博　士　論　文

# わが国の反応性骨材の地質学的な分布と岩石学的試験による骨材のアルカリシリカ反応性の判定に関する基礎的研究

金沢大学大学院自然科学研究科

環境科学専攻

環境創成講座

学 籍 番 号　1223142010

氏　　名　廣野真一

主任指導教員名　鳥居和之

提 出 年 月　2015 年 4 月

# わが国の反応性骨材の地質学的な分布と岩石学的試験による骨材のアルカリシリカ反応性の判定に関する基礎的研究

## 目　次


第１章　序論

1.1　研究の背景 1

1.1.1　わが国での ASR 診断の実状 1

1.1.2　岩石学的試験規格 1

1.1.3　わが国の ASR による被害が拡大した背景 2

1.1.4　現在に潜在する ASR 問題 2

1.1.5　岩石学的試験の意義 3

1.2　ASR 研究の現状における不備 3

1.2.1　岩石学的試験の適用方法 3

1.2.2　わが国で発生した ASR 被害に関する既往の研究 4

1.3　本研究の目的 5

1.4　本論文の構成 5

参考文献 7

第２章　コンクリートの岩石学的診断手法の現状と知見

2.1　まえがき 10

2.2　方法論の概要 10

2.3　方法論の各説 10

2.3.1　外観観察 12

2.3.2　岩石学的評価 14

2.3.3　岩石種構成の定量 17

2.3.4　SEM 観察／EDS 定量分析（SEM-EDS） 17

2.3.5　採取されたコンクリートコアの促進膨張試験 25

2.4　まとめ 27

参考文献 28

第３章　わが国の ASR の特徴と代表的な反応性骨材の地域的分布

3.1　まえがき 30

3.2　ASR 反応性鉱物 30

3.3　ASR 反応性鉱物の種類と産状 31

3.4　反応性鉱物を含むわが国の主な地層や岩体 31
3.5　反応性鉱物を含む地層や岩体の各論 35
3.5.1　安山岩をはじめとする火山岩類 35
3.5.2　チャート・珪質頁岩 37
3.5.3　泥質岩・砂質岩起源のホルンフェルス 38
3.5.4　変成岩（広域変成岩） 38
3.5.5　反応性鉱物を含むその他の主な岩石 39
3.6　日本各地の地質と ASR 40
3.6.1　北海道 40
3.6.2　東北 41
3.6.3　関東 43
3.6.4　中部（山梨県・長野県・新潟県・静岡県） 46
3.6.5　中部（富山県・石川県・福井県・岐阜県・愛知県・三重県） 49
3.6.6　近畿 52
3.6.7　中国 53
3.6.8　四国 55
3.6.9　九州 56
3.6.10 琉球列島 59
3.7　まとめ 60
参考文献 61

第４章　タイ国の ASR 事例における反応性骨材の岩石学的特徴と損傷形態
4.1　まえがき 63
4.2　概要 63
4.3　調査の目的 63
4.4　構造物の概要と劣化状況 63
4.5　試料 65
4.6　試験方法 65
4.6.1　岩石学的試験 65
4.6.2　水溶性アルカリ量の分析 66
4.7　試験結果 66
4.7.1　岩石学的試験 66
4.7.2　水溶性アルカリ量の分析 70
4.8　考察 70
4.8.1　劣化の主原因 70
4.8.2　エトリンガイトの産状と DEF との関係 70

4.8.3　熱帯気候下での ASR の促進 70
4.8.4　細骨材の ASR と反応性鉱物 71
4.9　まとめ 73
参考文献 74

第５章　北陸地方における代表的な反応性骨材の岩石学的特徴と推奨される
ASR 抑制対策
5.1　まえがき 75
5.2　北陸地方の地質と反応性骨材の分布 75
5.3　実験目的 77
5.4　使用材料 77
5.5　常願寺川産川砂利 78
5.5.1　常願寺川産川砂利の岩石学的特徴と ASR 被害 78
5.5.2　常願寺川産川砂利の混合セメントによる ASR 抑制効果確認試験 80
5.6　能登半島産安山岩砕石 86
5.6.1　能登半島産安山岩砕石の岩石学的特徴と ASR 被害 86
5.6.2　能登半島産安山岩砕石の混合セメントによる ASR 抑制効果確認試験 88
5.7　まとめ 94
参考文献 95

第６章　結論
6.1　本論文のまとめ 97
6.2　今後の課題と展望 98
6.2.1　岩石学的試験のあり方について 98
6.2.2　岩石学的試験の技術者育成 98
6.2.3　ASR 発生情報の共有とデータベース化 99

謝辞 100

# 第 1 章　序論

## 1.1　研究の背景

### 1.1.1　わが国での ASR 診断の実状

アルカリシリカ反応（Alkali-Silica Reaction：以下，ASR と略す）は，骨材岩石に含まれる ASR 反応性鉱物が，コンクリート中で高アルカリの細孔溶液に溶解することに始まるコンクリートの劣化現象である。ASR はコンクリート中で骨材岩石に生じる反応であるので，これを適切に診断するためには，反応を生じた岩石を観察して理解する岩石学的試験が必須である [1),2)など]。近年の岩石学的試験によるアルカリ炭酸塩岩反応の解明 [3),4),5)など]や，抑制対策実施後のコンクリートに発生した ASR の原因究明事例 [6),7)]などは，その代表例である。

一方，**表－1.1** に示すのは国内のある分析機関が，一定期間内に受注した ASR の診断に関わる内容と頻度である。総数約 250 件の内容につき，合計 490 項目の試験を行っている。内容は単独での発注や，いくつかの項目を組み合わせたものなどがあり，多岐にわたるが，多くても 4 項目に留まっていた。4 項目の実施は全体の数％であり，2/3 は単一の項目で行われたものであった [8)]。これによると，促進膨張試験が最も多く，管理者としては劣化が生じた構造物の今後の残存膨張に最も関心が高いとも考えられるが，実際には劣化が ASR によるものであることの確認のために，不適切な方法として行われている場合が非常に多いようである。SEM（走査電子顕微鏡）による ASR ゲルの確認の頻度 83 については，岩石学的試験と組み合わせて行われている場合はよいが，実際には単独で行われている場合が非常に多く，これも ASR ゲルの発見が即座に ASR 劣化であるという誤った認識に基づくものと考えられる。一方，岩石学的試験の頻度としては偏光顕微鏡観察と骨材岩石種の特定の合計でも 113 に留まり，その有効性が十分には理解されていないことがわかる。このように，本来は必須であるはずの岩石学的試験は，現実には必ずしも活用されていない。岩石学的試験を普及するためには，その有効性を十分に示すことと，質の高い報告内容により十分な信頼を得ることとの双方が必要である。

**表－1.1　わが国での ASR 診断の内容と頻度の一例** [8)]

| 試験項目 | 頻度 |
|---|---|
| 促進膨張試験 | 174 |
| 静弾性係数 | 52 |
| SEM による ASR ゲルの確認 | 83 |
| 偏光顕微鏡観察 | 89 |
| 骨材岩石種の特定 | 24 |
| 骨材の粉末X線回折（単独） | 23 |
| 水溶性アルカリ量測定 | 29 |
| コンクリートから取り出した骨材の化学法（JIS A 1145） | 16 |
| 計 | 490 |

### 1.1.2　岩石学的試験規格

岩石学的試験の方法を示した規格については，わが国では海外の ASTM C 295[9)]や国内の JCI-DD3[10)]，JCI-DD4[11)]などがよく知られているが，いずれも未使用な骨材を評価することに主眼を置いたものであり，ASR の診断方法を示したものではない。コンクリート中で発生した ASR の診断方法を示したものとしては，海外での RILEM（国際材料構造試験研究機関・専門家連合）のもの [12)]や，国内の原子力安全基盤機構のもの [13)]，日本コンクリート工学会の研究委員会報告書 [2)]

などが，Katayama et al. [14),15),16)]などの研究を取り入れたものとして，最近になって提示された。これらの手法は ASR の診断に非常に有効なものであるが，その意義が理解されていないことのほか, 実施には知識と経験の蓄積が必要であること, 費用や試験に要する期間などの問題もあり，適切な実施と普及は十分ではない。

### 1.1.3　わが国の ASR による被害が拡大した背景

わが国における ASR の最初の事例報告は，1951 年の近藤・北川による山形県の村山橋と長崎橋に関するもの [17)]とされている。その際，アルカリ骨材反応を起こす骨材の判定に，岩石学的試験が新しい骨材の試験として不可欠のものと既に認識され，アメリカの事例を参考に，例えば近畿・北陸・四国地方では地質図からチャートや酸性・中性の火山岩が“容疑骨材”であるとしている。しかしながら，近畿地方の川砂利・川砂を主とする 104 種の骨材に行った化学法の試験結果のうち，有害と判定されたものは被害を受けた村山橋に用いられた最上川産を含めて 2〜3 例しかなく，このことから国内には反応性をもった骨材はほとんどないと認識されるようになった。このとき，岩石学的試験は不可欠と強調しつつも，実際には岩石や反応性鉱物の具体的な観察が行われず，また反応性のとくに高い北陸地方や山陰地方などの川砂利・川砂が試験対象とならなかったことが見逃しの大きな原因であった。また，1965 年には村田・関・藤木が鳥取県での被害事例を報告している [18)]が，大きな反響もなかった。その結果，一部の研究者はわが国での危険性を指摘していた [19),20)など]が，1982 年ごろに阪神高速道路公団関連で橋脚に ASR が発見されるまで問題意識は薄く，対策が打たれることもなく状況は放置された。それ以降は調査委員会が設置されるなどにより，活発な研究調査活動が行われるようになり，1986 年に現在の ASR 抑制対策 [21)]の原形となる建設省暫定案 [22)]が出されるにいたるわけであるが，北陸地方などで ASR が顕在化している構造物の大半は，この間に建設されたものであった [23)]。このように，現在までに ASR が顕在化して問題となっている構造物は主に，1986 年に建設省暫定案が出される以前に，実質的な岩石学的検討がなされないままに，国内には ASR 反応性骨材はほとんどないという誤った認識のもとに建設されたものと言える。実際には，地表に露出する岩石の大半はシリカ鉱物またはガラスを含み，それはアルカリ環境下で様々な速度で溶解する。そのうち，溶解速度のとくに遅い粗粒な石英のみが，実用的には非反応性と扱っても差し障りがないに過ぎない。ASR 反応性の岩石は，わが国のいたるところに分布する [24),25)]という認識が欠如していたことが，現在の残念な結果に繋がったと言える。

### 1.1.4　現在に潜在する ASR 問題

現在の ASR 抑制対策に繋がる建設省暫定案が 1986 年に出されて以降に建設された構造物については，ASR の問題は解決したと考えられ，ASR への関心は再び薄まったようである。しかし，この ASR 抑制対策も，もともと完全なものではない [1)]。現在の ASR 抑制対策は，アルカリ総量規制と混合セメントの使用，「無害」と判定された骨材の使用の 3 つからなる。しかし，例えば日本海からの季節風や凍結防止剤散布によるアルカリ浸入が避けがたい北陸地方などの状況 [14),26)]や，骨材岩石種によっては反応過程でアルカリが溶出する問題 [27)]などを考慮するとアルカリ総量規制は完全でない。また「無害」な骨材のみの使用については，近隣の骨材資源を使いこなす地産地消の問題とともに，この「無害」を判定するためにわが国で規定されている骨材のアルカリシリカ反応性試験 [28),29)]についても，これらの規定で判定するのが適切ではない多くの岩石種や骨材の種類（例えば北陸地方の川砂）が存在することが確認されている [1),30),31)など]。さらには，反応性骨材のなかには，ASR 抑制対策を行った場合でも，ASR の発生を長期において完全には抑制できない岩石種も存在することなどがわかってきている [32)]。これらのことと対応するように，ASR 抑制対策実施後の実構造物においても，ASR は完全になくなったわけではない [6),8),33)34)など]。このように，必ずしも完全ではない規格のみに頼り，ASR の主役となる骨材岩石の

素性を理解することを放棄した結果として，失敗例が存在するものと考えられる。一方，日本企業が海外で請け負う工事に関しても，同様またはそれ以上の注意が必要である。日本国内での経験や常識を超えた骨材岩石や反応性鉱物のほか，ASR を抑制する目的で使用するフライアッシュなどの混和材やその他の材料事情に加え，建設後にコンクリートが置かれる気候などの環境条件も日本国内と大きく異なる場合があるからである [35]。

### 1.1.5　岩石学的試験の意義

このように，ASR 抑制対策が実施される以前に建設された構造物に顕在化している ASR，ならびに ASR 抑制対策実施後に建設された構造物に発生した ASR があるが，これらの原因については，いずれも岩石学的試験を取り入れることにより，比較的容易に究明できることが多い。さらに，原因が究明されることにより，その失敗を今後の対策に反映することが可能となる。しかしながら，現在までわが国では岩石学的試験を十分に取り入れた ASR の危険予知や ASR 抑制対策の実施，ASR の診断などが，必ずしも十分に行われてこなかった経緯がある。また，岩石学的試験を行う場合にあっても，分析機器や技術，手法，知識の最近の進歩を十分に取り入れて対応していない場合は，現代の認識としての適切な結果が得られず，判断を誤ることがある [2]。

## 1.2　ASR 研究の現状における不備

### 1.2.1　岩石学的試験の適用方法

前節で述べたように，わが国においても岩石学的試験の存在と重要性は認識されていたが，それが満足に実施されず，また有効に活用されてこなかった。そして，このことが，わが国には反応性骨材がほとんど存在しないとの間違った見解の放置を招き，その後の多大な ASR の被害を発生させることに繋がった。一方，1986 年から ASR 抑制対策が行われるようになって，それ以降に建設された構造物では ASR の発生が激減したと信じられているが，それは同時にセメントの原料事情からアルカリが低減した偶然も影響しているとの意見もある。実際に 1986 年に抑制対策が行われるようになって以降も，大半の骨材業者が自ら提出する ASR 反応性試験結果は区分 A（無害）であり，実質的に行われている ASR 抑制対策は，多くの場合は対策実施前と変化していなかった。骨材の反応性試験の結果については，試料の採取方法によるバラツキのほかに，何らかの操作が疑われたこともあった [36]。ASR 抑制対策において“無害”な骨材の使用のみが実際には優先され，骨材業者にとって，自社製品を区分 A とするか区分 B とするかは死活問題であった。2002 年の国土交通省の通達 [37]により，とくに土木構造物ではアルカリ総量規制と混合セメントの使用が優先されることとなったが，実際の状況に大きな変化はない。さらに，“無害”な骨材を判定する試験方法そのものにも，遅延膨張性骨材や多数の岩石種の混合である川砂などでは適切に判定できないなどの問題がある。このような事情とは関係なく，わが国には非常に多くの種類の ASR 反応性骨材が存在し，全国的に分布する。そして，これらの反応性を示す岩石は，岩石学的試験によって認識できるにも関わらず，その手法は普及していない。ASR 抑制対策実施後の構造物では ASR が激減したとされるが，その真相についても，ASR 抑制対策実施後に発生した事例も参考に，岩石学的試験により明らかにすべきである。

岩石学的試験が行われる場合でも，わが国では，その意義の認識，手法，品質などに問題がある場合が多い。まず第一に，岩石学的試験とは骨材岩石を観察し，反応性鉱物の有無を確認することのみと考える誤解がある。しかし，現代の岩石学的試験は Katayama et al. [14),15),16)]などが確立した後述の方法により，骨材岩石の反応性のほか，岩石中の反応性鉱物が実際に反応して膨張を生じている現場確認，ASR ゲルの組成を分析することによる今後の膨張の予測，混和材の抑制効果の確認，などに幅広く対応するものである。このようなことも，わが国では十分に認識されず，現代においては適切ではなくなった旧態依然とした認識と手法が行われている場合がある [38]。

一方で，ASR の診断のみに関わらず，一般に，高度な精密機器が発達した現代においても，偏

光顕微鏡による観察に重点を置いた岩石学的試験に代えられるものはない。現象を的確に把握するためには，まず第一には肉眼やルーペ，偏光顕微鏡を含む光学顕微鏡などで全体像を捉える“観察”が不可欠であるが，これを時代遅れかのように考える無知から怠った結果として，核心を外した無意味な数値データが氾濫する事例が多く見られ，これは現代人の病でもある。このような状況下において，“よく見てよく考える”という，当然なことを行う岩石学的試験の価値は，今後もさらに高まっていくものと考えられるが，それを実施できる技術者が育たない状況もある。

### 1.2.2　わが国で発生した ASR 被害に関する既往の研究

わが国の実構造物に発生した ASR の被害が，地域や骨材岩石の情報とともに報告された最初の事例は 1951 年の近藤・北川による山形県の村山橋と長崎橋ならびに某港防波堤のケーソン内詰コンクリートに関するものであった。前者は最上川の砂利に含まれる頁岩・浮石によるもの，また後者の骨材は高砂の砂利と武庫川の砂であるが，海水に対する抵抗性を増すためにポゾランとして混合された唐津の火山灰と北海道産火山灰が粗粒すぎたため，皮肉にも ASR を発生したものであると報告された [17]。1965 年には村田・関・藤木が，皆生浜産の安山岩質粗骨材による鳥取県での被害事例を報告した [18]。1983 年，川村ほかは，実際のコンクリート構造物と製品に発生した ASR の 3 つの事例を紹介し，そのうち 2 つはガラスを含む古銅輝石安山岩の粗骨材によるもの，1 つはクリストバライトとトリディマイトを含む粗骨材によるものとした [39]。同じく 1983 年，福島・二村が，阪神地区において，輝石安山岩砕石による ASR の被害が広く発生していることを報告した [40]。この骨材について，森野は瀬戸内火山岩帯に属する斜方輝石安山岩であるとした [41]。これらに関連し，1982 年には阪神高速道路公団の管理する橋脚で古銅輝石(斜方輝石)安山岩による ASR の被害が発見されており，調査研究委員会が設置されていた [42]。このように，1983 年ごろからは，報道などで取り上げられたことも契機に，俄かに ASR の研究が活発に行われるようになったが，その内容は ASR の反応機構の解明や骨材の反応性の判定試験方法，ASR の抑制などに関するものが非常に多く，当時の研究者による指摘 [43]もあるように，わが国の広範囲における反応性骨材の分布や ASR の実際の発生状況の地域的な特徴について論じたものは，ほとんどなかった。ASR の被害が発生した地域と反応性骨材の実態に触れたものとしては，阪神地区のほかでは，広島を中心とする中国地方におけるチャート・粘板岩による ASR の疑いの報告 [44]，札幌近郊の安山岩砕石などの反応性を検討した研究 [45]，山陰地方での事例を検討したもの [46]などがわずかに見られる程度であった。また，建設省の調査には，ASR 劣化の疑いが濃いとされる構造物が瀬戸内海沿岸や北陸地方に多いように見えるが，詳細は明らかでない [47]。

一方，近年になって石川県や富山県，新潟県などの北陸地方においては，鳥居などにより安山岩を含む川砂利と安山岩砕石による鉄筋破断事例を含む深刻な ASR が多数報告され，砂利資源の河川水系別の反応性の特徴などを含め，その実態が明らかにされた [48),49),50)など]。また，チャートを含む骨材による ASR の明らかな被害は，1986 年には森野により報告されている [51)]が，その後，岩月・森野は愛知県での ASR の特徴として愛知県～岐阜県で採取されたチャートと珪質粘板岩を含む骨材による劣化構造物が県全域に分布することを示し [52),53)]，また東三河地域では片麻岩などの変成岩による劣化も報告されている [54)]ことの紹介を加えている。

ASR による実構造物の被害は，骨材を産出する地質状況すなわち，それぞれの地域に分布する反応性を持った特徴的な骨材岩石種と強く関係した現象であるが，国内で発生した ASR について，発生地域と背景となる反応性骨材を結びつけた系統的な研究は，前述のように阪神地区と北陸地方，東海地方のものにほぼ限定され，わが国で広く発生している ASR の実態や原因はその他の大半の地域で明らかにされていない。ASR の被害を公表することにより，責任問題や利害関係を含め，混乱を招く恐れがあるなどの事情は理解できるが，これらの失敗を今後の対策に活用して適切に対処するためには，発生した ASR について地域と反応性骨材，環境要因などの詳細

を示すことが非常に重要であるとともに，それを基に同様な反応性の高い岩石種の分布を知ることも非常に有益であり，これが本研究の目的の一つでもある。

## 1.3　本研究の目的

わが国には ASR 反応性を示す岩石が各地に広く分布することは，地質学・岩石学の見地から明らかなことであったが，土木・建築の分野において，コンクリート工学やセメント化学などの知識と総合して考察する姿勢に欠けていたため，わが国で発生する可能性のある ASR の予測と発生した ASR の診断が適切に行われた事例は限られている。そこで，本研究では，まず現代における適切な岩石学的試験の内容と得られる結果について示す。また，わが国で多く見られる反応性骨材の岩石学的な特徴を示すとともに，地質学・岩石学的な見地から，その分布状況を概説することにより，わが国に様々な反応性骨材が広く分布し，実際に ASR が発生していることを示す。

さらに，環境の異なる海外で発生した ASR についても，岩石学的試験は普遍的に適用可能であることを示す。

また，地域における反応性骨材の特徴と気候などの環境条件を考慮した場合に推奨される ASR 抑制対策について，北陸地方を例に岩石学的試験を取り入れた検証実験結果と見解を示す。

## 1.4　本論文の構成

本論文の題目は，「わが国の反応性骨材の地質学的な分布と岩石学的試験による骨材のアルカリシリカ反応性の判定に関する基礎的研究」である。本論文の構成を**図－1.1** に示す。論文は第 1 章から第 6 章までの 6 章で構成されている。各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では，本研究を行う背景として，岩石がコンクリート中で引き起こす ASR の診断や反応性評価において，わが国で適切に岩石学的試験が行われてこなかったこと，ならびにわが国で広く発生している ASR の実態や原因について，一部の地域を除いて明らかにされていないことなどの問題に触れ，本研究の目的と本論文の構成，各章の概要を述べる。

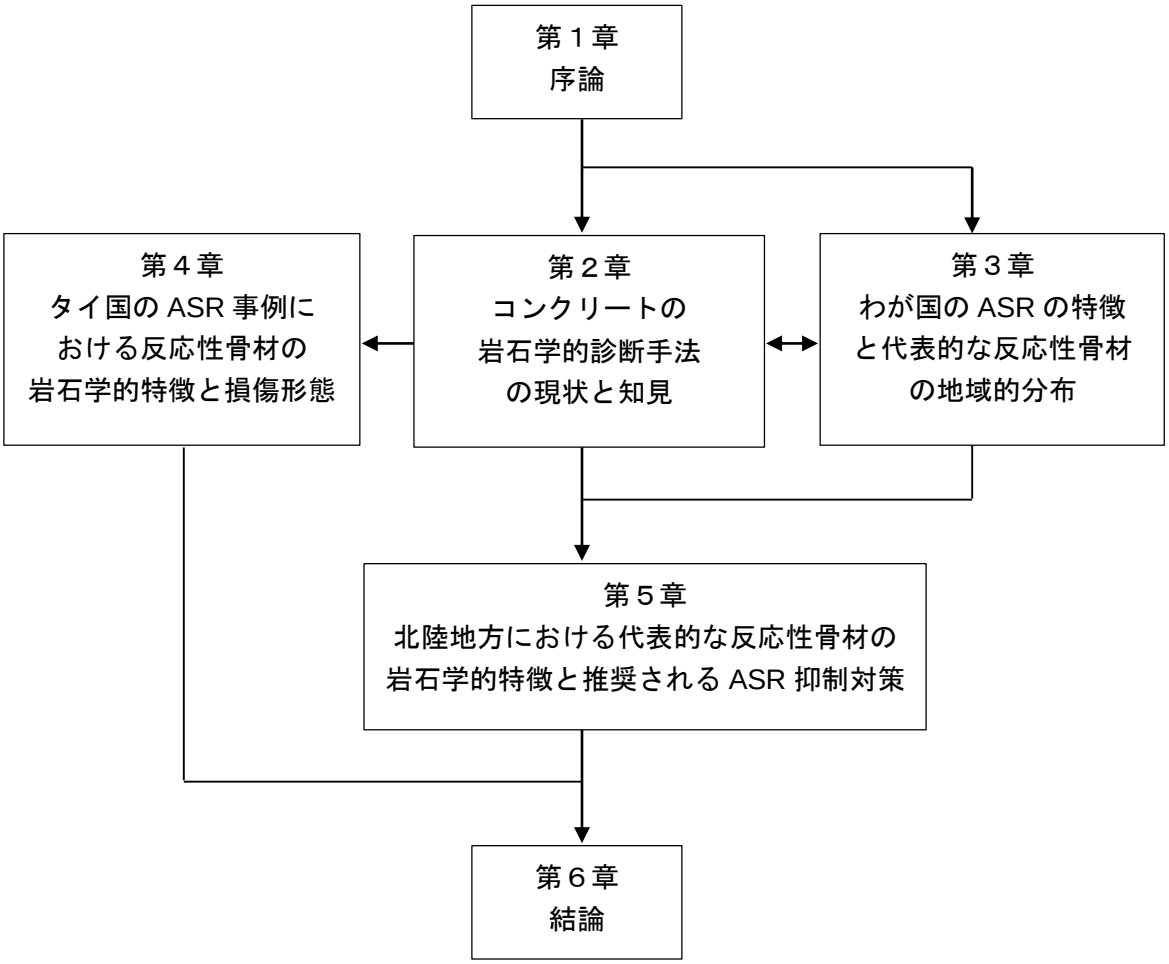
第 2 章「コンクリートの岩石学的診断手法の現状と知見」では，最近の岩石学的試験の手法の進歩にも関わらず，国内では旧態依然とした現在では不適切な手法による“岩石学的試験”も見られることから，Katayama et al.などによる最新の岩石学的試験の手法を示し，それにより得られる結果について述べる。

第 3 章「わが国の ASR の特徴と代表的な反応性骨材の地域的分布」では，これまでにわが国で ASR を発生してきた代表的な岩石を示し，その国内での分布と ASR の発生状況について，地域ごとに地質の概要とともに述べる。

第 4 章「タイ国の ASR 事例における反応性骨材の岩石学的特徴と損傷形態」では，これまで国内の ASR について主に述べてきたが，海外での事例としてタイ国の構造物に発生した劣化の岩石学的試験結果を示す。国内とは異なる反応性骨材の状況と ASR を促進する気候などの環境に注意が必要なことと，一方で適切な手法で行う岩石学的試験が普遍的に有効であることを示す。

第 5 章「北陸地方における代表的な反応性骨材の岩石学的特徴と推奨される ASR 抑制対策」では，ASR が顕在化している北陸地方の代表的な反応性骨材数種について岩石学的試験を行い，ASR については地域ごとに反応性骨材や環境が異なることを考慮したうえで，北陸地方で最適な ASR 抑制対策について言及し，その抑制効果の岩石学的試験を取り入れた検証結果を示す。

第 6 章「結論」では，本研究で得られた結論の総括と課題について述べる。


第１章
序論
第４章
タイ国の ASR 事例に
おける反応性骨材の
岩石学的特徴と損傷形態
第２章
コンクリートの
岩石学的診断手法
の現状と知見
第３章
わが国の ASR の特徴
と代表的な反応性骨材
の地域的分布
第５章
北陸地方における代表的な反応性骨材の
岩石学的特徴と推奨される ASR 抑制対策
第６章
結論

図－1.1　本論文の構成

**参考文献**


1) 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書 : 日本コンクリート工学協会，2008.
2) ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書：日本コンクリート工学会，2014.
3) Katayama, T. : How to identify carbonate rock reactions in concrete, Materials Characterization, Vol.53, pp.85-104, 2004.
4) Katayama, T. : Modern Petrography of Carbonate Aggregates in Concrete－Diagnosis of So-Called Alkali-Carbonate Reaction and Alkali-Silica Reaction, 8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Montreal, pp.423-444, May-Jun., 2006.
5) Katayama, T. : The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) – Its mineralogical and geological details, with special reference to ASR, Cement and Concrete Research, 40, pp.643-675, 2010.
6) 河村直哉, 川端雄一郎, 片山哲哉 : 岩石学的評価に基づいた空港コンクリート舗装の ASR 劣化事例解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1015-1020，2013.
7) 林建佑，山田一夫，河野克哉，大庭光商：プレストレストコンクリート橋で生じた ASR の劣化診断，土木学会第 64 回年次学術講演会，V-099，pp.195-196，2009.
8) 山田一夫，川端雄一郎，河野克哉，林建佑，広野真一：岩石学的考察を含んだ ASR 診断の現実と重要性，コンクリート構造物の補修・補強，アップグレード論文報告集，Vol.7，pp.21-28，2007.
9) ASTM C 295-03：Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete.
10) JCI-DD3 : 骨材に含まれる有害鉱物の判別（同定）方法（案），耐久性診断研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会.
11) JCI-DD4 : 有害鉱物の定量方法（案），耐久性診断研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会.
12) Godart, B., de Rooij, M. and Wood, J. (eds.): Guide to diagnosis and appraisal of AAR damage to concrete in structures, Part 1 Diagnosis (AAR 6.1), 91p., Springer, 2013.
13) 中野眞木郎：原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案，JNES-RE-レポート，2014.
14) Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S. and Hira, T. : Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol.53, nos.2-4, pp.105-122, 2004.
15) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., and Yamato, T. : Late-Expansive ASR due to Imported Sand and Local Aggregates in Okinawa Island, Southwestern Japan, Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Trondheim, Norway, pp.862-873, Jun.2008.
16) Katayama, T.: Late-expansive ASR in a 30-year old PC structure in Eastern Japan. Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Austin, Texas, USA. 10p. paper 030411-KATA-05, 2012.
17) 近藤泰夫, 北川欣一 : アルカリ骨材反応に関する研究, セメント技術年報, Vol.5, pp.379-398, 1951.
18) 村田清逸, 関慎吾, 藤木洋一 : アルカリ骨材反応を起こしたコンクリートの一例, セメント・コンクリート，No.220，pp.7-13，1965.
19) 有泉晶：コンクリート用骨材の問題点，粘土科学，Vol.19，No.2，pp.41-55，1979.
20) 枷場重正，川村満紀，竹本邦夫 : アルカリ・シリカ反応によるコンクリートの膨張特性と反応機構，セメント･コンクリート，No.408，pp.8-15，1981.

21) JIS A 5308-2014：レディーミクストコンクリート 附属書 B アルカリシリカ反応抑制対策の方法.
22) 建設省：「アルカリ骨材反応暫定対策」（土木構造物）及び「アルカリ骨材反応対策に関する暫定指針」（建築物），1986.
23) 大代武志：河川産骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁の維持管理に関する研究，金沢大学学位請求論文，2009.
24) Yamada, K., Hirono, S. and Miyagawa, T：New Findings of ASR Degradation in Japan, 13th International Congress on the Chemistry of Cement, No.589, CR-R 7pages, 2011.
25) 広野真一：岩石鉱物学的見地から見た国内のアルカリシリカ反応性骨材，コンクリートテクノ，Vol.30，No.11，pp.9-15，Nov. 2011.
26) 野村昌弘，青山實伸，平俊勝，鳥居和之：北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.3，pp.105-114，2002.
27) 野村昌弘：北陸地方におけるコンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する研究，金沢大学学位請求論文，2007.
28) JIS A 1145-2007：骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法），日本工業規格.
29) JIS A 1146-2007：骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法），日本工業規格.
30) 南善導，大代武志，野村昌弘，鳥居和之：骨材のアルカリシリカ反応性試験の判定結果の整合性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，2007.
31) 蟹谷真生，山戸博晃，広野真一，鳥居和之：遅延膨張型堆積岩系骨材のアルカリシリカ反応性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.959-964，2011.
32) 古賀裕久，百武壮，渡辺博志，脇坂安彦，西崎至，守屋進：野外に 23 年以上暴露したコンクリートの観察に基づく骨材の ASR 反応性の検討，土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4, pp.361-376，2013.
33) 上田洋，松田芳範，石橋忠良：アルカリ骨材反応の観点からみた骨材の現状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，pp.607-612，2001.
34) 尾花祥隆，鳥居和之：プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1065-1070，2008.
35) 広野真一，安藤陽子，山田一夫，鳥居和之：タイ国の高速道路で発見された熱帯地域における ASR の実態，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1084-1089，2014.
36) 森野奎二：アルカリ骨材反応の基礎シリーズ III アルカリ骨材反応の抑制対策と成果の現状，骨材資源，No.174，pp.90-104，2012.
37) 国土交通省通達：アルカリ骨材反応抑制対策について，別紙 1，2002.
38) 小林一輔，丸章夫，立松英信：アルカリ骨材反応の診断，森北出版，1991.
39) 川村満紀，竹本邦夫，枷場重正：わが国におけるアルカリ骨材反応の 2，3 の実例，セメント技術年報，Vol.37，pp.136-139，1983.
40) 福島正人，二村誠二：コンクリート砕石のアルカリ骨材反応性，セメント・コンクリート，No.438，1983.
41) 森野奎二：アルカリ反応性骨材の岩石学的考察，第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.241-244，1984.
42) 幸左賢二，小林和夫，白野弘明：反応性骨材コンクリートの調査と実験の概要，土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集，V-8，1984.
43) 渋谷長美，藤崎邦弥，山本博之，今立文雄，堀内しほう：アルカリ骨材反応に関する岩石学的特徴，骨材資源，No.64，pp.194-200，1985.
44) 草野守夫，小堀光憲，山田正貴，田澤榮一：チャートおよび粘板岩（広島産）のアルカリ骨材反応の可能性について，第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.125-128，1985.

45) 洪悦郎，鎌田英治，鈴木秀明，一戸康生：アルカリ反応性骨材の各種試験による特性評価，第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.153-156，1985.
46) 西林新蔵，矢村潔，林昭富：アルカリ骨材反応による被害例と骨材の特性，土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集，V-90，1985.
47) 桑原啓三，小林茂敏，平野勇，河野広隆：実構造物から採取した ASR コンクリートコアの特性，セメント技術年報，Vol.41，pp.423-426，1987.
48) 大代武志，平野貴宣，鳥居和之：富山県の反応性骨材と ASR 劣化構造物の特徴，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1251-1256，2007.
49) 鳥居和之，大代武志，山戸博晃，平野貴宣：石川県の反応性骨材と ASR 劣化構造物のデータベース化，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1017-1022，2008.
50) 野村昌弘，鳥居和之，青山實伸：北陸地方の河川産骨材を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価法の開発，材料，Vol.53，No.10，pp.1065-1070，2004.
51) 森野奎二：わが国のチャート質骨材のアルカリ骨材反応例，骨材資源，No.70，pp.63-73，1986.
52) 岩月栄治，森野奎二，後藤鉱蔵：チャート質骨材のアルカリ反応性と実構造物の劣化について，土木学会第 42 回年次学術講演会，V-194，pp.426-427，1987.
53) 岩月栄治，森野奎二：愛知県の ASR 劣化構造物と反応性骨材に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.999-1004，2008.
54) Katayama, T., Sarai, Y., Higashi, Y. and Honma, A.：Late-expansive alkali-silica reaction in the Ohnyu and Furikusa headwork structures, Central Japan, Proceeding of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1086-1094, 2004.

# 第２章　コンクリートの岩石学的診断手法の現状と知見

## 2.1　まえがき

ASR 診断における岩石学的試験の重要性については，多数の文献に説明されている[1),2),3)など]。何よりも，ASR は骨材岩石の反応であるので，それを理解して調べることを放棄しては，満足な ASR の診断ができるはずはない。しかし，岩石学的試験を行った場合でさえも，実施する試験機関や個人により，その方法が大きく異なり，このことが結果の内容と質に大いに反映されていることが明らかとなっている[3)]。したがって，質の高い岩石学的試験を行うためには，岩石・鉱物に十分な知識を持った者が，合理的・適切な方法で行うべきである。そこで，以下では現在の技術を用いた ASR の診断や分析の方法とその活用方法などについて，Katayama et al.が行った高度で研究的な内容の紹介も含めて述べる。これらは最新技術を用いた技術的に理想的な方法論であるので，費用や時間の制約もある個別の事例に対しては，必ずしもこれらの全てを行わなければ結果が得られないということではないが，この方法論に示される基本的な原理や考えかたを無視しては，現代の技術レベルに沿った適切な結果を得ることも技術の進歩もない。また，本章で解説する方法論は単に研究方法ではなく，ASR の診断技術として国内外で標準化されつつある内容でもある[4),5)]。本章の内容は，日本コンクリート工学会の研究委員会報告書[3)]に詳しく示されている。

## 2.2　方法論の概要

コンクリートコアなどの採取された試料を観察・分析するための，最新技術を用いた合理的・適切な方法として，ASR 診断フローを**図－2.1** に示す。これは，原子力用コンクリートに関して提案されたもの[4)]を引用したものであるが，原子力用のみではなく，コンクリート全般について適用すべきものである。したがって，本章では，この診断フローの各項目について，方法論とそれにより得られる情報（活用方法）などについて，研究的な内容も含めて，最近の診断・分析事例や論文など[3),6)]を参考に紹介する。

コンクリート試料を対象とした岩石学的試験方法は，ASR ゲルやひび割れの状況の把握に留まらず，反応生成物の生成現場と反応に関与した鉱物の特定，反応生成物による膨張ひび割れか，あるいはひび割れが先で生成物が充填したのか，またエトリンガイトの生成との関係，および他の有害鉱物（黄鉄鉱や濁沸石など）の有無とその影響なども含めて明らかにすることができる。さらに，SEM-EDS での分析では，ASR ゲルの組成からその変質過程や反応の進展段階の情報が得られるほか，使用セメントや混和材の分析からはアルカリ量や抑制効果などの様々な情報が得られる。このように，コンクリートの岩石学的評価は，その状態を判断するために不可欠であり，結果からは既設コンクリートの評価および今後の施工への重要な指針が得られることが期待される。

## 2.3　方法論の各説

以下では，採取されたコア試料を室内に持ち込んで，詳細な試験を行う方法と注意点などについて，**図－2.1** に基づいて解説する。

岩石学的試験はコアの詳細調査であり，その診断フローは段階 2 と段階 3 の 2 段階からなる構成となっている。段階 2 は，外観観察，岩石学的評価，岩石種構成の定量，SEM 観察／EDS 定量分析ならびに採取されたコンクリートコアの促進膨張試験などを行うことにより，ASR の発生や進行段階，反応した岩石・鉱物を特定する材料試験，段階 3 はコンクリートのアルカリ収支や混和材の抑制効果の検証により ASR の発生原因を特定し，ASR 抑制対策へフィードバックするための試験と位置づけられている。なお，ここに示されない段階 1 は，コア採取にいたる前段階の予備調査である。

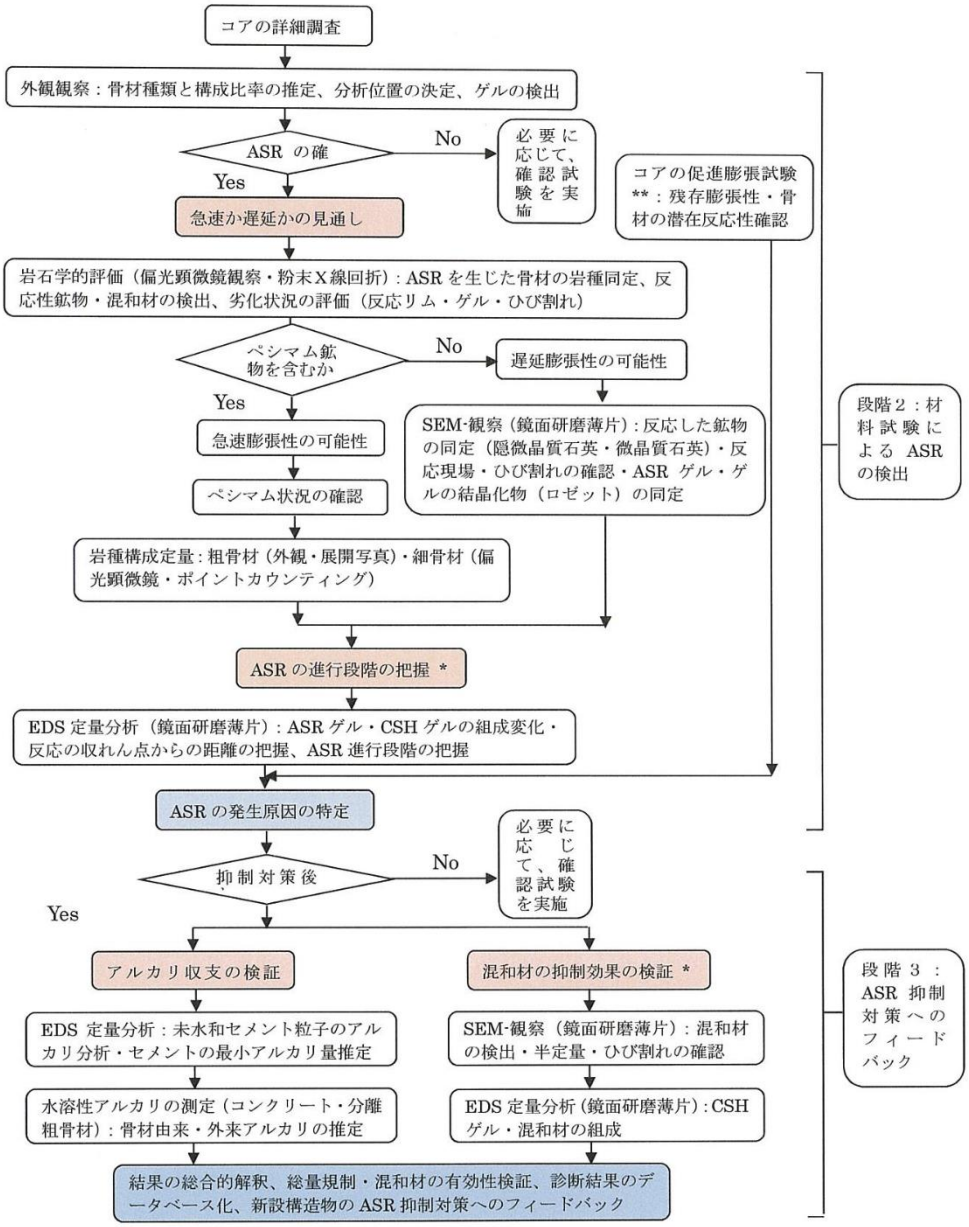



図 2.2（続き）　コンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）
* Katayama et al.（2004, 2008）、EDS:エネルギー分散型スペクトル分析装置
**Katayam et al.（2004）の方法（φ5cm×L13cm, 80℃ 1M NaOH 浸漬）、または JCI-DD2

