

# 論文 火山ガラス微粉末利用による環境負荷低減効果に関する研究

友寄 篤\*1・野口 貴文\*2・袖山 研一\*3・東 和朗\*4

**要旨**：日本産業標準調査会により公告された JIS 原案に対する意見受付が 2019 年 11 月に終了した JIS A 6209 「コンクリート用火山ガラス微粉末」について、コンクリートによる実験的検討にこれまでのラボ機での製造実績を加えて、その環境性能を検討した。年間 2.9 万トンの製造能力を持つモデル工場を想定した場合、セメント製造に伴う二酸化炭素排出量の約 1 割の排出量となり、地上 8 階建のモデル事務所ビルについて設計基準強度を 24N/mm<sup>2</sup> と仮定して試算したところ、躯体工事・土工事に伴う二酸化炭素排出量を最大で 20%以上削減できる結果が得られた。

**キーワード**：火山ガラス微粉末, 混和材, 環境負荷, インベントリ, 二酸化炭素排出量

## 1. はじめに

ポルトランドセメントに置換される混和材として産業副産物が実用化されているが、フライアッシュを副産する石炭火力発電の先行きは不透明であり、高炉スラグ微粉末も世界的に見ればその量には限りがある。また、副産物であるが故に混和材として利用する際には温暖化ガス排出量はほぼカウントされないものの、主製品の製造過程では大量の燃料等を消費している。2017 年に JIS 制定に向けて新市場創造型標準化制度に採択され、日本産業標準調査会により公告された JIS 原案に対する意見受付が 2019 年 11 月に終了した JIS A 6209 「コンクリート用火山ガラス微粉末」は、原案によれば「火山噴出物を原料とし、選別、粉碎、分級その他によって製造したアルミノけい酸塩ガラス（火山ガラス）を主成分とした微粉末」である。1000℃を超える地下のマグマが噴出し堆積する過程で急冷された火山ガラスは、環境負荷のない自然エネルギーとも言える地球の火山活動による産物であり、混和材として用いる際に焼成の必要がない。

これまでに火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの強度発現性や流動性については、W/B=20%におけるシリカフェームとの比較、W/B=50%におけるフライアッシュとの比較検討がなされ<sup>1)</sup>、促進中性化試験や浸漬法による塩化物イオン浸透抵抗性に関する結果も報告されている<sup>2)</sup>。しかしながら、火山ガラス微粉末を用いたコンクリートに関する環境負荷低減効果に関する検討は、セメント使用量の削減について検討<sup>3)</sup>がなされているものの、詳細については明らかになっていない。産業副産物混和材については既に多くの蓄積があり<sup>4)</sup>、副産物ではない火山ガラス微粉末についても環境負荷低減効果があると予想されるものの、原単位に関する境界条件が異なるため、直接的な参考にはならない。そこで、本研究で

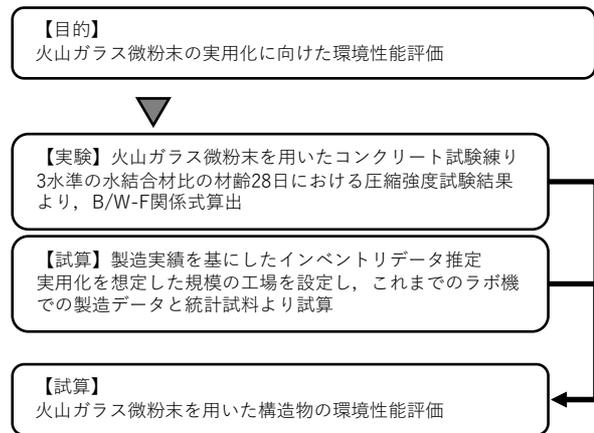


図-1 研究の流れ

は火山ガラス微粉末の実用化に向けた環境性能を評価することを目的に、実験的検討を行った上で試算を行った。図-1に研究の流れを示す。実験では3種類の粉末度の火山ガラス微粉末を用いた場合のB/W-F関係式を算出し、これまでの製造実績に基づき実大規模の製造工場におけるインベントリを試算し、実構造物に火山ガラス微粉末を用いた場合の環境負荷低減効果を粉末度ごとに算出した。

