

地殻における造構破碎と応力との相関関係について*

M. B. Gzovskii

小 西 善 治 訳

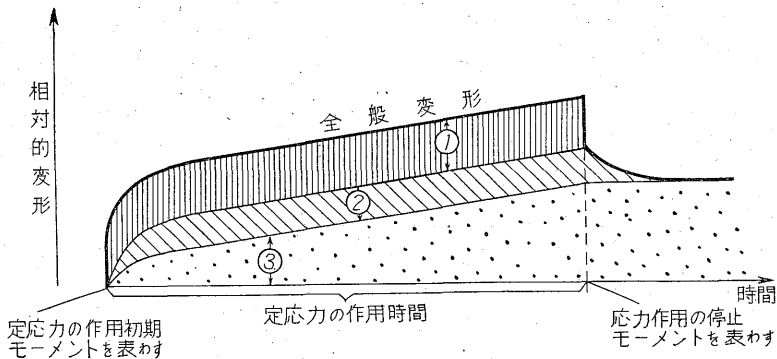
地質家・鉱床探査家は、造構破碎地帯の縫合帯を充填する鉱脈の形態と分布とを絶えず研究し、また破碎運動で層状有用鉱物鉱床に生じた(鉱体)構造の錯雑化を常に明らかにすべきである。したがって地質家は、地殻における破碎運動の発生の物理的条件および岩石の破碎と変形との相関関係とに関する理論的表象を身につけることが必要である。

変形稜円体と破碎との相関関係について

破碎帯の発生条件と破碎帯の分布の規則性とを明らかにするために、有名な Becker の仮説一裂罅と変形稜円体成分とを結びつけている一が地質学的研究でしばしば適用されている。外国の鉱床構造の総合報告では、この一般に知られている見解が利用されている。この仮説(すでに発表以来 20~30 年経っている)の批判とこの仮説に関する論議とは最近高まりつつある。Becker の仮説に関する正しい見解とならんで、その仮説とはそれ自体無関係な変形稜円体に関する表象の正しさと理論的裏付けとにしばしば疑問が抱かれていることを強調しておくことが必要である。

これと関連して変形稜円体に関する考え方は、任意の等分布変形の幾何学的考察によつてきわめて厳密に理論的に裏付けられていることを強調しておく必要がある。完全等分布変形ならびに変形の塑性、弾性成分を記載する場合には、変形稜円体は、幾何学的特性として利用できるであろう。さらに変形稜円体は、小等分布変形および大最終等分布変形にも適用される。等分布弾性変形の幾何学的特性に稜円体を利用する場合には、岩石に出現する次の物理的特性を考慮に入れるべきである。

a) 応力の作用条件のもとでの弾性変形には、時間の経過につれて変わる塑性成分が共存する(第1図)。



第1図 定応力によって生じる岩石の変形図
1)弾性変形の1次成分(瞬時条件) 2)弾性変形の2次成分(残留弾性成分の作用期を表わす) 3)塑性変形

b) 引張応力に対する岩石の“瞬時の強さ”註1)は、弾性係数が0.001 オーダであるが。

* M. B. Гзовский: Соотношения между тектоническими разрывами и напряжениями в земной коре, Разведка и охрана недр, № 11, 1956

註1) 地質調査所月報, Vol. 8, No. 8 複雑な造構造破碎の生成機構参照

セン断応力に対する瞬時の強さは、セン断係数が0.01オーダである。

c) 前述の特性により岩石の弾性伸張度は常に1%以下であるが(弾性)セン断角は1°以下である。

d) 準等方性岩石にあつては、弾性変形軸は、応力軸の(作用)方向と一致するが、終塑性変形軸と一致しない。

造構破碎運動の跡を追跡すれば、応力軸の方向が確かめられるから、それによつて全般変形(general deformation)の弾性成分(楕円体)の軸方向が明らかになる。この種楕円体は常に僅かの伸長(短半軸と長半軸の僅かの差によつて起る)を示す。極大接線応力の作用面の方向は、変形の弾性成分の(楕円体)円形断面の方向と1°までの精度で一致する。

等分布塑性変形の幾何学的特性に楕円体を利用する場合には、次の物理的特性を利用すべきである。

- a) 応力が作用する全時間にわたつて、塑性変形は連続的に成長する(第1図参照)。
- b) 上述の全作用時間にわたつて、全般変形の弾性成分は、塑性変形と同時的に発生する。
- c) 塑性変形は、岩石中で大きな値に達する。
- d) 塑性変形軸の方向は、弾性変形軸の方向と一致しない。

岩石上にしばしば記録される塑性変形の楕円体は、著しい伸長を示し、楕円体軸は応力軸の方向と一致する場合もあるが、一致しない場合もある。塑性変形楕円体の円形断面は、極大接線応力の方向と一致しない。

セン断裂罅と変形楕円体の円形断面とが一致すると仮定している Becker の説は、弾性、塑性変形楕円体の特性差を考慮にいれていない。さらにこの説には、多くの他の理論的な欠陥を含み、この学説で決定的なものと考えられる現象は、実験的、地質学的観察では事実において認められない。セン断面および引張面は、Becker 学説から誘導されるように配向(orientation)しない。

セン断裂罅および引張裂罅の分布は、応力軸または弾性変形楕円体軸に対して検討することが必要である。セン断裂罅の方向と塑性変形楕円体の成分(その軸と円形断面)との相関関係は多様な意味を含んでいる。したがつて一つの場合についても、Becker 学説は確認されるときと明らかに否定されるときがあるような印象を受ける。

裂罅と大規模の造構破碎とを研究する場合には Becker 学説でなく、物質の強さに関する学説の現状を反映する表象系を利用することがすすめられる。

したがつて問題となるのは変形楕円体に関する正しい観念でなく、Becker の提唱する裂罅と変形楕円体とを対比するような方法であることが考えられる。

造構破碎の発生(物理的)原因に関する現学説について

筆者は多くの仮説と既知のデータをまとめて、破碎発生の物理的条件に関する明確な総合観念を造構破碎の研究に利用することを提案した。現在この総合観念は次のように定式化される。たゞし観察対象の物質は均一、かつ等方性と仮定する。

1. まず第一にあげられる説は、2型の破碎現象—引張とセン断—が各物質に出現する可能性に関する説と破碎型を特色付ける2強さ成分 P_{σ} と P_{τ} とに関する説である。この説は Y.B. Fridman が定式化し、G.V.U. Uzhk が発展させた。この説によると、セン断現象は σ_1 軸に対して α 角度で傾くある面では、接線応力が P_{τ} に等しいことを示す場合に発生する。

