

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05676

研究課題名(和文) 火成岩や堆積岩の衝撃破壊時に発生する電磁波の計測と、その発生メカニズムの解明

研究課題名(英文) Measurement of electromagnetic waves generated by impact fracture of igneous rocks and sedimentary rocks and solution of its mechanism

研究代表者

小林 秀敏 (Kobayashi, Hidetoshi)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：10205479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：最初の2年間では、人工水晶を用いた準静的および衝撃圧縮試験を実施し、応力-ひずみ関係および発生電磁波の計測を行った。その結果、試験片に割れが生じたと考えられる時に大きい振幅の電磁波が観測され、水晶内のき裂発生に伴って電磁波が発生していると考えられることや、水晶の圧縮強度に、ひずみ速度依存性があること、発生した電磁波は概ね253 kHzであること、等が明らかとなった。

最終年度の2017年度は、花崗岩、斑禰岩、閃緑岩の3種類の岩石について、立方体試験片を用いた準静的および衝撃圧縮試験を実施し、準静的および衝撃圧縮試験のいずれにおいても、圧壊破壊時に比較的大きい電磁波発生が確認された。

研究成果の概要(英文)：In first two years, we studied about the clarification of the relationship between the mechanical properties of synthetic quartz and the electromagnetic phenomena during its fracture. A series of uniaxial compression tests were carried out at quasi-static and dynamic rates. Not only the stress-strain curves but also the electromagnetic waves generated during the fracture of specimens were measured in a shield box made of permalloy plates. The dynamic compressive strength was greater than those in static tests and there is strain-rate dependence in their strength of synthetic quartz. It was also found that the electromagnetic phenomenon does not depend on the loading direction even at dynamic rate.

In the 3-rd year, some uniaxial compression tests for granite, gabbro and diorite were performed at quasi-static and dynamic rates. Relatively large electromagnetic waves were measured when these rocks fractured even at quasi-static rates.

研究分野：構造強度学、材料力学、植物バイオメティクス

キーワード：人工水晶 花崗岩 斑禰岩 閃緑岩 圧縮破壊 ホプキンソン棒法 電磁波 二点ゲージ計測法

1. 研究開始当初の背景

岩石が変形・破壊する際に電磁波が発生するという現象は古くからよく知られており、これを利用して、石油や鉱物などの資源探査や地震発生の予知[1~3]、地殻の調査等の試みがなされている。また、岩石の破壊や変形により発生する電磁的現象を解明するために、自作のアンテナを用いて、花崗岩や安山岩等7種の岩石の準静的一軸圧縮試験時に発生する電磁波を捕えた福井らの研究[4]や、花崗岩の破壊時に発生するAE波形を計測し岩石の帯電現象を捕えた堤らの研究[5]など、多くの研究が行われている。これらの研究から、電磁波発生メカニズムとして、岩石内の圧電物質による圧電効果説や、生成された破面同士の摩擦による摩擦帯電説、き裂表面の電荷の不均一分布による電荷分離説、磁性を帯びた物質の移動・振動による磁性体振動説など、様々な説が提唱されているが、真実の発見には至っていないようである。また、これまでの研究は、岩石の準静的な荷重下での変形や破壊に伴った電磁的現象に関するものが主で、曲げやせん断等の異なる変形モードにおける電磁的現象や、衝撃的な荷重下での変形や破壊により生じる電磁的現象に関してはほとんど調べられていない。火山の噴火や隕石の地球への衝突、宇宙空間での星の発生メカニズムである岩石の相互衝突など、岩石の衝撃的な変形や破壊を伴う自然現象は極めて多い。このような事象では、岩石や岩盤の力学的な応答とともに、動的な変形に関する電磁波の発生原因を明確にすることが極めて重要である。

