

旧生野鉾山における多項目総合観測システム

小笠原 宏・藤森 邦夫・小泉 尚嗣・藤原 智
中尾 節郎・西上 欽也・谷口 慶祐・大塚 成昭
平野 憲雄・西田 良平・飯尾 能久

COMPREHENSIVE OBSERVATION SYSTEM AT OLD IKUNO MINE FOR EARTHQUAKE PREDICTION

By *Hiroshi OGASAWARA, Kunio FUJIMORI, Naoji KOIZUMI, Satoshi FUJIWARA,*
Setsurou NAKAO, Kinya NISHIGAMI, Keisuke TANIGUCHI, Shigeaki OTSUKA,
Norio HIRANO, Ryohei NISHIDA and Yoshihisa IIO

Synopsis

Using tunnels and shafts in Ikuno mine, which was closed in 1974, we started in 1987 to observe seismic events and temporal change of 1) electric self-potential, 2) apparent resistivity, 3) underground water level, 4) water seepage from tunnel wall and 5) γ ray intensity. The main purpose of our comprehensive observation is to discuss correlation between the observed data in such a stable circumstance as that without excavation, taking account of the continuous observation of crustal movement which have been carried out before the mine was closed. Since all tunnels and shafts below the underground water table filled up with water now, we expect to catch any behavior of rock body in response to any change of underground water and also any preseismic or postseismic effect. From the observation of about five years, we found that the seismic events ($S-P$ time < 0.3 s; $M < 0$) still occur even now in the vicinity of mine. From our preliminary analysis, the secular change of electric self-potential seems to correlate to the activity of the seismic event in the mine.

1. は じ め に

我々は、兵庫県朝来郡生野町の旧生野鉾山 (Fig. 1) の廃坑を利用して、「一辺が約数百 m の巨大な岩石試料」とみたてることができる領域 (Fig. 5) において、自然電位、比抵抗、 γ 線、地下水位、そして、この領域もしくはそのごく近辺に発生する地震を観測することによって、岩盤の挙動を総合的に把握する試みを、多項目総合観測と称して、1987年から開始した。

生野鉾山においては、1943年3月から現在にいたるまで、数度の観測の中断や観測地点の移設を経ながらも、地殻変動連続観測が継続されている^{1), 2), 3), 4)}。この間には、1943年9月の鳥取地震の前兆的な異常傾斜変動が観測された¹⁾のをはじめ、周辺の地震活動と関連があるとみられる地殻変動なども幾例か^{2), 3), 4)}報告されている。また、1984年には、生野鉾山の南西約 30 km に発生した M5.6 の地震の際に、2～3ヶ月間にわたり余効変動が観測されている⁵⁾。このような地殻変動が観測されたとき、岩盤はどのような挙動をしたのかを知ることが、我々の観測の目的の一つである。また、このような岩盤の異常時の挙動だけでなく、平常時の挙動を総合的に知ることも、目的の一つである。

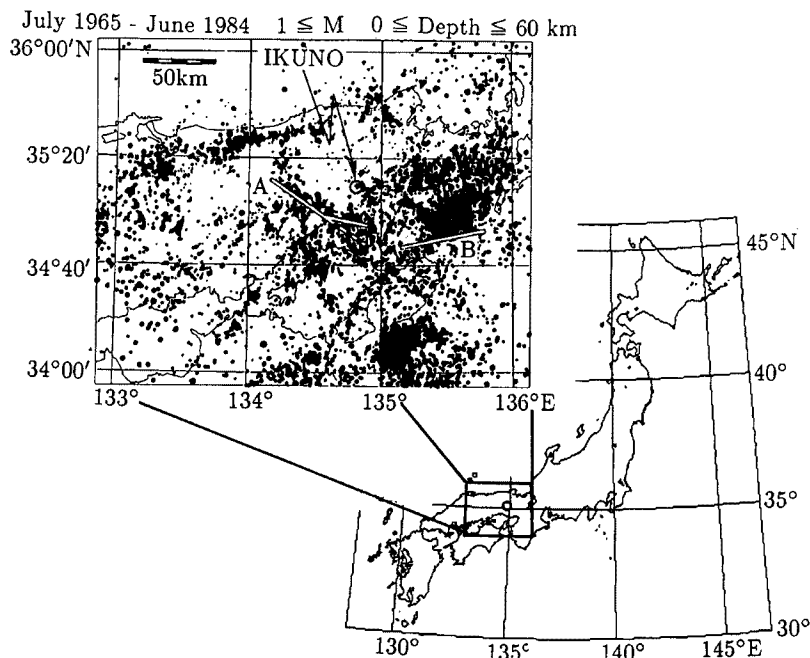


Fig. 1. Location of Ikuno mine (○) and Seismicity in and around Ikuno mine (after Kishimoto and Oike (1985)¹⁰⁾).

生野鉱山の廃坑を利用した、このような「多項目観測」のアイデアは、田中・西田 (1977)⁶⁾ によって既に提案され、また試行もされてきた。しかし、当時は、たとえば地震観測については時間分解能やノイズ対策などの技術上の問題があり、精度のよい観測が困難であった⁷⁾。今回の我々の試みでは、地震観測にはパーソナル・コンピュータをデータ記録システム^{8),9)}を主役として採用することによって、精度の高いデータ収録が実現した。