引張り現象は最大引張応力($+\sigma_1$)が P_{σ} 強さ成分に等しいときに出現する。したがつて破碎発生の主物理的条件は次のようになる。

$$\tau_{\alpha} = P_{\tau}; +\sigma_1 = P_{\sigma} \quad (1)$$

個々の具体的な場合には、破碎型は引張り、セン断に対する物質の強さと破碎を生ずる応力状態の特性との相関関係で決定される。引張裂罅は、極大引張(垂直)応力で、セン断裂罅は接

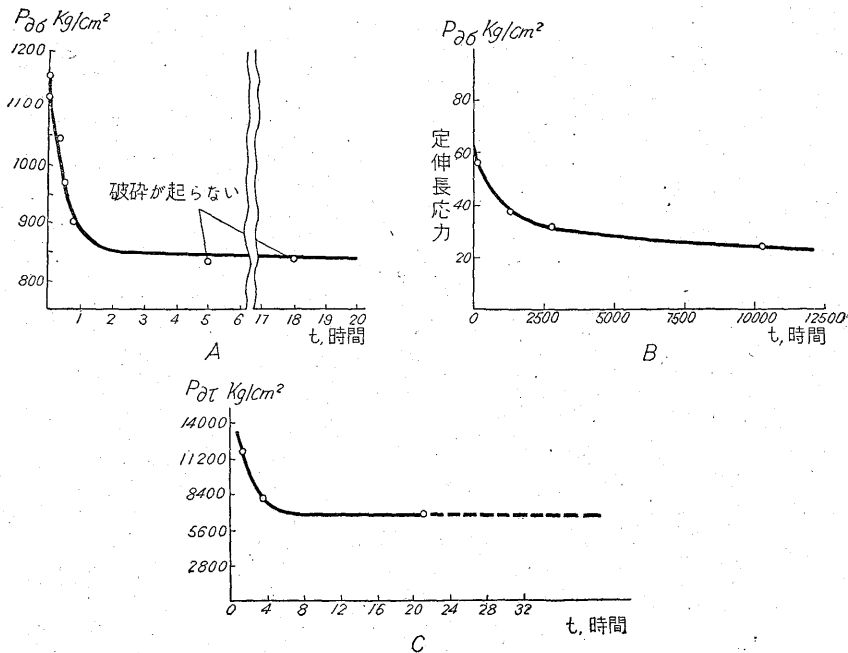
線応力とそれぞれ関連性がある。引張応力に対する岩石の強さがせん断応力の強さの $1/2 \sim 1/3$ 以下であることはよく知られている。

2. 破砕を導く垂直引張応力値および接線応力の値 P_{σ} と P_{τ} とは一定でない。この値は、i) 破砕応力 D の作用時間の短縮, ii) 4 面圧縮 (σ_{sr}) 状態の成長, iii) 温度 T の低下 (Zhrkov・Narzullaev・Bartenev の実験と学説, Mohr の仮説 Griggs・Phillips・Uzhik の実験) によつて増大する。

そのほかに強さに対する影響は、地殻を循環する溶液の組成と濃度とがあげられる (Rebi Ndev 学説および Griggs の実験)。

いま溶液が強さに及ぼす影響を除外すると残りの因子の作用は次のように特徴付けられる。

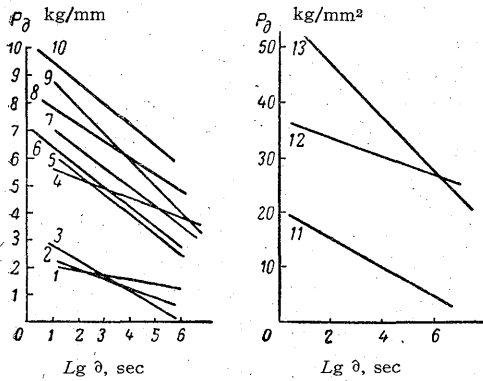
せん断(引張)現象の発生(直接的)原因としては、 P_{τ} と P_{σ} に等価の一定の値を示す接線応力(垂直引張応力)である。たゞしこの場合には、応力は完全に一定時間作用するものとする(第2図)、応力が大きくなれば岩石の破砕に必要な応力の作用時間は短くなる。応力の作



第2図 強さに及ぼす応力の持続作用の影響
(A) Bakerite の破砕 (B) 鈔の破砕 (C) Zolen Gcfesk 産褶曲石灰岩 (10000 気圧の全面圧下
の実験) P_{σ} 破砕に対する強さ ($P_{\sigma} + \sigma_1$) P_{τ} せん断破砕に対する強さ ($P_{\tau} = \tau$ 極大)

用時間の長さと同張性破砕との依存性に関する主法則性は、高結晶物質(金属)・潜晶質珪酸塩玻璃および高分子潜晶物質で、きわめて明確に確かめられることを考慮にいれるべきである(第3図)。同一法則性は、せん断応力による破砕についてもあてはまる。このような法則性は岩石にあてはまることが推定できる。したがつて破砕応力の作用時間の大きさの対数 $1n\theta$ と、この応力の値—持続の強さ(continuous strength)— P_{σ} は、図表上では直線となる一次従属関係を示す。強さを理論的に解析すれば、極大の強さ(瞬時) P と極小の強さ P_0 とに対応する2つの端点で限られた直線を考えにいれることが必要となる。この2つの強さの値とそれに対応する応力の作用時間の長さ $\theta_{瞬時}$ と θ_0 の値とは図表で決定される。すなわちこの図表によると、強さの持続(抵抗)成分と時間成分との従属関係を表わす特性が完全に求められる。既知の座標値をもつ2点を通る直線の方程式は次の型で示される。

$$\frac{P_{瞬時} - P_0}{P_{瞬時} - P_0} = \frac{1n\theta - 1n\theta_{瞬時}}{1n\theta_0 - 1n\theta_{瞬時}} \quad (2)$$



第3図 伸長垂直応力の持続作用によって生じる破壊に対する強さの函数関係を示す

(S. N. Zhurkov, V. N. Narzulleev による)
 1) 非 carbon black 性ゴム(ブナS) 2) Polivinil chloride 3) ブナN 4) アルミナ箔 5) 有機ガラス
 6) ポリスチロール 7) セロファン 8) セルロイド
 9) アセトン・セルロース 10) 酢酸纖維素 11) カーボンブラック性ゴム(ブナS) 12) 含磷青銅 13) Capron

りに θ_2 時間の持続下の強さの実験値 P_2 を選ぶべきである。 P_1 と P_2 およびそれに対応する $\ln \theta_1 = 0$ と $\ln \theta_2$ を利用して、 P_0 と $\ln \theta$ と従属関係を表わす方程式は次のようになる。

$$\frac{P_1 - P_0}{P_1 - P_2} = \frac{\ln \theta}{\ln \theta_2} \quad (3)$$

したがって

$$\ln \theta = \frac{\ln \theta_2}{P_1 - P_2} P_1 - \frac{\ln \theta_2}{P_1 - P_2} P_0 \quad (4)$$

