

高温下における堆積岩の熱膨張・収縮特性

木下直人¹・安部 透²

¹正会員 理修 清水建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒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)

5種類の軟岩と、5種類の硬岩を用いて、高温下における堆積岩の熱膨張・収縮特性が温度、圧力、含水状態によってどのように変化するかを調べた。また、熱膨張・収縮特性を支配する要因についても検討を行った。その結果、軟岩と硬岩とでは、熱膨張・収縮特性を支配する要因が異なるため、両者の挙動が全く異なること、および軟岩の場合には、温度、圧力や含水状態の影響を大きく受けることがわかった。

Key Words: *thermal expansion, high temperature, sedimentary rock, soft rock, hard rock*

1. はじめに

近年、地下岩盤内での新たなエネルギー関連施設等の開発にともない、高温下における岩盤の挙動についての研究が進められている。高温下岩石の熱膨張・収縮特性は、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、従来研究例があまり多くなかった。その上、高温下岩石の熱膨張・収縮特性に関する研究は、従来主として火成岩を対象としてきており^{1)~7)}、堆積岩の熱膨張・収縮特性に関する研究例は、それと比較すると、ずっと少ない。しかも、従来の堆積岩の熱膨張・収縮特性に関する研究の多くは硬岩を対象にしており、軟岩の熱膨張・収縮特性と硬岩のそれとがどのように異なるかについてはほとんどわかっていない。また、堆積岩の熱膨張・収縮特性に対する圧力や含水状態の影響についても、研究例が少なく、よくわかっていない。

高温下岩石の熱膨張・収縮特性に関する研究において、軟岩を用いている例としては、Lappinら^{8)~10)}およびBuskirkら¹¹⁾の研究がある。LappinらおよびBuskirkらは、凝灰岩の熱膨張・収縮挙動を調べ、間隙率が25%以上の、ゼオライトや膨張粘土を含む凝灰岩の挙動は、大気圧下においても、拘束圧下においても、脱水作用に支配されること、および脱水作用が生じるような条件下では、試料が収縮し、線膨張係数が負になることを指摘している。このような熱膨張・収縮挙動の特徴が、軟岩の挙動の一般的な特徴をどの程度反映しているかについては、他に比較すべき測定例がないため、いまのところほとんどわかっていない。

堆積岩の熱膨張・収縮特性に対する圧力および含水状態の影響に関しては、Lappin and Nimick¹⁰⁾およびBuskirkら¹¹⁾による研究の他に、Somertonら¹²⁾、Contrerasら¹³⁾の研究例がある。Somertonらは、拘束圧下において、硬岩に属すると思われる、飽和した3種類の砂岩の熱膨張・収縮挙動を調べ、大気圧下での乾燥供試体のそれと大きな違いがないことを報告している。また、Contrerasらは、280℃までの温度範囲において、乾燥した2種類の砂岩の熱膨張・収縮挙動に対する拘束圧の影響を調べ、150℃以上の温度での線膨張係数は、拘束圧の増加にともなってやや減少する場合と、拘束圧に依存しない場合とがあるという結果を得ている。Lappin and Nimick¹⁰⁾は、硬岩に属する凝灰岩の熱膨張・収縮特性に対する拘束圧の影響についても調べており、100℃以上の温度になると、拘束圧の作用によって線膨張係数が大気圧下でのそれよりも小さくなる場合があり、それは、岩石内に存在する微小クラックの閉塞効果によるとしている。

このように、堆積岩の場合、火成岩とは異なった要因によってその熱膨張・収縮挙動が支配され、火成岩とは全く異なった挙動を示している場合がある。特に軟岩の場合、その力学特性がそうであるように、熱膨張・収縮特性もまた、温度、圧力や含水状態の影響を硬岩よりもはるかに受けやすく、複雑な挙動を示す可能性があると考えられる。それにもかかわらず、上に述べたように、まだ全体的に研究例が少なく、その特性のごく一部しか明らかになっていない。そこで、まず、軟岩と硬岩の熱膨張・収縮特性の違いを調べるため、3種類の軟岩と、5種類の硬岩について、大気圧下において、室温から500

表一 1 岩石試料の単位体積重量、
間隙率および一軸圧縮強度

	岩石の種類 (産地)	単位体積重量 kN/m ³	間隙率 %	一軸圧縮強度 MPa
古第三紀 碎屑岩	砂岩 A (北海道)	24.8	7.5	71.6
	砂岩 B (北海道)	24.8	6.9	75.7
	頁岩 A (北海道)	24.2	8.9	80.3
新第三紀 碎屑岩	砂岩 C (北海道)	13.6	42.2	1.8
	砂岩 D (神奈川県)	15.3	44.3	12.5
	泥岩 A (富山)	17.6	29.6	3.8
	泥岩 B (神奈川県)	15.5	41.6	5.7
凝灰岩	凝灰岩 A (群馬)	25.4	9.9	147.4
	凝灰岩 B (栃木)	23.5	12.3	89.9
	凝灰岩 C (栃木)	13.5	43.5	16.2

℃までの温度範囲において、熱膨張・収縮挙動の測定を行った。また、軟岩の熱膨張・収縮特性に対する圧力の影響を明らかにするために、別の2種類の軟岩について、30℃から280℃までの温度範囲で熱膨張・収縮特性の圧力依存性を調べた。さらに、そのうちの1種類の岩石について、拘束圧下において、熱膨張・収縮特性に対する含水状態の影響を調べた。その結果、軟岩と硬岩とでは熱膨張・収縮特性が全く異なること、および軟岩の場合には、温度、圧力や含水状態の影響を大きく受けることが明らかになったので、それについて報告する。

2. 実験概要

大気圧下における熱膨張・収縮挙動の測定には真空理工(株)製の押棒式熱膨張計(DL-1500Y型)を、拘束圧下における測定にはMT S社製の線膨張係数測定装置の一部を改良したものをを用いた⁷⁾。

測定に用いた岩種は古第三紀の碎屑岩3種類、新第三紀の碎屑岩4種類および新第三紀の凝灰岩3種類の合計10種類である。これらの試料の単位体積重量、間隙率および一軸圧縮強度を表一1に示す。新第三紀の碎屑岩および凝灰岩Cはいずれも間隙率がほぼ30%以上、一軸圧縮強度が20MPa以下であり、軟岩に属している。これに対して残りの5種類の試料はいずれも間隙率が15%以下、一軸圧縮強度が70MPa以上であり、硬岩に属している。大気圧下における測定では、これら全ての岩種を用いたが、拘束圧下における測定では、砂岩Dと凝灰岩Cのみを用いた。