研究代表者らは、最近、石英岩、大理石、砂岩の三種類の岩石試験片を用いて準静的および衝撃圧縮試験を行い、圧電物質である石英を含む石英岩、砂岩の破壊時に400k~1MHzの周波数を持つ電磁波が観測されるが、石英を含まない大理石では電磁波は観測されないこと[6]を明らかにした。そこで、この結果を踏まえて、圧電物質である石英の含有量の異なる二種類の岩石を用いて、摩擦、き裂発生、せん断等の現象が混在している圧縮試験に加え、破壊をモードIのき裂進展に限定できる曲げ試験をも実施し、岩石の機械的性質と負荷速度の関係や、岩石の破壊力学的パラメータと電磁的現象の関連性について、実験的検討を行った[6~9]。その結果、花崗岩については、破壊時の応力拡大係数の最大値と発生する電磁波の最大振幅により相関があること[8,9]や、破壊の際に摩擦が非常に少ない曲げ試験において電磁波の発生が観察されたことから、電磁波の発生は摩擦帯電説では説明できない可能性も示唆された。このように、深成岩の一部に関する破壊時の電磁的現象に関しては、次第に明らかにされてきているが、他の火成岩や堆積岩、あるいは石英自身に関する知見や、せん断試験等の他の力学条件における知見は得られておらず、これらも含めた岩石の電磁波に関する系統的研究が、今こそ、切に望まれている。

2. 研究の目的

- (1) 電磁波発生メカニズムと思われる石英の力学的挙動と電磁波発生との関連性について実験的検討を行い、併せて、様々な火成岩や堆積岩の準静的および衝撃圧縮試験を実施して、変形・破壊時に電磁波を発生する岩石とそうでない岩石に分別し、発生する岩石、発生しない岩石の共通成分や共通構造を明らかにする。
- (2) 岩石の破壊時のき裂進展速度と岩石自身の負荷速度を分離して取り扱うために、準静的圧縮破壊時に発生する除荷波を正確に評価することで、負荷速度とき裂進展速度との関係や、き裂進展速度と電磁波発生との関連性を明らかにする。
- (3) 片側切欠試験片を用いた衝撃三点曲げ試験や、段違い両側切欠試験片による衝撃剪断試験を実施し、破面の摩擦がほとんど無いモードIの開口破壊における電磁波発生や、剪断による破面摩擦が支配的なモードII破壊における電磁波発生について、実験的検討を実施する。

3. 研究の方法

- (1) ホプキンソン棒法による衝撃試験片
試験片は、図1(a)に示すように、人工的に製造され、天然石に比べ品質が安定している人工水晶を、ファインクリスタル(株)から提供を受け、異方性を確認する為に、光学軸(C軸)、電気軸、機械軸の3方向を圧縮面に持つよう、また、圧縮面の平行度は1/500以下(1つの試験片で高さ h のバラツキが10 μm 以下)になるように、一辺5mmの立方体試験片をワイヤーカットにより製作した。
- (2) 電磁波の計測法
電磁波の計測には、図1(b)に示すような直径10mmのフェライト棒に、直径0.4mmのエナメル線を約200回巻きつけた自作のフェライトコアアンテナを用いた。アンテナ出力測定時、周囲からのノイズを除去するために、アクリル板の周囲にパーマロイ薄板(厚さ0.1mm)を貼り付けたシールドボックスを用い、アンテナからの出力は284k~1MHzの周波数帯をもつバンドパスフィルターを介して差動増幅器で100~1000倍に増幅した後、デジタルオシロスコープに記録した。

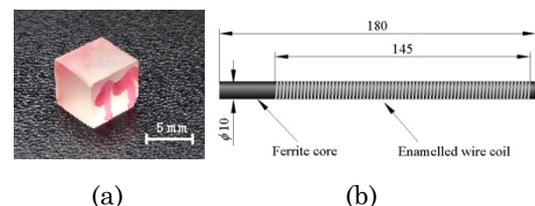


図1 試験片とアンテナ：(a) 人工水晶立方体圧縮試験片、(b) フェライトコアアンテナ

(3) 準静的試験法

準静的試験は、インストロン型万能試験機(島津 AUTOGRAPH, 100kN)に図2(a)に示すロードセル付きの圧縮治具を用い、クロスヘッド速度0.1mm/minで行った。ノイ

