

南アフリカ金鉱山における地震観測

長 秋 雄¹⁾

はじめに

南アフリカ共和国の金鉱山の地下2,600mで、採掘によって誘発される地震を対象として、地震発生機構の解明を目的とした観測が、日本と南アフリカ共和国の国際共同実験グループによって行われている。日本からは京都大学・立命館大学・名古屋大学・東京大学・防災科学技術研究所・地質調査所の研究者が、南アフリカ共和国からはウィットウォーターズランド大学・ISS インターナショナルの研究者が参画している。

ここでは、南アフリカ共和国の金鉱山において採掘によって誘発される地震(以下では鉱山地震)の研究の歴史と、今回の共同研究の内容について紹介する。

1. 南アフリカ共和国の金鉱山での鉱山地震

南アフリカ共和国のヨハネスブルグとウェルコムの間を結ぶ線を長軸として、北東から南西方向にのびるウィットウォーターズランド盆地は世界最大の金鉱床地帯である。この盆地の北西側に金鉱山が分布している。東から順にEvender, East Rand, Central Rand(ヨハネスブルグ市近郊), West Rand, Far West Rand, Klerksdorp Area, Orange Free State(ウェルコム市近郊)の7つの地域に大別されている。1992年にこの地域の29鉱山から、世界の生産量の3分の1にあたる約610トンの金が採掘されている。

金の採掘は同国の主要産業であり、金鉱山に従事する労働者数は36万人に達する。その内の88%は黒人労働者であり、南アフリカ共和国内および周辺

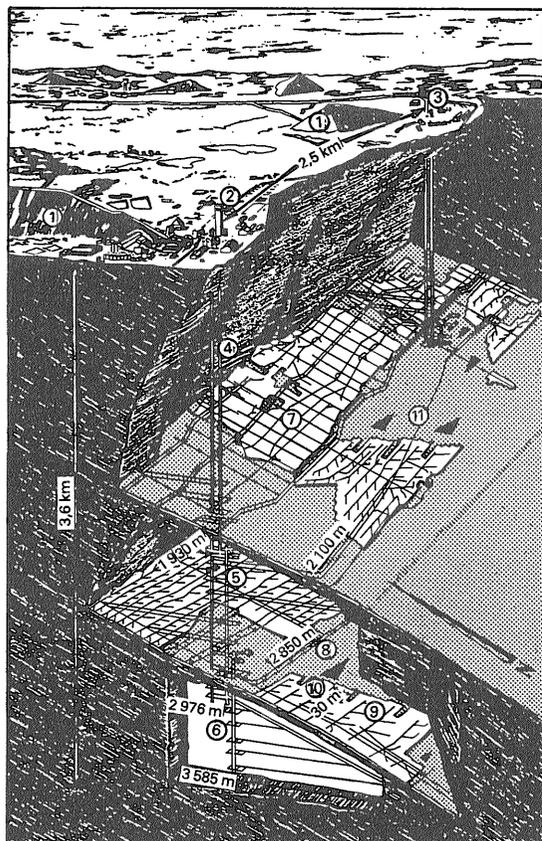
諸国からやってきている。彼らの収入によってこれら地域の300万人を越える人々の生計が支えられていると推定されている。

ウィットウォーターズランド盆地で採掘されている金鉱床は、上部ウィットウォーターズランド層群中の7層に薄く(層厚は2m以下)狭在している。そのほとんどが上部の堆積層(厚さ約1km前後)に覆われている。金鉱床は平均で20度~30度で傾斜しており、金の採掘は地下1kmから約4kmにかけて行われている。まず、2km級の立坑が掘られ、この立坑から各深度レベルで、鉱床位置へ枝をのばすようにサービストンネルが掘削される。そして、金鉱床に沿って高さ1m程の板状の採掘が行われている(第1図)。採掘位置では、岩盤の崩落を防ぐために、ポンプ式の支保棒や角材を積み上げて支保がなされている(第2図, 写真1)。

