

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01285

研究課題名(和文) C-S-Hに基づくコンクリートの新しい材料・配合設計体系の構築

研究課題名(英文) New material design and mix design methods of concrete based on C-S-H

研究代表者

佐伯 竜彦 (SAEKI, TATSUHIKO)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：90215575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 24,300,000円

研究成果の概要(和文)：C-S-Hの組成・構造を詳細に検討することによって、焼成-水和の繰返して組成の変化が起きない再生可能セメントの実現可能性を示した。また、C-S-Hの化学組成の変化とそれによる微視的構造の変質が乾湿や炭酸化によるセメント硬化体の体積変化に対して大きく影響を及ぼすことを明らかにし、体積変化を低減する材料設計の考え方を示した。

さらに、各種水和物が物質移動に及ぼす影響を評価し、酸素、塩化物イオンおよび水分拡散係数に及ぼす水和物の影響を定量評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

C-S-Hの組成と生成量に立脚したコンクリートの材料・配合設計手法の基礎を構築することができた。これにより、材料として何を扱うかでなく、どのような水和物をどれだけ生成させるかという、これまでと全く違った視点で無数の材料・配合の組合せの中から最適なものを合理的に選定できることになり、コンクリート材料科学の新しい視点での体系化への途を拓いた。

研究成果の概要(英文)：The possibility of the recycled cement was recognized by comparing the generated C-S-H from  $-C_2S$  and the starting synthetic C-S-H. It is clarified that the volume change behavior of cement paste is influenced by the structural change depending on the change of the chemical composition of C-S-H during the drying/wetting and carbonation. The influence of various hydration products on mass transfer was estimated by regression analysis.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：C-S-H 再生セメント 体積変化 重合度 拡散係数

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

近年、コンクリートに求められる性能が高度化・多様化し、それに対応するために使用材料や配合が多様化してきている。一方で、資源の有効利用などの目的で多種多様な副産物や廃棄物がセメントやコンクリート用材料として用いられるようになってきている。特に、高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった混和材の大量使用はCO<sub>2</sub>排出量削減に有効であり、コンクリートの性能を確保しながら大量使用を推進することが求められている。また我が国では、生産性向上の取り組みにおいて工場製品の活用が検討されている。工場製品では一般に高温蒸気養生を行うが、高温の影響によって水和特性が変化することから、材料・配合設計においては養生方法も併せて検討する必要がある。

これまでのコンクリートの配合設計では、材料の種類と混和材置換率、養生条件を設定し、これらの条件の組合せ毎に求められた性能評価式を用いて、要求性能を満たす水結合材比を求めるのが一般的である。この場合、新しい材料・配合・養生条件では既存の評価式が使えず、その都度、新たな検討が必要となっていた。さらには、多様化する要求性能の中にはトレードオフ関係にあるものも多く、膨大な選択肢の中から最適な材料・配合・養生方法を必ずしも合理的に選定できなかった。このため、上述したような要求性能と材料・配合・養生方法の多様化に対応するために、全く新しい方法論が必要とされている。

C-S-Hは、セメント系材料の水和生成物の大部分を占める主要な物質であり、他の水和物と比較して比表面積が極めて大きい。このため、セメント硬化体の空隙構造とそこで生じる諸現象に支配的に影響し、コンクリートの性能に大きく影響する。しかし、材料・配合・養生条件によりその化学組成(C/S比)が変化するため、物理化学的性質についてはそれがセメント硬化体の性能に及ぼす影響について不明な点が多かった。そこで、C-S-Hの組成と構造から物性を評価し、硬化体性能を説明し、材料・配合設計に利用する技術の開発が必要とされている。

## 2. 研究の目的

本研究は、セメント系材料の主要な水和物であるケイ酸カルシウム水和物(以降、C-S-H)に着目し、コンクリートの要求性能を満足するために必要なC-S-Hの生成量とその組成であるCaO/SiO<sub>2</sub>モル比(以降、C/S比)を逆算し、それを達成するための材料選定と配合設計を行う新しい手法の枠組みを構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、C-S-Hの組成と環境作用がその性質に及ぼす影響、C-S-Hの性質がC-S-Hの集合体である硬化体の性能に及ぼす影響を実験的に把握するために、セメントペーストおよび純薬合成したC-S-Hおよびそれを圧縮成型した供試体を用いて各種検討を行った。これらの検討により、C-S-Hの組成・構造、さらには環境作用がC-S-Hの性質に及ぼす影響を評価した。

