

# 地震動 6 成分観測と地震・火山噴火現象の物理過程解明

## Observation of 6-components Ground Motions Excited by Earthquakes and Volcanic Eruptions, and These Physical Processes

武尾 実

Minoru Takeo

東京大学地震研究所

Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo

Large rotational motions excited by earthquakes are recorded during two earthquake swarms at offshore Ito in Izu peninsula, Japan, which occurred in March, 1997 and in April, 1998. The purpose of this paper is to report the characteristics of the rotational ground motions excited by the earthquakes, and to estimate spatial changes of slips for small earthquakes. The largest rotational velocity recorded at KAW is  $2.6 \times 10^{-2}$  rad/s around the north-south axis during an earthquake of magnitude 5.2 at 14:09 (GMT) on March 3, 1997. The largest earthquake with a magnitude of 5.7 occurred at 3:51 on March 4 (GMT), 1997, whose rotational motions around the vertical axis was  $3.3 \times 10^{-3}$  rad/sec. Considering a spatial variation of slip velocity which directly relates to excitation of a rotational motion, we apply simple point source models to the largest event and the second largest event in the swarm of 1997, and succeed in explaining the observed rotational motions around the vertical axis. These results suggest that the fault slip of the largest event stopped rapidly about 1 km southeast of the hypocenter, and that a large slip occurred at a shallower part (about 3 km deep) of the fault during the second largest event.

There are several technologies to measure rotational motion. A top spinning gyro, a quartz rate sensor, and a fluid rotor sensor are classified into mechanical gyro. Gyros using laser technology are a fiber optic gyro and a ring laser gyro. Fiber optic gyro has the following advantages; it is easy to increase sensitivity by enlarging the size of the fiber coil, and it has no moving elements that make internal noise. Because of these advantages, we select a fiber optic technology as a basic technology of the rotational-motion seismograph. The target value of sensitivity is less than  $10^{-9}$  rad/sec for a portable type and  $10^{-11}$  rad/sec for a long-period type. Now, we can reduce the internal noise down to  $10^{-8}$  rad/sec in the last trail model and succeeded in recording ground rotational motions excited by local small earthquakes within the epicentral distances of 150 km.

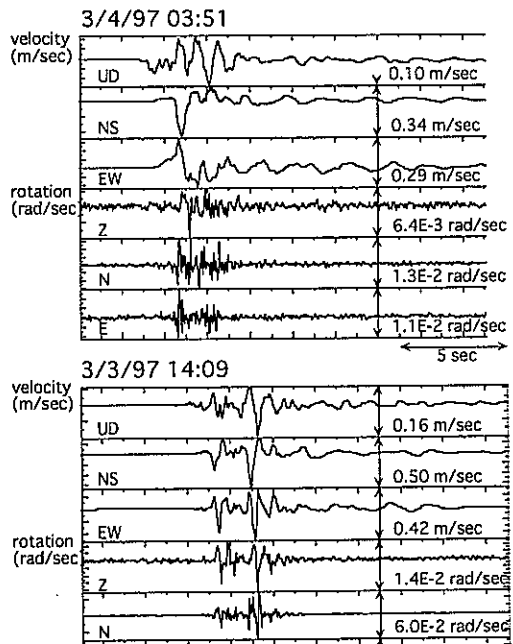
### 1. 研究目的

1995 年兵庫県南部地震の際に神戸市内で記録された強震動記録は、これまでの我々の予測を越えた特異な波形であった。我々の従来の推測を越える自然現象が起こることは、兵庫県南部地震の強震動記録にも見られるように地震学の分野でも大いに起こりうることである。本研究では、最近の急速な計測技術の進歩により可能となってきた高精度の回転運動検出センサーを地震動回転成分の観測に応用することにより地震や火山の噴火の際の地動回転成分を検出し、地震の震源過程や火山の噴火過程のダイナミクスを解明しようとするものである。さらに、実際の地震動を観測することで地震の際の地動回転成分の大きさの評価を行い、構造物への影響を考える上での基礎データを蓄積する。

本研究計画は、次の三つの柱 1) 震源近傍での地動回転成分を並進成分を併せて観測すること、2) 観測データに基づいて地震発生過程とその停止過程を解明すること、3) 各種火山性地震の観測を実施し、その観測データを基に減圧過程の実態解明に取り組むこと、から成り立っている。

