

地質構造の光弾性モデル

1 地質構造のモデル実験

野外でみられる褶曲や断層が、どのような原因でどのような過程をたどって発達してきたかを明らかにすることは、もっとも古くて新しい地質学の課題の1つである。

多くの地質家たちは、地質構造の発達のしかたやその成因に関する自分の考えを説明するために、手近かなものを使ってモデル実験を試みた。地質学がまだ十分に発達しない頃には、紙や布やゴム板を押しまげてしわをつくり、地層の褶曲を“再現”してみせたりした。これらは、今日の目からみれば、モデル実験というよりは“たとえ話”といったものにすぎない。それでもその形の類似性から、褶曲のでき方に関するイメージを人々の頭の中に定着させるためには役立ったのである。

やや時代が進んでから(19世紀のおわり頃)は、モデルにつかう材料が“進歩”して、褶曲の実験には粘土・石こう・臘・油・グリースなどが用いられた。またそれらの材料を重ねあわせた多層モデルによって、モデル材料の物性がちがえば、褶曲のできかたもちがうことを説明した実験も行なわれた(第1図)。

今世紀に入ってから、地質家たちも、岩石の物理的な性質とモデル材料の性質の間に一定の関係が成立していなければ、モデル実験をやってもあまり意味がないことに気付いた。本体とモデルの間には「相似理論」によってきめられる。これは、流体力学の応用部門(たとえば造船部門)などで発達した理論であるが、地質学にこれを本格的に紹介したのは、K. HUBBERT(1937)であった。

地質構造は、巨大な空間(たとえば数10km)と、とほうもない時間(たとえば数10万年)の中で作られていく。これを実験室内で、何時間という時間の中で再現させようとするれば、モデルの大きさと実験時間の縮少率に応じて、モデルの物性を相似理論にもとづいてきめてやる必要がある。たとえば、100kmの長さの地殻が100万年かかって変形したり、破壊したりする状態を、長さ1mのモデルを用い1時間の実験であらわそうとすると、ごく大ざっぱに、モデルの弾性定数や破壊強度は岩石の10万分の1(10^{-5})、モデルの粘性は岩石の1,000兆分の1(10^{-15})前後の値となる。このようなモデルには、40~50%の水を含んだ粘土とか、わずかに水を含んだ

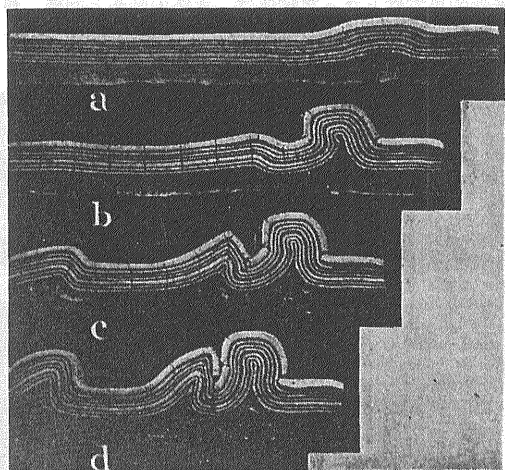
垣見 俊弘・小玉 喜三郎

ウドン粉などを使う必要がある

実際には、モデルの弾性的な性質、塑性的な性質、強度の性質、その他あらゆる物性が、すべて岩石の物性と「相似」であるような材料を得ることはきわめて困難である。ただし、実験の目的によっては、モデル物質がこれらのすべての相似性を満たす必要はない。たとえば、短時間に比較的強い応力が働いて地殻に断層が生ずる場合のモデル実験では、時間や粘性の相似性は無視しても大勢に影響はない。逆に、断層による変位がさして大きくない、褶曲だけのモデル実験では、弾性や強度の相似性は、それほど気にしなくてもよいであろう。