ズ対策の為に、シールドボックス内に入るアンビルは、端面にアルミナを埋め込んだ、直径 30 mm の非磁性材 SUS310 のロッドを用いた。

(4) 衝撃試験法

衝撃圧縮試験には図 2 (b)に示すスプリット・ホプキンソン棒法衝撃試験装置を用いた。打撃棒、入力棒、出力棒はいずれも SUS304 材で作られており、入力棒と出力棒の試験片側端面に準静的試験に用いたアンビルを取り付けて実験した。入力棒・出力棒には図に示すように、試験片側の端面からそれぞれ 815 mm, 210 mm 離れた位置にひずみゲージが貼られており、その出力をブリッジ回路、アンプ、を通してオシロスコープに記録した。実験では、圧縮空気により加速された打撃棒が入力棒に衝突し、入力棒に発生した圧縮応力波（入射波）が入力棒中を伝播して試験片に到達する。入射波の一部は試験片を透過して出力棒に伝播し（透過波）、残りは反射して引張波（反射波）となって再び入力棒を伝播する。ひずみゲージで測定したこれらの応力波から、試験片に作用する試験片の公称応力、公称ひずみ速度、公称ひずみ求めた。

4. 主な研究成果

(1) 人工水晶の準静的圧縮試験時の電磁波

図 3 に、ひずみ速度 $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ で行った準静的圧縮試験中の応力-時間曲線のギャップとその時に観測された電磁波出力を示す。ほぼ直線的に応力が増加途中で、局所的な急速破壊が生じて応力が急降下したとタイミングで電磁波が発生していることが確認できた。

(2) 衝撃圧縮試験結果と圧縮強度

図 4 は、 $300 \sim 400 \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度の衝撃圧縮試験から得られた人工水晶試験片の衝撃圧縮試験時の応力-ひずみ曲線で、光学軸、電気軸、機械軸の負荷方向の違いによる応力-ひずみ関係の大きな違いは認められず、いずれの方向の試験片も、圧壊強度までの直線的な応力上昇の傾きは概ね 45 GPa であり、破壊強度も $1400 \sim 1600 \text{ MPa}$ であること、また、準静的強度はいずれの負荷方向も概ね $1200 \sim 1400 \text{ MPa}$ で、衝撃強度より小さく、速度依存性があることがわかった（図 5）。

