

生野鉱山内の山はねによる震動（続報）

西 田 良 平・田 中 豊

GROUND TREMORS CAUSED BY ROCK BURSTS IN THE IKUNO MINE (CONTINUED)

By Ryohei NISHIDA and Yutaka TANAKA

Synopsis

The largest rock burst occurred on June 21, 1971 at the same position to that of Jan. 26, 1970 in IKUNO MINE. Ground tremors caused by the rock burst were also observed by the net of microearthquake observation in Hyogo Prefecture.

A source-mechanism of the rock burst could be explained well as a dip-slip type. Namely, σ_1 estimated from seismic data was perpendicular to the vein-plane and σ_3 was nearly vertical within that plane. It is interesting that the direction of principal stress coincided with that of tectonic force in the vicinity. Besides, the results that conversion rate of strain energy into wave energy was less than 10% in case of rock burst were obtained.

1. 結 言

前論文発表後¹⁾, 1971年6月21日に前回の山はねと同じ場所で, 大きい山はねが発生した。今回も山はねに因る震動が兵庫県, 鳥取県, 京都府, 大阪府の微小地震観測室14点で, 今までの山はねよりも大きい振動として記録された。続いて, 1972年1月18日にも山はねの発生が鉱山内で確認されたが(坑外で音をきいたという人もある), 震動としては小さく, 神崎観測室で最大振幅 $80 \mu \text{ kine}$, S-P time = 1.6 sec であって, 他の観測点では記録されていない。ここでは, 主に6月21日の山はねの状況と, 震動の解析による波動 energy, 発震機構の問題等前論文で結論づけられなかった事についての議論を行ない, また前論文の誤りを修正したい。

2. 現場の状況

生野鉱山の全般的な地質構造については前論文で詳細に述べたのでここでは省略するが, 山はねの発生した金盛鍾の走向はほぼ南北で $70^\circ \sim 80^\circ$ の傾斜で東落である。したがって鍾押し坑道もほぼ南北であることを再度のべておきたい。

1970年の1月26日(以下1・26と略す)の山はね発生場所の31・32・33番坑道の内, 33番坑道からの掘り上がりが進み, 32番坑道に9mまで接近し, 32番坑道の山はねに因る破壊領域の20・21・22号階段付近の踏前・土平のゆるみが激しくなってきた。当初, このゆるみは岩石の変形坐屈現象だと見られ歪 energy を一度に放出するような山はねの発生はないと考えられていた。一方採鉱上の都合により20号階段付近から32番坑道と同じレベルでこれと約10mの間隔を持って下盤切替立入坑道を堀削していた。この様に1・26の山はねによる歪の解放後32番坑道の周囲に stress が集中する要素が出て来た。そして, 1・26の山はねが発生して1年半後の6月21日午後7時17分に32番坑道の20~21号階段を中心にして山はねが発生した。被害の状況は Fig. 1 に示す様に, 32番坑道で踏前の盤ぶくれ, 坑柱の折損, 天盤の崩落, 土平の崩壊・剝離が見られる。(Photo. 1, 2) これと10mの間隔で堀られている下盤切替立入坑道では崩壊が著しいため切羽部

