

深部地質構造のもつ意味(1)

昭和57年3月29日地質調査所において講演

木村 敏雄 (東京大学名誉教授)
Toshio KIMURA

(1) はしがき

地質構造は空間の3次元に時間の次元を加えて4次元のものとしてとらえる必要がある。現在という時点において考察するとき地質構造は3次元空間のものとしてとらえ得る。しかしかつて地下深部で生じた地質構造をもつ地層がのちに浅所で異なる変形を受ける場合があることに示されるように現時点でみた地質構造はしばしば時代を異にした異なる3次元空間において生じた地質構造の重ね合せである。

ある地域の地質構造のほとんどすべてがある1つの顕著な地殻変動(造山運動)によって生じそのあとには大きな変化はなかったときめてかかる学説ないし研究法が現在支配的であるように見える。またこの学説に否定的な人すら実際の研究においてはこの種の研究法を無意識的に採用して1つの地域の顕著な地質構造が(例えば“リニアメント”としてあらわれた地質構造が)1つの時期に(例えば第四紀に)すべてできたとしばしばきめてかかる。この種の研究法は地質構造の時代的な重ね合せすなわち4次元のうち時間軸を無視して地質構造のある特定の1時期(造山運動期その他)における3次元空間のものとしてとらえようとするものである。私は日本列島区において新旧の構造帯地質構造の幾重もの重ね合せがあることを述べたが(木村1981)これは地質構造を4次的にとらえようとして考察した結果である。

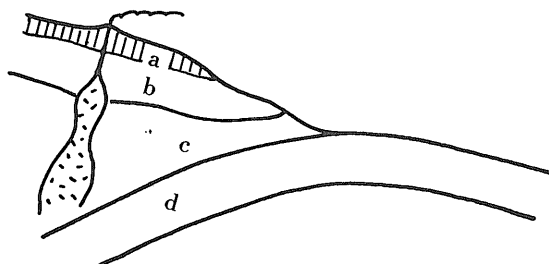
このように4次的に考察する必要がある地質構造を4次的にとらえるどころか3次的考察もなされておらず2次的ないし1次的考察に終る場合が非常に多い。その場合にしばしば欠落するのは空間の鉛直方向の次元である。例えば四国とか紀伊とかの断面を作ってそれによって西南日本外帯という広域の地質構造発達史を論ずる場合にそのような例がみられる。このときしばしば四国のある地域を調査した人は紀伊はおろか四国の他地域を調査した他の研究者の調査結果を理由をあげることなく無視する。また自分がかつて発表したその地域または他域の調査結果との矛盾を無視する。紀伊を研究した人は逆に四国のことを無視する。



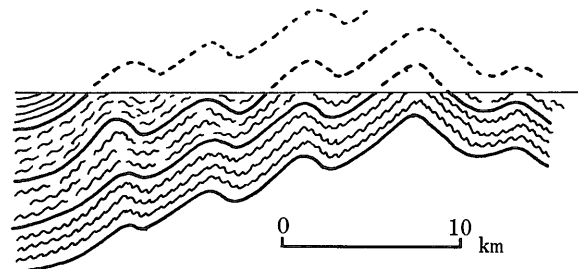
ここでは地質断面において2次的に考察しようとする意図はあるものの地表における広域の地質分布を無視したという意味で3次的考察は欠落することになる。

四国とか紀伊とかの地質断面についての考察が2次的なものを用意しながら実はみせかけの2次的考察である場合が少なくない。例えばプレートテクトニクス説において島弧の下にサブダクションする大洋プレートの運動に伴う地質現象の議論にもそのような例がしばしば見受けられる(第1図)。そのような場合地殻上層部の地質とマントル最上層部の下位にもぐり込んだ大洋プレートについての推定とがあるだけであって上層部を除いた地殻の大部分とマントル最上部についての考察が全く欠落しているものが非常に多い。これを2次的考察のみせかけと呼んだのはその欠落部分があまりにも大きいからである。もぐり込んだ大洋プレートに伴って生ずるとみられるマグマの起源についての議論のときその欠落はあまり大きい障害とならない。しかし大洋プレートのサブダクションに伴って生じた応力が地殻上層部に如何に伝わるか地下で生じたマグマの移動に伴って生ずる応力はどうかといった問題を議論するときすなわち地体構造地質構造について議論するとき地下深部における岩石物性が地殻上層部のものと著しく異なるためにこの欠落は致命的なのである。

