

熱環境下の岩盤施設の開発をめざして

－熱物性と解析－

岩盤の熱環境に関する研究小委員会 活動報告

土木学会 岩盤力学委員会
岩盤の熱環境に関する研究小委員会

1. はじめに

我が国は約 75%が山地であり、25%が平野である。国土が狭く山地が多い、エネルギー資源が乏しい、地震が多いなどの特殊事情を持つ我が国においては、土地の立体的有効利用、エネルギーの大型貯蔵、耐震性等を考慮した施設ならびに省エネや廃熱利用を考慮した循環型社会を構築するための施設の建設は重要な課題であると考えられる。これらの条件を兼ね備えたものとして岩盤空洞の利用が考えられる。これまで岩盤空洞は主に地下発電所、石油の備蓄などに用いられてきた。近年の岩盤空洞の利用に関するプロジェクトでは実証プラントや実用化に至るものもあり、その期待度は高いと考えられる。岩盤空洞の特性としては、音、熱、電磁場、放射能などの遮断性や耐震性などが挙げられる。その中で熱の影響を受ける貯蔵施設や熱の遮断性を生かした施設としては約 100℃の熱水貯蔵システムや高レベル放射性廃棄物地層処分から-253℃の液体水素貯蔵まで様々なものがあるが、構想段階、研究段階のものもあり、岩盤物性を十分把握できていないものや解析において未解決な部分もある。岩盤・岩石と熱の関係に関する研究はこれまでプロジェクト・構想別、研究機関毎で個々に行われてきてはいるが、基礎的データを総合的に整理し、比較検討、分析を行った例はほとんどみあたらず、情報交換が行われにくいのが現状であると考えられる。また、これらの基礎的データの検討、分析が行われなければ対象となる岩盤空洞の安定性評価の信頼性も高めることができないと考えられる。

本研究小委員会は岩盤・岩石の熱に関する物性および解析のデータベース化を目的に、平成 12 年 3 月から準備 WG として活動を開始し、平成 14 年 12 月からは研究小委員会として活動を行ってきている。委員会では熱物性、解析の 2 つの WG で検討しており、熱物性 WG では約 400 編の文献より約 36,000 個のデータを収集しデータベースを構築した。また、解析 WG では熱に関連する解析手法の分類と評価および解析事例の調査を行った。研究成果は出版物として広く公表する予定である。本文はシンポジウムでの報告のために執筆中の書籍の一部をとりまとめたものである。

2. 熱物性WG活動報告

熱物性WGでは既往の文献に記載されている岩石・岩盤の高温・低温下における物性データを収集し、この分野での研究の発展や構造物設計に際しての物性値設定などに資することを目的としてデータベース化を行った。データベース化に際しては物性値のみならず、元の文献の図表類もそのまま画像データとして取り込み、それらを容易に検索できるように整理した。これらのデータベースを元に岩石・岩盤の高温・低温下における諸特性について整理し、分析を行った。なお予定されている報告書出版に際してはデータベースファイルをCD-ROMとして添付する予定である。

以下文献調査およびデータベースの作成方法、力学特性、熱特性、凍結融解特性、原位置試験他の順に概要を報告する。

(1) 文献調査およびデータベースの作成方法

(a) 文献調査の方法

対象文献は科学技術振興機構の文献データベース (JOIS) から検索して得られた文献の中からタイトルおよび抄録をもとに絞込みさらにWGメンバーによって文献を追加して約400編の文献を選定した。

なお文献検索のキーワードは「岩石物性, 高温, 低温, 凍結融解」とした。

(b) データベースの作成方法

① 作成したデータベースの内容

- ・ 文献総括表 (各文献で扱われている岩石および物性の種類の一覧表)
- ・ 物性値データベース (数値データベース)
- ・ 図表データベース (電子ファイル化した図表)

なお報告書取りまとめに際しては各文献において図示されたデータをデジタル化したものも用いている。

② データベースで扱った試験方法

- ・ 高温, 低温下試験
- ・ 履歴試験 (熱衝撃, 凍結融解含む)
- ・ 室内試験に限定

③ データベースの対象物性

- ・ 基本物性 (常温時): 見掛け比重 (乾燥), 見掛け比重 (湿潤), 有効間隙率, V_p
- ・ 物理特性: 見掛け比重, 有効間隙率, V_p , V_s , 動弾性係数
- ・ 力学特性: 一軸圧縮強度, 静弾性係数, ポアソン比, 引張強度, C , ϕ , 三軸強度 (軸差強度), 破壊靱性,
- ・ 透水特性: 透水係数
- ・ 熱特性: 熱伝導率, 熱拡散率, 比熱, 線膨張係数, 凍結膨張

④ その他

- ・ 物性値データベースの形式は EXCEL 形式とする。
- ・ 図表はそのままスキャナで読み取りファイル化(jpg)し, 一覧表から岩種・物性項目などを基に検索および表示可能とする。
- ・ 使用単位: 温度は $^{\circ}\text{C}$, その他の物性は SI 単位で表示した。

(2) 力学特性

(a) 高温下における力学特性¹⁾⁻¹²⁾

高温下における岩石の力学特性を調べるために比較的多く実施されている試験としては、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、圧裂引張試験、弾性波速度測定、破壊靱性試験などがある。

高温における力学試験では、乾燥状態の試料を用いている場合が多いが、高温岩体発電のように、岩盤が高压の熱水に長期間にわたって晒されることにより、鉱物と熱水の間で生じる化学反応の影響を受ける場合を対象にして、熱水環境下における岩石の力学特性を調べるための試験も行われている。

設定温度までの昇温過程では、供試体内に生ずる温度差に基づく熱応力により供試体の損傷が起こらないようにするため、昇温速度はできるだけ遅いことが望ましい。しかし、昇温速度を遅くすると、試験時間が非常に長くなることもあって、実際に用いられている昇温速度はまちまちであり、20°C/hとしている例もあれば、200°C/hとしている例もある。

高温下における岩石の力学特性の温度依存性に関する試験は、花崗岩、安山岩、凝灰岩、砂岩といった岩種を対象に行われている場合が多く、これらの岩種では比較的試験データが多い。

花崗岩の一軸圧縮強度は、図 2-1 に示すように、温度上昇に伴って低下している。例えば 300 °Cにおける一軸圧縮強度は常温における値の 70~90%に低下している場合が多い。花崗岩の引張強度や静弾性係数も、温度上昇に伴って低下している。

安山岩や凝灰岩の一軸圧縮強度と引張強度は、図 2-2 に示すように、温度上昇に伴って増加する例、ほとんど変化しない例、低下する例があり、まちまちの結果が得られている。

砂岩の一軸圧縮強度や引張強度はあまり温度に依存しない場合が多いが、ある温度以上になると強度が低下している例がある。

高温下三軸圧縮試験によって得られた粘着力および内部摩擦角と温度の関係を図 2-3 に示す。花崗岩、安山岩および凝灰岩の粘着力と温度の関係は、これらの岩石の一軸圧縮強度や引張強度と温度の関係とほぼ同じ傾向を示している。一方、これらの岩石の内部摩擦角は、ほとんど温度に依存しない結果が得られている。

岩石の物性に対する高温の温度履歴の影響を調べるための試験も比較的多く実施されている。高温の温度履歴を 1 回だけ与えたときの物性の変化を調べている場合が多く、多数回の繰り返しによる岩石の劣化を調べている例は非常に少ない。

