岩石圧縮破壊に伴うマイクロ波放射の観測

東京大学大学院工学系研究科* 牧 謙一郎†
宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部** 高 野 忠
東京理科大学大学院工学系研究科*** 相馬央令子・石井健太郎
東京大学地震研究所**** 吉 田 真 吾・中 谷 正 生

An Experimental Study of Microwave Emissions from Compression Failure of Rocks

Ken-ichiro MAKI†

School of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan

Tadashi TAKANO

Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency,
3-1-1 Yoshino-dai, Sagami-hara-shi, Kanagawa 229-8510, Japan

Eriko SOMA and Kentaro ISHII

Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku,
Tokyo 162-8601, Japan

Shingo YOSHIDA and Masao NAKATANI

Earthquake Research Institute, University of Tokyo,
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

(Received January 5, 2005; Accepted December 15, 2005)

Electromagnetic emissions observed in a series of rock fracture tests are described. Four kinds of rocks, basalt, gabbro, granite and quartzite were pressed by uniaxial compression to fracture, for all of which many signals were detected at two microwave bands (2 GHz and 300 MHz). These detected signals consist of intermittent pulses of a short duration. Comparing the microwave records and the observation with a high-speed digital video camera, we found that the pulse signals were generated after the decrease of the axial load, and even after the macroscopic fracture (deformation) was completed. This differs from the occurrence of lower frequency emissions (0.3–300 kHz) monitored as well, which became active and was strongest during the load decrease. The occurrence of signals at the two microwave bands did not always coincide, but a signal at 300 MHz often followed a signal at 2 GHz with a short interval of 50–100 ns. An additional detector at 22 GHz picked up emissions only for quartzite, which occurred exclusively during the decrease of axial load.

Key words: Microwave emission, Rock fracture

* 〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1
** 〒229-8510 相模原市由野台 3-1-1
*** 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3
**** 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

† 現所属: 理化学研究所テラヘルツイメージング研究チーム

〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 519-1399

† Present Address: Terahertz Sensing and Imaging Laboratory, RIKEN, 519-1399 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0845, Japan

§ 1. はじめに

地震に伴う電磁場変動あるいは電磁放射が数多く報告されている [例えば, Asada *et al.* (2001), Fraser-Smith *et al.* (1990), Gokhberg *et al.* (1982), Nagao *et al.* (2002), 吉田・西 (2002)]. しかしその発生メカニズムは明らかになっていない. 岩石破壊実験を行うことで, その放射特性, およびメカニズムの解明を目的とする研究が多くなされている. 提案されている放射メカニズムのひとつとして, 岩石中に含まれる石英の圧電性に起因するものがある. 例えば Nitsan (1977) は, 様々な岩石を用いて破壊実験を行い, 圧電性をもつ岩石からのみ数 MHz 帯の電磁放射を検出した. Ogawa *et al.* (1985) は岩石同士をぶつけるときに生じる電磁放射を調べ, 圧電効果が発生メカニズムのひとつの候補と推測しているが, その他に接触電位差に基づくメカニズムの可能性についても論じている. また Ikeya and Takaki (1996), Yoshida and Ogawa (2004), Yoshida *et al.* (1994) は, 岩石破壊実験の結果に基づき, 圧電による分極と岩石内の補償自由電荷の両方の効果を考慮したモデル化を行い, 周波数特性などを定量的に議論した.

一方, 圧電性を持たない岩石の破壊に伴う電磁放射も観測されている. Yamada *et al.* (1989) は, 岩石破壊に伴う電磁放射とともに, 岩石中に生じる超音波振動を同時観測した. 伝播速度を補正すると両者の検出時刻がほとんど一致することから, 微小亀裂が電磁放射と密接に関係すると推測している. 破壊による摩擦や亀裂生成に伴う化学結合の切断により, 表面間で異符号の電荷が分離され, 亀裂表面で沿面放電による電流が流れ, 電磁放射に至るというモデルも提出されている [O'Keefe and Thiel (1995), O'Keefe *et al.* (2000), Takeuchi and Nagahama (2001)]. また, Takeuchi and Nagahama (2002) は花崗岩の摩擦すべり実験を行い, すべり始める直前に電磁放射が観測されたとして圧電効果以外のメカニズムを考察しているが, 変位や荷重の測定系について周波数特性は記載されてない. Cress *et al.* (1987) は岩石が破壊する際の光, および 900 Hz から 500 MHz 以上までの電磁放射の測定から, 周波数帯によっては破壊時ではなく破壊後に検出されるものもあることを示し, エクソ電子放射により帯電した小破片が dust のように噴き出ることによる現象であると考えた. Freund (2000) も岩石に対して衝突実験を行い, 衝突後に電荷が蓄積し電磁放射が起こる現象を見だし, 正孔が移動するモデルにより説明を試みた.