地表に分布する岩石地層から地体構造を論ずる場合ももっとしばしば2次的考察に終る。例えば低温高压型の変成作用によって生じた“変成帯”の考えにその



第1図 大洋地殻のもぐり込みと 地殻およびマントル最上部. a: 地殻最上部 b: 地殻主部 c: マントル最上部 d: もぐり込んだ大洋プレート.



第2図 地下深部——浅部の変成・変形層の地下と地表における分布.

ようなものがある。この種の変成作用においては 地下の非常に深い所にあった地層だけが変成岩となる。

したがって地下深くにあって変成作用がおこった区域が隆起し その上にあった非変成岩部が浸食によってとり除かれない限り 高压型変成岩は地表にはあらわれない(第2図)。“高压変成帯”と通例呼ばれているのは 地下深くで変成作用がおこった広い地域のうち 地表に変成岩があらわれた所だけである。地表にあらわれた“変成帯”のみに着目し 地下で広いはんにおこった変成作用に留意しないのは 地表面についての2次元的考察に留まったことになる。高压型変成作用を論ずるのに重要な鉛直方向の次元についての考察を忘却したことになる。褶曲変形 断層破碎変形もまた地表と地下深所とでは大きく異なる。したがって これらについても3次元空間的な考察が必要欠くべからざるものである。そして地質時代におけるある時期の3次元空間と 次の時期の3次元空間における地質構造をお互いに比較し かつ総合することによって4次元的考察が可能となるのである。

地表近くでおこる重力滑動を除いて 地質構造形成の根本原因の多くは地下深所にある。その故にこそ 地表面だけでなく かつての地下深部構造の研究をも含めて 地質構造の3次元的な考察を必要とする。深部構造がどのようなものであるか 地表近くで生ずる地質構造と如何なる関係にあるかを知ることは また深部地質構造が如何なる条件で形成したかを知ることは 地質構造形成の根本原因を求める上に重要なことである。

(2) 高温高压下の岩石変形実験と深部地質構造

地下深部の地質構造が地表近くのものとは大きく異なるであろうことは 高温高压下での岩石変形実験の結果からわかる。地表近くの常温ではぜい性破壊する固い岩石も 1000°C を上回る高温では溶融して液体となるこ

とが良く知られている。それ以下の温度であっても かなり高い温度の下では 岩石はそ性変形する。また 高い圧力(封圧)の下でも岩石はそ性変形する。

高温高压下で岩石がそ性変形するということは そのような条件の下では 鉱物粒子と粒子との間の変位 鉱物粒子内部の変位を伴いながら あるいはまた鉱物の再結晶を伴いながら岩石が変形することを示す。この際の変形単位(木村 1973)は 鉱物粒子の大きさないしそれより小さい大きさである。ぜい性破壊によって岩石が割れるときの変形単位は割れた岩塊の大きさである。高温高压の条件になるに従って変形単位はより小さいものが卓越する。その変形単位の相対的移動の仕方 すなわち岩石変形のおこり方もまた 温度圧力(封圧)条件の変化に従って変化する。

