

2017年日本建築学会賞(論文)

—受賞業績—

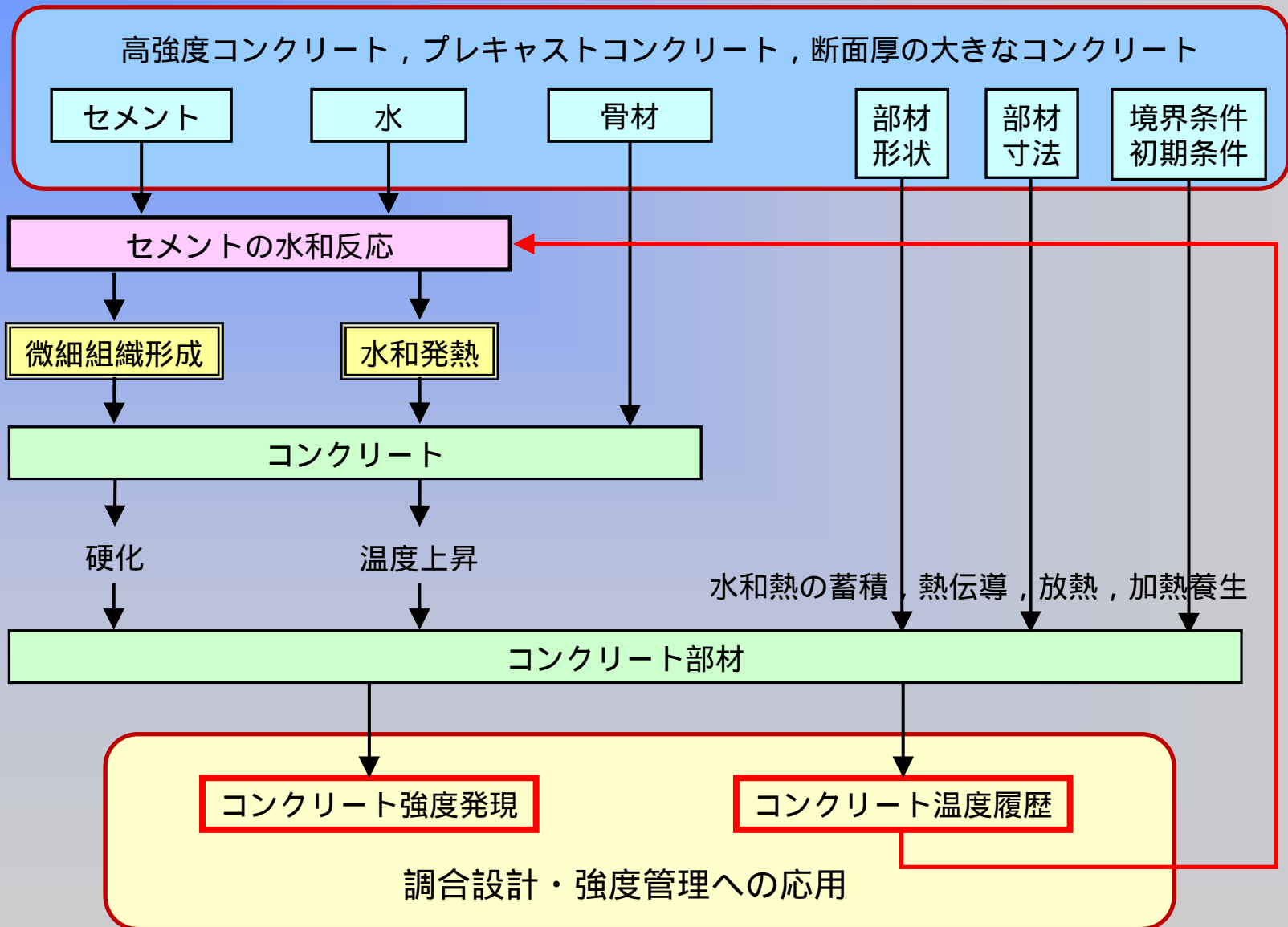
各種コンクリートの発熱・硬化性状の解明と
調合設計・強度管理への応用に関する研究

宇都宮大学 教授 杉山 央

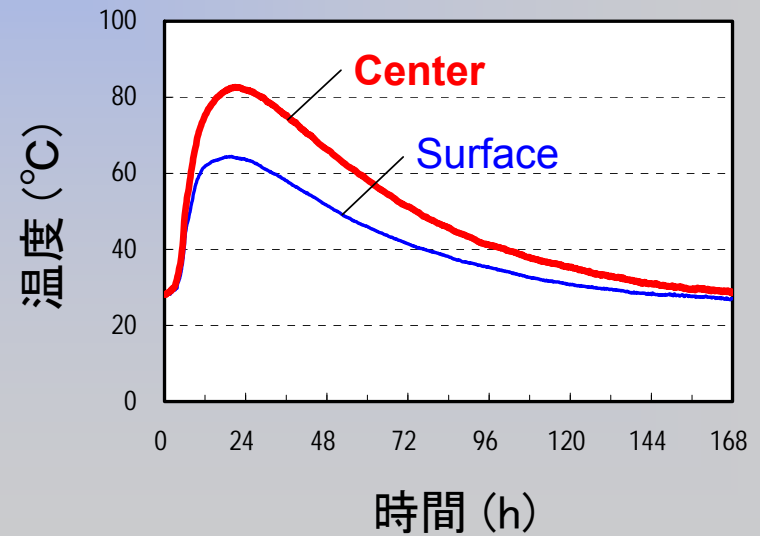
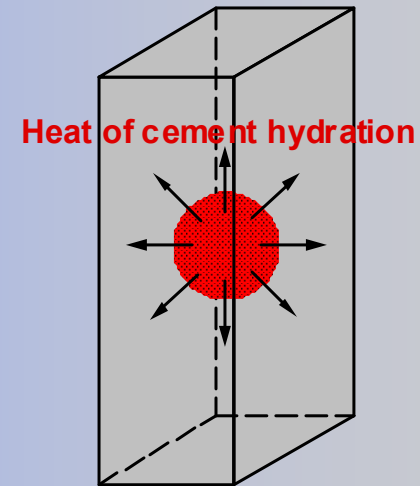
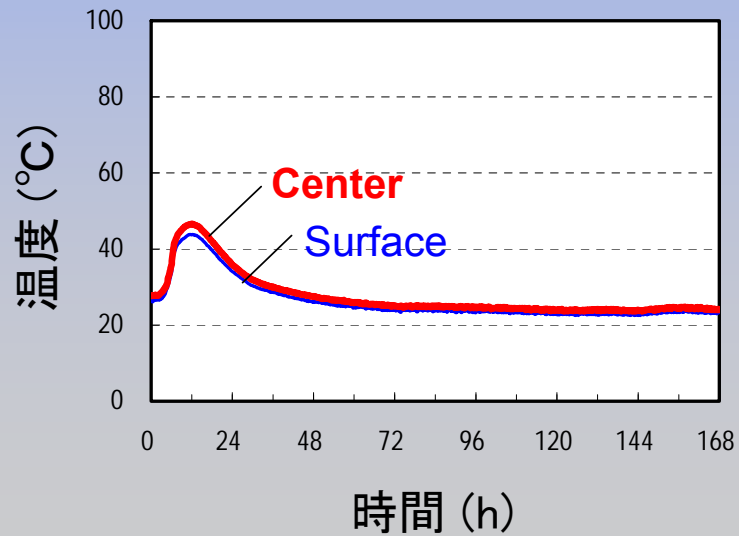
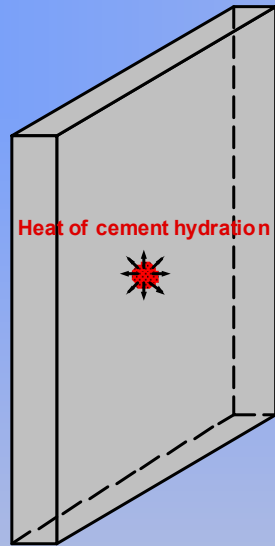
論文の構成

- 第1章 はじめに
- 第2章 各種コンクリートの発熱性状と硬化性状
- 第3章 コンクリートの発熱による高温履歴が硬化性状に及ぼす影響の解明と定量化
- 第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリートの発熱・硬化性状の予測計算
- 第5章 各種コンクリートの調合設計・強度管理への応用
- 第6章 調合設計・強度管理等に関する情報の保管
- 第7章 まとめ

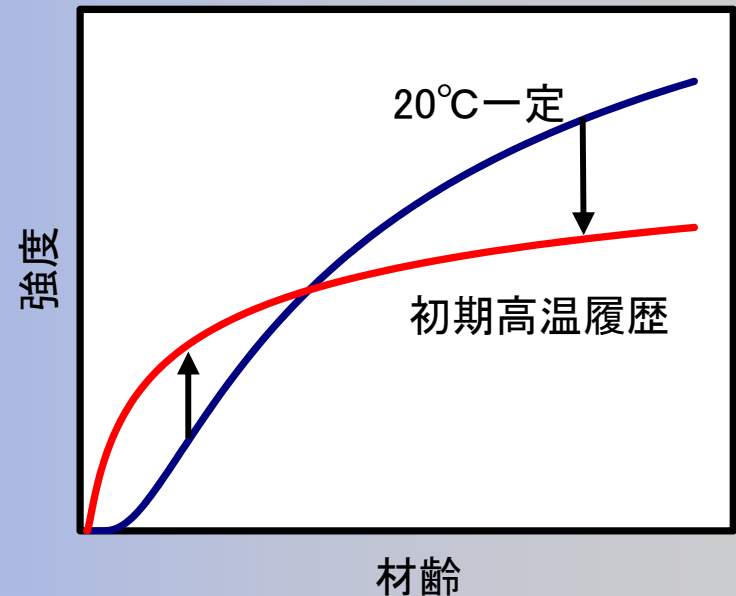
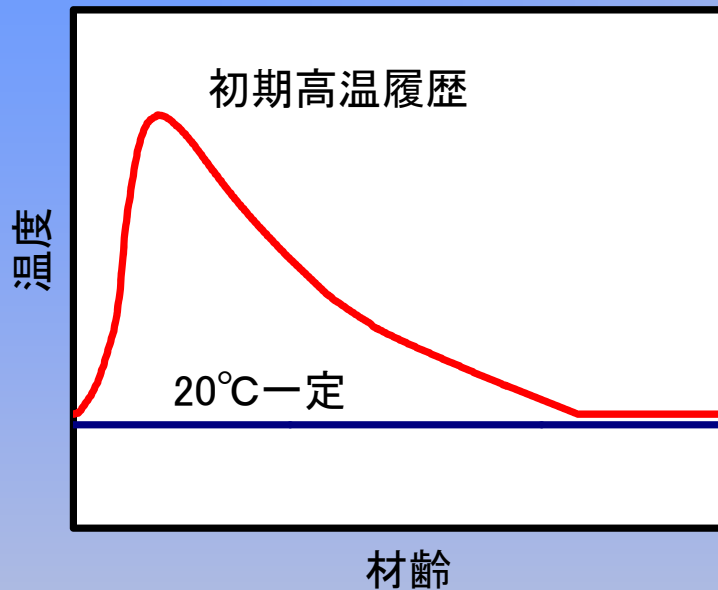
研究の全体像



