

火山灰を使用した長寿命コンクリートの開発

高橋 徹, 富田 恵一, 若杉 郷臣
谷口 円*, 垣原 康之**, 佐川 孝広***
島多 昭典****, 吉田 行****
秋山 護*****, 石塚 浩章*****, 齊藤 宗三*****

Long Life Span Concrete Using Volcanic Ashes

Touru TAKAHASHI, Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI
Madoka TANIGUCHI*, Yasuyuki KAKIHARA**, Takahiro SAGAWA***
Akinori SHIMATA****, Susumu YOSHIDA****
Mamoru AKIYAMA*****, Hiroaki ISHIZUKA*****, Munemitsu SAITO*****

抄 録

火山ガラスを大量に含み、均質かつ大量に賦存する北海道の火山灰について元素分析、鉱物組成分析、ポゾラン反応性の検討を実施した。その結果、北海道内火山灰がポゾラン反応性を持つことを明らかにし、反応性の評価方法等を提案した。

キーワード：火山灰，ポゾラン反応，コンクリート，火山ガラス，Rietveld法

1. はじめに

コンクリートの長寿命化を図るために、セメント量を増やし、高強度化する手法が一般的であるが、単価が増加する一方でメンテナンスフリーを実現するわけではない。そのような中、火山灰をセメントの一部に使用した小樽北防波堤コンクリートは、建設後100年を経て十分な機能を果たし、長寿命コンクリート構造物の代表例となっている。その一因として、近年の調査ではポゾラン（フライアッシュ、火山灰等）の未反応成分が未だ残存し、水和反応が継続していることが

明らかとなっている¹⁾。また、火山灰の長期的な反応の活用によっては、自己修復効果も期待でき、コンクリートへの火山灰の利用は、コンクリートの長寿命化に寄与するものと考えられる。しかし、戦後火山灰をコンクリートに利用した例はごくわずかである。武若ら²⁾は、シラスを細骨材としたシラスコンクリートを提案、実用化を図り、粒径0.15mm以下の微粒分もそのまま混合することで、ポゾラン反応による長期強度の増進や耐硫酸塩性に優れることを示している。ただし、品質管理を容易にする観点から、鹿児島では始良カルデラの入戸火砕流に使用火山灰を限定した検討となっている。

* 道総研 北方建築総合研究所,

* Local Incorporated Administrative Hokkaido Research Organization Northern Regional Building Research Institute

** 道総研 地質研究所,

** Local Incorporated Administrative Hokkaido Research Organization Geological Survey of Hokkaido

*** 日鉄住金セメント株式会社,

*** NIPPON STEEL & SUMIKIN CEMENT CO.,LTD.

**** 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所,

**** Incorporated Administrative Civil Engineering Research Institute for Cold Region

***** 全国コンクリート製品協会,

***** Japan Concrete Products Association

事業名：重点研究

課題名：火山灰を使用した長寿命コンクリートの開発

北海道では、火山灰の埋蔵量が膨大であるにもかかわらず、近年はコンクリートへの利用はほとんどない。また、火山灰のガラス部分の化学・鉱物組成を評価する標準的な手法が確立されておらず、火山ガラスの特性とボゾラン反応性の関係は明らかではない³⁾。北海道の火山灰を新たなボゾラン源として活用するため、ボゾランの評価手法の確立が望まれる。そこで本研究では、北海道内に分布する未利用資源である火山灰の品質、賦存量に関する調査を行い、コンクリート用混和材としての利用可能性に関する検討を行った。

2. 実験方法

2.1 火山灰試料

図1に北海道の火山灰の分布を示す。北海道内には鮮新世～第四紀にかけて噴出した複数の大規模火砕流堆積物が広く分布する（灰色の領域）。これらの中から規模が大きく、火山ガラスの含有量が高いものを対象に30試料を採取した。

火山灰30試料は、105℃で恒量まで乾燥後、5mmふるいを通したものを使用した。20±3℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室で恒量となるまで保管し、ボールミルにて粉砕した後、75μmふるいを通したものを使用した。