## 2. 実験的検討

### 2.1 使用材料と実験の水準

本研究では既報<sup>5)</sup>と同様に鹿児島県鹿屋市串良町の採掘業者より取り寄せた前処理なしの入戸シラスを原鉱とした。天日干しで含水率を1%以下として5mmの篩を通過する粒分をエアテーブルにより選別し、回収された火山ガラスを図-2に示す通り一次粉碎品とこれを分級した微粉と粗粉の3種類の火山ガラス微粉末（以下、VGPとする）を用いた。予備試験の結果、それぞれ JIS 原案

\*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻助教 博士（工学）（正会員）

\*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻教授 博士（工学）（フェロー会員）

\*3 鹿児島県工業技術センター 地域資源部シラス研究開発室長 博士（工学）s（正会員）

\*4 （株）プリンシプル 代表取締役

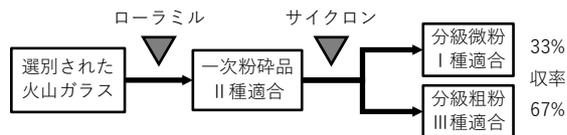


図-2 使用した VGP の製造方法

表-1 使用した VGP の基本物性

|     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 強熱減量 | BET 比表面積(cm <sup>2</sup> /g) |
|-----|------------------|--------------------------------|------|------------------------------|
| I   | 73.0             | 13.1                           | 2.47 | 10400~11600                  |
| II  | 73.9             | 12.8                           | 2.25 | 6300~6700                    |
| III | 74.3             | 12.6                           | 2.25 | 2700~3500                    |

表-2 使用材料

| 材料         | 種類                               | 記号  |
|------------|----------------------------------|-----|
| セメント       | 普通ポルトランドセメント                     | OPC |
| 火山ガラス微粉末   | 表-1 の通り                          | VGP |
| 硬質砂岩砕砂     | 鹿児島県日置市産, 2.62 g/cm <sup>3</sup> | S1  |
| 石灰砕砂       | 大分県津久見市産, 2.67 g/cm <sup>3</sup> | S2  |
| 硬質砂岩砕石     | 鹿児島県日置市産, 2.64 g/cm <sup>3</sup> | G1  |
| 石灰砕石       | 大分県津久見市産, 2.70 g/cm <sup>3</sup> | G2  |
| 高性能 AE 減水剤 | ポリカルボン酸系                         | SP  |
| AE 剤       | アルキルエーテル系                        | AE  |
| 水          | 地下水                              | W   |

表-3 実験の要因と水準及びフレッシュ試験結果

| VGP 種-置換率 | W/B (%) | W (kg/m <sup>3</sup> ) | s/a  | SP 量 (B×%) | AE 量 (B×%) | スランプ (cm) | Air (%) |
|-----------|---------|------------------------|------|------------|------------|-----------|---------|
| I -20%    | 60      | 172                    | 50.3 | 0.80       | 0.3        | 19.0      | 5.9     |
|           | 50      | 170                    | 49.2 | 0.90       | 0.0        | 19.0      | 5.7     |
|           | 35      | 174                    | 41.5 | 0.90       | 0.0        | 19.0      | 5.9     |
| II -20%   | 60      | 172                    | 50.3 | 0.65       | 0.2        | 19.0      | 5.9     |
|           | 50      | 170                    | 49.2 | 0.65       | 0.1        | 19.0      | 4.6     |
|           | 35      | 174                    | 41.5 | 0.80       | 0.0        | 20.0      | 3.4     |
| III -20%  | 60      | 172                    | 50.3 | 0.65       | 0.0        | 20.0      | 5.4     |
|           | 50      | 170                    | 49.2 | 0.60       | 0.1        | 20.0      | 4.9     |
|           | 35      | 174                    | 41.5 | 0.95       | 0.1        | 20.0      | 3.7     |
| I -5%     | 60      | 172                    | 50.6 | 0.70       | 0.0        | 18.5      | 5.8     |
|           | 50      | 170                    | 49.5 | 0.90       | 0.0        | 20.5      | 4.8     |
|           | 40      | 172                    | 44.3 | 0.70       | 0.0        | 19.0      | 3.5     |
| I -10%    | 60      | 172                    | 50.5 | 0.70       | 0.0        | 18.0      | 5.2     |
|           | 50      | 170                    | 49.4 | 0.90       | 0.0        | 20.0      | 5.4     |
|           | 40      | 172                    | 44.1 | 0.85       | 0.0        | 21.0      | 4.0     |