**図－2.1　最新技術を用いた合理的で適切な ASR 診断フロー[4)]**

### 2.3.1　外観観察

外観観察はコア試料の全体像を把握するとともに，その後の詳細な観察・分析の方針決定や位置決定を行うものであり，極めて重要である。これにより，骨材の種類と構成比率の推定，ASR ゲルの分布（有無の推定），ひび割れ状況や生成物などの観察可能な全ての項目について，広く概観する。

（1）コア展開写真撮影とスケッチ

コア試料の室内観察では，コア側面の展開写真撮影（コアスキャニング）または透明なシートを用いた展開スケッチ（トレース）などによって，コア中の骨材の分布やひび割れ・空隙状況を記録する。また，変色域（炭酸化や風化，表面水の浸透状況など）の観察を行う。コアを縦方向，または横方向に切断した時も同様に可能な限りの断面観察を行い，必要であればひび割れ図などに記録する。

その上で，ルーペや双眼実体顕微鏡などでの観察に移行するとともに，この段階で薄片作製箇所の予察的検討を行う。なお，ASR ゲルの乾燥や変質を防ぐため，観察時以外はラップなどで包んだ状態で保管するとよい。

a）コアスキャニング

コアスキャナーにより，コア試料の側面の全周 360°を連続的に記録する（コアスキャナーは市販されていないので，自作や特注などを検討する必要がある）。なお，コア側面の展開写真は，一般的なカラーコピー機のガラス面にコア試料を置き，走査線のスキャン速度に合わせてコアを上手に回転させることでも撮影が可能である。これにより，骨材の粒径や形状，岩石種の外観，反応リムや骨材粒子の周囲に滲出して白色・濡れ色に見える ASR ゲルの分布，ひび割れの状況などを網羅的に記録することができる。

b）ひび割れ図

コア試料を長軸方向に切断し，切断面におけるひび割れの分布とひび割れ幅(mm)を示すひび割れ図を作成する。また，切断面に表れたひび割れとともに骨材の形状や岩石種，ASR などによる変状を写真やスキャナーなどにより記録して重ねることもできる。

コアにおけるひび割れなどの劣化状況の概要と岩石種，骨材の割れや ASR ゲルの滲出などの ASR の概要などを記録することができる。

（2）肉眼＋実体顕微鏡観察

ASR の診断のみにかかわらず，肉眼と実体顕微鏡下での観察は極めて重要である。これにより，粗骨材や細骨材の種類・岩石種構成と ASR などによる劣化の進行状況，などの概要を認識し，その後の分析方針と偏光顕微鏡観察などを行う位置を決定する。

コア試料などの切断面や側面，破断面を肉眼や実体顕微鏡下で観察し，ASR などの現象（反応リム，ひび割れ，ASR ゲルの滲み出し，ひび割れや空隙への ASR ゲルの充填など）の有無や程度を観察する。反応を生じているのは粗骨材なのか，細骨材なのか，また何の岩石種にどの程度の反応が発生しているのか，などの概要を確認し，詳細な偏光顕微鏡観察を行う位置を決定する。偏光顕微鏡観察は少なくともコンクリートの ASR に最も寄与している代表的な岩石種などについて行う必要がある。ASR は反応性の骨材粒子に発生し，その影響がセメントペーストへと拡大していく現象である。したがって，反応の有無と進行の程度や状況を観察するために，反応した骨材粒子と周囲のセメントペーストなどを含む適切な位置でコンクリート薄片を作製しなければ，その後の観察をどんなに詳細に行ったとしても意味のないものとなる。肉眼＋実体顕微鏡観察と薄片作製位置の検討は極めて重要である。

a）注意点

通常は，コア試料の切断前にエポキシ樹脂を含浸させ，硬化後に切断するのが望ましい。コンクリートの切断などの際に，ひび割れ中の ASR ゲルが失われることがあるからである。とくに処理工程時に使用する水によって，ひび割れ中の脆い物質が溶かされる可能性もあるので注意が必要である。かつて，ASR ゲルのないひび割れはアルカリ炭酸塩反応（ACR）の影響を受けたコンクリートの特徴であるとされ，ACR の本質が誤認されてきた例もある。炭酸塩岩骨材を使用したコンクリートにも，実際には ASR ゲルが充填したひび割れは卓越する。またドロマイト質骨材中に多く形成するマグネシウムシリケートゲルは組織が小さいため，実体顕微鏡下では見逃す可能性が高い。なお，脱ドロマイト化作用（dedolomitization）は膨張ひび割れを発せず，膨張とひび割れは炭酸塩岩中の隠微晶質石英に起因する ASR であることが確認されている。

（3）分析位置の決定（鏡面研磨薄片の切り出し箇所の選定）

肉眼やルーペ，実体顕微鏡を使用した観察によって，最も反応した骨材粒子と周囲のセメントペーストを含む箇所で，ひび割れや反応生成物の充填箇所を重点的に薄片作製箇所として選定する。また，粗骨材と細骨材中の反応性鉱物を明らかにするためには，粗骨材の部分と細骨材が含まれるモルタル部分を選定する。粗骨材が砂利である場合，その岩石種は多くなるため，一般に必要な薄片数は増える。なお，粗骨材の薄片を作製する場合についても，反応リムの確認や膨張ひび割れのセメントペーストへの進展状況などを明らかにするため，必ず骨材周囲のセメントペーストなどを含めたコンクリート薄片として作製する。

以上の薄片作製箇所の選定部分は，後から切り出し箇所の確認が可能となるように，写真やスケッチなどに残しておくとよい。

（4）薄片作製

岩石薄片は一般に大きさ 20mm×30mm 程度，厚さ 20～30μm 程度であるが，ASR の観察では反応性鉱物や反応生成物が非常に微細であるため，薄片の厚さ内で微細な鉱物や生成物が重なると明瞭な像が得られない。したがって，薄片は一般に厚さ 15～20μm 程度の薄目に作製するのが望ましい。とくに骨材中のクリストバライト，トリディマイト，隠微晶質～微晶質石英の微細な組織や ASR ゲルに充填されたひび割れは，厚い薄片では鑑定しづらい。また，黄鉄鉱などの不透明鉱物を反射光で確認する場合があることや，同じ薄片試料を SEM-EDS や EPMA で観察，分析する場合もあることから，カバーグラスを使用せず，ダイヤモンドペーストで表面研磨して仕上げる（鏡面研磨薄片）。

また，ひび割れなどに存在する軟質物質がとくに脱落しやすい傾向があるため，薄片作製時には注意が必要である。薄片作製の前処理の注意点としては，たとえばひび割れの入ったコンクリートに対し，補強するための低粘性エポキシ樹脂の切断前での注入や，切断時に冷却用の非極性溶剤を使用することなどである。

コンクリートの研磨試料をスライドグラスに張り付ける際は，エポキシ樹脂を使用する。この時，セメントペーストの収縮ひび割れ，エトリンガイトの光学性やその他の加熱による変化を防ぐため，低温（約 40℃程度以下）で接着する。なお，紫外線硬化樹脂は硫黄を多量に含み，分析値に与える影響が大きいため避ける。また，試料の切断，研磨，洗浄時における ASR ゲルやその他の水溶性物質の溶解などには注意する。近年，EPMA による分析試料では，アルカリなどを溶脱させる可能性のある極性溶剤を避ける傾向にある。国内では標準的な研磨では灯油が，洗浄には 2-プロパノール（イソプロパノール）が使用されている。メタノールは極性溶媒であるが，Durand and Berard が研磨用潤滑剤として使用したところ，Katayama によると ASR ゲルからのアルカリ溶脱はなかったようである。アセトンはエポキシ樹脂の薄い表面を犯す可能性がある。一

般に, アルカリなどの表面からの溶脱を抑制するために, 切断から研削を通して非極性冷却液（流動パラフィンなど）を潤滑油に使うのが望ましい。

カバーグラスを使用しないコンクリートの研磨薄片は，真空保管が原則である。空気中に晒されていた場合, 未水和セメント粒子やセメント水和物（エーライト, ビーライト, CSH ゲルなど）がカルシウム炭酸塩，シリカゲル，低カルシウム CSH ゲルに分解される。とくにアルカリに富む ASR ゲルは炭酸化しやすい傾向にある。変質した研磨薄片は，表面を研磨してもすでに内部まで変質している。真空デシケータで保管し，移動時にはポリエチレンの封筒に入れ，プラスチックケースに入れるなどの配慮が必要である。それでも，NaOH 溶液に浸漬したモルタル/コンクリートバーの薄片では，真空デシケータから度々移動させると，ナトリウムに富んだ相の潮解や炭酸塩を生成し，これによりチャージアップが発生する。一方，試料中に付着水が多い場合は，長期間の真空引きにより表面に水分が吸い出され，かえって観察に支障を来たす場合がある。一般に蒸着やサンプル保管などの真空過程が水和物に与える影響は, たとえばエトリンガイトの脱水などの限定的なものであるが，連続排気や SEM-EDS 分析中の電子ビームによる加熱は ASR ゲルや CSH ゲルの脱水を促進させ，その結果，蒸着した表面の乾燥収縮ひび割れや部分的なチャージアップ現象を促進させることがある。以上のように，鏡面研磨薄片に対しては，変質を防ぐために真空保管が望ましい。

### 2.3.2　岩石学的評価

わが国では岩石学的試験について，骨材岩石に含まれる反応性鉱物などの構成鉱物を確認し，その反応性を評価することのみと考えられていることがあるが，これは誤りである。岩石学的評価は岩石・鉱物学的な手法と見解に裏付けられた評価であって，骨材岩石の反応性評価のほか，コンクリート薄片により，反応性骨材粒子が実際に ASR ゲルを生成し，膨張ひび割れを発生している状態などを観察し，その劣化原因と劣化程度を特定するものである。岩石学者が岩石を観察し，その生成過程を詳細に読み取るように，コンクリートを観察することにより，その劣化原因と劣化の過程を読み取ることができる。ASR の観察においては，骨材粒子から生じた ASR ゲルを伴う膨張ひび割れを観察することにより，反応した骨材岩石・反応性鉱物（原因）と膨張による劣化の程度（結果）を直接的に結び付けて捉えることができる。偏光顕微鏡観察，SEM 観察，粉末X線回折などの手段が含まれる。

（1）偏光顕微鏡観察

偏光顕微鏡下での薄片観察では骨材の岩石種や構成鉱物（ASR 反応性鉱物），セメントの種類（フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材の有無），気泡や空隙などのコンクリートの構成要素とともに，ASR の発生状況を確認する。

ASR の発生状況は，i ）骨材の反応リムの形成，ii ）骨材周辺の ASR ゲルの取り巻き，iii ）骨材粒子内の膨張ひび割れの形成と ASR ゲルの充填，iv ）骨材を取り巻くセメントペーストへの膨張ひび割れの進展と ASR ゲル充填, v ）骨材から離れたセメントペーストの気泡内への ASR ゲルの浸入，の有無と発生頻度（密度）に着目する。これらの状態は，コンクリート中の岩石種と骨材の種類（粗骨材・細骨材）ごとに観察する。なお，反応リムは骨材周縁部の視覚的な変質（変色）であるので，骨材の種類（遅延膨張性骨材やアルカリ炭酸塩反応性骨材の一部）や，もともとの色調によっては認識されない（生じない）こともあり，また劣化原因ともならない。

偏光顕微鏡下では，その他にセメントペーストの水和や炭酸化などの状態，使用セメントの品質，その他の劣化，など得られる情報は多く，観察項目は限定されるものではない。

細骨材の岩石種構成を定量的に求める場合は, 偏光顕微鏡下でポイントカウンティングを行う。

a）ASR の進行ステージ [7),8),9)]

ASR の進行程度は偏光顕微鏡下での薄片観察で決定し，野外の構造物の被害と対応させる。以下の偏光顕微鏡下での ASR の劣化の分類は Katayama et al. [7),8),9)]が用いたものであり，単純明快でありながら，構造物の劣化ともよく対応する。

ASR による劣化は，i ）骨材の反応リムの形成 →ii ）骨材周辺の ASR ゾル・ASR ゲルの取り巻き →iii ）骨材内のひび割れ形成・ASR ゲル充填 →iv ）骨材を取り巻くセメントペーストへのひび割れ進展・ASR ゲル充填 →v ）骨材から離れたセメントペーストの気泡内への ASR ゲルの浸入，の順序で進行する。このような点に着目して進行段階を分類する。次に，進行段階の分類に基づき，劣化度を考察する。例えば，3 段階（軽微・中程度・顕著）で推定するのであれば，骨材に初期の反応（反応リム・ASR ゲルの取り巻き）のみが主に認められる場合には軽微（潜伏期），ひび割れが多数の骨材内に生じたものや，骨材からセメントペーストに向かって進展し，コンクリートに劣化を生じたことを意味する場合は中程度（進展期・加速期），さらに反応が進行し，ひび割れに沿った気泡内への ASR ゲルの浸入が頻繁に見られる場合は顕著（加速期・劣化期），などと劣化度を分類する。ただし，これらの対応関係は固定的なものではなく，実際にはケースバイケースで判断する必要がある。

偏光顕微鏡下では，一般に採用されている外観目視による構造物の劣化進行度の評価とは異なり，構造物表面に劣化（ひび割れ）が現れる前の段階から反応の状態を評価できるという利点がある。

b）注意点

全般：偏光顕微鏡による薄片観察は，試料中の反応性鉱物と ASR ゲル，膨張ひび割れとの関係を明らかにすることが重要である。とくに，反応を生じた骨材からセメントペーストに向かって，膨張ひび割れが生じているか，反応生成物は骨材中またはセメントペースト中のひび割れや気泡の内部にまで存在するのか，ひび割れの程度（密度や幅）・反応の進行状況，反応した骨材・鉱物は何かなどを観察する。観察の項目として，コンクリート全体の組織と骨材，セメントペーストなどとの関係，骨材の岩石種，反応生成物（反応リム，ASR ゲル，ACR の炭酸塩ハロー），膨張ひび割れ，水和生成物（ひび割れ中，空隙，骨材－セメントペーストの界面），セメントペーストの炭酸化，などが挙げられる。

骨材：岩石種と特徴，反応性鉱物の有無と産状など（微晶質／隠微晶質石英，カルセドニー，クリストバライト，トリディマイト，オパール，火山ガラス），ASR ゲルの生成現場，またひび割れや ASR ゲルと反応性鉱物との関係を観察する。反応性鉱物について，岩石種毎に注目すべき観察視点が異なる。火山岩の場合，反応性鉱物が主にクリストバライト，トリディマイト，火山ガラスであり，急速膨張性である場合が多い。岩石が未変質の場合，クリストバライトやトリディマイトは結晶粒間に微細な結晶として見出される。判別が困難な場合は粉末Ｘ線回折を併用する意味がある。岩石が変質している場合は，初生的なクリストバライトやトリディマイトが消失している場合と，新たに変質作用による低温型クリストバライトやトリディマイトが生成している場合とがあるので，注意が必要である。火山ガラスは一般にシリカに富む流紋岩質～安山岩質の場合，反応性が高いとされるが，玄武岩質ガラスでも ASR が認められることがあるので注意が必要である。なお，火山ガラスは $SiO_2$ 含有量により，玄武岩質（53wt.%未満），安山岩質（53～63wt.%），デイサイト質（63～70wt.%），流紋岩質（70wt.%以上）のように分類する。偏光顕微鏡下では，$SiO_2$ に富む火山ガラスは無色透明で屈折率が低いのに対し，$SiO_2$ にやや乏しく，Mg や Fe に富む火山ガラスは褐色を帯びる傾向にある。

堆積岩の場合は，含まれる微晶質～隠微晶質石英が通常は反応性鉱物で，一般には遅延膨張性である。砂岩，泥質岩（頁岩などを含む），チャートなどで，とくに注意が必要である。これら

の岩石中の微晶質～隠微晶質石英は，初生的な石英粒子のほか，続成作用や変質作用によって生成した石英の場合もある。微晶質～隠微晶質石英は偏光顕微鏡で観察されるが，鉱物粒子が密着して極めて微細な場合は SEM-EDS での確認が必要な場合もある。これらの石英は遅延膨張性 ASR の原因となる。一方，変質作用により堆積岩中にクリストバライトやトリディマイトが生成することもある。とくに，プランクトン由来の非晶質シリカ（オパール-A とも）からクリストバライトやトリディマイトに変化，またはその過程にあるものがあり（オパール-CT とも），この場合は火山岩中のクリストバライトやトリディマイトと同様に急速膨張性を示す。

変成岩の場合も，含まれる微晶質～隠微晶質石英が反応性鉱物となる。とくに，チャート，泥質岩，砂質岩を原岩とする比較的変成度の低い広域変成岩やホルンフェルスなどに多量に含まれる場合が多く，遅延膨張性 ASR の原因となる。

炭酸塩岩の場合は，屈折率と複屈折の高い炭酸塩鉱物の粒間に含まれる微細な鉱物の確認が，偏光顕微鏡下では非常に難しい場合がある。このことが，長年の ACR の誤認原因の一つでもあった。ドロマイトを含む場合，ACR による脱ドロマイト化作用が進行し，その生成物としてのブルーサイト，炭酸塩ハロー，マグネシウムシリケートゲルを確認するとともに，ブルーサイトと二次的方解石の斑点状集合体，ドロマイト結晶の仮像に留意する。脱ドロマイト化作用では膨張ひび割れが生じないため，ASR の観察では隠微晶質石英などのシリカ鉱物の有無を詳細に確認する。ただし，炭酸塩岩中のこれらの生成物は非常に微細であり，通常は SEM-EDS での確認が必要となる。

その他：透過光と反射光の切り替えが可能な偏光顕微鏡が推奨される。反射光では，黄鉄鉱などの不透明鉱物の識別，微細なひび割れ充填物の確認，試料の研磨や保管の影響などの状態確認，さらに SEM-EDS の分析点（エーライト，ビーライトなどを含む未水和セメント粒子や ASR ゲル，CSH ゲルなど）の選定も行う。

細骨材の岩石種構成定量のためのモード測定は偏光顕微鏡下で行う。なお，粗骨材の岩石種構成割合については，肉眼+実体顕微鏡観察時に行うが，岩石種の最終決定は偏光顕微鏡下で行う。

（2）粉末X線回折

骨材中の反応性鉱物とセメントペースト中の生成物などの同定を目的とする。分析試料は，薄片作製時に切り出した対の試料を使用するとよい。骨材は岩石種ごとに測定する。セメントペースト中の生成物などを分析する場合は，粗粉砕後に目開き 0.15mm 程度のふるいに残留するものとして，硬く粉砕されづらい骨材をできるだけ除去したものについて，めのう乳鉢で微粉化する。この分析により，セメント水和物の二次変質，コンクリート中に侵入した硫酸塩や塩化物，反応生成物などの同定を行う。

炭酸塩岩中の石英や火山岩中のクリストバライトの有無が微量で判断しづらい場合，重複するピークをもつ鉱物を薬品で溶解・除去した上で測定を行うこともできる。炭酸塩岩では塩酸を使用して炭酸塩鉱物を除去し，残渣を分析する。なお，塩酸処理法は変質した火山岩などで実施すると，骨材中の粘土鉱物のうち，緑泥石とカオリン鉱物の判別が可能である。

一方，火山岩中の少量のクリストバライトの有無を確認するために，ピークの重なる斜長石などを分解する場合は，リン酸処理法（JCAS I-2(1996)）を用いる。

a）注意点

骨材中に含まれる ASR 反応性鉱物を同定するために，粉末X線回折がしばしば行われる。しかし，粉末X線回折で同定できる反応性鉱物はクリストバライトとトリディマイトのみであり，それを含むのは通常は急速膨張性の火山岩の一部に限られている。最近，わが国でも多く見られるようになった，チャート・珪質頁岩・ホルンフェルス・泥質片岩などによる遅延膨張性の ASR

の反応性鉱物は隠微晶質石英・微晶質石英・カルセドニーなどの石英であるが，これは粉末X線回折では反応性のない粗粒な石英と区別がつかない。また，粉末X線回折で反応性鉱物が同定されたとしても，それが実際に反応して膨張を引き起こしているかどうかはわからない。粉末X線回折は，このような点を認識したうえで行えば，有意義なデータとなる場合がある。

### 2.3.3　岩石種構成の定量

粗骨材または細骨材の岩石種構成は，コンクリートコアの側面や切断面または薄片中における面積割合として求める。岩石種構成を求めることにより，反応性岩石種による ASR の発生やペシマム現象などについての検討が可能となる。

粗骨材の岩石種構成を求める方法には，ポイントカウンティングや線積分法などがある。細骨材の岩石種構成は，一般に薄片中でのポイントカウンティングにより求められる。

（1）ポイントカウンティング

粗骨材の岩石種構成を求める場合は，コンクリートコア試料の側面または切断面に適当な間隔（例えば 5mm）の方眼をかけ，交点上の岩石種を種類別に数える。次に，計測した総数に対する種類別の計測数から構成割合を求める。作業は展開写真上などで行ってもよい。

細骨材についても同様に，薄片試料上に適当な間隔（例えば 0.5mm）の方眼をかけ，交点上の岩石や鉱物を種類別に数え，計測した総数に対する種類別の計測数から構成割合を求める。なお，細かな細骨材の岩石種や鉱物の識別は偏光顕微鏡下で行う必要があるため，実際には“メカニカル・ステージ”を使用し，一定間隔（例えば 0.5mm）で薄片試料を移動しながら，顕微鏡の視野に設置された十字線の交点の直下にきた岩石や鉱物を数えることになる。

岩石種構成定量の際に推奨される測定総数（精度と測定数との関係）などは，RILEM AAR-1.1(2014)などを参照のこと [10]。

（2）線積分法

コンクリートコア試料の側面または切断面に等間隔（例えば 5mm）の直線を引き，各岩石種ごとに，この線と交わる長さを積算，岩石種ごとの積算長さを積算合計で除して構成割合を求める。

### 2.3.4　SEM 観察／EDS 定量分析（SEM-EDS）

微細なひび割れに伴われる ASR ゲルの同定や，ASR ゲルの発生現場を観察してコンクリート中で実際に溶解しつつある反応性鉱物を特定する場合などで，偏光顕微鏡下での確認が難しい微細な領域を観察・分析するために，偏光顕微鏡観察に使用した鏡面研磨薄片について，SEM 観察と EDS 定量分析を行う。また，ASR ゲルの組成を詳細に分析することによる ASR の発生～終息の過程における現段階の推定や，残存する未水和セメントの分析による使用セメントのアルカリ量の見積りのほか，混和材が使用されていた場合はその抑制効果の検証なども可能である。

（1）注意点

EDS 分析では，通常，酸素と水素は測定・定量計算しないこと（つまり含水鉱物の水の成分は測定されない）と多孔質であるため，ASR ゲルや CSH ゲルは分析値の合計が 100%にならない。分析装置のソフトウエアが測定結果を 100%に換算して自動表示する場合もあるが，100%に満たない合計値であること自体に意味があるので，安易に 100%換算しない。ASR ゲルや CSH ゲルの分析結果は，[Ca/Si]-[Ca]/[Na+K]図または Ca/(Na+K)図，Si-Mg-Ca 三角ダイヤグラムなどにプロットし，ASR の状態や炭酸化の状態などを明らかにする。面分析により元素ごとの濃度分布を示し，反応の状態などを明らかにすることもできる。

なお，EPMA(WDS)を使用する場合もある。EPMA の特徴として，SEM に比較して桁違いに多

い電流量を照射でき，高精度・高速分析ができる。しかし，かつて推奨されていたように 15kV，100nA というような条件は ASR ゲルや CSH ゲルには明らかに過大であり，試料へ著しい損傷を与え，定量値に影響があるので，影響度を使用装置により確認しておく必要がある。EPMA を使用する場合，15kV，10nA，ビームサイズ 2μm 以上で，アルカリを測定する場合は測定時間を短くするなどの配慮が必要である。

（2）ASR ゲルの生涯と組成線 [11)]

鏡面研磨薄片を使用し，ASR ゲルと CSH ゲルの組成変化を分析することにより，ASR の現在の過程を検討することができる。ASR ゲルの組成は，コンクリート中での位置，ASR の進展ステージ，コンクリートの置かれた環境を反映している。SEM-EDS 分析により ASR ゲルの組成の分布を検討し，ASR の過程（反応性骨材からセメントペーストへの ASR ゲルの移動）を明らかにできる可能性を Katayama が示している [11)など]。

セメント粒子に含まれるカルシウムシリケートであるエーライトとビーライトは水和して CSH ゲルになるが，化学的にはカルシウムを放出し，最終的には一定の[Ca]/[Si]比をもった水和物となる。一方で，ASR ゲルは膨張ひび割れに沿って反応性骨材粒子から周囲のセメントペーストに移動し，その過程でアルカリを放出，セメントペーストからはカルシウムを吸収し，組成は CSH ゲルに近づいていく。このようにして，ASR の進行したステージでは，コンクリート中の ASR ゲルと CSH ゲルは，最終的には平衡状態に到達する [12)]。

SEM-EDS または EPMA（WDS）で分析した ASR ゲルの組成を[Ca]/[Si]－[Ca]/[Na+K] 組成図に落とすと，ASR ゲルと CSH ゲルの様々な状態を組成線と線上での分布により説明できる。この図上では ASR ゲルと CSH ゲルの組成線の延長上の交点によって，“収斂点（Convergent point：**図－2.2** 参照）”が表される。骨材粒子内のひび割れを充填する ASR ゲルはセメントペーストのひび割れを充填するものよりもアルカリに富む。反応した骨材粒子から遠く離れた気泡を充填する ASR ゲルはカルシウム含有量が最も高い。ASR ゲルの組成線の形（傾き，範囲）は，ASR ゲルの位置，ASR の進行ステージ，風化変質の程度，コンクリートの置かれた環境を反映し，コンクリートの潜在的な残存膨張を暗示する。

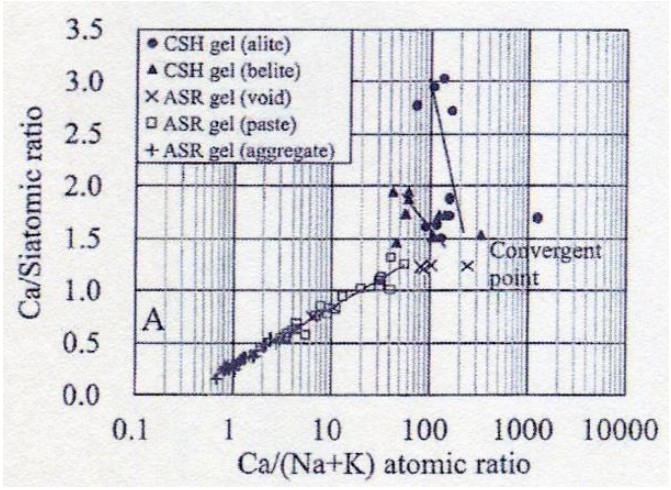
ASR ゲルの組成変化に，3 つの進化型がある。すなわち，I 型，II 型，III 型の進化型であり，これには骨材岩石種の違いは影響しない [13)]。この分類には，骨材中のひび割れを充填する ASR ゲルの組成線の形を用いる。I 型は ASR ゲルの 1 本の組成線で表され，この線上で[Ca]/[Si]比が[Ca]/[Na+K]比とともに着実に増加する（**図－2.2**）。これは膨張が進行中で，ASR のステージとしては前期から中期のコンクリートに最も普通に見られる。例えば，急速膨張性の安山岩骨材による ASR で風化変質の少ない日本のコンクリートの場合に，ASR ゲルは[Ca]/[Si]－[Ca]/[Na+K]組成図上で典型的は I 型を示す。骨材内のひび割れを充填する ASR ゲルは，アルカリに富み，[Ca]/[Si]比<0.4 にデータのほとんどが集中し，図の左下の領域を占める（低[Ca]/[Si]比かつ低[Ca]/[Na+K]比）。ASR ゲルは骨材からセメントペーストへ，さらに気泡への移動に伴い，単純に，カルシウムに富み，アルカリに乏しくなる。ASR ゲルは新鮮で炭酸化もなく，風化による溶脱の痕跡もほとんどない。ひび割れに沿って，反応性骨材内から単に移動している状況を示す。ASR を生じた構造物から採取したコンクリートコアを高湿度の容器に保管（40℃，6 カ月）した場合，アルカリに富み，カルシウム含有量の低い ASR ゲルが骨材粒子内に多いコンクリートで大きな残存膨張が観察された。Rodrigues et al. は，モルタルバーの膨張と ASR ゲルの[Ca]/[Si]比には相関があり，低[Ca]/[Si]比（<1.0）の ASR ゲルは大きな膨張（0.1%以上）をもたらすことを報告した [14)]。これらの背景に基づくと，コンクリートの潜在的な膨張性は主に ASR ゲルの組成に関係している。したがって，このような風化変質の少ない ASR 劣化コンクリートは大きな膨張力を残している。

II 型は ASR ゲルの複数の平行な組成線で特徴づけられる（**図－2.3**）。これは，ひび割れの壁

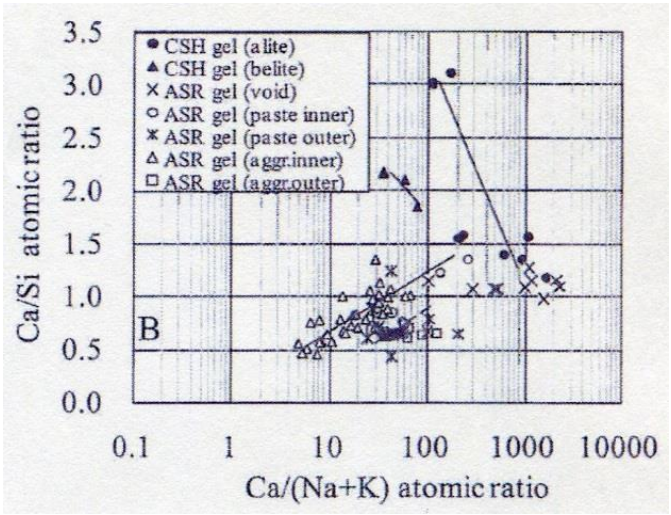
面に接した非常に風化変質した ASR ゲルと，それとは生成時期の異なる比較的新鮮な ASR ゲルの存在を示し，コンクリート中に発生時期と変質過程の異なる ASR ゲルが共存していることを反映している。この場合，おそらく ASR は中期から後期ステージにあり，ASR ゲルの膨張性は比較的小さい。この進化型は比較的まれであるが，ニューファンドランドの ASR を生じたコンクリートとカナダ･オンタリオの ACR を生じたコンクリートの表面から比較的浅い部分（<5cm）に確認された [6]。例えば，ニューファンドランドの風化の進行したコンクリートは，遅延膨張性の ASR とともに，大きく開いたひび割れに沿って風化変質と溶脱を受けているが，反応した骨材からセメントペーストへ繋がる同じひび割れの中に，何層にも重なった ASR ゲルが含まれる（**図－2.3** の“inner”と“outer”）。日本の風化の少ないコンクリート（**図－2.2**）と比較すると[Ca]/[Si]－[Ca]/[Na+K] 組成図上で，低[Ca]/[Si]比で高[Ca]/[Na+K]比の領域にある。遅れて発生したひび割れ内側の新しい ASR ゲルは骨材内で主系列の組成線を形成している（**図－2.3** の“aggr. inner”）。一方，先に発生していた外側の古い ASR ゲルはひび割れの壁に接していて，光学的等方性のゲル様の特徴を持ち，主系列の組成線より低[Ca]/[Si]比の領域で広範囲に分散して並走する。外側の ASR ゲルは骨材周囲でも内部でも組成が変化せず，アルカリが顕著に溶脱したことを示す。アルカリが顕著に低く，[Ca]/[Si]比は概して高い（[Ca]/[Si]>0.5）ASR ゲルと，CSH ゲルの中間的な組成とから，ASR は中期ステージにあると考えられる。

III 型は屈曲した ASR ゲルの組成線（**図－2.4**）で示される。劣化と風化変質が顕著に進行した野外のコンクリート中で，ASR と凍結･融解，炭酸化の複合劣化を受けた表面から浅い部分（<5-7cm）に主に現れる。屈曲は[Ca]/[Si]=1.0～1.2，また[Ca]/[Na+K]=100 付近に位置し，図上でここを右に超えると組成線は水平に変化し[Ca]/[Si]比は一定となる [13]。これは ASR がさらに後期のステージにあることを示唆する。

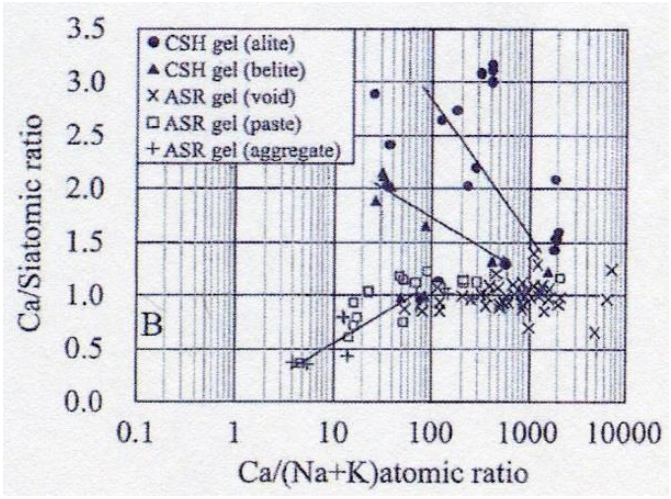
このように，Katayama は ASR ゲルの組成がコンクリート中での位置，ASR の進展ステージ，環境などを反映していることを示した。また，ASR ゲルの組成を[Ca]/[Si]－[Ca]/[Na+K] 組成図上で検討することにより，コンクリートの今後の膨張性を評価できる可能性があることを示した。今後は構造物のモニタリングと併せたさらなる研究が必要である。促進膨張試験による“残存膨張量”がしばしば測定されているが，過酷な環境で反応を促進した結果の解釈は不明であり，骨材の潜在反応性を評価しているにすぎない場合もある。これに対し，ASR ゲルの組成は ASR の現状と現在までの過程を物語っており，残存膨張量の推定へ向けた研究が期待される。




図－2. 2　ASR ゲルの I 型進化 [11)]




図－2. 3　ASR ゲルの II 型進化 [11)]



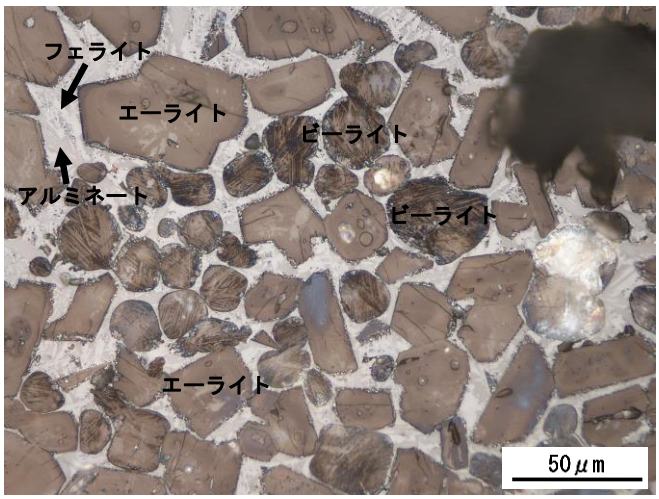

図－2. 4　ASR ゲルの III 型進化 [11)]

（3）セメントの最小アルカリ量推定とアルカリ収支の検証 [7)]

コンクリートに含まれるアルカリについて，セメントと骨材，凍結防止剤などのそれぞれからもたらされた量を区別する方法を，Katayama et al. が北陸地方で行った調査 [7)]を例に説明する。これにより，コンクリートのアルカリ量が高まった原因を検討することができる。

未水和セメントを反射/偏光顕微鏡下で特定し，コンクリート中に当初に含まれていたセメントアルカリを見積る。これは，鏡面研磨薄片中に見出される未水和クリンカ鉱物の EDS 定量分析結果に基づき，使用されたセメントのアルカリ含有量を求めるものである。未水和セメントのクリンカ鉱物であるエーライトやビーライトは，間隙質のフェライトなどより水和が速いため，野外の硬化コンクリート中に完全に未水和なものを見つけるのは一般に難しい。しかし，使用セメントのアルカリ量を見積るため，4 つのクリンカ鉱物（エーライト・ビーライト・フェライト・アルミネート：**写真－2.1** 参照）のそれぞれについて，未水和なものを見つけて，アルカリ含有量を知る必要がある。EDS 定量分析では，エーライトとビーライトは合計が 97wt.%以上で未水和なものとして受け入れる。しかし，水和が進行し，データが少ない場合は，[Ca/Si]比がエーライトで 3.0 以上，ビーライトで 2.0 以上であれば 95wt.%程度まで採用する。このようにして見積もられたアルカリ量（**表－2.1**）が，セメントの最小アルカリ量である。一方，セメントの全アルカリ量は，上記の 4 つのクリンカ鉱物中以外として，セメント中に存在する水溶性の硫酸アルカリも加えたものである。硫酸アルカリも加えた全アルカリ量は，セメントクリンカのアルカリ／硫黄の比に関係し，当時のセメントでは一般に 4 つのクリンカ鉱物に含まれる最小アルカリ量の 120%程度であった。ASR に影響するのは，セメントに含まれる全アルカリ量のうち，実際に細孔溶液に溶け出して骨材に作用する水溶性アルカリ量である。一般的には，水溶性アルカリ量は全アルカリ量の 50％前後である。したがって，水溶性アルカリ量は，セメントの最小アルカリ量に補正係数 0.6 を使用し，単位セメント量を乗じて算出する（**表－2.2**）。補正係数 0.6 の意味は，セメントの最小アルカリ量の 120%としての全アルカリ量のうち，50% が水溶性アルカリ量であるという推定である（0.6=1.2×0.5）。

同様に，コンクリートから分離された粗骨材の水溶性アルカリ量の実測値と骨材量とから，全骨材からの水溶性アルカリを算出する。Katayama et al. が北陸地方で行った場合では，石英粒子に富んだ細骨材の水溶性アルカリは，全骨材の 60%を構成する粗骨材の 50%と仮定することにより，全骨材からの水溶性アルカリとして換算係数 0.8 を採用している（$0.8=0.6_{\text{粗骨材}}\times 1.0+0.4_{\text{細骨材}}\times 0.5$）。この例では，このようにして求められた全骨材からの水溶性アルカリは 0.3～0.8kg/m$^3$ の範囲にあった（**表－2.2**）。




**写真－2.1　未水和セメントのクリンカ鉱物** [3)]

表－2.1　セメントの最小アルカリ量推定の一例 [7)]

| | B7-A (cement: M) | | | | B8-A (cement: M) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Alite | Belite | Aluminate* | Ferrite* | Alite | Belite | Aluminate | Ferrite |
| $SiO_2$ | 25.00 | 33.52 | 5.10 | | 25.36 | 31.53 | 3.69 | 1.60 |
| $TiO_2$ | 0.00 | 0.00 | 0.29 | | 0.53 | 0.20 | 0.04 | 0.98 |
| $Al_2O_3$ | 0.90 | 0.53 | 21.57 | | 0.84 | 0.77 | 29.95 | 20.25 |
| $Fe_2O_3$ | 1.15 | 0.65 | 18.82 | | 0.25 | 0.61 | 6.96 | 30.98 |
| MgO | 0.08 | 0.00 | 2.14 | | 0.71 | 0.00 | 0.00 | 0.97 |
| CaO | 70.23 | 63.56 | 48.69 | | 70.07 | 60.12 | 53.16 | 44.51 |
| $Na_2O$ | 0.32 | 0.44 | 1.91 | | 0.34 | 0.26 | 4.76 | 0.52 |
| $K_2O$ | 0.01 | 0.13 | 0.45 | | 0.34 | 0.19 | 1.34 | 0.08 |
| $SO_3$ | 0.00 | 0.00 | 0.26 | | 0.51 | 0.08 | 0.00 | 0.00 |
| $P_2O_5$ | 0.00 | 0.42 | 0.17 | | 0.25 | 0.66 | 0.00 | 0.00 |
| Total | 97.69 | 99.25 | 99.40 | | 99.20 | 94.41 | 99.90 | 99.79 |
| $Na_2O$eq | 0.19 | 0.11 | 0.44 | | 0.34 | 0.08 | 0.56 | 0.06 |
| Total | | 0.74 | | | | 1.04 | | |

Assumption: Alite 60%, Belite 20%, Aluminate 10%, Ferrite 10%.

* Undifferentiated.

