

資 料

地 質 学 の 将 来 の 展 望*

V. V. Belousov

青 木 斌 訳

地質学は文字どおり地球に関する科学である。しかしながら、歴史的な形成の過程を経るなかで、地質学は地球に関する科学のなかの一部分にすぎなくなった。地球をとりまくガス状および液状のマントルは気象学・海洋学・水理学の手に渡ってしまった。地理部門では地表の発達に関する多くの諸問題を取り扱っている。地表の計測は測地学の分野に属している。このように、地質学の分野にはいわゆる「固体の地球」だけしか残されていない。しかしながら、ここでも地質学者の活動分野は限られている。地質学の土台が築かれた当時、すなわち、18世紀末から19世紀にかけては、地表に露出する岩石や坑道や浅掘りのボーリングによってとりだされた岩石のほか、現世の表層プロセスしか地質学の研究対象となりえなかった。このように、地質学者の活動分野は地殻の表層部と大陸だけにかぎられてきた。

研究対象に応じて、地質学の課題と方法が確立された。地殻上部の組成の研究が第一の課題となったのはいうまでもない。その結果として、地表付近の化学元素の分布や、鉱物や岩石中での出現・結合形態に関する諸概念と造岩鉱物の組成・構造・成因による分類とが生まれてきた。

第二の課題は、地殻の研究、すなわち、地殻内におけるいろんな岩石の分布と産状に関する研究であった。この課題は地域調査によって解決されてきた。この地域調査のもっとも合理的な形態は地質図と地質断面の作製であった。地域調査の基本的な方法として現在も保持されている地質図の作成法ほど最近まで地質学を特徴づけていた対象と可能性とをその古い形のなかにうまく表現しうるものはない。地質学者は地図を作るとき、地表の研究を行ないながら、目にふれる岩石を決定し、その産状や相互関係や相対的な年代を明らかにし、地図に記入してゆく。

長期にわたる地域調査の結果、岩石の分布に幾つかの規則性が発見されてきた。その筆頭におくべきものとして、堆積岩の層理と単層や単層群の広がりがある。しかしながら、地層の初生的産状はどこでも保存されているわけではなく、地層は変形し、裂かによって切断されることが多い。しかしながら長い間の観察によって、変形した地層のなかにも法則性、すなわち、幾つかのもっとも典型的な「産出形態」をみだすことができるようになった。その結果によって構造形態（たとえば褶曲）の小さな断片を個々の露頭のなかで観察することによって、露頭間でのもっとも可能性の高い配列を予測できるのである。

もちろん、場合によって簡単なこともあれば複雑なこともある。簡単な場合には、解釈は完全に、一義的でありうる。しかしながら、複雑な場合には、問題の解決ははるかに困難である。地質調査が標準化された調査方法のセットとなりえないのは、まさしくこのような場合にも起因している。われわれがこのことを強調するのは、一時地質調査を一定の作業規準と指導にしたがって行なうことのできる純「生産的」操作とみなし、調査者の個性にはかかわりないと考える傾向があったためである^{注1)}。鉱物や岩石の地殻中における分布についてこれまでにみだされた法則性は、有用鉱物の調査や各種の応用地質部門における科学的予測の基礎となってきた。

地殻上層部の組成や構造に関する資料が集積されるにしたがって、科学としての地質学の核

* V. V. Белоусов (1963) : О путях развития геологической науки, Советская Геология, Том. 6, No. 1, p. 11~28.

心をなす次の課題を解決するための研究が発展してきた。それは地殻の歴史の研究である。事実、地質過程の歴史を研究することによってはじめて地質過程の発達順序とその組み合わせの規則性と同時に現在の地殻構造の規則性をも解明することができるのである。

すべての歴史的分析の根底をなすものは、事件が一定の順序にしたがって起こるという考えである。地質学は事件の順序と同時性とを原理的に確立しうる比較編年法をあみだした。この方法の基礎をなすものは、岩石や鉱物相互の関係と古生物学的資料である。

ここ100年間に著しい発展をとげた古生物学的方法によって、相対的編年スケールを作り、そのなかに過去に起こった地質現象をあてはめることができるようになった。しかしながら、この方法には先古生代の岩石に対しては化石は時代決定に限られた意義しかもたないということに伴う本質的な制約をもっている。したがって、この方法は地殻に関してこれまでにわかっている全歴史のわずか15%にもみえない古生代以降の期間にしか適用できない。そのほか、この方法は火成源の岩石には適用できないし、その相対年代は周知のとおり間接的にしか決定できない。

しかしながら、このような制約をもつにもかかわらず、古生物学的方法はこんにちまで地史学の主要な武器として用いられている。

一方、歴史的解析は地殻構造それ自身のなかにきざみこまれている歴史的変遷の諸特徴の研究にも立脚している。たとえば、堆積岩の構造には堆積物が順次累積した痕跡がはっきりと読みとれる。また、火成岩の構造中には、それがはじめは溶融状態にあり、いろんな順序で鉱物が晶出したことを示す徴候がみられる。褶曲にみられる地層の変形や裂かにはそう転位などは、はじめ水平であった地層が変形を蒙ったことを示している。

地殻上部の組成や構造にこの種の歴史的変遷の徴候が存在することは明らかであるが、この徴候だけでこれまでに起った変化の内部機構やましてその原因について何かをいいうる場合はごくまれである。

そこでは、地質学者は古生物学的方法と肩をならべうるような意義をもつ方法、すなわち、現在主義 (actualism) の方法を用いる。この方法は前世紀の前半末期に人間思想の偉大な達成の結果——地質時代は巨大な時間にわたるもので、この期間を通じて現在地球表面で進行しているのほとんどかわらないゆっくりした変化の集積によって、地殻とその表面の構成に著しい変化が生ずることができたとする考えが生まれたのに関連して出現した。

現在主義の方法はその基本的・古典的な形としては、地表の諸過程は過去の地質時代においても現在と同じ原因によって起こり同じ結果をもたらすという考えから出発している。したがって、地殻構造のなかにみられる変化の諸特徴をその機構や原因のわかった現在の類似した諸過程と比較することによって、古い過程の機構や原因に関して結論しうるわけである。