含水状態に関しては、基本的には乾燥状態で測定を

行ったが、凝灰岩Cについては、拘束圧下において、含水飽和状態でも測定を行った。ここでは、デシケータ内で1週間以上乾燥させたものを乾燥状態、72時間以上減圧水浸させたものを含水飽和状態としている。供試体寸法は、直径30mm、高さ100mmとし、所定の含水状態にした後測定を行った。大気圧下における測定では、供試体を設置し、30℃/hの昇温速度で500℃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℃まで冷却しながら線膨張ひずみと残留ひずみを測定した。ただし、砂岩Dと凝灰岩Cについては、拘束圧下での測定と温度範囲を一致させるため、300℃までとした。そして、熱履歴の影響を調べるため、同一試料について2回繰り返し測定を行った。

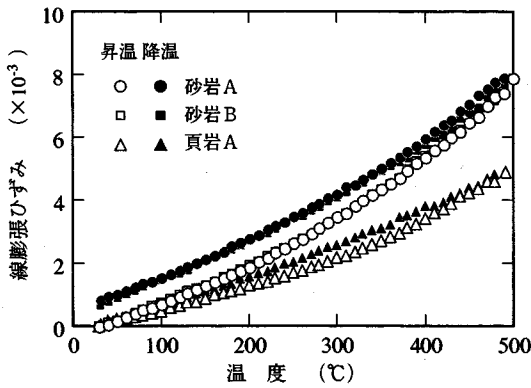
拘束圧下における測定では、所定の拘束圧、間隙水圧を作用させ、試料のクリープ変形が収束、安定してから加熱を開始した。乾燥状態の供試体を用いた測定では、20℃/hの昇温速度で280℃まで加熱し、約3時間一定温度を保持した後、加熱時と同じ速度で30℃まで冷却しながら線膨張ひずみと残留ひずみを測定した。280℃で一定温度を保持している時間を、大気圧下における測定時のそれよりも長く、3時間としたのは、メンブレンの影響により、供試体内の温度が定常状態に達するまでの時間が少し長くなることを考慮したためである。なお、実際の測定時における供試体内の温度測定結果によれば、加熱最高温度に達した約60分後には供試体内温度はほぼ定常状態に達しており、一定温度を保持している時間ももっと短くても問題なかったことが確認されている。含水飽和状態の供試体を用いた測定でも、昇温速度は20℃/hとしたが、乾燥状態と比べて高温でのメンブレンの劣化が著しいので、測定温度範囲を少し狭くし、260℃までとした。測定時の有効拘束圧は、乾燥状態では、0.29, 0.98, 2.94MPaの3条件、含水飽和状態では、0.49, 0.98, 2.94 MPaの3条件とした。含水飽和状態では、供試体の温度が260℃になっても間隙水が沸騰しないように間隙水圧を12.26MPaとしているので、実際に作用させている拘束圧はそれぞれ12.75, 13.24, 15.20MPaである。

3. 実験結果

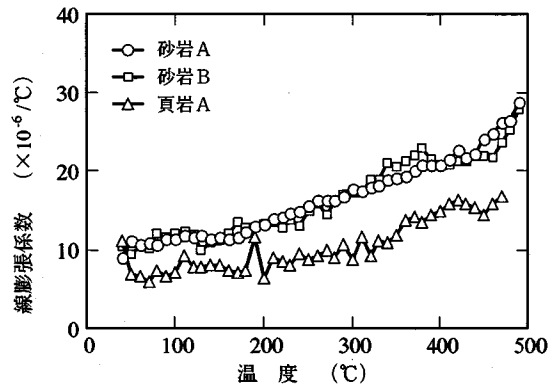
(1) 大気圧下における測定

大気圧下における古第三紀の碎屑岩の線膨張ひずみおよび昇温時の線膨張係数の測定結果を図一1に示す。3種類の岩石の線膨張係数は、いずれも温度の上昇にともなって増加し、400℃では常温における値の2倍以上になっている。そして、残留ひずみはあまり大きくない。

新第三紀の碎屑岩の線膨張ひずみおよび昇温時の線膨張係数の測定結果は図一2のようになっており、古第三

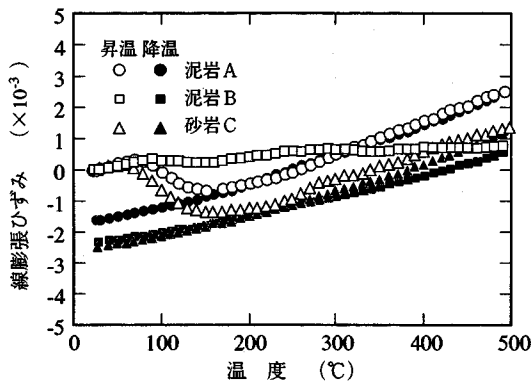


a) 線膨張ひずみと温度の関係

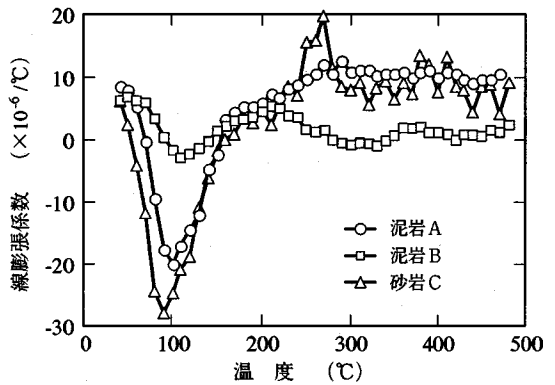


b) 線膨張係数と温度の関係 (昇温時)