本報では、このような目的で行っている多項目総合観測のシステムについて報告する。

2. 生野鉱山

2.1 生野鉱山付近の自然地震活動

生野から半径数十 km の範囲の地震活動¹⁰⁾ は、日本海沿いの活動、山崎断層 (Fig. 1 中の白線 A) 沿いの活動、有馬高槻構造線 (Fig. 1 中の白線 B) 以北に広がる丹波地方の地震活動、の 3 つに大別することができる。これらの地震は、東西圧縮によって深さが十 km 前後の地点を中心に発生しているものである。生野鉱山 (Fig. 1 中の○) は丹波の活動域の北西端に位置している。生野鉱山のごく付近にも地震活動が見られるが、これらは、後述 (2.3. 参照) するように、鉱山域に発生した山はね (最大 FP マグニチュード 2.4)^{6),11),12),13)}、あるいは、閉山後の地下水位の回復によって誘発された地震 (最大 FP マグニチュード 2.9)^{6),13)} など、すなわち、いずれも半人為的で深さが 1~2 km 未満の浅い地震活動によるものである。これらの半人為的な地震が治まった 1978 年以後の地震 (Fig. 2(b)) を見ると、生野鉱山の南東約 5 km にある、長さが約 10 km で走向が北東—南西の确实度 2 の活断層 (Fig. 2(a)) が、丹波の地震活動域の北西縁にほぼ一致しているように見える。

2.2 生野鉱山付近の地質と鉱床^{15),16)}

厚さ 1000 m を超える第三紀凝灰岩などの累層 (Fig. 3 中の Tf₂, Rh₂, Tf₁, Rh₁) が、鉱山域で北東—南西

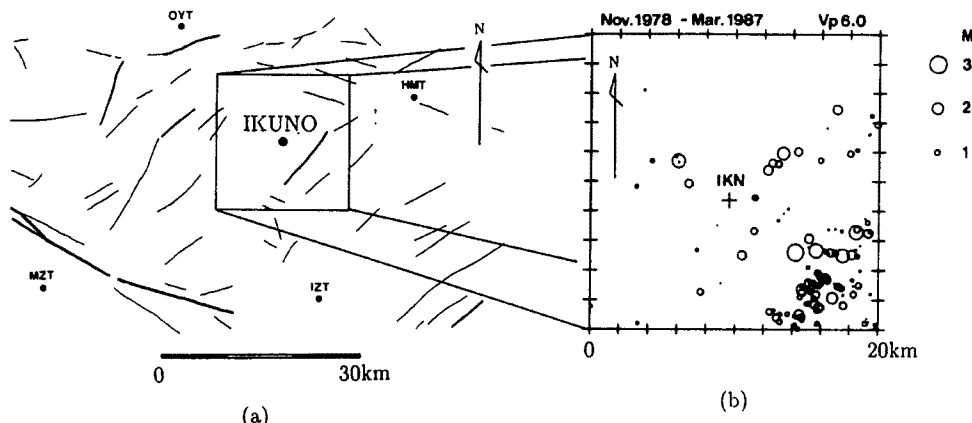


Fig. 2. (a) Active faults in the vicinity of Ikuno mine¹⁴⁾. Thick lines represent the most active faults in the first or second certainty class. (b) Epicentral map in the vicinity of Ikuno mine in the period after the activity of water-induced earthquake (1976–1986) (supplied by Tottori Microearthquake Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University).

方向を長軸とする盆地をなし、この盆地を安山岩など (Fig. 3 中の An など) が水平に覆っている。その後、玄武岩などが貫入し岩脈と岩床を形成した (Fig. 3 中の Ba など)。鉾床のほとんどは、Dip がほぼ鉛直で南北走向に発達するこの玄武岩岩脈が固結する際に生じた張力割れ目、あるいは、北西—南東走向の剪断割れ目を充填した熱水性のものである。生野鉾山の稼行の対象となった鉾脈は70条あまりであり、その範

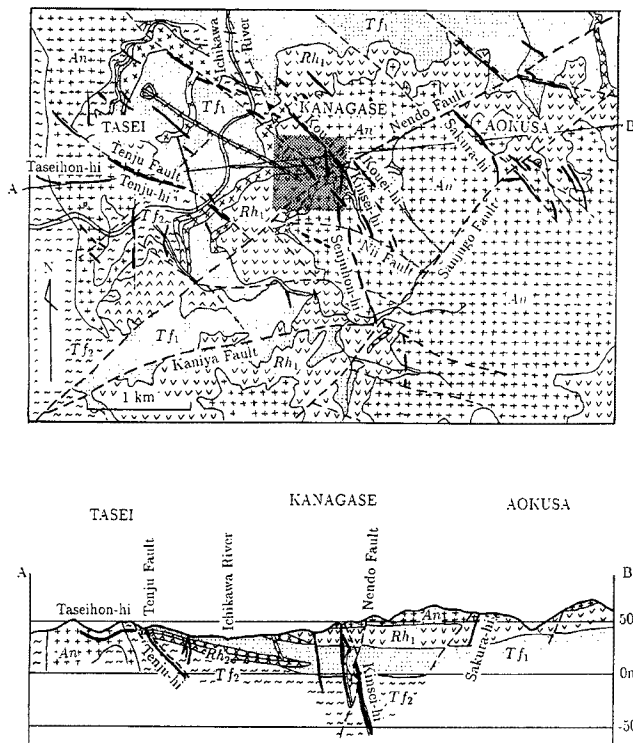


Fig. 3. (a) Geological map in the vicinity of Ikuno mine and (b) vertical cross section along a line A-B (supplied by Ikuno mine). The area shown in Fig. 5 is shaded.

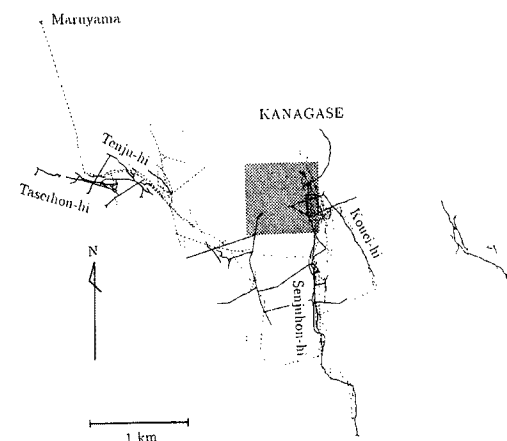


Fig. 4. Plane map of tunnels excavated (supplied by Ikuno mine). Solid line: tunnels at an altitude of about 360–370 m. Dashed line: tunnels at 260–270 m altitude (5L tunnels). The area shown in Fig. 5 is shaded.

