

シラスを用いた機能性材料

袖山研一*, 吉村幸雄*, 目 義雄**

Functional Materials Utilized by SHIRASU

Ken'ichi SODEYAMA, Yukio YOSHIMURA and Yoshio SAKKA

シラス（火山噴出物）は、鹿児島県本土の面積の約50%を占め、鹿児島湾周辺で厚さ数10～200mの台地を形成し、埋蔵量が膨大で自給可能な天然資源であるが、際立った特徴が無いいため、総じて資源的な扱いをされなかった。

しかし、シラスを建材に利用可能な資源の一つとして着目し、その特性とそれを活用したシラスコンクリートやシラス瓦および軽量ブロックなどへの製品開発に取り組んできた。

本稿ではシラスを用いた各種製品や施工事例を中心に機能性材料としての活用分野を紹介する。

Keyword : シラス, シラスパルーン, 火山噴出物, 軽石, コンクリート, 軽量, 断熱

1. はじめに

日本は、活火山の多い世界第4位の火山大国であり、噴火や地震が頻発する¹⁾。平成23年1月27日に52年ぶりの爆発的噴火を起こした霧島連山の新燃岳、3月11日の東日本大震災、昨年896回もの爆発的噴火を起こし年間最多記録を更新した桜島など、これらの自然現象・災害は、地球規模の地殻変動に端を発している。

太平洋側のプレート（プレートとは、厚さ約100kmの硬い岩石の層）が、海溝部分から水平面と約45度の角度をなして日本列島を形成するプレートの下に海底堆積物や水分を道連れにして沈み込んでいる。後者のプレートが戻るようにずれると地震が起こる。また、プレート間の摩擦熱と地熱によってマグマができ、噴火を起こす。マグマに含まれる数%～10%の揮発成分（ H_2O や CO_2 ）が、地表に上昇して噴出する原動力の一つとして作用²⁾し、火山活動が起こる。この火山活動により、約3万年前に鹿児島湾奥の始良カルデラから噴出した巨大火砕流の堆積物がシラスである。

近年、地球温暖化が原因とされる異常気象が顕在化し、地球環境への負荷が少ない自然素材への関心が高まっている。一方、火山噴出物は、資源の乏しい日本において、埋蔵量が膨大で自給可能な天然資源であるが、際立った特徴が無いいため、総じて資源的な扱いをされなかった。

本稿では、建材に利用可能な資源の一つとして火山噴出物のシラスに着目し、自然素材として、その特性とそれを活用した機能性材料について解説する。

2. 火山噴出物の利用

南九州は、シラス台地と呼ばれる火山灰土壌に覆われている（図1）。シラスは、約3万年前の入戸火砕流の堆積物で、噴出源が錦江湾奥部の始良カルデラである。シラスとは、白砂または白州を意味する俗語に由来し、白色・粗鬆なパサパサした火山噴出物の総称である。このシラスは、鹿児島県本土の面積の約50%を占め、鹿児島湾周辺で厚さ数10～200mの台地を形成し埋蔵量は750億 m^3 とされている⁴⁾。シラスは固結性が弱くて透水性が高いため農業生産性が低く、梅雨時には浸食と崩壊を受けやすいため大きな土砂災害を引き起こし厄介者扱いされてきた。

シラスは、一般に灰白色で半固結状を呈し、多孔質であり、大部分を構成するのは2mm以下の火山灰で軽石を含む。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、次いでアルミナ分約14%、アルカリ酸化物約8%と続く。

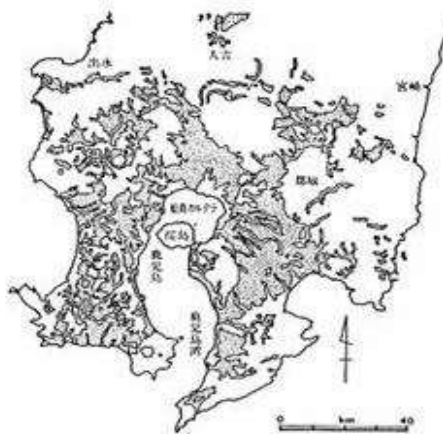


図1 南九州におけるシラスの分布³⁾
(着色部分がシラス)

