

地球表層部における変質の速さを考える

水谷 伸治郎¹⁾

1. ま え が き

地質学者は、長い間、資源とエネルギーの開発という社会的要請に支えられて活動を続けてきた。しかし、とくに最近では社会情勢や経済構造が変わってきたこともあって、この分野、つまり地球科学や地質学の現状と将来については多くの問題があり、あらためて検討を要し、新しい方向を見出さねばならないと言われている。事実、内外を問わずいろいろな組織で、将来の問題を取り上げ議論がなされてきている。例えば、Ernst は、当時のアメリカ地質学会の会長としての立場から、1987年に地質学の将来の問題について幾つかの課題を掲げて論じた。興味深いのは、応用研究としての地球科学に言及し、水理地質学の重要性や放射性廃棄物処理の問題にも触れていることである。彼は、将来予測の手掛かりとして、来る10年間に必要な地球科学関係者の職種別人口の推移を引用し、1980-85年の間に総計1116人であった水理地質学関係者（応用地質学者や地球化学者を含む）は、1985-90年には3401人、1990-95年には6776人に増えるという数字を掲げた。10年間に6倍の増加である。これだけのマンパワーが必要とされる背景には、広い意味の環境問題と廃棄物処理対策があるためと彼は指摘したのである。

彼の引用したその予測が示したように、アメリカの地学情報誌 GEOTIMES の本年一月号の表紙は「水理地質学者を求む」という大学、研究所の求人広告の切り抜きを集めて飾られた。今、アメリカではこの水理地質学関係の研究が非常に重要と考えられており、関連分野の人材が積極的に求められている。同誌のその号に寄稿した Claudy によると、「地質コンサルタントでは3~5年の経験をもつ水理地質学専門家は引っ張りだこで、しばらくはヘッドハンターの世話にならなければならない」という。大学においても水理地質学、応用地質学などの環境関係の研究・教育はもっと強調されるべき分野であり、同時に、伝統的な教育内容は再検討されなければ

ならないだろうともいう。この地学情報誌の同号には、昨年秋テキサスのダラスで開かれたアメリカ地質学会年会の概要が Marsh によって紹介されている。その報告によれば、地下水の移動と高レベル放射性廃棄物処理、放射性核種の地下水への混入などの問題もこの年会で参加者の関心を引いた研究課題であったという。以上、これらの資料から、次のような相互の関係と昨今の動きが想像できるであろう。つまり、水理地質学という名の学問分野のもとに、地殻構成物質と水との関係を研究し、その結果得られた地殻表層部での諸現象に関する知識体系を廃棄物処理や環境問題に結び付け、実際に役立てていこうとする動きである。上に掲げた話題はごく一例に過ぎない。アメリカの地質学会だけをみても、学会全体の年会に加えて、毎年の各支部の会合では、水理地質学—水—廃棄物処理といったような関係の課題を掲げた討論会が頻繁に開かれてきている。すでに、ある大きな動きが地質学のなかで始まっていることを感じさせるのである。わが国においても、1987年にはじめて応用地質学会において、高レベル放射性廃棄物処理問題に関するシンポジウムが開かれた。そして、その頃から研究者の間でも意欲的に関係者を集めて、議論が進められるようになってきている。

地殻の表層部では静かに、しかし、確実にある種の変化が進んでいる。風化作用や続成作用と呼ばれている現象がそれである。筆者はこのような変化の質的な側面に興味をもって研究を続けてきた。また、日本列島の骨格をつくっている中・古生層の地質構造に大きな関心をもって仕事を続けてきた。そのような経験から、筆者はまったく個人的に、上述の問題に対して、地質学や地球科学の立場からの参加の意義を考えてきた。ここでは、筆者の仕事の一端を例に挟みながら、日頃考えていることを述べてみよう。この問題に直接関係している専門家諸氏ばかりでなく、一般の地球科学関係者の御批判と御叱正を、あらかじめお願いしておく。なお、この小文は、上記の応用地質学会シンポジウムでの講演(1987. V. 29),

1) 名古屋大学理学部地球科学教室：〒464-01 愛知県名古屋市中千種区不老町

キーワード：風化作用、続成作用、物質移動、反応速度、開放系

原子力研究所での研究会における講演 (1989. I. 23), ならびに原子力学会シンポジウムでの講演 (1989. VII. 6) のメモを参考にしまとめたものである。

2. 地質学の特徴と役割

広い科学技術の分野の中で、地球に関する学問は地球を対象としてそれに関するさまざまな現象を方法や手段を問わず自由に研究するものである。そのような学問が、あらゆる科学の基礎となっている物理学や化学、あるいは、それらの思考を支えている数学などと違ってどのような特徴をもち、存在意義をもっているかということは古くからいろいろと議論されてきている。昔から指摘され、また実際に認められているのは、この学問が資源・エネルギーおよび環境に大きく関わっているという点であろう。さらにまた、ある種の生物学関係の研究のように、自然そのものに直接取り組む姿勢、平たくいえば、野外科学という研究方法にもこの学問の特徴がある。すでに想定されたある考えを野外科学の研究過程で実際に証明するという仮説検証型の研究もあるが、それとは別に、何か新しいことを発見し、その事実に基づいて新しい考えを出す仮説提唱型の研究も少なくない。いずれにしても、常に自然をよく見るということの重要性は自然科学のすべてについて、科学的研究と呼ばれる作業がはじまって以来、ずっと続けて主張されている点でもあり、その意味では野外科学は学問の原点でもある。

ごく最近になって、私たち一人ひとりが、地球という生活空間と人類という生物との関わり合いに強い関心と自覚をもつようになり“かけがえのない地球”などという表現を使って、この地球を別の面から見直すようになってきた。果てしない海洋も、見渡す限りの地平も、最近の人類の活動からみると限られた狭い空間となってしまった。また何世紀も先の問題がやがてやってくる明日の課題として、頻繁に議論されるようになってきている。科学技術の発達によって、時空のスケールが大きく変わったためである。

そのような状況になった今、地質学や地球科学は他の学問分野と異なってどのような点で人類に貢献できるであろうか。私たち人類に解決を迫られている問題の中で、数学者でも物理学者でもできない。しかし、地球科学者や地質学者ならば出来る問題、それは何であろうか。ここで話題として解説するのは、そのような種類の問題の一つとされている非常に長い期間にわたるものの変化にまつわる問題である。

私たちが知りたいと思うこと、それらすべてを実際に室内で実験し、確かめることができれば、学問は著しく

進むであろう。事実、この数世紀の間、科学はこの手法によって、新しいことを発見し、その因果関係を確かめながら、自然科学の体系をつくり上げてきた。それは大変な進歩であった。しかし、これまでの実験的な検証を積み重ねて試みられてきたその手法によって、今後の数百年や数千年先のことを予測することができるであろうか。科学の歴史はまだ浅い。近代科学がまだ手をつけていない事柄は数限りなくある。そのような長い将来のことを、現在の知識や経験だけから、予測するとなると、今の科学や技術はほとんど無力に等しい。かなりの確実さでものが言えたとしても、それはたかだか、この100年ほどの蓄積の結果に過ぎない。それより長い期間にわたる現象については、技術はいうまでもなく、自然科学の理論は甚だ頼りない。私たちの経験はそれほど浅く、また、短いものなのである。

人類の歴史や私たちの体験に比べると、自然現象は比較にならないほど長く、大きな規模で起こっている。今、仮に、自分たちの知りたいことと似た現象がどこか自然界で起こっているに違いないと考えてみる。例えば、今から500年、あるいは1000年前にある変化が始まったと仮定し、その結果を調査し、結果を知り得たとして、そのようにして得られた結果は、それと同じ現象が今日起こり始め、そして500年先あるいは1000年先にどうなるかという質問に対する回答になる。それは自然界でなされた長時間の実験結果とみなすことができる。その種の事象について、いろいろな場所でいろいろな期間にわたった変化の例を丹念に探し出し、検討結果を系統的に整理すれば、きっと室内実験や理論的な計算では知ることができない事実が得られるに違いない。

