

2025年7月11日(金)

(一財)港湾空港総合技術センター 研究開発助成 成果報告会

火砕流堆積物を用いた海水練りコンクリートの 港湾構造物への適用に関する基礎的研究

助成番号：令和6年3月21日付 第18-4号

九州大学大学院

工学研究院 社会基盤部門

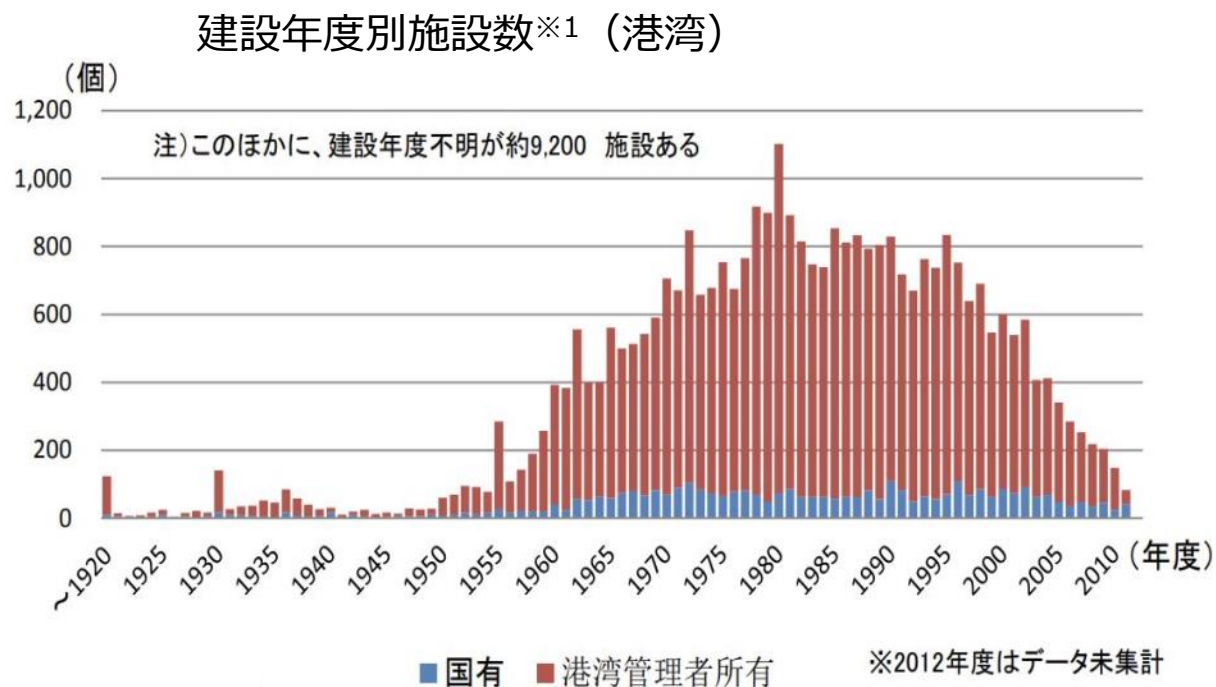
助教 福永 隆之



九州大学

1. 港湾構造物のストック数の増加

港湾構造物のストック数の増加



高度経済成長期以降に整備された港湾施設は、建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる。

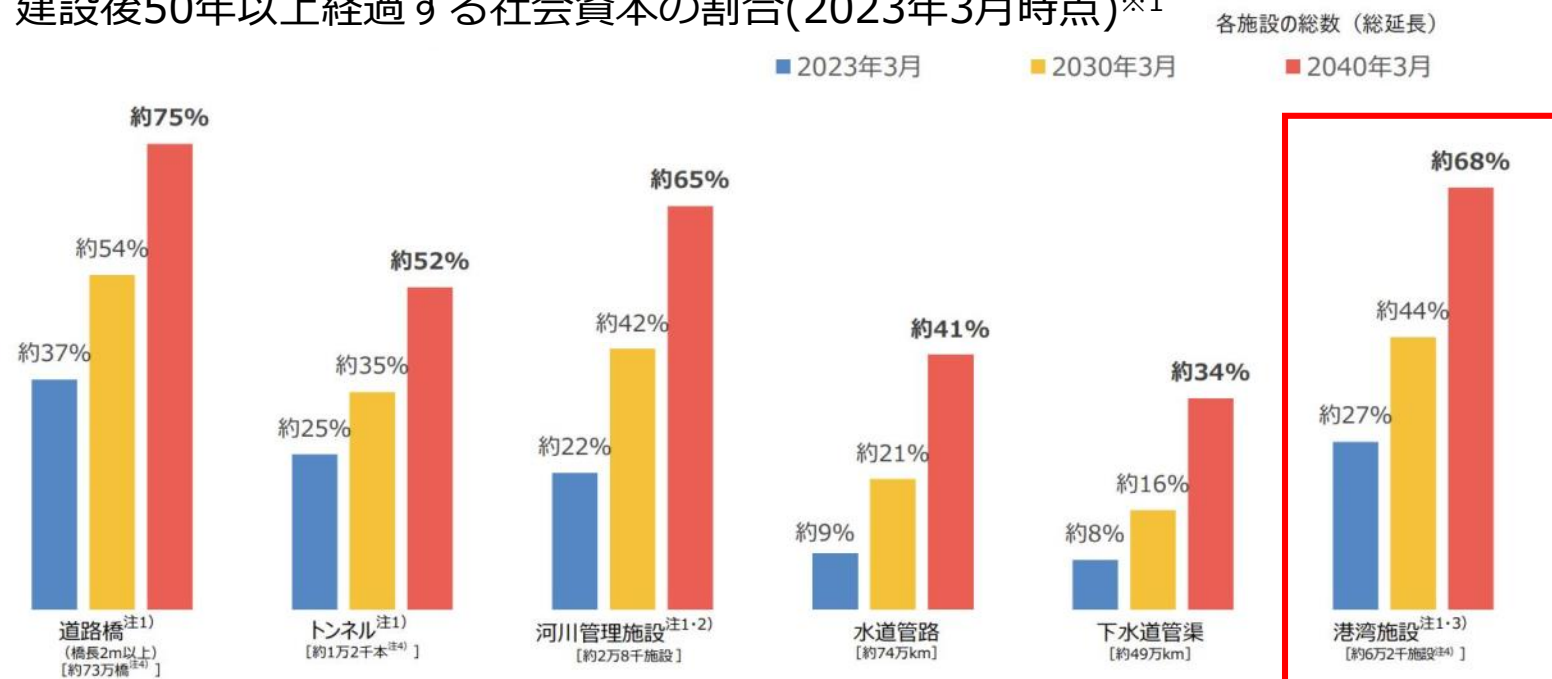
これらのコンクリート構造物に対して劣化診断し、補修・新設・廃止などの対応が必要である。

※1_国土交通省：社会資本の老朽化対策情報ポータルサイト インフラメンテナンス情報より

1. 港湾構造物のストック数の増加

港湾構造物のストック数の増加

建設後50年以上経過する社会資本の割合(2023年3月時点)※1



高度経済成長期以降に整備された港湾施設は、建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる。

これらのコンクリート構造物に対して劣化診断し、補修・新設・廃止などの対応が必要である。

※1_国土交通省：社会資本の老朽化対策情報ポータルサイト インフラメンテナンス情報より

1. 離島地域の維持管理に関する課題

全国の離島数…14,125島(R4年1月時点の電子国土基本図を用いて国土地理院が計数)

- ・九州・沖縄に存在する離島数…3,908島 (長崎1,479島(全国1位), 鹿児島1,256島(全国3位))
- ・有人離島でも九州・沖縄は多い (長崎51島(全国1位), 沖縄39島(全国2位), 鹿児島28島(全国4位)) ¹⁾

離島における問題

- ・離島において淡水の確保は生活するうえで重要
- ・鹿児島県には、サンゴが隆起してできた島が多数あり、特に淡水の確保が難しい。

離島や過疎化地域における問題

少子高齢化や財源的な理由により、コンクリートプラント自体の運営もできなくなっている。

インフラ維持のため、簡易プラントを設置しての維持工事が考えられ、海岸線に近い地域では、海水を使いこなす必要性が高いと考えられる。

1. 練混ぜ水に海水を用いた海水コンクリート

練混ぜ水に海水を用いた海水練りコンクリートの特徴¹⁾

- ・ 初期強度の向上
- ・ 鉄筋コンクリート中の鋼材の腐食が懸念される

鉄筋コンクリートの練混ぜ水に海水を利用するには、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を活用しないといけない

※日本コンクリート工学会：コンクリート分野における海水にの有効研究委員会報告書より

利用できる産業副産物の減少

CO₂排出量を減少するために、

- ・ 製鉄所では、高炉から電炉を用いた製鉄方法へ
- ・ 石炭由来の火力発電所の減少

海水練りコンクリートを活用するためには、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ以外の代替材料が必要となる。

日本経済新聞

朝刊・夕刊 LIVE Myニュース

トップ 速報 オピニオン 経済 政治 ビジネス 金融 マーケット マネーのまなび テック 国際 スポーツ 社会

日鉄、30年までに国内に大型電炉 脱炭素へ生産見直し

ビジネス
2021年3月30日 18:41

📌 保存

📧 📧 📧 📧 📧 📧

日本製鉄は30日、2030年までに鉄スクラップを原料とする大型の電炉を国内につくる方針を明らかにした。鉄鉱石と石炭由来のコークスを使う高炉に比べ、電炉は製造時の二酸化炭素（CO₂）排出量が4分の1に減る。コークスの代わりに水素を使う生産技術も研究し、生産体制を脱炭素時代にあわせて見直す。

※<https://www.nikkei.com/article/DGXZQODZ301BE0Q1A330C2000000/>

1. 火山堆積物を利用したコンクリート

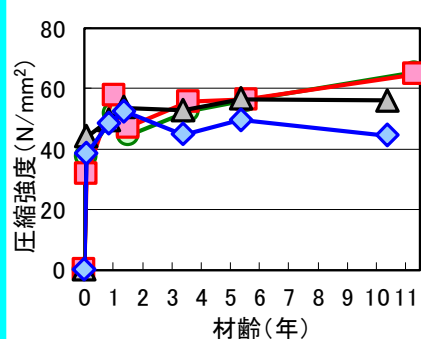
九州地方には、17の活火山が存在し、様々な年代でそれぞれ噴火を起こしている。活火山によっては、定期的に火砕流堆積物が発生しており、これらの堆積物を上手に活用できれば、資源不足に対応できる可能性が高い。



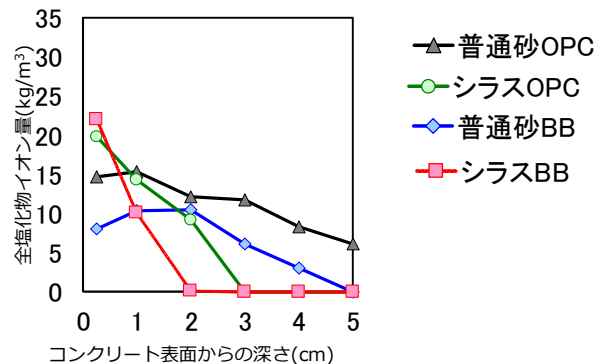
火砕流堆積物の活用例

南九州に堆積するシラスを細骨材として利用したシラスコンクリートとして実用化

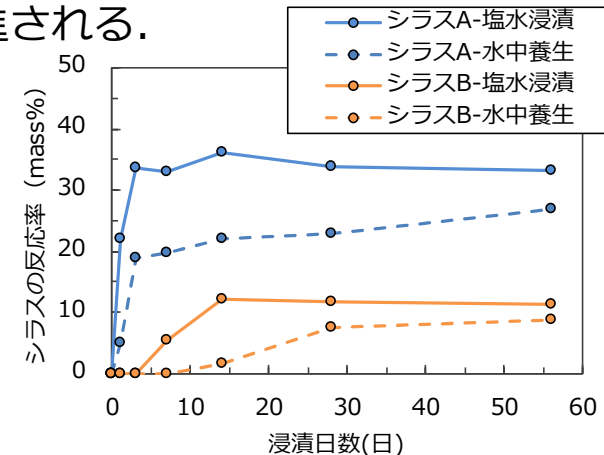
- ・ 初期強度は低いですが、強度は長期的に増加する。
- ・ 海洋環境下で優れた遮塩性能を有する。
- ・ シラスを混和した試験体を塩水に浸漬するとシラスの反応率が促進される。



海洋環境に暴露したコンクリートの圧縮強度¹⁾



海洋暴露10年における塩化物イオンの浸透性状 (W/C=60%) ¹⁾



シラスの反応率の推移

1: 里山永光, 武若耕司ら: 干満帯に長期暴露したシラスコンクリートの耐久性評価, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.775-780, 2017

2. 目的

南九州に堆積するシラスに着目

- ・ シラスコンクリートは、塩害抵抗性に優れる
 - ・ シラスは、海水環境下で反応が促進する
- 
- ・ 海水練りコンクリートとシラスは親和性が高いと考えられる.
 - ・ 実際の海水練りシラスコンクリートに関する研究は報告されていない.