岩盤崩落による事故の防止は、鉱山会社の重大な関心事の一つである。南アフリカの鉱山研究所が、1988年にまとめた統計によると(Chamber of Mines research Organization, 1988)、鉱山での死亡事故の約半分は岩盤崩落によるものである。岩盤崩落事故による年間の死亡者は、1936年から1982年にかけて鉱山労働者1万人あたり約7名ある。その後減少に転じ、1986年には1万人あたり約5人になっている。1980年からは、崩落事故のうち鉱山地震による岩盤の急激な破壊(ロックバースト)によるものが、区別されるようになった。ロックバーストによる死亡者は、1980年から1986年にかけて、1万人あたり2~3人である。これは、岩盤崩落事故による死者の約4割、全死者の約2割にあたる。ロックバーストによる死亡事故は掘削深度が深い地域ほど多い。

1) 地質調査所 環境地質部

キーワード: 南アフリカ共和国, 金鉱山, 鉱山地震, 地震予知, 震源過程



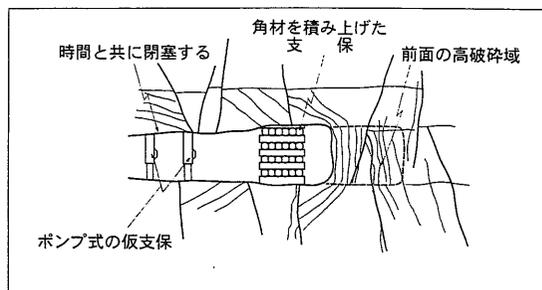
第1図 南アフリカ金鉱山の鳥瞰図。これは、Far West Rand 地区にある世界最深のウェスタンデープレベル鉱山のもので、地下2kmから4kmかけて採掘が行われている。Tanton et al. (1984)より転載。凡例は、以下のとおり。

- ① ずり山, ② 第2立坑, ③ 第3立坑, ④ 主立坑,
⑤ 2次立坑, ⑥ 3次立坑, ⑦~⑨ 金鉱床, ⑩ 岩盤支保のための鉱柱列, ⑪ 採掘方向。

ウィットウォーターランド地域での鉱山地震の歴史は、鉱山地震が初めて体感された1908年にさかのぼる。これは、この地域での採掘が開始されてから、およそ20年後のことである。2年後の1910年にはヨハネスブルグでウィヘルト式水平動地震計による観測が開始された。この地震計によって、鉱山地震の発生数は体感されるものよりはるかに多いこと、採掘量や採掘深度の増加に伴い、鉱山地震の発生数や地動の振幅が増加することが判明した (Gane et al., 1946)。

1939年には、ヨハネスブルグ周辺に設置された6台の地震計を用いて、鉱山地震の震源決定がされ

1996年11月号



第2図 南アフリカ金鉱山での板状採掘の様子。採掘現場の閉塞を防ぐために、ポンプ式の支保棒や、組み上げた角材によって支保がなされる。南ア鉱山研究所 (1988) より転載。

