

資 料

551.1+551.24 : 551+550.3+550.4

地殻の発達とその過程における交代作用の意味について*

V. V. Tikhomirov

小 西 善 治 訳

研究対象となりうるわれわれの遊星の部分であり、かつ実際的にも最も興味のある部分にあたる地殻は、いままでは、最も外殻にあたる部分、主として陸地の範囲だけが研究されていた。しかし現在の地質学的編年史のデータと地球物理学研究の新しいデータとによれば、地殻深部の構造問題の解決に近づくことが可能となるとともに、地殻の発達問題の検討にふみ出すことができる。

地 殻 の 構 造

乾陸ならびに海洋で実施された最近の広範な地球物理学的研究・調査では、地球の種々の殻の構造および組成について推定できるような多数のデータが求められた。地球の最上部殻——すなわちレアル殻——は、その下部のシアル殻ときわめて明確な境界（モホロビッチ層面）で区別される地殻からなっている。このモホロビッチ層面は、地震研究で明確に捕捉されている。また陸地の地震、重力異常研究がすすむにしたがって、地殻が数層にそれぞれ分けられることが確認されるようになった。例えば、陸地では、比較的薄い脆弱な堆積岩層の下には、平均厚約 15 km のいわゆる花崗岩質基盤が分布している。その下部には、カンラン岩基体（sub-structure）に直接する玄武岩質層が分布している。花崗岩質、玄武岩質、超塩基性質、カンラン岩質基体という名称は、岩石学的組成が直接決定できない限りにおいて仮定的に与えられた名称である。しかしこれらの基体は、地震波の伝播速度および若干の他の地球物理学のデータによつて決定できる。陸地では、地殻の厚さは、25 km から 75 km の範囲であり、平均約 35 km である。海洋領域では、地殻の厚さは、著しく薄くなっている。この領域では、モホロビッチ面は、大洋の水面下 10～12 km の深さに分布している。この場合水柱の部分は 4～8 km であるか、硬い地殻の部分の割合は約 5 km である。海洋領域では、海成堆積物の薄層下には、海洋底のほとんど至る処にひろがる玄武岩質層が分布している。Magnitsukii によれば、この海洋底では、厚化海成堆積物・火山堆積物が、玄武岩質中間層を伴わずに、カンラン岩質層上に直接していることが推定できる。地球の海洋地域では、花崗岩類を欠失している。花崗岩類は、大陸斜面および、島弧地域にのみ出現し、ここでは、シアル殻が一層厚くなっているのが認められる。

陸地を構成する岩石組成に関する地球物理学的数据は、地質学的観察によつて確かめられるとともに、陸地では、珪酸を多量に含む晶質生成物が広域に分布していることを確立している。この種の珪酸を多量に含む晶質生成物は、変成作用産物に近い花崗岩質組成の様々な貫入岩類ならびに酸性侵入岩類である。大陸地域の上部殻層準では、酸性組成の岩石類が卓越していることは、陸地の花崗岩質基盤説を裏付けている。同時に、海盆地域や、遊星の下部殻の部

*V. V. Tikhomirov : К вопросу о развитии земной коры и о значении в этом процессе явления метасоматоза, Проблема 14 гранито-гнейсы, Международный геологический конгресс XXI сессия доклады советских геологов, 1960

分では、酸性岩類がみられない。一般的にみて、地球の構造中における酸性岩類の役割はきわめて低い。すなわち容積についてみれば、われわれの遊星を構成する物質の1%にすぎない。他の天体では、花崗岩類は、全然存在しないか、きわめて僅か分布しているにすぎない。このような考え方は、遊星の破砕片である隕石の組成が常に超塩基性組成に近いことに基づいている。最も酸性度の高い隕石の変種には、輝緑岩が対応している。たしかに様々なテクタイトおよびシリカガラス——ほとんど珪酸から組成されている——の発見が知られている。しかしこの種珪酸生成物の成因については、現在においても、明らかでない。

E. K. Gerlingom と M. L. Jashchenko のテクタイト類の絶対年代の測定結果は次のようである。

すなわちリアザライト—12百万年、インドシナイト—4,6百万年、モルダヴェイト—3,1百万年である。テクタイト類の絶対生成年代をみると、われわれが発見している岩石類の絶対年代よりも古くない。石質隕石の絶対年代と比較すると、テクタイトは、宇宙物体に対して若干新しいことを示している。双生化学元素系列 (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu) Paragenesis series の比の不変法則によつて鉄族の量的比を決定すると、テクタイトの上述比は、地球成堆積物の比と、きわめて精確に一致するが、石質隕石について観察できる比とは、著しく異なっている。かりにテクタイトが隕石源であると仮定すれば、隕石中で知られている輝緑岩類と、テクタイトおよびシリカガラスを構成するほとんど純粋な珪酸質の生成物との間に中間生成物があるかどうか問題となってくる。輝緑岩とテクタイトとが同一起源であるとすれば、当然中間岩石組成の隕石が存在するはずである。しかし、このような中間組成の隕石は、観察されていない。上述のデータは、むしろ、テクタイトの地球源に有利であることを物語っている。

以上にのべてきたことは、花崗岩類が、われわれの遊星に特徴的な特殊な生成物であることが推定できる根拠となつている。地下深部で発生しその作用容積については太陽系の物体とほぼ等しい物理化学的作用過程は同一であるはずであるから、花崗岩の生成帯は、地表面だけに限られ、その物理、化学的条件の支配環境は、他の既知の遊星面にみられる環境と著しく異なっている。

類似の考え方は、さまざまな岩石類の酸素同位元素分析の結果によつてある程度確認されている。その結果によれば、花崗岩中の $O^{16} : O^{18}$ 比は超塩基性岩石類ならびに隕石の珪酸塩相の相似比と本質的に異なつていることを示している。すなわち隕石とカンラン石系の岩石類とは生成条件が近似し、この2群——一方では花崗岩、他方で隕石とカンラン石系の2群——は本質的に成因が異なつていることを立証している。