図-1 古第三紀の碎屑岩の熱膨張特性

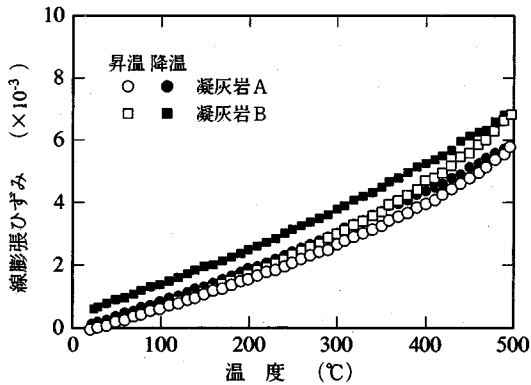


a) 線膨張ひずみと温度の関係

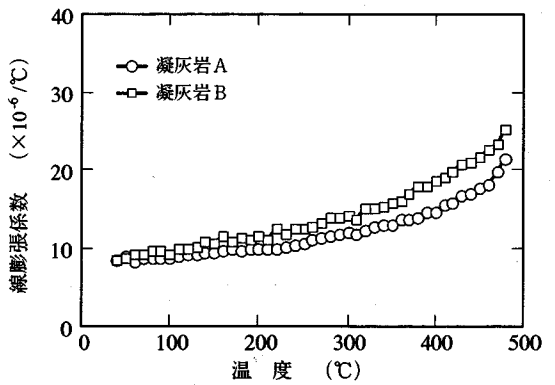


b) 線膨張係数と温度の関係 (昇温時)

図-2 新第三紀の碎屑岩の熱膨張特性



a) 線膨張ひずみと温度の関係

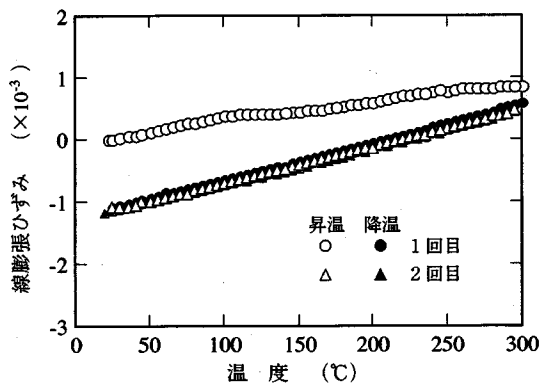


b) 線膨張係数と温度の関係 (昇温時)

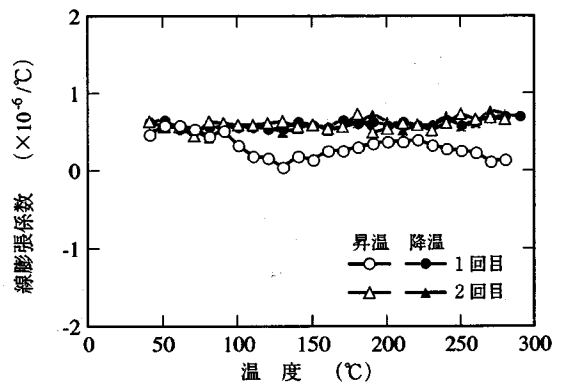
図-3 凝灰岩の熱膨張特性

紀の碎屑岩とは全く違った特性を示している。最も大きな特徴は、約70℃から150℃までの温度範囲において、試料が収縮し、線膨張係数が負の値を示すかまたは、収縮しないまでも、非常に小さな線膨張係数の値を

示すということである。そして、いったん収縮した試料は、冷却過程においても元に戻らず、負の残留ひずみ（収縮ひずみ）を生じている。200℃以上になると、砂岩Cと泥岩Aは温度上昇にもなって膨張し、残留ひずみ

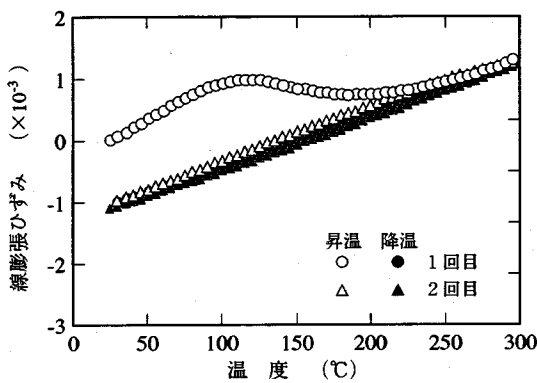


a) 線膨張ひずみと温度の関係

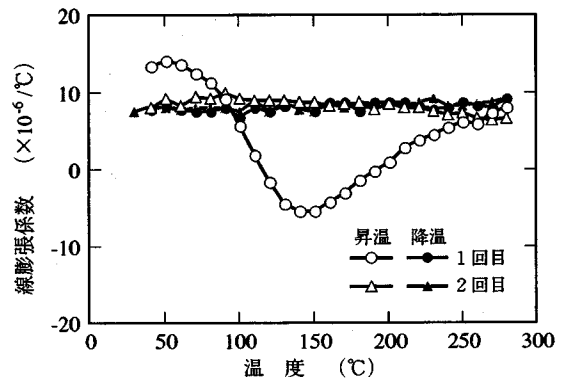


b) 線膨張係数と温度の関係 (昇温時)

図-4 2回繰り返し測定時の砂岩Dの熱膨張特性



a) 線膨張ひずみと温度の関係



b) 線膨張係数と温度の関係 (昇温時)

