花コウ岩大型ビームの長期たわみを見いだす 実験方法と最初の7年間の実験結果*

熊谷直一** 伊藤英文***

Method to Find Secular Bending of Big Granite Beams and Results Obtained for the First Seven Years

by

Naoiti KUMAGAI

(Faculty of Literature (Natural Science), Otani University, Kyoto)

and Hidebumi Itô

(Faculty of Home Economics (Natural Science), Kyoto Women's University, Kyoto)

Hard rocks on the earth's surface are frequently observed at places as severely deformed and folded without fractures. How much would rocks flow under how large external forces through how long period of time of their application? The present experiments have been intended to answer this question. As for the rocks of the test-piece materials, granite was employed that forms the upper layer of the crust under the continents. Two large test-pieces of granite from one block were shaped into straight beams of 215 cm length with rectangular cross-sections of 12.3 cm width and 6.8 cm thickness. These two test-pieces are separately mounted freely on end supports of blunt knife-edges at a distance of 210 cm, which are made of granite quite similar to the materials of the test-pieces.

One of the two test-pieces called the unloaded beam bends under its own weight and the other called the center-loaded beam does under its own weight plus an extra center-load of 22.06 kg. The maximum bending stress produced in the unloaded beam is 12.8 kg/cm² and that in the center-loaded 24.8 kg/cm². The experiments started on August 7, 1957. Since then, the experiments have been continued and until today (end of Feb., 1965) a time of seven and a half years has elapsed. Our experiments are the experiments that shall be carried on without end.

For finding vertical displacements of 11 measuring points at the upper surface of each of the test-pieces on end supports that would continue its secular bending, a dial gauge of 0.01 mm/div is used to measure vertical coordinates of them which slides along a straight steel beam (SSB) of 103 cm length which is horizontally placed in the middle portion of the upper surface of the test-piece with SSB's three legs at fixed points. When the measurements are not performed, SSB is removed from the test-piece. Prior to the commencement of these measurements, the test-piece was mounted horizontally on two supports specially positioned as shown in Fig. 4 to produce no appreciable elastic bendings and the initial values of the vertical coordinates of the measuring points were found.

Influences upon the measurements of those vertical coordinates that should be produced from the circumstance that SSB might not be set constantly in each of the continuing experiments are obtained to get corrections, and also the corrections due to additional displacements of the measuring points by mounting SSB are likewise determined from a measurement by a level of a small inclination of the test-piece produced at its end by the mounting of SSB. This measurement of the small inclination of the test-piece enabled us to calculate instantaneous Young's modulus under a small stress of the test piece at the time of each experiment carried out on it.

The results obtained for the first 7 years since the beginning of the experiments are as follows :

(1) Since about 50 days after the beginning of the experiments, the upper surface of both test-pieces show very minute folds. They display gradual growth for the first 3 to 4 years since the beginning of the experiments and hereafter remain almost stationary until today. For both test-pieces the forms of the folds are unsymmetrical with respect to the central point P_0 , the wavelengths

* 本報を「花コウ岩大矩形棒の長期たわみの実験的研究 (第1報)」とする
原稿受理 昭和40年3月2日

** 正会員 大谷大学文学部(自然科学) 京都市北区小山上総町
*** " 京都女子大学家政学部(自然科学) 京都市東山区東山七条

being much larger than the spacing of 10 cm of the measuring points and the average amplitudes of the folds being in the order of 0.01 mm. These folds may be seen as laboratory midget-models of synclorium. The center-loaded beam shows stronger folds than the unloaded does.

(2) Both test-pieces display very strange phenomena of sags that oscillate with time with periods differing from one year—temperature of the laboratory is kept constant within the range of $\pm 2^\circ\text{C}$ but humidity is not done so and does annual changes. Analyses of these oscillating sags will be published in the next paper.

(3) Both test-pieces also show such instantaneous Young's modulii that irregularly change with time apparently not parallel with the change of sags with time. (Received Mar. 2, 1965)

1 序 言

大地を作る岩石が現在示している流動による大きな変形量は、数百万年ないし数千万年もの長年月の間にでき上がったものであって、人間一生の長さを測るところの1年というような短時間内の変動量は非常にわずかであつたろうと考えられる。それならばいい、どのくらいの大きさの力が、どのくらいの時間作用すれば、どのくらいの流動を起こすであろうか。この質問に答えるには、岩石試料を実験してみるに越したことはない。この実験を思いついたのは、著者のひとり、熊谷直一が京大物理学科を卒業後、地質学に転向し、1924年、奥山田の野外調査に参加した際、固い岩が始めのようにたわみ変形している超実験室的な事実を初めて見て強い印象を受けたことが動機であつた。それ以来、この実験をなんとかしてやってみたいと思つてゐた。さて、この実験を出発させたからには、普通の実験とは異なり、終着駅というものはないのであつて、最小限人間一生をかけてみる覚悟を要することがまず最初に考えられた。1952年以来、著者達はこの実験のための慎重な準備を進め、約5年後の1957年8月7日に実験を出発させたのである。

この実験の試料岩石としては、大陸の表層部を構成していると考えられている花コウ岩を選び、Table I に示されている寸法の巨大な眞直はり状の試片2本が作られた。これらを間隔210cmの、試料と同類花コウ岩の鈍い刃稜の上に水平に載せ、一方は自重だけで、他方は中央に22.06kgの荷重をつるしてたわませることとした。今後、試片のうち前者を unloaded beam、後者を center-loaded beam と呼ぶことにする。両試片は1957年8月7日午後2時に刃稜の上にかけられ、center-loaded beam に対する上記の荷重は翌8日午後2時20分につるされた。実験は今日(1965年2月末日現在)すでに満7年半を経過した。本論文では、実験方法と最初の7年間の測定結果を報告するものである。なお、実験結果に対する解析等は次の論文において発表する予定である。

2 試片について

2・1 試料

試料として用いた花コウ岩は、広島県赤坂産、黒雲

母花コウ岩である。

二つの試片は同一花コウ岩塊中の相接した部分から切り出された。ゆえに、両試片とも物理的性質および岩石学的性質はほぼ同一とみなすことができる。

Table I に二つの試片の寸法(長さ・幅・厚み)、重さ、密度を示す。幅と厚みは10cm 間隔にとられた21個の試片断面におけるそれらの値の平均値であり、重さは大気中での測定値で、密度はその重さから計算されたものである。

Table I. Size, weight, and density of each test-piece.