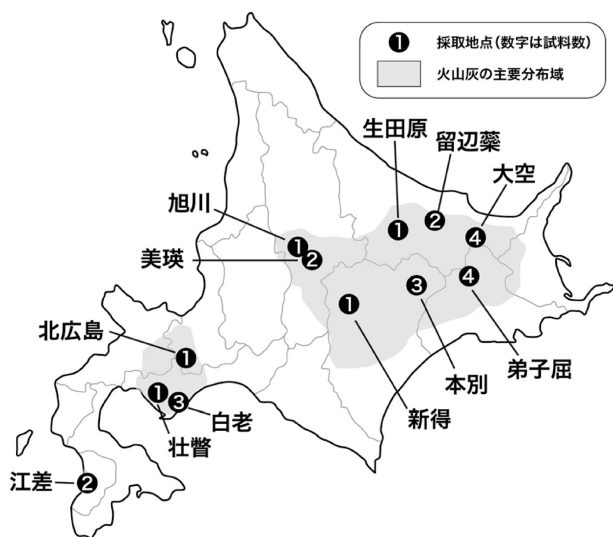


図1 北海道の火山灰の分布

2.2 火山灰の基礎物性の測定

2.2.1 化学組成

火山灰の強熱減量は、105℃乾燥試料を1000℃で強熱した際の質量変化から算出した。また、火山灰の密度については、micro meritics社製密度測定装置AccuPyc 1330を用いて、ヘリウム置換法により測定を行った。火山灰の化学組成は、蛍光X線分析装置（リガク社製RIX3000）を用いて、ファンダメンタルパラメーター法FP法により測定した。

2.2.2 鉱物組成および比重分離

火山灰の鉱物相の把握と非晶質量を推定するためにX線回折装置（リガク社製ULTIM IV）により測定した。X線回折装置（以下XRD）の測定は、内部標準物質として平均粒径3μmのコランダム（Corundum）を内割20%添加して行った。XRDの測定条件は、ターゲットCuKα、管電圧40kV、管電流30mA、走査範囲5～63deg. 2θ、ステップ幅0.02deg.とした。

Rietveld解析は、SIROQUANT Ver.3を用い、定量対象鉱物の粒径を直径10μmとして吸収効果を補正した。解析の対象とした鉱物は、事前の定性結果に基づき、解析ソフトのデータベースから適宜選択した。解析対象鉱物は石英(Quartz)、曹長石(Albite)、中性長石(Andesine)、曹灰長石(Labradorite)、灰長石(Anorthite)、輝石(Augite)、黒雲母(Biotite)、角閃石(Hornblende)、鋼玉(Corundum(内部標準))とし、クリストバル石(Cristobalite)やカオリン(Kaolin)およびモンモリロナイト(Montmorillonite)などはピークが認められた場合に対象鉱物とした。それぞれの鉱物の結晶構造データがデータベースに複数登録されている場合は、すべて含めたサーチマッチを実施し、対象鉱物を選択した。対象相の選択後、精密化を行い、鉱物相の定量値を得た。非晶質量は内部標準の混合率と定量値から、以下の式(1)により算定した。

$$A = 100 \times (C - C_0) / (C(100 - C_0) / 100) \quad (1)$$

ここで、A：非晶質量（%）、C₀：内部標準の混合率（%）、C：Rietveld解析によるCorundumの定量値（%）

既存の非晶質量の定量手法として、武若らは、シラスの検討において、重液分離を行い、密度2.4g/cm³以下となるものをガラスとみなしている⁴⁾。本研究においても、重液分離により密度2.4g/cm³以下の浮遊粒子と2.4g/cm³以上の沈降粒子を分離し、その重量比から非晶質割合を算出することとした。

市販のポリタングステン酸ナトリウム（SOMETU社製）を水に溶かして、密度が2.39～2.41g/cm³になるように調製し、JIS Z8804の「比重瓶による密度及び比重の測定方法」に準拠し、重液の密度を確認した。試験管（10mmφ 容量25mL）に火山灰1gを秤量し、重液10mLを加え、超音波振

動及びローター回転により攪拌した。24時間静置後、重液の下部に沈降している沈降粒子を残し、浮いている浮遊粒子をスポイトで回収した。回収した浮遊粒子と沈降粒子を固液分離後、水洗いし、乾燥した。得られた各粒子を秤量し、密度2.4g/cm³以下の粒子が占める割合を求め、非晶質割合とした。分離後の試料については、非晶質粒子と鉱物粒子の顕微鏡観察を行った。