$\frac{\ln \theta_2}{P_1 - P_2}$ を次のように表わすと

$$\frac{\ln \theta_2}{P_1 - P_2} = \frac{1}{\zeta} : \frac{1}{\zeta} P_1 = \ln \theta \quad (5)$$

すると(4)式の代りに次式が求められる

$$\ln \theta = \ln \theta - \frac{1}{\zeta} P_0 \quad (6)$$

(6)式を累乗すると Buss, Zhurkov, Narzullaev の方程式と一致する式が得られる。

$$\theta = \frac{\delta}{e^{P_0/\zeta}} \quad (7)$$

e は 2.7 に等しい自然対数の基数

時間次元の δ 係数値と応力次元を示す ζ 値とが、2つの破壊抵抗の強さ P_1 と P_2 およびそれに対応する応力の作用時間の持続度 θ_1 と θ_2 で決められることは(5)式から明らかとなる。

ζ 係数は応力作用の(時間)持続度に対する強さの感度を反映し、“強さ—応力作用の持続対数”の直接図表(direct graph)の角係数を表わしている。相対的抵抗の強さ P_0 の解は次式で求められる。

$$P_0 = P_1 - \frac{P_1 - P_2}{\ln \theta_2} \ln \frac{\theta}{\theta_1} = P_1 - \zeta \cdot \ln \frac{\theta}{\theta_1} \quad (8)$$

このようにして破壊応力(接線応力あるいは垂直応力)の値とその応力(作用)の持続度との相関関係は、Zhurkov および Narzullaev の方程式と等価の(7)と(8)式で任意に表わされる。

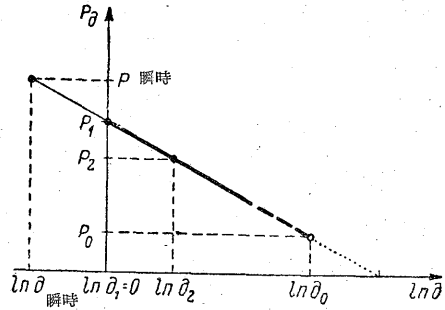
個々物質に対してはセン断性破壊現象と時間(成分)との従属関係を特色付ける P_{1T} , P_{2T} , θ_{2T} があるいは P_{1T} と ζ_T 値および引張性破壊を表わす $P_{1\sigma}$, $P_{2\sigma}$, $\theta_{2\sigma}$ あるいは $P_{1\sigma}$ と ζ_σ 値を明らかにすることができるはずである。 P_{1T} と $P_{1\sigma}$ ならびに ζ_T と ζ_σ との値は応力次元をもつことが明らかである。(7)式の δ 値は時間次元(time dimension)を表わす値である。

岩石の強さに及ぼす全面(4面)圧 σ_{sr} の影響は、有名な Mohr, Karman および Gariggs の実験で明らかにされている。Mohr の仮説は、せん断応力に基づく破碎の場合に起る、この種の従属関係の2出現形態を完全に反映している。

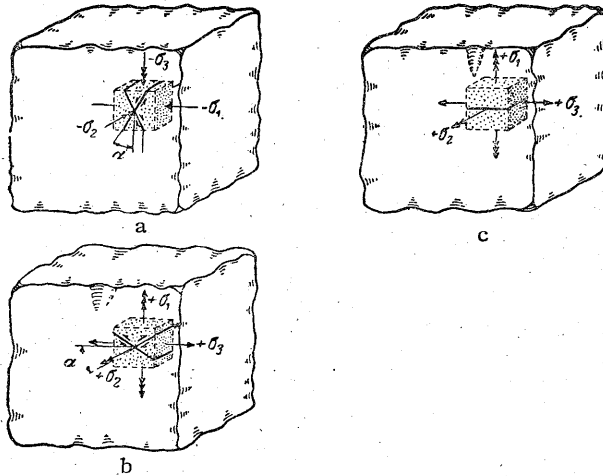
第1には応力作用の同一持続時間のもとで、せん断による岩石の破碎に必要な接線応力が全面圧縮の成長に従って増大する。

せん断応力 $P_{\theta r}$ に対する任意の破碎抵抗の強さが増加する。せん断応力の岩石の強さに及ぼす影響は、全面圧の増大に伴って常に弱まってくる。

第2には、せん断裂縫は極大接線応力の2作用面から代数極小主垂直応力 σ_3 (algebraic minimal, normal strain) の軸側—(45-a) の角度—に傾く2面にそう各点に発生する(第5



第4図 岩石の強さと応力の持続作用との結び付きを示す予想図、記号は本文参照



第5図 応力軸に対する破碎面の配列図

a)一全主垂直応力が圧縮性の場合のせん断面の配列状態 b)一全主垂直応力が伸張性の場合のせん断面の配列状態 c)一全主垂直応力が伸張性の場合の裂け面の配列状態
 α_1 —せん断角 $+\sigma$ —最大主伸張応力 σ_2 —平均主伸張応力 σ_3 —最小伸張応力 $-\sigma_1$ —最小主圧縮応力 $-\sigma_2$ —平均主圧縮応力 $-\sigma_3$ —最大主圧縮応力

図参照)。応力 σ_3 とせん断面とのなす角は、せん断角と呼ばれ α に等しい。この角の値は、せん断物質の強さに及ぼす垂直応力の影響で左右される。この強さと垂直応力との従属度が低下すると、せん断角は 45° に近づく。応力作用 θ が一定時間持続的に働く場合には、第1近似ではせん断応力に対する強さ $P_{\theta r}$ と、せん断面(小間隔内)に働く垂直応力との相関関係は次式で表わされる。

$$P_{\theta r} = (P_{\theta r})_0 - q\sigma \quad (9)$$

$(P_{\theta r})_0$ 垂直応力 σ が0に等しいような面の強さ

q 函数 σ で表わされる係数、圧縮度の増加に伴ない減少する。

$$q = f(\sigma) \quad (10)$$

せん断角 α は次の関係が成立するので、 q 値を反映する。

$$q = \text{tg}(90^\circ - 2\alpha) \quad (11)$$

(11)式からさまざまなせん断角は、次の q 係数値に対応することが明らかとなる。

α 角	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
係数 q	5.67	2.75	1.73	1.19	0.84	0.58	0.36	0.17	0

極大接線応力の作用面とセン断裂罅面との偏差角は、全面圧の増大につれて減少するから、全面圧縮の増大に伴なつて、セン断(応力)に対する強さに及ぼす垂直応力の影響が弱まつてくることは明らかである。q と σ の函数関係の形式については、適切な実験データが存在しないので問題として残されている。