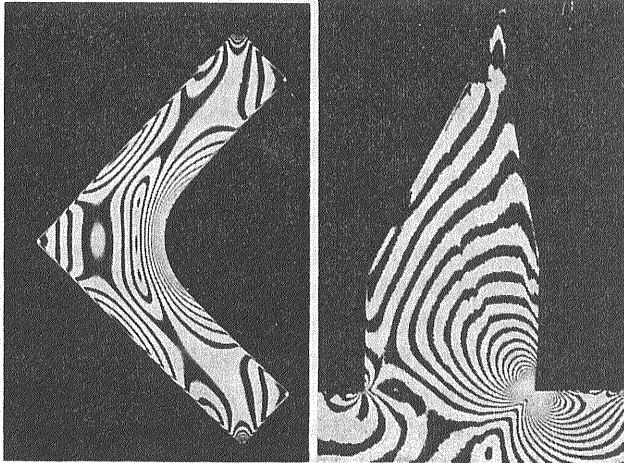
さて、これまで地質学で用いられてきたおもなモデル実験は、地質構造—褶曲や断層—の形を直接再現してみよう、あるいはできる過程を追求してみようとするものであった。これは、動的なモデル実験といえることができるであろう。これに対して、別な目的をもったモデル実験が考えられる。それは、地層や地殻の変形にともなう、ある瞬間に地殻の内部で力のつり合い—厳密には応力の分布状態—がどのようにになっているかを明らかにしようとするものである。これは、いわば静的なモデル実験である。

最近の構造地質学の進歩にともなう、地層や岩石の中での応力の配置状態が次第に明らかになってきた。断層や褶曲の規則性、もとの形のわかっている物体の変形(たとえば化石の変形)あるいは応力場のもので変



第1図：褶曲のモデル実験の一例(B. WILLIS, 1893 による) 上位の黒白の互層は臘と石膏をまぜたもので“かたい”層をあらわし、下位層は臘とテレピン油をまぜたもので“やわらかい”層をあらわしている。もとの長さは約65cm、右側から押したものである。

第5図 等色線写真



a L形板を上下から圧縮した場合 b ダムにかかる水圧による応力の等色線

をかぞえることによって、 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ の値を知ることができる (第5図)。

ただ単に 2枚の偏光板を直交しておいただけでは 等傾線と等色線とはいっしょにあらわれてしまう。単色光の場合には同じような明暗のしまになって見にくいので、補助的な偏光板の組み合わせで、等傾線と等色線が別々にみえるようにすることができる。このように工夫されているのが、一般の光弾性装置である (第6図)

等傾線から、主応力の方向および主剪断応力の方向 (主応力の方向を2等分する方向) が得られ、等色線からは、主応力差の値とその分布が求められる。このようにして、モデルの内部の応力分布状態を解析していくのが、光弾性実験のおもな目的である。この方法によると、どんな複雑な形の材料の内部にかかる応力の集中部も“一目”で見ることができると、材料の強度を吟味したり、構造物を設計する場合にはなはだ便利である。このため、光弾性実験は、主として機械、建築、土木などの工学方面で発展させられてきた。

今日では実験法そのものも進歩し、三次元応力の解析もどんどん行なわれるようになった。これは、立体的なモデルに荷重をかけたまま熱を加え、これを常温に戻してもなお内部に歪みが残っている状態にしておいたのち、これを薄片に切って、そこに残された応力分布を観察するもので、応力凍結法という。また、模型ではなく、実物に光弾性材料を直接はりつけ、実物に荷重をかけて、光弾性材料にあらわれるしま模様を反射によってとらえるという、実物光弾性実験

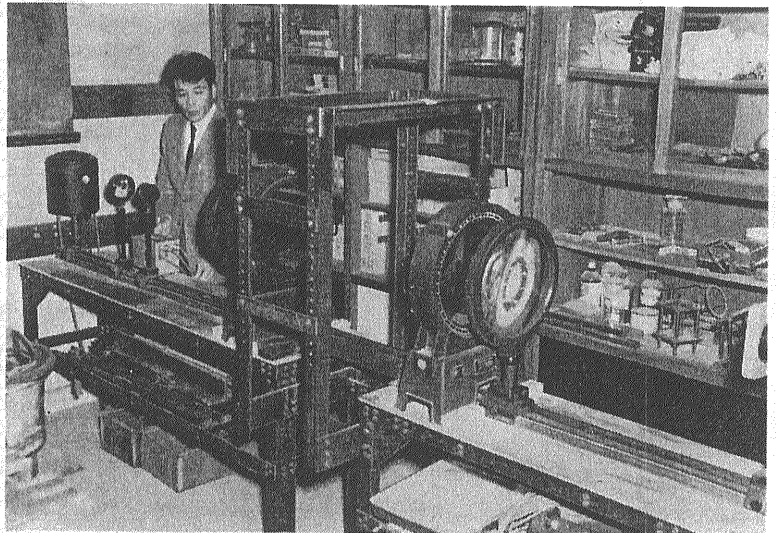
(皮膜法)も行なわれている。わが国では、光弾性実験はよく発達している。光学活性材料や実験装置も優秀なものが開発されている。