シアル地殻の成因

この地殻を構成する岩石はどうして発生したか？ある学者は、花崗岩が初成マグマの産物であることを認めている。この種の学者は単一マグマ——その組成についてみれば neutral ——が分化するために、超塩基性ならびに酸性誘導物が析出することを確認している。他の学者は、地殻の深部には、2種または3種の異なるマグマの独立の“hearth”があり、花崗岩類が酸性マグマ種の凝固産物を代表するものと考えている。

珪酸、アルミニウムが卓越する地球上の堆積岩類は、若干の地質学者の見解によると、初期花崗岩の直接破砕産物である。このような考え方は、地殻の表面帯を構成する多数の陸成岩石類と花崗岩類との全化学組成の近似性に基づいている。

しかし塩基性、超塩基性岩石類の風化産物の研究結果から明らかなように、この種の風化堆積物の組成は、花崗岩の破砕生成物のそれときわめて近似している。

塩基性、超塩基性のマグマ源岩石類の風化について現在観察できる現象としては、機械的および化学的風化過程系があげられる。この場合には、初期物質の破砕と分化とが発生し、1鉱物が消滅し、他の鉱物が誘起され、その上風化過程は、珪酸、アルミナ、炭酸塩に本質的に富

化された堆積層の生成方向に進行する。例えば Polkanov のデータによると、湿度の高い熱帯気候の下で塩基性岩石類が風化されると粘土および砂以外に、非破砕鉱物から、アルカリ珪酸塩溶液および膠状珪酸が生成される。そのほかに炭酸塩・重酸塩カルシウム・マグネシウム・鉄および珪酸が求められる。

カンラン石のような超塩基性鉱物類が風化されると、マグネシウム質、鉄質炭酸塩、褐鉄鉱、珪酸が求められる。

超塩基性岩石類の重要な鉱物の1つである斜方輝石も、カンラン石が破砕されると求められるような風化産物を生じる。ウラルの超塩基性岩石の風化殻を研究した Ginzbug によると、蛇紋岩が風化、破砕されると、他の鉱物類とともに、蛋白石・石英・玉髓・緑玉髓が生成される。単斜輝石からも、水酸化アルミナが生成される。塩基性岩石類の組成中にみられる輝石・角閃石・斜長石および若干の他鉱物類が完全風化を受けると、花崗岩が風化される場合に生じるような風化産物を発生することが確認されている。

このデータは、次のような結論を明らかに裏付けている。すなわちシアル殻の堆積生成物が生じるためには、すべての堆積岩系が塩基性火成岩類から生ずるようであるから、初生花崗岩類をさがす必要がない。

また次の点は重要である。すなわち堆積岩中における石英の含量は、塩基性組成の岩石類と比較して著しく増大するので、すべて珪酸塩が分解すると、蛋白石・玉髓およびその他の珪素変態の型態で蓄積される遊離珪酸が求められることが明らかにされている点である。ただしこの場合には過剰の鉄、苦土化合物は運び去られ、さまざまな鉄質鉱石、白雲石等の型態で、多量に堆積される。しかし鉄、苦土溶液の1部分は、地殻中に深く吸収され、カンラン石基体中にまで達することが考えられないことはない。この種溶液は、また下降過程で、大洋底の脆弱岩石類の化学的組成に若干の変化を及ぼすことが推測される。

はるか昔に起こった風化過程は、現在観察されている上述の風化現象と類似の既知特性をもっていることを考えておく必要がある。事実において、地殻の古期堆積岩を研究すると、その組成中に多量の珪素、アルミニウムがみられるにもかかわらず、源泉としては——発生した破砕作用の結果として生じる——シマ組成、すなわち超塩基性組成の初成地殻であつたことが推定される根拠がえられる。Frolova のデータによると、シベリヤ東南の原生代の岩石の平均組成は、次のようである。SiO₂—57%、Al₂O₃—10~11%、FeO+Fe₂O₃—12~13%、MgO—5~6%、CaO—8~8.5%、アルカリ—4%である。

Frolova の見解によると、この種岩石類は珪酸に著しく enrich されているにもかかわらず、岩石学的組成では塩基性の火成生成物の分解によつて生じたものである。

Frolova は次のような結論に到達している。すなわち初成シマ殻は、原生代の堆積岩が生成されるのに必要なあらゆる素材を提供することができた。これは、鉄・マグネシウム・カルシウムの珪酸塩の含量の高い塩基性火成岩には、他のすべての岩石類よりも、迅速に化学的に分解される状態が促進されるからである。

Gill はカレドニア植状地を研究して類似の結論に到達している。Gill によれば、この地域の原生代岩石類は、岩石学組成が、塩基性の地殻が破壊、再処理されて生成されたものであると。

岩石類の風化を語る場合には、まずこの種の現象に特有な若干の特性についてのべておくことが時宜に適している。さまざまな気候条件の下で脆弱な陸成物質を形成し、次いで堆積岩の組成中に入る重要なファクターの一つである風化過程は、さまざまな強さで完了される。例えば風化速度は、熱帯の湿潤な気候条件の下では増大する。この過程自体は、また地表水または大気中の炭酸類の含量の増大の下で行なわれる。この過程では、これらの諸現象とともに、化学反応速度が温度が10°上昇するたびに2倍または4倍増大することが知られている。

地質学的編年史に反映している物理的、地理学的条件の変化史を解析すると、先カンブリア紀の風化の強さは、古生代および現代のそれよりも著しく大きかつたことが指摘できる。

Obruchev によれば、古期シベリアの乾陸地では、強力な化学的、機械的風化の明確な跡が認められる。Korzinskii は Alaah に関する著作中で同一現象を記載している。Polkanov によると、バルト楯状地地域内に発達する岩石類はその地域に広大な乾陸地が先カンブリア紀に存在し、そこでは、強力な風化と全堆積分化作用とが、行なわれるのに必要な好ましい条件が発達していたことを立証している。類似の物理的、地理学的条件は、先カンブリア時代およびわれわれ遊星の他の地域でも、また特徴となつている。

