

宇宙でのマイクロ波受信による地震・噴火の探知法とその実証

高野 忠 (JAXA・ISAS)、前田 崇(東大・工)、相馬 央令子 (東京理科大・工)、今岡 啓治 (JAXA・EORC)、吉田 真吾 (東大・地震研)、服部 克己 (千葉大・理)

Microwave emission was found when materials were destroyed by a static pressure. This paper describes the experimental setup to observe the phenomena, the obtained terms and results and the method to convert to power. According to the obtained experimental results, the cause of microwave emission is inferred to be the dissociation of atoms or molecules, but is not yet completely confirmed. Currently, the phenomena is expected to be applied to geophysical explorations in the earthquake detection.

1. まえがき

従来より、物質の破壊現象については種々の実験が行われてきたが、静的圧力による岩石破壊実験もその中の一つである。この分野の研究は、地質学や地球物理学、地震学の研究者により進められてきた。この破壊実験では、圧縮機を用いて岩石に加える圧力を徐々に強め、それによって岩石が破壊される過程で観測される電気信号を観測する。これまでの実験より、数 100kHz の放射 [1] やパルス的な電気雑音 [2] の検出が報告され、電気信号と岩石物性との関係や水分含有量との関係が指摘されている。周波数的には、30GHz までの高い周波数の発生が示唆されてきた [3] が、今回、我々が行った岩石破壊実験によってマイクロ波 (300MHz、2GHz、22GHz) の放射が世界で初めて確認された。

この実験結果は、岩石の破壊を伴う自然現象である地震や火山噴火の際にも同様の現象が起きていることを示唆している。特に地震については、地震に関連して各種電磁放射が観測されたという報告は多数ある [4,5,6,7] もの、その電磁放射の発生が実験的に示されているものは少ない。また、地震は発生場所の予測が困難であるため、地震関連マイクロ波の観測には地球全体を観測領域とする人工衛星を用いることが望ましい。このような状況の中、我々は岩石破壊実験の結果に基づいて、実際の地震に伴う岩石破壊でどの程度のマイクロ波が放射されるのかについてモデルを構築し、そのマイクロ波を衛星で検出可能という検討結果を得た。

本稿では、まず、岩石破壊実験の概要とその結果に基づいて構築した地震関連マイクロ波の放射モデルについて述べる。続いて、リモートセンシング衛星 Aqua に搭載のマイクロ波放射計 AMSR-E のデータ解析を通して、構築した放射モデルの妥当性を示す。

2. 岩石破壊実験 [8]

2.1. 実験設備

岩石破壊実験は、図 1 に示す装置を用いて、岩石試料を加圧して破壊することにより行った。コンプレッサによる圧縮力を制御器で制御しつつ、圧縮力をロードセルで測定している。最大 11 トンの力で、0.08mm/sec の変形に対応できる。岩石試料としては、それぞれ特徴ある

次の 4 種を用いた。いずれも円柱状で、直径 27mm、長さ 60mm である。

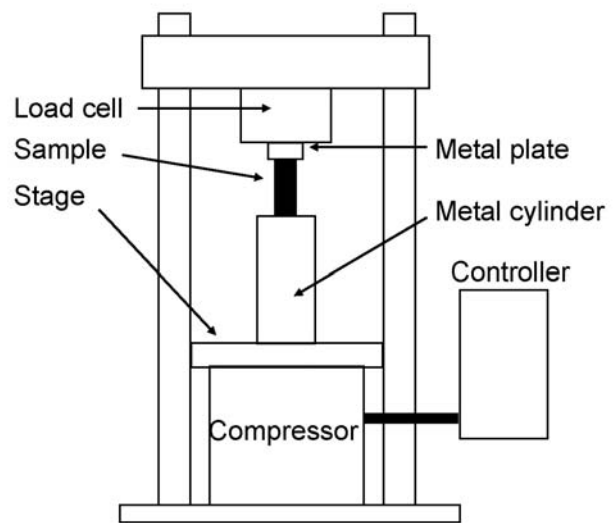


図 1 岩石破壊実験系

- ・珪岩
石英が組成の 9 割を占める。
- ・花崗岩
石英 3 割。陸の地殻で最も一般的である。
- ・斑レイ岩
石英を含まない。
- ・玄武岩
石英を含まない。海底の地殻で最も一般的である。