3 光弾性実験の地質学への応用

さきにもべたように、構造地質学の分野でも、かつて岩石にかかっていた応力が“化石”になって残っているものを利用し、少なくとも応力の方向だけは定性的にわかるケースが多くなってきた。地質構造の成因——どうしてできたのか——を明らかにするためには、まず地殻の中の応力の分布状態を定量的に知ることが、ぜひとも必要である。それには、光弾性モデルを用い、いろいろな外力をかけて、モデルの変形とその内部の応力状態を、天然の岩石と比べてみるのが、もつともよさそうである。しかし、ダムや坑道、トンネルなど小区域の岩盤にかかる応力分布ならばともかく、地質構造そのものを、光弾性材料で実験すると、事柄はそう簡単ではない。

第1には、とほうもなく巨大な空間と時間との中で発達してきた地質構造を、せいぜい数10cmの光弾性材料で再現させるためには、相似理論にもとづいて、材料物質の物性をきめてやらなければならない。

ごく一例をあげてみよう。深さ10kmの地殻の底には、岩石の自重によって $2 \sim 3 \times 10^9$ ダイン/cm² の荷重がかかっており、これによって、 $10^{11} \sim 10^{12}$ ダイン/cm² のオーダーの弾性率をもつ底部の岩石は、かなりのていど歪んでいるはずである。この自重による歪みの状態 (歪み量の包配) を10cmモデルで再現しようとするれば、モデルの弾性率は、大ざっぱにいったい、 $10^6 \sim 10^7$ ダイン/cm² の



第6図 大型光弾性装置 視野部 300mm (東京都立大学 光弾性研究室)

オーダーでなければならぬ。わかりやすくいえば地殻と同じようにモデルの材料も自分の重さで歪むような“やわらかい”物質をえらばなければならない。

第2には地質構造の場合には変形の割合が大きい現象をとり扱わねばならないことである。それどころか変形が弾性限界を越して塑性変形に移っている場合の方が多いわけである。ところが光弾性実験を発達させてきた工学方面では機械とか建築物のような“かたい”材料の応力分布をみることに主力が注がれてきている。たとえ自重で変形したり弾性限界をこえて永久歪をおこすようなモデル実験ができたとしても実物ではそんなことは許されなわけである。

したがって現在の光弾性学界では“かたい”歪のすくない材料にはきわめて優秀な光学活性体が作られているが“やわらかい”すなわち弾性率の小さな光学活性材料についてはあまり開発されていない。塑性をしめす材料にいたっては光学的な性質(光塑性)の解析のむずかしいせいもあってほとんど知られていないといつてよいであろう。

地質構造の研究のために光弾性実験をはじめ組織的に採り入れたのはソ連の地質学者であった。彼ら(M. V. GZOVSKYとその仲間たち)も前にのべた事情からモデル材料の開発には工学畑の経験をあまり導入するわけにもいかずずい分苦心したらしい。1950年代には彼ら地質家によって種々の岩石と相似の材料や材料の物性試験機の開発に関する論文が数多く出されている。彼らはとにかく自分たちの力で地質構造のモデルに適当な材料を開発した。弾性材料としてはおもに水やグリセリンにとかしたゼラチンゼリー、塑性材料としてはいろいろな溶材にとかしたエチルセ