現在主義の方法に関しては、この方法は単純化した形では完全に正しいとは考えられないとする至極もつともな見解が一再ならず表明されてきた。地球上の諸条件が変化してきたことは疑いないところである。たとえば、大気組成も変化してきた。すなわち、現在のところ、地史の初期段階では、大気中では炭酸ガスは現在よりもはるかに多く、酸素はずっと少なかったと考えられている。また、先古生代には地熱勾配は現在よりも高く、したがって、火成岩や変成岩の生成にこれが反映しているはずだと考える人も多い。さらに、生物—動植物が生物界の変化に伴って地表過程で果たす役割も著しく変ってきた。このような考えはすべて正しいものであり、同様の地球上で起こった諸条件の全般的変化にしても当然注目する必要がある。しかしながら、ここでは現在主義的方法の創造的・批判的適用の必要性を説いているのであって、決してそれを全面的に否定するものではない。この方法は現在でも古生物学とともに地史学の主導的方法として用いられている。

注1) こういったからといって地質調査の標準化に対する要求を全面的に否定するものではない。調査結果を比較対照できるようにし、また国民経済の要求にそう計画性をもたせるためには、調査者が一定の規則や規準、その他の指導にしたがって、資料のまとめを行なわねばならないのはもちろんである。

しかしながら、現在主義的方法には明白な制約もある。この制約はこれからのべることには大きな原則的意義をもつのでこの問題にとくにふれておく必要がある。もちろん、この方法は現在地表で直接観察されるような過程には適用できる。しかしながら、一旦われわれが地表を離れて地下深部に下りてゆこうとするとたちまちこの方法は役に立たなくなる。明らかに、われわれがたとえば、現在の地殻中に産する古い熔岩流の流れた様子やそれが固結した条件を知ろうとする場合には、現在の地表での観察は非常に有益である。しかしながら、現在主義的方法は熔岩の成因やそれがでてきた深さや上昇した原因については何も語ってはくれない。

現在主義的方法は侵入岩の生成あるいは褶曲の生成のような過程の研究にはあまり役に立たない。というのは、これらの諸過程は地表では観察されないか、あるいは、そこではあまりにゆっくりとしか進行していないからである。この方法がもつ同様な制約を、いくつかの類推を使って克服しようとする試みがなされてきた。たとえば、地殻深所におけるマグマの生成・固結と人工珪酸塩熔融物の熔融・固結との比較が行なわれた。また、地層中での褶曲や断層の生成は工学分野で研究される建築材料の変形との比較によって考察された。このような類推がある種の内成的過程の内部機構に関する一般的概念を構成する一助となったことはまちがいない。しかしながら、その場合地下深所に存在する特殊な条件の真の役割がほとんど考慮されていないためもっとも一般的な概念もまちがっていることが多い。

これとは別にここで強調しなければならないことは、古典地質学の方法は大洋下の地殻については全くかえりみなかったということである。この部分の地殻は簡単に近よりにくいため、まったくふれられなかった。大洋は地球表面の3分の2を覆っているのであるから、古典地質学が言及しうる地殻の深さや面積はごく限られたものであり、それは地球表面のわずか3分の1の部分に関する科学にすぎなかった。

古典期の地質学の状態は上に述べたような次第である。その成果は、大陸に関するぼう大な記載資料や地図資料、鉱物や岩石の組成・構造・成因などによる分類、外成過程と内成過程の比較編年、外成過程の機構と原因の解明などである。古典地質学は有用鉱物を含む岩石や鉱物の分布や生成順序および生成・配列過程の相互関係などの歴史的法則性の総括を行なった。地球表面を地向斜と台地に区分し、それぞれの進化過程の主要な特徴を解明したのもその中心的な成果をなしている。しかしながら、古典地質学は内成的地質過程の機構と原因に関する問題に直面すると、たちまちしっかりした事実と方法論上の基盤を失ない、ごく限られた根拠しかもたない仮説の道にてん落ちていった。これらの仮説の特徴は、地質過程と地史の粗雑な模式化である。

この時代の主導的な総合仮説は、ラプラスの宇宙成因論に基づく収縮説であった。この成因論は科学界で支配的な力をもっていた当時から、数多くの欠陥をはらんでいた。現在では、この仮説が地球の物理的状態やその発展に関してわかっているあらゆる事実と矛盾することは疑いないところである。

地質学の研究対象はその性格からして、地質学者に観察事実の実験的復元をしようという気を起こさせない。というのは、この過程に参与する材料の量があまりに多いうえ、かって地殻中に存在していた物理条件がよくわからないし、作用する力の原因についても議論の余地が多いからである。このような条件のもとでは、地質学者はその課題の主体は記載にあると考えるようになる。地質学者はその観察事項についてできるだけ秀れた正しい記載をし、記録にとどめようとする。地質過程の歴史については、もちろん上に述べたような地質編年法に基づいて、主として比較類推によって歴史の復元を行なっている。上に述べたような諸条件のために、地質学者の結論は大抵の場合定性的な性格をおびてくる。地質学者は地質過程の無尺度的な記載を行なうことが多い。というのは、この過程に参加する範囲の大きさもこれに働く力の大きさもまったくわからないからである。

さらに、このような地質学の定性的アプローチを規定するものとして、非常に多くの基本的諸過程が相互に重なって生ずる複雑な過程を取り扱う場合が多いことがあげられる。これらの基本的な構成要素を区分し、その中から主要なものや局地的条件に関連した偶然的な要素とを

区別するのは非常に難しいし、場合によってはまったく不可能なことさえある。もしもこれまでに地質学者が実験室や試験場でこれらの過程を復元できていたら、当然地質学者も化学者が実験室で行ない農学者が試験場で行なうと同じように主導的な過程と副次的な過程とを区分できていたであろう。しかしながら、一般にこのような可能性は地質学者にはないので、現象を複雑なままで全体としてとらえざるをえない。しかしながら、この複雑な総体のなかには常に地質過程の主要な性質とは無関係な多少とも偶然的な局地的条件によって（たとえば、同じ過程がすすむ場所ごとの物質の違いによって）生じ付加されるものが存在するため、地質学的な諸概念に強い影響を与える事情——観察される現象の個別性と非反復性とが生まれる。個々別々の火山噴火、個々の褶曲、あるいは（名称の）同じ岩石の個々の露頭ですら、その具体的な現象をそれと類似の現象から区別するなんらかの個別的特徴をそなえている。この個別な差異が本質的なものでなく、研究対象となっている現象を同一のグループに入れてもさしつかえないことが簡単にわかる場合もある。しかしながら、本質的でない偶然的偏倚とすでに新しい種類の現象との境界をどこにひくべきであろうか？ この疑問に対する明確な解答はいまのところ存在しない。しかしながら、その困難さは地質学の場合には、他の実験科学や精密科学に較べるとはるかに大きい。さらに、この疑問に対する解答は、われわれが現象の分類をしようとする区分の大きさによってもかわるのである。というのは、ある大きさの区分では本質的な意義をもたない変化が他の大きさの区分の場合には非常に重要なものとなりうるからである。

