

基盤のブロック状変形に伴う断層形成の数値実験* その1

—基盤ブロックの大きさが地表変形に及ぼす効果について—

小玉 喜三郎** 本多 進*** 藤田 仁*** 新田 潔*** 鈴木 耐元**

**Numerical Analysis of Faulting in the Course
of Block Deformation—(1) Effect of width of the basement
block on faulting near the earth's surface—**

Kisaburo KODAMA, Susumu HONDA, Kiyoshi NITTA,
Hitoshi FUJITA and Yasumoto SUZUKI

Abstract

The elasto-plastic deformation of surficial layer on the basement block is analysed by the finite element method. Von Mises's criterion is applied to decide the yielding condition. Three models, in which $2B/D$ is 0.8, 2.0 and 4.0 where B and D show a half width of the basement block and thickness of the layer respectively, are planned.

Three types of plastic regions of V, N and R are appeared in the course of deformation. V plastic region is developed around the corner of the block at first. Judging from stress patterns, vertical and horizontal faults can be formed in the region. N and R plastic regions are developed at the shoulder and elbow of the upper surface respectively in the next stage of deformation. Normal and reverse faults can be formed at either part respectively. In the course of deformation, strain inhomogeneity increases remarkably in the model system.

V and R plastic regions are apt to occur in the model of wide basement, and N plastic region is more easily developed in case of narrow basement block. These differences are compared with the natural fault patterns found in the south Kanto district, central Japan.

1. はじめに

地殻中の造構応力場の解析はこれまでいろいろな地域で行われ、断層発達と地殻変形の機構が研究されてきた。とくに同一地域において、造構応力場の異なる断層系が時代とともに発達する例が明らかにされ、構造運動の発展に応じて断層が形成される機構が研究されてきた(垣見, 1974; 衣笠ほか, 1969; KODAMA, 1975など)。

上のような造構応力場は、しばしばその方向や大きさが飛躍的に変遷することが多い。その原因を、地殻に作用する水平外力の急変化に求め、基盤変形のタイプが大

きく変わったことによるとする考えと、基盤はもともとブロック化した昇降運動をするが、その形状や、新しい断層の発生自体によって、地表での造構応力場が急変してあらわれるとする考えがある。

いずれにしても、地表付近の応力場が基盤の形状や運動に直接規制されているわけで、このような構造は、新潟地域や関東地域の油田・ガス田の新第三系の構造にみられる基本的な形式である(鈴木ほか, 1974; 小玉ほか, 1974)。

この一連の論文で、筆者らは上で述べた2つの基盤運動の仮定のうち、とくに後者のモデルについて検討する。本論文では、平坦な基盤ブロックが一様な上昇変形をするときに、被覆層中に断裂域が発達していく過程

* 1974年12月構造地質研究会, 1975年6月石油技術協会にて発表。

** 燃料部 *** 元芝浦工業大学土木工学科

を解析し、それがブロックの大きさによりどう影響されるかを検討した。

これまで、ブロック変形に伴う断裂の発生機構に関する実験的または理論的研究は、断裂が発生する前の弾性応力の集中を扱った場合が多い (HAFNER, 1951; SANFORD, 1959; 藤井, 1974; 衣笠, 1974など)。一部には断裂が形成されたのちの周辺の応力分布に関する研究もある (OGUSA, 1967; GZOVSKII・平山, 1969など)。しかし、断裂が形成されていく各過程を扱った研究は、スケールモデル実験 (小玉ほか, 1974など) を除いてほとんど行われていない。今回の実験では、このような過程を数値実験で解析することにより、さらに詳しく明らかにできた。

本実験および論文をまとめるにあたり、地質調査所の三梨 昂・垣見俊弘・小出 仁・衣笠善博・星野一男・加藤碩一の各氏、ならびに東京大学地震研究所南雲昭三郎氏には様々な御指導・御批判をいただいた。また東京教育大学の藤田至則氏や新潟大学の植村 武氏はじめ、構造地質研究会の方々に様々な御検討をいただいた。芝浦工業大学の高田武雄氏には終始はげましてご援助をいただいた。工業技術院電子総合研究所の西村怒彦氏ならびにコンピュータ・サービス株式会社の野村利男氏には、電子計算機使用の上の技術的な様々の御指導をいただいた。これらの方々に心より感謝申し上げる。

2. 弾塑性体の数値実験法

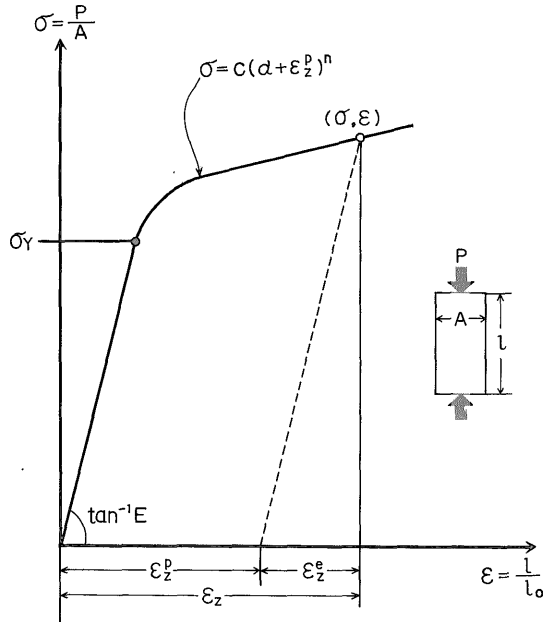
2.1 弾塑性変形

地殻変形を巨視的にみた場合、その一部に発生する断層群は相対的には微少破壊とみなされ、全体として弾塑性変形をすると解釈できる。岩石の物性試験においても、試験片に対して相対的に微小な破壊が生ずる初期の変形段階は、このような弾塑性変形の型を示す。たとえば第1図に示すように、応力とひずみの関係は、ひずみが小さいときは線形性を示すが、ひずみが大きくなると非線形性に移行する。線形部分のひずみは除荷したとき回復する弾性を示すが、非線形部のひずみは除荷しても復元しない塑性を示す。線形から非線形に移る点は降伏点あるいは弾性限界とよばれる。