* 素材開発部（現 地域資源部 シラス研究開発室）

** 独立行政法人物質・材料研究機構

次に、シラスを資源として利用する考え方を示す。

(1) 量的特徴を活かす。

分布範囲が広く大量にあるので、原材料として廉価に入手出来る。希望する場所近くで容易に調達できる。

(2) 非溶結性、粒状性を活かす。

岩石のように固結していないため、採取が容易で搬出しやすい。それ自体が砂礫の集合体であるため、粉碎の手間なく粉体を取り出すことが出来る。特定の粒径だけを抽出することも篩分け操作で簡単に出来る。

(3) 軽石などの特性を活かす。

軽石の軽量性をもって軽量ブロックなどの建築材料に用いる。その多孔質な性質や絶縁的な特性により、防音、断熱、吸着材などへの利用が考えられる。

(4) 化学組成、鉱物組成を活かす。

シラスは火山ガラスを70%以上含有している。この火山ガラスの含水性を利用して発泡体ができる。ガラス質のままガラス製造に結びつける。シラスが各種の鉱物、外来岩片を含みながらもマクロにみて化学成分が比較的安定していることは、高純度を要求される原料物質としては不向きでも、この範囲が許容されるものが見出せれば、大量かつ廉価に入手できる資源となる。

以上4項目は、鹿児島県資源開発協議会が1979年に発行した「明日の資源“シラス”」からの引用であり、火山噴出物全般にも言える示唆を含んでいる⁵⁾。

3. 火山灰

シラスの構成は、単純化すると2mm以下の「火山灰」(図2)とそれ以上の「軽石」からなる。火山灰を焼成すると発泡してガラス質中空体となり「シラスバルーン」と呼ばれる。まず、火山灰全般についての歴史的な利用を述べ、次にシラスの利用について述べる。

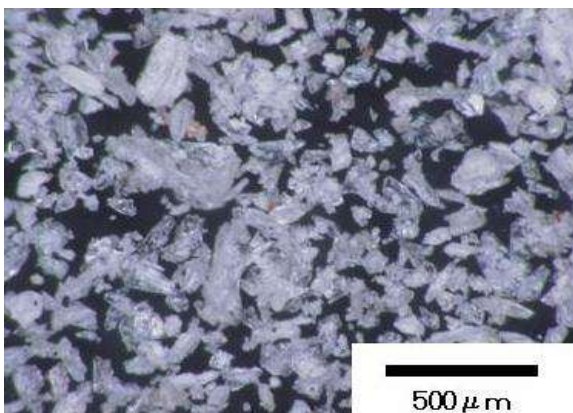


図2 シラスの光学顕微鏡写真

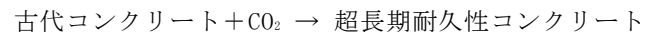
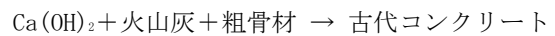
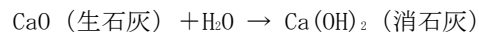
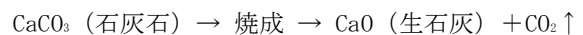
3. 1 古代コンクリート

人工構造物で唯一、数千年以上の耐久性が実証されている古代コンクリートは、長期耐久性構造物の研究対象とし

て、また放射性廃棄物の埋設処分用の人工バリアとしても検討が進んでいる⁶⁾。古代ローマ帝国時代のコンクリート建造物(パンテオン神殿のドーム、コロセウム、港湾、道路、水道橋など)には、消石灰とともに火山灰や軽石が用いられている⁷⁾。コンクリート用混和材の作用として「ポズラン反応」があるが、これは古代コンクリートに使われたナポリ近郊のPozzuoliの火山灰の名称に由来している。

現在、ポズランとは、それ自体に水硬性は殆どないが、水の存在のもとで水酸化カルシウムと常温で徐々に反応して不溶性の化合物をつくり、硬化する微粉末のシリカ質材料を示す⁸⁾。火山灰は、天然ポズランとして有史以前から使用されており、イタリアのBacoliポズラン、ギリシャのSantorin土に並んで日本のシラスも天然ポズランとして認識されている⁹⁾。石灰をベースにしたコンクリートとしては、イスラエルのYiftah elで発掘された9千年前のコンクリート床が最も古いとされている¹⁰⁾。

