

高温、拘束圧下における火成岩の熱膨張特性

木下直人¹・安部 透²・奥野哲夫³

¹正会員 理修 主席研究員 清水建設(株) 技術研究所 (〒135 東京都江東区越中島3-4-17)

²正会員 清水建設(株) 技術研究所 (〒135 東京都江東区越中島3-4-17)

³正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 (〒100 東京都千代田区内幸町2-2-2 フコク生命ビル27階)

高温、拘束圧下における火成岩の熱膨張特性を明らかにするため、5種類の岩石を用いて、温度30°C~284°C、拘束圧0~49.0MPaの条件下で測定を行い、火成岩の熱膨張特性は、温度にも圧力にも依存すること、および花崗岩質岩石と安山岩とでは、熱膨張特性が異なることを示した。また、火成岩の熱膨張特性を支配する四つの要因を提案するとともに、今回の測定結果は、これらの要因によりよく説明できることを示した。

Key Words : high temperature, thermal expansion, igneous rock

1. はじめに

近年、地下空間利用の多様化にともない、高温下における岩盤構造物の挙動についての研究が重要になり、これに関連して、高温下岩石の物性に関する研究が多く行われるようになってきている。高温下における各種岩石物性の温度依存性に関する既往の研究については、Heuze¹⁾および北野ら²⁾によって整理され、報告されている。それによれば、既往の研究の多くは、大気圧下で行われた試験に基づいている。したがって、高温下における岩石物性に対する拘束圧の影響については、今後解明すべき課題が多く残されている。

高温下岩石の熱膨張特性は、高温下岩盤の挙動を基本的に支配する物性であるのにもかかわらず、他の熱伝導率などの物性値と比較して全体的に研究例が少ない。特に、熱膨張特性に対する拘束圧の影響に関しては、海外で研究例が少しみられるだけであり、わが国では測定装置が皆無であったこともある。全く研究例がない。今までの研究例^{3)~5)}では、高温下岩石の線膨張係数は温度と圧力の両方に依存するが、測定精度が充分でないこともある。单純な関係になっていない。例えば、Heard³⁾は、Climax Stock石英モンソナイトの線膨張係数を拘束圧0, 13.8, 27.6MPa、温度19~300°Cの範囲で測定し、線膨張係数は温度と圧力の両方に依存するが、单純な関数にはならないとしている。彼は同時に、拘束圧下における熱膨張特性に対する温度履歴の影響についても測定を行っており、大気圧下における測定^{6)~8)}とは異なり、300°Cまで昇温させた後再び室温に戻しても、残留ひずみがほとんど発生しないことを報告している。

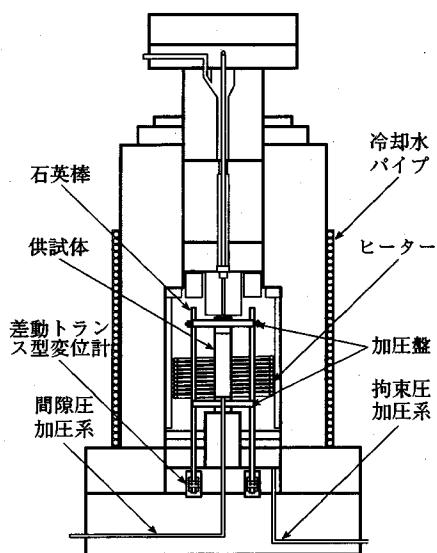
Heard and Page⁴⁾は、Westerly花崗岩およびStripa花崗岩の線膨張係数を、拘束圧最大55MPa、温度最大350°Cで測定し、前者では、線膨張係数は温度よりも圧力に強く依存するのに対して、後者では逆に温度に強く依存するという結果を得ている。また、Bauer and Handin⁵⁾は、3種類の火成岩の線膨張係数を、拘束圧5, 50, 100MPa、温度25~800°Cの範囲で測定しているが、200°C以下の温度範囲では線膨張係数が負になる場合がみられるなど、複雑な結果を得ている。このように、火成岩だけをとりあげてみても、今までの測定例では、熱膨張特性に対する温度と圧力の影響はまちまちであり、よくわかっていない。

そこで筆者らは、拘束圧下において、岩石の線膨張係数を精度良く測定できる装置を導入し、それを用いて3種類の花崗岩質岩石および2種類の安山岩の熱膨張挙動の測定を行った。花崗岩質岩石および安山岩を用いたのは、それぞれわが国における深成岩および火山岩を代表する岩石であり、これらの岩石の熱膨張特性を調べることにより、わが国における火成岩の熱膨張挙動の特徴を明らかにできると考えたからである。また、これらの測定結果に基づいて、火成岩の熱膨張特性を支配する要因について検討を行った。その結果、火成岩の熱膨張挙動の特徴および熱膨張特性を支配する要因について、ある程度まとまった結論を得ることができたので、ここに報告する。

2. 実験概要

大気圧下における線膨張係数の測定には真空理工(株)製

表一 試料の基本物性および粒径



図一 線膨張係数測定用三軸室

岩石の種類 産地	単位体積重量 (kN/m ³)	間隙率 (%)	鉱物組成 (%)		粒径 (mm)	
			範囲	平均		
初森花崗閃綠岩 福島県産	25.9	1.4	石英 32 斜長石 48 微斜長石 14 黒雲母 3 白雲母 2 緑泥石 1	0.3 3.0	1.2	
稻田花崗岩 茨城県産	26.3	0.9	石英 42 斜長石 22 微斜長石 31 黒雲母 4 角閃石 1	0.3 8.0	2.8	
沢入花崗岩 群馬県産	26.1	0.9	石英 25 斜長石 43 正長石 26 黒雲母 6	1.0 12.0	4.0	
小松安山岩 神奈川県産	25.5	6.1	斑晶 斜長石 22 单斜輝石 5 磁鐵鉱 1	0.05 2.5	0.25	
			石基 ガラス質 72	----	----	
三城目安山岩 福島県産	21.0	19.2	斑晶 斜長石 16 单斜輝石 2	0.3 ~ 2.0	0.8	
			石基 斜長石 36 ガラス質 36 单斜輝石 9 不透明鉱物 1	----	----	

