

改良化学法の指標とモルタルの膨張挙動との相関
THE CORRELATION BETWEEN THE INDEX OF MODIFIED CHEMICAL METHOD
AND EXPANDING BEHAVIOR OF MORTAR SPECIES

佐々木孝彦*・石田良二**
By Takahiko SASAKI, Ryoji ISHIDA

1. はじめに

現在、骨材のアルカリ反応性を評価する手法として、化学法とモルタルバー法が汎用されているが、有害と判定された骨材でも、コンクリートに対して損傷を与えないことが多く、判定結果と実際にセメントと組み合わせた結果とは異なる場合が少なくない。このような骨材の評価法の不都合を解消するためには、一義的に有害であるという理由で排除するのではなく、どのようにしたら使用できるかという考え方に立つ評価法が望ましい。

アルカリ骨材反応には、アルカリ量と骨材の反応性が大きく関わっているが、骨材はその性質は変えられないものであるのに対して、コンクリート中のアルカリ量は比較的容易に制御しうる。一般に、アルカリが多いと膨張量も大きくなることは良く知られた事実で、このことはコンクリートに損傷を与えるような有害な膨張に転ずるアルカリ量(限界アルカリ量)¹⁾というものが存在することを示唆する。

限界アルカリ量を求めるためには、添加アルカリ量を変えたモルタルあるいはコンクリート供試体の膨張特性を調べれば推定しうるが、特に堆積岩系骨材のように反応が遅い骨材などはかなり長い試験期間を要し、実用的な評価法とは言えない。

立松ら²⁾は、現行化学法の問題点を明らかにするとともに、Rcの経時変化から得られる新しい指標『Rc⁰』とScの経時変化を考慮した指標『Sc²⁴およびSc⁴⁸』を導入して、限界アルカリ量を推定する『改良化学法』を提案している。

本報では、添加アルカリ量を変えたモルタル供試体を作製して限界アルカリ量を求め、改良化学法における指標との関連について検討した結果を報告する。

* (財)鉄道総合技術研究所 立松研究室(無機材料) 研究員(〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)
** 前田建設工業(株)技術研究所 地盤研究室 主任研究員(〒179 東京都練馬区旭町1-39-16)

表1 鉱物組成

骨材	岩種	岩石名	産地	組成								
				Qz	CR	TR	F	Px	Mi	Gl	Opq	その他
AA	火山岩 (安山岩)	両輝石安山岩	佐賀	-	++	-	++	++	-	+	+	Mo
AO		両輝石安山岩	大分	+	++	+	+++	++	tr	+	+	Mo
AI		両輝石安山岩	静岡	++	tr	+	+++	++	tr	-	+	Ch
AF		普通輝石安山岩	静岡	-	-	++	+++	+	-	-	+	-
AN		紫蘇輝石安山岩	長野	-	+	++	+++	tr	-	tr	+	Ch
SH	堆積岩	砂岩	東京	+++	-	-	++	tr	+	-	+	Ch Ca
SI	砂岩	砂岩	茨城	+++	-	-	+	-	++	-	tr	-
SY	砂岩	砂岩	岐阜	+++	-	-	-	-	tr	-	-	Ch

(相対的な含有量の目安)
+++:多い +:少ない
++:中位 tr:僅か

(凡例)
Qz--Quartz Opq--Opaque mineral
CR--Cristobalite Mo--Montmorillonite
TR--Tridymite Mi--Mica
F--Feldspar Ch--Chlorite
Px--Pyroxene Ca--Calcite
Gl--Glass

表2 化学法の結果と改良化学法の指標

骨材	化学法の結果			改良化学法における指標		
	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	判定	Rc ⁰ (mmol/l)	Sc ²⁴ (mmol/l)	Sc ⁴⁸ (mmol/l)
AA	690	210	有害 (潜在)	75 ± 5	690	890
AO	370	64	有害	30 ± 5	370	550
AI	45	58	無害	40 ± 5	45	85
AF	764	122	有害 (潜在)	70 ± 5	764	872
AN	880	85	有害	25 ± 5	880	930
SH	50	87	無害	65 ± 5	50	95
SI	30	42	無害	30 ± 5	30	55
SY	345	93	有害	35 ± 5	345	611