に示される火山ガラス微粉末 I 種, II 種, III 種に適合した。(以下, それぞれ VGP-I, II, III とする。)表-1 に基本物性を示す。

試験練りはレディーミクストコンクリート工場の試験室で実施し, VGP 以外は実出荷と同じ材料を用いて 3 水準の W/B で試験練りを行った。使用材料を表-2 に, 実験の水準と要因, フレッシュ試験の結果を表-3 に示す。20%置換で VGP3 種類の試験を行い, VGP-I については置換率 5%と 10%も実施した。OPC 単味に合わせて骨材は重量比で S1:S2=7.5:2.5, G1:G2=7:3 とし, s/a は W/B により調整した。練混ぜは強制二軸練りミキサーを用い, 結合材と細骨材の空練りを 15 秒, 水と化学混和剤を投入して 60 秒間練り混ぜ, 粗骨材を加えてさらに 60 秒間の練混ぜを行った。なお, W/B=35%のみ粗骨材投入後の練混ぜを 90 秒とした。目標スランプ 18cm±3cm, 目標空気量 4.5%±1.5%を満たす様に化学混和剤量を調整した。φ100×200mm の円柱供試体を作成し, 標準養生材齢 28 日で 3 本の圧縮強度試験を行なった。

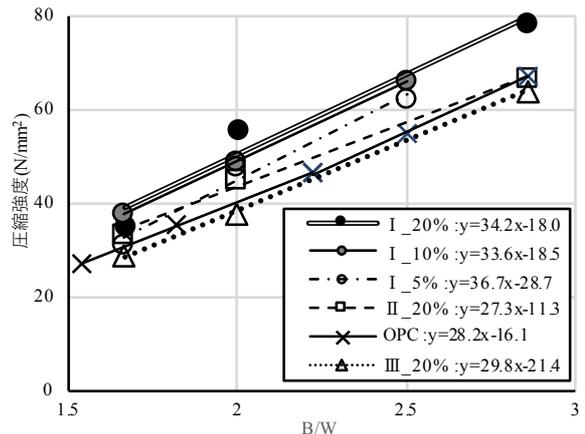


図-3 VGP を用いたコンクリートの B/W-F 関係式

表-4 30N/mm<sup>2</sup> を得るための配(調)合

|          | W/B (%) | W (kg/m <sup>3</sup> ) | B (kg/m <sup>3</sup> ) | OPC (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------|---------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| OPC      | 61.17   | 180                    | 294.3                  | 294.3                    |
| I -5%    | 62.52   | 170                    | 271.9                  | 258.3                    |
| I -10%   | 69.28   | 170                    | 245.4                  | 220.8                    |
| I -20%   | 71.25   | 170                    | 238.6                  | 190.9                    |
| II -20%  | 66.10   | 170                    | 257.2                  | 205.7                    |
| III -20% | 57.98   | 170                    | 293.2                  | 234.6                    |

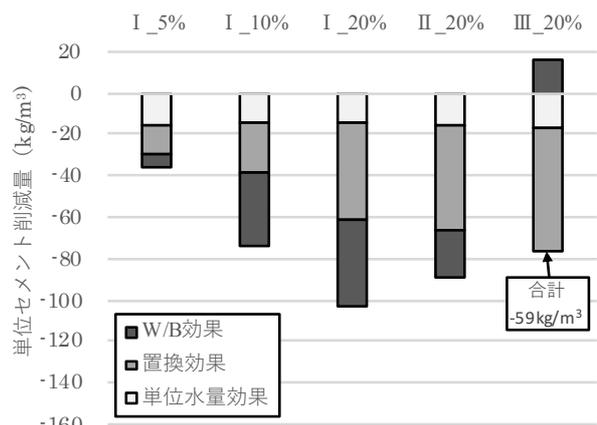


図-4 30N/mm<sup>2</sup> における単位セメント削減量

## 2.2 実験結果と考察

圧縮強度の試験結果をプロットし, これを近似直線として得られた B/W-F の関係を図-3 に示す。なお, 図中には同一材料を用いて実出荷で採用しているセメント単味の関係式を OPC として記載した。3 水準の W/B について各 1 回の試験練りで近似しているため, 4 回の試験練りの平均値で近似している OPC より VGP-I の 20%置換ではやや結果に変動があるが, 同一 B/W において OPC と比較すると, 置換率 5%でも強度発現し, 置換率 20%までさらにその性能が発揮される結果が得られた。VGP-II の 20%置換ではやや OPC を上回り, VGP-III の 20%置換ではやや下回る結果が得られた。