野外の事実に着目し、それを自然の行った実験結果とみなし、観察事実を解析し、私たちの知りたいデータを抽出するには、膨大な知識体系が要る。長い伝統的な学問の作り上げた知識とその蓄積から組み立てられた体系である。もちろん、それには物理学や化学の助けを借りなければならない。しかし、物理学や化学だけでは問題の解決に迫ることはできない。ここに、地質学が登場する意味がある。長期間、大規模に起こった自然現象を調べ、その本質を見極めることができるのは地球を相手にしてきたこの学問、地質学以外にはない。

自然界を調べ、その結果を参考に計画を立て、工事を行うといったことは昔から人間社会の中では、普通に行われて来たことであった。しかし、よく考えてみるとわかるように、そのような計画は、その時対象とした自然の姿を動かないもの、変わらないものと見なし、立てられたものであった。その考えは誤りではない。施設の耐用年数と自然の変化速度を比較してみると、十分

にそれでことを決めていくことはできた。また、そう考え扱うことも許された。しかし、私たちが取り扱う問題すべてについて、そのように考えることが許されるわけではない。自然は動いているという認識がまず必要だという場合もある。

昨今、この種の問題で最も焦眉の問題とされているのは、廃棄物処理である。とくに、高レベル放射性廃棄物の地層処分と呼ばれている一連の問題である。現在のところ、あらゆる種類の廃棄物は、宇宙空間・海洋投棄などを合せて検討された結果、結局は関係する地域ごとに地下に埋め込む方法しかないといわれている。その時、地下で何百年、何千年先に、どのようなことが起こるであろうか。「地下に埋め込む」ということは、単に私たちの視界から隔絶し、手に触れないようにするという事以上に、科学的にはどのようなことを意味しているのであろうか。安全を保证するためには、どのようなことを考えて手を打たなければならないか。このような質問やあるいは要望に、地質学関係の研究者は応えなければならない。風化作用や統成作用といった自然界で普通におこっている変化現象を手掛かりにして、この問題にどのように応えていくかを、述べてみよう。

3. 変化や変質をどうとらえるか

3.1 “もの”の状態と変化

私たちが通常取り扱う物質は、その性質や状態が多の場合わずかに変動している。時には、その変化を見たり、感じたりすることができる。風や雨といった気象は一番わかり易い例である。ところが、石や岩という固体物質となると、その感じは著しく異なってくる。プレートテクトニクスの考えが確立して、多くの人々はみな大陸が移動することを頭の中では理解するようになった。動かざること大地の如し、などという表現はもう使えなくなっている。たとえ直接に目で見ても変わっていないように見えても、ゆっくり徐々に動き、変化していく現象はよくある。そして、あらためて強調されなくても、そのようなことも十分に理解している積もりである。しかし、実際自分の身の回りのことになると、必ずしもそうではない。新しく建てた記念碑やビルディングは、何時までも建てた時のように美しく輝いているものであると思っている。そんなことはあり得ないといって説明しても、やはり、感覚的には今の姿のままと思いがちである。

森羅万象ことごとく変化を続ける。それは真理である。それが分かっているにも、それをどのように科学的に解析していったらよいか、そして、その結果をどのよう

に利用していったらよいか、戸惑うことは少なくない。

一般に、ものが変化している時、動いている場合、それをどう考えるか、どう取り扱うか—基本的には2つの立場や方法がある。それは物理化学では、熱力学的な立場と速度論的な立場と呼ばれる。それについての基本的な問題点をはじめに解説し、筆者の考えを述べておこう。

3.2 変化や反応は何処へいくか—熱力学的な考え

ものが動いている時、一つの関心はそれがどこへ行くかということにある。最後にどこに到達するかが分からないと不安であることは、旅行を想定してみればわかる。ある反応や変化の終点、そこへ到達してしまえば、あとは何の変化も起こらない、そういう所が必ずあるはずだ。そこでは安定に問題の物質が存在しうる—そういう所、そこはどこであろうか、どういう状態であろうか、その終点を知り、それに基づいて議論するのが熱力学的な考えである。

地質学においても、この考え方は大きな流れをつくってきた。とくにその応用として、相平衡の概念が使われ、野外における変成岩岩石学の分帯に使われた。つまり、次のような論理である。「①ある所にある物質が存在する。②それは、その鉱物が出来た時に、その鉱物がその条件で安定であったからであろう。それ故、③その鉱物の存在することは、その条件がどのようなものであったかを推定するのに大変役立つ。一方、④実験によってその鉱物が安定に存在しうる条件を求めることができる。そして、その結果、その鉱物がある温度・圧力条件下で安定・平衡に存在することが明らかになる。⑤それを天然の状態に戻して考えてみる。そしてある場所にその鉱物があったことは、その場所がかつて実験で知られていると同じような温度・圧力条件にあったことを推定することを許す。」

このような考え方や攻め方は正しいとは思われないが、学問の発達史からみれば、上のように仮定して話を進めることは進歩の段階として当然のことであろう。変成岩岩石学ではこれに加えて、変成相系列という概念を導入して、広域的に変成作用の問題を論じた。それはその学問としては大変に大きな実りのある議論であった。しかし、上の論理は、大変に勝手な都合のよい理屈を含んでいる。とくに、②と③のところである。それは、ある外的条件が与えられた時、例えばある温度・圧力条件にその物質がおかれた時、理想的にはなるべく速くその条件下で平衡で安定になるように反応が進んで欲しいという願望がある（その条件で平衡ということはそれを意味する）。しかし、実際にその条件が未来永劫に継続するとはとても考えられない。その条件はいずれ変わって

いく。事実、例えば、問題の変成岩は野外（つまり地表の温度圧力条件下）で採取されている。それ故、最初の与えられた外的条件は、すでにかかなり変化してしまっている。しかし、にもかかわらず、一度、平衡・安定になったものは、二度ともう変わらないで欲しいという次の、別の、願望がある。とくに、後者、つまり、次の条件になった時には、反応は進んで欲しくないという願望は実に勝手な願望といわなければならない。換言すれば、この2つの願望は全く矛盾する。だから、あくまでそれは願望にしか過ぎない。理論的な体系をなしてはいない。

しかし、それでもそこに反応速度の知識を借りて説明をすれば、ある程度の近似は許されそうである。反応温度の高い変化や物質移動の媒体の役割を担う水を伴っていない反応では、上のような仮定に基づいて議論を進めても大きな間違いはない。ただ、このような取り扱い、低温常圧での反応の場合、まったく成り立たない。ものが変わるといっても、対象として変成岩を考える場合と堆積岩の場合とでは、その考え方や研究の方法はまったく異なる。それは、堆積岩では反応温度が低く、さらに、物質移動の媒体としての水の存在を無視できないからである。

3.3 変化や反応はどのような速さで進むか—速度論的な考え

変化の最終点に着目する平衡論や熱力学的な考え方に対して、その状態に到達するにはどの程度の時間がかかるか、という立場から議論をするのが速度論的な考え方である。

この考え方では、岩石の中に、ある鉱物が含まれているか、いないかという存否によって、岩石の区別や分類を行うことは行わない。岩石の中にその鉱物がどの程度の割合で含まれているかということを中心とする。また、空間的に考えれば、その鉱物がどこで多くなり、また、どちらの方へ減少していくかという風に議論が進められる。つまり、鉱物の存在に関しては量的な取り扱いがなされるのである。

