

インド岩石力学研究所との共同研究(予察) —コラー金鉱山での山はね予知研究のために—

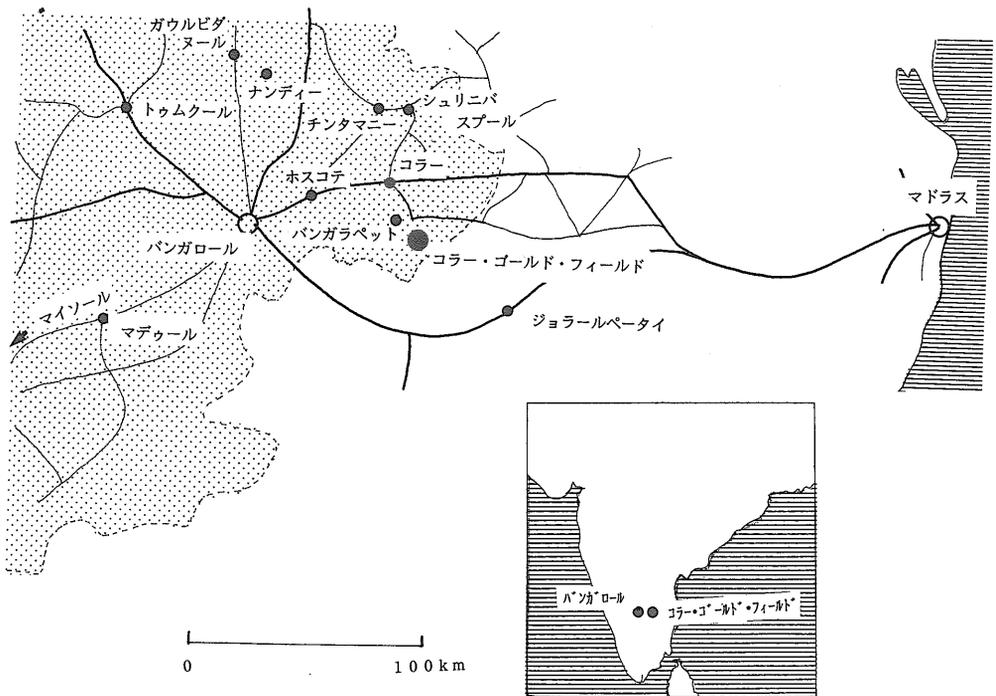
楠瀬 勤一郎¹⁾

1. はじめに

1993年度, 科学技術庁の予算で, インド国立岩石力学研究所と, 山はね(地下の高い圧力のために坑道やトンネルの壁面などが突然破壊する現象. ここでは, 破壊にともなっている地震波も含めて山はねと呼ぶことにします)を予知するための共同研究を始めることになりました. 坑道などの空洞を地下深部で掘削すると, 空洞の周囲の岩盤に応力が集中し, 山はねが発生します. この岩盤の応力集中によって, 山はねの発生前に微小地震が誘発されること

が予想されます. また, 応力集中が大きければ大きいほど, 山はねの規模は大きくなるでしょうから, もし, 大規模な山はねが発生する場所の周囲に誘発される微小地震が, 高い応力集中のために大きな応力降下を伴うとすれば, 観測される地震の波形は, 相対的に高周波になるはずです.

この共同研究では, 山はねの前に, 微小地震の震源分布と波形などにどのような変化が表れるのかを調べることと, 室内の実験をもとにして, 岩盤の破壊に先立つ現象を詳しく調べることを, 二つのアプローチを行う予定になっています. このうち, 野外



第1図 Koral Gold Field 周辺の地図. 太い線は幹線道路で, よく舗装されている. 灰色の部分は, Karnataka 州.

