

深部構造研究の歴史的概観と現状について ～第三系堆積盆地の形成機構の研究その2～

鈴木尉元・三梨昂・影山邦夫・宮下美智夫・小玉喜三郎・島田忠夫

近年 油田地帯において5,000mあるいはそれ以上の深さの坑井が掘さくされるようになり 深部の地質や地質構造の解明の問題が 強く要求されるようになってきた。このような深部の地質の問題は 石油や天然ガスだけの問題ではなく 金属・非金属鉱床なども 次第に地下深部の潜頭鉱床にその主力が向けられるようになってきて 地球科学全体に投げかけられた大きな問題になってきている。このような深部の地質の問題は 地質学的方法によって 地表の観察事実から 直接外挿して予測することがきわめて困難であり そのような予測をしても その蓋然性はきわめて低いものである。したがってこの深部の地質の解明には 地質学的方法だけでなく 重力や人工地震などの 地球物理学的方法が大きな比重をしめてくる。それらの結果を総合して はじめて地下の実体の一部が把握されるわけである。

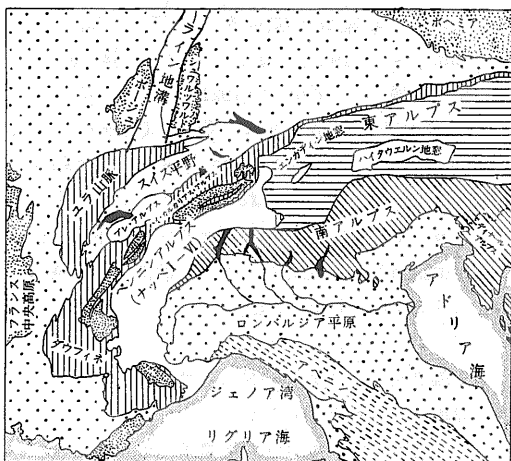
一方 深部の構造の問題は このような直接探鉱に結びついた面からだけではなく 純学問的な面からのアプローチも行なわれている。現在の地震学は 一つの大きな地震の波を各地で観測し それらを解析して 大まかな地球の構造を探求する時代から 大爆破地震を用いて地質学的スケールでの深部の構造を探求することに 目が向けられるようになってきた (Keylis-Borok, 1968)。ここで対象とする深さは 地下数 km ないし数 10km の地殻の構造である。この問題は 堆積盆地の構造が その下部の基盤の構造運動によって規制されるという意

味で 堆積盆地の構造とも密接な関係をもっている。したがって 探鉱の問題にたずさわるものにとっても地殻の構造の問題は無視しえない分野である。さらに 上部マントルの問題も 深部の構造解明に不可欠の一つの問題と考えられる。それは 地質構造運動や火成活動などの内因的の地質現象が 上部マントルと密接な関連をもっていて その原因が 主として上部マントルにあることによる。この分野は 大きなエネルギーを有する地震波の解析や 自然地震の空間的分布などが 有力な手掛りを与えてくれる。

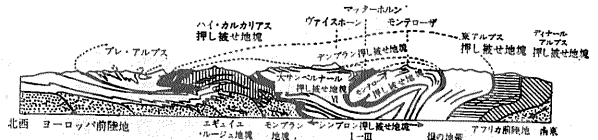
私達は さしあたり 最初へのべた第三系堆積盆地の深部の構造解明に従事している。しかしながら 上にものべたような各分野の成果を総合して はじめて深部の構造研究の正しい発展が期待されると考える。さきにも述べたように 構造運動の機構の問題 (これは上部マントルの問題と密接な関係をもっている 問題であるが) は 現在暗中模索の段階にある (島田ら 1967)。そして いろいろな意見が 地球物理学者から 地球化学者から また地質学者から提出されている。この意味で 私達の立っている足場を歴史的に明らかにして そのような種々の意見をもその中に位置づけし これから進むべき方向ならびにその中での構造地質学の位置づけを明らかにすることが 現在必要であると考える。

今日 地球物理学的情報にもとづく構造運動論が風靡し その中での構造地質学の位置づけが きわめて不明確になっている面があるように思われる。このような情勢の中で 野外地質に主として従事する私達自身の位置づけの問題には 特に留意した積りである。また それがこの小論の主題とするところでもある。

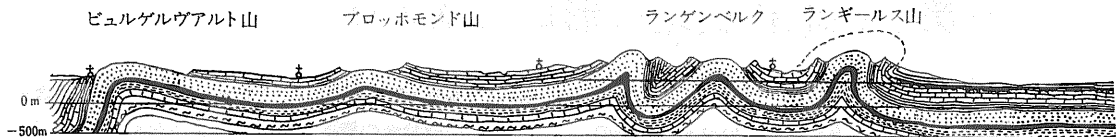
以上のべてきた次第で これから地下深部の構造についての見方を 代表的な論文について時代を追って概観することにしよう。そして その背後にある考え方を



第1図 アルプスの構造区分図 (Holmes 1964による)



第2図 Emile Argand および R. Staub の概念による西アルプスの構造断面図 (Holmes 1964による)



第3図 ユラ山脈の断面図 (Müller, Rollier, Heim, Buxtorf による)

も分析してみよう。これからあつかうものは主として地質学的方法によって明らかにされた地質構造の問題である。それは私達のおもな目的とする範囲(深度)がその程度であることと古くから議論され材料が豊富なためである。地殻や上部マントルの構造の問題は具体的な資料にもとずいて議論されるようになったのが比較的新しくその材料は多くない。しかし、堆積盆地の構造の問題とも関連をもつ部分が少なくないのでふれることにする。このような歴史的な分析の上になつて現状を把握し私達の深部の構造についての考えを予察的な段階であるが提出してみたいと思う。

問題が大きいことや境界領域にまたがる部分も多いので間違いや見当違いも多々あるのではないかと思う。また重要な論文で参照していないものも多々あると思う。そのような点についてお教え願えれば幸いである。この小論は単なる紹介ではなく論文である。したがって筆者らの意見の多く入ったもので学界の定説となつたようなものではない点をおことわりしておく。

I 深部の地質構造の歴史的概観

構造地質学は1860年から70年代にHallとDanaによってアパラチア山脈を中心とする造山帯となつている地域がその前に堆積物の厚く堆積する場であつたという地相の概念が提出されEscher Studerらのアルプスを中心とする地域で造山帯の構造が具体的に明らかにされるにおよんで19世紀末から20世紀の初めにかけて大系化されるに至るのである。すなわちこの頃までに地相という造山帯の前史からどのようにして現在見られるような造山帯の複雑な構造をもつに至つたかが具体的に論議されるようになってきた。

