

# 論文 太陽光パネルガラスのアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる ASR 抑制効果の検証

参納千夏男\*1・市瀬誠\*2・安藤陽子\*3・鳥居和之\*4

**要旨:** 本研究では、太陽光パネルのガラスを破碎したガラスカレットの細骨材としてのリサイクルを目的として、ガラスカレットのアルカリシリカ反応(ASR)の特徴とフライアッシュによる ASR 抑制効果を各種試験により検討した。その結果、ガラスカレットの ASR は、ガラスカレット破碎製造時にできた微細なひび割れ内部から進行することが明らかとなった。また、高いアルカリシリカ反応性を示すガラスカレットに対しても、高品質なフライアッシュをセメントの 15%以上で置換することにより、ASR を効果的に抑制できることが示された。

**キーワード:** リサイクル, 太陽光パネルガラス, アルカリシリカ反応性, フライアッシュ, 偏光顕微鏡観察

## 1. はじめに

我が国では、2012 年の固定価格買取制度 (FIT)の開始により、2010 年代から太陽光発電が急速に普及したが、太陽光発電に用いる太陽光(PV)パネルの耐用年数は通常 20 年程度と想定されることから、2030 年代半ば以降に、パネル材が大量に廃棄されることが予想されており、パネル材料の大半を占めるガラスの処分先がひっ迫することが懸念されている<sup>1)</sup>。

ガラス廃材の利用に関しては、これまで、板ガラスやワインボトルのガラスなどのコンクリートへの利用が検討され<sup>2)</sup>、試行的に利用されることはあるものの、実用的な有効利用までに至っていないのが現状である。この理由としては、ひとつには、廃棄ガラスのコンクリートへのリサイクルを実用化するには、行政、処理業者、コンクリート製造者および建設会社などの関係者が一体となり、製造・流通の仕組みを構築する必要があるが、この際には、利用する廃棄ガラスの量と品質の安定的な確保、経済性の確保が必要であり、両者をともに満足することが難しく、実現に至っていないものと思われる。また、大前提として、ガラス骨材をコンクリートに混合した場合には、ASR が発生することが十分に想定されることから、確実な ASR 抑制対策を講じる必要があるが、具体的な対策方法まで確立されていないことも廃棄ガラスの利用が進まない一因であると考えられる。

ガラス骨材のアルカリシリカ反応性に関する研究としては、廃棄ガラスには各種の化学組成をもつものがあり、ガラス自体からのアルカリ溶出の影響により、ペシマム混合率があるものとならないものが存在すること、また、粒径に関してペシマムサイズが存在することなどが指

摘されている<sup>3~6)</sup>。また、ASR 抑制対策に関しては、ある種のガラスに対して、フライアッシュをセメントの 10%から 20%程度で置換することにより、ASR を効果的に抑制できたことが報告されているものの<sup>3,4)</sup>、実際の廃棄ガラスは、有色のガラス瓶や原料、製造方法が異なる各種のガラス瓶、板ガラスなどが混在しており、これらに対して、一律の対策方法を講じることが難しいことが課題となっている。その一方で、PV パネルガラスは、ある程度一律の品質のものが同時期に大量廃棄されることが想定されるため、アルカリシリカ反応性や ASR 抑制効果を検証しておくことは、今後の利用に大変有効であると考えられる。

そこで本研究では、PV パネルガラスのコンクリート用細骨材としてのリサイクルを目的として、PV パネルガラスのアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる ASR 抑制効果に関しての実験的検証を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本研究では、廃棄物中間処理業者が PV パネルガラスを破碎したガラスカレットを骨材として使用した。ガラスカレット(GC)には、パネルガラスと太陽電池セルの間に封入されている封止材(樹脂)が混入しているため、手作業にて除去した後、各種試験に供した。写真-1 に試験に供したガラスカレット(表乾密度 2.48g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.37%, 粗粒率 3.97)の外観を、図-1 にその粒度分布図を示す。写真-1 に示すように、ガラスカレットの粒子には、PV パネルの破碎時にできた微細なひび割れが粒子表面に確認された。図-1 に示すように、今回使

