



地震を手にとって調べる  
—南アフリカ金鉱山での地震発生の研究—

## 南ア金鉱山における電磁 気観測環境と地震に伴う 電磁放射観測の試み

小笠原 宏  
おがさわら ひろし  
高野 雅夫  
たかの まさお  
長 秋雄  
ちよう あきお  
笠谷 貴史  
かさや たかふみ  
住友 則彦  
すみとも のりひこ  
後藤 忠徳  
ごとう ただのり

編集部

筆者：立命館大学理工学部 助教授  
名古屋大学理学部 助教授  
地質調査所地震地質部 主任研究官  
京都大学防災研究所  
京都大学防災研究所 教授  
愛知教育大学教育学部

南ア金鉱山では、震源距離が数十m以下で、地震に伴う電磁気現象が観測できる。ノイズレベルは低くないが、地表観測よりはるかによいS/N比で観測が可能である。しかし、震源過程に同期した、顕著な電場変化はまだ見いだされていない。

### 1. はじめに

南アフリカの金鉱床は広大で、現在、ヨハネスブルグ近郊では、数十km×数十kmの範囲の地表下2000~4000mで、金の採掘が行われている。そこは、採掘していない岩盤にも、数十MPa程度の鉛直応力が最大主圧縮応力として常にかかっており、採掘に伴う応力集中のために、さらに大きな応力が採掘域の周囲の岩盤にかかり、地震が頻発している。

我々「南アフリカ金鉱山における国際共同実験グループ」は、事前に予測できる地震の震源の直近で、「地震の一生をとらえ」ようと、地下約2600mの水平坑道の長さ約200mの部分を利用して、各種観測を展開している(飯尾・深尾, 1992; 飯尾, 1995; 本号他論文参照)。

観測サイトの特徴は下記の通りである：

1) 採掘に伴って、応力が、大きいところでは1ヶ月間に10MPaのオーダーで準静的に変化する(石井・他, 本号)。

2) 岩石は、破壊強度以下の環境から、降伏点を経過して、破壊に至る。つまり、弾性的な応答をしている状態と、塑性的に応答している状態を観測できる。

3) 地震の多くは、震源距離200m以下で、場合によっては、震源距離が10m以下のこともある(西井・他, 本号)。

4) 地震が、多いときに一日に百個のオーダー、あるいは、一分間に数十個観測されることもある(佐藤(志)・他, 本号)。

5) 10Gを超える強震動も観測され、その際には、 $10^{-3}$ のオーダーを超える動的な歪(応力)の変化も起こる。

以上の様に、観測サイトは、数十mから数百mのサイズの巨大な岩石の破壊実験場として考える

ことができる。さらに、電磁気的な観測に関わる環境としては：

1) 地震発生域の岩盤はquartziteで、石英に富んでいるため、大きな圧電効果が期待できる。

2) 地震発生域の岩盤は、ほとんどドライで、比抵抗が非常に大きいために、表皮効果の影響が小さく、ソースで起こった現象を、減衰の少ない姿で観察できる可能性がある。

3) Takano *et al.* (1993) の室内実験によれば、ほとんどドライでも、破壊直前に比抵抗が大きく変化するため、3次元的に電極を配置すれば、トモグラフィーによって、震源域を含む領域の、比抵抗の時空間変化を捉えることができる。

4) 暗闇を作るのは容易であるから、破壊に伴うフォトンを検出できる可能性もある。

などである。このような環境は、地震に関連した電磁気現象について未解明な点や課題を解決するために絶好の環境である。

## 2. 観測サイトのノイズレベルと地表観測との比較

一般に、地表観測では、震源域までの距離が数kmないし10kmのオーダーであるのに対し、南アの観測サイトでは、震源域までの距離が数十m以下の観測事例も数多く、また、数m程度の事例も観測されている。

だから、何らかの電磁気現象が、ソースからの距離の、1乗、2乗、または、3乗で減衰して観測されるならば、南ア金鉱山深部ではそれらを地表観測の、それぞれ、 $10^3$ 倍、 $10^6$ 倍、または、 $10^9$ 倍で観測できることになる。地表に近づけば、比抵抗は小さくなる場合も多いため、比抵抗の大きい南ア金鉱山深部では、より明瞭に観測できる可能性がある。

