

資 料

551.24.001.57 : 53

造構造物理学のモデル化方法について*

M. V. Gzovskii

小 西 善 治 訳

造構造物理学は、地球上における(造構造)変形、破碎の発達機構を研究する学問である。問題の設定とその解決には、造構(野外の観察)方法と物理的方法(実験室研究、モデル化、理論的解析)とを適用する。造構造物理学は、地殻の構造発達の合法則性を明らかにし、実際面においても大きな意味をもっている。これは、鉱床の集積に好都合な場所が造構変形運動の行なわれた場所と関連性があることを考えれば明らかである。そのほかに造構破碎運動は、その作用を受ける石炭・石油鉱床の質に影響を及ぼす。さらに造構造物理は、水理地質学、応用地質(土木地質学)の諸問題の解決に重要であるとともに、地震の予知方法の研究にとつても必要である。造構造物理学で重要な役割を占めるのは、野外における地質観察であるが、実験室の研究も大きな意味をもっている。

地殻上に発達する変形および破碎のモデル化方法は、野外における造構研究を補足するものである。モデル化方法は全地球年代にわたって適用する場合には、その主要仮設は、著しく精確化されることが必要とされる。

モデル実験の結果は、モデルが類似条件を満足させている場合にのみ、天然の地質現象の検討に好都合である。

ソヴィエトで発達しているモデル化理論によれば、誤りまたは余分の複雑化をさけるために類似条件には、特徴的な物理的変数で書き表わされている方程式を研究過程に導入すべきである。

岩石の造構変形を表わすには、Koshの提案した既知の平衡・運動方程式系、あるいはマクスウェルの方程式が利用できる。

$$\begin{array}{ccc} \text{全般変形の} & \text{弾性変} & \text{塑性変形} \\ \text{成長速度} & \text{形速度} & \text{速度} \end{array} \quad \frac{d\tau_i}{dt} = \frac{1}{2G} \cdot \frac{d\tau_i}{dt} + \frac{\tau_i}{2\eta_{III}} \quad (1)$$

一層完全な形態の方程式——後弾性変形作用(secondary action)と、条件付瞬時弾性変形とが別々に表わされている——も利用される。

$$\tau_i = \frac{\tau_i}{2G_I} + \frac{\tau_i}{2G_{II}} \left(1 - 2.7^{-t} \frac{G_{II}}{\eta_{II}} \right) + \frac{\tau_i}{2\eta_{III}} t \quad (2)$$

3軸変形は、 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ の3の主伸張値で書き表わされる。

$$\tau_i \sqrt{\frac{1}{6} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \cdot$$

値

$$\tau_i = \sqrt{\frac{2}{3} (\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2)}$$

この値は、3主接線応力総和の全般特性である。 t —時間、 G_I —条件付瞬時弾性変形に基づく転位係数、 G_{II} —後弾性変形作用に基づく平衡転位係数、 G —全弾性変形の転位係数、 η_{II} —後弾性変形効果の粘性度、 η_{III} —塑性変形の粘性度。

* Гзовский, М. В.: Метод Моделирования в тектонофизике, Советская Геология, № 4, Госгеолтехиздат, 1958

多様な素材に対して一連の研究が行なわれ、全面圧 σ_{III} 、温度 T 、接線応力の強度 (1, 2, 6, 17, 20, 21, 25, 26, 28, 53) τ_i によつて変わる重要な値 $G_I, G_{II}, \eta_{II}, \eta_{III}$ が確認された。

$$\eta_{III} = \eta_0 \cdot 2.7 \frac{u - \alpha \sigma m}{kT}, \quad (3)$$

$$\eta_{III} = \eta_{III} \left(\begin{matrix} + \\ \text{(極小)} \end{matrix} \eta_{III} \begin{matrix} - \\ \text{(極大)} \end{matrix} \eta_{III} \begin{matrix} - \\ \text{(極小)} \end{matrix} \right) \frac{\frac{\tau_i}{P_{\eta}}}{Sh \frac{\tau_i}{P_{\eta}}} \quad (4)$$

η_0, η_{III} 極小 極大 u, α, P_{η} —定数 k = ボルツマン定数

実験結果によれば、岩石の粘性度 η_{III} は、(3)と(4)型の応力の函数であると考えられる。岩石中では、金属および多くの他の素材のように、破壊は2型、引張り剪断で行なわれる。引張り破壊は、張力(垂直応力)、剪断破壊は、接線応力が働くために起る。各素材に対応して、2破壊抵抗、2強さ $P\sigma$ と $P\tau$ 成分をもっている。張力破壊の場合も、また剪断破壊の場合でも、破壊は、素材の強さと素材に働く垂直、接線応力との相関関係によつて起る。

実験結果に強さの分子学説 (molecular theory) を組合すと、0.0001秒から百万分の1時間範囲で表わされる破壊応力 P 値の年数は、その作用持続期間の対数の一次函数となる。この相関関係は、次の方程式で表わされる。

$$P\theta = P_1 - \zeta \ln \frac{\partial}{\partial_1} \text{または} \quad \theta = \frac{\delta}{2.7 P\theta/\zeta}, \quad (5)$$

P_1, ζ —素材の性質の特色づける定数

P_1 応力が約1秒間作用する場合の条件付瞬時強さ

実験室で求められる岩石の強さは、条件付瞬時強さに近いが、この値より若干低い。これは応力があがるのには1秒間以上を要するからである。

応力が一定時間の間、持続的に働く場合には、岩石の強さは、温度の上昇によつて弱まり、全面圧縮の成長によつて増す。剪断応力に対する条件付瞬時強さに対しては Mohl 仮設の方程式で表わされる。

$$P_1\tau = P_0\tau - q\sigma, \quad (6)$$

q 係数、僅かの時間間隔では、垂直応力値 σ は一定とみなされる。剪断応力角 a は、 q 係数で決められる。

$$t_g 2\alpha = \frac{1}{q} \quad (7)$$

$P_0\tau - \sigma = 0$ の場合の剪断破壊に対する条件付瞬時強さ

(1)~(7)方程式に入れられる多数の係数および modulus の値は、岩石に対して第1近似値として知られている。全岩石に対する系統的測定は、将来における実験研究の重要な課題である。このようにすれば (系統的に測定)、定応力の作用下の岩石の持続変形曲線が求められる(第1図)。

