

# 論文 高炉セメントの若材齢の水和反応に練上り温度と初期高温履歴が及ぼす影響

全 培糊\*1・丸山 一平\*2

**要旨:** 本研究では、材齢初期の練上り温度と水和熱による高温履歴が高炉セメントの若材齢水和反応に及ぼす影響について検討を行った。高炉セメント硬化体中の C<sub>3</sub>S の反応が 90%を超えた時点から C<sub>2</sub>S の反応が活性化される傾向が確認された。高炉セメント硬化体中の C-S-H の CaO/SiO<sub>2</sub> モル比は、温度履歴に拘わらず BFS の反応により一緒に低下する傾向が確認された。このことから、C<sub>3</sub>S の析出物である CH からの反応とともに、C-S-H の層間にあるカルシウムイオンとの反応性が生じ、結果として C-S-H の平均 CaO/SiO<sub>2</sub> が低下したと考えられる。その傾向は温度履歴によらず高炉スラグ微粉末の反応率によって決定されると考えられる。

**キーワード:** 高炉セメント, 温度履歴, 水和反応, 若材齢, 相組成

## 1. はじめに

産業副産物である高炉スラグ微粉末を混合した高炉セメントは、アルカリ骨材反応の制御、化学抵抗性の向上効果などの利点から様々な構造物に適用されており、今後も利用拡大が見込まれている。

一方で、近年では、初期強度の改善のために高炉スラグ微粉末の粉末度を大きくした高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた場合より発熱量や自己収縮が大きくなることや、また材齢初期に乾燥収縮ひび割れが発生する事例が報告されている<sup>1),2)</sup>。

このことから、本研究では、高炉セメントを使用したコンクリートの若材齢に生じる水和発熱による温度上昇を想定した温度履歴をセメントペースト試験体に加え、材齢初期に受ける高温履歴が高炉セメントの水和反応に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び調査

本実験で使用した結合材は、市販されている高炉セメント B 種(記号 BFSC)である。表-1 に高炉セメントの物性を示し、表-2 は本研究の水和反応分析に使用したセメントペーストの調査条件を示す。水セメント比は 0.55

としセメントペーストは 20℃環境で練混ぜた。

### 2.2 温度履歴条件

試験体の温度履歴は、コンクリートの打込み時期として冬期, 中間期, 夏期を想定し、それぞれ 10℃一定条件(以下, 10℃条件, 記号: 10-10)および 20℃一定条件(以下, 20℃条件, 記号: 20-20)並びに 30℃一定条件(以下, 30℃条件, 記号: 30-30)と設定した。また、一定温度に対して、水和発熱による温度上昇を模擬した+40℃の温度履歴を与え、最大温度 50℃の山型の履歴条件(以下, 10-50℃条件, 記号: 10-50)および最大温度 60℃の山型の履歴条件(以下, 20-60℃条件, 記号: 20-60)並びに最大温度 70℃の山型の履歴条件(以下, 30-70℃条件, 記号: 30-70)を与えた。この温度上昇量はコンクリート部材の中央部を想定して設定したものである<sup>3)</sup>。

実部材における水和発熱性状は高炉セメント種類や練上り温度により差があると考えられるが、本研究では温度履歴の相互比較を行う目的で、すべての条件で温度上昇開始材齢を 10 時間とした。温度上昇開始後は一定温度勾配で昇温を行い、材齢 22 時間で最高到達温度に達し

表-2 セメントペーストの調査

記号			W/B
10℃シリーズ	20℃シリーズ	30℃シリーズ	(-)
BFSC10-10	BFSC20-20	BFSC30-30	0.55
BFSC10-50	BFSC20-60	BFSC30-70	0.55

表-1 高炉セメントの物性

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ブレン (cm <sup>2</sup> /g)	LOI (%)	化学成分 (%mass)								
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>
BFSC	3.05	3090	2.14	24.63	8.94	1.88	55.23	3.38	2.06	0.2	0.35	0.023

\*1 名古屋大学大学院 環境学研究科 大学院生 (学生会員)

\*2 名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 准教授・博士(工学) (正会員)