しかしながら、鉱山は、竖坑や水平坑道等の限られた動線に、動力線等の人工的なノイズ源が集中している。また、観測計器も動線付近から遠く離れた地点に設置することは、コスト的に困難である。このため、ノイズが観測可能なレベルを超えていないかを調べることは重要である。そこで、

1996年2月に現地で、ULF、VLF帯の電場変化のノイズレベルを観測した。ULF帯は現在解析中であるが、VLF帯は、50Hzとその高調波のノイズレベルが $2\text{mV/m}$ であった。減衰の距離依存性が、1乗、2乗、あるいは、3乗のソースが、もし震源域にあるとしたら、地表観測では、ノイズレベルが、それぞれ、 $2\mu\text{V/m}$ 、 $2\text{nV/m}$ 、あるいは、 $2\text{pV/m}$ 以下でないといえられない現象を、南アフリカ金鉱山深部では、容易に観測できることになる。

## 3. 地震に伴う電磁放射観測の試み

1) 室内実験や大きな地震の際の観測事例と課題  
岩石破壊に伴って電磁放射が起こることは、数多くの室内岩石実験において実証されている（例えば、Nitsan, 1977; Ogawa *et al.*, 1985）。また、大規模な地震の前後に、電磁放射が観測されたという報告も少なくない（例えば、芳野, 1997; 尾池・他, 1995; Maeda *et al.*, 1996）。このような例が、本当に地震に関連した現象であれば、岩石破壊現象の物理や地震予知を研究する上で非常に興味深い。未解決な根本的な課題がいくつかある：

i) 室内実験よりもはるかに大規模な岩石破壊では、どのような電磁放射が起こるのか？ 震源過程は、全震源域で同時に起こるのではなく、1kmあたり、1/3秒~1/2秒（破壊伝播速度 $2\sim 3\text{km/s}$ の逆数）の時間差で起こる。それは、S波の伝播速度に近いため、地震動（特にS波）は衝撃波的に増幅される。ところが、電磁場の伝播は破壊の伝播よりも非常に速いため、電磁場は地震動ほど強くないと考えられる。しかも、震源域の応力降下量は地震の大きさに依存しないとよく言われる。従って、大地震の際に電磁放射が長期間続くことは説明できても、強い電磁放射が出るのは、どのようなメカニズムで説明できるのか？

ii) 地表で電磁放射が観測された時刻に、地表の地震計では微小地震すら観測されていないことが多い。また、地表で観測された一つ一つの前震・本震・余震に発震時刻と電磁放射が観測された時刻が対応していないこともしばしばである。