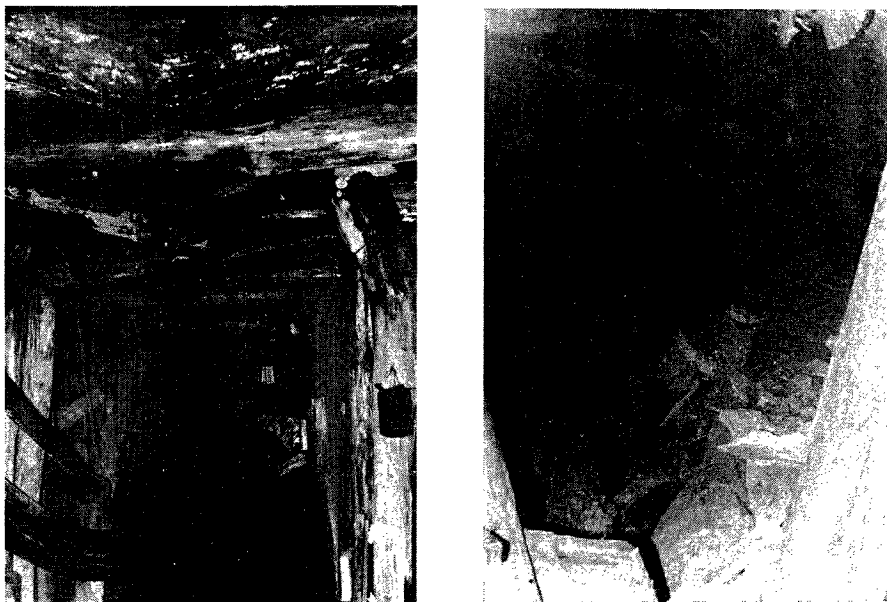


Photo. 1, 2 Scene of rock burst on June 21, 1971.

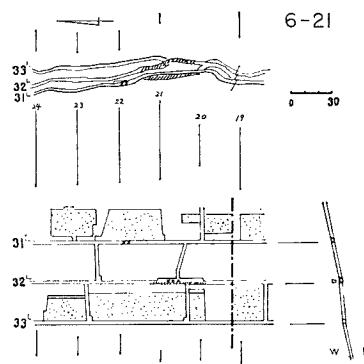


Fig. 1 The domain of rock burst on June 21, 1971.

分へ行くことが出来なかったが、その後この崩壊部分を取り除いた結果、踏前に敷かれている軌条が約 60 cm も跳ね上げられていた。また、33 番坑道では約 40 m にわたって人道堰矢が折損し、頭除けの折損・崩落が見られた。これら 3 つの坑道の位置関係と破壊の状況から、1・26 の山はねに因る 33 番坑道周辺部の破壊で坑道の免圧圏が増し、そこに隣接坑道が掘られたことにより免圧圏の干渉が起り、山はねが発生したと思われる。このことは、現場の破壊程度が、1・26 の山はねにくらべて 6・21 の方が小さいのに反し、震動は 6・21 の方が大きいという事実からも推定でき発生条件が両者で異なり、6・21 の場合、3 つの坑道にはさまれた地山内部全体にわたって破壊が及んだことを示すものと考えられる。しかし現場の状況を比較してみればもちろん共通点が多い。すなわち、坑柱の折損、天盤の崩壊、踏前の盤ぶくれ、そして土平の剥離等が特長的に見られる。ここでは引張力による破壊で見られる割れ目は全然見られず、今まで述べて来た状況は坑道周辺

に加わっている圧縮力による破壊であることを示している。

3. 震動源の位置決定

前回1・26の山はねでは、発生現場の地図上の経緯度と震動から求めた震源位置が震源決定精度内で一致することが示されたが、今回の山はねに因る震動も同様に解析を行った。

前論文でも述べた様に記録は自然地震の波形と同様で、P波・S波・表面波が見られ、波形の特長はP波の立ち上りが明瞭でS波も判別可能なことである。そして震源が浅いという特長として氷上観測室（HM）、香寺観測室（KD）の記象には周期の長い表面波がS波のすぐ後に見られる。

また、6・21の山はねに伴う震動を1・26と比較して見れば三日月観測室（MZ）、夢前観測室（YS）で振幅が大きくなっていること、氷上観測室、泉観測室（IZ）、丹南観測室（Tn）でS波の立ち上りがやや見にくいこと等が類似点として上げられる。この記録をFig. 2に示し、各観測室のP-time、S-Ptime、振幅、P波初動の方向等の読み取り値をTable 1に掲げる。このDataを用いて震動の発生場所を求めた。使用した観測記録は1・26では氷上・泉・大屋（OY）・夢前・三日月・船岡（FO）の6点であったが、6・21では神崎観測点を加えた7点で震源を求めた。これらの波動源位置と山はねの発生場所の緯度・経度をTable 2に記す。震源位置は1・26で東へ約250 m ずれ、6・21では北々西に約500 m ずれて求めたが、一方深さについては1・26は0~7 kmの範囲の誤差で最適値6 kmと求まり、今回6・21では深さ1 kmと発生場所と一致している。1・26の山はねについては、最近接観測室である神崎が欠測中であったこと、震源が1 kmの浅い場所で表面層の複雑さ等を考慮に入れば良い一致していると見てよい。その上各観測室の時間精度が0.1 secであり、S波の到達時間の判定に多少の不確定性を伴うこと等から、P波速度を5 km/sec とすれば震源決定

