

高炉水砕スラグの活性度指数の新たな評価指標の提案 (塩基度式の改良に関する実験的検討)

伊藤貴康・三隅英俊

2050年のカーボンニュートラル達成に向けて、建設業界でもコンクリートの低炭素化の動きが加速している。その中で、高炉水砕スラグ (BFS) を多量利用したコンクリートが実用化されているが、今後のBFSの調達環境の変化も考慮すると、その品質評価・管理手法が重要になると予想される。

本研究では、BFSの活性度指数をより確度高く予測できる評価指標 (塩基度式の改良) を実験的に検討し、BFSの品質評価方法への適用について確認した。検討は、 TiO_2 、 MnO 、 Na_2O および K_2O を添加して電気炉試製した $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 系スラグを用い、活性度指数に及ぼす化学成分の影響を詳細に調査した。その結果、JISで規定される塩基度式で CaO と等価で扱われる Al_2O_3 や MgO は、 CaO に比べて活性度指数への影響が小さかった。また、 TiO_2 や MnO の増加は活性度指数を低下させることを確認した。これらの結果に基づき、 Al_2O_3 と MgO の係数を小さくおよび TiO_2 と MnO で補正した塩基度から、活性度指数を精度良く推定できることがわかった。なお、各成分が活性度指数に及ぼす影響は、スラグの化学構造や反応性よりも、水和物構成の違いによるものである可能性が推測された。

キーワード：高炉水砕スラグ、塩基度、活性度指数、スラグ反応率

1 緒言

近年、2050年のカーボンニュートラルに向けて、建設業界でも様々な技術開発が行われている。直近の動きとして、コンクリートの低炭素化のために混合材の利用が進められている。その中で高炉水砕スラグ (以下、高炉スラグ) は、フライアッシュなどに比べると強度発現性が良いことから、ポルトランドセメントに置き換えられる主要な混合材の1つになっている。

現在、実用化が検討されている低炭素コンクリートでは、高炉セメントC種 (高炉スラグ置換率60%を超え80%以下) 相当の高炉スラグが結合材として使用される。そのため、コンクリート強度などの性能は、ベースセメントよりも高炉スラグの品位に依存する部分が大きくなり、高炉スラグの品質評価・管理が非常に重要となってくる。

高炉スラグの強度発現性は活性度指数 (JIS A 6206) で評価され、塩基度 ($(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$ 、以下JIS塩基度) で管理されることが多い。この塩基度式の中で MgO および Al_2O_3 は CaO と等価で扱われ、活性度指数に対して

CaO 、 MgO および Al_2O_3 は正の影響、 SiO_2 は負の影響を示すとされる⁽¹⁾。しかし、従来の研究で Al_2O_3 は活性度指数に対して負の影響を示す⁽²⁾ともいわれ、必ずしも CaO と等価ではないとも考えられる。

従来より、高炉スラグの活性度指数への化学成分の影響が研究されているが⁽³⁾⁻⁽⁶⁾、その多くはC/S (= CaO/SiO_2) 一定で Al_2O_3 や MgO 等の成分量を変化させたり、実際の高炉スラグの成分と活性度指数試験結果を重回帰分析することで、各成分の影響度を求めている。

本研究では、塩基度式の中で CaO に対する Al_2O_3 や MgO の効果、および少量成分の影響度を明確にすることを目的に、 TiO_2 、 MnO 、 Na_2O および K_2O を添加した $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 系スラグを電気炉で試製し、活性度指数に及ぼす各成分の影響を系統的に調査した。さらに、実験結果に基づいて、活性度指数をより確度高く推測するために改良塩基度式を提案した。なお、本報は、著者らが過去に発表した研究報告⁽⁶⁾を整理し直したものである。

2 塩基度式の補正に関する実験的検討

2.1 高炉水砕スラグを模擬したガラスの作製

試験に用いたスラグは、純堿（炭酸カルシウム、酸化マグネシウム、酸化アルミニウム、二酸化ケイ素、酸化鉄、酸化チタン、炭酸マンガン）を原料として調合し、表1に示す組成のスラグを試製した。

