

## 学位論文題名

## 深部採炭に伴う微小地震の観測とその予測に関する研究

## 学位論文内容の要旨

深部炭鉱の採掘現場では、周辺の炭層や岩盤の破壊に伴う「山鳴り」と呼ばれる音響が頻繁に聞かれる。また、大音響と共に石炭が空洞内に圧出する「山はね」と呼ばれる突発性の現象も時に発生する。両者の発生機構は同一で、発生場所の差異しかないといわれているが、山はねの多くは災害を引き起こすので、その発生機構や予知についての研究は、地層制御の分野における重要課題の一つになっている。

山鳴りの発生位置や激しさの程度は、これに伴う震動、つまり微小地震の計測を基に評価できる。本論文では深部採掘に伴う微小地震を観測し、山鳴りの集中箇所と激しさの推移について採掘活動との関係を明かにする一方で、その予測方法について研究することにした。微小地震活動の予測が可能であれば、これを正確に解釈することが可能になり、ひいては、山はねの予知に役立つと考えられるからである。

研究対象として、代表的な深部炭鉱である北海道の幌内炭鉱と九州の三池炭鉱を選定した。幌内炭鉱については、かぶり1, 055~1, 195 mに存在する12の採掘切羽を対象に、採掘に伴って発生する微小地震活動を6年間にわたって計測し、データの収集と解析を行った。三池炭鉱については、かぶり600 mの4つの採掘現場における微小地震の計測結果の収集と解析を進めた。同時に、両炭鉱の事例を対象に微小地震活動の予測方法について研究を進めた。

本論文はこれらの研究を9章にわたって述べたものである。

第1章では、研究の目的と意義について述べるとともに、深部炭鉱で発生する微小地震の震源メカニズム、および、微小地震活動の予測方法に関する既往の研究について概括し、本研究の位置付けを行っている。

第2章では、研究の対象である幌内炭鉱と三池炭鉱を中心に、深部炭鉱における地圧現象ならびに地質状況について概括している。

第3章では、微小地震の計測システムについて説明している。そして、本システムによって捉えた幌内炭鉱の採掘切羽周辺で発生する微小地震波が、次の2つの特徴を有していることを明かにしている。

- 1) 地表のセンサーのほとんどがP波に関して引きの初動を受感する。
- 2) 震源で放射された弾性波は、自然地震の場合と比較して周波数が高いために(数100 Hz程度)、地表に届く間に著しく減衰する。

第4章では、計測された震動データから震源パラメーターを解析する方法について述べている。まず、震源標定については、沿層坑道の掘進発破を利用して直線波線の仮定の下で評価されたP波速度を用い、掘進発破の位置を水平面内では10 m程度、垂直方向では20 m程度の誤差で標定できることを示している。次に、地震モーメントテンソルを評価するために、幌内炭鉱の微小地震波が第3章で述べたような特徴を有していることを考慮し、自然の地震波とは異なった解析方法、すなわち、P波のフーリエ振幅スペクトルを利

用する方法を新しく開発している。開発に際しては、主値の1つが0であるという拘束条件を用い、岩盤の粘性を考慮している。この方法で、幌内炭鉱の微小地震を解析し、発震機構がダブルカップル型でないことを明かにしている。微小地震の規模については、地震モーメントテンソルに注目して評価し、微小地震の規模を表す別の指標であるローカルマグニチュードについては、地震モーメントテンソルを基に評価している。最後に、微小地震活動の活発さの推移を表す指標として、ある期間に発生した微小地震の最大せん断地震モーメントの合計をこの間の払進行長で除した値として定義される量（最大せん断地震モーメント解放率と名付けた）を新しく導入している。

第5章では、微小地震は岩盤や炭層の破壊に伴うとの仮説に立脚し、採掘活動に伴って生じる破壊の発生箇所と広がり、および破壊の激しさの程度を予測する数値シミュレーションの方法について述べている。まず、採掘現場周囲の応力状態を求めるための数値解析方法として採用した境界要素法の一形態である3次元変位くい違い法の理論を拡張し、板状介在物問題を簡便に解く方法とともに、近接する2層の採掘問題を取り扱うための近似的な方法や炭層の面内応力を評価する方法を提案している。

次に、各採掘過程に対応した弾性応力解析を基に、破壊条件を満たす領域を求め、そこでの破壊の程度を表すために、4つの指標、すなわち、エネルギー解放率、体積余剰せん断応力指数、ひずみエネルギー解放率、最大せん断地震モーメント解放率の具体的な評価方法について検討している。最初の2つの指標は、南アフリカの研究者によって、後の2つの指標は、本研究において、それぞれ導入されたものである。これらの内で、最大せん断地震モーメント解放率は、微小地震の観測結果からも評価される指標であり、実測と予測を直接的に比較・対比できるという特徴を持っている。

第6章では、幌内炭鉱の6事例、12の採掘切羽について実施した微小地震の計測結果について述べ、予測と比較している。1つの事例に関して1,000~10,000の事象が計測されたが、当鉱における微小地震の特徴として、そのローカルマグニチュードが最大で+1.5であったこと、採掘切羽周辺で多発し、特に、古洞側に集中する場合が多かったこと、稀に切羽面の古洞とは反対側に集中する現象や、払始発部後方の未採掘領域に集中する現象もみられたこと、微小地震活動の採掘に伴う消長に関し、採掘深度に関わらず3つの区域毎に特徴がみられたことなどを明かにしている。