分類規準を選ぶさいに客観的な標識があるかどうかは非常に疑問である。これについては2つの型の玄武岩——かんらん石玄武岩とソレアイト玄武岩——を区別する根拠があるかどうか、あるいはこの2つのグループは一つの型の変種にすぎないかということに関して長い間岩石学者の間でたまたかわされた論争を想起していただければ充分である。このような例は構造地質学の場合にはもっと多く、おそらく、その全域にわたるのである。まったく同一の2つの地角斜も地溝も褶曲も存在しない。もし、地質学者がそれらの間に共通する特徴をみだすとすれば、複雑な現象の精密な定量的分析によってではなく、数多くの個々の現象に対する長い間の観察とこれらの現象の観念的比較対照によってなのである。このような比較の結果が研究者によって異なってくるのは至極当然なことであり、ここから、地殻の発展法則に関する見解の相違も必然的に起こってくる。

まさしくこのような理由のために、地質学者の間には一般法則の探求に対する幾分懐疑的な態度がどうしても生じやすい。ある種のグループでは、このような一般法則は存在しないのだ、個々の地角斜はそれぞれ独自の発展の経路をたどっているのだ、あるいは地質現象のタイプは個々の発現形態の数だけ存在するもので、地殻の異なる地域に発生する現象の間の相互関係については何もいえないというような主張が「流行」になっているようである。このような主張が間違っていることはいうまでもない。しかしながら、このような主張は前にのべたように、典型的なものと非典型的なものとを納得のゆくように客観的に区別することが困難なために生まれてきたのである。

定性的なアプローチでその観察結果と結論を読者に最大限に理解させようとするため、もしも正確な定量的規定ができるならばまったく余分で不必要と考えられるような表現の形象化や比喩や比較に地質学者は熱中する。次にこれが術語の不正確さをよびおこし、地質学のうち総括を主とする部門では非常に不確定な概念と記載を使用せざるをえなくなるため、これらの部門は全体としてこの欠陥になやまされる結果となる。地質学の分野でももちろんもっとも基本的な現象を表わす確定した用語がいくつかある。しかしながら、比較的複雑な現象が問題になり始めると、たちまちこのような明確さが著しく失われ、地質学者ごとに古い用語に新しいニュアンスをもたせたり、新語を考えだしたりする。地質用語を科学の一般部門のなかで整理し位置づけることは、前にのべたように地質現象が複雑なためと、それを基本的な構成部分に区分することが難しいかあるいは不可能なためと、さらに程度の差はあれそこから生ずる地質現象の非反復性などのために著しく困難である。

地質学者は類推を行なうさい自分の論文中に精密科学——物理学・化学・物理化学などのデータを引用する。しかしながら、そこではいたるところに誤解がみられる。長い間定性的な思考様式にならされてきた地質学者の頭脳は、これらの諸科学の核心をなす定量的な側面を間違えて受けとり、数値計算については上面をなでただけで、定性的な意味をもつと思われる結論だけを拾い集める。

そこでは、地質学者は根本的な誤まりをおかしている。精密科学ではすべての結論は定量的な意義をもっている。そこで考察されている現象は正確な尺度と発展速度とこれまた厳密に規定された環境条件との正確な相互関係とをもっている。したがって、個々の結論は特定の厳密に規定された条件のなかでだけ意味をもっているのである。したがって、この結論は他の条件や別の尺度には適用できないものである。

このような定量科学の結論の特性を無視したために、地質学者は幾度となく誤った結論に達した。たとえば、無限に小さな瞬間変形を問題にし、流動や時間の役割りについては考慮しない弾性理論に基づいて造構変形を理解しようとした試みなどがその例である。また、地球の規模では熔鉱炉の場合とまったく異なるプロセスで固結が進むであろうということが考慮されなかった当時、地球の固結と熔鉱炉中での珪酸塩鉄鉱の結晶作用との間に類似性をみいだそうとしたのもこの例である。おそらく、最近におけるこの種の誤解のもっとも顕著なあらわれとして「天文地質学的」方向をあげることができよう。これは内成的地質過程の原因を宇宙的なものに求めようとしている。そこで普通にみられる誤りは、定性的にある必要な方向に働く現象を見つけると、天文地質学者はその量的な側面にしかるべき注意を払えばその効果はほとんどとるにたらないものだということがわかるような現象のせいによることである。

もちろん地質現象を説明するために、他の科学とくに基礎科学のデータを利用する努力を全面的に歓迎すべきである。しかしながら、いままでの失敗例から地質学者にはまだこれらのデータを使いこなすだけの準備が不十分なことが多いということがわかる。もちろん、これは地質学者が自分に必要な科学部門の研究をおろそかにしているためではなく、あらゆる研究作業の様式やその専門分野における思维構造全体の様式が異なるため、これが心理的混乱をひき起こすことに起因する。精密科学の分野の代表的人物が自分の方法論で地質現象の説明を試みる例にぶつかることがしばしばある。彼らの作った模式から地質学者は到底実際の地質現象を読みとれないような自然現象の荒っぽい模式化によってこれをやってのけている。数学者には自然現象の複雑さとその内的な不可分性は理解しにくいものである。したがって、このような現象をどうしても区分しようとする、ある種の本質的なものが失なわれ、現象全体の性質がゆがめられてしまうということを数学者は考えないのである。

20世紀の特徴は物質に関する基礎科学——物理学・化学とその数学的解析の巨大な進歩である。このような事情は当然新しい成果をとり入れる自然科学の進歩にも反映し、その方法論的な可能性が拡大し、研究対象に関する諸概念はより完全で正確なものになった。物理学や化学の方法と資料が自然科学に浸透したことによって、生化学・生物物理学・農芸化学などのような境界領域が急速に発達した。新しい方法論的可能性を与えられたこれらの境界領域で非常に成果がえられたのも当然である。これらの境界分野は古い対象のなかにまったく新しい側面と性質をみつけたし、古い固定概念を打ち破って自然科学の古典的な考えの再検討を迫った。