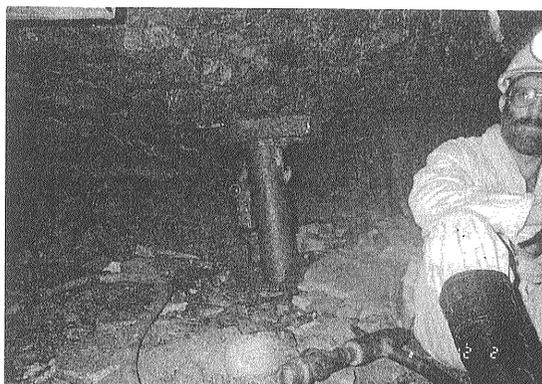
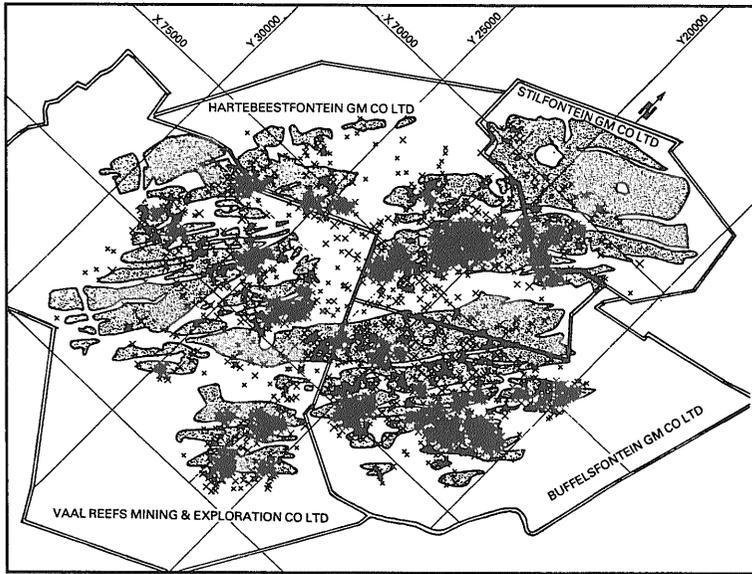


写真1 筆者らが訪れたWDL鉱山の26レベル (地下2,250m)の採掘現場。中央に見えるのがポンプ式の支保棒。

始める (Gane et al., 1946)。1950年には、鉱山の地表で6個の上下動地震計をさしわたし5kmの範囲に設置し、電送トリガー方式による観測が行われた。この観測によって鉱山地震の震源がより高精度で決定され、鉱山地震は採掘位置の近傍およびやや上方で発生していることが見いだされた (Gane et al., 1952)。このことは、Cook (1963)が行った地下観測網による観測によって確かめられることになる。

1970年代から80年代にかけて、鉱山に地震観測網が導入されてゆく。第3図は、1971年に南ア鉱山研究所と4つの鉱山会社によって、クラークスドープ地域に設置された観測網により決定された鉱山地震の震源分布図 (1971年~1981年)である。10年間でマグニチュードが0.2から5.2の地震が6,000個以上観測されている。南アフリカの観測史上最大のマグニチュード5.2の鉱山地震が、この地域で1977



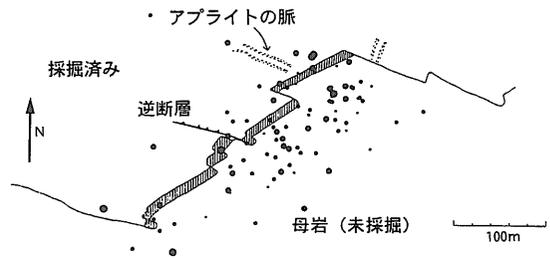
第3図

クラークストープ地域での鉱山地震の震源分布図。1971年から1981年の10年間のもの。影をかけてある部分は採掘済みの場所を示している。Gay et al. (1984)より転載。この地域では4つの鉱山会社が操業している。

年に発生している。規模の大きい鉱山地震は、ダイクや断層などの地質学的な不連続面の近くで発生する (Gay et al., 1984)。

1972年から73年にかけて、ウィットウォーターランド大学の研究グループによって、East Rand Proprietary Minesの地下約3kmの採掘位置の周辺で発生する鉱山地震の観測が行われている。観測期間中、幅が約100m、高さが1.25mの採掘が、鉱脈に沿って7ヵ所で行われていた。採掘速度は1ヵ月あたり約6mであった。鉱山地震 ($M < 3$) はそのほとんどが採掘位置の前面から上方にかけての100m以内で発生している (第4図, McGarr et al., 1975)。鉱山地震の規模別頻度分布は、自然地震で用いられているグーテンベルグ・リヒターの式で表され、積算曲線でのb値は約0.6であった。マグニチュードが0(ゼロ)以上の鉱山地震の発生数は、解析対象とした100日間では1ストップあたり平均で40個であった (McGarr and Wiebols, 1977)。マグニチュードが0~3の24個の鉱山地震の波形解析の結果では、その応力降下量、マグニチュードとモーメントの大きさの関係、マグニチュードと震源の大きさの関係において、鉱山地震は自然地震と極めて類似している (Spottiswood and McGarr, 1975)。