研究代表者らの地動回転成分の地震学的活用に関する最近の理論的研究により、地動回転成分の観測を地動並進成分と併せて解析することにより、地震の震源過程や火山の噴火過程のダイナミクスに関し、これまでの理論モデルの枠を越えた現象の解明

ができることが明らかにされた。この研究成果をベースにして、観測に地震動回転成分という新しい観測量を導入し地震や火山噴火現象を新しい観点で捉



え直す事がこの研究の目指すところである。例えば、火山の爆発的噴火に伴う爆発地震及びその後の減圧過程ダイナミクスの解明、地震の食い違いモデルの枠を超えた現象の観測と新たな視点によるモデル化などが挙げられる。特に、地震断層の端で回転成分が大きくなることが予測され、地震の停止機構に関する物理過程を解明することが期待される。地震の停止過程の解明はどのような地震が大地震となるのかを明らかにすることと繋がっており、防災上も大いに意義があると思われる。さらに、蓄積されたデータを基に大地震の際の震源域近傍での地動回転成分に関する予測も行うことも可能となる。

## 2. 研究成果

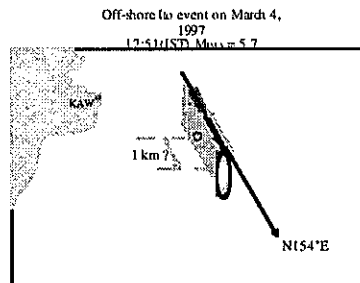
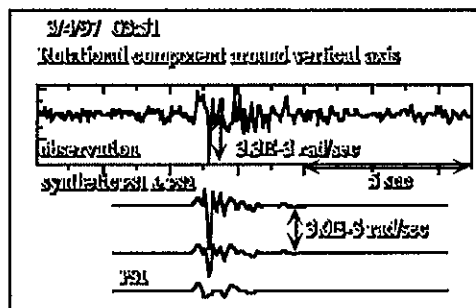
### 2. 1 伊豆半島群発地震活動の観測と震源過程の解明

第一の柱に関連しては、昨年 3 月に発生した伊豆半島の伊東沖群発地震活動の際に、世界で初めて地震の震源域近傍での地震動回転成分の観測に成功した。地動 6 成分（並進及び回転各 3 成分）を記録できた地震は 13 個であったが、回転成分データは単純な断層モデルから予測される値よりも数倍から十倍程度大きなものであった。このことは、震源近傍での地盤や建物に対する被害を考える上で、地震動の回転成分も今後十分に考慮していく必要があることを示している。第二の柱については、伊東沖の群発地震活動の最大地震の 6 成分観測データに、一般的な地動回転成分の定式化で導かれた定式化を適用して断層面上での食い違い速度の空間変化を見積もった結果、断層南東端で急激な滑り速度の変化があったことが推定された。この第一、第二の柱に関連した成果は国際学術誌の論文として公表された。その具体的内容は以下の通りである。

### 2. 2 地動回転成分から推定される 1997 年 3 月伊東沖地震の震源過程

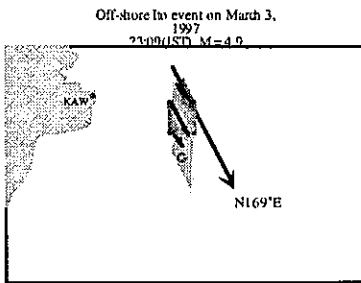
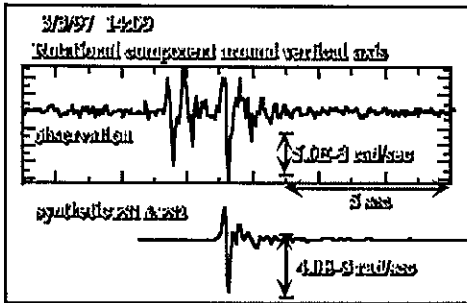
1997 年 3 月 3 日から始まった伊東市沖の群発地震活動は、翌 4 日に M 5.7 の最大地震が発生し、その後活動は徐々に低下し 26 日まで続いた。川奈崎はこの活動域から僅か 5 km 程の近傍にあり、3 月 3 日から 7 日にかけて最大地震を含む 13 個の地震で地動回転センサーのノイズレベルを超えるシグナルが記録された。図 1 に、3 日 23 時 9 分(M 5.2)と最大地震(4 日 12 時 51 分)の地動 6 成分の記録を示す。これらの地震は共に深さ約 5 km に決められ(地震研究所・地震地殻変動観測センター)、川奈崎は震央距離 3.4 km(3 日 23 時 9 分の地震)、3.2 km(最大地震)と極めて震源に近接している。3 日 23 時 9 分の地震記録を見ると震源過程が 2 個のサブイベントから成っていることが一目瞭然である。この地震では南北軸回りの成分で  $5.8 \times 10^{-2}$  rad/sec (3.3 deg/sec) という大きな回転運動が記録されたが、この振幅は最大地震の記録の数倍になっている。最大地震について、川奈崎と伊東(K-net)の強震記録データ(並進成分)を用いて点震源を仮定したモーメントテンソルインバージョンで震源過程を求め、そのメカニズムから計算される川奈崎での地動回転成分を計算して観測と比較した(図 2)。点震