昇温時は、一定の昇温速度で設定温度まで加熱している場

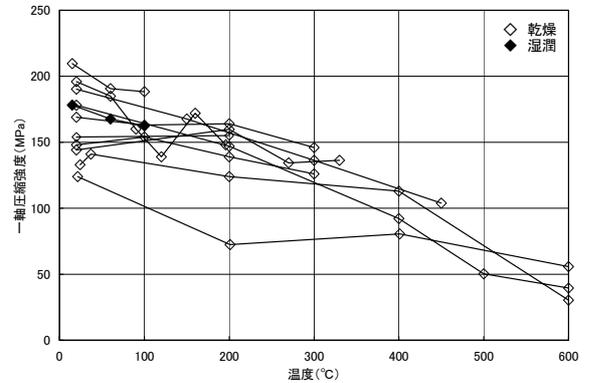


図 2-1 高温下花崗岩の一軸圧縮強度と温度の関係

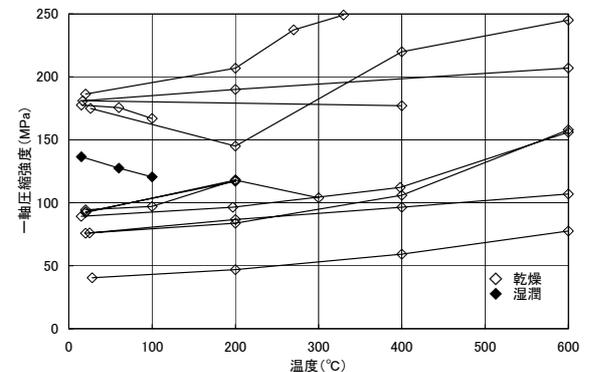


図 2-2 高温下安山岩の一軸圧縮強度と温度の関係

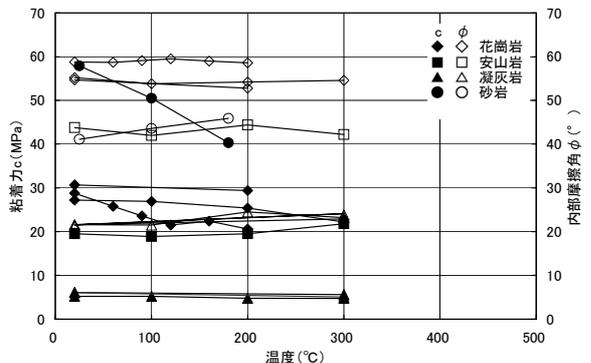


図 2-3 高温下岩石の粘着力、内部摩擦角と温度の関係

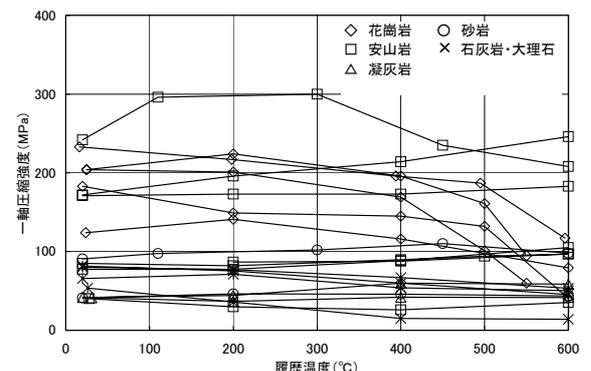


図 2-4 一軸圧縮強度と履歴温度の関係 (乾燥状態)

合が多いが、供試体の冷却方法はまちまちであり、一定の降温速度で室温まで冷却している例、自然冷却により室温まで冷却している例および水中で急冷している例などがある。

各種岩石の一軸圧縮強度と履歴温度の関係を図 2-4 に示す。花崗岩、石灰岩(大理石を含む)の一軸圧縮強度や引張強度は、履歴温度の増大に伴って低下している。圧縮強度と比較して、引張強度のほうが、履歴温度の増大に伴う強度低下が顕著である。静弾性係数も、履歴温度の増大に伴って低下している。

安山岩および凝灰岩の一軸圧縮強度は、履歴温度の増大に伴ってほとんど変化しないか又はやや増加している例が多い。引張強度や静弾性係数に関しても同じ傾向がみられる。

(b) 低温下における力学特性¹³⁾⁻²⁰⁾

低温下における岩石の力学特性を調べるために比較的多く実施されている試験としては、一軸圧縮試験、圧裂引張試験、弾性波速度測定、破壊靱性試験などがある。三軸圧縮試験の実施例は非常に少ない。

試験時の含水状態はまちまちであり、乾燥状態、自然含水状態、湿潤状態(含水飽和状態)といった様々な状態で試験が実施されている。また、「乾燥状態」や「湿潤状態」にするための試料調整の方法も様々である。

乾燥状態および湿潤状態における一軸圧縮強度と温度の関係を図 2-5 に示す。乾燥状態における一軸圧縮強度は、温度低下に伴いほとんど変化しないか又はやや増加している。強度の増加は小さく、-150~-200℃で常温の 1.5 倍程度又はそれ以下であることが多い。一方、湿潤状態では温度低下に伴って一軸圧縮強度が顕著に増加している例が多い。特に常温において強度が小さく、間隙率の大きい岩石では、間隙水の凍結の影響が大きいので、強度の増加が顕著であり、-150℃で常温の 10 倍以上になっている例もみられる。

引張強度や静弾性係数に関しても、同様な傾向がみられるが、凝灰岩、砂岩、泥岩といった岩石では、乾燥状態でも、温度低下に伴って引張強度が顕著に増加している場合がある。

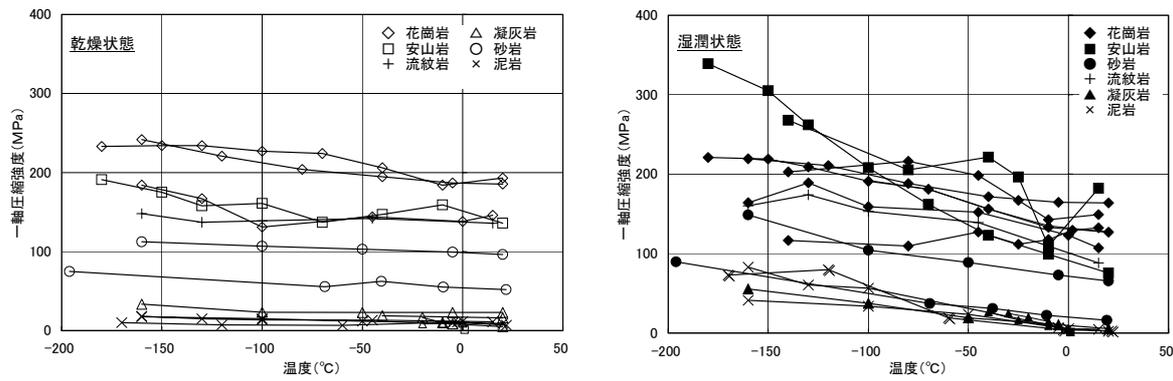


図 2-5 低温下岩石の一軸圧縮強度と温度の関係

(3) 熱特性

熱特性に関しては、熱伝導率、熱拡散率、比熱および線膨張係数に関して調査を行った。このうち、比較的データの報告例が多い熱伝導率に関して、調査結果の一例を以下に示す。

低温下および高温下における岩石の熱伝導率が報告されている文献を表 2-1 および表 2-2 に示す。低温下でのデータは 22 文献、高温下でのデータは 10 文献で報告されている。熱伝導率の計測方法については、詳細が記載されていない文献もあったが、以下の 2 種類の方法に大きく分類されるようである。

① 非定常細線加熱法²¹⁾の原理を用いる方法

温度が一樣な無限大の均質試料中に線状熱源を挿入する。この線状熱源に一定の熱量を連続的に供給して試料を加熱し、試料の熱伝導率を以下の式によって求める。

$$\lambda = (q / 4 \pi) \cdot \{(\theta_2 - \theta_1) / \ln(t_2 / t_1)\}$$

ここで、λ：熱伝導率、q：単位長さあたりの熱量、t₁、t₂：加熱過程での時間、

θ₁、θ₂：t₁、t₂における細線表面の温度

なお、低温下および高温下での計測は、雰囲気温度を制御した恒温槽の中で実施している。

② 熱拡散率を計測して計算により熱伝導率を求める方法

熱伝導率と熱拡散率との間には次式のような関係があり、熱拡散率、比熱および密度の値から熱伝導率を計算によって求めることができる。

$$\lambda = \kappa c \rho$$

ここで、 λ : 熱伝導率, κ : 熱拡散率, c : 比熱, ρ : 密度

なお、熱拡散率の測定方法の一つに要素分割法を応用した方法²²⁾があげられるが、詳細については参考文献を参照されたい。

低温下における種々の岩石の熱伝導率と温度との関係を図 2-6(a)に示す。12種類の岩石のデータが報告されており、岩種ごとにデータを整理した。データ数が比較的多い安山岩、花崗岩のデータを図 2-6(b)および図 2-6(c)に示す。試験に用いた岩石は種々の産地のものが使用されており、低温下における熱伝導率の値は安山岩では0.8~3.6 W/m°C程度の範囲、花崗岩では1.8~5.8 W/m°C程度の範囲でばらついている。

