長壁式採炭法における炭壁圧出型山はねの 応力解析に基づく予測*

藤井 義明¹ 石島 洋二² 出口 剛太³

Prediction of Rockburst at Longwall Coal Face Based on Stress Analysis

by Yoshiaki FUJII¹, Yoji ISHIJIMA¹ and Gota DEGUCHI²

1. Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060

2. The Coal Mining Research Centre, Japan, Chiyoda-ku, Tokyo 101

The authors have developed a method called 'seismic moment method' to predict microseismicity induced by deep coal mining. The method is based on stress analysis and is applied to three cases in two deep coal mines in Japan, including two cases having experiences of rockbursts.

Through comparison between observation and prediction, it is clarified that the method is also effective for the three cases and that the rockbursts at longwall coal face tend to occur when microseismicity is being activated and when the width of relaxed zone in front of coal face is narrow. Criteria to evaluate rockburst danger area are also proposed.

KEY WORDS : Longwall Coal Face, Rockburst, Stress Analysis, Prediction

1. 緒 言

深部採炭活動に伴って生じる山鳴りの集中位置と消長を予測するために地震モーメント法と名付けた方法を開発し、幌内炭鉱8片(かぶり1,055~1,125 m)の事例について適用したところ、予測計算の結果と観測が良く一致することがわかった¹⁾。しかし、この事例では山はねの発生はなかった。そこで、地震モーメント法が山鳴りの形態の一つと考えられる山はねの予測に対しても有効であることを確認する目的で本研究を実施することにした。なお、本研究では、検討の対象とする山はねを、長壁式採炭法の切羽近傍の石炭が上下岩盤の破壊を伴わずに音響とともに破壊し、作業空間に圧出する「炭壁圧出型」と呼ばれるもの²⁾に限定する。

目的を達成するために、まず同方法を炭壁圧出型の山はねの発生がみられた幌内炭鉱と三池炭鉱の計2つの事例に応用する。また、比較のために、多数の山鳴りが発生したにもかかわらず山はねの発生が皆無であった幌内炭鉱の1つの事例にも応用する。次に、事例の比較を通じて、採炭切羽前方の緩み域の大きさが山はねの発生と密接に関係していることを明らかにする。最後に、炭壁圧出型の山はね時に山鳴りの観測と予測計算の結果に見られた異常を整理し、地震モーメント法に基づいて山はね危険区域を予測する方法を提案する。

地震モーメント法の詳細は文献1)に譲るが、同方法では、応

力解析に基づいて岩盤や炭層の破壊箇所を求めて山鳴りの集中箇所を予測し、地震モーメント³⁾を用いて岩盤や炭層の破壊の規模、つまり、山鳴りの規模を予測する。

地震モーメントは、予測計算の他に、地震観測網による計測結果からも評価できるが、その際に破壊(地震)のメカニズムを仮定する必要がある。ここでは、従来と同様に、非ダブルカップル型を仮定し、最大せん断地震モーメントの形で山鳴りの規模を表現した¹⁾。また、採掘の進行に伴う山鳴り活動の消長は、切羽が単位長さ進行する間に生じる山鳴りの最大せん断地震モーメントを合計した値、つまり、最大せん断地震モーメント解放率で表すことにする。

2. 三池炭鉱の事例

三池炭鉱では採掘区域の深部化に伴い山はねが頻発したために、山はねの予知・予防に資することを目的として山鳴りの計測システムが導入された。同鉱の山鳴り観測網を構成する12個の地震計は、海底炭鉱であるためにすべて坑内に設置された。計測システムの周波数特性は10~60 Hzの範囲で平坦である⁴⁾。

震源標定にあたっては、天盤に破壊がほとんどみられず、山鳴りが炭層から聞こえたこと、ならびに、センサーが一つの平面上にあるために震源深度の標定が困難なことなどにより、炭層上に震源が位置すると仮定された。また、震源標定に必要な弾性波速度については、切羽の放圧発破や、坑内作業員から報告のあった大規模な山鳴り時の観測結果を参考にして、それらの発生位置に震源が標定されるように決定された。実際の発破と標定された震源のずれは20 m以内であった。また、検出された山鳴りの規模はローカルマグニチュードで最大-1程度であると推定される。

* 1994年7月18日受付 9月14日受理

1. 正会員 工博 北海道大学助手 工学部資源開発工学科

2. 正会員 工博 北海道大学教授 工学部資源開発工学科

3. 正会員 工博 (財)石炭技術研究所

[著者連絡先] FAX 011-716-6175 (北大・工・資源)

