

目 次

第1章 緒 論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 新燃岳の噴火と火山灰(降灰)の堆積	1
1.1.2 降灰処理の実態	2
1.1.3 天然資源としての火山灰の有効活用について	2
1.2 火山噴出物の土木材料としての有効活用に関する既往研究と火山灰使用の特許	4
1.2.1 火山とその噴出物	4
1.2.2 火山噴出物の有効活用に関する既往研究と火山灰使用の特許	6
1.3 一般廃棄物溶融スラグを混入するILBの開発	14
1.4 ヒートアイランド現象緩和型の環境製品としての保水性ILBについて	15
1.5 本研究のオリジナリティーと学術的・社会的に重要なポイント	20
1.6 本研究の目的	22
1.7 本論文の構成	23
参考文献	24
第2章 新燃岳火山灰のコンクリート用細骨材への適用性	29
2.1 まえがき	29
2.2 新燃岳火山灰の物理的性質	29
2.2.1 火山灰の粒度と形状	29
2.2.2 火山灰の物理的性質	33
2.2.3 火山灰を配合したモルタルの強さと保水性	34
2.3 新燃岳火山灰の化学的性質	38
2.3.1 火山灰pH	38
2.3.2 堆積火山灰中のSO ₂ ガス濃度と火山灰pHの変化	40
2.3.3 火山灰への有機不純物の混入とその対策	42
2.4 まとめと課題	44
参考文献	46
第3章 新燃岳火山灰を配合した保水性インターロッキングブロックの特性	47
3.1 まえがき	47
3.2 試験概要	48
3.2.1 試験ブロックについて	48
3.2.2 ブロックの材料	49
3.2.3 ブロックの配合	50
3.2.4 ブロックの成型製造	51
3.3 各種試験方法	52
3.3.1 火山灰の化学的性質の試験とアルカリシリカ反応性試験	52
3.3.2 ブロックの充填率の計算	53
3.3.3 ブロックの曲げ強度試験	53
3.3.4 ブロックの保水性試験	53
3.3.5 ブロックの吸水性試験	54
3.3.6 ブロックの透水性試験	54
3.3.7 ブロックの表面色調測定	56

第6章 保水性インターロッキングブロック切片を用いた 歩道の温度上昇抑制メカニズムの解明	99
6.1 まえがき	99
6.2 実験概要	99
6.2.1 日射による保水性ILB切片などの表面温度の測定実験	99
6.2.2 保水性ILB切片の表面を強制的に温めた場合の温度上昇実験	100
6.2.3 保水性ILB切片の水分蒸発量と層別の単位容積質量の測定実験	100
6.2.4 保水性ILB切片の表面からの水の浸透実験	101
6.3 実験結果および考察	101
6.3.1 日射による保水性ILB切片などの表面温度変化	101
6.3.2 保水性ILB切片の表面を強制的に温めた場合の温度上昇	103
6.3.3 保水性ILB切片の水分蒸発量と層別の単位容積質量の比較	105
6.3.4 保水性ILB切片の表面からの水の浸透量	106
6.4 保水性ILB(灰)による歩道の温度上昇抑制機能の総合的検討	107
6.5 ブロック舗装面の温度上昇抑制機能評価における簡易放射温度計 による新方法の提案とその実証	110
6.5.1 ブロック舗装面の温度上昇抑制機能評価における簡易放射 温度計による新方法の提案	110
6.5.2 簡易放射温度計を用いたブロック舗装面温度上昇抑制機能の 新評価方法の実証	112
6.6 まとめと課題	120
参考文献	121
 第7章 汎用性のある火山灰等混入型保水性ILB製造技術の提案	 123
7.1 経緯	123
7.2 汎用性のある火山灰等混入型保水性ILB製造技術の提案	123
7.3 汎用性のある火山灰等混入型保水性ILB製造技術と 公共事業への活用のフロー	127
 第8章 総括	 131
8.1 本研究における成果	131
8.2 今後の展望	133
 謝辞	 135
 Summary	 136

第 1 章 緒 論

1.1 本研究の背景

1.1.1 新燃岳の噴火と火山灰(降灰)の堆積

宮崎県と鹿児島県の県境にある霧島連山の一つである新燃岳は、2011年1月26～27日に、享保の大噴火（1716～1717年）以来となる爆発的噴火（マグマ噴火）を起こした¹⁾。産業技術総合研究所によると、この2日間に噴出した火山灰の堆積量が約7,000万トン（その後2,400万トンに修正された）、宮崎県都城市御池（みいけ）から日南海岸までの陸上部に積もった火山灰の総量が約400万トンと見積られた²⁾。その後も噴火が多く繰り返され、1月26日から2月末日までの約1カ月間の降灰の総堆積量は噴火時の風向きと噴煙高度により図-1に示す分布³⁾となり、新燃岳から都城市中心部にかけての降灰が顕著であったことがわかる。また、火山灰の大きさとして、写真-1に示すように4～5mmの中粒～粗粒砂サイズが細粒のものよりも卓越していることが気象庁から報告された⁴⁾。

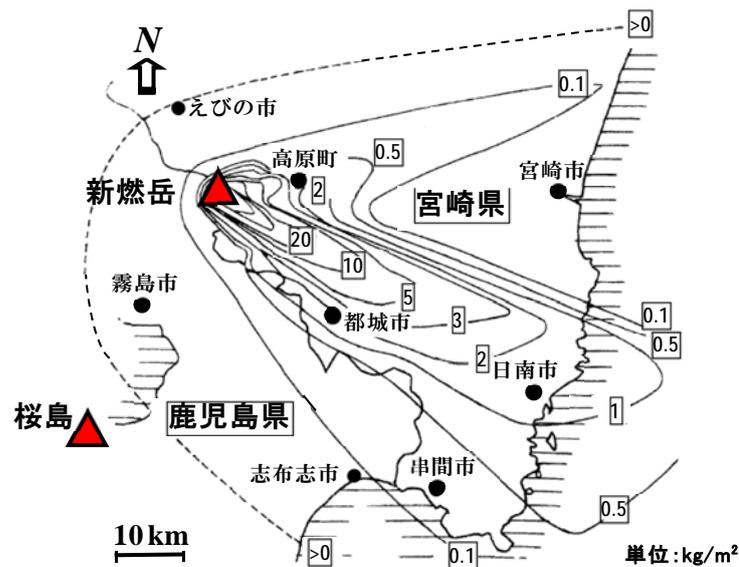


図-1 2011年1月26日～2月末日における新燃岳火山灰の堆積量の分布³⁾



写真-1 都城市山田町内の畑に堆積した約5cm厚の火山灰の状況
(5mm程度の粗粒が目立つ。2011.4.16)

1.1.2 降灰処理の実態

時々噴火を繰り返している桜島の火山灰は都城市に届いていた。しかし、新燃岳からの降灰により大被害を受けることに対する備えは少なく、それまでに降灰への対策体制はほとんど整備されていなかったといわれている。

都城市における降灰処理の実態として、2011年1月30日に災害対策本部を設置し、道路交通の確保を図るために、鹿児島市から路面清掃車と散水車を、国土交通省の各地方整備局や北海道開発局から大型路面清掃車や散水車を借り受け、地元の建設業協会の応援も得て、路上の降灰除去と清掃作業を優先した。市道対策の路面清掃作業距離は延べ3,400kmに達したという。また、学校や住家、工場、畜舎・温室などにおける降灰処理は、地域住民の協力も得て広範囲な集積・回収により、市の指定した仮置き場や埋立て処分地に堆積した。その際の降灰処理状況は、写真-2に示すように降灰の堆積量が多いだけに大掛かりなものとなった。

都城市が2011～2012年度の2か年にわたって降灰処理等に要した経費は、道路の降灰除去に5.90億円、宅地等の降灰除去と運搬に6.00億円、市の施設の降灰除去に2.29億円など総額15.19億円であり、予算が680億円（2012年度、人口約17万人）の都城市としては少なくない支出となった⁵⁾。

1.1.3 天然資源としての火山灰の有効活用について

新燃岳の噴火は2016年時点で発生していないものの、活火山である以上、噴火が継続することになれば堆積灰の量もかさむため、その減量（減容）対策を講じておく必要がある。火山国であるわが国では、全国的に多くの活火山と共生せざるをえない状況にある。最近では御嶽山が噴火（2014年9月）するなど、火山噴火の頻発化で大災害も生じていることから、以前よりも危機意識を持つようになってきた⁶⁾。

火山灰や噴石などの噴出物は、その降灰による直接的な被害も面積的に広いために甚大であり、またこれらの堆積物による土石流災害も二次的に惹起されるので、極めて厄介なものである。比較的集積・回収しやすい火山灰は適当な場所に堆積処理しているのが一般的である。しかしながら、噴火を繰り返す事態になれば、噴火・降灰・処理の繰り返しに



写真-2 降灰の処理状況（左：集積灰を詰めた大型土嚢の搬出，中：山間溪流脇に土石流防止対策で配置した大型土嚢，右：埋立て処分地で降灰と土壌を交互に積層処理中の状況）

よって堆積地の確保も難しくなる可能性がある。その堆積火山灰を可能な限り多く有効活用して、その減容促進対策を検討する必要がある。そこで、いつやって来るかわからない火山噴火に伴う噴出物の処理対策の一つとして、即応可能な火山灰有効活用メニューを提示しておくことは社会的観点から極めて重要である。

南九州一帯にはシラス台地が広がっている。その名称に使われているシラスは、鹿児島県内でよく採掘される火山灰や軽石（ボラともいう）である。これらは約3万年前に始良（あいら）カルデラ（鹿児島湾の北側）から噴出した巨大火砕流が堆積・埋没したもののほか、桜島や霧島が近世に噴火して堆積した軽石状のものもあり、コンクリート用骨材や建材、緑化資材などに有効活用されてきている。こうしたシラス埋没量は900億トン以上もあるといわれ、この膨大かつ未利用なシラスを資源として有効活用し、建設材料としての付加価値を付与できるならば埋没地近傍において大量使用が可能となり、地域産業の活性化に直結することが期待されている。

本研究で取り扱う火山灰は、歴史的に古くから火山噴火に伴う火山灰等が堆積・埋没しているシラスとは異なり、噴火して降下し堆積したばかりのフレッシュな火山灰であり、これを生（なま）火山灰と呼ぶ。また、シラスなどを形成するはるか以前に噴火した火山灰等が堆積して、あるいは年数経過の中でこれの繰り返しにより堆積した層、すなわち凝灰岩地層が生成される。凝灰岩はわが国では各地に多く見られ、例えば小樽凝灰岩や大谷石（おおやいし）などは建築材や壁材などに利用されている。こうした歴史的に古い火山灰由来のシラスや凝灰岩とは異なり、直近の火山灰を生火山灰と定義した。しかしながら、その生火山灰でも年数経過で落葉堆積や植物生育の根群形成の過程でそれらの腐食が進み自然現象による風化も伴い有機物含有が多く火山灰の性質が変わったものは有効活用できないと思われる。

この生火山灰を火山噴火地域の天然資源として捉え、すでに鹿児島県でコンクリート用細骨材として技術化しているシラスと同様に、身近なコンクリートに有効活用できれば、堆積火山灰の減容を促進できるとともに資源循環型社会の構築にも役立つ。ただ、細骨材の一部として使用する場合、コンクリートの強度や所要の機能を満足することを確認し、できるだけ多くの生火山灰を混入できる技術の開発も重要である。火山噴火地域における地域的問題であるとはいえ、わが国の活火山の多さから考えると、喫緊で社会的に解決すべき課題の一つと思われる。

まず発生地域が異なる火山灰の特性を分析することは基本的に重要である。例えば新燃岳火山灰と桜島火山灰は両火山が距離的に近い位置にあるが、その特性は同じでない。生火山灰の特性の差異は第2章以降で詳しく述べるが、新燃岳火山灰はその降灰地別に大小

さまざまな粒度を持ち比較的細粒である一方、桜島のそれは乾いた火山灰の上を歩くと粉が舞い上がるほど非常に微細である。そこで、生火山灰のコンクリート用細骨材への適用性をまず検討し、次に、比較的製造の容易なプレキャスト無筋コンクリート製品（即時脱型製品）へ適用するための技術マニュアルを作成しておくことが望ましいと考えられる。例えば、新燃岳火山灰の吸水率が約 7%程度で、一般の細骨材のそれとは顕著な違いがあるだけではない。降灰当初の火山灰には SO₂ などの火山性ガスが灰粒の孔隙に閉じこめられているために、降灰は農作物被害を及ぼすほどの酸性を呈する。火山灰の酸性程度にもよるが、これを鉄筋コンクリート用コンクリートに配合すると、その硬化後にコンクリート内部で鉄筋が発錆し構造物に膨張性ひび割れを生じさせる危険性がないわけではない。このため噴火後の堆積期間の短い生火山灰は特に無筋コンクリートに配合すべきであると考えられる。また、新燃岳火山灰の高吸水性から機能的に吸水性や保水性を有する無筋コンクリート製品、例えば保水性インターロッキングブロック（以降、保水性 ILB という）に適用できる可能性は高い。

ここでは、新燃岳火山灰を天然資源の土木材料と位置づけ、その有効活用について概観的に述べてきた。次項以降で、火山灰等火山噴出物を土木材料等に有効活用している既往研究や火山灰使用の特許、および、この有効活用効果の期待されるヒートアイランド現象緩和型の環境製品である保水性 ILB について取りまとめる。また、本研究のオリジナリティーと学術的・社会的重要性についても論じる。

1.2 火山噴出物の土木材料としての有効活用に関する既往研究と火山灰使用の特許

1.2.1 火山とその噴出物

火山灰を対象とする研究である以上、ここで、火山がなぜ発生するのか、そして火山からの噴出物にはどんなものがあるのかについて整理しておく必要がある。

地球の表面を覆うプレートには大陸プレートと海洋プレートがある。海洋プレートは大陸プレートよりも強固で密度が高いため両者がぶつかり、海洋プレートは大陸プレートの下に沈んでいく。日本列島は、図-2 に示すように、海洋プレートである太平洋プレートとフィリピン海プレートや、大陸プレートである北米プレートやユーラシアプレートなど、複数のプレートが接する境界に位置している⁷⁾。わが国は、この地殻の変動に伴い大きな地震や火山が発生しやすい島国である。海溝型地震は、ユーラシアプレートの下に太平洋プレートが沈み込むときに生じたひずみが蓄積され、その蓄積したひずみに限界がきてずれ動く際に、引き込まれた大陸プレートの先端部が跳ね返ったときの衝撃で生じる。この大きな衝撃が、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震のような

巨大地震につながった。また、沈み込む海洋プレートの内部で発生するのがプレート内地震が、また、大陸プレートでも固い岩の層のずれによって内陸型地震が生じる⁸⁾。わが国のいたるところに認められる活断層のずれによる地震も近年多く生じており、2016年4月14日に発生した「平成28年熊本地震」はその最たる例である。

一方、地球上の火山には、先のプレートの動きの中で、プレートの海溝沿いに連なって分布する火山フロント(前線)と、プレート内に点状に生じるホットスポットの火山がある。海溝沿いの火山は、大陸プレートの下に沈み込んだ海洋プレートからの水の働きによって地殻に近い上部マントルの一部が融けだして上昇しながら地殻にマグマを形成し(図-2)、それが蓄積したマグマ溜りが様々な作用を受けて地表に噴出するものである。日本列島はその火山フロントの付近に位置している。一方、ホットスポットはプレート内部を貫いて点状のマントルの湧き上がりとして継続的に大量のマグマが供給されて生じるものをいい、ハワイ諸島やガラパゴス諸島が例として挙げられる⁹⁾。

新燃岳火山については、篠原・石塚¹⁰⁾によると、マグマ溜まりの中で長期間にわたりマグマ混合を繰り返してきたマグマに、噴火直前にマグマ混合が再度生じた結果、噴火に至ったという。わが国が火山列島といわれる所以は、日本列島が上述の海溝沿いに生じた多くの活火山を連ねた火山フロントの付近に位置していることによる。活火山とは、「概ね過去1万年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山」であると、火山噴火予知連絡会が2003年に定義してい

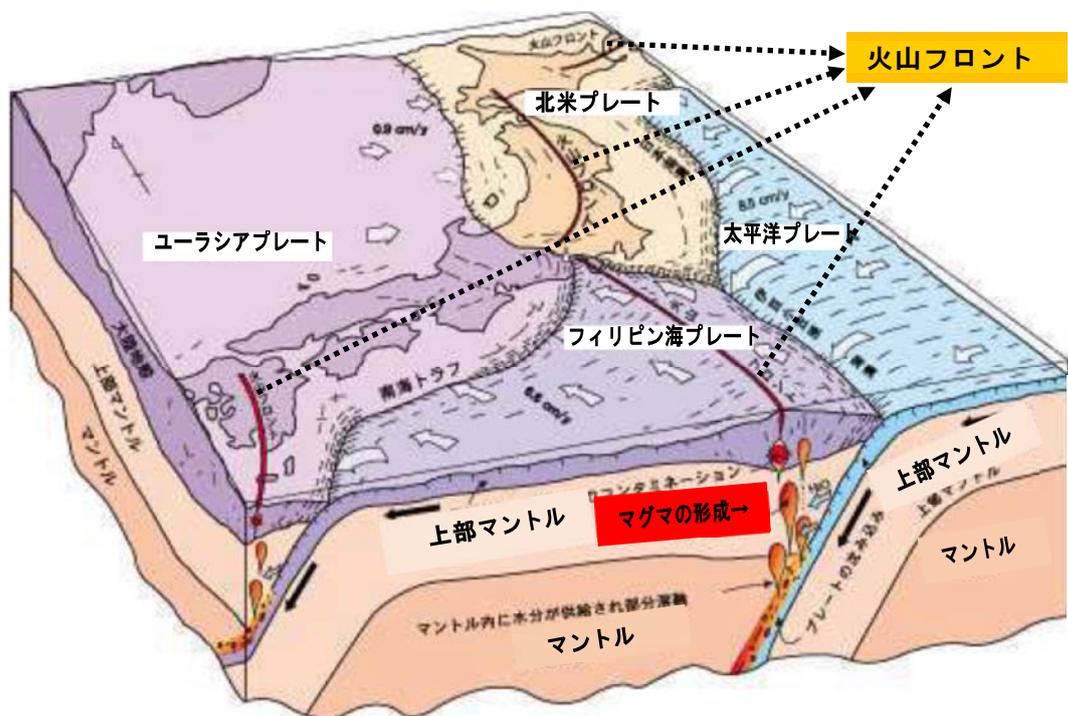


図-2 プレートテクトニクスからみた日本列島⁷⁾

る。わが国における活火山の分布を図-3 に示すが、まさに日本列島全域に活火山が分布しており、現在(2011年6月以降)その数は110もある¹¹⁾。

火山噴火とともに地表に噴出する物質を火山噴出物といい、これにはマグマ起源の本質物質とそれ以外の異質物質がある。本質物質の代表的なものが溶岩であり、爆発的な噴火ではマグマが破碎されテフラを噴出する。テフラとは古代ギリシャ語で「灰」を意味し¹²⁾、火山砕屑(さいせつ)物のことで、大きさによって火山灰(直径2mm以下)、火山礫、および、火山岩塊(直径64mm以上)に分類される。火山礫や火山岩塊は噴石とも呼ばれ、紡錘状などの特有な形のものを火山弾、空隙が極めて大きいものを軽石(流紋岩質など白っぽいもの)やスコリア(玄武岩質など黒っぽいもの)と呼ぶ。一方、異質物質には噴火で吹き飛ばされた基盤岩の破片などがあるほか、火山ガスや温泉水も火山噴出物に含まれる。

ここでは火山灰を天然資源の土木材料と位置づけし、コンクリート用の砂(細骨材)として扱い砂利や碎石(粗骨材)と区別するため、5mm以下の大きさのものを火山灰とする。

1.2.2 火山噴出物の有効活用に関する既往研究と火山灰使用の特許

1) シラス

九州地方では火山噴出物の代表例としてシラスが挙げられる。火砕流が2~10万年前に南九州で発生し4,000km²に及ぶ範囲を覆い約900億t以上も堆積したものがシラスで、火



図-3 わが国における活火山の分布¹¹⁾

砕流堆積物の総称であり、乱した状態では砂状となることから、コンクリート用細骨材への活用可能性が検討されてきた。それは、1990年代後半以降、採取が規制された海砂の代替骨材としてシラスが着目されたためである。しかし、鹿児島県内のシラスの分布と特性について、文献¹³⁾より抜粋したものを図-4に示すとおり、自然状態のシラスはコンクリート用細骨材の密度・吸水率・粒度などがJIS規格を外れる。

武若ら¹⁴⁾は、シラスを細骨材として用いたコンクリートが、粒径0.15mm以下の微粒分もそのまま混合することによって、火山灰由来のポゾラン反応効果で長期強度の増進や耐硫酸塩性に優れることを示した。こうした研究を元に、鹿児島県は2006年1月に『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)』を発刊した¹⁵⁾。その後のシラスコンクリートに関する研究も少なくない¹³⁾。

シラスは細かいので細骨材のJIS規格を満足しないが、南九州地域には大量に埋蔵しているため、コンクリート用細骨材としてそのまま有効活用できるように技術化し、そのシラスコンクリートの設計施工マニュアルを作った。前述したようにシラスは2~10万年前の火砕流堆積物であるが、噴火して堆積したばかりの新燃岳火山灰とは物性が明らかに異なるものであり、同一に使用できる土木材料とはいえない。

2) 火山礫や軽石

南九州ではシラスよりも大きな軽石(現地ではボラと呼ぶ)も産出する。空隙の多い軽石であるため、張ら¹⁶⁾はこれを配合したポーラスコンクリートが吸音特性に優れていることを報告した。また、約3万~2万5,000年前に形成された十和田カルデラ(現十和田湖の原形)の秋田県側で採掘される火山礫は軽石凝灰岩であり、加賀谷ら¹⁷⁾はこれらを川

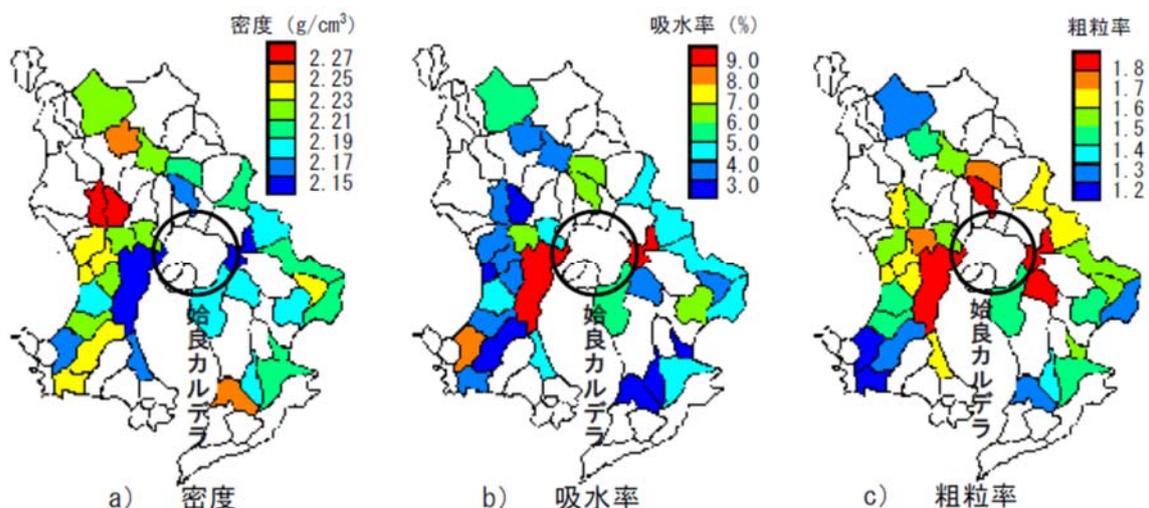


図-4 鹿児島県内のシラスの分布と特性 ¹³⁾(筆者が一部抜粋して掲載)

砂利同様に粒度調整し粗骨材としてコンクリートに使用した。特にそのコンクリートは川砂利よりも熱伝導率を 40%程度小さくし、保温性建材や歩道用ブロックに用途があることを論じた。同様の火山礫を用いる中で、城門・加賀谷¹⁸⁾は火山礫ポーラスコンクリート平板がヒートアイランド現象抑制として温度低減効果のあることを、加賀谷ら¹⁹⁾は火山礫コンクリート面を洗い出し仕上げすると緑化植栽性のあることを、加賀谷・飯村²⁰⁾は火山礫コンクリートによる緑化屋根が室温調整機能のあることを、それぞれ報告した。さらに、長森・越後谷²¹⁾は約 4 万年前に形成された北海道の支笏カルデラ（現支笏湖の原形）周辺で得られる発泡軽石を活用して、軽量コンクリートの強度特性について報告した。

このように、数万年前の火山活動に伴う火砕流堆積物や噴出堆積物の中の軽石は、多孔隙なため高い吸水率と小さい密度を有するので、コンクリート用粗骨材の JIS 規格を満足するものではないが、歩道用ブロックや吸音性・保温性機能のある軽量コンクリート建材、緑化環境コンクリートなどに有効活用できることを示している。

3) 火山弾・火山岩塊

火山弾や火山岩塊は、火山ガスの抜けた空隙が内部だけでなく外表面にも顕著に多く発現するので、ごつごつした小突起やくぼみが複雑に表面を形成している。写真-3 は、握りこぶし大の火山弾・火山岩塊の一部を約 5mm 厚でスライスしたものをセメント系ボードに接着剤で貼りつけたもので修復された壁面である。こうしたボードは、既存の擁壁や積みブロック等を壊すことなく、その表面にアンカー止めされる。時間経過でコケ等が空隙の多い火山弾・火山岩塊のスライス表面に付着・成長し、次に、時間経過でコケ等を母材として緑化が進み、生態系創造も可能なものとなる。そのほか、曲面のあるフレキシブルな形状のある壁面等に貼りつけられるように工夫した、やや細かな火山弾・溶岩をポリエステル繊維に貼りつけたフィルムも、壁面緑化資材として施用されている²²⁾。

このように、火山弾・火山岩塊の持つ空隙などのごつごつとした複雑表面と内部空隙で



写真-3 JR 四ツ谷駅の線路脇の壁面を構成する火山岩塊(スコリア)スライス貼りつけたボード(左)と、その拡大写真(右、各種断面形状と空隙のあるスライス片、黄色の丸の中はアンカーピン)

の保水機能を有することに着目し、これらを接着したボードや繊維を壁面等に留める方法により緑化促進と生態系創造を図る土木・建築資材に有効活用されている。

4) 火山灰（歴史的に古い堆積火山灰も含む）

火山灰をコンクリートに使用した例として、古代ローマ時代に建造された多くの遺跡に見られ、火山灰や軽石が消石灰とともに用いられている。イタリア・ナポリ近郊の古代ローマ時代の遺跡からは約 2,000 年経過したコンクリート系材料も発掘されているが、その遺跡コンクリートを調査・分析した成果を土木学会が「古代ローマコンクリート²³⁾」に著している。また、「コンクリートの文明誌²⁴⁾」によると、古代ローマ時代の工匠たちは、従来のモルタルが川砂と石灰に水を混ぜたのち十分な時間をかけて乾かして固めていたものであったが、火山灰と石灰と水を混ぜて固まるモルタルを発明したという。ここでいう石灰とは消石灰のことであり、石灰岩を焼いて得た生石灰（きせっかい）に水を加えて生石灰の消化から消石灰を得、それを粉末状にして用いられる。また、火山灰はポッツォラーナ (Pozzolana) やポッツォリ (Pozzuoli) の丘の塵といい、イタリアのナポリ近郊のヴェスヴィオ火山の噴火によるもので、この産地の地名からポゾラン (Pozzolan) と呼んでいる。発明したモルタルは、火山灰：消石灰：水＝2：1：0.5 の割合（質量比か容積比かは本書²⁴⁾に記載がない）で混合したもので、各種の建物や水中工事に使用されていた²⁴⁾。

また、明治時代後期 (1897～1908 年) に小樽港北防波堤が北海道産火山灰を配合したコンクリート製ケーソンを基礎に並べて建設された。防波堤を計画・設計したのは「日本近代港湾建設の父」といわれる廣井勇であった。彼の著した「小樽築港工事報文 前編」(1908, 北海道廳) には、火山灰 (a) とセメント (c) の容積比を 0.8：1.0 とし、[セメント+火山灰] を結合材とし、その容積中の火山灰容積比が $a/(c+a) = 0.8/(1.0+0.8) = 0.44$ と記載されている。また、当初のコンクリートの容積配合 [セメント：砂：砂利・碎石＝1：2：4] を、[セメント：火山灰：砂：砂利・碎石＝1.0：0.8：3.2：6.4] に変更し火山灰を混入するようにした。結合材の 44% (vol.) の火山灰を混和材料とする容積配合は、コンクリートの耐海水性向上とセメントを節約し工事費の節減を図ることにあつた。この防波堤は現在も健在で、当時製造した供試体を継続的に試験してきたことから“百年耐久試験”^{25), 26)}といわれている。

この火山灰の採取地はこの工事報文に「小樽」と記されているが、小樽近傍に歴史に残る火山噴火はない。小樽市手宮洞窟保存館のホームページによると、小樽港北防波堤に近い手宮洞窟の周辺に「小樽軟石」と呼ばれる凝灰岩が露出している。当時はそれを切り崩して、防波堤近くの厩町工場へ運搬し、明治 35 (1902) 年 8 月に購入した火山灰粉末機を使用してセメント並みの細かさまで火山灰を微粉碎し、セメント代替の混和材料として用

いたものと考えられる。最近になって沢木ら²⁷⁾は当時施工した北防波堤（上部工）から採取したφ45mm コンクリートコアを特殊な機器で観察し、火山灰が用いられていることを確認した。ただ、この火山灰は小樽近傍で産した堆積火山灰か、凝灰岩粉末であるかについては言及していない²⁷⁾。凝灰岩は火山灰が地上や水中に長い時間をかけて堆積してできた岩石であるので、その成分は火山灰由来ではあるが、生成条件からみれば堆積岩（火山砕屑岩）に分類される。1957年発行の北海道小樽東部の地質図によれば厩町工場近傍に凝灰岩が存在していることから、廣井勇の報告した「火山灰」という表現よりは粉末機で製造したので「凝灰岩粉末」として扱う方が正しいように思われる。

以上のように、天然ポズラン材である火山灰や凝灰岩粉末はコンクリート混和材料として有効活用できることを示している。このポズランは、シリカ質あるいはシリカとアルミナを主成分とし、それ自体には自硬性に乏しい材料であるが、水があれば水酸化カルシウム（ Ca(OH)_2 ）と常温で徐々に化合（これをポズラン反応と呼ぶ）し、接着性のある不溶性化合物を生成する。天然ポズランには火山灰のほかにケイ酸白土、ケイ藻土などがあり、人工ポズランにはフライアッシュやシリカフェームなどがある。

ポズラン材がコンクリートに及ぼす効果として、一般に次のことが挙げられる。

- 1) 生コンクリートにおいてワーカビリティが向上する（適切な粒度分布と粒形が必要）
- 2) 硬化する際に発生する水和熱を減少する（ダムなどマスコンクリートに適する）
- 3) 長期強度が増進する（適切な養生をおこなう）
- 4) 耐硫酸塩性など化学抵抗性が向上する（結合材中の Ca(OH)_2 を相対的に少なくさせる）
- 5) 水密性が向上（細かな材料のため混和によりコンクリートの細孔量が減少する）

さらに、火山灰の有効活用として、Hossain²⁸⁾はパプアニューギニアの火山噴出物（火山灰と軽石粉）のセメント代替可能性について報告した。また、ジオポリマー材料に火山灰を用いる研究²⁹⁾もおこなわれた。ジオポリマーとはセメントを使わず、水ガラスなどのアルカリシリカ溶液とアルミナシリカ粉末などの活性フィラーとの反応による非晶質の縮重合体の総称であり、成分的にシリカが約60%とアルミナが約15%の火山灰を活性フィラーとするものであった。

ごく最近、吉田ら³⁰⁾は北海道内に産する25種類の堆積火山灰（凝灰岩なども含む）を混和材料として用いたコンクリートの特性について取りまとめた。この火山灰は歴史的に古くから火山噴火で堆積したものである。その結果、火山灰を細骨材容積の30%を外割で置換したコンクリートは、火山灰を混入しないコンクリートよりも強度発現や塩化物イオンの浸透抵抗性、凍結融解抵抗性が向上し、火山灰のポズラン反応効果を確認している。ここでは5mmふるいを通過した火山灰をボールミルで粉砕してから75μmふるいを通過

したものを試料としたことから、細骨材としての使用ではなく混和材料として配合したものである。

新燃岳の噴火で堆積した火山灰を生コンクリートに用いた取組みとして、満留³⁾の報告がある。噴火後に降灰し堆積した火山灰をコンクリートの細骨材の一部に直接的に配合した研究成果である。数万年前の堆積火山灰（シラスなど）と異なる点が特徴であり、本研究で対象とする新燃岳火山灰の有効活用例として大いに参考になるものであるため、以下にその詳細を整理した。

この新燃岳の火山灰は、その成分分析から SiO_2 が約 55%、 Al_2O_3 が約 19% で安山岩の部類に入り、粒度では粒形が小さい方に多く分布し 0.15mm 以下のふるい通過率は約 9% で、密度や吸水率はコンクリート用細骨材の JIS 規格を満足するものではなかった。火山灰はアルカリシリカ反応性試験（化学法）で「無害ではない」と判定されたが、モルタルバー法による試験を実施しなかった。後者の方法では最終結果が出るまでに 6 か月を要するので、火山灰の活用可能性の判断を出すには時間がかかりすぎるためであると思われる（その代わりに、硬化コンクリートについて迅速法でアルカリシリカ反応性試験を実施した）。また、骨材の損失質量百分率は硫酸ナトリウムによる安定性試験結果が 1.8% と少なく JIS 規格を満足した。この火山灰をコンクリートの細骨材としてどの程度まで使用できるかについて、火山灰混入率を細骨材質量の 0, 5, 10, 20 および 30%、水セメント比を 65%、細骨材率を 45%、単位水量を 170kg/m^3 、スランプを 8cm とする生コンクリートを配合設計した。その結果、材齢 28 日の圧縮強度はその混入率の順に 30.2, 30.1, 31.8, 26.6 および 29.2N/mm^2 、乾燥収縮率の変化は混入率 0% と 10% が材齢 1, 4, 8, 13 および 28 週ではほぼ同じであったが混入率 30% ではやや大きく発現した。圧縮強度でもっとも低かった 20% 混入率のコンクリートはスランプが 9.5cm、空気量が 5.7% であったことが、ほかの配合のものより強度を低く発現させた原因としている。以上の結果から、コンクリートの品質に大きな影響を生じさせない火山灰の混入率は最大 10% と結論づけている。なお、硬化コンクリートについてのアルカリシリカ反応性試験（迅速法）の結果、30% 混入率でも“反応性なし”の成果を得ていたことは、火山灰を活用する上で有益な情報である。さらに、30% 混入率の生コンクリートのブリーディング水の pH は 13.88 で、0% 混入率のそれ 13.92 と比較し、セメント成分が強いことから特段の影響が生じていないとしていて、火山灰の酸性はほとんど問題にならないことを示唆した。ただ、火山灰の酸性度（pH）は測定していなかった。

このようにコンクリートに混入する火山灰は、歴史的に古くから堆積していた火山灰や凝灰岩の粉末、および、直近の噴火によるフレッシュな生火山灰に大別できること、また、

その活用方法は2つあり、細骨材の一部や微粉末化してポズラン材として、有効活用していることが明らかになった。ただ、実際的な有効活用対策としては、①火山噴火が続くと堆積灰も累積増加し堆積場の新規確保の困難性、②急峻地や溪流に堆積した火山灰が惹起する土石流災害への対策、③火山灰・凝灰岩の粉末化に要する製造コストなどから、生火山灰は直接的にコンクリート用細骨材として使用するほうが望ましいと考えられる。

5) 火山灰使用の特許

火山灰を使用する特許としては3件あった。「ジオミラクル土舗装³¹⁾」は、さつま天然真砂土、シラス（特許にはシラス土と記載）、軽石、火山灰、現地土に、固化剤として酸化マグネシウムやエマルジョン系をジオバインダーとして規定の土重量に2～10%を混入してミキサーで練り、シラス砂や自然土を路盤に敷設均して転圧して仕上げるものであり、この材料を用いて平板ブロックとすることもできる。この特許の特徴は、固化剤としてセメント系を用いずにシラスや火山灰などを舗装材に用いる点である。しかし、セメント系固化剤による平板ブロックの製造方法には触れていないことや、前述の固化剤では強度的にコンクリート並みに出せないことが指摘される。

次に、「シラスを原料とするスラリーの製造方法および固化体³²⁾」は、シラスや火山灰、水溶性樹脂、でんぶん、水を混合して得た固化体が道路の舗装材や補修材、ブロック塗り壁、建築材料になるというもので、これを製造するためのスラリー製造方法も特許にしている。シラスや火山灰が固化体の混合材料として使われているが、コンクリート材料としての活用まで特許範囲に含めていない。

また、「新燃岳噴火降灰を使用した骨材とその製造方法並びにこれを用いた建築材³³⁾」は、新燃岳火山灰を粘土と混合して1,000℃以上で焼成し、その過程で赤色や黒色に発色した建築材、煉瓦、瓦、ブロックおよびタイルを製造できるものである。ここでは火山灰を最大50%まで多く使用できるものの、一緒に焼成する粘土には砒素など有害物質が含まれる場合もあり使用材料の成分について全く触れていないこと、1,000℃以上で高温焼成するための燃料代とCO₂排出量が無視できないこと、ブロックという記載があるがその製造方法の記載がなく製造コストも明らかにされていない。多分、火山灰を粘土と混合して1,000℃以上で焼成すると固形物ができるので、それを粉砕しふるいで分級したものをブロック製造に回しているとしか考えられない。もしそうであるなら、ブロック製造コストは普通ブロックよりも高額にならざるを得ない。なぜならブロック製造では、粘土混合火山灰の高温焼成→冷却後の粉砕→ふるい分級と水分調整→良質細骨材へ配合しブロック製造、の工程を少なくとも経る必要があるからである。

以上のことから、生火山灰を使用する場合、これに関する特許に内容的に触れるもの

は認められず、噴火後に堆積したばかりの生火山灰を無処理で生コンクリートに活用した満留³⁾の報告(この生コンクリートを型枠に流し入れて製造したコンクリートブロックも含め)があるのみである。

6) 火山灰活用の方向性について

火山噴出物の土木材料としての有効活用は、既往研究などから多岐にわたっていることが明らかとなった。その中でも火山灰は、JIS規格を外れるもののコンクリート用細骨材の一部に、および粉末状のポゾラン材(混和材料)として使用されている。混和材料とした火山灰は、混入したコンクリートの品質向上に寄与し、コンクリート材料の中で高コストなセメントの代替材として有利に働くため、明治時代後半に施工した小樽港北防波堤の基礎ブロック等にも使用された歴史^{25, 26)}などもある。このように火山灰は省資源や省エネルギーの観点から有益であるので、資源循環型社会の構築に役立つものである。また、最近の研究として吉田ら³⁰⁾の成果を取り上げたが、北海道火山灰(75 μ mふるいを通過したもの)を混和材料として外割30%としてコンクリートに使用していた。しかしながら、ふるいで火山灰をより細かに分級する作業や特殊機械で粉末状の混和材料に多量に調整するコストは無視できない。一方、堆積している生火山灰を直接的に使用する場合、新燃岳火山灰(5mmふるいを通過したもの)を細骨材として生コンクリートに最大10%まで混入した報告³⁾がある。このため生火山灰の活用にあたっては、無処理なままで使用することがコストパフォーマンス的に推奨される。

本研究で対象とする生火山灰は、新燃岳噴火で降灰し堆積したフレッシュなものを主に使用する点が特徴である。この生火山灰に加え、新燃岳とは距離的に近く現在も噴火し降灰・堆積している桜島火山灰も使用した。桜島火山灰は微細で密度が大きく吸水率が小さな特性を有している。新燃岳火山灰は密度が小さく高吸水性である。相対する性質の火山灰であったので、比較検討するために用いた。また、これらの単体あるいは両者を混合した生火山灰をコンクリートに良質細骨材の一部として混入する方法で実験的に検討した。一般的に、微細な火山灰をコンクリートに配合すると、所要のスランプを確保するために水量を増す必要がでてきてスラリー状の軟(なん)練りコンクリートとなり、そのため低強度となりがちである。その強度を大きくするためには結合材であるセメントの量を多くせざるをえなくなり、逆にコスト高になる。さらに、生火山灰を無処理のまま直接活用するコンクリートの開発にあたり、すでに特許に触れるものではないことを確認している。

降灰し堆積したての生火山灰を配合するコンクリート製造では、満留³⁾が取り組んだ軟練りの生コンクリートではなく、水量を増やさずに小さい水セメント比で、ゼロスランプの硬(かた)練りコンクリートを製造する方が、生火山灰を活用しやすい。また、その硬

練りコンクリートを型枠に入れて振動加圧して即時脱型方式のプレキャスト無筋コンクリート製品を製造する方法が単純な製造工程として推奨される。こうして製造されたブロック製品は歩道などの現地施工に早期に使用可能であり、例えば 7 日の短い試験材齢で JIS 規格を満たしているかを判断できる点で有利である。武若ら¹⁴⁾のシラスコンクリートではシラスをそのまま配合するが、シラスの粒径 0.15mm 以下の微粒分によるポズラン反応効果として長期強度発現や耐硫酸塩性を得ている。このため、本研究における生火山灰は細かな微粒分をそのまま配合に用いるため、長期的にはポズラン効果も期待できる。

このようなことから、生火山灰の有効活用の方向性として、所要の強度の確保のみならず保水性や吸水性の機能を付与させた環境製品の開発をめざすが、このことは社会的にも資源循環の観点でも重要であり、特に火山発生地域では住民の協力で回収する経緯もあるから火山灰有効活用への理解が得られやすく、環境製品への認知度も高まるものと考えられる。しかしながら、生火山灰を用いた硬練りコンクリートによる即時脱型の環境製品の強度や各種機能などの特性はまだ解明されていない。このため、生火山灰の物理的・化学的性質に関する試験などによって、コンクリート用細骨材への適用可能性をまず確認し、製品性能として JIS 規格を満足するかどうかを確認しながら、各種の配合試験と JIS 試験などから硬練りコンクリート製品の強度や機能などの特性を学術的に明らかにする意義は極めて大きい。

1.3 一般廃棄物溶融スラグを混入する ILB の開発

国内の建設廃棄物中で最も多いのがコンクリート塊であり、2015 年度では廃棄物全体の 54% を占めるほどであった。その再生率は、建設リサイクル法により再資源化等が義務付けられていることから、99.9% (2015 年度) に達する。数字上は非常に高い再生率であるが、その実、そのほとんどは再生路盤材や埋立て用として用いられており、再生コンクリートに用いるのはごく少量である。例えば、コンクリート製品の廃棄物を破砕した再生骨材をコンクリート用骨材として適用した再生コンクリート製品の開発研究が進められてきた^{34, 35)}。

最も深刻な廃棄物は、産業廃棄物はもちろん都市で多量に発生する一般廃棄物（都市ゴミ）がある。最終処分場の確保も難しくなっているため、溶融スラグにする方法が考えられ、一般廃棄物や下水汚泥の焼却灰等を 1,200℃ 以上の高温で溶融したものを冷却・固化させた骨材である（例えば、JIS A 5031 (2006) 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材）。一般廃棄物の溶融スラグの活用先は、細川³⁶⁾が解説しているように、コンクリート製品に比較的多い。例えば、重金属溶出

量が土壤環境基準 No.46 に示す量を超えないことを確認しながら、良質細骨材に熔融スラグを 10～20%置換するプレキャスト無筋コンクリート製品の研究を進めてきた^{37, 38)}。熔融スラグの ILB の製造に際しては、市役所が ILB 製造工場に委託して必要数量の ILB を製造し、それを公園広場や歩道に敷設する資源循環を考えた取り組みもある。このような場合、ILB では熔融スラグ 50%の混入もできたようである。Hosokawa ら³⁹⁾は、熔融スラグ 100%を混入した ILB を製造し、これを破砕して得た再生細骨材を 3 回繰り返す再々再生 ILB の製造試験をおこなった。曲げ強度的には若干低下するものの重金属溶出量が基準値を超えることはなく、歩道などに十分敷設できるものであった。最近、生火山灰を保水性 ILB に混入した研究が Hosokawa らによっておこなわれた^{40, 41)}。

また、時代が進む中で、産業廃棄物の分別と熔融スラグの製造工程管理などの研究で産業廃棄物熔融スラグのコンクリート⁴²⁾への適用も考えられる。また、県や協会の「リサイクル製品の認定製品」として熔融スラグを配合した鉄筋コンクリート製品も出回っているほか、熔融スラグ自体の JIS 製品も出始めた。国土交通省がおこなっている「公共事業等における新技術活用システム (NETIS)」の登録もある。したがって、生火山灰の活用を考えると、熔融スラグの場合と同様に、火山噴火地域における防災備蓄用としての生火山灰混入型の ILB やブロック、環境製品を、県や協会のリサイクル製品としての認定や NETIS に登録になれば、公共事業などへの積極的使用を義務づける道が一層開けるものと考えられる。

1.4 ヒートアイランド現象緩和型の環境製品としての保水性 ILB について

持続可能な社会構築を目指している多くの都市における環境課題の一つに、人口集中地域の気温上昇、すなわちヒートアイランド現象が挙げられる。この現象は、都市の中心部の気温が郊外に比べて島状に高くなる現象のことである。この現象に伴うものとして、気温上昇だけの影響による問題や、熱中症のように湿度や構造物表面からの放射による温熱環境の悪化に伴う問題なども含まれる⁴³⁾。また、最近頻繁に発生する都市域での局地豪雨は、積乱雲の成長で突発的かつ局地的に生ずる豪雨のことであり、その強く降った雨が長らく貯まったままの状態排水されない問題もあった。三上ら⁴⁴⁾は、都心部のヒートアイランドの高温域が、日中の海風によって北西方向に変位し、そこに向かって北からの風(多くの場合、鹿島灘海風)が収束して上昇流を強化し局地的な大雨(都市型豪雨)をもたらすと報告している。都市型豪雨の特徴は、短時間に局地的な大雨をもたらすことである。降雨継続時間は 1 時間から 2 時間程度であるが、時間降水量が 50～100mm に達することもあるため、表面流出した大量の雨水が洪水被害を引き起こす場合もある⁴⁵⁾。このように

ヒートアイランド現象と局地豪雨は都市において関連性が強いことが伺える。

ヒートアイランド現象緩和対策として、国土交通省都市計画課は「風の道」に配慮した都市づくりガイドライン⁴⁶⁾を提案し、その対策の一つに地表面被覆の改善策を挙げている。「風の道」を流れる冷涼な風を、地表面温度の上昇しやすい人工的な被覆で暖められることなく都市空間内に導くために、「風の道」となる街路等の緑化の充実と、その周辺の建物の敷地・屋上・壁面の緑化や高反射化、舗装の改善、水辺空間の確保を図ること等が有効としている。中でも道路の多くはアスファルト材やコンクリート材など排水性の悪いもので舗装されている。舗装の改善には、局地豪雨などの際は表面流出雨水の迅速な排除が必要なため、舗装内の隙間から地中へ還元する機能をもつ透水性舗装が開発された。これに加えて、ヒートアイランド現象緩和対策として舗装体内に保水された水分が蒸発し、それに伴う気化熱で路面温度の上昇を抑制する機能をもつ保水性舗装も開発された。

保水性舗装には、①アスファルト舗装系（開粒度アスファルト混合物層の空隙に吸水・保水性能のある材料（保水材）を充填したもの）、②コンクリート舗装系（ポーラスコンクリートに保水材を練混ぜあるいは充填したもの）、および、③ブロック舗装系（吸水・保水能力を備えた舗装用ブロックを用いたもの）がある⁴⁷⁾。ブロック舗装系には透水性機能をもったブロックもある。舗装用ブロックの種類は、無筋コンクリート製のプレキャストコンクリート製品の JIS 規格：附属書⁴⁸⁾に示されており、平板、境界ブロック、曲線部・横断部ブロックおよびインターロッキングブロックがある。1950年代に西ドイツで開発されたインターロッキングブロック（interlocking block、以降 ILB という）のインターロッキング（interlocking）とは、ブロックをお互いが噛み合うように敷きつめることである。ヨーロッパなどにおける道路舗装では石畳が多いが、その石の採取から所要形状に加工成形したものを舗装現場まで運搬し敷設する作業工程は、実際のところ非常にコストがかかるといわれている。この石畳に代わるプレキャスト無筋コンクリート製品としての ILB は、いろいろな形状や色調、機能などを持ちあわせた舗装用製品である。

