

論文 低温焼成型汎用セメントを使用したコンクリートの長期強度発現性、耐久性および環境影響評価

新見 龍男^{*1}・茶林 敬司^{*2}・加藤 弘義^{*3}・河合 研至^{*4}

要旨：セメント産業はエネルギー多消費型産業であり、環境保護の観点から省エネルギー技術の開発が求められる。本研究では、鉱物組成を調整して実機キルンで焼成した低温焼成型クリンカーから試製したセメントのコンクリート性状およびクリンカー焼成時の環境影響について評価を行った。その結果、低温焼成型試製セメントのコンクリート性状は促進中性化深さが若干大きいものの概ね普通ポルトランドセメントと同程度であり、クリンカー焼成時の環境負荷は普通ポルトランドセメントより小さいことが示された。

キーワード：低温焼成、コンクリート、長期強度、耐久性、環境影響評価

1. はじめに

セメント産業はエネルギー多消費型産業である。セメント製造において日本は世界でもトップクラスのエネルギー利用効率を誇っている¹⁾が、CO₂ 排出量削減などの環境面、天然資源や化石燃料使用等の観点から、更なる省エネルギー技術の開発が求められている。現在のセメントクリンカーは約 1450℃と非常に高い温度での焼成が必要であり、セメント製造においては焼成工程が最もエネルギー消費の大きい工程である。従って、クリンカーの焼成温度の低減が可能であれば、燃料使用量の削減だけでなく CO₂ 排出量の削減にも繋がると考えられる。焼成工程の省エネルギー技術については鉱化剤使用による低温焼成技術開発、鉱物組成変更による省エネ型クリンカーの焼成技術開発および省エネセメントの開発の検討などが行われている^{2), 3), 4), 5), 6), 7)}。

筆者らはこれまで、普通ポルトランドセメント（以下、OPC）クリンカーに比べて C₄AF を増加し C₂S を減少させることで、セメントの強度発現性を維持したまま現行の OPC クリンカーよりも焼成温度を 100℃程度低減することの可能な低温焼成型クリンカーについて検討を行ってきた。ラボ試験の結果⁸⁾を基に実機キルンによる焼成試験を実施し、実機キルンにおいても低温焼成型クリンカーが焼成可能であり、焼成時の熱量原単位が OPC より約 5%低減されること、実機キルンで製造した低温焼成型クリンカーから試製したセメントを使用したコンクリートの凝結性状および材齢 28 日までの強度発現性が OPC と同等であることを報告した⁹⁾。しかしながら、コンクリートの長期材齢の強度発現性や耐久性に関しては未検討である。

一方、環境に及ぼす影響に関して、低温焼成型クリン

カーは OPC クリンカーと比較して、焼成面では石炭使用量の削減、原料面では C₂S 量の減少に伴う天然原料使用量の削減および C₄AF 増加に伴う廃棄物・副産物使用量の増加による環境負荷の低減が見込まれる。そのため、環境影響を評価するにあたっては CO₂ 排出量の削減と省資源・資源循環が同時に影響していることを考慮する必要がある。しかしながら、低温焼成の環境負荷低減効果を評価するためには、それぞれの影響について定量化する必要があると共に、統合化した評価も必要であると考えられる。

そこで本検討では、実機キルンで製造した低温焼成型クリンカーから試製したセメントを用いて、コンクリートの長期強度発現性および耐久性について評価すると共に、セメント製造時の環境影響について評価方法の策定および評価結果について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

低温焼成型試製セメントは、表－1に示す鉱物組成を目標とした低温焼成型クリンカーを実機キルンで焼成し、実機仕上げミルで粉砕することにより試製した。試製セメントの比表面積は 3200cm²/g 程度（低温 3200）と 3500cm²/g 程度（低温 3500）とした。なお、比較として同キルンで試製した OPC を使用した。使用したセメントの鉱物組成を表－2に示す。細骨材は、福岡県産海砂お

表－1 低温焼成型クリンカーの鉱物組成の目標値

鉱物組成（%, Bogue 式）			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
63	8	8	17

*1 (株) トクヤマ セメント開発 Gr. 工修 (正会員)

