報　文

化学的風化に伴う岩石の性状の変化とその予測

Alteration of Rock Properties with Chemical Weathering and Prediction of It

疋田　貞良*　　鈴木　哲也**

Sadayoshi HIKITA and Tetsuya SUZUKI

地表付近の岩石は常に物理的風化と化学的風化の２つの風化作用に曝されている。このうち物理的風化は岩石自体の物理的・力学的性質に影響を与えるのみである。これに対して化学的風化は、岩石自体の化学的性質、物理的・力学的性質および周辺環境にも影響を及ぼすより複雑な現象である。本研究では、黄鉄鉱を含む岩石の風化促進試験などの結果をもとに、化学的風化に伴う岩石の性状の変化およびその予測の可能性について検討した。

その結果、化学的風化の進行に伴い黄鉄鉱・方解石・スメクタイトなどの鉱物に変化が生じ、それに起因して岩石中から様々な物質が溶出することがわかった。この岩石の化学的風化が著しく進行した場合、岩石中から溶出する可能性のある物質の重量は岩石の総重量に対して平均数%、最大12%程度と見積もられ、これに伴い岩石の物理的・力学的性質が大きく低下することが容易に推定される。また岩石中からの物質の溶出量と化学的風化進行後のpHは新鮮な岩石の性状からある程度予測可能であることがわかった。

《化学的風化；風化促進試験；黄鉄鉱；方解石；スメクタイト》

Rock around the surface of the earth is always exposed to two kinds of weathering, mechanical weathering and chemical weathering. Mechanical weathering influences only mechanical properties of the rock. On the other hand chemical weathering is more complicated phenomenon that influences not only chemical properties and mechanical properties of the rock but also surrounding environment. In this study, alteration of rock properties with chemical weathering and the predictability were examined, based on weathering-promotion test of pyrite-bearing rock.

The results showed that such minerals as pyrite, calcite and smectite were altered with the progress of the chemical weathering, and it caused leaching of various substances from the rock. As the weight of the substances which could leach out from the rock were estimated to be several percent on average and about 12 percent at most of the rock due to the serious chemical weathering, mechanical properties of the rock are supposed to be considerably reduced owing to the leaching out. Both the amount of the substances leaching out from the rock and pH after the progress of the chemical weathering can be approximately predicted from the properties of fresh rock.

Keywords : Chemical weathering, Weathering-promotion test, Pyrite, Calcite, Smectite

はじめに

地表付近の岩石は時間の経過とともに例外なく風化してゆく。すなわち、一般の土木施工において岩石・岩盤を扱う場合、ほとんど例外なくこの問題に関わっていることになる。風化の問題を取り扱う場合、２つの重要なポイントがある。１つは現時点での風化の程度を正確に把握することであるが、これについては目視による観察または物性値の変化などに基づいて判断

されている場合が多い。もう１つは将来の状況を予測することである。これに関しては、現場において意識されることは数少ないであろうと考えられるが、スレーキング試験や凍結融解試験などを行うことなどはこれに当たる。

風化のメカニズムは大きく物理的風化と化学的風化の２つに区分される。従来、岩石の風化の研究はスレーキングや凍結融解などの物理的風化を対象とするものが多かった。しかし、近年黄鉄鉱などのイオウ化合物を含む岩石の化学的風化による様々な弊害が多数報告されつつあり、これに関しての研究例も増えつつある。これらの研究によれば、黄鉄鉱を含む岩石の化学的風化のメカニズムは、岩石中に含まれる黄鉄鉱の酸化・分解により硫酸が発生する過程と、その硫酸が岩石中の他の鉱物と反応する過程の２つの過程からなる[1),2),3),4)]。

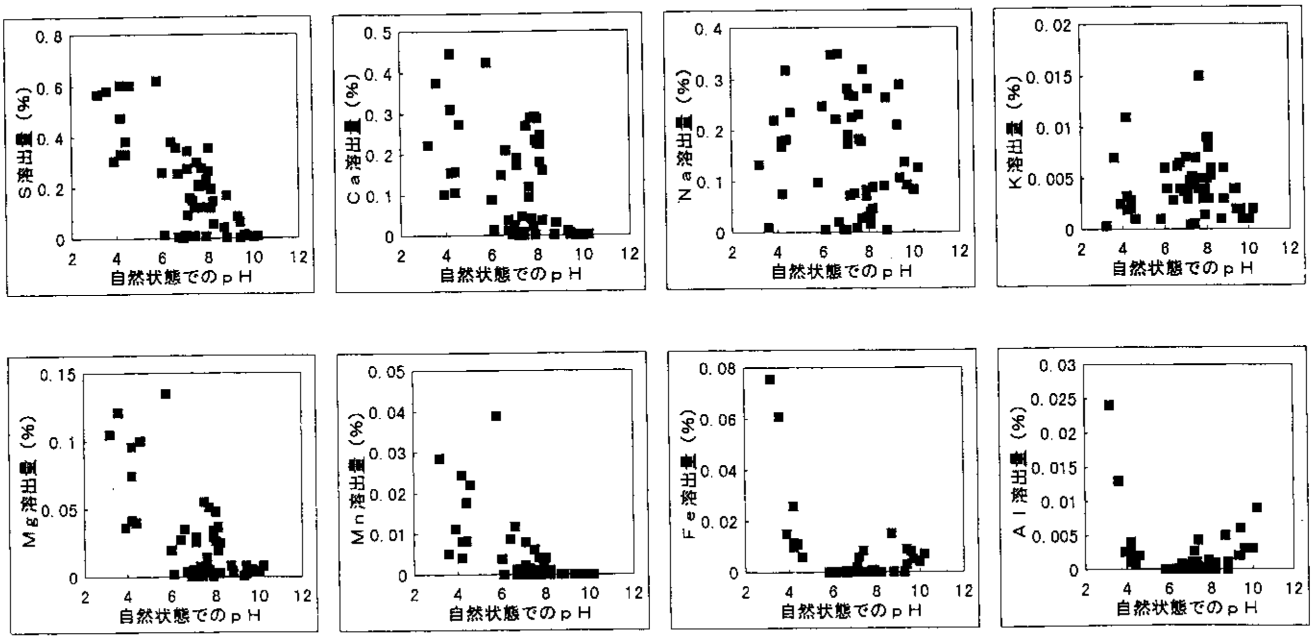
岩石の化学的風化の影響による弊害としては以下のようなことが挙げられる。まず、地盤の酸性化に伴うコンクリートの劣化[5)]、作物の生育障害などの問題、および酸性水・重金属の流出などによる水質汚染などの化学的影響に関する問題である。もう１つは、構造物の基礎地盤・切土斜面・自然斜面の長期的安定性、および岩石を盛土材などの土木材料として用いた場合の材料物性の変化等の物理的・力学的影響に関する問題である[2),4)]。この種の問題としては、さらに風化生成物としての石膏などの硫酸塩が析出する際の膨張圧による盤膨れによる被害も報告されている[6),7)]。化学的影響に関する問題については、これまで枚挙に遑がないほど多数の研究例があり、特に土壌の分野ではその歴史は古い。