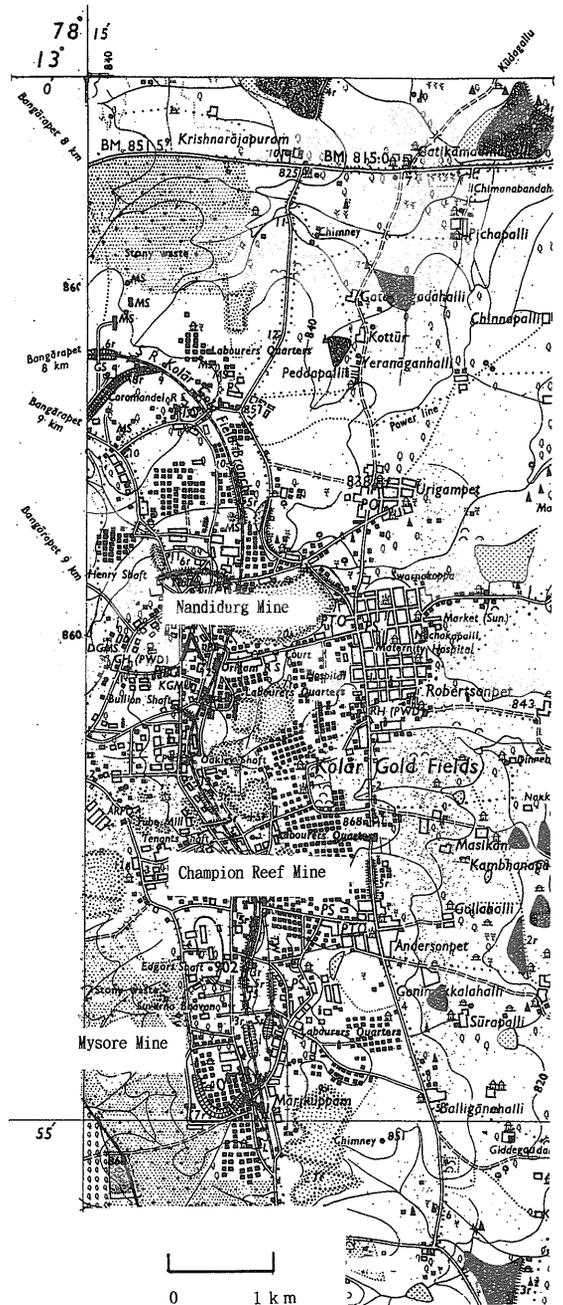
での微小地震の観測は、この共同研究のためにデザインされた高密度の観測網を、インド国立岩石力学研究所が、設置する約束になっておりましたので、1993年2月に、インド国立岩石力学研究所にいき、地震計の配置を決めてきました。

現在(1993年夏)、新しい観測網が設置されたところです。これから収集されていくデータを解析して、山はね発生前の応力場の変化など、いろいろな現象について、来年には報告することが出来る予定です。ここでは、共同研究を始めるにあたって、インド国立岩石力学研究所が行ってきた山はねの研究の現状と、岩石実験の研究室の様子を中心に、野外フィールドとなるコラー・ゴールド・フィールドや国立岩石力学研究所について報告します。

2. コラー・ゴールド・フィールド

南インド中央部には、花崗岩や片麻岩の中に、プレカンブリアンの緑色片岩が、南北に約80 kmの長さに帯状に分布しています。そのうち、カルナタカ州の南東縁の8 kmの部分には、金が伴われています。この、金が産出する地帯はコラー・ゴールド・フィールドと呼ばれ、また、町の名ともなっております。インド国立岩石力学研究所は、この、標高900 mほどの高原の鉱山町にあります。車で行くならば、州都バンガロールからマドラスへの幹線道路(4号線)を西に約100 kmいったところにあるコラーの町から、さらに40 kmほど南に下ることになります(第1図)。また、この町には、バンガロール-マドラスの鉄道の支線が走っていて、日に数本の列車がバンガロールとの間を往復しています。

コラー・ゴールド・フィールドには、Champion Reef, Mysore, Nandidurg の三つの金鉱山があります(第2図)。現在採掘している鉱脈の金の品位は、スポット的には5-6 g/トンですが、平均的には、3 g/トンで、金は、緑色片岩中に入っている幅1-6 mの石英脈に含まれています。研究所の建物(写真1)は、その一つ、Champion Reef Mine (写真2)に隣接しています。Champion Reef Mineは、最深の採掘現場が地下3.2 kmをこえる、インドで一番深い鉱山で、南アフリカの金鉱山に次ぐ世界第2の深さを誇っています。現在は、Mysore 鉱山の採掘は停止しており、また、他の鉱山も深い部分での採



第2図 Koral Gold Fieldの地図。北より、Nandidurg, Champion Reef, Mysore の各鉱山が並んでいる。インド岩石力学研究所は、Champion Reef mine に隣接している。

掘はほぼ終了して、浅い部分を中心に採掘されています。コラー・ゴールド・フィールドでの金の採掘は、1,000年以上昔にさかのぼるといわれています。現在の三つの鉱山は、1880年にイギリス人



写真1 インド岩石力学研究所



写真2 Champion Reef mine

によって開発され、独立後、1956年に国営の Bharat Gold Mines Limited となりました。いままでに、これらの鉱山で採掘された鉱石は約4900万トンで、793トンの金が回収されております。このような歴史があるため、コラー・ゴールド・フィールドの町は、植民地時代のイギリスの臭いをまだ色濃く残して、鉱山会社のクラブハウスやゲストハウス、幹部職員や研究所の研究者の宿舎は、植民地時代のクラブハウスやイギリス人技術者の社宅をそのまま使い続けています(写真3)。

町の水道や電力も、基本的には植民地時代の物を使い続けているので、信頼性に欠けることがあります。たとえば、微小地震の観測のためには、電圧が安定していることが望ましいのですが、コラー・ゴールド・フィールドの町の電力は、電圧の変動があるようで、ホテルの明りが突然暗くなったりします。約2週間の滞在中に停電も1回経験しました。