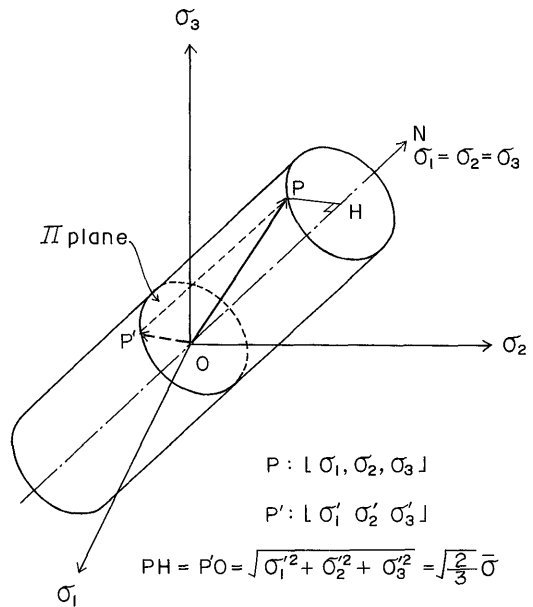
初めて降伏したときの条件を初期降伏条件という。弾塑性体から塑性体への移行は初期降伏条件で判定することができる。降伏条件の判定には Tresca の条件や von Mises の条件が用いられるが (JAEGER, 1962)、この実験では後者を用いた。

von Mises の条件では、任意の座標系 (O-xyz) におけるある点の応力テンソルの成分を $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz},$

$\tau_{zx})$ としたとき、 $f = \sqrt{1/2} [(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2)]^{1/2} = \bar{\sigma}$ で表わされるスカラー値 f が、一定の大きさを越えたとき降伏すると判定する。単軸圧縮試験の場合、これは降伏強度 σ_Y に相当する応力値である。そこでこれを $\bar{\sigma}$ とおき、相当応力とよぶ。



第1図 弾塑性変形の応力-ひずみ曲線



第2図 von Mises の降伏条件の幾何学的表示

von Mises の条件は主応力座標系 ($O-\sigma_1\sigma_2\sigma_3$) で示すと、原点を通り3軸に対して等しい傾角を持つ直線 ON ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$) を中心軸とした半径 $\sqrt{2/3}\bar{\sigma}$ の円柱で表される(第2図)。円柱の内部の点 P における応力に対しては、材料の要素は完全に弾性の状態である。降伏にどれだけ近づいているかは、 P から ON へ至る距離 PH により判断される。

図でも明らかのように、降伏条件は静水応力の状態をあらわす ON の大きさには全く影響されない。しかし、一般に岩石の三軸圧縮試験によれば、応力・ひずみ曲線は封圧条件によって大きく変化する。したがって上でのべた円柱は、 ON を軸とした円錐ないしラップ状管とするのが妥当であろう。ただし今回の実験ではこれを円筒として扱った。そして、自荷重の影響は、はじめから静水応力として作用すると仮定したので、von Mises の条件にしたがい、この項を省略して計算した。

2.2 弾塑性体の構成方程式と有限要素法

個々の材料に応じた応力とひずみの関係を示すテンソル方程式を構成方程式という。弾性体解析では次の関係であらわされる。

$$\{\sigma\} = [D]^e \{\varepsilon\} \text{ または } \{d\sigma\} = [D]^e \{d\varepsilon^e\}$$

ただし $\{\sigma\}$ および $\{\varepsilon\}$ は応力テンソルおよびひずみテンソルの成分からなる列ベクトルで、 $\{d\sigma\}$ および $\{d\varepsilon^e\}$ はこれに対応する応力増分および弾性ひずみ増分の成分ベクトルである。 $[D]^e$ は弾性体の応力・ひずみマトリックスで、平面ひずみ場における等方性材料については、弾性係数 E とポアソン比 ν を用いて次のようにあらわされる。

$$[D]^e = \begin{pmatrix} \frac{E}{1-\nu} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{E\nu}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{pmatrix}$$

塑性部は次のようなひずみ硬化曲線であらわされる(第1図参照)。

$$\bar{\sigma} = c(\alpha + \varepsilon^n)$$

ここで、 c, α, n は単軸変形試験で求められる物性定数であり、 $\bar{\sigma}$ および ε^n は、軸相当応力および軸塑性ひずみである。

弾塑性体においては、応力とひずみの関係が両者を合わせたかたちとなる。したがって応力増分 $\{d\sigma\}$ と全ひずみ増分 $\{d\varepsilon\}$ を結ぶ増分形の構成方程式は次のようになる。

$$\{d\sigma\} = [D]^p \{d\varepsilon\}$$

ここで $\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\}$

$$[D]^p = [D]^e - \frac{4G}{S_0} \begin{pmatrix} \sigma_x'^2 & \sigma_x'\sigma_y' & \sigma_x'\tau_{xy} \\ \sigma_x'\sigma_y' & \sigma_y'^2 & \sigma_y'\tau_{xy} \\ \sigma_x'\tau_{xy} & \sigma_y'\tau_{xy} & \tau_{xy}^2 \end{pmatrix}$$

ただし、 $S_0 = \frac{4}{9}\bar{\sigma}^2(H' + 3G)$, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

$$H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon^p} = nc(\alpha + \varepsilon^n)^{n-1}$$

$$\sigma_x' = \sigma_x - \sigma_m, \sigma_y' = \sigma_y - \sigma_m, \sigma_z' = \sigma_z - \sigma_m$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

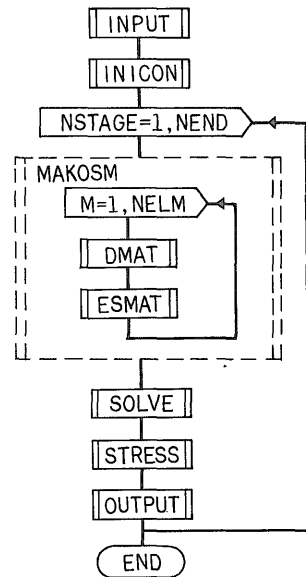
今回用いたプログラムでは、増分法にしたがって各変形段階(以下ステージとよぶ)ごとに構成方程式を解く。このとき、先に述べた降伏条件の判定にしたがって、各要素ごとに $[D]^e$, $[D]^p$ のいずれかを選択していく。このようにして全変形段階の解析を行った。