古代コンクリートは、まず石灰石を焼いて生石灰にする。それを水で消化して消石灰にする。その消石灰と火山灰を混ぜてモルタルとする。さらに粗骨材を混ぜるとコンクリートとなる。古代コンクリートに含まれる消石灰が長い年月を経て火山灰とポズラン反応を起こし、残った消石灰成分が空気中のCO₂を吸収しながら炭酸カルシウムに変化する。原料調整時にCO₂を排出するが硬化過程で再吸収する環境に優しい材料であり、数千年経過した古代コンクリート構造物は、もはや自然と渾然一体化した環境に優しい究極のインフラといえる。こうした硬化反応を利用したのとして天然水硬性石灰(NHL)を用いた研究が進められている¹¹⁾。以上をまとめると古代コンクリートの生成過程は次のようになる。



3. 2 シラスコンクリート

日本でも100年以上前に着工し、火山灰を混和材として用いた土木建造物が現存し活用されている。それは、近代築港の父といわれる廣井勇が苦心の末、完成させた北海道の小樽港北防波堤である¹²⁾。

昨今、海砂や川砂の枯渇、採掘による環境破壊が表面化し、海砂依存率の高い西日本においてその安定供給が課題となっている。その代替骨材として無塩砂であるシラスが注目され、半世紀以前からシラスコンクリートが研究されてきた。

しかし、自然のままのシラスは、コンクリート用の細骨材としては、細かすぎる粒度(コンクリート用細骨材では

10%以下に制限されている $150\mu\text{m}$ 以下の微粒分が平均30%と多すぎる)、高い吸水性、小さい密度(平均の粒子密度2.4)の3性質がJISに不適合であり、さらに粒子形状も角張っているという欠点を持つため利用が進まなかった。シラス中の微粒分が多いのは、大規模な火砕流で起こった噴出物同士の衝突・粉砕が一因とされている。

鹿児島大学の武若耕司教授は、1985年から細骨材にシラスを用いたシラスコンクリートの実用化研究を進めている。その結果、シラスコンクリートは、普通コンクリートと同等の強度を有し、ポゾラン反応により長期耐久性を発現すること、塩害抵抗性や硫酸塩劣化抵抗性など過酷環境下で優れた耐久性を示すこと、適用環境によっては普通コンクリートより品質の優れた「最適品」になり得ることを明らかにしている¹³⁾。

その成果を受け、鹿児島県土木部では、シラスコンクリートの優れた耐久性を活かした36のモデル工事(1998~2010年)を行い、2002年からは温泉環境下での橋梁基礎工事を行っている。霧島市にある橋梁の橋台及び橋脚を建設する地盤は、地温が地下10m以深で 100°C を超え、 $\text{pH}=2\sim3$ の硫酸イオン濃度の高い場所もある。この環境に、2008年までの間に4基の橋脚が建設され、その深礎杭基礎工(杭径: $8\sim10\text{m}$ 、杭長: $20\sim25\text{m}$)に合計で $5,000\text{m}^3$ のシラスコンクリートが使用されている¹⁴⁾。図3に、温泉環境橋脚基礎へのシラスコンクリートの施工状況を示す。

さらに県土木部では、シラスコンクリート二次製品を普及するために、2006年にシラスコンクリートの設計施工マニュアル(案)を発刊した。県土木部の事業においては、2007年からコンクリート積ブロック(図4)、2008年から歩車道境界ブロック(図5)、2010年から落蓋側溝(図6)の3製品については、原則シラスコンクリートを使用することとしている¹⁵⁾。



図3 温泉環境橋脚基礎へのシラスコンクリートの施工状況



図4 コンクリート積ブロック



図5 歩車道境界ブロック(B型)



図6 落蓋側溝(蓋版も含む)

現在、鹿児島県内では、シラスコンクリートを使用した積ブロックは7工場、歩車道境界ブロック(B型)及び落蓋側溝は6工場で製造可能となっている。それらの2010年度の施工実績は、コンクリート積ブロック $20,154\text{m}^3$ 、歩車道境界ブロック $1,452\text{t}$ 、落蓋側溝 67t となっている。

課題としては、シラスの保水性が高いため水分管理が難しく、細骨材に適する表面乾燥飽水状態に調整するための屋根付保管施設が必要なことと、 5mm 以下に分別する必要があることなど、経費が割高になることが挙げられる¹⁴⁾。

3.3 軽量断熱屋根材

コンクリートは、水和反応して変化するセメントと安定な骨材からなり、時間とともに水和反応して強度を発現する。良いコンクリートに必要な条件は、適切な材料、配合、施工であり、その性能は、配合条件によって複雑に変化する¹⁶⁾(図7)。この図は、水、セメント、砂、砂利の単位量に対して、水セメント比①、砂と砂利を合わせた骨材比②、砂と砂利の配合比③を増減させた場合の施工性、強度、

