

地層処分システムにおけるシーリング研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1992年2月

鹿島建設株式会社

地層処分システムにおけるシーリング研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1992年2月

鹿島建設株式会社

資料-1、資料-2、資料-6を「個人情報又は著作権等に関する該当箇所につき、不開示又は削除としています。

本技術資料は、個人情報、著作権等に係る当該箇所につき、不開示または削除としています。

この資料は、動燃事業団の開発業務を進従って、その取扱には十分注意を払って下さい。事業団の承認が必要です。また、今回

This document is not intended for publication.
made without prior written consent of Power Re

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

電話:029-282-1122(代表)
ファックス :029-282-7980
電子メール:jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

本資料についての問合せは下記に願います。

〒319-11

茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術管理室

1992年2月

地層処分システムにおけるシーリング研究

吉田 宏 西 謙治 磯辺 隆寿 坂野 且典
沢内 至武 石原 和夫 中島 健一
田中 協一 古市 光昭

要旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体の定置後、処分のために掘削した坑道（処分坑、処分坑道、連絡坑道、接続坑道等）を人工バリア材の一つである埋戻し材、プラグ材、グラウト材等により閉鎖し（以下「シーリング」と呼ぶ）、廃棄体の隔離性能を確保する必要がある。

本年度は、我が国の地質環境条件を考慮して粘土系材料等の物性試験を継続して実施するとともに、シーリングに関する概念検討を実施し、埋戻し、プラグ、グラウトなどに関する概念を検討した。さらに、室内及び原位置において行うべきシーリング試験に関する試験設計を実施した。

本報告書は、鹿島建設株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：030D0181

FEBRUARY, 1992

Investigation of Sealing in Geological Disposal

H.Yoshida K.Nishi T.Isobe K.Banno
Y.Sawauchi K.Ishihara K.Nakajima
K.Tanaka M.Furuichi

Abstract

For the geological disposal of high level radioactive wastes, after placement of the wastes, it is necessary to close off (to be called 'sealing' hereafter) the underground passages (disposal pits, disposal tunnels, liaison tunnel and construction tunnels) that were excavated for the purpose of the disposal, with one of the engineered barriers, such as, backfill materials, plugs or grout. It is important to ensure the isolation preservation of the disposed materials in such a way.

For this fiscal year, in consideration of the geological environmental condition of Japan, the property tests of materials, like clayey materials, will be continued as before and the conceptual study relevant to the sealing will be conducted. Also, the concepts regarding backfill, plugs and grouts will be reviewed. In addition, the test designs were performed regarding the sealing tests that is required to be done at in-doors and site locations.

This work has been performed by KAJIMA Corporation under commission from the Power Reactor and Nuclear Fuel Developement Corporation (PNC).

Contract No. 030D0181

目次

1.研究の目的及び範囲	
1.1 目的	1-1
1.2 研究の範囲	1-1
1.3 研究の内容	1-2
2.材料の物性試験	2-1
2.1 三軸クリープ試験	2-2
2.1.1 一軸クリープ試験	2-2
2.1.2 クリープ試験	2-6
2.1.3 供試体	2-7
2.1.4 試験装置	2-10
2.1.5 試験方法	2-12
2.1.6 試験結果	2-13
2.1.7 結言	2-18
【参考文献】	
2.2 透水性	2-20
2.2.1 試験装置	2-20
2.2.2 試験材料	2-21
2.2.3 試験方法	2-22
2.2.4 試験条件	2-23
2.2.5 試験結果	2-24
2.2.6 試験結果の考察	2-57
2.2.7 今後の課題	2-61
【参考文献】	
2.3 熱特性--熱膨張率--	2-62
2.3.1 試験の概要	2-62
2.3.2 試験装置	2-62
2.3.3 試験試料	2-64

2.3.4 検定方法	2-66
2.3.5 検定結果	2-67
2.3.6 熱膨張率	2-100
2.3.7 考察	2-102
2.3.8 結言	2-103

【参考文献】

3.シーリング概念の構築	3-1
3.1 概念構築の考え方	3-1
3.2 シーリング概念	3-8
4.試験設計	4-1
4.1 シーリングにおける事象の整理	4-1
4.2 解析コードの調査	4-3
4.3 予備解析	4-5
4.4 基本設計	4-7

資料- 1 SKB Technical Report 90-43: GMM---A general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays, pp.82-89 (1990)

資料- 2 SKB Technical Report 88-30: Rhological properties of sodium smectite clay, pp.66-61(1988)

資料- 3 解析コードの調査結果

資料- 4 埋戻し材の諸特性

資料- 5 繰成作用について

資料- 6 Operating phase experiments planned for Atomic Energy of Canada Limited's Underground Research Laboratory

表・図一覧

2.1 三軸クリープ試験

- 図2.1.1 圧縮応力および経過日数と試験体密度の関係[1]
- 図2.1.2 クリープ時間と空隙率比の関係[1]
- 図2.1.3 飽和セルの構造と写真
- 図2.1.4 3か月後の供試体の飽和状況
- 図2.1.5 中圧三軸試験装置の写真
- 図2.1.6 フィルター
- 図2.1.7 三軸圧縮試験の結果
- 図2.1.8 三軸試験におけるせん断強度
- 図2.1.9(1)～(3) 三軸クリープ試験の結果
- 図2.1.10 参照時間10⁴秒におけるひずみ速度と与えた応力比との関係

- 表2.1.1 クリープ定数の計算結果（20日以内）[1]
- 表2.1.2 中圧三軸試験装置の仕様
- 表2.1.3 三軸圧縮試験供試体の寸法と物性値
- 表2.1.4 三軸クリープ試験の結果
- 表2.1.5 クリープパラメータの文献値[2]との比較

2.2 透水性

- 図2.2.1 透水試験用セル
- 図2.2.2 クニゲルV1の粒径加積曲線
- 図2.2.3(1)～(4) 試料飽和過程における透水量の変化
- 図2.2.4(1)～(4) 透水量の時間変化
- 図2.2.5 透水係数と乾燥密度との関係
- 図2.2.6 透水係数の温度依存性

- 表2.2.1 クニゲルV1の鉱物的組成[1]
- 表2.2.2 試料と測定条件
- 表2.2.3 圧縮固化ペントナイトの透水係数
- 表2.2.4 加熱前後の透水係数の変化

2.3 热特性--熱膨張率--

- 図2.3.1 セル周囲に巻かれるヒーターおよび断熱材
- 図2.3.2 リングゲージ
- 図2.3.3 HE-13～15の試料の切り出し

図2.3.3 HE-13～15の試料の切り出し

図2.3.4 セル内の温度変化

図2.3.5(1)～(15) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化

図2.3.6(1)～(15) 試料の体積変化

表2.3.1 測定試料の寸法と物性値

表2.3.2 圧縮固化ペントナイトの体積膨張率

表2.3.3 MX-80飽和固化体の熱膨張率

3. シーリング概念の構築

図3.1 地層処分におけるバックフィル材料の要求性能

図3.2(1) シーリング概念図（結晶質岩系岩盤：坑道定置方式）

図3.2(2) シーリング概念図（結晶質岩系岩盤：処分孔定置方式）

図3.2(3) シーリング概念図（堆積岩系岩盤：坑道定置方式）

図3.3(1)～(3) シーリング概念図

表3.1(1)～(4) シーリング概念の構築

4. 試験設計

図4.1 シーリングシステムにおけるシナリオ

表4.1 シーリング概念の評価項目と解析コード

表4.2 シーリング原位置試験基本設計

1. 研究の目的及び範囲

1.1 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体の定置後、処分のために掘削した坑道（処分孔、処分坑道、連絡坑道、接続坑道等）を人工バリア材の一つである埋戻し材、プラグ材、グラウト材等により閉鎖し（以下「シーリング」と呼ぶ）、廃棄体の隔離性能を確保する必要がある。

シーリング研究開発としては、候補材料の基本特性に関する試験・研究により基礎データの取得を行ってきた。今後は、我が国の地質環境条件に適応しうるシーリングシステムにおいて、考慮すべき現象を抽出し、これらの現象のモデル化、解析手法の開発及び設計、施工技術の開発を行い、シーリングシステムを構築する必要がある。そのためには、室内基礎試験において材料の基本物性を把握するとともに、室内工学試験や原位置試験において現象の把握、現象モデルの開発、確認及び設計、施工技術の開発、確認が必要である。

本年度は、我が国の地質環境条件を考慮して粘土系材料等の物性試験を継続して実施するとともに、シーリングに関する概念検討を実施し、埋戻し、プラグ、グラウト等に関する概念を検討する。さらに、室内及び原位置において行うべきシーリング試験に関する試験設計を実施する。

1.2 実施項目

- 1.2.1 材料の物性試験
- 1.2.2 シーリング概念の構築
- 1.2.3 試験設計
- 1.2.4 報告書の作成

1.3 実施内容

1.3.1 材料の物性試験

シーリングを行う場所は、その部位によって想定される現象及び環境が異なり、材料の物性試験を実施するに当っては、これらのこと考慮して実施しなければならない。

また、実際の処分場の環境条件、経済性等を考慮すると単一材料ではなく、掘削ずり等を加えた複合材料によってシーリングを行うと考えられる。従って、材料の物性試験はずり等を混合させた複合材料の試験を行わなければならないが、本年度は複合材料の基本となる粘土系材料（ベントナイト、クニゲルV1）について以下の試験を実施する。

① クリープ特性

昨年度実施した三軸クリープ試験手法に関する検討結果を踏まえて、試験装置の検討、開発を行い基本物性を測定する。試験体は直径5cm、高さ10cmを用い、飽和状態の試料で行う。

② 透水性

温度をパラメータとした粘土系材料の透水係数を測定する。試験体は膨潤圧測定用のセル内に直径4cm、高さ2cmに圧縮成型され、温度条件はセル周囲に巻かれたヒーターを調節することで制御される。

③ 熱特性

圧縮固化したベントナイトについて、三軸的に拘束条件を設定し、非排水状態での熱膨脹率を測定する。試験体は直径5cm、高さ5cm（または10cm）に成型され、含水は自然乾燥状態及び飽和状態のものを測定する。また、圧縮成型は通常一次元的に行われるため、熱膨脹に指向性が予想される。これについてもデータを取得し確認を行う。

1.3.2 シーリング概念の構築

諸外国においては、シーリングに関する検討が行われており、各国の地質環境条件に適した様々な埋戻し仕様、プラグ仕様、グラウト仕様が提案されている。我が国においても我が国の地質環境条件に適したシーリングに関する概念を明確にしなければならない。本年度は、1.3.3で計画する試験を目的としたシーリング概念の検討を実施し、試験で実施すべき埋戻し仕様、プラグ仕様、グラウト仕様を明確にする。

1.3.3 試験設計

試験設計を実施するに当っては、まずこれまでの研究成果をもとにシーリングに及ぼす事象を整理すると共に、現状の解析コードを調査し、事象を評価する上で関係するコードの問題点、改良点等を抽出する。次に試験設計を検討する上で、必要と考えられる予備解析を実施する。

以上の検討結果を踏まえ、シーリング試験の基本設計を実施する。

- ① 各種のシナリオを基にシーリングに及ぼす事象を整理
- ② 解析コードの調査
- ③ 現状の解析コードの問題点、改良点等を抽出
- ④ 予備解析
- ⑤ 基本設計の実施

2. 材料の物性試験

放射性廃棄物地層処分において、廃棄体を地下深部に定置した後、それらを搬入するため掘削された処分立坑や処分坑道、処分孔は低透水性、長期健全性などを備えた材料によって埋め戻しされる。廃棄体の周囲に配置される緩衝材や坑道などを埋める埋め戻し材として、ペントナイトを主材とした複合材料が研究されている。

定置後の現象を予測するうえで、重要なシナリオとして地下水移行シナリオが挙げられるが、初期において緩衝材の冠水や変質を知るために、ペントナイトの熱変質に関する調査研究が必要と考えられる。

この章においては、複合材料の基本となる粘土系材料のペントナイト（クニゲルV1：(株)クニミネ工業）についてクリープ特性、透水性、熱特性（熱膨張率）の試験、測定を行った結果について述べる。

2.1 三軸クリープ試験

この試験では、飽和した圧縮固化ベントナイトの三軸拘束状態でのクリープ特性について各種パラメータの実験的な取得を行なうことを目的としている。

2.1.1 一軸クリープ試験

一軸クリープ試験（長期）を行なった結果について、動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書「地層処分におけるバックフィル候補材料に関する調査」（1990年9月）[1]にまとめられている。この試験では、ステンレスのシリンダー内に設置された固化ベントナイト(クニゲルVA)あるいはその混合材料に対して、地下1000mを模擬するように26MPa (260kgf/cm²)のクリープ応力をかけ、試料の密度と空隙率の変化を450日間にわたり測定している。その試験結果を図2.1.1、図2.1.2、表2.1.1に示す。

この試験で得られた結果は、

- ・空隙率などの時間変化を見ると、試験開始以降約20日を境に異なった様相を示している。すなわち、20日以内の変形はクリープ的な性状を示しているが、それ以後の変形には時間依存性がほとんどない。
- ・その理由として、径方向の変形が完全に拘束されており、初期の変形は試料が固化され、装置に設置される間にリバウンドした分を相殺しているのではないか。
- ・試験終了時で各試料は50%程度の空隙率を有しており、堆積岩の続成作用を考えた場合、さらに圧密が進むことが予想される。
- ・実際の地下深部での設置条件を模擬するためには、三軸条件の下で体積変化を求める必要がある。

であった。以上の結果を踏まえると、圧縮固化ベントナイトのクリープ特性を評価するためには、三軸拘束状態でクリープ試験が行なうことができる装置を製作し、クリープ試験を行なう必要があるといえる。

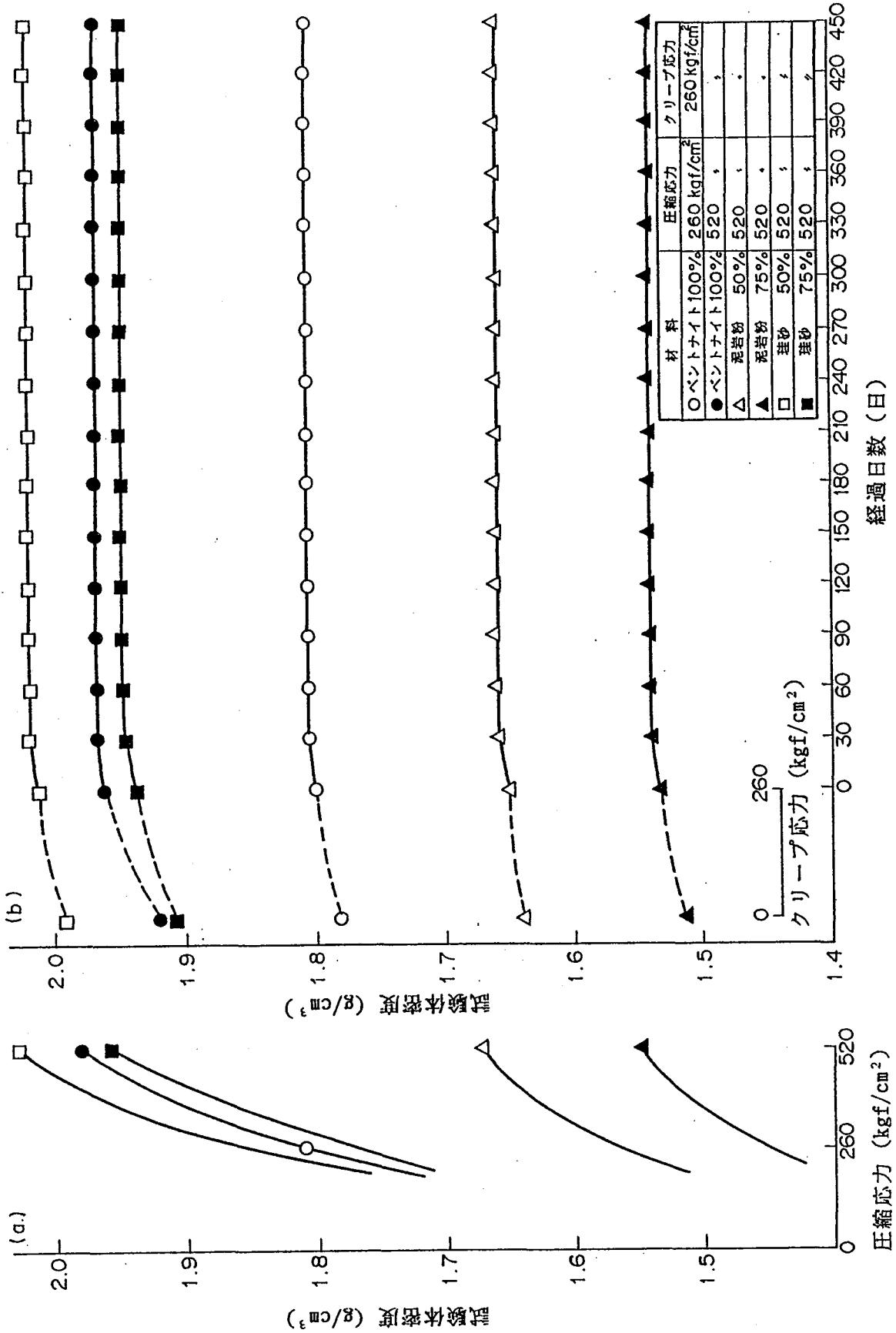


図2.1.1 圧縮応力および経過日数と供試体密度の関係[1]

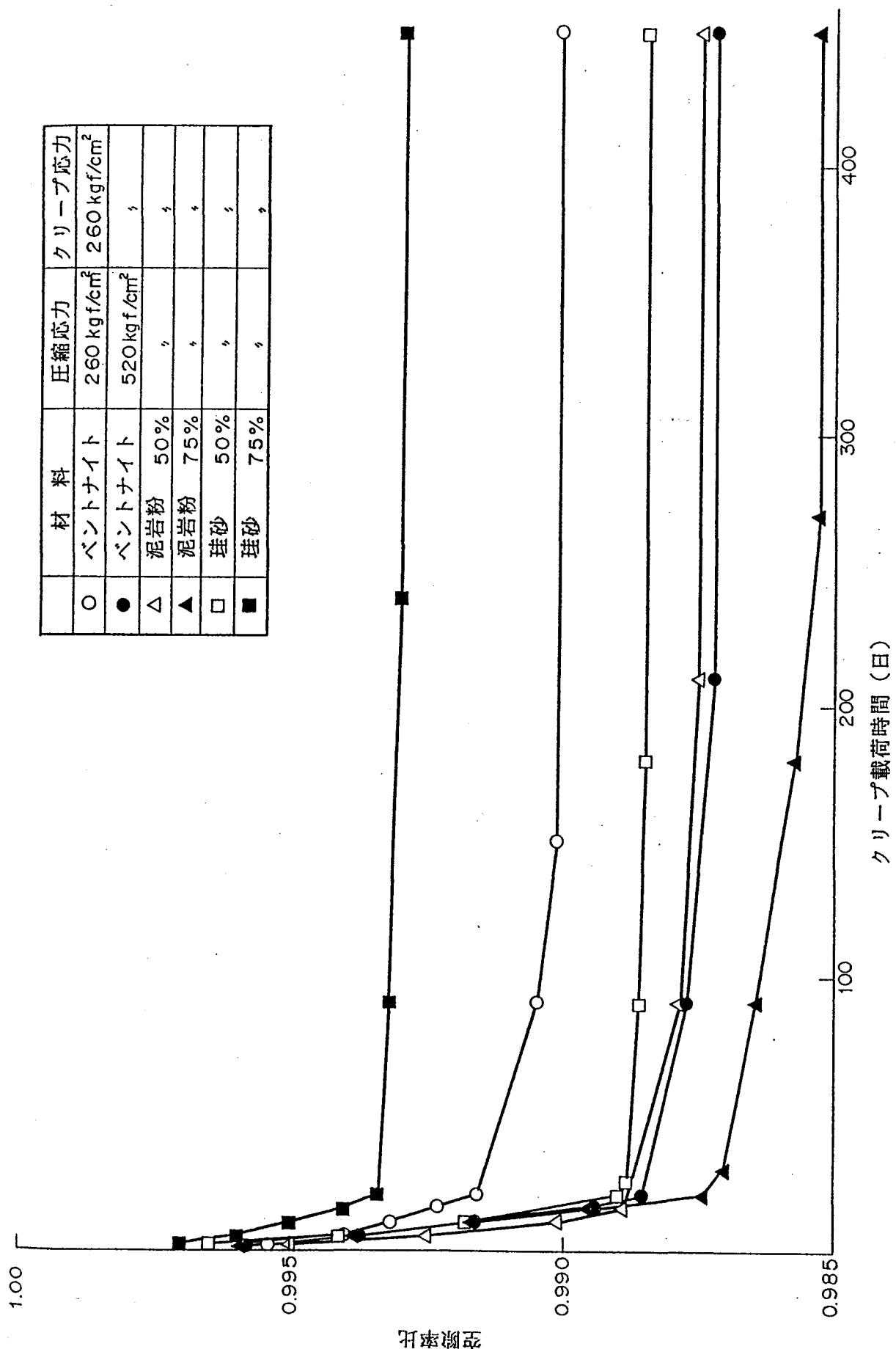


図2.1.2 クリープ時間と空隙率比の関係[1]

試験体番号	試 料	圧縮応力	クリープ応力	n_{r0}	a
①	ベントナイト 100%	260 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	0.9946	0.1409×10^{-3}
②	ベントナイト 100%	520 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	0.9958	0.4231×10^{-3}
③	ベントナイト 50% 泥岩 50%	520 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	0.9964	0.4632×10^{-3}
④	ベントナイト 25% 泥岩 75%	520 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	0.9970	0.2009×10^{-3}
⑤	ベントナイト 50% 珪砂 50%	520 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	0.9949	0.4842×10^{-3}
⑥	ベントナイト 25% 珪砂 75%	520 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	0.9958	0.4231×10^{-3}

表2.1.1 クリープ定数の計算結果（20日以内）[1]

$$n_{rt} : \text{初期空隙率比}、a : \text{定数} \quad n_{rt} = n_{r0} \cdot e^{-at}$$

2.1.2 クリープ試験

クリープ試験の方法にはいくつかの方法があるがその分類は、排水状態or非排水状態、試料が破壊するまで同じ荷重を与えるα荷重を変化させてゆく、一面せん断試験α三軸セルでの試験等が挙げられる。圧縮固化ペントナイトは乾燥密度が1.8のとき、 10^{-13} m/secの非常に小さい透水係数を持ち、排水試験を行うにためには非常に多くの時間かける必要がある。一方、一面せん断試験は簡易で費用も少なく行うことができるが、せん断が起こる部分が確定できず、せん断ひずみを評価することが難しい、また、排水状態を設定できない等の理由で奨められない。この章では、非排水状態で三軸セルを用いて行なうクリープ試験の方法を取り上げる。

圧縮固化ペントナイトを供試体としてクリープに関する物性値取得の試験を実施し、報告したものとしてPuschらによって行なわれた実験[2]がある。この中で著者らはクリープ理論としてSingh&Mitchellの理論[3]が実験値を有効にモデルに活かせるとして、三軸クリープ試験や一面せん断試験を行って、いくつかのパラメータを求めている。

Singh&Mitchellの理論では、ひずみ速度 $d\gamma/dt(\dot{\gamma})$ は次式の様なせん断応力 τ と時間 t の関数で表されるとしている。

$$\frac{d\gamma}{dt} = A e^{\alpha\tau} t^{-n} \quad (2.1.1)$$

または

$$\log \dot{\gamma} = \log A + \alpha\tau - n \log t \quad (2.1.2)$$

ここで、(2.1.1)式を基準化し、参考時間 t_r を用いると、

$$\dot{\gamma}_0 = A e^{\alpha\tau_0} \cdot t_r^{-n} \quad (2.1.3)$$

となり、ここでせん断応力 τ をせん断強度比 τ/τ_f で置き換え、(2.1.1)式を(2.1.3)式で除すると以下の式を得ることができる。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \cdot e^{\frac{\alpha\tau}{\tau_f}} \cdot e^{-\frac{\alpha\tau_0}{\tau_f}} \cdot \left[\frac{t}{t_r} \right]^{-n} \quad (2.1.4)$$

この式を見てわかることは、ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ と時間 t は両対数グラフの上で傾き n の直線

にのり、また、せん断強度比 τ / τ_f は片対数グラフ上でひずみ速度 $\dot{\gamma}$ と直線関係を持つ。従って、参考時間 t_r と τ / τ_f を決めれば α を求めることができる。

なお、今回行う三軸セルでの試験を考える場合、 τ は $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と変更して考えればよい。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \cdot \exp \left[\alpha \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right] \cdot \exp \left[-\alpha \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_0}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right] \cdot \left[\frac{t}{t_r} \right]^{-n} \quad (2.1.5)$$

2.1.3 供試体

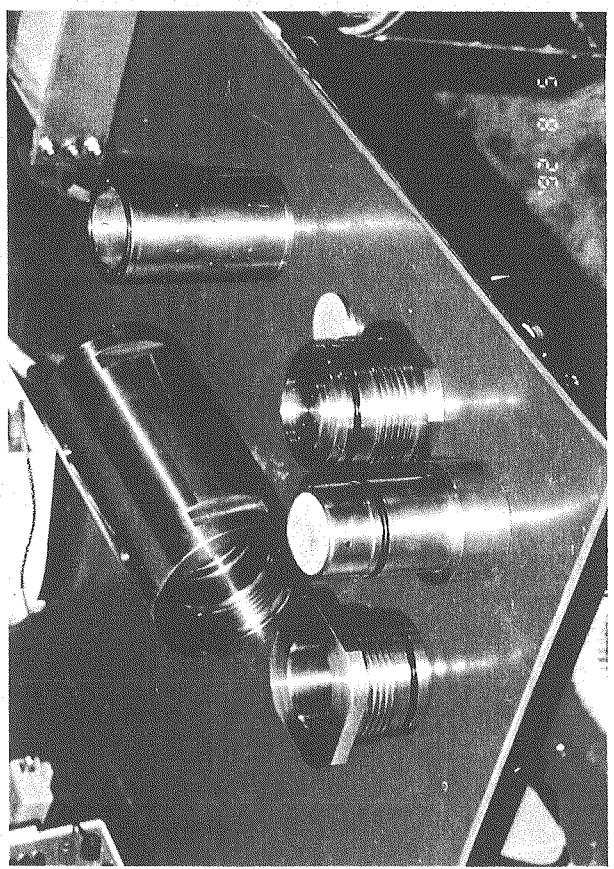
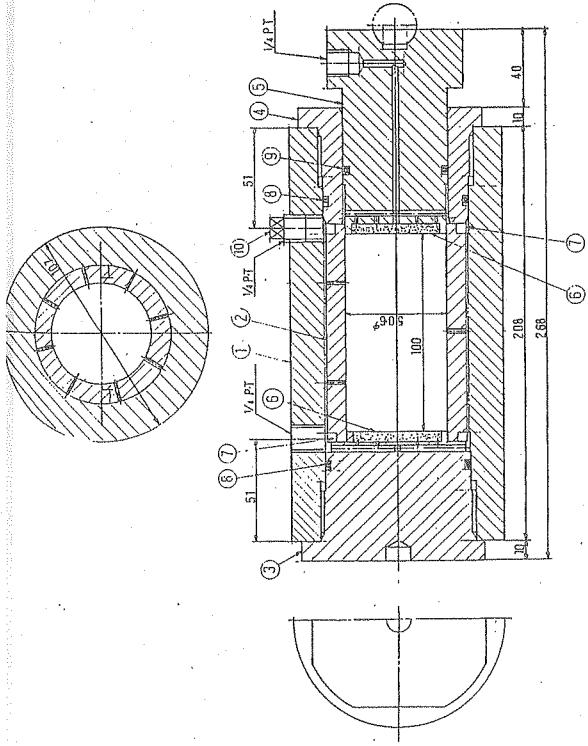
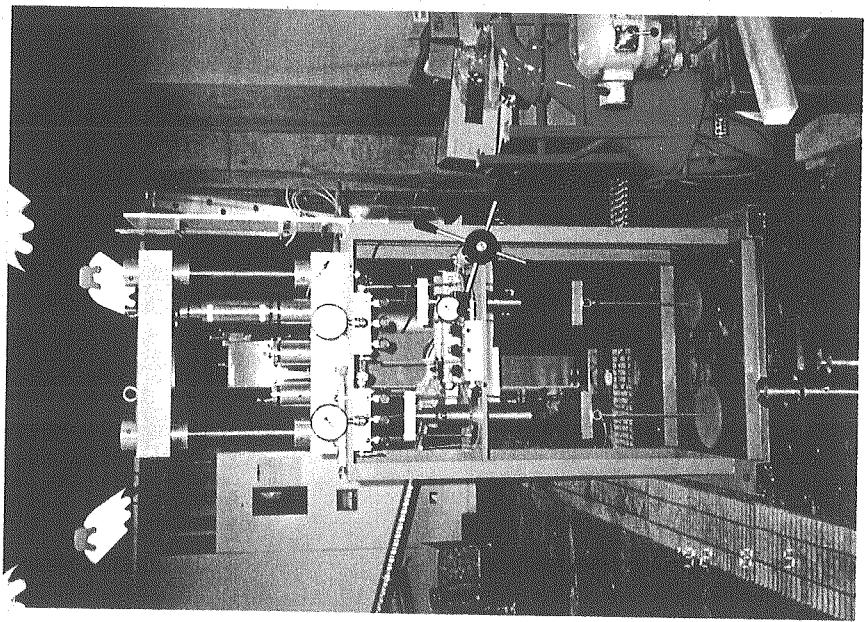
供試体の材料として用いたペントナイトは、クニミネ工業(株)のNaペントナイト、クニゲルV1である。

