

乾式比重選別によるシラスの全量活用

袖山研一*, 友寄 篤**, 野口貴文**, 東 和朗***

Total Utilization of Shirasu by Dry Gravity Classification

Ken'chi SODEYAMA*, Atsushi TOMOYOSE**, Takafumi NOGUCHI** and Kazuro HIGASHI***

南九州に分布する火山噴出物のシラスを堆積状況から“淘汰されたシラス”, シラス台地下層の“降下軽石”, その上層の“普通シラス”に大別し, 産地の異なる7か所のシラスの化学組成と結晶鉱物, 火山ガラス, 軽石の粒度と鉱物組成, 密度を明らかにした。最も賦存量の多い普通シラスについて, 大量需要が期待されるコンクリート用細骨材としての課題を解決する新たな乾式比重選別技術を開発し, シラスから結晶質のJIS適合砂を分離できることを示した。乾式比重選別技術は, 結晶質, 軽石質, 火山ガラス質, 風化物を分離・回収することが可能であり, シラスの全量活用に有効である。

Keyword : シラス, 火山ガラス, 結晶, 鉱物組成, 比重分離

1. 緒言

日本は, 123もの活火山を有する世界第4位の火山大国である¹⁾。鹿児島県は, 霧島火山脈と呼ばれる霧島, 桜島, 開聞岳, 硫黄島などの7つの活火山が連なっており, シラス台地と呼ばれる軽石を含んだ火山灰土壌で覆われている。白砂が語源とも言われ, 約3万年前に鹿児島湾奥部の始良カルデラから噴出した入戸火砕流を主体とする堆積物が台地を形成し, 農業生産性が低く雨で崩れ易いので災害の元凶とされている²⁾。このシラスを工業資源化できれば, 地域産業の振興に繋がる。本研究では, シラスの密度, 組成などの基本物性を明らかにし, コンクリート用細骨材としての試験研究の経緯と新開発した乾式比重選別^{3)~5)}による全量活用について述べる。

2. 実験方法

2.1 試料

鹿児島県は, シラス台地と呼ばれる火山灰土壌で覆われている。図1にシラスの分布⁶⁾と本研究に用いた7種類のシラスの採取場所を示す。シラスは, 堆積状況から“淘汰されたシラス”, “降下軽石”, “普通シラス”に大別される。

淘汰されたシラスは, 入戸火砕流以前の火山噴出物が川や海の水による淘汰作用で, 結晶鉱物や軽石が除去されて火山ガラス粒子が高純度で堆積したものである。南九州では鹿児島市の吉田地区と宮崎県のえびの市の2か所しか産出しない希少且つ高価なシラスである⁷⁾。

降下軽石は, 大隅半島の鹿屋市, 志布志市周辺の入戸火砕流の直前に堆積した約3万年前に噴出した大隅降下軽石⁷⁾に由来する軽石の多い火山噴出物である。

普通シラスは, 学術的な定義はないが, シラス台地を形成する入戸火砕流の非溶結部を主体とした堆積物とする。一般に灰白色で半固結状を呈し, 多孔質であり, 大部分を構成する2mm以下の砂分(火山灰)と礫(主に軽石)からなる。鉱物組成は, 火山ガラスを主成分とし, 斜長石, 輝石, 石英, 磁鉄鉱などを副成分としている。化学組成は, ケイ酸分が約70%と最も多く, 次いでアルミナが約14%, アルカリ酸化物が約8%である。

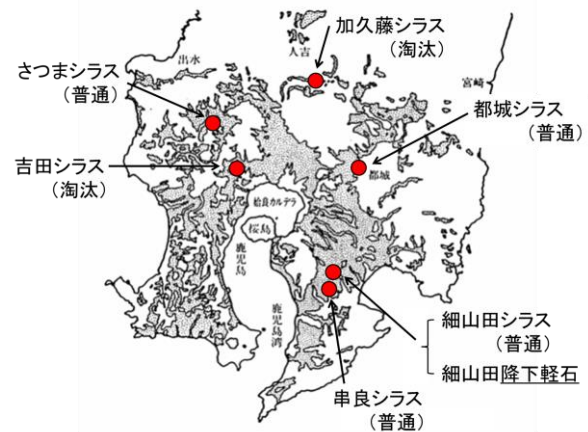


図1 シラスの分布と本研究に用いたシラス (灰色部分がシラス)

2.2 物性評価

シラスとその分離成分の粒度は, JIS A 5308 附属書 A の砂の粒度でふるい分けしたふるい上積算分布から粒度分布と平均粒径を算出した。シラスを乾式比重分離した火山ガラス質と風化物の粒度は, 粒が細かいためレーザー一回折式粒度分布測定装置を用いて測定した。鉱物組

* 地域資源部 シラス研究開発室

** 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻

*** 株式会社プリンシプル

成については、シラスおよびふるい分けした分離成分を臭化亜鉛水溶液の重液を用いて火山ガラス、結晶質、軽石を分離し、鉱物組成を明らかにした。密度は、JIS A 5008 に準拠してルシャテリエの比重瓶を用いて測定した。化学組成は、蛍光 X 線測定装置により分析した。強熱減量は、105℃乾燥した試料の 1,000℃ 1 時間焼成後の減量を測定した。

2. 3 湿式比重分離

臭化亜鉛水溶液の重液を用いたシラスの鉱物組成については、諫山らにより⁸⁾、密度 2.4 g/cm³ 以上を結晶鉱物、それ以下を火山ガラスとして分離できるとされている。また、シラスに含まれる「軽石」の分離と比率については、JIS A 5002 の軽量骨材の区分「M」に相当する絶乾密度 1.8 g/cm³ 以下 (4.75mm 以下) と絶乾密度 1.5 g/cm³ 以下 (4.75mm 以上) の成分を分離して「軽石」とし算出した。