*2 (株) トクヤマ セメント開発 Gr. 理修

*3 (株) トクヤマ セメント開発 Gr. リーダー 工博 (正会員)

*4 広島大学 工学研究院 社会環境空間部門 教授 工博 (正会員)

よび福岡県産陸砂を使用し、混合割合は体積比で海砂：陸砂＝96：4 とした。粗骨材は、山口県産硬質砂岩碎石 1505 および 2010 を使用した。混合割合は体積比で 1505：2010＝50：50 とした。混和剤は、AE 減水剤および AE 助剤を使用した。AE 減水剤の添加量はセメント×0.25% で一定とした。使用材料の詳細を表－3 に示す。

2.2 配合条件

表－4 にコンクリートの配合条件を、表－5 に配合の詳細を示す。目標スランブは 18.0±1.5cm とし、目標空気量は 4.5±0.5% とした。

2.3 コンクリートの混練および養生

コンクリートは 100L パン型ミキサにより混練した。セメントと細骨材を投入後 30 秒間空練りし、水および混和剤を投入後 90 秒混練して排出した。コンクリートの練上がり性状を表－5 に併せて示す。

2.4 試験方法

(1) コンクリートのスランブおよび空気量

スランブ試験は JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」に準拠し、空気量試験は JIS A 1128「フ

レッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に準拠し、試験を行った。

(2) コンクリートの凝結時間

コンクリートの凝結試験は JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠し、試験を行った。

(3) コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

供試体寸法は φ100×200mm とし、脱型直後および 20℃水中養生を行った供試体について、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」および JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して試験を行った。強度試験材齢は 7, 28, 91 および 182 日とした。

表－2 使用したセメントの鉱物組成

	鉱物組成 (% , Bogue 式)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	55	18	10	9
低温焼成型	60	9	8	15

表－3 使用材料

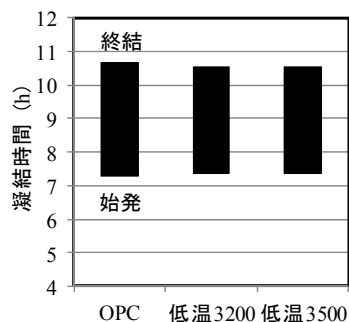
材料	種類		物性値
セメント	OPC		密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3150cm ² /g
	低温焼成型セメント	低温 3200	密度:3.22g/cm ³ , 比表面積:3160cm ² /g
		低温 3500	密度:3.22g/cm ³ , 比表面積:3520cm ² /g
細骨材	海砂		表乾密度:2.55g/cm ³ , 吸水率:1.83%, 粗粒率:2.81
	陸砂		表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:0.84%, 粗粒率:1.32
粗骨材	硬質砂岩碎石	1505	表乾密度:2.72g/cm ³ , 粗粒率:6.33
		2010	表乾密度:2.69g/cm ³ , 粗粒率:7.01
混和剤	AE 減水剤		リグニンスルホン酸塩系
	AE 助剤		アルキルエーテル系

表－4 コンクリートの配合条件

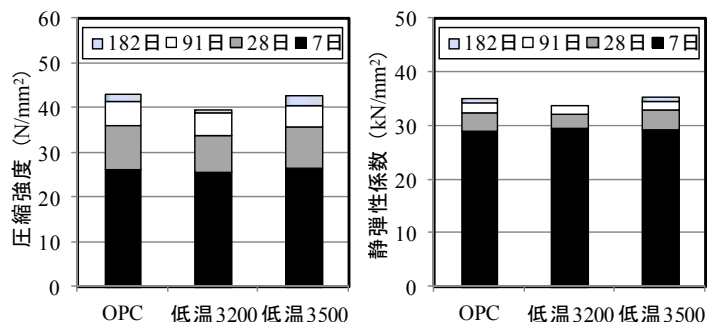
	粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	粗骨材のかさ容積 (m ³ /m ³)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)
OPC	20	55	172	0.570	18.0±1.5	4.5±0.5
低温 3200						
低温 3500						

