

氏名・(本籍)	やまざきけんすけ 山崎謙介
学位の種類	理学博士
学位記番号	理第520号
学位授与年月日	昭和52年 2月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和47年 3月 東北大学大学院理学研究科 (修士課程)地球物理学専攻修了
学位論文題目	ダイラタンシーによる地殻変動の理論と地震前兆現象の定量的評価
論文審査委員	(主査) 教授 鈴木次郎      教授 高木章雄 教授 平沢朋郎

## 論 文 目 次

はじめに
第1章 ダイラタンシーモデルの概略
第2章 ダイラタンシーの数学的表示
第3章 有限体積源による解
第4章 自然地震への適用
第5章 解析結果の検討
ま と め
謝 辞
文 献
補 足

## 論 文 内 容 要 旨

地殻変動に現われる地震の前兆現象を定量的に吟味することを目的として、Scholz et al. (1973)のダイラタンシー・モデルに基づき、地殻内のダイラタンシー領域を張力型の割れ目の集合としてモデル化し、弾性論的に定式化して理論的研究を行った。その結果を逆断層型地震である新潟地震(1964年6月, M7.5)と秋田県南東部地震(1970年10月, M6.2)の場合に適用し、観測された地殻変動を詳細に検討するとともに、モデルの検証を行った。

古い違いの弾性理論によれば、張力型の割れ目に等価な点源は「center of dilatation」と「double force without moment」の実体力の組み合わせである。逆断層型地震を発生する応力場におけるダイラタンシーとして、地表面に平行な面内に横たわる微小な張力型の割れ目(クラック)を想定し、有限な体積(V)を持つ、ある領域内に一様に分布するものとする。このモデルに対する弾性問題の形式解は、半無限弾性体に点源がある場合のMindlin and Cheng (1950b)の解を利用し、クラックに等価な点源による解をダイラタンシー領域にわたって体積積分をすることによって得られる。

ダイラタンシー領域が一般的な形状を有する場合には解析解を求めることはできない。従って、その形状が球の場合に対してのみ厳密な解析解を導き、三軸不等の楕円体源に対してはポテンシャル論の手法を応用して遠方近似解を求めた。次に、近地においても成り立つ解を得るために、有限な厚さを持つ水平な楕円板源に対して、三重積分のうち二重積分を解析的に遂行し、残りの一次元の積分を数値的に実行する方法を開発した。この理論的研究の主な結果を要約すると次の通りである。

(i) 地表での上下変位は、点源の場合と同様に、いたる所隆起であり、原点(地表に投影したダイラタンシー領域の中心点)でその大きさが最大となる。水平変位は原点でゼロ、ダイラタンシー領域の端で最大になる。上下変位の半値幅がダイラタンシー領域の拡がりを近似的に表わす。

(ii) 近地に対して有効な有限な厚さを有する楕円板による地表変位は(i)の結果と同じ傾向をもつ。楕円板源による傾斜の大きさはダイラタンシー領域の境界で他の場所に比べて著しく大きい。動径方向の縦歪はダイラタンシー領域外では概ね縮みであり、領域内では概ね伸びである。境界付近では傾斜量が大きいのに反して縦歪の大きさは小さいことがきわめて特徴的であり、ダイラタンシー領域の拡がりの推定に有効である。また、面積歪、最大せん断歪、主歪、傾斜ベクトルの二次元的パターンの特徴も明らかにされた。なお、変形の回転成分はゼロである。

1964年の新潟地震は、その発生以前に地磁気異常、地震波速度異常とともに顕著な異常地殻変動が観測されており、ダイラタンシーの仮説の検証によく利用されている。地盤沈下を監視する目的で、新潟付近の水準路線に沿って繰り返し水準測量が行われていたが、1955年頃か

ら水準変動が急変し、その異常変動が停滞ないし、逆向きの動きに転じてまもなく新潟地震が発生した。茂木(1974)はこの地震発生直前の水準変動の変化に注目して、いわゆるドライ・ダイラタンシーモデルを主張している。一方、1970年の秋田県南東部地震に際しても、地震波速度異常と東北大学地殻変動観測所の仁別における傾斜計の記録に異常が報告されている。本研究では前述の理論的研究結果をこれら二つの地震に適用し、その地殻変動の観測データを定量的に検討した。その主な結果は下記の通りである。

- (1) 1955年から1959年迄の水準変化をダイラタンシーに起因するものとみなし、震央分布がほぼ長径50 Km、短径25 Kmの楕円である余震域の形と大きさを参考にして、7点の国土地理院一等水準点のデータから最小二乗法的に、ダイラタンシー領域の拡がりか1959年当時、長径・短径がそれぞれ余震域の約2倍であったと結論される。この結論は異常領域の厚さを震源分布から10 Kmに固定し、間瀬における傾斜計、伸縮計の観測データを考慮に入れ導かれた。1955年から1959年間のダイラタンシー現象の時間的推移については、1959年当初から異常域は余震域の約2倍の拡がり有し、ダイラタンシーの強さを徐々に増大したと考えられる。
- (2) 1959年以後の水準変動については、 $S/\sqrt{N}$ を考慮するとその変動量は十分とは言えず、水準測量が連続観測ではないことを考え併せて、定量的な検討の対象とはなり得ない。しかし、間瀬における傾斜計、伸縮計の連続記録が利用可能である。これらの記録の時間変化から、1959年以降ダイラタンシーの強さはほぼ一定でその領域が水平方向にさらに拡大したと結論される。
- (3) 秋田県南東部地震に際して、仁別(震央距離80 Km)の傾斜計に1969年頃から異常変動が現われた。しかし、同じ仁別の伸縮計にはどの成分にも異常変動が検出されない。この点が従来は解釈に苦しむところであった。前述の理論的研究結果(ii)より理解されるように、異常期間初期からダイラタンシー領域が仁別付近まで延びており、その拡がりは一一定で強さが時間と共に増大したとすれば傾斜、伸縮計の観測結果が説明される。このようにして、秋田県南東部地震の場合ダイラタンシー領域の水平方向の拡がりか余震域(長径約7.5 Km)の約10倍であったと結論される。この結果はAnderson and Whitcomb(1975)が与えたダイラタンシー領域と地震のマグニチュードの関係式を満足するものである。
- (4) ダイラタンシーによる非弾性的体積歪は、その領域の体積を $V$ 、体積の増分を $\Delta V$ として $\Delta V/V$ で表わされる。一方、地震モーメントに対応して、体積モーメント $M_0$ を次のように定義する。

