



暑中環境下における コンクリートの強度発現性

中央研究所 第2研究部
高機能コンクリートチーム
森 寛晃

太平洋セメント株式会社

- 背景
- 暑中コンクリートとは
 - 業界動向と規格について
 - 一般的な対策、コンクリート品質への影響
- 高温度履歴を受けるコンクリートの強度発現性
 - モルタルでの検討、分析・解析
 - 長期強度の停滞現象(セメント化学の視点から)
 - 表面塗布剤による強度・耐久性の改善
- 高強度コンクリート(N,M,L,SFPC)の場合

- 近年の地球温暖化、都市部のヒートアイランド現象によって、夏季の外気温が上昇
- 外気温が27°Cを超えると、、、
 - ✓ 外気温+2°C、運搬中に+4°C
 - ✓ 荷卸し、打込み終了までに+2°Cで、コンクリート温度は35°Cを超える

⇒暑中期のコンクリート工事として対策

温度を下げる努力

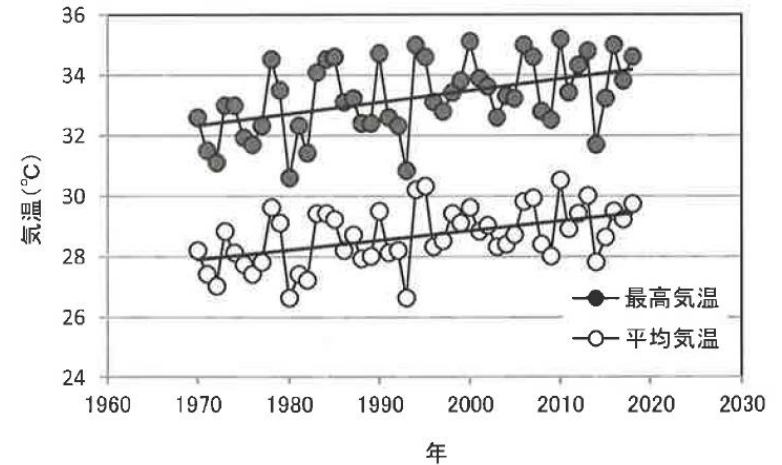
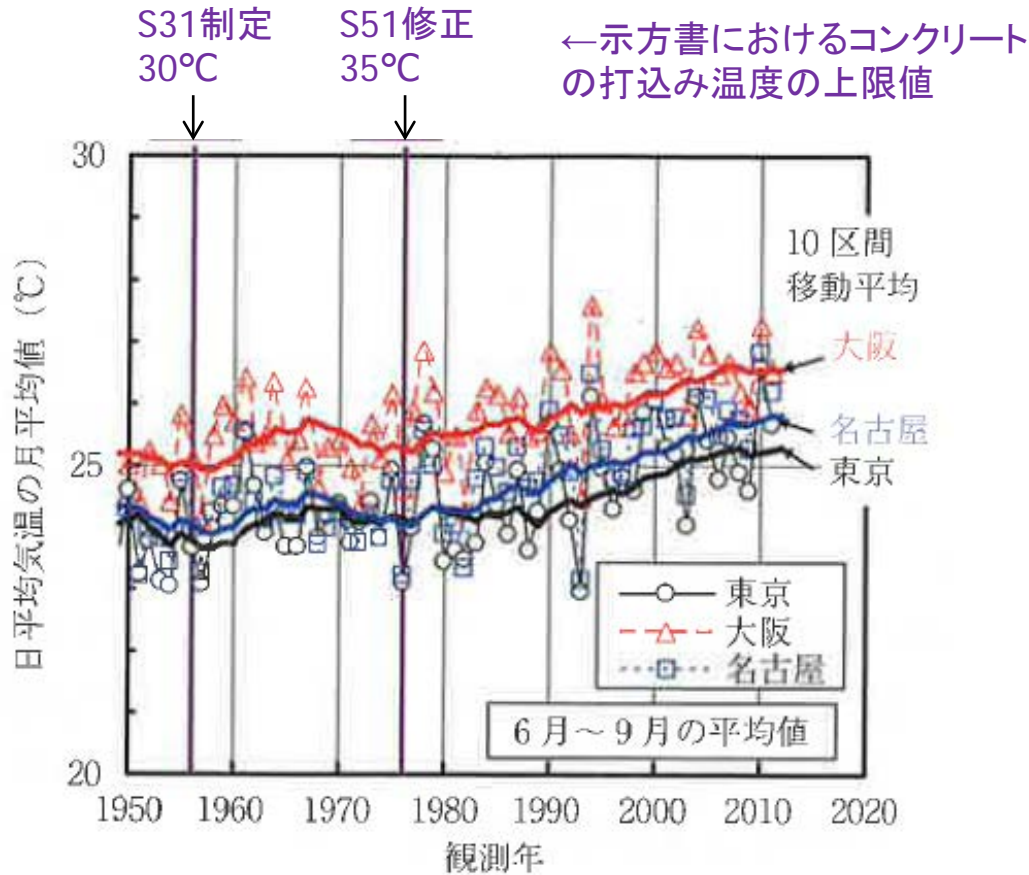
施工者

・日中のコンクリート打設が中止
⇒工期遅れ、打継ぎ部の欠陥など

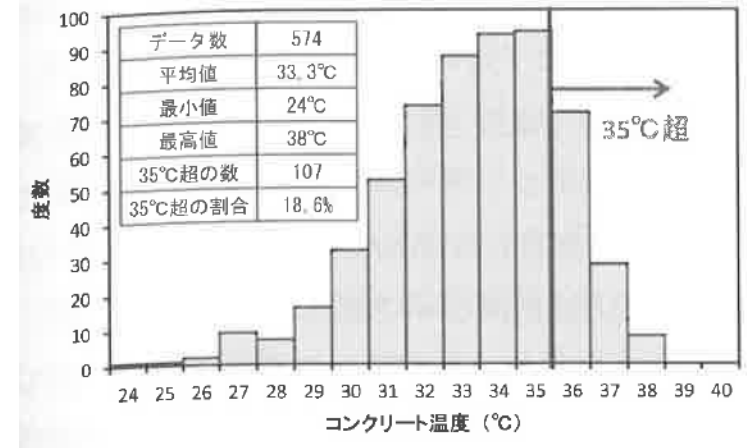
生コン生産者

・生コン返品
⇒処理・廃棄の手間とコスト

日平均気温の推移とコンクリート温度の実態



大阪市の8月の日平均気温と日最高気温の変化※



荷卸し時のコンクリート温度の実態調査※
(2018年大阪府)

※ 暑中コンクリート工事における対策マニュアル2018(AIJ近畿支部編)より抜粋


暑中コンクリートに関する規定の変遷

● 示方書とJASS5の比較

	示方書(2017年版)	JASS 5(2018年版)
条文	<ul style="list-style-type: none">・打込み時のコンクリート温度の上限は35°C以下を標準とする・上限値を超える場合は、コンクリートが所要の品質を確保できることを確かめねばならない	<ul style="list-style-type: none">・荷卸し時のコンクリート温度は、原則として35°C以下とする・35°Cを超える場合を想定し、工事監督者とコンクリートの品質変化に対する対策を講じておく
変更点	2012年版から大きな変更なし	2009年版から大きな変更なし
その他	<ul style="list-style-type: none">・確認事項として、フレッシュ、強度、施工への影響、断熱温度上昇特性、初期高温履歴の影響など	<ul style="list-style-type: none">・構造体強度補正值$_{28}S_{91}$は特記のない場合、6N/mm²とする(通常期は3N/mm²)・38°C程度までなら極端な性能低下は生じないと解説に明記
(共通点)	<ul style="list-style-type: none">・練混ぜから打込み終了までの時間は1.5時間以内(外気温25°C以上)・Nの湿潤養生期間は5日間以上	

- 日平均気温が25°Cを超える時期に施工するコンクリート

どんな「わるさ」が生じるのか？

- ✓ スランプが出にくい
- ✓ 空気が連行されにくい
- ✓ 運搬中のスランプ低下が大きいくい
- ✓ コールドジョイントが生じやすい
- ✓ 初期ひび割れが生じやすい(急速な乾燥や高い水和熱)
- ✓ 長期強度の増進が少ない  本日の主題
- ✓ 耐久性が低下する(?)

近年、セメントの初期強度は高くなる傾向があり、
コンクリートは年々高強度化している

 暑中コンクリートの
物理的・化学的な特徴は顕在化しやすい

<業界動向>

- 日本建築学会(AIJ)近畿支部と大阪生コン協組(2009～)
⇒条件付で38°Cを認める**対策マニュアル発刊**(2013.5)・・・JASS5(2009)を補完
- **全生連関東一区**でも同じ動き(2012～)
- ゼネコンが独自に認定取得
 - 三井住友、竹中、大林、上限値を37°C

★ 35°C超えを前提として、データ収集・品質確認の取り組みが進む

<学会動向>

- AIJ(2014近畿)パネルディスカッション
 - 気候変動下における暑中コンクリート工事の課題と対策
- AIJ近畿支部 **暑中コンクリート工事対策マニュアル2018**が改定発刊
 - NもしくはBB使用、 $F_c=36\text{N/mm}^2$ 以下の一般強度の普通コンクリート
 - マスコンは温度応力によるひび割れの発生可能性を検討
- JCI近畿支部 **土木構造物**における暑中コンクリート工事の対策検討ガイドライン(2018.6)
 - N使用、設計基準強度 30N/mm^2 以下を対象
 - 部材温度が90°Cを超えないことを確認する

暑中コンクリート工事における対策マニュアル

● 作成の目的

- 35°Cを超える場合の具体的な対応、設計者、施工者、製造者のなすべき対策を明確にする

例えば、製造者は・・・

- コンクリートの製造に使用する材料が、日射により過度に高温にならないようにする
- 製造設備や生コン車が日射により過度に高温にならないようにする
- 練り混ぜ水に地下水を使用するなど、日射の影響を受けにくい材料を使用する
- 遅延形のコンクリート用化学混和剤を使用する
- 上記材料についても試験練り等により、フレッシュ性状や硬化性状を確認しておく
- 混和剤の準備ができる期間をあらかじめ購入者（施工者）と協議し、決めておく。もしくは示しておく。

一般的な暑中コン対策

項目	内容
練り上がりコンクリート温度の抑制	・材料の温度抑制、冷却 (ヤードへのカバー、骨材への散水、地下水、 練混ぜ水冷却)
運搬時のコンクリート温度上昇の抑制	・トラックアジテータドラムの温度抑制 (幌やドラムカバー、 遮熱塗料 、ドラム散水、日陰待機、運搬時間短縮)
打ち込み後のコンクリート温度上昇の抑制	・低発熱型セメントの使用 ・混和材の使用
コールドジョイントの防止	・遅延型混和剤の使用 ・打重ね時間間隔の厳守
プラスチック収縮ひび割れの防止	・散水養生 ・養生シートによる養生

} **施工面の対策**

★ **設備面の対策はコスト増につながる**
⇒ **生コン販売価格にのせる仕組みができていない**



ドラムカバー(発泡ポリエチレン製)

- ドラムカバーは10~15万円、遮熱塗料は15~25万円。
- コンクリート温度の低下はいずれも1~1.5℃程度
- 他に、日陰待機やドラム散水など。効果は軽微



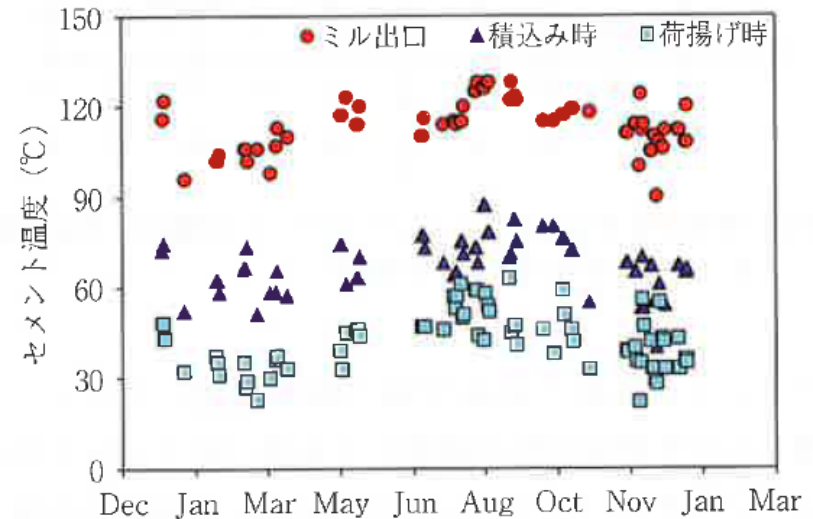
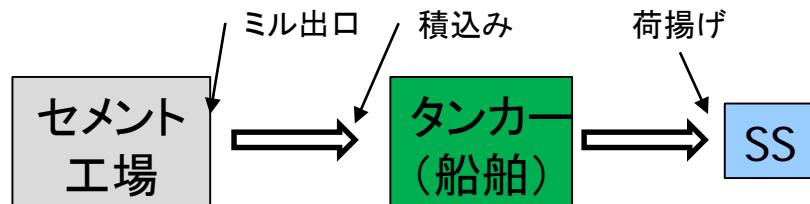
遮熱塗料(着色顔料と特殊セラミック)

セメントの温度

- セメント温度が8°C、骨材温度が2°C、練混ぜ水温が4°C上がると、コンクリート温度は1°C上昇

⇒セメントの影響は他より小さい

- 3~4日間のタンカー輸送では、SS荷揚げ時の温度は20°C~60°C



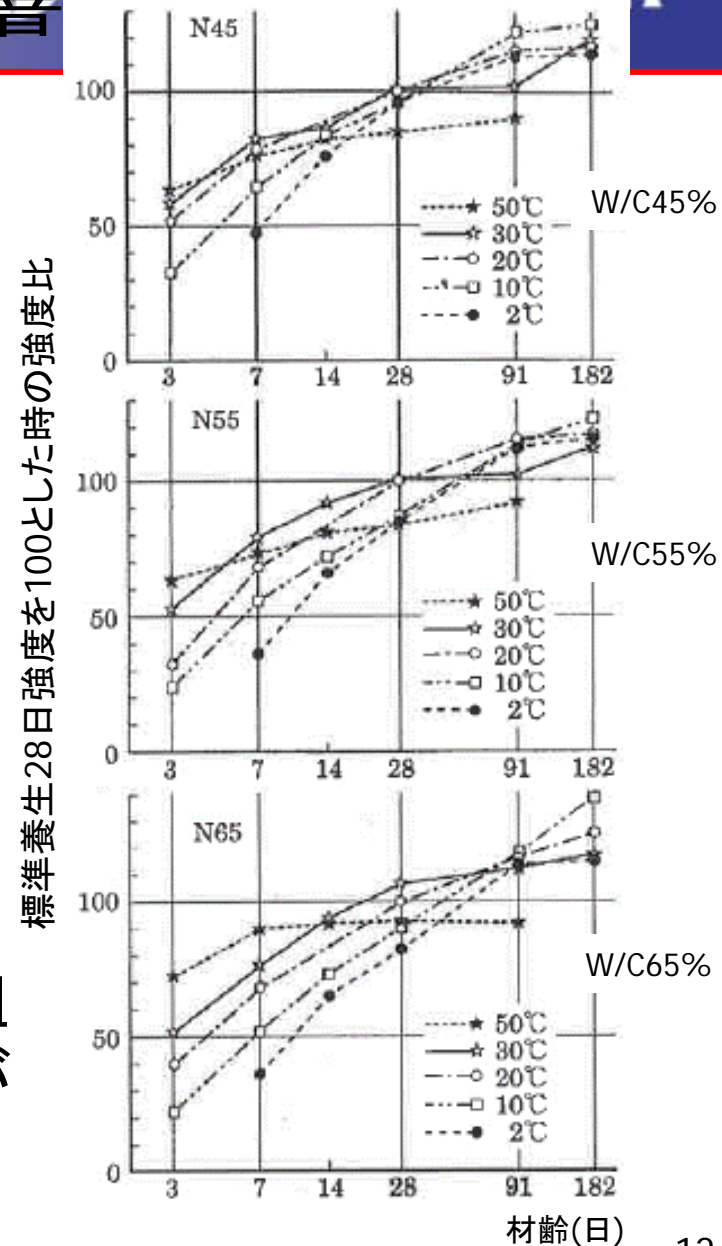
ミル出口、輸送前後のセメント温度の一例※

- バラ車による工場からの近距離陸送では、暑中期には70°C以上になる
⇒セメントクーラーや気流冷却設備を備えた工場あり。現状、セメント温度の受け入れ基準はない

暑中コンクリートの品質への影響

- フレッシュ性状の面では、
 - 単位水量の増加、スランプロス、凝結時間の短縮、プラスチック収縮ひび割れ
- ⇒ 化学混和剤、膜養生剤の利用で対応
- 硬化性状の面では、
 - 長期強度発現の低下および耐久性の低下
- ⇒ 強度補正による対策
(管理方法を試行錯誤しながら・・・)

長期強度が低くなれば、硬化体組織は粗くなっており、耐久性も低下する可能性が高い???



