

氏 名	Lin 林	Weiren 為	人
授与学位	博士（工学）		
学位授与年月日	平成4年3月27日		
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 資源工学専攻		
学位論文題目	花崗岩中の流体包有物とその熱破壊に関する研究		
指導教官	東北大学教授 鈴木 舜一		
論文審査委員	東北大学教授 鈴木 舜一	東北大学教授 高橋 秀明	
	東北大学教授 阿部 博之	東北大学助教授 松木 浩二	

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 言

流体包有物とは、流体により満たされている結晶中の微細な空隙である。結晶成長の過程、あるいは結晶成長後に生じたマイクロクラックが“癒着”する過程で流体を捕獲して形成されたもので、前者を初生包有物、後者を二次包有物と称する。

流体包有物は、加熱されると内部の流体が膨張して、内圧が急増する。ある温度に達すると流体包有物が破壊し、鉱物中にマイクロクラックが生じる。従って、造岩鉱物中に流体包有物が含まれていれば、これが岩石の熱破壊の一要因となりうると考えられるが、このような観点からの岩石の熱破壊に関する研究は行われていない。

原子力発電などの高レベル放射性廃棄物の処分方法として、いろいろな方法が提案されているが、実用的と考えられているのは地下深部の岩盤中、特に花崗岩中における処分である。これらの廃棄物は発熱するので、貯蔵用地下空洞の周囲の岩盤の隔離性および力学的安定性を確保するためには、高温下における岩石特性に関する研究が不可欠であり、かつ急務である。このことから、最近高温環境下における岩石の力学的性質に関する研究が盛んに行われているが、岩石の熱破壊の原因については、従来、主として熱応力、熱膨張率、相転移、脱水、熱分解などが考えられている。

本研究は、日本の代表的花崗岩の1つであり、岩石の力学的研究試料として広く用いられている稲田花崗岩を用いて、花崗岩中の流体包有物とその熱破壊特性を明らかにし、花崗岩の熱破壊に及ぼす影響を解明することを目的として行ったものである。

第2章 稲田花崗岩中の流体包有物の特徴

稲田花崗岩の石英、斜長石およびアルカリ長石中には流体包有物が含まれており、これらはすべて二次包有物である。すなわち、これらの鉱物の晶出後に生じたマイクロクラックやへき開面に熱水が入り、同じ鉱物が沈殿して、マイクロクラックが癒着し、この過程で流体を包有する微小な空隙が取り残されて、二次包有物が形成される。二次包有物は癒着したマイクロクラック面に配列しており、これを流体包有物面と称する。流体包有物面は薄片ではトレースとして現れ、流体包有物はトレースに沿って配列している。

稲田花崗岩の鉱物モード組成は、石英36%、アルカリ長石28%、斜長石32%および黒雲母4%である。また、これらの主成分鉱物の平均粒径は、石英3.3mm、アルカリ長石3.0mm、斜長石2.5mm、黒雲母0.9mmである。

石英および長石中の流体包有物の含有個数は1mm³あたり10⁵オーダーである。最大流体包有物の大きさは石英では20μm、長石では15μmであり、平均大きさは石英では2.2μm、長石では1.9μmである。流体包有物面のトレース密度は石英では5.8/mm、長石では5.3/mmであり、流体包有物面のトレースの平均長さは、石英では0.4mm、長石では0.2mmである。

先在粒内マイクロクラックのトレースの密度は石英では1.7/mm、長石では6.3/mmであり、長石中の密度が高いのはへき開が発達するためである。石英中に含まれるマイクロクラックのトレースの平均長さは0.5mmで、長石中のものの2倍以上である。

先在粒界クラックは、石英-石英粒界、長石-長石粒界、石英-長石粒界および黒雲母-石英(又は長石)粒界において認められる。全体の平均については、全粒界の約2割にはマイクロクラックが認められる。

第3章 流体包有物の加熱顕微鏡観察

流体包有物は、常温では一般に液相を主とする気液2相からなり、加熱されると液相が膨張して気相が縮小し、ある温度になると気相が消え、気液二相の流体包有物が液相单相のものとなる。この温度を均質化温度と称する。温度がさらに高くなると、流体包有物の内圧が急激に増加し、ある温度に達すると流体包有物が破壊し、鉱物中にマイクロクラックが生じる。この温度を破壊温度と称する。