囲は水平的には東西約4 km, 南北約3 kmにおよんだ (Fig. 4)。生野鉱床の主体は中央部の金香瀬鉱脈群である (Figs. 3, 4)。金香瀬鉱脈群では, NS系の千珠本ひ, 千珠前ひ, 金盛ひ, NW系の光栄ひが主要脈であり, NS系の鉱脈の稼行深度は地表下約1000 mに達する。西部の太盛鉱床群は, 金香瀬鉱床群よりも稼行深度が浅い。東部の青草鉱床群 (桜ひなど) は前記の両鉱床群に比べて小さい。

生野鉱山における断層 (Fig. 3) には, NE-SW系の粘土断層と三十号断層, NW-SE系の20号断層, 二井断層, 蟹谷断層, 天受断層などがあるが, これらは, 鉱脈生成後の活動によるものである。これらのうち, 粘土断層と三十号断層は2万5千分の1の地形図でもトレースでき, 顕著である。

2.3 生野鉱山の閉山と山はね・誘発地震

生野鉱山は, 日本における最も歴史の古い鉱山のひとつで, 大同2年 (807年) に開坑としたと伝えられており, 本格的な採掘は天文11年 (1542年) に始まった。歴史時代の採掘によって, 地表下数十 m の範囲の有望な鉱脈の付近には, 狸穴と呼ばれ, 断面が数十 cm×数十 cm の非常に狭い坑道が数多く存在し, 現在でも地表付近の地下水の動きに影響を与えている。

近代の採掘により, 採掘深度が地表下1000 m 近くになるに従って, 採掘地点や坑道付近 (地表下1000 m 弱) において山はねが発生し始め, 1971年6月には最大のもの (FP マグニチュード2.4)^{6), 11), 12), 13)} が発生し, 1973年3月には閉山のやむなきにいたった。閉山後, 地下坑内の排水が行われなくなり, 総延長が約350 km におよんでいた坑道のほとんどは水没した。地下の坑道が次々に水没してゆく過程では, 誘発地震が発生し, 地下水位がほぼ現在のレベルに達した1976年には M2.9 の有感の誘発地震が発生した^{6), 13)}。しかし, その後, 現在にいたるまで, 生野鉱山域では顕著な地震活動はない (Fig. 2(b))。

3. 観測システム

3.1 観測に使用している坑道

閉山後も, いくつかの坑道は現在も封鎖されずに保存されており, その一部は観光事業として一般に公開されている。また, コンクリートで巻き立てられているのは採鉱跡や断層破碎帯近傍などの一部の箇所に限

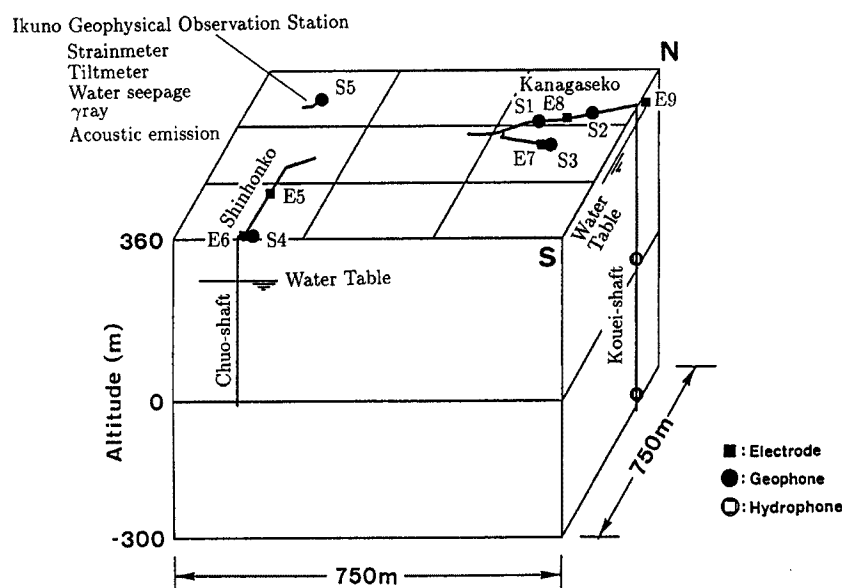


Fig. 5. Schematics showing three-dimensional relationship of location between observation points and tunnels or shafts.

られ、他の箇所は岩盤が露出している。このため、坑内という気象擾乱の少ない環境下で、しかも、各種センサーを直接岩盤に設置して観測することが可能である。

観測に使用している坑道を Fig. 5 に示す。金香瀬坑は、生野鉱山の最も主要な鉱脈を採掘するために掘削された、歴史の最も古い坑道の一つである。我々の観測では、標高約 365 m のレベルの水平坑道の一部である、東西走向の長さ約 400 m の部分を利用している。この部分のかぶりは最大で約 140 m である。この 400 m の区間にはいくつかの鉱脈があり、また東端付近では粘土断層が坑道と交差している。

新本坑は、昭和になってから掘削された坑道で、我々の観測には南北走向の長さ約 400 m の部分を利用している。この区間で最大のかぶりは約 150 m である。この約 400 m の区間には鉱脈は見られないが、区間の南端付近では粘土断層が交差している。標高は金香瀬坑とほぼ同じであるので、この 2 本の坑道を利用することによって、標高約 365 m の水平面上に、2 次元的に観測点を展開できる。

生野地学観測室は旧火薬庫の約 70 m の坑道で、かぶりは最大で約 40 m である。

光栄堅坑は、標高約 365 m からの深さが約 600 m あり、下部約 550 m が水没している。水位は標高約 300 m に一定するように、ポンプで人工的に調節されているが、大雨等の際には 10 m 以上上昇することもある (Fig. 6)。