岩石の物理的風化は岩石自体の物理的・力学的性質に影響を与えるのみであるが、これに対して化学的風化は、上述のとおり岩石自体の化学的性質、物理的・力学的性質および周辺環境にも影響を及ぼすより複雑な現象である。本文では黄鉄鉱を含む岩石の風化促進試験結果などをもとに、化学的風化が岩石自体に与える影響およびその予測の可能性について述べる。

１．試料および試験方法

白亜系粗粒砂岩のボーリングコアを2mm以下に粉砕したものを試料として用い、まず新鮮な試料の鉱物組成を把握するためにＸ線粉末回折法により鉱物の同定を行い、この岩石の化学的風化に深く関与していると考えられる黄鉄鉱、方解石、スメクタイト、沸石[4)]の４鉱物の最強線のピーク強度を測定した。また、新鮮な試料および風化促進試験後の試料についてpHの測定、溶出試験、置換容量の測定、メチレンブルーによるモンモリロナイトの定量を行った。なお、上記の〝新鮮な試料〃という用語は全く未風化の試料という意味ではなく、風化促進試験で強制的に風化させる前の自然状態の試料という意味で用いた。

風化促進試験は岩石の化学的風化を短期間で再現する目的で、新鮮な試料に30％過酸化水素水を加え、目視により反応が収束するまで加熱し、試料を強制的に



図－１　新鮮な試料からの溶出成分とpH

酸化させるものである。溶出試験は風化に伴う岩石中からの溶出成分およびその量を把握する目的で実施し、硫酸イオンおよびカルシウム、ナトリウム、カリウム、マグネシウム、マンガン、鉄、アルミニウムの7種の陽イオンについて分析を行った。さらに、一部の試料についてはケイ素イオンの分析も行った。各成分の分析は、新鮮な試料では固液比1：50、風化促進試験後の試料では固液比1：100の条件で実施した。なお、分析方法については、硫酸イオンはイオンクロマトグラフ法によるイオウ量の測定値から求めた。また、ケイ素イオンは吸光光度法、それ以外の陽イオンはいずれも原子吸光法による分析値である。

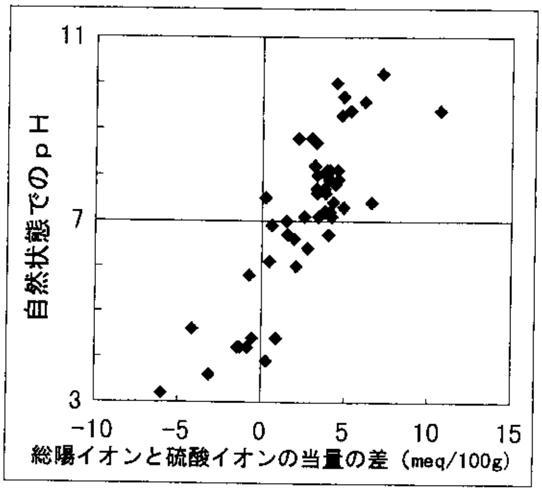
2．化学的風化に伴う岩石構成物質の変化

試料として用いた粗粒砂岩の化学的風化に伴う溶出物質と鉱物変化を確認するため各種試験を実施した。溶出試験については、新鮮な試料からの溶出成分および風化促進試験後の試料からの溶出成分を分析し、岩石の化学的風化に伴って溶出する可能性のある成分量（化学的風化が著しく進行した場合に溶出する成分量）をその両者の差として求めた。この際同時にpHの測定も行った。

