

資 料

552.333.5 : 552.11 : 553.21

玄武岩マグマの研究問題*

A. P. Lebedev

小 西 善 治 訳

塩基性岩石の研究と関連性のある諸問題は、玄武岩マグマおよびそれと組成の近似している塩基性マグマの発生、その分化作用の特性等を解明している。この種の問題は、岩石学の多くの根本的問題の解決を促進するので、現代岩石学の中心課題となっている。これらの根本問題としては、地殻におけるマグマ素材のソースの問題、地表下の物質の性質、地殻の構造と組成、Plate-forme および可動帯におけるマグマ活動過程の特質、さまざまな地質条件下における個々のマグマ型の晶出、分化作用過程の特性、後火山活動に基づく鉱床生成の特徴等があげられる。

以下においては、この種の問題のうちで若干のものをソ連文献・外国文献・ソ連の主要玄武岩体の研究データ、とくにシベリヤの Plate-forme 地域のトラップの研究データに基づいて検討したい。

筆者は、地殻上に、さまざまな型のマグマが現実存在する点を考慮に入れて、玄武岩に近似の組成のマグマを総括して玄武岩マグマと名付けることにする。

玄武岩マグマ (Protomagma) またはマグマの成因

母マグマの性質 (レヴィソン・レンシクによれば Protomagma) すなわち玄武岩組成のマグマに関する問題の解は、地殻の組成およびそれより一層深所の地圏の構造の問題と密接に関連性をもっている。この種の問題は、それぞれの仮説を証明する可能性がきわめて乏しいのでいまだ解決されていない。

本論文では、地球およびその外殻の発生に関する一般の問題をとりあげないで、現在の地質時代における地殻の構造に関する本質的な表象のみを述べるに留めよう。

岩石学にとって最も興味がある Washington, Daly の地球の内部構造図式と、Goldschmidt および Fersman の図式とは一般的には一致している。最も興味があるのは、地球の外殻、すなわち、1,000 km—深発地震の震源地帯—までの構造である。このような地殻外圏の構造を、岩石学的観点から比較的詳しく研究した人は、Buddington である。Buddington の図式は次のようである。(深度 km)

0~15	花崗岩
15~25	石英ハンレキ岩およびハンレキ岩
25~30	黒雲母灰長石
30~38	カンラン石ハンレキ岩・ノーライト
38~70	輝石・カンラン石・ヅンカンラン石
70~500	ハリ質カンラン石・超溶融性成分に富む、上部および下部は、晶質カンラン石に移行する。
500~1,000	晶質カンラン石
1,000~2,900	移行帯、上部は球粒隕石に下部はバラシスサイト質隕石に類似している。
2,900~2,920	硫化物質塩
2,920 以下	鉄、ニッケル核

上述の図式の本質的な補足としては、亜帯に分けて、中間灰長石帯を入れることである。こ

* A. П. Лебедев: Вопросы изучения базальтовой магмы, Известия Академии наук СССР, Серия геологическая, № 12, 1958

の面帯の存在は、地球物理学的データおよび岩石学的データに基づいて推定される。この図式は、仮設であり、正確なデータとくに個々の分帯の賦存深度関係に関するデータによつて充分裏づけられていないにもかかわらず、各マグマサイクルの範囲内におけるマグマ分化過程の逐次性、密度に基づく地殻における物質の分布に関する、現存の地球物理学的、岩石学的データ等をまとめることが、他の仮設よりも充分にできるので興味がある。したがつてこの図式は、ある程度作業仮設として役立つことが可能である。

カンラン岩質殻またはシマ層帯の存在に関する観念は、地殻の構造問題をそれぞれ研究している、ほとんどすべての研究者によつて確認されている。上部殻、とくに玄武岩層の組成および構造に関しては、一致した見解が存在しない。例えば、Lodochnikov は、周知のように、地球内部の密度変化が、組成の変化でなく、種々の深度における物質の集合状態の変化と相関関係があるから、組成の異なる地殻の存在に疑問を表明した。この仮設は、その後他の研究者も述べている。しかし、この見解は、それ自体問題である。すなわちさまざまな岩石組成帯からなるという地殻の帯状構造学説は、確実な方法によつて、岩石学・地球化学・地球物理学の諸事実を解明できることが認められているからである。しかし根本的にみて、上述の地殻(分帯)または地帯が地表面下に連続的に存在することについては疑問が残る。各(地)殻の構造および厚さの差異は、構造の異なる地球上の地域、例えば海盆地域および大陸地塊、および(おそらく)大陸地塊内の各地域に確かにみられる。したがつて各地域の各地殻の厚さに若干の差異があることを認めるのが、一層正しいであろう。玄武岩層またはカンラン岩層が連続的地殻の形態で存在することは、地球物理学的データと至るところで合致しない。

カンラン岩層の上部限界深度は、さまざまな地域で異なる。海洋調査によれば、カンラン岩石層の表面は、海洋では 15 km、大陸地塊下では 10~40 km、Plate-forme 地域下では、最大深度 40~60 km の深所にある。

カンラン岩層の存在が確認されているのは地球物理学的データならびに岩石学データによるものである。Ross, Foster, Myers の論文では、この立場からヅンカンラン岩——多くの地域の玄武岩質岩石にきわめて特徴的な——質包有物の組成および構造に関するデータを批判的に検討している。とくにドイツのデータ——ヅンカンラン岩質包有物の分布が、南と北との2帯に分たれている——が詳細に研究され、次のような結論に到達している。すなわち玄武岩中にみられる多数のヅンカンラン岩質包有物は、玄武岩マグマの分結カンラン石粒を代表するものではなく、一層深所のカンラン岩帯で生成されたものである。この種包有物は、半晶質状態でマグマにはいつたものである。このような状態は、プロトマグマ(縞状構造)構造の存在によつて立証される。この結論によれば、包有物の研究はカンラン岩基体学説を裏づけている。