第1章 はじめに



第1章 はじめに



◆コンクリート部材厚の増大

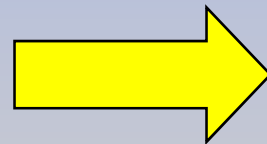
- セメント水和熱の蓄積
- 温度上昇

◆高強度コンクリート

- 単位セメント量の増大
- 温度上昇量の増加

◆プレキャストコンクリート

- 硬化促進
- 加熱養生



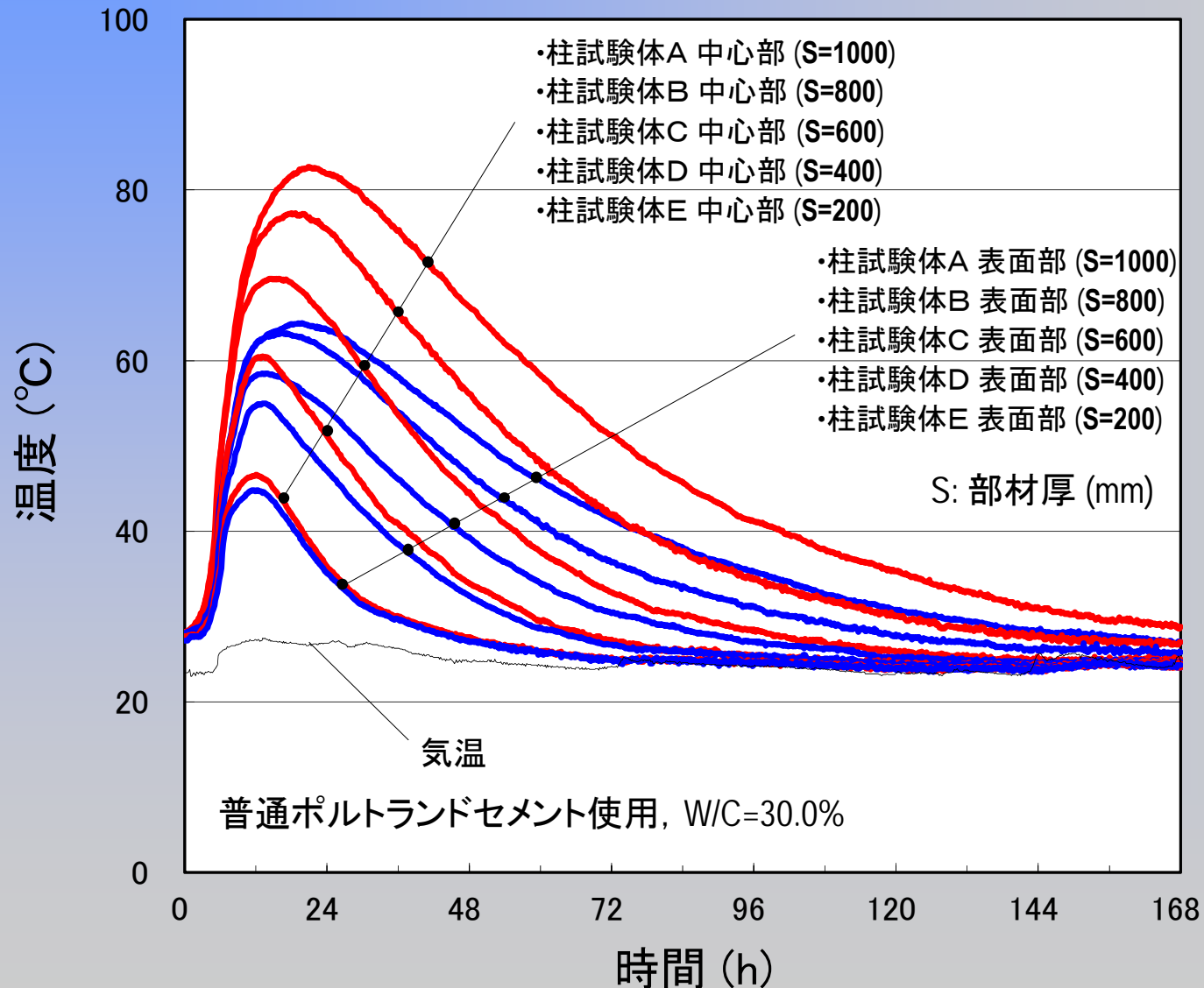
◆特異な強度発現

- ↓
- ・調合設計上の問題
- ・強度管理上の問題

- ↓
- 現象の把握
- 原因の解明
- 解決策の提案

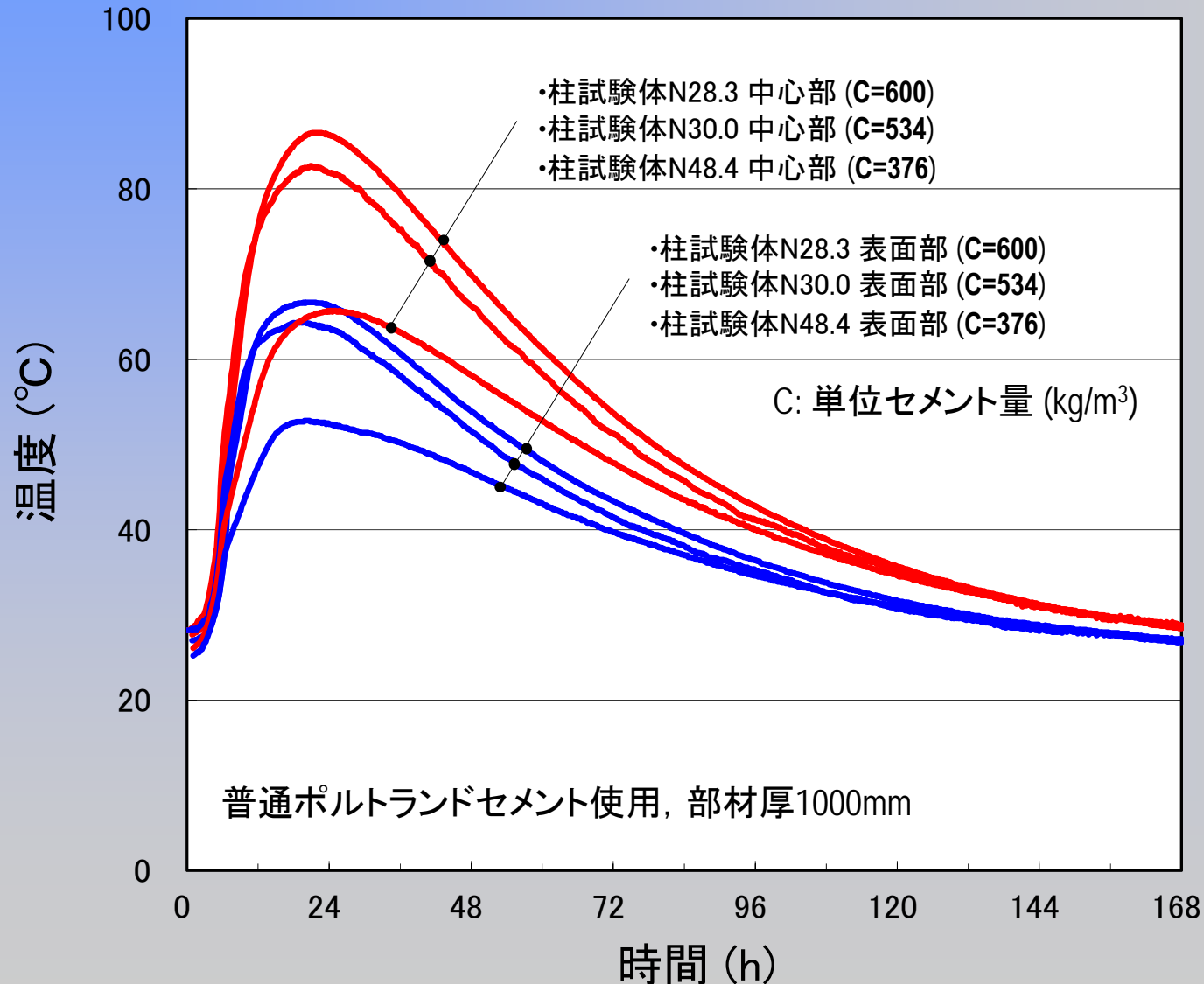
第2章 各種コンクリートの発熱性状と硬化性状

部材厚と温度履歴の関係



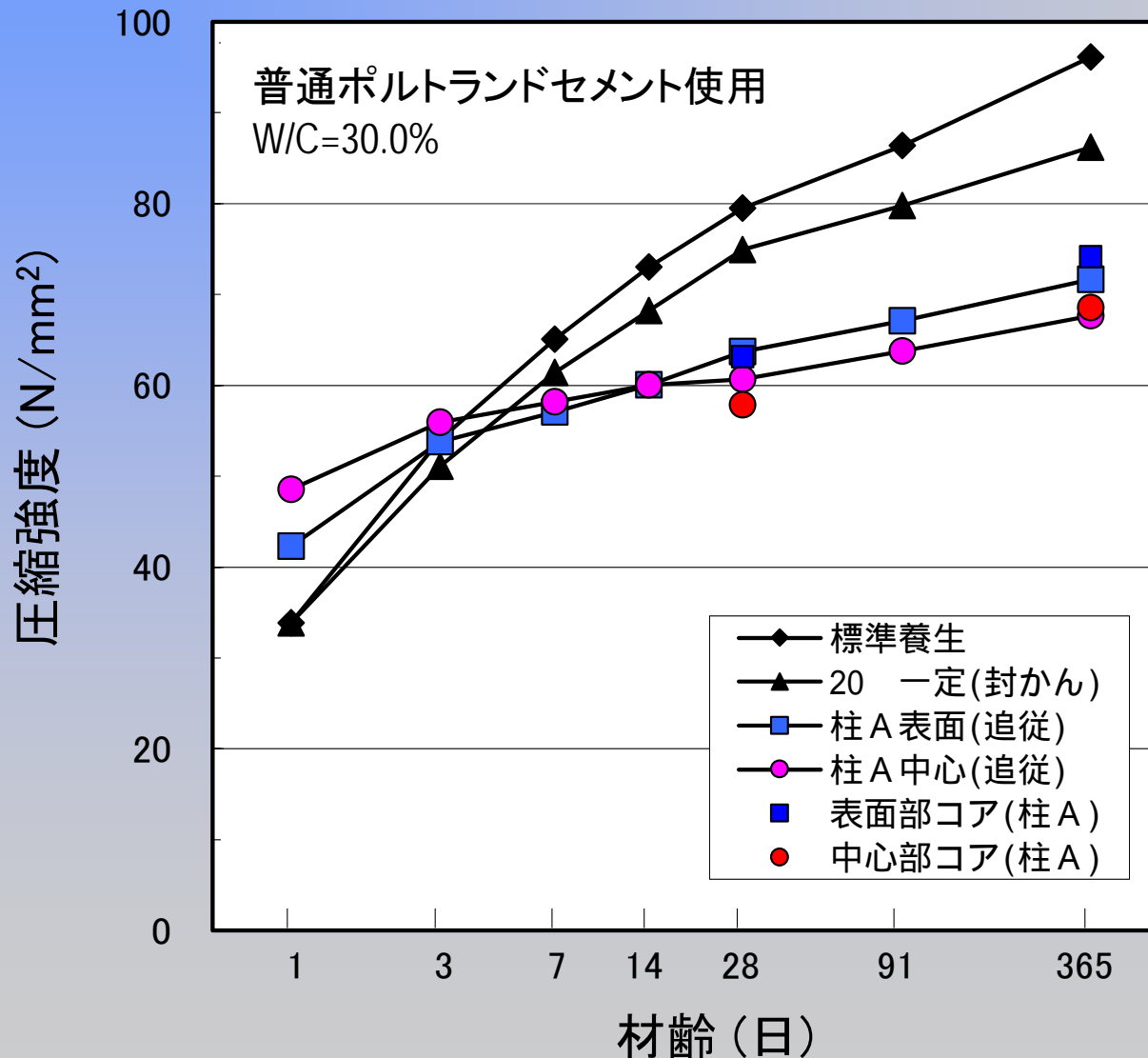
第2章 各種コンクリートの発熱性状と硬化性状

