

# 強度増進の温度依存性に及ぼすセメント鉱物組成の影響

## EFFECTS OF THE MINERAL COMPOSITION OF CEMENT ON THE TEMPERATURE DEPENDENCY OF STRENGTH DEVELOPMENT

谷口 円\*, 桂 修\*\*, 佐川孝広\*\*\*, 濱 幸雄\*\*\*\*  
*Madoka TANIGUCHI, Osamu KATSURA, Takahiro SAGAWA  
 and Yukio HAMA*

In recent years, use of low heat Portland cement is promoted. However, there was no general method to predict the strength development of the concrete using cement which has wide range of mineral composition. In low heat Portland cement, it was pointed out that application of "Maturity method" was difficult. We considered application of the equivalent age to predict the strength development of concrete using various type of cement. Then, we examined the strength development of mortar using cement has wide range of mineral composition under different curing temperature. As a result, the temperature dependency of strength development of various cements was explained by the equivalent age. The values of the apparent activation energy of cement were dependent on its mineral composition.

**Keywords:** Strength Development, Cement, Mineral Composition, Equivalent age, Apparent Activation Energy

強度増進性状, セメント, 鉱物組成, 等価材齢, 見かけの活性化エネルギー

### 1. はじめに

コンクリートの圧縮強度はセメントの水和反応に依存し、温度と時間の影響を大きく受ける。特に寒冷期のコンクリート工事では、低温の影響により強度増進が遅れるため、工事を支障なく行うためには計画した材齢で所要の強度を得るための対応が重要となる。日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」<sup>1)</sup>では温度・時間関数である積算温度を用いた計画・管理方法が示され実務に用いられ、1998年からは圧縮強度増進を予測する強度増進標準曲線が示されている。

積算温度で強度値を整理する方法は1950年代に示され、我が国に導入され実務に適用する方式が作られたのは1959年であった<sup>2)</sup>。ただし、この基準温度を一定とした積算温度の適用は経験則に基づく利用であり、普通ポルトランドセメントに対応したものであった。その後、ビーライトを多く含む低熱ポルトランドセメントが開発されたが、これを用いたコンクリートでは基準温度を $-10^{\circ}\text{C}$ とした従来の積算温度方式の適用が困難であること<sup>3)4)</sup>や、低熱セメントでもメーカーにより強度増進性状が異なること<sup>5)</sup>が報告されている。筆者ら<sup>6)</sup>も普通、中庸熱、低熱ポルトランドセメントを用いたコンク

リートで、養生温度を変えた圧縮強度増進性状の実験を行い、低熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートには基準温度を $-10^{\circ}\text{C}$ とした積算温度が適用できないことを確認した。使用するコンクリート毎に最適な基準温度を試験結果から定める方法も示される<sup>7)</sup>が、数水準の温度条件での試験が必要であり実用的でない。

一方、等価材齢(Equivalent age)も温度時間関数として知られている。セメントの水和反応の温度依存性はアレニウス則に従うとして、様々な温度条件での材齢を基準温度の材齢に換算するものであるが、算定にはセメントごとに活性化エネルギーが必要となる。Carino<sup>8)</sup>の研究を受けたASTM1074<sup>9)</sup>には等価材齢の算定に用いる見かけの活性化エネルギーをモルタル実験から求める方法が示される。また、Schindler<sup>8)</sup>は見かけの活性化エネルギーの値をアルミネート、フェライト、ブレン比表面積の関数とした実験式を示している。筆者らは算定に用いた各セメントの見かけの活性化エネルギーの値が鉱物組成に依存する傾向を明らかにしている<sup>6)</sup>。

セメントは、エーライト(けい酸三カルシウム、以下 $\text{C}_3\text{S}$ )、ビーライト(けい酸二カルシウム、以下 $\text{C}_2\text{S}$ )、アルミネート(以下 $\text{C}_3\text{A}$ )、フェライト(以下 $\text{C}_4\text{AF}$ )の主要4鉱物からなり、鉱物組成とブ

\* 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所環境科学部  
研究主任・工修  
(室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻  
博士後期課程)

\*\* 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所居住科学部  
研究主幹・博士(工学)

\*\*\* 日鐵セメント(株)技術部研究所 副主幹研究員・博士(工学)

\*\*\*\* 室蘭工業大学大学院工学研究科くらし環境系領域  
教授・博士(工学)

Researcher, Environmental Engineering Division, Hokkaido Research Organization  
Northern Regional Building Research Institute, M. Eng.  
(Graduate Student, Graduate School of Eng., Muroran Institute of Technology)

Senior Research Manager, Residential Planning Division, Hokkaido Research Organization  
Northern Regional Building Research Institute, Dr. Eng.