従つて初期の構造地質学は山岳の構造地質学であり具体的な構造は長い歴史と露出条件などの自然的条件に恵まれたヨーロッパのアルプスを中心に発展した。そしてアルプスの構造が造山帯の典型と考えられ各国でその構造にならつて地質構造や構造地質学が組

み立てられていった。したがつてこのアルプスの構造研究から見ていくことにしよう。

A. アルプス中心の時代

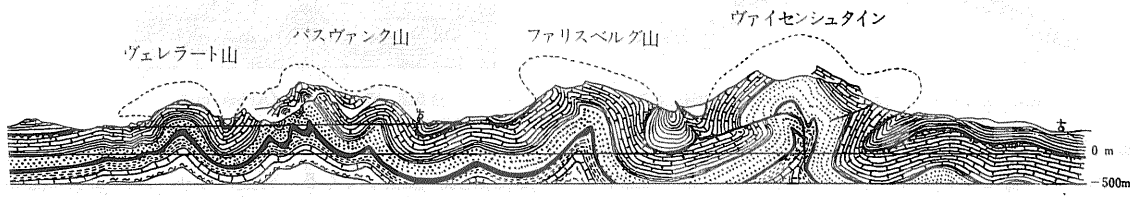
A. 1. 収縮説

ここでは歴史的概観とはいつても一応構造地質学が独立した学問としての体系をととのえた1920年頃から見えていくことにする。それはこの時代が収縮説による地相斜造山論の歴史においてその完成を示す三つの代表的な論文のあらわれた時代であり(山下1967)以後の地質構造ないし構造論に与えた影響も大きいからである。そして現在においても大きな影響を及ぼしていることは以下に見ることからもわかるであろう。

収縮説は地殻の中で支配的な力は水平の力でありその力の作用によっていろいろの造構現象が起こると考える。地層の彎曲する現象もその一つで水平方向の圧縮によると考えるわけである。この仮説はJeansらの地球の起源に関する説と密接な関係をもつていて火の玉として出発した地球は現在冷却・収縮の段階にある。地球の上部の外殻はすでに最大限にまで冷却しその容積は一定になっている。ところが地球の内部はまだ十分冷却しておらずその容積は収縮しつつある。その結果地殻は収縮しつつある内部と無関係の状態となりその表面は縮小し褶曲すると考える。

さきのべた収縮説の完成を示す三つの論文とはAlb. Heim (1919~1921)によるGeologie der Schweiz (スイスの地質) L. Kober (1921)によるDer Bau der Erde (地球の構成)とH. Stille (1926)によるGrundfragen der vergleichenden Tektonik (比較構造論の根本問題)である。これら三つのうちあとの二つはヨーロッパないしヨーロッパアルプスを中心に発展してきた構造論を一般化したもので深部の地質構造についての考え方はHeimの著書以上にあまりでないように思われる。そこでここでは主としてHeimの論文を多少くわしく見ていきKoberらについては簡単にふれるだけにする。

Heimの著書は2巻3冊の大著でその頃までにえ



られたスイスの地質資料が丹念に集められ 記述されたものである (山下 1967)。1巻はモラッセ地域とユラ山地を 2巻はスイスアルプスを扱っている。2巻3冊の大著で しかも記載を主とした論文では 全部どころか一部を読むのも容易ではない。ここでは 主として構造について 特に後に大きな影響をおよぼした深部の地質構造についての考え方を中心に概観して 筆者らの感想をのべることにする。

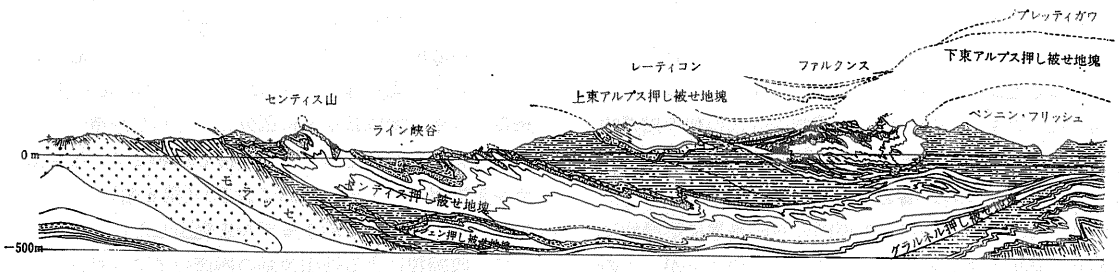
この著書全般についていえることであるが きわめて行きとどいたこまかい観察眼を感じさせる。これは一つには露頭条件の良いことにもよるのであろうが やはり 地に根をおろした ねいもうな研究によるものである。

一巻のモラッセ地域における 構造の項について見てみよう。たとえば 背斜の翼の形態についていうとその形態の変化について こまかく図示し説明を加えている。そして 種々の形態があるけれども 翼の傾斜が決して一様に変化するものでなくて 急変点をもつものが多く バスク法で描かれるようなものでないことを示しているのは このような観察の結果であろう。このモラッセ地域の章において 従来いろいろの人によって描かれた断面図を図示している。それによると 比較的高角度の押しかぶせ断層を重視していることがわかる。

第2章のユラ山脈の構造の項には やはり断面図が多く付されているが それらは 地層がどこまでも一様の厚さで堆積したのとして 作図している(第3図)。

また モラッセ地域の構造と同様であるが 押しかぶせ断層に大きな役割を認めているように思われる。これは 一つには 地層の層厚がどこまでも一様で余り変化しないと考えたために 断面図では 大きな押しかぶせ断層を描かなければ 収拾がつかなくなったことにも その一因があるように思われる。このユラ山脈の褶曲形態はいわゆる箱型褶曲や櫛型褶曲 すなわちベロソフの中間型褶曲構造に属するものである。したがって形態的には 私達の研究している新潟堆積盆地をも含めた グリントフ地域の第三系の褶曲構造と 同じ範ちゅうに属する。この地質構造と層厚変化との関係については 後に私達の意見をのべたいと思う。

2巻のスイスアルプスについては 2冊に書かれていること 色ざり 折り込みのアルプスを横断するような数葉の断面図を付していることから判断して Heim の最も力を入れて書いた所と思われる。ここでは まずアルプスの地質の研究史を概観し その結果えられた一般的な成果についてのべている。次に 現地性の中央地塊 ヘルヴェート・デッケン ロマン・デッケンやブレアルプスとクリッペン スイスの東アルプス スイスの南アルプスなどについてまとめている。そして これら各々についてのこまかい記載と同時に 想像たくましく 造山帯の深部約 5km の深さまでの構造を描いた(第4図)。これらは 大きな低角度の衝上断層の存在によって解釈したものである。この衝上断層は 前記のデッケン地域で観察される衝上断層を 深部にまで拡