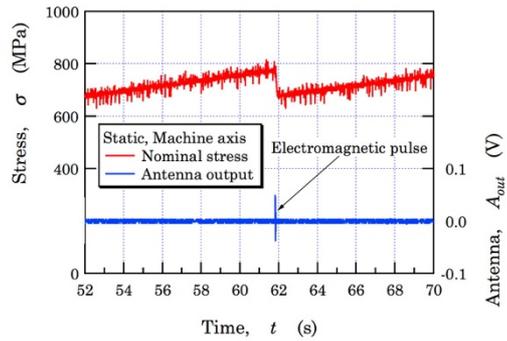


図 3 準静的試験中の応力変化と電磁波出力

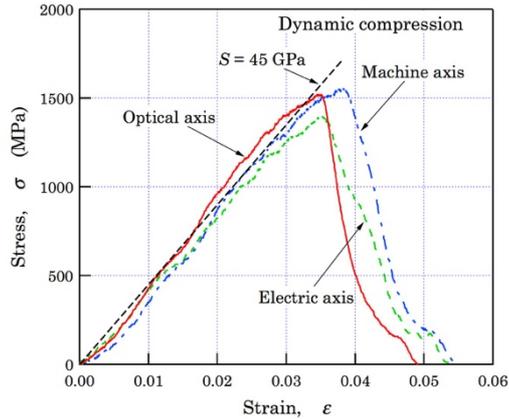


図 4 3 方向の人工水晶衝撃圧縮試験から得られた応力-ひずみ曲線

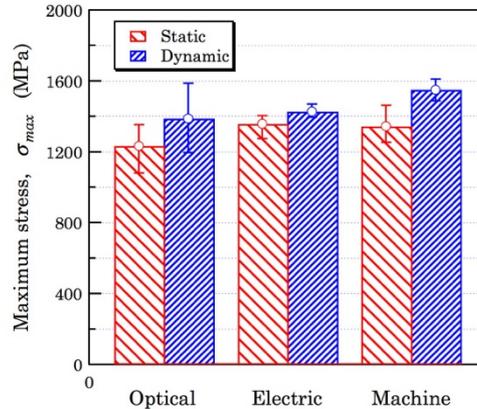


図 5 3 方向の人工水晶の準静的・衝撃圧縮強度

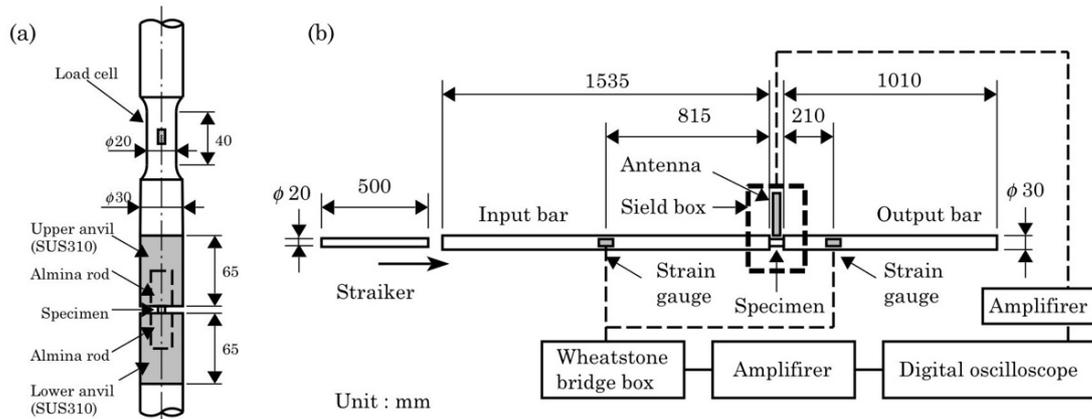


図 2 人工水晶の圧縮試験装置：(a) 準静的圧縮試験治具、(b) ホプキンソン棒型衝撃圧縮試験装置

(3) 衝撃圧縮試験時の電磁波

図6に、光学軸方向に衝撃圧縮した人工水晶試験片の応力—時間曲線、ひずみ速度—時間曲線と、同時に観察された電磁波—時間曲線を示す。この図から、電磁波は変形の初期段階から発生しており、衝撃的負荷の場合は、たとえ負荷された応力が小さく水晶の破壊が生じていない場合でも、電磁波が発生すると思われる。これは、水晶が圧電物質であり圧力により表面電荷が発生し、それにより電磁波が誘起されたのではないかと考えられる。ピーク直後に再び電磁波の振幅が大きくなっているのは、準静的試験でも観察されたように、水晶の破壊により電磁波が発生したと考えられる。また、機械軸、電気軸方向に負荷した場合も、同様の傾向が見られ、このような水晶の変形や破壊に伴う電磁波の発生現象は負荷方向に関係しないことがわかった。

(4) 電磁波の最大振幅と振動数

図7に、衝撃圧縮試験で観察された電磁波の最大振幅と振動数の関係を示す。○印は光学軸、■印が電気軸、▲印が機械軸の結果で、いずれの方向のデータも、観測された電磁波の最大振幅は1～30 mVの範囲で分散しているが、電磁波の振動数はほぼ同じで、平均はおおよそ254 kHzであった。発生電磁波の振動数が負荷方向に依存しない傾向は、破壊強度や変形初期のひずみによる応力変化率の傾向と一致している。