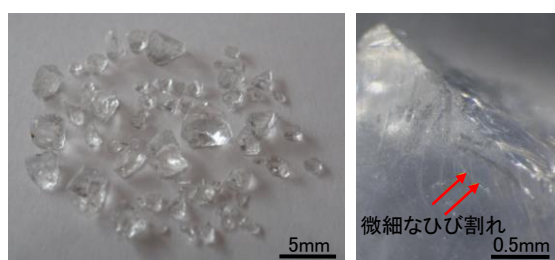
\*1 北陸電力(株) 土木建築部 博(工)(正会員)

\*2 北陸電力(株) 土木建築部

\*3 (株) 太平洋コンサルタント ソリューション技術部 博(工)(正会員)

\*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 工博(フェロー会員)

用したガラスカレットの粒度分布は、JIS A5308 附属書 A (レディーミクストコンクリート用骨材) で規定される粒度分布に対して、微粒分が若干、少なく、規定の範囲を満足していなかったが、今後、砂の代替としてそのままリサイクルすることを意図し、供試体作製においては粒度調整せずを使用することとした。また、混合する砂は、ASR 非反応性の埼玉県秩父郡産の石灰石砕砂 (表乾密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.96%) を使用した。使用した石灰石は、挟みや雑岩、不純物を含まないものを選別したものであり、ASR に関して非反応性であることが確認されている。セメントは、普通ポルトランドセメント (T 社, 比表面積 3,090cm<sup>2</sup>/g, 密度 3.15g/cm<sup>3</sup>) を使用した。フライアッシュ (FA) は、石川県七尾大田火力発電所産の分級フライアッシュ (JIS II 種灰, 比表面積 4,600cm<sup>2</sup>/g, 密度 2.40g/cm<sup>3</sup>, 等価アルカリ量 R<sub>2</sub>O=1.6%) を使用した。なお、使用したフライアッシュは、北陸地方で主に公共土木工事に供給されており、高い ASR 抑制効果が確認されているものである<sup>7,8)</sup>。本研究に使用したセメントとフライアッシュの化学成分を表-1 に示す。



全体写真 拡大写真  
写真-1 ガラスカレットの外観

## 2.2 試験方法

### (1) ガラスカレットの化学組成および鉱物組成分析

ガラスカレットの化学組成および鉱物組成を調べるために、蛍光 X 線分析および粉末 X 線回折分析 (XRD) を実施した。

### (2) ガラスカレットのアルカリシリカ反応性およびフライアッシュによる ASR 抑制効果の確認

ガラスカレットのアルカリシリカ反応性を確認するために、化学法 (JIS A1145-2017) と促進モルタルバー法 (ASTM C1260, モルタルバー (25mm×25mm×285mm) を温度 80°C の 1N・NaOH 溶液に浸漬養生) を適用した。さらに、フライアッシュによる ASR 抑制効果を確認するために、ガラスカレットを混合した場合に高い膨張率を示したケースにおいて、フライアッシュを添加した配合にて、同様に促進モルタルバー法 (ASTM C1260) を適用した。モルタルの配合を表-2 に示す。なお、促進養生期間中の長さ測定は、浸漬開始後 7 日, 14 日, 21 日および 28 日に行い、アルカリシリカ反応性の判定は基準材齢 (14 日) での測定結果により行った。

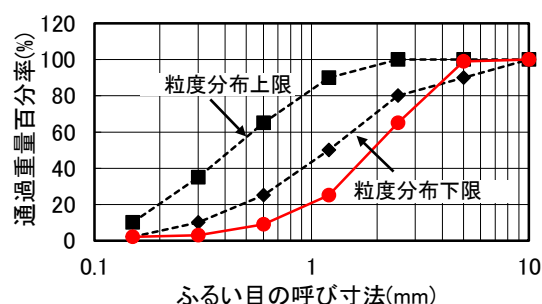


図-1 ガラスカレットの粒度分布

表-1 セメントおよびフライアッシュの主な化学成分 (%)