海水と火山堆積物を組合せた建設材料の物性や反応性を明らかにして、港湾構造物へ活用できるか検討する.

2. 検討項目

0. 研究に使用するシラスについて（選定）
1. 火山堆積物を**混和材**として用いた海水練りコンクリートの物性に関する検討
2. 火山堆積物を**細骨材**として用いた海水練りコンクリートの物性に関する検討

2. 検討項目

0. 研究に使用するシラスについて（選定）

1. 火山堆積物を混和材として用いた海水練りコンクリートの物性に関する検討
2. 火山堆積物を細骨材として用いた海水練りコンクリートの物性に関する検討

2. シラスについて

南九州には複数のカルデラがあり、様々な年代で、それぞれ噴火を起こしていることが明らかになっている。

カルデラから火砕流が発生し、シラスが形成

火砕流堆積物のシラス

南九州に存在するシラスの堆積量・・・750億 m^3

地域の特色であるシラスを産業に利用することが望まれている

シラスの特徴

- ・主成分は、 SiO_2 （約70%）・ Al_2O_3 （約15%）であり、ポゾラン活性を有する
- ・吸水率が高い・密度が低い・細粒分が多い



2. シラスについて

火砕流の発生年代，火砕流の発生場所からの距離，堆積環境等によって，火山堆積物の物性が異なる。

シラスの名称	堆積時期 (火砕流の種類)	堆積地 (推定)	絶乾密度 (g/cm ³)
串良シラス	3万年前 入戸火砕流	陸地	2.49
横川シラス		陸地	2.48
阿多シラス	10万年前 阿多火砕流	陸地	2.44
吉田シラス	50万年前 (国分層群由来)	湖や川	2.32



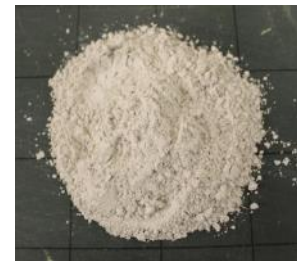
串良シラス



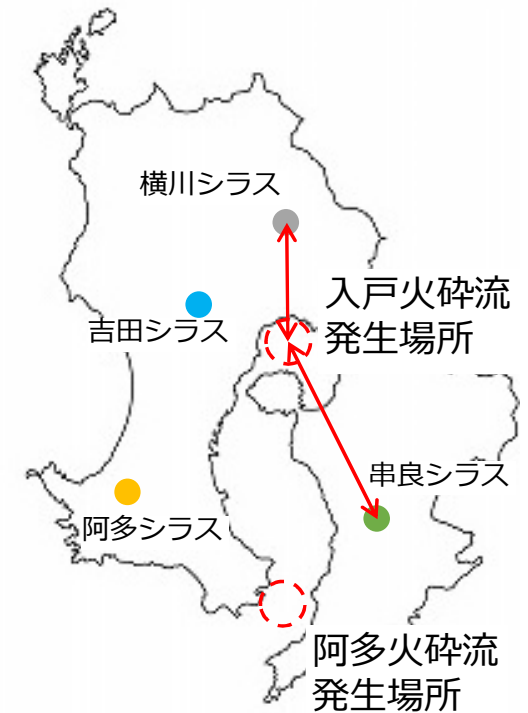
横川シラス



阿多シラス

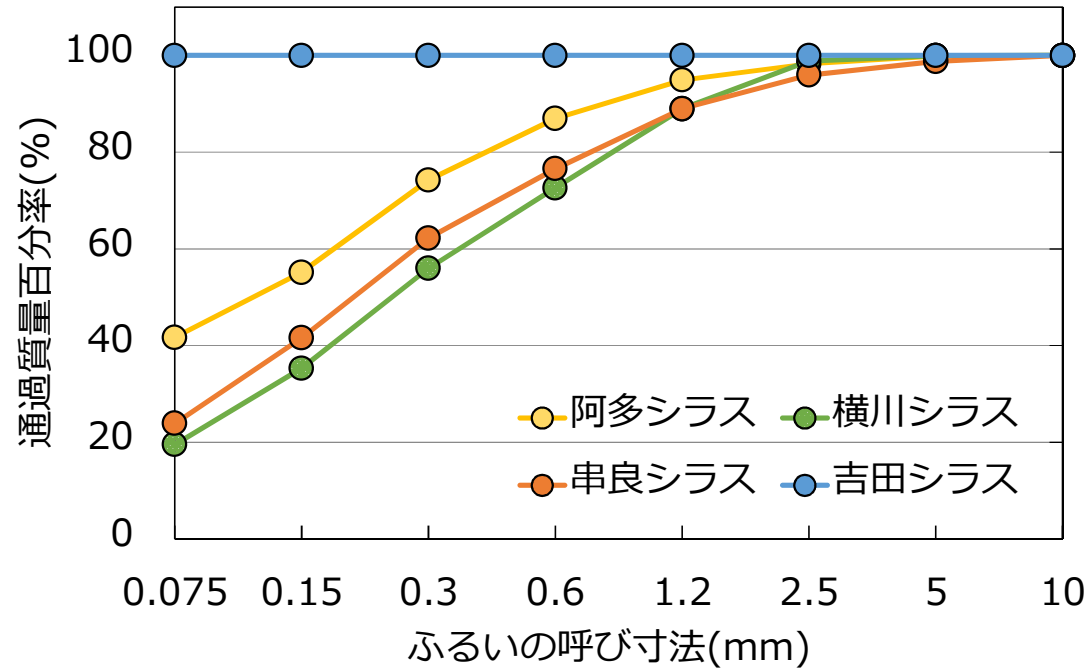


吉田シラス



2. シラスの粒度分布

各シラスのふるい分け試験による粒度分布



- 吉田シラスは、全粒径が75 μ m以下である。
- 阿多シラスは、150 μ m以下が50%以上含まれる。
- 全シラスにおいて、150 μ m以下の微粒分を多く含む

2. シラスの粒度分布

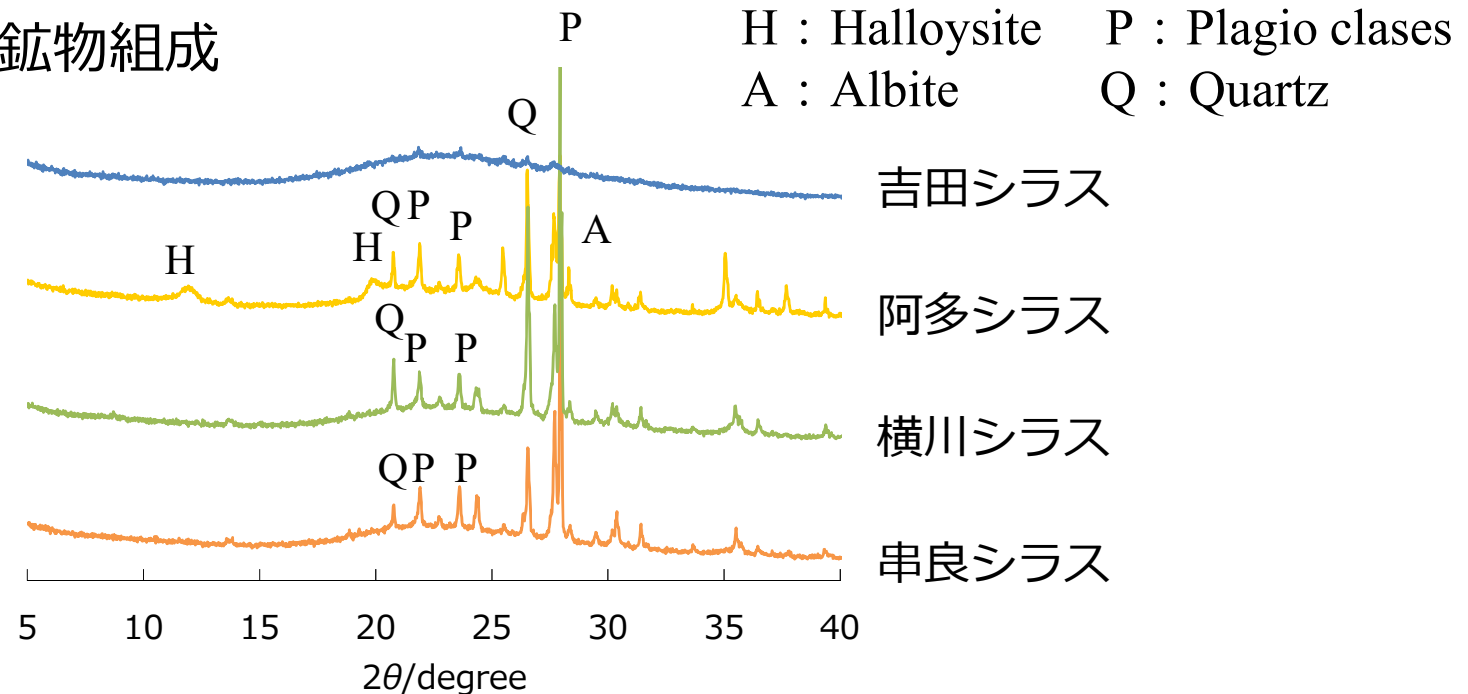
XRFによる化学組成

シラスの名称	化学組成 (mass%)					非結晶質の割合 (mass%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	
串良シラス	70.2	14.2	4.5	4.4	4.2	65.6
横川シラス	64.2	11.1	9.9	3.7	6.5	54.8
阿多シラス	64.9	20.2	3.5	5.9	3.2	58.5
吉田シラス	72.9	12.7	3.2	3.6	5.2	94.6

- すべてのシラスの主成分はSiO₂である
- 入戸火砕流由来の串良シラスと横川シラスは化学組成に大きな差は見られない
- 阿多シラスは他のシラスと比較してAl₂O₃多く含んでいる。他のシラスよりも堆積時期が早かったためだと考えられる