※AIJ神戸大会パネルディスカッション配布資料から引用

- 暑中期に打込まれるコンクリートの品質を調べる
⇒各種分析・解析を行い、メカニズム考察
- 長期強度の停滞現象について
- コンクリートの耐久性はどうか？
- 高強度コンクリート(セメント種N,M,L,SFPC)ではどうか？

モルタルでの実験

- 目的: 練上がり温度がモルタル強度に与える影響

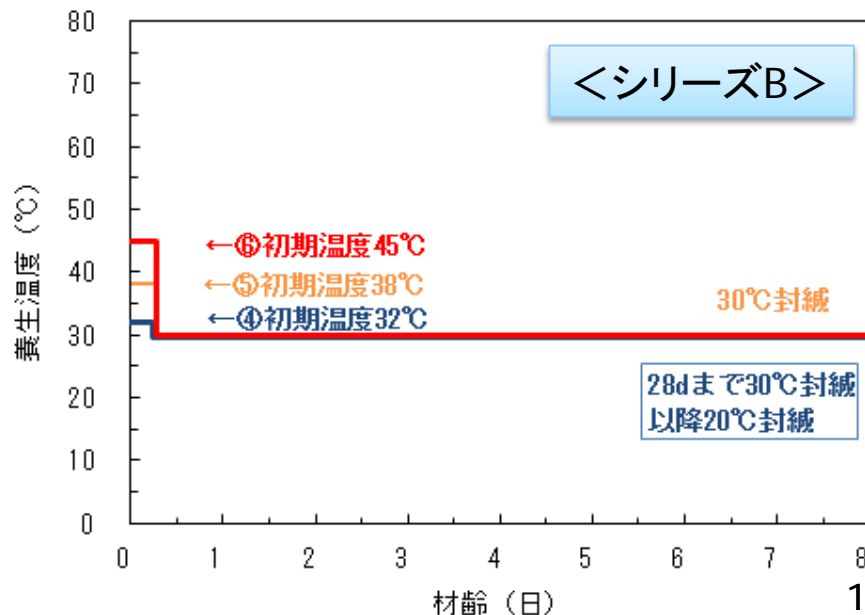
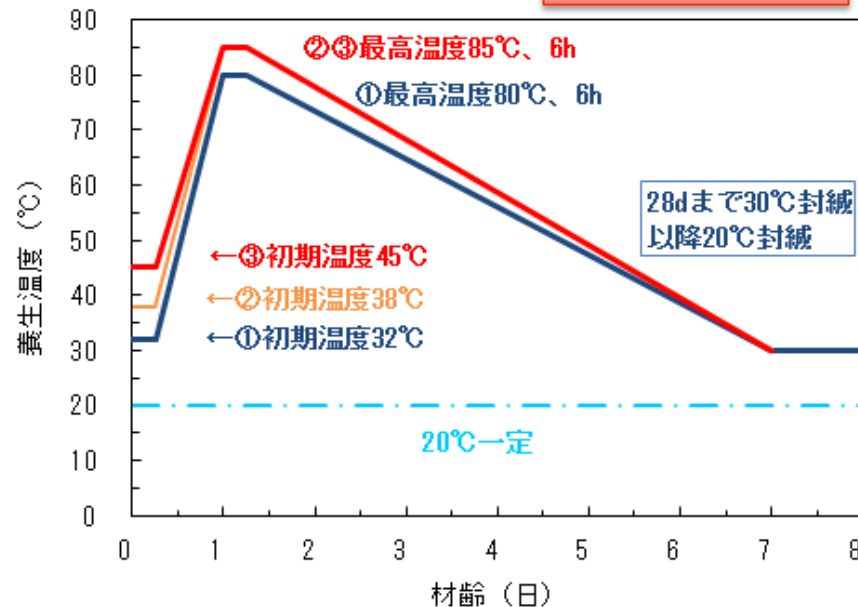
- 実験要因

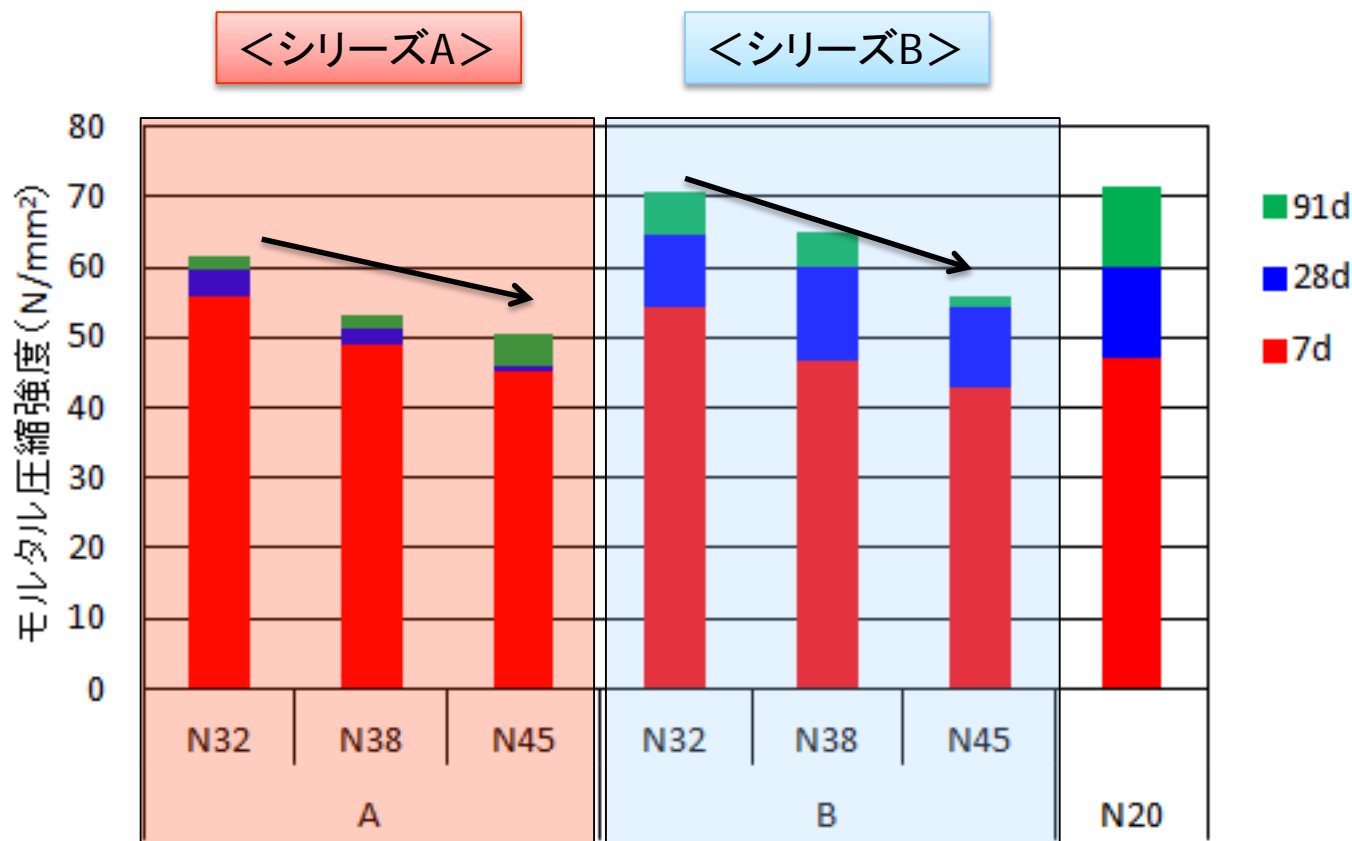
練混ぜ水温度で調整

- 初期温度: 32°C, 38°C, 45°C
(比較として20°C一定)
- 熱履歴パターン:
 - シリーズA: マス部材
(模擬部材実測データを参考)
 - シリーズB: 薄い部材あるいは部材表面層
(打込みから6h初期温度保持)

- モルタル配合

- 普通ポルトランドセメント(N), 掛川産山砂, SP8RV(遅延タイプ)
- 水セメント比0.45, S/C=2.5
- 目標フロー220mm, Air=2.0%





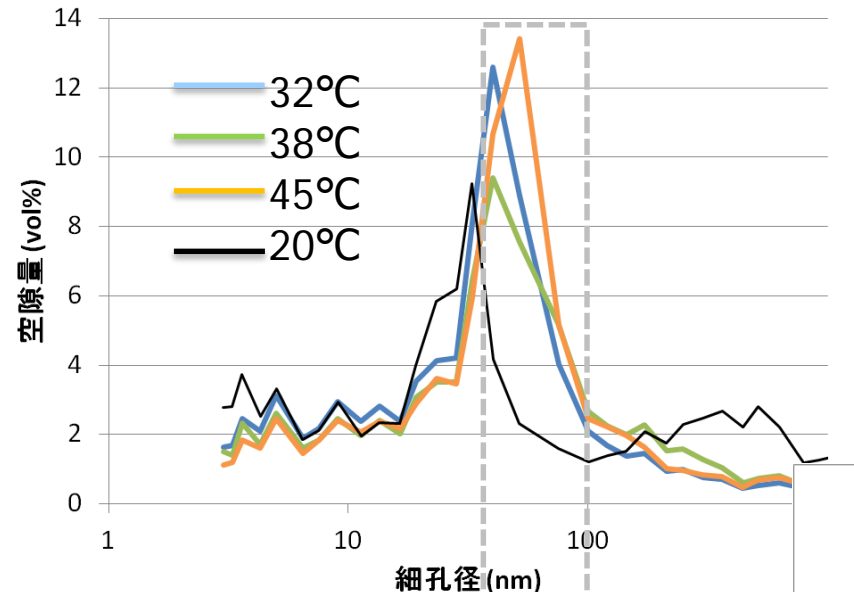
- 初期温度の違い: 温度が高いほど強度は低下する
- 熱履歴の有り無し: 熱履歴を与えない方が強度増進は大きい

モルタルの空隙構造と強度の関係

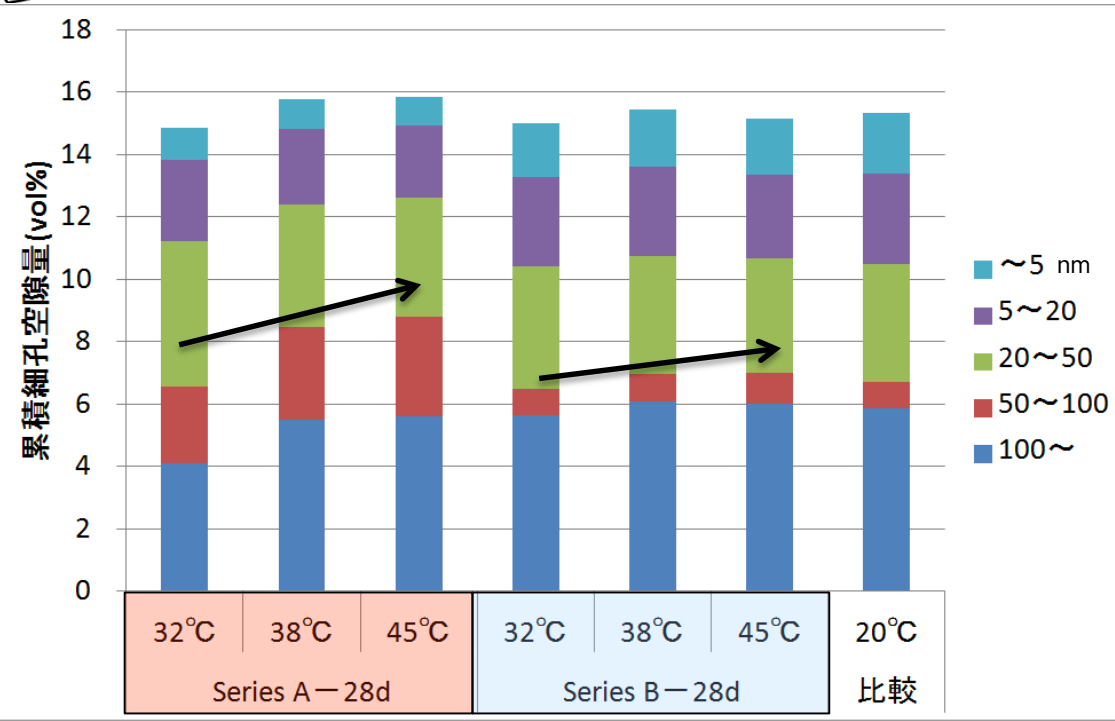
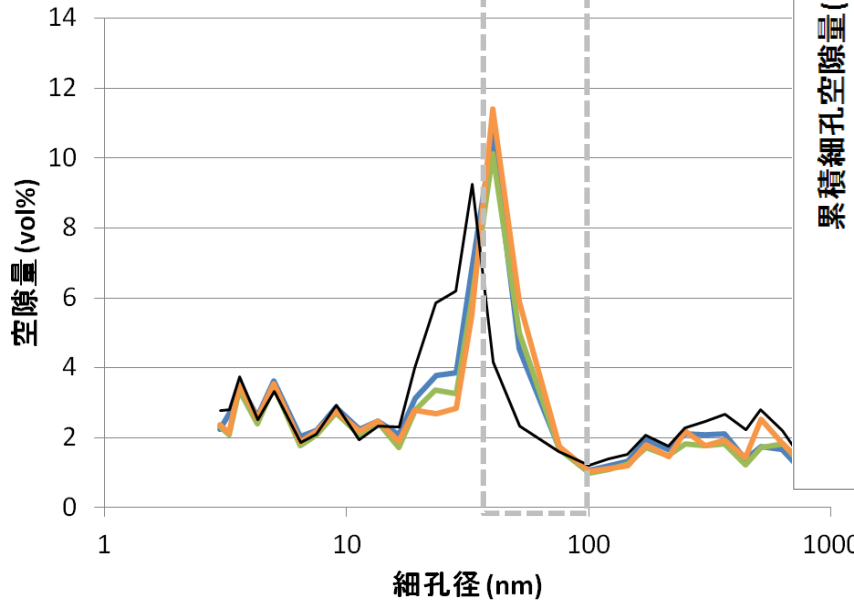
※シリーズAは空隙径50nm~100nmの粗大な空隙が多い