の押棒式熱膨張計(DL-1500Y型)を、拘束圧下における測定にはMTS社製の線膨張係数測定装置の一部を改良したものを用いた。拘束圧下における線膨張係数の測定に用いた三軸室の概要を図一に示す。三軸室内を高温用シリコンオイルで満たし、所定の拘束圧を作用させた状態で、三軸室内の温度を徐々に変化させる。そして、三軸室下部に設置されている差動トランス型変位計を用いて加圧盤間の相対的変位を測定することにより、供試体の線膨張ひずみを測定できるようになっている。変位計が設置されている部分の温度は、供試体周辺の温度が300°Cになった場合でも、50°C以下に保たれるようになっている。また加圧盤は、熱膨張量ができるだけ小さいことが望ましいので、スーパーインバー製としている。

測定に用いた岩石試料は、茨城県産の稻田花崗岩、群馬県産の沢入花崗岩、福島県産の初森花崗閃綠岩、福島県産の三城目安山岩および神奈川県産の小松安山岩の5種類であるが、その基本物性、鉱物組成および粒径を表一に示す。3種類の花崗岩質岩石を比較すると、稻田花崗岩および沢入花崗岩はほとんど変質していないのに對し、初森花崗閃綠岩はやや変質しており、白雲母や緑

泥石のような二次生成鉱物を少し含んでいる。また鉱物の平均粒径は初森花崗閃綠岩が最も小さく、1.2mm程度であるのに対して、稻田花崗岩および沢入花崗岩はそれぞれ2.8mm、4.0mm程度である。三城目安山岩と小松安山岩には、ともに斜長石、单斜輝石が含まれているが、その他に、X線回折により、三城目安山岩にはクリストバライドが、小松安山岩には石英が含まれていることが確認されている。

3種類の花崗岩の間隙率はいずれも小さく、2%以下であるのに対して、小松安山岩と三城目安山岩の間隙率はそれぞれ約6%と約19%であり、花崗岩質岩石よりずっと大きい。

供試体の採取方向が異なることによって生じる測定値の変動を避けるため、5種類の岩石それについて、同一方向から採取した供試体を用いた。供試体の寸法は、大気圧下における測定では、直径20mm、高さ200mm、拘束圧下における測定では、直径30mm、高さ100mmとし、デシケータ内で1週間以上乾燥させた後測定を行った。

大気圧下における測定の場合の昇温(降温)速度は30°C/hとしたが、更に遅い速度で測定した場合の値と比較

することにより、30°C/hでも昇温（降温）速度の影響がないということは既に確認されている⁹⁾。拘束圧下における測定では、昇温（降温）過程において供試体の温度ができるだけ一様になるようするため、昇温（降温）速度を20°C/hとした。所定の昇温速度で約290°Cまで加熱し、約2時間一定温度を保持した後、加熱時と同じ速度で30°Cまで冷却しながら、線膨張ひずみおよび残留ひずみの測定を行った。ただし、昇温（降温）速度制御用の熱電対は、メンブレンの外側（側液中）に設置されているので、制御用の熱電対の温度が290°Cになったときでも、供試体の温度（供試体の表面および内部の5点の温度から求めた平均値）はそれよりもやや低く、約284°Cである。したがって、測定温度範囲は、大気圧下では30°Cから300°Cであるのに対して、拘束圧下では30°Cから約284°Cとなっている。なお、大気圧下においても、拘束圧下においても、標準試料として、溶融石英を用いることにより装置の温度ドリフト量を求め、それに対する補正を行っている。

5種類の岩石について、熱膨張挙動に対する拘束圧の影響を調べるために、大気圧下、9.8MPa、29.4MPaおよび49.0MPaの4拘束圧（静水圧）条件下において熱膨張挙動の測定を行った。測定個数は、原則として各条件毎に1個としたが、3種類の花崗岩質岩石についてのみ、大気圧下では3個とした。

岩石の線膨張係数の測定に先立って、拘束圧下における線膨張係数測定装置の測定精度を確認するために、30°Cから280°Cの温度範囲でアルミニウムの線膨張係数を測定し、押棒式熱膨張計（DL-1500Y型）を用いて同一試料の線膨張係数を測定した結果と比較した。両者の測定結果は良く一致しており、30°Cから280°Cの温度範囲における線膨張係数は、前者の装置を用いた場合は $2.32 \times 10^{-5}/\text{°C}$ 、後者の装置を用いた場合は $2.35 \times 10^{-5}/\text{°C}$ となっている。また、各温度における線膨張係数を求めてみても、両者はほぼ一致している。したがって、この装置を用いることによって、大気圧下における測定に近い精度で線膨張係数を測定できることが確認された。

3. 実験結果

稻田花崗岩、三城目安山岩および小松安山岩の大気圧下および拘束圧下における線膨張ひずみの測定結果を図-2、図-3および図-4に示す。稻田花崗岩の場合、大気圧下では3個の供試体について測定を行っているが、それらの測定結果はほぼ一致しているので、図にはそのうちの1個についての結果のみを示す。加熱時のこのような線膨張ひずみと温度の関係に基づいて、その曲線の勾配から、各温度における線膨張係数を求めた。一般に、線膨張係数の測定においては、測定の最高温度

