

# 国内外の高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの品質評価法

依田 侑也 清村 俊介 片山 行雄 黒田 泰弘  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## Qualitative Evaluation Method for Japanese and Imported Ground-Granulated Blast-Furnace Slag and Flyash

Yuya Yoda, Shunsuke Kiyomura Yukio Katayama and Yasuhiro Kuroda

コンクリート用混和材の選定や日常的な品質管理に使用できる手法の構築を目的とし、伝導型熱量計を用いた簡易なキャラクタリゼーション手法を検討した。本報告では、国内外で一般的に使用される混和材の中でも、自らが反応し、かつ、反応速度の遅い高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ単体の品質評価を行うため、50°Cの高温養生と反応刺激材として水酸化カルシウム粉末を用いた促進試験法を提案した。促進試験法を用いて材齢1日もしくは7日まで伝導型熱量計で実測を行うことで、混和材の活性度指数の違いを判断でき、品質評価に使用できることを示唆した。

A method is proposed as one component of a routine quality control and screening system for admixtures for concrete. By using conduction calorimeter to obtain the integrated calorific value of ground-granulated blast-furnace slag and flyash during the first few days of aging, characteristic differences in binder strength can be assessed. Also proposed is an accelerated test method featuring high-temperature curing and the use of reaction stimulants. This allows qualitative evaluation of individual admixtures with slow reaction rates on a routine basis.

### 1. はじめに

COP21では、新たに「パリ協定」によるCO<sub>2</sub>の削減に関する法的枠組みが採択され、国内外において継続してCO<sub>2</sub>削減が求められている。

コンクリート産業におけるCO<sub>2</sub>の削減手法としては、高炉スラグ微粉末(以下BFS)、フライアッシュ(以下FA)などの産業副産物を、ポルトランドセメントに混合したり、コンクリートを製造する際に使用する混和材として利用したりすることで、コンクリート製造時のCO<sub>2</sub>を削減する方法が主流である。

一方、国内外において建設工事を行う場合の基幹材料であるコンクリートに使用するセメント・水・骨材などの材料は、使用量が多いこともあり、輸送による環境負荷も考慮して、現地で調達するのが一般的である。当然ながら、混和材であるBFSやFAについても、地産地消が基本となるため、国ごとに規格値が定められているが、品質はそれぞれ地域性があり、異なる場合が多い。そのため、個々の性能評価を行って、コンクリートの配(調)合設計に反映することが品質確保のためには重要となる。また、設計した品質を確保し、維

持していくためには、材料の品質を定期的にチェックする必要がある。この際には、可能な限り短期間で簡易な品質評価方法でチェックができることが望ましい。

既報<sup>1)</sup>において、海外セメントを対象に、品質を簡易に評価できる手法を報告したが、本報では、BFSとFAの品質を簡易に評価できる手法について検討した結果について報告する。

### 2. 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの規格の概要

#### 2.1 高炉スラグ微粉末の規格

表-1にコンクリート用混和材としてのBFSの規格の違いを示す。JISでは比表面積で種類が分けられているが、ASTMでは活性度で種類が分けられている。また、ENでは1種類しかない。

ここで、活性度指数(普通ポルトランドセメントを用いて作製した基準とするモルタルの圧縮強度に対する、混和材と普通ポルトランドセメントとを用いて作製した試験モルタルの圧縮強度の比を百分率で表した値)に着目すると、規格によって規定する材齢、規格値は若干異なっている。特に、

JISでは材齢91日の活性度指数が規定されているが、ASTMやENでは規定されていない。なお、材齢91日の活性度指数を規定している国は、日本と韓国のみである。

次に、化学成分のMgO量とSO<sub>3</sub>量に着目すると、ASTMでは、MgO量は規定せず、SO<sub>3</sub>量はS量で2.5%以下としていることに特徴がある。ENでは、MgO量はJISよりも多い18%と規定しているが、SO<sub>3</sub>量はJISよりも少ない2.5%と規定している。

## 2.2 フライアッシュの規格

表-2にコンクリート用混和材としてのFAの規格の違いを示す。JISでは、比表面積と強熱減量値(以下Ig.loss)の組合せで種類が分けられているが、ASTMではFAの原料となる石炭の起源で分けられており、ENでは粉末度(45μ篩残分)とIg.lossの組合せで6種類に細分されている。

ここで、活性度指数に着目すると、ASTM、ENでは材齢28日の活性度指数が75以上と規定しているが、JISではコンクリートに使用されることの多いII種の活性度指数は材齢28日で80以上と規定していることに特徴がある。なお、材齢28日で80以上と規定している国は、日本、韓国、インドである。また、ASTMでは材齢91日の活性度指数は規定しておらず、ENではJISのII種よりもやはり低く、85以上となっている。

さらに、化学成分では、JISではSiO<sub>2</sub>量で規定

しているが、ASTMやENはSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の総量で規定している。また、SO<sub>3</sub>量はJISでの規定がないが、ASTMやENでは上限値が決められている。なお、タイや中国ではCaO量で規格値を分けており、SiO<sub>2</sub>量以外の指標でFAの種類が規定されることもある。