図-5 2回繰り返し測定時の凝灰岩Cの熱膨張特性

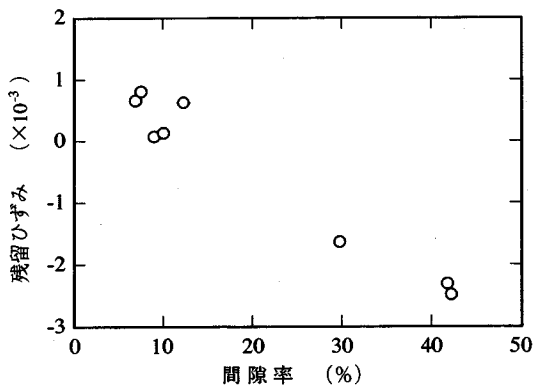


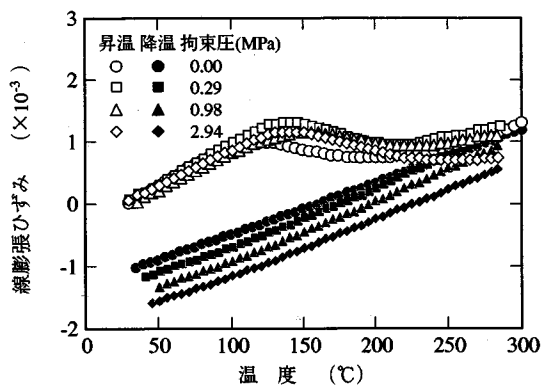
図-6 残留ひずみと間隙率の関係

をほとんど生じないのに対して、泥岩Bは昇温時にほとんど膨張せず、大きな負の残留ひずみを生じている。

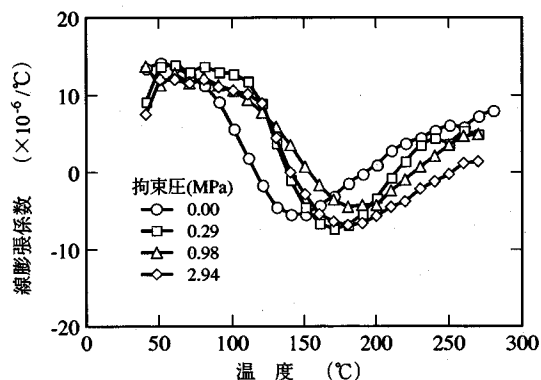
凝灰岩Aおよび凝灰岩Bは、図-3に示すように、常温付近の線膨張係数の値に関しても、線膨張係数の温度依存性に関しても、古第三紀の碎屑岩と類似の特性を示している。

砂岩Dおよび凝灰岩Cについて、大気圧下において、2回繰り返し測定を行った結果は図-4および図-5のようになっており、砂岩Dも凝灰岩Cも、1回目の測定結果と2回目のそれとは全く異なっている。砂岩Dの1回目の昇温、降温時の熱膨張・収縮挙動は、全体的に、泥岩Bと同じ特徴を示しており、200°C以上になっても、昇温時にほとんど膨張せず、大きな負の残留ひずみを生じている。一方、2回目の測定においては、昇温時も降温時も、1回目の降温時の測定結果とほぼ一致しており、昇温時も試料の収縮現象がみられない。

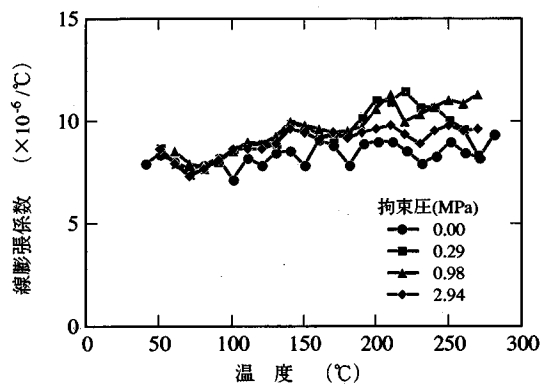
軟岩に分類される凝灰岩Cは、硬岩に分類される凝灰岩Aや凝灰岩Bとは異なり、1回目の昇温時においては、120°C以上になると、試料は収縮し、線膨張係数は負の値を示している。180°C以上になると、再び温度上昇にもなると試料は膨張するようになる。新第三紀の碎屑岩と同様に、いったん収縮した試料は、冷却しても元に戻らず、大きな負の残留ひずみを生じている。2回目の測定においては、砂岩Dと同様に、昇温時も降温時も、1回目の降温時の測定結果とほぼ一致している。



a) 線膨張ひずみと温度の関係

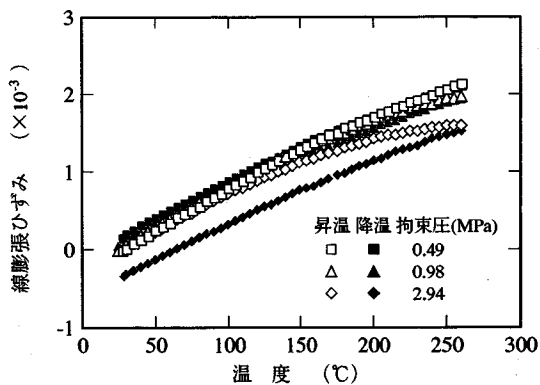


b) 昇温時の線膨張係数と温度の関係

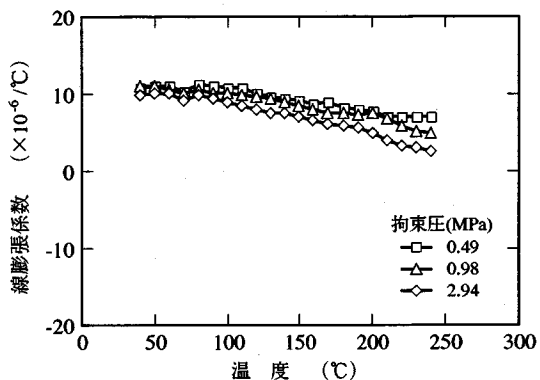


c) 降温時の線膨張係数と温度の関係

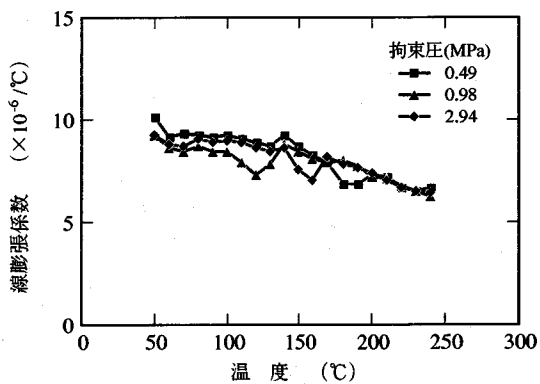
図-7 乾燥状態における凝灰岩Cの熱膨張特性



a) 線膨張ひずみと温度の関係



b) 昇温時の線膨張係数と温度の関係



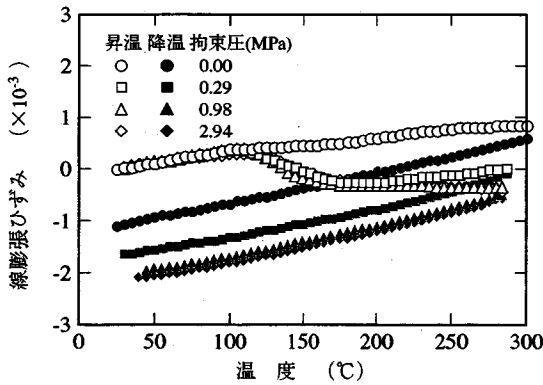
c) 降温時の線膨張係数と温度の関係

図-8 含水飽和状態における凝灰岩Cの熱膨張特性

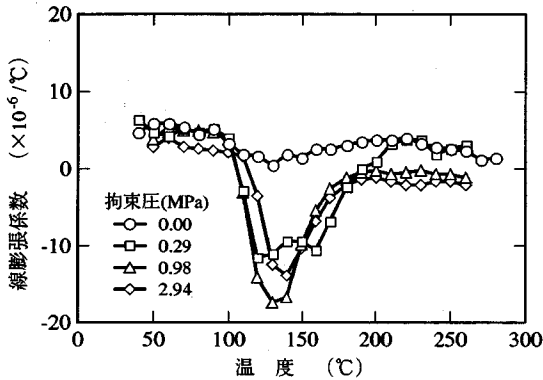
500°Cまで加熱した8種類の岩石についての、残留ひずみと間隙率との関係を図-6に示す。全体的に大きく二つのグループに分かれており、間隙率の大きい軟岩はいずれも測定開始時よりも大きく収縮しているのに対して、間隙率が小さい硬岩は逆に測定開始時よりも少し膨張している。

