

珪岩・水晶・溶融石英の破壊に伴う発光の色について — 結晶の圧電性の寄与 —

三井 雄太

北海道大学大学院理学研究院

柳谷 俊

元・京都大学防災研究所

(2011年12月26日受理)

On the differences of fractoluminescence color among crystalline quartzite, quartz crystal and fused silica — contribution of piezoelectricity —

Yuta MITSUI

Graduate School of Science, Hokkaido University

Takashi YANAGIDANI

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

(Received December 26, 2011)

We observed clear fractoluminescence in crystalline quartzite, quartz crystal and fused silica at uniaxial compressional loading tests by commercial digital cameras. These fractoluminescence are composed of blue and red colors. In particular, a blue color does not appear in fractures of fused silica but appear in crystalline quartzite and quartz crystal, which implies that the piezoelectric charge and discharge play a key role in the blue-color fractoluminescence via excitation of N_2 molecules.

I. はじめに

物質の破壊に伴う発光は普遍的な物理現象と考えられる。これに関係する地球科学現象として、断層のすべり破壊に伴う発光現象の存在可能性と、その物理メカニズムとが長きにわたって議論されてきた (Terada, 1931; Derr, 1973)。しかし、自然地震に伴う発光現象はそのおおよそが目撃情報であり、その物理メカニズムを論ずることのできる観察事例が非常に少ないという問題がある。

これに対し、室内実験では、破壊時の発光現象を容易に観察可能である。たとえば Brady and Rowell (1986) は、モノクロの高速度カメラを用いて岩石の破壊の瞬間を撮影し、発光現象の観測に成功した。彼らは発光の物理メカニズムとして、破壊面からのエキソ電子の放射による大気分子の励起を提唱した。同種の実験は Martelli et al. (1989) によっても行われ、同様の結論が提示された。

一方、Kato et al. (2010) は、市販のカラーデジタルカメラを用いて岩石の破壊の瞬間を撮影し、発光の色情報を報告した。特に、花崗岩の破壊時に観察された青色発光に対し、花崗岩に含まれる石英結晶の圧電チャージと、その破壊時の放電に伴う大気分子の励起が寄与していることを主張した。しかしながら、花崗岩中に含まれる石英結晶の圧電現象の発光への寄与は、Brady and Rowell (1986) の論文では否定された発光メカニズムであり、両者の結論は矛盾している。このことに決着をつけるため、より単純で透明な純石英系の破壊実験を行うことが必要であると考えた。

本研究では、Kato et al. (2010) の観察に続けて、一軸圧縮破壊試験を行い、市販のデジタルカメラを用いて破壊発光を捉えた。試料として、複雑な組成を持つ岩石ではなく、石英の多結晶体である珪岩、人工的に生成された水晶および熔融石英を用いた。これらの試料は化学成分としてはすべて SiO_2 であるが、前者 2 つは結晶質で最後 1 つは非晶質、という違いがある。

II. 実験の手法

破壊時発光の観察には市販のデジタルカメラ (Canon 社 EOS10D) を使い、試料の破壊に伴う発光を捉えるために、3 秒間ずつの露光で連続的に撮影した。試料の破壊強度は事前には予測困難であるため、三台のカメラのいずれかが常に試料を撮影しているように、PC でコントロールした。セットアップを Fig. 1 に示す。

試料として、まざインド産の珪岩を直径 29.5 mm 長さ 47.0 mm の円柱状に整形した。これを試料 1 と呼ぶ。次に、市販の熔融石英 (直径 16.0 mm 長さ 30.0 mm の円柱) を用意した。これを試料 2 と呼ぶ。さらに、熔融石英 (直径 30.0 mm 長さ 29.0 mm) の円柱試料 2 つの間に、人工的に生成された水晶 (直径 28.0 mm 長さ 6.0 mm) を挟む試料を用意した。これを試料 3 と呼ぶ。水晶はいわゆる圧電 X 軸に対して垂直に切り出されている。試料 1 が白色半透明、試料 2・3 が無色透明であるので、不透明な岩石試料の場合と異なり、試料内部で生じた発光の観察も可能となる。

III. 実験結果

本研究で発光現象の時間分解能は、上述の手法から、3 秒である。これに対して一軸圧縮試験における主破壊の継続時間はマイクロ秒オーダーの瞬間的現象であると考えられる (Brady and