火山学データの側からの同一仮説の裏づけは Powers が行なつている。Powers はハワイ地区の火山岩組成を解析して、この種岩石とカンラン岩層との結びつきに関して結論をだしている。Powers は、玄武岩層の存在仮設を一般的に否定し、輝石・斜長石共融混合物は、造構応力の周期的発生によつて、温度・圧力系に著しい変化が起つて、カンラン岩層の物質から熔融されて生成されると考えている。この場合形成される玄武岩質マグマ、とくにその存在の初期階梯では、揮発性物質に著しく富んでいるので、可動性を帯びている。アルカリ、超塩基性物質およびその他の析出物質の出現は、二次溜りにおける晩期の分化過程と結びついているから、純粹の局部的な意義をもつている。玄武岩質マグマの成長にふれているこの仮設の後半部は、組成の多様な熔岩(ハワイの火山)の生成図式をよく解明している。さらにまたこの仮説は、火山作用、他の地域、とくにシベリヤのトラップ質火山岩の生成像の解明に適用できるであろう。しかし玄武岩層の存在に関する仮設を全面的に否定している Powers は、他の地球物理学的・岩石学的要因から知られている事実と矛盾するにいたつている。

さまざまな岩石学的組成をもつ地殻の、上述の帯造構造様式をとりあげるならば、地殻の上部帯またはその表面上に、さらに出現するさまざまな組成のマグマの生成方法を充分解明でき

る。Kennedy, Anderson は、対応圏（地殻）の素材の完全または部分熔融によつて、それぞれの組成のマグマが生成される可能性を示した図式をつくつた。Buddington もまた、若干変形した、かつ補足的な図表を作成している。Buddington の図式によれば、等地熱線下で、一定の殻層までマグマが上昇する場合には、対応組成のマグマは、熔融状態であるはずである。この種のマグマは、好ましい造構環境下にある場合には、さらに地殻の上方帯に上昇することができるであろう。

しかし類似図式の一般的な型態においては、地殻の全帯状構造の推定像は、その水平への拡がりでは、地圏の構造、組成が上述のように不均質であるから、事実においては著しく錯雑化されていることに留意すべきである。したがつて個々の地域におけるマグマの発生過程の出現特性には、本質的な変化が加わるべきである。そのほかに一層低熔融性共融物質が完全に熔融されることがあるから、ハンレキ岩基体またはカンラン岩基体の分化熔融は、対応組成のマグマの出現を必ずしも誘導しない。

少なくとも、上述の状態を考慮に入れるならば、対応組成の地圏の周期的熔融によつてマグマが発生するという上述の考え方は、目下のところ火成活動の領域における観察現象を論理的に、かつ最も一貫して説明を与えることを認めなければならないであろう。

推定玄武岩質基体の分布観点から、地殻の組成に関する既知データを解析せんとするならば、ある種の基体が存在し、一方では可動帯（地角斜帯）と、他方では Plate-forme と海盆地域との間で著しい差異があることを許容しなければならないであろう。この問題については、さらに詳しく論じよう。

地殻の内部構造問題および深所から地表面へのマグマ物質の移動過程の特性とは、物体の移動で誘起される対流問題とも密接な関連性がある。対流存在に関する仮説は、地質学的、地球物理学的事実で裏づけられている。この仮説がなり立つ主要な根拠は、次のようである。(1) 地球が常に冷却しつつあること、(2) 層対流層の存在であること。

海洋下（平均深度 4 km）および大陸下（平均高距 2,000 m）の地殻における同一水準の温度（地熱）差は、Holmes によれば、大陸塊の領域では上方へ、海盆地域では下方へそれぞれ物質の移動を不可避的に誘導するはずである。この種の対流運動には、補償水平移動を伴うから、また上方地圏では、大陸地域から海洋地域へ、一層深所の地圏では反対方向に、物質の移動が起るはずである。

Bonchkovskii は、大陸および海洋の境界帯における等大等圧面の分布と関連して発生するような、流れの明確な図式を誘導している。

Vening, Meinesz によれば、この流れは、熱勾配が、対応地域の岩石の弾性限界を克服する程度に上昇する場合には、地殻に周期的に発生する。このような過程では、まず第一に玄武岩質マグマが運動（対流）に必然的に巻き込まれるはずである。同時にこの種の物質の移動は（あらゆる確率を考えると）、著しい深所、おそらくは 1,000 km 以上——ペロソーフの推定によると——の地球内部に発生する持続的分化作用過程とも関連性をもっている。特徴的なトラップの生成を伴う Plate-forme の火成活動史の特性を解析しても、Plate-forme とそれを縁取る褶曲構造が形成される際に、玄武岩質マグマの周期的移動が起つたという結論に達する。例えばシベリヤのトラップの発達史の研究結果にみられるように、トラップ（玄武岩質）マグマの活性化、Plate-forme の上方構造階への侵入（透）期は、Plate-forme 地域の褶曲形成運動の最盛期と一致している。巨大な水平対流塊の移動仮説は、他の仮説よりも、この種の法則性を比較的よく説明できる。

Holmes が誘導した対流塊が、比較的長距離にわたつて移動する可能性があるという仮説に有利な、興味ある岩石学的实例を思いだしてみよう。Holmes は、北部英国の粗粒玄武岩脈地帯を研究し、その組成がこの地帯の延長に沿つて規則的に変わることを認め、マール島の中央部から東へ向かつてのマグマの移動説を提唱した。類似の事実は、系統的に研究すれば、多

くの他の地域でも発見できるであろう。

マグマの対流学説は、若干の弱点をもっているにもかかわらず、結論的にいえば、地球上の各地域の火山作用の発達にみられる多くの規則性を充分解明できるとともに、さらに研究を押し進めるのに役立つであろう。