第4図 アルプスの押し被せ構造の例 (Heim 1922)

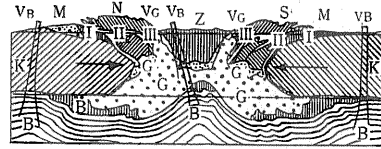


第5図 褶曲の形成のモデル (Studer) (Bloussov 1954による)

張して適用しアルプスの地質構造を解釈したものと考えられる。彼は アルプスのいろいろな人によって描かれた地質断面を集めたが その結果 大きく切る断面を描きたくするのは 自然の感情であろうとのべてこれらの断面図を提出している。この種の断面はこれ以後も多くの人によって描かれたが 大体同様のもので これによってアルプスの構造について 構造地質学者のイメージを固定させる役割を果たしたように思われる。そして 以後 デッケン構造が造山帯の典型を示すものと考えられるようになった。このデッケン構造は Bertrand や Süss の時代に盛んに議論されたものであるが ここに造山帯の深部の構造にまで拡張して適用されたものと考えられる。

Heim の断面図から推定すると 彼は 地殻の変形は主として表層に限られ いわゆる基盤はあまり変形しないものと考えたように思われる。そして 上にのべたように地表付近のみならず 深部においても 低角度の衝上断層による水平方向の移動を きわめて大きなものと考えた。モラッセ帯のように 比較的構造のゆるい単純な所でも 地表の褶曲構造とほとんど全く無関係に深部に衝上断層を想定して 地表の構造が 深部と関係なく存在するような図を提出している。これは 一部の露頭で観察した逆断層ないし衝上断層を 過大に評価したことによるものと思われる。

実際の構造がそのようなものであるとすると 地表付近の構造を いかにも綿密に観察しても それをもとに深部に外挿して考えることが ほとんどできないことになってしまう。このモラッセ地域などに見られる 地表付近の構造と深部の衝上断層との関係は いかにも不調和な感じをいだかせるが 後にこれらが引用される場合には 地表付近の構造が省略されてしまつて この不調和感を感じさせないように改められている点 注意を要する。この Heim の雄大な断面図を描いた背景になっている構造論は さきにものべた収縮説であるが 具体的に描いたものの中には 収縮説の時代の前の指導的な学説であった 隆起火口説の支持者 Escher や Studer の構造生成モデルの影響をも感じさせる (第5図)。それは Heim の断面が 深層型の層間異常に形態的にきわめて類似していることによる。このことが この



第6図 造山帯の構造 (Kober 1933)

後 隆起火口説を止揚したような 重力性地すべりによる褶曲説が台頭してくる 背景になっているように思われる。

山下 (1967) は Heim のこの著書について「内容は特に目新しいというわけではないが その頃までのデータが実にたんねんにまとめられ 記述されている。だから この本は複雑なアルプスの構造の事実証拠集という性質のもので どんな疑い深い人でも これを見たら信用しないわけにはいかないといったようなものである」と述べている。しかし その証拠が あくまでも地質学的方法によつたものである限り 地下数kmまで描かれた断面図の信頼度の高い部分は あくまでも地表付近に限られ 以後造山帯の一般的構造として示されるに至つた深部の低角度の衝上断層は Heim によって考えられたものであつた。この部分までも後には無批判に受け入れるのであるが この辺に 地質学的方法による構造論無用論にまで発展していった礎があつたと考える。このことについての筆者らの意見は あとにのべる。

Kober の論文は ヨーロッパアルプスで完成された造山論が 世界の造山帯にもあてはまることを主張したものである。この中で彼が 横臥褶曲を造山帯に典型的に発達するものとして きわめて重視していることは多くのページをそれにさいていることからわかる。これは 基礎になっているアルプスの構造についての考え方が 前記の Heim にもとづくものであること したがって 具体的な構造については Heim と同様のイメージをもっていたと考えられ 実際に Heim と同様のしかし地表付近の構造を省略した 大きな断面を描いている。この Kober の論文は Jeans らの潮汐説による地球の起源から説き始められ 火の玉冷却説による地球の発達についてのべられていくが Heim のものこととなり その中にあまり自然のいぶきを感じさせないような 観念的なにおいの強いものであるように思われる。

Kober は 別の論文 (1933) で 造山帯を内帯 中央帯 外帯 変成帯などに区分し それらが造山帯において対称的な配列をし 両側に押しかぶせている構造モデルを提出した (湊 1953による) (第6図)。そして それらの生成機構を示すモデルを提出したが これによって 収縮説による造山運動の機構のイメージは きわ

めて明確になったことは確かである。しかしながら彼の提出したモデルによって期待されるような構造ができるものかどうかは問題であろう。Kober のものは余りに図式化して 割り切りすぎる感をまぬがれない。たとえば Heim の所でもふれた造山帯の周辺地域にあたるモラッセ帯での構造の不調和性は Heim の描いた深部の衝上断層のみがとりだされたために 実際の断面図での不自然さはなくなってしまっている。そして 巧みな作図で 不自然さをあまり感じさせないモデルを作りあげたわけである。Belousov (1954) にいわせると これらは 10中9まで事実にもとづかずにまた構造ができる機構と地史との観点からみて まったく説明ができないような 幾何学的思想の産物であった。

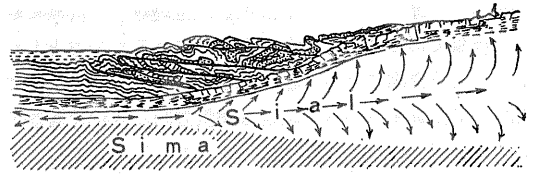
この時代までが 一応収縮説の全盛期であるが この頃から 収縮説に反論する数多くの学説が提出された。ここでは これらのうち 現在指導的な学説が一つになっている 対流説を中心に見ていくことにする。

A. 2. 収縮説批判

この収縮説批判の背景は 19世紀末のベックレルによる放射能の発見 (1896) やキュリー夫妻によるラジウムの発見 (1898) などによって 地球内部に大きな熱源の存在することの確認が大きなものであったろうが 一方には 地球上に大地溝などに示される張力帯の存在の発見など 地質学的な諸事実もあったものと考えられる。