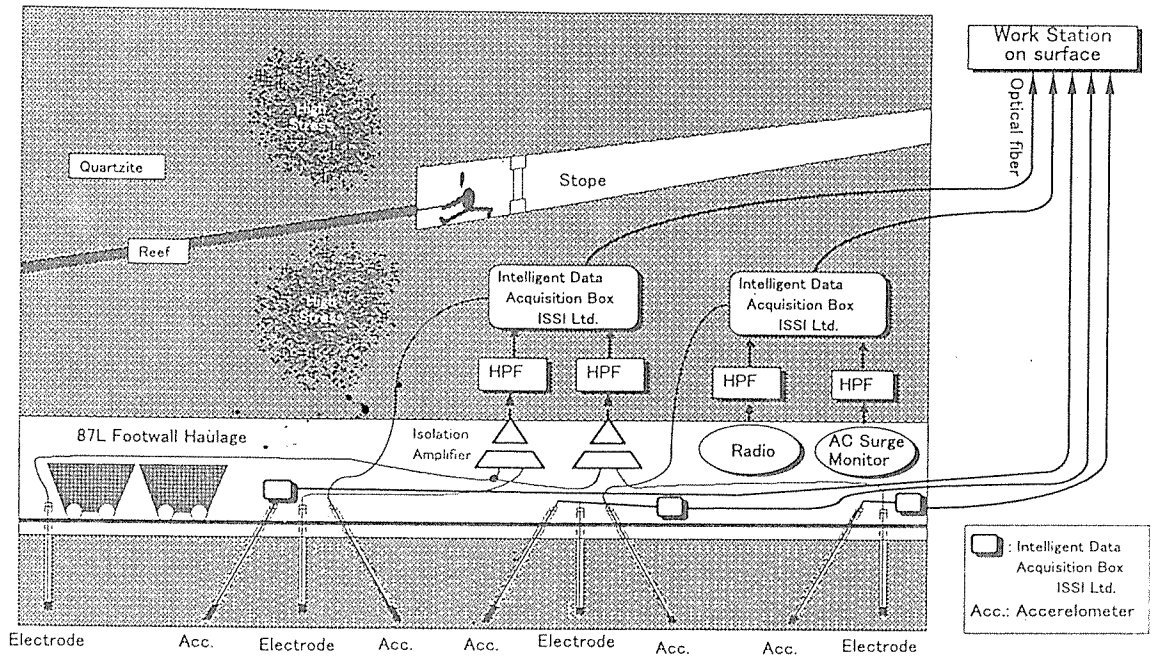


図1 観測システム模式図.

では、何が震源域の岩盤で起こって電磁放射が起きたのか？ 地表で検地不能な微小破壊によるのか？

iii) 震源付近で電磁放射が起きているとしても、Conductiveな地殻の中を、どのようなメカニズムで電磁現象が伝わるのか？ 等々である。

このような課題を考えるために、震源から至近距離で観測ができる南アフリカ金鉱山深部で、基礎的な観測を行うことは非常に重要である。

## 2) 観測環境と観測システム

南アフリカ金鉱山の国際地震半制御実験のテストサイトにおいて、1997年2月から、地震に伴う電磁放射観測を開始した。図1に坑道と切り羽の関係、観測項目、そして、観測システムの概略図を示す。図2に、観測に使用した電極(●)とラジオの設置点、そして、坑道と切り羽や採掘跡との位置関係を示す。観測現場の岩盤はquartziteでほぼ完全に乾燥している。水は、坑道の測溝と切

り羽にあるのみである。岩盤の温度は40℃前後であるが、現場は空調されており、気温は27.1℃、湿度は55%であった。

それぞれの間隔が70~100mで、それぞれの深さが約10mである4本のボアホール内(図2の●印)に、チコージェルで鉛電極を埋設した。3つの鉛電極(C1, C2, P2)の接地抵抗は数kΩ以下であったが、電極(P1)の接地抵抗は1MΩ以上と大きかったため、P2-C1間、およびP2-C2間の電位差をモニターすることにした。電極間の電位差は、アイソレーションアンプで受けて、カットオフ200Hzのハイパスフィルターを通してハム(50Hz)とその3次の高調波をカットした。従って、200Hzから地震収録システムの上限である2kHzが観測周波数帯域である。図3に示されるように、電極間隔の短いP2-C2間の方が、電極間隔の長いP2-C1間の電位差よりもノイズが大きいが、それは、電極P2とC2の間の分岐部に、変電施設、エアコンプレッサーや送風ファンなどの大電力を使