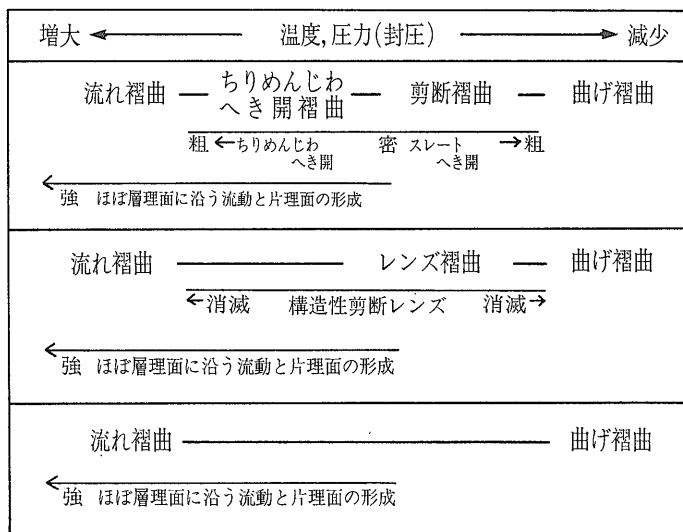
地表近くでは軟弱な岩石だけがそ性変形する。固い岩石は地表近くではぜい性破壊変形する。そのように地表では固くてぜい性破壊する岩石も地下深所にもたらされると すなわち高温高压の条件下にもたらされるとそ性変形する。変形単位が小さくなるからである。結晶片岩や片麻岩では顕微鏡のスケールの小褶曲が認められることが多い。そこに顕微鏡サイズの非常に小さい変形単位があったことを示す。

一般に地表近くから地下深所に至るにつれて より小さい変形単位が卓越する。この変化は漸移的におこる。このことから「地表から地下深所に向って 岩石変形の仕方は変化する。しかもその変化は大きくみて漸移的である」と推定できる。

(3) 深部から浅部への褶曲構造の漸移的移行

1つの時期に 大きくみてほぼ同時にできた褶曲構造には 第1表に示すような系列があって深部から浅部に向って移行する。第1表に示したものでは 流れ褶曲から剪断褶曲への移行を除き その移行が漸移的におこり

第1表 3つの褶曲構造階層系列における漸移する変形様式.



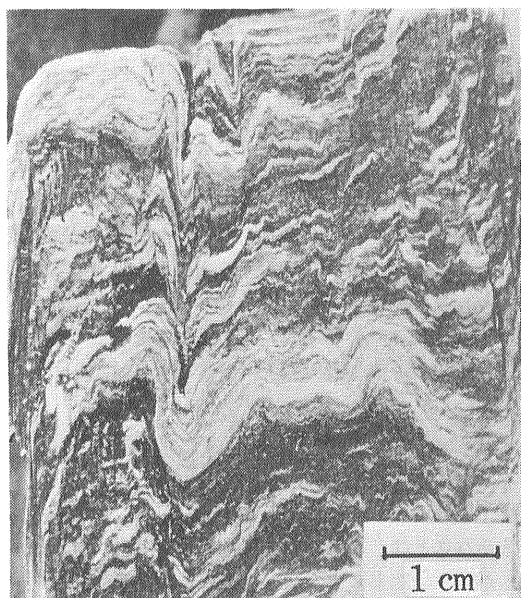
得ることが直ちにみてとれる。これに対して 流れ褶曲から剪断褶曲への移行が漸移的に起り得ることは直ちにはみてとれない。流れ褶曲では層理面にほぼ平行に曲線的に物質の流動がおこり 剪断褶曲では層理面に斜交したへき面に沿って直線的に物質の流動がおこったとみられ 両者での物質の流動の仕方に著しい違いがあるからである。

このように全く異なる変形様式を示す流れ褶曲と剪断褶曲ですら 2つの褶曲層群の間にそれぞれの褶曲の特徴を兼ね備えた ちりめんじわへき開褶曲(ちりめんじわへき開をもつ流れ褶曲—第3図)が介在することによって全体として漸移する褶曲様式をもつ系列を作る。ちりめんじわへき開は剪断褶曲におけるスレートへき開に相当し ちりめんじわへき開に囲まれた細片部は流れ褶曲の特徴をもつ。このようにして流れ褶曲の階層の上部層準中に粗くちりめんじわへき開がはじり始めることにより ちりめんじわへき開褶曲の階層が始まる。更にちりめんじわへき開がしだいに密となり へき開間の流れ褶曲部が消失して へき開のみが発達するに至って剪断褶曲となる。かくして 流れ褶曲と剪断褶曲とは少なくとも原理的には 完全に切れ目なく漸移し得ることとなる。ここで原理的にはといたのは 地層や温度圧力条件の不均質性が自然には必ずあって 実際には小規模の非連続を多数生じ それに応じて後述するようにデゴルマとして小断層を多数に生ずるからである。