## 2.3 活性度指数の意義

2.1、2.2節より、混和材の品質の指標には様々なものがあるが、強度への寄与率である活性度指数の規格値に特に地域性があることがわかる。活性度指数は、コンクリート用混和材の強度性状として最低限満たすべき基準値であるが、それぞれの国のBFSやFAの特性を共通試験や実績値などにより考慮し、表-1、表-2のように若干異なる規格値が定められているようである。このことから、様々な特性をもつBFSやFAが世界には存在することが推察され、共通の条件により短期間で活性度指数を推定できる手法を構築できれば、非常に有用であると考えられる。

そこで、本報告では、国内外で使用されている銘柄の異なるBFS、FAを複数入手し、物理的性質や化学成分について同一の試験条件で比較検討することとした。合わせて、活性度指数を、既往の化学組成を用いる手法<sup>2,3)</sup>と比較して、短期間のうちに簡易かつ高精度に評価できる手法を検討することにした。

表-1 コンクリート用混和材としてのBFSの規格の違い

国		日本			米国			欧州
規格番号		JISR6206			ASTM C989			BS EN15167-1
種類		3000	4000	6000	80	100	120	-
密度(g/cm <sup>3</sup> )		2.80以上			-			-
比表面積(cm <sup>2</sup> /g)		2750-3500	3500-5000	5000-7000	45μ篩残分20%以下			2750以上
活性度指数(%)	7日	-	55以上	75以上	-	75以上	95以上	45以上
	28日	60以上	75以上	95以上	75以上	95以上	115以上	70以上
	91日	80以上	95以上	-	-	-	-	-
化学成分(%)	MgO	10.0以下			-			18以下
	SO <sub>3</sub>	4.0以下			Sで2.5以下			2.5以下

表-2 コンクリート用混和材としてのFAの規格の違い

国		日本				米国			欧州
規格番号		JISR6201				ASTM C618			BS EN450-1
種類	I種	II種	III種	IV種	N	F	C	Ig.loss(A,B,C)による区分 粉末度(N,S)による区分	
					天然ホゾラン	無煙炭 瀝青炭	褐炭 亜瀝青炭		
密度(g/cm <sup>3</sup> )		1.95以上				平均値±5%以内			申告値±0.2以内
比表面積(cm <sup>2</sup> /g)		5000以上	2500以上	2500以上	1500以上	45μ篩残分34以下			45μ篩残分でN:40以下、S:12以下
活性度指数(%)	7日	-	-	-	-	75以上			-
	28日	90以上	80以上	80以上	60以上	75以上			75以上
	91日	100以上	90以上	90以上	70以上	-			85以上
化学成分(%)	Ig.loss	3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下	10.0以下	6.0以下	6.0以下	A:5、B:7、C:9以下
	SiO <sub>2</sub>	45.0以上				S+A+Fで70.0以上		50.0以上	S+A+Fで70.0以上
	SO <sub>3</sub>	-				4.0以下		5.0以下	3.0以下

### 3. 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの 化学成分・活性度指数の実情調査

#### 3.1 実験概要

##### (1) 使用材料

混和材は、表-3に示す10種類のBFSおよび表-4に示す14種類のFAを用いた。BFSについては、J-BFSの記号のものは日本の製品であり、粉末度が約3000、4000、6000(cm<sup>2</sup>/g)のものを使用した。A-BFSの記号のものは、海外産のBFSである。

FAについては、J-FAの記号のものはJISでII種にあたる製品であり、A-FAの記号のものは、海外産のFAである。なお、表-3には、BFSの化学組成からみた活性度の指標として、(CaO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO)/SiO<sub>2</sub>で求められる塩基度<sup>2)</sup>を付記した。また、表-4には、FAの化学組成からみた活性度の指標として、(CaO+MgO+R<sub>2</sub>O)/SiO<sub>2</sub>で求められる、M値<sup>3)</sup>を付記した。

混和材の密度、ブレン比表面積、化学組成のうち、密度・ブレン比表面積はJIS R 5201に準じて測定した。強熱減量(以下 Ig.loss)は950℃強熱時における減量値であり、ISO 29581-1に準じて

測定した。その他の化学成分は、ISO 29581-2に準じて定量を行った。なお、BFSのSO<sub>3</sub>量に関しては、湿式分析による結果である。

なお、セメントには研究用セメントを、細骨材にはセメント強さ試験用標準砂を用いた。

##### (2) 活性度試験

活性度試験を行うに際し、BFSの基準セメントに対する置換率はJIS A 6206(コンクリート用高炉スラグ微粉末)に準じ、50%とした。また、FAの基準セメントに対する置換率は、JIS A 6201(コンクリート用フライアッシュ)に準じ、25%とした。JIS R 5201に準じてモルタルを練混ぜ、φ50×100mmの円柱型枠に打設した。材齢1日で脱型し、所定の材齢まで20℃に管理された水中で養生を行い、圧縮強さの測定を行い、式(1)によって活性度指数を算定した。

$$As = C2/C1 \times 100 \quad (1)$$

ここに As：活性度指数(%), C1：各材齢における基準モルタルの圧縮強さ(N/mm<sup>2</sup>), C2：各材齢における試験モルタルの圧縮強さ(N/mm<sup>2</sup>)