中央堅坑は、標高約 365 m からの深さが約 300 m あり、下部約 200 m が水没している。中央堅坑の地下水は、鉱山北西部の円山疎水口 (Fig. 4) から自然排水されているため、中央堅坑の水位は、円山疎水口へいたる 5 番坑道 (Fig. 4 中の鎖線の坑道；標高約 250 m) のレベルでほぼ一定している。

これらの水平坑道と堅坑を利用することによって、3 次元的にセンサーを配置することができる。

3.2 ケーブル

データはすべて、地殻変動総合観測線のテレメータ室にシールド・ケーブルを介して集められる。テレメータ室と新本坑の間のデータ転送には、10 芯のシールド・ケーブルを使用し、テレメータ室と金香瀬坑の間には、10 芯および 20 芯のケーブル各 1 本を使用している。ケーブルは、排水溝の側壁や石垣の壁面に固定し、それが不可能な区間は地下 10~30 cm に埋没した。ケーブルは、観測開始当初は、途中に接続箇所がなく、それぞれ 1 つなぎのものであり、絶縁も良好であった。しかし、テレメータ室と金香瀬坑の間の 2 本のケーブルは、1988 年に草刈作業のために、また、1991 年にはがけの修復工事のために切断され、接続しなおしている。テレメータ室と新本坑の間は、1992 年 3 月に、工事のために切断され、接続しなおしている。これらのため、ケーブルの絶縁性は観測開始当初よりはやや悪くなっている。

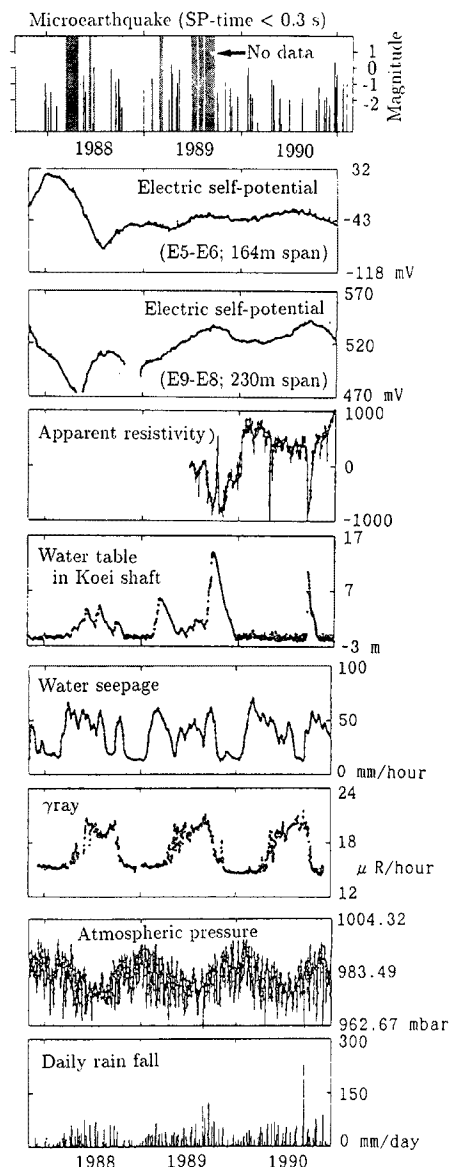


Fig. 6. Results obtained by comprehensive observation (1987-1990)²⁶⁾.

3.3 長周期成分のデータ収録方法と各観測項目

以下に述べる、自然電位、 γ 線などの長周期成分は、地殻変動総合観測線のテレメータの空きチャンネルを利用して京都大学防災研究所に転送され、1分値、5分値、60分値がファイルとして保存されている。また、60分値については、端末での出力をMS-DOSのファイルにしている。

(1) 自然電位差

詳細は別報^{17)~20)}ですでに報告済みであるので、ここでは概略を述べるにとどめる。Fig. 5 の黒四角(E5-E9)で示された地点に炭素棒電極を設置し、ケーブルによって生野地学観測室(Fig. 5)のテレメータ室の入力絶縁型の差動アンプと接続されている。信号はアンプによって10倍増幅され、 $f_c=0.01$ Hzのローパス・フィルターがかけられた後、テレメータ装置の入力レンジ(± 500 mV)からはずれぬように、DCオフセットが調節された後、テレメータ装置に入力されている。

金香瀬坑のトンネル壁面には、光栄堅坑の水位調整用ポンプのための3000 Vの電源線と照明用の100 Vの電源線が走っており、自然電位(Fig. 5中の電極E7-E8)の観測環境としては悪い。しかし、新本坑のトンネルにはAC電源線は全く残されておらず、自然電位(Fig. 5中の電極E5-E6)の観測環境としては良好である。

いくつかの鉱脈をまたいでいる電極9-8(ほぼ東西走向; スパン230 m; Fig. 5中の電極E9-E8)のDC電位は約-100 mVであるのに対し、鉱脈をまたいでいない電極5-6(ほぼ南北走向; スパン164 m; Fig. 5中の電極E5-E6)のDC電位は約500 mVである。それぞれの電位には、さまざまな外的な要因による変化が重なっている。まず、数mVほどの日周変化は、生野鉱山の東方30 kmを走るJR福知山線の列車運行ダイヤと同期しているため、電車からの漏洩電流の影響によると考えられる。また、雨が降ると5 mVほどの変化が数日前見られる。金香瀬坑の電極9-8の電位では、大雨があると20 mVほどの変化が1週間近く続くこともある。また、大きい磁気嵐が発生した場合にも、その影響を捉えることができる。