第3図はプログラムの流れ図で、各ブロックにおける主な内容は次のとおりである。なおこのプログラムは山田(1972)によるものに一部改訂を加えて作成したものである。

INPUT: ステージ総数(NEND), 要素総数(NELM)や節点, 要素, 物性, 境界条件などに関するデータの入力。

INICON: 全体剛性マトリックスを作るための準備, および弾性剛性マトリックス $[D]^e$ の作成。

MAKOSM: 塑性域に達した要素だけは孫サブルーチンDMATで弾性剛性マトリックス $[D]^p$ を作り $[D]^e$ と取り替える。次に孫サブルーチンESMATで全体剛性マトリックスを組み立てる。



第3図 弾塑性有限要素法解析のフローチャート

SOLVE: 全体剛性マトリックスを係数とする連立一次方程式を共役傾斜法で解き、各節点変位増分を求める。

STRESS: 各要素の相当応力を求め、その要素の降伏条件を最も大きく越える要素を判定する。これから逆に、ただ1つの要素だけが降伏条件に達するように境界増分条件を縮小(または拡大)する率を求め、これをつかってこのステージでの応力分布、ひずみ分布、相当応力分布と各節点の変位増分を求める。降伏応力を越えた要素については、次のステージで $[D^p]$ を採用するよう準備する。

OUTPUT: 計算結果のうち任意のものを印刷する。またカーブ・プロッタを用いて計算結果を直ちに自動図化する。

なおコンピュータは地質調査所の TOSBAC 3400/51 を用いた。

3. モデルと実験条件

この実験では、地層中の断層発達が基盤のブロック状変形を直接反映するという考えにもとづき、その垂直断面を平面ひずみ問題として解析した。第4図および第1

第1表 モデルを構成するパラメータ

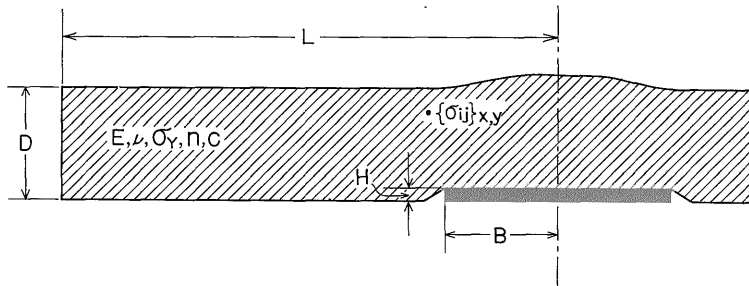
記号	内容	次元
σ_{ij}	応力テンソルの成分	$[L]^{-1}[M][T]^{-2}$
E	ヤング率	$[L]^{-1}[M][T]^{-2}$
ν	ポアソン比	無次元
σ_Y	降伏強度	$[L]^{-1}[M][T]^{-2}$
n	塑性硬化曲線の指数	無次元
c	塑性硬化曲線の勾配	$[L]^{-1}[M][T]^{-2}$
D	地層の厚さ	$[L]$
B	ブロック幅の半分	$[L]$
L	システムの長さ	$[L]$
H	ブロックの上昇量	$[L]$
x, y	座標	$[L]$

表に、この実験の構成と全てのパラメータを示した。

π 定理を用いて互いに独立な無次元パラメータを求めると、このシステムの物理方程式は次のように示される (SHIMAMOTO, 1974)。

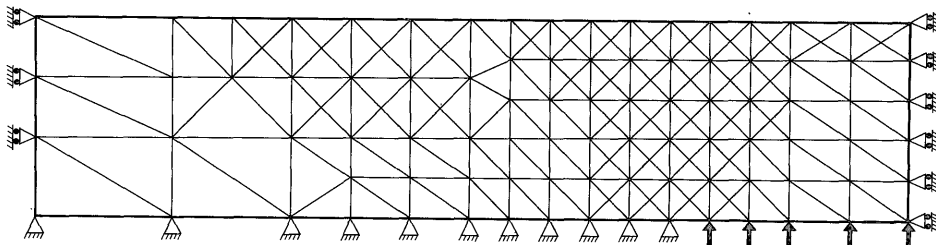
$$\Pi(D/L, H/D, B/D, \nu, \sigma_Y/E, \sigma_Y/c, n, \sigma_{ij}/E, x/D, y/D) = 0$$

したがって特定な位置における応力状態は



- CASE "A" $2B : D = 0.8 : 1$
- CASE "B" $2B : D = 2 : 1$
- CASE "C" $2B : D = 4 : 1$

第4図 モデルの構成



NOD NUMBER 124
ELEMENT NUMBER 207

第5図 要素の分割と境界の変位拘束条件

$(\sigma_{ij}/E)_{xy} = \phi(H/D, B/D, \nu, \sigma_r/E, \sigma_r/c, n)$
 ただし D/L は L を十分大きくとることによって省略した。

このように、このシステムのひずみ状態は物性に係る4つのパラメータと、形状に係る2つのパラメータで規定されていることがわかる。そこでこの実験では、一定の厚さの地層に対する基盤ブロックの幅の比、すなわち B/D が異なる次の3つのケースを設定して解析した。

CASE A: $2B: D=0.8:1$

CASE B: $2B: D=2:1$

CASE C: $2B: D=4:1$

実験結果は基盤上昇率 $H_d(H_d=H/D \times 100, \%)$ ごとに検討した。そして変形する地層の物性パラメータは全ての実験につき共通とした。これには中新世三浦層群中のシルト岩の三軸物性試験 (HOSHINO et al., 1973) などにもとづき、つぎのような値を与えた。

$$\nu=0.25, \sigma_r/E=0.013, \sigma_r/c=0.27, n=0.32$$

σ_r/E の値は初期降伏時の軸ひずみが1.3%であることを示している。

周辺の変位拘束条件および要素の分割は、第5図に示した。これは上昇ブロック部の幅が異なる以外、3つのケースについて全て共通である。

4. 実験結果

4.1 塑性域のタイプと拡大過程

ケースA, B, Cのそれぞれについて、要素が塑性に達していく過程を同じ基盤上昇率 (H_d) ごとに比較して示した (第6図, 第7図)。

いずれのケースでも、塑性域はまず基盤ブロックの境界部から発生しはじめ、基盤が上昇するにつれて垂直に上方へ向かって拡大していく。この一連の塑性域拡大系列をここでは V 系とよんでおこう。