<シリーズA>

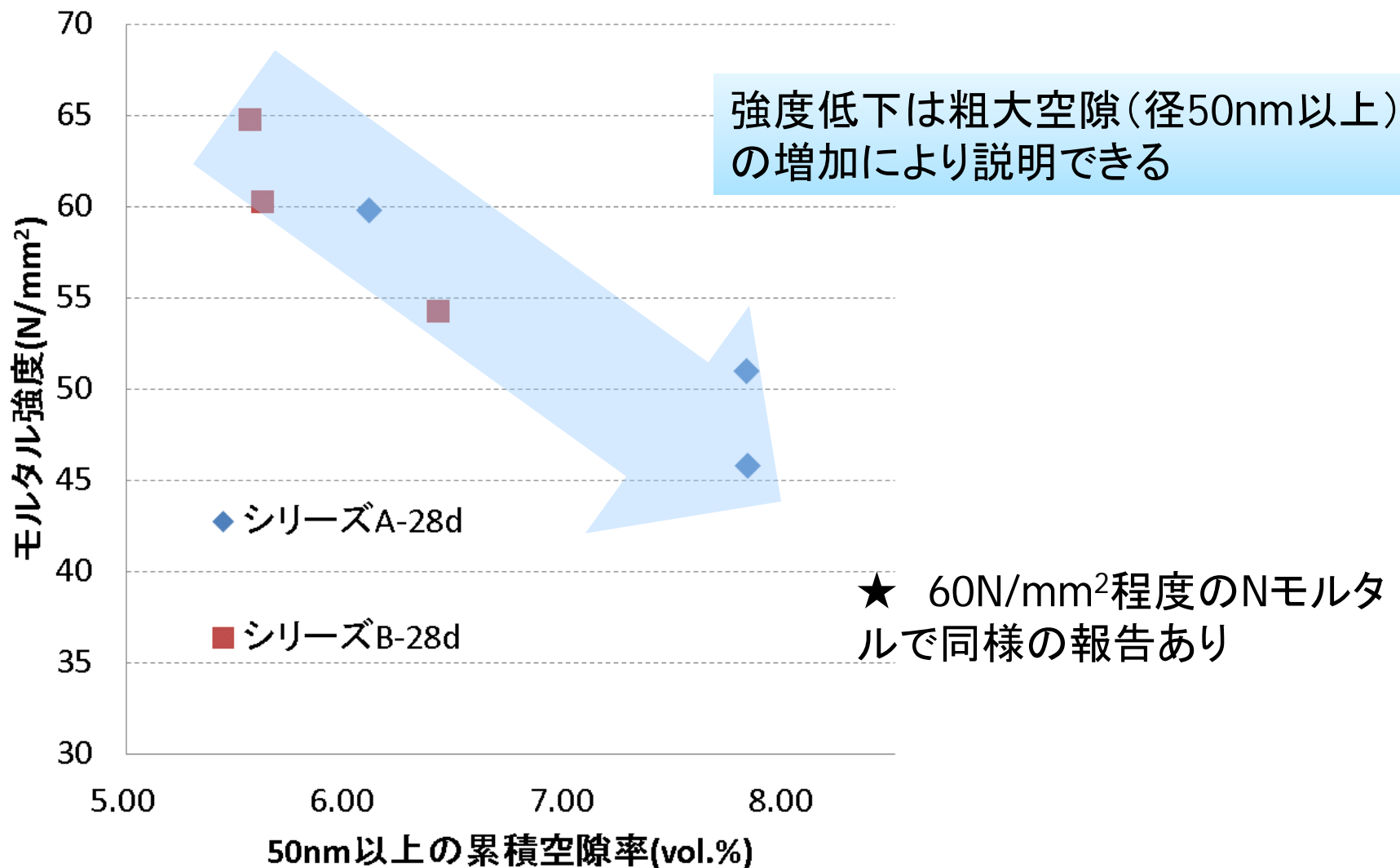
50~100nm



<シリーズB>



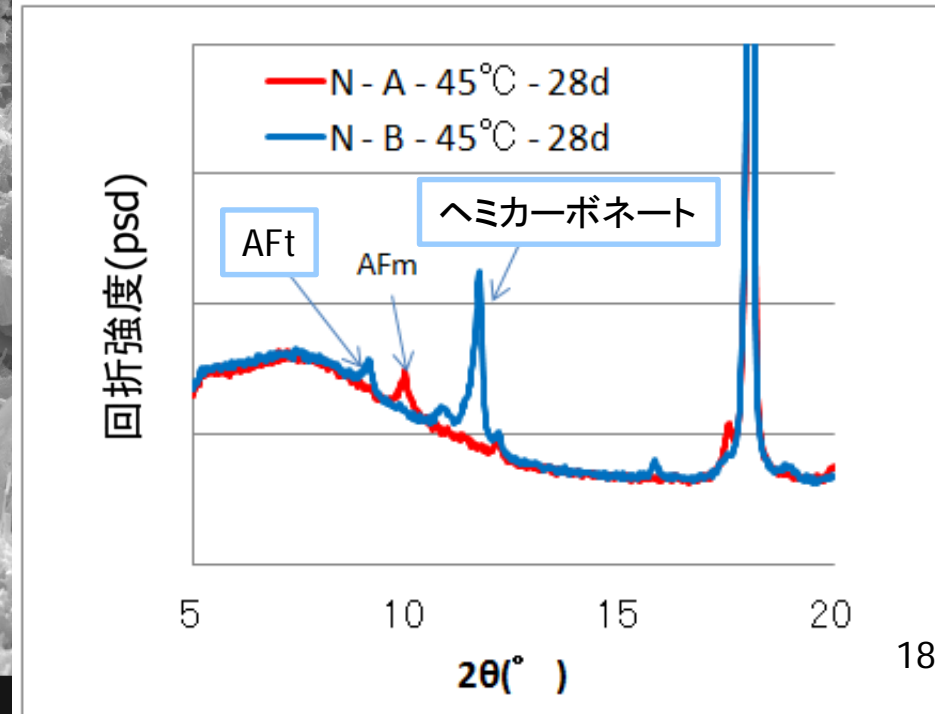
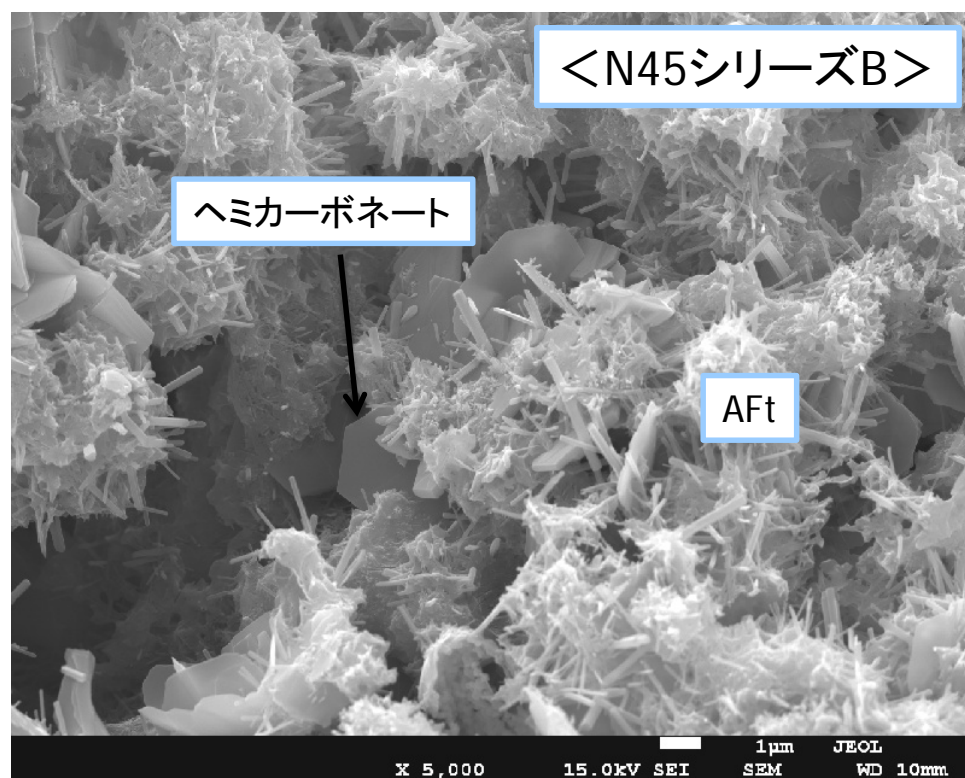
50nm以上の空隙量と強度の関係



モルタルのSEM(二次電子像)観察

初期温度による水和物の違いは認められない

初期温度(°C) ←	シリーズA(熱履歴あり)	シリーズB(熱履歴なし)
32, 38, 45	Ca(OH) ₂ , モノサルフェート(AFm) , C-S-H, CaCO ₃	Ca(OH) ₂ , ヘミカーボネート , エトリンガイト(AFt) , C-S-H, CaCO ₃
20	Ca(OH) ₂ , ヘミカーボネート , エトリンガイト(AFt) , C-S-H, CaCO ₃	



コンクリート試験

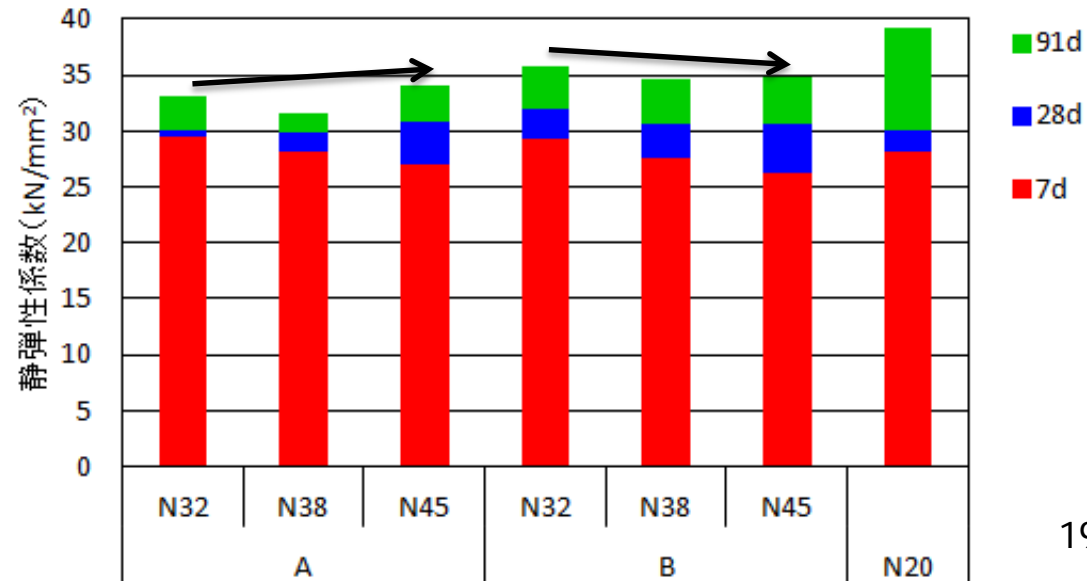
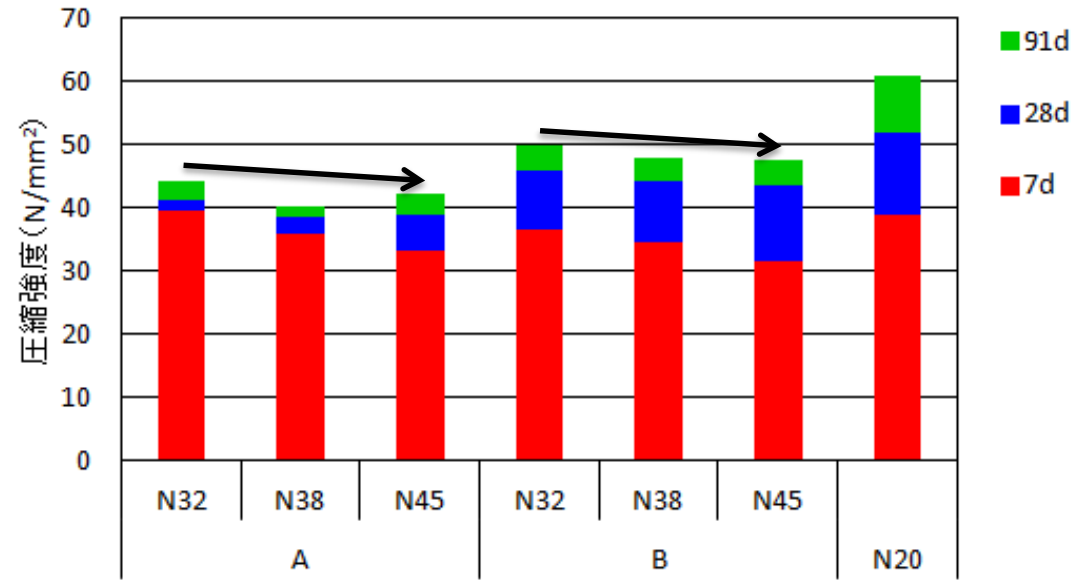
● 実験要因

- 初期温度: 32°C, 38°C, 45°C
- 熱履歴: モルタルと同様
シリーズA (熱履歴あり)
シリーズB (熱履歴なし)

● コンクリート配合

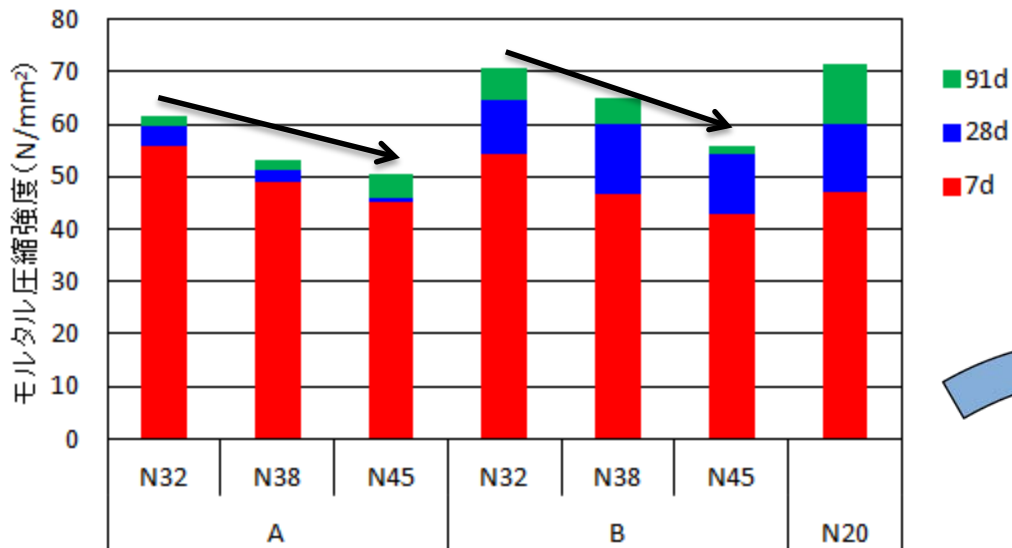
- 普通ポルトランドセメント(N), 掛川産山砂, 桜川砕石, SP8RV
- $W/C=0.45$, $W=170\text{kg/m}^3$
- 目標SL=18cm, $Air=4.5\%$

初期温度上昇による強度低下は比較的小さい!