ルローズの溶液が用いられているようである。それらの実験結果をみると物性の相似律を満たすために光学的な活性度や透明度はやや犠牲にならざるを得ないためか写真うつりもよくなくしま次敷もあまり高次のものは出ていない。また強度の相似性を完全に満足する材料はまだ得られていないようである。

しかし彼らはこのような材料を使って精力的にいろいろな地質構造のモデル化を試み地質構造の発達にもなつて地層や地殻の中に発生する応力の変化のありさまを次々と解析していった。今のところ地質構造の光弾性モデル実験についてはソ連は他の追随を許さないほどに進歩しているといえる。その一例を第7図に示しておこう(BELCOUSOV & GZOVSKY 1965)。

ソ連から技術を吸収した中国の地質家たちもほぼ同じような手法で野外の地質構造と光弾性モデルとの比較を行なっている(馬瑾ら 1965)(第8図参照)。

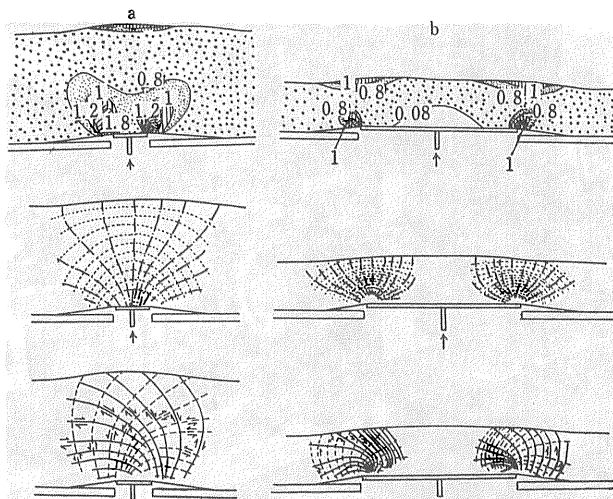
欧米の学界ではソ連や中国ほど光弾性による地質構造の応力解析を組織的にはやっていないようである。

むしろ教値計算によって理論的な応力分布を求めることが盛んになされている。しかしなかには理論を検証するために光弾性を利用したモデル実験を試みている報告も見られる(たとえばCURRIEほか 1962 第9図参照)

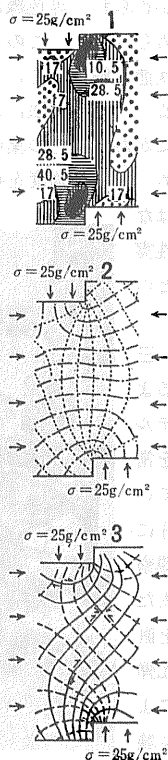
不透明な材料を使って地質構造のできる過程を追求めた前にのべた動的なモデル実験は欧米ソ連中国をとわずさかんに行なわれている。

ところがわが国ではこのような実験的な研究は最近では〔昭和のはじめ頃わが国でも一部の地質家や地球物理家によってモデル実験が盛に行なわれたことがあったが一般の地質学界にはあまりかえりみられなかったようにみえるのは残念なことである〕ほとんど行なわれていない。地質学的光弾性実験に至つては直接に岩盤を対象としたもの以外は未だかつて行なわれたことがないようである。このような現状は筆者たちにはいかにも淋しく思われる。

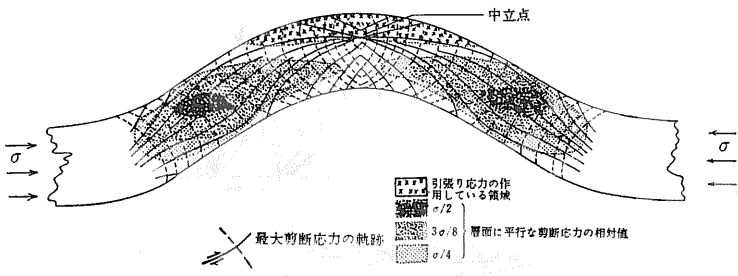
ごく最近 筆者たちは 小玉を



第7図 下からの押しによって生ずる応力分布 (Belossov および Gzovsky 1965 による)
 a: 地層が厚く隆起部のせまい場合
 b: 地層が薄く隆起部の幅が広い場合
 上段: 等色線による応力分布図 (数字は最大剪断応力の相対値(15g/cm²を1とした))
 中段: 主応力軸の軌跡
 下段: 最大剪断応力軸の軌跡 30%ゼラチンゼリーを使用