Series AはAl₂O₃～K₂Oの量を固定してCaOをSiO₂で置換した水準であり、これによりC/Sの影響を調査した。

また、Series BおよびEはJIS塩基度一定でCaOをAl₂O₃あるいはMgOで置換、Series CおよびFはC/S一定でCaOとSiO₂をAl₂O₃あるいはMgOで置換、Series DおよびGはCaO量一定でSiO₂をAl₂O₃あるいはMgOで

置換した水準であり、様々な条件でAl₂O₃とMgOを変化させることにより、CaOに対するこれらの影響度の違いを検討した。

さらに、Series H～Jは、JIS塩基度一定でTiO₂、MnO、Na₂OおよびK₂O量を変化させた水準で、少量成分が活性度指数に及ぼす影響を調査した。

調合した原料はカーボン坩堝に入れて、1500℃の電気炉内で30分間加熱して熔融させた。その後、電気炉から取り出し、直ちに熔融物を大量の水中に投入して急冷した（写真1）。水中から回収した試料は105℃で24時間乾燥し供試スラグとした。

表1 試製スラグの化学成分およびJIS塩基度の目標値

No.	Series		Chemical components (%)								C/S (-)	JIS Basicity(-)																									
			SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Na ₂ O			K ₂ O																								
1	Standard		34.2	43.5	13.8	5.7	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3	1.27	1.84																								
2	Substitution of CaO by SiO ₂	A	32.9	44.7	13.8	5.7	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3	1.36	1.95																								
3			35.3	42.3								1.20	1.75																								
4			36.6	41.0								1.12	1.65																								
5			38.1	39.5								1.04	1.55																								
6	Substitution of CaO by Al ₂ O ₃	B	34.2	44.2	13.0							5.7	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3	1.29	1.84																		
7				42.2	15.0													1.23																			
8				41.7	15.6													1.22																			
9				41.2	16.0													1.20																			
10	Substitution of CaO and SiO ₂ by Al ₂ O ₃	C	35.3	40.9	15.2							5.7						0.5	0.4	0.2	0.2	0.3	1.75														
11			34.7	40.2	16.5																		1.16	1.80													
12			34.1	39.5	17.9																		1.85														
13	Substitution of SiO ₂ by Al ₂ O ₃	D	35.0	43.5	13.0																		5.7	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3	1.24	1.78							
14			33.5		14.5																								1.30	1.90							
15			33.0		15.0																								1.32	1.95							
16	Substitution of CaO by MgO	E	34.2	45.2	13.8																								5.7	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3	1.32	1.84	
17				44.2		5.0	1.29																														
18				42.2		7.0	1.23																														
19				41.7		7.6	1.22																														
20	Substitution of CaO and SiO ₂ by MgO	F	35.3	40.9	13.8	5.7	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3																								1.75		
21			34.7	40.2									8.5	1.16	1.80																						
22			34.1	39.5									9.8	1.85																							
23	Substitution of SiO ₂ by MgO	G	34.9	43.5	13.8								5.7	0.5	0.4	0.2	0.2																		0.3	1.25	1.78
24			33.5																																	6.4	1.30
25			32.9									7.0						1.32	1.95																		
26	Addition of TiO ₂ , MnO, Na ₂ O & K ₂ O to standard	H	34.1	43.4	13.8							5.7						0.5	0.6	0.2	0.2	0.2														1.27	1.84
27			34.1	43.3	13.7														0.8																		
28			34.0	43.2	13.7														1.1																		
29		I	34.1	43.4	13.7														0.4																		
30			34.0	43.3	13.7														0.6																		
31		J	34.2	43.5	13.8														0.2				0.2	0.2	0.2	0.2	0.5										
32			34.1	43.4	13.7																							0.4	0.3								
33			34.1	43.4	13.7																																



写真1 試製スラグの試製状況（水冷）

なお、試製スラグの結晶化率は、試製したスラグに対して Al_2O_3 を外割で10%添加し、XRD/リートベルト解析より求めた。その結果、いずれも0%（ガラス化率100%）であった。