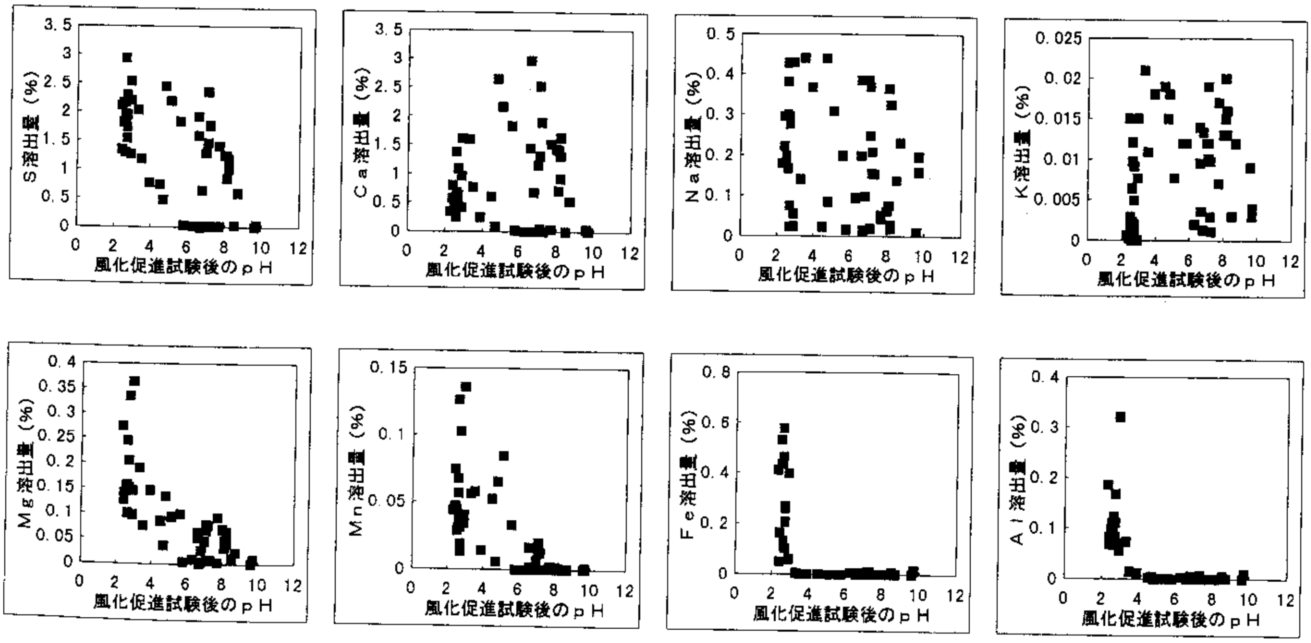
2．1　新鮮な試料からの溶出成分とpH

新鮮な試料からの溶出成分とpHの測定結果を図－1に示す。図中の各成分の溶出量は試料総重量比に対する重量比で表しており、硫酸イオンについてはイオウの重量に換算して示してある。また図－1に示した溶出成分の分析結果を当量に換算し、試料ごとに7種の陽イオンの当量の合計と陰イオン中で唯一分析を行った硫酸イオンの当量の差を求め、それとpHの関係を図－2に示した。図－2をみると、pHは上記の当量の差と比較的良く対応しており、図－1に示した溶出成分のほとんどが硫酸塩または硫酸として存在すると考えてさしつかえないと判断できる。また、これらの溶出成分は地山内において自然条件下で徐々に進行した化学的風化による生成物であると考えられる。

図－1をみると、試料のpHは3～10と広範囲にばらつくが、NaとK以外の6成分については、pHが低い試料ほど多くの物質が溶出する傾向が認められ、特にMg、Mn、Fe、Alの4成分はpH4～5以下の



図－2　新鮮な試料からの溶出成分当量とpH

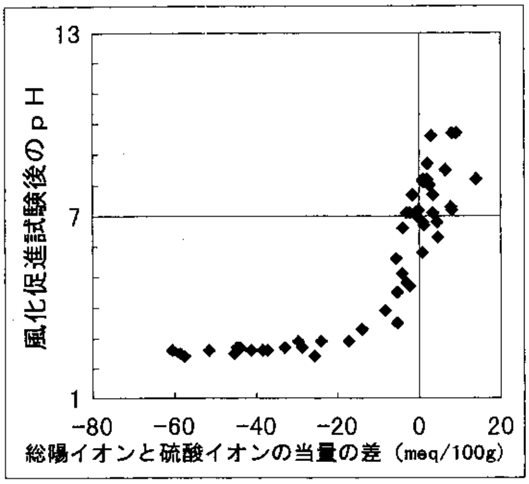


図－3　総溶出成分とpH

試料からの溶出が顕著である。また、S、Ca，Naの3成分については、他成分に比べて大きな溶出量を示す試料が多く見られるが、これはX線回折試験によって多くの試料から硫酸カルシウムの2水塩である石膏および硫酸ナトリウムの無水塩であるセナルダイトが検出されている[4]ことと符合している。

2．2　風化促進試験後の試料からの溶出成分とpH

風化促進試験後の試料からの溶出成分とpHの測定結果を図－3に示す。図中の各成分の溶出量は図－1と同様に、試料総重量に対する重量比で示している。また図－3に示した溶出成分の分析結果を当量に換算し、試料ごとに7種の陽イオンの当量の合計と硫酸イオンの当量の差を求め、それとpHの関係を図－4に示した。図－4をみるとこの両者の対応は良好であり、図－3に示した溶出成分のほとんどが硫酸塩または硫酸として存在すると考えられる。これらの溶出成分は、上述の新鮮な試料が元来含有している溶出可能物質と、風化促進試験による強制風化に伴って新たに生じた溶出可能物質を合わせたものと考えられ、この岩石中から溶出する可能性のある物質の総量を示していると考えられる。