(1)~(7)方程式から2つの類似全般条件が誘導される。

$$C_G = C_\rho C_g C_i, \quad (8)$$

$$C_\eta = C_\tau C_i. \quad (9)$$

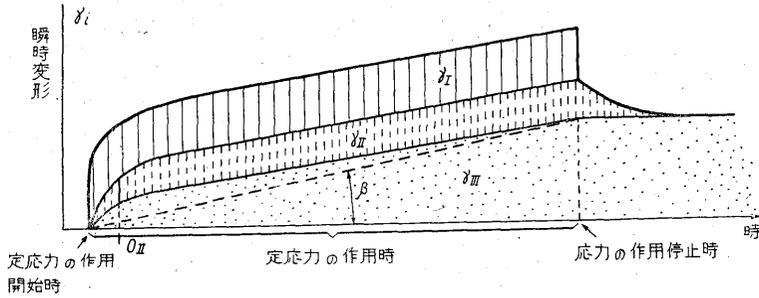
そのほかに、次のように平衡関係にあることが必要とされる。

$$C_G = C_\tau = C_E = C_\sigma = C_P \quad (10)$$

さらに類似の限界、初期条件が存在するものとする。

類似の対応乗数はこゝでは次のようである。

転位および伸張に対する完全弾性平衡係数は、



$$G_I = \frac{\tau_i}{2\gamma_I} \quad G_{II} = \frac{\tau_i}{2\gamma_{II}} \quad \eta_{II} = G_{II} \theta_{II} \quad \eta_{III} = \frac{\tau_i}{2t\theta\beta}$$

- γ_I 条件付瞬時弾性変形
- γ_{II} 後弾性変形作用効果
- γ_{III} 塑性変形
- θ_{II} 限界値 $\gamma_{II} 0.63$ に達する場合の時間
- t 時間

第1図 定応力 τ_i の場合の岩石変形曲線の解状図

$$C_G = \frac{G \text{ 係数}}{G \text{ 対象物}}, \quad C_E = \frac{E \text{ 係数}}{E \text{ 対象物}}$$

接線, 垂直応力に対しては

$$C_\tau = \frac{\tau \text{ 係数}}{\tau \text{ 対象物}}, \quad C_\sigma = \frac{\sigma \text{ 係数}}{\sigma \text{ 対象物}}$$

$$\text{強さに対しては, } C_P = \frac{P \text{ 係数}}{P \text{ 対象物}}, \quad \text{強さ } C_\rho = \frac{\rho \text{ 係数}}{\rho \text{ 対象物}}$$

$$\text{粘性度に対しては, } C_\eta = \frac{\eta \text{ 係数}}{\eta \text{ 対象物}}$$

$$\text{時間に対しては, } C_t = \frac{t \text{ 係数}}{t \text{ 対象物}}$$

$$\text{重力加速度に対しては, } C_g = \frac{g \text{ 係数}}{g \text{ 対象物}}$$

$$\text{距離に対しては, } C_l = \frac{l \text{ 係数}}{l \text{ 対象物}}$$

破砕現象をモデル化する場合には, 類似の応力の類似の場と素材の強さ特性を特色づける値とを確保することが必要である。類似の応力の場は, (8)条件で確保される。類似の破砕過程条件が導入された場合には, 強さの特性——(5)の応力とダイメンションと瞬時強さ $P\sigma, P\tau$ がもっている——は, 次のように相等しくなければならない。

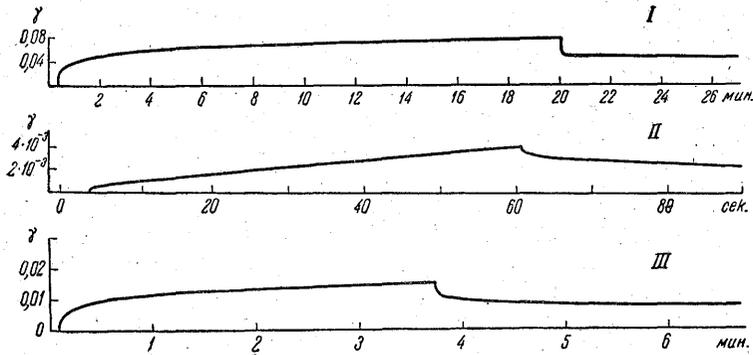
$$C_P = C_\sigma = C_P = C_G = C_E = C_\sigma = C_\tau. \quad (11)$$

(5)式の他の特性 σ は, 時間ダイメンションをもち, 以下の関係にある類似の C_σ 乗数に支配されるはずである。

$$C_\sigma = C_t. \quad (12)$$

岩石の機械的性質の研究はあまり進んでいないので, モデルがもっているはずの性質を, きわめて高い精度で計算できない。しかし近似的計算を行なうことは可能であつて, 度々行なわれている。その結果は表中に掲げられてある。

モデルは, その性質が類似条件によつて, あらかじめ算出された値と一致する材料からつくられることが必要である。このためには, モデルの素材の $G_I, G_{II}, \eta_{II}, \eta_{III}, P\tau, P\sigma$ 値が決められるような特殊の装置を必要とする。このような装置は, ソ連で研究に成功し, 利用している。第2図には, この方法で求められた曲線が掲げられている。この曲線は, 岩石の曲線に類似し $G_I, G_{II}, \eta_{II}, \eta_{III}$ 値が計算できる。計算結果は表に示してある(印刷省略)。この表によれば, 水



