

放射光分析を用いたガラス骨材の ASR劣化抑制効果の評価

研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

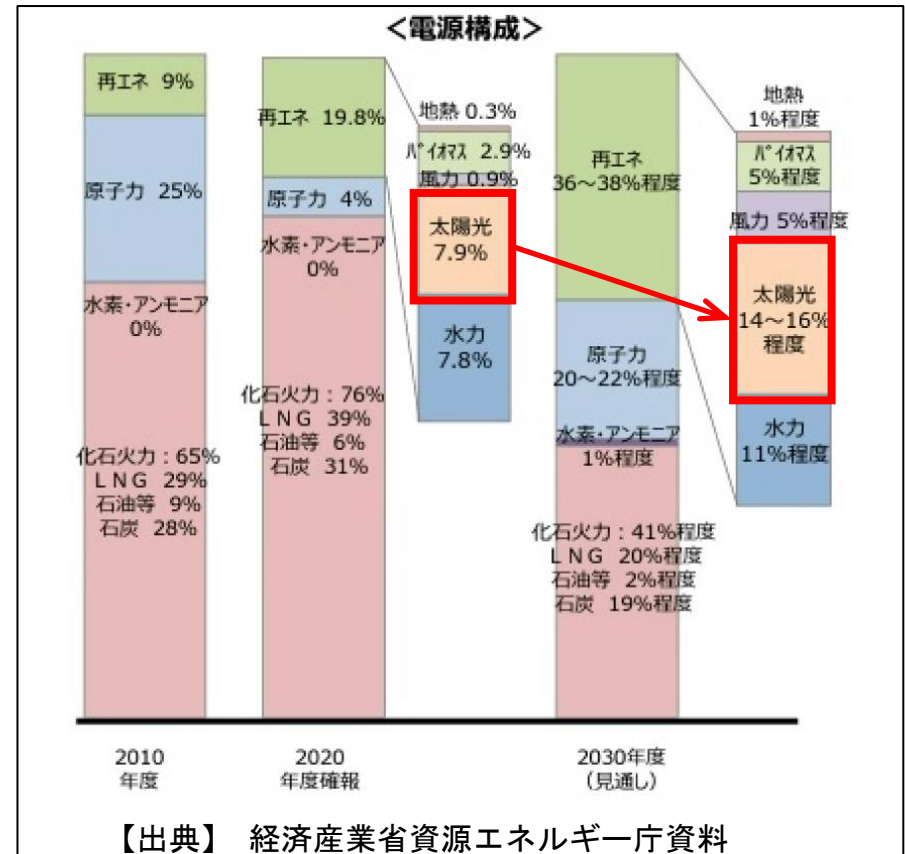
ASRによるコンクリート劣化の問題

劣化抑制対策を打ち出した

対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

- 国内の太陽光発電設備の設置は、2012年以降に急増してきた。
- カーボンニュートラルの観点から、今後も増加し続ける。



研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

ASRによるコンクリート劣化の問題

劣化抑制対策を打ち出した

対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

- 2030年代に、使用済み太陽光パネルは**大量排出**される見通しである。
- 産業廃棄物処分場の増設が厳しいため、**廃ガラスの有効利用**の検討は急務となっている。



【出典】NHKビジネス特集(2022年1月14日) :
太陽光パネル“大廃棄時代”がやってくる

研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

ASRによるコンクリート劣化の問題

劣化抑制対策を打ち出した

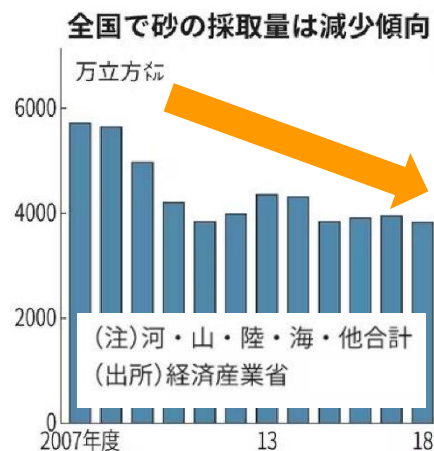
対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

- 建設分野では、自然環境保護の観点から新しい代替材料の使用が求められている。
- ガラスは石灰石に相当する強度を持つため、廃ガラスを骨材（砂）として再生利用する研究を行っている。

良質な天然骨材が枯渇

自然環境保護の側面から、供給が困難な地域も出てきており、対策が求められる。



【写真出典】日本経済新聞（2021年10月21日）生コン用砂に値上げ圧力 資源枯渇、かさむ輸送費

研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

ASRによるコンクリート劣化の問題

劣化抑制対策を打ち出した

対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

- 太陽光パネル由来のガラスは7割以上がシリカ (SiO_2) である。
- コンクリート劣化現象の一つ、アルカリシリカ反応 (ASR) を引き起こすおそれがある。