	Unloaded beam	Center-loaded beam
Size { Length (cm)	214.9	214.9
Width (cm)	12.275 $\pm$ 0.006 (m.e.)	12.250 $\pm$ 0.007 (m.e.)
Thickness (cm)	6.755 $\pm$ 0.010 (m.e.)	6.815 $\pm$ 0.010 (m.e.)
Weight (kg)	42.42 $\pm$ 0.01 (m.e.)	46.80 $\pm$ 0.01 (m.e.)
Density (gm/cm ³)	2.605 $\pm$ 0.004 (m.e.)	2.609 $\pm$ 0.004 (m.e.)

試片は1955年10月に作られ、実験を始めた1957年8月の前月まで約21箇月間水平に横たえたまま放置された。このように長期間放置したから、その間に試片中に加工の際に生じたであろうひずみはほとんど消失したものと想像する。

2・2 外部条件の変化が試片に及ぼす影響

われわれの実験室は京都大学理学部地質学鉱物学教室の地下地震計室である。

地震計をすえつけるために作られた台が二つあいているので、この台の上に試片と同じ花コウ岩で作られた支持台をすえつけ、この台の上端が鈍い刃稜になっている。この刃稜の上に unloaded beam と center-loaded beam のおのおのがかけられている(Fig. 1)。それゆえに、本実験は近くの地表面および床面から来るショックの影響をほとんど受けないと仮定されよう。支持台の刃稜の頂部の半径は試片の重みによってつぶれないよう鈍く作られてある。center-loaded beam に対する重りは花コウ岩塊で作られ、付属物を含めた重さは22.06kgである。

室温は23~25°C程度の恒温に保たれているが、実験

1. Center-loaded beam, 2. Unloaded beam, 3. Center-load, 4, 4'. Blunt knife-edges of granite, 5. Straight steel beam (SSB), 6. Dial-gauge, 7. Level, 8. Vacant stands formerly prepared for installation of seismographs

Fig. 1. Test-pieces under experiments.

を出発させた最初の1年間は自然に放置された。この間、夏は最高25℃、冬は最低8℃の漸移的な年変化を記録した。恒湿に保つのは経済的に困難なので、湿度は自然の年変化を許した。ただし、実験室外の湿度の日変化は、実験室が外部としゃ断されているので、問題にはならない。

2・3 実験出発当初の圧縮・引張りの両ヤング率について

実験を開始すると同時に、試片の断面には上部に圧縮応力が下部に引張応力が現われる。今後行なうべき試片の力学性の解析のためには、実験を出発させる前に、試片の圧縮ヤング率と引張ヤング率が等しいかいないかを確かめておく必要がある。

電気抵抗線ひずみ計を試片の表面に張付ける。まず試片を水平の台の上で、その幅を垂直に立てて、たわんでない状態におく。次の瞬間、試片を両端で自由に支持して自重でたわませる。たわんでない状態を作る操作とたわんだ状態を作る操作とを繰り返して行なう。ひずみ計が張付けられている面が上(下)表面になるようにこの操作を行なえば、ひずみ計のすぐ下の面に生ずる圧縮(引張り)ひずみを測ることができる。

上述の方法に基づいて、現在の center-loaded beam を試片として、1957年7月15日(本実験出発の23日前)にテストを行なった。ひずみ計は試片の長さ×幅の両面(Table I)の中央部に裏表相対して1個ずつ張付けられた。記述を明確にするために、ひずみ計が張付けられた一方の小面積をA、他方をBと名づける。テストから次の結果が得られた。

Aに対して、

圧縮ひずみ	44.9×10^{-6} $\pm 1.0(\text{m.e.})$	引張ひずみ	43.8×10^{-6} $\pm 0.6(\text{m.e.})$
-------	---	-------	---

Bに対して、

圧縮ひずみ	46.7×10^{-6} $\pm 0.2(\text{m.e.})$	引張ひずみ	48.6×10^{-6} $\pm 0.8(\text{m.e.})$
-------	---	-------	---

AとBとで測られたひずみにかなりの差があるが、これは次のことに起因していると思われる。第一に、厳密にたわんでない状態を作ることとは大変困難なことであって、Aの測定のとときBの測定のとときで、その状態は必ずしも同一でない。第二に、AとBに張られた両ひずみ計の物理定数は必ずしも規格どおりと同じでない。

このようにして、このテストにおいて、圧縮ひずみと引張ひずみの間、したがって、圧縮ヤング率と引張ヤング率の間には考慮すべき差はないと思うと結論した。この実験から、試片の圧縮ヤング率と引張ヤング率とは実験出発後のある時期以後は等しくなるかもしれないが、少なくとも実験出発当初は両ヤング率は等しかったと仮定してよいと思う。

このテスト(自重の場合)における最大曲げ応力は計算してみると 12.7 kg/cm^2 の低応力である。われわれの本実験も次の2・4で述べるように低い応力下で遂行されるのである。

なお、上記のひずみの4測定値からヤング率の逆数を計算すれば次の値を得る。

$$37.4 \pm 0.5 \text{ (m.e.)} \quad 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{dyne.}$$

低応力に対する圧縮ヤング率と引張ヤング率とが等しくなるのは、砂岩(大阪府淡路輪産¹⁾)においても成立していることを、平松良雄と岡行俊の論文から知ることができる。

2・4 試片内の応力

試片が充分に大きいので、試片の力学性を論ずるのに、試片を構成している個々の鉱物粒の影響を無視して、試片は均質であるとみなすことにする。なお、試片は長さに対して充分細い支持はりとして取り扱うことができるものと仮定する。

当然のことながら、試片に対する最大の圧縮・引張りの応力はスパンの中央断面上、上表面・下表面のすぐ内側において生ずる。その値は、両ヤング率が等しいならば、

unloaded beam に対して	12.8 kg/cm^2
center-loaded beam に対して	24.8 kg/cm^2

である。われわれは同試料の破壊試験を行なっていないので、これらの応力を破壊強度と比較することはできないが、他の花コウ岩に対する測定例から、上記の最大応力は破壊強度よりかなり低いと想像される。たとえば、平松良雄、岡行俊、西原正夫は愛知県額田郡真福寺村産の花コウ岩に対して、圧縮強度 1160 kg/cm^2 (標準偏差66)、引張強度 77.5 kg/cm^2 (標準偏差9.3)、曲げ強度 167 kg/cm^2 (標準偏差11.7) を得ている。

次に、最大せん断応力は試片の両支点の上にある中立面に沿って作用し、その値は大変小さく、unloaded

Fig. 2. Sketch of the measuring instrument mounted on the test-piece.