2. 実験

2.1 使用骨材

本実験に用いた骨材は火山岩5種、堆積岩3種の合計8種類である。以後、これらの骨材は、火山岩系についてはすべて安山岩であることからA-、堆積岩系についてはS-の略号で表すこととした。各骨材の岩種や鉱物組成を表1、化学法におけるScとRc、改良化学法におけるRc⁰とSc²⁴およびSc⁴⁸を表2に、示す。

鉱物組成は、偏光顕微鏡観察やX線回折、ScやRcに係わる指標は、化学法あるいは改良化学法に基づいて求めた。

2.2 モルタル供試体の作製と膨張量測定

モルタル供試体の作製や促進養生条件と膨張量の測定方法は、基本的にはJIS A 5308『骨材のアルカリシリカ反応性試験法（モルタルバー法）』に準拠して行ったが、有害な膨張を引き起こすアルカリ量（限界アルカリ量）を求めるために添加アルカリの種類と量は以下のように設定した。すなわち、モルタル供試体の配合は、モルタルバー法と同様としたが、添加アルカリ量は等価Na₂O量（以下、アルカリ量は○%R₂Oと表記する）で0.6%R₂Oから0.2%R₂Oごとに1.6%R₂Oまで変化させた。また、セメントに含まれる主たるアルカリ金属元素はナトリウムとカリウムであること、ナトリウムを添加した場合とカリウムを添加した場合で、モルタルバーの膨張挙動が異なることを考慮して、添加アルカリはナトリウムとカリウムの2種類とし、この比率はセメント中の比率と同じになるようにした。添加の方法は、水酸化ナトリウム水溶液と水酸化カリウム水溶液を練混水に加える方法で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 モルタル供試体の膨張特性

各骨材を用いたモルタル供試体における材令12ヶ月までの膨張量の経時変化は図1に示すとおりで、以下のような結果が得られた。すなわち、いずれの骨材においてもアルカリ量が多くなると膨張量も大きくなるという事実が本実験でも確認された。また、火山岩系骨材と堆積岩系骨材の膨張量を比較すると、火山岩系骨材の方が大きく、一般的に言われている事実³⁾と良く符合している。

ここで、現行モルタルバー法の判定基準にしたがって本実験に用いた骨材のアルカリシリカ反応性を判定すると、骨材A Oのみ有害でそれ以外はすべて無害となる。有害と判定された骨材A Oは0.6%R₂Oでも大きな膨張を示すような反応性の極めて大きいものである。しかし、骨材A NやS Yは、骨材A Oより高いアルカリ反応性を示すにもかかわらず無害と判定され、アルカリ量を固定したモルタルバー法による試験結果だけでは、アルカリ反応性は正しく捕えられないと思われる。

以上の膨張試験結果をもとに、それぞれの骨材の限界アルカリ量を求めるのに際して、有害な膨張量について定義しておく。コンクリート供試体において、目視でひびわれの存在が確認できる程度の膨張量は、およそ0.02~0.03%程度と言われている。そこで、本実験では、このことを参考にして、有害な膨張量を0.02%以上とした。