Research Manager, Technical Development Lab., Nittetsu Cement Co., Ltd., Dr. Eng.  
Prof., College of Environmental Technology, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

表1 セメントの物性値と鉱物組成

セメント種類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ブレン 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	鉱物組成(リートベルト)(%)				
				C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Total
早強	H	3.12	4780	76	3	7	8	94
	N1	3.17	3450	68	13	4	11	96
普通	N2	3.16	3460	68	13	6	10	97
	M1	3.23	3030	54	28	2	12	96
中庸熱	M2	3.21	3710	40	43	5	8	96
	M3	3.24	3100	43	41	1	13	98
	M4	3.23	3080	55	26	2	14	97
	L1	3.23	3420	27	58	2	8	95
低熱	L2	3.24	3590	25	58	2	9	94
	L3	3.22	3500	32	52	3	9	96
	L4	3.24	3330	32	52	3	10	97

ブレン比表面積がセメント種類により異なることが広く知られている。「JIS R5210:2009 ポルトランドセメント」では、中庸熱ポルトランドセメントではC<sub>3</sub>S量が50%以下、低熱ポルトランドセメントではC<sub>2</sub>S量が40%以上と、それぞれ上限値および下限値のみが規定され、同じ種類のセメントでも鉱物組成に幅のあることが考えられる。混合セメントを除くと、これまでの多くの実験研究により示されてきたセメント種類によるコンクリートの強度増進性状等の違いは、主要鉱物の組成および反応に依存したものと推察することもできる。

以上をふまえ、本研究では、使用するセメント種類によるコンクリート強度増進の温度依存性の相違を、鉱物組成を指標としてとらえ直し、強度増進の温度・時間依存性を記述する手法を提案することを目的とした検討を行った。はじめにセメントペーストの実験を行い、強度増進を担うセメント鉱物(C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S)の反応の温度依存性を評価した。次にモルタルを用い、国内の3メーカーの広範囲な鉱物組成を持つポルトランドセメント11種を使用し、強度増進の温度依存性を評価し、鉱物組成の影響を検討した。

## 2. 使用したセメント

セメントは、ポルトランドセメントとし、早強ポルトランドセメント(以下早強セメント)1種類(H)、普通ポルトランドセメント(以下普通セメント)2種類(N1, N2)、中庸熱ポルトランドセメント(以下中庸熱セメント)4種類(M1~M4)、低熱ポルトランドセメント(以下低熱セメント)4種類(L1~L4)の合計11種類を用意した。表1に各セメントのブレン比表面積、密度、X線回折リートベルト法により定量された主要4鉱物の割合を示す。ペースト実験ではN2, M3, L4の3種類、モルタル実験では11種類すべてを使用した。

## 3. セメントペーストによる検討

### 3.1 実験概要

セメント鉱物(C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S)の反応の温度時間依存性を評価した。セメントの水和解析は近年研究が盛んである<sup>9)10)11)12)</sup>X線回折リートベルト解析で行った。

#### 3.1.1 水和試料の作製と調製

ペーストの水セメント比は50%とし、混練はJISR5201に準じて行った。混練後4×4×16cmの型枠に成型し、普通セメントでは約半日、中庸熱、低熱セメントで約1日20℃封緘養生を行った。脱型後、厚さ約3mmに切断し、飽和水酸化カルシウム溶液とともにチャック付きビニル袋に密封し、所定の温度に調整された水槽で、所

表2 実験計画

水セメント比 (%)	養生温度 (℃)	材齢 (日)
50	20	1,3,7,28,56,91,(182)
	5	7,28,56,91,(182)
	50	3,7,14,28,(91)

定の材齢まで養生した。表2に実験計画を示す。養生後の試料は、アセトンにより水和を停止させ、D乾燥を行った。乾燥後の試料は鉄乳鉢で粗粉碎後、ボールミルにて微粉碎した。