単位セメント量と温度履歴の関係



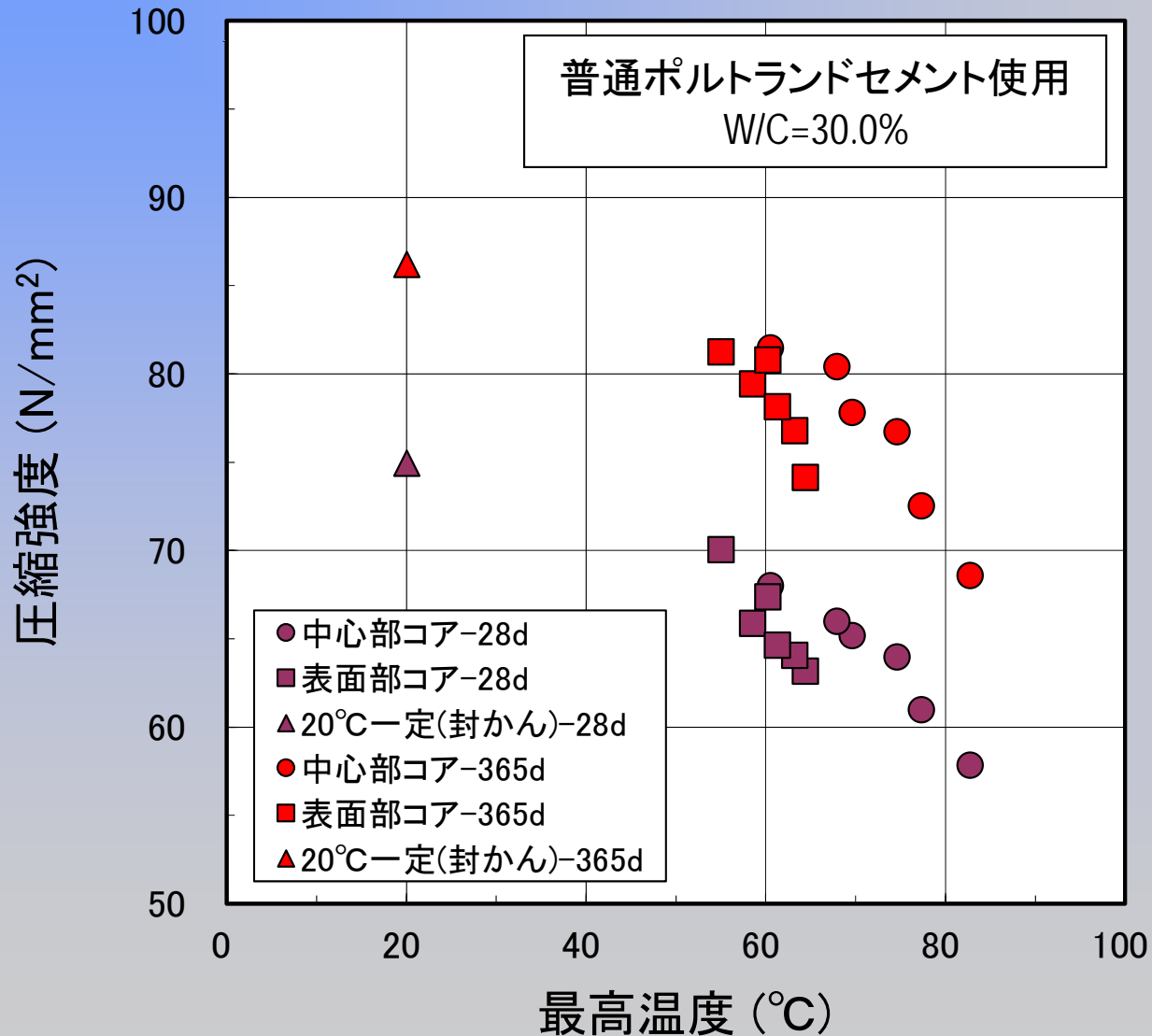
第2章 各種コンクリートの発熱性状と硬化性状

コンクリートの強度発現



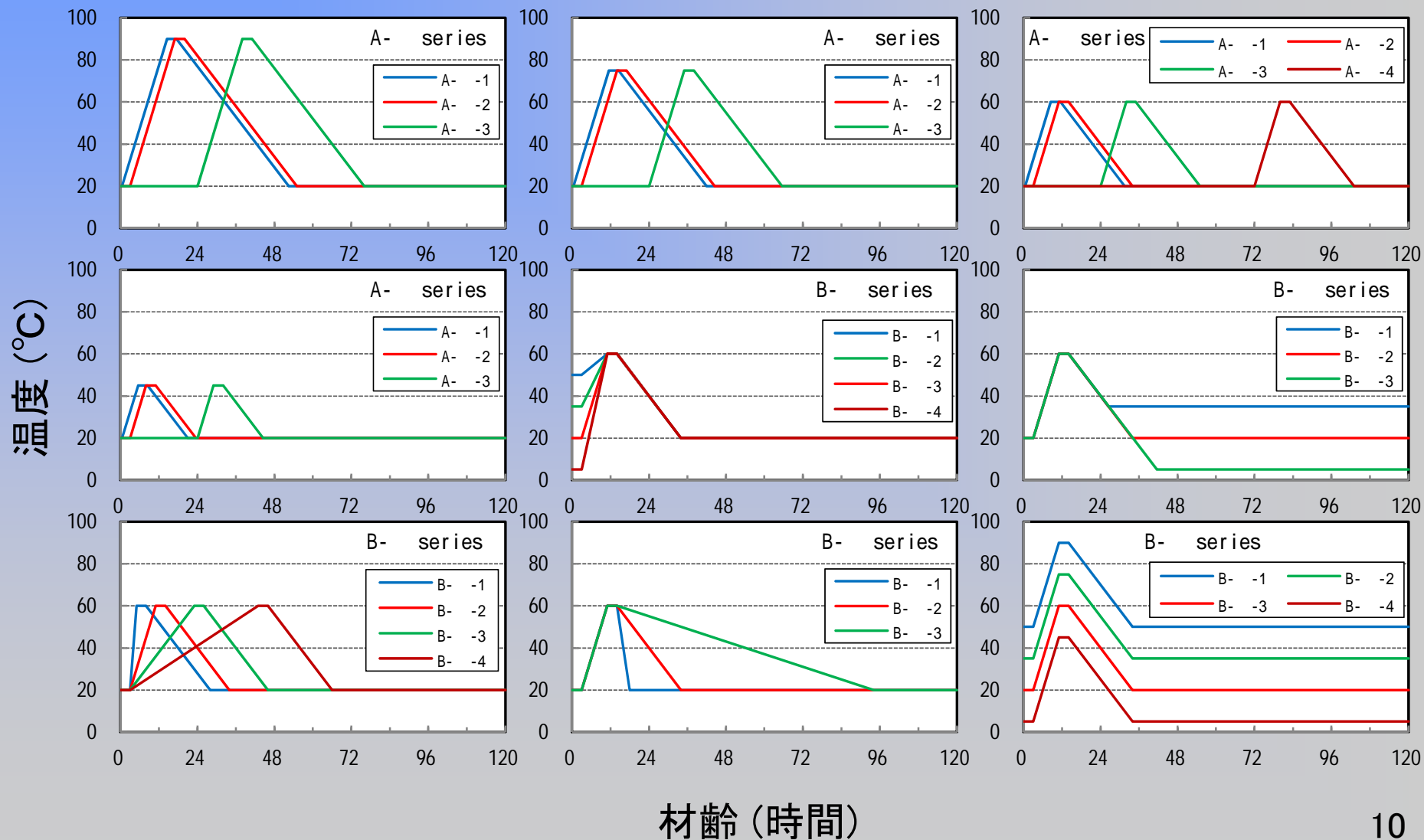
第2章 各種コンクリートの発熱性状と硬化性状

最高温度と強度の関係



第3章 コンクリートの発熱による高温履歴が 硬化性状に及ぼす影響の解明と定量化

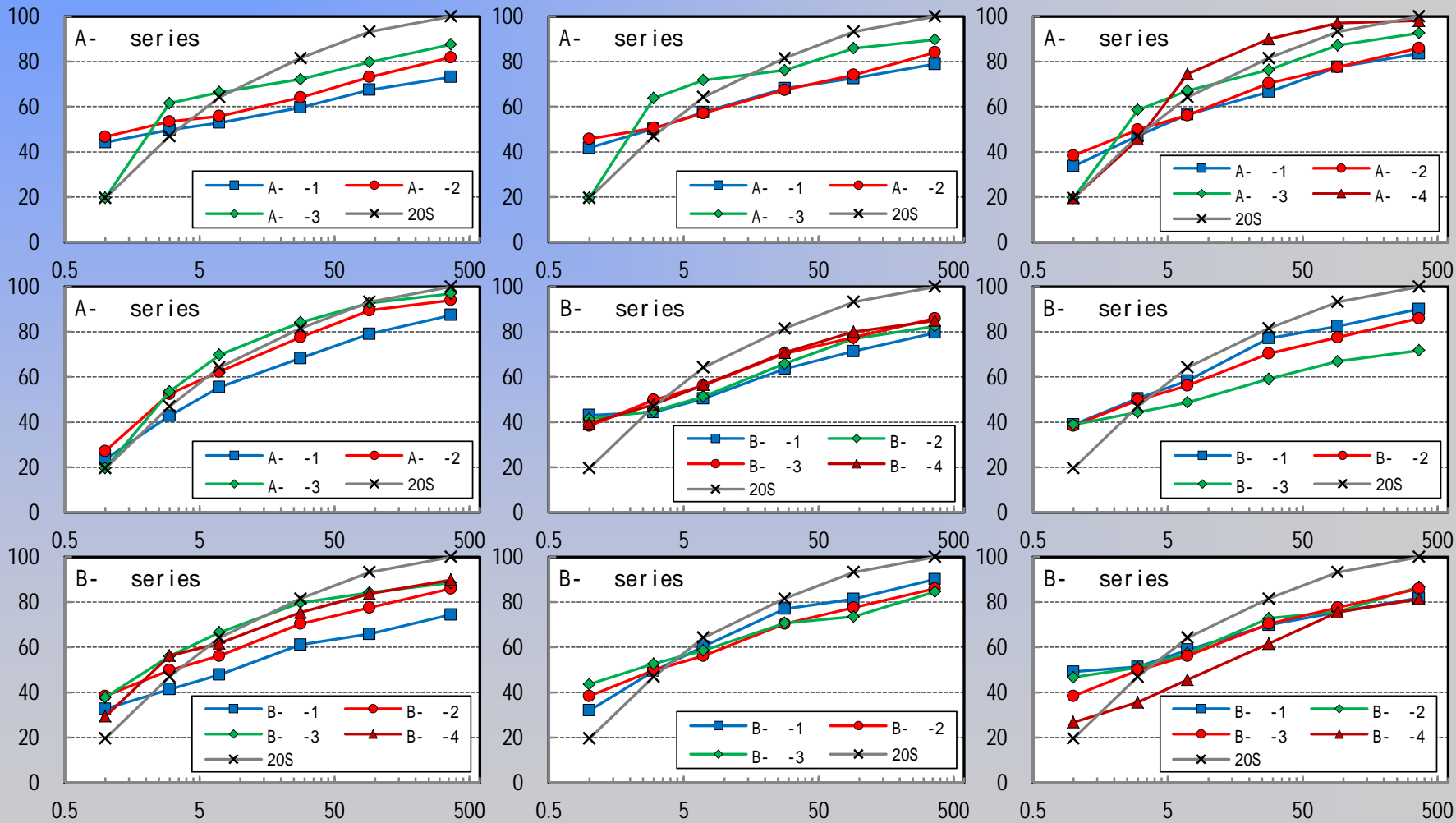
コンクリートに履歴させた各種の温度パターン



第3章 コンクリートの発熱による高温履歴が 硬化性状に及ぼす影響の解明と定量化

各種の高温履歴を受けたコンクリートの強度発現

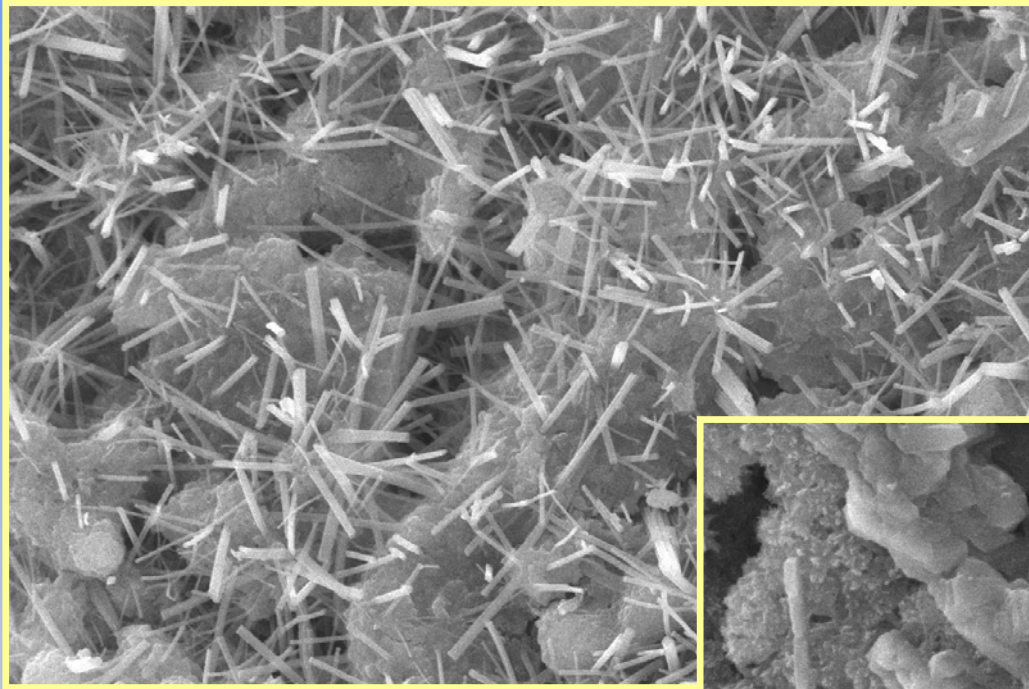
強度発現率 (%)



材齢 (日)