この収縮説に代る学説として 現在までも大きな影響を及ぼしているものは 対流説の系譜に属する諸説であろう。この説は オーストリアの Ampferer (1906) の底流説にまで さかのぼることができるようである (Bubnoff, 1954)。Ampferer は 東アルプスを主として研究した人で その構造が複雑で それまで考えられていたような 南から北へというような単純な運動だけでは 到底説明できないようなものであることを見出し それを説明するために底流説を提唱したということである (山下 1967)。彼は そのような複雑な構造ができるのは 地殻の下にある物質が流れ動き それに引きずられて 上にある地殻が移動する。このためにいろいろな方向に押しかぶせ構造ができると考えた。Bubnoff (1954) は この Ampferer の説を アルプスの構造に 新しい根本理論の不可欠なことを論証したものと 評価している。

次いで 同じオーストリアの Schwinner (1919) は 「気圏における大旋風と逆旋風に類似した対流を マグマ帯の中に想定することによって (底流説を) 動力学的に基礎づけることを試みた」 (Bubnoff, 1954)。まず



第7図 Haarmann の説による褶曲作用 (Belousov 1954)

地殻下に鉛直方向の流動を考え そのうちの上昇流によって 断裂や火山作用が起こり 下降流によって 堆積作用や褶曲作用が起こる。そして この上昇流と下降流との中間では 水平の運動方向を持つ流れが生じ この流れと 地殻との摩擦によって 上盤のシアル地塊に衝上などの変化を起こすことができると考えた。

この対流の起こる原因については この頃までに大きな発展を見せていた 放射能による説明が与えられた。この仕事は 当時の放射能の研究の中心であった イギリスで行なわれた。すなわち Joly (1925) によって基礎づけがされ Holmes (1928) がそれをひろく修正した (Bubnoff, 1954)。彼は 地下深部の放射能による熱によって 温度が上昇すると密度の不均衡が生じ また地殻の底層の融解作用が起こる。それによって対流が始まる。それにひきずられて 地殻は運動する。そして 地殻の運動の前面では荷重が働き 褶曲が生ずる 一方 背面では展張が働き 割れ目を生じ 深部から融解した物質が流入する。それによって 大量の熱が外部に搬出され温度が下り そのために対流は停止するという機構を考えた。このような機構によって その当時までにわかっていた地向斜造山運動 展張帯の存在 造山運動の周期性などを 統一的に説明した。

Ampferer, Schwinner と同じオーストリアの Haarmann (1930) は 脈臥説をとらえた。彼は 従来の収縮説は 造山運動の機構を説明するのに 余りに横圧力に大きな役割を演じさせ過ぎると考えた。彼は この横圧力は 地殻の垂直運動にもとづくもので それに付随した現象ないしその結果なのだと考えた。すなわち その垂直運動によって地表面に高度差を生じ傾斜ができる。そして 重力によって地層はこの傾斜方向に滑り 高い位置の部では引っ張りが より低い位置では圧縮を受ける。この運動によって 先端部では褶曲 逆転褶曲 横臥褶曲がよくできる。一方 高い位置では引っ張りが働く結果 割れ目ができ それを補充する運動として 火山岩がしばしば噴出するのだと考えた (第7図)。Haarmann は Ampferer や Schwinner らと同様に この地殻の振動の原因が 地殻下の物質移動の外部へのあらわれであると考えた。しかし Joly,

Holmes と違って この垂直運動が地球上に同時に起こる現象であるから 宇宙的な原因によるものとした。この宇宙的原因によって極が移動し それにともなって沈降部が移動するから 地層は傾斜方向の変化を受けて以前とは反対の方向に動く場合がでてくる。これによって 場所的時間的運動の変化が説明できるのだとした。この変化は 収縮説では説明できないが 彼の説では うまく説明できるのだとのべている。

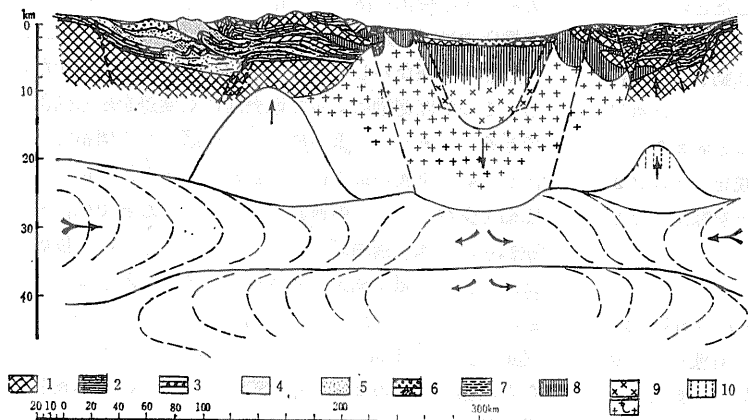
オランダの van Bemmelen(1933) は 脈動説(Undation theory) を提唱した。彼は 第一次の構造運動要素が波曲であると考えた点は Haarmann と同様であるが 彼は垂直昇降運動の原因を 本来中性である地向斜のマグマ基盤(Salsima) が 上昇する 酸性物質と 下降する 塩基性物質とに分かれる分化作用に求めた。彼は 波曲が 地向斜の内から外へ移動するから 宇宙的原因といった 外因的なものに帰することができないと考えた。Haarmann や van Bemmelen の説を見ると この時代になると地向斜の発展を説明することに目が向けられているようになったことが読みとれる。これは Heim や Koberの時代に比較して 堆積運動の様式が明瞭になってきたことの反映なのであろう。

収縮説批判は 地質学の分野だけでなく 地球物理学の分野にもあらわれた。Gutenberg (1926) は それらを総括した(小川 1929による)。彼によると Jeffreys Adams や von Cotta らが火の玉-冷却説にもとづく計算を行なった。その結果 地下深所に進むに従って冷却の進行が緩慢になる。したがって 地球内部の冷却によっては 地表付近にアルプスにおいて期待されるような収縮は 考えがたいと結論された。このような批判の下で 収縮説は昔日のおもかげを失い 対流説が抬頭してきたわけである。

A. 3. アルプスの構造地質学の輸出

1930年代になると 地質構造論の中心舞台は アルプスから遠く離れた 太平洋周辺に集まってきた。これは主として 植民地開拓にともなうものであった。1933年には Vening Meinesz によって 東南アジアの海域で最高 200 mgal に達する 重力の負の異常が発見され それを説明するために 対流説が適用された。(従来 しばしば Meinesz が対流説の提唱者のごとく見なされているが 前にのべたように対流説という語こそ使っていないにしても 対流の考えは Holmes あたりで 今日のものほとんど変わらない所にまで発展させられている。したがって Meinesz は これを重力の負異常に適用して解釈したと考えた方がよいと考える)。