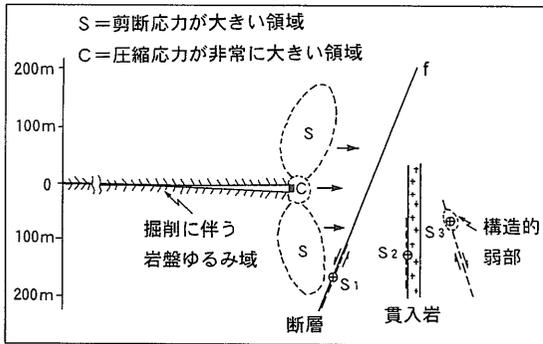
鉱山では、鉱山地震によるものと思われる岩盤の破壊面が掘り出されることがある。1974年にEast Rand Proprietary Minesで比較的新鮮な岩盤の破



第4図 採掘位置前面での鉱山地震の震源分布。地震の大きさは5つ ($M < 0$, $0 < M < 0.75$, $0.75 < M < 1.5$, $1.5 < M < 2.25$, $M > 2.5$) に分類され黒丸で示されている。観測期間は45日間。ほとんどの地震が採掘位置(斜線を施した箇所)の前面から上方にかけての100m以内で発生している。McGarr et al. (1975)より転載。

壊面が掘り出された。それまでの地震活動の記録から、この破壊面は1990年9月に発掘現場の近くで発生した2つの地震 ($M3.4$ と $M2.1$)のいずれかによるものと考えられた。そして、破壊面に沿って総長75mの調査トンネルが掘られ、破壊面の詳細な記載がなされている (Gay and Ortleep, 1979)。

鉱山地震が採掘位置の周辺で発生するのは、採掘に伴う鉛直方向の応力集中に起因している。採掘位置の極近傍での応力集中は、岩石の破壊強度を超える。また周辺での応力集中は、例えば地下3kmの採掘位置の斜め前方(前方25m・上方70m)では、鉛直方向の応力が通常の800気圧から1,800気圧に



第5図 鉱山地震と応力集中域の関係。採掘位置の周辺では大きな応力集中が生じる。掘削位置の直前面(図中のCの領域)では、応力集中の値は岩石の圧縮強度を上回る。また、掘削位置の斜め上下方向(図中のSの領域)では、剪断応力が大きくなり、構造的な弱面が存在すると剪断型の破壊が生じる。南ア鉱山研究所(1988)より転載。

まで増加する。このような応力集中域と鉱山地震の震源分布とは非常によい相関がある(McGarr et al., 1975)。

しかし、応力集中だけで鉱山地震の原因を説明することはできない。岩盤の一軸圧縮強度は約2,000気圧である。地下3kmでの静水岩圧(400気圧)を考えると、この深度での岩石の圧縮強度は約4,400気圧に達する。応力集中以外の原因として、構造的な弱面の存在(第5図、南ア鉱山研究所、1988)や局所的な高応力域の存在などがあげられている(McGarr et al., 1975)。

2. 南アフリカ金鉱山における国際共同実験

これまで述べてきたような南アフリカでの鉱山地震の研究成果をもとに、ウィットウォーターズランド大学のニコライセン教授によって、鉱山地震の予知に関する国際共同実験(International semi-controlled experiment on seismic events)が提唱された。これは、ウェストドリーフオンティン(WDF)鉱山でシャフトピラー(立坑を保持するため採掘が残されていた1辺500mの柱状岩盤)の地下2.5kmで採掘が開始されることを機会に、採掘位置の前面で発生が予想される鉱山地震の震源域の近傍数100m以内に、地下のサービストンネルを利用して、地震計・歪み計・傾斜計・磁力計・地電位計・ガスセンサー等の地球物理学的観測機器を設置して、鉱山地震の前兆現

