

第3回 セメント

講師：野上 暁*

1. はじめに

わが国のセメント産業は、1875年に初めてセメントを製造して以来、140年以上の歴史のなかで、さまざまな社会基盤の整備に貢献し、わが国の繁栄に大きな役割を果たしてきました。現在では、品質、廃棄物・副産物の取込み技術、省エネルギー技術、労働生産性など、あらゆる面で世界のトップクラスにあります¹⁾。

1999年5月および7月に掲載された「PCの新しい材料入門講座 第3回セメント」のなかで、セメントの歴史、生成や水和の概要、製造方法など基礎的なことや、当時のセメント事情などがとてもわかりやすく解説されています。

本稿では、前回の講座では解説されていない最近のセメント事情や環境対策、耐久性に関わる品質規格の変遷について紹介します。

2. セメントの種類¹⁾

現在、日本工業規格(JIS)で品質が規定されているセメントは、ポルトランドセメント、混合セメントおよびエコセメントの3つに分類され、JIS R 5210「ポルトランドセメント」、JIS R 5211「高炉セメント」、JIS R 5212「シリカセメント」、JIS R 5213「フライアッシュセメント」、JIS R 5214「エコセメント」の5規格があります。また、JIS以外のセメントとしては、特殊なセメント(膨張セメント、三成分系の低発熱セメント、油井・地熱井セメント、アルミナセメントなど)やセメント系固材材(一般軟弱土用、特殊土用、高有機質土用、発塵抑制型など)があります。

2.1 ポルトランドセメント

ポルトランドセメントは、強度発現性状や発熱性状の違

いにより6種類(普通、早強、超早強、中庸熱、低熱、耐硫酸塩)が規定されています。さらに、それぞれの種類について低アルカリ形が規定されているため、全部で12種類となります。

ポルトランドセメントは、図-1に示すように、クリンカー、せっこう、少量混合成分(高炉スラグ、シリカ質混合材、フライアッシュ、石灰石)で構成されます。ただし、少量混合成分の混合量は、セメントに対して質量で5%以下であり、混合が認められているのは、普通、早強、超早強ポルトランドセメントにかぎられます。なお、クリンカーは主に表-1に示す化合物により構成されます。

普通ポルトランドセメントは、もっとも一般的で汎用性が高く、幅広い分野で使用されています。

早強ポルトランドセメントは、普通ポルトランドセメントが材齢3日で発現する強さを材齢1日で、材齢7日で発現する強さを材齢3日で発現します。

超早強ポルトランドセメントは、普通ポルトランドセメントが材齢7日で発現する強さを材齢1日で発現します。

中庸熱ポルトランドセメントは、大きな構造物用に普通ポルトランドセメントよりも水と熱を低くしています。水と熱を低くするために、クリンカー鉱物のなかでも水と熱が大きいアルミン酸三カルシウム(C₃A)と水と熱が中程度のけい酸三カルシウム(C₃S)の含有量に上限値(C₃Aは8%以下、C₃Sは50%以下)が規定されています。

低熱ポルトランドセメントは、中庸熱ポルトランドセメントよりさらに水と熱が低く、クリンカー鉱物の中でも水と熱が大きいアルミン酸三カルシウムの含有量には上限値(6%以下)、水と熱が小さいけい酸二カルシウム(C₂S)の含有量には下限値(40%以上)が規定されています。

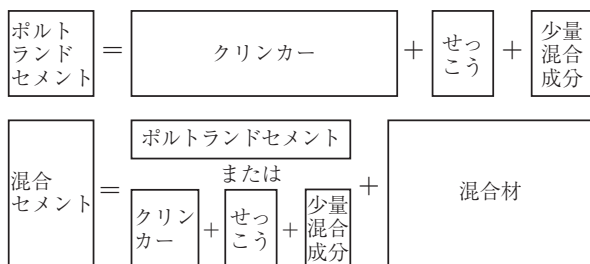


図-1 セメントの構成¹⁾

表-1 クリンカーを構成している主な化合物¹⁾

クリンカー構成化合物(鉱物)	化学組成	備考
けい酸カルシウム	けい酸三カルシウム(エーライト) (C ₃ S)	微量のAl, Fe, Mg, Na, K, Ti, Mnなどを含んでいる。
	けい酸二カルシウム(ビーライト) (C ₂ S)	
間隙相	アルミン酸三カルシウム(アルミネート相) (C ₃ A)	少量のSi, Mg, Na, Kなどを含んでいる。
	鉄アルミン酸四カルシウム(フェライト相) (C ₄ AF)	