この対流説は 収縮説が破綻をきたし それに代って 造山帯において構造運動をひきおこす横圧力の源を説明するために提唱されたものであった。したがって 造山帯の具体的な構造については 何等新しいものを提供しなかったように思われる(野外の研究を指導する学説ではなかった)。この間の事情は Meinesz が1954年および1958年に描いた断面図に きわめて象徴的に示されている。彼の断面図では 上にある地質断面図は Argand, Staub によって描かれた アルプスの縦断面である。そして 地殻深部の変形は 彼が考え Kuenen (1936) や Griggs (1939) によってモデル実験によって検討された buckling (挫屈) である。したがって 地質断面図は Kober や Heim の描いたものにおいて指摘したと同様の欠点をもったものを そのままもってきたものであった。このことから 対流説の主唱者たちは Heim らの断面は絶対的に正しいものとして ただその機構を考えれば良いのだと考えていたのではない



第8図
地中海西部のテロ・ベチック系を
切る断面 (1952 van Bemmelen)

- 1 結晶質基盤岩類
- 2 二疊-三疊系 (上; 石灰相
下; 湯成相)
- 3 ユラ系 (おもに石灰岩相)
- 4 白亜系
- 5 始新統フリッシュ
- 6 中新統モラッセ (上; 碎屑堆積
物 下; 安山岩質火山岩)
- 7 中・鮮新統
- 8 オフィオライト質火成岩
- 9 酸性火成岩 (上; 花こう閃緑岩
質 下; 花こう岩質)
- 10 酸性マグマと混成岩

だろうか。このように発展してきた構造地質学も第二次世界大戦によってその進歩をおしとどめられてしまった。戦後の発展はこの1930年代までの構造地質学を消化するところから始まるというよいであろう。

ただし次にのべる van Bemmelen のように戦前までの蓄積を戦後に刊行したものも多い。

脈動説を提唱した van Bemmelen は従来のインドネシアの研究を総括し 1949年には 2巻からなる大著 Geology of Indonesia (インドネシアの地質) をあらわし 1954年には Mountain building (造山運動) をあらわした。後者には「世界で最も活発な地殻変形構造運動を受けた地域であるインドネシア地域に主として基づく研究」という副題からもわかるように前者の結果を要約し彼の造山説でまとめたものであった。このような副題にもかかわらずこの本で最も力を入れかつ詳細に彼の学説にもとづいて描かれた深部までの構造はアフリカ北部のアトラス山脈からスペインとフランスとの国境にあるペンニン山脈にかけてのものである(第8図)。インドネシアについては層序 火成活動 構造運動 地球物理 構造発達史など地学的諸現象を総括しているけれどもそれにもとづく断面図は前のものに比較してきわめて貧弱である。これは1920年代以後いかに精力的に研究を行なっても所詮ヨーロッパにおける長い歴史をもつ研究以上にはでなかったことを端的に示しているといえよう。そこにはもちろん Meinesz のような偶然的な偉大な発見はあったにしても山下(1967)の言葉をかりるならば「アルプスの構造地質学の植民地への輸出」以上には出なかったことを示しているのであろう。

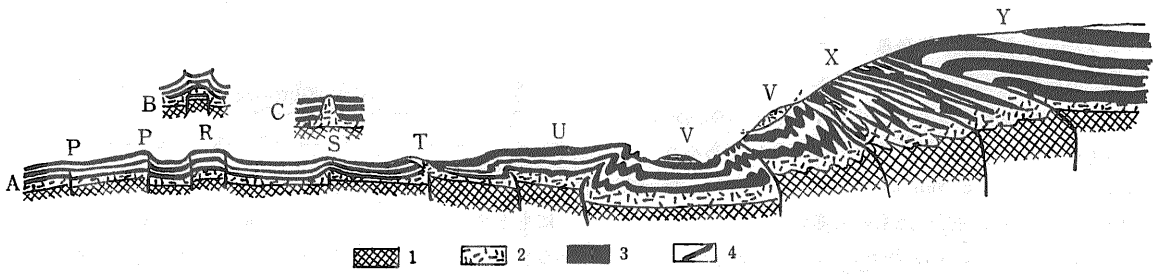
彼の描いた断面図を検討してみるとさらに1920年代に一応の完成をみたヨーロッパアルプスの構造地質学の影響の強いことがわかる。一つは低角度の衝上断層をきわめて重要視していることである。従ってその断面は Heim によって描かれたアルプスの断面ときわめて似かよったものであることがこのことを如実に物語っている。ただし van Bemmelen はこの衝上断層を無条件に仮定してはいない。彼はこの時代に発表された Hubbert (1937) の実物とモデルとの相似律を地層に適用するとそれが室内実験ではうすい歯みがき粉(diluted tooth paste)程度の粘性をもった物質に相当する。したがってそのような物質では横方向の圧縮応力を伝え得ず重力作用下では流れるはずだと考えた。これによって褶曲や衝上断層ができると考えたわけである。そして重力性地すべりをその起こる深さによって epidermal, dermal, bathydermal の



第9図 アパラチア山脈の模式断面 (King 1950)

三種に区分した。これはおそらく実際に野外の事実にもとづくものではなく彼の頭の中で考えたものであろうさらに彼は自分の仮説にもとづく構造運動モデルが重力の資料による検討にも合うと主張した。彼の説自体は以前のもと同様のもので前記の断面図中にも大たんにマントル中(彼のasthenolith)での分化作用の有様を描いているが上にのべたように新しい理論や地球物理学的資料を援用してその仮説を発展させている。また彼はこの頃までに明らかにされた中・深発地震についても意見をのべている。すなわち最も深いものが700kmにもおよぶ中・深発地震は造山運動の一つのあらわれではなくむしろより広範な地域の構造運動と関係をもつ造陸運動に関係するものであろうと述べていることをつけ加えておこう。それは彼が活発な反応の行なわれるasthenolithは深さ数10kmまでの上部マントルと考えたからであろう。このように1930年代から島弧の地域ならびにそこでの問題が構造地質学の第一線におどり出たけれどもその解釈にあたってはヨーロッパアルプスの構造地質学の伝統の影響を抜け切れなかった。そしてアルプスの構造地質学を多少修正したものにとどまりそれから飛躍的に発展はさせえなかった。すなわちアルプスを典型的な地域としてそれを模範として褶曲構造をはじめとする地質構造を理解する態度に終始した。このような態度は「すべての岩相が水平転移をうけて最初堆積した場所に存在しないから地層の層相や層厚の分布の知識にもとづいて野外で具体的に構造の機構を研究する態度を不可能にし構造発達史的な研究を不可能にしてしまった」(Belousov, 1954)。Haarmann や van Bemmelen の段階では堆積盆地の移動(すなわち堆積運動)についてかなり明らかにになってきているのであるから Belousov の言い方は多少極端な面があるが構造の機構を研究する態度を不可能にしないまでもそれを明らかにしようという意欲をうばったことは否定できないであろう。