3. インド国立岩石力学研究所

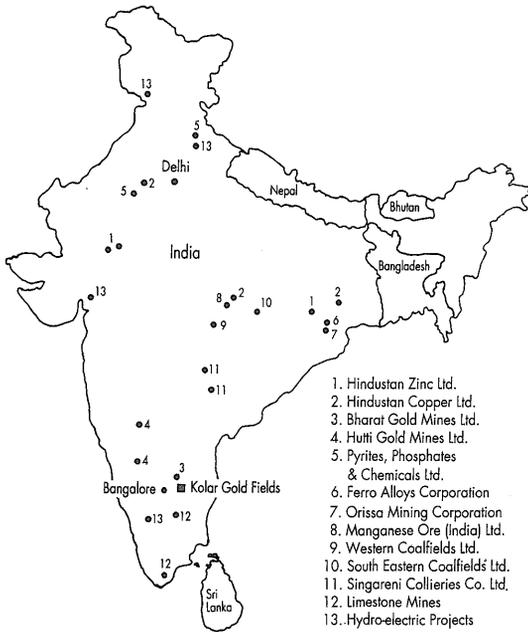
インド国立岩石力学研究所は、インドにおける岩

石力学専門の唯一の研究所で、国営の鉱山会社 (Bharat Gold Mines Limited) の技術部門(1960年代にできた。研究者6名技官12名その他2名)を核に、1988年7月、鉱山省に属する国立研究所に格上げされたものです。このような生い立ちからも分かるように、いまでも鉱山会社との結びつきがたいへん深く、鉱山会社への技術的なサービスが、仕事の大きな部分を占めています。そのサービスの中でも、特に、鉱山の保安・生産技術の向上、鉱山の坑道や地下発電所の建設など、地下を安全に開発するためのいろいろな問題を解決する手助けを行うことと、大学を卒業し、実社会で技術者として働いている人へ、最新の岩石力学の知識や技術をトレーニングすることに、力が注がれています。そのため、第3図にみられる、インド国内のいろいろな鉱山をフィールドとして、それぞれのサイトが直面している様々な問題の解決をめざしています。

研究所の組織は、ラジュ(Raju)所長、M. V. M. S. ラオ(Rao)副所長、チェトパシヤヤ(Chetopathyaya)副所長の下に、三つの研究部門があって、研究者は約30名(そのうち1/3が資源工学分野の出身)、所員全体で約65名の比較的小さな所帯です(第4図)。所長・副所長は、研究部門を分担して管理することになっていて、ラジュ所長は応用岩石力学部門、ラオ副所長は岩石力学の基礎研究部門、チェトパシヤヤ副所長は鉱山の設計・デザイン部門をそれぞれ分担しています。これらの研究部門のなかで、応用岩石力学部門と鉱山の設計・デザイン部門は、鉱山会社や建設会社からの資金が流入しているので(たとえば、鉱山機械の検査業務を行っている部門には、鉱山会社が年間1万ルピー(約



写真3 クラブハウス。建物は、イギリス植民地時代からの物で、図書室やバー、ゴルフコースが付属している。土曜日には、研究者や鉱山会社幹部の家族ともどものパーティが開かれる。



第3図 インド岩石力学研究所の野外研究フィールド

(単科大学卒), 6名のルーチンワークを行うテクニシャン(秘書や運転手)がいます(ほかに、ヘルパーという、掃除とかお茶汲みとか、庭の手入れとか雑役をする人がいます)。

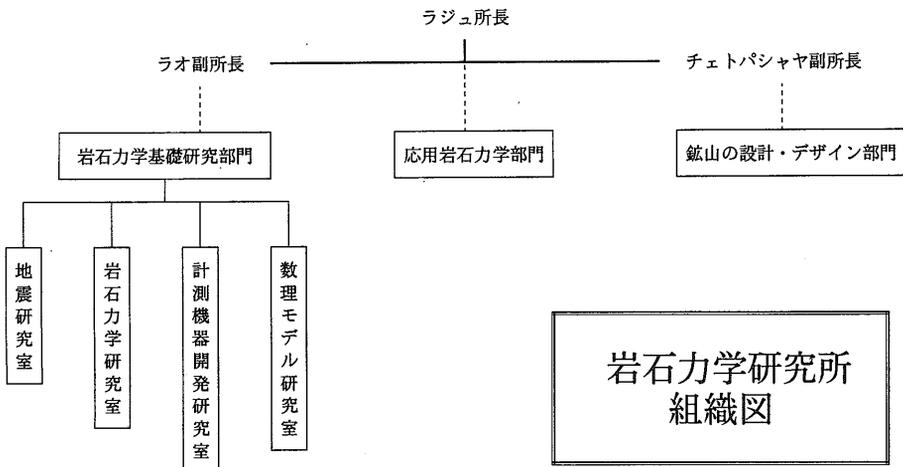
研究所の設備は、性能の高い輸入品と、大変な年代物の装置が同居していて、今までの研究所の複雑な歴史を感じさせます。高価な装置は、海外との共同研究に伴って導入されたものや、企業からの寄付によるものが大部分です。研究所の中では、インド国内で作られたIBM-PCと互換性のある計算機(たとえば、ZENTHという名の386マシンの)がよく使われています。どの国でもそうなのでしょうが、若い研究者は、コンピュータを使い慣れており、既存のソフトウェアの改造や、自分に必要なプログラムを書いたりすることに不自由しないようです。個人差は小さいぶん有りますが、30代の後半ぐらいの所に、コンピュータが出来る・出来ないの境目があるように感じました。