以上述べた各測定は, Cress *et al.* (1987) を除けば, 観測周波数帯は DC から数百 MHz までか, あるいは光の帯域であり, GHz 帯のマイクロ波帯域での観測例は極

めて少ない. 例外的に Geng *et al.* (1999) は, マイクロ波帯で岩石破壊時の電磁放射を観測している. ただし測定は放射計 (ラジオメータ) によっているため時間分解能が低く, 応力による輝度温度の準静的変化をみただけである. 電磁放射の原因としてすでに提案されている圧電気の解放や, 岩石亀裂での沿面放電による電磁放射の場合, その時定数は 130 μ s 程度であり [O'Keefe and Thiel (1995)], このような遅い現象によって, GHz 帯であるマイクロ波が放射されるとは考えにくい. したがって岩石破壊に伴うマイクロ波放射の観測は, 電磁放射の原因を明らかにする有力な手段のひとつと考えられる. その際, マイクロ波を十分な時間分析能で観測することにより, 放射原因の持続時間がわかり, ひいては放射原因の特定につながると期待できる.

物質の破壊に伴う電磁放射現象としては, 金属への超高速衝突によるマイクロ波発生が観測されている [Takano *et al.* (2002)]. この場合, 金属分子が熱解離して, プラズマ振動が発生することも考えられる. Bianchi *et al.* (1984) および Crawford and Shultz (1991) は超高速衝突実験により, 岩石への衝突でプラズマが生成されることを示した. Martelli *et al.* (1989) は花崗岩や玄武岩の破壊実験を行い, ラングミュアプローブを用いて破壊時にプラズマ放射を検出した. 彼らは 2 kHz 帯の電磁放射も検出しているが, マイクロ波は測定していないので, マイクロ波が発生するほどプラズマ密度が高かったかどうかはわからない. また, Kamogawa and Ohtsuki (1999) は地殻内部でのプラズマ振動について論じた.

本研究では, 岩石破壊に伴うマイクロ波放射を観測し, その特性を実験的に解明することを目的とする. 放射は広帯域に及ぶと予測し, 300 MHz, 2 GHz, 22 GHz の 3 つの周波数帯で観測し, それぞれに適した受信系の選択, および較正を行う. できるだけ多くの周波数帯での測定が望ましいが, 測定器などの関係から離散的な周波数帯で測定した. また, 0.3~300 kHz の低周波帯での放射も同時観測し, マイクロ波との比較を行う. 検出信号を 1 GHz の高サンプリングで記録し, 現象を時間的にできるだけ精密に捕える. 岩石試料には石英の含有率の異なるものを用いて, 放射特性の違いを調べる. さらに, 高速デジタルビデオカメラにより岩石の破壊・変形の様子を撮影し, 電磁放射と破壊過程との時間的関係を調べる.

§ 2. 実験装置構成

岩石の破壊には Fig. 1 に示す油圧サーボ制御式一軸圧縮試験機を使用する. Fig. 1 のように, ステージに置

Fig. 1. Schematic illustration of loading apparatus.

RF : radio frequency, IF : intermediate frequency
LNA: low noise amplifier

Fig. 2. Block diagram of heterodyne receiving system.

かれた金属円柱上に岩石試料を設置する。試料上部には厚さ 1 cm の金属円盤が接着される。荷重は金属円盤上部のロードセルで計測され、その時定数は 0.3 ms である。試料の変位はステージの動きとして計測され、その時定数は約 0.5 s である。岩石への加圧速度は変位量で 0.08 mm/s である。

実験に供した岩石は、石英が 9 割を占める珪岩（愛知県額田産）、石英が 3 割を占める花崗岩（茨城県稲田産）、石英を含まない玄武岩（兵庫県豊岡産）と斑レイ岩（山口県高山産）の 4 種類である。試料形状は、直径 27 mm、高さ 60 mm の円柱形である。破壊時における岩石破片の散乱を防ぐため、試料側面全体をビニールテープで被う。