基盤上昇率がある程度の大きさに達すると、新たに別の塑性域が地表部から発達し始める。これには2つの拡大系列がある。1つは地表変形の肩 (shoulder) または頂部 (crest) から発達するもので、もう1つは同じく地表変形の肘部 (elbow) から発達するものである。これらをそれぞれ、 N 系および R 系とよぶことにする。

V 系の塑性域の拡大過程は、ケースA, B, Cとも、各 H_d に対してほとんど変わりが無い。ただ基盤上昇がかなり進んだ段階 (たとえば $H_d=6\%$) では、ケースCの場合のみ、 V 系が地表部まで発達している。

N 系は、ケースAよりB, Cになるほど、 H_d の進んだ段階で発達しはじめる。第7図によれば、この系は、ケースAの場合には $H_d=2.1\%$ の段階で、ケースB, C

ではそれぞれ $H_d=3.4\%, 4.7\%$ の段階で初めて発達しはじめる。また N 系の発達する場所は、ケースAの場合には地表の隆起部の頂部だが、ケースBからCになるほど、隆起の肩部に集中する。ケースCの場合には、塑性域が最後まで頂部に形成されなかった。 N 系の塑性域は、ケースBおよびCの場合、まず隆起肩部の曲率の最も高い部分から生じはじめる、それから徐々に、頂部方向あるいは逆の肘部方向へと水平に拡大していく。

R 系の発達は、以上とは対照的に、ケースAからケースCになるほど顕著である。それは第6図の $H_d=6\%$ の図に示されている。また第7図によれば、この系はケースC, B, Aの順で、 $H_d=4.2\%, 4.5\%, 5.3\%$ と変形の早い段階から発達しはじめる。ケースA, Bの場合には、 R 系は N 系よりあとから発達しはじめるが、ケースCの場合には先に発達しはじめる。

以上のように、基盤ブロックの上昇程度が同じ条件でも、その幅に応じて、とくに地表部にあらわれる塑性域のタイプや発生時期に対照的な差異の現れることが示された。すなわち、相対的に基盤の幅が大きいほど、 V 系の塑性域が地表に達しやすく、 R 系がよく発達する。そして N 系は比較的あとの段階になってから、隆起の肩部に限って発達する。逆に基盤の幅がある限度以下に小さくなると、 N 系が隆起の頂部を中心に著しく発達し、 R 系の発達は逆に少なくなる。

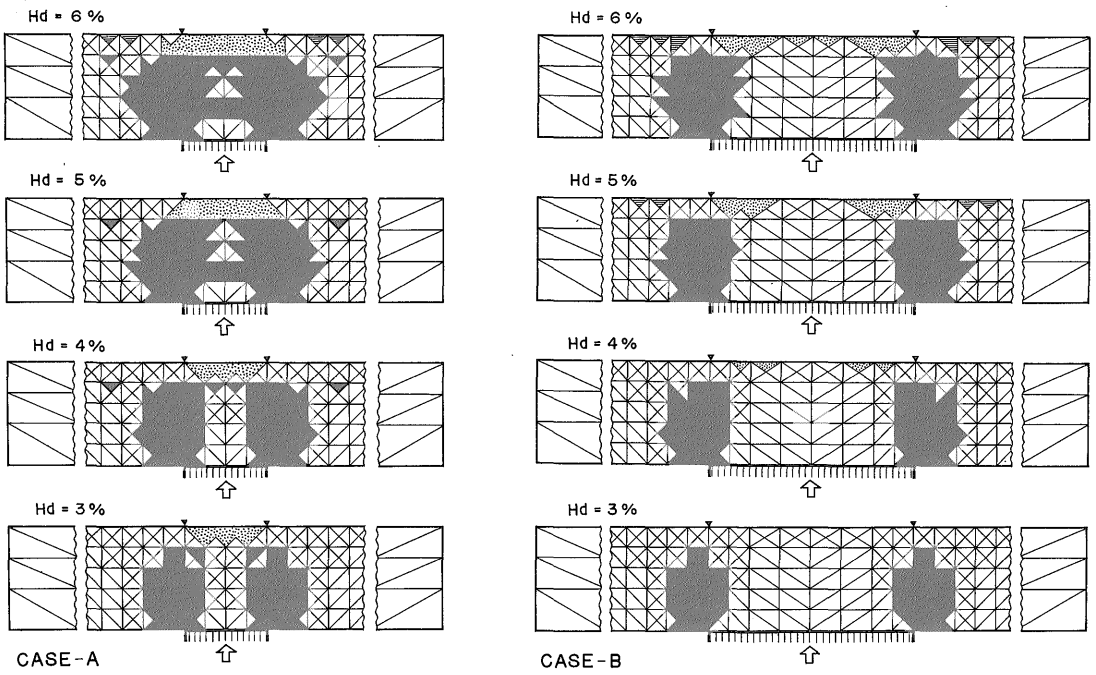
これらの傾向は自然の条件と比較すると大変興味ある問題であるので、第5章でさらに検討したい。

4.2 塑性体ブロックの断続的形成

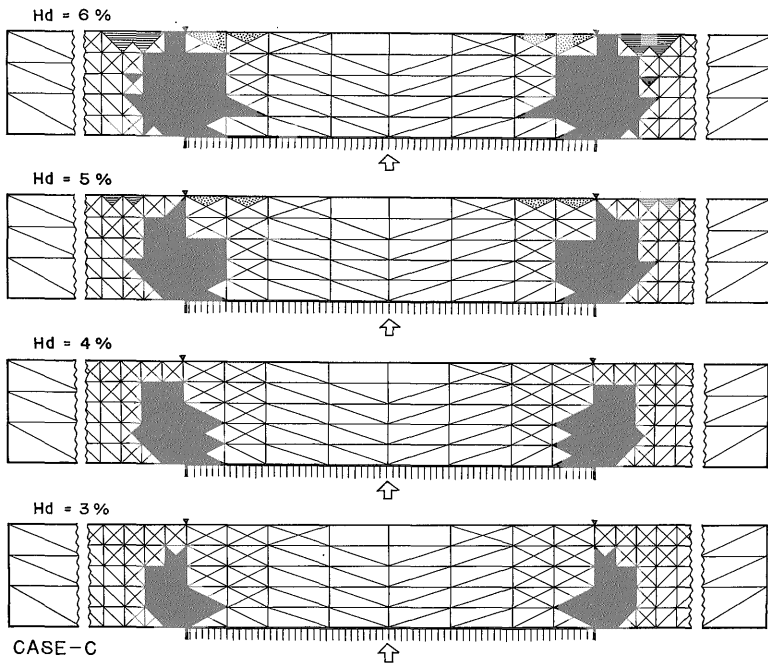
第7図は要素が塑性に達する順序を基盤上昇率 (H_d) に対して全てプロットしたものである。このうちとくに V 系の発達に注目してみよう。