400万円)出資している), 研究資金は豊富です。一方, 基礎研究部門は, 原子力・科学技術の各省庁など, 国からの研究費が主要な財源なので, 台所事情は苦しそうです。

共同研究の相手であるラオ副所長が分担している基礎岩石力学部門は, 地震, 岩石力学, 計測機器開発, 数理モデルの四つの研究室からなっていて, 各室に, 教授クラスが1名, 助教授・講師クラスが1名の計8名の研究者(総合大学卒)と, 8名の助手

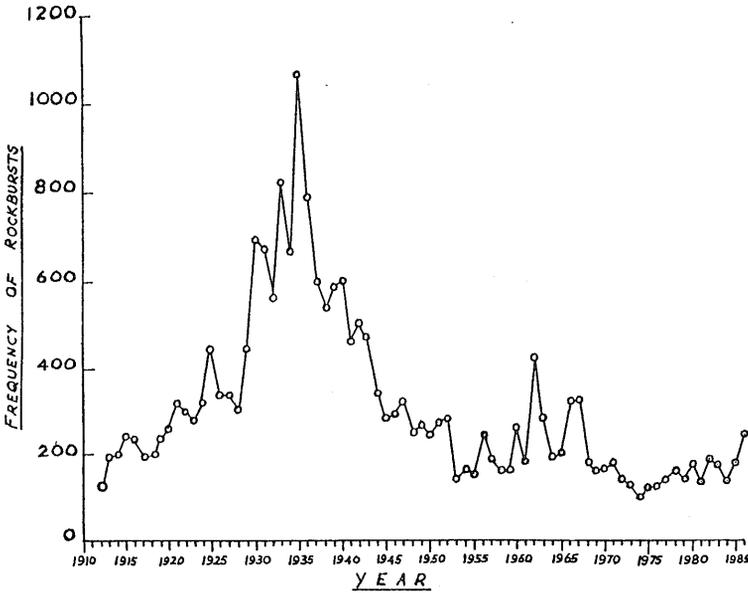
4. 岩石実験研究室

岩石実験の研究室では, 岩石の脆性破壊機構と, 破壊前の前兆現象を研究しています。岩石力学の試験には, 剛性が高いアメリカMTS社製の最大圧縮力150トンの岩石試験機を使っています。この試験機は, ストローク制御・歪制御等, 簡単な自動制御ができるようになってきました。この試験機で得られたデータのルーチン的な処理は, インド国産の計算



岩石力学研究所
組織図

第4図 インド岩石力学研究所組織図。ラオ副所長は, 1990年4月より, 地質調査所に1年間滞在し, 共同研究を行った。



第5図

Wiechert型地震計で観測された、鉱山地域に起こったマグニチュード3以上の地震の頻度変化。縦軸は年間観測された地震数。イギリス植民地時代は、採掘深度の増加とともに誘発される地震が加速的に増加している。独立後は、保安技術に力を入れるなどしたために、誘発地震の発生数も比較的落ちついている。

機を使って、MTS社のお仕着せのプログラムによっておこなっています。現在は、微小地震の観測から山はねを予知する手法を開発するために、AE(微小破壊にともなって放射される100 KHz-1 MHzの弾性波)計測技術を導入しようとしています。AEの計測システムは、アメリカから購入する予定で、とりあえず4チャンネルの導入を考えており、最終的には8チャンネルのシステムを持ちたいと希望しています。日本との共同研究では、AEの震源決定や震源メカニズムなどの解析手法のサポートと、研究者のトレーニングを期待していました。岩石力学研究所の研究者は、データを取ってしまった後の、解析手法を大変気にしているのですが、圧力容器からの信号の取り出し方一つをとっても、インド国内の工作精度などが問題となって、解析に耐えられるようなAE記録を取るまでに、大変苦勞をするのではないかとこの恐れがあります。