マイクロ波放射観測の受信周波数帯は 22 GHz, 2 GHz, 300 MHz の 3 つである。22 GHz, 2 GHz 帯については、Fig. 2 に示すヘテロダイン検波受信系を採用し、マイクロ波信号 (RF) を混合器 (MIXER) に掛けて中間周波数信号 (IF) に変換する [Takano *et al.* (2002)]. 300 MHz 帯および同時観測する低周波帯 (0.3~300 kHz) の受信系は、アンテナ、増幅器 (AMP) と帯域通過フィルタ (BPF) で構成される。感度を高めるために、すべての受信系に低雑音増幅器 (LNA) を含める。

Fig. 3. Output voltage versus input power of the receivers. A dotted line indicates a linear characteristic.

Fig. 4. Gain versus intermediate frequency of the receivers for 2 GHz and 22 GHz bands.

Fig. 2 で示されるマイクロ波受信系において、アンテナ直後の系に、単一の周波数をもつ連続信号を入力し、入力電力に対する出力電圧を校正する。Fig. 3 に 3 周波数帯における校正結果を示す。図中の点線 (Ref.) は線形な特性を表す。各周波数帯の受信系において、非線形性が現れている。出力電圧は $3.1V_{p-p}$ (22 GHz 帯), $4.0V_{p-p}$ (2 GHz 帯), $1.2V_{p-p}$ (300 MHz 帯) で飽和する。検出可能な最小電力は、通常時の雑音電圧によって決定され、その値は、 10^{-11} W (22 GHz 帯), 10^{-12} W (2 GHz 帯), 10^{-10} W (300 MHz 帯) である。22 GHz 帯, 2 GHz 帯, および 300 MHz 帯の受信機利得の周波数特性をそれぞれ Fig. 4 と Fig. 5 に示す。これより受信系の帯域が求められ、Table 1 にまとめる。

受信アンテナおよび高速ビデオカメラの配置を Fig. 6 に示す。マイクロ波帯観測用受信アンテナには、ホーンアンテナ (22 GHz 帯), 対数周期アンテナ (2 GHz 帯),

Fig. 5. Gain versus frequency of the receiver for a 300 MHz band.

Table 1. The radio and intermediate frequency band characteristics of the receiving systems.

RF band	IF band
22–23 GHz	0–500 MHz
1.94–2.24 GHz	0–190 MHz
292–309 MHz	—
0.3–300 kHz	—

Fig. 6. Experimental layout.

ループアンテナ (300 MHz 帯) を用い、岩石試料との距離はそれぞれ、48 cm, 34 cm, 68 cm である。また、低周波帯 (0.3–300 kHz) の観測には 45 mm × 45 mm の銅箔アンテナを用い、岩石から 10 cm の位置に設置して

電界変動を観測する。また、外部からの雑音を遮断するため、試料およびアンテナのほぼ全体を電波広帯域吸収体 (各周波数帯での吸収は 300 MHz: -6 dB, 2 GHz: -13 dB, 22 GHz: -50 dB) で被う。

マイクロ波帯信号用の記録装置にはサンプリング周波数 1 GHz、観測時間 4 ms のデジタルオシロスコープを用いる。限られた観測時間内でも確実に信号を捕えるために、3 つのマイクロ波帯信号電圧のいずれかが、設定された閾値 (トリガ電圧) 以上になる時点で波形の記録を開始させる。閾値は雑音電圧よりわずかに高い 0.30 V (22 GHz 帯)、48 mV (2 GHz 帯)、4.8 mV (300 MHz 帯) に設定する。

マイクロ波記録用オシロスコープで発生する観測トリガ信号は、以下の 3 つの観測機器へ出力される。(1) 0.3–300 kHz 信号記録用デジタルオシロスコープ (サンプリング周波数 100 kHz、観測時間 1 s)、(2) 荷重、変位測定用パーソナルコンピュータ (サンプリング周波数 2 kHz)、(3) 高速デジタルビデオカメラ (分解能 74 μ s、観測時間 0.91 s)。トリガ信号を出力することにより、すべての測定信号を同期させる。また、高速カメラからは撮影開始を表す同期信号を出力し、記録することで、受信系との同期を可能とする。