また、製造条件の影響も調べるため、熔融温度を1400~1500℃の範囲で変化あるいは冷却時に炉外取出し後の空冷時間を20秒程度として冷却速度が遅くなる水準を加えた。

2.2 高炉スラグの強度発現性と活性度指数

JIS塩基度が1.67~1.73の高炉スラグ5試料を使用して、普通ポルトランドセメントに50%あるいは80%混合した場合の材齢7日のモルタル圧縮強さを調べた。モルタル圧縮強さは、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠して測定した。

また、活性度指数は、試製スラグをブレン比表面積 $4300 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ になるようにボールミルで粉碎したスラグ粉を用いて、混合率50%として測定した。試験方法は、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に準拠した。

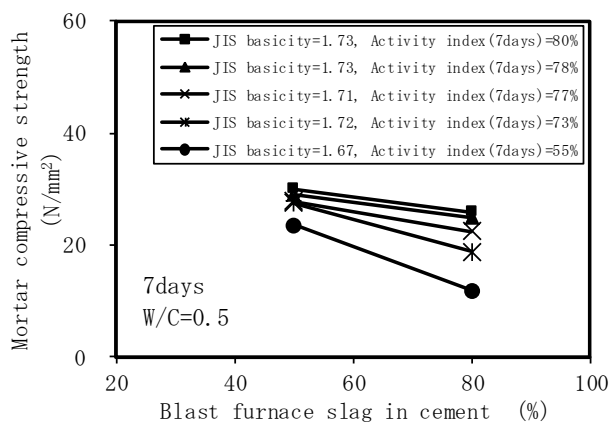


図1 高炉スラグ混合割合とモルタル圧縮強さの関係

3. 実験結果

3.1 スラグ高含有セメントの強度発現性に及ぼすスラグ品位および混合率の影響

JIS塩基度が同等（1.67~1.73）の高炉スラグを用い、高炉スラグ含有セメントの強度発現性に及ぼすスラグ混合率の影響を調べた。結果を図1に示す。

スラグ混合率を50%から80%に高めると、JIS塩基度がほぼ同じでも高炉スラグ間の圧縮強さの差異が拡大するケースが見られる。この差異はスラグの活性度指数の違いに対応しており、高炉スラグの混合率を高めた場合は、活性度指数の違いをより正確に予測して高炉スラグを使用することが重要である。このため、以降では、JIS塩基度よりも精度高く活性度指数を推測する方法を検討した。

3.2 スラグの試製条件と活性度指数との関係

熔融温度や冷却速度を変えて試製したスラグの結晶化率（100-ガラス化率）と活性度指数の関係を調査した。図2に熱処理条件を変えたスラグの結晶化率と活性度指数の関係を示す。スラグの活性度指数は、結晶化率が5%以下の範囲では大差なく、これを超過すると低下した。実際の高炉スラグの結晶化率は5%未満であることが知られるため⁸⁾、1435℃以上の熔融温度で急冷すれば実機に近い熱履歴を与えていると考えられる。このため、以降の化学成分の影響は1500℃で熔融後に急冷させたスラグを用いて検討を行った。

3.3 化学成分が活性度指数に及ぼす影響

(1) 主要成分（ CaO 、 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 ）の影響

図3に、スラグ中の Al_2O_3 および MgO が活性度指数に及ぼす影響を示す。(a)は CaO 一定で Al_2O_3 または MgO を SiO_2 と置換してJIS塩基度を高めた系（Series D、G）、(b)はC/S一定で Al_2O_3 または MgO を CaO および SiO_2 と置換してJIS塩基度を高めた系（Series C、F）、(c)はJIS塩基度一定で Al_2O_3 または MgO を CaO と置換した系（Series B、E）であり、それぞれJIS塩基度と活性度指数の関係で整理した。なお、 Al_2O_3 および MgO 一定でC/Sを変えてJIS塩基度を高めたSeries Aの結果を(a)および(b)に併記した。

