生野地学観測室における自然極微小 破壊の観測 (1)

京大学理学部地球物理学教室 小笠原 宏・藤森 邦夫

(昭和 62 年 6 月 10 日受理)

Observations of Natural Ultramicro-Fracturings at Ikuno Geophysical Observation Station (1)

Hiroshi OGASAWARA and Kunio FUJIMORI

Geophysical Institute, Kyoto University

(Received June 10, 1987)

Since February 1985, we have observed natural ultramicro-fracturings occurring in an area of several tens square meters at Ikuno Geophysical Observation Station in Hyogo Prefecture. From the present observation, we have attempted to obtain an adequate idea of the mechanism of the anomalous crustal deformation: it was recorded only by the extensometer No. 4 at this station before and after the Yamasaki fault earthquake (M 5.6; $d \approx 30$ km) on May 30, 1984. The Observation system was designed to detect an event occurring near the extensometer No. 4 with frequencies of 100 Hz-30 kHz and an amplitude larger than 30 gals. Another anomalous crustal deformation was recorded only by the same extensometer No. 4 in October-November 1985. The events that could be regarded as ultramicro-fracturings were observed in this period. The larger one had a predominant frequency of about 3 kHz and a maximum amplitude greater than 50 gals. This event was observed only by the sensor near the interface between rhyolite and tuff across which the extensometer No. 4 was installed. The other was observed by two sensors also near the interface. It can, therefore, be thought that the sources of these events are near this interface and that the anomalous crustal deformation and the natural ultramicro-fracturings are probably caused by local slips on this interface. This view, however, requires more data to be investigated and confirmed.

§1. はじめに

1984 年 5 月 30 日の山崎断層地震 (M 5.6) 前後から、兵庫県朝来郡生野町の生野地学観測室において異常な地殻変動が観測された [藤森・他 (1984, 1985)]. この変動は、同観測室に設置されている複数の計器に同時に現れたものではなく、凝灰岩と流紋岩との接触面をまたぐ伸縮計 4 番のみに顕著に現れたものであった。藤森・他 (1984, 1985) は、この接触面における局所的なスリップが、観測された異常地殻変動の直接的な原因であると考えた。しかし、観測をただ継続するだけでは、このような異常地殻変動がもし再び観測されたとしても、藤森・他 (1984, 1985) の考えを検証できる可能性は薄いと思われた。また、異常地殻変動の原

因に関するより多くの情報を得るためには、同じ観測坑内のしかるべき位置へ地殻変動観測計器を増設するか、あるいは、地殻変動に関連する他の現象の同時並行観測を新たに始めることが必要であった。もし、局所的なスリップが生じているならば、微小破壊が同時に発生している可能性がある。また、異常地殻変動に関する情報がこの観測から得られなかったとしても、微小破壊と地殻変動との同時並行観測から新しい知見が得られる可能性もある。このような動機で自然極微小破壊の観測を生野地学観測室において行うことにした。

同観測室においては、どこでどの程度の振幅、卓越周波数の振動を捉えることができるかという事前の情報が全くなかったため、とりあえず、飯尾 (1984) が中竜鉦山において捉えたものと同規模の微小破壊 (振幅 数gal~数十gal, 周波数 100 Hz~30 kHz の振動) を捉えることができるように観測システムを設計した。1985 年 2 月に予備観測を行った後、1985 年 3 月にイベント計数観測を開始し [小笠原・藤森 (1985)], 1985 年 7 月から波形観測を開始した。1985 年 10 月から 11 月にかけて伸縮計 4 番に顕著な異常地殻変動が再び観測された。微小な破壊によって発生したと思われる振動が、少数ではあるが、これと同時期に捉えられた。これらは、発破等の人工的な原因によって岩盤応力が時間的に急変したために発生したのではなく、また、飯尾 (1984) によって捉えられた微小破壊の小さいものと同程度、あるいは、それよりも小さいと思われるので、自然極微小破壊と呼ぶことにする。本論文では 1985 年 7 月から 1986 年 2 月までの観測の概要と観測システム、ノイズとその対策、そして上記のイベントについて報告する。

§ 2. 自然極微小破壊の観測

2.1. 生野地学観測室

生野地学観測室は、旧生野鉦山域内の金香瀬山 (標高 700 m) 中腹の旧火薬庫坑内 (地表か

Fig. 1. The location of Ikuno Geophysical Observation Station [after Tabei *et al.* (1985)].