§3. 各種岩石におけるマイクロ波放射

実験は各岩石試料について 3 回 (花崗岩のみ 4 回) 行われた。高速ビデオカメラによる岩石破壊状況の撮影は各岩石につき 1 回ずつ行った。この撮影により、岩石試料に亀裂が入り変形する様子が観測された。一例として、Fig. 7 に変形前後の班レイ岩の撮影画像とその詳細を表すスケッチを示す。円柱の岩石中に斜めに亀裂が入っている。ただしこの場合、全体をビニールテープで巻いているので、破壊後に試料片が飛散することはない。

Fig. 8 に珪岩での観測結果の一例を示す。この場合観測トリガは 300 MHz 帯の小さいパルスでかかっており、その発生時刻を 0 s としている。Fig. 8(a) で示す荷重は、時刻 -0.05 ms 付近から急激に降下し始め (図中 A)、時刻 0.1 ms で極小値をとっている。荷重降下後、約 2 ms にわたり荷重が変動している (図中 B)。これは、ロードセルまたはプレス共振によるものであると考えられる。変位計による記録 (Fig. 8(f)) では変形は 10 ms 続いているように見えるが、変位計の計測システムの時定数が 0.5 s なので、周波数特性の補正をしないと正しい変形終了時刻は求められない。しかし、試料の巨視的変形の高速ビデオカメラ観察から、破壊に伴う高速な圧縮変形の開始、および主破壊の終了時刻をコマ送り

Fig. 7. The images of gabbro sample taken with a high-speed digital video camera: (a) photo and (b) sketch before fracture, (c) photo and (d) sketch after fracture.

精度 ($74 \mu\text{s}$) で同定でき、本実験の場合、試料の変形は -0.2 ms から始まり 0.9 ms に終わったことがわかった。ただし、巨視的な主破壊終了後に試料内部で局所的な破壊が起こっている可能性はある。

Fig. 8(b) で示す 22 GHz 帯では、図中 C で示される信号が、時刻 -0.05 ms から 0.05 ms まで見られる。この信号は詳しく見ると断続的に生起するパルスであり、発生時刻を Fig. 8(a) の荷重ロード変化と比較すると、荷重降下中に放射されたことがわかる。また、 22 GHz 帯の信号が検出されたことから、時定数 0.05 ns の高速な現象が発生していることがわかる。これ以外に、バックグラウンドノイズよりも高い信号は確認できない。Fig. 8(c) の 2 GHz 帯信号もやはり断続的なパルスである。

まず時刻 $-0.05 \sim 0.05 \text{ ms}$ (22 GHz 帯信号と同時刻) にパルス群が見える。荷重降下後にも断続的なパルスが複数観測されており (図中 D)、時刻 3.5 ms 付近に最も高い信号がある (図中 E)。Fig. 8(d) の 300 MHz 帯でも区間 F において、荷重降下後の断続的なパルスが多数確認できる。いくつかの信号は次節で詳述するように 2 GHz 帯のパルス信号と同期しているが、Fig. 8(b) 中 C に相当する時間では 300 MHz 帯のみ信号が極めて弱い。またビデオカメラによる観察から主破壊の終了時刻は 0.9 ms であることがわかっているため、 2 GHz と 300 MHz 帯のパルスは荷重降下中だけでなく、荷重が降下したあとと剪断破壊面に沿ってすべりながら圧縮変形している間、および巨視的な破壊終了後も出続けていたことにな

Fig. 8. Records from quartzite experiment: (a) load with high sampling, (b) voltage of microwave at 22 GHz band, (c) 2 GHz band, (d) 300 MHz band, (e) load with low sampling, (f) displacement and (g) voltage of 0.3 k-300 kHz band. The measurement periods of (a) to (d) are correspondent to the period indicated by T_μ in (f). The moment when the microwave recorder was triggered is taken to be 0 s. Labels with capital letters are referred in the text.

Fig. 9. The same as Fig. 8 except for gabbro.