耐久性、軟度、材料分離に及ぼす影響を示している。

当センターでは、セメント瓦メーカーと共同で、シラスを細骨材に用いた二次製品の開発に取り組んだ。単に砂や砂利の代わりにシラスを用いると、前述の性質から単位水量の著しい増大は避けられず、強度や耐久性に劣ってしまうので、JISの配合・成形方法はシラスには適さない。

そこで、加圧脱水成形により、単位水量を少なくしてセメント水比を増大させ耐久性と強度を向上させる方法を試みた。まず、シラスとセメントと水をオムニキサーで混合してモルタルを作成し、それをプレスマシンで脱水成形して瓦を成形した。シラスには微粒が多いため層間剥離を起こす欠点があったので、砕砂を20%程度添加し、加圧方法を工夫して層間剥離を抑え、シラス瓦の製造技術が完成した¹⁷⁾。このシラス瓦は、断熱性に優れ、軽量で大判化が可能であり、意匠性、施工性に優れている(図8)。現在まで、民営・公営住宅(図9)など25,214m²の屋根施工実績を有している。

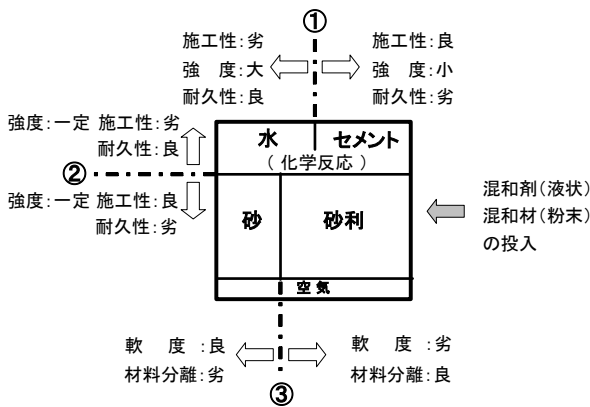


図7 コンクリートの調合と特性の関係



図8 普通セメント瓦とシラス大判瓦



点線内が、シラス瓦の施工住宅

図9 シラス瓦を施工した県営住宅

3.4 左官壁材

シラスを用いた二次製品の先駆けとして、1999年にシラスをけいそう土の代わりに用いてセッコウで硬化させる内装用左官壁材が製品化された。この壁材は、調湿・消臭機能、VOC吸着効果を有する100%自然素材の健康建材として、累計233万m²の施工実績を誇る。シラスとセメントを用いた外装材も累計137万m²の施工実績があり、シラスを用いた内外装材で年間55万m²、10億円規模の市場に成長している¹⁸⁾。

4. シラスバルーン

シラスバルーン(図10)とは、シラス等の火山灰を熱処理して発泡させた微細な風船状の粒径20μm~1.4mm程度のものであり、低かさ比重、不燃性、高融点、低熱伝導率、無色、無害、有毒ガスの発生がない、低価格という特徴をもつ¹⁹⁾。その原料としては、シラス台地の火山灰は副成分の結晶鉱物が多いので用いられず、淘汰された特殊な火山灰(ガラス含有量が95%以上)である鹿児島県の吉田シラス、宮崎県の加久藤シラス、福島県の中野白土のほか東北・北海道の火山灰が用いられている。

シラスバルーンは、年間14,250t(1991年)生産されているが、日本工業規格の区分が無い。製造各社合わせて50種類以上の品種があり、価格差も大きい。一般的には10kg当たり1000~2000円台(工場出荷単価)である。

そのシラスバルーンは二次製品としては、軽量モルタル、OAフローア、パネル、ロックウール天井材、セッコウプラスター、軽量PC板、セメント成形品などの無機建材用、FRP充填材、ポリエステル系パテ材、FRPパイプなどの樹脂系部材、建築用外装、下地処理用などの塗料用、接着材などの各種製品中に含まれている。東日本大震災以降、パテ材、軽量建材の需要が伸びている。

火山性ガラス質堆積物(シラス、軽石、白土など)の粒体及びそれらの発泡体(シラスバルーン)と無機系繊維を複合し、有機系結合剤によって層状に成形した建築用ボードがJIS A5440「火山性ガラス質積層板(VSボード)」として2003年に認定され、大手建材メーカーが製造販売している。また、シラスバルーンに珪酸アルカリを混ぜて成形し、CO₂ガスで硬化させた軽量ボードも商品化されている²⁰⁾。