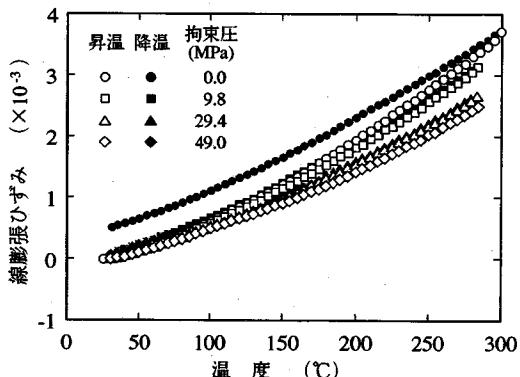


図-2 稲田花崗岩の線膨張ひずみと温度の関係

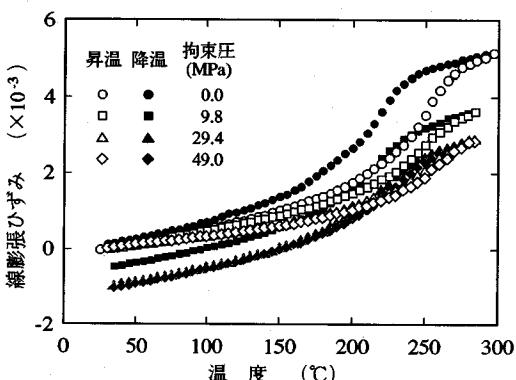


図-3 三城目安山岩の線膨張ひずみと温度の関係

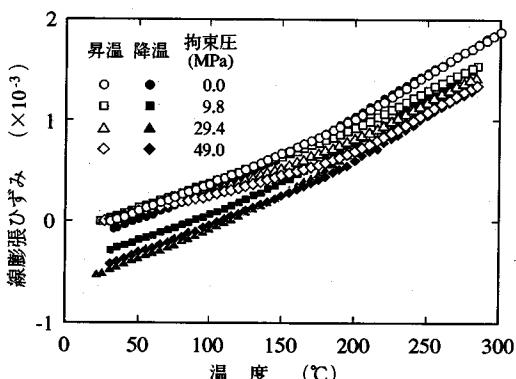
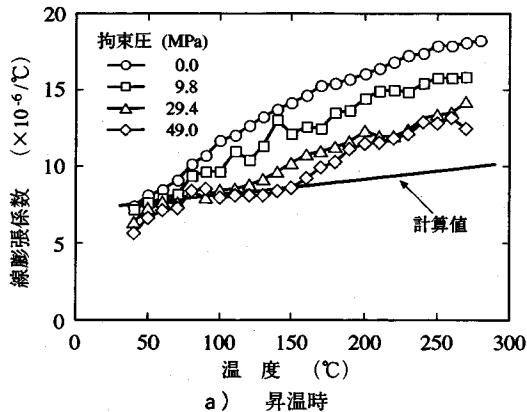


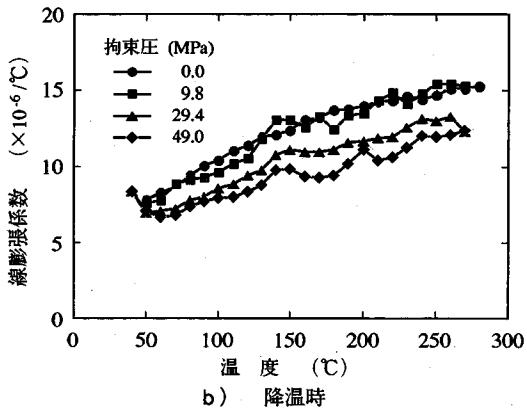
図-4 小松安山岩の線膨張ひずみと温度の関係

および最低温度付近では、測定精度が低下するので、今回は最高温度および最低温度から約5°Cの温度範囲のデータを除外して、線膨張係数を求めている。5種類の岩石のそれぞれについて、このようにして求めた昇温時と降温時における線膨張係数と温度および拘束圧との関係を図-5～図-9に示す。ただし、降温時については、稻田花崗岩と三城目安山岩の結果だけを示した。

50°C付近における大気圧下での3種類の花崗岩質岩石



a) 昇温時



b) 降温時

図-5 稲田花崗岩の線膨張係数と温度の関係

の線膨張係数はほぼ似た値を示しており、いずれも $7.7 \times 10^{-6} \sim 8.6 \times 10^{-6}/\text{°C}$ の範囲の値を示している。そして、50°C付近では、稻田花崗岩と沢入花崗岩の線膨張係数は、拘束圧にほとんど依存していないのに対し、初森花崗閃綠岩のそれは、拘束圧依存性を示しており、拘束圧の増加とともに線膨張係数が低下している。

3種類の花崗岩質岩石の線膨張係数は、いずれも温度が高くなるにしたがって増加するが、その増加の度合いは拘束圧が小さいほど著しい。例えば、大気圧下では、3種類の花崗岩質岩石とも250°Cでの線膨張係数は50°Cでのそれの2倍以上の値を示している。また、高温での線膨張係数は、拘束圧が大きくなるにしたがって小さくなっている。線膨張係数の拘束圧依存性は、高温になるほど顕著である。このように、高温下における花崗岩質岩石の線膨張係数は、温度と拘束圧の両方に依存する。

昇温時と降温時の稻田花崗岩の線膨張係数を比較すると、拘束圧9.8MPa以上では、全体的に両者はほぼ似た値を示している。大気圧下では、50°C付近では、両者はほぼ同じ値を示しているのに対して、高温になると、昇温時の線膨張係数の方が降温時のそれよりも大きくなっている。