このようなアルプスを手本にした研究はインドネシアだけでなく世界各国で行なわれた。そして現在においても「アルプスの地質」は根強く各国の構造地質学者の頭の中に根を下ろしているように思われるたとえば1964年に出版された Gansser による Geology of Himalaya (ヒマラヤの地質) においても 大



第10図 褶曲帯の模式構造図 (Belousov 1958)

- | | | | |
|------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| 1. 結晶質基盤 | 2. 可塑性にとむ岩石 | 3. 種々の層状岩 | 4. 造構断裂 |
| A: 褶曲帯の構造の原理的模式図 | B: 縁辺褶曲で複雑化した箱型褶曲 | C: ダイアビルドーム | P: 片面型ブロック褶曲 |
| R: 両面型ブロック褶曲 | S: 注入褶曲 | T: 穿孔核をもった注入褶曲 | U: 転倒した撓曲で壊されたブロック褶曲 |
| V: 重力性押しかぶせ | X: 岩石が強く押しつぶされた地帯 | Y: かすかに転位した中央ブロック | |

な地質断面は Heim のアルプスの断面とほとんど同じ考え方で描いているのは その一例である(第9図)。すなわち 深部に 低角度の衝上断層を考え それに大きな意味を与えている。また 最近の代表的な構造地質学の教科書である de Sitter (1956) の Structural geology(構造地質学)の模式的な造山帯の断面も Heimらのアルプスの断面と同様に 低角度の衝上断層に重要な位置を与えている。

このような傾向は 個々の構造地質学的現象を野外の事実にもとづいて 相互の関連のもとに 深く考察することがなくなってしまったことに 大きな原因があるように思われる。しかしながら このような傾向に対して 各国で反省の色が見え始めた。

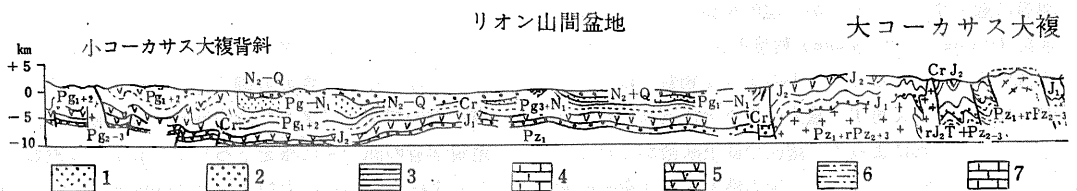
B. アルプスの構造批判の時代

戦後になって 1930年代頃までに大いに発展したヨーロッパの構造地質学の伝統をうけつぎ それを発展させた一つの学派が ソ連において形成されていたことがわかった。特に 従来 構造地質学の中心は山岳であったが 大陸の構造地質学が生れ 体系化されようとしていることは 大きな進歩であった。そして 山岳の構造地質学における大きな問題の一つである褶曲の機構などにもその結果は大きな影響を及ぼしていた。もちろん このような芽はすでにヨーロッパの学派に見られるが (Bubnoff 1954) これらの事情は Belousov の構造地質学の翻訳によって 今ではわれわれの身近なものになっている。彼等は ヨーロッパの地質学を徹底的

に吸収する所から始めたということである。そして他の国におけると同様に 収縮説が一時風靡したということである。ところが 彼らによって このヨーロッパの構造地質学が多くの欠陥をもつものであることが明らかにされ 造山帯の構造について 新しい見方が提出された。

Belousov (1951) らは 東アルプスの構造を研究して 従来の研究が 衝上断層を重視しすぎていたことを指摘し その衝上断層自体も 垂直昇降運動から派生した二次的なものであるという考えを提出した。また 従来西アルプスの押しかぶせ断層の水平移動距離は 約 10km であると考えられていたのに対して 東アルプスは Kober の考えによると 200km にも達するとされていた。しかし Belousov らは 水平距離が10ないし 20km の押しかぶせ断層は いくつかの地点で見られるがアルプスの構造は 従来考えられていたよりもはるかに単純であって “普通見られる構造” とかわらないと結論した。彼等は アルプスは 押しかぶせ断層にとられすぎた あやまった一般化の例であると考えた。そして 東アルプスの構造で大きな役割を果たしているのは 山脈の隆起のときにできた 新しい正断層であるとしている (第10図)。

この Belousov らの構造論は 垂直昇降運動に第一義的な意義を与え 横圧力は それから二次的に派生したものと考える点では Haarmann や van Bemmelen らと同様の考え方をとっているが 彼らは 重力性の褶曲生成機構に対しては批判的である。その批判を引用



第11図 コーカサスの地質断面図 (Milanovskii, Khain による)

- | | | | | |
|------------------|--------------------|----------------|--------------|----------|
| 1. 沖積および洪積統 | 2. 古第三紀および新第三紀の陸成層 | 3. 下部漸新統と中部始新統 | 4. 下部始新統と暁新統 | 5. 上部白亜系 |
| 6. アルビアン・アプティアン統 | 7. パレニアン・バランジアン統 | 8. 上部ユラ系 | 9. 断層 | |

してみよう。

「ハールマンの考えでは 地球の内部と堆積岩層との関係がまったく無視されている。彼の仮説によると 堆積岩層は滑動して より深部の構造と無関係な褶曲その他の構造をつくる。これは実際に見られる事実と矛盾している。すなわち すでに述べたように 各種火成作用の形態は 堆積岩層の構造と密接な関係をもっており これはたとえば侵入がおもに複背斜におこるなどの現象になってあらわれている。もし深部の岩漿の運動と 地表の累層群中の移動現象とのあいだに相互関係がなかったならば このような規則性はみられないであろう。……また力学的な反論もあるが もっとも本質的な矛盾は つぎの点にある。すなわち 褶曲はおおくの場合 地殻の物質が上から下に斜面にそって運動するためではなく 下から上に運動する すなわち高い場所に はいのぼるためにできたものである。」

