

# 委員会報告 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

一宮 一夫\*1・畑中 重光\*2・新 大軌\*3・国枝 稔\*4・合田 寛基\*5・原田 耕司\*6

**要旨：**ジオポリマーは、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量が少なく、各種産業副産物が有効利用でき、アルカリシリカ反応、強酸、高温に対する抵抗性にも優れている一方で、固化メカニズムが十分に解明されていないことや長期性状に関する情報が少ないことなど、実用化までに解決すべき課題も多い。本研究委員会は、ジオポリマー技術に関する国内外の既往の知見を取りまとめてジオポリマーの体系と期待できる品質を明快に示すこと、我が国の実情にあったジオポリマーの製造方法を探ること、そして我が国の建設分野へのジオポリマーの適用に向けた提案を行うことを目的に設置された。本稿では2年間の研究委員会の活動の成果の概要を示した。

**キーワード：**ジオポリマー、反応機構、力学特性、耐久性、製造施工、共通実験、eラーニング

## 1. はじめに

ジオポリマーは、『セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物水溶液を用いて硬化させたもの』で、一般にはフライアッシュとケイ酸ナトリウムを基本とし、固化促進のために高炉スラグ微粉末や水酸化ナトリウムが添加されることが多い。代表的な特長は、クリンカーを使用しないことから低炭素である、固化にカルシウムを必ずしも必要としないので耐酸性や高温抵抗性に優れる、フライアッシュなどの産業副産物を大量消費できる、などがある。その一方で、固化メカニズムが十分に解明されていない、ジオポリマーの特長を發揮できる配(調)合はピンポイントである、従来のコンクリートと比べて高コストである、長期性状に関する情報が少ないなど、実用化までに解決すべき課題も多い。

以上のような背景のもと、本研究委員会では、ジオポリマー技術に関する国内外の既往の知見を取りまとめてジオポリマーの体系と期待できる品質を明快に示すこと、我が国の実情にあったジオポリマーの製造方法を探ること、そして我が国の建設分野へのジオポリマーの適用に向けた提案を行うことを目的とし、平成 27, 28 年度の 2 ヶ年にわたり活動した。

表-1 に委員会構成を示す。委員は土木、建築、化学の各分野のコンクリートに関する深い知見を有する研究者と技術者からなり、反応機構 WG (WG1: 新主査)、力学特性・耐久性・構造 WG (WG2: 国枝主査)、製造・施工 WG (WG3: 原田主査) について、既往の知識を整理した。加えて、材料と配(調)合を指定したモルタルによる共通実験を行った。

WG ごとの取り組んだ課題を次に示す。

**【WG1: 反応機構】** 1) コンクリートの知識を有する人が理解できる反応メカニズムの説明, 2) 高炉スラグ微粉末を併用したジオポリマーのセメント硬化体との組成の違い, 3) ジオポリマーに関する各種化学分析の評価方法, 4) ジオポリマーの定義

**【WG2: 力学特性・耐久性・構造】** 1) ジオポリマーの物性に関する知見の整理, 2) 共通実験の実施, 3) コンクリートの知識を有する技術者や学生を対象にした、ジオポリマーの概要を説明する eラーニングの作成

**【WG3: 製造・施工】** 1) ジオポリマーの実用化例について、国内外での事例の収集（工場製品、現場施工等）  
本稿では、2 章で反応メカニズムならびに材料、3 章でジオポリマーの可能性、4 章で建設分野へ適用する場合の基礎知識、5 章で施工事例、6 章で共通実験、7 章で eラーニングなどの委員会成果の概要を紹介し、8 章ではジオポリマーの今後の展開についての考えを示した。

表-1 委員会構成

委員長：一宮 一夫（大分高専）	
副委員長：畑中重光（三重大学）	
幹事長：新 大軌（島根大学）	
幹事：国枝 稔（岐阜大学）	合田 寛基（九州工業大学）
原田 耕司（西松建設）	
<b>【WG1: 反応機構WG】</b>	
◎ 新 大軌（島根大学）	○橋本 忍（名古屋工業大学）
上原 元樹（鉄道総研）	大塚 拓（電中研）
大宅 淳一（日本大学）	佐川 孝広（前橋工科大学）
鳥居 和之（金沢大学）	丸山 一平（名古屋大学）
山本 武志（電中研）	李 柱国（山口大学）
<b>【WG2: 力学特性・耐久性・構造設計WG】</b>	
◎国枝 稔（岐阜大学）	○佐川 康貴（九州大学）
一宮 一夫（大分高専）	畑中 重光（三重大学）
宮原 茂禎（大成建設）	山口 明伸（鹿児島大学）
<b>【WG3: 製造・施工WG】</b>	
◎原田 耕司（西松建設）	○合田 寛基（九州工業大学）
尾上 幸造（熊本大学）	熊谷 慎祐（コニシ）
菅俣 匠（BASFジャパン）	前川 明弘（三重県工研）
◎WG主査 ○WG副主査	

\*1 大分工業高等専門学校 博士（工学）（正会員）

\*3 島根大学大学院 博士（工学）（正会員）

\*5 九州工業大学大学院 博士（工学）（正会員）

\*2 三重大学大学院 工学博士（正会員）

\*4 岐阜大学 博士（工学）（正会員）

\*6 西松建設（株） 博士（工学）（正会員）

## 2. 反応メカニズムならびに材料

### 2.1 概要

WG1 ではジオポリマーの反応機構について議論を進めてきた。その中で、とくに議論に時間を要したのは、ジオポリマーの定義であった。ジオポリマーに使用される材料は多様であり、使用材料によってマトリックスを構成する反応生成物も大きく異なる。また、その反応メカニズムもすべて明確になっているわけではない。本章ではジオポリマーの定義および反応メカニズム、使用材料について概説する。