らの深度は約 40 m; Fig. 1) に, 1976 年に開設され, 地殻変動と気象等の観測が行われている [田部井・他 (1985)]. 生野鉱山は 1973 年に閉山され, 1986 年現在, 応力場を短時間内に急変させる人工的な要因は観測室付近にはない (発破が行われているのは約 1 km 西方の採石場のみ). また, 最も近い旧鉱区から約 500 m 離れており, 観測室付近の静的応力場が, 採鉱跡などによって大きく乱されていることもないと思われる. 観測坑内の岩盤は, 藤森・他 (1984) が言う岩体接触面を境にして, 坑口側が流紋岩, 坑道奥側が凝灰岩からなる (Fig. 2).

2.2. 観測システム

2 種類のプリアンプ内蔵の圧電型加速度計をセンサーとして併用した. 一方は, 30 kHz まで特性が平坦であるが感度は低いもの (TEAC/bbn 社 508B; 10 mV/G; 以下, 単に「低感度センサー」), 他方は, 特性が 10 kHz までしか平坦でないが感度が高いもの (TEAC 社 707; 100 mV/G; 以下, 単に「高感度センサー」) である.

亀裂の多い場所や浮き石では高周波成分の減衰が激しいため, このような地点を避け, センサーは直接岩盤に石膏で固定した. また, 空気中を伝わる音波に共鳴しないように, ケーブルもセンサー付近約 10 cm は石膏で固定した. ロックハンマーで岩盤をたたいたときに生じる振動を全点で捕捉しうる範囲内で, 互いにできるだけ離れるように, 3 個の低感度センサーを数 m 間隔で岩体接触面付近に設置した. 観測点 1 および 3 に設置したセンサーは 1985 年 3 月から 1986 年 2 月まで位置を変えなかった. 観測点 2 に設置したセンサーは, 1985 年 12 月までの間にイベントが全く捉えられなかったため, 1985 年 12 年月に観測点 3 から約 1 m 坑口側の地点に移設した. 第 4 のセンサーは, 場合と目的に応じて感度や設置箇所を変えた.

観測システムのブロック図を Fig. 3 に示す. センサー, アンプ, パーソナルコンピュータ, ウェブメモリ以外は手作りである. センサーの出力は, 坑内で 1,000 倍に増幅され (アンプは TEAC 社 SA-16; 周波数特性 0~50 kHz, +1 dB, -3 dB) 同軸ケーブルで坑外へ送られる. 坑外では, 信号は, $f_c=50$ kHz のパワース型 5 次のローパスフィルターを通された後, トリガー判定される. フィルター出力中の定常的な電氣的バックグラウンドノイズレベルは, 約 50 mV_{p-p} である. これは加速度に換算すると, 低感度センサーおよび高感度センサーに対し, それぞれ, 5 および 0.5 gal_{p-p} である. また時々 300 mV を超える突発的な電気ノイズ

Fig. 2. The observation tunnel and the arrangement of instruments [modified after Tabei *et al.* (1985)].

Fig. 3. A block diagram of the observation system of natural ultramicro-fracturing. The analog and digital signal lines are shown by thick and thin lines, respectively.

Fig. 4. An electric circuit diagram of a gain control unit and its response.