象や、鉱山地震の震源メカニズムを解明しようというものである(Nicolaysen, 1992; 飯尾・深尾, 1992)。この計画は、1991年に行われたIASPEI(国際地震学地球物理学連合)の地震予知小委員会でも採択され、この計画への研究者の参加が国際的に呼びかけられた。

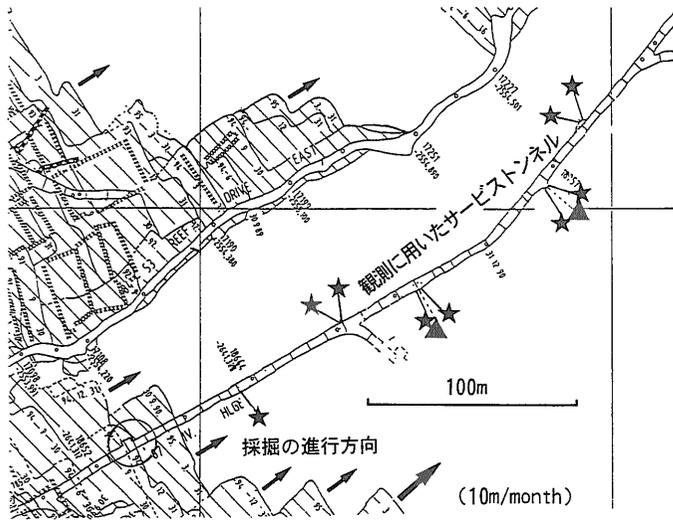
ニコライセン教授は、1992年3月に来日し、京都大学で行われた春季地震学会で講演を行うと共に、日本の研究機関を歴訪し、日本の研究者に計画への参加を呼びかけた。地質調査所には4月24日に来られている。そして、この計画に関心をもった研究者によって、日本側の研究グループがつくられ、研究資金の獲得が図られた。

南アフリカ側からの今回の国際共同研究の提案は、同国のアパルトヘイトの廃止の流れと機を一にしている。1985年の南アフリカ共和国での非常事態宣言の発令と反政府運動の弾圧強化に抗議して、各国は経済制裁に踏み切っていた。しかし、ニコライセン教授が来日した前年の1991年の2月には当時のデクラーク大統領がアパルトヘイト法の全廃を宣言(6月には正式に全廃)。これを受けて、各国の経済制裁は解除されてゆく。日本は6月に人的交流の制限解除、10月には全制裁の解除と国交回復を行っている。日本と南アフリカの共同研究の実施にあたっての政治的障壁は取り除かれた。1994年の4月には、全人種が参加した選挙が行われ、5月には黒人のマンデラ大統領が選出された。

3. 紆余曲折

WDF鉱山の第3シャフトピラーの南東部での観測実施に向けて、1993年から観測機材の調達と、南アフリカのスタッフとのセンサーの設置位置に係わる話し合い、鉱山会社との交渉が進められた。しかし、掘削に用いる水の漏洩や火災事故の発生によって、このシャフトでの観測実施を断念せざるをえなくなった。

テストサイトは第5シャフトの南西部に変更された。この場所には2本の大きなダイクがあり、規模の大きい鉱山地震の発生が期待される場所である。しかし、観測に用いる28レベルの古いサービストンネル(地下2,350m)はダイクの手前で崩れており、再掘削の必要があった。鉱山会社の援助によって、1994年の



第6図

日・南ア共同研究グループによって、ウェスタンディープレベル鉱山に設置された観測点配置図。地下2,600mのサービストンネルにおいて、9個の3成分加速度型地震計(星印)と2ヵ所に3成分石井式歪み計(三角印)が設置された。南西方向に21度傾斜した金鉱床がトンネル上方60mから120mにかけて位置している。斜線部分はセンサー設置時点で採掘済みの鉱床を示しており、1ヵ月あたり約10mの速さで、北東方向に採掘が進んでゆく。