### 2.2 ジオポリマーの定義

ジオポリマーはダビドビツが提唱した用語であり、無機ケイ酸が縮重合した状態のものを示している。それはジオポリマーが開発された 1970 年代当初の出発材料として使用されていた粉体がメタカオリン（カオリン鉱物を非晶質状態となるよう加熱処理したもの）であり、これがアルカリ刺激作用を受けることで図-1 に示すような天然ゼオライトの構造に近いアルミノケイ酸塩の縮重合体（これをジオポリマーと呼称する）を生成するためである。その後石炭火力発電所から排出されるフライアッシュが廃棄物使用量増大、二酸化炭素排出量削減の観点から広範に使用されるようになってきたが、フライアッシュを 60℃以上の高温のアルカリ刺激条件下で養生を行うとやはりアルミノケイ酸塩の重合体が生成する。このため、フライアッシュを単独で使用したものはジオポリマーと呼称しても反応生成物の観点からも差し支えないと考えられる。

しかしながら、近年ではフライアッシュを使用したジオポリマーの弱点である初期強度を改善するために、高炉水砕スラグが併用されるようになってきている。高炉水砕スラグを使用した場合、その酸化カルシウム成分の影響により、メタカオリンやフライアッシュなどのケイ酸アルミニウム系活性フィラーだけで作製したものと比較して反応生成物の構造は複雑となる。一般的にカルシウムイオンの存在下では、ケイ酸イオンはゼオライトのような 3 次元構造を形成しづらく、ジオポリマーと呼称されるものとは異なる構造をとる。このため、高炉水砕スラグを使用した場合にその反応生成物をジオポリマーと呼ぶことは反応生成物の構造の観点からは正しくない。

しかし当委員会では、現在のジオポリマー研究の実体をよく表すよう、硬化体を形成する反応生成物の近距離秩序構造を特に考慮せず、出発材料の相違で分類することとし、ジオポリマーを『セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物水溶液を用いて硬化させたもの』と定義することとした。ここで、非晶質のケイ酸アルミニウム（活性フィ

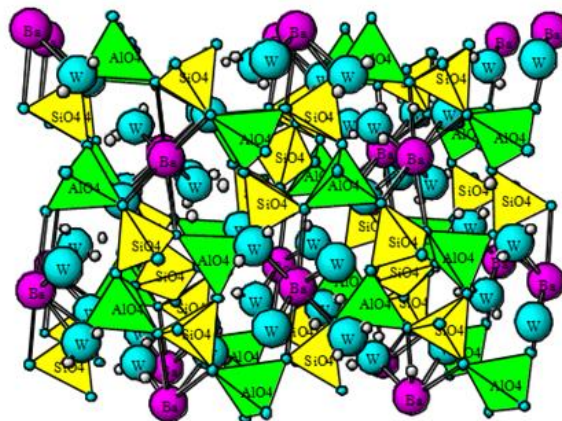


図-1 天然ゼオライト（エディングトナイト）の結晶構造図の例

ラー）の代表的なものは、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末等のみでなく、メタカオリン、下水汚泥やある種の火山灰等も含まれる。アルカリ金属のケイ酸塩溶液とは、水ガラスあるいはそれに水酸化ナトリウム（NaOH）溶液や水酸化カリウム（KOH）溶液を混合したもの、アルカリ金属の炭酸塩溶液は、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液や  $\text{K}_2\text{CO}_3$  溶液、水酸化物水溶液は NaOH 溶液や KOH 溶液が代表的なものである。したがって、セメントを少量用い混和材としてフライアッシュや高炉スラグを多量に使用した系、あるいは主として Ca 系溶液をアルカリ刺激剤として用いて硬化させたような系はジオポリマーには含まないこととしている。

### 2.3 ジオポリマーの反応メカニズム

#### (1) フライアッシュやメタカオリンを活性フィラーとした場合

現在、ジオポリマーは上記のように出発粉体も種々異なり、使用する溶液の配（調）合範囲も大きく異なっている。したがって、ジオポリマーの反応および生成物の性状は、出発粉体の相違や使用する水溶液の化学組成で大きく異なり、各配（調）合における生成物や反応機構の詳細は、現在多くの科学者が研究を進めている。

ジオポリマー反応は未だ不明な点も多いが、概要としては以下のように説明することができる。水ガラスと呼ばれるケイ酸ナトリウム溶液中には元々ケイ酸イオンが存在し、また、強いアルカリ成分と高温養生環境下によりフライアッシュなどの活性フィラーからもケイ酸イオンが溶出する。同様に活性フィラーからはアルミ酸イオンが溶出し、これとケイ酸塩イオンとで縮重合反応が生じることで、アルミノケイ酸塩のフレームワークが生じる。このとき、フレームワークは  $\text{Si}^{4+}$  に対する  $\text{Al}^{3+}$  の置換により全体としては負に帯電するため  $\text{Na}^+$  や  $\text{K}^+$  の水和イオンがフレームワーク中に取り込まれる。これが、メタカオリンやフライアッシュ起源のジオポリマー硬化体

の生成物である。ここで、ジオポリマー生成物と一括りに表現しているが、鉱物であるゼオライトにも様々な構造・種類があるように、その構造は、ケイ酸アルミニウム系活性フィラーの種類、配(調)合や養生温度で大きく異なる。また、生成したジオポリマーは非晶質構造が主であるため、X線回折によって分析しても生成物の明確なピークが出現しない(結晶性が低い)ことに注意が必要である。