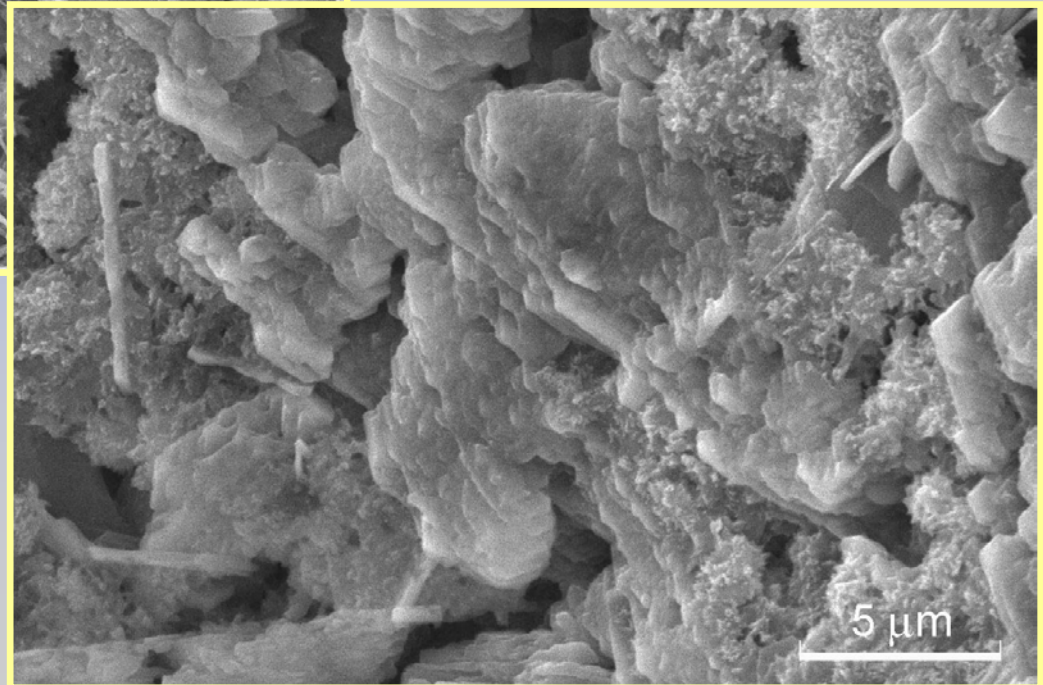
第3章 コンクリートの発熱による高温履歴が 硬化性状に及ぼす影響の解明と定量化

微細組織の形成 — 材齢1日

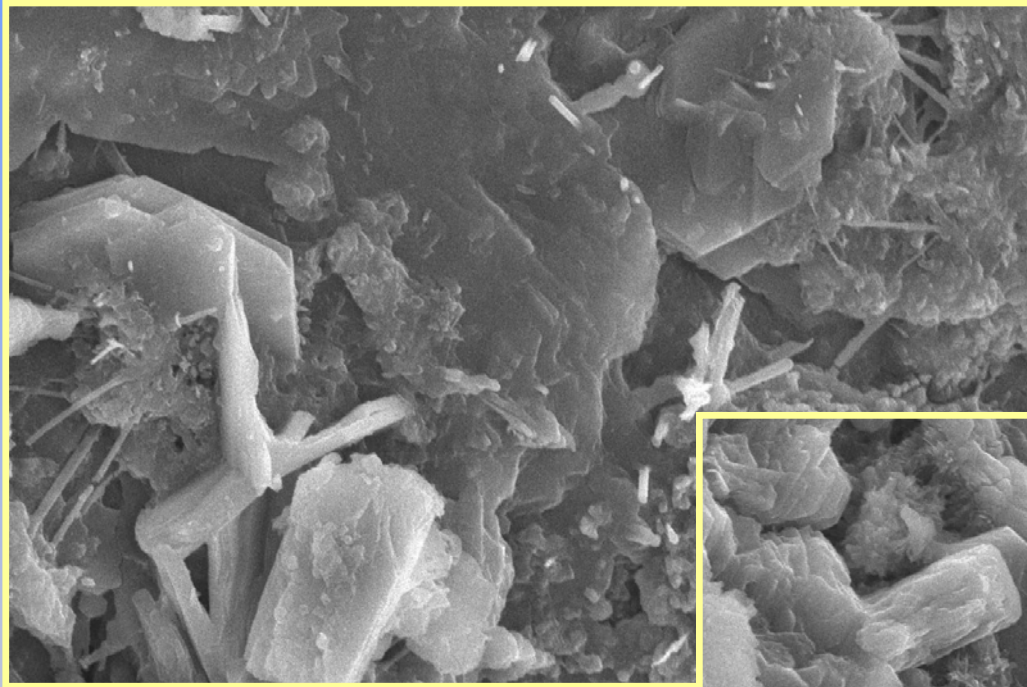


← 20°C一定

初期高温履歴 →

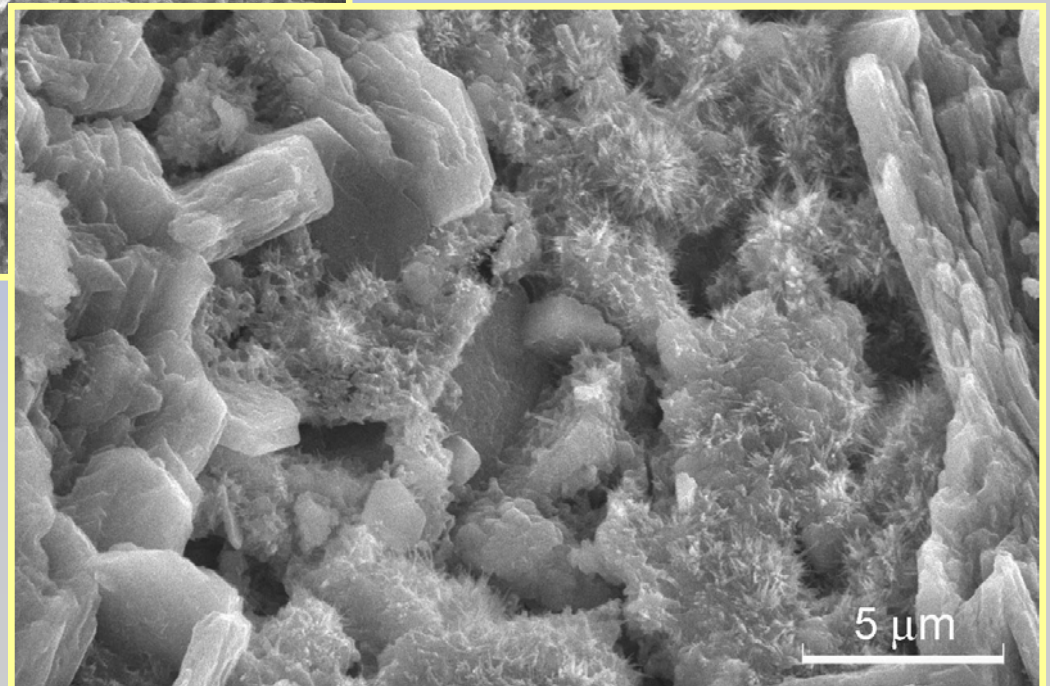


第3章 コンクリートの発熱による高温履歴が 硬化性状に及ぼす影響の解明と定量化 微細組織の形成 —材齢365日



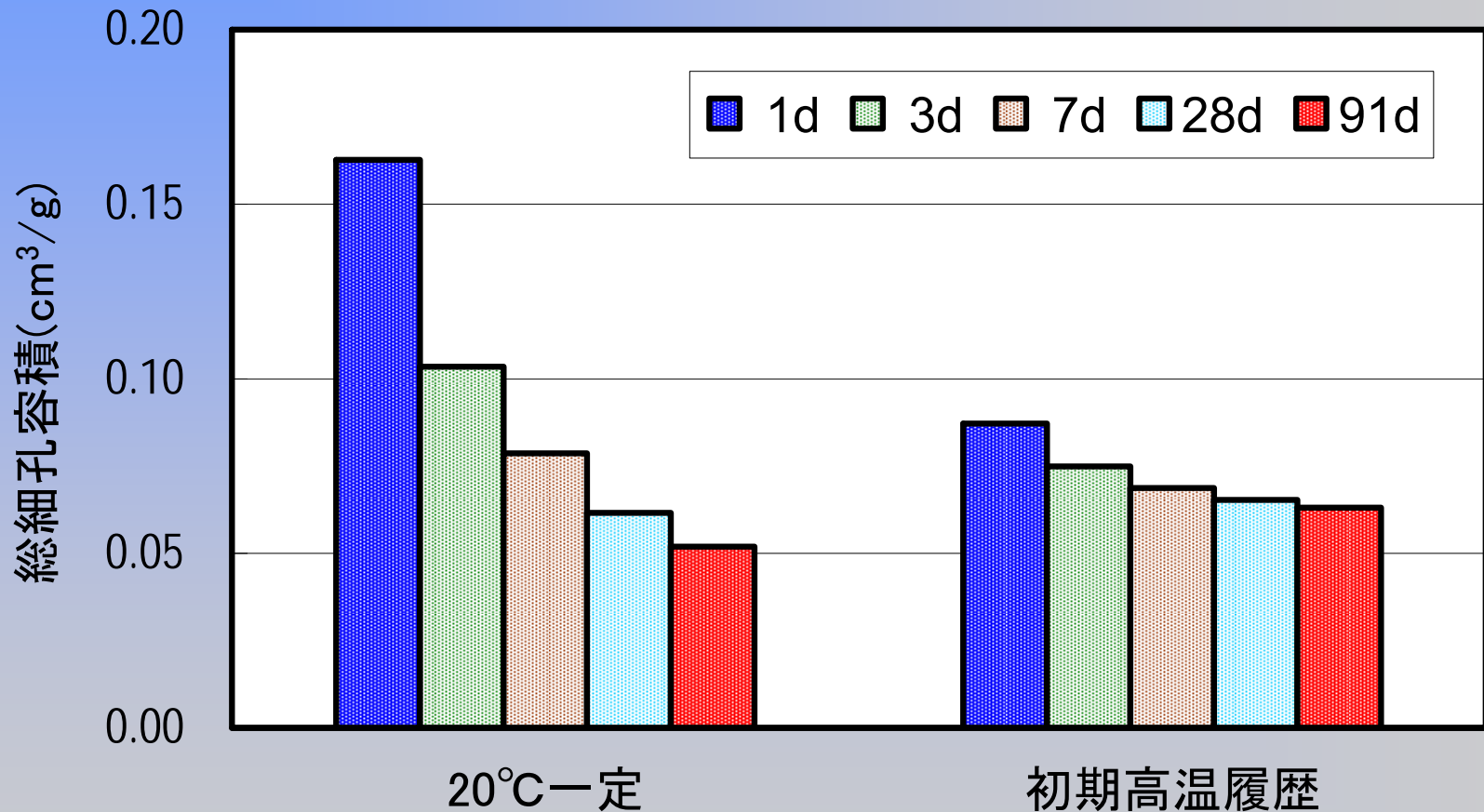
← 20°C一定

初期高温履歴 →



第3章 コンクリートの発熱による高温履歴が 硬化性状に及ぼす影響の解明と定量化

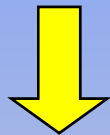
セメント硬化体の総細孔量



普通ポルトランドセメント使用, W/C=30.0(%)

第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

- ★ コンクリートは、使用するセメントの種類、調合、部材の形状・寸法、環境条件(温度・湿度)などによって発熱・硬化性状が大きく異なる。



- ★ コンクリートの発熱・硬化性状を予測する。
 - セメントの水和反応シミュレーションを基点
 - 1) 様々な種類のセメント・骨材に対応
 - 2) 様々な調合のコンクリートに対応
 - 3) 様々な形状・寸法のコンクリート部材に対応
 - 4) 様々な環境条件(温度・湿度)に対応

第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

★コンクリートの発熱性状の予測

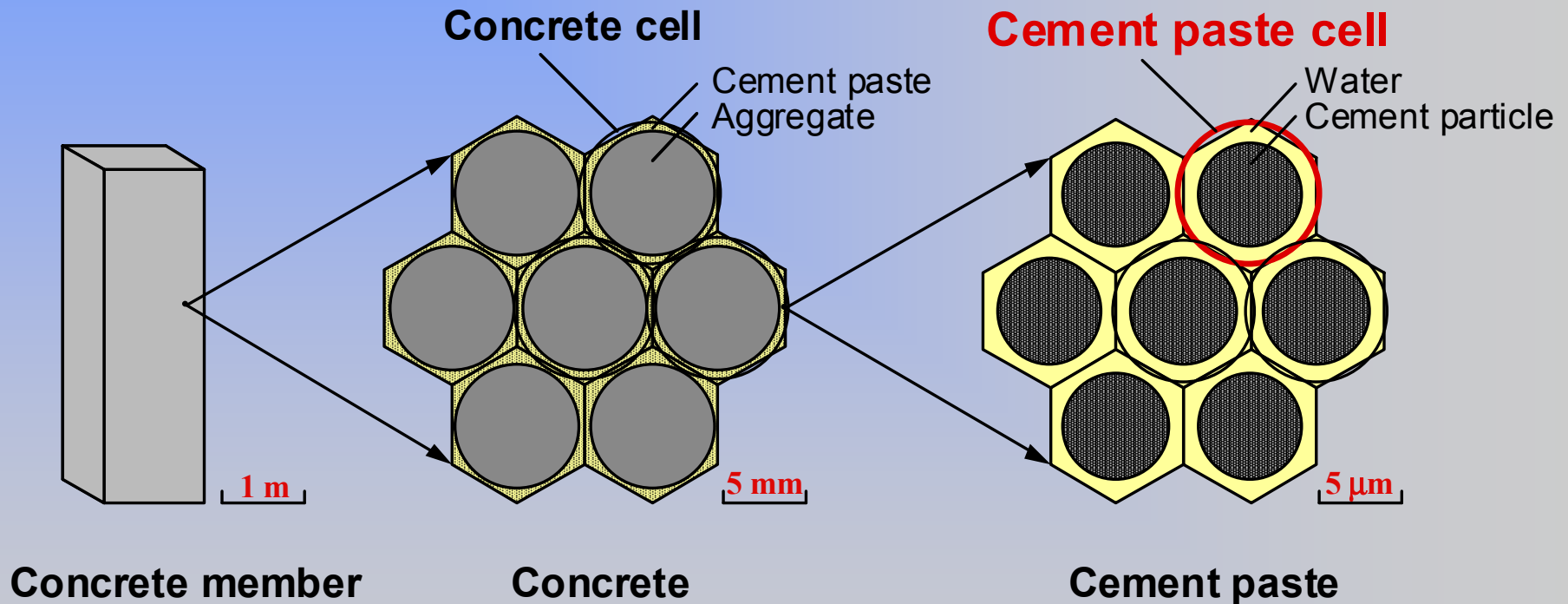
- セメントの水和反応熱に起因したコンクリートの温度上昇
- セメントの水和反応率を精緻に予測する必要がある。

★コンクリートの硬化性状の予測

- コンクリートの強度発現メカニズムは、
 - 1) セメントの水和反応によりセメント水和物が生成され、
 - 2) セメント水和物により微細組織構造が形成される過程に支配されている。
- 水和反応率よりも、セメント水和物の生成量・生成分布など微細組織の形成過程に着目する必要がある。