また、観測で得られた微小地震の集中場所や活動の推移に関する特徴は、数値シミュレーションでも捉えられることを確認している。

第7章では、三池炭鉱における微小地震活動の消長に関して、最大せん断地震モーメントの解析に基づく予測と実測が合うことを確認している。

第8章では、まず、微小地震活動の予測に関して、筆者の開発になる最大せん断地震モーメント解放率が4つの指標の中で最も正確であることを明かにしている。また、ゆるみ域の分布状態および破壊の発生箇所が、幌内炭鉱と三池炭鉱の両事例では全く異っており、前者の場合には、岩石の破壊が卓越し、緩み域が切羽を厚く取り巻いているのに対し、後者の場合には専ら炭層の破壊が生じ、緩み域が狭いこと、これらの特徴が採炭切羽で起る山はねの発生と密接に関係すること、その差異は主に採掘の深度に起因することなどを明かにしている。次に、これらの知見を基に、微小地震活動や山はねに影響を与える要因について考察し、微小地震計測と数値シミュレーションを組み合わせた山はねの監視と予測に関する提言をしている。

第9章は結論で、本研究で得られた主な研究成果について述べている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 島 洋 二  
副 査 教 授 中 島 巖  
副 査 教 授 鏡 味 洋 史  
副 査 教 授 三 田 地 利 之

## 学位論文題名

### 深部採炭に伴う微小地震の観測とその予測に関する研究

深部炭鉱の採掘現場周辺では、「山鳴り」や「山はね」と呼ばれる炭層や岩盤の脆性的な破壊現象が時に頻発する。同一の発生機構に基づくと考えられるこれら二つの現象の中で、災害を引き起こす危険性の高い山はねの予知・予防についての研究は、地層制御の分野における重要課題の一つになっている。

山鳴りも山はねも発生時には震動や音響、つまり微小地震を伴うので、これを観測することにより、それらの集中箇所と激しさの推移を知ることができる。本研究は、山鳴りや山はねの発生機構を解明しそれらの予測方法を開発する目的で、深部採炭に伴う微小地震について観測と応力解析に基づく数値シミュレーションを行ったもので、評価すべき成果は以下の3点に要約される。

第一の成果は、微小地震の観測に関するものである。まず、採炭に先立つ坑道掘進発破に伴って生じる震動を利用して評価したP波速度を用い、震源の位置を水平面内で30 m程度、垂直方向で40 m程度の誤差内で標定する方法を開発している。次に、震源規模を表す指標として地震モーメントテンソルを導入し、観測波形から、主値の一つが0であるという拘束条件を用い、岩盤の粘性を考慮してこの指標を評価する方法の開発に成功している。

これらの方法により、幌内炭鉱の地表下1100m前後の6つの採炭パネルにおいて、採掘に伴って発生する微小地震を6年間にわたり連続的に観測し、数万に及ぶ微小地震の震源位置と規模を評価している。そして、その規模はローカルマグニチュードに換算して最大で+1.5であること、採掘に伴う消長に関し3つの採掘区域毎に特徴がみられること、微小地震の集中区域は採掘切羽の古洞側など応力集中帯に一致することを明かにしている。

第二の成果は、微小地震の数値シミュレーションに関するものである。まず、採掘現場周囲の応力状態を求めるために、境界要素法の一つである三次元変位くい違い法の理論を拡張し、板状介在物問題を簡便に解く方法、近接する二層の採掘問題を取り扱うための近似的方法、炭層の面内応力を評価する方法の開発に成功している。

次に、各採掘過程に対応した弾性応力解析結果を基に、破壊条件を満たす領域を求め、そこでの破壊の激しさを表すために、4つの指標、すなわち、エネルギー解放率、体積余剰せん断応力指数、ひずみエネルギー解放率、最大せん断地震モーメント解放率を評価する方法を検討している。後の2つの指標は、本研究において新たに導入されたものである。これらの中で、最大せん断地震モーメント解放率は、払がある距離だけ進む間に発生した破壊（微小地震）の最大せん断地震モーメントの合計をこの距離で除した値として定義されるが、この指標は物理的に明確な意味を持ち、かつ微小地震の観測結果からも評価できる量であり、実測と予測を直接的に比較・対比できるという特徴を持っている。そして、

最大せん断地震モーメント解放率を観測結果にあてはめた結果、他の三つの指標に比べて予測と実測の一致の程度が格段によく、微小地震の集中場所や活動の推移に関する特徴が概ね予測できることを明らかにしている。

第三の成果は、山はねの発生機構の解明と予測に関するものである。まず、開発した方法を山はねの発生した三池炭鉱における事例に適用し、当該事例の場合、微小地震の観測と数値シミュレーションのいずれの方法によっても山はねが予知し得たことを確認している。また、幌内炭鉱と三池炭鉱では破壊の発生箇所が著しく異っており、前者の場合には、岩盤の破壊が卓越し、緩み域が切羽を厚く取り巻いているのに対し、後者の場合には専ら炭層で破壊が生じ、緩み域が狭いこと、これらの特徴が採炭切羽で起る山はねの発生と密接に関係すること、その差異は主に採掘の深度に起因することなどを明かにしている。

次に、山はねに影響を与える要因について考察し、本研究で開発した数値シミュレーションではこれらの要因が適切に考慮されていることを確認するとともに、微小地震観測と数値シミュレーションを組み合わせた山はねの監視と予測方法を提言している。

これを要するに、著者は、深部採炭に伴う微小地震を6年間にわたり観測するとともに、応力解析に基づいて微小地震を解析・予測する方法を開発し、山鳴りや山はね現象に関して有益な多くの新知見を得たものであり、資源開発工学ならびに岩石力学の進歩に貢献すること大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。