同様なプロセスは地球に関する科学でも始まった。物理学や化学の進歩によって地球を構成する物質の物理的・化学的研究方法、すなわち、地球物理学や地球化学の方法に著しい進歩がもたらされた。ここではこのプロセスの2つの側面を区別する必要がある。そのうちの1つは、以前でも地質学者に理解され研究されていた対象の研究をよりよく行なうためのより完全な物理的・化学的方法を応用することである。これに属するものとして、以前より完成された化学分析法や鉱物・岩石標本の物性の決定法や普通の地質学的方法で到達しうる範囲の地殻を構成する岩石の性質をその場で(試掘井内あるいはその他で)調べるいろいろな物理的・化学的方法などがあげられる。上にあげた場合はすべて、いわば地質学の内部にとり入れられて

いる地球物理学的・地球化学的方法に関するものである。検層法はコアを上げずに坑井断面を調べる可能性を与える。もちろん、これは作業のテンポを著しく高めそれを容易にするが、岩石標本を坑井の外に取り出すことによってこの断面を調べることは原理的には可能である。また、地球物理学的方法によってボーリングなしに地下数 km の地殻構造を知ることができるようになったとき、もちろんその作業は著しく軽減された。しかしながら、ここでも経費と時間さえ考慮に入れなければ一群のボーリングによって同じデータをうることは原理的には可能である。

上にのべた場合はすべて新しい分野の発生とはいえない。これはすべて地質学的方法論的可能性をその「古典的」範囲内で拡大するものといえる。したがって、われわれが地球物理学的方法とか地球化学的方法とかいう場合には、この言葉の意味するものは地質学による地球物理学的手法や地球化学的手法の利用にすぎない。

しかしながら、地球に関する科学の進歩はこれだけにとどまらなかった。これまでもみてきたように、過去の地質学はその「古典的な」方法では地下数 km 以上には言及しえないというような歴史的な形成過程を経てきた。おそらく、地質学もはじめからもっと地下深所の広範な物質全体をその研究領域と考えていたであろうが、まったく信用のおけない根拠にのってだされたいくつかのあいまいな仮説を別にすると事実上この問題にはとりくんでこなかったといえよう。ところが、まさにこの領域に物理学と化学とがそれぞれの方法でもってちん入してきたのである。これらの科学の方法のたすけをかりて、本来の地質学的方法ではとても到達しえない領域にあった地球の構成物質の物理学的・物理化学的性質に関する考えを組み立てることができるということがわかってきた。このような場合はすでに、地質学が以前にあれこれととりくんできた対象の研究に関する方法論的可能性の改善というものではなく、まったく新しい対象——それまで地質学がとりくみえなかった地球深部の研究といえる。

別の場合の成果は、空間的な意味ではなく、「古典的な」地質学的方法ではまったく近よれなかった地質学的対象や現象のまったく新しい性質の発見や研究という意味での新分野の開拓である。この範ちゆうに属するものとして、たとえば、鉱物にふくまれる放射性元素の崩壊速度の一定性に基づく絶対年代の測定、構造変形のマカニズムを明らかにするため実験をふくむ物理学的方法を用いる造構物理学、地下深部の火成・変成過程の条件の復元をめざす珪酸塩に関する実験的物理学化学、岩石中の残留磁気による地球の古い磁場を研究する古地磁気学、化石中に含まれるある種のアイソトープの量比からたとえば過去の時代の温度条件を明らかにするアイソトープ古地理学などをあげることができる。

明らかに、空間的にも地質学的対象の新しい性質の意味においても研究分野の原理的拡大に当面する場合にはすべて地球に関する新しい科学の発生に言及せざるをえない。このような科学として地球物理学と地球化学の2つが発生した。いずれにせよ、現在地球深部を取扱うすべての種類の新しい科学分野をこの地球物理学と地球化学にまとめることができよう。

このようにして、はじめ地球に関する唯一の科学として自任していた地質学に代って、地質学・地球物理学・地球化学の3つの科学が現われることになった。あとの2つは地質学プラス物理学、あるいは、地質学プラス化学とみなすべきものではなく、独立の科学、すなわち、地球に関する物理学と化学と理解すべきである。前者は地球のいろんな物理場を利用しながら、地球を構成する物質の物性とその内部で生起するいくつかの物理過程(力学的過程全般と地震過程のほか、とくに電磁過程と地熱過程)とを研究し、後者は主として化学・物理化学・固体理論のデータと法則に基づいて、地球の構成物質の化学性を明らかにする。

もちろん、ささいな地質学的な問題を考慮した場合、地球に関するこれら2つの新しい科学が関係する分野と、設定する課題は地質学者の日常的な関心や直接的な実践的努力の範囲外にあることがあるため、これらの諸科学はいつでも狭義の地質学と交差するとはかぎらない。しかしながら、もっと広い観点から地質学の今後の発展経路を予見した場合、地球に関する科学が3つの独立した部門に分離することは異常でありその発展を促がすものとは考えられな

い。事実、地球は全体として一つのものであり、その中の一部分が全体の中で占める位置を知らずしてその部分の発展過程を理解することは不可能である。地殻を構成する「地質層」は、この層よりも深いところ——「地球物理学的深度」で進行するものに基本的に依存している。したがって、地質学はこれまでに内成過程のメカニズムや原因を説明するに当って克服できない難関にぶちあたった。これはこのような問題に対する解答が地質学的方法の手のとどかない深さにかくされているためである。したがって、従来の地質学は深部過程の外的発現に関する科学にとどまり、これらの過程そのものの科学とはなりえなかった。後者を研究するには、地質学は他の地球に関する諸科学と統一されねばならない。

ここで強調しなければならないことは、内成過程——マグマの生成と移動、造構運動、変成作用などの成因と原動力に関する問題の解明が地質学史のうえでこんにちほど必要なときはないということである。いうまでもなく、問題は理論的に非常に大きな意義をもっている。われわれは地球上に住んでいる。人間が宇宙空間のどんなに遠くまで飛び立とうとも、地球はやはりいつまでも人間の住み家なのである。にもかかわらず、現在すでに宇宙空間と天体についてはいくつかの点ではその住み家自体よりもよくわかっている。地球の深部で何が起っているかを知ることはイデオロギーのうえでも大きな意義をもっている。現在この問題が“実践的にも”大きな意義をもっていることはますます明らかになっている。地表の鉱床を半偶然的に発見していた時代は終りをつげようとしている。鉱物原料の新しい鉱体を探鉱するに当って、応用地質学は、地下深部にはいり、ときには地下数 km のところにかくされている鉱床を探し出すことをしいられている。さらに、有用鉱物の種類も異なってきた。すなわち、石油・石炭のほか非常に分布の広い金属などのように地殻内に局部的ではあるが著しい濃度を示す古典的な有用鉱物のほかに、現代工業は著しく分散的な状態で存在する種々の稀有元素をも利用するようになっている。このような事情から有用鉱物の分布に関する予知理論を発達させることが急務になっている。