- 飽和した圧縮固化試料を製作するためには、いくつかの方法が考えられる。すなわち、
- ・ 圧縮固化する前にペントナイトに固化後に飽和度が100%以上になるように霧吹きで水分を与えて、1日間養生してから固化する。
 - ・ 霧吹きで水分を与えた場合、水が均一に混合しない可能性があるので水蒸気で湿度を適当に調節できるフード内でペントナイトと水蒸気を攪拌混合させる。
 - ・ スラリー状のペントナイトを長期間かけて圧密させる。
 - ・ 圧縮固化したペントナイトを多孔質体で囲んで拘束し、水圧を与えて適当な時間をかけて飽和する。

等である。今回の試験では、図2.1.3に示すように試料の全表面から水が供給できるような仕組みを持った特殊なセルを用いた。圧縮固化した後に飽和度が100%になるように粉末ペントナイトの水分を調整した後固化し、その後、試料に濾紙を巻いて飽和セルの中に設置する。セルは二重シリンダー構造を持ち、中のシリンダーには側面から試料に水が供給できるように細孔が数多く開けられている。また、外のシリンダーは試料が水を吸うことによって発生する膨潤圧に抵抗できるよう、厚さ1.5cmの厚さを持ったステンレスでできている。セルは、1990年に長期透水試験で用いた実験架台[1]にセットされ軸方向の変位を固定した後に、1MPaの圧力で水を浸透させた。

乾燥密度1.8の試料の透水係数は約 10^{-13} m/sec[4]であるので、厚さ2.5cm（試料の半径）

図2.1.3 飽和セルの構造と写真



の試料に1MPaで水を浸透させると、動水勾配～4000、移行速度が 4×10^{-10} m/secと計算できる。従って、2.5cmの厚さの試料の片側から水を浸透させて、もう一方の側に達するまでにかかる時間は2年弱となる。しかし、試料は固化前に飽和に相当する水分を含んでいること、底面からの浸透にも期待できることなどからさらに短い時間で試料を完全に飽和できると予想した。実際には、図2.1.4に示されるように、色が変化している部分が完全に飽和しているとすると、3か月の浸透によって試料の全体積の98～99%を飽和することができた。セルの数や実験工程などの実験の制約上、このセルの中で飽和させる時間は1か月とした。

上記の過程を踏んで三軸クリープ試験のための供試体を作成した。

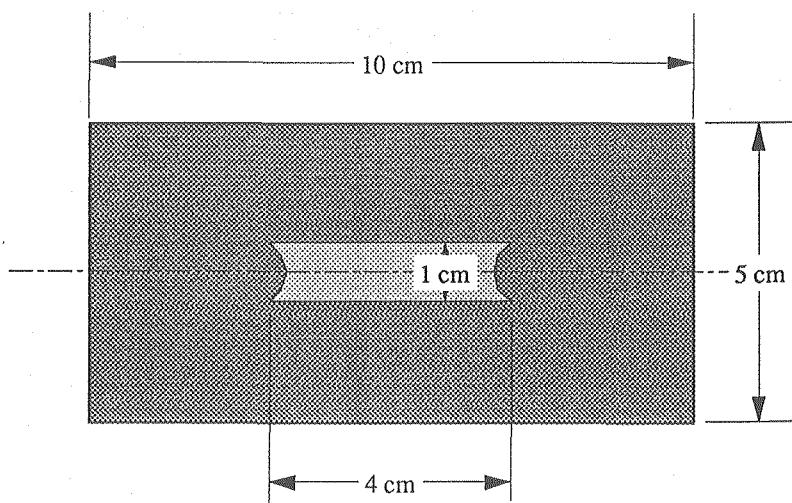


図2.1.4 3か月後の供試体の飽和状況

2.1.4 試験装置

試験装置は(株)マルイ製の中圧三軸試験装置で、表2.1.2に示す仕様に従っている。また、セル内には供試体の直径方向の変位を測定するためのリングゲージが2本とセル内の温度測定用の熱電対が1本設置されている。図2.1.5は三軸試験装置の写真である。

●側圧負荷方式

低圧用（最大0.99MPa）：エアレギュレーター方式

高圧用（最大 10MPa）：エアハイドロブースター方式

●軸荷重負荷

最大 1tonf ($\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 試料に換算して5MPa)

●背圧負荷装置

最大 0.3MPa : エアレギュレーター方式

●センサー類

・軸荷重 : 1tonf

・変位 : 25mm

・側圧 : 10MPa

・間隙水圧 : 1MPa

・体積変化 : 50cm³

表2.1.2 中圧三軸試験装置の仕様

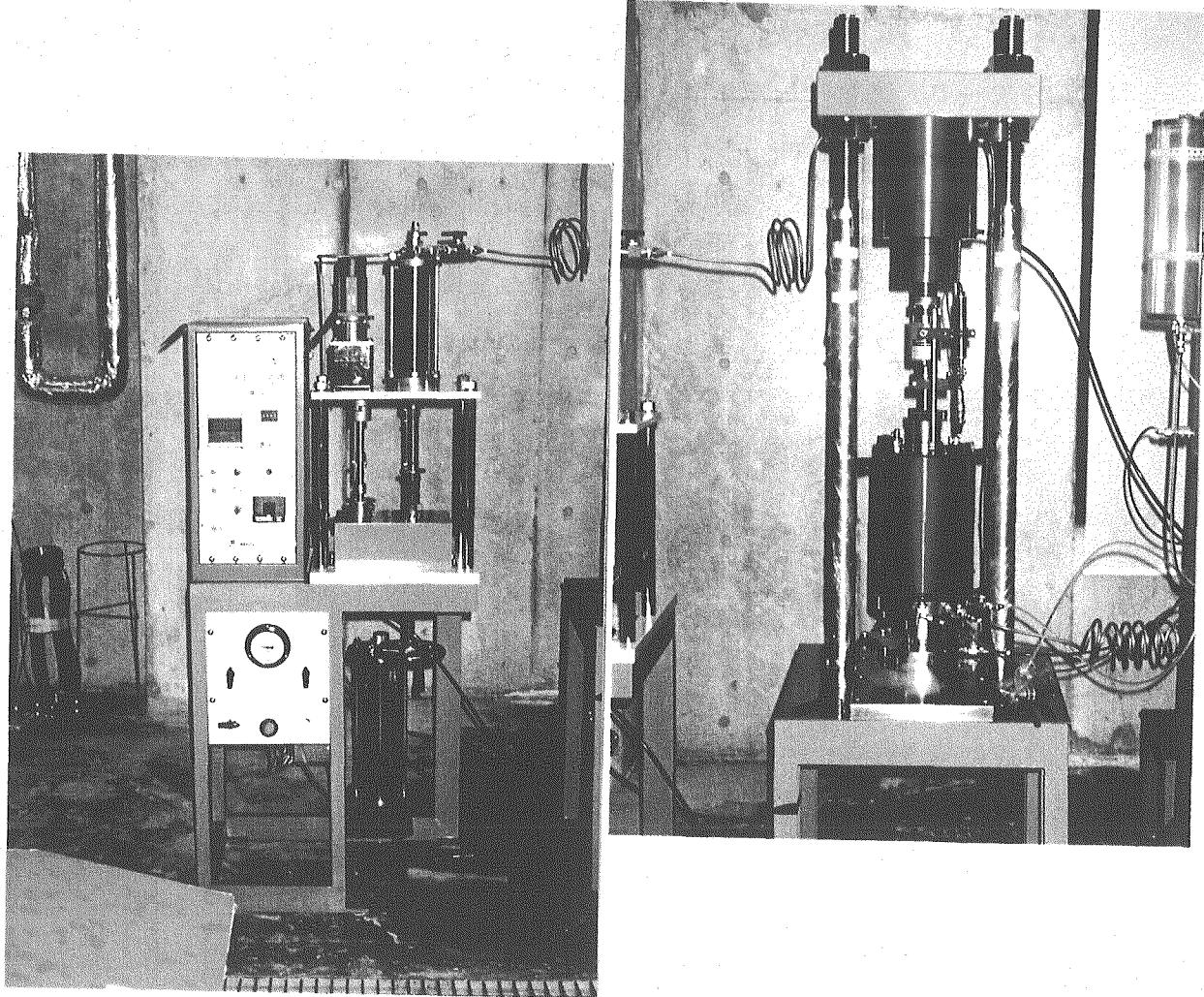


図2.1.5 中圧三軸試験装置の写真

2.1.5 試験方法

以下の手順で三軸クリープ試験を行った。

- ① ベントナイト試料の圧縮固化
- ② 試料の飽和：図2.1.3に示される様な飽和セルを用いて行なう。水を効果的に浸透させるために真空で吸引を行い、その後、1MPaの水圧で水を浸透する。
- ③ 試料に濾紙で作成したフィルター（図2.1.5参照）を巻いてゴムスリーブを取り付け、三軸セル内に設置する。（フィルターは間隙水圧が速やかに平衡になるようにするために用いる）
- ④ 配管系や供試体の側面に水が回り込むように調節する。
- ⑤ 供試体の膨潤圧に相当するセル圧をかける。
- ⑥ 供試体の変形や間隙水圧の変化が時間的に変化しなくなったことを確認して、所定のクリープ荷重を与える。
- ⑦ クリープ荷重各試験によって設定し、今回の試験では $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ が 0.3, 0.5, 0.7 となるように設定した。
- ⑧ 結果のプロットと評価

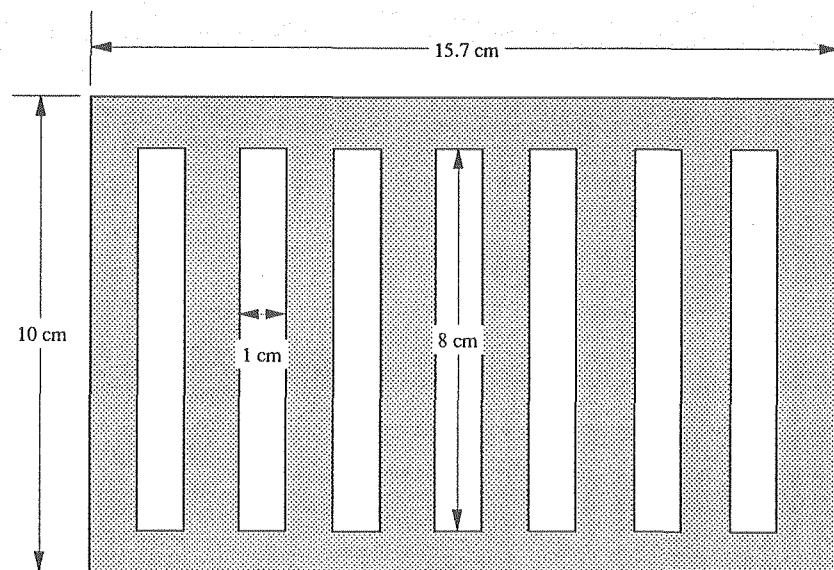


図2.1.6 フィルター[5]

2.1.6 試験結果

試験は、飽和圧縮固化ペントナイトの最大主応力差を知るための三軸圧縮試験と、三軸クリープ試験の2つに分れる。

2.1.6.1 三軸圧縮試験

表2.1.3に試験で用いた試料の寸法及び物性値そして、試験の結果を示す。試料の物性値を計算する際に用いたペントナイト土粒子の密度は2.7とした。

試験番号	直径 cm	高さ cm	重量 g	湿潤密度 g/cm ³	含水比 %	乾燥密度 g/cm ³	空隙率 %	飽和度 %	拘束圧 MPa	初期間隙水圧 MPa	σ_{3i} MPa	最大軸差応力 MPa
1.1	5.03	10.29	404	1.98	26.8	1.56	42.3	98.7	1.35	~0	1.35	0.85
1.2	5.02	10.28	403	1.98	26.8	1.56	42.1	99.2	1.35	~0	1.35	0.76
2.1	5.02	10.25	413	2.04	23.3	1.65	38.8	98.9	2.23	~0	2.23	1.38
2.2	5.03	10.18	409	2.02	23.3	1.64	39.2	97.2	2.23	~0	2.23	1.4
3.1	5.03	10.09	418	2.08	19.8	1.74	35.5	96.8	3.68	~0	3.68	2.5
3.2	5.03	9.95	413	2.09	19.8	1.74	35.4	97.3	3.68	~0	3.68	2.3

表2.1.3 三軸圧縮試験供試体の寸法と物性値

試験は6供試体について行い、それぞれ2供試体は同じ密度を持つように設定した。含水比は圧縮固化する前のペントナイトから求めた。拘束圧は各密度 ρ_d における膨潤圧 p_s に相当する大きさであり、以下の式で求められる。

$$p_s = 4.8 \times 10^{-6} e^{7.8 \rho_d} \quad (2.1.6)$$

拘束圧を与えた1週間後の間隙水圧を初期間隙水圧としようとしたが、間隙水圧はほとんど0MPaから変化しなかった。圧縮時の軸ひずみ速度は通常の圧縮試験の1%/minではなく、三軸クリープが非常にゆっくりした現象であることから1%/hourとした。試験中の温度は室温である。

図2.1.7に三軸圧縮試験の結果（ひずみ応力曲線）を、図2.1.8に σ_{3i} とせん断強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$ の関係を示す。

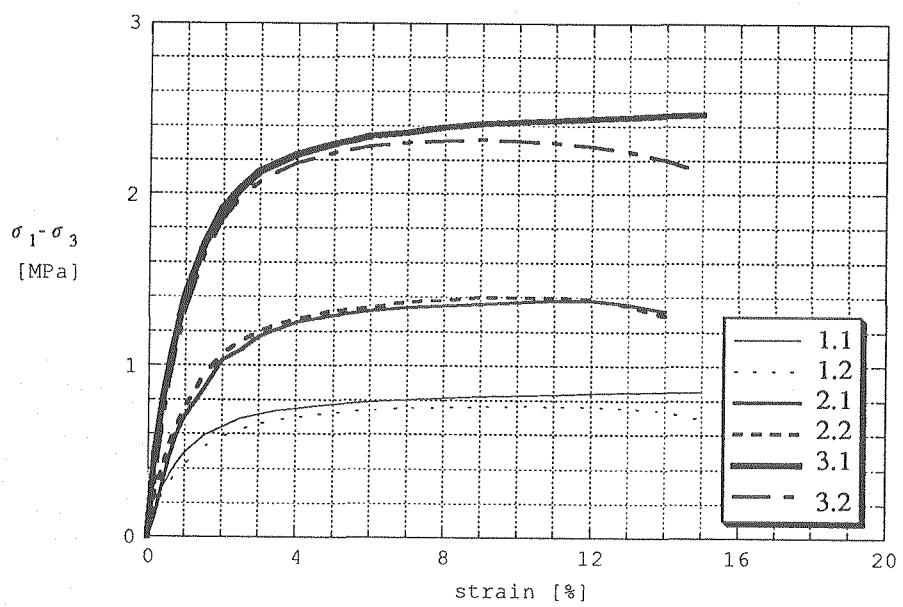


図2.1.7 三軸圧縮試験の結果

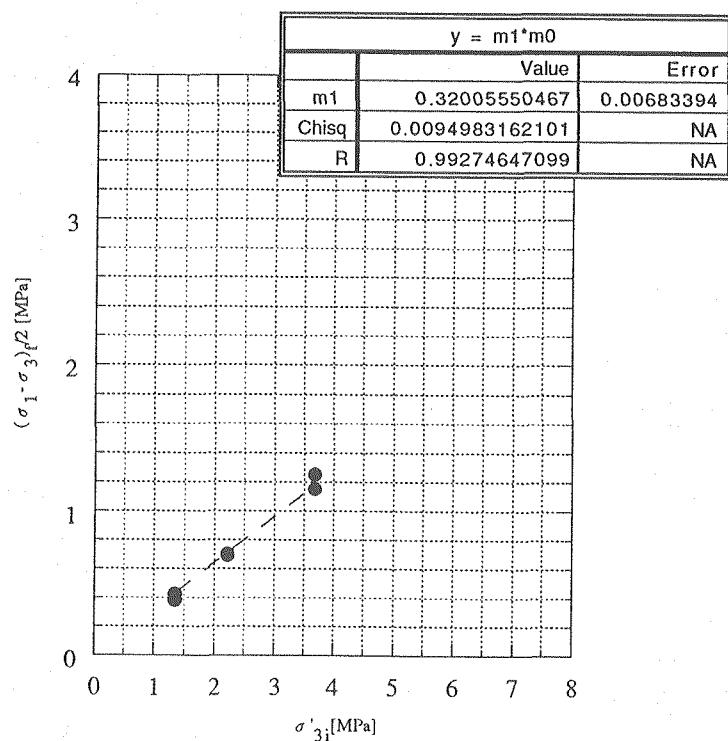


図2.1.8 三軸試験におけるせん断強度

2.1.6.2 三軸クリープ試験

表2.1.4に試験の結果を示す。

試験番号	飽和密度 $\rho_m [g/cm^3]$	含水比 w[%]	乾燥密度 $\rho_d [g/cm^3]$	空隙率 %	飽和度 %	拘束圧 $\sigma_3 [MPa]$	初期間隙圧 $u_i [MPa]$	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3 [MPa]$	最大主応力差との比 $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)$	ひずみ速度 $d\gamma / dt [1/s]$	傾き n
TCR-1	2.13	18.8	1.79	33.60	100.33	5.7	0.0017	1.8	0.49	1.0E-07	0.87
TCR-2	2.11	20.4	1.76	34.98	102.18	4.4	0.0027	2.0	0.71	4.5E-07	0.90
TCR-3	2.12	19.6	1.77	34.33	101.42	4.9	0.0007	1.0	0.30	1.0E-07	0.83

表2.1.4 三軸クリープ試験の結果

この表の中で、拘束圧は式(2.1.6)から計算される値、主応力差（クリープ応力）は拘束圧から初期間隙圧を差し引いた値から、図2.1.8から読み取れるせん断強度（図の中では外挿した値を用いた）をもとに、その比が0.3,0.5,0.7程度になるように決定した。

図2.1.9は三軸クリープ試験における供試体の軸方向のひずみ速度と時間の関係を示しており、この近似式の傾きが式(2.1.5)などにおける n の値となる。また、参照時間 t_r を10000秒とし、そのときのひずみ速度を求めたものが表2.1.4の「ひずみ速度」である。この値を片対数グラフ上に、応力比でまとめると図2.1.10のようになる。このプロットから読み取った傾きが α である。

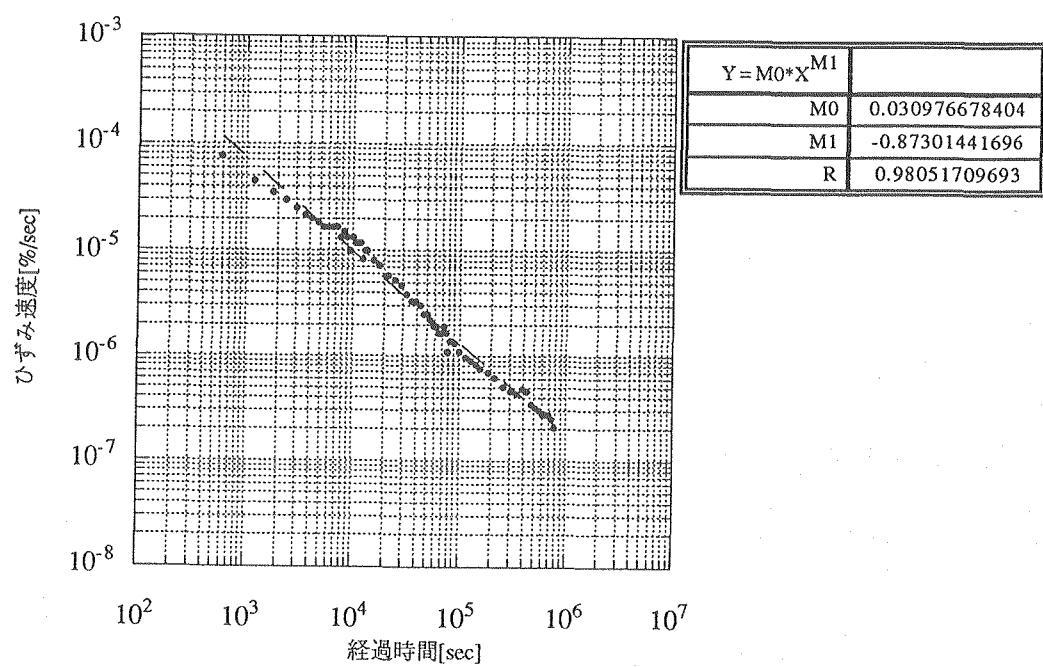


図2.1.9(1) 三軸クリープ試験の結果 (TCR-1)

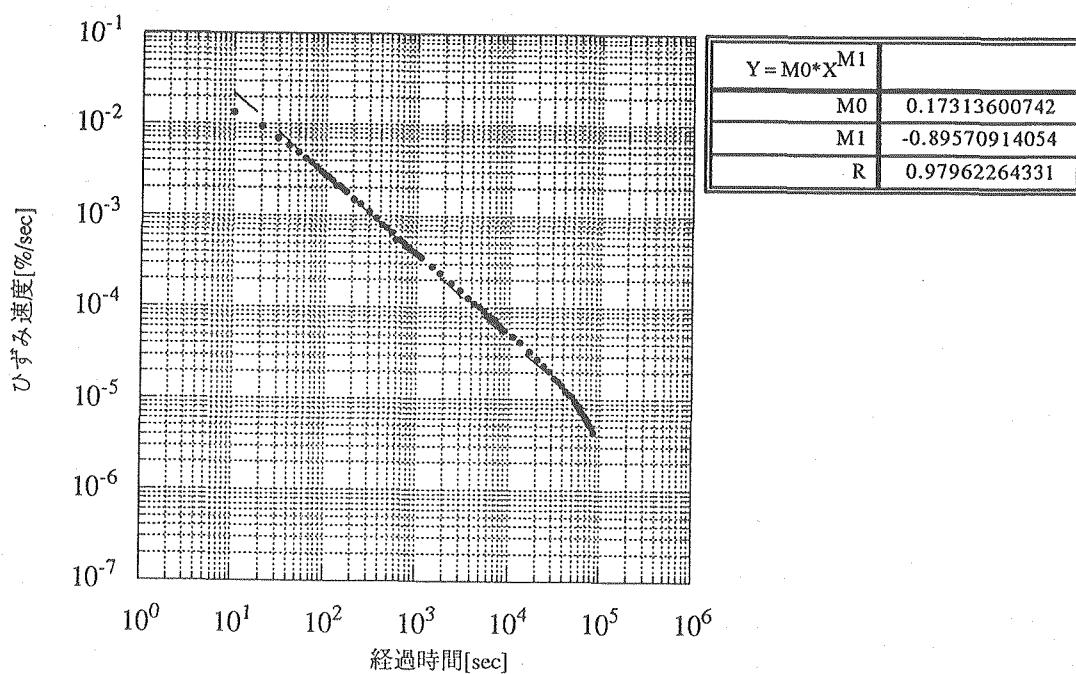


図2.1.9(2) 三軸クリープ試験の結果 (TCR-2)

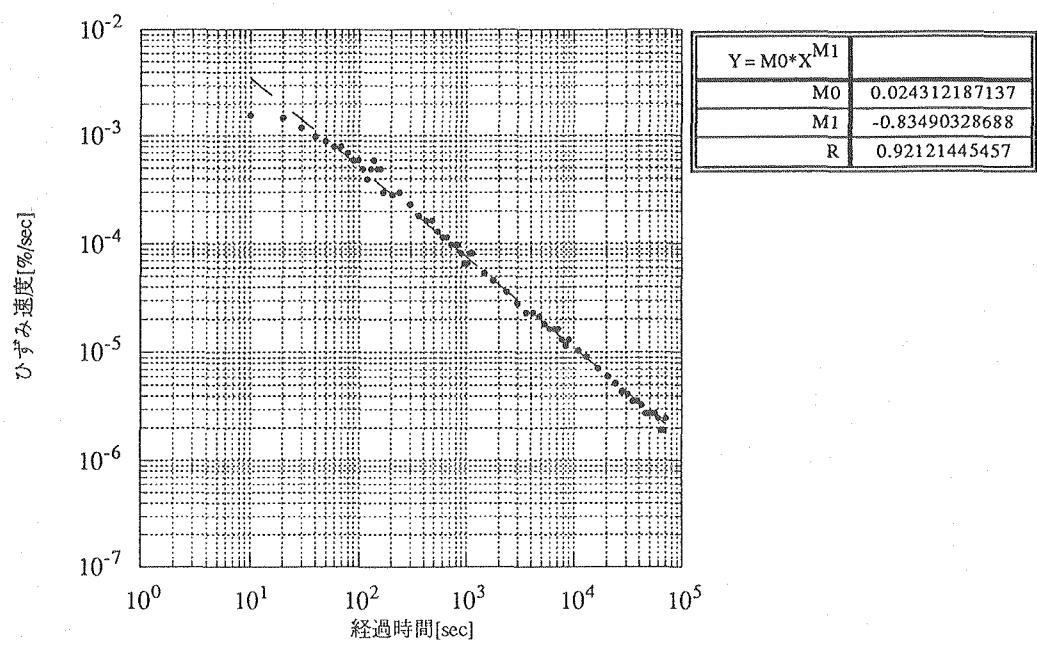


図2.1.9(3) 三軸クリープ試験の結果

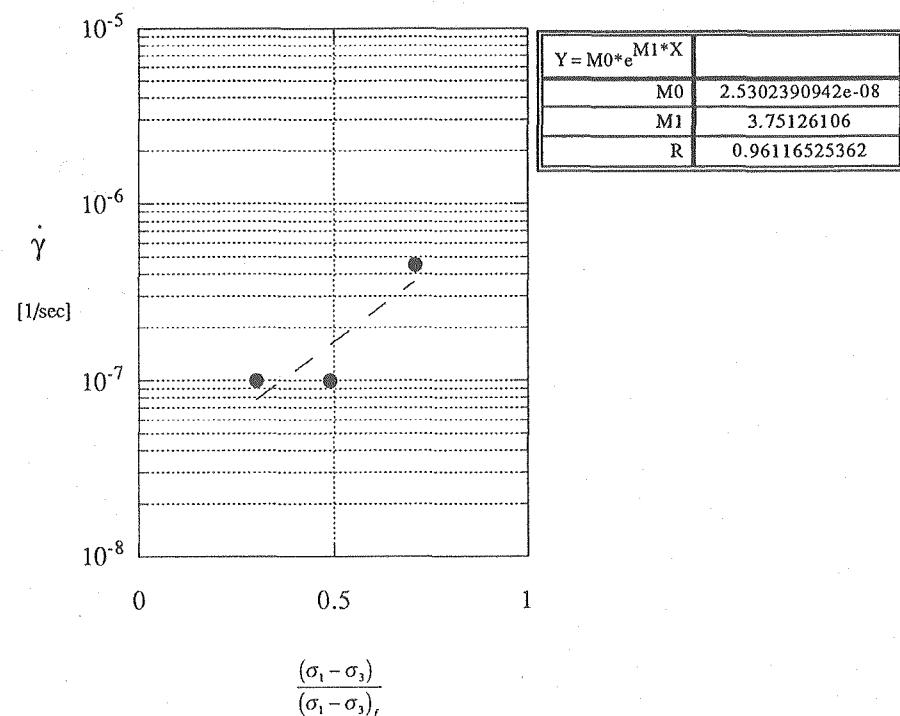


図2.1.10 参照時間 10^4 秒におけるひずみ速度と与えた応力比との関係

表2.1.5にBorgessonらが行った三軸クリープ試験から得られたクリープパラメータ[2]と今回の試験で得られたパラメータをまとめます。

	MX-80[2]	クニゲルV1
飽和密度 [t/m ³]	1.96	2.12
(σ ₁ -σ ₃) _f [MPa]	1.50	3.05
γ ₀ [1/sec]	4.4 × 10 ⁻⁸	1.7 × 10 ⁻⁷
n	0.91	0.87
α	4.15	3.75