## 4. 研究成果

本研究は以下の3つの検討に分けられる。

- ①コンクリートの環境負荷低減のための、繰り返し再生可能な再生セメント設計の可能性の検討
- ②環境作用(乾湿繰り返しや炭酸化)によって生じるセメント硬化体の体積変化について明らかにするための、空隙径内の水の挙動と環境作用に応じたC-S-Hの変化についての検討。
- ③物質移動特性に及ぼす相組成とC-S-Hの影響に関する検討。

以降に、各検討項目別に研究成果を示す。

### 4. 1 C-S-Hの合成とセメントの再生サイクルに関する検討

(1) はじめに

水和活性の高い $\beta$ -C<sub>2</sub>Sを製造し、水和時にCa/Si比の低下の要因となるCa(OH)<sub>2</sub>(以下、CHと記載)が生成しないものとしたできれば、Ca/Si比2.0程度の非晶質C-S-Hが生成すると考えられる。さらに水和により生成したC-S-Hを再焼成することで、再び高活性 $\beta$ -C<sub>2</sub>Sを得ることができれば、再生セメントのサイクルが成り立つと考えられる。

そこで本研究では、共沈法により合成したC-S-Hの焼成物の水和反応性状を解明することを目的として、焼成物を様々な条件で水和させ、得られた水和生成物の結晶構造に着目することにより評価・検討を行った。さらに得られた水和生成物を再び、焼成することによって、2サイクル目における $\beta$ -C<sub>2</sub>Sの生成に関する検討を行った。

(2) 実験概要

C-S-Hの純薬合成に際しては、目標Ca/Si比を2.0に固定して、Ca源試薬としてCaCl<sub>2</sub>、Si源試薬としてNa<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>を用いた。共沈法により純薬合成したC-S-Hは、プレス機で成型後、電気炉で空气中、焼成温度810℃として3時間焼成した。

水和の際には焼成物( $\beta$ -C<sub>2</sub>S)1g±0.5mgに対して20℃のイオン交換水2ml(水粉体質量比2.0)を用いて2分間の練混ぜを行い、サンプル瓶にて窒素封入を行い封緘養生した。また、養生温度は20℃、40℃、80℃、材齢28日とした。なお、水和条件を各グラフ中に示す際には、“[条件番号]-養生温度-養生期間”と表記する。

(3) 実験結果と考察

a)  $\beta$ -C<sub>2</sub>Sの水和性状に関する評価(1サイクル目)

C-S-Hの合成条件(Ca水溶液のpH調整や洗浄操作)が、水和反応に及ぼす影響と水和に伴うCH生成の有無を確認するため、XRDによる測定を行った。図4.1.1にCa水溶液のpH調整を行っていない合成試料とそれを養生温度20~80℃、28日間養生した水和物のXRDパターンを示す。

図の一番下に示した焼成物に着目すると、 $\beta$ - $C_2S$ の回折ピークは、養生温度 20~80°C, 28 日間養生により消失していることが確認された。加えて、CH の回折ピークは見られず、水和に伴う CH は生成していないものと考えられる。

b) C-S-H の合成条件および  $\beta$ - $C_2S$  の水和条件が水和時の CH 生成に及ぼす影響 (1 サイクル目)

水和物においては、養生温度に関わらず、試料中に CH が全く生成せず、水和後においては高 Ca/Si 比の C-S-H のみが生成する結果となった。これは、本実験で得られた高活性  $\beta$ - $C_2S$  の比表面積が非常に高かったことに加え、残存したアルカリの影響を受けたものと考えられる。