ILB 舗装の原理⁴⁹⁾は、隣接するブロック同士の噛み合わせ効果とともに、敷砂、目地砂⁵⁰⁾および舗装端部の拘束が一体となって荷重分散性能⁵¹⁾を発揮するものである。ILB 舗装は、ILB の表層モルタルにカラー（色付け）を施せることや種々の形状を製造でき、また敷設方法もブロックの並べ方が多種多様で工夫を凝らすことができるため、舗装道路のみならず街並み美観の形成にも役立つ。このような特徴から ILB 舗装は、現在、車道・歩道や公園、広場、商店街、駐車場、家庭庭園などに広範に利用されてきている。また、上述したような局地豪雨が発生した場合は、お互いのブロック間に幅 3mm 程度の目地を持たせて敷設施工しているため、その目地から下方の路盤へ表面水を迅速に浸透させ、同時に

排水される仕組みがある。こうした舗装施工の詳細は、インターロッキングブロック舗装技術協会が技術基準として整理した「インターロッキングブロック舗装設計施工要領」に記載されている⁵²⁾。

また、機能による ILB の種類には、普通 ILB、透水性 ILB、保水性 ILB および視覚障害者誘導用 ILB がある。普通 ILB は密実な硬化コンクリートからできているので、雨水の浸透や透水の少ない一般的な舗装用 ILB である。また、透水性 ILB はポーラスコンクリートを使用してブロック本体に透水性能を付与したブロックである。さらに、保水性 ILB は、ブロック内部に水分を保持する保水性と保持した水分を上方へ吸上げる吸水性を持たせたブロックで、路面温度の上昇抑制機能を有しているといわれている。普通 ILB、透水性 ILB および保水性 ILB の品質は、表-1 に示す JIS 規格⁴⁸⁾を満足する必要がある。一般のコンクリートの JIS 規格では 28 日の長い材齢で圧縮強度などを測定し設計基準強度を満足するか評価している。ILB は舗装材であるため、ブロック上を大型車両が走行する、あるいは、歩行者や軽車両（乗用車および 39 kN 以下の週に数度の通行頻度の管理用車両）が利用するとき曲げ作用を受けるため、前者では 5.0 N/mm² 以上、後者では 3.0 N/mm² 以上の曲げ強度が JIS 規格値となっている。ただ、常時 39 kN 以下の車両が通行する場合の曲げ強度は 5.0 N/mm² 以上が要求される⁵³⁾。

以上のことから、ヒートアイランド現象緩和型の環境製品としての保水性 ILB を対象と

表-1 普通 ILB、透水性 ILB および保水性 ILB の JIS に示す品質規格⁴⁸⁾

ILBの種類	品質項目	車道	
		駐車場（大型車主体）	歩行者系道路
		歩道の車両乗り入れ部（大型車主体）	歩道の車両乗り入れ部（乗用車主体）
		消防車両乗り入れ部	—
普通	寸法（幅・長さ）	±2.5mm以内	
	寸法（厚さ）	±2.5mm以内	
	曲げ強度	5.0 N/mm ² 以上	3.0 N/mm ² 以上
透水性	寸法（幅・長さ）	±2.5mm以内	
	寸法（厚さ）	-1.0~+4.0mm	
	曲げ強度	5.0 N/mm ² 以上	3.0 N/mm ² 以上
	透水係数	1.0×10 ⁻² cm/sec以上	
保水性	寸法（幅・長さ）	±2.5mm以内	
	寸法（厚さ）	±2.5mm以内	-1.0~+4.0mm
	曲げ強度	5.0 N/mm ² 以上	3.0 N/mm ² 以上
	保水性	保水量 0.15g/cm ³ 以上	
	吸水性	吸上げ高さ 70%以上	

し、吸水率の高い新燃岳火山灰の有効活用を主体に、また、それに微細な桜島火山灰を混合して JIS 規格を満足する保水性 ILB の製造技術を確立することと、このブロックの敷設後のヒートアイランド現象緩和機能を有するかどうかの検証も重要である。そのような生火山灰の有効活用技術は新燃岳火山灰に限らず、最近わが国で多発する火山噴火に配慮して、汎用性のある火山灰等有効活用技術を示すことも必要である。

なお、ヒートアイランド現象緩和に効果が期待されている保水性ブロックの JIS 規格は 2010 年 3 月に制定され⁴⁸⁾、現在までの制定後の経過年数は 6 年に過ぎない。しかしながら、保水性舗装だけではなく、温度低減を一層図ることのできる都市型の舗装技術を模索している。国土交通省道路局⁵⁴⁾は、2015 年 6 月に「路面温度上昇抑制機能を有する舗装技術の効果検証計画（案）」に基づき、すでに実証的に 2 箇所試験計測された。図-5 は路面温度上昇抑制機能を有する舗装を示したものである。これには保水性舗装と遮熱性舗装があり、両者の路面温度の低減効果はほぼ同一として比較したものであるが、その結果はまだのようである。

本論文と関連が深い舗装業界の直近の動きとして、3 点を紹介する必要がある。一つは、写真-4 に示すように、2014 年 3 月に普通 ILB、2 つの遮熱透水性 ILB、透水性 ILB、保水性 ILB および高強度透水性 ILB が車道に施工され、各種 ILB の温度上昇抑制機能を比較試験したものがあ。ここには先取的に遮熱透水性 ILB を配置していたが、この試験結果を得ることはまだできていない。二つめは、インターロッキングブロック舗装技術協会

	概要	イメージ図	施工方法	効果(※)	
				路面温度低減効果	表面温度低減効果
保水性舗装	舗装の空隙に保水材を充填し、それに吸収された水が蒸発散する際の気化熱によって路面温度を低減する舗装			【日最大】 約10～17℃ 【平均】 12.3℃	約9℃
遮熱性舗装	表面で赤外線を反射させて路面温度の上昇を抑制する舗装			【日最大】 約11～17℃ 【平均】 13.4℃	約7℃

※関東地方整備局関東技術事務所フィールドでの調査結果(平成15年度～平成26年度)。保水性舗装は、自然降雨時もしくは散水時の計測結果。路面温度低減効果については、平成15年度～平成26年度の平均値。ただし、一部計測していない年度含む。表面温度低減効果については、平成15年9月11日の調査結果。

図-5 路面温度上昇抑制機能を有する舗装技術の例⁵⁴⁾

が「クールブロックペイブ」認定制度のパフレット⁵⁵⁾を2015年2月に発行したことである。クールブロックペイブとはブロック系路面温度低減舗装をいい、その舗装資材に写真-4の参考に示す遮熱性の平板ブロックやILBがある。その遮熱性ILBの路面温度は、図-6に示すとおり、暑熱期に密粒度アスファルト舗装(As)より低く発現している。路面温度の低減機能を有するILBについては、定めた室内照射試験方法〔A法〕遮熱性タイプと〔B法〕保水性タイプの区分がある⁵⁶⁾によって、路面温度低減値が標準の密粒度As供試体より8℃以上あるものを協会がクールブロックペイブとして認定するものである。この場合、供試体はILB自体ではなくこれから採取したφ100mmのコアを用いることになっている。また、最後の三つめは、路面温度上昇抑制舗装研究会遮熱部会⁵⁷⁾が遮熱性舗装技術資料を2016年9月に改訂したことである。この初版が1999年3月に発行されて以来、遮熱性舗装について技術的に検討されてきたことがわかる。

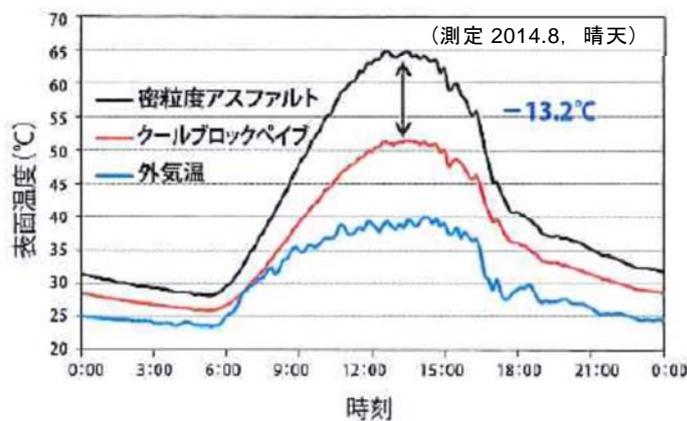


参考写真：遮熱性平板ブロック



(30×30×5cm, 太平洋プレコン工業株式会社製)

写真-4 T社研究所内舗装道路に組み込まれた6種類のILBによる温度上昇抑制機能の試験状況と、遮熱性平板ブロックの参考写真(2014.3施工, 2016.6.20筆者撮影)



左：密粒度As
右：遮熱性ILB

図-6 「クールブロックペイブ」のパフレット⁵⁵⁾から筆者が抜粋・編集した図

以上のように、ヒートアイランド現象緩和対策としての各種舗装の技術的検討は、保水性舗装⁵⁶⁾への取り組みが先行し、保水性 ILB の JIS 規格の制定（2010 年 3 月）を経ながら、ブロック系路面温度低減舗装を含む遮熱性舗装も併せて検討されてきた。したがって、本論文で対象としている生火山灰を配合した保水性 ILB の温度上昇抑制機能に関する研究は、現在も極めて重要なものであることには違いはない。

1.5 本研究のオリジナリティーと学術的・社会的に重要なポイント

研究の背景、火山噴出物有効活用の既往研究および環境製品の保水性 ILB の特徴を踏まえながら、本研究のオリジナリティーと学術的・社会的に重要なポイントについて、以下に述べる。

本研究のオリジナリティーとして、以下のことがらが挙げられる。

- 1) 歴史的に古い火砕流等堆積物シラスのような活用ではなく、噴火に伴い降灰したばかりの生火山灰を細骨材の一部として直接的にコンクリートに配合する点、また、新燃岳および桜島の火山灰を各々単体で、あるいは両者の混合で、無筋コンクリートに使用する研究は初めてである。
- 2) 噴火が継続されると降灰処理用の堆積場の確保が困難になるので、堆積火山灰の減容を図るために、火山灰混入率をできるだけ大きくするコンクリート配合を検討する。
- 3) 火山灰が細かく吸水率が高いために所要の流動性を得るための鉄筋コンクリートの配合設計は単純ではなく、生火山灰では SO₂ などの火山性ガスが微量にも残留が懸念される場合は鉄筋コンクリートへの適用を避けるべきである。そこで、プレキャスト無筋コンクリート製品（ここでは保水性 ILB）に適用するための製造技術を開発する。
- 4) 製造した保水性 ILB の歩道における温度上昇抑制メカニズムを解明し、普通 ILB や芝生、アスファルト舗装と比較してヒートアイランド現象緩和効果を検証する一方、保水性 ILB 敷設舗装における温度上昇機能評価方法について検討する
- 5) 多発する火山噴火に配慮した汎用性のある保水性 ILB 製造技術を、火山灰等有効活用メニューとして提案する。

また、本研究における学術的・社会的に重要なポイントは、以下に掲げるものが考えられる。

- 1) 火山灰の物性が採取地によって異なる可能性があるため、火山灰採取地ごとにその物理的性質を明らかにする。火山灰 pH の分析は農作物の作付け対策として実施されただけで、コンクリート用細骨材として化学的に問題となる火山灰 pH の時間経過に伴う変化や、地域住民が回収する火山灰の有機不純物含有性など、化学的特性がほとんど明らかにされていない

ない。今回、その化学的性質を明らかにする。こうした火山灰の特性を学術的に評価したうえで、そのコンクリート用細骨材への適用性を明らかにする必要がある。

- 2) 研究対象の主たる生火山灰は新燃岳火山灰であるが、これに加え、新燃岳とは距離的に近く現在もときどき噴火し降灰・堆積している桜島火山灰も使用する。両者を各々単体で保水性 ILB に使用した例は皆無であるため、学術的に検討する意義は大きい。特に火山灰の特徴として、新燃岳火山灰は密度が小さく高吸水性であるが、桜島火山灰は微細で密度が大きく吸水率が小さな特性を有していて、両者の特性を活かし比較検討することは重要である。また、これらの単体あるいは両者の混合した生火山灰をコンクリート製品に配合する方法で実験的に検討する。新燃岳火山灰を主体的に有効活用するだけでなく、火山立地的に近接している桜島の火山灰も、コンクリート用細骨材としてブロックに配合できないかを単体で、あるいは、両者の混合で検討することは新規な知見が得られる可能性があり、実験的に重要である。その理由としては、桜島火山灰が微粉であるものの密度が大きく吸水率が小さい特徴から、新燃岳・桜島火山灰を各々単体で保水性 ILB に混入することに加え、両火山灰の混合により保水性 ILB の物性にどのように影響を及ぼすかを明らかにする必要があるためである。
- 3) ガラス質であるシリカ(SiO_2)の含有が多い火山灰を混入したコンクリートは、アルカリシリカ反応で膨張性ひびわれが生じる恐れがあるので、化学法で迅速に判断して“無害ではない”と判断されれば、モルタルバー法の 6 か月の長い実験によって最終的に無害なものかを評価する必要がある。
- 4) 火山灰を生コンクリートに配合する場合は所要の強度が出ているかを、一般に材齢 28 日で圧縮強度試験によって判断している。一方、即時脱型製品である保水性 ILB は試験材齢に特にしぼりがなく、工場によっては材齢 7 日や 14 日で曲げ強度試験と保水性・吸水性の試験を実施する JIS 認定工場が一般的に多い。すなわち、保水性 ILB など即時脱型製品は JIS 規格を満足するかどうかの結果を生コンクリート製品より短期間に得られるメリットがある。
- 5) 保水性 ILB に適用される JIS 規格を満足し、かつ、その場合に最多の生火山灰を混入可能な配合を明らかにすることは、生コンクリートの配合設計より比較的容易であり、4) に示す時間的なメリットから、火山噴火の降灰処理対策メニューの一つとして、社会的には即応性の高い環境製品の開発重要度が増す。
- 6) 生火山灰の有効活用に着目した環境にやさしいブロック製品は、降灰を集積・回収する住民にとって認知されやすい。また、都市域や南九州など暑熱期間の長い地域におけるヒートアイランド現象の緩和に効果があることを前提とすると、例えば市民の多くが出歩く歩道に保

水性 ILB を敷設することは、社会的にも生火山灰活用型ブロックへの理解が進み、その需要は高まるものと考えられる。

- 7) 古代ローマにおいても近くに産する火山灰あるいは堆積火山灰を建材の天然材料として活用してきた。コンクリート用細骨材の JIS 規格を満足しないシラスでも、前述したように技術化されコンクリートに使用できている。新燃岳や桜島の生火山灰混合にとどまらず、シラスや凝灰岩粉末とのブレンドなど国内における汎用性に考慮し、例えば高保水性機能を有する製品が開発されるようになれば、ヒートアイランド現象緩和に役立ち、その活用性が高まるだけでなく、火山噴火地域の堆積灰の減容促進により堆積地確保の問題を解消できるようになり、また、そのことが資源循環型社会の構築に役立つことになる。

ただ、歩道などに敷設される保水性 ILB の温度上昇抑制メカニズムが十分に解明されていない状況があるため、現状の舗装の温度低減評価法として、敷設したブロック 1 個（場合によっては数個）の表面温度において標準の密粒度 As 供試体の表面温度より 10℃以上低い場合に保水性 As や保水性 ILB として評価する室内照射試験があるが、果たして実態に即したものであるかどうかの検討が必要である。この方法に代えて目地を含めた舗装面で測定した平均温度による評価法が実用的と考えられる。これらの点は、学術的に論議を深める必要がある。

- 8) わが国において多発する火山噴火に配慮した汎用性のある火山灰等有効活用メニューを、本研究で得られた知見をもとに構築し、それを提案することは、社会的に非常に重要な役割を果たすことになる。

1.6 本研究の目的

本研究のオリジナリティーと学術的・社会的に重要なポイントを踏まえ、本論文における主要な目的を次に取りまとめた。

- 1) 新燃岳火山灰の物理的性質・化学特性について実験および調査によって明らかにし、問題点を抽出して、コンクリート細骨材に適用できるかを検討する。
- 2) 新燃岳火山灰と桜島火山灰を保水性 ILB の細骨材として単体で混入し、JIS 規格を満足する最大の混入率を抽出する。
- 3) 新燃岳火山灰と桜島火山灰を混合した火山灰を保水性 ILB に混入して、両者の容積混合比と最大の生火山灰の混入率を検討して、保水性機能を高めた火山灰混入型保水性 ILB を開発する。
- 4) 火山灰の混入・無混入の保水性 ILB 2 種類、普通 ILB、アスファルト舗装、芝生の 5 種

類の資材による道路の温度上昇抑制に関する実証試験から、温度上昇抑制に寄与する資材や条件、その火山灰混入の保水性 ILB の機能を明らかにする。

- 5) 火山灰の混入・無混入の保水性 ILB 2 種類の温度上昇抑制効果の差が小さい原因を各種実験で検討し、保水性 ILB の温度上昇抑制メカニズムを解明し、それが敷設された歩道における温度上昇抑制機能の歩道面温度評価法を実用的な評価法か検討する。
- 6) 本研究で取り扱った火山灰 2 種類の有効活用に限らず、得られた知見をもとに、わが国で汎用性のある火山灰等有効活用型環境製品メニューを構築提案し、火山噴火時の降灰の回収対策や堆積したばかりの生火山灰および隣接する堆積火山灰等による保水性 ILB 製造と公共事業の仕様まで提示する。

1.7 本論文の構成

本論文は 8 章構成であり、各章の内容は以下に示すとおりである。

第 1 章では、緒論として研究の背景、火山噴出物有効活用の既往研究、環境製品の保水性 ILB の特徴、本研究のオリジナリティーと学術的社会的な重要性、本研究の目的および構成について論じた。

第 2 章では、新燃岳火山灰の物理的性質、モルタル性状、化学特性について実験および調査によって、火山灰活用における問題点を摘出するとともに、コンクリート細骨材にどの程度適用できるかを検討した。

第 3 章では、新燃岳火山灰および比較のための桜島火山灰を、保水性 ILB の細骨材の置換材料として細骨材量の 10, 20, 30, 50% (vol.) に単体で各火山灰を混入し、保水性 ILB の JIS 規格を満足する配合を実験によって特定した。

第 4 章では、新燃岳火山灰は吸水率が高いことによる保水性 ILB の保水性向上と、微細な桜島火山灰の混入が同様に保水性向上に寄与することから、これらを混合した場合の、保水性、吸水性に加え、透水係数の測定をおこない JIS 規格を満足する配合条件を実験的に検討し、生火山灰を活用する保水性 ILB を開発する。

第 5 章では、第 4 章で得た火山灰混入の保水性 ILB と、火山灰無混入の保水性 ILB、普通 ILB、アスファルト舗装、および、芝生の 5 種類で試験歩道を施工し、暑熱時に歩道温度変化を把握しながらどの資材が歩道温度上昇抑制に寄与するかを検証した。

第 6 章では、第 5 章で火山灰混入の保水性 ILB と、火山灰無混入の保水性 ILB とに温度上昇抑制への影響がそれほど明確な差異がでていなかったため、第 4 章で使用した同じ配合の保水性 ILB の半割り切片を利用した各種の実験から、保水性 ILB の歩道温度上昇抑制メカニズム

を解明した。また、ブロック 1 個による温度低減評価法ではなく、目地も含めた舗装面の温度の簡易な測定による評価法を提案し、その提案の妥当性を実証する。

第 7 章では、最近頻発する火山噴火を鑑み、汎用性のある火山灰等混入型保水性 ILB 製造技術を提示し、火山噴火地域での火山灰の有効活用メニューとしてまとめた。

第 8 章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について論じた。また、最後に、謝辞および Summary を掲載した。

参考文献

- 1) 内閣府宮崎県・鹿児島県霧島山（新燃岳）噴火に関する政府支援チーム：霧島山（新燃岳）噴火時に噴石等から身を守るために、入手先<http://www.bousai.go.jp/kazan/kirishima_shien/pdf/manual_02.pdf>（参照 2011.6.1），2011
- 2) 産業技術総合研究所霧島火山緊急調査対策本部：霧島山新燃岳の噴出量，入手先<http://www.aist.go.jp/ais_j/pressrelease/pr2011/pr20110201_2/pr20110201_2.html>（参照 2011.4.1），2011
- 3) 満留康裕：新燃岳噴火に伴う火山灰をコンクリートに有効利用—宮崎県の取り組み，セメント・コンクリート，No.782，pp.14-20，2012 《引用した図は産業技術総合研究所から提供されたと記載があり》
- 4) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：2011 年 1 月 26～27 日の現地調査の様子その 2，現地調査(速報)/霧島山新燃岳 2011 年噴火情報，入手先<<http://www.gsj.jp/hazards/volcano/kirishima2011/index.html>>（参照 2011.1.1），2011
- 5) 細川吉晴：新燃岳の噴火に伴う降灰などによる宮崎県の農業被害，農業農村工学会誌，Vol.81 (7)，pp.7-10，2013
- 6) 日本火山学会：Q&A 火山噴火 127 の疑問—噴火の仕組みを理解し災害に備える—，254p，講談社，2015
- 7) 全国地質調査業協会連合会：地質関連情報 Web—プレートテクトニクスからみた日本列島—，入手先<<https://www.zenchiren.or.jp/tikei/plate.html>>（参照 2016.2.8），2016
- 8) 国土交通省国土地理院：活断層とは何か，入手先<<http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/explanation.html>>（参照 2016.2.8），2016
- 9) 気象庁：火山噴火の仕組み，入手先<<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/2-4.html>>（参照 2016.2.8），2016
- 10) 篠原宏志・石塚吉浩：産業技術総合研究所の火山研究への取り組み，防災科学技術研究

所研究資料, 第 380 号:45-48, 2013

- 11) 気象庁:活火山とは, 入手先<http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/katsukazan_toha/katsukazan_toha.html> (参照 2016.2.8), 2016
- 12) 鈴木毅彦:火山灰から知る火山噴火と降灰ー過去と未来ー, 科学, Vol.85, No.12, pp.1125-1127, 2015
- 13) 前田聡・武若耕司・山口明伸・淵田和樹:コンクリート用細骨材のシラスの諸物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.2069-2074, 2006
- 14) 武若耕司・松本進・川俣孝治:しらすのコンクリート用細骨材への利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.7-12, 1987
- 15) 武若耕司:シラスコンクリートの特徴ー鹿児島県制定マニュアルの内容を基にしてー, コンクリート工学, Vol.45, No.2, pp.16-23, 2007
- 16) 張雪梅・中澤隆雄・今井富士夫:ポーラスコンクリートの吸音特性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1161-1166, 2002
- 17) 加賀谷誠・徳田弘・飯村弥:火山礫を用いたコンクリートの基礎的性質, 材料, Vol.45, No.9, pp.1008-1013, 1996
- 18) 城門義嗣・加賀谷誠:火山礫を用いたポーラスコンクリートのヒートアイランド現象抑制効果に関する検討, 土木学会論文集, Vol.781/V-66, pp.133-143, 2005
- 19) 加賀谷誠・濱田昌宏・城門義嗣・飯村弥:火山礫を用いたコンクリートの自然親和性に関する実験的検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.52, pp.486-491, 1998
- 20) 加賀谷誠・飯村弥:火山礫コンクリートを用いた緑化屋根の室温調整機能, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.115-120, 2001
- 21) 長森正・越前谷智:支笏第 1 軽石の火山礫を利用した軽量コンクリートの強度特性に関する基礎的研究, 建設用原材料, Vol.15, No.1, pp.6-11, 2006
- 22) 佐藤俊明:溶岩革命, プレジデント社, 東京, pp.93-136, 2011
- 23) 土木学会コンクリート委員会ローマコンクリート調査小委員会:古代ローマコンクリートーソンマ・ヴィスヴィアーナ遺跡から発掘されたコンクリートの調査と分析ー, コンクリートライブラリ 131, 土木学会, 東京, 134p, 2009
- 24) 小林一輔:火山灰が原料?, コンクリートの文明誌, 岩波書店, 東京, pp.6-10, 2004
- 25) 長滝重義(監修):コンクリートの長期耐久性ー小樽港百年耐久性試験に学ぶ, 技報堂出版, 東京, 278p, 1995
- 26) 山下茂:北の荒波に耐える「小樽港外洋防波堤」, Consultant, 建設コンサルタンツ協会, Vol.234, pp.32-35, 2007

- 27) 沢木大介・安藤陽子・高橋晴香・松本浩史・新岡博文・早川隆之：現存する日本の歴史的建造物～小樽港北防波堤コンクリートコアの調査報告～，CEM'S，No.64，pp.4-10，2015
- 28) Hossain, K. M. A : Blended cement using volcanic ash and pumice, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.1601-1605, 2003
- 29) 松岡史也・尾上幸造：新燃岳火山灰を用いたジオポリマーモルタルに関する基礎的研究，平成22年度土木学会西部支部研究発表会講演要旨集，pp.735-736，2013
- 30) 吉田行・田口史雄・谷口円・垣原康之・高橋徹・秋山護：火山灰の反応性と火山灰を用いたコンクリートの特性，寒地土木研究所月報，No.729，pp.10-24，2014
- 31) 津曲麻衣子（発明者）：ジオミラクル土舗装，特開2011-111881，公開日2011.6.9
- 32) 立石正徳（発明者）：シラスを原料とするスラリーの製造方法および固化体，特開2011-148663，公開日2011.8.4
- 33) 仙臺洋（発明者）：新燃岳噴火降灰を使用した骨材とその製造方法並びにこれを用いた建築材，特開2012-218990，公開日2012.11.12
- 34) 例えば，Hosokawa, Y. : Properties of concrete product using recycled coarse aggregate from waste flumes, Trans. JSIDRE, Vol.227, pp.49-56, 2003
- 35) 例えば，細川吉晴・前田直己：再生粗骨材のモルタル除去が再生コンクリート製品の特性に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.57，pp.556-563，2004
- 36) 細川吉晴：一般廃棄物溶融スラグを原材料とするブロック，エコマテリアルハンドブック，山本良一監修，丸善，pp.766-770，2006
- 37) 例えば，Hosokawa Y., Ohta Y., Komura M., Sugawara K. and Muramatsu S. : Creation of concrete products reusing melting slag from waste incineration ash, Our World in Concrete & Structures, Ed. by Tam C.T., Ong K.C.G. and Tan T.H. (Singapore), Vol.20, pp.325-332, 2001.
- 38) 例えば，Hosokawa Y., Shoya M., Tsukinaga Y., Aba M., Yamamichi H. and Sugawara T.: Recycling molten slag from waste to concrete products and construction materials in Japan—A case study report—, Our World In Concrete & Structures, Ed. by Tam C.T., Ong K.C.G. and Tan T.H. (Singapore), Vol.23, pp.289-296, 2004
- 39) Hosokawa, Y., Komura, M. and Ohta, Y. : Utilization of molten slag interlocking concrete block (ILCB) in Japan and recycling of 100% molten slag ILCB, Proceedings of the 9th International Conference on Concrete Block Paving (Buenos Aires, Argentina), Web-paper No. 40, pp.1-11, 2009

- 40) Hosokawa, Y. and Onoue, K.: Basic Study on Effective Utilization of Newly Volcanic Ash from Mt. Shinmoedake into Concrete, Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies (Kyoto, Japan), CD-ROM, e408: pp.1-10, 2013
- 41) Hosokawa, Y.: Characteristics of water-retentive interlocking concrete block mixed with volcanic ashes of two volcanos erupted in Southern Kyusyu, Japan, Proceedings of the 6th International Conference of Asian Concrete Federation (Seoul, Korea), pp.1131-1136, 2014
- 42) 例えば, Shoya M., Tsukinaga Y., Aba M., Yamamichi H., Hosokawa Y. and Sugawara T.: Basic study on utilization of unlawfully dumped industrial waste for concrete materials, Our World In Concrete & Structures, Ed. by Tam C.T., Ong K.C.G. and Tan T.H. (Singapore), Vol.23, pp.495-500, 2004
- 43) 日本建築学会: ヒートアイランドと建築・都市-対策のビジョンと課題, 丸善, 東京, 211p, 2007
- 44) 三上岳彦・安藤晴夫・横山仁・山口隆子・石井康一郎・塩田勉・森島濟・小島茂喜・泉岳樹: 東京都区内における夏期ヒートアイランドの時空間構造, 東京都環境科学研究所年報, pp.11-17, 2004
- 45) 三上岳彦・大和広明・安藤晴夫・横山仁・山口隆子・市野美夏・秋山祐佳里・石井康一郎: 東京都内における夏期の局地的大雨に関する研究, 東京都環境科学研究所年報, pp.33-42, 2005
- 46) 国土交通省都市局都市計画課: ヒートアイランド現象緩和に向けた都市づくりガイドライン, 55p, 2013
- 47) 路面温度上昇抑制舗装研究会: 保水性舗装技術資料 Ver.3, 14p, 2011
- 48) 日本規格協会: JIS A 5371:2010 プレキャスト無筋コンクリート製品, 60p, 2010
- 49) インターロッキングブロック舗装技術協会: インターロッキングブロック舗装設計施工要領, pp.1-3, 2007
- 50) 青柳義雄・林寛親・竹内康・岡澤宏・柳沼宏始: インターロッキングブロック舗装における目地砂の荷重伝達効果に関する基礎的研究, 土木学会第 66 回学術講演会要旨集, V-390, 2011
- 51) 唐沢明彦・関根重年・加形譲・東滋夫: インターロッキングブロック舗装の重荷重分野への適用化に関する一検討, 第一回舗装工学講演会講演論文集, pp.265-272, 1996
- 52) 同上 49), pp.15-17, 2007
- 53) 同上 49), pp.50-51, 2007

- 54) 国土交通省道路局:路面温度上昇抑制機能を有する舗装技術の効果検証計画(案), 9p, 2015
- 55) インターロックブロック舗装技術協会:「クールブロックペイブ」認定制度(パンフレット), pp.1-4, 2015
- 56) インターロックブロック舗装技術協会:ブロック系路面温度低減舗装「クールブロックペイブ」の表面温度の測定方法 [A] [B], pp.1-6, 2015
- 57) 路面温度上昇抑制舗装研究会遮熱部会:遮熱性舗装技術資料, 26p, 2016

第2章 新燃岳火山灰のコンクリート用細骨材への適用性

2.1 まえがき

本章では、新燃岳火山灰がコンクリート用細骨材として適用できるかどうかを明らかにすることを研究目的とする。この生火山灰は、第1章の前段で論じたように、都城市などに広範にわたって降灰しているので、その物性が採取地別に異なる可能性があるだけでなく、地域住民が回収したものは攪乱されゴミも混入した火山灰になっている可能性もある。また、その火山灰の酸性度が高いと、鉄筋コンクリート構造物を対象とするコンクリートに配合すると硬化後に鉄筋腐食に伴うひび割れが生じないとは断言できない以上、鉄筋コンクリート用細骨材への使用は避けるべきである。さらに、周辺農地の土壌の飛来・混入で生火山灰に有機不純物含有が多いと細骨材としては問題となる。このため、生火山灰の採取地による物性の違い、例えば生火山灰の物理的性質やモルタルに配合した場合の保水性、化学的性質を明らかにして細骨材として使用できるかを検討することが基本的に重要である。

ここではまず、生火山灰の採取地ごとにその物理的性質を、土木材料試験や火山灰を配合したモルタルの強さ試験などから明らかにする。次に、生火山灰 pH の分析は野菜の作付け対策として宮崎県営農支援課¹⁾が主に実施しただけで、コンクリート用細骨材として化学的に問題となる生火山灰 pH の時間経過に伴う変化や、地域住民らが回収した生火山灰に有機不純物が含まれているかなど化学的特性が明らかにされていなかった。このため生火山灰の化学的性質について各種試験や調査などから検討する必要がある。

2.2 新燃岳火山灰の物理的性質

2.2.1 火山灰の粒度と形状

1) 目的と方法

生火山灰をコンクリート用細骨材として使用する場合、その粒度と形状をまず把握し、土木学会の推奨する細骨材の粒度の標準範囲と比較する必要がある。

試料とする新燃岳の生火山灰は、2011年3月に回収したものや同年4月中旬に新燃岳噴火に伴う立ち入り規制が解除された地区および降灰の仮置場・堆積場で採取した。その採取地点は図-1に示す9箇所、採取火山灰の状況を地図上で火口からの直線距離と併せて表-1に示した。2011年3月に回収したものはNo.3とNo.8であり、これら以外は同年4

月中旬である。また、生火山灰の粒形を実体顕微鏡で観察・撮影し、粒度については骨材のふるい分け試験（JIS A 1102）をおこない、その粗粒率を求めた。

2) 結果および考察

写真-1 に採取地別の生火山灰を示した。降灰日の異なる No.3（高原町）を除き、No.7～No.9 は若干の形状の違いはあるが No.5 よりも粒度が小さく、No.6 は No.5 と同じ採取地であるが細粒のものを選択的に採取した関係で細かくなっている。また、生火山灰 9 種類の粒形では、No.3 以外のものは火山性ガスが抜けた孔隙や角張り、不規則なものまで種々認められた。しかし、No.3 は非常に微細な粉状で黒灰色を呈したためほかの火山灰と同一な性状ではなく、その成分が 1 月 26～27 日に都城市内に降灰したものと異なることが考えられ、これについては次項 2.3 で述べることにする。

生火山灰の粒度に関して、宮崎県営農支援課は、2011 年 1 月 26～27 日に宮崎県北諸県・

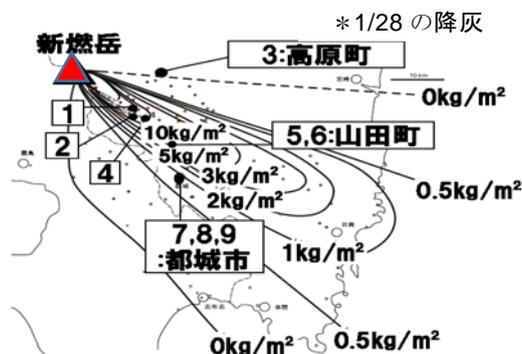


図-1 1/26-27 噴火の降灰堆積量と生火山灰の採取地 9 箇所（図中 No.は表-1 参照）

表-1 採取地別の生火山灰の状況と新燃岳火口からの直線距離

No.	地名	生火山灰の状況	火口からの距離 (km)
1	御池(みいけ)	御池の展望所の路面に散乱した降灰	5.0
2	青少年自然の家	入口の道路に流去されて堆積した灰	5.8
3	高原(たかばる)町*	狭野神社境内から清掃回収された灰	8.7
4	上馬渡(かみまわたり)	牛之脛(うしのすね)公民館前路上集積地	10.9
5	山田町(粗粒)	山田支所降灰仮置場の粗細粒灰	16.3**
6	山田町(細粒)	(大半が粗粒で、細粒は小盛部の頂上から採取)	
7	都城高専	校庭から集積・回収した火山灰	23.1
8	高木町(東霧島)	都城IC付近の駐車場に堆積した灰	24.5
9	都北町(住友ゴム)	工場屋根雨樋の灰をバキューム回収	25.2

* 高原～小林地区への 1/28 降灰は、ほかと異なり微粉で黒灰色が強かった

** 5と6は近い場所にあったので、火口からの直線距離は同一とした

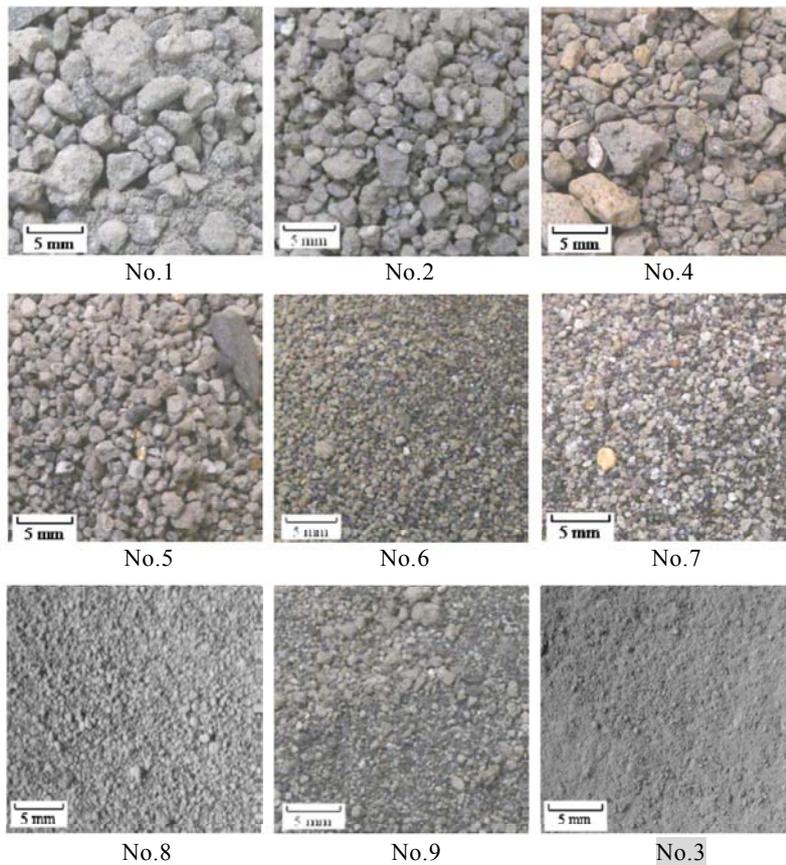


写真-1 採取地別の生火山灰の形状 (No.は表-1を参照)
 (右下 No.3(高原町)は 1/28 の降灰)

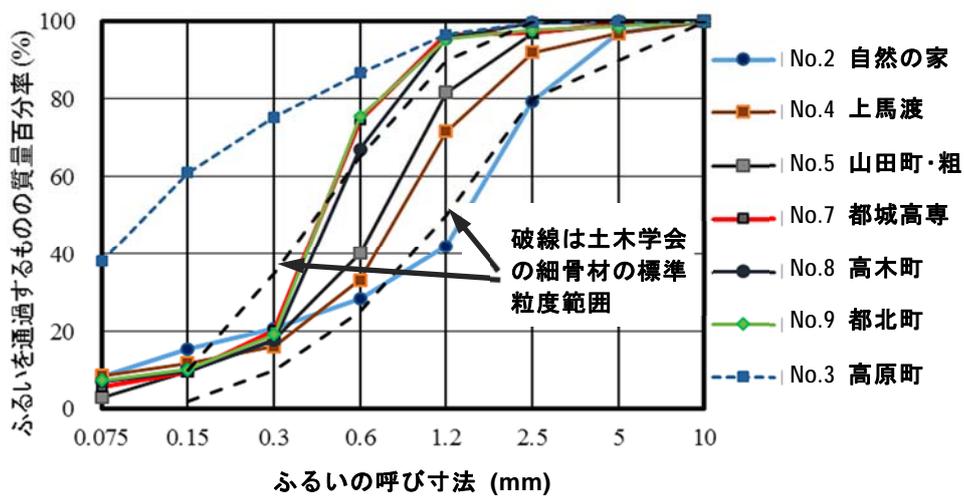


図-2 採取地別の新燃岳火山灰の粒度分布

南那珂地域（No.2（自然の家）の付近）への降灰は粒度が粗く，同年1月28日に西諸県・中部・児湯地域（高原町～小林市方面）に降下したものは細粒であり，火山灰の粒度に違いがあると報告している¹⁾。二つの降灰地域別にみれば確かに報告どおりといえるが，都城市内の8種類の生火山灰を比較すると，新燃岳火口から遠く離れるにつれて生火山灰の粒度が細くなることを写真-1から明らかに確認できる。

また，ふるい分け試験による生火山灰の粒度曲線を図-2に示す。土木学会の細骨材の標準粒度範囲におさまったものがNo.4（上馬渡）とNo.5（山田町・粗）であるが，No.2が粗め，No.7（都城高専）・No.8（高木町）・No.9（都北町）はそれよりも細かい方にまとまって分布した。しかし，No.3は極めて細かく，その標準粒度範囲からかなり外れていた。

2011年1月下旬の季節風の影響を受けて新燃岳火口から噴出した火山灰は南東方向へ降下し，この場合，噴煙の高度にもよるが粒径の小さなものは軽いために遠方に飛ばされたことが，図-1から容易に想定できる。このことは，図-3に示すとおり，火口から採取地までの直線距離と粗粒率との相関が高いことから明らかである。すなわち，No.7・No.8・No.9は近くにまとまっているので1点とみて地点数を4点とした統計処理から，火山灰の粗粒率は新燃岳火口から遠くなるほど有意に小さいことが判明した（ $P < 0.01$ ）。この図から，火山灰の降灰範囲を噴火当時の噴煙方向から考慮して，新燃岳火口から20km付近では粗粒率がおよそ2.3の火山灰が堆積しているものと推察される。

また，粒度分布だけをみれば，土木学会の細骨材の標準範囲の上限線に並んでいる粗めのNo.2と細かめのNo.8とを質量比1:1で混合すると，粗粒率は計算上2.63となり，細骨材の標準粒度範囲にほぼ入ることがわかる。生火山灰の粒度は粗粒から細粒まで幅のある分布を示しているが，適宜混合することによって土木学会の細骨材の標準粒度範囲に入る粒度に調整は可能である。この細粒・粗粒の混合に関しては，尾上²⁾も有効な粒度調整

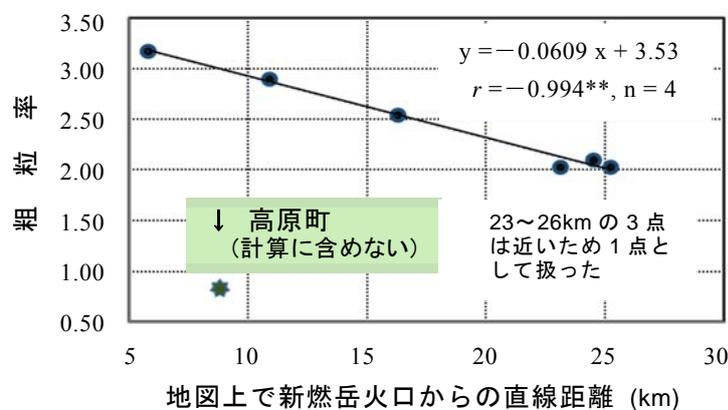


図-3 新燃岳火口からの直線距離と火山灰の粗粒率との関係

法であると述べている。次の項では粒度以外の生火山灰の物理的性質などを比較し、所要の細骨材条件を満足するか検討する必要がある。

2.2.2 火山灰の物理的性質

1) 目的と方法

粒度以外の生火山灰の物理的性質を測定し、コンクリート用細骨材としての利用可能性を検討する必要がある。密度および吸水率、単位容積質量および実積率、ならびに、微粒分量の各試験は順に JIS A 1109, JIS A 1104, JIS A 1103 に準じておこなった。なお、微細な生火山灰の密度および吸水率試験では、その表面乾燥飽水（以降、表乾という）状態の見極めは容易ではない。竹内ら³⁾の提案したように JIS 試験のコーンや他の用具による表乾判定試験方法を検討した方が望ましいかもしれない。ただ、JIS A 1109 の試験では、密度が JIS 規格の精度内に入っても吸水率がばらついて JIS 規格の精度内に入らず、しかも細かい火山灰ほどそのバラツキが大きく生じる場合がある。ここでは JIS の方法に準拠した測定を 3 回以上繰り返し、密度と吸水率が JIS 規格の精度内にいずれも入った段階で、その平均値を求めることにした。

2) 結果および考察

表-2 に生火山灰の物理的性質の一覧を示す。生火山灰の表乾密度と吸水率には負の高い相関 ($r = -0.822$, $P < 0.05$) があり、密度が高いほど吸水率が有意に小さくなる関係を示している。ただ、コンクリート用細骨材では、密度が $2.50 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ 、吸水率が $1 \sim 3\%$ のものが一般的に多いが、生火山灰はこの範囲より外れた値を示すものが多かった。

再生コンクリートを対象とした再生細骨材 L では吸水率が 13.0% （再生骨材 L : JIS A 5023）、再生細骨材 M では絶乾密度が 2.2 g/cm^3 以上、吸水率が 7.0% 以下（同 M : JIS A 5022）、また再生細骨材 H では絶乾密度が 2.5 g/cm^3 以上、吸水率が 3.5% 以下（同 H : JIS A

表-2 生火山灰の物理的性質の一覧

採取地	粗粒率	密度 (g/cm^3)		吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	微粒分量 (%)	細骨材利用性
		表乾	絶乾					
自然の家	3.17	2.16	2.08	5.78	1.36	65.7	11.5	△
高原町	0.81	2.57	2.52	1.77	1.66	65.5	34.6	×
上馬渡	2.90	2.08	1.95	6.97	1.32	68.2	1.7	○
山田町・粗	2.54	2.15	2.01	6.75	1.15	57.4	1.0	○
都城高専	2.03	2.27	2.19	3.84	1.23	56.1	3.0	○
高木町	2.10	2.32	2.21	5.07	1.27	57.6	8.1	△
都北町	2.03	2.29	2.20	3.97	1.33	60.3	6.7	△

注) 塗りつぶし箇所は良好な細骨材条件と思われるもの

5021) である。この中で比較的良好な再生細骨材 H の基準に適合しているのは No.3 の火山灰であったが、微粒分量が 34.6% と多すぎる。望ましい微粒分量は、無筋および鉄筋コンクリートではすり減りを受ける場合に最大値が 3.0%、それ以外は 5.0% であるため、これを満足するのは No.4、No.5 および No.7 の火山灰であった。

表-2 の右端欄の細骨材利用性に○をつけたのは、これら 3 種類の生火山灰における絶乾密度が約 2.0g/cm^3 以上、吸水率が 7.0% 以下であるので、細骨材として利用する場合、再生細骨材 M の基準にやや近いものとして評価できると考えたからである。例えば、これらは高い吸水性と保水機能を有する保水性 ILB や緑化促進・環境修復系の積みブロック（面モルタル）などに適用できると考えられる。もちろん、生火山灰 100% をこのようなプレキャスト無筋コンクリート製品に配合するものではなく、所要の強度や機能を満足する範囲内で、堆積火山灰の減容を促進するための最大使用割合を明確にする必要がある。また、物理的性質で JIS 規格から外れる場合は砕砂など良質な細骨材の一部に置換することも、生火山灰の活用策として考えるべきである。

2.2.3 火山灰を配合したモルタルの強さと保水性

1) 目的と方法

前節で新燃岳火山灰の中で利用可能な 3 種類の生火山灰を配合したモルタルの強さを、標準砂を用いたモルタルと比較した。また、生火山灰の有効活用に資するデータを得るために、モルタルの保水性試験をおこない検討を加えた。

モルタル供試体の作製はセメントの物理試験方法に準じたが、テーブルバイブレータを持ち合わせていなかったため、JIS R 5201 : 1992 の配合、すなわち水セメント比を 65%、セメント : 砂（表-3 に示す標準砂と 3 種類の生火山灰）の質量比を 1 : 2 とした。また、結合材は表-4 に示す高炉セメント B 種、標準砂はセメント協会のものを用いた。生火山灰は、表-3 に示すとおり、いずれも吸水率が高いので、砂の乾湿状態がモルタルに及ぼす影響を把握するため、砂を絶乾状態と表乾状態の 2 区分に調整して実験に用いた。

表-3 モルタルに使用した標準砂と生火山灰 3 種類の物理的性質

記号	砂の種類	表乾密度 (g/cm^3)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率	単位容積 質量 (kg/L)	実績率 (%)
A	標準砂	2.61	2.60	0.41	2.43	1.77	68.0
B	上馬渡	2.08	1.95	6.97	2.90	1.32	68.2
C	山田町・粗	2.15	2.01	6.75	2.54	1.15	57.4
D	都城高専	2.27	2.19	3.84	2.03	1.23	56.1