2.3 ポゾラン反応性の評価方法

2.3.1 ポゾラン反応

ポゾラン反応とは、ポゾランに含まれる二酸化ケイ素等がセメントの水和反応によって生じた水酸化カルシウムと反応し、緻密で耐久性に優れたケイ酸カルシウムの水和物を生成させる反応である。緻密なケイ酸カルシウム水和物はコンクリート中の細孔に生成し、コンクリート構造物を脆くする硫酸塩、塩化物、炭酸塩の透過を抑え、長寿命化が期待できると考えられる。

2.3.1 EN規格

火山灰の反応性をEN196-5-2005 (Methods of tenting cement-Part5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement) に準じ、評価した。普通ポルトランドセメント15g、火山灰5gを水100gと混合し、40℃恒温状態で15.60日経過した後ろ過し、ろ液中の水酸化イオンとカルシウムイオンを塩酸滴定、ICP発光分光分析法(株島津製作所製ICPS8100)により測定した。

2.3.2 酸-アルカリ溶解法

大沢ら⁵⁾の既報において、フライアッシュ混合セメントペースト中の未反応フライアッシュを定量する手法として示された2 mol/L塩酸-5%炭酸ナトリウム溶解法を適用し、不溶残分を測定した。また、2.3.1項のろ過残分は、40℃で15、60日と養生した火山灰混合セメントペーストであるため、このろ過残分を乾燥、粉碎し、酸-アルカリ溶解法の試料とした。なお、火山灰単体について同様の試験を実施し、未反応の火山灰の大部分が酸に溶解しないことを確認した。不溶残分試験は1gの試料で実施し、火山灰単体とセメントペーストでの反応後の不溶残分から以下の式(2)により反応率を算定した。なお、今回使用したポルトランドセメントおよび水和物の不溶残分は1%未満であることを確認し、セメント由来の残分の補正は実施していない。

$$\alpha(t) = 100 \times (P_0 - Rt/B) / P_0 \quad (2)$$

ここに、 $\alpha(t)$ ：材齢tでの火山灰の反応率(%)、 P_0 ：火山灰単体の不溶残分(g)、 Rt ：セメントペーストの反応後試料の不溶残分(g)、 B ：火山灰の置換率(ここでは0.25)。

2.3.3 火山灰の微粒分の反応性評価

火山灰の微粒分(ふるい目0.075mmを通過するもの)に着目し、火山灰から4種類を選別し、ペースト、モルタルに混合し、セメント硬化体中での反応を検討した。測定材齢は、7、35、91、182日とし、酸-アルカリ溶解法による反応率を測定した。

3. 実験結果

3.1 火山灰の化学組成

表1に強熱減量および化学組成を示す。主成分は、二酸化ケイ素(SiO₂)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)、副成分として酸化鉄(Fe₂O₃)、酸化ナトリウム(Na₂O)、酸化カリウム(K₂O)、酸化カルシウム(CaO)、酸化マグネシウム(MgO)、微量成分として酸化マンガン(MnO)、酸化チタン(TiO₂)、酸化硫黄(SO₃)となっている。ポゾラン反応に必要な二酸化ケイ素および酸化アルミニウム含有量が多いことが分かった。ASTM C618でclass Nポゾラン規格は、SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃が70%以上、SO₃が4.0%以下、強熱減量は10%以下とされている⁶⁾。表1に示した30種類の火山灰はASTM C618のclass Nに適合する組成であった。

表1 火山灰の化学組成(%)