コンクリートとの比較

<モルタル(N)>



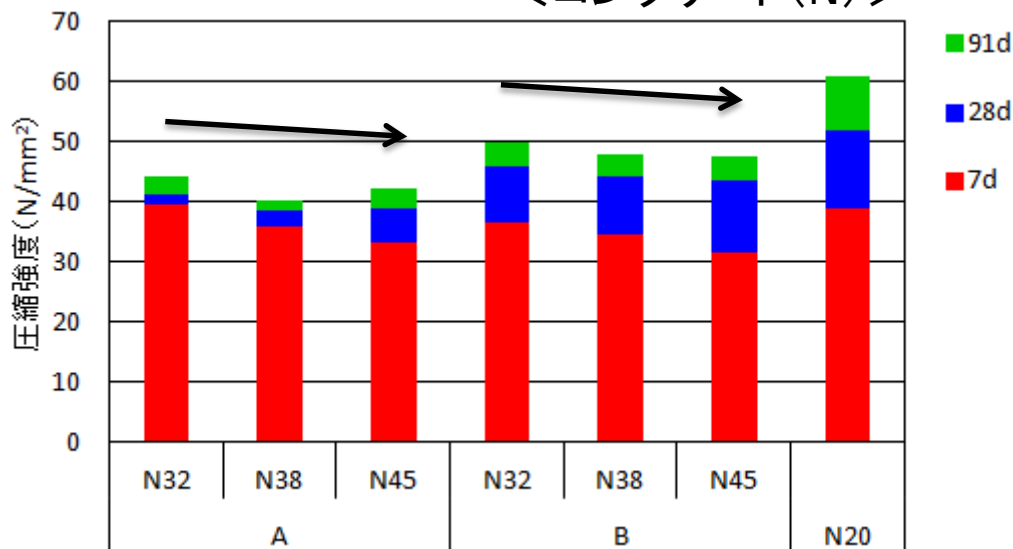
● コンクリート配合

- 普通ポルト(N), 掛川産山砂, 桜川砕石, SP8RV
- $W/C=0.45$, $W=170\text{kg/m}^3$
- 目標SL=18cm, Air=4.5%

※初期温度が高いとSP添加量は増加傾向

モルタルとの傾向の差異?
・明確な理由は不明

<コンクリート(N)>



- 初期温度が32°Cから38°Cに上昇するとモルタル強度は約1割低下する
- 初期温度の違いによって水和生成物やセメント反応率は大きく変わらない(28d時点)
- 初期温度が上昇すると粗大な空隙が増える(空隙構造の変化)
- 但し、コンクリートでの強度低下は限定的

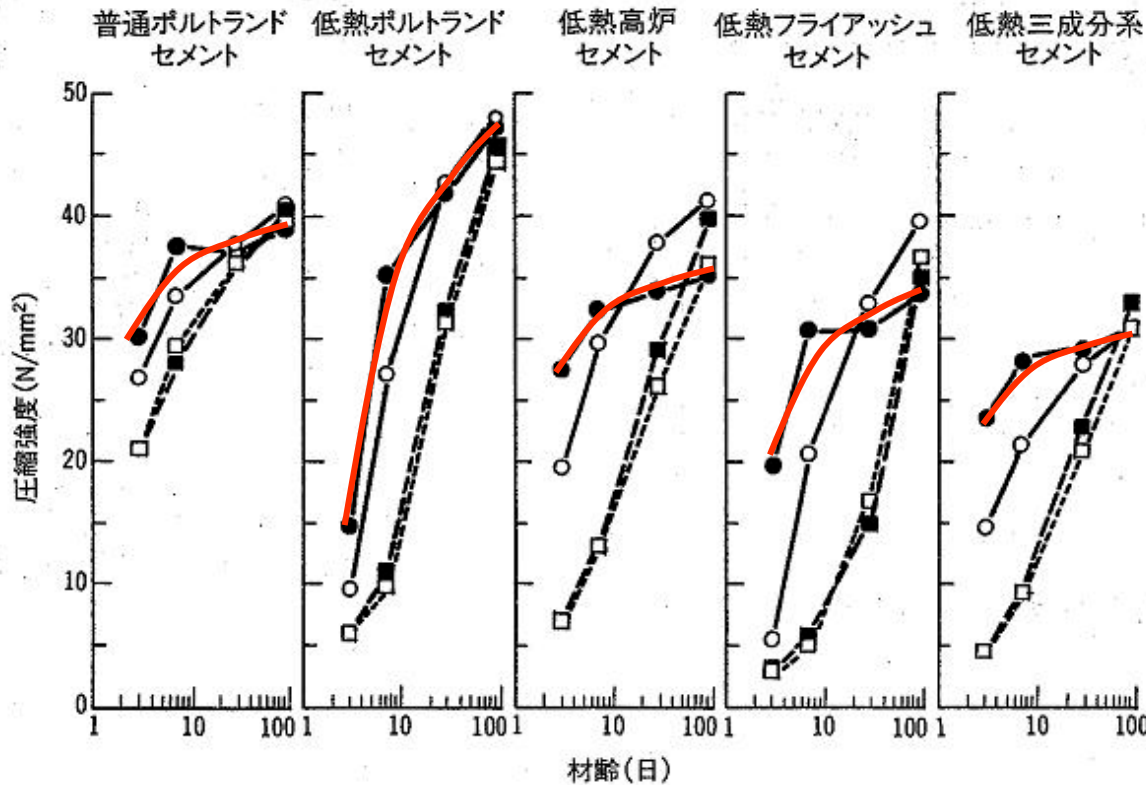
⇒材齢初期に乾燥を受ける部材表層の品質への影響が懸念(耐久性に深く関与)

- 暑中期に打込まれるコンクリートの品質を調べる
⇒各種分析・解析を行い、メカニズム考察
- 長期強度の停滞現象(セメント化学の視点から)
- コンクリートの耐久性はどうか？
- 高強度コンクリート(セメント種N,M,L,SFPC)ではどうか？

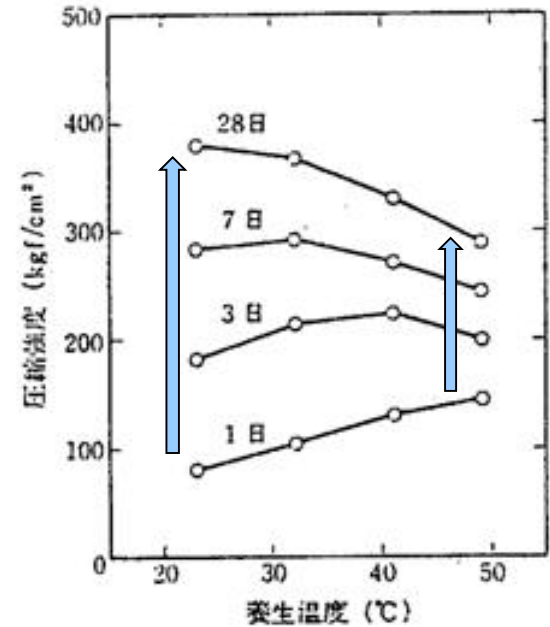
高温養生が強度発現に及ぼす影響 TAIHEIYO CEMENT

<W/C=0.55、コンクリート>

● 高温養生 60°C ■ 水中養生 20°C
○ 高温養生 40°C □ 封かん養生 20°C



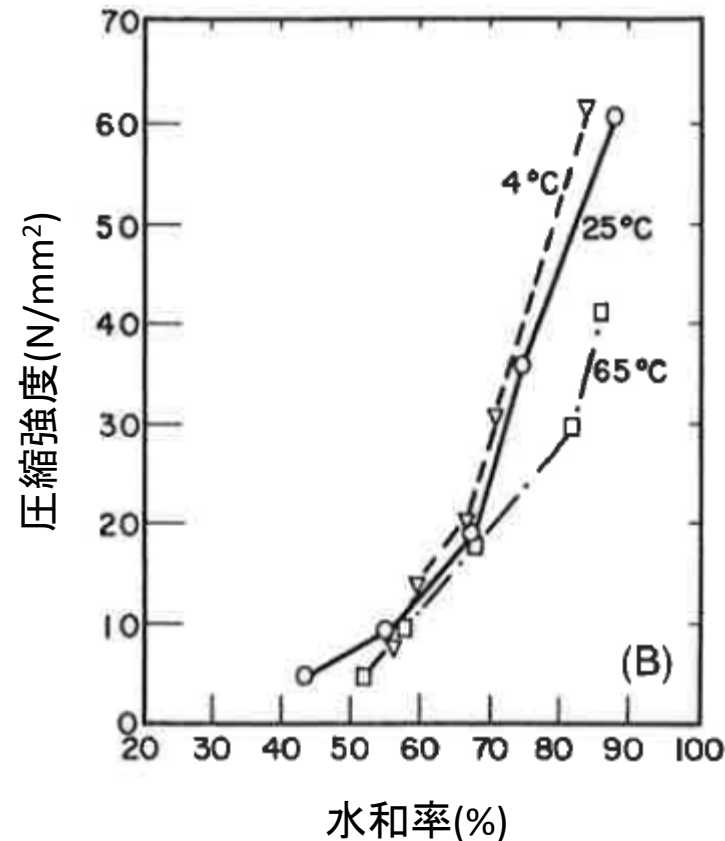
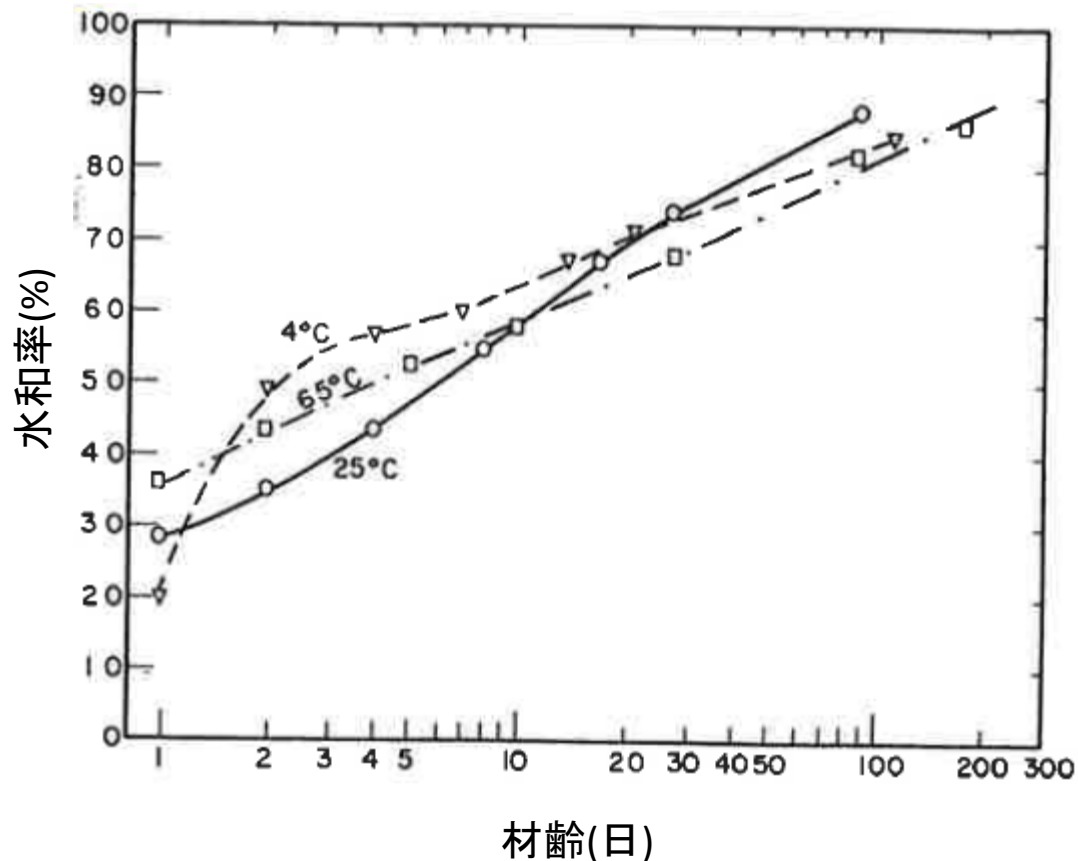
<W/C=0.45、コンクリート(N)>



<セメント・コンクリート、NO.658、2001>

養生温度が強度発現に及ぼす影響

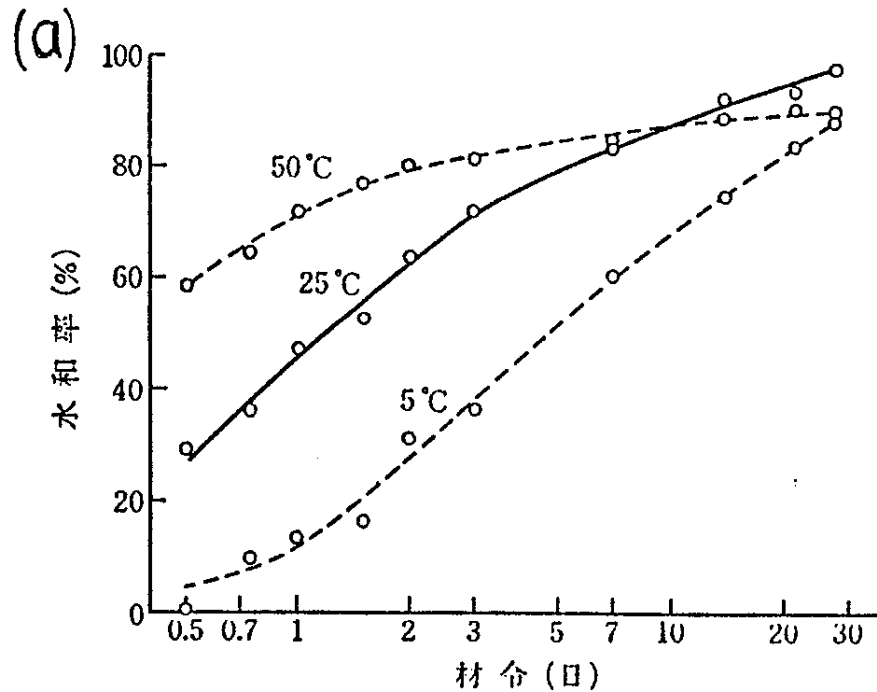
<W/C=0.55、セメントペースト(N)>



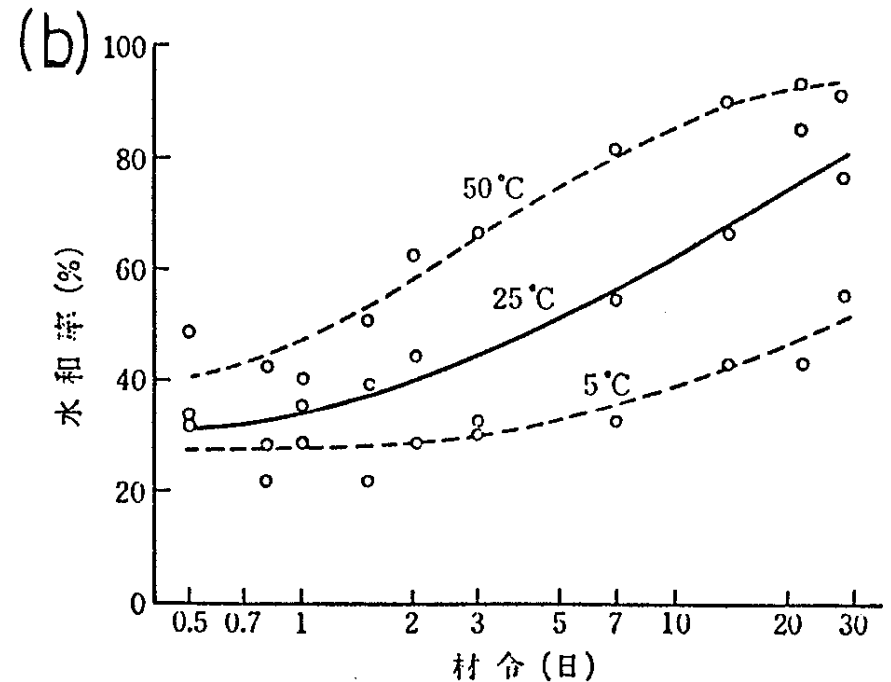
温度が高いほど初期水和率は大きく、その後の水和率上昇は温度が低いほど早い。最終的に同じ水和率となっても65°C養生の強度は低い