beam に対して 0.41 kg/cm^2 , center-loaded beam に対して 0.61 kg/cm^2 である。

3 測定方法

3・1 ダイヤルゲージによる鉛直変位の測定

試片のたわみ変形を測定する主な器具のスケッチが Fig. 2 に示されている。すなわち、1/100mm 目盛りのダイヤルゲージが三つの脚を持った長さ 103cm の鋼の真直はり (Straight steel beam—以下 SSB と称す) の上をすべるようになっていて、測定を行なうとき、SSB は試片の上表面にほぼ水平にセットされるのであるが、常に同位置にセットされるように SSB の三つの脚の位置 (L_1 , L_2 , L_3) が試片の上表面に小さな円の印で示されてある。このようにセットされた SSB に沿って、ダイヤルゲージをすべらせ、その目盛りを読むと、試片の上表面のプロフィールを見いだすことができる。そのために、11個の測点 P_i ($i = -5, -4, \dots, 0, \dots, 4, 5$) が上表面に 10cm 間隔で記されていて、 P_0 は測点の中央点である (Fig. 2 および 3)。これらの測点を含む小面積は平滑にみがかれている。はりの横断面は曲げ応力により微小ではあるが、長方形から扇形へ変化する。この変化による上表面の変位ができるだけ避けられるように、測点を上表面の縦中心線から 26 mm 離れた線上に配列した (Fig. 2)。center-loaded beam の P_0 は理論的取り扱いの上では、ちょうど、

4 and 8 are the same as those in Fig. 1.

Fig. 3. Position of the 11 measuring points.

中心荷重のかかる位置であるが、荷重をささえる鉄板 (Fig. 1) の中央にみぞが切ってあって、試片の上表面の P_0 の座標が直接測定できるようふうしてある。

実験を出発させる前に、たわんでない状態における測点 P_i の鉛直座標を決定しておかねばならない。このために、Fig. 4 に示されるように、試片を木製の2個の刃稜で水平にささえ、上表面に SSB をセットした。図中の w は試片の単位長さあたりの重さ、 V (=

Fig. 4. Arrangements to measure the initial values of vertical coordinates of the 11 measuring points.

1.865 kg) は SSB の重さの 1/2, l_2 は SSB の脚間距離 (Fig. 2 の L_1 と L_2 の距離), l_0 は試片の長さである。なお、11個の測点はすべて上記の2個の木製刃稜の間に位置している。この場合、2・3で求めたヤング率を用いて、この刃稜間の SSB を載せた試片の弾性変形を計算してみるも、ほとんど測定可能な値とならないことが明らかになった。ゆえに、刃稜間で試片はたわんでないとみなして測定された P_i の鉛直座標を P_i の初期値とした。

以後、座標の記述は次のようにする。(1) 測点 P_0 上に座標の原点をおく。(2) 測点 P_i の水平座標を x_i ($= 10 i \text{ cm}$) で表す。(3) 鉛直座標軸は上向きにとる。したがって、11個の測点の鉛直座標の時間的変化を見

いざせば、 P_{-5} または P_5 を不動とみた場合の他測点の鉛直変位をうることになる。

P_5 の初期値を $\phi(x_i)$ で表わす。 $\phi(x_i)$ は3日間繰り返し測定を行なって決定された。この決定方法は次の4で述べ、Table IIに決定した結果を示す。

Table II. Initial values of vertical coordinates, $\phi(x_i)$, of the measuring points.

x_i (cm)	$\phi(x_i)$ (cm)	
	Unloaded beam	Center-loaded beam
50	-57.0×10^{-3}	11.4×10^{-3}
40	-20.4	0.7
30	13.2	-9.3
20	-15.3	43.5
10	0.0	20.3
0	0.0	0.0
-10	-12.6	26.3
-20	19.8	23.4
-30	-16.9	40.4
-40	-30.5	48.5
-50	-47.5	79.3
Mean error	± 0.5	± 0.3

実験を出発させた後のある時点における測点の鉛直座標を $\Psi(x_i)$ とする。ただし、 $\phi(0)=0$ および $\Psi(0)=0$ 。したがって、その時点における11個の測点の鉛直変位は

$$\Psi(x_i) - \phi(x_i)$$

で与えられる。

3.2 SSBの重量による付加的鉛直変位に対する補正

ところで、SSBの重さ(ダイヤルゲージとも)は3.73 kgである。 $\Psi(x_i)$ の測定のためにSSBを試片の上表面にセットするとき、その重さによって引き起こされる試片の付加的弾性変形の量は小さいけれども、測点の鉛直変位 $\Psi(x_i) - \phi(x_i)$ と比較して無視できないことを前もって知ることができた。

この付加的弾性変形は花コウ岩刃稜の上部における試片の付加的傾き α を測ることによって計算される。 x_i における付加的弾性変形を $\Delta\Psi(x_i)$ で表わせば、これは α に比例し、unloaded beamとcenter-loaded beamの両試片に対して、断面の寸法には無関係な式で与えられる(Table III)。なお、 α は試片の端、刃稜上部にセットされた水準器によって、測定された(Fig. 1)。ただし、 $\alpha > 0$ とする。

したがって、SSBをセットする直前における試片の変形による測点の鉛直変位を $D(x_i)$ とすれば、上記の補正值 $\Delta\Psi(x_i)$ を考慮に入れて、 $D(x_i)$ は次式で与えら

Table III. Additional displacements $\Delta\Psi(x_i)$ due to the mounting of SSB (α is corresponding inclination of the test-piece at its end).