表－5 配合の詳細およびコンクリートの練上がり性状

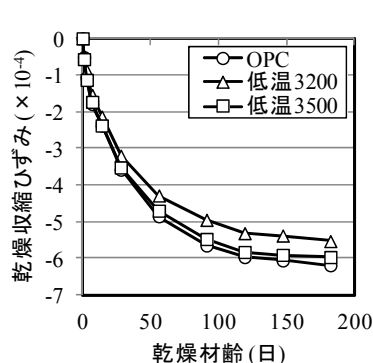
	kg/m ³						化学混和剤 (セメント×%)		練上がり性状	
	水	セメント	細骨材		粗骨材				スランプ (cm)	空気量 (%)
			海砂	陸砂	1505	2010	AE 減水剤	AE 助剤		
OPC	172	313	834	36	462	467	0.25	0.06	17.5	4.5
低温 3200			839						18.5	4.3
低温 3500									18.0	4.2



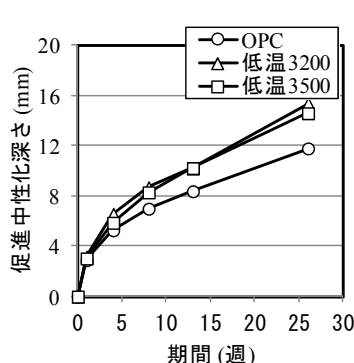
図－１ コンクリートの凝結時間



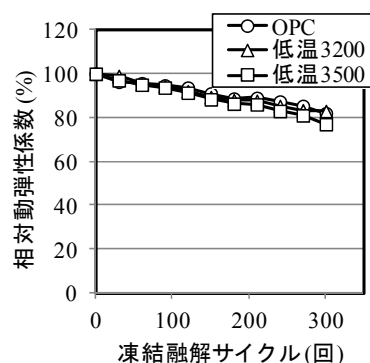
図－２ コンクリートの圧縮強度および静弾性係数



図－３ コンクリートの乾燥収縮ひずみ



図－４ コンクリートの促進中性化深さ



図－５ 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

(4) コンクリートの乾燥収縮ひずみ

JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第 2 部：コンタクトゲージ方法」に準拠して試験を行った。標点距離は約 250mm とし、材齢 7 日まで 20℃で水中養生した後の測定値を基長とした。その後は温度 20℃，相対湿度 60%の恒温恒湿室に静置した。

(5) コンクリートの耐凍害性

JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法(A 法)」に準拠して試験を行った。供試体は材齢 28 日まで 20℃で水中養生し、試験を開始した。その後、300 サイクルまで 30 サイクルごとに一次共鳴振動数を測定し、相対動弾性係数を求めた。

(6) コンクリートの促進中性化深さ

JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して促進中性化を行い、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して中性化深さの測定を行った。供試体は材齢 28 日まで 20℃で水中養生し、温度 20±2℃，相対湿度 60±5%の恒温恒湿室に 28 日間静置した後に試験を開始した。

3. コンクリート試験結果

図－１にコンクリートの凝結時間を示す。比表面積に関わらず、低温焼成型試製セメントは OPC と同程度の凝結時間を示した。図－２にコンクリートの圧縮強度およ

び静弾性係数を示す。低温 3200 の圧縮強度は OPC より若干低く、材齢 91 日以降の強度増進は僅かであった。一方、低温 3500 は概ね OPC と同程度の強度を示し、材齢 91 日以降も OPC と同等以上の強度増進が確認された。低温焼成型試製セメントは OPC より C_2S が少ないため、低温 3200 では長期強度の増進が小さかったが、低温 3500 は比表面積が高いために C_2S の反応性が向上し、長期材齢でも強度増進に繋がったためと考えられる。静弾性係数は概ね圧縮強度と同様の傾向を示した。

図－３にコンクリートの乾燥収縮ひずみを示す。低温焼成型試製セメントの乾燥収縮ひずみは、OPC より小さくなる傾向を示した。

図－４に促進中性化試験を行ったコンクリートの中性化深さを示す。低温焼成型試製セメントは OPC より中性化深さが大きくなる傾向を示した。低温焼成型試製セメントは OPC に比べて C_2S が少ないことから、長期的な $Ca(OH)_2$ の生成量が OPC より少なくなるためと考えられる。また、 C_2S 量の違いにより細孔構造が異なる可能性があり、透気性を含めた諸性状への影響が考えられるが、硬化性状に関しては今後詳細な検討が必要である。

