

令和 4 年 4 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05344

研究課題名(和文)長石の人工熱発光現象の地熱資源探査技術への展開

研究課題名(英文) Application of artificial thermoluminescence of feldspar to geothermal resource exploration technology

研究代表者

平野 伸夫 (HIRANO, NOBUO)

東北大学・環境科学研究科・助教

研究者番号：80344688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：長石類の熱発光挙動について、NTL(天然TL)およびATL(人工放射線照射TL)の検討をおこなった。通常の地熱兆候探査で用いられている石英と比較して、長石NTLは微弱であるが、地熱の影響をある程度検出できていることを確認した。また長石ATLについては、地熱の影響をより明確に検出することが可能であった。この結果、石英と比較すると精度で劣るものの、長石によると地熱兆候探査は可能であると結論づけられた。次に実証のため、中米エルサルバドルのアワチャパン地熱地帯において長石を利用した地熱兆候中心の推定をおこなったところ、既存の地熱発電所や火山の位置と整合するような結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

石英TLを用いた地熱兆候探査はほぼ実用化されてきたが、当然ながら石英を産出しない場所では適用できない。しかし、長石についても石英と同様に地熱兆候探査に使用できることが判明したことから、この調査を適用できる地域を拡げることができた。また、この探査方法は他の地熱探査と比較して探査コストが非常に低いことから、本格的かつ高額な地熱探査をおこなう前に探査地域を絞り込むためのスクリーニング方法として非常に有効である。

研究成果の概要(英文)：The thermoluminescence behavior of feldspar NTL (natural TL) and ATL (artificially irradiated TL) was investigated. Compared to quartz, which is usually used in geothermal signature surveys, the geothermal effects of feldspar NTL were detected to some extent, although the effects were weak. The feldspar ATLs were able to detect the geothermal effects more clearly. As a result, it was concluded that geothermal signatures can be detected using feldspar, although the accuracy is inferior to that of quartz. Finally, We estimated the center of geothermal signature using feldspar in the Ahuachapn geothermal field in El Salvador, Central America, and obtained results consistent with the locations of existing geothermal power plants and volcanoes.

研究分野：地球化学

キーワード：長石熱発光 Thermoluminescence Feldspar 地熱探査 エルサルバドル

1. 研究開始当初の背景

近年では再生可能エネルギーの開発や利用促進が急務であると言える。この再生可能エネルギーの中でも地熱発電はベースロード電源として有効である。この開発を行うための最も初期の段階が地熱兆候探査であるが、この主な方法として、MT や自然電位などの電磁気探査、地震波探査、重力探査などが挙げられるが、どの探査も技術的なハードルや探査コストが比較的大増する傾向があるため、可能であれば地熱資源が存在することが確定してからの精査に活用することが望ましい。今回の研究の核となる技術である熱発光を用いた地熱探査は、地表踏査によって収集した鉱物を使用するものであり、前述した探査方法と比較して技術的なハードルや探査コストが明確に小さい。よって、地熱兆候地域の初期スクリーニングや、地熱資源が存在するが探査コストをあまりかけられない途上国での地熱探査に活用できると考えられる。

この鉱物熱発光による地熱探査方法については、石英を使用した方法がほぼ確立してきている。そのため、石英が存在しない、あるいは存在量が非常に少ない地熱兆候地域への適用が困難とされていた。一方、石英の他に長石類についても熱発光を示すことが知られているが、石英と比較して発光量が小さいためこれまであまり研究がなされてこなかった。しかし、この長石類が石英と同様に地熱兆候探査に使用可能であれば、熱発光による地熱兆候探査をさらに発展させることが可能であると考え、長石の熱発光について詳細な検討をおこなうこととした。