この定義にしたがって、骨材それぞれの限界アルカリ量を求めた結果は表3に示したとおりである。

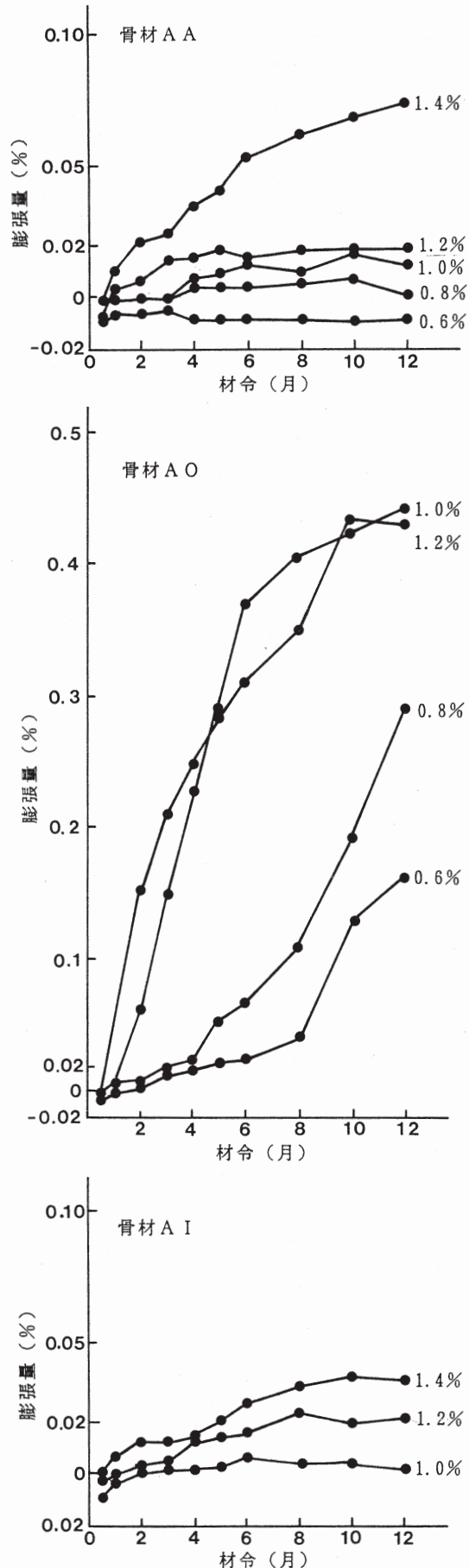


図1 膨張特性 (その1)

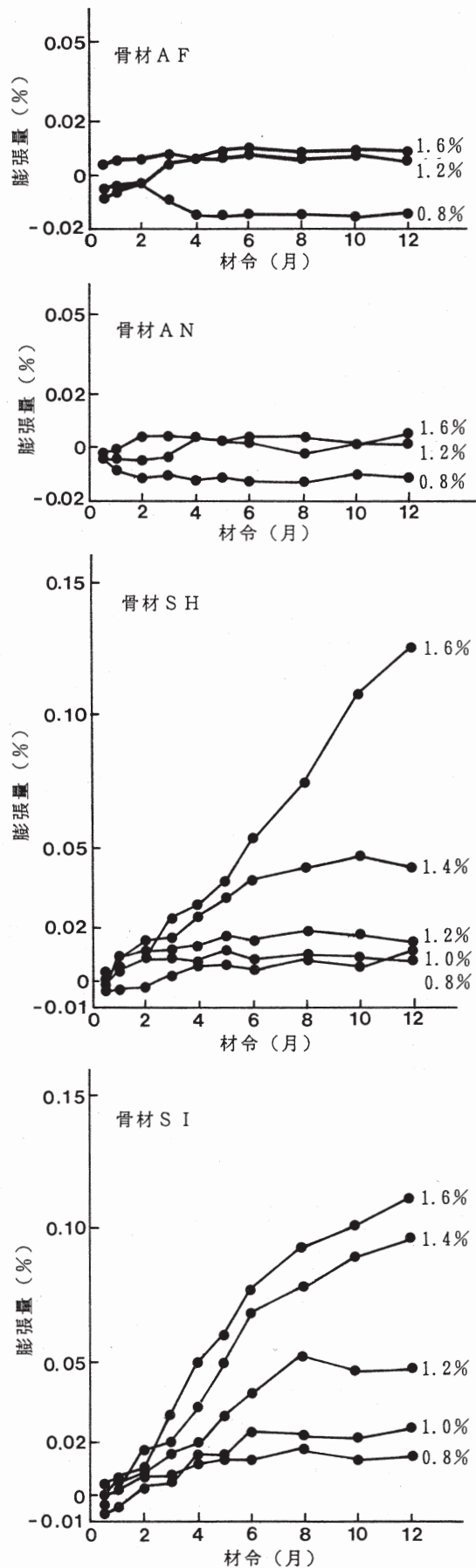


図1 膨張特性 (その2)