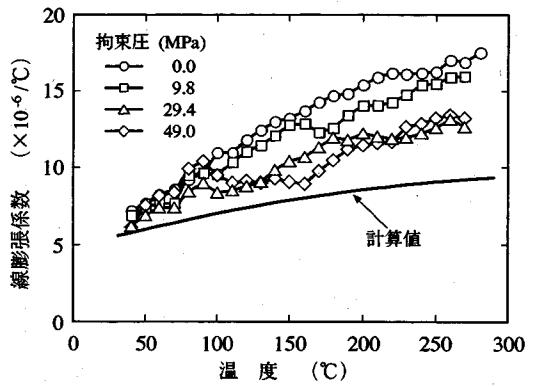


図-6 沢入花崗岩の線膨張係数と温度の関係

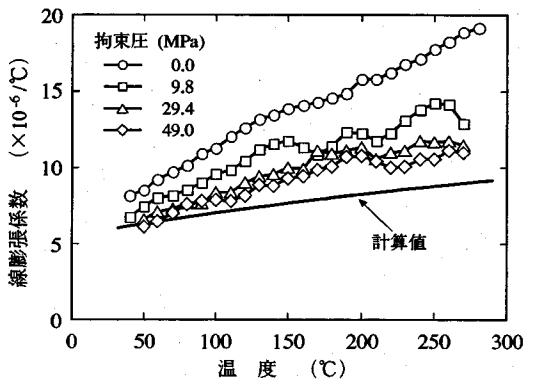
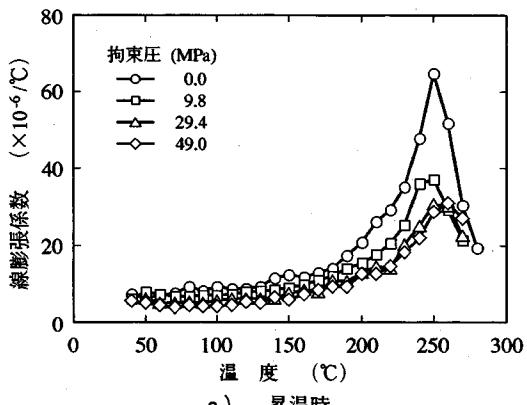


図-7 初森花崗閃綠岩の線膨張係数と温度の関係

いる。図には示していないが、沢入花崗岩と初森花崗閃綠岩でも同じような結果が得られている。

50°C付近における昇温時の三城目安山岩の線膨張係数は、大気圧下では $6.2 \times 10^{-6}/\text{°C}$ であり、花崗岩質岩石のそれよりやや小さい。100°C以上になると、三城目安山岩の線膨張係数は温度上昇とともに増加している。そして、250°C前後の温度になると、著しく大きな線膨張係数を示している。特に、大気圧下では、著しく大きい。拘束圧が大きくなると、熱膨張量が減少するとともに、線膨張係数がピークを示す温度がやや高温側にシフトする傾向がみられる。このような特徴を示す温度範囲は、昇温過程より降温過程の方が $20 \sim 30^\circ\text{C}$ 低くなっている。

拘束圧が増加すると、全体的に三城目安山岩の線膨張係数は低下している。ただし、拘束圧が30MPaを越えると、線膨張係数は拘束圧に依存しなくなっている。大気圧下における線膨張ひずみと拘束圧49.0MPaにおけるそれを比較すると、100°C以下の温度範囲では、前者が後者の約2倍の値を示している。このように、三城目安山岩の線膨張係数も、拘束圧が30MPa以下の場合には、



a) 昇温時

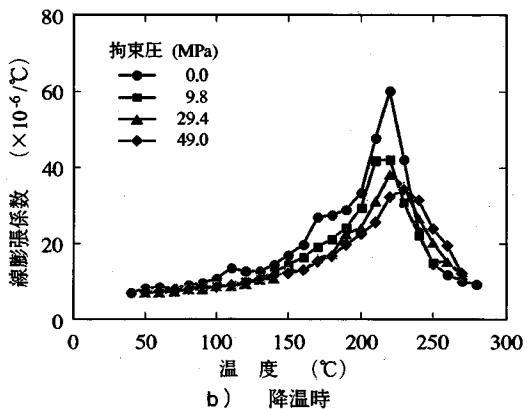


図-8 三城目安山岩の線膨張係数と温度の関係

花崗岩質岩石の場合と同様に、温度と拘束圧の両方に依存している。

50°C付近における昇温時の小松安山岩の線膨張係数は、大気圧下では $5.8 \times 10^{-6}/\text{°C}$ であり、三城目安山岩と同様に、花崗岩質岩石のそれよりやや小さい。初森花崗閃緑岩や三城目安山岩と同様に、50°C付近でも線膨張係数は拘束圧依存性を示しており、拘束圧の増加とともに顯著に低下している。全体的に、小松安山岩の線膨張係数の温度依存性は、3種類の花崗岩質岩石のそれよりずっと小さい。ただし、温度が180°C以上になると、相対的に線膨張係数の温度依存性がやや大きくなっている。

小松安山岩の場合、温度が低いときのほうが線膨張係数の拘束圧依存性が顯著であり、高温になるにしたがって、拘束圧依存性は徐々に小さくなっている。

図-10に、5種類の岩石について、284°C(大気圧下では300°C)まで昇温させた後再び室温に戻したときの残留ひずみを測定した結果を示す。残留ひずみは膨張を正にとって示している。大気圧下における3種類の花崗岩質岩石の残留ひずみと2種類の安山岩のそれとを比

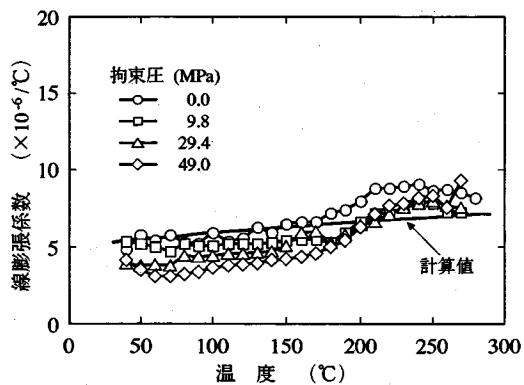


図-9 小松安山岩の線膨張係数と温度の関係

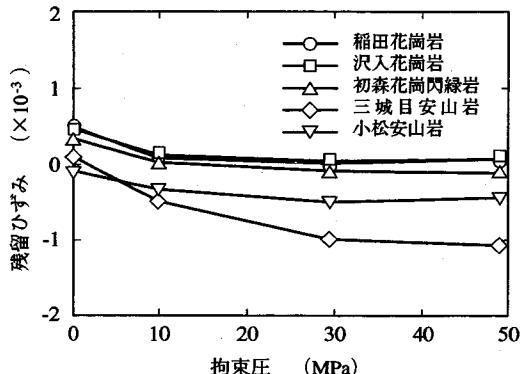


図-10 残留ひずみと拘束圧の関係

較すると、全体的に前者の方がずっと大きい。そして、花崗岩質岩石では、拘束圧が大きくなるにしたがって、膨張ひずみは減少している。また、初森花崗閃緑岩および2種類の安山岩では、拘束圧が大きくなると、残留ひずみは負の値になっており、収縮ひずみが発生していることを示している。特に三城目安山岩では、29.4MPaおよび49.0MPaといった高拘束圧になると、約 1.1×10^{-3} といった大きな収縮ひずみが発生している。