成分名		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
セメント	含有量	20.31	5.16	3.13	64.03	1.01	1.93	0.33	0.33	0.33	0.08
フライアッシュ		57.83	21.81	4.93	3.41	1.29	0.15	0.44	1.76	1.14	0.06

表-2 モルタルの配合 (質量置換率%)

ケース	水結合材比 (%)	結合材		細骨材	
		セメント	フライアッシュ	ガラスカレット	石灰石砕砂
1	47.0	100(440)	0(0)	5(50)	95(940)
2				30(297)	70(693)
3				60(594)	40(396)
4				80(792)	20(198)
5				100(990)	0(0)
6		85(374)	15(66)	100(990)	0(0)
7		80(352)	20(88)		
8		75(330)	25(110)		

( )内は、供試体 3 本分の質量 (g)

### (3) ASR ゲル生成状況の観察

促進モルタルバー法による促進養生後（28日）の試料を切断し、切断面（25mm×25mm）にゲルフルオレッセンス法を適用した<sup>9)</sup>。ゲルフルオレッセンス法は、希釈酢酸ウラニル溶液を切断面に塗布し、暗室状態で紫外線を照射し、ASRゲルが緑黄色に発光することにより、ASRゲルの生成状況を確認する手法である。

### (4) ひび割れ発生状況の観察

促進モルタルバー法による促進養生後（28日後）の試験体から薄片試料（20mm×25mm、厚さ：20μm）を作製し、偏光顕微鏡（単ニコル）によりガラスカレットのASRの発生状況と膨張ひび割れの進展状況を観察した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ガラスカレットの化学組成および鉱物組成

ガラスカレットの化学成分分析結果を表-3に、鉱物組成分析結果を図-2に示す。表-3に示すように、ガラスカレットは、シリカ（SiO<sub>2</sub>）を主成分とし、カルシウム（CaO）とアルカリ分としてナトリウム（Na<sub>2</sub>O）を多く含むことが特徴的であり、この結果は典型的なソーダ石灰ガラスによるものであった<sup>2)</sup>。また、図-2に示

すように、ガラスカレットには、非晶質なガラス相の存在を示すハロー（halo, 2θ=15~40°のブロードなピーク）のみが認められたが、ガラス相以外の不純物や結晶鉱物は含まれておらず、これは、太陽光発電の発電効率を上げるためにパネルが通常のガラスに比べて無色透明に製造されていることが理由であると考えられた。このことから、廃棄パネルのガラス組織はほぼ均質であり、鉛や水銀などの有害金属を含まないものであることが推察できた。

### 3.2 ガラスカレットのアルカリシリカ反応性およびフライアッシュによるASR抑制効果

ガラスカレットの化学法の結果を図-3に示す。図-3に示すように、ガラスカレットでは、既往の一般廃棄ガラスの研究結果と同様に、アルカリ濃度減少量(Rc)が負となり、ガラス自体にアルカリを多く含有することから、化学法の試験中に骨材のASRで消費されるよりもはるかに多いアルカリとシリカ(Sc)が骨材自体から溶出していることが示された<sup>4,5)</sup>。また、ガラスカレットの混合率を変えた場合のモルタルバーの膨張挙動を図-4に、ガラスカレットの混合率とモルタルバーの膨張率との関係を図-5に示す。図-4に示すように、ガラスカレ

表-3 ガラスカレットの化学成分 (%)

成分名	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Cl
含有量	72.05	0.10	0.03	9.54	3.75	0.23	13.83	0.02	0.01	0.021
成分名	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	ZnO	SrO	ZrO <sub>2</sub>	MoO <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	ig.loss
含有量	0.002	0.002	0.001	0.001	0.060	0.015	0.003	0.063	0.030	0.25