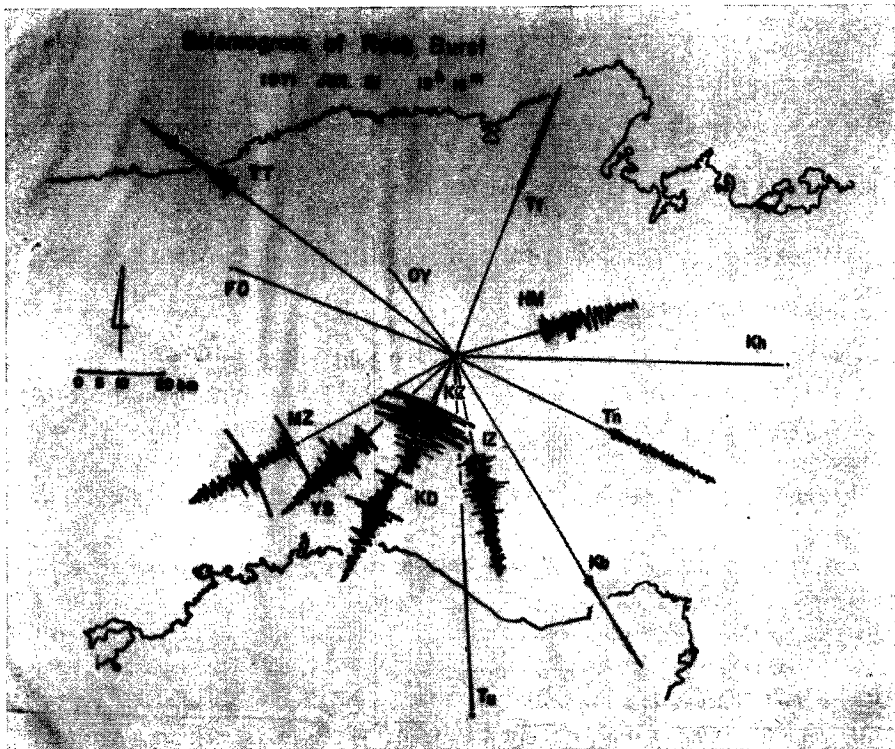


Fig. 2 The seismogram of tremors by the rock burst.

Table 1 Seismological data of rock burst on June 21, 1971.

Obs. station	P-time			S-P time sec	F-P time sec	Max. Amp. μ kine	Initial motion
	h	m	sec				
K Z	19	16	02.05	1.6	35	s.o.	pull
HM			03.8	2.7	40	310	push
I Z			04.1	2.9	50	467	pull
O Y			04.15	3.0	60	520	pull
Y S			04.60	3.45	45	472	pull
K D			05.50	3.95	40	546	pull
M Z			07.10	5.1	50	s.o.	pull
F O			09.3	—	—	135	pull
T T			11.5	8.1	—	120	pull
K h			12.95				pull
T t			05.05				push
T u			12.35				—
T n			06.65				pull
M k			10.95				pull

Table 2 The position of rock burst and the origin of ground tremor.

		Latitude	Longitude	Depth
Position on map (1-26, 6-21)		35°10'05''N	135°50'03''E	400 m*(860m)**
Origin estimated by seis. data	1-26 '70	35°10'06''N	135°50'12''E	0-6-7 km
	6-21 '71	35°10'20''N	135°49'55''E	0-1-1 km
Difference	1-26 '70	30 m	230 m	
	6-21 '71	460 m	200 m	

* below the sea level ** under the ground surface

誤差は約 500 m と考えられる。これにより 1・26, 6・21 の震動はまさしく山はねに因る震動だと考えて良い。

4. 山はねの波動 energy

山はねの震動から Magnitude と波動 energy を求め、それと山はねの現場で解放された歪 energy を比較してみることは前論文でも行ったが、大変興味深い問題である。しかし、波動 energy 算出の過程、又、破壊領域の推定等に不確定の要素があり一義的に求まらない。ここでは現在用いられている Magnitude の決定式、Magnitude-Energy の関係式を採用し求められた波動 energy の最大値と最小値を示した。また、解放された歪 energy としては、破壊領域に局部的に集中し蓄積された歪 energy が放出されるものとして推定を行った。