図－５に凍結融解試験における凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を示す。低温焼成型試製セメントの相対動弾性係数は OPC と同様の挙動を示した。OPC と同一の配合かつ空気量が確保された条件で評価した場合、

低温焼成型試製セメントの耐凍害性は OPC と同等であった。

4. セメント製造時の環境影響評価に関する検討

4.1 検討の概要

セメント製造が及ぼす環境影響の主要な環境側面として、地球温暖化および天然資源の消費が挙げられる。そこで本検討では、CO₂ 排出量および省資源・資源循環についてそれぞれの指標を用いて評価し、それらを統合して評価するための指標および評価結果について検討を行った。本検討で環境影響評価の試算に用いた OPC クリンカーおよび低温焼成型クリンカーの代表的な鉱物組成を表－6に、各クリンカーの原料原単位の一例を表－7に示す。各クリンカーの原料原単位は、当社で使用する廃棄物・副産物を含む各原料の代表的な化学成分から、Bogue 式により表－6に示す鉱物組成が算出される化学成分となるように、各原料の調合比を調整する方法により試算した。

4.2 CO₂ 排出量原単位の試算方法

セメント産業における CO₂ の排出は、原料起源とエネルギー起源に分類され、原料起源は石灰石の脱炭酸量より、エネルギー起源は化石燃料系と廃棄物系に区分して計算される¹⁰⁾。本検討では、OPC クリンカーの CO₂ 排出量原単位に土木学会が示すポルトランドセメントの値¹⁰⁾を用い、各排出起源における低温焼成型クリンカーの CO₂ 排出量原単位を算出した。石灰石脱炭酸起源による CO₂ 排出量原単位は、低温焼成型クリンカーと OPC クリンカーの石灰石使用原単位の比に、OPC の石灰石脱炭酸起源の CO₂ 排出量原単位を乗じて算出した。化石燃料起源に関しては、前報⁹⁾の結果より実機による低温焼成型

クリンカーの焼成時に化石燃料の使用量が 5%削減可能であったことから、OPC の化石燃料燃焼起源の値から 5%差し引いて算出した。なお、低温焼成型クリンカーの廃棄物等燃焼起源の CO₂ 排出量原単位を推定することが困難であったが、「焼却不要による削減」により相殺されることから、OPC と同じ値とした。

4.3 CO₂ 排出量削減に関する評価方法

低温焼成型クリンカーは、焼成の結果として石灰石脱炭酸起源と化石燃料燃焼起源の CO₂ が同時に削減される。そのため、いずれか一方に着目して評価するよりも両者を同時に評価した方が、CO₂ 排出量の削減効果をより明確に表すことができると考えられる。そこで、CO₂ 排出量の削減効果について式(1)を用いて評価を行った。

$$I_{CO2} = ((100 - E_{ls-CO2}) / 100) \times ((100 - E_{ff-CO2}) / 100) \times 100 \tag{1}$$

ここに、I_{CO2}：CO₂ 排出量削減効果指数
E_{ls-CO2}：石灰石脱炭酸起源の CO₂ 削減率(%)
E_{ff-CO2}：化石燃料燃焼起源の CO₂ 削減率(%)

本式は、CO₂ 排出量削減効果指数は現状を 100 として、数値が小さくなるほど削減努力を払っていることを示している。また、石灰石脱炭酸起源、化石燃料起源の一方での削減努力よりも、両者での削減努力がより指数を低下させるものとなっている。

4.4 省資源・資源循環に関する評価方法

環境負荷低減の視点から、天然資源消費量の低減およびリサイクル資源の有効活用が望ましいと考えられる。すなわち、天然資源量が少ないほど、リサイクル資源使用量が多いほど好ましいこととなることから、リサイクル資源使用量と天然資源使用量の比を省資源・資源循環指数として、式(2)を用いて算出した。

$$I_R = W_r / W_n \tag{2}$$

ここに、I_R：省資源・資源循環指数

表－6 各クリンカーの代表的な鉱物組成

	鉱物組成 (%, Bogue 式)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	62	15	10	9
低温焼成型	64	9	9	17