* Satoru NOGAMI : (一社)セメント協会 研究所 セメント品質保証グループ

耐硫酸塩ポルトランドセメントは、硫酸塩に対する抵抗性に優れています。アルミン酸三カルシウムから主に生成する水和物は、硬化後に浸透した硫酸塩（海水、温泉地付近の土壌、下水・工場廃水中などに多く含まれている）と反応し、膨張性の水和物に変化することがあるため、その含有量に上限値（4%以下）が規定されています。

各ポルトランドセメントの低アルカリ形は、アルカリ骨材反応を抑制するために全アルカリを0.60%以下に抑えられています。

2.2 混合セメント

混合セメントは、図-1に示すように、ポルトランドセメントと混合材、または、クリンカー、せっこう、少量混合成分、混合材で構成されます。ただし、少量混合成分には混合材を含まず、その混合量は、クリンカー、せっこう、少量混合成分の含量に対して質量で5%以下であります。

混合セメントには混合材の違いにより高炉セメント、シリカセメントおよびフライアッシュセメントの3種類があります。また、それぞれの混合セメントは混合材の分量によって、A種、B種、C種に区分されます。

高炉セメントは、高炉スラグを混合したセメントで、耐海水性（塩化物イオンの浸透に対する抵抗性）や化学抵抗性に優れています。高炉スラグは、水と混ぜただけでは反応せず、アルカリ性の刺激を受けることにより硬化するという潜在水硬性を有し、セメントに混合すると長期的な強度増進に寄与します。高炉セメントは、普通ポルトランドセメントと比較して初期強度は低いですが、長期強度は同等かそれ以上になります。

シリカセメントは、シリカ質混合材を混合したセメントで、耐薬品性に優れていますが、初期強度が低いです。シリカ質混合材は、セメントに混合するとセメントの水和反応で生成する水酸化カルシウムと反応して水和物を生成し（ポゾラン反応）、硬化組織が緻密になります。

フライアッシュセメントは、フライアッシュを混合したセメントで、フライアッシュの球状微粒子によりコンクリートのワーカビリティが向上し、また、水密性に優れています。フライアッシュにもポゾラン反応性があり、フライアッシュのポゾラン反応はゆっくり進むため、セメントに混合するとセメントの水和反応により生じる発熱を緩和することができます。

2.3 エコセメント

JIS R 5214「エコセメント」は、ポルトランドセメントをはるかに超える量の都市ごみ焼却灰などの廃棄物を原料として活用することを目的に、TR R 0002:2000「エコセメント」として公表されていた標準情報を見直し、日本工業標準調査会が推進する循環型社会構築に資する「環境JIS」の第1号として2002年に制定されました。エコセメントは、都市ごみ焼却灰を主とし、下水汚泥などの廃棄物を従として主原料に用い、製品1tにつき廃棄物を乾燥ベースで500kg以上使用してつくられるセメントと規定されており、普通および速硬の2種類があります^{2,3)}。

普通エコセメントは、図-1に示すポルトランドセメントと同様の構成で、クリンカー、せっこう、少量混合成分

として石灰石で構成されます。速硬エコセメントは、クリンカー、せっこう、硫酸ナトリウムで構成されます。

普通エコセメントは、製造過程で脱塩素化させ、塩化物イオンが0.1%以下のものです。塩化物イオンはやや多いですが、普通ポルトランドセメントと類似の性質を有しています。JIS制定当初、普通エコセメントはポルトランドセメントと比較して塩化物イオンがやや多く、使用実績が少ないことから、当面の処置として、単位セメント量の多い高強度・高流動コンクリートを用いる鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートには使用できないことが規定されていました。しかし、品質規格で用途制限していると、新しい技術が確立しても当該用途には使用することができないため、2009年の改正において用途制限が廃止されました。ただし、その使用にあたっては、一部のコンクリートについて法令、JIS、土木学会のコンクリート標準示方書、日本建築学会の調査設計・施工指針（案）などで使用の制限が定められているので、その適用について検討する必要があります（たとえば、JIS A 5364:2016「プレキャストコンクリート製品—材料及び製造方法の通則」では、4.1.1セメントにおいて、“JIS R 5214は、これを用いたコンクリートの長期実績がなく、乾燥収縮、クリープなどが明らかでないことから、プレストレスを付与するプレストレストコンクリート製品には、用いてはならない。”と記載）。また、2009年の改正で、塩化物イオン残存比の測定方法が規定され、普通エコセメントの試験成績表に塩化物イオン残存比（フレッシュコンクリート中の水に溶出ししないセメント中の塩化物イオンの比率）の項目が追加されたことにより、エコセメントを用いたフレッシュコンクリート中の塩化物イオンをより正確に管理および検査することが可能となりました³⁾。