#### 3.1.2 反応率の測定

X線回折の測定は、内部標準物質としてコランダムを内割10%添加して行った。測定条件は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°、計数時間2秒で行い、回転試料台、モノクロメーターを使用した。リートベルト解析はRIETAN-2000<sup>13)</sup>を用いた。解析、定量の対象鉱物はC<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF, 水酸化カルシウム,モノサルフェート, カルサイトとしセメント鉱物結晶構造データの初期値は佐川ら<sup>10)</sup>の値を用いた。

セメント鉱物の反応率の算出方法は佐川ら<sup>10)</sup>の方法にならない、得られた定量値を内部標準量と強熱減量にて補正し、未水和セメント鉱物定量値との比から算出した。

強熱減量の測定はTG-DTAで行った。測定条件は、昇温速度20℃/min, N<sub>2</sub>フロー(200ml/min)環境下で常温から1000℃の範囲で行い、常温~1000℃の質量減少を強熱減量とした。

## 3.2 結果および考察

C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>Sの反応について温度時間関数による温度依存性の評価を行う。

図1に基準温度を-10℃とした積算温度とC<sub>3</sub>SおよびC<sub>2</sub>Sの反応率の関係をセメントごとに示す。積算温度の算出式をここに示す。

$$M = \sum (T + 10) \Delta t \quad (1)$$

ここに、M: 積算温度(°C・D・D)

T: 期間 $\Delta t$ のコンクリート温度(養生温度)の平均(°C),

$\Delta t$ : 期間(日)

得られた反応率が途中で低下が認められる場合もあり、測定誤差によるものと考えられるが、全体的な温度依存性の傾向は捉えられるものと判断した。

C<sub>3</sub>Sでは異なる養生温度の反応率を積算温度によりほぼ一義的に表すことができるが、C<sub>2</sub>Sでは表せないことが示されている。