図 1 の装置周囲に、各周波数帯 (300MHz、2GHz、22GHz) のアンテナを配し、全体を電波吸収体で被った、受信機は電波吸収体の外側に置き、同軸ケーブルでアンテナと結んでいる。また破壊による状態変化を観るため、高速ビデオカメラを設置する。

メモリで制限される観測時間内で信号を捕まえるため、トリガー信号の発生法が重要である。本実験で 3 周波数帯のいずれかの信号が、ある設定値を超えた時に、トリガーを発生する回路構成とした。

2.2. 実験結果

破壊は殆ど瞬時に起る。ロードセルによる変化は図 2(a) に示されているが、立ち下りの速さ (図中 A) は現象そ

のものよりもロードセルの応答を表している。

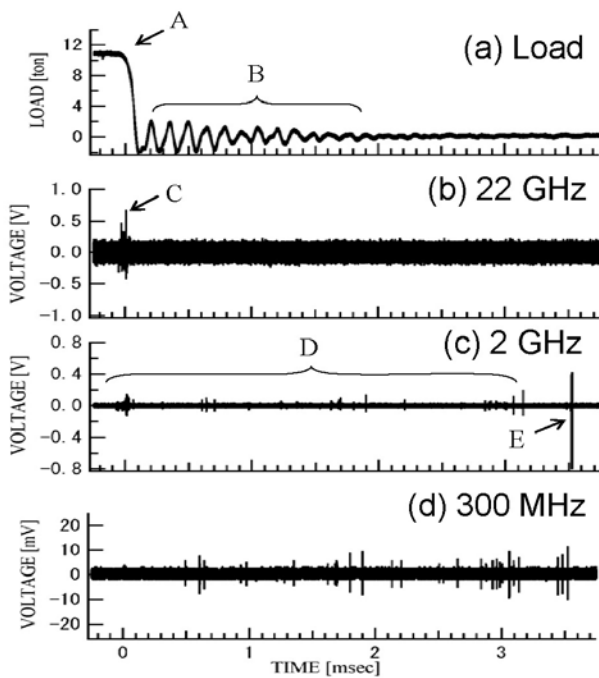


図2 珪岩珪岩破壊時のマイクロ波帯観測波形

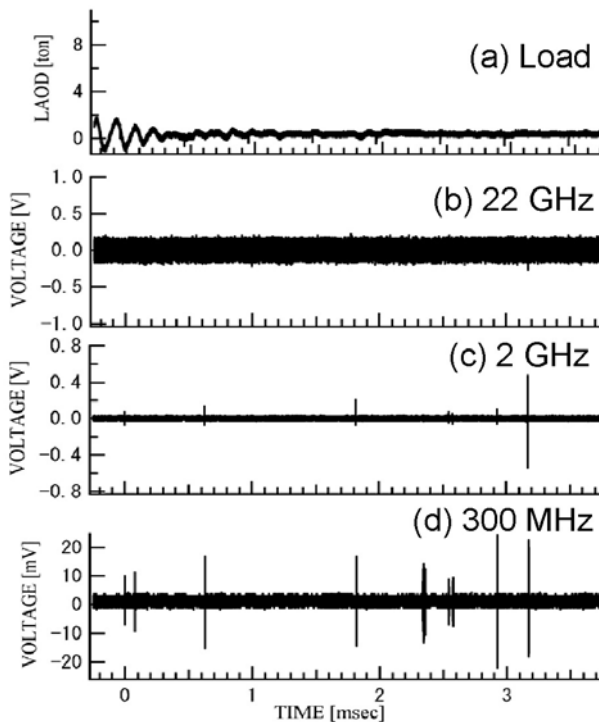


図3 斑レイ岩破壊時のマイクロ波帯観測波形

破壊に伴ったマイクロ波の波形を、珪岩の場合について図 2(b) ~ (d) に示す。22GHz では岩石破壊した直後 100 μ sec の間に、パルス波形が出て(図中 C)、その後は見当たらない。2GHz では、22GHz と同じ時間にパルス群がある(図中 D)が、その後散発的に現れ、観測時間 (3.7msec) まで続いている(図中 E)。300MHz では、