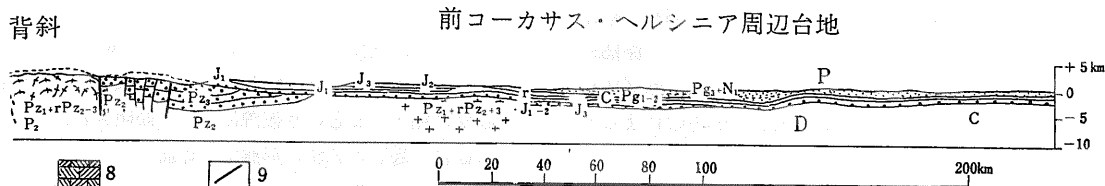
Belousov らの構造地質学の特徴は 上に引用した文章にも多少見られるが 構造運動を歴史的に段階的に明らかにする方法を開拓し そのような方法にもとづいて構造の機構を明らかにする方法を体系化しようとしたことにあると考える。実際に褶曲運動の機構を明らかにする上でも 構造と層相や層厚との関係の知識が不可欠で 両者の関係についての重要ないくつかの指摘をしている。これは従来の 形態だけ(それも頭の中で考えられたものが多かった)を見て その機構をいろいろ考える行き方と相当に違って それを一步進める方法論を提示したものと考えられる。

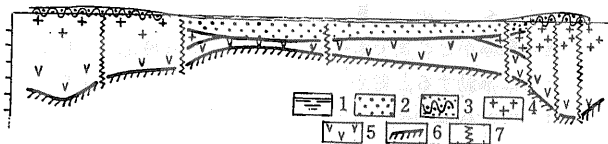
彼らの考え方をきわめて良くあらわしている構造断面図の一つは コーカサスのものである(第11図)。ここは きわめて露頭条件の良いこと 北部に産油地帯 また中部に金属鉱床が多数分布していることなどのために 学術的な研究がここを舞台に多くなされたことが一因と考えられる。これは Schatskii の監修したヨーロッパの地質構造図(1964)に付されたものである。このコーカサスは アルプス造山帯に属する 典型的な造山帯であるが 従来のアルプスの断面ときわめて異なる

っていることが 一見してわかるであろう。まず 地層の層厚がどこまでも一様でなく 最大層厚部は時代とともに移動すると考えている点である。このこと自体は van Bemmelen も考えていて 目新しいことではない。第二点は 基盤の変形が第一義的に重要であって その結果被覆層が褶曲すると考えた点である。もちろん van Bemmelen や Meinesz も マントルに構造運動の源があり 地殻は受動的に動くと考えたわけであるから まず基盤の変位・変形を考え それが被覆層に二次的な変形をもたらすと考えた。しかし Schatskii らの考えは 大きな単元から小さな単元まで 垂直昇降運動に第一義的な位置を与えた。これは 従来の衝上断層に大きな比重を与え これを造山帯 merkmal と見なすような考え方を 完全に排除したものである。

このように 従来のアルプスの構造に対立した 一つの考え方を提出しているところは あまりないようであるが 造山帯の構造についての従来の考え方に対する疑問は あちこちで出始めているように感じられる。

アメリカにおいては 1950年代までは 深部の構造について アルプスの影響もあって 低角度の衝上断層をきわめて重要視していたように思われる。たとえば Bucher (1955) は 造山帯の構造に関する論文の中で アパラチアとアルプスの構造を比較し 衝上断層を重視し 特に外帯では 褶曲が表層に限られることを述べるなど アルプスの構造を造山帯の典型と見なす見方から脱却していないことを示している(第9図)。しかしながら 石油の探鉱に結びついて 深部の構造を具体的に予想しなければならない事態にいたって その辺に反省の色が見え始めたように思われる。たとえば Rodgers (1950) は アパラチアの Valley and Ridge 地区の古生層の褶曲が 結晶質の基盤岩に達していて その基盤岩の運動の反映が褶曲なのか 全ての褶曲はその上に乗る堆積物だけのものか 基盤岩とは独立なものなのか という議論の行なわれていることをのべている。後者の立場をとる人は 堆積岩のプリズムに働く切線方向の力によって 褶曲は形成されると考えるわけである。また1964年には 基盤の構造の問題について





第12図 ヨーロッパ・ロシア南部の地震波による地殻の概念的断面
 1. 水 2. 堆積岩層 3. 著しく乱された堆積岩層
 4. 花崗岩質層 5. 玄武岩質層 6. M不連続面
 7. 深部裂溝 (Chekunov 1967)

のシンポジウムが行なわれたが これは 先にのべたような状態の反映なのであろう。

1968年に出版された イギリスの地質構造図においては従来の造山帯の断面図とは全く異なって 垂直ないしそれに近い深部断裂に第一級の位置を与えた断面を提示している。そして 横臥褶曲や衝上断層は副次的なものと考えているようである。

このように 最近に至って 従来のアルプスの構造を造山帯の典型的な構造と見なす見方に 反省がでてきている。この問題は 深部の構造の問題とも直接関係をもっている点で地球物理学的な諸結果にも 判定の鍵の一つがにぎられているように思われる。そこで この問題に関連する分野での 最近の成果を概観することしよう。

II 地殻・上部マントルの構造の問題

1. 地殻の構造の問題

さきにものべたように アルプスの構造断面において最も弱い点の一つは 深部の構造である。この部分は通常の地質学的方法によってだけでは 解析しえない部分であるからである。ところが 1950年代の末頃から大爆破人工地震を用いて 地殻の構造がさぐられるようになり この部分にも光が当てられるようになってきた。その結果 深部の地質構造を考える上で 見のがすことのできない いくつかの事実が発見されている。その一つは 台地や地向斜のような 主要な地質構造単元の境界に発達する 垂直ないし垂直に近い 深部断層の存在である。同様の深部断層はこれらの主要構造単元を複向斜 複背斜などに分けていて 地殻は大きなブロックになっているという事実である。その一例を 第12図に示す (Chekunov, 1967による)。このような深部断層の重要性は 地質学的事実にもとづいて Peive (1947) が主張したもので これが 地球物理学的的方法によって立証されたものである (Belousov, 1954)。

このような地殻構造は ここにあげたこのヨーロッパ・ロシアの南部だけに限らず 中央アジアの天山山脈な

ども確認されていて この地域だけの特殊なものでないらしいことを 裏書している。地向斜・造山帯の地殻の構造がこのようなものであるとすると 従来 造山帯の典型として見なされてきたアルプスの構造も 全くその姿をかえなければならなくなるであろうことは容易に想像されるであろう。そして ユーカサス山脈やイギリスの断面図に示される構造に近いものに 変ぼうするであろう。

2. 上部マントルの構造の問題

いわゆる 地殻の成層構造以外の上部マントルの構造の問題は 主として 中・深発地震の震源の分布の問題に関連して あつかわれてきた。この問題は 日本の地震学者が 先駆的な研究を行なった。この上部マントルの構造ならびにそこでの運動を論ずる際に 基準となった現象は 1935年の和達清夫による発見になる 中・深発地震の震源の深さの空間的分布の規則性の問題であった。この現象とは 中・深発地震の震源の深さが太平洋側から大陸側に深くなるような 面上に分布するという事実である。このような現象は 日本列島付近だけでなく 東南アジアの他の島弧においても見出された (Umgrove, 1949)。