まず、CaO量一定でAl₂O₃またはMgOをSiO₂と置換してJIS塩基度を高めた場合(図3(a))、Al₂O₃とMgOのいずれもJIS塩基度が高くなるに従って材齢7日の活性度指数を高める効果が確認できた。但し、材齢28日ではこれらの影響度は小さくなった。次に、C/Sを一定としてAl₂O₃またはMgOを増やしてJIS塩基度を高めた場合(図3(b))、活性度指数はほとんど増加しなかった。また、JIS塩基度一定でAl₂O₃またはMgOをCaOと置換した場合(図3(c))、JIS塩基度は同等でもAl₂O₃やMgOの増加により活性度指数はやや低下した。

これらの結果から、Al₂O₃やMgOは、SiO₂と置き換えると活性度指数を高める効果が顕著であるが、CaOに置換した場合はその影響度が小さくなり、CaOと等価ではないことがわかった。従って、塩基度式としては、Al₂O₃やMgOをSiO₂との比で取り扱うことはJIS塩基度と同様で良いが、その係数は見直すのが

適当と考えられた。

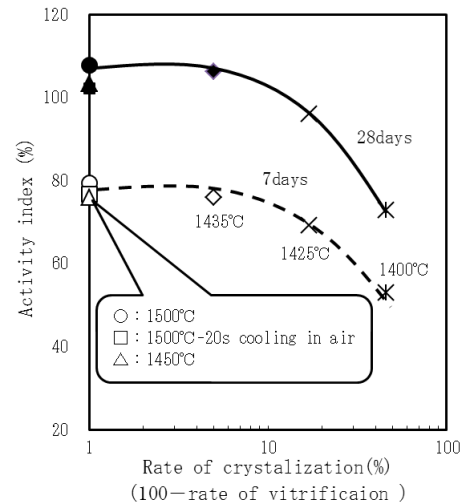


図2 高炉スラグの活性度指数に及ぼす結晶化率の影響

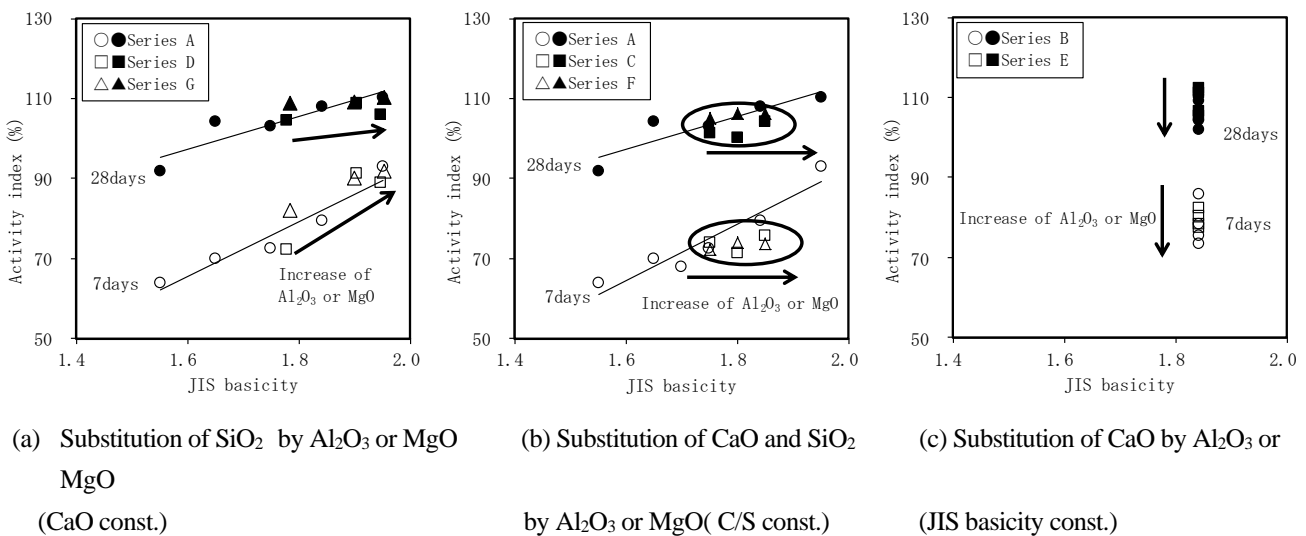


図3 高炉スラグのJIS塩基度と活性度指数の関係 (Series A~G)