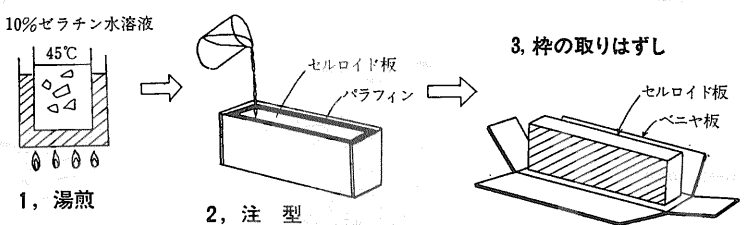
第8図 圧縮の場の中で剪断力が作用した場合の応力分布(馬ほか1965による)20%ゼラチンゼリーを使用
 1: 等色線から計算した応力分布図 数字は τ (g/cm²)をあらわす
 2: 主応力軸の軌跡
 3: 最大剪断応力軸の軌跡



←
第9図
光弾性法によって求めたゼラチン棒の撓曲によって生ずる応力分布 (Curries ら 1962による)

中心にある仮定された地質構造の中に期待される応力分布を光弾性モデルによって追求してみた。

まだ予備実験の段階であるがよい結果が得られ 将来の見通しもついたので 以下にそれを紹介しよう



↓第10図
ゼラチン・モデルの作り方

4 ゼラチンモデルによる光弾性実験の1例

現在わが国の地質学関係の大学や研究所で 光弾性装置をもって上のような研究を行なっているところはどこにもない現状である。〔わずかに秋田大学鉱山地質教室の香沢新 研究室で この準備がはじまったばかりである〕 さいわい筆者らは 東京都立大学土木工学科山本稔研究室のご厚意で 装置を借用させていただく事ができた。ここに紹介するのは そこで行なった簡単な実験の一例である。 まずもっとも基本的な構造の一つである横曲げ撓曲に伴う応力分布の状態を解析してみる。

これを長さの相似比が1:10⁵ (モデルの1cmが実際の1kmに相当する)の模型で再現させようとすると まえにのべたような相似関係を満足させるために 密度が約1g/cm³ ヤング率が500g/cm² というやわらかい物質が必要となる。 さらにこれは 無色透明で光弾性感度が高く 取り扱いが容易な材料でなければならない。

現在かなりやわらかい光弾性材料としては ポリウレタンラバーやエポキシラバーなど すぐれた材料が開発されてきたが それでも上の条件を満足するものでなく 結局現在のところ 山本博士が開発してきた10%のゼラチン水溶液が最も低弾性率の材料ということになった。

この材料は密度が約1.02g/cm³ ヤング率約500g/cm² 光弾性感度0.0469cm/g (YAMAMOTO, M. et al, 1967) 無色透明で 上の条件を満足する。 ただ水分が蒸発することにより表面の物理的性質が敏感に変化しやすく また30℃以上では熔融状態となるので夏期の使用が困難であるなど かなり使用上には技術を要するやっかいなしろものである。

