

## 褶曲のタイプとその起源\*

V. V. Belousov

垣見 俊 弘 平 山 次 郎 訳\*\*

## 要 約\*\*\*

現在、有効な資料の示すところによれば、あらゆる褶曲のタイプは、疑いの余地なく、地殻の昇降運動 (Vertical oscillation) によって生じた現象とみなされるように思われる。この概念にとって最大の難点は、垂直な運動がしわ寄せ (crumpling) へと転化する過程を説明することである。この問題を明らかにしようという観点から、特別な構造的研究を行なった。その主要な結果は、次のように総括されよう。

褶曲作用についてきわめて重要なのは、地殻が、垂直運動の際に、しばしば、垂直の転位量が相互に異なる、ばらばらのブロックに分かれるという事実である。褶曲作用は、ブロックの垂直な差動に対して、成層した可塑的な岩石が反応したものである。運動学的な基礎にたつて、3つの褶曲作用のタイプが区別される。すなわち、ブロック褶曲 (block-folding)、注入褶曲 (folding of injection)、および全般的しわ寄せ褶曲 (folding of general crumpling) である。

ブロック褶曲は、地殻を構成するブロックの差動の、もっとも直接的な反映である。箱型褶曲 (box-folds) は、そのもっとも特有な形態である。

岩体 (rock masses) の水平運動があらわれ、それが増大してくると、さらに複雑になる。これが、すべての地層を巻きこむのではなく、最も可塑的な地層に集中すると、可塑的な物質がある場所から流れ出して、他の場所へ集まることと関連して、注入褶曲がおこる。このタイプの褶曲作用の主要な原因は、上になっている地層による、分布の不均一な荷重の効果で、可塑的な物質が水平流動をおこすことの反映である。地表の起伏や、可塑的な物質とその上になっている地層の比重のちがいや、隆起するあいだに頂部から物質が削剝されることは、第二義的な原因である。

全般的しわ寄せ褶曲にとっての必要条件は、地殻の中における、水平方向の圧縮応力である。このような応力の原因は、多分、一般に推定されているよりは、役割割りとしてははずつと局部的なものであろう。圧縮は、次のような作用の結果であろう。(a) 上昇したブロックの上部が重力によって横へ滑ること、および、それによって、となりの低いブロックに圧力がかかること、(b) 上昇したブロックの上部の物質が、それより上の岩石の抵抗によって、しぼり出されること、(c) 自由な重力的地すべり、(d) 一連の地層が、ブロック群が連続的に上昇および沈降の差動をうけている際に、引張りと圧縮をうけること。

さまざまな褶曲作用のタイプは、すべて、地殻のブロックの垂直な差動に共通の基盤をもっている。地向斜の中で、もっとも激烈な褶曲があらわれるのは、このようにして理解できるようになるのである。褶曲作用の起源がいろいろ異なることは、地質学者をして、褶曲地域のそれぞれの中で、褶曲作用の地方的な原因を発見する必要性に直面させる。

\* V. V. Белоусов: Типы и происхождение складчатости, Советская геология, 1958, No. 1

V. V. Belousov: Types of Folding and their Origin, International Geology Review, Vol. 1, No. 2, 1959

後者は前者の Belousov 氏自身によるほん訳である。

\*\* 本文は、はじめ平山が原文により全訳し、それを垣見が英文により対照した。英文と原文とで若干の食い違いがある所は、主として原文によった。英文を採用した所は、訳注に明記した。

\*\*\* 原文では文献表の前に掲載されているが、英文では置頭に挿入されているので、それによった。

## (研究史)注1)

地殻の成層した岩体 (masses) における褶曲作用の起源は、いまなお、構造地質学にとって、最もきびしい未解決の問題の1つである。よく知られているように、この問題を解決しようとする最初の科学的な試みは、古典的な時期に、収縮説の展開としてあらわれた。この時期にもっとも重要なのは、Suess (45), Heim (33), および Willis (46) の行なった仕事であった。収縮説が、その支配的な地位を大方喪失してしまったのちでさえ、褶曲作用の問題は、似たような線にそって、引きつづきあれこれと論じられていた。すでに述べた Heim (32) や、Sonder (43), Stille (44), Kober (34), などの研究がこのなかに入るであろう。収縮説の諸概念を褶曲作用に応用したもののうちの若干は、現在もなお、わが国でも諸外国でも、実用に供されている (15, 27, 35, 36, 41)。地球の全般的発展については、別な理論を持っていないが、褶曲作用を説明するためには、地球表面の全般的収縮の概念をなお支持している (例えば Bucher (26)) 人々の研究も、このカテゴリーに属する。

しかしながら、今世紀初頭の 10 年代から、多くの著者等 (しかもこの人達の数には次第にふえていった) は、褶曲地域の構造や発達史について特殊性があること、すなわち褶曲作用が地殻の全般的な水平圧縮と結合しているとの考えに矛盾している現象を、指摘した。これらの人々は、少なくともある褶曲のタイプを説明するためには、水平方向の圧縮は、局地的な範囲で、かつ別なプロセスからもたらされた第二義的な現象として、必要なだけであるとみなしている。

これと関連して、まず第一にオーストリアのすぐれた地質学者 Ampferer の仕事を指摘しなければならない。この仕事はそれがなされてから (24) こんにちまで 50 年たっているにもかかわらず、なお重要性を持っている。Ampferer の基本的な原理は、地向斜の中で褶曲をおこした水平方向の圧縮は、地向斜それ自体の中でおこったものであって、地向斜のまわりの台地からの圧縮とは、どうしても結び付かない、というものであった。Ampferer は、地殻のそのような圧縮を、地殻と地殻下のマグマ塊 (magmatic masses) の流れとの反応に関連させた。したがって、主として対流的な地殻下の流れが、地殻の発展に、基本的な役割をなしているというこの考えは、特に地球物理学の分野において非常に発達した。最近、この考えを褶曲作用に適用して、Griggs (29) はきわめて具体的な検討を行なっている。これと同じ頃に、別の方向が発達した。その説くところは、褶曲 (局地的な現象) に至る地層のしわ寄せの原因を、地殻における波形の昇降運動の過程で生じた応力にもとめている。

過去 20 年間に、重力性褶曲作用説が大いに成功をおさめた。これは、地層のしわ寄せを、重力の作用で構造的隆起の傾斜面に沿っておこるすべりと関連させている。この仮説は、もともと Reyer (40) によって展開されたが、当時ばかりみられなかったもので、Haarmann (30) によって復活させられ、また特に Bemmelen (25) によって充分に発展させられた。さまざまな褶曲地域に固有の構造を説明するために、この仮説を適用した多くの例が、文献のなかにみられる。

褶曲と地殻の垂直運動との関連性について、別な方から接近しようとする試みが、Yu. A. Kosggin および V. A. Magnitsky (14, 17) の仕事にあらわれている。彼らは地殻の局地的な圧縮を、純幾何学的な論拠からみちぎき出した。すなわち、昇降運動の過程で、地表が弦 (波の) を通過する間にその収縮がおこるといっているのである。

全般的に、この問題に対してソビエトの学者達が行なった最近の独創的な仕事は、褶曲変形のなかでいくつかの、起源を異にしたいろいろなタイプの違いをみとめ、それを分類したことである。この方向に向かっただけで、最初にして最大の進歩は、M. M. Tetyayev (22) によってなされた。彼は、褶曲変形のなかから、成因的に地殻の昇降運動と直接関連する“ドーム”という大きなグループを分離した。この時以来、褶曲変形にはいろいろな種類があるという考え方が、ソビエトの構造地質学者を風びするに至った。この考え方をもとにして、Belousov は自

注1) ( ) 中の見出しは、訳者が便宜上つけものである。以下同様。

形 (不連続) 褶曲 (idiomorphic (intermittent) folding) と全形 (完全) 褶曲 (horomorphic (complete) folding) とを区別した。それらは、それぞれ地殻の垂直運動と水平圧縮によって形成されたものである。かなり多数の、褶曲の成因的なタイプが、Ye. V. Khayn (23) によって発見された。V. V. Bronguleev (9), A. A. Sorsky と I. V. Kirillova (21), I. A. Rezanov (19), その他の人々は、起源を異にする褶曲の数多くのタイプを指摘した。

同じ時期に、ソビエトの研究者達は、水平的なしわよせの褶曲を、地殻の波形の昇降運動にむすびつけることができるという、新しいメカニズムをも指摘した。これから、このメカニズムを“動力的しぼり出し (dynamic squeezing)”と呼ぶことにする。これは、成長する構造的隆起の冠部から、この成長に対して、上位層が抵抗することによって、可塑的な地層が外側へしぼり出されることである。この情況のもとでは隆起の冠部にある (地表面からある深さに存在している) 可塑的な地層は、おしつぶされ側方におし出され、そしてしわくちゃに褶曲すると考えられる。

この考えは、最初 M. M. Tetyaev (22) によって一般的な形で表明され、次いで V. V. Belousov (3, 5), M. V. Gzovsky と A. V. Goryachev (7), および V. V. Bronguleev (8) によって、もっと完ぺきに、個々の実際の場合にあてはめて表明された。Khayn (23) もまた、いろいろあるメカニズムの、ある特別なものとしてこのメカニズムを認めている。岩塩ドームは、ソビエトの学者達によって、主として軽い、粘性のある物質が、重い物質の中で浮び上る現象と関連した、構造変形の特別なタイプであるとされていることに、注意を喚起しておこう (12, 13)。

褶曲作用の問題に関するソビエトの研究のもう一つの特徴は、褶曲が生ずる際に、地層が変形する内部的なメカニズムの問題に対して、大きな関心をよせていることである。この内部的なメカニズムは、褶曲の“解剖的構造 (anatomy)”をくわしく研究することによって、解明されてきた。これに関したものとして、Belousov (4, 5), Azhvirei (1), Sorsky (20), Kirillova (11), その他の人々の研究をあげることができる。この研究の一部は、室内におけるモデル実験を併用して、行なわれている (5, 16, その他)。褶曲の過程における岩石の挙動についての多くの特殊性が、この種の研究の結果説明された。

#### (本 文)

いままであつめてきたあらゆる資料を分析し、それを基礎として、筆者はまえまえから、次の結論に達していた。すなわち全形 (完全) 褶曲型をも含めた、あらゆる意味の褶曲作用は、地殻の垂直の昇降運動によってもたらされた現象とみなされるべきである。

Ampferer, Haarmann, Bemmelen, Tetyaev, その他の人々に続いて、筆者もまた、地向斜における褶曲作用が、外側からの水平方向の圧力によっておこったという概念を、打破しうとできるだけつとめた。この見解は、何度も強調してきたので、ここでもう一度証明をくりかえす必要はないだろう。

この理論、すなわち褶曲運動が昇降運動に従属するとみなす説にとつて、最大の難点は、いかなるプロセスによって、地殻の垂直運動を褶曲運動に転化させるか、という問題である。この難点は主として完全褶曲の形成を分析する際にあらわれる——つまり、完全褶曲は地殻における横圧力と直接むすびついているからである。

すでに指摘したように、地殻の垂直の運動が、物質の水平の変位へと転化することは、通常 2 つのプロセスと関連している。すなわち、地殻を構成する岩体 (masses) が、造構的隆起の斜面にそって動く、重力的運動; 地層 (layers) が、隆起形成の過程で上下方向に扁平になった際に、それを構成している物質が、隆起の冠部から外側へしぼり出されること (outward squeezing)。これらのメカニズムは両方とも——重力的なものも、隆起冠部からの動力的なしぼり出しも——1 つの同じ結果をもたらす。すなわち、隆起冠部から斜面または隣接沈降部への物質の移動をみちびくのである。このプロセスにおいては、冠部における物質の量は減少す

る。すなわち、そこに発達する岩体の全層厚は減少する、一方、斜面および沈降部では、層厚は増大する。成層した岩体に特有力学的性質のために、全体の厚さがどのように増加しても、それに伴って、地層のしわよせによって、褶曲が生ずる。このようにして、褶曲は、成層した物質が動いて集積したところに形成される。

褶曲地域の構造を、このような2つのメカニズム——すなわち、重力的なメカニズムと動力的なしぼり出し——という観点から解釈する場合、物質が流出した地帯(どの地帯から、これらのプロセスで、物質が動いたか)および、物質が注入ないし集積した地帯(そこで、物質がつかさなり、褶曲が形成されている)をさがすことが、明らかに必要である。成層した岩体が水平に引きのばされた痕跡(一般に厚さが減ってみえる)、レンズ状の尖滅(lensing out)、特定の断層運動などは、流出帯をあらわしている可能性が最も多いはずである。流出帯が、褶曲系の軸部(もともと、完全褶曲の発達がもっとも著しい、中央隆起の軸部にある)に位置するはずだということは、きわめてありそうに思われる。このような1つの流出帯は、特定の褶曲系全体に“供給する(service)”と考えられ、また、それゆえにこの流出帯はかなりの幅があるはずだと考えられる。