4. 火成岩の熱膨張特性を支配する要因に関する検討

火成岩の熱膨張特性を支配する要因としては、従来①構成鉱物の熱膨張特性、②鉱物粒子間の熱膨張率の不一致による微小クラックの発生、③構成鉱物の相転移の三つが考えられていた。今回測定を行った5種類の試料のうち、初森花崗閃緑岩および2種類の安山岩では、拘束圧が大きくなると、負の残留ひずみが生じているが、上に示した三つの要因ではこのような現象を説明するこ

表-2 鉱物の体積弾性係数および体積膨張ひずみ

鉱物名	体積弾性係数 (GPa)	体積膨張ひずみ---30°Cを0とした場合 (%)					
		50°C	100°C	150°C	200°C	250°C	300°C
石英	38.3	0.08	0.28	0.49	0.72	0.96	1.22
斜長石 $Ab_{77}An_{23}$	61.6	0.02	0.08		0.22		0.40
微斜長石	55.5		0.11		0.29		0.46
正長石	52.8	0.03	0.12	0.23	0.36	0.51	0.63
角閃石	96.8	0.05	0.17	0.30	0.43	0.54	0.67
单斜輝石	93.3		0.13		0.34		0.56
クリストバライト	39.2		0.63		1.63		5.87
安山岩質ガラス	33.0		0.12		0.29		0.48

とはできない。このような負の残留ひずみを生じる原因としては、押固め作用による岩石の収縮が考えられる。そこで、ここでは、今回の測定結果について、従来から指摘されている三つの要因に、押固め作用による岩石の収縮を加えた四つの要因によって説明できるか否かの検討を行った。

(1) 火成岩の熱膨張特性に対する構成鉱物の熱膨張特性および相転移の影響

まず今回の測定結果を、構成鉱物の熱膨張特性および相転移によってどの程度説明できるかの検討を行った。表-1に示した5種類の火成岩の鉱物組成を用いて線膨張係数を計算し、測定結果と比較、検討を行った。線膨張係数の算定には次に示すTurnerの式を用いた。

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i K_i V_i}{\sum K_i V_i} \quad (1)$$

ここで α は岩石の線膨張係数、 α_i 、 K_i 、 V_i はそれぞれ i 番目の鉱物の線膨張係数、体積弾性係数、体積密度である。ここで、実測値と比較するために α の値を温度の関数として求める必要がある。鉱物の線膨張係数は一般に温度に依存することが知られているので、以下のようにして各鉱物の線膨張係数と温度の関係を求めた。花崗岩質岩石を構成する鉱物のうち、石英、正長石、斜長石、微斜長石および角閃石に関しては、それぞれ表-2に示すように、体積膨張ひずみと温度の関係に関する既往の測定データがある^{10)~13)}ので、それらを3次曲線で近似した後、温度に関して微分することによって、体積膨張係数と温度の関係を求めた。そして、各鉱物の線膨張係数は、体積膨張係数の

1/3であるとした。また、黒雲母、白雲母および緑泥石に関しては、実測データが見つからなかったので、これらの鉱物はいずれも同じ熱膨張特性を有しており、温度上昇にともなって体積膨張係数は直線的に増加すると仮定した。これらの鉱物はいずれも含有量が少ないので、このように仮定しても、計算値に与える影響は小さいと考えられる。なお、花崗岩質岩石の場合には、300°Cまでの温度範囲において相転移する鉱物を含んでいないので、それについては全く考慮しなかった。

鉱物の体積弾性係数は、全体的に、線膨張係数に比べて温度依存性が小さいと考えられる。そこで、Turnerの式を用いて岩石の線膨張係数を計算する際に、体積弾性係数に関しては、温度に依存しないものとして、表-2に示すような、常温における値のみを用いた¹⁴⁾。

3種類の花崗岩質岩石についての線膨張係数の計算値を図-5~図-7に示す。30~50°Cの温度範囲における線膨張係数の計算値と、大気圧下における線膨張係数の実測値を比較すると、両者の差は大部分のところで20%以下であり、ほぼ似た値を示している。この結果は、50°C程度までの温度での花崗岩質岩石の大気圧下における熱膨張特性は、主として構成鉱物の熱膨張特性に支配されていることを示している。

高温における線膨張係数の実測値と、計算値を比較すると、3種類の岩石とも、全体的に実測値が計算値を上回るようになり、両者の差は高温になると大きくなっている。例えば、両者の差が最も大きい沢入花崗岩では、温度250°C、拘束圧49.0MPaにおける線膨張係数の実測値は、計算値の約1.5倍近くになっている。この結果は、高温になると、今回測定を行った程度の拘束圧下では、構成鉱物の熱膨張特性以外の要因の影響をかなり受けようになることを示している。