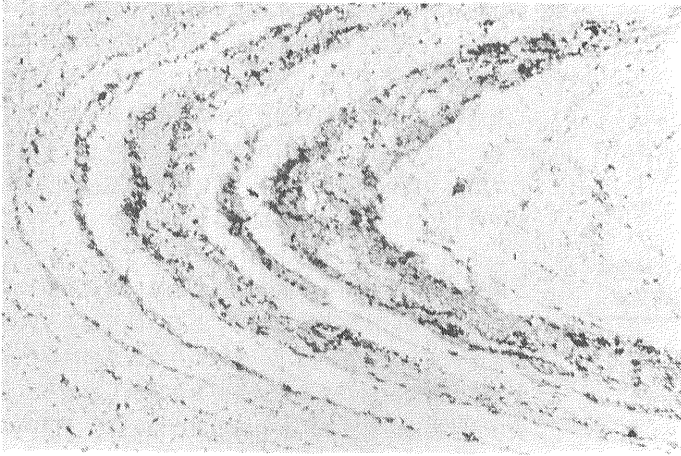
ちりめんじわへき開褶曲について ちりめんじわへき開は後成的に生じたものであるから 流れ褶曲よりもず

っと上位の構造層準を示すものではないとする見解がある。確かに初期に形成された片理面に対してちりめんじわへき開は常に後成的である。しかし ちりめんじわへき開褶曲では 初期のへき開が形成したあとも 流れ褶曲を示す片理面もまたへき開も再生を繰り返すのであって 大きくみると片理とへき開とは同時に形成される。少なくともそのような場合がある。

ちりめんじわへき開褶曲層に近接して 流れ褶曲のみを示しちりめんじわへき開をもたない褶曲(第4図)層が分布することがある。ちりめんじわへき開が地表から



第3図 ちりめんじわへき開褶曲。(台湾脊梁山脈)



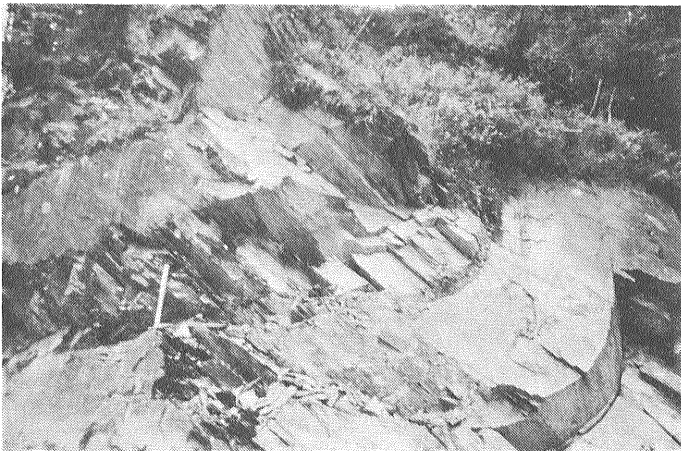
第4図
流れ褶曲. この図の横の長さがほぼ1cm.
(台湾脊梁山脈東部)

地下深層準まで一様に後成的に生じたとすると その付近の流れ褶曲層にはすべてちりめんじわへき開がはいっているはずである。流れ褶曲層においてちりめんじわへき開をもつものもたないものが近接して存在することはちりめんじわへき開がある条件に限定されて生ずることを示す。そして広域の地質調査の結果ある層準に限定されて生ずることがわかっている。阿武隈山地 (IWAMATSU 1975) 台湾脊梁山脈 (KIMURA 1973) において流れ褶曲のみの層準 ちりめんじわへき開をもつ流れ褶曲の層準 スレートへき開をもつ剪断褶曲の層準が下から上へ重なって分布することが確かめられている。