表－7 各クリンカーの鉱物組成からシミュレートした原料原単位の一例

原単位：g/kg		OPC		低温焼成型	
天然原料	石灰石	1240	1310	1224	1229
	珪石	70		5	
リサイクル資源	副産物	25	277	69	336
	廃棄物	石炭灰		202	
		建設発生土		0	
		汚泥類		65	

Wr：リサイクル資源使用量 (kg)

Wn：天然資源使用量(kg)

省資源・資源循環指数は、数値が大きくなるほど天然資源消費量の低減あるいはリサイクル資源の有効利用が図られていることを示している。

4.5 環境評価の統合化

CO₂ 排出量削減効果指数は数値が小さいほど、省資源・資源循環指数は数値が大きいほど環境負荷に対する影響が小さいことを示していることから、式(1)および式(2)について式(3)により両者の統合化を図った。統合化においては CO₂ 排出量削減効果指数と省資源・資源循環指数は同じ重みとした。なお、I₁ が高いほど環境負荷が小さいことを示している。

$$I_1 = I_R / I_{CO_2} \times 100 \quad (3)$$

ここに、I₁：統合化指標

4.6 環境影響評価結果

(1) CO₂ 排出量削減に関する評価

表－8 に各クリンカーの焼成時における CO₂ 排出量の排出量原単位、削減率および CO₂ 排出量削減効果指数を示す。ここで、CO₂ 削減率とは、表中の同項目の CO₂ 排出量原単位について、OPC クリンカーに対する OPC クリンカーと低温焼成型クリンカーの差分を百分率として表したものである。低温焼成型クリンカーを焼成した場合の CO₂ 排出量は石灰石脱炭酸起源で 443.1g/kg、化石燃料燃焼起源で 282.8g/kg であり、OPC に対してそれぞれ 98.71%、95.00%の値を示した。CO₂ 排出量削減効果指数を用いた場合、石灰石脱炭酸起源および化石燃料燃焼起源の CO₂ 排出量を同時に削減する努力は、CO₂ 排出量をいずれかの一方のみで 93.77%まで削減する努力と同等

であるとみなすことができると考えられる。

(2) 省資源・資源循環に関する評価

表－9 に、OPC クリンカーおよび低温焼成型クリンカーの省資源・資源循環指数を示す。また、参考としてセメント協会が示す全ポルトランドセメントの LCI データ^{11), 12)}を用いた場合を表－10に示す。なお、LCI データと表－8 の OPC の値が異なる理由として、LCI データはセメント協会の全会員会社が生産する全ポルトランドセメントについて社別生産数量で加重平均したものであるが、OPC は単一の製造会社のデータであるためと考えられる。LCI データについて 2011 年度と 2012 年度を比較した際、2012 年度の方がリサイクル資源使用率は低く、それに伴い省資源・資源循環指数も低い値を示している。省資源・資源循環指数に関して、低温焼成型クリンカー

表－8 CO₂ 排出量原単位、削減率および CO₂ 排出量削減効果指数

		OPC	低温 焼成型
CO ₂ 排出量 原単位 (g/kg)	石灰石脱炭酸起源	448.9	443.1
	化石燃料燃焼起源	297.7	282.8
	廃棄物等燃焼起源	36.2	36.2
	焼却不要による削減	-36.2	-36.2
	合計	746.6	725.9
「石灰石脱炭酸起源」の CO ₂ 削減率(%)		-	1.29
「化石燃料燃焼起源」の CO ₂ 削減率(%)		-	5.00
「合計」の CO ₂ 削減率(%)		-	2.77
CO ₂ 排出量削減効果指数		100	93.77

表－9 各クリンカーの省資源・資源循環指数

	OPC	低温焼成型
省資源・資源循環指数	0.2115	0.2734

表－10 全ポルトランドセメントの LCI データ^{11), 12)}を用いた場合の試算値

原単位：g/kg			2011 年度		2012 年度	
天然原料	石灰石		1115.11	1183.79	1102.52	1169.45
	粘土		4.1		5.85	
	珪石		60.27		58.88	
	その他		4.31		2.2	
リサイクル	鉄原料	副産物	8.97	249.54	8.03	211.36
		廃棄物	7.67		7.59	
		合計	16.64		15.62	
	副産物		6.81		4.37	
	廃棄物		226.09		191.37	
省資源・資源循環指数			0.2108		0.1807	