周知のように、その中に循環酸素をもつ土壤は、下部の岩石類の風化過程の速度を促進する。原生代においては、このような好ましい条件を欠失していたにもかかわらず、特定の外的環境により、充分迅速にかつ完全に行なわれた。例えば、当時大気中の炭酸量は、こんにちよりも遥かに、大きく、そのうち相当の部分は5億万年にわたつて吸収され、膨大な石炭層が形成され、また一方では、炭酸カルシウムの形態で海中に沈積した。その当時の地球表面の温度は、こんにちよりも遥かに高かつたことが考えられる。

Khlopin の計算によれば、放射源熱量は、原生代(3億万年)では、現在よりも5倍以上であつた。しかし2億万年代では、こんにちの数値を2倍上廻つていた。そのほかに、強い太陽光線で地表面が暖められていたので、比較的浅海が存在と乾陸を切る多数の海峡とが特色となつていた当時の地形特性の形成が促進された。このような露出岩石の強烈な加熱、過分の植生、土壤の生成に対して、盆地に注ぐ水の加熱が加わつた。したがつて地球内部の周期的加熱説——これによつて地球表面の温度上昇を誘導する——によらなくても、先カンブリア時代に、当時乾陸であつた地域に露出していた岩石類の強力な風化に対して必要な充分条件が存在していたことが容易に指摘できる。このような条件は、風化帯に傾いた地域に膨大な堆積層の蓄積を促進し、シアル層の初期生成が行なわれたようである。

いつ初成花崗岩が出現したか？

堆積岩の平均組成は、熔融すると15~20%までの花崗岩質共融物質が生じるような組成である。さらにこの種の物質が片麻岩類および花崗岩類へ変形するには、交代作用で可能である。Korzinskii は、珪素、アルミナ、鉄およびその他の僅かの易動性成分の相関関係が花崗岩に近いような岩石類では、花崗岩化作用を誘導する交代作用によつて、花崗岩相が直接生ずることを指摘している。

頻度は劣るが、他の好ましい場合には、花崗岩化作用は、その性質からみると交代作用に近い熔解と置換を誘起する汎過、浸透(マグマ性)溶液の作用によつて発生する。

Sudovikov は、さまざまな岩石類が花崗岩に緩転移する数例を記載している。Sudovikov によると、北部カレリヤ地方の塩基性岩石類は、花崗岩化作用を受けて石英・斜長石質角閃岩類に転移し、次いで花崗岩類組成の角閃石質片麻岩が生じた。

このようにして、現在の文献は、初成シマ殻が長期間にわたつて風化作用を受けると、シアル組成で覆われた巨大な地区に堆積岩類の膨大な地層を生じることを立証している。さらに原生代にその地域に起こつた(その後の)交代作用過程は、巨大な酸性岩石類塊の生成を誘導したことが推測される。巨大な先カンブリア紀の花崗岩質底盤は、類似の成因によるものであるから、貫入成因を主張する人々にはとうてい解明できない空間問題を解決することが必要であることを示している。

先カンブリア紀花崗岩の変成性質に関する上述のような考え方については、最近多くの学者が述べている。その中には、Sedergolm, Read, Backlung, Nikolaev, およびその他の多くの地質学者の名があげられる。

このような考え方は、Gilluly の著作の中にもみられる。Gilluly によれば、多くの地向斜帯の花崗岩質基盤は、初成のシアル殻でなく、交代作用によつて花崗岩・片麻岩類に転移した古期シマ質岩石である。

以上のデータをまとめると、次のような結論が誘導される。すなわちシアル殻は、地球の初期発展階梯で発生し、次いで花崗岩が出現し、陸地の花崗岩基盤の生成は、われわれの遊星の

原生代史の若干後期の段階にあつている。

このような考え方に近い Frolova によれば地球のシアル殻は原生代の初期になつて生成されたものであつて、それまでは、堆積岩類の素材を供給したのような初成花崗岩類も、存在しなかつた。初成花崗岩石類は、原生代の終り頃にはるかにおくれて、主として超変成作用 (ultra metamorphism) によつて生成されたものである。

Pavrovskii は、初成玄武岩質殻の風化にとつて必要な条件が存在していた古期“島”地域にシアル殻ができたはずであるという考え方を主張している。Pavrovskii によれば、この種の“島”が、現世の陸地の基盤となつたものである。

原生代に発生したシアル殻は、分布地域の拡大と厚さの増大によつて、その容積をさらに増しつづけた。(先カンブリア紀後期、古生代おそらく中生代にわたつて、拡大運動が持続したものと考えられる。)

花崗岩体の賦存条件を研究してみると、重要な法則性、すなわち隆起地帯にのみ位置していることが考えられる。花崗岩類は、陸地の基底を構成し、背斜褶曲の中心核部に出現する。同時に、大陸の低地地域では、向斜構造内の貫入物質は、花崗岩質組成をほとんどもっていないで、常に塩基性かまたは超塩基性組成を規則的に示す。

このような現象は、花崗岩類が交代作用で生成された先カンブリア紀の構造についても、また貫入花崗岩類がマグマの凝固産物——原生代花崗岩の再熔融によつて生成されたようである——として出現する古生代および一層新期の(地質)造構生成物についても認められる。経験的に指摘された事実は、隆起地帯では、花崗岩化作用に対して好ましい条件がつくられたことを立証している。たしかにいえることは、花崗岩の交代作用の誘起を促進した流体——流動状態の花崗岩質マグマにあたる——が、隆起地帯だけに分布する地殻の上部層準に上昇、浸透する可能性が考えられることである。また隆起ならびに花崗岩質溶液の発生が、深部現象——その本質については現在明らかでない——で条件付けられる同一の共通原因によつて出現することは、無視できない。

シアル層の形成特質と履歴に関する上述のデータは、陸地地域のものである。すでに指摘したように海洋底地域では、陸地と本質的に異なる地殻の構造および組成がみられる。

地殻の陸地型の海洋型への転移現象

多くの研究者によれば、地殻の造構的発達の過程は、陸地に置き換わる地域の拡大、すなわちシアル殻の拡大方向へ進行しつつあることが推測される。

例えば Pavrovskii は、類似の見解を主張し、造構造過程の方向は、シアル質、花崗岩質外殻の地域的拡大とその厚さの不断の増大とで特徴付けられる。

Arkhangerskii および Shatskii は以上の結論を基にして、原生代の初期から終期にわたつて、Plate-forme が地向地地域の(面積)規模の縮小によつて絶えず拡大していたという仮説を述べている。しかし Plate-forme の成長という明確な事実はもちろん陸地地域の拡大が無限に続いたということをも物語つてはいない。

