

CEMENT & CONCRETE

セメント・ コンクリート

2023
No.916

6

一般社団法人セメント協会
JAPAN CEMENT ASSOCIATION

令和5年6月15日発行 ISSN0371-0718



ハイブリッド混和剤

目指したのは「丈夫で長持ち」。

乾燥収縮の低減でひび割れを抑制、耐久性を向上。

過度なブリーディングを抑え、より緻密な組織へ。

高い減水性能で扱いやすく、施工不良のリスクも低減。

高品質なコンクリートは建設廃材を減少させ、環境にも貢献。



高性能AE減水剤（増粘剤一液タイプ）

チューポールHP-70

AE減水剤（高機能・ブリーディング低減タイプ）

チューポールEX60LB

高性能AE減水剤（収縮低減タイプ）

チューポールSR

AE減水剤（高機能・収縮低減タイプ）

チューポールLS



TAKEMOTO

ケミカルで社会インフラの発展を支える

KaO
きれいを ところに 未来に

粉塵量を大幅削減
ビスコトップ UT



加振時の流動性向上
マイティ 21V-SG



花王株式会社 ケミカル事業部門

東京 〒131-8501 東京都墨田区文花2-1-3
大阪 〒550-0012 大阪市西区立売堀1-4-1
URL <https://chemical.kao.com/jp/>
E-mail chemical_eif@kao.com

コンクリート専門 コンサルタント

●フレッシュコンクリート

配調合選定試験 試験体作製
RCD・CSG ダムコンクリート
繊維補強コンクリートの評価

●硬化コンクリート

強度・耐久性試験 熱特性試験
打継ぎ部の一面せん断 橋梁・トンネル関連試験

●コンクリート材料・建設材料

骨材・セメントの物理試験 補修材の性能評価
鉄筋・繊維補強材の物性試験

コンクリート 試験

構造物 調査診断

●一般建築構造物

採取コアによる試験 非破壊検査

●ダム・河川・橋梁・上下水道

劣化度調査 耐久性調査

●トンネル・洞道

ひび割れ調査 空洞調査

●原子力施設

健全性評価 現地調査 室内試験

化学分析

●化学分析

配合推定 塩化物イオン量 アルカリ量
アルカリ骨材反応性試験 有害鉱物判定
粉末 X線回折 走査型電子顕微鏡
細孔径分布

*High
Technology
and
Creative
Challenge*

建設コンサルタント

HCC 株式会社 八洋コンサルタント

本社 〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1丁目7番8号
電話 03 (5577) 5826 (代表) FAX 03 (5577) 5829
技術センター 〒253-0071 神奈川県茅ヶ崎市萩園 2722 番地
電話 0467 (87) 3451 (代表) FAX 0467 (57) 0618
URL <http://www.hachiyo.co.jp>

AE減水剤 (高機能タイプ) ヤマソー 02NL

収縮低減剤 ヤマソー DS100

減水剤(遅延形) ヤマソー R

AE剤 ヴィンソル

AE減水剤(高機能タイプ・フリーディング低減型) ヤマソー 16NB

高性能AE減水剤 ヤマソー V1S

AE減水剤 (高機能タイプ) ヤマソー 09NL

AE減水剤 (耐寒促進剤タイプ) ヤマソー ウィン

高性能AE減水剤(収縮低減タイプ) ヤマソー V1-DS

硬化促進剤 ヤマソー ウィンS

高流動コンクリート用分離低減剤 ヤマソー ビスコン

AE減水剤(高機能・高保持タイプ) ヤマソー 22NEX

AE減水剤 ヤマソー 90SE

スランプ保持剤 ヤマソー 2020

あした
明日へ繋げる

コンクリートという無機質の中から
人々が理想とする安心・安全・快適さを実感できる、
より良い街づくりのお手伝いをします。



山宗化学株式会社
YAMASO CHEMICAL CO., LTD.

本社 〒104-0032 東京都中央区八丁堀2-25-5 ☎03-3552-1341 (代)
東京営業部 ☎03-3552-1261
支店 ●大阪/☎06-6353-6051 福岡/☎092-483-8567 札幌/☎011-662-5552
営業所 ●広島/☎082-237-3083 仙台/☎022-224-0321 北陸/☎0776-28-2566
出張所 ●静岡/☎054-202-5111 高松/☎087-863-7565
事務所 ●平塚/☎0463-23-5536

<https://www.yamaso-chem.co.jp/>

クリップボードの コンクリート化学編 出ました。

セメント協会の出版物



ブルーのカバー
e3 (シースリー)
クリップボード
コンクリート化学編
A4判・123頁・3,080円



グリーンのカバー
e3 (シースリー)
クリップボード
セメント化学編
A4判・134頁・3,080円

月刊セメント・コンクリート誌に長期連載した人気シリーズが単行本になりました。コンクリートの気になるキーワード全47項目をそれぞれ2~3ページで簡潔に解説。既刊の[セメント化学編]とともにお役に立つこと間違いなしです。

4つのカテゴリーに分類 ● [フレッシュコンクリートの物性](#) [硬化コンクリート](#) [耐久性](#) [いろいろなコンクリート](#)

お求め・お問い合わせは…一般社団法人セメント協会 図書販売係 まで

東京都中央区新富二丁目15番5号 RBM築地ビル2階
TEL 03-5540-6173 FAX 03-5540-6181

もくじ

02	JCA Report 2022年度セメント需給と今後の展望	… (一社)セメント協会 調査・企画部門
05	JCA Report 2022-OC セメント共同試験 結果と最近10年間の推移	… (一社)セメント協会 研究所 技術情報グループ
11	熱力学的相平衡計算を用いたセメントマトリックス組成の推定	… 宮本 慎太郎
17	環境負荷低減性が期待されるジオポリマーの可能性	… 合田 寛基
25	すいそう 百年先へ	… 本田 顕子
27	主要地方道秋田北インター線コンクリート舗装による現道補修について ～アスファルト舗装からコンクリート舗装へ～	… 佐々木 浩喜ほか
33	コンクリートのひび割れ点検の高精度化と効率化を目指して ～ひび割れ画像解析技術「t.WAVE」の開発～	… 堀口 賢一ほか
39	シリーズ/セメント産業 脱炭素・低炭素社会を目指すキーワード 低温でCO ₂ からメタノールを合成できる触媒の開発	… 姫田 雄一郎
45	シリーズ/セメント系固化材 その特性と広がる可能性⑤ セメント改良技術の適用事例・深層混合処理 粉体噴射攪拌工法(DJM工法)	… 島野 嵐ほか
51	特別寄稿 続・コンクリート鳥居 ～赤城・小泉稻荷神社と貫前神社の大鳥居～	… 辻 幸和

10	「2023-OC セメント共同試験」参加募集
57	外国雑誌の記事情報
59	EVENT GUIDE
61	セメント・データファイル
63	主要建設工事・資材統計
65	7月号予告



今月の表紙

コンクリート舗装による打換えが行われた秋田北インター線〔秋田県／提供：秋田県〕

2022年度セメント需給と今後の展望

(一社)セメント協会 調査・企画部門

1. はじめに

1-1. 概況

2022年度のが国経済は、コロナ禍からの社会経済活動の正常化が進みつつある中、緩やかな持ち直しが続いています。その一方で、世界的なエネルギー・食料価格の高騰や欧米各国の金融引締め等による世界的な景気後退懸念など、わが国経済を取り巻く環境は厳しさが増しています。

こうした中、政府は、景気の下振れリスクに先手を打ち、わが国経済を民間主導の持続的な成長経路に乗せていくため、「物価高・円安への対応」、「構造的な賃上げ」、「成長のための投資と改革」を重点とする「物価高克服・経済再生実現のための総合経済対策」を策定し、その裏付けとなる2022年度第2次補正予算を編成しました。こうした下で、実質成長率は1.2%となりました。

セメント関連項目をみると、公共投資は伸び率▲2.6%、民間住宅投資は同▲4.4%、民間設備投資は同3.0%と見込まれました(内閣府 2023年5月17日公表)。

1-2. セメント需給(図1,表1)

(1) 国内需要

2022年度のセメント国内需要は3,728万t、前年と比較すると60万t減、前年比98.4%となり、4年連続マイナスとなりました。前年プラスとなった地区は、関東二区、近畿、九州です。コロナ禍からの回復の動きも

見られ、概して都市再開発事業や道路整備事業などが寄与しました。一方、他の地区では工期の長期化、建設労働者の人手不足など弱含みで推移したことから、前年マイナスとなりました。このうち輸入は1.6万t、前年比151.4%、シェア0.0%となりました。全量韓国からのものです。

全体的な背景として、官需についてはマイナスとなりました。2022年度国の公共事業当初予算は補正予算と合わせて金額ベースでは減額されました。労務費や建設資材コストが急騰し、金額当たりのセメント使用量(セメント原単位)が減少したことからマイナスとなりました。一方、民需は前年並みとなりました。設備投資は倉庫、流通施設に加え、半導体関連など工場への投資が堅調、首都圏の再開発工事も本格したことからわずかにプラスとなりました。住宅投資は建設コスト増加や住宅ローン金利の上昇に対する懸念からわずかにマイナスとなりました。

(2) 輸 出

2022年度の輸出は814万t、前年比70.9%となりました。1,000万t台を8年ぶりに割り込みました。仕向地はアジア向けが493万t、同62.3%と全体の60.5%を占めました。主要な輸出先で、エネルギー価格高騰による原価高の影響から、近隣輸出競合国との競争が激化し、シンガポールは193万t、同72.3%とマイナスとなりました。中国は27万t、同15.8%、香港は117万t、同71.0%と軒並みマイナスとなりました。一方、オースト

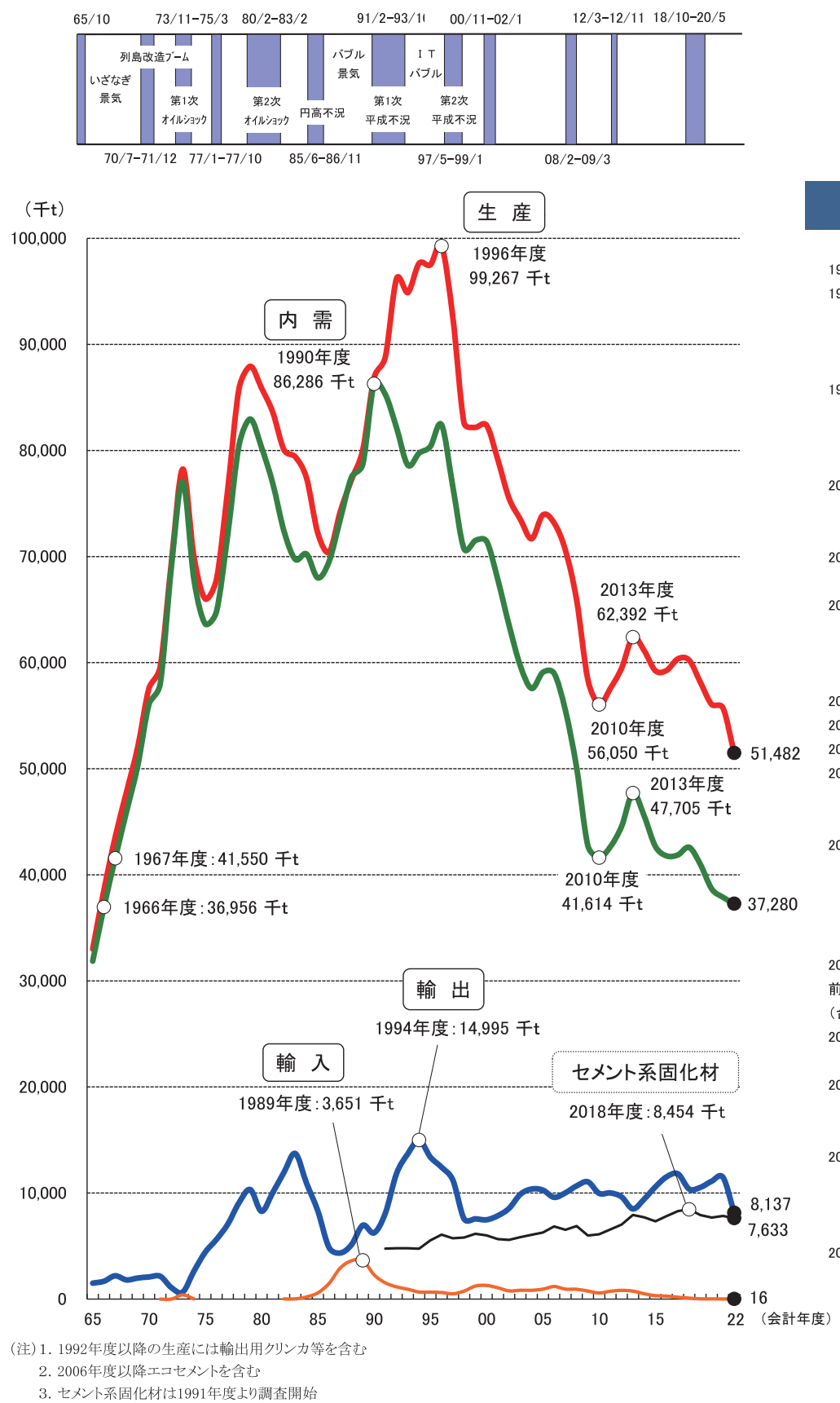


図1 セメント需給の推移

1995年以降のセメントに関わる主な出来事

1995. 1 阪神大震災
1997. 4 消費税率3%→5%

1998～ 累次に亘る経済対策

2004 台風10個上陸
10 新潟県中越地震

2007. 6 改正建築基準法

2008. 9 リーマンショック

2009. 9 民主党政権誕生
2011. 3 東日本大震災
2014. 4 消費税率5%→8%
2016. 4 熊本地震

2018. 6 大阪北部地震
7 西日本豪雨
9 台風21号上陸
北海道胆振東部地震

2019. 6～10
前線、台風による爆風雨・豪雨
(台風15号、19号他5個上陸)
2019.10 消費税率8%→10%

2020～ 新型コロナウイルス感染拡大
7 令和2年7月豪雨

2021. 7～8
東京オリンピック・パラリンピック開催
石炭価格の上昇

2022. 2 ロシアのウクライナ侵攻
石炭価格の高騰

表1 地区別販売

(単位:t,%)

地区	項目	2022年度		2021年度		前年比 (A/B)
		(A)	構成比	(B)	構成比	
北海道		1,728,323	4.6	1,789,888	4.7	96.6
東北		2,903,547	7.8	3,074,893	8.1	94.4
関東	一区	8,845,604	23.7	9,022,704	23.8	98.0
	二区	3,626,770	9.7	3,500,393	9.2	103.6
	計	12,472,374	33.5	12,523,097	33.1	99.6
北陸		1,506,367	4.0	1,684,232	4.4	89.4
東海		4,383,414	11.8	4,446,301	11.7	98.6
近畿		5,409,051	14.5	5,353,973	14.1	101.0
四国		1,257,635	3.4	1,341,157	3.5	93.8
中国		2,198,924	5.9	2,313,437	6.1	95.1
九州		4,645,855	12.5	4,576,996	12.1	101.5
沖縄		759,110	2.0	767,874	2.0	98.9
国内計		37,264,600	100.0 (82.1)	37,871,848	100.0 (76.7)	98.4
(内 需)		37,280,448		37,882,316		98.4
輸出		8,137,123	(17.9)	11,483,777	(23.3)	70.9
合計		45,401,723	(100.0)	49,355,625	(100.0)	92.0

ラリアは208万t、同112.3%とプラスとなりました。

2. 今後の展望

(1) 2023年度セメント需要見通し

2023年度の国内需要は3,800万t、前年比101.9%と見通しました。官需については、国の公共事業予算は当初と補正(防災・減災、国土強靱化のための5

か年加速化対策)の予算で、それぞれ前年度と同水準確保されていること、低下傾向にあった予算執行率は下げ止まりの動きが見られます。一方で労務費や建設資材価格の上昇も懸念されることから、前年並みと想定されます。民需については、住宅投資において新設住宅着工戸数は建設コストと住宅ローン金利のさらなる上昇懸念から、やや減少すると予想されます。設備投資は都市部の再開発工事が継続し、事務所は前年を上回り、店舗、工場、倉庫も高水準を維持すると予想されることから、前年を上回ると想定されます。同輸出は700万t、前年比86.0%と見通しました。引き続き世界情勢の不安定要素が多い中、エネルギー価格の変動が続くことが予想され、減少するものと想定されます。

(2) 中期的なセメント需要見通し

都市開発事業、地方での防災、減災対策などが継続されることや、2025年大阪万博開催の関連工事、インバウンド需要の回復による宿泊施設需要、リニア中央新幹線工事の沿線地域での直接・間接投資が期待されることから、中期的には一定水準の需要は維持するものと期待されます。一方で人手不足や働き方改革推進による工期の長期化や、労務費、資材価格の上昇などのマイナス要因も懸念されます。

セメント規格がわかる本

2015年3月20日にJIS R 5201およびJIS R 5203が改正されたことに伴い、これら試験方法規格に関する「セメント規格がわかる本」を改訂しました。今回の規格改正において変更や追加された点について詳しく解説するとともに、試験を行う上で不可欠な知識やノウハウを理解しやすい内容となっています。

JIS R 5203：2015「セメントの水和熱測定方法（溶解熱法）」編 A4版・60ページ・3740円（税込）・送料実費	JIS R 5201：2015「セメントの物理試験方法」編 A4版・135ページ・5500円（税込）・送料実費
--	--

お求め・お問い合わせは… 一般社団法人セメント協会 図書販売係 まで
東京都中央区新富二丁目15番5号 RBM築地ビル2階 TEL 03-5540-6173 FAX 03-5540-6181



2022-OCセメント共同試験 結果と最近10年間の推移

(一社)セメント協会 研究所 技術情報グループ

1. はじめに

セメント協会は、セメント試験技術の維持・向上を目的として、全国のセメントおよびコンクリート関係の試験所・研究所を対象に共通試料によるセメント共同試験を毎年実施している。この共同試験は10月に行うことからOC (October) 共同試験と称しており、1948年から2022年まで73回実施した。

本稿では、2022年10月に実施した「2022-OCセメント共同試験」の結果を紹介する。

2. セメント共同試験の概要

参加した試験所は、セメント協会の会員(セメントメーカー関連の試験所・研究所)36試験所、セメント協会の会員外(公益法人、生コンクリート工業組合、民間企業、海外の試験所など)59試験所の計95試験所であった。最近10年間の参加試験所数の推移を表1に示す。

試験に使用した試料は、普通ポルトランドセメント1

- 試料である。実施した試験項目は次の通りである。
- (1) 日本産業規格(JIS)に規定された化学分析、物理試験、水和熱試験
 - (2) セメント協会標準試験方法(JCAS)に規定された45 μ m網ふるいによる粉末度、エア・ジェット式ふるい装置による粉末度、遊離酸化カルシウムの定量
 - (3) 米国試験ASTMに規定された凝結、安定性、圧縮強さ

本稿では(1)および(2)の試験結果の概要について報告する。

3. 日本産業規格(JIS)による 試験結果の概要

- (1) JIS R 5202による化学分析結果
参加試験所は42試験所(会員26、会員外16)であった。化学分析結果(規格本体)を表2に、最近10年間の化学分析結果(規格本体)の標準偏差の推移を表3に示す。
- (2) JIS R 5201による物理試験結果

表2 化学分析結果(規格本体)

項 目		会 員						会員外					
		平均	最大	最小	標準 偏差	変動 係数	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動 係数	試験 所数
						(%)						(%)	
強熱減量	(ig.loss)	2.81	2.90	2.72	0.034	1.2	26	2.84	3.20	2.60	0.134	4.7	16
不溶残分	(insol.)	0.10	0.15	0.06	0.027	27.0	17	0.14	0.22	0.08	0.063	45.0	6
二酸化けい素	(SiO ₂)	20.30	20.38	20.22	0.050	0.2	15	20.24	20.91	20.00	0.303	1.5	7
酸化アルミニウム	(Al ₂ O ₃)	5.43	5.48	5.35	0.039	0.7	15	5.46	5.57	5.24	0.123	2.3	6
酸化鉄(Ⅲ)	(Fe ₂ O ₃)	2.90	2.93	2.86	0.021	0.7	14	2.90	2.93	2.86	0.027	0.9	6
酸化カルシウム	(CaO)	64.31	64.64	64.06	0.144	0.2	15	63.99	64.80	61.70	1.065	1.7	7
酸化マグネシウム	(MgO)	0.90	1.00	0.86	0.034	3.8	14	0.96	1.04	0.89	0.056	5.8	7
三酸化硫黄	(SO ₃)	1.87	1.94	1.82	0.032	1.7	17	1.85	1.88	1.78	0.036	1.9	10
酸化ナトリウム	(Na ₂ O)	0.31	0.33	0.28	0.015	4.8	14	0.30	0.32	0.29	0.012	4.0	7
酸化カリウム	(K ₂ O)	0.37	0.39	0.34	0.015	4.1	14	0.37	0.39	0.32	0.022	5.9	7
酸化チタン(Ⅳ)	(TiO ₂)	0.30	0.33	0.29	0.011	3.7	15	0.31	0.34	0.29	0.019	6.1	5
酸化りん(V)	(P ₂ O ₅)	0.23	0.24	0.21	0.009	3.9	15	0.24	0.25	0.22	0.011	4.6	5
酸化マンガン(Ⅱ)	(MnO)	0.07	0.08	0.06	0.007	10.0	14	0.07	0.07	0.07	—	—	2
塩素	(Cl)	0.021	0.022	0.019	0.0006	2.9	18	0.022	0.025	0.020	0.0022	10.0	6

表3 最近10年間の化学分析結果(規格本体)の標準偏差の推移

項 目	種別	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
強熱減量 (ig.loss)	会 員	0.042	0.037	0.046	0.031	0.046	0.035	0.053	0.044	0.077	0.034
	会員外	0.053	0.127	0.124	0.073	0.079	0.060	0.145	0.196	0.194	0.134
不溶残分 (insol.)	会 員	0.028	0.033	0.030	0.033	0.038	0.033	0.031	0.030	0.024	0.027
	会員外	0.041	0.038	0.042	0.032	0.040	0.086	0.027	0.031	0.061	0.063
二酸化けい素 (SiO ₂)	会 員	0.062	0.087	0.054	0.072	0.067	0.071	0.152	0.087	0.074	0.050
	会員外	0.117	0.329	0.279	0.347	0.127	0.233	0.336	0.289	0.135	0.303
酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)	会 員	0.061	0.048	0.050	0.044	0.074	0.043	0.050	0.062	0.027	0.039
	会員外	0.196	0.103	0.332	0.138	0.093	0.179	0.155	0.226	0.090	0.123
酸化鉄(Ⅲ) (Fe ₂ O ₃)	会 員	0.029	0.021	0.030	0.023	0.035	0.041	0.028	0.065	0.036	0.021
	会員外	0.222	0.045	0.078	0.046	0.048	0.097	0.053	0.070	0.060	0.027
酸化カルシウム (CaO)	会 員	0.178	0.115	0.109	0.131	0.159	0.146	0.135	0.263	0.148	0.144
	会員外	0.241	0.173	1.268	0.226	0.345	0.259	0.139	0.397	0.282	1.065
酸化マグネシウム (MgO)	会 員	0.028	0.020	0.026	0.023	0.024	0.032	0.037	0.055	0.028	0.034
	会員外	0.177	0.110	0.304	0.083	0.063	0.056	0.096	0.166	0.147	0.056
三酸化硫黄 (SO ₃)	会 員	0.022	0.026	0.033	0.025	0.021	0.032	0.019	0.028	0.020	0.032
	会員外	0.061	0.106	0.045	0.032	0.057	0.056	0.226	0.082	0.070	0.036
酸化ナトリウム (Na ₂ O)	会 員	0.012	0.011	0.009	0.007	0.013	0.011	0.016	0.007	0.009	0.015
	会員外	0.021	0.015	0.025	0.014	0.032	0.013	0.013	0.025	0.017	0.012
酸化カリウム (K ₂ O)	会 員	0.013	0.012	0.012	0.016	0.030	0.017	0.016	0.013	0.010	0.015
	会員外	0.023	0.021	0.051	0.016	0.034	0.016	0.030	0.020	0.023	0.022
酸化チタン(Ⅳ) (TiO ₂)	会 員	0.012	0.008	0.008	0.011	0.015	0.007	0.007	0.007	0.006	0.011
	会員外	0.053	0.038	0.052	0.011	0.014	0.022	0.000	0.046	0.010	0.019
酸化りん(V) (P ₂ O ₅)	会 員	0.012	0.007	0.008	0.009	0.012	0.020	0.006	0.010	0.006	0.009
	会員外	0.010	0.015	0.039	0.006	0.010	0.016	0.021	0.061	0.009	0.011
酸化マンガン(Ⅱ) (MnO)	会 員	0.006	0.005	0.005	0.006	0.003	0.006	0.005	0.003	0.006	0.007
	会員外	0.003	0.012	0.025	0.008	0.005	0.013	—	0.000	0.000	—
塩素 (Cl)	会 員	0.0008	0.0010	0.0009	0.0007	0.0011	0.0011	0.0021	0.0008	0.0008	0.0006
	会員外	0.0030	0.0031	0.0024	0.0012	0.0023	0.0018	0.0021	0.0011	0.0021	0.0022

表1 参加試験所数の推移

種 別		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
会 員		30	37	37	37	37	36	38	37	36	36
会員外	国内	62	57	57	50	52	51	49	48	48	54
	国外	9	5	6	8	5	6	5	8	6	5
	計	71	62	63	58	57	57	54	56	54	59
合計		101	99	100	95	94	93	92	93	90	95

表4 物理試験結果(規格本体)															
項 目			会 員						会員外						
			平均	最大	最小	標準 偏差	変動 係数 (%)	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動 係数 (%)	試験 所数	
密 度		(g/cm ³)	3.14	3.16	3.13	0.007	0.2	24	3.14	3.15	3.12	0.010	0.3	22	
粉 末 度	比表面積		(cm ² /g)	3347	3430	3270	39	1.2	30	3381	3710	3130	115	3.4	18
	標準網ふるい 90 μ m残分		(%)	0.4	0.8	0.2	0.13	32.5	23	0.7	1.6	0.3	0.51	72.9	6
凝 結	水 量		(%)	27.4	28.2	26.9	0.36	1.3	32	27.7	29.8	27.0	0.53	1.9	29
	始 発		(h-min)	2-2	2-25	1-40	0-10	8.2	32	2-9	2-40	1-50	0-10.3	8.0	29
	終 結		(h-min)	3-8	3-55	2-40	0-14.4	7.7	32	3-8	3-35	2-50	0-14.4	7.6	29
強 さ	圧縮 強さ	3日	(N/mm ²)	34.2	35.2	32.7	0.66	1.9	26	33.6	36.2	29.2	1.27	3.8	51
		7日		49.6	50.9	47.4	0.95	1.9	26	48.5	51.2	43.9	1.59	3.3	51
		28日		64.1	66.1	61.1	1.37	2.1	26	63.0	65.9	56.2	1.63	2.6	51
	曲げ 強さ	3日	(N/mm ²)	6.7	7.0	6.3	0.21	3.1	19	6.6	7.6	5.8	0.37	5.6	38
		7日		8.1	8.7	7.6	0.30	3.7	19	8.0	9.0	7.2	0.43	5.4	38
		28日		9.3	10.1	8.6	0.34	3.7	19	9.3	11.3	8.4	0.53	5.7	38
フ ロ ー		(mm)	201	216	188	11.1	5.5	7	184	193	160	11.4	6.2	7	

表5 最近10年間の物理試験結果(規格本体)の標準偏差の推移														
項 目			種別	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
密 度		(g/cm ³)	会 員	0.011	0.010	0.007	0.007	0.006	0.007	0.008	0.012	0.009	0.007	
			会員外	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007	0.011	0.009	0.011	0.008	0.010	
粉 末 度	比表面積	(cm ² /g)	会 員	28	37	34	35	35	27	40	42	53	39	
			会員外	82	112	62	105	48	72	106	59	56	115	
	標準網ふるい 90μm残分	(%)	会 員	0.29	0.13	0.10	0.10	0.16	0.08	0.19	0.38	0.12	0.13	
			会員外	0.38	0.24	0.20	0.22	0.19	0.19	0.43	0.60	0.28	0.51	
凝 結	水 量	(%)	会 員	0.36	0.38	0.43	0.38	0.47	0.40	0.41	0.45	0.34	0.36	
			会員外	0.65	0.39	0.68	0.30	0.59	0.78	0.30	0.82	0.80	0.53	
	始 発	(h-min)	会 員	0-08.8	0-08.4	0-13.9	0-07.7	0-9.9	0-12	0-9.3	0-11.9	0-12.8	0-10	
			会員外	0-10.4	0-09.9	0-14.2	0-07.7	0-10.4	0-14.1	0-11.9	0-12.4	0-11.3	0-10.3	
	終 結	(h-min)	会 員	0-15.0	0-10.5	0-11.9	0-12.1	0-12.1	0-20.3	0-11.1	0-15.9	0-14.6	0-14.4	
			会員外	0-14.0	0-16.7	0-15.6	0-12.3	0-17.3	0-19.6	0-15.6	0-17.1	0-19.2	0-14.4	
強 さ	圧縮 強さ	3日	(N/mm ²)	会 員	0.96	0.61	0.68	0.88	0.79	0.93	0.55	0.99	1.11	0.66
				会員外	0.79	1.04	1.23	0.94	0.83	0.96	1.35	1.15	0.98	1.27
		7日		会 員	1.33	0.86	1.16	0.96	0.83	0.98	0.82	0.99	1.11	0.95
				会員外	1.42	0.98	1.75	1.07	0.98	1.21	1.40	1.33	1.49	1.59
		28日		会 員	1.88	0.79	1.41	1.19	1.04	1.17	1.03	1.06	1.22	1.37
				会員外	1.89	1.71	2.64	1.62	1.36	1.61	1.63	1.58	1.63	1.63
	曲げ 強さ	3日	(N/mm ²)	会 員	0.33	0.26	0.24	0.26	0.25	0.31	0.32	0.35	0.29	0.21
				会員外	0.39	0.27	0.30	0.28	0.37	0.33	0.37	0.31	0.31	0.37
		7日		会 員	0.21	0.35	0.34	0.37	0.36	0.34	0.32	0.49	0.31	0.30
				会員外	0.42	0.36	0.42	0.45	0.37	0.42	0.38	0.41	0.34	0.43
		28日		会 員	0.29	0.40	0.29	0.31	0.31	0.33	0.45	0.41	0.39	0.34
				会員外	0.68	0.48	0.52	0.47	0.51	0.38	0.41	0.46	0.46	0.53
フ ロ ー		(mm)	会 員	-	-	-	-	-	-	-	-	12.3	11.1	
			会員外	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.5	11.4

参加試験所は83試験所(会員32, 会員外51)であった。
物理試験結果(規格本体)を**表4**に, 最近10年間の物理試験結果(規格本体)の標準偏差の推移を**表5**に示す。材齢28日の圧縮強さの分布を**図1**に示す。

(3) JIS R 5203による水和熱試験結果
参加試験所は16試験所(会員14, 会員外2)であった。
水和熱試験結果を**表6**に, 最近10年間の水和熱試験結果の標準偏差の推移を**表7**に示す。