図－4　風化促進試験後の試料からの溶出成分当量とpH

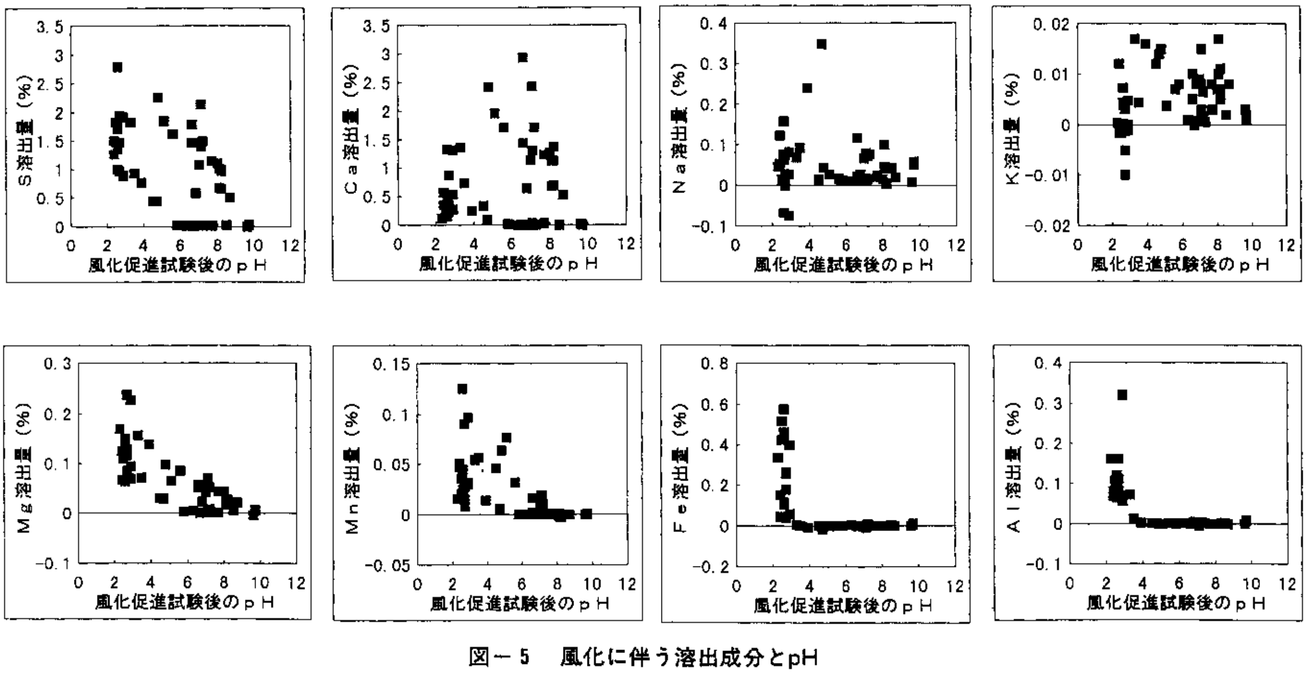
図－3をみると、化学的風化が著しく進行した場合の試料のpHは2～10と広範囲にばらつき、Mg、MnはpHの低い試料ほど多量に溶出する傾向が認められる。さらに、Fe、Alについてはph3以下の強酸性を示す試料のみから検出されている。ただ、溶出量の絶対値としてはSとCaが圧倒的に大きい。

2．3　化学的風化に伴う物質の溶出と鉱物変化

試料とした岩石が著しい風化作用を被った場合に、風化に伴って新たに溶出する可能性のある成分量を、上述の2つの溶出成分測定値の差として求めた（図－5）。

この結果を疋田他(1994)によって求められた風化促進試験前後での鉱物のX線回折強度の変化と考え併せ、化学的風化に伴う岩石の変化について考察する。

図－5から、SとCaの溶出量が他成分に比べて圧倒的に多いことが認められ、化学的風化の進行に伴い多量の硫酸カルシウムが生成されていることがわかる。新鮮な試料のほとんどから黄鉄鉱が検出されていることから、風化に伴い多量に溶出するSはこれに由来



図－5　風化に伴う溶出成分とpH

することは疑う余地はない。Ca についても、一部はスメクタイトおよび沸石の交換性イオンとして存在したものであると考えられるが、その多くは方解石の分解によって溶出したものであると考えられる。上述の硫酸カルシウムは2水塩である石膏であることがX線回折試験により明らかになっている[4]。この結果は、この岩石の化学的風化の主体をなすのは黄鉄鉱の分解に伴って発生した硫酸により方解石が分解され石膏が生成される反応である、という疋田他(1994)が風化促進試験前後のX線回折強度の変化などから得た結論を支持するものである。

Ca については pH と溶出量の間に明瞭な関係は認めがたい。S については、不明瞭ではあるが pH の低い試料ほど溶出量が多くなる傾向が認められる。方解石の分解量は、方解石の含有量のほかそれを分解する硫酸の量、すなわち分解される黄鉄鉱の量に規制されるため、特に pH との一義的な関係はないものと考えられる。一方、黄鉄鉱の分解量は、当然黄鉄鉱の含有量に規制されるが、強酸性の条件下では黄鉄鉱の分解が進行しやすい[4),8),9)]ため上述の傾向が現れるものと考えられる。

Na と K の2つのアルカリイオンについては、いずれも強酸性を示す試料の一部に風化に伴い溶存量の明らかな減少が認められる。これは、一部の試料からX線回折試験によりナトロジャロサイトが検出されている[4]ことからも明らかなように、強酸性下で安定な不溶性のナトロジャロサイトおよびジャロサイトが形成されたためと考えられる。現在この岩石中の交換性イオンの分析結果を検討中であるが、これら2種のイオンについてはスメクタイト、沸石などの交換性イオンとして存在していた可能性が高い。

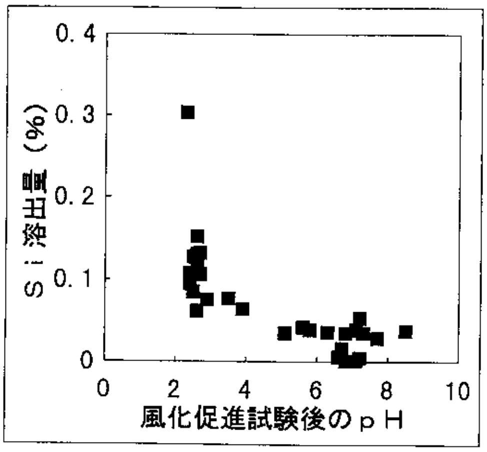
Mg と Mn については、pH の低い試料ほど多く検出されている。これらにはスメクタイト、沸石のイオン交換によって溶出したものと、後述するスメクタイトの変化に由来するものの両者が含まれていると考えられる。