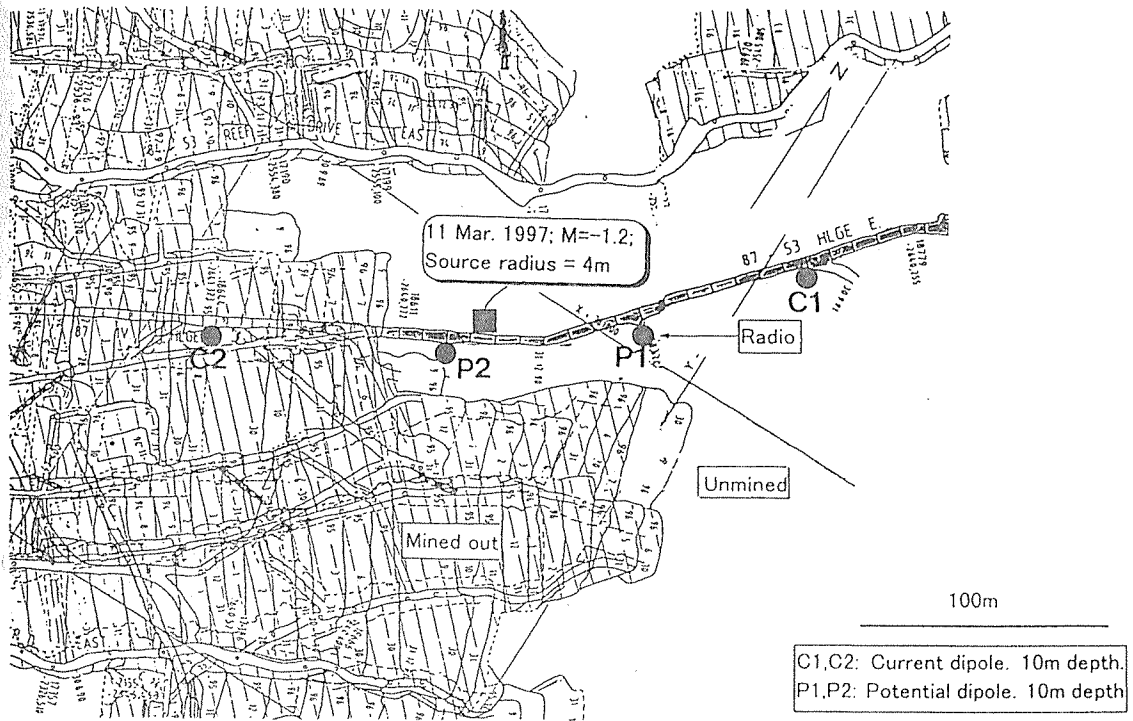


図2 観測点配置図(平面図)。■: 1997年3月11日のM=-1.2の震央。●: 電極。VLF電場観測に使用した電極は、C1, C2, P2。ラジオ設置点は、電極P1の付近。図の中央を左右に走る87-53HLGE Eと示されているのが地表下約2650mの水平運搬坑道であり、地震計や歪計もこの坑道沿いに設置されている。その運搬坑道の上側数十mから約100mには、21度で傾斜した鉱脈があり、図の左側は半分斜線部が採掘済の箇所である(1ヶ月毎の切り羽の位置が、年月日と共に示されている)。また右側は半分白い部分は未採掘の部分を示し、採掘は、図の左から右へ進んでいる。

用する機器があるためである。また、P2-C2, P2-C1のどちらも、ハムの奇数次高調波が目だっている。

また、ラジオを使用しLF帯の電磁波観測を行った。低周波数バンドほどskin depthの影響が小さいため、使用したラジオによって設定のできる周波数の中で、最も周波数が低い帯域の範囲で、周波数を変えて雑音レベルを聞き比べた。その結果、159kHzが最も雑音レベルが低く、その周波数帯で観測をすることにした。観測する周波数帯域を探す際に、イベントを示唆するパルス的なノイズは、ラジオから聞こえなかった。我々が入坑した時間帯は、1日のうちで最も地震の発生数の少ない時間帯(佐藤(志)・他、本号)であったためかもしれない。

現場では、鉱山の技術者達に、盗難に注意するように強く言われたため、ラジオは止む無く金属製の筐の中に収納し、単芯ケーブルを外部アンテナとして使用した。

坑道にはAC電源線が引かれているため、AC電源線から放射された電磁波が信号と誤認されたり、アースを通じて流れた地電流が、信号と誤認される怖れがある。そこで、AC電源線に、信号と誤認されるような変化(例えばサージなど)があるかどうかを確認するために、AC電源線の電圧を抵抗分割で1/40にし、アイソレーションアンプで受けて、ハムと3次の高調波成分を200Hzのハイパスフィルターで除去し、それをモニターすることにした(図1のAC Surge Monitor)。