三城目安山岩について、同様にTurnerの式を用いて岩

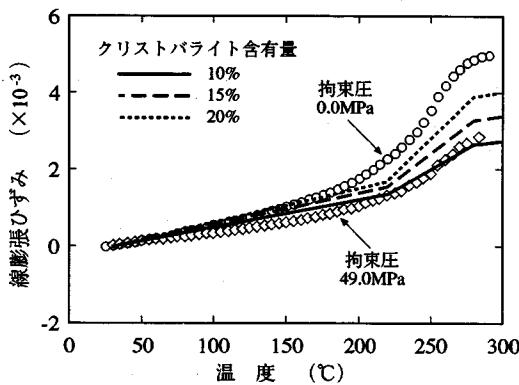


図-1-1 三城目安山岩の線膨張ひずみの計算値と実測値の比較

石の線膨張係数を計算し、実測値と比較・検討を行った。三城目安山岩を構成する鉱物のうち、斜長石と单斜輝石については、体積膨張ひずみと温度の関係に関する既往の測定データがあるので^{11), 15)}、その値を計算に用いた。花崗岩質岩石とは異なり、三城目安山岩は、表-1に示したように、クリストバライトを含んでいる。クリストバライトは、大気圧下では、220°Cから277°Cまでの温度範囲で徐々に α 型から β 型に転移すること、そして、 β 型から α 型への転移温度はそれより30°C前後低いことが知られている¹⁶⁾。なお、今回の測定結果からすると、 $\alpha - \beta$ 転移温度は圧力に依存し、高圧になると転移温度が高温になっている可能性がある。また、クリストバライトは表-2に示すような熱膨張特性を有しており¹⁷⁾、 α 型から β 型に転移する際に体積膨張をともなう。したがって、三城目安山岩の線膨張係数を計算する際には、この相転移についても考慮する必要がある。そこで、ここでは、クリストバライトは、220°Cから280°Cの温度範囲で α 型から β 型に転移し、その範囲で直線的に線膨張ひずみが生じるとして計算を行った。クリストバライトの含有量については定量的な分析が困難だったので、10, 15, 20%の3ケースの含有率を仮定した。ガラス質の部分については、安山岩質ガラスの組成を仮定して、各成分の線膨張係数¹⁸⁾からガラス全体の線膨張係数を求めた。ガラス質の部分の体積弾性係数についても、同様に各成分の体積弾性係数から求めた。結果を図-1-1に示す。実測値と計算値を比較する際に、三城目安山岩の熱膨張挙動は、前に述べたように拘束圧の大きさによって大きく異なっており、どの値と比較すべきかについて検討する必要がある。三城目安山岩の場合、後で述べるように、圧力が低いと、鉱物粒子間の熱膨張率の相違およびクリストバライトの相転移にともなう体積変化により微小クラックが発生し、その影響を受けていると考えられる。一方、圧力が

高くなると、押固め作用による試料の収縮の影響を受けていると考えられる。したがって、低圧下では、高温において計算値よりも大きな熱膨張率を、高圧下では、全ての温度範囲において計算値よりも小さな熱膨張率を示していると考えられる。こうした点を考慮して、計算値と実測値を比較すると、クリストバライトが15~20%含まれるとした場合の計算値が実測値と対応している。

小松安山岩について、同様にTurnerの式を用いて岩石の線膨張係数を計算した結果を図-9に示す。計算に際しては、ガラス質の部分に10%の石英が含まれていると仮定した。180°C以下の温度では、大気圧下での実測値と計算値はほぼ一致しており、大気圧下での熱膨張挙動は、主として構成鉱物の熱膨張特性に支配されていることがわかる。温度が180°C以上になると、実測値では、線膨張係数の温度依存性がやや大きくなっている、計算値とはやや相違している。したがって、180°C以上の温度では、構成鉱物の熱膨張特性以外の要因も影響を及ぼしていることがわかる。しかし、現在のところそれが何の影響によるものか不明である。

(2) 火成岩の熱膨張特性に対する微小クラックの発生の影響

花崗岩質岩石の場合、岩石内部に温度勾配が発生しないようゆっくりとした昇温速度で加熱した場合でも、鉱物粒子間の熱膨張率の不一致により、ある温度以上になると、微小クラックが発生し始め、その量は温度上昇とともに増加することは良く知られている。これは、異なる熱膨張率を有する鉱物粒子の境界において作用する応力が、温度上昇とともに増大するためである。既往の測定例^{8), 19), 20)}によれば、稻田花崗岩をゆっくりと加熱した場合、60~70°C程度の温度になるとAEが発生し始めている。したがって、室温付近では、拘束圧の作用の有無にかかわらず、線膨張係数は微小クラックの発生の影響を受けないのに対して、60~70°C以上の温度になると、大気圧下では、微小クラックの発生の影響により、温度上昇とともに、線膨張係数は構成鉱物の熱膨張率に基づいて計算した値よりも大きな値を示すようになると考えられる。今回の花崗岩質岩石の熱膨張挙動の測定では、このような考え方と基本的にはよく対応する結果が得られている。

これらの岩石に拘束圧を作用させると、微小クラックが発生し始める温度が高くなり、発生量も減少すると考えられる。Wong and Brace²¹⁾は6種類の岩石について、室温付近で、拘束圧下で熱膨張挙動の測定を行い、ある臨界圧力になると微小クラックの発生を抑えられるようになること、臨界圧力以上では、熱膨張挙動はほとんど圧力に依存しないこと、および臨界圧力は岩種やその岩石の熱履歴に依存することを指摘している。

今回の3種類の花崗岩質岩石の熱膨張挙動の測定において、高温下における線膨張係数は拘束圧に依存しており、拘束圧の増加とともに線膨張係数が低下し、また、残留ひずみが拘束圧の増加とともに減少するという結果が得られているのは、拘束圧の作用によって微小クラックの発生が抑えられたためであると考えられる。

大気圧下において、昇温時と降温時の熱膨張率が異なることについても、微小クラックの発生の影響として説明することができる。すなわち、昇温時においては、鉱物粒子間の熱膨張率の不一致により、微小クラックが発生するのに対して、降温時には、基本的には新たな微小クラックの発生はなく、また、昇温時に発生したクラックも完全に元に戻ることはない。したがって、昇温時の熱膨張率は、降温時のそれより大きな値を示すことになる。拘束圧が大きくなると、昇温時においても、微小クラックの発生が抑えられるので、稻田花崗岩の測定結果に示されているように、昇温時と降温時の熱膨張率の差はほとんどみられなくなる。