微視的にはちりめんじわへき開は確かに流れ褶曲層を切ったり急に屈曲させたりしている。ちりめんじ

わへき開が後成的要素をもつことは確実である。しかし台湾脊梁山脈のものを顕微鏡で詳しく調べるとちりめんじわへき開に沿って緑泥石結晶が生じたとき流れ褶曲の片理面に沿っても緑泥石結晶は再結晶している。ちりめんじわへき開を生じたとき片理面は機械的変形を受けただけではない。片理面は再生している。初期的片理面の形成 それを切りかつ屈曲させるちりめんじわへき開の形成 片理面の再生といったことが緑泥石の再結晶を伴いながら無限に繰り返しおこなわれてちりめんじわへき開褶曲層が形成させるものと推定される。

ここでちりめんじわへき開褶曲が単に機械的変形ではなくて 鉱物の再結晶を伴いながらおこった変形であることに留意する必要がある。ちりめんじわへき開褶曲の層準よりも下位層準の流れ褶曲の形成には再結晶作用がもっと大きな役割をはたす。それより上位層準の剪断褶曲 (第5図) はかつてはマイクロリソンの平行移動によって形成されると想像された。しかしこれにおいてすらイライトや緑泥石が再結晶することが褶曲変形の重要な要因となっている (Ohno 1981)。



第5図 剪断褶曲 (スレートへき開褶曲).
(西ドイツのフランケン森)

このようにして 温度・圧力 (封圧) が層準によって異なる場で 偏圧に対して物質が機械的に如何に流動するか また如何に鉱物が再結晶するかによって流れ褶曲 ちりめんじわへき開褶曲 剪断褶曲の異なる構造階層を生じている。それぞれは異なる構造層準を示す。これらよりも更に上位には 鉱物の再結晶をあまり伴わず主として機械的変形のみによる曲げ褶曲の構造階層が重なる。このように地表から

第2表 褶曲構造階層系列と非連続

I	構造階層系列の形成時に生ずる非連続
I-1	ほぼ同一の温度圧力層準内に生ずる非連続
I-1-a	変形の仕方によって必然的に生ずるデコルマ。 (例 強く閉じた不調和曲げ褶曲層内に生ずるもの)。
I-1-b	異なる岩質層の介在によって生ずるデコルマ。 (基盤岩類とこれをおおう地層が共に変形を受けた場合もこれに含まれる)。
I-2	局所的な温度圧力の不均一性に伴うデコルマまたは断層
II	構造階層系列形成後に 後成断層によって生ずる非連続。

地下深所に至って温度・圧力(封圧)がしだいに増加するにつれて褶曲様式がしだいに变化するが、地下深所に至るほど褶曲変形の際の再結晶作用がはたす役割りが大きくなる。一つの地殻変動による地殻の変形において地殻上層部では機械的変形が中・下部では再結晶を伴う変形が卓越する。かつて地殻上層部で生じた変形層の研究によってまた現在地殻上層部でおこっている変形の研究によって地下深所における変形を直ちに知ることはできない。まして地下深所にある地殻変動の根本原因を知ることはできない。地殻上層部における変形を地殻中・下部の変形と結びつけて考えるための論理を我々は必要とするものである。漸移する構造階層の研究を通じての深部構造の研究はその一助たり得るものであろう。

(4) 構造階層系列にあらわれる非連続

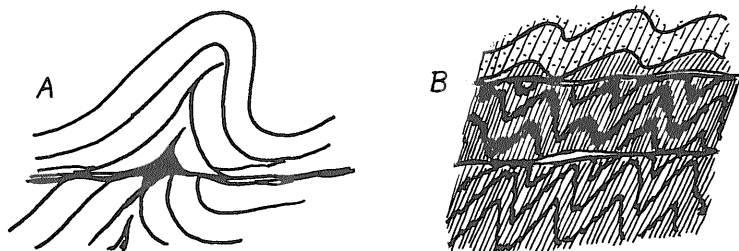
地殻上層部と深部との構造のお互いの関係を知る研究に障害となるのは構造階層の非連続の存在である。その非連続が実際には小さい場合でも非常に大きいものと見誤ることがその種の研究を阻害する。