- I 水分43%の粘土
- II パキンスキー産の petrolatum
- III エチルアルコールおよびベンジルアルコール溶液30%
- γ 転移変形

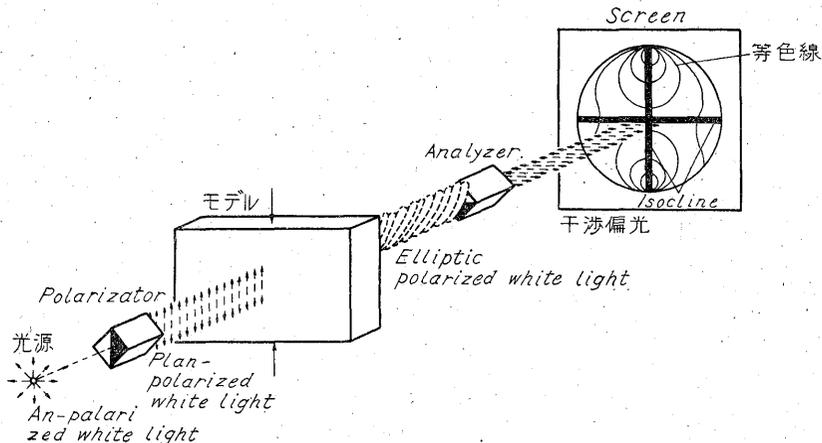
I と III とは Parlov, II は Mihailov が作った装置で求められた自己記録

第2図 定応力下での変形長曲線

分を含む粘土, petrolatum およびその他の素材の機械的性質の主特性——一般には(8)~(12)の類似条件に一致するような性質にあたっている——値は、幾何学的に相似の乗数 (*T.e.* 1:100,000) $C_1=1 \cdot 10^{-5}$ と類似の時間乗数 $C_2=2 \cdot 10^{-12}$ による場合のモデルがもっているはずである。ただしこの場合には、1分間の実験時間は、天然過程では百万年に近似的に対応するものとする。

多くの造構物理学の問題を解決するために、本質的な意味をもつものは、変形、破碎に関する知識ばかりでなく、こんにちまで研究されていないモデルの応力状態に関するデータである。地質学的客体のモデルの応力状態に関する初期研究は、光弾性法である。造構物理学へのこの方法を適用する場合には、モデル作成資材としては光学的に活性な弾性物質のみが知られ、必要な塑性素材がなかつたので、実験は複雑となつた。現在においては、機械的、光学的性質を決定するためには、光学的に活性な塑性物質と特殊の装置——光感粘度計——がすでに存在する。

1952年からゼラチンゲルのモデル実験が始められた。この実験では(時間の決定モメントに作用する)、応力の(働く)瞬時の場のみを質的にモデル化することが可能である。このモデルは、相似の唯一の充足条件に対応してつくられている。このようなモデルの変形は、モデルの塑性部分が初期モデル形態を伝えるので、全般変形の弾性部分だけが再現される。光学的成



第3図 モデルで応力を研究するための偏光機式

分を利用するか、または screen に現われるモデルの干渉(着色)像に直接よれば、モデルに働く極大接線応力の相対値が決定される。応力モデルには、岩石顕微鏡と類似の装置に偏光が照射される(第3図)。層状モデルを研究し、地震の予知に関連性のある2, 3の問題を解決する際には、各等色帯に作用する絶対応力値を知ることが必要である。この種素材に対しては、特殊の予備実験が行なわれる。

著者の指導の下で行なわれた Oskin の研究によれば、ゼラチンでは、光の伝播速度差 R は、全般変形の弾性部分と関連性があるが、一般に考えられているような応力との関係はみられない。弾性変形の二次変形部分が、40 時間にわたって拡大の一途をたどるから、モデルからでる光の伝播速度差は、応力が一定であるにもかかわらず、時間の経過とともに増大する。モデルの任意の点における極大接線応力値は、次の方程式によつて決定される。

$$\tau_{\text{極大}} = \frac{R_t}{Btd} \cdot 10^{-7} \text{ } \Gamma/\text{cm}^2, \quad (13)$$

R_t —与えられた時間モメントにモデルからでるミリミクロン光線の(伝播)速度差

B_t —応力の光学係数、この係数値はモデル素材を特色づけ、実験の継続時間の函数である。

d —モデルの厚さ、単位 cm

(8)式を利用する場合には、ゼラチンゲルの G または E 係数は、弾性変形の二次成分が長時間にわたって成長するので、 t 時間の函数とみなされる G_t または E_t におきかえるべきである。したがつて著者の使用したゼラチンゲルモデルによる研究方法は、工学で利用されている方法と異なつて、定数 G, E, B, R の代わりに、時間成分によつて異なる G_t, E_t, B_t, R_t 値が導入されている。

応力軸の配向(方位)は、モデルの任意の点で確認される。これは、光がモデルを透過するのが止まり、応力軸が直交ニコルの扁光面にだけ平行に現われるからである。応力軸が同一配向(方位)を示す(幾何学的)地点の連なりで求められる線は、isocline と名づけられる。isocline は、screen 上に黒色帯を形成する(第3図参照)。

ゼラチンモデルの作成にあつては、次の点を考慮に入れるべきである。硬さは、類似条件が要請する硬さよりも大きくとることである。これは、岩石の変形が1%も超えないときに、ゲルの弾性変形が数10%に達するからである。

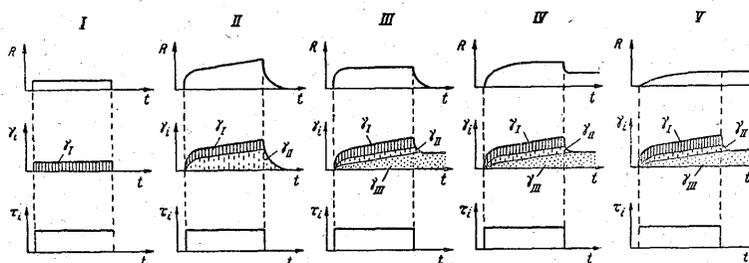
本質的に改善をみたのは、著しく塑性変化を蒙るモデルの光弾性応力研究法である。この場合には、(8)と(9)との類似条件が充たされる。著者は、物理学者、G. V. Vinogradov, 物理学者 V. P. Pavlov および D. N. Oskin と共同研究によつて造構造モデルに適する光学的に活性な塑性素材がベンジアルアルコールに溶解させたエチルセルローズであることを明らかにすることができた。観察される伝播速度差の値 R は、変形の弾性部分の値に正比例する。一定の応力の場合には、弾性部分は、短時間の間(数秒後)に、時間的に安定となり極大接線応力値に正比例する。したがつて次のようになる。

$$\tau_{\text{極大}} = \frac{R}{Bd} \cdot 10^{-7} \text{ } \Gamma/\text{cm}^2 \quad (14)$$