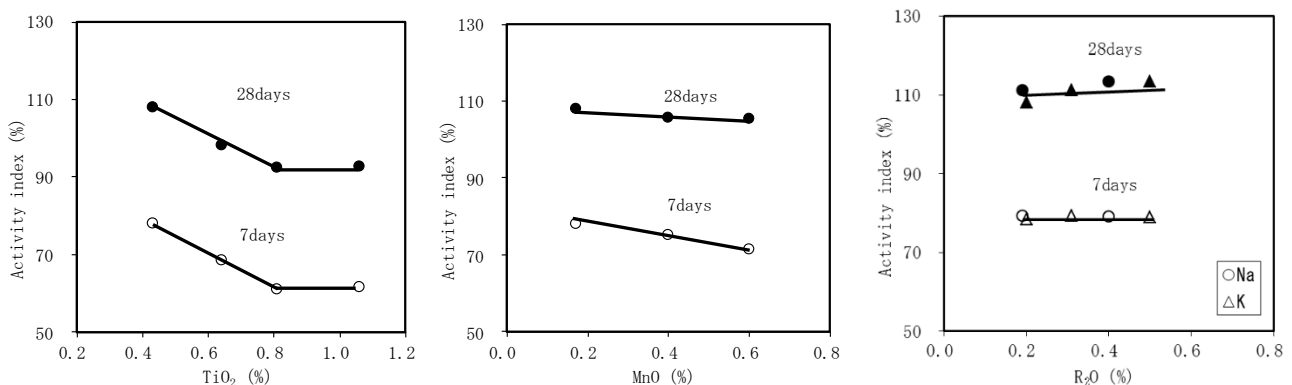


図4 高炉スラグの少量成分と活性度指数との関係 (Series H, I and J)

(2) TiO₂、MnOおよびアルカリ金属の影響

スラグ中に含まれる少量成分 (TiO₂、MnO、Na₂O、K₂O) の影響は、過去の研究でも電気炉試製品^{(3),(9)}や実際の高炉スラグ⁽¹⁰⁾の解析結果から検討されている。本研究でもこれらの成分を系統的に変えてそれぞれの影響度を確認した。図4に活性度指数に及ぼすTiO₂、MnOおよびアルカリ金属の影響を整理した。

No.1 (表1) の基準スラグに対してTiO₂を増加した場合 (Series H) 、その活性度指数はTiO₂量0.8%まで直線的に低下したが、0.8%を超えると殆ど変化しなかった。TiO₂が増加すると活性度指数が低下する現象は過去の研究結果と同様であるが⁽⁹⁾、その効果が頭打ちになることについては報告されていない。今後、TiO₂増加によるスラグのガラス構造の変化や反応性の変化を詳細に研究していく必要がある。

また、同様にMnOを増加した場合 (Series I) も活性度指数が直線的に低下し、従来の研究結果⁽¹¹⁾と同様の傾向であった。アルカリ金属(Na₂O、K₂O)を増加した場合 (Series J) はいずれも活性度指数に顕著な影響はなかった。

これらの結果から、スラグ中の少量成分のうち、活性度指数を評価するために考慮する必要がある成分は主としてTiO₂およびMnOであることが確認できた。

3.4 活性度指数予測のための塩基度式の改良

以上のように、各成分が活性度指数に及ぼす影響を定量的に評価したところ、Al₂O₃とMgOはCaOと等価で扱えないこと、少量成分のうちTiO₂とMnOの影響は無視できないことなどがわかった。そこで、JIS塩基度式を改良して活性度指数の予測精度を高めることを検討した。