材齢 32 時間まで一定温度、その後、材齢 144 時間に開始温度となるように降温した。本研究で適用した温度履歴を図-1 に示す。

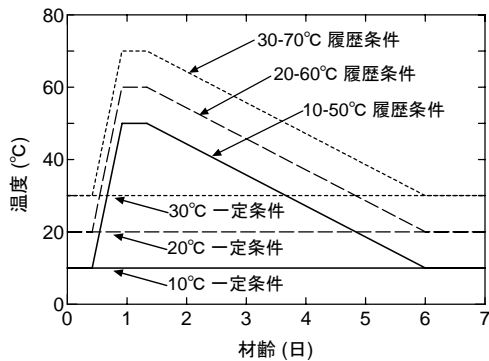


図-1 各試験体に与えた温度履歴

表-3 各乾燥状態における水和生成物の組成

水和物	乾燥状態	H/C	組成式	分子量 (g/mol)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
C-S-H	1000°C	0	C <sub>x</sub> SH <sub>0</sub>	155	-
	105°C	0.88	C <sub>x</sub> SH <sub>1.5</sub>	182	2.60
	11%RH20°C	1.47	C <sub>x</sub> SH <sub>2.5</sub>	200	-
	Saturated	1.47	C <sub>x</sub> SH <sub>2.5</sub>	200	2.41
AFt	1000°C	0	C <sub>6</sub> A $\hat{S}$ <sub>3</sub> H <sub>0</sub>	679	-
	105°C	2.00	C <sub>6</sub> A $\hat{S}$ <sub>3</sub> H <sub>12</sub>	895	2.38
	11%RH20°C	5.33	C <sub>6</sub> A $\hat{S}$ <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	1255	-
	Saturated	5.33	C <sub>6</sub> A $\hat{S}$ <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	1255	1.78
AFm	1000°C	0	C <sub>4</sub> A $\hat{S}$ H <sub>0</sub>	406	-
	105°C	2.00	C <sub>4</sub> A $\hat{S}$ H <sub>8</sub>	550	2.4
	11%RH20°C	3.00	C <sub>4</sub> A $\hat{S}$ H <sub>12</sub>	623	-
	Saturated	3.00	C <sub>4</sub> A $\hat{S}$ H <sub>12</sub>	623	1.99
C-A-H	1000°C	0	C <sub>4</sub> AH <sub>0</sub>	326	-
	105°C	1.75	C <sub>4</sub> AH <sub>7</sub>	452	2.52
	11%RH20°C	3.25	C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>	560	-
	Saturated	3.25	C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>	560	2.05
C-F-H	1000°C	0	C <sub>4</sub> FH <sub>0</sub>	384	-
	105°C	1.75	C <sub>4</sub> FH <sub>7</sub>	510	2.84
	11%RH20°C	3.25	C <sub>4</sub> FH <sub>13</sub>	618	-
	Saturated	3.25	C <sub>4</sub> FH <sub>13</sub>	618	2.16

ここに、C: CaO, S: SO<sub>2</sub>, A: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H: H<sub>2</sub>O,  $\hat{S}$ : SO<sub>3</sub>,  $\hat{C}$ : CO<sub>2</sub>である。また、C-S-H については、x=1.7 のときの値を記載した。

### 2.3 水和停止

高炉セメント硬化体の各材齢による水和反応率、結合水量、高炉スラグ反応率の測定には水和停止を行った試料を用いた。水和停止は、高炉セメント硬化体をハンマ

ーで約 5mm 角以下に粉砕してすぐアセトンに 30 分程度浸漬させてから、吸引濾過(アスピレータ)により試料とアセトンを分離させた。その後、再度アセトンに 6 時間程度浸漬後、試料とアセトンの分離を行った。その後、11%RH, 20°C 環境下で 3 週間乾燥を行った。試料は材齢 1, 3, 7 日において採取した。

### 2.4 熱重量分析

強熱減量の測定は、TG-DTA 2010 SA (BrukerAXS 社製)により、水和停止を行った粉末試料から質量 20±2mg を用い、室温から 1000°C まで昇温速度 10°C/min, N<sub>2</sub> フロー環境下で熱重量分析(TG)を行った。TG-DTA 分析結果から算出した強熱減量(LOI)から結合水量を算出して、各材齢による水和反応の分析に用いた。