セメント鉱物反応の温度依存性

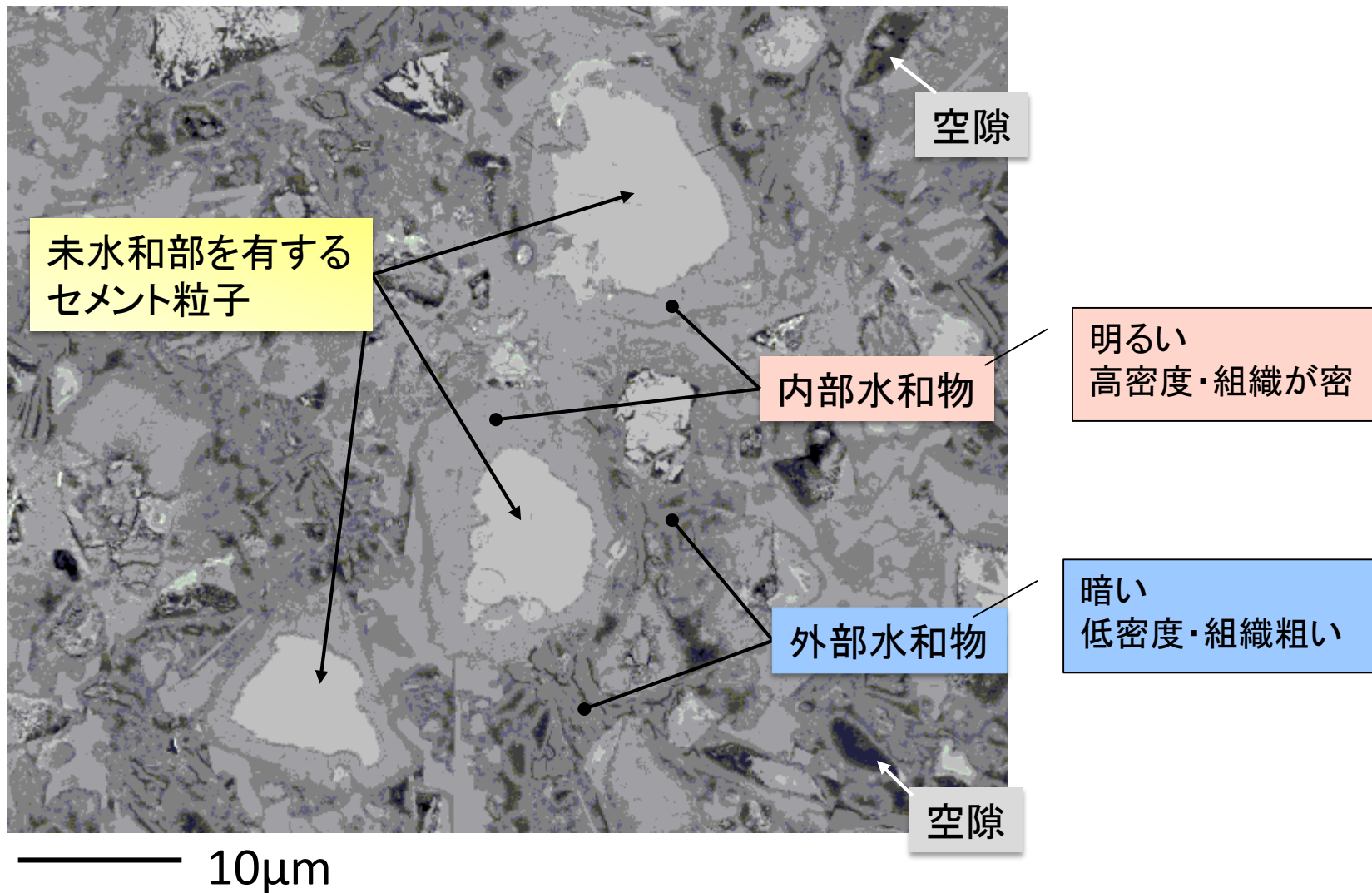
エーライト (C_3S)



ビーライト (C_2S)

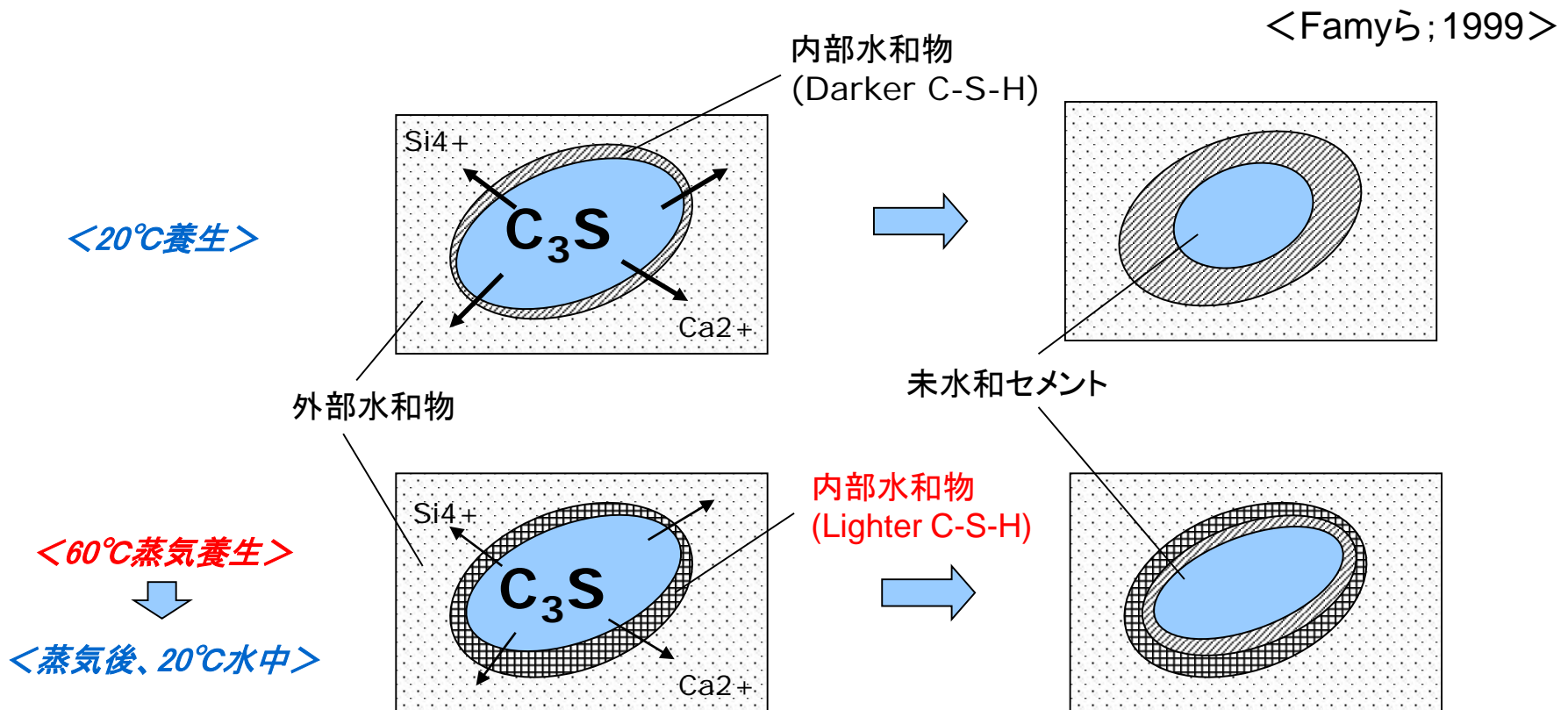


エーライトは温度が高いほど初期水和率は大きく、その後の水和率上昇は温度が低いほど早い。**ビーライトは温度が高くても水和は停滞しない**



60°C蒸気養生を行ったセメントペースト硬化体

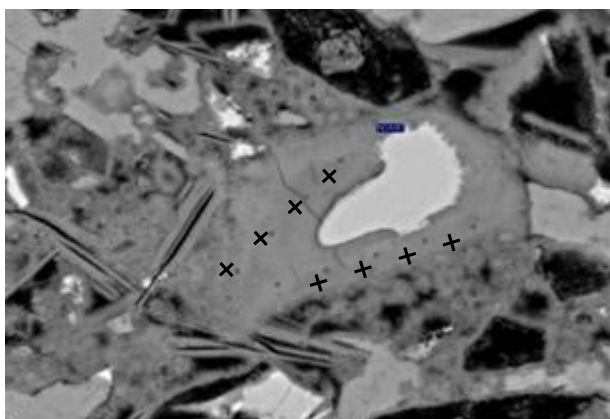
- 高温養生で**エーライト(C₃S)**の水和が促進
⇒セメント粒子表面のC-S-H生成が早い
⇒表面を水和物で覆われることで、それ以降の水和が停滞する



◆ エネルギー分散型X線分析(EDX)

	材齢 (日)	組成(質量%)							モル比	Ca/Si比 標準誤差	標本数
		Ca	Si	Mg	Al	Fe	O	Total	Ca/Si		
60℃ 蒸気養生	3	44.6	14.8	0.61	0.96	0.58	37.4	99.0	2.12	0.035	44
	7	44.6	14.9	0.71	0.99	0.58	37.4	99.2	2.11	0.036	41
	28	45.4	14.6	0.68	0.9	0.7	37.1	99.3	2.20	0.028	67
20℃養生	28	44.7	15.5	0.47	0.72	0.5	37.3	99.2	2.02	0.039	16

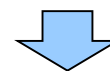
※ほかにK、Na、Sなど微量



20µm

〈点分析箇所イメージ〉

高温で生成する水和物のCa/Si比は高い

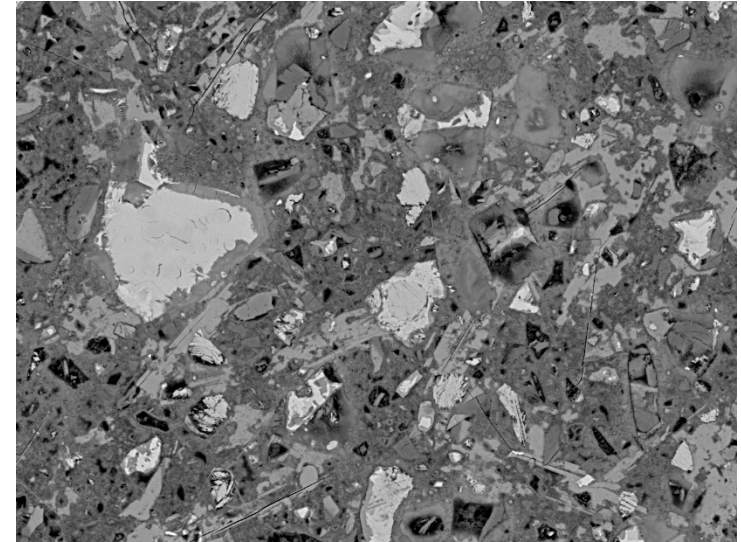
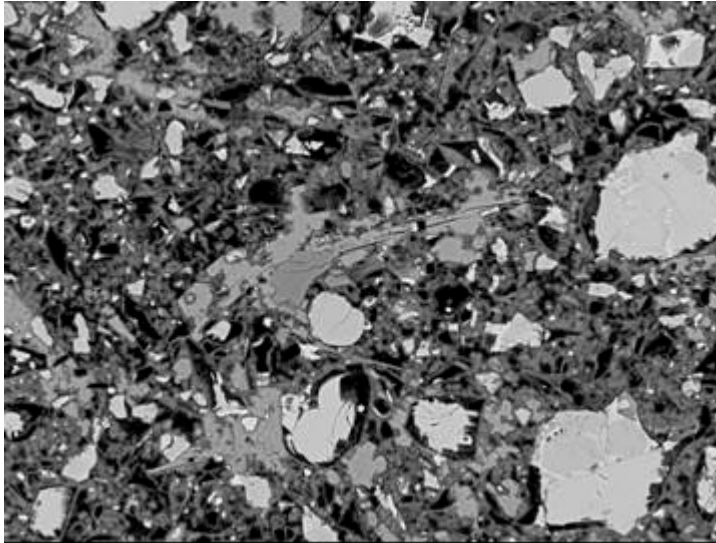


緻密な水和物層により、水やイオンの拡散移動が生じ難い可能性

セメントペースト硬化体(N)の組織形成

- 材齡3日⇒28日(20°C水中養生)

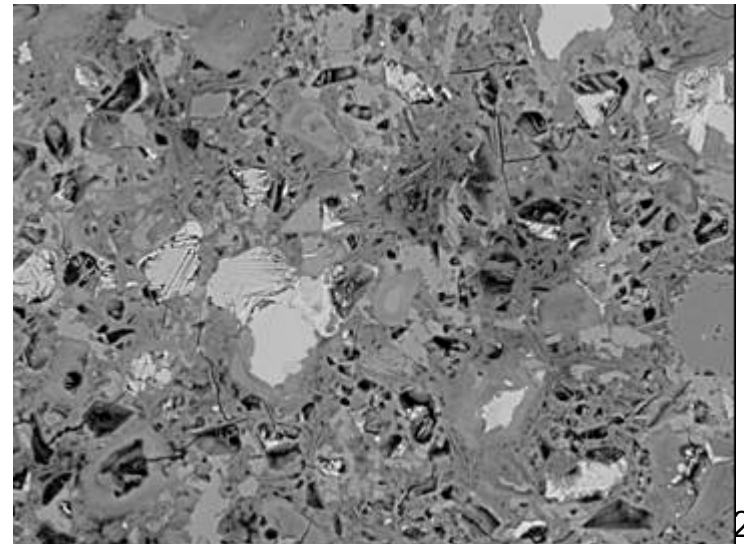
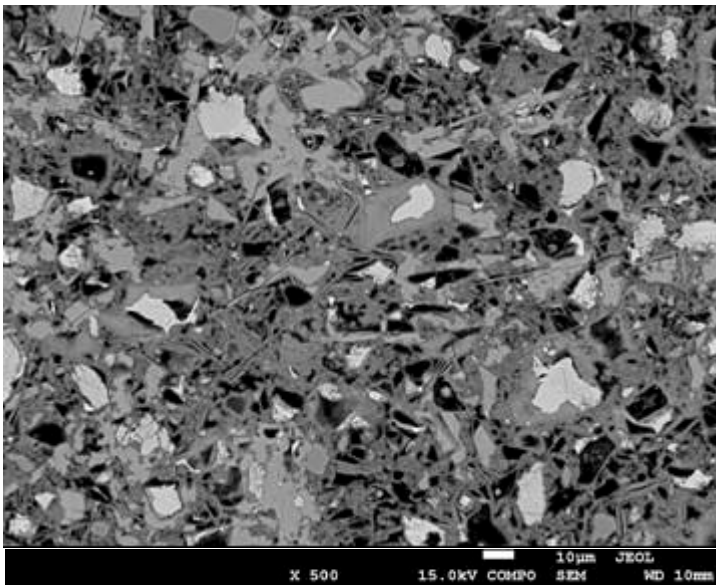
<20°C養生>