源モデルの様な単純なものでは観測された回転成分の約半分の振幅しか説明することが出来ない。同様の比較を 3 日 23 時 9 分の地震について行うとその差は約数倍となる。このことは、震源近傍での地動回転成分では、Takeo and Ito (1997)に示されたような断層すべりの空間変化による励起が無視できない大きさを持っていることを示唆している。そこで、最大地震について、断層南端で急激に断層運動が停止したため、断層南東端でのすべりの空間変化が大きいモデルを想定して、順方向のモデリングでその破壊過程を推定した。その結果、断層南東端で数百 m の間に約 100cm/sec のすべり速度から零になる様な急激な空間変化を考えることにより、観測データがよく説明できた(図 2)。



次に、群発地震活動中でもっとも大きな地動回転成分が記録された 3 日 23 時 9 分(M 5.2)の地震について検討を行った。3 日 23 時 9 分の地震記録を見ると震源過程が 2 個のサブイベントから成っていることが一目瞭然である。この地震では南北軸回りの成分で  $5.8E^{-2}$  rad/sec という大きな回転運動が記録されたが、この振幅は最大地震の記録の数倍になっている。水平軸周りの回転成分(傾斜成分)は鉛直軸周りの回転成分に比べ短周期が卓越しているので、今回の解析では、鉛直軸周りの成分についてのみ検討を行った。鉛直軸周りの回転成分も並進成分の記録と同じく殆ど相似な波形を持つ明瞭な 2 つのパルスで構成されており、その大きさは、最初のパルスが  $6.4E^{-3}$  rad/sec、2 番目のパルスが  $8.2E^{-3}$  rad/sec の大きさを持っている。最大地震の際の鉛直軸周りのパルスが持っていた振幅は  $3.3E^{-3}$  rad/sec であるから、マグニチュードで比較するとかなり大きな地動回転成分が励起されたこ

とになる。そこで、まず、K-net 強震記録データを用いてこの地震のモーメントの再検討を行った結果、2つのサブイベントを含む十分に長い震源時間関数を設定すると最大地震とほぼ同じ  $1E17Nm$  の地震モーメントとなることが判明した。しかし、この地震モーメントでも観測された回転成分を十分に説明することは出来ない。つぎに、Takeo and Ito (1997)の結果に基づき、断層面上での空間的な急激な滑り速度の変化を想定して、どのような空間変化が観測された回転成分を説明するかを検討した。その結果、断層上端での急激な滑り速度の減少を考えるとある程度観測された大きな回転成分を説明できることが判明した(図3)。これは、この地震の破壊が浅い方に向かって進行したことを示唆するものである。



## 2. 3地動回転成分を用いた震源における1998年伊東沖群発地震のdislocation current tensorの推定

1998年の伊東沖群発活動では、新たに開発した高感度回転地震計を用いることにより、震央距離10kmまでのM1クラスの地震を含む約230個の地震について、地動回転成分を観測することに成功した。これらのデータを整理して、いくつかの地震について点震源近似でのdislocation modelから期待される地動回転成分の励起と観測地とを比較すると、観測値が全体に大きい値を示していることが明らかとなった。これまでは、この違いを説明する一つのモデルとして、断層面上でのすべり速度の空間的な変化により地動回転成分の励起を用いて説明を試みてきた(Takeo, 1998)。しかし、このモデルもより一般的な震源におけるdislocation current tensorに帰着させることが出来るので、ここでは