*標準砂の各数値は、セメント協会の品質表示例の値でなく実測値である

さらに、表-5 に、モルタルの配合と、混練後のフローおよび脱型直後の供試体の単位容積質量を示した。モルタルは材料をモルタルミキサー（篠原製作所，5L）に入れて練り混ぜたのち、フロー試験によりフロー値を求めた。同様に練り混ぜたモルタルを三連型枠に高さの半分の下層に入れ、その下層モルタルはフロー値に応じた突き数で突き棒を用いて突き、同様に入れた上層モルタルも同様の突き数で突いてから、上面をセメントナイフでやや平らに盛り上げてブリーディングがほぼ終わるのを待ち、ストレートエッジで平滑に成形しラップをかけて水分蒸発を防いだ。翌日、モルタルの硬化を確認してから慎重に脱型し記号を記載し、供試体の質量と寸法を測定した。その後、 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ の水中で材齢 28 日まで標準養生した。各配合の供試体 3 本に対して曲げ強さ試験を、次にその曲げ折れた供試体切片 3 個ずつに対して圧縮強さ試験をおこなった。

また、上記の圧縮試験後の残りの供試体切片 3 個ずつを 24 時間吸水させた後、表面の水膜を拭い去って質量を測定し、恒温恒湿室（約 20°C ，約 60%）の床に水平に敷いたコンパネの上に直径 5mm の丸棒 2 本を平行に止め、その上に切片を静置した。その切片の質量を 3，7，14，21，28 日目に測定し、4 種類のモルタル供試体の保水性を検討した。

表-4 結合材*の試験成績

結合材	区分	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	凝結試験 (h-min)		安定性	圧縮強さ(N/mm^2)		
				始発	終結		3日	7日	28日
高炉セメントB種 JIS R 5211-1997	測定値	3.04	3,790	3-19	5-12	良	23.2	39.2	63.0
	JIS値	-	3,000以上	60分以上10時間以下		良	10.0以上	17.5以上	42.5以上

* 太平洋セメント(株)セメント成績表(2011年6月度)

表-5 モルタルの配合*とフロー・単位容積質量

砂の 乾湿 状態	砂(S)の 種類	記号	水セメント 比 W/C (%)	C:S 質量 比	水 W (g)	セメン トC (g)	砂 S (g)	モルタル フロー (mm)	単位容積 質量 (kg/m^3)
絶乾	標準砂	A						227	2056±3
	上馬渡	B	65	1:2	338	520	1040	182	1782±11
	山田町・粗	C						145	1895±5
	都城高専	D						158	1895±4
表乾	標準砂	WA						231	2072±6
	上馬渡	WB	65	1:2	338	520	1040	224	1864±5
	山田町・粗	WC						182	1910±7
	都城高専	WD						172	1910±6

* 旧JIS:セメントの物理試験方法 (JIS R 5201: 1992)

2) 結果および考察

表-5 に示すモルタルのフローを砂の乾湿状態別にみると、表乾状態の生火山灰モルタルのフローは、事前に吸水させた状態であるために絶乾状態のものよりも大きくなった。標準砂 (A) のフローは、吸水率が 0.41% と小さい A であるために、絶乾から表乾にしたことで 227mm から 231mm へとわずかに大きくなった。一方、絶乾の山田町・粗 (C) と都城高専 (D) のモルタルは混練中に各々の生火山灰が水を吸収する過程で流動性が悪くなり、また粗粒率が小さく細かい粒度であることもモルタルのフローを小さくさせる要因となり、総じて硬めのモルタルになった。C と D の吸水率の違いは、生火山灰の絶乾状態を混練したモルタルのフローの違いに顕著に反映し、吸水率が C > D であったため、モルタルのフローは絶乾状態では D > C となった。

表-6 に材齢 28 日のモルタルの曲げ・圧縮強さ、および、両者の比を示す。曲げ強さの範囲は絶乾状態では 6.1~8.3 N/mm²、表乾状態では 5.6~7.5 N/mm² であり、上馬渡 (B) が A より低かった。圧縮強さの範囲は絶乾状態で 31.2~46.5 N/mm²、表乾状態で 31.0~37.9 N/mm² であり、B が A より低く、曲げ強さと同様な傾向となった。総じて、圧縮強さは絶乾状態の方が表乾状態のものより高めに発現した。これは、絶乾状態の砂が配合の水を混練中に吸水するが、その吸水が不十分であると水中養生の間にも吸水し、モルタル中ではペーストの実質的な水セメント比が相対的にやや小さくなって硬化が進み、圧縮強さを高めたものと考えられる。

また、表-5 に示したモルタルの単位容積質量は、C と D は絶乾・表乾の各状態とも同じ値であるがどちらも密度がもともと小さかったことが影響して、標準砂よりも小さく発現した。ここで曲げ強さと圧縮強さとの相関関係を表-5 の表値で調べると、高い相関 ($r = 0.856^{**}$) が認められ、曲げ強さと圧縮強さの比は 1/4.8~1/6.0 となった。この強さの比は、

表-6 モルタルの曲げ・圧縮強さと両者の比

砂の乾湿状態	砂の種類	記号	曲げ強さ (N/mm ²)	圧縮強さ (N/mm ²)	曲げ: 圧縮比
絶乾	標準砂	A	7.2 ± 0.3 ^a	36.2 ± 2.2 ^a	1/5.0
	上馬渡	B	6.1 ± 0.4 ^b	31.2 ± 2.3 ^b	1/5.1
	山田町・粗	C	8.3 ± 0.3 ^c	45.6 ± 2.4 ^c	1/5.5
	都城高専	D	7.8 ± 0.3 ^c	46.5 ± 2.5 ^c	1/6.0
表乾	標準砂	WA	7.5 ± 0.3 ^a	36.0 ± 2.5 ^a	1/4.8
	上馬渡	WB	5.6 ± 0.3 ^b	31.0 ± 2.6 ^b	1/5.5
	山田町・粗	WC	7.5 ± 0.3 ^a	37.9 ± 2.2 ^a	1/5.5
	都城高専	WD	7.5 ± 0.3 ^a	36.5 ± 2.4 ^a	1/4.9

注) 表中、絶乾・表乾別に、異なる英文字間の値に5%水準の有意差あり

コンクリートの一般的な比である1/5～1/8よりも、わずかに大きく発現した。さらに、火山灰は微弱なポズラン活性がある⁴⁾といわれているが、材齢28日の強さではポズラン活性の効果があつたかは判断できなかった。今後、火山灰混入のモルタルやコンクリートの長期強度を求めた上で判断する必要がある。

さらに、図-4にモルタル供試体の質量変化を示す。全ての供試体は事前に24時間吸水させたものであり、恒温恒湿室内に静置したモルタル供試体の質量はその後の緩やかな乾燥によって変化が生ずる。保水性とはまず吸水があり、その後のモルタル内部の水分の放出が緩やかにおこなわれながら水分を保持する性質といえるので、質量変化率が小さいことは、保水性が良いとは必ずしもいえないが、モルタル内部の水分の放出が少なく水分保持力があるとみなせるから、保水性が高いといえる。結果として、**A**と**WA**はほぼ同様の緩やかな質量変化を示したが、両者の吸水率が標準砂のため小さく、モルタル単位容積質量が標準砂の配合のためもっとも大きく発現したので、モルタル内部の水分量が元々少なく時間経過に伴う内部水分の放出が少なく、緩やかな質量減少につながったと考えられ、その保水性は特段高いとはいえなかった。また、**A**・**WA**以外の質量減少の順は、絶乾状態では**C**<**D**<**B**、表乾状態では**WD**<**WC**<**WB**であった。生火山灰**B**、**C**および**D**の3種類の中でも**B**や**WB**は質量減少が大きく保水性が低かったが、これは密度が小さく吸水率が大きい物理的性質に起因すると考えられる。写真-1において**B**・**WB**はやや大きな粒度であったが内部空隙の多さから約7%の高い吸水率が影響し、モルタルの性状は表乾状態の方が絶乾状態よりフローおよび単位容積質量を大きくしたものの、小さい保水性を示した。

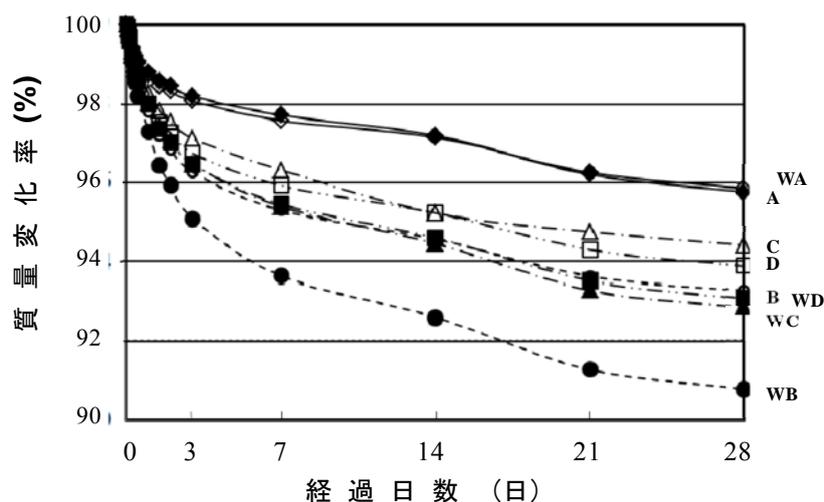


図-4 モルタル供試体の質量変化
(図中の英記号は表-6を参照)

以上のことから、モルタルの強さや保水性が比較的良好な生火山灰は **C** であるといえる。この採取地付近に堆積した生火山灰は、保水機能を有するコンクリートを製造する際の細骨材により適しているものと考えられる。また、絶乾状態で生火山灰をコンクリートに配合すると、火山灰が混練中に配合水を吸水し流動性を抑制するので、生火山灰を表乾状態に調整してからコンクリートに配合する必要がある。

2.3 新燃岳火山灰の化学的性質

2.3.1 火山灰 pH

1) 目的と方法

土懸濁液の pH とは、土粒子または岩石粉砕物を機械的に懸濁させた水の中に存在する水素イオンのモル濃度の逆数を常用対数で表したものをいい、水素イオン濃度指数とも呼ばれ、中性の pH 7 より小さい場合は酸性である。火山灰 pH は火山噴出時の SO₂ など酸性ガスの濃度に影響されるため、生火山灰をコンクリート用細骨材として使用する場合、その pH を把握してコンクリート性状に影響する酸性の度合いを判断する必要がある。

土壌の環境条件や土性などの測定項目にある pH は、一般に「土懸濁液の pH 測定法：JGS 0211」に基づいて測定される。コンクリート用細骨材の pH の測定方法を規定したものは特にないので、土壌 pH の分析では常法であるこの方法による。ここでは、ガラス電極による pH メーター（堀場製作所、F-55）で火山灰 pH を測定した。まず、あらかじめ中性リン酸塩（pH 6.86）とフタル酸塩（同 4.01）でメーターの pH を校正してから用いた。また、質量比で火山灰（乾物）：蒸留水＝1：5 でビーカーに入れ、マグネットスターラーで攪拌後 5 分以上懸濁させ、30 分以上～3 時間以内静置したのち、その上澄み液を試料液とした。その試料液に pH メーターの電極を浸漬し、指示値が安定した後の pH を読み取った。なお、蒸留水は市販のもの（和光純薬工業、JIS K 0577 用、pH 約 6.60：25℃）を使用した。

2011 年 5 月 22 日に pH を測定した試料①は、先述の物理的性質の土木材料試験をおこなった後、市販の土嚢袋に入れたまま約 1 か月間、試験室のコンクリート床に保管していた火山灰である。その後、選り分けた試料②はパッチ付きビニール袋内で試験室の棚に 1 年 1 か月保管したものである。pH は、試料①と②で各々 3 回測定して平均を求め、①から②への変化（pH の差：②－①）を検討した。

2) 結果および考察

採取地別の火山灰 pH について、採取後まもなく測定した試料①と、1 年 1 か月経過後

の試料②，および，①から②へ変化した両者の差を表-7に示す．試料①における pH の範囲は 4.70～6.63，その平均が 5.63 ± 0.67 で，いずれも酸性域にあった．高原町のもは 4.70 で最も強い酸性を呈したが，この火山灰は 2011 年 1 月 28 日に降下したものであり，同年 1 月 26～27 日に降下した他のものと同一には比較できない．試料②では，pH は 4.60～7.00 の範囲，その平均が 6.00 ± 0.69 で弱酸性～中性 (7.0) の域にあった．①と②の pH の差は，火山灰中のガスがビニール袋から多少の漏れがあり，またビニール袋内の空気などとの化合による変化とみられ，pH が平均で 0.37 だけ中性側に变化した．このように微少ではあるが，火山灰はビニール袋に密閉し室温で約 1 年間保管しただけでも酸性から中性側に变化することが明らかになった．

宮崎県営農支援課は，「新燃岳噴火に伴う春夏作野菜の作付けに関する指針」（2011 年 2 月 24 日発表）の中で，同年 1 月 26 日に降下した都城市火山灰の pH が 5～6（弱酸性），同年 1 月 28 日に降下した高原町（小林市～野尻町）火山灰の pH が硫黄や硫酸，塩基等の成分含量が高いため 4～5（強酸性）と報告している¹⁾．また，上田ら⁵⁾による高原町内と都城市山田町・三股町に降下した火山灰の化学分析結果を表-8に示すが，火山灰 pH は前者が平均 5.9，後者が平均 4.5 となり，後者の方ほど強酸性を呈した．その原因は，表-8 の水溶性成分の中の SO_4^{2-} （硫酸イオン）が，前者が 29～44 mg/100g であるのに対し後者が 339～433 mg/100g で，高原町の降灰はほかの地域の約 10 倍も多い SO_4^{2-} を有するため

表-7 火山灰 pH の変化

pH測定 区分	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	平均 ± SD
	御池	自然の家	高原	上馬渡	山田町粗	山田町細	都城高専	高木町	都北町	
pH①	5.70	6.00	4.70	6.60	4.90	6.63	4.90	5.63	5.60	5.63 ± 0.67
pH②	6.40	6.10	4.60	6.10	7.00	6.70	5.20	6.00	5.90	6.00 ± 0.69
変化 (②-①)	0.70	0.10	-0.10	-0.50	2.10	0.07	0.30	0.37	0.30	0.37 ± 0.69

注) 2011年4月16日にほとんどを採取し、①: 同年5月22日、②: 2012年6月11日に測定

表-8 火山灰の化学的特性⁵⁾*

降下日 (2011年)	採取地点	pH (水)	EC** (dS/m)	水溶性成分 (mg/100g)				
				CaO	MgO	K ₂ O	SO ₄	Cl
1月26-27日	都城市山田町	5.8	0.2	16	0	1	29	3
	三股町樺山	5.9	0.3	19	1	1	44	3
1月28日	高原町狭野	4.3	2.0	122	17	8	339	144
	高原町西麓	4.7	1.9	151	16	9	433	69

* 文献5)の表1を筆者が一部加工， ** EC: 電気伝導度

である。また、宮崎県営農支援課が報告¹⁾したように、硫黄や硫酸、塩基等の成分含量が高いことも、黒灰色を呈する要因と考えられる。

火山灰粒の内部に微細な孔隙があり、これらに噴火の際にガスが閉じこめられ、降下中に周囲のガス類と、あるいは、堆積後も周辺のガスや雨水と化学反応を繰り返したはずである。産業技術総合研究所によると、2011年3月15日に無人飛行機に搭載した Multi-GAS センサーで噴煙組成を観測（飛行高度 1,700m で風下約 3km から新燃岳火口直上までを複数往復測定）し、二酸化硫黄 SO₂ ガス濃度が最大 0.7 ppm 程度、硫化水素 H₂S ガス濃度が最大 0.07 ppm 程度（組成（モル比）：SO₂/H₂S = 10 から SO₂ ガス濃度の 1/10 となるため）と検出した⁶⁾。pH 試験の際に、火山灰中のガス体の溶出がその pH に強く影響している。

また、噴火火口からの生火山灰採取地までの水平距離と各々の pH との関係は、無相関（高原町を除いた相関係数が -0.381^{NS}）となり、火口に近いほど火山灰 pH が小さく酸性度が強くなるとはいえなかった。火山灰 pH にバラツキが生じた理由には、噴火当時のガス濃度の影響のほか、地上に降下し堆積した後に降雨などとの接触や流出に伴う洗われ方、あるいは、集積・堆積地において降灰の表面が外気に晒されている期間が長いことの影響なども挙げられる。

表-1に採取地別の生火山灰の状況を記載したが、都北町の火山灰は工場屋根の雨樋に溜まったものをバキュームで回収したものであり、その pH は 5.63 と中間的な値であった。このように屋根の雨樋への堆積状況では、火山灰が降灰後に降雨と接触し酸性度が薄まり外気に晒される過程で、その酸性度は徐々に薄れていったものと考えられる。降灰・堆積中の火山灰 pH を正確に捉えるには、堆積場所でも乱されていない地点において採取した火山灰中のガス濃度を測定する必要がある。しかしながら、これは時間の経過とともに堆積周辺環境が変わるので実際のところ難しい。

2.3.2 堆積火山灰中の SO₂ ガス濃度と火山灰 pH の変化

1) 目的と方法

火山灰の降下した農地の土壌は酸性を示したと報告された¹⁾。火山噴火の際に噴出されるガスには SO₂ や H₂S が主体であり、SO₂ は新燃岳噴火初期の 2011 年 1 月頃、1 日当たり 1.1 万～1.2 万トンの放出があったといわれる⁷⁾。SO₂ はそのままでも降雨（水 H₂O）と反応し、SO₂+H₂O→H₂SO₃ の化学式から亜硫酸となり、火口付近では酸性雨（pH=5.6 以下）が降る場合がある。火山灰粒の微細な孔隙に封じ込められたり残留した SO₂ は火口から噴出した直後に空気中の酸素 O₂ と化合して SO₃ となり、地上に降下してから雨水と反応して強酸性の亜硫酸 H₂SO₃ や硫酸 H₂SO₄ に変化する。こうした酸性ガスや発生する強酸が

農作物を傷めてしまう直接的原因となるのは当然のことである。生火山灰に酸性ガスが最少でも残留する場合は鉄筋コンクリート用細骨材に適用できるかを検討する必要がある。

火山灰が堆積している場合にその pH がどう変化するかを検討するため、新燃岳登山口の高千穂河原における火山灰の堆積層内に残留する SO₂ ガス濃度を、噴火 1 年 7 か月後の 2012 年 8 月 16 日に新燃岳火口から直線距離で南東約 3km に位置する高千穂河原のビジターセンターの北東側 10m, 20m, 40m 地点で測定した。ガス濃度は、図-5 に示すように、堆積火山灰の層（厚さ 7~8cm）の表面から下方へ約 1cm, 3.5cm, 6cm の深さで、各層それぞれ 3 ケ所において、ガス検知器と SO₂ ガス検知管（ガステック, No.5Lb, 測定範囲 0.05~10.0ppm）を用いて測定した。ここは新燃岳火口に近いことから入山規制の解除まで時間が長くかかった。ガス濃度は、堆積火山灰中のガス類が放出あるいは雨水へ溶出したためと思われるが、極めて低かった。そこで検知管に変色が生じるまで、ガス検知器で 6~10 回の吸引の後にその変色域のガス濃度を読み取り、それを吸引回数で割って 1 回当たりのガス濃度とした。

2) 結果および考察

図-5 に SO₂ ガス濃度と堆積火山灰の含水率の関係を示す。SO₂ ガス濃度と含水率との間に相関性 ($r=0.126$ NS) はなかった。また、SO₂ ガス濃度を図の中において楕円などで層別にくくった場合、上層の平均が約 0.045ppm, 中層の平均が約 0.03ppm, 下層の平均が 0.02ppm となるため、有意な差こそないものの SO₂ ガス濃度は表層に近いほど高い傾向が若干認められた。

SO₂ ガスが水に溶けやすい性質から、堆積火山灰が湿潤であるほど火山灰中のガスの溶出や排出が促進されると考えたが、SO₂ ガス濃度と含水率との間には傾向は認められなかった。また、厚さ 7~8cm の堆積火山灰の比較的薄い層であり、堆積火山灰中の SO₂ ガスの動向を経時的に把握するのは困難であるといえるが、その薄い堆積層の中でも、上述の

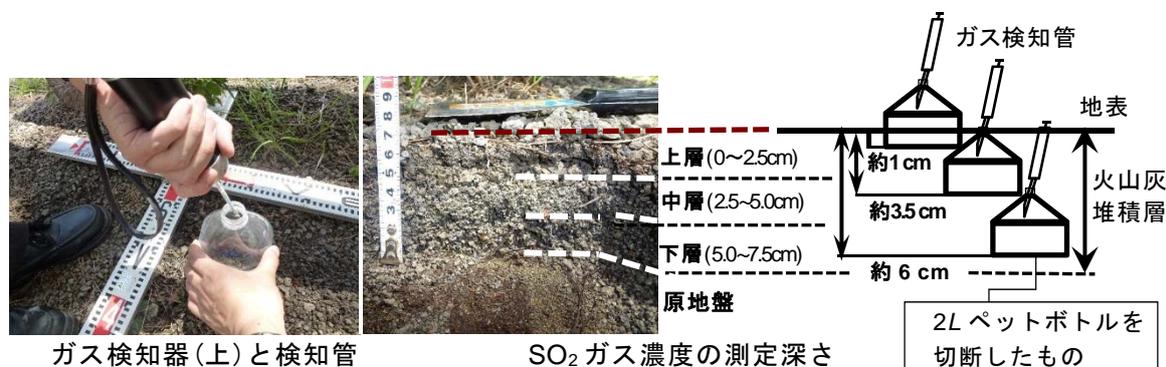


図-5 堆積火山灰層における SO₂ ガス濃度の測定方法

傾向は、SO₂ ガスの表層への上昇で上層のガス濃度がやや高くなり、一方、堆積層の下層ほど SO₂ ガスが降雨に溶出し排出されてガス濃度がやや低く発現したことを示唆するものと考えられる。

したがって、火山灰 pH は降灰当初、火山性ガスの影響により酸性を呈するが、その火山灰が堆積してからの時間経過の中で、降雨に伴って水に溶けやすい SO₂ ガスが溶出・排出されて、徐々に酸性度が薄まる。しかしながら、実際には降下後の堆積火山灰の処理が採取地で異なったり降雨との接触から酸性ガスの溶出も進み、火山灰 pH が変動の大きな値を示しつつも酸性域から中性近くに変わる傾向を示した。ちなみに、2014 年 8 月中旬に同じ地点で測定した SO₂ ガス濃度は検知できず、採取した火山灰 pH は中性の 7.0 に近い値を示した。このように噴火から約 3 年半も経過すると、堆積火山灰は降灰後の時間経過とともに中性近くまで変化し、良質な細骨材と併用してコンクリート用細骨材に使用してよいことが確認された。ただ、堆積の時間経過が浅い生火山灰では、灰粒中に残留する SO₂ ガスがコンクリート内の鉄筋を腐食させないとはいえないので、無筋コンクリートへの適用が望ましい。

2.3.3 火山灰への有機不純物の混入とその対策

1) 目的と方法

道路上の降灰には周辺農地からの土壌の混入があり、降灰の回収時に種々のゴミを含む場合がある。生火山灰を細骨材としてコンクリートに用いる場合、有機不純物試験 (JIS A 1105) ⁸⁾ によって無害であることを確認する必要がある。この試験方法は、気乾状態の試料 125mL を無色透明の広口ビンに入れ、3%水酸化ナトリウム溶液を 200mL まで加えて十

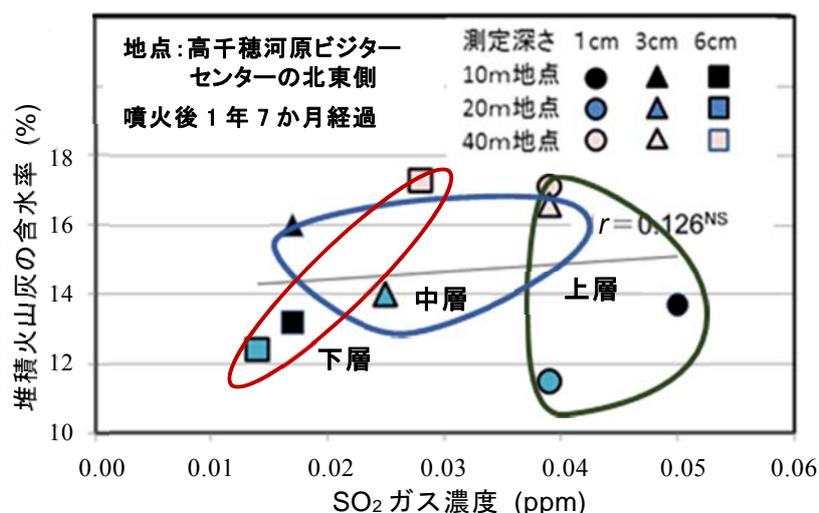


図-5 高千穂河原における堆積火山灰の SO₂ ガス濃度と含水率との関係

分に攪拌し、24 時間静置後の上澄み液の色が標準色液よりも淡い場合を合格と判断するものである。

この標準色液は、10%アルコール溶液で 2.5mL の 2%タンニン酸溶液をつくり、それを 3%水酸化ナトリウム溶液 97.5mL に加えたものであり、写真-2 の左側に示す色調となる。この過程で、標準色液よりも色調が濃くなり有機不純物を有害量含む恐れがある場合は、有機不純物を含む細骨材のモルタルの圧縮強度による試験方法（JIS A 1142）に準じて、その細骨材を用いたモルタル供試体の圧縮強さを確認して（例えば、有機不純物を含まないものと比較し 90%以上の圧縮強度が得られるなど）問題がないと判定されれば使用することも可能である。火山灰の溶液色が標準色液よりも濃い場合は、この方法で確認する必要がある。

実際には、降灰の回収段階で周辺農地の土壌が風で飛来して堆積火山灰にまぎれこみ有機物を含む場合も容易に考えられる。その判定が微妙な場合もあるので、有機不純物が混合していると思われる火山灰を無機化できないか強熱減量試験で検討した。これには、土の強熱減量試験（JIS A 1226）⁹⁾ を、有機不純物の無機化に高温焼成が容易なため応用した。火山灰は絶乾状態で 50.0g とし、強熱前に 2mm ふるいを通過するように全量を粉碎したものを耐熱皿に入れ、それを電気マッフル炉（ヤマト科学, FO-810, 使用温度範囲 100～1,150℃）の炉内で、強熱温度 750℃を基本に高温焼成マチュリティを 750℃×1 時間＝750℃・hr, これを 2 時間, 3 時間, 4 時間で設計したので、マチュリティは順に 750℃・hr, 1,500℃・hr, 2,250℃・hr および 3,000℃・hr の 4 つで比較した。その高温焼成後に、それぞれ有機不純物試験によって火山灰の有機不純物が無機化されたかどうかを判断した。

2) 結果および考察

表-1 の採取地別火山灰に対する有機不純物試験の結果は、写真-2 に示した高原町火山灰以外は標準色液とほぼ同等レベルかそれより薄い色調で問題はなかった。高原町のものには、ふるい分け試験の際に植物や枝葉の枯れた細かな有機物が混入し、また、SO₄²⁻（表

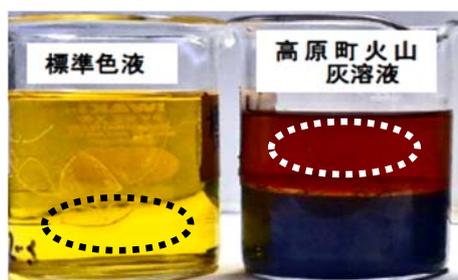


写真-2 有機不純物試験における標準色液（左）と高原町火山灰の攪拌液の上澄み液（右）

-8, 硫酸イオン) などによる黒灰色を呈する火山灰も混じり, 攪拌液の上澄み液は写真-2 に示すとおり濃い褐色となったので, 明らかに有機不純物が含まれていると判断され, このままでは細骨材として使用できない。

また, この降灰を段階的に高温焼成する強熱減量試験を試みたところ, 写真-3 に示す結果となり, マチュリティ 3,000°C・hr まで実施するまでもなく, 最小の 750°C・hr で無害化できた。これは有機不純物混入の火山灰が高温で焼成されると, 有機不純物の灰化と含有成分の気化などにより無害化されたためである。さらに強熱温度 750°C を基本に本実験をおこなったが, 750°C 以下でも無害化できる可能性があると思われるので, 今後その確認が必要であろう。

このような有機不純物を含む火山灰を高温焼成によって無害化する方法は, 確かに有効な方法の一つではあるが, 大量の堆積火山灰を処理する場合には高温焼成用のガスや電力の熱源費がかさみ非現実的である。今後, 火山噴火地域において地域住民の協力を得られるならば, 有機物やゴミができるだけ混ざっていない火山灰を回収してもらい, 分別回収した資源材として扱うことが望ましいと思われる。

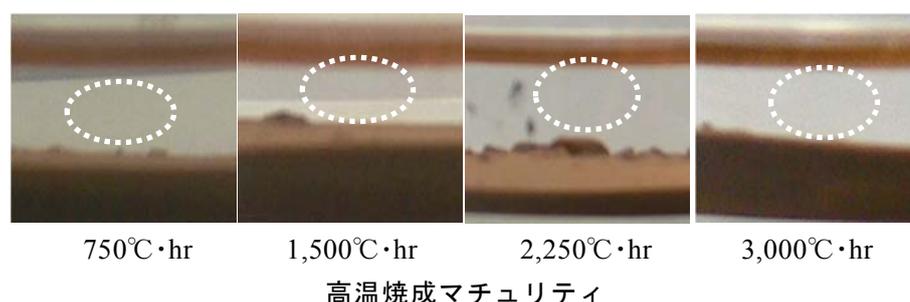


写真-3 強熱減量試験による有機物混入灰の無害化

2.4 まとめと課題

新燃岳火山灰のコンクリート用細骨材への適用性について, 採取地別の生火山灰の物理的・化学的な試験などから生火山灰の物性を評価した結果を, 以下にまとめた。

- (1) 採取地別の生火山灰の粗粒率は 2.03~3.10 の範囲にあったが, 土木学会の細骨材の標準粒度範囲に入るものは上馬渡と山田町(粗)の2つの火山灰であった。これら粒度分布の良い火山灰の地理的範囲は, 降灰時の風向に配慮して新燃岳火口から 15~20km に堆積した火山灰であると推察された。
- (2) 採取地別の生火山灰の密度・吸水率, 微粒分量などを比較したが, 細骨材の JIS 規格を満

足する火山灰はなかった。上馬渡・山田町（粗）の火山灰は吸水率が 6.8~7.0%と高い特徴があり、山田町（粗）の火山灰モルタルの強さは表乾状態で標準砂と大差なく、保水性では標準砂より劣るが上馬渡より良好であった。新燃岳火山灰の高い吸水特性を利用した保水性コンクリート製品の開発の可能性が示唆された。ただ、コンクリート配合においては表乾状態に調整して使用すべきである。

- (3) 化学的性質として火山灰 pH は、採取後まもない段階で 4.70~6.63、これがビニール袋で 1 年間少々の保管後に 4.60~7.00 と酸性から中性まで変化した。また、火口から 3 km 地点の火山灰堆積層（7~8cm 厚）における SO₂ ガス濃度は、噴火後 1 年 7 か月経過で下層が約 0.02ppm、上層が約 0.045 ppm であったものが、3 年半経過した段階で全く検知できなかった。火山灰 pH は降灰当初の酸性状態が時間経過で中性近くに変化するため、良質細骨材の一部に生火山灰を置換できると考えられるが、灰粒内に微少でも酸性ガスの残留が懸念されて鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食を招かないとはいえない以上、無筋コンクリート用細骨材への適用が妥当である。
- (4) 有害量の有機不純物を含む火山灰は高原町のものだけであり、これに対し強熱減量試験（750°C・hr）で無害化できた。ただ、高温焼成に必要な熱源費がかさむため現実的ではない。地域住民の協力を得て、有機物やゴミなどをできるだけ含まない火山灰を分別回収し、資源材として扱うことが望ましい。

以上のように、生火山灰は、堆積した状態で降雨と接触し火山灰中に内在していた酸性ガスが溶出・排出することと、生火山灰をビニール袋に 1 年少々保管した場合でも、酸性域から中性に近い域まで変化することが明らかとなった。しかし、火山灰中の酸性ガスが完全に抜けているかの検証に時間や経費を要するだけでなく、それが迅速に確認できない以上、鉄筋コンクリート用細骨材への適用は避けるべきである。このため生火山灰（堆積火山灰）は、噴火・降下後の時間経過に関わらず、無筋コンクリートへの適用が無難である。また、物理的性質の観点から、粒度的に土木学会の細骨材の標準粒度範囲に入るものもあるので、高吸水性の特徴を活かす方向で生火山灰の有効活用を考えるべきである。この場合、生火山灰を 100%用いるのではなく良質な細骨材の一部に適切な割合で置換することが現実的である。

第 3 章以降では、こうした生火山灰の高吸水性を活かし保水機能を有するプレキャスト無筋コンクリート製品の開発を検討する。この場合、製品の設置場所にもよるが、保水性から製品表面へコケの付着が促進される環境製品も開発できるようになる。さらに、地域的に噴火が続くような場合は、堆積火山灰の減容を一層促進する観点から無筋コンクリ

ート製品の JIS 規格を満足する配合条件を試験的に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 宮崎県営農支援課：新燃岳噴火に伴う春夏作野菜の作付けに関する指針，入手先<<http://www.pref.miyazaki.lg.jp/parts/000154701.pdf>>（参照 2012.8.16），2011
- 2) 尾上幸造：新燃岳火山灰の粒度分布について—新燃岳火山灰の有効活用に関する私案 (1) —，宮崎大学学術情報リポジトリ，入手先<<http://hdl.handle.net/10458/3238>>（参照 2011.8.24），2011
- 3) 竹内一真・武若耕司・奥地栄祐・山口明伸：細骨材の表乾判定試験方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.77-82，2003
- 4) 尾上幸造・坂井義彰・福田浩一・中澤隆雄：新燃岳火山灰を混入したセメントモルタルの強度特性，平成23年度土木学会西部支部研究発表会講演要旨集，pp.823-824，2012
- 5) 上田重英・甲斐憲郎・飯田久雄・福田武美・赤木康：新燃岳の火山活動に伴う火山灰の性状と土壤に及ぼす影響，九州農業研究発表会第74回発表要旨集，p.63，2011
- 6) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：新燃岳噴煙組成(速報)，第119回火山噴火予知連絡会資料，入手先<<https://www.gsj.jp/hazards/volcano/kazan-bukai/yochiren/119-2.pdf>>（参照 2011.4.1），2011
- 7) 福岡管区気象台火山監視・情報センター：霧島山の火山活動解説資料，入手先<http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_vact_doc/fukuoka/11m01/505_11m01.pdf>（参照 2011.8.25），2011
- 8) 土木学会コンクリート委員会：土木材料実験指導書 2011 年改訂版，細骨材の有機不純物試験，土木学会，東京，pp.52-56，2011
- 9) 「土質試験—基本と手引き—」改訂編集 WG：土の化学的性質の試験「強熱減量試験」，土質試験—基本と手引き—（第2回改訂版），地盤工学会，東京，pp.66-67，2010

第3章 新燃岳火山灰を配合した保水性インター ロッキングブロックの特性

3.1 まえがき

第2章において、新燃岳火山灰は、その粒度が採取地で大小異なりはするが比較的細かいものであり、土木学会の推奨する細骨材の標準粒度範囲におさまるものもあり、また吸水率が約7%と高い特徴を示した¹⁾。この生火山灰の有効活用ではコンクリート用細骨材の一部に火山灰を置換して活用するので、その際、最大混入率を見出す必要がある。それは、火山噴火地域で降灰が続く場合には堆積処理地の確保が困難となることが想定されるので、堆積灰の減容促進も一方で考えておく必要があるからである。

都市ゴミの高温焼却炉で発生する溶融スラグの有効活用を推進するために、溶融スラグを道路用資材やコンクリート用細骨材として活用できないか多くの研究^{2, 3, 4)}がおこなわれてきた。その中で検討がまだ不十分なために日本工業規格(JIS)には制定できないが、その前段として情報公開を急ぐ必要から標準情報(TR:テクニカルレポート)を公示する必要があり、コンクリート材料については2002年7月にTRA0016「コンクリート用溶融スラグ細骨材」に定められ⁵⁾、その後も種々の研究成果を踏まえて2006年9月にJISA5031「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート溶融スラグ骨材」が制定された⁶⁾。溶融スラグ化技術は、都市ゴミ(一般廃棄物)処分地が狭まりその確保も困難になってきている現状を打開するものとして受け入れられてきた背景がある。溶融スラグは、すでに有用な資源として公共事業資材に利用されている。また、産業廃棄物のスラグ化の取組みもおこなわれている。

また、社会的に問題となっているヒートアイランド現象の緩和対策として、道路舗装にはアスファルト舗装やコンクリート舗装がある中で保水性舗装の技術開発が進んだ。車道や歩道に敷設するインターロッキングブロック(以降、ILBという)においても関連協会が確認試験をおこないながら⁷⁾、保水性ILBの品質性能規格とその試験方法を2005年7月に(社)インターロッキングブロック舗装技術協会が制定した⁸⁾。その後、2010年にJISA5371:2010「プレキャスト無筋コンクリート製品」の中に保水性ILBが制定された⁹⁾。都市部のヒートアイランド対策などとして施工実績が増加しているため、「保水性平板」と「保水性ブロック」を追加し、これに必要な性能および保水性試験方法を規定した。なお、推奨仕様では保水量を 0.15 g/cm^3 以上としている¹⁰⁾。現在、保水性ILBの細骨材に高炉スラグ(水砕など)が使用できるようになった^{11, 12)}。

写真-1(左)に細骨材の例を示す。吸水率は JIS A 5011-1-第 1 部「コンクリート用高炉スラグ骨材」に 3.0%以下と規定されているが、骨材内部に空隙が生ずるため吸水率は高い特徴がある。鉄鋼などの製造過程で高炉から排出される 1,000 度を超す熔融スラグは水や空気ですばやく冷却され、その過程でガスが抜ける際に微細な空隙を形成する。この微細空隙のある形状は、写真-1(右)からも判るように、火山灰・火山礫(軽石)の形状とよく似ている。

そこで、新燃岳火山灰の吸水率の高い特徴を活かすには保水機能をもつ保水性 ILB の開発に活用することが考えられた。特に大都市の市街地のみならず、南九州はわが国でも夏期に暑熱・高温な地域にあるため、暑熱な舗装の改善としてこの保水性 ILB を市中の歩道に敷設してヒートアイランド現象の緩和に寄与できる可能性は高いと思われる。

ここでは、新燃岳火山灰の混入率を変えた保水性 ILB を、比較のために近くに発生する桜島火山灰も使用して製造し、その曲げ強度や機能について保水性 ILB の JIS 規格と対応させながら試験的に検討した。

3.2 試験概要

3.2.1 試験ブロックについて

試験ブロックは、吸水率の高い火山灰の使用を主眼とした歩行者道路用の保水性 ILB である。ブロック形状は長さ 198×幅 98×高さ 60mm のストレートタイプの二層型(写真-2)である。二層型とは、ブロックの下側が基層コンクリート、上側が表層モルタルからなり、

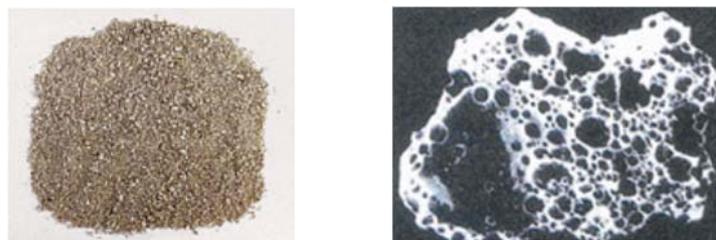


写真-1 高炉スラグ細骨材の状態¹³⁾(左)とそれを拡大して見られる微細空隙¹⁴⁾(右)

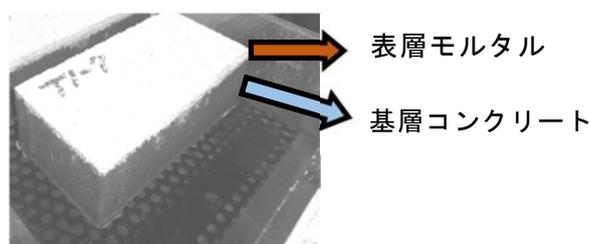


写真-2 二層型ストレートタイプ ILB の外観
(寸法：長さ 198×幅 98×高さ 60mm)

着色 ILB によく見られる。表層モルタルには本研究では白色セメントを使用した。使用骨材の色彩や使用量の影響を受けるほか、生火山灰の混入率がブロック表面の色調にどのような影響を及ぼすかを把握するためである。

保水性 ILB の品質性能規格⁸⁾の中に、歩行者道路用のための JIS 規格があり、曲げ強度が 3.0 N/mm² 以上、保水性能として保水量が 0.15 g/cm³ 以上、吸水性として吸上げ高さが 70% 以上である。透水係数は透水性 ILB 用の JIS 規格であり保水性 ILB に適用されていない。本試験では、透水係数が保水性能や吸水性能の相互に影響を及ぼすかもしれないので測定した。

3.2.2 ブロックの材料

ブロックの材料のうちセメントは 2 種類あり、基層コンクリートには普通ポルトランドセメント(太平洋セメント, 密度 3.16g/cm³)を、表層モルタルには白色セメント(同様, 3.05g/cm³)を、いずれも表-1 に示す品質のものを用いた。水は水道水を使用し、混和剤はコンクリート製品用の高性能減水剤 I 種(BASF ジャパン, 主成分:ポリカルボン酸エーテル系化合物)でセメント量の 1.0%内割(単位水量の一部として)で用いた。

また、基層コンクリートおよび表層モルタルに使用した骨材の種類と物理的性質は、表-2 に示すとおりである。生火山灰は、前述したように、新燃岳と桜島の降灰であるが、前者は都城市高城

表-1 使用セメントの品質

結合材* の種類	区分	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結試験 (h-min)		安定性	圧縮強さ (N/mm ²)		
				始発	終結		3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	測定値	3.16	3,350	2-08	4-41	良	30.8	45.8	62.8
白色セメント	測定値	3.04	3,760	2-47	3-52	良	30.2	44.1	65.8
JIS R 5210	JIS値	-	2,500以上	60分～	～10時間	良	12.5～	22.5～	42.5～

* 太平洋セメント(株)セメント試験成績表(普通ポルトランドセメント:2012年12月度, 白色セメント:2013年度1月度)

表-2 ブロックに使用した骨材の種類と物理的性質

区分	骨材の種類	記号	密度 (g/cm ³)		吸水率 (%)	粗粒率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	微粒分量 (%)	有機不純物	産地 (火山灰は集積地)
			表乾	絶乾							
基層 コン クリ ート	粗 砕石	G	2.65	2.62	1.03	6.5	1.57	59.9	—	—	東京都八王子市
	砕砂	S ₁	2.63	2.60	0.98	3.04	1.44	55.2	1.6	薄い色	神奈川県相模原市
	細 石灰砂	S ₂	2.68	2.66	0.92	3.01	1.78	66.9	2.1	薄い色	東京都奥多摩町
	火山灰1*	T	2.28	2.12	7.60	2.20	1.17	55.3	5.5	同等色	宮崎県都城市高城町
表層モ ルタル	火山灰2*	S	2.67	2.65	0.93	0.61	1.64	62.0	13.3	薄い色	鹿児島市吉野町
	細 珪砂	S ₃	2.61	2.59	0.63	1.00	1.51	58.3	0.3	薄い色	愛知県豊田市
	この他、石灰砂の粗めと細かめの2種類も使用：基層コンクリートの石灰砂S ₂ とほぼ同等										

* T: 新燃岳火山灰, S: 桜島火山灰

町の降灰堆積地から、後者は鹿児島市吉野町の最終処分地から、両市の許可を得て採取したものである。新燃岳火山灰と桜島火山灰の概観を写真-3 に示す。前者は、第 2 章で論じたように、土木学会 (JSCE) の細骨材の標準粒度範囲と比較して、やや細かく 2.5mm ふるいを通過するものが多く、また、後者は微細であり 0.6mm ふるいをほとんど通過した。この試験に使用する生火山灰の準備として、前者は 2.5mm ふるいを、後者は 0.6mm ふるいを通過したものを、大型乾燥機により 110℃でそれぞれ約 100kg を乾燥した。次に、これらを 20kg ずつに梱包したものを、ブロック製品工場 (JIS 認定工場、神奈川県愛甲郡愛川町中津 6915) へ搬送した。

新燃岳火山灰の化学的性質の一部に関しては第 2 章で論じたが、桜島火山灰の物理的性質 (表-2) や化学的性質も分析した。両火山灰を混入して保水性 ILB を製造するので、製造後のブロックにアルカリシリカ反応 (ASR) に伴うひび割れが発生しないことを確認する必要がある。

3.2.3 ブロックの配合

表-3 に、火山灰を細骨材量の容積割合で 10, 20, 30, 50%を混入したブロックの基層コンクリートの示方配合を示す。同様に、表-4 に表層モルタルの示方配合を、表-3 に対応させる配合として示した。一般にブロック工場における試験配合は、正確に 1m³ の単位量となっておらず経験的な配合を用いている場合が少なくない。例えば、1 バッチ量を単位量としてセメント 50kg、骨材 190kg などと固定している。ここに示した示方配合は、工場内の固定された配合を骨材の密度を用いて計算しなおし、そのコンクリート容積が 1.0m³ になるようにしたため、数値に端数が出ている。なお、この計算では、混和剤は内割としたので充填率の計算 (3.3.2 項) に用いる単位容積質量の計算には含めていない。

また、生火山灰を含む細骨材は、事前に表乾状態に調整し、練り混ぜ時の材料計量まで、ビニール袋に詰めておいた。表-3 および表-4 の示方配合をもとに、1 バッチ量が基層コンクリート 12.0 リットル (L) 分および表層モルタル 1.5 L 分の材料で、1 試験あたり供試体 3 個とする必要量を十分に製造できるので、試験前にそれぞれ計量し、練り混ぜに用いた。

なお、この示方配合は、実際に工場内で油圧式の高振動加圧即時脱型方式で製造すると 5.0 N/mm² 以上の曲げ強度を発揮する車道用ブロックの配合である。しかし、写真-2 (a) に示す試験室にある空気圧式の振動加圧成型機 (ITSUBA-KOKI 製, IK-2A 型) は即時脱型方式ではある

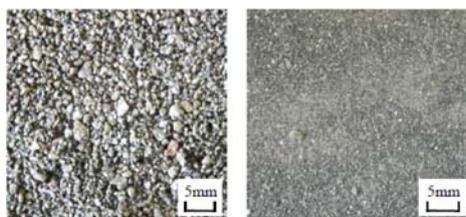


写真-3 新燃岳火山灰 (左) と桜島火山灰 (右) の概観

が、製造が古くその能力も低くなったために曲げ強度で 5.0 N/mm² 以上を確保できないと思われたために、目標値を下げた曲げ強度 3.0 N/mm² 以上の歩行者用道路用ブロックとして製造することにした。

3.2.4 ブロックの成型製造

基層コンクリートの練り混ぜの手順は、パン型ミキサー(住友重機械工業, 3AVM 86 型, 50 L)に【粗骨材+細骨材+セメント】を投入 → 30 秒間の練り混ぜ → 水投入 → 3 分間の練り混ぜ, とした。次に、表層モルタルを練り混ぜる。その手順は、鉄製容器(30 L)に【細骨材+セメント】を投入 → ハンドミキサーで 10 秒間の練り混ぜ → 水投入 → 30 秒間の練り混ぜ, とした。練り上がりのコンクリートはゼロスランプであり、パサパサな性状であった。配合ごとに練り混ぜした基層コンクリートおよび表層モルタルは、ブロック成型機(写真-4 (a))のそばま

表-3 基層コンクリートの示方配合

バッチ No.	火山灰混入率 (Vol. %)	記号	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)						粗骨材 1305	混和剤 C×1%
				水 W	セメント C	細 骨 材					
						砕砂 S1	石灰砂 S2	火山灰*			
1	0%	K	30	105	352	502	1557	-	-	30	3.52
2	T 10%	T1				452	1401	176	-		
3	T 20%	T2				402	1246	352	-		
4	T 30%	T3				351	1090	528	-		
5	T 50%	T5				251	779	880	-		
6	S 10%	S1				452	1401	-	206		
7	S 20%	S2				402	1246	-	412		
8	S 30%	S3				351	1090	-	618		
9	S 50%	S5				251	779	-	1031		