る。荷重降下中にマイクロ波が発生することや、その波形の特徴は、珪岩を用いた他の実験でも再現された。

22 GHz 帯、2 GHz 帯および 300 MHz 帯で観測された断続的なパルス状の信号は、物体の超高速衝突の際も観察されている [Takano *et al.* (2002)]。

Fig. 8(e), (f), および (g) は時間軸を変えてあり、低サンプリングで計測された荷重、変位、および 0.3~300 kHz 帯の低周波信号の変化をそれぞれ示す。Fig. 8(a) から (d) までの観測期間は、Fig. 8(f) 上の T_μ で示す区間に相当する。荷重が降下する前の時刻 -7.2 ms, -5.7 ms

で、低レベルの低周波信号パルスが見られる(図中H)。荷重降下の始まりと同時に、高レベルの振動波形が現れる(図中I)。この部分の信号の始まりは、マイクロ波信号と比べ約 0.5 ms 速い。周期 0.02 ms (周波数 50 kHz) から 0.8 ms (周波数 1.3 kHz) の成分が複合した信号が、時刻 9 ms まで継続している。

本実験では試料をビニールテープで巻いて破壊させた。テープの帯電の可能性は完全には否定できないが、ビデオによる観察からテープの剥離はほとんどなく、ま

た比較のためテープを巻かないで行った実験でも同様のマイクロ波が検出されたことから、本稿での議論についてはテープの帯電の影響はないと考えられる。

斑レイ岩を用いた場合の荷重、マイクロ波信号、変位、低周波信号を、各々Fig. 9(a) から (g) に示す。トリガとなる信号が検出されたときに、斑レイ岩では荷重が完全に降下し終わっており、珪岩で荷重が降下中であるのと異なっている。22 GHz 帯では、顕著な信号は確認されない。2 GHz 帯と 300 MHz 帯の信号は、珪岩の場合と同様に断続的なパルスであるが発生数は珪岩より少な

Fig. 10. The same as Fig. 8 except for granite.

Fig. 11. The same as Fig. 8 except for basalt.

い。Fig. 9(g) に示す 0.3~300 kHz 信号では、マイクロ波とは異なり、荷重降下中から信号が検出されていることが確認できる。荷重が完全に降下し終わってからマイクロ波が発生することや、その波形の特徴は、斑レイ岩を用いた他の実験でも再現された。

花崗岩、玄武岩についても、2 GHz 帯と 300 MHz 帯において断続的パルスのマイクロ波信号が検出されている。各々のデータを Fig. 10 と Fig. 11 に示すが、ビデオカメラによる観察との比較から、すべて主破壊が終了した後に検出されたことがわかっている。放射レベルは、珪岩や斑レイ岩に比べて低い。22 GHz 帯の信号は確認されていない。0.3~300 kHz 信号は、花崗岩ではマイクロ波検出時刻の 180 ms 前から検出された。玄武岩ではタイムウィンドウの設定が適切でなかったため、マイクロ波検出時刻より前は記録できなかった。

石英の含有量の多いケイ岩と花崗岩に見られる 100 mV オーダーの 0.3~300 kHz 信号は（珪岩は飽和しており少なくとも 80 mV 以上）応力変化中に発生していることから、複数のメカニズムが働いている可能性はあるが、少なくとも圧電効果が強く寄与していると考えられる。

Cress *et al.* (1987) は破壊後の電磁放射の原因として、エキソ電子放射などにより帯電した岩石破片が dust 状に吹き出すことを考えている。今回は岩石試料をテープで巻き付け、破片が飛び出さないようにして実験を行い、高速ビデオカメラによる観察により dust が吹き出なかったことを確認している。したがってこの説は本実験に対しては妥当でないと思われる。巨視的な破壊が終わってからもなぜマイクロ波が発生するかを明らかにすることは、今後の課題である。

本実験の結果から、地震のときもマイクロ波が放射されると考えられる。地殻の比抵抗が低いとスキンドープの関係から地表まで伝播するのは難しいが、Yoshida and Ogawa (2004) の結果に基づけば、例えば比抵抗が 50 k Ω m の場合、10 km より浅い震源からはマイクロ波の方が低周波数帯の電磁波より伝播しやすい。また、地中にマイクロ波の波長の半分程度以上の割れ目が入り、導波管モードで伝播する可能性もある。

§ 4. 各周波数帯における信号波形の詳細

珪岩の場合、22 GHz 帯 (Fig. 8(b)) と 2 GHz 帯 (Fig. 8(c)), 300 MHz (Fig. 8(d)) の各信号について、拡大波形を Fig. 12 に示す。信号は断続的に生起するパルスの集合であり、パルス間隔は約 0.2~4 μ s であることがわかる。

22 GHz 帯の信号は、前述したように珪岩の主破壊中のみに検出された。そのパルス状信号の時間軸を拡大し

Fig. 12. Expanded view of microwave signals from quartzite.