①骨材中の反応性シリカ

②セメント中のアルカリ金属

③水

ゲル状物質

ひび割れ発生

ゲル状物質 (吸水膨張)

【アルカリシリカゲルの生成】
 $n\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (アルカリシリカゲル)

【アルカリシリカゲルの吸水・膨張】
 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ (膨張生成物)

【イメージ図の出典】 阪神高速道路株式会社資料

研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

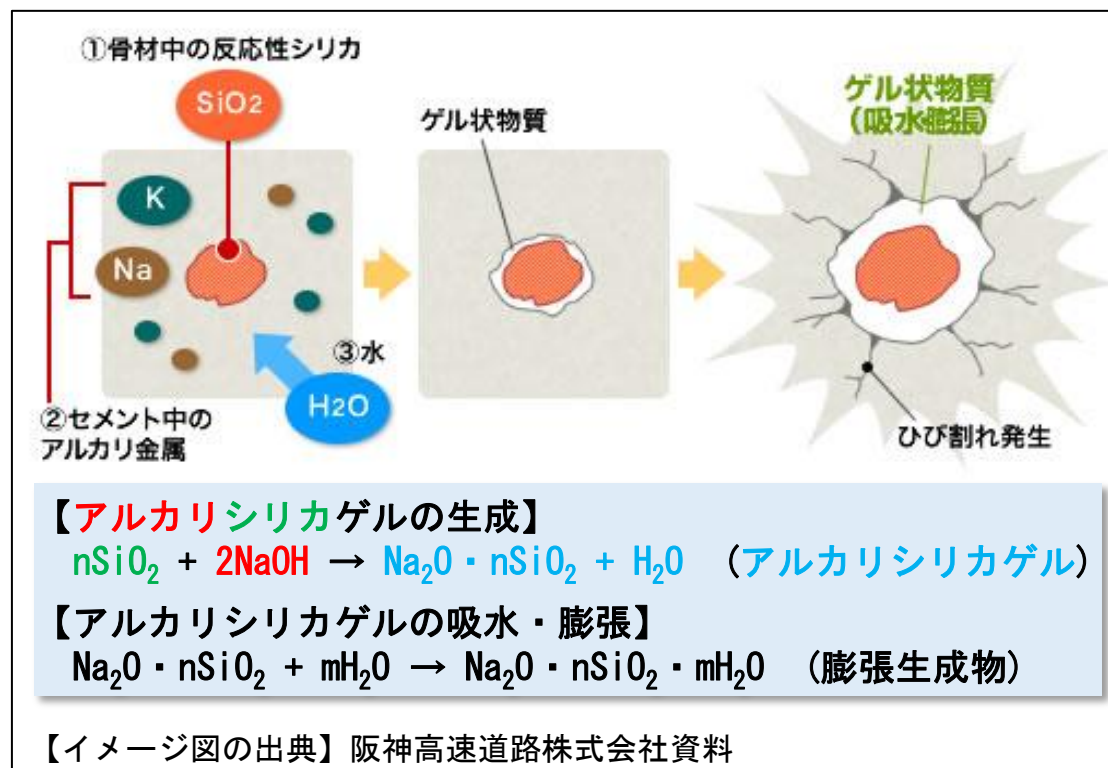
ASRによるコンクリート劣化の問題

劣化抑制対策を打ち出した

対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

- 太陽光パネル由来のガラス骨材を対象とする研究はほとんどなく、ASR劣化抑制のメカニズム、抑制効果および持続性が不明であり、廃ガラス高度利用の技術的な壁となっている。



研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

ASRによるコンクリート劣化の問題

劣化抑制対策を打ち出した

対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

- 本研究では、国土交通省が定められたASR対策に基づき、通常の天然骨材に対して有効とされる劣化抑制対策を打ち出した。

【通常のASR対策～国土交通省資料】

- 1) コンクリート中のアルカリ総量の抑制
コンクリート1m³に含まれるアルカリ総量をNa₂O換算で3.0kg以下とする。
- 2) 抑制効果のある混合セメント等の使用
高炉セメントなどのアルカリシリカ反応の抑制効果のあるセメントを使用する。
- 3) 安全と認められる骨材の使用
骨材のアルカリシリカ反応性試験で無害と確認された骨材を使用する。