* T: 新燃岳火山灰, S: 桜島火山灰

表-4 表層モルタルの示方配合

バッチ No.	火山灰混入率 (Vol. %)	記号	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)							混和剤 C×1%
				水 W	セメント C	細 骨 材					
						石灰砂 S2 M	石灰砂 S2 S	珪砂 S3	火山灰*		
1	0%	K	28	138	494	889	494	494	-	-	4.94
2	T 10%	T1				800	445	445	161	-	
3	T 20%	T2				711	395	395	322	-	
4	T 30%	T3				622	346	346	482	-	
5	T 50%	T5				445	247	247	804	-	
6	S 10%	S1				800	445	445	-	188	
7	S 20%	S2				711	395	395	-	377	
8	S 30%	S3				622	346	346	-	565	
9	S 50%	S5				445	247	247	-	942	

* T: 新燃岳火山灰, S: 桜島火山灰

で手押し車などで運搬した。まず基層コンクリートを空気圧式の振動加圧即時脱型機の型枠内に投入し、プラスチック製スクレーパで余盛り分を均等にならし、一旦、振動加圧をおこなう(写真-4 (b))。その後、その凹部に表層モルタルを投入したのちスクレーパで表面を均してから、再度、振動加圧(写真-4 (c))をおこない、一度に供試体 3 個を製造する(写真-4 (d))。このままの供試体は即時脱型のため衝撃で壊れることもあるので、敷き鉄板 1 枚に供試体 3 個を載せたまま、試験室のコンクリート床に静置し硬化を待った。翌朝、ブロックの表面に記号を記してから恒温恒湿室へ搬入し、室内の棚の木製スノコの上に静置して材齢 7 日まで気中養生をおこなった。なお、室内の温度と湿度は設定範囲(20℃, 60%)内で管理されていることを確認した。

3.3 各種試験方法

3.3.1 火山灰の化学的性質の試験とアルカリシリカ反応性試験

生火山灰を保水性ブロックに使用する前に、その化学成分と化学組成、JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性(ASR)試験方法(モルタルバー法)」による ASR 試験で問題がないか確認した。化学成分の分析は、火山灰少量を供試し原子吸光光度計(HITACHI, Z-2000)を用いて測定した。生火山灰の成分にはその化合組成からシリカ反応性を有する物質を含む場合があるので、その化学組成を X 線回折装置(RIGAKU, RINT 2000/P)を用いて測定し、そのピーク量から検討した。

また、反応性シリカの量によっては保水性ブロックに膨張性ひび割れを起こす場合があるので、ASR 試験を実施した。特に両端にチップを埋め込んだモルタル供試体は、1 本ずつを十分に湿らせた吸取紙で巻き包んでビニール袋に入れ、さらにジップ付きのビニール袋に入れて密封した。それを、インキュベータ(三洋電機, MIR-154 型)内で温度 $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、



写真-4 保水性 ILB 供試体の製造方法

- (a): 空気圧式の振動加圧即時脱型機の概観, (b): 振動加圧後の基層コンクリートの状況,
(c): 表層モルタルを(b)の凹みに充填した後、成形枠から抜き出しやすいようにプラスチックフィルムを掛けて振動加圧している状況, (d): 一度に3個仕上がった保水性 ILB 供試体を敷き鉄板に載せたまま翌朝まで試験室のコンクリート床上で養生する。

湿度 95%以上を試験期間中維持するが、所定の材齢の 1 日前に供試体を測定室の温度環境になじませるため測定室に静置した。その翌日、モルタルコンパレータ（マルイ、MIC-350-1-11）を用いて長さを計測した。なお、モルタル用の細骨材には各々全量を粒度調整して用いたが、桜島火山灰だけは呼び寸法で 1.2mm ふるいに残留する分がほとんどなかったため、ふるい目の通過と残留割合で、1.2～0.6mm は 30%、0.6～0.3mm は 35%、0.3～0.15mm は 35%に、それぞれ調整して用いた。

3.3.2 ブロックの充填率の計算

成形直後に、供試体全数について寸法と質量を測定し、単位容積質量を求めた。その際、供試体は即時脱型製品であるので、まだ十分に硬化していなために、測定する際は慎重におこなった。ブロックの充填率の計算は、成型直後の供試体の単位容積質量を、配合表から求めた充填率 100%の供試体の単位容積質量で割った値 (%) である¹⁵⁾。

3.3.3 ブロックの曲げ強度試験

ブロックの曲げ強度試験は、JIS A 5731 「プレキャスト無筋コンクリート製品」に準拠し、圧縮試験機（前川試験機製作所製、耐圧 1,000 kN）で曲げ強度試験用器具を装着し、材齢 7 日の供試体で実施した。曲げ強度は、式[1]で算出した。

$$f_b = Pl / (b \times d^2) \quad [1]$$

ここに f_b : 曲げ強度 (N/mm²)

P : 試験機の示す最大荷重 (N)

l : スパン (ここでは 160mm)

b : 破壊断面の幅 (mm)

d : 破壊断面の厚さ (mm)

3.3.4 ブロックの保水性試験

ブロックの保水性試験は、JIS A 5371 「プレキャスト無筋コンクリート製品 付属書 B5.4.1 保水性試験」に準拠し、まず供試体を乾燥した後の絶乾質量を測定する。その後、その供試体に水中で 24 時間吸水させた後、写真-5 のように、プラスチック容器の底に敷いたコロ(φ5mm 丸棒)



写真-5 保水性試験の状況

(フタは撮影のため外している)

の上に静置して水を切り、フタをして 30 分後に目に見える水膜をぬぐって湿潤質量を測定する。そして供試体の体積を用いて、式[2]により保水量を求めた。

$$\text{保水量 (g/cm}^3\text{)} = (W_w - W_D) / V \quad [2]$$

ここに W_w : 供試体の湿潤質量 (g)

W_D : 供試体の絶乾質量 (g)

V : 供試体の体積 (cm³)

3.3.5 ブロックの吸水性試験

ブロックの吸水性試験は、JIS A 5371 「プレキャスト無筋コンクリート製品 付属書 B 5.4.2 吸水性試験」に準拠し、配合別に供試体 3 個ずつに対して実施し、吸上げ高さ H_w を式[3]で算出した。この場合、供試体を 24 時間絶乾後に絶乾質量を計測し、写真-6 および図-1 のように、プラスチック容器内に水を入れて、供試体の底面から高さ 5mm に水面がくるようにセットするが、底面から吸水させるために金網かスポンジなどを挟み、供試体を試験装置に静置し水浸 30 分後に取り出し、水膜をぬぐった後の質量を測定する。また、供試体の湿潤質量は、水中で 24 時間吸水させた後に水を切り、目に見える水膜をぬぐった後に測定する。

$$H_w (\%) = (W_{30} - W_D) / (W_w - W_D) \times 100 \quad [3]$$

ここに W_{30} : 30 分後の吸い上げ質量 (g)

W_w : 供試体の湿潤質量 (g)

W_D : 供試体の絶乾質量 (g)

3.3.6 ブロックの透水性試験

ブロックの透水性試験は、透水性 ILB に対する JIS A 5371「プレキャスト無筋コンクリート製品



写真-6 吸水性試験状況

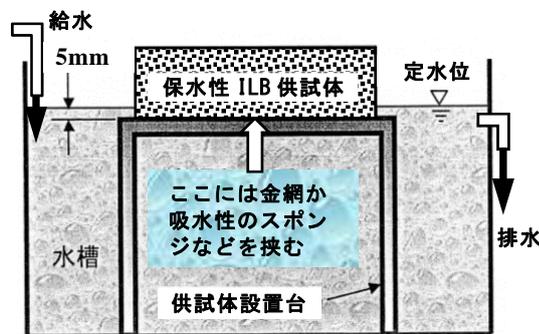


図-1 吸水性試験装置の略図
(JIS A 5371 付属書 B5.4.2 より転載：一部加筆)

附属書 B5.3 透水性試験」に準拠し、配合別に供試体 3 個ずつを対象に専用の試験容器を用いておこない、透水係数 C_{WP} を式[4]で算出した。本来、保水性 ILB に対しておこなう必要はないが、保水性や吸水性と関係があるかもしれないので、この方法で、供試体の透水係数を測定する。

図-2 に示すように、供試体の表面から水をかけ流して、一定流の状態でする水量（排水量）を測るものである。この場合、写真-7 に示すように供試体を装置に漏水しないように取り付け、注水量を調整して一定の水位を保つようになってから、30 秒間の排水量を測定する。透水係数 C_{WP} は、式 [4] で求めるが、式中の水頭差 H は本来 11.0cm のところを供試体の高さが 6.0cm であるので 10.0cm とし計算しやすくした。

$$C_{WP}(\text{cm/s}) = D \times Q \div (H \times A \times 30 \text{ 秒}) \quad [4]$$

ここに D : 供試体の厚さ(cm)

Q : 排水量(cm^3)

H : 水頭差(cm)

A : 供試体の面積(cm^2)

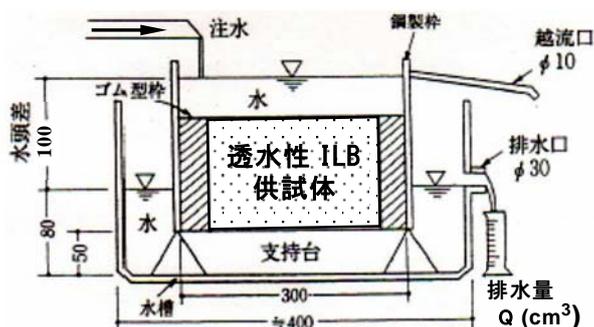


図-2 透水性試験装置の略図

(JIS A 5371 附属書 B5.3 より転載：一部加筆修正，図中の透水性 ILB 供試体のところへ保水性 ILB 供試体を入れる)



写真-7 透水性試験の装置と試験状況

(左: 供試体周囲の漏水防止のため硬質ゴム枠に供試体を押し入れて固定し、さらに目地をゴム粘土で目張りした状態，右: 透水性試験の状況)

3.3.7 ブロックの表面色調測定

ブロックの表面色調の測定は、L*a*b*表色系とし、JIS Z 8729「色の表示方法—L*a*b*表色系およびL*u*v*表色系」に準拠した。色度・明度を測定する場合、同一な照明環境条件下でおこなう必要から、全種類を一緒に撮影した材齢7日の供試体写真（写真-8）を用い、写真-9に示す色彩色差計（ミノルタ、CR-200）を用いて各々のブロックで6か所以上を測定した。明度はL*値で表示され、白色の100から黒色の0の範囲である。また、同時に表示される赤色方向の色度a*値と黄色方向の色度b*値を用いて、式[5]から彩度(C*)を求めた。彩度は無彩色（白・黒・灰）の0から鮮やかな純色の最大値までを範囲としている。

$$\text{彩度 (C*)} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad [5]$$

ここに a*:色彩色差計の読み取りa*値

b*:色彩色差計の読み取りb*値

3.3.8 ブロックの重金属溶出量と pH

保水性 ILB うち生火山灰が無混入のブロックと本研究で新燃岳と桜島の最大の火山灰50%混入率のブロックを対象に、重金属溶出量と pH を測定した。ブロック3種類のサンプルは、曲げ強度試験後の供試体切片3個からハンマーで打ち落とした少量を、さらに細かに破碎し2mmふるいを通したものを環境テクノ㈱（本社：東京，解析センター：山口県周南市）に送って分析を依頼した。

重金属類の溶出量試験は「土壌中重金属等の溶出量分析方法（土壌環境基準，環境庁告示第46号（平成3年8月23日付け）に掲げる方法）」によって分析した。重金属類の溶出量と pH の計量は、総水銀（T-Hg）のみを「環境庁告示第59号付表1」に、それ以外はJIS K 0102「工場排水試験方法」によっておこなった。

本試験に使用した2種類の生火山灰は、宮崎県都城市高城町近辺および鹿児島市内に降



写真-8 材齢7日の全供試体



写真-9 色彩色差計（ミノルタ、CR-200）

灰後、地域住民によって回収されたものが多いが、降灰地周辺の畑土壌や路上のゴミが紛れ込むことが容易に想定される。このため、環境庁告示第46号の方法によることが適切と判断した。

3.4 試験結果および考察

3.4.1 火山灰の化学的性質およびアルカリシリカ反応性試験結果

表-5 に両火山灰の化学成分（酸化物）を示した。新燃岳火山灰の化学成分は 56%のシリカ（SiO₂）と 17%のアルミナ（Al₂O₃）、11%のフェライト（Fe₂O₃）、10%のカルシウム（CaO）と続き、K₂O、MgO の順に化学成分割合が小さくなっている。一方、桜島火山灰のそれは 56%のシリカ、17%のアルミナ、12%のフェライト、10%のカルシウムとなっている。両火山灰の化学成分は、似かよったもので構成されていることが判明した。

高炉水砕スラグは塩基度 1.6 以上のものを使用することが、コンクリート用高炉スラグ微粉末（JIS A 6206：2013）に規定されている。この試料は比表面積が 4,000 cm²/g 程度になるように粉砕したものをを用いることになっている。このように、塩基度はセメント代替材料などの潜在水硬性の指標によく用いられる。火山灰の塩基度は、その水硬性の有無の指標になるかもしれないので、塩基度の式 [6] に表-5 の各々の割合を入れて求めた。

$$\text{塩基度} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 \quad [6]$$

その結果、火山灰の塩基度は新燃岳が 0.52、桜島が 0.51 であり、潜在水硬性の指標 1.6 に届かなかった。両火山灰は比表面積 4,000 cm²/g 程度に微粉砕していないこともあると思われるが、両火山灰は表-5 から 56%のシリカなどポゾランを多く含んでいるので、火山灰を混入したコンクリートはポゾラン活性により長期的に硬化するものと考えられる。

また、図-3 に火山灰の X 線回折結果を示すが、下図が新燃岳、上図が桜島の火山灰のものである。そのピーク値の分布から見て、新燃岳火山灰にはクオーツが、桜島火山灰にはクリストバライトとクオーツが見出された。これらは反応性シリカであるので、場合によっては火山灰のアルカリシリカ反応（ASR）により膨張性ひび割れがブロックに生じるこ

表-5 火山灰の化学成分(酸化物:%)

区分	化学成分 (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	TiO ₂	SO ₃	Other	Total
新燃岳火山灰	55.9	17.2	11.1	10.5	2.5	1.2	1.0	0.2	0.4	100.0
桜島火山灰	55.8	17.3	12.0	10.0	1.8	1.3	1.2	0.3	0.3	100.0

とが考えられる。そこで、この結果を受けて火山灰が「無害」かどうかを確認するために ASR 試験で検討した。

図-4 に ASR 試験の結果を示す。この膨張率の JIS 規格 (JIS A 1146) は、材齢 13 週目が 0.050%未満、26 週目が 0.100%未満であると「無害」と認められる。26 週目における膨張率は新燃岳、桜島の順に 0.025%、0.028%であったので、両火山灰とも ASR に対して「無害」と判定できる。なお、念のために 52 週まで試験したところ膨張率が 0.100%より低く発現したので両火山灰は「無害」と判定できた。

生火山灰を混入した保水性 ILB を実用的に開発する際は、火山灰を 100%使用するわけ

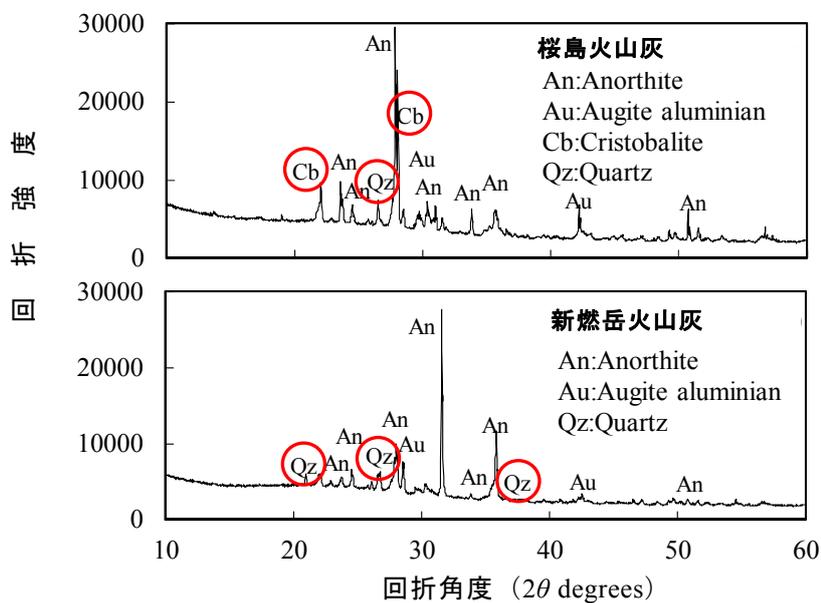


図-3 新燃岳・桜島火山灰の X 線回折結果

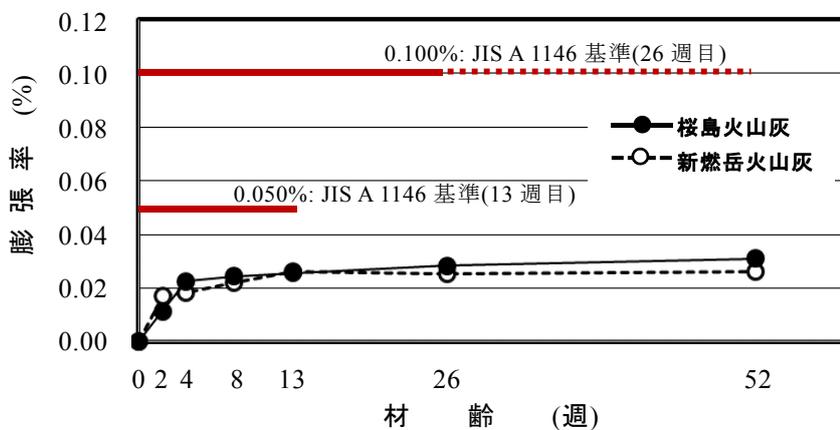


図 4 ASR 試験結果 (JIS では 26 週まででよい)

ではなく、生火山灰を良質な細骨材に 20~30% (vol.) の割合で混入することになる。したがって曲げ強度や機能性で保水性 ILB の JIS 規格を満足する条件の混入率を安全側に設計して保水性 ILB を製造するので、ほとんど問題なく生火山灰を使用できるといえる。

3.4.2 ブロックの曲げ強度

ブロックの曲げ強度は、図-5 に示すように、生火山灰を混入した保水性 ILB は、火山灰無混入のものより低く発現した。同時に、火山灰混入率が増すにつれて、曲げ強度は新燃岳火山灰が緩やかに低下するのに対し、桜島火山灰では顕著に低下した。保水性 ILB の曲げ強度の JIS 規格は 3.0 N/mm² 以上であるので、これを満足する火山灰混入率 (vol.) は、新燃岳が最大 30%、桜島が最大 20%であることがわかった。

また、充填率と曲げ強度との関係を示した図-6 から、充填率が高いほど曲げ強度は増加し、両

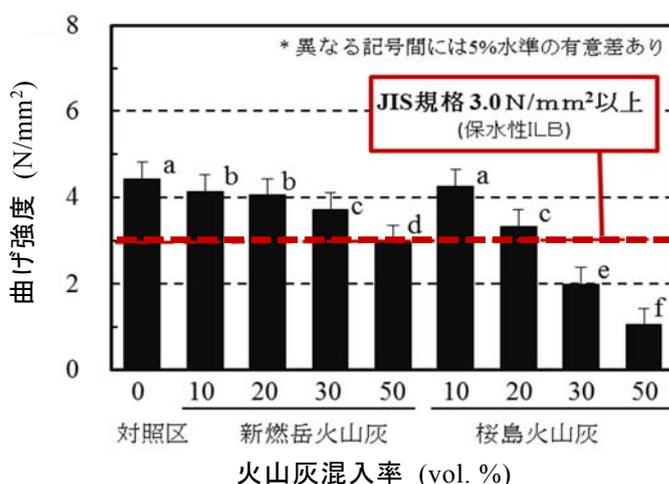


図-5 材齢 7 日のブロックの曲げ強度の比較

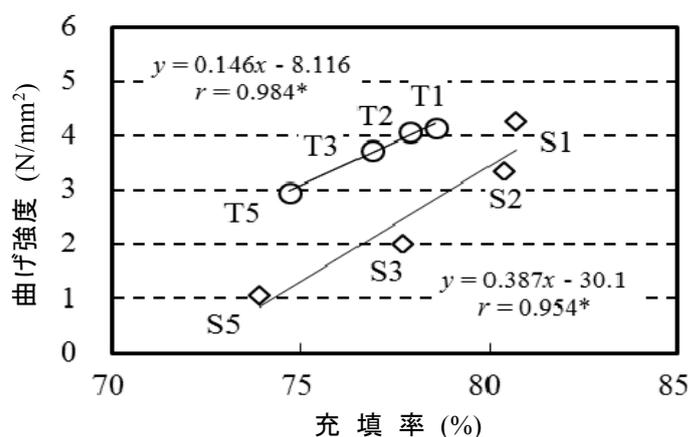


図-6 ブロックの充填率と曲げ強度の関係
(図中の英記号は表-3・表-4を参照)

者の相関係数は新燃岳火山灰が 0.984, 桜島では 0.954 で, いずれも高い相関性が認められた ($P < 0.05$). また, 火山灰の混入率が増すにつれ, 曲げ強度と充填率は低く推移した. 火山灰無混入の保水性 ILB の充填率は 78.8%であり, 桜島火山灰の 10%と 20%混入率のものはその 78.8%を若干上回っており, 微細な桜島火山灰 10%と 20%混入率のものは充填率を高めたものの, 30%と 50%混入率では充填率を低下させた. このことは, ブロックの単位容積質量とも相関が高く, 火山灰無混入の保水性 ILB の単位容積質量が 2.023kg/L であるのに対し, 桜島火山灰の 10%と 20%混入率のものは順に 2.065, 2.050kg/L であり, 火山灰無混入の保水性 ILB のそれを上回った. また, 桜島火山灰の混入率と同様に, 新燃岳火山灰も, その混入率が増すほど, 密度の小さな火山灰の量が相対的に増すために, 単位容積質量が低下する傾向を示した.

溶融スラグ混入で ILB を製造したときの充填率は, 90~98%と極めて高率であったことがある¹⁶⁾. この高率な充填率は, 高炉などから溶融排出されるガラス質の溶融スラグの多くが角や針状のものを含むため細骨材として使えないので, 粒度調整として専用機械で摩砕して, 大小の粒度分布の良いものを混入したためである. 本研究では, 空気圧式の振動加圧成型機は供試体作成用に特別に製造された古いものであり性能的に油圧式より弱いために, 基層コンクリートや表層モルタルの充填が十分ではなかったといえる. もし充填率が 90%を上回るものであれば, 車道用保水性 ILB の JIS 規格値 5.0 N/mm²を上回ることが想定される.

また, 3.2.2 ブロックの材料で述べたように, 本試験の火山灰は, 新燃岳火山灰が土木学会の細骨材の標準粒度範囲と比較してやや細かく 2.5mm ふるいを通過したもの, 桜島火山灰が 0.6mm ふるいを通過した極めて細かいものである. 一般に, 骨材の粒度は大小粒が適度に混合しているものは単位容積質量が大きく, セメントペーストが節約され, 密度の高

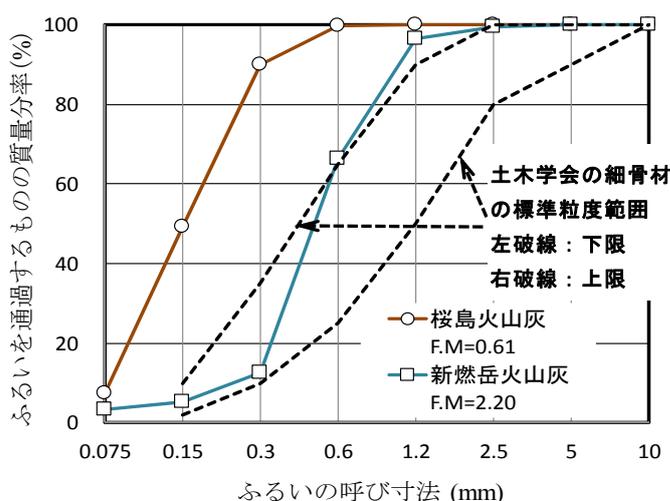


図-7 新燃岳と桜島の火山灰の粒度曲線

いコンクリートが得られ経済的となる¹⁷⁾。図-7に示すように、新燃岳火山灰の粒度曲線から、土木学会の細骨材の標準粒度範囲の下限に近いため大小の粒度はやや小さい方に多く分布し、粗粒率は2.20であった。それに対し桜島火山灰は0.6mmふるいをほとんど通過するように極めて細かな粒度だけで構成されていることがわかる。

以上のように、火山灰の大小の粒が適度に混合していると、ブロックの充填率や単位容積質量を高めており、そのことが曲げ強度も高めているといえる。特に細かな火山灰を多く混入すると曲げ強度や充填率、単位容積質量の低下を招くので、火山灰混入率は小さいほうが良質ブロックを製造できる。ただ堆積灰の減容促進に配慮した場合、その最大混入率は桜島火山灰では20%、新燃岳火山灰では30%が上限と考えるのが妥当である。

3.4.3 ブロックの保水性

保水性 ILB の保水量の JIS 規格は 0.15g/cm^3 以上である。保水量の分布を示した図-8 から、新燃岳火山灰と桜島火山灰は同様な分布をなし、火山灰混入率が高くなるほど保水量は多くなる傾向が認められた。また、すべての配合がこの規格値を満足した。

3.4.4 ブロックの吸水性

保水性 ILB の吸水性については、図-9に示すように、JIS 規格では水の吸上げ高さで表現することになっており、その最小規格値は70%である。いずれの配合も70%以上で満足したが、新燃岳火山灰 20, 30, 50%は全体的に低めに発現し80%以下であった。桜島のものはすべて90%以上の吸上げ高さであった。

毛細管現象により吸水する過程で、吸水率の高い火山灰が多いほど空隙が増して、その毛細管現象が制限を受けていると考えられる。細粒の多い桜島火山灰では混入率の大小にかかわらず高い吸上げ高さを示し、細粒間で適度な空隙が保持されて、毛細管現象が早期に進んだことによると考えられる。

3.4.5 ブロックの透水係数

ブロックの透水係数は、図-10に示す分布となった。保水性ブロックには透水係数の JIS 規格値はない。この図から透水係数は、新燃岳火山灰が桜島より高めに推移し、桜島火山灰 20~50%混入のものは極めて低かった。透水係数が最も小さい桜島火山灰 50%混入率ブロックは混入した火山灰に極めて細粒が多いために、表面からの透水が非常に低くなり、その分保水性が高まり、一方、新燃岳火山灰 50%混入率ブロックは透水がやや小さいが保水量は多かった。この現象には微細火山灰の混入と、高吸水率火山灰が影響していると思われる。

以上のように、透水試験はブロック上面から水を掛け流しながらの透水量を測定するから、細か

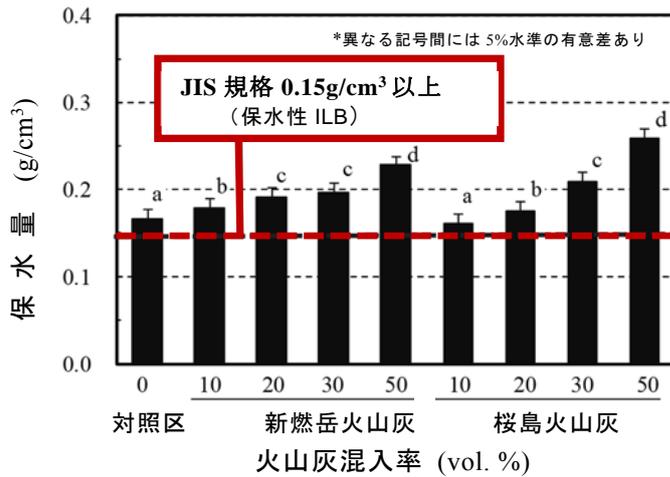


図-8 材齢 7 日のブロックの保水量の比較

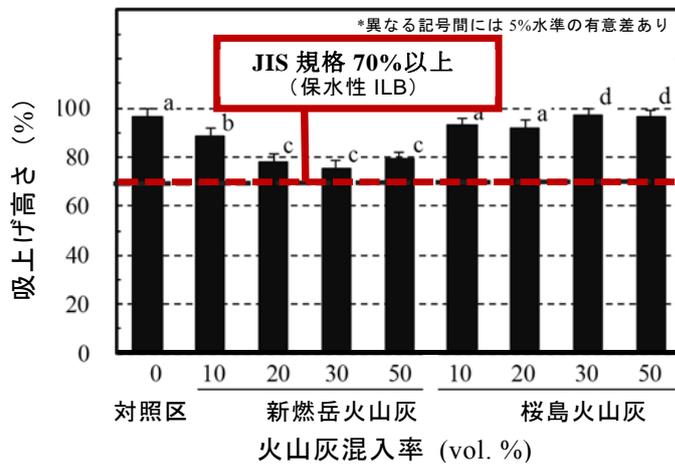


図-9 材齢 7 日のブロックの吸上げ高さの比較

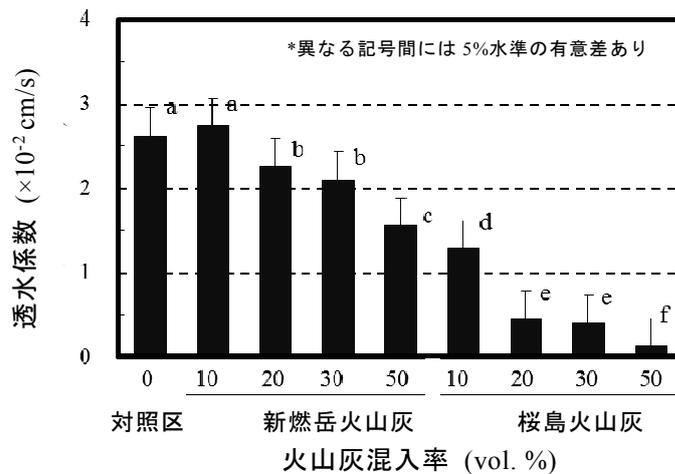


図-10 材齢 7 日のブロックの透水係数の比較

な火山灰を多く混入したことでその表面を緻密に形成することになり、透水を抑制する要因になっていると推察される。このことは、保水性 ILB の内部に吸水・保持された水分が表層から蒸発する際に、保水性 ILB 周囲の温度上昇抑制機能を抑制することも考えられる。

3.4.6 ブロックの表面色調

写真-10 に新燃岳火山灰と桜島火山灰を再掲した。細骨材としての粒度は、図-7 に表した粒度曲線の違いからも判るように、新燃岳火山灰が桜島火山灰よりも大小の粒度が見られるが、桜島火山灰は微細な粒度で暗色の色調を呈している。また、図-11 に、各ブロック表面の色調として彩度と明度の分布と、両火山灰そのもの(●:新燃岳火山灰, ■:桜島火山灰)の色調を示した。桜島火山灰は濃紺色系、新燃岳火山灰は褐色系であった。火山灰が無混入のブロック K(◇印)と比較すると、新燃岳火山灰の彩度が8~9で若干小さく、明度が68~75でわずかに明るく、混入率の大小にかかわらず、ひとまとまりの分布を示した。一方、桜島火山灰では彩度が約4~9に、明度が50~70に広く分布し、Kよりも鮮やかでなく暗い色調をなし、混入率が多くなるほど暗く彩度も低くなる傾向があった。

また、新燃岳火山灰の方が、Kのブロック面と同等程度の色調の範囲にまとまったが、桜島火

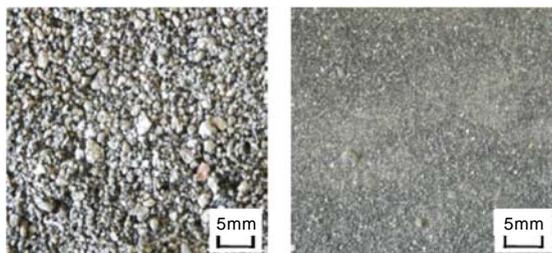


写真-10 火山灰の粒度と色調 (左:新燃岳, 右:桜島)

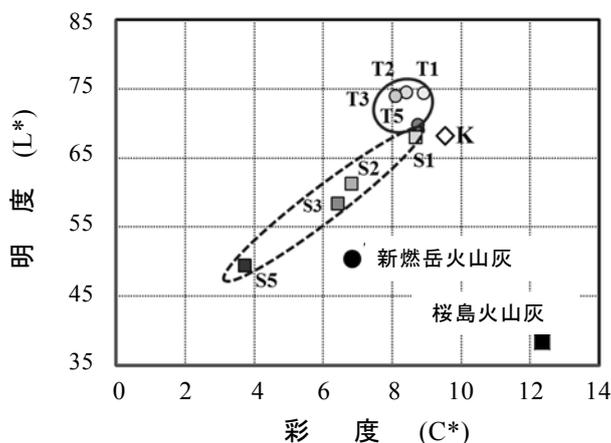


図-11 ブロック表面の彩度と明度の関係
(図中の英記号は表-3・表-4を参照)

山灰はもともと色が濃いだけに、有効活用として表層のある二層型の歩道ブロックにして敷設すれば、その混入率によっては不統一な色調になることが懸念される。

3.4.7 ブロックの重金属溶出量と pH

表-6 にブロックの重金属溶出量と pH を示した。火山灰無混入のブロック、新燃岳火山灰および桜島火山灰の 50%(vol.) 混入のブロックには、重金属類の溶出量が環境庁告示第 46 号に定められた基準値¹⁸⁾を超えるものはなかった。ただ、六価クロム(Cr⁶⁺)の溶出量がやや多いが、これはセメントの成分に由来していると考えられる。また、ブロック 3 種類の溶出水の pH は 12.5~12.6 で強アルカリを呈した。これは一般的なコンクリートの pH と同等であった。このように、火山灰を 50%(vol.) 混入したブロックを分析した結果から、細骨材量の半分の火山灰を混入したとしても重金属溶出や pH において問題となることはないといえる。

近年、コンクリートにスラグ骨材を用いるケースがみられるが、それに対応する JIS は以下に示すものがあり、また、いずれも表-7 に示す環境安全品質基準を規定している。

- ・ JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材—第 1 部:高炉スラグ骨材
- ・ JIS A 5011-2 コンクリート用スラグ骨材—第 2 部:フェロニッケルスラグ骨材
- ・ JIS A 5011-3 コンクリート用スラグ骨材—第 3 部:銅スラグ骨材
- ・ JIS A 5011-4 コンクリート用スラグ骨材—第 4 部:電気炉酸化スラグ骨材

表-6 保水性 ILB の重金属溶出量¹⁸⁾ と pH

保水性ILBの種類	Cd	Pb	Cr ⁶⁺	As	T-Hg	Se	pH (20°C)
	(mg/L)						
火山灰 無混入	<0.001	0.002	0.020	<0.005	<0.00005	<0.005	12.6
新燃岳火山灰50%混入	<0.001	<0.002	0.022	<0.005	<0.00005	<0.005	12.6
桜島火山灰 50%混入	<0.001	<0.002	0.031	<0.005	<0.00005	<0.005	12.5
基準値*	≤0.01	≤0.01	≤0.05	≤0.01	≤0.0005	≤0.01	—
定量下限値	0.001	0.002	0.005	0.005	0.00005	0.005	—

* 環境庁告示第46号 (1991)

表-7 環境安全品質基準 (一般用途)¹⁹⁾

項目	溶出量 (mg/L)	含有量 (mg/kg)
カドミウム	0.01 以下	150 以下
鉛	0.01 以下	150 以下
六価クロム	0.05 以下	250 以下
ひ素	0.01 以下	150 以下
水銀	0.0005 以下	15 以下
セレン	0.01 以下	150 以下
ふっ素	0.8 以下	4000 以下
ほう素	1 以下	4000 以下

- ・ JIS A 5031 一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材

また，表-7 のスラグ骨材の重金属溶出量(環境安全品質)基準値は，表-6 の環境庁告示第 46 号の重金属溶出量の基準値と同一である。スラグ骨材では，これらを混合利用したもののリサイクルまで考慮し，環境安全性に配慮した品質を確保するために，重金属の溶出量と含有量を環境安全品質基準として規定したものである。このことは，生火山灰の使用に際しても，降灰地の環境により堆積火山灰への農地土壌の飛来混入や降灰回収時の市街地のゴミをまったく含まないとはいえない状況から，保水性 ILB などに配合する前の生火山灰自体，あるいは，生火山灰を混入して製造した保水性 ILB の粉砕物に対して，環境安全品質基準を満たしているかの確認が必要になると考えられる。なぜなら，坂元²⁰⁾が桜島火山灰中の重金属含有量は表-7 に示すほどではないが微量に含有することを，また，田野ら²¹⁾がセメントには鉛，カドミウム，六価クロムなどの重金属をわずかながら含有することを報告しているからである。いずれにしても生火山灰の活用にあたり，降灰の堆積状況などを考慮し環境安全品質基準に適合するかを判定する必要もでてくる。

3.4.8 ブロックの曲げ強度や機能性項目の単相関からの保水量の検討

新燃岳火山灰と桜島火山灰を混入した保水性 ILB の曲げ強度や機能性項目同士の相関係数を表-8 に示す。この中で，保水量の増加に寄与する要因を挙げると，1%および5%の有意水準(*, **)のあるものは以下のものが挙げられる。

- ・ 新燃岳火山灰の保水性 ILB について，正の相関「火山灰混入率**，空隙率**」，負の相関「単位容積質量**，充填率**，曲げ強度*」

表-8 材齢 7 日におけるブロックの曲げ強度や機能性項目の相関係数

新燃岳火山灰	混入率	単位容積質量	充填率	空隙率	曲げ強度	透水係数	吸上げ高さ	保水量	
保水量	0.992**	-0.990**	-0.990**	0.990**	-0.985*	-0.563	-0.731		保水量
吸上げ高さ	-0.775	0.737	0.737	-0.737	0.653	0.825 ⁺		0.505	吸上げ高さ
透水係数	-0.659	0.646	0.646	-0.646	0.553		0.139	-0.854 ⁺	透水係数
曲げ強度	-0.983**	0.989**	0.989**	-0.989**		0.809 ⁺	-0.425	-0.963**	曲げ強度
空隙率	0.998**	-1.000**	-1.000**		-0.875 ⁺	0.450	0.668	0.966**	空隙率
充填率	-0.991**	1.000**		-1.000**	0.875 ⁺	0.450	-0.668	-0.966**	充填率
単位容積質量	-0.998**		1.000***	-1.000***	0.875 ⁺	0.450	-0.668	-0.966**	単位容積質量
混入率		-0.841 ⁺	-0.841 ⁺	0.841 ⁺	-0.977**	-0.859 ⁺	0.261	0.952*	混入率
	混入率	単位容積質量	充填率	空隙率	曲げ強度	透水係数	吸上げ高さ	保水量	桜島火山灰

注) 表中の相関係数の右肩の***, **, *, + は，それぞれ $P < 0.001$, $P < 0.01$, $P < 0.05$, $P < 0.1$ を示す

- ・桜島火山灰の保水性 ILB について、正の相関「火山灰混入率*、空隙率**」、
負の相関「単位容積質量**、充填率**、曲げ強度**、透水係数*」

また、保水性 ILB の保水量を高める条件は、両火山灰ともその混入率を大きくすることであるが、同時に空隙も多くなるため、単位容積質量や充填率、曲げ強度を低下させる要因になる。したがって、両火山灰を混合することは保水性 ILB の保水量の向上を期待できる一方、特に曲げ強度を低下させる可能性がある。そこで、保水性 ILB の JIS 規格を満足するような両火山灰の混合割合を、さらに検討する必要がある。

3.5 まとめと課題

本研究は、南九州に産する生火山灰の有効利用の観点から、特に新燃岳火山灰の高吸水率性に着目して保水性 ILB を開発するには、新燃岳や桜島の火山灰をどの程度まで混入できるのかを試験的に検討した。試験の範囲内で結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 保水性 ILB ブロックに使用した火山灰は、塩基度が 0.51～0.52 で潜在水硬性の指標 1.6 より小さいものの、シリカなどが多いのでポゾラン活性でコンクリートは長期的に硬化するものと考えられる。また、反応性シリカのクリストバライトとクオーツが見出されたので火山灰混入により膨張性ひび割れがブロックに発生する恐れがあったが、ASR 試験における JIS 規格で 26 週目の膨張率が 0.100%未満に留まり無害と判断できた。以上のことから保水性 ILB に使用できる。
- (2) 曲げ強度の JIS 規格 3.0 N/mm² 以上を満足する火山灰の最大混入率 (vol.) は、新燃岳火山灰が 30%、桜島火山灰が 20%であった。また、保水性 ILB の吸上げ高さの JIS 規格は 70%以上であるが、すべてのブロックが満足した。ただ、新燃岳火山灰の混入率 20、30、50%は全体的に低めに発現し 80%以下であったが、桜島のものすべては 90%を越す吸上げ高さであった。
- (3) 保水性 ILB の保水量の JIS 規格が 0.15g/cm³ 以上であるが、すべての配合が満足した。火山灰混入率が高くなるほど保水量は多くなる傾向も認められた。特に粗粒率が小さく細粒な桜島火山灰を多く混入すると透水を悪くするが、保水量を高める傾向があった。
- (4) 色調が濃紺系の暗色であった桜島火山灰を混入したブロックの表面色調は、混入率が大きいほど彩度は低くなった。新燃岳火山灰は褐色で明るく、白セメントとの混練でも、火山灰を混ぜなかったものと大きく変わらない色調を呈した。
- (5) 新燃岳火山灰と桜島火山灰を 50% (vol.) 混入したそれぞれのブロック粉砕物からの重金属溶出量は基準値を超過するものはなかったが、六価クロム(Cr⁶⁺)の溶出量がやや

多かった。また、コンクリートの pH 値は火山灰を 50% (vol.) で混入したとしても問題はなかった。さらに今後は生火山灰の環境安全品質への適合を判定する必要もでてくる。

今後は、より高い保水性能をもつ保水性 ILB の適切なコンクリート配合を明らかにするため、両火山灰を各種割合で混合したもので製造した保水性 ILB の品質を比較する必要がある。また、その中から得られた望ましい配合で製造した保水性 ILB を歩道に敷設し、歩道周囲の温度低下効果をどの程度、発揮できるか、実証試験で確認する必要がある。

参考文献

- 1) 細川吉晴・宇田津徹朗・河野俊介・尾上幸造・染矢敏寿・河野道文：新燃岳火山灰の諸特性とその有効利用－火山と都市との共生を考える－，平成 23 年度農業農村工学会九州支部講演要旨集，pp. 130-133，2011
- 2) 例えば，北辻政文・藤居宏一：ごみ熔融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質，農業土木学会論文集，200 号，pp.59-67，1999
- 3) 例えば，細川吉晴・太田好重・松村茂男・斉藤俊一：ゴミ熔融スラグを混入したコンクリート製品の特性，第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.506-507，2001
- 4) 例えば，Hosokawa Y., Ohta Y., Komura M., Sugawara K., Muramatsu S: Creation of concrete products reusing melting slag from waste incineration ash, Proceedings of 20th Our World in Concrete & Structures (Singapore), Vol.20, pp.325-332, 2001
- 5) 細川吉晴：一般廃棄物熔融スラグを原材料とするブロック，エコマテリアルハンドブック（山本良一監修，丸善，東京，816p，ISBN 4-621-07744-9），pp.766-770，2006
- 6) 田澤榮一：熔融スラグの JIS 化について，産業機械，pp.7-11，2006
- 7) 唐沢明彦・藤田仁・江角典広・高森哲也：保水性コンクリートブロック舗装の路面温度上昇抑制効果に関する研究，コンクリート工学，Vol.44，No.7，pp.9-16，2006
- 8) インターロッキングブロック舗装技術協会：保水性舗装用インターロッキングブロック品質規格，9p，2005
- 9) 日本規格協会：JIS A 5371:2010 プレキャスト無筋コンクリート製品，60p，2010
- 10) 経済産業省産業技術環境局産業基盤標準化推進室：プレキャストコンクリート製品の JIS を改正－資源循環型社会に貢献し，ユーザーに対する情報提供の拡充をめざして－，8p，2010
- 11) 例えば，細川吉晴・太田好重・古村満：水溶性酸化チタンを塗布したインターロッキ

- ングブロックの NOx 吸着性, 第 24 回日本道路会議議講演要旨集, pp.604-605, 2001
- 12) 鐵鋼スラグ協会: 鐵鋼スラグのコンクリート骨材への利用, 31p, 2004
 - 13) 鐵鋼スラグ協会: 鐵鋼スラグについて, 入手先<<http://www.slg.jp/slag/product/kotuzai.html#Q02>> (参照 2015.11.18)
 - 14) 三和グランド: 高炉水砕スラグ, 入手先<<http://www.sanwagrd.co.jp/slag#section-1>> (参照 2015.11.18)
 - 15) 唐沢明彦・長野健一: インターロッキングブロックへのエコセメントの適用に関する検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会要旨集, pp.297-298, 2008
 - 16) Hosokawa, Y., Komura, M. and Ohta, Y.: Utilization of molten slag interlocking concrete block (ILCB) in Japan and recycling of 100% molten slag ILCB, Proceedings of the 9th International Conference on Concrete Block Paving, Web-paper No. 40 (<http://www.iccbp2009.com.ar/papers.htm>), pp.1-11, 2009
 - 17) 土木学会: 骨材のふるい分け試験, 土木材料実験指導書, pp.28-32, 2009
 - 18) 環境省: 環境庁告示第 46 号 (土壌の汚染に係る環境基準について, 平成 3 年 8 月告示, 1991), 入手先<<http://www.mlit.go.jp/tec/kanky>> (参照 2013.3.1)
 - 19) 経済産業省産業技術環境局産業基盤標準化推進室: 附属書 1 「コンクリート用スラグ骨材に環境安全品質及びその検査方法を導入するための指針(2011.7.12 策定)), pp.1-12, 入手先<http://www.jisc.go.jp/newstopics/2011/2_for_concrete.pdf> (参照 2017.3.9), [スラグ骨材に関する JIS 策定指針を決定ーコンクリート用及び道路用スラグ骨材の利用促進を図るためにー, 建設分野の規格への環境側面の導入に関する指針 (2003.3.28, 日本工業標準調査会土木技術専門委員会・建築技術専門委員会議決), https://www.jisc.go.jp/newstopics/2011/201107_slag_aggregate.htm]
 - 20) 坂元隼雄: 桜島火山灰中の重金属元素(銅, 亜鉛, カドミニウムおよび鉛)の濃度, Nature of Kagoshima, Vol.40, pp.237-246, 2014
 - 21) 田野彰一・河合研至・石田剛朗: セメント硬化体からの重金属溶出機構に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.749-754, 2006

第4章 新燃岳と桜島の火山灰を混合配合した 保水性インターロッキングブロックの開発

4.1 まえがき

生火山灰の有効活用の一環として、吸水率の高い火山灰を配合して保水性 ILB の開発を試みている。第3章では、新燃岳火山灰の保水性 ILB への適用について、直近の桜島火山灰と比較しながら検討し、新燃岳火山灰と桜島火山灰を単体でそれぞれ細骨材量の 10, 20, 30 および 50%混入率で置換したところ、保水性 ILB の JIS 規格を満足するには、新燃岳火山灰は最大 30% (vol.) 混入率、桜島火山灰は最大 20% (vol.) 混入率であることを明らかにした。保水性能を高めるには、両火山灰は 10%混入率よりも 50%混入率と多めに混入すると保水量が徐々に増加する傾向もあり、また、30%・50%混入率の場合、微細な桜島火山灰の方が新燃岳火山灰よりも保水量が若干高まる傾向も把握した。