このような推測を、いろいろな褶曲帯の実際の構造にあてはめてみると、これらの条件が疑いもなく1つの完べきな場合——東アルプスの1断面——に生じていることがわかった。そのプロファイルは、説明付きで公表されている(7)。

しかるに、ほかの多くの場合には、褶曲地域を形成するプロセスを、この観点からほんやくしようとしたが、大きな困難におつかってしまった。それらの地域の軸部においては、十分に幅広い物質の流出帯の徴候がなかったからである。例えば、南東コーカサスでは、その軸部(そこから物質が流れ出したにちがいない)については公表された地質断面によると、高度に圧縮された、振幅の大きな、等斜状の、急傾斜扇状褶曲が示されているので、難点が生じた。このことは、もちろん、仮説と完全に矛盾する。

この場合、2つの情況があり得るだろう。すなわち、仮説がまちがっているか、褶曲帯の内部構造に関するこれまでの概念が不完全であったか、どちらかである。第2の場合は、第1のそれよりも、可能性がすくないとは思えない。なぜなら、周知のように、一般の地質調査の過程では、複雑に転位した地帯の構造の研究は、きわめて模式的にやらざるをえなかったからである。何よりもまず、どうしてこの第2の可能性があり得たかを、決めようとする必要があるであった。このことに着眼して、褶曲系の形態に関して、より正確な資料がうもれているかもしれないような所で、詳細な構造的研究を行なった。これらの研究は、地質図の作成と、また、主として全褶曲地域にわたる、詳細でしかも正確な断面図作成を含むものであった。

断面図がたて、よこ1:1のスケールであること、およびその断面図が大・小の構造を両方とも記録しているように、特に注意した(小縮尺の模式的な断面図をコンパイルしたのでは、大・小の構造形態の特定の関係が、そこなわれてしまうからである)。

こんにちまでに、(この線にそって)観察された地域は、南東コーカサス(A. A. Sorsky, A. V. Delitsky, M. M. Shurygin), フェルガナ(40.30° N, 71.50° E)(D. A. Kazimirov), カラ・タウ山脈(43° N, 70° E)(V. V. Ez, M. V. Gzovsky), タジクスタン(39.0° N, 71.0° E)(M. V. Gzovsky, V. N. Krestnikov), ケルチ・タマン地域(45.19° N, 36.29° E)(N. A. Syagaev, N. B. Levedeva, O. M. Filatov, V. I. Bashilov)などである。

これらの研究は、まだ、完全にはほど遠い状態である。しかし、得られた結果は、明らかに、さきほどの第2の推測に有利である。とにかく、南東コーカサスにおける詳細な研究によると、この褶曲帯の内部構造に関する従来の考えとは、はっきり異なった結果がでたのである。

1955年に、筆者はフランス・アルプスを旅行した。この地域は、詳しく研究されているし、また露出も良い。そこで、この地域は、構造についての基本的に重要な特性を、いろいろなタイプの個々の褶曲および褶曲系全体の両方ともに、数多く観察する例外的な機会を与えてくれる(6)。筆者の扱った素材と、いまのべた研究者達の素材とを対比し、また、文献からの資料

の有効性をも考慮して、あとで述べるような結論に達した。下記の結論に対しては、あくまでも筆者個人にだけ責任があって、そのために資料を提供した人達は、各自どのようにそれらの資料を解釈し、また独自の結論を導き出そうとも全く自由である注2)。

この結論が、どの程度まで一般性をもつかを断言することはできない。その一般的な意義の当否を決定するためには、同様な観察を、ほかの多くの褶曲地域に及ぼす必要がある。このことは、以下にふれる問題が、さまざまな褶曲地域で研究している多くの地質家の注目をあびるようになったあかつきに、はじめて可能になるであろう。

しかし、それにもかかわらず、フランス・アルプス、カラ・タウ、コーカサス、フェルガナなどのような、位置も地質構造も異なる地域で得られた観察事項が、きわめてよく一致した結果をもたらしているという事実を、否定するわけにはいかない。これは偶然ではあり得ないことだ。

明らかに、褶曲の過程できわめて本質的なことは、昇降運動の過程で地殻が多くの場合、相対的に垂直の変位をあらわすべつべつの断片に割れる、という事実である。このような断片をこれから、ブロックと呼ぶことにする。これらのブロックは、断層もしくは撓曲によって、互いにへだてられている。明らかに、ブロック間の同じ傷跡でも、深度がちがひ、また岩石がちがえば、断層となったり、あるいは撓曲となったりする。これらの傷跡は、多分 Peyve が“深部裂か”(18)と称したものであろう。一方、運動の独自性を保っている、分離したブロックは“要素帯 (elementary zones)”を形成する。これは、Gzovsky (10)により、地向斜の中に認められたものである。

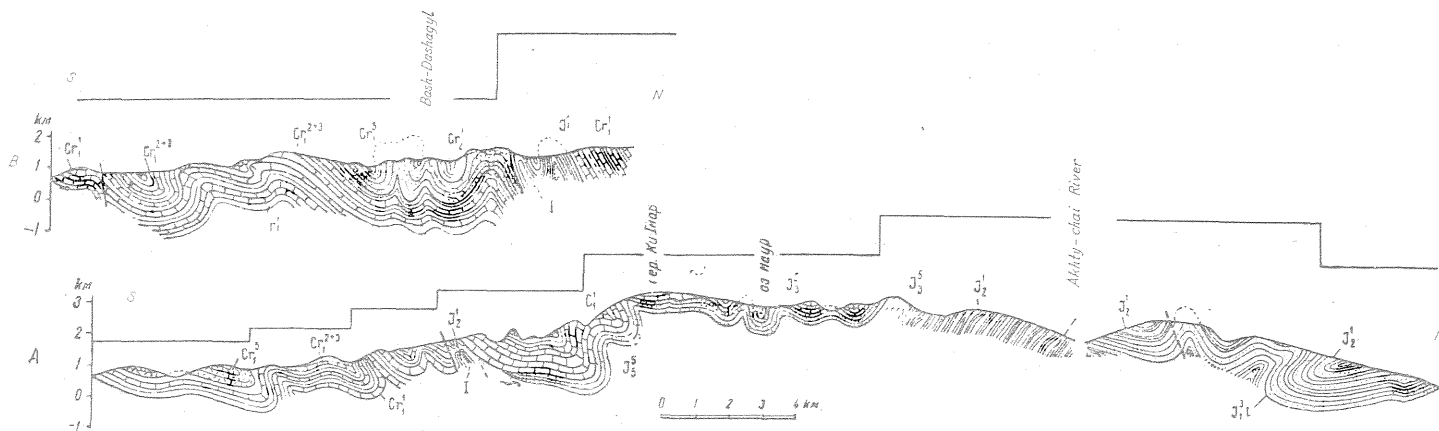
そのようにいったからといって、地殻の垂直な差動が、地殻の淀みない湾曲によって生ずることも、ないというわけではない。筆者の見解では、かかる“淀みない”または“可塑的”な昇降運動は、単に存在するというだけではなく、ブロック運動よりむしろ広範囲なくらいである。さらに、ブロック運動は、それが発達している間は、地殻の昇降運動について一般に確立されたのと同じ法則に従うことを、付け加えておこう。要点はつまり、昇降運動は、ある場合には沈降地域から隆起地域へ連続的に移行しながら発達し、一方他の場合には、その間の移行は断続的である、ということである。しかしながら、切線方向の圧縮と結合して褶曲が形成される際に、垂直運動が水平運動へ転化する場合、きわめて重要な役割を演ずるのは、まさしくブロック運動である。このブロック運動の重要な役割は、ブロック間の境界で、力学的条件が急変するためである。この事情があるために、隆起部から沈降部への、物質のより精力的な移動が促がされるのである。

このブロック運動の際に、ブロックは結合して“鍵盤 (key board)”(ある地域を、ある平均の水準をもった、相対的に上昇および沈下したブロックに、区分すること)と呼んでよいような形をとるか、または、結合して巨大な階段状の隆起または沈降を形成する連続的な“階段 (steps)”(上むきか、また下むき)の集合として現われる。

地殻の区分は、ある平均の水準よりも上、または下へ変位した“鍵 (keys)”になる場合が普通で、またよく知られている。例をあげると、塊状の箱型隆起をもったフェルガナ沈降部の南部、中央ヨーロッパの新生界中部、ロッキー山脈、中国台地、その他多くの地域がある。

巨大な山脈状隆起をなす階段状構造は、あまり知られていない。この構造は、大分前から、天山山脈(49° N, 80° E)で、一連の階段“商品陳列台 (counters)”として発見されている。きわめて最近の文献では、階段状構造がジュラ山脈にあることが指摘されている(28)。フランス・アルプスを旅行して、その高い山脈部の構造は、階段状として解釈されるかもしれないとの暗示をうけた(6)。全く思いがけず、大コーカサスの東部に階段状の構造が発見された(第1, 2図)。第1図は、ある斜面の断面(フリッシュ帯)を、A. M. Dolitskyのコンパイルによって示したものである。第2図は、A. M. Shuryginによりコンパイルされたもので、南東コーカサスの中央部全体を含んでいる。このプロファイルは、構造的な棚 (ledges)

注2) 原文にはあるが、英文にはない。



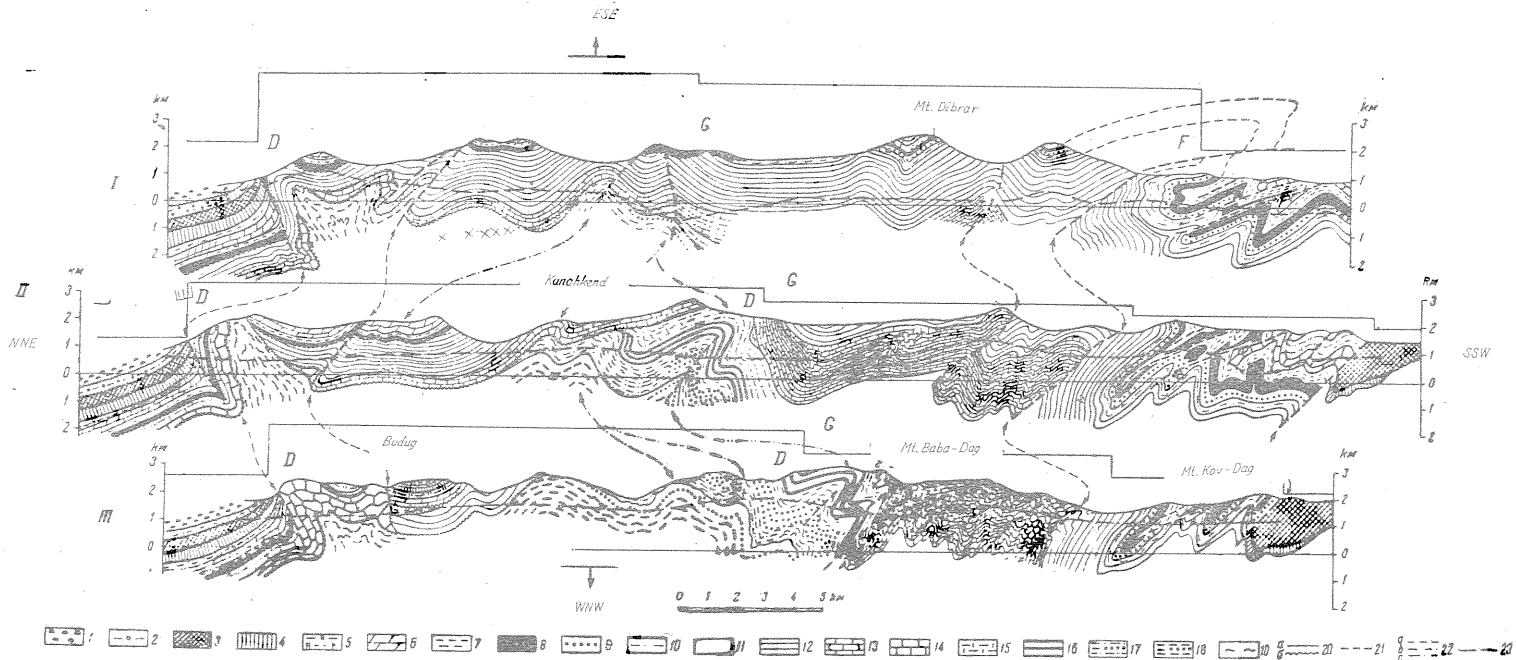
第1図 大コーカサス山脈南東部（ノウカ地域）の南斜面の地質断面図（A. Dolitzky による。）