等価材齢は以下の式で示される。

$$T_e = \left( \frac{k_T}{k_{T_f}} \right) \times \Delta t \quad (2)$$

ここに、T<sub>e</sub>: 等価材齢(日), k<sub>T</sub>: 温度T<sub>c</sub>での反応速度定数,

k<sub>T<sub>f</sub></sub>: 基準温度T<sub>f</sub>での反応速度定数,

$\Delta t$ : 時間間隔

反応速度定数k<sub>T</sub>はArrhenius式による。

$$k_T = A \exp \left( \frac{-E}{RT} \right) \quad (3)$$

ここに、A: 前指数項,

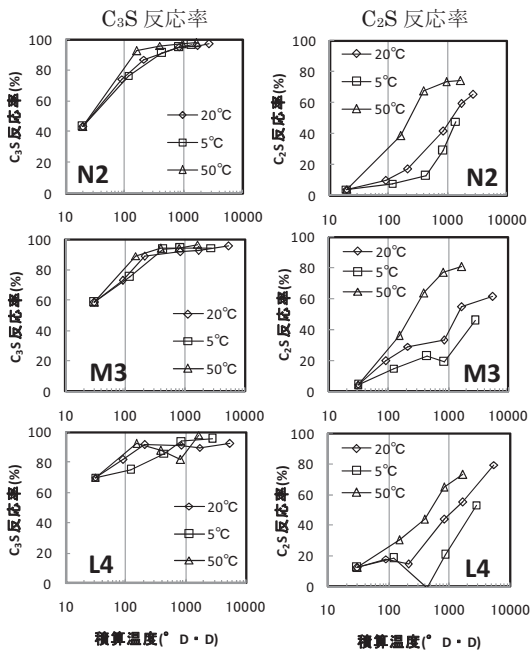


図1 基準温度-10℃の積算温度とC<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S反応率の関係

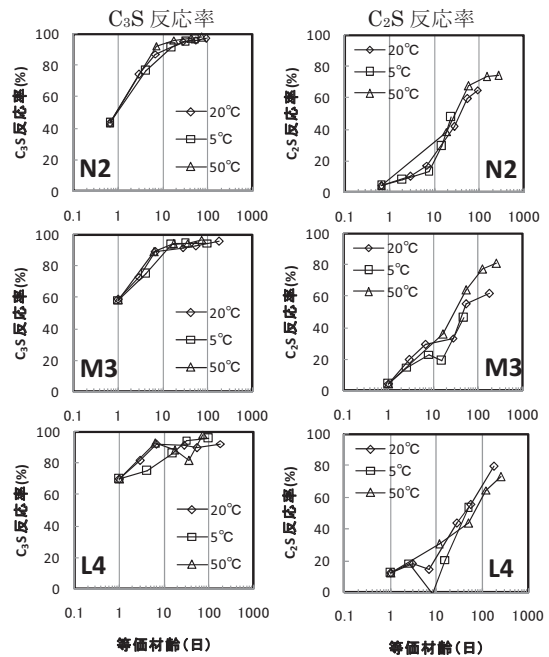


図2 等価材齢とC<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S反応率の関係

$E$ : 見かけの活性化エネルギー (J/mol),  
 $R$ : 気体定数 (J/molK),  
 $T$ : 温度(K)

算定に必要な見かけの活性化エネルギーの値は、文献値<sup>14)</sup>(C<sub>3</sub>S: 26.5kJ/mol, C<sub>2</sub>S: 60.1kJ/mol)を用いた。

図2に等価材齢と反応率の関係を示す。等価材齢を用いると、C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>Sともに養生温度の異なる水和の進行をほぼ一義的に表すことができた。

普通セメントは基準温度を-10℃とした積算温度により強度増進の温度依存性を表すことができる。しかし、低熱セメントは基準温度を-10℃とした積算温度が適用できないことが指摘されている<sup>3)4)6)</sup>。このことは、C<sub>2</sub>Sの反応の温度時間依存性が積算温度で表せないため、C<sub>2</sub>S割合の多い低熱セメントの強度増進には積算温度が適用できないものと考えられる。

C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>Sそれぞれの見かけの活性化エネルギーを用いた等価材齢ではC<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>Sそれぞれの反応の温度依存性を表すことができた。ポルトランドセメントの強度増進は主にC<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>Sの反応によることから、適切な見かけの活性化エネルギーの値を得ることで、等価材齢によって強度増進の温度時間依存性を表すことができると考えられる。

#### 4. モルタルによる検討

##### 4.1 実験概要

###### 4.1.1 使用材料と試験体の作製

使用したセメントは表1に示す11種類とした。調合および試験体作製は、JISR5201-1997「セメントの物理試験方法 10.強さ試験」に準じて行った。試験体数が多いことから、混練は45リットル傾胴形ミキサーを用いて行った。

###### 4.1.2 実験方法

表3に実験計画を示す。型枠の脱型は材齢1日で行い、5,20,35

表3 実験計画

セメント種類	記号	養生温度 (°C)	試験材齢 (日)	
早強ポルトランドセメント	H	5	7,14,56,119,182	
普通ポルトランドセメント	N1 N2			
中庸熱ポルトランドセメント	M1	20	1,3,7,28,56	
	M2 M3 M4			
	低熱ポルトランドセメント	L1	35	2,3,14,35
		L2 L3 L4		
		50	2,3,7,28	

および50℃で所定の材齢まで水中養生し、JISR5201-1997に準じて圧縮強度を測定した。試験材齢は表3に示す通りとした。

中心部分にTC熱電対を埋め込んだ試験体を用意し、打設直後から10分間隔で温度を測定しデータロガーに記録・管理した。

#### 4.2 モルタルの強度増進と温度依存性

##### 4.2.1 セメント種類と等価材齢

図3に材齢と圧縮強度の関係を使用したセメントごとに示す。

早強セメント(H)では、35℃と50℃で強度の発現が早く、5℃で若干遅いが温度依存性は小さい。普通セメント(N)では、温度依存性が認められ、5℃で遅延し、35℃と50℃で促進する傾向が示された。中庸熱セメント(M)では、普通セメントよりも温度依存性が大きく、低熱セメント(L)では、さらに顕著な温度依存性が示されている。