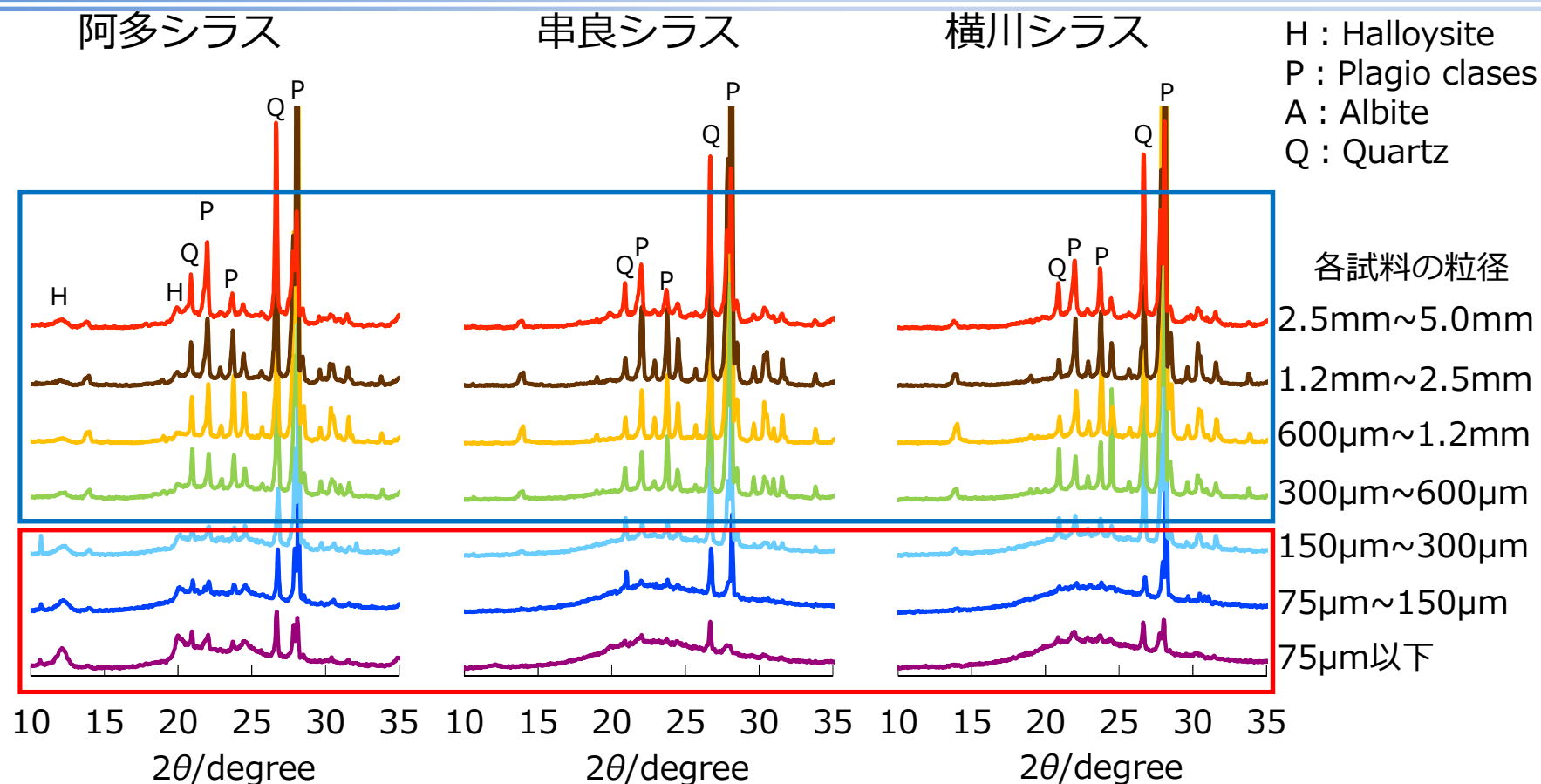
2. 各シラスの鉱物組成

XRDによる鉱物組成



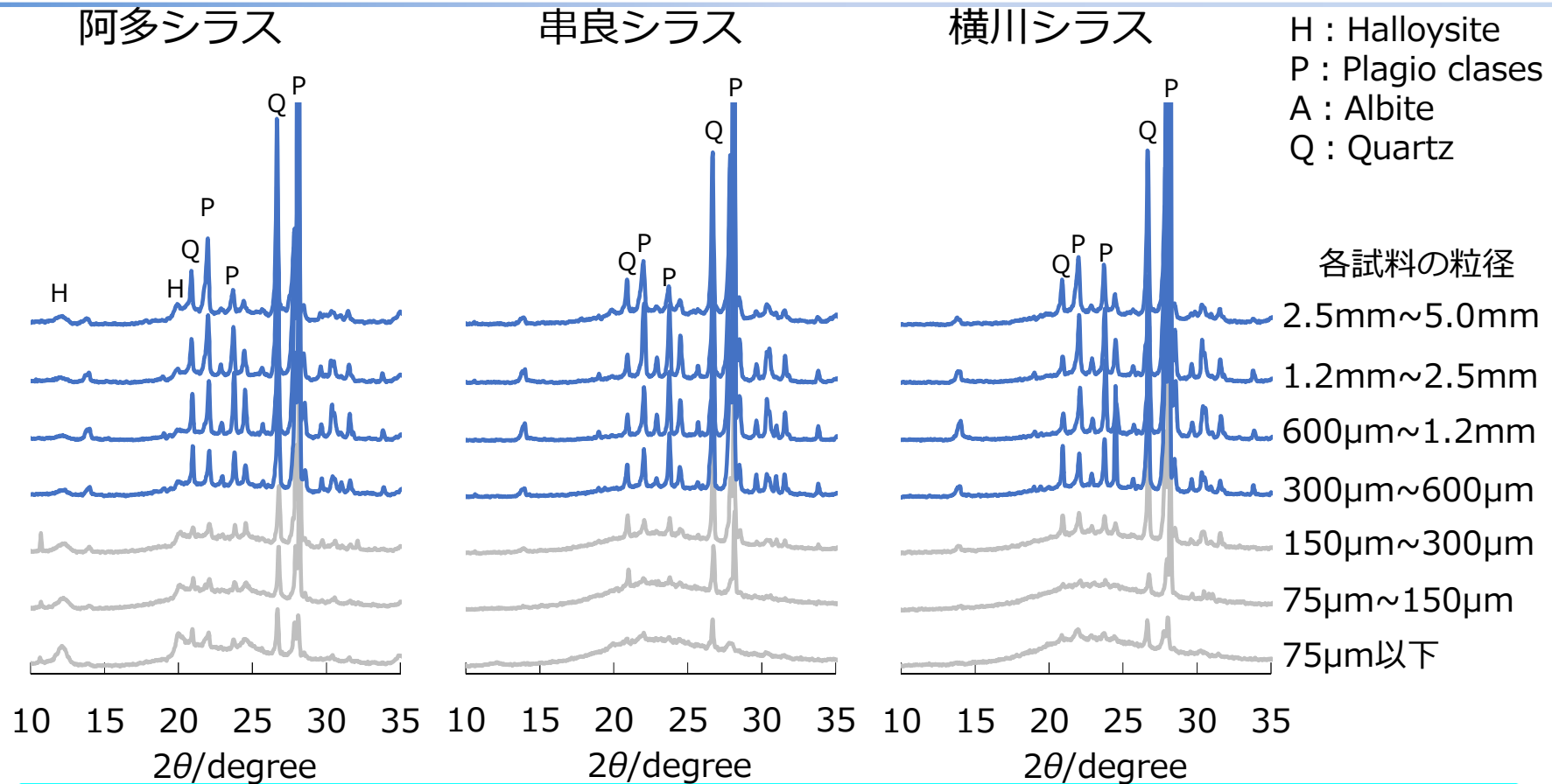
- 吉田シラスは非結晶質で構成されている。
- 吉田シラス以外のシラスは、石英、斜長石類およびガラス質を含んでいる
- 阿多シラスは粘土鉱物であるハロイサイトを含んでいる。これは、斜長石類が風化し変質したことにより、生成されたと考えられる
- 入戸火砕流由来のシラスは、ピークの高さに差があるものの、構成している鉱物は同じである

2. 各シラスの粒径ごとの鉱物組成



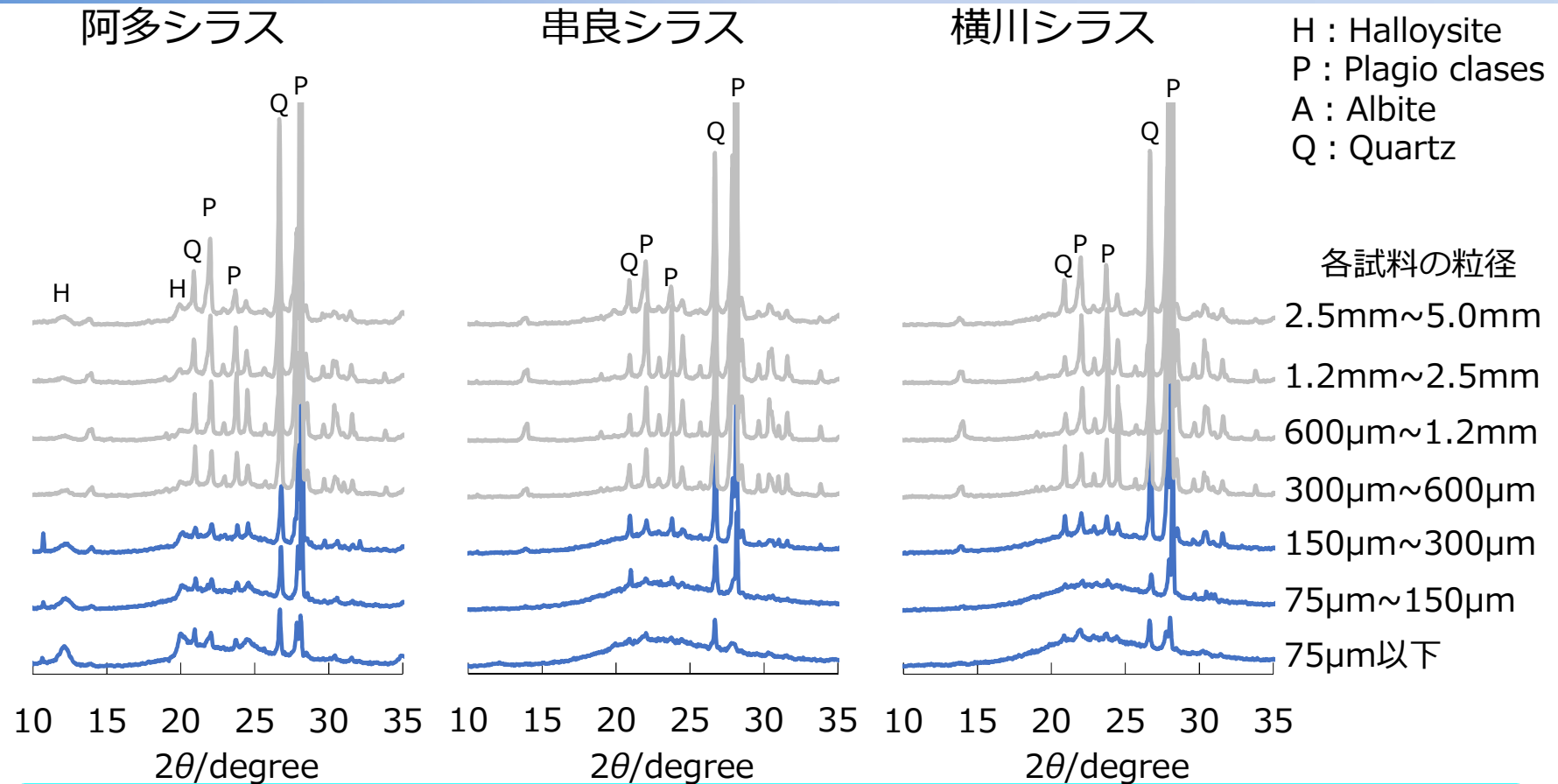
各シラスともシラスの粒径が300µmを境に2パターンに分けられる

2. 各シラスの粒径ごとの鉱物組成



シラスの粒径が大きいほど、石英や斜長石類の結晶質などのピークが多く確認できる
主に細骨材の役割

2. 各シラスの粒径ごとの鉱物組成



- ・ 串良シラスおよび横川シラスは、粒径が小さくなると斜長石類のピークが小さくなり、非結晶質特有のハローが確認できる。

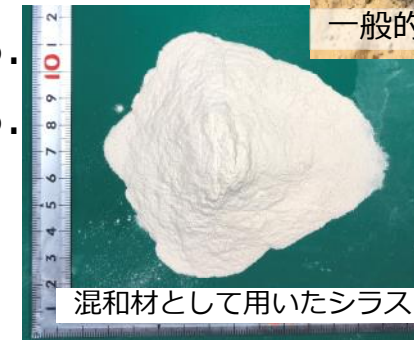
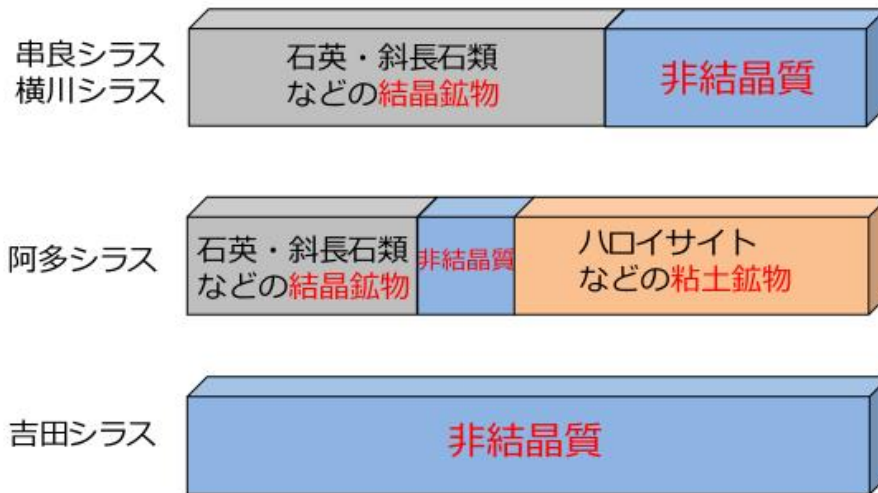
→主に混和材の役割