そこで本章では、保水性 ILB の製造に当たり両火山灰を混合使用する場合の最適な配合条件を明らかにすることを目的として検討した。この場合、良質な粗骨材・細骨材を用いて堆積している生火山灰の減容促進を図ることに配慮し、両火山灰の最適な混合比と最大の容積混入率を求めることにした。もちろん火山灰を含め、使用する骨材の品質がばらつくともブロックの品質に影響するため、骨材の組合せにより最適な混入率も変わることが想定される。ここでは火山灰を 100%使用して保水性 ILB を製造するのではなく、あくまでも良質細骨材と併用して生火山灰を細骨材として使用することを前提とし、堆積灰の減容促進を図るために、両火山灰を積極的に保水性 ILB に混入する際の混合比や最大混入率の解明を試みた。

4.2 試験概要

4.2.1 試験ブロックについて

試験ブロック（供試体）は歩道用保水性 ILB であり、その寸法は長さ 198×幅 98×高さ 60mm で、形式はストレートタイプである。第3章で製造した 2 層（表層厚：8～10mm）の供試体と異なり、ブロック面に表層を載せない基層コンクリートのみの配合で製造する。

供試体は 2013 年 6 月 26 日に、ILB などブロック製品を製造している神奈川県愛川町の A 社 JIS 認定工場に混練・製造した。その際、使用する骨材を表乾状態に調整する作業は数日前から実施した。

4.2.2 ブロックの材料

ブロックの材料として、セメントは表-1 に示す普通ポルトランドセメント（太平洋セメント、密度 3.16 g/cm³）を用いた。骨材の種類と物理的性質は表-2 に示すとおりであるが、粗骨材の碎石は東京八王子産硬質砂岩（JIS 規定の碎石 1305、最大寸法：13mm）であり、細骨材のうち砕砂（S1）は神奈川相模原産硬質砂岩、石灰砂（S2）は東京西多摩産石灰岩である。

また、混和剤は、コンクリート製品用の高性能減水剤 I 種（BASF ジャパン、主成分：ポリカルボン酸エーテル系化合物）で、セメント量の 1.0%を内割で使用した。さらに、水には水道水を使用した。

4.2.3 ブロックの配合

ブロックの基層コンクリートの示方配合は、表-3 に示すとおり、10 種類である。新燃岳・桜島火山灰の容積混合比を 3：7、5：5 および 7：3 の 3 水準とし、これで混合した火山灰の混入率を細骨材量の 20、30 および 40% (vol.) の 3 水準とする。よって 9 種類となるが、対照として火山灰無混入（混入率 0%）の 1 種類を加え、全部で 10 種類の配合とした。

実際に計量する材料は 1 配合ごと 13.0 リットル（L）分であるが、この量は、供試体 9 個（曲げ強度試験用 3 個、保水性・吸水性試験用 3 個、透水性試験用 3 個）を十分に製造できるものである。

表-1 セメントの品質

結合材*の種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結試験 (h:min)		安定性	圧縮強さ (N/mm ²)			全アルカリ (%)
			始発	終結		3日	7日	28日	
普通ポルトランドセメント	3.16	3330	2:11	3:21	良	30.5	46.4	63.4	0.56
JIS R 5210	-	≧2500	≧60min	≧10h	良	≧12.5	≧22.5	≧42.5	≧0.75

* 太平洋セメント(株)セメント試験成績表(2013年6月度)

表-2 骨材の種類と物理的性質

区分	骨材の種類	記号	密度 (g/cm ³)		吸水率 (%)	粗粒率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	微粒分量 (%)	有機不純物	産地 (火山灰は集積地)
			表乾	絶乾							
基層 コンク リート	粗 碎石	G	2.65	2.62	1.03	6.47	1.57	59.9	—	—	東京都八王子市
	細 砕砂	S ₁	2.63	2.60	0.98	3.04	1.44	55.2	1.6	薄い色	神奈川県相模原市
	石灰砂	S ₂	2.68	2.66	0.92	3.01	1.78	66.9	2.1	薄い色	東京都奥多摩町
	火山灰1*	T	2.28	2.12	7.60	2.20	1.17	55.3	5.5	同等色	宮崎県都城市高城町
	火山灰2*	S	2.67	2.65	0.93	0.61	1.64	62.0	13.3	薄い色	鹿児島市吉野町

* T: 新燃岳火山灰, S: 桜島火山灰

4.2.4 ブロックの成型製造方法と養生方法

練り混ぜ、製造および養生に用いた機材は、第3章のものと同一である。各配合の材料は、表乾状態とした骨材やセメントを計量後、ビニール袋に各々入れて準備した。また、混和剤はセメント量の1%内割としていた量を精密に計量し、それを入れた容器に水を慎重に加えながら攪拌して配合水量として準備した。

コンクリートの練り混ぜは、パン型50Lミキサに13.0L分の【粗骨材+細骨材+セメント】を順に投入 → 練り混ぜ30秒間 → 水の投入 → 練り混ぜ3分間、の手順でおこなった。練り混ぜられたコンクリートは一輪車で直ちにブロック成型機まで運び、第3章と同様にブロックを振動加圧方式で成型した。このようにして製造された10種類のブロック(供試体)は、敷き鋼板上に載せたまま試験室の床に静置して硬化を待ち、翌朝、ブロック表面に記号を記して寸法や質量などを測定後、大型恒温恒湿室(20℃, 60%)へ搬入し、室内の棚の木製スノコに載せて材齢7日まで気中養生をおこなった。

4.2.5 各種試験方法

1) ブロックの単位容積質量および充填率の計算

ブロックを製造した翌朝に、その全数の寸法と質量を測定し、単位容積質量を求めた。また、ブロックの充填率は、その単位容積質量を充填率100%とした試験ブロックの単位容積質量で除した値(%)であり¹⁾、充填率100%の単位容積質量とは空隙ゼロとしたもので、配合表の質量を各々の密度で除して合計した値(混和剤量をその合計には含めない)となる。

表-3 基層コンクリートの示方配合

バッチ No.	火山灰 混入率 (Vol. %)	T:S* (容積 比)	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)									
				水	セメント	細 骨 材			粗骨材 1305	混和 剤** C×1%			
						砕砂 S1	石灰砂 S2	火山灰*					
1	0	—	30	105	350 (OPC)	500	1550	—	—	30	3.5		
2	20	3:7				400	1240	105	287			30	3.5
3		5:5						175	205				
4		7:3											
5	30	3:7				350	1085	158	431			30	3.5
6		5:5						263	308				
7		7:3											
8	40	3:7				300	930	210	575			30	3.5
9		5:5						350	410				
10		7:3											

* T: 新燃岳火山灰, S: 桜島火山灰, ** 高性能減水剤(I種)

2) ブロックの曲げ強度試験，保水性試験，吸水性試験および透水性試験

ブロックの曲げ強度試験，保水性試験，吸水性試験および透水性試験は，材齢 7 日の 2013 年 7 月 3 日に実施した。なお，これらの試験方法は第 3 章と同様であるので記載を省略する。

4.3 試験結果および考察

4.3.1 保水性 ILB の曲げ強度と単位容積質量および充填率の関係

保水性ブロックの曲げ強度を図-1 に示す。火山灰混入率 0%（無混入）の曲げ強度が平均 5.04 N/mm² で，10 配合の中では最も高い強度を示し，ほかの火山灰混入ブロックよりも有意に高く，1.0~2.0 N/mm² の強度差を示した ($P < 0.05$)。また，火山灰混入率 20, 30, 40% の順に曲げ強度の平均値を示すと 3.75, 3.33, 3.10 N/mm² となり，火山灰混入率が増すにつれて曲げ強度は徐々に低下する傾向が認められた ($P < 0.05$)。

また，新燃岳・桜島の火山灰の混合割合（容積比 T : S）を火山灰混入率別にみると，容積比 7 : 3 と桜島火山灰の少ないものほど曲げ強度が高く発現する傾向が有意に認められた ($P < 0.05$)。図-2 に示すように，桜島火山灰は微細で粒度が細かな方にまとまって分布している一方，新燃岳火山灰は細骨材の標準粒度範囲にほぼ入って適当な粒度分布をしている。このため桜島火山灰の量が多い 3 : 7 では，配合したコンクリートの振動加圧作業で十分に締固められず，ブロック強度を若干ではあるが低下させたと考えられる。

図-3 に，保水性 ILB の単位容積重量と曲げ強度との関係を示す。両者の間に高い相関が

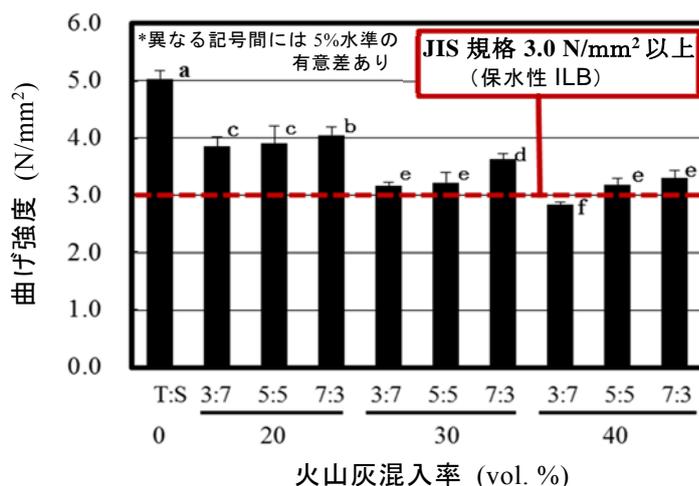


図-1 材齢 7 日の保水性 ILB の曲げ強度の比較

認められた ($P < 0.001$). この単位容積重量は、振動加圧成型作業で締固められたコンクリートの充填程度も示している. そこで、保水性 ILB の充填率と単位容積重量の関係を図-4

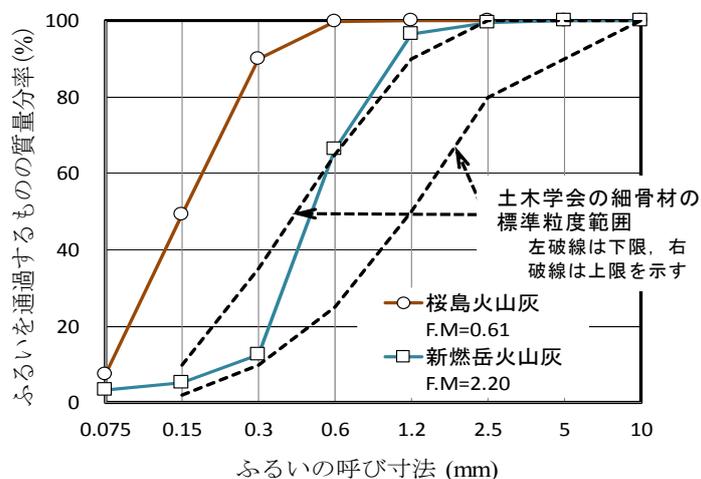


図-2 新燃岳と桜島の火山灰の粒度曲線

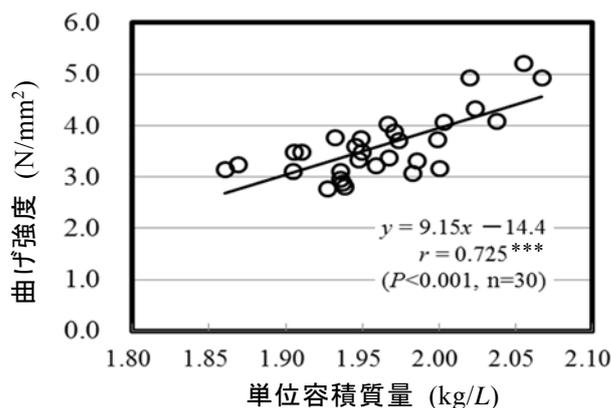


図-3 材齢 7 日の単位容積質量と曲げ強度の関係

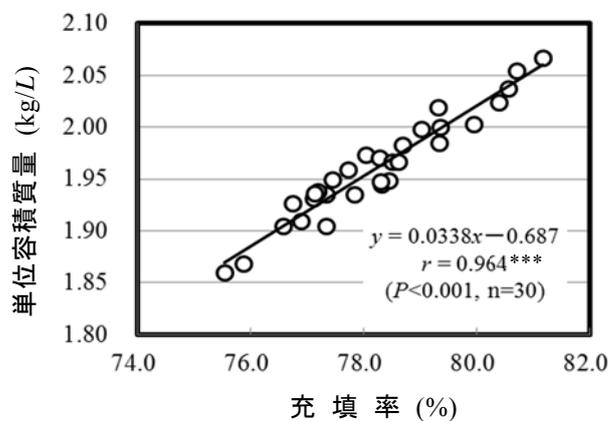


図-4 材齢 7 日の充填率と単位容積質量の関係

に示すと、両者の間に高い相関が示された ($P < 0.001$)。さらに、図示していないが、充填率と曲げ強度との相関係数は 0.709 で、これも有意に高い相関となった ($P < 0.001$)。このように保水性 ILB は、振動加圧成型作業でコンクリートが締固められ、その際の充填率が高いほど単位容積重量および曲げ強度を高めたといえる。

単体で使用した桜島火山灰の 30%混入の保水性 ILB の曲げ強度は 2.0 N/mm^2 、50%混入は 1.0 N/mm^2 であり、微粉の多い桜島火山灰を多めに使用するほど曲げ強度が低く発現した²⁾。この桜島火山灰に新燃岳火山灰を混合することにより、細骨材の粒度分布が、単体で使用するよりも改善されて、単位容積質量および曲げ強度の増加に寄与したものと考えられる。また、充填率 76~81%の保水性 ILB の空隙率は単純に 24~19%となる。この空隙率が多くなればブロック内の空隙が増すことになるので、ブロックの吸水性や保水性に影響することが考えられる。

4.3.2 ブロックの保水性

保水性 ILB の保水性は保水量で示すことになっており、図-5 に示す分布となった。その保水性 ILB の保水量の規格は 0.15 g/cm^3 以上であり、いずれのブロックもその規格を十分に満たしている。最も低い値を示したものは、火山灰無混入のものであった。

充填率と保水量の相関を図示していないが、その相関係数は -0.808 ($P < 0.001$)であった。このことから、充填率が高いほど空隙が減るために、その空隙間に保持される水量も少なくなることが示唆された。火山灰混入ブロックの保水量は、総じて、火山灰混入率が 30%と 40%では若干後者が、また、新燃岳・桜島の火山灰の混合割合では桜島火山灰が多

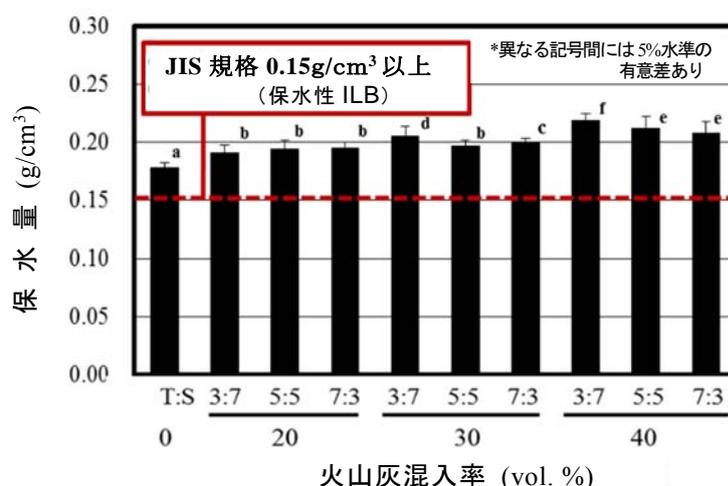


図-5 材齢 7 日の保水性 ILB の保水量の比較

いほど、わずかに高めに推移した。両火山灰とも火山灰混入率が高いほど保水量が高まる傾向があった¹⁾が、本試験でも同様であった。

4.3.3 ブロックの吸水性

保水性 ILB の吸水性は水の吸上げ高さで示すことになっており、図-5 に試験結果を示す。その JIS 規格は 70%以上である。吸水性はブロック底部からの吸上げ性能と言える。いずれの配合もその規格を十分に上回ったが、その中でも最も低位なものは火山灰無混入のブロックであった ($P < 0.05$)。火山灰を混入したすべてのブロックは 90%以上の吸上げ高さを示した。ただ、火山灰混入率 30%の T : S = 7 : 3, 同 40%の 5 : 5 と 7 : 3 のブロックは、ほかの火山灰混入ブロックよりも、吸水性が有意に低く発現した ($P < 0.05$)。

T : S = 7 : 3 は曲げ強度が増加する関係でありながら吸水性は若干低下した。これには両火山灰の小さい粗粒率のものと良質細骨材との混合具合が良好だったことが考えられる。このことが充填率を高めに維持し、空隙を低減する関係でブロックの曲げ強度は高まったことが想定される。また、充填率と吸水性との相関係数は -0.448 ($P < 0.05$) で、充填率が高いほど吸水性がやや低下する傾向が認められた。振動加圧成型作業で締めめられてブロックの充填率が高まるとともに密実が進み、ブロック底部からの吸上げが若干低下したと考えられる。

また、保水性 ILB の配合で 2 種混合の火山灰を多く混入すると曲げ強度を低下させたが、吸水性や保水性の試験で火山灰混入率 30%および 40%のうち微細な桜島火山灰の多い T : S = 3 : 7 のブロックは、新燃岳火山灰の多い 7 : 3 のものより、わずかに大きな吸上げ高さと保水量を示した。これには、微細な火山灰を混入することにより、ブロック組織が

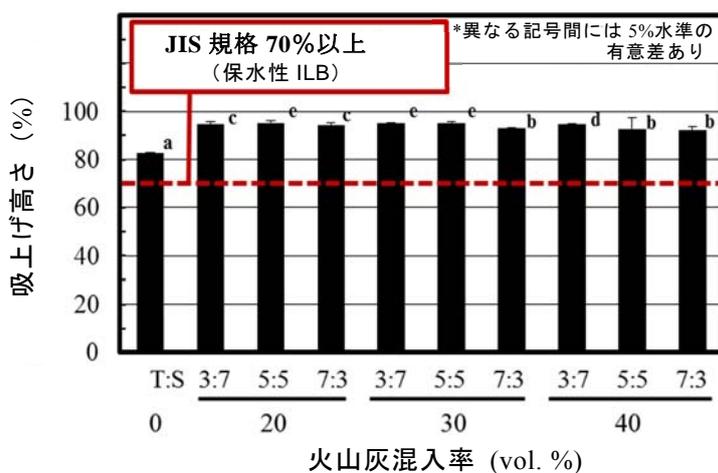


図-6 材齢 7 日の保水性 ILB の吸上げ高さの比較

密実に形成されることから、その密実な組織の中の水みち、あるいは空隙における毛細管現象の効果によって、ブロック底面から水を吸上げる吸水性と内部に吸上げられた水を保持する保水性がやや高まったものと推察される。

4.3.4 ブロックの透水係数

保水性 ILB の透水係数の比較を図-7 に示す。保水性 ILB に対する透水係数は、JIS 規格の適用外である。この結果、火山灰無混入の保水性 ILB の透水係数は $2.3 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ で、 $1.5 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 以下で分布している火山灰混入のものよりも有意に高かった ($P < 0.05$)。また、火山灰混入ブロックでは、桜島火山灰の混合割合が多いものほど、透水係数を小さくさせている ($P < 0.05$)。また、この透水係数の比較図は、図-1 に示す曲げ強度の比較図と、その配合別の並び・分布が酷似していることが判読できる。ブロックの透水があるほど新燃岳火山灰を多めに配合したものであり、その方が曲げ強度も大きく発現しているため、生火山灰の有効活用を考える場合は、図-2 に示す細骨材の粒度曲線において土木学会の標準粒度範囲に入るものを選定することは重要なことと考えられる。

写真-1 において、桜島火山灰の多い 3 : 7 のブロックの表面は、微細な火山灰の混入により緻密に形成されていることが明らかである。そこにその上面から水を掛け流して透水試験をおこなうので、透水しにくい表面であるほど透水係数を低下させた結果が、図-7 といえる。この透水係数は 30 秒間に 6 cm 厚のブロック内を透過する水量を求めて算出されるが、短い時間の試験であっても配合別に有意な差異が認められた。火山灰混入率 20% から 40% の間では、透水係数が若干後者ほど低めに発現したが、新燃岳火山灰の多い T : S = 7 : 3 のものほど比較的透水しやすいブロックを作出している。ただ、その 7 : 3 配合の

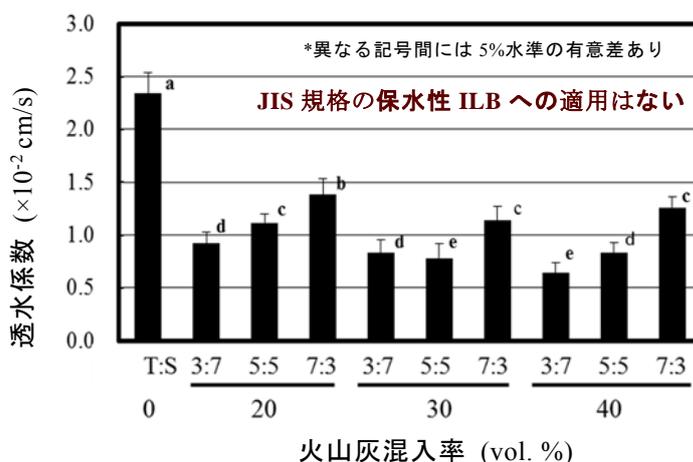


図-7 材齢 7 日の保水性 ILB の透水係数の比較

ものでも火山灰無混入のブロックの透水係数には達していない。

また、ブロックは振動加圧成型作業により密実に締固められて製造されるけれども、微細な火山灰の量が多いブロックほど細かなモルタルが表面ほど緻密な面に形成された(写真-1)。このため、その表層部では毛細管圧が高くなり透水を低くする作用が生じたものと考えられるが、製造時のブロックの密実な締固めにより保水性は若干高まるものの、ブロック表面から内部への透水や内部から底面への保水の移動が制限されるとなれば、保水性 ILB のヒートアイランド現象の緩和効果が薄れることが懸念される。それは、吸水によりブロック内部に保持された水は、外気が温められるにつれて内部も暖められながら、毛細管現象でブロック表面まで水分を上昇しようにも、ブロック表層組織の密実化で目詰まりとなり、表層からの蒸発・気化は抑制されることが想定されるからである。したがって、微細な火山灰の多めの混入は、保水性を少なからず向上させる以上に、ブロック表面からの蒸発を抑制する可能性があるので、保水性 ILB の温度上昇抑制機能を検討すべき課題といえる。

こうした火山灰等のコンクリートへの混入率に関して、例えば、**第3章 3.1 まえがき**

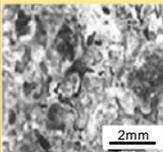
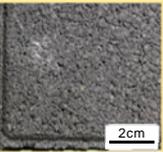
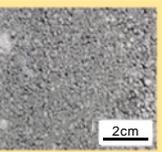
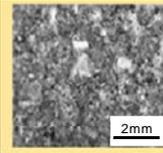
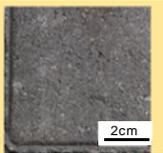
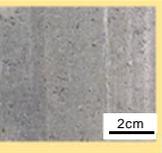
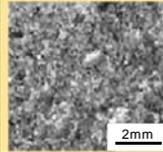
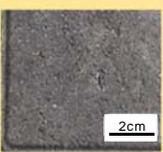
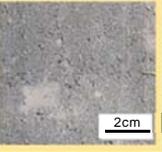
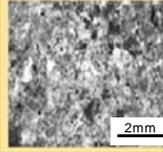
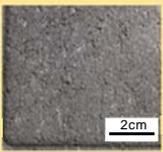
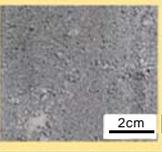
火山灰混入率	T:S	内部拡大(15倍)	表面	底面
0%	-			
30%	3.7			
	5.5			
	7.3			

写真-1 火山灰混入率 0%・30%の保水性 ILB の内部、表面および底面の比較
(表中、T:S=新燃岳火山灰と桜島火山灰の容積比)

で「熔融スラグ」について述べたが、その有効利用では最大どの程度を混入するかを試験的に把握している。すでにリサイクル製品のマークを記した縁石コンクリートブロックなどは、公共事業の現場に納入されて久しい。熔融スラグを多く混入すると、スラグ自体の色調が黒いものが多いと黒ずみが出ることもあるため、コンクリートブロックの外表面の色調²⁾に配慮する必要もある。

スラグの混入率は、地域によって異なるが 20～30%程度を混入可能としている場合が多い³⁾。尾上ら⁴⁾は宮崎市中央部の一般廃棄物および産業廃棄物で可燃物の焼却熔融スラグのコンクリートへの混入率に関する研究から、25%を上限としている。一方、歩道を主体にリサイクル ILB も多くなってきたが、その混入率は 20～30%が多い⁵⁾。もちろんこのスラグを 100%混入してこれを三度もリサイクルして再三混入した場合でも、熔融スラグがガラス質であるために、溶出する重金属の溶出量は環境庁告示 No.46 の基準値を越すことはなかった⁶⁾。いずれにしても、都市ゴミは多様な物が集積されるだけでなく季節や地域でも多種多様なために製造される熔融スラグの性質が変動するだけに、その混入率は試験をおこないながら吟味する必要がある。一方、火山灰の場合は噴火火山が特定されるから、細骨材としての物理的性質や化学的性質もデータ化されて、それを有効利用する上での安全性あるいは危険性の確認は取り易いと思われる。

以上のことから、堆積灰の減容促進を図ることを考慮し、保水量と吸上げ高さでは T : S 比が違っても大差なかったことから、両火山灰の混合容積比は混合方法や製品製造上の作業性から T : S = 5 : 5 が望ましく、混合火山灰とした最大混入率は 30% (vol.) が妥当である。また、この配合による保水性 ILB は、曲げ強度は火山灰無混入の 65%程度しか発現していないが JIS 規格 3.0 N/mm² 以上を満足し、かつ、保水性や吸水性も JIS 規格以上を確保できるものである。

4.4 まとめと課題

本試験は、新燃岳火山灰の有効利用として、桜島火山灰も使用して両者の混合配合を考え、火山灰の容積混入率を 20, 30 および 40% (vol.) とし、その中で両者の混合容積比 (T : S) を 3 : 7, 5 : 5 および 7 : 3 とした保水性 ILB を製造し、曲げ強度や保水機能などの JIS 規格を満足するかの観点から比較検討した。

本試験の結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 曲げ強度の JIS 規格 3.0 N/mm² 以上を発現させる保水性 ILB の配合として、新燃岳・桜島の火山灰の混合比 T : S = 3 : 7, 5 : 5, 7 : 3 に対しては火山灰混入率 20%, 同様に

5 : 5 と 7 : 3 では同じく 30%と 40%が該当した。ただ、3 : 7 の配合では、微細な火山灰の偏った粒度分布のものを多くしているため、コンクリートの締固めが十分でないために充填率を低くさせ単位容積質量も小さくさせており、このことが曲げ強度を低下させた要因と推察された。

- (2) 保水性 ILB の吸水性では水の吸上げ高さ 70%以上の JIS 規格をいずれの配合も満足し、その配合間に大差はなかった。また、保水性では、保水量 0.15 g/cm^3 以上の JIS 規格をすべての配合が満たし、配合間の差は少なかった。保水量を配合別に細かにみると、火山灰混入率 30%と 40%では若干後者が、また、両火山灰の混合の際に桜島火山灰が多い配合が、保水量をわずかながら高めた。
- (3) 堆積灰の減容促進に配慮した配合による保水性 ILB は、曲げ強度や保水性・吸水性の機能性の JIS 規格を満足した。このため、両火山灰を容積比 T : S=5 : 5 で混合した混合火山灰の最大混入率 30%とする保水性 ILB を開発することができた。

新燃岳と桜島の火山灰の混合配合により JIS 規格を満足する歩道用保水性 ILB を開発できたので、これらを歩道に敷設し暑熱環境時の温度測定をおこない、ヒートアイランド現象の緩和効果が得られるかを実証的に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 唐沢明彦・長野健一：インターロッキングブロックへのエコセメントの適用に関する検討，土木学会第 63 回年次学術講演会要旨集，pp.297-298，2008
- 2) 細川吉晴・千賀年浩・安部明彦：南九州に産する火山灰を混入したインターロッキングブロックの特性，セメント・コンクリート論文集，Vol. 67，pp. 304-310，2014
- 2) 例えば，細川吉晴・太田好重・松村茂男・斉藤俊一：ゴミ熔融スラグを混入したコンクリート製品の特性，第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.506-507，2001
- 3) Hosokawa Y., Shoya M., Tsukinaga Y., Aba M., Yamamichi H., Takahashi S., Seino K., Echigoya K., Komuro T., Sugawara T. and Carroll T.: Recycling molten slag from municipal waste to construction materials in Japan –A case study of Tohoku District of Japan–, Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials (Vancouver), CD-ROM: Session 3.5, pp.1-10, 2005
- 4) 尾上幸造・関戸知雄・中澤隆雄・中村公生：宮崎県で製造されるゴミ熔融スラグ細骨材を用いたコンクリートの基礎的性質に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.65，

pp.368-275, 2011

- 5) Hosokawa Y., Shoya M., Tsukinaga Y., Aba M., Yamamichi H. and Sugawara T.: Recycling molten slag from waste to concrete products and construction materials in Japan—A case study report—, Proceedings of the 23rd Our World in Concrete & Structures (Singapore), Vol.23, pp.289-296, 2004
- 6) 細川吉晴:ゴミ熔融スラグを混入した持続可能な生態系創造ブロックの技術開発, 第 3 回 JICE 国土技術研究センター研究開発助成成果報告会成果概要集, pp.18-25, 2003

第 5 章 新燃岳と桜島の混合火山灰を混入した保水性インターロッキングブロックの歩道の温度上昇抑制効果

5.1 まえがき

ヒートアイランド現象は、都市の気温が周囲よりも高くなる現象のことであり、気温分布図において高温域が都市を中心に島のような形状に表れることから、この名称がきている。太陽からの直達日射はもちろん、都市における人工的な構造物からの輻射熱や排熱、地面からの輻射熱などによって気温が上昇する現象のことである¹⁾。その広がりには都市部に限定して見られるものであるが、地球温暖化とは異なる。地球温暖化は、18 世紀半ばに産業革命が始まって以降、地球上の気温や海水温が上昇して氷河などが縮小する現象で、異常高温や干ばつ・大雨の増加などの気候変化を伴い、大気中の二酸化炭素などの温室効果ガスの増加が主な要因として気温が上昇する現象である²⁾といわれている。わが国では都市部のみならず暖地における顕著な夏季の暑熱現象もあり、例えば街中の商店街の片側式アーケードの下の歩道などから受ける輻射熱は相当の暑さを感じる。こうした身近な場所に発生するヒートアイランド現象を緩和する対策を具体的に探求することは重要なことである。

本研究は、ヒートアイランド現象の緩和をめざして開発した生火山灰混入の保水性 ILB の温度上昇抑制の効果を確認しようと試みたものである。いままで生火山灰の有効活用策のひとつとして、その吸水率の高い特性に着目して、歩道などに敷設する保水性 ILB への適用を検討した。新燃岳火山灰の利用を主眼に取り組んだ**第 3 章**では、比較のために近くに産する桜島の火山灰も加えて、かつ、噴火が続く場合は堆積したままではさらに深刻になるためにその減容促進も図るために、可能な限り堆積灰の多くを保水性 ILB へ活用することを考えた。その手始めに、両火山灰を単体で混入できる最大割合が保水性 ILB の JIS 規格を満足するかどうかで探った。その結果、良質な細骨材の置換割合、すなわち火山灰容積混入率は新燃岳火山灰が最大 30%、桜島のそれが最大 20%であることを把握した。各々の生火山灰を混入して製造した保水性 ILB の保水量はその混入率が高いほど高まるが、曲げ強度では保水性 ILB の JIS 規格を必ずしも満足するものではなく、その規格以下のものもあった。また、**第 4 章**では、保水性 ILB の保水性と吸水性、曲げ強度の JIS 規格以上を確保できるような両火山灰の混合組み合わせの結果から、両者を容積比 5 : 5 で混合した火山灰の細骨材量への置換割合、すなわち火山灰容積混入率は最大 30%であることを摘出した。

このように両火山灰を適切な割合で混合した保水性 ILB（以降、保水性 ILB（灰）という）は、火山灰無混入の保水性 ILB（以降、保水性 ILB（無）という）より保水量、吸水性および曲げ強度において JIS 規格以上を確保できた。そこで、これを歩道や広場などに敷設した場合、他の資材よりも温度上昇抑制機能を発揮し、ヒートアイランド現象緩和に寄与することを確認する必要がある。

ここでは、暑熱期における歩道の温度上昇抑制に保水性 ILB（灰）がどの程度寄与するかを明らかにするために、暑熱期に試験歩道で温度測定フィールド試験をおこなった。

5.2 フィールド試験の概要

5.2.1 試験に用いた資材と ILB の試験

2013 年 7 月 10 日に、新燃岳火山灰 (T)と桜島火山灰 (S) を容積比 T : S=5 : 5 で混合した火山灰を細骨材量の 0%（無混入）と 30%の容積混入率で 2 種類の保水性 ILB を、表-1 の示方配合によって製造した。ブロックは試験室内で気中養生した（写真-1 (a)）のち、材齢 7 日で単位容積質量と充填率、曲げ強度、吸水性・保水性試験を、第 3 章と同様な方法でおこなった。なお、透水性試験は実施しなかった。養生を終えたブロックは屋外のストックヤードに一般製品と同様にパレット積みした。また、普通 ILB は表-1 に示す示方配合で 2013 年 6 月 12 日に製造した市販のもので、材齢 35 日で同様の試験をおこなった。

5.2.2 フィールド試験地の施工

フィールド試験は、保水性舗装ブロック品質規格検討委員会が定める「保水性舗装用コンクリート品質規格」に基づき、2013 年 7 月 11 日にブロック製品工場 (JIS 認定工場、神奈川県愛甲郡愛川町中津 6915) から近い日本国土開発 (株) 技術センター (神奈川県愛甲郡愛川町中津 4036-1) の敷地の一部に施工した (図-1)。

このフィールド試験では、保水性 ILB（灰）と比較するために、保水性 ILB（無）、普通

表-1 コンクリートの示方配合

ILBの種類	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)									
		水 W	セメント C	細 骨 材				粗骨材		混和剤* C×1%	
				砕砂	石灰砂	高炉 スラグ	5~2.5mm (7号)	火山灰 T S	1305 (6号)		
普通ILB	30	96	320	550	700	125	700	—	—	50	3.2
保水性ILB（無）	30	105	350	500	1550	—	—	—	—	30	3.5
保水性ILB（灰）**	30	105	350	350	1085	—	—	263	308	30	3.5

* 高性能減水剤 (I種) , **火山灰容積混入率=30%, 火山灰容積混合比(新燃岳T : 桜島S) = 5 : 5

ILB、芝生、アスファルト舗装 (As) も加えた 5 種類の資材により比較検討した。その試験歩道の配置計画を図-1 に示す。2013 年 7 月 11 日に、陽射しの入射角度とその時間帯などを参考にフィールド試験地を選定した。その場所は、図中の大型実験棟の西側の空き地にあり、その南側の As 道路と縁石コンクリートブロックを利用した。図-2 に試験歩道の ILB 敷設断面³⁾ と温度測定位置を示す。

試験歩道の施工状況を写真-1 b~f に示す。まずブロックの 6cm の厚さを考慮して、仕上げのレベルに水系を張り、路盤の下端まで約 20cm の表土を剥ぎ取って平らに均してから、クラッシュランとして市販の砕石 (20mm) を 15cm 厚で敷き転圧して平坦にした (写真-1 b)。次に、ブロック張りする敷地に不織布を張り、それがずれないように細部止めを施した (写真-1 c~d)。その不織布の上に、サンドクッションとして 3cm 厚で市販の川砂を敷き、カケヤと角材でブロックを張る面を平らに均した (写真-1 e)。次に、1m² 分のブロック 50 個ずつで 3 種類の区画を連続で試験歩道を敷設した (写真-1 f)。この場合、ブロックの敷設パターンは比較的単純な「バスケット織り」⁴⁾ とし、隣同士のブロックを噛み合わせるように注意して配置した。その後、不陸を調整したブロック面にまき出した市販の珪砂をホ



図-1 試験歩道の配置計画

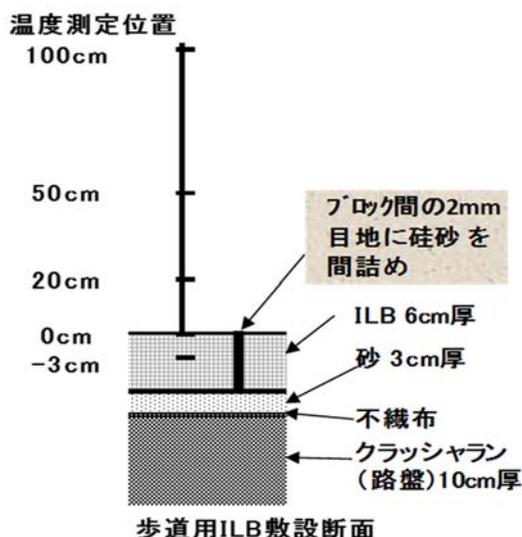


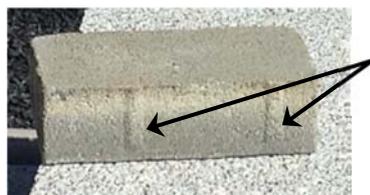
図-2 試験歩道の ILB 敷設断面と温度測定位置

ウキで掃きながらブロック目地に入念に充填した. 目地の間隔は写真-2 に示す突起高 2mm



写真-1 フィールド試験地の設営

- a : 製造ブロックの気中養生(2013.7.10)
- b : 路盤碎石の敷き込み(2013.7.11)
- c : 不織布を張る
- d : 不織布の細部止め作業と市販の敷砂
- e : 敷砂の処理後の突固めと平坦作業
- f : ILB 50 個で $1 \times 1\text{m} = 1\text{m}^2$ を敷設するが, これで 3 区画を施工



ストレートタイプ ILB の突起 2mm 高の目地キープ

写真-2 目地キープ

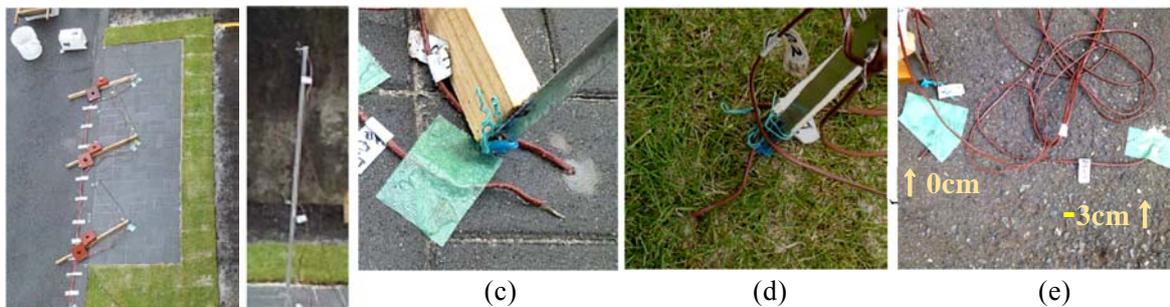


写真-3 試験地の全景(a)と熱電対の位置方法(b~e)

(a)

(b)

- (b) 高さは上から 100, 50, 20cm で熱電対を横に張り出す. 目地処理済み.
- (c) 3 種類の ILB: 熱電対を表面 0cm に接着剤で接着し, そのすぐ後方に粘着テープで固定. ブロック内部 (-3cm) はドリルで 3cm 掘った穴先に熱電対を差込み, セメントモルタルで充填固定.
- (d) 芝生では熱電対を表面に固定し, 土壌 3cm 深まで熱電対を差込んだ.
- (e) As: 熱電対を舗装面に接着剤とテープで固定, As 表層内部 (3cm) はドリルで 3cm 掘った先に熱電対を差込み, セメントモルタルで充填固定.

の目地キープで正確に目地が維持される。

さらに、芝生は図-1 に示すように、ILB の 3 区画の右端およびその周囲に隙間なく約 3m²を張った。この芝生は市販の姫高麗芝（ひめこうらいしば）で根・土壌を含め 3~5cm の厚さがあった。

さらにまた、隣接する道路の As（アスファルト混合物，粗粒度 As：20mm）の一部に温度測定地点を、芝生の温度測定地点に近いところに配置した。

5.2.3 温度測定方法

温度測定の位置は、国土交通省関東地方整備局が 2004 年に「環境舗装プロジェクト」を立ち上げ、保水性舗装の温度測定を路上が 0.4, 1.5, 3.0m, 路面が -1cm で実施した⁵⁾。山口⁶⁾は、校庭の温度測定で 5 高度（0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1.5m）や 2 高度（0.2, 1.5m：黒球温度用）を示しつつ 0.2m と 1.5m の温度変化を掲載した。また、体感温度の測定高さは 1.1m といわれ⁷⁾、舗装道路関係では表面 0cm と内部（-0.5cm⁸⁾、-1cm⁹⁾、-3cm¹⁰⁾あるいはブロックの底面（-5cm¹¹⁾）で測定していた。そこで、フィールド試験では資材内部、表面、上方において気化熱による温度上昇抑制が生じると考えて、その高さを -3, 0, 20, 50, 100cm の 5 箇所とした。

また、各資材区の面的な測点はその区画 1m×1m の中央である。図-2 および写真-3 にあるように、温度は熱電対（東京測器研究所，T-G-0.32，純銅線（赤：+），コンスタンタン（白：-））で測定しデータロガーにて温度データを収集した。熱電対の設置方法を写真-3 に示す。深さ -3cm の測点は区画中央のブロック 1 個の中心にドリルで 3cm 掘り、その穴に熱電対の先端を差込み、隙間をセメントモルタルで充填し固定した（写真-3 (c)）。ブロック表面中央の測点は熱電対の先端を表面に接着剤で固定させて、そのすぐ後方を粘着テープでブロック面に固定した（写真-3 (c)）。各区画の中央点に立てた熱電対保持材は木材とアルミ角棒で構成し、高さ別に温度測定する際の転倒防止用に木材に金属製重りを載せた。

さらに、温度測定の前に 1 区画 1m²に水道水 10L を電動噴霧器で入念に散水したが、この水量は 1 時間に 10mm の降雨（やや強い雨）を想定して決めた。場合により、散水後に扇風機で風を送り、蒸発・気化現象を再現しながら温度を測定した。

5.2.4 保水性 ILB など熱画像撮影方法

フィールド試験期間中、敷設現場の熱画像を可視画像と共に赤外線サーモグラフィ装置（日本アビオニクス，TH9100MV）で撮影した。

5.3 結果および考察

5.3.1 使用した ILB の性能比較

表-2 にフィールド試験に用いた 3 種類の ILB の性能結果を示す。この中で、保水性 ILB の 2 種類は JIS 規格を満足したものである。保水量は保水性 ILB (灰) が保水性 ILB (無) より 0.02g/cm^3 大きく、吸上げ高さも 95% を越す大きな値を示した。

また、両者の曲げ強度は、表-2 から、2013 年 6 月 26 日製造時とまったく同一なコンクリート配合であっても、約 6% 低いものであった。この ILB の製造は同年 7 月 3 日であるが、試験室外は 25°C 内外の気温であっても室温は 30°C ほどになり、その中で火山灰と細骨材の表乾状態調整時には散水し入念に細骨材を攪拌したとしても乾きが早かったため、結果的に水量がわずかに多めに配合した影響があったと思われる。その 7 日後の 7 月 10 日に各種 JIS 試験をおこなった。さらに、ILB 製造工程で脱型直後に移動すると型崩れる恐れがあるので、その硬化を待つ必要から ILB 供試体は恒温恒湿室へ移設するまでの 1 日間を床に静置した。供試体を静置した昼過ぎから夜間にかけての室温は 30°C を越える状態であった。そのため、供試体の水分はコンクリート硬化に回される以上に蒸発したものと考えられる。このことは、表-2 の下側の表値 (6 月 26 日製造のもの) と比較して、単位容積質量が 1.5~3.5% も小さくなり曲げ強度も低くなった原因と推察される。

ブロック工場にはブロック製造機が 2 種類あり、実機の工場のものが油圧式の高振動加圧即時脱型方式、試験室のものが空気圧式の振動加圧即時脱型方式である。今回のブロック製造は後者の製造機でおこなったが、元々古い機械であるため製造能力が低かった。そこで工場内で同じ配合の硬練りコンクリートを用いて、ILB 製品の両者による曲げ強度に

表-2 フィールド試験に用いた 3 種類の ILB の性能結果

ILB の区分	材齢 (日)	単位容積質量 (g/cm^3)	充填率 (%)	曲げ強度 (N/mm^2)	保水量 (g/cm^3)	吸上げ高さ (%)
普通 ILB	35	2.06 ± 0.01	81.2 ± 0.4	6.69 ± 0.33	0.13 ± 0.00	60.0 ± 1.5
保水性 ILB (無)	7	2.02 ± 0.00	79.5 ± 1.6	4.74 ± 0.14 *	0.19 ± 0.01 *	88.7 ± 0.7 *
保水性 ILB (灰)	7	1.89 ± 0.03	75.4 ± 1.3	3.03 ± 0.18 *	0.21 ± 0.03 *	96.8 ± 0.8 *

* 保水性 ILB の JIS 規格を満たしている

2013.6.26 打設		結果表を、比較のために示す				
ILB の区分	材齢 (日)	単位容積質量 (g/cm^3)	充填率 (%)	曲げ強度 (N/mm^2)	保水量 (g/cm^3)	吸上げ高さ (%)
保水性 ILB (無)	7	2.05 ± 0.02	80.4 ± 0.73	5.04 ± 0.13 *	0.18 ± 0.00 *	82.6 ± 0.48 *
保水性 ILB (灰)	7	1.96 ± 0.02	78.4 ± 0.97	3.22 ± 0.18 *	0.20 ± 0.01 *	95.4 ± 0.47 *

* 保水性 ILB の JIS 規格を満たしている (2013 年 6 月 26 日製造)

どの程度の差異があるかを実験で確認した。その結果を材齢 14 日の曲げ強度として表-3 に示す。両者には明らかな差異が認められ、締固めの強い前者による曲げ強度の方が高かった。前者：後者の強度比は 100 : 73 (または 138 : 100) で、強度の変動係数は両者とも約 3.5%で強度のばらつきが小さかった。この強度比を用いると、表-2 における保水性 ILB (灰)の曲げ強度が JIS 規格ぎりぎりの 3.03 N/mm²であったものが、これを工場内の大型成形機で製造すると、1.38 倍の 4.18 N/mm²の強度になり安全側になることが分かった。

5.3.2 歩道の温度変化について

(1) 測定期間の気象概要

試験地の気象として温度・湿度を自記温湿度計で測定していたが、その固定が不十分で期間中のデータを取れなかった。そこで試験地から直線距離で約 8km と近い海老名観測所 (海老名市中新田)「海老名」¹²⁾ の過去のアメダスデータの 2013 年 7 月と 8 月から抜粋したものを表-4 に示す。この表にある 2013 年 7 月 25, 26 日および 8 月 5 日のデータから、これらの 3 日間に降水量はなく、最高気温が 28.4~32.1℃、日照時間が 7 月 25 日以

表-3 ブロック成形機の振動加圧方法の違いが曲げ強度に及ぼす影響

ILBの製造方法	曲げ強度* (N/mm ²)	変動係数 (%)	曲げ強度 比	振動加圧 方法
工場内 大型成形機 (実機)	5.75±0.19	3.3	100 (138)	油圧方式
試験室内 成型機	4.18±0.15	3.5	73 (100)	圧縮空気方式

*実機用コンクリートを両者で製造した14日材齢の曲げ強度

表-4 フィールド試験地に近い「海老名」の 2013 年 7 月 24 日～8 月 6 日の気象データ¹²⁾

月	日	降水量 (mm)	気温(℃)			平均 風速 (m/s)	日照 時間 (h)
			平均	最高	最低		
7	24	2.5	24.8	26.3	24.0	1.8	0.0
	25	0.0	25.3	28.4	23.6	1.2	0.1
	26	0.0	26.6	31.2	23.0	2.0	4.3
	27	9.0	26.8	33.0	21.5	2.5	5.9
	28	0.0	26.0	31.4	21.9	1.5	5.5
	29	3.0	25.3	27.1	24.0	1.2	0.1
	30	0.0	26.8	32.6	23.5	1.9	3.1
	31	0.0	26.0	30.4	24.3	1.7	0.3
8	1	12.0	27.6	33.5	24.3	1.8	2.7
	2	0.0	25.5	29.0	23.6	1.8	1.1
	3	0.0	25.8	29.7	23.4	1.9	4.1
	4	0.0	26.4	30.0	22.7	2.4	3.5
	5	0.0	27.8	32.1	23.4	3.0	8.9
	6	0.5	27.3	30.7	24.2	2.2	1.0