第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

スケールレベル

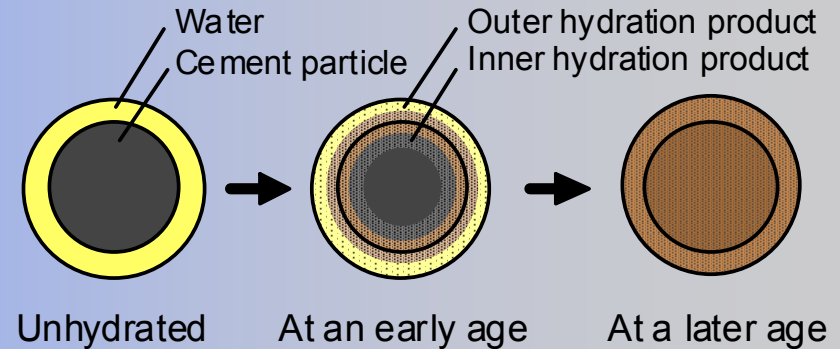


第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

セメントの水和反応・組織形成モデルの概念

★ 水とセメント成分の双方向拡散

- セメント粒子内への水の拡散
- セメント粒子外へのセメント成分の拡散

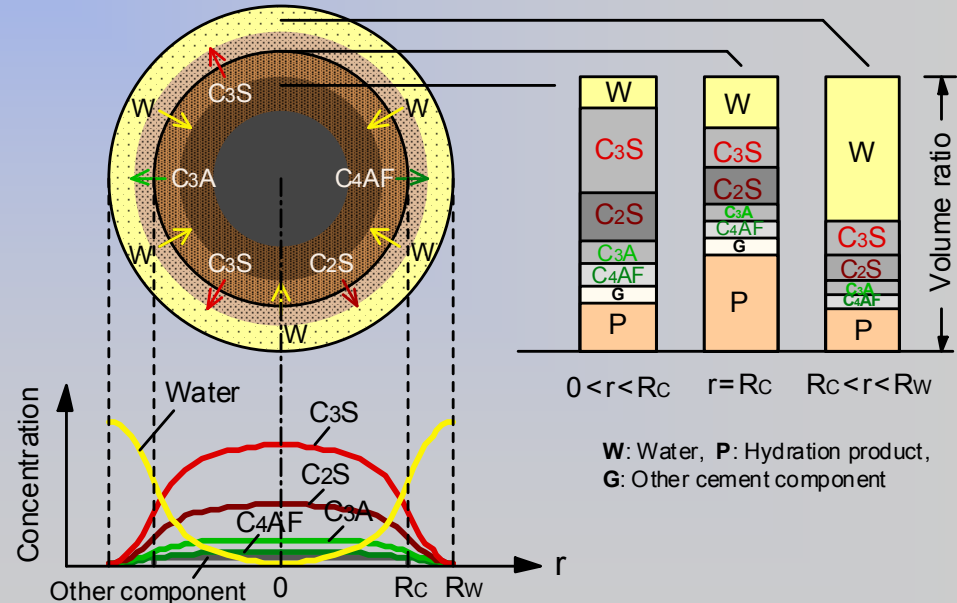


★ 2次反応

- 位置によって、セメント水和物の生成量が異なる。

★ 外部水和物の組織形成率

- セメント粒子外部の水和物の生成量は、コンクリートの硬化性状に大きく関与する。



第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

★ C3Sの拡散方程式

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{D_A}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 f_A \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{C_A}{f_A} \right) \right\} - \frac{k_A C_A C_W}{f_A}$$

★ C2Sの拡散方程式

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = \frac{D_B}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 f_B \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{C_B}{f_B} \right) \right\} - \frac{k_B C_B C_W}{f_B}$$

★ C3Aの拡散方程式

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} = \frac{D_L}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 f_L \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{C_L}{f_L} \right) \right\} - \frac{k_L C_L C_W}{f_L}$$

★ C4AFの拡散方程式

$$\frac{\partial C_F}{\partial t} = \frac{D_F}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 f_F \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{C_F}{f_F} \right) \right\} - \frac{k_F C_F C_W}{f_F}$$

★ 水の拡散方程式

$$\frac{\partial C_W}{\partial t} = \frac{D_A}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 f_A \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{C_W}{f_A} \right) \right\} + \frac{D_B}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 f_B \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{C_W}{f_B} \right) \right\} + \frac{D_L}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 f_L \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{C_W}{f_L} \right) \right\} + \dots$$

第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

★ C3Sの水和反応率

$$\alpha_A = 1 - \frac{3}{V_A^* R_C^3 C_{A0}} \int_0^{R_w} r^2 C_A dr$$

★ C2Sの水和反応率

$$\alpha_B = 1 - \frac{3}{V_B^* R_C^3 C_{B0}} \int_0^{R_w} r^2 C_B dr$$

★ セル全体の水和物の組織形成率

$$\begin{aligned} \chi_{ALL} = & \frac{3\xi_A}{R_W^3 C_{PA0}} \int_0^{R_w} \int_0^t \frac{r^2 k_A C_A C_W}{f_A} dt dr + \frac{3\xi_B}{R_W^3 C_{PB0}} \int_0^{R_w} \int_0^t \frac{r^2 k_B C_B C_W}{f_B} dt dr \\ & + \frac{3\xi_L}{R_W^3 C_{PL0}} \int_0^{R_w} \int_0^t \frac{r^2 k_L C_L C_W}{f_L} dt dr + \frac{3\xi_F}{R_W^3 C_{PF0}} \int_0^{R_w} \int_0^t \frac{r^2 k_F C_F C_W}{f_F} dt dr \end{aligned}$$

★ 外部水和物の組織形成率

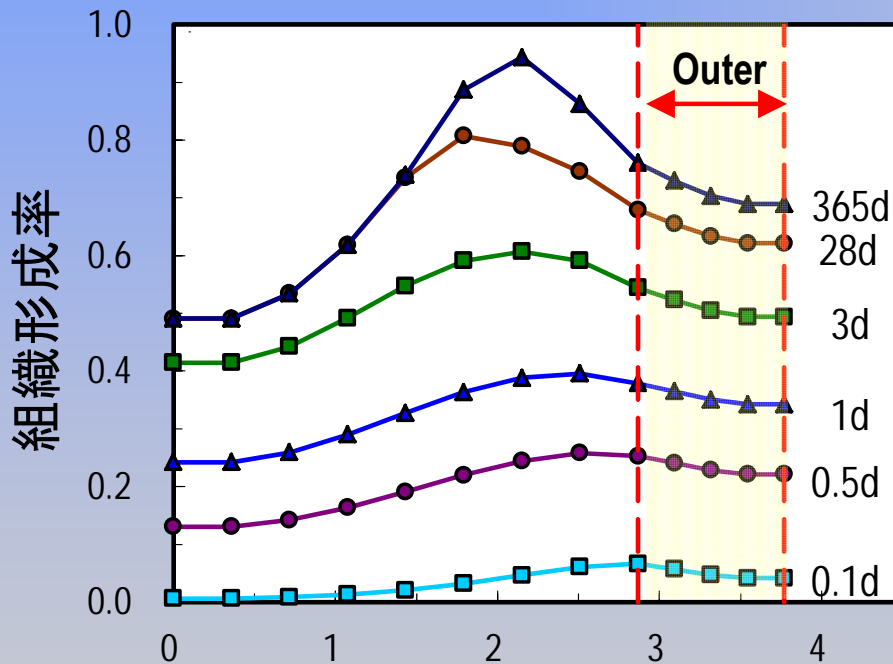
$$\begin{aligned} \chi_{OUT} = & \frac{3\xi_A}{(R_W^3 - R_C^3) C_{PA0}} \int_{R_c}^{R_w} \int_0^t \frac{r^2 k_A C_A C_W}{f_A} dt dr + \frac{3\xi_B}{(R_W^3 - R_C^3) C_{PB0}} \int_{R_c}^{R_w} \int_0^t \frac{r^2 k_B C_B C_W}{f_B} dt dr \\ & + \frac{3\xi_L}{(R_W^3 - R_C^3) C_{PL0}} \int_{R_c}^{R_w} \int_0^t \frac{r^2 k_L C_L C_W}{f_L} dt dr + \frac{3\xi_F}{(R_W^3 - R_C^3) C_{PF0}} \int_{R_c}^{R_w} \int_0^t \frac{r^2 k_F C_F C_W}{f_F} dt dr \end{aligned}$$

第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

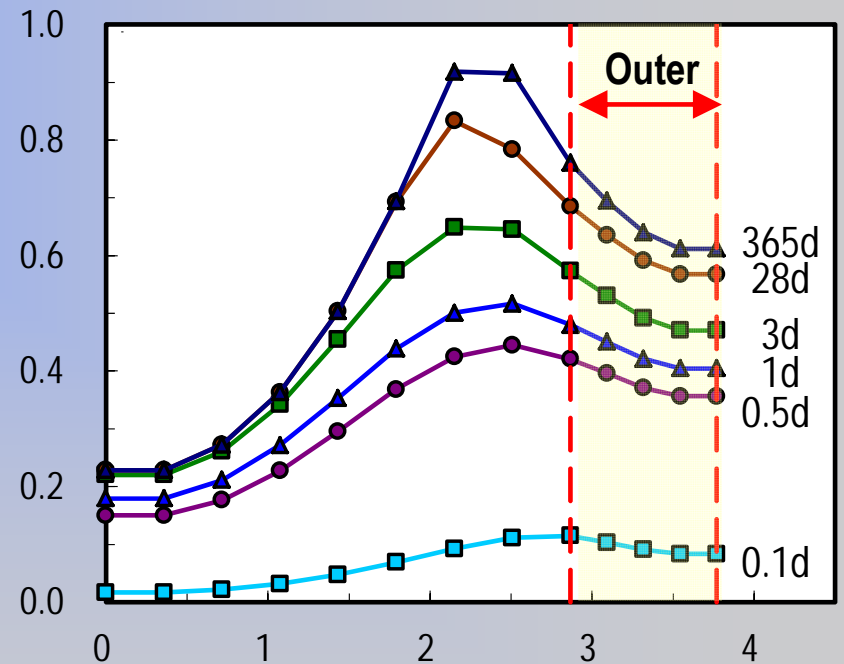
セメント水和物の組織形成率の計算例

◆ 20°C一定

◆ 初期高温履歴



セル内の半径位置 (μm)



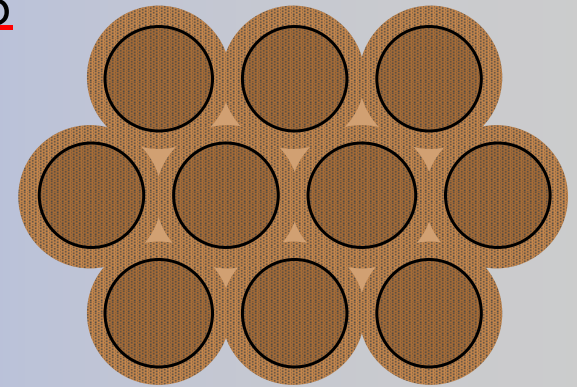
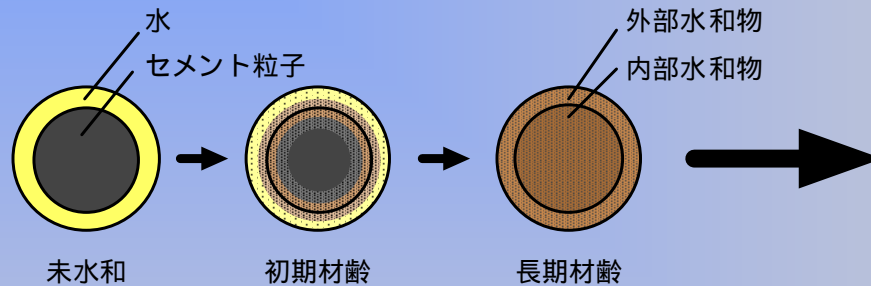
セル内の半径位置 (μm)

普通ポルトランドセメント使用, W/C=40.0(%)

第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

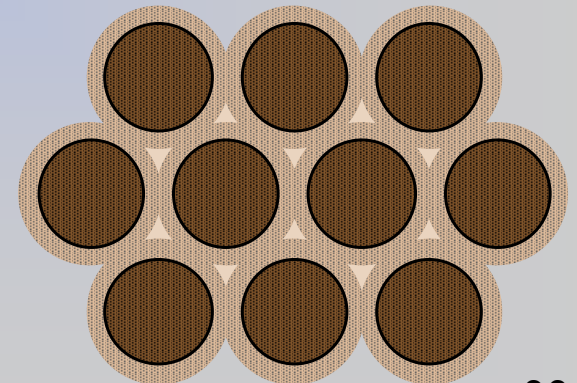
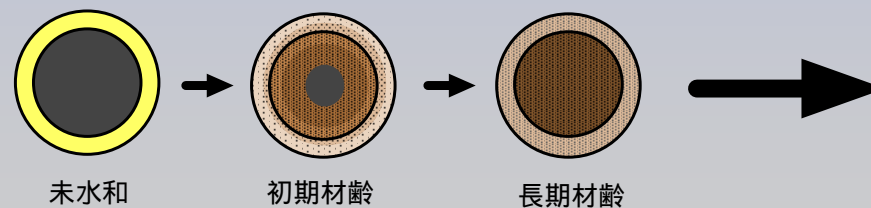
★ 20°C一定