表-3 様々なBFSの化学組成

産地	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分 (mass %)											塩基度
				Ig.loss	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	TiO <sub>2</sub>	MnO	
日本	J-BFS-1	2.89	3380	0.14	34.58	13.92	0.42	42.96	6.33	0.04	0.22	0.33	0.54	0.23	1.83
日本	J-BFS-2	2.88	4230	0.03	33.63	14.88	0.50	42.15	6.52	0.26	0.22	0.30	0.57	0.25	1.89
日本	J-BFS-3	2.89	5420	0.15	33.96	14.42	0.71	42.53	6.34	0.04	0.23	0.34	0.51	0.25	1.86
アジア	A-BFS-1	2.90	3730	0.00	31.16	16.11	0.43	38.02	11.28	0.02	0.37	0.36	1.77	0.41	2.10
東南アジア	A-BFS-2	2.89	4040	0.81	31.30	15.52	0.42	40.25	7.75	1.40	0.30	0.46	1.21	0.20	2.03
東南アジア	A-BFS-3	2.91	4370	0.28	32.37	13.80	0.34	43.17	5.93	4.47	0.24	0.35	0.51	0.23	1.94
東南アジア	A-BFS-4	2.91	4100	0.12	33.50	14.60	0.30	43.30	5.40	1.92	0.27	0.33	0.55	0.15	1.89
東アジア	A-BFS-5	2.91	4200	0.23	36.16	13.80	0.36	42.44	4.23	2.10	0.23	0.46	0.59	0.36	1.67
欧州	A-BFS-6	2.87	3910	0.74	34.36	14.46	0.34	39.60	8.57	0.10	0.36	0.58	0.76	0.33	1.82
欧州	A-BFS-7	2.92	4750	0.00	37.27	11.65	0.50	40.06	8.00	0.11	0.34	0.69	0.99	0.77	1.60

表-4 様々なFAの化学組成

産地	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分 (mass %)											M 値
				Ig.loss	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	TiO <sub>2</sub>		
日本	J-FA-1	2.22	3830	2.58	52.84	31.51	3.99	2.90	0.84	0.43	1.08	0.89	2.01	0.11	
日本	J-FA-2	2.23	4370	2.63	55.13	31.82	2.32	1.89	1.11	0.15	1.01	0.59	1.67	0.08	
日本	J-FA-3	2.36	3760	1.39	56.46	22.56	6.02	6.15	1.30	0.68	0.61	0.59	1.07	0.15	
東南アジア	A-FA-1	2.75	3800	1.91	58.72	22.34	7.44	3.85	1.18	0.27	0.91	1.34	1.13	0.12	
東南アジア	A-FA-2	2.37	4180	0.30	39.01	16.18	14.74	15.56	7.02	0.99	2.07	1.30	0.78	0.67	
東南アジア	A-FA-3	2.30	3950	2.10	57.44	24.70	8.22	2.33	0.94	0.22	0.49	1.20	1.55	0.09	
東南アジア	A-FA-4	2.57	3910	1.06	45.99	19.86	11.66	10.95	3.75	1.00	2.59	1.09	0.76	0.40	
東南アジア	A-FA-5	2.55	6540	1.07	44.17	26.42	8.64	15.01	1.52	1.35	0.23	0.52	1.04	0.39	
東南アジア	A-FA-6	2.77	5210	4.41	27.86	14.24	4.94	28.56	1.19	12.48	0.89	0.48	0.70	1.12	
東南アジア	A-FA-7	2.43	3720	2.43	47.06	21.00	9.91	10.40	3.33	1.06	2.50	1.36	0.85	0.37	
東南アジア	A-FA-8	2.61	3890	4.82	29.68	7.88	3.79	34.65	4.35	9.64	0.09	4.64	-	1.47	
欧州	A-FA-9	2.24	2960	5.26	53.33	20.86	7.86	4.79	2.08	0.64	1.20	2.38	0.89	0.20	
欧州	A-FA-10	2.30	3260	4.97	52.47	21.21	7.92	4.60	2.02	0.67	1.18	2.80	0.89	0.20	
欧州	A-FA-11	2.70	3430	2.10	32.72	13.16	8.51	36.23	2.61	1.46	0.30	0.86	0.63	1.22	

### 3.2 実験結果および考察

#### (1) 化学成分

BFSの化学成分の試験結果を表-3に示す。日本のBFSの化学成分と比較すると、海外のBFSは、BFSの主な構成成分であるCaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、SiO<sub>2</sub>の量が異なるものが存在することが確認できる。特にA-BFS-1は、MgO量が約11%と大きな値を示していた。また、A-BFS-7は、他と比較してSiO<sub>2</sub>量が大きく、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量が小さかった。

次に、FAの化学成分の試験結果を表-4に示す。FAについても、日本のFAと比較して、海外のFAは化学成分が大きく異なるものが存在した。特に、A-FA-6、A-FA-8、A-FA-11は、CaO量が30%程度と大きく、SiO<sub>2</sub>量も45%以下であったため、JIS A 6201には該当しないような製品であった。また、A-FA-6、A-FA-8はSO<sub>3</sub>量も大きな値を示していた。どのような鉱物として存在しているのかは不明であるが、ASTM C618や、BS EN450-1の規格値外となる製品であった。