当センターでは、シラスバルーンのセメント硬化体にフェライトやカーボンなどの導電体を複合した軽量の電波吸収体を開発した²¹⁾。また、シラスバルーンにリン酸アルミニウムを被覆して1000℃以上の耐熱性を付与した耐熱バルーンや耐火ボードを開発し、共同開発企業でサンプル出荷している²²⁾。

入戸火砕流由来のシラスは、火山ガラス含有率が70%前後と低く、粒度分布も広い。乾燥しただけではシラス

バルーン原料としては使えない。そこで、当センターとベンチャー企業との共同研究により、シラスを気流選別して細骨材と微粒分のシラスバルーン原料を分離し、同時に後者を焼成してシラスバルーンを製造する装置（図11）を開発した。乾燥の熱源にシラスバルーン焼成炉の高温排気を利用し、複数のサイクロンで気流分級している。これにより、シラスコンクリート用の細骨材とシラスバルーンの低コスト化を図っている。

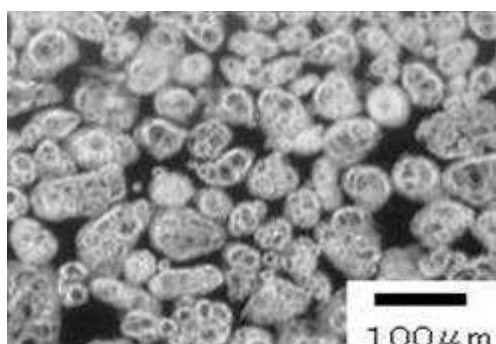


図10 シラスバルーンの光学顕微鏡写真



図11 多段気流分級装置

4. 1 遮熱・断熱塗料

シラスバルーンを用いた遮熱・断熱塗料は、1990年代から製品化されており、鹿児島県内の1社で累計142,000m²の施工実績がある。この塗料は、断熱・省エネ効果も認められ、建築塗装向けのほか本塗料が施された工事用ヘルメットも製品化されている²³⁾。同社は今年、インド政府系のBuilding Energy Performance LaboratoryのSRI (Solar Reflectance Index) 試験の認証を得て、マルチ・スズキ・インドアの自動車製造工場の屋根施工を行っており、海外展開を進めている。

4. 2 ガラスクリーナー

今年、シラスバルーンの研磨効果を活かしたガラスクリーナーが製品化された²⁴⁾。ガラス面の水垢や油膜・酸焼けを除去する性能に優れ、薬剤を使用しないエコクリー

ナーとして注目されている。業務用としては、新幹線や鉄道・バスなどの車両をはじめ、船舶及びコンビニ等の店舗のガラス窓、鏡のほかステンレス、陶器、タイルなど清浄用として民間ホテルや官公庁などの実績があり、台湾やドバイから引き合いが来ている。

5. 軽石

シラス台地を形成する入戸火砕流堆積物には2mm以上の軽石（図12）も含まれているが、入戸火砕流堆積物の下層に厚さ8mほどの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。これは大隅降下軽石と呼ばれ、灰白色で主に軽石礫の集合体からなり、始良カルデラから入戸火砕流と同じ時期に噴出した。この軽石の化学組成や鉱物組成は、シラス本体とほぼ同等である。大隅降下軽石は、入戸火砕流由来の軽石より硬く、ふるい分けするだけで良質の天然軽量骨材になり、軽量ブロック、グラウンド材、耐火材料、化粧ブロックの原料などの用途がある。大きい軽石は、板状に加工してサウナ室用の内装タイルなどとして出荷されている。軽石単体としては、鹿児島県で年間54,613t（2004年）出荷されている。



図12 軽石の写真

5. 1 緑化基盤

当センターでは、人造大理石メーカーと共同で、軽石と極少量のセメントを混合してゼロランプ状態（コンクリートの変形量がゼロ）で加圧成形する方法による軽量基盤を開発した²⁵⁾。硬化反応に必要な水は、加圧成形時に軽石から染み出る水を利用した。この軽石基盤は、低コストで軽量且つ透水性、保水性、断熱性に優れており、芝生植生に適するので、路面電車の軌道敷芝生（全長6,460m、緑化面積24,700m²）（図13）の基盤に採用されている。また、ヒートアイランド現象の緩和や電車の騒音低減効果が実証され、都市景観の向上に寄与し、住民や観光客にも好評である。この基盤は、屋上緑化のほか飼育環境を改善する畜舎床材などにも活用されている。