Fe と Al の2つのイオンは、pH 3 以下の強酸性を示す試料のみから溶出するという類似の傾向を示すが、それらの溶出機構は全く異なると考えられる。Fe については、その大部分が黄鉄鉱の分解に由来すると推定されるが、中性～弱酸性の条件下ではゲータイトなどの不溶性物質として存在すると考えられる。それが pH 3 以下の強酸性条件下では、3価の鉄イオンとして溶液中に溶存するようになるため[8),9)]、pH 3 以下の強酸性の試料でのみ Fe が検出されるものと考えられる。これに対して、Al は後述するスメクタイトの変化に由来するものであろう。

2．4　スメクタイトの変化

上述のとおり Al、Mg、Mn の溶出は強酸性条件下で著しく進行する。また、風化促進試験前後のX線回折試験によれば、一般に化学的風化によりスメクタイトの回折強度が低下することが認められ、その傾向は酸性条件下で顕著である[4]。これらの結果から、化学的風化によりスメクタイトには何らかの変化が起こっており、それは強酸性条件下でより顕著であると考えられる。複雑な化学組成および構造を持つスメクタイトの変化については、黄鉄鉱や方解石の分解などよりも複雑な現象であると考えられるため、その確認のためケイ素の溶出量の測定、置換容量の測定、メチレンブルーによるモンモリロナイトの定量などの補足実験を行い、それらの結果をもとに以下に述べる。

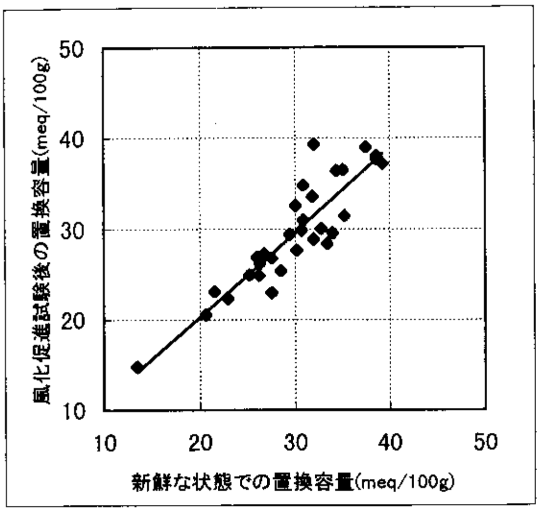
図－6に化学的風化に伴う Si の溶出量を pH とともに示す。Si の溶出は強酸性の試料で顕著に認められ、Al の溶出と類似の傾向を示す。また、Si は Al とともにスメクタイトの主要構成物質であることから、強酸性条件の下ではスメクタイトの分解が進んでいることはほぼ確実である。



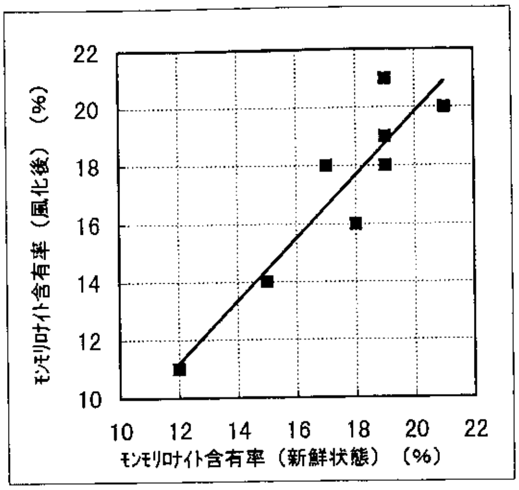
図－6　風化に伴うケイ素の溶出量

風化促進試験前後の岩石の置換容量の測定結果を図－7に示す。図をみると、風化促進試験の前後で置換容量に大きな違いは認められない。このことから、この岩石の置換容量に大きなウェートを占めると考えられるスメクタイトの置換容量にも大きな変化は生じておらず、著しく化学的風化を被ってもスメクタイトの基本構造は保持されているものと考えられる。

風化促進試験前後の岩石中のモンモリロナイト含有



図－7　風化促進試験前後の置換容量



図－8　風化促進試験前後のモンモリロナイト定量結果

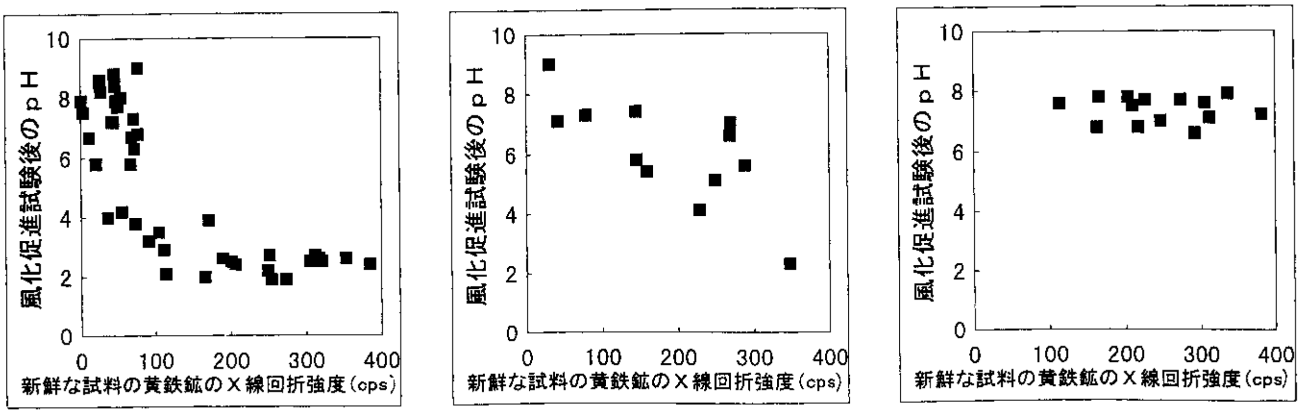
率（重量比）の測定結果を図－8に示す。モンモリロナイトはスメクタイトの一種であり、この岩石中では全重量の約10～20%を占める主要構成鉱物である。ここで用いたモンモリロナイト定量方法は、メチレンブルー溶液を利用してモンモリロナイトの吸着能を測定するものである[10]。図から風化促進試験の前後でモンモリロナイトの吸着能にほとんど変化は認められないことがわかり、上述の置換容量の測定結果から導かれたのと同様の結論を得る。