断面図の上の屈折線は地殻のブロックの位置を表わす。

A: 主断面図

B: ジュラ系下部の泥岩からなる注入核 I から南方の地域の A 断面の拡大図; 棚の直下で地層のしわよせが観察される。

60—(678)



第2図 大コーカサス山脈南東部 (Dibrar 山と Baba-Dag 山の間) を切る総合地質断面図 (A. Shourygin による)。I からIIIの断面は順次東から西に並べられている。各断面図の上の屈折線は地殻のブロックの位置を示す。

1—上部中新統； 2—中部中新統； 3—漸新統と下部中新統； 4—暎新統と始新統； 5—グニヤン階； 6—上部カムパニア階—メーストリッヒ階； 7—サントン階—下部カンパニア階； 8—上部チューロン階—コニヤック階； 9—セノマン階—下部チューロン階； 10—アルプ階； 11—上部アプチア階； 12—オーテリア階—下部アプチア階； 13—バラング階； 14—ルチア階—チットン階； 15—キンメリッジ階—チットン階； 16—カロピア階—ルシタン階； 17—中部ジュラ系； 点—バイオス階砂岩； 18—下部アーレン階； 点—アタシュカイン砂岩； 19—海底地すべり； 20—層位境界； a—整合， b—不整合； 21—逆掩断層； 22—構造の連続を示す線； a—断層， b—背斜軸 (バラング期以前に生じたもの)， c—背斜軸 (バラング階以後に生じたもの)； 23—直接観察される断層の下限； D—本文中でのべた注入褶曲， F—南方の転倒梳曲， G—西方の断面だけでよく観察される構造節。

をあらわし、そのおのおのは、地表では、はっきりした、小規模な層位的間隔 (interval) をもった岩石からなっている。棚の表面は褶曲作用によって複雑になってはいるが、褶曲はおのおの棚の範囲内では同じ層準を保っている。しかしながら、地表にあらわれている地層の系列の時代は、各棚ごとに根本的にちがっている。

地層がしわくちゃに褶曲することは、地殻における成層岩体が、そのブロックの垂直の差動に対して反応したものとみなすべきだというのが一般的結論である。いろいろな場合で、この反応はその複雑さを全く異にする変形としてあらわれる。しかし、いつも規則的なのは、個々の場合を、ある系列のようなものにアレンジできるという点であって、例えば、単純な変形からより複雑な変形へと系列化できることである。これを利用して、明らかに運動学的な原理に基づき、褶曲作用を次のように分類することができよう。

この原理によって、私は褶曲 (作用) の3つのタイプを区別することができた。すなわち、ブロック褶曲・注入褶曲・全般的しわよせ (による) 褶曲である。

### (ブロック褶曲)

ブロック褶曲は、地殻におけるブロックの差動を、最も直接的に反映している。観察によると、ブロックには、両面型 (bilateral) と片面型 (unilateral) の両方がある (第3図)。第一の場合には、ブロックを覆う地層の褶曲性の湾曲は、箱型褶曲 (box-fold) の形をとる (カラ・タウ山脈); 第2の場合には、撓曲 (flexure) の形をとる (クガンタッシュ山脈)。

典型的なブロック褶曲の例は、第4図にもみられるであろう。このタイプの褶曲は、褶曲帯の周辺部 (outskirts) および半地向斜 (para-geosynclines) の地域に、広範に発達している。それらは、ダゲスタン (43° N, 47° E), クリン沈降部 (40° N, 48° E), リオン沈降部 (42.3° N, 42° E) など大コーカサス山脈の褶曲帯の縁辺部、西アルプス (外帯), フェルガナ沈降部, ロッキー山脈, 小コーカサスのソムヘット帯 (41.15° N, 44.30° E), その他の地域でみられる。

概して、プロファイルを上方向にたどって行くと、かかる褶曲は、箱型隆起の場合も、急傾斜の撓曲の場合も、だんだんおだやかに傾むき、パール状の隆起 (swell-like uplifts) へと漸次発展する傾向がある。褶曲の形についてのこのような変化は、単純な実験によくあらわされている (第5図)。

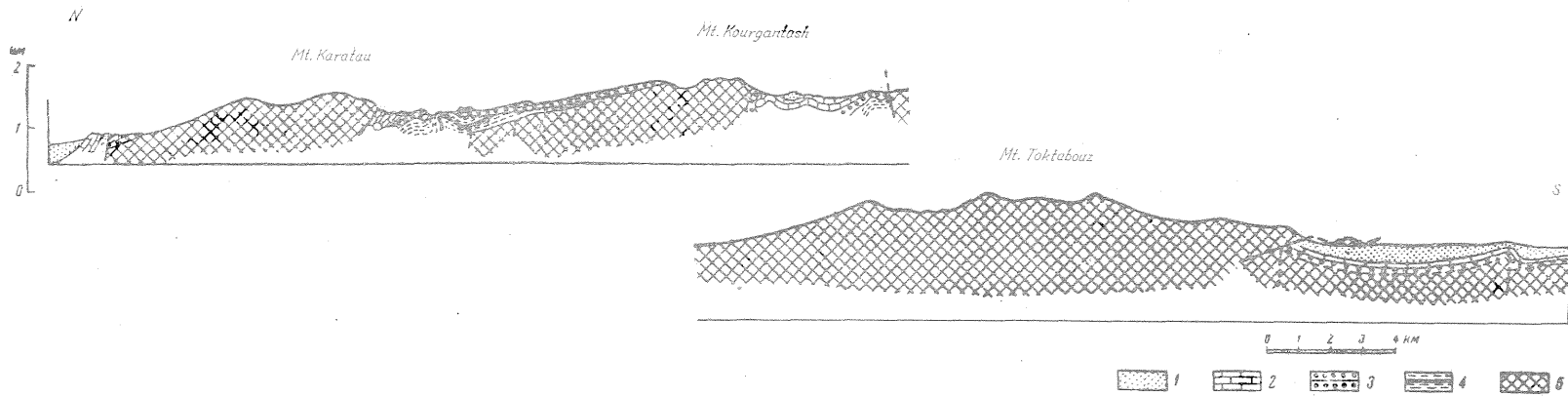
このように、プロファイルに沿って上方へ褶曲の形が変化するために、いろいろなパール (swells) や短軸褶曲 (brachy-folds) やドームは、特に台地に広く発達するものであり、また地層が局部的に垂直に隆起したためできたものとして、同じタイプのブロック褶曲に入れることができるのである。多くの場合、このようなゆるく傾むいている岩石の背斜状の形態は、深部における、よりコントラストのはげしいブロック運動が、地表におけるきわめてスムーズな形態の中に反映しているものだと、結論してよいであろう。

こうして、私は自形 (idiomorphic) [不連続 (intermittent)] 褶曲 (以下にのべるダイアビルドームを除く) の広範囲なグループを、主としてブロック型褶曲に含めてしまったが、術語としては、ゆるやかなパール (gentle swells) と短軸背斜とドームとは、明瞭な境界をもつより典型的なブロック褶曲から、はっきり区別しておく必要があると考える。

以前しばしば使われていた用語を用いるとすれば、自形褶曲 (ダイアビルを除く) のさまざまな種類を“ブロック反映褶曲 (reflected block folds)”とよぶこともできよう。このようなあい、ブロック“反映”褶曲は、地下深所でより典型的なブロック隆起へと移行するということを考慮に入れているのである。しかし、このような転化は、必ずしも結晶質の基盤と堆積岩被覆層との境界部にある必要はない。それはこの境界の上にあっても、下にあってもよい。ブロック反映褶曲の構造は、ある褶曲帯の原理的な全体を示すプロファイルに見られよう (第13図参照)。

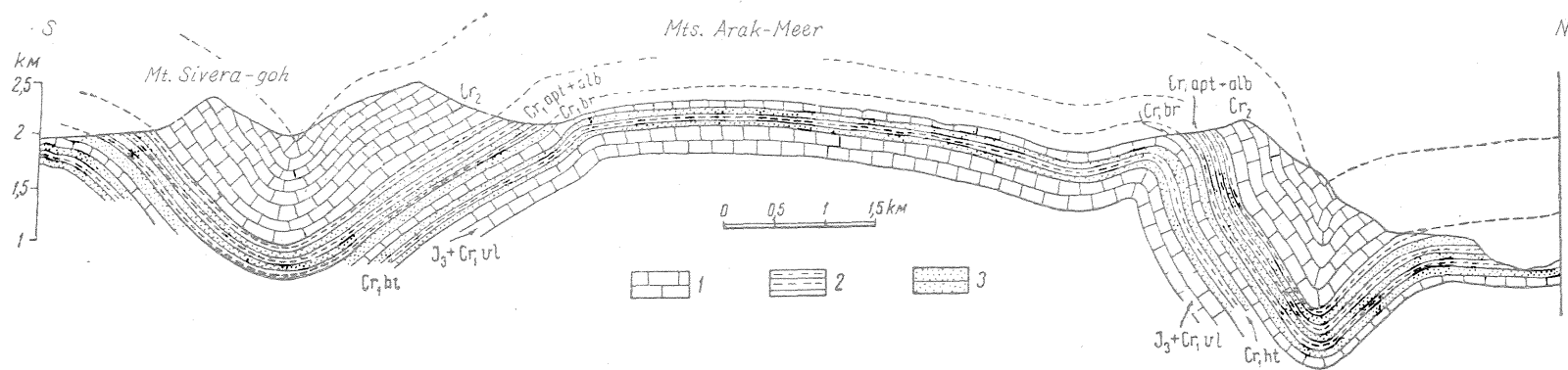
褶曲作用の運動は、当然褶曲の形態に反映されている。主として、ある特定の褶曲があるきまった運動学的なタイプに帰することができるのは、まさしく形態的な特性によってである。





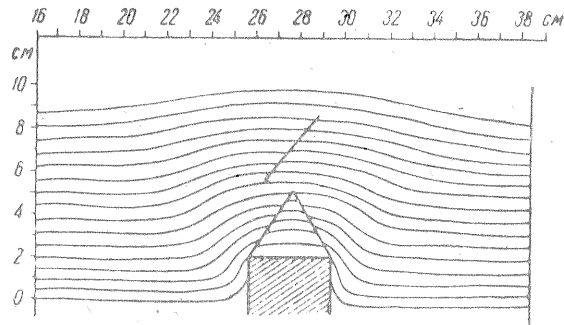
第3図 Kara-tau山・Kourgantash山・Tokhtabouz山(南西フェルガナ)を通る地質断面図(D. A. Kazimirovによる)

1—新第三系—第四系下部; 2—古第三系; 3—白堊系; 4—ジュラ系; 5—古生界



第4図 Avar Koisou河と Andy Koisou河にはさまれた Limestone Daghestan を切る地質断面図(A. A. Sorskyによる)

1—石灰岩; 2—泥岩; 3—砂岩



第5図 箱型褶曲が上方に向かって平坦化する現象を示す。モデルは銃砲用グリースからなる。(A. M. Sycheva-Mikhailovaによる。)

しかし、そうだからといって、いろいろな特性が、ある1つのものに取れんすることがあり得るという面を、見落してはならない。こういう意味で、ブロック褶曲の形態的な特性のうちのあるものが箱型なのである。箱型褶曲のすべてが、その形成のメカニズムに関して、ブロック型に属するわけではない。もっと後のところで、われわれはジュラ山脈の褶曲を、典型的な注入褶曲の一例とみなすであろう。がそれでもなお、可塑的な注入核 (injection core) をカバーしているジュラ紀の塊状石灰岩の中の褶曲は、しばしば箱型的である。しばしば注目されていることだが、ある櫛型 (crest-like) 褶曲構造——それ全体を私は注入褶曲のカテゴリーに入れている (以下をみよ) ——のあるものでは、その断面図における個々の背斜は、これまた箱形をあらわしているのである。その例は、北ダゲスタン (46.5° N, 66.4° E) におけるテレク背斜、スンザ背斜の若干の断面にあらわれている。

したがって、あれこれの褶曲が、どのような運動学的タイプに属しているかを決定するためには、形態的特性の組合せ、できるだけ深部における褶曲構造に関するデータ、およびその発達史に関する情報などを合わせ用いることが必要である。