【本研究のASR対策】

上記2)に基づき、より優れる劣化抑制効果を求め、セメントの一部に、高炉スラグ微粉末およびガラス微粉末の単独使用または併用による対策を行った。

研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

ASRによるコンクリート劣化の問題

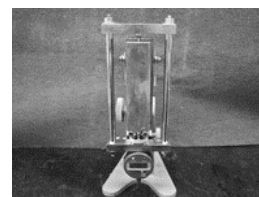
劣化抑制対策を打ち出した

対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

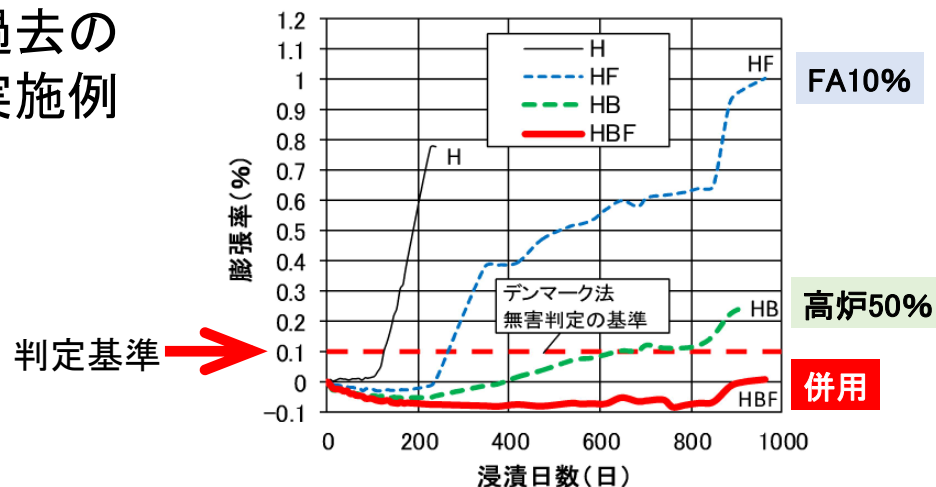
従来の研究手法

モルタルまたはコンクリート供試体の促進試験を行い、表面観察し、膨張率を測定する。



ASTM法/JIS法/デンマーク法

過去の実施例



【問題点】

- ・ 新材料の場合、メカニズムの解明に至っていない。
- ・ 実験の実施ケースが多く、実施期間が長い。

研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

ASRによるコンクリート劣化の問題

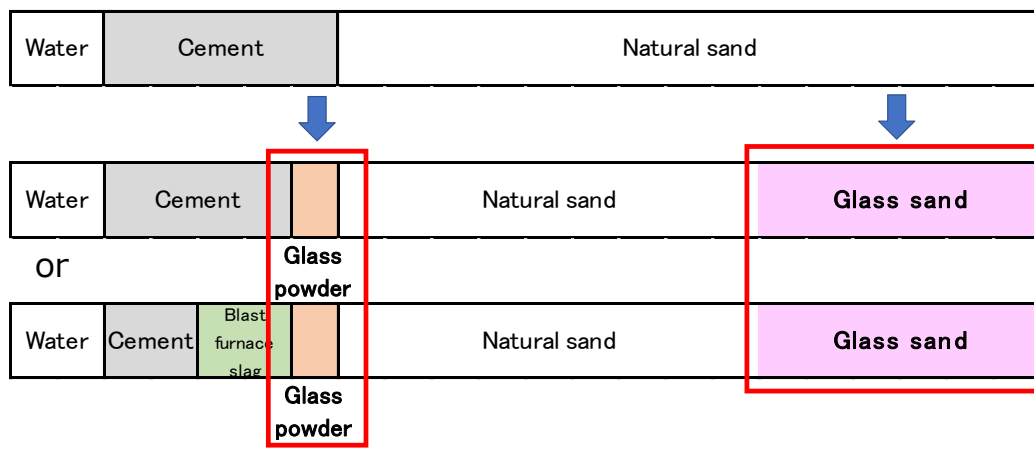
劣化抑制対策を打ち出した

対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

- ガラス骨材を使用したコンクリートのASR対策効果に対する評価方法が確立されていない。
- 特に本研究では、複数の材料を組み合わせて使用し、ASR反応のメカニズムが複雑であり、従来の効果検証方法は不十分である。

【結合材】セメント(C)、高炉スラグ微粉末(BFS)、ガラス微粉末(GP)
【細骨材】天然骨材(S)、ガラス骨材(GS)



研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

ASRによるコンクリート劣化の問題

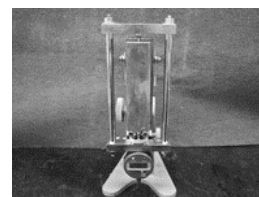
劣化抑制対策を打ち出した

対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

従来の研究手法

モルタルまたはコンクリート供試体の促進試験を行い、表面観察し、膨張率を測定する。



促進試験
ASTM法/JIS法/デンマーク法



新しい研究手法

従来の研究手法に加え、シンクロトロン放射光による高精度の分析を行い、ASRの劣化状況および対策効果を総合的に評価する。

蛍光XAFS試験	BL6N1	ASR反応物ゲルの化学状態の分析
XRD試験	BL8S1	ASR反応物の結晶構造の分析
X線CT試験	BL8S2	モルタル中に発生する微細ひび割れの画像化と測定
小角散乱試験	BL8S3	モルタルの微細構造変化の分析