キーワード: 長壁式採炭法, 山はね, 応力解析, 予測

図1 採掘レイアウト（三池炭鉱東3～6片）

ここでは、四山鉱本層西60卸の東3片～東6片の4つの長壁式採（図1参照）における事例を取り上げる（以下、各ロングは東3片～東6片と略称する）。これら4つのロングはいずれもスライシング採炭の上段採掘切羽で、採掘深度は600～650 m、面長は100 m、稼行丈は2.3 mであった。本層の天盤は厚い砂岩層になっており、約60 m上方には上層と呼ばれる炭層の古洞があった。

東5片の採掘時に、切羽進行長100 m付近と200～400 mで数回の小規模な炭壁倒壊が発生した⁵⁾。東6片の採掘時には切羽進行長220 mで山はねが発生し⁴⁾、そこでロングの切り替えが行われた。山はねの発生時には、発生部位を挟んで一方の側で「キーン」という音響と圧風を感じ、反対側では「ドーン」という音響のみが聞かれた。山はね発生時に記録された震動のローカルマグニチュードは当鉱の山鳴りの最大規模に等しい～1程度であり、標定された震源は、炭壁の山はねで損傷を受けた部分の端部に位置していた⁶⁾。以上から、この山はねについては、切羽炭壁のある部位で発生し、炭壁に沿って一方向に伝播したものと推定される。

東3片～東6片の採掘に伴って観測されたすべての山鳴りの震央を図2(a)に示す。また、この内、切羽の前方40 mから後方10 mに位置する震央を図2(b)、その他の震央を図2(c)に示す。同図(b)、(c)中の6本の直線AA～FFはKaneko et al.⁴⁾が推定した地質的不連続である。東3片の中央部、東5片の切羽進行長130 m付近と中央部、東6片の山はねの発生した部位の3箇所に山鳴りの集中がみられる（図2(a)）。東3片の場合、山鳴りの切羽近傍への集中はみられない（同図(b)）。当該ロングにおける山鳴りの集中箇所は切羽から離れており、地質的不連続AA上に分布しているようにみえる（同図(c)）。

予測計算に用いた岩盤や炭層の諸定数と要素の寸法を表1に

(a)

(b)

(c)

 図2 山鳴りの震央分布⁴⁾（三池炭鉱東3～6片）。(a) すべての震源、(b) 切羽の後方10 mから前方40 mまでの事象、(c) その他の事象

表1 予測計算に用いた岩盤や炭層の諸定数と要素の寸法

岩盤の単位体積重量 (N/m ³)	25,000	炭層のヤング率 (GPa)	1
側圧係数	0.25	炭層のポアソン比	0.2
岩盤のヤング率 (GPa)	2	要素辺長 (m)	20
岩盤のポアソン比	0.2		

表2 予測計算に用いた強度特性値（岩盤の強度特性値については両事例共通）

強度特性値	岩盤	炭層（三池）	炭層（幌内）
単軸圧縮強度 (MPa)	45.0	11.0	25.0
残留強度 (MPa)	38.3	9.4	21.3
内部摩擦角 (°)	30.0	20.0	20.0
破壊後の摩擦角 (°)	30.0	20.0	20.0

示す。岩盤や炭層の強度特性値は、数回の試行を経て、観測結果との一致の程度が最も良い値を選択した（表2）。単軸圧縮下の

[illegible]

図3 三池炭鉱東3片～東6片の採掘に伴って生じた炭層・岩盤要素の破壊箇所に関する予測計算結果。炭層要素の破壊は破壊が生じた採掘ステップ（1ステップは20mの切羽進行を表す）で示す。なお、0は未破壊、1は東3片の採掘前に破壊したことを示す。また、岩盤要素の破壊はすべて東5片の採掘時に発生したが、これらの部位の炭層要素はステップ1で破壊した。岩盤要素の破壊は¥、\$の記号で示す（¥：ステップ51に天盤と下盤が破壊、¥¥：ステップ52に天盤と下盤が破壊、\$：ステップ53に下盤、ステップ53に天盤が破壊、\$\$：ステップ52に天盤が破壊）。 i の採掘開始時のステップ数 x 、終掘時のステップ数 y を $i(x, y)$ の形式で記す次のようになる：東3片(2, 25)、東4片(26, 47)、東5片(48, 72)、東6片(73, 99)