速度論的な取り扱いをするためには、現象をきめ細かに丹念に見ていかねばならない。大変に面倒な作業を要求する。しかし、時間軸上のあらゆる点において議論ができるので、実際の問題を論ずる際には、欠かすことができない。理想的には、ある変化現象を研究する際には、熱力学的な取り扱いと並行して、速度論的な研究が進められる必要がある。にもかかわらず、この種の研究は比較的少ない。速度論的研究や実験には大変に手間と時間がかかるからである。反応の速度を決める律速段階や律速因子は非常に多い。それが実験を進める過程で次々と分かってくる。そして、結局、限られた期間のあ

いだに満足した結論を出すことができなくなってしまふ。ありとあらゆる場合について実験を試み、議論を尽くすことは出来ない。ひょっとしたら、何か重要なことを見落としていたり、忘れていたりしているかも知れない。さらにまた、反応速度が著しく遅いと、実験結果を得るために非常に長い時間がかかる。ほとんどの人はその種の実験を好まない。辛抱強い努力が要るからである。そのような仕事の意義を認めてくれる理解者や雰囲気がないところでは、精神的に参ってしまう。

現在、私たちが直面しているのは、さらにもっと長い時間にわたるきわめて緩慢な変化過程である。実際には、一人の人間の寿命をはるかに超えた長期間にわたる変化なのである。そのような現象については人為的な実験では、目的とする結果はとて得られそうにない。ではどうすればよいであろうか。ただ一つできること、それは、自然を忠実に観察し、その中から関係のあるデータを抽出することである。それしか方法はない。このような研究はしたがって、必須である。それなしでは事柄の本質は理解できない。

4. 自然界における鉱物の変化現象

4.1 緩慢な変化

プレートテクトニクスや大陸移動説が提唱された時よく次のような議論をする人がいた。それは、大陸が動いているかどうか目で見てもわからないではないか、という言い方であった。そのような認識の仕方では議論をするのであれば、おそらく地球上では変化といえるような現象はほとんど何も起こっていないことになるであろう。地殻で起こっている変化は実に微々たるものである。目で見ただけでは分からない。何年経っても、何の変化も見られないことは普通にある。そのような場合、地殻を造る物質がその条件で安定であり、平衡であると考えられることは許されるであろうか。許されないであろう。正しくないからである。実際は、進んでいる変化がごくわずかであるがために、感知できないのである。このようなことは、地質学ではごく常識的なことである。

このようなゆっくりと進む変化を、ただ、変量が検出できないほど小さいからという理由だけで変化がないとすると、大変な間違いを犯すことになる。つまり、現在まだ平衡にはなっていないで、現象が変化しつつあるにもかかわらず、変化があまりにもわずかであるがために、その系の全体が最終安定な平衡点に達してしまっているとみなしてしまう過ちである。

そのような例としてよく引用されるのは、緩和現象であり、最も分かり易いモデルとして、ばねとダッシュポ

ットとを直列につないだいわゆるマクスウェル・モデルが用いられる。変形を与え、ひずみを一定に保った時、この系は外から見ただけでは何の変化も起こっていないように見える。しかし、決してそれは平衡状態にあるわけではない。内部にはまだ応力が残っている。その応力は徐々に解放され、ゼロに収束していく。いわゆる応力緩和として知られている現象である。

ここでは、もっと身近な例として、フルイを使って砂質堆積物の粒度組成を知る方法について述べよう。フルイを積み重ね、それに震動を与えて、粒度分析を行う時、もし十分な時間をかけないで途中で実験を中止したらどのような結果が得られるであろうか。第1図から理解できるように、正しい答とはまるで異なった粒度組成が得られるであろう。

ここで注意しなければならないことがもう一点ある。それは、実験的研究の結果を評価する際によく言われる再現性ということである。第1図から理解できるように、もしフルイに与える震動の継続時間が同じであれば、別の人が実験しても、また、同じ人が別の日に実験しても、与えられた試料が同じであれば、フルイに残る堆積物の量は同じである。したがって、結果として得られた粒度分布は同じになる。すなわち、この実験には再現性があるということになる。しかし、真の粒度組成を

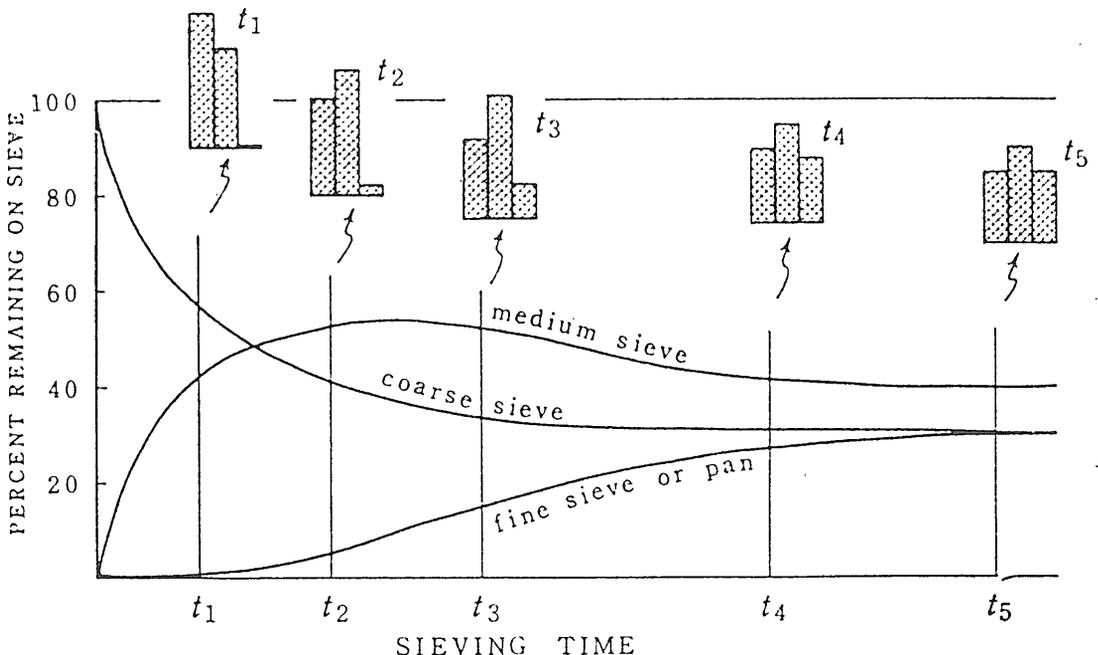
知るという意味では、明らかにその結果は正しいものとは言えない。

以上述べたことがすなわち、ある事象の現在の姿を変化しつつある途中の段階とみるか、あるいは、それを最終結果とみなすか、の立場の違いである。たとえ、わずかであってもその系がまだ最終的な平衡の状態になっていないならば、それは動いているものとして、速度論的な扱いをしなければならない。

4.2 自然の実験とその結果

地球の表層部で起こっている風化作用や続成作用も、他の地質学的な現象と同じようにきわめて緩慢な変化現象である。すでに述べたように、そのような現象の本質は速度論的な取り扱いによって解析されなければならないであろう。あたかも、すでにある安定な平衡状態に達しているように見え、今日も明日も何も変化が起こっていないように見えたとしてもそれはその速度があまりにも遅いからであって、現在、それがそこで平衡になっているわけではない。今もなお、動きつつある変化と考えるなければならない。

このような諸作用を含んだ地球の歴史は非常に長い。そのため、風化作用や続成作用の最終到達点はどこであるかはおおよそ、わかっている。最終生成物についての知識があることは、熱力学的な取り扱いも出来ることを



第1図 フルイの震動時間とその結果得られる粒度分布との関係。2個のフルイと下の受け皿だけを用いた場合。横軸は時間、縦軸は重量百分率。

意味する。したがって、熱力学と速度論との両方の立場を上手く使って、私たちは地球という実験室での実験結果を解析することができるであろう。それがつまり、風化作用や続成作用などの反応速度論的な立場にたった研究である。