#### (2) 活性度指数

BFSの活性度指数の試験結果を図-1に示す。活性度指数はそれぞれのBFSで異なることが確認された。特に、A-BFS-1、A-BFS-4では、粉末度はJ-BFS-2(約4000cm<sup>2</sup>/g)と比較して同等であるにも関わらず、活性度指数が大きかった。対して、A-BFS-7は、J-BFS-2と比較して活性度指数が小さかった。

ここで、化学組成から算出した塩基度と活性度指数の関係を図-2に示す。小さな相関があることが確認されるが、特に材齢91日ではバラつきも大きいことが確認される。なお、A-BFS-1、A-BFS-4では、塩基度の違いが大きいが、活性度指数の違いは小さくなっており、塩基度からは、活性度指数を評価しきれない事例も存在した。

次に、FAの活性度指数の試験結果を図-3に示す。A-FA-2、4、5、6、7、8、11は、J-FA系と比較して材齢28日における活性度指数が大きかった。これらのFAは、何れもCaO量が10%を超えるものであり、CaO量が多い場合、FAの活性度指数は高くなる傾向にあると推察される。

また、図-4にFAのM値と活性度指数の関係を示す。材齢28日の活性度指数とM値は高い相関が得られたが、材齢91日では、相関は低くなることが確認された。

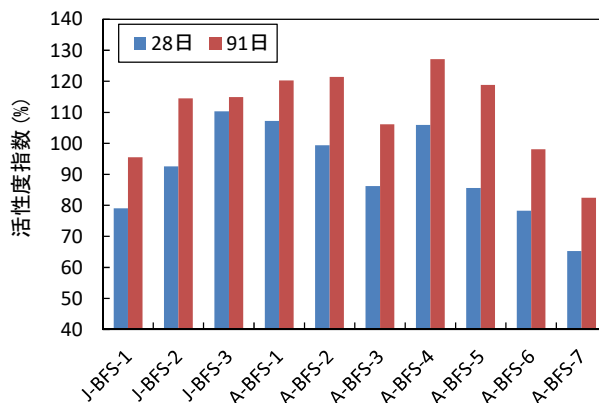


図-1 BFSの活性度指数の試験結果

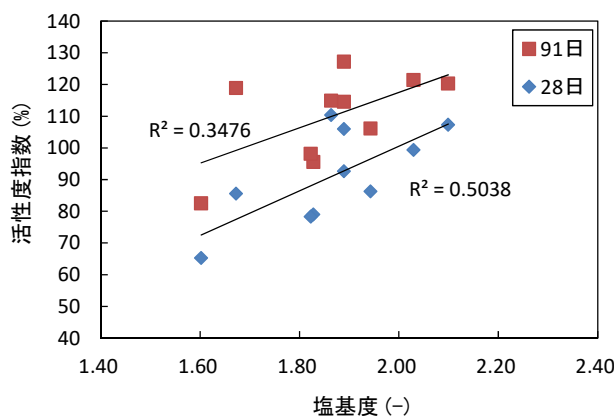


図-2 BFSの塩基度と活性度指数の関係

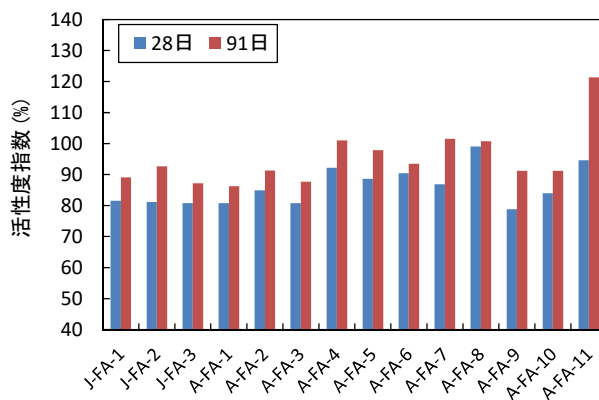


図-3 FAの活性度指数の試験結果

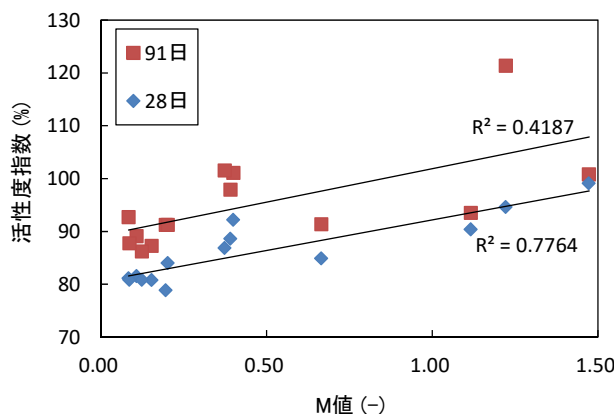


図-4 FAのM値と活性度指数の関係

#### 4. 伝導型熱量計を利用した高炉スラグ微粉末 およびフライアッシュの活性度の促進試験法

##### 4.1 促進方法の検討

本章では、前章で示したように、材齢 28 日ないし 91 日までかかる BFS や FA の活性度指数の評価を、共通の促進条件で、簡易かつ短期で行うことのできる手法の検討を行った。