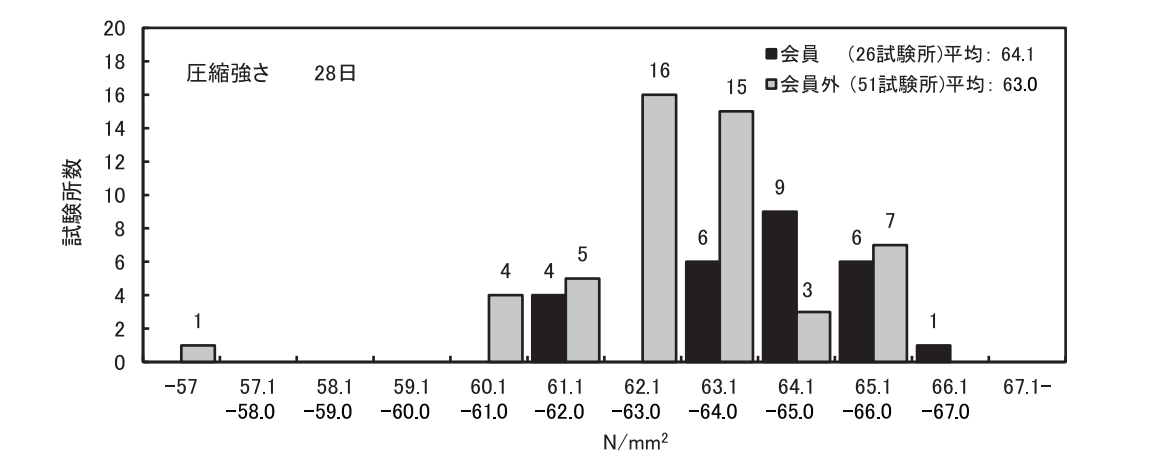


図1 材齢28日の圧縮強さの分布

表6 水和熱試験結果													
項 目		会 員						会員外					
		平均	最大	最小	標準 偏差	変動	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動	試験 所数
						(%)						(%)	
熱 容 量		(J/K)	1715	1738	1697	12.6	0.7	14	1721	-	-	-	1
未水和セメント の溶解熱		(J/g)	2517	2528	2484	10.2	0.4	14	2523	-	-	-	1
水 和 熱	7日	(J/g)	334	357	274	18.3	5.5	14	326	336	315	-	2
	28日		388	404	325	18.7	4.8	14	376	395	356	-	2

項 目		種別	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
水和熱	7日	会 員	3.7	4.8	5.6	3.7	4.9	4.5	3.9	4.0	3.8	18.3
		会員外	4.0	－	－	－	－	－	－	－	－	－
	28日	会 員	2.4	5.0	4.5	2.3	5.5	4.4	4.8	3.7	3.7	18.7
		会員外	6.3	－	－	－	－	－	－	－	－	－

表8 蛍光X線分析結果													
項 目		会 員						会員外					
		平均	最大	最小	標準 偏差	変動	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動	試験 所数
						(%)						(%)	
強熱減量		(ig.loss)	2.82	2.88	2.72	0.034	1.2	25	2.84	2.84	2.83	-	2
二酸化けい素		(SiO ₂)	20.19	20.46	20.06	0.090	0.4	26	20.03	20.18	19.87	-	2
酸化アルミニウム		(Al ₂ O ₃)	5.42	5.48	5.38	0.028	0.5	26	5.71	5.91	5.51	-	2
酸化鉄(Ⅲ)		(Fe ₂ O ₃)	2.92	2.94	2.88	0.015	0.5	26	2.92	2.94	2.89	-	2
酸化カルシウム		(CaO)	64.47	64.75	64.21	0.147	0.2	26	66.51	68.57	64.44	-	2
酸化マグネシウム		(MgO)	0.90	0.94	0.88	0.016	1.8	26	0.95	0.99	0.90	-	2
三酸化硫黄		(SO ₃)	1.85	1.91	1.80	0.025	1.4	26	1.89	1.93	1.85	-	2
酸化ナトリウム		(Na ₂ O)	0.30	0.33	0.26	0.018	6.0	26	0.28	0.29	0.27	-	2
酸化カリウム		(K ₂ O)	0.36	0.38	0.34	0.010	2.8	26	0.37	0.37	0.36	-	2
酸化チタン(Ⅳ)		(TiO ₂)	0.30	0.31	0.29	0.008	2.7	26	0.30	0.31	0.29	-	2
酸化りん(Ⅴ)		(P ₂ O ₅)	0.24	0.25	0.22	0.006	2.5	26	0.24	-	-	-	1
酸化マンガン(Ⅱ)		(MnO)	0.07	0.08	0.07	0.004	5.7	26	0.09	0.10	0.08	-	2
酸化ストロンチウム		(SrO)	0.05	0.05	0.04	0.005	10.0	12	0.05	-	-	-	1
塩素	(Cl)	ガラスビード法	0.022	0.025	0.019	0.0020	9.1	6	-	-	-	-	0
		ブリケット法	0.021	0.023	0.019	0.0010	4.8	9	-	-	-	-	0

表9 エア・ジェット式ふるい装置および45μm網ふるいによる粉末度

項 目			会 員						会員外					
			平均	最大	最小	標準 偏差	変動 係数	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動 係数	試験 所数
							(%)						(%)	
エア・ジェット式 ふるい装置 による 粉末度残分	10 μ m	(%)	68.7	68.9	68.6	0.15	0.2	3	－	－	－	－	－	0
	16 μ m		50.2	50.3	50.0	0.15	0.3	3	－	－	－	－	－	0
	20 μ m		35.2	40.7	19.0	10.77	30.6	4	－	－	－	－	－	0
	32 μ m		18.9	19.5	18.4	0.32	1.7	10	－	－	－	－	－	0
網ふるい残分	45 μ m		7.7	8.1	6.7	0.41	5.3	10	7.2	7.9	6.4	－	－	2

表10 遊離酸化カルシウムの分析結果

項 目			会 員						会員外					
			平均	最大	最小	標準 偏差	変動 係数	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動 係数	試験 所数
							(%)						(%)	
遊離酸化 カルシウム	A法	(%)	0.7	1.0	0.5	0.14	20.0	12	0.5	0.7	0.2	0.26	52.0	3
	B法		0.6	0.8	0.2	0.14	23.3	21	－	－	－	－	－	0

表11 最近10年間のB法による遊離酸化カルシウムの標準偏差の推移

項 目			種別	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
遊離酸化カルシウム	B法	(%)	会 員	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09	0.09	0.12	0.16	0.09	0.14
			会員外	0.13	－	－	－	－	－	－	－	－	－

(4) JIS R 5204による蛍光X線分析結果

参加試験所は28試験所(会員26, 会員外2)であった。蛍光X線分析結果を表8に示す。

4. セメント協会標準試験方法(JCAS)による試験結果の概要

参加試験所は、JCAS K-03による「エア・ジェット式ふるい装置による粉末度」が10試験所(全て会員)、JCAS K-02による「45μm網ふるいによる粉末度」が12試験所(会員10, 会員外2)、JCAS I-01による「遊離酸化カルシウムの定量」は、A法(エチレングリコール法)が15試験所(会員12, 会員外3)、B法(グリセリン-アルコール法)が21試験所(全て会員)であった。エア・ジェット式ふるい装置および45μm網ふるいによる粉末度を表9に、遊離酸化カルシウムの分析結果を表10に、また最近10年間のB法による遊離酸化カルシウムの標準偏差の推移を表11に示す。

5. おわりに

正しい試験結果を得るためには、当該試験の規格や解説書をもとに定められた試験条件の遵守、試験機器の整備、試験技量の習得が重要である。

試験結果の確認には、当協会で販売しているセメント強さ試験用標準砂をはじめ、装置の校正用標準物質、試験の技能確認用標準物質、蛍光X線の検量線作成に用いる標準物質、検量線の検定に用いる認証標準物質をご参考にして頂きたい。

共通試料による共同試験への参加は、自己の試験操作や試験結果等を客観的に比較・考察できる貴重な機会であり、本試験が各試験所の試験技術向上の一助となれば幸いである。

今年も10月に「2023-OCセメント共同試験」の実施を予定している。参加募集についての詳細は右ページ、またはセメント協会ホームページをご覧ください。

お知らせ

「2023-OCセメント共同試験」 参加募集

セメント協会は、セメント試験技術の維持・向上のため、1948年より「共通試料によるセメント共同試験」を実施しております。昨年は国内外のセメント・コンクリート関係95ヶ所の試験所・研究所よりご参加をいただきました。

今年も10月に、日本産業規格(JIS)、セメント協会標準試験方法(JCAS)、米国試験(ASTM)による共同試験を実施いたしますので、ふるってご参加ください。詳細はセメント協会ホームページをご覧ください。

・名 称 2023-OCセメント共同試験

・参加申込み 下記の[OCセメント共同試験]の参加申込より「申込み」をクリックし、必要事項をご入力ください。入力が完了しましたらご登録頂いたメールアドレスに入力情報が送信されますので内容をご確認ください。

セメント協会ホームページ

<https://www.jcassoc.or.jp>

[トップページ]>[イベント・募集]>[OCセメント共同試験]

・参 加 料 金 一般 17,000円(消費税含む)
※セメント協会会員会社は11,000円(消費税含む)
※国外の参加料金は別途送料

・問 合 せ 先 一般社団法人 セメント協会
研究所 技術情報グループ OCセメント共同試験 担当
〒114-0003 東京都北区豊島4丁目17番33号
TEL 03-3914-2692 E-mail jca_event@jcassoc.or.jp

・試 験 日 程 申込み締切日 2023年 6月30日(金)
参加料金振込期限 2023年 8月25日(金)
試験開始予定日 2023年10月 2日(月)
試験結果の報告期限 2023年12月 1日(金)
報告書送付 2024年 3月下旬

熱力学的相平衡計算を用いた セメントマトリックス組成の推定

Estimation of phase composition of cement matrix using
thermodynamic phase equilibrium calculations

宮本 慎太郎

1. はじめに

セメントと水を混ぜ合わせるとクリンカー鉱物（エーライト、ビーライト、アルミネート相、フェライト相）が水に溶解して新たな水和物が析出し、セメントマトリックスが形成される。セメントマトリックスは一つの水和物で形成されているわけではなく、複数の水和物によって形成されている。ここで、水和物は固有の平衡定数を有している。平衡定数は対象の水和物が飽和状態であるときの水和物を構成するイオンの直積集合で表されるものである。すなわち、例えば portlandite に着目した場合、実際の系における液相中のイオン活量積 (ion activity product : IAP)、この場合は式 (1) の値が平衡定数の値に達すると portlandite が析出することになる（ただし、実際には安定した核が生成されるためにはある程度の過飽和状態になる必要がある）。

$$\text{IAP}(\text{Ca}(\text{OH})_2) = \gamma_{\text{Ca}^{2+}} \gamma_{\text{OH}^-}^2 [\text{Ca}^{2+}] [\text{OH}^-]^2 \dots\dots (1)$$

ここで、 $\gamma_{\text{Ca}^{2+}}$: Ca^{2+} の活量係数、 γ_{OH^-} : OH^- の活量係数、 $[\text{Ca}^{2+}]$: Ca^{2+} のモル濃度 (mol/L)、 $[\text{OH}^-]$: Ca^{2+} のモル濃度 (mol/L) である。

次に、熱力学的相平衡計算について簡単に説明する。

熱力学的相平衡計算は名前の通り、熱力学が基盤となっている。熱力学は系の状態に着目した学問である。詳細には、熱力学的相平衡計算は、着目した系の最初の状態が把握できており、系内で析出する水和物の熱力学的平衡定数がわかっているれば、その系の最終的な状態を計算することができる。すなわち、セメントの化学組成あるいは相組成がわかっているればセメントマトリックスの相組成を計算することが可能である。

セメント・コンクリート分野では Lothenbach et al. らによって Cemdata18¹⁾ と呼ばれるデータベースが公開されており、一般的にセメントマトリックスを構成するセメント水和物の熱力学的平衡定数が実装されている。したがって、セメントの水和や系の内外における種々のイオンの授受によって乱された系内の状態変化、すなわち、硬化したセメントマトリックスの経時変化も計算することができる。さらには、Phreeqc²⁾ や GEMS-PSI³⁾ などの熱力学的相平衡計算を実行できるフリーソフトも公開されているため、煩雑なプログラムを用いることなく熱力学的相平衡計算を実行することができる。

本稿では、セメント・コンクリート分野における熱力学的相平衡計算の適用例を紹介するとともに当該計算を実行する際に注意する点などを紹介する。

2. セメント・コンクリート分野で熱力学的相平衡計算を適用するための準備

2-1. 一般的な結晶の定義

本稿では Phreeqc を使用した場合のセメント・コンクリート分野での熱力学的相平衡計算の適用方法について紹介する。なお、Phreeqc は熱力学的平衡定数により系の状態変化を計算するようにプログラムされており、GEMS-PSI は Gibbs の標準生成自由エネルギーにより系の状態変化を計算するようにプログラムされている。ただし、熱力学的平衡定数は Gibbs の標準生成自由エネルギーから算出されるために「熱力学的」という言葉が付記されている。すなわち、どちらのプログラムを使用した場合でも得られる系の状態に差は生じることはない。

ここで、セメントマトリックスを構成する一般的な結晶とは portlandite や ettringite、monosulfate が挙げられる。セメントマトリックスを構成する物質としては一つの結晶で形成される固相と複数の結晶を端成分に持つ固溶体、あるいは結晶ではない非晶質が存在しており、熱力学的相平衡計算を実行するに当たって、これらは分けて考える必要がある。

固相について portlandite を例に挙げて相の定義を示すこととする。Phreeqc では、固相の定義は下記のように記述する。

```
Line 1 Equilibrium_Phases 1
Line 2 Portlandite 0.0 0.0
```

Line 1 の Equilibrium_Phases は固相を定義するためのキーワードであり、後ろの数字は対象となる系である。すなわち、複数の系を定義したい場合は 1 ではなく 1-20 などと記述すると、連続して連なった 20 の系を定義することができる。この方法は物質移動と連成させる場合に非常に便利である。

Line 2 は定義した固相の名称を記述している。なお、結晶の名称の後ろに付記されている二つの数字は、一つ目の数字が臨界過飽和度で、二つ目の数字は相の初期値である。エーライトの水和などを計算したい場合、初期のエーライトの量あるいは化学組成を入

力し、portlandite の初期値をゼロとすることでエーライトの水和が計算できる。なお、臨界過飽和度をゼロとした場合、飽和状態になると速やかに対象の相が析出する設定となる。

次に固溶体の定義について説明する。ここでは、既報で固溶体を形成すると説明されている monosulfate を例に挙げて固溶体の記述を説明することとする⁴⁾。Monosulfate 固溶体 (monosulfate - hydroxy AFm / Ms-ss と記載) の定義は下記のように記述する。

```
Line 1 Solid_Solutions 1
Line 2 Ms-ss
Line 3 -comp monosulfate 0.0
Line 4 -comp hydroxy AFm 0.0
```

Line 1 は前述の結晶の定義と同様で固溶体を定義するためのキーワードであり、後ろの数字で対象とする系を指定する。Line 2 は定義する固溶体の名称であり自由に付けることができる。

Line 3 と Line 4 では固溶体を構成する端成分 (end member) を定義している。端成分の後ろに付記されている数字は端成分の初期値である。

以上のように固相や固溶体を定義して熱力学的相平衡計算を実行する。なお、固相や固溶体の名称は使用するデータベースに登録されている名称で定義する必要があるため、この点は注意が必要である。

2-2. カルシウムシリケート水和物の定義

結晶や固溶体の他にカルシウムシリケート水和物 (C-S-H) のような非晶質の定義も重要である。ここで、C-S-H は結晶の様な調和溶解を起こさず、系内の状態変化によって C-S-H に結合している Ca^{2+} などが選択的に着脱するような非調和溶解を起こす。つまりは、前述した Equilibrium_Phases で定義することは困難である。この問題を解決するために用いられる方法として固溶体として C-S-H を定義する方法や表面錯体反応を組み込んで定義する方法がある。



みやもと しんたろう / MIYAMOTO Shintaro
東北大学
大学院工学研究科
准教授 博士(工学)

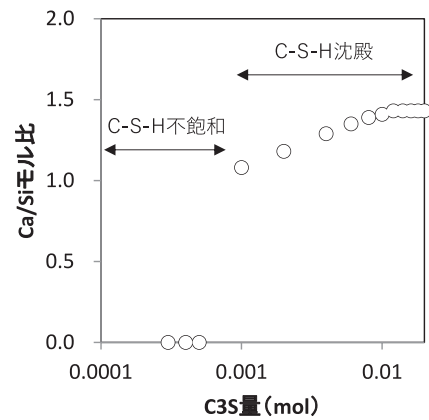


図1 エーライトの溶解量とC-S-HのCa/Siモル比の関係

まず、固溶体モデルについては、C-S-Hがいくつかの端成分からなる固溶体としてモデル化するものである。例えばKulik⁵⁾はCa/Siモル比の異なる三つの端成分でC-S-Hを構成し、三つの端成分の熱力学的平衡定数の違いによって系の状態変化によるCa/Siモル比の変化を表現している。

次に、表面錯体モデルについて説明する。当該モデルはC-S-Hを固溶体とはせずに表面ポテンシャルからシラノール基に吸着するイオンを選択するようにモデル化する。例えば、Nonat⁶⁾はSi二量体を基本の構造として、この基本構造が有するシラノール基に対してSiやH⁺、Ca²⁺などが吸着するモデルを構築し、これらの吸着能力の違いからCa/Siモル比の変化を表現している。

上記で紹介した両方のモデルはともに実験により得られた系の状態とCa/Siモル比の関係に基づいて構築されたものである。したがって、実験で確かめられている系の状態の範囲内であれば、どちらのモデルを使用した場合でも同様の結果を得ることができると考えられる。

3. セメント・コンクリート分野における熱力学的相平衡計算の適用例

3-1. クリンカ鉱物の水和反応

実際に熱力学的相平衡計算を利用してクリンカの水和反応を計算した例を紹介する。本計算ではKulik⁵⁾のCSH3Tモデルを採用して、エーライトが水に少しずつ溶解していく現象を計算した。図1,2はそれぞれエー

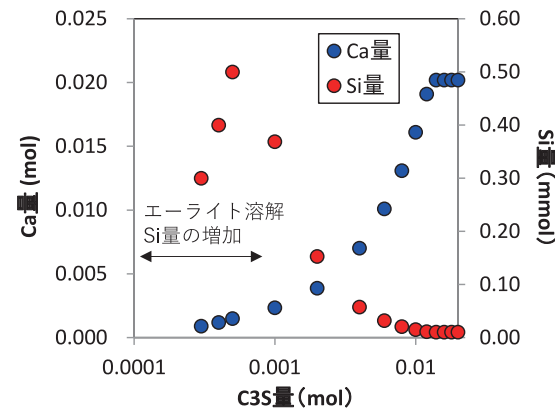


図2 エーライトの溶解量と系内のCa量とSi量の関係

ライトが水に溶解していったときのC-S-Hの析出挙動と系内のCa量とSi量の関係を示している。両者の図を観察するとエーライトが水に溶解することで系内のCa量とSi量が増加していき、これらの量がC-S-Hのイオン活量積に達するとC-S-Hが析出し、Ca/Siモル比の関係からSi量は低下しCa量は増加するという現象が再現できている。

このように熱力学的相平衡計算を利用することで系内の状態変化を可視化することができる。この点は熱力学的相平衡計算の持つ大きなメリットであり、研究や材料開発のエビデンスの一つとして用いることも十分に可能であると考えられる。実際に著者は化学分析では把握しきれない情報を熱力学的相平衡計算により補完して、劣化メカニズムを整理した経験がある。

3-2. セメントの水和反応

次に、セメントの水和反応を熱力学的相平衡計算により計算した例を示す。この計算ではReactionというキーワードを使用してクリンカ鉱物の化学組成を初期値として入力する方法とEquilibrium_Phasesキーワードを使用してクリンカ鉱物自体の量を入力する方法がある。これらのプログラムなどはセメント協会から発刊されている「コンクリート中のケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)とは何か ～キャラクターゼーションと性能発現機構～」⁷⁾で紹介しているため、詳細な入力値等を詳しく知りたい方はそちらを参照して頂きたい。

図3に熱力学的相平衡計算を用いてセメントの水和

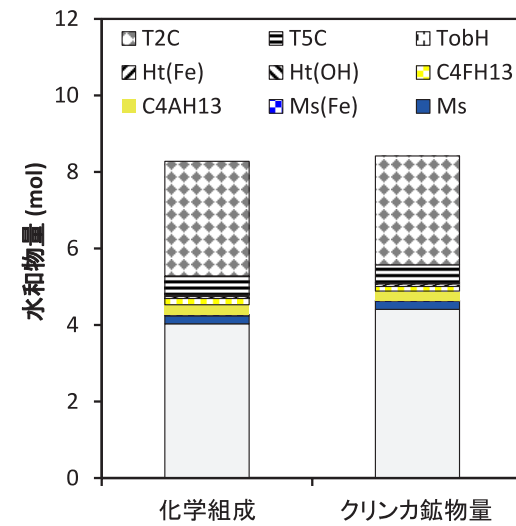


図3 セメントの水和反応の計算例⁷⁾

反応を計算した例を示す。なお、化学組成と記載している結果はクリンカー鉱物の化学組成の量を初期値として系の平衡状態を計算した場合であり、クリンカ鉱物量と記載している結果は各クリンカ鉱物そのものの量を初期値として系の平衡状態を計算した場合である。両者の結果から、どちらの計算方法を採用した場合でも最終的な平衡状態はほぼ同一であることが確認できる。このように、熱力学的相平衡計算では初期値の入力の仕方が異なっても系に存在する元素量が同一で定義する析出相が同じであれば最終的な平衡状態は同じ結果となる。

3-3. セメントマトリックスの経時変化

最後に、熱力学的相平衡計算に物質移行計算を連成したモデルについて紹介する。このモデルでは系の内外において様々なイオンの授受が行われて系が乱された際の状態変化を計算することができる。このような現象は例えば塩化物イオンの浸透に伴うkuzel saltやfriedel's saltの析出、硫酸イオンの浸透に伴うettringiteやgypsumの析出などである。

ここで、本稿では一例としてセメントマトリックスにNa₂SO₄溶液が浸透したときの相組成の変化を計算した。初期条件については一つの系の体積が1.6 mL (40 × 40 × 1 mm)となるようにセメントの化学組成を設定し、この系が60連に繋がるモデルを設定した。加え

て、熱力学的相平衡計算を行う際の析出相の定義については固相としてportlandite (CH)とgypsum (Gyp), ettringite (Ett), brucite (Bru), 3CaO・Fe₂O₃・Ca(OH)₂・12H₂O (C4FH13)を定義し、固溶体としてmonosulfate (Ms)とhydroxy-AFm (C4AH13)を端成分とするMs-ssを、さらにはC-S-HはKulikが構築したTobHとT5C、T2Cを端成分とするCSH3Tモデルと呼ばれる固溶体モデルで定義した。

実効拡散係数については、既報⁸⁾を参考にして式(2)の ε^n が0.0089になるように設定した。加えて、各イオンの自己拡散係数はPhreeqcのデータベースの値を用い、拡散方程式を解く際の境界条件は、 $x = 0$ の点ではディリクレ条件を、 $x = 60$ mmの点(つまりモデルの最深部)ではノイマン条件を設定した。

$$D_{e,i} = D_{w,i}' \times \varepsilon^n \cdots \cdots \cdots (2)$$

また、作用させるNa₂SO₄溶液は低濃度を想定した0.01mol/Lと高濃度を想定した0.5mol/Lの2ケースであり、溶液が作用する期間は91日として計算した。なお、物質移行計算については、Transportキーワードを使用することで熱力学的相平衡計算に連成することができる。

図4,5より、作用するNa₂SO₄濃度が異なるだけで相組成変化の進行程度が大きく異なることがわかる。例えば、低濃度のNa₂SO₄溶液が作用した場合には、表層にettringiteが少量析出するに留まっている。一方で、高濃度のNa₂SO₄溶液が作用した場合、表層ではettringiteの析出に留まらずgypsumが析出していることがわかる。さらには、より深部までettringiteが析出していることがわかる。このように、熱力学的相平衡計算に物質移行計算を連成することで系外からあるイオンが浸透してきたときのセメントマトリックスの相組成変化を可視化することが可能である。このような技術はコンクリート構造物の耐久性評価においても重要な役割を担うことができると考えられる。

さらには、低濃度・高濃度の場合の相組成の変化の違いや深さ方向の相組成の変化の違いを参照すること

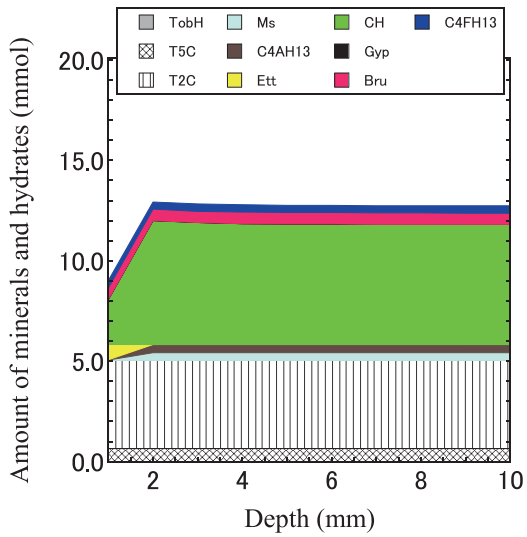


図4 Na₂SO₄溶液がセメントマトリックスに作用したときの深さ方向の相組成変化(低濃度)

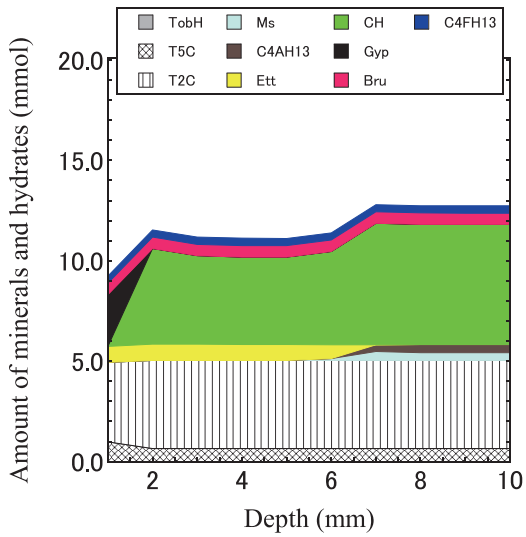


図5 Na₂SO₄溶液がセメントマトリックスに作用したときの深さ方向の相組成変化(高濃度)

表 1 熱力学的相平衡計算を用いたセメントの水和反応の計算例

No.	pH	Ms	C4AH13	Ett	CH	Gyp	Bru	TobH	T5C	T2C	C4FH13
		(mmol)									
1	13.5	0.38	0.42	0.00	5.97	0.00	0.57	0.00	0.65	4.39	0.36
2	14.9	0.27	0.53	0.00	0.00	0.08	0.57	0.00	0.00	5.20	0.36

で、硫酸イオンがセメントマトリックスに浸透した場合には、まずはAFm相が減少してettringiteが析出すること、そしてこの反応が進行してAFm相が消失すると、系内で余剰した硫酸イオンの濃度が上昇して gypsum が析出することなど、詳細な反応経路についても理解を進めることができる。

4. セメント・コンクリート分野で熱力学的相平衡計算を使用するときの注意点

4-1. 析出相の定義の問題

熱力学的相平衡計算を実行する際に、析出する相の定義は重要である。析出する相に誤りがあった場合、適切な平衡状態には至らず、定義された相で平衡状態を計算してしまうためである。この点は、粉末X線回折(XRD)／Rietveld法に類似している。XRD／Rietveld法についても分析したサンプルに含まれる全ての相を対象としない場合、対象とした相のみでフィッティングしてしまうためである。さらには、存在しない相

までも対象にしてしまった場合、実際の相組成と大きくかけ離れた結果が得られてしまう危険すらある。

ただし、XRD／Rietveld法の場合であれば、セメント化学の知識があり、現実的な相を対象としていることが前提であるが、フィッティングが上手く行われているか解析したピークと実際のピークを比較することができるため、フィッティングできていないピークが存在していれば結果が誤っている可能性が高いことが把握できる。

それでは、熱力学的相平衡計算の場合はどうような点を観察することで結果の誤りに気付くことができるのであろうか。この点について一例を挙げて解説していく。

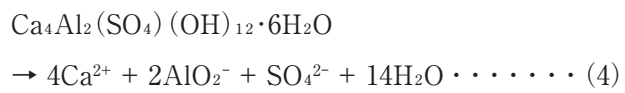
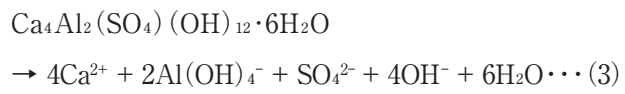
表1に熱力学的相平衡計算を用いてセメントの水和反応を計算した例を示す。No.1が3-3.と同じ析出相の定義で計算したセメントの水和反応の計算結果であり、No.2が3-3.の定義からあえてportlanditeとettringiteを除外して計算したものである。どちらの定義でも解は得られるが、No.2ではNo.1で析出していたportlanditeが析出していない。加えて、portlanditeが析出しない影響を受けて、No.2では系全体のバラ

スを取るためにNo.1では析出していない gypsum が析出している。この両者ではNo.1の方がより実際の相組成に近いと言える。そしてNo.2の計算のように析出相の定義を誤った場合にはpHなどを観察すると分かりやすい。No.1では通常のコンクリートの細孔溶液のpHと同等になっているが、No.2では通常の細孔溶液のpHと比較して極めて高くなっている。

本計算例は非常にわかりやすい形になっているが、No.2の計算のように析出相の定義を誤った場合には強引に平衡状態を計算するため、系内のpHが実際とは大きくかけ離れていたり、あるいは現実では析出する相が析出していなかったりといくつかのしわ寄せが確認できる。ただし、適切なセメント化学の知識が無い場合には析出相や細孔溶液のpHの異常に気付くことはできない。このことから熱力学的相平衡計算をセメント・コンクリート分野の技術に導入するためには、計算知識と同等以上にセメント化学を理解しておく必要があると言える。

4-2. データベースが抱える問題

データベースを使用する際にも注意が必要な点がある。熱力学的平衡定数はGibbsの標準生成自由エネルギーから算出するものである。詳細には反応物と反応物から溶解したイオン群のGibbsの標準生成自由エネルギーの差に基づいて算出されるものである。つまり、想定している溶解反応が異なれば熱力学的平衡定数も異なる値になるのである。つまり、monosulfateを例に挙げると、式(3)⁹⁾と式(4)¹⁾ではmonosulfateの溶解に関する熱力学的平衡定数は異なるということである。



加えて、Phreeqcのデータベースではアルカリ雰囲気

におけるAlのイオン態は $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ が使用されているがCemdata18では AlO_2^- が使用されている。このようにデータベースによって使用されるイオン態が異なっていることがある。これらを混同して使用してしまうとエラーが生じてしまうことがあるので、この点にも注意する必要がある。

5. まとめ

本稿では熱力学的相平衡計算について概説した。熱力学的相平衡計算はセメント・コンクリート分野との相性が良く、身に付ければ非常に便利なツールとして活躍してくれる。しかしながら、計算に関する知識のみならずセメント化学に関する知識も重要になってくるため、両方を学ぶ必要がある。さらには、熱力学的平衡定数の性質も知っていないと大きな過ちを犯す可能性があるため注意が必要である。

【参考文献】

- 1) B. Lothenbach et. al. / Cemdata18 / A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, Vol.115, pp.472~506, 2019.
- 2) D. L. Parkhurst and C. A. J. Appelo, User's Guide to Phreeqc (Version 2) -A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 99~4259, pp. 1-312, 1999.
- 3) D. A. Kulik et. al. / GEMS / Gibbs Energy Minimization Software for geochemical modeling, <https://gems.web.psi.ch/contribs/GEMS-talk-Sep-2015.pdf> (2022年11月10日閲覧).
- 4) T. Matschei, B. Lothenbach, F. P. Glasser / The AFm phase in Portland cement, Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.118~130, 2007.
- 5) D. A. Kulik / Improving the structural consistency of C-S-H solid solution thermodynamic models, Cement and Concrete Research, Vol.41, pp.477~495, 2011.
- 6) A. Nonat / The structure and stoichiometry of C-S-H, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.1521~1528, 2004.
- 7) (一社)セメント協会／コンクリート中のケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)とは何か～キャラクターゼーションと性能発現機構～ pp. 382~386, 2018.
- 8) Y. Hosokawa, K. Yamada, K. Haga and S. Ogawa / Numerical modelling of the alkali penetration into cementitious materials using the coupled thermodynamic phase equilibrium-mass transfer system, Proceedings of 15th International Congress on the Chemistry of Cement, 2019.
- 9) B. Lothenbach / Thermodynamic equilibrium calculations in cementitious systems, Materials and Structures, Vol.43, pp.1413~1433, 2010.