インドでも現実の問題となりつつある、原子力発電所から出る放射性廃棄物の地層処分の問題に関係した研究も行っていて、たとえば、放射性廃棄物から出る熱のために、どの程度岩盤の強度が低下するのかを調べています。このため、Champion Reef Mineの坑道の床にいくつもの穴をあけ、放射性廃棄物を模したヒーターを埋め込んで、長期間孔の周囲の岩盤を熱し、岩盤中の亀裂の発達や地下水流の変化を連続測定しています。また、この研究のため

に、高温・高圧容器を用いて、静水圧下で岩石に熱を加え、熱による岩石試料の強度変化を調べています。将来は、室内で岩石に熱を加えたときに発生するAEの震源分布と波形の変化から、岩石の内部にクラックが発達していく様子を調べるといった研究計画も持っています。

研究者は、G. M. N. ラオ氏(1951年生まれで、バンガロールのインド学術研究所(通称 TaTa 研究所)との共同研究で、花崗岩の熱応力によるAE発生の研究を行っており、近く博士号を取る予定)と若いK. シュリクマ氏(1967年生まれで、大学卒業の時に金メダルを貰った秀才。コンピュータが強いようです)の二人です。今年の秋には、このうちの一人が地質調査所に来て、AEの測定と解析を行うことになっています。

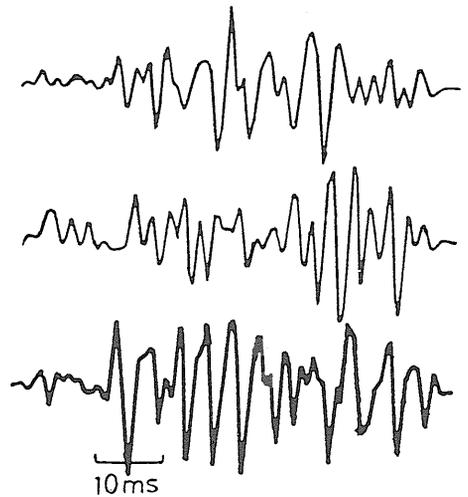
5. 山はねと地震観測網

カラー・ゴールド・フィールドの金鉱山では、今世紀のはじめから山はねが採掘作業上の問題となり、採掘現場が深くなるにつれ、だんだん重大な問題となってきました(記録の残っている最初の山はねは、1898年に現在のChampion Reef Mineの深さ3000 mに発生した)。たとえば、山はねによって、切り羽や坑道、立坑などが大きな被害を受け、また、鉱夫や鉱山技術者が死んだりけがをしたため

に、金含有量の高い鉱脈を放棄したこともありまし
た。採掘作業ともなって誘発された地震の中
には、マグニチュード5から6のものも生じ、震源
から2-3 kmの範囲の建物に被害を出しました(た
とえば、1971年11月27日 Nundydroog Mine の深
さ2800 mで生じた山はねに伴う地震は、震央から
半径3 km以内の地上の鉱山施設に大きな被害を出
した)。このような地震の波は、1000 km離れた地
震計でも記録されました。

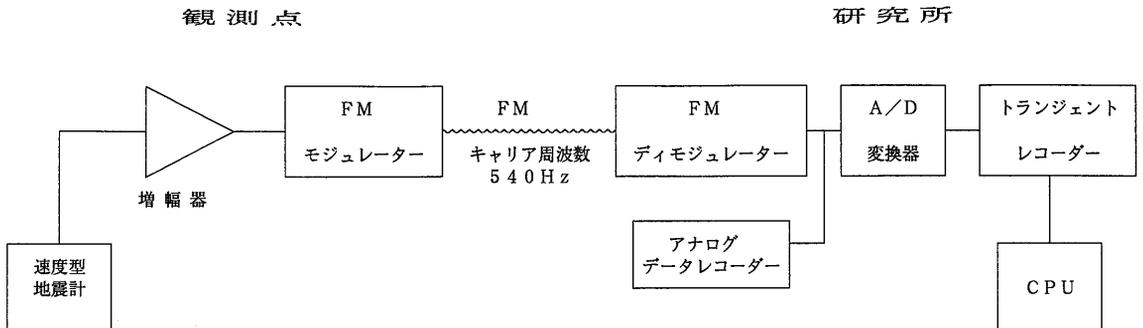
このように、山はねが早くから問題となっていた
ので、コラー・ゴールド・フィールドにおける地震
観測の歴史は長く、イギリス人が鉱山経営をして
いた1912年に Wiechert 型の地震計が設置され、鉱山
地域に生じるマグニチュード3以上の地震を観測
しておりました(第5図)。1978年、核実験探知の
ために地震計のアレー観測を行っている Bhabha
Atomic Research Center の技術的な支援のもとに、
Bharat Gold Mines Ltd は、山はねや誘発地震の震
源を求めるために、多数の地震計による地震観測網
の整備を開始し、まず、地表に8点の観測点を設
置しました。さらに、1988年からは、坑道の中に
6点の観測点を設置しました。最終的には、緑色片
岩のベルトに沿って東西の幅3 km、南北の長さ6
km、深さ2.1 km (7,000フィート)の範囲に地震計
が設置され、観測網は、三つの鉱山をすっぽりと立
体的にカバーするようになっていきます。現在、研究
所がジュリニバサン博士のもとで観測を続けている
地震観測網は、これを引き継いだものです。