玄武岩や安山岩といった非花崗岩質岩石では、鉱物粒子間の熱膨張率の相違による微小クラックが発生しにくく、したがって、熱膨張にヒステリシスも残留ひずみも生じにくいことが江原ら²²⁾によって指摘されている。今回の測定でも、小松安山岩は、図-4に示すように、大気圧下では、ヒステリシスが小さく、残留ひずみもわずかに生じているが、それは負の値を示していることから、微小クラックはほとんど発生していないと考えられる。三城目安山岩の場合は、ガラス質の部分にクリストバライドが含まれており、鉱物粒子間の熱膨張率の差が大きいので、江原らが実験に用いた非花崗岩質岩石よりは微小クラックが発生しやすいと考えられる。しかし、構成鉱物の粒径は花崗岩質岩石よりもずっと小さいので、クリストバライドの相転移が生じる温度範囲以外では、花崗岩質岩石よりも微小クラックが発生しにくいと考えられる。図-10に示すように、大気圧下では残留ひずみが発生しているものの、約 1.1×10^{-4} であり、花崗岩質岩石のそれよりもずっと小さいという測定結果がその考え方の妥当性を裏付けている。また、200°Cから275°Cの温度範囲における線膨張ひずみは、大気圧下と拘束圧49.0MPaの下での測定では大きく異なっており、前者は後者の約2倍になっているが、これは前者の場合クリストバライドの相転移とともに微小クラックが発生し、その影響を受けているためであると考えられる。

三城目安山岩では、30MPa以上になると、熱膨張特性が圧力依存性を示さなくなっていることから、その臨界圧力は花崗岩質岩石よりもずっと低く、300°Cまでの温度範囲では30MPa以下であると考えられる。

(3) 火成岩の熱膨張特性に対する押固め作用の影響

次に、熱膨張特性に対する押固め作用の影響について検討する。稻田花崗岩と沢入花崗岩では、今回測定を行った拘束圧の範囲では、いずれも残留ひずみは正の値を示している。一方、初森花崗閃緑岩では、拘束圧が小さいと、残留ひずみは正の値を示しているが、拘束圧が大きくなると、負の値を示すようになる。また、2種類の安山岩では、比較的拘束圧が小さい段階から残留ひずみは負の値を示している。そして、拘束圧が大きくなると、花崗岩質岩石よりもずっと大きな負の残留ひずみが発生している。これら2種類の安山岩と初森花崗閃緑岩では、室温付近において、拘束圧の増加にともない、線膨張係数が顕著に減少している。拘束圧の増加にともなって残留ひずみが減少する理由の一つは、先に述べたように、微小クラックの発生が抑えられるためであるが、それだけでは負の残留ひずみが発生することはあり得ず、別の要因を考える必要がある。このように、負の残留ひずみの発生がみられるのは、押固め作用による岩石の収縮現象の影響であると考えられる。2種類の安山岩と初森花崗閃緑岩の場合に、室温付近において拘束圧の増加にともない顕著に線膨張係数が減少するのも、押固め作用による岩石の収縮現象の影響であると考えられる。

押固め作用によって火成岩が収縮する具体的なメカニズムについては、まだよくわかっていないところが多く、今後さらに検討を行う必要があるが、一般に、押固め作用は、岩石の鉱物粒子間の結合が緩やかで、作用する圧力が大きいほど、また、温度が高くなるほど顕著になるとされる。今回測定を行った2種類の安山岩は、花崗岩質岩石と比較すると、間隙率が大きく、鉱物粒子間の結合が緩やかなので、押固め作用の影響を受けやすいと考えられる。また、花崗岩質岩石であっても、初森花崗閃緑岩のように、風化・変質している場合には、拘束圧が大きくなると、押固め作用の影響を受けるようになるとされる。一方、沢入花崗岩および稻田花崗岩は、間隙率が小さく、鉱物粒子間の結合がしっかりとおり、また、風化・変質の程度も小さいので、押固め作用の影響がほとんどないと考えられる。

なお、押固め作用による岩石の収縮量は、当然のことながら、昇温速度に依存し、昇温速度が速ければ収縮量が小さく、昇温速度が遅ければ、収縮量が大きくなると考えられる。従来、熱膨張率測定時の昇温速度については、微小クラックの発生との関連でのみ決定されており、供試体内の温度勾配による熱応力に起因するクラックの発生の影響を受けない程度のゆっくりとした速度で測定する必要があるとされてきた。そして、押固め作用により収縮する岩石についての測定が今まで行われていなかったこともある、それとの関連で、どのような昇

温速度で測定すべきかという検討は全くなされてこなかった。今回の測定においても、この点については全く考慮することなく、昇温速度の決定を行っており、今後この点について検討を行う必要がある。

(4) 各岩石の熱膨張特性を支配する要因

今回測定した5種類の岩石は、前に述べたように、大きく花崗岩質岩石と安山岩とに分けることができる。そして、それぞれの熱膨張特性を支配する要因は、以下のようにまとめることができる。

花崗岩質岩石の熱膨張特性は、主として、構成鉱物の熱膨張特性と、鉱物粒子間の熱膨張率の不一致による微小クラックの発生によって支配されている。そして、押固め作用による岩石の収縮の影響は、その岩石が風化・変質している場合を除けば無視できる。また、花崗岩質岩石の場合、今回測定を行った温度範囲では、通常相転移するような鉱物は含まれていない。したがって、石英が α 型から β 型に転移するような高温にならない限り、相転移の影響を考慮する必要はない。

一方、安山岩の熱膨張特性は、一般に構成鉱物の熱膨張特性と押固め作用による岩石の収縮の二つ要因によって支配されており、小松安山岩は、その代表例である。鉱物粒子間の熱膨張率の不一致による微小クラックの発生の影響および構成鉱物の相転移の影響はあまり受けない場合が多いと考えられる。ただし、安山岩の場合、例外的にではあるが、鉱物組成によっては、その熱膨張挙動が、4つの要因全ての影響を受ける場合がある。三城目安山岩はその代表例である。