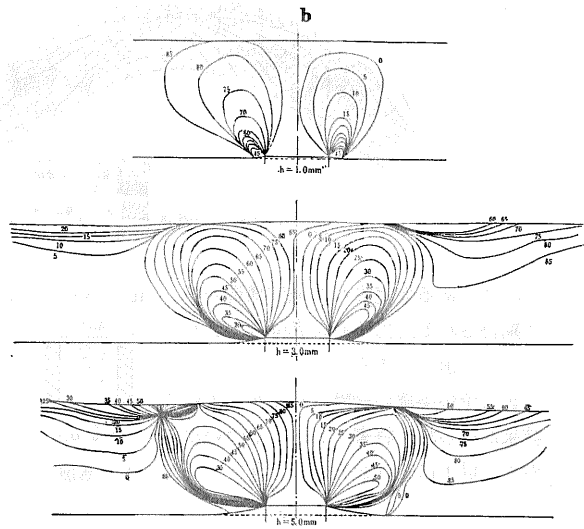
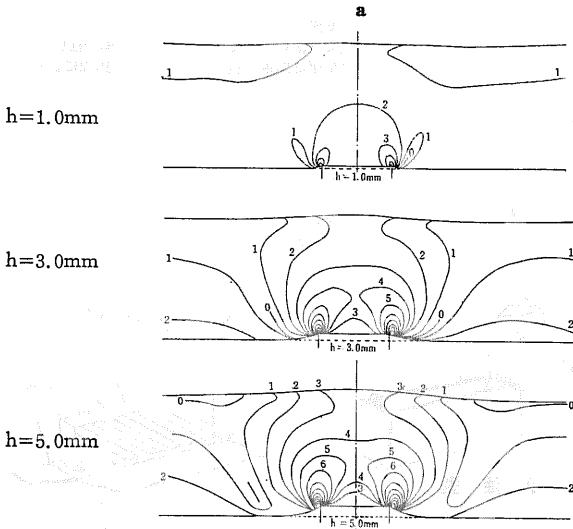
このゼラチンを使って 等色線用には高さ5cm よこ40cm たて10cm のサンプルを 等傾線用には高さ5cm よこ40cm たて3.5cm の直方体のサンプルを型枠で作る。

等傾線と等色線用でたての長さ(光軸方向の長さ)が違うのは 前者は光弾性感度の低い方が都合がよく 後者は高い方が都合がよいためである。 注型のときは 光の通過する前後の面と サンプル台にのる底面が完全な平面となるように セルロイド板やプラスチック板を用いて細かな工夫が必要であった(第10図)。

サンプル台はプラスチック製で まん中に たて10cm よこ3cmの平板が切っており それがネジを回すことによって水平のまま1cmまで上昇するようにできている(第11図参照)。 そして台とサンプルとの間には まさつをできるだけ少なくするよう スピンドルオイルなどをぬっておく。 さてこのような装置で 中央の平板を0から5.0mmまで上昇させて 1mmごとの応力状態をみてみよう(第12図)。 ここで用いたゼラチン材料は 透明度がソ連や中国のものよりもずっとすぐれているため たて方向の長さを十分とることができるから きわめて高感度のものを得ることができた。 写真のように色帯によらなくても 単光色のしま模様によって正確な応力解析を行なうことができた。

写真の1は水平な基盤の上に厚さ5km 水平距離30km以上の比較的やわらかい地層が水平にのっているときに重力の作用だけによって 地層中に生じる応力状態をあらわしている。 第1次のしま模様を上から1cmぐらいのところには水平にはしているのがみられる。 これに対応する等傾線写真は示していないが それは全面がほとんど一様な暗黒になって 主応力軸が水平と垂直の2方向に向いていることがわかる。

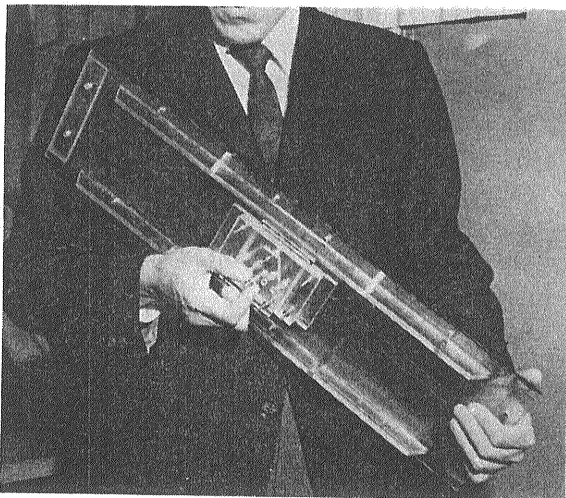
写真の2~6は それぞれ かい基盤がブロック状にわれ 100m 200m ……500mと比較的短時間の間に上昇したときに生じると想定される弾性的な応力分布のようすを示している。 この写真から 応力の集中して