表－2.2　コンクリートのアルカリ収支の検証の一例 [7)]

| Material | Calculation sequence | Structure | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | B5-P 1973 | V1-A 1973 | B7-A 1975 | B8-A 1975 | B9-A 1980 | V2-A 1980 |
| Cement | ① Estimated cement content * (kg/m³) | 336 | 265 | 285 | 251 | 252 | 284 |
| | ② Estimated minimum cement alkali by EPMA $Na_2O$eq (%) | 0.68 | 0.84 | 0.74 | 1.04 | 0.50 | 0.74 |
| | ③ Estimated minimum cement alkali (①x②) $Na_2O$eq (kg/m³) | 2.28 | 2.23 | 2.11 | 2.61 | 1.26 | 2.11 |
| | ④ Estimated water-soluble alkali (③x 0.6) $Na_2O$eq (kg/m³) | 1.37 | 1.34 | 1.27 | 1.57 | 0.76 | 1.27 |
| Aggregate | ⑤ Estimated aggregate content * (kg/m³) | 1788 | 1916 | 1778 | 1935 | 1887 | 1934 |
| | ⑥ Water-soluble alkali ** of coarse aggregate (%) | 0.023 | 0.040 | 0.052 | 0.049 | 0.046 | 0.034 |
| | ⑦ Estimated water-soluble alkali of total aggregates (⑤x⑥x 0.8) $Na_2O$eq (kg/m³) | 0.32 | 0.62 | 0.74 | 0.76 | 0.70 | 0.53 |
| Deicing salt + admixture | ⑧ Estimated water-soluble alkali (⑨-④-⑦) $Na_2O$eq (kg/m³) | 0.86 | 0.94 | 0.48 | 0.57 | 0.24 | 0.08 |
| Concrete | ⑨ Water-soluble alkali ** $Na_2O$eq (kg/m³) | 2.45 | 2.90 | 2.49 | 2.90 | 1.70 | 1.88 |
| | $Na_2O$ | 1.73 | 2.02 | 1.79 | 2.16 | 1.17 | 1.29 |
| | $K_2O$ | 1.10 | 1.34 | 1.06 | 1.13 | 0.80 | 0.89 |
| | ⑩ Apparent concrete alkali ** ($Na_2O$/0.6 + 0.658 x $K_2O$/0.8) | 3.78 | 4.47 | 3.85 | 4.53 | 2.61 | 2.88 |
| | ⑪ Estimated total alkali (③x 1.2 +⑦+⑧) $Na_2O$eq (kg/m³) | 3.92 | 4.24 | 3.75 | 4.35 | 2.45 | 3.14 |

* CAJS F-18 (1967),　** General Project Method (1989)

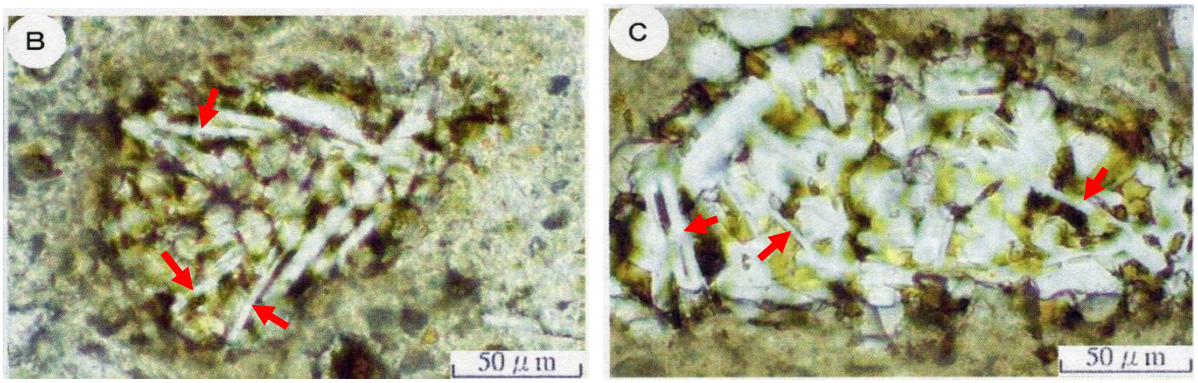
④= cement alkali x 0.5= ③x 1.2 x 0.5, ⑦=⑤x⑥x ($0.6_{Coarse}$ x 1.0 + $0.4_{Fine}$ x 0.5)

凍結防止剤と化学混和剤からの水溶性アルカリ量は，コンクリートの水溶性アルカリから上述のセメントと骨材のそれを差し引いて求める。その結果，凍結防止剤からもたらされたアルカリの見積値は，0.1～0.2kg/m$^3$（1980），0.5～0.6kg/m$^3$（1975），0.9kg/m$^3$（1973）と，建設時期の古いコンクリート構造物ほど高くなった（**表－2. 2**）。この結果は，この幹線道路で凍結防止剤（主に NaCl）が使用されてきたという事実と一致していた。セメントと骨材，凍結防止剤からもたらされた水溶性アルカリの合計としてのコンクリートの全アルカリ（$Na_2Oeq$）は，野外で ASR の見られないコンクリートを除いては 3.0kg/m$^3$ を超過していた。無視できない量のアルカリ（0.6～1.5kg/m$^3$）が骨材と凍結防止剤から構造物の表面にもたらされ，コンクリートのアルカリを ASR 発生の閾値（例えば総量規制値 $Na_2Oeq$ 3.0kg/m$^3$）以上に引き上げた。このようにして，Katayama et al.[7]は，セメントアルカリだけで算出されるアルカリ総量が規制値以下であっても，ASR が促進されることを確認した。

なお，“全アルカリ量”とされるコンクリートの見かけのアルカリ量は，ここでのコンクリートの全アルカリ量の見積値と当然同じである。しかし，前者は野外の古いコンクリートのアルカリも，$Na_2O$ と $K_2O$ の回収率をそれぞれ 0.6 と 0.8 として，セメントのみに由来することを前提としたもので，骨材と凍結防止剤からの水溶性アルカリをもセメントに帰している。Katayama et al. は，従来，コンクリートのアルカリ量としてしか出せなかったものを，セメント，骨材，凍結防止剤などからもたらされたそれぞれについて推定し，またコンクリート構造物が 25 年を経ていても，使用セメントの最小アルカリ量を評価できることを示した。コンクリート中の未水和セメントについて EDS 定量分析を行うことにより，使用セメントは少なくとも 0.5～1.0%のアルカリ（$Na_2Oeq$）を含んでいたこと，そして水溶性アルカリの一部は骨材と凍結防止剤からコンクリートに供給され，ASR 発生の閾値（例えば総量規制値 $Na_2Oeq$ 3.0kg/m$^3$）に達したことが示された。

なお，凍結防止剤や融雪剤を散布しない地域（沖縄）でも，同様にコンクリートのアルカリ収支を検証した事例がある[8]。

ところで，セメントを構成するクリンカ鉱物について，低アルカリセメントでは普通のアルミネート，高アルカリセメントでは長く伸長したアルカリアルミネート結晶（**写真－2. 2**）が特徴的に観察される。反応性鉱物と ASR ゲルによる膨張ひび割れ，アルカリアルミネートの組み合わせは，ASR を支持する十分な証拠であり，いずれも岩石学的試験により容易に確認できる。セメントクリンカの主なアルカリ含有相はアルミネートとビーライトであるが，特にアルカリアルミネートは水溶性の硫酸アルカリを除いた全アルカリ含有量の約半分を占める[7]。




**写真－2. 2　アルカリアルミネート**[15]

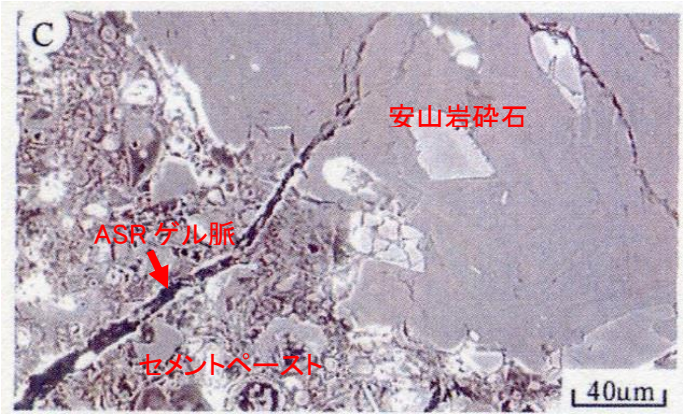
（4）混和材の抑制効果の検証[11]

混和材使用の有無や種類について，偏光顕微鏡観察や SEM 観察の岩石学的試験により確かめ

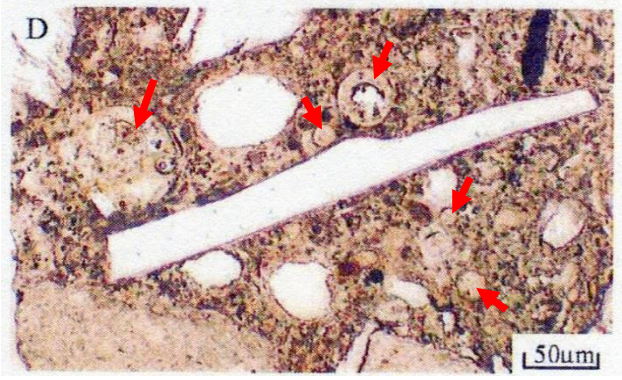
られることは言うまでもない。ここでは，混和材による抑制効果の検証について，フライアッシュでの事例を示す[11]。

わが国では高炉セメント（高炉スラグ 40～70wt.%）とフライアッシュセメント（フライアッシュ 15～30wt.%）が ASR 抑制対策に推奨されている。抑制効果はガラスのポゾラン反応性によるものであるが，仕様に沿ったコンクリートに ASR が発生した明らかな事例がある。この事例では“古銅輝石安山岩”の砕石（粗骨材の約 30vol.%を占める）に発生した ASR ゲル脈（ASR ゲルに充填された膨張ひび割れ）が，セメントペーストへ進展していた（**写真－2.3**）。水和した仮像（**写真－2.4**）から見積られたフライアッシュの混合率は，約 25vol.%（18wt.%）であった。したがって，建設時には ASR 抑制対策や ASR の試験基準がなかったものの，混合セメントの使用による現在の抑制対策を満たしていた。近隣で，この安山岩砕石の使用されていない橋脚に ASR 劣化はなく，観察の結果，フライアッシュは同様の混合率でも，砂岩・クォーツァイト・変質した流紋岩凝灰岩などの遅延膨張性骨材の ASR については，反応リムや ASR ゲルの取り巻き程度に十分に抑制していることが確かめられている[16]。モルタルバーの膨張に対するフライアッシュガラスの抑制効果は，$SiO_2/D^2$（D：粒径）と相関があることが示されている[17]。このフライアッシュのガラスと ASR を生じた安山岩中のガラスについて EDS 定量分析を行った結果，フライアッシュのガラスは安山岩中の水を含んだ流紋岩質ガラスより，$SiO_2$ に乏しいことが示された（**表－2.3**）。すなわち，このフライアッシュが“古銅輝石安山岩”の ASR に対して抑制効果がなかった理由として，フライアッシュに含まれるガラスの反応性が，水和した急速膨張性の流紋岩質ガラスやクリストバライトの反応性より低かったということが考えられた。一方，遅延膨張性骨材の微晶質石英よりは反応性が高かったものと考えられた[11]。

このように，例えばフライアッシュガラスと火山ガラスの組成を比較することにより，その抑制効果の検討が可能である。




写真－2.3　安山岩の ASR[11]




写真－2.4　水和したフライアッシュ[11]

表－2.3　“古銅輝石安山岩”とフライアッシュのガラスの化学組成 [11)]

| Material | Remarks | $SiO_2$ | $TiO_2$ | $Al_2O_3$ | FeO | MgO | CaO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $P_2O_5$ | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Andesite | Rhy. glass | 75.04 | 0.39 | 10.08 | 1.31 | 0.00 | 0.35 | 1.76 | 5.22 | 0.09 | 94.24 |
| Fly ash | Dia. 56 μm | 63.89 | 0.54 | 21.06 | 1.93 | 0.00 | 3.51 | 3.44 | 3.21 | 0.00 | 97.58 |
| Fly ash | Dia. 50 μm | 49.71 | 1.61 | 27.43 | 7.67 | 0.27 | 3.09 | 0.66 | 1.65 | 0.05 | 92.40 |
| ASR gel | In aggregate | 58.22 | 0.00 | 3.12 | 0.36 | 0.00 | 5.46 | 1.09 | 0.38 | 0.21 | 68.85 |

### 2.3.5　採取されたコンクリートコアの促進膨張試験

凍結防止剤（主に NaCl）が冬季に使用される北陸地方の幹線道路では，1980 年代には ASR が認識されていた。しかし，採取コアの JCI-DD2 法による促進膨張試験では，有害な膨張が検出されていなかった。そこで，CSA A23.2-25A に基づき，Katayama et al. が行ったコンクリートコアの促進膨張試験が国内でのアルカリ溶液浸漬法，いわゆるカナダ法の始まりである [7),18)]。この試験で北陸地方の ASR の被害を受けた構造物から採取したコアは，一般に 21 日で 0.10%以上（14 日で 0.05%以上）の膨張を示した。膨張率はコア試料の薄片観察による ASR の程度とも対応していた。なお，21 日で 0.10%の基準は，促進モルタルバー試験によるオーストラリアの遅延膨張性石英質砂利骨材と同じである。日本の火山岩の砂利は，それよりも反応性が高いが基準が同じであるのは，野外での材齢が古く，大きな径のコンクリートコアを使用するため，アルカリが浸透しづらいからである [7)]。CSA A23.2-25A と ASTM C1260 では，14 日の期間において，それぞれ 0.15%，ならびに 0.1%と 0.2%の判定基準を設定しているが，これは 25mm×25mm と小さく，また作製間もないためにアルカリの浸透しやすいモルタルバーに対するものである。打設後に長期が経過した実構造物から採取した大きな径のコンクリートコアに対し，同じ基準が使用できるわけではない。Katayama et al. は φ56mm で採取したコンクリートコアの促進膨張試験（1M NaOH, 80℃）を行った結果として，遅延膨張性の ASR もあるため，必ず 4 週まで測定するとしながら，ASR の被害を受けた構造物では多くが，21 日で 0.10%以上（または 14 日で 0.05%以上）の膨張を示すことを確認した [7)]。鳥居・野村は試験方法とコア径，判定基準について，**表－2.4** のように整理している [19)]。

また，Katayama et al. は比較的劣化の少ない構造物からのコア試料を選び，飽和 NaCl 溶液を使用したコンクリートコアの膨張試験（いわゆるデンマーク法：50℃, φ56×130mm, スパン 100mm）を行い，同じコアについて CSA A23.2-25A に基づいた促進膨張試験の結果と比較している。飽和 NaCl 溶液浸漬下では，3 か月（91 日）で非直線的な遅延膨張を示し，膨張量は 21 日間の NaOH 溶液での促進膨張試験によるものに匹敵した [7),18)]。野村ほかは，同一構造物から採取したコアについて，カナダ法（21 日）とデンマーク法（91 日）の膨張率との間には，ほぼ 1:1 の対応関係があることを示し，デンマーク法の基準としては 91 日での膨張率 0.1%以上を「有害」，それ未満を「無害」とするのが妥当であるとしている [18)]。ただし，火山ガラスについて，川端ほかは飽和 NaCl 溶液では反応が促進されないことを指摘している [20)]。おそらく，隠微晶質石英についても同様であり，岩石種と試験法との組み合わせには注意が必要である。例えば，野村ほかは富山，新潟などの地方ではクリストバライト，トリディマイトを含有する火山岩類を含む川砂，川砂利により ASR が発生していること，コア径を太くすることによりカナダ法では膨張率が小さくなるのに対し，デンマーク法では大きくなる傾向を示すこと，デンマーク法の浸漬日数 91 日では（φ100mm 以下において）コア径に関わらず，NaCl 溶液がコアの中心部まで完全に浸透していることを確認し，デンマーク法によるコアの膨張率はコア径や骨材の最大寸法による影響が小さく，安山岩が主要な反応性骨材である北陸地方では，デンマーク法によりコンクリートのアルカリシリカ反応性を正確に評価できるとしている [21)]。

**表－2.4　試験方法とコア径・判定基準** [19)]

| | | JCI-DD2 法 | | ASTM 法 | デンマーク法 | CSA A864-00 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 阪神高速道路公団 | 建設省総合技術開発プロジェクト | 日本道路公団北陸支社 | 日本道路公団北陸支社 | |
| コア径 | | 75mm | 規定なし | 55mm | 55mm | 100mm |
| コア長 | | 150mm | 直径の 1.5 倍 | 150mm | 150mm | 200mm |
| 開放膨張 | 養生方法 | 20℃，RH100% | 20℃，RH100% | 規定なし | 規定なし | 38℃，RH100% |
| | 養生期間 | 5 週 | 規定なし | 規定なし | 規定なし | 8 週 |
| 残存膨張 | 養生方法 | 40℃，RH100% | 40℃，RH100% | 80℃，1N･NaOH 溶液浸せき | 50℃，飽和 NaCl 溶液浸せき | 38℃，RH100% |
| | 養生期間 | 10 週 | 13 週 | 3 週 | 13 週 | 52～104 週 |
| 残存膨張の判定 | | 0.1% 以上を「有害」（15 週） | 0.05% 以上を「有害」または「潜在的有害」（13 週） | 0.1% 以上を「残存膨張性あり」（3 週） | 0.1% 以上を「残存膨張性あり」（13 週） | 0.03% 以上を「有害」（規定なし） |

## 2.4　まとめ

本章では ASR の診断や反応性評価などに必須の岩石学的試験について，現状とそれにより得られる知見を述べた。

本章の内容をまとめると，以下のとおりである。

(1) コンクリートの岩石学的診断において適切な結果を得るには，現代の知識や技術レベルに対応した方法論を適用する必要がある。本章では方法論の現状を示した。

(2) 肉眼や実体顕微鏡などによる外観観察では可能な限りの観察を行い，その後の詳細な観察・分析の方針や研磨薄片試料の作製位置を決定する。ASR は骨材粒子からセメントペーストへと影響が拡大していく現象であるので，進行過程の確認には反応した骨材粒子と周囲のセメントペーストを含む適切な位置の決定が極めて重要である。

(3) 岩石学的評価では，コンクリート研磨薄片試料を観察し，混和材の有無を含む構成材料を確認するとともに，組織を観察して劣化の原因・過程を読み解く。岩石種ごとに ASR を観察し，ASR によるコンクリートの劣化程度を分類する。

(4) 偏光顕微鏡下で観察した研磨薄片試料を SEM 観察することにより，反応性鉱物と，その溶解現場（ASR ゲル生成現場）を確認し，ASR の現象と原因の確実な同定を行うことができる。

(5) ASR ゲルと CSH ゲルの組成変化から，それらの組成線と収斂点が画かれる。ASR ゲルの組成線の形や組成線上での分布状態は構造物の置かれた環境を反映したものであるので，これを検討することにより，ASR の進行段階（発生～終息）を推定可能になってきている。

(6) 偏光顕微鏡観察で確認した鏡面研磨薄片の未水和セメントや混和材，ポゾラン反応生成物の微細な領域について，SEM 観察-EDS 定量分析を行うことにより，コンクリートのアルカリ収支や混和材の抑制効果の検証が可能であり，これを ASR 抑制対策へフィードバックすることができる。

**参考文献**


1) 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書 : 日本コンクリート工学協会，2008.
2) 山戸博晃，尾花祥隆，鳥居和之：堆積岩系骨材の岩石・鉱物学的特徴とアルカリシリカ反応性，セメント・コンクリート論文集，No.62，pp.326-333，2008.
3) ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書：日本コンクリート工学会，2014.
4) 中野眞木郎：原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案，JNES-RE-レポート，2014.
5) Godart, B., de Rooij, M. and Wood, J. (eds.): Guide to diagnosis and appraisal of AAR damage to concrete in structures, Part 1 Diagnosis (AAR 6.1), 91p., Springer, 2013.
6) Katayama, T. : The so-called alkali-carbonate reaction(ACR)－Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR, Cement and Concrete Research, Vol.40, No.4, pp.643-675, 2010.
7) Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S. and Hira, T. : Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol.53, nos.2-4, pp.105-122, 2004.
8) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., and Yamato, T. : Late-Expansive ASR due to Imported Sand and Local Aggregates in Okinawa Island, Southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Trondheim, Norway, pp.862-873, Jun.2008.
9) Katayama, T. : Late-expansive ASR in a 30-year old PC structure in Eastern Japan, Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Austin, Texas, USA. 10p. paper 030411-KATA-05, 2012.
10) RILEM Recommended test method: AAR-1.1：“Detection of potential alkali-reactivity”: petrographic examination method. Materials and Constructions, 2014.
11) Katayama, T. : Diagnosis of alkali-aggregate reaction－polarizing microscopy and SEM-EDS analysis, Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions(CONCEC ’ 10), Jun.2010.
12) Katayama and Bragg : Alkali-aggregate reaction combined with freeze/thaw in Newfoundland, Canada-petrography using EPMA,In Shayan(ed.) Proceedings of the 10th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, pp243-250, 1996.
13) Katayama, T. : ASR gel in concrete subject to freeze-thaw cycles－comparison between laboratory and field concretes from Newfoundland, Canada, In Broekmans, M.A.T.M. and Wigum, B.J.(eds), Proceedings of the 13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp174-183, 2008.
14) Rodrigues, F.A., Monteiro, P.J.M. and Sposito, G. : A reply to discussion of the paper, The alkali-silica reaction the surface charge density of silica and its effect on expansive pressure : Cement and Concrete Research, Vol.30, No.3, pp.503-504, 2000.
15) Katayama, T. : Alkali-aggregate reaction in the vicinity of Izmir, western Turkey, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Quebec, pp.365-374, 2000.
16) Katayama, T. : Petrography of alkali-aggregate reactions in concrete-reactive minerals and reaction products, In Nishibayashi, S. and Kawamura, M.(eds), Proceedings of the East Asia Alkali-Aggregate Reaction Seminar, Supplementary papers, Tottori, Japan, A45-A58, 1997.
17) Inoue, T., Ohga, H., Maruyama, O. and Nagataki, S. : Proceedings of the Japan Concrete Institute(JCI) annual meeting, 11, pp.93-98, 1989 (in Japanese).

18) 野村昌弘，青山實伸，平俊勝，鳥居和之：北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.3，pp.105-114，2002.
19) 鳥居和之，野村昌弘：コンクリートコアによる ASR 残存膨張性の評価，セメント・コンクリート，No.715，pp.64-70，2006.
20) 川端雄一郎，山田一夫，松下博通：岩石学的分析に基づいた安山岩の ASR 反応性評価および膨張挙動解析，土木学会論文集 E，Vol.63，No.4，pp.689-703，2007.
21) 野村昌弘，鳥居和之，青山實伸：北陸地方の河川産骨材を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価法の開発，材料，Vol.53，No.10，pp.1065-1070，2004.

# 第３章　わが国の ASR の特徴と代表的な反応性骨材の地域的分布

## 3.1　まえがき

本章では，日本列島の地質図を参考に地質学的な情報に触れながら，ASR のリスクと実態の概要を地域ごとに説明する。ASR はコンクリート中のアルカリ溶液に骨材中の反応性物質，すなわちシリカ鉱物や非晶質シリカが溶解することに端を発するコンクリートの劣化現象である。コンクリート用骨材の大半には，地産地消に近い形で，近隣地域の岩石や鉱物の集合である砂利や砂，あるいは岩石を破砕した砕石や砕砂が使用されている。したがって，コンクリートに使用される骨材事情は近隣に分布する岩石の種類，すなわち地質と切り離して述べることはできない。

日本列島は狭い国土でありながら，複雑な地質から構成されている。また，環太平洋火山帯・地震帯上に位置し，火山活動や造山運動，断層運動などの活発な地殻変動の影響を強く受けている。国内で使用されているコンクリート用骨材のほとんどは，このような背景を持った地質から産出する岩石に起源を持ち，十分な強度などの物理的性質を兼ね備えたものである。ASR を生じた骨材岩石の種類は，国内の事例だけでも枚挙に暇はない。以下には，日本国内に広く分布し，コンクリート用骨材として普通に利用され，あるいは混入する機会の多い ASR 反応性鉱物を含む岩石のうちのいくつかについて，日本の地質とも関連させながら説明する。また，わが国における反応性骨材の分布と ASR の発生について，地域ごとに概説する。

## 3.2　ASR 反応性鉱物

従来，アルカリ骨材反応には，アルカリシリカ反応(ASR)，アルカリ炭酸塩岩反応(ACR)およびアルカリシリケート反応があるとされてきた。しかし，最近の研究により，これらの名称で呼ばれてきたコンクリートの膨張を伴う劣化は，全て ASR に起因するものであると考えられるようになった[1),2),3)など]。一般にシリカ($SiO_2$)は結晶質，非晶質かを問わずアルカリ溶液に溶解し，これが ASR の原因となる。シリカを構成する珪素(Si)は地殻を構成する元素のなかで，酸素($O_2$)に次いで最も多く含まれているものであり，珪素に酸素が結びついた $SiO_2$ の組成をもつシリカ鉱物または非晶質シリカは地表に露出する岩石の大半に含まれていると言っても過言ではない。$SiO_2$ の組成をもつ物質のうち，石英は常温常圧下で安定な唯一の形態であるので，とくに微細で過大な表面積を持つ場合（隠微晶質石英・微晶質石英）に緩慢に溶解する（遅延膨張性）ことを除き，実用的にはコンクリート中で溶解しないとみなすことができる。したがって，粗粒な石英を除いたシリカ鉱物あるいは非晶質シリカが骨材岩石に含まれている場合，ASR が発生する可能性があるといえる。このような ASR 反応性鉱物とは，言い換えれば結晶構造上あるいは熱力学的に不安定な状態にあるシリカであり，隠微晶質石英，微晶質石英，カルセドニー，クリストバライト，トリディマイト，オパール，火山ガラスなどである。隠微晶質石英・微晶質石英の遅延膨張性に対し，オパール・クリストバライト・トリディマイトは急速膨張性を示し，カルセドニー・ガラスは一般に中間的である。

### 3.3　ASR 反応性鉱物の種類と産状

ここでは，ASR 反応性鉱物の種類と産状について述べる。骨材として利用される岩石中に普通に含まれる ASR 反応性鉱物について，それが含有される岩石や産状に基づき，以下のような区分で説明する。

①シリカ鉱物の高温変態として，高温のマグマから晶出したクリストバライトとトリディマイト，②シリカに富んだ火山ガラス，③水を含んだ非晶質シリカから主に構成されるオパール，④カルセドニー，⑤隠微晶質石英・微晶質石英

なお，オパールなどの非晶質シリカは，安定な石英へと変化していく過程において，低温で生成したクリストバライトやトリディマイトを含む場合があるが，これはオパール-CT などとも呼ばれるため，ここではオパールとして扱う。

①と②のクリストバライト，トリディマイトと火山ガラスはいずれも常温では不安定な物質であり，その産状は比較的新鮮(新第三紀以降)な安山岩やデイサイト，流紋岩などの火山岩類中に限られる。③のオパールも不安定な物質であるが，生物起源ならびに，続成作用の過程で自生または火山ガラスなどを交代し，あるいは熱水変質作用などにより生成するのが代表的な産状である。したがって，比較的新しいか，やや変質を受けた地層や岩体に含まれるが，堅硬であることが前提の骨材では火山岩類に伴われることが多く，その反応性は著しい。いわゆるグリーンタフと呼ばれる火山岩類を主とする新第三紀の地層中などにも多い。④のカルセドニーが骨材に伴われる主な産状はチャートに含まれるものである。⑤の隠微晶質石英や微晶質石英は様々な地質時代の地層や岩体に含まれる。隠微晶質石英や微晶質石英を多量に含む岩石として，代表的なものにはチャートや珪質粘板岩があるが，その他にも砂質・泥質岩起源の変成岩（とくにホルンフェルスや変成度の比較的低い広域変成岩），カタクレーサイトやマイロナイトなどの断層岩類などの様々な岩石がある。

### 3.4　反応性鉱物を含むわが国の主な地層や岩体

日本列島は環太平洋地域の火山帯に位置し，火山帯の配列は太平洋沖合いの海溝とほぼ平行で，一定の距離を持って分布している。古第三紀以前は日本は大陸の一部であったが，新第三紀中新世以降，徐々に日本海が開き日本列島が誕生したとされる。同時期にはグリーンタフ変動と呼ばれる火山活動を伴う地殻変動が活発化したが，この頃以降から現世にいたる比較的新しい火山岩類にはマグマより直接に生成したクリストバライトやトリディマイト，火山ガラスのほか，火山ガラスの変質などにより生成したオパール（あるいは二次的なクリストバライト）を含む場合があり，その反応性は顕著である。

チャートは海洋プレートの沈み込みに伴い，日本列島に付加された遠洋の珪質堆積物と考えられている。古生代～新生代の地層中に含まれるが，ジュラ紀の付加体には特に多く含まれている。これは頁岩や砂岩から主に構成されるジュラ紀までの地層中に，チャートや石灰岩，緑色岩などのより古い異地性の岩塊を含んだものである。

砂質・泥質岩起源のホルンフェルスは，砂岩や泥岩などが花崗岩などの深成岩を形成したマグマの影響を受けたことにより生成した岩石であり，接触変成作用により多量の隠微晶質・微晶質石英が生成している。なお，深成岩類そのものは通常は非反応性である。

カタクレーサイトやマイロナイトなどの断層岩類は中央構造線の断層運動に伴ったものが有名であるが，その他の構造線を構成する断層群に伴うもののほか，地質図に表現されないような，または未知の小規模な断層破砕帯や剪断帯も含めて随所に存在し，破砕により生じた隠微晶質・微晶質石英が問題となる場合がある。

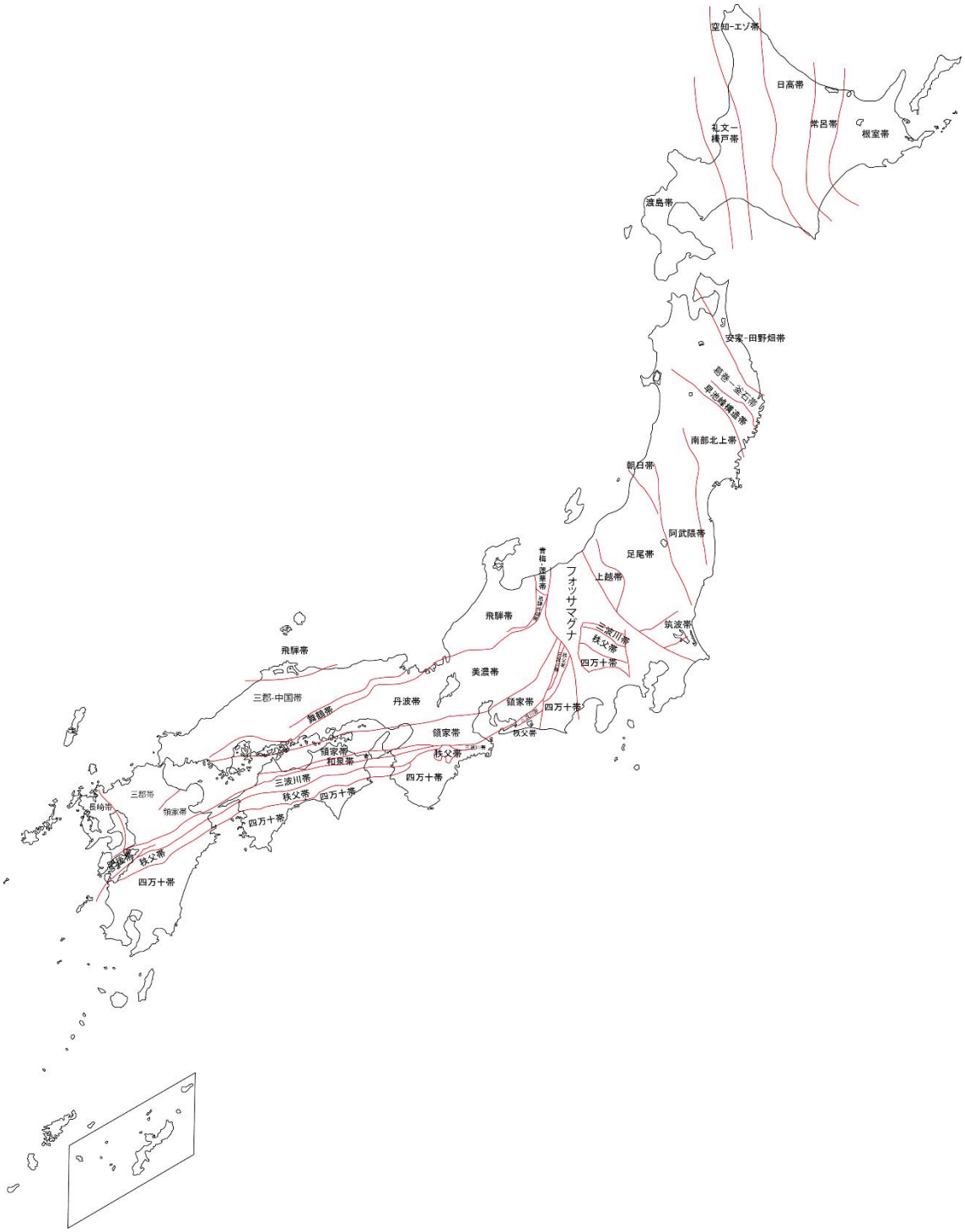
変成岩（広域変成岩）類では，特に泥質・砂質岩およびチャート起源で変成度が比較的低く，再結晶作用が不十分なものに，隠微晶質・微晶質石英を多く含む傾向が強いが，粗粒な片麻岩にも粗粒結晶の粒界に微晶質石英を含む場合がある[4)]。

**表－3.1** に反応性鉱物と，それを多量に含み国内で骨材に使用されることの多い主な岩石種，ASR 反応性の特徴との関係を示す。

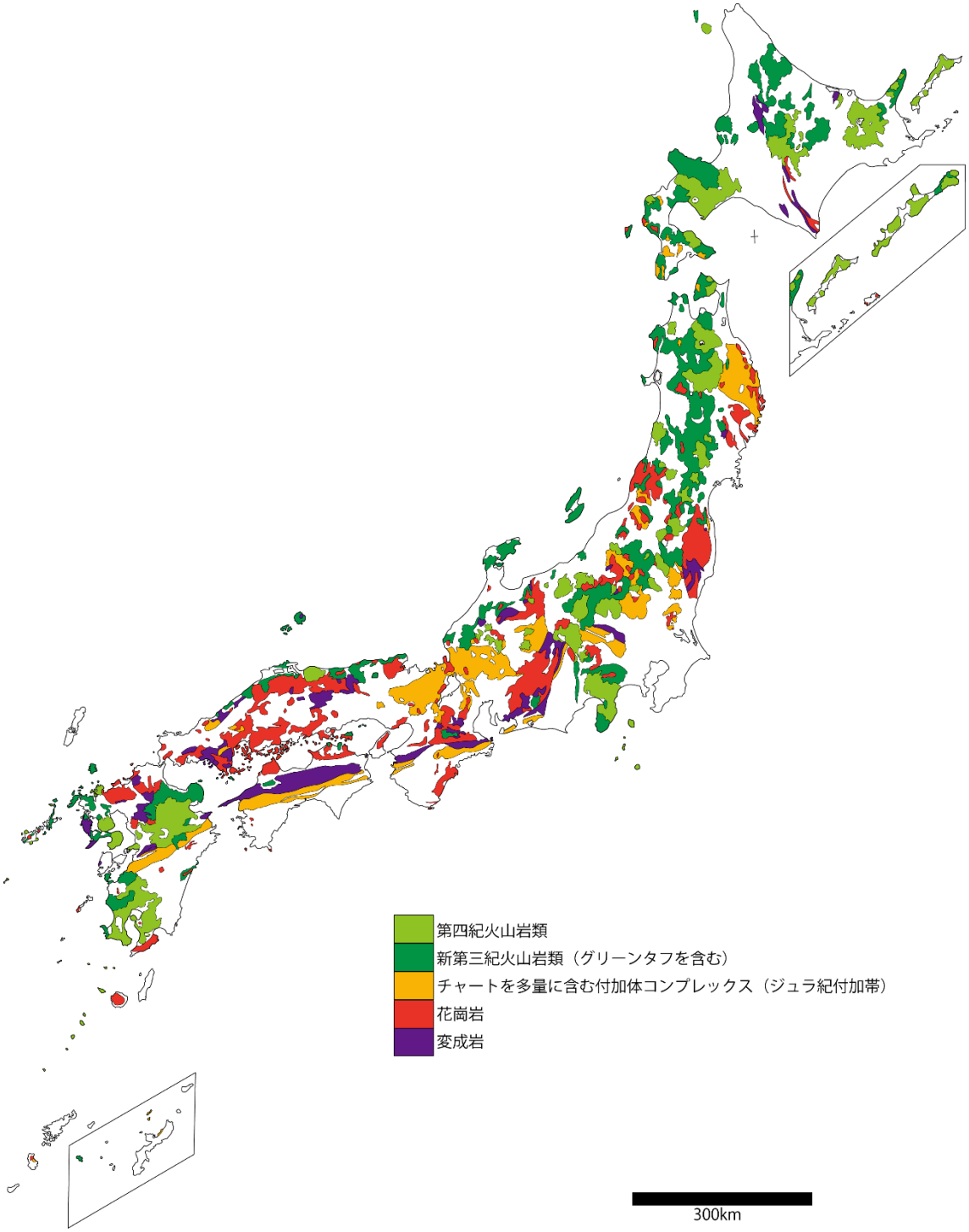
本章で述べる日本の各地域の地質の記述や地質構造区分などは，日本の地質 全 9 巻[5)] を大いに参考とし引用・編集したものである（**図－3.1**）。また，ASR と関連の深い地層や岩体の分布を，独立行政法人 産業技術総合研究所 地質標本館 グラフィックシリーズ 8 日本の鉱物資源[6)]に基づき，**図－3.2** に示してある。これらはコンクリート診断学[7)] に詳しく示したものを引用したものである。なお，山砂利・川砂利あるいは山砂・陸砂などの未固結な砂利・砂の資源は第四紀または第三紀の堆積岩に分類され，上述の反応性の高い岩石としては示されないが，砂利や砂の一粒一粒の岩石種は，それを供給した後背地(上流側の出所)の地質を反映しており，これらの堆積物の反応性は後背地の地層や岩体の特性を反映する。

**表－3.1　反応性鉱物・主な岩石種と ASR 反応性の特徴**

| 反応性鉱物 | 国内で骨材利用の多い主な岩石種 | ASR の特徴 |
|---|---|---|
| オパール | 火山岩類など | 急速膨張性 |
| クリストバライト<br>トリディマイト | 火山岩類<br>（安山岩，流紋岩など） | |
| ガラス | 火山岩類<br>（安山岩，流紋岩など） | 急速～遅延膨張性 |
| カルセドニー | チャート | |
| 隠微晶質石英<br>微晶質石英 | チャート，広域変成岩類，断層岩類，<br>砂質・泥質岩起源のホルンフェルス | 遅延膨張性 |




**図−3.1　日本の地質構造区分** [5),7)]



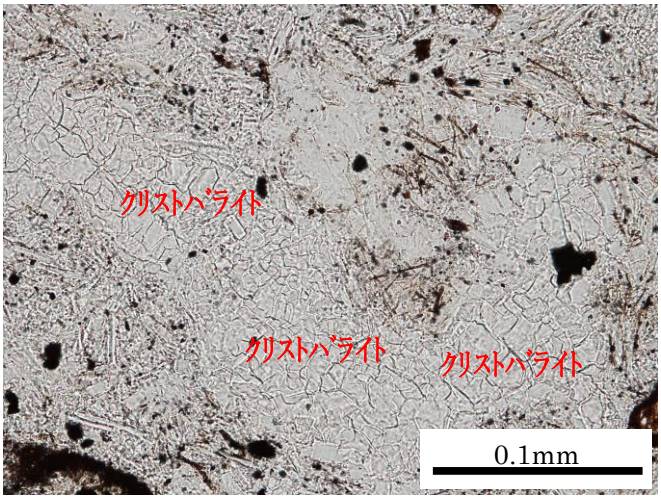

図－3. 2　ASR と関連の深い地層や岩体 [6),7)]

## 3.5　反応性鉱物を含む地層や岩体の各論

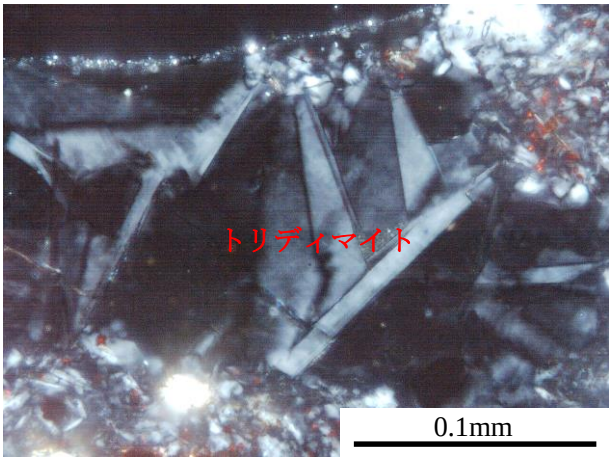
本節では，わが国に広く分布し，コンクリート用骨材として砕石に使用または砂利資源に普通に混入しているもののうち，ASR を生じる可能性の高い岩石種の主なものについて，説明する。

### 3.5.1　安山岩をはじめとする火山岩類

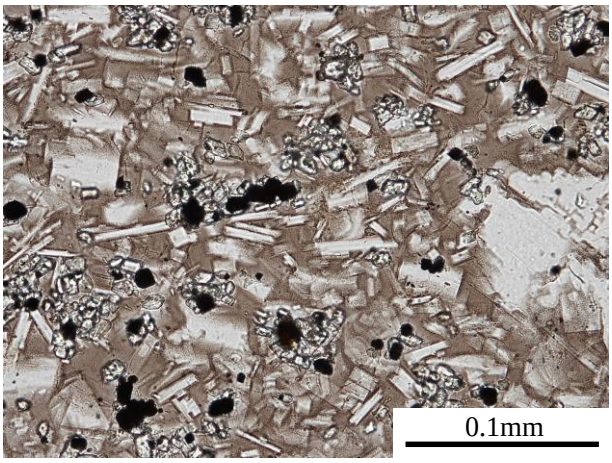
日本列島は環太平洋火山帯上に位置し，千島列島・北海道から南西諸島に至るまで，多くの火山が分布する。火山活動とは地下のマグマが地表付近に噴出する現象であり，マグマが地表付近で急速に冷却して生成した岩石が，玄武岩，安山岩，流紋岩などの火山岩類である。このような岩石には高温のマグマから晶出したシリカ鉱物の高温変態であるクリストバライトやトリディマイト，ならびに急冷されたマグマが結晶化することなく固化したガラスがASR反応性の物質として含まれていることが非常に多く，急速膨張性の反応性を示す。また，クリストバライトやトリディマイトはガラスの脱ガラス化作用や変質により，二次的に生成することもある。**写真－3.1**は偏光顕微鏡下で観察された安山岩中のクリストバライト，**写真－3.2**は同じくトリディマイト，**写真－3.3**はガラスである。これらのシリカ鉱物やシリカに富んだガラスは一般に，流紋岩，安山岩，玄武岩の順に多く含まれ，これは岩石全体のシリカ分の高い順と一致する。日本国内では安山岩によるASRが早くから注目され，現在も顕著なASRでは安山岩が主要因のことが最も多い。これは主には，新第三紀以降の日本列島では安山岩質の火山活動が目立ち，流紋岩より安山岩の分布が広いことに対応しているためと考えられる。一方，さらに古い白亜紀～古第三紀に生成した火山岩類では流紋岩などの分布が広く，このような岩石では不安定なクリストバライトやトリディマイト，火山ガラスなどは，既に石英などのより安定な形態に変化し反応性は小さくなっている。**図－3.2**には，上述の急速膨張性の反応性鉱物を含む岩石として新第三紀と第四紀の新しい火山岩類の分布を，それぞれ示してある。日本列島全般に広く分布していることがわかる。近畿地方などで早くから知られている“古銅輝石安山岩”によるASR[8]や，北陸地方の川砂利や砕石によるASR[9),10)]などは，いずれも安山岩をはじめとする火山岩類によるものであり，わが国を代表する反応性岩石種と言える。安山岩などの堅硬な火山岩が，物理的性質から高品質な骨材資源として重宝されるのは必然的である一方で，ASR反応性などの性質も理解し，適切な抑制対策を行ったうえで使いこなす必要がある。