引張応力に対する岩石の強さは、全面圧の函数として研究されていない。この種強さも見掛上全面圧縮の増大に伴ない増加する。引張裂罅の分布は、セン断裂罅の場合と異なり、全面圧値で左右される応力軸に対して変らないはずである。

セン断応力および引張応力を蒙つた岩石の強さに及ぼす影響は研究されていない。この種の影響は、多くの滑晶、多結晶物質 (polycrystalline) の引張の強さに及ぼす温度影響におそらく近似しているはずである。この問題は実験的に確かめられ、Zhwrkov および Narzullaev の方程式にとり入れられている。

$$\theta = \delta_T \cdot e^{U/kT} \quad (12)$$

θ 破碎に必要な応力の作用時間数

T 絶対温度

δ_T と U 時間・エネルギー次をもつ一定の物質

k $1.38 \cdot 10^{-16}$ erg/grad に等しいボルツマン定数

kT の積の物理的意味は平均運動エネルギーが $\frac{1}{2}$ kT に相等するから、岩石の構成成分(イオンまたは原子)の運動エネルギーの平均値を表わすものと考えられる。一成分の平均エネルギー(運動およびポテンシャル)の完全数は 3kT に等しい。

U 値は破碎過程の活潑化エネルギーと呼ばれる。kT の積が U に等しい場合には、破碎応力の作用時間は $\delta = 2.7 \delta t$ となる。したがつて U は、物質の強さと温度との函数的関係を表わす。さらに岩石に対しては、セン断および引張に対する強さに及ぼす温度影響を対应的に反映する U_r と U_o 値とを確かめることができるであろう。まず計算にあつては、温度範囲の大きな物質(珪酸ガラスを含む)の強さは、Bartenev によれば温度の上昇に伴なつて、ほとんど直線状に減少する点を考えに入れると、次の近似方程式が求められる。

$$P \approx P_r - aT \quad (13)$$

a 物質の性質を特色付ける係数

P_r 一定の温度下の強さ

岩石の強さと地殻を循環する天然の水(溶液)の組成および濃度との函数的関係の研究は、きわめて少ない。したがつて造構破碎の与えられた研究段階において、この種の函数関係を考慮に入れることはできない。

3. 機械的破碎の成分面 (elementary surface) の発達にみられる上述の法則性は、次のような現象の結果とみなすべきである。すなわち破碎過程は、時間的にみると塑性、弾性変形が起るとともに、破碎作用に対立する癒合現象が出現して徐々に進行する。

4. 地殻の同じような地域、すなわち同一種類の岩石からなる地域は、造構破碎運動の大きさによつて均質または不均質と考えられる。かりに破碎運動に基づく極小の伸びは、与えられた地域(岩石)を構成する構成成分の極大線状ダイメション(長さ)の 10~100 倍を超える場合には、この物質は見掛上均質とみなされる。

岩石の強さに関する上述の総合概念、および現在広く使用されている強さの仮説は、地殻を構成する物質(岩石)の不均質性と異方性とを考慮にいれていない。したがつて現在発展しつつある強さの統計学的方法による地殻の不均質性と異方性の計算を導入すると、与えられた考え方が錯雑化する。

このような計算はあらゆる場合を通じて必要とは考えられない。大規模な破砕帯を岩石学的に研究する場合には、多くの岩石累系は、地殻中で最も分解を受けている部分でも均一と考えられる。このような地層の厚さは、全層の厚さの $1/10 \sim 1/100$ 以下であるから、全体として均一な物質からなるものとみなしてさしつかえない。この場合の強さは地層を構成する全層の強さの静平均値 (statec mean value) とみなすべきである。堆積岩被覆から褶曲結晶質基盤、貫入岩塊へ、次いで地殻の深所へ (いわゆる花崗岩および玄武岩) 移行すると、広域にわたる地域内の物質は一層均質性を示す。

岩石および大規模の層状堆積系は、異方性と関連してしばしば固難 (強さの推定のさいに) に当面する。異方性に基づく固難さは、非変形堆積系であつても、褶曲運動による乱れが減少する場合か、反対に岩石の変成作用による塑性変形が増大して褶曲が発達する場合に本来起るようである。岩石中に存在する弱線面と一致しない破砕面が広域に発達している場合には、あらゆる場合を通じて破砕面の方向が物質の異方性組成でなく、その物質に作用する応力で、決定されることが裏づけられる。

等方性物質に固有な破砕方向が指向性応力 (dictative strain) によつて弱線面の方向に近い状態を示す場合には、異方性 (物質) が破砕面の配列方向におそらく影響を及ぼしたことが考えられる。このような条件下では、破砕面はまず第一に、応力 (極大値を示さない場合) の強さと被応力物質の強さ (若干弱化した) との間に平衡関係が成立する面に (幾らか位置のずれを起して) 発生する。したがつて岩石の異方性が多くの場合破砕面の位置 (状態) を決定しないばかりか、岩石に若干複雑な容相を 2 次的に加えるという仮説は支持できる。

岩石の強さに関する仮説およびそれに基づく総合的観念は、破砕現象を応力作用に結びつけているから、破砕過程に及ぼす塑性変形の影響を指摘していない。

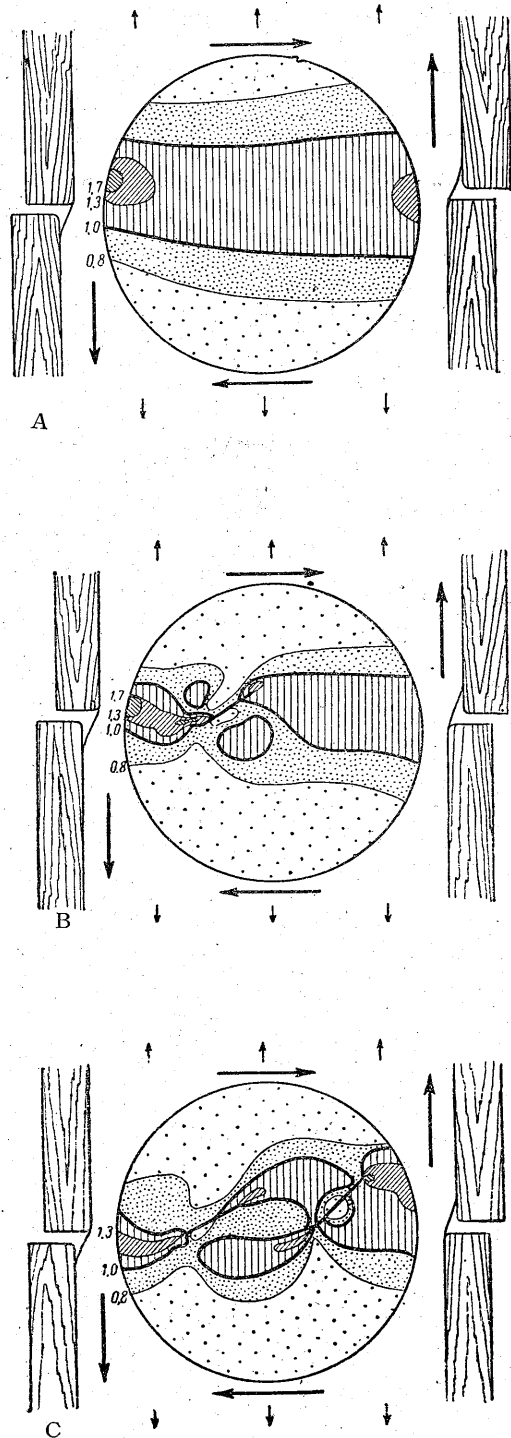
Becker の仮説はこの点において、正しくなくても破砕作用と塑性変形との相関関係にふれているから見掛上すぐれている。現在の諸仮説の欠点は、塑性変形によつて成長するような物質の異方性を考慮にいれず除去できるであろう。破砕作用に及ぼす塑性変形の影響 (物理的) とは、筆者の考えによれば、強さの弱まつた面が出現することである。