表2.1.5 クリープパラメータの文献値[2]との比較

参照パラメータ $t_r = 10,000 \text{ seconds}$

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_0}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} = 0.5$$

2.1.7 結言

今回はクリープパラメータを求めるなどを第一の目的として、非排水条件での飽和圧縮固化ペントナイトの三軸クリープ試験を行った。表2.1.5に示されるように、両ペントナイトのクリープパラメータは大きな差はないようである。今後は、これらのパラメータが適当であるか、排水条件を考慮しながらさらに試験を行い、温度の影響や混合材の影響を実験的に確認していくとともに、モデルの検証を行ってゆく必要がある。

【参考文献】

- [1]動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書「地層処分におけるバックフィル候補材料に関する調査」（1990年9月）
- [2]Lennart Borgesson et al., "Rheological properties of sodium smectite clay", SKB technical report 88-30(1988)
- [3]Singh&Mitchell, "General stress-strain-time function for soils", American Society of Civil Engineers, Proceedings, vol.94, No.SM1 (1968)
- [4]動力炉・核燃料開発事業団 「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書-平成3年度-」(1992)
- [5]土質工学会 「土質試験の方法と解説」(1990)

2.2透水性

この試験では温度条件を室温から90℃の範囲で変化させた場合に、透水係数がどのように変化するか実験的に測定することを目的としている。

2.2.1 試験装置

試験は膨潤圧測定用のセル（図2.2.1）を用いて行なう。装置はステンレス製で、試験中に試料の体積が変化しないようにセルは反力フレームで固定されている。また、温度条件の設定はセルの周囲に巻かれたバンドヒーターに流す電流を調節器で設定することによって行った。なお、試料は $\phi 40\text{mm} \times 20\text{mm}$ の円柱である。

透水量はoutletに接続されたマノメータの下部の水圧計によって測定した。測定に用いた水圧計は共和電業(株)のPGM-02KGである。

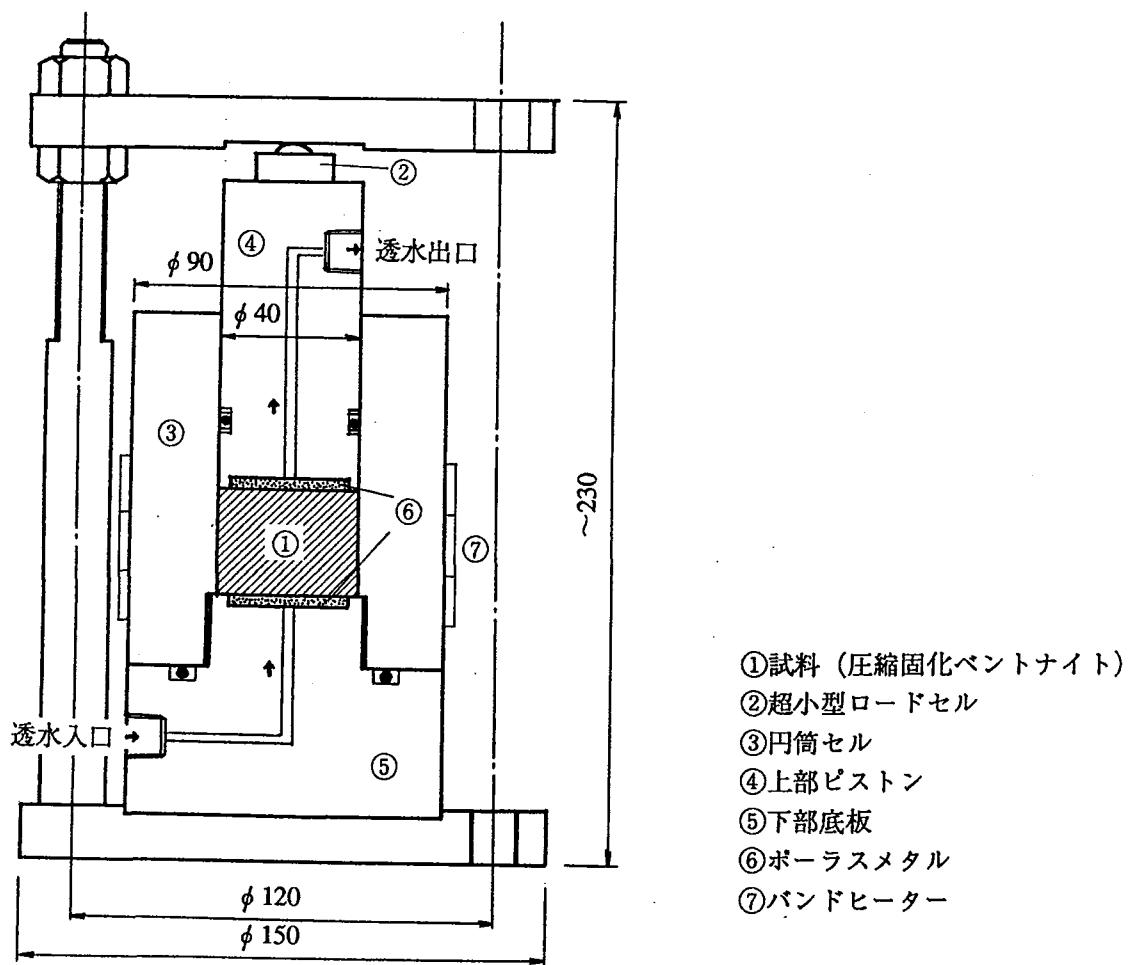


図2.2.1 透水試験用セル

2.2.2 試験材料

試験に使用したペントナイトはクニゲルV1である。その鉱物組成は表2.2.1に示される通りである。また、図2.2.2に粒径加積曲線を示す。

鉱物名	存在割合
モンモリロナイト	46~49
石英	19~23
玉髓	~24
斜長石	1~5
方解石	1~4
苦灰石	2~4
方沸石	3~4
黄鐵鉱	0.5~0.9

表2.2.1 クニゲルV1の鉱物的組成[1]

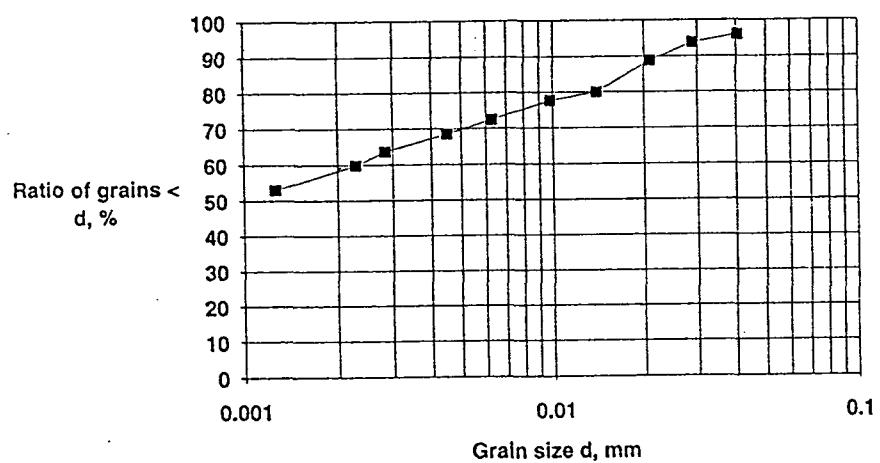


図2.2.2 クニゲルV1の粒径加積曲線

2.2.3 試験方法

- 試験は以下の手順で行なった。
- i) 圧縮固化後の乾燥密度が指定値になるように自然乾燥状態（含水比およそ7%）の粉末ベントナイトをセルにいれる。
 - ii) ピストンを介して一次元的に圧縮固化を行なう（*）。また、試験体の高さが2cm弱に達した時点で圧縮応力を除く。
 - iii) セルを反力フレームに設置し、ヒーターを取付ける。
 - iv) 試験体に水（蒸留水）を両底面から浸透させる。そのとき水にはほとんど圧力を掛けていない。（飽和過程）
 - v) 膨潤圧がある一定値に安定し、試料に水が浸透しなくなった時点で試験体下部から浸透する水に 7kgf/cm^2 （又は 3kgf/cm^2 （**））の圧力を負荷し温度条件を設定する。なお、膨潤圧が一定値に達するまでの時間は、乾燥密度が1.6、1.8の場合におよそ1週間、また、乾燥密度2.0では1か月程度である。
 - vi) 出てくる水の体積の時間変化が直線になったことを確認して、単位時間あたりの流量を決定し、動水勾配、試料の断面積からダルシー則にしたがって透水係数を求めた。

- ・試料の断面積： 12.56cm^2 （試料の直径は4cm）
- ・inlet水圧： 3kgf/cm^2 （又は 7kgf/cm^2 ）

出てくる水の流量を $\text{Qcm}^3/\text{時}$ 、また、試験終了後の試料の高さを $h \text{ cm}$ で表すと、透水係数は次式で計算できる。

$$k=7.40 \times 10^{-11} Q \cdot h \text{ [m/sec]} \quad (\text{浸透する水にかける圧力 } 3\text{kgf/cm}^2) \quad (2.2.1)$$

$$k=3.16 \times 10^{-11} Q \cdot h \text{ [m/sec]} \quad (\text{浸透する水にかける圧力 } 7\text{kgf/cm}^2) \quad (2.2.2)$$

- vii) 温度条件を変更して試験を続行する。

(*) 例えば、圧縮固化後の乾燥密度で1.6を目指すとき、およそ17MPa、1.8では40MPa、2.0では90MPaの圧縮応力をかける。

(**) 試験番号1、2、3では、 3kgf/cm^2 で試験を行なった。

2.2.4 試験条件

表2.2.3に測定条件を示す。

試験番号	乾燥密度 g/cm ³	含水比 %	測定温度 20,40,60,90,60,40,20℃	透水負荷 3kgf/cm ²
1	1.58	26.6	〃	3kgf/cm ²
2	1.67	23.8	〃	3kgf/cm ²
3	1.79	18.9	〃	7kgf/cm ²
4	1.69	21.9	〃	7kgf/cm ²
5	1.84	16.8	〃	7kgf/cm ²

表2.2.2 試料と測定条件

なお、上の表において乾燥密度は透水係数測定後の試料を乾燥して求めたものである。透水試験前にセルにいれたペントナイトの重量は、試験番号4、5では乾燥密度が1.8及び2.0になるように調整されているが、試験終了後に試料を取り出す際にセル内にわずかにがらペントナイトが残留すること、また、試験中に浸透水などに溶出しているのではないかと考えられる。

透水試験終了後の試料は通常飽和していると考えられるので、測定結果から土粒子の密度を求めることができる。表2.2.3からその値を求めると、 $2.71 \pm 1.4\%$ となりこれまで土粒子の密度を2.70として種々の計算を行なってきたことは妥当であると考えられる。

2.2.5 試験結果

図2.2.3 (1) ~ (4) [(1) 試験番号1; (2) 試験番号2; (3) 試験番号3; (4) 試験番号4、5] に水に圧力をかけないで試料に浸透させたときの試料に入った水の量の変化を示す。試料への水の注入は2.2.3項iv)で述べたように試料の両面から行なっており、また、この図に示されている浸透水の体積変化は試料下面から入るものだけ (inlet側のみ) を計測しているため、これ以上水が入らなくなった時点での浸透体積は試料中の空隙の体積に相当しない。しかしながら、圧力勾配をいつ負荷するか判断するためにこのデータを計測している。

図2.2.4 (1) ~ (4) にinletに負荷を与えた後の各測定温度での透水量の変化を示す。それぞれの試料で共通して観察できる傾向として、以下の2点が挙げられる。

- ・設定温度を上昇するときには水の入ってゆく速度はいったん大きくなり時間が経過するに従ってある値に落ち着く。
- ・設定温度を下げると、マノメータの読みはいったん負になる。(試料から水がでて来ることに相当) その後、再び試料中への浸透が卓越し、水の入ってゆく速度が一定になる。

これらの傾向は試料中の水分が温度変化に応じて出入りすると言うよりは、温度変化によって、セルや配管の容量が変化することに起因していると思われる。今回の測定は定常状態で透水係数がどのような値を取るかを主眼としているので、以上の主に実験手法に関連する傾向に関しては議論しない。

表2.2.3に図2.2.4から読み取ったoutletからの流量Q、試験終了後の試料の高さh、式(A),(B)から計算される透水係数をまとめた。なお、試験番号4,5において、データのうち降温過程の一部分が欠落しているが、試験途中の停電により、余儀なく試験を終了させられたためである。

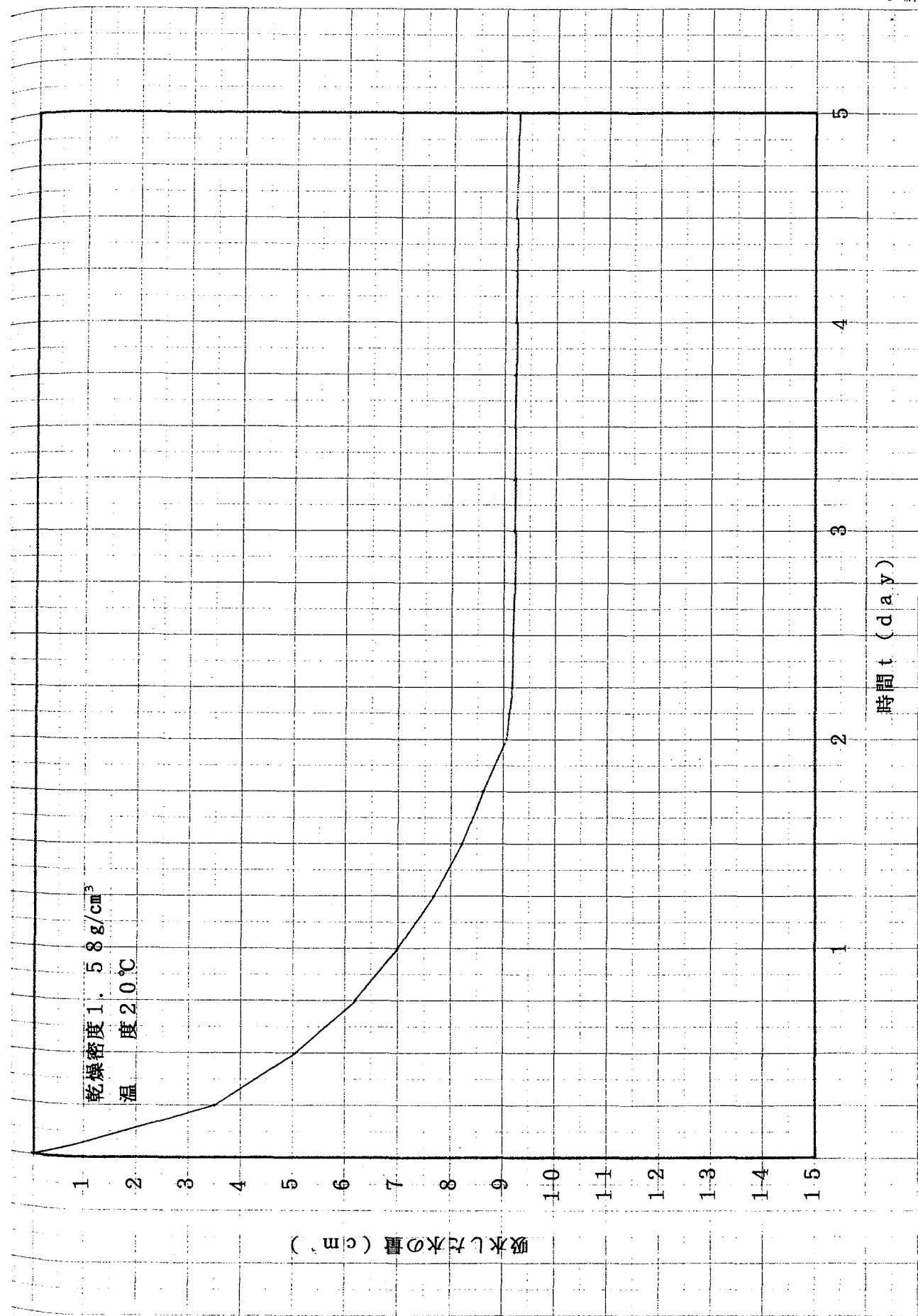


図2.2.3(1) 試料飽和過程における透水量の変化(試料番号1)

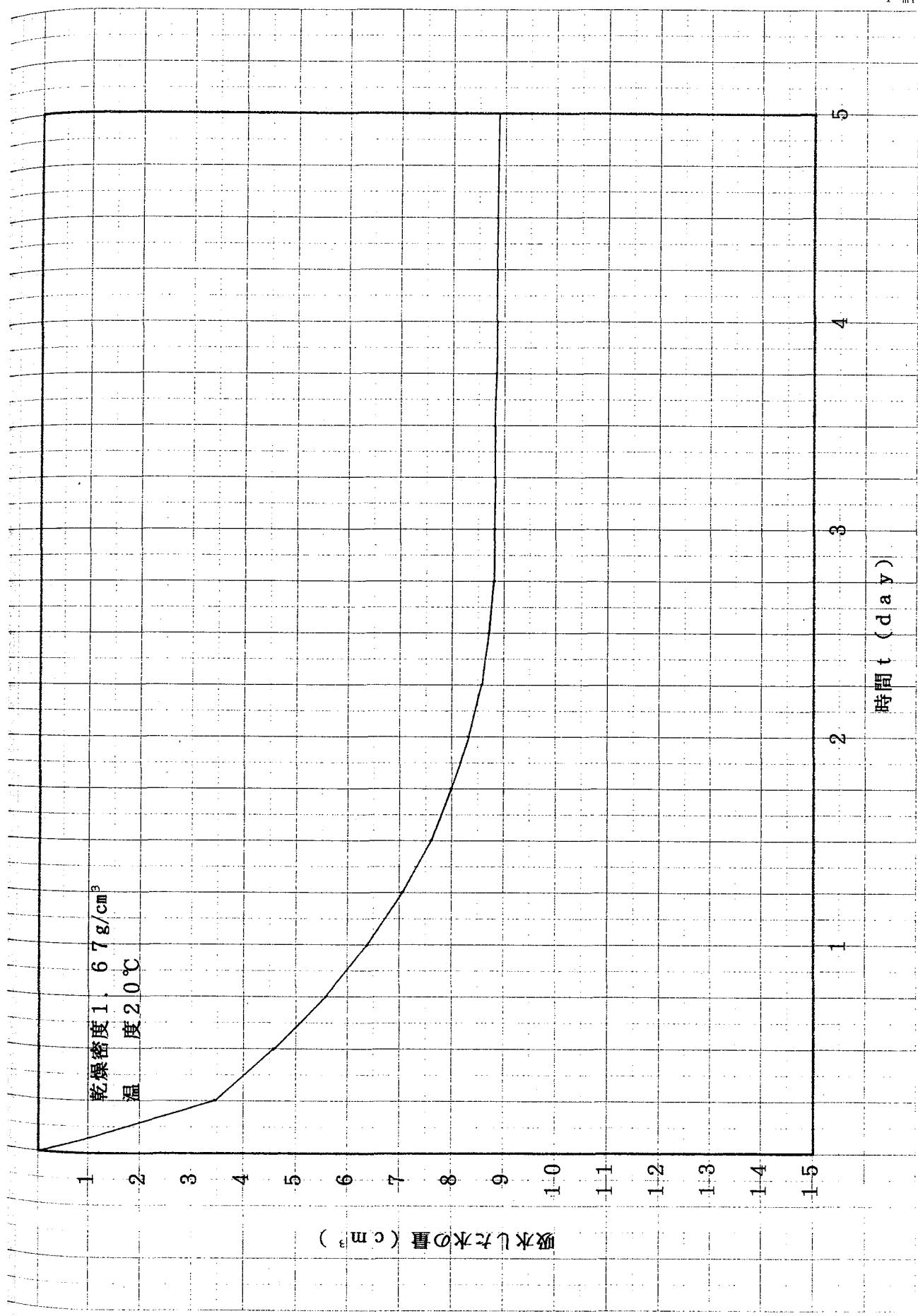


図2.2.3(2) 試料飽和過程における透水量の変化 (試料番号2)

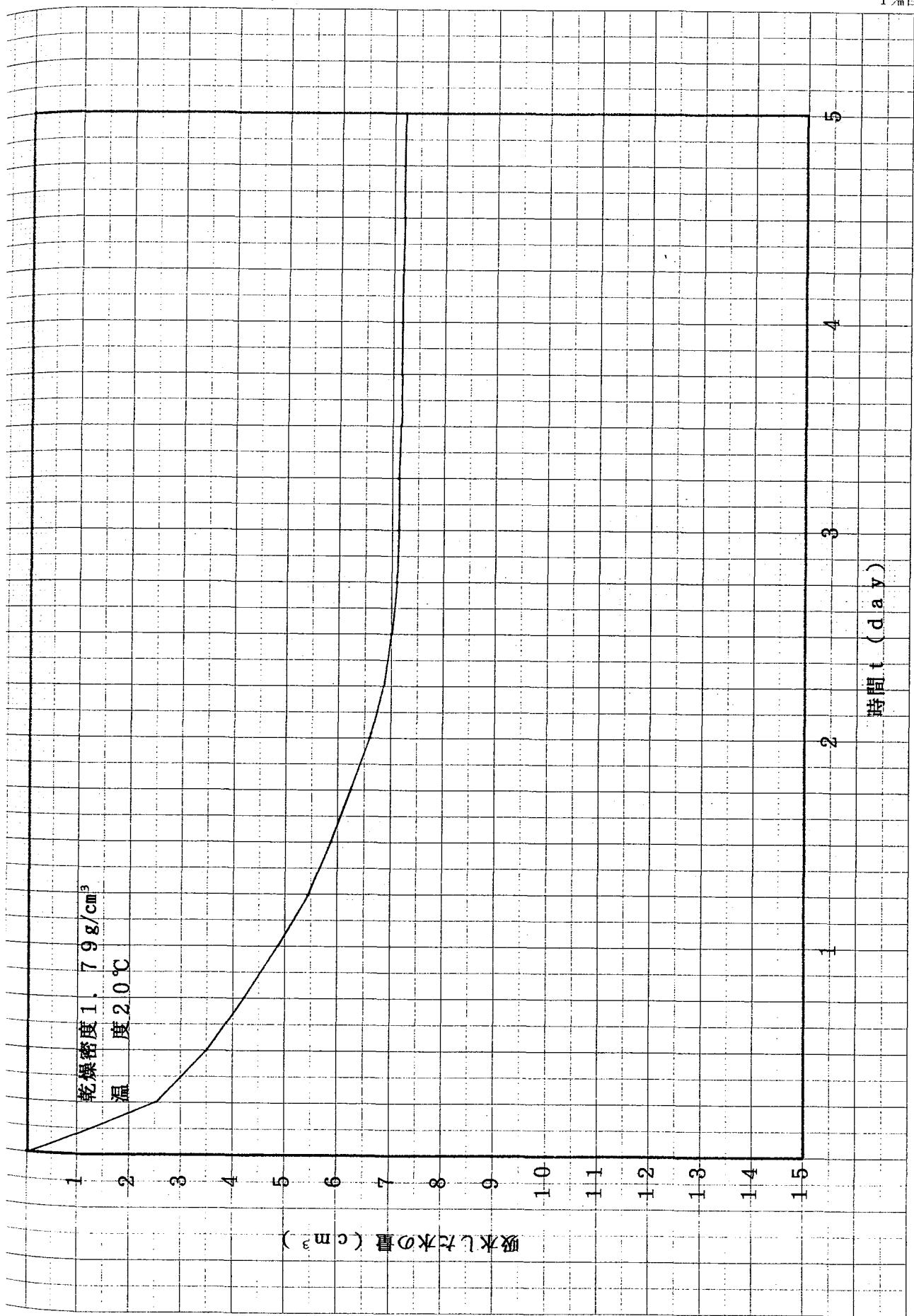


図2.2.3(3) 試料飽和過程における透水量の変化(試料番号3)