研究背景・目的

太陽光発電が普及した

廃ガラス処理が課題となる

建設材料として再利用の可能性

ASRによるコンクリート劣化の問題

劣化抑制対策を打ち出した

対策効果の評価方法が未確立

放射光分析による対策効果の評価

研究目的

ガラス骨材によるコンクリートの ASR発生機構を解明 すること、ならびに 劣化抑制対策の効果 を評価することを研究目的とした。

研究体制

(株) 安部日鋼工業

金城学院大学



研究概要

1) 供試体作成：材料の組合せにより、計12種類のモルタル供試体を作成した。

モルタルの調(配)合一覧表 (kg/m³)

大分類	番号	記号	調(配)合種類	水	結合材			細骨材	
					普通ポルトランドセメント	ガラス微粉末	高炉スラグ微粉末	珪砂	ガラス細骨材
添加率						20%	40%		40%, 100%
シリーズ1 ガラス細骨材 0%	1	0-N	ベース	240	480	0	0	1440	0
	2	0-GP	ガラス微粉末添加		384	96	0	1440	0
	3	0-B	高炉スラグ微粉末添加		288	0	192	1440	0
	4	0-W	W添加		192	96	192	1440	0
シリーズ2 ガラス細骨材 40%	5	40-N	ベース		480	0	0	864	576
	6	40-GP	ガラス微粉末添加		384	96	0	864	576
	7	40-B	高炉スラグ微粉末添加		288	0	192	864	576
	8	40-W	W添加		192	96	192	864	576
シリーズ3 ガラス細骨材 100%	9	100-N	ベース		480	0	0	0	1440
	10	100-GP	ガラス微粉末添加		384	96	0	0	1440
	11	100-B	高炉スラグ微粉末添加		288	0	192	0	1440
	12	100-W	W添加		192	96	192	0	1440

研究概要

- 1) 供試体作成 : 材料の組合せにより、計12種類のモルタル供試体を作成した。
- 2) 促進試験 : ASR劣化の促進環境条件や促進期間が異なる促進試験を行った。
- 3) 試料作成 : シンクロトロン光センター試験分析用の試料を作成した。

供試体作成～試料作成の試験状況



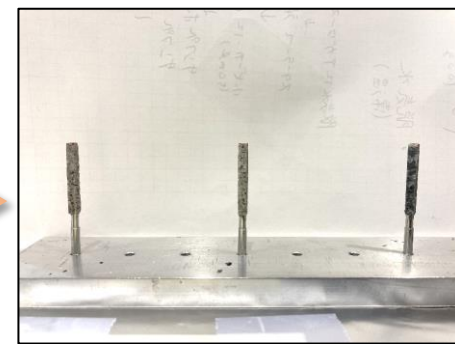
モルタル供試体作成



アルカリ溶液浸漬
(NaOHまたはNaCl溶液)



高温による促進試験
(50または80°C)



試料作成
(バルク試料の例)

研究概要

- 1) 供試体作成 : 材料の組合せにより、計12種類のモルタル供試体を作成した。
- 2) 促進試験 : ASR劣化の促進環境条件や促進期間が異なる促進試験を行った。
- 3) 試料作成 : シンクロトロン光センター試験分析用の試料を作成した。

実験のスケジュール

2022年	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
ASR促進試験および膨張率測定									
ASTM法(14日間)		供試体							
デンマーク法~A(3ヶ月以上)			供試体	促進試験					
デンマーク法~B(3ヶ月以上)					供試体	促進試験			
JIS法(6ヶ月以上)		供試体	促進試験						
放射光による詳細分析									
BL利用状況			○	○				○	