光学活性係数 B はきわめて大きく、60,000 プリコステル、 $6 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\Gamma$ に達する。速度差 R は、塑性変形値によつて左右されないが、塑性変形速度——変形弾性部分として応力値で決定される——のみは対比される。

ベンジアルアルコールに溶したエチルセルローズとゼラチンゲルとの機械的、光学的性質差は、第4図に示されてある。この表をみれば、ベンジアルアルコール中に溶したエチルセルローズでは、光の速度差は応力値とよく対応しているのが明らかとなる。さらに研究を押し進める必要のある重要な課題は、(11)と(12)の硬さの相似条件がまもられるような光学的に活性な塑性素材を作ることにある。

モデル化法は、造構造物理学に多く利用され、成功している。この方法の主要な意義は研究対象の変形、破壊の成長に必要な物理的条件が実験によつて確認できる点である。そのほかに



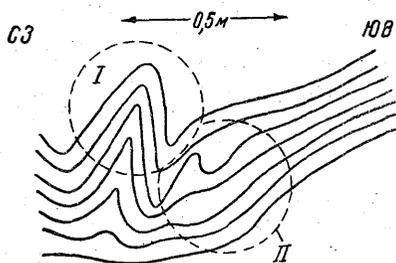
第 4 図

この方法によれば、野外の地質調査では気づかないような重要な二次要因が確認できる。次に3例をあげよう。

1. 一次撓曲 (linear warping) と一次“押しつぶし”による褶曲出現の物理的條件の解明
 地殻では、地層が“一次活性化力” (linear activated force) で圧縮される場合には、さまざまな型の褶曲が発生する。一次撓曲褶曲では、地層の厚さは、実際上において変わらないが、変形過程では、地層の塑性撓曲が主として起る。他方において一次押しつぶし褶曲では、地層の厚さは、著しく変わるが、変形過程は、主として地層の局所薄化にきせられ、撓曲は低度に現われる。さらに中間型の褶曲、すなわち混合成因型の褶曲型にも出会う。

地層の外部形態の変化以外に、各地層の内部に発生する変形が解析できる。一次押しつぶし褶曲系中には、3つの変種が認められる。横断面が密接して配列する隣接地層中の1つの地層では、変形度は他の地層のそれと同一程度に近い状態を示すから、地層断面は接近するといえよう。褶曲を形成する地層の撓曲部の周辺部は、隆起面の周辺部よりも、地層断面の接近度が大きい。変形後には、断面形態は保持される。他の変種型とは、地層内部の素材の塑性変形度が著しく不均質と錯雑性を示すことによつて識別される。地層の横断面は、著しく撓曲する。このように考えられる弾性変形種型は、一般に“流動褶曲”という術語が使用される。最後に多数の内褶曲面が生成され、塑性変形を伴う褶曲型に出会う。この種の褶曲型は、剪断褶曲と呼ばれる。

層間変形の問題に立ち入らないで、こゝでは、2極型、すなわち一次撓曲型と一次押しつぶし型の褶曲型に限定して詳細に検討しよう。ときには、同一地層内に数個(2極型)がみられることがある(第5図)。褶曲の各2極型には、特殊の複雑な破碎帯を伴ない、鉼石でしばしば充



第 5 図

填されていることがある。したがつて一定の機械的運動型の褶曲の生成が、どのような条件の下で促進されるかを知ることが、重要である。

個々の地層の塑性変形を理論的に追跡すると、次のような仮設が求められる。活性化一次圧縮応力 P が一定の時間持続的に作用するならば、一次撓曲褶曲は、次の場合に出現するはずである。すなわち作用応力の持続時間と大きさが地層の機械的性質と一定の相関関係にあつて、3条件を満足させる場合にのみ、一次褶曲は発生する。

I条件：一次応力 P は、 P_k 値より大きくなければならない。たゞし P_k 値は、1地層の粘性度 η_{III} 、地表面の接線応力 f 、実験持続時間 θ 、地層の厚さ m 、走向に沿う地層の延長 d 、若干の係数值によつて異なるものとする。

$$P > P_k; P_k = k_1 \frac{f^{2/3} \eta_{III}^{1/3} m d}{\theta^{1/3}} \quad (15)$$

P 応力の変わりに、それによつて造成される一次垂直線 P をとりあげるならば、一次撓曲現象は、次のように表わされる。

$$P > P_k; P_k = k_1 \frac{f^{2/3} \eta_{III}^{1/3}}{\theta^{1/3}} \quad (16)$$

k_1 定係数、この値は実験によつて確かめられるであろう。

II条件：一次圧縮応力 P は、 θ 応力の作用時間 θ に対応して、塑断破碎 Par に対する地層の硬さが半分以下になることが必要とされる。

$$P > 2 P_{\theta r} \quad (17)$$

III条件：地層表面 S に働く垂直応力は、地層表面に及ぼす接線応力 f に比例して若干値が小さくなるはずである。実験によつて裏づけられる比例係数は k_{III} で表わされる。

$$S > k_{III} f \quad (18)$$

モデル化によつて決められる第1課題は、個々の地層における一次撓曲の上述の出現条件の正しさを検証することにある。最も単純な場合、すなわち同一持続時間に、粘性度 η_{III} 、最小応力値 P_k ——一次撓曲褶曲の出現に必要とされる——をもつ同一素材からなる1層の地層が変形する場合には、下盤層に及ぼされる接線応力 f によつてのみ右左される。(16)式から次のようになる。

$$P_k = k' f^{2/3} \quad (19)$$

ここで、 k' は定係数を示し、応力 f は、地層とそれが乗る基盤との磨擦係数 k_f と地層の重さに左右される。地層の層厚 m は、撓曲の出現に影響を及ぼす。応力 f を決定する地層の重さは、層厚によつて異なるからである。IIおよびIII条件は、依然として働く。