<60°C蒸気養生>

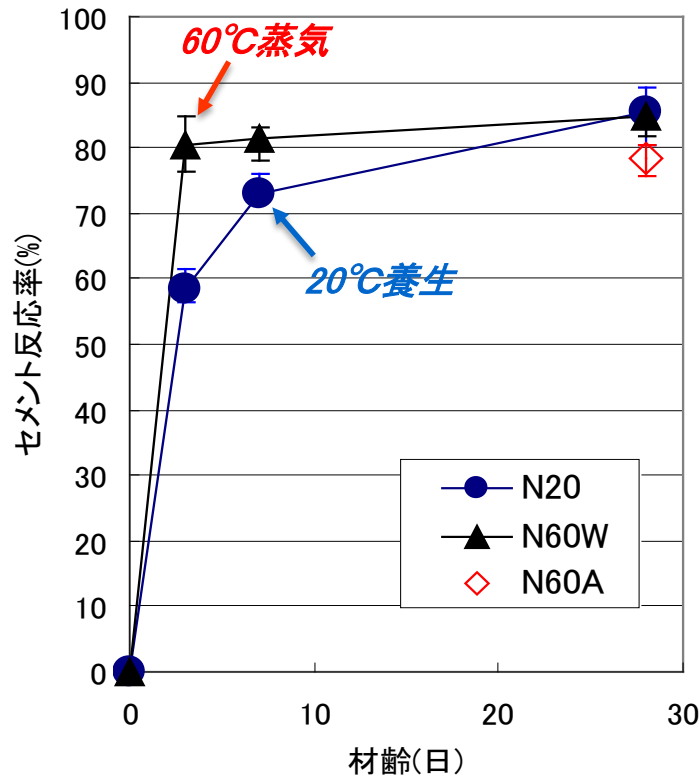


<20°C水中>

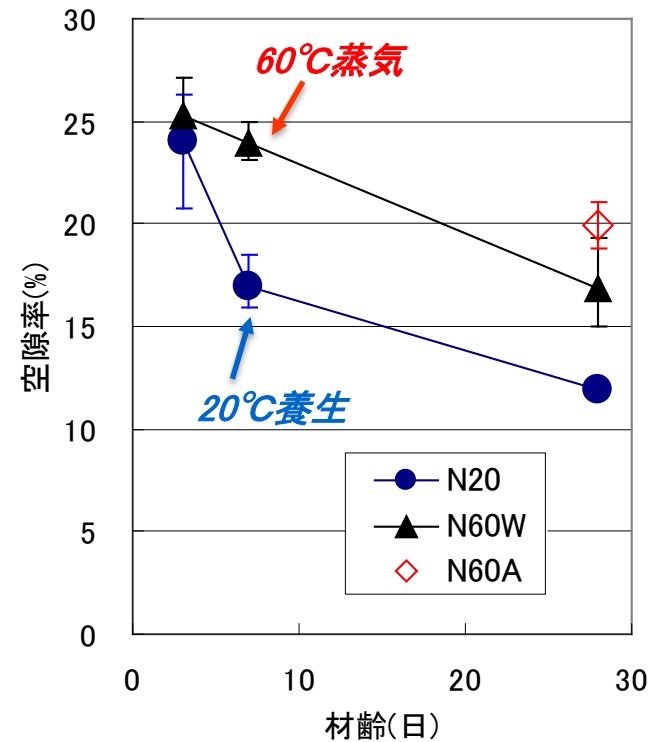


- 10視野の反射電子像から未水和セメントと空隙を抽出

<セメント反応率>



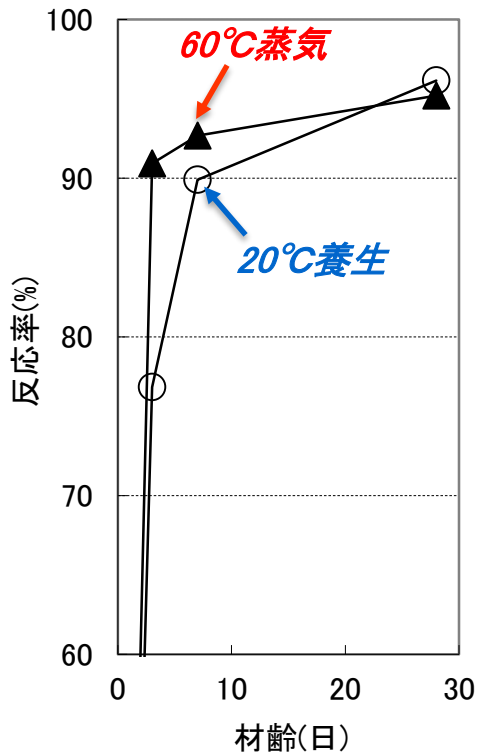
<全空隙率>



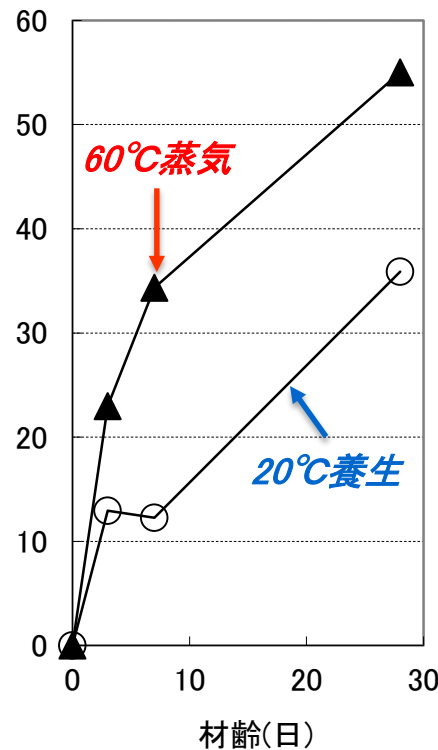
- 高温で初期セメント反応率は上昇するも、反応率は伸びない
- 空隙率の低下が小さい(空隙が埋まらない)

- 各セメント鉱物の反応率を算定

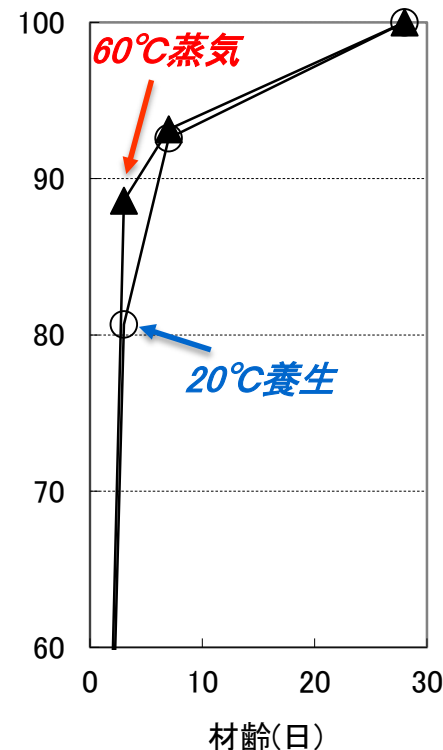
エーライト(C_3S)



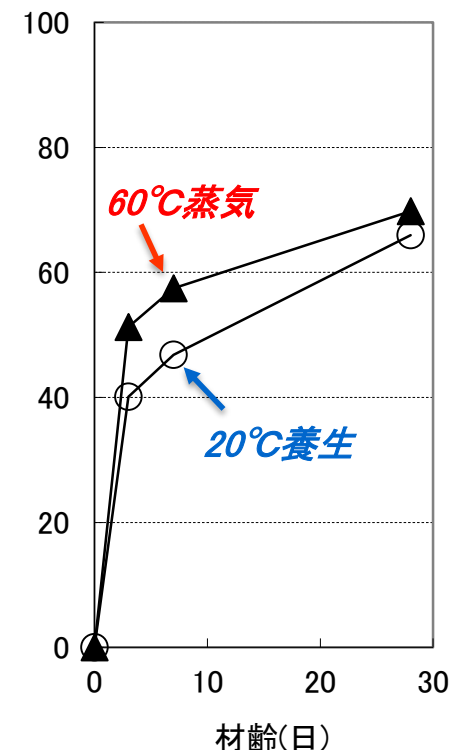
ビーライト(C_2S)



アルミネート相(C_3A)



フェライト相(C_4AF)

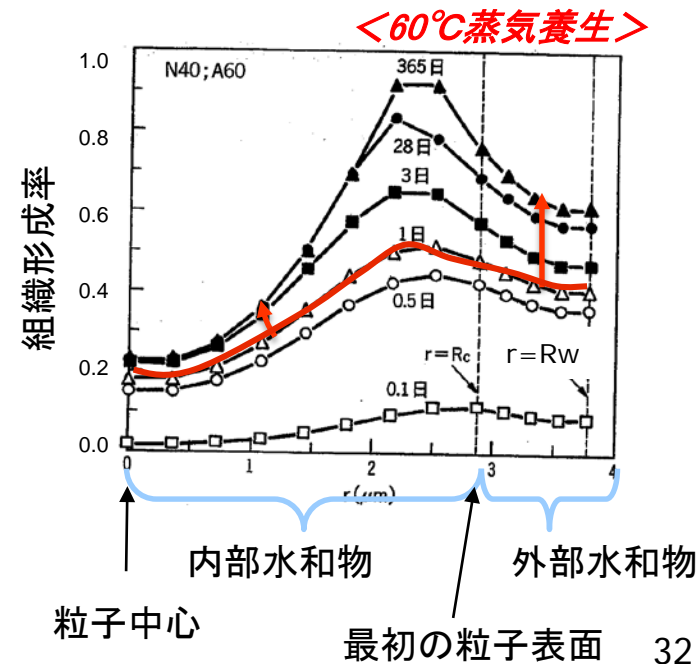
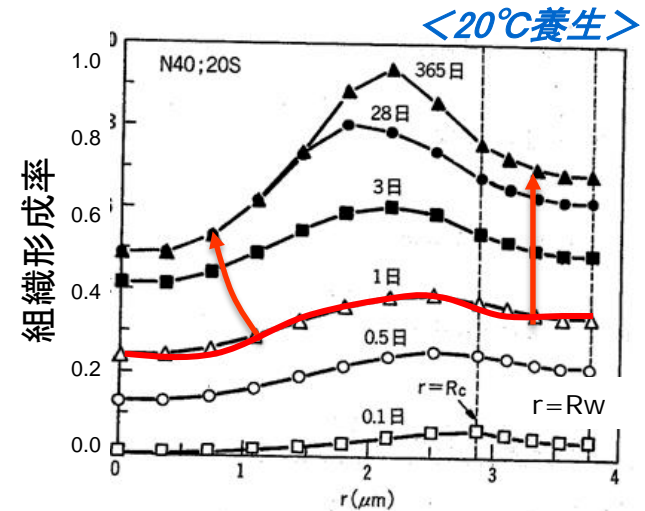
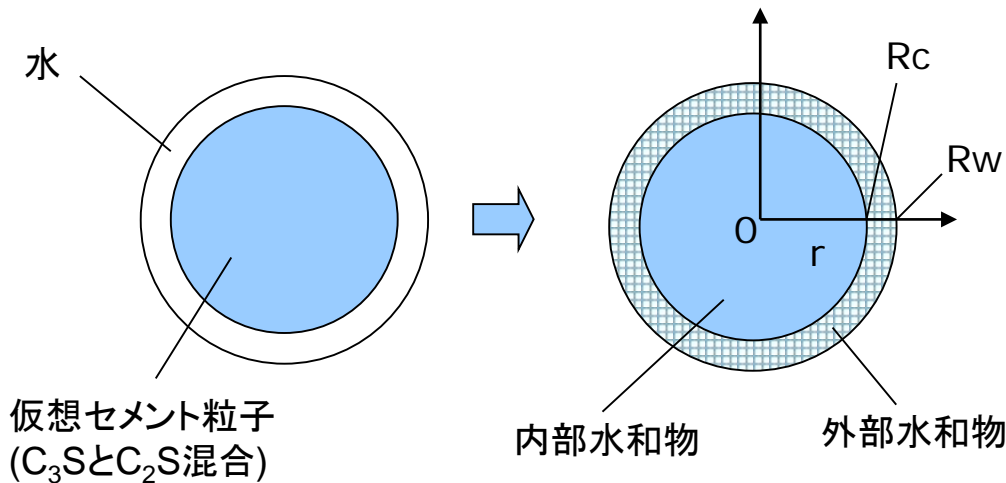


- いずれの鉱物も高温で反応は促進
- ビーライト反応は余力が残り、その後も反応は継続

組織形成シミュレーション

- セメント粒子内への水の拡散と粒子外へのセメント成分の拡散を考慮し、セメントの水和反応、組織形成過程をシミュレート

<杉山、梶田ら;2002>



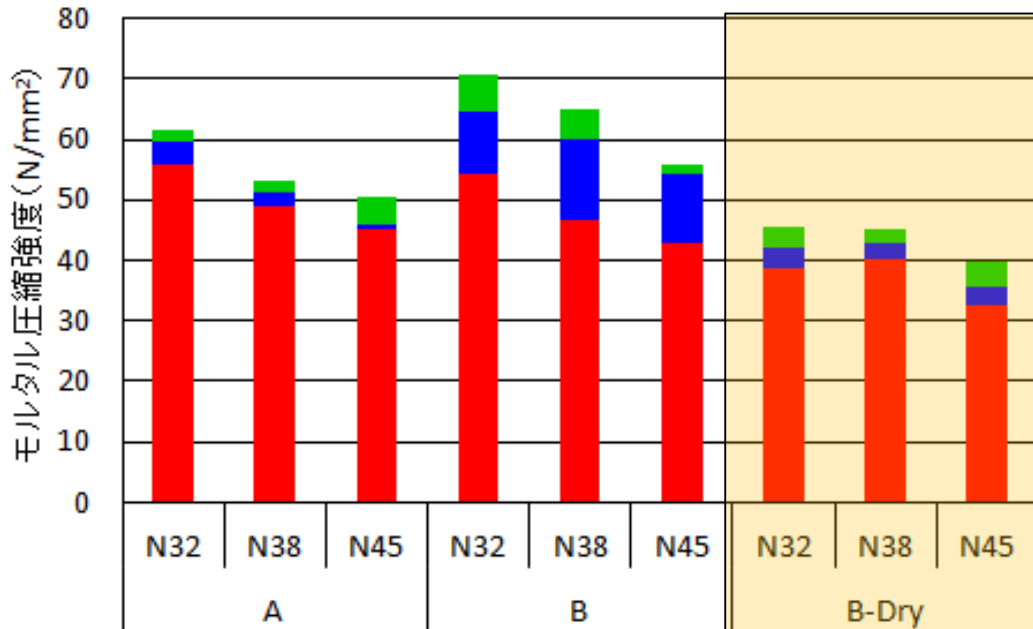
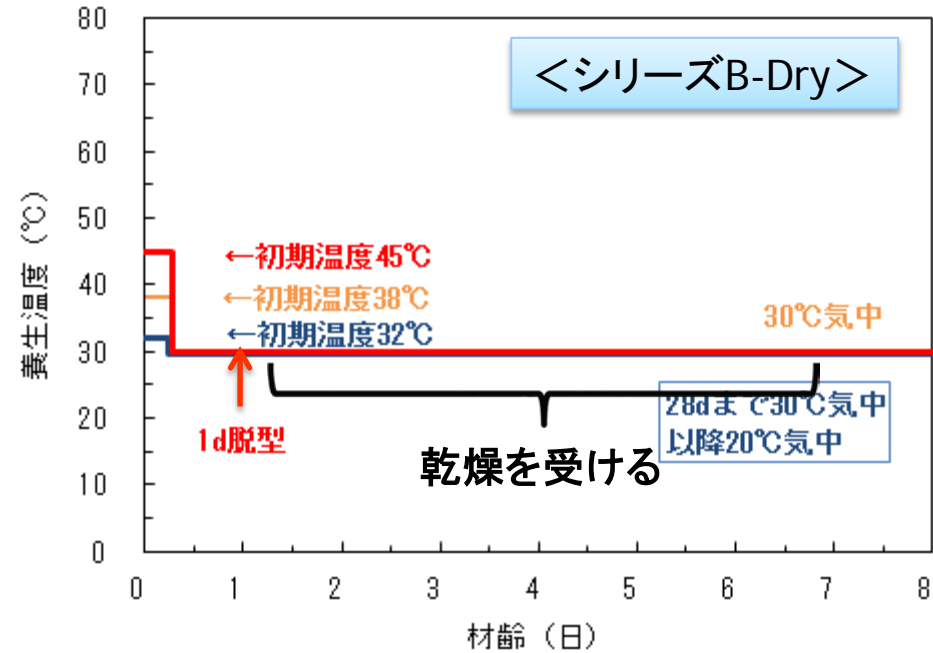
- 養生温度が高いほどエーライトの水和は促進される。
- 高温で生成する水和物のCa/Si比は20°C養生のものより高い。セメント粒子表面が緻密な内部水和物で覆われることで、その後の水和進行が抑制される可能性がある。
- セメント水和率が同程度であっても硬化体組織の形成過程に違いがあり、空隙率に差が生じる。

⇒硬化体組織は20°C養生と比べて均質でない
(水和物の組成や密度に違い)

- 暑中期に打込まれるコンクリートの品質を調べる
⇒各種分析・解析を行い、メカニズム考察
- 長期強度の停滞現象(セメント化学の視点から)
- **コンクリートの耐久性はどうか？**
- 高強度コンクリート(セメント種N,M,L,SFPC)ではどうか？

乾燥の影響

- 目的: 脱型後、直ちに乾燥を受ける部材表層を対象として、練上がり温度の影響を調べる
- 実験要因
 - 初期温度: 32°C, 38°C, 45°C
 - 養生: 1dで脱型⇒30°C気中保管
(シリーズB-Dry)
- モルタル配合は同じ