写真－3.1　安山岩中のクリストバライト




写真－3.2　安山岩中のトリディマイト：直交ポーラー

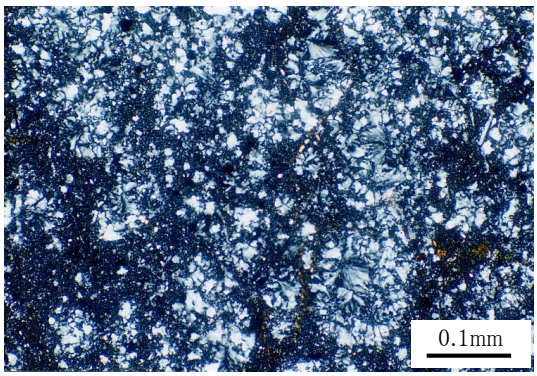



写真－3.3　安山岩中のガラス（褐色の部分）

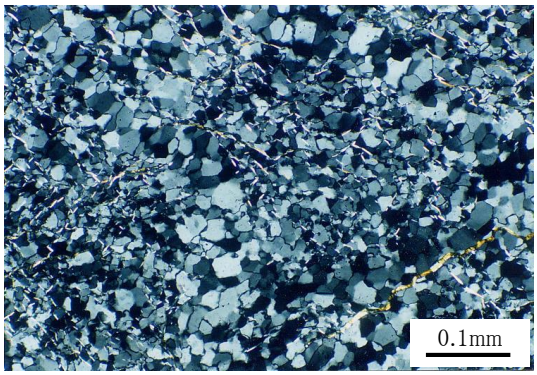
### 3.5.2　チャート・珪質頁岩

チャートはほとんどシリカから構成される岩石，珪質頁岩はシリカのほかにやや多くの泥分を含む岩石である。シリカの起源は主に微生物であり，海洋底に堆積した放散虫殻や海綿骨針，珪藻などに由来する非晶質シリカ(オパール)である。このような非晶質シリカ(オパール)のほか，泥や砂などの堆積物や珊瑚礁などを載せた太平洋下の海洋プレートの一部が剥ぎ取られて大陸側に付加したものが日本列島の骨格となっている。**図－3.2**には，チャートや珪質頁岩を特に多く含むことが知られるジュラ紀付加体の分布を示してある。分布面積に地域差はあるが，ほぼ日本列島全般に分布していることがわかる。日本の主なチャートや珪質頁岩では，海洋底に堆積し大陸側に付加する過程において，非晶質シリカ(オパール)は既により安定な石英に結晶化しているものの，この石英は未だ結晶性が低く，極めて微細で表面積の大きな隠微晶質石英または微晶質石英であり[11]，さらにカルセドニー(微細な繊維状石英の集合体)を伴う場合もある。隠微晶質とは，偏光顕微鏡下でも個々の結晶を識別できないような極めて微細な組織を指し，微晶質は偏光顕微鏡下でようやく個々の結晶を識別できる程度の微細な組織を指す。**写真－3.4**, **写真－3.5**, **写真－3.6**，**写真－3.7**はそれぞれ，チャートの隠微晶質石英，チャートホルンフェルスの微晶質石英，花崗岩質岩の粗粒石英，チャート中のカルセドニー脈である。これらは偏光顕微鏡下では一目瞭然であるが，粉末X線回折ではいずれも石英として検出され，その区別は不可能である。反応性鉱物の検出にしばしば粉末X線回折が試みられるが，隠微晶質・微晶質石英・カルセドニーのほか，ガラスやオパールなどの非晶質の検出にも適用できないので注意が必要である。

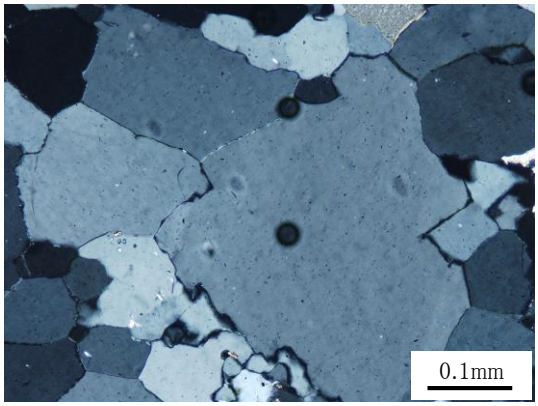
隠微晶質石英･微晶質石英はコンクリート中でゆっくりと反応し，遅延膨張性のASRを生じる。例えば中部地方に分布するジュラ紀付加体の一つである美濃帯はチャートや珪質頁岩を多く含む地質体であり，これに起源をもつ骨材により発生したASRでは施工後30年を経過しても残存膨張を示し，反応が長期間継続していることが報告されている[12]。



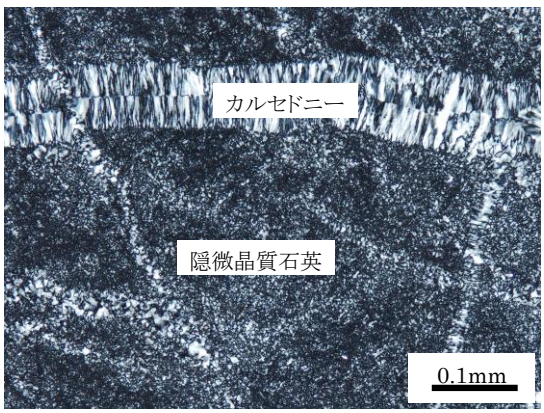

**写真－3.4　隠微晶質石英：直交ポーラー**




**写真－3.5　微晶質石英：直交ポーラー**




**写真－3.6　粗粒な石英：直交ポーラー**



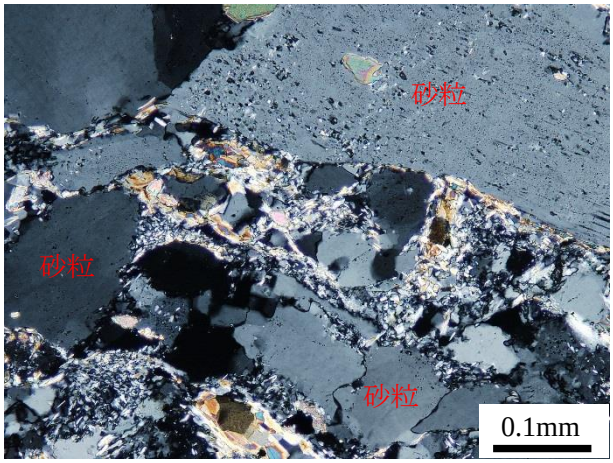

**写真－3.7　チャート中のカルセドニー：直交ポーラー**

### 3.5.3　泥質岩･砂質岩起源のホルンフェルス

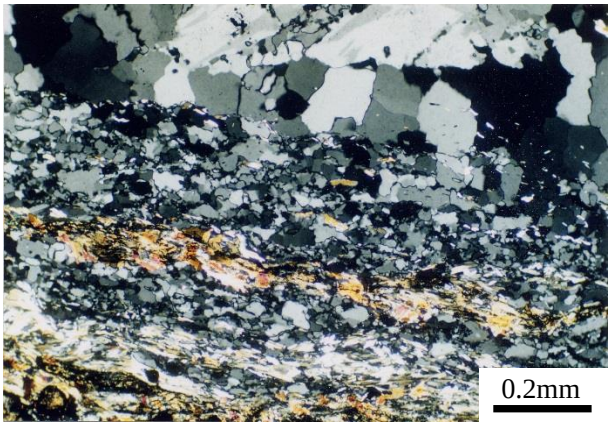
日本列島には花崗岩類が広く分布している。花崗岩類は，地下深くに貫入したマグマがゆっくりと冷え固まって生成した岩石である。この環境で生成するシリカ鉱物は粗粒な石英であり，花崗岩類そのものは一般に反応性を示さない。一方，マグマに貫入された周囲の地層や岩体はその熱で焼かれ，もととは異なった岩石となる。このように，花崗岩類などを生成したマグマに接触し，高温で焼かれて新たに生成した変成岩がホルンフェルスであり，主に花崗岩類の周囲に分布する。特にマグマの貫入した場所が泥質岩や砂質岩(泥岩･頁岩･砂岩など)であった場合，そこに多く含まれる粘土鉱物などが分解し，代わりに変成鉱物が多量に生成する。**写真－3.8**は砂質岩起源のホルンフェルスの組織であるが，もともとの砂岩の砂粒である粗粒な石英や長石の粒間に，微晶質～隠微晶質な石英・黒雲母・白雲母の生成が見られる。これらの変成鉱物は変成度が高まり十分に焼かれるほど，一般に大きく成長して粗粒となる。しかし，多くの場合，これらの変成鉱物は微細であり，泥質岩･砂質岩起源のホルンフェルスには隠微晶質・微晶質石英が多量に含まれていることが多い。例えば，非反応性であることが確認された砂岩を砕石に利用しているつもりであっても，地下に潜在する花崗岩に近づいていたため，反応性が大きくなっていることもある。**図－3.2**には日本の主な花崗岩類の分布が示されている。花崗岩類そのものは一般に非反応性であるが，その周囲には隠微晶質・微晶質石英を多量に含むホルンフェルスが分布する場合がある。

### 3.5.4　変成岩（広域変成岩）

既存の岩石が地下深くに持ち込まれ，高い温度と圧力にさらされると，上述のホルンフェルスと同様にもととは異なった岩石となる。しかし，このような岩石はホルンフェルスとは異なり，一般に広域的な構造運動に伴い生成し，変成岩地帯を形成する結晶片岩や片麻岩などであり，広域変成岩と呼ばれる。広域変成岩においても，ホルンフェルスと同様に既存の鉱物のいくつかが分解し，代わりに高い温度や圧力で安定な変成鉱物が生成する。**写真－3.9** は石英・斜長石・白雲母･黒雲母などからなる泥質片岩の微晶質組織である。変成岩中のこれらの鉱物は温度が上り，変成度が高くなるほど，一般に大きく成長して粗粒となる。しかし，一般には微細な組織が多く含まれ，とくにシリカ分の高い泥質岩･砂質岩・チャート起源の変成岩には隠微晶質・微晶質石英が多量に含まれていることが多い。**図－3.2** には変成岩（広域変成岩）の分布が示されている。変成岩の多くないしほとんどは，様々な程度に緩慢な遅延膨張性を示す反応性の岩石である。




**写真－3.8　砂質ホルンフェルス：直交ポーラー**




**写真－3.9　泥質片岩：直交ポーラー**

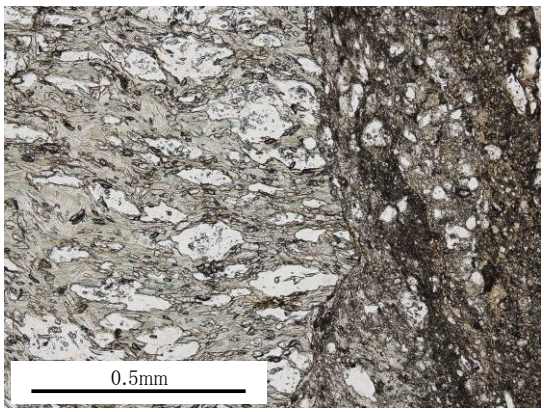
### 3.5.5　反応性鉱物を含むその他の主な岩石

上述した以外で，ASR 反応性の高いわが国の代表的な岩石のいくつかについて説明する。

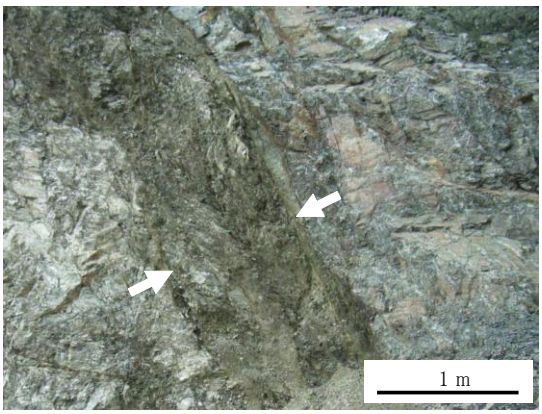
（1）カタクレーサイト・マイロナイト

千島列島・北海道から南西諸島に至るまで，日本列島に沿った太平洋には海溝あるいはトラフが存在する。プレートテクトニクスによる説明では，太平洋下の海洋プレートが日本列島のほうへ向かって移動し，海溝あるいはトラフで日本列島を載せた大陸プレートの下に沈み込んでいく。大陸プレートは海洋プレートに固着した状態で一時，引きずり込まれる。固着域はついにははがれ，大陸プレートの跳ね上がりにより地震や津波が発生する。なお，ここで海洋プレート側の一部が剥ぎ取られて大陸側に付加したものが，前述のチャートや珪質頁岩を含む付加体である。このような過程で変形し，歪みを蓄えたプレートには随所に破壊が生じ，断層(地震)の発生とともに歪みが解放される。日本列島においては，地震の心配がない地域はないように，いたるところに既知未知を問わず，大小様々な断層が存在している。このような断層に伴い生成する岩石に，カタクレーサイトやマイロナイトなどがある。このうち，機械的な破砕が卓越した組織を持った岩石がカタクレーサイトであり，一方で地下深部のやや高温化で形成され，動的再結晶・鉱物の塑性変形・岩石の面構造を伴う引き延ばされたような組織をもった岩石がマイロナイトである。いずれも内部に破砕された形跡を残す組織を持ちながら，岩石の固結性は保持されているものであり，骨材としての使用に耐える十分な強度をもっている。もとの岩石が何であったかに関わらず，カタクレーサイトやマイロナイトは岩石内部に破砕・圧砕組織を持ち，その一部は微粉砕された隠微晶質または微晶質な組織である。**写真－3.10**は軽微なカタクレーサイト化を被った結晶片岩を，偏光顕微鏡下で観察した組織である。写真左半部はこの結晶片岩本来の組織であり，粗粒な構成鉱物が左右方向に整然と配列している。一方，右半部には粉々に粉砕された顕著な破砕組織が認められる。多くの岩石にはもともと石英が含まれており，その場合は破砕組織中に隠微晶質石英または微晶質石英が生成しているため，岩石はASR反応性を示すことがある。

**写真－3.11**は，ある採石場の切羽である。中央付近左上から右下への向きに小さな断層と破砕帯が存在する。断層とそれに伴うカタクレーサイトやマイロナイトは，小規模で局所的なものを含めれば随所に存在し，その一々を把握することは不可能である。例えばもとの岩石が花崗岩のように，通常は非反応性と考えられるものであっても，採石場の一部に小規模な断層に伴うカタクレーサイト化部が存在する場合，骨材品質のバラツキとしてその部分で反応性が高くなる。このような事情により，ASR反応性を示さないことを確認済みの骨材を使用しているにもかかわらず，ある現場や部位に限ってASRが発生することもある[13)]。




**写真－3.10　カタクレーサイト**

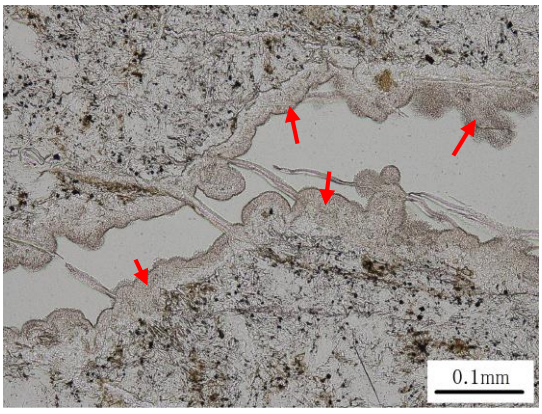



**写真－3.11　採石場切羽に見られる断層と破砕帯**

（2）オパールを含む岩石

オパールは水を含んだ非晶質または非晶質に近いシリカであり，変質した岩石中に様々な鉱物や火山ガラスの分解物として生じたり，気孔や割れ目を埋めた沈殿物として生じたりする。また，第三紀以降の若い珪質泥岩やチャートの主成分であることもある。ある場合には砕石として使用される流紋岩や安山岩などの小さな割れ目や気孔中などに存在し，ある場合にはほとんどオパールからなる砂粒子として川砂や山砂に混入したりしており，実際には多くの骨材に含まれている。オパールの産状の一例として，**写真－3. 12**には安山岩の小さな割れ目に沈殿したものを示してある(割れ目の両壁面の入道雲のような形のもの)。

オパールを一定量含んだ骨材に発生したASRでは，建設後約2年で発生し，その後すぐに構造物が破壊した事例が報告されている。しかも，このコンクリートのアルカリ総量は約2.2kg/m$^3$であり，総量規制値の3.0kg/m$^3$以下であった[14)]。このように，ASR反応性鉱物のなかでもオパールの反応性は著しく，コンクリートにアルカリ総量規制による抑制対策がなされている場合であっても，急速に反応し構造物の早期破壊に至る場合さえある。骨材が“無害”か“無害でない”かの二分のみではなく，地域ごとに現地の骨材の反応性がどのようなものであるのかを認識し，それに沿った適切な抑制対策を行う必要がある。




**写真－3. 12　安山岩の割れ目に生成したオパール**

## 3.6　日本各地の地質と ASR

本節では，わが国の地質と上述などの ASR 反応性の岩石，ASR の発生状況について，地域ごとに述べる。

### 3.6.1　北海道

北海道は東北日本弧と千島弧の会合部にあたり，その中軸部は北にサハリンへと連なる。北海道の先第三系基盤地質帯はほぼ南北に配列し，これらを第三紀・第四紀の堆積物・火山噴出物が広く覆っている。砕石あるいは砂利資源として利用される岩石は，これらの地質の分布を反映している。道南では先第三系の分布より新第三系・第四系の火山噴出物の分布が卓越することから，安山岩などの火山岩類を対象とした砕石の利用が多い [15),16),17),18)]。道北・道東地域では先第三系の分布が卓越することから，新生代の火山岩類と同程度に先第三系の砂岩・輝緑岩などの利用も目立つ [15),16),17),18)]。道央の日高山脈・夕張山地地域は変成岩・深成岩と堆積岩よりなり，特に堆積岩の分布が優勢な地域であり，石狩低地帯や十勝平野などの軟質または未固結により砕石の対象とならない第三紀以降の堆積岩類や堆積物などが広く分布する地域では，これらを起源とする砂利資源(川砂利・陸砂利・山砂利)が主に活用されている [15),16),17),18)]。

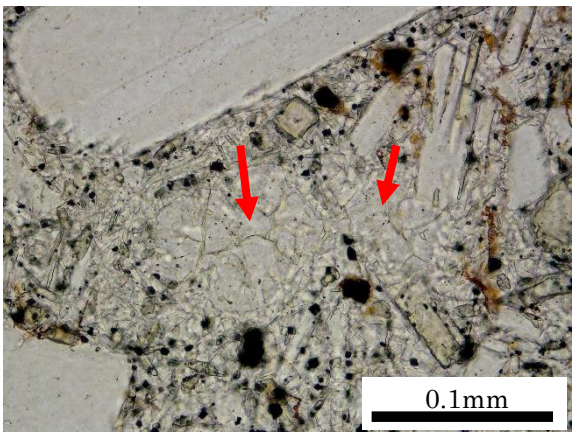
北海道には 40 あまりと多くの第四紀火山・火山群があり，うち 11 火山は過去 350 年間に噴火

した。第四紀火山の噴出物は，玄武岩・安山岩・デイサイト・流紋岩からなるが，特に安山岩～流紋岩に富む。北海道西部の火山は主に安山岩～デイサイトからなる。北海道中央部には大雪山～十勝岳など多数の火山が集合し，広範囲に溶岩・火砕流堆積物が分布する。その岩質は安山岩を主とし，玄武岩，デイサイトなどを伴う。北海道東部の雌阿寒岳から知床半島には，主に安山岩・デイサイト・玄武岩からなる多くの火山があり，この火山列は東方の国後島・択捉島などの火山列とともに火山帯を構成する。一方，グリーンタフと呼ばれる新第三紀の火山岩類は，北海道西部に広く分布するほか，知床半島や北海道中央部の北～北東部などに見られる。

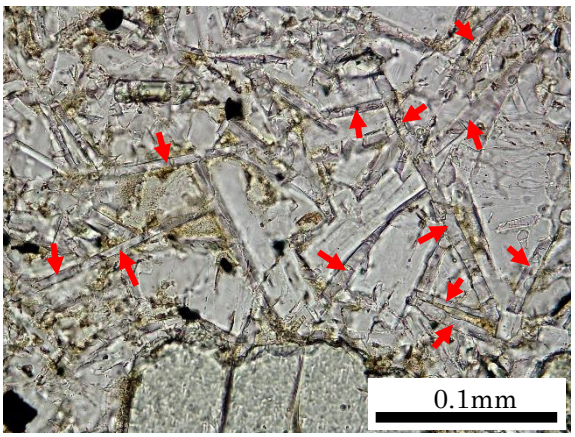
このように，北海道では顕著な反応性を示す可能性のある新第三紀以降の安山岩を主とする火山岩類が広く分布することが特に注目され，砕石場の 7 割程度が安山岩を採取していることからも，安山岩砕石などの急速膨張性反応性骨材が広く使用されているものと考えられる。これに対し，北海道での ASR の事例報告は意外に少ないのが特徴である。**写真－3.13** と**写真－3.14** は北海道産安山岩砕石中に多量に含まれるクリストバライトとトリディマイトである。このうち，**写真－3.14** の製品は反応性試験結果“無害”として使用されている。

その他に，緩慢な反応性を示す遅延膨張性骨材を生み出す地質帯として，渡島半島と北海道東部の中・古生界(渡島帯と常呂帯仁頃層群)は非変成の堆積岩類を主とする後期三畳紀～前期白亜紀初頭の付加体を含み，チャートを比較的多く伴う。また，一部で花崗岩類に貫かれ，接触部にはホルンフェルス化した砂質・泥質岩が存在する。

また，北海道の中軸部には変成岩類(神居古潭帯と日高変成帯)が南北方向に分布する。




**写真－3.13　安山岩砕石中のクリストバライト**




**写真－3.14　安山岩砕石中のトリディマイト**

### 3.6.2　東北

東北地方ではほぼ南北方向に地形が配列し，太平洋側の北上山地・阿武隈山地の高地帯と，その西側の北上川・阿武隈川流域の低地帯，さらに西側の奥羽脊梁山地から出羽丘陵までの高地帯が最も明瞭である。東北地方は，このような現在の南北方向の大地形とは斜交して白亜紀までに形成された北北西－南南東方向に配列した地質区（中・古生界）と，それ以降に形成された火山岩類を含む地層などから構成される。東北地方の中・古生界は，太平洋側の北上・阿武隈・八溝山地，日本海側の白神・太平・朝日・飯豊・帝釈山地に広く分布する。北部北上山地(葛巻－釜石帯, 安家－田野畑帯)にはチャートを頻繁に挟む地層が分布し, 遅延膨張性 ASR のリスクがある。これに対し，南部北上帯には頁岩や砂岩，石灰岩を主とする主に浅海成の堆積岩類とその基盤をなす変成岩類，花崗岩類が広く分布する。また，北上山地・阿武隈山地・朝日山地・会津地方などには白亜紀の花崗岩類が分布し，その周囲には隠微晶質・微晶質石英を含むホルンフェルスが分布する場合がある。そのほかに，阿武隈山地南部には変成岩類(御斎所・竹貫変成岩類)が広く

分布する。

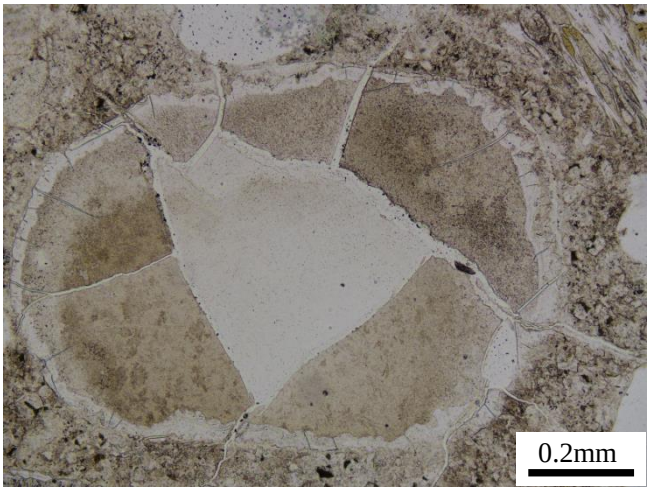
茨城県水戸市付近から猪苗代湖東方を経て朝日山地東方へと続く断層破砕帯は日本列島の地質区を西南日本と東北日本とに分ける大断層でもあり，棚倉構造線と呼ばれる(このような断層付近にはカタクレーサイトやマイロナイトなどの断層岩類が分布する)。

この大断層の西側の朝日山地西南部・飯豊山地・帝釈山地・足尾山地・会津盆地周辺・八溝山地などに分布する足尾帯は近畿地方や中部地方に分布する丹波帯や美濃帯の東方延長で多量のチャートを含む地層である（遅延膨張性 ASR のリスク)。また，これを起源とする古第三紀の礫層が，堅硬な古期の岩石や火山岩類の分布しない近隣の地域で，山砂利資源として利用されている例もある(福島県いわき市付近)。

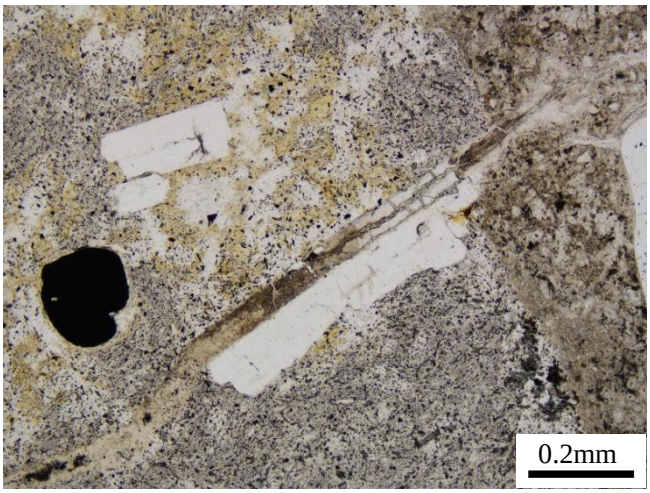
一方，東北地方には 50 ちかい火山があり，その約 80%は奥羽脊梁山地とその周縁部，のこりの大部分は出羽丘陵にある。このように現在の火山群の分布は南北方向の大地形と調和的で奥羽脊梁山地と出羽丘陵に集中するが，東北地方で顕在化している ASR は，これらの火山岩類に起源にもつ急速膨張性骨材によるものが多い。そして，東北地方の特徴として新第三系・第四系の分布域が先第三系に対して広いことが挙げられ，特にグリーンタフを含む新第三紀以降の火山岩類が，前述のように奥羽脊梁山地から日本海側の地域にかけて広く分布し，太平洋側でも仙台市・名取市付近をかすめる。これらの火山岩類は主に安山岩からなり，東北地方ではこれによる急速膨張性 ASR のリスクと事例が多い。

東北地方で砕石として使用されている岩石は，このような地質状況を反映し，奥羽脊梁山地－日本海側沿岸地域における安山岩・玄武岩・流紋岩などの火山岩類と，北上・阿武隈山地における砂岩・頁岩・ホルンフェルス・輝緑岩などが主である。生産量では安山岩が 50%をしめ，ついで砂岩・玄武岩・頁岩・輝緑岩・デイサイトの順となっている。県別にみても，岩手県で砂岩(含ホルンフェルス)が数%の差で第 1 位であるのを除き，各県とも第 1 位は安山岩である。細骨材は川砂や陸砂・山砂などが主であると考えられるが，これらも周囲の地質を反映したものとなる。

したがって，東北地方においても，安山岩を主とする火山岩類による ASR が多い。グリーンタフも広く分布し，やや変質してオパールの生じた安山岩や流紋岩などによる顕著な反応もある[19]。**写真－3.15** は東北地方の山砂に含まれるオパール質な粒子に発生した ASR である。**写真－3.16** はクリストバライトとオパールを含む，変質したデイサイトの砕石に発生した ASR の偏光顕微鏡下での写真である。**写真－3.17** は，青森県において安山岩砕石を使用した PC 水槽に発生した ASR 劣化である。




**写真－3.15　砂に含まれるオパール質な粒子に発生した ASR**




写真－3.16　デイサイトの砕石に発生した ASR

写真－3.17　青森県産安山岩砕石を使用した PC 水槽

### 3.6.3　関東

関東地方は本州弧の中央部にあって，西南日本弧と東北日本弧の会合部にあたる。西部の関東山地は西南日本の外帯の延長，北部の三国山脈や足尾－八溝山地は地形的には東北日本の奥羽山脈へつながる山地であり，これらの山地にいだかれて，その南東側に関東平野が拡がっている。関東平野内に認められる丘陵や台地は主に第三系と第四系の半～未固結の地層で構成されている。一方，関東平野を取り巻く関東・足尾・帝釈・三国・八溝の各山地と日立地域には堆積岩を主とする中・古生代の堅硬な地層とその変成相および各種の火成岩類が分布する。これらの中・古生界の配列は棚倉破砕帯より西側では西南日本弧のそれらと共通する。関東山地は西南日本で中央構造線より南に分布する外帯と同様に，北から三波川帯・秩父帯・四万十帯で構成される。三波川帯は秩父帯の岩石を原岩とする変成岩から主に構成され，秩父帯は丹波－美濃－足尾帯と

同様に多量のチャートや珪質粘板岩を含む地層であり，四万十帯は砂岩や頁岩から主に構成される地層からなる。北関東の栃木県・群馬県・福島県に位置する足尾山地から帝釈山地には，丹波帯や美濃帯の東方延長で多量のチャートを含む地層からなる足尾帯が分布する。関東平野北東部に南北に連なる八溝山地にも足尾帯が分布するが，南端の筑波山塊は深成岩と変成岩からなり西南日本の領家帯の延長と見られている。

棚倉破砕帯で八溝山地と隔てられた東の地域は東北日本弧の阿武隈山地の南端で，阿武隈山地の変成岩との関係も議論される日立変成岩と深成岩が分布する。

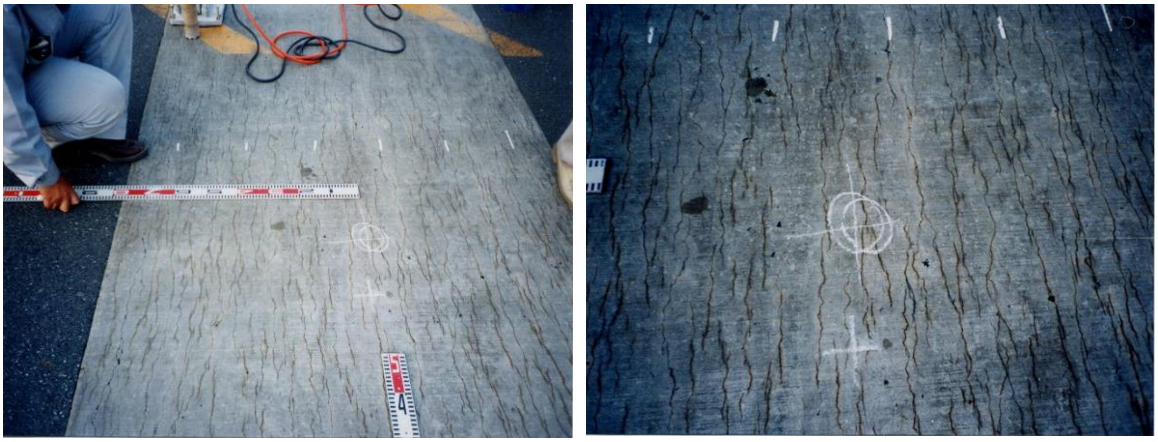
以上の中・古生代の堅硬な地層とその変成相などとは無関係に，足尾山地と三国山地の周辺には那須火山帯に属する諸火山，関東山地の南－西部には富士火山帯に属する火山群，さらに関東地方の北西隅は上記 2 つの火山帯と鳥海火山帯とが会合する地域にあたり，浅間火山と草津白根火山とがそびえ立つ。特に北関東の栃木県・群馬県・福島県に位置する足尾山地から帝釈山地には，北東－南西方向に那須・高原・男体・皇海・赤城など約 20 の火山が並ぶ。富士火山帯の火山は玄武岩・安山岩・流紋岩など，那須火山帯の火山は安山岩・デイサイトからなる。新第三紀の火山岩類を含むグリーンタフも同様に丹沢山地をはじめ，北関東の群馬県下や栃木県下などに分布して関東平野を取り巻く。特に丹沢山地のグリーンタフは厚く堆積し，深成岩や変成岩を伴う。このように関東地方は北と西を第四紀火山とグリーンタフに囲まれて温泉も多いが，それと密接に関連し，クリストバライトまたは（および）トリディマイト，火山ガラス，オパールを多量に含んだ高反応性の安山岩などが砕石として利用されていたり，河川砂利に含まれていたりする事例も多い[20),21)]。なお，グリーンタフには ASR のほかに濁沸石による被害事例もある。

このように，砕石として利用されているのは関東地方の周縁部に主に分布する新第三紀～第四紀の安山岩を主とする火山岩類，ならびに中・古生代の堅硬な堆積岩とその変成相およびこれらに伴う各種の火成岩類である。関東地方で ASR 発生の事例やリスクが多いのは，第一には新第三紀～第四紀の安山岩を主とする火山岩類（急速膨張性）であり，次いで中・古生代のチャートや一部の変成岩などの隠微晶質・微晶質石英を含み遅延膨張性を示すものである。砂利資源では，関東山地は荒川・多摩川・千曲川(信濃川)などの源流地，北関東地方の足尾・帝釈・三国山地は利根川・那珂川などの源流地，また富士火山と丹沢山地は相模川と酒匂川の源流地であり，これらの山地に起源を持つ砂礫（川砂利）が反応性の高い岩石種も含めて下流へ供給される。川砂利でリスクの高い水系は安山岩などの火山岩類を含む利根川・那珂川・相模川・酒匂川などであるが，荒川にもチャートや反応性を持った変成岩類，多摩川にもチャートは含まれている[20),21)]。なお，利根川の現在の流路は徳川幕府により人口的に改変されたものであり，江戸時代以前は東京湾に流入していた。

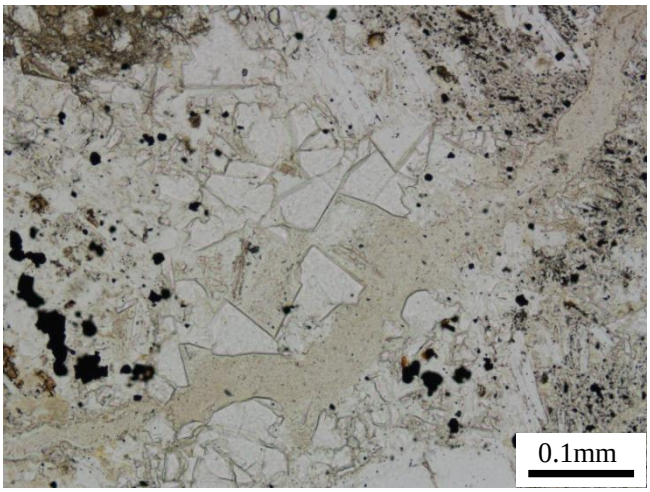
関東平野に厚く堆積する未固結な海成堆積物のうち，特に房総半島の丘陵や台地では主に第四紀の浅海成の砂礫層が山砂資源として多量に採取されている。これは関東平野の周囲の山地に分布する，上述の中・古生界のほかグリーンタフや第四紀の火山岩類などを起源とする多種の岩石片や結晶片が集積したものであり，また平野の西方や北方の火山群からの降下火砕物を挟む。

なお，東京湾岸には関東地方以外の各地の骨材が海送され，これによる ASR も顕在化している（**写真－3.18**[14)]）。

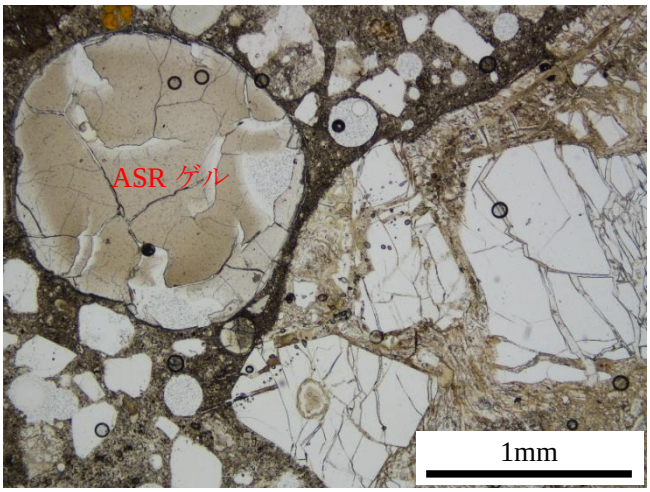
**写真－3.19** は，くさび型のトリディマイト結晶が溶解し，ASR ゲル脈（膨張ひび割れ：写真左下－右上）を生成している安山岩砕石内部である。**写真－3.20** は陸砂利粗骨材中のデイサイト溶結凝灰岩に発生した ASR，**写真－3.21** は細骨材（砂）に含まれていた安山岩粒子に発生した ASR である。**写真－3.22** はコンクリートの切断面写真であり，チャートや変成岩類などの砂利粒子に ASR ゲルの滲出や割れを伴う ASR が発生しているが，岩石種構成から砂利の起源は荒川水系の可能性がある。これらは，いずれも関東地方で発生した ASR の事例である。



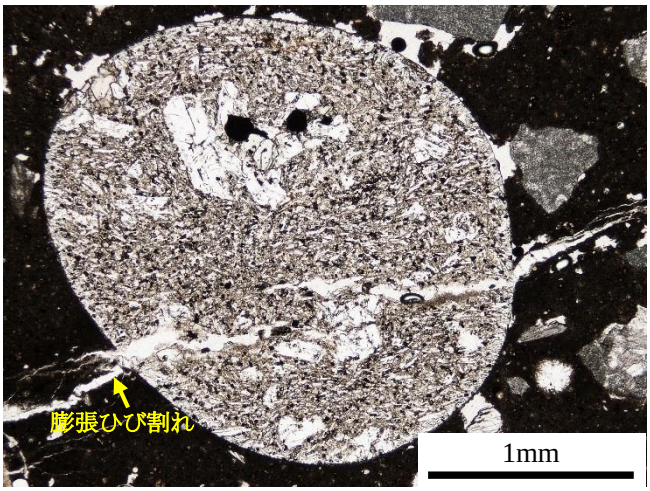
写真－3.18　“千葉県産山砂”を使用した PC 舗装版 [14)]



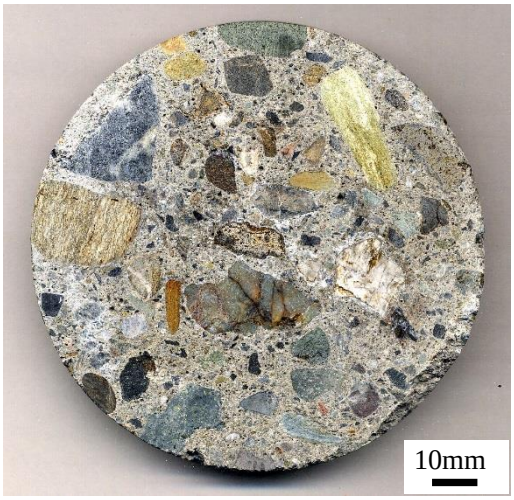

写真－3.19　安山岩砕石に含まれるトリディマイトによる ASR ゲル生成現場




写真－3.20　陸砂利に含まれるデイサイト溶結凝灰岩粒子に発生した ASR




写真－3. 21　細骨材(砂)に含まれる安山岩粒子に発生した ASR




写真－3. 22　チャートや変成岩類を含む砂利に発生した ASR

### 3.6.4　中部（山梨県・長野県・新潟県・静岡県）

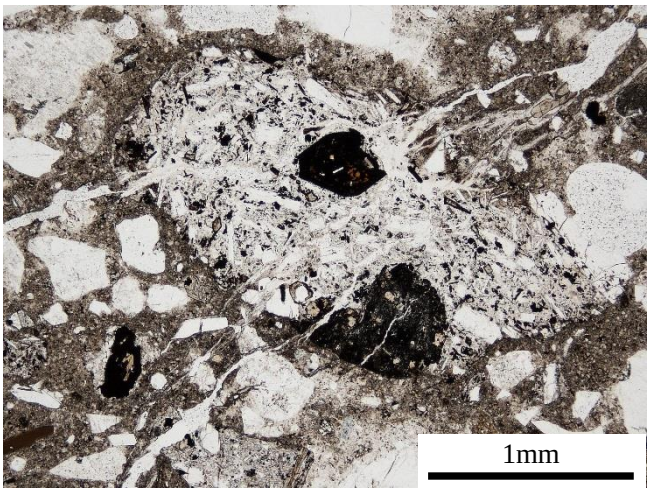
本州弧の中央部に位置し，本州弧と伊豆－マリアナ弧が会合する部分でもある。高峻な山岳地帯と，その間をきざむ長大な河谷からなる。この地域の多くは山地であり，主な平坦地は内陸の山間盆地と新潟・静岡地域の海岸平野である。例えば，この地域の西部には北北東－南南西にのびる飛騨・木曽・赤石など海抜 3,000m 前後の山脈が配列し，東部には海抜 1,000～2,000m 級の越後・三国・関東の山地がある。これらの山地の間を流れる大きな河川は上流では狭い河谷の急流となって山地を侵食し，発生した砂礫により中流では内陸盆地をつくり，下流では海岸平野を形づくる。日本海にそそぐ日本最長の信濃川や太平洋にそそぐ天竜川などが，その代表である。このような地質や地形を反映し，砕石のみならず，河川と周囲の平野や盆地，丘陵などに砂利資源が豊富なのが本地域の特徴である。砂利資源を構成する礫層の礫種すなわち礫を構成する岩石も，後背地となる周囲や上流の地質を反映したものとなる。また，この地域には富士山・浅間山をはじめ，富士・乗鞍・那須・鳥海などの火山帯に属する多くの火山がある。また，糸魚川－静岡構造線・三面－棚倉構造線・柏崎－銚子線・新発田－小出構造線・中央構造線・赤石構造線・御荷鉾構造線・仏像構造線などに伴う大きな断層破砕帯がある。糸魚川－静岡構造線の西側は中・