この事実は アイソスタシーの原理から 地下100ないし200km以深は平衡状態にあると考えられていた時代においては 大きな驚きをもって受けとられたに違いない。Bubnoff (1954) の著書においては いまだその意味づけにとまどっているように感じられる。

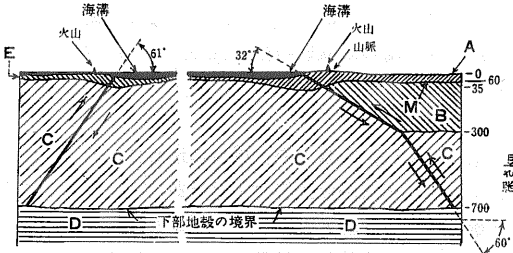
それは 彼 (1954) が次のようにのべていることから推察できる「実際の地殻の力学にとっては 一般に上部の100~200km が問題になるにすぎないことがわかるのであろう……今日合理的とみなされているアイソスタシーの理論によれば 120kmの深度で地殻の各地塊の重力の差違は平均化される。通常は純粹に理論的意義しかもたないこの地殻均衡面の下では 地球は“力学的に静した”ものとみなされる。しかし最近ではたしかに震源の深度が700kmにもおよぶ地震が立証されているのである種の運動(拡散・対流)は均衡面の下でもありうるし 実際あるらしいのである」。

上のべた現象は Gutenberg と Richter (1941) によって その中・深発地震発生面は地下深部における衝上断層に相当するという仮説によって説明された。この仮説は 島弧の弧状の形態が 球面をななめに切った断面の切口に相当するという Lake (1931) の説にも調和していて 一般に受け入れられていった。

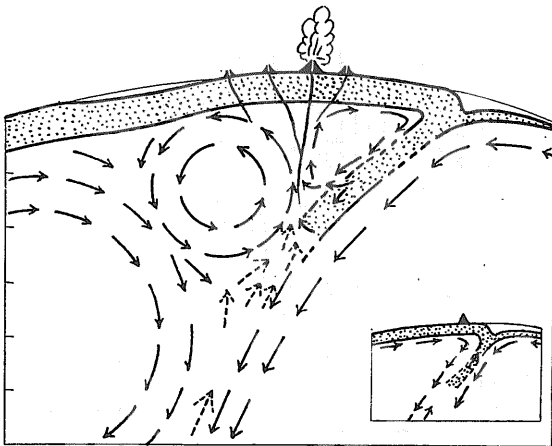
Benioff (1954) は 太平洋周辺地域の中・深発地震の震源の空間分布をしらべそれが一定の傾きをもつ面上に分布することを再確認するとともにそれが形態的に二つに分離できることを主張した(第13図)。彼はこの面を Gutenberg と Richter 同様に衝上断層なのだと解釈した P波の初動分布から求められる起震歪力もこのような仮説と調和するような状態と主張された(本多 1950)。すなわち中・深発地震の起震歪力の主圧力軸は中・深発地震の等深線の方向に直交するような配列をとるから。

この中・深発地震の地理的分布の規則性の問題は日本の火山岩の成因の問題や 変成岩の成因の問題とも関係をもつと主張されている(久野 1961 都城 1961)。

Meinesz (1949) は マントル対流説は中・深発地震の発生をよく説明しようとする主張したが最近 竹内均と上田誠也(1965)はこの中・深発地震発生面が太平洋側からのマントル対流が日本列島の下へもぐり込むその上面に相当するという解釈を与えている。



第13図 造山性断層をもつ海洋型および大陸型地殻の断面 (Benioff 1954)



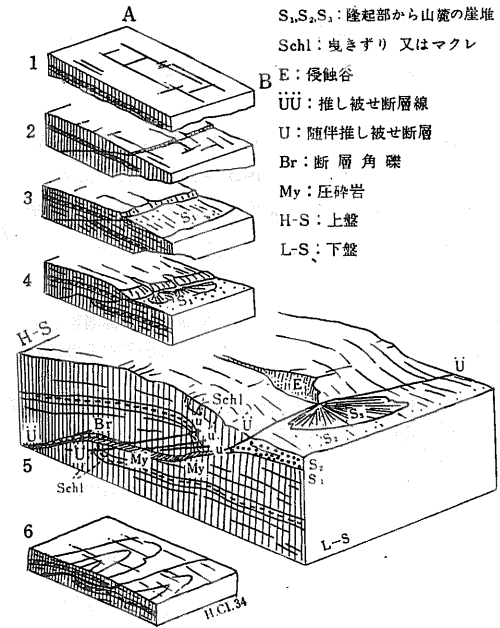
第15図 弧状列島をきる模式的断面。安山岩溶岩とその副生物の起源や中・深発地震域の直上に火山が集中することと対流の向きとの関係を推定的に示す。右下は中・深発地震帯に沿う下降流でこのゾーンは連続的な破壊をこうむりまた地下深部から地表へ向かう熱拡散の通路となっている。(Holmes 1964)

筆者らはこのような中・深発地震の分布を説明する仮説の裏にアルプスの造山論のにおいを感じるのであるがひがめであろうか(第14図)。すなわち深部に衝上断層を考え横圧力を無条件に仮定するなどアルプスなどの造山帯において最も重要なものに考えられた衝上断層を単純にさらに深部に拡張しなかつたであろうかということである。収縮説の完成者の一人である Stille (1955) が衝上断層説をとっていることが象徴的にそれを示しているように思われるのであろうか。

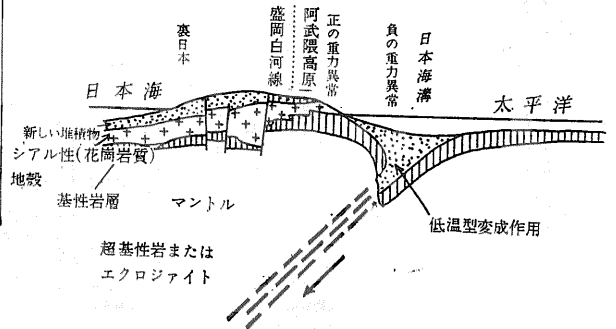
これらの上部マントルの構造仮説を新しい資料によって検討した結果については後にのべることにする。

(つづく)

(筆者らは 第三系堆積盆地研究グループ)



第14図 押し被せ逆断層の形成 (H. Cloos)



第16図 東北日本と日本海溝付近の推定地下構造(都城 1961)