研究結果

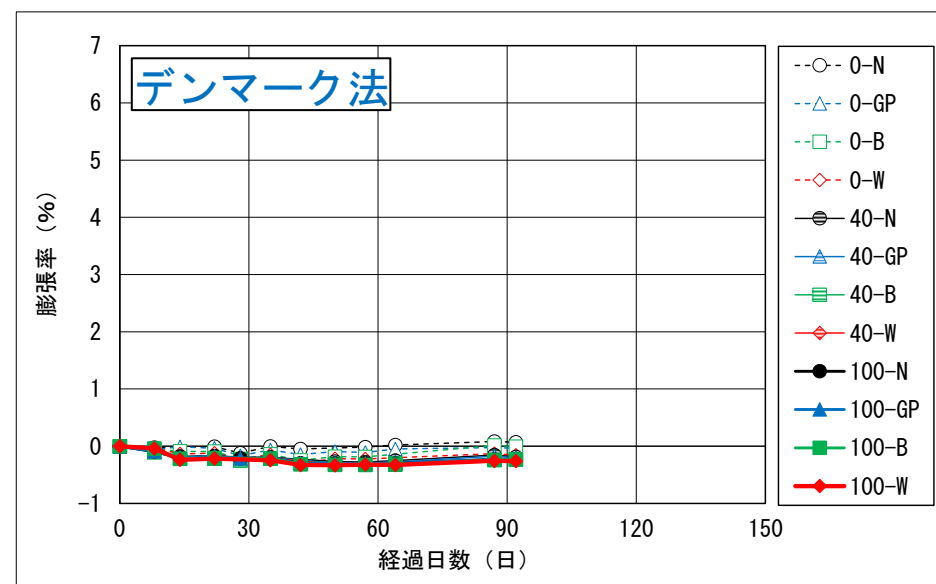
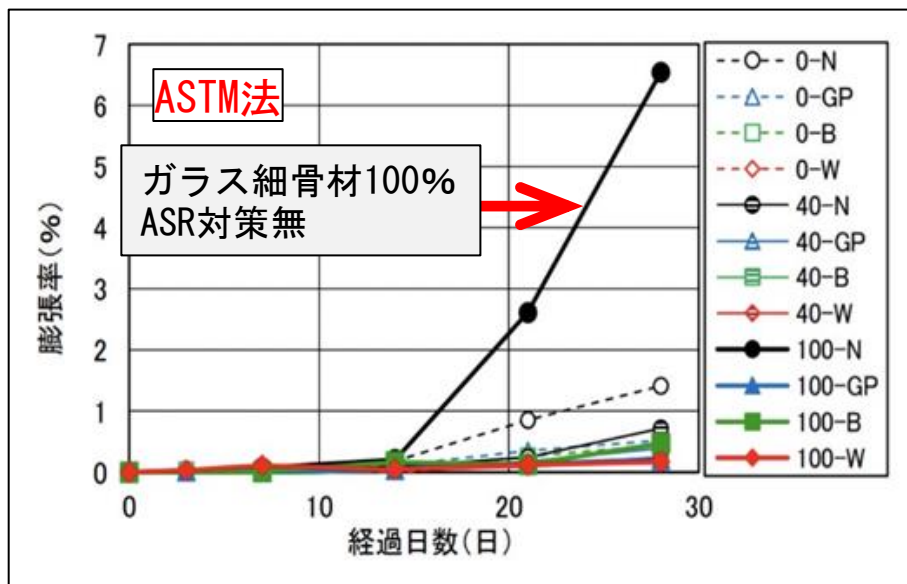
ASR促進試験および膨張率測定の結果

ASTM法促進試験 (NaOH溶液、80°C)

- ・ 迅速判定できるが、精度に欠ける。
- ・ ガラス細骨材100%使用のケースは著しく膨張し、ガラス細骨材のASR反応が確認された。

デンマーク法促進試験 (NaCl溶液、50°C)