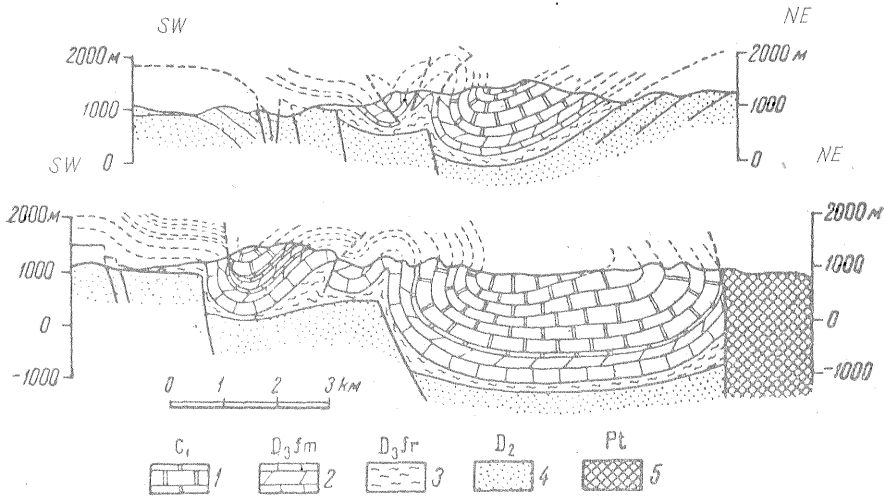
#### (注 入 褶 曲)

さて、もう一度多数の褶曲の運動学的種類について考察しよう。いままで考察したブロック褶曲に較べて、これらの褶曲構造は、いままでと全く同一のブロック運動を背景として、岩体の水平運動の要素が出現し、かつ一層強まるために複雑になる。

このような複雑化は、まず、岩体の水平運動がすべての地層を巻きこむのではなく、特に可塑性にとむ若干の地層に集中する場合にはじまる。この地層内では物質は、ある地域から流れ出して、他の地域に集中し、その結果、ある場所では層厚の減少を、他の場所では増加をおこすのである。後者の場所には、“注入核 (injection cores)” および“穿孔核 (piercement cores)” が形成される。下位の可塑的な地層から物質がこのように再配分されるのに伴ない、上位の地層は、“注入核”の上では曲隆 (upwarp) をおこし、物質が流れ出した場所の上では曲降 (downwarp) をおこす。これが注入褶曲 (injection folding) である。

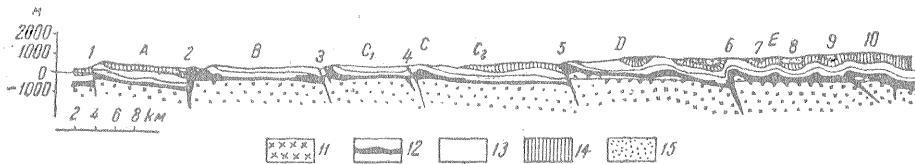
注入褶曲とブロック運動を力学的に結びつけて考える試みとして、南東コーカサスの南斜面に注目してみよう。A. V. Dolitsky により提供された情報によれば、構造的な棚の1つの端のま上のところに、下部ジュラ紀の可塑的な岩体からなる1つの強烈な注入体が、上位の地層を貫いているのが観察される (第1図 AI のを見よ)。A. M. Shurygin によってコンパイルされた、同じ地域のプロファイルにおいても、低位の棚に面しているブロックの前縁で、物質が注入している例が認められる (第2図の D を見よ)。

V. V. Ez によれば、カラ・タウ山脈でも、基盤の構造的な棚と上位の可塑的な岩体の褶曲との間に、相似の結合関係を観察することができる (第6図)。



第 6 図 Turlin 峠と Kyzylata 川との間の Kara-tau 山脈中央部の地質断面図 (V. V. Ez による)  
 1—下部石炭系：石灰岩とドロマイト； 2—上部デボン系：ファミンヌ階、石灰岩と泥炭岩；  
 3—上部デボン系：フラスマ階、泥炭岩と泥質岩； 4—中部デボン系：赤色砂岩； 5—原生  
 代変成千枚岩

第 7 図はジュラ山脈全体の一般的プロフィールである。この地域も同様に、階段状構造に特徴がある。三畳紀の可塑性な岩体からの物質の移動が、ここでも、おのおのの棚の範囲内で認められる。それは、全般的な斜面上にそって低下してゆく棚の前縁に、しばしば複雑な注入核が形成されるという様式をとっている (6, 28)。



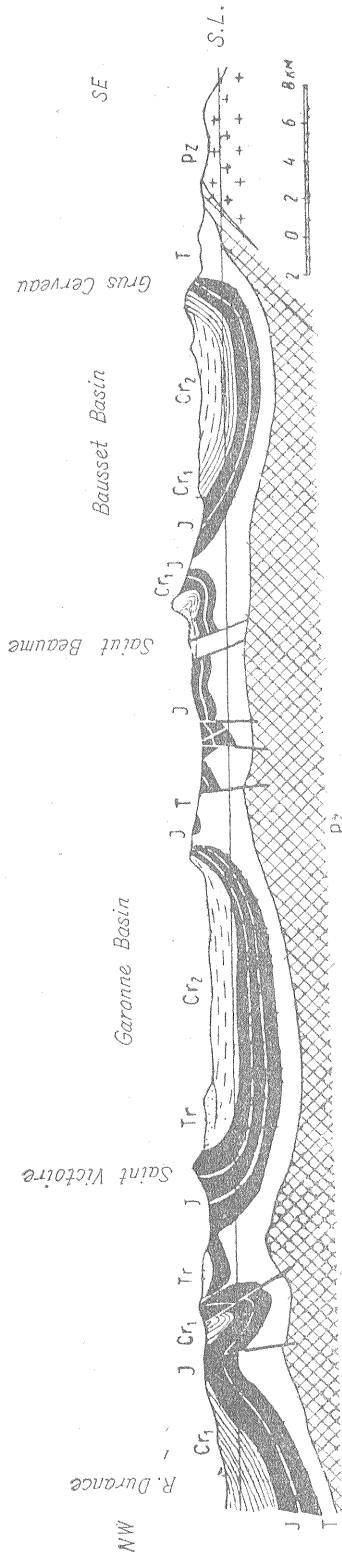
第 7 図 北ジュラ山脈をきる全地質断面図 (Glangeaud による)  
 A—Ognon 以北のブロック； B—Besancon ブロック； C—Ornan ブロック、Mamirolle 断層で C<sub>1</sub> と C<sub>2</sub> に分離されている； D—Levier ブロック； E—Helvetic 褶曲群。  
 1—Soane 断層帯； 2—Ognon 断層； 3—Doubs 断層； 4—Mamirolle 断層； 5—Saline 褶曲群； 6—Laveron； 7—Planée 向斜； 8—Saint Point 複向斜； 9—Metabief 向斜； 10—Mont'or 背斜； 11—結晶質基盤； 12—三畳系； 13—ライアスおよびドッガー； 14—マ  
 ルム； 15—白堊系と第三系

注入帯は、おのおののブロックを下位にあるブロックからへだてる接合部 (seam) のちかくに形成され、一方、ブロックの残りの部分は、物質の流出帯を形成するといえよう。

コーカサスにおいても、ジュラ山脈においても、注入褶曲は櫛型褶曲の形をとっている。プロヴァンスの櫛型褶曲も、注入褶曲に属することは明らかである (第 8 図)。ここでは、穿孔核はある場合には、小さい表面的なおしかぶせ (charriage) として発達している (詳細は (6) を見よ)。

コーカサスにおいては、おそらく注入褶曲のカテゴリーに属すべき櫛型の褶曲が、ブロック褶曲とともに周辺部に生じている。それら (櫛型褶曲) は、北ダゲスタンの前凹地 (foredeep)、大コーカサス山脈が北西および南東方に沈下する地域およびクラとリオンの山間沈降部 (intermountain depressions) などにみられる。それらは漸移部を経て、アプシエロンおよびケルチ・タマン地域の粘土質のダイヤピルと、密接に結合している。

西アルプスにおける注入褶曲も、これと同様に、典型的なブロック褶曲が発達する同じ外帯に規則的に産出する。注入褶曲は、一般に、堆積起源の非変成岩の厚さが比較的大きく、また



第8図 西 西プロンプスを通る模式断面図 (Corroy and Denizot による)

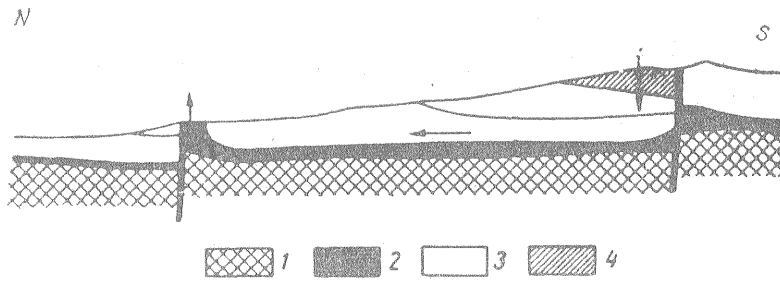
それら岩石の中に可塑性にとむ岩層がかなりの量存在する地域では、ブロック褶曲に付随して産するように思われる。

前にのべたあらゆる場合に、ブロック構造は、ある褶曲帯の中で、注入褶曲が形成されるさい前に考えたような、ある単独の大きい全般的流出帯のかわりに、おのおののブロックに属する多くの部分的流出帯が形成されるのを促がしているようにみえる。かかる部分的流出帯は、それぞれ、与えられたブロックの範囲内にあるそれ自身の注入帯に“serves 供給”する。したがって、おのおの場合においては、物質の運ばれる距離は小さいものである。

Glangeaud (28) は、ジュラ山脈における注入褶曲の形成の原因は、三疊紀の可塑的な地層の上ののっている岩体の、不均等な重力荷重にあると、考えている (第9図のダイヤグラムによる)。

私は、注入褶曲については、可塑的な地層が、不均等に分布した上位層の荷重によってしぼり出されるという、このメカニズムが主導的な役割りを演ずるものと考えている。このような観点からみた場合このタイプの褶曲が発達する際には、2つの段階が予想される。第1の段階には、片面型の上昇の端部の上に、バール状隆起が徐々に形成され、表面から削剥されてゆく。同時に、隣接する凹地が徐々に沈降し、堆積物がたまる。凹地および隆起部における可塑的な地層の上の荷重の差が充分に大きくなり、また、背斜部において可塑的な地層の上限が地表と充分に接近して、上位の岩体の抵抗が減少した時に、可塑的な地層の物質が背斜の中心部に注入され、また隣接する凹地に蓄積された岩石の荷重によって、地表上にしぼり出されることさえある。このプロセスの個々の段階は、褶曲帯の構造を示した原理的ダイヤグラムの中に示されている (第13図の P, S, T をみよ)。片面型のブロックの接合部 (scar) の上に構型褶曲の形成されている場合が、最も普遍的なように思われる、がしかし、もちろんこれが唯一の場合ではない。注入褶曲の基盤は、両面型上昇ブロックのこともあり、また徐々に傾むくバール状の隆起のこともある。

しぼり出しのプロセスは、もちろん、逆起



第9図 ジュラ山脈の構造の形成機構 (Glangeaud による)。

1—基盤； 2—可塑性にとむ三疊系； 3—ジュラ系； 4—白堊系

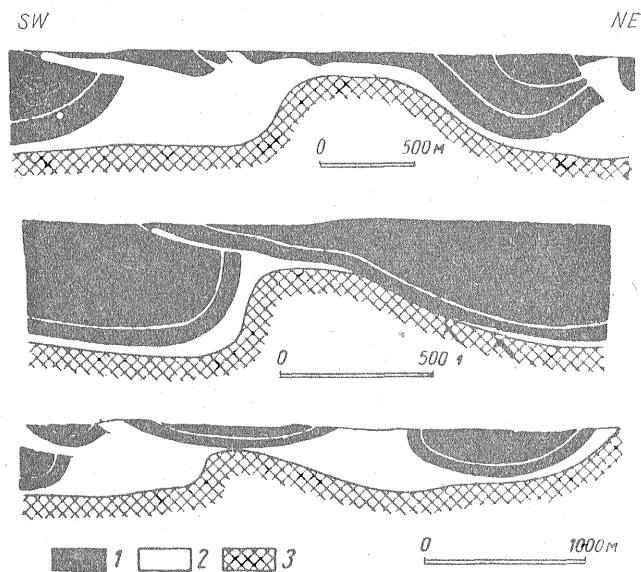
伏 (reverse relief) (構造的低地の上の高地とか、背斜の上の凹部) や、また可塑的地層の岩石の比重が、上位の岩石に較べて小さいことによっても、助長されているであろう。これらの要因は両方とも、ジュラ山脈では現実に存在する。そこでは、逆起伏があり、また三疊紀の岩塩層や含石膏層は、それを覆うジュラ紀の石灰岩より明らかに軽い。プロヴァンスでは、ただ1つの要因 (比重) だけが現実に作用しており、一方、例えばケルチ半島においては、2つの要因がふたたびあらわれる。この地域の特性は逆起伏である。また、圧搾を蒙ったマイコーブ粘土は、泥火山ガスの充満した水で飽和しているために、比重が減っている。