古生界の堆積岩・花崗岩類・変成岩類などの古い岩石が整然と帯状に配列（日本海側ではこれらに載る新期の火山岩類を伴う），一方で東側はフォッサマグナと呼ばれる地域にほぼ相当し，グリーンタフ地域でもあり，新しい地層や火山岩類が主に分布する。

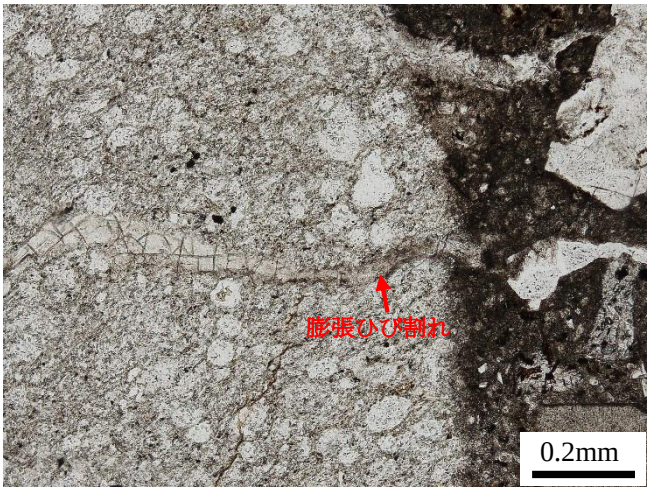
中・古生界と古第三系の古い岩石はフォッサマグナ地域の東西両側の山地とフォッサマグナ地域のなかの関東山地を構成し，北から飛騨帯・飛騨外縁帯・美濃帯・領家帯・三波川帯・御荷鉾帯・秩父帯・四万十帯の順に配列する。なお，フォッサマグナ地域の東側には西から上越帯・足尾帯が配列，北方の朝日山地東部には朝日帯があり，それぞれ飛騨外縁帯・美濃帯・領家帯の東方延長とする考えもある。美濃帯・足尾帯と秩父帯は砂岩・泥岩(頁岩)・チャートなどの厚い地層からなり，遅延膨張性のチャートや珪質頁岩を多量に含む。領家帯は美濃帯が変成作用を受けた岩石からなり，花崗岩類を伴う。関東山地北縁から筑波山地の南部，さらに北方の朝日山地周辺にも類似の岩石が分布し，領家帯の東方延長という意見がある。また，三波川帯は秩父帯の変成相である。領家帯と三波川帯は，ともにチャートなどから引き継がれた，または変成作用により生じた多量の隠微晶質・微晶質石英を含む岩石を伴う。花崗岩類の貫入も多く，周囲の岩石（ホルンフェルス）には接触変成作用により生じた隠微晶質・微晶質石英が多量に含まれる場合がある。さらに，領家帯と三波川帯を境する中央構造線は西南日本の内帯と外帯の境界をなして，長野県の赤石山脈北西側から紀伊半島・四国を経て九州にいたる大断層であり，隠微晶質・微晶質石英を含有するマイロナイトやカタクレーサイトを伴う。四万十帯は主に砂岩と泥岩(頁岩)からなり反応性は一般に高くないが，一部に新第三系までの若い地層が分布し，反応性の高い岩石を含む可能性もある。

フォッサマグナ地域と日本海側の飛騨山脈は火山活動が活発な地域でもあり，主に安山岩質のマグマ活動で形成された多くの火山やグリーンタフ（フォッサマグナ地域）がある。

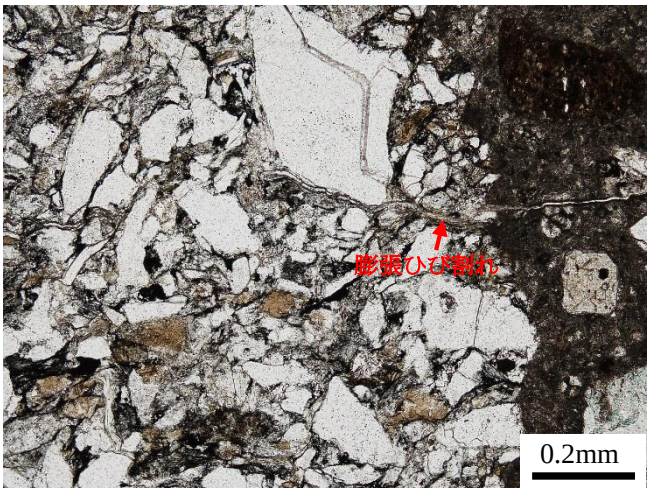
砕石としての利用は安山岩や砂岩が多く，安山岩などの火山岩類による ASR が主に見受けられる。砂利についても上記の地質の分布を反映し，安山岩などの火山岩類やチャートをはじめ，反応性の岩石を含む場合があり，とくに火山岩類が広く分布する日本海側の河川の流域には ASR の影響を受けた構造物が多く見られる地域がある。**写真－3.23～3.25** は，この地域の砂利や砂に含まれていた安山岩をはじめとする多種の反応性岩石が，コンクリート中で ASR を発生した事例の偏光顕微鏡写真である。**写真－3.26** は長野県内の電柱に観察された ASR 劣化，**写真－3.27** は阿賀野川産砂利による ASR 発生事例である。



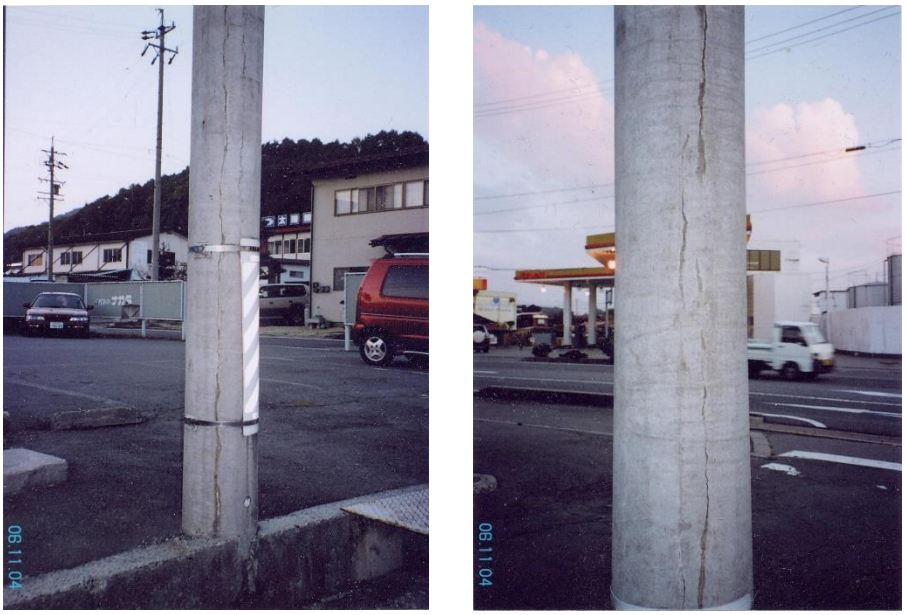

**写真－3.23　砂に含まれる安山岩粒子に発生した顕著な ASR**




写真－3.24　砂利に含まれる珪質頁岩粒子に発生した ASR




写真－3.25　砂利に含まれる砂質岩ホルンフェルス粒子に発生した ASR



写真－3.26　長野県内で観察された電柱の ASR 劣化

**写真－3. 27　阿賀野川産砂利を使用した構造物**

### 3.6.5　中部（富山県・石川県・福井県・岐阜県・愛知県・三重県）

この地域の地形は，大きく見ると中央部の中部山岳地帯と日本海・太平洋に面した平野部からなる。中部山岳地帯には，この地域の東縁に沿い標高 3,000m 級の飛騨山脈・木曽山脈がほぼ南北方向にのび，その西側に飛騨高原・美濃高原が，さらにその西側には両白山地がある。木曽山脈の南方には三河高原が拡がり，両白山地の南方には養老山地・鈴鹿山脈・布引山地がほぼ南北に連なる。飛騨山脈には立山・乗鞍岳・御嶽火山などが，両白山地には白山火山などが載る。これらの山岳地帯から流れ出す主な河川が，下流域では大きな海岸平野を形成する。海岸平野は日本海側で東から富山・砺波・金沢・福井平野が海岸に沿って並び，富山平野には黒部川・常願寺川・神通川などが，砺波平野には庄川などが，金沢平野には手取川などが，福井平野には九頭竜川などが中部山岳地帯から流れこみ，それぞれに砂利資源を豊富に育んでいる。とくに常願寺川はわが国有数の荒れ川であり，砕屑物(砂利資源)の搬出量(発生量)も非常に多い。太平洋側では東から豊橋・岡崎・濃尾・伊勢平野が並ぶ。豊橋・岡崎平野には三河高原から豊川・矢作川などが，濃尾平野には中部山岳地帯から木曽川・長良川・揖斐川などが，伊勢平野には鈴鹿山脈・布引山地から鈴鹿川・雲出川などが流れこむ。

日本列島の骨格を形成する古第三紀以前の地層や岩体について，この地域では日本海側から太平洋側へ，飛騨帯・(宇奈月帯)・飛騨外縁帯・美濃帯・領家帯・三波川帯・秩父累帯・四万十累帯にわけられる。飛騨帯は主に片麻岩類・花崗岩類からなる変成岩の分布地域であるが，飛騨帯の東・南縁には飛騨帯の変成岩類とは異なる結晶片岩が点在し，宇奈月帯を構成する。美濃帯は近畿地方の丹波帯の東方延長でもあり，主に三畳～ジュラ紀の砂岩・泥岩・チャートなどからなり，緩慢な反応性を示すチャートや珪質頁岩を多量に含む。一方，飛騨外縁帯の砕屑岩類は美濃帯と比べると一般に陸地に近い浅海成の堆積物・火山性物質が多く，チャートが少ないとされる。領家帯は美濃帯が変成作用を受けたもので，多量の花崗岩類を伴う。これには，チャートなどから引き継がれた，または変成作用により生じた多量の隠微晶質・微晶質石英を含む岩石を伴う。中央構造線と呼ばれる大断層をはさみ，南側に三波川帯の変成岩類が分布するが，中央構造線に沿った地域では花崗岩類が圧砕されたマイロナイトやカタクレーサイトが分布することがよく知られる。飛騨帯～領家帯の構成岩類は流紋岩～デイサイト質の溶結凝灰岩など(濃飛流紋岩類)の火成岩類に広く覆われたり，貫かれたりしている。濃飛流紋岩類は白亜紀～古第三紀の古い時

代に生成したものであり，火山岩類に含まれていたガラスやクリストバライトは現在では遅延膨張性の隠微晶質石英・微晶質石英に置き換わっている。秩父累帯は美濃帯同様の地層から構成され，チャートや珪質頁岩を多く含む。三波川帯は概ね美濃帯に分布するような岩石の変成岩からなり，チャート由来または変成作用で生じた隠微晶質・微晶質石英を多く含む岩石も伴う。一方，四万十累帯は主に砂岩や泥岩からなるが，この地域での分布は紀伊半島に限られる。

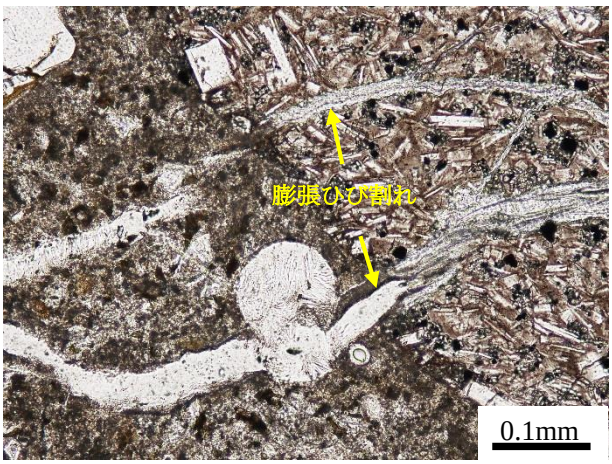
新第三紀以降の地質構造区分は，日本海側の北陸区および太平洋側で内陸側の瀬戸内区と海側の南海区に 3 分され，このうち北陸区がグリーンタフ地域であり，火山岩類を多く含む。第四紀の火山も，主に日本海側の飛騨山脈とその南部地域，ならびに両白山地とその南部地域に分布するが，これらは主には安山岩質マグマの活動で形成されたものであり，これらの砂利や砂が常願寺川をはじめ，日本海側の河川には混入する場合がある [9]。

名古屋市東部丘陵地域では美濃帯のチャート・砂岩および濃飛流紋岩・ホルンフェルスなどを起源とする新第三紀の砂礫層が山砂利資源として採取され，コンクリート用骨材として周辺地域で利用されている [12),22),23)]。

砕石としては福井・岐阜・愛知・三重の各県では砂岩・流紋岩・チャート・かんらん岩・領家帯の変成岩類などがある。一方，富山・石川両県では安山岩を主とする火山岩類の利用が多い [9),10)]。

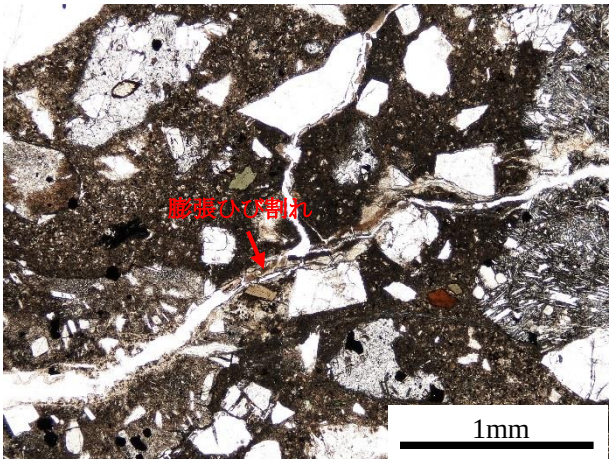
ASR は主に，新第三紀以降の火山岩類が広く分布する北陸地方では安山岩，東海地方ではチャートや珪質粘板岩により発生している [9),10),12),22),23)]。北陸地方・東海地方はそれぞれに ASR がよく研究され，その原因や被害の実態が広く知られるようになった数少ない地域の一つである。

**写真－3. 28～3. 29** は能登半島産安山岩砕石を使用したコンクリートに発生した ASR とその劣化構造物である。**写真－3. 30～3. 31** は富山県産の川砂利・川砂を使用したコンクリートに発生した ASR とその劣化構造物であり，これは砂利・砂の双方に含まれる安山岩粒子が著しく反応していたものである。**写真－3. 32～3. 33** は富山県産川砂・川砂利の ASR により劣化した電柱であるが，安山岩などの反応性骨材から発生した膨張ひび割れがセメントペーストに進展した部分では現在，ASR ゲルがエトリンガイトに置き換わっている [24)]。**写真－3. 34～3. 35** は愛知県産の山砂利に含まれるチャートにより発生した ASR の事例の偏光顕微鏡写真である。




写真－3. 28　能登半島産安山岩砕石に発生した ASR

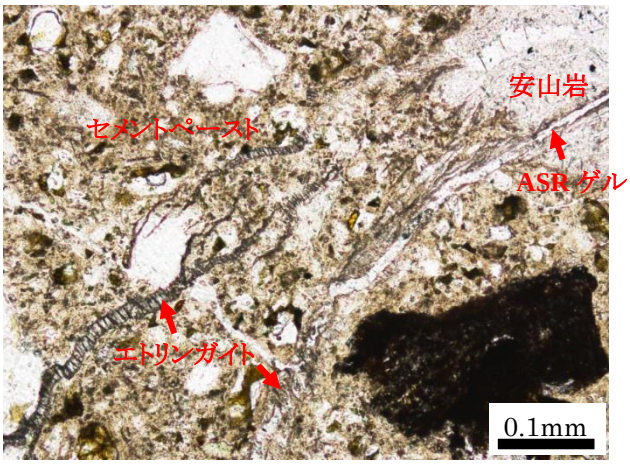
写真－3. 29　能登半島産安山岩砕石を使用した橋脚



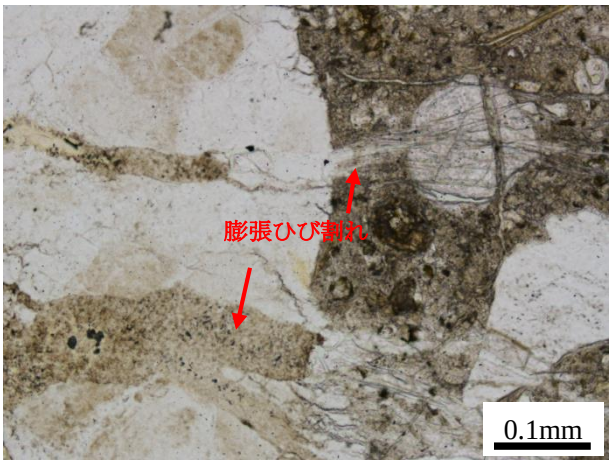

写真－3.30　富山県産川砂利･川砂に含まれる安山岩粒子に発生した ASR

写真－3.31　富山県産川砂利・川砂を使用した構造物

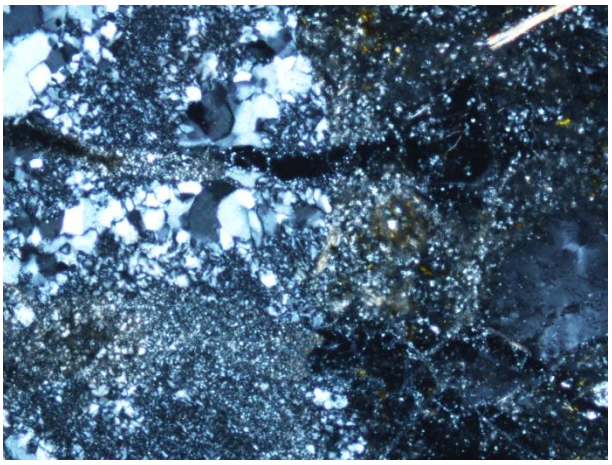
写真－3.32　富山県産川砂・川砂利を使用した PC ポール(電柱：PCa 製品)




写真－3.33　富山県産川砂・川砂利を使用した PC ポールの ASR[24)]




写真－3.34　愛知県産山砂利に含まれるチャート粒子に発生した ASR



写真－3.35　写真－3.34 と同視野：直交ポーラー

### 3.6.6　近畿

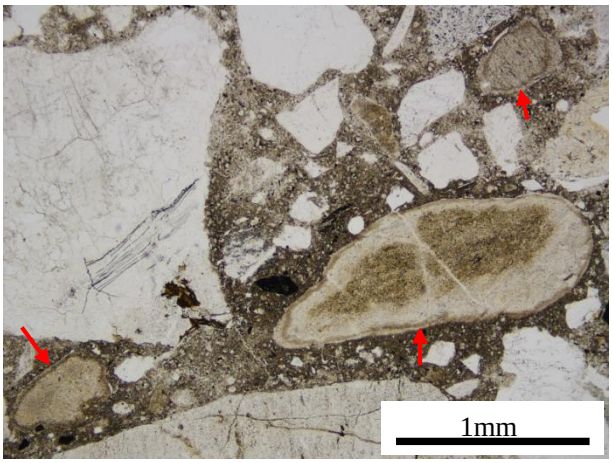
近畿地方は本州弧の中央部を占め，北部は日本海に面するとともにリアス式海岸の若狭湾が湾入，南部では紀伊半島が太平洋に張り出している。近畿地方の地質構造区分は，骨組みとなる古第三紀までの古い構造が，それぞれほぼ東西方向にのびた帯状区域に分布する。北から丹後－但馬帯(三郡－中国帯)・舞鶴帯・丹波帯・領家帯・和泉帯・中央構造線・三波川帯・秩父累帯・四万十累帯に区分されるものであり，概ね北から南にむかって新しい時代のものになる。また，中央構造線以北の構造体は，広く花崗岩をはじめとする白亜紀～古第三紀の火成岩類に覆われたり，貫かれたりしている。これらのうち，中部地方の美濃帯に連続して美濃－丹波帯とも呼ばれる丹波帯は，近畿地方北部の広い地域に分布するが，秩父累帯とともに，遅延膨張性のチャートや珪質頁岩を多量に含む。領家帯と三波川帯は，このような岩石が変成作用を受けたもので，また領家帯は多くの花崗岩類を伴う。領家帯・三波川帯ともにチャートなどから引き継がれた，あるいは変成作用により生じた隠微晶質・微晶質石英を多量に含む岩石を伴う。また，領家帯や和泉帯(主に砂岩・泥岩・礫岩からなる)，三波川帯の岩石には中央構造線とそれに伴う断層群の近くでマイロナイト化作用や破砕を受けているものがあり，この場合は破砕により生成した隠微晶質・微晶質石英が問題となる。四万十累帯は砂岩と頁岩の互層を主とする地層から構成されているが，このなかにも多くの断層が存在し，破砕を強く受けている部分があるほか，潮岬や熊野地域などには花崗岩類の貫入（遅延膨張性のホルンフェルスの生成）もある。

新第三紀以降の地帯区分は日本海側の山陰北陸区・太平洋側の南海区・中間の瀬戸内区に 3 区分される。山陰北陸区は日本海縁辺のグリーンタフ地域であり，瀬戸内区にもサヌカイトなどの安山岩～流紋岩質の火山岩類が比較的多く伴われる。第四紀の火山岩類は山陰北陸区にのみ，玄武岩や安山岩が活動している。

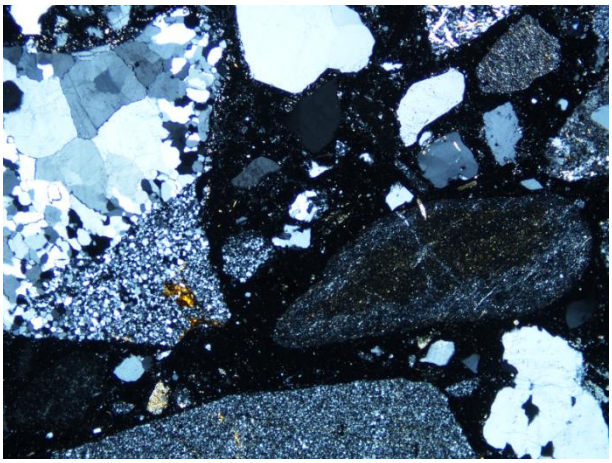
骨材には丹波帯などの砂岩や緑色岩，白亜紀～古第三紀の流紋岩類（隠微晶質・微晶質石英を含む）などが砕石として利用されている。また，京都府南部などの丘陵には新第三紀～第四紀の未固結な砂礫層が分布し，山砂利資源として利用されている。この砂礫層は主に丹波帯起源の堅硬なチャートや領家帯の花崗岩類からなる。このように，隠微晶質・微晶質石英を多量に含む遅延膨張性骨材にも注意が必要である。また，関東地方同様に他地域からの運送も盛んである。

ASR の主なリスクは山陰北陸区・瀬戸内区の安山岩などの火山岩類と，丹波帯・秩父累帯起源のチャートや珪質頁岩などであるが，現在までに顕在化しているものは瀬戸内区の火山岩類によるものが多い [8]。阪神高速道路などでは瀬戸内海を渡った安山岩が ASR を引き起こしたが，同様の岩石は上述のとおり近畿地方自身にも分布する。

**写真－3.36～3.37** は，砂に多く含まれているチャートや珪質頁岩などの粒子に，反応リムなどの潜在的な ASR が発生している近畿地方での事例の偏光顕微鏡写真である。また，**写真－3.38** は中部地方福井県での ASR 劣化構造物の事例であるが，これは近畿地方から連続する丹波帯を起源とする川砂・川砂利中のチャートが主な原因となっている。




写真－3.36　砂に含まれるﾁｬｰﾄなどの粒子に発生した潜在的ないし軽微な ASR（反応リム）



写真－3.37　写真－3.36 と同視野：直交ポーラー

写真－3.38　丹波帯起源の川砂・川砂利を使用したコンクリート構造物

### 3.6.7　中国

本州弧の西端部に位置し，日本海上の隠岐や瀬戸内海の島々を含む。中国山地中央部には 1,000m をこえる山々が脊梁山地を形成し，その南側には津山・東城・三次などの盆地をへだてて吉備高原・周防高原があり，北側には石見高原がある。骨組みをなす先白亜系の古い構造については，北から南へ，飛騨帯・中国帯・舞鶴帯・領家帯に区分されるが，中国地方ではこれらが白亜紀～古第三紀の花崗岩類や火砕岩類(流紋岩溶結凝灰岩など)に大規模に貫入されたり，覆われたりするなどし，その分布は断片的で複雑である。飛騨帯は中部地方からの延長と考えられ，隠岐島後に飛騨変成岩類と似た変成岩が分布する。中国帯の一部には三郡変成岩と呼ばれる結晶片岩類が分布する。広く分布する地域は，山口県中－東部，岡山県，島根県西部と鳥取県東部である。舞鶴帯は主に泥質岩(粘板岩･頁岩など)からなる。美濃－丹波帯に相当し，チャートを多く含む地層は領家帯の北縁部や中国帯のなかに小規模に分布する。主な分布地域は山口県東部地域・島根県南西部地域のほか，広島県西部・瀬戸内海北縁部・岡山県津山市北部・鳥取県若桜用瀬智頭などである（図に表現されない規模のものも多い）。また，このような岩石が変成作用を受けた領家帯は，岩国市の南や瀬戸内の島々に広く分布する。

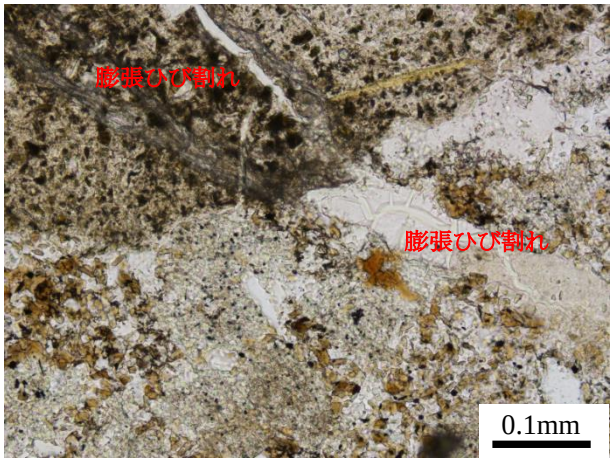
新第三紀の火山岩類の多くは，山陰北陸区の隠岐諸島や日本海沿岸域から一部は中国山地へ向けて湾入して分布するグリーンタフなどである。また，瀬戸内海沿岸域や瀬戸内海の島々を含む瀬戸内区にもサヌカイトなどの安山岩質の火山岩類がある。第四紀の火山列はほぼグリーンタフ

の領域に重なり，大山や三瓶山で代表される大山火山帯を形成し，山陰海岸に沿うものである。したがって，隠岐諸島も含む山陰海岸沿いから中国山地へ続く地域では安山岩などの火山岩類の砕石としての利用も多く，急速膨張性 ASR のリスクが特に大きいが，瀬戸内海沿岸にもリスクはある。

中国地方では白亜紀～古第三紀の花崗岩類や火砕岩類(流紋岩溶結凝灰岩など)の分布が広大であることは前述した。流紋岩溶結凝灰岩などの火山岩類に含まれていた急速膨張性のクリストバライトやガラスは現在では隠微晶質・微晶質石英に置き換わり，その反応性は緩慢なもの（遅延膨張性）となっている。また，これらの周囲に分布する泥質岩・砂質岩起源のホルンフェルスには，接触変成作用により生成した隠微晶質・微晶質石英を多量に含むものが多い。

以上の事情を反映し，山陰地方では安山岩などの火山岩類，山陽地方では泥質岩・砂質岩起源のホルンフェルスによる ASR が目立つ。**写真－3.39** は安山岩砕石により顕著な ASR が発生した山陰地方の橋梁，また**写真－3.40～3.41** は山陽地方で泥質岩ホルンフェルスの砕石を使用したコンクリートに発生した ASR の偏光顕微鏡写真とそのコンクリート製品である。

**写真－3.39　安山岩砕石を使用した山陰地方の橋梁**




**写真－3.40　泥質岩ホルンフェルスの砕石に発生した ASR**

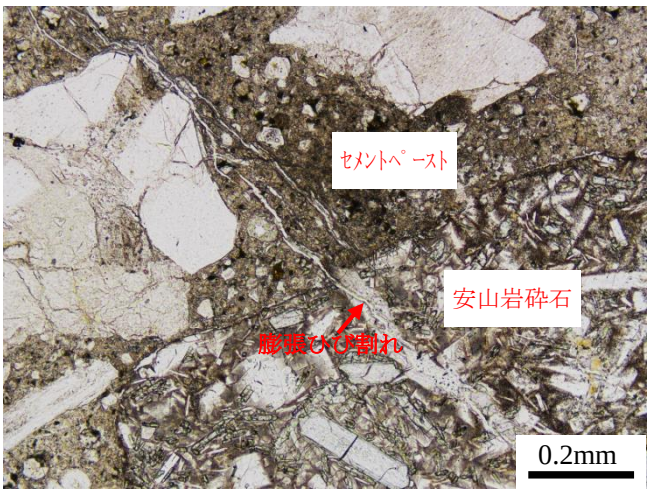
**写真－3.41　泥質岩ホルンフェルスの砕石を使用したコンクリート製品**

### 3.6.8　四国

東西性の帯状構造をなして分布する主に中・古生代の古くて堅硬な岩石からなる地層群と，それらの帯状構造に参加せず，それらを覆うなどして分布する新生代の岩石や地層群に大別される。四国地方は前者の分布が広いのが特徴であり，それは北から領家帯・和泉帯・三波川帯・秩父累帯・四万十帯にわけられる。四国地方の領家帯は主に花崗岩類からなり変成岩類は少ないが，変成岩類の原岩は砂岩・頁岩・チャートなどであり，それらから引き継がれた，あるいは変成作用により生じた多量の隠微晶質・微晶質石英を含む岩石を伴う場合がある。和泉帯は領家帯の南端部をおおい，近畿地方から連続する和泉層群の分布地帯であり，主に砂岩・泥岩からなる。和泉層群の南側には中央構造線を構成する断層や破砕帯を挟み，三波川帯が分布する。三波川帯は変成岩の分布域で，泥質片岩・砂質片岩・塩基性片岩・珪質片岩などの結晶片岩類から主に構成される。秩父累帯は砂岩・粘板岩・チャート・緑色岩などから構成されるジュラ紀の付加体である。四万十帯の大部分は砂岩・泥岩からなり，主に白亜紀～古第三紀の地層である。

一方，新生代の岩石・地層群の分布は散在的である。また，新期の堆積岩類は固結度が低いため，骨材資源となり得る堅硬な岩石としては火成岩類の比率が増すことになる。現在，四国地方に火山は存在しないが，新第三紀には石鎚山－松山を中心とした地域および讃岐平野・備讃瀬戸の島々の広い範囲に安山岩質な火山活動が存在した。特に後者は安山岩の一種であるサヌカイトを伴う瀬戸内火山岩類で知られ，これが四国地方のみならず瀬戸内海を渡った骨材製品の流通により近畿地方などでの急速膨張性の ASR にも関与した。このほかに秩父累帯に多く含まれるチャートや珪質頁岩は隠微晶質・微晶質石英を多量に含むものであり，三波川帯の珪質片岩・泥質片岩・砂質片岩などの変成岩にも隠微晶質・微晶質石英を多量に含むものがある。これらは遅延膨張性の反応性骨材となる。

川砂利などの砂利資源は，流域に分布する上記の地層や岩体の特徴を反映したものとなることは言うまでもないが，砕石としては和泉帯・四万十帯・秩父累帯の砂岩が最も多く利用されている。本章では砂岩を ASR のリスクの比較的低い岩石として扱っているが，砕屑粒子(砂粒)の構成岩片の種類や基質の量比のほか，低度の変成作用や変形作用(破砕)を受けた履歴などにより，ASR 反応性は異なる。実際に，四国地方での ASR も，その事例(偏光顕微鏡写真)を**写真－3.42** に示すように瀬戸内地域での安山岩によるものが主ではあるが，その他に砂岩のほか，広域変成岩類・ホルンフェルス・流紋岩でも確認されている [25]。




**写真－3.42　安山岩砕石に発生した ASR**

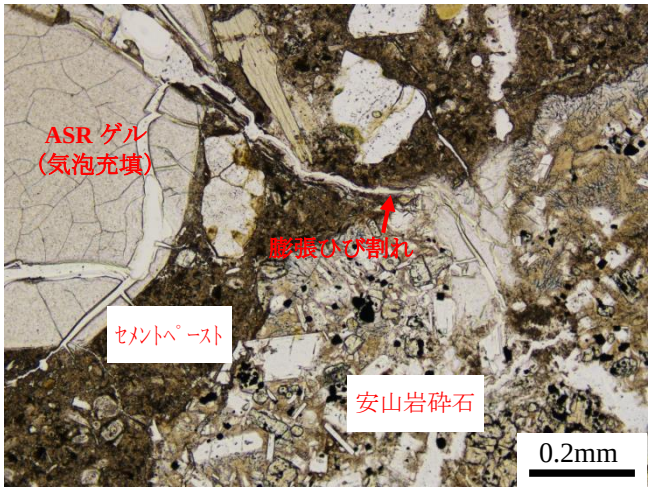
### 3.6.9　九州

西南日本弧と琉球弧の会合部にあたり，大陸とも接近している。骨格となる古生代～古第三紀の地質区は概ね北側から，三郡帯・肥後帯・領家帯・三波川帯・長崎帯・秩父累帯・四万十累帯に区分される。これらは基本的には東側の近畿・中国・四国地方からの延長であるが，連続や配列が大きく乱れ，また新第三紀以降の火山岩類などに広く覆われ不明な点も多い。三郡帯・肥後帯・領家帯・三波川帯・長崎帯は主に変成岩からなる。三郡帯は近畿・中国地方の三郡－中国帯の西方延長で主に三郡変成岩が分布し，砂岩・頁岩・石灰岩などを伴う。これらには白亜紀の花崗岩類が貫入し，北部九州を中心に広く分布する。肥後帯には領家帯の西方延長との意見もある肥後変成岩などの変成岩類が主に分布し，頁岩・砂岩などもある。また新第三紀以降の火山岩類に覆われ，花崗岩類の貫入もある。領家帯は主に変成岩類と花崗岩類からなり，礫岩・砂岩・頁岩なども分布するが，これらは新第三紀以降の火山岩類に広く覆われて分布は小規模であるため，**図－3.1** ではほとんど表現されていない。三波川帯は佐賀関半島にあたり，主に三波川結晶片岩の変成岩からなる。長崎帯は北西部の長崎・熊本両県にまたがる地域で，西彼杵半島・長崎半島・天草下島などに結晶片岩類(長崎変成岩)・変斑れい岩・花崗岩類などが分布するが，東側は広く新第三紀以降の火山岩類が覆う。秩父累帯は関東山地から西南日本を延々と縦断し，九州では大分県臼杵南部から熊本県南部の球磨川流域にいたる北東－南西方向の帯状地域に分布する。頁岩や砂岩のなかにチャート・緑色岩・石灰岩などを含むジュラ紀の付加体であり，チャートや珪質頁岩を多量に含むことは何度も述べてきた。秩父累帯以南の南部九州には四万十累帯が分布する。四万十累帯は主に砂岩や頁岩からなることは関東以西の他地域で述べてきたとおりであるが，一部に花崗岩類の貫入がありホルンフェルスを生じているほか，南西部は新第三紀以降の火山岩類に広く覆われる。

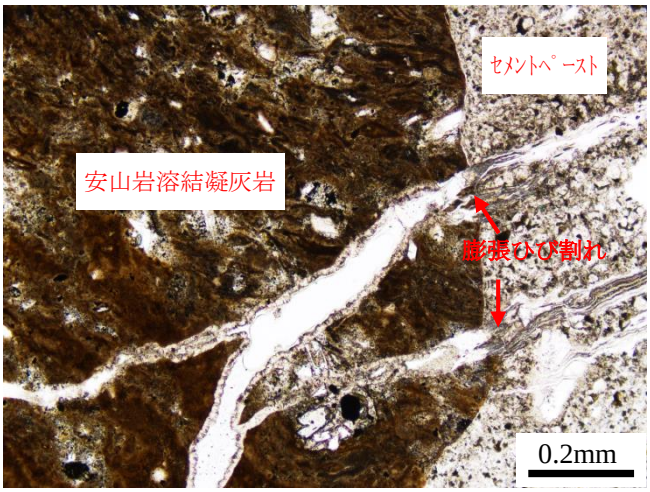
九州地方はグリーンタフを含む，新第三紀以降の安山岩を主とする火山岩類に広く覆われている。現在も火山活動は非常に活発で，姫島・由布岳・九重火山・雲仙・多良岳・金峰火山・阿蘇火山・霧島・始良カルデラ・桜島・阿多カルデラ・開聞岳・硫黄島(鬼界カルデラ)などの多数の火山が分布する。それらの分布は中部九州の大分県から福岡県境と熊本・佐賀・長崎県にまたがる地域，熊本県南部から鹿児島県にかけての地域，北部九州の玄界灘沿岸から壱岐・平戸島・五島列島などを含む地域であり，それぞれ中国地方の大山火山から東西方向に連なる大山火山帯，阿蘇火山から琉球列島へ続く霧島火山帯，そして最も北側で前二者とは成因も異なる西南日本日本海側の環日本海新生代アルカリ岩石区にまとめられる。

九州地方を大雑把にみると安山岩をはじめとする火山岩類に広く覆われ，これを除くと北部九州では変成岩類と花崗岩類，南部九州では砂岩や頁岩が多く，中間の秩父累帯分布域では多量のチャートも伴われるという図式である。したがって，九州地方でも ASR は安山岩などの火山岩類によるものがほぼ全域で多発しているが，加えて北部九州では隠微晶質・微晶質石英を含む泥質片岩・砂質片岩・珪質片岩などの変成岩類によるもの，秩父累帯分布域ではチャートや珪質頁岩によるものも発生している。**写真－3.43** は安山岩の砕石に発生した ASR，**写真－3.44** は砂に含まれていた安山岩溶結凝灰岩の粒子に発生した ASR，**写真－3.45～3.46** は泥質片岩の砕石に発生した ASR，**写真－3.47～3.48** は砂に含まれていたチャートや珪質頁岩の粒子に発生した ASR であり，いずれも九州地方での事例の偏光顕微鏡写真である。また，そのほかにも花崗岩類の周囲の砂質・泥質ホルンフェルスには隠微晶質・微晶質石英を多量に含むものがあり，遅延膨張性 ASR を生じる可能性がある。花崗岩類の分布は北部・中部九州に大規模なほか，五島列島・甑島・大崩山・市房山・紫尾山・尾鈴山・高隈山・大隅半島・屋久島にあり，また対馬・天草・薩摩半島などにも**図－3.2** に表現されない比較的小規模な分布がある。ところで，三郡変成岩の分布する北部九州で蛇紋岩を伴い分布する塩基性片岩が砕石として利用されている。この塩基性片岩は粗粒な点紋片岩で一見すると非反応性である。ところが，採石場内に小さな断層と破砕帯が存在したため，その部分に軽微なカタクレーサイト化(破砕)により生じた隠微晶質・微晶質石

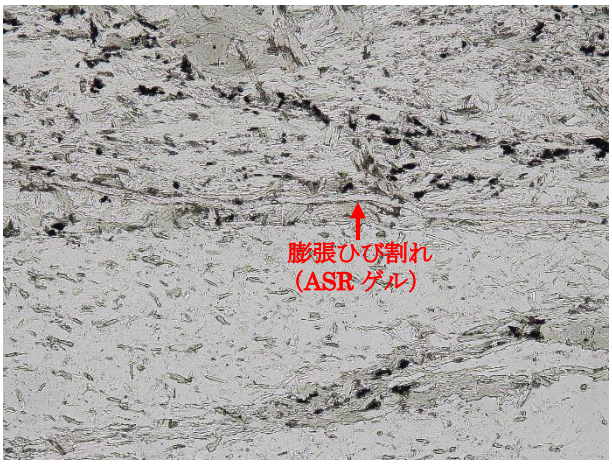
英を含み，ASR を生じた珍しい事例（**写真－3. 49**：偏光顕微鏡写真）もある [13]。また，**写真－3. 50** は，変成岩類による ASR 劣化を被った北部九州の実構造物である。