BFS や FA を水と混合しただけでは、BFS や FA の反応はほとんど活性化しない。通常はポルトランドセメントと混合することで、ポルトランドセメントが BFS や FA の刺激材となり、反応が活性化する(例えば4)。反応をさらに活性化させる方法としては、温度による促進が考えられる(例えば5)。

そこで、本節では、適切な促進温度と刺激材の選定を行うことで、BFS や FA の反応を促進させ、発熱量を測定することで、短期間で活性度を評価できる促進試験法について検討した。本節の検討は、表-1 に示した BFS のうち、J-BFS-1~3 および A-BFS-1、2 の 5 つの混和材を伝導型熱量計(株式会社東京理工製)の容器に合わせ、15g 使用して検討を行った。

初めに、養生温度を 40℃ とし、練混ぜ水として 0.5N 水酸化ナトリウム水溶液もしくは飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた。混和材が反応しやすい環境とするため、粉体の体積に対し、水の体積が約 2 倍となるよう、水/粉体質量比 0.6 で練り混ぜた後、伝導型熱量計にセットし、40℃ 定温時の積算発熱量を材齢 3 日まで測定した。測定後、図-1 に示した材齢 28 日活性度指数と積算発熱量の関係を比較検討した。

伝導型熱量計による積算発熱量の測定結果を図-5、図-6 に示す。また、本手法による積算発熱量と活性度指数の関係を図-7、図-8 に示す。どちらの促進法においても、J-BFS-1~3 の粉末度が大きいと材齢 28 日における活性度指数が大きくなる傾向は再現できていた。一方、材齢 28 日における活性度指数の最も高い BFS は J-BFS-3 であるが、本促進法では、図-5、図-6 のいずれの方法においても、A-BFS-2 の積算発熱量が J-BFS-3 と比較して非常に大きな値を示してしまい、図-7、図-8 に示した活性度指数との関係性が低くなっていることが確認できる。

また、A-BFS-1 の反応速度が異なることが、図-5、図-6 には表れている。この違いは、既往の研究における熱力学的考察<sup>6)</sup>を参考にすると、水酸化ナトリウムを用いた環境下と水酸化カルシウム

を用いた環境下における、各種成分の溶解度の違いが影響している可能性が示唆される。

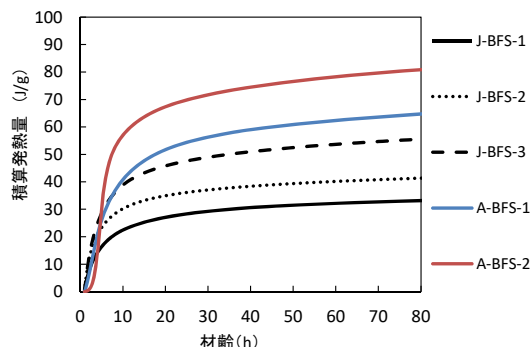


図-5 40℃-0.5N 水酸化ナトリウム水溶液促進による積算発熱量の経時変化

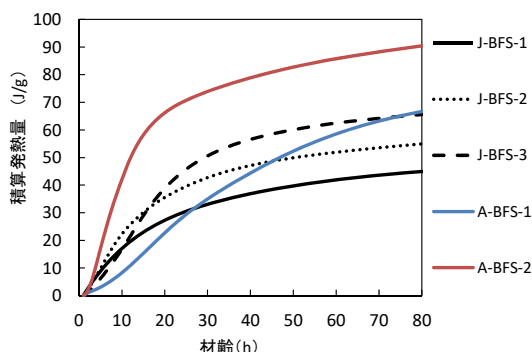


図-6 40℃-飽和水酸化カルシウム水溶液促進による積算発熱量の経時変化

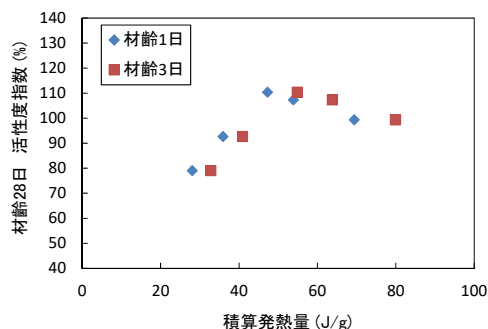


図-7 40℃-0.5N 水酸化ナトリウム水溶液促進による積算発熱量と活性度指数の関係

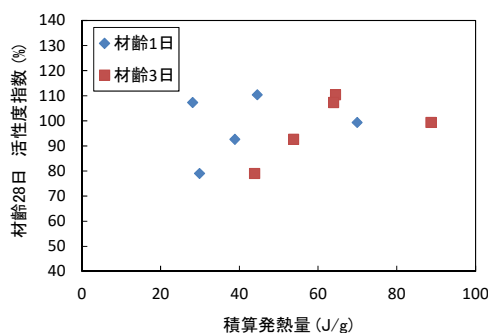


図-8 40℃-飽和水酸化カルシウム水溶液促進による積算発熱量と活性度指数の関係

このため、本促進法における推定対象である活性度指数の試験では、ポルトランドセメントからの刺激材が水酸化カルシウムであることを考えると、水酸化ナトリウムより、水酸化カルシウムで促進試験を行う方が適していると考えられる。