2. 研究の目的

地層岩石中に含まれる石英・長石等の鉱物は、結晶化後に自然放射線により結晶内部にエネルギーを蓄積していくが、このエネルギーは加熱によって光として解放される。これを熱発光 (Thermoluminescence, TL) と称し、過去には主として石英が地質試料の年代測定に用いられてきた。一方で、この現象は熱にきわめて鋭敏な現象であることから、地熱地域での石英の TL 挙動を観察することにより、地熱中心領域や熱水上昇領域など、熱源位置情報の推定が可能である事が見いだされ、新たな地熱探査法として活用されはじめている。しかし、石英の存在しない地質に対してはこの方法は適用できていない。従って、石英以外の鉱物においても適用可能であれば、熱発光を用いる地熱探査方法としてさらなる発展が期待できる。本研究では、この石英以外の鉱物として地熱地帯に普遍的に存在する長石に着目し、地熱探査への応用について検討する事を目的とする。

3. 研究の方法

長石そのものは自然放射線による自然熱発光 (NTL) が非常に微弱であると考えられるため、人工的に放射線を照射して熱発光を生じさせる人工熱発光 (ATL) の手法を適用する事も視野に入れる。この ATL については長石結晶の結晶構造や格子欠陥などの量に影響を受けると考えられ、また、この影響は長石が受けた熱量や熱水等による変質を反映していることが期待される。よって、これらの関係性を明らかにする事ができれば、長石 ATL の地熱兆候探査への応用が期待でき、さらには石英の産出しない場所での TL 探査への展開も期待できる。

上記を考慮して本研究は以下の方法でおこなった。

a) 長石を様々な条件で加熱あるいは熱水変質させる室内実験をおこない、熱影響が長石 TL に与える影響を明確にする。このために、微弱発光の検出方法の検討や発光波長の分光観察をおこない、長石の挙動を明確にする。

b) 上記 a の結果を基にした実際の地熱兆候探査へ応用として、エルサルバドル共和国の地熱地帯における長石試料を用いた評価をおこなう。これは、これまで同国の地熱地帯で得られた地質試料にはほとんど石英が含まれず石英 NTL が適用できないが、長石は多く含まれているためである。これらの結果から長石 TL による地熱兆候評価方法の確立を最終的な目的とする。

まず (a) では TL 評価のパラメータとして、これまでは発光量のみに着目していたが、この発光量に加えて発光波長の分光計測をおこない、評価の一つとして加える。発光波長は結晶内部の格子欠陥などによる不対電子の状態 (エネルギー準位) に左右すると考えられるため、これにより鉱物結晶がどのような熱変質を受けたか、たとえば熱だけの影響を受けたのか (格子欠陥が生じる蓋然性が低い)、それとも熱水の影響 (変質) を受けたのか (格子欠陥が生じる蓋然性が高い) 等の情報が得られる可能性がある。また、これらの情報が得られることが判明すれば、既存の石英 NTL または ATL の地熱兆候評価方法にフィードバックし応用が可能である。(b) では a で得られた結果をもとに、長石 ATL の有効性と実現性を確実に評価する。(c) では現在 SATREPS プロジェクトにおいて調査が進められているが、この調査結果を利用して、石英 NTL 適用不可地域における長石 ATL の有効性を実証する予定である。

4. 研究成果

4-1. 長石類（カリ長石および斜長石）の天然熱発光強度および波長分光結果

まず、参考のため石英熱発光のグローカーブ（加熱温度に対する発光光量）および発光波長分布を図1に示す。これによると加熱温度175 付近から発光が開始し、300 付近で最大発光を示した後は発光強度が減少する。この時の最大発光強度は約27であった。また、発光波長については約550nmから750nmであった。