また、ほぼすべてのセメントの50℃で養生した材齢28日の強度、35℃で養生した材齢35日の強度が20℃で養生した材齢56日の強度を下回る結果となった。初期材齢の養生温度が長期強度に影響を与えることはよく知られている。杉山らによれば、普通セメントは0.5日まで<sup>15)</sup>、中庸熱セメントでは1~3日<sup>16)</sup>、早強セメントでは3時間まで、低熱セメントでは0.5日まで<sup>17)</sup>の間に履歴する温度が長期強度に影響を与えるとされている。この結果をふまえ、本研究では、1日間20℃養生した後、それぞれの養生温度での養生を行うこ

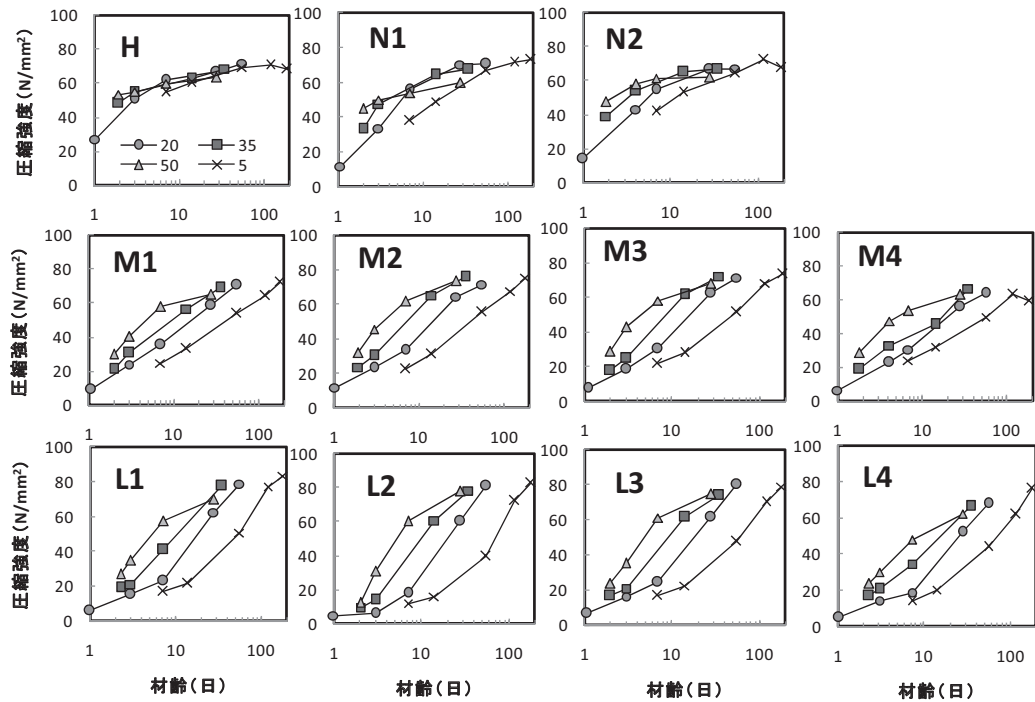


図3 材齢とモルタル圧縮強度の関係

とでその影響が低減されると推測した。しかしながら、初期高温の影響が認められると結果となった。この理由は本研究の範囲では明確ではない。

以上の結果を用い、温度依存性を表す見かけの活性化エネルギーを求める。

20°C標準養生のもので、材齢と強度の関係を以下に示すゴンペルツ曲線で近似し、曲線形状を決定する係数  $a, b$  を非線形最小二乗法により決定する。

$$F(t) = F_{inf} \cdot \exp(a \cdot T_e^b) \quad (4)$$

ここに、 $F_{inf}$ : 最終到達強度 (N/mm<sup>2</sup>),

$T_e$ : (等価) 材齢,

$a, b$ : 実験定数

また、ゴンペルツ曲線の係数  $a, b$  について、 $b$  はセメント種別によらずほぼ一定の値となったため、ここでは一定とし、使用したセメントごとに  $a$  を決定した。これにより、20°C養生での材齢と強度増進の関係がそれぞれのモルタルについて得られた事となる。次に、他の養生温度での材齢を式(2)(3)により等価材齢に換算し、各等価材齢での圧縮強度の実験値が 20°C養生での材齢と強度の関係に一致するよう、それぞれのモルタルごとに見かけの活性化エネルギーの値を最小二乗法により求めた。これをそれぞれのセメントで得られる見かけの活性化エネルギー  $E$  とした。ただし、35°C, 50°C養生では材齢 28 日以降の強度停滞が認められており、ここで検討する温度依存性以外の影響と考えられるため、材齢 14 日までの実験結果を用いることとした。