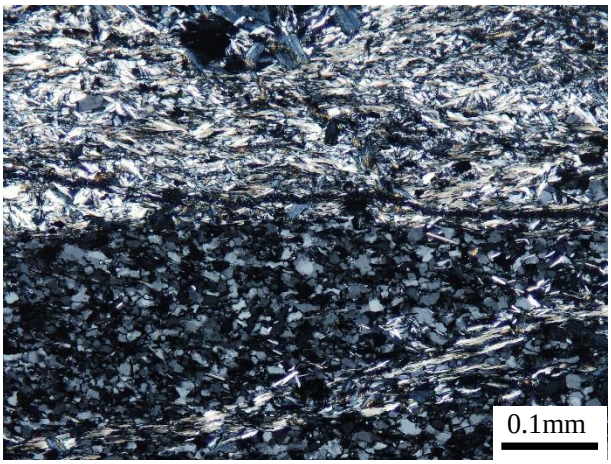

写真－3. 43　安山岩砕石に発生した ASR



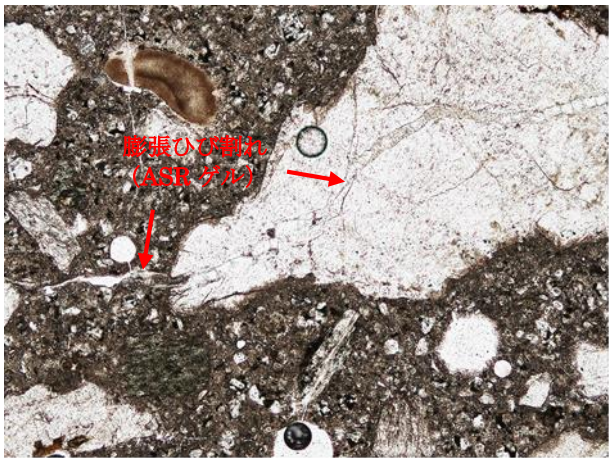

写真－3. 44　砂に含まれる安山岩溶結凝灰岩粒子に発生した ASR



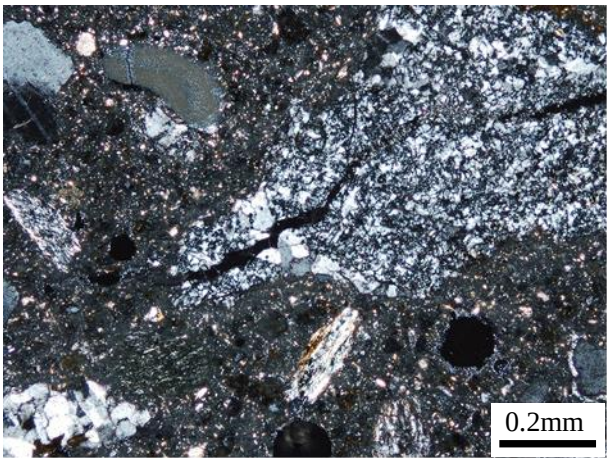

写真－3.45　泥質片岩の砕石に発生した ASR



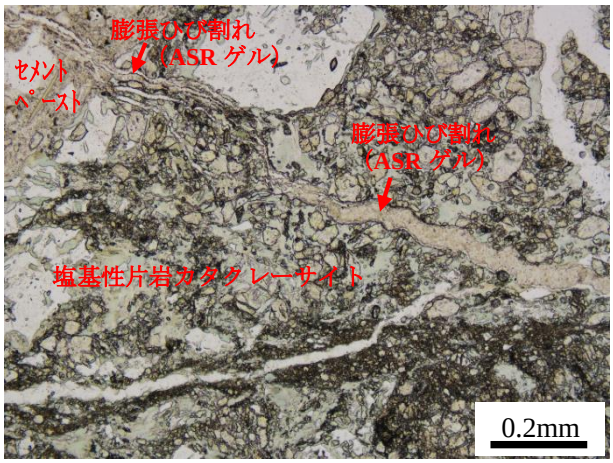

写真－3.46　写真－3.45 と同視野：直交ポーラー




写真－3.47　砂に含まれるチャート粒子に発生した ASR




写真－3.48　写真－3.47 と同視野：直交ポーラー




写真－3.49　塩基性片岩カタクレーサイトの砕石に発生した ASR

写真－3.50　遅延膨張性骨材を使用した北部九州の構造物

### 3.6.10　琉球列島

南北約 1,000km 以上にわたり弧状に点在する 100 個以上の島々からなる。島々の基盤には古第三紀以前の古い地質が推定され，それについては北～中琉球と南琉球とに分けられる。北～中琉球は四万十累帯の南西方延長とされるが，秩父累帯との境界である仏像構造線が琉球列島に沿って走り，その位置の見解は人により異なる。すなわち，主に泥質岩(頁岩・粘板岩・千枚岩など)や砂岩からなるが，厚い石灰岩やチャートの岩体も含む。地表での分布は鹿児島県の奄美大島～沖縄島の北半部に見られる。南琉球には八重山変成岩と呼ばれ，西南日本の三郡変成岩や長崎変成岩の一部と同年代を示す低温高圧型の古い変成岩類のほか，チャート・砂岩・石灰岩・緑色岩などが分布し，周辺海域も含め西南日本内帯の南方延長である。石垣島・西表島と，これらにはさまれた嘉弥真島・小浜島・竹富島で観察できる。

新第三紀以降の地層は砂岩・泥岩・石灰質砂岩・礫岩・石灰岩などが琉球列島全般に分布するが，固結度が弱い。また海岸や海岸沿いの沖積平野を形成する未固結な堆積物には，九州以北と異なり現世サンゴ礁堆積物がある。これを使用した細骨材はサンゴ礁を形成する生物群の石灰質遺骸・破片からなり，ASR を発生した事例は知られていない。

花崗岩類の貫入は屋久島・大島・加計呂麻島・請島・徳之島・沖永良部島・渡名喜島・沖縄島・石垣島にあり，周囲には隠微晶質・微晶質石英を多量に含むホルンフェルスが生成している可能性がある。

グリーンタフを含む反応性の高い火山岩類は，霧島火山帯の火山列として琉球列島の西側に沿いトカラ列島の島々や硫黄鳥島に主に分布し，西表島北方には海底火山もある。

沖縄県では石灰岩の砕石（石灰石）が主に使用されているが，石灰岩中に分布していた安山岩岩脈が石灰石骨材に混入し，顕著な ASR が発生した事例がある [26]。沖縄の海砂に含まれる変成岩やチャートのほか，台湾の花蓮から輸入されたコーツァイトを含有する骨材の遅延膨張性 ASR の関与も確認されている [26]。変成岩類からなる砂利による ASR もある。また，本土から持ち込まれたプレキャストコンクリートで，安山岩を含む砂などによる被害事例もある [27]。琉球列島でも鉄筋破断を含む著しい ASR の事例があるが，このように骨材の国外も含めた海送やプレキャストコンクリートによる持ち込みも多く，その発生原因は非常に複雑である。

## 3.7　まとめ

本章では，これまでにわが国で ASR を多く発生してきた代表的な岩石種について述べ，それらの分布と ASR の発生状況について地域ごとに示した。なお，本章で述べたものは代表的なものであり，わが国で発生している ASR の全てではない。

本章の内容をまとめると，以下のとおりである。

(1) わが国では多種多様な岩石種により ASR が発生しているが，主なものとしては，安山岩をはじめとする火山岩類，チャート・珪質頁岩，砂質岩・泥質岩起源のホルンフェルス，広域変成岩類，断層岩類，などがある。

(2) 安山岩をはじめとする火山岩類は急速膨張性の高い反応性を示し，わが国で古くから多数の被害を発生してきた代表的な反応性岩石種であると言える。一方，チャート・珪質頁岩，砂質岩・泥質岩起源のホルンフェルス，広域変成岩類，断層岩類についても隠微晶質～微晶質石英による緩慢な遅延膨張性を示す場合が多く，各地に被害が散発している。

(3) 地域により反応性骨材の種類や分布面積に特徴があるが，わが国の全域に様々な反応性骨材の分布ならびに ASR のリスクと発生が認められる。

**参考文献**


1) T. Katayama：Modern Petrography of carbonate aggregates in concrete –Diagnosis of so-called alkali-carbonate reaction and alkali-silica reaction, Professor Marc-Andre Berube Symposium, pp.423-444, 2007.
2) T. Katayama and H. Sommer： Further investigation of the mechanism of so-called alkali-carbonate reaction based on modern petrographic techniques, Proceedings of 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.850-860, 2008.
3) Katayama, T. : The so-called alkali-carbonate reaction(ACR)－Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR, Cement and Concrete Research, Vol.40, No.4, pp.643-675, 2010.
4) 野村昌弘，広野真一，大代武志：富山県内における花崗岩質岩石のアルカリシリカ反応，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，2014.
5) 地学団体研究会『日本の地質』刊行委員会：日本の地質 全 9 巻／別巻，共立出版.
6) 小笠原正継，須藤定久：地質標本館グラフィックスシリーズ 8 日本の鉱物資源，産業技術総合研究所，2003.
7) 山田一夫ほか：コンクリート診断学，森北出版(印刷中).
8) Katayama, T. : Diagnosis of alkali-aggregate reaction－polarizing microscopy and SEM-EDS analysis, Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions(CONCEC ’10), Jun.2010.
9) 大代武志，平野貴宣，鳥居和之：富山県の反応性骨材と ASR 劣化構造物の特徴，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1251-1256，2007.
10) 鳥居和之，大代武志，山戸博晃，平野貴宣：石川県の反応性骨材と ASR 劣化構造物のデータベース化，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1017-1022，2008.
11) 服部勇：チャート・珪質堆積物-その堆積作用と続成過程，近未来社，2008.
12) 岩月栄治，森野奎二：愛知県の ASR 劣化構造物と反応性骨材に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.999-1004，2008.
13) 山田一夫，川端雄一郎，河野克哉，林　建佑，広野真一：岩石学的考察を含んだ ASR 診断の現実と重要性，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 7 巻，pp.21-28，2007.
14) 尾花祥隆，鳥居和之：プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1065-1070，2008.
15) 長野伸泰，高橋徹，千場敬史，阿部芳彦，八幡正弘：北海道産砕石のアルカリシリカ反応性と岩石・鉱物学的特徴．北海道立工業試験場報告，No.290，pp.7-17，1991 a.
16) 長野伸泰，高橋徹，勝世敬一，岡孝雄，八幡正弘：コンクリート構造物におけるアルカリ骨材反応抑制技術．平成 2 年度共同研究報告書，北海道立工業試験場・北海道立地下資源調査所，1991 b.
17) 長野伸泰，高橋徹，勝世敬一，八幡正弘，岡孝雄：コンクリート構造物におけるアルカリ骨材反応抑制技術．平成 3 年度共同研究報告書，北海道立工業試験場・北海道立地下資源調査所，1992.
18) 長野伸泰，高橋徹，内田典昭，勝世敬一，八幡正弘：コンクリート構造物におけるアルカリ骨材反応抑制技術．平成 4 年度共同研究報告書，北海道立工業試験場・北海道立地下資源調査所，1993.
19) 林建佑・山田一夫・河野克哉・大庭光商：プレストレストコンクリート橋で生じた ASR の劣化診断，土木学会第 64 回年次学術講演会，V-099，pp.195-196，2009.

20) 千葉とき子，斎藤靖二：かわらの小石の図鑑-日本列島の生い立ちを考える，東海大学出版会，1996.
21) 渡辺一夫：川原の石ころ図鑑，ポプラ社，2002.
22) Keiji Morino : Alkali aggregate reactivity of cherty rock, Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.501-506, 1989.
23) 森野奎二，岩月栄治，後藤鉱蔵：チャート質骨材の微細構造とモルタルバー膨張挙動，コンクリート工学年次論文報告集，10-2，pp.717-722，1988.
24) 橋本徹，金井滋，広野真一，鳥居和之：電柱（コンクリートポール）の縦ひび割れの原因特定とその対策，第 69 回セメント技術大会講演要旨集，2015.
25) 三浦正純，田村栄治：中国四国地方の応用地質学．3.4.2 四国産骨材のアルカリ骨材反応，応用地質学会中国四国支部編，pp.74-76，2010.
26) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., and Yamato, T.：Late-Expansive ASR due to Imported Sand and Local Aggregates in Okinawa Island, Southwestern Japan, Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Trondheim, Norway, pp.862-873, Jun.2008.
27) 富山潤，山田一夫，金田一男，伊良波繁雄，大城武：ASR 劣化したプレテンション PC 桁の岩石学的検討に基づく ASR 診断および耐荷性能の評価，土木学会論文集，Vol.67，No.4，pp.578-595，2011.

# 第４章　タイ国の ASR 事例における反応性骨材の岩石学的特徴と損傷形態

## 4.1　まえがき

これまでは，日本国内での ASR について述べてきた。しかし，日本以外の海外では骨材事情やコンクリートの置かれる環境など，これまで述べてきたわが国での状況と必ずしも同じとは言えない。本章では，国外で発生した ASR の事例として，タイ国の高速道路構造物に発生した ASR の調査結果について述べる。また，国内とは異なる環境において，留意すべき点について指摘する [1),2)]。

## 4.2　概要

日本の政府開発援助（ODA）により，タイ国に建設された高速道路のコンクリートに生じたひび割れなどによる劣化原因について，岩石学的試験に基づく分析を行った。その結果，粗骨材には花崗岩マイロナイトからなるものと石灰岩などを主体とするものとがあり，前者に進行した ASR の発生が認められた。観察結果は構造物の劣化とよく対応することからも，劣化には粗骨材に発生した ASR の関与が大きいと考えられた。一方，細骨材は国内で一般に非反応性と認識される花崗岩であったが，これにも軽微な ASR が発生していた。これについて，熱帯多雨地域での風化作用により，溶脱したシリカから生成したオパールが原因となっている可能性を推察した。このことを含め，日本国内とは異なる熱帯気候下での特徴的な ASR が認められた。

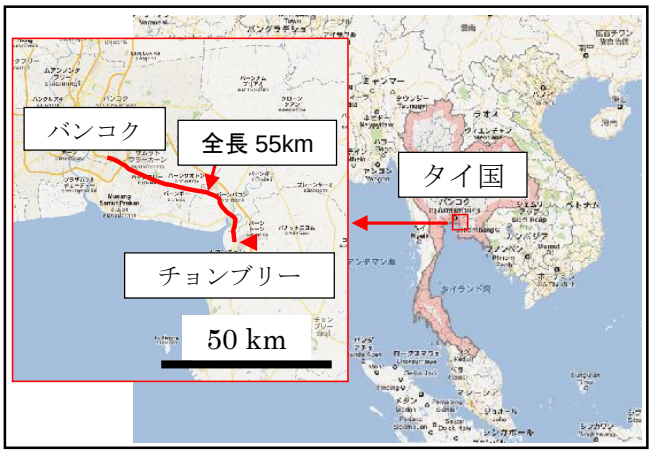
## 4.3　調査の目的

日本の ODA により，タイ国に建設された高速道路に，ひび割れなどを生じる深刻な劣化が発生した。この劣化原因については，タイ国内の研究機関により行われた調査結果で，ASR とエトリンガイトの遅延生成（DEF）との両者であるとの見解が示されている [3)]。一方，同研究機関から，日本の電力会社に対しても，この劣化原因についての調査依頼があり，現地での実地調査とともに，コンクリートコア試料の提供を受けた。本章の研究は，この調査の一環として行ったものであり，コア試料の岩石学的試験などに基づき，コンクリートの劣化原因を明らかにすることを主目的とするものである。

## 4.4　構造物の概要と劣化状況

劣化が発生し調査対象となった高速道路は，タイ国のバンコクとチョンブリーを結ぶものであり，全長は 55km に達する（**図－4. 1**）。日本の ODA により建設され，1998 年 3 月から一部で供用，2000 年 2 月より全線で供用されている。劣化は構造物全体の半数近くに相当する 1000 を超える Pile Cap（フーチング）と X 型 PC 橋脚の部材において，主にひび割れとして**写真－4. 1** に示すように発生し，とくにフーチングには調査対象の約 1 割に幅 3mm を超える顕著なものを含む，密集した地図状のひび割れが発達している。このひび割れは 2004 年には既に認識され，エポキシ樹脂注入による補修がなされたが，その後もひび割れは拡大し，新たなひび割れの発生による再劣化が確認されている。なお，タイ国の高速道路のフーチングはタールエポキシなどの防水処理がなく，また一部は埋め戻しもされていないために，降雨時には周囲が**写真－4. 1** の 1)のように湛水する。一方，橋脚のひび割れはフーチングと比較してかなり軽微である。また，上部構造（スーパーストラクチャー）にはプレキャスト製品が使用されており，劣化は認められていない。

本研究で対象としたコア試料は，1998 年に建設された構造物のフーチングから採取されたものである。




図－4.1　調査対象となった構造物の位置図

写真－4.1　構造物の劣化状況

### 4.5　試料

コンクリート構造物の劣化程度は，タイ国での調査により，外観目視によるひび割れ密度とひび割れ幅とから，4 段階に分類されていた。本研究で使用する試料は，劣化程度の 4 段階の分類に対応した 4 地点のフーチングから採取されたコンクリートコア試料（φ=68mm）である。劣化程度の分類と，それに対応する本研究でのコア試料の名称を**表－4.1** に示す。

**表－4.1　劣化程度の分類とコア試料の名称**

| 劣化程度 | | | |
|---|---|---|---|
| 非常に顕著<br>(A lot of wide cracks) | 顕著<br>(A lot of cracks) | 中程度<br>(Few cracks) | 健全<br>(No crack) |
| フーチング A | フーチング B | フーチング C | フーチング D |

### 4.6　試験方法

本研究では上記の試料について，岩石学的試験と，コンクリート中のアルカリ量の測定を主に実施した。

#### 4.6.1　岩石学的試験

（1）偏光顕微鏡下での観察

試料より，厚さ 15～20μm 程度のコンクリート研磨薄片試料を作製した。これについて偏光顕微鏡下で観察を行い，粗骨材と細骨材を構成する岩石種や構成鉱物ならびに ASR の発生・進行状況を含むコンクリート組織の観察を行った。ASR の進行状況については，Katayama et al.（2008）[4]に従い，**表－4.2** に示すように分類した。通常，ASR は表に示された分類の，1→4 の順序で進行し，これが構造物の外観目視による劣化状況とも，よく対応することが確認されている。

**表－4.2　Katayama et al.（2008）[4]に基づく ASR の進行状況の分類**

| 分類 | ASR の進行状況 |
|---|---|
| 1 | 骨材の反応リムの形成と骨材周辺の ASR ゾル/ゲルの滲出 |
| 2 | 骨材内のひび割れ形成と ASR ゲルの充填 |
| 3 | 骨材を取巻くセメントペーストへのひび割れ進展と ASR ゲルの充填 |
| 4 | 密集したひび割れ網の形成と骨材から離れたセメントペーストの気泡内への ASR ゲルの頻繁な浸入 |

（2）走査電子顕微鏡による観察

軽微な ASR による微細な生成物については，偏光顕微鏡下のみでの同定が困難な場合があるため，同じコンクリート研磨薄片試料について，走査電子顕微鏡（SEM）による観察とエネルギー分散型 X 線分析装置（EDS）による成分分析を行った。装置は，SEM 観察には日本電子社製 JSM-7001F を，また EDS 成分分析にはオックスフォード・インストゥルメンツ社製 INCA Penta FET x3 を使用した。試料は偏光顕微鏡観察に使用した研磨薄片に，電子線の導通処理のために炭素を蒸着したものである。

### 4.6.2　水溶性アルカリ量の分析

水溶性アルカリ量の測定については,「建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書<第二編>　3.3 コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法（案)」に準拠した。

## 4.7　試験結果

### 4.7.1　岩石学的試験

（1）偏光顕微鏡下での観察

偏光顕微鏡下での観察に先立ち, コンクリートの切断面について予察的に行った肉眼と実体顕微鏡下での観察の結果，骨材の種類について，粗骨材は最大寸法 20 mm 程度の砕石，細骨材は天然の砂であった（以下,「砂」は地質学的な粒径区分ではなく，骨材の種類としての天然の砂を指す)。劣化程度の大きい位置から採取された試料には，粗骨材に割れや ASR ゲルの滲出が明瞭に認められた。一方，細骨材には ASR の顕著な現象は認められなかったものの，一部の試料で骨材粒子周辺への ASR ゲルの滲出が確認された。

**表－4.3　コア試料の偏光顕微鏡観察結果**

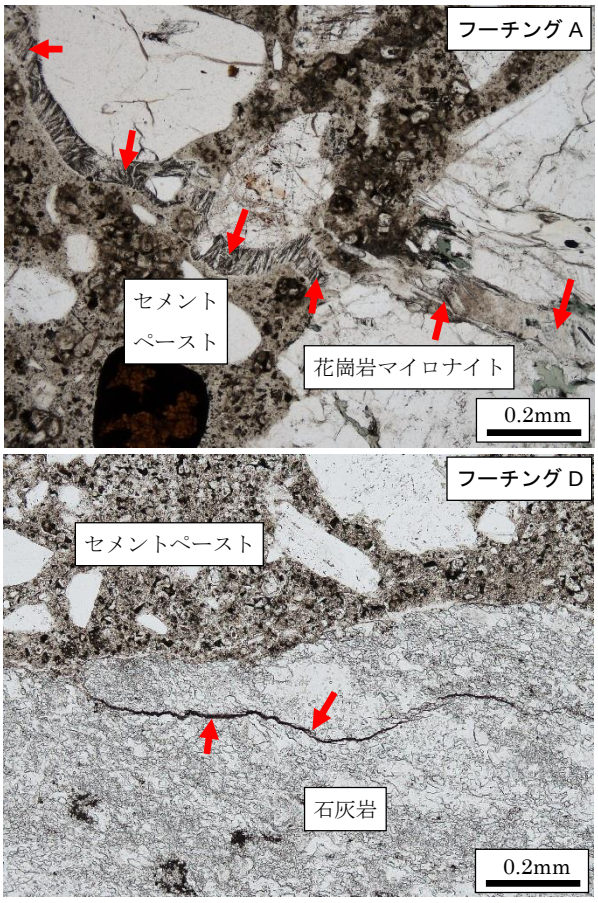
| コア試料 | フーチング A | フーチング B | フーチング C | フーチング D |
|---|---|---|---|---|
| 岩石種構成（粗骨材） | 花崗岩マイロナイト（4） | 花崗岩マイロナイト（3） | 花崗岩マイロナイト（2）<br>泥質ホルンフェルス（2）<br>石灰岩（2)，チャート（2） | 石灰岩（2） |
| 岩石種構成（細骨材） | 花崗岩（2） | 花崗岩（2） | 花崗岩（2） | 花崗岩（2） |
| コアの ASR の進行 | 4 | 3 | 2 | 2 |

コア試料より作製した研磨薄片試料の，偏光顕微鏡下での観察結果を**表－4.3** に示す。表中には，それぞれの骨材を構成する岩石種と岩石種ごとの**表－4.2** に基づいた ASR の進行状況の観察結果, ならびにそれぞれの試料全体の ASR の進行状況の総合評価を示してある。粗骨材には，試料により花崗岩マイロナイトを主体とするものと, 石灰岩または泥質ホルンフェルスを多く含むものとが認められた。そして粗骨材を構成する岩石種のうち，花崗岩マイロナイトに進行した ASR が確認されたが，これはコンクリート構造物の外観目視による劣化程度と，よく対応していた。花崗岩マイロナイトとは，原岩である花崗岩が断層運動の影響下で圧砕（塑性変形と破砕変形）を受けた岩石で，岩石組織はこれらの作用により部分的または全般的に細粒化している。**写真－4.2** に, 花崗岩マイロナイトと石灰岩のそれぞれに発生した ASR の偏光顕微鏡写真を示す。前者では顕著な膨張ひび割れが骨材粒子からセメントペーストに進展している（写真中の矢印）のに対し，後者では微細な膨張ひび割れが骨材粒子内部のみに認められた（写真中の矢印)。これらの粗骨材は ASR 反応性鉱物として，いずれも微晶質石英を含むが，花崗岩マイロナイトのものは断層運動に伴う圧砕作用により粗粒な石英から生成したもの, 石灰岩のものは不純物として含まれる泥分に由来するものである。微晶質石英を多量に含む花崗岩マイロナイトの偏光顕微鏡下での組織を**写真－4.3** に示す。圧砕作用により，写真の左右方向に引き延ばされたり細粒化した石英や岩石の組織がわかる。

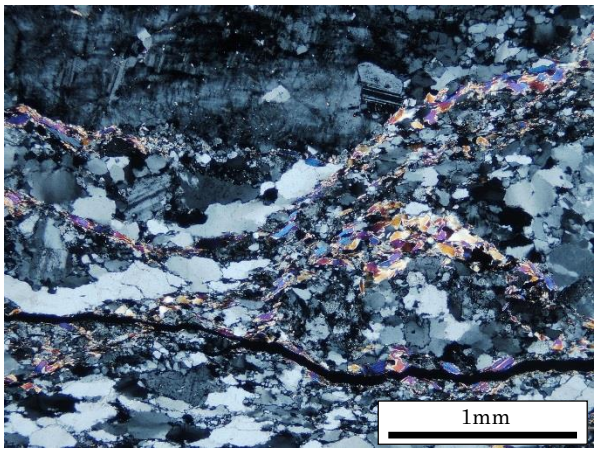
一方，細骨材は全試料に共通で，花崗岩起源の砂であった。細骨材の花崗岩には花崗岩マイロナイトの粗骨材に見られるような圧砕組織は認められないが，コンクリートの切断面において，この砂には ASR ゲルの滲出と疑われる現象が認められ（**写真－4.4**：フーチング D の例)，偏光

顕微鏡下では ASR によるひび割れと疑われる極微細な脈が骨材粒子内に，**写真－4. 5** に示すように存在していた。細骨材の ASR は花崗岩マイロナイトの粗骨材と比較して軽微であり，コンクリート構造物の劣化程度の差異とも対応していないため，劣化への大きな関与は考えられない。しかし，このような微晶質石英を含まない花崗岩に関しては，日本国内では一般に非反応性と認識され，ASR の事例も知られていないことから，ASR 発生の有無を確定するために，後述する走査電子顕微鏡による観察を行った。

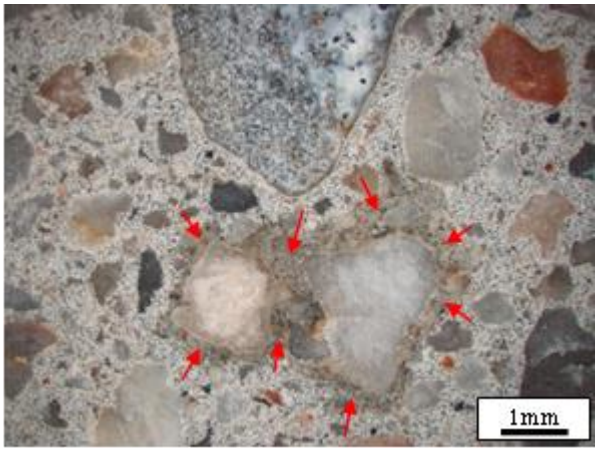
エトリンガイトは，いずれの劣化程度の試料についても，セメントペースト中の気泡や，骨材とセメントペーストとの界面などに多く生成していた。ASR の進行したフーチング A とフーチング B では，**写真－4. 6** に示すように，骨材粒子からセメントペーストへ連続する ASR によるひび割れ内にも，現在ではエトリンガイトが多く生成していた。



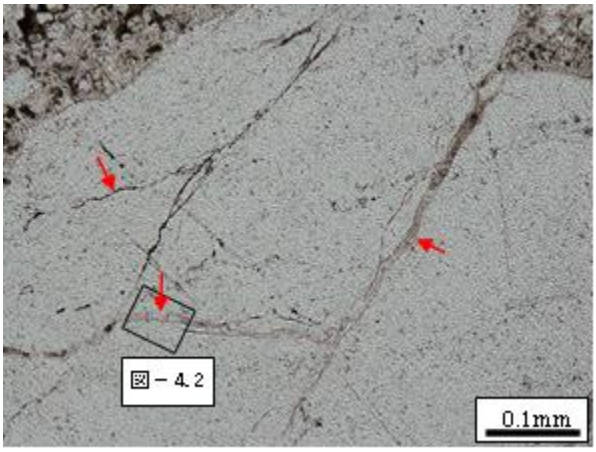

**写真－4. 2　粗骨材に発生した ASR の偏光顕微鏡写真**



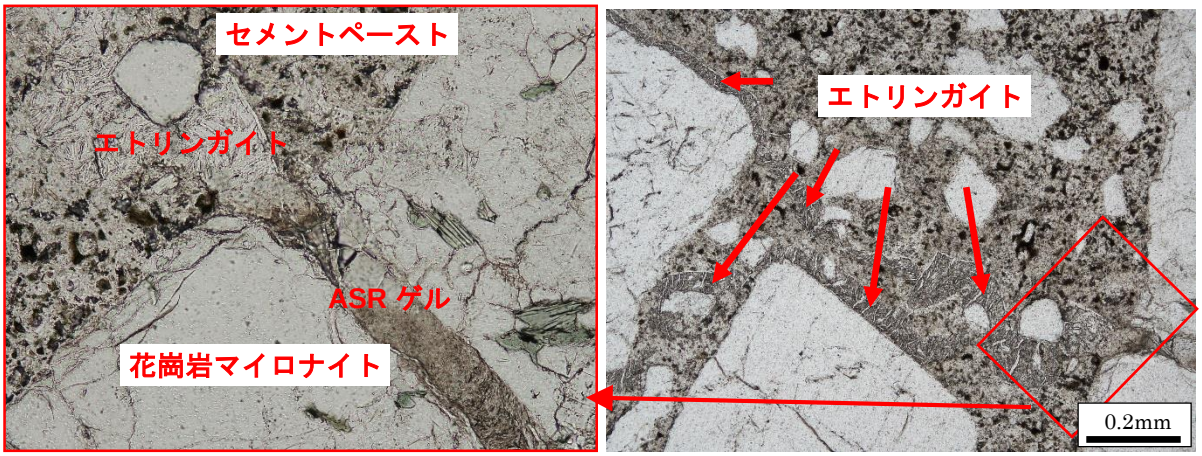

写真－4.3　花崗岩マイロナイトの岩石組織：直交ポーラー




写真－4.4　花崗岩起源の砂と ASR ゲルの滲出




写真－4.5　花崗岩起源の砂に見られる脈

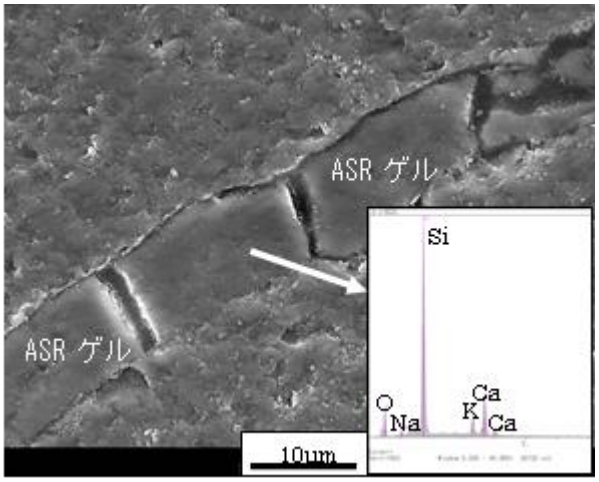



写真－4.6　エトリンガイトの産状（フーチング A）

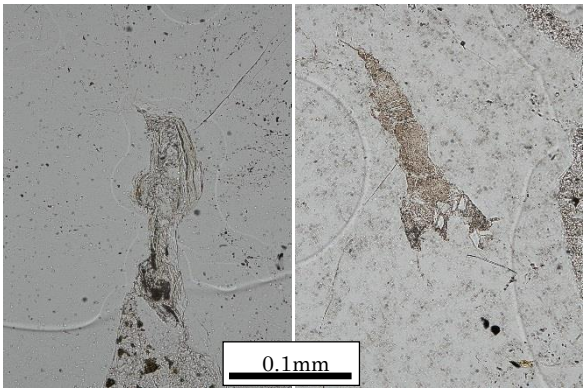
（2）走査電子顕微鏡による観察

ASR ゲルの滲出や極微細な脈を伴う花崗岩の細骨材粒子について，SEM-EDS による分析を行った。**図－4.2** は**写真－4.5** の脈の二次電子像による拡大と成分分析結果である。形態と成分から非晶質の ASR ゲルであり，脈はひび割れを ASR ゲルが充填したものであることが確かめられ

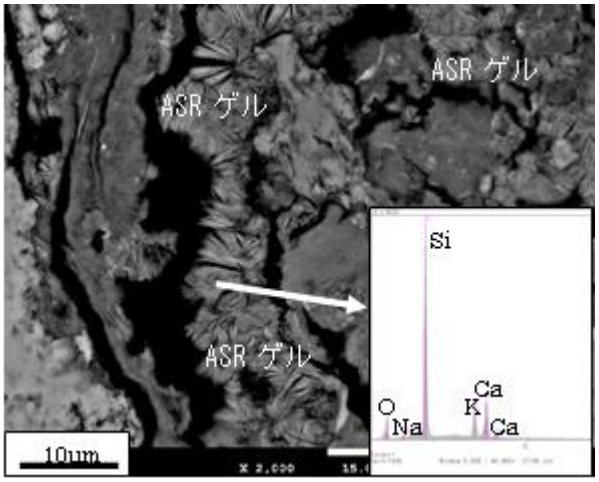
た。また，この花崗岩には**写真－4.7** に示すように，白雲母または黒雲母が変質し，非晶質ないし低結晶質の物質を生成している部分が偏光顕微鏡下でしばしば見られたが，このような部分の多くには，**図－4.3** の反射電子像と成分分析結果に示すように，ASR ゲルの結晶化による二次生成物（ロゼット状の ASR ゲル）が生成していた。以上から，花崗岩の細骨材粒子にも軽微な ASR が確認され，それは雲母の変質物に起因する可能性が示唆された。




**図－4.2　脈の二次電子像と成分分析結果**




**写真－4.7　花崗岩起源の砂に見られる雲母の変質物**




**図－4.3　雲母の変質物付近の反射電子像と成分分析結果**

### 4.7.2　水溶性アルカリ量の分析

水溶性アルカリ量の測定結果から得られた等価アルカリ量（$Na_2Oeq$）を**表－4. 4** に示す。数値は，総プロ法によるアルカリの回収率補正を行ったものである。また，コンクリートの単位容積質量は 2250kg/m$^3$ と仮定してある。

アルカリ総量の推定値はいずれの試料も比較的小さく，日本国内における総量規制値 3.0kg/m$^3$ と比較しても，十分に小さいものであった。また，アルカリ総量の推定値と ASR の進行ならびに劣化程度とに相関は見られなかった。したがって，ASR の進行ならびに劣化程度の差異はアルカリ量ではなく，粗骨材の岩石種に依存していることが確認された。

**表－4. 4　水溶性アルカリ量（$Na_2O_{eq}$）の分析結果**

| フーチング | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| % | 0.1139 | 0.1126 | 0.0897 | 0.1102 |
| kg/m$^3$ | 2.56 | 2.53 | 2.02 | 2.48 |

## 4.8　考察

### 4.8.1　劣化の主原因

フーチング A とフーチング B の粗骨材は花崗岩マイロナイトからなり，一方でフーチング C とフーチング D は石灰岩または泥質ホルンフェルスを多く含むものであった。膨張と劣化の原因であり証拠でもある ASR ゲルで充填された膨張ひび割れは，花崗岩マイロナイトの粗骨材に顕著に生成していることが確認され，これがコンクリート構造物の外観目視による劣化程度とも一致していた。花崗岩マイロナイトは，ASR 反応性鉱物として微晶質石英を多量に含んでいた。したがって，劣化には花崗岩マイロナイトの粗骨材に発生した ASR が最も大きく関与していると考えるのが自然である。また，アルカリ総量の推定値と ASR の進行ならびに劣化程度とに相関が見られないことから，ASR の進行程度の差異は花崗岩マイロナイトと他の岩石の反応性の差異が関与しているものと考えられる。

### 4.8.2　エトリンガイトの産状と DEF との関係

いずれの劣化程度の試料についても，セメントペースト中の気泡や，骨材とセメントペーストとの界面などにエトリンガイトの生成が多く認められた。とくに，フーチング A とフーチング B では，ASR によるものであることが明らかなひび割れ内にエトリンガイトが多く生成していた（**写真－4. 6**）。したがって，ASR の進行した試料ではエトリンガイトがより多く観察されるが，これらは気泡や ASR によるひび割れなどの既存の空隙に生成したものである。一方，DEF による膨張は C-S-H 中にエトリンガイトが生成することで発生する [5]ものであり，既存の空隙に生成したエトリンガイトは膨張とは無関係である。したがって，エトリンガイトが劣化に寄与した証拠は見出されていない。

### 4.8.3　熱帯気候下での ASR の促進

本研究ではタイ国の高速道路構造物において，比較的アルカリ量の少ない環境下での遅延膨張性骨材による比較的早期の ASR 劣化が確認された。このように，温暖・湿潤な地域においては，遅延膨張性骨材にあっても ASR が促進されることは，従来の研究 [4]からも知られている。熱帯気候下などでは，ASR に関して日本国内より厳しい環境が推察される。

さらに，タイ国の高速道路のフーチングはタールエポキシなどの防水処理がなく，また一部は埋め戻しもされていないために，降雨時に周囲が湛水する。そのため，コンクリートへの水分供

給が著しく，これも熱帯気候と相まって ASR を促進した要因と考えられる。コンクリートの湿潤状態を緩和するために，フーチングの表面防水処理と埋め戻しを行うことは，当面の ASR 抑制対策として有効であると考えられる。

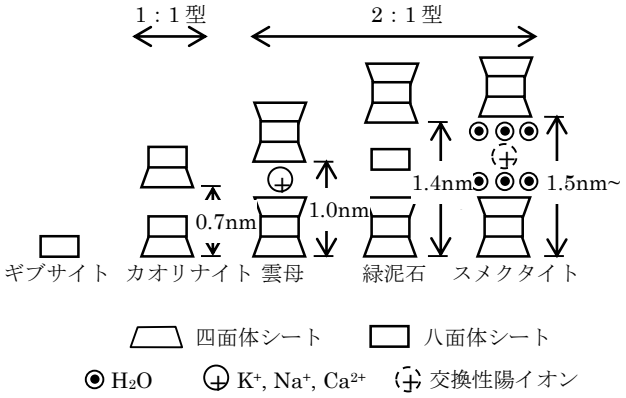
### 4.8.4　細骨材の ASR と反応性鉱物

粗骨材と比較して軽微であり，劣化に大きく関与したとは考えられないが，花崗岩起源の砂からなる細骨材にも ASR が認められた。微晶質石英を含まない花崗岩に関して，日本国内では一般に非反応性と認識されているが，熱帯地域で風化した花崗岩が割れ目を充填したオパールにより反応性を示した事例が世界にはある [6]。

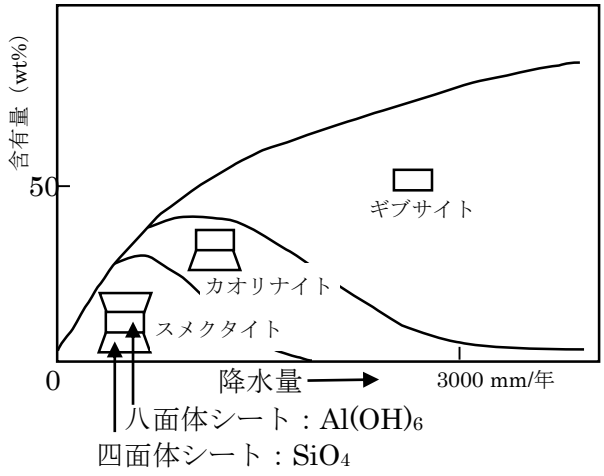
本研究の観察範囲では，細骨材の ASR は花崗岩の砂にしばしば見られる白雲母または黒雲母の変質により生成した非晶質ないし低結晶質な物質に伴い発生しているのが確認された。これらの物質の正体として，アロフェンやオパールなどが考えられるが，ASR 反応性鉱物である後者の成因について，以下のとおり考察する。

岩石が著しい変質を受け，オパールを生成する原因として，一般には珪化変質作用などを含む熱水変質作用が考えられる。これには岩石全体に著しい成分溶脱と珪化（シリカの付加）が伴われる場合が多いが，本試料の花崗岩の観察結果はそのようなものではない。

次に，タイ国の温暖・湿潤な熱帯性の気候下での風化作用について考える。雲母と，その変質により生成する粘土鉱物はいずれも，$SiO_4$ が 2 次元的に連続した四面体シートと $Al(OH)_6$ が同じく 2 次元的に連続した八面体シートとを基本的な構造とする（**図－4.4**）[7]。日本国内で粗骨材や細骨材中に見られる花崗岩では，四面体シートと八面体シートが 2：1 に組み合った雲母の風化変質により，同じく 2：1 に組み合ったスメクタイトや緑泥石を生成しているのが観察される場合が多い。しかし，タイ国においては高温・多湿な環境と水質の違いなどにより，1：1 に組み合ったカオリナイトや四面体シートを持たないギブサイトを生成（ラテライト化作用）し，結果として溶脱・遊離した四面体シートがオパールなどのシリカ鉱物の生成に関与した可能性がある。すなわち，風化作用により生成する鉱物組み合わせは環境により異なり，とくに気候による影響としては降水量が増すにつれ，風化生成物として，スメクタイト→カオリナイト→ギブサイト，のように卓越する変質鉱物が異なることが知られており [8]，温度が高いことにより風化変質そのものも促進される（**図－4.5**）[8),9)]。一方，日本の花崗岩にも変質によりカオリナイトを多量に生じたものがあり，著しいものは陶磁器原料としても使用されているが，その多くは過去の温暖・湿潤な地質時代の風化変質により生成した化石風化殻 [10)]または熱水変質に由来するものと考えられている。また，コンクリート用骨材として利用されることもない。したがって，日本国内で花崗岩が ASR を起こした事例はほとんどないが，とくに熱帯～亜熱帯の多雨地域では，本来は ASR 反応性を示さない岩石が風化変質することにより ASR を発生する可能性が考えられる。なお，変質した雲母などについて，今後，詳細に分析して確認する必要はある。




**図－4.4　層状珪酸塩の構造模式図** [7]を改変




**図－4.5　風化作用における降水量と生成物** [8),9)]を改変して作成

## 4.9　まとめ

本章では，日本国内とは様々な点で異なる環境にある海外での ASR の事例を扱った。ASR やその他によるコンクリートの劣化原因を適切に判断するためには，岩石学的試験が非常に有効であることが確かめられた。岩石学的試験は，膨張ひび割れなどの劣化を引き起こした組織を直接的に観察し，また複数の現象の関連性や順序を読み取り，真の劣化原因を特定するものであり，海外の ASR の評価などの特異な事例においても普遍的に有効である。

本章で得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) コンクリート構造物の劣化程度と観察された ASR の進行状況，骨材岩石種などとの対応から，劣化には ASR の関与が最も大きいと考えられた。ASR は粗骨材の微晶質石英を含む花崗岩マイロナイトに，比較的アルカリ量の少ない環境下で発生していた。

(2) いずれの試料についてもエトリンガイトの生成が多く認められた。ASR の進行した試料ではより多く観察されたが，ASR によるひび割れなどの既存の空隙に生成したためであり，エトリンガイトが劣化に寄与した証拠は見出されていない。

(3) 細骨材の花崗岩中で雲母の変質により生成した非晶質ないし低結晶質な物質に伴い，軽微な ASR が発生しているのが観察された。花崗岩に含まれる反応性鉱物には熱帯多雨地域での風化作用が関与している可能性が考えられる。

(4) 遅延膨張性骨材による比較的アルカリ量の少ない環境下での早期反応やオパールを生じる風化作用の可能性，などの熱帯多雨地域における日本国内とは異なる ASR の発生状況が考えられた。日本国内とは気候などの環境が異なる海外においては，反応性骨材の種類，ASR の発生状況ともに大きく異なる可能性がある。

(5) 本研究の対象となったタイ国の高速道路構造物において，フーチングの表面防水処理と埋め戻しは，当面の ASR 抑制対策として有効であると考えられる。

**参考文献**


1) 広野真一，安藤陽子，山田一夫，鳥居和之：タイ国の高速道路で発見された熱帯地域における ASR の実態，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1084-1089，2014.
2) Kazuo Yamada, Shinichi Hirono and Yoko Ando：ASR problems in Japan and a message for ASR problems in Thailand, Journal of Thailand Concrete Association, Vol.1, No.2, pp.1-18, Jul.-Dec.2013.
3) Lalita, B., Warangkana, S., Pongsak, C. and Somnuk, T.：Diagnosis of a Combined Alkali Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation, Tammasat International Journal of Science and Technology, Vol.17, No.4, pp.22-35, Oct.-Dec. 2012.
4) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., and Yamato, T.：Late-Expansive ASR due to Imported Sand and Local Aggregates in Okinawa Island, Southwestern Japan, Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Trondheim, Norway, pp.862-873, Jun.2008.
5) Thomas, M. et al.：Diagnosing Delayed Ettringite Formation in Concrete Structures, Cement and Concrete Research, Vol.38, No.6, pp.841-847, 2008.
6) Thaulow, N.：Alkali-Silica Reaction in the Itezhitezhi Dam Project, Zambia, Proceedings of the 6th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), pp.471-477, Jun. 1983.
7) 白水晴雄：粘土鉱物学―粘土科学の基礎―，朝倉書店，pp.11-25，1988.
8) Barshad, I.：The Effect of a Variation in Precipitation on the Nature of Clay Mineral Formation in Soils from Acid and Basic Igneous Rocks, Proceedings Inter. Clay Conf., Jerusalem, Vol.1, pp.167-173, 1966.
9) 吉村尚久ほか：粘土鉱物と変質作用，地学団体研究会，pp.156-161，2001.
10) 木宮一邦：三河高原の風化殻とその形成時期―花こう岩の風化・第 3 報―，地質学雑誌，Vol.87，No.2，pp.91-102，1981.