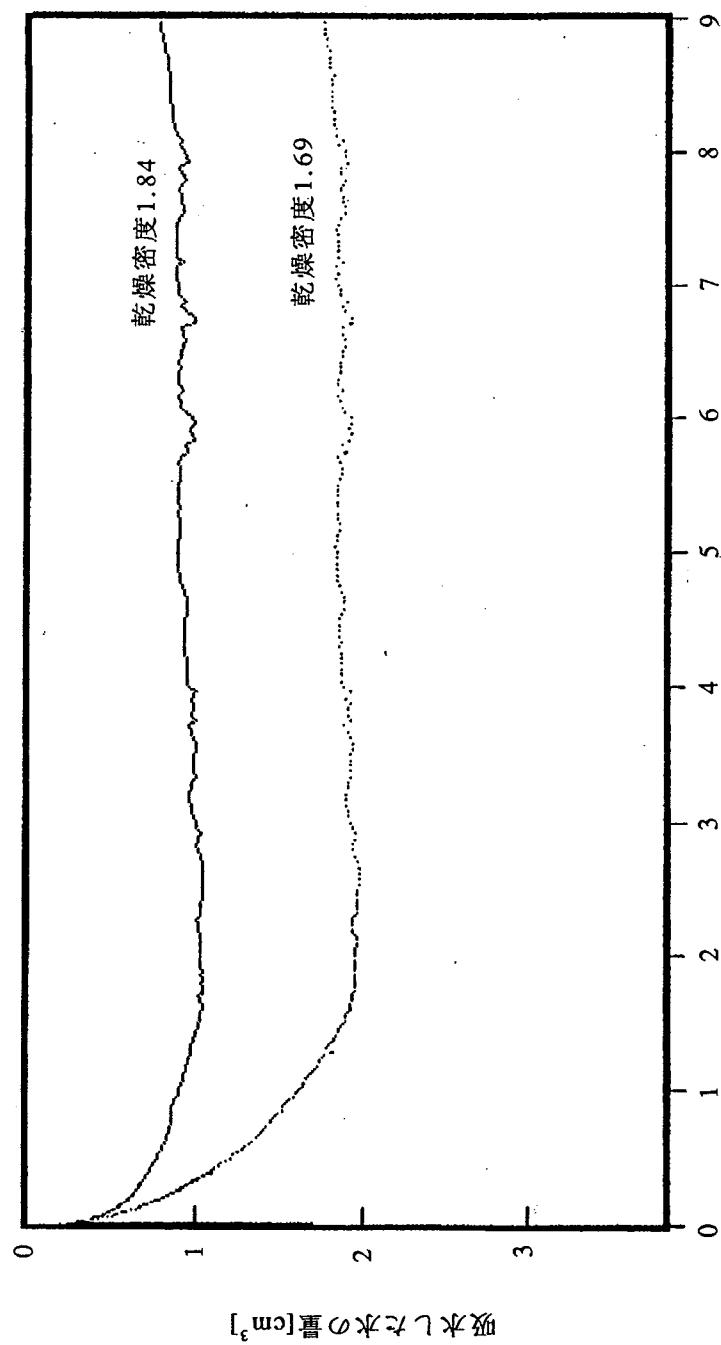


図2.2.3(4) 試料飽和過程における透水量の変化（試料番号4.5）

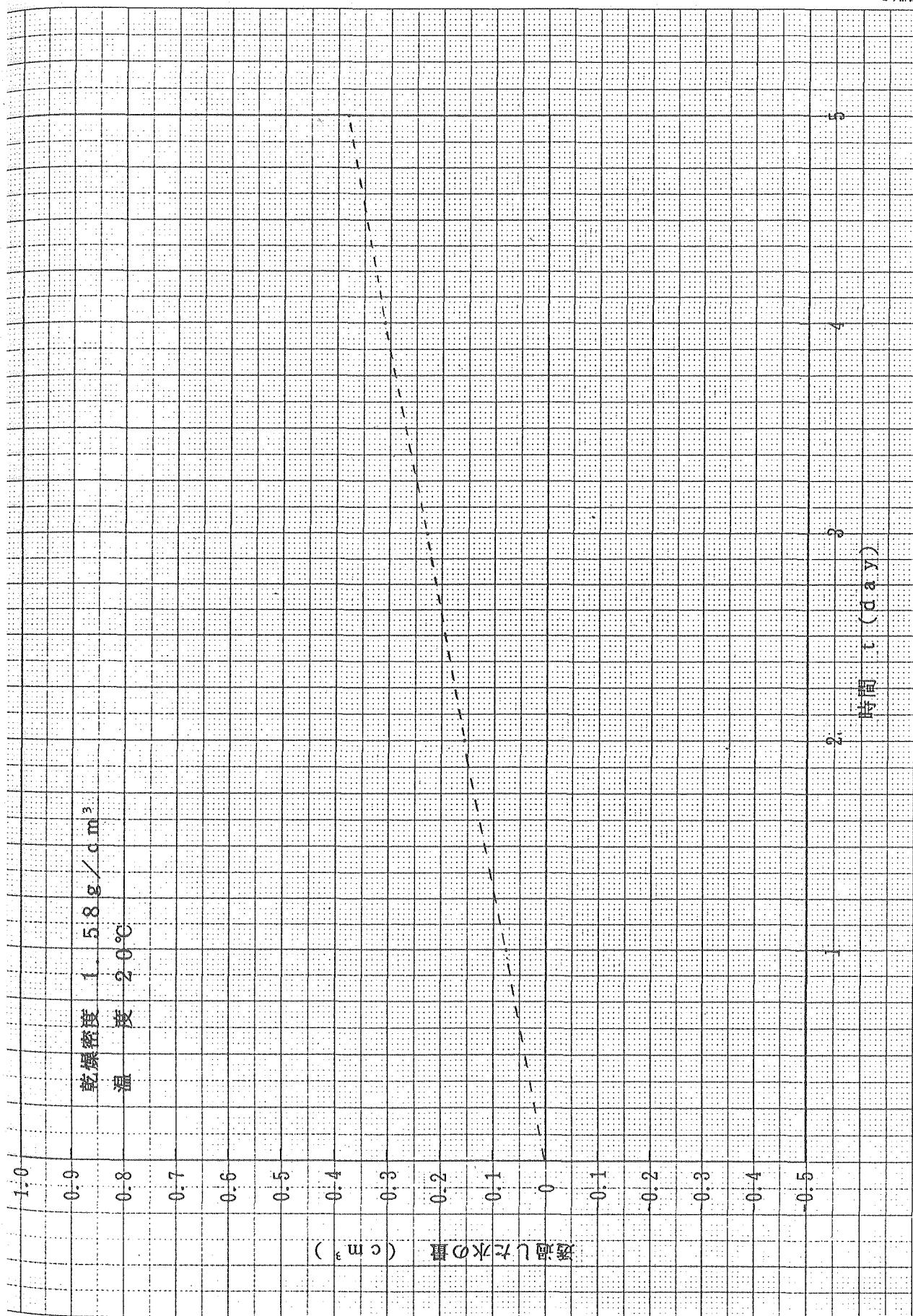


図2.2.4(1)-a 透水量の時間変化 (試料番号 1)

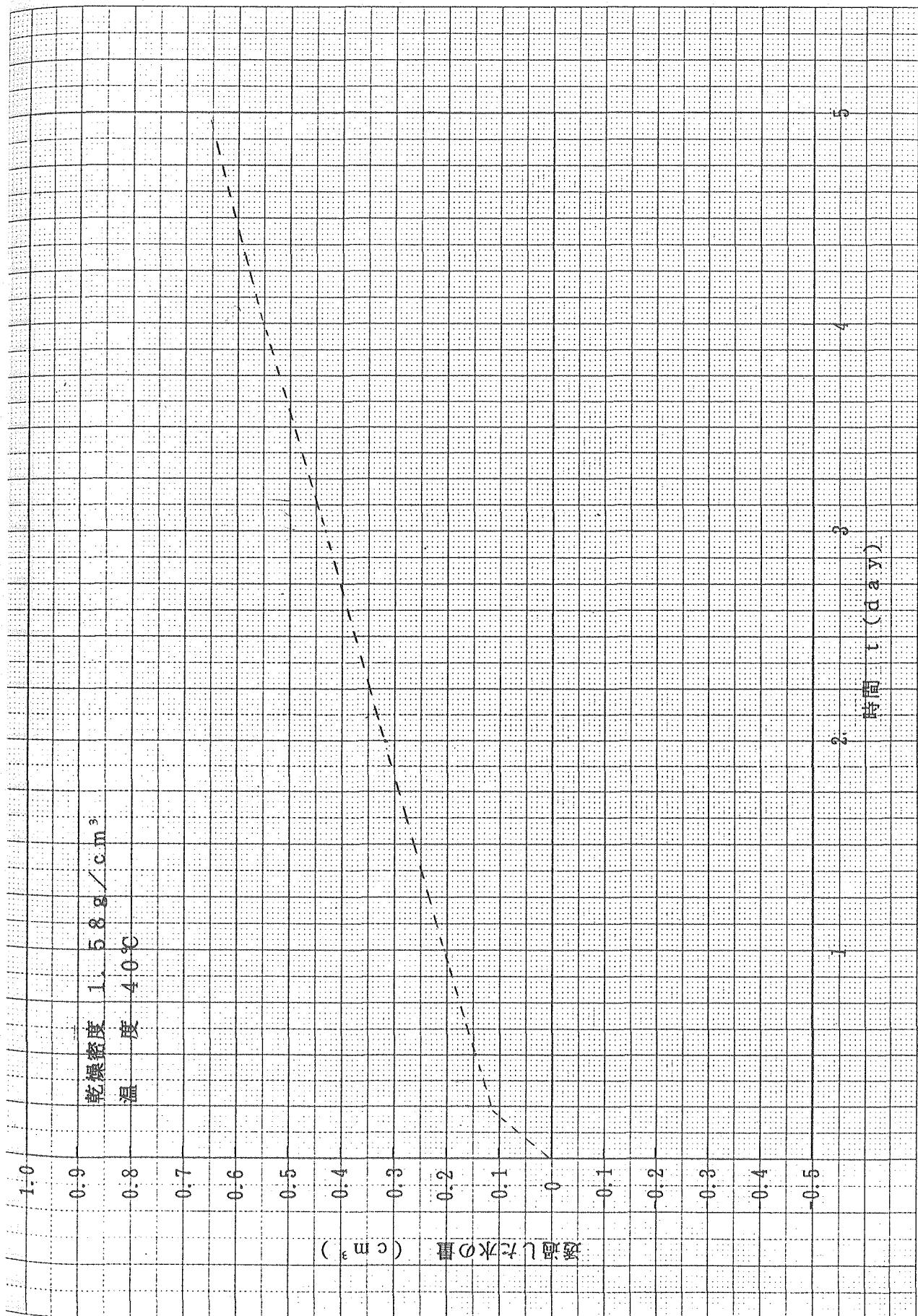


図2.2.4(1)-b 透水量の時間変化 (試料番号 1)

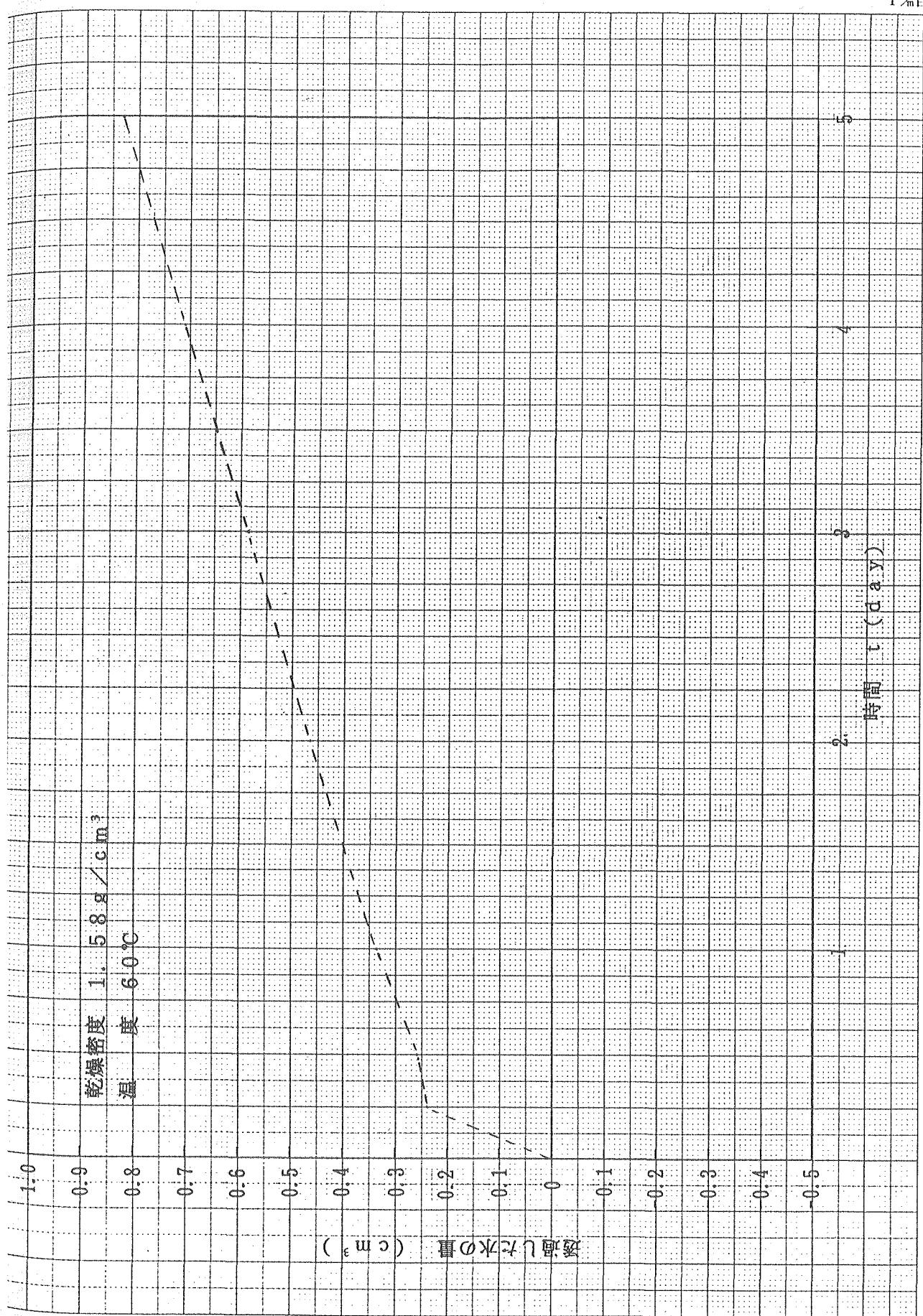


図2.2.4(1)-c 透水量の時間変化(試料番号1)

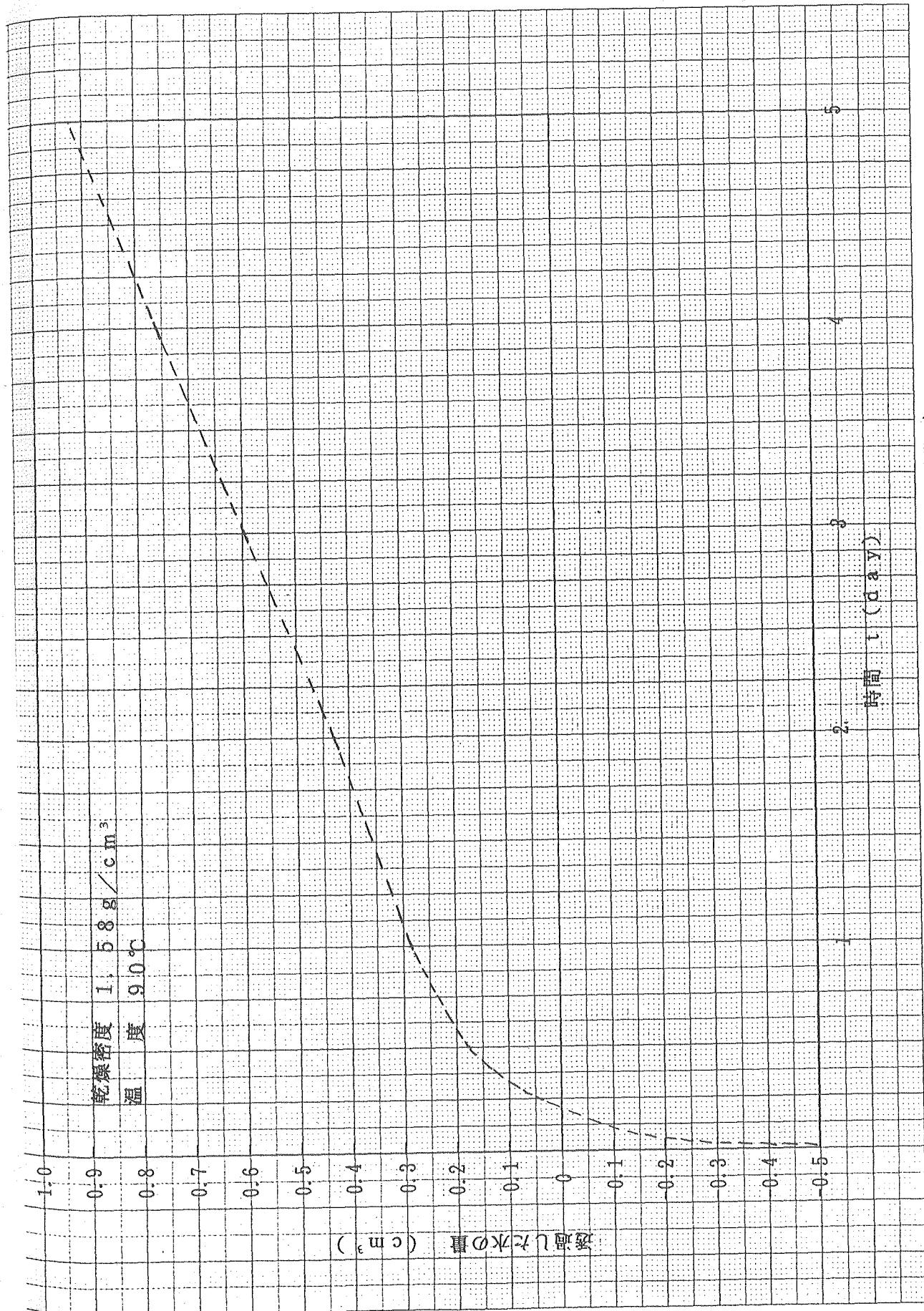


図2.2.4(1)-d 透水量の時間変化 (試料番号 1)

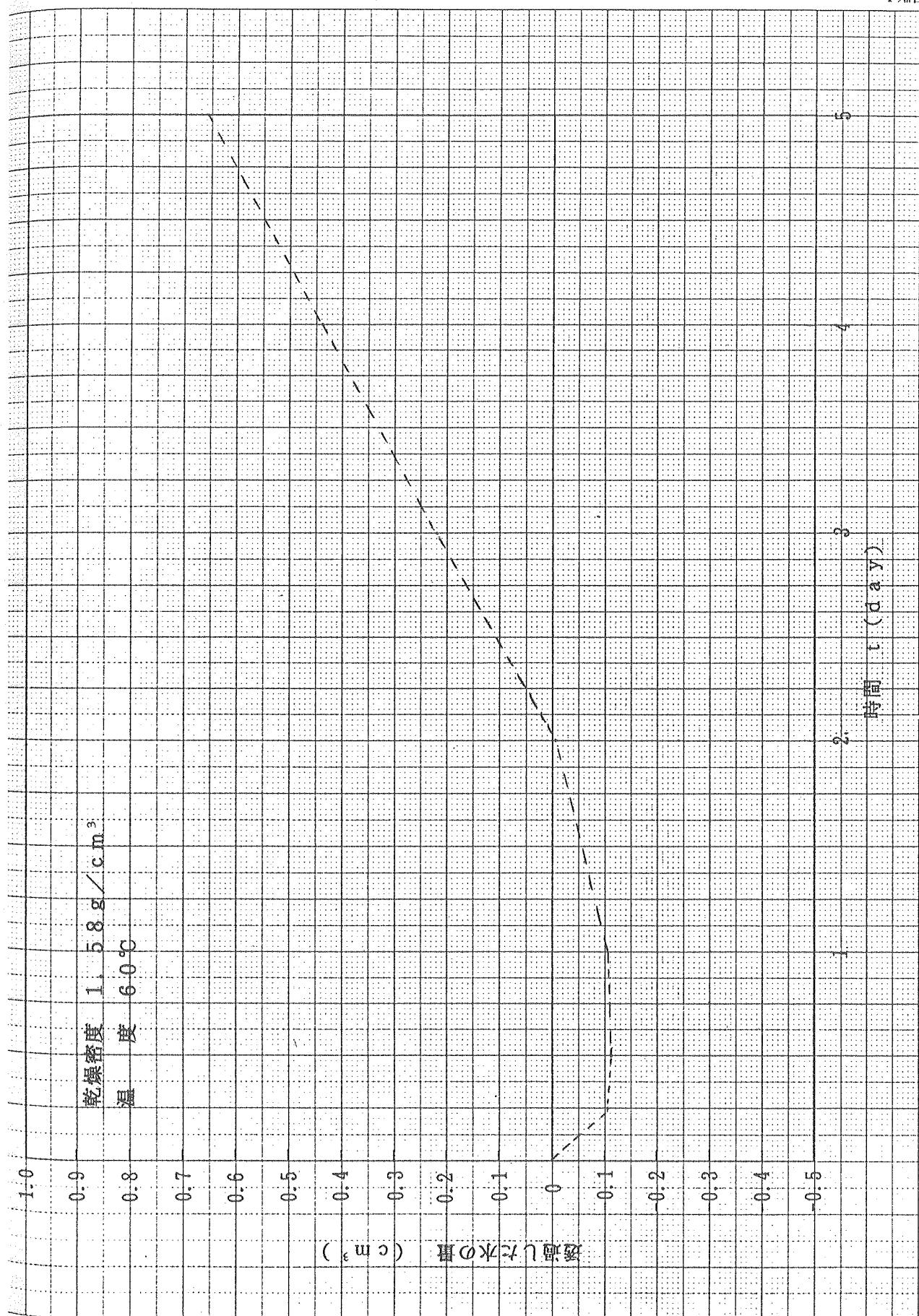


図2.2.4(1)-e 透水量の時間変化 (試料番号 1)

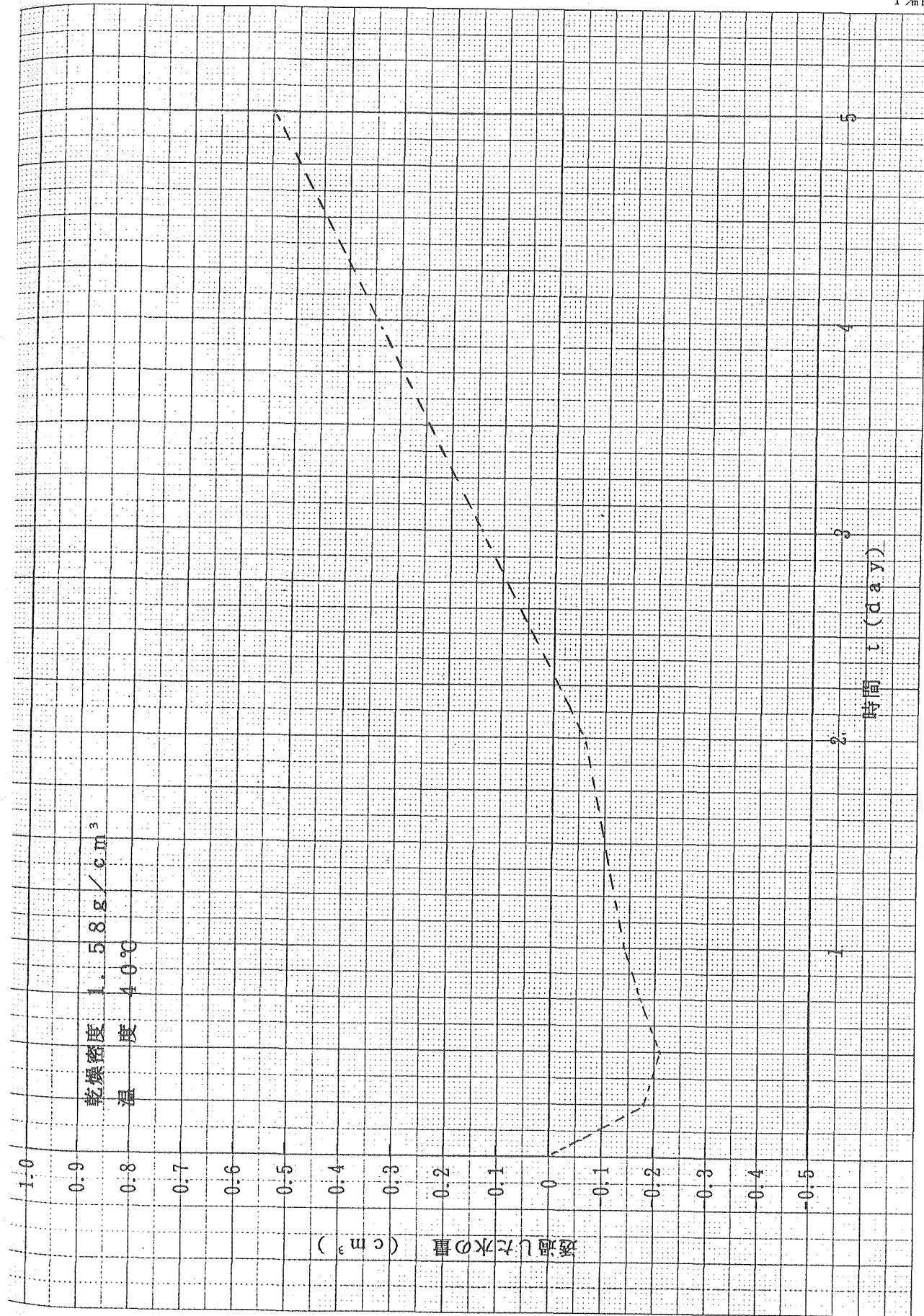


図2.2.4(1)-f 透水量の時間変化 (試料番号 1)

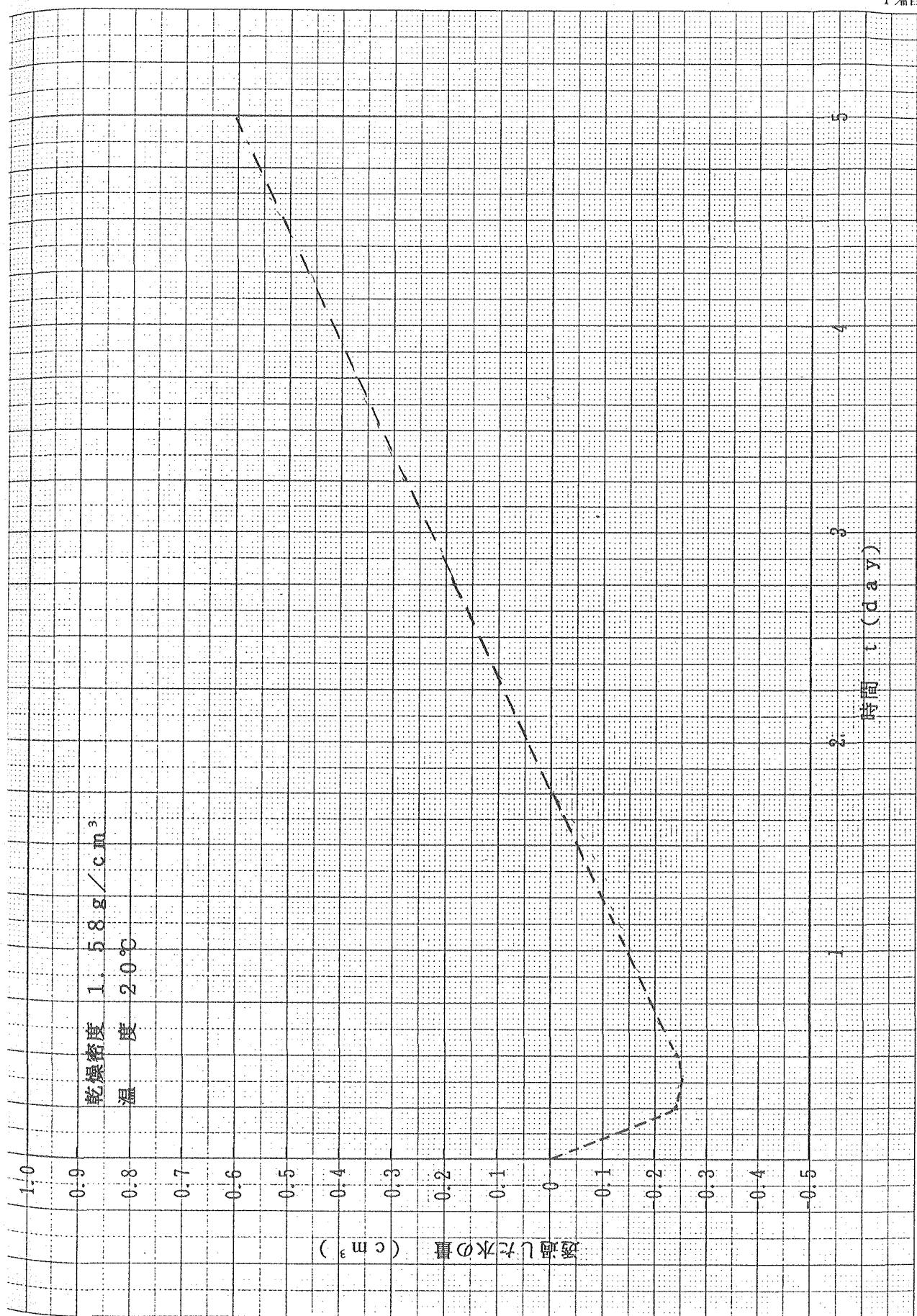


図2.2.4(1)-g 透水量の時間変化 (試料番号 1)