最近まで陸地であつた場所には、現在海盆が分布していることを立証する多くの事実がみられる。

Belousov, Lindeberg, Muratov およびその他の研究者によれば、以前に搬入(堆積物)地域——大陸棚の隣接地——であつた数箇所には、現在深海帯が分布している。これらの地帯には、ベーリング海峡、日本海、印度洋の広大な海域、および多数の他の海盆地域があげられる。

上述の海洋の深海地帯では、地震探査および重力測定によれば、大陸の沈降地域が地殻の陸地構造を示すはずであるが、地殻の厚さは、普通の海洋地域に近い厚さをもっている。若干の研究者はこのような現象について次のように解明できると考えている。すなわちこのような海域地域は、最近まで乾陸であつた地域に直接接近した地域にあたるか、また初成海洋の残留地域(relict)であると。例えば黒海および地中海のような内陸海盆に接する地域の地質学的履歴

を研究すると、これらの海から僅か離れた地域には、古生代の初期から侵食作用を受けた隆起地塊と活火山が存在していたが、中生代初期からすでに巨大な山嶽隆起地塊と Plate-forme 地帯ができあがっていた。したがって、この両海は、古生代終期から2億万年の間、少なくとも、堆積素材の不足を経験しなかつたはずであり、そのため陸成、火山成、造構成、化学的風化性生成物が堆積したことが考えられる。いま沈積速度を年0.1 mm、——この値は現在観察される値および過去の地質時代に起こつたものよりも著しく低い値である——にとれば、20 kmの厚さの地層が形成されているはずである。そのうえ堆積物が沈積すると、その補償作用として、この地帯は、間断なく沈降することが必要とされる。したがって地球物理的調査を行なうと20 kmの堆積岩層が対応的に観察されるはずである。しかしこの種の堆積岩層はみられない。

さらにアラビヤ半島とアフリカの沿海地帯を分かつ紅海のデータについても同様な現象がみられる。すなわち中生代の終期に発生した古期 Plate-forme が海盆中に分布する紅海では、隣接 Plate-forme の地層層厚に等しいシアル殻層厚が海底下にみられるはずである。しかしここでは、シアル殻層厚は著しく縮小し、地球物理学的数値は、一般の海洋底の堆積物の厚さに近似している。したがってこのデータは信頼がおけるものとするならば、地中海・黒海・日本海・ベーリング海等に以前にたしかに存在していたと思われるシアル層の消滅した事実の解明を求めることが必要となる。

この地域では、巨大な陸地地帯の複雑な沈降が起こつたことは明らかである。そのうえ同時に、これらの地帯を構成するシアル殻の根本的な再編成も行なわれた。このような過程はどうして実現したのであるか？最近この問題は、非常な注目をひき、この現象に対して、さまざまな提案がなされ、時には機知に富んだ解釈が行なわれている。

きわめて注目すべきものは、Belousov 仮説である。この仮説によれば、このような場合には、シアル殻は、沈降地塊を被覆しながら、下部超塩基性基体ならびに玄武岩質溢流マグマ中に“溶けこんだ”ことが考えられる。De Meniuzkaya は、同一見解を支持し、大西洋および太平洋の箇所に以前分布していた乾陸は、中生代に沈降し、この沈降現象は、陸地基盤の“溶けこみ”を伴つたと考えている。

Muratov はこの種の現象に対して若干異なつた解釈を提案し、沈降陸地地塊の花崗岩質層が、高压、高温作用下で塑性を帯び、陸地の隣接地域下に側圧入されることが考えられる。しかし近似計算によると、Berousov の見解でも、また Muratov の見解によつても“溶けこみ”または塑性圧入が起こるこのような比較的浅処では、この種現象が実現するために必要な物理的条件は存在しない。いま海域地域のモホロビッチ層面の平均深度を海面下10 km——水柱高5 kmとする——にとるならば、モホロビッチ層に直接隣接する地帯の圧力は、約2,000 気圧(水頭圧500 気圧、岩圧約1,500 気圧)となるから比較的小さいであろう。この深度では、温度は高くない。すなわち花崗岩中の地熱勾配の値は、50 m/1 に等しく、大陸および海洋底における地表面からの熱流は等しいが、海底堆積物層の温度が1度である点を考慮に入れるならば、モホロビッチ層の表面では温度は100度近くであるはずである。(Lovering は、熱流、熱伝導係数、放射熱の発生速度を考慮に入れてモホロビッチ面付近の温度について一層精確な計算を行なつている。この計算によると深度11 kmの温度は123°であつて、圧力は22,000 Bar、すなわち2,170 気圧である。ただし水柱5 km、地殻の厚さ6 kmとする。)

したがって、深度10 kmばかりでなく、圧力が5,000 気圧、温度が300度のような2倍以上の深処でも、超塩基性基質の溶け込みまたは粘弾性流動を起こすことを期待するのが難しいことは全く明らかである。そのうえ地殻の限界内ならびにカンラン岩被殻内には若干の流体マグマ溜が存在する可能性を無条件に除外している地球物理学データを考慮に入れるべきである。したがってシアル層の溶け込みまたはその塑性圧入を主張する仮説は、証拠があるものとは認められないであろう。さらに信頼度の低い考え方は、玄武岩質溢流マグマによる花崗岩質層岩石の同化の可能性を主張する考え方である。しかし、酸性岩石類が沈降すると結局は、超