- 拡散および水和反応が緩やかに進行
- 時間はかかるが、外部水和物が十分に成長する

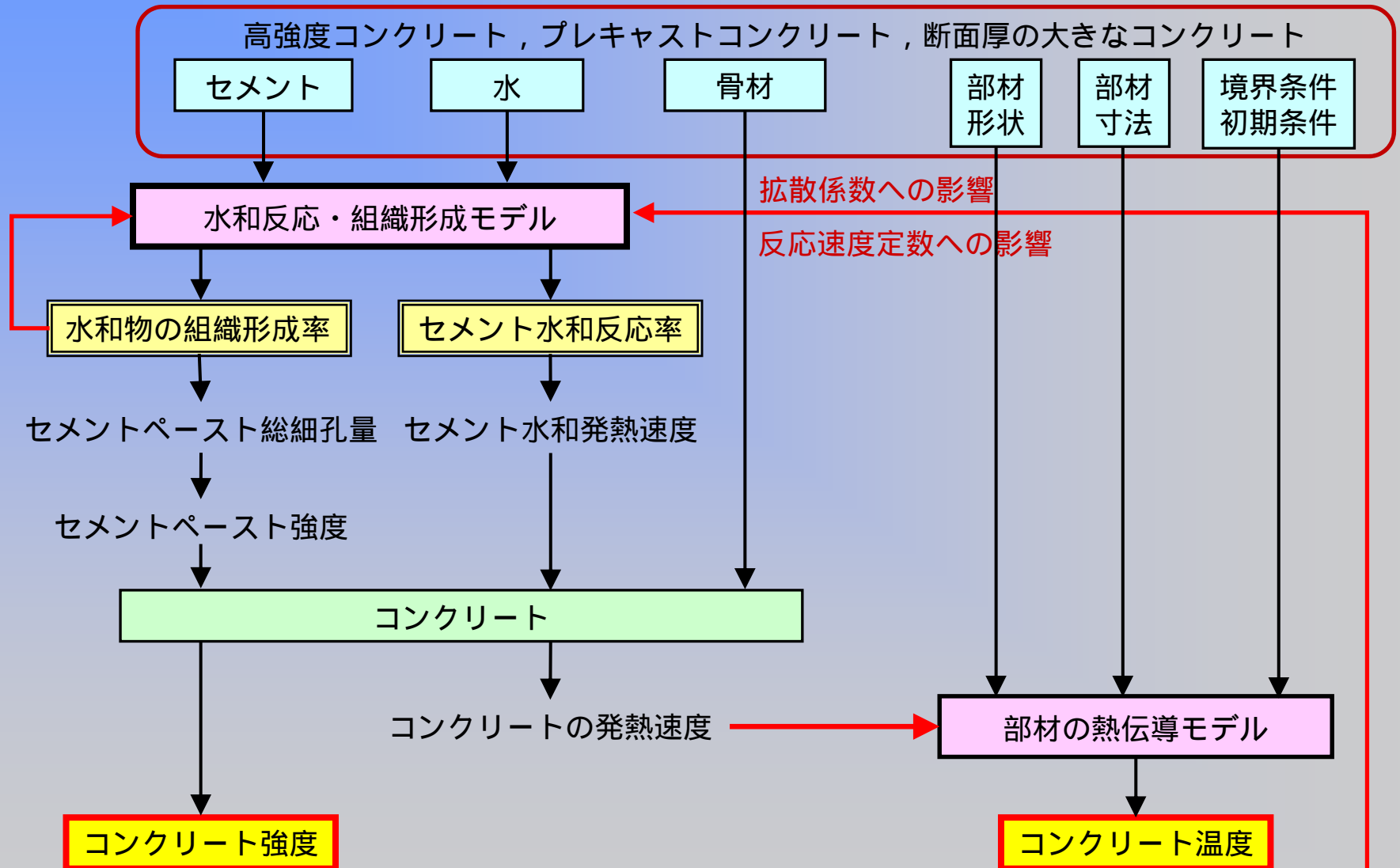


★ 初期高温履歴

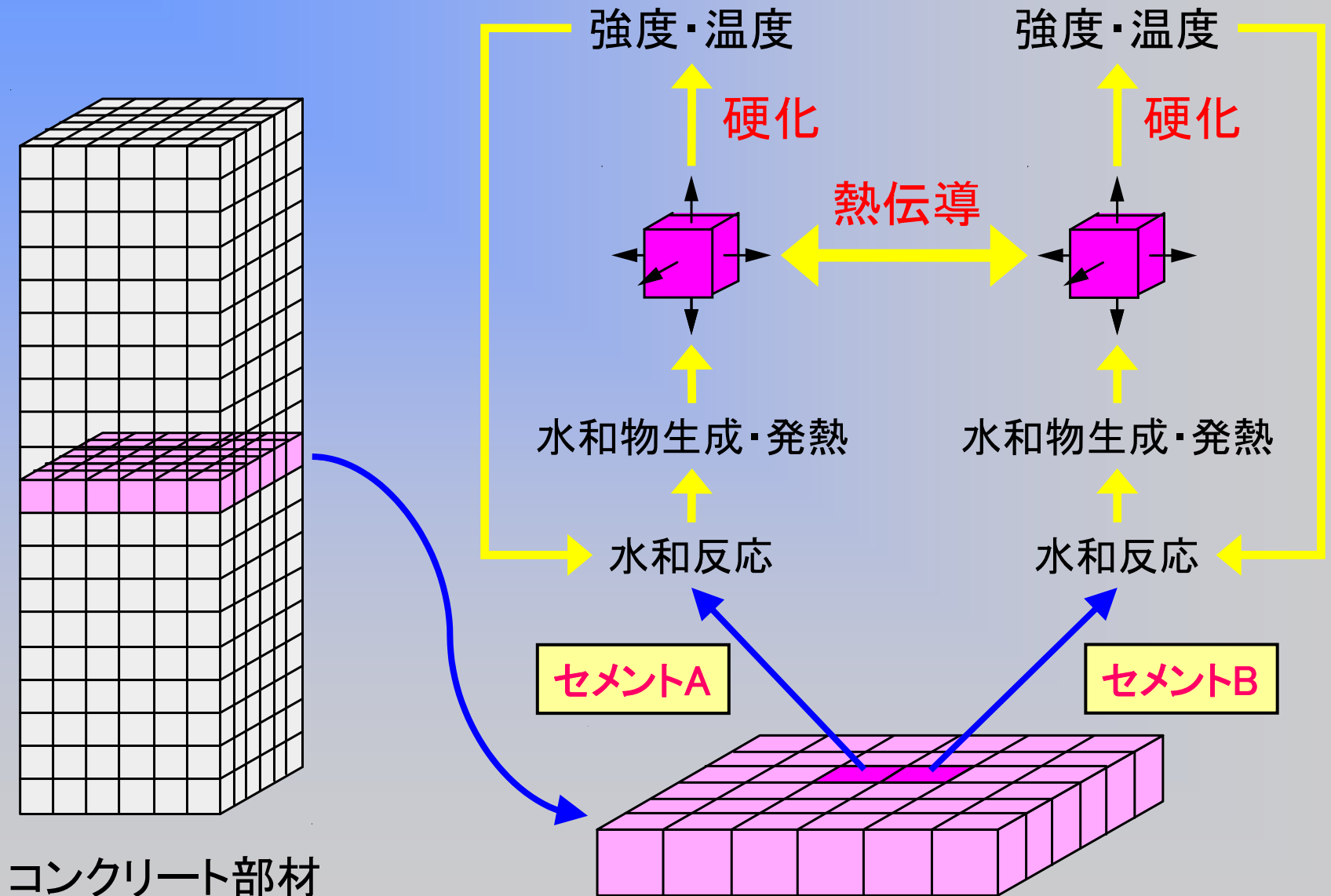
- 拡散が不十分な状態での急激な水和反応
- 外部水和物が十分に成長しない



第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

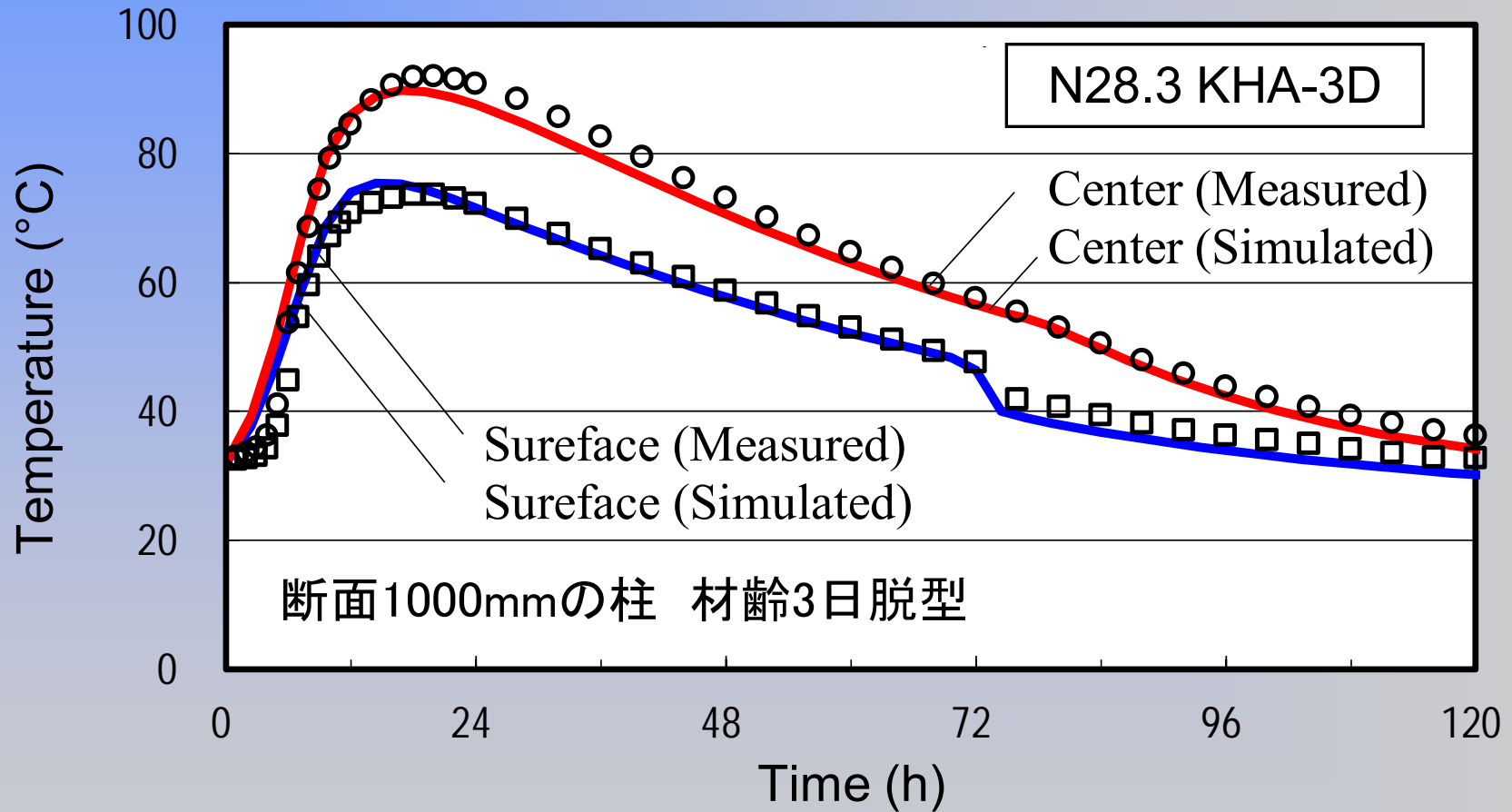


第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算



第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

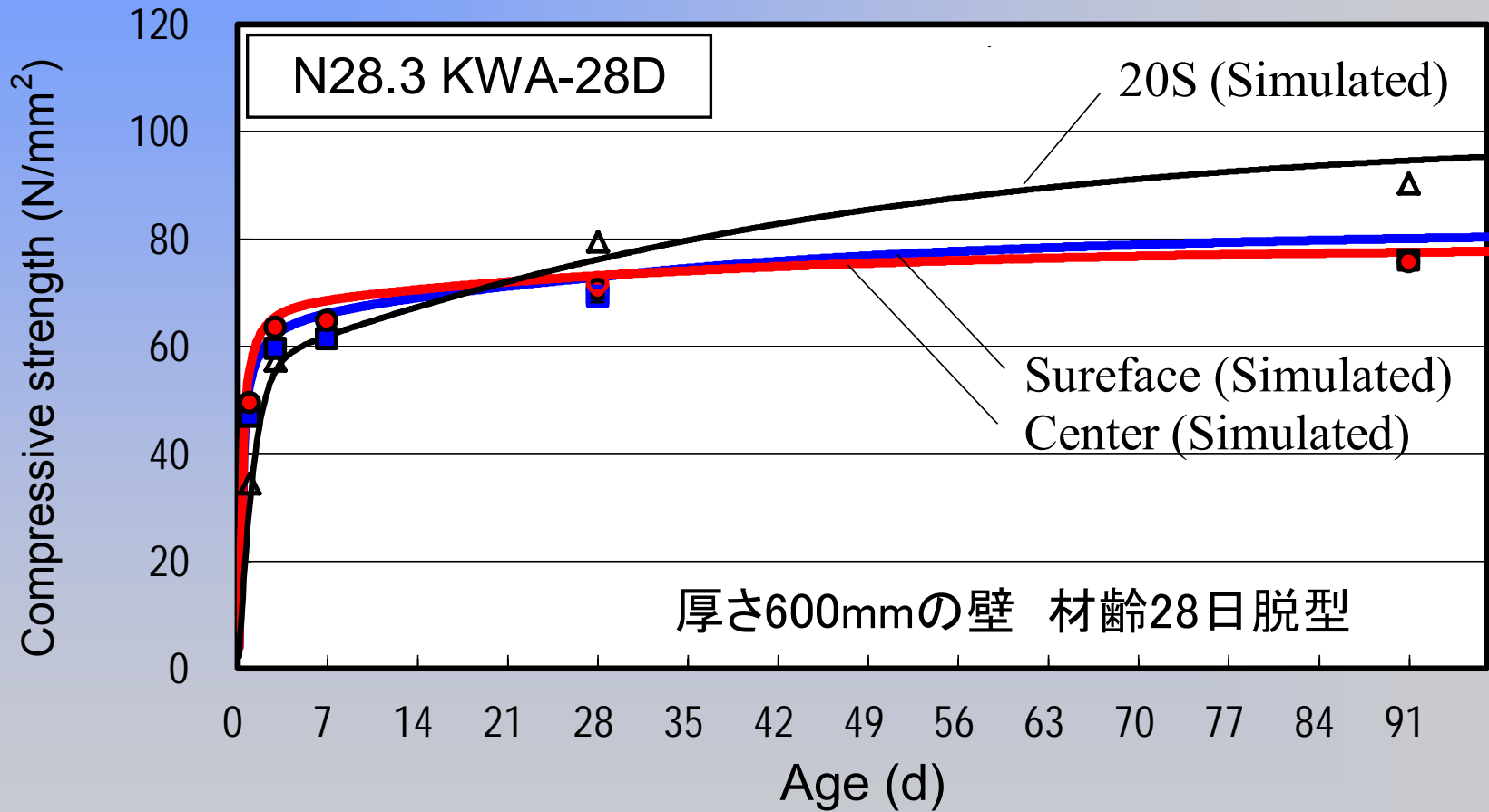
コンクリート部材の温度履歴予測計算例



高強度柱部材, 普通ポルトランドセメント使用, W/C=28.3(%)

第4章 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いた コンクリートの発熱・硬化性状の予測計算

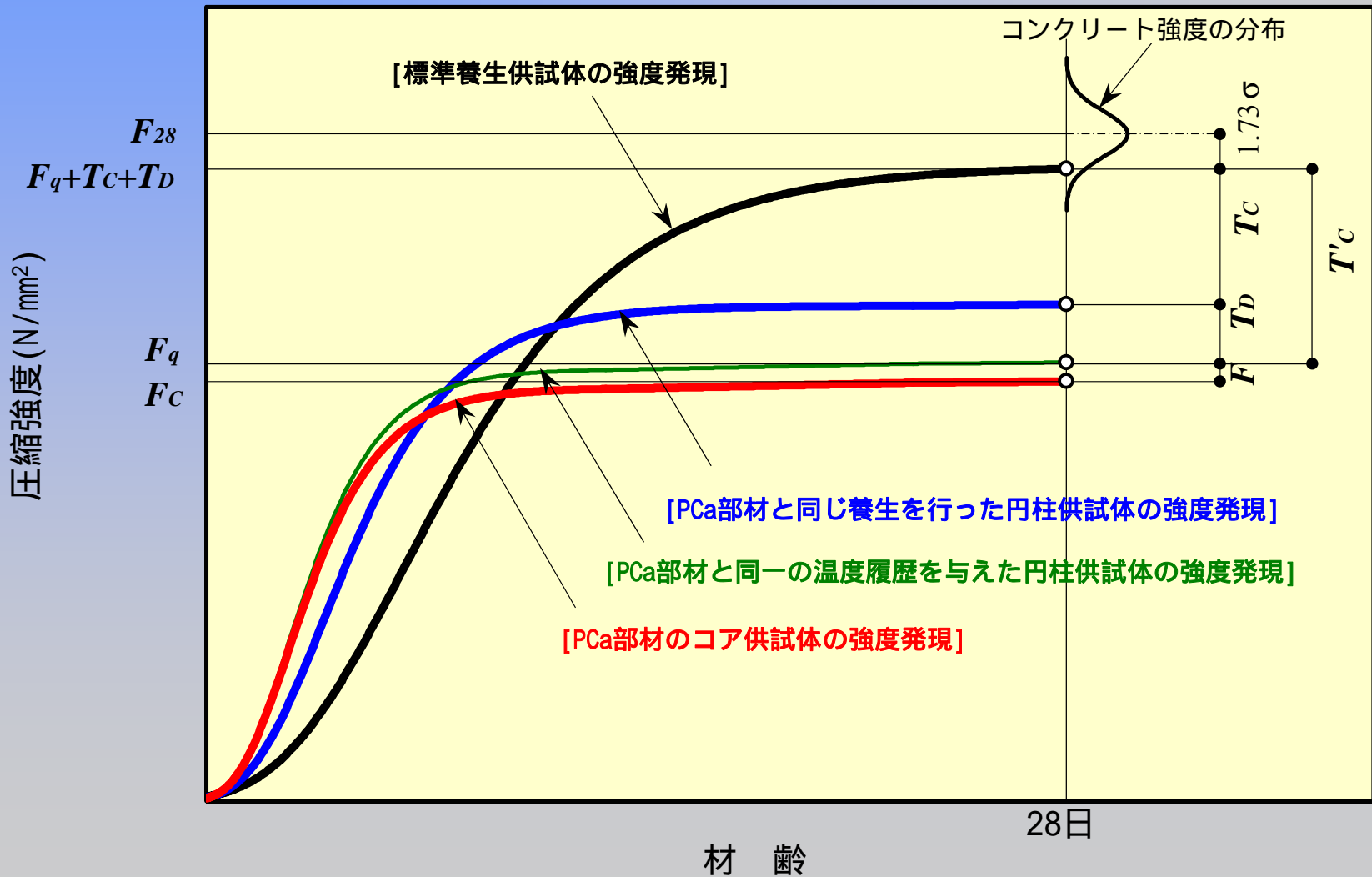
コンクリート部材の強度発現予測計算例



高強度壁部材, 普通ポルトランドセメント使用, W/C=28.3(%)