## (2) フライアッシュと高炉スラグ微粉末を併用して活性フィラーとした場合

上記のように、活性フィラーがメタカオリンやフライアッシュなどのケイ酸アルミニウム系材料の時は、生成物を整理することができる。しかし、近年、強度増進や物資移動抵抗性等のコントロールといった観点から、高炉水砕スラグ微粉末などのカルシウム(Ca)源を含む材料も添加したハイブリッド型ジオポリマーと称されるものが使用されるようになってきている。これにより、使用する溶液配(調)合も水ガラスのみで水酸化ナトリウムを使わない等、比較的低アルカリ領域で行われる場合もあり、かつ高温養生を行わない常温養生も行われるようになってきている。このためジオポリマーの生成物の構造は、出発物質、使用溶液の配(調)合、養生温度により大きく異なり、必ずしも生成物が(1)で記述したような3次元ネットワーク構造を持つアルミノケイ酸塩非晶質物質を主体とするものとは言えない状況となってきている。一般的にカルシウムイオンの存在下では、ケイ酸イオンはゼオライトのような3次元構造を形成しづらく、セメントの水和で生成するC-S-Hと類似した構造をとると推測される。しかし、その構造はセメント中のC-S-Hとは異なることも指摘されており、この構造の解明には今後の研究の発展を待つ必要がある。

## 2.4 材料

日本で多く取り扱われているフライアッシュはSiおよびAlを主成分とすることが特徴である。一方で高炉スラグはSi、Al成分に加えてCa成分を多く含むことを特徴とする。このほか、フライアッシュと同様にSiとAlを主成分とするメタカオリン等も出発粉体として使用されているが、フライアッシュ等と比較すると高価なため、セメントコンクリート代替用途としての研究例は多くない。フライアッシュの反応性に関しては、非晶質量やその組成等の諸性質と強度の関係など、種々の研究が行われているが、完全に整合性が得られる評価は得られていないため、セメント中でのフライアッシュのポゾラン反応を評価する方法であるAPI法の適用等、今後の研究が期待される。また、現在、フライアッシュと高炉スラグの混合系での研究例が多いが、フライアッシュ単独と比較して、さらに粉体と諸性質の関係は複雑である。将来

的には、混合粉体の反応性因子のようなものを配(調)合記述に組み込むことが望ましい。

ジオポリマー作製に使用するアルカリ溶液の成分としては、一般的には水酸化ナトリウム(NaOH)溶液あるいは水酸化カリウム(KOH)溶液と水ガラスを混合して使用する。この中で例えば、NaOH溶液は、NaOHとH<sub>2</sub>O成分に分けられる。同様にKOH溶液はKOHとH<sub>2</sub>O、水ガラスはNaOH、SiO<sub>2</sub>及びH<sub>2</sub>O成分に分けられる。

## 3. ジオポリマーの可能性

### 3.1 概要

ジオポリマーは普通ポルトランドセメントと比べて反応生成物が異なり産業廃棄物使用量が大きいいため、耐火材料、耐酸材料、重金属・放射性物質の固定、CO<sub>2</sub>排出削減などで、優れた特性を有していると期待される。

### 3.2 耐火材料

レンガなどの耐火材料では一般に焼成が必要であり、生産性の向上やCO<sub>2</sub>排出削減などの観点からコンクリート系材料にも関心が高まっている。しかし、従来の普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは高温になるとセメント系水和物の脱水・分解が生じるため空隙構造が変化し、強度が著しく低下する。一方でジオポリマーを用いたコンクリートでは、2.3で説明したように反応生成物としてセメント系水和物が生じない、あるいは生成量が少ないために高温においても脱水・分解が生じにくいと考えられることから、ジオポリマーコンクリートは優れた耐火材料として利用できる可能性がある。しかし、先述したように反応生成物は養生条件、材料によって大きく変化することから、すべてのジオポリマーが優れた耐火性能を有するわけではないことに注意が必要である。

### 3.3 耐酸材料

メタカオリンやフライアッシュを使用したジオポリマーでは普通ポルトランドセメントと比較して極めて高い耐酸性を示すことが多くの研究で報告されている。これはセメントの場合は、マトリックスがCHやC-S-Hで構成されているため、反応生成物が酸によって容易に溶解してしまうが、ジオポリマーでは生成物がアルミノケイ酸塩縮重合体であるので酸への溶解が生じにくいためである。また、高炉スラグ微粉末を添加したハイブリッド型ジオポリマーでもフライアッシュへの置換率が20%程度では耐酸性は顕著に低下することはなく、元来普通セメントを使用することができない箇所にジオポリマーを使用することができるという優位性がある。

### 3.4 重金属ならびに放射性物質の固定

Cd、Pb等の重金属やSr、Cs等の放射性物質の固定に関する研究も実施されている。一般に、カチオン選択性

については、価数が大きく原子番号が大きいほど、水和イオン半径が小さいため吸着しやすく、ジオポリマーにおいても、生成物の変化等が生じるような場合を除き、同様であることを示す例も見られる。陽イオン交換容量について 200cmol/kg 程度に向上させる方法が見出されており、各種のゼオライトと比較し遜色ない性能を発現することも可能である。一方で、As, Se 等の一部の重金属類の溶出について、原料に多く含まれる場合など、材料の製造方法や使用される環境も含め、適切に配慮する必要がある。

### 3.5 低炭素・資源循環型社会構築のための建設材料

ジオポリマーを建設分野で使用することで特に期待されるのは、フライアッシュや高炉水砕スラグなどの産業副産物を大量に利用可能である点、および石灰石の焼成を行わないので製造段階での CO<sub>2</sub> 排出量を大きく削減できる点である。ある試算によれば、同じ構造物を建設した場合、ポルトランドセメントと比較して約 80% の二酸化炭素排出量を削減できるとの報告もある<sup>1),2)</sup>。このようにジオポリマーは低炭素・資源循環型社会実現のための次世代のコンクリートバインダーとなる可能性を有している。

## 4. 建設分野へ適用する場合の基礎知識

### 4.1 概要

海外の雑誌等も含めて文献調査を行ったが、ここでは国内の文献の情報を参考にジオポリマーコンクリートならびにモルタルの特性の概要を紹介した。

### 4.2 製造

#### (1) 材料

建設分野では、活性フィラーとしてはフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末が最も多く使用されている。その他の材料としては、シリカフューム、都市ゴミ熔融スラグ微粉末等も使用されている例がある。