# 第５章　北陸地方における代表的な反応性骨材の岩石学的特徴と推奨される ASR 抑制対策

## 5.1　まえがき

本章では推奨される ASR の抑制対策の方法について，北陸地方の事例を検討する。

火山帯に位置するわが国には，地質年代の新しい火山岩類が広く分布し，安山岩などがコンクリート用骨材として各地で利用されている。一方，このような火山岩類は一般に，火山ガラス，クリストバライト，トリディマイト，オパールなどを含み，ASR による被害を発生してきた[1)]など。北陸地方においても安山岩は骨材資源として，砂利と砕石のいずれにも非常に重要であるが，反面，安山岩による顕著な ASR の発生が非常に多く確認されてきた[2),3)など]。わが国の ASR 抑制対策は，アルカリ総量規制によりコンクリートのアルカリ量を低く抑える方法，ASR 抑制効果のある混合セメントの使用，または ASR 反応性試験の結果が「無害」と判定された骨材の使用からなるが，「無害」と判定される骨材の使用に頼ることは，とくに北陸地方での地質状況を考慮すれば，地域の豊富な骨材資源を放棄することであり適当でない。また，北陸地方では冬季の日本海からの季節風や凍結防止剤の散布による，コンクリート中へのアルカリの浸入は避けられず[2),4)]，さらに ASR の反応過程で骨材からアルカリが溶出する問題もあり[5)]，アルカリ総量規制は意味をなさない場合がある。したがって，残る混合セメントの使用に期待が向けられるのは必然的である。とくに，地域内で得られる石炭火力発電の副産物であるフライアッシュを使用する ASR 抑制対策は，地産地消による環境負荷の低減と資源の有効利用を兼ね備え，またコンクリートの様々な耐久性を高めるためにも，非常に前向きな取り組みであると言える。このような事情と期待を背景に，平成 23 年 1 月には，産学官連携による「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」が設立された[6)]。本章の研究は，その一環として行われたものである。

本研究では，北陸地方で流通している代表的な反応性骨材について，岩石学的試験を行うとともに，この地方で供給可能な高品質化したフライアッシュ（分級フライアッシュと称す）を使用することによる ASR 抑制効果を，JIS A 1146 または ASTM C 1260，デンマーク法による促進モルタルバー試験で評価する。また，もう一つの代表的な混和材として，現在広く使用されている高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果も比較して評価するとともに，それぞれによる抑制機構の特徴も考察する。さらに，これらの結果を偏光顕微鏡下での観察により確認し，促進モルタルバー試験結果の検証とともに偏光顕微鏡観察による ASR 判定の有効性を確認する。これらの検討の結果として，当該地域における ASR 抑制対策の基本的な考え方を示す[7),8),9)]。

なお，一般には JIS Ⅱ種品でも同様かつ十分な ASR 抑制効果が期待されるが，高品質化した分級フライアッシュを検討する理由として，北陸地方の骨材には後述するようにきわめて反応性の高いものがあり，地域全体に分布するさまざまな反応性骨材に対して ASR を効果的に抑制することが求められることと，活性度指数やポゾラン反応性を高めたものとして，比較的短期材齢での十分な強度発現，コンクリートの品質やその他の耐久性向上も期待した積極的な検討であることによる。

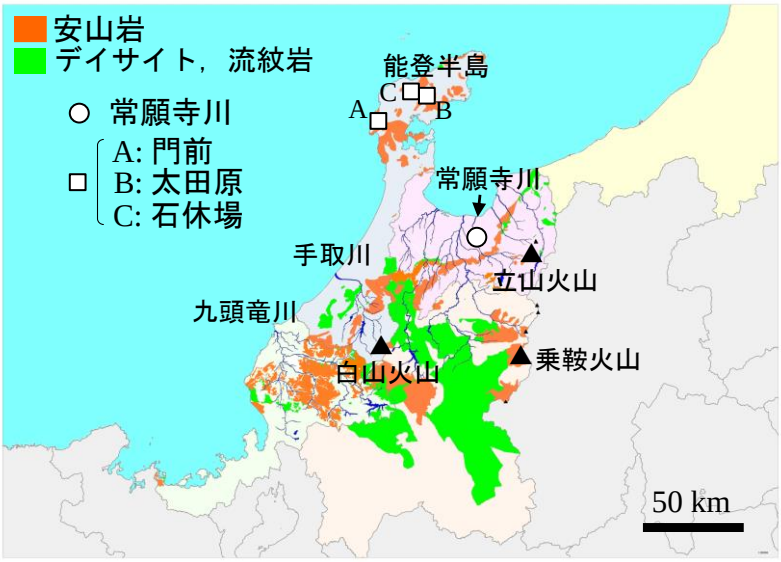
## 5.2　北陸地方の地質と反応性骨材の分布

北陸地方の地形は大きく見ると中部山岳地帯と日本海に面した平野部からなり，急峻な山岳地帯から流れ出す河川により運搬された砂礫が，下流域では大きな海岸平野を形成する。海岸平野は富山・砺波・金沢・福井平野などで，富山平野には黒部川・常願寺川・神通川などが，砺波平野には庄川などが，金沢平野には手取川などが，福井平野には九頭竜川などが，それぞれに砂利資源を育んでいる。したがって，砂利資源が非常に豊富なことが，この地域の特徴でもある。とくに常願寺川はわが国有数の荒れ川であり，砕屑物(砂利資源)の搬出量(発生量)も非常に多い。

北陸地方の骨格となる古第三紀以前に形成された地質構造区分については，日本海側から内陸へ，飛騨帯・(宇奈月帯)・飛騨外縁帯・美濃帯が分布する（**図－3.1**）が，これらの分布とは無関係に，そしてこれらを覆うように新第三紀から現在(第四紀)にいたる新しい時代に生成した火山岩類が広く分布する（**図－3.2**）。すなわち，北陸地方はグリーンタフ地域であり，第四紀(現世)の火山も，主に飛騨山脈とその南部地域ならびに両白山地とその南部地域に分布し，飛騨山脈には立山・乗鞍・御嶽火山などが，両白山地には白山火山などが載る。これらは主には安山岩質マグマの活動で形成されたものである。このような地質に含まれる主な反応性の岩石種としては，新第三紀～第四紀の安山岩を主とする火山岩類（急速膨張性）と，飛騨帯・宇奈月帯・飛騨外縁帯の変成岩類，美濃帯のチャート・珪質頁岩など（遅延膨張性）であり（**図－3.2**），これらの砂利や砂が北陸地方の河川には混入するが，北陸地方では反応性の特に高い前者の急速膨張性の岩石による ASR が多数の顕著な被害を発生してきた[10),11),12)]。一方，大きな河川に恵まれず，砂利資源に乏しい能登地方などでは，新第三紀以降の脆弱な地層からなることもあり，堅硬な安山岩が貴重な砕石資源である[10),11),12),13)]が，これについても多くの被害を発生してきた。

**図－5.1** には北陸地方における火山岩類の詳細な分布が示されている[14)]。安山岩やデイサイト，流紋岩の火山岩類が広く分布していることがわかる。北陸地方の ASR のほとんどは，このうち安山岩により発生しているが，これは火山岩類の潜在反応性が，埋没続成作用の進行による反応性鉱物や火山ガラスの再結晶のため，一般に岩石が古くなるにつれて減少することによる。安山岩の多くは，グリーンタフと呼ばれる地層の上部（中期中新世～鮮新世）のスメクタイト帯や弱変質帯からもたらされた比較的新しい火山岩類またはさらに新期のものであり，急速膨張性である。これに対し，流紋岩やデイサイトの多くが属するグリーンタフ下部（前期中新世）と基盤（漸新世以前）からもたらされた古期（緑泥石帯）のものは，脱ガラス化や再結晶による隠微晶質石英や微晶質石英を含む遅延膨張性である[15)]。火山岩類のなかで安山岩の反応性が最も高いのは，新しい地質年代に安山岩質の火山が多いのに対し，漸新世以前では流紋岩～デイサイト質の火山岩類が卓越しているからである。

なお，野村ほかの研究によると，最近では急速膨張性骨材の反応に加え，同じコンクリート中に，片麻岩などの変成岩や軽微なカタクレーサイト化を受けた花崗岩などの遅延膨張性岩石種の反応も認められるようになってきている[16)]。



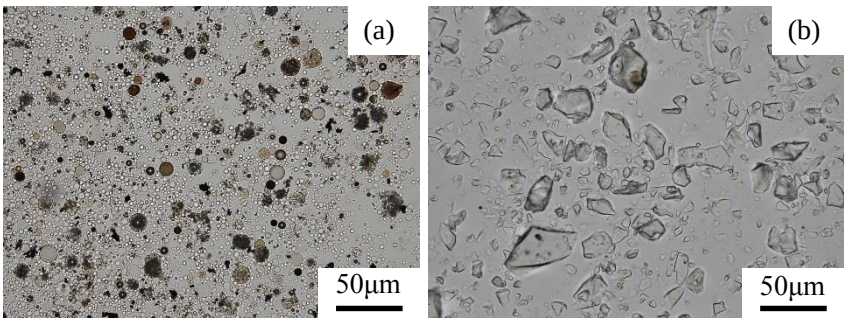

**図－5.1　北陸地方における火山岩類の分布[14)]と本章で使用した骨材産地**

## 5.3　実験目的

北陸地方の代表的な反応性骨材として，常願寺川産川砂利と能登半島産安山岩砕石を検討した。これらの骨材について岩石学的試験を行い，構成鉱物などの ASR 反応性を明らかにするとともに，JIS A 1146 または ASTM C 1260，デンマーク法による促進モルタルバー試験で，分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果を評価し，その結果をさらに偏光顕微鏡による微視的組織の観察などにより検証する。常願寺川産川砂利と能登半島産安山岩砕石（3 種類）の産地を**図－5.1** に示す。

## 5.4　使用材料

使用セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm$^3$，$Na_2O_{eq}$：0.55%）である。分級フライアッシュは地元の北陸電力七尾大田火力発電所で産出するものであり，コンクリートの耐久性や品質向上を目的に，前述の「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」で検討されているものである。これは原料炭の選別や燃焼温度などで品質管理されたもの（JIS Ⅱ種品）から，さらにサイクロンでの分級により微粒化して得られた JIS I 種相当品であり，粒径 22μm 以上の粗大粒子の大半を除去した結果，その平均粒径は 7μm と極めて微粒であり，またガラス相を多く含有するので，ポゾラン反応性に優れている [17]。なお，フライアッシュの ASR 抑制効果は一般に，シリカ質のガラス量と比表面積の影響が大きいことが知られている [18]。高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 の高炉スラグ微粉末 4000（S 社製）である。分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の顕微鏡写真を**写真－5.1** に，物理的性質，活性度指数とフロー値比を**表－5.1** に，また蛍光 X 線による化学組成の分析結果を**表－5.2** に示す。




**写真－5.1　使用した分級フライアッシュ(a)と高炉スラグ微粉末(b)**

**表－5.1　分級フライアッシュ(FA)と高炉スラグ微粉末(BFS)の物理的性質，活性度指数およびフロー値比**

| 混和材 | 密度 | ブレーン比表面積 | 活性度指数 (材齢，%) | | フロー値比 |
|---|---|---|---|---|---|
| | (g/cm$^3$) | (cm$^2$/g) | 28 | 91 | (%) |
| FA | 2.43 | 4780 | 91 | 104 | 107 |
| BFS | 2.90 | 4120 | 103 | 108 | 101 |

**表－5.2　分級フライアッシュ(FA)と高炉スラグ微粉末(BFS)の化学組成**　(mass%)

| 混和材 | LOI | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | $Na_2O$ | $K_2O$ | $TiO_2$ | $P_2O_5$ | MnO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FA | 2.0 | 53.60 | 28.93 | 6.74 | 3.20 | 0.77 | 0.22 | 0.30 | 0.72 | 1.39 | 0.98 | 0.09 |
| BFS | 0.97 | 33.14 | 14.19 | 0.33 | 42.96 | 5.29 | 1.97 | 0.25 | 0.28 | 0.53 | 0.01 | 0.28 |

## 5.5　常願寺川産川砂利 [7),8)]

### 5.5.1　常願寺川産川砂利の岩石学的特徴と ASR 被害

北陸地方で産出される川砂や川砂利については，上流域に分布する反応性の高い安山岩などの火山岩類が混入し，そのペシマム現象が ASR の発生と密接に関係している [2)]。一方で，骨材は河川水系ごとに多様な岩石種構成をもつため，河川流域に着目した ASR 劣化の実体を把握することが必要となる。富山市周辺の常願寺川や神通川の流域では，鉄筋の破断やコンクリートの強度低下などを伴う深刻な ASR 劣化が観察されている。**図－5.1** に示されるように，火山岩類の分布が連続する中部山岳地帯から多数の大きな河川が日本海に流れこむ富山県などでは，安山岩などの反応性の岩石を含む川砂利資源が豊富に存在するが，とくに立山火山の載った立山連峰を源流に持つ常願寺川産の骨材を使用した場合は，その例を**写真－5.2** と**写真－5.3** に示すように ASR 劣化が著しくなり，鉄筋破断が発生する可能性が高いことが確認されている [19)]。したがって，常願寺川産川砂利は，実構造物での ASR 被害も多く，北陸地方を代表する高反応性骨材の 1 つであると言える。なお，化学法（JIS A 1145）による結果の一例は，Sc/Rc=242/72 で「無害でない」である [17)]。

常願寺川産川砂利より作製した薄片試料を偏光顕微鏡下で観察し，それらを構成する岩石の種類や構成鉱物を明らかにした。常願寺川産川砂利は安山岩と非反応性の花崗岩質岩の 2 種類からほぼ構成され，川砂利としては比較的単純な岩石種構成を持つものであった。ただし，いずれも多数の支流から集積したものである。そのため，花崗岩質岩には石英や長石類の量比や組織により，花崗岩，花崗閃緑岩，閃緑岩あるいは片麻岩などに細分可能な岩石が含まれていたが，いずれも比較的粗粒な石英，斜長石，カリ長石，黒雲母，角閃石などから構成され，反応性鉱物をほとんど含まないものであった。同様に，安山岩にもさまざまな岩相のものが混在していた。斑晶は斜長石斑晶，単斜輝石斑晶，斜方輝石斑晶，鉄チタン鉱物斑晶のほか，骨材粒子により角閃石斑晶あるいは黒雲母斑晶を含むものが認められた。石基の組織も骨材粒子により多様であり，斜長石，クリストバライト，トリディマイト，単斜輝石，斜方輝石，石英，鉄チタン鉱物，火山ガラスなどをさまざまな量比で含み，また変質により生成したオパールを含むものも認められた。このように，常願寺川産川砂利は安山岩中に反応性鉱物として火山ガラスのほかに，反応性の非常に高い，クリストバライト，トリディマイト，オパールを多く含み，急速膨張性が顕著なものであった。常願寺川産川砂利における安山岩の構成割合をポイントカウンティングにより求めた値は 36～43%程度 [7),8)]であり，この河川水系の骨材を使用した，ASR 試験により求められた安山岩混入率のペシマム値である 40% [20)] とよく一致していた。オパールなどの反応性鉱物の含有とそれらのペシマム値付近での量比より，この骨材がきわめて高い反応性を持つことが明らかとなった。

常願寺川産川砂利に含まれる岩石種と反応性鉱物などの構成鉱物を**表－5.3** に示す。また，常願寺川産川砂利に含まれる安山岩中の主要な反応性鉱物の含有形態を**写真－5.4** に示す。

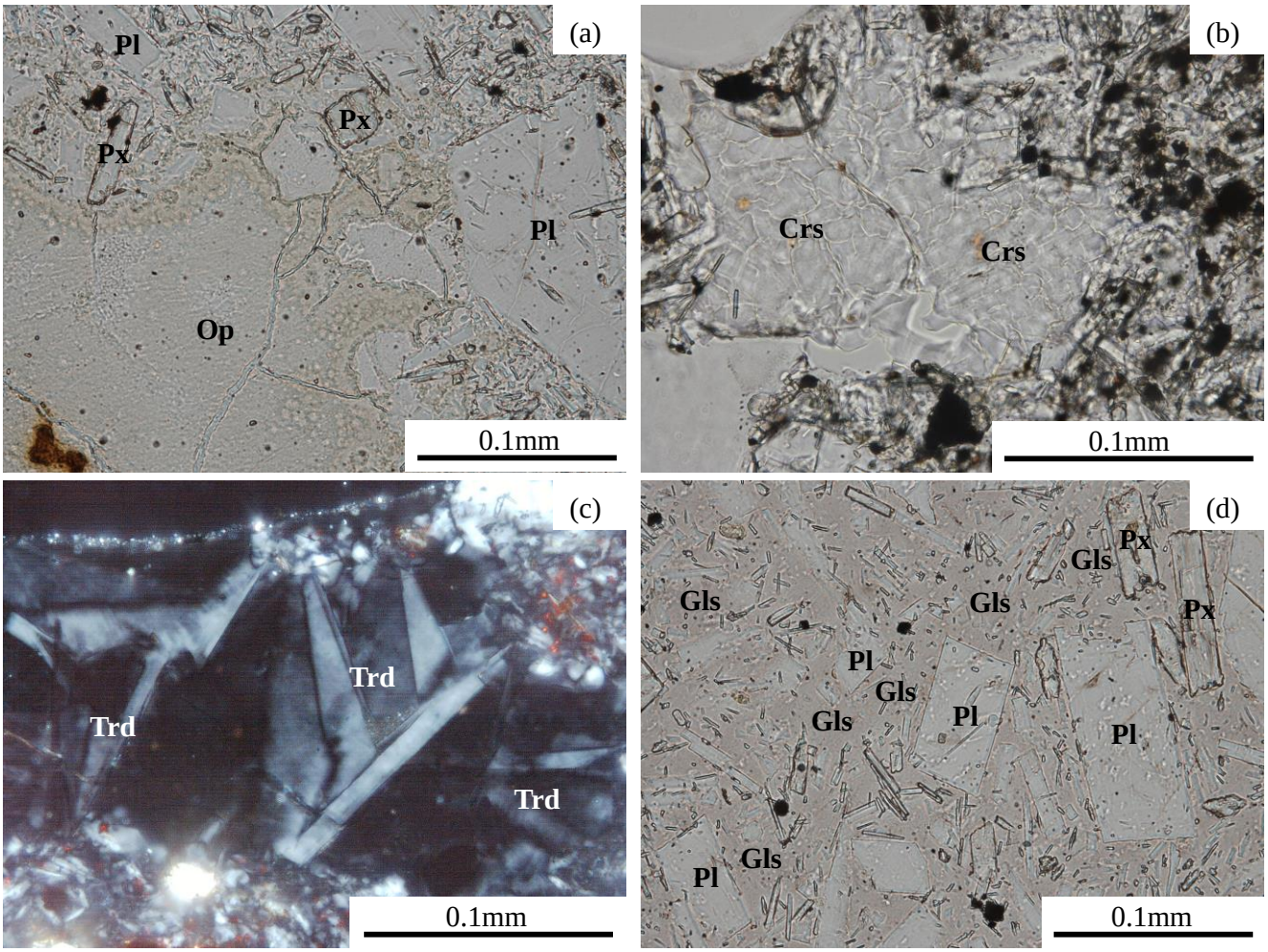
写真－5.2　常願寺川産川砂利を使用した橋脚の ASR 劣化(A 橋)

写真－5.3　常願寺川産川砂利を使用した橋脚の ASR 劣化(B 橋)

表－5.3　常願寺川産川砂利の岩石種と構成鉱物 [8)]

| 岩石種 | | vol.% | 構成鉱物 |
|---|---|---|---|
| 岩石片 | 花崗岩質岩 | 39 | 斜長石，石英，角閃石，黒雲母，カリ長石，緑泥石，緑れん石，くさび石，ぶどう石，鉄チタン鉱物，輝石 |
| | 安山岩 | 36 | 斜長石，クリストバライト(++)，トリディマイト(++)，ガラス(++)，輝石，鉄チタン鉱物，石英，オパール(+)，スメクタイト，黒雲母，角閃石，かんらん石，燐灰石 |
| | 玄武岩 | 2 | 斜長石，輝石，ガラス(+)，鉄チタン鉱物，クリストバライト(+) |
| 結晶片 | | 23 | 斜長石，石英，カリ長石，黒雲母，輝石，角閃石，緑泥石 |

ASR 反応性鉱物　多量 +++ ～ ++ ～ + 少量




**写真－5. 4　常願寺川産川砂利に含まれる ASR 反応性鉱物**

(a) 変質した安山岩中のオパール　(b) 安山岩中のクリストバライト

(c) 安山岩中のクリストバライト:直交ポーラー　(d) 安山岩中のガラス

Op: オパール；Crs: クリストバライト；Trd: トリディマイト；Gls: ガラス；Pl: 斜長石；Px: 輝石

### 5.5.2　常願寺川産川砂利の混合セメントによる ASR 抑制効果確認試験

（1）試験方法

a）JIS A 1146 による促進膨張試験

分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果を確認するため，JIS A 1146 に従い, 促進膨張試験を行った。分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末の混合率については，実用的な値として，それぞれ普通ポルトランドセメントに対し，15%または 42%での質量置換（FA15%，BFS42%と略す）とし，分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を混合しない場合（OPC と略す）と比較した。アルカリ量はセメントと分級フライアッシュ，高炉スラグ微粉末の合計に対して，$Na_2O_{eq}$ で 1.2%となるように NaOH で調製した。

JIS A 1146 の判定では，温度 40℃，相対湿度 95%以上での，26 週の促進養生期間により，0.100%未満の膨張を「無害」，また 0.100%以上の膨張を「無害でない」と判定する。

b）デンマーク法による促進膨張試験

分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果を確認するため，デンマーク法による促進膨張試験を行った。試験体にアルカリ添加は行わず，分級フライアッシュまたは高炉

スラグ微粉末の置換率，配合，骨材粒度，試験体寸法などは，JIS A 1146 と同様に作製した。

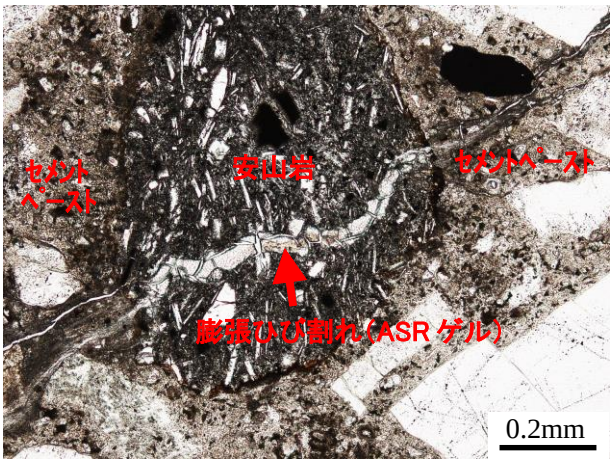
デンマーク法の判定では，温度 50℃の飽和 NaCl 溶液中への浸漬による 3 カ月間の促進養生期間で，0.1%未満の膨張を「無害」，0.1～0.4%の膨張を「無害と有害の両者が存在（不明確）」，0.4%以上の膨張を「有害」とする。

c）偏光顕微鏡による微視的組織の観察

促進膨張試験の終了後，各々の試験体から厚さ 15~20μm の鏡面研磨薄片試料を作製した。これについて，偏光顕微鏡下で観察し，ASR の発生状態を確認した。ASR の発生状態は Katayama et al.[21]に従い，その進行の程度を**表－5.4** のように分類した。この観察は，ASR の発生として単に ASR ゲルや反応リムの有無を論ずるものではなく，実際の膨張や劣化と密接に関連した，ASR ゲルに充填された膨張ひび割れの発生と発達を評価するものである。膨張ひび割れの一例を**写真－5.5** に示す。なお，デンマーク法では NaCl 溶液に接する試験体周縁部と，それを除いた内部で ASR の発生状態が大きく異なるため，両者を区別して評価した。

**表－5.4　Katayama et al.[21]に基づく ASR の発生状態の分類**

| ステージ | ASR の進行状態 |
|---|---|
| I | 反応リムの形成と骨材周囲への ASR ゲル/ゾルの滲出 |
| II | 骨材粒子内部に ASR ゲルに充填された膨張ひび割れの形成 |
| III | 骨材粒子からセメントペーストへの ASR ゲルに充填された膨張ひび割れの進展 |
| IV | ASR ゲルの充填した連続的な膨張ひび割れ網の形成と ASR ゲルの気泡への浸入 |




**写真－5.5　安山岩の骨材粒子からセメントペーストに延びる膨張ひび割れの偏光顕微鏡写真**
**（JIS A 1146 OPC 試験体）**

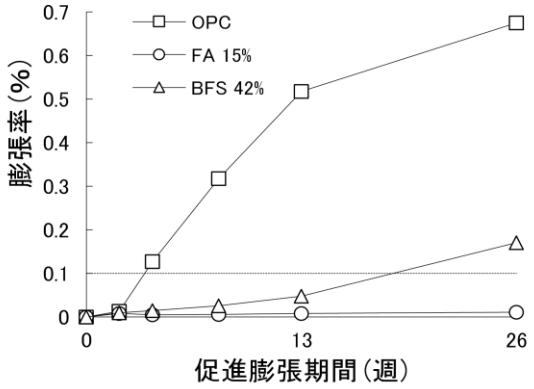
d）分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の反応状態と生成物の観察

偏光顕微鏡観察に用いた鏡面研磨薄片試料を使用し，走査電子顕微鏡と併設のエネルギー分散型 X 線分析装置（SEM-EDS）により，フライアッシュと高炉スラグ微粉末のモルタル中での反応状態と生成物を観察・分析した。装置は日本電子社製電界放射走査電子顕微鏡 JSM-7001F と同装置に付属の OXFORD 社製エネルギー分散型 X 線分析装置を使用した。

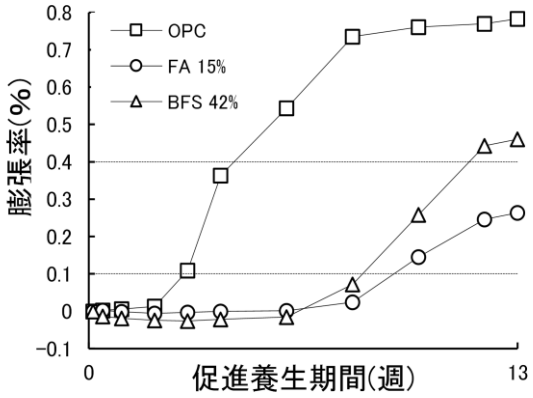
（2）試験結果と考察

a）JIS A 1146 による促進膨張試験

膨張挙動を**図－5.2** に示す。FA15%と BFS42%では，いずれも膨張が大きく抑制された。とくに，FA15%は 6 カ月の期間中に膨張を全く示さず，判定も「無害」となった。このことから，分級フライアッシュによる ASR 抑制効果がとくに優れていることが確認され，その実用化に大きな期待が持たれた。




**図－5.2　モルタル試験体の膨張挙動（JIS A 1146）**




**図－5.3　モルタル試験体の膨張挙動（デンマーク法）**

b）デンマーク法による促進膨張試験

膨張挙動を**図－5.3** に示す。FA15%と BFS42%では，ともに膨張が大きく抑制された。FA15%は多少の膨張を示したものの，JIS A 1146 による場合と同様に，BFS42%より大きく抑制され，その判定は「不明確」であった。実構造物においては，デンマーク法に匹敵するような過酷な環境は想定しがたいことを考慮すれば，この結果においても分級フライアッシュの実用化に大きな期待が持たれたと言える。

c）偏光顕微鏡による微視的組織の観察

促進膨張試験終了後の試験体を偏光顕微鏡下で観察し，ASR の進行の程度を試験体ごとに評価した。その結果を**表－5.5** に，また反応性骨材粒子に発生した膨張ひび割れの状態を試験体ごと（デンマーク法では内部と周縁部をそれぞれ）に**写真－5.6** に示す。ASR の進行の程度 II では骨材粒子内に，III と IV ではセメントペーストに進展した膨張ひび割れが認められ，ひび割れ幅も進行の程度に対応しているのがわかる。なお，進行の程度 IV では，写真の反応性骨材粒子から遠く離れたセメントペーストまで顕著な膨張ひび割れが高密度に分布し，セメントペーストの気泡中に ASR ゲルが頻繁に浸入していた。偏光顕微鏡下での観察による評価結果とその膨張率との関係を**図－5.4** に示す。JIS A 1146 の FA15%では ASR が十分に抑制され，膨張ひび割れが観察されなかったが，これに対応して促進膨張試験結果でも膨張が発生していない。その他の試験体においても，観察結果と膨張率とはよく対応していた。なお，デンマーク法の FA15%と BFS42%では，40×40mm の試験体断面において，NaCl 溶液に接する試験体周縁部（5mm 程度）では，内部に対して，より進行した ASR が観察され，ポゾラン反応による組織緻密化により内部へのアルカリ浸透が抑制されていることが確認された。また，膨張率は内部での ASR の進行の程度によく対応していた。

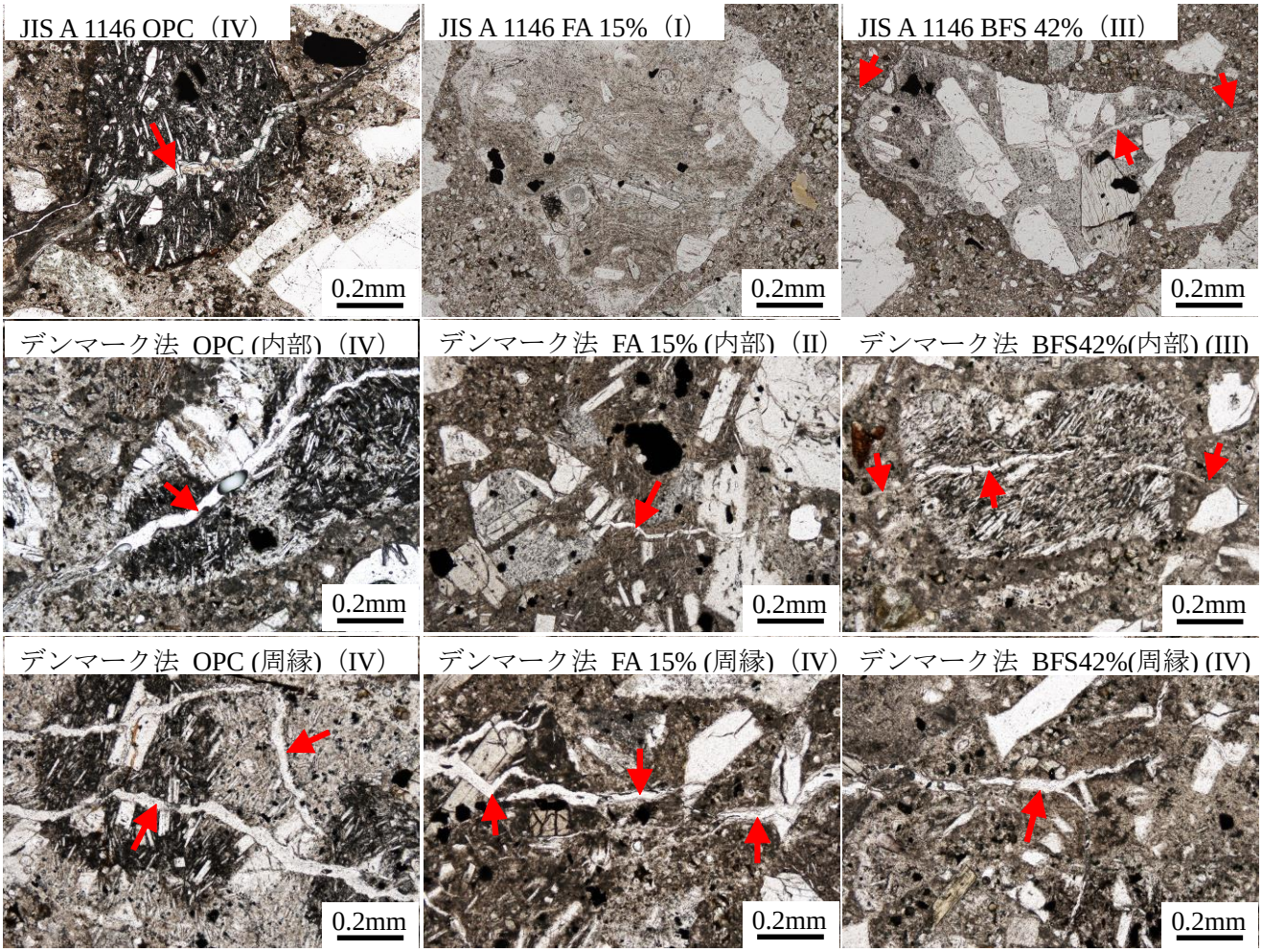
膨張が発生した試験体として，最も膨張率の小さかったのは JIS A 1146 の BFS42%であったが，この試験体中の膨張ひび割れはオパールなどの極めて反応性の高い鉱物を含む安山岩のみに

認められた。したがって，本研究の結果においては，オパールなどを含み，極めて反応性の高い常願寺川産の川砂利に対しては，高炉スラグ微粉末を 42%で混合した場合でも，ASR の抑制は十分とは言えなかった。

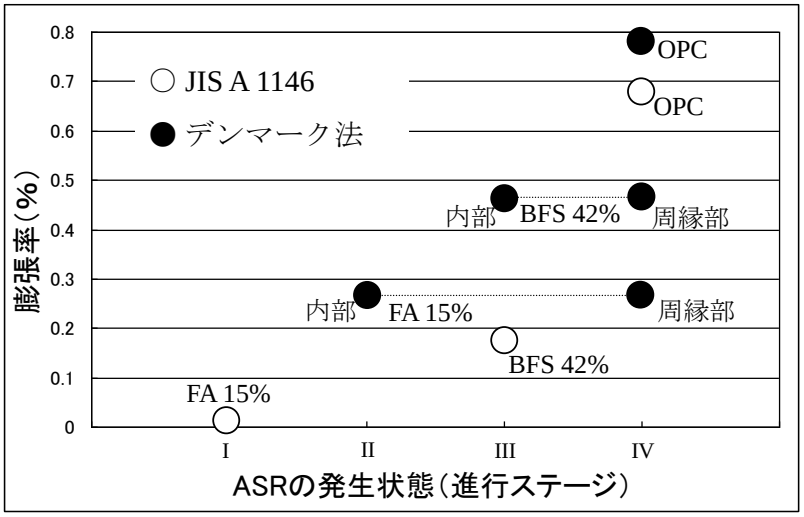
**表－5.5　偏光顕微鏡による劣化状態の評価結果（進行ステージ）**

| | OPC | FA 15% | BFS 42% |
|---|---|---|---|
| JIS A 1146 | IV | I | III |
| デンマーク法 | IV－IV | II－IV | III－IV |

デンマーク法：内部－周縁部



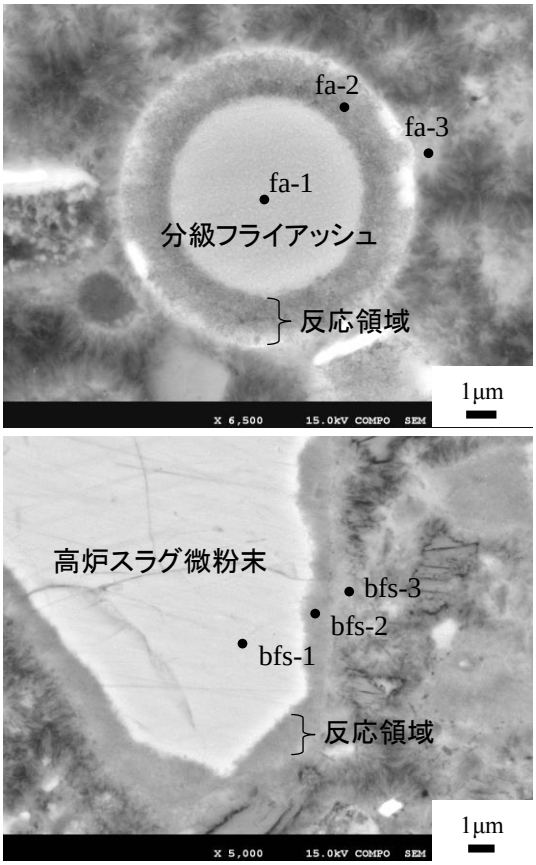

**写真－5.6　モルタル組織（ASR ゲルの充填した膨張ひび割れ）の偏光顕微鏡写真**




**図－5.4　偏光顕微鏡による劣化状態の評価結果と膨張率との関係**

d）分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の反応状態と生成物の観察

走査電子顕微鏡とエネルギー分散型 X 線分析装置（SEM-EDS）により，分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の促進膨張試験終了後の試験体中での反応状態とポゾラン反応生成物の特徴を観察した結果，JIS A 1146 とデンマーク法のいずれとも，分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の粒子周縁部に 1～2μm 程度の非常に狭い反応領域と，そこから粒子近傍の空隙に向かって成長した生成物が観察された。JIS A 1146 の試験体における，これらのポゾラン反応生成物について，反射電子像を**図－5.5** に，また EDS により求めたポゾラン反応生成物の Ca/Si 比を**表－5.6** に示す。とくに，分級フライアッシュについては粒子周縁部の反応領域に，0.9 程度の低 Ca/Si 比の C-S-H の生成が確認された。フライアッシュと高炉スラグ微粉末の ASR 抑制のメカニズムに関して，フライアッシュではポゾラン反応生成物としての低 Ca/Si 比の C-S-H がアルカリイオンを吸着することによる，細孔溶液の pH 低減作用が大きく貢献する[22),23)]のに対し，高炉スラグ微粉末ではフライアッシュと同程度の ASR 抑制効果を得るための置換率が大きいことからも，セメントのアルカリ希釈作用による効果が大きいこと，さらにデンマーク法などのようなアルカリ外来型の試験では，混和材の種類に関わらずポゾラン反応での組織緻密化による内部へのアルカリ浸透の抑制効果も大きいことが指摘されている[24),25)]。本研究の結果では，分級フライアッシュの ASR 抑制効果が高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果より優位であり，さらには，その優位性がデンマーク法よりも JIS A 1146 で顕著であったが，これは上記の見解を支持するものであると考える。すなわち，分級フライアッシュの JIS A 1146 における ASR 抑制効果の優位性の理由として，微細な粒子の周囲の反応領域の増大とともに，生成した低 Ca/Si 比の C-S-H による内在アルカリの吸着がもたらす細孔溶液の $OH^-$ の減少の効果が最も大きいと推察された。




**図－5.5　JIS A 1146 試験体中の分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の反射電子像**

**表－5.6　ポゾラン反応生成物の Ca/Si 比**

| fa-1 | fa-2 | fa-3 | bfs-1 | bfs-2 | bfs-3 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.05 | 0.88 | 1.64 | 1.39 | 1.47 | 1.58 |

※分析点は**図－5.5** に示してある。

（3）常願寺川産川砂利の混合セメントによる ASR 抑制効果確認試験のまとめ

北陸地方の代表的な砂利資源であるとともに，わが国有数の高反応性骨材でもある常願寺川産の川砂利に対して，分級フライアッシュ 15%と高炉スラグ微粉末 42%の質量置換による ASR 抑制効果を，JIS A 1146 とデンマーク法によるモルタルバー法で検証した。その結果，以下のことが明らかになった。

a）分級フライアッシュ 15%と高炉スラグ微粉末 42%の質量置換により，JIS A 1146 での膨張が大きく抑制された。とくに，分級フライアッシュ 15%では膨張を全く示さず，非常に優れた ASR 抑制効果を発揮した。デンマーク法でも，ともに膨張が大きく抑制された。分級フライアッシュ 15%では多少の膨張を示したものの，JIS A 1146 による場合と同様に，高炉スラグ微粉末 42%の場合よりも，膨張を大きく抑制した。

b）偏光顕微鏡下での観察による ASR の進行程度と，試験体の膨張率とは対応していた。フライアッシュ 15%置換による JIS A 1146 の結果では ASR が十分に抑制され，膨張ひび割れが観察されなかった。一方，本研究ではオパールなどを含み極めて反応性の高い粒子に対して，高炉スラグ微粉末 42%置換による ASR の抑制は十分とは言えなかった。

c）SEM-EDS による分析結果より，フライアッシュの反応領域は粒子表面付近の 1 ～2μm 程度に

限定されていたが，そのポゾラン反応生成物は 0.9 程度の低 Ca/Si 比の C-S-H を生成していることが明らかになった。JIS A 1146 における分級フライアッシュの ASR 抑制効果の優位性には，微細な粒子の周囲の反応領域の増大とともに，生成した低 Ca/Si 比の C-S-H による内在アルカリの吸着がもたらす細孔溶液の pH 低減作用が最も大きく関与していると推察された。