2. 4 乾式比重選別

シラスの乾式での比重選別を目的として、これまで垂直配管内での鉱物粒子の浮遊速度の差を利用した気流分級実験を行ってきたが、粒度分布が広すぎるため結晶鉱物と軽石の選別が困難であった。そこで、浮遊速度差に加えて振動流動層での比重分離作用を利用した装置として、従来の穀物の選別のほか産業廃棄物の選別にも活用されているエアテーブルと呼ばれる装置³⁾で実験を試みた。エアテーブルの比重選別の原理を図 2 に示す。多孔板の直径 1mm 程度の無数の孔に向けて、下からシロッコファン等で発生させた脈流の少ない気流を通す。上面に原料が供給されると、1mm 以上の結晶質の粗砂 (図 2 中の黒丸印) は、多孔板の上面の鋸刃状の底面に位置する凹凸に引っ掛かりつつ、偏心クランクの回転振動により多孔板の上手に移動して回収される。1mm 以下の結晶質の細砂 (図 2 中の黒点印) は、孔の上昇気流に逆らって落下して回収される。軽石 (図 2 中の白丸印) は、振動と多孔板の孔から噴出する気流による浮力で、重比重の粒からなる層の上側に移動し、斜めに傾斜した多孔板から転げ落ちて下手に回収される。上昇気流により舞い上がった火山ガラス質の細粒と風化物の微粉は、サイクロンと集塵機で分離・回収される^{3) 4)}。

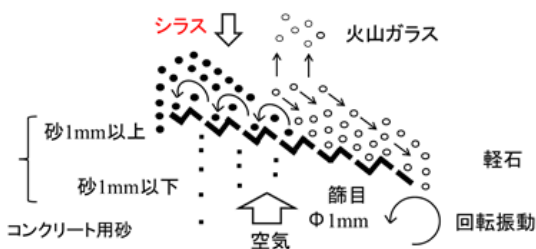


図 2 乾式比重選別の原理

3. 実験結果と考察

南九州の 7 か所のシラスを淘汰されたシラス、降下軽石、普通シラスに大別し、それらの原鉱と 5mm 篩以下について、粒度、密度等を分析した。鉱物組成は、湿式比重分離により粒度毎の結晶質、軽石質、火山ガラス質の割合を求めた。その結果からシラスの細骨材としての評価を行った。普通シラスのうち、鹿屋市串良町産の串良シラスについて、エアテーブルを用いた乾式比重選別を行った。

3. 1 淘汰されたシラス

火山噴出物が天然水の比重選別 (淘汰) 作用により、結晶鉱物が普通シラスに比べて非常に少なく火山ガラスが高純度に濃縮された希少なシラスである。

3. 1. 1 吉田シラス

鹿児島市北部の吉田麓周辺に産出する吉田シラスの基礎物性を表 1 に鉱物・化学組成を図 3 に示す。白色、微粒で粒径が揃っており、約 40 万年前の海に堆積したものとされている⁴⁾。明治期以前から磨き粉として利用され、強熱減量が 5.8% と大きく水分が多いため発泡しやすく、不純物も少ないことから、1970 年代に実用化されたシラスバルーンの原料として現在まで利用されている。火山ガラス含有率は 95%、結晶鉱物は 4% で、軽石は殆ど含まない。シラスバルーン原料、クレンザー、陶磁器用釉薬、石鹸、洗顔料、魚の干物の吸湿材等の用途がある。

表 1 吉田シラスの基本物性

	軽石	火山ガラス	結晶	平均粒径	密度
原鉱	0.5%	95.4%	4.1%	34μm	2.32g/cm ³
5mm以下	-	-	-	-	-

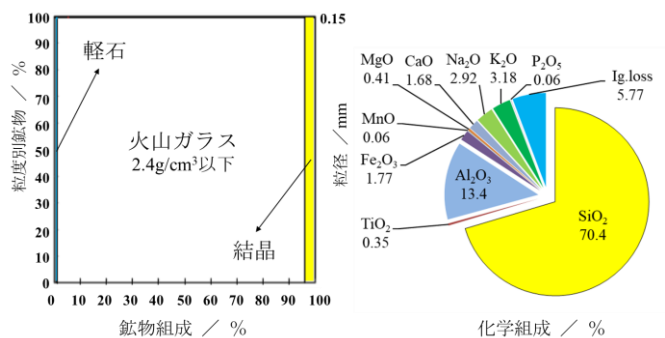


図 3 吉田シラスの鉱物組成と化学組成

3. 1. 2 加久藤シラス

宮崎県えびの市の加久藤盆地に産出する加久藤シラスの基礎物性を表 2 に鉱物・化学組成を図 4 に示す。吉田シラスよりも火山ガラスの純度が低く、粒子が粗いが、強熱減量が約 4% と普通シラスより多く焼成発泡しやすい。

表2 加久藤シラスの基本物性

	軽石	火山ガラス	結晶	平均粒径	密度
原鉱	11.9%	70.1%	18.0%	200 μ m	—
5mm以下	10.9%	70.9%	18.2%	195 μ m	2.19g/cm ³

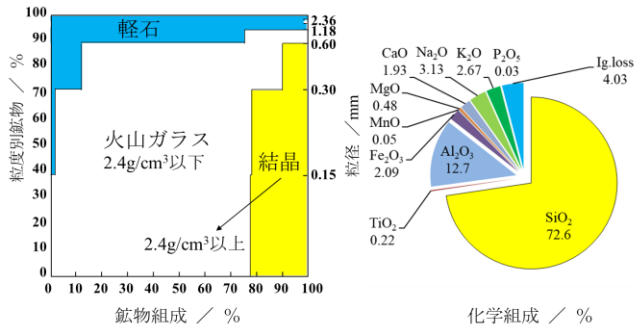


図4 加久藤シラスの鉱物組成と化学組成

湿式選別により精製されてシラスパルーン、シラス多孔質ガラス (SPG) , ガラス製品等の用途がある。

吉田シラスと加久藤シラスは、高純度の火山ガラス質からなり高付加価値の用途があるが、結晶鉱物が少なく密度が小さく、粒度が細かいため、細骨材には利用できない。

3. 2 降下軽石

入戸火砕流堆積物の下層に大隅降下軽石と呼ばれる軽石層が大隅半島の鹿屋市, 垂水市を中心に分布している。主に軽石礫の集合体からなり、入戸火砕流と同時期の約3万年前に噴出した。固い軽石からなり、ふるい分けするだけで、良質の天然軽量骨材になることから、軽量骨材用、洗濯 (ストーンウォッシュ) 用、污水处理用、垢擦り用、グラウンド材、耐火材料、内装タイル、化粧ブロック、園芸用、吸音板、バンカー砂としての用途がある。