造構破砕と応力の場との相関関係について

1. 上述の考え方は、造構破砕の形態と特性と、地殻に働く原応力の (構造) 場と岩石の機械的性質とによつて左右されると考えられている。引張およびせん断破砕に対する岩石の強さに及ぼす伸張、接線応力の大きさは、せん断、引張現象の発生を決定する。この場合応力の場の均一性の度合はきわめて重要な決定要素となる。応力値の勾配が小さければ、破砕現象は広い面積にわたつて (同時的) 起るはずである。すなわちまず第一に発生する各破砕波は広域にわたつて伝播することが知られている。この場合応力値ばかりでなく、応力軸の配向が均一であるならば、このような初期破砕作用の曲率半径は小さくなる。したがつて地殻の巨構造要素の成長は、大伸張性 (地殻) および小曲率性の初期破砕現象の出現を伴なう。

Tyan-shanya の北西方に位する Karataw 山脈の構造を研究した際に、筆者は、褶曲構造を伴なう初期地相斜性破砕帯が古生代の地相斜性褶曲運動に強度に左右されているが、延長 0.1 km から 1~2 km にわたつていることを報告した。破砕帯の曲率半径は対应的に 0.5 から 5 km の範囲の偏倚を示している。この地帯を走る古生代の Karataw 深所破砕帯の個々の chain は、曲率半径 100 km 以上、延長 100 km に及んでいる。最後にアルプスの薄殻型のプラットフォーム性破砕帯はこの地域の巨構造要素の成長と関連性を持ち、最大曲率半径、数百 km で 100 km にわたる距離を延びている。きわめて低度の撓曲を示す platforme 型破砕帯は、シベリヤ plate-forme およびカナダの循環地帯で 100 km にわたつて追跡されていることが報告されている。

単一の巨破砕帯に総合している初期破砕帯の延長性が、破砕運動の発生深所の性質、薄殻



第6図 単純転位に近い変形の場合のゼラチン層における極大接線応力の分布を示す。ただし垂直方向には低度全般伸張が起るものとする。第6図、第7図数字は、(相対)単位あたりの応力値を示す。矢印は力の働く方向を示す。

型性質または共存褶曲型 (Cofolding) の性質で左右されることは、このようにして確認されている。したがって地質学的、種々の成因論的分類群に属する破砕帯の様々な波状性状態 (undulation condition) はこの種の諸性質で決定される。小褶曲構造の成長と関連のある応力の場に普通特に出現する応力軸の配向方位の不均一性は、著しく撓曲をなす地層面にそつて、岩石の同時的破砕を起す原因となる。この種成因の初期撓曲を伴う擾乱現象のよい例としては、リング・ダイクの発達している擾乱帯および鐘状貫入岩の共心状破砕帯 (concentric fractured zone) があげられる。

2. 応力の大きさと応力軸の配向方位とが破砕型態に影響を及ぼす上述の場合以外に興味があるのは、その後大規模な擾乱運動が発生して錯雑化している応力の場の初期破砕に及ぼされた反影響である。

個々の破砕現象の出現は、その周辺の応力状態の変化を誘導する。その変化は、様々な型をとつて現われる。技術文献中では、媒質の応力状態に及ぼす種々の(空)孔隙の影響に関する論文が多数存在する。残念なことには、この種のデータには、地質学的問題の解決に直接利用できるようなものはみられない。

破砕の出現に基づく応力の場の最初の変形型態は、一地域における応力の弱化と他の地域における応力の強化との形をとる。主垂直応力の値の相関関係もまた変化する。新しい箇所、とくに初期破砕の発生箇所間の中間帯に極大応力が発生することは、何がゆえに破砕作用が互に“張り合う”ような状態を呈して働き、そのために破砕の成長方向が變つて巨擾乱帯に融合するかを明らかにしている。