アルカリ溶液としては、ナトリウム系およびカリウム系の水ガラス、水酸化ナトリウム、水酸化カリウムが多く用いられている。研究レベルでは、これらの材料を手作業で混合して用いている。なお、現在、我が国ではジオポリマー用アルカリ溶液として、「GP 溶液」が販売されており、使用された実績がある。

#### (2) 配合

ジオポリマーの配(調)合設計手法は、まだ確立されておらず、多くの配(調)合案が提示されている。配(調)合の一例を表-2に示す。表-2は活性フィラーにフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用い、アルカリ溶液には、ナトリウム系の市販のアルカリ溶液を用いた配(調)合である。アルカリ溶液の品質も、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の仕様も大きく異なることから配

表-2 配(調)合例

単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )				
アルカリ溶液 <sup>*1</sup>	フライアッシュ <sup>*2</sup>	高炉スラグ微粉末 <sup>*3</sup>	細骨材	粗骨材
235	457	65	618	927

\*1: ナトリウム系溶液

\*2: フライアッシュ I 種品

\*3: 石膏なし, 4,000 ブレーンクラス



写真-1 強制二軸ミキサでの練混ぜ状況

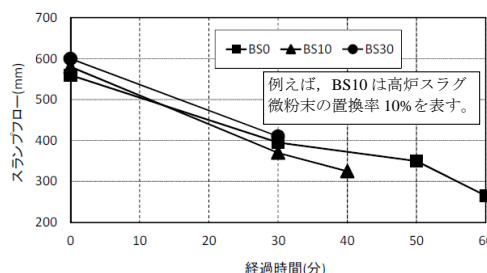


図-2 スランプフローの経時変化<sup>3)</sup>

(調)合は材料毎に検討を行う必要がある。

### (3) 練混ぜ

ジオポリマーの練混ぜは、特殊な配(調)合を除き、セメントと同じ手順で製造されている。製造設備もモルタルミキサ、パン型ミキサおよび強制二軸ミキサ(写真-1)等が用いられている。なお、ジオポリマーは粘性が高いため、その性能を十分に把握して、練混ぜ設備、練混ぜ時間等を決める必要がある。

### (4) 施工性(フレッシュ性状)

ジオポリマーの施工性に関しては、流動性と分離抵抗性、凝結時間等が特に重要となる。ジオポリマーは、一般的にスランプフロー値で施工性を検討する。これは、ジオポリマーは粘性が高く、セメントコンクリートの高流動コンクリートと同様なフレッシュ特性を有するからである。スランプフローの経時変化の一例を図-2に示す<sup>3)</sup>。図のように、ジオポリマーのスランプフローは、時間の経過とともに流動性が急激に小さくなることが多い。凝結時間に関しては、数々の研究がなされているが、ジオポリマーの凝結の定義がなく、さらに試験方法も確立されていないため、一律の評価はできないが、凝結時間はセメントに比べ短くなる傾向がある。他方、この点

をうまく利用した適用も今後期待される。

#### (5) 養生

ジオポリマーの養生は、給熱養生が基本となっている。給熱養生の種類としては、蒸気養生、加熱養生およびオートクレーブ養生が検討されている。ジオポリマーの強度は、温度が高い程、養生時間が長い程、増加する傾向にある。なお、常温養生でのジオポリマーについても検討が進められている。

#### 4.3 力学特性

一宮ら<sup>4)</sup>は、アルカリ溶液として水ガラスと水酸化ナトリウム、活性フィラーとしてフライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーモルタルを製造し、強度試験を行った。その結果、図-3に示すように、活性フィラー中に高炉スラグ微粉末を30%置換することで高強度が得られること、ジオポリマーモルタルは蒸気養生後の材齢1日で既に28日強度の75%程度の強度を発現すること、蒸気養生が24時間までは、時間とともに圧縮強度は直線的に増加することなどを報告している。

上原ら<sup>5)</sup>は、アルカリ/H<sub>2</sub>O比、Si/アルカリ比、および高炉スラグ置換率の異なるフライアッシュを主原料としたジオポリマー硬化体を、Si成分として水ガラスを用いる「一般法」および、シリカフェーム微粉末を練混ぜ時に溶かす「シリカフェーム添加法」で作製し、作製法により生成物に大きな違いはないが、シリカフェーム添加法では低アルカリかつ高炉スラグ置換率の小さい領域で一般法と比較して強度が小さくなること、配(調)合において高炉スラグ微粉末の置換率が大きく、アルカリ濃度が高いとき、細孔が緻密化し強度が大きくなることを報告している。さらに、上原ら<sup>6)</sup>は、フライアッシュの性状とジオポリマー硬化体の圧縮強度との相関を検討しており、非晶質成分が多いとき、Al、Fe、Caの成分が多いとき、また比表面積が大きいときに圧縮強度が大きくなることなどを報告している。南ら<sup>7)</sup>は、ジオポリマー硬化体の諸物性を把握するため、幅広い強度範囲(10~70N/mm<sup>2</sup>)において圧縮強度と静弾性係数および引張強度を測定した。その結果、図-4に示すように、ジオポリマー硬化体の圧縮強度と静弾性係数の関係は、一般的なコンクリートと同様に圧縮強度を指標とした指数関数で表すことができ、静弾性係数はセメント系材料の50~80%程度であること、図-5に示すように、圧縮強度に対する引張強度の比は1/17~1/9程度であることなどを報告している。

クリープに関しては、南ら<sup>8)</sup>は、圧縮強度70N/mm<sup>2</sup>級のジオポリマーコンクリートに対して、圧縮クリープ試験を実施し、載荷後410日における基礎クリープひずみは320×10<sup>-6</sup>程度となり、0.39のクリープ係数を得るとともに対数関数によるクリープ曲線式を求めている。