試料No.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	強熱減量
448	3.2	0.6	15.8	70.2	2.9	1.9	0.3	0.1	0.1	3.3	3.6
461	2.5	0.6	22.1	64.0	2.1	2.2	0.4	0.1	0.2	3.9	5.2
467	3.4	0.8	14.1	70.7	2.9	2.7	0.3	0.1	0.1	3.7	3.1
468	3.5	0.8	16.3	69.4	3.0	1.2	0.3	0.1	0.1	3.8	4.6
471	3.2	0.6	18.3	67.5	2.6	2.0	0.3	0.1	0.2	3.5	4.6
474	3.0	2.9	19.0	67.1	0.6	9.8	0.8	0.3	0.1	9.6	2.8
482	2.6	0.6	14.4	72.0	5.7	1.3	0.2	0.2	0.0	1.5	5.5
486	3.0	1.8	16.6	63.3	3.4	5.0	0.5	0.1	0.1	4.6	3.0
496	2.4	0.4	17.1	70.0	4.8	1.3	0.2	0.1	0.1	1.9	5.3
516	2.8	0.5	14.8	70.9	4.7	2.1	0.3	0.1	0.0	2.4	3.9
519	3.0	0.1	13.6	72.0	5.7	1.4	0.2	0.1	0.0	2.5	3.7
526	3.0	0.3	14.0	73.8	5.5	1.4	0.2	0.1	0.0	1.4	2.3
527	3.1	0.4	14.2	71.6	4.5	1.9	0.2	0.1	0.0	2.4	4.6
528	2.2	1.1	14.7	71.7	5.1	1.2	0.1	0.1	0.1	1.9	6.1
530	2.5	0.4	14.2	72.6	5.4	1.1	0.1	0.1	0.0	2.0	5.4
531	3.7	0.6	16.0	66.7	2.2	5.0	0.6	0.1	0.0	3.8	2.8
534	3.7	0.6	15.2	68.3	2.3	4.1	0.6	0.1	0.0	3.8	2.9
538	3.6	0.5	13.8	71.7	2.5	3.1	0.5	0.1	0.0	3.1	4.1
540	3.8	0.4	14.5	70.8	2.1	2.5	0.6	0.2	0.1	3.6	4.0
544	2.5	0.1	14.1	72.7	6.2	1.2	0.2	0.1	0.0	2.6	6.0
555	3.3	1.0	17.7	62.0	0.7	7.0	0.7	0.2	0.0	5.9	1.4
557	3.5	1.2	16.5	63.1	1.9	5.6	0.8	0.1	0.0	5.6	2.1
558	3.1	0.6	19.2	64.1	1.9	3.7	0.8	0.2	0.1	4.8	4.9
566	3.3	0.9	15.1	67.6	1.4	4.9	0.6	0.2	0.0	4.6	3.1
572	3.0	0.6	14.5	71.4	3.8	2.1	0.2	0.1	0.0	2.6	2.9
574	3.2	0.3	13.9	73.2	5.1	1.9	0.2	0.1	0.0	1.8	2.2
580	3.7	0.5	14.8	69.3	4.2	1.9	0.3	0.1	0.0	3.7	3.8
581	2.8	0.5	14.2	72.2	3.7	2.8	0.1	0.0	0.0	2.3	4.1
598	2.4	0.3	14.5	73.3	5.0	1.8	0.2	0.1	0.0	2.0	5.6
osaru	2.8	0.9	14.0	69.9	2.2	4.3	0.4	0.1	0.0	4.0	2.1

3.2 火山灰の鉱物組成および重液分離

図2に火山灰のXRDパターン、表2にRietveld解析により求めた非晶質量と鉱物相および非晶質相の組成を示す。定性分析結果から試料467のような石英、長石等の鉱物が多く、非晶質ピークの低い火山灰、544のような鉱物がほとんどなく、非晶質ピークの高い火山灰、さらにその中間の鉱物組成を有する火山灰に分けられる。定性判断では、ピークが認められれば粘土鉱物有としたが、Rietveld解析では定量値が得

られない場合があった。微量鉱物、粘土鉱物の取り扱いは今後の課題と考える。Rietveld解析により求めた非晶質量の妥当性は、火山灰の非晶質量の真値を知る手法が得られていないため、検証が難しい。ここでは、重液分離により求めた非晶質量割合との比較を試みた。