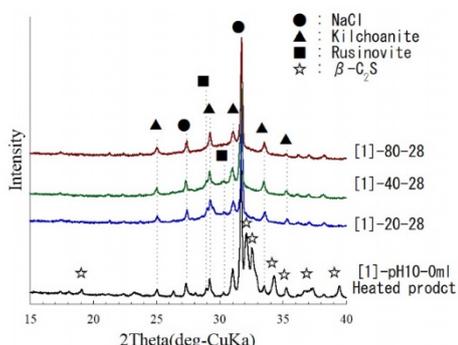


図 4.1.1 焼成および水和試料の XRD パターン

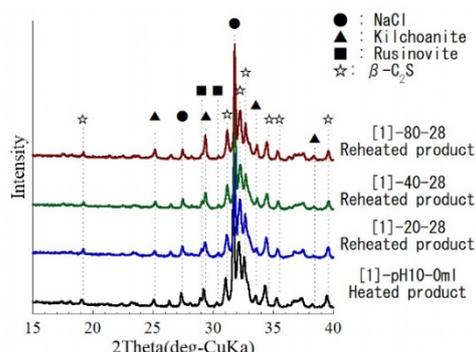


図 4.1.2 2 サイクル目焼成物の XRD パターン

d) 再焼成物の評価 (2 サイクル目)

1 サイクル目の水和物において、水和に伴う CH 生成が見られないことから、次に水和物を加熱した際の脱水挙動を確認するため、等速反応制御 TG 法 (CRC 法) によるダイナミック TG 測定を行った。合成試料とその焼成物を 20°C 養生した 1 サイクル目の水和物の減量曲線を比較すると、どちらも 600, 800°C 付近の 2 段階の減量が見られ、730~810°C の減量率も同等である。以上より、合成時の C-S-H と、それを焼成・水和して得られた 2 サイクル目の C-S-H は、同じ性状を有していることが考えられる。

e) XRD および窒素吸着測定による再焼成物の評価 (2 サイクル目)

図 4.1.2 には、水和物を焼成した 2 サイクル目の再焼成物と比較のために 1 サイクル目の焼成物の XRD パターンを示す。再焼成物においては、合成条件および水和条件に関わらず、すべての試料中に  $\beta$ - $C_2S$  の生成が確認された。これより、ダイナミック TG 測定において確認された 730~810°C の減量は、Ca/Si 比 2.0 の C-S-H から  $\beta$ - $C_2S$  が生成する際の結晶水の脱水に由来していると考えられる。2 サイクル目における比表面積は、それぞれ 6.6~7.3 m<sup>2</sup>/g となり、1 サイクル目における焼成物 (6.6 m<sup>2</sup>/g) と同じ値であり、1 サイクル目および 2 サイクル目において、生成した  $\beta$ - $C_2S$  は同じ性状を有していると考えられる。

## 4.2 環境作用がセメント硬化体の体積変化に及ぼす影響

(1) はじめに

環境作用 (乾湿繰返しや炭酸化) によって生じるセメント硬化体の体積変化において、セメント硬化体内部のスケール (分子スケールから巨視的なスケール) の異なる空隙内の水の挙動や、空隙を形成する C-S-H の化学組成や構造、性質が環境作用の変化によってどのように影響するのか明らかにされていない。そこで本研究では、供用中にコンクリートが環境作用を受け、コンクリート内部の C-S-H が変質し、それがコンクリートの性能に及ぼす影響を踏まえた材料・配合設計手法を構築するため、C-S-H に環境作用 (高温、乾湿繰返し、炭酸化) を与えた試料について、C-S-H の化学組成の変化と分子構造との関係を明らかにするとともに、C-S-H の微視的な構造変化によって生じるセメント硬化体のマイクロから