大きくみると連続してしだいに移化する構造階層も細かくみると非連続に移り変わる場合がある。非連続のでき方には第2表に示すような異なる種類のものがある。それは構造階層系列形成時に生ずる非連続と形成後に

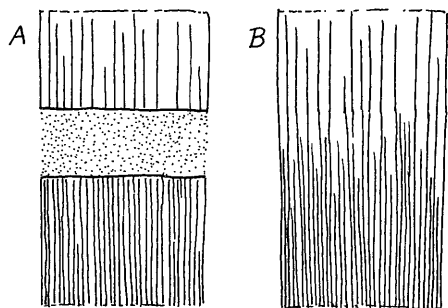
後成断層によって生ずる非連続とに大きく分けられる。構造階層系列形成時に生ずる非連続は多くの場合不調和褶曲層に生ずるデコルマ(第6図)である。強く褶曲した曲げ褶曲に不調和褶曲を生ずることは良く知られている。日本の強く褶曲した地層ではデコルマを境として異なる褶曲層が重なりあって二階建構造(徳山 1972)ができていのがしばしば観察される。

地表から地下深所への構造階層系列は垂直距離にして10kmあるいは20kmでいどあるいはそれより大きいスケールでできている。そのような大きいスケールでできた構造階層の全系列がそのまま横倒しになって地表に水平断面としてあらわれることはない。何10kmという大きさの波長をもつ複背斜の中軸部から周辺部への構造の移り変りとして全系列の一部のみが連続してあらわれるのがふつうである(第2図)。したがって全系列の把握はそしてそれが大きくみて連続的な系列を作るものであるという判断は非常に広いはんいの地域での知識を総合してはじめて得られる。そのはんいは大学教育において個人に課せられる調査はんいはをはかるに越えている。

我々がふつうに地質調査するはんいはこれに対してきわめて狭い。そしてそのはんい内において我々が見出した非連続が構造階層の全系列という観点からみると小さな意味しかもたない非連続であっても調査区域内では大きな非連続であるとき全系列の中での大きな非連続であるかのような誤認がおこる。西南日本外帯の各地で三波川変成作用を比較的強く受けたところとそれより弱くしか受けないところとの間に断層が見出されたときそれが西南日本外帯全域を通じて走る単一の大断層であるかの如く誤認されて(KIMURA 1961)三波川変成帯の南縁をなす大断層(“みかぶ線”)の存在を示すとされてきたのはその例である。現在では三波川変成岩類と秩父中・古生層とが漸移的に移り変わるものであることが明らかにされておりそのような位置に大断層がある地域にあったとしても構造階層という観点



第6図
褶曲層内のデコルマ。
A: 曲げ褶曲系の中のもの
B: へき開褶曲系の中のもの。



第7図 スレートへき開が示す構造階層と厚い砂岩層の介在。本来はBのようにへき開のはいり方は漸移的に変るが 厚い砂岩層がはいるとAのように急変して見える。

からすると後成的なものであることが明らかになっている。

“造山運動”と非連続性構造階層の考え

実際には小さな非連続であるものを 大きな非連続とする誤認は そのような小さな非連続の面を 異なる2つの造山運動変形層の間の大きな意味をもつ非連続面とみなすという誤認を生んでいる。日本におけるそのような誤認の好例は 南部北上山地の下部三畳系稲井層群の基底の不整合を非常に大きな意味をもつものとする考えである。その考えは 下位の上部二畳系登米層群およびそれよりも下位の地層が大きな地殻変動を受けたあとで その上を被覆層として三畳系がおおったとする。稲井層群の基底には軽微ながら不整合は確かに存在する。しかしながらスレートへき開のはいり方は上部二畳系から下部三畳系を通してジュラ系へとしだいに移り変っている。広い地域における観察から 剪断褶曲の構造階層という大局的観点に立つと そこには明らかに漸移関係が認められる。ただし 不整合の近傍のみという狭い視野に立つと 稲井層群基底の厚い砂岩層が 下位の登米層群のスレートと異って スレートへき開をもつように見えないために 基底砂岩層よりも上位の稲井層群にもスレートがあるにもかかわらず 稲井層群の基底に著しい非連続があるかの誤認を生ずるのである (第7図)。