### 2.5 粉末 X 線回折及びリートベルト解析

粉末 X 線回折の測定は、D8 ADVANCE (BrukerAXS 社製)により、X 線源 Cu-K $\alpha$ , 管電圧 40kV, 管電流 40mA, 走査範囲 2 $\theta$ =5~65°, ステップ幅: 0.02°, スキャンスピード: 0.5°/min. の条件で行い<sup>4)</sup>, リートベルト解析はソフトウェア TOPASver4.2 (BrukerAXS 社製)により行った。定量に際しては、C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A (cubic, orthorhombic), C<sub>4</sub>AF, MgO (M), CaCO<sub>3</sub> (C $\hat{C}$ ), CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O (C $\hat{S}$ H<sub>2</sub>), CaSO<sub>4</sub>·1/2H<sub>2</sub>O (C $\hat{S}$ H<sub>0.5</sub>), Ca(OH)<sub>2</sub> (CH), C<sub>3</sub>A·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O (AFt), C<sub>3</sub>A·CaSO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O (AFm), 内部標準試料として分析試料に 10mass%混合した  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を定量対象とした。定量に用いた各鉱物の結晶系 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A (cubic, orthorhombic), C<sub>4</sub>AF の結晶構造に関するパラメータは NIST Technical Report<sup>5)</sup>と同様とし、M, C $\hat{C}$ , C $\hat{S}$ H<sub>2</sub>, C $\hat{S}$ H<sub>0.5</sub>, AFt, AFm,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に関しては ICSD Database<sup>6)</sup>と同様とした。非晶質物質は内部標準物質  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の定量値から式(1)に従い算出した。

$$A = \{100 \times (S_R - S)\} / \{S_R \times (100 - S) / 100\} \quad (1)$$

ここで、A: 非晶質量(%), S:  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の混合率(%), S<sub>R</sub>:  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の定量値(% )である。

セメントの各鉱物の反応率や相組成を評価するにあたり、各乾燥状態における H<sub>2</sub>O/CaO 比(H/C 比)について、表-3 に示される組成や結合水量値を用い、すべて無水物に換算した上で水和率を評価した<sup>7)</sup>。

### 2.6 高炉スラグの反応率

本研究では佐川と名和ら<sup>8)</sup>の測定方法と同様にして、粉末 X 線回折およびリートベルト解析による定量で高炉スラグ(記号: BFS)の反応率を算出した。未水和および水和停止させた各材齢の高炉セメントペースト中のスラグを結晶化させるために 900°C で 30 分加熱した後、結晶化させた成分を定量するために粉末 X 線回折を行った。粉末 X 線回折およびリートベルト解析は 2.5 節の方法と同様である。定量に際しては、C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S ( $\beta$ ), C<sub>2</sub>S ( $\alpha$ ), C<sub>3</sub>A (cubic, orthorhombic), C<sub>4</sub>AF, MgO, Free-CaO, 無水石膏,

結晶化したスラグである Gehlenite ( $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ), Akermanite( $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ), Merwinite( $3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ), 内部標準試料として加熱後の分析試料に 10mass%混合した  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  を定量対象とした。未水和高炉セメント中の高炉スラグ混合率は、結晶された Gehlenite, Akermanite, Merwinite の 3 鉱物の合計量とし、各材齢の高炉セメントペースト中の高炉スラグ反応率は、結晶化された 3 鉱物量を内部標準物質定量値で補正して、未水和高炉セメント中の高炉スラグ混合率の定量値との比により算出した<sup>8)</sup>。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 セメント鉱物および高炉スラグの水和反応率

図-2 から図-6 に高炉セメント硬化体の  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ , 高炉スラグの反応率の経時変化を比較してそれぞれ示す。

高炉セメント硬化体中の  $\text{C}_3\text{S}$  について、材齢 1 日で 10°C 条件, 20°C 条件, 10-50°C 条件, 30°C 条件, 20-60°C 条件, 30-70°C 条件の順に高い水和率を示しているが、材齢 3 日からは高松ら<sup>9)</sup>の研究と同様にすべての高温履歴条件が一定温度条件より高い水和反応を示している。また、すべての温度条件で材齢 1 日から 3 日までは水和が急激に進行し、また、材齢 3 日から 7 日までの水和反応は、一定温度条件は徐々に増加する傾向であるが、高温履歴条件では水和が停滞する傾向を示している。