5. 化学系からみた変化過程

物質の変化を化学系としてみた場合、物質の移動や熱エネルギーの出入を考慮して、わかりやすく孤立系と閉鎖系と開放系に分けて考えることが多い。後述する問題の解説に使われるので、ここで簡単にその定義を説明しておく。

孤立系では、変化する“もの”の量は、ただ経過する時間のみ依存する。温度とか圧力とか、水素イオン濃度とかには関係しない、といった変化である。そのようなものは、逆にいえば、量を知れば経過時間がわかるような種類の変化である。つまり、時計の役割を果たすこともできる。砂時計がモデルとして、最もわかりやすいであろう。地球科学では周知のように同位体年代が使われているが、これはとりもなおさず孤立系での変化である放射性元素の壊変現象を利用したものである。

閉鎖系では、その系への“もの”の出入りはない。しかし、そこへ熱エネルギーが出入りするのを許す。熱エネルギーが出入りすれば温度が変わる。すなわち、反応速度に顕著な温度依存性がみられるようになる。それはアレニウスの式で表現され、また、反応については、その活性化エネルギーを論ずることになる。物質の移動を考えない同質異像の変化現象はこの閉鎖系での反応である。

開放系では、その系への“もの”の出入りも自由にあるものとする。したがって、温度依存性に加えて、環境依存性も考えなければならない。反応速度は、物質の移動によって生ずる環境の変化を鋭敏に反映して変わるからである。開放系での変化を研究する時には、いろいろな因子について検討を加えなければならない。当然であるが、面倒な解析が必要となる。

実際に私たちが現実の問題とする変化現象のほとんどは、開放系である。すなわち、顕著な物質移動を伴った非平衡の現象である。しかし、いきなり一般性のある理解困難な現象に取り組んでも解決はできないであろう。筆者自身も仕事の過程で、簡単な系から複雑な系へと研究を進めた。手法としては、モデルを考えたり、それに基づいて計算をしたり、実験を試みたりしながら、仕事を進めた。結論的にいえば、簡単にみえる自然現象の解析が、実験やモデルによる研究よりも、実際には最も手

間がかかり難しい。しかし、自然現象の解析結果は何によっても替えることができないほど、貴重である。

6. 表層過程における変化過程のいくつかの例

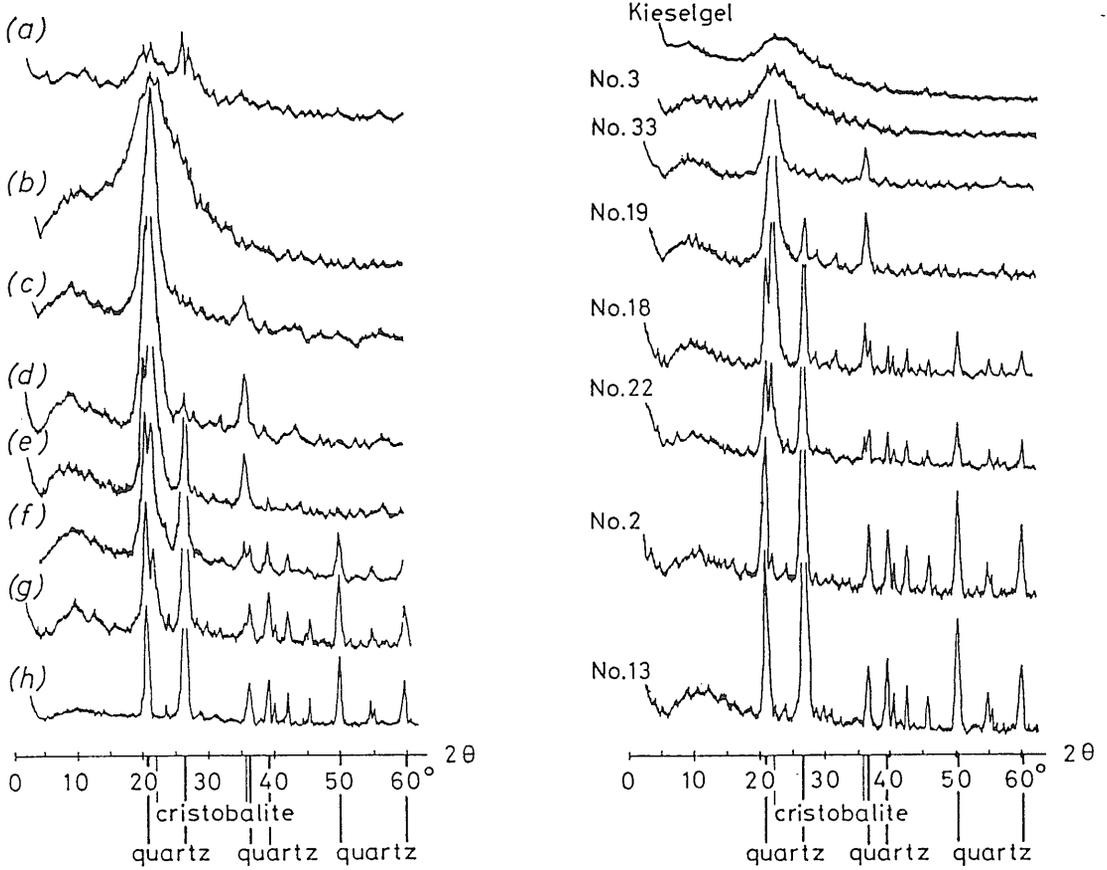
6.1 表層過程

表層過程は、地球の表層部で進んでいる大きな物質循環の一部であり、その上半部を担っているのが、風化作用、運搬作用、沈積作用、そして続成作用である。明らかに、ここでは流水の役割は大きい。ほとんどが地表付近の温度圧力の条件下で起こっている。物質の化学的变化という面からみると、上の全作用は開放系の非可逆過程の変化である。

運搬作用や沈積作用は肉眼で観察できる程度の速さで進んでいる。一方、風化作用や続成作用の過程は直接観察できるほど速くはない。故に、表層過程の各段階をすべて通して見ることはできない。しかし、いろいろな地質時代の地層を調べ、それらを年代の順に並べたり、あるいは、生成環境に従って堆積岩を系統的に分類すると、何千年もかかって固い岩石が風化によって分解されたり、逆に、何百万年もかかって柔らかい泥や砂のような堆積物が泥岩や砂岩のような固い堆積岩になることが分かってくる。問題はそのような変化がどれほどの速さで進んでいるか、ということである。

表層過程をこのような見方で取り扱うようになったのは比較的最近のことである。例えば、ある教科書には、「千年」という目盛りのついた時計が風化作用の説明に使われており、また「100万年に何メートル」という目盛りのついた速度計が構造運動や浸食作用の説明に使われている。これらの現象を理解するには、このような目盛りのついた時計が必要であろう。例えば、火山の爆発記録が明らかであれば、火山源の堆積物が風化によって粘土となる変化速度はかなりの確からしきで推定することができる。また比較的若い堆積物中の礫の表面の風化現象を調べることによって、表層過程での風化速度を検討することは可能であろう。

このような過程を反応速度論的な表現で示すことはできないであろうか。また、天然の実験結果から、速度定数あるいは活性化エネルギーを推測することはできないものであろうか。もし、ある程度の確からしきでその数値を知ることができたら、それを基にして、計算機を用い、風化や続成過程における変質のシミュレーションはできないであろうか。信頼のおける数値が得られれば、それを用いれば、これからさきの将来のことを推定することができるはずである。それがこの一連の研究の目的である。



第2図 天然にみられる珪酸鉱物(左)と珪酸物質の熱水条件下での変化(右)のX線回折図。右図の上から下へと、反応が進んでいく段階にしたがって配列。また、左図の上から下へ、だんだんと地質時代の古くなる順に配列。(a)第三紀中新世珪藻土、(b)現世噴気口珪質沈澱物、(c)第三紀中新世珪質結核、(d)第三紀中新世珪化木、(e)第三紀中新世珪質結核、(f)第三紀中新世珪質板状結核、(g)第三紀中新世珪質結核、(h)中生代白亜紀珪質結核。