$ x_i $ (cm)	$\Delta\Psi(x_i)$ (cm)
50	17.7α
40	11.4α
30	6.4α
20	2.9α
10	0.7α
0	0.0

れる。

$$D(x_i) = [\Psi(x_i) - \phi(x_i)] - \Delta\Psi(x_i) \quad (1)$$

したがって、水平座標を x_i 、鉛直座標を $D(x_i)$ とする11個の点をグラフ上にプロットすれば、試片の上表面が実験出発後時間とともにどのように変形したかを知ることができる。このグラフから、試片のたわみ曲線を求める方法は後の5において述べる。

3.3 瞬間ヤング率の測定

α を測定すると、さらに、その時期のヤング率を次式で示すように計算することができる。このヤング率を瞬間ヤング率と呼び E_{inst} で表わす。ここで名づけた瞬間ヤング率とは、荷重または自重の下で経年的たわみを行なっている応力状態にあるところの試片に、ある時点において短時間、付加的小荷重を加えて現われる微傾斜角を測定して見いだされたヤング率であって、試片から分離された小片に対して求められたヤング率ではないのである。

unloaded beam に対して

$$E_{\text{inst}} = 28.4 \times 10^6 / \alpha \quad \text{dyne/cm}^2$$

center-loaded beam に対して

$$E_{\text{inst}} = 27.7 \times 10^6 / \alpha \quad \text{dyne/cm}^2$$

(2)

3.4 水準器の精度

水準器の検査は1960年12月5日から翌年1月12日までの期間に一定温度に保たれたわれわれの実験室で、レベルトライヤーを使用して行ない、次の実験式を得た。

$$\beta = (0.71 + 3.08d) \times 10^{-5} \quad \text{radian} \\ \pm 0.27 \quad \pm 0.16 \\ (\text{m.e.}) \quad (\text{m.e.}) \\ \text{for } 1.0\text{div.} < d < 2.2\text{div.} \quad (3)$$

ただし、 β はレベルトライヤーによって見いだされた水準器の傾き(Radian)であり、 d はそれに対応する水泡の移動目盛りである。(3)式が $1.0\text{div.} < d < 2.2\text{div.}$ の範囲で定められたのは、 α の測定における水泡の移動量がその範囲にあるからである。

この検査によって、傾き β の測定値はかなりの誤差をもっていることがわかった。それは目盛り d を読む誤差のほか、傾きが小さいため水泡が摩擦のために

正確な位置に移動しないことにも原因するようと思われる。(3)式の決定には β , d の測定が88回も行なわれた。 d の1回の測定値の平均自乗誤差は, レベルトライヤーによる検査により $\pm 10\%$ である。SSBのセットによって引き起こされる付加的傾斜角 α の1回の測定値の平均自乗誤差は, (3)式と誤差伝播の公式により $\pm 12\%$ となる。このような誤差をもつ α の測定値を用いて, Table IIIによって, 補正值 $\Delta f(x_i)$ を計算してみると小さな値であることがわかる。(たとえば Table IVに示されてある)。しかしながら, 瞬間ヤング率を(2)式によって求めるときの精度はかなり悪い。

3・5 SSBの重量の実験に及ぼす影響

SSBの重さのために試片の内部に引き起こされる付加的なせん断力と曲げモーメントは, 実験の当初から中心荷重および自重により試片内部に発生しているところのそれらと比べて, 大変小さいことを容易に計算することができる。また, SSBをセットしている時間は1回の測定あたり30分以内である。ゆえに, 本実験はSSBのセットによって, ほとんど乱されないと考えてよいであろう。

3・6 なぜこのような測定方法を選んだか

実験を出発す前に, いろいろな測定方法を考えたが, 長期間に起こるかもしれないところの実験に妨害となる種々の外部条件を考慮し, それに測定方法が耐えうるかどうかを慎重に検討した。その結果, われわれが採用した測定方法では, 実験室の床の上にはなんらの基準も取らず, 試片それ自身に基準をおいた。すなわち, 測点 P_i の鉛直変移 $D(x_i)$ を中心点 P_0 に対する相対的変位であるとして見いだしたのである。したがって, 長期間の実験中に, 床面の周期的または経年的傾動があっても, 基準を床面にとっていないから, その影響を受けることはないのである。なお, 測定をしないときは, SSBと水準器はともに同一実験室内の専用の箱の中に納めておいた。

欲をいえば, 試片の全長にわたって変位の測定ができるほど長いSSBを採用したかったのであるが, SSBが重くなることが好ましくないため断念せざるをえなかった。

今日, 約7年間の測定の経験から, 新たに実験を始める場合の測定方法については新しい意見を持っていることを付記しておく。

4 測点の鉛直座標の初期値 $\phi(x_i)$ の決定

SSBが常に同一場所にセットされるように, 試片の上表面にSSBの脚の位置を示す三つのマーク(L_1 , L_2 , L_3)が記してあることを3・1において述べたが, 測定ごとに, ほんとうに正確に同一場所にSSBをセットすることは不可能である。不正確なセットは, (1) SSBがその長さの方向に傾く場合と, (2) SSBが試片

の幅の方向へずれる場合の二つの成分から成るものである。初期値 $\phi(x_i)$ の測定に起きる, 後者に起因する誤差は度外視しても, 前者に起因する誤差は, SSBの長さが100cmであることを考えれば無視できない大きさになると予想される。

いま, SSBの1回のセットから各測点の初期値 $\phi(x_i)$ の1個の測定値を得るとする。SSBを M 回セットして $\phi(x_i)$ の M 個の測定値を得たとき, その最確値をどう決めたらよいだろうか。

Fig. 5. Schematic diagram showing in accurate setting of SSB.

Fig. 5において, x 軸は正確にセットされたSSBに平行であるとし, x'_m 軸は m 回めに不正確にセットされたSSBに平行であるとする。 θ_m は x 軸と x'_m 軸とのなす角, δ_m は座標 (x, y) の原点と座標 (x'_m, y'_m) の原点との距離であるとする。もちろん, θ_m と δ_m はともに非常に小さな量であると仮定してよい。 $\phi'_m(x_i)$ を m 回めのセットで見いだされた P_i の鉛直座標の測定値とし,

$$\phi'_m(0) = 0$$

とする。 $\phi_m(x_i)$ は x 軸と P_i の距離であるとするれば,

$$\phi_m(x_i) = \phi'_m(x_i) - \theta_m x_i - \delta_m$$

$$(i = -5, -4, \dots, 0, \dots, 5; m = 1, 2, \dots, M)$$

である。

$$v_{im} = \phi_m(x_i) - \phi(x_i)$$

$$= \phi'_m(x_i) - \phi(x_i) - \theta_m x_i - \delta_m$$

とおけば, $\phi(x_i)$ の最確値は最小自乗法の条件

$$\sum_{i,m} v_{im}^2 = \text{minimum}$$

より求まる。観測式の数 $11M$, 未知数の数は $\phi(x_i)$ が11, θ_m および δ_m がそれぞれ M で計 $2M+11$ である。 $11M > 2M+11$ であるためには $M \geq 2$ とすればよい。このようにして, 次の結果を得る。

$$\phi(x_i) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \phi'_m(x_i) \quad (i = -5, \dots, 0, \dots, 5) \quad (4)$$

ここに, $\phi(0) = 0$ (4')