それぞれのセメントで得られた見かけの活性化エネルギー  $E$ 、等価材齢を用いて式(4)により計算した圧縮強度 (以下、計算強度とする) と実測強度の平均自乗平方誤差 (RMS) および相関係数、ゴンペルツ曲線の係数  $a, b$  を表 4 に示す。

図 4 に実測強度と計算強度をセメント種別ごとに示す。計算強度

表 4 ゴンペルツ曲線による近似結果

セメント種類	E (J/mol)	RMS (N/mm <sup>2</sup> )	相関係数	ゴンペルツ曲線係数	
				a	b
H	33121	0.91	0.929	-0.92	-0.54
N1	39344	1.72	0.955	-1.82	
N2	37555	0.92	0.981	-1.51	
M1	38198	0.52	0.996	-2.51	
M2	43513	1.02	0.996	-2.68	
M3	43330	1.12	0.995	-3.26	
M4	39009	1.36	0.976	-2.95	
L1	47515	1.71	0.970	-4.48	
L2	46780	1.73	0.987	-6.03	
L3	43823	1.05	0.994	-4.30	
L4	42900	1.06	0.982	-4.59	

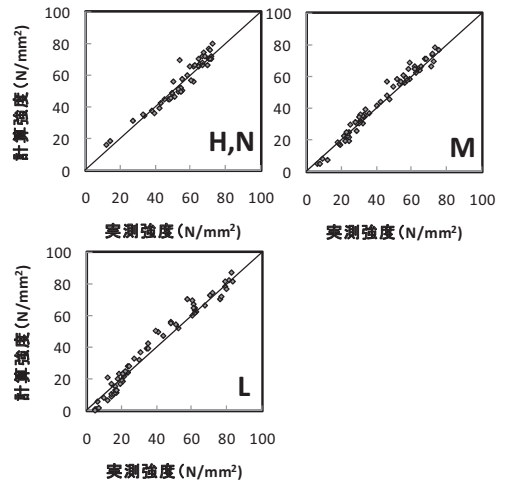


図 4 実測強度と計算強度の関係

表 5 鉱物割合の相関行列および鉱物割合と活性化エネルギーの相関係数

	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Ea
C <sub>3</sub> S	1	-0.999	0.640	0.233	-0.938
C <sub>2</sub> S	-0.999	1	-0.646	-0.225	0.942
C <sub>3</sub> A	0.640	-0.646	1	-0.519	-0.632
C <sub>4</sub> AF	0.233	-0.225	-0.519	1	-0.221