有用鉱物の大部分は直接あるいは間接にしろその生成あるいは濃集過程で内成過程に依存しているので、実際の予知理論を完成させるにはこれらの過程の発展の原因と規則性に関する知識に立脚する必要がある。

これは未知の深部過程とそれが進行する環境に関する知識を与えてくれる地球物理学と地球化学を地質学と統一させることによって達成することができる。もちろん、これらの知識が現在でもすでに広範で正確なものになっているとはいえない。なぜならば、地球物理学と地球化学はともに若い科学であって、その成果は上にのべた基本的問題を解決するには不十分だからである。しかしながら、その専門的文献に注意している人は誰でもこれらの科学が驚くべき速さで進歩していることに気づくであろう。文字通り毎月新しい事実がみいだされている。あらゆる瞬間に、これらの新しい分野においてはこれまで地球内部の動きをおおいかくしていたとばかりを一挙に開くような予期しない大きな発見がなされる可能性がある。

しかしながら、われわれは地球に関する他の諸科学の成果を「取逃さない」ためにそれらと地質学との統一を求めるのではない。むしろわれわれはこのような統一なくしては内成的地質過程に関する問題の解明に大きな成果をあげることは到底望みえないと信じている。

地質学がその方法で解決しうる深さを踏み越えようとするときに、誤りをおかしたり、それをあきらめたりすると、地球物理学と地球化学は地質学と別個にこの種の問題を解決しえなかった例が少なからずみられる。「純粹の」地球物理学者は地球化学者たちがこれまでに何回となく深部過程を総括する理論をたずさえて登場した。そして、次から次にこれらの理論ははっきりと観察される地質学的事実にそぐわないとして地質学者の断固たる反ばくを蒙った。一般にこのような理論では地質現象が極端に許し難いほど単純化されているため、その中に複雑な地質過程を「あてはめる」ことが不可能であった。地球物理学的理論も地球化学的理論も「古典的」地質学が蓄積してきたデータをすべて考慮に入れる必要がある。これは地球に関するいろんな科学の代表者達の共同作業によってはじめて可能である。それとともにこのような

共同作業は地球物理学や地球化学の研究そのものにも明確な目的をもたせるにちがいない。地球物理学や地球化学の最終目標は地殻中で起こっているでき事の説明のはずである。なぜならば、地球物理学や地球化学の研究結果は地殻中で生起する事件を通じてのみ直接われわれが観察したり、人間生活に益立てることのできる現象に具体化されるからである。地球物理学や地球化学が内成的地質過程の原因・規則性・メカニズムなどを明らかにし、その結論を地質学的予測の基礎としうる能力をもっているかどうかは、これらの科学によってえられた結果を検証する重要な手掛りとみなすべきである。

本当の所をいえば、ここで問題にすべきことはいろんな地球に関する科学の代表者の共同研究だけでなく(もちろん、これは絶対に欠かすことのできないステップであるが)、地質学・地球物理学・地球化学の方法論をいわば一つに融合させたような新しい地球に関する統一科学を創り出すことである。このような地球に関する統一科学はそのなかに古典地質学のすべての知識を保存するとともに、地球内部で起こる過程に対する定量的な物理学的・物理化学的研究態度を吸収する必要がある。

このような地球に関する統一科学を何とよんだらよいであろうか? おそらく、一部の人は「地質学 (geology)」という言葉が「地球に関する科学」を意味するという事実に基づいて、この名称を保存したいと望むであろう。この新しい科学はその内部でも自己的方法論的独自性を保ちうる古典地質学の枠から著しくはみ出している。一方、完全に独立した科学として誕生した地球物理学や地球化学もその本来の課題と方法を保存している。したがって、地球に関する統一科学に対して新しい名称をつくり出す方がより合理的なように思われる。たとえば、このような名称としてすでに慣用語となっている astronomy とか aeronomy に似た「geonomy」などが適当かとも思われる。

われわれも地質学・地球物理学・地球化学などの共同研究の幾つかの経験をもっている。これらの経験からも地球に関する諸科学の統一が必ずしも容易にできるものではないことがわかる。そのためにはいくつかの大きな障害を克服する必要がある。そのうちもっとも大きな障害は異なる研究方法によって生み出される心理的な相違であろう。定性的な思考法にならされてきた地質学者には現象に対する定量的取り扱いを身につけることは困難である。これについては前にもすでに述べた。一方、物理学や化学者にとっては自分にとって慣れた定量的評価からはなれて、評価の正しさが数によらず、確固たる法則にしたがっているとはかぎらない定性的な特徴を組みあわせたり比較したりする手腕、とくに長い経験を経た研究者の直観に支配されるような迷宮のなかでのあまり正確でない比較や一般的類推の言葉づかいに移ることは困難である。このような困難に関連して、地質学者が物理学や化学のそれぞれの分野をマスターし、自分の研究課題にあわせてそれらの分野の創造的な仕上げを行ったり、あるいは物理学者や化学者が地質学的な諸要因を本来の多様な形のままで意識的に評価しうる能力をそなえた秀れた地質学者になりうるケースはきわめてまれである。このようなケースが普通になり、自分の研究のなかに地質学的方法と定量的方法とを創造的に統一しうる geonomy の専門家が将来出現するようになるためには特別な努力を要することはもちろんである。

このような目標を遂行するためには、異なる科学がもっているそれぞれの方法を接近させる必要がある。たとえば、地質学の側からは古典地質学のなかにできるだけ広範に定量的方法を導入することによってこれを実現する必要がある。なぜならば、地質学的概念が数や尺度によってできるだけ正確に特徴づけられるようになった場合にはじめて、これらの概念は物理学的分析や物理化学的分析に適したものとなるからである。このような場合にこれらの概念は地質学者・物理学・化学者などの共同研究の対象となりうる。

現在でもすでに精密科学的方法が地質学の中に浸透しており、この浸透がどのような方向に行なわれるのがもっとも望ましく、かつ実現性とんでのいるかを定める助けになっている。

その筆頭にあげられるものとして絶対年代編年があげられる。地質過程は時とともに発展するから、その性質と性格を明らかにするには、もちろんこれらの過程のスピードを知ることが