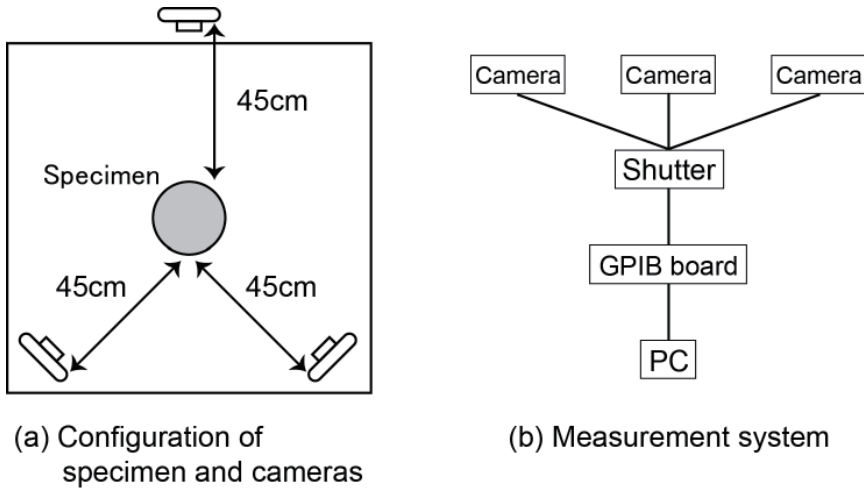


Fig. 1. Setup diagram of the experiments. The whole system is under dark-room environments.

Rowell, 1986). そのため、破壊進展の詳細な過程を捉えることはとうていできないが、破壊時発光の色を調べるには、破壊の瞬間が3秒の露光フレーム内に収まっているエポックを取り出せばよいと考えられる。

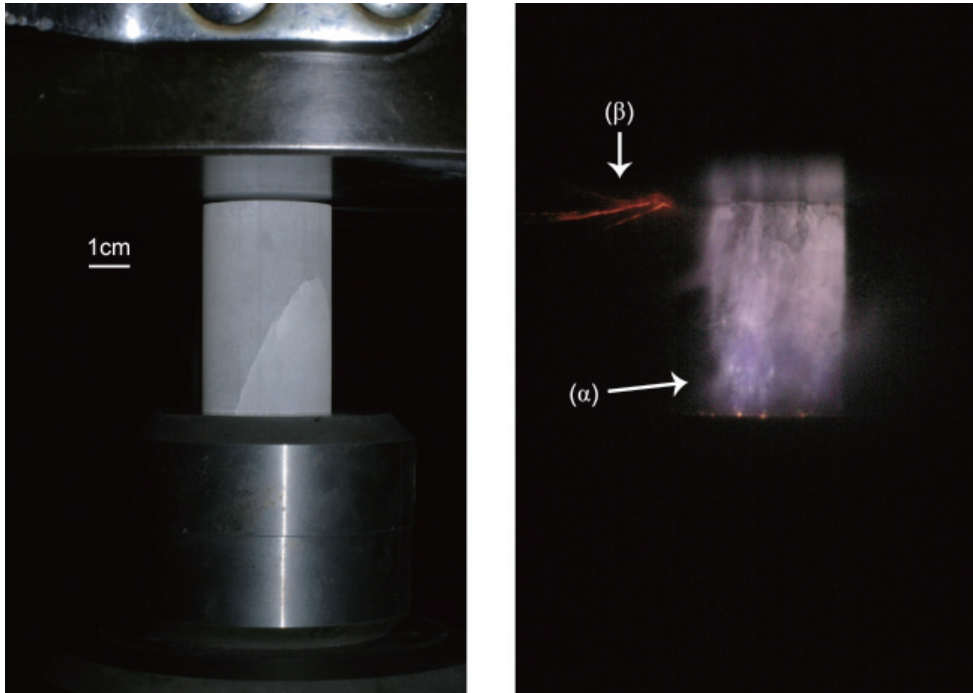


Fig. 2. Fractoluminescence of Specimen 1 (crystalline quartzite). Uniaxial compression is loaded vertically. The left figure is the photo before experiment, and the right figure is the photo of the luminescence. The loaded force at the fracture was 27 t.