表3に各鉱物の密度、表4に各火山灰の密度と密度2.4g/cm³以下の割合を示す。さらに、重液分離後の顕微鏡写真を図3に示す。表3からガラス以外の石英、長石、雲母、角閃石は、いずれも密度2.4g/cm³以上であり、分離可能と予測される。図3に示すように、火山ガラス粒子は光学的等方体であるため直交ニコルでは暗黒となる。浮遊粒子には、長石（白色）がわずかに混入しているが、そのほとんどがガラス粒子からなる。沈降粒子は、浮遊粒子よりも相対的に粒径が大きく、またガラス粒子のほか、長石（白色）と輝石（白色）が認められた。このことから、沈降粒子には、大きな粒子と重い粒子が濃縮されているが、火山ガラスも含まれており、ガラス含有量の推定には、多少の誤差が生じる可能性があることがわかった。

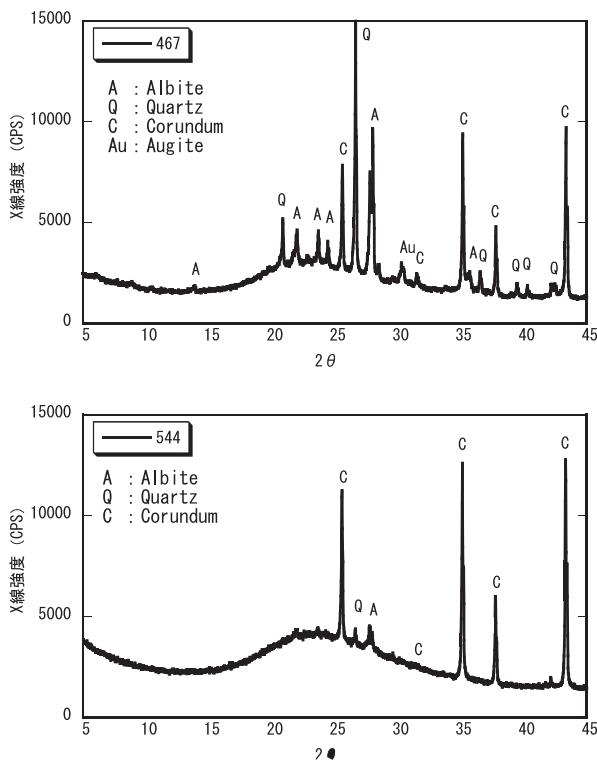


図2 火山灰のXRDパターン
 上 試料467 非晶質量 70.1%
 下 試料544 非晶質量 91.5%

表2 Rietveld解析による非晶質量と鉱物割合

	非晶質量		鉱物割合(%)					
	(%)	石英	曹長石	中性長石	曹灰長石	輝石	黒雲母	その他
448	88.4	3.3	2.3			0.3	0.2	灰長石 1.9
467	70.1	7.8	4.5	6.3	7.6			磁鉄鉱 0.7
468	74.6	6.7	14.1					
471	84.5	3.8	1.3		5.9			
482	84.3	2.9		4.4	2.6		0.3	
496	68.1	5.1	5.4		14.4		0.5	カオリン 1.2
519	90.1	0.7			5.5			
526	75.6	7.8			14.3			
528	90.1	1.5		1.1	1.2			
530	88.6	2.1		1.8	2.2			
531	63.3	0.6			33.4			
534	58.4	0.8	16.5		21.4			
538	73.9	0.7			21.3			
540	87.1	0.6	2.1		6.3			
544	91.5	0.3	0.1		2.1			
555	51.1	6			41.5			
557	51.3	3.8			42.8			
558	72.8	0.7	4.8		16.7			
566	50.7	6.2			40			
572	68.6	8			20.5			
574	75.1	5.6		3	13.7		0.5	
580	71.7	2.7		2.4	19.5			
581	60.5	10.3			25.1			
598	93.6	0.2	0.6					
osaru	46.6	13.3			34.9			角閃石 3.2

表3 各鉱物の密度 (g/cm³)

- 鉱物組成
- ・ガラス(2.4)
 - ・ケイ酸塩鉱物
 - 石英:2.7、クリストバライト:2.3、トリジマイト:2.3
 - 曹長石:2.62、灰長石:2.76
 - 正長石:2.6、角閃石:3.3、黒雲母:3.3
 - ・粘土鉱物
 - イライト、カオリナイト、スメクタイト:2.6-2.8