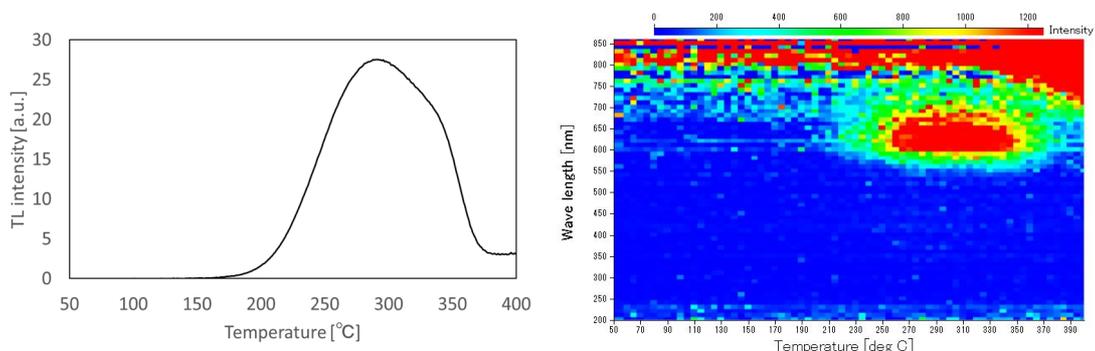


図1 石英熱発光グローカーブ（左）と発光波長分布（右）

次に、カリ長石のグローカーブおよび発光波長分布を図2に示す。これによると石英とは異なり加熱温度125 付近から発光が開始し、240 付近で最大発光を示したあとは石英と同様に発光強度が減少する。最大発光強度は約9.2を示し、石英のそれと比較すると約1/3であった。また、発光波長についても石英とは異なり200~300 において350~750nm, 300 以上では550~700nmの発光が観察された。

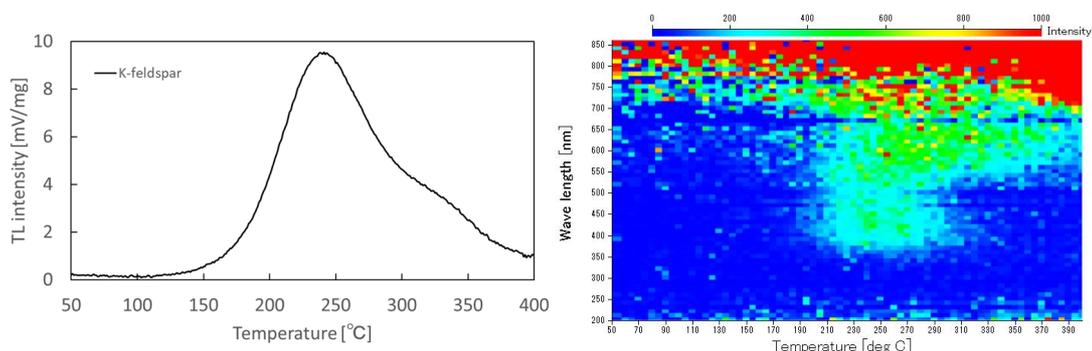


図2 カリ長石熱発光グローカーブ（左）と発光波長分布（右）

最後に斜長石のカリ長石のグローカーブおよび発光波長分布を図3に示す。これによると、発光強度については検出可能であったが非常に小さな値を示す結果となった。発光挙動そのものはほぼカリ長石と同様であるが、100 から200 において発光が観察されないのは、発光強度が小さいため検出できなかったと考えられる。最大発光強度は約0.7であり、石英の1/50、カリ長石の1/15程度であった。発光波長については発光強度が非常に小さいため識別が困難であるが、250 以上では主に300~400 nmと600~700nmで発光していると考えられる。