各観測室の最大振幅や振動継続時間 (F-P time) から波動 energy を算出する方法は今まで数多くの式が出されているがここでは次の 3 つの式を用いる^{3), 4), 5)}。

$$M=1.25 \log V+2.5 \log r+1 \dots\dots\dots(1)$$

$$M=2.70 \log (F-P \text{ time})-3.65 \dots\dots\dots(2)$$

$$M=\log A+1.73 \log r-0.83 \dots\dots\dots(3)$$

(1) 式の V は速度振幅で単位は kine, r は震央距離であり、村松が 1964 年に求めたものである。(2) 式は振動継続時間と村松マグニチュードの関係式で西田が 1970 年の群発地震を資料として求めた式である。

(3)式は日本付近の地震に対して坪井が求めた式で、 A は最大動の変位振幅で単位は μ , r は震央距離 (km) である。これらの式で求めた Magnitude を Table 3 に掲げる。この値は各観測点別にそれぞれ Magni-

Table 3 Magnitude and wave energy of rock bursts.

Date	$M_{(1)}$	$M_{(2)}$	$M_{(3)}$	$E_{(4)}$	$E_{(5)}$
1.10	-0.9	-0.95	-0.14	$2.4 \times 10^{10} \sim 4.0 \times 10^{11}$	$2.1 \times 10^{11} \sim 2.9 \times 10^{12}$
1.26	0.2	0.3	0.6	$1.3 \times 10^{12} \sim 5.7 \times 10^{12}$	$8.7 \times 10^{12} \sim 3.5 \times 10^{13}$
6.21	0.5	0.7	0.9	$3.6 \times 10^{12} \sim 1.4 \times 10^{13}$	$2.3 \times 10^{13} \sim 8.7 \times 10^{13}$

Suffix indicates the formula's number in the text.

tude を求め算術平均をしたものである。1・10 の山はねは $-0.95 \sim -0.14$, 1・26 は $0.2 \sim 0.6$, 6・21 は $0.5 \sim 0.9$ と計算されている。村松による Magnitude が小さく求まり、坪井の Magnitude が大きく求まっていることは自然地震においても同様の傾向が見られる。

次に, Magnitude から波動 energy を算出するのに次の2つの式を用いる^{6), 7)}。

$$\log E = 11.8 + 1.5M \dots\dots\dots (4)$$

$$\log E = 12.66 + 1.40M \dots\dots\dots (5)$$

(4)式は Gutenberg の式で、(5)式は飯田が今までに数多く求められている $\log E = a + bM$ の係数 a と b の値から、広範囲の Magnitude に適用できる式として求めたものである。これらの結果によると 1・10, 1・26, 6・21 の山はねの波動 energy はそれぞれ $2.4 \times 10^{10} \sim 2.9 \times 10^{11}$ erg, $1.3 \times 10^{12} \sim 3.5 \times 10^{13}$ erg, $3.6 \times 10^{12} \sim 8.7 \times 10^{13}$ erg となり、最大値と最小値の比はそれぞれ約 100 倍, 約 30 倍, 約 50 倍で波動 energy 算出の不確定さを示す。

山はねの現場で解放された歪 energy を推定するためには、破壊領域の体積と単位体積当りに蓄積される歪 energy の量が必要である。山はね現場付近から採石した Tuff・Basalt・Vein の岩石について、圧縮強度・引張強度・Young 率が三菱金属工業株式会社・中央研究所と京都大学工学部資源工学教室で測定されているので、これらの値を用いて一軸圧縮の場合に破壊時に有する energy を計算した。それらの値を Table 4 に示す。ここで、上の2つの Tuff・Basalt の Young 率が小さく求まっているのは試験機に原因するものらしいとの報告があった。また、前論文で一軸圧縮の場合の破壊時に有する energy を 7000 erg/cm^3

Table 4 Test results of rocks from the area of rock burst.