この観測網では、Geospace 社製で固有周期が
7.5 Hzの速度型地震計が用いられていて、0.3
Volts/cm/sec (Volts/kine) の感度、5 Hz-180 Hz
の周波数範囲で山はねや地震の波形を観測していま

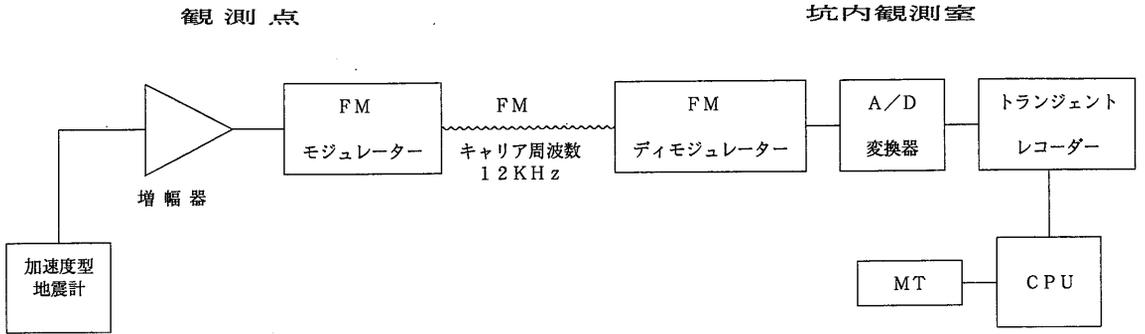


第6図 地震観測網で記録された微小地震波動の例

す(第6図)。地震計で検出された信号は、観測点
で、増幅器2段によって80 dB増幅された後、FM
変調され(キャリア周波数は540 Hz)、研究所の
中のアナログ記録装置(アナログテープレコーダー
TD-10 MarkIII イギリス製24チャンネル)へテレメ
タリングされ、連続記録されています。観測点での
ノイズは、100-500 Hzの周波数帯の変位振幅で、
 5×10^{-9} m から 5×10^{-7} m だそうです。研究所の
観測室では、大量のデータを処理するため、アナ
ログ記録装置への入力を分岐して、トランジェント
・レコーダーに入力し、このトランジェント・レ
コーダーが、各観測点への初動到達時刻差を検出
し、計算機が震源を自動決定するようになっていま
す(第7図)。また、この計算機は、震源分布、地
震活動の頻度、地震モーメントや応力降下量など、
山はねの発生状況を検討するために必要な情報を逐
次研究者に提供します。ここで使われている計算機



第7図 Koral Gold Field で現在使われている、地震観測システムの模式図



第8図 1983年から1990年まで Champion Reef mine に設置していた、加速度計によるデジタル地震観測システム

は、PDP 11/34で、解析プログラムは、研究所で独自に開発したものです。

岩石力学研究所では、地震や山はねの震源分布や震源機構、それぞれの地震によって解放されたエネルギーを見積もって、鉱山の山はねの警報を出します。鉱山会社は、この警報をもとにして、危険な場所での掘削作業を取りやめるなど、実際に採掘作業の安全に生かしています。このように、鉱山会社が実際の採掘作業計画に反映できるためには、山はねが起りそうな場所を、どの深さレベルの坑道のどの部分なのか示せるような、高い精度で予測しなくてはなりません。そのためには、警報を出すもとなる山はねや微小地震の震源の位置が、たいへん高い精度で求められなくてはなりません。観測網の設置されている場所の岩盤は、地震波速度の異方性の大きな緑色片岩なので(例えば、Champion Reef Mine の北側の部分では、南北方向のP波速度が6.1 km/sec、東西方向が5.4 km/sec、上下方向が6.2 km/sec)、大変複雑な速度構造モデルを使って震源の決定を行っています。このような努力の積み重ねで、現在、観測網の内部に生じる地震や山はねの震源は、誤差60 m 以内で求められています。

研究所で、山はねの警報を出すために一番重要視されているのが、微小地震の震源分布です。これに、点震源のモデルに基づいて推定されたモーメント量や応力降下量、地震の放出エネルギーを表す経験的な指標を合わせて、最終的に山はね発生警報が発せられています。この研究室が現在行っている山はねの警報システムは、完全な予知を行っているのではなく、山はねや微小地震の活動が活発な場所をいち早く見つけて、被害の拡大を防ぐために鉱山