(2) 拘束圧下における測定

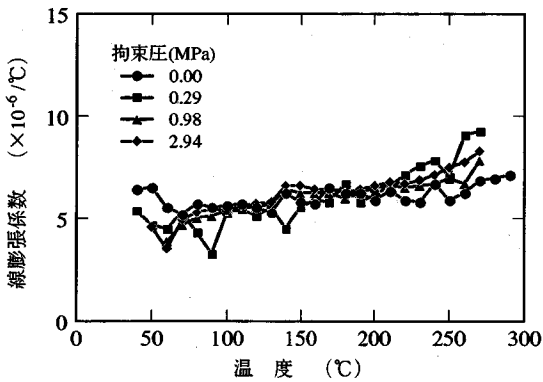
大気圧下および拘束圧下における乾燥状態の凝灰岩Cの線膨張ひずみおよび線膨張係数の測定結果を図-7に示す。ただし、大気圧下では、繰り返し2回測定を行ったうちの1回目の測定結果だけを示してある。昇温時には、室温から約100°Cまでの温度範囲では、線膨張ひずみは温度上昇にともなってほぼ直線的に増加してい



a) 線膨張ひずみと温度の関係



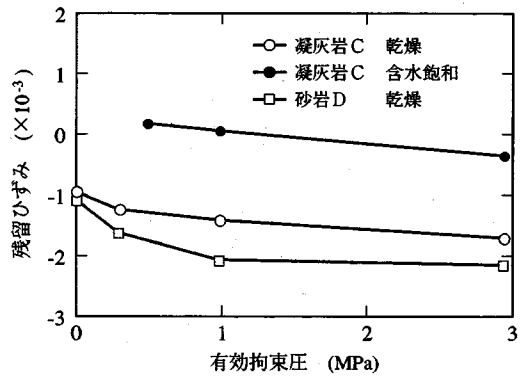
b) 昇温時の線膨張係数と温度の関係



c) 降温時の線膨張係数と温度の関係

図一 九 乾燥状態における砂岩Dの熱膨張特性

る。この直線部分の線膨張係数はほとんど拘束圧に依存せず、 $(11 \sim 14) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 前後の値を示している。140°C以上になると、試料は収縮し、線膨張係数は負の値を示す。200°C以上になると、拘束圧が小さい場合には、再び温度上昇にともなって膨張するようになるのに対して、拘束圧が大きい場合には、さらに収縮を続ける。280°Cで一定温度を保持している際にも、試料は収縮を続けてお



図一 十 凝灰岩Cおよび砂岩Dの残留ひずみと拘束圧の関係

り、拘束圧0.29MPaでの収縮ひずみは 1.8×10^{-4} 、拘束圧2.94MPaでのそれは 2.5×10^{-4} と、拘束圧が大きいほど収縮量が大きくなっている。

降温時の挙動は、昇温時のそれに比べてはるかに単純であり、線膨張係数は拘束圧にも温度にもほとんど依存せず、 $(7.8 \sim 11.2) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の範囲の値を示している。

含水飽和状態における凝灰岩Cの線膨張ひずみおよび線膨張係数の測定結果を図一 八に示す。乾燥状態の場合とは異なり、温度上昇にともなって試料が収縮する現象はみられない。そして線膨張係数は温度上昇にともなって低下している。室温付近では、線膨張係数は拘束圧にあまり依存しておらず、例えば、50°Cでは $(10.4 \sim 11.1) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、乾燥状態におけるそれに近い値を示している。一方、高温になるにしたがって、線膨張係数は拘束圧に依存するようになり、例えば、240°Cでは、拘束圧0.49MPaにおける線膨張係数は $7.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であるのに対して、拘束圧2.94MPaにおけるそれは $2.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と、拘束圧が大きいほど線膨張係数は小さな値を示している。また、260°Cにおいて、一定温度を保持している際には、拘束圧が0.49MPaではほとんど試料の収縮現象がみられないのに対して、拘束圧2.94MPaでは約 1.0×10^{-4} の収縮ひずみが発生しており、拘束圧が大きくなると、乾燥状態の場合と同様に、試料の収縮現象がみられる。

降温時における線膨張係数は、乾燥状態の場合と同様に、拘束圧にほとんど依存しない。ただし、乾燥状態では温度にもほとんど依存していないのに対して、含水飽和状態では温度に依存しており、240°Cでは、 $(6.0 \sim 6.7) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、150°Cでは $(7.7 \sim 8.9) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、50°Cでは、 $(9.4 \sim 10.2) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と、温度低下にともなって単調に増加する傾向を示している。

大気圧下および拘束圧下における砂岩Dの熱膨張・収縮特性の測定結果を図一 九に示す。ただし、大気圧下では、凝灰岩Cと同様に、2回繰り返し測定を行ったうち

の1回目の測定結果のみを示してある。昇温時における、室温から約110℃までの温度範囲での線膨張ひずみは、温度上昇にともなってほぼ直線的に増加している。この直線部分の線膨張係数は、凝灰岩Cのそれよりもかなり小さな値を示している。そして、拘束圧に依存する傾向がみられ、大気圧下では $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 前後の値を示しているのに対して、拘束圧2.94MPaでは約 $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、大気圧下における値よりもかなり小さい。約110℃以上になると、大気圧下ではあまり膨張しなくなり、 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ という非常に小さな線膨張係数を示す。また、拘束圧0.29MPa以上では、試料は収縮し、線膨張係数は負の値を示す。特に、160℃までの温度範囲では、著しい収縮現象がみられる。凝灰岩Cの場合と同様に、拘束圧が大きくなるほどより高温になるまで収縮現象が続いており、拘束圧0.98MPa以上では、280℃になっても収縮現象が続いている。280℃（大気圧下では300℃）で一定温度を保持している際にも試料は収縮を続けており、例えば、拘束圧0.29MPaでは 1.3×10^{-4} 、拘束圧2.94MPaでは 2.5×10^{-4} の収縮ひずみが発生している。