(4)式で求められる $\phi(x_i)$ の平均自乗誤差を求めてみると, i に無関係な次式となる。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i,m} v_{im}^2}{M(11M - (2M+11))}} \quad (5)$$

Table IIに示された $\phi(x_i)$ と ε の値は, unloaded beamに対しては(5)式に $M=7$, center-loaded beamに対しては $M=6$ として求められたものである。

5 試片のたわみ曲線の測定

5.1 測定方法

3.2の末尾において11個の点($x_i, D(x_i)$)をグラフ上にプロットすれば、試片の上表面が、実験出発後、時間的にどのように変形したかを知ることができることを述べたが、ここでは、そのグラフからたわみ曲線を求めよう。

一般には、たわみ曲線は原点を中立軸の中点に、 x 軸を水平軸に、 y 軸を鉛直軸にとって記述されている。中立軸上の点の鉛直変位は直接測られないから、上表面の測点 P_i の鉛直変位 $D(x_i)$ をもって、中立軸上の点($x_i, 0$)の鉛直変位とみなす。

そうすれば、実験に供した花コウ岩試片のたわみ曲線は、unloaded beam に対しては、

$$y = \frac{1}{E} \frac{1000wg}{24I} \left(\frac{3}{2} l^2 x^2 - x^4 \right) \quad (6)$$

center-loaded beam に対しては、

$$y = \frac{1}{E} \left\{ \frac{1000wg}{24I} \left(\frac{3}{2} l^2 x^2 - x^4 \right) + \frac{1000Wg}{48I} (6lx^2 - 4|x|^3) \right\} \quad (7)$$

で与えられる。ここに、 E dyne/cm² はヤング率、 I cm⁴ は断面の主軸に関する断面二次モーメント、 w kg/cm は試片の単位長さの重さ、 W kg は center-loaded beam の中央につるされた荷重の重さ、 g cm/sec² は重力の加速度、 l cm はスパンの長さを表す。 E は圧縮ヤング率と引張ヤング率とが等しければその値であり、もし両者が不等であれば、両者を組み合わせたところのヤング率と同じジメンションの量である。

もし、試片の変形曲線が時間とともに変化するならば、unloaded beam に対しては

$$y = T(t) \frac{1000wg}{24I} \left(\frac{3}{2} l^2 x^2 - x^4 \right) \quad (6')$$

center-loaded beam に対しては

$$y = T(t) \left\{ \frac{1000wg}{24I} \left(\frac{3}{2} l^2 x^2 - x^4 \right) + \frac{1000Wg}{48I} (6lx^2 - 4|x|^3) \right\} \quad (7')$$

と仮定する。ここに、 t は実験出発時から計った時間で、 $T(t)$ は(6)、(7)両式右辺の $1/E$ と同じジメンションをもつ未知関数である。ゆえに、 $T(0) = 1/E$ である。

簡単化のために、両試片のたわみ曲線を

$$y = T(t) X(x) \quad (8)$$

で代表するならば、 $X(x)$ は(6')、(7')両式の右辺の t に無関係な因子であって、 x の既知関数である。

ここでふたたび、実験出発後のある時点における測点の鉛直座標 $\Psi(x_i)$ を測定するときに、SSB をセットするが、この場合 4 (Fig. 5) でなしたと同様に、SSB が正しくセットされないための誤差の影響を考慮しな

ければならない。Fig. 5 でなしたと類似の考察を行な

$$\eta_i = D(x_i) - \theta x_i - \delta$$

とおく。(8)と比較して、

$$\begin{aligned} v_i &= \eta_i - y_i = D(x_i) - T(t) X(x_i) - \theta x_i - \delta \\ &= D(x_i) - f(x_i) \end{aligned}$$

ただし、

$$f(x) = T(t) X(x) + \theta x + \delta \quad (9)$$

であり、 $f(x_i)$ は $D(x_i)$ に最もよく近似する実験式である。 $f(x)$ 中に含まれる三つの未知数、すなわち、 $T(t)$ 、 θ 、 δ は最小自乗法の条件 $\sum v_i^2 = \text{minimum}$ によって決定される。したがって、 $T(t)$ が求まれば、(6')式と(7')式によって、測定時ごとのたわみ曲線が求まるのである。

(6')および(7')の右辺の時間因子 $T(t)$ は、たわみの時間的変化の模様を示すものである。刃稜の位置に当る中立軸上の点 $x=l/2$ における y の値を $S(t)$ とすれば、 $S(t)$ を $T(t)$ の代わりに採用してもよい。ただし、 $S(t)$ は $x=l/2$ の点に対する中立軸中点の相対的鉛直変位とみることができる。 $S(t)$ は次の式で与えられる。

unloaded beam に対しては

$$S(t) = 1.70 \times 10^{10} T(t)$$

center-loaded beam に対しては

$$S(t) = 2.96 \times 10^{10} T(t)$$

(10)

5.2 Center-loaded beam 試片のたわみ曲線の測定例

5.2.1 実験出発当初の測定例 まず、1957年8月8日午後3:30~3:55の測定例を Table IV に示す。試片は前日7日の午後2時にはじめて両端を刃稜に載せ、同日午後2時20分に中央に22.06kgの荷重がはじめてかけられた(Fig. 1)。この例は荷重後第1回めの測定である。

Table IV で x_i は試片の上表面にしるされた11個の測点 P_i の水平座標である。 $\Psi(x_i)$ は測点の鉛直座標で、

Fig. 6. Representations of $D(x)$, $f(x)$, and v of Table IV (The first measurements made after more than one hour since the beginning of the center loading).

Table IV. Example of measurements for the center-loaded beam.

The test-piece was placed on the two granite knife-edges at p.m. 2:00, August 7, 1957 and the load was first applied at the center at p.m. 2:20 of the next day.