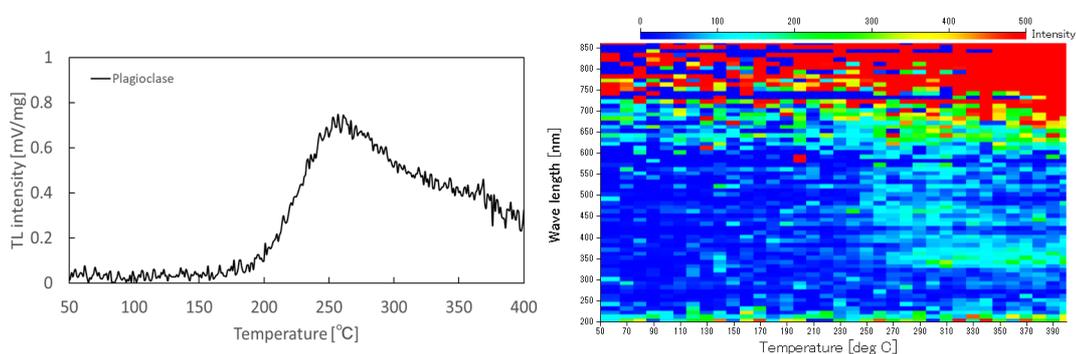


図3 斜長石熱発光グローカーブ（左）と発光波長分布（右）

これらの結果から、人工放射線照射による人口熱発光をおこなわない場合でも、グローカーブを観察することが可能であることが判明した。

3-2. 長石類の加熱による熱発光量減衰に関する評価

長石類の熱発光測定が十分に可能であることが判明したため、長石の加熱時間に対する発光量の減衰に関する検討をおこなった。実験については、カリ長石および斜長石試料を加熱温度 60, 90, 125, 150, 200 で最大約 18 ヶ月のあいだ保持し、途中数週間から数ヶ月ごとに試料を熱発光測定に必要な量だけ取り出して測定をおこなった。図 4 にカリ長石、図 5 に斜長石、図 6 に石英の実験結果を示す。図の縦軸が発光強度であるが、実験開始前の発光強度を 1 とした相対強度で示している。これによると、正長石、斜長石は両方とも加熱温度および加熱時間に比例して発光強度が小さくなる傾向が観察された。この傾向は石英の実験結果とほぼ同じであったことから、長石類も熱発光測定が可能であれば石英と同様に熱発光地熱探査用試料として使用できることが判明した。

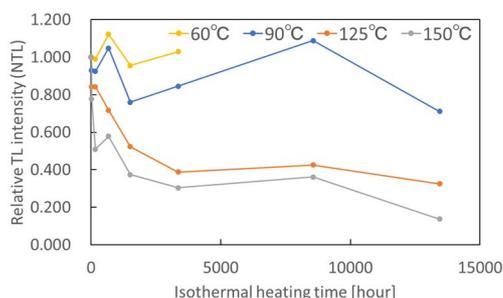
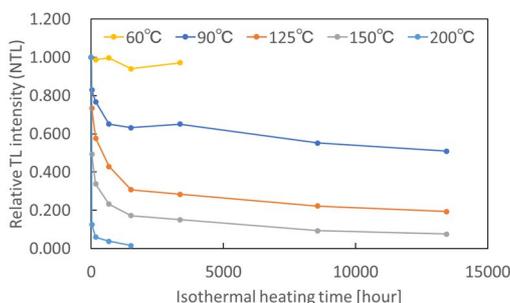


図 4 カリ長石の等温加熱による発光量変化

図 5 斜長石の等温加熱による発光量変化

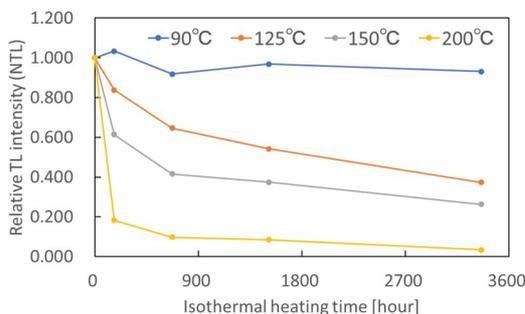


図 6 石英の等温加熱による発光量変化

4-2. 長石熱発光をもちいたエルサルバドル共和国における地熱兆候探査

室内実験の結果から、長石熱発光を用いた地熱兆候探査の可能性が大きくなったため、地熱地帯ではあるが長石試料しか得ることができない、エルサルバドル共和国のアワチャパン地熱地帯をテストフィールドとして、長石熱発光を用いた地熱兆候探査をおこなった。その結果を図 7 に示すが、図中の白丸が試料採取位置、六角形がアワチャパン地熱発電所の位置、赤円内がカルデラ地形や噴気孔などが点在する火山エリアである。