7月から崩れた岩盤の除去と支保が進められた。筆者らが12月にこのトンネルを訪れた時、崩れた岩盤のすき間から流れてくる風を頬に感じる事ができた。この風は、トンネルの貫通が近いことを予感させてくれた。筆者らをこの場所まで案内してくれたスタイルウォールさんはこの風を「グッドウィンド」と呼んでいた。しかし、その後も続いた鉱山側の努力にもかかわらず、1995年の2月になってもこのトンネルが開通する見通しは立たなかった。我々は、再びテストサイトの変更を余儀なくされたのである。

WDL鉱山にはもうこれ以外のテストサイトを見いだすことができず、1995年4月にはサイトをウェスタンディープレベル(WDL)鉱山に移すことになった。WDL鉱山のテストサイトでは、観測に使えるサービストンネルは1本だけで、これまで考えてきた観測機器の3次元的な配置は困難であった。幸いにも、WDL鉱山には、日本側研究グループが購入した地震観測装置のメーカーである南アISS社の地震観測網が設置されており、我々の地震計のカバーリッジの悪さは、鉱山会社の地震観測ネットによって得られる情報で補完することができよう。WDL鉱山での観測機器の設置作業が6月から開始された。

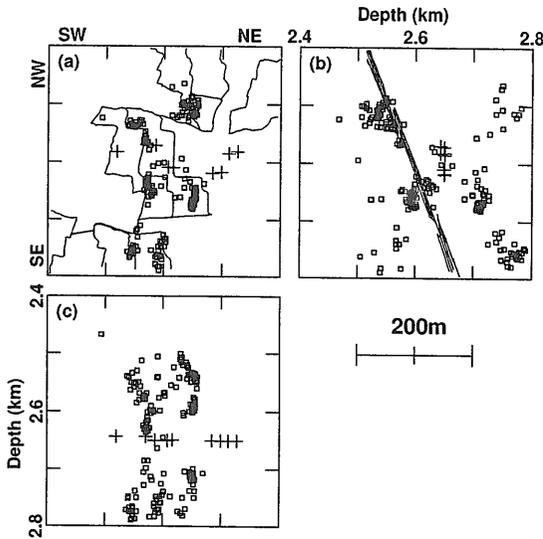
4. WDL鉱山での観測

WDL鉱山の地下2,600m地点のサービストンネルの5ヵ所の拡幅部を利用して、9台の3成分加速度型地震計と2ヵ所に石井式3成分歪み計が設置された。

これらのセンサーは、トンネル周辺の岩盤のゆるみ域をさけ健全な岩盤に設置するために、約15mのボーリング孔内に設置された。1996年度中に自然電位観測システムを追加設置する予定になっている。WDL鉱山でのテストサイトの平面図を、第6図に示す。観測アレイの全長は約210mである。南西に21度傾斜した鉱脈が、トンネルの上方60mから120mにある。採掘は南西方向から北東方向へ、1ヵ月あたり約10mの速さで行われる。

地震計および歪み計からの信号は、地下に設置されたデータアクイジションユニット(ISS社製)でA/D変換された後、光ケーブルで地上の収録システムに送られている。加速度計のサンプリング周波数14.97kHzであり、歪み計のサンプリングは現在のところ15分に1データである。

地震データは1996年の3月から日本に送られてくるようになった。震源決定はISS社製の地震データ処理ソフトウェアXMTSを用いて行われている。XMTSは、対話形式の震源決定の他に、自動震源決定、モーメントテンソルやスペクトルの計算、パーティクルモーションの表示などが行える。また、観測点の配置や時計の同期が悪い場合も考慮して、S-P時間(S波とP波の到達時間差)とP波の到来方向を用いた震源決定も行えるように設計されている。同時に導入した同社の震源表示ソフトウェア4DIでは、震源分布図の作成、各種震源パラメータの時系列図の作成を行うことができる。4DIでは、震源分布図を3次元的に回転させることができ、震源と採掘面