降温時の挙動は、凝灰岩Cの場合と同様に、昇温時のそれに比べてはるかに単純であり、線膨張係数はほとんど拘束圧に依存しない。そして、270℃前後では $(6.9 \sim 9.3) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、150℃前後では $(5.5 \sim 6.7) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、50℃前後では $(3.9 \sim 6.5) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と、全体的に凝灰岩Cよりもかなり小さい値を示しており、また、温度低下にともなって単調に減少する傾向を示している。

凝灰岩Cおよび砂岩Dの残留ひずみの測定結果を図-10に示す。凝灰岩Cは、乾燥状態では、大気圧下でも約 0.9×10^{-3} の収縮ひずみを生じている。拘束圧下では更に収縮ひずみが大きくなり、例えば、拘束圧2.94MPaの場合には、 1.8×10^{-3} と、大気圧下の約2倍の値を示している。一方、含水飽和状態では、拘束圧が小さいと、残留ひずみがほとんど発生していない。そして、拘束圧が大きい場合だけ収縮ひずみが生じている。乾燥状態と比較すると、全体的に、含水飽和状態では、残留ひずみがずっと小さくなっている。

砂岩Dの、乾燥状態における残留ひずみの測定結果もほぼ凝灰岩Cのそれと同じ傾向を示しており、拘束圧が大きくなるに従って収縮ひずみが大きくなっている。

以上のように、堆積岩の熱膨張・収縮特性、特に軟岩のそれは、温度、圧力や含水状態の影響を大きく受けることが明らかになった。前に述べたように、高温下岩石の熱膨張特性は、高温下において熱応力が作用する岩盤の挙動を基本的に支配する物性である。したがって、この研究により、堆積岩の場合、高温下岩盤の挙動を予測する上で、岩石の熱膨張・収縮特性に対する温度、圧力および含水状態の影響を把握することが非常に重要であることが明らかになった。

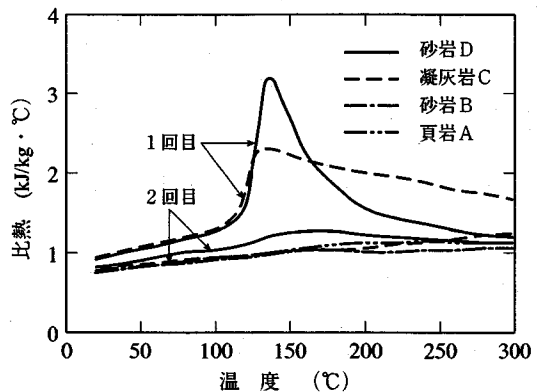


図-11 新第三紀および古第三紀碎屑岩の比熱と温度の関係

4. 考察

(1) 軟岩と硬岩の熱膨張・収縮特性

今回測定した5種類の軟岩では、いずれも乾燥状態では、100℃前後において試料が収縮し、線膨張係数が負の値を示すかまたは非常に小さな値を示している。そして、一度収縮した試料は、冷却しても元に戻らず、負の残留ひずみを生じている。このような試料の収縮現象は、花崗岩や安山岩といった火成岩や、古第三紀以前の硬岩に属する堆積岩にはみられない現象である。そして、膨張性粘土やゼオライトといった特定の鉱物が含まれている岩石だけにみられるのではなく、全ての軟岩に共通してみられる現象であると考えられる。また、これら5種類の軟岩のうち、泥岩Bと砂岩Dは、200℃以上の温度になってもほとんど膨張せず、大きな負の残留ひずみを生じている。Lappin⁹⁾は、ネバダ州内の3箇所から採取した凝灰岩の熱膨張・収縮特性について調べ、間隙率が25%以上の凝灰岩では、100~300℃の温度範囲で試料が収縮し、また、300℃以上になっても収縮し続ける場合があることを指摘している。そして、試料が収縮するのは、火山ガラスまたはその変質によって生じた粘土鉱物やゼオライトからの脱水の影響によるとしている。泥岩Bと砂岩Dとに共通しているのは、火山ガラスを多く含むことである。したがってこれらの岩石が200℃以上になってもほとんど膨張しないのは、Lappinが指摘しているのと同じ理由によるものと考えられる。

一方、100℃前後において、全ての乾燥状態の軟岩に共通してみられる収縮現象は、特定の鉱物を含んでいるためではないので、Lappinの指摘とは別のメカニズムによるものと考えられる。そのメカニズムとしては、以下に示すような、吸着水の脱水による試料の収縮が考えられる。デシケート乾燥した岩石の場合、完全に乾燥しているわけではなく、吸着水等の水分が含まれている。したがって

て、不飽和の粒子-水系を構成している物質であるときみなすことができる。このような2相の界面に働く表面張力は、界面の面積を最小にする方向に働く力であり、粒子相互の結合力として作用する。このような2相系としての岩石を加熱し、100℃前後になると、吸着水が次第に失われていく。そして、水膜の厚さの減少にともない表面張力が増加するので、粒子同志を引き寄せる力が増大する。軟岩の場合、粒子骨格がまだ強固になっていないので、この影響を受け、試料は全体として収縮する。一方、硬岩の場合は、脱水現象があったとしても、粒子骨格が強固なものになっているので、その影響により岩石が収縮することはないと考えられる。

凝灰岩Cと砂岩Dについて、大気圧下で、乾燥試料を用いて、2回繰り返し測定を行った結果、2回目の測定では、試料の収縮現象が全然みられない。これは、1回目の測定において、完全に脱水されてしまい、2回目では脱水現象が全然起こらないためであると考えられる。

もしも、100℃前後における試料の収縮現象が、吸着水の脱水によるものであれば、測定終了後の試料は、空気中の水分を吸収できる環境下に長期間放置すれば、再び膨張し、元の長さに戻ると考えられる。そこで、大気圧下、300℃までの温度範囲において、線膨張係数を測定した凝灰岩Cについて、長期間室内に放置し、質量および長さの変化の測定を行ってみた。その結果、線膨張係数測定終了時に、測定開始前の約95.7%に減少していた質量が、徐々に空気中の水分を吸収して増加するのにもなって、試料が膨張し、測定開始前の約98.6%まで質量が回復したときに、試料の長さが元に戻ったことが確認された。これにより、上に述べた考え方の妥当性を裏付けることができた。