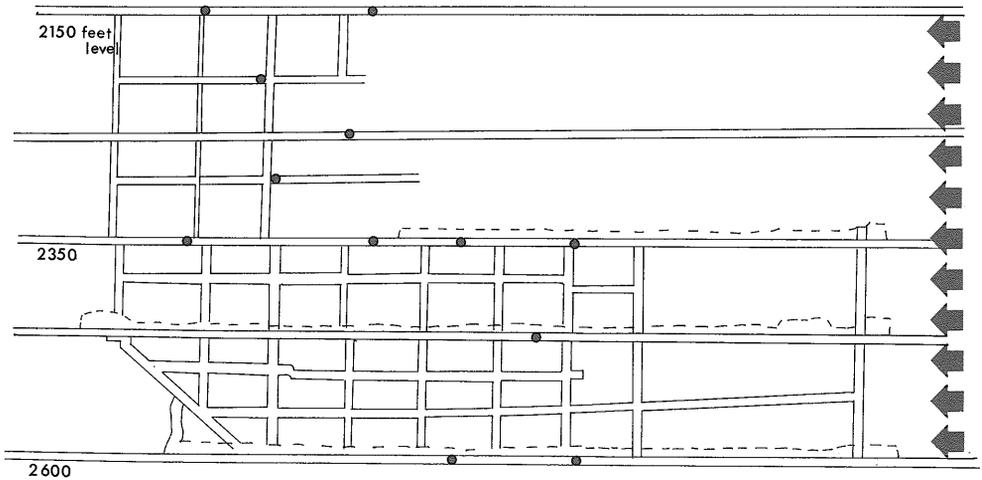
会社に警告を発するというシステムで、活動の初期に生じる被害は防ぎようがありません。この方法では、地震でいえば本震一余震型のように、はじめに大きな破壊が生じ、引き続いて、小さな被害が大量に誘発されるような場合には、被害の軽減に余り有効に働きませんが、同じ程度の破壊が次々に起こる、群発地震のような活動や、破壊の規模も数も時間とともに大きくなって行くような場合には効果が期待できます。

現在、カラー・ゴールド・フィールド金鉱山では、年間500-1,000回山はねが生じ、その約10%が、採掘のための施設や人間に被害を引き起こしています。採掘事故による死者は、かつてはかなりの数に上っていましたが、深い採掘現場がなくなってきたことや、採掘技術の向上、また、地震観測網の整備によって、山はねがおこりそうな場所がある程度分かってきたために、最近は少なくなってきています。

現在、山はねが大きな問題になってきているのは、北インドのマディープラディシュ州 Churcha などの炭鉱地帯です。そこで、地震研究室には、炭鉱地帯での地震観測網の設置や観測技術の指導が求められています。

6. 山はねの臨時観測

鉱山地帯全体をすっばりと囲む観測網とは別に、1983年、山はねが頻発していた Champion Reef Mine の深さ3100 m の採掘現場に、6点の地震計で構成された400 m×700 m×400 m の地震観測網が設置されました。この観測網では、山はねが起こる



第9図 今回の共同研究のために、インド側が Champion Reef mine の700 m レベルの坑道内に設置する、微小地震観測網の地震計の配置図。右手より1カ月に60 m 位の速度で採掘が進んでくる。

極近くの観測によって、震源の近くでしか観測できない様な極小さな地震の活動が、山はね発生前にものような変化を示すのかを詳しく調べました。小さな地震ほど地震波の周波数は高くなるので、アメリカ製の SM4 という地震計をもちいて、100 Hz から 5 KHz までの高い周波数範囲の記録を取りました。地下の観測点で増幅された信号は、坑内で FM 変調されて(キャリア周波数 12 KHz) 研究所まで送られ、研究所の観測室では、コンピュータ (PDP 11/34) を使い、トリガー方式で、12 bit のダイナミックレンジのデジタル記録としてこれらの記録を収録しました(第8図)。このシステムでは、1回のトリガーで収録される波形のデータ長が、2キロワードしかないで、山はねの P 波部分しか記録できません。この観測網の観測から、山はねの発生に先だって、山はね発生場所の極近くでしか観測できないような微小地震がたくさん起こること、また、多くの場合に、その活動度が、山はねの直前に低くなることを見いだされました。しかし、残念なことに、このシステムは、Champion Reef Mine が地下 3,100 m レベルでの採掘を中止したため、1990年に撤去されました。

今回の日本との共同研究では、Champion Reef Mine の、地下 700 m レベルを中心に、南北の長さ 125 m、東西の幅 20 m、上下 125 m の範囲に、12 点の地震計を設置する予定になっています(第9図)。記録システムは、1990年まで Champion Reef

Mine で使っていたシステムを使い、地下 700 m の立て坑のエレベーターから 50 m ほど入ったところに作る観測室の中に記録計を設置し、24時間体制で観測を行う予定です。