まずケースBを見ると、6ステージ ($H_d=1.2\%$) までに、一定の面積 (体積) の9つの要素が塑性体になっていく。しかし次の1つの要素が塑性体になる7ステージまでには、1要素につき $\Delta H_d=0.26\%$ というかなりの基盤上昇増分が必要である。7ステージで1つの要素が塑性体になると18ステージまで次々と要素が塑性体となる。この間の基盤上昇増分は $\Delta H_d=0.86\%$ であり、15個の要素が塑性になるので、1要素当たり $\Delta H_d=0.057\%$ である。以下同様に18ステージから19ステージにかけては1要素当たり $\Delta H_d=0.37\%$ 必要だが、19ステージから27ステージまでは、平均1要素当たり $\Delta H_d=0.038\%$ で、新しく13個の要素が次々と塑性体となる。

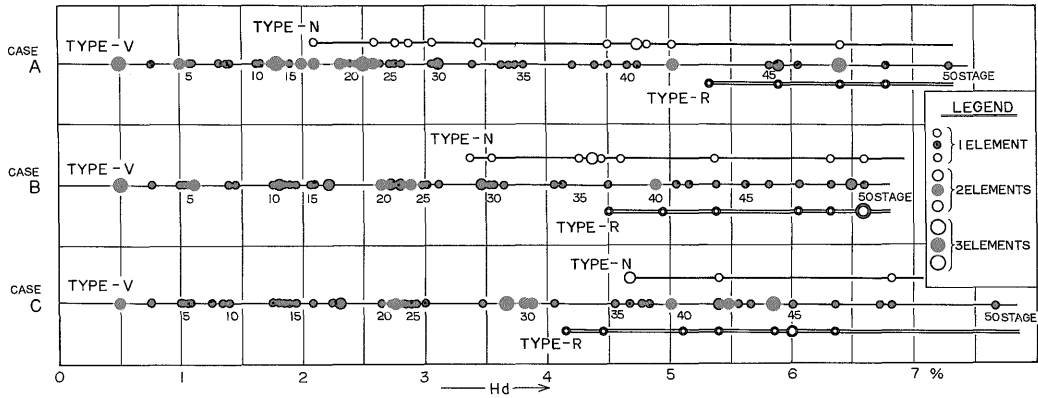
このように、少しの基盤上昇率で要素が次々と塑性になる区間と、1つの要素が塑性になるのに、1桁大きいオーダーの基盤上昇増分が必要な区間のあることがわか



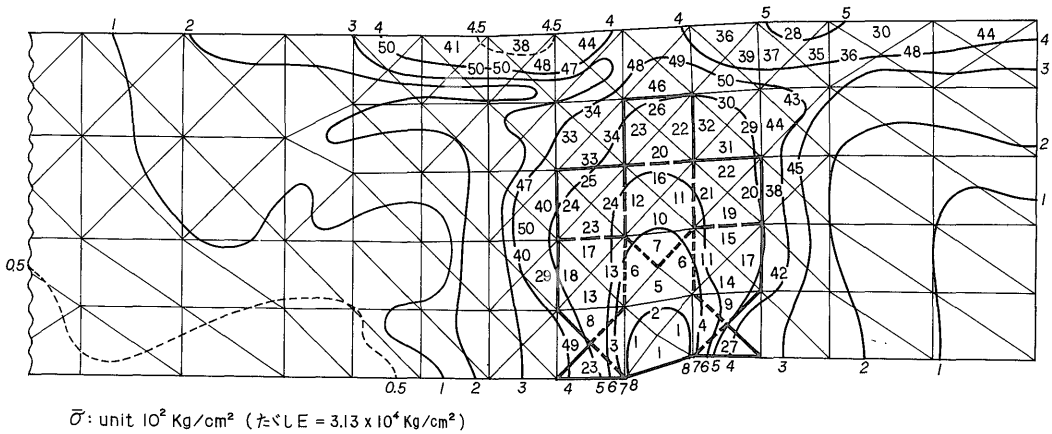
第 6-a 図 塑性域の拡大過程(1) ケースAおよびケースB, 図中の黒色部はV系の塑性域, 点部はN系, 横線部はR系のそれぞれ塑性域を示す



第 6-b 図 同, ケースC, 記号は a 図と同じ



第7図 塑性域の拡大過程(2)



$\bar{\sigma}$: unit 10^2 Kg/cm^2 (ただし $E = 3.13 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$)

第8図 塑性域の拡大過程(3) ケースBの場合の部分図(本文4.2参照)

る。

第8図には、同じケースBについて、要素が塑性になっていく順序を番号で示し、相当応力値の分布をコンターで示した。これを見ると、6ステージまでに短破線で囲んだ部分が塑性になる。そして7ステージから18ステージには新たに長破線で囲んだ部分が、その外側をとりまくように発達する。19ステージから27ステージまでも同様である。

したがって先に示した連鎖的な塑性域の形成過程は、同心状に分布するほぼ等しい塑性ポテンシャル域に、塑性が進行していく過程に対応している。そして、次の新たなポテンシャル域に塑性が広がるためには、一定の基盤上昇増分が必要なることがわかるだろう。

上のような塑性域の断続的な進行は、塑性ポテンシャル域を有限な要素に分割したため生じると解釈される。しかし自然の破壊の進行過程においても、たとえば地震体積(坪井, 1961)の概念のような、一定量のひずみ限