速硬エコセメントは、塩化物イオンが0.5%以上1.5%以下であり、塩素成分をクリンカー鉱物として固定した速硬性を有するセメントです。塩化物イオンが普通エコセメントよりもさらに多いため、鉄筋コンクリートへの使用は鉄筋の腐食の観点から困難であると判断し、用途が制限されています^{2,3)}。

3. セメントの生産量と廃棄物使用量

3.1 セメントの生産量

わが国のセメントの生産量は、1979年度の8794万tを境に、経済の低成長に伴い減少基調をたどってきましたが、バブル景気により回復に転じ、1996年度には消費税率引上げ前の駆け込み需要や阪神・淡路大震災の復興需要が盛んになったことに加え、アジア諸国への輸出が堅調であり、9927万tとなりました。しかし、その後は経済の低迷に伴い再び減少基調に転じ、近年では6000万t前後で推移しています¹⁾。

わが国のセメントの生産量の推移を図-2に示します。また、セメントの種類別生産量の推移を表-2に示します。1970年代には生産量の9割以上をポルトランドセメントが占めていましたが、徐々にその割合は減少し、2000年代になると7割程度になっています。生産量の減少分のか

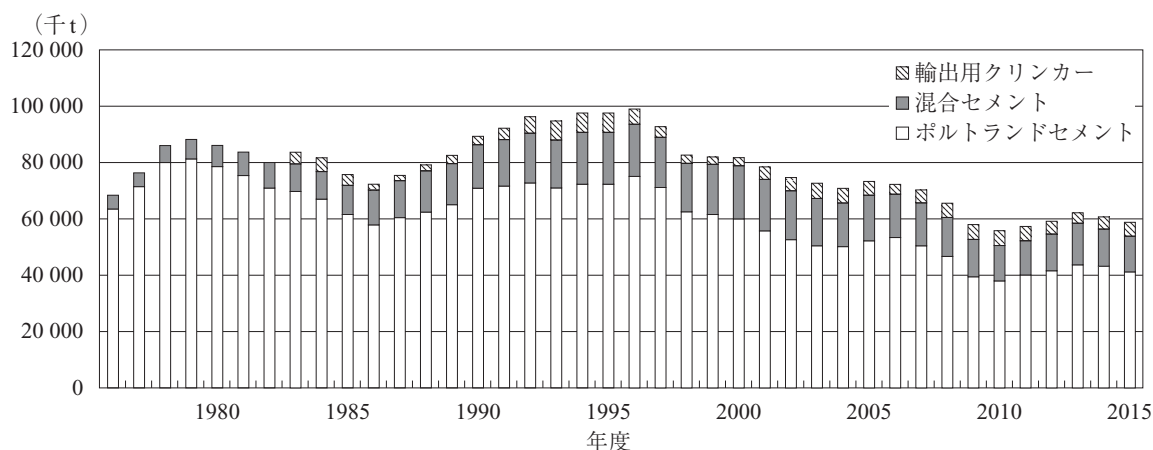


図 - 2 セメントの生産量の推移^{4, 5, 6, 7, 8)}

表 - 2 セメントの種類別生産量^{4, 5, 6)}

(単位：千 t)

種類		1990 年度	2000 年度	2010 年度	2015 年度
ポルトランドセメント	普通	66 549	56 766	34 650	37 617
	早強	3 631	3 483	2 679	2 990
	中庸熱	973	447	737	705
	低熱	-	-	164	188
	耐硫酸塩	6	22	2	6
	その他	20	176	3	1
小計		71 179	60 893	38 234	41 506
混合セメント	高炉	14 877	17 631	11 523	11 267
	シリカ	115	27	0	0
	フライアッシュ	538	498	167	101
	その他	139	270	671	1 046
小計		15 670	18 426	12 362	12 414
その他のセメント		-	-	148	165
計		86 849	79 319	50 743	54 085
輸出用クリンカーなど		2 582	3 054	5 307	5 153
合計		89 431	82 373	56 050	59 238

注：低熱ポルトランドセメントは1997年にJIS化。

なりの部分は、普通ポルトランドセメントが占めていることもわかります。

なお、わが国のセメントの生産量の中期的な見通しとしては、東日本大震災の復興需要、国土強靱化事業や2020年東京オリンピック・パラリンピックの整備事業などの要因により、安定基調で推移すると思われます⁹⁾。