Fig. 13. Expanded waveforms from quartzite rock: (a) no signal at 22 GHz, (b) pulses at 2 GHz at E in Fig. 8, (c) pulses at 300 MHz at G in Fig. 8.

て観たところ、持続時間は約 10 ns であることがわかった。22 GHz の信号が検出されたのと同時刻には、2 GHz 帯と 300 MHz 帯の信号は検出されていない。

主破壊後に検出された 2 GHz 帯、および 300 MHz 帯の信号のひとつ (Fig. 8(c) の E および Fig. 8(d) の G) の時間軸を拡大した図を Fig. 13 に示す。2 GHz 帯の信号

Fig. 14. Expanded waveforms from gabbro: (a) no signal at 22 GHz, (b) pulses at 2 GHz in L in Fig. 9, (c) pulses at 300 MHz in M in Fig. 9.

の持続時間は $0.1 \mu\text{s}$ 程度、300 MHz 帯の信号の持続時間は $0.2 \mu\text{s}$ 以上あり、長周期の信号の持続時間ほど長い傾向が見られる。ただし、試料の固有周波数が 2 GHz 前後なので、2 GHz 帯で得られた信号が固有振動も反映している可能性があり、測定された持続時間は発生源の持続時間の上限をみている。また、2 GHz の信号が検出されてから数十 ns 後に 300 MHz の変動が現れていることがわかる。このような遅れの例は他にも多数あることから、2 GHz 放射と 300 MHz 放射が独立な現象でたまたま数十 ns の間隔であったとは考えにくい。電磁放射の立ち上がり部分が 2 GHz 成分を多く含み、その後長周期成分に連続的に移行した、あるいは 2 GHz 放射が 300 MHz 放射を誘発する何らかのメカニズムが働いた、ということが考えられる。このことを調べるためには、2 GHz と 300 MHz の間のもっと多くの周波数帯で測定する必要がある。また、2 GHz 帯だけで検出された例、300 MHz 帯だけで検出された例もあり、マイクロ波放射メカニズムを明らかにすることは今後の課題である。

同じように、斑レイ岩からのマイクロ波パルス信号 (Fig. 9(b), (c), (d)) を拡大して波形を見る。斑レイ岩では、22 GHz 帯で顕著な信号は検出されていない。2 GHz 帯信号の典型として Fig. 9(c) の L、300 MHz 帯信号を Fig. 9(d) の M として選び、拡大波形をそれぞれ Fig. 14(b), (c) に示す。2 GHz 帯の信号の持続時間は 50 ~ 100 ns 程度、300 MHz 帯の信号の持続時間は 100 ~

200 ns 程度であり、珪岩の波形と同様、長周期の信号の持続時間ほど長い傾向が見られる。また、2 GHz の信号が検出されてから数十 ns 後に 300 MHz の変動が現れている。玄武岩、花崗岩についても同様な放射が見られた。

8.5. ま と め

大気圧下で岩石 (玄武岩、斑レイ岩、花崗岩、珪岩) を一軸圧縮破壊し、22 GHz、2 GHz、300 MHz 帯の各周波数帯で、破壊に伴った断続的なパルス状信号を検出した。高速ビデオカメラにより破壊過程を撮影し分析した結果、いずれの岩石においても、2 GHz、300 MHz 帯のマイクロ波は、岩石の巨視的な主破壊終了の後も数 ms 程断続的に発生し続けていたことを確認した。ただし、22 GHz 帯の信号は珪岩での荷重降下時のみ確認された。22 GHz、2 GHz、300 MHz 帯のひとつひとつのパルス状信号の持続時間は、長周期帯ほど長くなる傾向が見られた。また、2 GHz 帯信号の数十 ns 後に 300 MHz 帯信号が検出された例が多数あった。

マイクロ波の発生メカニズムは本実験からは特定できていない。何らかの原因で破壊に伴い電荷が発生し、微小亀裂の相対する面間で放電して微小ダイポール放射源となればマイクロ波が発生しうらだろうが [牧・高野 (2004)], 特に、巨視的な応力変化が終わってからもなぜマイクロ波が発生するかを明らかにすることは、今後の課題である。