そこで、ポルトランドセメントからの水酸化カルシウムの溶出に近い条件となるよう、水酸化カルシウム粉末（和光純薬製：試薬特級）を内割で10wt%、BFSに混合することとした。水酸化カルシウム粉末の量に関しては、ポルトランドセメントの材齢28日における水酸化カルシウムの生成量は、20～25wt%程度<sup>7)</sup>であることから、活性度試験時のポルトランドセメント量が50%であることを考慮し、概ね同等量となる10wt%とした。

また、40℃養生では材齢3日までの積算発熱量が100J/g程度しか得られず、十分な促進効果が得られなかった可能性があると考えられたため、より大きな促進効果が見込めるよう、促進温度を50℃とした。

この条件で、それぞれのBFSを、水/粉体質量比0.6で練混ぜ、積算発熱量を材齢3日まで測定し、図-1に示した材齢28日活性度指数との関係を比較検討した。

伝導型熱量計による測定結果を図-9に、積算発熱量と活性度指数の関係を図-10に示す。図-9に示す通り、図-5や図-6に示したJ-BFS-3とA-BFS-2の発熱特性とは対照的に、材齢1日までJ-BFS-3の発熱が先行し、その後A-BFS-2が上回ってゆく様子が確認できる。この傾向は、材齢28日活性度指数と、材齢91日活性度指数の傾向と同様である。また、図-10に示す通り、若干の傾向の違いはあるが、図-7、図-8と比較すると積算発熱量と材齢28日活性度の関係性の改善が確認できる。

以上の実験結果から、促進試験法の条件は、促進温度を50℃、水酸化カルシウム粉末を内割でBFSまたはFAに10wt%置換する条件とし、次節からの検討を行った。

#### 4.2 各種BFSの促進試験法による活性度指数の評価

表-1に示した様々な化学組成のBFSを、3.1節で条件を決定した促進試験法により積算発熱量を材齢7日まで取得した。試験結果を図-11(a)、(b)に示す。BFSの種類によって、それぞれ異なる積算発熱量を示しており、促進試験法における反応性には違いが確認された。同程度の粉末度の

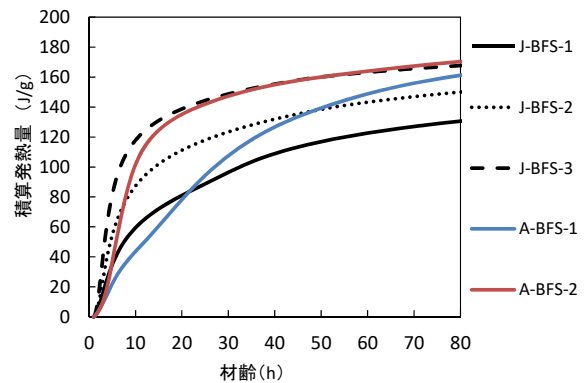


図-9 50℃-10%水酸化カルシウム粉末促進による積算発熱量の経時変化

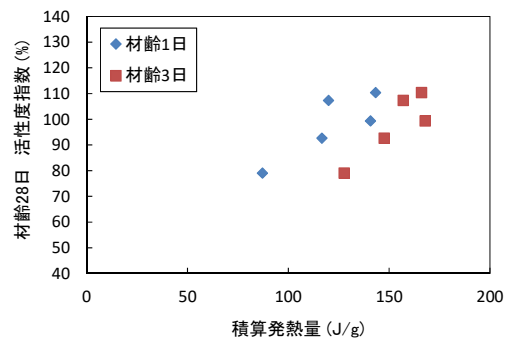


図-10 50℃-10%水酸化カルシウム粉末促進による積算発熱量と活性度指数の関係

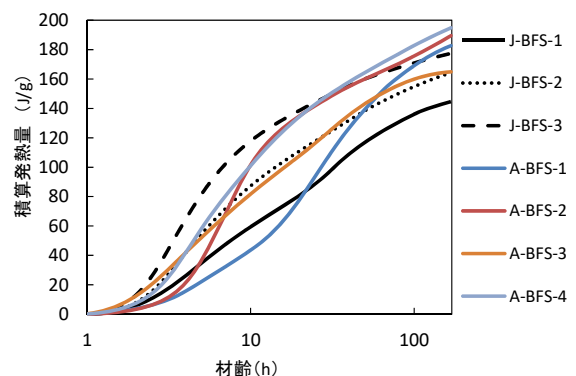


図-11(a) 促進試験法による様々なBFSの積算発熱量の経時変化

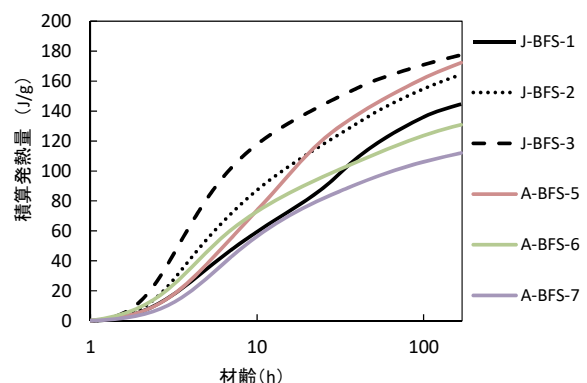


図-11(b) 促進試験法による様々なBFSの積算発熱量の経時変化

BFSを比較すると、2章と同様に $Al_2O_3$ や $MgO$ 量が多いほど材齢7日における積算発熱量が大きい傾向にあるようにも思われるが、A-BFS-4やA-BFS-6ではその傾向はなく、化学組成のみでは反応性について説明できない点も存在した。