3. 2. 1 細山田降下軽石

鹿屋市串良町細山田産の入戸火砕流の下層に位置する細山田降下軽石の基本物性を表3に鉱物・化学組成を図5に示す。

表3 細山田降下軽石の基本物性

	軽石	火山ガラス	結晶	平均粒径	密度
原鉱	46.3%	11.4%	42.3%	1.57mm	—
5mm以下	32.9%	7.9%	59.2%	0.92mm	1.30g/cm ³

原鉱は、軽石が46.3%含まれており、特に2.36mm以上の殆どは軽石で、平均粒径も1.5mmと普通シラスより粗粒で密度も小さいが、2.36mm以下は結晶質が多い。化学組成は、SiO₂が65.6%、Al₂O₃が16.3%であり強熱減量は2.54%であった。入戸火砕流に比べSiO₂が少なめでAl₂O₃が多めである。火山ガラス11.4%、結晶鉱物42.3%であり、4.75mm以下では、軽石と火山ガラスが減少し、

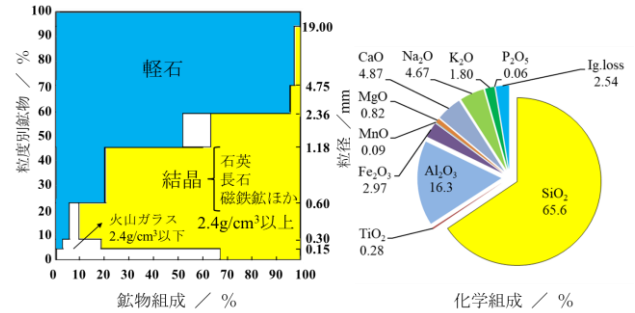


図5 細山田降下軽石の鉱物組成と化学組成

表4 細山田シラスの基本物性

	軽石	火山ガラス	結晶	平均粒径	密度
原鉱	8.8%	54.9%	36.3%	228 μ m	—
5mm以下	8.6%	55.1%	36.3%	227 μ m	2.12g/cm ³

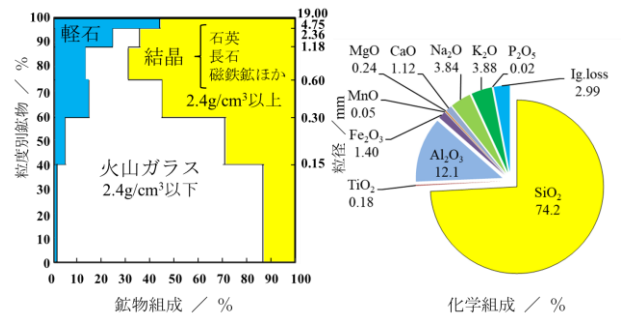


図6 細山田シラスの鉱物組成と化学物性

結晶鉱物が59.2%を占める。結晶鉱物のみを完全に比重分離できれば、粒度的には細骨材に適合する。

3. 3 普通シラス

入戸火砕流堆積物を主体とする普通シラスは、路盤材料や舗装用材料に利用されている。1972年に完工した鹿児島市の与次郎ヶ浜地区は、城山裏から0.013km³のシラスを削り、汲み上げた海水と混ぜて、水搬工法によって0.66km²の土地造成を行った。祇園之洲も同様である。普通シラスには多くの軽石が含まれており、垢すりなどの加工軽石の90%以上が鹿児島産である。大きい軽石は、鉢物の他、板状に加工して軽石タイルとして出荷されている。研究用のシラスは、産地名で後述のように称した。

3. 3. 1 細山田シラス

鹿屋市串良町細山田産の上層にあたる細山田シラスの基本物性を表4に、鉱物・化学組成を図6に示す。原鉱は、軽石が8.8%火山ガラス54.9%、結晶鉱物36.3%で、平均粒径は228 μ mであった。5mm以上の粒分が少なく、5mm以下も原鉱と同程度の値を示し、粒子密度は2.12g/cm³であった。化学組成は、SiO₂が74.2%、Al₂O₃が12.1%であり強熱減量は2.99%であった。0.15mm以下は火山ガラスが多く含まれ、0.15mm以上では結晶と軽石は、粒

度が重なっており、ふるい分けだけでは JIS 砂に相当する結晶成分を分離できないことが分かる。

3. 3. 2 さつまシラス

薩摩郡さつま町産のさつまシラスの基本物性を表 5 に、鉱物・化学組成を図 7 に示す。原鉱は軽石が 7.2%，火山ガラス 57.0%，結晶鉱物 35.8% で、平均粒径は 207 μm であった。5 mm 以下も原鉱と同程度の値を示し、粒子密度は 2.16g/cm³ であった。化学組成は、SiO₂ が 69.1%，Al₂O₃ が 14.6% であり強熱減量は 2.85% であった。

表 5 さつまシラスの基本物性

	軽石	火山ガラス	結晶	平均粒径	密度
原鉱	7.2%	57.0%	35.8%	207μm	—
5mm以下	5.3%	58.9%	35.8%	197μm	2.16g/cm ³