これらの場合、起伏と密度のちがいは、基盤のブロック運動と結合して作用する。しかし極端な場合には、これらの要因——起伏と密度の差——は、ブロック運動 (およびそれら相互の間でも) とは独立に作用することも、全く可能である。もし、可塑的な岩体が、削剝凹地 (erosion depression) の底に現われているとすれば、深部におけるブロック運動や、密度の減少とは無関係に、その岩体はしぼり出しの対象となるであろう。別な場合には、ただ密度のちがいがあただけ、すなわち、高度に可塑的な軽い岩石からなる地層が、重い岩石の下にある時には、軽い物質が重い物質の中でゆっくり上昇するという、完全なプロセスが成立する (16, 39)。この一例は、ダイヤビル岩塩ドームである。

そのような重力的“うき上り surfacing”による褶曲やドームは、現在でもまたきわめて特異な条件下でも形成されている。例えば日本では、可塑的な粘土層が、その上に降った粗い火砕岩層の不均等な荷重のためにしぼり出しを起した結果生じた、注入褶曲が知られている (37)。また、ミシシッピーのデルタでは、可塑的な粘土が、粗粒な沖積層の不均等な荷重の下で、典型的なダイヤビル核を形成している (42) 等々。V. V. Ez によれば、カラ・タウ山脈のある地域では、起伏が、不均等な荷重の形成と、注入褶曲の性格を具えた褶曲作用を伴う物質の移動に主要な役割を演じている。

このように、注入褶曲の形成条件は、かなり複雑なようにみえる。が、それでもなお、もっことみ入った考え方をする必要が生ずる。第10図は、イランにおける岩塩ダイヤビルの発達する地域を切るプロファイルを描いたものである (38)。このプロファイルからは次のことが明らかである。すなわち、この場合注入現象は、重力による“うき上り”とはそれほど密接ではなく、可塑的な岩体が、ドーム状隆起 (ブロック反映褶曲) の冠部から、それら隆起の生長しているあいだに、また被覆層の抵抗があるという条件のもとに、動力的に側方へしぼり出されることと関連している。可塑的な岩石が注入したまたそれらが地表へしぼり出される位置は、おそらく、上位の岩石中に古くから存在していた断層によって、あらかじめ決定されていたであろう。

したがって注入褶曲の形成には、なお次のように、別なメカニズムが観察される。すなわち、



第10図 イラン南部含塩地域を通る地質断面図 (O'Brien による。)  
 1—上部の硬い地質系統 (中部中新統—鮮新統); 2—可塑性にとむ地質系統 (下部—中部中新統); 3—下部の硬い地質系統 (下部カンブリア系—下部中新統)

可塑的な岩石が、ブロック隆起の冠部から、被覆層の中にある断層にそって、この岩石の注入を伴いながら、動力的にしぼり出されること (dynamic squeezing) である。

いままで述べてきたことを考察すれば、注入褶曲の形成には、次のような要因が参与しているといえよう。

(a) 一様でない荷重による重力的しぼり出し; 荷重の不均等性は、起伏および構造と結合しているであろう (すなわち、比較的盛上った起伏をもつ部分の下からのしぼり出し、および、被覆層の厚さが、背斜部上よりも厚くなっているような、構造的凹地の下からのしぼり出し);

(b) 軽い可塑的な地層が、重い地層の下位にある場合の、比重の差による重力的な“うき上り”;

(c) ブロック (またはブロック反映) 隆起の発達により、その上にある地層が圧潰されるという条件でおこる、冠部からの動力的なしぼり出し。

これらのプロセスは、いろいろな組合せで結合して展開するであろう。しかしながら、個々の具体的なケースについてそれらを分離し、その1つ1つについての役割りを確立しようとすると、きわめて大きな困難につき当る。これらの困難 (な事情) は、まず第1に、資料の不足と関係がある (われわれが注入褶曲の深部構造を確実に知りうる機会は、きわめてまれである)。第2には、上記のプロセスが、すべて1つの方向に向かって調和的に作用し、概して、同じ構造的結果をもたらす、という事実にもよる。(あとで) 全般的しわ寄せ褶曲の形成条件を考察する際にも、同様な困難が生ずるのに気付くであろう。

しかし注入褶曲が、このように複雑な起源をもつからといって、それを褶曲性変形の特定のグループ——褶曲構造のなかで、一定の場所をしめ、また一定の地質条件に属するグループ——とみなすことを、さまたげるものではない。

注入褶曲は、次 (の条件) によって特徴づけられる。(1) きわめて可塑的な岩石からなる地層を含む、厚い堆積岩体が存在すること。(2) 比較的穏やかな全般的造構運動を背景として、地殻の垂直運動に弱い分化性がみられること。これらの褶曲作用をもたらす小規模な力——重力や冠部からのしぼり出しと結合する——を決定するのは、まさしくこの微弱な垂直差動である。これらの力は、可塑性の強い岩体の水平的な流れをつくり出すには充分であるが、岩石

全体の全般的しわよせ (general crumpling) の原因となるには不十分である。このような状況は、前凹地 (frontal depression), 山間沈降部 (intermountain depression), 深く沈降した陸向斜 (盆地) などに認められる。

#### (全般的しわよせ褶曲)

3番目に分類されるタイプは、全般的しわよせ (による) 褶曲 (folds by general crumpling) である。この褶曲は、一般に著しい群集をなして発達する縦走性の湾曲で、厚くてしかも組成の異なる岩体の中にあらわれている。形態的には、これは完全 (全形) 褶曲である。

このタイプの褶曲の形成には、きわめて厚い不均質な岩体に水平方向の圧縮作用が働くことが必要である。

収縮説やその他多くの仮説は、この圧縮作用を、地球表面の収縮をひき起すいろいろな一般的原因によって説明している。Haarmann の、重力性褶曲の仮説は、大きな褶曲系の範囲内での岩体の全般的移動を仮定し、また、褶曲地域の軸部では、物質の幅広い流出帯が必要であると考へた。この論文の最初に指摘しておいたように、これらの説明は両方とも、実際の観察と矛盾しているので、受入れられなかった。そこで地殻の個々の部分における水平の圧縮に関する、より近似的で即物的かつ局部的な原因を求めるいろいろな試みがなされた。そのねらいは、それらの原因を見つけ出し、次いでそれら原因が観察された褶曲を説明するのに、いかに適切であるかをきめることであつた。

観察したところによると、水平的な圧縮は、例えば、地殻の比較的上昇したブロックのまわりの岩石の中に生じている。あるブロックが隣接ブロックよりも上昇した場合には、膨脹する傾向、あるいはもっと厳密にいうと、この上昇したブロックの上部が外側へ広がる傾向が、きわめて多くみられる。このブロックが眼にみえる断層で境されているとすれば、その断層は (この張り出しと結合して) 地表近くで扇状に傾むき、また垂直断層から衝上断層へと移化する傾向を有する。すなわち、最初は急傾斜で次にだんだん緩やかに傾斜し、遂には水平にまでなる。

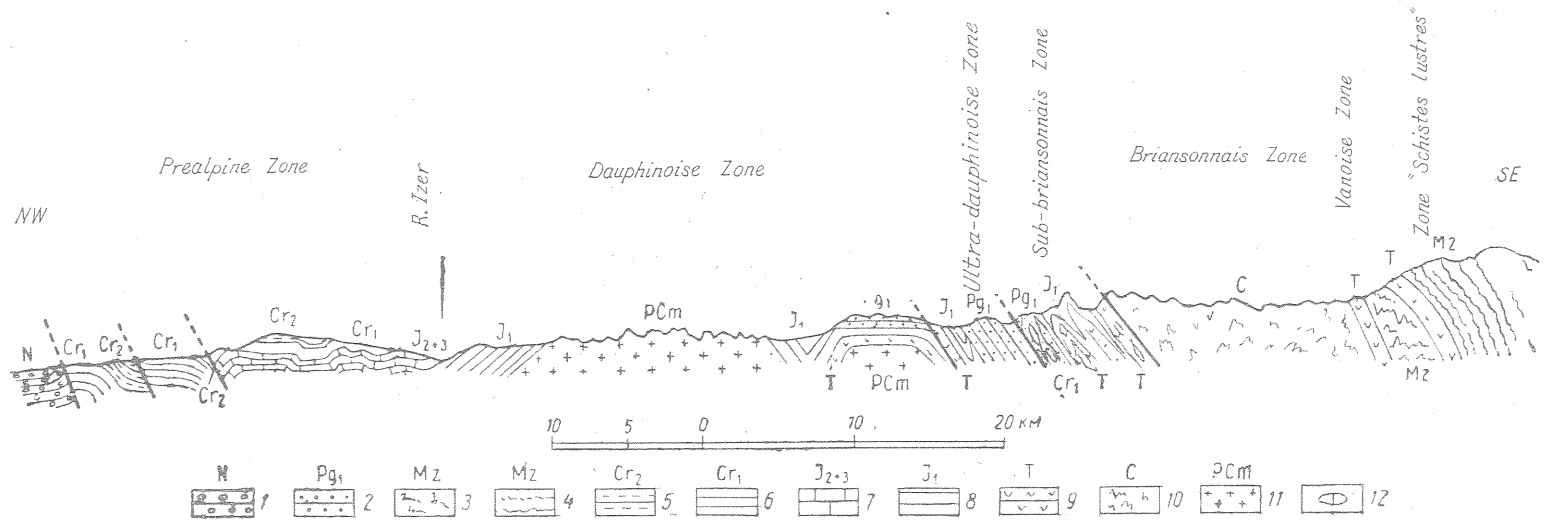
この現象は、例えば M. Shurygin によってコンパイルされた南東コーカサスの全断面図、なかんずくその1つ (第2図 I, F をみよ) にきわめてはっきりと見られる。このプロフィールに示された、南東コーカサスの軸部を通るすべての断面によって、南北にも北方にも扇状にひらいて衝上した単一の上昇ブロックの図式が与えられる。

張り出したブロックは、周辺の岩石を水平に押しつける。こうして、となりの部分に地層のしわよせ褶曲をひきおこすのである。この現象は Shurygin のプロフィール、特に南東コーカサスにおける上昇したブロックの南限付近 (第2図 III, G をみよ) に、きわめてたやすくみいだされ、また第1図 B にもみられる。

D. A. Kazimirov の見解によると、フェルガナの上昇したブロックの間にみられる褶曲 (第3図をみよ) も、同じように説明することができる。これらのブロック (中心部に古生代の岩石を有し、箱型隆起の形をしている) は、頂部で外側に張り出し、中生代と第三紀の岩石からなるブロック間の地層を、しわくちやに褶曲させている。

もしブロックが、褶曲帯の内部での場合のように、一段ずつ上へ上って階段状に配列しているならば、それぞれ高い方のブロックが低い方にのし上げる、片側だけの衝上が生ずる。A. V. Dolitsky によれば、これは南東コーカサスの南斜面で観察される図式である。ここでは、階段状にならんだブロックが、お互いの上にのし上げて、地表近くで次から次へとしわよせ褶曲をおこしている (第1図をみよ)。

階段状ブロックが次々にのし上げた極端な場合が、フランス・アルプスでみられる。文献 (6) の論ずるところによれば、西アルプスで分けられている構造帯は、昇降運動の変遷のなかで分化したのだから、それら (構造帯) を分割している断層は、もともとは垂直であつたにちがいない。それらはおそらく深部ではいまでもそのままであろう。しかし地表



第11図 Maurienne Alps (Aran 川流域) を通る模式断面図  
 1—新第三系； 2—古第三系 (フリッシュを主とする)； 3—強い変形をうけた中生界； 4—Schistes lustrés； 5—上部白堊系； 6—下部白堊系； 7—中・上部ジュラ系； 8—下部ジュラ系； 9—石膏を含む三畳系； 10—石炭系と二畳系； 11—結晶質岩； 12—他の岩石中に構造的にはさまこまれた中生界のブロック

褶曲のタイプとその起源 (種島俊弘・平山次郎訳)

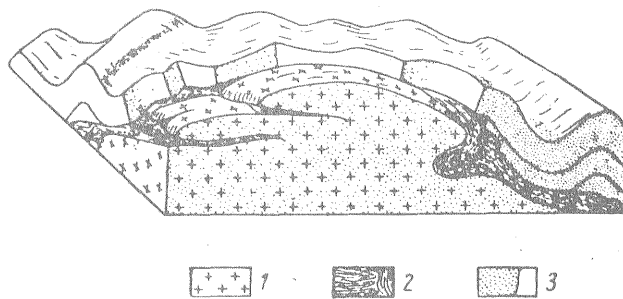


近くの上部では 45~50° の傾斜をもっている。このように、ブロックの上部は、コーカサスにおけるように、ここでもお互いの上のし上げている。しかしアルプスでは、こののし上げ (overturning) は特別に激しい。それは多分、この山岳地方のブロックが、より急傾斜の階段状系列を形成したせいであろう。その結果、より高位のブロックの上部が、低位のブロックの上に乗る、そしてそれを押し潰している。押し潰されたブロックの地層はしわくちやになって、地層の扁平化やレンズ状尖滅をおこし、密に圧縮された等斜褶曲となる。フランス・アルプスの内帯にみられる激しい変位とその特殊な性質は、三畳系とある程度までは古第三紀のフリッシュの可塑的な岩石の独特な力学的な役割によっても決定されている (第11図)。山脈の軸部を占め、また上からの圧力の支配を受けていない、最上部ブロック中の地層は穏やかに成層し、全体として、ゆるやかに傾斜した広い向斜を形成している。