B-Dryは初期強度から低下、
強度増進も期待できない



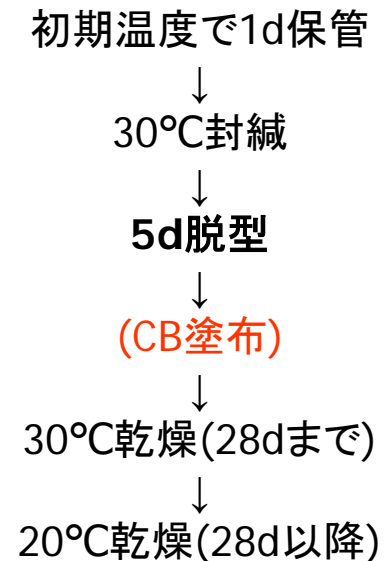
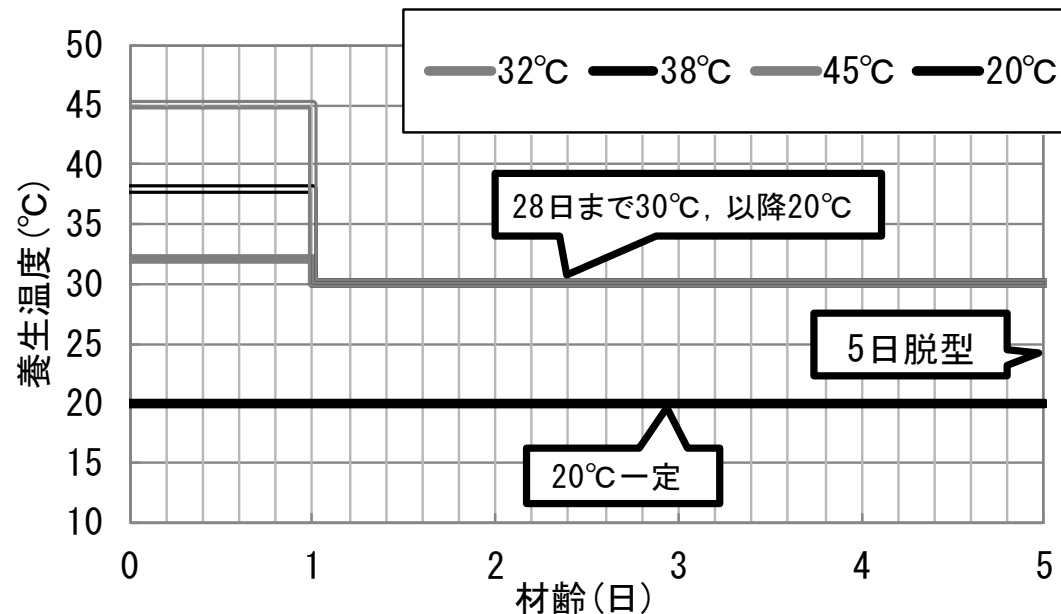
部材表層は、他のどの部位よりも品質が低下するおそれ

表面塗布剤による品質改善検討 TAIHEIYO CEMENT

- 試験因子: 初期温度(32, 38, 45°C)、塗布型養生剤の有無

- キュアブリッド(CB)とは、
 - 成分: 特殊シラン系化合物アルケニル系エステル化合物
 - 効果: 高い水分保持性能、強度向上、収縮低減など
 - 使用方法: 脱型後塗布、塗布量150g/m²

<養生方法>



耐久性向上養生剤

キュアブリッド

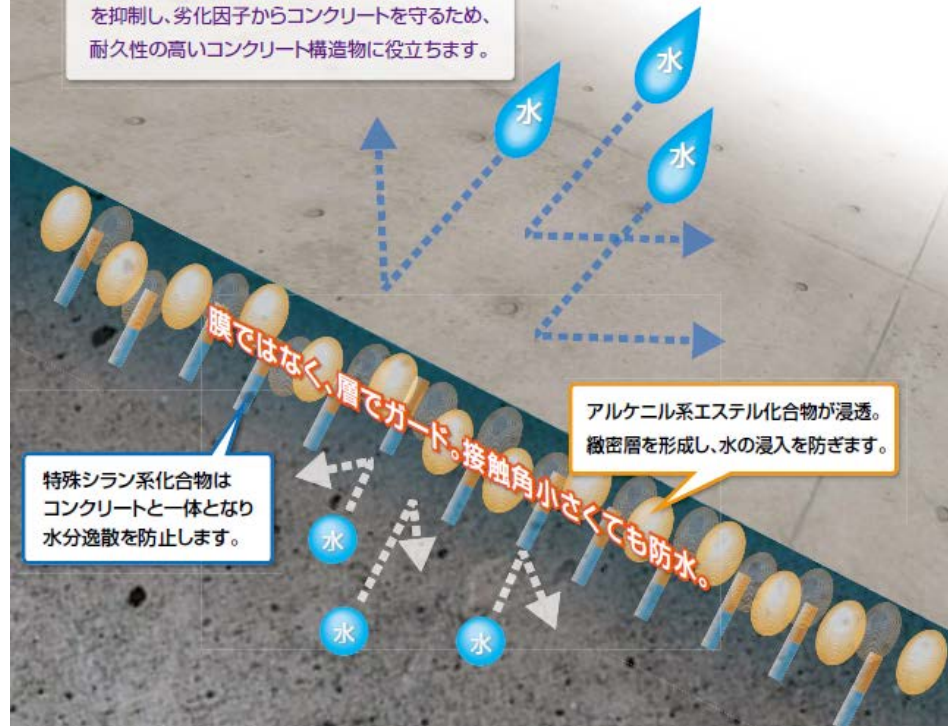
「キュアブリッド」は、表面に塗布することによって、コンクリート内部の水分蒸散を抑制するとともに、外部からの塩化物や炭酸ガスなど劣化因子の侵入を抑制することができる、コンクリートの耐久性向上を目的としたハイブリッド型耐久性向上養生剤です。

特徴

- ▶ 水分の蒸散を抑制し、初期ひび割れを低減します。
- ▶ コンクリートの緻密性の向上
- ▶ 乾燥収縮の低減
- ▶ 劣化因子の侵入抑制
- ▶ 中性化速度の低減
- ▶ 塩化物イオン浸透抵抗性



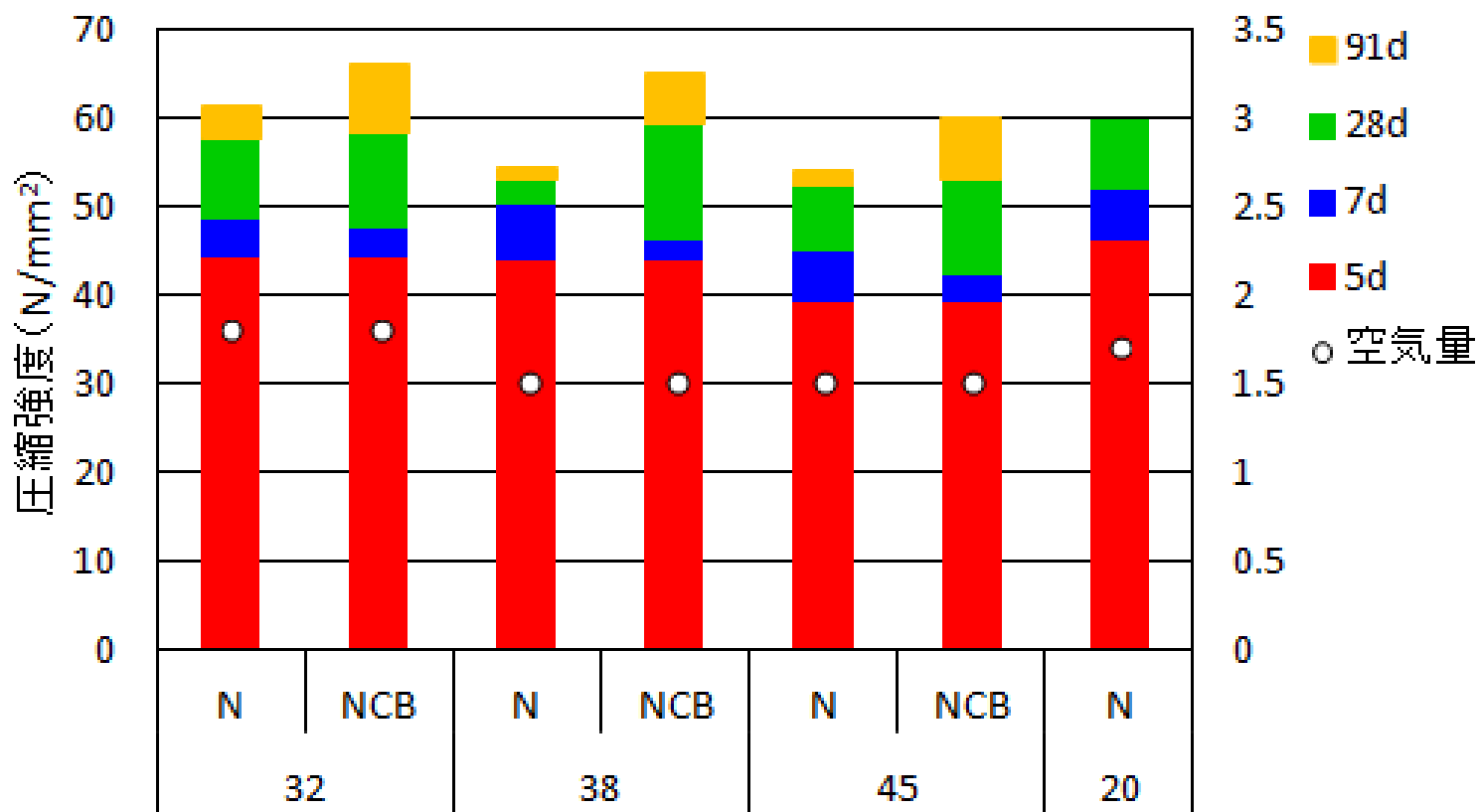
2つの有効成分を効果的に配列することにより、効率的に養生効果と耐久性を付与することができます。初期の急激な乾燥による初期ひび割れを抑制し、劣化因子からコンクリートを守るため、耐久性の高いコンクリート構造物に役立ちます。



- 養生効果(水分保持能力)
- 強度向上
- 収縮低減
- 透水抵抗性
- 中性化抵抗性
- 塩化物イオン浸透抵抗性

モルタル強度

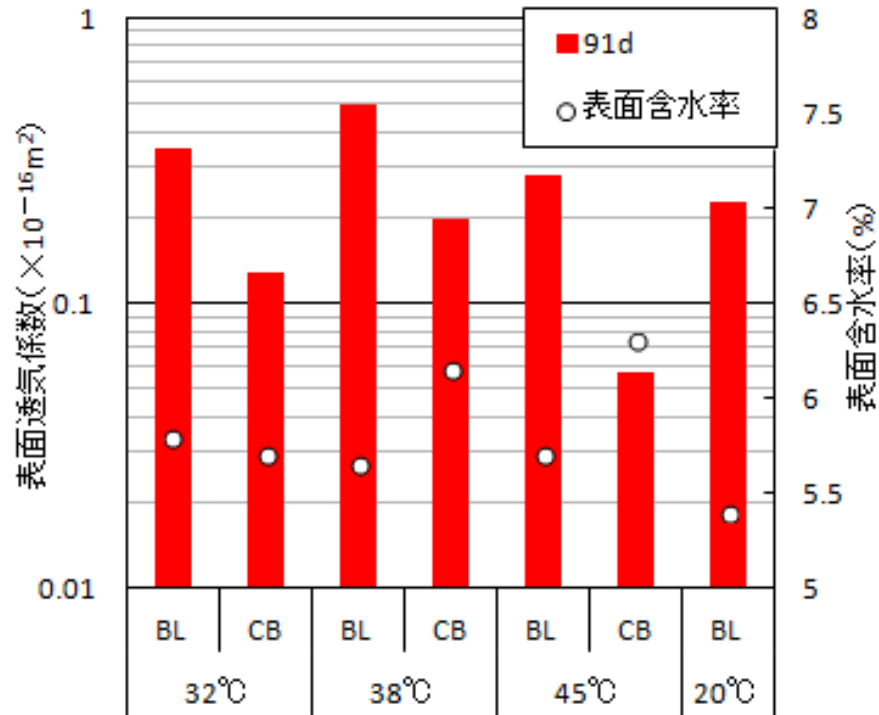
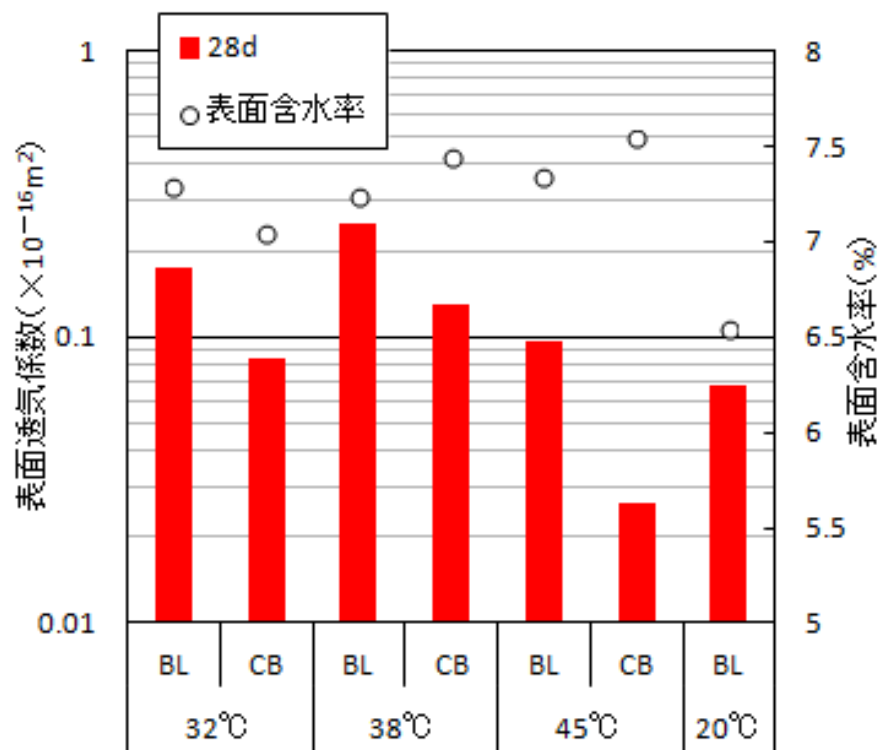
- 試験因子: 初期温度(32, 38, 45°C)、塗布型養生剤の有無