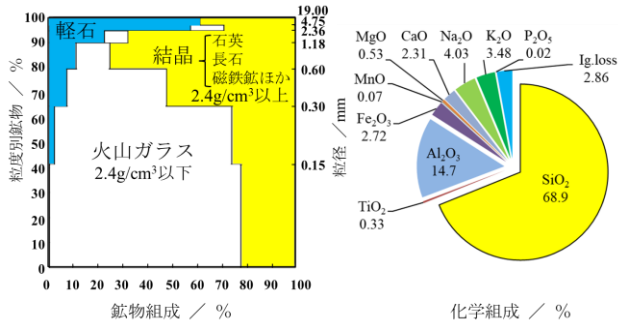


図 7 さつまシラスの鉱物組成と化学組成

3. 3. 3 都城シラス

宮崎県都城市山田町中霧島産の都城シラスの基本物性を表 6 に、鉱物・化学組成を図 8 に示す。鹿児島県内の普通シラスと同様な物性をしている。軽石以外の火山ガラスの含有率が、原鉱で 55.9%，5 mm 以下で 58.9% と比較的多い。1999（平成 11）年には、都城に工場を持つ横浜市の企業が、都城シラスを乾燥、粒度選別を行い、石膏等と配合したシラス左官壁材を実用化している。

表 6 都城シラスの基本物性

	軽石	火山ガラス	結晶	平均粒径	密度
原鉱	12.0%	55.9%	32.1%	243μm	—
5mm以下	8.6%	58.9%	32.5%	228μm	2.25g/cm ³

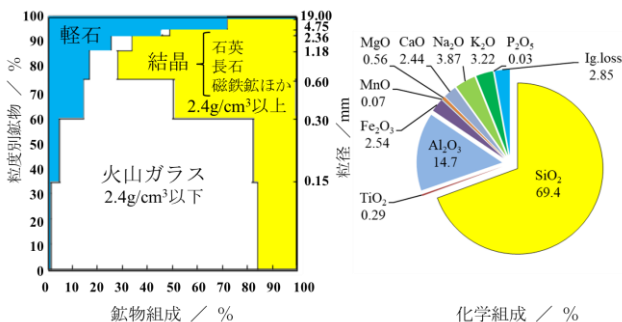


図 8 都城シラスの鉱物組成と化学組成

3. 3. 4 串良シラス

鹿屋市串良町中山産の串良シラスの基本物性を表 7 に、鉱物・化学組成を図 9 に示す。5 mm 以上では、66~91% が軽石であり、5~0.3mm の各粒度には 26~81% の結晶鉱物が含まれる。0.3mm 以下では火山ガラスが 74~83% 含まれる。原鉱および 5 mm 以下ともに結晶鉱物約 40%，火山ガラス約 60% であり、軽石は 8% 以上含まれる。細骨材相当の 5~0.15mm の範囲では、各粒度で結晶、火山ガラス、軽石の 3 種類が混在しており、ふるい分けでは各鉱物の分離ができないことが分かる。

表 7 串良シラスの基本物性

	軽石	火山ガラス	結晶	平均粒径	密度
原鉱	14.3%	46.5%	39.2%	284μm	—
5mm以下	8.4%	51.2%	40.4%	241μm	2.20g/cm ³

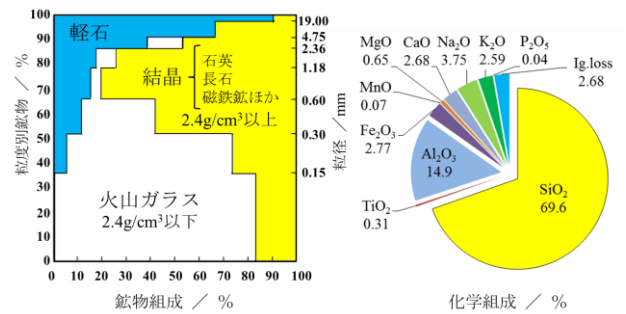


図 9 串良シラスの鉱物組成と化学組成

3. 4 普通シラスの細骨材としての評価

4 種類の普通シラスについて、コンクリート用の砂としての粒度の適合性を判定するため、5 mm 篩以下のシラスとそれを重液分離した結晶鉱物の粒度を測定した。

3. 4. 1 普通シラスの粒度

図 10 に JIS A 5308 に規定される砂の粒度範囲（点線内）と 5 mm 篩以下の串良シラス、さつまシラス、細山田シラス、都城シラスの粒度分布を示す。普通シラスは、1.2mm 以下の微粒が多く JIS 砂の粒度範囲から逸脱している。

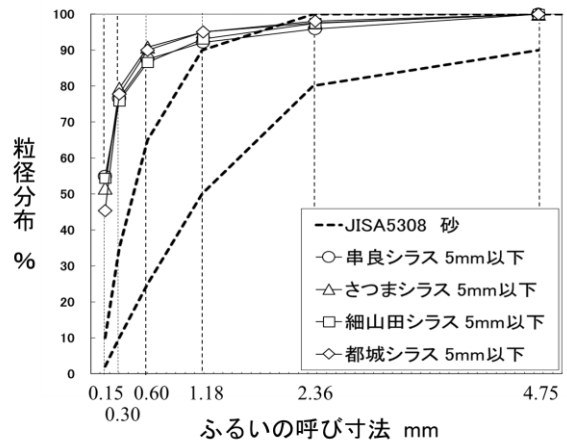


図 10 普通シラスの粒度分布

3. 4. 2 普通シラスに含まれる結晶質の粒度

図 11 に重液分離した普通シラスの密度 2.4g/cm³ 以上の結晶質の粒度分布を示す。さつまシラスが JIS 砂の粒度範囲から僅かな逸脱があるものの、普通シラスの結晶質は、JIS 砂の粒度にほぼ適合することが分かった。吹上浜などシラス台地周辺の浜砂には、浸食されたシラス由来の成分が堆積していることが知られており⁹⁾、南九州の海砂、川砂には、流水でシラス由来の結晶質が分離されて川底や海底に堆積したのも多いと推察される。