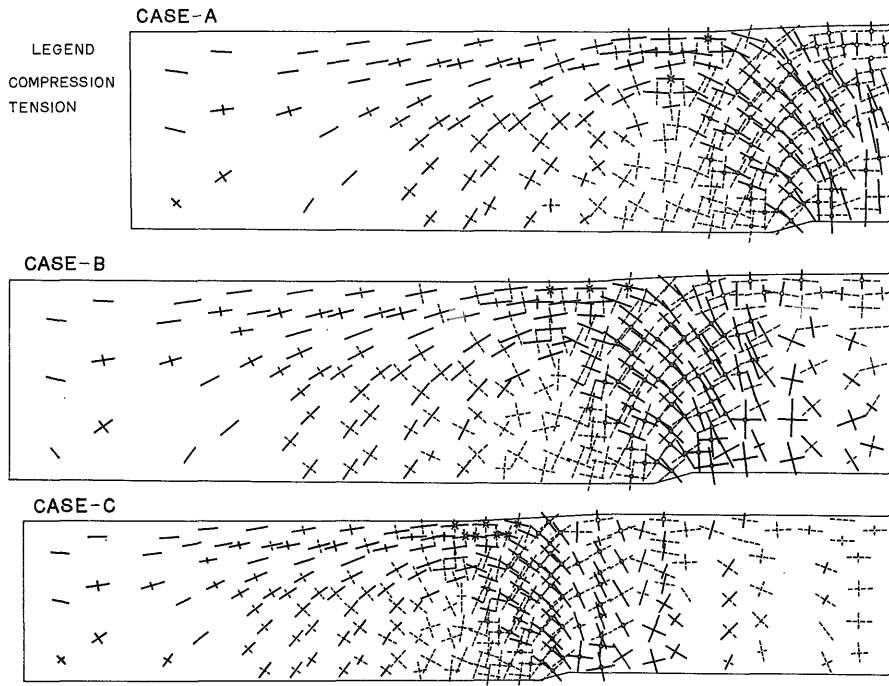
界をもつ有限要素を想定するならば、余震の発生のような連鎖的な破壊の進行過程を同様に理解することができよう。そして、基盤の変形が様な速度で進行する場合でも、このような過程が間欠的に、また空間的な広がりをも異にして進行することが理解されよう。

上のような一束の塑性形成域を、筆者らは等ポテンシャルの「塑性体ブロック」と呼んだ。そして第7図によれば、塑性体ブロックの形成はケースAやCでも、またN系の塑性過程でも、同様にみとめられる。

4.3 主応力分布と断層のタイプ

第9図には3つのケースについて、ほぼ $Hd = 7\%$ の段階における累積主応力分布を示した。なお各主応力記号の中心の○印または×印などによって、要素の相当応力が初期降伏条件を越えていることを、塑性系列のタイプ別に示した。

いずれのケースについても、ほぼ共通した次のような性質を指摘することができる。



第9図 主応力分布図

実線：圧縮，破線：伸張，白丸・黒丸・×印はそれぞれN・V・R系の塑性に達していることを示す

まず地表部において、中央（図の右端）から隆起の肩部あたりまでは、水平ないし微傾斜した引張応力が作用し、垂直方向に圧縮応力が作用する。したがって、この部分に発達するN系の塑性域中には正断層が発達すると解釈される。つぎに、地表部の隆起の外側（図のさらに左方）に形成される向斜（肘部）付近では、水平方向に圧縮応力が作用し、垂直方向に引張応力が作用する。したがって、この部分に発達するR系の塑性域中には逆断層が発達すると解釈される。さらに、基盤ブロックの境界部から垂直に地表へ至る要素では、最大・最小主応力がほぼ45°に傾斜している。したがって、この部分に形成されるV系の要素中には、ほとんど垂直ないし急傾斜した断層とほぼ水平な断層が生じると解釈されよう。

4.4 塑性域の形成と応力の再配列

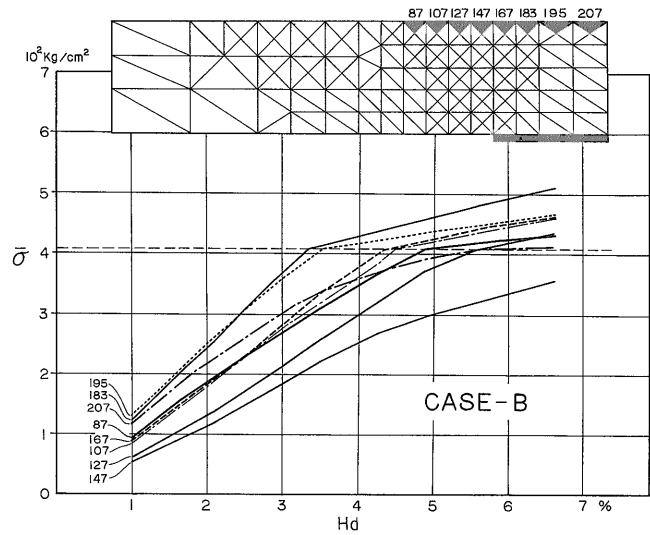
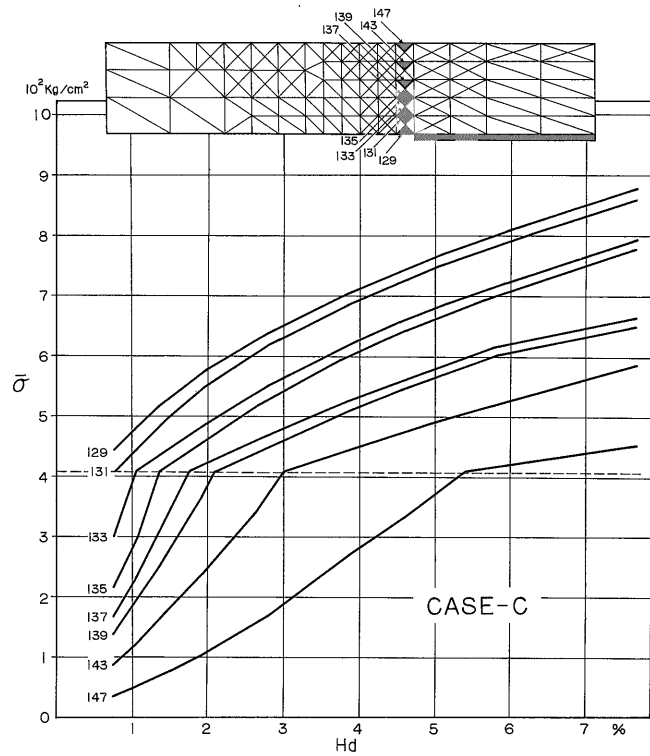
第10図上はケースCの場合で、基盤ブロック境界の上方にある各要素について、基盤上昇率の増加に伴う相当応力の増加過程を示した。この図より下部の要素ほど先にV系の塑性に達することがわかるが、そのとき、まだ弾性状態にある上方の要素では、相当応力が急激に増加することが示される。このように塑性域の進行に伴ってその周囲では応力集中が起こり、一層塑性域の拡大が助