Epoch of measurement : p.m. 3:30~3:55, August 8, 1957 ($t=1\text{h } 10\text{m} \sim 1\text{h } 35\text{m}$)

Room temperature : 25.5°C

Additional inclination of the test-piece at its end caused by the mounting of SSB : $\alpha=6.1 \times 10^{-5}$ radians ($d=1.75\text{div}$)

$D(x_i) = \psi(x_i) - \phi(x_i) - \Delta\psi(x_i)$

Horizontal coordinates	Measurements			Vertical displacements	Smoothed vertical displacements	Residual $D(x_i) - f(x_i)$
	Vertical coordinates	Initial vertical coordinates	Additional displacement due to SSB mounting			
x_i (cm)	$\psi(x_i)$ (cm)	$\phi(x_i)$ (cm)	$\Delta\psi(x_i)$ (cm)	$D(x_i)$ (cm)	$f(x_i)$ (cm)	v_i (cm)
50	40.1×10^{-3}	11.4×10^{-3}	1.1×10^{-3}	27.6×10^{-3}	28.57×10^{-3}	-0.97×10^{-3}
40	21.0	0.7	0.7	19.6	19.20	0.40
30	4.0	-9.3	0.4	12.9	11.63	1.27
20	49.8	43.5	0.2	6.1	6.04	0.06
10	23.0	20.3	0.0	2.7	2.62	0.08
0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.51	-1.51
-10	30.6	26.3	0.0	4.3	2.80	1.50
-20	28.6	23.4	0.2	5.0	6.38	-1.38
-30	52.9	40.4	0.4	12.1	12.15	-0.05
-40	69.7	48.5	0.7	20.5	19.90	0.60
-50	109.8	79.3	1.1	29.4	29.45	-0.05

$$f(x) = 34.09 \times 10^{-13} x^2(x) - 0.087 \times 10^{-4} x + 1.51 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$\varepsilon = \pm 1.08 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$\left. \begin{aligned} T(t) &= 34.09 \times 10^{-13} \pm 1.14 \times 10^{-13} (\text{m.e.}) \text{ cm}^2/\text{dyne} \\ S(t) &= 1.010 \pm 0.034 (\text{m.e.}) \text{ mm} \end{aligned} \right\} \text{ for } t=1\text{h } 10\text{m} \sim 1\text{h } 35\text{m}$$

ダイヤルゲージによって測定された値である。 $\phi(x_i)$ は測点の初期(たわむ前)の鉛直座標で、Table IIに与えられている。 $\Delta\psi(x_i)$ はSSBの重さのために生ずる付加的な弾性変形量で、水準器の助けによって計算された(Table III)。 $D(x_i) = \psi(x_i) - \phi(x_i) - \Delta\psi(x_i)$ は試片の上表面の P_i 点における測定時までのたわみ量である(1式)。なお、Fig. 6(a)に示された11個の点は、この第1回めの測定で見いだされた $(x_i, D(x_i))$ のプロットである。Table IVの下段に示された $f(x)$ はこれらの11個の点に最もよく近似する実験式(9)で、Fig. 6(a)の平滑な曲線は関数 $f(x)$ を示している。 $v_i = D(x_i) - f(x_i)$ である。

v_i を残差とみて、 $\varepsilon^2 = \sum v_i^2 / (11-3)$ で求められた ε の値はTable IVの下段に示されてある。これは測定値 $D(x_i)$ の平均自乗誤差(単一測定)とみなしうる。なお、Table IVの下段に示された $T(t)$ および $S(t)$ の値に付記された誤差(m.e.)は最確値の平均自乗誤差である。これらの平均自乗誤差を後のために $\varepsilon_T, \varepsilon_S$ なる記号で表わしておく。

これらの $T(t)$ および $S(t)$ の値は実験初期の弾性変形に基づくものである。したがって、 $T(t) = 34.09 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{dyne}$ なる値は、実験初期のヤング率の逆数である。これを実験開始前に、電気抵抗線ひずみ計で求められた $37.4 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{dyne}$ と比較すると9%ほ

ど小さい。

5・2・2 実験出発1年後の測定例 もう一つ、1958年8月5日標題の測定例をFig. 7に示す。この測定例では、 $\varepsilon = \pm 2.52 \times 10^{-3} \text{ cm}$, $T(t) = 40.59 \times 10^{-13} \pm 2.66 \times 10^{-13} (\text{m.e.}) \text{ cm}^2/\text{dyne}$, $S(t) = 1.140 \pm 0.079 \text{ mm}$ 。ここでは、 $t=362$ 日である。

以上2例の ε の値を比較すると、後例の ε は前例の ε の約2.2倍である。これはFig. 6(b)とFig. 7(b)を比較しても定性的には了解しうる。これは重要な事からであって、後節で全測定105個の実験結果を述べるときに詳しく解説する。

Fig. 7. Similar results obtained after one year since hanging the center-load.

5.3 Unloaded beam の測定

unloaded beam に対する上述のような測定例は、
その取り扱いが center-loaded beam のそれと同様で、

あるので，ここには示さない．ただし，たわみ曲線を表わす式は(6')である．

両試片とも同一器械で測定されるから、測定値

Fig. 8. Graphical representations of the results obtained for the period of about 2 580 days since the beginning of the experiments.

$D(x_i)$ の平均自乗誤差 ε は, 両試片に対してほぼ同じ値をもつはずであるが, 実際には, 後述するように **unloaded beam** の ε は平均して **center-loaded beam** の ε より小さい. $T(t)$ と $S(t)$ の平均自乗誤差 ε_T と ε_S は ε から求められる. もしも, 両試片に対して ε が等しいならば, **unloaded beam** の ε_T と ε_S は理論的に **center-loaded beam** のそれらの, それぞれ, 1.84倍と1.04倍になる.

6 実験結果

最初の7年間, 約2580日間の測定から得られた結果はFig. 8に示されてある. 図中に, たわみの変化の様子は $T(t)$ または $S(t)$ で, 測定誤差の変化の様子は ε_T および ε で, 瞬間ヤング率の変化の様子は $1/E_{inst}$ で表わしてある. なお, Fig. 8の下段には実験室の温度と湿度の変化の様子と有感地震の記録が付記されている.

室温は初めの1年間は自然の変化に放置されたが, 実験開始後約1年3箇月後に恒温設備を入れ, $\pm 1^\circ\text{C}$ ~ $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲で定温に保たれるようになった. 湿度は自然に放置しているため年変化をする. その測定は3年めの1960年9月から行なわれた. 有感地震の記録は京都地方気象台で得たものである.

温度・湿度の変化と地震とはわれわれの実験になんらかの影響をもたらしているに違いないが, Fig. 8に示された $T(t)$, $S(t)$, $1/E_{inst}$, ε および ε_T の変化の模様の中に, 温度・湿度の変化および地震と相関する相を見いだしがたいので, 一応, これらの影響を無視して考察を進めることにする.

6・1 測定誤差 ε は系統誤差である

Fig. 8の鉛直変位 $D(x_i)$ の平均自乗誤差 $\varepsilon (= \sum \sigma_i^2 / (11-3))$ のグラフはわれわれに次の消息を与える.