岩盤の強度 45 MPa の値は、砂岩の供試体について得られている⁷⁾湿潤状態の値 30 ~ 60 MPa の範囲内に収まっているが、残留強度は砂岩供試体の対応する値 (0 MPa) と一致せず、かなり大きい値になっている。

破壊箇所に関する予測計算の結果を図3に示す。なお、東6片の採掘は途中で切り替えられているが、予測計算では予定されていた終掘位置まで採掘を進行させた。炭層の破壊は東3片や東4片の採掘時にはほとんど発生せず、東5片において切羽進行長160 m付近と260～400 mで数多く生じるという予測計算結果が得られたが、この特徴は切羽近傍で生じた山鳴りの集中位置とほぼ一致している(図2(b))。東6片では炭層の破壊は初期の採掘段階ではあまり起こらず、切羽が山はねが発生した部位、すなわち、上層の古洞の中央部の下に差ししかかったときに生じるという予測計算結果が得られた(図3中の84)。予測計算によると、ここでは古洞の上下盤が接触条件を満たし、ある程度大きな応力が生じていた。

予測計算の結果によると切羽前方の炭層内の緩み域の大きさは0～20 mであった。木村²⁾は三池炭鉱において切羽から進行方向に向けて実施したテストボーリングの結果について述べている。それによると、穿孔作業はある深さまではスムーズであったが、それを越えるとジャミングが発生し穿孔不能となった。スムーズに穿孔できる範囲を緩み域と考えると、緩み域の幅は、稼行丈の0.6～2.8倍程度という見積もりが得られた。この計測結果は予測計算結果の範囲内に収まっており、後者の妥当性を示唆するものである。

なお、予測計算の結果によると、炭層の破壊はゲート坑道上や始発部でも生じたが、切羽の進行に伴う擾乱に関する検討に際しては、これらを無視した。その理由は、これらの箇所の炭層は、実際にはゲート坑道やロング昇の掘進時に既に破壊していたと考えられるためである。

予測計算結果では、岩盤の破壊は、東5片の採掘の際にわずかに肩坑道付近で発生した。この部分は上層の古洞縁辺の下に位置しており、応力集中箇所になっていた。

Kaneko et al.⁴⁾は山鳴り活動の活発さを表す観測量として、地震エネルギー解放率を無次元化した山鳴り強度係数を用いてい

図4 観測された山鳴り強度係数⁴⁾の切羽進行に伴う増減(三池炭鉱東3~6片, 切羽進行方向は図1に対応して横軸で右から左としている)

図5 予測計算の結果得られた最大せん断地震モーメント解放率の切羽進行に伴う増減（三池炭鉱東3～6片，太線は炭層の破壊の寄与，細線は岩盤・炭層の寄与の合計）

る。ここで、地震エネルギー解放率は切羽が単位長さ進行する間に生じた山鳴りの震動エネルギーの合計である。以下に山鳴り強度係数と最大せん断地震モーメント解放率について、切羽の進行に伴う増減挙動を比較する。

山鳴り強度係数（図4）は東5片の方が東3片に比べ大きく、相対的に山鳴り活動が活発であったことを示している。同ロングにおける山鳴り強度係数は、数回の小規模な炭壁倒壊が観察された切羽進行長100 m付近と200～400 mの両部位で大きい。東6片の山鳴り強度係数は、切羽進行長が200 mを過ぎてから大きくなっている。これらの特徴は予測計算の結果（図5）でも捉えられている。

予測計算の結果によると、最大せん断地震モーメント解放率に対する炭層の破壊の寄与は岩盤の寄与に比べ大きく、山鳴りは主に炭層の破壊に起因していると推定される。出口ら⁸⁾は三池炭鉱における放圧ボーリングに伴う山鳴りのエネルギーと排出繰粉量との間に正の相関関係を見だしている。これは、上記の推定が妥当なことを示す一つの証左を与えている。

以上述べたように、炭層要素の破壊位置と山鳴り震源の集中位置には良い一致がみられ、山鳴り強度係数と最大せん断地震モーメント解放率の挙動も互いに類似している。したがって、地震モーメント法は、少なくとも三池炭鉱の事例に関して、山はねを含む山鳴り活動の予測をする上で有用と判断される。

3. 幌内炭鉱の事例

筆者等は幌内炭鉱で6年間にわたり、8片、9片と呼ばれるかぶり1,055～1,195 mに位置する12のロングを対象として山鳴りの計測を行った。この間、多数の山鳴りが観測されたが炭壁圧出型の山はねの発生は皆無であった。