2. 各シラスの粒径ごとの鉱物組成

シラスには、石英・斜長石類などの結晶鉱物，ガラス質のような非結晶質，斜長石類が風化したハロイサイトなどの粘土鉱物が含まれる。

粒径によって大まかに分類できる。

- ・ 結晶鉱物は、粒径が $300\mu\text{m}$ 以上であり、骨材として機能する。
- ・ 非晶質は、粒径が $300\mu\text{m}$ 以下であり、混和材として機能する。



本研究では、

- ・ 混和材として活用できる吉田シラス
 - ・ 細骨材として利用できる横川シラス
- の2種類のシラスを用いて研究を行う。

2. 検討項目

1. 火山堆積物を**混和材**として用いた海水練りコンクリートの物性に関する検討
2. 火山堆積物を細骨材として用いた海水練りコンクリートの物性に関する検討

2. 使用材料・配合

材料	種別	密度 (g/cm ³)	備考
結合材	普通セメント	3.16	—
	シラス	2.37	鹿児島市産, 火山ガラスのみで構成
細骨材	海砂	2.59	吸水率 : 0.37%
練混ぜ水	水道水		上水道水
	海水		福岡県糸島市沿岸で採取



海水の成分(ppm)

採水日	Cl ⁻	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺
2021.6	17203	12047	2504	1278	296	303



2. 配合・測定項目

モルタル供試体の配合

供試体種類 (練混ぜ水－結合材種類)	W/C	S/C	単体量(kg/m ³)				
			W		B		S
			淡水	海水	セメント	シラス	海砂
海水－OPC	0.5	2	315		629	0	1259
淡水－OPC				315	629	0	1259
海水－S20			311		497	124	1242
海水－S20				311	497	124	1242

※高性能AE減水剤の添加量は、モルタルフローが200mmとなるように添加

※養生方法

モルタル：材齢7日までは封かん養生し、その後、海水養生を実施。2週間に一度全量交換

ペースト：封かん養生、海水養生を実施。なお、海水養生は、2週間に一度全量交換

試験項目

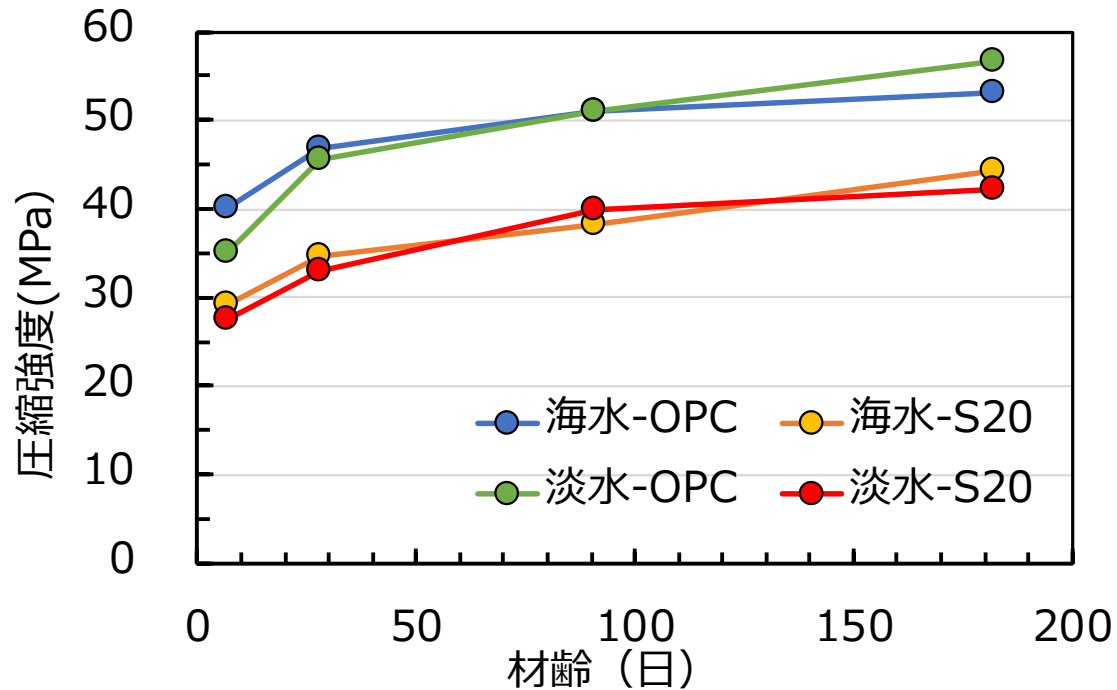
○ モルタル供試体

・圧縮強度試験

○ ペースト供試体

・水酸化カルシウム量、シラスの反応率

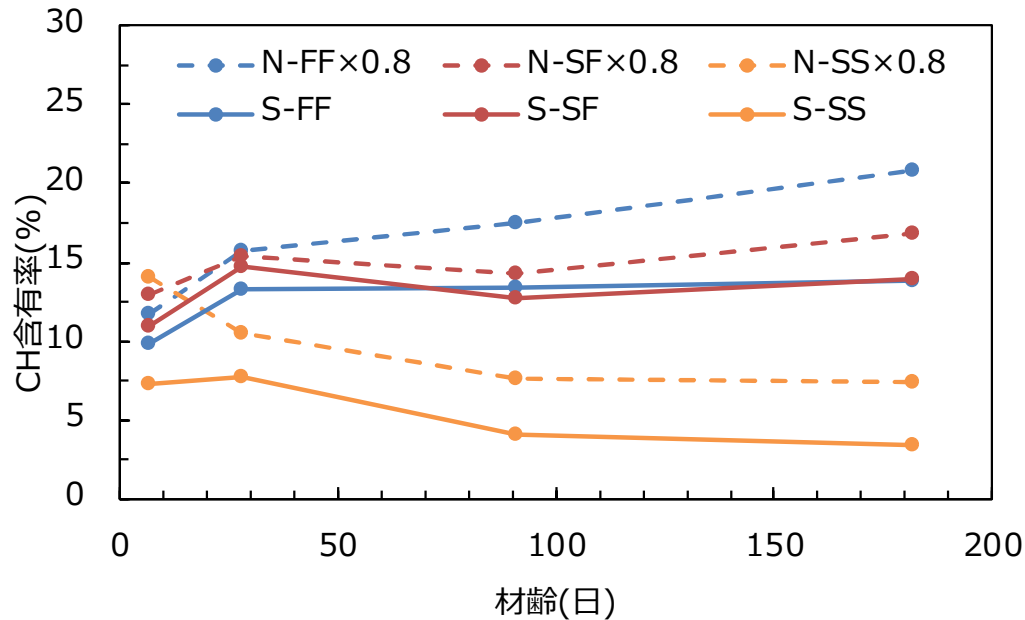
2. 圧縮強度試験



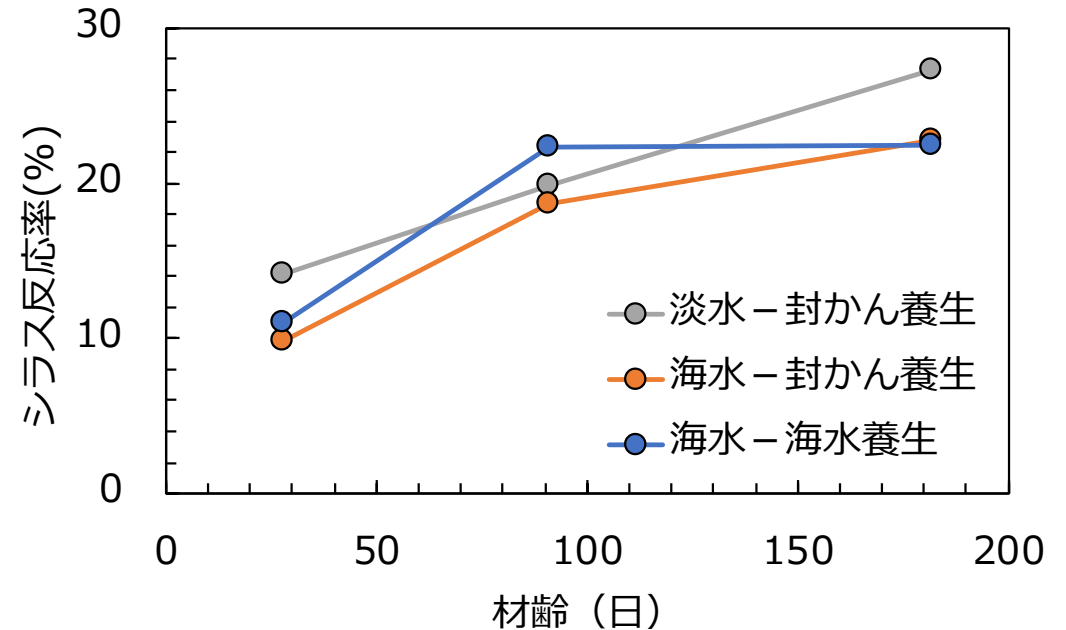
- ・ シラスを混和すると、セメント量が減少するためOPC単味より強度値は低い
- ・ 練混ぜ水に海水を用いると、初期の強度が向上する。現時点では、大きな差は確認できない。

2. 圧縮強度試験

水酸化カルシウム (CH) 含有量



シラスの反応率



- ・ 材齢91日以降, OPCの中のCH量は増加している. 一方, シラスを利用した試験体 (S-FF, S-SF, S-SS) のCH量は, 低下または変化がないため, 反応している可能性が高い.
- ・ 材齢の経過に伴い反応率は増加している. しかし, 養生方法や練混ぜ水の違いによってシラスの反応率には大きな差がない.

2. 検討項目

1. 火山堆積物を混和材として用いた海水練りコンクリートの物性に関する検討
2. 火山堆積物を**細骨材**として用いた海水練りコンクリートの物性に関する検討

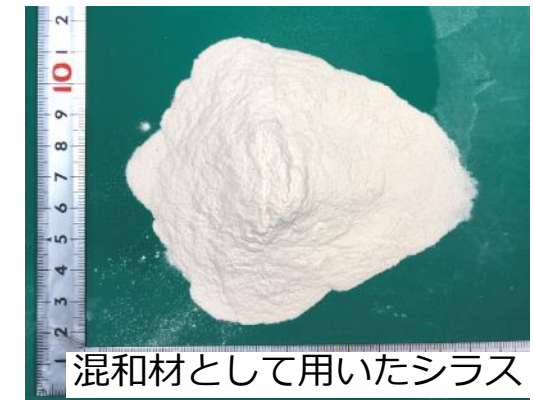
2. 使用材料・配合

材料	種別	密度 (g/cm ³)	備考
結合材	普通セメント	3.16	—
細骨材	シラス	2.16	横川産, 吸水率5.81%, 微粒分 20.1%
練混ぜ水	水道水		上水道水
	海水		福岡県糸島市沿岸で採取



海水の成分(ppm)

採水日	Cl ⁻	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺
2021.6	17203	12047	2504	1278	296	303



2. 配合・測定項目

モルタル供試体の配合

供試体種類 (練混ぜ水－結合材種類)	W/C	S/C	単位量(kg/m ³)				
			W		B		S
			淡水	海水	セメント	シラス	海砂
海水－OPC	0.5	1.24	359		718	0	892
淡水－OPC				359	718	0	892