100 μ sec 付近にパルスが無く、それより後方でパルス密度が高くなっている。

斑レイ岩の破壊に伴うマイクロ波波形を、図 4 に示す。22GHz の信号は、ほとんど認められない。2GHz か 300MHz における 0msec 位置のパルスによりトリガがかかったと思われる。珪岩に比べ全体的にパルス数が少ないが、パルス高が高い。その結果、発生電力は珪岩とほとんど同じレベルである。

花崗岩においてはパルス数・高さ共に斑レイ岩より小さい。玄武岩では更に小さい。

2.3. 衛星による地震関連マイクロ波の検出可能性検討

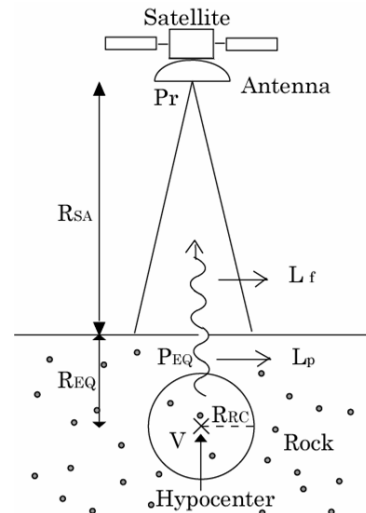


図4 地震によるマイクロ波放射モデル

図4は、地震に関連するマイクロ波を人工衛星に搭載した受信機によって検出するシステム構成を示している。この図において、各文字は、 L_p :地中での伝搬損失、 L_f :自由空間損失、 R_{EQ} :震源の深さ、 R_{SA} :衛星高度、 P_r :衛星での受信電力、 P_{EQ} :震源からの推定放射電力、 R_{RC} :岩石破壊半径、 V :破壊体積である。岩石破壊に伴うマイクロ波はパルス状に発生するが、数が十分多くなるとパルスが連続すると予想される。一方、火山噴火に際しても、溶岩や噴煙からは熱的マイクロ波が発生し、こちらは連続的な波形になると考えられる。いずれにせよパルス群がバースト的に発生する場合は、その包絡線が変化するので、低域フィルタを使う、あるいは包絡線時間内で積分するなどの方法でこれらのマイクロ波は抽出可能と考えられる。

衛星は低地球軌道上に有り、地球上をアンテナビームで走査しながら移動していく。震源近くの岩石破壊あるいは岩石擦れにより発生するマイクロ波は、まず地中を伝搬し、地表に出ると衛星まで自由空間を伝搬する。震源から人工衛星まで電波は、基本的に球面波状に広がって行く。そのため、衛星での受信電力 P_r は次式で与えられる。

$$P_r = P_e L_p L_f G_r \quad (1)$$

地中伝搬においては、岩石による吸収(誘電体損失)や、水分による吸収が有り、更に誘電率が一樣でないため散

乱損失も存在する。これらによる損失 L_p は、震源の深さや地下構成岩石、あるいは割れ目の有無等により、大きく異なる。

この時衛星で受信できるマイクロ波を、実験事実を基に推定する。実験で用いた試料岩石 27mm × 60mm 長なので体積 $3.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ である。全放射電力は、珪岩の場合、4msec にわたって平均して $1.6 \times 10^{-12} \text{ W}$ である。実際の岩石破壊が半径 1230m の球状に起ったとすると、体積比例で考えると $1.9 \times 10^3 \text{ W}$ のマイクロ波が発生する。式(1)から P_r は $9.1 \times 10^{-12} \text{ W}$ と小さい値となる。これに対し受信機内外で発生する雑音は、 $4.2 \times 10^{-13} \text{ W}$ と約 1/10 である。この S/N であれば、雑音の中からマイクロ波信号を十分認識できる。

3. リモートセンシング衛星の取得データの解析例 [9]