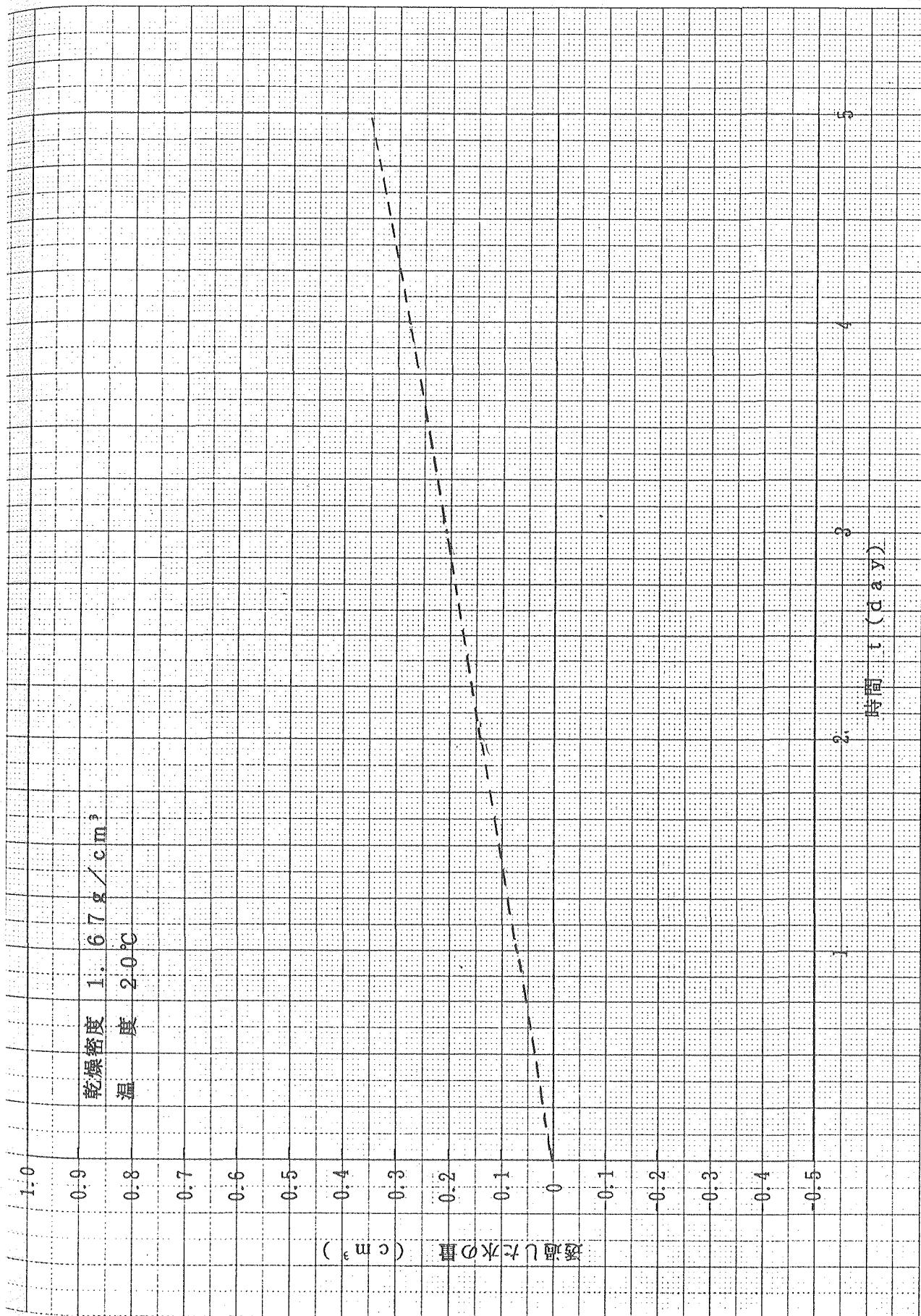


図2.2.4(2)-a 透水量の時間変化 (試料番号 2)

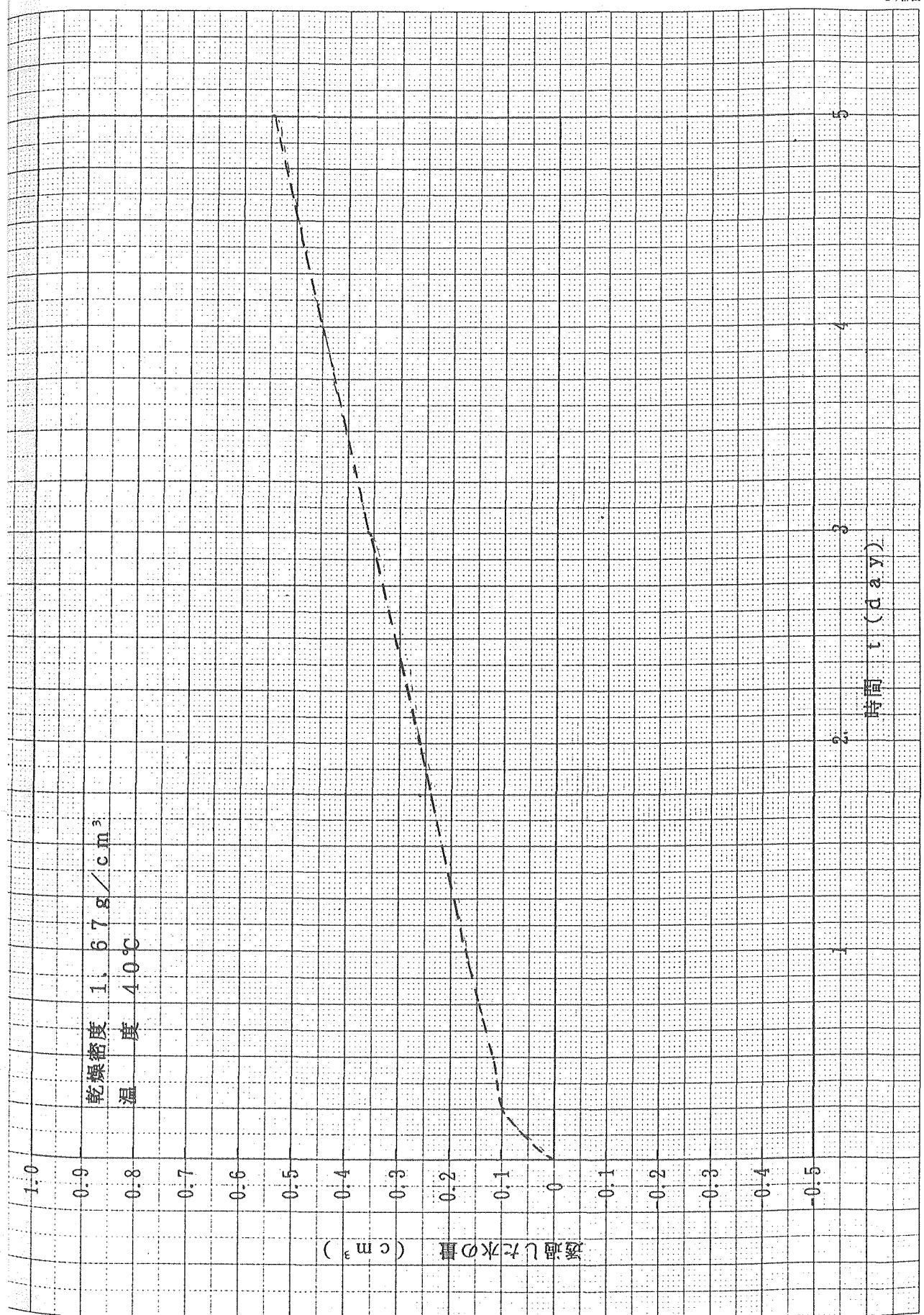


図2.2.4(2)-b 透水量の時間変化 (試料番号 2)

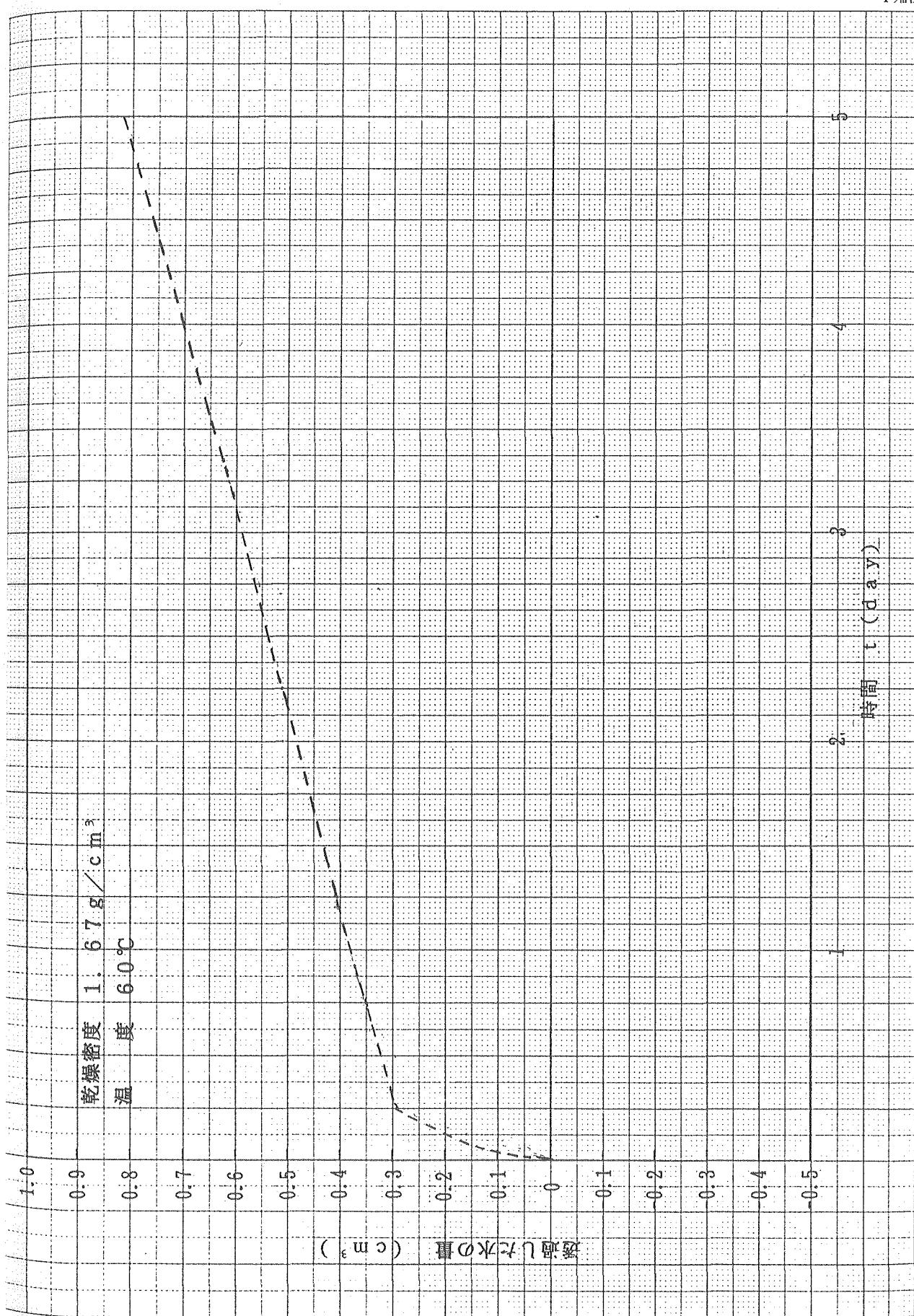


図2.2.4(2)-c 透水量の時間変化 (試料番号2)

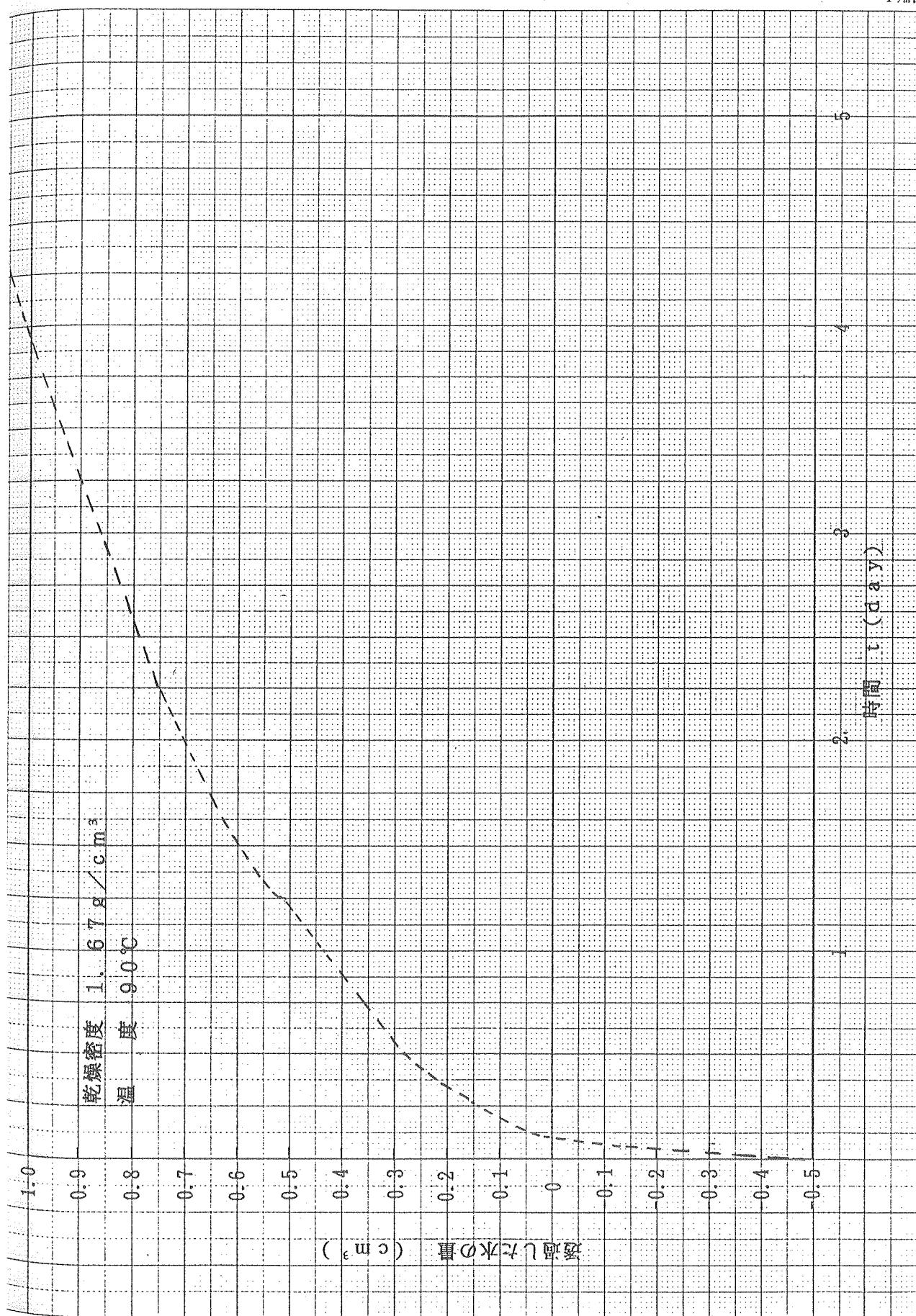


図2.2.4(2)-d 透水量の時間変化(試料番号2)

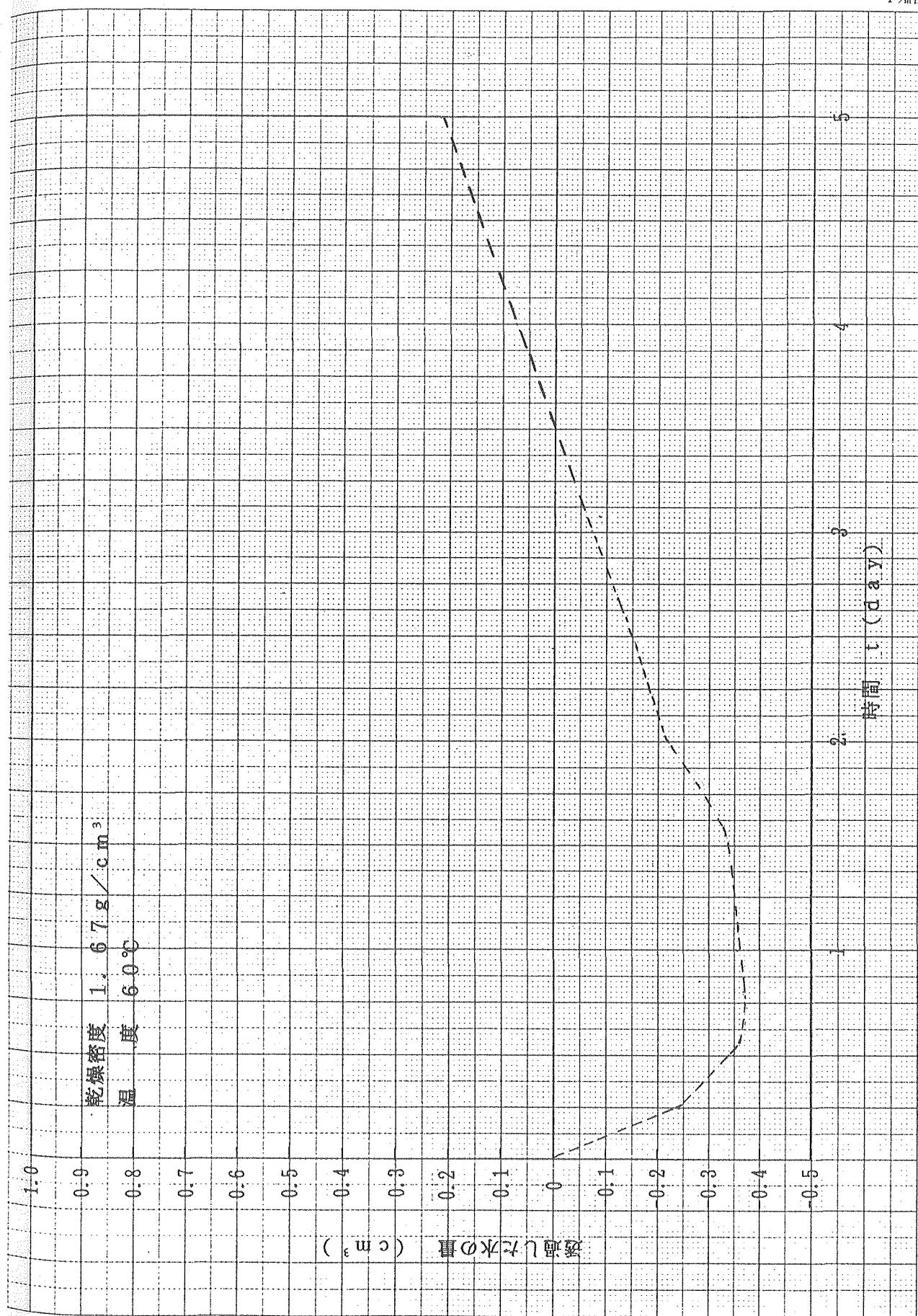


図2.2.4(2)-e 透水量の時間変化(試料番号2)

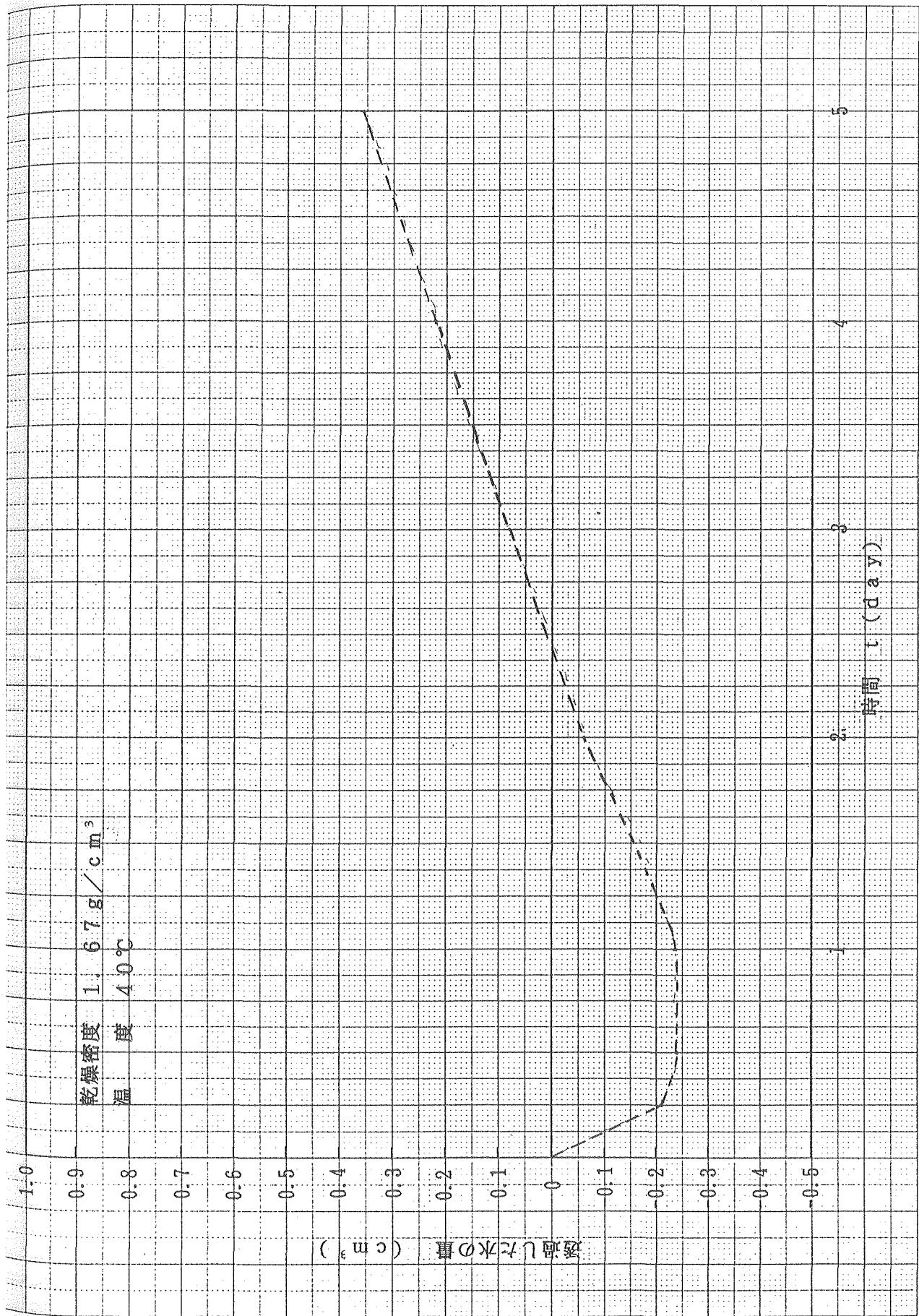


図2.2.4(2)-f 透水量の時間変化 (試料番号2)

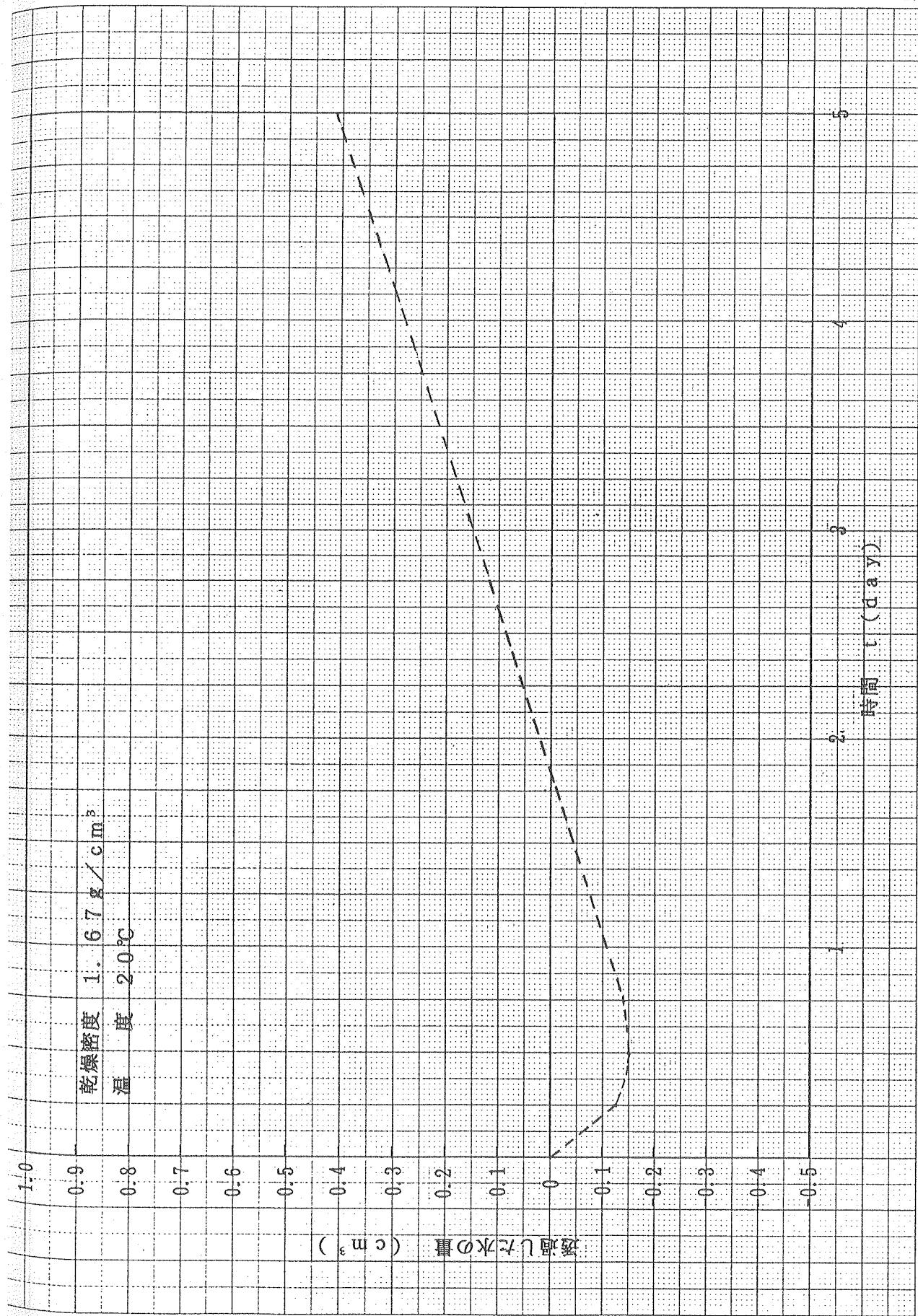


図2.2.4(2)-g 透水量の時間変化（試料番号2）

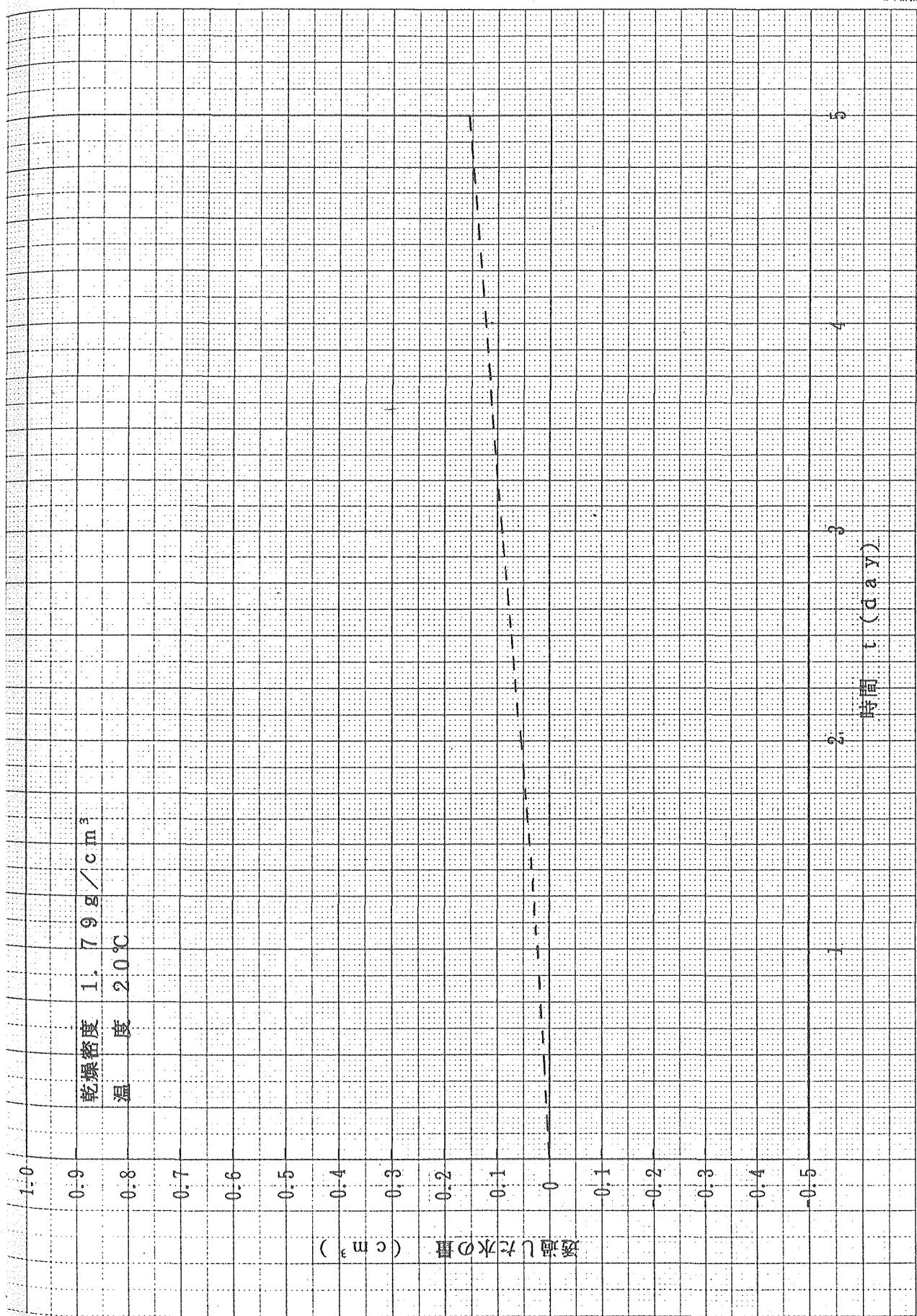


図2.2.4(3)-a 透水量の時間変化 (試料番号3)