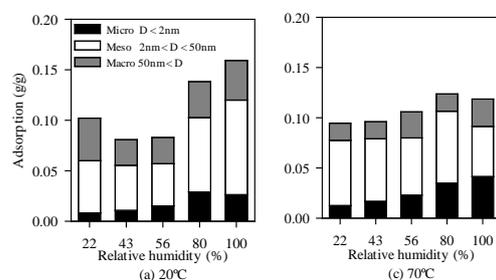


図 4.2.1 ミクロ孔、メソ孔、マクロ孔の空隙量  
(a) 養生温度 20°C (b) 養生温度 70°C

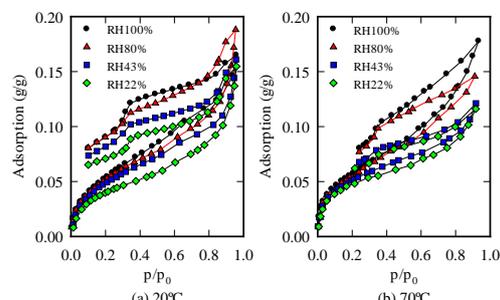


図 4.2.2 水蒸気吸着等温線  
(a) 養生温度 20°C (b) 養生温度 70°C

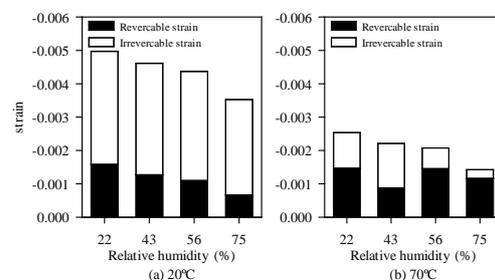


図 4.2.3 回復性ひずみと非回復性ひずみ  
(a) 養生温度 20°C (b) 養生温度 70°C

マクロスケールの空隙の変化を評価した。特に、乾湿繰返しや炭酸化によるセメント硬化体の体

積変化挙動と C-S-H の各種性質（組成と構造）との関係について検討を行った。

### (2) 研究の概要

乾湿繰返しによるセメント硬化体の体積変化は C-S-H の凝集体内部と外部の構造変化が相互に影響することによって生じ、C-S-H の構造内の水分量の違いが影響することから、ミクロからメソスケールの構造の評価が必要となる。したがって、C-S-H 凝集体内部のミクロスケールからマクロスケールの構造は、窒素および水蒸気の吸着試験により評価した。炭酸化によるセメント硬化体の体積変化は、C-S-H の水分量の変化だけでなく、

C-S-H の Ca/Si 比も変化するため、炭酸化による組成変化に伴う凝集体内部の構造変化と

体積変化の関係を評価した。

### (3) 実験結果と考察

#### a) 乾湿によるセメント硬化体の体積変化

図 4.2.1 に、養生温度 20°C、70°C の普通ポルトランドセメントペーストのミクロ孔、メソ孔、マクロ孔の空隙量の変化を示す。養生温度によらず、2~50nm のメソ孔の空隙が占める割合がもっとも多く、乾燥を行っていない相対湿度 100% の試料に着目すると、70°C 養生ほどメソ孔の量が減少し、2nm 以下のミクロ孔の量が増加した。また、乾燥時の湿度が低下するほど、窒素の侵入できる総空隙量が減少し、ミクロ孔やメソ孔といった微細な空隙の量も減少した。養生温度で比較すると 20°C 養生と比較して、70°C 養生では乾燥による空隙量の変化が小さい結果となった。

図 4.2.2 に、養生温度 20°C、70°C のセメント硬化体の水蒸気吸着等温線を示す。水蒸気吸着等温線は乾燥時の湿度が低いほど、各相対湿度における水蒸気吸着量が減少した。また、20°C 養生よりも 70°C で養生した試料では、吸着と脱着の違いを示すヒステリシスが小さくなった。したがって、20°C 養生と比較して 70°C 養生の試料では、空隙構造が複雑ではないことや水和物表面が疎水的であることが考えられる。

図 4.2.3 に乾燥収縮ひずみに対する回復性のひずみと非回復性のひずみを表す。図より 20°C 養生では、全ひずみ（乾燥収縮ひずみ）の内、非回復性のひずみの割合が多くなった。一方で、養生温度が高い試料では、非回復性のひずみの割合が全ひずみの半分以下となり、回復性のひずみの占める割合が多くなった。したがって、高温養生によって C-S-H の構造が安定化し緻密な構造となっているため、乾燥を受けたとしても不可逆的な構造変化が少なく、吸水処理によって乾燥前の構造に回復しやすいものと考えられる。

#### b) 炭酸化によるセメント硬化体の体積変化

炭酸化収縮ひずみと炭酸カルシウム生成量の関係を図 4.2.4 に示す。RH43% の環境での炭酸化では、炭酸カルシウムの生成量の増加に伴い、炭酸化収縮ひずみは増加した。一方で、RH66% の環境下での炭酸化収縮ひずみは、炭酸カルシウム生成量が 30% 程度を超えてから増大した。したがって、炭酸化によって生成した炭酸化カルシウム量が同程度であっても、炭酸化時の相対湿度の違いにより炭酸化収縮ひずみは異なる傾向を示した。