環境負荷低減性が期待される ジオポリマーの可能性

Potential of geopolymers with reduced environmental impact

合田 寛基

1. はじめに

現代版セメントコンクリートが社会生活を支えるようになって200年が経とうとしている。セメントコンクリートの特長は、打ち込み時における高い自由度、常温硬化性、鋼材との相性等、多岐多種にわたる。また、化学混和剤の開発により、汎用性に加えて特殊性も兼ね備えるようになった。もちろん、高炉スラグ微粉末(BFS)、フライアッシュ(FA)をはじめとする複数の産業副産物を活用可能な点も資源の有効活用に大いに貢献しており、優れた建材であることは周知の事実である。

一方で、これからは低炭素社会に向けた取り組みをより一層進めていく必要がある。これまでセメントコンクリートについては、製造時に多量のCO₂を排出するとの認識があったものの、各機関の努力の成果により、CO₂排出量の削減に寄与する種々の技術が報告されるようになった。

しかしながら、セメントコンクリートもすべてにおいて万能ではない。また、石灰岩等の貴重な天然資源を可能な限り多く後世に残していくことも考慮する必要がある。今後は、セメントコンクリート一極化という姿勢ではなく、セメントコンクリートと異なる特長を有し、ともに社会を支

えられる新たな建材の開発と実用化が期待される場所である。

その一例として、ジオポリマーが挙げられる。ジオポリマーは、シリカ(Si)とアルミニウム(Al)を主たるバインダーとする構造形式を有し、カルシウム系のセメントコンクリートと異なることから、材料特性の面でも相違点が複数見られる。すでに国内において、10年以上にわたり研究が進められており、一宮らによって複数の学術委員会も起ち上げられ、積極的に実用化を見据えた研究が進められてきた。結実した成果として、複数の実用事例が報告されているが、設計手法の確立までには、さらに取り組むべき課題を有するのが現状である。課題の解決に向けて、これまで以上に多くの技術者がジオポリマーに対しての関心と理解を示し取り組んでいくことが重要と考えられる。

本稿では、広く知られつつあるジオポリマーについて、主に九州工業大学で実施した、モルタルやコンクリートを対象とした試験を通じて、活性フィラーであるFAやBFSに着目しつつ、フレッシュ性状、圧縮強度特性、耐久性に関する特徴について紹介する。

2. フレッシュ性状

ジオポリマーモルタルを対象としたフロー試験を実施した。

表1に実験に用いた使用材料を示す。ケイ酸アルカリ

表1 使用材料

記号	材料	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
AS	アルカリ溶液	1.27	—
FA	フライアッシュII種品	2.32	3,580
BFS	高炉スラグ微粉末	2.91	2,010
			4,230
			6,210
STS	標準砂	2.64	—

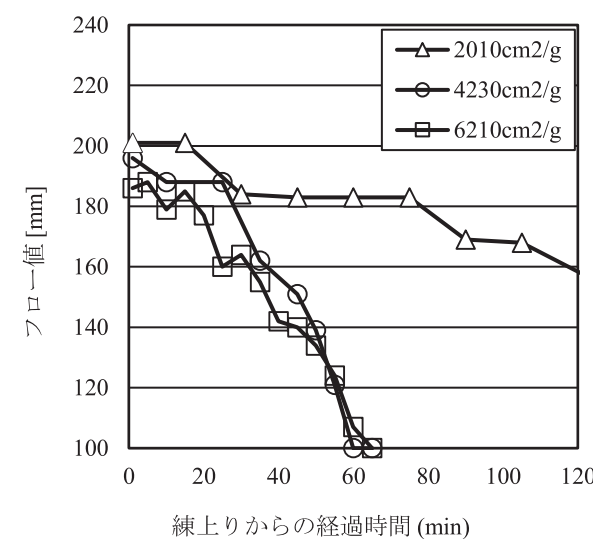


図1 プレーンごとのモルタルフロー経時変化

溶液は、水ガラスに苛性ソーダを混ぜ、密度1.27g/cm³に調整したものを使用した。活性フィラーの化学成分を表2に示す。活性フィラーに関して、フライアッシュは日本全国で入手が容易なフライアッシュII種品を採用した。高炉スラグ微粉末は、プレーン値がジオポリマーの性状に与える影響を検討するために、2,000クラス(2,010cm²/g)、4,000クラス(4,230 cm²/g)および6,000クラス(6,210 cm²/g)の3種類を用いた。フライアッシュを高炉スラグ微粉末で置換する割合は、容積比で0、10、20、30、50%とした。

図1は、置換率20%における、高炉スラグ微粉末のプレーンごとのフロー値の経時変化を示す。モルタルの配合は表3の通り。練上り直後のフロー値は、プレーン値2,010 cm²/g、プレーン値4,230cm²/g、プレーン値6,210 cm²/gの順に小さくなっており、高炉スラグ微粉末のプレーン値が、練上り直後のフロー値に影響を与えることが分かる。フロー値の経時変化に関しては、プレー

表2 活性フィラーの化学成分

種類	化学成分 (%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
FA	45.7	20.2	3.8	3.6
BFS	33.2	13.6	0.9	44.9

表3 モルタルの配合例

BFS/P (Vol.%)	単位量 (kg/m ³)			
	AS	FA	BFS	STS
0	318.8	598.6	0	1296.2
10	318.8	538.7	75.3	1296.2
20	318.8	478.8	150.7	1296.2
30	318.8	419.0	226.0	1296.2
50	318.8	299.3	376.7	1296.2

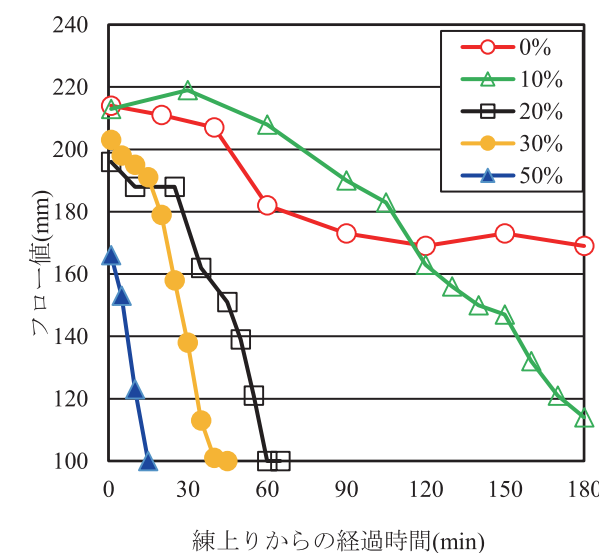


図2 全粉体に対する高炉スラグ微粉末置換率ごとのモルタルフロー経時変化

ン値2,010cm²/gの高炉スラグ微細粉末は、練混ぜ約30分後に10%程度フロー値が小さくなっているが、その後80分までそのフロー値を保持し、80分以降で再び徐々にフロー値が小さくなる傾向がみられる。これに対して、プレーン値4,230cm²/gおよび6,210cm²/gの高炉スラグ微粉末のフロー値は、20~30分までは若干フロー値が小さくなっているものの急激な低下は見られないが、約30分を経過したあたりから、いずれも急激にフロー値が低下することが分かる。

図2は、高炉スラグ微粉末置換率ごとのフロー値の経



ごうだ ひろき / GODA Hiroki
九州工業大学大学院工学研究院
准教授 博士(工学)

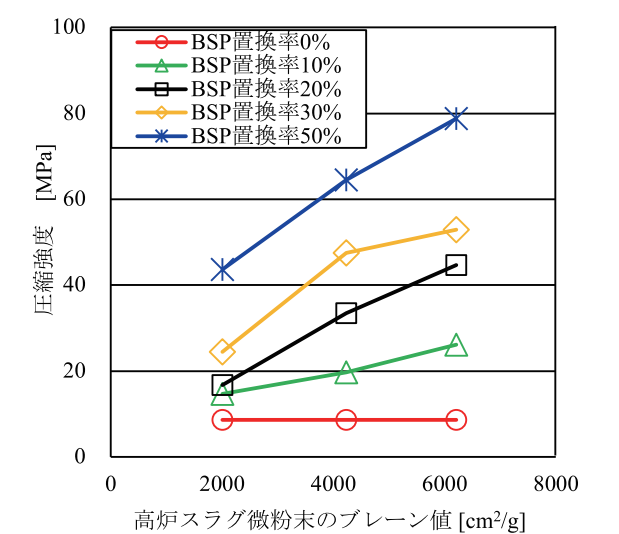


図3 圧縮強度試験結果

時変化を示す。なお、同図は、ブレン値4,230cm²/gの高炉スラグ微粉末を用いた試験結果である。

練上り直後では、置換率が大きくなるにしたがい、フロー値は小さくなる傾向が見られる。特に、置換率50%では、置換率0%に比べ20%程度フロー値が低下しており、高炉スラグ微粉末の混和は、練上り直後のフロー値に大きく影響を与えることが分かる。

フロー値の経時変化では、置換率0%と10%を比べた場合、練上りから120分程度までは、置換率10%の方が置換率0%よりフロー値が大きいが、120分を過ぎると逆に置換率0%の方が、置換率10%より大きな値を示している。この逆転以降のそれぞれのフロー値の経時変化をみると、置換率0%ではフロー値の減少が少ないのに対して、置換率10%では、急激なフロー値の減少傾向が確認できる。一方、置換率20%、30%および50%では、練上り直後から急激にフロー値が減少している。

以上より、高炉スラグ微粉末が混和されたジオポリマーは、その混和率により始まる時間は異なるが、急激にフロー値が小さくなる傾向がある。

3. 圧縮強度特性

3-1. 高炉スラグ微粉末が圧縮強度に及ぼす影響

高炉スラグ微粉末が圧縮強度に及ぼす影響とし

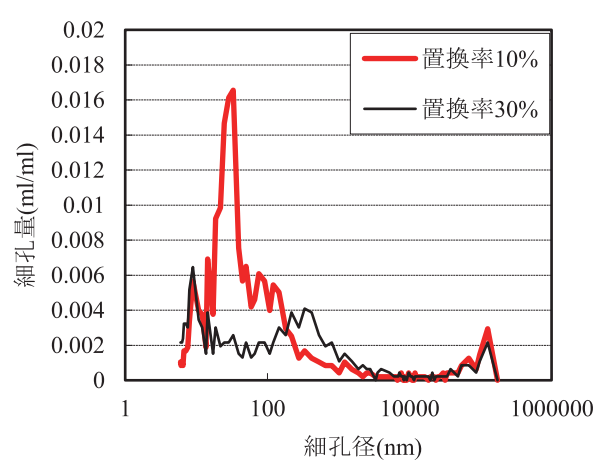


図4 細孔径と細孔量の関係

て、ジオポリマーモルタルの圧縮試験を実施した。使用材料および配合は、前述のモルタルフロー試験と同一とした。供試体形状はφ50mm×H100mmとし、練混ぜ後、3時間かけて温度を60℃まで上昇させ、その状態を6時間保持し、再び3時間かけて20℃まで温度を下げ、脱型後、試験材齢まで20℃RH60%で気中養生を行った。圧縮強度試験は、JISR5201に準拠し、試験材齢を1日とした。

図3には、圧縮強度と高炉スラグ微粉末のブレン値の関係を示している。これまでの研究報告と同様に、いずれのブレン値においても、高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなると圧縮強度が大きくなる。さらに、今回の試験の結果、高炉スラグ微粉末の置換率と同様に、そのブレン値も圧縮強度に影響を与え、高炉スラグ微粉末のブレン値が大きくなると、圧縮強度が増加することも分かる。高炉スラグ微粉末の置換率により若干異なるが、ブレン値2,010cm²/gの圧縮強度に比べブレン値6,210 cm²/gでは、圧縮強度が2倍程度増加している。これは、高炉スラグ微粉末のブレン値が大きくなると、アルカリ溶液中に縮合重合反応に必要な成分の溶出が大きくなったためと考えられる。

図4は、細孔量と細孔径の関係を示す。高炉スラグ微粉末の混和率が細孔量に及ぼす影響について、混和率が大きくなると、100nm程度より小さい細孔径で顕著に相違がみられることが分かる。すなわち、今回の実験条件では、置換率が大きくなるとジオポリマー

表4 使用材料

使用材料	記号	密度(g/cm ³)	備考
ケイ酸アルカリ溶液(標準)	AS	1.37	A/W=0.11
フライアッシュ	FA	2.26	FAII 種
高炉スラグ微粉末	BFS	2.91	石こう無
細骨材	S	2.56	海砂
水酸化ナトリウム	SO	2.13	顆粒

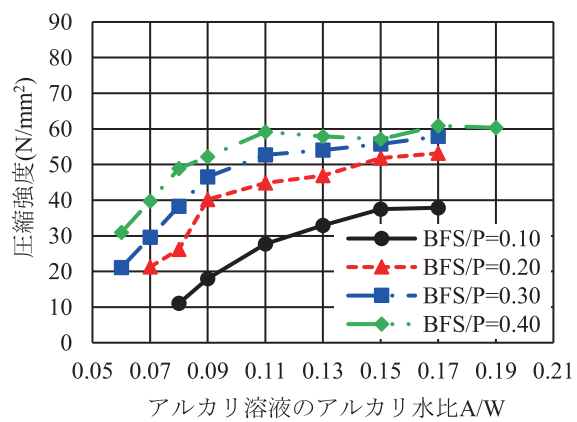


図5 アルカリ水比と圧縮強度の関係(60℃)

の組織が緻密化される傾向が伺える。またこの結果から、先ほどの圧縮強度試験で、置換率が大きくなると圧縮強度が増加した原因の一つとして、置換率が大きくなると、ジオポリマーの細孔量が少なくなることが影響している可能性が挙げられる。

3-2. アルカリ水比が圧縮強度に及ぼす影響

ジオポリマーモルタルの圧縮強度は、活性フィラーである高炉スラグ微粉末の混和率以外にアルカリ溶液の影響も受けると考えられることから、アルカリ水比と養生温度に着目して強度試験を実施した。

表4に使用材料、表5に配合例を示す。ケイ酸アルカリ溶液は汎用品(アルカリ水比(A/W=0.11))に水酸化ナトリウム(SO)または精製水(W)を添加して調整した。A/Wは0.06,0.07,0.08,0.09,0.11,0.13,0.15,0.17,0.19の9水準、全粉体(P)に対するBFSの混和率(BFS/P)は0.10,0.20,0.30,0.40の4水準とした。

養生方法は、プログラム式恒温機を用いた加温養生(最高温度60℃or 70℃、保持時間12時間)とした。圧縮強度試験はJISR5201に準拠(材齢1日)した。

表5 配合例

記号	AS	FA	BFS	S	W	SO
	kg/m ³					
0.07-10	222.7	502	56	1228	95.3	0
0.11-20	329.0	462	115	1270	0	0
0.15-30	313.9	408	175	1284	0	19.1
0.19-40	298.7	354	235	1298	0	37.3

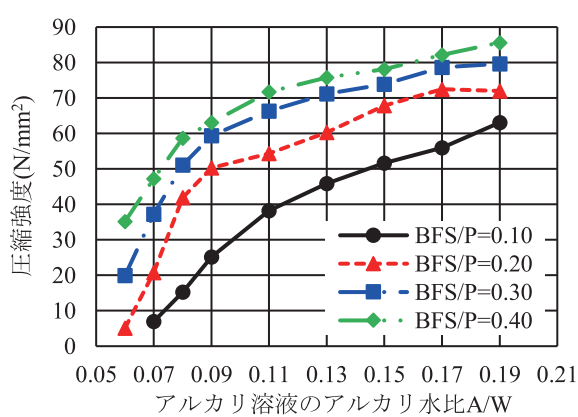


図6 アルカリ水比と圧縮強度の関係(70℃)

図5,6にA/Wと圧縮強度の関係を示す。60℃12時間で加温養生をしたGPモルタルは、A/Wの増加に伴い圧縮強度も増加しているが、BFS/P > 0.20、A/W > 0.11では、収束傾向が見られる。圧縮強度の最大値は、BFS/P=0.40、A/W=0.19では、約60N/mm²を示した。

70℃12時間で加温養生をしたGPモルタルについても、A/Wの増加に伴い、圧縮強度も増加している。BFS/P=0.10ではA/W=0.19まで強度がおおむね比例増加しており、最大で約62N/mm²となった。70℃12時間で加温養生をしたGPモルタルにおける圧縮強度の最大値は、BFS/P=0.40、A/W=0.19のときに約85N/mm²を示した。

上記の結果より、A/Wが小さいとき、BFS由来のケイ酸カルシウム水和物(C-A-S-H)の生成が支配的となるため、BFS/Pが強度発現に顕著に寄与すると推察できる。

一方で、A/Wが大きいときは、BFS/Pが小さくてもBFSとFAで生成される硬化体組織全体が十分な強度を発現する。FAの縮合重合反応は高A/Wの溶

記号	材料	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
AS	ケイ酸アルカリ溶液	1.27	-
FA	フライアッシュⅡ種	2.28	3534
BFS	高炉スラグ微粉末	2.92	4090
SP	砕石粉	2.76	-
S	海砂	2.56	-

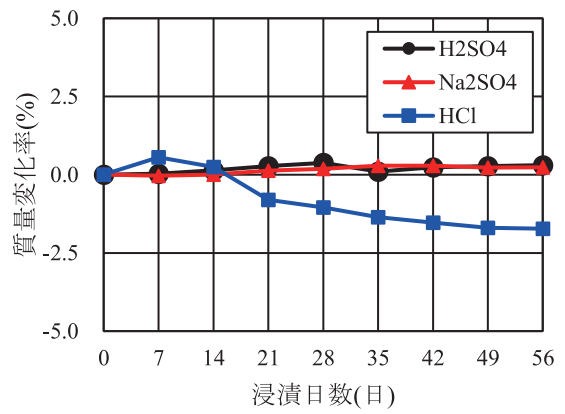


図7 質量変化率の経時変化

液により、FA中のSiやAlを溶出させ、ケイ酸ナトリウム水和物(N-A-S-H)を生成すること、吸熱反応に必要な熱を供給することが重要である。つまり、BFS/P=0.10でも、高A/Wの溶液と70℃の加温養生により、N-A-S-H、C-A-S-H双方の硬化体組織が高強度化すると考えられる。

4. ジオポリマーにおける耐久性面での特長

4-1. ジオポリマーの耐久性概説

ジオポリマーは前述の通り、CaではなくSi、Alを主たるバインダーとしていることから、Caが関連する劣化に対して高い耐久性を有することが知られている。以下に、耐酸、耐硫酸塩、アルカリシリカ反応(ASR)への抵抗性について紹介する。

4-2. ジオポリマーの耐酸性、耐硫酸塩抵抗性

本試験では、BFS置換率を変化させたジオポリマー

BFS 置換率	AS	FA	BFS	SP	S
%	kg/m ³				
0	244.2	341.9	0.0	146.5	1548.0
10	244.2	341.9	48.4	97.7	1550.5
20	244.2	341.9	97.7	48.4	1553.0
30	244.2	341.9	146.5	0.0	1555.4

モルタルを対象に、H₂SO₄、Na₂SO₄、HClによる浸漬試験を行い、pHの相違と硫酸イオンがGPの劣化に及ぼす影響について検討した。

表6,7に、使用材料と配合を示す。配合の選定にあたっては高炉スラグ微粉末の量の違いが及ぼす影響が明瞭となるように配慮し、砕石粉を使用して、アルカリ溶液、フライアッシュの容積を一定とした。

浸漬試験は20℃RH60%の環境で実施した。供試体は40×40×80mmの角柱とした。浸漬中は、4面ある40×80mmの断面のうち、2面にのみ浸漬溶液を作用させることとし、端部を含めた残りの4面を浸漬試験前にエポキシ樹脂により被覆した。

浸漬溶液は10%のH₂SO₄、Na₂SO₄、HClの3種類とした。pHはそれぞれ1.4、10、0.3である。浸漬直前に飽水状態にした。浸漬期間を8週とし、2週に一度浸漬溶液を入れ替えた。浸漬期間中、1週ごとに質量と高さを測定するとともに外観を観察した。質量を測定する際、表面の水分をふき取った状態で計測を行った。なお、セメントモルタルでは硫酸浸漬下にて60%質量が減少し、断面はおおむね20%程度欠損している。

また、浸漬試験終了後に表面の劣化程度を評価するため、引掻き試験を実施した。同試験は、質量120gのステンレス製の棒を用いて、浸漬前後の浸漬面を引掻いたときの、引掻き深さを測定した。本試験は人為的なものであり、客観性を有するものがなく、現段階では公に認められた定量的手法ではないが、EPMAの結果と比較した際に、劣化に関連する硫黄(S)元素等が侵入している深さと同程度であることを確認している。

図7に、BFS置換率30%の供試体をH₂SO₄、Na₂SO₄、HClに浸漬した場合の質量の経時変化を示

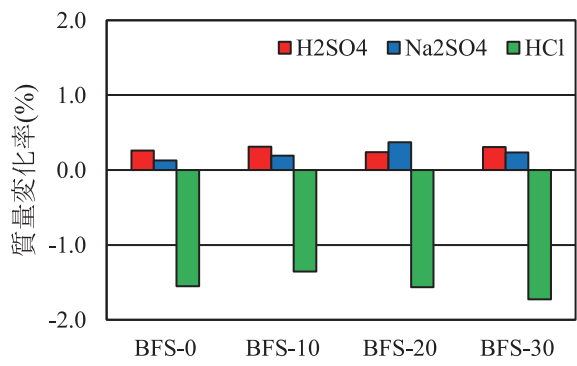


図8 BFS置換率と質量変化率の関係

Case	A/W	Si/A	AS/P	AS	BFS	FA	RS	NS	RG	NG	NaO	H ₂ O	*CaO
			%	kg/m ³									kg/m ³
1	0.08	1.14	90	346	348	99	363	513	237	358	0	56	140～
2	0.10	1.14	90	403	348	99	363	513	237	358	0	0	200
3	0.15	0.65	90	368	297	146	363	513	237	358	31	0	

*CaOは活性フィラー由来のCaO量

す。H₂SO₄、Na₂SO₄では、質量に変化が見られない。HClでは、質量浸漬前と比較して減少しており、変化率は8週で-1.7%となった。

図8に、BFS置換率と質量変化率の関係を示す。HClに浸漬させた供試体は質量が減少していることが分かるが、BFS置換率と質量変化との相関関係は見られない。HClに浸漬させた供試体は、質量、長さともに減少傾向を示しているが、いずれの変化率もセメントモルタルと比較して極めて小さく、最も大きい変化を示した長さ変化率は-2.5%となった。

4-3. ジオポリマーのASR抵抗性

セメントコンクリートにおけるASRのメカニズムでは、骨材中の反応性鉱物、アルカリ、水分に加え、間接的な要因としてCa²⁺の存在が重要とされる。ジオポリマーは、カルシウムがセメントコンクリートと比較して少ない、硬化体中の自由水のアルカリ量が少ない等の理由により、反応性骨材を含むコンクリートやモルタルの膨張量が少ないと考えられている。そこで本節では、ケイ酸アルカリ溶液中のアルカリ水比(A/W)、溶液粉体比(AS/P)およびCaO量をパラメーターとして、GPのASR抵抗性について評価した。

表8に配合表を示す。供試体は、75×75×250mmのコンクリート角柱とし、RILEMのAAR3試験方法に準じて促進膨張試験を実施した。

図9に各CaOの量における膨張率の経時変化を示す。CaO量=140、160kg/m³において、膨張はほとんど確認されず、また各A/Wの膨張率に差異は見られない。CaO量=180kg/m³では各A/Wにおいて0.05%程度の膨張が発生しており、膨張率はA/W=0.15>0.08>0.10の順になっている。各A/Wの膨張傾向として、A/W=0.08、0.10では、静置初期にはA/W=0.15よりも膨張率は小さかったものの、材齢経過とともに膨張率が大きくなる傾向が見られた。静置期間20週の段階で、膨張は収束しておらず、A/W=0.10の膨張率が最も大きくなっている。

一方で、A/W=0.15では、静置期間0～2週にかけて0.04%程度の膨張が発生し、その後は緩やかに膨張しており、A/Wの相違による膨張傾向の違いが確認された。CaO量=200kg/m³では、膨張はA/W=0.1>0.08>0.15の順になっており、CaO量=180kg/m³よりも早い段階で、A/W=0.08、0.1の膨張率が0.15よりも大きくなっている。膨張傾向として、A/W=0.08、0.1においては、CaO量=180kg/m³における膨張傾

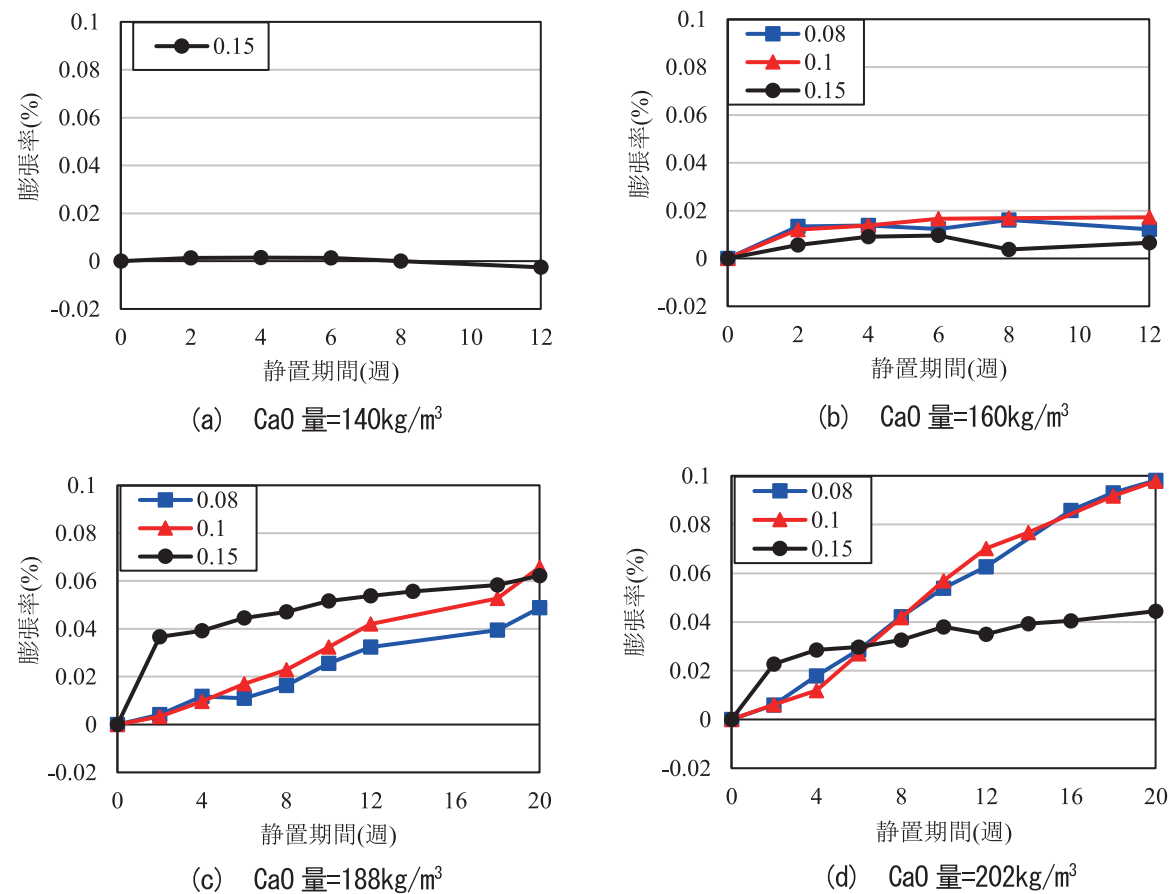


図9 膨張率の経時変化

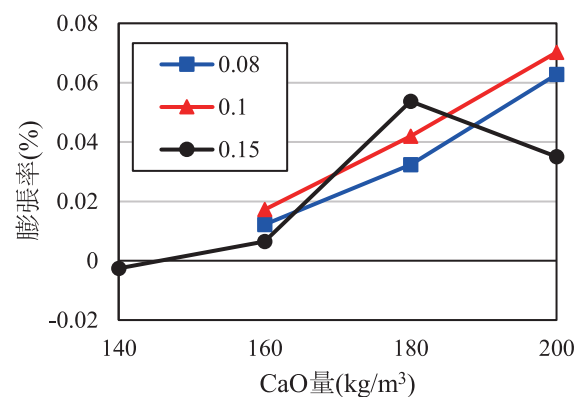


図10 静置期間12週時の各CaO量における膨張率

向と同様に、経時的に膨張が大きくなっており、静置期間20週において0.1%程度の膨張が発生している。また、A/W=0.15での膨張においても、静置期間0～2週にかけて0.02%程度の膨張が発生して以降は緩やかに膨張する傾向が見られ、静置期間20週で、膨張は収束している。

図10に静置期間12週時の各CaO量における膨張率を示す。全体的にCaO量において、A/Wの相

違による膨張率の差異は顕著ではなかった。各水準での特徴に着目すると、CaO量=180kg/m³ではA/W=0.08の膨張率が他水準より小さく、A/W=0.15とは0.02%程度の差異が見られた。CaO量=200kg/m³ではA/W=0.15の膨張率が他水準よりも顕著に小さいものの、A/W=0.08と0.10に顕著な差異は見られなかった。以上より、各A/Wにおける膨張率に顕著な差異は確認されず、A/WがASR膨張に及ぼす影響は非

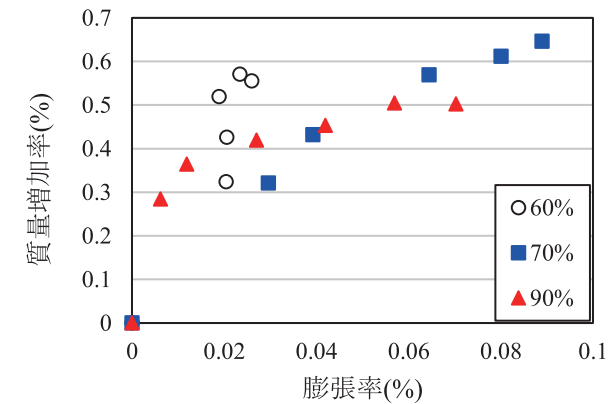


図11 溶液粉体比ごとの膨張率と質量変化率の関係

常に小さいと考えられる。膨張率の経時変化の結果から、GP中のアルカリ量が多くなると、材齢初期における膨張は大きくなるものの、アルカリの溶出など物質の移動が起りやすいことから、以降の膨張は停滞すると考えられる。