	S_c	S_t	S_s	E	$(W_{er})_1$
Tuff†	927 kg/cm ²	164 kg/cm ²	285 kg/cm ²	$4.8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$8.4 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$
Basalt†	997	115	209	5.7×10^4	5.7×10^6
Vein*	1285			1.3×10^5	1.3×10^6
Tuff*	1620			3.4×10^5	3.9×10^6
Basalt*	717			7.6×10^5	3.2×10^5
Basalt*	858			4.2×10^5	8.6×10^5

S_c : compressive strength.

S_t : tensile strength.

S_s : shearing strength.

E : Young's modulus.

$(W_{er})_1$: elastic strain energy in uniaxial compression.

† by Central Res. Lab., Mitsubishi Metal Comp.

* by Sugawara, Dep. Mineral Sci. & Technol., Kyoto Univ.

としたが計算違いであったので訂正しておく。なお、Tuff と Basalt の密度は 2.66 gr/cm^3 , 2.72 gr/cm^3 と測定されている。求められた単位体積当りの歪 energy は $8.4 \times 10^6 \sim 3.2 \times 10^5 \text{ erg}$ の範囲にあるが、ここでは $W=10^6 \text{ erg/cm}^3$ として計算を行う。

次に破壊領域の推定であるが、坑道の破壊された長さは生野鉱業所報告書「生野鉱山金香瀬下部における山はね現象」⁸⁾ に詳細に記録されているので推定しやすいが、問題は坑道表面から地山内部にどれほど破壊が及んでいるかである。坑道内の破壊の状況から、土平から踏前にわたる坑道下隅の部分が一番多く破壊されていて、盤ぶくれも著しいので、坑道の幅を 2 m とし、土平下端を中心に半径 1 m 以内の歪 energy が解放されたと考える。1・10 の山はねでは坑道の片側、上盤側に破壊が集中しているので、上盤側の踏前と土平下端部分が長さ 10 m に渡って破壊されているとすれば、破壊体積は $2.4 \times 10^7 \text{ cm}^3$ となり、同様に 1・26 では 31 番坑道が上盤側の土平下端を中心に長さ 70 m, 32 番坑道は両側の土平・踏前に長さ 50 m, 33 番坑道では上盤側土平下端を中心に長さ 25 m に及んでいて、破壊体積の合計は $4.6 \times 10^8 \text{ cm}^3$ である。6・21 では 2 本の坑道と掘り上がりの切羽が隣接している。もし 1・26 の山はねで、上記のように地山内 1 m まで破壊したとすれば、坑道の半径は実質上 4 m になっているので、免圧圏がさらにその 2 倍に及ぶとすれば、3 つの坑道の免圧圏は、互いに干渉し、破壊すると考えられる。歪 energy が解放された領域は、それ故 32 番坑道と切替坑道間 10 m と 33 番坑道からの掘り上がりが 32 番坑の下 9 m に迫っているのもその間とする。破壊された部分の長さを 40 m とすると、破壊体積は $1.5 \times 10^9 \text{ cm}^3$ となる。これらの破壊体積に単位体積当りに蓄積される歪 energy $W=10^6 \text{ erg/cm}^3$ を乗ずると、1・10 の山はねは $2.4 \times 10^{13} \text{ erg}$, 1・26 は $4.7 \times 10^{14} \text{ erg}$, 6・21 は $1.5 \times 10^{15} \text{ erg}$ と見積られる。

山はねの現場での歪 energy と震動から計算された波動 energy との比は波動 energy への変換率を示す。今、波動 energy の最大値を用いて計算すれば、1・10, 1・26, 6・21 はそれぞれ 12%, 8%, 5%, となり、最小値を用いれば、それぞれ 0.1%, 0.23%, 0.24% となる。故に、最大値の比を採用すれば通常の自然地震で言われている数%と大差がない。この意味からも山はねは地殻内において人間が無作為に行った地震発生の実験と言える。