塩基性物質の置換が起こることを示す。同時にどのような割合であつても、花崗岩が玄武岩質マグマ中に溶け込まなければカンラン岩が求められない。

Bemmeln によつて、展開された見解によれば、“海洋化現象” すなわちわれわれが陸地地殻の海洋への転移現象に対して名付けている現象は、2つの径路によつて実現される。この現象は、玄武岩質火山作用 (basaltic volcanisms) の結果かまたは変態作用 (transformation) の結果によるものである。地殻を構成する岩石および地向斜性堆積物の塩基性を誘導する変態作用は、上昇ミグマタイト front によつて移動する Mg, Ca, Fe イオンで誘起される。この種の変態作用では“地向斜海底”に蛇紋岩系の生成を誘導し、過変成作用および再生マグマの発生を伴う。Bemmeln の見解によれば、火山活動下の塩基化現象は玄武岩質マグマの長期間にわたる多回巨貫入、溢流によつて生じる。この種の現象は、地殻の平均密度を高めるので、陸地地域は、イソスタシ均衡状態をもち維持できなくなり、沈降して、海洋盆地に転化する。この仮説は、見掛上明確であるにもかかわらず、議論の余地がある。まず第一に、陸地地塊の沈降は、モホロビッチ層面の移動を伴う比密度の増大によつて完成されたものとするならば、現在の乾陸地域内において、沈降運動で準備されたと考えられるきわめて薄い地殻で構成された“伸張地帯”を求めることができるであろう。その他に、貫入作用で海洋化された地塊は明確な凹凸型態のモホロビッチ面をもつてはならずである。しかし實際上、沈降運動で準備されたきわめて薄い地殻からなる“伸張陸地地帯”も、モホロビッチ面がきわめて明確な波状を示す地帯も、こんにちにいたるまで明らかにされていない。(モホロビッチ層面は常にきわめてなだらかな曲線を示していることが知られている。)これらの諸事実は Bemmeln の見解に無条件に結び付けられない。

“海洋化”に伴う諸現象を解釈する場合に、地質学者が会合する難問題は、地殻の沈降地帯では変成現象が誘起され、反対に隆起地帯では、花崗岩化作用が行なわれるものとするならば、ある程度解くことができるであろう。また特別の場合には酸性岩類が化学的置換によつて塩基性岩石類へ転化 (transform) することが可能であるという説は、Bemmeln によつて述べられている。ただしこの際にはマグマ熔融液が生成されるはずであると仮定している。しかし計算結果で明らかのように、塩基性化地帯における問題とならないから、このような現象過程を取り扱う際には Bemmeln と異なる仮説を求めることが必要である。

花崗岩化作用および塩基性化作用の交代作用の類似性から出発すると、シアル層のシマ層への転移は、高くない温度、圧力の下での固相で起こりうることが期待されるはずである。この場合には、シアル殻下部は、カンラン岩質基体から供給される鉄、苦土溶液の作用を受けることが推定される根拠がある。花崗岩質岩石類の塩基性化は一度でなく、一定の継起性でもつて行なわれるとすると、初交代作用では岩石が優黒質ミグマタイトに完全に転化するまで有色鉱物の含量増加が起こる。次階梯では、交代作用がさらにすすんで、黒雲母化・角閃石化を誘起し、最終階梯では、塩基性岩石組成の基体岩石が転移によつて造成される。基体から供給される氫過、浸透マグマ性苦土質溶液は、珪素には不飽和状態にあるから、沈降岩石の石英と反応し、斜方輝石で置き換わるはずである。交代作用の初期階梯では、アルカリ長石類は、むしろすべて黒雲母・霞石・塩基性斜長石で置き換わる。しかしどのようなシアル殻岩石 (花崗岩類、長石質または石英質砂岩、粘土 (頁岩) または石灰岩) が沈降運動に巻き込まれるかによつて、さまざまな変成産物が、交代、置換によつて造成されるが、このような産物は、すべて中性または塩基性岩石組成をもっている。例えば、さまざまな酸性岩石類に対しては、Khamar, Daban 山脈地域で Semenenko が観察したものと類似の転移系列が指摘できるであろう。

1. 微長石-曹長石花崗岩類-石灰石-アルカリ角閃石花崗岩-花崗閃緑岩-閃長岩-閃緑岩
2. 微長石-曹長石花崗岩類-石灰岩-アルカリ輝石角閃石黒雲母花崗岩-透輝石を伴うチャルノカイト-鉄白雲石-モンゾニ岩-antiperthite を伴うマンゲル石-黒雲母-角閃石輝石-ハンレキ岩

3. 石灰石—石灰質角岩，輝石—黒雲母質—塩基性ミグマタイト
4. 黒雲母—角閃石—輝石—カンラン石

交代作用性塩基性化の初期産物は、全体としてはその性質がハンレキ岩に近い地層の生成を促進することは明らかである。そのために地球物理学者は、この種地層を玄武岩と名付けている。したがって上方の花崗岩堆積、被殻への緩転移と関連性のあるような地層が地球上に存するのはこのためである。交代作用性塩基性化を花崗岩質基盤岩石類ばかりでなく、脆弱堆積物類の上部も受けることを考えてみる必要がある。この種岩石類は、凝固し、交代作用の結果として変成岩類が生成されることは明らかである。海底下10 kmの深部では、一層不変の物理・化学的環境が成立し、そのために交代作用はここでは、安定環境で進行するとほぼ同様な状態で行なわれるはずである。すなわち Korzhinskii のデータによれば、ここでは、置換（交代作用性）は、緩慢でなく、即座に起こり、1相から他相へ継的に波及し、置換フロントがきわめて明白な出現形態をとつて進行する。そのために玄武岩層とその基盤——すでに交代作用終期にはカンラン岩類に転移している——と境界面は、きわめて明確であるはずである。例えばモホロビッチ層面がシアル地殻と超塩基性基とが明確になっているのが現実に観察されている。すなわちシアル地塊の沈降が進むにしたがつてますます新しいシアル殻の下部部分がカンラン岩類に転移し、下部生成物に結合し、モホロビッチ面は一層上位層準中に混合するとともに、測地面からの絶対深度は、ほぼ同一状態に留まる。写實的にあらわすと、沈降地域の地殻の岩石類は、遊星の所要の点ではモホロビッチ境界面に対応している等深曲線下部に沈降し、シアル殻からシマ殻に転移し、上部地殻と分離しカンラン岩質殻に分けられる。