近似直線の関係式から算出した圧縮強度 30N/mm<sup>2</sup> を得るための配(調)合を表-4 に示す。一般的なスランプ管理の OPC 単味における単位水量 180kg/m<sup>3</sup>, 火山ガラス微粉末を用いた場合はフレッシュ試験の結果より単

位水量を少なくできるため  $170\text{kg}/\text{m}^3$  とした。強度発現性に応じて W/B は約 58% から 71% となった。これらの配(調)合における OPC と比較した単位セメント削減量を図-4 に示す。単位水量を  $10\text{kg}/\text{m}^3$  少なくしたことにより、いずれの配(調)合においても約  $15\text{kg}/\text{m}^3$  程度のセメント削減に繋がっている。また、置換率が大きくなるほどセメント量は少なくなり、20%置換ではいずれの VGP でも  $50\text{kg}/\text{m}^3$  程度の効果となった。強度発現性に応じた W/B による効果については、Ⅲ種を 20%置換した場合のみ OPC よりセメントが  $16\text{kg}/\text{m}^3$  増える結果となったが、配(調)合全体としては  $59\text{kg}/\text{m}^3$  の削減となった。Ⅰ種は 20%までは置換するほど強度発現性が優れる結果が得られるため、そのままセメント量の削減効果に繋がりが、20%置換では  $103\text{kg}/\text{m}^3$  の削減となる。W/B 効果はⅠ種 10%置換がⅡ種 20%置換を上回るものの、配(調)合全体としては置換率効果によりⅡ種 20%置換の削減効果が上回る結果となった。

### 3. 火山ガラス微粉末のインベントリ試算

#### 3.1 モデル工場の規模と境界条件

コンクリート材料に関するインベントリデータは製造実績や産業関連表を基に算出されているが、VGP についてはラボ機での製造実績しかない。そこで、鹿屋市串良町中山の原鉱採掘場から約 20km にある志布志港に隣接する敷地にモデル工場を設定した。なお、同港は中核国際港湾に指定され鹿児島県・宮崎県の貨物運搬の中心となっている。モデル工場の規模は図-5 に示す通り年間 7.5 万トンのシラス原鉱を処理する能力とした。製品として 3 種類の VGP 合計で 2.9 万トン、副産物として細骨材に用いることが可能な砂が 2.0 万トン、軽石が 1.2 万トン、それぞれ製造される。サブシステムの境界条件を図-6 に示す。ラボ機では鹿屋市串良町のシラス採掘業者より原鉱を購入しているが、モデル工場における処理量から自社採掘の可能性などを想定し、原料採取もシステム内とした。また、サービスステーションはセメントやその他の混和材と境界の比較を容易するために、志布志港に隣接する工場敷地内を想定した。

ラボ機では取り寄せた原鉱を天日干しにより含水率を 1%以下に乾燥し、僅かに含まれる粗大な軽石を 5mm の篩で取り除きエアテーブルにより選別している<sup>5)</sup>。モデル工場では左官材料として採取されているシラスの天日乾燥方法が実用化されている<sup>6)</sup>ため、原料採掘地でこの方式を採用してまず乾燥する。粗大な軽石の除去については骨材と同じく、採掘場でトロンメルを用いる。

工場に搬入された 5mm 以下の入戸シラスを原料とした、火山ガラスを含む粒分の回収率については既報<sup>5)</sup>の回収率を設定した。選別された火山ガラスを粉砕・分級

するが、切替弁により粉砕と分級を調整する配管とし、一次粉砕品と分級品の割合は 5:5 とした。ラボ機のローラミルで  $8\text{kg}/\text{h}$  で火山ガラスを供給した場合、直結サイクロンによる分級により、VGP-Ⅰ種相当の微粉を 32%、VGP-Ⅲ種相当の粗粉を 68%回収出来ることを確認しており、モデル工場のサイクロンによる分級では微粉の回収率を 30%とした。