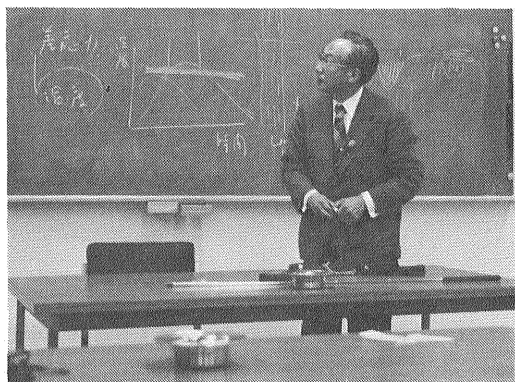
このように実際は連続的に変化している場合に それを基盤岩類の構造階層と 被覆層の構造階層との上下の重なり合いとする考えは ヨーロッパの文献に根ざしている。地角斜の基盤岩類の上に被覆堆積層がのったあとで その両者が共に褶曲変形を受けるとき 物性の異なる基盤岩類と被覆層が異なる挙動をするものを 異なる地殻変動を受けた異なる構造階層とみなすことによっ

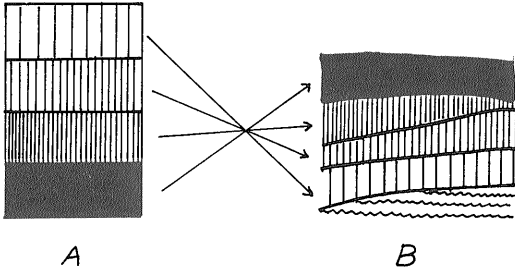
ている。そして時にカレドニアン構造階層(シュトックベルケ) パリスカンまたはアルプスの構造階層という語が見受けられる。

しかし異なる時代の異なる地殻変動を受けた地層群がそれぞれ構造階層を作って上下に重なり合うとするならば その考えは全くの誤りである。なぜならば上位の“階層”において変形があったとき その変形の原因が地下深所にある以上は その変形運動が下位の“階層”と無縁の形で起こることはあり得ないからである。パリスカン地角斜において 過去に大陸性地殻が基盤岩類として存在したところがあることが確実に知られている。そこではパリスカン造山運動のとき 基盤岩類と被覆層とを合わせて全体が1つの系列としての構造階層を作ったはずである。基盤岩類と被覆層との物性が異なるため その間に構造的な非連続を生ずることがあるのである。しかし地下20kmでいどの深所にあつて 高温高压下にあつた基盤岩類下部層が パリスカン造山運動の変形を全く受けなかったことはあり得ない。基盤岩類は先パリスカンとパリスカンとの2つの地殻変動の影響を受けたはずである。基盤岩類から先パリスカンの変形を除外し パリスカン変形のみをとりだし 被覆層の変形と総合したとき始めてパリスカン造山運動の全構造階層系列を知り得る。冒頭に地質構造の研究には4次元の考察を必要とすると述べたのはこのような点にある。

カレドニアン パリスカン アルプスの変形層がそれぞれ全く別の場所できて 巨大水平断層で重なりあつたときのみ これらに特有の構造階層の名を与えることができる。しかし それぞれの変形層ができたものの場所では やはり地下深所に及ぶ構造階層の系列ができていたはずのものである。