(加速度換算 30 gal, 3 gal; 後述) がバースト的に入る。なお、トリガーレベルは、低感度センサーに対しては 25~30 gal に、また高感度センサーに対しては 2.5~3 gal に設定した。

トリガーパルスはカウンターに入力され、その結果得られるイベント数はテレメータ装置に入力されている。ただし、振動レベルがトリガーレベル以下に下がってから 10 ms 経過する前に、再びそれがトリガーレベルを超える場合には、1 個のトリガーパルスが出続けるように設計した。従って、イベントが 10 ms 以内に群発したときも 1 個と数えられる。また、突発的電気ノイズが計数されることもあるが、アクティブチャンネルとダミーチャンネルが同時に計数されるので、容易に識別できる。

トリガー時刻の前後 10 ないし 20 ms の波形データは、それぞれ、100 k ないし 50 kHz サンプリングでウェーブメモリ (菊水社 WM 8700; 10 bit; 1024 word/channel) に取り込まれており、GPIB を介してパーソナルコンピュータ (NEC 社 PC-9801F3) に転送され、CRT 上に波形が表示されると同時に固定ディスクに記録される (約 1,000 個取込可能)。こ

れに要する時間は、1 イベントあたり約 30 秒である (この 30 秒間に発生するイベントの波形は観察できないが、その有無については、波形の取り込みとは独立に行われているイベント計数の結果から知ることができる)。また、固定ディスクに記録されたイベントの数はテレメータ装置に入力されており、大学の端末装置で、現地の固定ディスクに記録されているイベントの個数を知ることができる。停電に対しては、その復旧後に、装置の初期化と観測再開とを自動的に行うようにプログラムされている。

高倍率と低倍率の情報が1つのチャンネルに記録できるようにゲインを調節し、チャンネル数を節約している (ゲインコントロール; Figs. 3, 4)。高倍率が必要であるのは信号の立ち上がり付近の小信号部分だけであるから、振幅約 600 mV 以下の信号は減衰させずに記録させている。この小信号の範囲は 8 bit 強に相当する分解能で観察できる。一方、低倍率が必要であるのは大振幅の部分であるから、振幅 600 mV~5 V の信号は 1/10 に減衰させて記録させている。この範囲は 9 bit 強に相当する分解能で観察できる。例えば、10 V_{p-p} の三角波は Fig. 4 に示されている波形として固定ディスクにデジタル記録される。なお、歪んだ形で記録された波形は、ゲインコントロールの入出力特性 (Fig. 4) をもとに、パーソナルコンピュータによって数値的に復元される。

2.3. 突発的電気ノイズ対策

突発的電気ノイズは、観測対象としている振動と周波数帯域が重なるため、アナログフィルターによって除去することはできない。後述する突発的電気ノイズ対策が施される以前は、固定ディスクがノイズの波形データですぐ一杯になり、これを更新するために現地へ頻繁に赴かなければならなかった。また、記録された 1,000 個分のデータの中からごく少数のイベントをより分けなければならず、作業能率がきわめて低かった。

突発的な電気ノイズは、調査の結果、アンプに起因していることがわかった。アンプの内部を調べた結果、筐体が電氣的に浮いているのに加え、筐体内で入力信号線が単線のまま引き回されているため、突発的ノイズを拾いやすいということがわかった。これらの点を改良すべくアンプに改造を加えた。その結果、突発的なノイズの発生頻度が減り、定常的なノイズレベルも下げることができた。