玄武岩、安山岩、流紋岩といった火山岩のうち、今回測定を行ったのは、安山岩だけであるが、それ以外の大部分の火山岩でも、花崗岩質岩石と比べて、粒径がずっと小さく、また、間隙率が大きいという性質は共通している。したがって、今回安山岩について得られた測定結果の特徴は、基本的にはそれ以外の火山岩にも共通していると考えられる。

5. おわりに

火成岩の熱膨張特性に対する温度および圧力の影響を明らかにするため、3種類の花崗岩質岩石および2種類の安山岩を用いて、温度30°C～284°C、拘束圧0～49.0MPaの条件下で、熱膨張挙動の測定を行った。その結果以下のことが明らかになった。

(1) 火成岩の熱膨張特性は、温度にも圧力にも依存する。

(2) 火成岩の熱膨張特性は、①構成鉱物の熱膨張特性、②構成鉱物の相転移、③鉱物粒子間の熱膨張率の不一致による微小クラックの発生、④押固め作用による岩

石の収縮の4つの要因によって支配されており、今回測定を行った5種類の岩石の熱膨張特性は、いずれもこれらの要因によって支配されているとして説明することができる。これら4つの要因のどれが重要かは、岩石の種類によって、また温度、圧力条件によって異なる。

(3) 花崗岩質岩石では、鉱物粒子間の熱膨張率の不一致による微小クラックの発生の影響が顕著にみられるのに対して、押固め作用による岩石の収縮の影響は比較的小ない。一方、火山岩では、前者の影響はあまりみられないのに対して、後者の影響が顕著にみられる。

参考文献

- 1) Heuze, F. E. : High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks - A review, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 1, pp. 3-10, 1983.
- 2) 北野晃一、新孝一、木下直人、奥野哲夫：高温下岩石の力学特性、熱特性および透水特性に関する文献調査、応用地質、29巻、3号、pp. 36-47, 1988.
- 3) Heard, H. C. : Thermal expansion and inferred permeability of Climax quartz monzonite to 300°C and 27.6 MPa, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 17, pp. 289-296, 1980.
- 4) Heard, H. C. and Page, L. : Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granite to 350°C and 55 Megapascals, *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, No. B11, pp. 9340-9348, 1982.
- 5) Bauer, S. J. and Handin, J. : Thermal expansion and cracking of three confined, water-saturated igneous rocks to 800°C, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 16, pp. 181-198, 1983.
- 6) Richter, D. and Simmons, G. : Thermal expansion behavior of igneous rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 11, pp. 403-411, 1974.
- 7) Cooper, H. W. and Simmons, G. : The effects of cracks on thermal expansion of rocks, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 36, pp. 404-412, 1977.
- 8) Johnson, B., Gangi, A. F. and Handin, J. : Thermal cracking of rock subjected to slow, uniform temperature changes, *Proc. 19th Symp. on Rock Mech.*, No. 1, pp. 259-267, 1978.
- 9) 奥野哲夫、木下直人：高温下における岩石の線膨張特性、第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 176-180, 1985.
- 10) Kozu, S. and Saiki, S. : The thermal expansion of alkali-felspars, *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, Ser. 3, Vol. 2, pp. 203-238, 1925.
- 11) Kozu, S. and Ueda, J. : Thermal expansion of plagioclase, *Proc. Imp. Acad. Japan*, Vol. 9, pp. 262-264, 1933.
- 12) Kozu, S. and Ueda, J. : Thermal expansion of basaltic hornblende, *Proc. Imp. Acad. Japan*, Vol. 10, pp. 25-28, 1934.
- 13) Rosenholtz, J. L. and Smith, D. T. : Thermal studies of

- orthoclase and microcline, *Am. Mineral.*, Vol. 27, pp. 344-349, 1942.
- 14) 大草重康：土木地質学，朝倉書店，pp. 61-76, 1972.
 - 15) Kozu, S. and Ueda, J. : Thermal expansion of augite, *Proc. Imp. Acad. Japan*, Vol. 10, pp. 87-90, 1934.
 - 16) Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussmann, J. : *Rock-forming minerals*, Vol. 4, Longman, pp. 179-230, 1975.
 - 17) Johnson, W. and Andrews, K. W. : An X-ray study of the inversion and thermal expansion of cristobalite, *Trans. British Ceram. Soc.*, Vol. 55, pp. 227-236, 1956.
 - 18) 作花清夫, 境野照雄, 高橋克明編：ガラスハンドブック, 朝倉書店, 1975.
 - 19) Yong, C. and Wang, C. : Thermally induced acoustic emission in Westerly granite, *Geophysical Research Letters*, Vol. 7, pp. 1089-1092, 1980.
 - 20) 江原昭次, 寺田 孚：加熱・冷却にともなう岩石のAE発生特性, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 403-408, 1984.
 - 21) Wong, T. F. and Brace, W. F. : Thermal expansion of rocks : some measurements at high pressure, *Tectonophysics*, Vol. 57, pp. 95-117, 1979.
 - 22) 江原昭次, 柳谷 俊, 寺田 孚：低温で熱サイクルをうける乾燥岩石の熱膨張について, 材料, 第34巻, 第382号, pp. 857-863, 1985.

(1994. 2. 7 受付)

THERMAL EXPANSION BEHAVIOR OF IGNEOUS ROCK AT HIGH TEMPERATURES AND PRESSURES

Naoto KINOSHITA, Tohru ABE and Tetsuo OKUNO

The thermal expansions of three granitic rocks and two andesites have been measured at confining pressures of 0, 9.8, 29.4, and 49.0 MPa and at temperature from 30 to 284°C by use of a new apparatus. The observed thermal expansions of these rocks are dependent of both temperature and pressure. Significant differences in the thermal expansion behavior exist between granitic rock and andesite. The results indicate that the thermal expansion behavior of igneous rock can be determined by the four factors : the thermal expansion of constituent minerals; the phase transition of constituent minerals; microcrack formation and extension induced by thermoelastic property differences between adjacent grains; and pore volume decreases related to thermal compaction.