この場合交代作用現象は、安定地塊でなく易動地塊（沈降地塊）内で行なわれるので、置換現象の出現は、完全にかつ迅速に促進される。

沈降運動を受けた地殻地域は、巨大深部破砕帯に限られている。このような事実は、地形学的データとこの地帯に普通位置している超塩基性マグマの出現とが立証している。換言すれば、基体の超塩基性組成の下での塩基性化作用自体は、既知の物理、化学的法則に照らしてみると、花崗岩化作用よりも一層単純でかつ自然な現象である。

このようにして、さまざまな研究者は、海洋化現象——陸地地殻の再編成——の原因および結果の解釈に対してさまざまな approach を行なっている。

ある学者は、海洋化が沈降後に発生し、その直接の結果として出現する（Belousov, Muratov）と考えている。他の学者は、陸地地殻の“伸張”に終わった海洋化は、その（海洋化）結果として出現する追加沈降運動を誘導する（R. V. Bemmelen）。現在考えられている仮説の見解によれば、海洋化と沈降運動は、現在まだ明らかでない共通の原因によつて誘起されたものである。この原因は、遊星の固相物質の凝固化と、シマ、シアル地殻およびハンレキ岩塊に及ぶ巨深部破砕帯の生成、膨大なシアル地塊の沈降、交代作用を誘起した超塩基性流体の深部移動を誘起することが考えられる。

地殻の発達図式

地球の初成固化被殻がシマ組成の岩石類からなっていることは、推定できる根拠がある。流体殻（水圏）および気体殻（気圏）は太陽系の冷却遊星として地球が発生すると同時に形成されたものである。水圏および気圏の組成および容積は、安定していないで、時間の流れに伴なつて常に変わる。

原生代の初期には、地球の初成シマ殻の風化はきわめて強烈に行なわれた。この時代の地殻を特徴付ける著しい造構造運動は、多数の隆起、沈降地帯の生成を誘導し、そのために被覆岩石類の多回再堆積と膨大な変形堆積物層の沈積とを促進した。

堆積物は、鉄、苦土化合物の搬出に伴なつて珪酸、アルミナで富化される。隆起地帯では、カンラン岩殻から酸性、汎過、浸透溶液が同時に析出し、初成堆積岩層中へ浸透し、巨大な

花崗岩質塊が、交代、置換によつて誘起された。シアル被殻は、至る所に発生するが、われわれの遊星を不均一に覆っていた。

原生代初期の地球の地質学的履歴は不可逆性のある種の特性的で後の時代と区別される。とくに交代作用による花崗岩の発生は、同時代のきわめて特徴的な現象である。しかしこのことから、シアル殻の発生が風化と堆積分化とによつて主として起こつたものとはならない。また超塩基性基体からは、玄武岩層に対する素材を供給したハンレキ質マグマも析出し、既成のシアル層が拡大したことが推定できる。しかし類似の貫入現象は、原生代では比較的僅少であつたようである。したがつてマグマ分化現象は、ある程度大規模に行なわれなかつた。すなわちきわめて重要なことは、マグマ分化作用は、酸性溶液——花崗岩質溜分 (fraction)——の生成にまで達しなかつたことである。このことは、古期花崗岩類が常に整合 (地層に対して) に出現し、その後の時代になつてはじめて層面を切る花崗岩質、岩体が発生したことで立証される。

地質学的履歴の初期階梯の間では、遊星面の個々の地域の造構様式には、本質的な差異が存在しなかつた。上昇・沈降運動は、さまざまな地域に偶発的に発生し、地塊の置換が起こり、多回侵食 (multi erosion) と地表面岩石層の再沈積とが促進された。この時代に続いて、相当膨大なシアル層の沈積が進行した。

原生代、約 10 億 5 千万年以前に、現在の陸地地域は、既知のように凝固された。この地域内では、堆積物の沈積が停止し、マグマ活動も一時休止した。このことは、絶対年代の決定データで裏付けられる。すなわち 13 億 5 千万年から 8 億 7 千万年までの間にある種の岩石類を欠失していることが確認された。次いで Neogene になると、Shatskii が指摘しているように一般的造構様式の再編成と既知の Plate-forme および地向斜の定着が行なわれた。すなわちシアル層の拡大と現世の陸地の形成とを誘導した新堆積物沈積階梯が始まつた。さらに造構造的には比較的活性度が劣る地域が発生し、われわれの遊星を構成する物質の凝固化が持続するにしたがつて、地殻の巨地塊の沈降を誘導する条件が、しばしば発生した。

地質時代および造構造史の比較対照を行なうと次のような結論に達する。すなわち遊星を構成する物質の凝固化と放射熱の放出による地殻の冷却とは、地球の凝縮と個々の巨表面地塊の沈降とを誘起した。このような沈降地域は現在の海洋となつて出現した。

この過程では、測地学的にみた地球の容積および輪かくはほとんど変わらなかつたので、固態被殻内の凹地は、水圏で充たされ、その容積は、地球内部から供給された新水量によつて規則的に増大している。

沈降運動が及んでいる地域は、その地域の限界内における地殻の本質的な再編成を誘導した特有の沈降条件の作用を受けた。すなわちこの条件に支配された造構易動性帯には、比較的低温および圧力の下で、交代性塩基性過程の発生を誘導した超塩基性組成の汚過性、浸透マグマ溶液の循環が発生する。この場合には、シアル殻は、始め塩基性組成 (玄武岩質層)、次いで超塩基性組成の岩石類層に転移し、次いで超塩基性組成岩石層はカンラン岩質基体に合体している。初期地質学的履歴階梯では、陸地地帯のシアル殻の拡大が主として起こつたとするならば、ほぼ中生代からは、地殻の収縮を誘導した対立現象が認められる。初成階梯では、現在みられるような海盆は存在しなかつたようであるが、陸地の成長はあらゆる場合を通じて、決して海盆の隆起によつて起こらなかつた。しかし反対の場合には Kuenen が正しく指摘しているように、現世の陸地に、たしかに深海成と考えられる堆積物の発達する地域が求められるであろう。シアル殻の厚さの増大は、地向斜帯にのみ起こつたことを指摘しておくことは重要である。このような地向斜帯では、強烈な垂直運動が行なわれたために、厚層堆積岩層の沈積に対する可能性が造成された。古期 Plate-forme の発達地域では、地殻の厚さは、あたかも発生時と同じような状態に留まつている。したがつて地殻の極大層厚は、アルプス造山廻廻に生成された山嶽地域に認められるが、陸地地域の極小層厚は、晶質、片岩類の発達する楯状地、先カンブリア紀および古生代の Plate-forme 地域にみられる。このような状態は、シアル殻は、深