3.2 廃棄物使用量

わが国のセメント産業は、早くから資源を有効活用するために、廃棄物・副産物をセメントの原料やクリンカー焼成用の熱エネルギーの代替として活用する技術を開発し、廃棄物・副産物の受け入れ量を増やしてきました。

セメントの生産量と廃棄物・副産物の使用量の推移を図-3に、使用している廃棄物・副産物の主な用途とその使用量の推移を表-3に示します。

セメントの生産量は1996年度を境に減少傾向が続いていますが、セメント1tを製造するために使用する廃棄物・副産物の量は増加してきております。2015年度には廃棄物・副産物を約2800万t活用しており、これは、セメント1tを製造するにあたり、475kgの廃棄物・副産物を活用していることとなります。

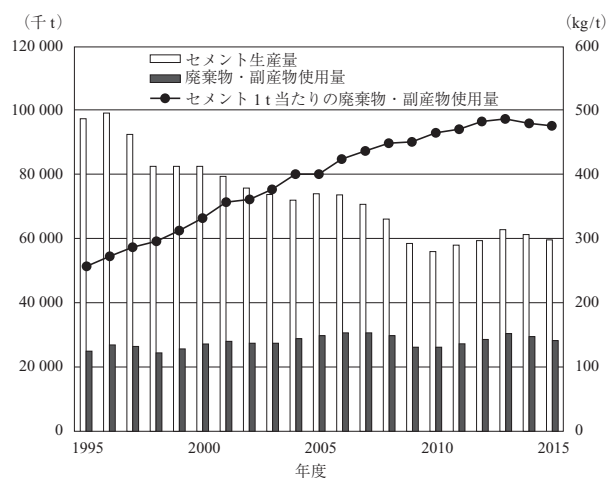


図 - 3 セメントの生産量と廃棄物・副産物使用量の推移^{4) 10) 11) 12)}

一般的に廃棄物などは焼却され、残った灰は埋立て処理されています。しかし、クリンカーに含まれる成分（主にカルシウム、けい素、アルミニウム、鉄）と同じ成分を含む廃棄物・副産物を、セメントの原料やクリンカー焼成用の熱エネルギーの代替として活用する技術が開発されたことにより、残った灰もクリンカーの原料の一部となるため、二次廃棄物が発生しません¹⁾。また、約1450℃の高温で焼成されるため、無害化され、ダイオキシン類はほとんど発生しません。

環境省の「平成28年度版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書」によると、平成25年度は、わが国では1年間に約5億8400万tの廃棄物などが発生しており、そのうちの2億6900万tが循環活用されています。セメント産業では、循環活用されているうちの約10%に相当する約3000万tの廃棄物などを活用し、廃棄物の最終処分場の延命化に貢献しています。

4. セメントの品質規格の変遷

わが国では1900年代初頭にポルトランドセメントおよび高炉セメントの品質が規格化され、工業標準化法制定後の1950年に現在のJIS R 5210およびJIS R 5211として制

表 - 3 セメント業界における廃棄物・副産物使用量⁴⁾

(単位：千t)

種類	主な用途	1990年度	2000年度	2010年度	2015年度
高炉スラグ	原料, 混合材	12 213	12 162	7 408	7 301
石炭灰	原料, 混合材	2 031	5 145	6 631	7 600
汚泥, スラッジ	原料	341	1 906	2 627	2 933
建設発生土	原料	—	—	1 934	2 278
副産石こう	原料 (添加材)	2 300	2 643	2 037	2 225
燃えがら (石炭灰は除く), ばいじん, ダスト	原料, 熱エネルギー	468	734	1 307	1 442
非鉄鉱滓など	原料	1 559	1 500	682	722
木くず	熱エネルギー	7	2	574	705
廃プラスチック	熱エネルギー	0	102	445	576
鑄物砂	原料	169	477	517	429
製鋼スラグ	原料	779	795	400	395
廃白土	原料, 熱エネルギー	40	106	238	311
廃油	熱エネルギー	90	120	275	293
再生油	熱エネルギー	51	239	195	179
ガラスくずなど	原料	0	151	111	129
廃タイヤ	原料, 熱エネルギー	101	323	89	57
肉骨粉	原料, 熱エネルギー	0	0	68	57
RDF, RPF	熱エネルギー	0	27	48	37
ボタ	原料, 熱エネルギー	1 600	675	0	0
その他	—	14	253	408	382
合計	—	21 763	27 359	25 995	28 053
セメント生産量		86 849	82 373	55 903	59 074
セメント1tあたりの使用量 (kg/t)		251	332	465	475