玄武岩質マグマの型

蓄積された地質学的データから推定して、地殻の比較的深所から、上方構造階へ上昇してきた玄武岩組成の熔融物が、地球の歴史の一定の時代に存在していたことについては、現在疑問の余地がないであろう。この種熔融物質、すなわちマグマが深所で発生したと若干の共通のソースと結びついている可能性とは、まづ第一に (1) 相当な空間に広域に、かつ到る所に分布していること、(2) 全化学組成が比較的維持されていること、(3) しばしば相当の距離にわたって驚くべきほど均一なこと、(4) 長い地質時代にわたって一定性(化学組成)が保たれていることで裏づけられる。

この種熔融物の組成を知るための、最も完全なデータとなるものは、貫入生成物に比較して比較的分化の程度が低く、後火山作用の影響および同化現象等に基づく変化をあまり蒙っていない侵入玄武岩質、または超塩基性生成物(主としてトラップ)である。

岩石学者の間には、単一の玄武岩質マグマ(塩基性組成の母体または全火成岩生成物の母体として)の存在に賛成する学者には、ソ連では、Zavaritskun, Auchitsko, 外国では Bowen およびその他である。

しかし誘導された個々の玄武岩質生成物の地質学・岩石学および化学機構に関するデータの綿密な研究が、研究者の間で行なわれたので数種の玄武岩質マグマ型が存在するという考え方に、比較的最近到達している。玄武岩と他の火山岩類とのさまざまな局地的共生型の存在が確認されているから、さまざまな型、主として玄武岩質マグマの2主要型が存在するという考え方がしばしば提唱されている。1922年に、Washington は玄武岩すなわち頑火輝石、普通輝石(Plate-basalt)、エジリン輝石が存在するという考えを述べている。さらに2母玄武岩質マグマ型——カンラン石、玄武岩質とソレアイト質と——が独立、かつ無関係に存在するという(一層完全に近い)考え方は、Kennedy によつて発展された。この様式によると、化学的關係においては、塩基度が高く、かつ苦土質で特徴づけられるカンラン石、玄武岩質マグマは、大洋地域に特有なものである。すなわちこの種マグマ型は、アルカリ岩石類の生成側へ進化するものに典型的なものである。珪酸およびアルカリに若干富むソレアイトマグマは、大陸地域に特有なものである。この種のマグマ型は、含石英文象岩、すなわち石英安山岩および粗面岩の形成側へ進化する。それぞれの火成岩区におけるマグマの分化方向は、Kennedy および Fenner によれば、初成マグマ組成にのみ左右され、地質的環境とは全然といつてもよいがほとんど関連性がない。

その後 Wells は、Kennedy のマグマ型を一層合理的に付けかえることを提唱し、それぞれ塩基性マグマのシマ型(カンラン石玄武岩質型)と亜シアル型(ソレアイト型)と名付けた。

Nigglı と Burri とは玄武岩族のマグマの分類を若干拡げて、(1) 正玄武岩、(2) 亜玄武岩、(3) アルカリマグマの3型に分類した。

最近25年間の間に行なわれた各玄武岩質岩石区およびトラップ質岩石区の詳しい研究結果は、一般的にいつて2玄武岩質マグマ型の存在を提唱する、Kennedy の分類様式を、あまり確認していないようである。すなわち特徴的なマグマ分化作用を伴うカンラン石玄武岩質マグマ型ならびにソレアイト質マグマは、多くの岩石区および同一マグマの溜の活動が推定される岩石区においても共存しているからである。例えば、Uoker, Poldervaart によれば、カル粗粒玄武岩の本源マグマの平均組成をみれば、ソレアイト質型のようなのであるが、各地域の平均組成——例えば Transkei——は、カンラン石玄武岩質型にきわめて近い。インドのデカントラップのマグマにも同様な現象が認められる。こゝでは、さまざまなマグマ型の代表的なもの、マグ

マの分化のさまざまな方向とが組合されている。トングスク盆地 (シベリヤプラットフォームの西部) のトラップ、マグマの平均組成は、Lebedev によれば、マケネデイの2玄武岩質マグマの組成の中間型である。鉱物学的組成——つねにカンラン石が含まれている——の指標によれば、この種岩石は、本源カンラン石玄武岩質マグマ型に近いが、分化産物の組成によれば、ソレライト質型にむしろ入れられるようである。

Holmes によればアイスランドの玄武岩類はアルカリ系にも、石灰系にも入れられないが、両系の特徴を合せもつている。Noe-Nygaard によれば、グリーンランドおよびフアレルの玄武岩には、アルカリ土類の代表種ならびに一層酸性の混成玄武岩質マグマの代表的種をもつている。Macdonald によれば、ハワイ島の玄武岩質区では、玄武岩質マグマ系がアルカリ岩石ならびに粗面岩・石英安山岩の生成方向へ進化する2径路で代表される。Tilley は、ハワイ熔岩に関するデータを批判的に検討し、次のような結論に到達している。すなわちこの種熔岩は、むしろソレライト質と関連があるが、この地区の典型的な海洋性状態から一般に期待されるような、カンラン石玄武岩質型ではない。Tilley の見解によれば、この地区の特徴なものは、次のような進化方向、すなわちピクライト質玄武岩——カンラン石玄武岩質——紫蘇輝石質玄武岩である。この種の岩石類は、カルー粗粒玄武岩の対応系、パリセイドおよび他の大陸岩石区のトラップ対応系に類似している。

ソレライト型のマグマの特性 (大陸型) は、Tilley によれば他の海洋区、例えばレユニオン島、タイチ島および他の箇所でも認められる。これらの諸事実は本源カンラン石玄武岩質マグマが、アルカリ質およびソレライト質の進化径路をとることができることを確かに立証するものである。