(2) 大地比抵抗

電流電極を金香瀬坑内(Fig. 5)のE9付近とS1付近に埋設し、また、E8とE9を電位電極として利用して、大地比抵抗計(山崎に設置されているものと同様の機種)によって比抵抗変化を観察している。自然電位と同様テレメータされている。大雨が降った後には、約1カ月間抵抗値が下がる。その回復は、自然電位よりは早い(Fig. 6)。詳細は、自然電位と同様に、別報^{19),20)}を参照のこと。

(3) 堅坑の水位

光栄堅坑(Fig. 5)においては、観測開始当初、我々の設置した水位計が正常に動作していたが、10 m近い水位上昇による水没のたびに水位計が故障し、期間を通じたデータは、結局、テクノ大手の方々が毎日午前8時頃、物差しで直接測っている水位データを使用することになった。観測期間中の10 mを超える増水(Fig. 6)は、大雨やポンプ不調などによるものであった。

中央堅坑(Fig. 5)では、高湿度のため長期の観測はできなかった。気圧が原因か地球潮汐が原因かわからないが、半日周期で1~2 cmの水位変化が見られる。大雨後には数cm上昇する。

(4) 生野観測トンネルからの湧水

生野地学観測室(Fig. 5)のトンネルの天井からは、しみだした水が水滴となって絶え間なく落下している。この水を幅1 m長さ2 mのビニールの屋根用の波板で受け、雨樋で転倒升雨量計へ導いて、湧水量を観測している。

(5) γ 線量変化^{21),22)}

生野地学観測室(Fig. 5)に γ 線シンチレーション・サーベイメーターを設置し、出力がテレメーターされている。その結果、秋冬春にかけては γ 線量は低レベルではほぼ一定であるが、春夏秋にはやや増加することがわかった(Fig. 6)。同様な変化が鳥取などの他の地点でも観測されているので、これらともあわせ、詳細が検討される予定である。

3.4 地震観測システム

(1) 観測対象とする地震

観測対象は、マグニチュード 1 程度以下の地震で、また、震源までの距離が数 km 程度以下であり、しかも震源が地表下 1~2 km よりも浅いものである。生野鉾山は京都大学防災研究所の微小地震観測網 (Fig. 2(a) 中の◎が観測網の観測点) の中に位置するため、微小地震観測網ではとらえることのできない小さい地震、あるいは、深さを正確に決定できないような浅い地震を、観測対象とした。

(2) 地震計

地震計は、マークプロダクツ社の L22D (固有周期 2 秒；感度約 $0.7 \text{ V} \cdot \text{s/cm}$) を使用している。振動台を利用して、数 kHz まで特性がフラットな圧電型加速度センサーと比較しながら、L22D の周波数特性を検定した結果、少なくとも約 1 kHz までは特性がフラットであった。地震計は、スパン約 100 m のトリパタイトと、スパン約 500 m のトリパタイトを構成できるように、標高約 365 m のレベルの坑道の 5 地点 (Fig. 5 の S1~S5) に設置し、このうち、S3 地点では 3 成分を、残りの 4 地点では上下動成分のみを観測している。

(3) ハイドロフォン

光栄堅坑 (Fig. 5) 内には、観測開始当初はマークプロダクツ社のハイドロフォン P-40 を 600 m の地点に、Geosource 社製アクアセンス (周波数特性 20 Hz~3000 Hz；感度 14 V/bar) を水深 300 m の地点に設置した。前者は設置後まもなく破裂し現在は観測を行っていない。後者は自作アンプで増幅しているが、ノイズが多いため、なお要調整であるが、大きな震動ならばとらえることができる (Fig. 8(b))。現在は、Geosource 社のハイドロフォンが水深 600 m の地点に移設されている。ハイドロフォンの信号の収録も地震記録と同様である。

(4) アンプ関連と電源

観測点によって数百 mV 近い地電位差や、坑道内の電源線などから誘導されるハム等のコモン・モード・ノイズ (例えば地電位差など) の対策として、プリアンプを地震計にできるだけ近い場所に設置して約 1000 倍増幅している。また、プリアンプは差動入力・差動出力であり、シールドされたツイスト・ペア線 (より合わせた 2 線) で信号を送っている。さらにまた、念には念を入れて、メインアンプの前段では、ツイスト・ペア線の 2 つの信号とも抵抗分割で 10 分の 1 に減衰させた後に、もう一度 10 倍差動増幅している。このことによって、単に差動増幅する場合に比べて、転送中に拾ったコモンモード・ノイズを 10 分の 1 に減少させている。

なお、プリアンプの電源は、 $+6 \sim +25 \text{ V}$ (マイナス電源不要) で動作するように、プリアンプの直前で三端子レギュレータで 5 V に定電圧化し、マイナス電源は 14 pin DIP 型 IC サイズの DC-DC コンバータで作っている。

(5) 地震の収録システム (Fig. 7)

地震の信号は、アンチ・エイリアス・フィルターとしてカット・オフ・周波数 (以下 f_c と略記) 450 Hz 5 次ローパス・フィルターを通し、さらに、 $f_c 1.8 \text{ Hz}$ 3 次ハイパス・フィルターを通して A/D 変換された後、平野のシステム^{8),9)}をアレンジしたもの (12 bit A/D コンバータ；2024 Hz サンプリング；12 チャンネルを収録) によって収録される。

雑音レベルは各地点とも数 $\times 10^{-6} \text{ cm/s}$ であり、トリガーレベルは各地点とも約 $20 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ である。ただし、遠地の中小地震や深発地震によってトリガーがかからないように、 $f_c 22 \text{ Hz}$ 5 次ハイパス・フィルターを通した信号をトリガー判定に使用している。トリガー条件は金香瀬坑内の 3 点 (Fig. 5 の S1~S3) の AND、あるいは、金香瀬・中央堅坑・旧火薬庫 (Fig. 5 の S3・S4・S5) の AND である。また、電源の瞬断や近地の落雷によって、収録システムが誤動作しないように、入力をショートさせたプリアンプ 1 台を金香瀬坑内のケーブル末端に設置し、その信号と地震計の信号とを比較することによって、地震が電気ノイズかを判別している。トリガーがかかると、トリガー前の約 1 秒間とトリガー以後の約 5 秒間の波形