なお、マスコンクリートの最高温度低減の観点でBFSを利用しようとした場合、J-BFS-3(粉末約6000 $cm^2/g$ )に近い積算発熱量を示す水準のBFSは、反応性が高く、コンクリートとしたときに最高温度が十分に低減できない可能性もあるため、試験練りにより目標とする温度を達成できるか、BFSの置換率とともに確認することが望ましいと考えられる。

次に、促進試験法による積算発熱量と、各材齢における活性度指数の関係を図-12に示す。図-12に示す通り、促進試験法における材齢1日の積算発熱量と材齢28日の活性度指数および、促進試験法における材齢7日の積算発熱量と材齢91日の活性度指数には相関があることが確認できる。

以上より、図-2に示した化学組成から算定される塩基度と活性度指数の相関係数と比較すると、塩基度での評価と比較して、本促進試験法によるBFSの活性度指数の評価は、簡易かつ精度が高いため、有用であると言える。

### 4.3 各種FAの促進試験法による活性度指数の評価

表-2に示した様々な化学組成のFAを、3.1節で条件を決定した促進試験法により積算発熱量を材齢7日まで取得した。FAの場合は、活性度試験における置換率が25%であり、ポルトランドセメント量が多いため、BFSと異なり、水酸化カルシウムの粉末が10wt%では足りない可能性があるが、本実験では条件を同一とした。

試験結果を図-13(a)、(b)に示す。FAの種類によって、それぞれ異なる発熱速度曲線と積算発熱量を示しており、FAの化学組成が異なる場合、促進試験法における反応性に違いが確認された。2章で示した通り、A-FA-2、4、5、6、7、8、11はCaO量の多いFAであり、活性度指数が大きかったが、本促進試験法においても、J-FA-1~3と比較して、これらのFAは大きな積算発熱量を示した。特にA-FA-8、A-FA-11のFAは、J-FAとは全く異なる傾向の積算発熱量を示すことが確認された。A-FA-8においては、材齢28日で活性度指数が最も大きい水準であり、A-FA-11については材齢91日で最も活性度指数の大きい水準であった。積算

発熱量の違いは、この傾向を示していると考えられる。

なお、マスコンクリートや高強度コンクリートの最高温度低減の観点でFAを利用しようとした場合、A-FA-8やA-FA11については、条件によって想定より温度を低減できない可能性も示唆されるため、モックアップを実施して温度を確認するなど、注意が必要と考えられる。