工場に設置される主要機械設備は原料のためのエアテーブルと呼ばれる選別機、火山ガラスを粉砕するローラミルであるが、ラボ機における実績を基に想定した装置規模を表-4 に示す。ローラミルの大型化に伴う粉砕能力はテーブル径 Dt の比の 2.5 乗に比例することが実証されているため、ラボ機では  $Dt=15\text{cm}$  の装置に  $5\text{kg}/\text{h}$  で火山ガラスを供給しているが<sup>5)</sup>、 $8\text{kg}/\text{h}$  で供給した場合、市販品である  $Dt=3.6\text{m}$  の装置に拡大すれば  $22.6\text{t}/\text{h}$  の粉

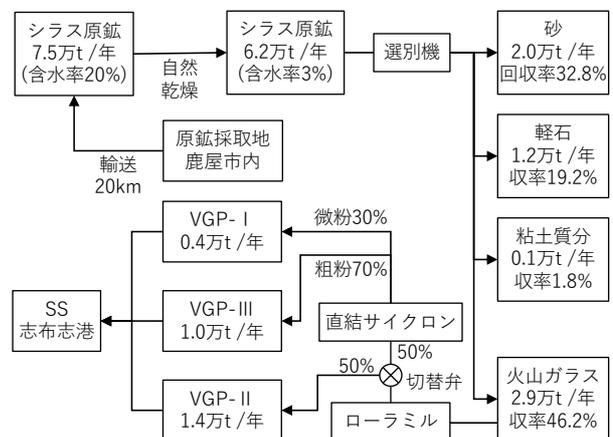


図-5 設定した VGP 製造モデル工場

表-4 主要設備概要

|     | ラボ機                                   | モデル工場                                  |
|-----|---------------------------------------|--|
| 選別機 | 篩：5mm 以下                              | トロンメル (乾式)<br>φ1800mm                  |
| 選別機 | 網面積：0.54 m <sup>2</sup><br>処理量：2.0t/h | 網面積：2.55 m <sup>2</sup><br>処理量：13.0t/h |
| 粉砕機 | テーブル径：0.15m<br>+サイクロン分級機<br>処理量：8kg/h | テーブル径：3.6m<br>+サイクロン分級機<br>処理量：22.6t/h |

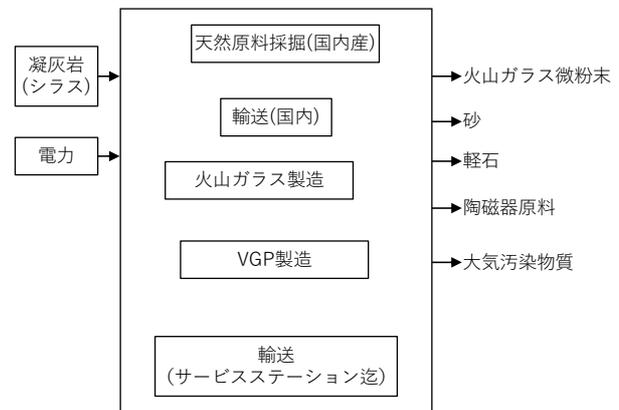


図-6 設定したサブシステム境界

砕が可能となる。8 時間/日、300 日/年の稼働とすれば 2400h/年の稼働となり、5.4 万トン/年の粉砕が可能な規模である。

エアテーブルの大型化に伴う選別能力は網面積比に篩効率（網面積比 4.7 の場合、篩効率 1.38）を乗じて算出できることが実証されている。また、風力選別機との組合せにより約 2 倍に処理能力が向上できることを確認している。テーブル面積 0.54m<sup>2</sup> のラボ機に 93.4kg/h の乾燥原鉱を供給しているが<sup>5)</sup>、同一機種で 2.0t/h の砂の選別実績があるため、2.55m<sup>2</sup> の網面積のエアテーブルに拡大して風力選別機と組み合わせれば、26.0t/h の乾燥原鉱の処理が可能となる。ローラミルと同じ稼働時間で 6.2 万トン/年の選別が可能な規模である。