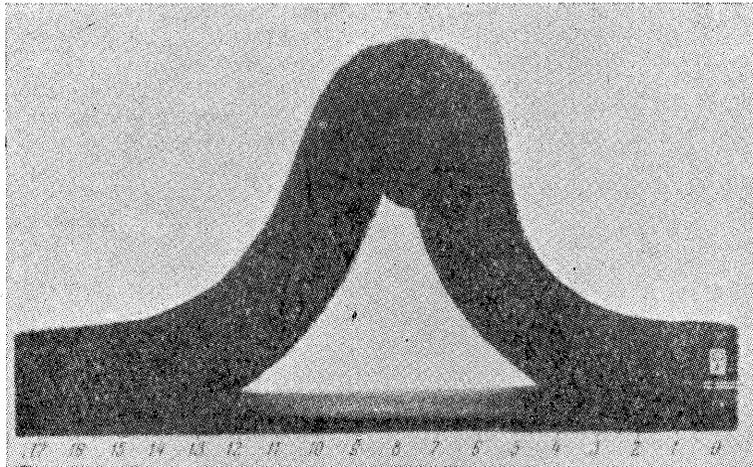
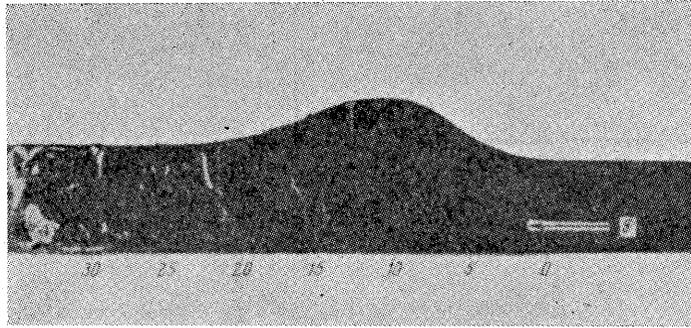
Kuznesho および著者は、2要因、すなわち一次垂直応力 P と一次接線応力のみの変化を媒介として一次撓曲または一次押しつぶし褶曲型(19)の条件を反映する型——が求められる可能性——を検討するために、1地層モデルの実験を系統的に行なつた。モデルの性質を計算するために、(8)、(9)、(10)の類似条件により、 $C_1=10^{-4}=1:10,000$; $C_2=10^{-12}$; $C_3=1$; $C_4=1/2$; $C_5=10^{-16}$; $C_6=10^{-4}$ にとつた。弾性モデルに対して、類似条件が満足されていることは、必要なものと考えなかつた。これは、このモデルには(15)~(19)条件がはいらないからである。筆者は、岩石が η_{III} 、約 10^{19} ~ 10^{20} ポアソン、 P_r 約 10^9 ダイン/cm² であると仮定した。対応モデルは η_{III} 約 10^4 ~ 10^8 、 P_r 約 10^5 をもつはずである。このような性質は Petrolatum の変種(バキンスキー産)がもつている。

多くのモデルの実験結果によると、同一塑性素材からつくられた各地層—— f または P 値に左右される——は、一次押しつぶしまたは一次撓曲か、いずれかの褶曲型が造成されることが確かめられた(第6図)。主要な実験結果は、図上の点分布が(19)方程式に矛盾しないことである。

最も重要なことは、1層内でなく層群内の一次撓曲および一次押しつぶし褶曲の物理的発生条件の決定である。この条件の決定はきわめて難しい。

モデル化方法で決められる第2の課題は、1地層の変形を誘導する条件が、層群の変形にどの程度普遍的に存在することかを定めることにある。層群の重要な機械的特質は、層群を構成する各地層の厚さ m と層間に起る磨擦を表わす係数 k_f である。

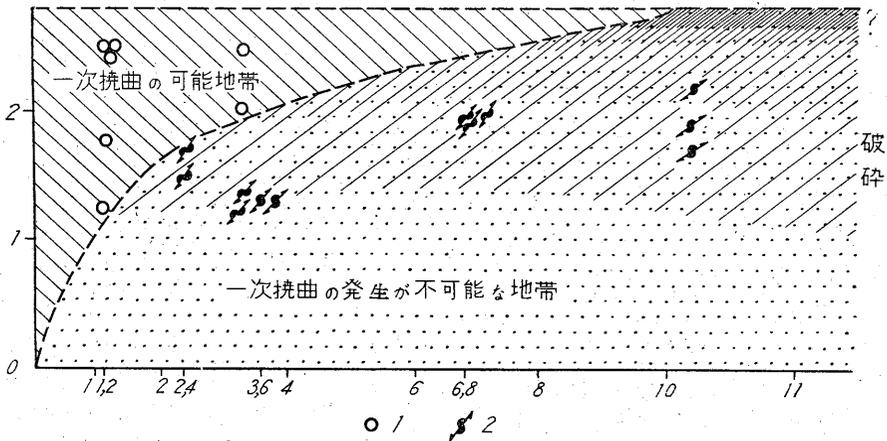
(15)方程式からは、1層に働く応力 P が一定の場合には層厚 m と磨擦係数 k_f ——天盤および下盤——の相関関係によつて異なるが、さまざまな型の褶曲が発生することが考えられる。一次撓曲は、次の条件が成立する場合には発生するであろう。



第6図 一次撓曲褶曲(上部)と一次押しつぶし型(下部) 単位 cm
P 活性一次圧縮力

$$m < \frac{k'}{kf^2/s} \quad (20)$$

k' は素材の粘性度, 実験の持続時間, 選択された応力値 P によつて異なる。
層群に対して(20)方程式の適用性を検討するために, Kuznesko および著者は, 層群モデル