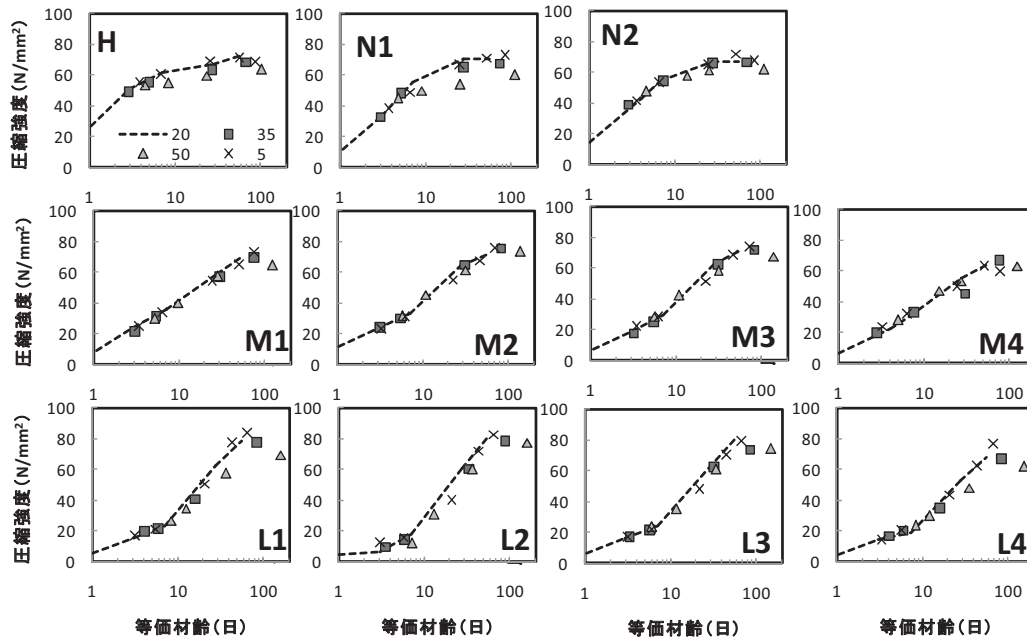


図5 等価材齢と圧縮強度の関係

は実測強度と良い対応を示した。これにより、得られた見かけの活性化エネルギーおよび材齢と強度の関係式は実験結果を良く表すものと判断し、以降の検討を行うこととした。

鉱物組成が見かけの活性化エネルギーの値に及ぼす影響を検討するため、鉱物それぞれの割合を説明変数とした重回帰分析を行った。説明変数間の交互作用を検討するため、表5に説明変数間の相関係数を示す。あわせて各鉱物割合と見かけの活性化エネルギーの相関係数を示す。それぞれの鉱物割合と活性化エネルギーの相関を見ると、 $C_3S$ 、 $C_2S$  割合との相関係数は0.9以上と高く、 $C_4AF$  割合は相関係数0.221とほとんど相関が認められなかった。説明変数間の相関をみると  $C_3S$  と  $C_2S$  割合は相関が高く、交互作用となる。よって、 $C_2S$  割合と  $C_3A$  割合をそれぞれ説明変数として重回帰分析を行った。その結果、 $C_2S$  割合は1%有意となるが、 $C_3A$  割合は5%有意にもならなかった。見かけの活性化エネルギーの値は  $C_2S$  割合のみで表され、回帰式は以下の通りとなる。

$$E = 206.9 \times C_2S + 34091.1 \quad (5)$$

ここに、 $C_2S$  : セメント中の  $C_2S$  割合(%)

図5に式(5)により計算された見かけの活性化エネルギーを用いて算定した等価材齢と圧縮強度の関係を示す。図中の点線は20°Cの結果である。全てのセメントで等価材齢28日程度までの異なる養生温度の強度増進をほぼ一義的に表すことができた。

#### 4.2.2 セメント種類と強度増進曲線形状

セメント種類による強度増進曲線形状の相違を検討するため、4.2.1で求めたゴンペルツ曲線の係数  $a$  と鉱物組成の関係を鉱物それぞれの割合を説明変数とした重回帰分析を行った。表6に係数  $a$  と鉱物それぞれの相関係数を示す。 $C_3S$  割合との相関が最も高く、 $C_3A$  も若干の相関が認められた。 $C_3S$ 、 $C_3A$  割合を説明変数として重回帰分析を行った結果、 $C_3S$  割合のみが1%有意となった。

図6に  $C_3S$  割合および  $C_3S$  割合の逆数と係数  $a$  の関係を示す。 $C_3S$  割合の逆数と係数  $a$  の相関係数は-0.956、重相関係数0.910となり、係数  $a$  は以下の回帰式で表されるとした。

表6 鉱物割合と係数  $a$  の相関係数

	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
$a$	0.939	-0.931	0.676	0.139

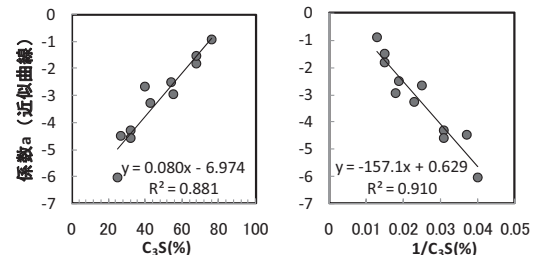


図6  $C_3S$  割合および  $C_3S$  割合の逆数と係数  $a$  の関係

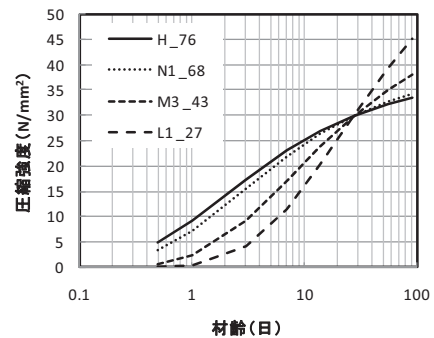


図7 強度増進曲線形状の比較

$$a = -157.1 / C_3S + 0.629 \quad (6)$$

ここに、 $C_3S$  : セメント中の  $C_3S$  割合(%)