図11に静置期間12週時における膨張率と質量の関係を示す。各水準で膨張率と質量の関係に異なる傾向が見られた。AS/P=70%では膨張率と質量に直線的な正の相関関係が見られ、90%では70%と比較すると緩やかな曲線的な相関関係が見られた。これは、比較的に硬化体組織が粗雑であるAS/P=90%ではASR膨張が70%より緩やかに生じたためと考えられる。一方、ASR膨張が生じていないAS/P=60%では膨張率と質量に相関関係は見られない。

5. まとめ

ジオポリマーは、水よりも高い粘性を有するアルカリ溶液、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を併用する機会が多く、フレッシュ性状もセメントコンクリートとは異なる点が多くみられる。また、圧縮強度はアルカリ水比、高炉スラグ微粉末の混和量、養生温度に影響を受ける。

耐久性においては、Caをバインダーとしないことで耐酸性、アルカリシリカ反応抵抗性等に優れている。このほか、水和物が少ないことから耐熱性にも優れているとの報告がある。

一方で、収縮特性、物質移動抵抗性などではセメ

ントコンクリートに優位性が見られており、材料特性の改善とともに適用分野や部材を熟慮した上での展開が期待される場所である。

新しい建材としての期待がかかるジオポリマーであるが、大学という教育研究機関に勤める立場としては、次代を担う学生たちが、可能性を秘めたジオポリマーのような材料に対して、セメントコンクリートとともに、熱意をもって積極的に研究に取り組んでくれていることが大変素晴らしいと考えている。一材料の研究を契機に、学生のみなさんが利他行である建設分野の真髄についても学んでももらえれば幸甚である。

【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学会九州支部／建設材料としてのジオポリマーに関する研究委員会報告書、2016
- 2) 日本コンクリート工学会／JCI-TC-155A 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書、2017
- 3) 土木学会／土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会報告書、2022
- 4) 原田耕司ら／ジオポリマーの高炉スラグ微粉末の影響に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.36, No.1, pp.2236～2241, 2014
- 5) 伊東奈月ら／アルカリ溶液中のアルカリ水比がジオポリマーモルタルの圧縮強度特性に及ぼす影響、土木学会西部支部研究発表会、V, 2023
- 6) 深野雄三ら／ジオポリマーモルタルの化学的侵食に対する抵抗性、構造材料論文集、Vol.32, pp.151～158, 2016
- 7) K.Shinkai, et al : Evaluation of ASR resistance of geopolymers using industrial by-products for application to bridges, ch257, Proceedings of IABMAS, 2022

百年先へ

本田 顕子

私が住む福岡県には、2015年登録の「明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業（福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・鹿児島県・山口県・岩手県・静岡県）」と2017年登録の「神宿る島」宗像・沖ノ島と関連遺産群」の二つの世界遺産があります。私は、「明治日本の産業革命遺産」の三池炭鉱・三池港がある大牟田市で育ちました。

市内でも炭鉱との関係が深い地域で、朝は炭鉱電車（三池炭鉱専用鉄道）のおじさんに手を振りながら小学校に通い、鍛錬遠足の目的地は学校から5kmほど離れた焼石山（断層面に石炭層を見ることができます）。自宅の近くの炭鉱社宅には食料品や衣料品を扱うお店、共同浴場、床屋、保育園まで揃い、同級生も多く住んでいました。曲がり角を間違えると友達の家に通り着けないほどの広大な敷地に木造住宅が建ち並んでいるリアル巨大迷路のような社宅でした。

小学生の頃の運動会、お昼は大きな敷物を広げて重箱に詰めたお弁当や秋の果物を家族みんなで賑やかに楽しむ一大イベントでしたが、運動が苦手な私はあまり好きではありませんでした。なかでも特に憂鬱な競技が地区対抗リレーです。社宅のチームは学年トップクラスの足の速さを誇る選手が出場し優勝争いを毎年繰り広げているのに、私の町

は小さくて、全ての学年で児童が揃わないからバトンを繋ぐために下の学年が上の学年の選手として出場するのは普通のこと。毎年、別の小さな町と最下位争いをしていました。お酒が入った大人たちの大きな声で盛り上がる応援のなかを（同じ学年で走っても遅いの）上の学年に混じって走るのは嫌だまらなかつた思い出、黒歴史の一つです。

高校生となった私はスクーターを手に入れ、行動範囲が劇的に広がります。赤いスクーターで友達と遊びに行く場所の一つに三池海水浴場がありました。海水浴場といっても、三池港の防波堤を兼ねた狭い砂浜です。砂は粗くて貝殻が混じっているから裸足では歩けない、ゴミもたくさん流れ着くので小さな子供が波打ち際で水遊びをするぐらいの海水浴場でした。泳ぐのには向いていないけど、周辺は工場なので大きな音がでる花火を打ち上げるには最適な場所でした。

私が生まれる少し前にピークの20万人を超えた市の人口は、炭鉱の衰退とともに産業全体が悪化し減少し続けています。そんななか明治日本の産業革命遺産を世界遺産への機運が高まり、社会人となった私は子供の頃に慣れ親しんだ三池炭鉱、三池港と仕事で関わることになりました。

世界文化遺産の登録には、構成資産の効

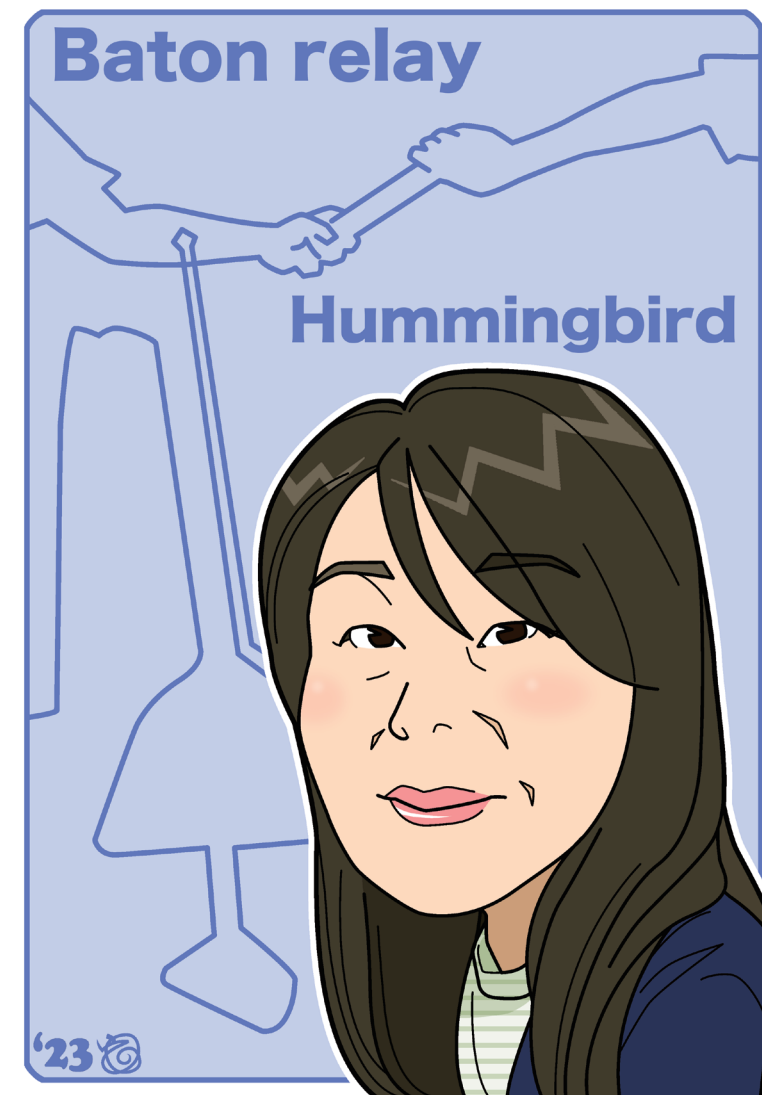
果的な保護を目的として、資産周辺に景観を保存するために法的な規制を設けることが求められます。当時、都市計画を中心にまちづくりや景観などの業務を担当していたため地元自治体の支援に携わることとなり、身近な存在だった三池炭鉱を改めて歴史や文化、周辺の自然環境から見つめなおしました。

炭鉱電車、宮原坑、三池港のどれもが明治時代に造られ、それぞれに歴史がありますが、本誌をご覧の皆さんに一番興味を持っていただけたそうなのは三池港でしょうか。

有明海特有の大きな干満差を克服するための工夫からハミングバード（ハチドリ）の美しい姿で生まれた港は1908年の開港から炭鉱閉山後も稼働し続けています。私も子供の頃に何度も乗った高速船三池島原ラインは長崎県島原市を結ぶ定期旅客航路として旅行やビジネス、福岡市へのショッピングなどに利用されています。また、韓国釜山港との間でコンテナ定期航路も開設され、釜山港を経由して中国や東南アジア方面へアクセスする物流拠点として位置づけられる現役の公共土木施設です。

三池炭鉱で産出された石炭を輸出するためとはいえ、百数十年前に海岸線を埋め立て、大規模な浚渫を行い、開門（こうもん）を設け大型船が接岸できる港を築造するという苦労は並大抵のことではなかったことでしょう。そこにあった強い意志には尊敬の気持ちしかありません。

最後に、三池炭鉱の近代化や築港を牽引



された團琢磨さんの言葉をご紹介します。

「石炭山の永久などということはありません。無くなると今この人たちが街となっているのが、また野になってしまう。築港をやれば、そこにまた産業を興すことができる。築港をしておけば、いくらか百年の基礎になる。」

先人の知恵と努力には到底かないませんが、今日の仕事もきっとどこかで誰かの安全で快適な生活や経済活動を支えることにつながっていると信じて進んでいきたいと思っています。

[ほんだ あきこ /

福岡県 建築都市部 流域下水道事務所 所長
(一社)土木技術者女性の会 副会長]

主要地方道秋田北インター線 コンクリート舗装による現道補修について ～アスファルト舗装からコンクリート舗装へ～

On the repair of the existing road of the Akita North Interchange Line with concrete pavement
～ From asphalt pavement to concrete pavement ～

佐々木 浩喜 油座 絵梨 佐藤 こまち

1. はじめに

近年、舗装の長寿命化による維持管理コストを縮減する目的から、耐久性が高く、LCCの軽減が期待できるコンクリート舗装が見直されている。

しかし、わが国におけるコンクリート舗装の割合は約5%に留まっており、現道補修が容易であるアスファルト舗装が依然として主流となっている(図1)。

秋田県では令和2年度から、供用中のアスファルト舗装の道路においてコンクリート舗装による打換え補修を実施している。

本稿は、令和4年度に実施した主要地方道秋田北インター線の施工事例を紹介するものである。

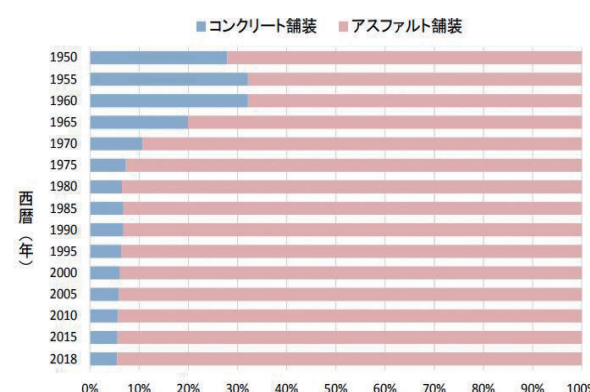


図1 道路延長に占める割合
[道路統計年報より]

2. 概要

2-1. 秋田県の現況

秋田県が管理する道路の路線数は203路線、延長約3,300kmである。

このうち約3,200kmが舗装されており、そのほとんどがアスファルトとなっている。

秋田県での舗装補修事業は、路面性状調査結果や道路パトロールによる現地状況調査、要望等を踏まえ、優先順位を決めて事業を実施している。

2-2. 秋田北インター線の概要

秋田北インター線は、秋田自動車道秋田北インターチェンジと秋田市街地を結ぶ道路として、平成9年に供用開始している(図2)。

延長は約4.3km、全幅員25m(車道幅員13m)の

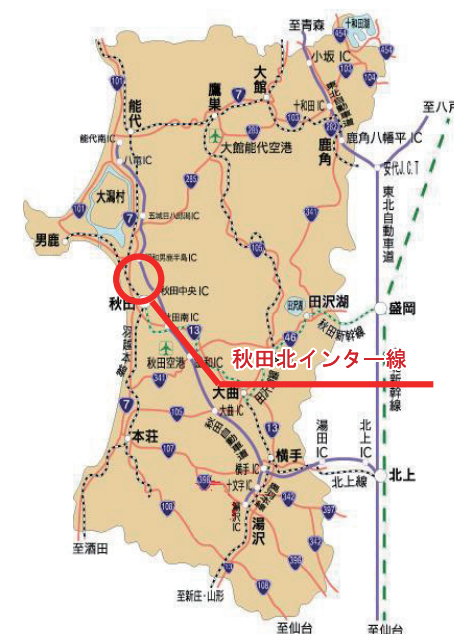


図2 施工箇所



写真1 施工前の状況

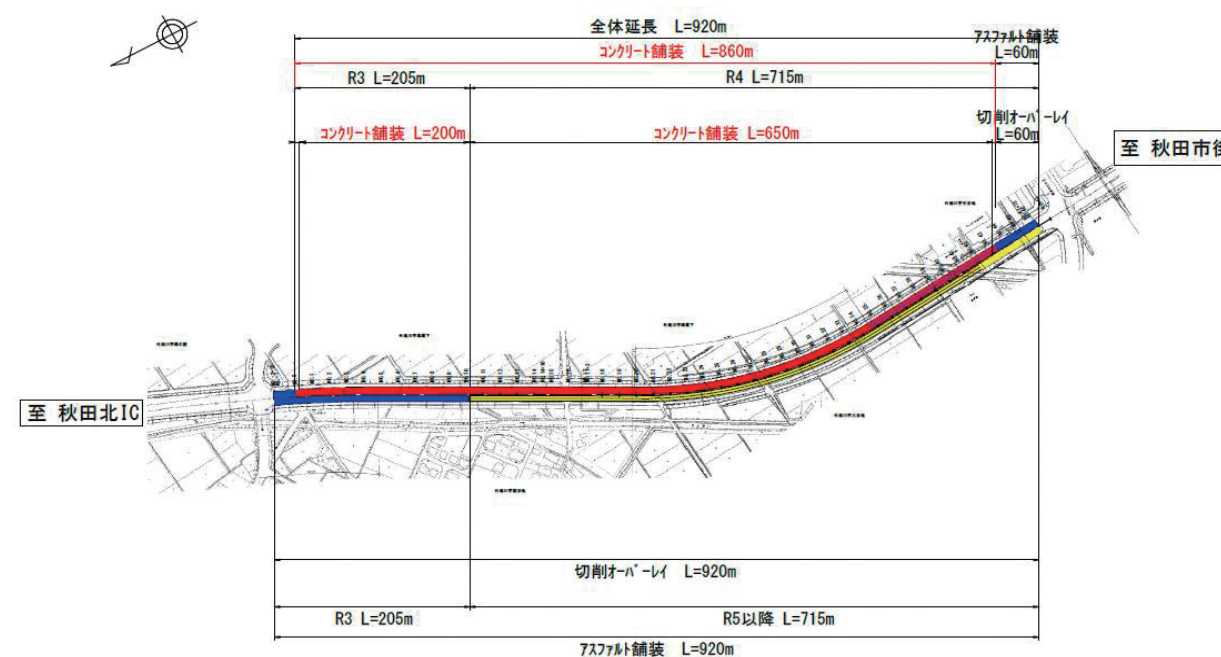


図3 平面図

[■ コンクリート舗装(施工済) ■ アスファルト舗装(施工済) ■ アスファルト舗装(未施工)]

4車線道路(一部暫定2車線区間あり)であり、24時間交通量は、22,628台/日(H27センサス)うち大型車交通量は2,240台/日である。

平成19年に切削オーバーレイで補修を実施しているが、その後15年経過しており、路面にひび割れが多数あるほか、わだち掘れも発生している状況である(写真1)。

全体計画延長920mのうち、特に損傷が著しい下り線860mをコンクリート舗装、上り線と交差点部は切削オーバーレイで補修を実施する計画とした。

令和3年度より補修事業に着手し、2か年で下り線のコンクリート舗装が完成、令和5年度以降に上り線をアスファルト舗装で補修を行い、事業完成の予定である(図3)。



ささき ひろよし / SASAKI Hiroyoshi
秋田県秋田地域振興局
建設部
保全・環境課長



ゆざ えり / YUZA Eri
同上
保全・環境課技師



さとう こまち / SATO Komachi
同上
保全・環境課技師

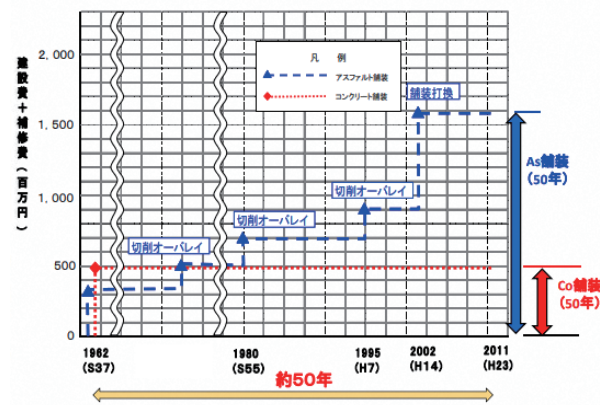


図4 アスファルト舗装とのコスト比較
〔国土交通省資料より〕

3. コンクリート舗装採用の経緯

先に述べた耐久性とLCCの面から、平成24年度以降、国土交通省がコンクリート舗装の積極的活用を明記している。

LCCはアスファルト舗装の1/3程度とされ、直轄国道でも約50年間大規模補修はされていない(図4)。

今回の施工区間は埋設物がないこと、家屋が連単していないため周囲への影響が少なく、長時間の交通規制が可能なことから、LCCを考慮しコンクリート舗装を採用した。

4. コンクリート舗装の種類

コンクリート舗装の工法は普通コンクリート、連続鉄筋コンクリート、転圧コンクリートの3つが主とされる。大規模なコンクリート舗装は本県で事例がなかったため、最も一般的な普通コンクリート舗装を採用し試験施工を行った。

普通コンクリート舗装で懸念される横目地が原因の騒音は、本施工箇所の沿線に家屋が連単していないことから課題とならない。なお、振動・騒音対策としては連続鉄筋コンクリート舗装が有効とされることから、走行性向上の観点で検討を行った。

連続鉄筋コンクリート舗装とは、鉄筋を縦断方向に配置したコンクリート舗装である。縦方向に配置された鉄筋および路盤の拘束により、収縮ひび割れを分散して発

生させ、ひび割れ幅を小さくすることが目的であり、横収縮目地は設けない。

ひび割れを適切に分散させるため一定の長さが必要であり、1日あたり200m以上の施工延長が望ましいが、本施工箇所までの材料の供給に課題があった。近傍のコンクリートプラントでは1日当りの供給量に制限があり、150m/日の施工量が上限であった。大型縦取り機での施工は可能であるが、機械の運搬コストおよび組立スペースの確保を考慮する必要がある。

以上の理由により、今回は連続鉄筋コンクリート舗装ではなく、普通コンクリート舗装を採用した。

5. 工法選定

普通コンクリート版の施工には、鉄網を用いる場合、路盤上にあらかじめ設置した型枠内にコンクリートを舗装するセットフォーム工法で行うことが多い。

コンクリート舗装の機械は、コンクリート版の側方に機械が走行するための施工余裕幅が必要である。中央分離帯の撤去により作業幅確保は可能だったものの、本工事では規制範囲の制限および工程の観点からW=0.5m以上の確保は困難であった(図5, 6, 写真2)。

作業スペースが限られていることからセットフォーム工法による型枠を設置するための施工余裕幅が確保できなかったため、スリップフォーム工法により施工した。

スリップフォーム工法とは、コンクリートの供給、敷均し、締固め、成型、平坦仕上げ等の機能を有する自走式

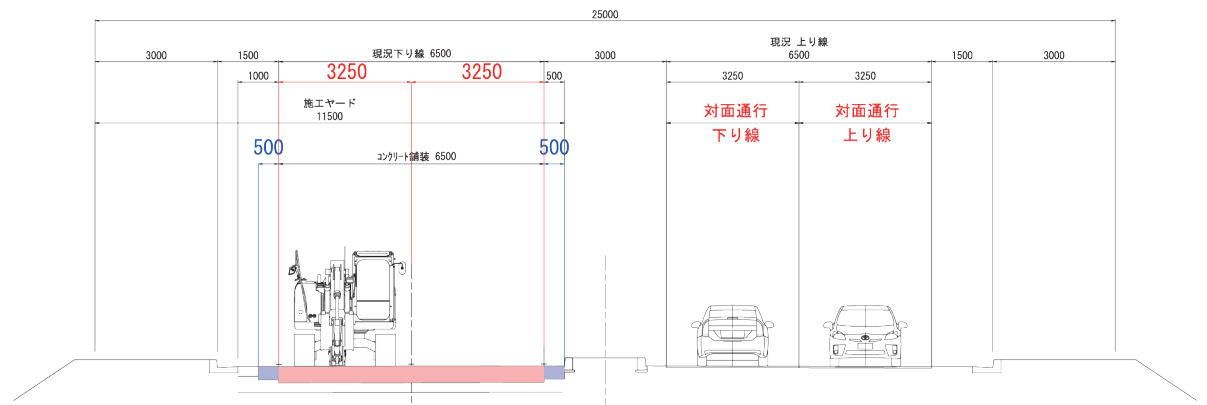


図5 標準横断面図

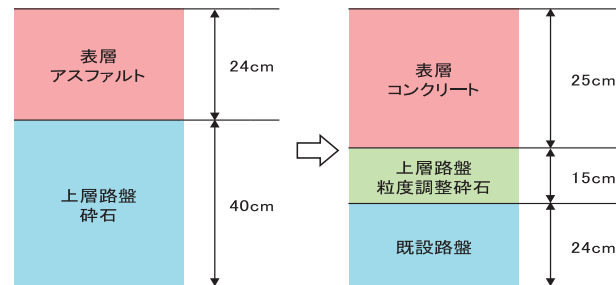


図6 舗装構成



写真3 スランプ試験

機械を用い、型枠を設置しないでコンクリート版を連続的に打設する工法である。

6. コンクリート配合

従来の舗装用コンクリートのスランプは2.5cmとされている。スリップフォーム工法ではスランプ3～5cmの配合が目標とされており、施工性および仕上げやすさから4cmを目標としていたが、現場打設時点に+1cmの誤差を許容した5cm以内となるよう配合を決定した。これは施工時期が7～9月であることを考慮した結果、本来の日



写真2 打設前の作業幅

表1 コンクリート配合

呼び強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	セメント種類
曲げ4.5	4	40	43.5	BB

標値としている4cmから運搬中の温度変化を見込んだことによる(写真3)。

また、暑中コンクリートとしての打設となるため、温度ひび割れの発生が懸念された。当初のコンクリート試験練りで単位セメント量を350kgとし曲げ強度が得られたものの、ひび割れの観点から過去の実績等を基に単位セメント量を330kgとして再度試験練りを行い、単位セメント量を決定した(表1)。

7. 打 設

1車線ずつ2回に分けて打設を行い、150m/日のペースで合計9日間の打設期間を要した。プラントから



写真4 トラックアジテータによる運搬



写真5 端部仕上げ



写真8 施工機械



写真9 終点部のアスファルト舗装



写真6 養生マット設置



写真7 カッター目地設置

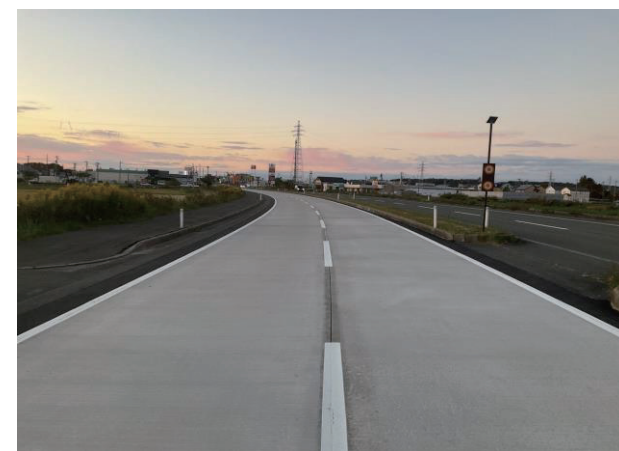


写真10 完成

8. 施工機械

スリップフォーム工法での施工に際し、スリップフォームペーパーを使用した。しかし、本県にはコンクリート舗装機械の保有業者はなく、東北地方にも当該機械の保有業者は1社に限られた(写真8)。

機械の運搬費を考慮すると機械の手配対象を東北地方から全国への拡大は現実的ではないため、本県におけるコンクリート舗装の機械施工の課題となる。

9. 施工による周辺影響

当該路線は上下4車線有しているうちの下り2車線を全面通行止めとしたため、工事区間での交通影響はない一方で、上り2車線は対面通行による車線規制を行っていた。本工事の終点部は交通量の多い交差点と接

続しており、約4ヶ月間の車線規制に伴う周辺の渋滞対策に工夫を要した。

また、終点部にある商業施設は通行不可となる期間に制限があったため、早期交通開放型コンクリート(1DAY PAVE)の採用も検討したものの、取壊し開始から6日間の規制は回避できないことから、採用していない。

代替工法としてアスファルトによる切削オーバーレイでの施工を行った。コンクリート舗装とアスファルト舗装との打継ぎ目周辺への影響を考慮し、より塑性変形抵抗性が優位なポリマー改質アスファルトⅢ型を採用した(写真9)。

10. まとめ

本県では、現道補修としての大規模なコンクリート舗

装の施工は、騒音や長期間の規制による周囲への影響から、採用が難しい補修方法として、これまでは認識されていた。本工事は供用中のアスファルト舗装をコンクリート舗装によって補修したものであるが、規制方法、施工機械の手配等に難しさは感じたものの、現場環境によっては施工の可能性は十分にある。施工技術ないしは技術者育成の観点からも、コンクリート舗装の採用は重要であると考え。

また、前例がないことから維持管理を経験していないため、劣化の進行、維持管理の実態については経過観察を行っていく予定である。

本工事の施工が今後のコンクリート舗装による補修の参考になれば幸いである(写真10)。

【参考文献】

- 1) コンクリート舗装の普及に向けた取組みについて、(一社)セメント協会
- 2) コンクリート舗装の利用促進の取組み、国土交通省

コンクリートのひび割れ点検の 高精度化と効率化を目指して ～ひび割れ画像解析技術「t.WAVE」の開発～

Aiming to improve accuracy and efficiency of concrete crack inspection
Development of crack image analysis technology "t.WAVE"

堀口 賢一 本澤 昌美 野村 侖生 上村 勇太

1. はじめに

近年、測量・調査から設計、施工、検査・維持管理・更新までのあらゆる建設生産プロセスの各段階において、3次元データやICT等を活用するi-Constructionが国土交通省で取り組まれている¹⁾。この取組みのひとつとして、維持管理段階における構造物の点検において、ロボットや3次元計測機器の活用により記録の整理の自動化や調書作成などの効率化が期待されている。また、点検記録や写真などをCIMモデルを介して3次元的な位置情報と連携させることで、維持管理段階の診断や補修設計などの効率化が期待されている。

このような背景のもと、コンクリート構造物のひび割れ

点検の効率化と高精度化を目指して、筆者らは、コンクリートのひび割れ画像解析技術t.WAVE(ティ・ドット・ウェーブ)(以下、t.WAVEと称す)を開発し、コンクリート構造物のひび割れ点検に活用している。t.WAVEでは、AIによりひび割れの位置を自動で検出し、高い精度でひび割れ幅を特定できるため、維持管理での評価・判定で活用性の高い情報を提供できる。また、コンクリート構造物が関わるインフラ整備のDXに大きく寄与できる技術であり、BIM/CIMと連携した活用が期待できる。

本稿では、t.WAVEの概要やコンクリート構造物のひび割れ点検への活用事例について紹介する。

2. t.WAVEの概要と特徴

図1にt.WAVEによるひび割れ検出と画像解析の処理フローを示す。本技術は、1)コンクリート構造物の撮影画像から、コンクリート表面のひび割れをAIにより自動検出して画像出力する工程と、2)そのひび割れ検出画像をウェーブレット変換してひび割れの幅や長さを評価する工程、および3)ひび割れの幅ごとに長さを集計処理する工程から構成される。この一連の処理は、クラウド上に構築したシステムで全て実施できる。

類似技術では、ひび割れ幅の算定を、①画像内の基準寸法との対比や、②画素ごとの輝度の単純比較で評価している。①の基準寸法との対比では、局所的

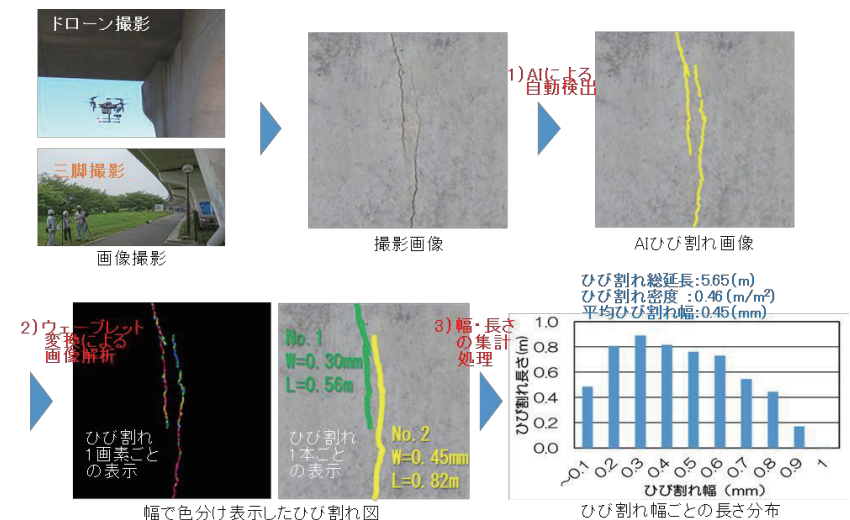


図1 t.WAVEによるひび割れ検出と画像解析の処理フロー



図2 AIによるひび割れ検出におけるTP/FP/FN/TNの概念図

な評価しかできない点が欠点となる。②の輝度の単純比較では、幅広のひび割れでの輝度は暗く、狭いと明るくなるとする判定法を用いているため、撮影画像の明暗や同じ画像内に明るさのムラがあるとひび割れ幅を正確に評価できない。①、②ともシステム、アルゴリズムが単純な点に利点があり、ひび割れ発生状況の網羅的な把握には適しているが、厳密な健全度判定や補修作業の優先付けなどに不可欠なひび割れ幅の推定には精度不足となることが欠点と言える。