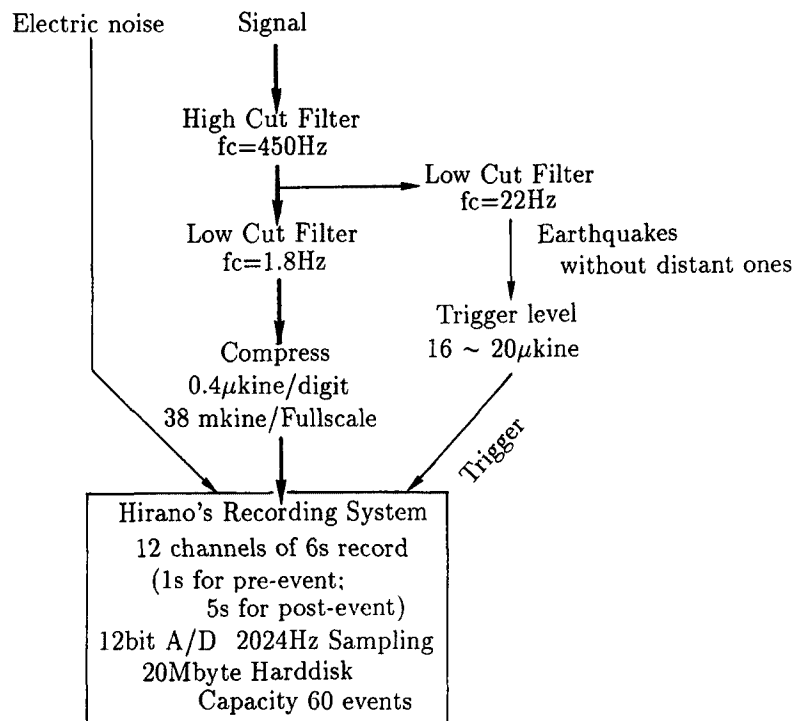


Fig. 7. Block diagrams of data acquisition system of earthquakes.

が、パソコンのハードディスクに収録される。平野のシステムは、もともと 20 Mbyte のハードディスクに 60個の地震を収録できるものであるが、ハード・ディスクが一杯になると自動的にテープにバックアップするように改良して、120個のイベントのデータが収録可能にしてある。

収録システムには 12 bit の A/D コンバータを用いているが、大振幅の場合は 1/10 に減衰させ、微小な場合は 10 倍増幅 (Fig. 7 の COMPRESS)²³⁾ して記録している。この圧縮/増幅によって、微小な震動は 1 digit あたり 0.4×10^{-6} cm/s で記録でき、また、 $\pm 20 \times 10^{-3}$ cm/s の震動でも波形が振り切れずに収録できている。このシステムで観測された小さいイベントと大きいイベントの例として、1988年の M マイナス 2.6 の地震 (Fig. 8(a)) と、M 2.6 の地震の波形 (Fig. 8(b)) を示す。

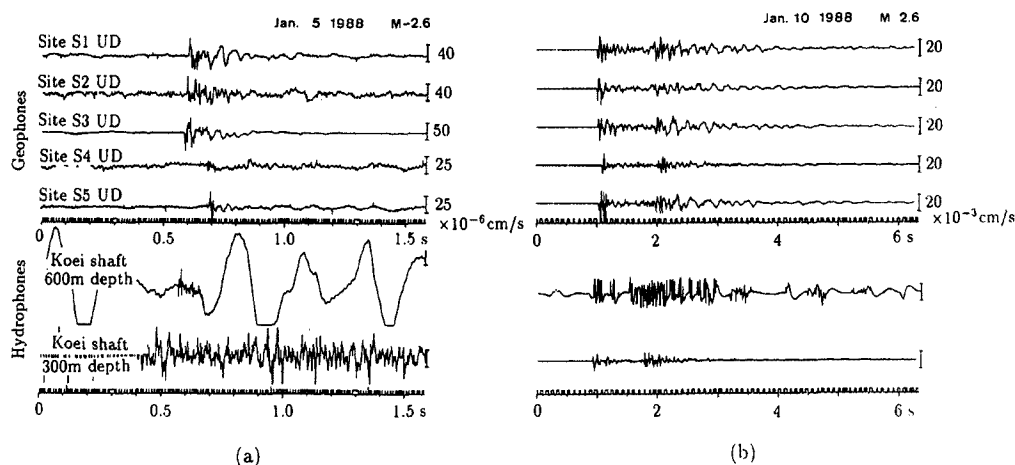


Fig. 8. Examples of seismograms of (a) relatively small event and (b) relatively large event.

(6) 地震観測データの処理と管理

平野のシステム^{8),9)}は、地震観測時に欠測の時間を可能な限り少なくなるように工夫されている。しかし、収録されたデータそのままでは、MS-DOS などによる複写や削除あるいは移動などの編集が容易ではないため、我々は以下に述べるようにして、平野のシステムで記録されたデータを、見かけ上 MS-DOS のファイルのデータとして扱っている。

MS-DOS では、ファイルの中身がハードディスクのどこ（どのセクター）にあるかが、ハードディスクの第0～第220セクターに記録されている。たとえば、MS-DOS のファイルを読む時は、第0～第220セクターの記録を参照して、ファイルの中身が記録されているセクターを見つけ、そこを読む。これに対し平野のシステムでは、読み書きの時間が最も少なく済むように、MS-DOS のようにファイル管理情報は参照せず、イベントの番号毎に読み書きする領域が Fig. 9 に示すように固定されている。例えば、イベント1番のデータは第264～1584セクターというようにである。つまり、平野のシステムでは、MS-DOS のファイル管理情報の領域（第0～第220セクター）には読み書きを行なわないため、地震の観測してもこの領域は変更されることがない。