表－１１ 統合化指標

	OPC	低温焼成型	LCI データ	
			2011 年度	2012 年度
統合化指標	0.212	0.291	0.211	0.181

ーは OPC クリンカーより 0.0619 高く、LCI データにおいて省資源・資源循環指数の高い 2011 年度の値と比較した場合でも 0.0626 高い値を示した。これは増加率で表すと 30%程度となる。低温焼成型クリンカーで使用される原料を OPC と単純比較した場合、天然資源使用量の減少率は 6.18%、廃棄物・副産物使用量の増加率は 21.3%となり、これらの和と省資源・資源循環指数の増加率は概ね同程度であることから、省資源・資源循環指数は数値化した指標としての有意性はあるものと考えられる。

(3) 統合化した指標の評価

表－１１に、式(3)により統合化した指標の試算結果を示す。低温焼成型クリンカーは OPC クリンカーより 0.079 高い値となることから、低温焼成型クリンカーの方が環境負荷は小さいことが示された。なお、本研究における OPC と 2011 年度の LCI データは、異なるインベントリデータにも関わらずほぼ同一の指標値が得られていることから、 I_L に指標としての妥当性はあるものと考えられる。しかしながら、本研究では OPC と LCI データで CO_2 排出量削減効果指数を同一としており、 CO_2 排出量原単位の違いについてはより詳細に調査する必要があると考えられる。また、指標としての有効性や有用性を検証するためには、今後の LCI データとの比較や OPC 以外の異なるケースに適用した場合等、更なる検討を行う必要がある。

5. まとめ

- 低温焼成型クリンカーから試製したセメントの強度発現性は、比表面積が高い場合に OPC と同程度の性状を示した。
- 低温焼成型クリンカーから試製したセメントの乾燥収縮ひずみは、OPC より小さくなる傾向を示した。
- 低温焼成型クリンカーから試製したセメントの促進中性化深さは、OPC より若干大きかった。
- 低温焼成型クリンカーから試製したセメントの耐凍害性は、OPC と同程度であった。
- 低温焼成型クリンカー製造時の CO_2 排出量削減、省資源・資源循環ならびに両者を統合して評価する場合の指標について示した。その結果、低温焼成型クリンカーは OPC クリンカーと比較して環境への負荷が小さいことが示された。

参考文献

- セメント協会ホームページ 省エネルギー対策：
<http://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan02/seisan02a.html>
- 経済産業省ホームページ 革新的セメント製造プロセス基盤技術開発 事後評価報告書：
http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/e00/03/h27/539.pdf
- 吉川知久：鉱化剤を用いたセメントクリンカーの低温焼成、無機マテリアル、No.18, pp20-24, 2011
- M. Yamashita and H. Tanaka : Low temperature burnt Portland cement clinker using mineralizer, Cement Science and Concrete Technology, No.65, pp.82-87, 2011
- 上河内貴，福山信吾，山下純成，横尾一：鉱化剤使用によるセメントクリンカーの低温焼成，第 68 回セメント技術大会講演要旨，pp.208-209, 2014
- 安藝朋子，新島瞬，黒川大亮，平尾宙：省エネルギー型汎用セメントの開発，セメント・コンクリート論文集，Vol.68, No.1, pp.103-109, 2014.3
- 安藝朋子，黒川大亮，吉光涼，平尾宙：小規模プラントによる省エネルギー型汎用セメントの試製造，セメント・コンクリート論文集，Vol.69, No.1, pp.131-138, 2015.3
- 茶林敬司，永田宏志，中村明則，加藤弘義：鉱物組成の調整によるクリンカー焼成温度低減に関する検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.66, No.1, pp217-221, 2012.3
- 茶林敬司，新見龍男，永田宏志，加藤弘義：低温焼成型クリンカーの実機キルン焼成試験結果および試製セメントの物性，セメント・コンクリート論文集，Vol.69, No.1, pp124-130, 2015.3
- (公社) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125, 2005.11
- (一社) セメント協会：セメントの LCI データの概要，2013.7
- (一社) セメント協会：セメントの LCI データの概要，2015.9