高炉セメント硬化体中の  $\text{C}_2\text{S}$  については、材齢 1 日は一定温度条件と高温履歴条件の水和率は同程度であるが、高温履歴条件が高温履歴を受けた後である材齢 1 日以降から一定温度条件より高温履歴条件の水和率が大きくなる。これは既往の研究と同様<sup>10)</sup>である。また、材齢 7 日時点から見ると、20°C 条件, 10°C 条件, 30°C 条件, 10-50°C 条件, 20-60°C 条件, 30-70°C 条件順に高い水和率を示し、10°C 条件と 30°C 条件, 20-60°C 条件と 30-70°C 条件は同程度の水和率を示している。

$\text{C}_3\text{A}$  の水和率は、高温履歴条件の水和率が材齢 1 日から一定温度条件より高い水和率を示している。材齢 3 日からは高温履歴条件である 10-50°C 条件, 20-60°C 条件, 30-70°C 条件がほぼ 100%の水和反応を示し、20-60°C 条件と 30-70°C 条件は材齢 1 日から 7 日まで同程度の水和を示した。一定温度条件の場合は、材齢 1 日から 7 日まで温度が高いものほど高い水和率を示しているが、材齢 7 日で 20°C 条件と 30°C 条件は同程度の水和率を示している。

高炉セメント硬化体中の  $\text{C}_4\text{AF}$  の水和反応は、一定温度条件の場合は、材齢 1 日から材齢 7 日まで水和率が急激に上昇する傾向を示し、この中で 20°C 条件の場合は、材齢 1 日に 10%以下の水和率を示しているが、材齢 7 日