軟岩の熱膨張・収縮挙動が吸着水等の脱水の影響を大きく受けているのであれば、これらの岩石の比熱もまた脱水の影響を受けると考えられる。そこで、今回の実験に用いた新第三紀の凝灰岩C、砂岩Dと、古第三紀の砂岩B、頁岩Aについて、室温から300℃までの温度範囲で断熱法により比熱の測定を行ってみた。その結果を図-11に示す。凝灰岩Cおよび砂岩Dについてのみ2回繰り返し測定を行ったが、1回目の測定では、100℃以上になると、両者ともに急激に比熱が増大し、140℃付近でピーク値を示している。2回目の測定では、全体的にやや値が小さくなっており、また、高温になって急激に比熱が増大するという現象もみられない。これらの測定結果は、1回目の測定では、100℃以上になると脱水が起これ、多量の脱水エネルギーを必要とするが、2回目の測定では、脱水後の供試体を用いているので、全体的に水分が減少した分だけ比熱が小さくなるとともに、100℃以上になっても、脱水エネルギーを必要としないと考えることにより説明することができる。1回目の測定において

比熱の値がピーク値を示す温度は脱水が最も盛んな温度であると考えられるが、それは、熱膨張・収縮挙動の測定において、試料が最も著しい収縮を示す温度にほぼ対応している。

凝灰岩Cについて、その鉱物組成から、予測される吸着水の脱水エネルギーを求め、実測値との比較を行ってみた。凝灰岩Cを構成している最も主要な鉱物はゼオライトであることが知られているので、この場合、主としてゼオライトの吸着水が脱水すると考えられる。Barrer and Cram¹⁵⁾によれば、ゼオライトの吸着水を脱水・蒸発させるのに必要な熱量は、吸着水1kg当たり $3.8 \times 10^3 \sim 7.1 \times 10^3$ kJ (0.9~1.7kcal/g)である。一方、図-11から1回目と2回目の凝灰岩Cの比熱の測定値の差が脱水によって生じたとして、吸着水の脱水エネルギー(蒸発潜熱を含む)を求めてみると、供試体1kg当たり約155kJである。供試体を300℃まで加熱し、脱水したことによる重量変化は3.9%であったので、吸着水1kg当たりの脱水エネルギーに換算すると、約 4.0×10^3 kJとなる。この値は、ゼオライトの吸着水を脱水・蒸発させるのに必要な熱量とほぼ対応している。砂岩Dの場合、供試体を300℃まで加熱し、脱水したことによる重量変化は2.2%であることが明らかになっているが、その鉱物組成が不明なので、凝灰岩Cと同じような検討を行うことはできない。しかし、吸着水の脱水エネルギーが凝灰岩Cのそれと同じであると仮定すれば、この重量変化の実測値は、1回目と2回目の比熱の測定値の差が吸着水の脱水によると考えた場合に推定される重量変化量とほぼ対応している。

高温下岩石の比熱に関する既往の研究結果によれば¹⁴⁾、硬岩の比熱は、岩石の種類による差があまりなく、どの岩石も同じような値を示している。今回測定した古第三紀の堆積岩もそれらと同様な値を示している。硬岩の場合には、間隙率が小さく、測定開始時における含有水分量はごくわずかである。したがって、比熱の測定値は脱水の影響をほとんど受けず、新第三紀の堆積軟岩のそれとは大きく異なる結果が得られたと考えられる。

このように、新第三紀の堆積軟岩と古第三紀以前の硬岩に属する堆積岩とでは、高温下における熱膨張・収縮特性や比熱が全く異なっており、前者のみが吸着水等の脱水の影響を大きく受けて収縮することが明らかになった。

(2) 軟岩の熱膨張挙動に対する含水状態および拘束圧の影響

軟岩の場合、上に述べたように、乾燥状態では約100℃以上の温度になると、吸着水等の脱水の影響を大きく受け、試料が収縮する傾向を示している。一方、含水飽和状態では、脱水現象は全然生じないので、当然のことな

がら、乾燥状態の場合とは異なり、温度上昇にもなって試料が収縮する現象は起こらないはずである。実際に、凝灰岩Cの含水飽和状態における測定結果はそのようになっている。したがって、軟岩の熱膨張・収縮特性が含水状態によって異なるのは、主として吸着水等の脱水現象が生じるか否かの違いによると考えられる。

次に、軟岩の熱膨張・収縮特性に対する拘束圧の影響について検討を行う。乾燥状態では、拘束圧が大きくなると、凝灰岩Cも砂岩Dも、試料が収縮する温度範囲が広がり、収縮量も大きくなっている。含水飽和状態でも、高温になるにしたがって、線膨張係数は拘束圧に依存するようになり、拘束圧が大きいほど線膨張係数は小さな値を示している。また、280℃または260℃で一定温度を保持しているときに、拘束圧が大きくなると、乾燥状態でも含水飽和状態でも、試料の収縮現象がみられる。

岡本ら¹⁶⁾によれば、堆積物が固化し、岩石になる過程は、①圧密、②押固め、③のり付けの3領域に分けることができると考えられている。そして軟岩は、吸着水の脱水と、それともなう押固めによって特徴づけられる②の段階にあり、前に述べたように、粒子骨格がまだ強固になっていない。一般に、押固め作用は、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考えられている。今回の、拘束圧下における軟岩の線膨張係数の測定結果でも、拘束圧が大きくなるほど、また温度が高くなるほど試料の収縮現象が顕著になっており、押し固め作用による挙動の特徴と一致している。したがって、軟岩の熱膨張・収縮特性が拘束圧依存性を示し、拘束圧が大きくなると、試料の収縮現象が著しくなるのは、試料が押固め作用の影響を受けるためであると考えられる。なお、押固め作用によって岩石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ことが多く、今後さらに検討を行う必要がある。