さまざまな型の玄武岩質マグマの存在を解明するために、ある学者は、地殻の上部シアル殻の物質が、カンラン石玄武岩質マグマとの同化過程で誘導発生するマグマとして、ソレライト質マグマを考えている。このような結論に到達した学者には、例えば久野がある。久野は、箱根および太平洋諸島の新期熔岩の詳しい研究を行ない、それに基づいて次のような結論に達している。すなわちこれらの岩石区では火山岩は2系統で代表され、玄武岩から安山岩にわたる火山岩は、化学的組成の特性と造岩輝石とによつて、(1) ピジオン輝石質岩系と、(2) ピジオン輝石と紫蘇輝石とが共存するもの、または紫蘇輝石のみの岩石系に区別されている。ピジオン輝石質岩系は、カンラン石玄武岩質マグマの分別晶出作用によつて生成される。第2の岩石系の生成は、マグマ物質と酸性岩石類との同化作用に関連性がある。この場合には、混成マグマにおける揮発性成分の濃度が上昇するので、マグマの温度が低下し、マグマから生成される岩石中に、紫蘇輝石の出現が促進される。第2岩石系の生成される場合の、同化作用の役割を裏付けるものとしては、一般的な考え方および化学的機構の特性以外に、石英および酸性斜長石の捕虜石が岩石中に存在し、ときには花崗岩の捕虜岩——那須火山および蔵王火山の熔岩——が認められることがあげられる。

他方において、Tilley によれば、カンラン石玄武岩質岩石を媒介とする、ソレライトマグマの生成説は、例えばハワイ島で観察された熔岩の溢出の時代的順序と矛盾するから、採用できないであろう。ハワイ島では、本源マグマは、岩圈の上部殻の熔融によつて発生したむしろソレライト質マグマであるが、この地域で代表的なアルカリ玄武岩系は、ソレライト質マグマの正常の晶出作用行程に、若干変化が起つて生成されたものである。

Green および Poldervaart が行なつた太平洋産玄武岩の平均化学組成 (12 地域 116 化学分析)、および大西洋の玄武岩 (9 地区、25 化学分析) の平均化学的組成、それに基づいて計算された地球上の先カンブリア・古生代・中生代・第三紀玄武岩の平均組成の対比は、次のような結論に達している。

(1) シアル (大陸) 玄武岩の平均組成は、 SiO_2 に不飽和であり、Kennedy によるカンラン石玄武岩マグマに近い成分である。

(2) 各地質時代における玄武岩マグマの平均組成には時間的に一定の規則的变化が観察されない。

(3) 玄武岩質マグマには、一定の平均化学的組成型は存在しないが、むしろソレアイト質から不飽和型にいたるマグマ系がみられる。

筆者の見解によると、この種結論は、玄武岩質マグマが地殻の上部殻の部分熔融過程で周期的に生成されるという説と一致する。

以上の概観から次のような点が明らかである。すなわち単一本源玄武岩質マグマ説も、また2玄武岩質マグマも、観察されうる自然現象のあらゆる多様性を解明できない。したがって地殻上には玄武岩質マグマの多相型の存在(または周期的発生)確率——この種の多型の玄武岩質マグマが、さらに進化すると、自然で観察される多様な共生関係がつけられる——を仮定すべきである。

塩基性マグマの活動と関連性のある、個々の火成岩系列の進化を検討しても、同様な結論に導かれる。この種の特性、すなわち個々の玄武岩質系列または岩石系の進化の特異な特性は、例えば Wager および Deer の提唱する $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} : \text{FeO} : \text{MgO})$ の三角形図に点示される。世界のある種の粗粒玄武岩系の玄武岩質岩石系およびグリーンランドのスケルガード貫入岩体には、鉄が晶出岩石中に濃集し、晩期の階梯に珪酸およびアルカリが濃集する傾向が進化の全経路にわたって明瞭に現われている。しかし石灰・アルカリメンバー(玄武岩・安山岩・石英安山岩)を含む岩石系には、鉄の著しい富化現象を伴わない他の進化型が一層明確に現われている。したがってこの種現象は、酸性シアル物質の同化作用によつて解明できよう。Poldervaart および Elston の図表には明確に表われている。この図表では、縦座標には、溶液液の鉄苦土部分の定変化を特徴づける、Mg と Fe との原子の総和に対する Mg の比を、横座標には、いわゆる結合因子をとつている。結合因子は、生成鉱物の結晶格子の結合度を特徴づけ、極大値は、与えられた場合にはカンラン石構造(密に配置された SiO_4 の正4面体)、極小値は角閃石および緑泥石(一層自由な Packing 状態を示す)構造をもつている。したがってこの“結合因子数”は、一般的にみて、岩石系が一層酸性メンバーに移行するにしたがつて減少する。

この図表上に引かれたカール粗粒玄武岩に対する曲線、Stillwater スケルガードの分化貫入岩体、Garibal-hills の貫入岩系列およびカリフォルニア州の底盤も、さまざまな岩石系——与えられた場合では粗粒玄武岩質岩石系および石灰・アルカリ質岩石系——における進化の方向に差異が存在することを示している。石灰・アルカリ岩石系では、主として長石の濃集と、苦土質鉱物類と比較して一層明確な分別晶出作用とが認められる。図表の著者は次のような結論に達している。すなわち石灰・アルカリ岩石系は、シアル殻の岩石の部分的熔融に伴なう同化作用過程の多数干渉と水の本質的な役割とによつて発生する。