表4 各火山灰の密度と密度2.4g/cm³以下の割合

試料	2.4g/cm ³ 以下割合(%)	密度 (g/cm ³)	試料	2.4g/cm ³ 以下割合(%)	密度 (g/cm ³)
448	87.46	2.45	531	65.34	2.54
461	93.17	2.59	534	89.68	2.57
467	88.31	2.51	538	94.44	2.48
468	96.71	2.51	540	95.37	2.51
471	89.05	2.48	544	83.44	2.37
474	13.23	2.63	555	53.58	2.63
482	84.59	2.42	557	68.01	2.63
486	74.83	2.59	558	74.35	2.57
496	95.17	2.47	566	64.14	2.58
516	62.78	2.50	572	92.41	2.47
519	92.31	2.40	574	88.72	2.51
526	93.55	2.49	580	85.80	2.48
527	73.85	2.48	581	89.80	2.47
528	92.81	2.42	598	96.61	2.43
530	92.64	2.43	osaru	51.75	2.55

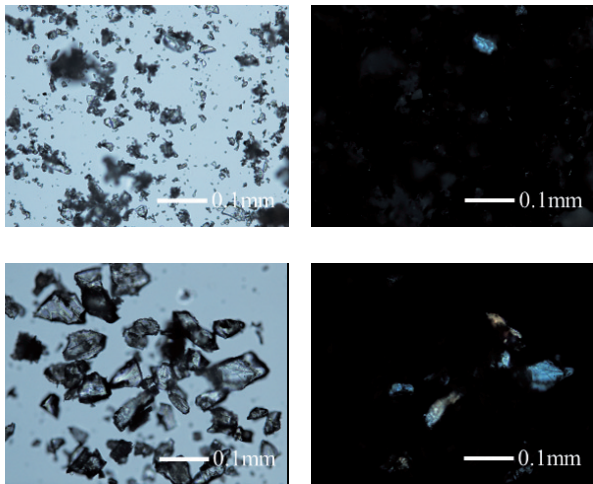


図3 重液分離後の顕微鏡観察

浮遊粒子(上)：平行ニコル観察(左)、直交ニコル観察(右)。
沈降粒子(上)：平行ニコル観察(左)、直交ニコル観察(右)。

図4にRietveld解析による非晶質量と重液分離により求めた密度 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ 以下の粒子の割合の関係を示す。ばらつきが認められるが、相関係数0.7程度であり、正の相関が認められた。以上から、Rietveld解析による非晶質量は重液分離による非晶質量と対応しており、非晶質量は概ね妥当なものであると判断した。

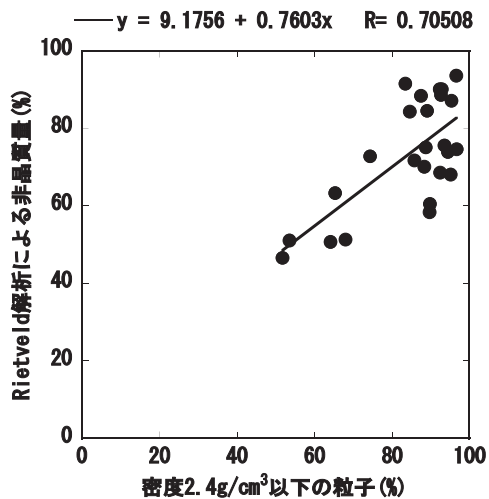


図4 Rietveld解析による非晶質量と重液分離により求めた $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ 以下の粒子の割合の関係

3.3 ポゾラン反応性の評価

3.3.1 EN規格による評価

図5にEN196-5-2005 Methods of testing cement-Part5: Pozzolanicity test for pozzolanic cementによる反応性の評価を示す。これは材齢15日の結果である。セメント+火山灰+水試料を 40°C で反応を促進させた後、ろ過し、ろ液に存在する水酸化物イオンとカルシウムイオンを実測する。その

結果が、カルシウムイオン飽和曲線の上であればポゾラン反応性なし、下部であれば反応性ありと判断される。図中の実線が飽和曲線であり、本検討での試料は、すべて反応性ありと判断された。