(筆者が必要部分を抜粋)

外長い時間であった。最高気温が 30℃を越す真夏日を表中に薄黄色で塗りつぶしたが、その日数は多かった。特に 8 月 5 日は気温も高く日照時間も約 9 時間と長かった。試験地の気象概要は「海老名」の状況と著しい開きはないと思われる。

降雨のあった 7 月下旬の 2 回と 8 月 1 日の 1 回の後に温度測定ができるようになったが、観測タイミングが合わず測定できなかった。そこで、温度測定の前に 1 区画 1m²に水道水 10L を電動噴霧器で入念に散水したが、この水量は 1 時間当たり 10mm の降雨（やや強い雨）を想定して決めた。散水時間帯が各区で異なるため、後続の測定区の温度データを同じ時系列になるように、散水開始時刻ごとに温度データを移動してグラフを合成し、その上で温度変化の特徴をまとめた。

(2) 歩道の高さ別温度変化

①7 月 25 日の温度変化

7 月 25 日の温度変化を図-3 (a:2013/07/25) に示した。表-4 から日照時間が短く、散水しないで乾燥状態で放置したまま温度を測定した。午後は 1 時に 10L/m² の散水を、ILB 区は約 30 分ずつ、その後、芝生は水がすぐ浸透し As は水が浸透し難いので併せて 30 分程度おこなった。その影響で一時的な温度の低下が高さの位置全体で認められた。

高さ 3cm では As と普通 ILB が高い温度を示し、芝生が最も低かった。保水性 ILB (灰) と保水性 ILB (無) はほぼ同等か、前者が 15~16 時に若干低くなった。また、高さ 0cm では芝生が 12 時ころに最も高かったが 17 時以降は逆に最も低くなった。高さ 20cm, 50cm および 100cm は外気温と同様ほとんど差がないまま変化した。

②7 月 26 日午前の温度変化

7 月 26 日は午前 10 時と午後 1 時に散水し、その後、扇風機で風を送って気化現象を再現して、温度を測定した。この日は表-4 (海老名) から日照時間が 4.3 時間と長く晴れ時々曇りの天気であったが、このフィールド試験地では晴天であったため、午前 9 時には 3 種類の ILB の表面はすでに乾燥していた。10 時に散水を各区 10L/m² で約 20 分間ずつ開始したが、3 種類の ILB の表面は天気がよかったため 12 時頃には乾燥していた。

図-3 (b: 2013/07/26 午前) において高さ別温度変化をみると、①高さ 100cm では全資材ほぼ同じ温度変化で、その温度差はなかった。②高さ 50cm では As の温度が高いほかは他の資材はほぼ同じ温度変化を示した。③高さ 20cm では保水性 ILB (無) の温度が 10 時 50 分~11 時ちょうどに高くなった。他の資材はほぼ同じ温度変化で推移した。④高さ 0cm の温度にバラツキが多く認められたが、保水性 ILB (無) は温度が最も低く、次に保水性 ILB (灰) と普通 ILB でほぼ同様な温度変化をした。両 ILB で表面の一部が湿っている箇所があるが、保水性の影響を受けていると思われる。高さ 0cm で温度が高くてもこれより

上方においては温度上昇抑制が認められた。目視観察による乾燥の速い ILB の順は、普通 ILB > 保水性 ILB (無) > 保水性 ILB (灰) であった。さらに、As と芝生の温度も高めに推移し、ほぼ同じ温度変化であった。温度変化が顕著な箇所は日陰になった箇所です、それも芝生ほど温度低下が見られた。⑤高さ-3cm において温度の高い方から順に、As > 普通 ILB > 保水性 ILB (灰) ≒ 保水性 ILB (無) > 芝生で推移し、保水性 ILB (灰、無) はともに普通 ILB より温度が 2~3℃低い傾向を示した。芝生の温度が最も低い要因は、芝草で被覆された土がまだ湿潤なため、センサー (深さ 3cm の土中) が土の温度を示していることが考えられる。

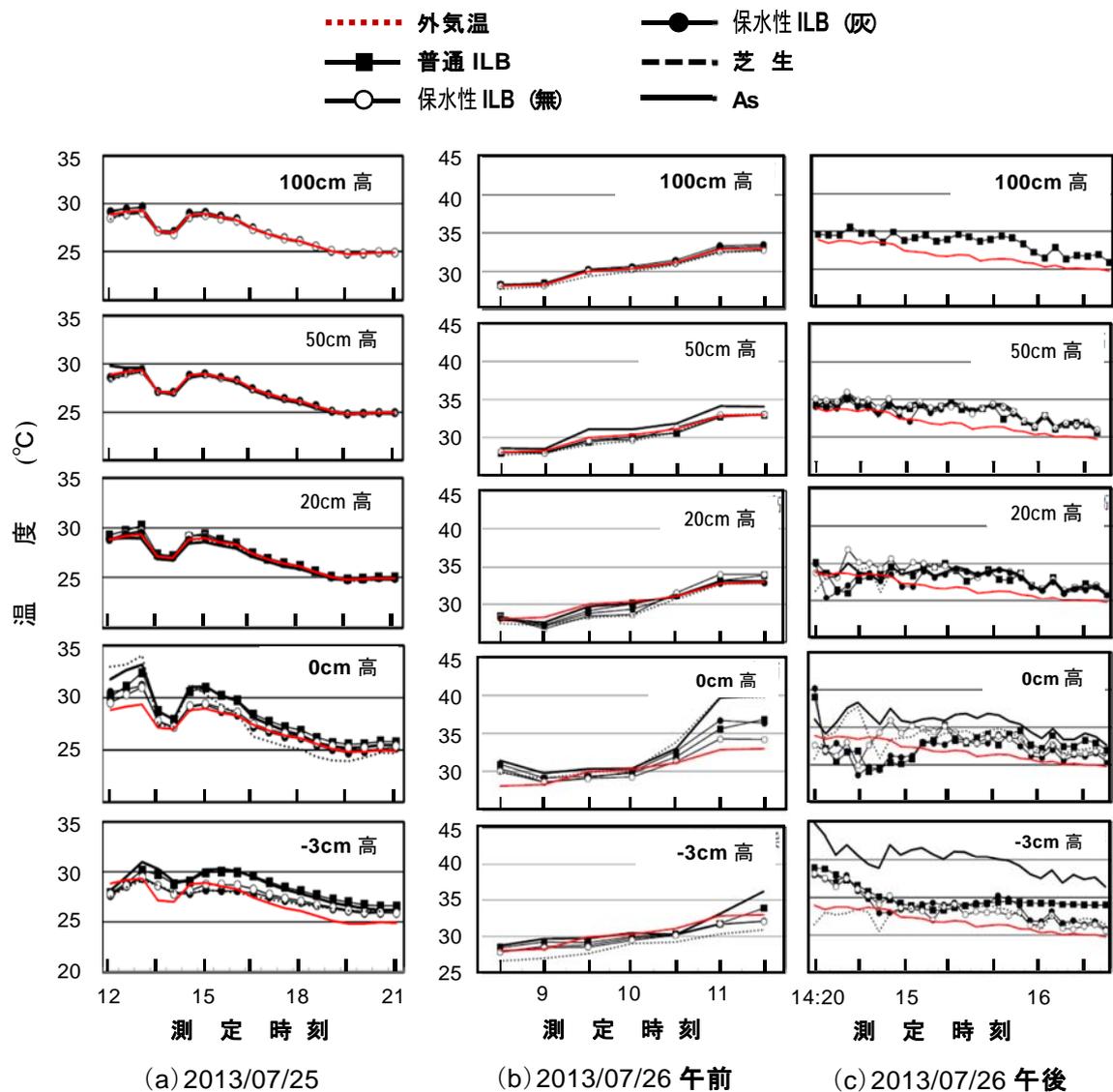


図-3 高さ別の温度変化 (a:2013/07/25, b/c : 2013/07/26)

③7月26日午後の温度変化（風速：約3.0m/s）

7月26日午後の天気は快晴となった。散水時間帯は、普通ILBが13時7分～13時25分（その後、風速約3.0m/sで扇風機を回し、ブロック区の中央（温度センサー部）に風が当たるようにした。以下、同様の送風である）、保水性ILB（灰）が13時44分～14時ちょうど、保水性ILB（無）が14時3分～14時23分、芝生が14時40分～14時43分、最後にAsが14時43分～14時44分であった。ILBでは連続する区で散水後に扇風機で風を強制的に送り気化を促進させて、ブロック表面が次のブロックの散水時間内にほぼ乾燥するまで扇風機を回し続けた。

図-3(c：2013/07/26午後)において高さ別温度変化をみると、①高さ100cmでは外気温と普通ILBのみ掲載したが、他の資材は普通ILBとほとんど同様の変化を示した。高さ100cmの温度変化は50cm、20cmとほぼ同様の傾向を示した。午前中の場合と比べて、資材の種類によって温度に差があるのは温度センサーへの風の微妙な接触頻度が影響していたといえる。②高さ20cmでは普通ILBと保水性ILB（無）が高い傾向があった。普通ILBの温度が高く発現したのは、風により気化されて、その表面が乾燥しやすかったものと考えられる。また、保水性ILB（灰）と保水性ILB（無）とを比較すると、全体的に前者が低い傾向があり、風を受けた影響で温度が低めに現れたものと推察される。③高さ0cmでは、14時40分ころに散水に伴う湿潤環境と風の影響で3種類のILBと芝生の温度が顕著に低くなった。15時ころに保水性ILB（無）の温度が急に上昇する部分も認められた。風を送るとブロック面の乾燥が促進されるため、より乾燥しやすい資材はその後に温度が高く、保水性が高いものは蒸発・気化により温度が低くなる傾向がうかがわれた。保水性ILB（灰）は他の資材よりも保水性が高いために湿り状態が長続きし、午前中の風を送らない場合と異なる結果となった。④高さ-3cmでは、Asの温度低下勾配が大きかった。他の資材は午前中と同様の傾向を示した。

図-3(c：2013/07/26午後)の高さ0cmでは、他の高さと比較して温度の上下変動や変化のバラツキが目立ち、温度変化の傾向を把握するのは難しかった。このため高さ-3cmの温度の方が安定した変化を示したので、高さ-3cmの温度変化で傾向を検討するほうが良さそうに思えた。

④8月5日の温度変化

8月5日9～16時の温度変化を30分間平均で求め、高さ別のそれを図-3(d:2013/08/05)に示した。表-4(海老名)では最高温度が32.1℃、日照時間は8.9時間と今までに最長であったから、このフィールド試験地は相当の暑熱環境下にあったといえる。特に外気温の最高は34℃に達し、風速は最大2m/sであった。散水は9時15分以降と13時20分以降の2

回、各区の順に 1m² 当たり水道水 10L を 30 分以内に電動噴霧器で入念に散水した。後者は暑熱環境下において 3 種類の ILB が 12 時頃に表面が乾燥したため、13 時 20 分に再び散水したものである。

高さ別の温度変化について、高さ 100cm、50cm および 20cm の温度は外気温と変わらずほぼ同様に推移した。高さ 0cm では 12 時ころをピークに As と芝生が温度上昇し 44℃に

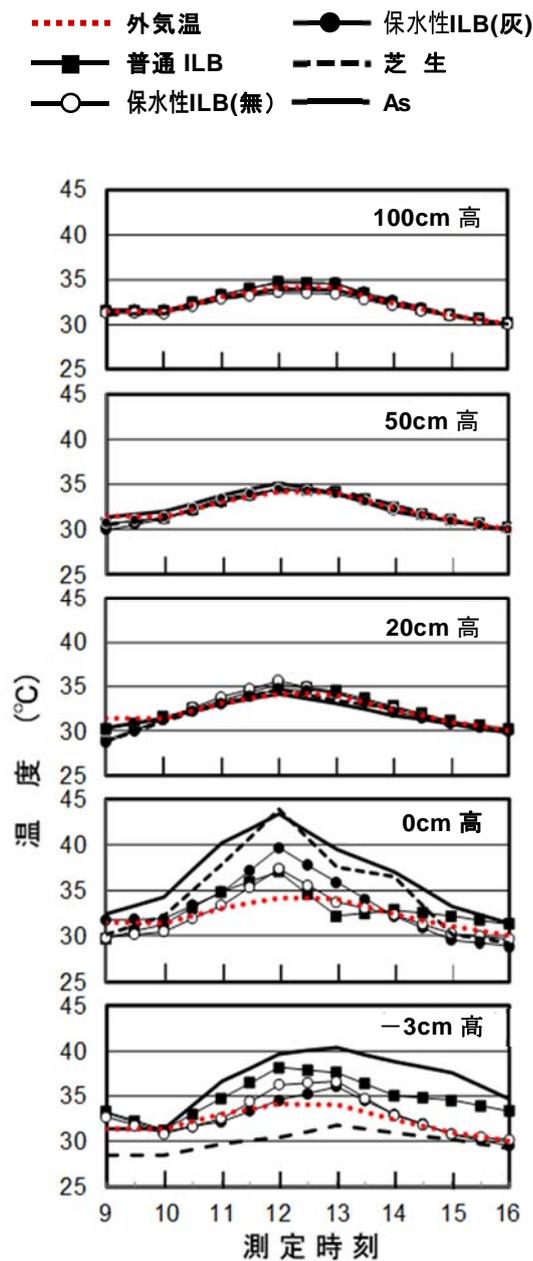


図-3 高さ別の温度変化 (d:2013/08/05)

達した。これに続いて保水性 ILB (灰) が 39°C, 保水性 ILB (無) と普通 ILB が 37°C, 外気温が 34°C となった。資材の温度差が最大で 7°C も生じた。14 時にはほぼ 32.5°C に収束し, 保水性 ILB (灰) が 15 時以降低く推移した。また, 高さ -3cm では 13 時に As が 41°C と最も高くなり, 同時刻に 38°C の普通 ILB, 37.5°C の保水性 ILB (無), 37°C の保水性 ILB (灰) であった。9 時 15 分の散水後の 10 時にほとんどの資材は温度上昇が抑制されて 31°C に収束したが, 2 回目の 13 時 20 分の散水後に保水性 ILB (灰) と保水性 ILB (無) は普通 ILB よりも緩やかに温度上昇抑制をしている。そこで保水性 ILB の両者は保水性があるため散水によって水分が補給されると ILB 内の保持水を緩やかに蒸発・気化させているようにと考えられる。15 時過ぎに日射が高い建物に遮られたが, 午後の散水の影響もあり 17 時頃にブロック表面がようやく乾燥した。

(3) 保水性 ILB などの熱画像から読み取れる目地の温度上昇抑制機能

写真-4 に 2013 年 7 月 26 日 16 時 35 分～16 時 38 分における 3 分間だけ撮影した可視画像と熱画像の 4 組を示す。ほかにも撮影したが使えるのはこれだけであった。3 分間の撮影であるため, 散水後の経過時間は考慮する必要があるが, 画像間の温度差は小さいと考える。4 組の画像で 3 つの ILB 区における散水は開始 (13 時 7 分) から終了 (14 時 23 分) まで時間を要し, つまり 1 時間少々の散水時間差が各区の間にあるから単純に比較はできない。

そこで, 写真-4 の 4 組の画像の色調だけから, ブロックなど資材の表面温度を比較すると, 表面温度の低いものから順に, 芝生が 28.5°C, 保水性 ILB (灰) が 30.3°C (乾燥面), 保水性 ILB (無) が 30.4°C (乾燥面), 普通 ILB が 31.3°C (乾燥面), As が 32.0°C であった。ILB 表面温度は, 乾燥面, やや湿潤な面, かなり湿潤な面で異なる。乾いた表面温度のみの比較では, 両保水性 ILB は普通 ILB より 1.0～0.9°C 下げている。この両保水性 ILB の温度差は 0.1°C と小さいものの, 保水性 ILB (灰) は, 保水性 ILB (無) より先に 13 時 20 分以降に散水していたことと写真-4 の右上写真の湿り程度から判断し, 経過時間が長いにも関わらず保水機能の高いことが示唆された。芝生の表面温度は 28.5°C で両保水性 ILB より低い温度で推移したことは判読できるが, 夕刻の時間帯では資材の比熱の差異も発現していると考えられる。

いずれにしても赤外線サーモグラフィ装置は環境条件を同一としほぼ同じ時刻に撮影して熱画像を比較するには便利なものである。また, 同一画像内での物体温度の比較は可能である。この熱画像では色調による温度の凡例を参考に画像中の温度を読み取るが, 個人的に注意したとしても 0.1～0.2°C 程度の読み取り誤差は生じる。ここで着目すべき箇所は目地であり, 同一画像内のブロック間の境界として線状に写っている。その目地の色調

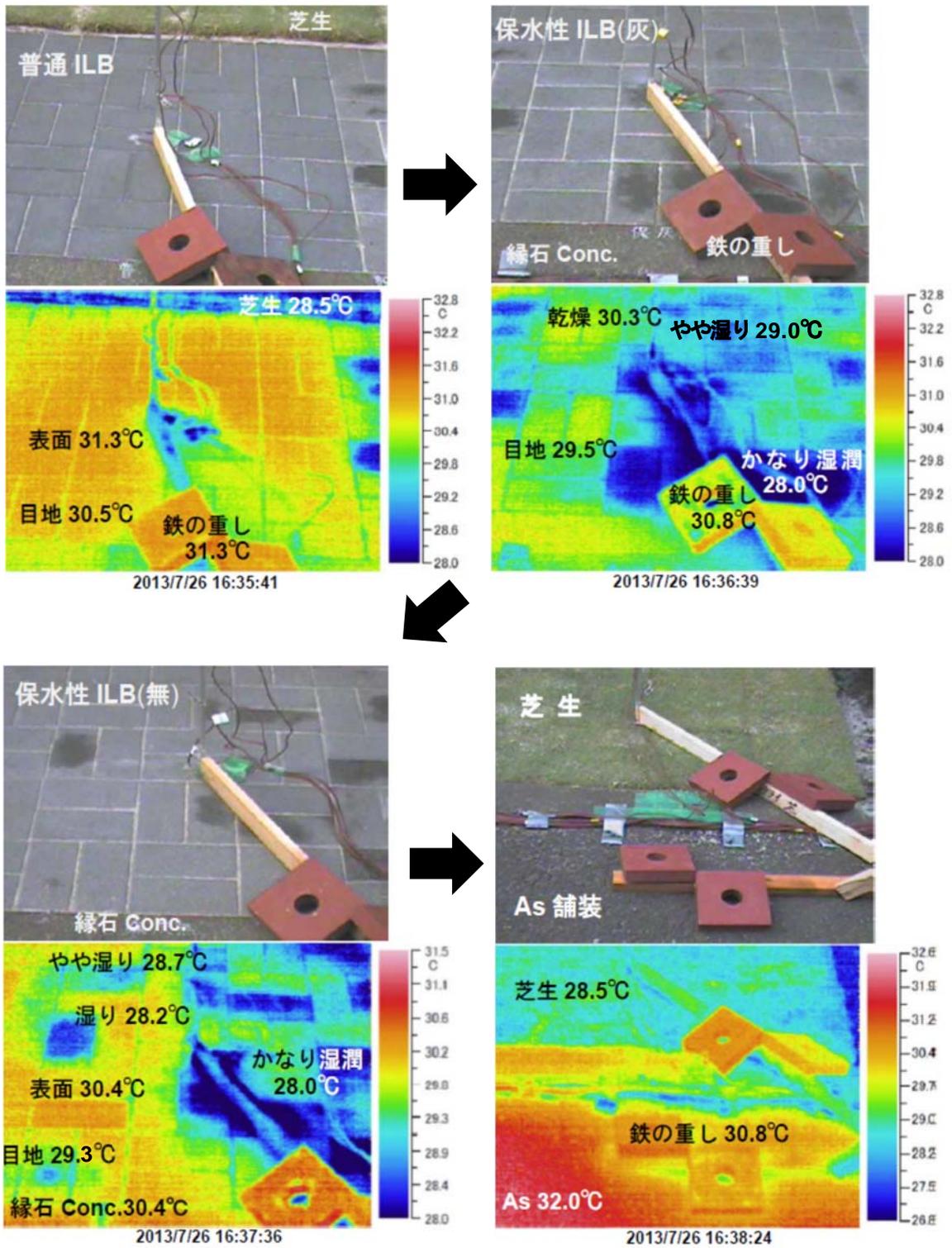


写真-4 2013年7月26日16:35~16:38における3分間の可視画像とそれに対応する熱画像（矢印は図-1の並びに対応させている）

とブロックの色調では明らかに差が生じている。すなわち、目地の温度は ILB 表面より 0.4~1.3℃も低い温度を呈している。本論では水分蒸発フラックス（これは、大規模で気象的な水蒸気フラックスではなく、極めて小規模な舗装面における水分蒸発のフラックスを意味する）を測定してないが、これが目地において発生し、夕刻でも路盤や敷き砂から水分を吸上げして目地から水分蒸発を発生して舗装面温度を下げていることが想定でき、ブロック舗装においてはブロック表面とともに目地が舗装面温度の上昇抑制（低減）の役割を果たしていると考えられる。

ヒートアイランド現象緩和の効果を確認すると称して舗装面温度を測定し比較するが、その多くはブロック 1 個の表面中央やその中央の少し内部に温度センサーを設置しておこなっている。しかし、温度低減を目標とする保水性ブロック舗装では、目地が線状なため面積的に少ないとはいえ、その舗装面温度の低減に寄与していたことから、温度上昇抑制機能の評価は ILB 表面だけではなく目地も含めた舗装面全体において実施しないと意味がない。

本研究では新燃岳火山灰に桜島火山灰を混合して保水性 ILB を開発してきた。微細な桜島火山灰の混入で保水性は高まるが、強度も透水性も低くし黒っぽいので太陽放射の反射率（アルベド）が小さくなり舗装面温度を高める⁸⁾ほか、製造時に形成されたブロック表層の緻密な組織が蒸発・気化現象を抑制していると考えられる。その際に、内部に保持された水分の蒸発を抑制する緻密な表層があれば、その内部の水分は舗装構造体の温度上昇に伴いブロック側面に移動しながら目地を介して蒸発することが考えられる。加えて目地砂の湿気の蒸発もこの目地から上方の開放部へ上がっていく。ブロック舗装面における蒸発・気化現象はブロック表面のみならず目地も含む舗装面全体に発生しており、ブロックと目地の組合せこそがブロック舗装面の温度上昇抑制メカニズムを担っていると考えられる。

ILB 舗装の温度上昇抑制機能の評価する場合、ブロック（あるいは平板）を用いて評価している¹³⁾が、その方法は室内照射試験であり、舗装面の蒸発現象を実態に即して評価しているとは思われない。そのブロックの温度上昇抑制機能を考えるとき、①ブロック表面と目地の平面状の蒸発メカニズムや、②ブロック側面と目地を介しての側面方向と線状の蒸発メカニズム、③目地溝内の堆砂からの目地幅分の線状の蒸発メカニズムがあり、これらが舗装面温度上昇抑制メカニズムとして総合的に機能して、ヒートアイランド現象の緩和が図られていると考えられる。このため、例えば直径 60cm の円の平均温度を簡易放射温度計で測定する評価法が実態に即していると考えられる。この評価法は第 6 章 6.5 で詳しく論じる。また補足として、可能ならば熱画像を添付・比較すると説得できる資料となる。

5.3.3 温度測定における課題

①フィールド試験における資材の温度測定における課題

温度測定で重要な温度センサーの取り付けでは、現地作業として、ブロック表面に接着した熱電対を銀箔やアルミテープなどでカバーしなかったために、日射がセンサーに直接当たった中で測定がおこなわれていた。このため、ブロック表面とセンサーとの密着処理の難しさもあり、ブロック表面温度ではなく接着剤で被覆された熱電対（金属製）の温度を測っていたことが考えられる。ブロック表面に5mmでも食い込ませて接着するなどの工夫をおこない、少なくとも日射から接着箇所を遮蔽するため、1×1cm以内の銀箔やアルミテープで被覆した方がよかったと思われる。

また、高さごとの温度センサーを支えるアルミ製支柱の影が表面温度センサーに重なることもあったので、その時間分の温度は敏感に低下したことが考えられる。このため各区の測定温度の変化傾向を把握するために散水時間分の平均温度で、おおよそその資材の温度変化傾向を比較することが望ましいといえる。

さらに、強制的に扇風機で風を送る試験では、温度センサーへの風の当たり方が扇風機の中心の高さごとに若干の差異を及ぼす影響がある。各ILB区の散水時間分だけグラフ軸をずらした合成図で比較しているため、その次々の区での経過時間内に生じた外気の微妙な現象が温度変化に影響したことは否めない。

②温度測定における既往の研究から抽出した課題

(1) 測定場所の選定と温度センサーの高さ⁷⁾

路上を歩く人々が感ずる体感温度は日当たりや風通しの有無などの影響を受けやすいことから、温度測定場所の周辺の建物状況などを観察し評価に適した地点に計測器を設置する。また温度センサーの設置高さについては、高温になった路上で測定すると低い位置ほど体感温度が高くなる傾向があるといわれている。歩行者の体感温度を評価する際の高さは地上高1.1mを基本とするが、着座時の体感温度を評価する場合には地面にできるだけ近い位置で測定する。

(2) 温度測定上の注意⁷⁾

温度センサーが日射や路面からの赤外放射を受けないように物理的に囲わなければならない。その温度センサーを筒や放射シールド、アルミテープ¹⁰⁾などで遮蔽する場合、通風を確保する必要がある。

特に自然通風式は、温度センサーを入れた筒などにファンで強制的に風を導入する強制通風式の温度計にくらべて、日向では日射などの影響をかなり受けることが指摘されてい

る¹⁴⁾。したがって、日向では気温など温度を強制的な通風条件で測定することで正確な値を測ることができるといわれている。

(3) 温度変化図の作成について

5分間隔で測定した温度変化図よりも、30分間平均で示したほうが、温度変化の傾向を把握しやすいと思われる。5分間隔では測点温度の上下変動やアバレが多すぎたので、温度センサー（熱電対）の取り扱い上、ブロック表面への接着剤でベタ付けでは問題があると考えられる。

(4) ブロック表面明度と路面温度

ブロック表面の明度が路面温度に影響することを唐沢ら⁸⁾が指摘している。ブロック表面の明度が高いほど舗装面温度を低くさせられるという。その表面明度が高ければアルベドが大きいのので、路面の温度上昇抑制を高めるためにはブロック表面明度の高いものにする効果があると考えられる。今回フィールド試験に用いた3種類のILBのうち保水性ILB（灰）に、やや黒っぽい桜島火山灰を混入したため表面明度くなり、ブロック表面の温度上昇を促進させた可能性がある。

5.4 まとめと課題

本フィールド試験は暑熱期の歩道温度上昇抑制に保水性ILB（灰）と保水性ILB（無）の物性の違いが生じるかを明確にするために実施した。試験期間中まったく降雨がなかったため試験区1.0m²当り10Lの水道水を電動噴霧器で散水することにした。温度測定は、その散水後に、また、蒸発・気化現象を再現するため散水後に扇風機で風を送って、高さ別に温度を測定した。

試験区では2つの保水性ILB（灰・無）に、普通ILB、芝生、Asを加えた5種類の試験区で温度を測定し比較検討し、以下の成果を得ることができた。

- (1) 試験歩道などに使用した5種類の資材の温度変化において、高さ別（100, 50, 20, 0（表面）、-3cm（ILB内部））に温度測定したところ、高さ100, 50, 20cmでは最高35℃を示した外気温とほとんど同様な温度変化を示した。暑熱時の歩道の20cmより上方では、水蒸気の拡散が早いと思われ気化熱による温度上昇抑制効果は明らかでなかった。
- (2) 歩道における高さ0cm（表面）と-3cm（内部）の温度変化から、高い温度の順に、As > 普通ILB > 保水性ILB（無） ≒ 保水性ILB（灰） > 芝生となった。このように保水性ILB（無）と保水性ILB（灰）は、Asや普通ILBよりも表面と内部の温度を2～3℃低下

させたものの、両者の温度差は小さかった。しかし風が通る場合は、保水量の大きな保水性 ILB（灰）が他の ILB よりも温度を低く維持される傾向があった。

- (3) 熱画像で ILB 表面の温度を比較するには環境条件を同一にする必要があるが、同一画像内での物体温度の比較は可能である。目地の温度は ILB 表面より 0.4~1.3℃低かったが、湿潤さが残存している証拠である。保水性 ILB（無）はブロックの表面から内部水分の蒸発は生じるが、保水性 ILB（灰）の場合は保水性 ILB（無）の表面からの蒸発と異なり、緻密なブロック表層のため蒸発が制御され、その蒸発しなかった内部水分がブロック側面へ移動し目地を介しての蒸発や目地砂などの蒸発が総合的に作用する温度上昇抑制メカニズムがあると考えられる。

今後の課題として、保水性 ILB（無）と保水性 ILB（灰）では保水量などの物性が異なるのに、フィールド試験では歩道の温度上昇抑制に、これらの物性の違いがどのように関わっているか明らかではなかった。保水性 ILB の歩道温度上昇抑制メカニズムの解明と、目地の温度低減機能を加味した評価法について、**第 6 章**で議論を深める。

参考文献

- 1) 例えば、日本建築学会：ヒートアイランドと建築・都市－対策のビジョンと課題，丸善，東京，211p, 2007
- 2) 例えば、小宮山宏：地球温暖化問題に答える，東京大学出版会，東京，204p, 1995
- 3) インターロッキングブロック舗装技術協会：舗道の構成と役割，インターロッキングブロック舗装設計施工要領，pp.4-5, 2000
- 4) インターロッキングブロック舗装技術協会：舗道の敷設パターンを選定，インターロッキングブロック舗装設計施工要領，pp.45-51, 2000
- 5) 東 拓生：「環境舗装東京プロジェクト」の取組み，建設の施工企画，日本建設機械化協会，713 号，pp.11-15, 2009
- 6) 山口隆子：ヒートアイランドと都市緑化，成山堂書店，東京 pp.93-104, 2009
- 7) ヒートアイランド現象に対する適応策検討委員会：体感温度の把握，まちなかの暑さ対策ガイドライン（案），pp.47-54, 2016
- 8) 唐沢明彦・藤田仁・江角典広・高森哲也：保水性コンクリートブロック舗装の路面温度上昇抑制効果に関する研究，コンクリート工学，Vol.44，No.7，pp.9-16, 2006
- 9) 国土交通省道路局：路面温度上昇抑制機能を有する舗装技術の効果検証計画（案），

2015

- 10) 例えば, 桐山和也・服部啓二・山口昇三, 梅原秀哲:路面温度低減機能を有するインターロッキングブロックに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1365-1370, 2002
- 11) 例えば, 藤原浩已・丸岡正知・川島顕・鯉渕清:リサイクル材料を用いた保水性インターロッキングブロックの特性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.61, pp.558-564, 2007
- 12) 国土交通省気象庁:過去の気象データ (海老名), 入手先<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_a1.php?prec_no=46&block_no=0388&year=2013&month=7&day=25&view=> (参照 2014.1.18), 2014
- 13) 路面温度上昇抑制舗装研究会:保水性舗装技術資料, Ver.3, pp.10-13, 2011
- 14) 国土交通省気象庁:気象観測の手引き, 81p, 1998

第6章 保水性インターロッキングブロック切片を用いた歩道の温度上昇抑制メカニズムの解明

6.1 まえがき

新燃岳火山灰と桜島火山灰を容積比 5 : 5 で混合した火山灰を、細骨材量の 30% (vol.) で混入した保水性インターロッキングブロック (以降、保水性 ILB (灰) という)、火山灰無混入の保水性 ILB (以降、保水性 ILB (無) という)、普通 ILB、芝生およびアスファルト舗装 (As) の 5 種類の資材による試験歩道で暑熱期に温度を測定した。その結果、高さ 20~100cm における温度変化はどの資材も外気温と変わらずほぼ同様の変化を示したが、表面と内部 (-3cm) では温度の高い順に、As、普通 ILB、保水性 ILB (無)・保水性 ILB (灰)、芝生となった。ここで、保水性 ILB (無) と保水性 ILB (灰) は、どちらも保水性 ILB であるので As や普通 ILB よりも表面と内部において温度上昇の抑制に寄与できたが、両者間の温度差は小さかった¹⁾。

温度上昇抑制を目的とした保水性 ILB でも物性が異なり、保水性 ILB (灰) の保水量が保水性 ILB (無) よりも 0.02g/cm^3 大きい²⁾ にも関わらず、前者のブロック表面と内部の温度は後者より低い傾向を示すものの両者の温度差は小さかった。その原因を明らかにするために、保水性 ILB の切片を用いた各種の実験から検討し、保水性 ILB の温度上昇抑制メカニズムを解明する。なお、保水性 ILB 切片は、第4章における曲げ試験で供試体が半割りされた残りものであり、その製造時の両者の物性を表-1 に示す。普通 ILB は市販のものでその物性は不明であったが、一般値は取れるものと考えて実験に使用した。

6.2 実験概要

6.2.1 日射による保水性 ILB 切片などの表面温度の測定実験

2014 年 10~12 月に宮崎大学農学部構内で、芝生に隣接する As 面に不織布を敷き、約 3cm 厚の敷砂の上に、保水性 ILB 切片を写真-1 に示すように、保水性 ILB (灰) と保水性

表-1 保水 ILB (無) と保水 ILB (灰) の物性の比較²⁾

ILBの区分	材齢 (日)	単位容積質量 (g/cm^3)	充填率 (%)	曲げ強度 (N/mm^2)	保水量 (g/cm^3)	吸上げ高さ (%)
保水 ILB (無)	7	2.05 ± 0.02	80.4 ± 0.73	5.04 ± 0.13 *	0.18 ± 0.00 *	82.6 ± 0.48 *
保水 ILB (灰)	7	1.96 ± 0.02	78.4 ± 0.97	3.22 ± 0.18 *	0.20 ± 0.01 *	95.4 ± 0.47 *

* 保水性 ILB の JIS 規格を満たしている (2013 年 6 月 26 日 製造)

ILB（無）、普通 ILB とを敷き並べ、これらブロックの目地には珪砂を充填し、実験枠面積に対し 1m^2 あたり 1.0L の割合で換算した量の水道水を散水し、日射により暖められたブロックの表面温度を熱電対で測定した。

ここで、比較のために、ブロックの配置箇所に隣接する As と芝生の表面温度も測定した。熱電対の取り付けでは、センサー部分をブロックと As の中心の表面に接着剤で固定し、その上を粘着テープで留め、芝生では熱電対の先端が動かないように細い杭で地際に留めた。

6.2.2 保水性 ILB 切片の表面を強制的に温めた場合の温度上昇実験

ブロック内部の水分を蒸発促進させるためヘヤードライヤ（ $1,200\text{W}$ 、吹き出し口から 5cm 位置の風速： 4.0m/s ）を用いて強制的に温度上昇環境モデルを作った。このとき、ブロックの側面4つと底面とを食品用プラスチックのラップで巻きとめて表面から水分蒸発をうながした。また、隣接ブロックとの目地に珪砂を充填した。固定装置に取り付けたドライヤは、ブロック表面から 5cm 離し 30 分間温風を連続して当てられるようにした。

温度測定箇所は表面、目地内部および外気温を、各ブロックに対応して熱電対を用い計測した。その熱電対の取り付けは、「表面」ではブロック表面の中心に接着剤で固定し、「外気温」ではドライヤの温風がかからない程度に離れた場所で、また、「目地」では目地表面から 3cm 深さの珪砂内に動かないように取り付けた。 1.0L/m^2 換算の量の水道水を 6.2.1 と同様に散水し、その水が目地にも浸み込んだことを目視確認したのち温度を測定した。

6.2.3 保水性 ILB 切片の水分蒸発量と層別の単位容積質量の測定実験

実験に用いたブロックは普通 ILB、保水性 ILB（無）および保水性 ILB（灰）の3種類の切片で、各々1個を使用した。実験は恒温恒湿室内（約 20°C ・約 60% ）でおこなった。保水性 ILB 切片を水に 24 時間以上浸したあとに取り出し、目に見える水膜などを拭って湿潤質量を電子秤で 0.1g



写真-1 日射による保水性 ILB 切片などの表面温度の測定状況

まで測定する。次に、それをプラスチック容器の底に敷いたφ5mmのコロの上に静置して、その質量を10分間隔で同様に測定し、初期質量からの質量減少(水分蒸発量)の割合を求めた。

また、上述の試験後に、コンクリート・カッター薄刃を取り付けた専用カッターで、その厚さ6cmのブロックをその表面に対して水平に3分割した。その後、その上・中・下の3層の板状切片の表乾質量と、採寸結果から算出された体積を用いて、単位容積質量を計算した。

6.2.4 保水性 ILB 切片の表面からの水の浸透実験

内径35mmの透明プラスチック製200mLメスシリンダーの底に、直径5mmほどの孔を開けたものを、保水性 ILB 切片の表面に漏水のないように鉛直に接着させ、その中へ約40mLの水を速やかに注ぐと、その水がブロックの表面から内部へ浸透する。そのときのメスシリンダーの目盛りを30秒間隔で180秒まで読み取り、浸透水量を求めた。なお、切片の数に限りがあり、この浸透試験は目詰まりすることから何度も実験ができないため、一度きりの実験である。

6-3 実験結果および考察

6.3.1 日射による保水性 ILB 切片などの表面温度変化

図-1(上)に、2014年10月17日12~17時の温度変化を示す。3種類のブロックは乾燥状態とした。外気温の最高温度が13~16時に約25℃であるのに対し、芝生は徐々に温

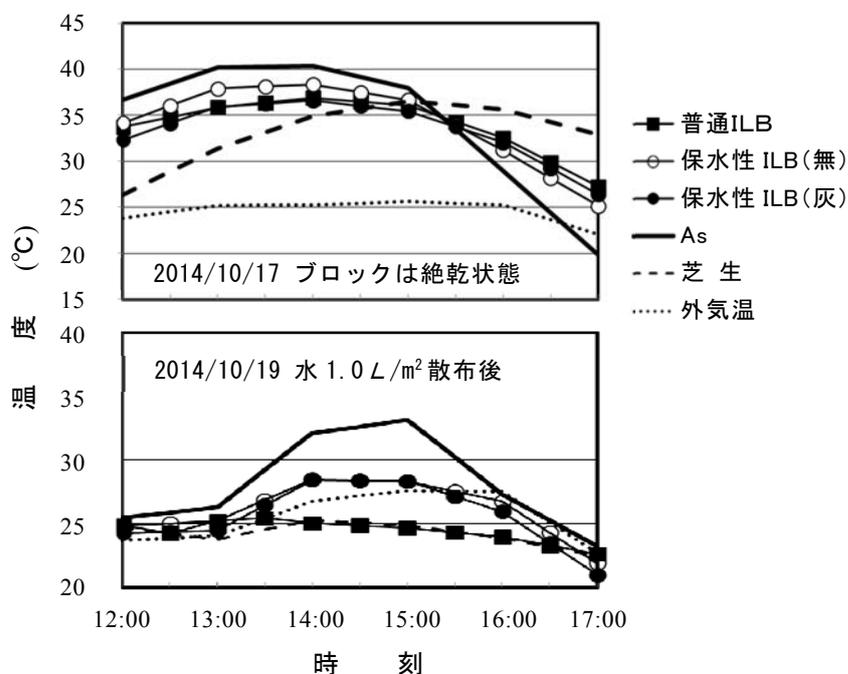


図-1 保水性 ILB 切片などの表面温度の変化

度上昇して 15～16 時にピークの 37℃に達した。一方、他の資材は 14 時ころにピークとなった。そのピーク値で 14～15 時まで最も温度が高かったのは As 舗装で、次いで保水性 ILB（無）、保水性 ILB（灰）と推移したが、陽が陰り始めた 15 時半以降は保水性 ILB（無）の方が低くなった。そのピーク値では保水性 ILB（灰）が保水性 ILB（無）より低く発現し、その差は約 2℃もあったが、絶乾状態であるため 3 種の ILB の物性がどう影響したものかは明らかでない。ただ外部的な実験環境では、表-2 に宮崎市の気象データの 2014 年 10 月 17 日の 1 時間ごとのデータ³⁾ からみて、宮崎大学の実験地の 13～16 時に外気温が約 25℃であったが、この表値では 22℃程度であったので、実験地は宮崎市よりはやや高めの温度環境にあり、日照時間から察して実験時間帯は良く日射を受けていた。

次に、図-1（下）に、降雨を想定し 1.0 L/m² の割合で実験枠内に散水した後の温度変化を示す。温度上昇は散水の影響で当初の 1 時間にはみられなかったが、日射によるために緩やかな温度反応といえる。それが 13 時過ぎから最も温度が上昇しはじめ、最も高くなったのは 32～33℃を示した As 舗装、次に 14～15 時に 28℃で推移した保水性 ILB（無）と保水性 ILB（灰）であった。模擬降雨によりブロック内部に水が浸透して保水性 ILB には保水された結果を示していると思われる。保水性 ILB（灰）の保水量は、表-1 から保水性 ILB（無）よりも 0.02g/cm³ 大きいので、温度の変化を細かに観ると、12 時半～14 時および 15 時半～17 時までには保水性 ILB（灰）の方が最大 1℃低く現れている。

また、保水性 ILB 切片を用いた実験結果として、保水性 ILB（灰）の保水量は保水性 ILB（無）より 0.02g/cm³ 大きい影響を受けて、保水性 ILB（灰）が温度を 1.0℃ほど低減した

表-2 2014 年 10 月 17 日および 19 日の気象観測データ(宮崎)^{3, 4)}

年 月/日	時	降水 量 (mm)	気温 (℃)	湿度 (%)	風速 (m/s)	風向	日照 時間 (h)	全天日 射量 (MJ/m ²)	天 気
2014 10/17	11	--	21.1	47	3.4	東北東	1.0	2.44	快晴
	12	--	21.5	45	3.3	東北東	1.0	2.70	
	13	--	21.9	48	3.2	東	1.0	2.70	
	14	--	21.8	49	3.0	東	1.0	2.47	
	15	--	21.8	50	2.9	東南東	1.0	1.97	快晴
	16	--	21.6	52	3.4	東南東	1.0	1.32	
	17	--	20.6	53	2.5	東南東	0.9	0.58	
	18	--	20.1	58	1.9	東南東	0.1	0.05	
2014 10/19	11	--	23.0	61	5.4	北東	0.7	1.98	晴れ
	12	--	22.9	65	4.7	北東	0.5	1.84	
	13	--	23.6	61	4.9	東北東	0.7	2.31	
	14	--	24.0	50	4.3	東	0.8	2.11	
	15	--	24.0	53	3.3	東	0.7	1.60	晴れ
	16	--	23.4	58	4.7	東	0.8	1.15	
	17	--	22.5	62	3.5	東北東	0.6	0.42	
	18	--	21.3	67	2.3	北東	0.0	0.04	

ことを確認した。また、表-2 に示す 2014 年 10 月 19 日の 1 時間ごとのデータ⁴⁾ から宮崎市内は 13～16 時の気温が 23～24℃, 若干風速があることと日照時間が 1 時間ではなく 0.7～0.8 時間であるので日射が雲等で少しさえぎられた状況であったと思われる。学内の実験地では 13～16 時の外気温が 27～28℃で推移したため、宮崎市内とは+4.0℃の差があった。このように、秋半ばとはいえ日射を十分に受けながら実験がおこなわれた。

以上のことから、保水性 ILB (灰) は、温度変化の判断から保水量が 0.02g/cm³ 大きい影響を受けて、保水性 ILB (無) より 1.0℃ほど温度上昇抑制したといえる。

6.3.2 保水性 ILB 切片の表面を強制的に温めた場合の温度上昇

図-2 にドライヤを各保水性 ILB の表面に 5cm 離して当てた後の「表面」・「外気温」・「目地」の温度変化を示す。ドライヤの噴出し温度は最初に湿潤なために 18℃から開始し、約 5 分後に 36～37℃に達し、その後は「外気温」と同様にわずかに上昇した。「表面」温度では普通 ILB が約 5 分後に 40℃に達し 30 分後には 42℃となり、両保水性 ILB より約 2℃高く推移した。「外気温」はいずれの ILB も 36～37℃でほぼ同様な温度変化を示したが、ドライヤの温風の当たる場所から少し離れているために、「表面」温度より 3～5℃低く推移した。一方、「目地」ではその温度を上昇させて、30 分後には「外気温」より約 7℃低く推移した。また、経過 5 分から 30 分までの温度変化をみると、「表面」の 1～2℃の上昇勾配に対し、「目地」の方は 3～5℃の上昇勾配であり、後者が顕著であった。その「目地」でも、保水性 ILB (灰) の場合、普通 ILB 保水性 ILB (無) よりも低くめに温度が上昇した。

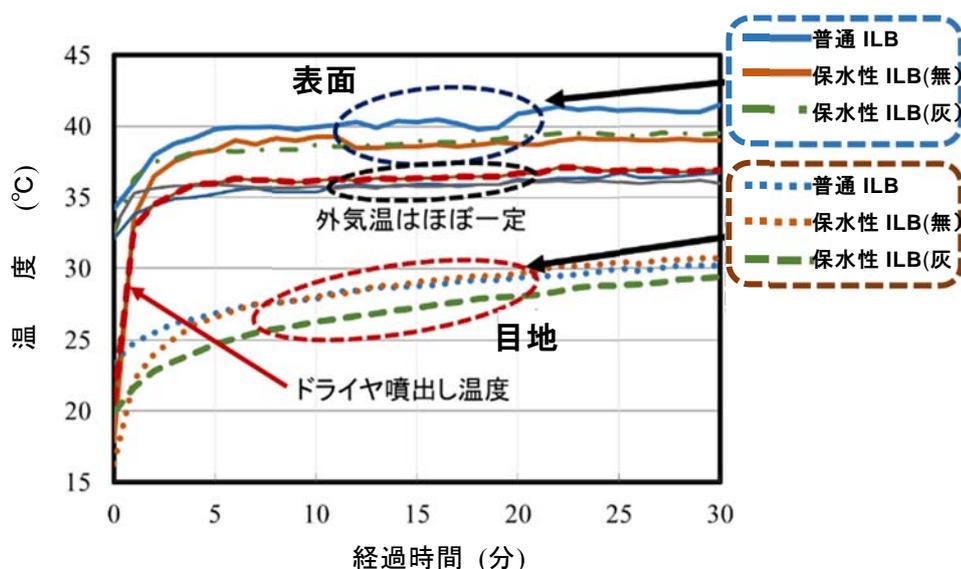


図-2 保水性 ILB 等の表面・外気温・目地の温度変化

図-2の結果は、時間経過に伴い最初に表面近くから蒸発する一方、内部の水分が毛細管現象で表面へ上昇しながら蒸発・気化するメカニズムに沿っている。ブロック表面の温度変化は、普通 ILB の温度が最も高くなり、そのまま緩やかに上昇したが、これより約 2℃ 低く保水性 ILB（灰）と保水性 ILB（無）とがほぼ同様に追隨して緩やかに上昇した。

一般に目地は ILB 同士の間にあるがその側面にある目地キープによって目地の隙間間隔が維持されており、目地砂としての珪砂などの細砂はその隙間にホウキなどで充填されている⁵⁾。実験では食品用プラスチックのラップで ILB の側面 4 つと底部を巻きとめて仕切ったが、ILB の中央表面に当たったドライヤの熱は徐々に目地に伝わり、その目地では目地砂の水分の蒸発により温度上昇抑制している。実際には目地とブロック表面の中心との距離は約 5cm であるが、ILB 内に保持されている水分はラップされているため目地には到達していない。ILB 表面からの水分蒸発は、ドライヤで温められるにつれて温風熱がブロック内部に伝わるもののドライヤの温風熱の吹き出しにより、水分蒸発に伴う温度の上昇抑制に関与したかは明らかでなかった。ただ、保水性能のある保水性 ILB は普通 ILB より熱伝導が遅れたことと、ILB 中心部から温められた熱が ILB 内部に伝わりながら徐々に側方の目地砂に伝わる過程があることが想定される。それで目地の温度も ILB 表面より遅れて低めに発現するが、その温度上昇の勾配は徐々に傾きを増している。これらのことから、ILB 歩道の温度上昇抑制には、保水性 ILB の内部の保水性と底面からの水分の持続的な吸水性のみならず、目地とそれに充填される目地砂が大きく関与することが示唆された。