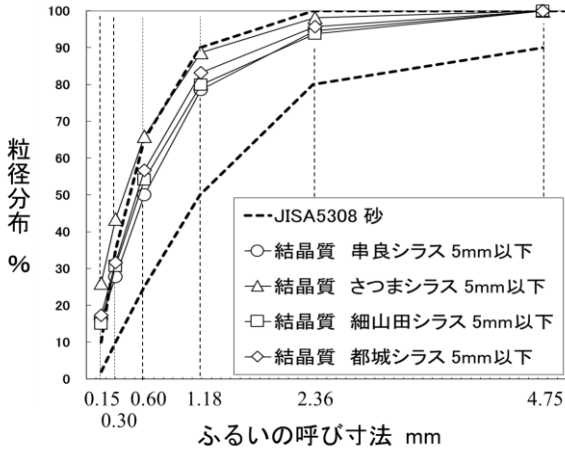


図 11 普通シラスに含まれる結晶質

3. 5 シラスの乾式比重分離

図 12 に比重差選別装置⁶⁾を示す。ベルトフィーダー式の定量供給装置と 5 成分の自動排出機構を有する集塵機およびサイクロンを付設している。シラスには、微粉の風化物が僅かに存在するので、それを集塵機で回収する。各回収成分は、1 mm 以上の結晶質を粗砂、1 mm 以下の結晶質を細砂と称す。結晶質回収の反対向きに軽石質が回収され、エアテーブルで舞い上がった細粒の火山ガラス質がサイクロンで回収される。サイクロンで回収できない微粉の風化物は集塵機に回収される。比重選別条件としては、原料供給量、多孔板の孔径、凹凸形状、傾斜角度、回転振動数、振動の振幅および空気量等がある。

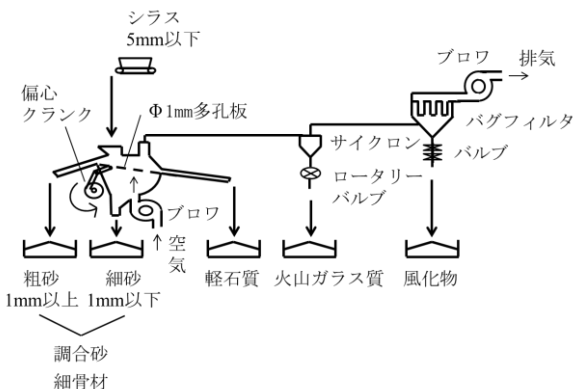


図 12 乾式比重分離装置

3. 5. 1 比重選別した成分の物性と JIS 適合性

乾式比重選別は、鹿児島県鹿屋市串良町中山産の入戸火砕流起源を用いた。普通シラスである串良シラスは、採掘業者より原鉱を取り寄せた。表 7 はエアテーブルにおいて孔径 1 mm の多孔板 (テーブル面積 0.54m²) を用いて、傾斜角度 12.6°、回転振動運動 304rpm、振動の振幅 ± 5 mm、多孔板上面の空気流速 3.0 m/s の条件で、5 mm 以下の入戸火砕流堆積物を 93.4kg/h で供給して比重選別した 5 成分における回収率、密度、火山ガラス含有率、平均粒径を示す。

表 7 串良シラスを乾式比重選別した成分の物性

シラスの分離成分	粗砂	細砂	軽石質	火山ガラス質	風化物
回収率 (%)	11.9	20.9	19.2	46.2	1.8
密度 (g/cm ³)	2.62	2.52	1.54	2.35	2.37
火山ガラス含有率 (%) 2.40g/cm ³ 以下	3.0	23.5	90.0	87.7	62.2
平均粒径 (μm)	1137	330	742	83.5	4.3

本方式のエアテーブルは、比重選別理論が構築されておらず、粒度分布が広く比重の異なる多種類の鉱物からなる火山噴出物の鉱物選別に関する報告例は無い。多孔板は、1 mm 前後の試料の選別に用いられる孔径 1 mm、凹凸差 10mm の鋸型を採用した。多孔板の振動の振幅は ± 5 mm に固定した。微粉の多いシラスのエアテーブルによる分離については、表面水が多いと凝集や凝固を起こし易いので、分離を容易にするために、含水率を 1% 以下に調整したシラスを用いた。まず、火山ガラス質に軽石質が殆ど混入しないように注意しながら、入戸火砕流堆積物の鉱物組成の成分比に近づけるように多孔板の傾斜角度、回転振動数および原料供給量空気量を調整し、各 5 成分の評価を行い、最適条件を導出した。