観測された地動回転成分のデータを用いて、地動回転成分の励起に直接関係している震源でのdislocation current tensorをインバージョンによって求めた。

欠陥を含む連続体の塑性変形の微分幾何学的記述の理論を適用することにより、Takeo and Ito (1997)は地震により励起される地動回転成分が震源でのdislocation current tensor及び塑性変形速度で表されるとを示した。さらに、地動の並進成分も併せて用いることにより、震源における塑性変形速度の空間変化やrotational strain tensorを求めることが可能となることを示した。このうち、塑性変形速度による地動回転成分の励起は、グリーン関数の時間2階微分との畳み込みに成るため高周波成分を扱う際には問題になるが、それ以外では極めて寄与が小さいことがシュミレーションにより確かめられている(武尾, 1996)。そこで、今回の解析では、この項は無視して地動回転成分から直接逆解析でdislocation current tensorを求めた。

1997年3月の群発地震活動の最大地震である4日12時51分(M5.7)について、地動回転成分の鉛直軸周りの成分が最も大きな振幅を持つ部分を切り出して解析した結果、求めたdislocation current tensor (Imn)の主な成分の大きさは、 $I(1,1) = 3.2 E+16 Nm$ ,  $I(1,2) = I(2,1) = 1.3 E+16 Nm$ ,  $I(2,2) = 0.6 E+16 Nm$ ,  $I(3,3) = 3.4 E+16 Nm$ である。また、1997年3月の群発地震活動で最大の地動回転成分を記録した3日23時9分(M5.2)の地震については、明瞭な2つのパルスで構成される記録であるため、前回の解析と同様に最初のパルスだけに注目して解析した。この地震の場合は、本震の深さが約5kmと求まっているが、大きな回転成分を励起したsourceの位置はそれよりも浅い約3km程度の深さに推定されている。そこで、今回の解析でもこの地震については、dislocation current tensorのsourceの位置を深さ3kmに仮定した。その結果求めたdislocation current tensor (Imn)の主な成分の大きさは、 $I(1,1) = 3.5 E+15 Nm$ ,  $I(1,2) \approx I(2,1) = 8.7 E+15 Nm$ ,  $I(1,3) \approx I(3,1) = 1.3 E+16 Nm$ ,  $I(3,3) = -7.8 E+15 Nm$ である。両者の結果とも、断層面上でのすべり速度の空間変化をモデル化した結果と矛盾しないものとなっている。

## 3. 高性能回転地震計の開発

第三の柱に関連しては、高感度地動6成分観測システムのテスト観測を東京及び松代(長野市)で実施し、本年1月に新潟県小千谷市付近で発生した地震を約100km離れた場所での地動回転成分の観測に成功した。さらに、現在使用している回転成分センサーは水晶発振子を利用したものであるがその感度に限界がこの間の観測研究で明らかになってきたので、別の原理に基づくセンサーによる回転地震計の可能性を検討した結果、光計測技術を応用したファイバーオプティックジャイロを改良することで小地震の微弱な地動回転成分を観測できることが明らかになった。

### 3. 1 光技術を用いた高性能回転地震計の試作

(その1：可能性評価)

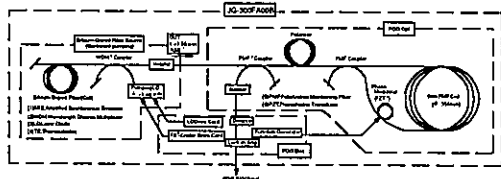
1997年3月の伊東沖群発地震活動において初めて、震源域近傍での地震動の回転成分観測に成功した(Takeo, 1998)。この観測では水晶発振子を用いたジャイロ技術を利用したが、小地震の回転成分を観測するには感度は不十分であった。一方、光技術を用いた回転運動計測技術の発展がめざましく、これを応用した高感度の回転地震計の開発が極めて実現性の高いものとなっている。