同鉱における炭壁圧出型の山はねは西部6片3層ロングで唯一
件報告されている⁹⁾。そこで、検討の対象に、このロングと、比
較のために山鳴りを計測した西部9片5上層・5層ロングを選定
した。なお、8片の2つのロングについては既に報告がなされて
いる¹⁾。

3・1 西部6片3層ロング

面長 208 m、稼行丈 2.3 m の当該ロングは、かぶりが 915 ～ 985 m あり、前進式長壁採炭法が採用された。傾斜 18° の 3 番層の上下盤は砂岩、頁岩、炭質頁岩で構成され、天盤の硬い砂岩層は 6.7 m の厚さがある（表 3 参照）。炭層は光沢が少なく岩石

図6 数値解析に用いた幌内炭鉱西部6片3層ロングのモデル

図7 炭層要素の破壊に関する予測計算結果(幌内炭鉱西部6片3層ロング)。切羽が140~160m進行したときの状況

の挟みを有しており、硬い部類に属すると想像される。

当ロングの幾何学的特徴は、(1)肩坑道に隣接する古洞(西部5片3層ロング)との間に約20mの保安炭柱を残しながら採炭したこと(図6)、(2)上位に5層、4上層、4層の古洞があったこと、(3)山はねの生じた位置の右方に約100m四方の未採掘区域が存在していたことなどである。

切羽が始発部から148m進行し、未採掘区域の縁辺部に達した1975年8月2日に山はねが発生し、2名が罹災した(死亡1名、重傷1名)。

当該ロングでは、山はね発生前の7月22日と26日に切羽上部で山鳴りが各1回ずつ生じ、26日の山鳴り時には負傷者が出た(同鉱では、山鳴りが軽度の災害を伴う場合でも特別の呼び方をしていなかった)。現場では、2回の山鳴りが、保安炭柱に生じた応力集中に起因するものと判断した。そこで、無炭柱採炭に転換することにし、始発部から140m付近において切羽面長を約208mに変更し、自走枠より上部の約28.7mの区間は鉄柱・カッペで支保し採掘を続けた。

表3 幌内炭鉱の3番層および、その上下盤の岩種と層厚⁹⁾

地層	岩種	層厚(m)
上盤	頁岩	3.0
	砂岩	6.7
3番層	石炭	2.0
	砂岩	1.0
	炭質頁岩	0.5
	砂岩	6.3
下盤

図8 予測計算の結果得られた最大せん断地震モーメント解放率の切羽進行に伴う増減(幌内炭鉱西部6片3層ロング。太線は炭層要素の寄与、細線は炭層要素と岩盤要素の寄与の合計)

災害当日、カッターにより上部ステープルから約7mの位置まで上り採炭した時に、ドーンという音と同時に上部ステープルから下部に向かって約8m間の切羽炭壁が倒壊した。これに伴い、トラフが折れ曲がり、この場所に居合わせた2名が罹災した。負傷した作業員は「ドーンという大きな音とともに、跡山側へ飛ばされた」と報告している。別の数人の作業員も音響について言及し、さらに「発破とは異なり圧風がなかった」ことを指摘している。山はね発生後も跡バラス天盤発破、炭壁への緩めボーリング等の対策を施しながら採炭が継続されたが、このロングの終掘以降、3番層の採掘は放棄された。

予測計算に用いた物性値を表1、2に示す。物性値の決め方は三池炭鉱の場合と同様である。両物性値を比較すると、炭層の強度が三池炭鉱の対応する値の約2倍になっている以外は同じである。なお、三池炭鉱と同じ炭層強度を用いると採掘前に炭層のほとんどが破壊するという計算結果が得られた。炭層の強度に関する両炭鉱間の差異の妥当性については測定結果がないので不明である。

予測計算によると、当該ロングの採掘前に既に上述した未採掘区域の一部で炭層の破壊が生じた。切羽が進行しても炭層や岩盤の破壊はあまり起こらなかったが、切羽が山はねの生じた部位に達したときに、切羽に接する炭層要素が破壊した(図7)。

予測計算の結果得られた最大せん断地震モーメント解放率の平均的な値は、三池炭鉱より約2倍大きく、同解放率は切羽の進行とともに徐々に増加した(図8)。炭層の破壊の全体の破壊に対する寄与の割合は三池炭鉱の事例よりも小さく、1/2程度である。