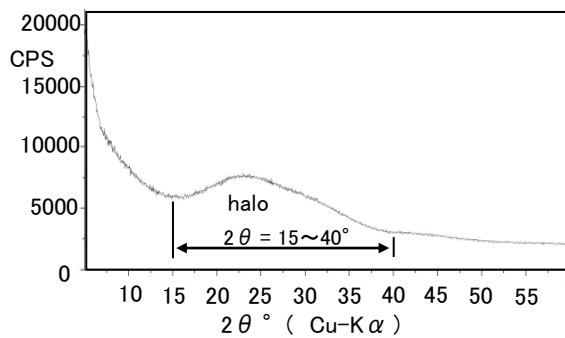


図-2 ガラスカレットの鉱物組成分析結果

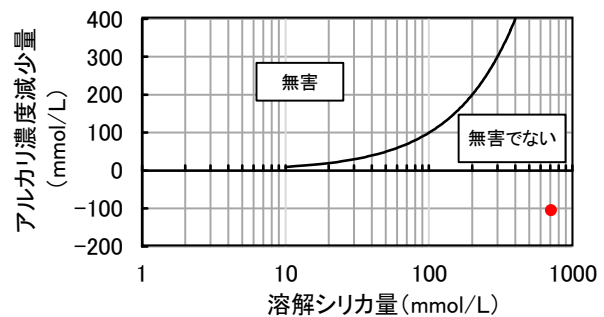


図-3 化学法の結果

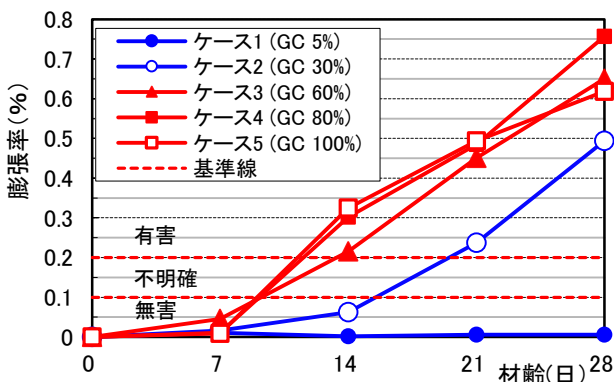


図-4 促進モルタルバー法の結果

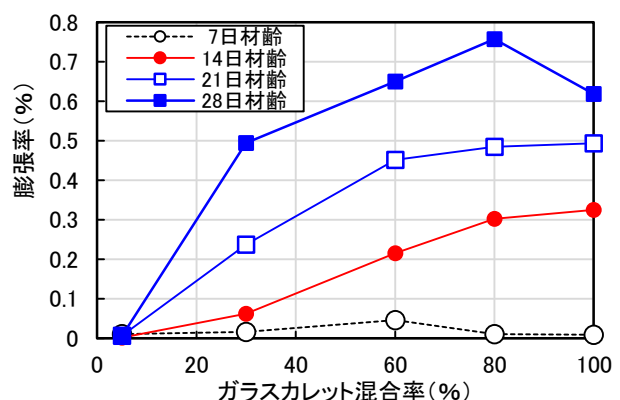


図-5 ガラスカレットの混合率と膨張率との関係

ットを60%以上混合した場合、浸漬材齢7日以降に急激に膨張し、0.1%以上の伸びを示し、「有害」との判定結果となった。その後もモルタルバーの膨張率は浸漬材令とともに直線的に増大し、材齢28日において0.6%以上の、大きな膨張率を示した。一方で、混合率が30%の場合、材齢14日まで、モルタルバーの膨張率は0.1%以下であり、「無害」との判定結果であったものの、その後、モルタルバーの膨張率は増大し、材齢28日において膨張率は0.5%を示した。モルタルバーの膨張率の増大は、ガラスカレット自体からのアルカリの溶出も関与している可能性が考えられる。また、混合率が5%の場合、材齢28日まで、ほとんど膨張しなかった。