以上の結果をまとめると、化学的風化の進行によって強酸性を示す場合にはスメクタイトは部分的に分解されるが、それは結晶構造全体に及ぶものではなく、基本構造は保持されていると考えられる。少なくとも結晶間の層間を保つ構造および電気的性質は保たれているといえる。

3．化学的風化進行後のpHの予測

前述のとおり、この岩石の化学的風化において支配的な反応は、黄鉄鉱の酸化・分解に伴う硫酸の発生および発生した硫酸と方解石の中和反応である。このことから、化学的風化が著しく進行した後の岩石のpHは、大略これら2つの鉱物の量比に大きく左右されることが予想される。この考えに基づき、新鮮な試料の方解石・黄鉄鉱のX線回折強度を指標として用い、化学的風化進行後のpHの予測の可能性について検討した。

試料を方解石の含有量によって(a)少・(b)中・(c)多の3つのグループに区分し、それぞれの試料群について黄鉄鉱のX線回折強度と風化促進試験後のpHの関係を示したのが図－9である。この図から、方解石を多量に含有する試料は風化後もすべて中性を保つのに対

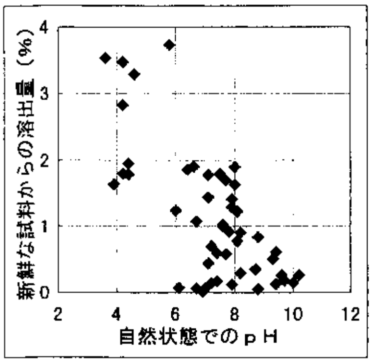


(a) 方解石のＸ線回折強度が500cps未満の試料

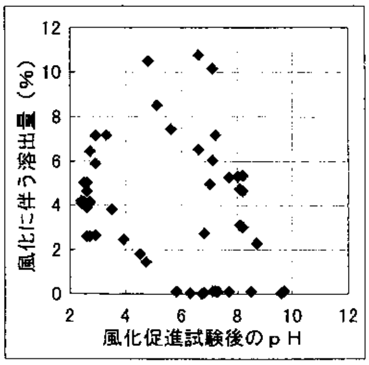
(b) 方解石のＸ線回折強度が2000cps未満の試料

(c) 方解石のＸ線回折強度が2000cps以上の試料

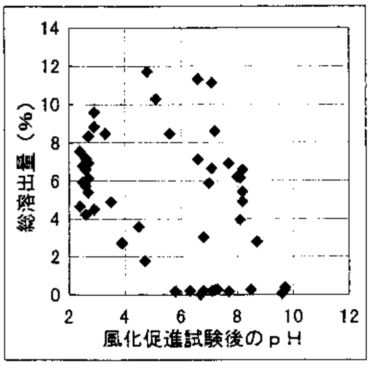
図－9　新鮮な試料のＸ線回析試験による風化後のpHの予測



(a)



(b)



(c)

図－10　岩石中からの溶出量の計算値とpH

して、方解石含有量の少ない試料ではわずかの黄鉄鉱の存在によってもpHは酸性となることがわかる。すなわち、新鮮な試料の方解石と黄鉄鉱の２つの鉱物の含有量をX線回折強度で代用し、それを指標として風化後のpHの予測がある程度可能であるといえる。

４．化学的風化を被った岩石中からの物質の溶出量

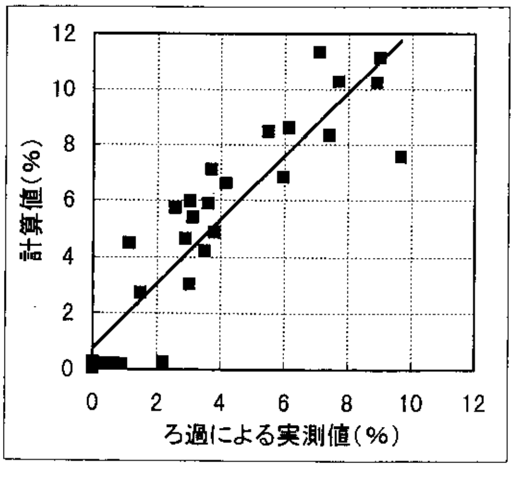
化学的風化の進行に伴う岩石の物理的・力学的性質の変化を把握するため、前述の溶出成分分析結果をもとに、岩石中からの物質の溶出量を試算した。

まず図－１に示した新鮮な試料からの各イオンの溶出量の分析値をもとに、各成分は自然状態で安定な硫酸塩として存在すると仮定し、新鮮な試料からの溶出量を総重量に対する重量比として試算した（図－10(a))。なお、陰イオンが過剰となる場合は、過剰分は硫酸として存在するものとみなし、陽イオンが過剰となる場合の過剰分はイオンのみの重量として計算を行った。この試算によって求められた値は、地山内で進行していた化学的風化によって既に生成されていた可溶性成分の量であるとみなせる。その値は、pHの低い試料ほど大きくなる傾向がみられ、最大で岩石総重量の３～４％程度の物質が溶出することがわかる。

続いて図－５に示した化学的風化の進行に伴い新たに溶出する各イオンの分析値をもとに、著しい風化に伴い新たに溶出する物質の量を試算した（図－10(b))。その際、SおよびCaはそれぞれ黄鉄鉱および方解石の分解によって生じたものとし、Ca以外の陽イオンはすべてイオンのみの重量として計算を行った。図から、風化に伴い新たに溶出する物質の量は多いものでは10％以上に達することがわかる。