過去の研究では、JIS塩基度をベースにしてTiO₂およびMnOの影響を補正して (以下、TiO₂・MnO補正塩基度、式[1]) 活性度指数の予測精度を改善し、高炉スラグの管理に適用した例がある⁽¹¹⁾。

$$\text{TiO}_2 \cdot \text{MnO補正塩基度}^{(11)} = \frac{(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{SiO}_2} - 0.13\text{TiO}_2 - \text{MnO} \quad [1]$$

本研究では、Al₂O₃とMgOがCaOと等価ではないことが確認できたので、式[1]のJIS塩基度部分の係数を含めて見直した。見直し方法は、3.3節の実験結果に基づいて、活性度指数 (7日、28日) を従属変数とし、CaO/SiO₂、Al₂O₃/SiO₂、MgO/SiO₂、TiO₂および

MnOを独立変数として重回帰分析を行い、それぞれの係数の最適値を求めた。その際、TiO₂は0.8%で影響が頭打ちとなるので0.8%以上の場合は固定値0.8を入力して解析を行った。その結果、以下の式[2]および[3]で示される改良塩基度を得ることができた。

$$\text{塩基度(7日)} = \frac{(\text{CaO} + 0.43 \times \text{MgO} + 0.28 \times \text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{SiO}_2} - 0.46 \times \text{TiO}_2^{**} - 0.27 \times \text{MnO} \quad [2]$$

$$\text{塩基度(28日)} = \frac{(\text{CaO} + 0.42 \times \text{MgO} - 0.16 \times \text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{SiO}_2} - 0.60 \times \text{TiO}_2^{**} - 0.14 \times \text{MnO} \quad [3]$$

※TiO₂>0.8では0.8を固定値で使用

改良塩基度と活性度指数との関係をJIS塩基度と比較して図5に示す。各成分の影響度を式[2]および[3]のように見直すことで活性度指数の予測精度を高めることができた。

また、過去に研究されてきた各種塩基度式を用いて今回の試製スラグの活性度指数との相関係数を求め、表2に改良塩基度式と比較して整理した。いずれの塩基度式よりも本研究の改良塩基度式の相関係数が高いことが確認できた。なお、過去に、実際の高炉スラグを用いた同様の検討が行われており、本改良式のようにTiO₂とMnOの影響を考慮すると、予測精度が高まることが示されている⁽¹²⁾。

表2 各塩基度式と活性度指数の相関係数(材齢7日)

	Formula of basicity	R [*]
JIS	$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$	0.71
C/S	$\text{CaO} / \text{SiO}_2$	0.69
Ti revision ⁽³⁾	$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 - 0.13 \times \text{TiO}_2$	0.77
Ti・Mn Revision ⁽¹¹⁾	$(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 - 0.13 \times \text{TiO}_2 - \text{MnO}$	0.66
Maeda et al. ⁽³⁾	$(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{S}) / (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)$	0.74
Iwamoto ⁽⁴⁾	$\text{CaO} + (2/3) \times \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$	0.58
	$(\text{CaO} + 0.7 \times \text{MgO}) / (0.94 \times \text{SiO}_2 + 0.18 \times \text{Al}_2\text{O}_3)$	0.69
Yamauchi and kondoh ⁽⁵⁾	$(\text{CaO} + \text{MgO} + (1/3) \times \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + (2/3) \times \text{Al}_2\text{O}_3)$	0.65
This study	$(\text{CaO} + 0.43 \times \text{MgO} + 0.28 \times \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 - 0.46 \times \text{TiO}_2^{**} - 0.27 \times \text{MnO}$	0.92

*R : Correlation coefficient

ここで、製造元の異なる生スラグ4種類を、ブレン比表面積で $4500 \pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$ となるように粉碎したスラグ粉について、改良した塩基度式による塩基度と活性度指数の関係を図6に示す。電気炉試製スラグと同様に、改良した塩基度により特に7日の活性度指数の推定精度は高まることが確認できた。