図 4.2.5 に、炭酸化 56 日における炭酸化後の非晶質の減少量とひずみの関係を示す。非晶質量の減少量が多いほど炭酸化収縮ひずみは大きくなった。普通ポルトランドセメントペースト中の非晶質量は主に C-S-H であることから、C-S-H の炭酸化が収縮挙動に影響を及ぼす結果となった。図 4.2.6 に、C-S-H の Ca/Si 比による炭酸化収縮ひずみと平均鎖長の変化を示す。炭酸化収縮ひずみは相対湿度の違いによらず、Ca/Si 比によって一律に示され、Ca/Si 比が 1.00 以下程度で、ひずみは大きく増加した。また、Ca/Si 比の低下による平均鎖長の増加は、ひずみの変化と概ね一致した。湿度により、C-S-H や水酸化カルシウムの炭酸化挙動が異なり、RH43% の炭酸化収縮ひずみの増加は、C-S-H の炭酸化が他の湿度よりも進行したことが要因と考えられる。セメント硬化体の炭酸化は、溶解・析出反応であるため、その進行には水分の存在が必要となる。水酸化カルシウムは C-S-H と比較して粒子が大きく、低湿度では周囲に水分が存在しないため、反応が停滞したものと推察される。

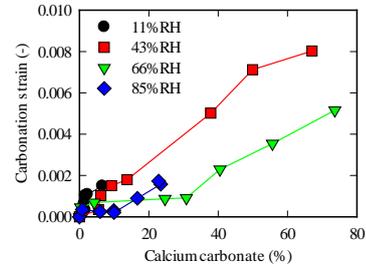


図 4.2.4 各相対湿度における炭酸カルシウム量と炭酸化収縮ひずみの関係

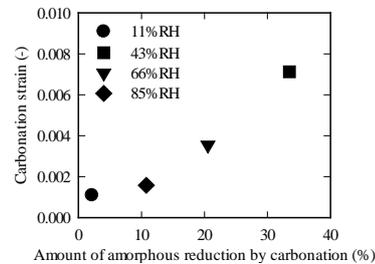


図 4.2.5 非晶質量の減少による炭酸化収縮ひずみの変化

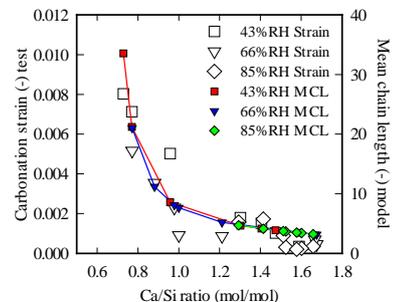


図 4.2.6 C-S-H の Ca/Si 比によるひずみとシリカの平均鎖長の変化

乾湿や炭酸化によるセメント硬化体の体積変化は、C-S-H の化学組成や構造変化に起因する。乾湿による体積変化では、例えば、高温養生によってシリカの重合度を高め C-S-H の構造を安定化させることで体積変化を抑制できる。炭酸化においては、図 4.2.6 より、Ca/Si 比が 1.00 以下でひずみが大きく増加し、その傾向が平均鎖長と類似した挙動を示した。このような知見は事前に C-S-H の Ca/Si 比を高めること、初期 Ca/Si 比が低下する混和材を使用した系においては、炭酸化や構造変化の緩衝となる Ca や Mg 源をセメント系材料に添加するといった最適な材料設計を行うための基礎資料として重要となる。

#### 4. 3 物質移動特性に及ぼす相組成と C-S-H の影響に関する検討

(1) セメント硬化体中の各水和物の役割を明確にすることができれば、最適な材料・配合設計を行うことが可能であると考えられるため、本研究では各水和物が物質移動抵抗性に及ぼす影響を評価する目的で、セメントペースト硬化体(一部、モルタル供試体)の相組成および酸素、塩化物イオン、水分の拡散試験のデータを用いて重回帰分析を行い、各水和物が物質移動抵抗性に及ぼす影響を評価した。