化学的風化を被った岩石中から溶出する可能性のある物質の総量を、新鮮な試料からの溶出量と風化の進行に伴い新たに溶出する物質の量の和として求め図－10(c)に示す。これをみると、この岩石の化学的風化が極限に近い状態まで進行した場合、最終的に平均数%、多いものでは12%近くの物質が溶出することがわかる。これを岩石の物性値の変化としてとらえた場合、比重の低下、吸水率の上昇および強度の大幅な低下が予想される。

上述のように図－10に示した岩石中からの溶出量は、溶出試験によるイオンの分析値を用いて、いくつかの仮定のもとに溶出物質を推定し、その重量を試算したものである。この試算の妥当性を検討するため、風化促進試験後の試料の懸濁液(固液比１：100)を0.2μmのメンブランフィルターを用いてろ過することにより得られる損失重量をこの岩石中からの総溶出量の実測値とみなし、それと計算値との比較を試みた（図－11)。この図から、総溶出量の計算値はろ過から求めた実測値よりも大きい値を示す場合が多いことがわか



図－11　総溶出量の計算値とろ過による実測値の比較

るが、これから直ちに実測値に基づいて計算値の補正または計算方法の見直しを行うことは早計であろう。というのは、フィルターによる懸濁液のろ過の過程で固液比は徐々に小さくなり最終的には１：０に近づい行き、さらに試料によってはその作業に数時間を要したことから、溶解していた物質がろ過の過程で再度析出することなども考えられる。すなわち、ろ過による実測値が必ずしも溶出量の正確な値を示すとはいえないため、これにつては今後さらに詳細に検討して判断する必要があると考えられる。

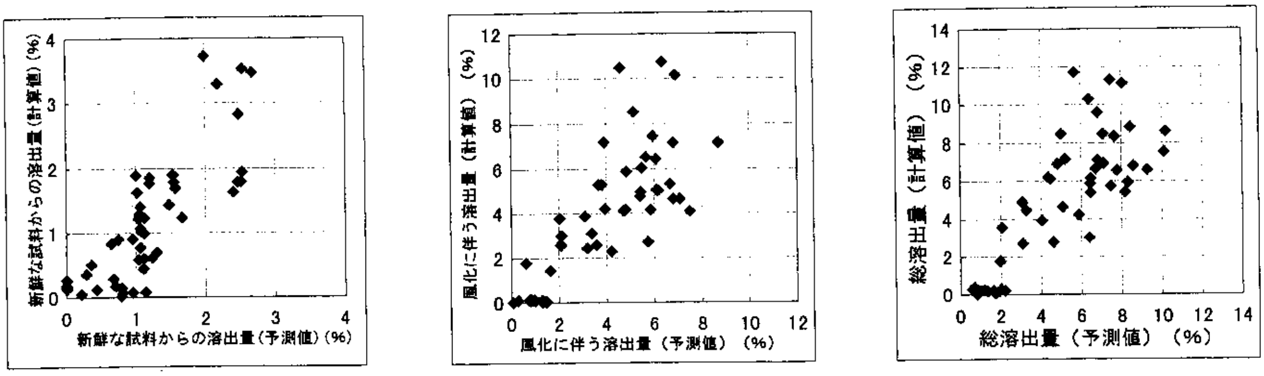
５．岩石中からの物質の溶出量の予測

この岩石は上述のように、化学的風化によって大きなダメージを受けると考えられる。ここでは、このダメージの大きさを４．で試算した岩石中からの溶出量で代用し、新鮮な試料の試験結果を指標として用いた溶出量の予測の可能性について検討した。

新鮮な試料の試験項目の中から最適な組み合わせを選択し、それらを説明変数として重回帰分析により岩石中からの溶出量の予測を行った。その結果と４．で求めた計算値との比較を図－12に示す。この図から、新鮮な試料からの溶出量、風化に伴う溶出量、総溶出量のいずれも、新鮮な試料についての２～３種類の試験結果から比較的高い精度で予測できるといえる。さらに、上記３とおりの溶出量試算結果と、それらと最も高い相関を示す指標との関係を図－13に示す。この図から、新鮮な試料からの溶出量は自然状態でのpHと、風化に伴う溶出量と総溶出量はいずれも新鮮な試料の黄鉄鉱のX線回折強度とそれぞれ高い相関を示し、それらを指標として岩石中からの物質の溶出量をある程度予測可能であることがわかる。