ともあれ、実際に自然の中で見られるいくつかの現象ならびに筆者の研究した結果を例として挙げながら考えてみよう。

6.2 続成過程における珪酸鉱物の変化

(a)熱水条件下における珪酸鉱物の変化

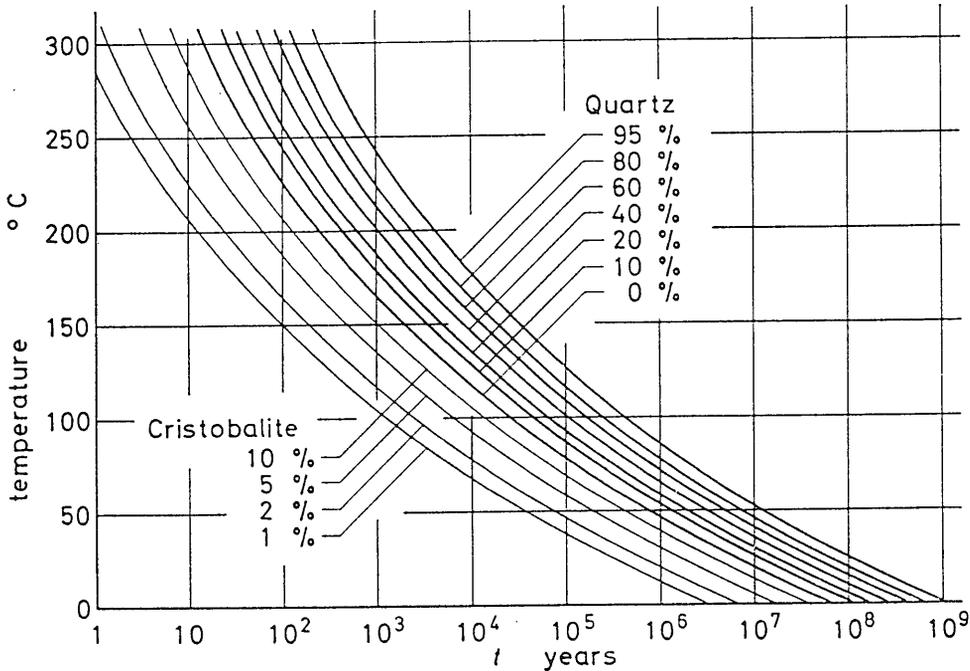
珪酸鉱物にはいろいろな種類があり、堆積物や堆積岩には、非晶質の珪酸、やや結晶質になったもの、石英の3種類の物質が産出することがわかっている。ここでは、これらの珪酸物質をそれぞれA、C、Qと便宜的に略記する。

出発物質としてAを使って、熱水条件で実験をすると、これはA→C→Qと変化する。その過程はX線回折で追跡することができる。その変化の過程は自然の珪酸物質のそれと大変によく似ている。そして、地質時代の若い地層にはAが多く、古い時代の珪質堆積物の中にはAはなくて、ほとんどQばかりであることから、このA

→C→Qの変化は続成作用によるものと考えられている(第2図)。

熱水実験によると、A→C→Qの変化過程は、一次の逐次反応モデルで近似的に示すことができる。しかし、その変化速度は明らかに温度によって差がある。反応時間と反応温度の関係は、温度が高いと反応は速く、低いと遅いという明瞭な温度依存性があることを示している。この実験の各段階における生成物を検討し、定量的な議論をすることによって、この変化過程における速度論的な関係を導くことができる。すなわち、この逐次反応の前段のA→Cと後段のC→Qの2段階について、活性化エネルギーや頻度因子を求めることができる。

この実験結果は、変化過程としては天然のそれと大変よく似ている。しかし、限られた期間に結果を出すという室内実験であるために、溶液の成分を著しくアルカリ性にし、また、温度を高くして行ったものであるため、



第3図
自然界における
A→C→Qの変
化の温度依存
性。横軸は時間
(年), 縦軸は温
度。図中の曲線
はそれぞれの鉱
物の含有量百分
率を示す。

その結果をそのまま、自然界にあてはめることはできない。

(b) 天然における珪酸鉱物の変化

自然界においても、上述の実験と同じようなことが起こっているように考えられる事実がいくつもある。例えば、火山の噴気口には珪酸物質が集散的に沈澱していることがある。その珪酸物質は新しくできたばかりであると、X線回折像ではAの結晶構造を示す。しかし、温度の高い噴気口で、1年も前に沈澱したものでは、X線回折像でCを示す。いうまでもなく、数千万年も経っている珪質堆積物では、低い温度におかれていたものでも、ほとんどの珪酸物質はX線回折像ではQを示している。

これらの試料を検討して、温度と経過時間を軸にして、おおよその関係をプロットし、そして、実験で得られた結果を使って、計算すると第3図が得られる。つまり、第3図は天然におけるA→C→Qの変化過程を図示したものだということになる。

以上の実験と議論で得られた結果は、天然にみられる続成作用の結果と比較検討された。そして、天然においても、このA→C→Qの変化が一次の逐次反応であると考えても矛盾はないことが明らかになった。これは、言葉をかえると次のように表現することができる。すなわち、天然が行った実験結果を調べて、反応式と速度定数ならびに活性化エネルギーと頻度因子を推定することができ、次のような値を求めることができる。

A→C : 活性化エネルギー=16 kcal/mole,
頻度因子=2.37×10⁴ year.

C→Q : 活性化エネルギー=16 kcal/mole,
頻度因子=7.11×10⁴ year.

以上の研究は、特別に異常な自然条件でないかぎり、この結果をそのまま天然の珪酸鉱物の続成作用の変化過程追跡のために、計算に使うことができることを示している。

6.3 熱水条件下における粘土鉱物の変化

(a) セリサイトがカオリナイトを経てパイロフィライトへ変わる変化

熱水条件下での鉱物変化の実験的研究のもう一つの例は、出発物質としてセリサイト(以下Sと略記)をとり、これを熱水条件下で溶液内で反応させて、カオリナイト(以下Kと略記)に変え、さらに実験を続けてこれを最終的にはパイロフィライト(以下Pと略記)に変えるという一連の変化である。

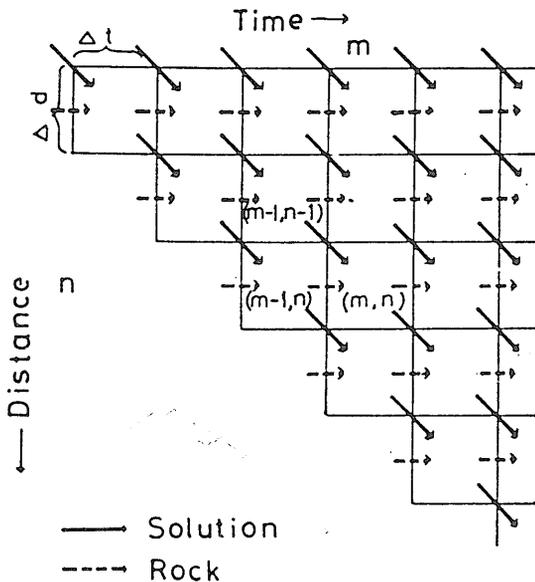
このS→K→Pの変化は、化学式を書いてみれば明らかのように、反応が進むに従って溶液の化学組成が変わる。実験によっても裏書きされたが、この反応の速度は溶液の化学組成によって異なる。すなわち、この変化過程では、反応が進み、その結果として溶液の成分が変化し、また、その結果として、反応速度が変わる。時間の経過とともに反応速度も変化していく現象である。このことは、次のようにも言える。反応の系内に物質が移動