### 3.2 積み上げ法によるインベントリ試算

VGP はラボ機での製造実績しかないために、積み上げ法により製造工程ごとにインベントリを推計する。

#### (1) 原料採取から工場搬入のプロセス

原鉱となる入戸シラスはコンクリート用の細骨材や路盤材などに使われている実績があるため、その原単位については砂利・砂と同等と仮定し、骨材に関するデータを引用する。骨材の原単位については、積算法や産業関連法によるいくつかの調査結果が報告されているが、その値は 1.04~9.9 kg-CO<sub>2</sub>/t と幅があり、その理由として輸送分が含まれているかが不明であることが指摘されている<sup>4)</sup>。本研究では海砂以外の川・山・陸その他における砂利砂採取に関する原単位試算結果<sup>4)</sup>から抜粋した表-5 に示す値を用いた。この試算では、モデル工場と同等規模の 1 日 150t の採取量、運搬に 10t ダンプトラックを使用し、片道運搬距離が 20km と設定され、往復のトラックが排出する量をカウントしている。これらを合計すると原料採取から工場搬入で 10.4kg-CO<sub>2</sub>/t の原単位となる。なお、引用した骨材試算には水洗選別機や脱水処理機の排出量も計上されているが、現状のシラス採取場では用いられていないため、計上していない。また、建屋の光熱水量も含まれていない。

#### (2) 選別・粉砕・分級のプロセス

ラボ機での消費電力を基にして、前節で設定した装置規模に拡大した場合の消費電力を、機械装置メーカーに実績を基に算出を依頼した。得られた結果を表-6 に示す。エアテーブルと風力選別機については、 $\sqrt{3} \times \text{電圧 (V)} \times \text{電流 (A)} \times \text{力率 (0.8)} \times 1 \text{ 時間}$  として算出し、ラボ機での実績がない風力選別機については、電流を 0.8A と仮定した。粉砕については、ラボ機での供給量 5kg/h、8kg/h、10kg/h、15kg/h における消費電力からモデル工場での消費電力を実績から算出した。電力については、工場敷地内における自家発電や原料採取場近辺での太陽光発電などの可能性が考えられるものの、信頼できる発電量につ

表-5 骨材採取に関する原単位試算結果<sup>4)</sup>

| 機器類                         | 台数                         | 稼働時間 (h) | 出力 (kW) | 燃料消費率 (L/kWh) | 軽油 or 電力消費量 (L/日) | CO <sub>2</sub> 原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /L) | CO <sub>2</sub> 発生量 (kg)      |
|-----------------------------|----------------------------|----------|---------|---------------|-------------------|---|-------------------------------|
| 掘削機                         | バックホウ (0.8m <sup>3</sup> ) | 1        | 8       | 104           | 0.175             | 146 (L/日)                                   | 2.64                          |
| 運搬                          | ダンプトラック (10t)              | 15       | 1.3     | 246           | 0.05              | 240 (L/日)                                   |                               |
| 選別                          | トロンメル                      | 1        | 8       | 7.4           |                   | 59.2 (kW/日)                                 | 0.407 Kg-CO <sub>2</sub> /kWh |
| 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 発生量 |                            |          |         |               |                   | 生産  | 4.1kg/t                       |
|                             |                            |          |         |               |                   | 運搬  | 6.3kg/t                       |

表-6 選別から粉砕工程における排出量試算

| 工程                          | 機械類    | 台数 | 消費電力 (kWh/t) | 排出係数 (kg-CO <sub>2</sub> /kWh) | CO <sub>2</sub> 発生量 (kg/t) |
|-----------------------------|--------|----|--------------|--------------------------------|----------------------------|
| 選別                          | 風力選別機  | 1  | 0.3          | 0.438                          | 0.1                        |
|                             | エアテーブル | 1  | 2.9          | 0.438                          | 1.3                        |
| 粉砕                          | ローラミル  | 1  | 175.9        | 0.438                          | 77.0                       |
| 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 発生量 |        |    | 合計           |                                | 78.4                       |

表-7 VGP を置換した場合の排出量の一例

| 置換率                                      | 置換率 |     |      |      |       |
|--|-----|-----|------|------|-------|
|  | 0%  | 5%  | 10%  | 20%  |       |
| 単位量 (kg/m <sup>3</sup> )                 | OPC | 300 | 285  | 270  | 240   |
|  | VGP | 0   | 15   | 30   | 60    |
| CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     | 230 | 220  | 209  | 189   |
| CO <sub>2</sub> 削減率 (%)                  |     | 0   | 4.4% | 9.1% | 17.8% |

いてのデータの入手が難しく、全て九州電力から購入すると仮定した。消費電力に対して、地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく命令に定める算定方法の、九州電力株式会社における一般電気事業者からの買電の排出係数 0.438（平成 30 年度）を用いて算出された排出原単位は 78.4kg/t となった。なお、この数値には建屋の光熱水量は含まれていない。また、分級についてもローラミルに内蔵されるファンのエネルギーを用いるため、特にエネルギーを必要としない。