図5 リモートセンシング衛星 AQUA



図6 ラジオメータ AMSR-E

前節の推定結果を基に、リモートセンシング衛星 AQUA(図5.)に搭載のラジオメータ AMSR-E(図6.)のデータを実際の地震発生時にあわせて解析した。AQUA は、高度 705km で、16 日で地球全域を走査完了する。AMSR-E は、6.3GHz から 89GHz まで 6 周波数を観測できる。しかし電波干渉や天候の影響が少なく、かつ岩石破壊による電波が発生すると見られるのは、18.7GHz あるいは 23.8GHz である。18.7GHz において受信周波数帯域は 200MHz、アンテナ利得は 2.5×10^4 、地上のビ

ーム照射径は、16km × 27km 雑音電力は帯域全体で $4.2 \times 10^{-10} \text{ mW}$ である。

地震の一例は、モロッコで 2004 年 2 月 24 日に発生したものを選んだ。これは震度 6.4 で強い上に、震源が極めて浅く、地下が珪岩でできており、かつ断層が多く存在するためである。これらの条件により、岩石破壊に際しマイクロ波が十分発生し、式(1)の L_p が十分大きくなる(損失が少ない)と期待できる。図6は解析対象とする地域範囲を示すが、同時に地震発生地域の地勢も示している。震央(4.00°西、35.14°北)は海岸から 10km しか離れていないので、アンテナビームは震央を照射する時、海も視野に入れてしまう。震央周囲には、種々の断層や亀裂が走っていることが判る。

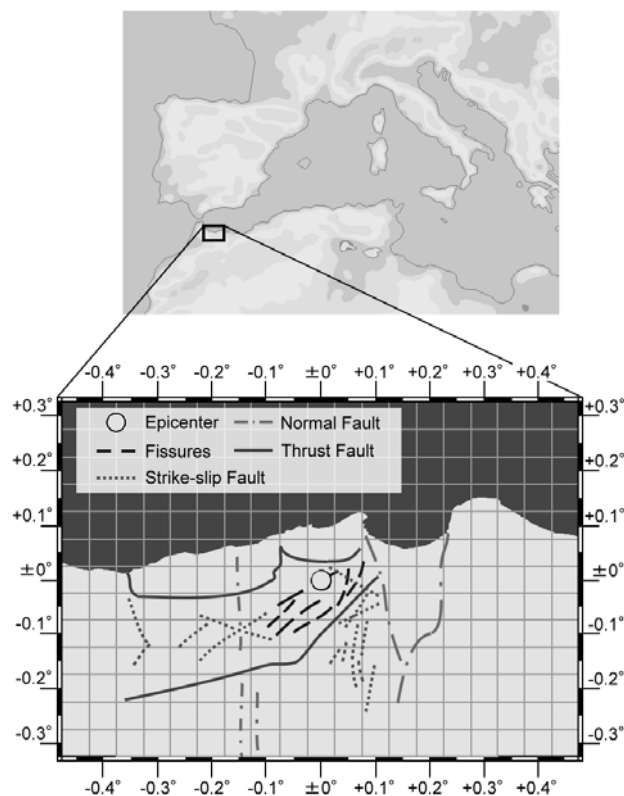
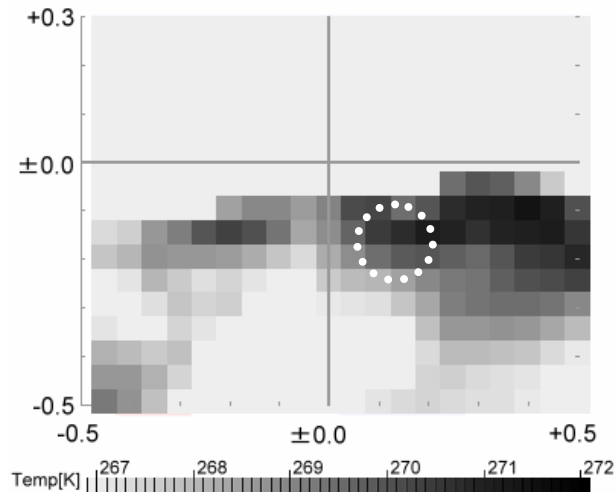