して出入りすることにより環境条件が変わる。そして、その結果として速度定数が変わる。つまり典型的な開放系の反応なのである。

(b)開放系での変化の過程

このようにして得られた実験結果をどのように使えば意味のある議論ができるであろうか。開放系の反応は、時間がたつ、反応が進む、環境が変わる、速度定数が変わる、そして、また、時間がたつ、生成物ができる、環境が変わる、という順に進んでいく。そこには溶液が存在する。溶液は空間を移動する。さらにまた、温度が変化すると、それだけで反応速度は変化する。やはり、独自の温度依存性があるからである。問題の系が独自の熱史をもつことになると、反応はさらに複雑になる。

このように溶液を媒介して物質が移動する系での変化を第4図のように考えてみよう。この図は時間の軸と空間(1次元)の軸をとって表現したものであるので、イメージとしては、次のように想像すると理解し易い。すなわち、地表があり、上から雨が降ってきて地面にしみ通り、そこで土と反応し、ものを溶かし、あるいは、そこでものを沈澱する。雨水は少しずつ深部へ入っていく。長い期間経つと、上部の土はすっかり成分が変わってしまうであろう。しかし、まだ水分のしみ通っていない深部では、以前と同じ処女の土が存在するはずであ



第4図 溶液を媒体とし、物質の移動を伴う変化過程—開放系の変化、実線は溶液の移動を示し、破線は岩石あるいは固体成分の移動を示す(ここで移動というのは、この時間・空間座標内の移動を意味する)。横軸は時間を表し、縦軸は空間(深さなど)を示す。

る。しかし、それはいずれしみ通ってくる溶液によって変質を受けるであろう。こうして結局は全体が変質していく。

重要な点は、この過程で土と反応する雨水の組成も少しずつ変わっていくことである。その量的な変化はきわめてわずかであるが、しかし、長い間かかって変わっていく蓄積効果を考えると、たとえわずかであっても、それを無視することは許されない。そのわずかな変化も十分に考慮に入れて、計算してみる必要がある。

第4図に示した座標内の枠(m, n)では次のような反応が起こっている。すなわち、(m-1, n-1)の枠でΔtだけの時間反応した固体と溶液のうち、溶液は次のΔtに別の枠の中の固体と反応するために下方へ、つまり深い所へしみ通っていく。ただし、この図ではその溶液の動く方向は斜め右下方向となる。こうして移動してきた溶液は枠(m-1, n-1)での反応を終えている。しかし、そこで十分に長く滞在していたわけではない。その枠内で平衡に達してしまっただけではない。そのような溶液が新しい枠(m, n)に入ってくる。一方、この枠内の固体というのは、その時刻の一単位時刻前には、枠(m-1, n)にあったものである。破線として、この座標の中を移動したかのように示されているが、それは時間が一単位時刻動いたためである。

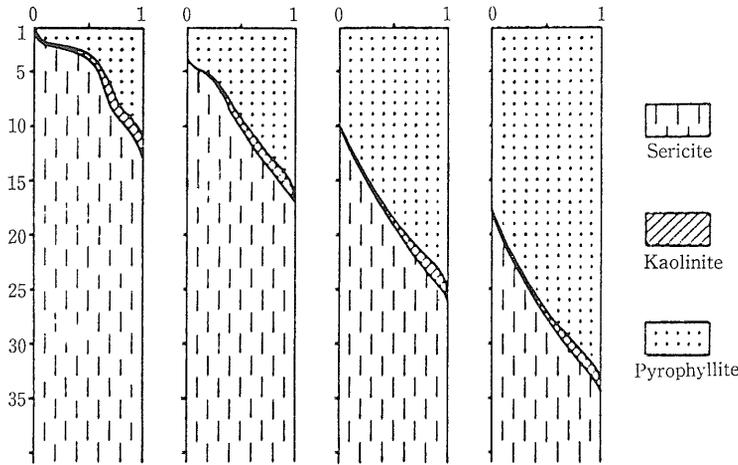
このようにして枠(m, n)で起こるであろう反応は、その固体成分と溶液成分とを考えると、この図内のどここの枠で起こる反応ともごくわずかに異なっている。環境条件がみな異なる。つまり、すべての枠内での反応速度定数は、わずかであるがみな異なっている。そして、起こる反応の反応速度はごくわずかに違うのである。

(c)モデルと計算

実験によって求めたS→K→Pの変化過程とその速度論的データを使い、さらに上述の開放系の図式に従って反応が順次起こるとして、計算によってその変質過程を追跡することができる。その結果の一つをまとめて図で示すと第5図のようになる。

この変質過程は、次のようなモデルを想定して計算してある。空間の次元は一次元であるので、具体的なイメージとしては、円柱を考えるとよい。その中心に細い管状の空間が通っている。そこを熱水が通過する。円柱の伸びの方向はすべて同値とする。この中心の管から円柱の周囲に向かって溶液がしみ込んでいくと想定する。空間の次元は円柱の中心から円柱の外周に向かう一方に限定する。すなわち、中心から同心円状の鉱物の変質帯ができる場合に相当する。

この計算をさまざまな場合を想定して行ってみると、次のようなことに気付く。すなわち溶液の量が十分にあ



第5図 過剰の珪酸を含むセリサイトからなる岩石が、熱水作用によって変質する過程（計算に用いた各種の定数は省略）。それぞれの柱状図は、横軸が鉱物組成（セリサイト+カオリナイト+パイロフィライト=100%）、縦軸が距離（深さなど）。左端の柱状図は反応が始まってから、50日後、その次は100日後、200日後、右端は300日後のモデル計算結果。

る場合は、変質速度や反応速度を決めるのは実際には溶液の浸透速度だということである。物質移動の媒体として、溶液が大きな役割を果たしていることにその原因がある。逆に、もし反応系に関与した溶液がほとんど動かなかつたら、どうであろうか。そのような系では一部が変質し、変化が起こるだけであろう。大部分はもとのまま、何も変化しないで残っているであろう。

この実験結果は、熱水条件での“もの”の変化を論ずることは、たとえ開放系であっても、可能であることを示している。室内実験は大変な手間がかかり時間もかかるが、現象論的には計算結果と自然界の事実との比較は可能である。また、低温ではあるが、風化作用のような明らかに開放系での反応や変化過程について、適当なデータさえあれば、検討ができることを例として示している。

6.4 風化作用による頁岩の変化

(a) 風化断面の実態

新しく山麓につくられた切り取り斜面などには、しばしば見事な風化帯の断面が見られることがある。ここで紹介するのはそのような例で、黒色頁岩を母岩とした風化帯の実例である。当然であるが、山麓部とはいえ地表から離れた深部では、風化の影響をほとんど受けていない新鮮な岩石が存在する。それは地表に近づくにしたがってだんだんと色が変わり、地表部では土壌と似た性質の、著しく風化したものになっていく。

風化帯の発達状況は肉眼でもその色調の変化として認められるが、構成物質がどのように変化しているかを知

るには、詳細な検討が必要である。よく行われるのは粘土鉱物の研究であるが、それはこの鉱物が風化作用の影響を受けて敏感に変化することが知られているからである。

ここで例として挙げるのは黒色頁岩の風化過程であり、その母岩は石英、長石、緑泥石、イライトを主な構成鉱物としている。地表から約10m以上深いところではこの母岩はまったく新鮮で黒い。風化を受けると徐々にその色や物理的性質が変わっていく。色は褪せていき、やや鶯色を帯びた灰色から褐色を帯びた黄色へと変わる。また固い黒色頁岩は脆くなり、そして最後は土のようにむしろ塑性をもつようになる。この色の変化は露頭から離れて眺めるとよくわかるが、大体地表から10mの深