地震計の配置を決めるために、地下 700 m レベルの坑道に降りてみました。坑道の気温は 30 度位で、やや蒸し暑いのですが、水が抜けてしまっているので床は乾いています。また、坑道の壁はなにも補強していませんが、今回、歩き回った範囲では、所々に割れ目が発達している程度で、しっかりした岩盤のようです。地震計を設置するための適当な広さの平らな空間は、床にも坑壁にも探すことが出来ました。坑道は立って歩ける高さがありますが、所々、天井が垂れ下がってきているために、頭を打つ場所があります。同じ深さに、一本の坑道が鉱脈上を、またもう一本がそれと平行に、二本並んで作られています。採掘された鉱石は、鉱脈に平行な坑道によって立坑まで運ばれます。観測期間中、立て坑に向かって 1 カ月に 60 m くらいの速さで、鉱脈の掘削が進んでいきます。

前回、臨時観測が行われた、地下 3100 m とは異なり、今回の観測場所は、比較的浅いので、岩盤にかかっている地殻応力によって、山はねが引き起こされることはないと思われませんが、採掘作業にもなると、採掘面の前面に応力集中が生じるので、小規模な山はねが生じることが予想されます。この共同研究では、震源決定の精度をさらに高めるため

に、室内実験の為に地質調査所が開発した AE の到達時刻の自動検出方法を、山はねの観測網に応用したいと考えています。また、現在、コラー・ゴールド・フィールドで行われている山はねの警報システムは、予知というよりも、山はねが頻発している場所を特定し、それ以上の被害を防ぐという意味合いが高いものなので、私たちは、地震予知のために続けてきた岩石破壊の前兆現象の研究成果を応用して、山はねの活動が始まる前にその予知が行なえるような方法を探ってみたいと思っています。

7. 山はね現象と地震予知技術

インドの例でみられるように、鉱山の採掘作業が深部に及ぶにつれ、世界中で、山はねは採掘上の大きな問題となってきております。山はねによる被害を最小限に食い止めるために、今回報告したインドのほか、アメリカ、カナダ、ヨーロッパ、南アフリカ、オーストラリアで、地震観測を含めた種々の観測研究を精力的に行っており、データの蓄積も進んでおります。また、1984年には第1回の「山はねと採掘のともなう鉱山におこる地震についてのシンポジウム」が南アフリカで開かれ、以後、アメリカ(1988)、カナダ(1993)で開かれるまでになっています。

私たちの周りでは、今回報告いたしましたインドとの共同研究のほか、京都大学を中心とした研究者によって、南アフリカのウィタースランド大学との共同研究が1993年からスタートします。この研究では、ウエストドリフオンテン鉱山の2100 mの深度に掘り残してあった、一辺が約500 mのシャフトピラーを掘削し、その際に発生する山はねを共同で観測します。この共同研究の中で、地質調査所は鉱山の深部での三次元微小地震アレー観測を担うことになっております。このように、山はねの国際共同研究が次々に外国から提案されるのには、日本では地震予知の研究ということで、地震の観測や理論の研究が蓄積されていることが重要な下地とな

っています。

一方、日本の事情からいえば、地震予知の研究が進むためには、地震が実際に起こってくれなくてはならないわけです。しかしながら、比較的繰り返し周期の短い海溝沿いの巨大地震でさえ、繰り返し周期は百年のオーダーですから、われわれの知識はなかなか貯まっていけないのです。さらに、これらの巨大地震の震源は陸地から遠いので、これらの前兆現象をしっかりと観測するためには、現在の関東・東海地方なみの高い密度の観測網を張って待ちかまえていなければなりません。

このようなフィールド観測の効率の悪さを補完する方法として、岩石実験などの基礎研究があるわけですが、さすがに、岩石試料の中に発生する数ミリの破壊と、数百キロメートルに及ぶ巨大地震の破壊とを完全に同一視する訳にはいきません。山はねの観測は、サイズの点でいえば、この両者の中間に当たりますし、震源の極近傍で、破壊の準備段階からいろいろな物理量の変化を精密に観測することが出来るという利点も持っています。山はねの前兆現象は、巨大地震のそれと全く同じではないでしょうが、山はねを予知できるようになれば、地震の予知についても確かな手ごたえがもてるようになると思います。

文 献

- Age, I. M., Shettigar, P. A. K, and Krishnamurthy R. (1990): Rockburst hazard and its alleviation in Kolar Gold Mines —A review . in Rockburst Global Experiences, eds. A. K. Ghose and H. S. S. Rao, Balkema Rotterdam, 43-69.
- 佐藤隆司・楠瀬勤一郎・西沢 修(1987): ミニコンピュータを用いた AE 波計測処理システム, 一高速デジタル記録と自動震源決定一. 地質調査所月報, 38, 295-303.

KUSUNOSE Kinichiro (1993): Introduction of a co-working project with the Indian National Institute of Rockmechanics.

〈受付: 1993年7月26日〉