まず試料1（珪岩）の破壊に伴う発光の様子を Fig. 2 に示す．右図からわかるように，発光は試料全域を覆っている．その色は図中(α)のように青みがかった白色となった．一方，図中(β)のように，試料の位置外において赤色の閃光のような発光も観測された．

次に，試料2（熔融石英）の破壊に伴う発光の様子を Fig. 3 に示す．やはり発光は試料全域を覆っている．その色は赤みがかった白色で，Fig. 2 図中(α)の青みがかった白色とは異なったものと考えられる．この点についてさらに確認するため，試料3（熔融石英2つに挟まれた水晶）での試験を行った．

Fig.4 に試料3の破壊に伴う発光の様子を示す．この場合も発光は試料全域に渡っており，(a) 青みがかった色 (b) 赤紫色 (c) 橙色の3種類が存在することが視覚的にわかる．このうち，(c) のみは明確に試料外の位置に発現していて，噴霧状に広がっている．

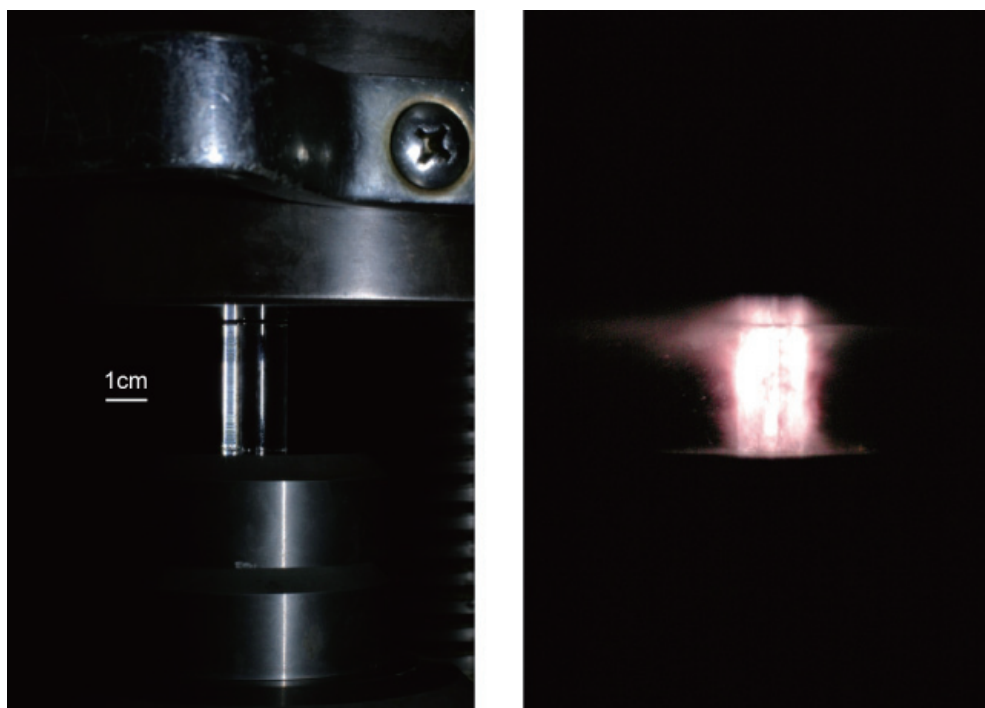


Fig. 3. Fractoluminescence of Specimen 2 (fused silica). Uniaxial compression is loaded vertically. The left figure is the photo before experiment, and the right figure is the photo of the luminescence. The loaded force at the fracture was 17.5 t.

III. 発光の分類

破壊に伴う発光現象は，試料1（珪岩）・試料2（熔融石英）・試料3（熔融石英2つに挟まれた水晶）のそれぞれにおいて幾種類も存在するという結果を得た．これらの分類を試みる．発光