さまざまな進化経路をも、独立の塩基性マグマ型の存在に関する問題を解く他の重要な方向としては、この型と与えられたマグマ源の共生造岩鉱物の形成環境(造構的)の差異とを結びつけることである。ここで重要なことは、マグマの物質的組成の特性と、地殻の造山帯および Plate-forme 地帯におけるその進化の方向に関する問題を解くことにある。しかしこの領域では、岩石学的研究は上述のように塩基性岩石類と、その同化作用との純粋な物理、化学的特性の解釈よりも著しく少ない。

この領域では、造山運動と岩石との会合関係の実例としてあげているオレゴン、ラセン、ピイク、マードック(カリフォルニア)に発達するアルミナに、相対的に富む安山岩、石英安山岩岩系の Tilley の結論を述べておこう。Tilley によれば、造山帯では、玄武岩系の原因の異なる型が観察される。すなわち (1) ソレアイト質岩石系、(2) ソレアイト質岩石系から求められる累積型(accumulation)、(3) 中間組成安山岩型の熔岩の主分化産物を代表する累積型である。Tilley は、各単独の特性をもつこの種マグマ型に対して、単一の進化分化経路を推

定することは不可能であると考え、同化作用が個々の岩石系成因において重要な役割を果たすという結論に到達している。

最後にこの領域においてきわめて有望な研究分野は、さまざまな岩石系の組成の微細な地球化学的特性を明らかにする地球化学的研究方向である。このような研究には、スウェーデンの塩基性玄武岩の造山運動型および非造山運動型に関する Lundegardth の研究があげられる。この種の造山運動、非造山運動岩石系の地球化学的研究は、ほとんど行われていないといえよう。

以上の諸記述は、一般的にみて、玄武岩質マグマの各型の存在について現在われわれがもっているデータである。

上述の概観およびトラップ区・玄武岩質岩石区・安山岩質岩石区の研究で求められたデータからみられるように、現在の段階では、次のようなことが考えられる。

(1) 固有の進化分化径路をもつ玄武岩質マグマ型が若干存在すること。

(2) 玄武岩質マグマには2主型、すなわち大陸型と海洋型(ソレアイト質岩石型とカンラン石玄武岩質岩石型)が存在するという考え方である。すなわち大陸型は、天然の玄武岩質マグマ(出現状態)の複雑な、かつ多様な実在像を過度に単純化したものである。海洋型は、地殻の地体構造(造成物)との実際上の結びつきを不完全に反映するものである。

(3) この種の考え方は、成因論の問題もまた十分に反映していない。したがって本質的には、本源マグマのさまざまな組成の初成因に関する問題は、未解決に残されている。

(4) 事実においては、固有の進化、分化径路をもつ、玄武岩質組成に近い本源マグマ型が若干——おそらく——存在するはずである。

このようにして、現在蓄積された岩石学的データによれば、“Polymagmatism”多相マグマ型の考え方が誘導される。すなわちさまざまな発達モーメントのマグマの多相性、地圏のさまざまな水準に周期的に発生し、地質的環境および初期化学的(反応)機構の特性によつて若干異なる後進化分化径路で特徴づけられるマグマに関する考え方である。しかし、具体的な地質環境で左右されるマグマの進化と、組成の特性とに関する正確なデータが、岩石学的領域では不十分であるから、この種の問題を解くことは困難である。したがってこの種問題を解く方法として造構火成活動“Tectomagmatism”問題を研究することが課題となつてくる。

分化作用型(玄武岩質岩石系における岩石の多様性の原因)

岩石学的研究は、一方においては、ハンレキ岩石系または玄武岩質岩石系からなる岩石類およびこれら岩石類から構成されている地質的(物体)の多様性の原因の解明と、他方においては晶出分化作用、拡散、対流、マグマの Splitting と liquefaction、ガスによる物質の運搬、同化作用、混成作用現象を導くさまざまな過程について行なわれている。

とくにイギリスおよびアメリカの学者は、晶出作用学説(分別晶出作用)を、岩石学的文献に幾度となく述べているが、具体的な地質学的要因の面については、充分解明されていない(例えば最近の牛来正夫の論文にみられる)ことに非常に留意している。この学説が、主として海洋地区のある種玄武岩質岩石の生成機構に適用された研究については、すでに述べた(箱根火山に関する久野の研究、ハワイに関する Wentworth, Macdonald の研究)。マグマ中に初期に析出したカンラン石、および他種鉱物斑晶の添加、または分離の結果出現する熔岩の多様性の原因とその出現機構の解明は、ある場合個々の岩石型の生成を充分に解明する手助けとなつている。しかしこのような考慮は、研究者自身が指摘している信頼すべき解明に、しばしば到達していないことがある。このような場合には、徹底的な“Bowenist”さえも、外来物質に基づくマグマの混成作用説に、不可避的に走らねばならなくなつている(例えば箱根火山の紫蘇輝石岩石系の形成に関する久野の上述の解釈およびその他の研究)。

この種の学説(他の学説も同様である)を適用する場合には、具体的な地質環境を考慮に入れ

ることが必要である。しかし残念なことには、充分に考慮が払われていない。小規模の貫入岩塊、火道等における分化作用の径路、または考えられ得る他の火成活動過程を比較的完全に追跡するならば、深成岩体、造山帯の岩体の進入(貫入)条件下——それに深い関連性をもつ全岩石区の物質すなわち生成物——のこの種過程の解釈は、きわめて複雑な容相を示す。このような錯雑する場合、個々の仮説とくに晶出分化作用説に対して——とくに地質環境が相当充分に解析されていないときには——批判的に望むことが必要である。