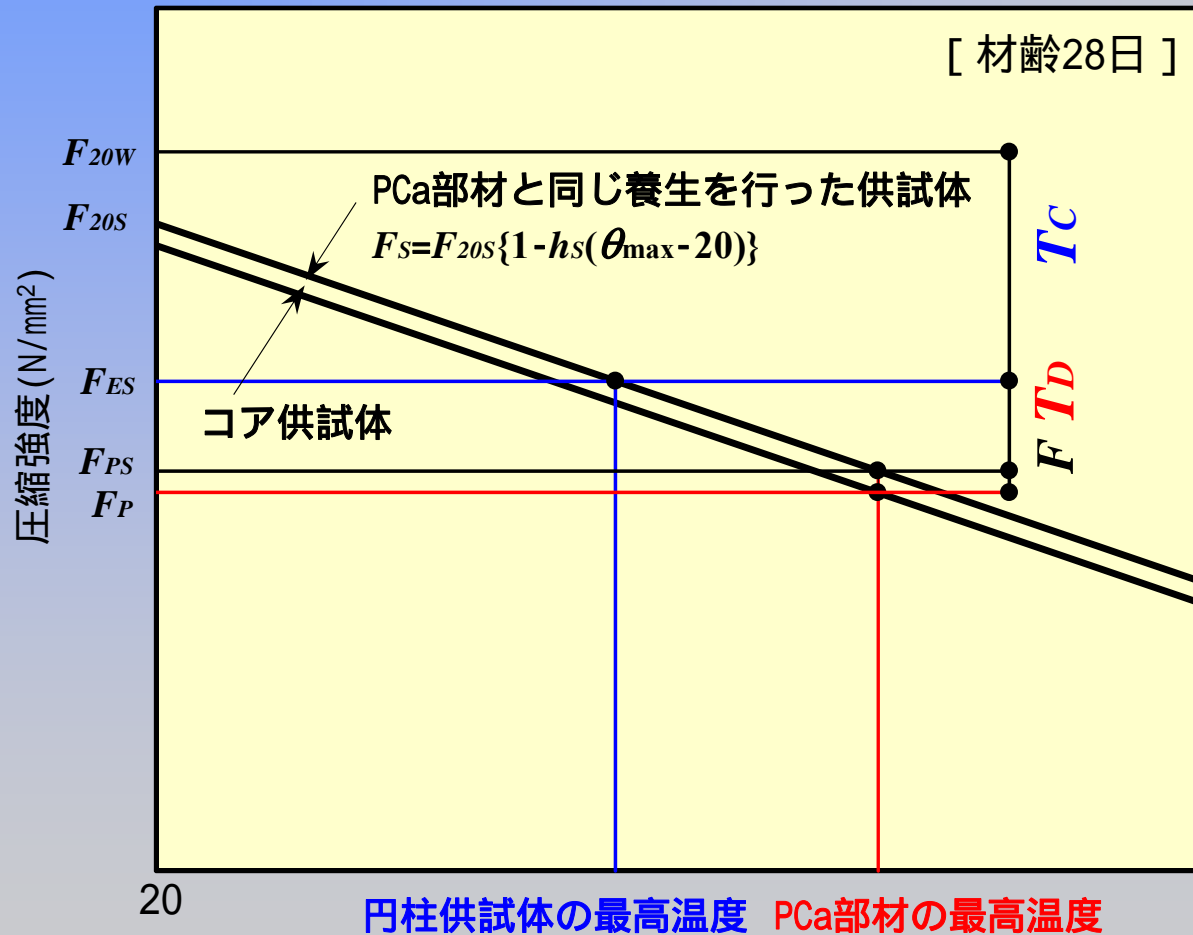
第5章 各種コンクリートの調合設計・強度管理への応用

断面厚の大きなプレキャスト部材の調合設計における強度補正值



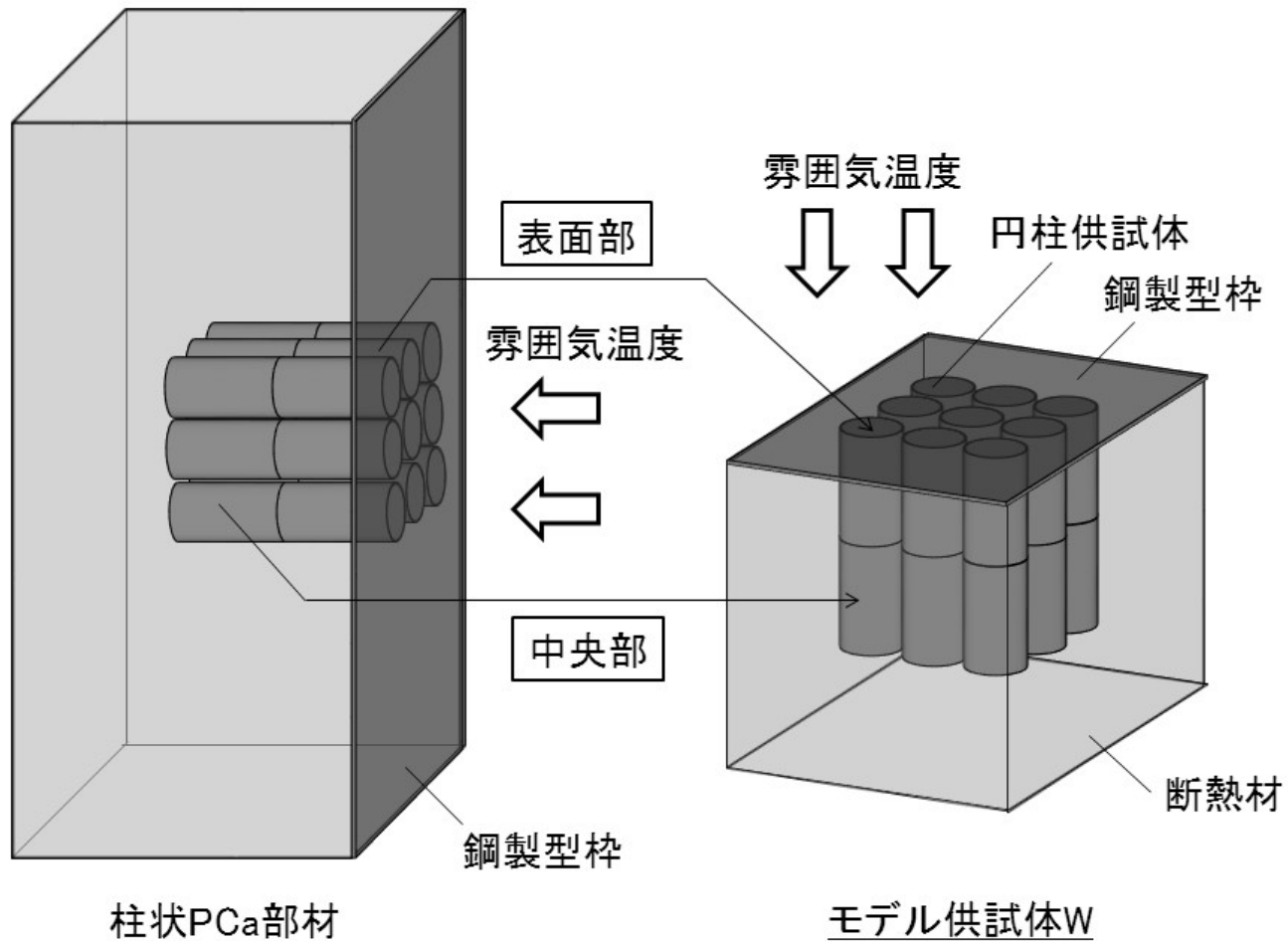
第5章 各種コンクリートの調合設計・強度管理への応用

プレキャスト部材の履歴最高温度と強度補正值の関係



第5章 各種コンクリートの調合設計・強度管理への応用

プレキャスト部材モデル養生供試体による強度管理



第6章 調合設計・強度管理等に関する情報の保管

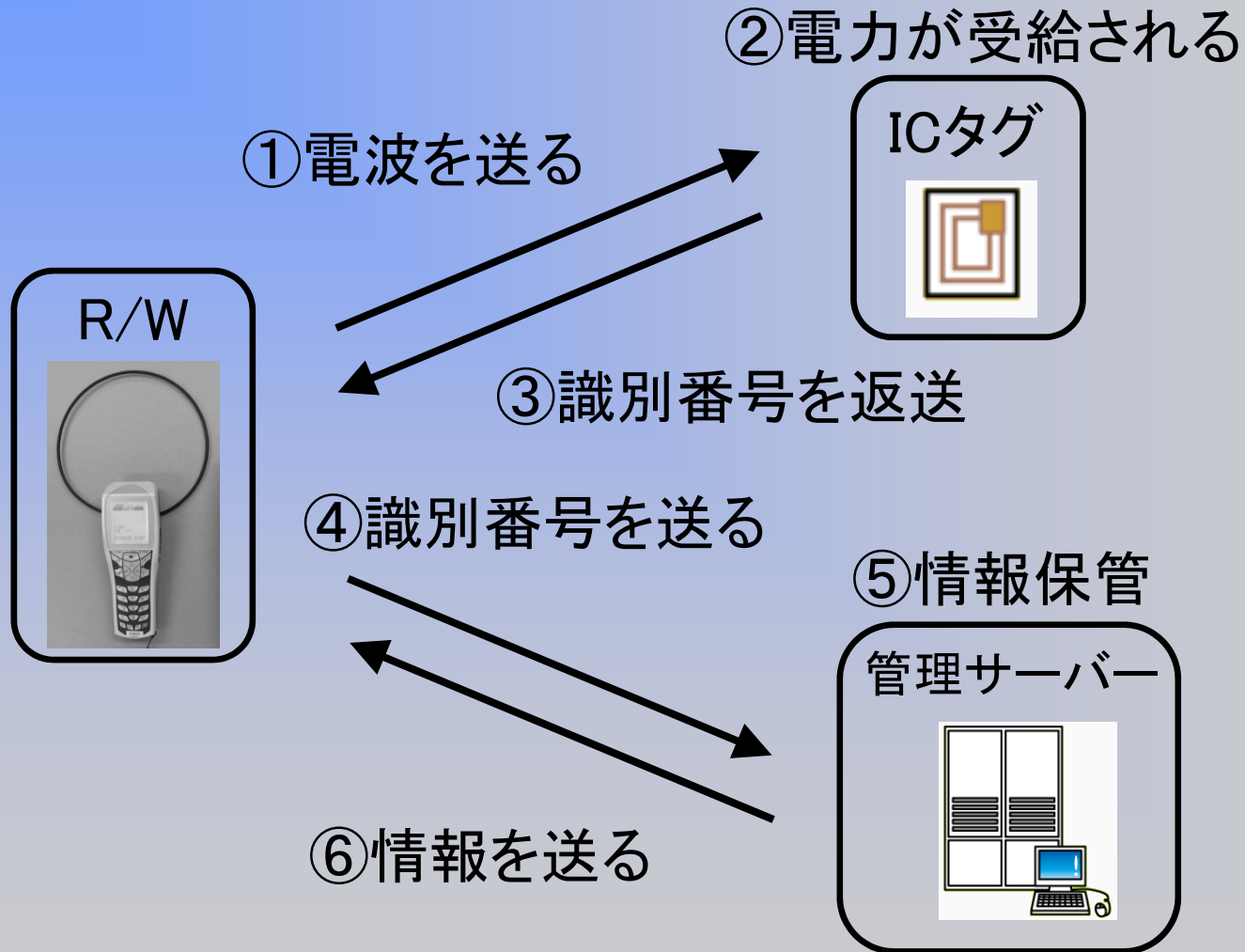
- 製造～現場搬入～施工 ⇒ **流動体**
- 施工～供用 ⇒ **硬化体**
- ◆ コンクリートが流動体の段階から情報を記録する必要がある。
- ◆ そのためには、識別のための目印が必要
- ◆ 流動体なのでシールやプレートは×



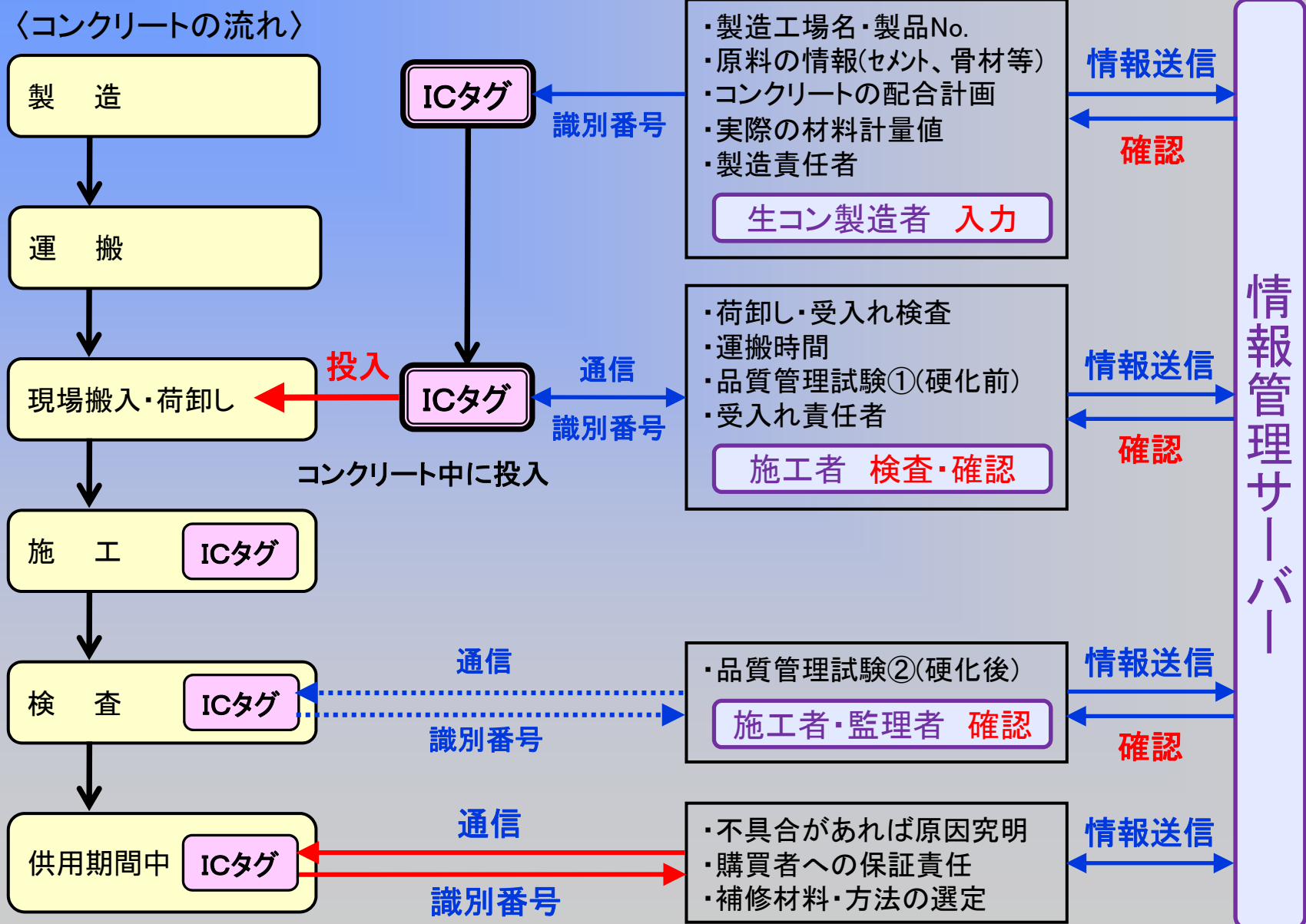
- ◆ ICタグをコンクリートに埋め込んで無線通信



第6章 調合設計・強度管理等に関する情報の保管



第6章 調合設計・強度管理等に関する情報の保管



第7章 まとめ

本論文に示した研究成果

- (1) 各種コンクリートの発熱性状と硬化性状の把握
- (2) コンクリートの発熱による初期高温履歴が硬化性状に及ぼす影響の解明および定量化
- (3) セメントの水和反応レベルを起点としたコンクリートの発熱・硬化性状の予測計算方法の提案
- (4) 各種コンクリートの発熱・硬化性状を考慮した強度推定・調合設計・強度管理方法の提案
- (5) 調合設計・強度管理等に関する情報の保管方法の提案

学術論文リスト

- 1) 杉山央, 榎田佳寛: 初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, pp.23-30, 1999.1
- 2) 杉山央, 榎田佳寛: 早強セメントおよび低熱セメントを用いたコンクリートの強度発現性に及ぼす初期高温履歴の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第520号, pp.9-16, 1999.6
- 3) 杉山央, 地濃茂雄: コンクリートの強度発現に及ぼす初期高温履歴の影響に関する定量的検討(中庸熱ポルトランドセメントを用いたモルタルによる基礎実験), 日本建築学会構造系論文集, 第525号, pp.7-13, 1999.11
- 4) 杉山央, 榎田佳寛: 非定常拡散理論に基づくセメントの水和反応・組織形成モデル, セメント・コンクリート論文集, 第53号, pp.35-42, 2000.1
- 5) H. Sugiyama, Y. Masuda, and M. Abe: Strength Development of Concrete Cured Under High-temperature Conditions at an Early Age, Proceedings of 5th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, SP-192-59, pp.965-982, 2000.6
- 6) 杉山央, 榎田佳寛: 積算温度方式を応用した初期高温履歴コンクリートの強度推定, 日本建築学会構造系論文集, 第538号, pp.21-28, 2000.12
- 7) 杉山央, 榎田佳寛: セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリートの強度発現推定, セメント・コンクリート論文集, 第54号, pp.646-653, 2001.1
- 8) 杉山央, 榎田佳寛, 岩井信彰, 中川侑治: 大断面プレキャストコンクリート部材製造時の温度履歴特性, 日本建築学会技術報告集, 第14号, pp.13-18, 2001.12