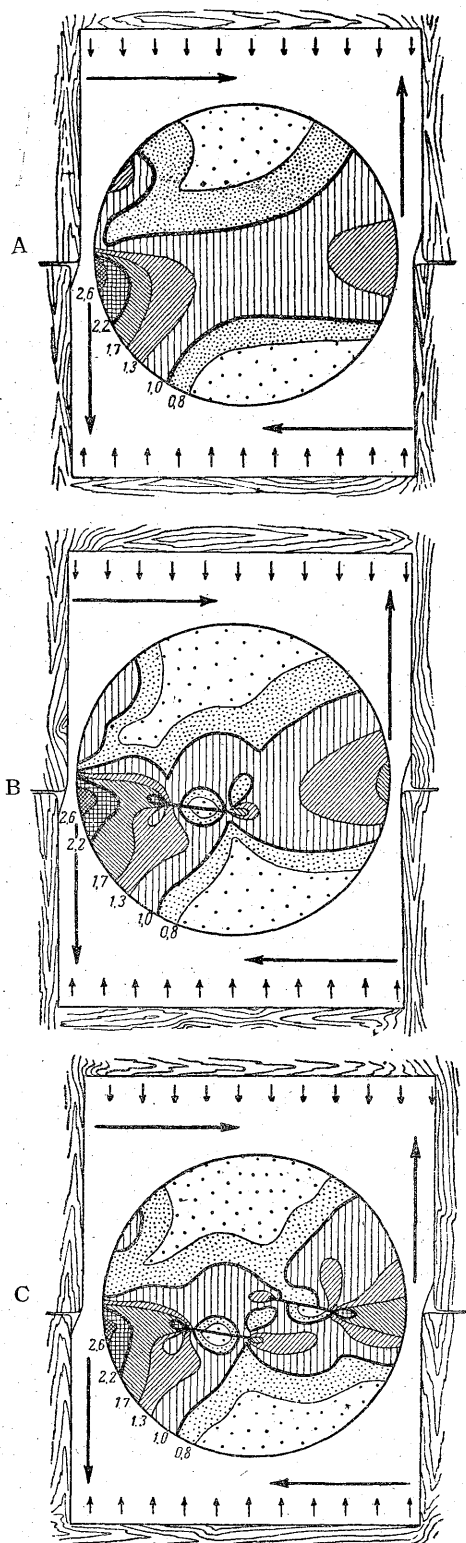
この現象を解明するために厚さ 2 cm の弾性ゼラチン質の物質にお

ける応力分布を光弾性方法で研究した。この種の薄層状物質は、2面が円形状に枠で囲んだ。次にゼラチン層を枠の1側から他側に向かって動かすと、その中央部には、単純転位に近い変形が起る。天然の条件の下では、単純転位変形はしばしば地殻が圧縮状態または伸張状態となつて発達することが知られている。したがつてゼラチン層は、転位するばかりか、伸張または圧縮される。このように枠内のゼラチン層の移動で生ずる弾性変形と関連性がある応力のみをとりあげる限り、物質の自重影響は無視できるから、類似の変形条件は異常に単純であることが明らかとなつた。こゝでは、モデル物質の性質を決定する類似のあらゆる乗数は除かれる。しかし限界条件の成立に必要な類似の必須条件のみは考慮に入れた。著者は、任意の弾性係数をもつゼラチン質膠状層をつくり、対応の端条件と始期条件とのもとで地殻上に起るはずの類似の応力分布を明らかにした。たゞし変形過程の成長は、塑性変形および応力弛緩の影響が無視されるほど短期間（1日、1月）に行われるものと仮定する。これらの仮定は、実験成績と野外でみられる普通の echelon 系の裂罅とを対比するならば、認められるであろう。

著者と I. M. Kuznetsov と共同して行つた実験成績によれば、モデルをほとんど水平の方向に横切するモデルの中央部には、接線応力の上昇帯が伸びていることが明らかとなつた。この帯状部分（接線応力帯）は、単純転位に近い変形を受ける上述のゼラチン層の部分に対応している（第6、7図参照）。この接線応力帯の終端では、応力はモデルにはめられた枠端にそつて著しく増大するが、こゝでは省略する。

補伸張 (complementary extension) が起る場合には極大接線応力の作用 (track) 方向は、単純転位に固有な普通 (力の作用) の方向と著しく異なることがまず第一に明らかになつた。

したがつて echelon (系列) をなす裂罅の配列は、普通のものに比して逆の関係を示すはずである（第6図）。すなわち補圧縮 (complementary compression)



第7図 単純転位に近い変形の場合のゼラチン層における極大接線応力の分布、たゞし垂直方向には低度の全般圧縮が起るものとする

作用の条件の下で期待される配列状態とは異なるはずである(第7図)。

極大接線応力の作用方向中の一方にそつて形成される極大応力帯には、発生期セン断面(nascent shearing plan)が再生して短い裂け目が生じる。応力の場の著しい変化はこのような小“破碎帯”の出現に関連性をもっているようである。第6図b, 第7図cには小“破碎帯”が出現すると接触応力がある箇所では弱化し、他の箇所では増すのがみられる。新しい応力の場に対応し、初期の割れ目(裂罅)に対してechelon状に配列を示す二次小“破碎帯”が形成されると、応力の場はさらに変わる(第6図c, 第7図c)。この応力の場には新しい極大応力が出現し、echelon状に配列する隣接破碎帯の端末は接合する。

褶曲モデルで形成された応力の一層複雑な、かつ不均質な場でも、応力の場の類似の変化が認められた。

応力の著しい低下が、各破碎帯周辺の一定地域に起ると、新破碎帯の形成が不可能となる。しかし連続媒質中では、一般的にいつて応力低下帯は、破碎帯からある距離をおいた箇所のみ分布し、その地帯を超えると、初期の高応力が保持されるから、新破碎帯が出現する。こゝに“互いに一定の間隔をおいて破碎帯が規則的に分布している”野外の状態を説明する一つの途がみいだされる。このような観点からみれば、隣接破碎帯間の間隔は、巨破碎帯のそれよりも大きくなるのが考えられる。このような相関関係は周知のように、野外で観察されている。破碎面近くに発生する応力(強さ)の、低下の度合によれば、集束(focusing)破碎帯および分散破碎帯(dispersion)の形成の物理的条件は、一般的な型で表わすことができるであろう。初期に出現した破碎帯からあまり隔たつていない地帯に伝播する応力の僅かな低下は、密集状に分布する多数の破碎面の形成を妨害しない。このような一層晩期の破碎面の発生は、分散性破碎帯の特色となつている。応力に及ぼされる破碎帯の低度の影響は、全面(四面)圧縮によつて促進される。しかし各擾乱帯の周辺から離れた地帯で応力の著しい低下が起ると、分散性破碎帯の形成が妨害され、集束性破碎帯の生成が促進されるはずである。そのために伸張状態に好都合な環境が形成されることを考慮すべきである。

集束破碎または分散破碎の形成条件に関する問題は、最近の問題となつてきたがあまり研究されていない。この問題を解く際には、応力の場の性質、とくに外力の特性および岩石の機械的特性の(全)総合的特性を考慮に入れるべきであろう。

破碎の場の周辺における応力状態の不等分布は、各地帯(域)の変形と不均質性とを導く。したがつて初期の破碎型態の歪みが目立つてくる。このようにして2次歪み(曲率)が形成される。

応力状態に及ぼす(既)破碎帯の影響の第2の型態は、応力軸の配向方位の変わることである。Karataw山脈のBaidzhansaisk地域の裂罅系の研究によれば、ある破碎帯の末端部では、その中央の部分の周辺よりも応力軸の配位方向に明確な歪みが現われることを確認している。したがつて等分布応力が働く地帯で、地殻の連続性に破壊が起ると、応力軸は、初期配位方向から局部的に偏倚する原因となるという仮説が生じる。この仮説は、単立方状体の様々な端条件から誘導される(この端条件によれば破碎帯の周辺部および破碎帯から離れた地帯に発生する、破碎の生成条件を仮りに区分できる)。透明モデルを使用した光弾性方法では、応力軸の配向方位の歪みは、予想された地帯にきわめて近くの箇所に現われた。

巨破碎帯の様々な生成機構のもとで現われる応力軸の配位方向の歪みは種々の性質を帯びることは明らかである。しかしあらゆる場合を通じて応力軸の変位配列は、初期応力の場合で生じた潜在(割れ目)裂罅の新しい成長方向で制約される。したがつて破碎帯は、初期の曲率(歪み)をもっている。裂罅(破碎帯)の成長方向の緩変位は、正弦曲線状または花冠形態を示す、巨縫合帯の沼状構造の生成を促進する。