ペシマム混合率の現象に関して、図-5に示すように、材齢14日で判定すると、ガラスカレットの混合率の増加にともない膨張率は大きくなり、ペシマム含有率は存在しないという結果であった。ペシマム含有率は、試験条件（アルカリ供給の有無）で大きく異なってくるのが想定され、今回の促進試験では、外部からアルカリが常に供給される条件下であったことがペシマム含有率が存在しなかったことに関係していると推察される。なお、材齢28日において、ガラスカレットの混合率100%の場合、混合率60%および80%と比較して膨張率が小さくなっているが、表面部のASRゲルが流動化（溶出）し膨張が緩和されている可能性が考えられる。

図-6にフライアッシュを混和した場合のモルタルバーの膨張挙動を示す。この際に、ガラスの混合率は、ペシマム値が存在しなかったため、混合率100%とし、フライアッシュのセメント置換率は、ASR抑制効果が期待できる15%、20%および25%と設定して試験を行った。その結果、図-6に示すように、材齢28日において、置換率15%および20%の場合、若干の膨張はしたものの、ASTM C1260法における判定材齢の14日においては、いずれのケースにおいても、ほとんど膨張を示さないことから、フライアッシュをセメントの15%以上で置換することにより、ASRによる膨張が効果的に抑制できたと言える。また、フライアッシュの置換率25%においては、材齢28日においても、膨張を完全に抑制していることから、ガラスを大量に混合する場合には、フライアッシュをセメントの25%で置換することにより、十分なASR抑制対策になると考えられる。

### 3.3 ASRゲルの生成状況

写真-2に促進モルタルバー法試験後のケース1、5、6、8における試料切断面(25mm×25mm)のゲルフルオロレセンス法によるASRゲルの発光状況を示す。写真-2に示すように、ケース5(ガラスカレット100%)にお

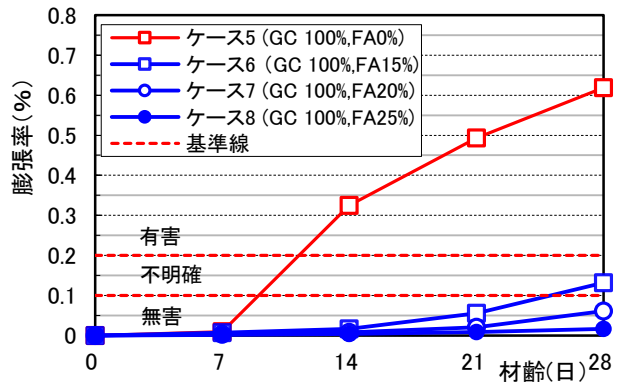


図-6 促進モルタルバー法の結果

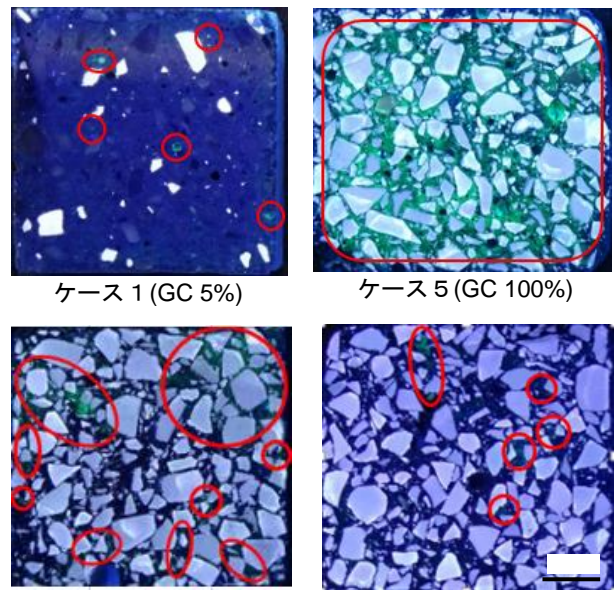


写真-2 ASRゲルの発光状況  
(赤線で囲った範囲は、発光が確認された箇所を示す。)