だから、MS-DOS のファイル管理情報の領域（第0～第220セクター）には、あたかも MS-DOS のファイルがハードディスク中に隙間なく詰まっているように設定すれば、MS-DOS のファイルを読む手続きで、地震のデータを読むことができる。たとえば、Fig. 9 のように、ハードディスクの全領域が Dummy data file 1, 2, ……であたかも隙間無く埋めつくされているかのように設定すると、例えば、平野のシステムで収録されたイベント1の波形データを、名目上、MS-DOS の Dummy data file 1 として処理できる。

このような処理を可能にするために、もっとも容易な方法は、地震観測前にハードディスクの全領域を MS-DOS のファイル（たとえば Fig. 9 のように Dummy data file 1, 2, ……）で隙間無く埋めつくすことである。一度こうすれば、以後、平野システムで地震観測を行う際には何も手を加えなくてもよい。

あらかじめ上記のように手が加えられていないハードディスクを使用して平野のシステムで収録された場合でも、上記の状態のハードディスクのファイル管理領域のコピーをフロッピーにあらかじめとってさえあれば、それをハードディスクの第0～第220セクターに重ね書きをするだけでよい。

このようにして MS-DOS での読み書きすると、要する時間は平野のシステムよりも数倍かかるが、収録データを、MS-DOS 上に COPY や DELETE、編集等を行うことが容易にできている。光磁気ディスクなどがあれば、データベースの構築も簡単にできる。また、FORTRAN などの高級言語による解析も容易になり、デジタル・フィルターや FFT などによる解析も容易にできている。

(7) 地震観測結果の例

マグニチュード約マイナス3の地震（波形例は Fig. 8(a) 参照）でも捉えることができた。地震は、SP 時間が0.5秒以下、M マイナス3～0のものが、平均して月に約1個の割合で、発生している（Fig. 10）。1990年12月までの期間における SP 時間が0.3秒以下の SEISMICITY は、途中欠測期間もあるが、Fig. 6 の様である。

(8) 自然極微小破壊^{23,24)}

地震 (M>-3) よりもさらに小さい地震（小石を岩盤にぶつけた時に発生する程度の震動；AE）を、圧電型ブリアンブ内蔵の加速度センサー数個を地殻変動観測坑内（Fig. 5）の岩盤の小断層近傍に埋設し、アンプで1000倍増幅した後、パソコンのハードディスクに収録した。その結果、岩盤からの湧水の多いときに、自然極微小破壊が発生する傾向があることがわかった²⁴⁾。しかし、発生頻度が年に数回と極めて少ない

Sector	Hirano's System	MS-DOS	Sector
0		MS-DOS (Reserved)	0
		File Alloc. Table	4
		FAT (Backup)	20
		Directory	36
		Dummy Data	220
264	Data of Event 1	File No. 1	
1584	" Event 2	" No. 2	1820
2904	" Event 3	" No. 3	3420
4224	" Event 4	" No. 4	5050
5744	" Event 5		6620
7064			

Fig. 9. Comparison of MS-DOS and Hirano's System in 20 Mbyte hard disk.

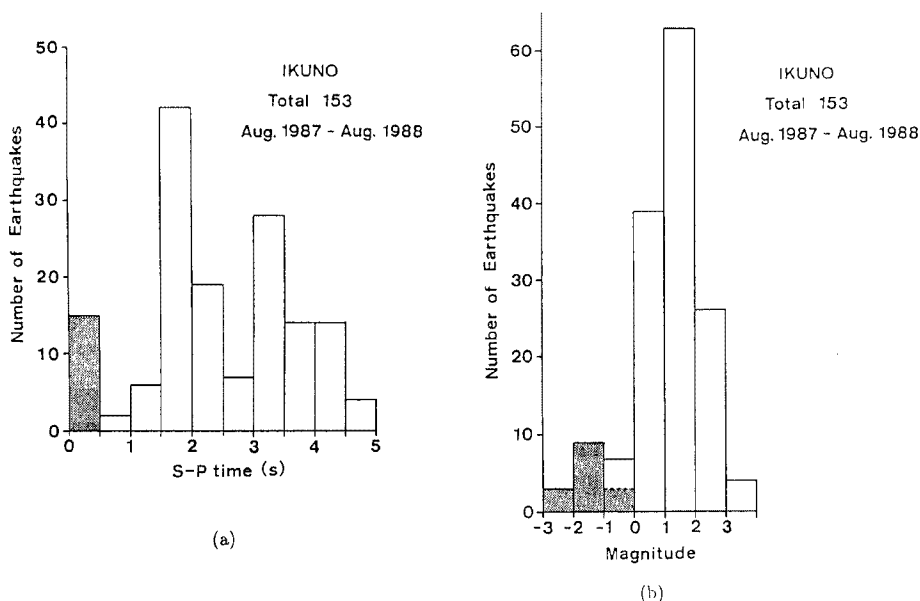


Fig. 10. (a) Number of observed earthquakes versus S-P time. Earthquakes with S-P time less than 0.5 s are shaded. (b) Number of observed earthquakes versus Mantitude. Earthquakes with S-P time less than 0.5 s are shaded.