### 3.3 火山ガラス微粉末の CO<sub>2</sub> 削減効果

VGP の製造工程全体では原料採取から粉砕までを合計して 88.8kg/t という排出原単位となった。普通ポルトランドの二酸化炭素排出量に関しては、2017 年度実績に基づく 769kg/t と報告されているため<sup>7)</sup>、これと比較すると VGP の製造にはセメント製造に比べると二酸化炭素排出量は 1 割程度まで削減されることになる。3 種類の VGP の各生産量についても切替弁による調整が可能であり、いずれの排出源単位についても同じであると考えることができる。この結果に基づき、VGP を単位結合材量 300kg/m<sup>3</sup> のコンクリートについて混和材として普通ポルトランドセメントに置換した場合の結合材に起因する CO<sub>2</sub> 排出量の一例を表-7 に示す。結合材に起因する CO<sub>2</sub> 排出量は置換率とほぼ同程度減少する。VGP の置換率については、これまでに 30%置換した W/B=40% のコンクリートについて、I 種相当品では材齢 1 週から OPC 単味の圧縮強度を上回るが、比表面積の小さな VGP でも 1 年までの長期材齢で強度増進することが報告され

ている<sup>8)</sup>。粉末度と置換率については、強度や耐久性に加えて環境性能の観点からも検討をする必要がある。

#### 4. 構造物に適用した際の環境評価

##### 4.1 モデル建物

建築学会で標準オフィスモデル<sup>9)</sup>として各種検討に用いられているモデル事務所(RC造,地上8階地下1階,延床面積7583m<sup>2</sup>)を仮定し,建築学会のLCAツール<sup>10)</sup>を用いて火山ガラス微粉末を用いた場合の新築工事分の二酸化炭素排出量を評価する。標準モデルビルでは躯体と杭工事で設計基準強度 $F_c=24\text{N/mm}^2$ が設定されているため,その配(調)合強度 $30\text{N/mm}^2$ と仮定し,2章の実験から得られた単位セメント削減量と3章で算出したVGPのインベントリデータを用いた。標準モデルビルでは土工事に含まれる杭のコンクリート1206m<sup>3</sup>及び躯体コンクリート4400m<sup>3</sup>が計上されているため,この全てが火山ガラス微粉末を用いたコンクリートに置換されたと仮定した。また,VGP製造に伴う副産物である砂を細骨材として用いた場合については,砕砂のみを用いたW/C=50%、目標スランプ18cm±2.5cmのコンクリートと比較して,同一化学混和剤量で目標スランプが得られるという結果が報告されている<sup>11)</sup>。そのため全ての細骨材に副産物である砂を用いると仮定した。3章でVGP製造に伴うシステム境界を設定した通り,この砂については副産物であるため,二酸化炭素排出量が0とみなすことができる。

##### 4.2 新築工事における二酸化炭素排出量削減

算出した新築工事分の単位床面積当たりの二酸化炭素排出量のうち,建築工事全体の約40%を占める躯体工事と土工事の結果を図-7に示す。なお,躯体工事をコンクリートとそれ以外(型枠,雑鉄骨,鉄筋,その他)に分類して示し,杭工事は土工に含まれている。躯体工事と土工のうち,躯体コンクリートと杭コンクリートで70%以上を占め,その構成材料であるセメントに関わる二酸化炭素排出量が圧倒的に多い。そのため,前章で比較した通りVGPを用いることで材料起源の温暖化ガスの削減につながる結果が得られるが,最も効果の大きいI種の20%置換でも20%以上の削減効果という結果となる。

LCAツールに環境対策として標準装備されている高炉セメントは強度発現の遅れによる工程影響指数などが設定され,その分の環境負荷の増加が考慮されている。ただし,VGP I種の5%置換と10%置換,20%置換およびII種20%置換の4水準では28日でセメント単味より強度発現が得られる結果となっているため,工程影響指数の設定も必要ないと考えられる。