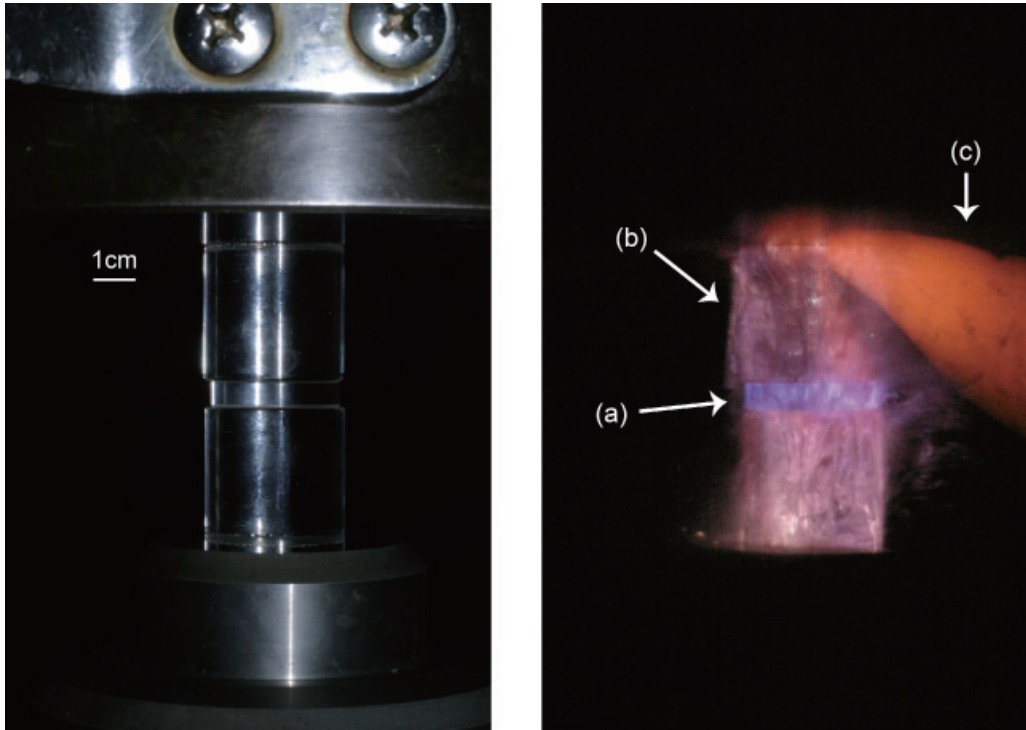


Fig. 4. Fractoluminescence of Specimen 3 (quartz crystal sandwiched by two fused silica). Uniaxial compression is loaded vertically. The left figure is the photo before experiment, and the right figure is the photo of the luminescence. The loaded force at the fracture was 14.9 t.

の色成分について、本研究の手法では、正確な分光測定に基づいた議論をすることができない。一方、デジタルカメラの画像上の色情報は、RGBの値（各成分とも8 bit, 256段階）でピクセルごとに与えられている。これは、レンズから入った光にR, G, Bの色フィルターをかけて、その強さを記録したものである。そのため、この画像上のRGB値を簡易分光の結果として分析に用いることができることが知られている（Kato et al., 2010）。

まず、試料2の発光および試料3うち(b)の発光については、熔融石英自体の破壊に起因する同じものと考えられる。これらの発光色を画像上でRGB解析すると、概ねR値が他に比べて卓越しており、 $R:G:B = (1.5 \sim 2) : 1 : 1$ 程度の関係にある。このことから、これらの発光を以下で<赤>として、分類する。

次に、試料1のうち(a)の発光および試料3のうち(a)の発光を見る。これらは、天然の珪岩・人工的な水晶という違いこそあれ、石英結晶の破壊に伴う同種のものとして推定される。これらの発光色をRGB解析すると、全体としてG値が他に比べて小さい傾向を持ち、 $R:G:B = (1 \sim 1.5) : 1 : (1 \sim 1.5)$ 程度の値を取っている。このことから、以下この種の発光を<青>としてまとめる。

最後に、試料1のうち(b)の発光と、試料3のうち(c)の発光について考察する。これらは共

Table 1. Classification of the observed fractoluminescence.

Specimen	Name	R:G:B	Location
2 and 3(b)	<Red1>	(1.5~2):1:1	On specimen
1(α) and 3(a)	<Blue1>	(1~1.5):1:(1~1.5)	On specimen
1(β)	<Red2>	(4~5):(1.5~2):1	Out of specimen
3(c)	<Red3>	(4~5):(2~3):1	Out of specimen

に試料の位置外に発現したという特徴をもつ。しかし、形状(閃光状か噴霧状か)や画像上の色(赤か橙か)を考慮すると、必ずしも同種のものとして認定して良いとは言えない。そのため、以下、試料1のうち(β)の発光を<赤二>、試料3のうち(c)の発光を<赤三>と呼称する。

以上の分類について、Table 1 にまとめた。

IV. 発光の物理メカニズムについて

まず、石英結晶の試料でのみ観察された<青一>の発光について議論する。この結果は、<青一>の発光が、石英結晶にはあって熔融石英にはない性質・物性に由来することを強く示唆する。すなわち、我々はKato et al. (2010)と同様、石英結晶の圧電性が重要であると考え。圧電性は、非晶質な熔融石英にはない性質である。