造山運動によって別々の構造階層を生ずるとする考えは 造山運動によって強く変形した岩石は基盤岩類とな





第8図 構造階層系列とデコルマ起源のデッケ。
B地区の地層の上にA地区の異なる構造階層が
デッケとして乗ったことを模式的に示す。

り その後の造山運動による変形を強く受けることはないという思想によっている。日本の新第三系褶曲層の基底部でしばしば認められるように 被覆層は褶曲しているのに基盤岩類が地塊運動を示すに留まっているというようなことから そのような思想が生まれる。しかしながら 地下20km ていどの深さにあたる温度・圧力(封圧)の下では 実験室で実験できるていどの歪速度の下でも岩石はそ性変形する。自然界にみられるような著しく低い歪速度の下では 地下深所では岩石は当然そ性変形するはずである。基盤岩類が被覆層の基底近くでは地塊運動するに留まった場合でも 地下深所での基盤岩類下部はそ性変形したはずである。

後成衝上断層群と構造階層

パリスカン造山帯を除いては 欧米の著名な造山帯では著しい褶曲変形は2つの大陸の大衝突の結果生じたと解されることが多い。そこでは 地下深部の構造階層の岩体はしばしば高角度衝上断層をもって地表に絞り出され また低角度衝上断層をもって浅部変形層の上のし上げる。また構造階層系列中に生じた非連続面としてのデコルマが低角または高角の衝上断層となる。かくして大きく見たときの構造階層系列の連続性は後成的に完全に失われることとなる。欧米の論文に 衝上デッケ毎に変形様式が異なるという報告がみられることがあるが その多くはデコルマを境とする異なる変形様式層が異なる衝上塊を作ったもののものである(第8図)。

このような後成断層による構造階層系列の乱れが少なかったパリスカン造山帯においては 例えば DE SITTER の学派による構造階層の研究が良く進められている。

(5) 深部地質構造研究のすすめ

深部地質構造が浅部地質構造へ移行するという考えが生まれたのは非常に古く 100年ほど前のことである。

アパラチア造山帯の中軸部に著しく変形した岩石がありその周辺部に変形の弱い地層が分布することからその考えが生まれた。 そのように早くからその考えがあったにかかわらず その研究に進展が少ないのは 先に述べたようにして連続性のある構造階層系列の中に生じた大きいみかけの非連続 特に地向斜堆積層と基盤岩類との間に生じた構造上の非連続を重視したために 被覆層から基盤岩類を含めての構造階層という考えが欠落するに至ったためである。 また欧米の造山帯では2大陸の大衝突によって生じた大衝上断層群の存在のために 全構造階層系列を全体的に把握することが困難になったことにある。

しかしながら地下深所に根本原因をもつ地殻変動の研究のために 地下深部構造と浅部構造との比較および総合の研究はますます重要となっている。プレートテクトニクス説に名を仮した説の中には先に述べたように最上層部を除いた地殻の大部分と 最上部マントルの物性についての考察が欠けているために地質構造形成論として不適格のものがある。マイクロコンチネント寄せ集め説にしても アクリーションプリズム説にしても 地下物質についての考察の欠落がある。プレートテクトニクス説をより良いものにするためにも 地下深部物質および深部構造の研究が重要である。

日本列島区は欧米の多くの造山区と異なり2大陸の大衝突という大事件を経験していない。そこでは構造階層の移り変りが良く残されている。その研究には 広域についての調査の経験と知識とを必要とするものであるけれども 浅部地質構造の下位にどのような深部地質構造があるのかを知る研究には 日本は非常に良いところにあるのである。日本では過去に繰り返し地殻変動があり かつての地殻変動で地下深くで生じた変形岩石が地表にあらわれているところがある。しかも現在でも活褶曲 活断層活動がある。地表においてとらえることができる活褶曲 活断層という地質現象が 地下における岩石のどのような挙動と結びついているかの研究を 古い地質時代の岩石 地層の変形の研究を通じて行い得るという意味でも 日本は非常に良いところにあるのである。

- (-)は次のような構成となる予定である。
 - (6) 日本における深部——浅部地質構造
 - (7) 高温高压下 低歪速度における永久歪の形成。
 - (8) 変形運動における温度の役割
 - (9) 断層活動と深部構造
- なお引用文献は(-)にまとめて示す。