晶出分化作用学説の研究とともに、岩石学者は、他の晶出分化過程すなわち晶出作用が分別晶出過程と組合わされて出現するか、または分別晶出作用と無関係に出現する場合に留意し始めている。玄武岩流および中深成貫入岩体の凝固過程を解明する場合には、拡散・対流現象が確かに重要な位置を占めるはずである。この過程の意義については、すでに以前から、ある岩石学者 Grout (Dulth 貫入岩体)、Wager および Deer (スケルガードに対する)によって指摘されていた。Carnwall の考え方によれば、ミンガン州の Keweenaw 統の玄武岩流にみられるマグマの凝固は、上方からの冷却過程と下方からの凝縮過程との作用が共存的に働いて形成されたものであるから、対流現象を必然的に伴なつたはずである。Wahle は、拡散・対流現象の組合せ生成に関する興味ある仮説を提唱した。Wahle の見解によれば、拡散・対流の組合せに基づくマグマ生成説は、貫入岩体、とくに中深成貫入岩体の凝固において重要な役割を果たす。この種のマグマ生成過程は、一般的な場合には、貫入岩体ならびにシルの層塩基性端成分部分の生成を誘起する。拡散・対流過程の作用を誘導するためには、僅かな温度勾配(差)があれば充分である。この種過程は、深所のマグマ溜における(マグマ)分化作用行程に(少なくとも)確かに重要な役割を果たすことを附加しておく。深所のマグマ溜から周期的に上昇するマグマ熔融液の組成差——とくに反復逆流または貫入過程の場合にみられる——を解明する際には、マグマ分化作用——そのうちには拡散・対流過程を含む——過程に留意することが必要である。

気成分化作用および液相化過程も、また局部的ならびに深所分化作用(現象)を解明するうえにおいて大きな意味をもっている。このような考え方に留意しないでは、輝緑石・ペグマタイト分結物の発生または中深成輝緑岩質貫入岩体および粗粒玄武岩体の組成にみられる粗粒部分を解明することは難しい。Tomkeef は、北部英国の粗粒玄武岩質、トレイ岩質シルの研究に基づいて、次のような結論に達している。水平の層状物体内で、塩基性マグマの晶出作用が行なわれる場合には、揮発性成分の上昇に伴なつて形成されたカンラン石の沈降が起り、そのために水平状物体の上部には、輝緑岩質ペグマタイトの分離、生成が促進される。Carnwall によれば、ミンガン州の粗粒玄武岩質・玄武岩質岩石流では、揮発性成分は、晶出の際にその中部(高さに対して)に濃集している。揮発性成分の溶解度は、冷却が進行するに従つて増大する(Bowen によれば、50°ごとに1%の割合)。この場合には、貫入(進入)した層と隣接層との間に温度勾配がつくられる。固化物質中では、揮発性成分の作用によって自変質作用性変質が行なわれる。Carnwall の見解によれば、上述の残液は、約750°まで流動状態を保ち、次いですでに固化した貫入岩体の割れ目および空隙中に(絞り出し作用によつて)侵入する。

揮発性成分が晶出岩体の上部に濃集するのは、2,3のシベリヤのトラップ貫入岩体例で確かに立証される。Lebedev によれば、この種現象は、凝固岩体のさまざまな部分における造岩鉱物の差異ばかりでなく、貫入岩体の上部と下部とにおけるトラップマグマ自体の晶出径路の本質的な差異を示すものである。貫入岩体の下部では、一般にみられるオフィチック構造およびポイキロ・オフィチック構造の形成を伴なう晶出作用が、上部ではペグマタイト構造と、柱状オフィチック構造の形成を伴なう晶出作用が行なわれている。しかし、上述の晶出分化作用過程が行なわれる物理、化学的条件は、依然として充分に明らかにされていない。したがって現在の推定は実験的裏付けが必要である。しかし固化貫入(進入)岩石塊中にみられる揮発性成分の不均等分布の重要性については、一般的にいつて、疑問の余地がない。

固化深度、誘導火道の本質貫入(進入)、定着機構

固化の規模と地質環境——形成期に支配的であつた——と結びついている火成進入(貫入)岩体の固化深度が、形成岩石の組成および構造を決定する主要因であることは、確かである。このことは、例えば塩基性岩石、とくにトラップにきわめて明確に現われている。とくに中深成岩体および浅所成岩体(地表近く)の構造と組成の解明にあつては、この種の要因を考慮することが重要である。すなわちこの場合には、この種要因の影響は、一層大規模の深成貫入岩体よりも比較的強く現われるからである。しかしすべてこれらの諸問題は、依然として十分に研究されていない状態にある。

マグマの固化深度およびマグマで充填される空間の本質に関する問題は、誘導火道の形成機構および火成活動の活性期におけるマグマの上昇原因と密接に結びついている。Plate-forme 地域では、貫入に適応して2問題の解決が可能となる。(1) マグマは、すでに準備された地殻中の割れ目あるいは空所の壁を突き破つて定着される。(2) マグマは、貫入火成岩と周辺岩石との間の空間が受動的に交換されるために、Roof の全ブロックが次々と置き変わつてマグマの定着化が進行する(レヴィソン・レンシングその他の見解)。現在大多数の研究者は、とくにPlate-forme 地帯では、玄武質マグマの主要特性の定着化が活性化されると述べている。このような現象は、層序の上部階を占める岩石層に賦存しているシベリヤ Plate-forme のトラップ質層状貫入で——ソ連のデータによる——裏付けられる。強烈な推力の影響下で、トラップ質マグマが上昇するという考え方は、ペンシルバニアのトラップ質シルの形成機構を記載しているHölzが支持している。結晶中岩の発達する地域(基盤の露出地帯)にみられる層状塩基性貫入岩体の定着形成機構は、Polkanov が最近述べているように、若干異なつていようである。しかし各具体的な場合についてのこの種問題の解決は、深所の貫入火成岩体の構造に関して相当完全な考え方をもちつことが必要とされるが、このことは、常に可能とはいえない。ときには、空間内の貫入構造の現実像は、地表面だけでの観察から推定されるものよりも、遙かに複雑である。実例としては、ランドリィドールスのトラップ質餅盤があげられる。Johns と Pugh は、ボーリングを利用して、この餅盤を詳しく調査した。餅盤は、シルル紀板岩層中に互いに近接して発達する多数の小規模貫入岩体“マイクロ餅盤”またはマイクロシルから事実上構成されている。この種貫入岩体の下部には、約100個の細いパイプ状物体で代表される(マグマ上昇通路)火道帯が存在する。著者の考え方によれば、マグマは、深所で消滅する割れ目網か、あるいは深所で共通の大きな火道に融合する割れ目から上昇する。マグマは全体としてみれば、推定初期餅盤面積の約25%を充填しているにすぎない。このことは、著しく大きい推力の下で発生したマグマの定着化の活性化特性がみられるにもかかわらず、餅盤の天井岩石の曲り、持ち揚り現象の欠失が解明される。