注1. 「建設発生土」は2000年度までは「その他」に含まれている。

注2. 「セメント生産量」には表-2の「その他のセメント」を含まない。

定されました。同様に、シリカセメントは1940年に規格化され、1950年にJIS R 5212として制定されました。また、フライアッシュセメントは1960年にJIS R 5213として、エコセメントは2002年にJIS R 5214として制定されました。以降、省資源化やより多量の廃棄物・副産物をセメントの原料や熱エネルギーの代替として有効活用するため、また、社会の要望に応えるためなど、さまざまな改正が行われてきました。ここでは、ポルトランドセメントおよび混合セメントに関し、近年行われた改正の主な内容について述べます。

1979年、省資源の観点から普通ポルトランドセメントに5%までの少量混合成分（高炉スラグ、シリカ質混合材、フライアッシュ、石灰石）の混合が認められました²⁾。これに伴い、各混合セメントA種の混合材の分量(%)に下限値が設けられました（「**以下」から「5を超え**以下」に改正）。

1986年、アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化を防止するための対策の一つとして、低アルカリ形ポルトランドセメント（全アルカリ0.6%以下）が規定されました。この規制値は、諸外国ですでに定められていたことやわが国でも研究結果により安全であることが報告されていたことから規定されました¹³⁾。

1992年、一般のポルトランドセメントにも全アルカリに上限値を設けるべきとの要請があり、また、旧建設省規格として普通ポルトランドセメントに全アルカリ0.75%以下の規格値が示されたことに伴い、すべてのポルトランドセメントに全アルカリ0.75%以下の規格値が新たに規

定されました。また、塩害による鉄筋コンクリートの劣化を防止するために塩化物イオンを規制すべきとの要請があり、さらに、1990年に旧建設省が発出した通達（建設省が施行する請負工事のコンクリート構造物に使用する普通ポルトランドセメントの塩化物イオンを0.02%以下にする。）に伴い、すべてのポルトランドセメントに塩化物イオン0.02%以下の規格値が新たに規定されました^{14, 15)}。

1997年、強さ試験にISO規格が導入され、標準砂の粒度範囲、モルタルの配合および作製方法が変更されたことに伴い、すべてのセメントの圧縮強さの規格値が改正されました。なお、圧縮強さの規格値は、従来のJISの試験方法による結果とISOの試験方法による結果とを比較することにより、改正前の規格値に沿った値が規定されました。また、コンクリートの低発熱性、高強度性および高流動性に対応できるセメントの要望に応え、低熱ポルトランドセメントが新たに規定されました。その品質規格値は、当時国内で生産されていた低発熱性のセメント（高ビーライト系セメント）の品質と諸外国の低熱ポルトランドセメントの品質規格値を参考にして規定されました^{2, 16)}。

2003年、さらに多量の廃棄物・副産物を有効活用する取組みに応えるため、また、2002年に国土交通省が発出した通達（国土交通省が2003年1月以降に発注するコンクリート構造物に使用する普通ポルトランドセメントの塩化物イオンについて、「0.02%以下」から「0.035%以下」に変更する。）に伴い、普通ポルトランドセメントの塩化物イオンの規格値が「0.02%以下」から「0.035%以下」に改正されました。なお、国土交通省の通達は、国土交通

省の「コンクリート中の塩分総量規制およびアルカリ骨材反応抑制対策に関する懇談会」が、コンクリートの耐久性を確保できるコンクリート中の塩化物総量規制値 0.30 kg/m^3 を満足する範囲で、セメント中の塩化物イオンの規制値を緩和することが可能であるとの提案を受けてのものでした¹⁵⁾。