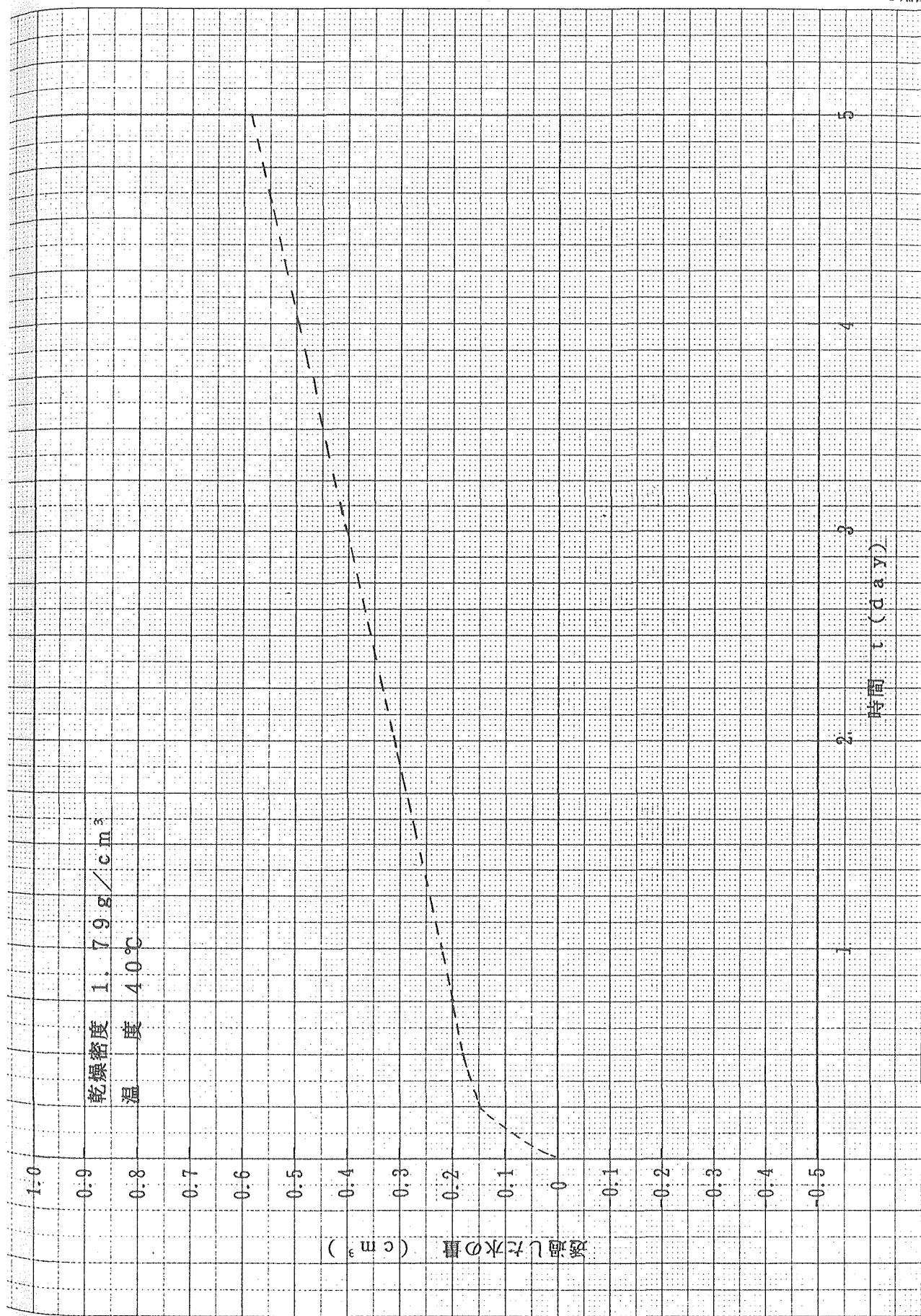
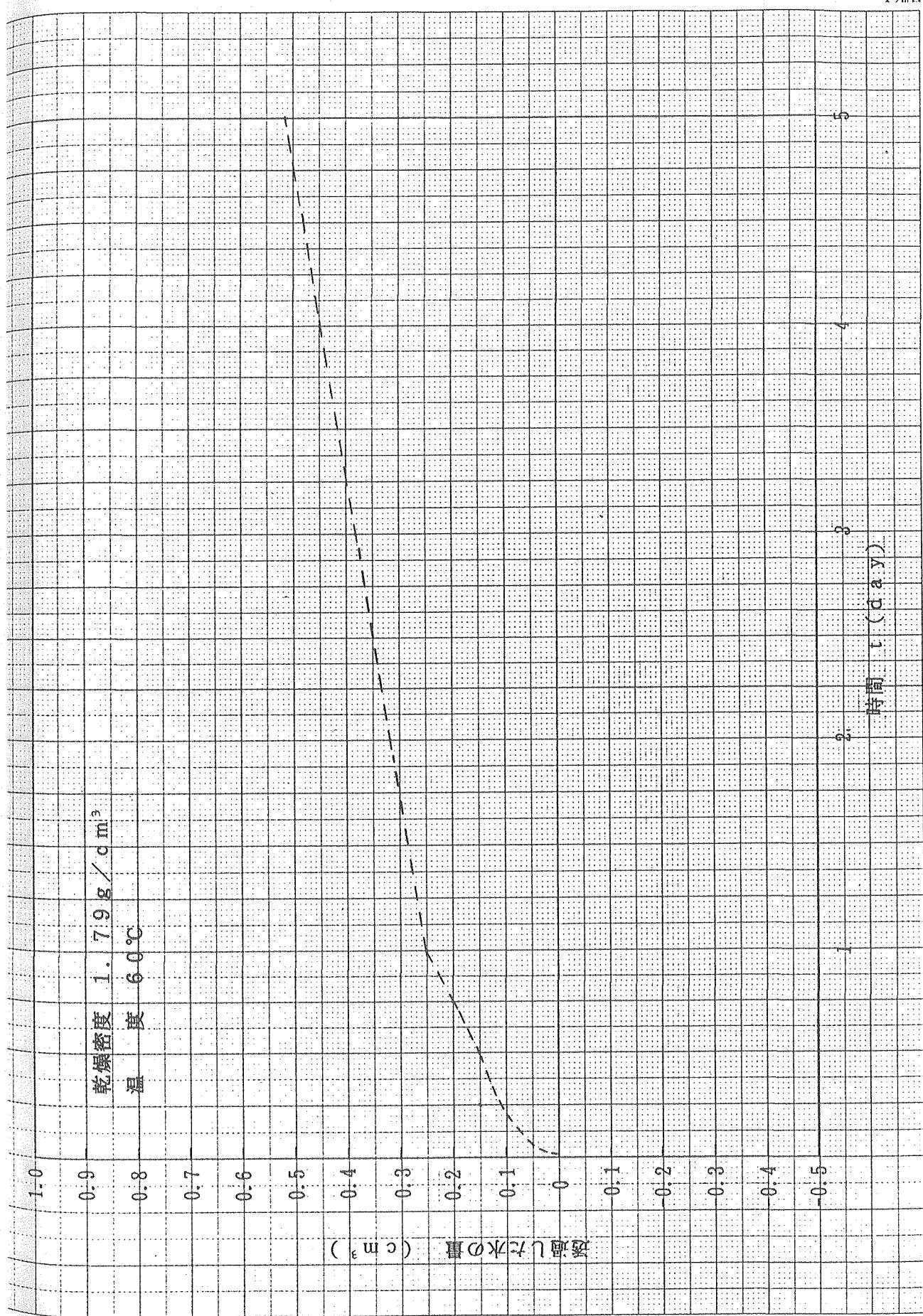


図2.2.4(3)-b 透水量の時間変化（試料番号3）



A4 180×250mm No A4-13

2-45

図2.2.4(3)-c 透水量の時間変化 (試料番号 3)

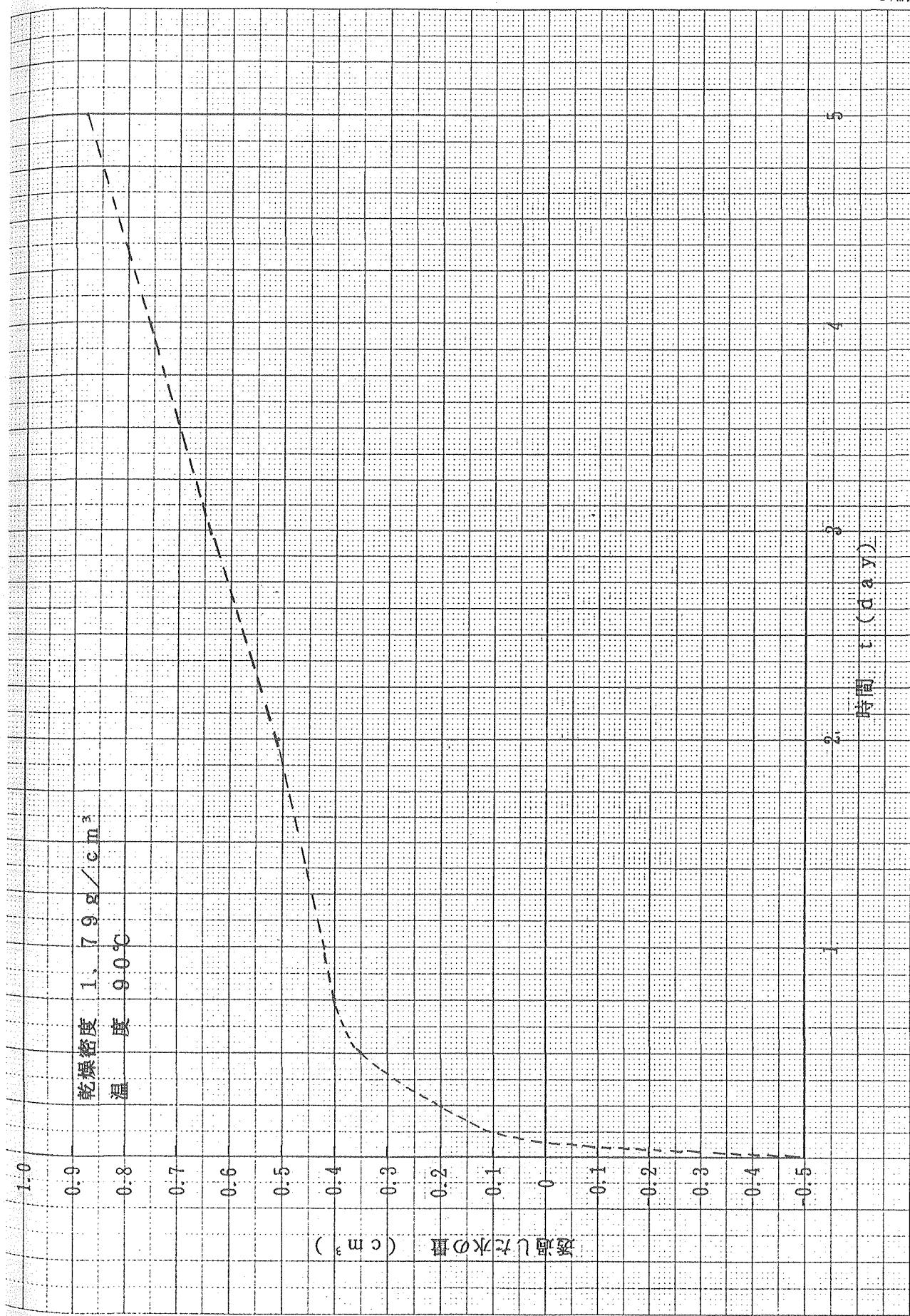


図2.2.4(3)-d 透水量の時間変化 (試料番号 3)

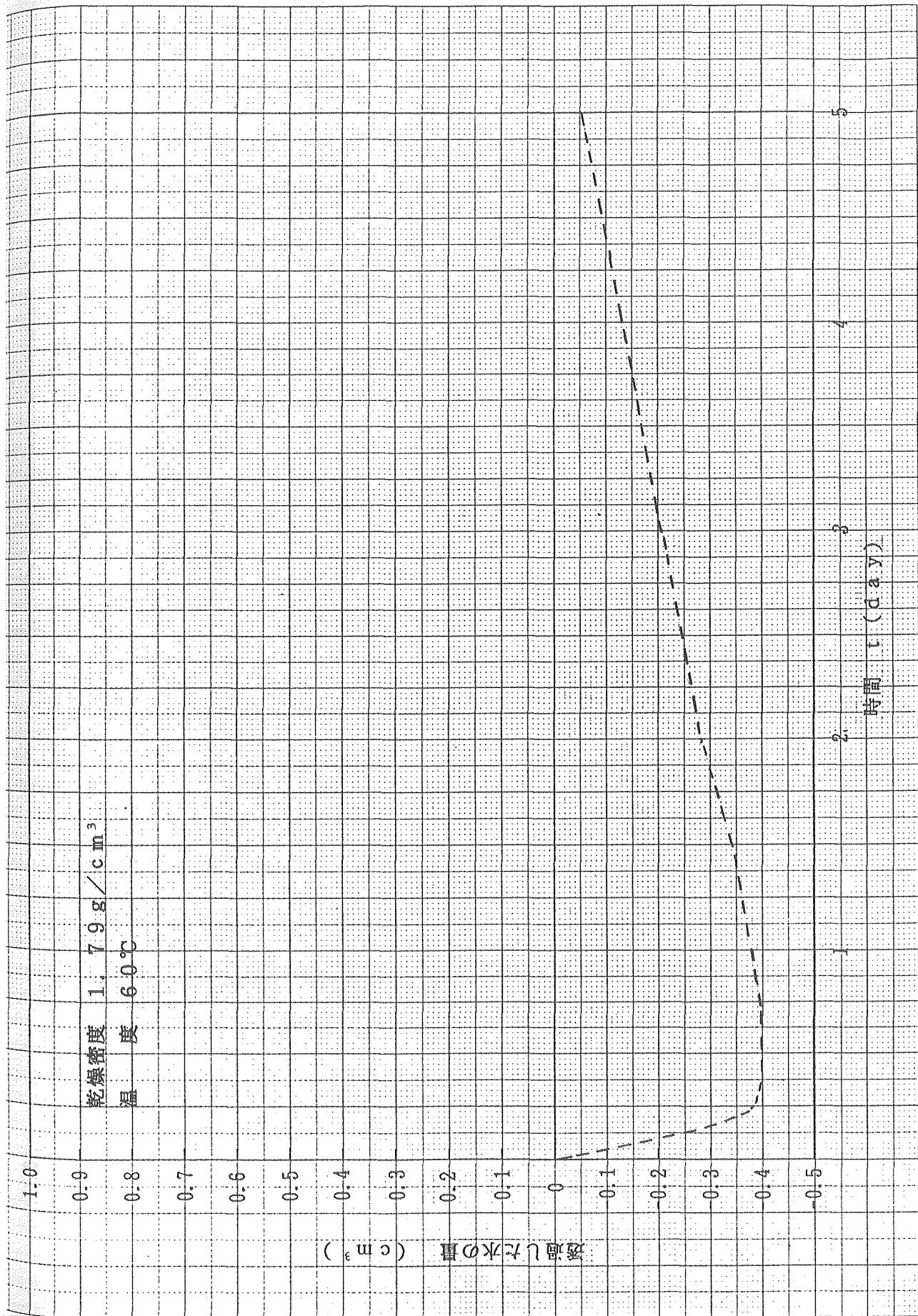


図2.2.4(3)-e 透水量の時間変化 (試料番号 3)

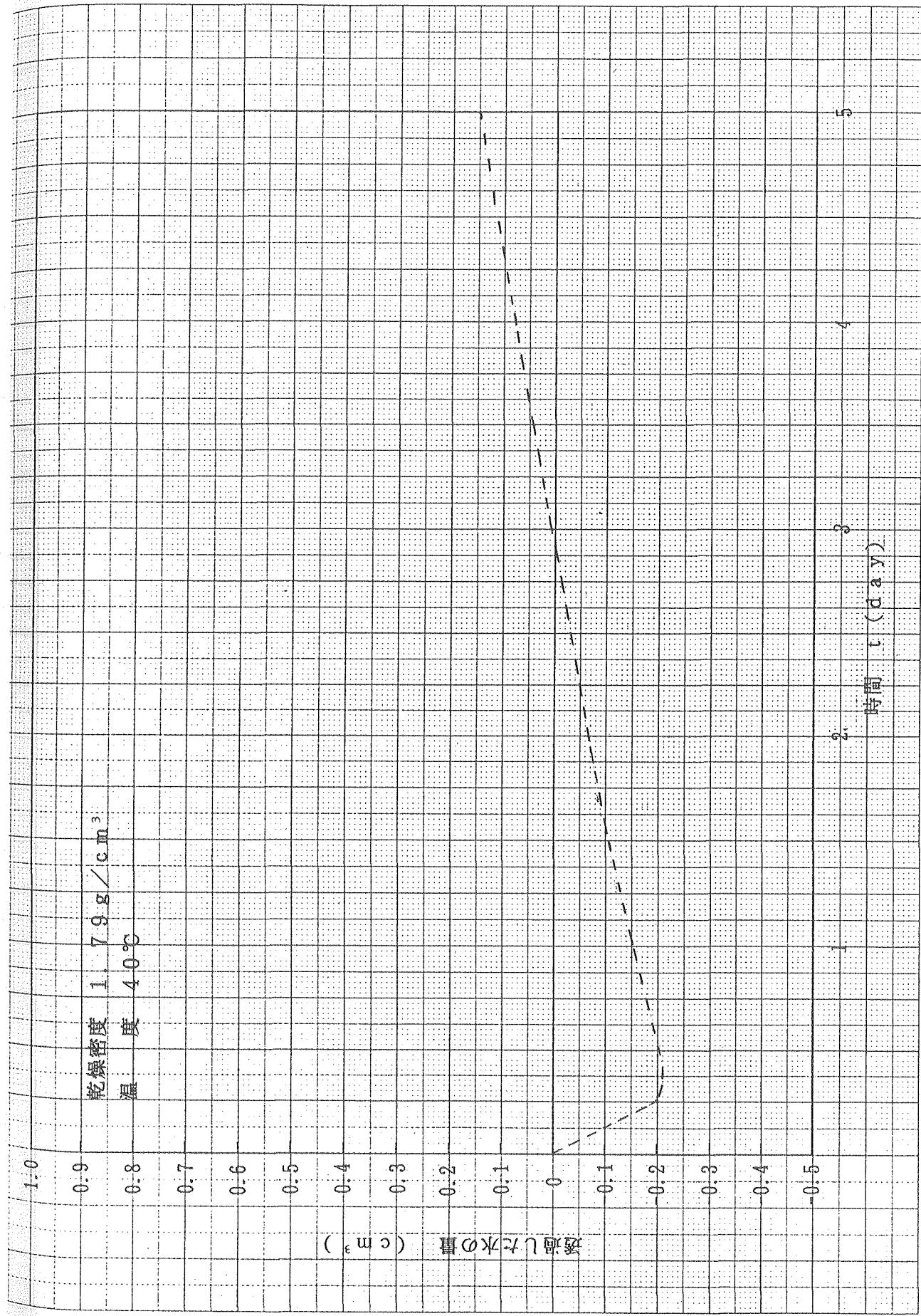


図2.2.4(3)-f 透水量の時間変化 (試料番号 3)

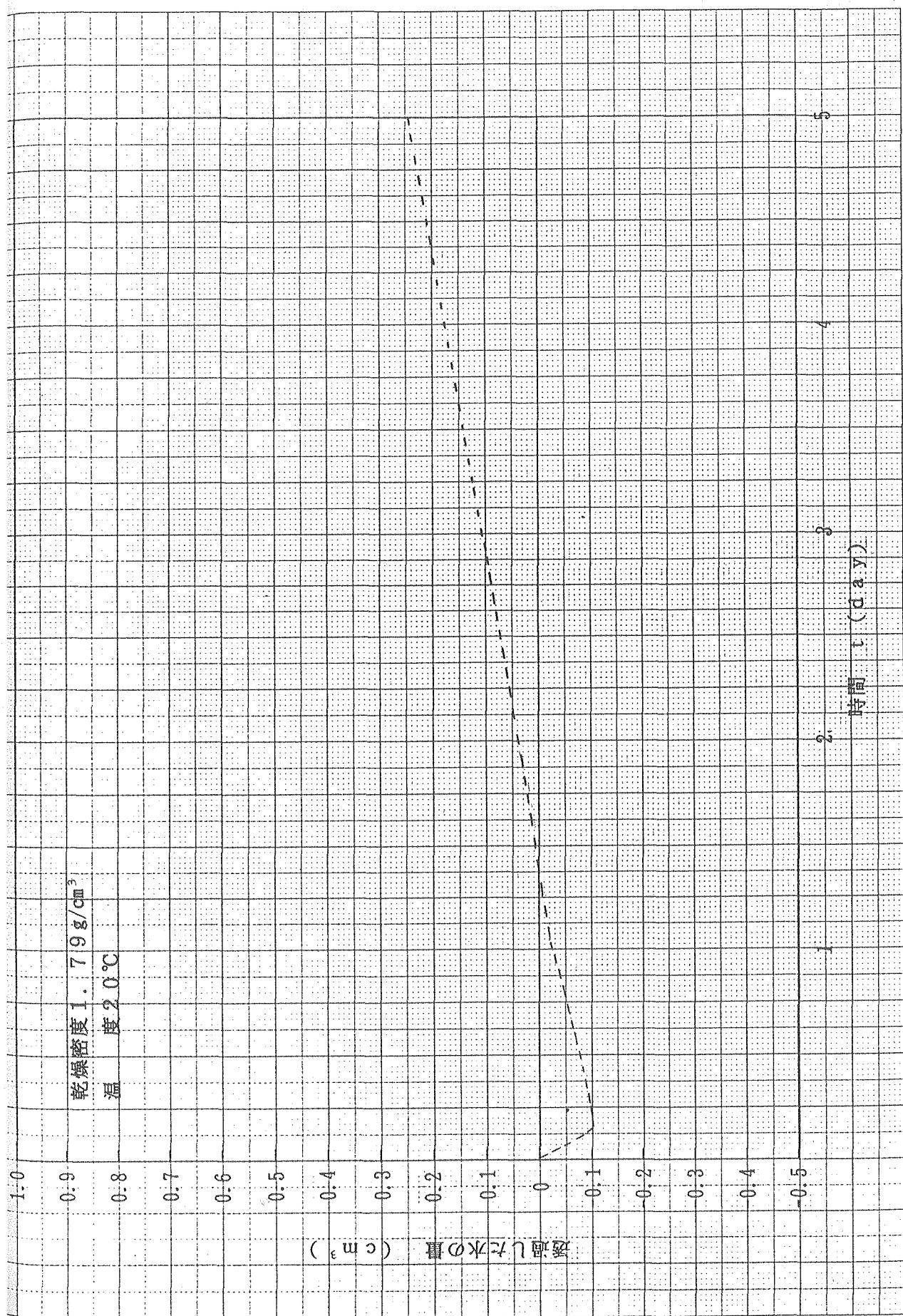


図2.2.4(3)-g 透水量の時間変化 (試料番号3)

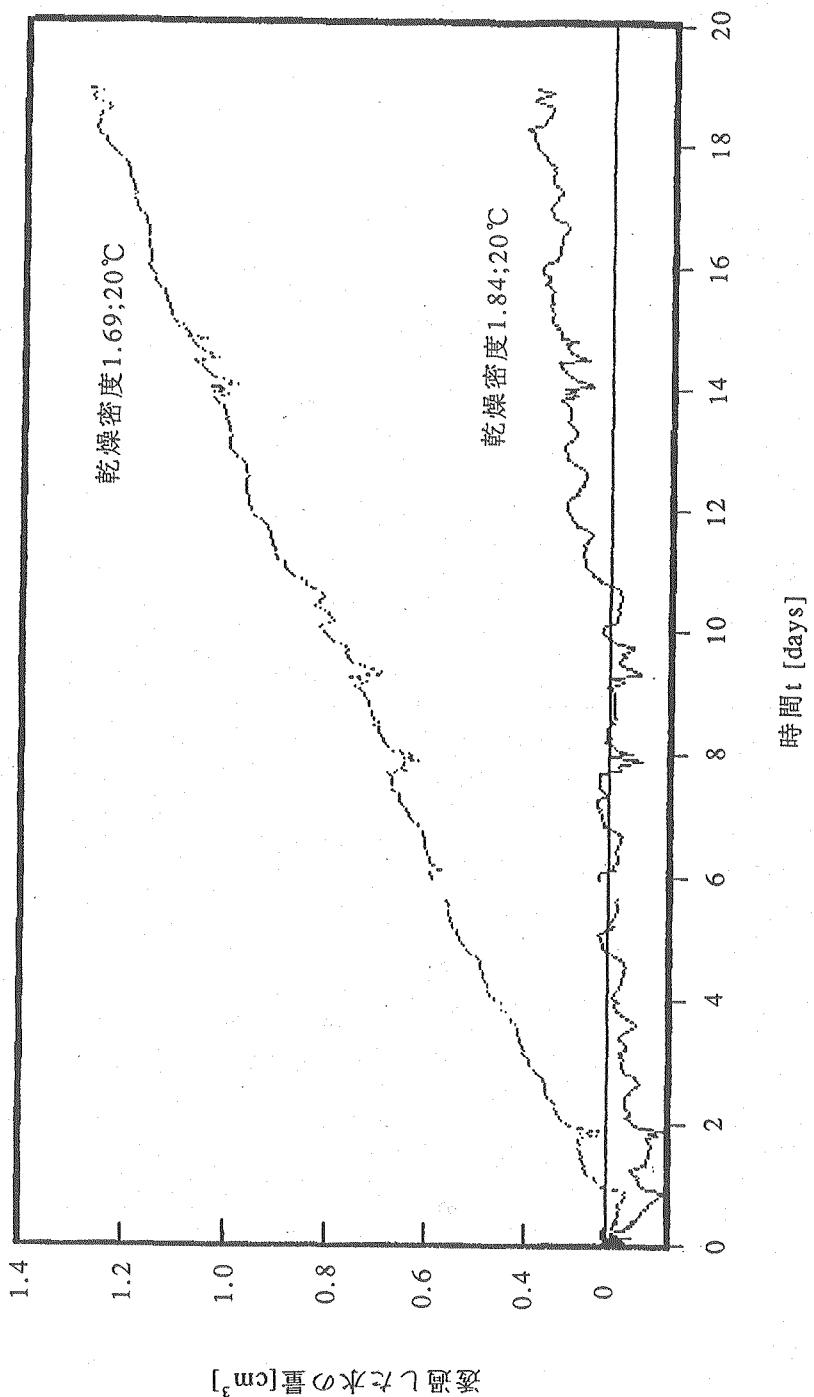


図2.2.4(4)-a 透水量の時間変化 (試料番号4,5)