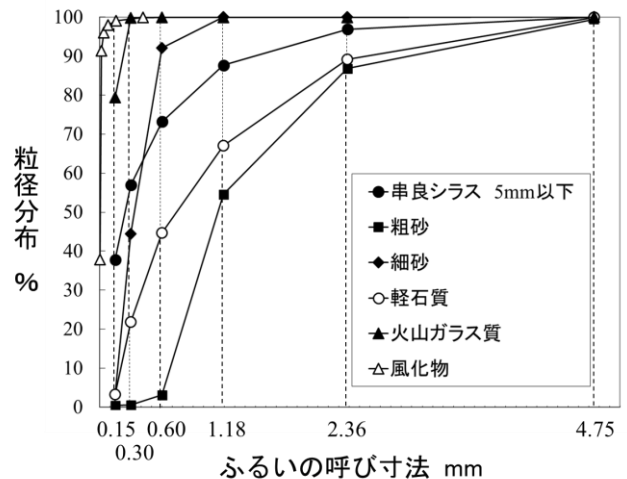


図 13 串良シラスと乾式比重選別した成分の粒度

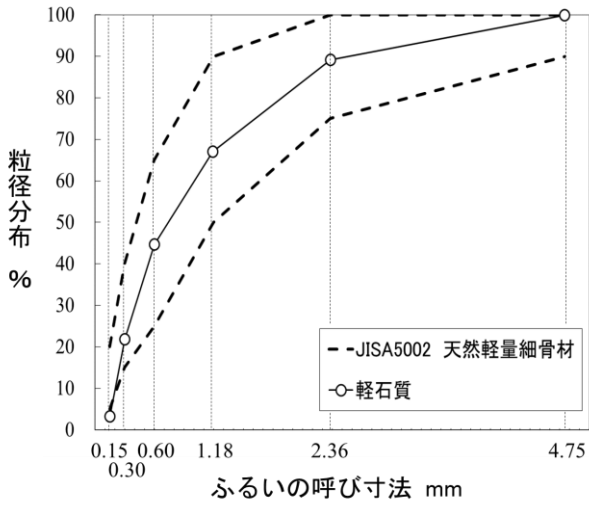


図 14 乾式比重選別した結晶質の粒度

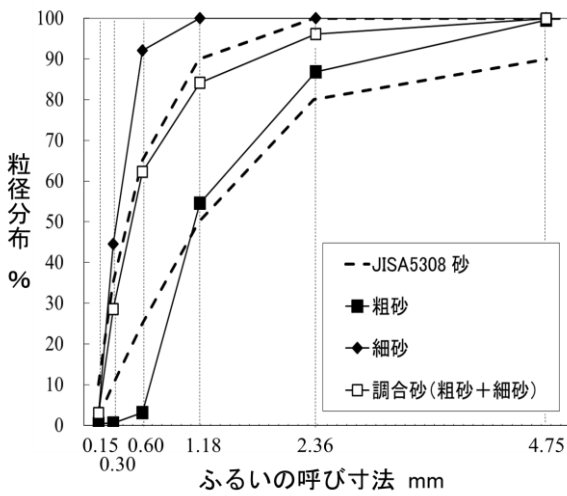


図 15 乾式比重選別した軽石質の粒度

その条件で重比重成分(粗砂と細砂)は、いずれも密度 2.5g/cm^3 以上となり、結晶質の回収率が最も高くなった。結晶質は、細骨材としての利用を想定し粗砂と細砂を混ぜて調合砂とした。図 13 に、5mm 以下の入戸火砕流堆積物と比重選別した 5 成分の粒度を示す。それぞれ異なる粒度分布をしている。

図 14 は、表 1 の回収率の比(粗砂=11.9:細砂=20.9)で再調合した調合砂=(粗砂+細砂)の粒度を示す。調合砂は、JIS A 5308 の附属書 A の規定内に収まり、密度 2.56g/cm^3 、吸水率 2.54% も JIS A 5308 附属書 A の規定に適合した。調合砂は、回収率は 32.8% となり、重液分離による結晶質含有割合 40.4% より小さな値となっており、約 8% 分の結晶質が火山ガラス質や軽石質に紛れて選別されたことが分かる。

図 15 は、軽石質の粒度を示す。軽石質は、JIS A 5002 の天然軽量細骨材(5mm 以下)の範囲内に収まった。

また、同 JIS の試験方法により、密度 1.53g/cm^3 (区分 M: $1.3\sim 1.8\text{g/cm}^3$)、実積率 78.6% (区分 A: 50.0

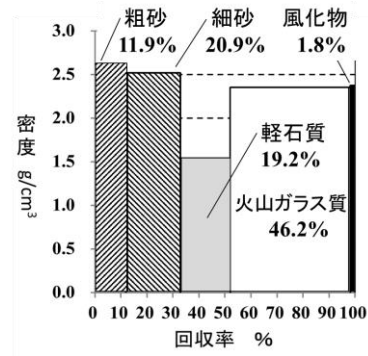


図 16 乾式比重分離した成分の収率と密度

%以上)、コンクリートの圧縮強度 29.8N/mm^2 (区分 2: $20\sim 30\text{N/mm}^2$)、フレッシュコンクリートの単位容積重量 $1,774\text{kg/m}^3$ (区分 17: $1,600\sim 1,800\text{kg/m}^3$) となり、天然軽量細骨材 MA-2-17 に区分されることが分かった。軽石質の回収率 19.2% は、重液分離による 8.4% より大きな値となっており、上述した結晶質が軽石質に移行して回収されていると予想される。

図 16 にエアテーブルで比重分離した 5 成分の密度と回収率との関係を示す。火山ガラス質は、密度 2.35g/cm^3 でガラス含有率 87% 以上の細粒が回収率 46% で安定して選別されることが分かった。細骨材としての調合砂(粗砂、細砂)と軽量細骨材としての軽石質の密度と回収率は、エアテーブルの条件設定で制御可能であり、無塩の JIS 適合品として選別できることが分かった。

以上のことから、普通シラスを乾式比重分離することで、結晶質をコンクリート用細骨材として、軽石質を天然軽量骨材として、火山ガラス質を混和材の原料として、風化物を陶磁器原料として分離活用する技術を確認した。

普通シラスをコンクリート用の細骨材として利用する研究は、昭和初期から行われている。第二次世界大戦中に鹿児島県当局は、当時、農家の堆肥混合砂や磨砂にしか用いられていなかったシラスを細骨材として使うための試験を、内務省土木試験所に依頼した。福島彌六ら¹⁰⁾は、シラスに凝結性を認めず、強度の増加は殆ど期待し得ない。シラスは川砂に比べて比重が極めて小さく、コンクリート混合に際し分離現象を起こす恐れがある。シラスは比重が軽く浮石分と粘土分が多く、細骨材として期待し得ないと報告している。

鹿児島大学の上田は、シラスは成分的にガラス質を多く含み且つ粒形が不整形なため軟度および中性化の二点から不適合で、普通コンクリート用細骨材として使用すべきでないとして 1965 (昭和 40) 年に報告している¹¹⁾。