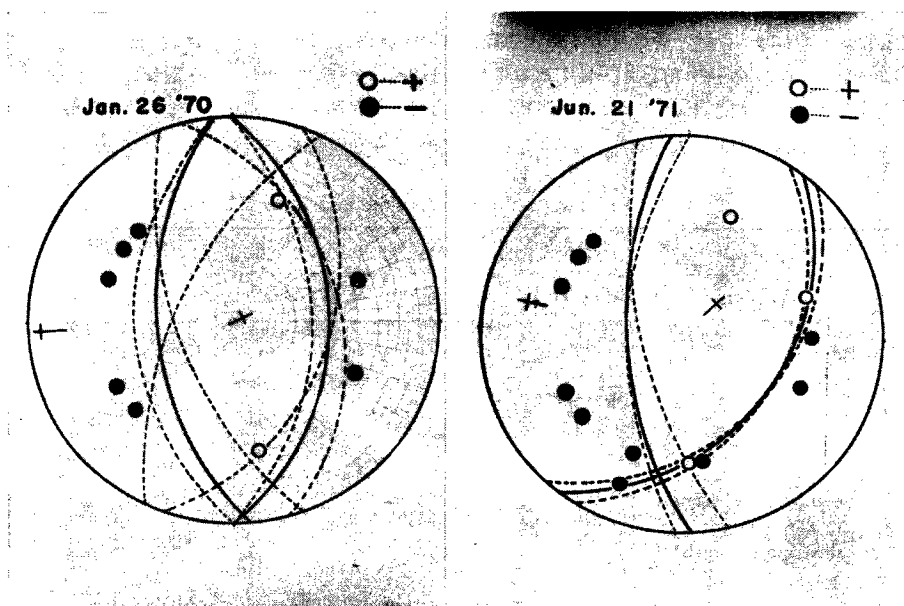


Fig. 3 Push-pull distribution of initial motion of the rock bursts.
Dotted lines show the movable extent of nodal plane.

5. 発震機構

前論文に述べたように、1・26の山はねの場合は、P波初動から発震機構を求めたが観測点の数が少なく、Strike-slip型ともDip-slip型とも一義的に決定出来ないという結果になった。6・21では13観測点でP波の初動の方向が判別出来たので、前回と同様Wulff netに投影し震源でのmechanism図を作製したところ、Fig. 3に示す様にdip-slip型に一義的に決定することができた。nodal planeはStrikeがN5°Wでdipが50°とStrike N40°E, dip=40°の2つとなる。これから求められる主圧力・主張力の方向はN80°W, dip=15°とN46°Eでdip=65°であった。1・26の山はねについては、坑道の現場の状況や6・21の波形との類似性等から、1・26の山はねの発震機構もdip-slip型が適当だと思われる。故にFig. 3に示す様にnodal planeはstrike N5°W, dip=60°と同じくN35°E, dip=35°で、主圧力・主張力はそれぞれS87°W, dip=4°とN65°E, dip=84°である。山はねの現場の坑道の走向はほぼ南北方向で、鍾面は東へ約80°落ちであるから、Fig. 4に示す様に主圧力(σ_1)は鍾面にほぼ垂直、すなわち坑道に横からほぼ水平で東西方向から作用し、主張力(σ_3)は鍾面内で上下方向に作用していることが分る。著者の一人はこの地方で発生したMagnitudeが3.0以上の自然地震について発震機構の解析を行っている⁹⁾。すなわち、Fig. 5の地図上の四角内の地震について主圧力・主張力軸の方向をFig. 6に示せば、主圧力の方向は東西方向を軸とする半径35°の円錐形の中に入る。これからこの地域に作用しているTectonic Forceの方向は東西方向と考えられる。1・26、6・21の山はねについても、

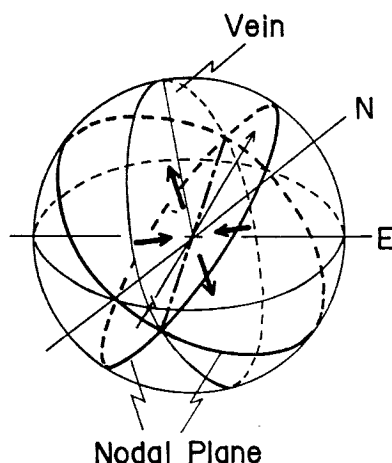


Fig. 4 Mechanism diagram of the rock burst.