3・2 西部9片5上層ロング

計測の対象となった西部9片5上層・5層ロングは、面長105~120mの片盤向長壁式採炭で、自走枠・ドラムカットによる機械化総バラス採炭が実施された。かぶりは1,125~1,195mで、層間距離8mの5上層と5層の山丈と傾斜はそれぞれ約2.1m, 36°, 2.3m, 32°である。当ロングには図9に示すよう

図9 数値解析に用いたモデル（幌内炭鉱西部9片5上層・5層ロング）

図10 5上層を線 A から線 B まで採掘したときに生じたローカルマグニチュードが 0 以上の山鳴りの震央分布（幌内炭鉱西部9片5上層・5層ロング）

に、西部8片5上層・5層ロングの古洞が隣接していた。

当現場では多数の山鳴り（筆者らの一人の経験によると一日に数十回）が生じ、そのうち1,712個の事象について、震源・規模を評価した。ローカルマグニチュードは最大で約 +1.5 であった。なお、10個の上下動速度型地震計からなる計測網による山鳴りの観測方法と観測結果の整理方法の詳細については文献¹⁰⁾を参照されたい。

採掘に伴って発生した山鳴りの震央の例を、切羽の位置とともに図10に示す。山鳴りは切羽近傍の肩坑道付近に集中している。

数値解析に際し、岩盤や炭層の諸定数と要素の寸法は西部6片3層ロングと同じ値を用いた（表1, 2）。

炭層要素の破壊に関する予測計算の結果を述べる（図11）。古洞のみが存在する状況下で、既に古洞縁辺から20mの範囲の要素が破壊していた（同図（a））。なお、古洞内部は未破壊となっているが、これは計算時間を短縮するために古洞が突然現れるモデルを用いたためである。5上層の払の設定後、直ちに払跡周辺の炭層要素は破壊を始め（同図（a））、採掘の進行に伴い破壊域は順次拡大し、切羽前方における炭層内の破壊域の深さは最大40mに達した（同図（b））。

岩盤要素の破壊に関する予測計算結果の例を図12に示す。破壊は切羽近傍の肩坑道付近に集中しているが、この特徴は山鳴りの集中箇所の特徴と一致している。

最大せん断地震モーメント解放率の実測値を図13に示す。5上層ロングにおける最大せん断地震モーメント解放率は、採掘の初期段階では小さいが、その後増加し、切羽進行長が300mのときに最大値を示した後、減少している。5上層ロングの直下を追いかける形で採掘した5層ロングの最大せん断地震モーメント解放率は、5上層ロングの約1/2の大きさに留まっている。

最大せん断地震モーメント解放率に関する予測計算の結果を図14に示す。大きさは実測の約2倍になっているが、5上層と5層の大小関係や、5上層の採掘において切羽進行長約350mで

- ☒ Already fractured before excavation reached A
- ☒ Newly fractured due to excavation from A to B

(a)

(b)

図11 炭層要素の破壊に関する予測計算結果（幌内炭鉱西部9片5上層・5層ロング）。(a)は切羽が120～140m、(b)は切羽が300～320m進行したときの状況を表す

図12 5上層を線 A から線 B まで採掘する間の岩盤の破壊箇所に関する予測計算結果（幌内炭鉱西部9片5上層・5層ロング、破壊箇所は立方体で示されている）

図13 観測された最大せん断地震モーメント解放率の切羽進行に伴う増減（幌内炭鉱西部9片5上層・5層ロング）。上は5上層、下は5層採掘時の結果を表す

図14 予測計算の結果得られた最大せん断地震モーメント解放率の切羽進行に伴う増減（幌内炭鉱西部9片5上層・5層ロング）。上は5上層、下は5層採掘時の結果を表す（太線は炭層要素の寄与、細線は炭層要素と岩盤要素の寄与の合計）

最大値を示している点は、予測計算結果と観測結果とで類似している。以上述べた破壊発生箇所や山鳴り活動の特徴は、隣接した古洞の影響によってもたらされたと考えられる。

予測計算の結果得られた最大せん断地震モーメント解放率の挙動に関し、炭層の破壊の規模の増減に注目すると、5上層の採掘の初期段階でピークを示した後、すぐに定常状態となりほぼ一定値を保っている。大きさは岩盤のそれの1/2以下であり、実測との間に切羽の進行に伴う増減に関する類似点は見られない。