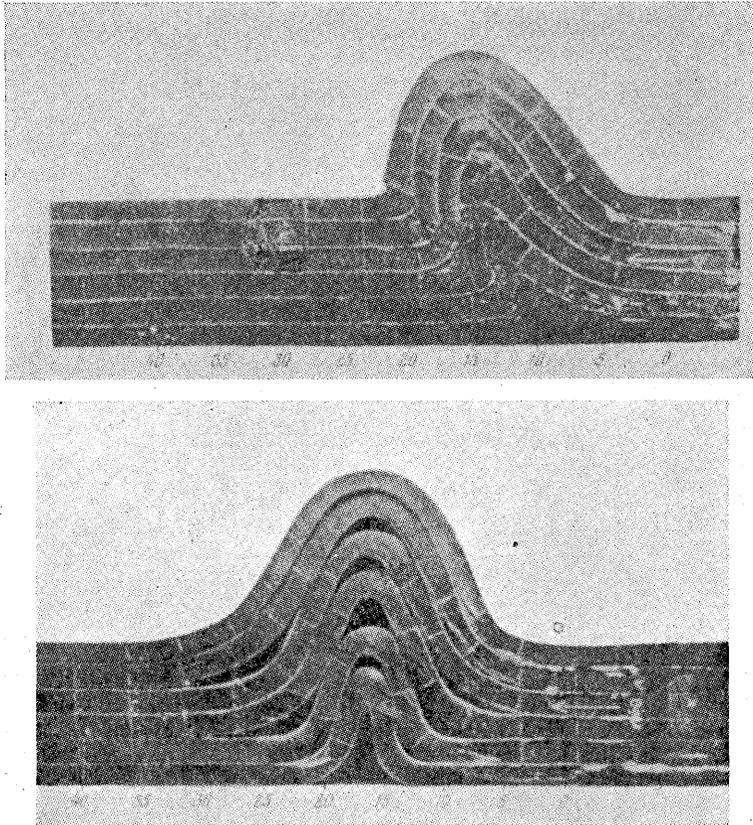


- P_{17} 剪断破碎に対する条件付瞬時強さ
- P 地層横断面にかかる粘性垂直応力
- f 表面層に働く接線応力
- 1 一次撓曲褶曲
- 2 押しつぶし褶曲, 破碎によつて複雑化している

第7図 同一地層内におけるさまざまな褶曲の物理的条件図

の実験を行なった。類似乗数には、1層モデルと同一乗数によつた。モデルは Petrolatum から作られた。地層間の磨擦度は、各地層に塗布したグリースの性質によつて決められた。

実験結果によれば、研究対象の各型の褶曲は、層厚 m または地層間の磨擦係数 k_f を変えれば求められることが明らかとなつた。他の要因(一次応力 P)等で変形する層群の全層厚は、本実験では不変とみなした(第8図)。多地層(層群)のモデル(第9図)に対して求められたグラ



第8図 一次撓曲褶曲(上部)と一次押しつぶし褶曲(下部) 単位 cm
P 活性一次圧縮応力

フの点が、(20)との相関関係と矛盾しないように合っている点は、注目に値する。

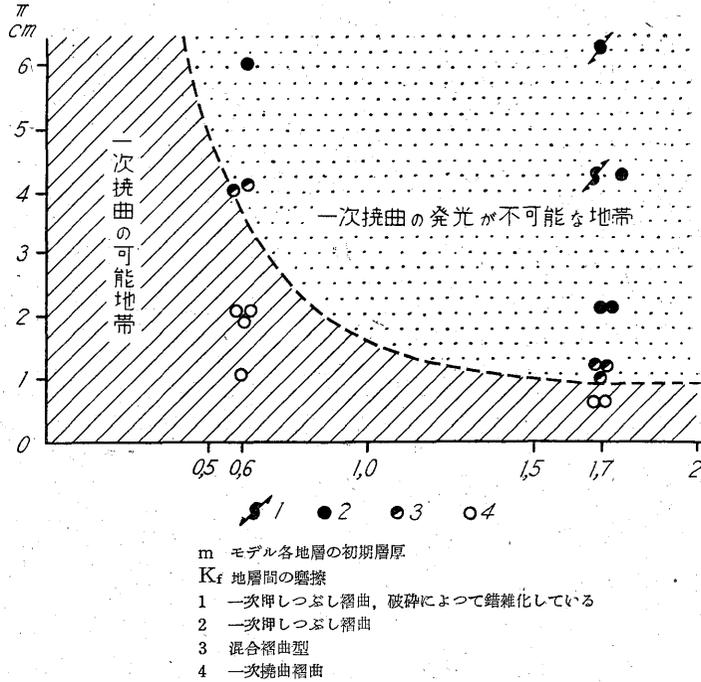
さまざまな型の褶曲は、(15)方程式に対応して累層中で、素材の塑性度 ν_m に依存して求められる。

このようなモデル化法によれば、(15)方程式は、一次撓曲および一次押しつぶし褶曲の物理的発生条件を考える場合に好都合であることが明らかとなる。

2. 時間、空間断面における破碎帯分布の合法則性の研究

具体的な条件の下でモデル実験を行なえば、地殻上に一定変形が起るならば、造構破碎が空間上にどのように分布するか、また時間的にみて変形運動がどのように進行するかが明らかとなる。1 鉱床地帯で、一次断層で地層の頂部が切られているが、その翼部では上部に突き上げられた一次衝上運動で褶曲が形成されている脊斜褶曲の研究を行なった。まずそれぞれの破碎型の同時成長の可能性に関する問題を解くために、また1つには褶曲の成因を解明するために、応力の場を再現させた。類似の応力の場では、垂直応力が作用するために(第10図)、(横切)撓曲によつて発生する“持ち上り”現象が塑性モデル中で認められる。したがつて与えられた天然の脊斜の形成には、垂直力の作用と関連性がある。