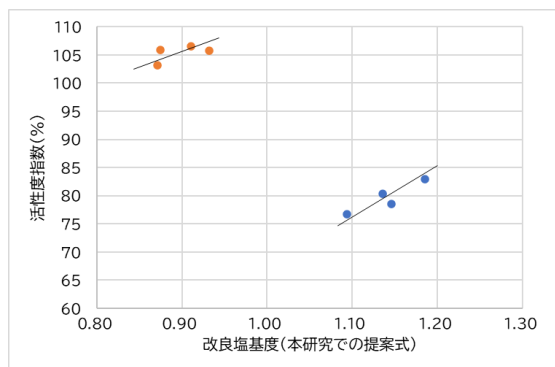


図6 実際の高炉水砕スラグにおける改良塩基度式による活性度指数の評価
(凡例 青：材齢7日、赤：材齢28日)

スラグの反応性の違いを直接調べるため、材齢7日における各スラグの反応率を測定した。

CaOとSiO₂を置換してJIS塩基度を増加 (No.2、3、5)、JIS塩基度一定でCaOをAl₂O₃で置換 (No.6、7、9)、C/S一定でAl₂O₃を増加 (No.10~12)、JIS塩基度一定でTiO₂を増加 (No.27、28) した試製スラグの反応率を表3に示す。同表には活性度指数も併記した。

スラグの反応率は、Al₂O₃を増加したNo.9で32%と若干大きかったが、その他はいずれも22~27%であり、反応率と活性度指数との対応はみられなかった。

スラグの結晶化率や反応率に大きな差異がないことから、スラグの化学成分が活性度指数に及ぼす影響は、スラグそのものの反応性の変化に起因するのではなく、生成する水和物構成やその化学組成の変化 (例えばC-(A)-S-HのAl₂O₃/SiO₂比など) による硬化体の空隙構造の変化に起因する可能性が考えられた。今後、これらに関して詳細な研究が必要である。

表3 試製スラグの反応率

sample	Reaction ratio (%)	Activity index (7days) (%)	
Standard	No.1	22	79.5
Influence of JIS basicity	No.2	26	93.0
	No.3	24	72.6
	No.5	23	63.9
Influence of Al ₂ O ₃	No.6	26	85.8
	No.7	27	78.3
	No.9	32	73.3
	No.10	27	74.0
	No.11	27	71.5
	No.12	26	75.8
Influence of TiO ₂	No.27	26	61.0
	No.28	27	61.7

4. 結言

CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO、TiO₂、MnO、Na₂OおよびK₂O量の異なるスラグを電気炉にて試製し、各成分と活性度指数の関係を系統的に調べ、活性度指数の予測方法を見直した。結果を以下に要約する。