一般的にブロック舗装における降雨や散水の（上方からの）水の流れから水を区分すると、①ILB 表層に浸透する水、②ILB 表層から浸透しきれずに位置的に低い目地に流れ込む水、③目地内の目地砂を介して ILB 側面から ILB 内部に浸み込む水、とがある。目地に浸入した②と③の水は目地砂を湿潤にしながら下方の敷砂、不織布、路盤へと浸透するが、一部は目地砂を介して ILB 側面に吸水される。保水性 ILB の JIS 規格の吸水性は ILB の底面からの吸上げ作用の強さを示すが、歩道の現場における吸水性と保水性との関係は、ILB に表面から浸透した水の ILB 内部の空隙に保持される保水もあるが、それよりも目地砂を介して ILB 側面から、あるいは、目地経由で下方へ浸透した敷砂・不織布・路盤の水分が ILB 底面から吸上げられ ILB 内部に保持される水がある。このようにブロック舗装における ILB の吸水と保水の仕組みには、目地が主体的な役割を担っていると考えられる。

この仕組みを逆にみれば、ILB 歩道の温度上昇抑制には、ブロック表面からの水分蒸発だけでなく、ブロック側面から目地を介してブロック内部水分の蒸発と、目地砂（あるいは、それより下の敷砂、不織布、路盤）に保持されている水分の蒸発も関わる総合的な温度上昇抑制メカニズムがあると考えられる。このことは第 5 章で論じたように、ILB 歩道

の温度上昇抑制に影響を及ぼすのは、ILB表面の水分蒸発のほか目地からの水分蒸発が大きく関わる。そこで微細火山灰混入の保水性ILB（灰）は、保水性は高いが表面透水性が悪いため保水性ILB（無）と同等な水分蒸発はILB表面で起こりにくいと想定される。このILB表面で温度を測定しても、温度上昇抑制効果を適切に表現しない可能性がある。

6.3.3 保水性ILB切片の水分蒸発量と層別の単位容積質量の比較

図-3に示す保水性ILB切片の質量変化から、経過30分の水分蒸発量が5.5%の保水性ILB（無）が最も水分蒸発しやすく、次に2.8%の保水性ILB（灰）であった。保水性能が大きいのは保水性ILB（無）より保水性ILB（灰）で、保水量の大小と同じ結果となった。

図-4に保水性ILBの層別単位容積質量を示す。保水性ILB（無）が保水性ILB（灰）より有意に重いことが認められる（ $P < 0.05$ ）。また、これを上・中・下の三層別で単位容積質量をみると、統計的な有意差はないが上層ほど単位容積質量が重い傾向を示している。

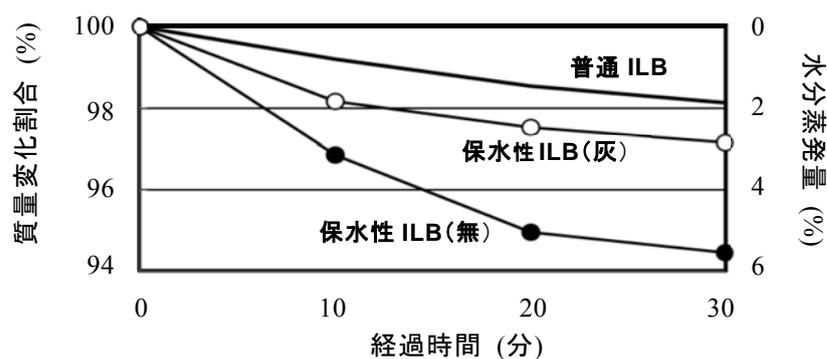


図-3 保水性ILB等の質量（水分蒸発量）変化

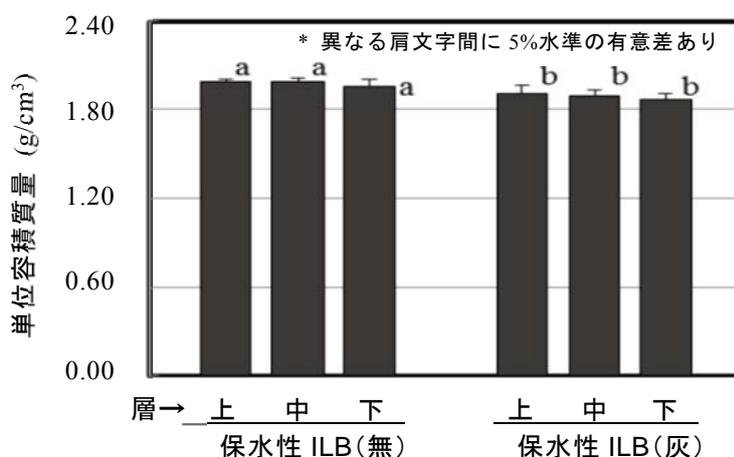


図-4 保水性ILBの層別単位容積質量の比較

ブロック製造時の振動加圧工程では、実はコンクリートが型枠内で二度締固められて密実な ILB が仕上がる。一度目は型枠内に充填されたコンクリートの表層から先に下方へ加圧して押し下げられ、次に型枠を上方へ外すと型枠のコンクリートに凹みができ、そこにまた継ぎ足しのコンクリートを満たしてから二度目の振動加圧がされる。このため、上層（表層）ほど空隙が少なくなり単位容積質量が重くなり、図-4 では層間に有意差はないが、単位容積質量の高さから上層ほどわずかに密実の度合いが高くなっている。例えば、上下間を同一な材料とするカステラを、上から下へ押し下げた際のスローモーション映像を想像すると判り易い。すなわち、この押し下げた状況は、上の層から下方へ縮まりながら下の層を徐々に締固められることを意味する。ブロックの場合も同様に、表層ほど密実の度合いが高く緻密なブロックが製造されたことは明らかである。

6.3.4 保水性 ILB 切片の表面からの水の浸透量

図-5 に保水性 ILB 表面への水の浸透状況を示した。いずれのブロックも時間経過とともに水の浸透量が増したが、保水性 ILB（無）は 180 秒間に約 20mL の水が浸透したのに対し、保水性 ILB（灰）は約 6mL しか浸透しなかった。

保水性 ILB（灰）には微細な桜島火山灰も混入しているために、表面からの水の浸透を抑制するほど緻密な表層部であることが示唆される。これは図-4 から明らかで、上層ほど単位容積質量が大きい傾向から緻密な表層組織であった。このため、表層へのブロック表面からの水の浸透も、毛細管現象による内部保水の上層への移動と表面からの水分蒸発も抑制され、これらのことが、歩道における温度上昇抑制を發揮していなかったことが考えられる。

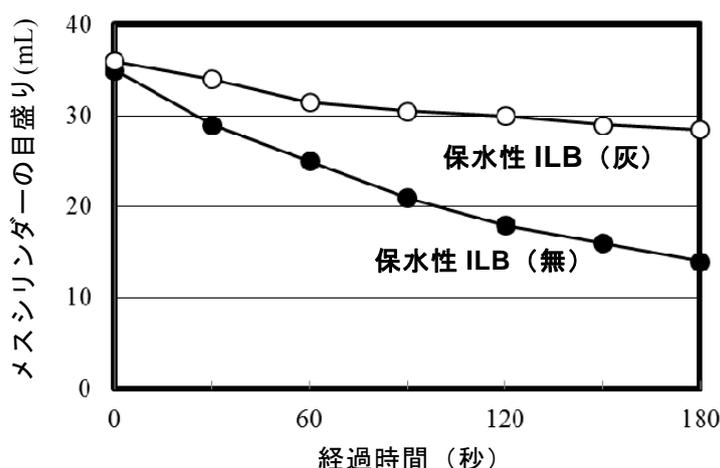


図-5 ブロック表面への浸透水量の変化

6.4 保水性 ILB (灰) による歩道の温度上昇抑制機能の総合的検討

第5章では保水性 ILB は普通 ILB と比較して歩道温度上昇抑制に寄与している。中でも保水性 ILB (灰) の保水量が保水性 ILB (無) より 0.02g/cm^3 ほど大きいため、前者ほど温度上昇抑制機能があったが、両者の温度上昇抑制寄与の差異が小さかった。その要因が何であるかを把握するために、第6章で種々の実験をおこなってきた。その中から、火山灰混入の保水性 ILB による歩道の温度上昇抑制機能について以下のように整理できる。

結論としては2点あり、1) 保水性 ILB (灰) と保水性 ILB (無) では物性の差が明らかに生じていたこと、2) 保水性 ILB (灰) の歩道温度上昇抑制メカニズムとして、微細火山灰を混入したコンクリートはブロック製造時の振動加圧工程で、そのブロック表層をより緻密に形成したため、ブロック内部から表層への内部水の毛細管現象(吸上げ)が制限を受けて、ブロック表面からの水分蒸発・気化が抑制されたことが考えられる。

1) については、桜島火山灰を保水性 ILB に混入した研究の第3章で、それを多く混入すると曲げ強度は顕著に低下し、保水量は増加した。そして第4章では、新燃岳火山灰との混合火山灰でも桜島火山灰 (S) を多くした 40%混入率 (T : S=3 : 7) の保水量が T : S = 5 : 5 の保水性 ILB より 0.01g/cm^3 、かつ 30%混入率 (T : S=3 : 7) では T : S=5 : 5 の

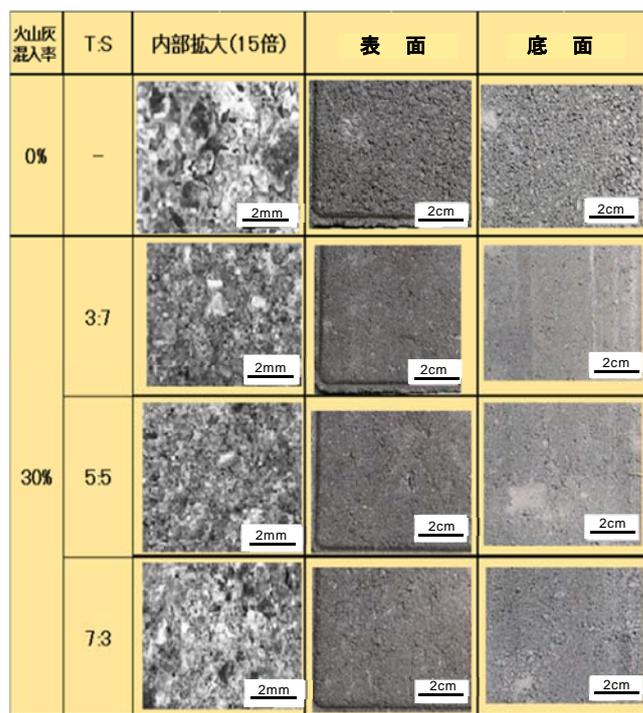


写真-1 火山灰混入率 0%・30%の保水性 ILB の内部、表面および底面の比較
(写真中、T : S=新燃岳火山灰と桜島火山灰の容積比)

保水性 ILB（灰）より $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 、いずれも有意に保水量が多く、また、20%混入率（T : S=3 : 7）の保水量は T : S=5 : 5 の保水性 ILB と同等だが、保水性 ILB（無）とは保水量で $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ の差が有意にあった。すなわち、両者間には保水量において明らかな差異が認められている。

2) については、写真-1（第4章に掲載したものを本章に再掲）から、30%混入率（T:S=3:7）のブロック表面は明らかに緻密な面が形成された。このことは、図-4における層別単位容積質量では配合が違うために保水性 ILB（無）が保水性 ILB（灰）より重いが両者とも上層は中層・下層よりもわずかに重い傾向があったことと、また、図-5 から表面から内部への水の浸透が抑制されていることから、明らかにいえることである。

保水性 ILB の品質規格の経緯は、第3章の 3.1 まえがきにすでに記載したが、ここに一部を再掲する。2005年7月に「保水性 ILB の品質性能規格とその試験方法」がインターロッキングブロック舗装技術協会により制定され、その後、「都市部のヒートアイランド対策などを背景に施工実績が増加している、『保水性平板』及び『保水性ブロック』を製品の種類として追加し(中略)、推奨仕様では保水性能は $0.15\text{g}/\text{cm}^3$ 以上とした」という理由で2010年3月に JIS A 5371: 2010「プレキャスト無筋コンクリート製品」の中に保水性 ILB が制定された⁶⁾。したがって、保水性 ILB が世に出たのは2005年であると思われる。そのころの保水性 ILB のヒートアイランド現象を緩和する仕組みは、一般的に図-6に示される単純なイメージであった。図-6の左はインターロッキングブロック舗装技術協会⁷⁾によるものである。

保水性 ILB が歩道の温度上昇抑制に及ぼす機能は、目地の役割も含め明解になったと思われる。すなわち、図-7に示す保水性 ILB（無）と保水性 ILB（灰）の歩道温度上昇抑制機能の模式図から、1) 両者の保水量の差が $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ と小さいことにもよるが、保水性 ILB（灰）の方に保水は多い、2) しかし保水性 ILB（灰）の表層が製造過程で微細火山灰混入によって緻密な表層が形成されるため、毛細管現象で水分は上昇するが表面からの水分蒸

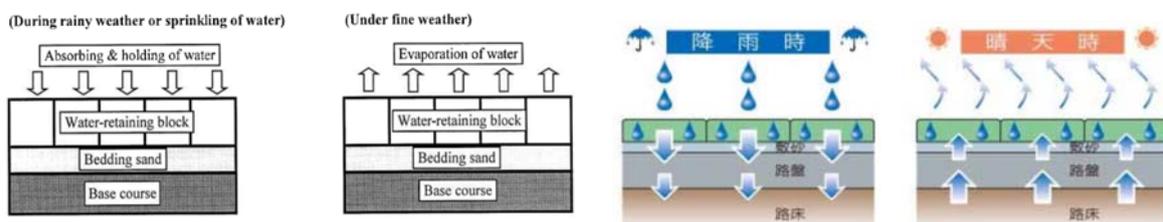


Figure 4. Water-retaining block pavement

図-6 保水性 ILB のヒートアイランド現象緩和メカニズムのイメージ

左:降雨・スプリンクラー水の浸透・保水状況と蒸発・気化の関連図⁷⁾
 右:コンクリート製品メーカーのカタログの例⁸⁾

発・気化が抑制され、一方でブロックの側面から目地を経て蒸発・気化が促進されたものと考えられる。もちろん、目地より下にある敷砂、不織布、路盤からの吸上げられる水分は、底面積の大きい ILB に吸上げられるか、目地を經由してヒートアイランド現象の緩和に効果を発揮すると考えられる。

目地は約 3mm の ILB 同士の間隙であるが、その中の目地砂も湿潤であるほど目地の上方へ水分蒸発が促進され、保水性 ILB (灰) の表層から蒸発が抑制されるとブロックの温度上昇に伴いブロック側面から目地へ抜けるバイパスルートで蒸発が促進されることは容易に推察できる。

以上のことから、吸水率の高い火山灰を混入した保水性 ILB (灰) ではあるが、微細な火山灰も混入して製造すると ILB の保水量を増す一方、製造工程でブロック表層を緻密化しているので、内部では毛細管現象で水分を上昇させたとしても表層での蒸発が保水性 ILB (無) よりも抑制されるメカニズムがあると考えるのが妥当である。その結果、保水性 ILB (灰) は保水性 ILB (無) より温度を低減させるが、歩道の温度上昇抑制に顕著には機能していないことが示唆された。

また、舗装面温度の変化を、既往の研究ではブロックの表面やわずかにブロック内部に入れた熱電対を用いて測定しているものがある。しかし、歩道で面積的に少ない目地が水分蒸発フラックスの発生を大きくし温度上昇抑制に効果的であるから、舗装を構成するブロックと目地の全体的な面における平均温度で、歩道資材のヒートアイランド現象緩和効果を評価すべきである。

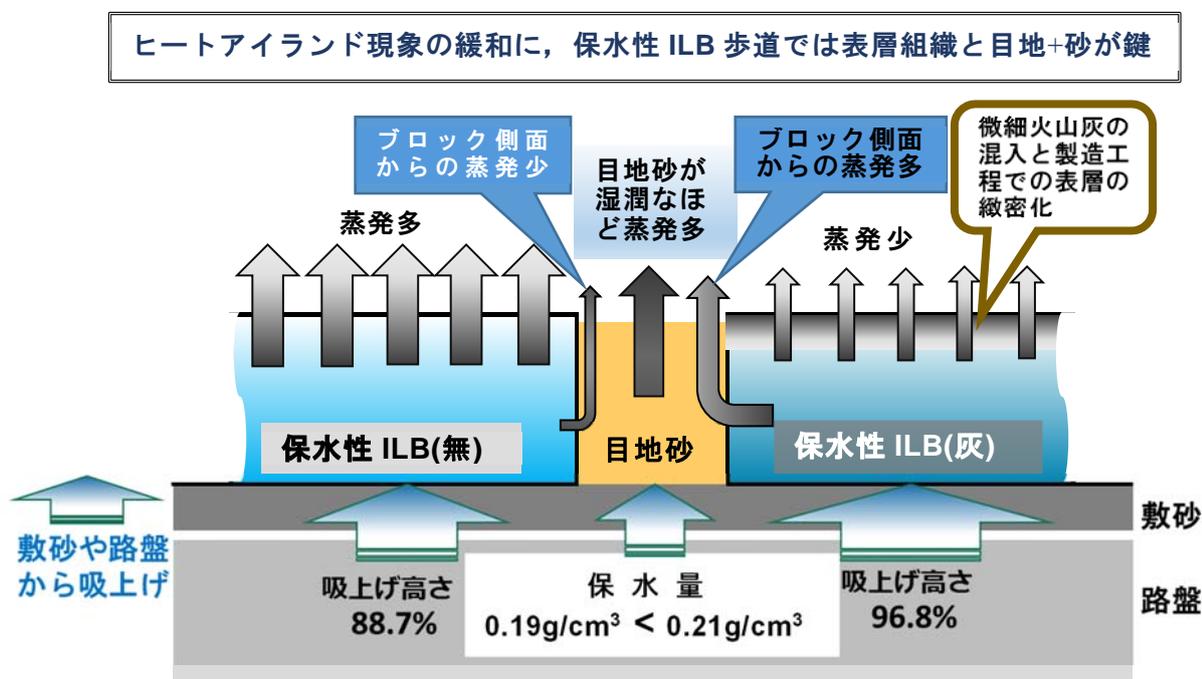


図-7 歩道温度上昇抑制メカニズム—保水性 ILB (無) と保水性 ILB (灰) の比較—

6.5 ブロック舗装面温度上昇抑制機能評価における簡易放射温度計による新方法の提案とその実証

6.5.1 ブロック舗装面温度上昇抑制機能評価における簡易放射温度計による新方法の提案

第5章の写真-4に、サーモレーサで撮影した熱画像を示した。散水後の時間経過が異なる熱画像は一概に比較できないため、同一の画像内で可視画像と位置確認しながら ILB の表面と目地の温度を比較すると、目地の温度はいずれの ILB の表面温度より 0.4~1.3℃ 低かった。また、散水終了から約3時間以上経った夕刻の撮影であっても、目地からの水分蒸発フラックス（大規模な気象的水蒸気フラックスと異なる、極めて小規模な舗装面上の水分蒸発のフラックスをいう）の影響を受けたと思われるが、目地の温度は ILB 表面よりも低かった。このことは、図-7の歩道の温度上昇抑制メカニズムを裏付けている。すなわち、暑熱環境下では保水したブロックの表面からの蒸発・気化に加え、ブロック内部水の側方移動、その内部水の目地からの蒸発、目地砂自体の水分蒸発が、総合的に温度上昇抑制に影響していると考えられる。そこで、目地も含め面的な平均温度でブロック舗装を性能評価するのが妥当である。

路面温度上昇抑制舗装研究会⁹⁾による保水性舗装の性能指標に、路面温度低減値や保水量等がある。その温度低減値は、夏季に施工現場で路面温度を測定し近傍の排水性舗装または密粒度舗装との温度差を求める方法や、室内で供試体にランプ照射し表面温度を測定して温度差を求める方法などがある。温度低減値は図-8の室内照射試験方法（研究会法）によって評価し、標準舗装（密粒度 13mm）の路面温度が 60℃に達したとき、保水性舗装材が 10℃以上の路面温度低減値を有する必要がある。これに歩道や車道の ILB を適用する場合、供試体の大きさや特別の装置が必要となるほか、何よりも目地の温度低減効果を測定していない。

すでに、「第1章 1.3 ヒートアイランド現象緩和型の環境製品である保水性 ILB について」の項で、ヒートアイランド現象緩和対策として道路舗装で保水性舗装と遮熱性舗装について述べた。その保水性舗装の室内照射試験方法⁹⁾について図-8に示した。密粒度アスファルト舗装の供試体(30×30×5cm)の温度よりも、保水性舗装の供試体(30×30×5cm)の温度が 10℃以上低く示す場合に保水性舗装材と呼ぶことができるというものである。また、2015年にはブロック系舗装に使用するブロックや ILB の「クールブロックペイブ」認定をインターロッキングブロック舗装技術協会が開始した¹⁰⁾。このクールブロックペイブでは、通常密粒度アスファルト舗装と比較して、路面温度低減値が 8℃以上になるかどうかを、保水性タイプや遮熱性タイプのブロックや ILB から採取したφ100mm のコ

アを用いて確認することになった¹¹⁾。さらに、遮熱性舗装の路面温度低減効果を評価する方法は、路面温度上昇抑制舗装研究会遮熱部会の遮熱性舗装技術資料¹²⁾によると、図-8に示す方法と同様であった。

この方法には30×30×5cmの供試体、あるいは、φ100mmのコア（以前まではブロックやILBの1個（あるいは数個）の表面温度の差異で検討した）が用いられ、小さい供試体を用いた室内照射試験による舗装面温度低減値で評価する方法がとられている。いわゆる実際の広い舗装面における温度を測定した上での舗装面温度上昇抑制機能を評価する方法とは異なる。室内照射試験の方法は、図-8に示す装置の設営や供試体準備、熱電対温度センサーなどの経費と時間が多大に掛かると思われる。すでに論じたように、ブロック舗装では目地が温度低減に重要な役割を果たすので、保水性ILBなどを主対象としてブロック舗装面の温度上昇抑制機能の評価を、簡易放射温度計による新規な方法を提案する。

図-9に示す市販の軽量で廉価な簡易放射温度計（例えば、A&D、AD-5617MT：約50g、最小表示0.1℃、標準価格：約3,600円（税抜、2016年7月現在）、測定距離（H）：測定領域直径（D）=1：1）を用いて現地のILB歩道面の平均温度（例えば、写真-2のように、高さ60cm（H：D=1：1））とすると舗装面上方から約60cm離して直径60cm程度の円で

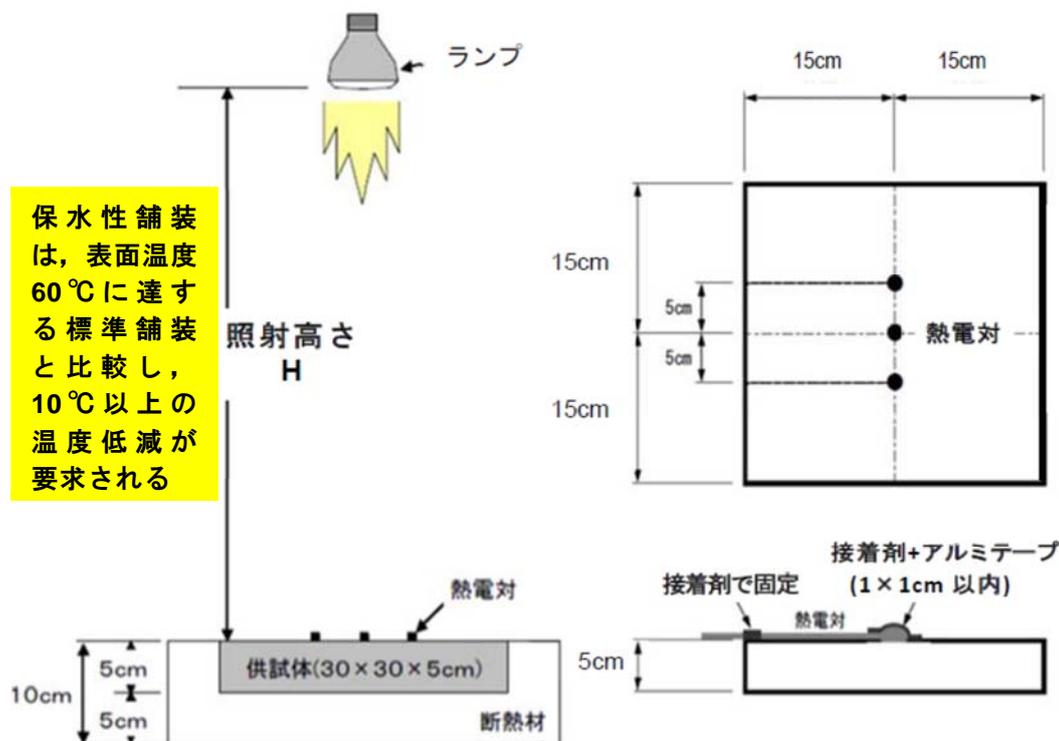


図-8 保水性舗装の室内照射試験方法(左)と熱電対の設置・固定方法

5~8箇所ほど測定した平均温度)で比較する方法は、極めて迅速に測定でき温度の読み取りも簡単であるため、保水性 ILB の温度上昇抑制効果、すなわち温度低減効果の評価法として最適であると考えられる。いままで ILB を 1 個あるいは $\phi 100\text{mm}$ コアの表面温度による評価法が舗装温度の保水性能評価法となっているが、それに代わる、目地を含めた直径 60cm 程度の円の温度を測定する方法はブロック舗装面の平均温度で容易に迅速に温度低減効果を評価できる方法であり、実用的で妥当な方法として提案する。

6.5.2 簡易放射温度計を用いたブロック舗装面温度上昇抑制機能の新評価方法の実証

ブロック舗装面温度上昇抑制機能を簡易放射温度計によって評価する新しい方法について、実際に市街地で供用されている普通 ILB 歩道 1 地点および保水性 ILB 歩道 2 地点の計 3 地点において温度測定をおこなった。その平均温度についてのブロック別平均値間の有意差検定結果から、新評価方法が実用的で妥当な方法であることを実証できたので、その成果を以下に取りまとめた。

(1) 黒・赤・白の 3 色カラーの普通 ILB における歩道 (写真-3)

- ・測定年月日と場所：2016 年 12 月 7 日 12 時 45 分～12 時 55 分，宮崎市清武総合運動公園野球場周囲歩道
- ・測定環境：晴天（測定前 3 日間降雨なし），無風，5cm 上方外気温 22.1°C ・湿度 40%
- ・ブロック敷設後の経過年数：1 年 2 ヶ月（2015 年 10 月完成）
- ・ILB 敷設のパターン：パーケット
- ・ILB の種類：ストレートシステム（外寸： $200 \times 100 \times 60\text{mm}$ ），黒・赤・白の 3 色の普通

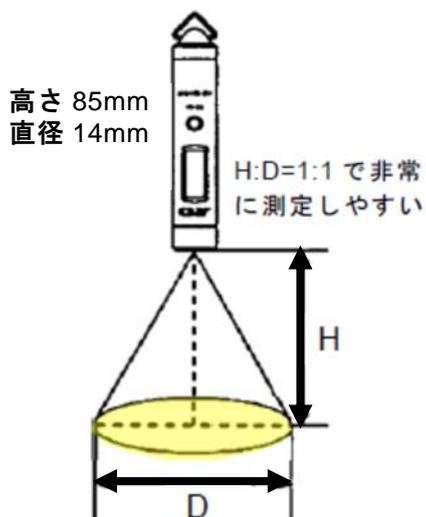


図-9 軽量で廉価な簡易放射温度計

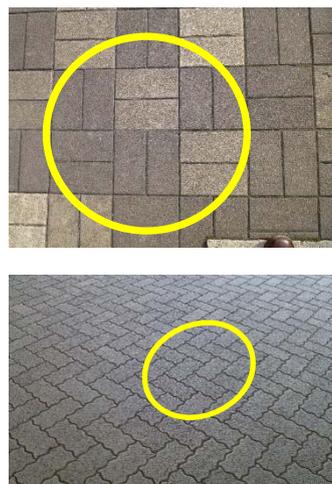


写真-2 直径 60cm 程度の温度測定範囲例

ILB, 製造工場は不明

・測定状況：歩道の温度は、各色別 ILB は上方 8~9cm (ブロック幅が 98mm のため) から任意 5 点, 路面上約 60cm から任意 5 点, 目地で任意 5 点の温度を簡易放射温度計で写真-3 のとおり測定した。ILB 表面は写真-3 のように靴跡や汚れが残っていたので大小の幅のある温度が測定されたため, 余分に 3 点ほど追加測定し大小すぎる値を棄却の上, 5 点の温度を採用した。目地では目地幅が小さいので放射温度計の先端を目地に接するように測定した。ILB 表面の平均明度 (L*) は, 測定時に撮影したブロック歩道写真をインクジェット式カラープリンタで光沢紙に拡大印刷した上で, ILB 表面の汚れが目立っていたので各色 ILB で 5 点ずつ (読取り誤差を無くすため, その 1 点につき 3 回測定) を, **第 3 章 3.3.7 ブロックの表面色調測定**で述べた色彩色差計 (ミノルタ, CR-200) を用いて測定した。なお, ブロック別温度の平均値間の有意差検定は「チューキー法 (Tukey's honestly significant difference (HSD) test)」によった。

・結果および考察

表-4 に測定箇所別の平均温度±標準偏差, 統計上の有意差および変動係数を示す。平均温度の低い順に, 目地, 白 ILB, 赤 ILB, 60cm 円, 黒 ILB であった。外気温が 22.1°C の環

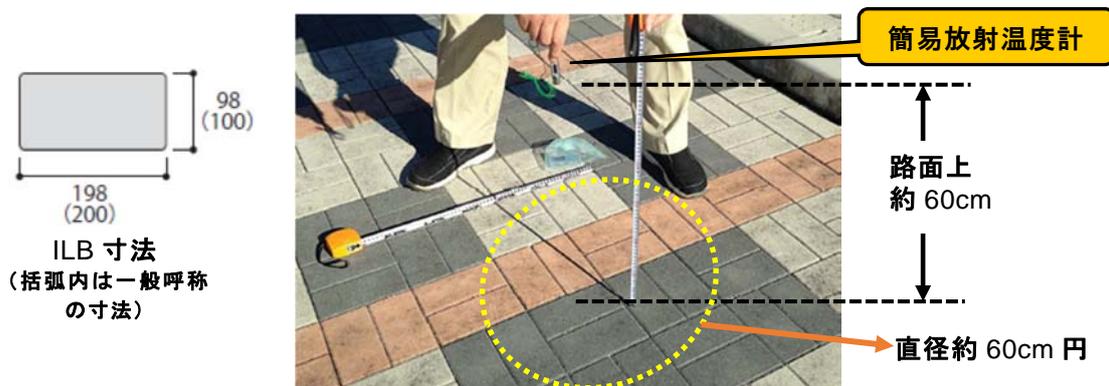


写真-3 黒・赤・白の 3 色カラー普通 ILB の歩道と簡易放射温度計による温度測定方法

表-4 歩道の測定箇所別平均温度 (±標準偏差), 有意差および変動係数

測定箇所	温度 (°C) M±SDn-1*	有意差 (P<0.01)	変動係数 Cv (%)
60cm円	22.9±0.58	a	2.5
黒 ILB	24.2±0.64	b	2.7
赤 ILB	22.2±0.70	c	3.2
白 ILB	21.4±0.68	c	3.2
目地	19.4±0.46	d	2.3

*測定数(任意): n=5

境で最低温度の目地と最高温度の黒 ILB との温度差は 4.8℃であった。しかしながら、赤 ILB と白 ILB の温度には有意差はないが、これらの 2 群と黒 ILB、60cm 円および目地との間にはそれぞれ有意に温度差が認められた ($P < 0.01$)。測定温度の変動係数は 2.3~3.2% の範囲にありバラツキが小さかった。特に目地の温度のバラツキは 2.3%と小さく、これには、敷設後の経過が 1 年少々で目地砂がよく充填された状況であることと、簡易放射温度計を目地に接して測定したことが影響したと思われる。また、測定前 3 日間に降雨がなかったため測定温度の差は小さいと考えたが、目地と着色 ILB で温度の最も低い白 ILB との温度差が 2.0℃生じた。これには降雨による影響が少ないとはいえ、敷設後の経過年数が短いので路盤・敷き砂からの水分の吸上げが目地砂まで湿潤にして温度上昇抑制に機能したものと考えられる。

さらに、各色の ILB 表面の明度 (L^*) と各色 ILB の平均温度との関係を示したものが、図-10 である。この図から、ブロック表面の明度と平均温度には負の極めて高い相関が認

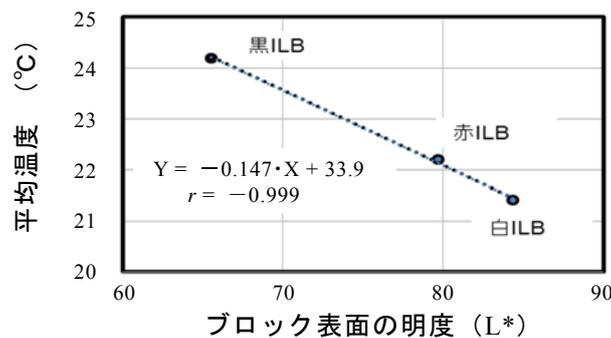


図-10 3色カラー普通 ILB 表面の明度と平均温度の関係

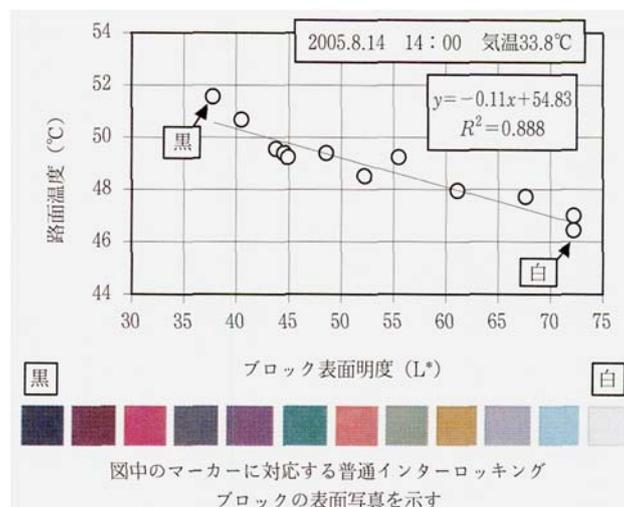


図-11 普通 ILB 舗装におけるブロック表面明度と路面温度の関係¹³⁾

められ、明度の高い白 ILB ほど表面温度は低く発現することが明らかとなった。ブロック表面の明度の高い白 ILB は、実際には、アルベド（太陽放射反射率）が大きいため平均温度を低く発現し、黒 ILB より約 3℃も低かった。

以上の結果は、各着色 ILB 写真で測定した表面明度と路面温度の関係（図-11¹³⁾）から、ILB 表面の明度の高いブロック舗装ほど路面温度が低く測定され、白 ILB は黒 ILB よりも路面温度が 5.1℃も低かったことと同様である。このためブロック舗装で着色 ILB の温度低減評価をおこなう場合、着色 ILB 自体のアルベドの測定とそれが表面温度に及ぼす影響を把握しながら温度測定をおこなうなど作業上の煩わしさが伴い、室内照射測定法⁹⁾は着色 ILB に対応した評価法とはいえない。またこのことから ILB 1 個を用いておこなう温度上昇抑制（低減）評価法には、白色系の ILB の表面温度を低く測定してしまうので、着色 ILB への配慮が必要である。そこで、簡易放射温度計による 60cm 円の平均温度は、着色 ILB が敷設されたとしても、ブロック舗装全体の平均温度であるので、実際のブロック舗装における温度上昇抑制（低減）評価法として迅速な測定も可能で実用的なものといえる。

(2) 灰色系・肌色系カラー保水性 ILB における歩道（写真-4）：2017 年 3 月 23 日と同年 4 月 5 日の 2 回測定

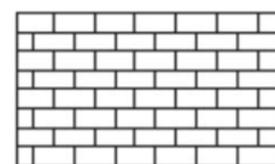
①測定年月日時刻と場所：2017 年 3 月 23 日 12 時 30 分～12 時 37 分，東京都千代田区丸ノ内「トラストタワーN 館東側歩道」南側歩道で北町奉行所跡地付近，南側の日射はビルの谷間から 12：30 から 5 分間ほど差し込む間に，外気温が上昇し保水性 ILB の温度も上がった

・測定環境：やや晴れ（2 日前に 25.5mm 降雨），微風（ビル風），5cm 上方外気温 13.8℃・湿度 34%

・ブロック敷設後の経過年数：1 年 5 ヶ月（2015 年 11 月完成）

・ILB 敷設のパターン：ブリック（写真-4 の右端の図を参照）

・ILB の種類：太平洋プレコン工業（株）製造，ストレートシステム（外寸：200×100×60mm），サンドブラスト加工による滑り防止の表面仕上げ，灰色系・肌色系カラー保水性 ILB（着色表層モルタルには黒粒の銅カラミがアクセントに練混ぜられて製造）。



パターン：ブリック

写真-4 東京・丸ノ内のビルの谷間の歩道に敷設された灰色系・肌色系カラー保水性 ILB

・結果および考察

この歩道には写真-4 に示す灰色系と肌色系の 2 色の保水性 ILB が敷設され、敷設後の経過年数が 1 年 5 ヶ月と比較的新しいものがあった。高層ビルの中の南北に長い歩道で、12 時 30 分ころに日射が狭い高層ビルの間から 6 分ほど差し込む程度で、ビル風も受けて目地砂が飛散している箇所もあった。2 日前に 25.5mm の降雨があったことや 5cm 上方外気温が 13.8℃と肌寒い環境でビル風も時々あり、歩道表面温度は 10℃前後と低かった。

測定点の数は測定箇所別に任意の各々 8 点であるが、風の影響などでばらついた値がでたときは 3 点ほど追加測定し、上下を棄却した 8 点の温度を採用した。その測定結果と統計処理結果を表-9 に示した。

温度の低い順に示すと、目地が 10.4℃、60cm 円が 10.8℃、肌色系 ILB が 10.9℃、灰色系 ILB が 11.1℃であり、最低温度と最高温度の温度差は 0.7℃と極めて小さかった。しかしながら、目地と 60cm 円、肌色系 ILB、灰色系 ILB との間に、また、60cm 円と灰色系 ILB との間に、それぞれ有意差が認められた ($P < 0.01$)。肌色系 ILB は 60cm 円、あるいは、灰色系 ILB との間には有意差はなかった。いずれにしても、保水性 ILB の歩道における平均温度では目地が最も低く、次に 60cm 円、肌色系 ILB、灰色系 ILB の順となった。このため目地の温度が低く発現することから、歩道表面温度はその全体を 60cm 円で測定して評価すべきことの妥当性が保水性 ILB の歩道で実証できた。

②測定年月日時刻と場所：2017 年 4 月 5 日 12 時 30 分～12 時 36 分、場所は同上①

・測定環境：晴天 (2 日前に 1.5mm 少雨)、風 (ビル風) 1～2m/s、5cm 上方外気温 31.0℃・湿度 24%

・結果および考察

上記①と同じ歩道で 4 月 5 日に測定時の 5cm 上方外気温が 31.0℃と①よりかなり暖かくなつた中で温度を測定した。測定点の数は測定箇所別に各々 8 点であるが、風の影響などでばらついた値がでたため 3 点ほど追加測定し、上下の値を棄却した 8 点の温度を採用した。その測定結果と統計処理結果、ブロック表面の明度を表-10 に示した。

表-9 ①2017.3.23 の歩道の測定箇所別平均温度 (±標準偏差), 有意差および変動係数

測定箇所	温度 (°C) M±SD n-1 *	有意差 ($P < 0.01$)	変動係数 Cv (%)
60cm円	10.8±0.04	b	0.3
灰色系	11.1±0.07	a	0.6
肌色系	10.9±0.04	ab	0.3
目地	10.4±0.25	c	2.4

*測定数：n=8

温度の低い順に示すと、目地が 19.5°C、60cm 円が 20.0°C、肌色系 ILB が 21.0°C、灰色系 ILB が 21.5°C で、この順は①と同様であった。また、最低温度と最高温度の温度差は 2.0°C であったが、環境温度が高くなったので、①の 0.7°C より大きく発現した。この結果、目地と 60cm 円、肌色系 ILB、灰色系 ILB との間に、また、60cm 円と肌色系 ILB、灰色系 ILB との間に、さらに、肌色系 ILB と灰色系 ILB との間に、それぞれ有意差が認められた ($P < 0.01$)。

着色 ILB の明度と表面温度の関係は図-10 に示す傾向と同様に認められ、明度と表面温度の関係は、肌色系 ILB が 46.8 と 21.0°C に対し、灰色系 ILB が 24.8 と 21.5°C となり、明るい色の ILB ほど平均温度が低くなった。

以上のことから、平均温度では目地が最も低く、次に 60cm 円、肌色系 ILB、灰色系 ILB の順となり、いずれの間にも有意差が認められたほか、環境温度が高くなるほど保水性 ILB の表面温度に差が出ていることも判明した。①と同様に、目地の温度が低く発現することから、歩道表面温度はその全体を 60cm 円で測定して、温度上昇抑制（低減）効果を評価することの妥当性を、保水性 ILB の歩道で実証できた。

また、全体の測定時間は、①、②とも、測定箇所 4×測点 11（8+追加 3）点×（移動・読取り・記録）7.5 秒=330 秒≒5.5 分と計算される。実際は 6～7 分を要した。このように極めて迅速に温度を測定できることを確認した。ILB 敷設現場の環境温度は変わりやすいことから、簡易放射温度計で歩道温度を迅速に測定できる方法は実用的である。

(3) 黒灰色系・灰色系カラー保水性 ILB における歩道（写真-5）

・測定年月日と場所：2017 年 4 月 5 日 13 時 24 分～13 時 31 分、東京都新宿区西新宿 8-14 成子天神社内歩道

・測定環境：晴天（2 日前に 1.5mm の少雨）、無風、5cm 上方外気温 37.3°C・湿度 10%

・ブロック敷設後の経過年数：3 年 6 ヶ月（2013 年 9 月完成）

・ILB 敷設のパターン：ブリック

・ILB の種類：太平洋プレコン工業（株）製造、ストレートシステム（外寸：200×100×

表-10 ②2017.4.5 の歩道の測定箇所別平均温度（±標準偏差）、有意差、変動係数および明度

測定箇所	温度 (°C) M±SD n-1*	有意差 ($P < 0.01$)	変動係数 Cv (%)	明度 L*
60cm円	20.0±0.32	c	1.6	
灰色系	21.5±0.64	a	3.0	24.8
肌色系	21.0±0.30	b	1.4	46.8
目地	19.5±0.40	d	2.1	

*測定数：n=8

60mm), 黒灰色系・灰色系カラー保水性 ILB.

・結果および考察

外気温が 37.4℃と陽射しが強くかなり暖かい中で温度を測定した. 測定点の数は測定箇所別に任意の各々8点であるが, 風の影響などでばらついた値がでたときは3点ほど追加測定し, 上下を棄却した8点の温度を採用した. その測定結果と統計処理結果, ブロック表面の明度を表-10に示した.

温度の低い順に示すと, 目地が 39.8℃, 60cm 円が 40.5℃, 灰色系 ILB が 40.5℃, 黒灰色系 ILB が 41.2℃であった. また, 最低温度と最高温度の温度差は 1.4℃であった. この結果, 目地と 60cm 円, 灰色系 ILB, 黒灰色系 ILB との間に, また, 60cm 円と黒灰色系 ILB との間に, それぞれ有意差が認められた ($P < 0.01$). しかし, 60cm 円と灰色系 ILB はほとんど同じ温度のため有意差はなかった.

着色 ILB の明度と表面温度の関係は図-10に示す傾向と同様に認められ, 明度と表面温度は灰色系 ILB が 65.6 と 40.5℃に対し, 黒灰色系 ILB が 57.7 と 41.2℃となり, 明るい色の ILB ほど, その平均温度が 0.7℃低くなった.

以上のことから, 平均温度では目地が最も低く, 次に 60cm 円と灰色系 ILB, 黒灰色系 ILB の順となった. 目地の温度が低く発現することから, 歩道表面温度はその全体を 60cm 円で測定して評価すべきことの妥当性が保水性 ILB の歩道で実証できた. また, この歩道における全体の温度測定時間が7分であったが, 簡易放射温度計を用いれば迅速な測定作業が可能であることを確認した.

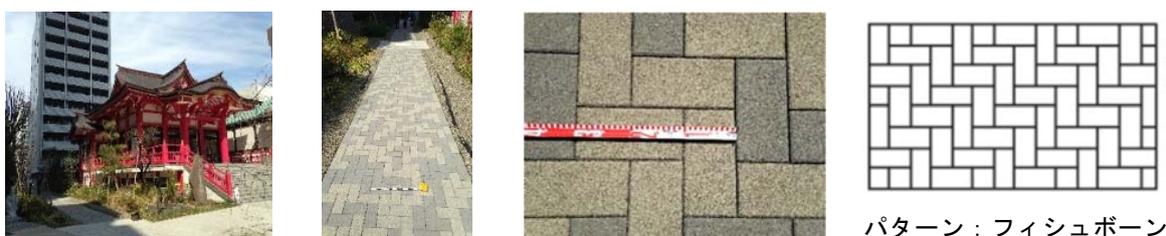


写真-5 西新宿の成子天神社の脇の歩道に敷設された黒灰色系・灰色系カラー保水性 ILB

表-10 歩道の測定箇所別平均温度(±標準偏差), 有意差, 変動係数および明度

測定箇所	温度 (°C) M±SD n-1*	有意差 ($P < 0.05$)	変動係数 Cv (%)	明度 L*
60cm円	40.5±0.38	b	0.3	
黒灰色系	41.2±0.69	a	0.6	57.7
灰色系	40.5±0.48	b	0.3	65.6
目地	39.8±0.50	c	2.4	

*測定数 : n = 8

(4) まとめ

3つのブロック舗装の現場(3色着色の普通 ILB 歩道が1箇所, 2色の着色保水性 ILB 歩道が2箇所)で, 舗装温度を目地も含めて簡易放射温度計で測定した結果, 以下のことが整理される.

1) 着色 ILB の明度と表面温度の関係は, 図-10 に示す傾向と同様に認められ, 明るい色の ILB ほど平均温度が低く発現した.

2) 歩道温度として測定した平均温度では目地が最も低く, 次に 60cm 円と灰色系 ILB, 黒灰色系 ILB の順となった. 目地の温度が低く発現することから, 歩道表面温度はその全体を 60cm 円で測定して評価すべきことの妥当性が保水性 ILB の歩道で実証できた.

3) 歩道温度の全体の温度測定時間は簡易放射温度計を用いれば非常に短く, 迅速な作業なることを確認した.

以上のことから, 着色 ILB の表面温度は黒っぽい色のものほど高く発現することから, 1個の ILB 表面温度による温度上昇抑制(低減)効果の評価法は着色 ILB 舗装には不向きであることが判明した. また, 目地の温度がほかの ILB よりも明らかに低いことから, 目地を含めた舗装全体の平均温度で温度上昇抑制機能の評価する方法が妥当であり, 例えば直径 60cm 程度の円の温度を簡易放射温度計で測定する方法が作業も迅速に進められるので実用的であることを実証した.