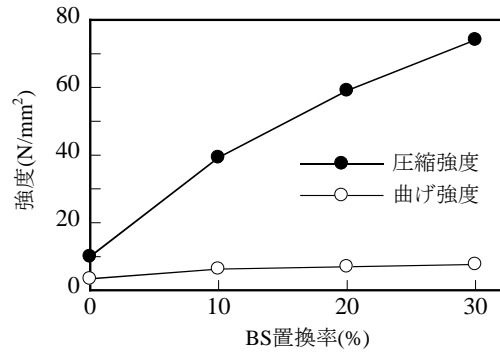


図-3 BS置換率と強度の関係<sup>4)</sup>

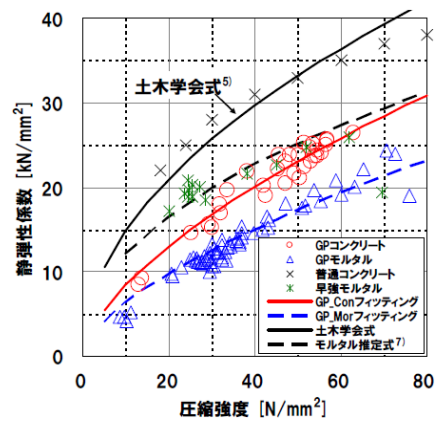


図-4 ジオポリマー硬化体の圧縮強度と静弾性係数の関係<sup>7)</sup>

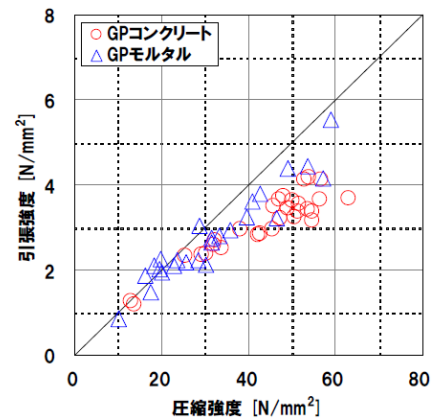


図-5 ジオポリマー硬化体の圧縮強度と引張強度の関係<sup>7)</sup>

鋼材との付着に関しては、太田ら<sup>9)</sup>は引抜き試験により鉄筋との付着強度を求めている。異形鉄筋の場合、ジオポリマーモルタルがセメントモルタルに比べて優れた付着特性を有していることを明らかにしている。

構造利用に関しては、河尻ら<sup>10)</sup>は、RC部材の基本的な力学的特性について検討を行っている。その結果、一般的なセメントコンクリートと類似した破壊プロセスであること、計算値と実験値の整合性が良好であったことなどを報告している。東原ら<sup>11)</sup>は、ジオポリマー法によ

る PVA 短繊維補強ジオポリマーまくらぎの実用化に向け、繊維量および鉄筋量を変えた矩形試験体を製作して曲げ試験を行い、その力学的性状、補強効果を検討している。矩形試験体の曲げ試験において、異なる試験体の荷重と変位曲線がおおむね一致することから、乾燥収縮ひずみなどの結果を踏まえ、Si/Al を選定すればよいこと、引張鉄筋比 1% のポリビニルアルコール短繊維の補強効果は、引張鉄筋比に換算して 0.5% 程度であったことなどを報告している。

#### 4.4 耐久性

中性化に関しては、原田ら<sup>12)</sup>はフェノールフタレイン噴霧直後は無色であっても、時間の経過にともなって変色する特性があり、その原因の究明とあわせて中性化の評価方法に関しても、今後検討する必要があることなどを報告している。

エフロレッセンス（白華）に関しては、一宮ら<sup>13)</sup>はジオポリマーコンクリートを歩車道境界ブロックに適用したところ、設置 1 年以内で表層部に白華ならびにスケーリングなどの変状が認められたことから、フライアッシュを基本とし、強度増進のために高炉スラグ微粉末を併用したジオポリマーモルタル製供試体に対して部分吸水試験を行い、気温や湿度は低い方が劣化は促進されること、高炉スラグ微粉末置換は表層劣化の抑制効果があること、ならびに溶液濃度を調整することでスケーリングが抑制されることを明らかにしている。

化学的侵食に対する抵抗性に関しては、一宮ら<sup>14)</sup>は、フライアッシュベースのジオポリマーに対して、活性フィラーの一部を高炉スラグ微粉末で置換した供試体を用い、耐酸性実験（室内における硫酸浸漬実験、酸性温泉地における温泉水浸漬実験）を行っている。図-6 に示すように、ジオポリマーは高炉スラグ微粉末置換率が高くなると耐酸性が低下するが、ポルトランドセメントに比べると性状変化はわずかであることを報告している。合田ら<sup>15)</sup>は、耐硫酸抵抗性が高いとされるフライアッシュ系ジオポリマーを対象として、化学的侵食に対する抵抗性について浸漬試験を実施した。その結果、ジオポリマーの硫酸塩環境に対する抵抗性は、酸性環境よりも高いこと、シリカフェームを混和することでジオポリマーの耐硫酸抵抗性が向上する傾向がみられることなどを報告している。

塩化物イオンの侵入に対する抵抗性に関しては、上原ら<sup>9)</sup>は、アルカリ/H<sub>2</sub>O 比、Si/アルカリ比、および高炉スラグ微粉末置換率の異なるフライアッシュを主原料としたジオポリマー硬化体を、Si 成分として水ガラスを用いる「一般法」および、シリカフェーム微粉を練混ぜ時に溶かす「シリカフェーム添加法」で作製し、塩化物イオンの侵入状況を調べている（図-7 参照）。