あらゆる場合において、透明モデルで発生する応力の場は、断層および衝上げが一般的には



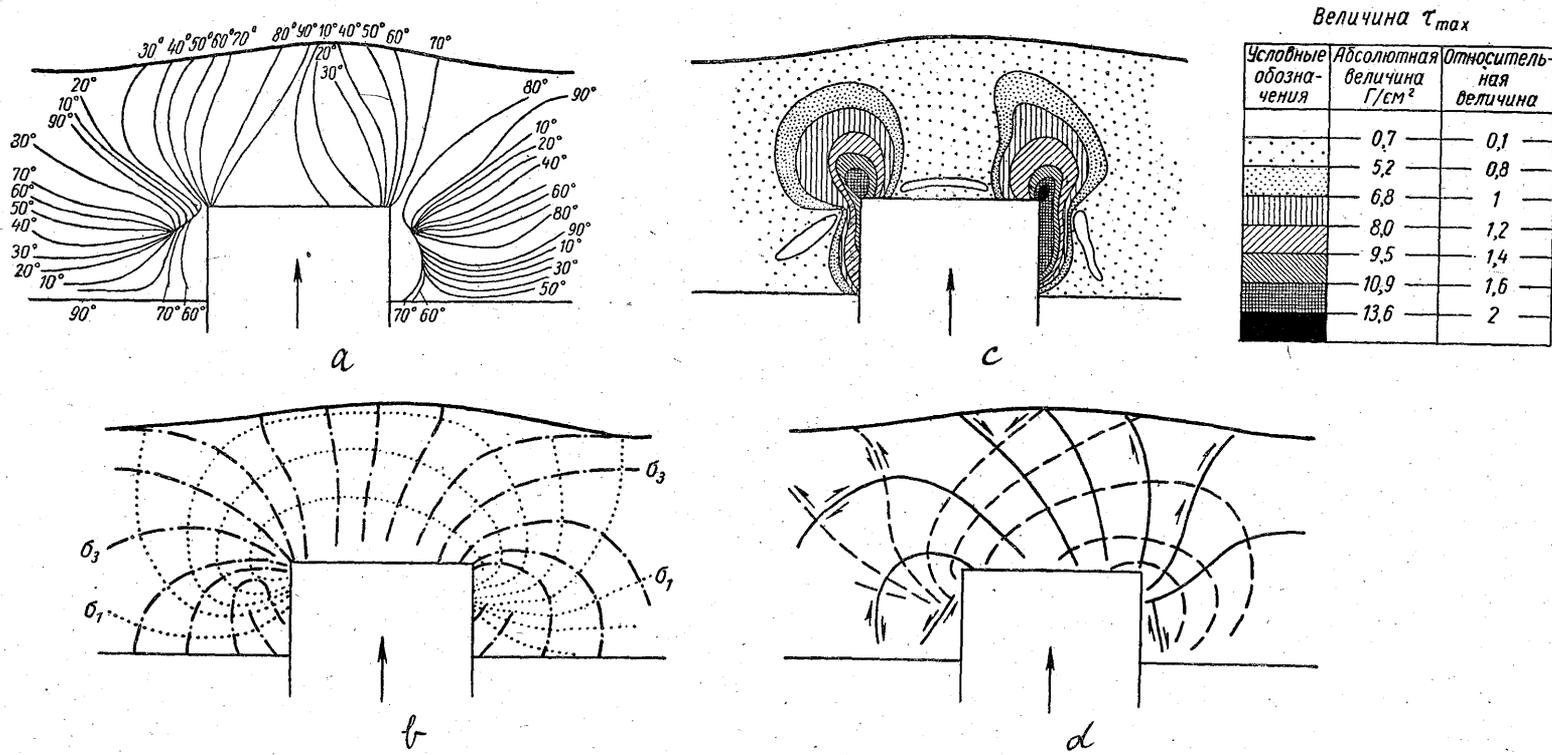
第9図 層群中におけるさまざまな褶曲の物理的発生条件

同時的に形成されるが、反対方向に成長することを裏付けている。すなわち断層は、地表面から下方に向かつて、衝上げは上方に向かつて成長する。この種の破碎運動の成長は、含水粘土の塑性モデルで観察されている。この種結論の実際的意味は明らかである。すなわち熱水鉱床・石油鉱床の探査の方向を決定するうえにおいて重要である。さらに地震の発生地帯を知るうえにおいても興味がある。地表面(地層の dome 部)上に現われ、深所にさがるにしたがつて消滅する小断層——小規模の応力によつて発生する——地帯は、一層大規模の衝上げ(逆断層)——深所の翼部に発達する——地帯よりも、地震に対して比較的安全である。しかし衝上げによつて形成される最も危険な破碎帯が、地表面上に現われていないことは、きわめて重要である。

含水粘土から作られた短軸脊斜モデルをみれば、上述の一次断層、衝上げが形成された後で一層晩期に横切(破碎)断層の出現することが明らかとなる。横切断層が発生するのは、一次擾乱現象が初期応力の場を変えるからである。たゞし“持ちあげ”軸の周辺には著しい引張応力が発生する可能性がある。野外の地質調査および中央アジアおよびカフカズの震源性質に関する地質データが示すように、隆起部の横切断層は、自然でしばしば出会い、主として一次擾乱後に発生する。したがつて横切断層は、鉱床生成後にしばしば出現するものようである。

3. 震源に関する仮設の発達

著者は1955年から地震の問題の検討にモデルを利用し始めた。地震と造構造破碎との結び付きは、こんにちでは十分に信頼がおける程度に確認されている。地層と時間——第一近似値で反映するものとして——との関連性から出発して、造構造破碎と地震とが地殻に、またはその下部で作用するさまざまな応力強度 τ_1 で発生することが考えられる。震源地の震動力は、震央の深所、その周辺の地殻の構造によつて異なるとともに、震源の総エネルギーの若干部分 ΔU_1 構成する地震波の動力学的エネルギー U_s にも左右される。X. Benioff, G.A. Gamburtsev, K.E. Bullen の考え方によれば、 ΔU_1 は、造構造破碎の発生によつて誘起される、条件付弾性形態の瞬時変化のようなポテンシャルエネルギーの弱化度に等しい。地震エネルギーは、地層の走向に沿つて発達する造構造破碎帯の延長、および応力の強度 τ_1 と対照できる可能性を示している。



第10図 脊斜撓曲の塑性変形モデルにおける応力の分布。素材はベンジアルアルコールに溶したエチルセルローズ溶液30%から作る。
 類似乗数 C_1 $10^{-6} \sim 10^{-5}$, C_t 10^{-13} , C_G $10^{-6} \sim 10^{-5}$, C_γ $10^{-19} \sim 10^{-18}$ 。 C_p は遵守しない。
 a isocline b 極大接線応力値 c 垂直応力の投影 d 極大接線応力の投影

$$U_s = \frac{\omega n \lambda}{2} \frac{\tau_i^2}{G_I} \cdot \beta \quad (21)$$

G_I —転位の条件付瞬時モデル; $\omega n \lambda$ —係数対応指標数; ω —全(般)エネルギー, 破碎帯(断層)の発生によつて遊離される ΔU_1 を構成するもの; n —遊離エネルギーのある部分にあたり, U_s に移行する; λ —震央の大きさと β との比例関係を示す。