なお、予測計算の結果得られた最大せん断地震モーメント解放率は、三池炭鉱の事例に比べて約20倍、西部6片3層ロングの事例に比べて約10倍大きい。

4. 緩み域の大きさと炭壁圧出型の山はねの関係

4・1 3つの事例の比較

三池炭鉱の事例に関する予測計算結果では、岩盤はほとんど破壊せず、専ら切羽近傍の炭層が破壊し、それに伴って形成される炭層内の緩み域の奥行きは0～20mであった。これに対して、幌内炭鉱9片のロングに関する予測計算結果では、炭層は切羽から20～40m前方で切羽に沿って一様に破壊し、岩盤は切羽から0～100m前方で破壊した。同様の結果は8片の2つのロングでも得られている¹⁾。

最大せん断地震モーメント解放率に占める炭層の破壊の寄与は、三池炭鉱の場合にはほぼ100%であったが、幌内炭鉱9片では50%以下であった。また、最大せん断地震モーメント解放率の大きさを両事例で比較すると、三池炭鉱は幌内炭鉱9片の1/20程度であった。

以上をまとめると、三池炭鉱の場合には比較的小規模で炭層の破壊に起因した山鳴りが切羽の近傍で生じたのに対して、幌内炭鉱8・9片では比較的大規模で岩盤の破壊に起因した山鳴りが、切羽よりある程度離れた奥部で生じたと推定される。

三池炭鉱では切羽前方の炭層の緩み域の奥行きが浅く、炭層の破壊が切羽近傍で生じる可能性が高い状態にあり、山はねの起こる危険があったといえる。木村²⁾によると、三池炭鉱では切羽前方の緩み域の大きさと山はねの発生頻度の間に明確な関係が認められ、採炭直後の緩み域の大きさが稼行丈の約1倍以下の場合には山はねが頻発し、2倍以上の場合には皆無であった。天盤が厚い砂岩層で構成され、しかもここがあまり破壊しなかったことも、切羽における山はねの発生を促す側に作用したであろう。

一方、幌内炭鉱の8・9片では、切羽前方の炭層や岩盤に大きな緩み域が存在したために山はねが発生しなかったという推定が可能である。

切羽前方の緩みに関して、幌内炭鉱の6片の事例は三池炭鉱と幌内炭鉱9片の事例の中間的な特徴を示した。同事例の場合は上部に古洞があり、古洞との位置関係によって、部分的に、山はねの生じやすい状況が現われたものと考えられる（4・3・2参照）。

以上述べたように、炭壁圧出型の山はねの発生は、切羽前方の緩み域の大きさと密接に関係している。そこで、緩み域を支配する要因である地圧に関して以下に考察する。炭鉱の場合には、地圧は主に採掘深度とロングの幾何学的レイアウトによって決まるので、考察はこの2つに限定する。なお、地質条件等を含めた山はねの発生条件についてのより一般的な検討は他¹¹⁾に譲る。

4・2 採掘深度の影響

炭層に垂直な直応力成分は、切羽周辺の応力集中に対し他の成分に比べてより大きな影響を持つ。一方、我が国の炭鉱における初期地圧の報告例^{12,13)}をみると、側圧係数が1未満のことが多い。このような状況の下では、0～30°の緩傾斜を持つ炭層の場合、切羽周辺の応力状態は、主に、初期鉛直成分に支配される。周知のように、この成分はかぶり圧にほぼ等しいことが多くの計測例で明らかにされている。この意味で、炭鉱における初期地圧は深度に比例すると考えてよい。そこで、採掘深度と山鳴りや山はねの関係について検討する。

4・2・1 かぶりが400～1,000mの場合 採掘深度がある程度大きくなると、上下盤よりも強度が小さく、かつ、応力集中箇所である切羽周辺の炭層で破壊が生じ、専らこれに起因する山鳴りが生じるであろう。三池炭鉱の事例はこのような状況に該当すると考えられる。予測計算結果でも、岩盤の破壊はほとんど起こらず、採掘の進行による山鳴り活動の活発さの消長は炭層要素の破壊の消長に一致していた。このように、岩盤が破壊せず、切羽前方の炭層の緩み域も小さいと、炭壁圧出型の山はねが発生する条件が整うようである。我が国の炭鉱における過去の事例⁹⁾をみると、炭壁圧出型の山はねは、すべてかぶり400～1,000mの深度で発生している。

山鳴り活動は、より深部に比べると活発ではない。例えば、最大ローカルマグニチュードは、幌内炭鉱の8・9片で+1.5なのに対して、三池炭鉱の場合は-1程度であった。幌内炭鉱6片3層ロングの場合も、山はね発生前の10日間に2回の山鳴りしか報告されていない。