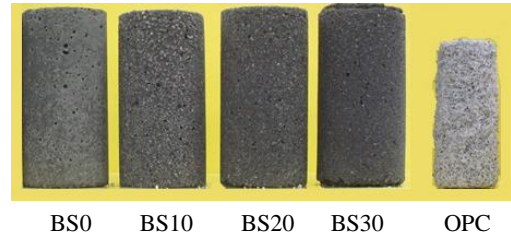
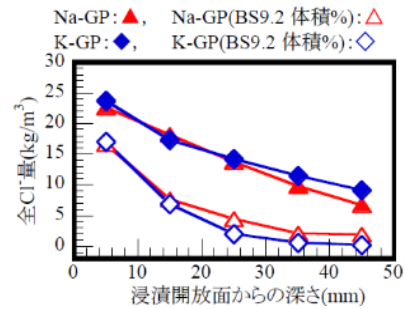


図-6 硫酸浸漬の結果<sup>14)</sup>



アルカリ/H<sub>2</sub>O 比=0.25, Si/アルカリ比=0.33, 単位水量 170kg/m<sup>3</sup>, BS 置換率 9.2 体積%

図-7 ジオポリマーモルタルの塩化物イオン浸透特性<sup>5)</sup>

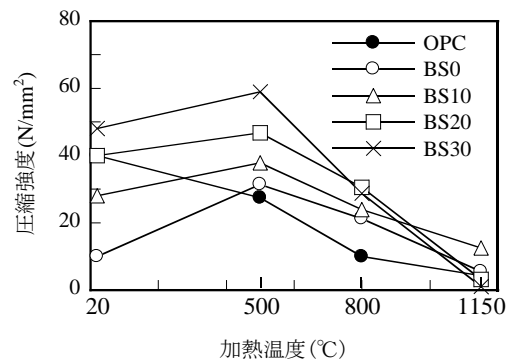


図-8 加熱後のBS置換率ごとの加熱温度と圧縮強度の関係<sup>16)</sup>

アルカリシリカ反応に関しては、原田ら<sup>12)</sup>はジオポリマーモルタルはアルカリシリカ反応が発生せず、高いアルカリシリカ反応に対する抵抗性があることなどを報告している。

高温特性に関しては、一宮ら<sup>16)</sup>は、図-8 に示すように、高炉スラグ微粉末置換率がジオポリマーの高温抵抗性に及ぼす影響を調べるための高温加熱実験を行っている。その結果、活性フィラーの一部を高炉スラグ微粉末で置換することで高温条件でのジオポリマーの強度は、常温強度に比べて、500°C ではそれ以上、800°C を超えるとそれ以下となることなどを報告している。

凍結融解抵抗性に関しては、南ら<sup>8)</sup>はケイ酸アルカリ溶液中のケイ素/アルカリ比（モル比）が凍結融解抵抗性に与える影響について実験的に検討している。

長さ変化に関しては、一宮ら<sup>16)</sup>は、試験材齢 4 週にお

けるフライアッシュ 4 種の収縮ひずみは、同 1 種のおよそ 5 倍、普通セメントのおよそ 1.7 倍で、他の配合よりも長さ変化が大きいことを報告している。本間<sup>17)</sup>は、加温養生中のジオポリマーモルタルの長さ変化および加温養生時間の異なるジオポリマーモルタルの乾燥収縮の検討を行った。ジオポリマーモルタルは、常温硬化時に膨張、加温硬化時に収縮を示すこと、加温養生時間およびアルカリの種類によって収縮特性が異なることなどを報告している。

## 5. 施工事例

### 5.1 概要

ジオポリマーの施工事例は、国内約 4 件（試験施工を含む）、海外では数件の実績がある。ここでは、国内 2 件、海外 1 件の施工事例の概要を述べる。

### 5.2 北部九州農地わきクリーク擁壁での施工事例

農業農村整備事業におけるクリーク整備に関して、木柵工法に代わる耐久性の高いクリーク斜面保護工法を確立する観点から、フライアッシュベースのジオポリマーペーストが施工された。

#### (1) 材料ならびに配合

使用した材料は、フライアッシュ、メタ珪酸ソーダ粉末および水である。

#### (2) 施工後の状況

写真-2 に施工後 7 年時点の状況を示す。表面に若干の劣化が見られるものの、現在も、擁壁としての機能を十分に満足している。

### 5.3 大分県明礬温泉での施工事例

施工場所では、酸によるコンクリートの劣化が激しく、耐酸性に優れたジオポリマーが採用された。

#### (1) 施工概要

本施工実績は、大分県発注の歩道等改良工事である。施工されたジオポリマーコンクリート製ブロックは、写真-3 に示す JIS A 5371 の境界ブロックである。

#### (2) 施工後の状況

施工後の状況を写真-4 に示す。ジオポリマーコンクリート製ブロックの施工本数は 128 本、施工延長は約 80m となっている。

### 5.4 オーストラリアでの空港新設建設での施工事例

オーストラリア クイーンランド州ダーリングダウンズの新空港ブリスベン ウェスト ウェルキャンブ エアポートに約 40,000 m<sup>3</sup> のジオポリマーコンクリートが適用された。

#### (1) ジオポリマーコンクリートの仕様

ジオポリマーコンクリートの仕様は、材齢 28 日の平均曲げ強度 4.8MPa、材齢 28 日の最大乾燥収縮ひずみ  $450 \times 10^{-6}$  である。



写真-2 施工後 7 年後の状況

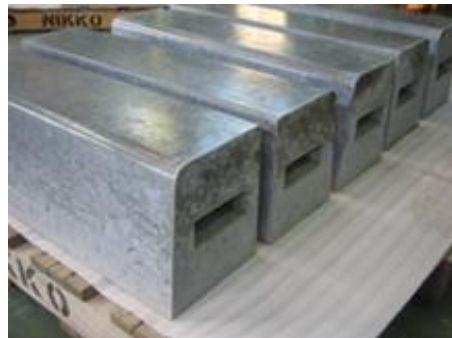


写真-3 境界ブロック



写真-4 施工後の状況



写真-5 バッチャープラント



写真-6 施工後の状況

表-3 配(調)合表 (g/L)