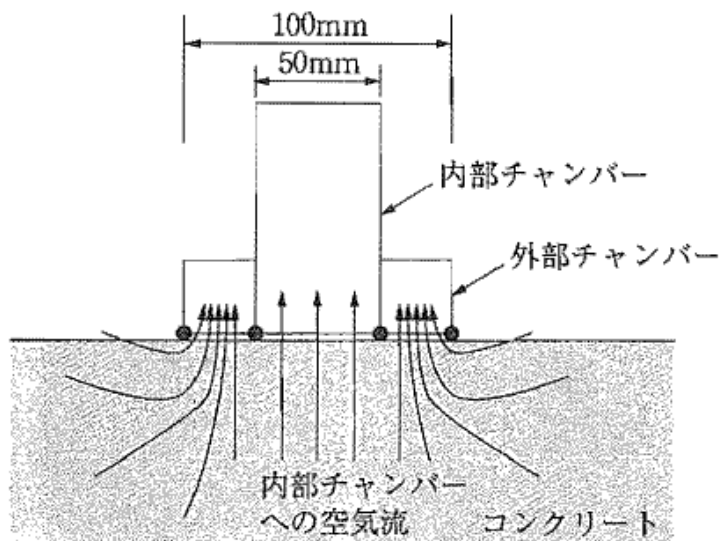
表面透気係数

- 試験因子: 初期温度(32, 38, 45°C)、塗布型養生剤の有無

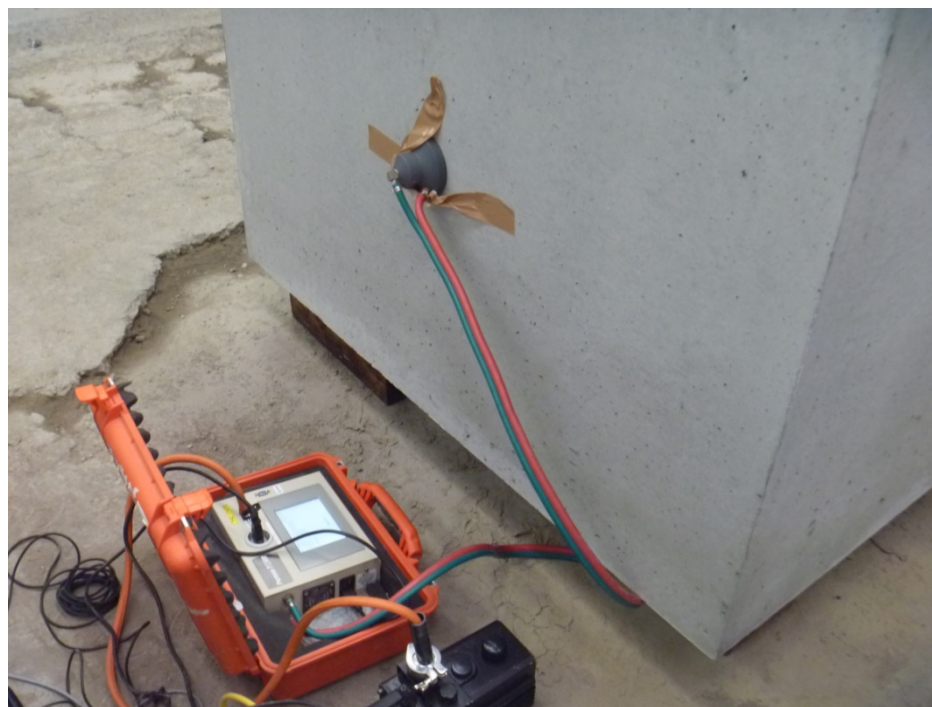
<表面透気係数>



- トレント法: コンクリート構造物の表層品質を評価する非破壊試験
 - ✓ 耐久性を支配する**かぶりコンクリートの密実さ**を評価
 - ✓ スイスではコンクリート構造物の竣工検査に活用



＜ダブルチャンバー方式＞



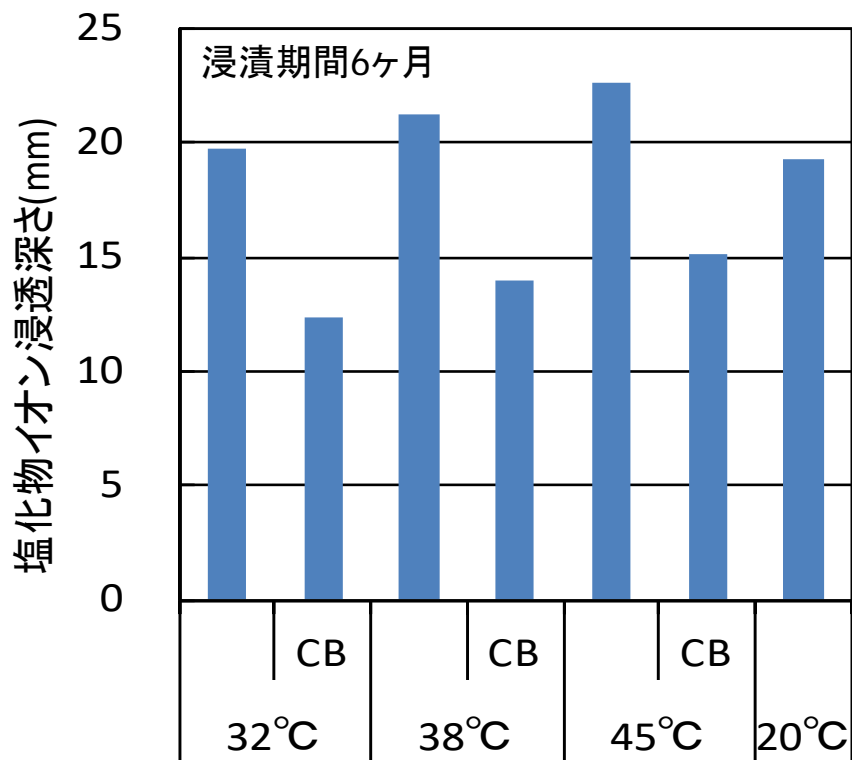
＜透気試験機 パーマツール＞

塩化物イオン浸透および中性化

- 試験因子：初期温度(32, 38, 45℃)、塗布型養生剤の有無

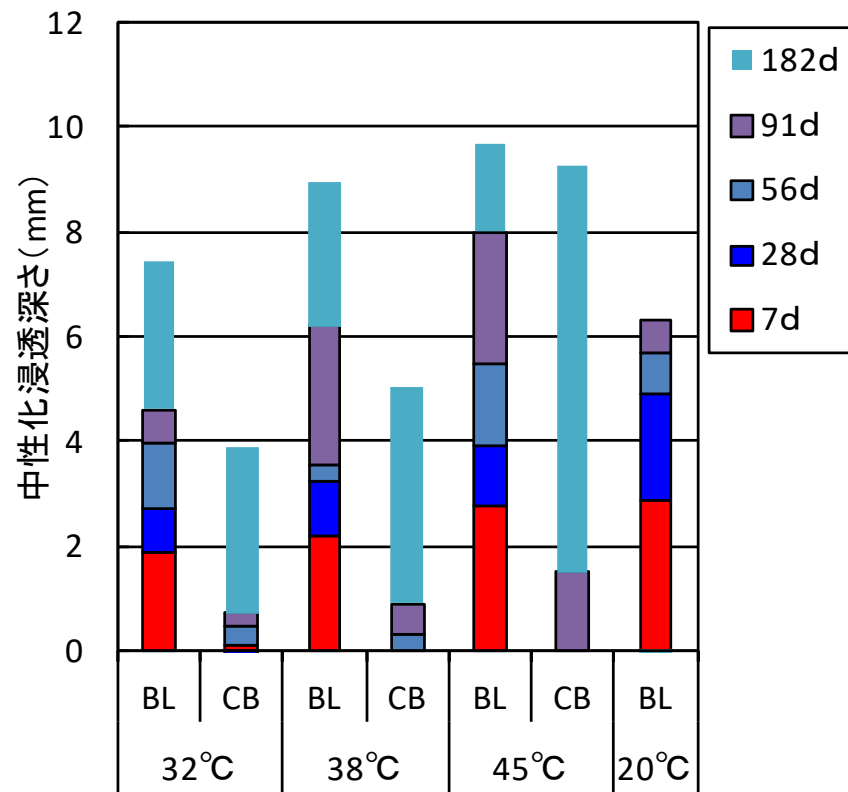
<Cl浸透深さ>

※JSCE-G572を参考。材齢28日から塩水浸漬



<中性化深さ>

※JIS A 1153に準拠。促進開始材齢28日

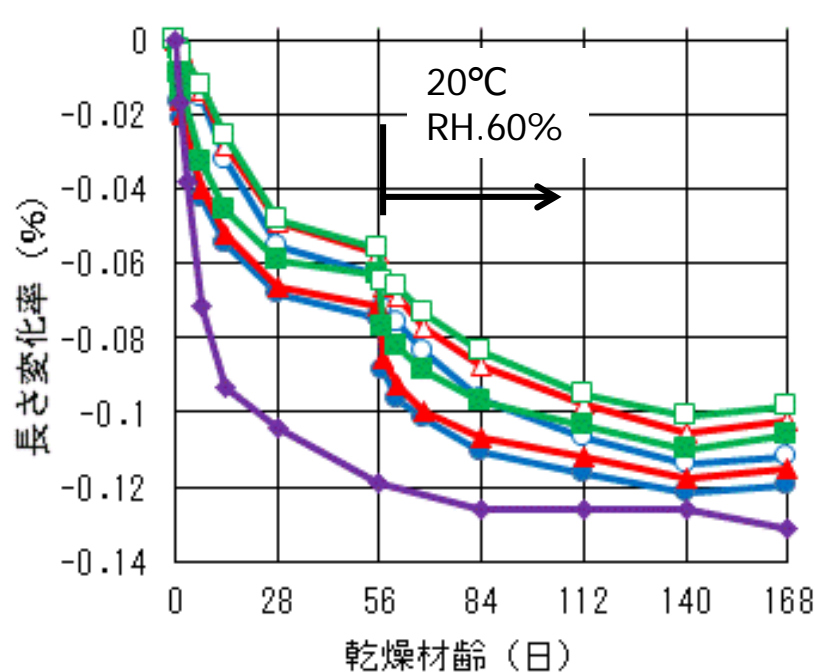
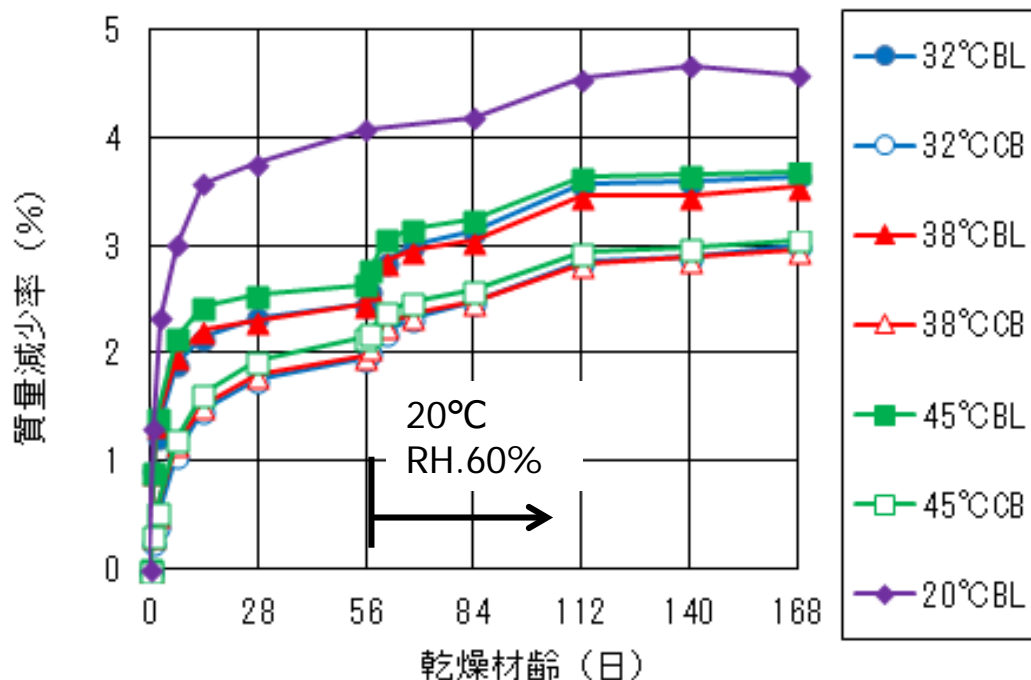


長さ変化

- 試験因子: 初期温度(32, 38, 45°C)、塗布型養生剤の有無

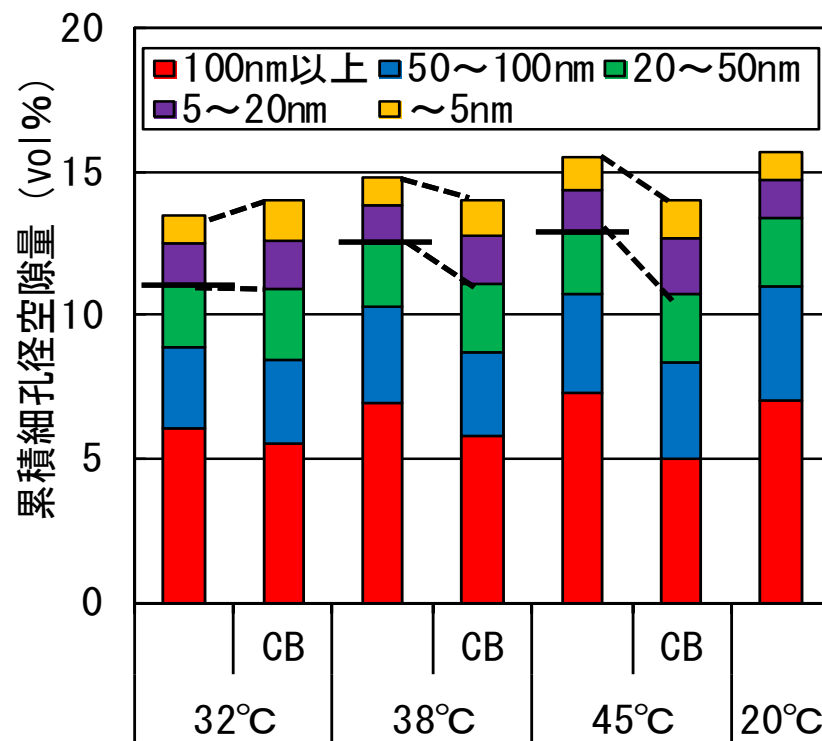
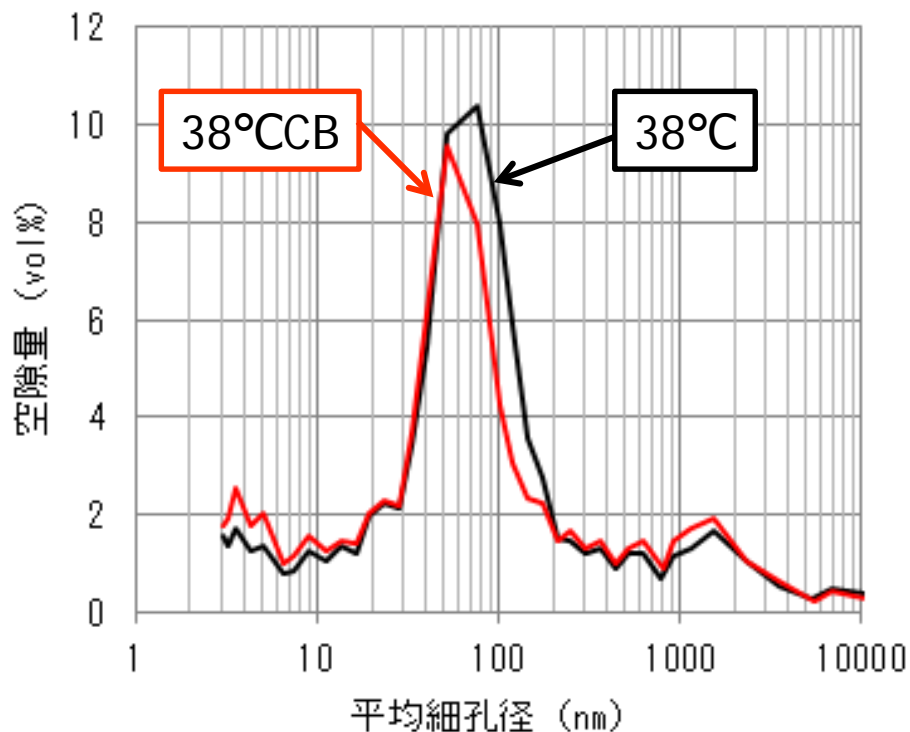
<質量減少率>

<長さ変化率>



※乾燥材齢56日まで30°C、RH.70%に保管

空隙構造の評価



- CB塗布により、粗大空隙径が細孔側にシフト。ピークも小さくなる
- 20nm以下の空隙が増え、20nm以上の空隙が減る

- 強度の他、全ての耐久性項目(CI浸透、中性化、乾燥収縮)で品質改善
 - 表面塗布剤による急激な乾燥の抑制および保水
 - ⇒養生延長や追加養生と同じ効果
 - ⇒空隙構造の変化(粗大な空隙が減少)で説明が可能
- ☆ 暑中期の対策をとった上で、それでも35°Cを超えた場合のコンクリート品質確保の方策として有効