長されると解釈される。

第10図下は、ケースBの場合の地表面にそった各要素について、同様の関係を示した図である。基盤の上昇に伴い、それぞれの要素で相当応力が増加していく。しかし興味あるのは頂部の要素“207”で、基盤の上昇につれて相当応力の増加率が減少している。その結果、たとえば要素“167”とくらべると、途中から相当応力の大きさが入れかわっていることがわかるだろう。要素“183”と“195”の関係も同様である。前者は基盤の上昇につれて、弾性域の途中から相当応力が徐々に増加するが、後者は相当応力の増加率が逆にぶる。その結果、初期の相当応力の大きさは入れかわって、前者の方が先に降伏に達する。

地表部の向斜（肘部）付近に位置する要素“87”，要素“107”でも、同様の応力の再配分が行われる。

以上のような現象は、基底部から塑性域が上方へ拡大していくにつれ、あるいは地表部に部分的な塑性域が形成されることにより、物性の不均質化が生じ応力分布に変化を与えるものと解釈される。このような過程は塑性を扱う実験で初めて明らかにされるもので、微小変形を扱う弾性問題の解とは大いに異なる点で注目されよう。



第10図 応力の再配分過程

上：相当応力の集中過程を示すケースCの例 下：相当応力の緩和過程を示すケースBの例 ($\bar{\sigma}$ は $E = 3.13 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ としたときの相対値)

5. 実験結果の検討と今後の課題

以上の実験結果によれば地表付近の塑性域の発達様式は、厚さに対する基盤の相対的な大きさによってはっきり規定されることが示された。そして塑性域の規模や発生時期が、それぞれの塑性域の形成過程で互いに干渉し合っていることも示された。それではこのような現象が、実際の野外の断裂発達にはどのように現れているだろうか。例として南関東の小断層発達の解析結果と比較、検討してみた。

南関東の断層発達の中でも最も典型的である房総半島東部(衣笠ほか, 1969)および三浦半島南部(KODAMA, 1975)の小断層発達の様子を要約して、第2表に示した。

このように、実際には、同一の地域に時期の異なるいくつもの断層系が重なって発達している。このうち、ほぼ南北走向の正断層系や東西走向の逆断層系がとくに顕著に発達し、これらと前後して東西走向の正断層ないし走向移動断層系が発達している。三浦半島南部では、南北走向の逆断層系もわずかに発達している。

平均走向が互いに直交する正・逆断層系は、主張力あるいは主圧力軸が南北・東西に複雑に入れかわることによって形成されたと推定される。そしてこのような造構応力場は、一貫した基盤のブロック状昇降運動の過程で形成されたと解釈される(衣笠ほか, 1969; 三梨, 1973; KODAMA, 1975)。たとえば、第2表のB系統は、基盤ブロックの南北端を限る東西性の基盤断層が地表にまでおよんだものと推定される。また、この地域に卓越して発達する南北走向の正断層系は、東西断面における基盤のブロック状と曲を反映して形成されたと解釈される。さらに、これらの断層の分布や地質構造から、基盤変形の形状が、東西に長く南北に幅の狭いブロック状のものだということも推定された。

以上の断層発達を今回の実験結果、とくに地表部付近の変形の特徴と比較してみよう。

まず、第2表に示す東西性のB系は、高角の正断層ないし走向移動断層あるいは急傾斜逆断層だから、これはV系の形状に対比される。そしてV系が地表部にもっとも発達しやすいモデルは、ケースCの実験である。また東西方向には逆断層がよく発達するが、この条件がもっとも生じやすいモデルもケースCの実験である。ケースCにおいては、R系がN系より早く発生するが、このような条件は、三浦半島南部のA系(逆断層)とB系(正断層)の関係に対比される。このように、東西走向の断層の様々の特徴からすると、南北断面における基盤変形の様式は、3つのモデルのうちではケースCにもっとも

第2表 三浦・房総半島に発達する小断層系

地域 順序	三浦半島南部*		房総半島東部**	
	系統	性質	系統	性質
新期 ↑ ↓ 古期	E	東西性の正断層 ないし走向移動 断層。開離	Y-EW	東西性の正断層ないし一部走向移動断層(?)
	D	南北性の低角逆断層。走向はばらつく。開離	Y-NS	南北性正断層。断層面は一部開離
	C	南北性正断層。面は一部開離	R	東西性逆断層。断層面固結。走向はばらつく
	B	東西性の正断層ないし走向移動断層。一部開離	O-EW	東西性正断層。面は固結、急傾斜
	A	東西性の低角逆断層。断層面は固結	O-NS	南北性正断層。面は固結、急傾斜

* 主としてKODAMA (1975), ** 主として衣笠ほか(1969)による。

近いと推定される。

一方、地表付近でN系が発達しやすい条件は、モデルのうちケースAないしケースBの特徴である。したがってこの地域に顕著にみられる南北走向の正断層系が発達に対応する東西断面の基盤変形は、ケースAないしケースBのそれに近いといえよう。

以上のように、南北断面の変形のタイプはモデルにおいて基盤ブロックの幅のもっとも長いケースCの様式に近く、東西断面のそれは、基盤ブロックの幅の短いケースBまたはケースAのモデルに近いと考えられる。

以上は地表付近の断層発達の特徴をよく説明しているが、基盤ブロックの幅の点では実際と全く逆の関係になる。このことから、南関東の場合に関しては、基盤が一樣に平坦な変形をするとして、その大きさだけで地表付近の断層発達の様式を説明するのは十分でないようだ。この点について、さらに次のような検討が必要であろう。