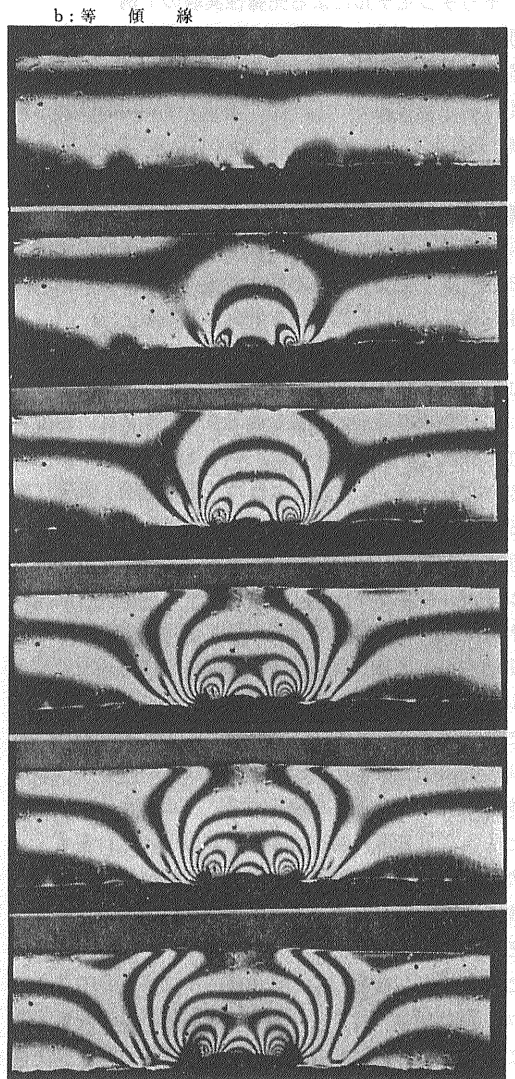
第13図 a: 等色線写真の各段階のものと同じ

いるのは 隆起部を底辺とする三角形の斜辺の部分でこの部分がまず破壊することがわかる。またこのような隆起によって地表部ではわん曲が生じ 水平伸長の働く部分と水平圧縮の働く部分のあることがわかる。

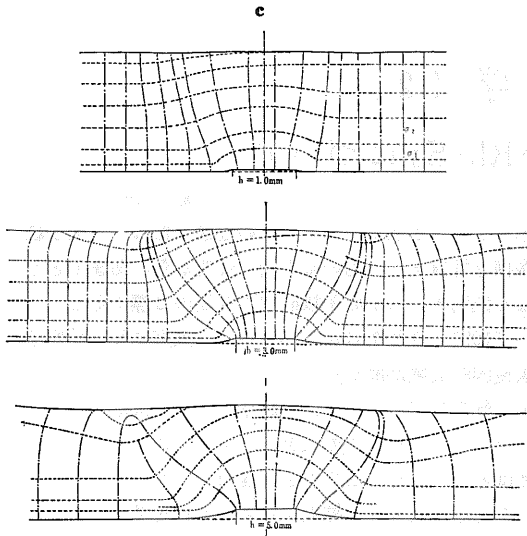
第13図にはこれらの各段階に対応する等傾線とそれから作成される主応力軸の軌跡 および主応力軸の軌跡と45°で斜交する最大せん断応力線の軌跡が描かれている。これを見れば どの部分でどのような断層が生じるのかを知ることができる。たとえば 隆起の中央の地表近くでは 水平方向の引張りが増大することによって共役な正断層が等しい傾斜角度で生じるであろう。中心より外側へそれた部分では やはり伸長の増大によって共役な正断層が生じるが、主応力軸がかたむいてゐるから、中心の方へ傾斜している正断層の傾斜角はゆるく、外側へ傾斜している正断層の傾斜角は急になる(場合によっては急傾斜の逆断層になる)ことがわかる。