※砂セメント比は一般的なシラスコンクリートの配合から粗骨材部を取り除いた配合

※高性能AE減水剤の添加量は、モルタルフローが180mmとなるように添加

※養生方法

材齢1日から28日までは封かん養生を実施。材齢28日以降は、封かん養生、気中養生、海水養生を実施

試験項目

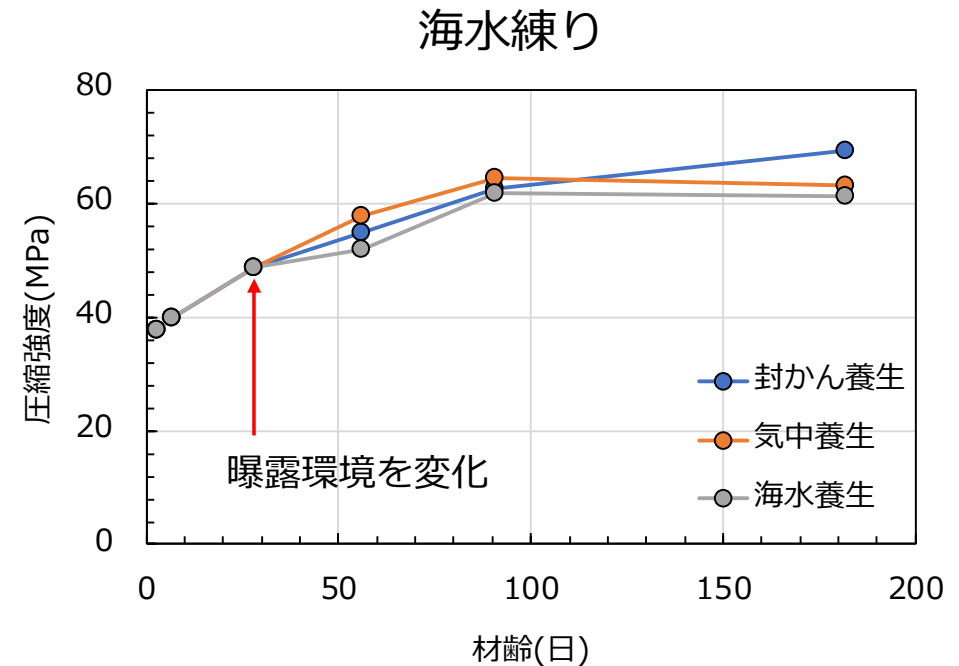
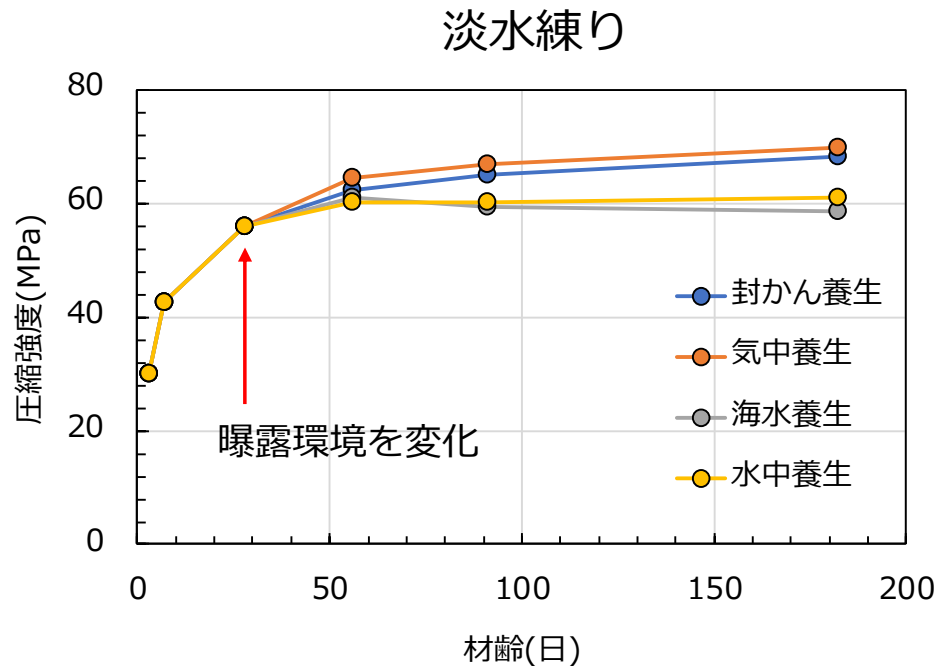
○ モルタル供試体

- ・ 圧縮強度試験
- ・ 空隙量分布

○ ペースト供試体

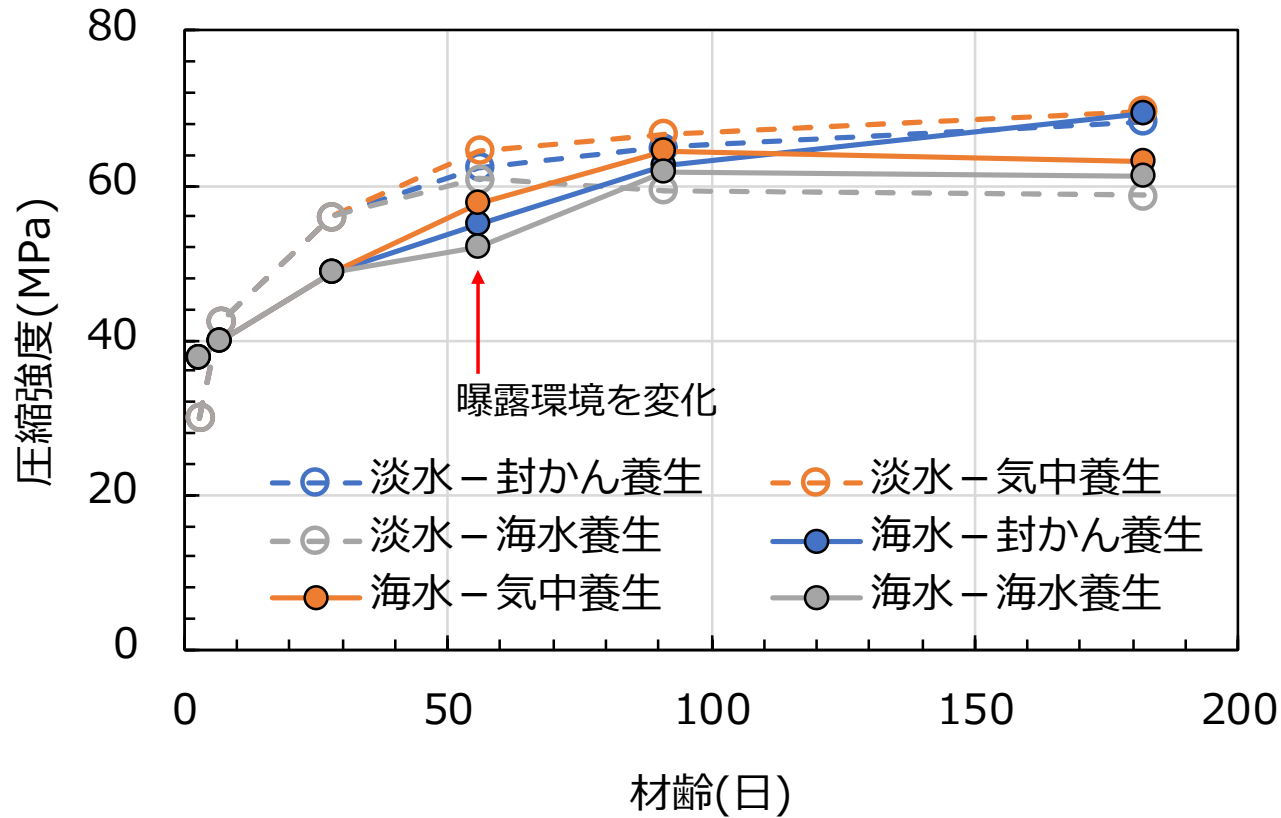
- ・ 水酸化カルシウム量、シラスの反応率

2. 圧縮強度試験



- ・ 淡水練りにおいて、材齢56日以降強度増加の傾向が異なり始める。気中養生と封かん養生は、強度の増加し続け、海水養生・水中養生は強度の伸びは確認できない。
- ・ 海水練りにおいて、封かん養生が強度の伸びが継続している。

2. 圧縮強度試験



- ・ 海水練りモルタルの初期強度が向上するが、その後の強度の伸びは緩やかになる。
- ・ 封かん養生を実施したモルタルの圧縮強度は、向上し続けている。

4. まとめ

現時点でのまとめ

- ・練混ぜ水に海水を用いることにより，OPCの反応が促進され，圧縮強度が増進する.
- ・養生条件（曝露条件）により，圧縮強度の伸びに差が出てきており，海水練りの封かん養生では，今度も強度が向上する傾向を得た.

今後の課題（2025年度に取り組む内容）

- ・長期材齢における各種データ（強度，細孔径分布，反応率等）の取得
- ・海水練りシラスコンクリートに埋設した鋼材の腐食性状（試験体作製済み）
- ・海洋曝露試験（曝露場所は選定済み）

2. シラスの化学組成

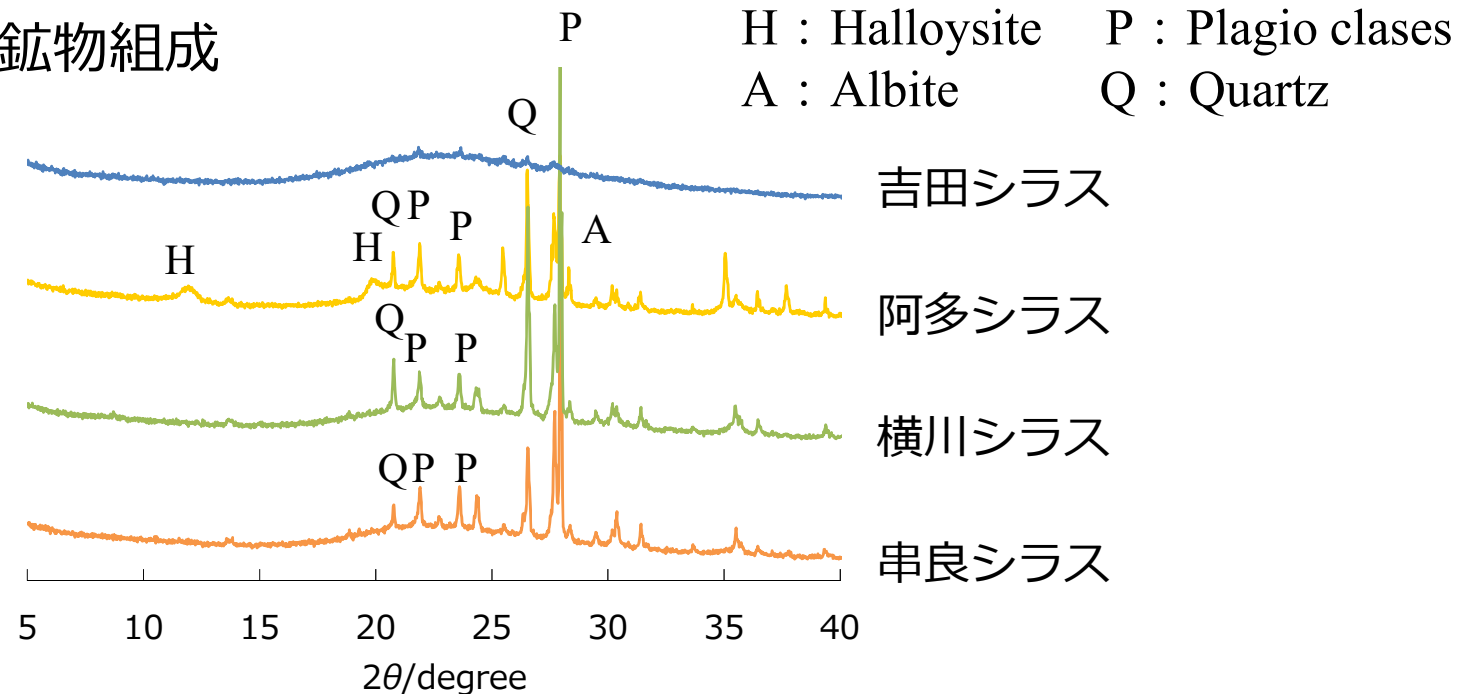
XRFによる化学組成

シラスの名称	化学組成 (mass%)					非結晶質の割合 (mass%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	
串良シラス	70.2	14.2	4.5	4.4	4.2	65.6
横川シラス	64.2	11.1	9.9	3.7	6.5	54.8
阿多シラス	64.9	20.2	3.5	5.9	3.2	58.5
吉田シラス	72.9	12.7	3.2	3.6	5.2	94.6

- すべてのシラスの主成分はSiO₂である
- 入戸火砕流由来の串良シラスと横川シラスは化学組成に大きな差は見られない
- 阿多シラスは他のシラスと比較してAl₂O₃多く含んでいる. 他のシラスよりも堆積時期が早かったためだと考えられる