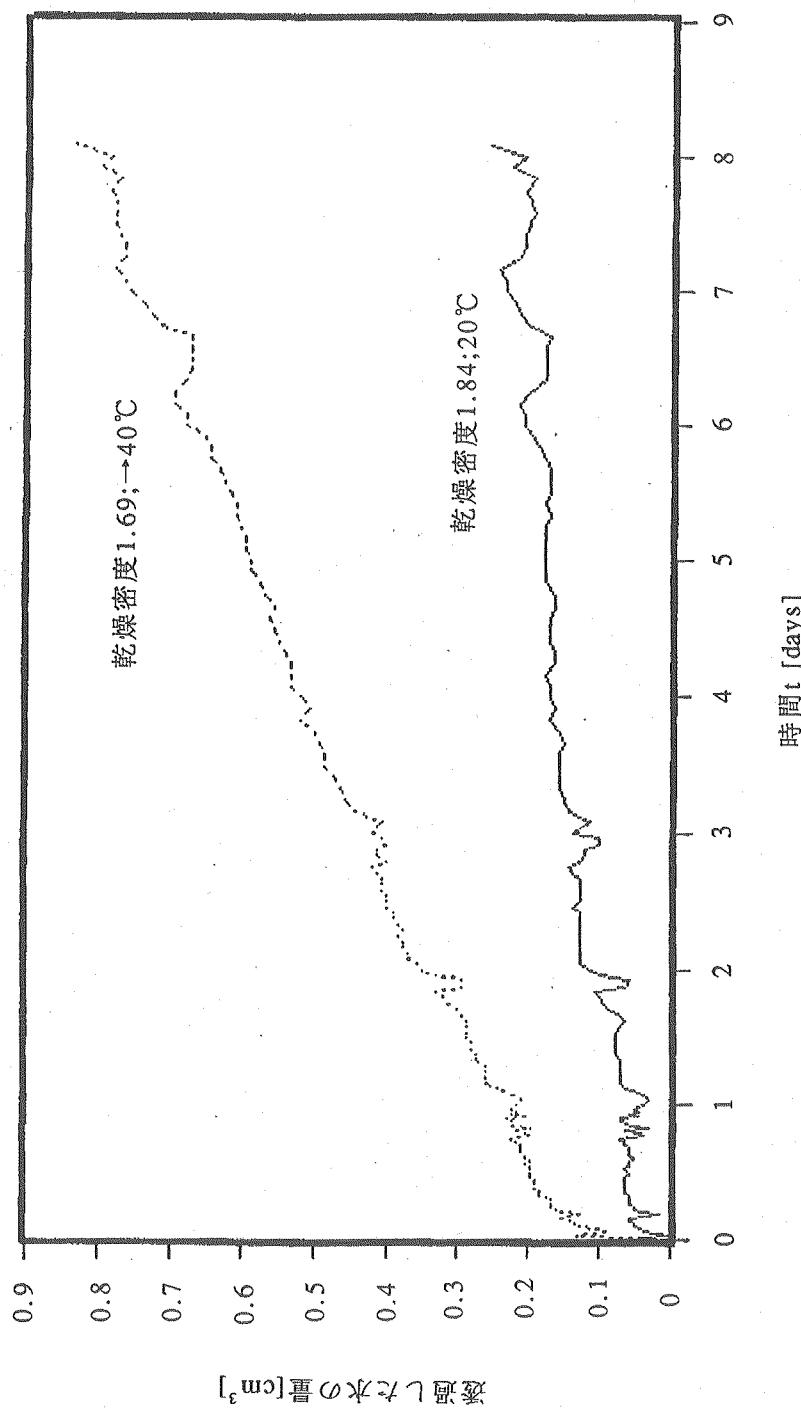


図2.2.4(4)-b 透水量の時間変化（試料番号4,5）

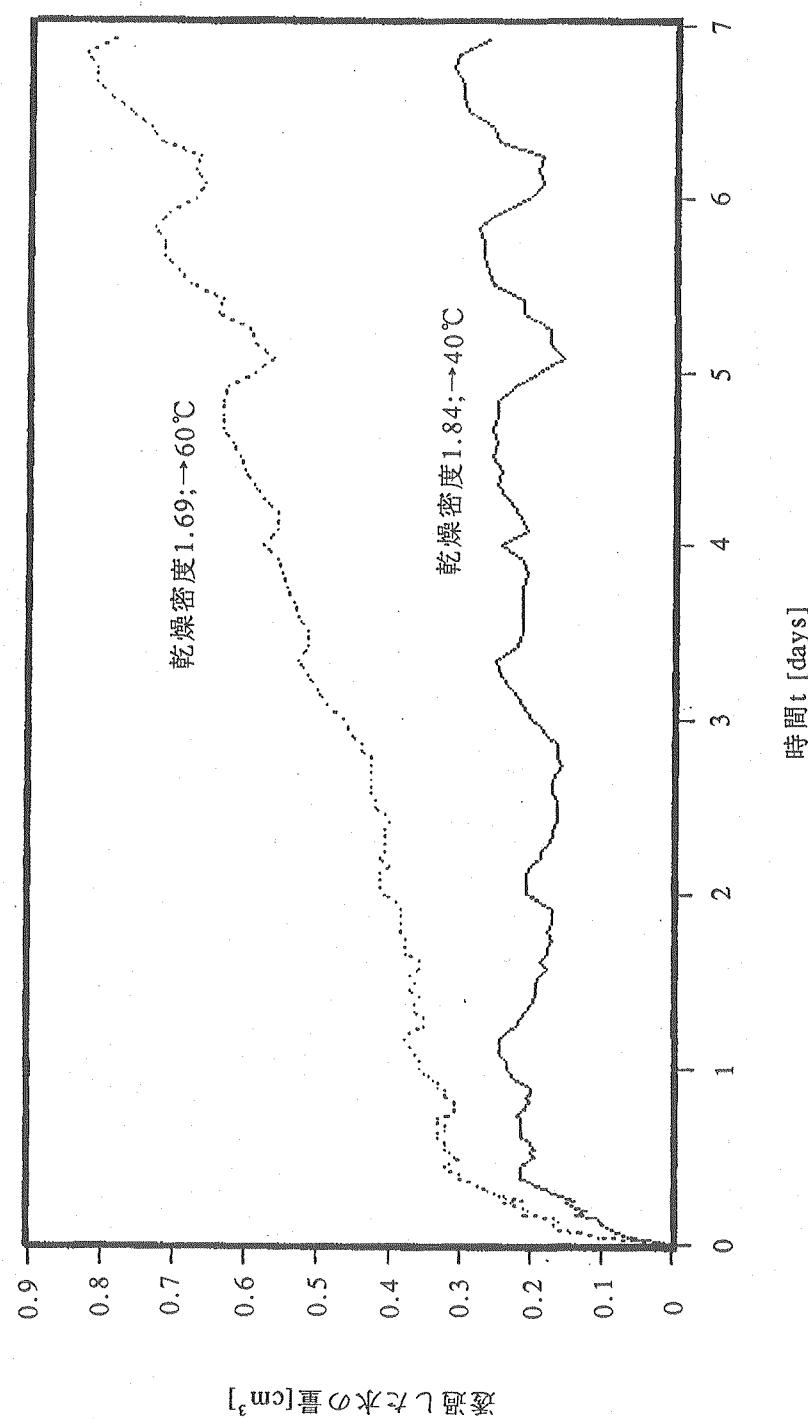


図2.2.4(4)-c 透水量の時間変化 (試料番号 4,5)

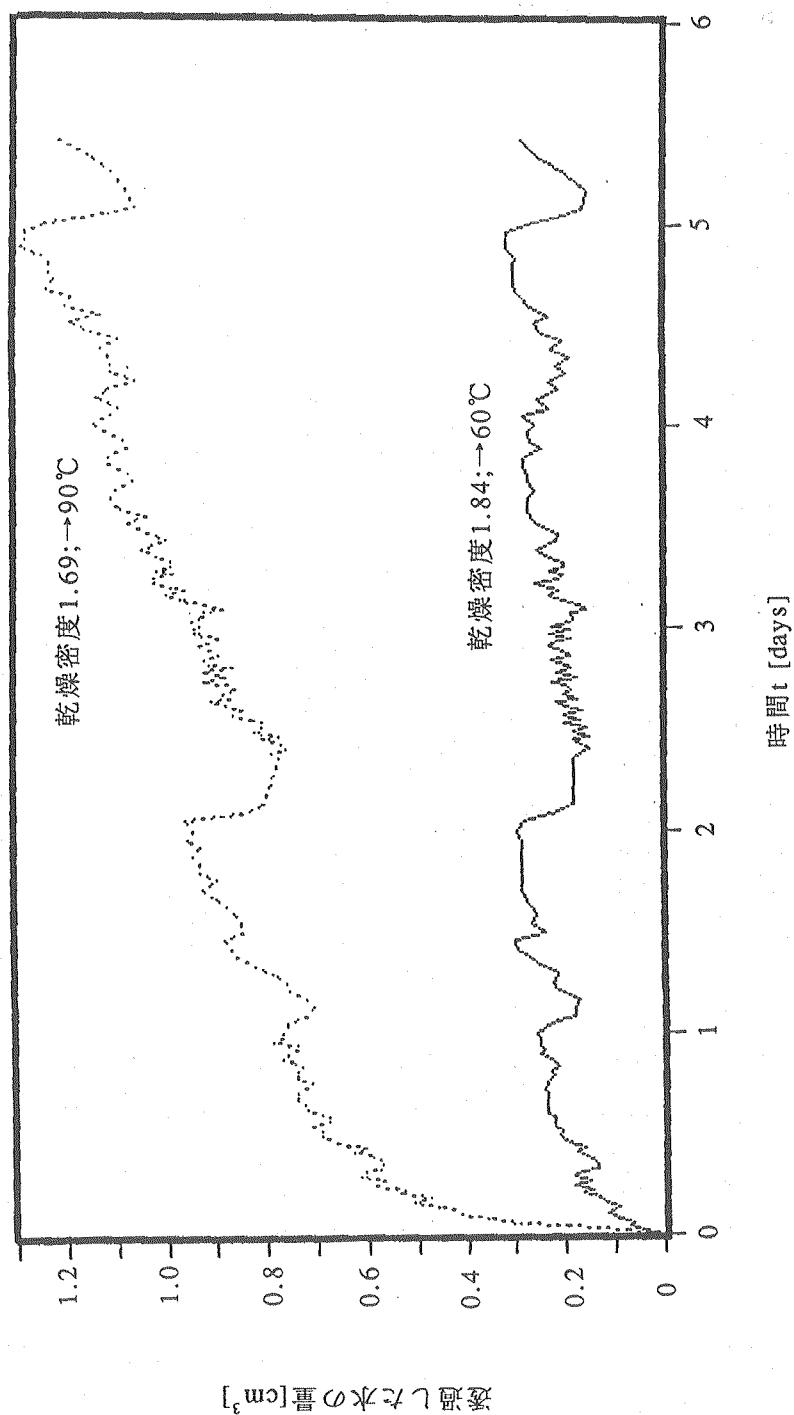


図2.2.4(4)-d 透水量の時間変化 (試料番号4,5)

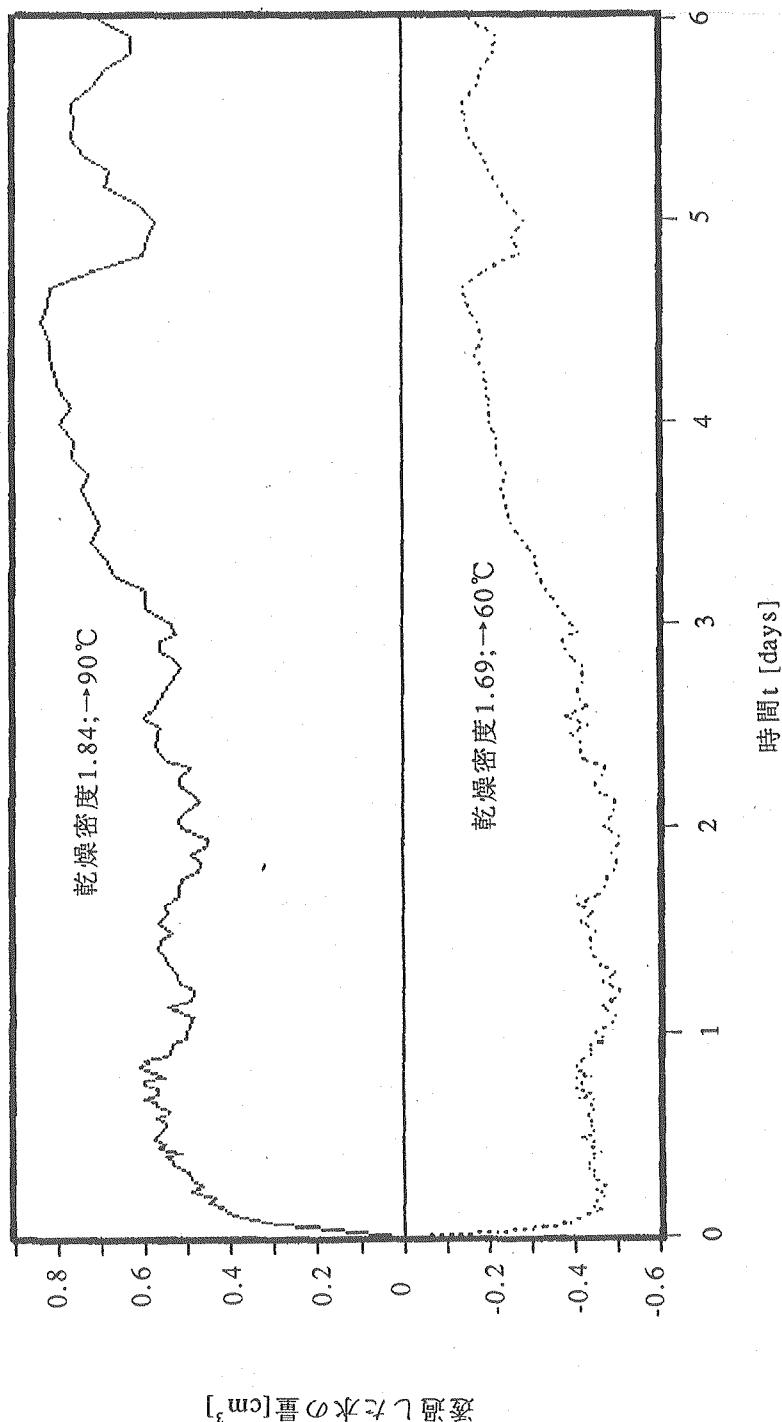


図2.2.4(4)-e 透水量の時間変化 (試料番号 4,5)

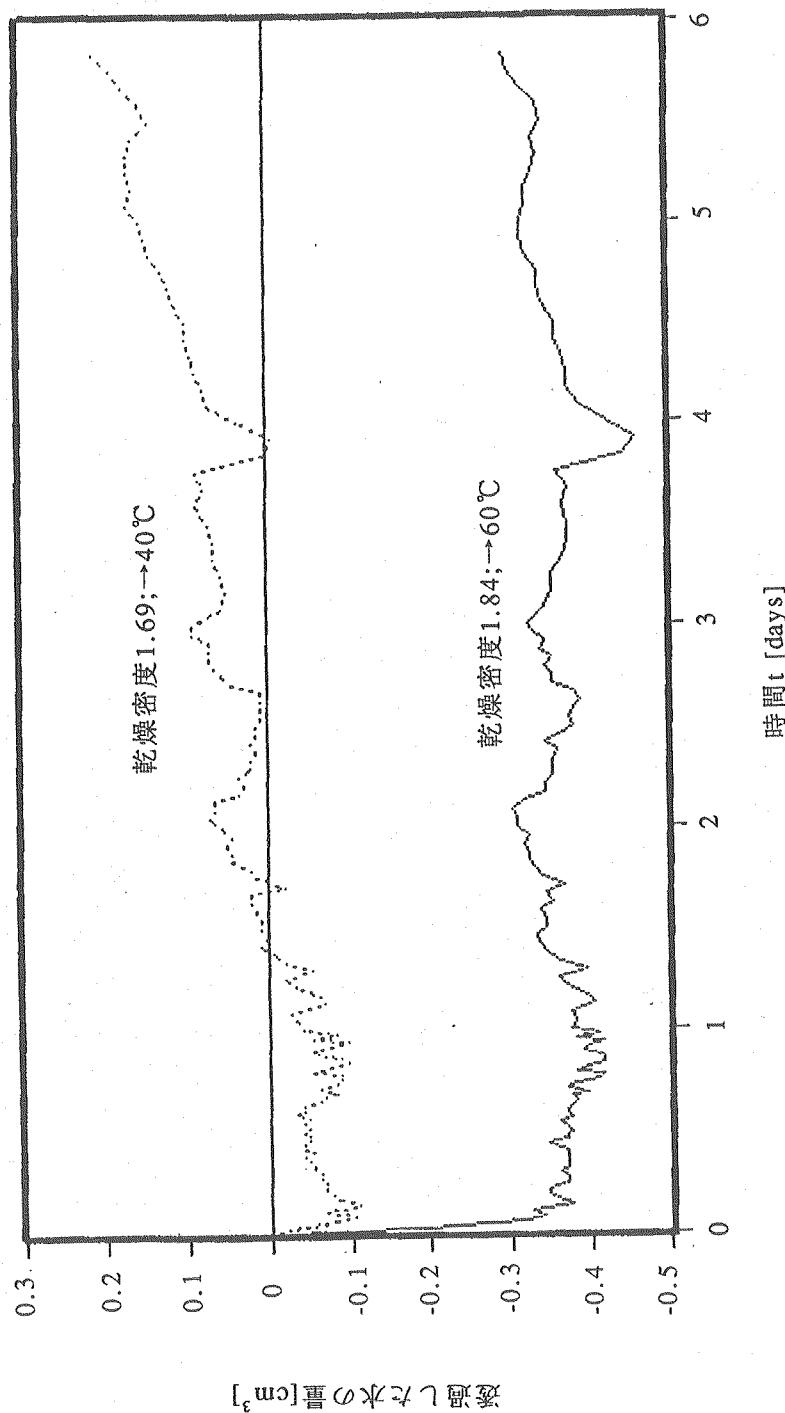


図2.2.4(4)・f 透水量の時間変化 (試料番号 4,5)

試験番号	密度		試料高さ cm	温度 °C	透過流量 cm ³ /hour	透水係数 m/sec
	乾燥	飽和				
1	1.58	2.00	1.99	20°C	3.13E-03	4.61E-13
				40°C	4.79E-03	7.07E-13
				60°C	5.21E-03	7.69E-13
				90°C	6.67E-03	9.84E-13
				60°C	9.17E-03	1.35E-12
				40°C	8.44E-03	1.25E-12
				20°C	7.81E-03	1.15E-12
2	1.67	2.07	2.11	20°C	2.92E-03	4.55E-13
				40°C	3.75E-03	5.84E-13
				60°C	4.58E-03	7.13E-13
				90°C	6.15E-03	9.58E-13
				60°C	5.94E-03	9.25E-13
				40°C	5.79E-03	9.02E-13
				20°C	5.42E-03	8.44E-13
3	1.79	2.12	2.16	20°C	1.57E-03	1.07E-13
				40°C	3.83E-03	2.61E-13
				60°C	2.73E-03	1.86E-13
				90°C	5.00E-03	3.41E-13
				60°C	3.19E-03	2.18E-13
				40°C	2.96E-03	2.02E-13
				20°C	1.71E-03	1.17E-13
4	1.69	2.06	2.05	20°C	3.09E-03	2.00E-12
				40°C	3.09E-03	2.01E-12
				60°C	3.42E-03	2.21E-12
				90°C	6.90E-03	4.47E-12
				60°C	5.67E-03	3.68E-12
				40°C	3.81E-03	2.47E-12
				20°C	***	***
5	1.84	2.15	2.08	20°C	1.00E-03	6.60E-14
				40°C	7.65E-04	5.03E-14
				60°C	1.72E-03	1.13E-13
				90°C	6.08E-03	4.00E-13
				60°C	3.38E-03	2.22E-13
				40°C	***	***
				20°C	***	***

表2.2.3 圧縮固化ペントナイトの透水係数

2.2.6 試験結果の考察

●透水係数と乾燥密度との関係

乾燥密度が大きくなるに従って、透水に寄与する空隙の割合は減少するため透水係数は低くなることが考えられる。実際の測定において、図2.2.5に示されるように同様の傾向が確認できるが、値にややばらつきが見られる。この理由として、実験誤差や試料が自然材料であるためのばらつきが考えられる。なお、図2.2.5にPuschらによってクニゲルV1を用いて同様の試験を行なった結果を併せて載せる。温度20℃に対して今回のデータ及びPuschらのデータから乾燥密度との関係を回帰計算すると、以下の式が得られる。

$$k = 1.94 \times 10^{-6} \cdot \exp(-9.01 \rho d) \quad (2.2.3)$$

また、すべてのデータはこの式から0.5倍～4倍の範囲に含まれ、この式から1オーダーずれてはいない。

●透水係数と試料の温度との関係

図2.2.6に透水係数と温度との関係を示す。若干のばらつきを伴うものの透水係数は温度が上昇するに従って、大きな値を取る傾向が見られる。温度の上昇に伴って起こる現象として、

- ・水の粘性、密度の減少
- ・土粒子径の温度膨張に伴う空隙体積の変化

等が考えられる。温度上昇に伴う透水係数の値の変化について、SKBテクニカルレポート90-43[2]に測定データと共に検討が行なわれている。これによると、Naベントナイトの透水係数は温度が室温から90℃程度に上昇すると、およそ2倍になる測定結果を得ている。今回の測定データについては、試料番号3（3.2倍）、5（6倍）を除いておおよそ室温から90℃の変化で透水係数が2倍になっていることがわかり、類似の結果が得られているようである。

次に粘性の温度変化を考えてみる。透水係数は浸透試験によると多孔質媒体の性質のみ

によって決まる透過度K、浸透水の密度 ρ 、重力加速度gに比例し、浸透水の粘性係数 μ に逆比例する。

$$k = \frac{K \rho g}{\mu} \quad (2.2.4)$$

透過度Kは土粒子の特性のみによって規定される。また、流体の粘性係数 μ [g/(cm・秒)]、密度 ρ [g/cm³]は流体の温度や溶存物質の濃度によって変化するが、今、ベントナイト中の水は大きく溶存物質が変化しないとして温度 θ [°C]の関数として次のように表される。[3]

$$\mu = \frac{0.01794}{1 + 0.03702\theta + 0.0001638\theta^2} \quad (2.2.5)$$

$$\rho = 0.9969 \left\{ 1.0 - 3.17 \times 10^{-4}(\theta - 25) - 2.56 \times 10^{-6}(\theta - 25)^2 \right\} \quad (2.2.6)$$

室温（20°C）における透水係数と90°Cにおける透水係数は、土粒子の構造が変化しないと仮定すれば、ほぼ3倍になると計算できる。この値は、文献による2倍、また今回の測定における2~6倍とほぼ同等の大きさであり、温度上昇に伴う透水係数の上昇は浸透水の物性変化による影響が大きいと考えられる。なお、透過程度Kは空隙率や土粒子の比表面積の関数であるが、温度上昇に伴うこれらの値の変化は試料の密度に關係すると思われ、間隙水の化学的組成等も含めこれらの検討が、より詳細な透水係数の温度依存性のメカニズムの解明に必要であると考えられる。

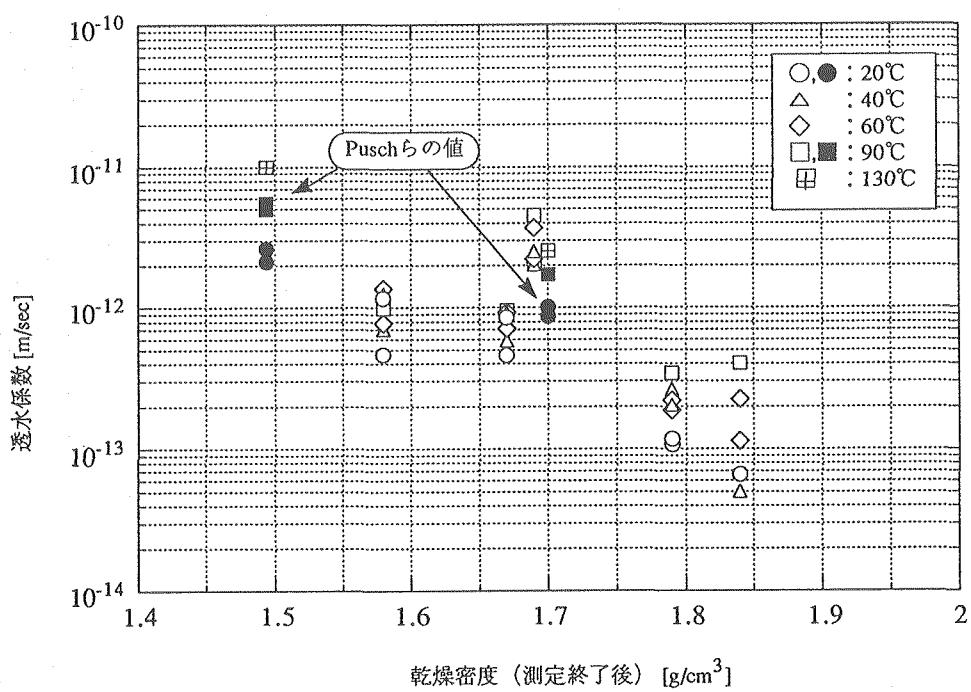


図2.2.5 透水係数と乾燥密度との関係

	試験番号	乾燥密度
●	1	1.58
■	2	1.67
◆	3	1.79
▲	4	1.69
○	5	1.84

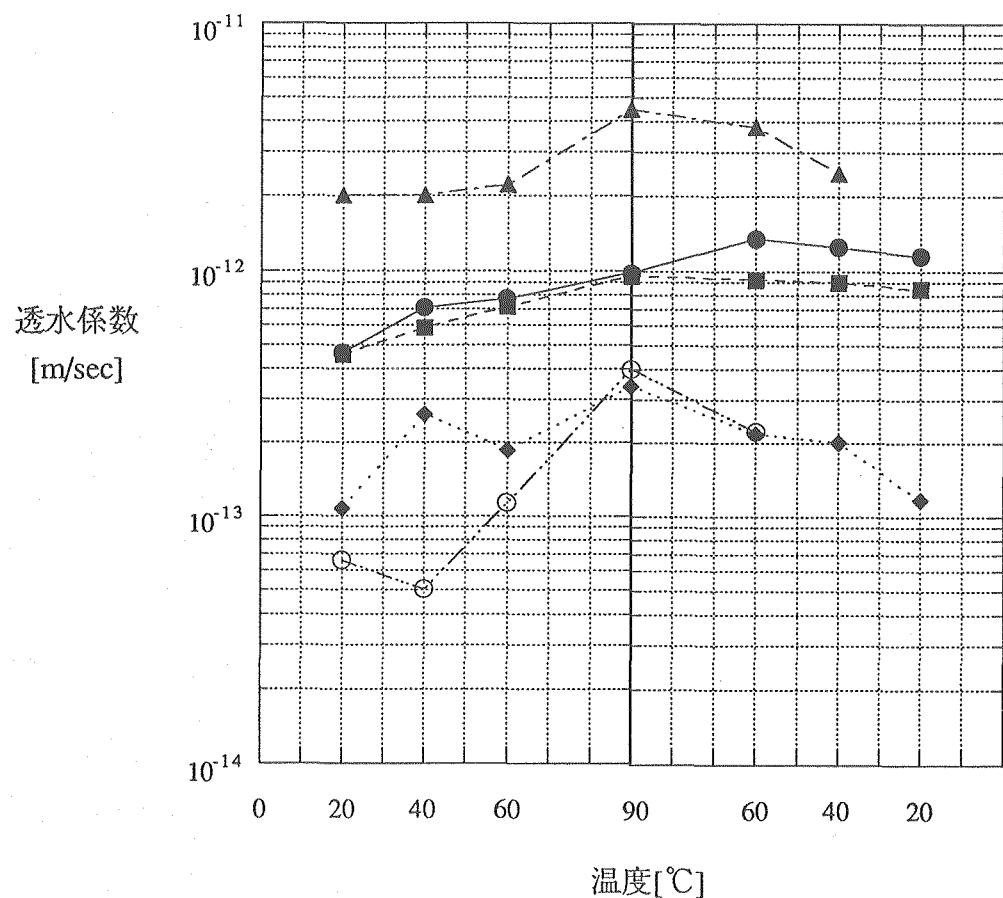


図2.2.6 透水係数の温度依存性

/●試料加熱の透水性への影響

図2.2.5からわかるように、試料を加熱する前後において、例えば、20℃の透水係数は加熱後の方が大きな値となっている。また、この性質は試料密度が小さい（空隙率が大きい）場合により顕著であるため（表2.2.5）、温度上昇によっていったん空隙が減少し、温度が下がっても空隙が現状に回復しないためではないかと考える。