ブロックが断層でなく地層の可塑的な湾曲—撓曲によって境されている時にも、条件はほとんどかわらない。そのさい、ブロックの上部の張り出しによって、垂直の撓曲は末端部で反転した縁辺褶曲 (boundary fold) に転化する (例えば、第2図の D と F、第1図をみよ)。下位のブロックの岩石にかかる接線方向の圧力については、すべて前にのべた場合と同様である。

ブロックが上昇して外側へはり出す根本的な原因となっているものが重力であることは、疑いをはさむ余地がない。その結果、ブロックの上昇した部分は、構成する岩石の重さによって、外側へ可塑的な流動をおこすことになるのである。しかしながら、注入褶曲についてと同様に、確心をもっていえそうなのは、全般的しわよせによって生じた褶曲は、重力的なメカニズムのみならず、動力的なしぼり出しのメカニズムとも関連しているということである。前にのべたように、このメカニズムが作用した例証としてチロルの構造をあげることができる。動力的なしぼり出しは、主として地殻のある深度のところのみみられるはずであり、一方重力的なメカニズムは地表近くに卓越するはずだと思ふのは、一理あることである。

この点に関してきわめて興味深いのは、Haller によって記載された、北東グリーンランドの“中央変成複合体 (Central Metamorphic Complex)”である。著者は、変成基盤のミグマタイト物質がドーム状 (筆者の“ブロック”だが、きわめて可塑的な状態にあるもの) に上昇し、そしてその頂部では、ナッペ (covers) およびキノコ (mushrooms) 状に水平に張り出していることを示している (31)。この場合、厚い被覆層の影響のもとに生じた物質の水平運動は、動力的なしぼり出しのメカニズムと関連しているものと考えられる (第12図)。



第12図 グリーンランドの変成複合岩体の構造模式図 (Haller による。)  
1—ミグマタイト； 2—変成千枚岩； 3—古生代の堆積岩類

A. A. Sorsky (20) の研究結果によれば、白海地域の始生代の変成岩層中に発達する、垂直な軸面を有する小褶曲は、巨大なドームの形をとって侵入した花崗岩が、この変成岩層に及ぼした水平的な圧力のために生じたものと、推論してよいであろう。ここでもまた、かなりの深度で生ずる水平的な圧力は、花崗岩が侵入する時に上位の岩石の重さによって受けた圧力と関連する動力的なしぼり出しのせい、生じたものとすべきであろう。

褶曲帯の構造についてのこれまでの知識によると、これらのメカニズムの作用が、あらゆる褶曲の形成を説明できないことは明らかである。その起源を隣接ブロックからの圧力と関連させることの困難な褶曲が広範に分布している。なぜなら、この褶曲はブロックからかなり離れていることもあるれば、最も上昇したブロックに属していることもあるからである。現在、このグループのしわ寄せ褶曲の起源の問題を、完全に解決することはできない。しかしながら、若干の論議を試みることはできる。褶曲の形成条件の考察にかぎり、われわれは問題の力学的側面だけに限定してきたし、褶曲構造の変遷については全然ふれなかった。しかし、褶曲の発達史的研究を行なえば、褶曲形成のメカニズムを解釈するうえでの、可能性が増すことになるであろう。

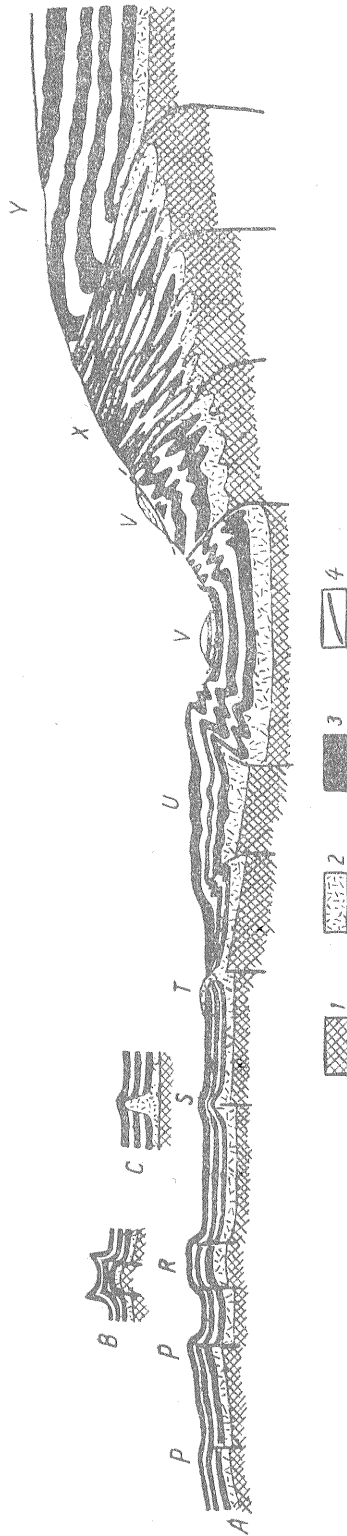
例えば、ブロックの上昇は一様ではないかもしれない。一部分がまず上昇し、次いでその運動が他の部分に広がるのかもしれない。その結果、ブロックの運動のいろいろな段階で、その境界はいろいろ違った位置にあるかもしれない。また、上昇ブロックの近くの縁辺褶曲やしわ寄せ褶曲ができる位置は、時とともに移動するかもしれない。しかしながら、(一度できた)褶曲が残存する限り、それら褶曲は、ブロックの境界が動くたびに、だんだん広く地表をカバーするようになる。

プロファイルII (第2図)は、最初に上昇したのは基本ブロックのうち北(図の左側)の部分であり、次いで全体として上昇をはじめたことを示している。このことは、地層の相互関係の基本的分析から明らかに読みとれる。この図に示されているプロファイルを比較すると、直ちに、比較的西側の方が、東側よりも、細かくブロックに分割されていることがわかる。(すなわち)東方に行くほど、いわばブロックの統合がみられる。ただし、最も東側のプロファイルでは、実際に(地表に)残存しているのは1つの幅広い上昇ブロックだけであるが、内部では、より西側のプロファイルに実在しているブロック間の、構造的階段のあるまさしくその位置に、一つの褶曲が見られるのである(第2図のG.をみよ)。このように、ある種の褶曲は、ブロック間のかくされた境界の性質を、あらわすこともある。

このグループの褶曲形成条件を理解するのに最も重要なのは、A. A. Sorsky がダゲスタンの山岳地域で行なった観察である。彼は褶曲の観察を、大コーカサス山脈の軸部における最も上昇したブロックの表面で行なった。これらの褶曲は、規模も小さく、集合状態や形もむしろ不規則である。Sorsky は、しわくちやに褶曲した地層が、各層ごと(layer by layer)に伸長している形跡があり、それはその中のより可塑性のすくない地層が個々バラバラの部分に分かれて、ブージュナージュ(boudinage)や分割(separation)を形成していることにあらわれていることに注目した。しかも、それと正に同じ褶曲は、垂直方向の支配的な軸面に平行な流動劈開(flow cleavage)によって、たち割られているのである。

力学的にいえば、褶曲構造にみられるこれら2つの特殊性は矛盾している。なぜなら、第1の特殊性が地層の水平方向の伸張を暗示しているとするれば、第2のそれは反対の、つまり水平方向の圧縮を示しているから。この矛盾は、2つの現象が時期を異にして発達したと推定すれば、解消するように思われる。すなわち、水平の地層が、最初は伸長し、次に圧縮されて、しわくちやに褶曲し、また垂直の流動劈開によりたち割られた、とみなすわけである。ここで、なお研究し、解決しなければならぬ1つの問題が生ずる。

A. D. Dolitsky は縦走性の褶曲は、地殻の一部が上一下方向の振動を何度もくりかえした結果——もしその地層がその振動によって、交互にかすかに伸びたり、また水平の圧縮をうけたりしたとするれば——できるかもしれないと考えている。実際、地層が垂直方向の力によって隆起が形成されるときに伸長することは、周知のとおりである。引っ張りの過程で、地層は薄くなり、また適当な条件が与えられれば、boudinage が生ずる。もしその後隆起地域が僅かに沈降すると、動いた部分の表面はふたたび縮少する。伸長した地層はそのためには“広”すぎるようになり、それらがブロックと一緒に沈下するにつれて、しわくちやに褶曲する。Dolitsky は、こういう運動の反復によって、巨大な褶曲が生じうると考えている。



第 13 図 褶曲帯の模式構造図  
 A—褶曲帯の構造の原理的図式図  
 1—可塑性にとむ岩石； 2—造轉碎岩； 3—造轉碎岩； 4—造轉碎岩；  
 B—縁辺褶曲で複雑化した褶曲； C—ダイヤビドム； P—片面型ブロック褶曲；  
 S—注入褶曲； T—穿乳核をもった注入褶曲； U—転倒した捷曲で壊されたブロック褶曲； V—重力能評しかぶせ；  
 X—岩石が強く押し潰された地帯； Y—岩石が転位した中央ブロック

この仮説はまだ充分な基礎づけがなされているとはいえない。かかる褶曲の起源についての概念を系統立てることができるようになるまでは、きわめて基本的な事実——褶曲した地層の構造——について、もっともっと研究しなければならない。ところで、なおもう一つの現象に注目してみよう。フェルガナでは、比較的上昇したブロックの翼部が、時としてブロックの側方から外側へ、2つの“耳”のように張り出している鋭い褶曲となってあらわれていることがある(第 13 図 B)。

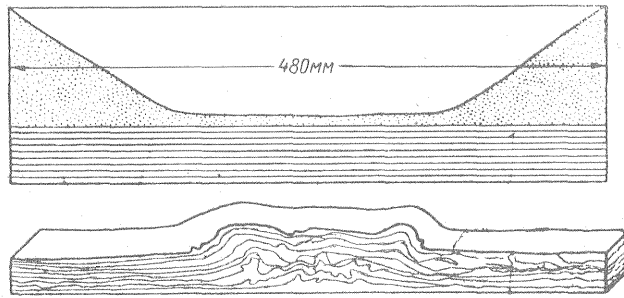
このような褶曲は、ブロックが最初上へ、次いで下へ動けば生じうると考えられている (D. P. Rezvoi および D. A. Kazimirov)。すなわち、上方への動きの際に境界部で撓曲した地層は伸長して、厚さが減り、ひきついで下方への動きの際には、それらは広すぎるようになるので、しわよせされて褶曲をつくるのである。

このように、明らかに、地殻のブロックの昇降運動の役割りは、少なくとも若干の褶曲のできる場合については、さらに検討される価値がある。

これと同様に、みのがしてはならないのは褶曲は物質の流出帯においてもできる可能性があり、また、物質が不均等に流出する際に、それが“流走 onflowing”する結果おこる物質の伸長自体と同時に地層も伸長する可能性があることである。そのような“流走”は Sorsky 【によって注目され、また私も、ある論文 (5) で、この問題を検討する必要性をのべた。おもしろいのは“流走”現象は実験によっても再現されたことである。

第 14 図は、この構造のスケッチである。地層が層理と直角の方向に薄化した流出帯の中で、物質の全般的しぼり出しを背景として“流走褶曲 onflow folds”が形成されている(下図の右手の部分)のが明らかに認められる。

適当な現出条件をもつ可塑的岩体が存在し、地表が急傾斜する所では、構



第 14 図 機械油でうすめた樹脂の間に粘土のフィルムをはさんだモデルで流出帯の褶曲を再現した。  
上図——はじめの状態：樹脂の上に砂の不均等な荷重を加える。  
下図——最終状態、Lebedeva の実験。

造は、個々の岩塊が重力の影響で自由に重力的にすべる（スリップする）ことによって複雑化される。このようにして、フランス・アルプスのおしかぶせ（charriage=流出）が生じている（6）。すべった地層の塊は、しわくちゃに褶曲する。しかし、自由な重力的すべりは、褶曲帯の構造を形成するうえで基本的な役割を演じていないように思われる。フランス・アルプスのアムブルネの衝上体でみられるように、このようにしてできた褶曲はきわめて小規模で、その形も配列も不規則である。