まとめ

化学的風化に伴う岩石の性状の変化について検討するため、白亜系粗粒砂岩を試料として風化促進試験およびその他数種の試験を行い、岩石中からの溶出成分、

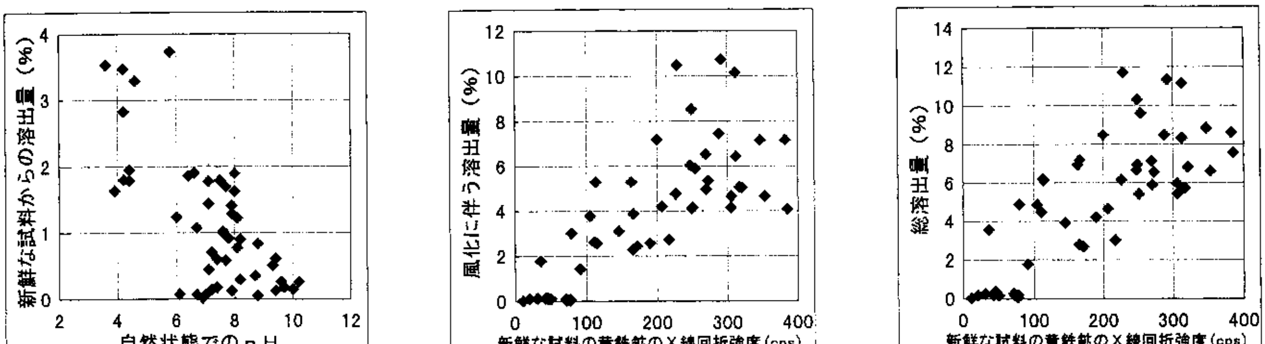


(a) Ｒ＝０．７９６
X1：新鮮な試料の黄鉄鉱のＸ線回折強度
X2：自然状態でのｐＨ

(b) Ｒ＝０．７９２
X1：新鮮な試料の黄鉄鉱のＸ線回折強度
X2：新鮮な試料の方解石のＸ線回折強度

(c) Ｒ＝０．８２７
X1：新鮮な試料の黄鉄鉱のＸ線回折強度
X2：新鮮な試料の方解石のＸ線回折強度
X3：自然状態でのｐＨ

図－12　新鮮な試料の試験結果による溶出量の予測（重回帰）



(a) Ｒ＝－０．７６４

(b) Ｒ＝０．７７６

(c) Ｒ＝０．７９４

図－13　新鮮な試料の試験結果による溶出量の予測（単回帰）

岩石中の鉱物変化、岩石中からの物質の溶出量などに関して以下の結果を得た。

① 化学的風化に伴いこの岩石中から溶出する成分としては、SとCaが圧倒的に多く、この岩石の化学的風化の主体をなすのは黄鉄鉱の分解に伴って発生した硫酸により方解石が分解され石膏が生成される反応であることが確認された。黄鉄鉱の分解はpH3以下の条件下で特に速やかに進行するため、Sの溶出量はpHの低い試料ほど多くなる傾向がある。なお、この岩石の風化後のpHは2～10と広範囲にばらつく。

② 化学的風化の進行に伴って試料が強酸性となる場合にはスメクタイトの分解が起こり、Al、Si、Mg、Mnなどが溶出する。ただし、その分解は部分的なものであり、スメクタイトの基本構造を破壊するものではないと考えられる。

③ 化学的風化が著しく進行した場合、この岩石中から、最終的には平均数%、最大12%近くの物質が溶出する可能性があり、その場合岩石の物理的・力学的性質は大きく低下すると考えられる。

化学的風化に伴う以上のような岩石の性状の変化のうち、化学的性質として化学的風化進行後のpH、物理的性質として岩石中からの物質の溶出量、の両者を新鮮な試料の性状から予測する可能性について検討した。その結果をまとめると以下のようになる。

① 化学的風化が著しく進行した後の岩石のpHは、新鮮な試料の方解石と黄鉄鉱の2鉱物のX線回折強度を指標として、ある程度予測可能である。

② 新鮮な試料からの溶出量、化学的風化に伴う溶出量およびその両者を合わせた総溶出量はいずれも、新鮮な試料についての2～3種類の試験結果を指標として用いることによって比較的高い精度で予測できる。また単独の指標を用いて予測を行う場合には、新鮮な試料からの溶出量に対しては自然状態のpH、化学的風化に伴う溶出量と総溶出量に対してはいずれも新鮮な試料の黄鉄鉱のX線回折強度が、それぞれ最適な指標となる。

本文は、ある状態で現存する岩石が将来どのように変化するのか、またその変化は予測可能であるかという点について述べたものである。ただし、その将来とは何時なのかは、重要な問題であるにも関わらず明確にはなっていない。今後、時間の概念すなわち風化の進行速度を組み入れて行くことが本研究の大きな課題である。

参考文献

1) 千木良雅弘・大山隆弘：堆積性軟岩の風化過程の工学的重要性、電力土木、No.241、1992.

2) 志田原巧・大山雅弘・千木良雅弘：砂質泥岩の化学的風化のメカニズム、電力中央研究所報告、U94001、1994.

3) 石坂信之：酸性泥岩の化学的特徴について、神奈川県温泉地学研究所報告、第24巻、第2号、1993.

4) 疋田貞良・鈴木哲也・秀島好昭・二平聡：黄鉄鉱を含む岩石材料の化学的風化、開発土木研究所月報、No.490、1994.

5) 菅伊三男・松下博通：硫酸塩地盤における建物基礎コンクリートの劣化崩壊について、日本応用地質学会平成6年度研究発表会講演論文集、1994.

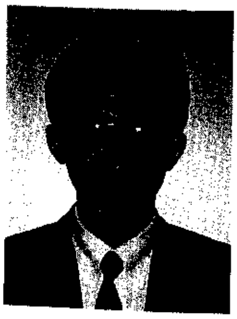
6) Berube, M. A., Locat, J., Gelinas, P., and Chagnon, J. Y. ：Black Shale Heaving at Sainte-Foy, Quebec, Canada, Canadian Journal of Earth Sciences, vol.23, 1986.

7) 大山隆弘・千木良雅弘：泥岩の化学的風化による石膏の生成の応用地質学的意義、日本応用地質学会平成7年度研究発表会講演論文集、1995.

8) 勝俣宏行・吉田冨男：酸性硫酸塩土壌におけるパイライトの微生物的酸化と有機物添加の影響、土と微生物、No.40、1992.

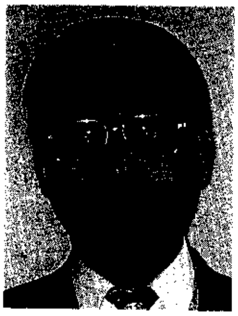
9) 林久人：ジャロサイトの鉱物化学と酸性硫酸塩土壌、粘土科学、第34巻、第3号、1994.

10) 須藤俊男：粘土鉱物学、岩波書店、1974.



疋田　貞良*

開発土木研究所
農業開発部
地質研究室
主任研究員



鈴木　哲也**

開発土木研究所
農業開発部
地質研究室長
理学博士