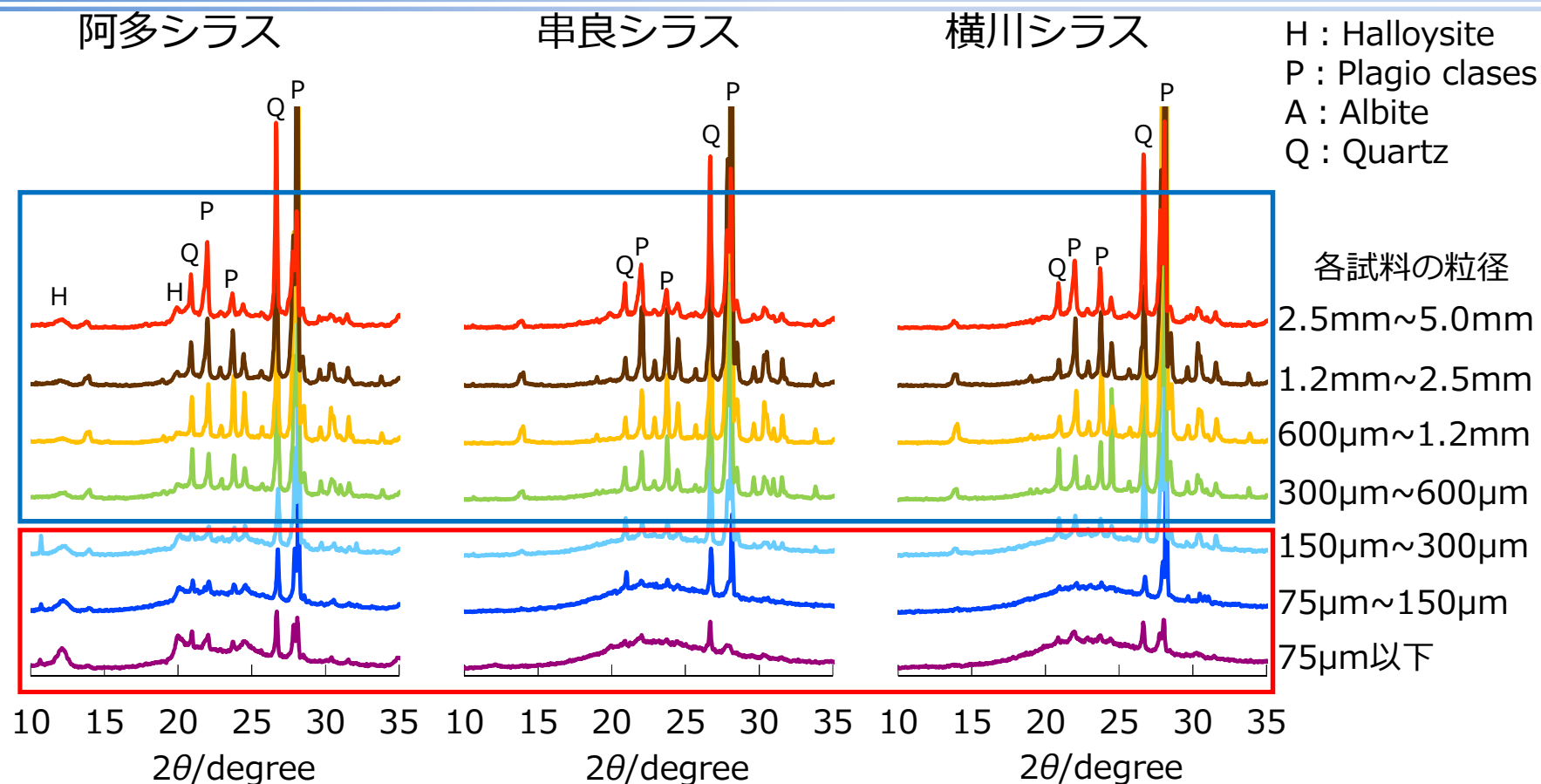
2. 各シラスの鉱物組成

XRDによる鉱物組成



- 吉田シラスは非結晶質で構成されている。
- 吉田シラス以外のシラスは、石英、斜長石類およびガラス質を含んでいる
- 阿多シラスは粘土鉱物であるハロイサイトを含んでいる。これは、斜長石類が風化し変質したことにより、生成されたと考えられる
- 入戸火砕流由来のシラスは、ピークの高さに差があるものの、構成している鉱物は同じである

2. 各シラスの粒径ごとの鉱物組成



各シラスともシラスの粒径が300μmを境に2パターンに分けられる

3. 実験概要 配合および試験項目について

材料・配合・養生方法

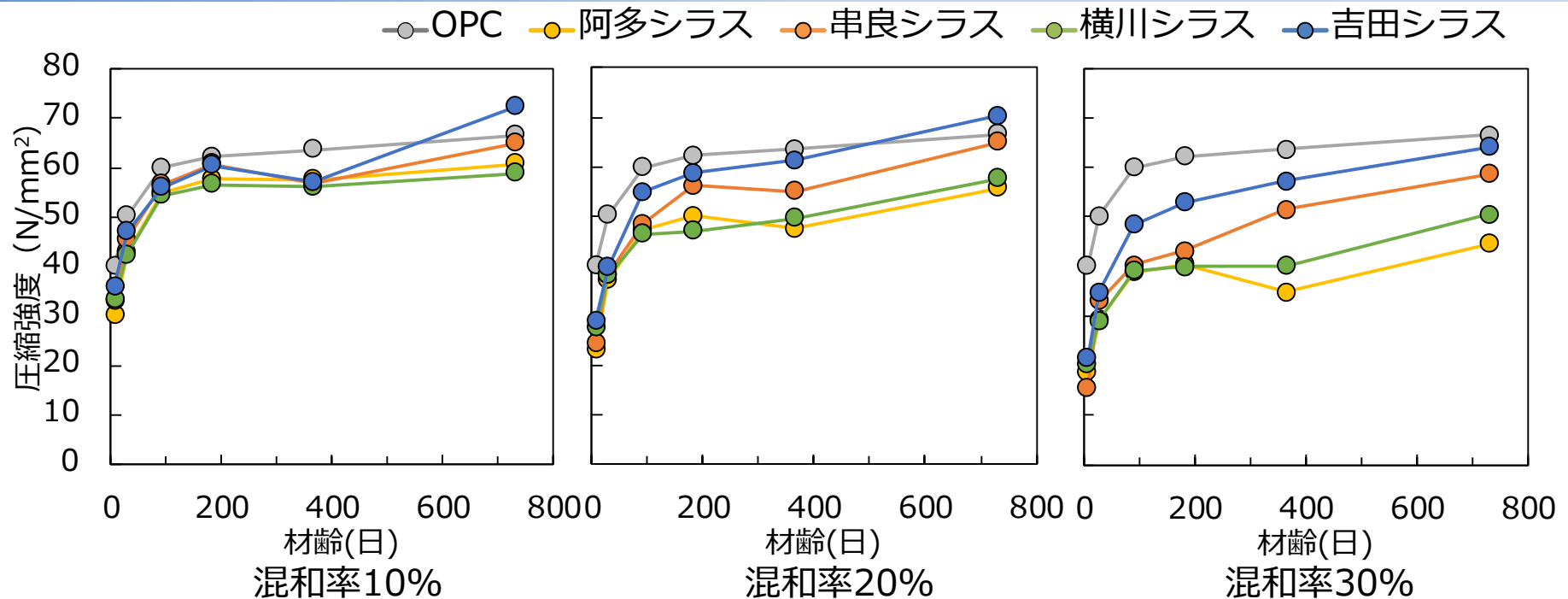
- ・材料 : 普通ポルトランドセメント (OPC) , シラス 4 種類 (シラスはミル機で粉砕) , 上水, 川砂(細骨材)
- ・結合材 : OPCのみ, OPCに各シラスを10, 20および30mass%混和
- ・水結合材比 : 0.5
- ・細骨材結合材比 : 3
- ・供試体寸法 : $\phi 5 \times 10$ cmの円柱供試体 (圧縮試験用)
- ・養生方法 : 打設24時間後に脱型を実施し, 所定の材齢まで20℃水中養生



試験項目

- ・圧縮強度試験
- ・空隙量
- ・塩水浸漬試験 (シラスの反応性, 各種塩化物イオン量, 見かけの拡散係数)

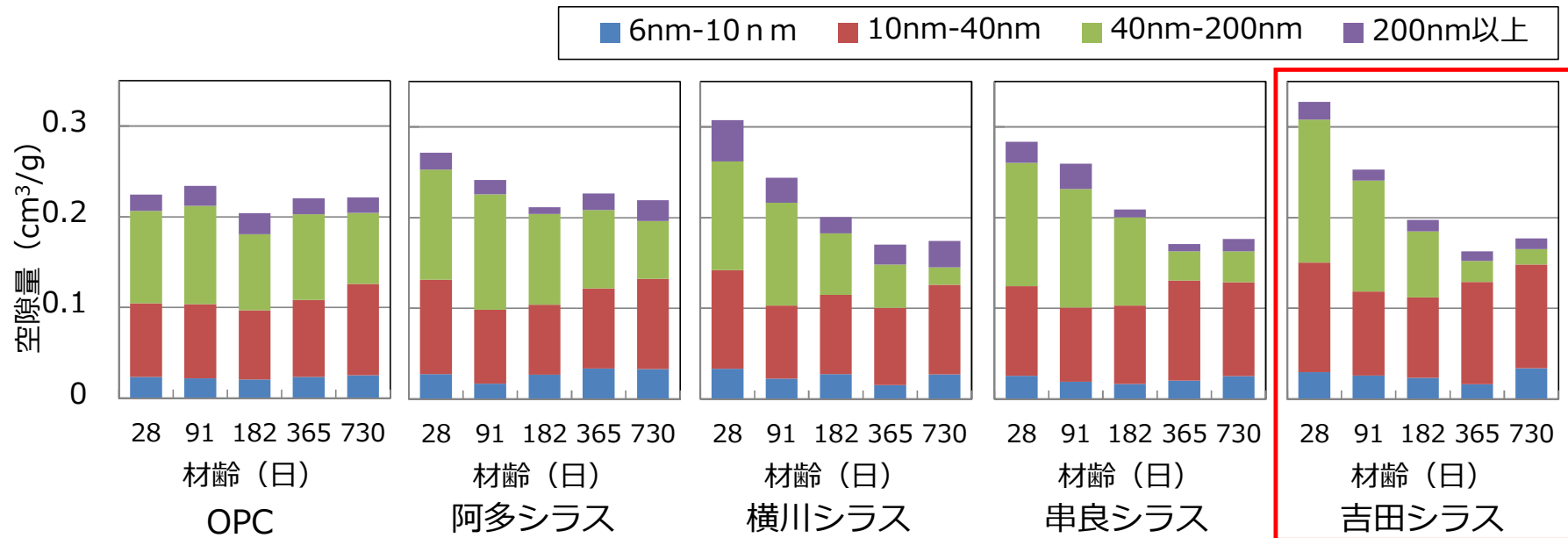
3. 実験結果 圧縮強度の関係



- ・ シラスを用いた配合は、混和率に関わらず材齢91日以降強度が増加し続け、材齢2年以降も増加する傾向にある
- ・ すべての混和率にかかわらず、吉田シラスを用いた配合が高い