非常に重要である。これは古典地質学に特有な「より以前」・「より以後」および「同時」という概念を年数で示しうるような絶対編年の詳しいスケールを作り上げることによってはじめて達成しうることである。近年絶対年代の測定で大きな成果が上げられている。その測定精度はいまのところまだ高くないが、地質時代の長さのオーダーについてはすでにわかっている。今後その測定法を改良し、それぞれのデータを蓄積し、それを古い相対的編年スケールと比較してゆくことは、ここで論じている範囲の研究のもっとも重要な方向の一つである。

次に必要な方向として、地殻の構成物質と地殻を構成する構造形態の定量的研究がある。鉱物や岩石を研究する場合、化学分析や各種の物理的決定(鉱物の構造・形態・大きさ・相互関係・層厚など)の形をとって定量的方法が用いられている。しかしながら、実際にはどんな場合にも必要にして可能なことがすべてこの方向でなされているとはいえない。たとえば、異なる地質区ごとにいろんな岩石の分布状態やそれが占める量が充分にわかっているとはいえない。また、火成作用・後火成作用・変成作用・交代作用のほか堆積作用・続成作用および風化作用に伴って生ずる鉱物群の再配分の定量的な特徴づけも非常に重要である。さらに、地質学者は個々の構造形態(structural forms)——テクトニックな構造形態や火成源の構造形態に充分な注意を払っていない。ところが、実際には構造形態やそのなかにおけるいろんな組成の物質の分布の大きさを正しく評価することなくしてはそれらの成因論を組み立てることは不可能である。地質学的概念にはスケールがないため、長い間、大きな複背斜と小型の褶曲の成因が同じだと考えられてきた。種々の構造形態の大きさを研究することによって、非常に重要な規則性を明らかにすることができるのである。たとえば、台地の陸背斜や陸向斜はそれぞれ地向斜中に発達する複背斜や複向斜より大きな面積をもっていることは周知のとおりである。しかしながら、個々の複向斜や複背斜あるいは陸向斜や陸背斜の大きさのちがいは一体どれ位あるのであろうか? これに対して地質学者は何らの解答もだしていない。ところが、もしも構造形態の大きさが連続スペクトルをなすか、あるいは、不連続なグループに分かれるかを明らかにすることができたとすれば、これはその成因上の問題の解決に大きな力となるであろう。大型の構造形態がマントル中の対流によって生じたと仮定してみよう。そうすると、構造形態の大きさは対流の構成単位の大きさとその発生深度を示すであろう。

これと同じような問題として構造形態の空間的配列の規則性がある。たとえば、構造帯ののびに関するいろんな規則性が指摘されている。しかしながら、これらの規則性はあくまでも「印象」によって推定されているのであって、ここでも確率論に基づく客観的な方法を適用することができる。このような方法の導入は非常に大切な課題である。

地殻の構成物質や絶対編年と組み合わせたそれらの分布の定量的研究はある種の地質過程のスピードを考えるさいの材料を与えるであろう。たとえば、堆積岩層の厚さや容積は堆積速度と地殻運動——その沈降と隆起の速さの尺度となる。

定量的な地質調査を行なう場合、近代的な電子計算技術その他の近代的な手法が効力を発揮する場合が多いであろう。たとえば、フォードロフのユニバーサルステージを用いて岩石薄片中でいろんな向きをもった結晶を計算する非常に面倒な過程も自動化し迅速化することができるであろう。グラフ表示による統計的処理(visual statistics)も計算機の利用によって代行させることができる場合も多いであろう。この方面では工夫すべきことが非常に沢山ある。

次に、普通の条件の場合はもちろんのこと、いろんな温度圧力のもとでの岩石の物性や物理化学性の定量的研究法についてのべておく必要がある。この方面でもすでに多くのことが始められているが、岩石の性質、とくに天然条件のもとで産出し、変形をうけるさいの岩石の性質についてはほとんどわかっていない。とくに変形速度による岩石の塑性変化についてはわからないことが多い。地殻の進化過程で岩石の性質が変化するために問題は層複雑になる。このため、ある種の平均花崗岩や平均石灰岩に関するデータも非常に信頼のおけないものとなっている。

近代的な実験技術によって岩石の性質を完全な型で研究することができるようになってい

る。

地質過程の定量的研究も非常に重要な面である。これについては物質の研究について述べたさいに部分的にふれておいた。しかしながらこれについてはもっと補足することができる。火成作用は揮発成分を含む珪酸塩の中で起こっている。この珪酸塩は地殻中で溶融し、移動し、結晶する。実験岩石学や地球化学は実験室でそれに対応する温度・圧力条件を作り出してこれらの過程を復元し、その研究を行なっている。これらの研究によっているんな火成岩の生成過程を理解するうえで非常に多くのことがわかってきた。しかしながら、研究の量はまだ不十分である。多くの分野が研究されないままで放置されている。とくに、重要であるにもかかわらずまったく研究の進んでいない問題は天然の珪酸塩混合物の進化の過程で揮発成分が果たす役割に関するものである。

変成作用の原因と物理化学的メカニズムに関する問題もマグマの生成と進化に関する問題と非常によく似た状態にある。ここではこの過程に参与する物質の組成と温度のほかに物質の移動が大きな役割を演ずる。この物質の移動過程でたとえば非常に広範な分布を示す広域変成作用が起こる。広域変成作用は地殻深部における全般的な現象で、変成現象の性質を明らかにすることなくしては地殻深部に存在する条件の理解は到底期待しえない。この分野では実験的研究は少ないが、困難ではあっても不可能なことではない。

地殻中で起こる力学過程は岩石の変形をひき起こす。この変形は早くから深部過程の指標と考えられていた。たとえば、数10年間にわたって支配的な地位を占めていた地球の収縮説は地層のしわ寄せ現象に立脚していた。岩石中にみられる天然の変形をモデルを使って復元しようという試みも非常に古くから始められていた。しかしながら、物理的相似理論や固体の変形・破壊理論を用いてはじめて造構的モデル化の理論的基礎がおかれたのはごく最近になってからである。ここでもまだ実験的研究分野でなすべきことが沢山残されている。このような研究によってあらゆる主要な造構変形のメカニズムが次第に明らかにされ、それによってその成因を考えるための材料が与えられるにちがいない。