一方、t.WAVEでは、ウェーブレット変換による画像解析に着目して、ひび割れ幅の評価に実装したことが最大の特長で、高い評価精度を確保できる。詳しいプロセスは4章で紹介するが、ひび割れ位置とその周囲の画素の輝度を用いて、ひび割れ位置のウェーブレット係数を算定し、ウェーブレット係数とひび割れ幅の相関から、ひび割れ幅を推定できる。この結果、撮影画像の画素寸法の1/4程度の微細なひび割れ幅も評価することができる。また、撮影機材や画像の明暗、明るさのムラなどの影響を受けにくいことも特徴として挙げられる。

3. AIを用いたひび割れ自動検出技術

本技術のひび割れ検出AIは、画像から直接深層学習によりひび割れを抽出し、幾何的特徴で一部フィルタリングするシステムで構成されている。ここでは、AIによるコンクリートのひび割れ自動検出の精度について、市販のAIシステムでの結果と比較して示す。

3-1. 再現率と適合率の定義

AIによるひび割れ検出精度は、再現率(Recall)と適合率(Precision)により比較する。ここでの再現率と適合率は、人がひび割れと判別した画素とAIがひび割れと判別した画素の一致、不一致に対する評価である。図2にAIによるひび割れ検出におけるTP(True Positive)/FP(False Positive)/FN(False Negative)/TN(True Negative)の概念図を示す。

また、表1にTP/FP/FN/TNの定義を示す。図2中の黒線は人がひび割れと判別した画素を表し、緑線はAIがひび割れと判別した画素を表している。また、

表1 TP/FP/FN/TNの定義

AI \ 人	人がひび割れであると判断	人がひび割れでないと判断
	○ TP True Positive (真陽性)	✗ FP False Positive (偽陽性)
AIがひび割れであると判断		
AIがひび割れでない判断	△ FN False Negative (偽陰性)	□ TN True Negative (真陰性)

	ほりぐち けんいち / HORIGUCHI Kenichi 大成建設(株) 技術センター社会基盤技術研究部先端基盤研究室 主席研究員 博士(工学) 技術士(建設部門) 一級土木施工管理技士 コンクリート主任技士 コンクリート診断士
	ほんざわ まさみ / HONZAWA Masami 同上 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 研究員 コンクリート技士
	のむら かい / NOMURA Kai 同上 生産技術開発部スマート技術開発室 副主任研究員 修士(工学) GCP Cloud Security Engineer, Deep Learning Specialization Practical Skill
	うえむら ゆうた / UEMURA Yuta 同上 技術センター社会基盤技術研究部先端基盤研究室 研究員 修士(工学)

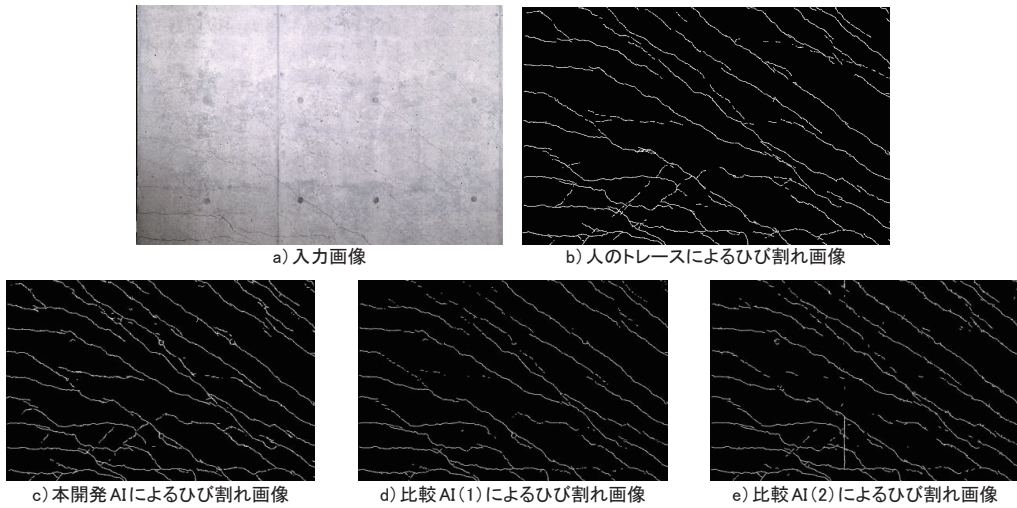


図3 AIにより自動検出したひび割れ画像の比較(空間分解能 0.4mm/画素の場合)

表2 AIによるひび割れ画像の再現率と適合率

画 像	本開発AI技術		比較AI技術(1)		比較AI技術(2)		空間分解能 (mm/画素)
	再現率	適合率	再現率	適合率	再現率	適合率	
図3	96.9	81.2	66.8	95.3	77.8	87.5	0.4
50枚平均	71.4	36.8	35.0	56.5	21.8	47.1	0.1~0.6

青，赤，黄，黒の印は，黒線，緑線の重なりの有無を概念的に示しおり，この色分けされた丸印は，それぞれTP，FP，FN，TNを示している。

再現率(Recall)，適合率(Precision)とTP/FP/FN/TNとの関係は，それぞれ式(1)，式(2)の通りとなる。

再現率は，人がひび割れと判別した画素(TP+FN)に対して，AIもひび割れと判別した画素(TP)の割合を示すものである。そのため，AIによるひび割れの検出漏れが多いと再現率は低く算出される。

適合率は，AIがひび割れと判別した画素(TP+FP)に対して，人もひび割れと判別した画素(TP)の割合を示すものである。そのため，AIによるひび割れの誤検出が多いと適合率は低く算出される。

$$\text{再現率(Recall)} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \cdots \cdots (1)$$

$$\text{適合率(Precision)} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}) \cdots \cdots (2)$$

3-2. ひび割れ検出精度の比較

ひび割れ検出精度の比較は，本開発技術のAIを用いたコンクリートのひび割れ自検出技術(以下，本開発AI技術と称す)と，他の類似の2つのAIひび割れ

自動検出技術(以下，比較AI技術(1)，(2)と称す)について，同じ撮影画像に対する再現率と適合率を算定して比較した。比較AI技術は，市販のAIによるひび割れ自動検出技術で，比較AI技術(1)は，その学習方法などの詳細は不明である。一方，比較AI技術(2)については，画像から輝度勾配のベクトルのパターンを算出し，これで深層学習することでひび割れを識別するシステムとされている。また，本開発AI技術により検出可能なひび割れの幅は，撮影画像の空間分解能の1/4程度であり，比較AI技術(1)，(2)も同程度と考えられる。

撮影画像は，空間分解能やコンクリート面の色合いなどが異なる50枚を選定した。図3にAIにより自動検出したひび割れ画像50枚のうち1枚の比較結果を示す。

図3には，a)入力画像，b)人のトレースによるひび割れ画像，c)本開発AI技術によるひび割れ画像，およびd)，e)に比較AI技術(1)，(2)によるひび割れ画像を示している。また，表2にAIによるひび割れ画像の再現率と適合率を示す。表2には，図3の再現率，適合率と全50枚の平均の再現率，適合率を示している。

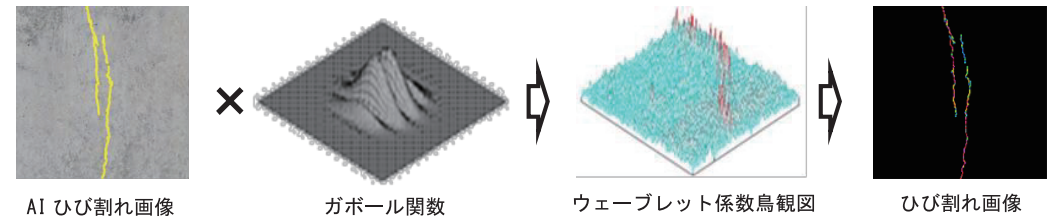


図4 ウェーブレット変換によるひび割れ定量評価の実施手順

図3の入力画像の空間分解能は0.4mm/画素で，コンクリート表面の汚れなどが少ない，比較的綺麗な面のひび割れである。また，クラックスケールにより人が目視で測定したひび割れ幅の最大値は0.9mmであった。このようなひび割れの撮影画像に対して，本開発AI技術の再現率は96.9%，適合率は81.2%であった。一方，比較AI技術(1)，(2)の再現率はそれぞれ66.8%，77.8%，適合率はそれぞれ95.3%，87.5%であった。50枚の平均で見ても，本開発AI技術による再現率は，比較AI技術(1)，(2)に比べて再現率が高く，ひび割れの検出漏れが少ないことがわかる。一方，本開発AI技術の適合率はやや低い。これは，本開発AI技術では型枠跡などの誤検出が多いことが主たる要因と考えられるが，一方で微細なひび割れのうち，人がトレースしていない画素を，本開発AI技術ではひび割れとして検出していることもひとつの要因と考えられる。

このように，本開発AI技術が他の比較AI技術に比べて再現率が高いのは，AIの深層学習において，ひび割れ部分を正確に抽出し，切り分けて学習する教師データの質がよいこと，ならびに，ひび割れだけでなく画像全体からひび割れの有無を判断する機能を導入していることが理由として考えられる。

4. ウェーブレット変換を用いたひび割れの定量評価技術

図4にウェーブレット変換によるひび割れの定量評価の実施手順を示す。AIひび割れ画像のひび割れと評価された画素の一つひとつの画素とその周囲の画素がもつ輝度に対して，ガボール関数を用いてウェーブレット変換を行い，式(3)に従い2次元ウェーブレット係数 Ψ

を求める。

$$\Psi_{\theta,k}(x_0,y_0)=\frac{1}{\alpha^k}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}f(x,y)\psi\left(\frac{x-x_0}{\alpha^k},\frac{y-y_0}{\alpha^k}\right)dx dy \cdots (3)$$

ここに， $f(x,y)$ は入力画像の輝度の平面分布， (x_0,y_0) は ψ の着目点， α^k は ψ の拡大縮小に関するパラメータである。また， ψ は式(4)に示すマザーウェーブレット関数であり，ここではガボール関数を用いている²⁾。

$$\psi_{\sigma,f,\theta}(x,y)=g(x',y')\left[\exp(i2\pi fx')-\exp\{-(2\pi f\sigma)^2\}\right]\cdots (4)$$

ただし，

$$g(x',y')=\frac{1}{2\pi\sigma}\exp\left\{-\frac{x'^2+y'^2}{2\sigma^2}\right\}\cdots\cdots\cdots (5)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \cdots\cdots\cdots (6)$$

ここに， g は式(5)に示す二次元ガウス関数であり， f は中心周波数， σ はガウス窓の大きさ， θ はガボール関数における波の進行方向を表す回転角である。また， (x',y') は式(6)に示す座標 (x,y) の回転角 θ に対する写像である。このようにして得られる2次元ウェーブレット係数は，ひび割れの輝度と背景色であるコンクリートの輝度，およびひび割れ幅によって変化することから，線と背景の濃淡の組み合わせを変化させた擬似データを用いてウェーブレット画像を別に作成し，これからひび割れ部とコンクリート部の輝度(濃度)を変数としたウェーブレット係数の閾値テーブルを作成して，ウェーブレット係数の鳥瞰図として示されるウェーブレット画像の画素ごとに，この閾値との比較からひび割れであるかを判定する。これにより，ひび割れと判定された画素を抽出すると，出力画像としてのひび割れ画像が得られる²⁾。すなわち，AIによりひび割れとして週出した画素は，ここで更にウェーブレット係数に基づいてひび割れの適否を



写真1 高架橋橋脚の外観

判別する。

また、ウェーブレット係数とひび割れ幅は高い相関を有することから、ひび割れと判定された画素ごとにひび割れの幅を定量評価できる。すなわち、撮影画像の1画素の大きさである空間分解能の1/4から2倍程度のひび割れ幅を推定できる。そのため例えば、撮影した画像の空間分解能が0.8mm /画素の場合に、ひび割れ幅0.2～1.6mmを推定できる。

5. 構造物のひび割れ点検への活用事例

5-1. 高架橋橋脚での適用事例

(1) 対象構造物と撮影条件

写真1に高架橋橋脚の外観を示す。対象の橋脚は、地中埋設部分を除き地上から高さが6.5～7.5m、正面の幅が5.0～16.5m、側面の幅が3.0mである。また、正面の面積は70m²程度、側面の面積は30m²程度で、橋脚1本あたりの面積は合計200m²程度である。以上のほぼ同一の形状寸法の4つの橋脚でひび割れの調査を実施した。

画像の撮影は、デジタル一眼レフカメラ(有効画素数6,100万画素)を三脚に固定して地上から行った。また、画像の空間分解能は、0.50～0.55mm/画素の範囲になるように撮影した。これは、撮影画像の1枚あたりの画角が縦3m×横5m程度で、本ひび割れ画像解析技術において、幅0.2mm以上のひび割れをほぼすべて検出できる撮影条件である。

(2) ひび割れ検出の精度と作業性向上の効果

図4にひび割れ画像を橋脚の3次元図に貼付した結

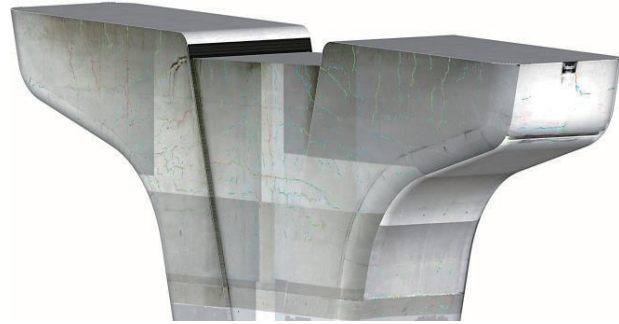


図4 ひび割れ点検結果の3次元表示

果を示す。4橋脚のAIによるひび割れ画像の再現率は71.5～79.9%、平均75.5%、適合率は33.2～47.6%、平均41.5%であった。適合率が低い要因として、3-2.でも述べた通り、型枠跡の誤検出がAIで多いことが考えられ、さらに人がトレースしていないひび割れを、AIが検出していることの影響が考えられる。

4橋脚について、近接目視手法とAI手法によるひび割れ調査に要した作業時間と作業費用を比較した。近接目視手法については、現地での高所作業車上でのひび割れのチョーキングと画像撮影、および室内でのあおり補正、画像合成、画像上のチョーキングのトレース、ならびにひび割れ図作図までの作業を対象とした。

一方、AI手法は、現地での画像撮影、室内でのあおり補正、画像合成、ひび割れ画像解析、ならびにひび割れ図作図までの作業を対象とした。このひび割れ調査では、近接目視手法に対してAI手法の作業時間は25%程度削減され、作業費用は45%程度削減できた³⁾。

5-2. 大深度立坑での適用事例

(1) 対象構造物と撮影条件

写真2に立坑内部の外観を示す。対象の立坑は、内径6.5mで深さがおよそ350mである。このうち、GL-273.8m～GL345.8mの72mの区間で、上下方向に2mごとに36分割してひび割れの調査を実施した。

図6に立坑内部壁面の画像撮影方法を示す。画像の撮影は、荷物などを搬送するカゴであるキブルにデジタル一眼レフカメラを設置して行った。このとき、立坑直径の中央にカメラを配置できるように、専用の鋼製架台を製作してキブルに設置した。また、水平方向に360°



写真2 立坑内部の外観(底版からの見上げ状況)



図7 ひび割れ点検結果の3次元表示

自在に回転できる雲台も鋼製架台に設置し、この上にカメラを載せて円周方向には6分割して撮影した。

立坑内部壁面の表面で、この60°ごとの区画を明示するために、あらかじめ色の異なる6本のロープをGL-250m付近の調査坑道から立坑の下方に垂らして設置した。このロープは、撮影時にカメラの向きを決めるときの基準とし、撮影画像の左右両端にこのロープが映るようにした。また、画像解析を行う際には、撮影画像を正面からの正対画像にあおり補正する必要がある、その時の目安としても利用した。

さらに、最終的にひび割れの発生位置を立坑内部壁面の3次元動画画像上に投影することを目的として、撮影位置の座標情報を取得できる動画も同時に撮影した。

(2) ひび割れ検出結果

図7にひび割れ点検結果の3次元動画表示の一例を示す。これは、GL-337.8m～GL339.8mの高さ2mの範囲を抜粋した結果である。目視点検でひび割れ幅が0.2mmと測定された箇所に対して、本手法によるひび割れ幅は0.2～0.3mm程度と評価され、両手法で大きな乖離は見られなかった。また、誌面上に抜粋した画像のため平面的に見えるが、円筒形の立坑内部壁面を3次元

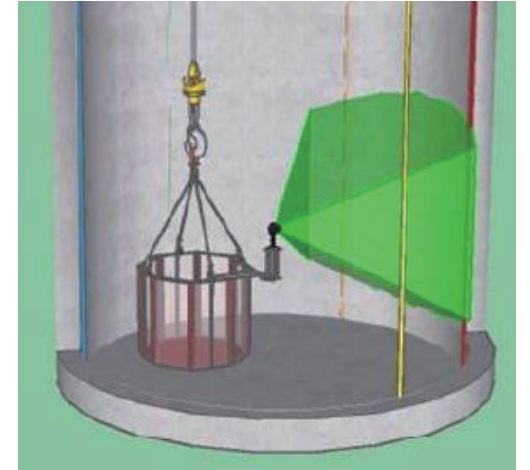


図6 立坑内部壁面の画像撮影方法

で立体的に動画化して、その画像上にひび割れ画像解析結果を重ね合わせることで、ひび割れの位置や幅を視覚的にわかりやすく表示することができている⁴⁾。

6. おわりに

本稿では、コンクリートのひび割れをデジタル画像からAIにより自動抽出し、さらにウェーブレット変換により幅や長さを定量的に評価できるひび割れ画像解析技術について紹介した。本技術は、2014年度から2018年度の5か年にかけて実施された、第1期SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)での課題のひとつとして採択され、技術開発をすすめたものである⁵⁾。また、そこでの成果を受けて、点検支援技術のひとつとして掲載されている⁶⁾。

【参考文献】

- 1) 三次元データ利活用方針、国土交通省、2017.1
- 2) 小山哲、丸屋剛、堀口賢一、澤健男／ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発、土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)、Vol.68, No.3, pp.178～194, 2012
- 3) 堀口賢一、本澤昌美、北原剛／AIを用いたコンクリートのひび割れ自動検出技術の高架橋橋脚での実証、土木学会第76回年次学術講演会、CS-14-42, 2021.9
- 4) 堀口賢一、本澤昌美、野村儒生、本島貴之、押野善之、広島隆司、菜花良平／大深度立坑の外観調査へのひび割れ画像解析技術の適用、土木学会第77回年次学術講演会、VI-323, 2022.9
- 5) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP: エスアイピー): <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>(閲覧日: 2021年1月12日)
- 6) 点検支援技術性能カタログ、国土交通省、2022.9

低温でCO₂からメタノールを合成できる触媒の開発

Development of molecular catalysts for low-temperature CO₂ hydrogenation to methanol

姫田 雄一郎

1. はじめに

化石燃料の燃焼に伴う大気中のCO₂濃度の増加による気候変動が深刻化している。カーボンニュートラル社会の実現が世界的に最重要課題となっている。再生可能エネルギーの普及や省エネルギー技術の浸透により、CO₂排出量の大幅削減が期待されている。一方、排出が避けられない一定量のCO₂が残るため、CO₂から有用な燃料・化成品へ転換するカーボンリサイクル技術の開発が必要になる。

しかし、CO₂は炭素化合物の燃焼最終生成物であり、熱力学的に安定で不活性な化合物である(図1)。このため、炭酸塩への変換(鉱物化)を除き、CO₂を変換するにはエネルギーが必要となる。すなわち、CO₂の酸素を炭素から引き剥がし、水素や別の炭素との結合を形成させる。このような変換は、結果として炭素にエネルギーを蓄積することでもある。これは、光合成(暗反応)によって生み出される化石資源やバイオマス等と同じであり、これらを利用することで産業革命以来の人類の発展の基礎を築いてきた。つまり、CO₂は化石資源に代わる安価で豊富な炭素資源であり、カーボンリサイクル技術の開発は、化石資源を消費するだけの従来の社会から、人工的な炭素循環型社会の構築を目指すものである。ただし、膨大に排出されるCO₂と反応させる高エネルギー物質としては、資源量に制約がある化石資源由来の化合物ではなく、水素や電力などが適切である。そのため、CO₂は水素化反応、あるいは電解反応により、メタン、一酸化炭素、メタノール、エタノール、ギ酸等への変換が想定される(図2)¹⁾。これらの中で、メタノールは、現在天然ガスや石炭から年間1億t以上生産され、燃料や化学原料として高い需要がある(図3)。各種燃料と比較した場合(表1)、メタノールは室温大気圧で貯蔵できる利点に加え、比較的高いエネルギー密度を有している。燃料用途として、欧州ではガソリンに3%までのメタノールの混合が認められている。また、メタノールを燃料とするタンカーも運行されており、将来的にはCO₂から合成されたメタノールによるCO₂排出削減を目指している。一方、需要の約2/3は化学原料用途として用いられている。従来は、酢酸やホルムアルデヒドの原料であったが、最近ではエチレン、プロピレンへの転換(Methanol to olefin (MTO))が急拡大している。このように、メタノールは、

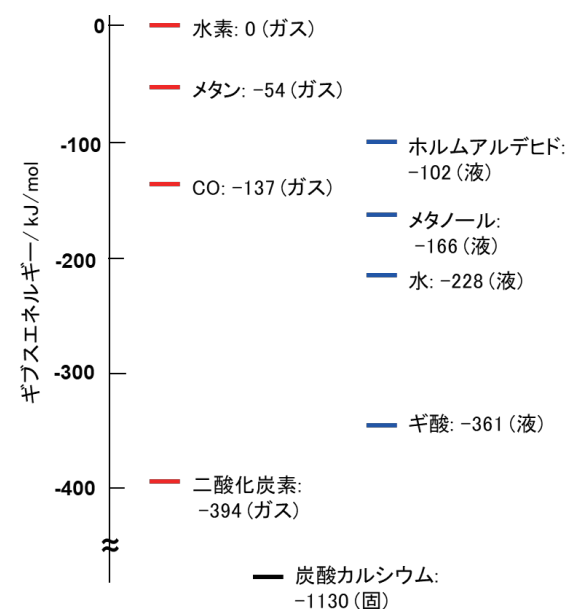
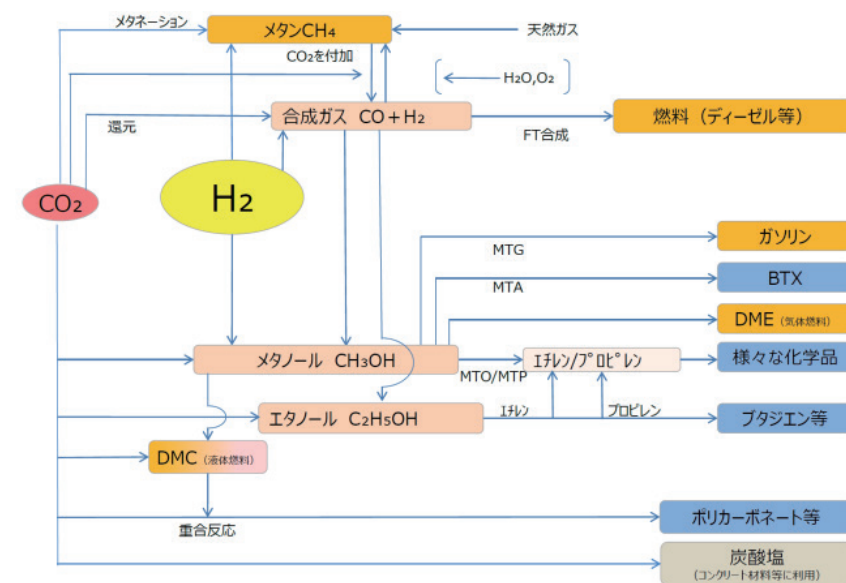


図1 化合物のギブスエネルギー(KJ/mol)

図2 CO₂利用のフロー図

[カーボンリサイクル技術ロードマップより]

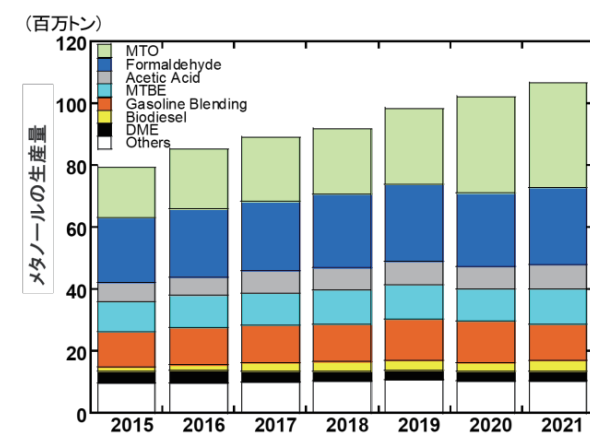


図3 メタノール生産量とその用途

[Methanol Market Services Asia 資料より作成]

表1 各種燃料比較

	LHV (MJ/Kg)	体積エネルギー密度 (GJ/m ³)	貯蔵圧力 (bar)	貯蔵温度 (°C)
メタノール	19.9	15.8	1	20
ジメチルエーテル	28.9	19.2	5	20
液化天然ガス	48.6	20.8	1	-162
圧縮天然ガス	48.6	9	250	20
液体アンモニア	18.6	11.5	1-10	-34 (1 bar) -20 (10 bar)
液体水素	120	8.5	1	-253
圧縮水素	120	4.7	700	20
ガソリン	43.4	32	1	20
船舶用ディーゼル	42.8	36.6	1	20
リチウム電池	0.4-1	0.9-2.4	1	20

LHV=低位発熱量

様々な化成品への転換が可能であり、将来的にはナフサに代わる汎用化学原料として期待できる。

このため、メタン水蒸気改質から得られるグレー水素の代わりに、再生可能エネルギーからのグリーン水素と

組み合わせてCO₂からのメタノールを利用する概念(メタノールエコノミー)をジョージオラーが1990年代にはすでに提唱していた(図4)²⁾。アイスランドのカーボン・リサイクルリング・インターナショナル(CRI)では、CO₂からメタノール

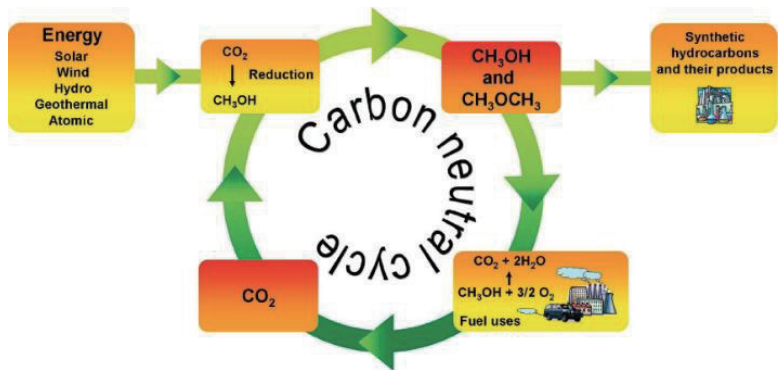


図4 メタノールエコノミー : Reprinted with permission from [3]. Copyright 2009 American Chemical Society.