- ・ ASR促進試験前、促進試験3か月後のデータを比較すると顕著な変化が確認できなかつた。
- ・ 遅延膨張性ASR劣化の可能性がある。



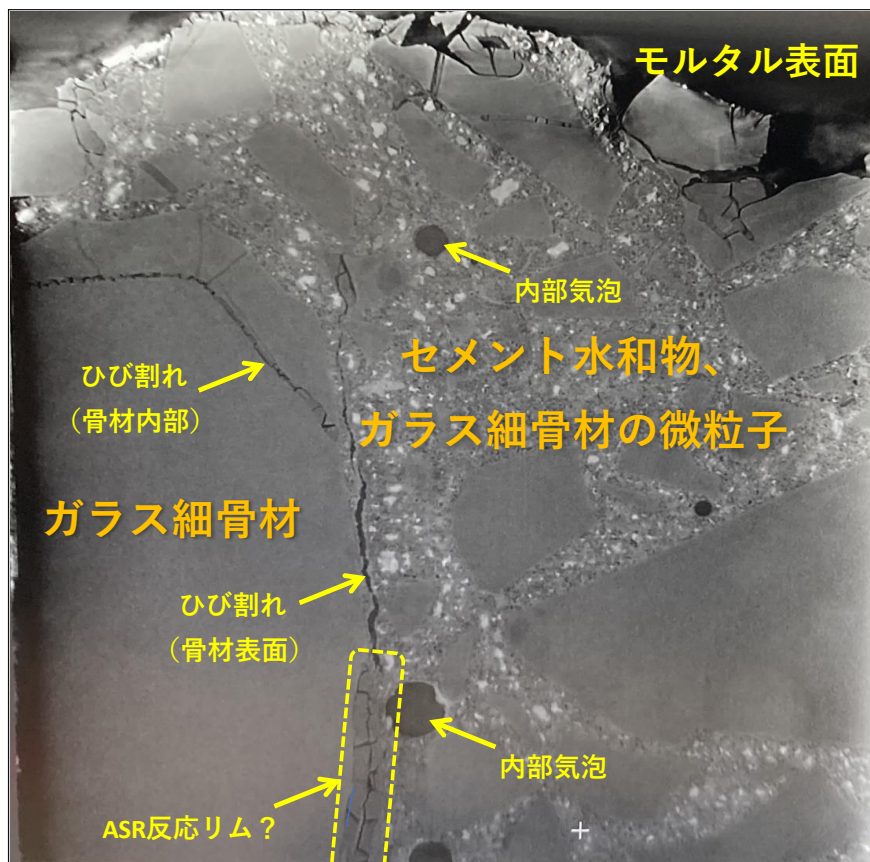
ASR促進試験における膨張率測定の結果

研究結果

X線CT試験

BL8S2

モルタル中に発生する微細ひび割れの画像化と測定



X線CT試験の測定結果

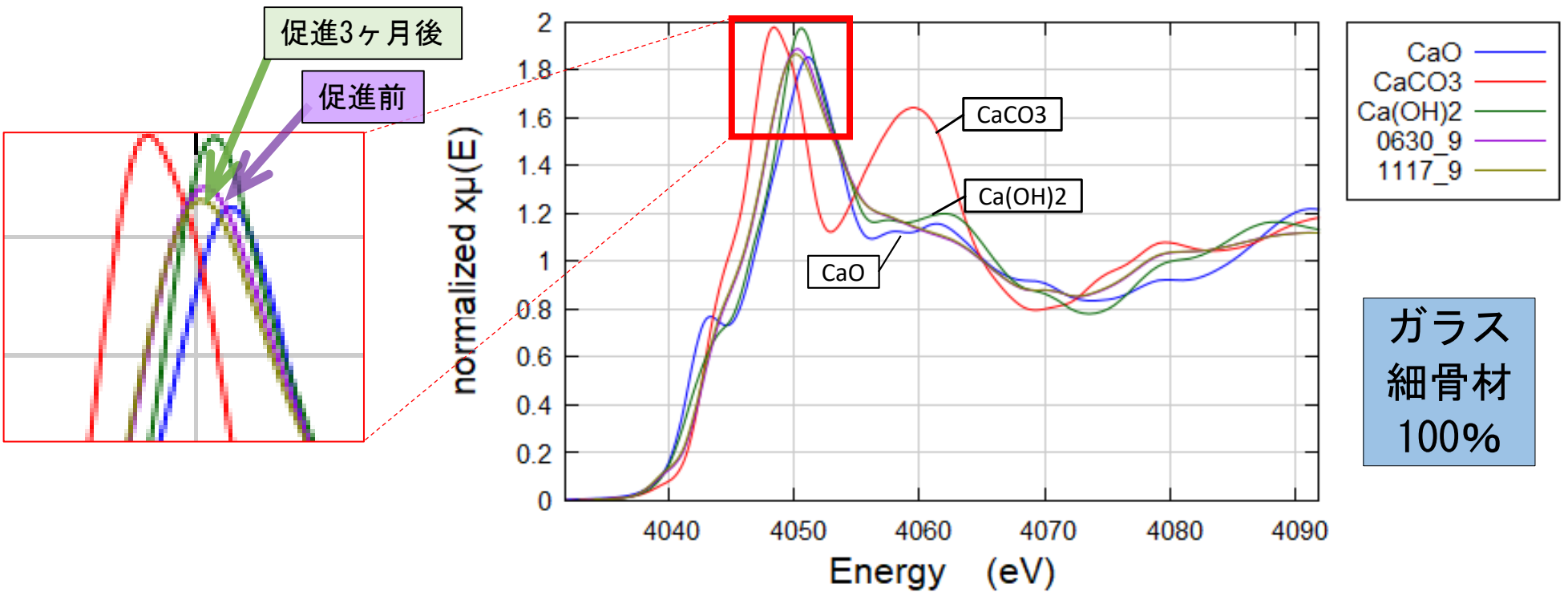
(ガラス細骨材100%、ASR対策無の例)