- 9) 杉山央, 榎田佳寛, 岩井信彰, 中川侑治: 大断面プレキャストコンクリート部材の強度特性, 日本建築学会技術報告集, 第14号, pp.19-24, 2001.12
- 10) 杉山央, 荒金直樹: セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリートの発熱シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第565号, pp.9-16, 2003.3
- 11) 杉山央, 榎田佳寛: 断面厚の大きなプレキャストコンクリート部材の計画調合における強度補正值に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第575号, pp.7-14, 2004.1
- 12) 杉山央, 安田正雪: 各種形状・断面厚を有する高強度コンクリート部材の温度履歴特性および強度特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第594号, pp.1-8, 2005.8
- 13) H. Sugiyama: Physical Properties of High-Strength Concrete in Large-Size Columns and Walls - Temperature Rise and Strength Development -, Proceedings of 8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, SP-235-21, pp.305-322, 2006.6
- 14) 杉山央, 榎田佳寛: セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリート部材の初期温度上昇予測, 日本建築学会構造系論文集, 第623号, pp.9-17, 2008.1
- 15) 杉山央, 榎田佳寛, 阿部道彦, 安田正雪: 高強度コンクリートを用いた実大柱部材の材齢15年における強度性状および中性化, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第631号, pp.1459-1466, 2008.9
- 16) 杉山央, 大久保孝昭, 中島史郎: コンクリート中に埋め込んだ各種ICタグの通信性に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第15巻, 第29号, pp.9-14, 2009.2
- 17) 杉山央, 角倉英明, 大久保孝昭, 古賀純子, 平出務: 大型コンクリート試験体に埋め込んだ各種ICタグの通信性に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第17巻, 第35号, pp.5-10, 2011.2
- 18) 杉山央, 角倉英明, 江里口玲: ICタグを活用したコンクリートのトレーサビリティ確保技術 -コンクリート中に投入するICタグの必要数量算出手法-, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第688号, pp.1045-1053, 2013.6
- 19) 杉山央, 水戸健介: 柱状プレキャストコンクリートの製造過程における強度管理手法, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第706号, pp.1729-1739, 2014.12
- 20) 杉山央: セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたプレキャストコンクリート部材の温度上昇予測, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第714号, pp.1215-1225, 2015.8