表2 CO₂からのメタノール合成プラント

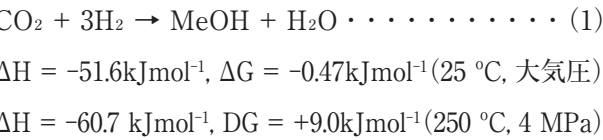
	場所	水素源	CO ₂ 源	生産量/年	開始年(目標)
CRI	アイスランド	地熱	地熱	4000t	2011
MefCO2	ドイツ	風力	発電所	350t	2018
Liquid Wind	スウェーデン	CCU	PV	45000t	2023
河南順成集団	中国	コークス炉	発電所	11 万 t	2022
Haru Oni	チリ	風力	DAC	100 万 t	2027

ル製造プラント(George Olah Renewable Methanol Plant)が2012年から商業稼働している⁴⁾。このプラントでは、近隣の地熱発電を利用して水電解で得られるグリーン水素と、随伴する年間5,500tのCO₂から、年間4,000tのメタノールをVulcanolの商品名で販売している。このプラントでは、銅系触媒を用いて、250°C, 10MPaの反応条件で運転している。これらの技術をもとに、近年多くのCO₂からメタノール製造施設が稼働あるいは予定されている(表2)。最近では、中国河南省安陽市など、年間10万t以上のメタノールを生産する複数のプラント建設が進められている。また、チリでは風力発電と大気からのCO₂分離回収技術(DAC : Direct Air Capture)を組み合わせたシステムでメタノールおよびガソリンの製造プラントの建設が進められている(Haru Oniプロジェクト)⁵⁾。日本でも2010年頃に三井化学で実証試験が行われていたが、最近になって三菱ガス化学から実証試験の開始が発表されている⁶⁾。

2. CO₂からのメタノール合成

CO₂と水素によるメタノール生成反応は、どの温度領域でも発熱反応であるが、エネルギー的には高温になるのに従って、吸エルゴン反応(非自発反応)となる(式

(1))。このため、250 °Cでの平衡転化率は、20%(5 MPa)から30%程度(10 MPa)であり、反応後多くの未反応ガスが残ることになる。一方、室温であれば、大気圧であっても、わずかに発エルゴン反応(自発反応)になる。従って、熱力学的には、高压低温条件が適していることになる。



CO₂からのメタノール合成は様々な手段が検討されている。一般に、固体触媒(主に、銅系触媒)を用いた水素化反応(ガス相反応)では、高温高压条件が必要であるが、比較的高い生産性、耐久性、技術成熟度(TRL)を示す。これまで報告されている160種のCO₂水素化触媒の反応温度とメタノール転換率を図5に示す⁷⁾。従来触媒では、180 °C以上の反応温度で駆動するため、メタノールへの低い平衡転換率が課題であった。このような制約から、「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2021年7月改訂)では、基幹物質であるメタノールの技術課題として、「反応低温化のための触媒開発(転換率・選択率の向上)」が挙げられている(図6)⁸⁾。

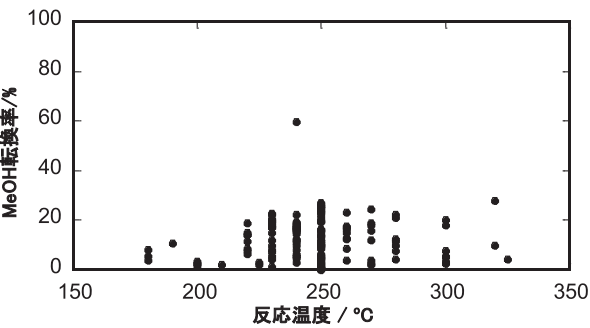


図5 CO₂水素化反応の反応温度とメタノールへの転換率 [参考文献7)より作成]

表3 メタノール製造1t当たりの消費エネルギー、CO₂排出量およびコスト^{11,12)}

	天然ガス由来 (メタン水蒸気改質)	再エネ由来
エネルギー/GJ	37.5	39.7
CO ₂ 排出量/t	1.82	-0.67
コスト/t	~€400 \$150-550	\$820-1620 \$1120-2380 (DAC利用時)

このため、反応低温化による平衡収率の改善か、生成する水の除去による平衡シフトが検討されている^{9,10)}。ドイツ化学工学協会の試算から¹¹⁾、水蒸気メタン改質とCO₂水素化によるメタノール製造におけるエネルギー消費、CO₂排出量およびコスト試算を表3に示す。天然ガスを原料とする水蒸気メタン改質は現在のメタノール合成の主流であり、低コストであるが、メタノール1t当たりの1.82tのCO₂排出を伴う。一方、グリーン水素とCO₂を原料とするメタノール製造では、CO₂削減が可能になる。しかし、メタノール価格は、グリーン水素価格と稼働時間に強く依存している。現状(~2021年)、天然ガス由来のメタノール価格レンジは\$150~550であるが、グリーン水素を用いるメタノール合成では\$820~1620、さらにDACからのCO₂を用いる場合は\$1120~2380と試算されている¹²⁾。グリーン水素の更なる価格低下を含めた技術開発が必要であろう。

CO₂からのメタノール合成は、一酸化炭素(CO)(式(2))あるいはギ酸(式(3))を経由すると考えられている。特に、COは、メタノール合成以外にも様々な炭化水素に転換可能なフィッシャー・トロプシュ(FT)法が実

基幹物質

・メタノール等の製造技術

熱化学(触媒など)

【CO₂ → メタノール】

<技術課題>

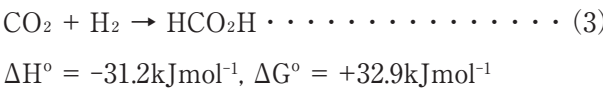
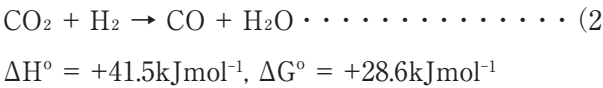
- ・反応低温化のための触媒開発(転換率・選択率の向上)
- ・反応により発生した水の分離・除去
- ・低質排ガスの直接利用(研究段階)
- 触媒劣化対策、耐久性向上

<その他課題>

- ・現行実用プロセス(合成ガス経由の反応)との比較検討
- ・既存メタノール製造設備でのCO₂の利用

図6 CO₂からメタノール製造の技術課題 [カーボンリサイクル技術ロードマップ改訂版より]⁸⁾

用化されており、利用価値は高い。しかし、COを生成する逆シフト反応は、強い吸熱反応でもあり、熱力学的には不利な反応となる。一方で、CO₂からギ酸生成反応は、発熱・吸エルゴン反応である。



なお、これら銅系触媒を用いたCO₂水素化によるメタノール合成技術の詳細な解説は他書に譲る。一方、ゼロエミッション社会に向けて、変動性の再生可能エネルギーの活用を考えると、反応の低温低圧化によるエネルギー効率の向上を図る必要がある。

3. CO₂水素化による低温メタノール合成触媒

反応温度の低温化に向けて、200°C以下で反応可

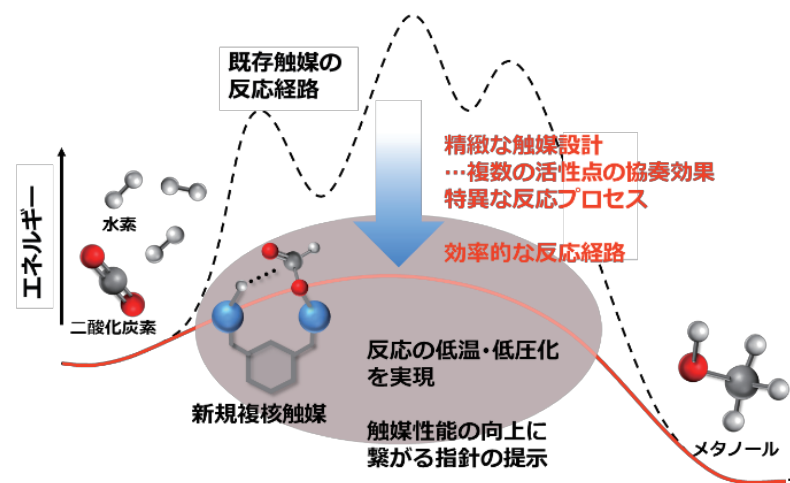


図7 CO₂からの低温メタノール合成

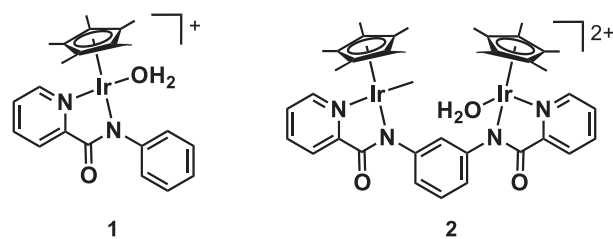


図8 CO₂水素化触媒

能な固体触媒の開発も進められている。北海道大学の清水らは、Pt/MoO_x/TiO₂やRe/TiO₂を用いて、ジオキサン等の有機溶媒中150 °Cでメタノールが生成することを報告している⁹⁾。一方、固体触媒では詳細な活性点構造や反応機構解析は困難であり、これに基づいた精緻な触媒設計は難しい。このため、低温で高い活性を示す固体触媒の報告例は極めて少ない。

4. 分子触媒を用いるCO₂水素化によるメタノール合成

近年、分子触媒(反応活性点である金属原子を有機分子が配位した触媒)を用いて、低温条件でCO₂からのメタノール合成を目指した研究が進められている¹³⁾。分子触媒は、精密に設計・合成可能な有機配位子によって、精緻な活性点を均質に構築できるとともに、各種分析機器で詳細な反応機構解析も可能である。このため、一般に固体触媒に比べて、分子触媒は高い触媒性能を示し、低温反応条件でも反応が進行するが、反応後の生成物分離、触媒回収・再利用は困難であった。

当初は、熱力学的に安定なCO₂を温和な条件で直接メタノールまで変換できる分子触媒がなかった。このため、CO₂からの変換が比較的容易な炭酸誘導体、ギ酸エステル、ギ酸アミド等を経由する間接的な方法が報告されていた。近年、CO₂から直接メタノールを生成する分子触媒が報告されてきたが、添加物や有機溶媒が必要であり、これらとの分離の困難さから生産性は低く、実用性には欠けていた。

最近、筆者らは、これまでの反応結果をもとに、精緻な触媒設計と反応場により、CO₂水素化によるメタノール合成の低温低圧化を達成した(図7)。従来開発してきたCO₂水素化触媒1は、ギ酸までの変換は高効率であったが、メタノールは得られなかった(図8)。そこで、分子内に活性中心(イリジウム(Ir)金属)を2つ有する触媒2を設計し、ガス相でのCO₂水素化によるメタノール合成を行った¹⁴⁾。その結果、低温条件(30～80°C)でもCO₂からの選択的なメタノール合成が可能であった(図9)。さらに、この触媒反応では、0.5 MPaであっても、CO₂と水素ガスからメタノールが生成する。また、生成物からメタンや一酸化炭素は検出されず、高い選択性を示した(図10)。従来の分子触媒と異なり、触媒を固体状態のままガスと反応させるために、生成物と触媒の分離が容易である。このため、バッチ式反応容器であっても、ガスの充填、放出を繰り返すことで触媒再利用が可能になった。触媒活性はまだ十分でないが、明確な触媒劣化がみられなかった。一

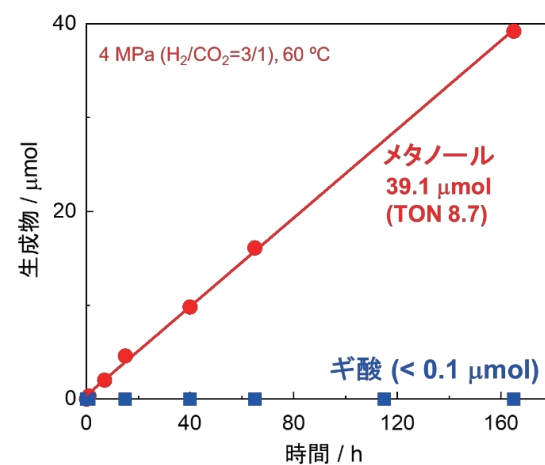


図9 CO₂水素化によるメタノール合成

方、2つの活性中心の相対位置や有機配位子など触媒構造を変更すると、触媒性能が著しく影響を受けた。これらの結果から、反応活性点の精密な設計・制御により、低温低圧反応条件で水素ガスの活性化とCO₂水素化により、CO₂からのメタノール合成が可能になったと考えている。触媒活性点を電子的・立体的に高度に制御できる分子触媒の長所と、固体触媒の特長である触媒の再利用および生成物を容易に分離できる利点を併せ持つ新しい触媒反応と考えている。

5. おわりに

低温でCO₂からメタノールに変換するCO₂水素化触媒を紹介した。すでに実証プラントで使われている銅系

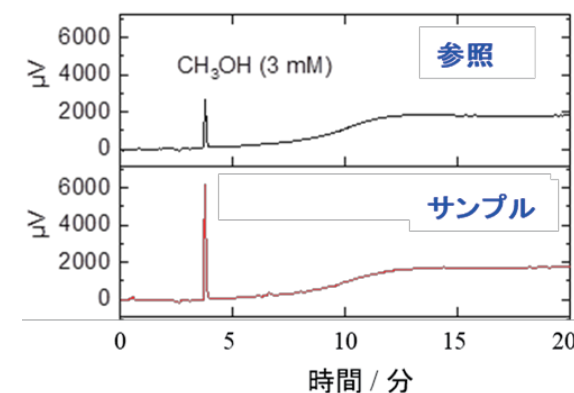


図10 ガスクロマトグラフィーによる生成物分析

固体触媒では、200 °C以上の高温反応条件が必要であるために、平衡転化率、エネルギー効率の点で制約が残っている。今回、詳細な反応解析をもとに、精密な触媒設計により、反応の低温低圧化に成功した。さらに、従来の分子触媒とは異なり、ガス相での反応であるために、実用的な触媒反応プロセスへの展開が容易になる。これらの結果は、CO₂からのメタノール合成を低温・低圧化するための触媒開発の基盤的な知見を提供するものである。今後カーボンリサイクルの基幹物質であるメタノール製造プロセスの高効率な触媒開発への貢献が期待できる。



ひめだ ゆういちろう / HIMEDA Yuichiro
(国研)産業技術総合研究所
ゼロエミッション国際共同研究センター
首席研究員 博士(理学)

【参考文献】

- 「カーボンリサイクル技術ロードマップ」, www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.html (accessed 2023.2.10).
- G. K. スリヤ・ブラカーシュ, ジョージ・オーラー, アラン・ゲッペルト/「メタノールエコノミー」～CO₂をエネルギーに変える逆転の発想～, 化学同人, 2010
- G. A. Olah, A. Goepfert, G. K. S. Prakash / J. Org. Chem. 74, pp.487～498, 2009
- Carbon Recycling International, www.carbonrecycling.is/ (accessed 2023.1.10)
- Haru Oni / www.haruni.com/#/en (accessed 2023.2.10)
- 三菱ガス化学, www.mgc.co.jp/corporate/news/2021/210330.html (accessed 2023.1.10)
- X. Jiang, X. Nie, X. Guo, C. Song, J. G. Chen / Chem. Rev. 120, pp.7984～8034, 2020
- カーボンリサイクル技術ロードマップ改訂版, www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.pdf
- 清水研一, 鳥屋尾隆 / JXTG Technical Review 61, pp.53～56, 2019
- 小俣光司, 朝見賢二, 藤元薫 / ペトロテック 42, pp.108～112, 2019
- Bazzanella, A. M. / Ausfelder, F. Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry; 978-3-89746-196-2; DECHEMA:dechema.de/Low_carbon_chemical_industry.html, 2017
- Innovation Outlook Renewable Methanol, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf (accessed 2023.2.12)
- N. Onishi, Y. Himeda / Coord. Chem. Rev., 472 214767, 2022
- R. Kanega, N. Onishi, S. Tanaka, H. Kishimoto, Y. Himeda / J. Am. Chem. Soc. 143, pp.1570～1576, 2021

セメント改良技術の適用事例・深層混合処理 粉体噴射攪拌工法(DJM工法)

Dry Jet Mixing Method

島野 嵐 山田 隆

1. はじめに

DJM工法(粉体噴射攪拌工法-Dry Jet Mixing method)は、軟弱地盤中に改良材を粉体のまま供給し、強制的に原位置土と攪拌混合することによって、土と改良材を化学的に反応させて、土質性状を安定なものにするとともに強度を高める工法である。

この工法は、建設省総合技術開発プロジェクトの「新地盤改良技術の開発」の一環として、建設省土木研究所(現(国研)土木研究所)と(社)日本建設機械化協会建設機械研究所(現(一社)日本建設機械施工協会施工技術総合研究所)が中心となって、1977年から1979年にかけて開発された技術を基礎として、実用化が進められてきた。また、最近では「環境への配慮」、「コスト縮減」といった建設市場のニーズに対応すべく、新たな技術開発も進められている。

本稿では、DJM工法の基本原理を概説した後、「環境への配慮」、「コスト縮減」をキーワードとして開発が進められたDJM工法の発展技術を紹介する。また、本工法は施工機として専用の三点支持式のベースマシンを用いてきたが専用機の生産中止を受け、汎用機を用いた施工を検討し、実大実験実施後に実用化に至った。汎用機械の概要についても併せて紹介する。

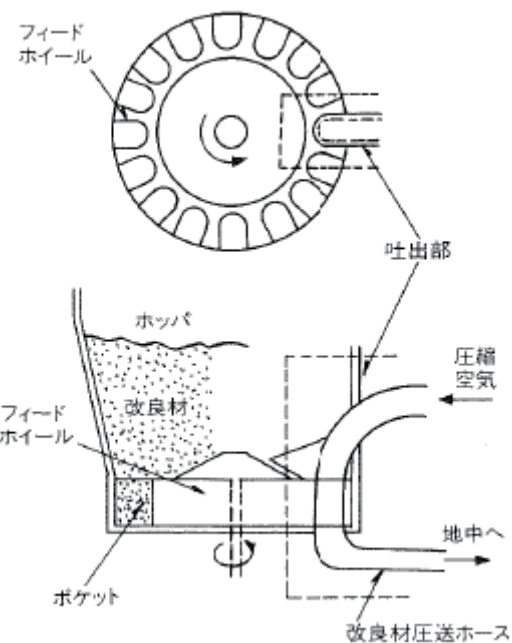


図1 改良体供給機の構造¹⁾

2. DJM工法の概要

2-1. 施工機構の原理

DJM工法は、圧縮空気搬送による改良材の連続供給技術、土中での改良材と空気との分離、空気の回収技術等の開発によって実用化されたものである。工法の施工機構の流れとしては、まず、図1に示す機構の改良材供給機により、フィードホイールの円周部にあるポケットに落ち込んだ改良材をフィードホイールの回転によって、吐出部の圧縮空気の流れの中に入れる。次に、改良材供給機で圧縮空気の流れに乗せられた粉粒体の改良材を圧縮用のホースと攪拌軸中部を経由し

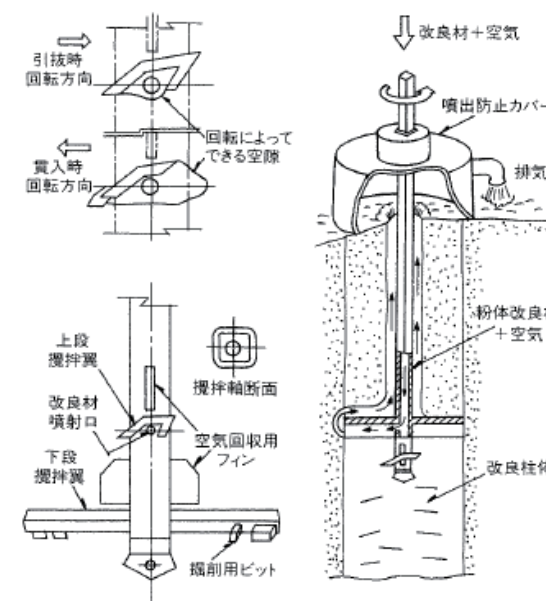


図2 攪拌翼形状と施工機構¹⁾

て、攪拌軸の付け根部の噴射口から土中に噴射する。攪拌翼の基本的な形状は図2に示す構造になっている。翼の回転によって翼背面に隙間が生じ、噴射口からこの空隙部に向かって改良材と空気を噴射し、攪拌翼でミキシングする。空気は、改良材と分離し、攪拌軸まわりを伝わって上昇し、地上に放出される。空気の地上放出効果を高めることを目的として、攪拌軸の形状は外形を角形にしたものが用いられている。

2-2. DJM工法の特長

DJM工法は、改良材を粉粒体で地盤に供給することから、以下に示す特徴を有している。

- ① 改良材の種類は、その最大径が5mm程度以下で乾燥状態の粉粒体であれば、セメント、石灰、消石灰、排煙脱硫石こう、鉍砕スラグ、フライアッシュ、あるいは乾燥状態の砂や碎石ダストなど、地盤の性質と改良の目的に応じて、さまざまな材料が使用できる。また、事前に混合しておけば2種類以上の材料を同時に噴射することもできる。
- ② 土質性状と必要強度に応じて、改良材の混合量を自由に選ぶことができる。そのため、有機質土などに対しても、混合量を多くすることにより改良が可能である。

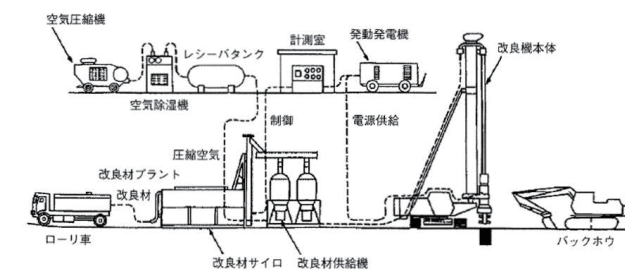


図3 DJM施工機の基本構成¹⁾

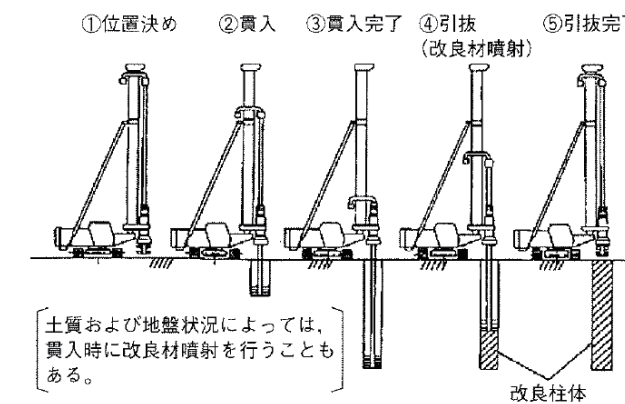


図4 施工手順¹⁾

- ③ 改良材が粉粒体のままであることから、スラリーに比べて地盤内に注入する絶対量が少なくてすむため、他の深層混合処理工法に比べ、比較的地盤の盛り上がりや周辺地盤への影響が少ない。
- ④ 水をまったく使用しないため、施工現場をきれいに保つことができる。さらに粉体の搬送に密閉型のシステムを使っているため、粉塵などがなく雨天、降雨時でも施工できる。

2-3. 施工機械と施工方法

図3にDJM工法の施工機械の基本構成を示す。図のように施工機械設備は改良機本体と改良材プラント部分に分けられる。改良機本体は地盤中に改良材の供給・攪拌・混合を行うもので、単軸型と二軸型がある。単軸型は簡単なほふく装置を持ったスキッド型、二軸型はクローラー型のベースマシンに搭載されている。

DJM工法では、改良径1,000mm、二軸同時施工(軸間距離:800mm, 1,000mm, 1,200mm, 1,500mm)を標準とし、最大貫入深度は33mまで施工可能である。

図4にDJM工法の施工手順を示す。まず、改良機

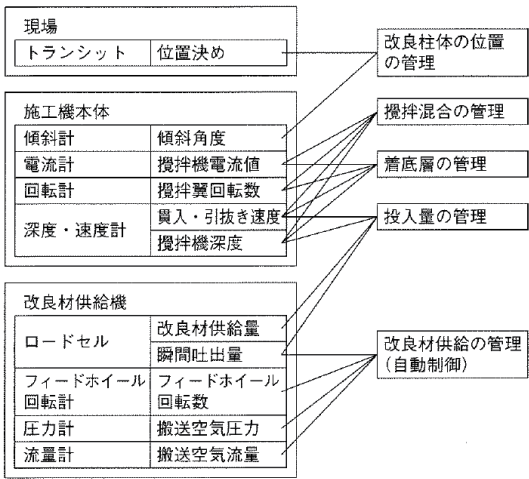


図5 施工管理項目



写真1 杭頭確認状況(左 φ1,300mm 右 φ1,000mm)

本体の位置決めと攪拌軸の鉛直性の確認の後、攪拌軸を回転させながら所定の深度まで貫入する。この際、改良材は噴射させないが噴射口を詰まらせないために圧縮空気は噴出させておく。これは、貫入に際して貫入速度を早くし、負荷トルクを軽減させる効果もある。次に引抜きと改良材の噴射攪拌が併行して行われる。改良材の量の制御は、改良材供給機から送出される改良材の吐出量と攪拌翼の引抜き速度の関係によって決まる。なお、鋭敏比が大きい地盤等では、貫入時の攪拌により強度低下が生じ、攪拌軸の周辺に空気回収のための空隙が保てない場合がある。このような地盤に対して貫入時に改良材の全部または一部を噴射する施工方法がとられる場合もある。

図5にはDJM工法の施工管理項目を示す。本工法では他の深層混合処理工法と同様に、一般に出来形を

改良パターン	杭式		接円ラップ式
φ1200×2軸	2.26m ³ /2軸 	2.17m ³ /2軸 	
φ1300×2軸	2.66m ³ /2軸 	2.56m ³ /2軸 	

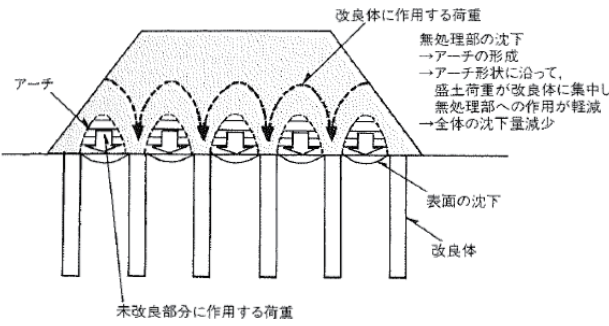


図6 盛土材のアーチ効果²⁾

直接肉眼で確認しながら施工することが出来ないため、施工管理は計器による確認が主体となる。計測する項目としては、空気の圧力、流量、攪拌翼の回転数、電流値、貫入・引抜き速度および深度。改良材の吐出量等多岐にわたる。

3. DJM工法の発展技術

3-1. 拡大径粉体噴射攪拌工法 (EX-DJM 工法)

EX-DJM 工法 (Expanded-DJM) は、従来改良径が1,000mmであった標準施工機をベースとして、攪拌翼径を1,200mmおよび1,300mmに拡大して大口径の改良体を造成する工法である。改良径の拡大により改良面積が大きくなることから、施工能率の向上、工期の短縮、コストの低減を図ることができる。

表1には標準の改良パターンを、写真1には杭頭部の確認状況を示す。なお、この工法は攪拌翼径の拡大により、処理機の負荷が増大するため、その適用に当たっては、土質条件や改良仕様等を慎重に考慮する必要がある。

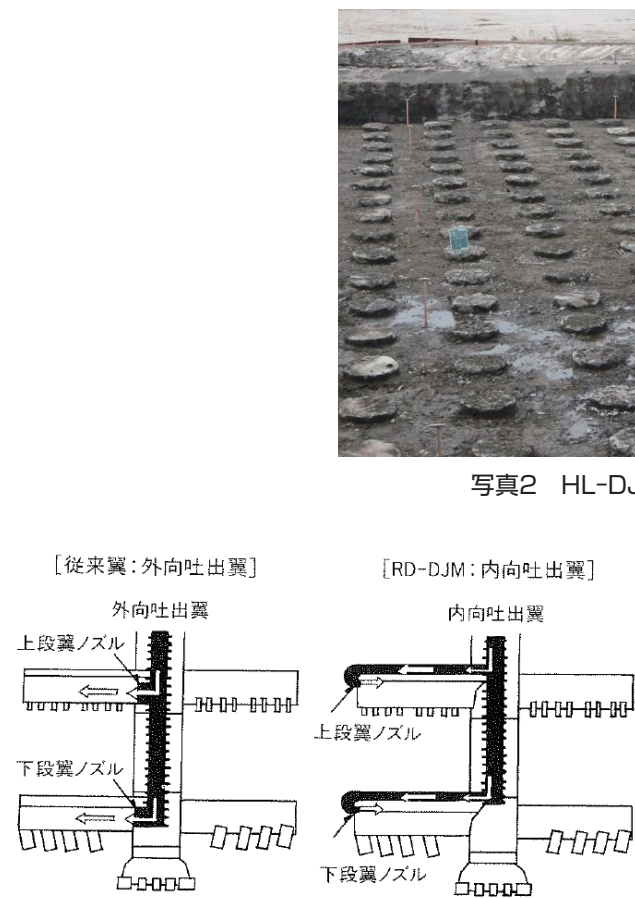


図7 外向吐出翼と内向吐出翼

3-2. 高強度・低改良率 (HD-DJM) 施工法

最近の建設市場における「コスト圧縮」の流れを受けて、盛土材のアーチ効果を考慮し(図6)、従来よりも低い改良率(10～30%)で盛土直下全面に改良体を配置することにより軟弱地盤の圧密沈下低減を図る、低改良率セメントコラム工法 (ALiCC 工法)²⁾が実用化されている。この工法は低改良率化によりコスト縮減、工期短縮を図ることが可能となる(写真2)。

HL-DJM (High strength Low improvement) 施工法とは、ALiCC 工法に代表される低改良率セメントコラム工法で要求される高強度・低改良率の改良体配置に対して、二軸施工機で効率的に施工ができる施工法であり、軸間距離1,600mm以上3,000mm以下(改良率10～30%相当)で施工が可能である。

3-3. 変位低減型 (RD-DJM) 施工法

変位低減型施工法 (RD-DJM Reducing Displacement-DJM)

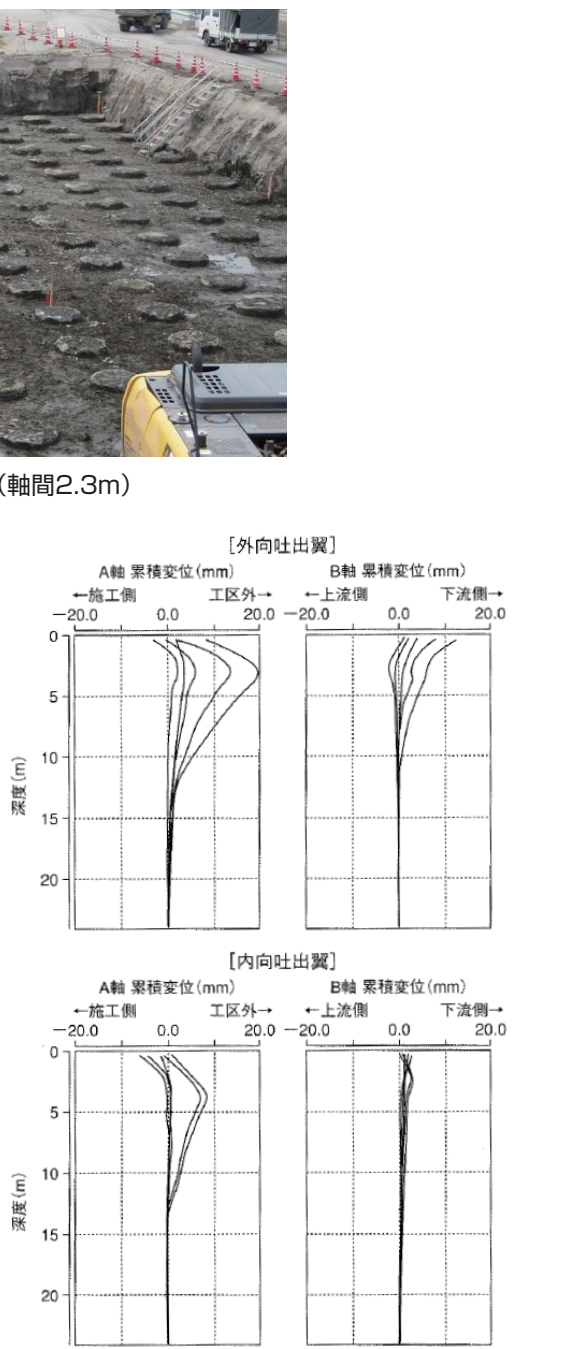


図8 地中変位測定事例³⁾

とは、従来施工機のように攪拌軸の付け根部噴射口から改良材を外側に噴射するのではなく、攪拌翼外縁に吐出管を配置し内向きに吐出する(図7)。この内向吐出翼を用い、さらに翼軸も含めた攪拌軸に特殊なフィンを付けることで、従来機より空気回収の効率化を図り、施工工程での周辺地盤変位の低減を図る工法である。

図8には、単軸施工機を用いて行われた、外向吐出翼と内向吐出翼の変位低減効果の確認試験結果³⁾を示す。改良域から3.0mの位置に設置された地中傾



写真3 単軸施工機全景(左:汎用機 右:従来機)

表2 施工機仕様(単軸機)

	汎用機	従来機
攪拌トルク kNm	71.2	19.6
出力 kw	132.5	75
走行形式	クローラ	スキッド*
全重量 t	27.1	24.0
設置圧 kPa	83.3	23.5
最大深度 m	15	20



写真4 二軸施工機全景

斜計の測定結果によると、従来の外向吐出翼の最大変位20mmに対し、内向吐出翼では8mm程度であり1/2～1/3程度に変位を低減できることが確認されている。なお、二軸施工機を用いた内向吐出翼においても同様に1/2～1/3程度に変位を低減できることが確認されている⁴⁾。

4. 汎用施工機を用いたDJM工法

本工法は施工機として専用の三点支持式のベースマ

シンを用いてきたが専用機の生産中止を受け、汎用機を用いた施工を検討した。なお使用する攪拌翼は従来施工機と同等のものをを用いている。

4-1. 単軸施工機

写真3に単軸施工機の全景を、表2に単軸施工機の仕様を示す。粘土質シルト(最大N値4)および沖積ローム(最大N値7)・沖積砂質土(最大N値37)を対象とした土質で実大実験を行い、施工性および改良体品質が従来施工機と同等であることを確認し⁵⁾実用化に至った。

4-2. 二軸施工機

写真4に二軸施工機の全景を、表3に二軸施工機の仕様を示す。沖積ローム(最大N値7)・沖積砂質土(最大N値37)を対象とした土質で実大実験を行い、改良体品質が従来施工機と同等であることを確認し実用化に至った。

5. おわりに

本稿では、DJM工法の概要とDJM工法に関する発展技術について紹介した。DJM工法は1980年に実用化されて以来、施工実績も年々倍増し、2022年度までの累計施工件数は5,350件を超え、実改良土量も3,480万m³に達している。近年では、「環境への配慮」、「コスト削減」といった建設市場に求められるニーズもますます

厳しくなっており、従来技術を応用した新しい技術開発への取り組みが、今後さらに必要になると考えられる。

【参考文献】

- 1) DJM工法研究会／DJM技術マニュアル、2014
- 2) 鹿島出版会／ALiCC工法マニュアル、2015
- 3) DJM工法研究会／RD-DJM技術資料、p.3、2017
- 4) 島野ら／粉体噴射攪拌工の変位低減型施工法(RD-DJM 施工法)、第49回地盤工学研究発表会、pp831～832、2014
- 5) 島野ら／粉体噴射攪拌工法の汎用施工機を用いた実大実験、第76回土木学会年次学術講演会、p.VI-107、2021