(1) **center-loaded beam** の ε は実験出発後50日間ぐらいはほぼ一定で, 0.014mm であるが, 50日を過ぎた頃から急に0.03mmに増大する. その後 ε は0.02と0.03の間を変動するが, だいたいの傾向は, 約50日から3年ないし4年ぐらまでは0.02から0.03へと増大し, それ以後7年までは一定値0.03になっている.

(2) 一方, **unloaded beam** の ε は最初ほぼ0.014mm で出発し, 50日ぐらいから急に増大する傾向があるが, **center-loaded beam** の場合ほど明りょうでない. ε の変化の全体的傾向は実験出発後3年ないし4年ぐらまでは増大し, その後はほぼ一定値0.023mm になっている.

(3) 両試片の ε は実験出発当時, ほぼ等しい値を示していたが, 時とともに **center-loaded beam** の ε は **unloaded beam** の ε より大きくなる. 両試片とも同一器械で測定されるにもかかわらず, このように異なった測定誤差を示すのはなぜだろうか, その理由を次

Fig. 9. Examples showing v - x curves suggesting the folds growing on the upper surfaces of the test-pieces.

に述べる。

(4) さて、11個の測点全体に対して考えた測定誤差 ε の代わりに、個々の v_k の測点による相違を見るために、Fig. 6 (b)やFig. 7 (b)のように点 (x_k, v_k) をプロットしたグラフを全測定について作った。各時期におけるこのグラフを比較してみると、次のようなことに気づくのである。これらのグラフを全部示すことを紙面が許さないで、1957年と1963年の両年に見いだされたものをFig. 9に示した。

(a) 点 (x_k, v_k) を曲線で結んでみると、これらの v - x 曲線群の形は数個の山と谷をもつ波形であって、互いによく似た形をしている。これは特定点 x_k に起こる残差 v_k は大部分は系統誤差であることを意味する。

(b) ε の値は近似的には v - x 曲線の平均振幅である。この平均振幅が時とともに増加する傾向があることは、 ε が同様の傾向をもつということを6・1・(1)と6・1・(2)ですでに述べたことから、明らかである。この平均振幅を両試片で比較してみると、平均して center-loaded beam のほうが unloaded beam よりも大きいことが、Fig. 8 の ε のグラフからうかがわれる。この理由は後の6・2・(4)で述べてある。

(5) 6・1・(4)・(a)で、 ε は主として系統誤差であると結論したが、われわれはダイヤルゲージをSSB上にすべらせて試片の上表面の様子を調べるのであるから、系統誤差を生ずる原因が測定器SSB自身の変形にある場合と、試片の上表面の変形にある場合との二つの場合が考えられる。まず、心配されることはSSBの材質に時効ひずみを生じたり、ダイヤルゲージをすべらすためにSSBが摩耗したりして、しだいに測定器SSBが初期の状態からはずんできたかもしれないということである。しかしながら、もしそうであったとしても、6・1・(3)の疑問に答えられないであろう。事実、仕上げられた平面として旋盤のすべり面を選び、SSBをその平面と比較した結果、SSBはひずんでないことが確かめられた。ゆえに、系統誤差は試片の上表面の変形に起因すると考えなければならない。

6・2 試片の上表面に表われた微しゅう曲

試片の上表面側は圧縮応力を受けているから、上表面がしゅう曲することは可能である。Fig. 9の相似した曲線群は上表面のしゅう曲の成立を表わしているのではないだろうか。いいかえれば、しゅう曲という手続きで上表面の収縮が行なわれているのであろう。このしゅう曲は中心点 P_0 に対し左右対称でなく、一方の側では波長は約45cm、他の側では約25cmで、いずれも測点間隔より大である。しゅう曲の平均振幅は、近似的には ε の値で与えられるとすれば、0.01mmのオーダーである(6・1・(1)および6・1・(2)参照)。さらに、測点下の結晶粒が周囲の結晶粒に対して相対的にずり

上ったり、ずり下ったりする現象も起こるであろうが、これはしゅう曲に付随して生ずるものと考えられる。

地質現象に、大きな向斜・背斜に小しゅう曲が重なっている構造をさして呼ぶ複向斜(Synclinatorium)・複背斜(Anticlinorium)というものがある。われわれは試片上表面にほんとうに微しゅう曲を発見したのであるならば、これは地質現象の複向斜を実験室的規模で実現したことになる。また、地質現象における複向斜(また複背斜も同様に)の小しゅう曲部は向斜(背斜)とほとんど同時期にできうるものであろうということも結論されうる。

したがって、測定誤差の中の系統誤差の原因は、試片の上表面のしゅう曲であると考えられよう。そうすれば、次のように合理的な解釈をすることができる。

(1) 実験出発から約50日間ぐらい、両試片ともほぼ等しい誤差(平均 ± 0.014 mm)を示すのは、偶然誤差が主で系統誤差が小さかった。すなわち、しゅう曲はまだ顕著に現われてなかったためであろう。それで、 ± 0.014 mmを ε の全測定に含まれる偶然誤差と仮定しよう。

(2) 50日を過ぎて3年ないし4年ぐらまで、 ε が増大するのは(Fig. 8)系統誤差が増大するため、すなわち、しゅう曲が時間とともに生長するためであろう。

(3) その後7年めまで、 ε がほぼ一定値を示すのは、しゅう曲の生長が止まったためであろう。

(4) center-loaded beam の ε が unloaded beam の ε より大きいのは、前者の系統誤差が後者のそれより大きいため、すなわち、前者に生じたしゅう曲が後者のそれよりよく発達しているためであろう。

6・3 上表面の微しゅう曲とたわみ曲線

われわれは試片の上表面のたわみが中立軸のたわみに等しいと仮定して(6')と(7')のたわみ曲線の式を導き出したのであるが、前述のように上表面にしゅう曲が生ずるとすれば、この仮定は多少修正されなければならないだろう。しかし、どのような修正を加えればよいかということは今後の問題として残しておきたい。ここでは、修正は微小であるとみなして、ここの論議を進めよう。

たわみを代表する $T(t)$ (または $S(t)$) の測定値をグラフ上にプロットすると、かなりばらつく(Fig. 8)。これらの測定値に対する誤差の割合として、6・2・(1)より、center-loaded beam に対して約4%を、unloaded beam に対して約7%を推定することができる(5・3参照)。このことを考慮したとき、 $T(t)$ はだいたい図に記入した破線の曲線に沿って変化しているようである。その変化は湿度の年変化に支配されない。