表 2-1 低温下における岩石の熱伝導率に関する文献

No.	文献名	著者	出典
1	低温の影響を受けた空洞周辺岩盤の熱的挙動に関する一 の知見	稲田善紀, 木下尚樹, 関正道, 松尾暁, 成行惇, 越智健三	土木学会論文集, No.547, pp.211-220, 1996
2	岩石の熱収縮破壊について	西牧均, 日景秀治, 添田弘基	土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部, Vol.38, pp.235- 236, 1983
3	低温時の岩の熱的性質について	姚義久, 柳沢栄司	土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部, Vol.44, pp.882-883, 1989
4	岩盤の凍結融解に伴う熱・変形特性に関する基礎的研究	山辺正, 渡辺邦夫, 野本寿, 石山宏二	岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.24, pp.101-105, 1992
5	岩石の低温における熱伝導率	松永烈, 厨川道雄	日本鉱業会研究業績発表講演会講演要旨集, pp.277-278, 1980
6	岩石の低温における熱伝導率 II	松永烈, 厨川道雄, 山口勉	日本鉱業会研究業績発表講演会講演要旨集, pp.307-308, 1985
7	極低温下における岩石の熱物性値測定システムの開発	根本勝久, 幾世橋広, 松木浩二, 出口衛	資源・素材学会春季大会資料, p.103, 1998
8	低温における岩石の熱的性質に関する研究の概観と課題	幾世橋広	資源・素材, pp.87-90, 1997
9	低温下における岩石の熱物性特に熱伝導率とその測定法	松永烈	全国地下資源関係学協会合同秋季大会分科研究会資料, pp.15- 18, 1987
10	低温における岩石の熱伝導率に関する研究	松永烈, 厨川道雄	探鉱と保安, Vol.26, pp.448-455, 1980
11	岩石の低温域における熱定数の測定	町田清, 上園正義	Thermophys Prop, Vol.12, pp.283-286, 1991
12	LPGの低温地下貯蔵における岩石の熱特性	大野清	石油学会誌, Vol.32, No.4, pp.190-198, 1989
13	非定常・サーマルプローブ法による岩石の熱伝導率	根岸正充, 菊地昌博	北海道開発局開発土木研究所月報, No.436, pp.17-23, 1989
14	道路トンネルにおける凍結指数と岩盤の凍結深さ	石塚達也, 根岸正充, 菊地昌博	北海道開発局技術研究発表会発表概要集, Vol.32, pp.43-48, 1989
15	低温液化ガスの岩盤内貯蔵に関する研究 II 低温下にお ける岩石の性状について	岡林信行, 青木謙治, 大野清, 森孝之	鹿島建設技術研究所年報, Vol.27, pp.33-38, 1979
16	低温液化ガスの岩盤内貯蔵に関する研究 III 低温下にお ける岩石の性状について III	岡林信行, 青木謙治, 大野清, 森孝之	鹿島建設技術研究所年報, Vol.28, pp.61-68, 1980
17	低温下における岩石, 土質材料の熱物性測定システム	小川豊和, 大里祥生, 福井勝則, 幾世橋広	大成建設技術研究所報, No.27, pp.367-376, 1994
18	泥岩地盤内への低温物質貯蔵に関する研究	畑野俊一郎, 壺内達也	東急建設技術研究所報, No.23, pp.109-114, 1997
19	LPG地下岩盤内低温貯蔵そうに関する研究	日景秀治, 添田弘基, 西牧均, 関根一郎	戸田建設技術開発センター研究報告, No.10, pp.36-48, 1983
20	原位置凍結・融解試験による岩盤の伝熱特性の研究	石山宏二, 野本寿	西松建設技報, No.27, pp.41-48, 1994
21	低温時の岩の熱的特性及びその評価に関する研究	姚義久, 古賀重利, 門田俊一	フジタ工業技術研究所報, No.27, pp.43-48, 1991
22	岩盤の超低温特性に関する研究	美好盛豊, 古賀重利, 門田俊一	フジタ技術研究所報, No.28, pp.25-30, 1992

高温下における種々の岩石の熱伝導率を図 2-7(a)に、安山岩、花崗岩のデータを図 2-7(b)および図 2-7(c)に示す。低温下と高温下のデータを比較すると、安山岩では高温下と低温下の値はほぼ同程度の値を示している。これに対して、花崗岩では低温下における熱伝導率の値は高温下における値よりも大きい値を示しており、安山岩に比較して温度依存性が強いことがわかる。

表 2-2 高温下における岩石の熱伝導率に関する文献

No.	文献名	著者	出典
1	高温下における岩石ブロックの熱応力による破壊挙動	木下直人, 若林成樹, 石田毅, 中川浩二	土木学会論文集, No.624, pp.101-112, 1999
2	熱水の影響を受ける空洞周辺岩盤の熱的挙動	稲田善紀, 木下尚樹	地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.4, pp.131-140, 1999
3	岩石・岩盤の伝熱パラメータの測定について	佐藤邦明, 佐々木康夫	土と基礎, Vol.32, No.1443, pp.47-52, 1984
4	線熱源法による高温岩石の熱伝導率測定	幾世橋広, 京宗輔, 石浜涉	日本鉱業会研究業績発表講演会講演要旨集, pp.305-306, 1979
5	高温下における岩石の熱伝導率 特に昇温温度場及び降温 温度場における測定値の岩種による差異について	幾世橋広, 京宗輔, 田中正三, 姜大雨	日本鉱業会研究業績発表講演会講演要旨集, pp.271-272, 1987
6	地下深部の花崗岩質層の熱物性値の評価 -熱伝導率-	幾世橋広, 加藤春貴, 佐藤稔紀	日本熱物性シンポジウム講演論文集, Vol.19, pp.191-194, 1998
7	岩石の種々なる物理的状態における熱伝導率測定について	伊藤芳朗, 斎藤輝夫, 南雲政博	地熱, Vol.14, No.2, pp.83-96, 1977
8	岩盤の熱応力について	市川浩	関東学院大学工学総合研究所報, Vol.5, pp.41-51, 1982
9	Measurements of thermal conductivity of rocks at elevated temperatures	Kiyohashi, H., Kyo, M., and Tanaka, N.	The Third Japan Symposium on Thermophysical Properties, pp.129-132, 1982
10	掘削による原位置岩石の有効熱伝導率の推算 2 掘削・水 充填層の伝熱解析および伏目地熱井における事例研究	幾世橋広, 京宗輔, 田中正三, 渡辺利幸, 吉村雄三郎	石油技術協会誌, Vol.54, No.11, pp.474-483, 1989

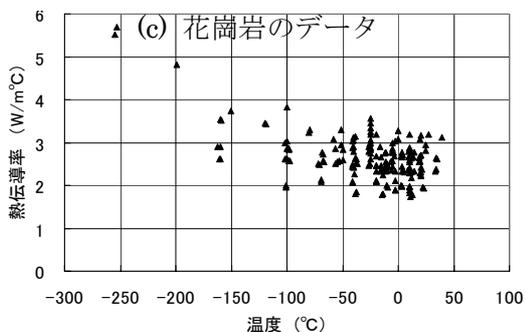
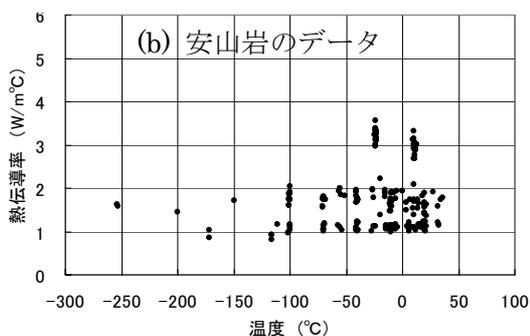
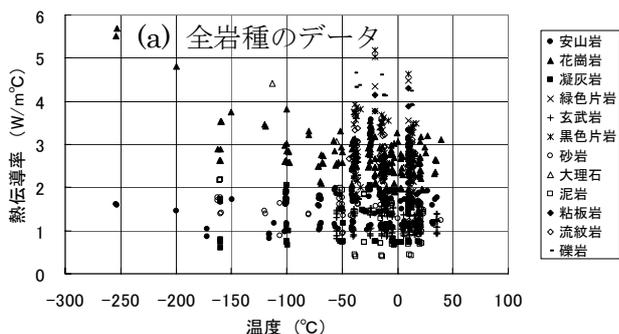


図 2-6 低温下における岩石の熱伝導率

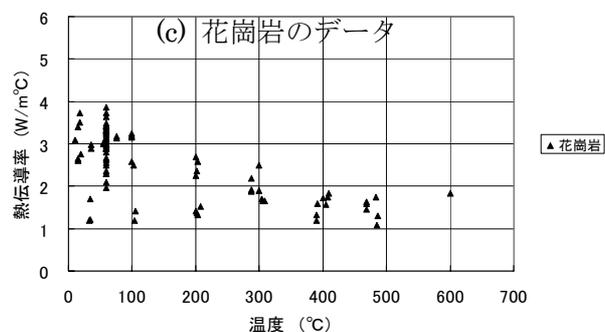
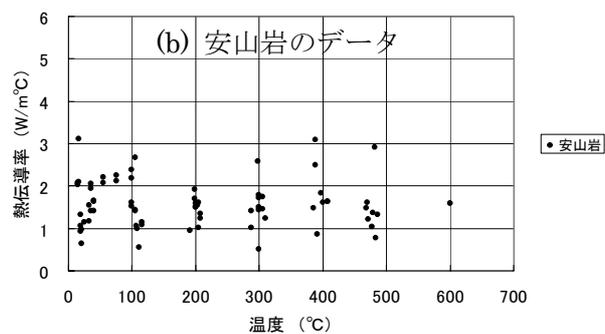
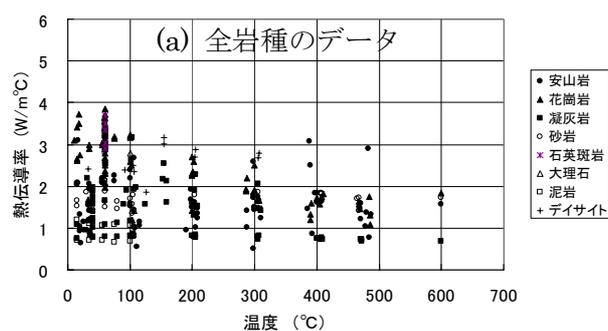


図 2-7 高温下における岩石の熱伝導率

(4) 凍結融解特性

凍結融解現象は自然界における岩石の機械的風化の大きな要因である。このため特に寒冷地における斜面安定性にかかわる岩石の性質を把握するための試験として、また岩石材料はコンクリート骨材やロックフィルダムの堤体材料として用いられるので長期的耐久性を確認するための風化促進試験として行われる事例が多い。このような目的で行われるため、ここで扱う凍結融解特性はおおむね -40°C までの凍結と融解を繰り返したときの岩石の物性変化に関するデータである。

斜面安定性に関する試験は大谷石などの軟質の凝灰岩や、北海道に広く分布し切り立った崖を形成する溶結凝灰岩を対象とした試験が多く行われている。凝灰岩の試験では凍結融解の繰り返しによる物性の低下を一軸圧縮強度や超音波速度で評価する試験を行った例²³⁾がある。凍結融解試験では含水状態によって物性低下の度合いが大きく異なる。図 2-8, 2-9 は凍結融解回数と一軸圧縮強度および超音波速度との関係を示したものであり、乾燥状態の岩石は凍結融解の影響を受け難いのに対し、飽和させた岩石は凍結融解の繰り返しによって急激に物性が低下し、一軸圧縮強度は 8 回で測定不能となっている。これは空隙を満たした水が凍結時に体積膨張することによるものであり大谷石のように空隙率の大きい岩石はこの影響が大きい。空隙率の小さい岩石についてはたとえば空隙率約 1%の安山岩を用いて 400 回までの凍結融解試験によって図 2-10, 2-11 のように一軸圧縮強度で約半分に、P 波速度は 85%に低下したことが報告されている²⁴⁾。したがって凍結融解によってどのような岩石でも物性の低下は認められ、空隙率が大きいほどその影響は大きい。

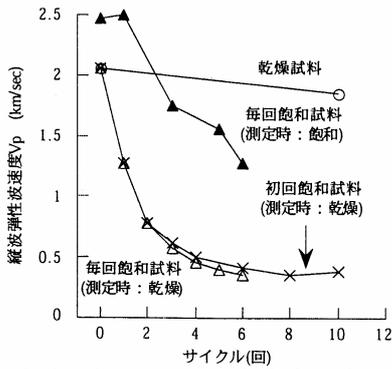


図 2-8 凍結融解に伴う P 波速度の変化(凝灰岩)²³⁾

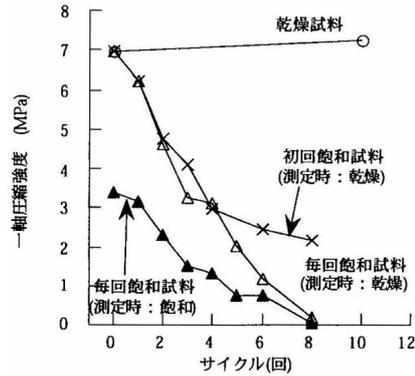


図 2-9 凍結融解に伴う一軸圧縮強度の変化(凝灰岩)²³⁾

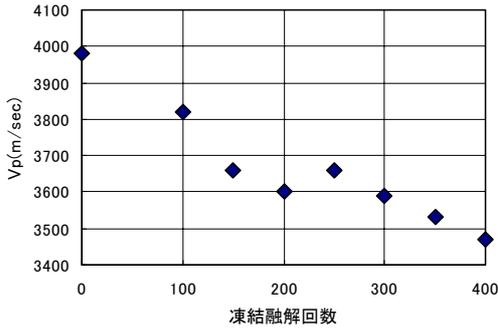


図 2-10 凍結融解に伴う P 波速度の変化(安山岩)²⁴⁾

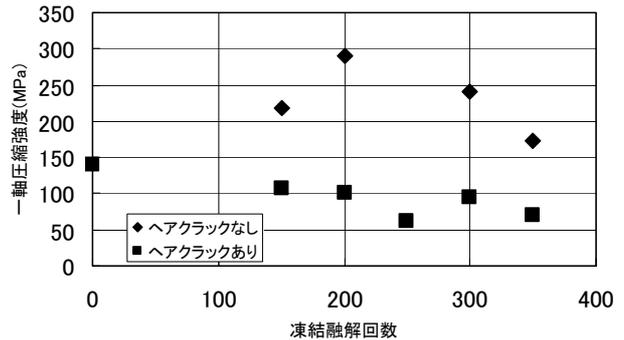


図 2-11 凍結融解に伴う一軸圧縮強度の変化(安山岩)²⁴⁾

コンクリートダム の骨材やロックフィルダムの盛り立て材料としての耐久性を評価する試験としての凍結融解試験は主に(独)土木研究所によって多くの試験が行われており、ここではそれらの結果の一部を紹介する。土木研究所による凍結融解試験は直径 5cm, 長さ 10cm の円柱形試料に対し+20℃～-20℃の温度変化を 360 サイクルまで加えるものである。図 2-12, 2-13 に花崗岩²⁵⁾⁻²⁸⁾, 安山岩²⁹⁾⁻³²⁾, 頁岩^{33),34)}の有効間隙率および Vp の変化を示した。以下の図においては初期の Vp によって層別(1km/sec 毎)し平均値の変化を表示した。有効間隙率は回数とともに増加し, Vp は減少していく傾向が明らかであるが破壊により個数が減少したもの(図中破線)は傾向が変化する。

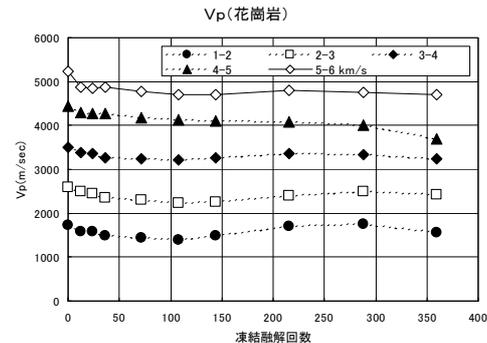
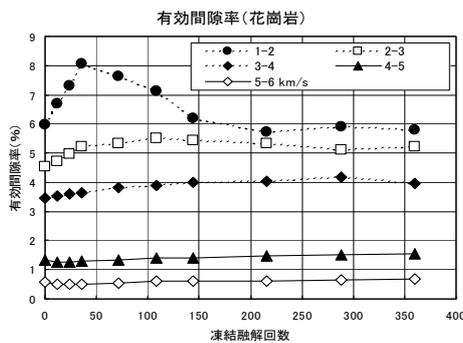


図 2-12 凍結融解回数と有効間隙率および Vp の関係 (花崗岩)

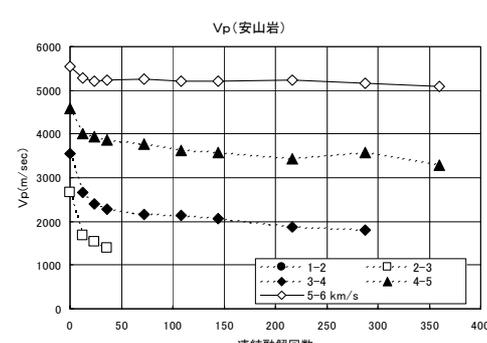
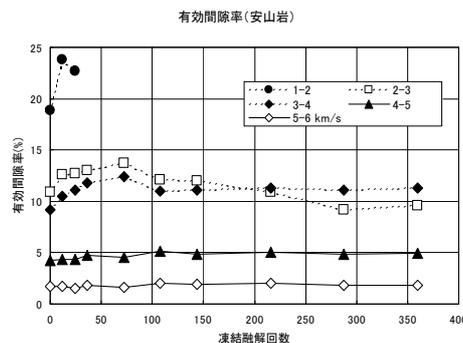


図 2-13 凍結融解回数と有効間隙率および Vp の関係 (安山岩)

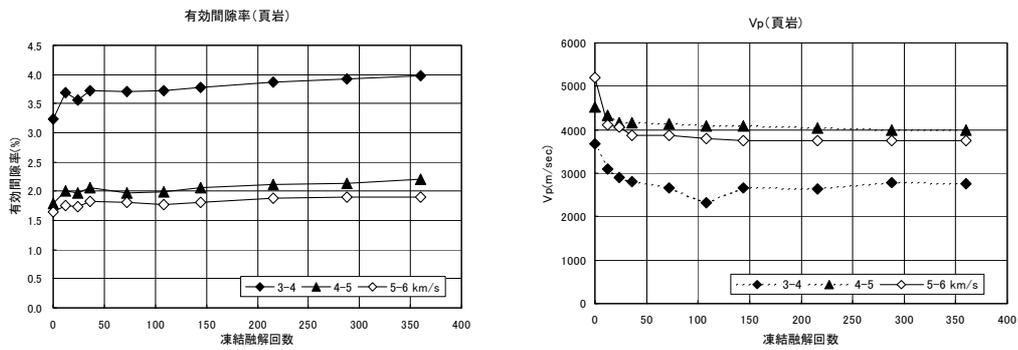


図 2-14 凍結融解回数と有効間隙率および Vp の関係 (頁岩)

(5) 原位置試験他

本節では熱物性に関する原位置試験，岩盤の凍上現象と岩石の凍上試験および熱環境下における AE 計測について述べる。

熱物性に関する原位置試験の事例として，若林ら³⁵⁾が行った大谷石空洞の側壁部において，熱源を用いて岩盤を加熱・冷却する方法により温度伝導率を測定する実験を紹介する．実験に用いられた装置を図 2-15 に示す．これは，1m×1m の大きさをもつ熱源を測定地点に設置し，熱源内部の温度を制御しながら冷却および加熱を行うものである．温度センサーは加熱・冷却面に直交するように 9 点配置されている．測定結果の解析は一次元の熱伝導方程式の離散近似解を用い，異なる 3 点で測定された一定時間ごとの 3 回のデータを用いて行われた．センサーの間隔が 1cm から 4cm までの場合はその間隔によって解析結果に差が生じ，この原因として大谷石の不均質性が影響していると考察されている．間隔が 5cm 以上の場合は図 2-16 に示すように測定間隔による差は見られなかった．温度が 0℃ 以上の場合の温度伝導率は $1.3\sim 1.4\times 10^{-3}\text{m}^2/\text{h}$ でほぼ一定であり，また 0℃ 以下では温度依存性が認められ冷却に伴い温度伝導率は増加していく．0℃ 付近では加熱側より冷却側の方が温度伝導率は小さく，これは水分の凍結に伴う潜熱の影響と考えられる．

寒冷地で冬季に地盤が凍結する際に，表面が持ち上がることがある．これは，凍結面へ水が吸い寄せられて氷として析出することにより起こる現象である．このような現象を凍上現象と呼ぶ．岩盤構造物に対しては，北川・川上³⁶⁾により寒冷地のトンネルの変状は凍上現象に原因があることが示されている．また自然の凍結とは別に，人工的に地盤・岩盤に凍結を起こす場合，すなわち地盤凍結工法や LNG 地下タンクでは凍上による地盤膨張の影響を定量的に評価する必要がある．凍上現象はもともと含まれている間隙水の凍結膨張のほか，未凍結部分からも水が吸い寄せられて凍結し，体積が膨張することによるとされている．凍上により地盤・岩盤中に厚さ数 mm から数 cm の氷の層 (アイスレンズ) が生じ，こうしたアイスレンズの厚さの和が凍上量になる．このような凍上のメカニズムは毛管を通じて氷-水界面に水が吸い上げられていく現象 (毛管力理論) などによって説明されている．地盤・岩盤の凍上に伴う諸問題を解決するために，室内で凍上試験が行われる．試験装置の一例を図 2-17 に示す．これは北海道開発局で原型が開発されたもので，岩石試料に対して適用されているものである³⁶⁾．

高温および低温下の岩石・岩盤の挙動を観測する手法として AE 測定に関する研究が行われている．熱環境下における岩石の AE には次の 2 つがあるとされている．一つは岩石内に温度差が生じないような状態を保って，ゆっくり温度を上げたり下げたりした場合に発生する AE であり，これは鉱物粒子間の熱膨張の不均一性による不均質なひずみの発生によるものとされている．もう一つは岩石内に温度勾配が生じ，熱応力が作用する場合に発生する AE であり，巨視的な破壊に結びつく可能性のあるものである．ここでは，前者に関する測定事例について紹介する．

江原ら³⁷⁾は，大島花崗岩を用いた岩石供試体を温度勾配が生じないような加熱・冷却速度で実験を行い，AE の発生と温度との関係を求めた．AE の測定は振動子からの信号をプリアンプで 40dB 増幅して，10kHz ~ 1MHz のバンドパスフィルターを通過させた後，収録している．加熱・冷却は温度勾配によるマイクロクラックの発生をさ

けるため 0.5K/min の速度で行い, 20K だけ加熱・冷却し, 約 2 時間保持するステップで測定を行っている. 図 2-18 に加熱時および冷却時の AE 積算数を示す. AE が発生しはじめる温度は, 加熱時では約 330K, 冷却時では約 270K であった. また, 加熱・冷却時ともに最初のサイクルでのみ AE が発生し, 2 回目以降のサイクルでは AE はほとんど発生していないことがわかる. この傾向は同時に測定を行った熱膨張率の傾向と一致している. これらの結果は熱サイクルを受ける岩石にも, 応力履歴を与えたときに現れるカイザー効果と同様な現象が観察されることを示している.

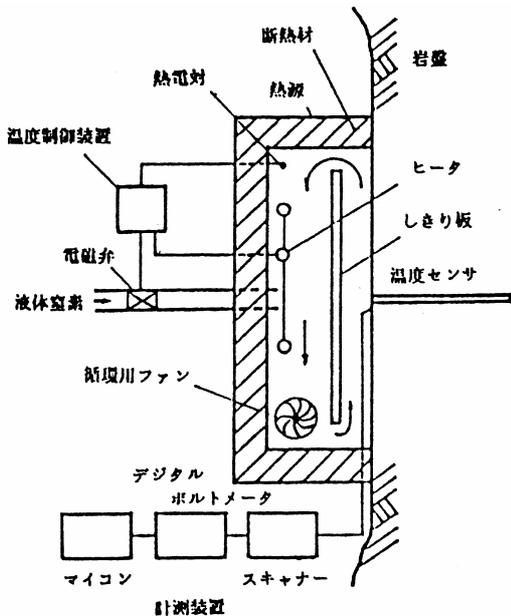


図 2-15 原位置での温度伝導率測定装置 35)

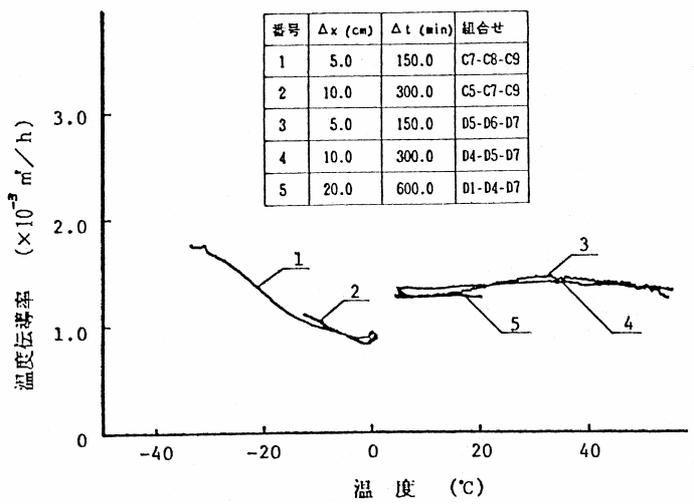


図 2-16 温度伝導率の解析結果 35)

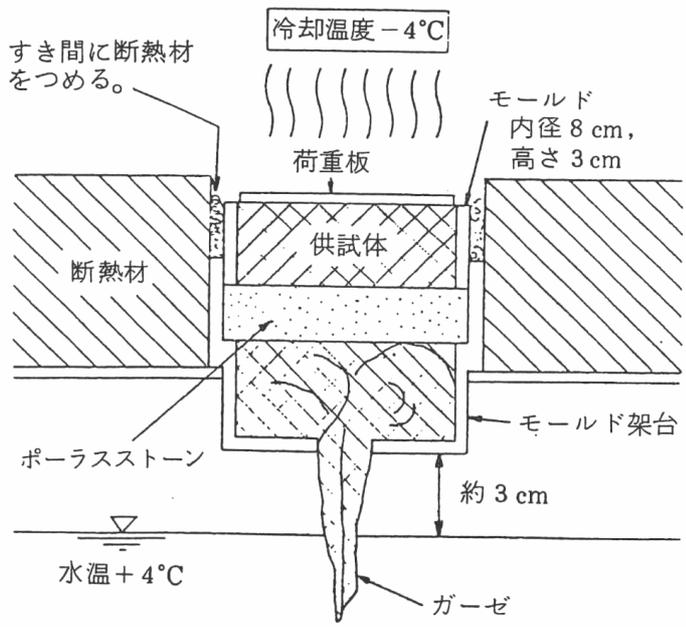
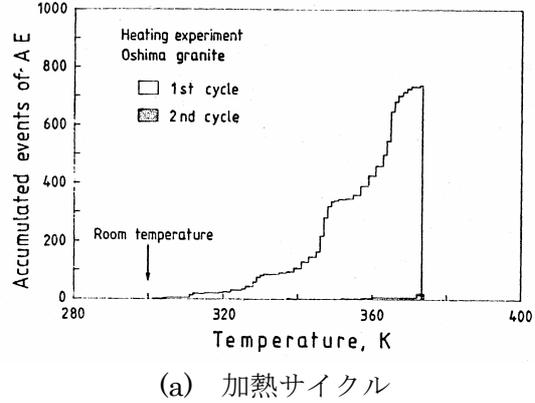
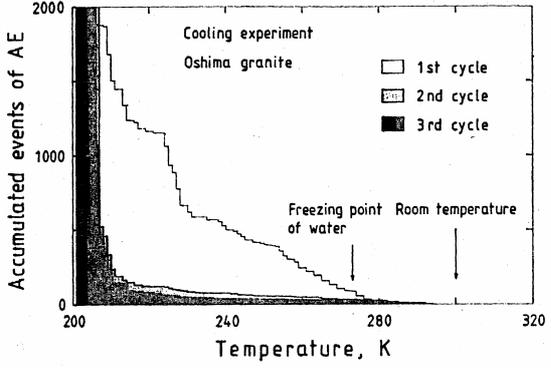


図 2-17 凍上試験装置の概略図 36)



(a) 加熱サイクル



(b) 冷却サイクル

図 2-18 加熱・冷却に伴う AE の発生挙動 37)

3. 解析WGの活動概要

(1)はじめに

本解析WGは、温度分布解析、熱応力解析、熱応力解析およびそれらの連成解析におけるこれまでの解析技術および利用可能なプログラムを収集、整理するとともに、構想・プロジェクト、解析事例などに関して調査し、その概要をまとめることを目的として活動を行っている。

本WGの活動は大別して解析手法に関する調査と熱環境関連構想・プロジェクトにおける解析検討事例の調査の二つである。

本報告では、これらの活動状況について報告する。

(2)岩盤の熱環境に関わる解析手法の調査について：連成問題とは

連成問題とは場の状態に熱(Thermal)、水理(Hydrologic)、力学(Mechanical)、化学(Chemical)現象を選び、それらの相互作用を考慮して解かねばならない問題の総称である。それぞれの場の頭文字をとって THMC などの略号で呼ぶことも多く、本文でもこの略号に従う。図 3-1 は連成問題の相関関係を表している³⁸⁾が、太い矢印で示された現象が問題における支配的な要因となる。土木分野で古くから認識されてきた連成問題には、有効応力の原理を媒介として HM の連成である圧密問題があり、流体による熱輸送に絡んで TH の連成も古くから研究されてきた。さらに、石油や天然ガスの生産においては高温側の温度を対象として THM の連成も直接的な工学の問題として捉えられてきた³⁹⁾。このように古くから認識されていた連成問題であるが、対象とする温度範囲を広くとれば高温側の熱環境としては熱水の地下貯蔵、地熱開発、放射性廃棄物の地層処分などの分野、低温側では低温液化ガスの岩盤内貯蔵、超伝導電力設備、寒冷地における凍害、各種の凍結工法などが関連する。この低温側の話題としては地盤が低温環境に置かれて内部に含まれる水分が凍結することによる力学的な影響は、水が相変化することによる体積変化と潜熱を放出することにまとめられる。本節では高温側の熱環境として近年特に注目を浴びている放射性廃棄物の地層処分に関連した連成問題を取り上げる。この場合には長時間にわたる連成現象に関する予測の必要性から、THMC の連成現象を取り扱った実験的・解析的研究が進められている。

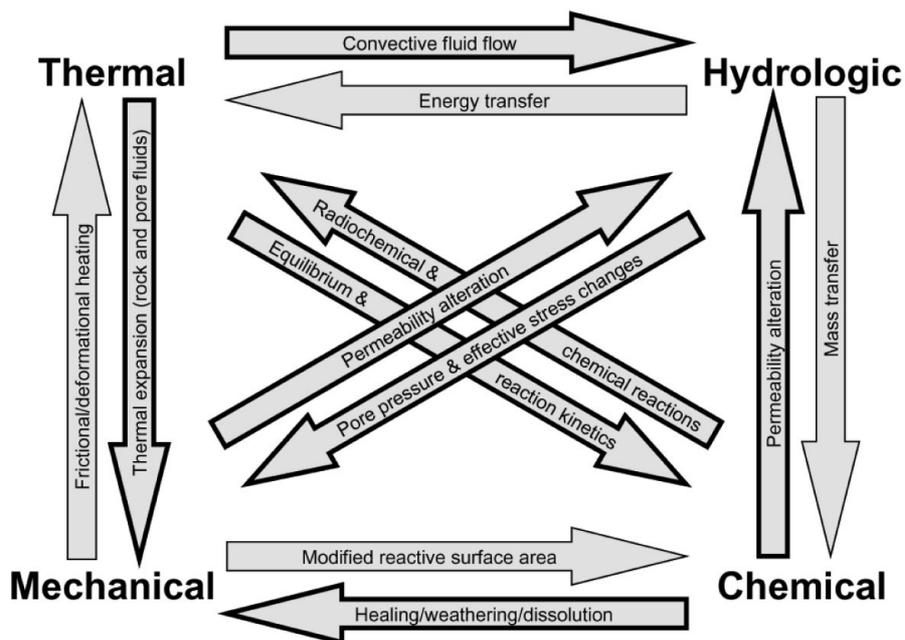


図 3-1 連成問題³⁸⁾

表3-1 参考文献38) に取り上げられた論文に含まれる連成現象の数

Modeling or Analysis	Four Processes				
	Three Processes	4, 7, 21 29, 30, 39, 43, 50, 51, 52	6 28, 60	3 31	5, 11, 20
	Two Processes	32, 44, 47, 48, 53, 55, 56, 57, 62, 63, 65, 66, 69	9, 15, 17 54, 61	10, 19, 22, 23 27, 35, 40, 41, 46, 58, 64, 67	2
	Single Process		14 26, 45	18	1
	No Modeling		24, 36	13 33, 37, 59, 68	12, 16 25, 34, 42, 49
	No Experimental Data Sets	Data for One Process	Data for Two Coupled Processes	Data for Three Coupled Processes	Data for Four Coupled Processes
Experimental Data					

文献 38) には、69 編の連成現象に関連する文献が取り上げられておりそれぞれの文献において実験データのあ
る場合にはその連成する現象の数を横軸に、解析モデルが取り扱う連成現象の数を縦軸にした表が表 3-1 に示す
ように与えられており、表中の番号は参考文献 38) が取り上げている参考文献番号に一致している。ここでは、
特に放射性廃棄物の地層処分に関連したヒーターテストに関する次の 2 つの文献に着目する。

[RM39-60] Rutqvist J, Borgesson L, Chijimatsu M, Kobayashi A, Jing L, Nguyen TS, Noorishad J, Tsang C-F. Thermohydromechanics of partially saturated geological media : governing equations and formulation of four finite element models, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 38(1), 105-127, 2001.

[RM39-20] Rutqvist J, Borgesson L, Chijimatsu M, Nguyen TS, Jing L, Noorishad J, Tsang C-F. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured and bentonite at Kamaishi Mine-comparison of field results to predictions of four finite element codes, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 38(1), 129-142, 2001.

上記の文献[RM39-60] では釜石におけるヒーターテストの連成解析を実施するにあたって、4 つの解析手法にお
いて用いられた構成関係について検討した。基本的には熱移動—応力—浸透連成場の質量保存則、運動量保存則、
エネルギー保存則について検討すればよいが、採用した構成関係や解析領域に対応する境界条件によって考慮すべ
き項が多少異なることも文献[RM39-20] から読み取れる。この高温側の解析事例も含め、低温側の連成解析⁴⁰⁾ に
についてもシンポジウム当日に紹介する。

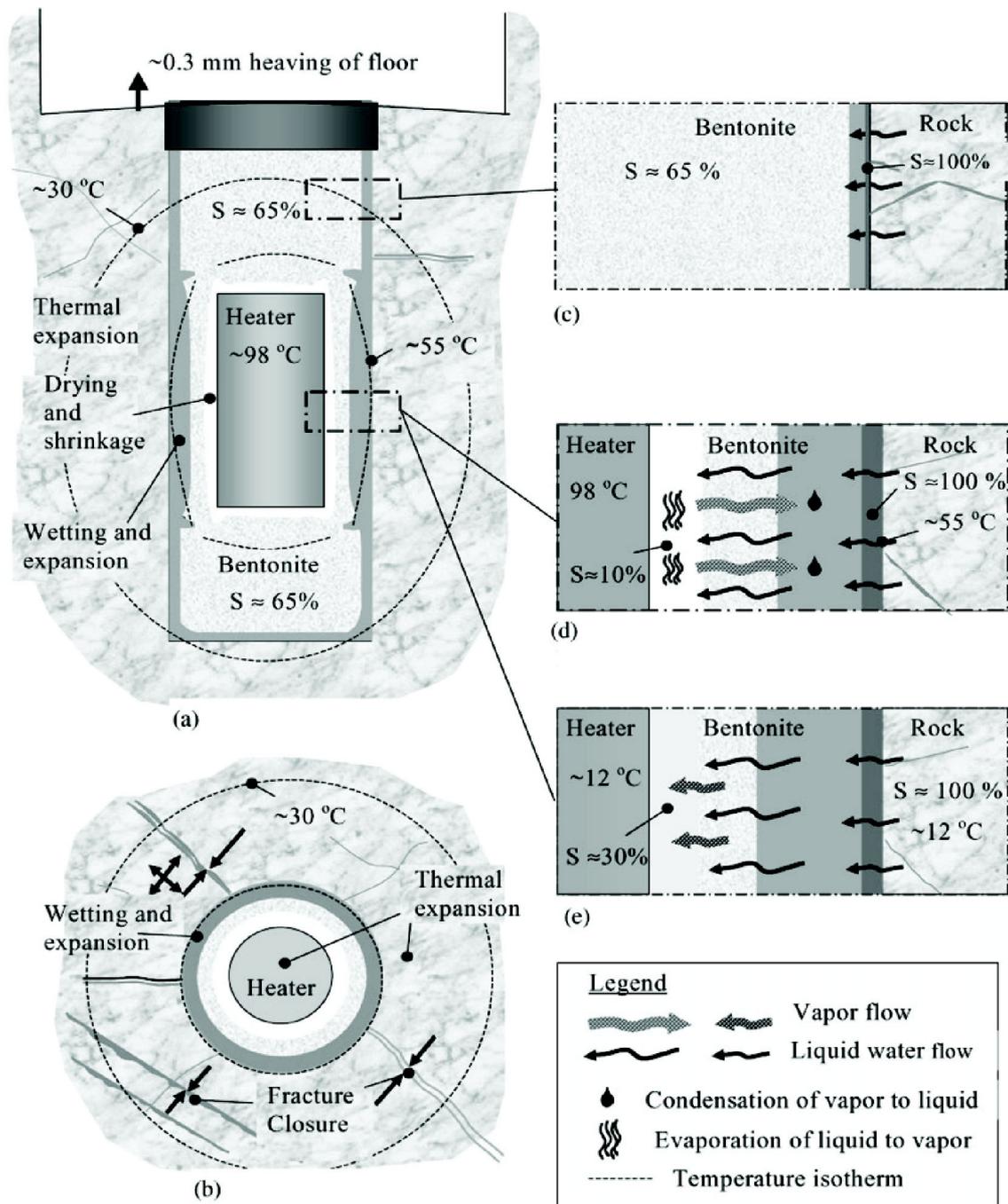


図3-2 釜石におけるヒータテスト解析のヒーター周辺部分 [RM39-20]

(3) 岩盤の熱環境に関わる関連施設における解析事例の調査

交通トンネルなどの一般的な地下構造物の設計検討などで実施されている解析はこれまで数多く実施されてきており、解析対象領域の範囲・大きさ、境界条件の設定方法、初期条件（初期応力状態）、岩盤・地盤の力学的な取り扱いなどの条件設定とモデル化や解析結果の出力とその評価についてある程度解析の手順や取り扱い方が定型化しているといえる。一方、岩盤の熱環境に関わる地下施設の解析では、上述のような取り扱い方については今のところ一般化しているとは言えず、解析検討を行うにあたり、解析領域の決定、要素分割の程度、境界条件の設定、初期条件の設定、時間刻み設定など様々な面で工夫や試行錯誤が必要が出ていると思われる。

そこで、本WGでは、熱環境に関わる既往の構想やプロジェクトで実際に実施された解析事例を収集し、それぞれの地下施設の解析目的やその目的のためにどのように解析を行い、結果を出力・表示して評価したかをまとめ、今後これらの解析に携わる際の参考事例とすることとした。

i) 調査対象とした岩盤施設（プロジェクト）について

熱に関わる施設には 0°C 以下の低温下での利用施設と 0°C 以上の高温化での利用施設の二つに分類される。今回の調査で収集された各々の施設・プロジェクト名を示す。ただし、（）で示された各施設は調査を実施したが解析事例を収集するには至っていない。

(a) 低温下での利用施設

- ・冷凍倉庫・低温冷凍倉庫
- ・LPG低温貯蔵施設
- ・岩盤内LNG貯蔵施設
- ・DME岩盤内貯蔵
- (・液体水素貯蔵施設)
- (・メタンハイドレード貯蔵施設)
- (・超伝導電力貯蔵施設)

(b) 高温下での利用施設

- ・地下蓄熱施設（温熱，冷熱）
- ・圧縮空気貯蔵施設（A，B）
- ・高温岩体発電施設
- ・熱水貯蔵施設
- ・高レベル放射性廃棄物処分施設
- ・TRU処分施設

なお、上記の分類中の地下蓄熱施設で冷熱蓄熱も高温施設に分類したのは、冷熱利用でも利用温度が 0°C 以上であることから高温下における貯蔵施設とした。

調査対象としたプロジェクト・施設の特徴を利用温度と深度および硬岩・軟岩で分類すると図 3-3 のようになる。なお、図中の熱水貯蔵 A，熱水貯蔵 B は貯蔵条件が異なるためそれぞれ示した。図に示されるように、利用温度は低温の -200°C 近傍から高温の 250°C であり、施設の建設深度は地表付近から深度 1000m 以上と広範囲にわたる。また、図 3-3 に示されるように多くの熱に関わる施設がエネルギー貯蔵施設であることがわかる。これは、低温貯蔵では、低温にすることで気体から液体にすることで大規模貯蔵が可能となることや逆に高温貯蔵では、地下貯蔵施設で高温かつ高圧状態を確保することで気体を液体化することにより同様に大規模貯蔵が可能となるためである。

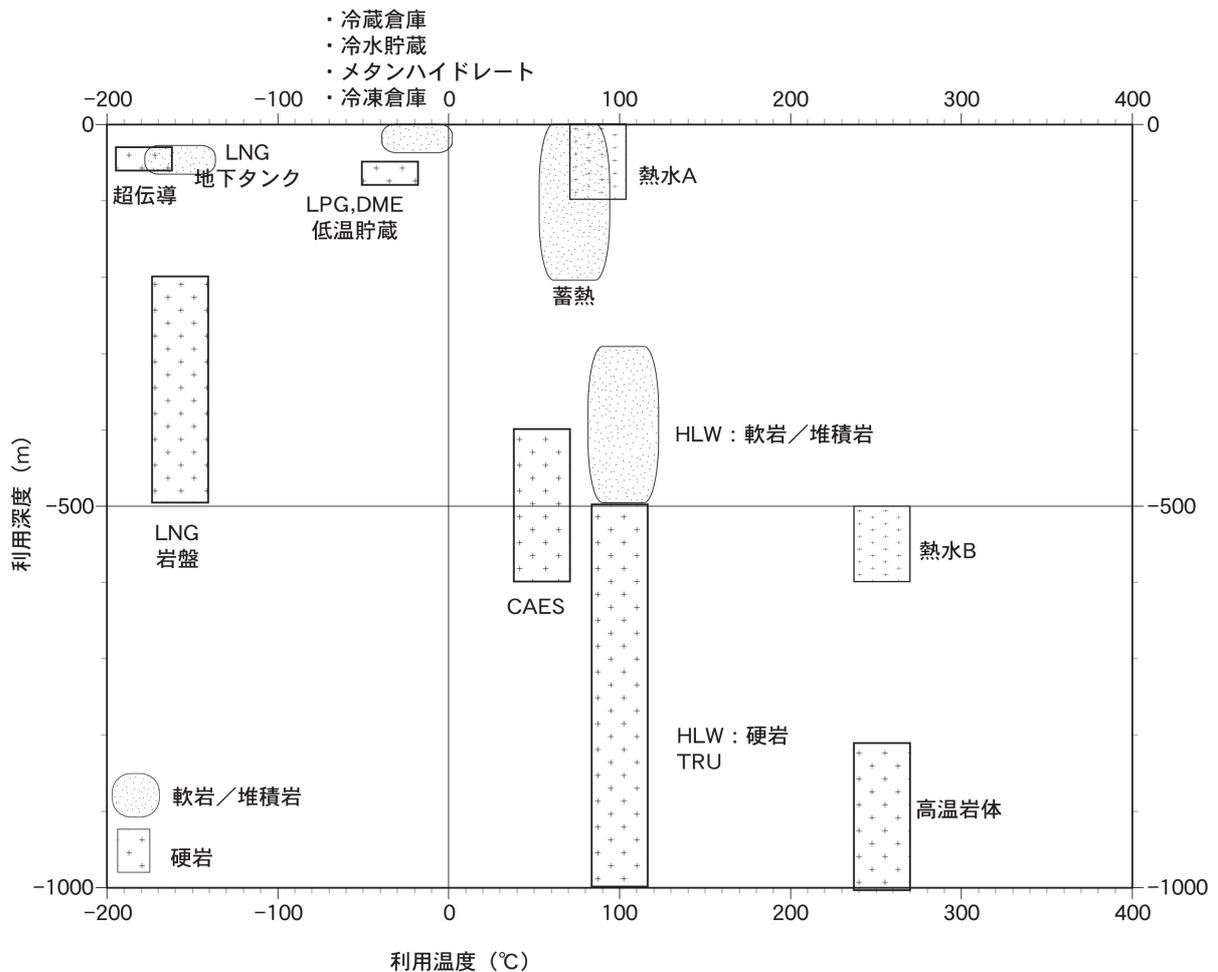


図3-3 熱環境に関連する施設における温度環境と施設深度の関係

ii) 調査項目等について

収集された各施設の資料を基に、以下の項目について整理、まとめを行っている。

- ①解析の目的
- ②解析条件
 - ・ 解析領域, 解析モデル
 - ・ 境界条件の設定
 - ・ 解析に用いた物性
- ③解析結果の項目と出力例
- ④課題など
- ⑤参考文献

(4) まとめ

熱に関わる地下施設の解析では低温環境と高温環境においては地下水の相変化を含めた連成場のモデル化・定式化が必要である。そこで解析手法の調査における今回の報告においては、低温・高温環境における支配方程式の定式化と解析事例についてまとめを実施しており、そのまとめの現況が紹介される。

一方、解析事例の調査では、岩盤のもつ保温性に加えて、低透水性や耐圧性を組み合わせることにより様々なエネルギー貯蔵施設が考えられる。これらの施設の基本となる岩盤の保温性については一般にはあまり認識されていないように思われる。今回の報告ではいくつかの解析事例を通じてこの点も説明する予定である。

4. おわりに

本研究小委員会では、ここに紹介したような内容で熱環境下の岩盤施設開発の参考資料となるような書籍出版をめざして研究活動を行ってきた。今後は本セッションでの貴重なご意見などを踏まえて書籍のブラッシュアップを図りたいと考えている。

なお、本文は本研究小委員会によって執筆中の書籍の内容を踏まえて執筆されたものである。

参考文献

- 1) 外尾善次郎：資源火焔ジェット工学，ラティス刊，1976.
- 2) 厨川道雄：回転圧砕方式による岩盤の機械掘削に関する研究，京都大学学位論文，1978.
- 3) 唐沢広和，三沢茂夫：PDC 刃先材による岩石切削に関する研究(第 2 報)，採鉱と保安，Vol.33，No.12，pp.625-635，1987.
- 4) 酒井昇：一軸圧縮下における加熱岩石の力学的挙動，応用地質，Vol.28，No.1，pp.19-24，1987.
- 5) 京宗輔他：高温下における岩石の力学特性について，日本鉱業会研究業績発表講演会講演要旨集，pp.345-346，1988.
- 6) 木山保他：岩石の力学特性に及ぼす温度の影響，土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集，pp.628-629，1995.
- 7) 木下直人他：高温下岩石の力学特性に関する研究，土木学会論文集，No.561/Ⅲ-38，pp.151-162，1997.
- 8) 稲田善紀他：熱水の影響を受ける空洞周辺岩盤の熱的挙動，地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.4，pp.131-140，1999.
- 9) 緒方義弘他：高温岩石の力学的特性の研究，採鉱と保安，Vol.24，No.1，pp.6-12，1978.
- 10) 岡田洋一他：和泉砂岩の高温封圧下における強度変形特性，応用地質，Vol.39，No.3，pp.282-286，1998.
- 11) 山口梅太郎，宮崎道雄：熱による岩石の強度の変化あるいは破壊について，日本鉱業会誌，86 巻，pp.346-351，1970.
- 12) 前田實他：各種岩石の熱対応挙動について，セメント技術大会講演要旨，Vol.36，pp.76-77，1982.
- 13) 岡林信行他：低温液化ガスの岩盤貯蔵に関する研究(その 3)，鹿島建設技術研究所年報，第 28 号，pp.61-66，1980
- 14) 松永 烈他：岩石の低温における機械的性質，日本鉱業会誌，Vol.97，No.1120，pp.431-436，1981.
- 15) 関根一郎他：岩石の低温下における力学特性と岩盤分離面の影響について，土木学会第 39 回年講，第 3 部，pp.649-650，1984.
- 16) 石塚与志雄他：岩石の亀裂進展特性と破壊靱性特性に関する研究，土木学会論文集，No.388，pp.103-110，1987.
- 17) 稲田善紀他：低温の影響を受けた空洞周辺岩盤の熱的挙動に関する一二の知見，土木学会論文集，No.547，pp.211-220，1996.
- 18) 福田正己：凍結－融解による岩石の風化，低温科学 物理篇，第 32 輯，pp.243-249，1974.
- 19) 小川豊和他：低温下における岩石，土質材料の熱物性測定システム，大成建設技術研究所報，27 号，pp.367-376，1994.
- 20) 小出祐毅他：低温下における砂岩・凝灰岩の弾塑性挙動に関する実験的研究，土木学会 55 回年講，Ⅲ-A262-263，2000.
- 21) 小川豊和 他：低温下における岩石，土質材料の熱物性測定システム，大成建設技術研究所報，No.27，pp.367-376，1994.
- 22) 稲田善紀：地下の空間利用，pp.101-102，森北出版，1989.

- 23)京谷孝史他：多孔質軟岩（大谷石）の凍結融解による力学特性劣化の定量的把握について,土木学会論文集 No.652, pp.103-114,2000.
- 24)室達朗他：凍結・融解による岩石の風化試験, 土木学会 32 回年講, III,pp.362-363, 1977.
- 25)市川慧他：摺上川ダムフィル堤体材料耐久性等試験その 1,土木研究所資料,1988.
- 26)中村康夫他：摺上川ダムフィル堤体材料耐久性等試験その 2,土木研究所資料,1989.
- 27)中村康夫他：大分川ダム堤体材料耐久性等試験,土木研究所資料,1992.
- 28)中村康夫他：竜門ダムリップラップ材耐久性試験,土木研究所資料,1991.
- 29)中村康夫他：殿ダム堤体材料試験その 1,土木研究所資料,1989.
- 30)中村康夫他：殿ダム堤体材料試験その 2,土木研究所資料,1990.
- 31)中村康夫他：殿ダム堤体材料試験その 3,土木研究所資料,1991.
- 32)中村康夫他：殿ダム堤体材料試験その 4,土木研究所資料,1992.
- 33)桑原啓三他：湯西川ダム使用材料試験その 2,土木研究所資料,1985.
- 34)桑原啓三他：湯西川ダム使用材料試験その 3,土木研究所資料,1987.
- 35)若林成樹他：離散系解を用いた原位置での温度伝導率測定,土木学会 39 回年講 第 3 部, pp.653-654, 1984.
- 36)北川修三他：寒冷地でのトンネル変状と地山の凍上性, 鉄道技術研究報告 No.1301, p.37, 1985.
- 37)江原昭次他：加熱・冷却にともなう大島花崗岩の AE と熱膨張, 材料, 第 35 巻, pp.490-495, 1986.
- 38)J.L. Yow & J.R. Hunt : Review Article, Coupled process in rock mass performance with emphasis on nuclear waste isolation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 39(2), 143-150,2002.
- 39)R.W. Lewis & B.A. Schrefler: The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media, John Wiley & Sons, 1987.
- 40)Neaupane K.M., Yamabe T. & Yoshinaka R.: Simulation of a fully coupled thermohydro-mechanical system in freezing and thawing rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.,36(5), 563-580, 1999.

岩盤の熱環境に関する研究小委員会メンバー

稲田善紀（委員長，愛媛大学）
 稲葉武史（WG 幹事，鹿島建設）
 上田貴夫（幹事長，竹中工務店）
 小川豊和（大成建設）
 勝山邦久（委員長代理，愛媛大学）
 亀谷裕志（応用地質）
 木下尚樹（幹事，愛媛大学）
 木下直人（地層科学研究所）
 熊坂博夫（WG 幹事，清水建設）
 甲村雄一（竹中工務店）
 瀬戸政宏（産業技術総合研究所）
 中川加明一郎（電力中央研究所）
 新田 昭（北海道科学技術総合振興センター）
 山辺 正（埼玉大学）