しまの あらし / SHIMANO Arashi
三信建設工業(株)
営業本部 技術営業部
部長

やまだ たかし / YAMADA Takashi
DJM工法研究会
事務局長

日本の国土強靱化に、貢献します。

DJM 工法は開発から 40 年、施工件数 5,350 件、施工土量 34,737,000m³の実績を有する日本を代表する深層混合処理工法です。



DJM1100型

DJM
DRY JET MIXING METHOD
粉体噴射攪拌工法

DJM 工法研究会

〒111-0052 東京都台東区柳橋 2-19-6 三信建設工業(株)内
TEL: 03-5825-3710 FAX: 03-5825-3756 E-mail: jimkyok@djm.gr.jp



<https://www.djm.gr.jp>

特別寄稿

続・コンクリート鳥居

～赤城・小泉稲荷神社と貫前神社の大鳥居～

Same type of Concrete Torii Gates at Akagi Great Torii and
Koizumi Inari Shrine Great Torii and an older Nukisaki Shrine Great Torii

辻 幸和

1. はじめに

鳥居とは、神社などにおいて神域と人間が住む俗界を区画するものの結界であり、一種の「門」とされている。鳥居の材料は、檜・杉などの木材で造られた「木鳥居」、石で造られた「石鳥居」、銅板で全体を葺いた「銅鳥居」などが一般的であり、コンクリート製の鳥居もまだ少ないものの建立されている。先に、鉄筋コンクリート製の大規模で建立後50年余を経ている「コンクリート鳥居」の赤城大鳥居、および一般的な規模であるが1936(昭和11)年建立と長い歴史を持つ東京の八名川稲荷神社の鳥居について、それぞれ紹介した¹⁾。

本稿では、赤城大鳥居とそれに類似の高さが約1m高い小泉稲荷神社の大鳥居について、設計の経緯とともに紹介する。そして、1929(昭和4)年に建立された八名川稲荷神社の鳥居よりも古い貫前神社の鉄筋コンクリート製と推定される大鳥居についても言及する。

2. 赤城大鳥居

赤城大鳥居は、前橋市富士見町小暮に位置し、設



写真1 赤城大鳥居

計・監理は前橋市役所建設部建築課で、施工は前橋市に本社を置く小野里工業(株)であった。設計・監理を主に担当した^{くわばら}榎原幸夫氏が保存している手書きの設計図によると、高さ21.3m、柱間約14.0m、笠木巾28.0m、柱径約1.7mの大規模な鉄筋コンクリート製の鳥居である(写真1)。

1965(昭和40)年の道路拡張のさいに当時の前橋市観光協会(現在の(公財)前橋観光コンベンション協会)が中心となって浄財を募り、建設された。そして1966(昭和41)年に群馬県営の「赤城南面有料道路」として開通した際に、その起点としてこの大鳥居が定められている。1995年には、前橋市富士見町小暮・同市富士見町赤城山の区間が無料化され、現在に至っている。

現在の鳥居は2010(平成22)年に塗り替えられている。

笠木と貫の端面の白色も、朱色と良い対比をして鮮やかである。また鳥居に近づくにつれて迫力が増して、毎回

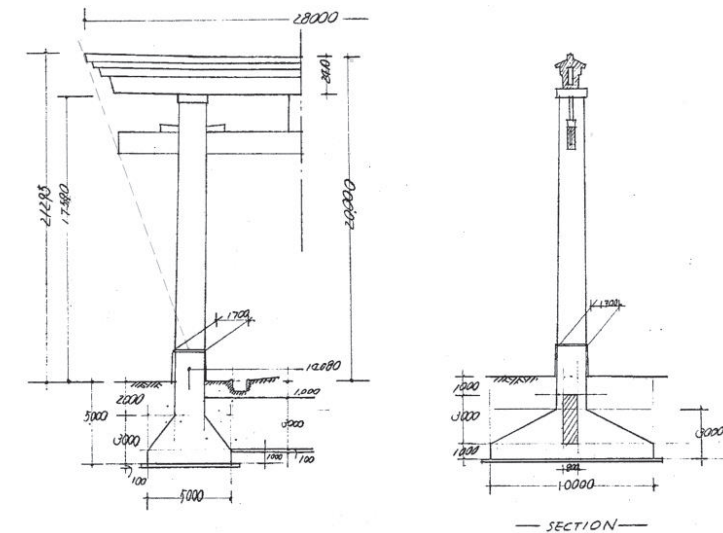


図1 赤城大鳥居のスケッチ

通るごとに素晴らしい鳥居と見上げてしまう、赤城山入口のシンボリックな大鳥居である。

榎原氏に伺うと、2本の柱間隔の14mは2車線の県道を車と人が行き交う条件で決まり、その高さや形状、笠木、貫および柱との構成に苦心されたとのことである。いかに美しく優雅に感じさせられるかである。すなわち、太い2本の柱と笠木、貫の配置と形状寸法の決定には、何度もスケッチを描き、同僚の意見を聞きながら直されたとのことである。そして、笠木と貫において片面6か所に設置するホワイトブロンズ製の菊座の大きさ(直径30cm)と位置、並びに柱頭の黒輪の形状寸法にも工夫を凝らされた。

その結果、最高高さ21.295m(標準地盤より)、柱の直径は1800mm～1580mm、柱間幅14.080m、笠木全幅28.000mに辿りついた。図1は、榎原幸夫氏の鉛筆書きによる「赤城大鳥居新設工事構造計算書-設計監理-」から複写させて頂いた。この「赤城大鳥居新設工事構造計算書-設計監理-」は、A4版10頁のもので、簡潔明瞭に設計の内容が記述されている。また設計図はA1版6枚に描かれており、こちらも非常に簡潔明瞭なものである。

赤城大鳥居は、鉄筋コンクリート(RC)製で、柱は充填しているが、重量軽減のため、笠木、貫、楔、中束は中空としている。そして柱の交差部において、ある区間を定めてコンクリートを充填している。なお、コ

ンクリートの打込みには埋設型枠を用いて、中空断面を形成している。

柱は17.590mの柱頭位置で394mm鉛直線から内側に傾けており、また笠木の頭部先端と、貫の下端、柱の袴上面の中心点が一直線に結ばれた、いわゆる“たすき掛け”としており、引き締まった部材構成になっている。笠木と貫の形状寸法についても、種々に工夫されている。すなわち、笠木と楔の側面の傾斜は、貫の下面と側面の角の点にそれぞれ収束させて、引き締まった形状寸法にしている。そして、優美で凛々しい佇まいの形状寸法になっている。また、菊座の直径を30cmとしてその位置、並びに黒輪の形状寸法も決定された。

コンクリート表面にはモルタルを塗り、金鋳で磨きプライマーを塗布し、漆系合成樹脂塗料のカシュー仕上げとして、色鮮やかである。

構造計算は、当時の建築基準法と同施行令、日本建築学会諸規準に準拠している。

鳥居面内と鳥居面外の両方向について検討を行い、軸部算定用震度は面外方向0.3、面内方向0.2とし、転倒の検討用震度は0.2としている。また下部には、鳥居面内方向の幅が5mと面外方向の幅が10mの鉄筋コンクリートの基礎スラブを配置しているが、その断面算定用震度は0.3としている。そして、短期荷重作用時に基礎スラブには引張を生じないように、合力を核内に収めている。



つじ ゆきかず / TSUJI Yukikazu
NPO法人 持続可能な社会基盤研究会
理事長
群馬大学・前橋工科大学
名誉教授



写真2 小泉稲荷神社の多数の献納された鳥居



写真3 小泉稲荷神社の大鳥居

2本の柱はまた図1に示したように、地盤中で、幅0.8m、高さ3mのRC梁で連結している。地盤は、スエーデン式ベネトロメーター（貫入試験器）により耐力を実測しており、許容地耐力は20t/m²を採り、地盤耐力は良好であったとのことである。

コンクリートの設計基準強度は225kgf/cm²で、レディーミクストコンクリートを用い、鉄筋は呼び名が32までの異形鉄筋SSD49（異形2種）のJIS規格品を用いた。許容耐力はそれぞれ75kgf/cm²および2000kgf/cm²であった。

3. 小泉稲荷神社の大鳥居

赤城大鳥居から車で約30分の佐波郡東村（現伊勢崎市小泉町）に、小泉稲荷神社がある。12代崇神天皇の世に、勅命により山城国伏見稲荷大明神の御分霊を奉祀し、住民の安寧と五穀豊穡を祈願し崇敬の道を教えるために創建されたと伝えられている。

その後1600（慶長5）年に、この地の領主の旗本久



写真4 小泉稲荷神社大鳥居の柱、笠木、貫、楔、中束

永源兵衛は崇敬の念が厚く、社殿を修理し敬神の範を示したため、領民は氏神として祀っていたといわれている。特に江戸時代末期は、祭礼日に近郷近在の参詣人で非常に賑わっていたといわれる。現在でも初詣では、15万人を超しており、全県的に知られている信仰対象稲荷神社としてあまりにも有名である。

近代に入り、社殿が老朽化したことから、社殿造営の奉賛会を組織して、崇敬者の多数の協賛により、1961（昭和36）年に現在の社殿を造営している。大願成就の鳥居の献納が盛んで、3百基に及んでおり、3列に隙間なくびっしりと並んでいることも著名である（写真2）。

その後1981（昭和56）年に、小泉稲荷神社の西方800m程の位置に、東村の村道を跨いで高さ22.2mの朱色のRC製の大鳥居が“小泉稲荷神社大鳥居”として建造された（写真3,4）。

設計・監理は、前橋市の（株）勝山工務所で、施工は伊勢崎市の佐藤建設（株）、神額製作は岩手県平泉町の日本美術工芸社であることが、大鳥居の柱に記されている。佐藤建設（株）は現在廃業となり、（株）

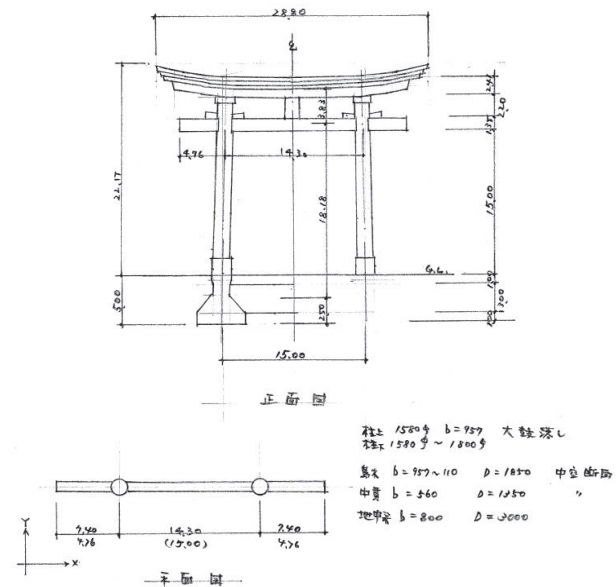


図2 小泉稲荷神社大鳥居のスケッチ



写真6 小泉稲荷神社大鳥居の笠木と貫の断面

勝山工務所は設計・監理された所長のご子息の小林幹昌氏が継いでおられる。設計図は廃棄してしまったが、「小泉稲荷神社大鳥居新設工事構造計算書」は残されている。なお東村は2005年に伊勢崎市と合併したが、関係図面と計算書は小泉稲荷神社および伊勢崎市には残っていない。

勝山工務所に残されている「構造計算書」は、A4版11頁の簡潔明瞭なものである。構造計算は、赤城大鳥居と同様に、建築基準法と同施行令、日本建築学会諸規準に準拠している。そして、鳥居面内と鳥居面外の両方向について検討を行っている。

大鳥居の最高高さは22.17m（標準地盤より）、柱間幅は15.00m、笠木全幅は28.80mで、柱の直径は1800mm～1580mmになっている（図2）。そして、柱



写真5 小泉稲荷神社大鳥居の柱、笠木、貫、中束の配置

は高さ18.18mの位置で350mm鉛直線から内側に傾けている。RC製で、柱は充填しているが、重量軽減のため、笠木、貫、楔、中束は中空としている。また、柱の交差部とその両区間をコンクリートで充填している点も、赤城大鳥居と同様である。そして、表面はサンダーをかけてプライマーを塗布し、漆系合成樹脂塗料のカシュー仕上げとして色鮮やかである。

2本の柱はまた地盤中で、「構造計算書」から複写させて頂いた図2に示したように、幅0.8m、高さ3mのRC梁で連結されている。コンクリートの設計基準強度は225kgf/cm²と240kgf/cm²で、鉄筋は呼び名が22までの異形鉄筋SD30のJIS規格品を用いている。許容耐力はそれぞれ75kgf/cm²と80kgf/cm²および2000kgf/cm²であった。

以上のように、小泉稲荷神社大鳥居は赤城大鳥居よりも約90cm高く、鳥居の高さでは群馬県では最高である。そしてその形状寸法は、赤城大鳥居と非常によく似ている。赤城大鳥居は傾斜のある県道に、小泉稲荷神社は平たんな田園の中の市道に位置し、約90cm高いため、少しスレンダーな感じはするものの、柱は柱頭位置で鉛直線から内側に傾けている（写真5）。

設計図が無いため確かめられないが、赤城大鳥居のように笠木の頭部先端と、貫の下端、柱の袴上面の中心点が一直線に結ばれた、いわゆる“たすき掛け”として、引き締まった部材構成になっていることが感じさせられる。そして笠木と楔の側面の傾斜は、貫の下面と側面の角の点にそれぞれ収束させており、引き締まった形状寸法になっている（写真6）。このように優美で

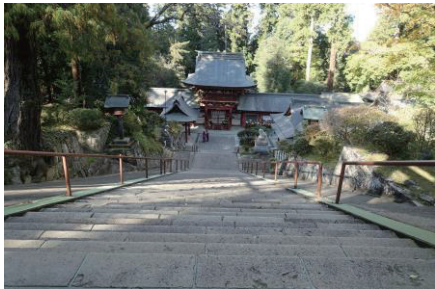


写真7 「下り宮」と称される 貫前神社



写真9 貫前神社の大鳥居

凛々しい佇まいとなっているのは赤城大鳥居と同様である。強いて相違点を探すと、笠木の屋根の上部分が細く、黒色を呈していることと、菊座が設置されていないことである。

そして、毎年秋には周囲の水田に咲くコスモスを祝う“コスモス祭り”が開催されており、その祭りで大きなアクセントとなっている。また、大鳥居は北関東自動車道からも見ることができる。

前出の栢原氏に何うと、赤城大鳥居の竣工から約15年経った頃に、当時の東村の尾内紀美村長から設計依頼があり、その要件が赤城大鳥居より1mでも高い大鳥居にすることであったとのことである。当時はまだ前橋市の職員であり、「政教分離原則」が厳しく問われていたため、藤井精一市長と相談して村長の依頼を断ったが、赤城大鳥居の関係図面と計算書は渡したとのことである。

小泉稲荷神社大鳥居の設計・監理を行った前橋市の(株)勝山工務所の代表をしていた小林昌樹氏は、栢原氏の古くからの友人であった。群馬県で最初の一級建築士事務所を開業したとのことで、スズラン百貨店スポーツ館、前橋東警察署、群馬銀行堅町支店などの設計・監理を行っており、群馬県内の建築士のリーダーであった。栢原氏から渡された赤城大鳥居の



写真8 貫前神社の表参道の階段と大鳥居

関係図面と計算書を参照したためか、引き締まって、優美で凛々しい佇まいの形状寸法は、赤城大鳥居と非常によく似ていることが頷けるのである。

4. 貫前神社の大鳥居

貫前神社は、群馬県富岡市一ノ宮にある神社で、式内社(名神大社)である。上野国の一宮と称されており、旧社格は官幣中社であったが、現在は神社本庁の別表神社である。創建は安閑天皇元年(534年?)と伝えられており、大変歴史のある神社である。

鐺川左岸の河岸段丘上に鎮座し、信州街道に面している。そして境内は正面表参道からいったん石段を上がり、大鳥居と総門を潜ったところから石段を下ると社殿があるという、いわゆる「下り宮」と呼ばれる珍しい配置となっている(写真7)。現在の社名は正式には「一之宮貫前神社」と、旧社格廃止に伴い改称したものであるが、古来は「貫前神社」と称されており、本稿では「貫前神社」と略称する。

社殿は江戸時代に第3代将軍徳川家光および第5代将軍綱吉により整えられた。そして、本殿・拝殿・楼門等が国の重要文化財に指定されている。

貫前神社の大鳥居は、表参道を進んで階段を登りきった場所に位置している(写真8)。高さは約10mであるが、階段の高さをあわせて高さが30mほどに感じさせられる凛々しい両部鳥居である(写真9)。



写真10 貫前神社大鳥居の建立寄付名



写真11 足利織姫神社(小林福太郎:設計)

従来からRC製の鳥居であると推測していたが、写真10に示す「大鳥居建立寄付名」の中に、“設計士小林福太郎”の名前を見つけて確信したので報告する。東京市の住所も記してあり、1929(昭和4)年10月竣工であり、先に報告した八名川稲荷神社鳥居の1936(昭和11)年2月よりも約6.5年前の建立である。

小林福太郎は、内務省社寺局、古社寺保存会、宮内省内匠寮で和風建築を担当し、1919(大正8)年には日光廟修理工事主任を務め、明治神宮の造営にも関与している。のちに社寺建築設計事務所を設立し、全国各地の社寺設計、国宝建築物の修理工事監督を務めている。そしてRC造の神社仏閣を多く設計した建築士として知られている。

1937(昭和12)年建立の登録有形文化財に指定されている「足利織姫神社」(写真11)とその近くの同じく登録有形文化財に指定されている1929(昭和4)年建立の「長林寺本堂」(写真12)も、小林福太郎の設計である。これらのRC造による社寺は、貫前神社の



写真12 長林寺本堂(小林福太郎:設計)

両部式の大鳥居と雰囲気相通じるものである。

5. おわりに

鉄筋コンクリート製の大規模な鳥居は少ないが、建立されて50年余を経ている「コンクリート鳥居」の赤城大鳥居とその15年後に建立された赤城大鳥居とよく似た小泉稲荷神社大鳥居を、設計の内容と経緯とともに紹介した。そして、これらの大鳥居の規模に比べて小さいものの1929(昭和4)年建立と長い歴史を持つ「コンクリート鳥居」と推定される貫前神社の大鳥居についても言及した。全国でも調査を進めれば「コンクリート鳥居」を特定できるものが多く出てくると考えて報告したが、本稿がその端緒となれば幸いである。

【参考文献】

- 辻幸和／コンクリート鳥居－赤城大鳥居と八名川稲荷神社の鳥居，セメント・コンクリート No.895, pp.40～44, Sep. 2021



過酷な環境下におけるコンクリートの養生

Marthe Brock,

Concrete Repair Bulletin

34 [2] 18～21 (2021)

コンクリートを湿潤状態に保ち、セメントの水和を促すことは、乾燥によるひび割れや脆弱部の発生を抑制する上で重要であり、過酷な環境下では養生の影響は顕著になる。著者は、コンクリートの養生方法を4つに分類し、長所・短所をまとめている。

水中養生は長期の強度や耐久性を確保できる。しかし、現場ではコンクリート全体の水中浸漬は現実的ではなく、凍結環境下の場合には適用できない。一方で散水養生は効果的だが、コンクリートを十分に湿潤に保つためには人件費が必要である。

被覆養生は、安価な麻布とポリフィルムが使用されてきたが、コンクリート表面の美観への課題がある。一方、凍結環境下への適用要求から、強化ポリフィルムと断熱材を組合わせた材料が普及している。これは軽量で作業性が良く、複数接続する事で現場の風に対しても十分な重量とすることが可能である。

液状被膜形成養生は、近年、吹付けから30日後に分解される薄膜材が考案されているが、分解速度は紫外線や交通量に影響すると著者は述べている。

水分保持材による養生は、近年、コンクリート中のシリカと結合してマトリクスの一部となるNa系、K系、Li系のケイ酸塩が使用されている。これらはコンクリート表面の留まる必要があるが、量の調整や乾燥には注意が必要である。

著者は、コンクリートの養生には万能な方法はない

が、簡易的で安価なものから、複雑でも予測に沿った結果が得られるものまで多くあり、適切な養生を選択することが重要であると述べている。

先進的な酸素燃焼技術

Dr Michael Clark,

International Cement Review

[5] 56～58 (2022)

現在、セメントキルン排ガスからCO₂を回収する技術については世界で20以上のプロジェクトが進行中である。その多くはプロセスから排出された後の排ガスからCO₂を回収する方法であるが、多量の窒素、過剰空気や水蒸気を含んだ混合ガスからCO₂を分離・回収しなければならないことが課題である。

この課題を背景に酸素燃焼が注目され始めている。酸素燃焼では空気の代わりに酸素を用いて燃焼することで排ガスに窒素が含まれず、CO₂との共存ガスは分離の容易な水蒸気だけとなる。しかし酸素燃焼の実装には大規模な改造が必要となる。

第1世代型の酸素燃焼では、クーラーの1段目の格子から酸素が吹き込まれる。酸素はクリンカを冷却し熱エネルギーを回収しつつキルンと3次空気ダクトに引き込まれ、キルンバーナと仮焼炉での燃焼に利用される。この際発生するCO₂主体の排ガスは一部酸素と混合して燃焼用空気の代わりにバーナから吹き込み、循環利用することで既存のプレヒーターや誘引ファンの流用を可能としている。

第2世代型の酸素燃焼は、CO₂の再循環が不要となることが特長である。純酸素雰囲気により燃料の燃焼が促進され、廃棄物燃料を多用してもキルンの燃焼状態を悪化させることはない。また高温の燃焼領域が仮焼炉まで保持されるため3次空気ダクトも不要となる。加えてガス体積流量が従来の半分になるため、排ガス

系統の設備のコンパクト化と簡略化が図れ、建設費を抑えることができる。

長期供用時に高炉スラグが形成する水和生成物の構造およびそのスラグ粒径との関連性

Yu Zhang, ほか

Cement and Concrete Research

162 論文 No.106985 (2022)

高炉スラグ(以下スラグ)はコンクリートの化学抵抗性向上、長期強度増進、水密性向上といった長所から広く使用される混和材であるが、水和速度の遅いスラグが長い期間を経てどのような水和生成物を形成するかについては知見が少ない。本論文では、暴露環境にあった40年前のスラグセメントコンクリート試料を対象として、高真空走査電子顕微鏡を用いた微細構造観察と主要元素(Ca, Si, Al, Mg)マッピングを行い、スラグ粒子の水和生成物の形成について、スラグ粒径と紐づけて分析した。

水和したスラグ粒子の外周部には、スラグ粒径によらずMgとAlを主成分とするハイドロタルサイト相が形成されていた。これは、Mgイオンは移動度が低く、水和進行時に拡散せずにハイドロタルサイト相として蓄積されるためと考えられる。CaイオンやSiイオンはMgイオンと比較して移動度が高く、スラグ粒子内部に取り込まれる形でC-S-Hゲル相を形成していた。ハイドロタルサイト相の厚みはスラグ粒径によらず最大4μm程度であり、粒径が中程度以上(>8μm)のスラグ粒子の中心には未水和部が見られた。

ハイドロタルサイト相は各種陰イオンの固定能力が高く、コンクリートの化学抵抗性の向上に寄与する。スラグセメントの製造工程において粒径が中程度(8-17μm)のスラグ粒子の割合を多くすることで、スラグ水和度とハイドロタルサイト相の生成量のバランスに優

れたスラグリッチセメントコンクリートを実現可能であると考える。

SO₃量が異なる石灰石か焼粘土セメント(LC³)の収縮、水和、強度発現性

Rotana Hay, ほか

Cement and Concrete Research

127 論文 No.104403 (2022)

石灰石か焼粘土セメント(LC³)には強度最大となる最適SO₃量があり、石こう添加によりSO₃量が調整される。石こう添加はエトリンガイト(Ett)の生成ひいては自己収縮に大きな影響を与えるが、SO₃量と自己収縮に関する知見は少ない。本稿ではSO₃量と自己収縮の関係を調査するため、か焼粘土にメタカオリンを使用し、半水石こうを0-4wt%加えたLC³を対象に、自己収縮、水和発熱速度等の測定を行った。比較として、OPCに半水石こうを0-2wt%加え、同様に測定した。

LC³の半水石こうの添加量増加に伴い、自己収縮量が減少した。材齢3日時の累積水和発熱量が増加したことから、メタカオリンの反応性が向上したと考えられた。XRDパターンでは、これに伴うと考えられるEtt量の増加が確認されており、Ettの結晶生成時に発生する圧力の上昇で自己収縮量が小さくなったと推察された。なお、LC³のモルタル圧縮強度は半水石こう2wt%添加時に最大となり、最適SO₃量の存在が確認された。

また、OPCに比べ、LC³は自己収縮量が大きかった。SEM観察から、LC³ではEttの結晶が小さく、C-A-S-Hの細孔が緻密である様子が確認された。ポズラン反応による構造緻密化、およびこれに伴いEttの結晶成長が阻害されることにより結晶成長圧が低下するため、OPCに比べ、LC³は自己収縮量が大きくなったと考えられた。

EVENT GUIDE イベントガイド

既刊図書講習会

「免震・制振構造の設計 学びやすい構造設計」

開催日：2023年6月26日(月)

会場：オンライン(Zoom ウェビナー)

参加費：会員 4,000円、会員以外5,500円

※テキスト代は別途

申込方法：土木学会HPより申込み

問合せ：土木学会事務局研究事業課(担当：佐々木)

メール：ssk@jsce.or.jp

コンクリートライブラリー第163号

石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針に関する講習会

開催日：2023年7月10日(月)

会場：土木学会講堂およびオンライン(Zoom)

参加費：会員7,000円、学生会員4,000円、会員以外9,000円

定員：会場70名、オンライン200名(申込先着順)

申込方法：土木学会HPより申込み

問合せ：土木学会 研究事業課 コンクリート委員会
担当事務局宛

メール：ssk@jsce.or.jp

第30回 プレストレストコンクリート建築技術講習会

開催日：2023年7月14日(金)13:00～17:00

会場：建築会館大ホール(東京都港区)

定員：会場200名、オンライン(Zoom ウェビナー)
1000名、オンデマンド受講100名(いずれも要
事前申込)

参加費：無料

問合せ：プレストレスト・コンクリート建設業協会 建築
委員会建築部会建築工法推進小委員会

メール：pc-kosyu@bizgroup.co.jp

第26回 橋梁等の耐震設計シンポジウム

開催日：2023年7月26日(水)～27日(木)

会場：土木学会およびオンライン(Zoom)

参加費：会員10,000円、学生会員6,000円、
会員以外15,000円

定員：100名(申し込み先着順)

申込方法：土木学会HPより申込み

問合せ：土木学会事務局研究事業課(担当：佐々木)

電話：03-3456-2051

第35回 日本道路会議

開催日：2023年11月1日(水)～2日(木)

会場：都市センターホテル(日本都市センター会館
内)東京都千代田区およびWEB配信(ライブ
配信、オンデマンド配信)

参加費：一般10,000円、学生3,000円

申込方法：日本道路会議HPより申込み

締切：2023年10月16日(月)

問合せ：日本道路協会 第35回日本道路会議事務局

メール：dourokaigi@road.or.jp

お知らせ

2023年度コンクリート技士・コンクリート主任技士試験のご案内

日時・方法： 2023年11月26日(日)
技士試験〔筆記試験(四肢択一式)〕13:30～15:30
主任技士試験〔筆記試験(四肢択一式および記述式)〕13:30～16:30

合否通知： 2024年1月中旬(予定)

試験地： 札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、広島、高松、福岡、沖縄

受験料： 技士試験 12,100円 主任技師試験 14,300円(いずれも税込)

受験願書： 1) 販売期間：2023年7月3日(月)～8月21日(月)消印有効
2) 代金：技士・主任技士とも1部1,000円(税・送料込み)
3) 提出期間：2023年8月1日(火)～9月4日(月)厳守(消印有効)※いずれも郵送のみでの受付け。
別途上記の受験料が必要。
4) 請求および提出先：東京都千代田区麹町1-7相互半蔵門ビル12F (公社)日本コンクリート工学会
「コンクリート技士試験担当」
詳細は日本コンクリート工学会ホームページの受験案内にてご確認ください。
URL：https://www.jci-net.or.jp/j/exam/gishi/index.html

名 称	開催期日	開催地	問い合わせ先	電話番号等	本誌掲載頁
第50回 プレストレストコンクリート技術講習会	2023年 6月5日～26日	オンデマンド 動画配信	プレストレストコンクリート 工学会	03-3260-2521	5月号 p.54
既刊図書講習会 「免震・制振構造の設計 学びやすい構造設計」	2023年 6月26日	オンライン	日本建築学会	03-3456-2521	本号 p.59
コンクリート構造物の補修・補強に関する フォーラム2023 ～コンクリート構造物の健康寿命を 延ばし、脱炭素社会の構築に寄与する～	2023年 6月14日～15日	東京都	コンクリートメンテナンス協会	082-541-0133	5月号 p.54
	2023年 6月28日～29日	大阪府			
	2023年 6月28日～29日	福岡県			
第43回 防錆防食技術発表大会	2023年 7月3日～4日	東京都	日本防錆技術協会 第43回防錆防食技術 発表大会事務局	03-3434-0451 jacc@jacc1.or.jp	4月号 p.60
コンクリート工学会次大会2023(九州)	2023年 7月5日～7日	福岡県	日本コンクリート工学会	03-3263-1571	4月号 p.60
コンクリートライブラリー第163号 石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計・ 施工指針に関する講習会	2023年 7月3日～4日	東京都 および オンライン	土木学会 研究事業課 コンクリート委員会 担当事務局	ssk@jsce.or.jp	本号 p.59
第58回 地盤工学研究発表会	2023年 7月11日～14日	福岡県 および オンライン	地盤工学会	jgs_support @nacos.com	4月号 p.60
第30回 プレストレストコンクリート建築技術講習会	2023年 7月14日	東京都 および オンライン	プレストレスト・コンクリート建設業協会 建築委員会建築部会建築工法推進小委員会	pc-kosyu @bizgroup.co.jp	本号 p.59
第5回「i-Construction」の推進に関するシンポジウム	2023年 7月19日	オンライン	土木学会 研究事業課 建設マネジメント委員会 担当事務局	momoi@jsce.or.jp	5月号 p.54
第26回 橋梁等の耐震設計シンポジウム	2023年 7月26日～27日	東京都 および オンライン	土木学会 事務局研究事業課 (担当：佐々木)	ssk@jsce.or.jp	本号 p.59
令和5年度 全国大会 第78回年次学術講演会	2023年 9月11日～15日	広島県	土木学会事務局総務課 全国大会係	03-3355-3442 office2@jsce.or.jp	4月号 p.60
2023年度日本建築学会大会(近畿) 学術講演会、建築デザイン発表会	2023年 9月12日～15日	京都府 および オンライン	日本建築学会	03-3456-2051	4月号 p.60
POWTEX 2023 国際粉体工業展大阪2023	2023年 10月11日～13日	大阪府	日本粉体工業技術協会	075-354-3581	5月号 p.54
	2023年 9月27日～11月10日	オンライン			
第23回 コンクリート構造物の 補修、補強、アップグレードシンポジウム	2023年 10月12日～13日	京都市	日本材料学会 「コンクリート構造物の補修、 補強、アップグレード論文 報告集・シンポジウム」係	075-761-5321	2月号 p.22
第32回 プレストレストコンクリートの発展に関する シンポジウム	2023年 10月26日～27日	福島県	プレストレストコンクリート 工学会 シンポジウム係	03-3260-2521	5月号 p.54
第10回 構造物の安全性・信頼性に関する 国内シンポジウム	2023年 10月25日～27日	東京都	土木学会 JCOSAR2023事務局	jcossar2023 @ml-jsce.jp	3月号 p.62
第35回 日本道路会議	2023年 11月1日～2日	東京都 および オンライン	日本道路協会 第35回日本道路会議事務局	dourokaigi @road.or.jp	本号 p.59
第16回日本地震工学シンポジウム	2023年 11月23日～25日	神奈川県	日本地震工学会事務局	03-5730-2831	4月号 p.60