厚さ約100μmの両面研磨薄片を用い、2°C/minの加熱速度で、加熱顕微鏡下で流体包有物の加熱挙動を観察した結果、流体包有物の均質化温度は、石英では85°C~260°C、長石では150°C~230°Cの範囲にあり、その平均値は石英では175°C、長石では180°Cである。流体包有物の破壊温度は、石英では170~550°C、長石では230~450°Cの範囲にある。破壊温度の平均値は石英では320°C、長石では310°Cであり、石英の方がやや高い。破壊温度は均質化温度が高いほど、または流体包有物の大きさが小さいほど高くなる傾向にある。なお、破壊温度は流体包有物の形状、鉱物の強度、薄片の厚さなどにも左右される。

破壊温度と均質化温度により、計算した流体包有物の破壊圧力は、石英では平均1220bars、長石では平均1080barsであった。

一個の流体包有物から生じたマイクロクラックの長さは、多くの場合では100 μm 以下であるが、最も長いものが200 μm である。それらの方向は、石英ではc軸に垂直又は平行に伸びるものが多く、長石ではへき開の方向である。流体包有物面内に含まれる多数の流体包有物から生じるマイクロクラックの相互関係は、連結するタイプ、雁行状タイプ、およびこの2種の混合タイプがある。

第4章 流体包有物の熱破壊による AE

非定常熱応力が無視できる場合、花崗岩の熱破壊には、主として鉱物粒間の熱膨張率の不調和による局所的応力集中に起因する破壊、および流体包有物による破壊がある。この中で流体包有物による熱破壊はどのような役割を果たすかを明らかにすることを目的として、稲田花崗岩から単体分離した石英および長石試料を用いて、流体包有物の熱破壊のみによる AE および花崗岩試料の全体の熱破壊による AE を測定し、これらの結果の比較検討を行った。

石英および長石単体分離試料の AE 発生数および AE カウントレートのプロフィールと、円盤状花崗岩試料のそれらを比較した結果、花崗岩の全体の熱破壊による AE のうち、約200°Cから石英の α - β 相転移温度(573°C)以下の範囲の AE には、流体包有物の熱破壊によるものが多く含まれていることが明かになった。すなわち、石英の相転移温度以下では、流体包有物の熱破壊が花崗岩の熱破壊の一要因である。

流体包有物の熱破壊による AE 発生ピーク温度は、石英では約380°C、長石では約360°Cであるが、これらの熱破壊は広い温度範囲にわたって発生する。AE 発生ピーク温度は加熱顕微鏡下の流体包有物の破壊温度の平均値より約50~60°C大きい、これは主として加熱顕微鏡で正確に測定できる流体包有物が大きさ約3 μm 以上のもののみであったためと考えられる。

石英中の流体包有物の熱破壊に伴う AE と長石のそれを比べると、石英では比較的大きなエネルギーを放出する AE が多い。すなわち、石英中の流体包有物の熱破壊によるマイクロクラックは長石のそれに比べて大きく成長する。

石英の α - β 相転移温度付近では、石英単体分離試料の AE 発生は不活発である。このことは単体石英粒子の相転移そのものに伴っては AE が発生しないことを示している。

第5章 加熱による花崗岩のマイクロクラック発生と残留熱ひずみ

花崗岩試料の加熱(2°C/min)に伴う熱ひずみの測定を行い、これらの試料は冷却されると熱ひずみが残留する。残留熱ひずみ量は、加熱ピーク温度が高くなるにつれ、ほぼ指数関数的に増加し、石英の α - β 相転移温度付近で、さらに急増する。同一ピーク温度の繰り返し加熱冷却試験において、300°C以上のピーク温度になると、二回以降の加熱では残留ひずみの増加が認められる。

熱ひずみ測定後に、試料の顕微鏡観察を行い、これらの残留熱ひずみは、加熱により新たに発生したマイクロクラックおよび先在マイクロクラックの成長に伴う開口によることを確かめている。