配(調)合 の名称	材料	FA	BS	1.5倍 WG	35% NaOH	水 W	標準砂	A/W モル比	Si/A モル比
	密度	2.26	2.91	1.30			2.64		
BS10	BS 置換率 10%	489	70	232	52	64	1297	0.102	0.707
BS20	BS 置換率 20%	434	140	232	52	64	1297	0.102	0.707

FA：フライアッシュ，BS：高炉スラグ微粉末，WG：水ガラス，NaOH：水酸化ナトリウム  
A/W=Na/H<sub>2</sub>O，Si/A=Si/Na

## (2) 製造設備および施工後の状況

写真-5にジオポリマーコンクリートの製造設備を示す。ジオポリマーコンクリートは、容量3m<sup>3</sup>の強制二軸ミキサーを有する2つのバッチャープラントで製造された。また、施工後の状況を、写真-6に示す。

## 6. 共通実験

### 6.1 概要

建設材料への適用が検討されているジオポリマーの材料特性に関しては、4.3と4.4に記載されたとおりであり、国内外を問わず多くの知見が報告されている。しかしながら、同様の研究内容であっても研究実施機関によってその知見や成果が異なる傾向が見られる場合がある。その要因のとして、材料、配(調)合をはじめ、製造方法等が異なることが大きい。加えて、各研究実施機関の設備をはじめとする実験環境が、製造されたジオポリマーに及ぼす影響も考えられる。ジオポリマーに関する国内での共通実験については、日本コンクリート工学会九州支部での実績<sup>18)</sup>を除いてほとんど報告されていない。

そこで本委員会では、材料や配(調)合、製造方法を統一した条件の下で、フレッシュ性状ならびに圧縮強度に関する共通実験を実施し、研究機関の相違がジオポリマーの材料特性に及ぼす影響について検討した。以下の実験条件に基づき、10の研究機関が参加して行われた。

- ・ジオポリマーモルタルを対象とする。
- ・アルカリ溶液は、水ガラスと水酸化ナトリウムの系、活性フィラーは、フライアッシュと高炉スラグ微粉末とする。
- ・養生条件は常温養生(20℃、28日)、加温養生(60℃：24時間、20℃：27日)の2水準とする。

### 6.2 材料ならびに配(調)合

アルカリ溶液には、水ガラス1号、水酸化ナトリウム水溶液ならびに水道水の混合液を使用した。水ガラス1号については、施工性に配慮して、1.5倍希釈溶液を用いた。活性フィラーには、同一ロットのJIS II種のフライアッシュならびに石こうを除去した比表面積4000mm<sup>2</sup>/gの高炉スラグ微粉末を使用した。細骨材にはJIS標準砂を使用した。

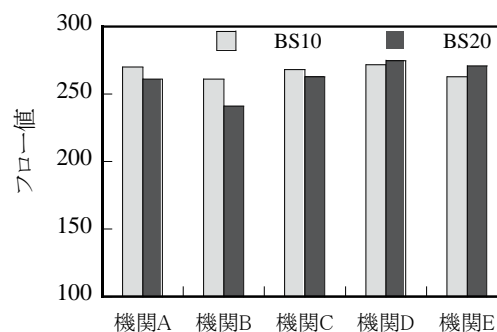


図-9 フロー試験の結果 (15打)

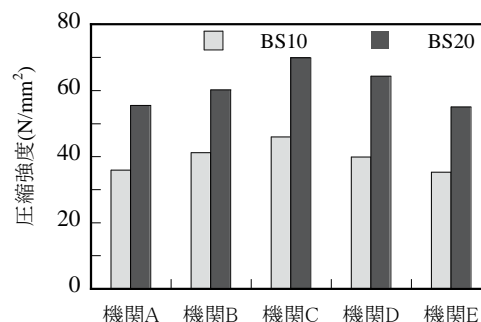


図-10 圧縮強度試験の結果 (60℃)

表-3に、共通実験で使用したジオポリマーモルタルの配(調)合を示す。

### 6.3 練混ぜならびに養生

練混ぜは、20℃環境の下でJISモルタルミキサーの使用を標準とした。まず、活性フィラーと細骨材を1分間空練りした後、アルカリ溶液を投入してさらに5分間練混ぜを行った。養生は、いずれも封緘状態で、前述のように常温養生と加温養生の2水準で行った。

### 6.4 実験結果

結果の一例として、図-9にフロー値、図-10に加温養生した圧縮強度の結果を示す。本実験の結果より、材料品質が確保できれば比較的再現性のある材料であることが明らかとなった。また、配(調)合の表示方法も含めて多くの技術者が参考にできる製造手順例が示された。

## 7. eラーニング

コンクリート工学の基礎知識を有する技術者ならび



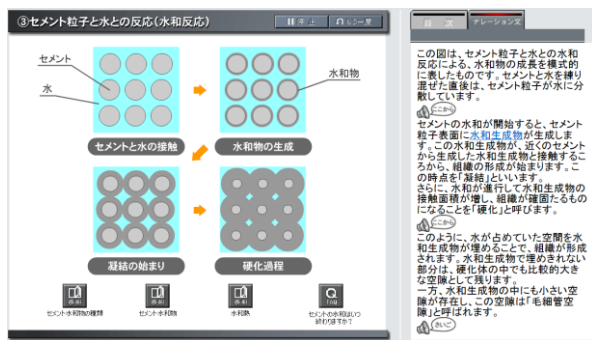


図-11 JST Web ラーニングの画面の例  
(セメント粒子と水の反応 (水和反応))