図7 モロッコで発生した地震の震央と周辺の断層

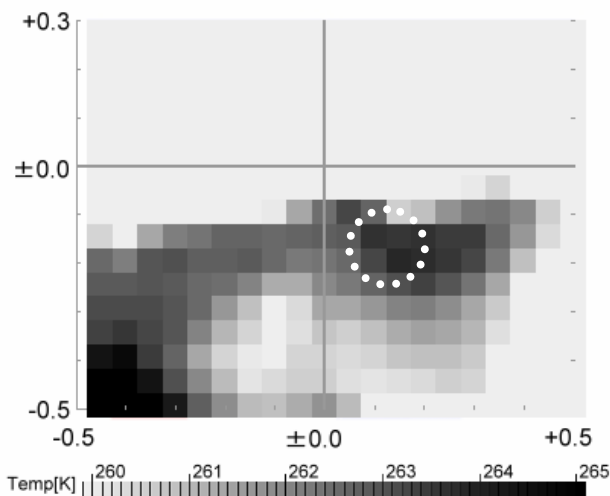
AMSR-E で取得したデータを、欠落データを補いつつ、輝度温度 T_b を等温表示する。地震発生日について示したものが、図8である。震央を座標原点にとっている。V 偏波は地表垂直面内の電界成分であり、H 偏波より高温に測定される。いずれの偏波においても、震央より 0.1° 東、0.2° 南の当り(図中 で示した領域)で T_b が増加していることが判る。この増加は、地震の2日前から現れて、4日後まで認めることができる。ただし、震源とマイクロ波発生点との位置関係、さらには地震(地面の揺れ)と岩石破壊・マイクロ波発生との関係等、今後検討する必要がある。

この輝度温度の変化分は 1 ~ 2 K と小さく、時々刻々の全体的な変化について埋もれている。この変化の要因として、雨や気温の時間的・空間的変動が大きい。ただ

マイクロ波は、空間的に限られた領域から発生すると考えられる。また時間的には、雨による土壌水分の変化や気温変化よりも速い変化をされると考えられる。従って、空間的な相関特性や時間的トレンドを解析することにより、地震によるマイクロ波を分離・抽出できると考えている。



(a) V 偏波



(b) H 偏波

図8 地震発生日における輝度温度 T_b の分布

4.まとめ

- (1) 静的圧力による物質破壊時にマイクロ波が発生する現象を世界で初めて確認した。
- (2) 観測されたマイクロ波はパルス状である。
- (3) 実験結果に基づいて地震関連マイクロ波放射モデルを構築した。
- (4) 構築したマイクロ波放射モデルによって、ラジオメータを搭載した人工衛星によって地震・火山噴火が探知できることを示した。

以上の結果から、探知専用の衛星や宇宙基地搭載設備を、検討

していきたい。

参考文献

- [1] Bianchi, R., Capaccioni, F., Cerroni, P., Coradini, M., Fla,omo, E., Hurrn, P., Martelli, G. and Smith, P. N. : Radofrequency emissions observed during macroscopic hypervelocity impact experiments, *Nature*, **308**, 830-832. (1984)
- [2] O'Keefe, S.G, Thiel, D.V. and Davey, N. P. : Fracture induced electromagnetic emissions in the minig industry, *Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics*, **12**, 203-209. (2000)
- [3] Geng, N., Deng, M. and Cui, C.: 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, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, 751-758. (1999)
- [4] Varotsos, P., Alexopoulos, K and Lazaridou, M. : Latest aspects of earthquakes prediction in Greece based on seismic electric signals, *Two, Tectonophysics*, **224**, 1-37. (1993)
- [5] Fraser-Smith, A. C., Bernardi, A., McGill, P. R., Ladd, M. E., Helliwell, R. A. and Villard, Jr., O. G. : Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the M_s 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1465-1468. (1990)
- [6] Molchanov, O., and Hayakawa, M. : Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **103**, 17, 489, 504. (1998)
- [7] Liu, J.Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J. and Tsai, H. F. : Variations of ionospheric electron content during the Chi-Chi earthquake, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 1383-1386. (2001)
- [8] Maki, K., *et al.*: An experimental study of microwave emission from compression failure of rocks, *Jour. of the Seismological Society of Japan*, **58**, 4, 375-384. (2006)
- [9] T. Maeda, T. Takano: Detection of Microwave Emission Associated with Earthquakes, S21A-03, AGU 2006, Joint Assembly, Baltimore, U.S. (2006)