1980 年代に海砂や川砂の枯渇、採掘による環境破壊やコンクリートの早期劣化問題が表面化し、海砂依存率の

高い西日本において細骨材の安定供給が課題となった。その代替として無塩砂のシラスが再び脚光を浴び、鹿児島高専の樋渡重徳、原口誠夫¹²⁾ら、豊橋技術科学大学の角徹三¹³⁾¹⁴⁾ら、鹿児島大学の久米国幹¹⁵⁾¹⁶⁾、武若耕司¹⁷⁾¹⁸⁾らによりシラスを細骨材に用いる研究が活発化した。

久米らは、シラスの普通砂としての不適格因子である軽石成分と0.3mm以下の微粒分を特殊な水洗装置で除去した洗砂が、JAS S 15 左官用モルタル砂 A 種に合格することを示し、セメント：洗砂＝1：1.25～1.35のモルタル試験を行った。鹿児島県日置市東市来町長里産の5mm以下のシラス洗砂は、海砂の普通砂よりもモルタルの収縮率が小さく、モルタル壁面のひび割れ発生率も低く左官用砂として好ましいと1986(昭和61)年に報告した¹⁵⁾。久米らは湿式比重分離において目開き1mmの網を用いて、1mm以上と1mm以下の洗砂を回収し、それらを混合したものが細骨材として好ましいとしている。

筆者らが開発した乾式の比重分離技術は、久米らの比重分離の低コスト化を図りつつ、細骨材相当である結晶質の分離・回収に加え、軽量骨材相当の軽石質、火山ガラス質および風化物の分離・回収ができる。

武若らは、5mm以下のシラスを使用し、細骨材率を減らしてセメント比を増し、高性能減水剤を用いることにより、普通コンクリートと同等の強度を有し、ポズラン反応により長期強度を発現すること、塩害抵抗性や硫酸酸塩劣化抵抗性など優れた耐久性を示すと発表した¹⁷⁾¹⁸⁾。この成果を受け、鹿児島県土木部では、シラスコンクリートの特徴を活かしたモデル工事を1998(平成10)年から行っており、シラスコンクリートの設計施工マニュアル(案)が2006(平成18)年に発刊されている¹⁹⁾。土木部指定の二次製品として、シラスコンクリート製の積ブロック、歩車道境界ブロック、落蓋側溝がある。2002(平成14)年からは、霧島市の丸尾の滝橋の橋脚基礎にシラスコンクリートが5,000m³用いられた⁷⁾。

野口らは、細骨材として鹿屋市串良町産の入戸火砕流堆積物の非溶結部の5mm篩以下のシラスを用いて、大臣認定のRC造地下1階地上3階建の環境型シラスコンクリート住宅を2015(平成27)年に完成させた²⁰⁾～²²⁾。

このように細骨材として不適合とされたシラスは、生コン調合の工夫により利用できる事が示された。しかし、JIS A 5308 附属書 A の生コンクリートの砂の規定の密度2.5g/cm³以上、吸水率3.5%以下、粒度の3要素に不適であるため、施工ごとに大臣認定が必要であり、普及は容易でない。シラスを細骨材に用いると軽石を含み微粒分が多いことや粒子形状が図17に示すように角張っていることから普通コンクリートと同様の施工性の確保は

困難であり、単位水量の増大は避けられない。

本研究で開発した乾式比重選別は、シラスの細骨材としての阻害要因と考えられる軽石、微粒の風化物、火山ガラス質を除去し、JIS A 5308 附属書 A に適合する結晶質からなる JIS 適合砂を分離し、他の分離成分も有効活用できる全量活用技術であることを特徴としている。水を使わないので廃水処理の問題も無い。JIS A 5308 附属書 A によると、砂と砕砂からなる混合砂を利用する場合は、混合前の粒度の規定がないので、シラスから乾式比重選別した調合砂、海砂を代替した混合砂としての利用が考えられる。

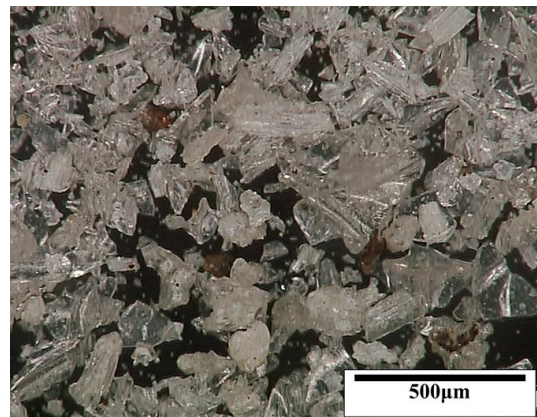


図17 シラスの光学顕微鏡写真

4. 結 言

本研究では、火山噴出物が自然淘汰された吉田シラスと加久藤シラス、約3万年前に堆積した大隅降下軽石由来の細山田降下軽石および同時期に大隅降下軽石の後に堆積した入戸火砕流堆積物の普通シラスである細山田シラス、さつまシラス、都城シラス、串良シラスについて、密度、鉱物組成、化学組成など基本特性を明らかにした。串良シラスについては、乾式比重選別により、JIS 適合砂である結晶質、軽石質および火山ガラス質、風化物に分割した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 吉田シラスは、平均粒径34 μ m、密度2.32 g/cm³、結晶質含有率：4.1%、火山ガラス質含有率：95.4%、軽石質含有率：0.5%であり、SiO₂：70.4%、Al₂O₃：13.4%、強熱減量：5.77%であった。
- (2) 加久藤シラス(5mm以下)は、平均粒径200 μ m、密度2.19g/cm³、結晶質含有率：18.2%、火山ガラス質含有率：70.9%、軽石質含有率：10.9%であり、SiO₂：72.6%、Al₂O₃：12.7%、強熱減量：4.03%であった。
- (3) 細山田降下軽石(5mm以下)は、平均粒径0.92mm、密度1.30 g/cm³、結晶質含有率：59.2%、火山ガラス質含有率：7.9%、軽石質含有率：32.9%であり、SiO₂：65.6%、Al₂O₃：16.3%、強熱減量：2.54%であった。
- (4) 細山田シラス(5mm以下)は、平均粒径227 μ m、密