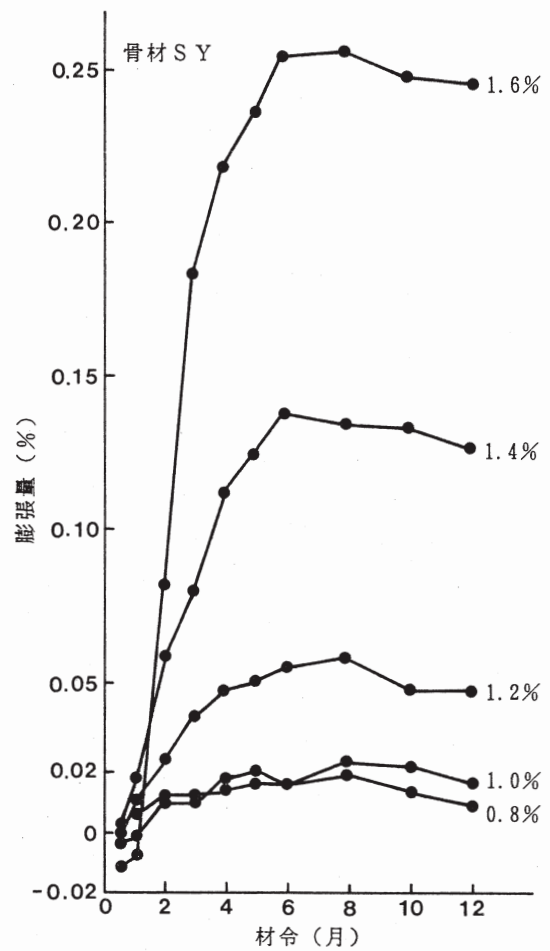


図1 膨張特性 (その3)

表3 現行モルタルバー法による判定と限界アルカリ量

骨材	モルタルバー法の判定	限界アルカリ量 (%R ₂ O)
AA	無害	1.2
AO	有害	0.6以下
AI	無害	1.0
AF	無害	1.6以上
AN	無害	1.6以上
SH	無害	1.2
SI	無害	0.8
SY	無害	0.8以下

3. 2 化学法の判定結果と限界アルカリ量の相関

各骨材の化学法の判定結果を図2に、判定結果と限界アルカリ量を表4に、それぞれ示した。

骨材AO、AN、SYはいずれも有害と判定されるが、この判定は、一般的な使用においてはコンクリートに損傷を与える可能性があるとして解釈される。このうち、骨材AOとSYの限界アルカリ量は、それぞれ0.6%R₂O以下、0.8%R₂Oと低いものであり、判定の意味と限界アルカリ量が低いことは良く一致している。しかし、骨材ANは化学法では有害でもモルタル供試体から求めた限界アルカリ量は1.6%R₂Oと非常に高くなり、判定の意図するところとは一致していない。

骨材AAとAFは、ともに有害（潜在的有害）に区別されるが、限界アルカリ量は、それぞれ1.2%R₂O、1.6%R₂Oで高く、この場合も判定の意図することとは一致していない。

骨材SHは無害域にプロットされ、この判定結果は一般的な使用ではコンクリートに損傷を与える可能性は少ないと解釈される。事実、限界アルカリ量も1.2%R₂Oであり、判定とは比較的一致していると言える。同じ無害

域でも骨材SIのように、化学法の測定許容誤差範囲内で有害/無害のいずれにも区分されるほど判定基準線に近いものは、判定すらあいまいであると考えねばならないし、限界アルカリ量も0.8%R₂Oでさほど高くないという事実から、判定を誤る危険性は多分にあると言わざるをえない。