ここでは光技術を用いた回転成分地震計の開発と実用化をめざすための可能性評価の結果を報告する。光技術を応用したセンサーには、主にファイバオプティクジャイロ(FOG)とリングレーザージャイロ(RLG)がある。これらの計測原理はともに Sagnac 効果を用いたもので、その分解能はフォトンノイズによるもので理論的限界も明確になっている。しかし、RLG では微小な入力に対してロックイン現象と呼ばれる不感帯が存在し、地震動のような微弱なシグナルの計測には不向きである。そこで、FOG に焦点を絞り、その可能性を検討した。まず、 $2 \times 10^{-8}$  rad という高い分解能を持つ高感度の液体の慣性を利用したセンサーと現行の FOG の比較を行った。両センサーを振動台で同時に揺すりその出力を比較した結果、FOG は流体センサーに比べノイズが高いが出力レベルはほぼ同程度であり、FOG センサーの改良により流体センサーのレベルの分解能は実現可能である事が確認された。FOG の短周期のノイズは光電変換回路に起因する部分が大いと考えられ、ファイバ長やコイル径を大きくする事による感度の向上と変換回路の低ノイズ化により、十分に低減できる事が見積もられた。

3. 2 光技術を用いた回転地震計の試作 (その2：試作器の性能評価)

我々は、これまでファイバオプティクジャイロ(FOG)の感度向上を図ることにより、地震で励起される地動の回転成分を計測する回転地震計の可能性評価を行った。現在、光ファイバ技術を用いたジャイロ開発で高い実績のある(株)日本航空電子の技術陣と連携して、可搬型回転地震計と地球自由振動の捻れモードの観測を実現する長周期用回転地震計の実用化をめざして開発に取り組んでいる。それぞれの回転地震計の具体的な感度の目標値は、可搬型回転地震計では数十ヘルツまでを  $10^{-9}$  rad/sec の分解能を、長周期回転地震計では周期数秒以上で  $10^{-11}$  rad/sec の分解能を設定した。ここでは、可搬型地震計試作器の性能試験結果を報告する。

図3にセンサー構成の概念図が示してある。



右端に光ファイバのコイルに右回りと左回りにレーザー光を走らせ、この系に加わる回転運動によ

り生ずる右回りと左回りの光の位相差を検出して入力した回転運動を計る。今回の試作器では Erbium-Doped Fiber を使った光源で光量の増加をはかると同時に、5km の偏波面保持ファイバを内径約 35cm のポビンに巻いて感度を向上させた。このセンサーのノイズを確認するため入力のない状態で出力スペクトルをシグナルアナライザーで解析した結果を、図4に示す。図から分かるように、 $10^{-9}$  オーダーのノイズレベルが 1Hz よりも低周波の領域で実現しており、分解能の初期目標値をほぼ達成している。現時点では、光量の増加による S/N 比の改善は理論的に期待されるまで至っていない。今後この原因を解明することにより、 $10^{-9}$  の分解能のセンサーではサイズを大幅に小型化できる。また、この点が改善されるとほぼこの試作器の大ききのセンサーで地球自由振動の計測が可能となる。

試作器の感度温度安定性誤差は  $-20 \sim +35^{\circ}\text{C}$  の範囲内で  $\pm 3\%$  以内である。しかし、約  $0.44^{\circ}\text{C}$  の温度変化に対して  $8 \times 10^{-5}$  volt のドリフトが発生するのでファイバーコイルに何らかの断熱対策を施す必要がある。

試作器内部の様子を図5に示す。上の灰色の部分ファイバを巻いているポビンで下に光源や検出回路を乗せた基盤が組み込んである。

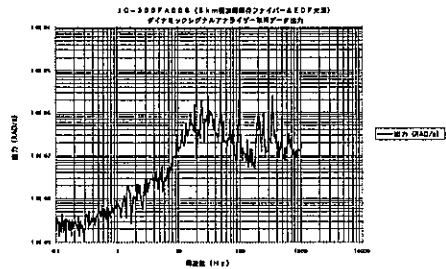


図4：回転地震計試作器の内部ノイズ

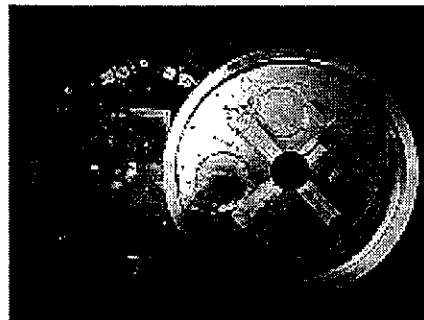


図5：試作器の内部写真