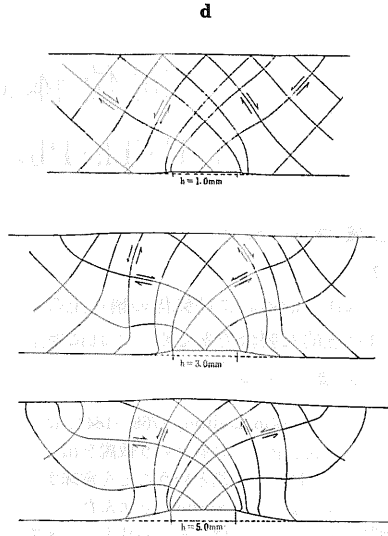
第11図 ブロックの隆起をあらわす「荷重台」 まんなかのネジをまわしてブロックを押し上げる (小玉喜三郎作成)



第12図 ゼラチンモデルの変形にともなう光弾性写真(等色線図) (小玉喜三郎撮影)



c: 主応力線 (点線・最大主応力 鎖線: 最小主応力)



d: 最大接線応力軸の軌跡

そしてさらにその外側では水平な圧縮力が働くので この部分では逆断層が生じるかも知れない。

もっともこのゼラチン材料は強度についての相似関係を満足していないので 実際の地層はこの途中の段階で断裂してしまい それによって応力分布はまた別の形になるであろう。このへんに スケールモデルが材料によって制約される一つの限界があるわけである。

5 あとがき

以上に紹介したように 光弾性実験によれば 複雑な変形をする物体の内部の応力状態が“一目”でわかってしまうわけで 使い方をくふうすればさらにいろいろな研究に応用できるであろう。たとえば 隆起する基盤の形をさまざまにかえてみたり 異なったヤング率の多層モデルを作ったり 実際に断裂を起こさせて それによって応力分布がどのように変化していくかを調べてみるのもおもしろい。さらにわれわれとしては塑性モデルや三次元モデル実験までもやってみたい。そのためには 新しい材料の開発なども われわれ地質家自身が進めていかねばならないのが現状であろう。それについても 一刻も早くこの種の装置が地質関係の大学や研究所に備えられることを希望するものである。

光弾性実験を含むスケールモデル実験は しかし 決して万能の手段ではない。さきにもべた材料の物性からくる制約や 境界条件の不充分さからくる制約のあることは認めねばならない。これらの制約を克服する工夫もなさねばなるまい。しかし一方では 材料や境界条件の制約なしにできる数値解析からのアプローチも重要な分野である。大型電子計算機の進歩しつつある現

代では「電子計算機実験」のできる日もそう遠くはないであろう。ただ その際にも計算のもととなるいろいろな条件を考える基礎として スケールモデルは依然有効であろうと思われる。

さいごに これらの実験にあたり 親切にご指導下さった都立大学の山本稔教授はじめ 同研究室の山崎良一助手や学生の方々にお礼申し上げる。また 光弾性実験の基礎技術をご指導下さった秋田大学鉱山学部鉱山地質教室の沓沢新助教授と 同探鉱学教室の荒川進教授にまた地質構造のモデル化について検討して下さいました地質部 平山次郎技官に厚く感謝申し上げます。

(筆者は地質部および東京教育大学)

おもな参考文献

- 光弾性実験法について
辻二郎 西田正孝 河田幸三 (1965): 光弾性実験法 534p., 日刊工業新聞社 東京
- 応力測定技術研究会 (編) (1955): 応力測定法 756p., 朝倉書店 東京
- 地質構造のモデル化と光弾性実験について
BELOUSSOV, V.V. and GZOVSKY, M. V. (1965): Experimental Tectonics. Physics and Chemistry of the Earth (AHRENS, L. H. et al editors), vol. 6. p. 409~498.
- CURRIE, J.B., PATNODE, H.W. and TRUMP, R.P. (1962): Development of Folds in Sedimentary Strata. Geol. Soc. America Bull. vol. 73, p. 655~674.
- HUBBERT, M. K. (1937): Theory of Scale Models as Applied to the Study of Geologic Structures. Geol. Soc. America Bull., vol. 48, p.1459-1520
- 平山次郎 (1966): 造構的応力場の解析法とそのモデル化について 地質雑 vol 72, p. 91~104
- 馬理 鐘嘉猷 (1965): 或種の構造変形体の光弾性模擬実験研究 構造地質問題 (中国科学院地質研究所 編) p. 31~46. (中国語)