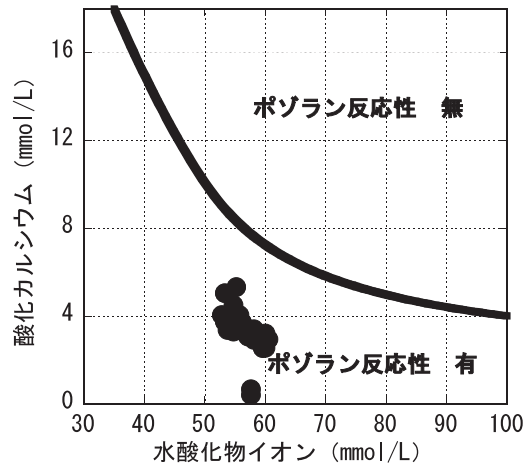


図5 EN規格によるポゾラン反応性試験

3.3.2 酸-アルカリ溶解法による評価

酸-アルカリ溶解法により求めた反応率を表5に示す。表から反応日数の増加により反応が促進し、火山灰単体では、ほとんど反応せず、セメントはほぼ100%の反応率を示した。

表5 酸-アルカリ溶解法による各火山灰の反応率

	反応率(%) 15日	反応率(%) 60日	反応率(%) 火山灰
448	35.0	50.0	4.7
461	32.8	58.5	6.7
467	39.5	52.0	7.7
468	39.6	47.5	5.7
471	34.7	46.1	10.5
474	41.8	52.3	8.0
482	34.3	52.1	5.4
486	27.2	49.2	7.7
496	32.4	58.2	4.9
516	32.4	60.4	3.1
519	28.5	56.4	3.4
526	32.1	65.9	1.9
527	42.0	61.6	5.8
528	38.4	60.0	7.0
530	29.5	59.1	5.0
531	43.4	63.5	5.1
534	39.5	64.1	3.7
538	46.8	66.3	3.8
540	34.8	57.7	3.3
544	48.4	60.3	3.1
555	47.2	62.1	5.8
557	54.9	61.6	5.6
558	53.5	63.7	5.8
566	49.1	64.7	5.0
572		49.0	3.6
574	43.9	64.1	2.9
580	44.2	53.6	2.8
581	56.6	62.7	2.8
598	74.0	66.0	3.1
osaru	41.7	55.2	6.2
セメント	97.4	98.7	

図6に酸-アルカリ溶解前後の火山灰とその残渣のXRDパターンを示す。酸-アルカリ溶解法により非晶質のハローピーク（面積，高さ）が減少しており，可溶性物質は，非晶質相（ガラス相）が多いことが確認された。

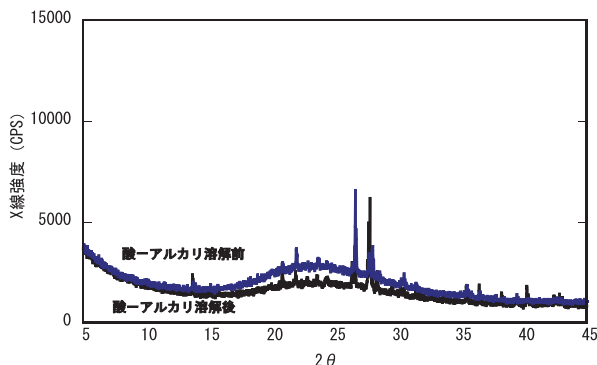


図6 火山灰と酸-アルカリ溶解法残渣のXRDパターン

表6に酸-アルカリ溶解法による可溶性物質の化学組成を示す。酸-アルカリ溶解前後の火山灰とその残渣の化学組成から可溶性物質の組成を算出した。表6から火山灰の組成と可溶性物質の組成は良く一致しており，反応に寄与する火山ガラスは，火山灰がガラス化したものと推測される。

表6 酸-アルカリ溶解法による可溶性物質の化学組成 (%)

試料名	448		482		516		555	
	火山灰	可溶性物質	火山灰	可溶性物質	火山灰	可溶性物質	火山灰	可溶性物質
Na ₂ O	3.2	3.8	2.6	3.9	2.8	4.9	3.3	4.7
MgO	0.6	0.6	0.6	0.7	0.5	0.8	1.0	1.2
Al ₂ O ₃	15.8	14.2	14.4	14.3	14.8	15.9	17.7	20.0
SiO ₂	70.2	73.0	72.0	70.0	70.9	69.1	62.0	60.0
K ₂ O	2.9	3.1	5.7	4.5	4.7	3.5	0.7	0.5
CaO	1.9	2.2	1.3	4.7	2.1	3.3	7.0	8.1
TiO ₂	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.7	0.5
Fe ₂ O ₃	3.3	2.0	1.5	1.0	2.4	1.7	5.9	4.4