- (1) まず、Al₂O₃およびMgOが活性度指数に及ぼす影響はCaOと等価ではなく、CaOに比べると影響度が小さかった。また、TiO₂やMnOが増加

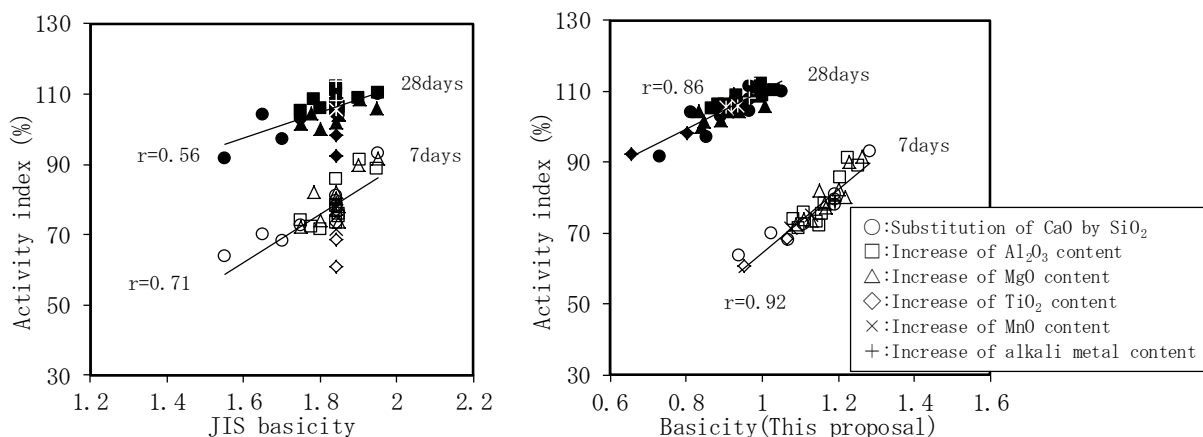


図5 試製スラグのJIS塩基度 (左) および改良塩基度 (右) が活性度指数に及ぼす影響

すると活性度指数は低下したが、アルカリ金属は活性度指数にあまり影響しないことがわかった。

- (2) TiO_2 および MnO の負の影響 (式[1]) に加えて、 Al_2O_3 や MgO の係数を 1 よりも小さく設定した塩基度式 (式[2], [3]) を提案した。この塩基度式を用いれば、活性度指数をより精度よく推測することが可能となった。
- (3) $W/C=50\%$ におけるスラグの反応率は、化学成分が異なっても材齢 7 日では大きな差異はなく、活性度指数の違いと対応しなかった。スラグの活性度指数には、スラグそのものの反応性よりも、生成水和物の構成やこれに起因する空隙構造の違いが関係する可能性がある。

提案した塩基度式はスラグの活性度指数の推定はある程度精度を高めることができたが、見直した係数の理論的な裏付けには至っていない。また、石膏添加量や硬化促進剤などと組み合わせた場合には、強度発現性も変わってくるのが推測される。

今後は、化学成分が異なるスラグの硬化体組織や水和物構成の違いについて、添加剤の影響も含めて研究を深めることで、各成分の係数値の意味を理論的に説明し、スラグの活性度指数の制御方法や管理方法を発展させる必要があると考えている。実際の高炉スラグを用いたデータの蓄積も行い、高炉スラグのより実用的な品質管理への適用を目指していきたいと考える。

5 参考文献

- (1) (社) 日本セメント技術協会：水滓委員報告 O-1、pp.1-8(1954)
- (2) H. G. SMOLCZYK: Slag structure and identification of slags, Int. Symp. Chem. of Cement, Paris, III -1/3 (1980)
- (3) 前田悦孝、長沼浩、橋本卓三：高炉水砕スラグの化学成分が高炉セメントの強さに及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.44、pp. 180 - 185 (1990)
- (4) 岩本信也：スラグの塩基度、溶接学会誌、Vol.50、pp. 324 - 334 (1981)
- (5) 山内俊吉、近藤連一：セメント用スラグ判別法、セメント技術年報、Vol.8、pp. 67 - 75 (1953)
- (6) 伊藤貴康、三隅英俊、高橋俊之： $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 系スラグの活性度指数に及ぼす化学成分の影響、セメント・コンクリート論文集、Vol. 70、pp. 222 - 229 (2016)
- (7) 佐川孝広、名和豊春：X 線回折リー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)
- (8) 沼田晋一ほか：我が国水砕スラグ及びこれを加工した高炉スラグ微粉末の品質、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.1、pp. 343 - 348 (1989)
- (9) 赤津健ほか： TiO_2 を考慮した高炉セメントの用水砕スラグの実用塩基度式、セメント技術年報、Vol.31、pp. 137 - 140 (1977)
- (10) 小野吉雄、河村繁雄、伊藤隆夫：高炉スラグのガラス化率、塩基度と高炉セメントの強さとの関係、セメント技術年報、Vol.37、pp.77-80 (1983)
- (11) 當房博幸：鉄鋼スラグ製品の開発と製造、生産と技術、第 66 巻、第 1 号、pp. 50 - 53 (2014)
- (12) 二戸信和、植田由紀子、松澤一輝、坂井悦郎：高炉スラグ高含有セメントの水和と強度に及ぼす高炉スラグの化学組成の影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.74、pp. 15 - 21、(2020)

伊藤貴康・いとう たかやす
技術戦略部 技術開発室 室長

三隅英俊・みすみ ひでとし
品質保証部 品質保証室 主幹