図7に  $a$  は式(4)による値、 $b$  は-0.54一定として、H、N1、M3、L1のそれぞれの強度増進曲線を示す。20°C28日強度を30N/mm²として算出した。凡例に  $C_3S$  割合を示した。 $C_3S$  割合の多い早強セメントほど強度の立ち上がり早く、図4に示したセメント種類による強度増進の傾向を良く表していた。

## 5. まとめ

本研究の結果は以下に要約される。

- 1)セメントペーストの実験から、 $C_2S$  の反応の温度時間依存性は積算温度で表せないことを示した。これにより、 $C_2S$  割合が多い低熱セメントのコンクリート強度増進の温度時間依存性を積算温度で表せないことが説明できた。
- 2)各種セメントを用いたモルタルの実験から、強度増進の温度時間依存性は等価材齢で表すことができ、その時の見かけの活性化エネルギーはセメントの  $C_2S$  割合から算定できることを示した。
- 3)材齢と強度増進の関係を表す強度増進曲線の形状は、セメント種類により異なり、ゴンペルツ曲線を近似した時には曲線形状を決定する係数を  $C_3S$  割合から算出することが出来た。

## 謝辞

本実験の実施にあたり、日鐵セメント株式会社、太平洋セメント株式会社、宇部三菱セメント株式会社および株式会社フローリックより材料の提供・実験に関し多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を示します。

## 参考文献

- 1) 寒中コンクリート工事施工指針・同解説，日本建築学会，2010
- 2) 洪 悦郎，長島 弘，鎌田 英治：寒中コンクリート，技術書院，2000
- 3) 田中敏嗣，丸岡正知，竹内良，富田六郎：ピーライトセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現に及ぼす温度履歴の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.18, No.1, pp. 237-242, 1996
- 4) 小山宣幸，平田久則，上田厚元，小島利広：低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの積算温度に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，vol.19, pp.523-528, 1997
- 5) 因幡芳樹，長田浩治，洪杰，高英雄：各種セメントを用いたコンクリートの強度発現に及ぼす養生温度の影響，コンクリート工学年次論文集，No.22, Vol.2, pp.475-480, 2000
- 6) 谷口円，桂修，松村宇，吉野利幸：各種セメントを使用したコンクリートの圧縮強度増進性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, No.1, pp. 357-362, 2008
- 7) “Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”，ASTM C 1074-98
- 8) Anton K. Schindler: Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials, ACI Materials Journal, Vol. 101, No. 9, pp.72-81, Jan.-Feb. 2004
- 9) 吉野亮悦，住田守：Rietveld法によるセメント鉱物の定量，セメント・コンクリート論文集 No.53, pp.84-89, 1999
- 10) 佐川孝広，桂修，関口岳彦，若杉伸一：セメント鉱物の反応率に及ぼす水セメント比と養生条件の影響，セメントコンクリート論文集，Vol.58, pp.23-30, 2004
- 11) 星野清一，平尾宙，山田一夫：X線回折/リートベルト法によるセメントペーストの水和反応の定量解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No. 1, pp.41-46, 2006
- 12) 松下哲郎，平尾宙，丸山一平，野口貴文：リートベルト法によるセメントの水和反応の定量解析，日本建築学会構造系論文集，No.73, Vol.623, pp.1-8, 2008.1
- 13) Izumi, F. and Ikeda, T.: “A Rietveld-analysis program RIETAN-98 and its application to Zeolites,” Mater. Sci. Forum, Vols. 321-324, pp.198-203, 2000
- 14) 佐川孝広：ポルトランドセメントの水和反応モデルによる強度推定，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.467-468, 2009
- 15) 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
- 16) 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，No. 525, pp.7-13, 1999.11

- 17) 杉山央，榎田佳寛：早強および低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの強度発現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，No. 520, pp.9-16, 1999.7

(2010年8月6日原稿受理，2010年11月29日採用決定)