3.3.3 火山灰の微粒分の反応性

図7に火山灰別，養生温度ごとに材齢と火山灰の反応率の関係を示す。図からすべての火山灰，養生温度で材齢の進行に伴い，反応率の増加が認められた。40℃では，91日以降で反応率の増加が緩慢となった。また，火山灰種類により反応速度が異なる傾向が認められた。

以上から酸-アルカリ溶解法は，火山灰の反応性指標として有効であることがわかった。

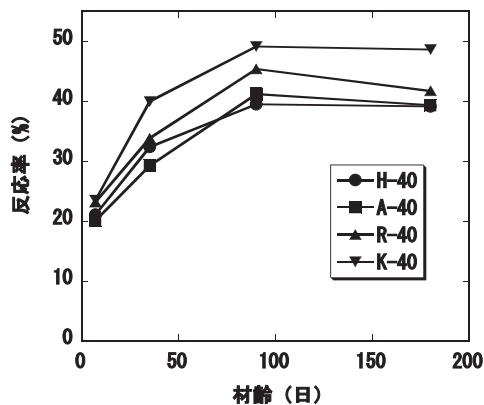
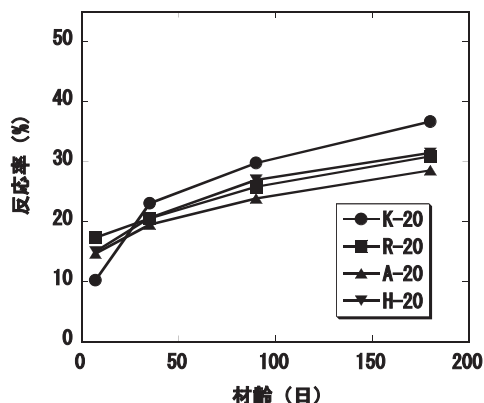


図7 材齢と火山灰の反応率

4. おわりに

北海道内に分布する未利用資源である火山灰の品質，賦存量に関する調査を行い，コンクリート用混和材としての利用可能性に関する検討を行った結果，次のことがわかった。

- 1) 火山灰中にはSiO₂・Al₂O₃含有量が多く，火山ガラスを含有しており，ポズランとして活用できる。
- 2) Rietveld解析による非晶質量は重液分離による非晶質量と対応しており，非晶質量は概ね妥当なものであると判断した。これにより，火山ガラス含有量の推測が可能となった。
- 3) EN規格では，すべての火山灰試料で「ポズラン反応性有り」と評価され，ポズラン源として利用できることがわかった。
- 4) 火山灰の反応率は，酸-アルカリ溶解法により測定でき，材齢の進行とともに増加した。酸-アルカリ溶解法は，火山灰の反応性指標として有効であることがわかった。
- 5) 北海道内の火山灰は，コンクリートへの利用が可能となり，耐久性向上に寄与できると考えられる。

謝辞

本研究で使用したICP発光分光分析装置，X線回折装置は，公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 長滝重義監修：コンクリートの長期耐久性 [小樽港百年耐久性試験に学ぶ]，技報堂出版，(1995)
- 2) 武若耕司：シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状，コンクリート工学，Vol.42, No.3, pp.38-47, (2004)
- 3) ACI 232.1R-00 (Reapproved 2006), Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete, Reported by ACI Committee 232
- 4) 武若耕司：しらすを利用したコンクリート用混和材の開発に関する研究，J.Soc.Mat. Sci. , Japan, Vol.48, No.11, pp.1300-1307, Nov.1999
- 5) 大沢栄也，坂井悦郎，大門正機：フライアッシュセメント系水和におけるフライアッシュの反応率，セメント・コンクリート論文集，No.53, pp.96-100, (1999)
- 6) ASTM C618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete