

幌延深地層研究計画における堆積軟岩の熱特性について

THERMAL PROPERTIES ON SOFT SEDIMENTARY ROCK OF HORONOBE UNDERGROUND RESEARCH PROGRAM

山本 卓也*・松井 裕哉**・堀内 康光***・富永 英治****

Takuya YAMAMOTO, Hiroya MATSUI, Yasumitsu HORIUCHI, Eiji TOMINAGA

Thermal properties on soft sedimentary rock were measured using specimens from boreholes in Horonobe Underground Research Laboratory project. Thermal conductivity, specific heat and coefficient of thermal expansion were measured under saturated, natural and dry condition. Thermal conductivity of rock slightly increased with temperature increase for all conditions. Specific heat of rock increased rapidly beyond 100 degrees C. for saturated and natural conditions, whereas constantly increased with temperature increase for dry condition. Two different types of thermal expansion behavior were observed; only thermal expansion during the measurement and thermal expansion/contraction at the specific temperature. Thermal contraction was observed for the case of temperature decrease.

Key Words: sedimentary rock, thermal properties, thermal expansion/contraction

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センターは、北海道幌延町における幌延深地層研究計画の一環として、堆積軟岩を対象とした試錐調査を平成 13 年度から実施している。試錐調査では、試錐孔掘削の他、岩芯採取・観察、物理検層、水理試験、地下水採水・分析、初期地圧測定、掘削時のガス成分等の連続モニタリング、岩芯室内試験（基本物性、力学特性、熱特性、岩芯からの地下水・ガスの抽出・分析、鉱物試験、微化石分析、同位体比測定）を行っている。本報は、試錐調査の一環として実施した堆積軟岩の熱特性試験結果について報告するものである。

2. 調査地点の地質および岩石の物理・力学特性

(1) 試錐位置および試錐方法

平成 13 年度から 15 年度の試錐孔 HDB-1～8 孔（HDB は、Horonobe Deep Borehole の略称）の位置を図-1 に示す。試錐孔深度は 470m～720m であり、いずれも鉛直下向き孔である。掘削は、コアの採取率 100% を目標とし、三重管ワイヤーラインコアバレルを用いた。最終的な孔径は 6-1/4"（約 158mm）、コア径は約 86mm である。

(2) 地質および物理・力学特性

HDB-7 孔を除く試錐孔の岩石は、声間層とされる軟質な珪藻質泥および稚内層とされる硬質頁岩および珪藻質泥岩/硬質頁岩の遷移帯から成る。HDB-7 孔の岩石は、勇知層の砂岩および珪藻質泥岩から成

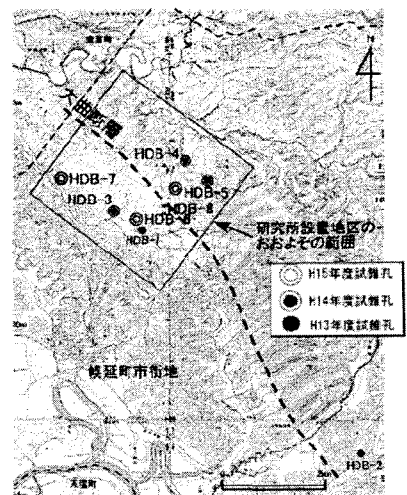


図-1 断層と試錐孔の位置図

* 正会員 大成建設株式会社 原子力本部原燃サイクル部 ** 正会員 核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター
*** 非会員 株式会社ドーコン **** 非会員 株式会社地層科学研究所

る。

珪藻質泥岩および硬質頁岩の物理・力学特性を表-1に示す。珪藻質泥岩の空隙率が比較的大きいことや珪藻質泥岩から硬質泥岩/硬質頁岩への遷移的な変化領域が存在し、この領域では静弾性係数や一軸圧縮強度が急激かつ連続的に変化すること等が本調査対象領域の岩盤の特徴である。

表-1 声間層および稚内層の物理・力学特性

	単位体積重量	空隙率	弾性波速度:km/sec		静弾性係数 (E50)	一軸圧縮強度	ポアソン比
	kN/m ³	%	P波	S波	GPa	MPa	
声間層 (珪藻質泥岩)	14~16	60~70	1.8	0.5	2以下	5程度	0.10~0.20
稚内層 (硬質泥岩/硬質頁岩)	16~18	40~50	2.0~2.5	0.7~1.0	1~4	5~25	0.15~0.45

3. 熱特性の測定方法

試錐掘削により採取した堆積岩試料を用いて、珪藻質泥岩および硬質頁岩の熱特性（熱伝導率、比熱容量、線膨張係数）を把握するための室内試験を行った。熱特性の室内試験は、HDB-1, 2, 3, 6 孔の 4 本の試錐孔について実施した。HDB-1, 2, 3 孔では深度 100m から 100m ごとに、HDB-6 孔では 250m と 500m の 2 深度で測定用のコアを採取した。測定方法を以下に示す。

(1) 熱伝導率

熱伝導率の測定は、定常法の 1 種である縦型比較法で行い、飽和、自然、乾燥の 3 状態（1 シリーズ 3 供試体：直径 50mm、高さ 30mm）で実施した。測定システムは、スライドレギュレータ、マルチチャンネルレコーダ（タケダ理工工業（株）製の TR-2711M）、冷却装置（オリオン機械（株）製キャリクール PA3）から成る。測定は、熱伝導率の温度依存性を把握するため、室温以外に 50℃、80℃および 120℃でも実施した。ただし、120℃における測定は乾燥状態のみとした。所定の温度までの昇温速度は 1℃/min とした。供試体と標準試料との間にはグリスを塗布し、できるだけ隙間ができないようにした。飽和試料は現地水を用いて 72 時間以上減圧水浸させ、自然状態の試料は保管中に含水状態が変化しないようにラップで包んだ。乾燥試料は、デシケータ内で 1 週間以上乾燥させた。

(2) 比熱容量

比熱容量の測定には断熱型熱量計を用い、飽和、自然、乾燥の 3 状態（1 シリーズ 3 供試体：直径 16mm、高さ 30mm）で実施した。測定システムは、熱量計（アルバック理工（株）製 SH3000-M）とデータ処理装置から成る。昇温速度は、最大でも 2~3℃/min 程度、測定温度範囲は全て室温~120℃とし、連続的に測定を行った。飽和および乾燥のさせ方、自然状態の試料の保管方法は熱伝導率測定と同様である。

(3) 線膨張係数

熱膨張率の測定には、アルバック理工（株）製の押棒式熱膨張計（DL-1500Y 型）を用い、直径 20mm、高さ 100mm の供試体について、全てデシケータ内で 1 週間以上乾燥させた状態で実施した。温度制御はプログラム温度制御方式を用い、熱電対により炉内の温度を測定し、プログラム温度との偏差量により炉への電流を連続的に調整することができる。熱電対（K タイプ）・差動トランスのデータ処理装置は、ナショナルインスツルメンツ社製の Lab.View6.0 を使用した。線膨張ひずみの測定温度範囲は室温~150℃とし、昇温速度を 30℃/h として連続的に測定を行った。また、最高温度および最低温度付近で測定精度が低下するため、線膨張係数の算出は 120℃までの温度範囲とした。

4. 熱特性の測定結果および考察

(1) 熱伝導率

自然状態の飽和度がほぼ 100%であることから、飽和試料と自然試料では各深度においてほぼ同じ熱伝導率の値

を示した。図-2 から、室温では飽和状態でも乾燥状態でも、深度の増加とともに熱伝導率が増加する傾向があることがわかる（HDB-1, 3, 6 孔）。珪藻質泥岩と硬質頁岩を比較すると、前者は $0.88 \sim 1.17$ ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)、後者は $1.24 \sim 1.61$ ($\text{W/m} \cdot \text{K}$) であり、全体的に前者の熱伝導率が小さい。さらに、熱伝導率は含水状態によらず、全体的に温度上昇に伴ってやや増加する傾向を示している（図-3）。

熱伝導率と有効間隙率の関係（図-4）については、飽和状態でも乾燥状態でも、有効間隙率の増加とともに低下している。このように、間隙率の増加に伴って熱伝導率が低下する傾向は、堆積岩では一般的に認められている¹⁾。

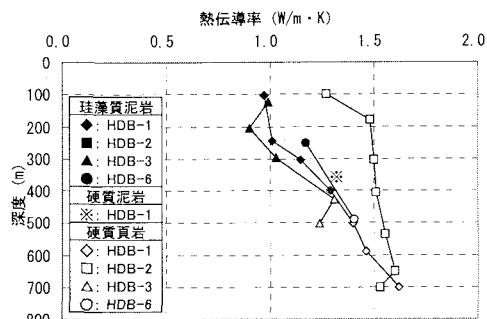
(2) 比熱容量

自然状態の飽和度がほぼ 100% であることから、飽和試料と自然試料では、各深度ともほぼ同程度の比熱容量を示した。飽和試料と乾燥試料を比較すると、飽和試料の方は深度の増加とともに比熱容量が低下する傾向がある（図-5）。

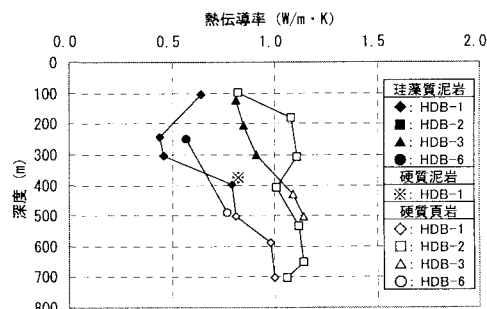
岩層区分で見ると、飽和状態における比熱容量の値は、珪藻質泥岩と硬質頁岩では大きく異なる。珪藻質泥岩の比熱容量は、 $1.86 \sim 2.67$ ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)、硬質頁岩の比熱容量は、 $1.34 \sim 1.53$ ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$) を示し、珪藻質泥岩の比熱容量は、硬質頁岩のそれに比べて大きな値を示す。乾燥試料における比熱容量は、深度にも岩相区分にも依存しておらず、 $0.77 \sim 0.90$ ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$) の値を示している。ただし、HDB-1 孔の 100~300m と HDB-3 孔の 200m 以深の試料は、それよりも大きな値を示し、岩石の比熱容量に関する既往の測定値と比較しても大きい。水の 18°C での比熱容量は、 4.184 ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$) であるため、珪藻質泥岩と硬質頁岩の差は空隙率の差とその中を満たす水の量に影響されているものと考えられる。

図-6 によれば飽和状態では、室温から 100°C までは温度が高くなるにしたがって比熱容量は緩やかに増加している。その後、 100°C に達すると急激に比熱容量が増大し、 $100 \sim 120^\circ\text{C}$ の間でピーク値を示している。 100°C を超えると急激に比熱が増大するのは、岩石内に含まれている水分が蒸発する際に潜熱を必要とするためと考えられる。比熱容量が $100 \sim 120^\circ\text{C}$ の間でピークを示すのは以下の理由によるものと考えられる。

① 比熱容量測定時における試料温度は、その表面の温度である。試料を加熱する際には、試料内部の温度は試料表面の温度よりも低くなっている。特に、試料内の水分が蒸発する段階になると見かけ上、比熱容量が非常に大きくなるので、試料内部の温度は上昇しにくくなり試料表面と試料内部の温度差が大きくなる。

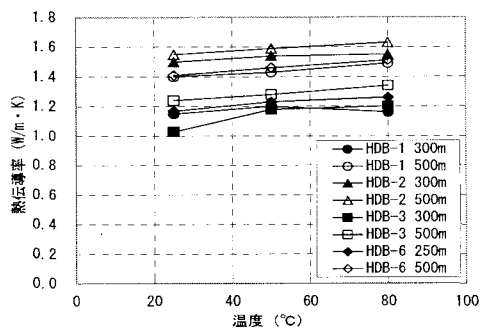


(a) 飽和状態

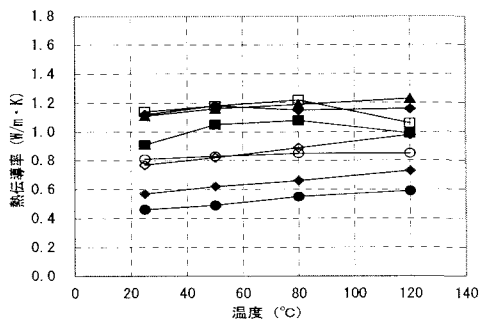


(b) 乾燥状態

図-2 熱伝導率と深度の関係（室温）



(a) 飽和状態



(b) 乾燥状態（凡例は(a)と同じ）

図-3 熱伝導率と温度の関係

②試料内部の水分が蒸発して試料表面へと移動するためには、ある程度の時間を必要とする。

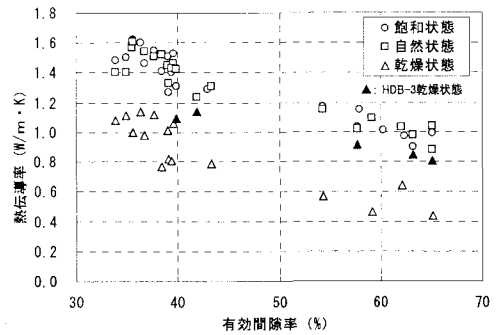
また、乾燥状態では、全温度領域において、温度が上昇するとともに緩やかな増加傾向を示している（図－6）。ただし、HDB-3 孔の試料は、デシケータ乾燥時の脱水が不十分であったためか、水分の蒸発の影響が顕著に現れ、80℃以上になると、比熱が急激に増加している。

図－7では、飽和試料と自然試料とも有効間隙率の増加に伴って比熱容量は増加している。これは、深度間の比熱容量値の変化は、深度間における有効間隙率の違いによって生じているためと考えられる。一方、乾燥状態における比熱容量は、有効間隙率に依存しない結果となった。これは、珪藻質泥岩、硬質頁岩とも珪藻起源の岩石であり、構成鉱物に大きな違いがないためと思われる。

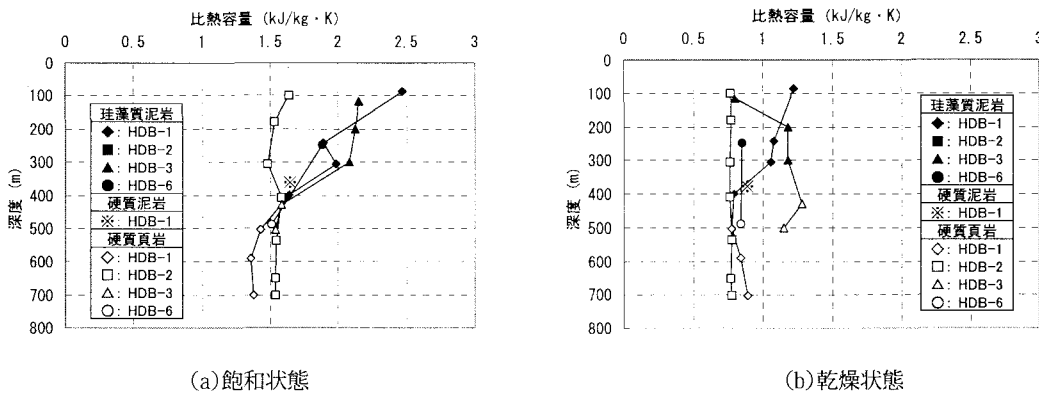
(3) 線膨張係数

珪藻質泥岩と硬質頁岩とでは熱膨張・収縮挙動が大きく異なる（図－8）。珪藻質泥岩の常温付近における線膨張係数は $(5\sim7) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度である。温度上昇に伴って線膨張係数は低下し、ある温度以上になると供試体は収縮する。ただし、HDB-1 孔の深度 300m の試料だけは高温になっても収縮していない。

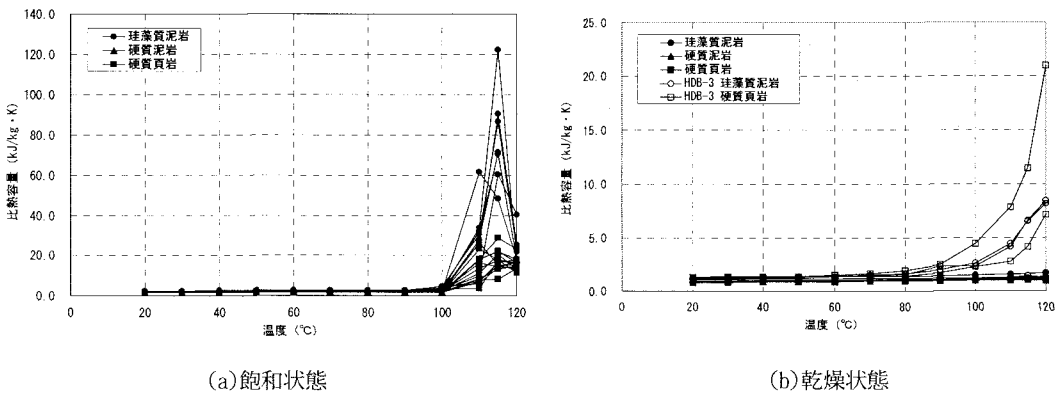
硬質頁岩の常温付近における線膨張係数は $(9\sim14) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、珪藻質泥岩のそれよりも大きい。線膨張係数は 50～60℃ 付近の温度で最大となり、それより高温



図－4 熱伝導率と有効間隙率の関係



図－5 室温での比熱容量と深度の関係



図－6 比熱容量と温度の関係

になると、温度上昇とともに顕著に低下している。珪藻質泥岩と硬質頁岩の遷移帯の試料の 40℃における線膨張係数は $11.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、硬質頁岩のそれと同程度である。その後、温度上昇に伴って線膨張係数は低下しており、約 90℃以上になると正の値から負の値に転じ、それ以上の温度では、珪藻質泥岩と同様に試料は収縮し続ける。また、図－8のうち昇温時については、常温の線膨張係数の値が大きく、かつ今回の測定温度の範囲内では高温になっても線膨張係数が正の値を示す試料と、常温における線膨張係数の値が小さくかつ、ある温度以上になると線膨張係数が負の値を示す試料とがある。

降温時（図－8）については、珪藻質泥岩も硬質頁岩も、測定終了時には負の残留ひずみ（収縮ひずみ）が生じている。珪藻質泥岩の線膨張係数は、温度の低下とともに顕著に低下している。珪藻質泥岩の中には、温度が 60℃以下になるとは負の線膨張係数を示すものがある（HDB-1 孔の 100～300m の試料）。他の試料とは異なり、HDB-1 孔だけが 60℃以下になると線膨張係数が負の値を示す理由は明らかではない。硬質頁岩の線膨張係数は、温度の低下とともに単調に低下する。珪藻質泥岩と硬質頁岩を比較すると、全体的に珪藻質泥岩の線膨張係数が小さい。線膨張係数の温度依存性は珪藻質泥岩の方が顕著である。昇温時と降温時の挙動の違いは、吸着水等の脱水による影響が原因の一つとして考えられる。

昇温時に収縮を開始するときの温度と有効間隙率の関係（図－9）を見ると、有効間隙率が大いほど収縮を開始する温度が低くなる傾向がある。これは、今回の測定温度範囲内において収縮を開始した試料についての特徴であり、有効間隙率が 30～40%でも収縮を開始しない試料も存在する。一軸圧縮強度と昇温時に収縮を開始するときの温度との関係（図－10）を取ると、一軸圧縮強度が小さい試料では、収縮を開始するときの温度が低い傾向がある。

5. まとめと今後の課題

(1) 熱伝導率について

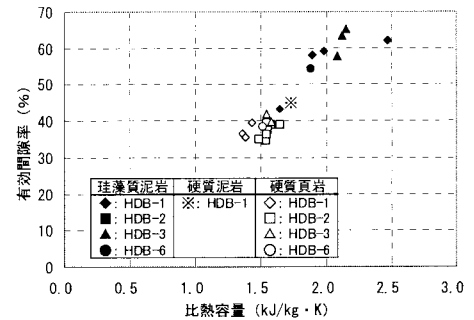
1) HDB-3 孔の試料は、デシケータ乾燥による試料の脱水が不十分であった可能性があり、その影響により他とは異なった結果が得られている。

2) 高温下における岩石の熱伝導率は、温度の上昇に伴って低下する場合が多い。温度の上昇に伴って熱伝導率が増加するのは、火山ガラスが多く含まれる火山岩や火山砕屑岩等に限定されている。これは、主要造岩鉱物の熱伝導率は温度の上昇に伴って低下するが、ガラスのそれは温度の上昇に伴って増加するためである。今回の測定において、温度の上昇に伴って熱伝導率が増加している理由は現段階では明らかではない。

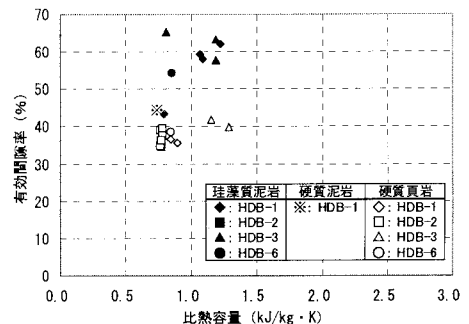
(2) 比熱容量

1) 熱伝導率と同様に、HDB-3 孔の試料は、デシケータ乾燥による試料の脱水が不十分であった可能性があり、その影響により、他とは異なった結果が得られたものと考えられる。

2) 乾燥状態における HDB-1 孔の 100～300m の試料の比熱容量は、他とは異なり、既往の測定値と比較して大きい値を示している。HDB-1 孔では、デシケータ乾燥の際の試料の脱水は十分に行われており、比熱容量が大きな値を



(a) 飽和状態



(b) 乾燥状態

図－7 比熱容量と有効間隙率の関係

示す理由は明らかではない。

(3) 熱膨張率

1)珪藻質泥岩は、昇温時において、ある温度以上になると試料が収縮し、線膨張係数は負の値を示しているが、HDB-1 孔の深度 300mの試料だけは高温になっても収縮していない。

2)ある温度以上になると試料が収縮するのは、脱水の影響によると考えられるが、そのメカニズムは明らかになっていないと言いは難い。

3)降温時において、HDB-1 孔の 100～300mの試料だけが、60℃以下になると線膨張係数が負の値を示しているが、その理由は明らかではない。

(4) 今後の課題

岩石の固結度、空隙構造、鉱物組成等の観点から、熱特性について今後検討を加える必要がある。

参考文献： 1) 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.242-251，1988 2) 木下直人，安部 透：高温下における堆積岩の熱膨張・収縮特性，土木学会論文集，No.517/Ⅲ-31，pp.53-62，1995 3) 木下直人，赤川 敏，傳田 篤：各種条件下における岩石の力学挙動—軟岩，材料，45 巻，2 号，pp.242-248，1996

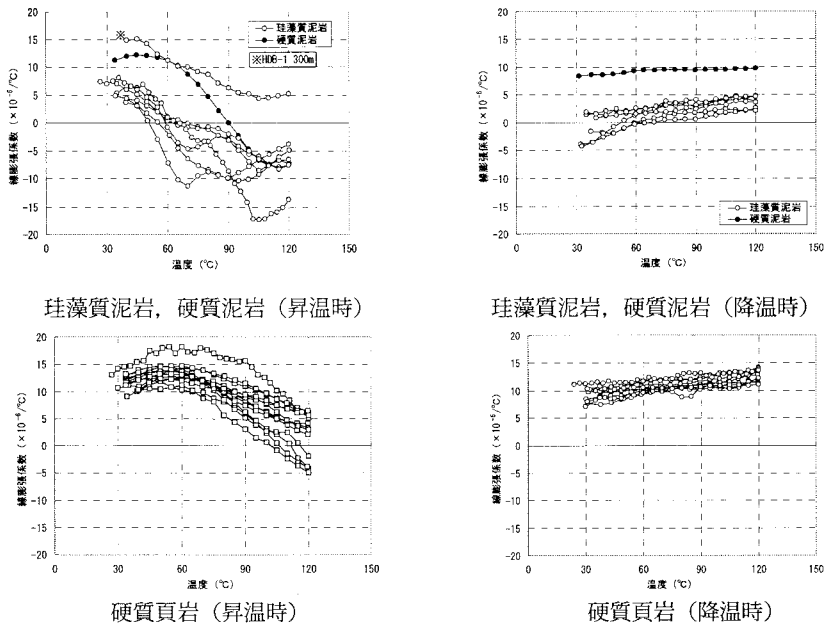


図-8 線膨張係数と温度の関係

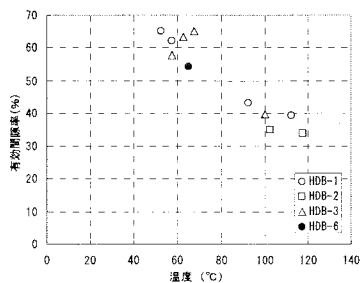


図-9 有効間隙率と収縮開始時の温度の関係

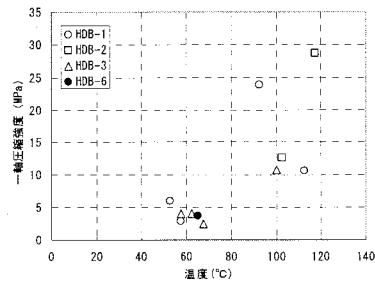


図-10 一軸圧縮強度と収縮開始時の温度の関係