図13 軽石基盤による軌道敷緑化

5. 2 軽量ブロック, その他

鹿児島県内の企業が、軽石と砂、セメント、水を原料に用いて、ブロックマシンで振動即脱成形し、JIS A5406「建築用コンクリートブロック」規定の塀ブロックを製造している。年間生産量は14,100 tで、県内で流通している。また当センターでは、軽石を媒体流動層で焼成して軽量化した焼成発泡軽石やそれを用いた水に浮く緑化基盤²⁶⁾、軽石に炭素を蒸着させた活性吸着剤²⁷⁾や軽石に酸化チタンを被覆した光触媒軽石²⁸⁾を開発している。

6. 結 言

先人技術者の叡知の結晶である世界遺産や古代遺跡を注意深く検証することによって、火山噴出物の化学・物理的な必然性(ボゾラン反応性、軽量性、断熱性、調湿性など)、CO₂を吸収しながら硬化する環境調和性、また、数千年以上の超長期耐久性、そして健康的な生活に欠かせない人に優しい住宅など機能性材料のヒントが見えてくると思う。

火山噴出物は、総じて資源として扱われなかったが、世界中に分布し、無害で汎用性の高い素材でもあり、いちど優れた製造技術が開発されれば世界に普及できる。日本は火山国であり膨大な火山噴出物を有している。南九州のシラスは、その規模、素性から、火山噴出物利用の「指標」となり得る。

近年の地球温暖化やCO₂削減問題に加えて、先の大震災により、社会・経済の停滞、放射性廃棄物処理、省電力、省資源の問題などが深刻化しており、生活スタイルや価値観も変化してきている。

そうした背景から、有望な天然資源としての火山噴出物の価値を見直す時期に来たのではと考えている。

謝 辞

研究報告の執筆に当たり、貴重な施工事例や実績の情報の提供をいただきました鹿児島県コンクリート製品協同組合、鹿児島県積ブロック工業組合、鹿児島県内関連企業お

よび有益な助言を賜りました鹿児島大学大学院理工学研究科の武若耕司教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本火山学会編：“Q&A火山噴火”，講談社（2001）p. 52
- 2) 下舞大輔，荒牧重雄，井田喜明，中田節也編：“火山の事典 [第2版]”，朝倉書店（2008）p. 2
- 3) 岩松暉，福重安雄，郡山榮：地学雑誌，**98**，379（1989）
- 4) 横山勝三：“シラス学 九州南部の巨大火砕流堆積物”，古今書院（2003）p. 177
- 5) 鹿児島県資源開発協議会編：“明日の資源シラス”，鹿児島県資源開発協議会（1979）p. 10
- 6) 坂井悦郎：“未来材料”，**9**，4，62（2010）
- 7) チャールズ フリーマン：“図説古代ローマ文化誌”，原書房（1996）p. 88
- 8) 吉田國夫：“鉱産物の知識と取引”，（財）通商産業調査会（1992）p. 619
- 9) 田澤榮一：“コンクリート工学”，技報堂出版（2000）p. 277
- 10) 早川光敬：コンクリート工学，**47**，9，8（2009）
- 11) 小野松景子，中島祐輔：“2005年度日本建築学会関東支部報告集”（2005）p. 589
- 12) 山下茂：Consultant，**234**，32（2007）
- 13) 武若耕司：コンクリート工学，**48**，1，73（2010）
- 14) 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. 66
- 15) 鹿児島県土木部：“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）
- 16) VSI研究会編：“新時代を築く火山噴出物”，リアライズ社（1995）p. 98-99
- 17) 袖山研一ら：特許 第3787595号(2006)
- 18) 袖山研一監修：“二十一世紀の民家をつくる シラス物語”，農山漁村文化協会（2005）p. 59
- 19) 袖山研一，目 義雄：材料の科学と工学，**43**，1，20（2006）
- 20) 上原豊：特許 第2958560号(1999)
- 21) 袖山研一ら：特許 第4336811号（2009）
- 22) 袖山研一ら：特許 第3635289号（2005）
- 23) 岡本利章，歌代和男，松若讓二，深江典之：土木学会誌，**86**，2，6（2001）
- 24) 迫正人：特許 第4231892号(2008)
- 25) 袖山研一ら：特許 第3858079号(2006)
- 26) 袖山研一ら：特許 第4344796号(2009)
- 27) 袖山研一ら：特許 第3787421号(2006)
- 28) 袖山研一ら：特許 第4123491号(2008)