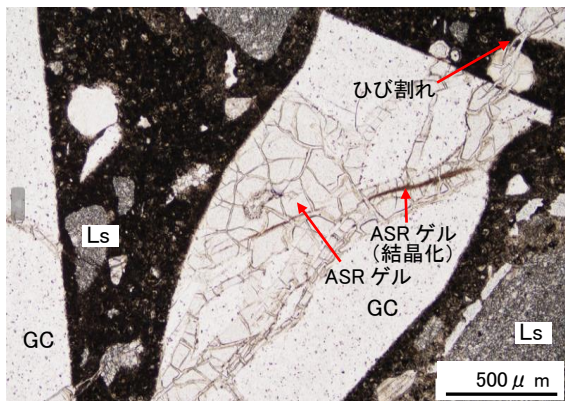
いては、骨材間を埋めるように多量のASRゲルの生成が確認されたが、ケース1(ガラスカレット5%)においては、発光している箇所がごく僅かで、かつASRゲルの生成量が少ないため、モルタルバーがほとんど膨張しなかったと考えられる。

また、フライアッシュを混和した場合、ケース6(フライアッシュ15%)よりもケース8(フライアッシュ25%)の方が、ASRゲルの生成量が少なく、ASRゲルは小さな粒子の周囲に限定的に生成されており、アルカリが供給される厳しい促進養生条件下においても、ASRゲルの生成が抑制されていることが明らかとなった。したがって、ガラスカレットはガラス自身からアルカリが供給されることにより、ASRが促進される可能性があるが<sup>45)</sup>、フライアッシュを一定量混和することにより、ポゾラン反応の進行による内部組織の緻密化と水和生成物のアルカリ吸着の相乗効果により、ASRを大きく低減できることが示されたと言える。

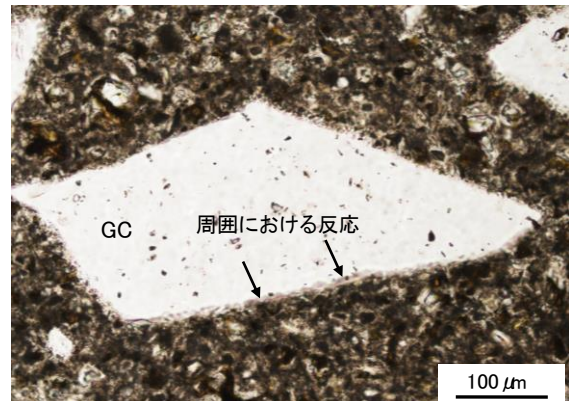
### 3.4 ひび割れの発生状況

写真-3に偏光顕微鏡による薄片の観察結果を示す。なお、ガラス組織（単ニコル）に見える黒点は、研磨時にガラスが欠けた部分であり、ガラス内部組織は、ほぼ均一であった。写真-3に示すように、ケース3(ガラスカレット60%混合)およびケース5(ガラスカレット100%混合)の場合、粒径2mm以上の比較的大きな粒子において、粒子内部に生成したASRゲルがセメントペーストに進展しているのが観察された。これは、PVパネルの破碎時にできた微細なひび割れから浸透したNaOH溶液によりASRゲルが生成され、ASRゲルの吸水膨張により

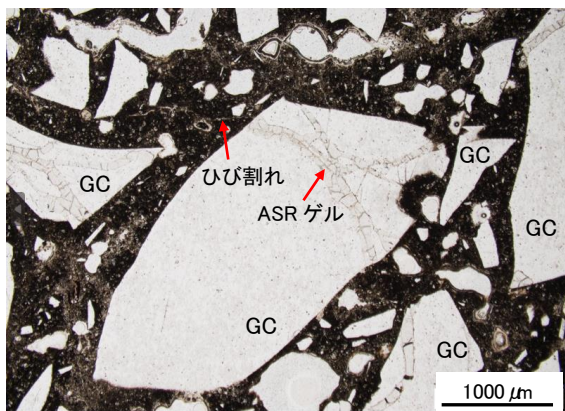
ひび割れが拡大し、さらにセメントペーストにひび割れを発生させたものと考えられる。また、粒径によらず、粒子の周囲において表面のガラスが反応している状況が観察され、ガラスがゲル化している状態であると推測されたが、ASRゲルが周囲に拡散しているか否かは不明確であった。ASRによる膨張発生機構としては、ASRゲルが膨張圧を発現するための反力障壁が必要であることが指摘されているが<sup>10)</sup>、一方でセメントペーストに進展したASRゲルが膨張に寄与する場合があることも示唆されている<sup>11,12)</sup>。今回のケースにおいては、元々微細なひび割れがあった比較的大きなガラスカレット粒子