さから3mの深さまでがやや風化した帯、それより浅い地表に近い部分が著しく風化した帯である。切り取り斜面は、おおきくみてこのように新鮮な部分を含めて3帯に区分できる。それを下から帯Ⅰ、Ⅱ、Ⅲと書くことにしよう。3つに分けられた風化帯の特徴はまた、その鉱物組成にも反映している。すなわち、帯Ⅰと帯Ⅱと帯Ⅲとはそれぞれその帯を構成する粘土鉱物が異なっている。粘土鉱物だけとると、帯Ⅰは緑泥石で、帯Ⅱはパーミキュライトで、そして、帯Ⅲはカオリナイトによって特徴づけられる。

(b) 風化帯の発達と風化の速さ

これらの風化帯を構成する物質はある条件下で平衡に達した最終の形成物ではない。いまなおわずかではあるがこの風化帯は下へ下へと、あるいはより深くより深く動いている。一体どの位の速さでこの風化帯は動いているのだろうか。言い換えれば、どの位の速さで緑泥石はなくなり、パーミキュライトができ、また、さらにカオリナイトが生成されるのであろうか。

風化帯の発達は地形と密接な関係をもっている。それは常々体験するように、沢を歩くことによって、新鮮な露頭に遭遇することが多いことから想像できる。つまり、沢には流水がある。流水は谷を作る。そこは浸食が続いている。もし岩石が風化したとすると、その部分は他の新鮮な部分よりも柔らかく浸食され易い。たちまち浸食されて風化した部分は除去される。そして新鮮な露頭が顔を出す。

逆に、風化は進んでいるが、浸食作用のまったくない

ところを想像してみよう。そこでは風化作用がひたすら深く深く進んでいくであろうが、その結果出来た風化生成物は浸食作用がないため、除去されない。そして風化帯はどんどん厚くなっていくであろう。

このように考えると、すでに述べた地表から約10mの風化帯というのは、ある速度の浸食作用とある速度の風化作用の兼ね合いの結果として形成されるのであるということがわかる。ある適当な値よりも、もっと風化作用の速度が速ければ、風化帯の厚さはもっと厚くなるであろう。反対に、もっと浸食作用の速度が速ければ、風化帯の厚さはもっと薄くなるはずである。

ここで、この風化帯の調査結果が得られた地域（岐阜・滋賀県境：関ヶ原から米原にかけての地域。鈴鹿山脈や養老山脈の地形で知られている）の地学的特徴について考えてみよう。この地域をつくっている地質は、いわゆる美濃帯の中・古生層であって、その大部分はジュラ紀末から白亜紀にかけてアジア大陸の東縁にできたものであることが明らかになっている。しかし、この地域の地形を決定的に決めたのは、もっと後のことであり、今からはば100万年頃である。それは、この地域に分布する約100万年前の地層が山系の形成に伴って、著しく変位・変形していることから推定できる。この時の山系の形成は本質的には高角度の断層を伴った地塊運動であった。そのため、鈴鹿山脈や養老山脈には一部、隆起準平原と考えられる地形が残っている。とくに、鈴鹿山系をつくる石灰岩の地域に顕著なものがみられ、この山系の高所にある平坦な地形の特徴は接断面によく表現されている。

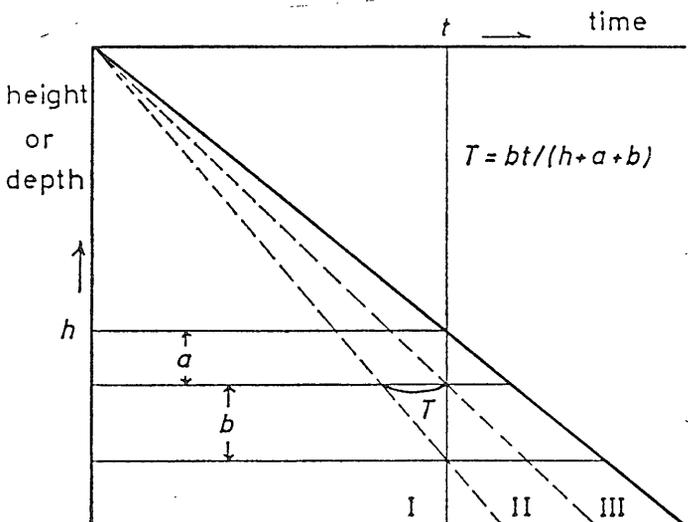
そのような地史をもった山地の現在の断面形態をみると、この100万年の間にこの地域がどの程度の浸食作用を受けたか推定することができる。すなわち、今から約100万年前に、この地域には地塊運動により地塊山地ができた。浸食作用はそれから徐々に進み、現在の地形を造った。山地を構成する地質にしたがって、浸食を受けやすいところもあり、また受けにくいところもある。石灰岩のところは古い隆起準平原の特徴を残すとされている。また、チャートの露出しているところは峰をつくっていることが多い。いうまでもなく断層が走っているところは、選択的に浸食が進んで、ほとんどが谷や沢になっている。そのような部分を区別して、砂岩や頁岩が卓越して分布するところを調べてみると、おおよそ、ここでの浸食速度は100万年に600m程度であ

ることがわかる。

すでに述べたように、浸食速度と風化速度には深い関係がある。この地域の風化帯は、もし上で推定したような値よりも浸食速度が小さかったら、おそらく地表から約10mの厚さではなくて、もっと厚くなっているであろう。逆に、もし上で推定したような値よりも浸食速度が大きかったら、おそらく地表から約10mの厚さではなくて、もっと薄くなっているであろう。極端に浸食が速ければ、現在の川床のように新鮮な岩石が露出し、風化帯などはまったく見られないはずである。

すなわち、風化帯が帯Ⅰ、Ⅱ、Ⅲと分けられ、それらが地表からそれぞれ3mと10mの深さにある境界によって境されているという観察事実は、ある値をもった風化帯の発達速度とまた別の値をもった浸食速度との兼ね合いによって決まった、変化しつつある現象の現在という時間的断面を見た結果なのである。

このような考えに基づいて、第6図から、下のように帯Ⅱの存在期間を見積もることができる。帯Ⅱは、すでに述べたように、パーミキュライトによって特徴づけられているので、帯Ⅱの存在期間というのは、とりもなおさずパーミキュライトという粘土鉱物が形成されはじめてから、それがなくなっていくまでの期間である。その期間の長さをTで示すと簡単な三角形の相似から、 $T = bt / (h + a + b)$ となる。野外調査の結果から、 $a = 3m$, $b = 7m$, $h = 600m$, $t = 1,000,000$ years, という値がわか



第6図 風化作用と浸食作用との関係を単純化して示したもの。横軸は時間、縦軸は距離（深さ、あるいは高さ）。風化の速度が浸食の速度よりもわずかに速いとして、両者の関係が示されている。左上の原点は風化作用の開始された時点を示す、また、tは現在の時点を示す、Tの長さは風化帯Ⅱの存在期間。

っているの、それを入れると、 $T = \text{約}11,000$ 年となる。つまり、これが帯II, あるいは、パーミキュライトの寿命である。

(c)速度論的モデルとの比較

この風化帯は鉱物組成の変化をみると、次のような変質過程によってでき上がっているようにみえる。緑泥石 \rightarrow パーミキュライト \rightarrow カオリナイト, これを以降、 $C \rightarrow V \rightarrow K$ と書くことにしよう。このような反応が実際に起こるかどうかもまだはっきりとは分かってはいない。例えば、カオリナイトの一部はパーミキュライトから変わるのではなくて、長石からできたのかも知れない。緑泥石はただ融けて分解するだけであって、新しく何か別の鉱物になるわけではないのかも知れない。しかし、このような反応が絶対がないという証拠もなく、一部は実験的にも確かめられているので、ここではこの反応が実際に起こると仮定して考察を進めてみよう。