3. 実験結果

各供試体の区分空隙量の推移（シラスの混和率20%）



○微細な細孔径となる6nm~40nmの区分細孔量 ■ ■

材齢の経過とともに、若干増加する傾向となった。

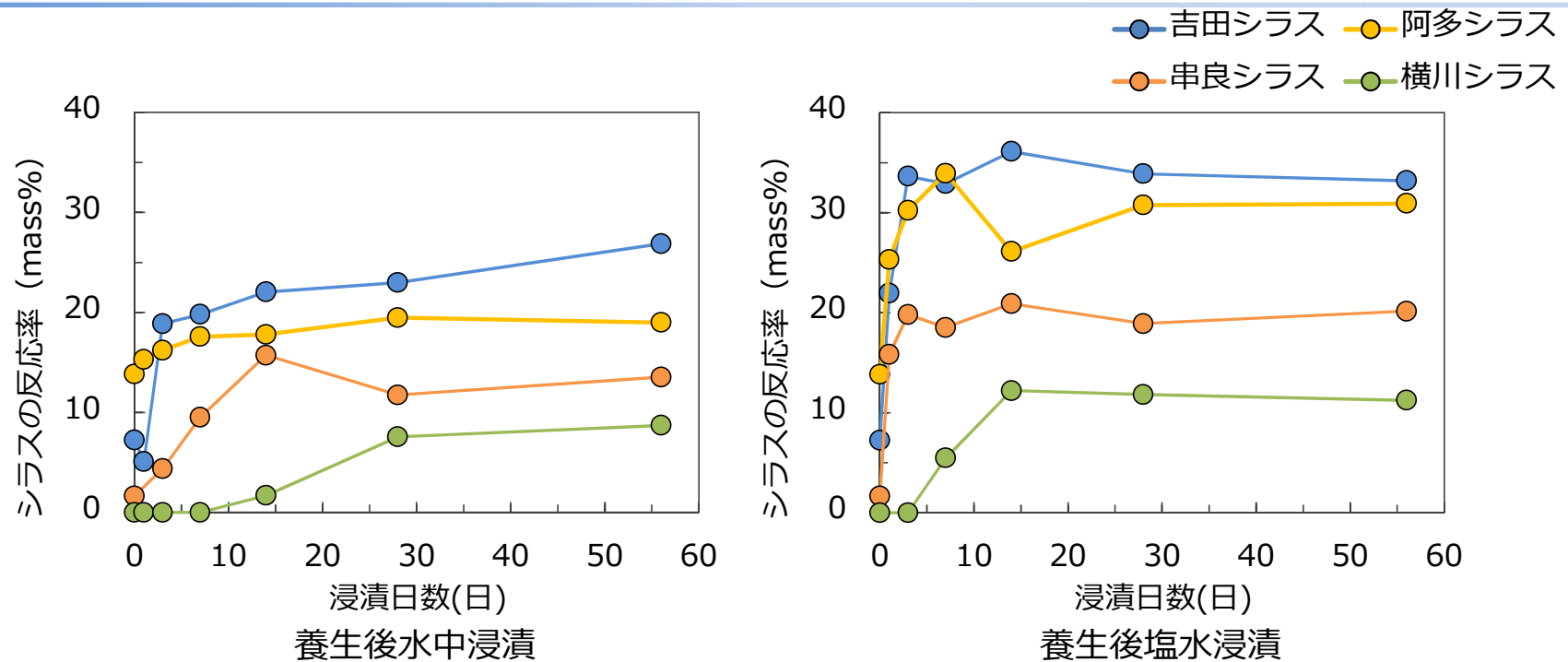
○比較的大きな細孔径となる40nm~200nmの区分細孔量 ■

材齢91日以降、空隙量は減少していき、材齢2年において極めて小さな値となる

○粗大な細孔径となる200nmの区分細孔量 ■

いずれのシラスを混和した場合においても経時変化量は少ない

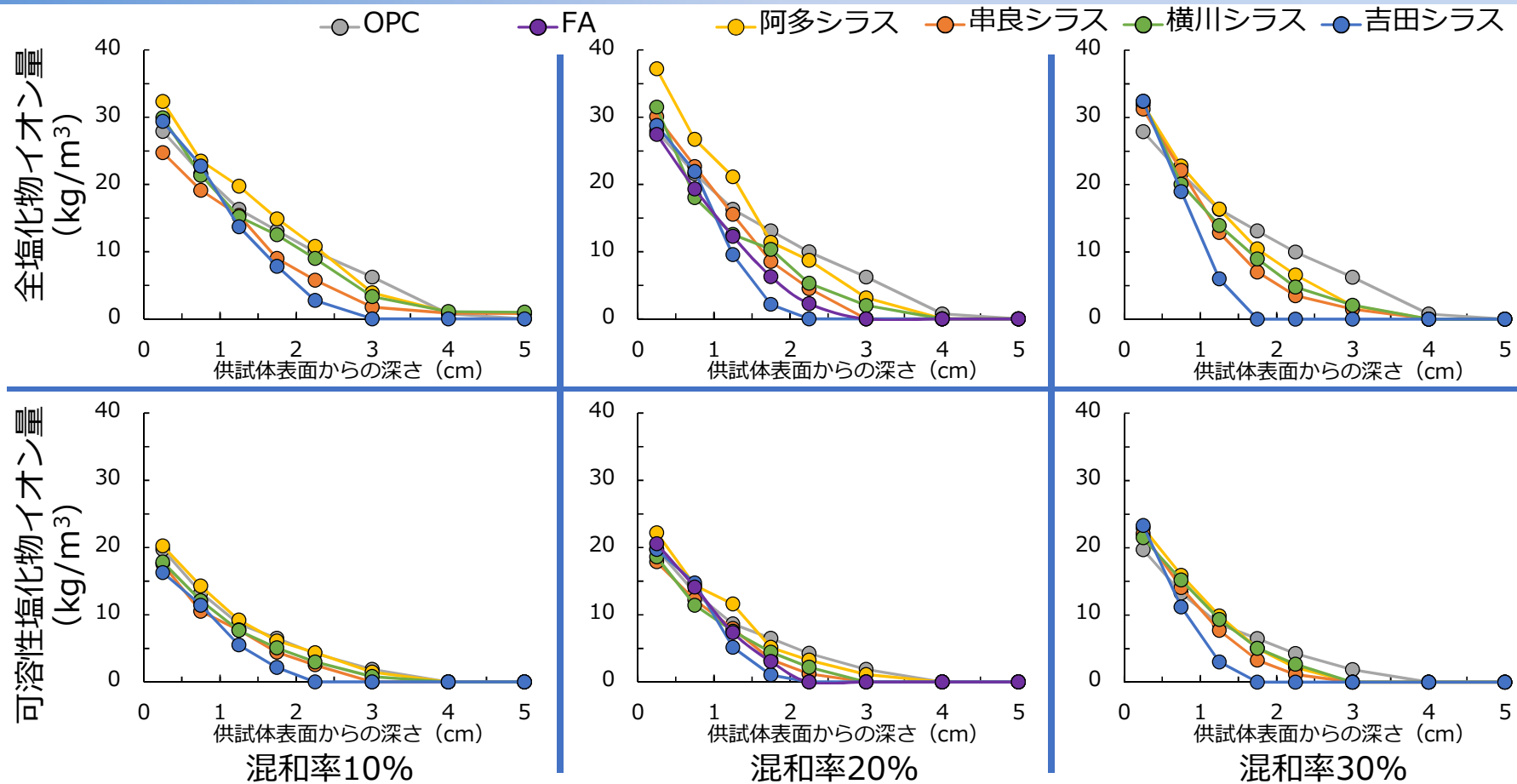
3. 塩水に浸漬したシラスの反応率の推移（シラスの混和率20%）



塩水に浸漬することにより，シラスの反応率は大幅に増加することが確認できる

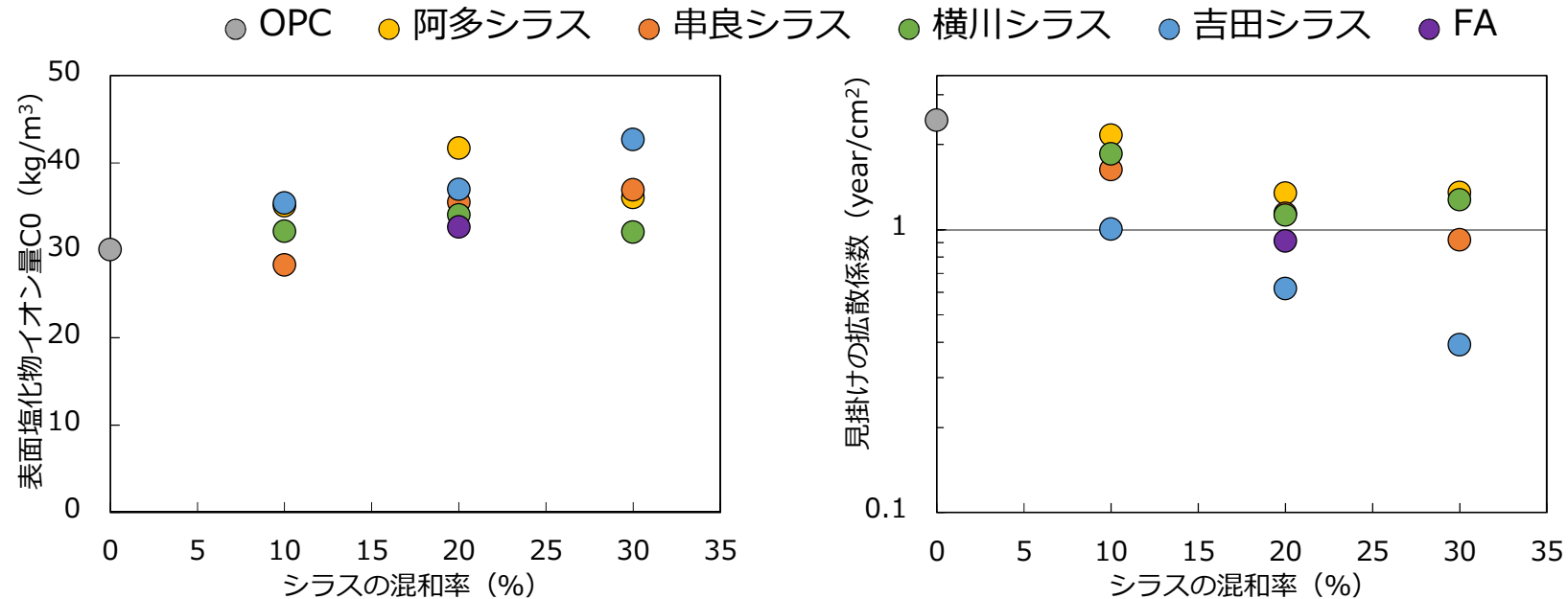
3. 各種塩化物イオン量

養生28日, 浸漬期間1年



○シラスの混和率が高くなると, 浸透深さは低下する.

3. 表面塩化物イオン量，見かけの拡散係数

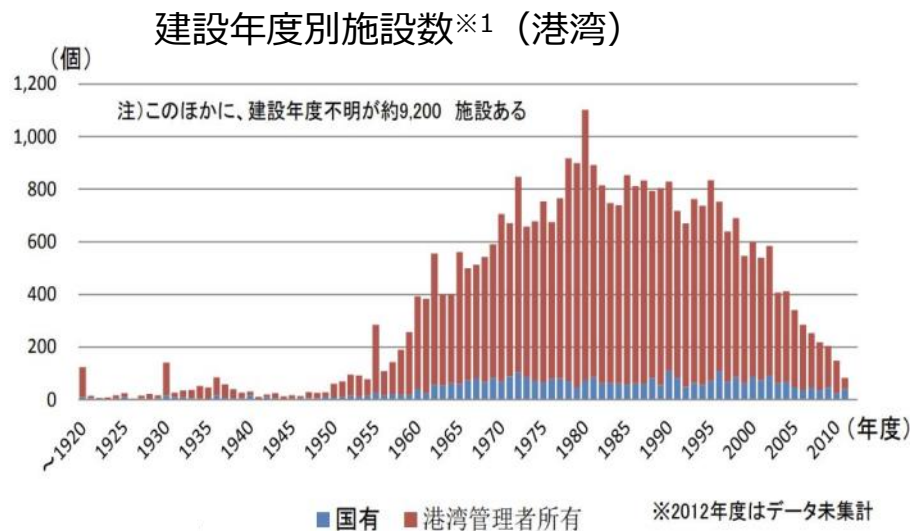


見掛けの拡散係数について

- ・ シラスを混和することにより，OPCよりも見掛けの拡散係数が低下する。
- ・ 特に，吉田シラスを用いた見掛けの拡散係数は，この傾向が大きい

見掛けの拡散係数は，供試体中の非結晶質の反応によって決定づけられる。

1. 建設資材の不足について



コンクリート構造物のストック数が増加しており、劣化しているコンクリート構造物の立替え・新設・廃止が必要となっている

将来的に、建設材料が不足している（する）状況のため、従来通りの新設構造物や補修ができなくなる可能性がある

良質な天然資源（骨材・混和材・水）の代替材料の探索

骨材に火山堆積物，練混ぜ水に海水を用いられないか

1. 離島地域の維持管理に関する課題

○海水練りコンクリート

全国の離島数…14,125島(R4年1月時点の電子国土基本図を用いて国土地理院が計数)