上に述べた実験的な面ではすべてその作業の拡大強化とともに、それぞれの技術的基礎も必要なことはいうまでもない。

地質調査の範囲を「深めること」も地質学と地球物理学・地球化学との接近を促がすにちがいない。この場合「深める」という言葉は文字通りの意味であって、ここでは従来よりももっと地下深部まで地質学的方法できわめることである。このことは非常に大切である。というのは、地球物理学や地球化学的方法をすべて用いてもこれらの方法は主として間接的であるため、物質のサンプルを地表にとりだしてちかに研究することはできないからである。超深度ボーリングが深部地質調査の方法とならねばならない。現在のところ、おそらく地下15 kmまで掘さくするために技術を改良し、それぞれの装置をつくることは原理的には可能である。この試錐によっておそらく花崗岩層の下部を直接調べたり、これまでその真の性質がまったくわからなかったいわゆる「玄武岩層」のなかまで調べることができるようになるであろう。場所によって——たとえば太平洋地域や島弧地域ではこのような試錐は上部マントルまで貫き、その組成を明らかにできるであろう。超深度ボーリングの技術的準備と組織化の課題はとくに重視する必要がある。将来はみずからエネルギー源を補給しながら独自に地下深部に道を開いてそこから物質のサンプルを取りだしたり、あるいは地質学者をのせてゆくような自動装置を作ることも考えられる。

地質学は自らの伝統的な方法に止まっても、地殻のなかでみることのできるもっとも深い部分の構造と発達に注意を向けることによって他の諸科学との接近を促がすことができる。ここで考慮しているのは著しい変成を受けた始生代の楯状地の基盤岩類である。その露頭では地殻の比較的深い部分の構造や発展の特性を理解するために普通の地質学的方法でなしうることがまだ非常に沢山ある。

上に述べたすべての研究面を進展させると同時に、地質学者の活動に対する普通の見解につ

いてもいくつか再検討を加える必要がある。国民経済の鉱物原料のベースを作るうえでの地質学の役割についてはよく知られている。工業化の時代にはわが国の地質学者には実践的性格の要求がとくに提起され全面的には認められていた。事実どのような時期にあっても、わが国の経済に鉱物原料を保障することに直接たずさわってきた地質学者の活動は最高の尊敬に値するものである。

しかしながら、応用地質学だけを十分に重んじて、地質学の理論的課題の存在とその課題を解決する必要性を忘れてはならない。現在、地質学の理論的研究には明らかに十分な考慮が払われないという事態が生じている。地質学者のなかに理論的問題の設定に明らかな遠慮すら存在する。純理論的なテーマはある種の地質研究機関ですらいとわしいものと考えられ、理論的研究に興味をもつ地質研究者はなにか応用的な「看板」でカムフラージュしながらこっそりと研究を行なっていることが多い。このような状態は異常である。原子核あるいは蛋白分子の構造に関する理論的研究の重要性を疑う者はいないであろう。物理学や化学の分野では、すべての人々がこんにち理論の領域にあるものが明日は重要で実用に供せられるということをよく知っている。こんにちでは理論と実践はほとんど融合しあっていて、理論は実践への道を開く前衛部隊にすぎない。

ところが、われわれの地質学の分野において、たとえば鉱床とは直接関係がないけれども花崗岩の生成や侵入の非常に重要な過程を明らかにするうえで興味ぶかい花崗底盤の構造や生成条件の全面的な研究に多くの努力が捧げられているであろうか？ また、造構変形の生成機構の法則性や成因に関する問題や古地理的総括に多くの人が専念しているであろうか？

いうまでもなく、現在のはかってないほどエネルギーに理論地質学を進展させる必要がある。というのは、探鉱作業を実施するうえでの多くの問題の解決は理論地質学の成否如何にかかっているからである。

このような理論的課題の観点からみてもっとも有利な対象に対して理論的研究を実施する必要がある。このような論議は無駄なようでその実重要である。というのは、理論的研究の重要性を認めながらも、このような研究はいろんな応用上の課題を解決する過程で付随的に実施するものだと考えられがちだからである。このような場合には、研究対象は応用的課題に応じて選択されるため、理論的研究はこの材料が許す範囲でしか実施することができない。したがって理論的研究は著しく不利な立場におかれ、この研究がもたらしうるすべての成果を期待しえない結果になる。

これまでに述べたことからどのような実践的結論を導き出すことができるであろうか？

地質研究機関の構想としては、特別に選んだ対象について実施する理論的研究を強化する必要がある。地殻とくにその深層部の構造と発展の規則性の解明をこのような研究の中心にするべきである。これらの研究によって地質過程、とくに内成的地質過程の歴史とメカニズム、これらの過程の発達順序の規則性、および現在の地殻構造を生ずるうえでそれが果たした役割などが明らかにされるにちがいない。

地質調査においては地質現象の構成要素の大きさ・形・量比のほか、その物質組成や空間的分布を決定して観察される現象をできるだけ正確に定量的特徴づけを行なうように心がけるべきである。それと同時に各種の客観的測定法や計算法や統計的処理方法をできるだけ広範にとり入れる必要がある。また、測定や計算の機械化法の探求も地質学における重要な課題である。

地質学における実験的方法の開発とその物質的保証の強化も重要である。鉱物学や岩石学における物理学的実験法や構造地質学における物理学的モデル化などは地質学者の方法論的武器庫のなかで普通のものとならねばならない。そのためにはもちろんそれぞれの実験室やおそらく研究所の組織化が必要である。そのためのもっとも緊急な課題は高温・高圧下における岩石の物性を調べるための設備のゆきとどいた実験室を作ることである。

放射性元素による絶対年代測定法のほか放射性同位元素による地殻中の物質移動や古地理条件の研究手法も今後発展させる必要がある。

超深度ボーリングも技術的検討を加え、その組織化を計らなければならない。

地質・地球物理・地球化学などの総合的研究はとくに重要な意義をもっている。地殻上部(「地質学的」)の構造および発達史と地殻深部とマントル上部の構造および物理条件との相互関係の解明をこのような研究の課題とすべきである。地殻表層の主要な造構現象と火成現象とが終局的にはマントル上部の諸過程に規制されていることが現在すでに明らかになっている。したがって、構造帯ごとにその下の上部マントルの構造と物理条件とに当然差異が期待される。このような差異は現在すでにいくつか知られている。たとえば、その例として大陸地域と大洋地域あるいはいろんな時代の台地と褶曲帯の深部構造のちがいをあげることができよう。しかしながら、これらの知識はまだ非常に不十分で、しかも非常に不正確である。

さらに、地質構造やその発達の特徴を地殻深層や上部マントルの構造や組成の特性と地熱その他地球物理的場の性格などと比較しながら、種々の構造帯、たとえば、楯状地・台地・時代の異なる褶曲帯・活性化帯(activated zone)・内海・大陸から大洋への移行帯・島弧・大洋・大洋盆・大洋海底山脈・その他異なる次元の局地的亜帯(上にあげた大構造帯内に存在する)などを地質・地球物理・地球化学的方法をすべて動員して比較研究を行なう必要がある。