このような沈状構造が誘導されるのは、応力軸の配位方向の変位によるものであろう。広域にわたつてechelon状に分布している裂罅間のbridge地帯に生じる破碎現象も、上述の仮説で明らかにできる。相互に隣接して分布している裂罅(破碎帯)に生じる“引付け現象”(attraction)は、第6図cに示されてある型の応力集束ならびに応力軸の配位方向の変位が、

裂罅間の bridge 帯に起ると形成されることが考えられる。

地殻における破碎と応力との相互間関連性の応用面について

1. 上述の考え方に照らしてみると、Becker の仮説を曲げて用いている多くの地質学的研究があることをまず指摘しておこう。この問題に答えるために、Becker の仮説の内容ばかりか、その仮説がどのように利用されているかを知る必要がある。この仮説は、巨地質学的物体および岩石の小構成成分の変形について、まず変形精円体の配向方位を確かめるために利用されているこの変形精円体から出発して、最も信頼度の高いセン断裂罅の方向を考えている。そのためにこのような状態はよく知られている。Becker 仮説を地質学的研究に徹底的に“直接”利用している論文はきわめて多い。塑性変形の性質に関するあらゆる結論は、この場合依然として優位を占めている。この種の変形精円体では、たゞ全般変形の塑性成分だけが軸状態を反映しているから、変形軸の配位方向は、応力の軸方向と無条件的に一致するものとはつねに考えられない。そのために、このような変形精円体からは、セン断裂罅の状態を明確に補足することはできない。したがってこの方法で問題を解決し、セン断面の推定方向を誘導しても、その結論には信頼をおけない。

Becker 仮説の大部分は、“逆の課題”を解決するのに利用されている。変形精円体の軸方向は、応力軸と一致するものと考え、軸方向を野外で確かめられたセン断裂罅の配列によって解明している。この場合には、全般変形の弾性成分の軸状態を裂罅によつて復元しているのは明らかである。したがって変形軸と一致する応力軸が現実にも可能であると考えている。指示軸 (indicated axis) はセン断裂罅の 2 共やく系の角の 2 等分線である。この種の軸名称は、裂罅翼部の転位方向によつて、きわめて正確に定められている。代数的極小垂直応力軸 (最大圧縮) が 2 方向の裂罅の間の鈍角を 2 等分する線と一致する一線によつて認められるような稀しい場合には、誤まつて軸名称の決定を考えることが起る。しかし幸いにも地質学的研究では、この種の推論に出会することが少なくない。したがって Becker の仮定を否定することは、この仮説に引きつけられて行われた多数の地質学的研究の、あらゆる成果を直ちに捨てることではない。Becker の仮説および岩石の破碎過程に関する上述の考え方を正しく理解するならば、これらの研究の内容の大部分に依然として残っている価値と、その正しさについて現在一致をみていない少数の推論とを常に識別できるはずである。

2. 裂罅の形成 (破碎現象) と応力との函数的関係に関する筆者の支持する観点は、空間と時間とにおける裂罅の分布に関連する多くの問題を解く基盤となる。

空間内の各点に存在する均質、等方性物質に生じる裂罅の配向方位は、完全に応力軸の配向方位と対応し、セン断角の変化範囲内で変わる。異方性または不均質物質中では、破碎面は均質の等方性物質に固有な (破碎面) 位置から若干の偏倚を生じ、応力に対する抵抗度 (強さ) の下面に順応して形成される。しかし破碎面の配向方位と、応力軸との間にみられる対応関係は、この場合第一近似において一保持される。成層面の走向をきる造構裂罅がきわめて広域にわたつて分布しているのは、この考え方を裏づけている。地殻のそれぞれの地域における応力の分布特性を知るならば、その地域をきる裂罅 (破碎帯) の分布状態を一般的な型態で表わすことが可能となる。

破碎現象は、大きさの異なる応力の作用のもとで生じる。しかし早期に近づくほど、大きな応力が働き、そのために応力の場は“時間の断面における裂罅発生の逐次性”に関する考え方で表わされる。この種現象 (裂罅の形成) は、まず第一に対応応力の極大地帯に生じるはずである。破碎現象は、この地帯から一層低い応力の作用地域に逐次的に拡大していく。

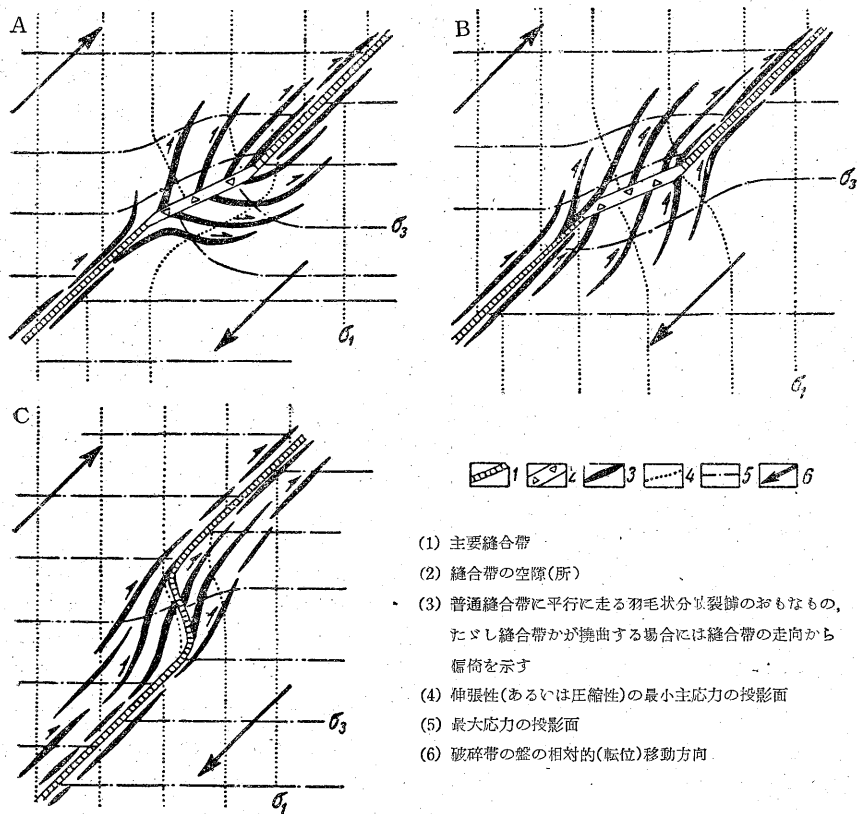
このような推論を行うためには、時間の断面に現われる応力の場の変化に留意すべきである。この種の変化は、造構発達の不均衡分布性 (不均質)、地殻構造の変形状態および破碎作用の出現と成長とに基づく応力の場の変形と関連性をもっている。