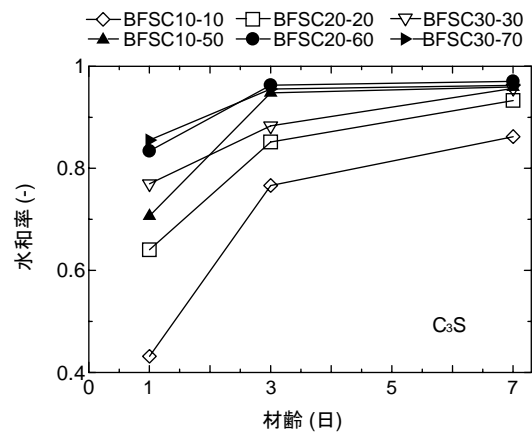


図-2 高炉セメント硬化体の  $\text{C}_3\text{S}$  の水和率

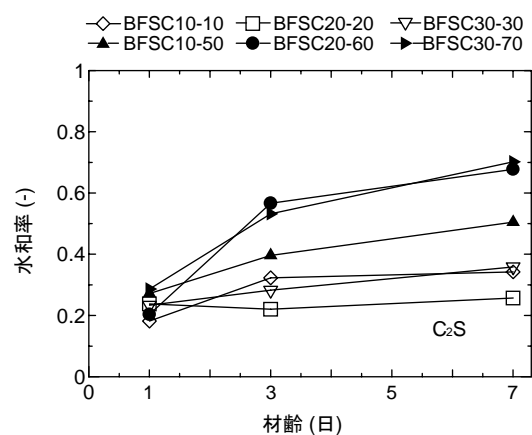


図-3 高炉セメント硬化体の  $\text{C}_2\text{S}$  の水和率

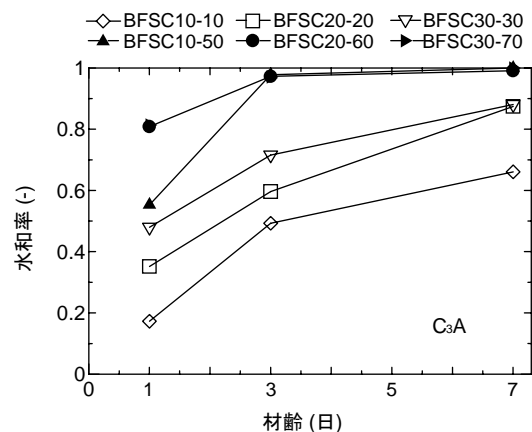


図-4 高炉セメント硬化体の  $\text{C}_3\text{A}$  の水和率

時点では 90%以上の水和率を示している。高温履歴条件の場合、20-60°C 条件と 30-70°C 条件は材齢 1 日から 80%前後の高い水和率を示し、材齢 3 日からほぼ 100%の水和反応を示している。また、10-50°C 条件は材齢 1 日に 30%以下の水和率であるが急激に上昇して材齢 3 日からほぼ 100%の水和反応を示している。

温度履歴による高炉セメント硬化体中の高炉スラグについては、前のすべての鉱物の水和反応と同様に材齢

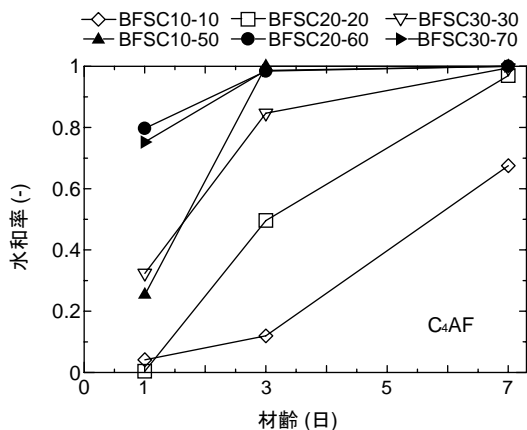


図-5 高炉セメント硬化体の  $C_4AF$  の水和率

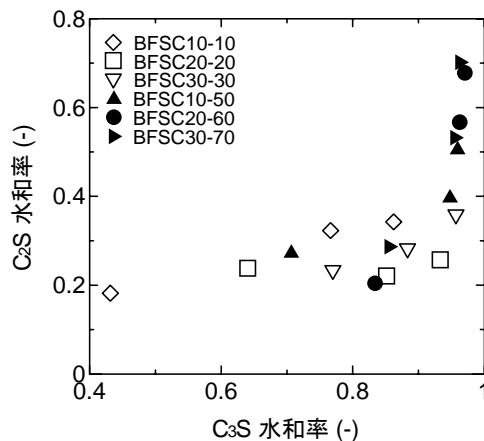


図-7 高炉セメント硬化体の  $C_3S$  反応率と  $C_2S$  反応率の関係

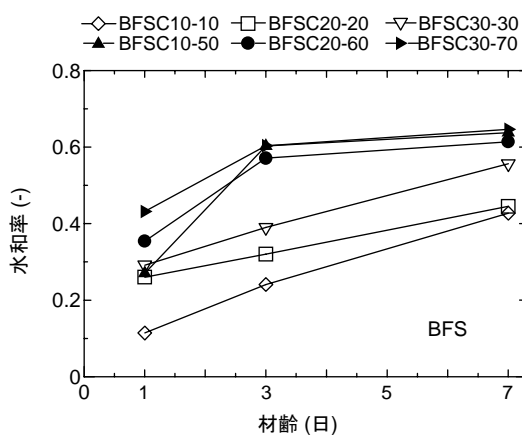


図-6 高炉スラグの反応率

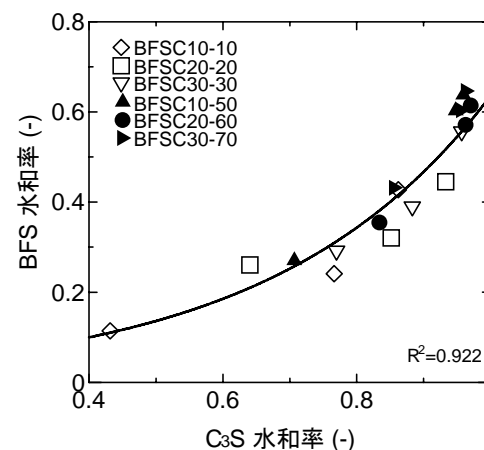


図-8 高炉セメント硬化体の  $C_3S$  反応率と高炉スラグ反応率の関係

7日時点から見ると、高温履歴条件の方が高い高炉スラグ反応率を示している。すべての一定温度条件は材齢1日から水和が徐々に上昇する傾向を示しているが、すべての高温履歴条件は、材齢1日から3日までは水和が急激に進行するが、材齢3日から7日までは停滞する傾向を示している。