いろんな構造帯は地殻の進化の異なる段階を反映するものであるから、このような比較研究によって地質時代を通じて地殻や上部マントルの深部構造や組成に起こった変化の順序をも明らかにすることができるであろう。この場合、一連の地質学的研究は内成過程(造構・火成・変成過程)のあらわれの研究に向けられるべきである。また、この種の研究にはできるだけ広範に実験的研究——物理化学的・物理学的・構造地質学的研究を併用し、もっとも進歩した近代的方法に立脚すべきである。

この種の総合的研究を発展させるためには、まず手はじめにいろんな構造帯に属するもっとも面白い地域をいくつか選び出し、試験的に一致した計画と共通の目的をもって地質学者・地球物理学・地球化学者のグループの力を合わせた調査を行なうべきであろう。

ことに、このような課題は“Upper Mantle Project”(正確には「上部マントルとそれが地殻に及ぼす影響」として知られている国際的研究計画として取り上げられている。この計画には広範な人々が関心をもちその数はますますふえているが、現在までのところでは実際の活動は主としていくつかの地球物理学的部門(とくに地震学)だけに集中され、地球化学的研究や、とくに地質学的研究はこの計画の枠内ではほとんどなされていない。

おそらく、地球に関する統一科学を創りだすうえでの最大の難関はその要員の適当な資質にあるものと考えられる。大部分の地質学者は、現在のところ物理学・物理化学その他彼らに非常に必要な精密科学の原理的な諸問題に対して十分な準備をもちあわせていないということを認めないわけにはゆかない。地質学の論文中にみられる誤りから、地質学者は至る所で基本的な物理原則すらあまりに単純化して理解していることがわかる。前にも述べたように、これらの物理原則の定量的本質を無視することが地質学者の通弊である。他方、物理学や物理化学の素養をもって地球の構造や発展に関する全般的問題を取り扱っている地球物理学者や地球化学者は、地質学的資料や地質学的方法に対してまったく不十分な知識しかもちあわせないことが多い。

地質学者を養成する教育課程はたしかに時代おくれのものとなっている。実験的・定量的なデータと方法とに大きな注意を払うという条件のもとで、地質の全専門科目のプログラムを再検討する必要がある。中学校で教えるそれぞれの科目から幾らか進んだ形で大学初級で将来の地質専門家としての研究と切り離されたプログラムで教授されている物理・化学・数学などの一般教養過程に代って、地質学の各部門ごとにさしそめた問題の解決に必要な物理・物理化学・数学などの特別課程を高学年において教授すべきであろう。おそらく、このような課程で地球に関する物理学や化学の具体的なデータと基本的な知識とを結合させることができるであ

ろう。

物理学部で学んでいる地球物理学専攻の学生も現在行なわれているよりももっとつっこんだ地質学の知識を修得するようにすべきである。ことに、適当に選んだ地質の野外調査に参加させるようにすべきである。

物理学を専攻した学生を生物学の研究要員として育てるために生物研究機関で実習を行なうさいに用いられるいわゆる基礎研究所の試みは注目に値する。物理学や化学を専攻した学生が補助的研究室の実験要員としてではなく、地質学上の問題を解決するための直接的な一員として地質研究機関に入所するのは、固体の物理学や物理化学を専門とする研究所で地質学専攻の学生が見習勤務をする場合と同様に非常に有益であろう。

一面では、地球物理や地球化学のデータとそれを理解するために必要な物理・化学・物理化学の知識を伝へ、地球深部の物理や化学と地殻内での地質過程の関係を解明した地質学者向けの本と、一方では、地質学の方法論と確立された地質法則の本質を述べ、地質過程をよりよく理解するために物理学や化学の果しうる役割を明らかにした物理学者や化学者向けの本とを編さんすることが急務である。

最後にとくに強調しておきたいことは、上に述べたことを地球に関するある種の科学の「劣等性」あるいは「後進性」とその独立的存在の不当性を示す証拠だと誤解してはならないということである。たとえば、地質学は滅亡に瀕しており、行きづまり、地球物理学がこれにとって代るべきだというような意見には筆者は真向から反対するものである。この種の議論ほど無意味なものはない。地質学は地球に関する他の両科学と同様にそれによってうまく解決することのできる理論的・実践的な課題を沢山もっている。地質学が方法論的に決してゆきづまっていな何よりの証拠として、国家経済に鉱産資源を保障するにあたって地質学がたえずかちえている大きな成果をあげることができよう。地質学の定性的な性格は決してその後進性を示すものではない。それは地質学の研究対象の特性、とくに、その内的な複雑さと非再現性によるものである。地質学者を非難するどころか、むしろ、「より多い」とか「より少ない」「より強い」「より弱い」「より早期に」「よりおそく」「同時に」というような不確定な概念をうまく操作する能力と、主要なものと同様のものを直観的に区別するさいに地質学者が発揮する洞察力とは敬服に値する。何しろこのようなあまりはっきりしない方法論的基礎の上に立って地質学者は経済に鉱物原料の基礎を確保するという非常に難しい課題を解決するための結論を導ききだしているのだから。この途上には客観的にも主観的にも非常に大きな困難があるからこそ、地質学者はもともと早くから自分の課題を解決するためにできるかぎり時とところをえらばず定量的方法を用いてきた。

しかしながら、地球に関する科学が設定すべき全般的目標について考え、地殻中における造構現象や火成現象を引き起こす深部過程の原因とメカニズムの解明をその目的とみなすと、この目的に向かう途上には個々の科学分野に関連した特殊な課題のほかに地球に関する諸科学が統一さるべき分野が存在するという結論に必然的に到達する。そのためには、これら諸科学の問題の扱い方を接近させる必要がある。とくに、地質学はその研究に定量的方法を導入するうえでまだ利用されていない非常に多くの可能性をもっと用いるようにし、上にのべたその他の諸条件をみたすようにすべきである。これらの諸条件のうち若い専門家の教育の改良はもっとも重要だと考えられる。

地球に関する科学の統一はすぐには実現できるものではない。しかしながら、これは科学の客観的な発展の歩みに促がされて、かならず実現されるであろう。しかしながら、この統一が意識的にとりくまれ、若い専門家の新しい教育法の導入によって準備が整えられるならば、諸科学の統一は一層みのり多く、かつ調和のとれたものとなるであろう。