4・2・2 かぶりが1,000mを超える場合 かぶりが1,000mを超えた幌内炭鉱の8・9片の採掘現場では、炭層や岩盤の破壊が頻発し、現場では山鳴りが1日に数十回聞かれた。筆者らの一人が聞いた限りでは、山鳴りの音質は鈍く響くようであり、岩盤の内部から生じるように感じられた。既述したように、最大ローカルマグニチュードは三池炭鉱の事例より2.5も大きかった。予測計算結果においても、採掘の進行に伴う山鳴り活動の消長は岩盤要素の破壊の消長によく対応していた。予測計算の結果得られた最大せん断地震モーメント解放率は、三池炭鉱の事例と比べ約20倍の値を示した。

かぶりが1,000mを超えると破壊の頻度や規模は相当大きくなるにも関わらず、幌内炭鉱の8・9片の場合には、山はねやこれに類似した現象は発生しなかった。同様の事例として、奔別炭鉱の切羽における山はねが、かぶり800mの現場で2件報告されているものの⁹⁾、1,140m以深の現場では皆無であったことが挙げられる。これらの理由については、既に述べた通りである（4・1）。

ただし、緩み域内の既に破壊を起こした石炭でも、stick-slip的な挙動に伴い、さらに応力低下を起こす能力を持っている¹⁴⁾ことに注意する必要がある。したがって、採掘深度がある限界

を越えても山はねに関し完全に安全になるとはいえない。

なお、旧西ドイツの深部炭鉱における長壁式採の炭壁圧出型の山はねは、採掘深度 1,000 m 前後でも生じている⁷⁾。山はねが我が国に比べ、より深いところでも起こっている理由は、夾炭層岩盤の強度が、古第三紀に属する我が国の炭鉱のものより大きいためと考えられる。

4・3 ロングの幾何学的レイアウト

4・3・1 隣接する古洞の影響 採掘切羽が古洞縁辺の応力集中部を通過する際には、切羽の古洞寄り部分に大きな応力集中が生じる。幌内炭鉱西部 9 片 5 上層ロングの山鳴りはここに集中して生じた。幌内炭鉱西部 6 片 3 層ロングにおける山はねもここで生じ、三池炭鉱東 6 片における山はねは、やや古洞寄りで生じた（これら山はねの事例の場合は、次項に述べるように上位の古洞の存在も影響していると考えられる）。

4・3・2 上位の古洞の影響 稼行している炭層よりも上位の層に古洞がある場合、切羽周辺では様々な応力状態が実現し得る。

古洞縁辺の下では一般に応力集中が起こっている。東 5 片の切羽進行長 100 m 付近で生じた炭壁の返りや幌内炭鉱 6 片の山はねは、上位の古洞縁辺に切羽が接近したときに生じた。

古洞の中央部の下では応力が抜けていれば破壊は起りにくいが、崩落ずりが圧密された状態になっていれば地圧は回復している。東 5 片の採掘の中盤において、比較的活発な山鳴り活動を伴って炭壁の返りが生じた事例では、上部の古洞がこのような状態になっていたと解釈できる。予測計算の結果でも、古洞中央部における上下盤が接触し、切羽に接する炭層要素が破壊した。東 6 片の山はねも、東 5 片の炭壁の返りと同様、古洞中央部に切羽が接近する状況下で発生した。

5. 長壁式採における炭壁圧出型の山はねの予測

山はね時の観測結果と予測計算結果を整理すると以下のようになる。

東 5 片における炭壁の返りが発生した 2 箇所では、比較的大きな山鳴り強度係数が観測された。予測計算でもこの部位で切羽に接する炭層要素が破壊し、大きな最大せん断地震モーメント解放率が生じた。

東 6 片における山はねが発生した部位では、山鳴り強度係数が値の小さい状態から増加に転じた。予測計算の結果によると、山はねの発生した部位に切羽が達したとき、それまで破壊しない状態にあった切羽に接する炭層要素が破壊し、それまで 0 であった最大せん断地震モーメント解放率がこの部位で増加し始めた。

幌内炭鉱 6 片では、山はねの発生箇所に切羽が近づくとそれまで生じていなかった山鳴りが生じた。予測計算の結果によると、山はね発生箇所付近への切羽の接近に伴い最大せん断地震モーメント解放率が増加し、それまで破壊しない状態にあった切羽に接する炭層要素が破壊した。

このように、東 5 片における数回の炭壁倒壊現象と東 6 片における 1 回の山はね、幌内炭鉱 6 片における山はねのいずれについても、発生した場所で観測結果と予測計算結果の両方が異常を示した。これらの異常は次の 2 項目にまとめることができる。