以上の結果を総合すると以下ようになる。判定基準線よりかなり離れた有害域と無害域に区分された骨材は、化学法の判定と有害な膨張に至るアルカリ量、すなわち限界アルカリ量の大小とが概ね良い相関を示すようである。一方、判定基準線近傍の領域は、誤差をある程度認める化学法のような手法では判定できない領域であるにもかかわらず、有害/無害という区分をしていることに大きな問題がある。さらに、有害域の中でも特に潜在的有害域に区分されるものは、限界アルカリ量が高いのに有害と判定される場合があって、この領域の判定にも問題のあることが判った。

3. 3 改良化学法の指標と限界アルカリ量の関連

ここでは、改良化学法における三つの指標と限界アルカリ量の関連について検討してみる。

本実験に用いた骨材を改良化学法における指標を用いて四つのグループ、すなわち

- I : R_c⁰ 小、S_c²⁴およびS_c⁴⁸小
- II : R_c⁰ 小、S_c²⁴およびS_c⁴⁸大
- III : R_c⁰ 大、S_c²⁴およびS_c⁴⁸小
- IV : R_c⁰ 大、S_c²⁴およびS_c⁴⁸大

に分ける。この場合、S_c²⁴およびS_c⁴⁸の大小の境界値はASTMに規格化された化学法の潜在的有害域と無害域の境界が判定図上S_c≒60mmol/lであることを考慮して、S_c²⁴は50mmol/lとした。S_c⁴⁸はS_cの経時変化を勘案してS_c²⁴の2倍すなわちS_c⁴⁸≒100mmol/lとした。この四つの分類とそれぞれの限界アルカリ量は図3に示すとおりである。

R_c⁰の限界アルカリ量に及ぼす影響は、溶解シリカ量(S_c²⁴およびS_c⁴⁸)が同程度のグループを比較することで得られる。溶解シリカ量が共に小さいIとIIIを比較すると、R_c⁰がおおよそ40mmol/l程度違って限界アルカリ量は0.4%R₂O増加する。一方、溶解シリカ量が共に大きいIIとIVを比較すると、同様のR_c⁰の違いに対して、限界アルカリ量は0.6%R₂O増加する。

次に、溶解シリカ量の限界アルカリ量に及ぼす影響はR_c⁰が同じようなグループを比較することで得られる。R_c⁰が共に小さいIとIIを比較すると、溶解シリカ量が約10倍程度違ってようやく限界アルカリ量は0.2%R₂O減少する。これに対して、R_c⁰の共に大きい場合(IIIとIV)は、溶解シリカ量が同じように違っても限界アルカリ量は変わらない。

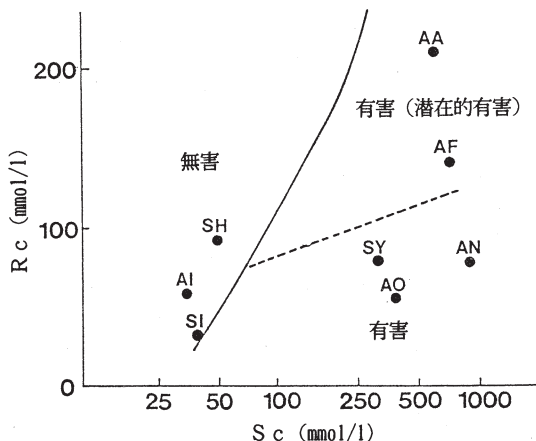


図2 化学法の判定結果

表4 化学法の結果と限界アルカリ量

骨材	化学法の結果		判定	限界アルカリ量 (%R ₂ O)
	S _c (mmol/l)	R _c (mmol/l)		
AA	690	210	有害 (潜在)	1.2
AO	370	64	有害	0.6以下
AI	45	58	無害	1.0
AF	764	122	有害 (潜在)	1.6以上
AN	880	85	有害	1.6以上
SH	50	87	無害	1.2
SI	30	42	無害	0.8
SY	345	93	有害	0.8以下