風化作用のような現象は、これまで述べてきたように、化学反応としては開放系での非可逆的な動きつつある反応である。この場合、地表あるいは地表近くで進んでいる変化であるから、多分、熱史とか温度のことはそれほど気にしなくてもよい。むしろ、問題となるのは開放系としてどのように取り扱えばよいか、という点である。例えば、ある条件下である反応の速度定数が求まったとしよう。しかし、それをそのまま開放系の反応に使うことはできない。何らかの工夫をし、手を加えて、論理的に矛盾のないように開放系への適用を考え、拡張してやらなければならない。そのような背景を考えて、この場合、筆者は次のように想定した。まず $C \rightarrow V \rightarrow K$ を近似的に一次の逐次反応と仮定する。次に、開放系における変化を想定して、それぞれの速度定数は時間とともに変化すると仮定する。一般に風化作用は、現象的には徐々に加速的にその速さが増す傾向がみられるので、速度定数は時間とともにわずかに大きくなっていくであろう。

以上のように想定し、筆者は問題を次のように解いてみた。既知の値は、風化帯の中にパーミキュライトが存在する期間、約11,000年である。いろいろな値を使って試行錯誤を繰り返した結果、最も観察した事実に近い値は、次のようになった。すなわち、

$$C \rightarrow V \text{ の変化の速度定数 } k_1 = 2 \times 10^{-4} + 2 \times 10^{-7}t$$

$V \rightarrow K$ の変化の速度定数 $k_2 = 1.6 \times 10^{-5} + 2 \times 10^{-8}t$ ただし、 t は風化がはじまってから現在まで経過した年数であり、それを含む第2項は速度定数の、開放系を想定したための、補正項である。本来の風化作用独自の速度定数は第1項で表される。

こうして求めた値は、風化作用における物質変化の速

度を知る手掛かりになる値である。これをおおよその自然界における速度定数とみなしてよい。この値は考えられるものよりも大きいであろうか、それとも想像したよりも小さいであらうか。残念ながら、この質問には答えられない。何故ならば、現在のところ比較するものが全然ないからである。ただ筆者は、すでに述べたように、自然界における続成作用の反応速度について論じた。その時、近似的ではあったが、珪酸鉱物の続成変化に関する速度定数を見積った。それと上記の風化作用の場合の検討結果とを比べてみよう。

・続成作用における珪酸鉱物の変化の速度定数

$$A \rightarrow C \quad k_1 = 2 \times 10^{-8} / \text{year}$$

$$C \rightarrow Q \quad k_2 = 6 \times 10^{-8} / \text{year}$$

・風化作用における粘土鉱物の変化の速度定数

$$C \rightarrow V \quad k_1 = 2 \times 10^{-4} / \text{year}$$

$$V \rightarrow K \quad k_2 = 1.6 \times 10^{-5} / \text{year}$$

上の値は、すでにここで解説してきたことから理解できるように、表層過程の特別な現象を取り上げて話題にし、それから求めた値ではない。現象として検討したのは、ごく身近にある普通の例であり、どこにでも見られる現象である。したがって、代表的な例として、この地殻表層部での変化の速さや遅さを、少なくともオーダーの大ききで比較することはできるであろう。結論的にまとめて言えば、地面の奥深くで起こっている現象と地表近くで起こっている現象とでは、その速さについて速度定数の値を使えば約 10^4 程度の差があると表現できる。具体的にいえば、続成作用にかかわる現象の方が、風化作用に関係した現象より、はるかに遅く、反応に時間がかかる。その差を数値で示せば、速度定数にして、 10^4 程度となる。

7. まとめとあとがき

ここで解説したこと、および、強調したことをまとめながら、問題点である廃棄物処理について触れておこう。

まず、地殻の表層で起こっているいろいろな現象を速度論的に扱い、動きつつある変化として検討した。具体的には、続成作用における珪酸鉱物の変化 ($A \rightarrow C \rightarrow Q$ と略記)、実験による熱水条件下での粘土鉱物の変化 ($S \rightarrow K \rightarrow P$ と略記)、ならびに自然界における風化作用による粘土鉱物の変化 ($C \rightarrow V \rightarrow K$ と略記) のそれぞれの鉱物学的変化である。これらのうち、 $A \rightarrow C \rightarrow Q$ は閉鎖系を思い浮かべながらモデルを考えた。また、 $S \rightarrow K \rightarrow P$ の結果は、一般の開放系における変質過程のモデルを確立するために使った。最後の $C \rightarrow V \rightarrow K$ の変化はすべての

データを自然界から取って、それに基づいて解析し、近似的ではあるが納得できるような数値的データを求めた。これらの研究についてはまだ種々の問題点が残ってはいるが、速度論的な取り扱いの例としては参考になる。

これらの例から理解できるように、反応速度が著しく遅い現象では理論や実験というものはほとんど役に立たない。本質を見極めるには野外の事実を観察し、それを速度論的に解析する以外に方法はない。それを理解し、検討し、解析することのできるの、おそらく地質学の分野の人であろう。少なくとも、その分野の人の助けを借りずには仕事はできないであろう。

このような研究例の示す重要な点は、問題の現象を数式として表現でき、さらに必要な数値を知ることができることである。とくに、その式の中に時間の項を含めて示すことができる点で、きわめて意義がある。つまり、予測に役立つ量的な結果が得られるということである。地面の中で、どのようなことがどの程度の速度で進んでいるか、それを調査することなく、ある決断をすることは、研究者としてはできない。筆者は、いろいろな目的をもった研究を進めるために、地下深所の実験施設が必要であると思っているが、そこで先ず手を付けなければならないことは、ここで述べたような研究である。

さらに、もう一点ある。それは、ここで述べた変化や反応が定常状態で静かに進んでいくと想定したことに関係する。たとえ変化現象が定常的であり、環境変動が連続的であっても、長い鎖はたった一つの弱い環で切れる。開放系の変化速度が化学反応の性質自体よりも、それに係わっている水溶液の移動速度によって大きく左右されるという例からも分かるように、ある変化の律速過程が何であるか、たった一つの弱い環は現象的には何であるかを知っておかなければならない。それが明らかになればその対策を考えることができるであろう。そのような現象を意識的に問題化し、浮き彫りにすることができる

のは、このような速度論的な研究があるからだ、筆者は信じている。

はじめに筆者は水理地質学のことを述べた。ここで紹介したことは、ある名称のついた特定の学問分野の研究ではない。たまたま筆者が堆積物や堆積岩を対象として研究を続けてきているので、この仕事は堆積学の研究だという人がいる。反応速度論がでてくるので、それは地球化学だという人もいる。熱水現象を取り扱っているから、鉱床学だと思っている人もいるらしい。また、問題をわが国の中・古生層から抽出しているので、中・古生層の研究かもしれない。筆者は、そのような研究の位置づけにはまったく関心がない。だから逆にあらゆる分野の人達から興味をもってもらえないのかもしれない。しかし、冒頭で記したように、ある新しい動きがあるとすれば、それを水理地質学と名づけるかどうかは別にして、ここで述べたような仕事がそこで真剣になされなければならないと思っている。

謝 辞

ここでは、筆者の体験と研究を中心として考えを述べた。しかし、実際には動燃や原研関係の方々のお仕事は筆者には大変に参考になった。とくに、動燃の湯佐泰久氏と原子力研究所の中嶋 悟氏には教示を受けた点が多い。また、日頃、このような問題について議論をし、意見を交換している埼玉大学の渡辺邦夫氏、動燃の吉田英一氏、地質調査所の小出 仁と塚本 斉の両氏、基礎工学コンサルタントの長坂勇二氏にはこの機会に心から謝意を表するとともに、今後の一層の御鞭撻をお願いする次第である。

MIZUTANI Sinjiro (1991): On the alteration rate in the near-surface environment.

<受付1991年3月5日>