## 5.6　能登半島産安山岩砕石 [9)]

### 5.6.1　能登半島産安山岩砕石の岩石学的特徴と ASR 被害

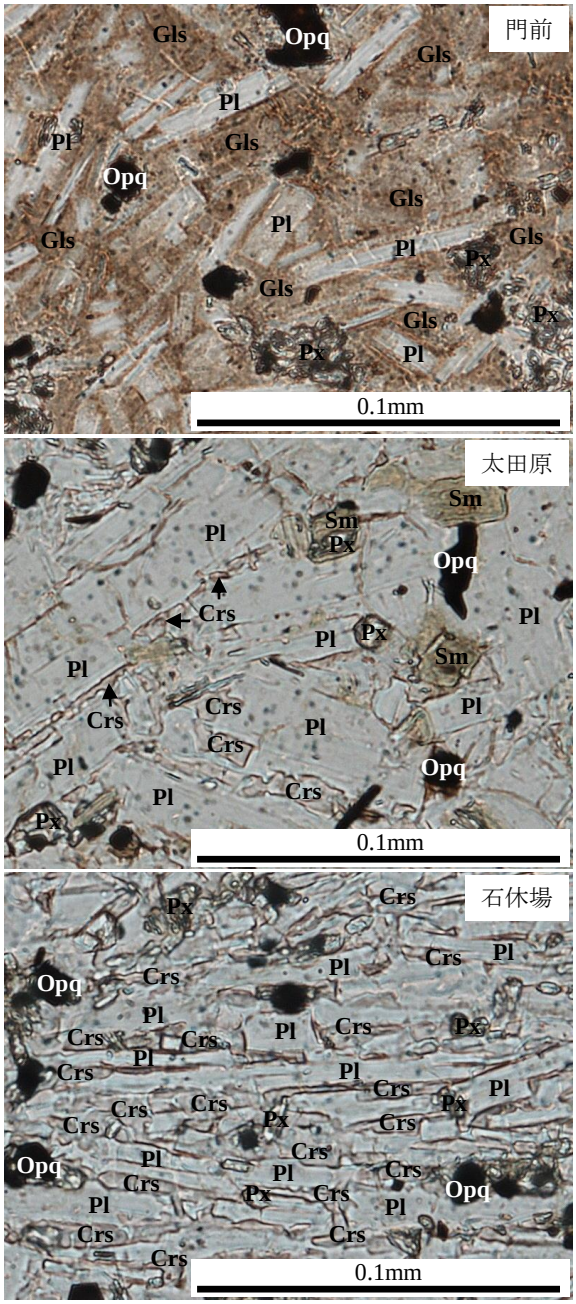
能登半島では砂利資源に恵まれた大きな河川に乏しいため，砕石に頼らざるを得ない事情があるが，同時に新第三紀以降の脆弱な地層が分布するため，能登半島北部の新第三紀の堅硬な安山岩溶岩が貴重な砕石資源となっている。ここでは，北陸地方のもう一方の代表的な反応性骨材として，能登半島で流通している安山岩砕石 3 種類（門前産・太田原産・石休場産）の反応性鉱物などの岩石学的特徴と被害実態を示す。

安山岩砕石の製品 3 種類は，いずれも安山岩のみから構成され，斑晶（斑点状の大きな鉱物）として主に斜長石，斜方輝石と単斜輝石を含む両輝石安山岩であった。さらに，門前産と太田原産には，少量のかんらん石斑晶が認められた。石基（斑晶の粒間の細かな部分）は，門前産，太田原産と石休場産のいずれとも，斜長石，輝石（単斜輝石または斜方輝石），クリストバライト，鉄チタン鉱物（磁鉄鉱など）の細かな結晶と，それらの粒間を埋めるガラスから主には構成されていた。これらの構成鉱物の量比はそれぞれで異なり，ASR 反応性を有する鉱物について，門前産はガラスを非常に多く含み，石休場産はクリストバライトを多く含んでいた。一方，太田原産はガラスとクリストバライトのいずれとも少量であった。石休場産は，門前産や太田原産と比較してシリカ分（$SiO_2$）に富み，また門前産は生成時にとくに急冷されたものである。一方，岩石の生成以降の現在にいたる期間に輝石の変質などにより生成したスメクタイト（粘土鉱物の一種）が，太田原産に多く，門前産に少量であった。スメクタイトはアルカリを吸着し，ASR の抑制に寄与するとされている。その一方で，JIS A 1146 によるモルタルバー法では，このスメクタイト含有の影響により，骨材の ASR 反応性を適切に評価できないことが知られている [26)]。したがって，いずれの安山岩砕石も反応性鉱物を含み潜在的な反応性を有するが，太田原産の反応性は門前産および石休場産と比較して低いものと考えられる。なお，これらの骨材を実際に使用した構造物では，太田原産で調査不十分のため不明であることを除いては，いずれについても実際に ASR 劣化が多く発生している [12),27)]。ASR との関連が大きい鉱物の量比と，その他の構成鉱物を**表－5.7** に示す。また，それぞれの安山岩について，主要な反応性鉱物などの含有形態を**写真－5.7** に示す。**写真－5.8** と**写真－5.9** は門前産安山岩砕石を使用した場合の鉄筋破断を伴う ASR 劣化事例である。

**表－5.7　能登半島産安山岩砕石の構成鉱物**

| 産地 | ASR 反応性鉱物 | ASR 抑制に寄与する鉱物 | 他の構成鉱物 |
|---|---|---|---|
| 門前 | クリストバライト(++),<br>トリディマイト(+),<br>ガラス(++++) | スメクタイト(+) | 斜長石，単斜輝石，斜方輝石，<br>かんらん石，燐灰石，石英，鉄チタン鉱物 |
| 太田原 | クリストバライト(++),<br>トリディマイト(+),<br>ガラス(+) | スメクタイト(+++) | 斜長石，単斜輝石，斜方輝石，<br>かんらん石，フロゴパイト，石英，<br>鉄チタン鉱物 |
| 石休場 | クリストバライト(++++),<br>トリディマイト(+),<br>ガラス(+) | スメクタイト(++) | 斜長石，単斜輝石，斜方輝石，石英，鉄チタン鉱物 |

多量 ++++ ～ +++ ～ ++ ～ + 少量




**写真－5.7　能登半島産安山岩砕石に含まれる ASR 反応性鉱物**

Gls: ガラス；Crs: クリストバライト；Pl: 斜長石

Px: 輝石；Sm: スメクタイト；Opq: 鉄チタン鉱物

写真－5. 8　門前産安山岩砕石を使用したフーチングの ASR 劣化

写真－5. 9　門前産安山岩砕石を使用した橋脚の ASR 劣化

### 5.6.2　能登半島産安山岩砕石の混合セメントによる ASR 抑制効果確認試験

（1）試験方法

能登半島で産出された代表的な安山岩砕石 3 種類，すなわち門前産，太田原産および石休場産につき，ASTM C 1260（温度 80℃，1N の NaOH 溶液に浸漬）による促進膨張試験を行い，骨材としての潜在的な反応性，ならびに分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果を確認することを目的とする。ASTM C 1260 では，外部から供給される十分なアルカリが常に反応に関与できるため，セメントやフライアッシュ，高炉スラグ微粉末，さらに骨材中のアルカリの形態とその量が ASR におよぼす影響について，考慮する必要がないという特徴がある。同時に，鉱物質混和材による ASR 抑制効果を，過酷な条件で早期に把握する目的により，ASTM C 1260 による促進膨張試験を行う。また，促進膨張試験の結果を偏光顕微鏡による微視的組織の観察により検証する。

a）ASTM C 1260 よる促進膨張試験

安山岩砕石 3 種類の反応性ならびに分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果を確認する。分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末の置換率は，JIS A 5308 による ASR 抑制効果の推奨値を参考に，セメントの内割でそれぞれ 15%または 42%（現在の高炉セメント B 種の平均的な置換率）の質量置換とした（略号 FA15%，BFS42%）。これに対し，分級フライアッ

シュや高炉スラグ微粉末をセメントと置換しない試験体を OPC と表記する。モルタルバーの作製は，使用セメントのアルカリ量を調整せず，水 :（セメント+分級フライアッシュ/高炉スラグ微粉末）: 骨材=0.47 : 1 : 2.25，モルタルバーの寸法は 25×25×285mm として，打設後 24 時間で脱型した。80℃の水中養生をさらに 24 時間実施後の長さを基長とし，その後，80℃の 1N-NaOH 溶液に浸漬，以降を促進養生期間として，28 日間の長さ変化を計測した。ASTM C 1260 による骨材の反応性の評価は，促進養生期間 14 日で 0.1%未満が「無害」，0.1～0.2%が「不明確（無害と有害の両者が存在する）」，0.2%以上が「有害」である。

b）偏光顕微鏡による微視的組織の観察

ASTM C 1260 による促進養生期間 28 日の終了後，モルタル試験体から，厚さ 15～20μm 程度の鏡面研磨薄片試料を作製した。これを偏光顕微鏡下で観察し，内部組織の ASR による劣化状態を評価した。ASR による劣化状態の評価基準は，Katayama et al. の研究 [21] に基づき，**表－5.8** に示す分類を用いた。これは主に，ASR ゲルに充填された膨張ひび割れの発生と発達の程度を評価するものであるが，本研究では劣化状態がⅢ以上に大きい部分については，より細分化した評価を行う目的で，膨張ひび割れの最大幅でさらに分類している。

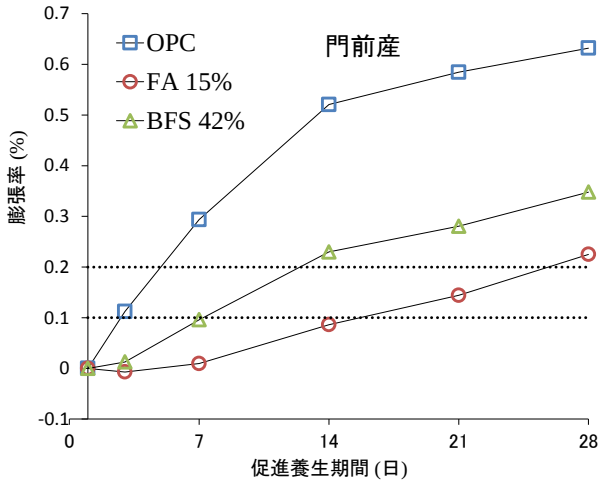
**表－5.8　ASR による劣化状態** [21]

| ステージ | ASR の進行状態 |
|---|---|
| 0 | 反応なし |
| I | 反応リムの形成と骨材周囲への ASR ゲル/ゾルの滲出 |
| II | 骨材粒子内部に ASR ゲルに充填された膨張ひび割れの形成 |
| III | 骨材粒子からセメントペーストへの ASR ゲルに充填された膨張ひび割れの進展 |
| IV | 連続的なひび割れ網の形成と ASR ゲルの気泡への浸入 |

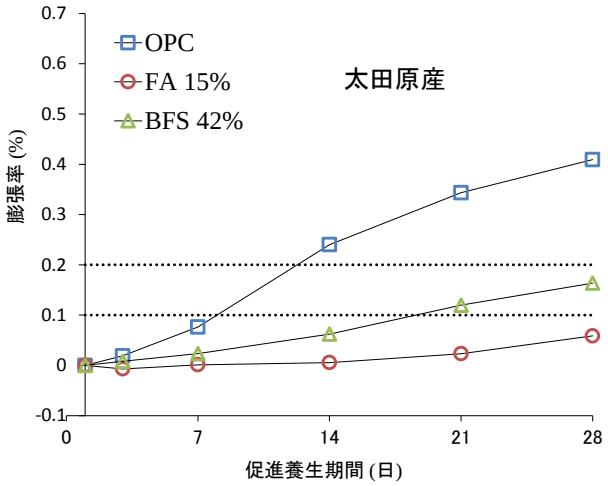
（2）試験結果と考察

a）ASTM C 1260 よる促進膨張試験

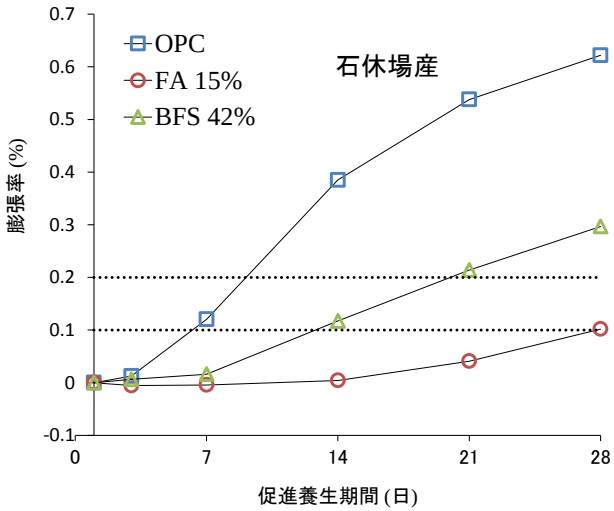
モルタル試験体の膨張挙動を**図－5.6～5.8** に示す。OPC ではいずれの安山岩砕石も，促進養生期間 14 日で 0.2%を超える有害な膨張を示した。また，安山岩砕石の種類による膨張率の大小では，太田原産が最も小さく，この結果は岩石学的特徴の観察結果とも一致していた。FA15%では，いずれの安山岩砕石とも，判定基準となる促進養生期間 14 日の膨張率は 0.1%未満で，「無害」の判定となった。BFS42%では「無害」の判定は太田原産のみであったが，いずれの安山岩砕石も膨張が大きく低減し，同様な ASR 抑制効果が認められた。以上より，ASTM C 1260 による促進膨張試験は鉱物質混和材による ASR 抑制効果を早期に判定するのに有効であることが示された。なお，いずれの安山岩砕石とも，また分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末の混和の有無に関わらず，促進養生期間 14 日の判定以降も膨張は継続していた。しかし，この判定結果は，あくまでも高濃度のアルカリ溶液が常時供給される過酷な条件下によるものであることに注意することが必要である。また，ASTM C 1260 での評価に適さない岩石種（例えばチャート）があることにも注意する必要はある [28]。




図－5.6　モルタル試験体（門前産安山岩砕石）の膨張挙動（ASTM C 1260）




図－5.7　モルタル試験体（太田原産安山岩砕石）の膨張挙動（ASTM C 1260）



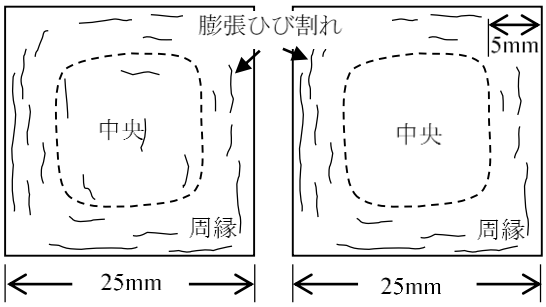

図－5.8　モルタル試験体（石休場産安山岩砕石）の膨張挙動（ASTM C 1260）

b）偏光顕微鏡による微視的組織の観察

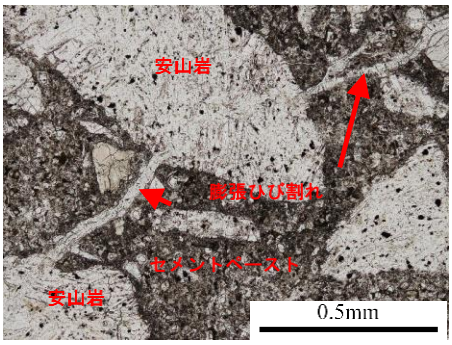
促進養生期間 28 日終了後の，25×25mm 試験体断面より作製した研磨薄片を偏光顕微鏡下で観察した結果，**図－5.9** に示すように，主な膨張ひび割れは表面と平行で，NaOH 溶液に接する周縁部には中央部より顕著に観察された。とくに分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を使用した試験体では，表面からの深さ 5mm 以深には，膨張ひび割れがほとんど観察されなかった。これは，両試験体でのアルカリ溶液の浸透が，表面に限定されたことにより，この箇所に集中的に発生したものと推察された。このため，中央と周縁を区別して評価した。偏光顕微鏡下で観察された劣化組織の一例を，**写真－5.10** に示す。

偏光顕微鏡による評価結果を**表－5.9** に示す。また，その評価結果とモルタルバーの膨張率との関係を**図－5.10** に示す。分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を使用した場合，試験体周縁部は OPC と大差がないが，中央での ASR 劣化が大きく低減していたことが特徴である。さらに中央における劣化程度の評価結果とモルタルバーの膨張率は**図－5.10** の破線に示すように，よく対応していた。これらは，前述したように分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末の混和による組織緻密化により，外部からのアルカリ浸透が抑制された結果と考えられた。このように，偏光顕微鏡による観察は，骨材の構成鉱物を識別し，その反応性を明らかにするのみではなく，モルタルまたはコンクリートの微視的組織を同様に観察することにより，ASR による劣化状況，すなわち膨張率との関係などを知ることが可能であり，ASR の評価や診断に非常に有効であると考えられた。

鏡面研磨薄片試料中の分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の反応状態を，走査電子顕微鏡の反射電子像により観察した結果を**図－5.11** に示す。分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末の周縁部に，アルカリ溶液との相互作用による反応相が明確に識別できた。また，分級フライアッシュや高炉スラグ微粉末の近傍の空隙を埋めるようにポゾラン反応などの生成物が成長し，組織緻密化が進行しているものと考えられた。一方，分級フライアッシュや高炉スラグ微粉末の周縁部に見られる反応相の厚さは，促進養生期間 28 日終了後も数 μm 以下と小さく，分級フライアッシュや高炉スラグ微粉末の粒子表面付近に限定されていた。ポゾランなどの反応と ASR が材齢とともに進行するが，前者による組織緻密化やアルカリの低減が早期より発生し[29]，骨材よりも相対的に早く反応できるフライアッシュや高炉スラグ微粉末の粒径（比表面積）が，ASR 抑制効果に与える影響が最も大きいこととも整合していた。



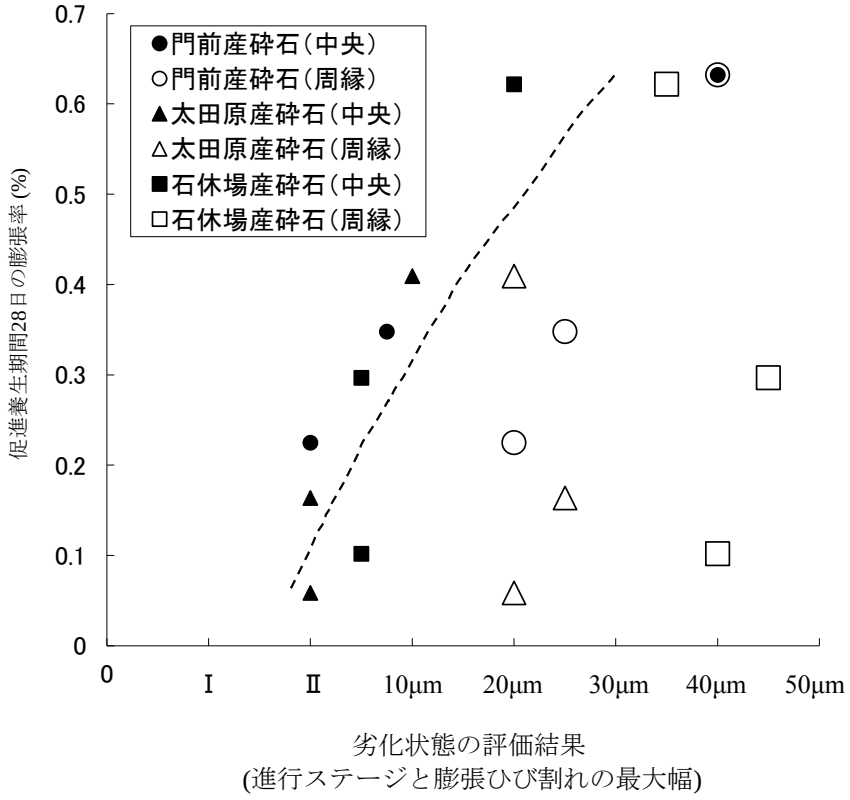

**図－5.9　モルタル試験体断面の模式図（左：OPC；右：FA15%,BFS42%）**



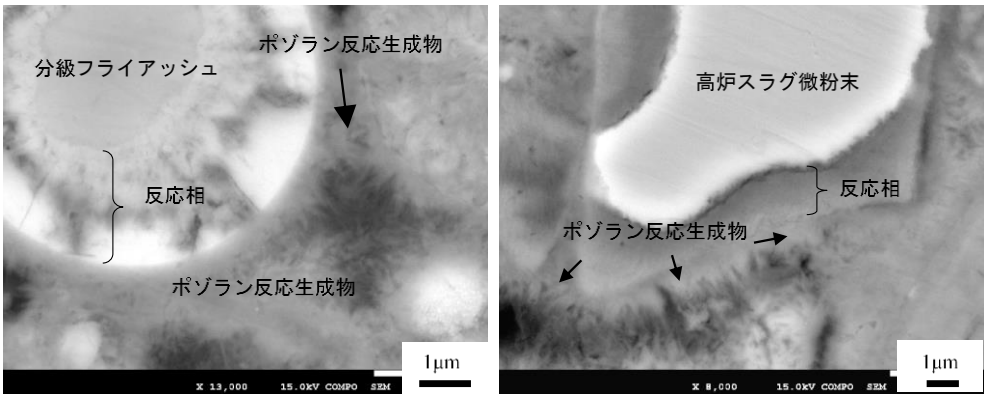

写真－5.10　劣化組織の偏光顕微鏡写真（石休場 OPC 周縁部）

表－5.9　偏光顕微鏡による劣化状態の評価結果（進行ステージと膨張ひび割れの最大幅）

| 骨材＼混和材 | | OPC | FA15% | BFS42% |
|---|---|---|---|---|
| 門前産 | 中央 | 30-50μm | Ⅱ | 5-10μm |
| | 周縁 | 30-50μm | 20μm | 20-30μm |
| 太田原産 | 中央 | 10μm | Ⅱ | Ⅱ |
| | 周縁 | 20μm | 20μm | 20-30μm |
| 石休場産 | 中央 | 10-30μm | 5μm | 5μm |
| | 周縁 | 30-40μm | 40μm | 40-50μm |




図－5.10　偏光顕微鏡による劣化状態の評価結果と促進養生期間 28 日の膨張率




**図－5.11　試験後の分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の反応状態（反射電子像）**

（3）能登半島産安山岩砕石の混合セメントによる ASR 抑制効果確認試験のまとめ

北陸地方の代表的な安山岩砕石 3 種類に，分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用した ASR 対策の試験結果より，以下のことが明らかになった。

a）岩石学的試験により ASR 反応性が確かめられた能登半島産安山岩砕石 3 種類は，いずれも ASTM C 1260 による促進膨張試験で有害な膨張を示した。

b）分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を通常の B 種の置換率で使用することにより，いずれの安山岩砕石も，ASTM C 1260 による膨張が大きく低減した。とくに，北陸地方で供給が可能となった高品質な分級フライアッシュで 15%を置換したものでは，判定基準材齢において，すべての安山岩砕石で「無害」となり，北陸地方の ASR 対策への実用化が期待できた。また，ASTM C 1260 による促進膨張試験は，鉱物質混和材による ASR 抑制効果を早期に判定するのにも有効であることが示された。

c）分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を使用した場合，試験体周縁部に対して内部での ASR 劣化の低減が大きく，これがモルタルバーの膨張率とよく対応していた。したがって，ASTM C 1260 による促進膨張試験において，両者による ASR 抑制効果は組織緻密化に伴う，外部からのアルカリ浸透の抑制によるものが大きいと推察された。

d）反射電子像により観察された，分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末の反応相は，促進養生期間 28 日終了後も粒子表面付近に限定され，それらの粒径（比表面積）の ASR 抑制効果に与える影響が非常に大きいことと整合していた。また，両者の粒子近傍の空隙を埋めるように反応生成物が成長し，組織緻密化が進行しているのが確認された。

## 5.7　まとめ

北陸地方は骨材資源に恵まれた地域であるが，砂利または砕石の多くには ASR 反応性の高い安山岩が混入または利用され，安山岩系骨材の ASR 対策が必要となる。本章では，地産地消による環境負荷の低減や骨材資源・副産物資源の有効利用，北陸地方の環境条件などを考慮した場合に推奨される ASR 抑制対策としての混合セメントの使用について，北陸地方を代表する反応性骨材を用いて検討した。その結果，北陸地方における ASR 抑制対策の基本的な考え方として，北陸地方で産する高品質なフライアッシュ（分級フライアッシュ）を通常の使用量で混合することにより，反応性がきわめて高い北陸地方の骨材に対しても，十分かつ効果的に ASR を抑制可能なことが示された。

本章では北陸地方の代表的な反応性骨材について，分級フライアッシュ 15%または高炉スラグ微粉末 42%をセメントに対して質量置換することによる ASR 抑制効果を検証した。得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) 北陸地方の代表的な砂利資源であるとともに，わが国有数の高反応性骨材でもある常願寺川産の川砂利について，JIS A 1146 とデンマーク法によるモルタルバー法で検証した。その結果，分級フライアッシュ 15%置換と高炉スラグ微粉末 42%置換により，JIS A 1146 での膨張が大きく抑制された。とくに，分級フライアッシュ 15%置換は膨張を全く示さず，非常に優れた ASR 抑制効果を発揮した。デンマーク法でも，ともに膨張が大きく抑制された。分級フライアッシュ 15%置換では多少の膨張を示したものの，JIS A 1146 による場合と同様に，高炉スラグ微粉末 42%置換よりも，膨張を大きく抑制した。

(2) 北陸地方の代表的な安山岩砕石 3 種類については，ASTM C 1260 による促進膨張試験で検証した。その結果，いずれの安山岩砕石でも分級フライアッシュ 15%置換と高炉スラグ微粉末 42%置換により，膨張が大きく低減した。とくに，分級フライアッシュ 15%置換では，判定基準材齢において，すべての安山岩砕石で「無害」となり，北陸地方の ASR 対策への実用化が期待できた。また，ASTM C 1260 による促進膨張試験は，鉱物質混和材による ASR 抑制効果を早期に判定するのにも有効であることが示された。

(3) 偏光顕微鏡下での観察による ASR の進行程度と試験体の膨張率とはよく対応し，ASR ゲルに充填された膨張性のひび割れにより膨張が発生していた。偏光顕微鏡による岩石学的試験は，骨材の反応性評価とコンクリートの ASR 検証の双方に有効であることが示された。なお，デンマーク法や ASTM C 1260 のアルカリ外来型の試験法では，分級フライアッシュや高炉スラグ微粉末での置換による試験体周縁部に対する内部での ASR 劣化の低減が大きく，後者がモルタルバーの膨張率とよく対応していた。

(4) デンマーク法や ASTM C 1260 などのアルカリ外来型の試験における分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果は，組織緻密化に伴う外部からのアルカリ浸透の抑制によるものが大きいと推察された。反射電子像による観察では，分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の粒子近傍の空隙を埋めるようにポゾラン反応生成物が成長し，組織緻密化が進行しているのが確認された。

(5) SEM-EDS による分析結果より，分級フライアッシュの反応領域でのポゾラン反応生成物は 0.9 程度の低 Ca/Si 比の C-S-H を生成していることが明らかになった。JIS A 1146 のようなアルカリ内在型の試験において，分級フライアッシュの ASR 抑制効果が特に優位である理由には，微細な粒子の周囲の反応領域の増大とともに，生成した低 Ca/Si 比の C-S-H によるアルカリの吸着がもたらす細孔溶液の pH 低減作用が最も大きく関与していると推察された。

(6) 分級フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末の反応相は，試験終了時点でも粒子表面付近に限定され，それらの粒径（比表面積）の ASR 抑制効果に与える影響が非常に大きいことと整合していた。

## 参考文献


1) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか《試験，診断と対策の課題》，セメント・コンクリート，No.696，pp.1-9，2005.
2) Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S. and Hira, T. : Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol.53, nos.2-4, pp.105-122, 2004.
3) 湊　俊彦，鳥居和之：能登有料道路の ASR 劣化橋梁と反応性骨材の岩石学的特徴，材料，Vol.59，No.10，pp.781-786，2010.
4) 野村昌弘，青山實伸，平俊勝，鳥居和之：北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.3，pp.105-114，2002.
5) 鳥居和之, 野村昌弘, 南善導:北陸地方の川砂のアルカリシリカ反応性とアルカリ溶出性状，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.390-395，2006.
6) K. Torii , T. Hashimoto, T. Kubo and C. Sannoh：The effective utilization of classified fine fly ashes for production of highly-durable concrete mixtures, Proceedings of 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies, Kyoto, CD-R 8 pages, 2013.
7) 広野真一，鳥居和之：北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる抑制機構，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.499-506，2012.
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) 広野真一，鳥居和之：ASTM C 1260 によるフライアッシュ含有モルタルの安山岩に対する ASR 抑制効果の評価，材料，Vol.62，No.8，pp.498-503，2013.
10) 大代武志，平野貴宣，鳥居和之：富山県の反応性骨材と ASR 劣化構造物の特徴，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1251-1256，2007.
11) 鳥居和之，大代武志，山戸博晃，平野貴宣：石川県の反応性骨材と ASR 劣化構造物のデータベース化，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1017-1022，2008.
12) 湊　俊彦，鳥居和之：能登有料道路の ASR 劣化橋梁と反応性骨材の岩石学的特徴，材料，Vol.59，No.10，pp.781-786，2010.
13) 地質調査所：50 万分の 1 地質図幅「金沢（第 2 版)」，1974.
14) 大代武志：河川産骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁の維持管理に関する研究，金沢大学学位請求論文，2009.
15) Katayama, T. and Kaneshige, Y. : Diagenetic Changes in Potential Alkali-Aggregate Reactivity of Volcanic Rocks in Japan－A Geological Interpretation, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Ottawa, pp.489-495, 1987.
16) 野村昌弘，広野真一，大代武志：富山県内における花崗岩質岩石のアルカリシリカ反応，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，2014.
17) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会 報告書－コンクリート構造物の長寿命化と環境負荷低減を目指して－富山・石川版，2012.
18) 川端雄一郎，松下博通：アルカリシリカ反応抑制の観点からのフライアッシュの品質評価に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.63，No.3，pp.379-395，2007.
19) 大代武志，広野真一，野村昌弘，鳥居和之：富山市周辺の橋梁の ASR 劣化と骨材の岩石学的特徴に関する調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.991-996，2013.
20) 富山県生コンクリート工業組合・コンクリート耐久性向上委員会：富山県内反応性骨材調査報告書（その 2)，1994.

21) T. Katayama et al.：Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008.
22) S. Y. Hong and F. P. Glasser：Alkali binding in cement pastes Part I. The C-S-H phase, Cement and Concrete Research, Vol.29, pp.1893-1903, 1999.
23) 山本武志，廣永道彦：フライアッシュのアルカリシリカ反応抑制メカニズムに関する実験的検討，電力中央研究所報告，N07016，2007.
24) 吉田匠吾，板坂匠，Irfan Prasetia，鳥居和之：PC 桁・PCa 製品の ASR 抑制対策としての分級フライアッシュの効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.985-990，2013.
25) 林建佑ほか：外来アルカリ環境下におけるフライアッシュ II 種のアルカリシリカ反応抑制効果，セメント・コンクリート論文集，No.62，pp.334-341，2008.
26) 鳥居和之，野村昌弘，本田貴子：北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性，土木学会論文集 No.767／V-64，pp.185-197，2004.
27) 鳥居和之，宮村雅之，湊俊彦，西川元気：能登有料道路の基礎構造物の ASR 劣化とその対策，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.4，pp.27-33，2008.
28) 岩月栄治，森野奎二：ASTM C 1260 及び JIS A 5308 による ASR モルタルバーの膨張挙動と微細構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.687-692，2002.
29) 長瀧重義，大賀宏行，井上毅：フライアッシュによるアルカリ骨材反応の膨張抑制効果とそのメカニズム，土木学会論文集，No.414/V-12，pp.175-184，1990.

# 第６章　結論

## 6.1　本論文のまとめ

本研究は，わが国でコンクリート構造物の耐久性低下の大きな要因の一つである ASR についての基礎的な研究である。ASR はコンクリート中での骨材岩石の反応であることから，主役である岩石を十分に観察する姿勢が ASR の理解には欠かせないが，国内で浸透していない。ASR に関する失敗事例の多くは，これを怠ったことも大きな原因であった。ASR の理解に不可欠な岩石学的試験は，機器分析や測定とは異なり，人間による観察が最も重要な要素である。したがって，実施者の能力や経験が不足する場合や誤った手法で行った場合は適切な結果が得られないため，現代における適切な最新の手法について説明した。また，わが国に分布と被害事例の多い ASR 反応性の岩石を示し，日本の地質学的背景を考慮すると，反応性骨材の分布は国内に普遍的であることを述べた。一方，環境の異なる海外での ASR の事例として，タイ国で発生したコンクリート劣化について，岩石学的試験により得られた知見を示した。推奨される ASR 抑制対策については北陸地方の事例を示し，岩石学的試験で検証した。

以下に各章の内容と得られた結果を総括する。

第 1 章「序論」では，本研究を行った目的として，わが国で ASR の被害が多発した背景や経緯，技術の進歩を反映した適切な岩石学的試験が必ずしも行われていない現状，ASR は地域特有の要因により発生する現象にも関わらず地質学的背景や環境などを含めた系統的な研究が少ないことなどの問題点を示し，本論文の構成と各章の概要を述べた。

第 2 章「コンクリートの岩石学的診断手法の現状と知見」では，現代における適切な岩石学的試験の方法について説明し，それにより得られた最新の研究結果の事例を紹介した。国際的には，岩石学的試験の手法や ASR の認識に進歩があるにも関わらず，わが国では旧態依然とした現代では不適切となった認識や手法が行われている場合が少なくないことから，現代の適切な方法論を述べた。岩石学的試験は骨材岩石の反応性鉱物の有無を知るためだけではなく，コンクリート薄片により，反応性鉱物が実際に溶解し，生成物がコンクリートに膨張を与えている組織を観察することにより，劣化の原因や過程を解き明かすものである。さらに，ASR ゲルの組成分析による現時点の ASR の過程推定や，劣化コンクリートの分析による使用セメントのアルカリ量や外来アルカリ量の推定，混和材の抑制効果の検証，などが可能となってきていることを述べた。

第 3 章「わが国の ASR の特徴と代表的な反応性骨材の地域的分布」では，ASR 反応性鉱物の種類と，わが国でコンクリート中に骨材として普通に混入する代表的な ASR 反応性の岩石について説明した。また，地域ごとに地質学的背景と反応性骨材となる岩石の分布を述べた。地質学・岩石学的な観点からは，わが国の随所に様々な種類の反応性骨材が広く分布することを示し，各地でそれぞれによる ASR が実際に発生していることを示した。

第 4 章「タイ国の ASR 事例における反応性骨材の岩石学的特徴と損傷形態」では，わが国とは地質も気候も異なる海外の ASR 事例として，タイ国の構造物に発生した ASR についての研究結果を述べた。熱帯多雨地域での比較的低アルカリ環境下での遅延膨張性骨材による早期劣化や岩石の風化変質が反応性に与える影響など，ASR の発生に関してわが国とは大きく異なる環境が推察された。日常とは異なる事例の検討においても，岩石学的試験は普遍的に有効であることを示した。

第 5 章「北陸地方における代表的な反応性骨材の岩石学的特徴と推奨される ASR 抑制対策」では，ASR を抑制するために，どのように対応すべきかを検討した。その一例として，北陸地方を事例に，その地理的ならびに自然条件や地産地消による環境負荷低減と資源の有効利用などを念頭においた基本的な考え方を示した。すなわち，北陸地方で使用されている代表的な反応性骨材に対し，北陸地方で生産可能となった高品質化したフライアッシュを使用することによる ASR 抑制効果を検討し，非常に有効であることを確認した。また，骨材の潜在反応性などの実態確認のほか，混和材による ASR 抑制効果の検証や抑制機構の解明などに，岩石学的試験が非常に有効であることも示した。わが国には各地に様々な種類の反応性骨材が存在するとともに，地理的ならびに自然条件なども地域により異なるが，それらを考慮した場合の ASR 抑制対策のあり方として，北陸地方で推奨されるものを示した。

## 6.2　今後の課題と展望

### 6.2.1　岩石学的試験のあり方について

本研究では ASR に関する様々な局面に対応するとき，地質学・岩石学的な考察と岩石学的試験が非常に有効であることを示してきた。しかしながら，わが国で岩石学的考察を含んだ検討は必ずしも十分には行われていない。その原因としてはまず，試験費用が高額であること，試験期間が長いこと，実施可能な試験機関が少ないこと，などが考えられる。これらは，岩石学的試験は知識と経験を積んだ技術者の詳細な観察により適切な結果が得られる，ということからの宿命である。とは言え，特殊な事例でもない限り，例えば電柱 1 本や橋脚 1 つの ASR の確認のために，多大な費用と期間を要するのでは岩石学的試験は普及どころか敬遠もされかねない。したがって，岩石学的試験の有効性が理解されても，日常の構造物の管理においては，それを行う費用や試験期間の面での課題がある。

第 2 章に示したように，最近の ASR の研究の進歩により，岩石学的試験も非常に高度で有意義な内容が実施可能になってきている。今後は，このような研究や手法の進展・高度化と，一方でどのように実用化していくのかという問題がある。実用化に関して，一つは重要な事項に対し高度な研究的内容を適用するような場面がある。また，もう一つは，研究や技術の進歩を，いかにルーティンに適切に反映していくかという問題がある。後者については，研究による技術の進歩が，岩石学的試験を高度で実施と理解が困難なものにするだけに終わるのではなく，その内容が一般の読者に理解しやすいようなシンプルで本質的な評価手法の開発にも注がれるべきである。例えば Katayama et al.の ASR の進行ステージの評価は，ASR による膨張ひび割れの有無ならびに，あるのであれば，それが反応性骨材粒子内か，それともセメントペーストへ進展しているのか，のような単純な事項が実構造物の劣化と良好に対応するものであり，その好例といえる。

### 6.2.2　岩石学的試験の技術者育成

岩石学的試験を実施できる技術者の育成も常に問題となる。岩石学的試験は，実施者の知識や経験などの能力に基づいた観察結果を根拠とした判断によるものであり，結果の質は個人の能力次第である。コンクリートなどの岩石学的試験ではコンクリートを観察し，その構成要素の理解やひび割れなどの組織，その位置関係などの解読により，劣化の原因や過程を明らかにしなければならないので，岩石学のみではなく，セメント化学やコンクリート工学などの幅広い知識や経験が必要とされる。したがって，岩石学的試験が ASR の評価に非常に有効であるとしても，知識と経験の浅い技術者が誤った結果を示したのでは，元も子もない。岩石学的試験を行える技術者育成を考えると，本来は人材獲得に有利な大企業でも，転勤や配置転換などが多いこともあり，多大な経験に基づく判断が必要な岩石学的試験などの技術者は育ちづらい状況がある。企業の枠を越えた情報交換や人材育成も検討すべきかもしれない。いずれにしても，積極的な検討なしには技術の育成や維持は難しい。

### 6.2.3　ASR 発生情報の共有とデータベース化

ASR が発生した地域と原因となった骨材の特徴，その他の要因などの情報を知ることは，他の地域においても今後の発生予測や ASR 対策に非常に有益である。ASR の原因となる反応性鉱物は既に研究され確定しているし，わが国での ASR 抑制対策も既に確立されている。しかし，ASR の反応性は反応性鉱物の含有のみではなく，岩石の組織などに起因するアルカリ溶液の浸透しやすさや岩石の強度，アルカリ溶出性状などの様々な要因が関係するものと考えられ，実際には（少なくとも筆者には）全てが簡単に理解できるわけではない。一方，わが国の ASR 抑制対策についても，もともと ASR を完全に防ぐ前提ではなく，また規定された骨材の反応性試験についても，そもそも全ての岩石や環境条件に合わせて完全なものなどはない。このような状況において，実際に野外の実構造物で ASR が発生しているのかどうか，どのような地域と環境で，どのような岩石に ASR が発生しているのかの情報は，ASR 対策には極めて重要である。現在，このような ASR の情報はほとんど公開されないが，大学などの研究機関などで全国を網羅したデータベース化が行われることが切望される。

# 謝　辞

本研究の遂行ならびに本論文の取りまとめにあたり，金沢大学理工研究域環境デザイン学系　鳥居和之教授には，多大な温かいご指導とご教示を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表します。また，国立環境研究所　山田一夫博士には本研究の当初から支えていただき，始終，激励とご指導を賜りました。ここに，心より感謝とお礼を申し上げます。さらに，本論文の取りまとめに際して，金沢大学理工研究域環境デザイン学系　桝谷浩教授，同　深田宰史准教授，同　久保善司准教授，同　自然システム学系長　神谷隆宏教授にご指導を賜りました。ここに，心より感謝とお礼を申し上げます。

金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程への入学の機会を与えて頂き，その後の研究を見守っていただきました株式会社太平洋コンサルタント　下山善秀社長，石川雄康専務，加藤忠男常務，沢木大介解析技術部長に，心より感謝とお礼を申し上げます。さらに，金沢大学に在席中の研究に関しては，金沢大学理工研究域環境デザイン学系　山戸博晃主任技術職員，同　大学院自然科学研究科社会基盤工学専攻　蟹谷真生氏（現　北陸電力株式会社），同　環境デザイン学専攻　中島隆甫氏ならびに京都大学大学院　西澤彩氏（現　株式会社大林組）に実験などにおいて，多大なご協力を頂きました。心より感謝とお礼を申し上げます。また，鳥居和之教授のもとで研究をされた先輩の野村昌弘の研究所　野村昌弘博士，富山県　大代武志博士，北陸電力株式会社　橋本徹博士，同　参納千夏男博士，東京コンサルタンツ株式会社　湊俊彦博士をはじめ，多くの方々に温かく支えて頂きました。心より感謝とお礼を申し上げます。

本研究は，金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程の在席中の研究ならびに，日本コンクリート工学会の「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」での活動，山田一夫博士中心の書籍執筆活動，産学官連携による「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」での活動により得られた成果の一部を取りまとめたものです。これらの活動において，多くの方々にお世話になりました。とりわけ，株式会社太平洋コンサルタント　片山哲哉博士，港湾空港技術研究所　川端雄一郎博士，電源開発株式会社　鍵本広之氏，マイジオ　八幡正弘博士には多くのご指導を賜りました。心より感謝とお礼を申し上げます。

会社の業務と本研究において，株式会社太平洋コンサルタント　安藤陽子氏，佐藤友美博士，高橋晴香氏，山内祥行氏をはじめ，解析技術部の皆様に多大なご協力を頂きました。心より感謝とお礼を申し上げます。

このように，本論文の作成には多くの方々のご指導やご協力がありました。全ての方々のお名前をあげることはできませんでしたが，心より感謝申し上げます。今後は ASR 研究の発展に少しでも貢献し，恩返しができれば幸いです。

2015 年 1 月

広野真一