##### (2) 実験概要

本研究では、相組成の定量および空隙率の測定、酸素拡散試験、塩分拡散試験にセメントペーストを使用した。水分拡散試験では、モルタルを使用した。

セメントペースト硬化体は、ポルトランドセメントを用いた供試体は、水結合材比を 35, 45, 55, 65%とした。高炉スラグ微粉末を置換した供試体では、高炉スラグ微粉末置換率 35, 50%の供試体は水結合材比 55%とし、置換率 70%では、水結合材比 45%, 55, 65%とした。フライアッシュを置換した場合は、置換率 15%では水結合材比 55%, 置換率 30%では水結合材比 45, 55, 65%とした。また、シリカフュームを置換した供試体では、置換率 8%, 水結合材比 45%, とした。初期養生方法は 20°C水中養生とし、フライアッシュを用いた供試体は養生期間を 91 日とし、他の配合では 28 日とした。

##### (3) 重回帰分析

重回帰分析の目的変数は、水和物に着目した分析を実施する目的で、毛細管空隙率あたりの酸素拡散係数( $D_{O_2}/\epsilon_{cap}$ )、毛細管空隙率あたりの塩分拡散係数( $D_{Cl}/\epsilon_{cap}$ )および毛細管空隙率あたりの水分拡散係数( $D_{H_2O}/\epsilon_{cap}$ )とした。説明変数は、すべての水和物のうち最も決定係数が高くなった水和物の組み合わせとした。

##### (4) 水和物が物質移動抵抗性に及ぼす影響

式[4.3.1]に  $D_{O_2}/\epsilon_{cap}$  を目的変数として重回帰分析を実施した場合の回帰式、式[4.3.2]に  $D_{Cl}/\epsilon_{cap}$  を目的変数にした場合の回帰式、式[4.3.3]に  $D_{H_2O}/\epsilon_{cap}$  を目的変数にした場合の回帰式を示す。

$$D_{O_2}/\epsilon_{cap}=5.37X_1+0.76X_2-1.48X_3+1.79X_4-4.56X_5-0.67 \quad [4.3.1]$$

$$D_{Cl}/\epsilon_{cap}=4.38X_1+0.47X_2-1.33X_3+0.51X_4-4.51X_5+1.15 \quad [4.3.2]$$

$$D_{H_2O}/\epsilon_{cap}=1.46X_1-1.98X_2-2.39X_3-2.19X_4-1.21X_5+7.27 \quad [4.3.3]$$

ここに、

$X_1$ : OPC45%を基準とした各配合の CH 体積比

$X_2$ : OPC45%を基準とした各配合の AFm 体積比

$X_3$ : OPC45%を基準とした各配合の  $C_4AH_{13}$  体積比

$X_4$ : OPC45%を基準とした各配合の  $C_3AH_6$  体積比

$X_5$ : OPC45%を基準とした各配合の C-S-H 体積比

式[4.3.1]の決定係数が 0.82、式[4.3.2]の決定係数が 0.83、式[4.3.3]の決定係数が 0.95 となった。回帰式の係数に着目すると、CH や AFm、 $C_3AH_6$  が正の値をとっていることから拡散係数を大きくし、負の値になった C-S-H および  $C_4AH_{13}$  が拡散係数を低減することに寄与することが分かる。

また、水分拡散係数では、CH が拡散係数を大きくすることが分かった。実験は、モルタル供試体で行ったため、水分移動には遷移帯が大きく影響していると考えられる。CH は遷移帯で多量に生成し、50nm 以上の毛細管空隙が形成するため、拡散係数を大きくする水和物であると考えられている。

以上の分析結果より、セメント硬化体、ひいてはコンクリートの物質移動抵抗性を向上させるには、硬化体に占める体積が大きい水和物である CH を少なくし、C-S-H を多くすることが必要であると言える。また、本研究では C-S-H に着目したがカルシウムアルミネート系の水和物の影響も無視できないことから、今後の検討が必要である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 18件）