度 2.12 g/cm³、結晶質含有率：36.3%、火山ガラス質含有率：55.1%、軽石質含有率：8.6%であり、SiO₂：74.2%、Al₂O₃：12.1%、強熱減量：2.99%であった。

- (5) さつまシラス（5mm以下）は、平均粒径 197 μm、密度 2.16 g/cm³、結晶質含有率：35.8%、火山ガラス質含有率：58.9%、軽石質含有率：5.3%であり、SiO₂：68.9%、Al₂O₃：14.7%、強熱減量：2.86%であった。
- (6) 都城シラス（5mm以下）は、平均粒径 228 μm、密度 2.25 g/cm³、結晶質含有率：32.5%、火山ガラス質含有率：58.9%、軽石質含有率：8.6%であり、SiO₂：69.4%、Al₂O₃：14.7%、強熱減量：2.85%であった。
- (7) 串良シラス（5mm以下）は、平均粒径 228 μm、密度 2.25 g/cm³、結晶質含有率：32.5%、火山ガラス質含有率：58.9%、軽石質含有率：8.6%であり、SiO₂：69.6%、Al₂O₃：14.9%、強熱減量：2.68%であった。
- (8) 串良シラスについて乾式比重選別装置を用いて、結晶質（粗砂，細砂），軽石質，火山ガラス質，風化物に選別した。結晶質の粗砂と細砂を混合した調合砂は、回収率 32.8%であり、JIS A 5308 の附属書 A の粒度と密度，吸水率の規定に適合し，海砂，川砂の無塩の代替骨材として期待される。19.2%回収の軽石質は，JIS A 5002の天然軽量細骨材に適合した。シラスバルーンの原料やボゾラン反応が期待できる火山ガラス質は，46%回収した。1.8%回収の風化物は，陶磁器原料に利用できる。普通シラスの全量活用に乾式比重選別が有効である事を示した。

謝 辞

乾式比重選別実験でご協力を賜りました原田産業(株)の原田直輝氏と植原浩和氏に深く御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本火山学会編：“Q&A 火山噴火”，講談社（2001）p. 45-52
- 2) 鹿児島県地質図編集委員会編：“鹿児島県の地質”，鹿児島県企画部企画調整課（1990）p. 1-3
- 3) 袖山研一，友寄 篤，野口貴文，東 和朗，“乾式比重選別と粉碎によるシラスの建設材料への全量活用”，Journal of the Society of Materials Science, Japan. **66**(8), 574-581(2017)
- 4) 袖山研一，友寄 篤，野口貴文，東 和朗，“シラスを乾式比重選別・粉碎した火山ガラス微粉末からなるコンクリート用混和材の開発”，Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan **25**, 51-57(2018)
- 5) 袖山研一，吉村幸雄，東和朗：特許第 6458267 号(2018)
- 6) 岩松 暉，福重安雄，郡山 榮：地学雑誌，**98**，379（1989）
- 7) 鹿児島県工業技術センター：“かごしまシラス産業おこし企業ガイドブック”（2011）p. 54-65，p. 77
- 8) 諫山幸男，陣内和彦，古賀義明：九州工業技術試験所報告，**2**，83-91(1969)
- 9) 須藤定久，有田正史，砂と浜の地域誌(2)鹿児島県薩摩地方の砂-吹上浜と緑砂そして不思議な貝殻，地質ニュース 609 号，p53-62（2005）
- 10) 福島彌六，松本 榮：石灰或はセメント凝結材として本邦産岩石風化物に関する調査及試験（第3報）火山灰砂「シラス」に就いて（鹿児島県），第 51，p. 416-422(1943)
- 11) 上田通夫，鹿児島地方の特殊事情に於ける鉄筋コンクリート調合に関する標準仕様書案，鹿児島大学紀要，第 12 号（1965）
- 12) 樋渡重徳，斉藤利一郎，原口誠夫：“火山灰を細骨材として利用した火山地帯におけるコンクリートの開発に関する研究（第2報）”，鹿児島工業高等学校研究報告，No. 17，p. 73-80（1983）
- 13) 角 徹三，中村聖吾：“細骨材にシラスを利用したコンクリートの基礎的実験”，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1-3（1985）
- 14) 芳賀亮介，倉本 洋，角 徹三，袖山研一，星野 実：日本建築学会講演梗概集 A-1 材料施工，p. 105(2006)
- 15) 久米国幹，迫田順一，シラス洗砂の左官用モルタル砂としての検討，日本建築学会九州支部研究報告，第 29 号，p. 85-88（1986）
- 16) 久米国幹，迫田順一，シラス洗砂を用いたコンクリートに関する研究（その 1，調合・強度），日本建築学会九州支部研究報告，第 30 号，p. 149-152（1988）
- 17) 武若耕司，川俣孝治：“しらすのコンクリート用骨材への利用に関する検討”，土木学会西部支部研究発表講演梗概集，p. 512-513（1986）
- 18) 武若耕司：“シラスコンクリートの特徴-鹿児島県制定マニュアルの内容を基にして”，コンクリート工学 **45**(2)，p. 16（2007）
- 19) 鹿児島県土木部：“「2005 年制定」シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル（案）”，（2006）
- 20) 崔 亨吉，野口貴文，友寄 篤：日本コンクリート工学年次論文集，**37**(1)，p. 424-429（2015）
- 21) 野口貴文：“鹿児島島の資材シラスの建設材料としての有効活用に関するシンポジウム」講演梗概集，56-62（2016）
- 22) AXIS，特集「素材と向き合う」素材開発からまちづくりへ，**184**，58-63（2016）