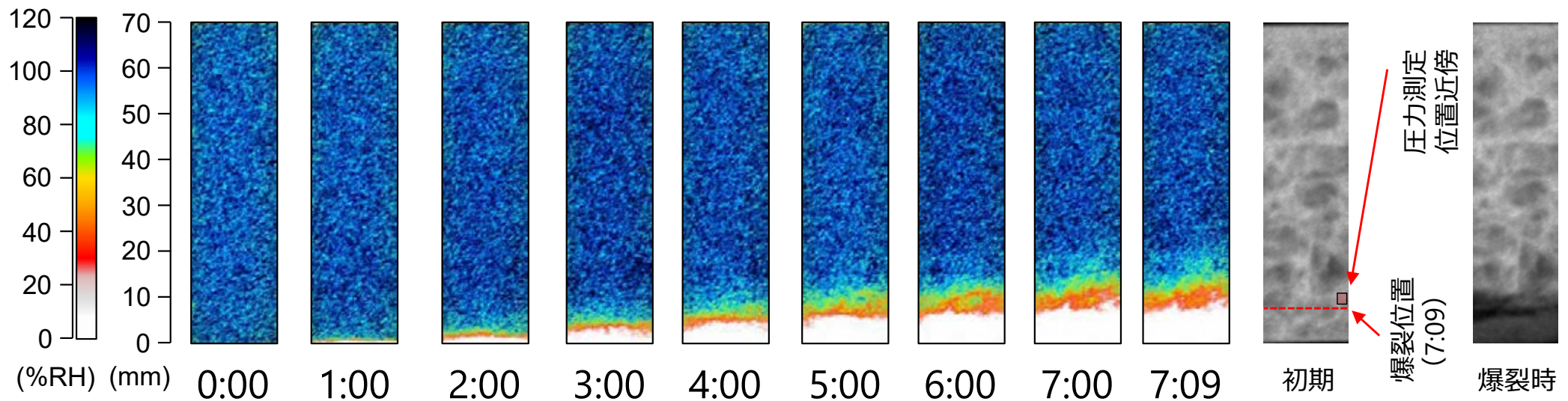
## 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

圧力測定位置近傍の水分挙動（初期含水率：88%）



# 加熱中のコンクリート内部の水分挙動

圧力測定位置近傍の水分挙動（初期含水率：100%）



- 中性子ラジオグラフィの結果より算出した水蒸気圧と圧力の測定値で同様の傾向

# まとめ

---

1. 中性子ラジオグラフィによる水分の定量化手法を適用し、加熱下のコンクリート中の水分挙動を定量的に評価した。
2. 異なる含水状態の高強度コンクリートについて、相対含水率80%程度の場合に爆裂が発生しやすい傾向が示された。爆裂が生じた試験体は、発生した時間に爆裂位置付近で60～80%RHの含水状態であることが確認された。
3. 気乾状態の試験体において、中性子ラジオグラフィの結果を用いて算出した水蒸気圧が、爆裂前後の時間に、増加と減少の傾向が見られた。
4. 中性子ラジオグラフィの結果を用いて算出した水蒸気圧とコンクリート内部圧力の測定値で同様の傾向を示し、爆裂現象にはコンクリート内部の温度と含水率により生じる水蒸気圧が寄与した可能性が示唆された。