第7図 日・南ア共同研究グループの観測網によって決定された震源分布図。1996年2月27日のもの。□印が震源、+印は地震計の位置、実線は金鉱床の位置を示している。

の関係容易に視覚的にとらえることができる。第7図は1996年2月27日に発生した鉱山地震の震源分布図である。+印が地震計の位置を、実線が金鉱床の位置を示している。採掘位置に対応して、鉱床の上盤に鉱山地震の集中が見られる。

採掘は、すでに観測アレイの南西部に達してきており、1996年から1997年にかけて観測アレイの上方を通過してゆく。大きな、しかし人的被害を引き起こさない程度の鉱山地震の発生を待っている段階である。鉱山地震の震源域での観測が、今まさに始まろうとしている。

なお、日本側の研究者は以下の通りである。住友則彦・安藤雅孝・後藤忠徳(京都大学防災研究所)、大倉敬宏(京都大学・総合)、小笠原宏(立命館大学・理工)、高野雅夫(名古屋大学・理)、石井 紘・深尾良夫・功刀 卓(東京大学地震研究所)・脇田宏(東京大学・理)、飯尾能久(防災科学技術研究所)、楠瀬勤一郎・佐藤隆司・長 秋雄(地質調査所)

謝辞：南アフリカ金鉱山における国際共同実験グループの研究は、文部省科学研究費一般研究A、東京海上火災各務記念財団地震予知助成金、IASPEI、ISS International Co., Western Deep Levels Limited、京都大学防災研究所、立命館大学、地質調査所によりサポートされている。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- Chamber of Mines research Organization ed. (1988) : An industry guide to methods of ameliorating the hazards of rockfalls and rockbursts.
- Cook, N. G. W. (1963) : The seismic location of rockbursts, Proc. Fifth Rock Mechanics Symposium, Pergamon Press, Oxford, 493-516.
- Gane, P. G., A. L. Hales, and H. A. Oliver (1946) : A seismic investigation of the Witwatersland earth tremors, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.36, 49-80.
- Gane, P. G., P. Seligman, and J. H. Stephen (1952) : Focal depths of Witwatersland tremors, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.42, 239-250.
- Gay, N. C. and W. D. Ortleep (1979) : Anatomy of a mining-induced fault zone, Geol. Soc. Amer. Bull., Part1, Vol.90, 47-58.
- Gay, N. C., D. Spencer, J. J. van Wyk and P. K. van der Heever (1984) : The control of geological and mining parameters in the Klerksdorp gold mining district, Proc. of the 1st international congress on rockbursts and seismicity in mines, Gay, N. C. and E. H. Wainwright ed., 107-120.
- 飯尾能久・深尾良夫 (1992) : 南アフリカ金鉱山における国際共同実験参加の呼掛け, 地震学会ニュースレター, Vol.3, No.6, 8-9.
- McGarr, A., S. M. Spottiswoode and N. C. Gay (1975) : Relationship of tremors to induced stress and to rock properties in the focal region, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.65, 981-993.
- McGarr, A. and G. A. Wiebols (1977) : Influence of mine geometry and closure volume on seismicity in a deep-mine, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.14, 139-145.
- Nicolaysen, L. O. (1992) : International semi-controlled experiment on seismic events : a review of the background and proposal, 地震学会ニュースレター, Vol.3, No.6, 9-27.
- Spottiswoode, S. M. and A. McGarr (1975) : Source parameters of tremors in a deep-level gold mine, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.65, 93-112.
- Tanton, J. H., T. F. McCarthy and T. O. Hagan (1994) : The introduction of stabilizing pillar to reduce rockbursts at Western Deep Levels, Limimed, Proc. of the 1st international congress on rockbursts and seismicity in mines, Gay, N. C. and E. H. Wainwright ed., 245-256.
- CHO Akio (1996) : The mine tremors in South African gold mines.

< 受付：1996年8月29日 >