τ_i 値は, (1) 方程式から, 地殻の(長期間にわたる)変形速度と対比されることが考えられる。そのほかにこの変形速度は, 地表面の造構運動の速度勾配 $\frac{dr_i}{dt} \approx \theta |\text{grad V}|$ に近似的に比例し, (21)式から次の近似方程式が導入できることを示している。

$$U_s \approx \varphi \frac{\eta_{III}^2}{G_I} \beta |\text{grad V}|^2 \quad (22)$$

$$\varphi = 2 \omega \theta^2 \lambda n \quad (23)$$

このようにして次の値と結び付いている地震波の総エネルギーが求められる。

(1) 造構断層型で決定される φ 係数, この値は, 破碎「断層」運動の発生がどのように初期応力場を変えらるか, どんな ΔU 部分が U_s を構成するか, 震源の大きさと β とはどのような相関関係を示すかによつて異なってくる。

(2) 粘性係数 η_{III} の二乗と条件付瞬時転位モデル G_I 。

(3) 発生した造構断層の延長 l の三乗。

(4) 地球表面に起る造構運動の速度勾配の二乗 $|\text{grad V}|$ 。

(5) 方程式が破碎(断層), 衝上げに第1近似で表わせるものとするならば, この式を用いて地震の発生時に関する問題を解くことができるはずである。この式は, 次のように変形されるであろう。

$$\delta s \approx \frac{\delta}{2 \frac{\varphi \eta_{III}^2}{G_I} \cdot |\text{grad V}|} \quad (24)$$

2.7

δs —一定の速度勾配 grad V をもつ造構運動の初期モーメントから, 断層, 地震の発生までの時間の長さを表わす。他の値は上述の項参照。

(21)~(24)方程式は, 地震の地質学的判断基準に関する理論的表象を, 一般化した仮説を表わしている。対応震源としては, 断層面ではなく, 岩石の容積(volume)が考えられ, そこでは古期断層の再生, または新しい断層の発生によつて応力の条件付変化が起る。

この種研究には塑性モデルが利用される。すなわちこの種モデル研究によれば, 地殻の変形部分の表面に起る運動速度勾配, 接線応力の強度, 地殻内部——震源地帯——の変形強度との相関関係が光弾性方法によつて研究できる。塑性モデルで求められる撓曲型は第10図に示されてある。 φ 係数は, 2~3.5に等しいものとみなして求められている。

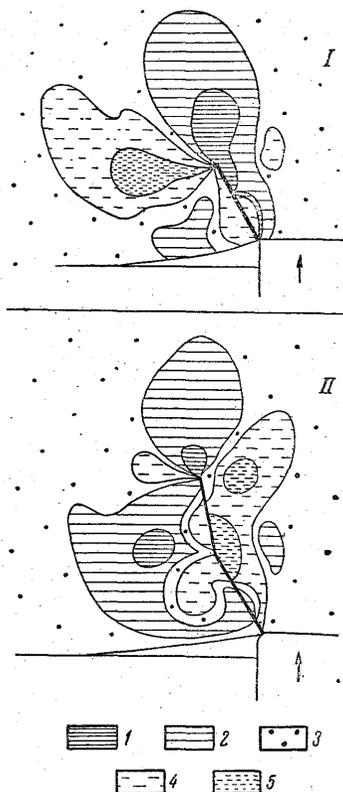
ゼラチンゲルから作られた弾性モデルでは, 断層形成時に短時間内に発生する応力の変化過程が研究される。この種モデルによれば, 造構変形型および断層(破碎)の大きさが震源の(容積)大きさと型とにどのような影響を及ぼすかが観察される。第10図および第11図に示された型のモデルの λ 係数は, 0.1 から 0.2 であるが, ω 係数は 0.01 から 0.3 である。

第11図では造構断層が発達するにしたがつて(時間の経過とともに)震源の性質が変わってくることを示されてある。現在この種データは, 天然の地質的客体の研究ではたゞ1つも求められていない。したがつてモデル実験によつて求められた近似的な知識でも, 地震研究および地質学的研究の諸成果に対して貴重な裏付けデータとなるとともに, 地震の判断基準の発達を促進するであろう。

結論として次のことがいえる。

1) 物理的相似理論と岩石の機械的性質に関する現在の知識によつて, 天然の地質客体に相似のモデルの性質がどのような性質であるかが確かめられる。このようにすれば, 地殻の造構変形と断層破碎のモデル化方法が基礎づけられる。

2) モデルの機械的性質の特性値——相似条件中にはいる——の測定が可能な器具が存在す



第 11 図

モデル素材 ゼラチンゲル
 相似乗数 $C_I=10^{-6}$; $C_E=10^{-9}$

1. 初期階梯 (小衝上げの形成)
2. 第 2 階梯 (断層の成長過程を示す)

横切れ曲性の地質斜構造と関連性をもつ震源モデル
 断層の個々の部分が発生後に応力 τ 極大変化が起る

- 1) 応力が強度に増大する (平均 1.7).
- 2) 低度に増大する (平均 1.3).
- 3) 応力変化が起らない箇所を示す。
- 4) 応力が低度に減少する (平均 0.8).
- 5) 強度に減少する (平均 0.6)

る。モデルに対して要請されている性質をもつある種素材は、すでに以前から知られている。以前から問題となっていた性質をもつ新しい素材も作られている。造構造変形および破碎 (断層) のモデル化は、実現しているといえよう。

3) モデル実験によつて、天然の地質客体では解明がきわめて困難な、ときには不可能に近い事実が確認され、合法則性が明らかにされている。この種の例としては、深所にまで及ぶ地殻の構造の細部研究、きわめて長期間にわたつて行なわれる変形、断層の発達履歴の追跡、地殻の応力状態の研究と一定の型の変形、断層型の物理的発生条件の決定があげられる。したがつてモデル化方法によれば、さまざまな地質学的、物理学的問題の解決が促進される。