に学生を対象としたジオポリマーのeラーニングを試作した。同システムでは、科学技術振興機構 (JST) 製作の Web ラーニングプラザ (現在は JREC-IN Portal (<https://jrecin.jst.go.jp/>)) を参考にした。図-11にコンテンツの一例を示す。画面は、画像、解説 (ナレーション文)、関連知識のアイコン (図中下部の■) で構成されており、効率よく学習できるように配慮されている。ジオポリマーのeラーニングも、最終的には画像、解説、関連知識のアイコンで構成する計画である。

eラーニングのコンテンツの種類を以下に示す。

- ① ジオポリマーの定義と特徴
- ② ジオポリマーに用いられる材料と製造方法
- ③ ジオポリマーの固化メカニズム
- ④ ジオポリマーの歴史
- ⑤ ジオポリマーの強度
- ⑥ ジオポリマーの体積変化
- ⑦ ジオポリマーの耐久性
- ⑧ 鋼材とジオポリマーとの附着性
- ⑨ ジオポリマーの今後の展開

図-12と図-13に、「②ジオポリマーに用いられる材料と製造方法」での配(調)合の一例、「⑦ジオポリマーの耐久性」からは中性化の一例を示す。

## 8. おわりに

以上のように、ジオポリマーは従来のコンクリートと同じ指標で評価できる場合もあるが、ジオポリマーの特徴を引き出すためには、これまでとは異なる視点からの検討が求められる。

ジオポリマーを実用化するうえでの現時点で考えられる課題としては、(1) 材料コストの低減、(2) 安定した品質を得るための製造技術、(3) 長期特性推定のための促進試験方法やそのデータの評価方法の確立、(4) 規準類の制定、(5) 普及に向けたPR活動などが挙げられる。併せて、実用化促進のためには、非構造部材を対象にした大規模な現場実験や構造部材を対象にした応用的



図-12 eラーニングの画像の例  
(②ジオポリマーに用いられる材料と製造方法：配(調)合の一例)

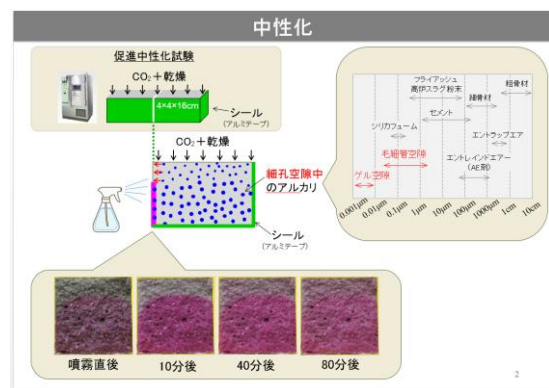


図-13 eラーニングの画像の例  
(⑦ジオポリマーの耐久性：中性化の一例)



図-14 ジオポリマーの特徴と性能照査型設計法の適用

な試験施工も必要である。

図-14は、ジオポリマーのプラス面とマイナス面を内部要因と外部要因に分けて表したSWOT分析と、その結果として性能照査型設計法の適用が有効であることを説明した図である。引き続いて、固化メカニズムや実験室レベルでの物性の解明に取り組むとともに、使用目的や材料を限定したうえで規準類を作成して実績を増やしていくことが、ジオポリマー技術の普及のための現実的な方向と考えられる。

## 謝辞

本報告は、「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」の活動における成果の一部を紹介したものです。また、今後のジオポリマー開発の方向性につきましては東京大学前川宏一教授に貴重なアドバイスをいただきました。

末筆ながら、ご協力いただきました皆様に心よりお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) J.Davidovits : GEOPOLYMERS: INORGANIC POLYMERIC NEW MATERIALS, JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS, Vol.37, pp.1633-1656 1991
- 2) 池田攻：二酸化炭素問題とジオポリマー技術，耐火物，58 [8]，pp.396-400, 2006
- 3) 原田耕司，富井孝喜，矢田部勝博，青木峻二，西崎丈能，大西俊輔：蒸気養生を行わないジオポリマーコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度特性について，土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，pp.1399-1400, 2016
- 4) 一宮一夫，津郷俊二，原田耕司，池田攻：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.575-580, 2011.7
- 5) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.1987-1992, 2015.7
- 6) 上原元樹，佐藤隆恒，杉本行弘：フライアッシュの性状がジオポリマー硬化体の圧縮強度に与える影響，粘土科学討論会講演要旨集，Vol.54, pp.174-175, 2010.9
- 7) 南浩輔，松林卓，船橋政司：ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.1957-1962, 2013.7
- 8) 南浩輔，白根勇二，佐藤隆恒，上原元樹：ケイ酸アルカリ溶液中のケイ素／アルカリ比がジオポリマーコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.2331-2336, 2016.7
- 9) 太田周，佐川康貴，原田耕司，西崎丈能：ジオポリマーモルタルと鉄筋との付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.2313-2318, 2016.7
- 10) 河尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.1943-1948, 2011.7
- 11) 東原実，大木信洋，上原元樹：短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.1963-1968, 2015.7
- 12) 原田耕司，一宮一夫，津郷俊二，池田攻：ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.1937-1942, 2011.7
- 13) 一宮一夫，山下祐弥，原田耕司，池田攻：フライアッシュ系ジオポリマーの部分吸水に伴う表層劣化と試験環境や配合の関係，土木学会西部支部研究発表会概要集，V-012, pp.619-620, 2017.3
- 14) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田攻：活性フィラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.2005-2010, 2013.7
- 15) 合田寛基，原田耕司，津郷俊二，日比野誠：フライアッシュ II 種を用いたジオポリマーの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.1993-1998, 2015.7
- 16) 一宮一夫，上野貴行，原田耕司，池田攻：高炉スラグ微粉末を添加したフライアッシュベースのジオポリマーの高温下における物性変化：コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.1269-1274, 2016.7
- 17) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田攻：フライアッシュ 4 種を用いたジオポリマーの基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1900-1905, 2012.7
- 18) 本間雅人：加温養生を行ったジオポリマーモルタルの収縮特性，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），A-1, pp.355-356, 2014.9
- 19) 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，2016.11