- **ASTM法促進試験**の試料で試験した。
- ガラス**細骨材の周辺**または**細骨材本体**には、0.2mm以下の**微細ひび割れ**が発生したことが確認されている。
- これは、試料を切断した際に発生した機械ひび割れではないことを別途確認されたため、**ASRによる膨張ひび割れの可能性が極めて高い**と考えられる。
- 細骨材周辺および細骨材内部において、**水和生成物と異なる脆弱層**が生成したことが確認され、この部分はASR反応リムの疑いがあるが、今後、さらに詳細な解析を進める予定である。

研究結果

蛍光XAFS試験	BL6N1	ASR反応物ゲルの化学状態の分析
----------	-------	------------------

デンマーク法ASR促進試験前、促進試験3か月後のデータを比較して、全体的に変化量が小さいことが確認された。今後も継続して実験する予定である。



蛍光XAFS試験の測定結果（ガラス細骨材100%、ASR対策無の例）

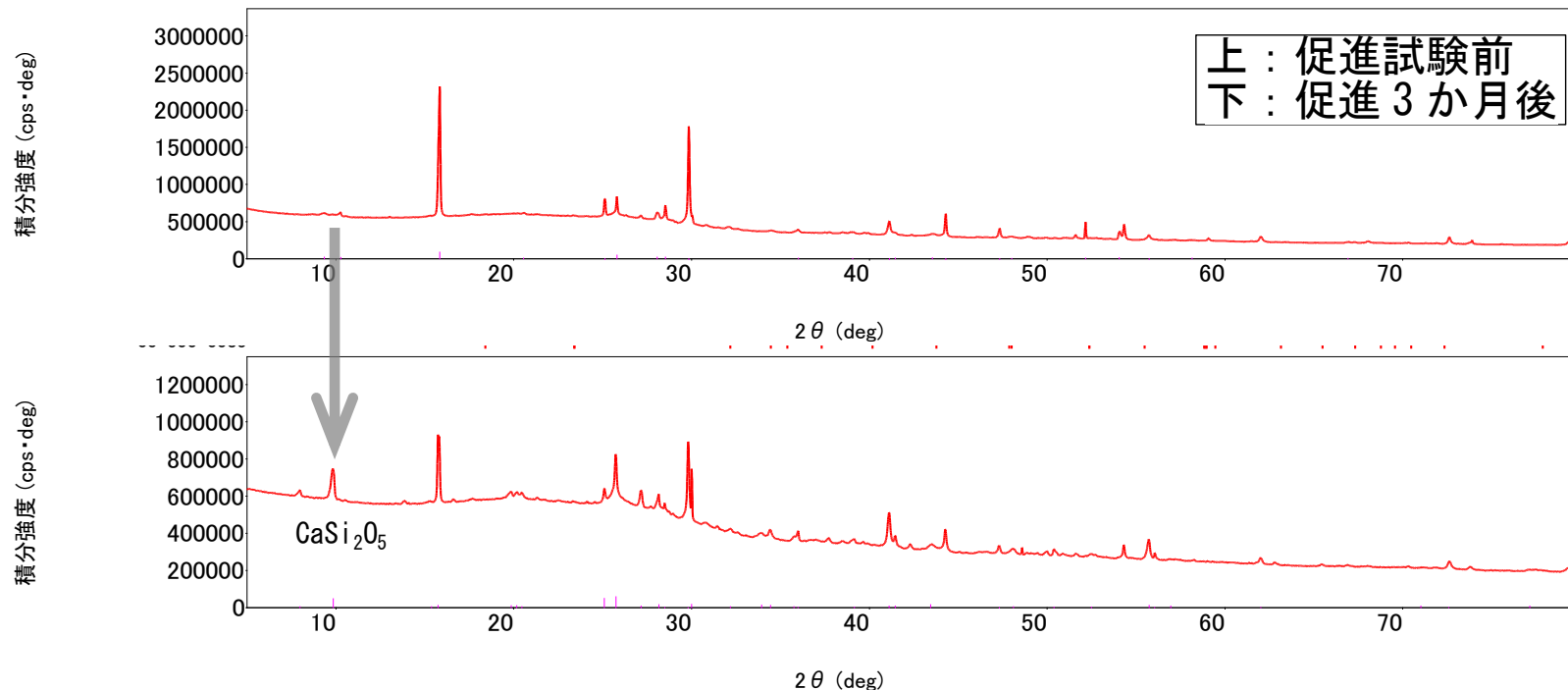
研究結果

XRD試験

BL8S1

ASR反応物の結晶構造の分析

デンマーク法促進試験3か月後に、ケイ酸カルシウムなどセメント由来の水和生成物を中心に各種生成物が増加したことが確認された。この中には水和生成物およびASR反応物が含まれており、今後は促進試験の進行と合わせ、ASR反応物の要素のみを抽出し定量的に評価していく予定である。