ケースCは地層の厚さに対し基盤の幅が相対的に広いので、他とくらべ基盤のブロック状変形の特徴が直接地表部に反映していると考えられる。南関東の南北断面の地表変形は、このように基盤のブロック状変形が直接地表に及ぶ変形だと推定される。これに対し、ケースAやケースBの場合、地表変形に基盤のブロック変形の影響があらわれにくくなる。それは、ケースCと同じ幅の変形にすれば基盤がゆるやかなと曲変形をしたときの効果と等しい。したがって南北幅より波長が長く、かつ地表部にN系を発達させやすい東西断面における基盤変形

の条件は、南北断面と同様なプラットホーム状のものではなく、ゆるやかなう曲変形と推定される。

上のような基盤変形の形態(すなわち変形の鋭さ)の違いによる地表変形の効果については、さらに詳しく今後の実験で検討してみたい。

実際の断層発達では、様々のタイプのものが同一地域に重なって発達するなど、かなり複雑であるが、この一連の研究の中で、一つ一つのパラメータの効果に分けて検討していきたい。たとえば、塑性域拡大のプロセスには、物性の差、すなわち σ_r, c, n などの塑性パラメータの違いによる影響が大きく作用すると推定される。また、重力による地層の自荷重効果も変形前の降伏条件に影響を与えると推定されるので、この点の検討も、今後の重要な課題である。

これらの様々の効果を検討することによって、実際の断層発達の機構を規制している条件について知るヒントを得ることができると考える。

6. ま と め

この一連の論文で筆者らは、基盤がブロック状の変形をするとき、被覆層中に塑性域が発達する過程をコンピュータを用いた有限要素法で解析する。地表の断層や褶曲が基盤のブロック状変形を直接反映して生じることは、新潟や関東などの油田・ガス田地域にみられる新第三系の基本的地質構造である。これらの実験結果をもとに、地表付近の変形や断層発達の様式を実際と比較検討した。

小論の実験では、基盤が一様な上昇変形をするとき、均質等方性弾塑性体に仮定された被覆層中に塑性域が発達する様子を求めた。とくに基盤の大きさが異なる大・中・小のケースを設定し、それが地表付近の断層発達の様式に及ぼす効果を検討した。

おもな実験結果はつぎのとおりである。

1. 基盤ブロックが上昇するにつれ、境界部から垂直上方に向かって塑性域が拡大する。この部分には垂直な亀裂断層が生じると推定される。
2. ある変形段階に達すると、新たに地表部から、正断層と逆断層を生じる塑性域が発達しはじめる。
3. 地表部の正断層が形成されやすいのは、基盤幅のもっともせまいケースで、逆断層や垂直断層が形成されやすいのは、比較的基盤幅が広いケースである。
4. 塑性域の形成とともに、その周囲では応力が一層集中する部分や、逆に緩和する部分がみられ、一層ブロック化が進行する。
5. 塑性域の拡大過程は、等塑性ポテンシャル域ごとに

断続的に進行する。

以上の結果のうち、とくに地表部付近の断層発達の様式については、南関東の小断層の発達様式と比較して検討した。その結果、この地域の基盤変形がブロック状のものであることが推定されたが、同時に基盤幅以外に基盤変形の形状が及ぼす効果も大きいことが推定され、次の実験課題として提起された。

引用文献

- BELOUSSOV, V. V. and GZOVSKY, M. V. (1965) Experimental Tectonophysics. *Physics and Chemistry of the Earth* (AHRENS, L. H. et al. ed), vol. 6, p. 409-498, Pergamon.
- 藤井敬三 (1974) 基盤の地塊化運動に伴う地殻上層部中の応力分布に関する二・三の考察。地調報告, 第250—2号, p. 145-158.
- HAFNER, W. (1951) Stress distributions and faulting. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 62, p. 373-398.
- HOSHINO, K., KOIDE, H., INAMI, K., IWAMURA, S. and MITSUI, S. (1972) Mechanical Properties of Japanese Tertiary Sedimentary Rocks under High Confining Pressures. *Rep. Geol. Surv. Japan*, no 244, 200 p.
- JAEGER, J. C. (1962) *Elasticity, Fracture and Flow, with Engineering and Geological Applications*, 2nd. ed., Methuen & Co., London, 207 p.
- 垣見俊弘 (1974) 南関東における第四紀応力場の変遷——小断層解析を中心として。垣見俊弘・鈴木尉元編「関東地方の地震と地殻変動」, p. 51-70, ラテイス刊, 東京。
- 衣笠善博・垣見俊弘・平山次郎 (1969) 房総半島東海岸の小断層。地調月報, vol. 20, p. 13-38.
- (1974) 基盤ブロックの昇降運動による被覆層内の応力分布について。地調報告, 第250—2号, p. 159-174.
- 小玉喜三郎 (1968) 城ヶ島における小断層解析。地質雑, vol. 74, p. 265-278.
- ・鈴木尉元・小川銀三・丸田美幸 (1974) 箱型褶曲の内部構造について——スケール・モデル実験による研究。地調報告, 第250—2号, p. 121-144.
- KODAMA, K. (1975) Fault systems of the southern part of the Miura Peninsula, south of

- Tokyo. *Tokyo Univ. Educ. Doctor Thethys.*
- 三梨 昂 (1974) 南関東地区の構造発達史. 垣見俊弘・鈴木尉元編「関東地方の地震と地殻変動」, p. 31-50. ラテイス刊, 東京.
- SANFORD, A. R. (1959) Analytical and experimental study of simple geologic structures. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 70, p. 15-52.
- SHIMAMOTO, T. (1974) Application of the Pi-theorem to the similarity criteria of inhomogeneous viscous fluids. *Tectonophysics*, vol. 22, p. 253-263.
- 鈴木尉元・三梨 昂・影山邦夫・島田忠夫・宮下美智夫・小玉喜三郎 (1974) 新潟第三系堆積盆地に発達する褶曲の形成機構について. 地調報告, 第250-2号, p. 53-78.
- 坪井忠二 (1961) 「地球の構成」. p. 174-178. 岩波書店.
- 山田嘉昭 (1972) 「塑性・粘弾性」. 日本鋼構造協会編, コンピュータによる構造工学講座, II-2, 培風館.

(受付: 1975年8月26日; 受理: 1975年9月9日)