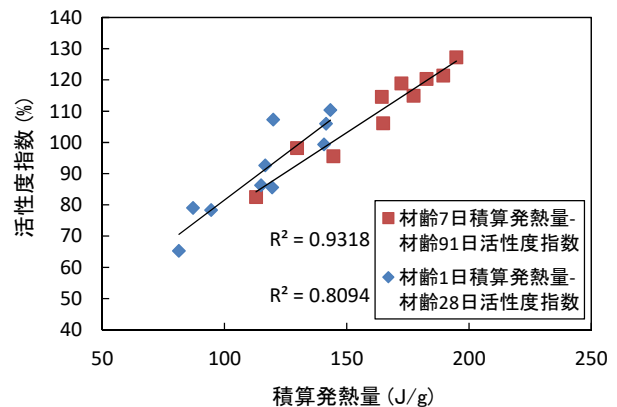


図-12 促進試験法による様々なBFSの積算発熱量と活性度指数の関係

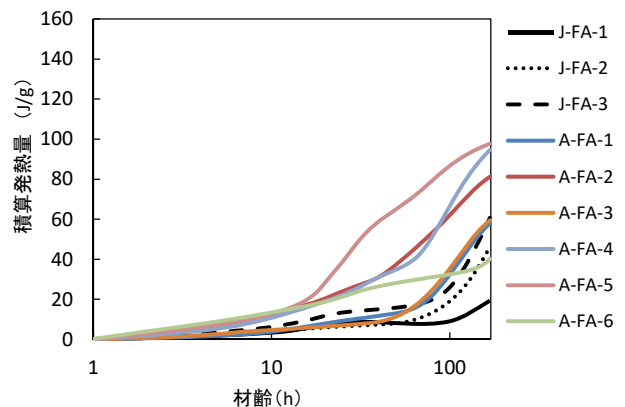


図-13(a) 促進試験法による様々なFAの積算発熱量の経時変化

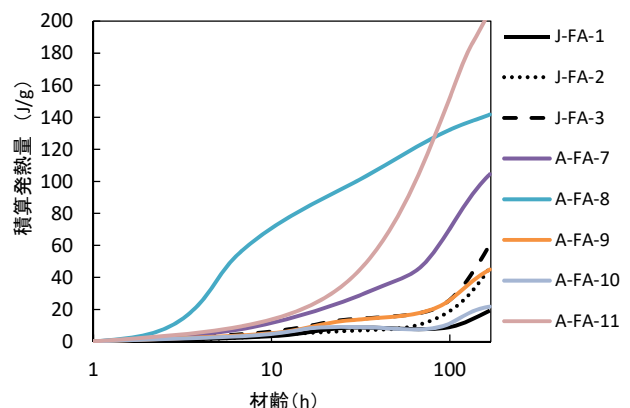


図-13(b) 促進試験法による様々なFAの積算発熱量の経時変化

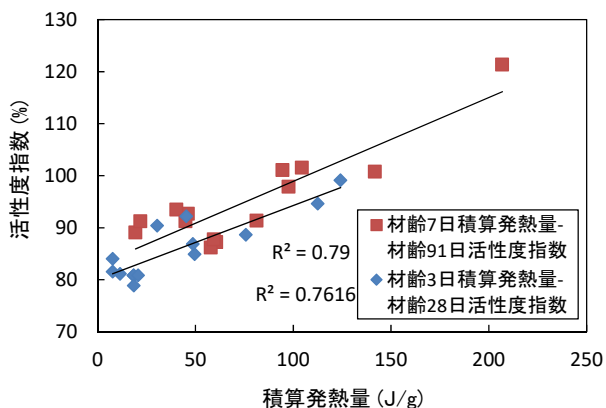


図-14 促進試験法による様々なFAの積算発熱量と活性度指数の関係

次に、促進試験法による積算発熱量と、各材齢における活性度指数の関係を図-14に示す。FA系においては、BFS系と異なり、促進試験法における材齢3日の積算発熱量と材齢28日の活性度指数の相関が高くなった。一方、促進試験法における材齢7日の積算発熱量と材齢91日の活性度指数の相関については、BFSと同様に高かった。この理由としては、FAの反応は促進試験法においても図-13に示す通り、一部の水準を除いて積算発熱量がある材齢まで大きくなりにくい(=反応が活性化しにくい)ため、材齢1日では適切な評価が出来なかった可能性が考えられる。もしくは、刺激材である水酸化カルシウム量が十分でない可能性があるが、水酸化カルシウム量の適正值に関しては今後の検討課題とする。

以上より、図-4に示した相関係数と比較すると、化学組成から算定されるM値と比較して、本促進試験法によるFAの活性度の評価は、材齢28日の精度は同等であるが、材齢91日の精度は高く、加えて簡易であるため、有用であると言える。

最後に、本検討においては、促進温度50℃、水酸化カルシウム10mass%の刺激材が促進条件として適用できる可能性を示唆したが、さらに促進温度を上げた場合や、より適する刺激材および刺激材量がある可能性もある。より精緻な推定のためには追加の検討を行う必要があると考えられる。

## 5. まとめ

本報告では、反応速度の遅い高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの品質評価のため、50℃の高温養生と反応刺激材として水酸化カルシウム粉末を用いた促進試験法を提案した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 国内外の様々な種類の高炉スラグ微粉末やフライアッシュを調査した結果、化学成分や活性度指数は日本国内と異なるものが存在した。
- (2) 活性度指数を化学成分から推定する場合、塩基度やM値と呼ばれる指標からでは評価しきれない事例が存在した。
- (3) 高炉スラグ微粉末やフライアッシュ単体の反応を促進させるためには、水酸化ナトリウムを溶解したアルカリ水溶液よりも、水酸化カルシウムの粉体が適していた。
- (4) 本報告における促進試験法は、塩基度やM値と呼ばれる指標から活性度指数を推定するよりも相関係数が高く、手法としても簡便であるため、有用である可能性が示唆された。

## 謝辞

本研究は、東京工業大学・坂井悦郎特任教授に多くのご指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

## <参考文献>

- 1) 依田侑也、寺本篤史、黒田泰弘：海外セメントの基礎物性および簡易品質評価手法に関する検討、清水建設研究報告、第91号、pp.19-26、2014
- 2) (社)日本セメント技術協会：水滓委員報告、O-1、pp.1-8、1954
- 3) 大塚拓、森慎一郎、石川元樹、坂井悦郎：フライアッシュの鉱物組成とボゾラン反応性、セメント・コンクリート論文集、No.63、pp.16-21、2009
- 4) 近藤連一、宋宗澤、後藤誠史、大門正機：種々の刺激剤による高炉水砕スラグの潜在水硬性、鉄と鋼、第13号、pp.1825-1829、1979
- 5) 國府勝郎、村田芳樹、高橋茂、安斎浩幸：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇と水和性状に関する研究、土木学会論文集、第396号、pp.39-48、1988
- 6) 近藤連一：セメント化学のシーズとニーズ、コンクリート工学、Vol.17、No.2、pp.1-11、1979
- 7) 坂井悦郎、加藤昌宏、浅賀喜与志、大門正機：セメント水和の相組成モデル、コンクリート工学年次論文集、Vol.20、No.1、pp.101-106、1998