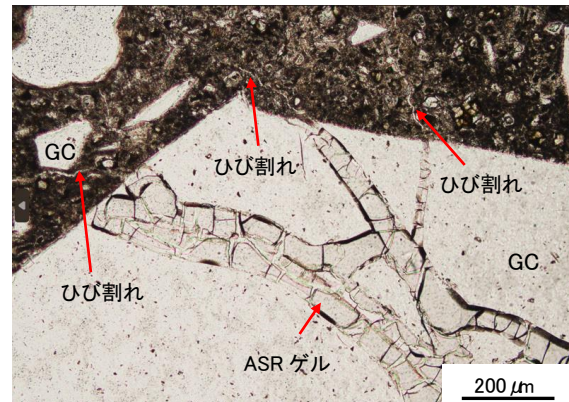
ケース 3 (a)(GC 60%)



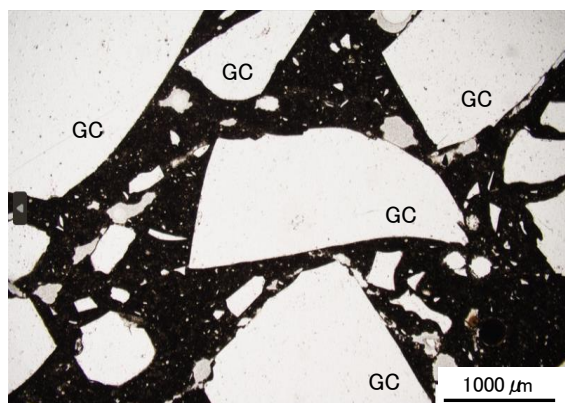
ケース 3 (b)(GC 60%)



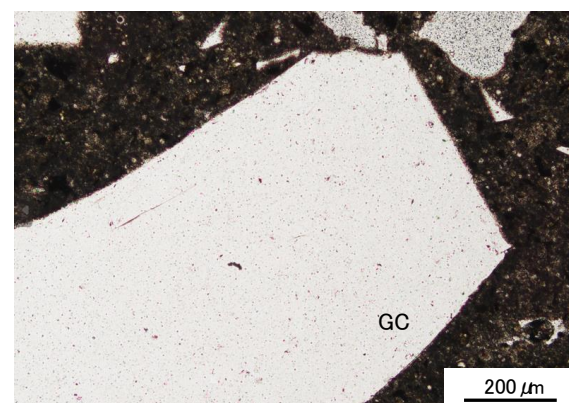
ケース 5 (a)(GC 100%)



ケース 5 (b)(GC 100%)



ケース 8 (a)(GC 100%,FA 25%)



ケース 8 (b)(GC 100%,FA 25%)

(GC : ガラスカレット, Ls : 石灰石)

写真-3 薄片観察結果 (単ニコル)

の内部からのひび割れの進展による膨張が卓越し、大きな膨張力を発揮した可能性が考えられた。また、このことより、ガラス骨材の場合、粒径ペシマムが存在することが言われているが<sup>9)</sup>、ガラスの粒形や粒径、また微細なひび割れの有無などの違いによって、ASR ゲルの生成状況や膨張力の発生機構が異なることが一因である可能性が示唆された。