謝 辞

小河 勉氏と匿名の査読者および編集委員の田中 聡氏から有益なご意見をいただきました。桑野 修氏には実験を手伝っていただきました。記して感謝いたします。

文 献

- Asada, T., H. Baba, M. Kawazoe and M. Sugiura, 2001, An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes, *Earth Planets Space*, **53**, 55–62.
- Bianchi, R., F. Capaccioni, P. Cerroni, M. Coradini, E. Flamini, P. Hurn, G. Martelli and P. N. Smith, 1984, Radiofrequency emissions observed during macroscopic hypervelocity impact experiments, *Nature*, **308**, 830–832.
- Crawford, D. A. and P. H. Schultz, 1991, Laboratory investigations of impact-generated plasma, *J. Geophys. Res.*, **96**, 18, 807–18, 817.
- Cress, G. O., B. T. Brady and G. A. Rowell, 1987, Sources of electromagnetic radiation from fracture

- of rock samples in the laboratory, *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 331–334.
- Fraser-Smith, A. C., A. Bernardi, P. R. McGill, M. E. Ladd, R. A. Helliwell and O. G. Villard, Jr., 1990, Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the M_S 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1465–1468.
- Freund, F., 2000, Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks, *J. Geophys. Res.*, **105**, 11, 001–11, 019.
- Geng, N., M. Deng and C. Cui, 1999, Simulated experimental studies on earthquake prediction by using infrared and microwave remote sensing, in “Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes”, ed. by M. Hayakawa, Terrapub, Tokyo, 751–758.
- Gokhberg, M. B., V. A. Morgounov, T. Yoshino and I. Tomizawa, 1982, Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan, *J. Geophys. Res.*, **87**, 7824–7828.
- Ikeya, M. and S. Takaki, 1996, Electromagnetic fault for earthquake lightning, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 355–357.
- Kamogawa, M. and Y. H. Ohtsuki, 1999, Plasmon model for origin of earthquake related electromagnetic wave noises, *Proc. Japan Acad. B*, **75**, 186–189.
- 牧謙一郎・高野 忠, 2004, 衝突破壊に伴う放電によるマイクロ波放射解析, 電気学会全国大会, 1–081.
- Martelli, G., P. N. Smith and A. J. Woodward, 1989, Light, radiofrequency emission and ionization effects associated with rock fracture, *Geophys. J. Int.*, **98**, 397–401.
- Nagao, T., Y. Enomoto, Y. Fujinawa, M. Hata, M. Hayakawa, Q. Huang, J. Izutsu, Y. Kushida, K. Maeda, K. Oike, S. Uyeda and T. Yoshino, 2002, Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake, *J. Geodyn.*, **33**, 401–411.
- Nitsan, U., 1977, Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks, *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 333–336.
- Ogawa T., K. Oike and T. Miura, 1985, Electromagnetic radiations from rocks, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6245–6249.
- O’Keefe, S. G. and D. V. Thiel, 1995, A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **89**, 127–135.
- O’Keefe, S. G., D. V. Thiel and N. P. Davey, 2000, Fracture induced electromagnetic emissions in the mining industry, *Int. J. Appl. Electromag. Mech.*, **12**, 203–209.
- Takano, T., Y. Murotani, K. Maki, T. Toda, A. Fujiwara, S. Hasegawa, A. Yamori and H. Yano, 2002, Microwave emission due to hypervelocity impacts and its correlation with mechanical destruction, *J. Appl. Phys.*, **92**, 5550–5554.
- Takeuchi, A. and H. Nagahama, 2001, Voltage changes induced by stick-slip of granites, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3365–3368.
- Takeuchi, A. and H. Nagahama, 2002, Interpretation of charging on fracture or frictional slip surface of rocks, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **130**, 285–291.
- Yamada, I., K. Masuda and H. Mizutani, 1989, Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **57**, 157–168.
- Yoshida, S. and T. Ogawa, 2004, Electromagnetic emissions from dry and wet granite associated with acoustic emissions, *J. Geophys. Res.*, **109**, B09204, doi: 10.1029/2004JB003092.
- Yoshida, S., P. Manjgaladze, D. Zilpimiani, M. Ohnaka and M. Nakatani, 1994, Electromagnetic emissions associated with frictional sliding of rock, in “Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction”, ed. by M. Hayakawa and Y. Fujinawa, Terrapub, Tokyo, 307–322.
- 吉田彰顕・西 正博, 2002, 2000 年鳥取県西部地震および 2001 年芸予地震に関連した VHF 帯電磁現象の観測, *地震*, **55**, 107–118.