この結果から、高炉セメント硬化体中の  $C_3S$ 、 $C_2S$ 、 $C_3A$ 、 $C_4AF$  の水和反応および高炉スラグの反応率は、材齢初期の高温履歴より練上り温度が及ぼす影響が大きいと考えられる。

図-7は図-2と図-3に示した高炉セメント中の  $C_3S$  と  $C_2S$  の反応について、 $C_2S$  の反応率と  $C_3S$  の反応率の関係である。図を見ると、 $C_3S$  の反応率が90%前後に到達すると  $C_2S$  の反応が活性化する傾向が確認された。このような傾向は、既往の研究<sup>11)</sup>で推察した通り、 $C_3S$  の反応中の液相の組成関係から、 $C_2S$  の反応が遅延される状況が作られているためであると考えられる。

図-8は、図-2と図-6に示した  $C_3S$  と高炉スラグの反応について、高炉スラグの反応率と  $C_3S$  の反応率での関係である。図を見ると、 $C_3S$  の水和反応は、温度条件に拘わらず、高炉スラグと高い相関性が確認された。

### 3.2 硬化体の相組成

本研究では、水和反応に伴う  $CaO/SiO_2$  モル比(以下、 $C/S$  比)の変化を考慮して、リートベルト解析による分析値から以下のような繰り返し計算によって相組成を同定した。セメントの各相から結合水を除いた無水物量に換算する。このとき、 $C-S-H$  は暫定的な  $C/S$  比の仮定値を用いる。測定結果から各未水和物相の水和反応率を算出し、結晶相から確認できる  $Al_2O_3(A)$  および  $Fe_2O_3(F)$  の収支を計算し、各々の非晶質中の存在量を計算する。このときの  $A$  および  $F$  はそれぞれ  $C_4AH_{13}$ 、 $C_4FH_{13}$  構造の水和物を形成していると仮定して、非晶質中の  $C_4AH_{13}$  および  $C_4FH_{13}$  で利用された  $CaO(C)$  量が計算されるので、セメント鉱物の反応量から算出された反応に利用されたはずの  $C$  を算出し、 $C-S-H$  の中で利用されている  $C$  を物質収支から計算し、 $C/S$  比を算定する。この繰り返し計算によって  $C/S$  比を収束させて計算を行うことで各相を同定することが可能になる<sup>7),12)</sup>。高炉スラグについて