また、ケース 3(ガラスカレット 60%)の場合、ケース 5(ガラスカレット 100%)の場合と同様にガラスカレット内部からセメントペーストに進展したひび割れの発生が確認されたが、より内部に ASR ゲルが大量に生成するとともに、ASR ゲルの一部がロゼット状に結晶化(膨張力が小さい)しているものが観察された。これは、ケース 3 の場合、非反応性の石灰石の存在により、ガラスカレットの個々の粒子に作用するアルカリ量が相対的に多かったことが原因であり、モルタルバーの膨張率としては、同程度であったことから、全体として、ひび割れの発生、ASR ゲルの生成によるモルタルバーの膨張率が同程度になったものと考えられる。

一方、ケース 8(ガラスカレット 100%,フライアッシュ 25%)の場合、明確に ASR ゲルが生成している粒子や ASR によるひび割れはほとんど確認されず、高い反応性を示すガラスカレットに対してもフライアッシュの 25%添加により、ASR ゲルの生成とひび割れの発生が完全に抑制されたことが組織観察からも同様に示された。

#### 4. 結論

本研究では、PV パネルガラスカレットのアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる ASR 抑制効果を ASTM C1260 法による試験と偏光顕微鏡による骨材内部とその周囲の ASR ゲルの生成状況の観察より検討した。本研究で得られた主な結果は、以下に示すようである。

- (1) 高いアルカリシリカ反応性をもつガラスカレットに対しても、高品質なフライアッシュ (JIS II 種灰) をセメントの 15%以上で置換することにより、ASR を効果的に抑制できた。
- (2) ガラスカレットの ASR は、ガラスカレットの破碎製造時にできた微細な内部ひび割れの影響を受けて、粒子の内部から進行し、大きな膨張が発生した。
- (3) ガラス骨材の粒径ペシマム混合率は、ガラスの粒形や粒径、さらに微細なひび割れの有無などによって ASR ゲルの生成状況や膨張力の発生機構が異なることにより相違した。

#### 参考文献

- 1) 環境省：太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン (第 2 版), 2018

- 2) (社) 日本コンクリート工学協会：廃棄物のコンクリート材料への再資源化研究委員会報告書, pp.117-125, 2003
- 3) 杉政幸寿, 川村満紀, 中村静夫：フライアッシュによる廃棄ガラスモルタルの ASR 膨張抑制効果, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.600-601, 2001
- 4) 山戸博晃, 鳥居和之, 岸田年弘, 吉田遼二：ガラス破碎砂の化学組成とアルカリシリカ反応性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1429-1434, 2005
- 5) 鳥居和之, 杉山彰徳, 山戸博晃, 酒井賢太：廃棄ガラス起源リサイクル砂のアルカリシリカ反応性に関する研究, 材料, Vol.55, No.10, pp.905-910, 2006
- 6) 山田寛治, 石山智：廃ガラスカレットを骨材とするモルタルのアルカリシリカ反応による膨張特性に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 607 号, 1-6, pp.1-6, 2006
- 7) 参納千夏男, 宮里心一, 鳥居和之：SDGs に合致した北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの地域実装の現状と展望, セメント・コンクリート, No.907, pp.48-55, 2022
- 8) 広野真一, 安藤陽子, 大代武志, 鳥居和之：フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果の比較, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.441-448, 2013
- 9) 参納千夏男, 丸山達也, 山戸博晃, 鳥居和之：ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.973-978, 2013
- 10) 川端雄一郎, 広野真一, 岩波光保, 加藤絵万：岩石学的観察に基づく ASR による各種反応性骨材の損傷形態と損傷過程の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1031-1036, 2011
- 11) 久保哲司, 佐野朝恵, 参納千夏男, 鳥居和之：砂のアルカリシリカ反応性評価と建設工事における ASR 抑制対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.901-906, 2017
- 12) 大澤紀久, 五十嵐豪, 山田一夫, 西脇智哉：アルカリシリカ反応によるアルカリシリカゲルが膨張圧を発生する機構に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.272-279, 2017