通常、地震のIntelligent data acquisition box (図1

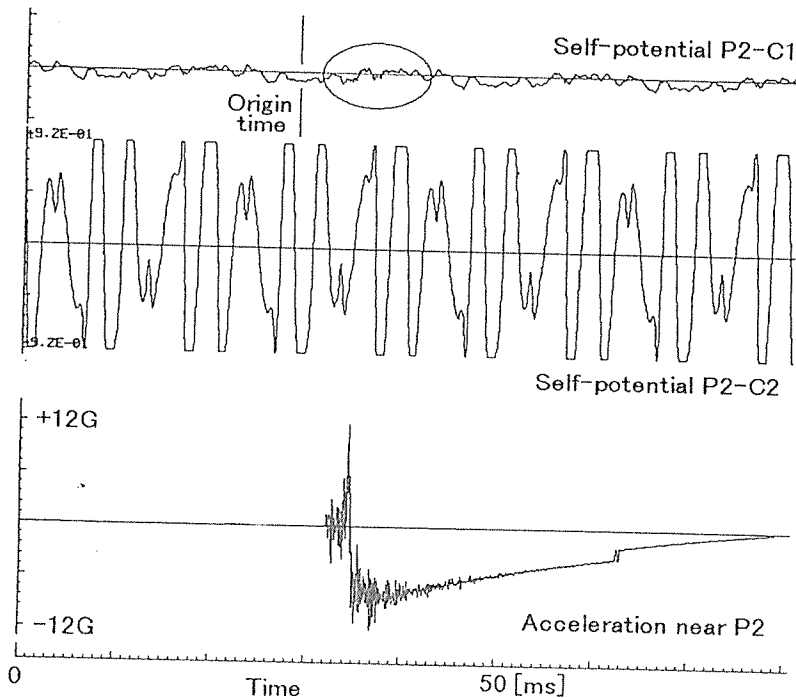


図3 1997年3月11日午前2時49分22秒に、電極P2から約20mの地点にM=-1.2の地震が発生したときの、電極P2-C1(上)とP2-C2(中)の自然電位変化、および、P2に最も近い地点(距離15m)の加速度記録(下)。定期的に見られる変化は、ハムの5次以上の奇数次高調波。

における影のついた角の丸い四角)の3つのチャンネルには、加速度計3成分の信号が接続し記録される。しかし、今回の電磁放射観測のために、2つのIntelligent data acquisition boxについては、加速度計1成分の接続はそのまま残したが他の2成分ははずし、かわりに、それぞれ、自然電位2成分(P2-C1、および、P2-C2)、もしくは、ラジオ(159kHz)の出力およびAC電源線中のサージモニターを接続した。引きつづき、加速度計の信号をトリガーソースとしたため、地震が発生する前後の自然電位とラジオの出力およびAC電源線の電圧変化が収録される。

#### 4. 観測結果と課題・展望

1997年3月11日、電極P2から約20mの地点で、M=-1.2の地震が発生した(図2の■)。その際に記録された震源距離約20mの電極P2による自然電位とP2付近の地震動加速度波形が図3、震源距離約70mのラジオ(159kHz)とACサージモニター、そして、ラジオ付近の地震動加速度波形が

図4である。

図3によれば、電極P2付近では、10G(100m/s<sup>2</sup>)を超える強い地震動に見舞われ、加速度記録も乱れている。しかし、電極P2-C1(図3上)の波形の中の、M=-1.1の発震時付近には、地震に関連した信号を見いだすことができない。

発震時から数ms後(図3中の楕円で囲んだ部分)に小さな変化が見られるが、この時間帯は、地震動がP2付近で烈しい時間帯(図3下参照)である。

電極P2-C2(図3中)には、ハムの高調波が大きく、地震の信号の有無が分からない。

これらは、ノッチフィルターでハムの高調波を取り除けば興味深いフェイズが見えるかもしれないが、いずれも、地表では観測できないほど小さな信号であることは間違いない。

震源から約70m離れたラジオの出力(図4上)には、意味ありげなパルス状のフェイズが見られるが、ラジオの近く(距離15m)の加速度記録(図4下)と比較すると、M=-1.1の地震プロセ