また,一般的には混和材を用いると中性化抵抗性が低

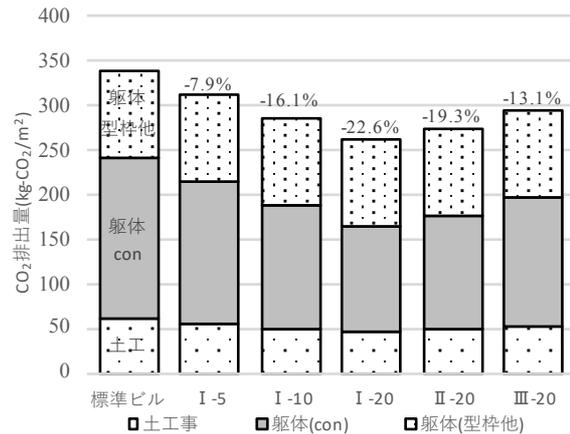


図-7 新築工事分の排出量比較

下すると指摘されるが,VGP I種の5%置換と10%置換では同一水結合材比OPCに比べて中性化抵抗性が低下しないという報告がなされている。建築物の寿命については中性化が支配的であるかどうかについて2018年の建築学会大会で議論が始まったばかりであるが<sup>12)</sup>,VGP I種を10%程度まで置換した場合のW/B=60%のコンクリートに対する浸漬法における見掛けの塩化物イオン拡散係数がOPCに比べ1割に低下するという結果も報告されているため<sup>2)</sup>,普通コンクリートの製造時における低炭素化に加えて建設後の長寿命化にも寄与する可能性があると考えられる。ただし,これらの中性化抵抗性や塩化物イオン浸透抵抗性については,本研究で実施した同一強度ではなく,同一水結合材比での比較となっているため,それを踏まえた今後の評価が今後の課題である。

#### 5. まとめ

本研究で得られた火山ガラス微粉末を利用した場合の環境性能に関する知見を以下に示す。

##### (1) セメント使用量削減

試験練り結果に基づくB/W-F関係式より,配(調)合強度 $30\text{N/mm}^2$ の場合の単位セメント使用削減量を算出し,その要因について分析した。

##### (2) VGP製造に伴うインベントリ試算

年間2.9万トンのVGPを製造するモデル工場を想定し,副産物としての砂は排出量をゼロ,全てを購入電力と仮定してとして試算したところ,セメント製造に伴う排出量の約1割の88.8kg/tとなる結果が得られた。実工場では自家発電などにより更なる排出削減も可能である。

##### (3) 構造物に適用した際の効果

地上8階建のモデル事務所ビルについて設計基準強度を $24\text{N/mm}^2$ と仮定して試算したところ,躯体工事・土工に伴う二酸化炭素排出量を最大で20%以上削減できる結果が得られた。

## 謝辞

本研究のモデル工場の想定に当たっては、原田産業の植原和浩様にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 友寄篤, 野口貴文, 袖山研一, 東和朗: コンクリート用火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの基本特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.255-260, 2018.7
- 2) 袖山研一, 友寄篤, 野口貴文, 楠元宏を治: 火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの鉄筋腐食因子の侵入抵抗性に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.167-172, 2018.7
- 3) T. Noguchi, A. Tomoyose, K. Sodeyama, K. Higashi: Concrete with High-purity volcanic glass powder manufactured from pyroclastic flow deposit through dry gravity classification and pulverization, Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Building material, Vol.2, pp.244-255, Aug.2019
- 4) 日本コンクリート工学協会: コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書, 2010.7
- 5) 袖山研一, 友寄篤, 野口貴文, 東和朗: 乾式比重選別と粉砕によるシラスの建設材料への全量活用, 「材料」, Vol.66, No.8, pp.574-581, 2017.8
- 6) 九州環境エネルギー産業推進機構: 九州地域環境産業企業要覧, 2014.3
- 7) セメント協会: セメントの LCA データの概要, 2019.2
- 8) Tomoyose, A. et al.: Utilization of volcanic ejecta as a high-performance supplementary cementitious material by gravity classification and pulverization, RILEM technical letters, Vol.3, pp.66-74, 2018.12
- 9) 滝沢博: 標準問題の提案 (オフィス用標準問題), 日本建築学会環境工学委員会 熱分科会第 15 回熱シンポジウム, 1985.9
- 10) 日本建築学会: 建物の LCA 指針～温暖化・資源消費・廃棄物のための評価ツール～, 日本建築学会, 2006.11
- 11) Tomoyose, A. et al.: Total utilization of pyroclastic flow deposits as construction materials through dry gravity classification and pulverization, Proceedings of the 8th International Conference of Asian Concrete Federation, Vol.1, pp.475-481, 2018.11