上記の改良によって突発的なノイズの頻度は減ったものの、依然、少なくはなかった。そこで、ダミーセンサー (抵抗器を銅箔で覆ったもの) を使用し、ダミーチャンネルには信号は現れず電気ノイズだけが現れることを利用して、突発的電気ノイズによってはトリガーされない機構を考えた。最初は、ダミーチャンネルからトリガー信号が出続けている間は、波形データの取り込みもイベント計数も行わないという単純な機構にした。しかし、トリガーレベルはチャンネルごとに微妙に異なるため、突発的電気ノイズが全チャンネルに同時に現れても、トリガー信号が全チャンネル同時には出ない。場合によってはアクティブチャンネルから先にトリガー信号が出てしまうこともあったため、突発的電気ノイズを確実に除去することができなかった。そこで、次に、ダミーチャンネルの場合にはその出力がトリガーレベルを超えた瞬間に、またアクティブチャンネルの場合には 1 ms 遅れて、トリガー信号が出るように変更した。Fig. 3 中の Delay が、この遅延を行う部分である。このようにして、突発的な電気ノイズが発生したときには、ダミーチャンネルから、必ず先にトリガー信号が出るように改良された。この改良によって、1986 年 2 月に、電気ノイズではほとんどトリガーされないシステムが、

ようやく完成した。この機構は AC 電源の瞬断等の大きい電気ノイズには無力であるが、その頻度は少ない。

§3. 捉えられたイベント

1985 年 2 月から 1985 年 7 月まではイベント計数のみが行われており、降雨中とその前後にはイベントが頻繁に計数されていた [小笠原・藤森 (1985)]。しかし、1985 年 7 月から開始した波形観測の結果、降雨中とその前後に計数されるもののほとんどすべてが電氣的ノイズであることがわかった。7 月以前の観測で計数されていたものも恐らく全部が電氣的ノイズであると思われる。

観測点 1 では次に述べる イベント以外には、1985 年 7 月から 1986 年 2 月までの間に、20~30 gal を超える振動は記録されなかった。観測点 2 では、1985 年 7 月から同年 12 月までの間に、20~30 gal を超える振動は 1 度も記録されなかった。観測点 3 については §4 に述べる。ただし、固定ディスクがデータで一杯になってしまったために、あるいは、突発的電気ノイズが頻発していたために、イベントの有無がわからない期間は、1985 年 7 月から 1986 年 2 月までの間で延べ約 1 ヶ月である。

1985 年 7 月から 1986 年 2 月の観測期間を通じて最大のイベントは、10 月 21 日 0 時 8 分に最も岩体接触面に近い観測点 1 で捉えられた。このイベントの卓越周波数は約 3 kHz、最大振幅は 50 gal 以上であった (Fig. 5)。他のセンサー (すべて低感度) にはこのイベントは捉えられてはいなかった。約 7 ms 後に新たな振動が始まっているが、ウェーブメモリの容

Fig. 5. Wave forms of the micro fracturings that occurred during an anomalous crustal deformation. These were observed at the locations shown in Fig. 2. by solid circles with the corresponding numerals.

Fig. 6. The former part of an anomalous deformation observed by the extensometer No. 4 in October-November 1985. The micro fracturings in Fig. 5 were observed at the times pointed by arrows. [modified after FUJIMORI *et al.* (1986)].

量不足のため、以後の波形は記録されていない。一方、イベント計数では、このイベントによるトリガー時刻前後（波形観測不能な 30 秒間を含む）には、1 個しか記録されていない。したがって、トリガーレベルを超えたイベントは、10 ms を隔てずに群発していたか、あるいは Fig. 5 に示された 2 つのイベントの後には発生していなかったということになる。

このイベントが発生した約 16 時間後の 10 月 21 日 16 時頃から伸縮計 4 番が異常な伸びを示し始め、10 月 25 日 0 時頃まで伸び続けた (Fig. 6) [藤森・他 (1985)]。

異常地殻変動が最も激しかった時期には間に合わなかったが、10 月 25 日 15 時に観測点 4 に高感度センサーを設置し、トリガーレベル 3 gal の観測を開始した。その後、11 月 4 日に別のイベントが観測点 1 および 4 で捉えられた (Fig. 5)。最大振幅は 10 月 21 日のイベントの 1/10 以下である。これは異常地殻変動が一時小康状態になったときに発生している (Fig. 6)。その後、最大振幅が 11 月 4 日なみのイベントが、1 月 5 日と 8 日に観測点 1 および 4 で捉えられた。この時には異常地殻変動は観測されていない。