採取した長石試料の熱発光量から推定した熱影響の大きい地域（暖色）と小さい地域（寒色）を図中に示しているが、調査地域の東～南東側が熱影響を受けている可能性が高い事を示している。この結果は熱影響が大きいとされる方角にはアワチャパン地熱発電所や火山地帯が存在していることとも整合的である。

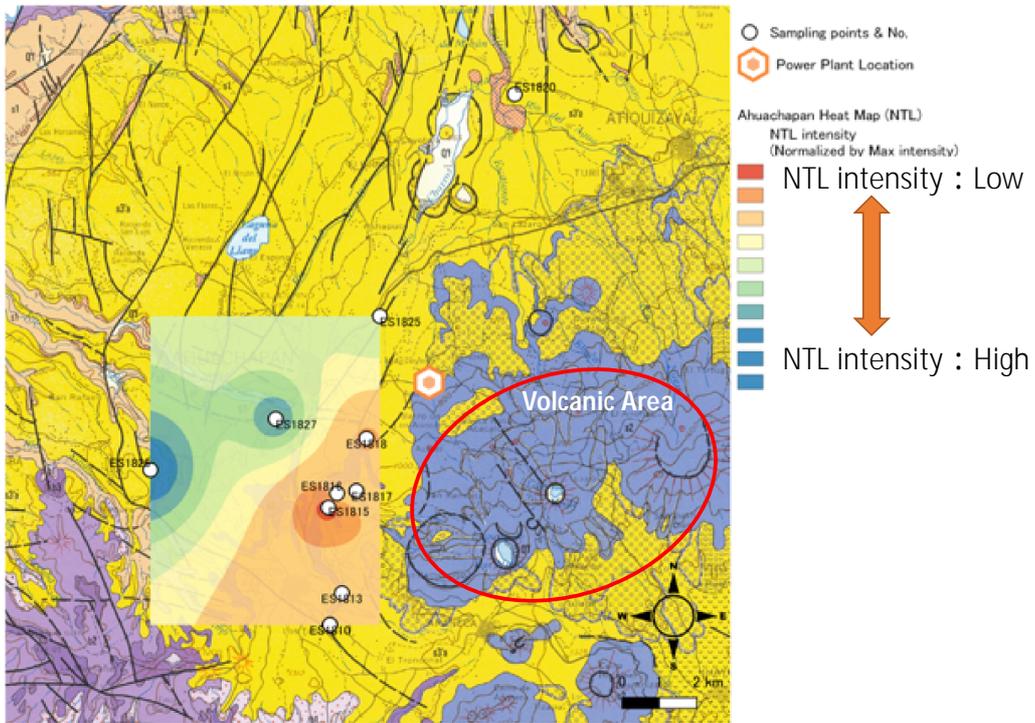


図7 長石熱発光による地熱兆候探査の結果

4-3.まとめ

以上の室内実験およびフィールド調査結果から、鉍物熱発光による地熱兆候探査について、長石の熱発光をもちいることができる可能性が高いことを示す事ができたと言え、このことは低コストでの地熱探査方法の発展に寄与できたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤貴啓, 平野伸夫, 土屋範芳
2. 発表標題 エルサルバドルAhuachapan地熱地帯における斜長石の自然熱発光を用いた地熱探査法の検討
3. 学会等名 日本地熱学会 令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤颯太, 布原啓史, 山田亮一, 岡野広樹, 平野伸夫, 土屋範芳
2. 発表標題 熱発光地熱探査法による秋田県湯沢南部地域の地熱資源評価と熱源モデル
3. 学会等名 日本地熱学会 令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤貴啓, 平野伸夫, 土屋範芳
2. 発表標題 長石の人工熱発光による地熱探査の可能性
3. 学会等名 日本地熱学会 令和2年学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡野広樹, 土屋範芳, 平野伸夫, 布原啓史
2. 発表標題 栗駒北部地域における鉱物の熱発光を用いた地熱探査
3. 学会等名 日本地熱学会 令和元年熊本大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------