(3) 堆積岩の熱膨張特性を支配する要因

筆者ら⁷⁾は、火成岩の熱膨張・収縮挙動は、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、④押固め作用による岩石の収縮の四つの要因によって支配されていることを明らかにした。堆積岩の場合、硬岩の熱膨張・収縮挙動を支配する要因は、基本的には火成岩のそれと同じであると考えられる。一方、軟岩の熱膨張・収縮挙動に対しては、四つの要因のうち、鉱物粒子の熱膨張率の不一致による微小クラックの発出現象の影響は無視することができると思われる。残りの三つの要因に加えて、軟岩固有の要因として、前に述べたように、吸着水等の脱水による岩石の収縮作用がある。したがって、軟岩の熱膨張・収縮挙動は、①構成鉱物の熱膨張特性、

②構成鉱物の相転移、③押固め作用による岩石の収縮、④吸着水等の脱水による岩石の収縮の四つの要因によって支配されていると考えられる。

5. おわりに

10種類の堆積岩の高温下における熱膨張・収縮特性を調べた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 間隙率が大きく、一軸圧縮強度が20MPa以下の軟岩と、間隙率が小さく、一軸圧縮強度が70MPa以上の硬岩とでは熱膨張・収縮特性が全く異なる。
- (2) 大気圧下における硬岩の線膨張係数は、温度上昇にもなって増大する。残留ひずみは小さく、正の値(膨張ひずみ)を示す。
- (3) 軟岩は、約100℃以上の温度になると、乾燥状態では、吸着水等の脱水により収縮する傾向を示す。試料が収縮する温度範囲は、拘束圧が大きいほど広範囲におよぶ。火山ガラスや、火山ガラスが変質して生じた鉱物等を含む場合は、200℃~500℃の温度範囲においても、それらからの脱水の影響により、ほとんど膨張せず、線膨張係数は小さな値を示す。
- (4) いったん収縮した岩石は冷却しても元に戻らず、負の残留ひずみ(収縮ひずみ)を生ずる。試料の収縮量および残留ひずみの量は、拘束圧が大きくなるにしたがって増加する。
- (5) 乾燥状態の軟岩について、大気圧下において、2回繰り返して測定を行うと、1回目と2回目とは結果が全く異なる。試料の収縮現象がみられるのは、最初の昇温時だけである。2回目の測定においては、昇温時も降温時も、1回目の降温時の測定結果とほぼ一致しており、全体的に1回目の昇温時よりもはるかに単純な挙動を示す。
- (6) 含水飽和状態では吸着水等の脱水による試料の収縮は起こらない。そのため、乾燥状態における軟岩の熱膨張・収縮挙動と、含水飽和状態におけるそれとは大きく異なる。
- (7) 乾燥状態においても、含水飽和状態においても、軟岩の熱膨張・収縮挙動は、高温になり、拘束圧が大きくなると、押固め作用の影響を受ける。
- (8) 軟岩の熱膨張・収縮挙動は、①構成鉱物の熱膨張特性、②構成鉱物の相転移、③押固め作用による岩石の収縮、④吸着水等の脱水による岩石の収縮の四つの要因によって支配されている。一方、硬岩のそれは、火成岩のそれと同じ要因によって支配されていると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
 - 3) Wong, T. and Brace, W. F. : Thermal expansion of rocks: some measurements at high pressure, *Tectonophysics*, Vol.57, pp.95-117, 1979.
 - 4) Heard, H. C. : Thermal expansion and inferred permeability of Climax quartz monzonite to 300°C and 27.6MPa, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.17, pp.289-296, 1980.
 - 5) Heard, H. C. and Page, L. : Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granites to 350 °C and 55 Megapascals, *J. Geophys. Res.*, Vol.87, No.B11, pp.9340-9348, 1982.
 - 6) 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.
 - 7) 木下直人, 安部透, 奥野哲夫: 高温, 拘束圧下における火成岩の熱膨張特性, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.69-78, 1995.
 - 8) Lappin, A. R. : Preliminary thermal expansion screening data for tuffs, *Sandia National Laboratories*, Albuquerque, SAND78-1147, 1980.
 - 9) Lappin, A. R. and Nimic, F. B. : Bulk and thermal properties of the functional Tuffaceous Beds in holes USW G-1, UE-25a#1, and USW G-2, Yucca Mountain, Nevada, Sandia National Laboratories, Albuquerque, SAND82-1434, 1985.
 - 10) Lappin, A. R. and Nimic, F. B. : Thermal properties of the Grouse Canyon Member of the Belted Range tuff and of Tunnel Bed 5, G-Tunnel, Nevada Test Site, *Sandia National Laboratories*, Albuquerque, SAND82-2203, 1985.
 - 11) Buskirk, R. V., Enniss, D. and Schatz, J. : Measurements of thermal conductivity and thermal expansion at elevated temperatures and pressures, In *Measurement of Rock Properties at Elevated Temperatures*, *ASTM Special Technical Publication 869*, 1983.
 - 12) Somerton, W. H., Janah, A. H. and Ashqar, P. I. : Thermal expansion of fluid saturated rocks under stress, *Trans. SPWLA 22nd Annu. Logging Symp.*, pp.55-62, 1981.
 - 13) Contreras, E., Iglesias, E. and Bermejo, F. : Effects of temperature and stress on the compressibilities, thermal expansivities, and porosities of Cerro Prieto and Berea sandstones to 9000 psi and 280°C, *Proceedings Eighth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, pp.197-203, 1982.
 - 14) 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.
 - 15) Barrer, R. M. and Cram, P. J. : Heats of immersion of outgassed ion-exchanged zeolites, *Molecular Sieve Zeolites-II, Advances in Chemistry Series 102*, American Chemical Society, pp.105-131, 1971.
 - 16) Okamoto, R., Kojima, K. and Yoshinaka, R. : Distribution and engineering properties of weak rocks in Japan, *Proc. Int. Symp. on Weak Rock*, Tokyo, Vol.2, pp.1269-1283, 1981.

(1994. 4. 26 受付)

THERMAL EXPANSION/CONTRACTION BEHAVIOR OF SEDIMENTARY ROCK AT HIGH TEMPERATURES

Naoto KINOSHITA and Tohru ABE

The variation of the thermal expansion/contraction behavior of five sedimentary hard rocks and five sedimentary soft rocks with temperature, pressure and water content have been measured at high temperatures. A study has been made on the factors which determine the thermal expansion/contraction behavior of these rocks. The experimental results indicate that significant differences in the thermal expansion/contraction behavior exist between the hard rocks and the soft rocks. The observed thermal expansion/contractions of the soft rocks are markedly dependent of temperature, pressure and water content.