そこで、褶曲に関しては、褶曲帯における階段状構造の意義について論ずることが、ふたたび重要になってくる。もし自由な物質の重力流が、一様な、なめらかに傾いた中央隆起のスロープをすべりおちたとすれば、流れおちてからは下の方だけに物質があつまって褶曲が生ずるはずだから、結果として褶曲は、主としてスロープの脚部に形成されるであろう。さらにまた、流れの速さと物質の性質に応じて、褶曲の前面（fold front）は、スロープの脚部で、数多くの花ずな（festoon）および湾曲を形成するはずである。

階段は物質の流れにとって障害となり、また数多くのダム役目をする。褶曲が隆起のスロープ全体に一樣に分布していて、脚部だけに集中しているわけではないのは、そのためである。ブロックの境界は、褶曲の走向を規制する。かくして、それら褶曲の走向は、比較的安定したものになるのである。

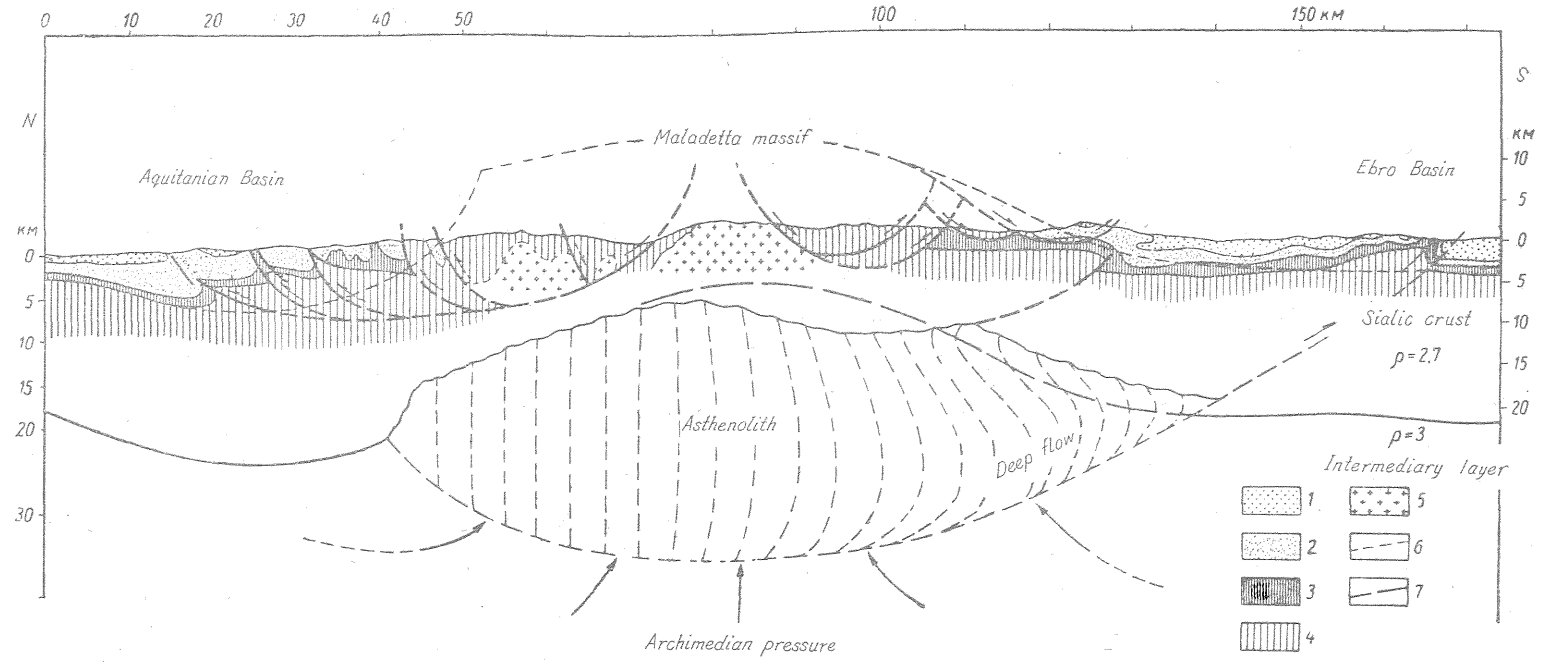
Bemmelen は、なお、造構運動の別な重力的メカニズムを、具体的に指摘した（25）。彼は、1つのレンズ状の岩石のかたまりが山脈状隆起にそって伸びる水平軸のまわりで回転し、スロープの上部では引張りによる正断層が、下部では圧縮による衝上断層がおこると推察している（第 15 図）。北フランスの炭田の構造に関するある種の特異性は、この方法で説明することができるであろう（第 16 図）。Bemmelen は同様にして、地下深所においては、上昇地域の下から、物質が重力の平衡を得ようとして外側（外界）へ上ってくる可能性を考えている（第 15 図をみよ）。

## 総 括

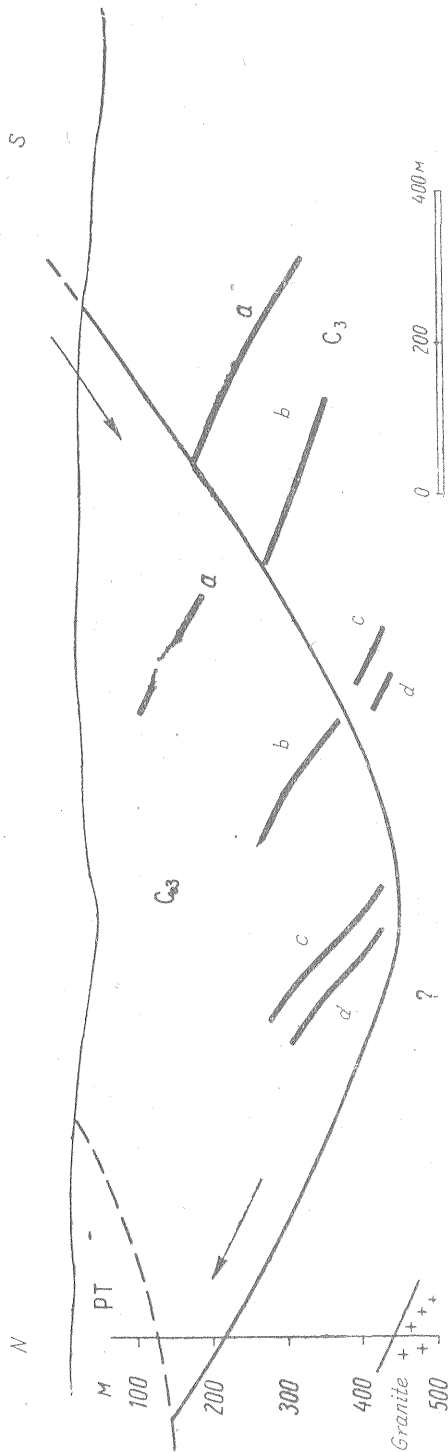
褶曲の起源に関する論議を総括すると、いままでの図式をみると、地層のしわ寄せをいろいろなタイプの褶曲にまで至らしめるプロセスには、相当広範囲な多様性があるといえよう。これらのタイプは、地殻ブロックの運動が成層した岩体に及ぼす直接的作用を含んでいる。すなわち、それ自体いろいろな形となってあらわれる重力的なしほり出し；重力的な“浮き上り”，すべり，張り出し；冠部からのしほり出し；および、昇降運動による地層の交互の引張りと圧縮。これを完全褶曲の形成条件だけに限ってみたとしても、メカニズムの相当な多様性がなお存在する。

このように広範囲にわたる原因があることは、完全褶曲が世界中どこにでもあらわれていることや、そのみかけ上の形態的な一様さと、矛盾するようにみえるかも知れない。一般に相似

74—(692)



第 15 図 Bemmelen による重力性造構作用の模式図 (Pyrenees 山脈の例)。  
 1—第三系； 2—ジュラ系—白堊系； 3—二疊系—三疊系； 4—古生界； 5—ヘルシニアン花崗岩類；  
 6—侵蝕作用と重力性崩壊を考えない場合の基盤面の位置； 7—深部流が生ずる前の Asthenolith  
 とシアル殻の接触面



第 16 図 北アフリカ岩田を通る模式断面図 (Pruvost による。) 断面中のそれぞれの文字によって示された岩層の移動がみられる。

の褶曲性変位が広範囲に分布していることは、どちらかといえば、みんな同じ原因によるプロセスを必要とするようにみえるであろう。

しかしながら、いくつかの事実を考慮に入れなければならない。まず第一に、完全褶曲に関するごく最近の知識によれば、その構造が一様であるという考えは、もはや通用しない。実際、褶曲帯には、形態においてもまた明らかに形成のメカニズムについても、根本的に異なる褶曲のグループが存在する。さらに、しわ寄せ褶曲 (crumpling into fold) は、縦方向の圧縮に対する成層した可塑性の岩体の正規の、また最も普通の反応である。ほかのどんな反応も(ただし、もちろん断層を除いて)、成層した媒体においては期待できない。しわ寄せ褶曲は、十分に強い縦方向の圧縮がありさえすれば、その原因のいかんにかかわらず出現する。したがって、形態的には同一の褶曲でも、異なる起源を持つことがあり得るのである。しかしながら……そしてこれが、特に重要なことなのだが……これらの原因はすべておのずから、激しい、反対向きの垂直運動をもった地域、すなわち地向斜に共生し、また最もよく発達するものなのである。実際のところ、完全褶曲について挙げられた直接原因のすべては、地殻の反対向きの垂直運動を共通の基礎としている。その運動は、地表の傾き(重力性のすべりにとって必要)、荷重の不均等な分布、冠部からのしぼり出し、地層の交互の引張りと圧縮などをひきおこす。同一の地帯にあって異なる起源をもつ完全褶曲の形成は、このような観点からみると理解することができる。

これにおとらず重要なのは、1つの地向斜帯のなかでは、褶曲の個々のグループが、場所を異にするのに応じてその起源を異にし、もしくは少なくともその形成のメカニズムを異にすることがあり得る、という事実である。この観点からみると、しわ寄せ褶曲の具

体的かつ直接的な原因は、局部的な性格のものかもしれない——たとえ、それらのもっと一般的な基礎が(昇降運動が適度に発達するという形で)同一であるにせよ。

それでもなお、同一でない原因によって生ずる褶曲の形成機構自体のなかですら、共通の要素をみいだすことは可能である。いままで論じてきたあらゆる場合において、褶曲は物質の再配分——地点から流れ出して他の地点へ集積する——の結果として形成されるのである。物質の流出は、地層(シリーズ)全体およびその個々の地層(ストラータ)の厚さの減少と結合し、また、それに対応しておこる地層の表面(積)の増大と関連している。圧縮は、地層のこの伸張を補償する形で、物質が集積する所に発達する。しかしこの補償は、地層の厚さが逆に増加したり、その表面(積)が(ふたたび)減少したりするやり方ではなく、地層をしわくちゃに褶曲させるという手段でおこるのだから、しわよせ褶曲は、地層の表面積が全般的に増加することの代償として形成され、その伸長した地層自身は、もとの場所に引きとめておかれるといえよう。

この結論はきわめて重要である。こんにちに至るまで、最も普通の見解は、これとは正反対の原理に基づいてすすめられていた。すなわち、地殻のある特定の部分の表面は、地層の表面積は不変のまま、収縮すると見なしている。そこで、これらの地層は、力をうけてこの収縮したスペースに収まるように、しわくちゃに褶曲する。ここにのべた概念によれば、状況はまさに正反対である。そしてここが重要なところである。このために、褶曲の形成機構を解くおもな要素として地層の表面積を増大させる原因を探すことに力を注ぐ必要がある。これらの理由のうち若干は前に述べたが、しかしそれらをもってしても、あらゆる可能性を解き放すことはできない。

一般的性質については、まだ若干の補足的な問題が残っている。

しほり出しや重力のメカニズムについて論ずるとき、ことがらを堆積岩からなる非変成被覆層の変形のみに局限しようと考えてはならない。多くの変形においては、結晶質でかつ変成した基盤の岩石も、ともにそれに参与できるし、また、するのが当然である。そのような参与は、例えば、ジュラ山脈の場合には、実際のところは欠けており、そこでは褶曲変形は、ただ堆積岩層中のみに集中している。しかしながら、アルプスの内帯における場合のように、階段状に配列したブロックがお互いに作用し合っているような時は、基盤の岩石もまた、堆積岩と一緒に、圧碎や変形の対象となっている(第11図をみよ)。これに関連して、結晶質基盤の“剛性”に関する従来の見解を、根本的に再検討する時がとっくにきていることに、注意しなければならない。片理を有し変形した内部構造をもつ変成岩、それは方向性をもった鉱物の集合状態と、平坦で“すべった”表面をもつ鉱物の発達によって特徴づけられているが、それは疑いもなく、多くの場合、同一条件の下における多くの堆積岩よりは、より大きな可塑性を有している。したがって、ブロック起源の褶曲ができる際には、結晶質の基盤は、必ずしも断裂によってのみ反応するとは限らない。それは可塑的に湾曲して、パール状あるいはドーム状の隆起を形成することもあり得る。