1. 著者名 齋藤豪, 横山卓之, 佐藤賢之介, 佐伯竜彦	4. 巻 72
2. 論文標題 メカノケミカル法によって合成した C2Sに関する基礎的検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Cement Sci. and Concrete Tech.	6. 最初と最後の頁 366-372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.72.366">https://doi.org/10.14250/cement.72.366</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 齋藤豪, 鈴木一帆, 細川佳史, 佐伯竜彦	4. 巻 72
2. 論文標題 高Ca/Si比C-S-Hの低温焼成によるC2Sの生成に関する検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Cement Sci. and Concrete Tech.	6. 最初と最後の頁 373-380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.72.381">https://doi.org/10.14250/cement.72.381</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 鈴木一帆, 齋藤豪, 佐藤賢之介, 細川佳史	4. 巻 72
2. 論文標題 高Ca/Si比C-S-Hの低温焼成によるC2Sの生成に関する検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Cement Sci. and Concrete Tech.	6. 最初と最後の頁 381-388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.72.381">https://doi.org/10.14250/cement.72.381</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 井川義貴, 齋藤豪, 細川佳史, 佐伯竜彦	4. 巻 72
2. 論文標題 高C/SのC-S-HからなるC2Sの水和反応解析成	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Cement Sci. and Concrete Tech.	6. 最初と最後の頁 18-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.72.18">https://doi.org/10.14250/cement.72.18</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 加藤福将, 斎藤豪, 松井久仁雄, 佐伯竜彦	4. 巻 72
2. 論文標題 トバモライトの生成および結晶構造に乾燥条件, Mgおよびアルカリが及ぼす影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Cement Sci. and Concrete Tech.	6. 最初と最後の頁 48-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.72.48">https://doi.org/10.14250/cement.72.48</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 須田裕哉, 富山潤, 斎藤豪, 佐伯竜彦	4. 巻 40
2. 論文標題 湿度変化による乾燥作用を受けたセメントペーストの空隙構造と塩化物イオンの拡散性状の関係に関する基礎的検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 747-752
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない, 又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中山大誠, 佐々木謙二, 原田哲夫	4. 巻 41
2. 論文標題 蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの中酸化抵抗性に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない, 又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐藤賢之介, 斎藤豪, 細川佳史, 佐伯竜彦	4. 巻 71
2. 論文標題 共沈法による高C/S比のC-S-Hの合成と低温焼成した -C2Sの水和反応に関する検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 48-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.71.48">https://doi.org/10.14250/cement.71.48</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 斎藤豪, 佐藤賢之介, 鶴木翔, 佐伯竜彦	4. 巻 71
2. 論文標題 ケイ酸カルシウム水和物による硫化水素吸着機構に及ぼすCa/Si比およびAl置換の影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 101-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.71.101">https://doi.org/10.14250/cement.71.101</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 品川英斗, 佐藤賢之介, 斎藤豪, 佐伯竜彦	4. 巻 71
2. 論文標題 モノサルフェートの前処理乾燥および共存物質の種類がエトリンサイト生成に及ぼす影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 109-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.71.109">https://doi.org/10.14250/cement.71.109</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 栗山友之, 斎藤豪, 佐藤賢之介, 佐伯竜彦	4. 巻 71
2. 論文標題 CaO-MgO-SiO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O系セメント材料における空隙構造と相組成が物質移動性状に及ぼす影響に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 353-360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.71.353">https://doi.org/10.14250/cement.71.353</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉田 泰崇, 小島 彩, 佐伯 竜彦, 斎藤 豪	4. 巻 71
2. 論文標題 C-S-H加圧成型体の作製および物質移動性状の評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 133-139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.71.133">https://doi.org/10.14250/cement.71.133</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉田 泰崇, 小島 彩, 佐伯 竜彦, 斎藤 豪	4. 巻 71
2. 論文標題 C-S-H加圧成型体の作製および物質移動性状の評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 140-145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.71.140">https://doi.org/10.14250/cement.71.140</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 須田 裕哉, 河野 伊知郎, 斎藤 豪, 佐伯 竜彦	4. 巻 71