2009年、一部の早強および超早強ポルトランドセメントにおいて、注水後の早い時間にセメントペーストの軟度が低下することがあり、これを改善する方法として少量混合成分の混合が有効であることから、普通ポルトランドセメントと同様に早強および超早強ポルトランドセメントにも少量混合成分を5%まで混合できるようになりました。しかし、少量混合成分として石灰石を5%混合すると、石灰石の脱炭酸により強熱減量（セメントを $950 \pm 25^\circ\text{C}$ で強熱した場合の質量の減少率）が規格値を超えてしまいます。このことに対応するため、普通、早強、超早強ポルトランドセメントの強熱減量の規格値が「3.0%以下」から「5.0%以下」に改正されました。また、普通ポルトランドセメントの三酸化硫黄の規格値が「3.0%以下」から「3.5%以下」に改正されました。これは、廃棄物・副産物の使用量の増加に伴いクリンカー中のアルミン酸三カルシウムが増加する傾向があることに対し、セメントの水和反応を考えた場合、三酸化硫黄を増加させた方がよいためであり、さらに、水中膨張が問題とされない範囲で規定されました。また、混合セメントにおいて、試験成績表に混合材の分量の範囲を記載することが規定されました。さらに、混合セメントの構成にポルトランドセメントと混合材からなる構成が規定され、少量混合成分の混合が認められたことに伴い、高炉セメント、シリカセメントA種、フライアッシュセメントA種の強熱減量の規格値が普通、早強、超早強ポルトランドセメントと同様に「3.0%以下」から「5.0%以下」に改正されました。高炉セメントにおいては、高炉スラグとして従来規定されていた高炉水砕スラグに加え、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に規定されるものが追加されました。JIS A 6206では、高炉水砕スラグの塩基度が1.60以上と規定されているため、高炉セメントに使用する高炉水砕スラグの塩基度も「1.4以上」から「1.60以上」に改正されました。なお、塩基度は $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$ （含有率で計算）により求め、大きいほど反応性が高いことを示します。また、JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」が1999年に改正されたことに伴い、フライアッシュの品種がI種またはII種に限定されました^{2, 17)}。

省資源化や廃棄物・副産物の使用量の増加に合わせて品質規格が改正されてきましたが、実際のセメントの品質はどの様に推移しているのか、例として塩化物イオンの推移を図-4に示します。これは、セメント各社が提供する毎月のセメント試験成績表の年平均値を示しており（平均：

毎月の平均値の平均値，最大値の平均：毎月の最大値の平均値），Nは普通ポルトランドセメント，Hは早強ポルトランドセメントを表します。普通ポルトランドセメントの塩化物イオンは，規格値が改正されて以降，最大値の平均は早々に，平均は徐々に増加してきております。一方，早強ポルトランドセメントの塩化物イオンは，規格値に変更がないため，大きな変動はありません。

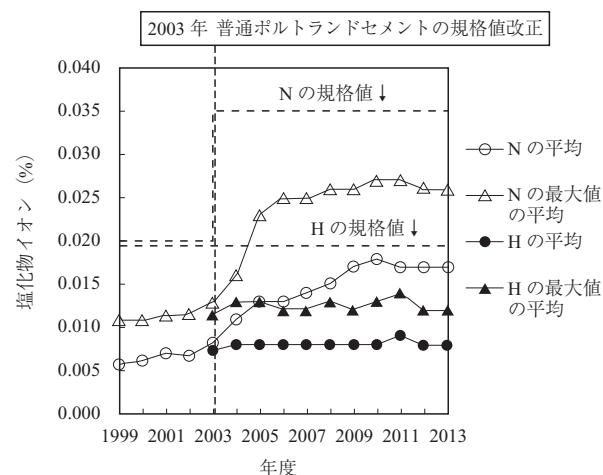


図-4 塩化物イオンの推移

5. おわりに

セメント産業は、社会インフラ・防災インフラなどの整備を進める上で、必須の役割を担っています。セメントの生産にあたっては、多様な廃棄物・副産物を原料や熱エネルギーとして受け入れ、セメントに生まれ変わらせ、かつ二次廃棄物を一切出さない究極の環境産業でもあります。今後も、さらなる省エネルギー化に取り組み、また、廃棄物・副産物の有効活用を推進し、持続可能社会の構築へ貢献していきます⁹⁾。

参考文献

- 1) セメント協会：セメントの常識，2013
- 2) 日本規格協会：セメント規格がわかる本「セメントの品質規格」編 2010年版
- 3) 日本規格協会：JIS R 5214：2009
- 4)～8), 10)～12) セメント協会：セメントハンドブック 2016年度版，2006年度版，1996年度版，1993年度版，昭和61年度版，2010年度版，2005年度版，2000年度版
- 9) セメント協会：セメント協会ウェブサイト
- 13) 日本規格協会：JIS R 5210：1986
- 14) 日本規格協会：JIS R 5210：1992
- 15) 日本規格協会：JIS R 5210：2003
- 16) 日本規格協会：JIS R 5210：1997
- 17) 日本規格協会：JIS R 5210：2009

【2016年10月31日受付】