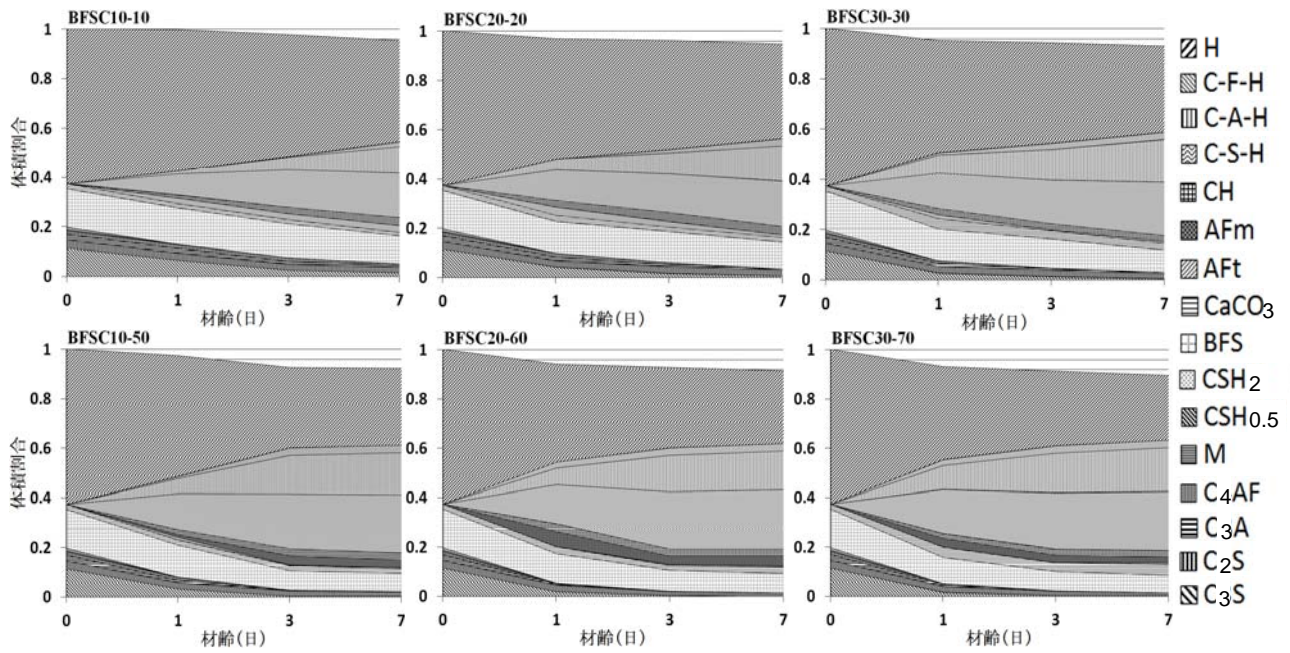


図-9 高炉セメント硬化体の相組成の経時変化

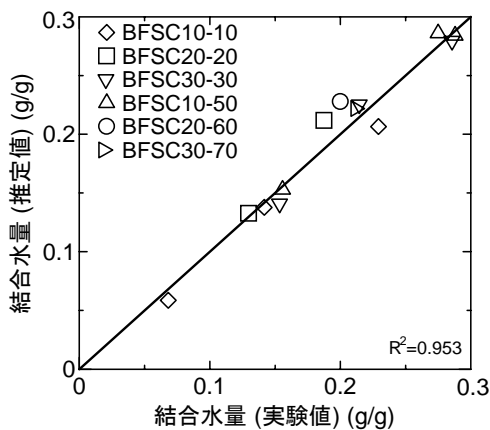


図-10 高炉セメント硬化体の温度履歴による結合水量の比較

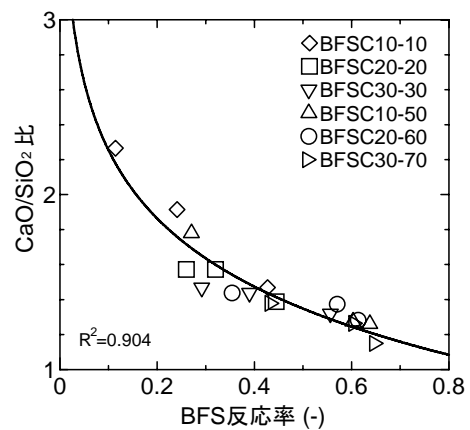


図-11 高炉セメント硬化体の CaO/SiO<sub>2</sub> モル比と高炉スラグ反応率の関係

は、Gehlenite, Akermanite, Merwinite の 3 鉱物の定量値を基に CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の溶出量を算出した。

結果として、得られた高炉セメント硬化体の相組成を図-9 に示す。また、算出された相組成の妥当性を検証するために、リートベルト解析に基づく相組成モデルから算出した結合水量と TG-DTA による算出した結合水量の比較を図-10 に示す。比較結果を見ると、若干のばらつきはあるものの、比較的良好に対応することが確認された。

### 3.3 C-S-H の CaO/SiO<sub>2</sub> モル比

図-11 にリートベルト解析から得られた高炉セメント硬化体の C-S-H の CaO/SiO<sub>2</sub> 比について高炉スラグ反応率との関係を示す。温度条件にかかわらず、すべての高炉セメント硬化体で高炉スラグの水和反応により C/S 比が減少する傾向を示している。このことから、エーラ

イトの析出物である CH からの反応とともに、C-S-H の層間にあるカルシウムイオンとの反応性が生じ、結果として C-S-H の平均 CaO/SiO<sub>2</sub> が低下したと考えられる。その傾向は温度履歴によらず高炉スラグ微粉末の反応率によって決定する。今後、異なる鉱物組成、高炉スラグ置換率の結合材を用いて、同一曲線上で評価できるか検討する予定である。