所物質の分化によつて下方からでなく、堆積物の沈積によつて上から生長し、その上シアル殻の成長は、陸地の拡張期(海退期)にのみ起こつた。以前の巨乾陸地塊の破碎と沈降傾向が強まつた時代から、地傾斜におけるシアルの成長と海洋化によるその収縮とが補正的に行なわれたことは疑問がある。遊星の収縮現象は将来においても持続するものと仮定すると、巨陸地塊の沈降現象は、現在においても停止していないと理論的には考えられる。そのために、陸地の面積は、さらに収縮するが、この種過程に伴うシアル層の変貌は、結局シアル層と花崗岩層とのほとんど完全に近い消滅を誘導するはずである。

地球が現在体験しているような発展階程を過ぎた他の遊星では、シアル殻も、Granitoid 殻も存在しないと考えられているのはこのためである。破烈した遊星の破片(隕石)は地球上に落下するこの種の遊星は、一層軽くその組成が酸性の被殻がすでに沈降と塩基性化とを蒙つた進化の最終段階で、catastrophy をも受けたことは明らかである。

地球の進化がさらにすすむと、固化外被殻を構成する物質のある平均組成が確立されるはずである。この種の組成の物質は、超塩基性組成に近い鉱物化合物——所要の物理、化学的条件下で最も安定したもの——に必ずなるであろう。要約すると地球上のシアル殻とGranitoid は、われわれの遊星の進化階梯を特徴づける特性を示しているものといえよう。

遊星は、宇宙の進化過程で出現し、消滅するようである。そのために、われわれ遊星に特有なシアル層およびGranitoid は、宇宙においてはきわめて珍しい現象である。

上述の地殻発達仮説に関連する若干の問題について

上述の仮説は、地殻の変形の主要要因として交代作用のさまざまな形態を考えている。

火山性溢流および貫入の形態で地殻上に定着するマグマ活動の出現は、どのように解釈すべきであるか? まず下部シアル殻ならびにシマ殻は、著しい圧力下にある固態加熱物質からなっていることを考えてみるべきである。個々の地域では、さまざまな深度に、流態マグマの局所“たまり”が誘起される。このような溜りの出現は、地域的放射能加熱の強度の増大かまたは地下深部で発生した造構造の緊張の解放によつて、均衡が一時的に乱されると誘起されるであろう。

長期間の観測結果によると、火山は地震帯に規則的に分布し、震央深度は70~150 kmであることが指摘されている。したがつてマグマのたまりの大部分は、地殻基体と関連性を持ち、マグマ組成の(対応)変化にしたがつて、破碎帯に沿つて上昇移動することが考えられる。

新たに生じた熔融域の深さによつて異なるマグマが発生する。すなわち、magma focus (マグマ溜り)がカンラン岩層中に発生した場合には超塩基性マグマ、それが玄武岩層中に発生した場合には玄武岩質マグマ、そしてシアル殻の比較的上位の層準中に magma focus が発生した場合には花崗岩質マグマが生ずる。

侵入活動過程では、塩基性岩石が酸性岩石で置き換わるのが観察されている。このような現象は、深所マグマ溜りが、除々に冷却し始めると一方では侵入によつて発生した。地圧低下が同時にシアル層の熔融をすることを立証している。

花崗岩質共融物質が比較的可熔融性であることを考慮に入れると、酸性侵入岩類が多数みられることおよび褶曲地帯の上位層準にGranitoid 貫入が出現することは容易に説明できる。

したがつて超塩基性岩石類は、カンラン岩基体中で発生した初生マグマの産物であるとするならば、酸性火成岩は、地殻の変成岩または堆積岩が熔融して誘起された再生 (paligenesis) 源マグマから生成されたものである。

中間位置を占めるものは、おそらく玄武岩質マグマであろう。玄武岩質マグマは、カンラン岩、輝石質被殻から析出し、超塩基性マグマ類の分化産物であることはたしかである。このことはマグマのたまりが多くの場合シマ(被)殻内に分布している大陸地域およびとくに海盆地域の深所破碎帯を特徴付けている玄武岩質溢流現象が裏付けている。それとともに、陸地の玄武岩質溢流は、地殻下部の玄武岩質層で発生したマグマの溜りから供給される。したがつてこ

の種マグマは、二次性熔融液である。玄武岩質組成部分が塩基性マグマから析出することは、分化作用現象をたしかにあらわすものである。しかしこのような分化現象が極大領域まで進行するのに有利な論拠であるとはいえない。マグマの分化がこのような状態(完全分化作用)を示すものとするならば、遊星を構成するすべての物質は、個々の化学的元素に分離され、おのおのの比重に対応して分布するであろう。しかしこのような現象は、全く例外的である。したがって最も易動性成分は、マグマの分化作用によつて析出され、地球の流体、気体殻を充填するものと推定できるであろう。残留物質は、所要の物理、化学的環境の下で、最も不活性化化合物を形成しようとする根拠がある。

他の複雑な問題は、交代作用過程における搬出、搬入物質のバランス問題である。地球履歴の初期階梯では、この問題の解は、多かれ少なかれ自信をもつて指摘できる。すでに示したように、地球履歴への初期階梯で発生した初成シマ殻の化学的、物理的風化は、多量の鉄、苦土化合物の分解を誘導し、次いでこの種物質の溶液からの沈殿が起こる。その結果として先カンブリア紀の堆積物中には、多数の鉄鉱床が形成される。