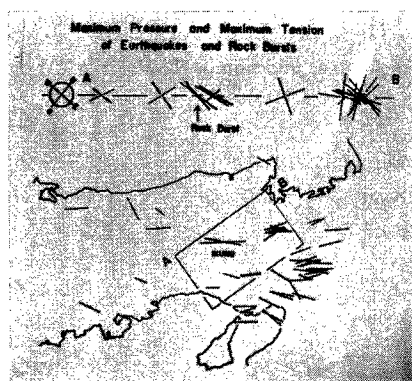


Fig. 5 Maximum pressure and tension of earthquakes and rock bursts occurred in the northwestern part of Kinki District. Straight lines show maximum pressures and dotted ones tensions respectively.

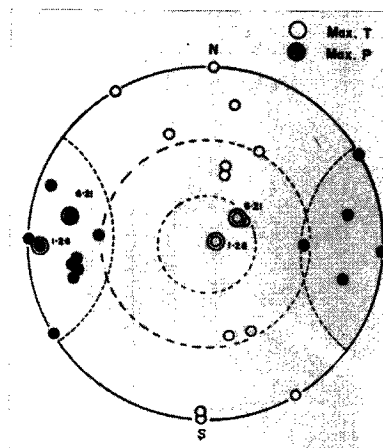


Fig. 6 Directional Characteristics of principal stress of earthquakes in the square region in Fig. 5.

Open circle: max. tension.
Closed circle: max. pressure.
Double circle: those of rock bursts.

主圧力の方向はこの範囲の中に入り、山はねを発生させた力の方向が Tectonic Force の方向と一致する。一方、主張力の方向については、自然地震でも分散が大きく震源での任意性があるらしい。しかし、どちらかと言えば自然地震は東西主圧力に因る strike-slip 型であり、山はねは東西主圧力に因る Dip-slip 型である。

6. 盤鳴り発生の時系列

生野鉱山では 6・21 の山はねの発生前から坑内の異常変化を詳細に記録している。その内で、盤鳴りの発生に特に注意を向け、大きい山はねの予測に力を注いできた。盤鳴りは、山はねが坑道の内部で発生する破壊であるのに対し、盤鳴り（山鳴り）は、地山内部に起る小破壊で、本質的には山はねと似たものである（山はねと盤鳴りは厳密に区別すべきであるという意見もある）。Fig. 7 に生野鉱業所探鉱課が調査した

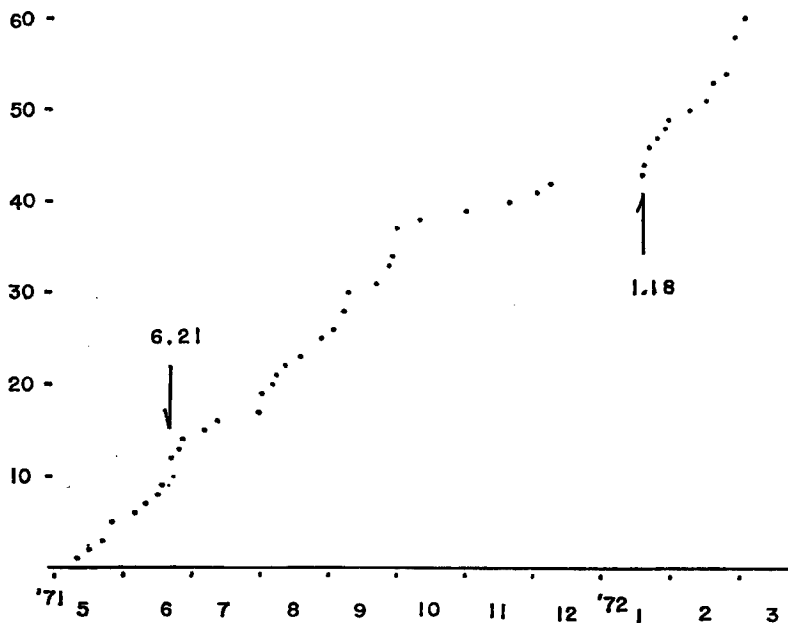


Fig. 7 Accumulative frequency distribution of rock bursts and bumps (Ban'nari).
(Supplied by the Ikuno mine)