ことと、センサーの寿命が半年程度しかない（多湿が原因）ため、コストパフォーマンスが悪く、また、メンテナンスも大変であるため、観測を中止した。

4. お わ り に

これまでに光栄堅坑の水位の 10 m 近い上昇が何回もあり (Fig. 6), 1988年までのデータでは、それに呼応する変化が 自然電位差, 比抵抗, γ 線量に現れているかに見えた²⁵⁾。しかし、その後の観測結果ではそれが見かけ上のものであることがわかった²⁶⁾。対応があると見られるのは、自然電位と seismicity との間だけである。さきほどの自然電位差変化と比較すると、自然電位差がへこんでいる位置で、seismicity が高くなっているように見える。「もしかしたら広域的な応力変化をとらえているのではないか」と期待しながら、他の成分と比較しながら、現在、解析を進めている。

我々の多項目観測の目的の一つは、近畿西部に発生する中小規模の地震の前後に、生野付近の岩盤がどういう挙動をするかを総合的に知ることである。しかし、生野鉱山の付近には中小の地震が起らなかったため、地震の前後の現象についてはデータを得ることはできなかった。これは、今後の課題である。

謝 辞

三菱マテリアル株式会社生野製作所ならびに株式会社シルバー生野の両社ならびに関係者各位には、多大なるご協力とご便宜をいただいた。電磁気学的な観測については、京都大学防災研究所の住友則彦教授にご指導をいただいた。鳥取微小観測所の地震データについては、渋谷拓郎助手にお世話になった。ここに記し、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Sassa, K. and E. Nishimura: On phenomena forerunning earthquakes. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 37, 1956, pp. 645-64.
- 2) 田中 豊・小泉 誠・加藤正明：地震活動に関係した地殻変動 (5A)―近畿地方北西部の地震活動と生野で観測された地殻変動―，京都大学防災研究所年報，第13号 A，1970，pp. 91-108.
- 3) 田中 豊・小泉 誠・加藤正明：地震活動に関係した地殻変動 (5B)―近畿地方北西部の地震活動と生野で観測された地殻変動―，京都大学防災研究所年報，第14号 A，1971，pp. 71-84.
- 4) 田部井隆雄・藤森邦夫・田中 豊：生野における地殻変動の連続観測 (1977～1983)，測地学会誌，第31巻，1985，pp. 189-201.
- 5) Tabei, T.: On the postseismic deformation at Ikuno immediately after the 1984 Yamasaki earthquake, J. Phys. Earth, Vol. 35, 1987, pp. 225-239.
- 6) 田中 豊・西田良平：山はねおよび廃坑内注水による誘発地震の発生機構，第5回岩の力学シンポジウム講演論文集，1977，pp. 91-96.
- 7) 西田良平：私信.
- 8) 平野憲雄：パソコンを用いた臨時地震観測システム，京都大学防災研究所年報，第29号 B-1，1986，pp. 29-37.
- 9) 平野憲雄：パソコンによる地震波形の収録と読み取り，京都大学防災研究所年報，第30号 B-1，1987，pp. 1-10.
- 10) 岸本兆方・尾池和夫：概論：山崎断層，月刊地球，通巻67号，1985，pp. 4-8.
- 11) 田中 豊・西田良平：生野鉾山内の山はねによる震動，京都大学防災研究所年報，第14号 A，1971，pp. 149-164.
- 12) 西田良平・田中 豊：生野鉾山内の山はねによる震動 (続報)，京都大学防災研究所年報，第15号 B，1972，pp. 43-51.
- 13) Tanaka, Y. and Y. Oka: Generation mechanism of rock bursts and water-induced earthquakes under the tectonic stress field, Rock Mech. Jpn. Vol. 3, pp. 71-73.
- 14) 活断層研究会編：日本の活断層―分布図と資料，東京大学出版会，1980.
- 15) 三浦伝七：生野鉾山，日本鉱業会誌，第83巻，1967，pp. 1667-1673.
- 16) 生野鉾山所採鉾課：生野鉾山の地質鉾床，1971.
- 17) 大塚成昭・大村 誠・福田正浩・藤森邦夫・住友則彦：地殻変動観測坑内における自然電位差変化の観測，第81回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会講演予稿集，1987，p. 160.
- 18) 大塚成昭・大村 誠・福田正浩・藤森邦夫・住友則彦：地殻変動観測坑内における自然電位差変化の観測，Conductivity Anomaly 研究会論文集，1988，pp. 211-223.
- 19) 藤原 智・藤森邦夫・大塚成昭・小笠原宏・住友則彦：旧生野鉾山における自然電位差変化 (序報)，京都大学教養部地学報告 (九十九地学)，第23号，1988，pp. 1-8.
- 20) 藤原 智・住友則彦・狐崎長琅：比抵抗連続観測の安定性について，一地震に関連した変動の検出のために―，Conductivity Anomaly 研究会論文集，1988，pp. 202-210.
- 21) 中尾節郎・桂 郁雄・小泉尚嗣・渋谷拓郎・平野憲雄・西田良平：地震変動観測坑 (鳥取・生野・鯖江・山崎) での γ 線線量率連続測定，地質学会講演予稿集，No. 2，1990，p. 266.
- 22) 小泉尚嗣・中尾節郎・矢部 征・桂 郁雄・平野憲雄・西田良平：地震予知研究センター鳥取観測所の地下水・地球化学多点観測，京大防災研年報，第34号 B-1，1991，p. 365-375.
- 23) 小笠原宏・藤森邦夫：生野地学観測室における自然極微小破壊の観測(1)，地震 2，第40巻，1987，pp. 445-454.
- 24) 小笠原宏・藤森邦夫：生野地学観測室における自然極微小破壊の観測―異常地殻変動およびしみだし水との相関―，日本測地学会第69回講演会要旨，1988，pp. 123-124.
- 25) 藤森邦夫・小笠原宏・小泉尚嗣・中尾節郎・藤原 智・谷口慶祐・西上欽也・大塚成昭・平野憲雄・

- 鈎卯三郎・飯尾能久：旧生野鉾山における多項目観測，地震学会講演予稿集，No. 2，1988，p. 240.
- 26) 小笠原宏・藤森邦夫・小泉尚嗣・中尾節郎・藤森 智・谷口慶祐・西上欽也・大塚成昭・平野憲雄：
旧生野鉾山における多項目観測(2)，地震学会講演予稿集，No. 1，1991，p. 59.