2. 論文標題 乾燥を受けたセメント硬化体の気体の移動性状に対する空隙構造と水和物による評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 210-217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.71.210">https://doi.org/10.14250/cement.71.210</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 MITSUMORI Yosuke, SAITO Tsuyoshi, KATO Fukumasa, SAEKI Tatsuhiko	4. 巻 73
2. 論文標題 EFFECT OF Al AND Mg ON FORMATION AND CRYSTAL OF TOBERMORITE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cement Science and Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 2~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.73.2">https://doi.org/10.14250/cement.73.2</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 KATO Fukumasa, SAITO Tsuyoshi, MATSUI Kunio, SAEKI Tatsuhiko	4. 巻 73
2. 論文標題 INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF Mg AND ALKALI-ADDED 1.4nm TOBERMORITE DRIED UNDER VARIOUS CONDITIONS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cement Science and Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 10~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.73.10">https://doi.org/10.14250/cement.73.10</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 HAYASHI Ryosuke, SAITO Tsuyoshi, SATO Kennosuke, SAEKI Tatsuhiko	4. 巻 73
2. 論文標題 EFFECTS OF MIXING AMOUNT OF MONOCARBONATE AND CURING TEMPERATURE ON THAUMASITE AND ETTRINGITE FORMATION	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cement Science and Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 18 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.73.18">https://doi.org/10.14250/cement.73.18</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SUDA Yuya, TOMIYAMA Jun, SAITO Tsuyoshi, SAEKI Tatsuhiko	4. 巻 73
2. 論文標題 EFFECT OF RELATIVE HUMIDITY ON CARBONATION SHRINKAGE AND HYDRATION PRODUCT OF CEMENT PASTE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cement Science and Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 71 ~ 78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.73.71">https://doi.org/10.14250/cement.73.71</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 IGAWA Yoshitaka, SAITO Tsuyoshi, SUZUKI Kazuho, HOSOKAWA Yoshifumi	4. 巻 73
2. 論文標題 HYDRATION STUDY OF $C_2S$ WITH HIGH SPECIFIC SURFACE AREA SYNTHESIZED BY COMPLEX POLYMERIZATION METHOD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cement Science and Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 363 ~ 370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.73.363">https://doi.org/10.14250/cement.73.363</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SUZUKI Kazuho, SAITO Tsuyoshi, IGAWA Yoshitaka, HOSOKAWA Yoshifumi	4. 巻 73
2. 論文標題 STUDIES ON SYNTHESIS OF C-S-H BY DOUBLE COMPOSITION METHOD WITH CALCIUM CHLORIDE, AND RECYCLE SYSTEM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cement Science and Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 421 ~ 428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14250/cement.73.421">https://doi.org/10.14250/cement.73.421</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 須田裕哉, 長嶺剛, 富山潤	4. 巻 41
2. 論文標題 自然環境下におけるセメント硬化体の変質と酸素および塩化物イオンの拡散性状に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 593-598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 須田裕哉, 富山潤, 斎藤豪, 佐伯竜彦
2. 発表標題 セメント硬化体の炭酸化収縮に及ぼす相対湿度の影響に関する研究
3. 学会等名 第73回セメント技術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須田裕哉
2. 発表標題 湿度による乾燥を受けたフライアッシュセメントペーストの塩化物イオンの拡散性状に関する基礎的検討
3. 学会等名 土木学会全国大会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山大誠, 佐々木謙二, 原田哲夫
2. 発表標題 蒸気養生コンクリートの実環境における中性化抵抗性に関する検討
3. 学会等名 第73回セメント技術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木隆雅, 佐々木謙二, 原田哲夫
2. 発表標題 蒸気養生コンクリートの水分浸透特性に関する基礎的検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須田裕哉, 富山潤, 斎藤豪, 佐伯竜彦
2. 発表標題 炭酸化によるフライアッシュを用いたセメント硬化体の相組成変化と収縮挙動に及ぼす相対湿度の影響
3. 学会等名 第74回セメント技術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安齋正樹, 佐伯竜彦, 斎藤豪
2. 発表標題 和物がセメント硬化体の物質移動抵抗性に及ぼす影響の評価
3. 学会等名 第74回セメント技術大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	須田 裕哉  (Suda Yuya)  (10636195)	琉球大学・工学部・助教    (18001)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐々木 謙二 (Sasaki Kenji) (20575394)	長崎大学・工学研究科・准教授  (17301)	
研究分担者	斎藤 豪 (Saito Tsuyoshi) (90452010)	新潟大学・自然科学系・准教授  (13101)	