- ・九州・沖縄に存在する離島数…3,908島 (長崎1,479島(全国1位), 鹿児島1,256島(全国3位))
- ・有人離島でも九州・沖縄は多い(長崎51島(全国1位), 沖縄39島(全国2位), 鹿児島28島(全国4位))¹⁾

離島における問題

- ・離島において淡水の確保は生活するうえで重要
- ・鹿児島県には、サンゴが隆起してできた島が多数あり、特に淡水の確保が難しい。

離島や過疎化地域における問題

少子高齢化や財源的な理由により、コンクリートプラント自体の運営もできなくなっている

インフラ維持のため、簡易プラントを設置しての維持工事が考えられ、海岸線に近い地域では、海水を使いこなす必要性が高いと考えられる

1. 建設資材の不足について

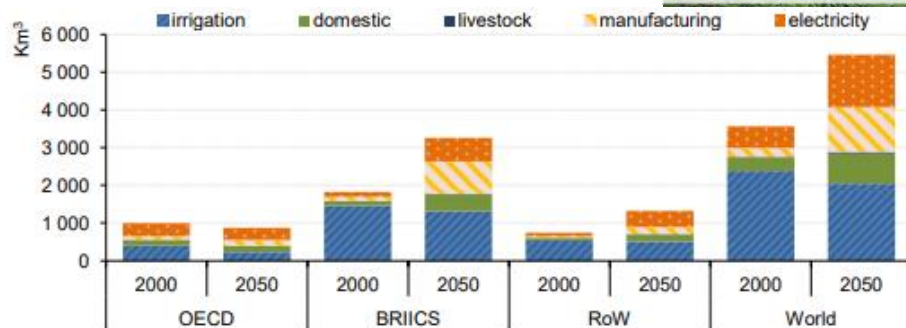
世界規模での都市化や人口増加が進むことによる資源不足+地球温暖化の対策

水不足

- OECDの報告※1では、2050年には上水道を利用できない人口は2億4000万人に上ると予想
- 離島では水の確保が重要
- 福岡県でもダムの渇水など※2



油木ダム(福岡県田川郡添田町)



Note: This graph only measures blue water demand (see Box 5.1) and does not consider rain-fed agriculture.
RoW = rest of the world
Source: OECD Environmental Outlook Baseline; output from IMAGE suite of models.

※1_OECD, 2012:Environmental Outlook 2050

※2_ <https://mainichi.jp/articles/20190604/k00/00m/040/061000c>

副産物の減少

CO₂排出量を減少するために、
製鉄所では、高炉から電炉を用いた製鉄方法へ
石炭由来の火力発電所の減少

これまで使用してきた高炉スラグ微粉末やフライアッシュが貴重になってしまう。

日本経済新聞

朝刊・夕刊 LIVE Myニュース

トップ 速報 オピニオン 経済 政治 ビジネス 金融 マーケット マネーのまなび テック 国際 スポーツ 社会

日鉄、30年までに国内に大型電炉 脱炭素へ生産見直し

ビジネス

2021年3月30日 18:41

保存

印刷 共有 投稿

日本製鉄は30日、2030年までに鉄スクラップを原料とする大型の電炉を国内につくる方針を明らかにした。鉄鉱石と石炭由来のコークスを使う高炉に比べ、電炉は製造時の二酸化炭素（CO₂）排出量が4分の1に減る。コークスの代わりに水素を使う生産技術も研究し、生産体制を脱炭素時代にあわせて見直す。

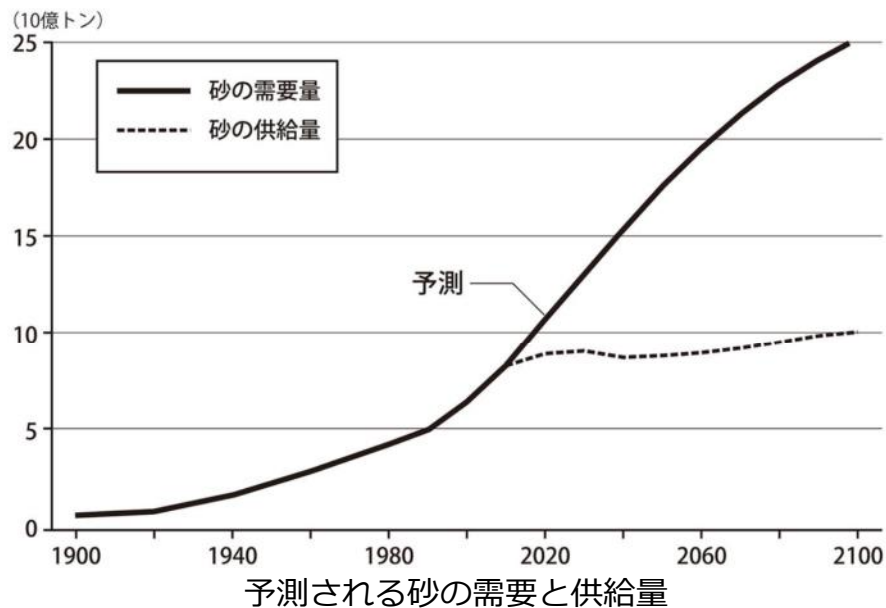
※<https://www.nikkei.com/article/DGXZQODZ301BE0Q1A330C2000000/>

1. 建設資材の不足について

世界規模での都市化や人口増加が進むことによる資源不足

骨材不足

コンクリートを構成する材料が世界的に不足している（例えば、すでに砂戦争と言われる資源(天然細骨材)の争奪戦が始まっている）日本も海外から輸入し始めている



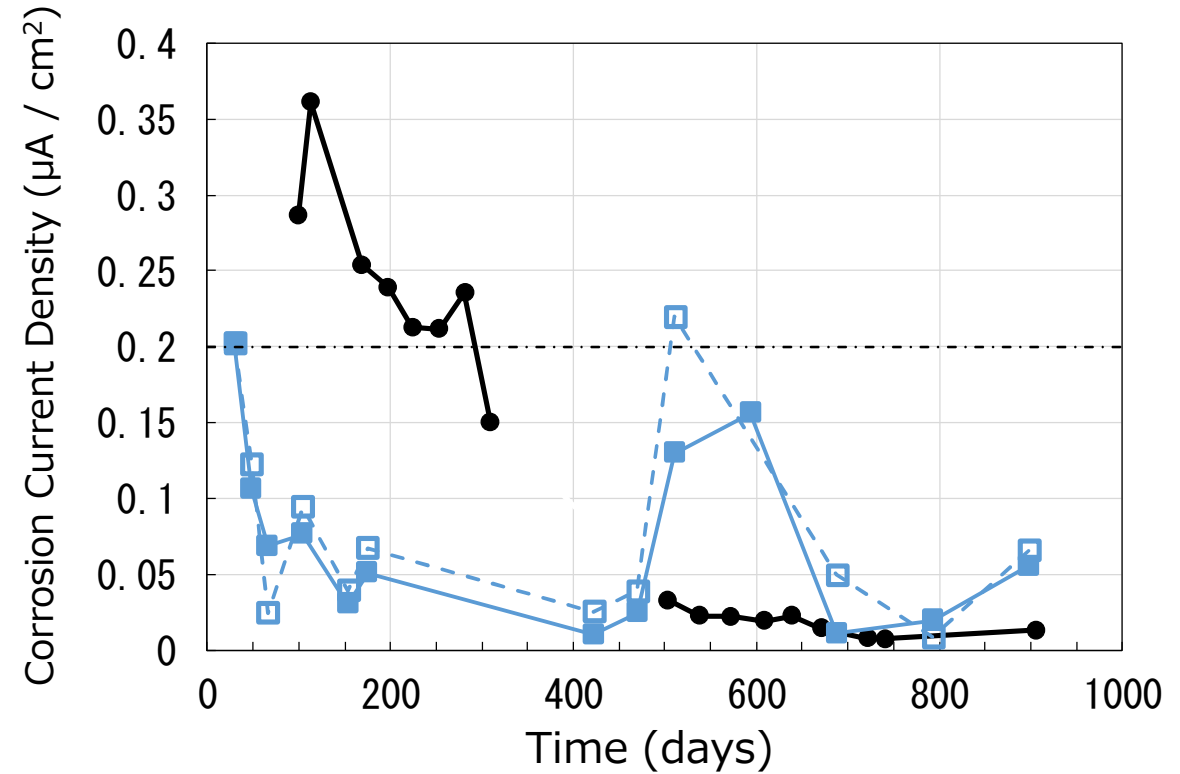
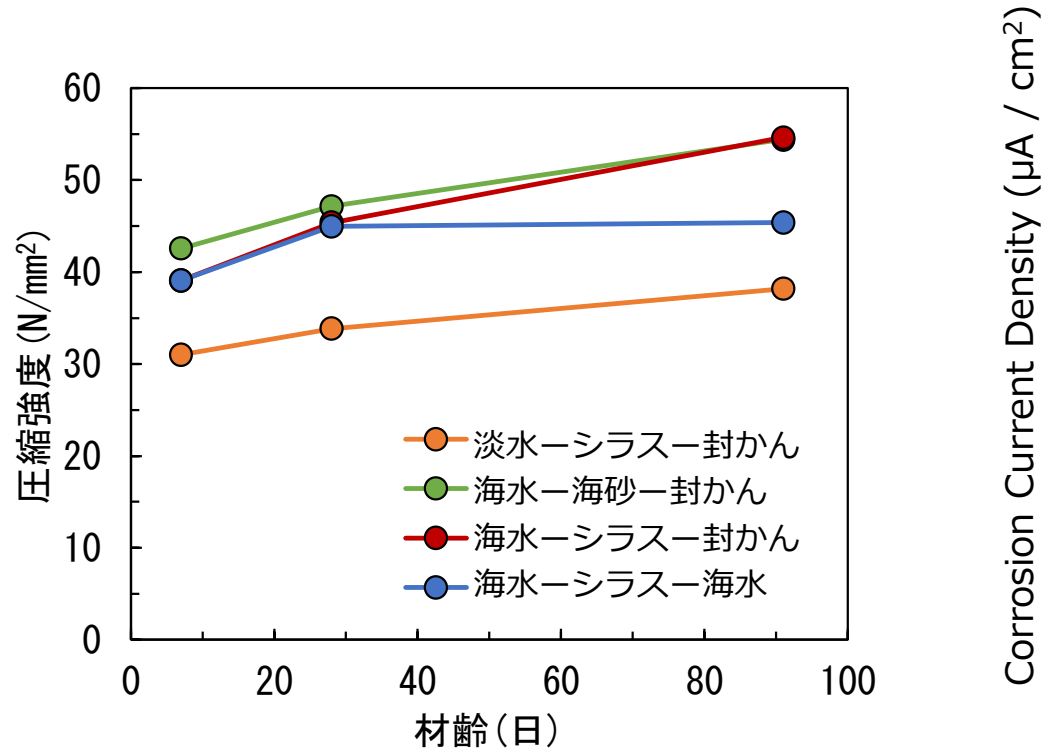
※Time is running out for sand (Nature 571, pp29-31, 2019) より日本語訳



※<https://www.nhk.jp/p/bs1sp/ts/YMKV7LM62W/episode/te/8P4Z7Z4KPP/>

2. 圧縮強度試験

○練混ぜ水に海水を利用した研究



4章のまとめ

現行のシラスコンクリートで使用されているシラス細骨材の効果

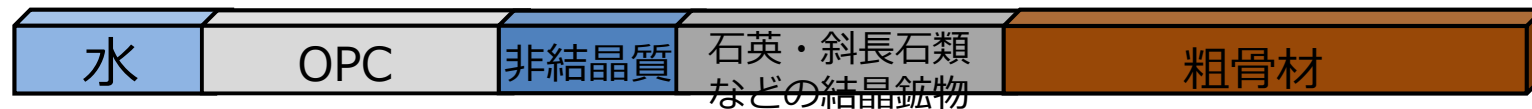
シラスコンクリートを一般的なコンクリートで見たときの役割

シラス細骨材



シラスの中の各鉱物の効果を考慮した場合の役割

混和材 細骨材



シラス細骨材に含まれている非結晶質は、混和材として機能し、**長期的に圧縮強度の増進**や**遮塩性の向上**に寄与する