いずれのイベントも多くても 2 点でしか捉えられていない。また、2 点で捉えられている場合でも、 S/N 比が悪いため位相を比較するのも困難であり、震源を推定することはできない。

§4. 検 討

今回捉えられたイベントを、これまでに述べた観測事実だけから、微小破壊と結論づけるのは時期尚早であろう。以下では、誤認する恐れがあるノイズ源について検討する。

雷雨時の電気ノイズの波形例を Fig. 7(a) に示す。図に示すように、短周期成分と長周期成分が同時に現れているものと、図には示さないが、いずれかの成分しか現れていないものがある。次に、突発的電気ノイズの波形例を Fig. 7(b) に示す。これらは、降雨中あるいはその前後に多く捉えられ、空電をアンプが拾ったと思われる [尾池 (1986)]。このような電気ノイズは、ごくまれに降雨に関係ない時期に捉えられることもあった (例えば、10 月 22 日には、兵庫県北部は快晴であったにもかかわらず数十個捉えられている)。電気ノイズは全チ

Fig. 7. Typical examples of electric noises. (a) Thunderbolts, (b) Atmospherics observed in sequence before and during rainfall. These were observed at the location shown in Fig. 2 by solid circles with the corresponding numerals.

Fig. 8. Examples of the wave forms observed by the sensor No. 3 when the signal cable was not fixed firmly (see the location in Fig. 2).

チャンネル同時に現れるので容易に識別できる。Fig. 5 と Fig. 7 に示された波形を比較することによっても、前節で述べたイベントが電気ノイズでないことがわかる。

観測点3付近の坑壁にはケーブルを固定するのに適当な凹凸が少なかったため、ケーブルの固定が十分ではなかった。特に、センサー極近傍のケーブルが十分に固定されていない場合は、ケーブルが微小な岩盤を伝わる振動や空气中を伝わる音波に共鳴し、それが実際よりもかなり大きい信号として記録されることがあった。例を Fig. 8 に示す。これらには、以下のような特徴があった：

- 1) ケーブルの固定度が低くなるに従って発生頻度も高くなった、
- 2) ケーブルを固定し直したら発生しなくなった、
- 3) 観測点4に設置した高感度センサーによっても、また観測点3から 1m しか離れていない地点に一時的に設置した低感度センサーによっても、捉えることはできなかった。

観測点3では、ちょうど伸縮計4番に異常地殻変動が現れていた10~11月に、このようなイベントが頻繁に捉えられていた。捉えられていたものは、何であるのか興味深い、不明である。

観測点3のみで頻繁に捉えられた上記のイベントに対し、10月21日に観測点1で捉えられたイベントや、11月4日、1月5日および1月8日に観測点1および4で捉えられたイベントは、単発的であり、ケーブル固定度も落ちていなかった。従って、これらは観測点3のみで頻繁に捉えられていたものとは性質が異なるものである。

水滴が岩盤に衝突したときの振動はどうであろうか。実験したところ、水滴がセンサーを直撃しないかぎり、トリガーレベルを超える振動は記録されなかった。センサーはオーバーハングの陰に設置されているため、水滴の直撃を受ける恐れはない。従って、今回捉えられたイベントは、規模や可能性から水滴が原因とは考えられない。

落石が岩盤に衝突した場合ならば、捉えられたイベントと同程度の規模の振動が発生しうる。しかし、捉えられた規模の振動を発生させるためには、こぶし大の石が落下することが必要である。このような石が落ちていないか坑内を注意深く探したが、そのような石は見いだせなかった。また、天井や坑壁にもそのような大きさの石がはがれ落ちた形跡も無かった。

イベントが捉えられた時、生野地学観測室付近では微小地震 ($M > 0$) は発生していなかった [京都大学防災研究所附属鳥取微小地震観測所 (1986)]。また、遠地の大地震も起こっていなかった [気象庁地震火山部 (1986)]。従って、今回捉えられたイベントは、地震そのものの震動でもなく、その震動に励起されたものでもない。