6・4 $T(t)$ に見いだされた特異性

さて、われわれの試片が Maxwell-liquid である

ならば、 $T(t)$ は時間とともに直線状に増大するし、Kelvin-bodyであるならば、 $T(t)$ は時間とともに指数関数的に増大し、ついには一定値に収束するはずである。今日の Rheology で定義されているいかなるモデルであっても、 $T(t)$ は減少することはない。それにもかかわらず、Fig. 8 で示された $T(t)$ は明らかに周期的な増減を示しており、これはこの実験が見いだした驚くべき特異性^{*1}であり、従来報告されたことが少

ない事からであると思う。 $T(t)$ の変化の解析については、後日、別の論文で詳しく報告する予定である。

なお、実験出発当時の $T(t)$ の値を、Fig. 8 では明らかに表現できないので、Table V に示しておく。Fig. 8 の unloaded beam の $T(t)$ には8月7日の二つの測定の平均値と8月8日の二つの測定の前平均値とが記されている。Fig. 8 の center-loaded beam の $T(t)$ には荷重前の測定は記されていない。

Table V. Values of $T(t)$ in the beginning of the experiment just after its start.

	Date of measurement(1957)	$T(t)$ (cm ² /dyne)	ϵ_T (cm ² /dyne)	
Unloaded beam on end supports	p.m. 2h 30m~2h 45m, Aug. 7	36.1×10^{-13}	3.5×10^{-13}	
	p.m. 3h 45m~4h 05m, Aug. 7	37.4	3.3	
	p.m. 0h 00m~0h 20m, Aug. 8	35.6	2.3	
	p.m. 3h 10m~3h 30m, Aug. 8	39.3	1.7	
	p.m. 5h 00m~5h 20m, Aug. 9	36.6	2.6	
Center-loaded beam on end supports	p.m. 2h 45m~3h 00m, Aug. 7	34.0	2.6	Before hanging the center-load
	p.m. 4h 05m~4h 30m, Aug. 7	36.9	2.5	
	p.m. 0h 25m~0h 45m, Aug. 8	36.0	0.9	
	p.m. 3h 35m~3h 55m, Aug. 8	34.1	1.1	After hanging the center-load
	p.m. 5h 10m~5h 25m, Aug. 8	35.7	1.5	
	p.m. 4h 25m~5h 00m, Aug. 9	37.1	1.6	

6・5 瞬間ヤング率の時間的変化について

瞬間ヤング率 E_{inst} は(2)式によって計算された。その値の逆数 $1/E_{inst}$ が Fig. 8 にプロットされているが、点はかなりばらついている。1回のSSBのセットによって測定された $1/E_{inst}$ の測定値の3・4で述べた平均自乗誤差の±12%を考慮して、 $1/E_{inst}$ の変化をスムーズした曲線を作ってみると、平均して、 $1/E_{inst}$ は $T(t)$ のほぼ半分 に等しいことがわかる。すなわち、 $E_{inst} \div 2/T(t)$ という興味ある結論がでてくる。

$1/E_{inst} \frac{cm^2}{dyne}$	付加的 小荷重kg	付加的 最大曲 げ応力kg/cm ²	測定日 1961年
unloaded beam に対して			
$(17.8 \pm 0.2(m.e.)) \times 10^{-13}$	2.0	1.1	1月19日
$(16.7 \pm 0.1(m.e.)) \times 10^{-13}$	3.0	1.7	1月23日
center-loaded beam に対して			
$(19.1 \pm 1.2(m.e.)) \times 10^{-13}$	2.0	1.1	1月19日
$(21.2 \pm 0.2(m.e.)) \times 10^{-13}$	2.0	1.1	1月23日

これらの値はFig. 8の $1/E_{inst}$ の同時期の値とだいたい等しくなっている。

$1/E_{inst}$ の変化をスムーズした曲線は、室温が、一定に保たれなかった最初の1年3箇月の期間を除いても、なお、ゆるやかな不規則の時間的変化を示してい

$1/E_{inst}$ したがって、 E_{inst} は時間とともに不規則に変化する。

E_{inst} はSSBの重さによって生ずる付加的弾性変形から求められたものであり、その際の付加的最大曲げ応力は1.4kg/cm²である。ところで、別に同様に小さい付加的曲げ応力を生ずるように、試片の中央に付加的小荷重をかけて瞬間ヤング率を測る実験を1961年1月に行なって次のような結果を得た。

付加的 最大曲 げ応力kg/cm ²	測定日 1961年
1.1	1月19日
1.7	1月23日
1.1	1月19日
1.1	1月23日

る。これは一定の荷重を受けている試片の瞬間ヤング率が同様な変化をしていることを意味するものとするならば、応力状態にある地殻岩石のヤング率が時間的に変化するのではないかという地震学上重要な疑問を提供することになる重要な結論である。これは特別な実験装置を作って改めて実験を行なうべきテーマである。

なお、本論文を書き終えるにあたり、電気抵抗線ひずみ計による本実験開始前のヤング率測定に協力を得

*1 この特異性、特に、たわみが時間的に減少するということが、試片の上表面に微小な曲が起ることという二つの新事実は、本実験の最初の3年間に見つけたので、昭和35年10月の地震学会秋季大会および昭和36年4月の日本地質学会総会で、これらを発表して注意を喚起しておいた。

た京大理学部高木秀夫教授、レバルトライヤーを貸与された同学部清水彊教授、ならびに、SSBの検査のために便宜を計っていただいた京大工学部平松良雄教授と藤中雄三助教授に対し深く感謝の辞を呈す。また、本研究に対し重要な批判をしていただいた名大理学部飯田汲事教授およびその研究室の方々、また、本研究に深い関心を寄せられ、本論文完了にあたり、種々助言を与えられた京大名誉教授榎山次郎博士に厚く感謝するものである。

著者のひとり、熊谷直一は1961年1月に京都大学を停年退官し、その後、当実験は京大理学部地質学鉱物

学教室地質学第一講座の地下実験室で継続されておるのであるが、種々お世話になっている同講座担任の初田甚一郎教授にこの機会に特に謝辞を呈したい。

最後に、本研究の実験設備の整備には文部省科学研究費が使用されたので、同様深く感謝する次第である。

(昭和35年10月29日地震学会秋季大会講演会にて講演)
(昭和36年4月6日日本地質学会総会)

参 考 文 献

- 1) 平松良雄, 岡行俊, 鉱業会誌, **78**, 803 (1962).
- 2) 平松良雄, 岡行俊, 西原正夫, 水曜会誌, **13**, 321 (1957).