※掲載中の情報は状況により中止・延期の場合がございます。各主催HP等にて最新情報をご確認ください。

セメント協会の動画配信・WEBセミナーのご案内

セミナー・講座名	会場名	土木学会 CPD(単位)
1 DAY PAVE 製造施工マニュアル[第1版]の概要(約26分)	WEB	-
動画で学ぶ断面修復工法の基礎知識(約34分)		-
コンクリート舗装の基礎知識(約33分)		-
セメント系固化材の基礎知識(約45分)		-
セメント系補修・補強材料の基礎知識(約29分)		-
地盤改良に関する試験について(約31分)		0.5

セミナーに関する詳細・お申込みはセメント協会 動画配信サイトをご覧ください ▶▶▶ <https://jcafukyu.jp/>

セメント・データファイル

※千t以下を四捨五入したため、必ずしも合計に合致しない

生産

(単位:千t, %)

種類	項目	23年		23年	
		2月	前年比	3月	前年比
ポルトランドセメント	普通	2,460	90.7	2,701	94.8
	早強・超早強	304	97.2	308	95.6
	中熟熱	61	85.9	61	66.5
	低熱	19	181.2	15	77.3
	耐硫酸塩	0	-	0	-
	その他	0	-	1	-
	小計	2,843	91.6	3,086	94.0
混合セメント	高炉	804	95.2	849	94.6
	シリカ	0	-	0	-
	フライアッシュ	2	136.8	4	99.9
	その他	88	81.3	64	52.0
	小計	894	93.7	918	89.5
その他のセメント		11	137.3	12	73.3
計		3,749	92.2	4,016	92.8
輸出用クリンカ等		189	40.4	195	35.4
合計		3,938	86.8	4,211	86.4

販売

(単位:千t, %)

地区	23年			23年		
	2月	前年比	構成比	3月	前年比	構成比
北海道	96	108.0	3.3	101	105.4	3.1
東北	186	96.4	6.4	210	94.3	6.5
関東一	699	98.0	24.0	799	97.7	24.7
関東二	291	98.8	10.0	318	92.9	9.8
北陸	104	98.2	3.6	120	89.5	3.7
東海	364	103.2	12.5	383	99.7	11.8
近畿	452	105.1	15.5	517	108.3	16.0
四国	106	91.2	3.6	111	96.1	3.4
中国	177	96.8	6.1	195	89.6	6.0
九州	380	97.8	13.0	409	95.7	12.6
沖縄	62	97.2	2.1	69	93.5	2.1
計	2,916	99.6	100.0	3,233	97.7	100.0

輸出

(単位:千t, %)

地域・仕向地	23年		23年	
	2月	3月	2月	3月
アジア	韓国	38	25	
	中国	0	0	
	台湾	25	38	
	香港	66	89	
	フィリピン	23	23	
	シンガポール	163	155	
	マレーシア	0	0	
その他	大洋州	163	147	
	中南米	0	0	
	小計	163	147	
	合計	478	477	

需給

(単位:千t, %)

項目		生産		販 売				期末在庫		輸 入		内 需		固化材 原料他		
		前年比	国 内	前年比	輸 出	前年比	合 計	前年比	前年比	前年比	前年比	前年比				
会計年度	2013	62,392	104.9	46,953	107.3	8,503	88.3	55,455	103.9	4,412	106.6	752	91.4	47,705	107.0	6,665
	2014	61,139	98.0	45,048	95.9	9,421	110.8	54,469	98.2	4,580	103.8	503	66.8	45,551	95.5	6,502
	2015	59,238	96.9	42,347	94.0	10,583	112.3	52,930	97.2	4,684	102.3	320	63.7	42,668	93.7	6,204
	2016	59,271	100.1	41,497	98.0	11,529	108.9	53,027	100.2	4,393	93.8	280	87.4	41,777	97.9	6,536
	2017	60,360	101.8	41,701	100.5	11,808	102.4	53,508	100.9	4,189	95.4	175	62.6	41,876	100.2	7,056
	2018	60,230	99.8	42,499	101.9	10,371	87.8	52,870	98.8	4,446	106.1	91	51.8	42,589	101.7	7,103
	2019	58,135	96.5	40,948	96.4	10,532	101.6	51,480	97.4	4,492	101.0	22	24.6	40,970	96.2	6,609
	2020	56,053	96.4	38,650	94.4	11,113	105.5	49,763	96.7	4,332	96.4	20	90.0	38,670	94.4	6,450
	2021	55,741	99.4	37,872	98.0	11,484	103.3	49,356	99.2	4,347	100.3	10	52.0	37,882	98.0	6,371
	2022	51,482	92.4	37,265	98.4	8,137	70.9	45,402	92.0	4,194	96.5	16	151.4	37,280	98.4	6,233
暦年度	2013	61,694	104.1	46,177	106.2	8,763	90.1	54,940	103.2	3,872	101.5	789	97.7	46,966	106.0	6,695
	2014	61,916	100.4	45,854	99.3	9,108	103.9	54,962	100.0	4,401	113.7	567	71.8	46,421	98.8	6,425
	2015	59,465	96.0	43,034	93.8	10,142	111.3	53,176	96.7	4,358	99.0	348	61.4	43,382	93.5	6,333
	2016	58,978	99.2	41,324	96.0	11,536	113.8	52,860	99.4	3,927	90.1	281	80.7	41,605	95.9	6,549
	2017	60,788	103.1	41,985	101.6	11,911	103.2	53,896	102.0	3,902	99.4	228	81.2	42,213	101.5	6,917
	2018	60,093	98.9	42,178	100.5	10,658	89.5	52,836	98.0	4,005	102.6	115	50.4	42,293	100.2	7,154
	2019	58,335	97.1	41,389	98.1	10,323	96.9	51,712	97.9	3,938	98.3	17	14.9	41,406	97.9	6,689
	2020	57,083	97.9	39,236	94.8	10,979	106.4	50,214	97.1	4,412	112.0	16	90.8	39,251	94.8	6,395
	2021	55,580	97.4	38,019	96.9	11,460	104.4	49,479	98.5	4,086	92.6	20	131.1	38,039	96.9	6,426
	2022	53,207	95.7	37,488	98.6	9,569	83.5	47,057	95.1	4,062	99.4	10	51.2	37,499	98.6	6,175
半期	2020年度上	28,958	96.8	19,605	95.2	5,854	106.1	25,459	97.5	4,332	96.4	15	137.0	19,629	95.2	3,297
	2021年度上	27,343	100.9	18,690	98.1	5,705	108.5	24,395	100.4	4,117	99.7	5	100.4	18,696	98.1	3,162
	下	28,398	98.1	19,181	97.8	5,779	98.7	24,960	98.0	4,347	100.3	5	35.1	19,187	97.8	3,208
2022年度上	26,016	95.1	18,592	99.5	4,807	84.3	23,399	95.9	3,935	95.6	5	99.2	18,598	99.5	3,029	
下	25,466	89.7	18,672	97.3	3,330	57.6	22,003	88.2	4,194	96.5	11	203.8	18,683	97.4	3,204	
四半期	2020年度Ⅳ	13,383	92.9	9,045	93.9	2,891	104.9	11,936	96.4	4,332	96.4	10	187.5	9,055	94.0	1,526
	2021年度Ⅰ	13,466	103.1	9,224	98.2	2,859	119.6	12,083	102.5	4,069	98.2	0	-	9,224	98.2	1,646
	Ⅱ	13,877	98.9	9,466	98.1	2,846	99.2	12,312	98.4	4,117	99.7	5	100.4	9,472	98.1	1,516
	Ⅲ	14,854	95.4	10,283	97.4	2,865	96.7	13,148	97.2	4,086	92.6	5	103.9	10,288	97.4	1,737
	Ⅳ	13,544	101.2	8,899	98.4	2,914	100.8	11,813	99.0	4,347	100.3	0	-	8,899	98.3	1,471
	2022年度Ⅰ	13,224	98.2	9,171	99.4	2,636	92.2	11,807	97.7	4,246	104.3	5	-	9,176	99.5	1,518
	Ⅱ	12,792	92.2	9,422	99.5	2,170	76.3	11,592	94.2	3,935	95.6	0	-	9,422	99.5	1,511
	Ⅲ	13,647	91.9	9,997	97.2	1,848	64.5	11,845	90.1	4,062	99.4	5	99.7	10,002	97.2	1,675
	Ⅳ	11,819	87.3	8,675	97.5	1,482	50.9	10,157	86.0	4,194	96.5	5	-	8,680	97.5	1,529
	2021年4月	4,266	101.1	3,171	99.4	753	92.9	3,924	98.1	4,182	102.6	0	-	3,171	99.4	493
	5月	4,806	111.4	2,746	96.6	1,229	151.5	3,976	108.8	4,515	104.1	0	-	2,746	96.6	496
	6月	4,394	97.1	3,306	98.3	877	114.0	4,183	101.2	4,069	98.2	0	-	3,306	98.3	657
	7月	4,568	96.4	3,305	99.5	852	88.0	4,157	96.9	4,016	98.8	0	-	3,305	99.3	464
	8月	4,529	92.1	2,811	94.5	1,000	97.8	3,812	95.4	4,388	97.0	0	-	2,811	94.5	345
	9月	4,780	109.2	3,350	100.0	994	113.3	4,343	102.7	4,117	99.7	5	-	3,355	100.1	708
	10月	5,101	99.6	3,488	93.2	1,077	111.8	4,565	97.0	4,044	106.0	0	-	3,488	93.1	610
	11月	4,660	90.6	3,447	101.2	802	91.6	4,249	99.2	3,840	93.4	0	-	3,447	101.2	615
	12月	5,093	96.0	3,348	98.2	986	87.7	4,334	95.6	4,086	92.6	5	-	3,353	98.3	513
	2022年1月	4,132	98.1	2,661	99.8	848	90.5	3,509	97.4	4,173	90.6	0	-	2,661	99.7	536
	2月	4,536	104.8	2,928	98.2	927	100.5	3,856	98.8	4,457	98.9	0	-	2,928	98.2	397
	3月	4,876	100.7	3,309	97.4	1,139	110.5	4,448	100.4	4,347	100.3	0	-	3,309	97.2	538
	4月	4,128	96.8	3,064	96.6	713	94.7	3,776	96.2	4,178	99.9	5	-	3,069	96.8	521
	5月	4,555	94.8	2,772	100.9	1,127	91.7	3,900	98.1	4,405	97.6	0	-	2,772	100.9	428
	6月	4,541	103.3	3,335	100.9	796	90.8	4,131	98.7	4,246	104.3	0	-	3,335	100.9	569
7月	4,236	92.7	3,189	96.5	646	75.9	3,835	92.3	4,092	101.9	0	-	3,189	96.5	556	
8月	4,443	98.1	2,950	104.9	826	82.5	3,776	99.0	4,349	99.1	0	-	2,950	104.9	410	
9月	4,112	86.0	3,283	98.0	699	70.3	3,982	91.7	3,935	95.6	0	-	3,283	97.9	545	
10月	4,676	91.7	3,357	96.3	672	62.4	4,029	88.3	3,848	95.2	0	-	3,357	96.3	734	
11月	4,504	96.7	3,399	98.6	554	69.1	3,953	93.0	4,009	104.4	5	-	3,404	98.7	391	
12月	4,467	87.7	3,241	96.8	622	63.1	3,863	89.1	4,062	99.4	0	-	3,241	96.7	551	
2023年1月	3,670	88.8	2,527	94.9	527	62.2	3,054	87.0	4,281	102.6	0	-	2,527	94.9	396	
2月	3,938	86.8	2,916	99.6	478	51.5	3,393	88.0	4,311	96.7	0	-	2,916	99.6	515	
3月	4,211	86.4	3,233	97.7	477	41.9	3,710	83.4	4,194	96.5	5	-	3,238	97.8	618	
4月	3,597	87.1	2,811	91.7	487	68.4	3,298	87.3	3,989	95.5	0	-	2,811	91.6	504	
累計	2023年1月～	15,416	87.2	11,486	96.0	1,970	54.3	13,455	86.3	3,989	95.5	5	-	11,491	96.0	2,033
	2023年4月～	3,597	87.1	2,811	91.7	487	68.4	3,298	87.3	3,989	95.5	0	-	2,811	91.6	504

主要建設工事・資材統計

年月	建設工事受注動態統計(出所:国土交通省)							(単位:億円)
	合計	国	独立行政法人	政府企業	都道府県	市区町村	その他	
2021年度	200,576	37,968	4,867	27,813	55,215	55,967	5,752	
2022	215,422	41,065	7,012	22,833	59,451	62,687	9,982	
2022年1月	9,739	1,976	235	1,905	2,970	1,838	141	
2	11,513	3,388	253	1,744	2,934	2,048	552	
3	34,541	10,188	989	4,423	10,489	5,890	655	
4	13,561	3,979	279	2,292	3,043	2,333	341	
5	10,892	1,552	382	1,165	1,811	4,484	880	
6	20,290	2,684	420	2,103	3,976	8,783	721	
7	16,770	2,748	281	1,042	4,762	6,543	238	
8	17,167	2,753	302	1,235	5,671	5,744	532	
9	24,272	5,104	541	2,332	6,897	7,595	499	
10	17,406	2,195	627	1,679	6,564	5,028	321	
11	13,077	1,665	607	1,475	4,773	3,412	370	
12	15,489	1,686	380	2,025	4,598	5,667	360	
2023年1月	11,173	2,240	677	1,553	3,037	2,477	439	
2	20,885	5,160	929	1,640	4,014	4,498	4,064	
3	34,439	9,300	1,589	4,292	10,303	6,123	1,216	

年月	着工建築物 構造別 床面積の合計(出所:国土交通省)								(単位:万㎡)	
	合計	構造別						用途別		
		木造	鉄骨鉄筋 コンクリート造	鉄筋 コンクリート造	鉄骨造	コンクリート ブロック造	その他	居住用	非居住用	
2021年度	12,246	5,280	197	2,129	4,558	6	78	7,440	4,806	
2022	11,872	4,877	238	2,458	4,197	6	97	6,746	4,690	
2022年1月	862	349	14	127	348	0.3	4	538	324	
2	922	370	23	192	331	0.5	5	551	371	
3	979	403	10	206	351	0.5	7	616	363	
4	1,127	417	29	268	403	0.4	7	640	486	
5	970	411	30	180	341	0.6	8	578	392	
6	1,105	446	13	213	425	0.5	7	626	479	
7	1,125	438	25	218	435	0.6	8	627	498	
8	1,042	437	13	232	350	0.5	9	645	397	
9	968	437	7	193	322	0.6	8	610	358	
10	990	433	21	181	345	0.6	9	630	360	
11	957	425	16	158	346	0.6	12	606	351	
12	897	386	14	170	319	0.4	7	558	339	
2023年1月	928	330	40	250	299	0.5	8	538	390	
2	902	352	58	194	343	0.5	6	545	357	
3	860	363	22	200	267	0.4	6	579	280	

※単位は万㎡以下を四捨五入したため、必ずしも合計に合致しない

年月	建設工事受注動態統計(大手50社)(出所:国土交通省)									(単位:億円)
	総計	民間		公共機関		建築	土木	大規模工事	未消化工事高 (月末)	
		計	製造業	計	国の機関					
2021年度	150,979	109,267	24,237	33,500	21,885	103,889	47,090	100,146	202,497	
2022	165,377	116,357	32,673	37,045	25,000	112,943	52,434	113,603	-	
2022年1月	11,660	7,955	1,408	2,892	1,952	8,014	3,641	8,180	194,534	
2	12,152	9,464	2,400	2,280	1,700	8,766	3,387	8,875	193,576	
3	28,665	21,001	4,095	6,090	4,030	18,978	9,687	21,341	202,497	
4	9,462	6,623	2,182	2,268	1,578	6,347	3,114	6,028	201,690	
5	8,930	6,695	2,012	1,038	754	6,290	2,640	5,317	201,369	
6	15,741	11,290	3,251	2,525	1,676	11,414	4,327	9,697	202,288	
7	9,176	6,529	2,073	1,839	991	6,310	2,865	5,351	202,222	
8	10,334	8,302	3,261	1,451	1,146	7,711	2,624	6,649	202,166	
9	21,617	13,586	3,925	5,298	4,177	13,970	7,647	15,040	208,186	
10	10,520	7,331	1,341	2,426	1,311	7,400	3,120	6,998	208,774	
11	9,636	6,849	1,908	2,121	1,590	6,736	2,900	5,906	206,833	
12	17,593	14,275	5,184	3,208	1,707	13,048	4,544	14,299	207,841	
2023年1月	10,021	6,986	1,556	2,452	1,782	6,867	3,154	6,992	207,251	
2	14,867	9,285	1,928	5,010	3,207	9,662	5,204	11,344	209,850	
3	27,481	18,606	4,053	7,409	5,081	17,187	10,294	19,983		

※受注高10億円以上の国内工事のみを対象

年月	企業物価指数(出所:日本銀行)									(2020年平均=100)
	総平均	セメント	生コンクリート	セメント製品	製材	砂利・採石	形鋼	小形棒鋼	金属製品	建設・鉱山 機械
2020年平均(C.Y.)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2021年平均(C.Y.)	104.6	100.5	101.4	101.9	140.9	102.5	123.0	120.3	101.5	100.1
2020年度平均(F.Y.)	99.8	100.1	100.2	100.5	100.2	101.7	101.2	100.7	100	100.3
2021年度平均(F.Y.)	107.0	100.6	102.1	102.4	156.9	102.8	130.9	129.0	103.3	100.2
2022年1月	109.3	100.5	102.9	103	165.1	103	139.7	138	106.2	101.6
2	110.3	100.5	103.5	103.6	164.5	103.2	140.2	140	106.7	102
3	111.4	101.7	103.6	103.5	164.7	103.2	142.6	145.2	107.5	101.6
4	113.3	106.6	103.7	103.7	167.6	104.6	150.4	148.9	108.5	101
5	113.3	108.8	105	104.7	168.1	106.3	155.1	153.9	109.5	101.8
6	114.3	110.8	106	106.2	166.8	107.3	157.1	158.3	111.2	103.6
7	115.2	110.8	107	107.7	165.8	107.3	159.4	159.8	114	104.4
8	115.7	111.1	108.5	108.4	163.8	107.7	160.3	160.6	114.6	105
9	116.9	114.9	111.8	109.9	160.8	107.9	160.4	161.9	115.5	105.6
10	118.1	118.1	114.5	111.8	154.7	109.8	159.7	159.7	117.3	106
11	119.1	120.4	115.2	114.3	153.8	109.8	159.3	161.8	118.1	106.2
12	119.8	120.4	115.9	115.3	152.7	109.8	159.3	161.4	118.7	106.2
2023年1月	119.9	120.4	116.1	115.7	148.8	109.8	158.6	162.8	120	106.8
2	119.5	120.4	116.6	116	145	111.4	158.9	164	120.6	106.9
3	119.6	122.9	118.2	116.2	142.1	111.4	158.9	165.2	120.8	107.3
4	119.8	122.9	118.2	116.9	140.3	111.4	159.5	167	121.4	107.6

※企業物価指数が2020年基準に変更

年月	品目	主要セメント製品出荷高Ⅰ(出所:経済産業省)					
		遠心力鉄筋コンクリート製品			空洞 コンクリートブロック (千個)	護岸用 コンクリートブロック (t)	道路用 コンクリート製品 (t)
		管 (t)	ボール (t)	パイプ (t)			
2020年12月		12,208	37,450	118,215	5,922	60,604	223,770
2021年12月		9,887	37,243	104,406	5,351	54,364	185,559
2022年1月		11,706	34,446	98,983	4,091	55,355	165,266
2		10,378	31,936	123,327	5,000	59,450	176,941
3		10,307	33,000	149,572	5,431	47,976	162,267
4		8,489	30,480	139,768	5,963	40,209	141,401
5		7,330	28,302	115,727	5,116	34,545	123,967
6		10,485	32,237	124,415	5,506	30,521	145,665
7		8,408	31,271	115,814	5,138	31,719	138,948
8		7,645	30,995	112,248	4,769	26,945	132,354
9		9,466	32,253	125,194	5,214	25,124	146,645
10		10,737	33,214	132,971	5,338	36,892	158,515
11		12,286	34,069	123,269	5,527	38,818	176,626
12		10,631	30,719	112,858	5,281	42,085	158,413
2023年1月		8,970	27,442	108,222	4,048	42,004	151,189
2		10,034	27,960	128,634	4,946	46,654	157,334
3		11,700	29,855	120,571	4,994	49,803	156,257

年月	品目	主要セメント製品出荷高Ⅱ(出所:経済産業省)			
		PC製品		木毛・木片・セメント板 (千枚)	気泡コンクリート製品 (㎡)
		はり・けた (t)	その他 (t)		
2020年12月		17,054	55,845	2,740	110,898
2021年12月		15,948	54,642	2,595	118,751
2022年1月		8,771	41,831	2,315	96,860
2		15,218	43,062	2,474	91,643
3		20,647	56,579	2,758	103,188
4		15,969	51,271	2,527	98,544
5		14,242	40,732	2,338	91,205
6		16,974	49,821	2,695	107,363
7		13,715	41,894	2,593	103,755
8		12,408	35,475	2,538	100,701
9		13,947	42,105	2,648	112,161
10		11,097	33,241	2,422	117,669
11		8,850	29,573	2,588	117,623
12		10,593	29,525	2,498	114,000
2023年1月		6,847	21,091	2,183	92,185
2		9,203	18,687	2,336	92,707
3		14,809	22,255	2,681	103,964

顧問

長瀧 重義 東京工業大学 名誉教授

委員長

小堺 規行 住友大阪セメント(株) 常務執行役員 セメント・コンクリート研究所長

委員

石橋 忠良	J R 東日本コンサルタンツ(株) 技術統括
伊藤 智章	UBE三菱セメント(株) 技術戦略部 部長
伊藤 康司	全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 所長
内田 俊一郎	太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発推進部 部長
浦野 真次	清水建設(株) 技術研究所 建設基盤技術センター 主任研究員
河村 直彦	(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会((株)ピーエス三菱)
岸 利治	東京大学 生産技術研究所 教授
黒岩 秀介	大成建設(株) 技術センター 都市基盤技術研究部 部長(研究担当)
古賀 裕久	(国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員
小林 竜平	竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 コンクリートグループ マネージャー
坂井 悦郎	東京工業大学 名誉教授
坂井 吾郎	鹿島建設(株) 技術研究所 主席研究員
棚野 博之	(国研)建築研究所 材料研究グループ 客員研究員
流 龍成	住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 研究企画グループ グループリーダー
野口 貴文	東京大学 大学院 工学系研究科 教授
平田 隆祥	(株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 上級主席技師
平本 真也	日鉄高炉セメント(株) 技術開発センター 技術開発グループ グループリーダー
前田 禎夫	麻生セメント(株) 品質技術部 部長
森川 嘉之	(国研)港湾空港技術研究所 地盤研究領域長
山路 徹	(国研)港湾空港技術研究所 構造研究領域長
窪木 康雄	(一社)セメント協会 セメント系固化工材普及専門委員会 委員長
宮脇 賢司	(一社)セメント協会 セメント系固化工材技術専門委員会 委員長
大石 英男	(一社)セメント協会 生産・環境幹事会 幹事
廣川 誠一	(一社)セメント協会 常務理事
吉田 雅彦	(一社)セメント協会 研究所長

編集委員会の動き

本誌の編集企画にご尽力いただいた、編集委員の黒田泰弘氏(清水建設(株))は5月号をもって退任されました。ここに長年にわたるご協力・ご支援に対し感謝の意を表します。なお、今月号より浦野真次氏が就任されました。

一般社団法人 セメント協会加盟会社

八 戸 セ メ ン ト (株)	敦 賀 セ メ ン ト (株)
日 鉄 高 炉 セ メ ン ト (株)	(株) デ イ ・ シ イ
日 鉄 セ メ ン ト (株)	デ ン カ (株)
東 ソ ー (株)	麻 生 セ メ ン ト (株)
(株) ト ク ヤ マ	U B E 三 菱 セ メ ン ト (株)
琉 球 セ メ ン ト (株)	明 星 セ メ ン ト (株)
荻 田 セ メ ン ト (株)	日 立 セ メ ン ト (株)
太 平 洋 セ メ ン ト (株)	住 友 大 阪 セ メ ン ト (株)

○JCA Report/2022年度のセメント 生産および操業の概況

○セメント・コンクリート分野におけるCO₂削減—建築基準における課題と方策

○国道185号呉市安浦町地内におけるコンクリート舗装修繕工事

○β-C₂Sの炭酸化によるCO₂固定化—「カーボフィクスセメント®」のCO₂固定化機構の解明に向けて

○第10回セメント・コンクリート国際会議と中国のセメント・コンクリート技術動向

○シリーズ/セメント産業 脱炭素・低炭素社会を目指すキーワード CO₂とケイ素化合物からポリカーボネートやポリウレタンの原料を合成

○シリーズ/セメント系固化工材 その特性と広がる可能性

⑥セメント系深層混合処理工法—スラリー攪拌工 (CDM工法)

⑦セメント改良技術を取り巻く海外事情

○ずいそう(中島良光) ほか



押出し仮設工法で石狩川を渡河する妹背牛橋の施工

セメント・コンクリート No.916 6月号
2023(令和5)年6月15日発行

定価1100円 本体1000円 ⑩

発行者 乾 敏一
編集者 小宮山 慎一郎
発行所 一般社団法人 セメント協会
〒104-0041 東京都中央区新富2-15-5
RBM築地ビル2階
電話 03-5540-6171 (代表)
03-5540-6175 (広報部門/出版担当)
03-5540-6173 (図書販売)
FAX 03-5540-6181
研究所 〒114-0003 東京都北区豊島4-17-33
電話 03-3914-2691 (代表)
FAX 03-3914-2690

○予約購読のご案内/予約購読をご希望の方は1年分 11,000円(税込み/送料当協会負担)を「振替」または「現金書留」で直接当協会にお申込み下さい。

○本誌への広告申込みはセメント協会広報部門/出版担当 ☎ 03-5540-6175へ

○セメント協会加盟会社の購読料は会費に含まれます。

本誌へのご意見、ご感想、ご要望、送付先の変更などは、セメント協会ホームページまたは出版担当直通までEメールでお寄せください。

メールアドレス (出版担当)

cemecon@jcassoc.or.jp

ホームページ

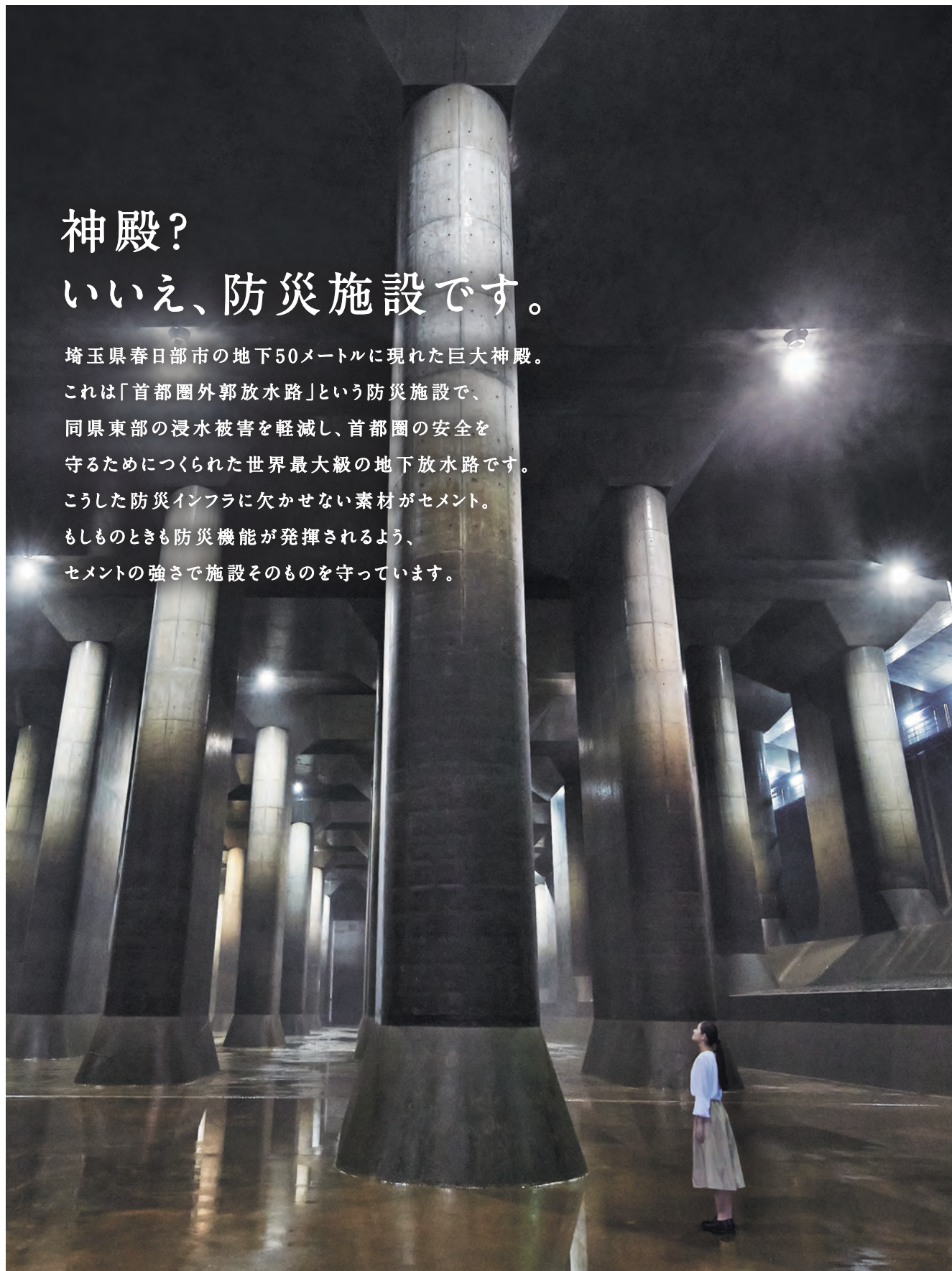
https://www.jcassoc.or.jp

セメント協会ホームページ



神殿？ いいえ、防災施設です。

埼玉県春日部市の地下50メートルに現れた巨大神殿。
これは「首都圏外郭放水路」という防災施設で、
同県東部の浸水被害を軽減し、首都圏の安全を
守るためにつくられた世界最大級の地下放水路です。
こうした防災インフラに欠かせない素材がセメント。
もしものときも防災機能が発揮されるよう、
セメントの強さで施設そのものを守っています。



セメントが、日本をまもる。

一般社団法人セメント協会

セメント協会

検索

定価 1100 円 本体 1000 円 ⑩ 送料別