誤認する恐れがあるノイズ源は上記以外にはないと考えられる。

以上の検討の結果、今回捉えられたイベントは、これまでに述べた原因では説明できず、自然極微小破壊である可能性が高いと考えられる。

§ 5. まとめと今後の課題

1985年7月から1986年2月までの8ヶ月間、イベント計数と波形観測とを行った結果、自然極微小破壊によって発生したと思われる振動を4例捉えることができた。1985年10月21日のイベントは岩体接触面に最も近いセンサーのみに、他のイベントもこのセンサーと次に近いセンサーとによって捉えられたものであった。これらの振動は、波形や発生頻度、到達時刻差において、他の原因によって発生するノイズや振動とは明かに異なるものであった。

自然極微小破壊と地殻変動との同時並行観測の結果、幸運にも、観測期間を通じて最も大きい極微小破壊と異常地殻変動とをほぼ同時期に捉えることができた。これらは全く無関係ではないと思われる。しかし、多くても2点でしか振動を捉えることができず、震源決定はできなかった。また、異常地殻変動が最も激しかった10月21~24日には、高感度センサーの設置が間に合わず、最大振幅30 galより小さいイベントがこの期間に発生していたかどうかはわからなかった。

今回の観測結果だけから異常地殻変動の原因を解明することはできなかった。システムの検知能力を上げて自然極微小破壊の観測を続け、データを増やすことが重要である。

謝 辞

三菱金属(株)生野工場の各位, 株式会社シルバー生野故横山圭一支配人および西村米一現支配人ならびに藤原栄治, 藤原光幸両氏を始め同職員の方々には, 観測の便宜をはかって頂きました. 元京都大学理学部地震予知地域観測センター三木晴男教授には多くの支援を頂きました. 京都大学理学部地震予知観測地域センター行竹英雄助手には, 予備観測に際して測器を貸して頂き, また, 微小破壊観測の手ほどきと多くの助言を頂きました. 京都大学理学部中川一郎助教授および田中 豊講師には有益な助言を頂きました. 京都大学防災研究所尾池和夫助教授には有益な唆を頂きました. 京都大学防災研究所岸本兆方教授ならびに同研究所附属鳥取微小地震観測所渋谷拓郎助手には地震データを提供して頂きました. 予備観測とセンサー設置時には京都大学理学部地球物理学教室の田部井隆雄・福田正浩両氏をはじめ院生諸氏の助力を頂きました. これらの方々に, ここに心からお礼を申し上げます.

文 献

- 藤森邦夫・田部井隆雄・田中 豊, 1984, 1984 年 5 月 30 日山崎断層地震前後の生野観測室における地殻変動, 地震学会講演予稿集, No. 2, 9.
- 藤森邦夫・田部井隆雄・田中 豊, 1985, 生野地学観測室における地震に先行する異常地殻変動, 地震学会講演予稿集, No. 1, 264.
- 藤森邦夫・田部井隆雄・田中 豊, 1986, 生野地学観測室における異常地殻変動と地震(本震・余震)との関連について, 地震学会講演予稿集, No. 1, 261.
- 飯尾能久, 1984, 余震を伴う微小破壊, 地震, 2, 37, 599-606.
- 気象庁地震火山部, 1985, 地震火山概況, No. 259, 11.
- 京都大学防災研究所附属鳥取微小地震観測所, 1986, 私信.
- 小笠原 宏・藤森邦夫, 1985, 生野地学観測室における自然極微小破壊の観測について, 地震予知「きんき・けいはんしん」会報, 7, 4-17.
- 尾池和夫, 1986, 私信.
- 田部井隆雄・藤森邦夫・田中 豊, 1985, 生野における地殻変動の連続観測(1977~1983), 測地学会誌, 31, 189-201.