I					III				
骨材	Rc ⁰ (mmol/l)	Sc ²⁴ (mmol/l)	Sc ⁴⁸ (mmol/l)	限界アルカリ量 %R ₂ O	骨材	Rc ⁰ (mmol/l)	Sc ²⁴ (mmol/l)	Sc ⁴⁸ (mmol/l)	限界アルカリ量 %R ₂ O
SI	30 ± 5	30	55	0.8	SH	65 ± 5	50	95	1.2
AI	40 ± 5	45	85	1.0					

II					IV				
骨材	Rc ⁰ (mmol/l)	Sc ²⁴ (mmol/l)	Sc ⁴⁸ (mmol/l)	限界アルカリ量 %R ₂ O	骨材	Rc ⁰ (mmol/l)	Sc ²⁴ (mmol/l)	Sc ⁴⁸ (mmol/l)	限界アルカリ量 %R ₂ O
AO	30 ± 5	370	550	0.6以下	AA	75 ± 5	690	890	1.2
SY	35 ± 5	345	611	0.8以下	AF	70 ± 5	764	872	1.6以上
AN	25 ± 5	880	930	1.6以上					

図3 改良化学法の指標と限界アルカリ量の関係

以上の結果を要約すると、溶解シリカ量の違いは限界アルカリ量に対して大きく影響することはない、Rc⁰の違いが限界アルカリ量を支配することが明らかとなり、Rc⁰は限界アルカリ量と密接に関連する重要な指標であることが確認された。

これまで、Rc⁰および溶解シリカ量と限界アルカリ量の関係を明らかにすべく検討してきたが、改良化学法の指標、Rc⁰とSc²⁴およびSc⁴⁸によっても限界アルカリ量をうまく説明できない骨材（骨材AN、AF）がある。骨材ANは化学法の判定基準線からかなり離れた有害域にプロットされ、改良化学法によればRc⁰は小さく溶解シリカ量も大きいのでIIグループに分類される。同じIIグループに区分される骨材AOの限界アルカリ量は0.6%R₂O以下であり、このグループの骨材は限界アルカリ量が低いはずである。しかし、この骨材を使ったモルタルの表面には反応生成物が認められるので、確実に反応が起きているが、限界アルカリ量は1.6%R₂O以上と著しく大きい。この事実は、膨張量だけから限界アルカリ量を推定するには問題があることを示している。すなわち、骨材がアルカリと反応すること自体がコンクリートに有害であるという考えに立てば、ANのような骨材の限界アルカリ量は低いと考えねばならず、この種の岩石の特徴については別途報告する。

4. まとめ

モルタル供試体を作製し、限界アルカリ量を求め、これと化学法の判定結果や改良化学法における三つの指標との関連を調べた結果、

1) 化学法の判定結果と限界アルカリ量の大小とは、潜在的有害域と判定基準線近傍領域を除いた領域では概ね一致するようである。

2) 潜在的有害域に区分される骨材の限界アルカリ量は高い場合が多く、十分使用可能である。

3) 判定基準線の近傍にプロットされる骨材の限界アルカリ量はさほど高くなく、この種の骨材のアルカリ反応性を化学法によって判定することは避けるのが望ましいと考えられる。

4) 限界アルカリ量は、溶解シリカ量の指標（Sc²⁴およびSc⁴⁸）の違いよりはRc⁰の違いに大きく影響されることが明らかとなり、Rc⁰は極めて重要な指標であることが判った。

以上のことが明らかとなった。

[謝辞]

本報告をまとめるに際して、(財)鉄道総合技術研究所立松研究室（無機材料）立松英信室長には懇切丁寧なる御指導と大変有益な助言を賜った。ここに記して謝意を表する次第である。

[参考文献]

- 立松英信：アルカリ骨材反応と骨材の評価，資源・素材学会秋期大会分科研究会資料〔骨材の開発と生産技術〕，1988，pp.33
- 立松英信・佐々木孝彦・水野清：コンクリート用骨材の新しい評価法，鉄道総研報告，Vol.3，No.2，pp.51，1989
- 石田良二・岸本均：アルカリ骨材反応に関する岩石・鉱物学的研究，前田技術研究所報，Vol.28，pp.19，1987