1971年5月以降の盤鳴り発生数の積算を示す。6・21、1・18の山はねは矢印で示す。これによると、10月から1・18の山はねまで盤鳴り発生数が非常に減じており、1・18の山はねと同時に余震のように増えて以降発生数を減じていない。6・21の場合も同様で余震としての盤鳴りを伴うようである。群発地震などの場合でも、類似した時系列がみられるのは興味深い。

7. 結 語

発震機構の解析から、1・26、6・21の2つの山はねを引き起こした主圧力の方向が、ともにこの地域の Tectonic Force の方向と一致することが確認された。また、energy の変換率も自然地震とほぼ同じと思われる。これらのことから前論文で推論したように、鍾面が南北に近い走向を持つことが、坑道付近の応力集中の上に、さらに東西性の地殻応力変化による影響を受けやすくし、すなわち一種の微小地震発生の条件を地殻浅所に作っている可能性が考えられる¹⁰⁾。もし鍾面が東西の走向を持っていたならば同じ掘削条件でも山はねは発生しなかったのではないかとすることも想像できる。以上のことは山はねと自然地震の類似性が

波形、盤鳴りの起り方と群発地震の時系列との類似性などからも考えられる。これから山はねは、自然地震の発生機構の解明に何らかの示唆を与えるのではないだろうか。

以上をまとめると次の通りである。

i) 1・26の山はねと6・21の山はねの発生条件は多少異なっていると考えられる。6・21の場合は掘削状況がかなり影響して、破壊は地山内部にまで及んでいると考えられる。しかし震動の発生機構は大差がないようである。

ii) 地震波から計算される波動の energy と山はねの現場状況から推定される歪 energy との比は、波動 energy の最大値を採れば、数%程度である。

iii) 発震機構の解析から、主圧力はほぼ水平で東西方向、すなわち、錘面に垂直に作用している。主張力はほぼ上下方向で、錘面内にある。

iv) この主圧力の方向は、この地域の自然地震の発震機構の解析から求められた主圧力の方向 (Tectonic Force) と一致する。

v) 盤鳴り、山はね等坑内での破壊の発生の時系列は、自然地震（群発地震）の時系列と似ている。

最後に、この研究に対し、種々御教示を賜わり、また生野の岩石の圧縮試験を行なって下さった京大工学部資源工学教室の平松良雄教授、岡行俊助教授、および菅原勝彦氏に謹んで感謝の意を表する次第である。また生野鉾業所岡本克己前所長、赤穂光孝採鉾課長、田中威、石岡修、佐々木薫氏はじめ採鉾課御一同には数々の資料を提供して頂き、また種々の御援助を頂いた。ここに厚く御礼申し上げる。なお阿武山地震観測所、鳥取微小地震観測所、防災研地かく変動部門、理学部地殻物理学講座の方々にも御協力頂いた。合わせて感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 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，昭46.4，pp. 149-164.
- 2) 橋爪道郎・岸本兆方：微小地震の震源の求め方について，京都大学防災研究所年報，第10号，昭42.3，pp. 35-41.
- 3) 材松郁栄：Maguitude の定義式について，地震，第17巻，第4号，昭39.12，pp. 210-221.
材松郁栄：Maguitude の式の訂正および注釈，地震，第19巻，第4号，昭41.12，pp. 282-285.
- 4) 西田良平：船岡観測点付近に発生した地震の前震・余震について，京都大学防災研究所年報，第14号A，昭46.4，pp. 165-175.
- 5) 坪井忠二：日本付近の地震のマグニチュード，理科年表.
- 6) Gutenberg, B. and C.F. Richter: Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration, B.S.S.A., Vol. 32, 1942, pp. 163-191.
- 7) 飯田波事：地震のマグニチュードからエネルギーを求める新公式，地質工学，第7輯，昭46，pp. 9-12.
- 8) 生野鉾業所：生野鉾山金香瀬下部における山はね現象，三菱金属鉾業株式会社鉾山部報101，昭46.7.
- 9) 西田良平：中国地方東部近畿地方北半部の地震の発震機構，地震学会講演，昭46.11.
- 10) 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，昭45.3，pp. 91-108. および同 (5B)，同第14号A，昭46.4，pp. 71-84.