流体包有物の熱破壊のみによって生じたマイクロクラックおよび花崗岩試料中の全体のマイクロクラックの密度を調べた結果、400°C以上の加熱試料の石英および長石中には、流体包有物によるマイクロクラックが多く認められ、その密度は、熱処理ピーク温度が高くなるにつれ増加する。

この傾向は第3章の加熱顕微鏡の測定結果とほぼ一致する。

花崗岩が加熱されると、粒内クラックと粒界クラックが発生する。全体のマイクロクラックの密度は、熱処理ピーク温度が高くなるにつれ増加する。稲田花崗岩の粒径が大きいため、粒界クラックの密度は小さく、粒内クラックが量的に主要な部分を占めている。

花崗岩の加熱によるマイクロクラックの発生に対する流体包有物の役割をみると、400°C以上の熱処理試料においては、流体包有物から生じたマイクロクラック数が、新たに発生したすべてのマイクロクラック数の約60%を占めている。なお、流体包有物によるマイクロクラックが比較的短く、残留熱ひずみの発生に対する影響が比較的小さい。

加熱試験後の試料について、P波伝播速度の測定を行った結果、P波速度は、200°Cから石英の α - β 相転移温度付近までの区間では、加熱ピーク温度が高くなるにつれほぼ線形的に低下する。

第6章 結 論

以上のように、稲田花崗岩中の流体包有物の熱破壊に関する研究の結果、稲田花崗岩中の流体包有物の産状およびその熱破壊特性が明らかになった。また、流体包有物は、石英の α - β 相転移温度以下における花崗岩の加熱によるマイクロクラッキングの一要因として、その果たす役割が明らかになった。

審 査 結 果 の 要 旨

最近放射性廃棄物の地下処分などのために、高温環境下における岩石の力学的性質に関する研究が盛んに行われているが、岩石の熱破壊については、従来、熱応力、熱膨張率などの面からの研究が主である。著者は、日本の代表的花崗岩の一つであり、研究試料として広く用いられている稲田花崗岩を選び、花崗岩の熱破壊における流体包有物の役割を明らかにすることを目的として研究を行った。本論文はその成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、稲田花崗岩中の流体包有物の特徴について述べている。流体包有物は、石英および長石中の二次包有物として、“癒着”したマイクロクラック中に含まれるもので、石英では最大20 μm 、平均2.2 μm 、長石では最大15 μm 、平均1.9 μm で、含有個数は鉱物1 mm^3 あたり 10^6 オーダーであることを明らかにしている。

第3章では、加熱顕微鏡下で観察を行い、流体包有物の均質化温度は、石英では85~260°C、長石では150~230°C、さらに流体包有物の破壊温度は、石英では170~550°C、平均320°C、長石では230~450°C、平均310°Cであり、流体包有物の破壊によるマイクロクラックの方向は、石英ではc軸に垂直又は平行に伸びるものが多く、長石ではへき開の方向であることを明らかにしている。これらは重要な成果である。

第4章では、石英および長石の単体分離試料と花崗岩の円盤状試料を用いて、加熱によるAEを測定し、これらを比較検討した結果、花崗岩全体のAEのうち、石英の α - β 相転移温度以下では、流体包有物の熱破壊によるものが多く含まれており、流体包有物が花崗岩の熱破壊の一要因であることを明らかにしている。これは新しい知見である。

第5章では、花崗岩の熱ひずみの測定を行い、冷却後の残留熱ひずみ量は、加熱ピーク温度が高くなるにつれ、ほぼ指数関数的に増加し、さらに石英の α - β 相転移温度付近で急増することを見出している。熱ひずみ測定後に試料を顕微鏡観察し、これらの残留熱ひずみは、新たに発生したマイクロクラックおよび先在マイクロクラックの開口によることを確かめている。400°C以上の熱処理試料では、流体包有物の熱破壊により生じたマイクロクラック数は新たに発生したマイクロクラック数の約60%を占めることを明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、花崗岩中の流体包有物の加熱によるマイクロクラックの発生と花崗岩の熱破壊におけるその役割を明らかにしたもので、資源工学の発展に資するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。