きわめて興味があるのは、進入岩、貫入岩が形成される場合の塩基性マグマの上昇原理に関する問題、上昇マグマ柱における高推力、高温度の形成を促進する要因に関する問題である。地球物理学的データによつて、シアル殻の厚さを10~12 km その上方の堆積層厚を3~4 kmにとれば、マグマの発生深度、すなわち地殻を貫ぬいているはずの火道は、少なくとも、15~17 kmになる(もちろん中間マグマの溜りの存在が推定される)。地殻に貫通孔が形成されるために、上部岩柱の重量で生じる負荷が減少するとするならば、マグマは、上方へ運動する傾向を帯びる。マグマ内の推力形成において重要な役割を果すものは、水蒸気、追加機械的、熱エネルギー増量である。火山学者のデータによれば、ガス組成に70~90%を構成する水を含んでいる。いま側壁が水蒸気に対して不浸透性であるならば、マグマ中に含まれている水蒸気は逃げないから、圧力は上昇し、マグマは、膨張ガスの推力の影響を受けて上方へ押しやる。マグマの定着化には、2要因によつて異なつてくる。(1) マグマ内に含まれているガス圧およびその温度である。水蒸気が遊離し、上部堆積層圧が除かれると、熱の発散が誘導され、それと

関連してマグマ温度の低下が起る。そのために、上昇マグマ柱の一層高水準では、マグマは、低水準におけるよりも、遙かに低い温度状態にあるはずである。このようにして側壁に及ぼす塩基性マグマの熱(温度)作用の弱化は、接触帯の相対的低温度現象で説明される。しかしそれとともに、深所における高温度発生原因(推定固相基体の熔融が必要である)と、膨大な周期的圧力増加——推定深度——との原因があいまいのまま残っている。

地体構造の形態、ダイメション特色およびトラップ質岩石系およびそれに近似する中深成塩基性岩石系の定着化機構とに関する現有データを一般化しようとするならば、われわれの見解によれば、少なくとも、(1) 古期 Plate-forme 地帯の地層層序の上部階への貫入、(2) Plate-forme の下部階(基盤)への貫入、(3) Pre, Co, Post 造構造運動の亜グループを伴なう褶曲帯への貫入の3構造、造構造型に分類すべきである。

第1型には、シベリヤ Plate-forme 地帯およびカール地域のトラップ質貫入岩体の大多数が属する。第2型には、古期楯状地帯——フェノスカンジナビヤ・デカン高原・カナダおよびその他の地域——のトラップ質貫入岩系の大部分が入れられる。第3型には、中央カフカズ・タイムウル・ペンシルバニアおよびその他の地域に発達するトラップ質・輝緑岩質貫入岩体があたつている。

上述の問題を解く場合には、岩石学者は、火山爆発にみられる高圧、高温の周期的発生原因を研究している火山学者からも、援助を求めるべきであることは明らかである。

混成現象

塩基性岩石に適用されるこの問題を解くために、岩石学者はきわめて興味があるデータを最近集めている。この種データは、玄武岩質およびトラップ質岩石系の組成が、酸性、中性メンバーの形成には、この種過程(混成現象)が大きな意味をもっていることを益々裏付けている。この問題を検討する場合には、2現象グループを区分すべきであることを強調しておくことが必要である。

(1) 混生現象は、固化火成岩体と側壁岩石との直接接触部に発生する。この種現象が起ると、外来物質の部分的同化および流動変態現象を誘導する。この過程は、地殻の比較的浅所の条件下で行なわれる。

(2) 外来包有物のマグマ質物質による一層完全な同化と、それに関連性がある異常(与えられたマグマに関して)組成の岩石の出現とを誘導する混成過程で、この種過程は一層深所の条件下で行なわれる。

一般的にみた初成混成岩石種の出現は、岩石学の文献に記載され、かつ研究されている(Veljankin, Sedergolm等)。サタラントのヨットニヤアの輝緑岩の混成現象(フィンランド)は、最近 Kahma が詳しく記載している。この地域では輝緑岩体は不規則な形態を形成し、ラバキヴィ花崗岩およびそれを圍繞する砂岩(ヨットニヤア)中に貫入している。輝緑岩体と花崗岩との接触部では、局部的には含角閃石質の微ペグマタイトからなる不規則な細脈(2cm以下)網が多数派出している。化学的關係ではこの種物質は Mg, Fe, Ca, Na に若干富む花崗岩自体で代表され、Shairey, および Bowen の三角形図では、花崗岩質マグマの晶出作用にみられる残留成分領域の上部にあたつている。この領域では、熔融液の温度は約1,000°である。この温度は、輝緑岩の温度に近く、ラバキヴィ花崗岩または砂岩の対応組成の共融混合物を熔融する。変形流体形質岩脈(Rheomorphic)が比較的苦土物質に富んでいるのは、著者によれば、苦土の比較的動性の大きいことと関連性がある。