このような事実に着目した Obruchev は、原生代およびアルゴキオン時代には鉄鉱床の沈積に対する好ましい条件が存したことを指摘している。Strachov は、大部分の鉄鉱床が先カンブリア時代に沈積、生成されたことを明確に示した。Shatskii は、Dzhespili 型鉄鉱床およびマグネサイト鉄床が Rifeisk 期またはそれより一層古期堆積物中にのみ出会うことを強調している。その後の時代においては、鉄床中における堆積性鉄量は著しく減少する。

したがって、遊星の表面はシアル質物質で覆われている限り、鉄分で enrich されたシマ質岩石類の新出現の機会が著しく減少したことは、明らかである。

類似の現象は、苦土質化合物に対しても認められる。

比較のおくれて出現した苦土質溶液は、少なくなり、白雲石の堆積はますます減少(古生代)したが、中生代および新生代まで全く停止しなかつた。したがって原生代堆積物中にみられる多量の沈積性鉄分と先カンブリア紀、古生代堆積物中に相当広く分布する苦土質化合物とは、シマ質岩石類の風化によつて発生した過剰のこの種元素と補償状態にあることは、考えられる。しかし沈降シアル地塊の交代作用性転移過程で運び出されたはずの過剰アルミニウム元素およびアルカリ元素の濃集している箇所をみいだすことは、きわめて困難である。現在のところでは、この種元素の一部分は、下降流体中に吸収されて深部の基体中に分布し、沈積物を形成しないことが推定できるだけである。この種過剰元素の他の部分は、巨負異常地帯におそらく出現し、そこで“山の根”と名付けられている著しい沈積物を形成していることが考えられる。この仮説は、依然、あくまで仮説である。したがって、運び出された化学的元素類にながら発生するかの問題に対して多少信頼度における回答を求めるためには、補足的事実データの収集と地球化学的立場からの綿密な研究とが必要である。

最後に、一層難問題は、水圏問題である。地質学的過去を研究すると古生代から始まる陸地と海洋との相対的水準はほぼ同一に留まっていることを裏付けるデータが求められる。同時に、第三紀の初期から、太平洋の膨大な空間は、1 稜以上も沈下した。このことは Berousov が指摘しているように、著しく深い海底(太平洋)に分布している“Giiot”および段丘状階梯と、底部に始新世動物群を含む数百 m 高さのサンゴ礁で裏付けられる。

そこで乾陸、太洋の相対的水準の一定説と(太洋の成長、深さの増大)とを立証するデータ——巨地殻の沈降——とをどのように組み合わせるか? すると、新たに誘起された凹地に、追加水量が出現して容量補償が行なわれたという印象が与えられる。

どこから水が求められるか? 処女水が地表面上に規則的に湧水することはたしかである。このような現象は、マグマの溢流および温泉媒介として出現する。Rubey によれば、地質学的過去の間の処女水の湧出強度は、こんにちと同様であると仮定するならば、水の新しい部分(portion)での水圏の充填は、過剰水が現世海を充すために、充分であつたことが考えられる。

海洋と陸地面の相対的水準がほぼ一定であるということを立証する事実以外には、現在のと

ころ他のデータはない。しかし地球上の物質の凝縮は、処女水 (マグマ) の“絞り出し”によるものであり、そのために、自由空間中に沈降した地塊の位置には、地下の深部から追いつき出された水の容量にほぼ等しいか、あるいは等しい凹地が形成されるという仮説が残る。

結 論

上述の概念は、地球一般、とくにその地殻の進化にはきわめて明確な方向性が存在するという仮説から誘導されたものである。シアル被殻は、遊星の明確な進化の階梯で発生した。シアル被殻は、初生マグマの産物でなく、風化および交代作用性置換それ自体を代表するものである。地質学的履歴の全期間にわたって、地殻は、さまざまな堆積岩の沈積によって、主として生長した。次いで地殻の各地塊の沈降に伴って海進が起こり、海域の持続的な拡大過程が始まった。この現象は地殻の根本的な再編成を誘導し、陸地の海域への転移が出現し、それに伴って花崗岩層のそう失が起これ、その厚さが著しく収縮するに至った。さらに地球物質の収縮が進行すると、将来においては、大規模な沈降が発生し、それに伴ってシアル被殻が著しく縮少し、花崗岩層は、ほとんど完全に消滅するに至るはずであることが推定できる。地殻の生成過程と陸地の海洋への再編成過程とで決定的意味をもつ現象は、交代作用性置換現象である。原生代初期では、この種現象は、古期堆積岩累層 (現在の変成岩層) に整合に分布する膨大な花崗岩体を誘導した。現在では、大陸地殻の沈降帯における交代作用は、地殻上位層に分布する花崗岩およびその他の酸性岩石類の完全消滅を誘導している。

このようにして遊星の履歴の初期階梯における進化過程は、地殻のシアル被殻と、その内部に晶質花崗岩塊の生成とをもつて始まる。その後の地球の進化過程では、一定の相当な規模に達したシアル被殻は、除々に消滅し始め、シアル被殻を構成する酸性岩石類は、塩基性および超塩基性岩石類に転移する。究極においては、花崗岩質層はほとんど完全に消滅し、表面被殻 (殻) は、岩石学的組成からみれば、むしろ塩基性というよりは、超塩基性となる。しかし初期の状態に復帰しない。地質学的履歴の初期階梯では一地殻は原生代の物理、化学的環境条件では破壊され易い超塩基性岩石類より構成されていた。その後の地殻の進化過程で発生した地殻も、一見して塩基性または超塩基性岩石類からなっていたようである。しかしこの種岩石類は、外的環境の破壊作用に対して安定臨界の岩石学的組成をもっているであろう。したがって以前の質へ単純に復帰するものでなく、その特性が本質的に異なる新地殻の生成を誘導する。

上述の考え方は、長年にわたる地球物理学的研究で求められた地球の上位被殻構造に関する新データを解明する必要が熟してきたので提起されたものである。さらに事実データが蓄積されるようになると、この仮説の個々の論旨が再検討され、他の仮説がおきかえられることが必要となることについては、疑問の余地がない。しかしこれは全く科学的思惟の発達の当然の帰結である。