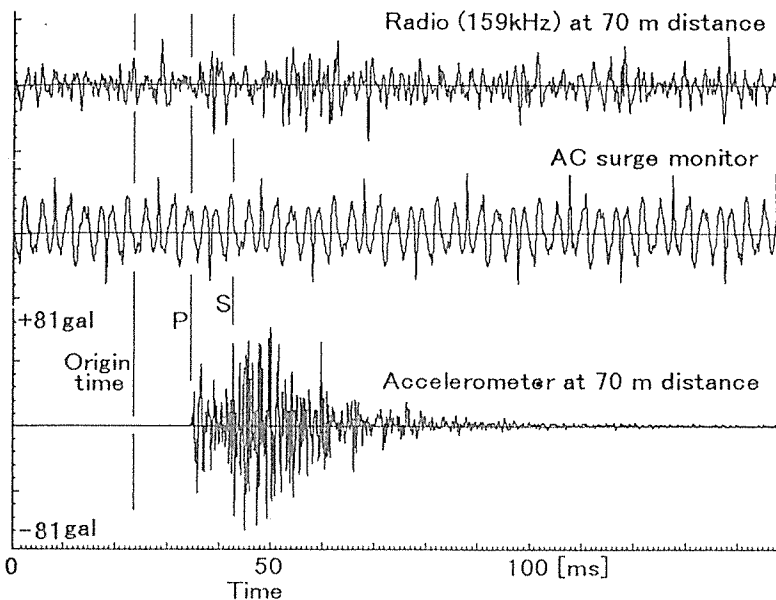


図4 1997年3月11日午前2時49分22秒に、電極P2から約20mの地点にM=1.2の地震が発生したときの、震源距離70mにあったラジオ(159kHz)の出力(上)とACサージモニター(中)、そして、ラジオにもっとも近い地点(震源距離70m)の加速度記録(下)。

スに直接関係があるとは考えにくい。しかし、ACサージモニターの中には、ラジオの出力と同期するフェイズが見られないので、ラジオに見られる意味ありげなパルス状の乱れの起源は、AC線でもなさそうである。今後は、そのソースがどこかを突き止める必要がある。例えば、平日と週末、午前と午後とは、地震活動度が大きく異なる(佐藤(志)・他、本号)から、時間帯別、あるいは、曜日別のラジオ出力のパルス状のフェイズの発生個数などを調べてみる必要がある。

今回は、データ収録システムが、地震をトリガースソースにしたイベント収録型であったが、1日ないし数日間の連続観測をする必要があると思われる。

今回の観測坑道の坑壁には、浮き石の落下や山はね時の岩石片の飛び出しを軽減させるために、10cmメッシュの金網が張りめぐらされていた。ラジオやそのアンテナはその中に設置されたため、信号がシールドされてしまった可能性がある。したがって、ラジオについては、十分な長さのボアホールを掘削し、アンテナを金網の外に設置する必要がある。

謝辞: 1997年2月の南アでの観測では、ISSイン

ターナショナル社、とりわけA. メンデツキ博士、E. デコック氏、R. コステラ氏の御世話になりました。鉱山では、R. グロツベラー、J. クルーゲル、T. ノルジェ、S. モラク、M. モライ各氏の御世話になりました。今回、電磁放射観測のための、小笠原と高野の南アフリカ渡航費用は、地震予知総合研究振興会によりました。原稿作成にあたっては、立命館大学工学部の見野和夫教授、西井聡君、佐藤志津加さんにご助力頂きました。ここに記して感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 飯尾能久: 岩波科学, 65, 279-278 (1995).
- [2] 飯尾能久・深尾良夫: 地震学会ニュースレター, 3, No.6, 8-9 (1992).
- [3] Maeda, K. and Tokimasa, N.: Geophys. Res. Lett., 23, 2433-2436 (1996).
- [4] Nitsan, U.: Geophys. Res. Lett., 4, 333-336 (1977).
- [5] Ogawa, T. et al.: J. Geophys. Res., 90, 6245-6249 (1985).
- [6] 尾池和夫・他: 月刊地球, 号外No.13, 81-87 (1995).
- [7] Takano, M. et al.: J. Phys. Earth, 41, 337-346 (1993).
- [8] Yoshino, T.: CA研究会論文集, 82-89 (1997).