圧電電荷がどのように<青一>の発光を生じさせるかのプロセスについて、本研究で詳細かつ決定的な議論を行うのは難しい。しかし、我々が冬季に経験する摩擦放電の色が青色であることを考慮すれば、最終的に<青一>発光のメカニズムとして、圧電によってチャージされた電荷が破壊時に分離されることに伴う局所的な放電・大気分子の励起、が有力なシナリオであろう。地球大気での放電励起は、 N_2 分子のセカンド・ポジティブ・バンドと呼ばれる遷移帯の固有励起スペクトルを卓越させることがわかっており (Salenave, 1980)、これらは可視光領域の短波長側から近紫外領域の周波数を持つ。青色成分の強い発光は、このメカニズムと調和的と考えられる。

次に、<赤一><赤二><赤三>の赤系統の発光について考察する。まず<赤二>は、発現位置が試料から遠く離れていることから、試料の破壊時の現象というよりも、破壊後の試料飛散に伴う二次的な発光現象と考えられる。色が可視光領域の長波長側から赤系統であるため、一つのメカニズムとしては、試料破片と試験機の衝突に伴う瞬間的高温化に伴う電磁波放射が考えられる。同様のメカニズム(瞬間的高温化)は、<赤一><赤三>の発光についても説明可能である。しかし現在の実験セットアップでは、それ以上の議論は難しい。また、このような高温化発光のメカニズム(温度依存の電磁波放射)は破壊に普遍的に伴うので、石英結晶の破壊にも当然重畳するはずである。<青一>についてもこのメカニズムの発光色への寄与はあると考えられる。

V. まとめと考察

我々は、室内での岩石一軸圧縮破壊試験を行い、石英 (SiO_2) 結晶および熔融石英の破壊に伴う発光について、デジタルカメラで露光撮影した。その結果、石英結晶の破壊に伴って試料上に現れる青色系の発光<青一>と、どちらの場合の破壊にも伴ってくる赤色系の発光<赤一><赤二><赤三>とに発光を分類できた。それぞれの主たるメカニズムとして、前者には石英の圧電チャージからの放電に起因する大気中 N_2 分子の励起、後者には破壊に伴う局所的な高温化を考えた。

本研究で観測された発光は、実験室スケールでの破壊に伴う coseismic な現象と考えられる。一方、自然地震においては、preseismic な発光現象に関する報告も存在する (たとえば Derr, 1986)。また、発光現象のみならず、さまざまな周波数域において preseismic な電磁気学的シグナルの存在についてはこれまでに議論されてきており (Park et al., 1993)、岩石に含まれる石英鉱物の圧電現象が寄与している可能性も示唆されてきた (Ogawa et al., 1985)。

こういった、天然の複雑な環境下で preseismic に起こる (かもしれない) 現象と、本研究で観察された実験室での破壊発光とを同一のものとするのは、まだ早計である。しかし、石英結晶の圧電現象のような物理過程が地震時発光に寄与する可能性は十分考えられる。実験や理論に基づいたフォワードから発光の素過程について理解を深めていくことは今後とも重要であろう。

文 献

- Brady, B. T. and G. A. Rowell, 1986, Laboratory investigation of the electrodynamics of rock fracture, *Nature*, **321**, 488-492.
- Derr, J. S., 1973, Earthquake lights: A review of observations and present theories, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **63**, 2177-2187.
- Derr, J. S., 1986, Luminous phenomena and their relationship to rock fracture, *Nature*, **321**, 470-471.
- Kato, M., Y. Mitsui and T. Yanagidani, 2010, Photographic evidence of luminescence during faulting in granite, *Earth Planets Space*, **62**, 489-493.
- 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.
- Ogawa, T., K. Oike and T. Miura, 1985, Electromagnetic radiations from rocks, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6245-6249.
- Park, Stephan. K., Malcolm J. S. Johnston, Theodore R. Madden, F. Dale Morgan and H. Frank Morrison, 1993, Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observations and mechanics, *Rev. Geophys.*, **31**, 117-132.
- Salenave, Leon E., 1980, *Lightning and its spectrum*, The University of Arizona Press.
- Terada, T., 1931, On luminous phenomena accompanying earthquakes, *Bull. Earthq. Res. Ist.*, **9**, 225-254.