側壁岩石の構成物質が一層完全に溶解されている場合には、輝緑岩と側壁との境界面はあたかもかき取られたような状態を示す。例えば、スウンタク地域の輝緑岩体では、平均組成(閃緑岩質)の混成岩の外来岩が存在する。この場合には、輝緑岩の造岩鉱物類に次の岩石類が添加されている。石英・アルカリ長石・蛇紋石化カンラン石・角閃石である。そのなかでは、カ

ソラン石は一層鉄質となつている。Kahma の考え方によれば、混成作用は、輝緑岩の固化期の末期に始つたものである。他の場合には上盤近くには、確かに輝緑岩（トラップ）体に酸性分結物の生成が促進されたが、輝緑岩体の実質的組成に直接干渉していない。例えばペンシルバニアの三畳紀の輝緑岩質シルでは、Hötz によれば、天盤から僅か離れた上部には、レンズ状文象斑岩体および輝緑岩—ベグマタイト部分が存在し、その成因については、次のように解釈されている。すなわちシルの上部でマグマの晶出作用が行なわれたとき、残漿が上部に集まり、それとともに鉄・アルカリ・珪素および水がこの種の残漿中に濃縮して、現在みられるような酸性岩石類が形成された。しかしこのような解釈には、類似の条件下でかつ類似の方法でさまざまな組成の岩石——輝緑岩ベグマタイトと文象斑岩——が発生する原因について不明確な点が残っている。晶出分化作用の異常な役割について展開している考え方は、混成作用過程を考慮に入れなければ、現在みられる像を完全に解明できない。

微ベグマタイトまたは塩基性貫入岩体——その組成が——の輝緑岩質部分の形成を解釈する際に、多くの場合、この種部分には、確かに混成成因の Indicator があるにもかかわらず、側壁の構成物質との直接的な結び付きをみだされていないことに留意すべきである。ときには全く相似の組成をもつ部分が、与えられた部分の貫入岩体の側壁組成と、いわゆる無関係の状態で存在していることがある。このような部分は、砂岩・粘板岩・凝灰岩・石灰岩および花崗岩等である。実例としては、北部ウラルの Sosvi 河の分化輝緑岩・モンゾナイト質貫入岩体・トングスク・トラップのある種のシルがあげられる。このような場合の現象解釈にあたっては塩基性マグマによる深所また上昇通路のシアル質側壁物質の深所同化作用または混成作用過程の役割を仮定することが必要である。このような過程の存在可能性は、その固化位置におけるマグマの温度と比較して、マグマ柱の一層深所部分における温度が著しく高いことで立証される。

与えられた問題を解く場合に、本質的な意味をもつものは、層序の上方を占める堆積物の下方にある基体——トラップ質岩体を包む——の本質の正確な知識である。さらに塩基性（玄武岩質岩石および類似の岩石）生成物を媒介とする鉱床成因の多くの特性は、それぞれの造鉱石成分が分散または濃集形態で含まれている。

基体岩石の深所混成過程を完全に考慮に入れられるならば、それ自体説明がつくことが考えられるであろう。この種の重要問題は、とくに検討するに値するであろう。

結 論

本概観では、マグマの形成と進化に関連性がある、他の興味ある問題の検討を行なわなかつたので、上述のデータの解析と比較を基礎において考えられる、若干の一般的な規定を結論としてあげておこう。

- (1) マグマまたは玄武岩質組成のマグマの発生は、固体またはハリ質集合状体で存在し、かつ若干異なる化学組成をもつカンラン岩質ならびに玄武岩質組成の一定の深度地圏 (Geosphere) と関連性がある。
- (2) 地殻における玄武岩質マグマの発生は、周期的に起り、そのうえ発生した熔融液（マグマ）は、基体の一次性不均一性 (Primary heterogeneity) のために、若干異なる組成をもつが、一般的には、玄武岩質マグマの平均組成に近づく。
- (3) 地殻の上部水準において、流体状態で発生した玄武岩質マグマのその後の進化的行程は、第一には、地殻の上部階の構造の地体構造的な特性——Plate-forme, 造山帯およびその他の地帯で異なる——により、第二には、マグマの出現、固化期における地殻のこの区域の造構様式とに左右されて、若干異なるようである。
- (4) 上方構造階に上昇する玄武岩質マグマは、最も顕著な変化（分化作用、晶出作用）を蒙る。これは、圧力および温度条件が著しく変わるとともに、上昇マグマとの間に相互作用が行

なわれ、周辺媒質の組成も変化するからである。

(5) 最終産物として、アルカリ・亜アルカリ・酸性またはペグマタイト質派生物 (Derivative) の出現を誘導する玄武岩質マグマ進化には、数径路が存在する。それぞれのマグマの進化径路は、与えられた熔融物の本源組成の特性ならびに若干の他の上述要因で決定される。

(6) 2本源玄武岩質マグマ型のみが存在するという Kennedy および Anderson の仮説——その仮説を変形させる追隨者で補促されている——は、現在みられる天然現象の全多様性を解明することができない。

(7) 言葉の広い意味における同化現象は、玄武岩質マグマそれ自体のさまざまな型およびこのマグマから誘導されるさまざまな岩石類が形成される場合に重要な意味をもっている。深所同化作用 Contamination, 局部同化作用または混成作用過程を区別すべきである。

(8) 中深成玄武岩質(トラップ質)組成のグループでは、貫入帯を、造山帯, Plate-forme の下部構造階(基盤)帯および上部層序の堆積岩の発達する地帯に分類すべきである。

(9) 玄武岩質マグマを媒介とする鉱床成因特性は、マグマ自体の組成圍繞基体および、マグマの上昇後の晶出、分化作用行程特性と密接な関連性がある。