$$M_0 = \mu \Delta V_1$$

ここで $\mu$ は剛性率である。新潟地震の場合、7点の水準変動の観測値を用いて、1959年当時のダイラタンシーによる体積歪と体積モーメントの最確値はそれぞれ $(3.7 \pm 0.57) \times 10^{-6}$ ,

$(1.7 \pm 0.3) \times 10^{26}$  dyne $\cdot$ cmとなった。一方秋田県南東部地震の場合には、仁別における傾斜変動から体積歪が  $1.5 \times 10^{-5}$  と推定された。

以上が観測データの解析から直接得られた結論である。これらの結論からさらに、今後の観測、研究に対して示唆に富んだいくつかの推論が導かれる。

- (a) 新潟地震の場合に、1955年から1959年にかけてダイラタンシー領域がほぼ一定でその強さが増大し、1959年以降は逆に強さがほぼ一定で領域が拡大したという事実は、ダイラタンシーを引き起こす地殻応力が増大したということは考えられても、減少したとは考えられない。この事は速度異常の回復を説明するため周辺地域の応力降下を必要とするドライ・ダイラタンシーの仮説と調和しない。
- (b) ダイラタンシーによる非弾性的体積歪は高々  $10^{-5}$  程度であって、それを引き起こす地殻内偏差応力による限界せん断歪の  $10^{-4}$  の約  $1/10$  である。地殻の限界歪の値  $10^{-4}$  は、岩石試料の室内実験で得られる値に比べて、きわめて小さいことはよく知られた事実であるが、非弾性的体積歪の値もまたきわめて小さい。このように、地殻内では低偏差応力の下できわめて弱いダイラタンシーが発生するが、それでもなお地震波速度の異常が検知されるという事実は、地殻内ダイラタンシー現象の源である微小クラックの縦横比が  $10^{-4}$  以下のきわめて小さな値であることを示唆する。
- (c) 前述(1)のように新潟地震の場合、1955年から1959年にかけてダイラタンシーの領域の拡がりは一一定でその強さを増したと結論された。しかも、1956年頃から地震波速度異常が認められるという事実(長谷川他(1974))は、異常域のクラック密度はほぼ一定で、ダイラタンシーの強さの増大はクラックの縦横比の増大によることを示している。この事は、さらに、地殻内ダイラタンシーの発生およびダイラタンシーからの回復は既存クラックの開閉に基づくことを示唆していると考えられる。
- (d) 非弾性的体積歪が  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  であることは1点における地殻変動の観測から異常変動を検出することがかなり困難なことを示している。今後は群列方式の地殻変動連続観測が必要であり、それによって地震の前兆地殻変動に関する、より明瞭かつ決定的な結論が得られるであろう。

## 論文審査の結果の要旨

山崎謙介提出の論文は地震発生時の応力場についてダイラタンシー模型を採用して求めた数学的結果と実際の観測結果を対比したものである。

岩石に圧力を加えると、当初は圧力の増加とともに体積が減少するが、ある程度以上の圧力では圧力増加に伴って体積は逆に増大する。これは岩石内に発生する微小クラックによるもので、ダイラタンシーと呼ばれ、地震の前兆現象の説明に用いられる。張力型のクラックは数学的には1つの dislocation center とモーメントを持たない double force の組み合わせによって表わされる。

山崎はこのようなダイラタンシーが地下のある深さにおいて三軸不等の楕円体内および有限な厚さを持つ楕円板内に分布するとき、地表での変位、歪、傾斜等の計算を行いその特性を図示している。ただしこの際微小クラックは水平に存在すると仮定しているが、これは実際の地震では逆断層型の地震に対応している。

さらに著者は以上の結果を1964年新潟地震及び1970年秋田県南東部地震の際の水準測量及び地殻変動連続観測の結果と対比している。その結果新潟地震では1959年以来余震域の約2倍の広がりを持つダイラタンシー領域が発生し、その強さが時間とともに増大しかつその広さもまた時間とともに拡大していったものと結論している。また秋田県南東部地震の場合には1969年以降余震域の約10倍にあたるダイラタンシー領域が発生し、その広さは一定であるが、強さは時間とともに増大したものと推論している。なお各々の場合の体積歪の最確値としてそれぞれ  $3.7 \times 10^{-6}$  および  $1.5 \times 10^{-5}$  を得ている。この値は従来考えられている数値より小さいが、山崎はこれから微小クラックの縦横比が  $10^{-4}$  以下の極めて小さいものであろうと述べている。

以上述べた如く、山崎の論文は水準測量および地殻変動連続観測の両者を併用して、地震発生時の応力場特にその時間的変化を解明したもので地震学上興味深い知見を与えたものである。

よって山崎謙介提出の論文は、充分自立して研究能力のあることを示し、理学博士の学位論文として合格と認める。