測量における歩幅(歩長)の精度は $1/100 \sim 1/200$ であり¹⁴⁾, 距離は歩きながらも十分に測量できる. 歩幅は歩く速度や直線性, 個人差もあるから一概に何 cm とはいえないが, 簡易放射温度計を用いた温度測定では, 筆者の歩幅の延長線上で「移動歩行・温度測定と読取り・記録」の繰り返しで, 計 8 点で直線上距離約 5m にほぼ 60 秒を要した. 1 点あたり約 7.5 秒の速さでバラツキの小さい温度測定作業が可能であった. もし測定値にバラツキがあったら速やかに追加測定して大小値を棄却した方が望ましく, 日射が雲などで遮られたり風が少しでも生じると測定値にバラツキが生じやすいので, 無風で一定な日射が測定環境として必要である.

吸上げ機能の高い保水性 ILB は, 普通 ILB と比較し, 敷設環境の温度が高くなるほど吸上げに伴う水分蒸発フラックスが大となることが想定される. 先の歩道温度の実証調査で, 環境温度が高くなると目地と ILB 表面との温度差が大きく発現したので, 夏季のように環境温度が高くなると, 保水性 ILB 歩道における目地と ILB 表面の温度差はより大きく発現するものと推察される.

以上のことから, ILB 系舗装面の温度上昇抑制機能の評価方法として, 室内照射試験における ILB 1 個の表面温度による「舗装面温度低減評価法」ではなく, 目地を含む舗

装面の平均温度で評価すべきであり、これには H:D=1:1 の簡易放射温度計によるのが迅速でバラツキが小さい測定を可能とするため最適である。事実、3箇所 of ILB 歩道で測定したブロック舗装面温度では目地が ILB 表面より明らかに低く発現することを確認した。このことは、図-7 の温度上昇抑制メカニズムを解明し、また、第 5 章の表-4 に示す熱画像（目地が ILB 表面より低かった）の再現性を裏付けるものであり、ブロック舗装面温度上昇抑制（低減）効果の評価方法として妥当であることを実証した。

6.6 まとめと課題

保水性 ILB(無)と保水性 ILB(灰)の保水量など物性が異なるのに、歩道温度上昇抑制に顕著に発現していない現象となったため、保水性 ILB 切片を用いて歩道温度上昇抑制メカニズムを実験的に検討した。第 6 章における各種実験は第 5 章を簡略に再現した一部でもあるが、ブロック表面組織の緻密さがブロック面の透水を低下させた現象は、表面からの水分蒸発を低下させる現象につながり、その結果が、目地の温度上昇抑制(低減)の役割を果たすという、保水性 ILB の歩道温度上昇抑制メカニズムを解明できた。いままでに得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 日射による保水性 ILB 切片などの表面温度変化から、保水性 ILB(灰)が保水性 ILB(無)よりも保水量が 0.02g/cm^3 大きな影響により、歩道温度を最大 1°C ほど下げることが確認できた。
- (2) 保水性 ILB 切片の表面を強制的に温める実験から、温度上昇の早いのは普通 ILB であり、約 2°C 低く保水性 ILB(灰)と保水性 ILB(無)が続いた。遅れて目地の温度が上昇し始めるが、保水性 ILB(灰)ほど遅れて上昇した。目地と目地砂の歩道温度上昇抑制に果たす役割が大きいことが示唆された。
- (3) 保水性 ILB 切片の保水性能が大きいのは保水性 ILB(無)より保水性 ILB(灰)であり、保水量の差異と同様であった。これらの単位容積質量は保水性 ILB(無)が保水性 ILB(灰)より有意に重く、また、表面に平行に 3 層に切断した場合、表層ほど重い傾向から、ブロック製造工程で表層ほど緻密に形成されていることが判明した。
- (4) ブロック表面からの水の浸透は、保水性 ILB(無)が保水性 ILB(灰)より多かったことから、微細な火山灰を混入して保水性を高めてはいるものの、ILB 表層を緻密化させたためにブロック表面からの水分蒸発を抑制していることが示唆された。
- (5) 火山灰混入の保水性 ILB による歩道の温度上昇抑制機能について検討した。微細火山灰を混入したことがブロックの表層をより緻密に製造・形成したため、ブロック内部から表層への毛细管現象を抑制し、ブロック表面からの水分蒸発をも抑制するメカニズムがあり、その微細火山

灰の混入量を減らす必要がある。また、目地や目地砂の温度上昇抑制に果たす役割は極めて大きい。

- (6) 温度上昇抑制には目地が大きな役割を果たすので、ブロックや目地の全体、すなわち舗装面の温度を簡易放射温度計で測定する方法を、ヒートアイランド現象緩和効果を評価する方法として新規に提案した。この方法で実際に 3 色普通 ILB(宮崎市)と 2 色保水性 ILB(東京都内)の歩道でブロック舗装面温度を測定した結果、歩道の目地の温度がブロック表面より有意に低く発現した($P<0.05$ および $P<0.01$)。このことは、保水性 ILB 歩道の温度上昇抑制メカニズムを解明するとともに、熱画像で目地の温度が低く表示した結果を再現するものであり、目地を含む舗装面の平均温度で温度上昇抑制(低減)効果を評価する方法が自然で実用的で妥当性があることを実証した。この簡易放射温度計は廉価であるが、舗装面温度を容易に迅速に測定できることを確認した。

今後の課題として、火山灰混入型保水性 ILB の歩道温度上昇抑制機能を向上させるには、保水量の増大を目指す必要がある。桜島火山灰の混入率を下げたり保水量を増大する材料、例えば、吸水率が 3~9% と高いシラスや、吸水率の高めの高炉スラグ等の混入も考えられる^{15, 16)}。また、少雨などで水の少ない期間が長びくと保水性 ILB の機能が果たせなくなるので、利用頻度の高い都市部における歩道では、敷設ブロックの路盤や脇に水を持続的に供給できる貯水槽や給水システムなどを歩道断面構造に配慮して設計して、ヒートアイランド現象緩和のさらなる対策を構築する必要がある。

参考文献

- 1) 細川吉晴:新燃岳と桜島の混合火山灰を混入した保水性インターロッキングブロックの歩道周囲温度に及ぼす影響, 土木構造・材料論文集, 第 31 号, pp.79-87, 2015
- 2) 細川吉晴・関戸知雄・土手裕・平瑞樹:南九州における新燃岳と桜島の火山灰を混合配合した保水性インターロッキングブロックの特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.379-386, 2016
- 3) 国土交通省気象庁: 2014 年 10 月 17 日宮崎市気象観測データ, 過去の気象データ, 入手先<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/hourly_s1.php?prec_no=87&block_no=47830&year=2014&month=10&day=17&view> (参照 2014.12.18), 2014
- 4) 国土交通省気象庁: 2014 年 10 月 19 日宮崎市気象観測データ, 過去の気象データ, 入手先<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/hourly_s1.php?prec_no=87&block_

no=47830&year=2014&month=10&day=19&view> (参照 2014.12.18), 2014

- 5) インターロッキングブロック舗装技術協会:舗道の構成と役割, インターロッキングブロック舗装設計施工要領, pp.4-8, 2000
- 6) 日本規格協会: JIS A 5371:2010 プレキャスト無筋コンクリート製品, 60p, 2010
- 7) Yamamoto,T., Maki,T., and Honda,T.: Discussion on assessment and quality standards of water-retaining concrete block, Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Block Paving (San Francisco), pp.253-262, 2006
- 8) 例えば, インフラテック:クールトーン (製品カタログ), 入手先<https://www.infratec.co.jp/products/detail.php?serv_id=106&cate_id=54>, (参照 2011.11.18), 2012
- 9) 路面温度上昇抑制舗装研究会:保水性舗装技術資料, Ver.3, pp.10-13, 2011
- 10) インターロッキングブロック舗装技術協会:「クールブロックペイブ」認定制度, パンフレット, pp.1-4, 2015
- 11) インターロッキングブロック舗装技術協会:ブロック系路面温度低減舗装「クールブロックペイブ」の表面温度の測定方法 [A] [B], pp.1-6, 2015
- 12) 路面温度上昇抑制舗装研究会遮熱部会:遮熱性舗装技術資料, 26p, 2016
- 13) 唐沢明彦・藤田仁・江角典広・高森哲也:保水性コンクリートブロック舗装の路面温度上昇抑制効果に関する研究, コンクリート工学, Vol.44, No.7, pp.9-16, 2006
- 14) 細川吉晴・西田修三・今野恵喜・藤原広和・諸泉利嗣・守田秀則:よくわかる測量実習 (増補), コロナ社, 東京, pp.7-11, 2016
- 15) 例えば, 藤原浩巳・丸岡正知・川島顕・鯉渕清:リサイクル材料を用いた保水性インターロッキングブロックの特性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.61, pp.558-564, 2007
- 16) 例えば, 関賢治:ヒートアイランド対策の超保水性インターロッキングブロック—高い保水機能を有するレインボーエコブロック Biz の効果検証—, 建設機械施工, Vol.65, No.10, pp.46-51, 2013

第7章 汎用性のある火山灰等混入型保水性 ILB 製造技術の提案

7.1 経緯

高吸水率の新燃岳火山灰の有効利用を図るために、近接する桜島の微細火山灰も混合したものを良質細骨材の一部に置換して練ったコンクリートを振動加圧させ即時脱型方式により保水性 ILB を製造した。そのブロックの JIS 規格を満足するコンクリート配合条件と火山灰の最大混入率も明らかにすることができた。この保水性 ILB がヒートアイランド現象緩和に寄与するかを試験歩道において確認したところ、保水性 ILB (灰) が保水性 ILB (無) より温度上昇抑制機能が認められた。また、保水性 ILB の切片による実験から、温度測定は代表的なブロック表面で測定するのが一般的であるがブロック間の目地からブロック内部水分が蒸発して歩道全体の温度上昇抑制を促進する可能性を示唆した。そこで、温度測定方法ではブロック 1 個の表面ではなく、歩道面の目地を含むブロック面における平均温度によりブロック舗装面の温度低減効果を評価する方法を提示した。

しかしながら、昨今、わが国で多発する火山噴火の実情を鑑みると、例えば 2 つの火山噴火が比較的近いところに発生した場合、その降灰を主に活用する汎用性のある火山灰等混入型保水性 ILB 製造技術を、火山灰等有効利用対策メニューとして提案する必要がある。本論文で主対象とした生火山灰は、噴火に伴う降灰であり、歴史的に極めて古くに火山噴火で噴出した火山灰等が地中に埋没している堆積火山灰（シラスや軽石）や堆積固化した凝灰岩とは性質が異なるものとして取り扱っている。

7.2 汎用性のある火山灰等混入型保水性 ILB 製造技術の提案

汎用性のある火山灰等混入型保水性 ILB 製造技術を提案する際に最も基本的に重要なことは、直近の火山噴火に伴う降灰を主体的にブロック材料に活用することである。このブロック材料の調達区分を考えると、この降灰のほかに、1) 近隣に噴火した火山からの降灰との組み合わせや、2) 火山噴火地域の近くに埋没している堆積火山灰との組み合わせ、3) 火山噴火地域の近くに見られる凝灰岩の粉末との組み合わせがある。1) はすでに本論文で構築した新燃岳火山灰と桜島火山灰の例があるように、細骨材の一部として用いるものである。2) は例えば新燃岳火山灰とシラスの組み合わせ、あるいは、1) とシラスの組み合わせであり、これも細骨材の一部として用いる。3) は、火山灰は細骨材の一部とし、凝

灰岩は粉末状に調整した混和材料としてセメント代替材として用いることである。このように、火山噴火場所に応じて、各種のブロック材料の調達区分があり、また、それらの組み合わせも細骨材の一部として、あるいはセメントの代替材料としての調整法も異なる。したがって、主体となる火山噴火の降灰に加えて、その近隣地域で新規に噴火火山の降灰が生じたり堆積火山灰や凝灰岩があることが前提となるので、汎用性のある火山灰等有効利用対策メニューの提示の仕方はその前提によって異なる。

この対策メニューは、火山灰等ブロック材料の調達から公共事業への持続的利用策まで多岐にわたる。その項目と実施内容を以下に列挙する。

(1) 火山噴火による降灰地域の確認

火山噴火の発生に伴い、その規模や災害、またその対策などの具体的なことがらを確認する必要がある。中でも火山噴火で降灰した地域的広がりなど降灰分布状況の確認と、降灰量の火口からの拡散や堆積など地理的分布について情報収集をおこなう。

一方、この火山に近接する活火山の有無や地質図などから近隣の堆積火山灰や凝灰岩地質の有無を確認する必要がある。

(2) 地域住民による降灰の集積回収

降灰の集積回収は地域住民の協力を得ながらおこなわれるが、この場合、市役所からタバコの吸殻や犬のフンなど有害物を含めないような注意喚起と集積回収の依頼をおこなう必要がある。このことが困難な場合は、できるだけ有害物を含まない降灰集積地を選定して、問題の少ない降灰かどうかの分別回収までおこなう必要もある。

(3) 資源火山灰などの運搬・保管

分別回収した火山灰は資源火山灰として、運搬・保管の扱いを受けられると思われる。資源火山灰がコンクリート用骨材との認識があれば、運搬移動の際に県をまたぐような場合は特に問題はないと思われる。ただ、産業廃棄物並みの取扱いとなれば隣接県間の調整が必要になる場合がある。

資源火山灰が運搬車から路上などへ飛散しない対策や事故・問題のないように取り決めに基づいておこなうべきであり、これを保管する場所の確保やその安全性・品質保持を守るために不純物などが混入しない保管方法に留意が必要である。これには、市役所や製品工場が窓口として対応した方が円滑に進めやすい。

(4) ブロック製品用の細骨材・混和材料の適性確認

2つの火山灰や凝灰岩に関する細骨材あるいは混和材料としての物理的性質・化学的性質について、各種の実験をおこなって把握する必要がある。一方で、火山灰についてはふるい分け試験によって採取地別の火山灰の粒度分布と計算された粗粒率を求め、噴火火山

の火口から降灰地までの距離と粗粒率の関係、および、火山灰の粒度分布をもとに火口からどの程度の距離に分布する火山灰を採取できるかを検討する。

また、アルカリシリカ反応性 (ASR) 物質が採取した火山灰に含まれていないかどうかを X 線回折により分析し、もしそのような物質があれば、その火山灰を混入したコンクリートに膨張性亀裂が入る恐れがあるので、モルタルバー法で ASR 試験をおこない材齢 13 週や 26 週で膨張率が JIS 規格より下回ることを確認する必要がある。もしも上回る場合は、アルカリ量の少ないセメントを使用するなどして対応する必要がある。さらに、回収された生火山灰には市街地のゴミや土壌などを含むことがあるので、場合によっては重金属の溶出量と含有量の JIS 基準を満たすかどうかの環境安全品質の判定も必要である。

さらに、火山灰を細骨材の一部として用いるか、あるいは、凝灰岩を粉末にして混和材料 (天然ポゾラン材) として用いるかを検討する必要がある。また火山灰を粉末にして混和材料とすることも考えられるが粉末製造のコストがかかるので、火山灰はそのまま用いることが望ましい。凝灰岩は火山灰が固化した軟らかい岩石であるからその露頭から切り出してクラッシャーで粉砕しミルで粉末にすることになる。したがって、技術的には粉末化は可能であるが製造コストがかかるので、化学抵抗性などをコンクリートに持たせなければならないなど特殊事情を除けば、凝灰岩を用いない方が望ましい。

また、コンクリートの長期特性試験は、上述の混和材料として使用した場合、ポゾラン反応によって長期耐久性が発現することが知られている。ただこの試験をおこなう場合は、供試体の作成個数が多大となり長期試験に対応する職員も配置する必要があり、いわゆる、時間と経費を要するために限られた研究機関でしか対応できない。したがって、この長期耐久性試験をおこなうかどうかについては慎重に検討すべきである。

(5) ブロック工場選定とコンクリート配合、試作品製造

火山噴火地域においては、JIS 規格製品を製造できる JIS 認定のブロック工場を選定する。その後、火山灰等混入型の即時脱型製品：保水性 ILB のコンクリート配合を設計し、保水性 ILB 試作品を製造する。所要の材齢で試作品の JIS 規格適性を確認し、配合設計変更がある場合は、すみやかに配合設計をやり直し、試作品で JIS 規格を満足する配合のうち、堆積降灰の処理をできるだけ促進するためにも最大の混入率を求める必要がある。

火山灰等をポゾラン材料として使用するための粉末技術はミルで製造調節は可能であるが、細かさの指標である粉末度を各種製造した上で事前に凝灰岩粉末を混入した供試体で試験をおこない、所要の粉末度はどの程度であるべきかを実験的に検討する必要がある。特に粉末化火山灰等を混合したコンクリートの長期特性を測定するかどうかは、上記 (3) でも論じたように、時間と経費を要するために限定的となる可能性がある。

高吸水率火山灰等を単体で、あるいは混合でコンクリート配合を設計し、各種の保水性 ILB の試作品製造をおこなう。そして、試作した保水性 ILB について JIS 規格を満足する配合条件を摘出するか、あるいは、JIS 規格を満足するように配合設計の変更を試みる。

(6) 保水性 ILB の製造と JIS 規格の品質確認

上記(4)により、高吸水率火山灰など単体あるいは混合による保水性 ILB を実機レベルで製造する。その後、抜き取りで JIS 規格に適合する製品であるかどうかを確認する必要がある。

しかし、火山灰等ブロック材料の調達区分からみた火山灰等の運搬や粉末化等製造調整経費、製品の搬出等についての全体コストを求め、採算面でどうなるかコストパフォーマンスを検討する必要がある。とりわけ火山灰等資材の調達や準備にかかる経費や保水性 ILB など製造等における費用対効果の側面から改善すべきことがらを摘出することは重要である。

(7) 公共事業へのブロック製品の持続的利用策の構築

保水性 ILB の歩道温度上昇抑制効果を検証して評価を受けることは重要である。この検証結果を地域住民に持続的利用策として公開し認知を図ることも必要である。ここでは保水性 ILB の製造を例に述べてきたが、このほかに防災用ブロックとして大型積みブロックを、火山灰等の公共事業への持続的利用促進策の一環として製造し、防災ハザードマップ等を参考に被害の想定される場所付近に事前に相当量を備蓄しておくことが安全上重要と思われる。特にサイズの大きな積みブロックなどの即時脱型製品を防災用に製造し備蓄を図ることは、火山灰等の一層の減容促進になる。

一方、火山との共生のあり方を地域資源有効利用の観点や防災活動の一環として小・中学校生徒に育むことは極めて重要なことである。“禍（わざわい）は忘れたころにやってくる”ので、繰り返し指導する事項として定着させるべきである。

また、地域の公共事業に、火山灰等資源を活用した JIS 製品等を「火山灰等混入 JIS 製品を優先的に使用する」ことを工事仕様書に明記し、現実的な火山灰の減容促進を図る必要がある。さらに、第 1 章の「1.3 一般廃棄物溶融スラグを混入する ILB の開発」に記載したように、溶融スラグなどを混入して製造したリサイクル製品に関しては県や協会の「リサイクル製品の認定製品」の指定や、最近の国土交通省の「公共事業等における新技術活用システム(NETIS)」の登録もある。生火山灰混入の JIS 製品等をこのような指定や登録するには時間がかかるかもしれないが、チャレンジする価値はあるし、それが可能になれば製品の公共事業などで持続的に利用される道が開けるものと考えられる。

(8) ブロック製品の維持管理

ブロック製品の保守点検など地域住民の理解と協力を得ながら維持管理に努める

7.3 汎用性のある火山灰等混入型保水性 ILB 製造技術と公共事業への活用のフロー

表-1 は、上記 7.2 に提案したことがらを踏まえ、汎用性のある「火山灰等混入型保水性 ILB 製造技術と公共事業への活用」のフローとして、ある程度絞った項目とその中で実施すべき内容、具体的に確認すべき事項も記述し、この実施内容を推進するための担当部署等も付記したものである。なお、表中で灰色に塗りつぶした箇所は、時間と経費を要することから限定された研究機関でしか対応できないものであり慎重に検討する事項である。

この表は、南九州における 2 つの火山噴火の降灰や、鹿児島県中心に広く埋没している堆積火山灰のシラスあるいは近くの地質図で検索される凝灰岩を例として、火山噴火に伴う火山灰等の調達から保水性 ILB 製造を経て製品活用へのロードマップを示すものである。ブロック材料の調達区分では、偶然にも 2 つの火山噴火が約 50km 圏内と近いところにあり、その付近に堆積火山灰や凝灰岩の埋設や露出の場所が既知であると設定したものである。汎用性という側面では、ブロック製造のコンクリート材料である良質骨材の一部に置換する火山灰等を、細骨材や混和材料として汎用的に活用できることを示している。

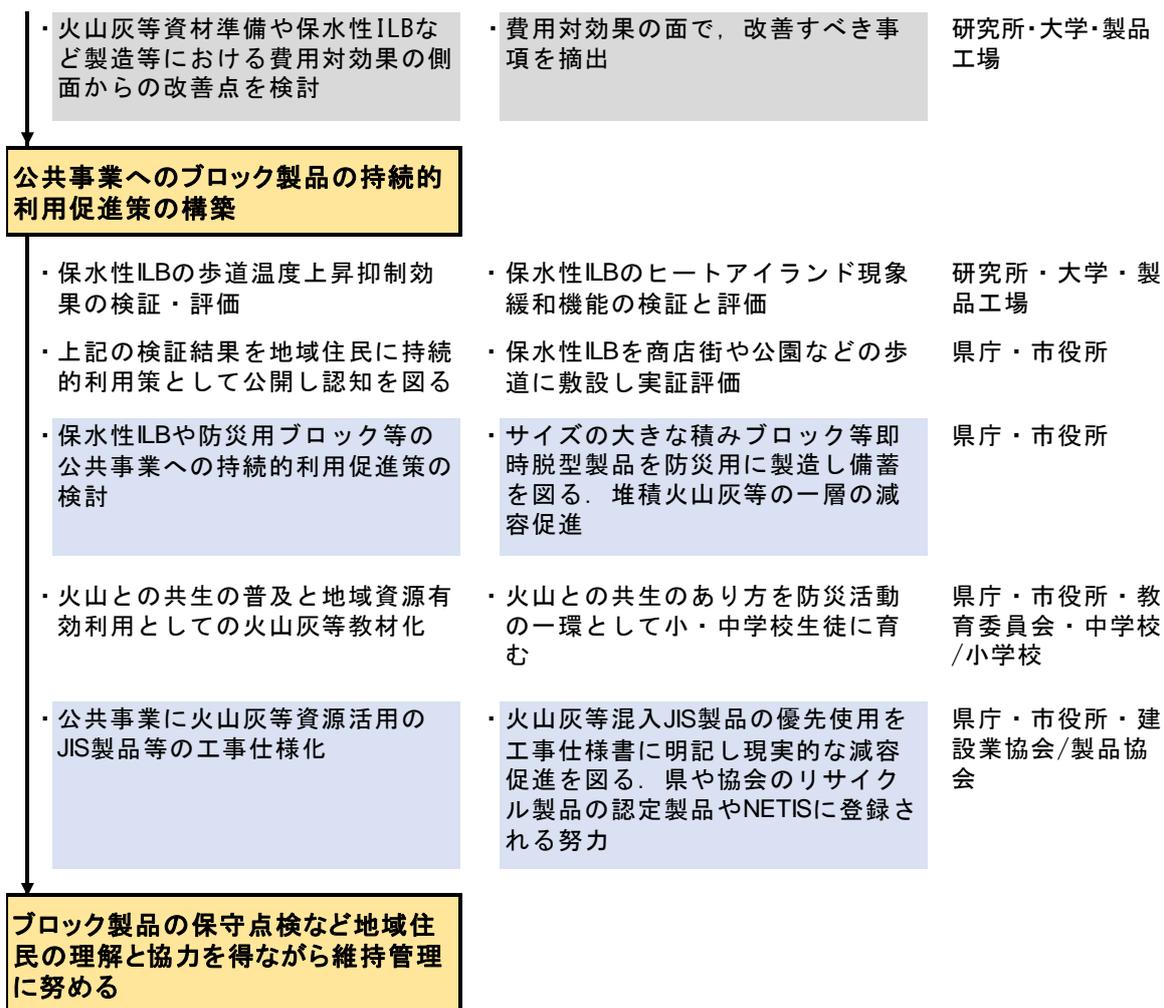
ここでは高吸水率な生火山灰を主体的に混入した保水性 ILB の製造をベースにしてきたが、火山灰等の減容を一層促進するには、この保水性 ILB よりも大きなサイズで、防災現場に直接的に配置できる即時脱型製品の積みブロックなどを多量に備蓄しておくことも必要である。参考例として、群馬県吾妻郡長野原町北軽井沢にある浅間火山博物館の中に火山噴火に対応する防災対策のパネルが展示されていて、その中に防災用に備蓄しておく大型土留めブロック（1 個 3 トン）を、国土交通省は群馬県側に約 9,600 個、長野県側に約 16,000 個を設置しているという。大型製品は一般的な生コンクリート配合と思われるが、このような製品にこそ、SO₂ 含有はすでになくなっていると思われるが堆積火山灰等を一部に混入して堆積量の減容に地産地消で活用することも考えてよいと思われる。

また、こうした環境製品を公共事業に使用することに関しては、公共事業発注側の県や市役所が、公共事業における工事仕様書の中に、「〇〇環境製品を優先的に使用しなければならない」と記述することが重要である。仕様化しない限り、多くの場合、“火山灰を混入した珍しい製品”で認知も広まらず終わっているのが現状で、資源循環型社会の構築には程遠いものになってしまう。また、生火山灰混入型 JIS 製品等を、前述したように、県や協会のリサイクル製品の認定製品に、あるいは NETIS に登録する努力も必要であると思われる。

表-1 火山灰等混入型保水性 ILB 製造技術と公共事業への活用のフロー

項目と実施内容	具体的確認事項など	実施担当等
火山噴火による降灰地域の確認		
<ul style="list-style-type: none"> ・2つの火山噴火の規模や災害、その対策などの確認 ・火山噴火で降灰した地域の確認と降灰量分布の情報収集 ・火山の近隣で地質図から古来の堆積火山灰やシラス、軽石あるいは凝灰岩の地層や露頭の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・噴火後の安全確認を優先 ・火山に近すぎず遠すぎない降灰地の確認 ・火山から遠すぎない堆積火山灰やシラス、軽石あるいは凝灰岩の地層や露頭の確認 	<p>気象庁・県庁・市役所</p> <p>気象庁・産総研地質調査総合センター</p> <p>産総研地質調査総合センター(シームレス地質図)・都道府県地質図</p>
地域住民による降灰の回収・集積		
<ul style="list-style-type: none"> ・降灰集積の際に有害物を含めない地域住民への注意喚起と依頼 ・上記が難しい場合は降灰集積地の選定と分別回収の必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・有害物をできるだけ含まない火山灰回収の住民理解の必要 ・分別火山灰で良質なものが多いほどよい 	<p>県庁・市役所</p> <p>県庁・市役所・都道府県研究施設(以降、研究所)</p>
資源火山灰などの運搬・保管		
<ul style="list-style-type: none"> ・分別回収した資源火山灰などの運搬では、問題のないように取り決めに定めた上でおこなう ・資源火山灰などの移動で県をまたぐ場合は、運搬上の問題が生じないように隣接県間の事前の打ち合わせが必要 ・資源火山灰などの安全性や品質保持の観点から保管方法に留意 	<ul style="list-style-type: none"> ・分別回収した資源火山灰などが運搬車から路上などへ飛散しない対策や事故・問題のないように取り決めに基づいておこなう ・資源火山灰などの移動で県をまたぐ場合は、コンクリート用骨材との認識があれば特に問題はないと思われるが、産業廃棄物並みの取扱いとなれば隣接県間の調整が必要になる場合がある ・資源火山灰などを保管する場所の確保やその安全性・品質保持を守るために不純物などが混入しない保管方法に留意が必要 	<p>県庁・市役所・製品工場</p> <p>県庁・他県の県庁</p> <p>市役所・製品工場</p>
ブロック製品用の細骨材・混和材料の適性確認		
<ul style="list-style-type: none"> ・2つの火山灰の物理的・化学的性質について各種実験 	<ul style="list-style-type: none"> ・高吸水率性で有機不純物を含まないことの確認 	<p>研究所・大学・製品工場</p>





第 8 章 総 括

8.1 本研究における成果

2011 年 1 月下旬に爆発的に噴火した新燃岳の火山灰は、周辺地域に多大な被害をもたらした。この火山灰の多くは市町村で定めた処分場所に堆積してきたが、噴火が継続するとなれば堆積量もかさむことから、その減容対策も必要である。また、堆積灰の一部は瓦やレンガなどに火山灰の科学的分析もなく対処療法的に有効利用されていた。

本研究は、2012～2013 年度 JSPS 科研費 24658205 の助成を受けて実施した「新燃岳火山灰を活用した環境修復ブロックの開発に関する基礎研究」をきっかけに始めた。火山噴出物の有効活用に関する研究は少なくはないし、火山灰は天然資源の一つであるものの、科学的な分析研究を進めた上でその利活用を考える必要がある。

新燃岳火山灰を主体に配合する保水性 ILB の開発とその温度上昇抑制機能に関して研究した主要な成果を、以下に総括する。

最近噴火した新燃岳の火山灰と時々噴火している桜島の火山灰のコンクリート用細骨材への適用性について、物理的・化学的性質の試験や採取地の現地調査などから検討した。前者は、採取地により吸水率が 4～7%、表乾密度が $2.1\sim 2.3\text{g/cm}^3$ 、粗粒率が 2.0～3.2 の範囲で土木学会の細骨材の標準粒度範囲に入るものは少なかった。高吸水率な生火山灰を混練したモルタルは保水性を高めることが示唆された。化学的性質の pH は当初、火山灰中の SO_2 ガスによって 4.60 程度で強酸性を呈したが、1 年1か月の室内保存後には中性に近づき、また 3 年半経過の堆積火山灰層の SO_2 ガス濃度を検知できなかった。生火山灰の使用に当たり、暴露期間が短いので SO_2 ガス残留が皆無とはいえない以上、鉄筋コンクリートよりは保水機能を持たせた無筋コンクリート製品への活用が無難に思われた。製品試験に用いるため、粗粒率 2.15～2.27 の採取地に近い堆積地から粗粒率 2.20 と吸水率 7.60% の新燃岳火山灰 (T) を多量に採取した。一方、後者の桜島火山灰 (S) は、0.6mm ふるいをほとんど通過するほど微細で粗粒率が 0.61、吸水率が 0.93%、表乾密度が 2.67g/cm^3 の性質であった。生火山灰の化学成分は両者とも 56% のシリカ、17% のアルミナを主体としており、天然ポゾラン材といえる。X 線回折の分析の結果、両者にアルカリシリカ反応 (ASR) 物質が確認されたので、ASR 試験 (モルタルバー法) を実施し 26 週目の膨張率が JIS 基準 0.100% より低く“無害”と判定された。以上のことから、両者はコンクリート用細骨材の JIS 規格を満足するものではないが、良質な細骨材との併用により保水機能を有する無筋コンクリート製品への適用が妥当と考えられた。

次に、高吸水性の T に着目し保水性インターロッキングブロック（以下、保水性 ILB という）を開発するため、比較として S も用い、生火山灰の単体および両者の混合による配合設計で各種保水性 ILB を JIS 認定ブロック工場で製造し JIS 試験（他に透水試験も）を実施した。堆積灰の減容促進を考慮した最大火山灰混入率（細骨材量置換割合）の特定と、製品性能として JIS 規格を満足する点で配合を検討した。保水性 ILB の JIS 規格は、ヒートアイランド現象緩和に寄与するとして 2010 年 3 月に制定されたばかりで、 3.0 N/mm^2 以上の曲げ強度（歩道用）、 0.15 g/cm^3 以上の保水量、70%以上の吸上げ高さが要求される。生火山灰の単体配合の試験結果、JIS 規格をすべて満足する火山灰混入率（vol.）の最大は T が 30%、S が 20%であった。ILB 粉末の重金属溶出試験から基準値を越すものはなかった。また、火山灰の T・S 混合配合では、T:S 容積比 3:7, 5:5, 7:3 の混合で火山灰混入率（vol.）を 20, 30, 40%、および、火山灰無混入の 10 配合で保水性 ILB を製造した。曲げ強度の JIS 規格を満足したのは、火山灰混入率 20%では 3:7, 5:5, 7:3 が、同じく 30%と 40%では 5:5 と 7:3 の配合であった。全ての配合が保水量と吸上げ高さの JIS 規格を満足した。混入率 30・40%で S の多い配合は保水量を若干高めた。以上のことから、堆積灰減容や保水量、安全側な混入率を考慮すると火山灰混入率 30%の 5:5 混合が最適な配合であり、生火山灰を活用する保水性 ILB を開発することができた。

また、保水性 ILB でも火山灰混入を保水性 ILB(灰)、火山灰無混入を保水性 ILB(無)というが、この両者に加え、普通 ILB、芝生およびアスファルト舗装(As)の 5 種類の資材で施工した試験歩道において、2013 年 7 月下旬～8 月初旬の暑熱期に、資材の歩道温度上昇抑制機能を比較する温度測定試験をおこなった。各資材区 1 m^2 の中央部で高さ 100, 50, 20, 0(表面)、-3cm(内部)の温度を測定した結果、高さ 20～100cm ではいずれの資材区でも外気温と大差ない温度変化を示し、表面と内部では温度の高い順に $\text{As} > \text{普通 ILB} > \text{保水性 ILB(無)} \approx \text{保水性 ILB(灰)} > \text{芝生}$ となった。保水性 ILB(灰)の温度上昇抑制効果は保水性 ILB(無)よりも認められたが、その差は小さかった。その小さな温度差の原因把握のため ILB 切片で実験した結果、1) 保水性 ILB(灰)の表面温度は保水性 ILB(無)より最大 1°C 下げた、2) ILB 表面を強制的に温めると保水性 ILB(灰)と保水性 ILB(無)の表面が温度上昇し始め、保水性 ILB(灰)の目地も遅れて徐々に温度上昇したことから、目地が温度上昇抑制に影響することが示唆された、3) 保水量の高い保水性 ILB(灰)は、保水性 ILB(無)より保水性能が認められた、4) ILB 表面に平行に切断した三層の単位容積質量は表層ほど若干重い傾向を示し、ILB 製造工程で密実に締固められる中でも表層ほど緻密に形成されていた、5) 保水性 ILB(灰)の表面から水を浸透させると保水性 ILB(無)より浸透が遅

かった。よって、保水性 ILB (灰) は微細な S の混入で保水量を高めるが、より緻密な表層からの水分蒸発が抑制され、ブロック舗装では目地が温度低減に寄与することが示唆された。

保水性 ILB (灰) の歩道温度上昇抑制機能のメカニズムは、微細火山灰 S を混入したことでブロックの表層がより緻密に製造工程で形成されたため、内部の保水の表層への毛細管現象が抑制されブロック表面からの水分蒸発が抑制されることと、そのために内部の保水がブロック側方に回り目地からの水分蒸発や、目地砂からの水分蒸発が生じてしまうことであり、歩道表面温度では目地がブロック表面より低く発現することが示唆された。これは、夕方に撮影した熱画像から目地の温度がブロック表面より $0.4\sim 1.3$ °C 低く推移したことから裏付けられる。舗装面の温度上昇抑制に目地が大きな役割を果たすので、測定面の円直径と高さが同一な簡易放射温度計で目地を含めて舗装面温度を測定する方法を、ヒートアイランド現象緩和効果を評価する方法として新規に提案した。この方法は、今までの ILB 1 個の表面や供試体、 $\phi 100\text{mm}$ コアを用いる室内照射試験よりも現場的に実用性がある。実際に 3 色普通 ILB (宮崎市) と 2 色保水性 ILB (東京都内) の歩道でブロック舗装面温度を測定した結果、歩道の目地の温度がブロック表面より有意に低く発現した ($P<0.05$ および $P<0.01$)。このことは、保水性 ILB 歩道の温度上昇抑制メカニズムを解明するとともに、熱画像で目地の温度が低く表示した結果を再現するものであり、目地を含む舗装面の平均温度で温度上昇抑制 (低減) 効果を評価する方法が自然で実用的で妥当性があることを実証した。この簡易放射温度計は廉価であるが、舗装面温度を容易に迅速に測定できることを確認した。

最後に、最近多発する火山噴火を鑑み、生火山灰を活用する対策として、汎用性のある火山灰等混入型の保水性 ILB 製造技術を構築した。これは、生火山灰や古来の堆積火山灰 (シラス) を細骨材の一部として、あるいは、凝灰岩粉末を混和材料として火山噴火地域で調達できる前提で、火山灰等混入の積ブロックや環境製品を防災現場に備蓄する公共事業などに優先して供するフローも含め、火山灰等活用メニューとして提案した。

8.2 今後の展望

今までの研究成果で本論文に収められた内容はすべてではなく、未整理なものも残念ながらある。筆者が寒冷な北東北地方において大学院生のときにコンクリート製品の凍結融解耐久性に関する研究を JIS 認定の製品工場において実施したことがある。コンクリート材料の研究は、その後も「もったいない」の精神でリサイクル骨材、溶融スラグ、もみ殻炭、ホタテ貝殻等の有効活用の観点で取り組んできた。宮崎の地で 2011 年 1 月に新燃岳噴火に遭遇し、その噴火で発生する空振 (くうしん) も経験したが、都城市で堆積している降

灰を手ですくってみて、空隙の多い生火山灰であるため保水性ブロックやポーラスブロックに活用できると直感した。それは今までのコンクリート材料や ILB など即時脱型製品の研究経験があったからである。火山灰等混入型保水性 ILB の開発研究は 2012～2013 年度科研費により本格的に着手できた。生火山灰を活用した保水性 ILB は、曲げ強度はもちろん保水量と吸上げ高さの向上・改善を図るために、その地に産する、あるいは、近傍から得られる天然資源（ポゾランとしての生火山灰や古来より堆積しているシラス、それ以前に火山灰が堆積して生成された凝灰岩など）を併用することが手っ取り早い。今後、微細すぎる火山灰を混合しない代わりにシラスなどを混入すると、保水性 ILB などの環境製品ブロックの品質改善が一層図れるものと思われる。

本論文は、その研究の終点ではなく通過点であろう。わが国の列島は 4 つのプレートの上にあるために、多発する地震や火山と共生せざるを得ない。その中で産出する生火山灰などを天然資源として有効活用する道を探求することは重要である。

謝 辞

本論文の主体は天然資源とコンクリート製品、ブロック舗装であるため、その分野で多くの研究実績を有することで著名な八戸工業大学大学院の博士学位論文審査に申請することにしました。八戸工業大学大学院教授 阿波 稔博士には、その学位論文審査の主査を快くお引き受け頂き、そして多くの貴重なご指導を賜りながら学位論文を提出することができました。心から厚くお礼申し上げます。また、論文審査の副査をお引き受けいただいた八戸工業大学大学院教授 竹内貴弘博士・月永洋一博士および国立八戸高等専門学校名誉教授 菅原 隆博士には、ご多忙な中で懇切丁寧な査読と貴重なご助言を頂きました。心から感謝申し上げます。

宮崎大学工学部教授 土手 裕博士，同准教授 関戸知雄博士，熊本大学工学部准教授 尾上幸造博士，鹿児島大学農学部助教 平 瑞樹博士，国策ブロック株式会社愛川工場 安部明彦氏，日本国土開発株式会社技術センター 千賀年浩氏とは，共同で研究論文を執筆することができました。また，保水性インターロッキングブロックの製造・JIS 試験の実施では神奈川県愛川町の国策ブロック(株)愛川工場の皆様およびブロック試験歩道における温度測定では日本国土開発(株)技術センターの皆様にはご多用な中で絶大なご協力を頂きました。ならびに，現地調査や各種実験では宮崎大学農学部の研究室卒業生のご助力を得て進めることができました。さらにまた，大学・企業など関係する方々から，専門的に貴重な情報提供や実験機材の借用，統計処理方法などにおいてご協力やご助言を頂きました。ここに記して，深甚の謝意を表します。

また，私の長年の学究生活を陰に陽に支えてくれた母と妻に心から感謝いたします。

最後に，私のコンクリート研究において次の先生から生前多くのご指導・ご助言を賜りました。ここに記して衷心よりお礼申し上げます。

故 八戸工業大学学長 庄谷征美博士（リサイクルコンクリート・廃棄物処理）

故 秋田大学工学資源学部教授 加賀谷 誠博士（火山礫コンクリート）

故 島根大学生物資源科学部教授 野中資博博士（利水構造物コンクリート）

Studies on development of water-retentive interlocking block (WR-ILB) mixed with fresh volcanic ashes, and on function of temperature-rise-restraint of surface of WR-ILB paving road

Yoshiharu HOSOKAWA

(Ph.D. in Agriculture of Tohoku Univ., Emeritus Professor at Univ. of Miyazaki)

Summary

The applicability to concrete fine aggregate of the volcanic ashes, i.e. the ash from Mt. Shinmoedake erupted recently and one from Mt. Sakurajima erupted sometimes, was studied by the physical and chemical tests and the investigation in ash-falling sites. The former ash, sampled from wide ash-falling sites, had physical properties of 4-7% absorption, 2.1-2.3 g/cm³ density in saturated surface-dry condition, and 2.0-3.2 fine modulus occupied with smaller particles in a range of JSCE standard fine aggregate grading. Mortar specimen mixed with high-absorption ash tended to raise their water retention. As the chemical properties, firstly ash's pH was about 4.60, strong acid, due to SO₂ volcanic gas, and secondary the ash, being packed in plastic bag for one year and one month, changed from the acid side to near the neutrality one, and then the density of SO₂ volcanic gas could not detect in the ash layer for 3.5 years. As it could not deny residual possibility of a very small amount of SO₂ gas inside fresh ash, mixing fresh ash into reinforced concrete could be difficult. Shinmoedake ash (T) was newly prepared large quantity for concrete product examinations from the sedimentation place of volcanic ash as indicating 2.15-2.27 fine modulus. On the other hand, Sakurajima ash (S) was very fine with 0.61 fine modulus, 0.93% absorption and 2.67 g/cm³ density in saturated surface-dry condition.

Chemical compositions of T and S were composed by both 56% SiO₂ and 17% Al₂O₃ mainly, being natural pozzolan material. Both ashes were judged to be harmless from the ASR test's results indicating be less than 0.100% of JIS 26-week-mortar-bar

expansion standard, although containing ASR properties in both ashes by a XRD analyzing. Therefore, both ashes were confirmed to be able to utilize into precast unreinforced concrete products as fine aggregate by mixing with high quality fine aggregate, although both ashes were not satisfied JIS standard for fine aggregate of concrete.

Water-retentive interlocking block (WR-ILB) must be satisfied the bending strength (for sidewalk block): more than 3.0 N/mm^2 , the capacity of water-retention: more than 0.15 g/cm^3 and the height absorbed water: more than 70%, as JIS standard for WR-ILB, being just established in March, 2010 to contribute to heat island effect relaxation. The JIS authorization factory plant of concrete block produced WR-ILB without volcanic ash and WR-ILB with each T and S of 10, 20, 30, 50% (vol.), being fine aggregate replacement ratio. All WR-ILB was experimented on the above three tests adding the water permeability test. As the results, the maximum mixing volume rate was 30% for T and 20% for S to be satisfied JIS standard for WR-ILB. Mixing with very fine S a lot into concrete could increase water retention but extremely reduce a water permeability. The heavy metal leaching test for the grain of each piece of WR-ILB, mixed with 50% T and S, were not found numerical values to exceed its standard values.

Then, the concrete block plant produced 10 types of WR-ILB, which was mixed without volcanic ash and with 9 combined ash of 3-volume ratio blended with T of S, i.e. 3:7, 5:5 and 7:3, and 3-mixing-volume rate of 20, 30 and 40% being a fine aggregate replacement ratio. The maximum mixing volume rate of volcanic ashes for WR-ILB was clearly recommended 30% with 5:5 of T: S volume ratio blending both ashes, while thinking about reduction of volcanic ash accumulation volume, keeping JIS standard for WR-ILB, and keeping more water retention. So, WR-ILB with most suitable concrete mix proportion to utilize fresh volcanic ash was developed.

The field test was done to measure temperature comparing the function of temperature- rise-restraint of surface in a test sidewalk composed with 5 materials, i.e. two types of WR-ILB (Ash-WR-ILB and No-Ash-WR-ILB mixed with and without volcanic ashes), normal ILB, loan and asphalt road, in the summer heat period from last of July to first of August in 2013. The changes of temperature in 20, 50, and 100cm heights above each test sidewalk surfaces was almost same as changes of the outside

temperature. The higher temperature on surface and in 3cm-depth indicated as the order of asphalt road, normal ILB, No-Ash-WR-ILB, Ash-WR-ILB and loan. An effect of temperature- rise-restraint of Ash-WR-ILB was, however, recognized with a small different of temperature than No-Ash-WR-ILB.

Using ILB graft to make clear the reason of its small different of temperature between both WR-ILB, several tests were done, and their results were shown below; 1) Ash-WR-ILB could reduce 1.0 degree Celsius centigrade ($^{\circ}\text{C}$) than No-Ash-WR-ILB. 2) When warming the surfaces of WR-ILB forcibly, the surface temperature of both WR-ILB increased gradually and then after warming the neighbor ILB graft, the joint of Ash-WR-ILB was warmed to increase its temperature. The joint could be influenced to temperature-rise-restraint effectively. 3) Ash-WR-ILB had a higher water retention because its quantity of evaporation was smaller than No-Ash-WR-ILB. 4) Unit weight of upper layer of ILB tended slightly heavy, and it indicated the upper layer of ILB is surely formed minute organization by producing ILB. 5) When infiltrating water into the surface of ILB, Ash-WR-ILB was infiltrated slowly than No-Ash-WR-ILB. Therefore, it is suggested that Ash-WR-ILB increase water retention by very fine S but a restrain evaporation and/or vaporization from upper layer forming by minute organization, and the joint contributed to a temperature reduction effect in ILB paving road.

Based upon the foregoing, on the function of temperature-rise-restraint of Ash-WR-ILB sidewalk, an original mechanism was elucidated as capillary phenomenon and water evaporation, from inside to upper layer and then from upper layer to surface, were restrained by forming minute organization in upper layer of Ash-WR-ILB, and as then inside water of ILB move to flank and neighborhood and then evaporate from the joint, being a free face for ILB. Thus was supported the joint contribution for a temperature reduction effect because the joint's temperature was remarkably low by $0.4\text{-}1.3^{\circ}\text{C}$ than the ILB surface one in thermograph figures of sidewalk ILB.

Accordingly the joint contribute to a temperature reduction effect, and it must evaluate a heat island effect relaxation by measuring the surface temperature including joints in ILB paving road. At present, a temperature reduction effect in ILB paving road is evaluated by an indoor irradiation examination measuring method (the indoor method) in center point of surface of one ILB, a plate block with $30\times 30\times 5\text{cm}$ size, and

φ100mm-block core. Instead of that method, the author suggested newly the method of measuring temperature by using a low price radiation thermometer, as a temperature measuring tool with light weight, small size and simple working. Using a radiation thermometer is the merit that anyone can easily and quickly measure temperature of circle of a diameter same as a height from paving surface in ILB paving road, and it is easy to be understood as a method to compare the paving surface temperature on the site. After measuring temperatures of about 60-cm-diameter-circle surfaces (the mean temperature), ILB surfaces and joints in one sidewalk with 3-color-normal ILB in Miyazaki and in two sidewalks with 2-color-WR-ILB in Tokyo, temperatures of joints were significantly low than ILB surface temperatures ($P<0.05$ and $P<0.01$), and the mean temperature indicated effectively sidewalk surface temperature rather than ILB surface one. These results showed clearly to elucidate the mechanism of temperature-rise-restraint of WR-ILB sidewalk and also to reproduce indicating low temperatures of the joints in the thermograph figures of surface on sidewalk paved ILB. Furthermore, measuring the mean temperature including the joint temperature on ILB sidewalk was reasonable naturally and practically to evaluate a temperature reduction effect rather than the indoor method.

Finally, in view of a volcanic eruption to occur frequently these days, as countermeasure to utilize fresh volcanic ashes, WR-ILB production technologies were built as a volcanic ashes mixture type with the versatility. On the premise that can recruit fresh volcanic ashes, sediment old volcanic ashes (for example, Shirasu) as a fine aggregate, powder from tuff repository as a pozzolan, near a volcanic eruption area, the menu utilizing fresh volcanic ash was suggested for public works projects to store concrete blocks and environmental product mixed with volcanic ashes in the disaster prevention spot, including the flow to take first priority.