(1) 山鳴りが活発に生じる（特に、山鳴りが不活発な状態から活発になる）

(2) 予測計算において切羽に接する炭層要素が破壊する

これらは、従来提案されている山はね発生の危険性を示す次の

ような尺度⁹⁾、すなわち、

(3) 天盤に厚い砂岩層が存在する

(4) ある程度以上の採掘深度がある

に加えて、山はねの発生場所と時期を絞り込む上で有用な判断基準となり得るであろう。これら (1)、(2) を用いたならば、三池炭鉱東 5 片の採掘時の数回の炭壁の返り、東 6 片の採掘時の山はね、および、幌内炭鉱 6 片の山はねが予測できたことになる。

予測計算では、結果が仮定する変形定数や強度定数に依存し、また、現状では断層等の地質的擾乱の存在を考慮できないという欠点を有する。これらの欠点については、山鳴りの観測や地質調査を組み合わせることで用いることにより補われるものと考えられる。すなわち、予測計算の精度は、山鳴りの観測結果に基づいて変形定数や強度定数を調整することにより向上する。また、断層等の地質的擾乱が調査によってあらかじめ把握されていれば、必要に応じて、そこでの山鳴り監視を強化することができる。

判断基準 (1) ~ (4) および現場の経験的な判断基準に基づいて山はねの危険箇所が絞り込まれれば、そこでテストボーリングによる緩み域の調査を集中的に行い、改めて危険と判断されたならば放圧発破、緩めボーリング等の山はね防止対策²⁾を実施する体制作りが可能になると期待される。

6. 結 言

深部採炭に伴う山鳴り活動を予測するために開発された地震モーメント法が炭壁圧出型の山はねを含む事例についても有効であり、山鳴りの集中部位や山鳴り活動の採掘の進行に伴う消長が概ね予測され得ることを明らかにした。山鳴りと山はねが同一の破壊規準により概ね予測可能であるということは、両者の発生機構の間に大きな差異がないことを示唆するものと考えられる。

また、長壁式採における炭壁圧出型の山はねは切羽前方の緩み域の大きさと密接に関係していることを指摘し、山はね危険区域の予測方法を提案した。

謝辞 本研究の遂行にあたり熊本大学工学部金子勝比古助教、ならびに、川崎地質藤島泰隆氏には貴重な御助言と文献の提供を賜わった。また、幌内炭鉱における山鳴りの計測は幌内炭鉱、室蘭工業大学、北海道大学の関係各位の協力の下に行われた。記して感謝申し上げる。

引 用 文 献

- 1) 藤井義明・石島洋二：資源と素材，Vol.110，p.992-998，(1994)
- 2) 木村 治：京都大学工学部博士論文，(1989)
- 3) Aki, K. and Richards, P.G.: Quantitative Seismology, Theory and Methods, I, W.H. Freeman and Company, San Francisco, (1980)
- 4) Kaneko, K., Sugawara, K. and Obara, Y.: Induced Seismicity, p.79-92, A.A.Balkema, Rotterdam, (1992)
- 5) 菅原勝彦・金子勝比古・岡村 宏：昭和61年度全国地下資源関係学会合同秋季大会分科研究会資料，[G]，p.1-4，(1986)
- 6) 石炭鉱山保安技術対策検討部会山はね対策分科会ワーキンググループ（委員長 菅原勝彦）：山はね対策に関する調査，(1985)
- 7) 菅原勝彦・金子勝比古・岡村 宏：昭和60年度全国地下資源関係学会合同秋季大会分科研究会資料，[D]，p.22-25，(1985)
- 8) 出口剛太・小田仁平・松本広市：昭和61年度全国地下資源関係学会合同秋季大会分科研究会資料，[G]，p.9-12，(1986)
- 9) 札幌炭鉱保安監督局監修：山はね事例集，北海道炭鉱技術振興会，(1983)
- 10) Fujii, Y. and Ishijima, Y.: Min. Sci. & Tech., 12, 3, p.265-285, (1991)
- 11) Bräuner, G.: Proc. 6 th. Intl. Strata Control Conf., (1977)
- 12) 菅原勝彦・金子勝比古：日本鉱業会誌，Vol.102，No.1177，p.143-148，(1986)
- 13) 松本裕之：室蘭工業大学博士論文，(1994)
- 14) 後藤龍彦・佐藤干城・吉田 豊・藤井義明：日本鉱業会誌，Vol.104，No.1199，p.17-22，(1988)