## 4. まとめ

本研究では、結合材として高炉セメント B 種について、10°C 一定条件、20°C 一定条件、30°C 一定条件および 10-50°C 高温履歴条件、20-60°C 高温履歴条件、30-70°C 高温履歴条件のコンクリートの若材齢に生じる水和発熱による温度履歴を模擬した条件で水和反応に関する検討を行った。その結果以下のことが確認された。

- (1) 水和反応に伴う  $\text{CaO/SiO}_2$  モル比の変化を考慮して検討した高炉セメント硬化体の粉末X線リトベルト解析及び相組成モデルは、若干のばらつきはあるが、比較的良好に評価できることを確認した。
- (2) 高炉セメント中の  $\text{C}_3\text{S}$  と  $\text{C}_2\text{S}$  の水和の相関関係を検討した結果、高炉セメント硬化体中の  $\text{C}_3\text{S}$  の水和反応が90%を超えた時点から  $\text{C}_2\text{S}$  の水和反応が活性化される傾向が確認された。
- (3) リトベルト解析から得られた高炉セメント硬化体の C-S-H の  $\text{CaO/SiO}_2$  モル比は、温度履歴に拘わらず高炉スラグの反応により減少する傾向が確認された。このことから、エーライトの析出物である CH からの反応とともに、C-S-H の層間にあるカルシウムイオンとの反応性が生じ、結果として C-S-H の平均  $\text{CaO/SiO}_2$  が低下したと考えられる。その傾向は温度履歴によらず高炉スラグ微粉末の反応率によって決定されることが確認された。
- (4) 高炉セメント硬化体中の高炉スラグの反応率と母材セメントのエーライトには温度履歴に拘わらず、高い相関が確認された。

#### 参考文献

- 1) 二戸信和, 大澤友宏, 鯉淵清, 宮澤伸吾: 高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度と  $\text{SO}_3$  の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp. 121-126, 2008
- 2) 寺本篤史, 丸山一平: 人工軽量骨材による高炉セメントコンクリートの線膨張係数制御の検討, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp. 107-113, 2009
- 3) 寺本篤史, 丸山一平: 超低水セメント比シリカフェームコンクリートの自己収縮温度依存性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.634, pp.2069-2076, 2008.12
- 4) S.Hoshino, K.Yamada, and H.Hirano: XRD/ Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and limestone Blended Cement, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.357-367, 2006
- 5) P.Stutzman, S.Leigh: NIST Technical Note 1441-Phase Composition Analysis of the NIST Reference Clinkers by Optical Microscopy and X-ray Powder Diffraction, pp.34-43, 2002
- 6) Fachinformationzentrum Karlsruhe and National Institute of Standards and Technology, Inorganic Crystal Structure Database, ICSD, 2006, <http://icsd.ill.fr/icsd/index.html>, (accessed 2010-06-09)
- 7) 五十嵐豪, 丸山一平: 普通ポルトランドセメントを用いたセメント硬化体の相組成と力学的性質の関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.660, pp.213-222, 2011.2
- 8) 佐川孝広, 名和豊春: X線回折リトベルト法による高炉スラグ量の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp. 155-160, 2010
- 9) 高松伸之, 丸山一平, 五十嵐豪, 寺本篤史: 高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体の若材齢体積変化と水和反応に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp. 187-192, 2009
- 10) 久我龍一郎, 森寛晃, 鶴澤正美: 初期高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末添加セメントの水和に及ぼす養生条件の影響, 日本材料学会論文集, Vol.60, No.8, pp. 693-700, 2011.8
- 11) 丸山一平, 松下 哲郎, 野口 貴文, 細川佳史, 山田一夫: エーライトおよびビーライトの水和反応速度に関する研究—ポルトランドセメントの水和機構に関する研究 その1—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.650, pp.681-688, 2010.4
- 12) 五十嵐豪, 丸山一平, 高松 伸之, 山田一夫: 高温履歴を受けるセメント硬化体中の普通ポルトランドセメントの水和反応と硬化体の物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp. 715-720, 2009