このような一般的な原則を明らかにするには、地殻に作用する応力の場の解明方法に関する

複雑な問題を解くことが必要となる。この問題は別の論文でとりあげた。

破砕帯周辺の応力状態に及ぼす破砕作用の影響は、實際上重要な結果を誘導する。この1つは、鉱床の生成に重要な意味をもつ特殊の裂罅系の発達である。この種裂罅系は、主破砕作用が働いて生成されたものである。

破砕運動が主応力の作用方向が破砕帯の形成に及ぼす影響を考慮に入れると、鉱脈の分岐の原因を理解する鍵が与えられる。一巨波状破砕帯にそつて地殻の移動が起ると1地域では、その縫合帯にはレンズ状の空隙が生じるが、他の地域では、翼部(裂罅)が接近、圧縮され互に凸面を向い合う裂罅が形成される。外力がなんら作用しない(自由面)空隙の周辺には、一主垂直応力軸が平行に存在するが、他の応力軸は、縫合帯に垂直に走っている。与えられた地域の破砕面が圧縮されるか、または伸張するかによつて、平行の縫合帯は σ_3 または σ_1 の方向となる。破砕地帯の縫合帯面に沿つて、摩擦力が働く箇所の周辺では、応力軸の配向方位は、縫合帯に斜めの方向となる。



第8図 巨破砕地帯の縫合帯の歪み部分の周辺に生じる羽毛状分岐裂罅と主垂直応力との投影図
(A) 伸張応力が破砕帯の下盤側の空隙附近に出現した場合、(B) 圧縮応力が破砕帯の両盤の空隙附近に働く場合、(C) 破砕帯両盤の凸出部が境を接して分布している場合。

第8図には、破砕面の移動、転位時の波状破砕帯に対する応力軸の理論配向方位のおもな場合が示してある。巨破砕帯の撓曲方向 (flexure) およびレンズ状空隙周辺の圧縮特性あるいは伸長特性によつて左右されて、裂罅の羽毛状分岐は、本質的に異なる形態をなして分布するはずである。例えばある地帯では、裂罅の羽毛状分岐を充填する鉱脈(岩脈)は、主破砕面の凹凸をあたかも消し去るような状態を示すが、他の地域では、鉱脈は主破砕面から著しく離れて存在する。

空隙周辺に発達する主縫合帯からの鉤脈の偏倚の度合は、縫合帯の歪み(撓曲)度が低度であればあるほど大きくなる(第8図 a, c)。

与えられた場合における羽毛状分岐裂罅の偏倚の度合を決定する主要因は、1 破碎帯の曲率(撓曲度)でなく、空隙が縫合帯に出現することにある。境を接する破碎面の凸部分の周辺に存在する縫合帯の歪みは、羽毛状分岐裂罅の発達によつてなくなる。しかしこのような消去現象は、縫合帯がとくに著しく“歪み”を示している際に最も完全に現われる。鉤脈分岐の類似の法則性に関する知識が、地質家・探鉱家にとつて重要なことは、こゝで説明を要しない。

破碎現象の出現と関連性のある応力の大きさの変化に関する知識を明らかにするために、地震の地質学的解釈をあげよう。地震の原因の一つとしては、新しい破碎現象の出現か、既破碎帯の回春かいずれかによつて地殻の内部に発生する応力の大きさの瞬時、変化 (conditional momentary change) があげられる。地表上に出現する破碎力を決定する地震エネルギー U_s は、震源地帯で放出される(転位に基づく)瞬時、弾性変形の位置エネルギーの総量の僅かの部分を占めている。

地震の全エネルギー U_s は、近似的に次の大きさをもっている。

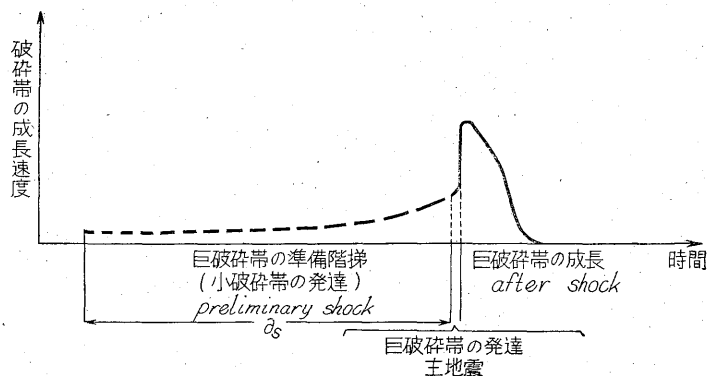
$$U_s \approx \varphi \frac{\eta_1^2}{G_1} l^3 (\text{grad } V)^2 \quad (14)$$

こゝで φ は、その大きさが破碎現象の地質学的成因形態で決定される係数である。

- 1) 震源地帯に存在した位置エネルギー ω の割合、この位置エネルギーは、破碎地帯の形成によつて放出される。
- 2) 地震波のエネルギーに転位する放出エネルギーの部分 N
- 3) 震源の大きさと破碎帯の延長 l_{pr} にそう 3 乗の伸長度との比例係数 λ
- 4) 震源地帯における岩石の塑性変形速度と勾配 V の地表面の造構運動速度の勾配との比例係数 ϕ である。

$$\varphi = 2 \omega \lambda N \phi^2 \quad (15)$$

そのほかに 15 方程式の η_1 は、震源地帯における岩石の粘性係数、 G_1 は、瞬時転位係数をそれぞれ表わす。(14) の方程式では、エネルギーすなわち地震の力は、地質学的方法で決定される(大きさ)量と関連性をもっている。換言すれば、破碎帯の延長 (1) に沿う伸長度、その地質学的、成因型 φ 、地表面の造構運動速度勾配 (勾配 V) と関連性がある。したがつて(14) 方程式は、地震学の地質学的判断基準に関する考え方を抽象化したものであつて、この判断基準



第9図 巨造構破碎帯の成長速度の推定変化図

の造構物理的特性を表わす明確な仮説を反映している。

造構破碎帯の成長の緩徐性および、造構運動の終期における高接線応力の発生に関する考え方は、巨破碎の各階梯の地震学的特性図式で表わすことができる(第9図)。巨破碎作用の準備階梯は、きわめて弱い shock と関連性をもっている。主要地震は、巨破碎帯(断層)の発生産物と考えられている。次で起る弱い部分震動(after shock)は、既巨破碎帯の生長、拡大を示している。そのエネルギーは、応力が新たに集中する箇所(容積)で決定される。しかし時間断面における振動は、(7)式によつて、集中箇所の応力の大きさに左右される。