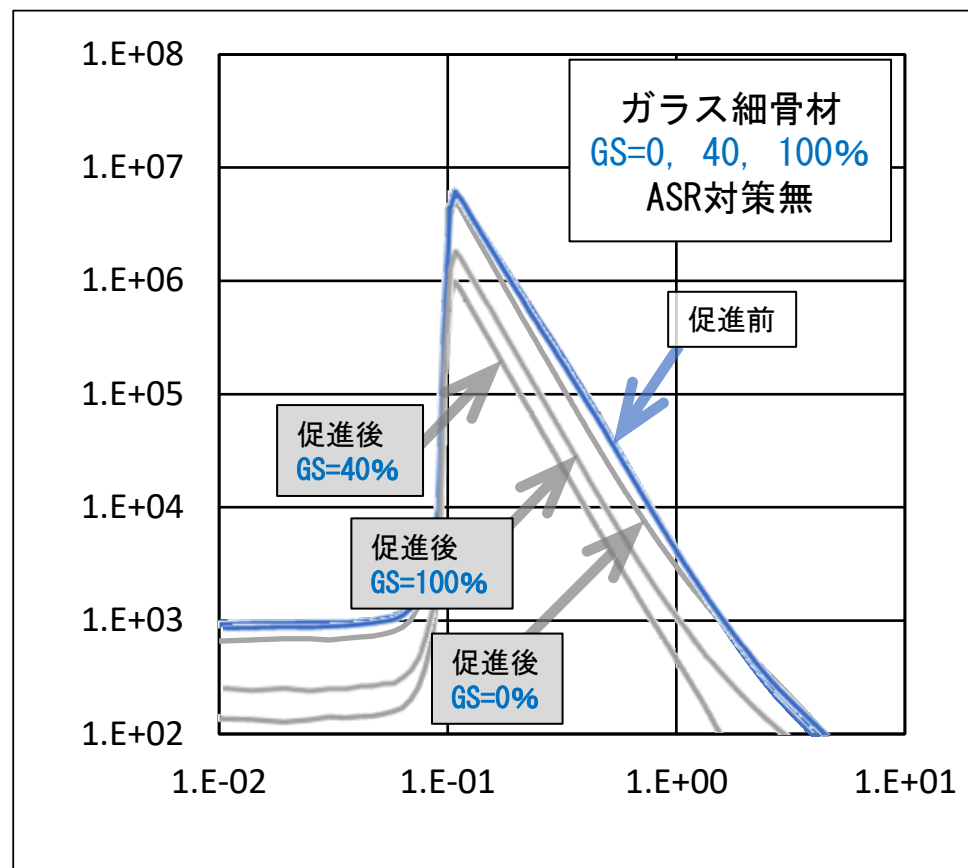
XRD試験の測定結果（ガラス細骨材100%、ASR対策無の例）

研究結果

小角散乱試験

BL8S3

モルタルの微細構造変化の分析



- ・ 促進試験前後の結果を比較すると、時間経過に伴い曲線の膨らみが変化していることが確認された。
- ・ 今後はこのような変化と促進試験の日数や使用材料の関係を、カメラ長の変更を含めて詳細を解明していく予定である。

小角散乱試験の測定結果例
(ASR対策無、促進試験前、促進3か月後の比較)

まとめおよび今後の予定

まとめ

- ・放射光利用により、迅速で高精度の試験データを取得することができ、評価方法として有効である。
- ・具体的に、ASR促進試験を行った結果、反応が進行した試料によるX線CT試験では、ガラス細骨材の周辺または細骨材本体に微細ひび割れの発生、水和生成物と異なる脆弱層の生成が確認された。
- ・また、反応が顕著に進行していない試料においても、蛍光XAFS試験、XRD試験、小角散乱試験の有効性が確認された。
- ・以上のように、水和生成物およびASR反応物による変化が確認されたほか、ASRによる微細構造の差異が見られ、評価結果の信頼性が向上したと考えられる。

今後の予定

- ・ASRの反応が緩やかに進行し、試験前との差異が小さかったため、今後も促進試験を継続して行う。
- ・年度内および来年度の適切な時期に追加試験を行うなど、さらに詳細で定量的な分析を加えていく予定である。

謝辞

あいちシンクロトロン光センター様より成果公開無償利用事業にご採択いただき、廃ガラスのコンクリート材料への高度利用に役立つ研究開発を行う貴重な機会を賜りました。

コーディネーター 山元様、野崎様

アドバイザー 東様

BL6N1 村井様、陰地様

BL8S1 山本様、酒井様

BL8S2 花田様、櫻井様

BL8S3 神谷様、福永様

に大変お世話になりました。この場を借りて御礼を申し上げます。