いかにして褶曲の時期(epochs)および時相(phases)という概念を、いま考えている概念と一致させるかについて、若干つけ足しておこう。現在では、不連続褶曲は地質時代の長期間にわたって、ゆっくりと漸進的(グラジコアル)に形成されるという事実には、疑いをはさむ余地がない。運動学的分類の用語でいえば、これはブロック褶曲のあらゆる変種をも含んでいるはずである。このこと、つまり長期間に形成することは、注入褶曲の性格についても同様であって、注入褶曲は深所のブロックと間接的に結合しているか、または重力的しほり出しあるいは重力的“浮き上り”の、ゆっくりしたプロセスに依存している。

しかし、これらのタイプの褶曲の発達が長期間持続するプロセスを持つということを背景として、褶曲の成長が強まる時期と弱まる時期がみられる。ブロック褶曲に例示したように、褶曲形成に関するこの不均一性は、明らかに、地殻におけるブロック運動そのものの不均一性によるのである。注入褶曲に関しては、プロセスはより複雑であり得るだろう。別の面からいう

とこの褶曲タイプの成長の不均一性は、深所に存在するブロック運動のプロセスが原則として不均一であることを、反映している。ただし、他の現象もまた、その一部を受持つ場合がある。

岩塩ドームの構成過程をモデルであらわしてみると、ドームの成長は、ダイヤモンド核をカバーする岩体の厚さがある限界量に達した時に、停止することがわかった(39)。したがって、岩塩ドームの発達地域の地殻が全般的沈降をうけ、比較的急速な堆積作用が行なわれる時期は、隆起と削剝の時期よりも、ドームの成長(また、おそらくは一般に注入褶曲の成長)にとっては好都合ではない。このことは、地殻の隆起と海退の時期に、ダイヤモンドの成長が速くなるという、周知の事実を説明している。

完全褶曲の時期は、地向斜における中央隆起部の発生および成長の時期と一致している。中央隆起部の出現に伴ない、重力的運動にも動力的しぼり出しにも、好条件が生れる。しかしながら、もし完全褶曲、すなわち全般的しわ寄せ褶曲が(観察されているように)個々の時相(フェーズ)に発達しているとすれば、この事情は、中央隆起部を形成するブロックの相対的運動がコンスタントに行なわれなかったことを、反映しているものと見なければならぬ。中央隆起部が断続しながら成長する原因はわかっていない。しかし、(変動の時が)断続的なことが、一般に地殻の強い垂直運動に特有なものであることは、層理を例にとっても理解できる。したがって、褶曲時相とは、ブロックの垂直運動のコントラストが一時的に強くなった時であり、階段の相対的な高さが増大した時であり、また傾斜の角度が急になった時である。この時期に、物質の強い運動が、重力の影響の下に、また動力的しぼり出しの結果として発達するのである。重力的な平衡が成立し、また重力と岩石の可塑性の限界との間に平衡が成立し、あるいはコントラストおよび傾斜(の増大)が、一時的な逆方向の運動のために緩和された時に、運動は停止する。

いままで述べたことから、褶曲の成因の問題に関する将来の研究のために、きわめてはっきりした見通しがあらわれてくる。われわれは、いろいろな褶曲地域について、詳しい構造的研究を続行しなければならない。この探究のねらいとする所は、しわくちやに褶曲した地層についてのあらゆる構造的的特異性(きわめて小規模なものさえ含めて)の研究であり、また褶曲帯のそれぞれの場合、それぞれの部分について、褶曲を形成する具体的かつ地方的な原因の正確な研究でなければならない。同一の場所でも、褶曲の等級(オーダー)や時代がちがえば、これらの原因は違ってくるかもしれない。たとえば、重力的なすべりによって生じた褶曲は、物質が重力性褶曲の斜面で扁平になり、しぼり出されて盛り上げるしぼり出し褶曲によって、翼部また特に冠部では、複雑化されることがあり得るのである。

この研究については、実験が重要であり目的にかなったものである。異なる起源をもつ褶曲についてのモデル(実験)は、褶曲形成のさまざまな原因となっている条件を確立するために、またさまざまな褶曲の形成に関する結論を下す場合、天然に用いられるべき基準を計算するのに、きわめて有力であり得る。本文に解説した諸見解は、実験のテクニック、およびモデル材料の性質について、決定的な許容条件を与える。モデル材料は、ある面では変形に附随する内部構造の研究ができるような成層した試料を作れるようであればならぬし、また他方では、それ自身の重さで変形し得るようなもの——変形が実験に都合のよい速度で進行するために——でなければならぬ。

さて、これから一つの結論的な所見をのべよう。こんにちまで地質家は、ある褶曲地域の構造を研究する場合、通常、完全褶曲の原因を検討する必要性を考えずに行なってきた。この原因は、幾分、明らかになったようである。褶曲についてのこの態度は、あらゆる褶曲を地表面の全般的な収縮に還元させてしまった、収縮説に由来していた。もちろん、この見解が受入れられるとしたら、それぞれの具体的な場合について褶曲の原因を検討する必要などなくなるであろう。

ここに解説してきた概念は、地質家になおやることがあると、発奮させるものである。どんな地域の研究でも、十分に広い面積を包含していれば、地質家のなすべき仕事は、観察された



褶曲の形成様式を、それが地域ごとに異なることを念頭において研究することである。地質家は造構的な発達についての地方的具体的な条件に由来する、褶曲作用の地方的原因を探究すべきである。

この結論は、別に気休めの意味でいっているのではない。いままで単純に、1つの原因と関連しているだけだと考えていた現象が、いまは、多様化されたいろいろ異なる原因をもつ、コンプレックスであるように思われる。このことは、われわれの直面する分野にある問題の幅を、かなりの程度までひろげることになる。しかしながら、これらの問題は、以前よりもはるかに具体的になってきている。最近まで単純であるようにみえた地質現象も、もっと充分突込んで研究することにより、きわめて複雑なものであることがわかる場合が非常に多いのである。

文 献

Papers in Russian\*

- 1) Azhvirei, G. D., The Role of Ancient Crystalline Material in Alpine Folding in the Central Caucasus: Bull. Moscow Soc. Nat. Geol. Div., No. 4, 1951.
- 2) Belousov, V. V., On the Origin of Folding: Soviet Geology, Collection of Papers, 16, 1947.
- 3) Belousov, V. V., Fundamental Problems in Geotectonics, 1954.
- 4) Belousov, V. V., Problems of the Mechanism of Folding: Bull. Moscow Soc. Nat. Geol. Div., No. 3, vol. XXII, 1947.
- 5) Belousov, V. V., Layer-by-Layer Redistribution of Material in the Earth's Crust and Folding: Soviet Geology, Collection No. 39, 1949.
- 6) Belousov, V. V., Tectonic Observations in the French Alps in 1955: Soviet Geology, Collection No. 54, 1956.
- 7) Belousov, V. V., Gzovsky, M. V. and A. V. Goryachev, On the Structure of the Eastern Alps in Connection with Certain General Tectonic Conceptions: Bull. Moscow Soc. Nat., Geol. Div. Nos. 1 and 2, vol. XXVI, 1951.
- 8) Bronguleev, V. V., Minor Folding on Platforms: Bull. Moscow Soc. Nat., 1951.
- 9) Bronguleev, V. V., Principal Genetic Types of Folded Structures of the Earth's Crust: Soviet Geology, Collection No. 54, 1956.
- 10) Gzovsky, M. V., Certain Peculiarities in the Development of Oscillatory Movements in Geosynclines: Izv. USSR Academy of Sciences, Geol. Series No. 6, 1948.
- 11) Kirillova, I. V., Certain Problems in the Mechanism of Folding: Transactions of the Geophysical Institute of the Academy of Sciences, USSR, No. 6, 1949.
- 12) Kosygin, Yu. A., The Formation Mechanism of Salt Domes: Bull. Moscow Soc. Nat., Geol. Div. Nos. 5-6, 1945.
- 13) Kosygin, Yu. A., The Salt Tectonics of Platform Regions, 1950.
- 14) Kosygin, Yu. A. and V. A. Magnitsky. On Possible Forms of Geologic and Mechanical Connection between Primary Vertical Movements, Magmatism and Folding: Bull. Moscow Soc. Nat., Geol. Div. No. 3, 1948.
- 15) Kropotkin, P. N., On the Origin of Folding: Bull. Moscow Soc. Nat., Geol. Div. No. 5, 1950.

訳者注) 原文はもちろんロシア語であるが、ここでは読者の便宜のために英文のリストを転載した。文献番号は原文と同じ。

- 16) Lebedeva, N. B., Modelling Process of the Formation of Diapir Domes: Soviet Geol. Collection No. 54, 1956.
- 17) Magnitsky, V. A., On the Problem of the Genesis of Plakanticlines: Bull. Moscow Soc. Nat., Geol. Div., No. 3, 1946.
- 18) Peyve, A. V., Deep Faults in Geosynclinal Regions: Izv. USSR Academy of Sciences, Geol. Series, No. 5, 1945.
- 19) Rezanov, I. A., On the Age and Types of Folding of the Kopetdag Meganticlinorium: Soviet Geology, Collection No. 54, 1956.
- 20) Sorsky, A. A., The Mechanism of Formation of Small Structural Forms in Metamorphic Series of the Archean: Trans. Geophysical Institute, No. 18 (145), 1952.
- 21) Sorsky, A. A. and N. V. Kirillova., On the Problem of Tectonic Division of Folded Regions: Comptes Rendus, Academy of Sciences, USSR, vol. 100, No. 2, 1955.
- 22) Tetyaev, M. M., The Principles of Geotectonics, 2nd Ed., 1941.
- 23) Khayn, Ye. V., The Geotectonic Principles of Oil Prospecting, 1954.

In Other Languages

- 24) Ampferer, O., Ueber Das Bewegungsbildung Von Faltengebirgen: j. d. k. k. geol. Reichsanstalt., Wien, vol. 56, 1906.
- 25) Bemmelen, R. W., Tectogénèse par Gravité: Bull. Soc. Belge de Geologie, vol. 69, No. 1, 1955.
- 26) Bucher, W. H., The Deformation of the Earth's Crust, 1933.
- 27) Cloos, H., Einführung in die Geologie, 1936.
- 28) Glangeaud, Le Role du Socle dans la Tectonique du Jura: Ann. Soc. Geol. Belgique, Vol. 73, 1949-1950.
- 29) Griggs, D., A Theory of Mountain Building: Am. J. Sci., vol. 237, 1939.
- 30) Haarmann, E., Die Oszillations Theorie, 1930.
- 31) Haller, J., Probleme der Tiefentektonik Bauformen im Migmatitstockwerk der Ostgrönländischen Kaledoniden: Geol. Rundschau, vol. 42, No. 2, 1956.
- 32) Heim, A., Geologie der Schweiz, 1919-1922.
- 33) Heim, A., Mechanismus der Gebirgsbildung, 1878.
- 34) Kober, L., Der Bau der Erde, 1928.
- 35) Landes, K. K., Our Shrinking Globe: Bull. Geol. Soc. Am., vol. 63, 1952.
- 36) Lees, G. M., The Evolution of a Shrinking Earth: Quart. Jour. Geol. Soc. London, vol. 109, 1953.
- 37) Mason, A. C. and H. J. Foster., Extrusive Mudflow Hills of Nirasaki, Japan: Jour. Geol., vol. 64, No. 1, 1956.
- 38) O'Brien, C. A. E., Salz Tektonik in Sudpersien: Zeitsch. d. Deutsch. Geol. Ges., Bd. 105, 4, I, 1953, Hannover, 1955.
- 39) Parker, J. J. and A. N. McDowell., Model Studies of Salt Dome Tectonics: Bull. Am. Ass. Petr. Geol., vol. 39, No. 12, 1955.
- 40) Reyer, E., Teoretische Geologie, 1888.
- 41) Scheidegger, A. E. and Wilson., An Investigation into Possible Methods of Failure of the Earth: Geol. Assoc. Canada, Proc. vol. 3, 1950.

- 42) Shaw, E. W., The Mud Lumps of the Mouth of the Mississippi: Prof. Pap. 85-B.  
U. S. Geol. Survey, T. 11-27, 1913.
- 43) Sonder, R. A., Die Erdgeschichtlichen Diastrophismen: Geol. Rundschau, 13, 1922.
- 44) Stille, H., Grundfragen der Vergleichenden Tektonik, 1924.
- 45) Suess, E., Entstehung der Alpen, 1875.
- 46) Willis, B., The Mechanics of Appalachian Structures: 13, Ann. Rep. U. S. Geol.  
Survey, 2, 1893.