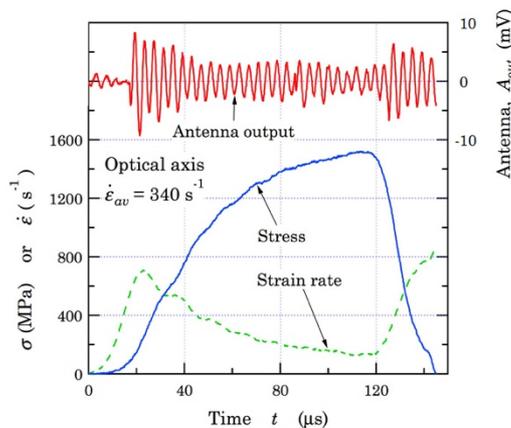


図6 衝撃圧縮時に観察された、応力、ひずみ速度、および電磁波の時間的変化

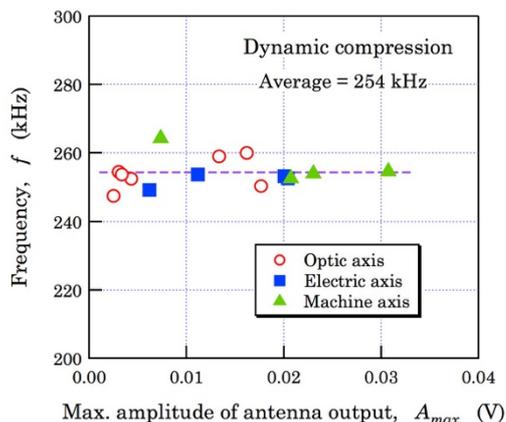


図7 人工水晶の電磁波の最大振幅と振動数の関係

参考文献

- [1] J.W. Warwick, C. Stoker and T.R. Meyer, “Radio emission associated with rock fracture: possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960”, *J. Geophys. Res.*, Vol.87, pp.2851–2859, (1982)
- [2] P. Varotsos & K. Alexopoulos, “Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I”, *Tectonophysics*, Vol.110, No.39815, pp.73-98 (1984)
- [3] M. Hayakawa, K. Hattori and K. Ohta, “Observation of ULF geomagnetic variations and detection of ULF emissions associated with earthquakes”, *Elect. Eng. in Jpn*, Vol.162, No.4, pp.1238-1244 (2008)
- [4] K. Fukui, S. Okubo, and T. Terashima, “Electromagnetic wave emission in uniaxial compression testing”, *Journal of MMIJ*, Vol.117, pp.703-710 (2001)
- [5] A. Tsutsumi, S. Tanaka, N. Shirai and Y. Enomoto, “Electric signals accompanying fracture of granite”, *Japanese Journal of applied physics*, Vol.42, pp.5208-5212 (2003)
- [6] K. Watanabe, K. Ogawa, K. Tanaka, H. Kobayashi & K. Horikawa, Electromagnetic phenomena associated with dynamic deformation and fracture of rocks, *Proc. DYMAT 2009*, pp.757-763 (2009).
- [7] K. Tanaka, K. Ogawa, H. Kobayashi, K. Watanabe, S. Yamashita & K. Horikawa, “Strength and electromagnetic phenomena in impact compressive and bending deformation of rocks”, *J. Soc. Mater. Sci. Jpn.*, Vol.58, pp.910-916 (2009).
- [8] H. Kobayashi, K. Ogawa, K. Horikawa and K. Watanabe, “Fracture Behavior Accompanying Electromagnetic Waves of Granite in Dynamic Three Point Bending”, *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, Vol.5, No.11, pp.873-881 (2011).
- [9] H. Kobayashi, K. Ogawa, K. Horikawa and K. Watanabe, “Impact compressive and bending behavior of rocks accompanied by electromagnetic phenomena”, *Philosophical Transactions Royal Society A*, Vol.372, 20130292 (2014).

5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(計1件)

Hidetoshi Kobayashi, Keitaro Horikawa, Ken-ichi Tanigaki and Kinya Ogawa, Impact compressive fracture of synthetic quartz accompanied by electromagnetic phenomenon, *Key Engineering Materials*, Vol.715, pp. 13-20, 2016, DOI: 10.4028/www.scientific.net/ KEM.715.13

① H. Kobayashi, Impact Compressive

Fracture of Synthetic Quartz Accompanied
by Electromagnetic Phenomenon, 9th
International Symposium on Impact
Engineering (ISIE 2016), 2016.09.05 ~ 09,
Tainan, Taiwan, Invited

② 大内智貴、谷垣健一、堀川敬太郎、小林秀敏、
岩石の圧縮破壊現象と発生する電磁波、
2017 年度関西学生会卒業研究発表講演会、
2018.03、摂南大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 秀敏 (KOBAYASHI Hidetoshi)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：10205479

(2)研究分担者

堀川敬太郎 (HORIKAWA Keitaro)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号：50314836

谷垣 健一 (TANIGAKI Ken-ichi)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号：40631875