試験番号	乾燥密度	空隙率	透水係数 (20℃)		比
			加熱前	加熱後	
1	1.58	0.415	4.61E-13	1.15E-12	2.49
2	1.67	0.381	4.55E-13	8.44E-13	1.85
3	1.79	0.337	1.07E-13	1.17E-13	1.09

表2.2.4 加熱前後の透水係数の変化

2.2.7 今後の課題

2.2.6において、測定によって得られたデータを仮定を含めて考察した。今後はこれらの考察が正しいかどうか実験的に確認することが必要である。

【参考文献】

- [1]伊藤、鈴木、柴田、亀井、佐々木；ベントナイト中の鉱物の定量方法の検討；原子力学会1992秋F5(1992)
- [2]R.Pusch, O.Karnland, H. Hökmark;GMM---A general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays;SKB Technical Report 90-43(1990)
- [3]地下水問題研究会編；地下水汚染論(1991)

2.3 熱特性--熱膨張率--

2.3.1 試験の概要

この試験では、ベントナイト圧縮固化体の熱膨張率を測定することを目的としている。熱膨張率の測定方法には、押棒式熱膨張計法、光干渉計法、望遠測微計法、X線回折法等があるが、押棒式熱膨張計法が一般的である[1]。

本熱膨張率の測定は、押棒式熱膨張計法に準じて三軸試験装置を利用して行なった。試験体は三軸セル内にゴムスリーブを巻いた後に設置され、セル内にシリコンオイルを充填後、セル周囲に巻かれたヒーターで加熱、温度条件を室温から60°C前後 ($\Delta T=40°C$) まで変化させ、その間の軸方向及び直径方向の長さの変化を測定するものである。以上の測定データから、試料の体積変化を求めて体積膨張率を求めた。また、圧縮成型方法による試料の不均一性が体積変化に及ぼす影響を調べるために、軸方向及び直径方向の熱膨張の傾向について調べた。

2.3.2 試験装置

試験はマルイ製中圧三軸試験装置を用いて行なった。装置は三軸クリープ試験で使用したものと同じである。セル内の温度の設定はセル周囲及びオイルタンク内に設けられた2つのヒーターを用いて行なわれる。セルの周囲のヒーターは断熱材と共にセル周囲に巻かれ(図2.3.1) セル内の温度を熱電対(セル内で試験体の高さの中位程度に接点がある)の値によって制御、設定できるようになっている。オイルタンク内のヒーターは補助的な役割を果たすもので、三軸セル内へ流し込むオイルの温度の初期値を設定するために用いる。(実際には、試験装置は25°Cの恒温室内に固定されているのでタンク内のヒータは使用しなかった。)

軸方向の長さ変化は試料の上部と接触するピストンに取付けられたダイヤルゲージから、また、直径方向の長さ変化は2つのリングゲージを直交するように試料に取付けて求めた。(図2.3.2にリングゲージの写真を示す) 今回の試験ではそれぞれのゲージに与えられる温度変化は40°C程度であるので、オイル内に設置されるリングゲージの出力については補正などの操作をする必要はないものとした。

測定データの収録、管理は東京測器製TDS-301を使用した。

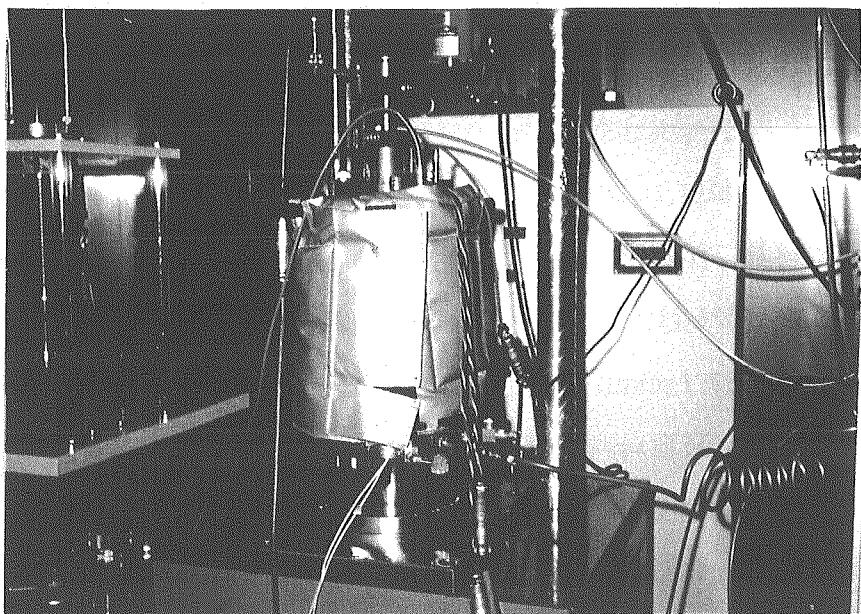


図2.3.1 セル周囲に巻かれるヒーターおよび断熱材

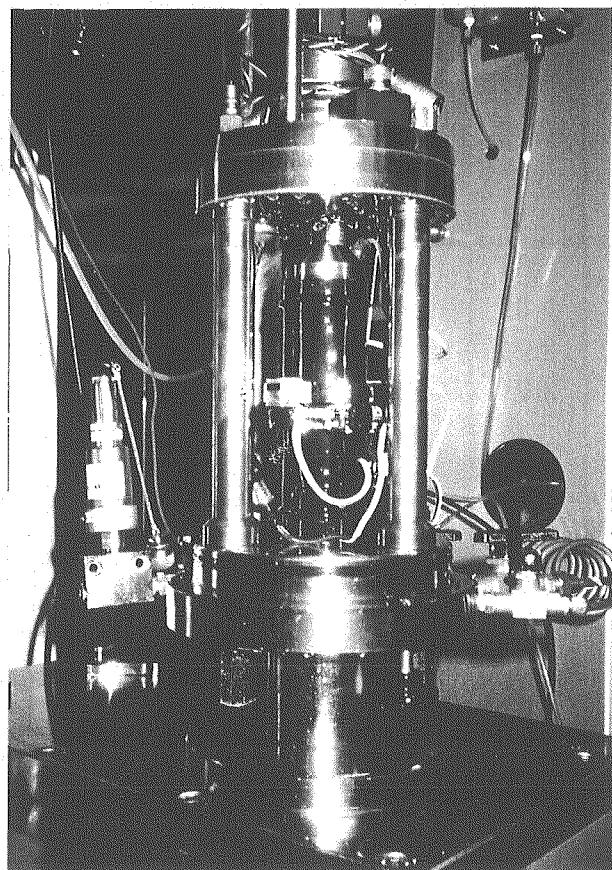


図2.3.2 リングゲージ

2.3.3 試験試料

試験で用いた圧縮固化ペントナイトの物性値、寸法などを表2.3.1にまとめる。HE-1～HE-6までは自然乾燥状態の圧縮固化ペントナイトの熱膨張率測定のために、また、HE-7～HE-12は飽和度約100%の熱膨張率を測定するために製作した。HE-1,2,HE-7,8は乾燥密度1.6になるように、同様にHE-3,4,HE-9,10は1.8、HE-5,6,HE-11,12は2.0になるように調整した。また、試料の成型は一次元に圧縮して行なうため、基本的に試料は等方体ではない。従って、熱を作用することでその膨張（長さ変化）に依存性が現われることが予想される。それを確認するために、HE-13～HE-15では、 $\phi 110\text{mm} \times 120\text{mm}$ の圧縮固化体から図2.3.3に示すような試料の切り出しを行ない、円柱軸方向に直交するように圧縮固化した試料を作成した。この4試料は乾燥密度1.8になるように調整した。

使用したペントナイトはクニミネ工業(株)のクニゲルV1である。

sample	圧縮固化応力 kg	直径 cm	高さ cm	重さ g	乾燥密度 g/cm ³	含水比 %	空隙率 %	飽和度 %
HE-1	2300	5.05	9.97	352.9	1.62	9.2	40.1	37.2
HE-2	2300	5.05	10.24	350.1	1.56	9.2	42.1	34.2
HE-3	6000	5.04	10.00	395.3	1.81	9.2	32.8	50.9
HE-4	6000	5.05	10.17	394.9	1.78	9.2	34.2	47.7
HE-5	8000	5.05	9.97	434.4	1.99	9.2	26.2	69.9
HE-6	8000	5.08	10.27	433.3	1.91	9.2	29.4	59.7
HE-7	2900	5.05	9.56	372.7	1.52	28.4	43.9	98.2
HE-8	4800	5.05	10.01	390.0	1.51	28.4	43.9	98.0
HE-9	11000	5.05	10.24	428.4	1.74	19.8	35.4	97.4
HE-10	2000	5.05	10.30	434.7	1.76	19.8	34.9	99.9
HE-11	42000	5.07	10.04	457.1	2.00	13	26.1	99.5
HE-12	40000	5.09	9.78	451.0	2.01	13	25.7	101.4
HE-13		5.02	10.01	407.7	1.73	18.9	35.9	91.1
HE-14		4.98	9.92	407.7	1.77	18.9	34.3	97.9
HE-15		4.98	9.98	409.7	1.77	18.9	34.3	97.5

表2.3.1 測定試料の寸法と物性値

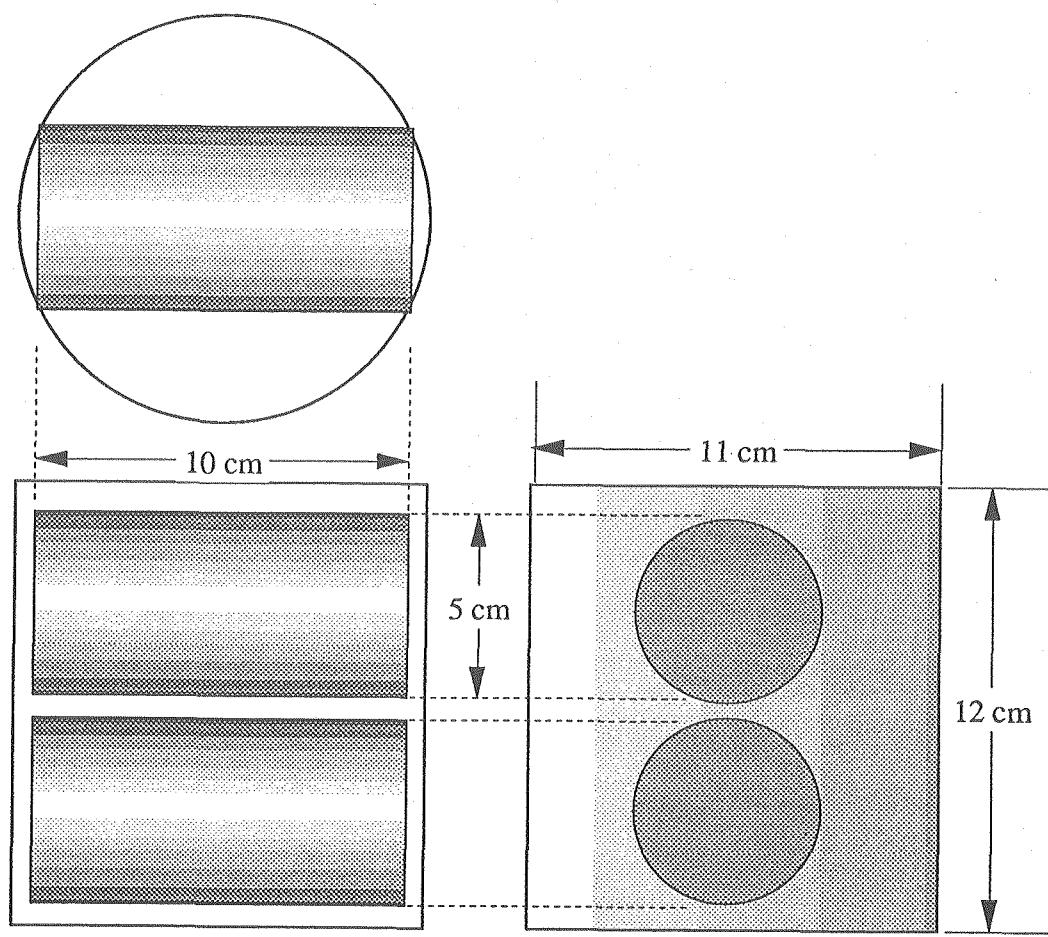


図2.3.3 HE-13～HE-15の試料の切り出し

2.3.4 測定方法

測定方法を以下に手順として示す。

- a) 試料の重量を確認して、セル内に設置。ゲージなどを取付ける。
- b) タンク内のシリコンオイルの温度が室温になっているか確認する。
- c) セル内をシリコンオイルで満たす。流入過程で熱電対の温度変化を注意する。
- d) セル上部ドレインからオイルができた時点で流入を終了する。（閉じた状態で温度を変化させるとオイル自身の熱膨張で試料が圧縮されるため、測定中ドレインは開放する。）
- e) セルの周囲に巻いたヒーターに通電し、セル内の温度を上昇させる。（およそ2時間で室温から設定温度の60℃程度になる）
- f) 軸方向の長さ変化、直径方向の長さ変化（2箇所）、セル内の温度をデータとして取得する。
- g) セル内の温度が一定になり、試料の体積変化が一定になったことを確認して測定を終了する。
- h) 取り出した試料の重量を測定する。

2.3.5 測定結果

測定されるデータは、セル内温度、軸方向の長さ変化、半径方向の長さ変化および試験前後での試料の重量変化である。図2.3.4にセル内の温度の時間変化を示す。温度の制御は±0.1°Cになるように設定されており、また、装置全体が恒温室に入っていることから、各試験におけるセル内の温度変化はこの図とほとんど変わらない。すなわち、セル内の温度は2、3時間後には設定温度の約60°Cに達し、その後は一定値となる。

図2.3.5(1)～(15)は各試料の軸方向及び半径方向の長さ変化を表している。この図からわかるることは、

- a) 半径方向の長さ変化は5時間程度で、また、軸方向の長さ変化は40時間程度経過した後に一定値に達している。
- b) 一定値に達した後、半径方向は縮む傾向にある。
- c) 試料番号1～12では軸方向の加熱による長さ変化は半径方向に比べて大きくなっている。
- d) 試料番号13～15では半径方向の長さ変化は、軸方向の長さ変化と同等である。従って、歪み変化で言えば、軸方向の方が歪みが小さい。

である。前に述べたようにセル内の温度は2、3時間で一定値に落ちついており、また、試料の熱伝導率や比熱などの熱物性値を考慮すると、試料内の温度分布は数時間後には一様になっていると考えられる。したがって、試料1～12の軸方向の長さ変化が直径方向に比べてなかなか落ち着かない理由は、熱膨張以外の原因が考えられる。また、上に述べたc)、d)の現象からも直径方向と軸方向の長さ変化が同じ現象で説明できないといえる。この理由として考えられるのは、ベントナイト圧縮固化体の製作方法（軸方向に一次元的に圧縮固化する）である。すなわち、圧縮固化時に内部に残留した応力が、温度が付加されることによって開放され、試料の構造が伸長すると考えられる。また、半径方向の長さは最大値に達した後に徐々に小さくなっていることから判断すると、測定開始から数時間までは熱膨張による長さ変化が卓越しており、その後は応力開放による長さ変化が引き続いていると考えられる。なお、図2.3.5(13)などに見られる試験途中（20時間後）での軸方向の長さ変化のモードの変化は、試料中の水分がセル内の温度により移動し（この試験では、水分は下の方向に移動していた）、ベントナイトが新たに水を吸った形になり膨潤し

たものと考える。（リングゲージは軸方向で中ほどの位置に設置されているので、試料の下部での膨潤を検知できない）

図2.3.6(1)～(15)に試料の体積の時間変化を示す。この図から以下のことことがわかる。

- ・試料の体積はセル内の温度上昇にしたがって増加し、セル内の温度が一定に達した後、ピーク値に達して、その後、わずかながら減少してゆく。
- ・飽和試料（試料7～12）での体積変化は、そうでない試料（試料1～6）に比べてピークに至る間での時間が長い。

はじめの数時間は温度上昇によって、ペントナイトのそれぞれの粒子が膨張して、セル内の温度が一定になった後に試料内部の温度分布が均一になり、膨張過程が収束する。その後、応力の開放によってペントナイト試料は、若干の体積減少を伴いながら形状を変化させ、最終的な平衡値に至るのではないかと考えられる。また、b)は試料中の水分が多いために、比熱が大きく温度平衡に達する時間が長くなっていると考えられる。

セル内温度

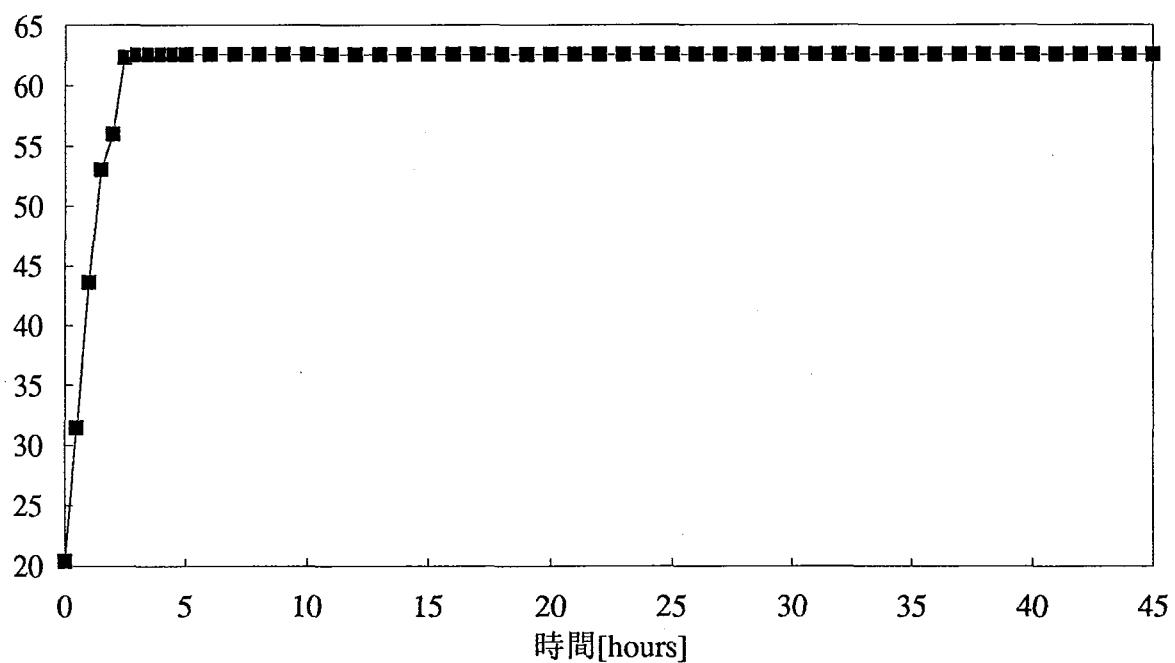


図2.3-4 セル内の温度変化

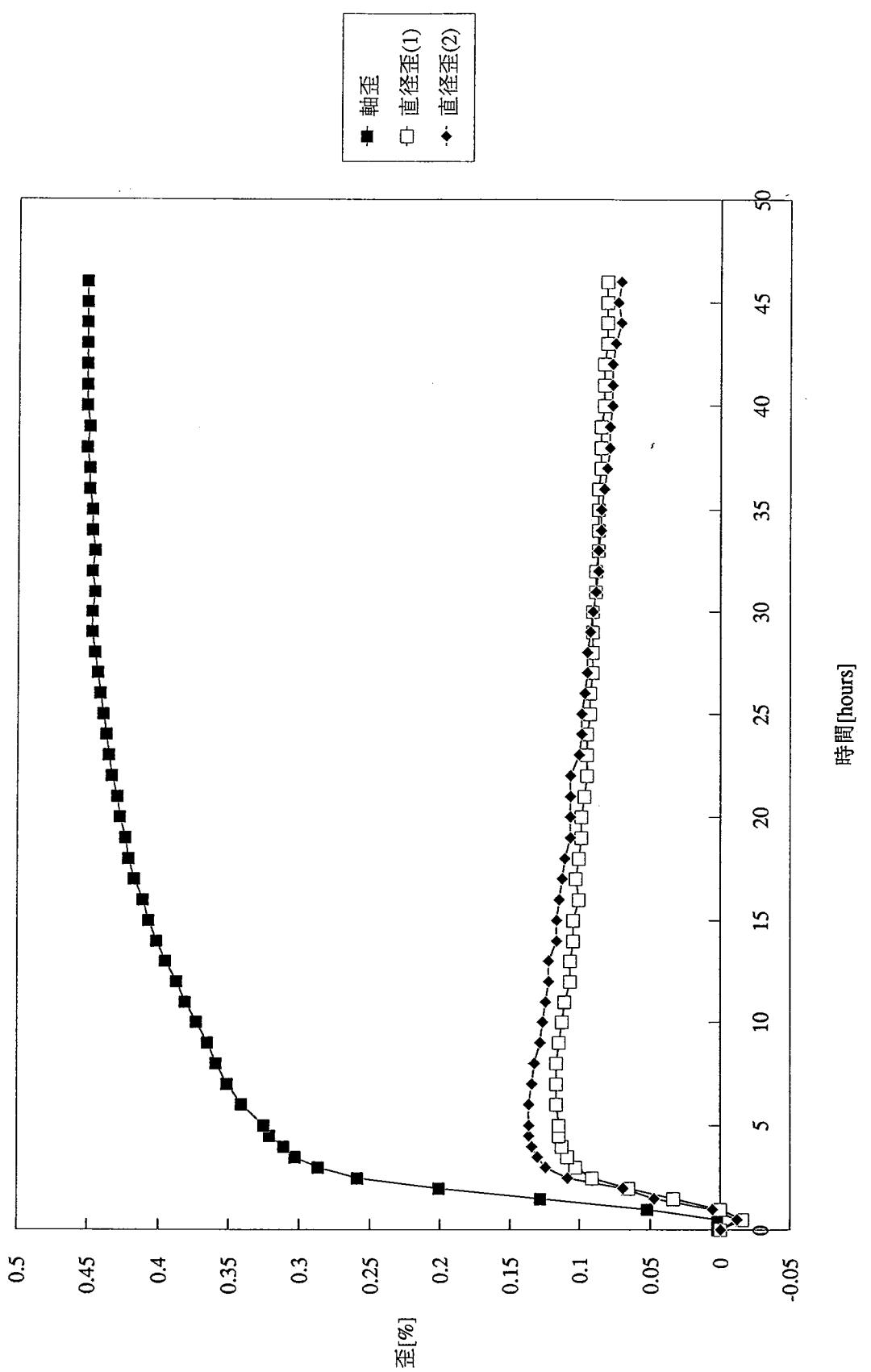


図2.3-5(1) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-1)

グラフ (歪) HE-2

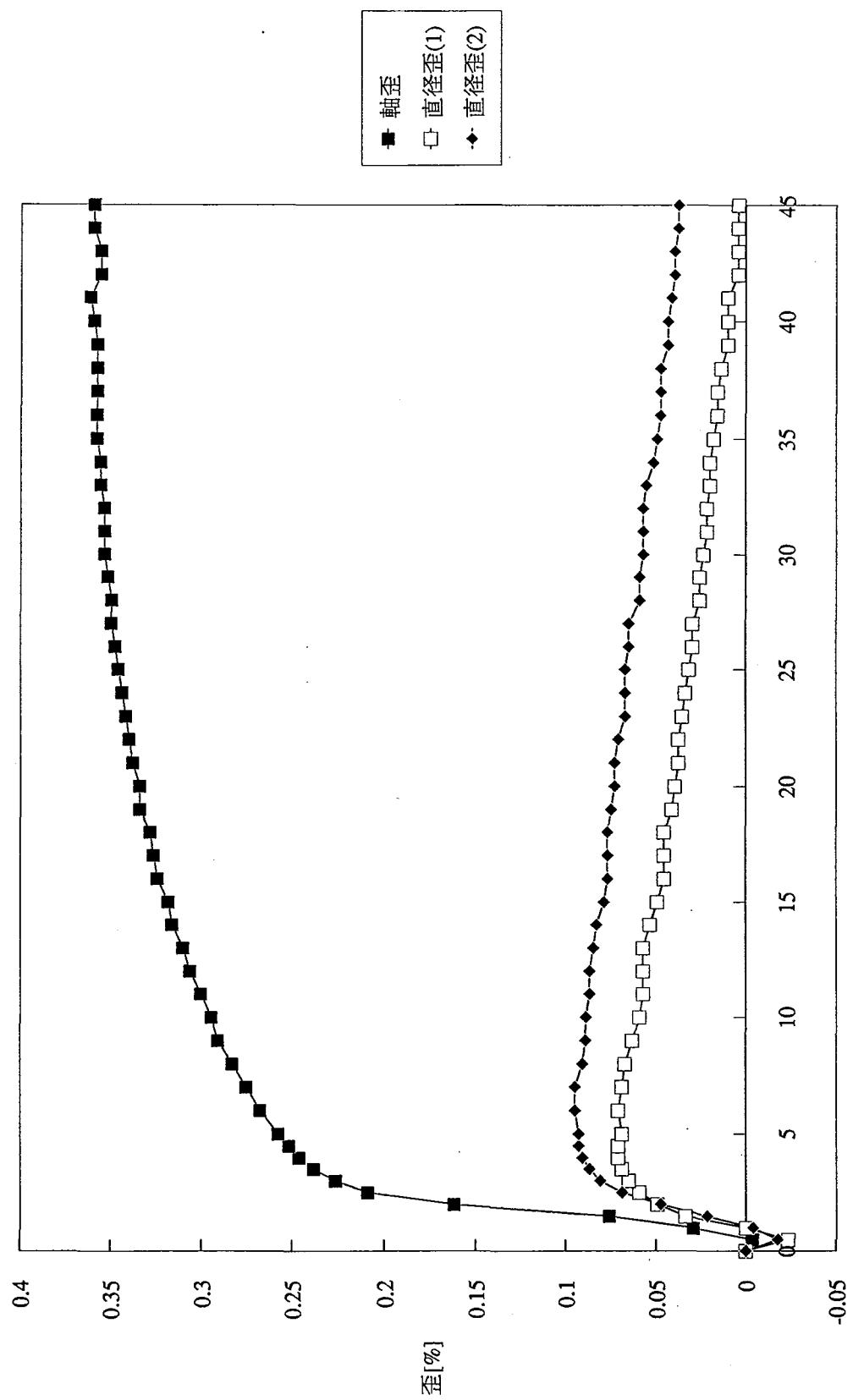
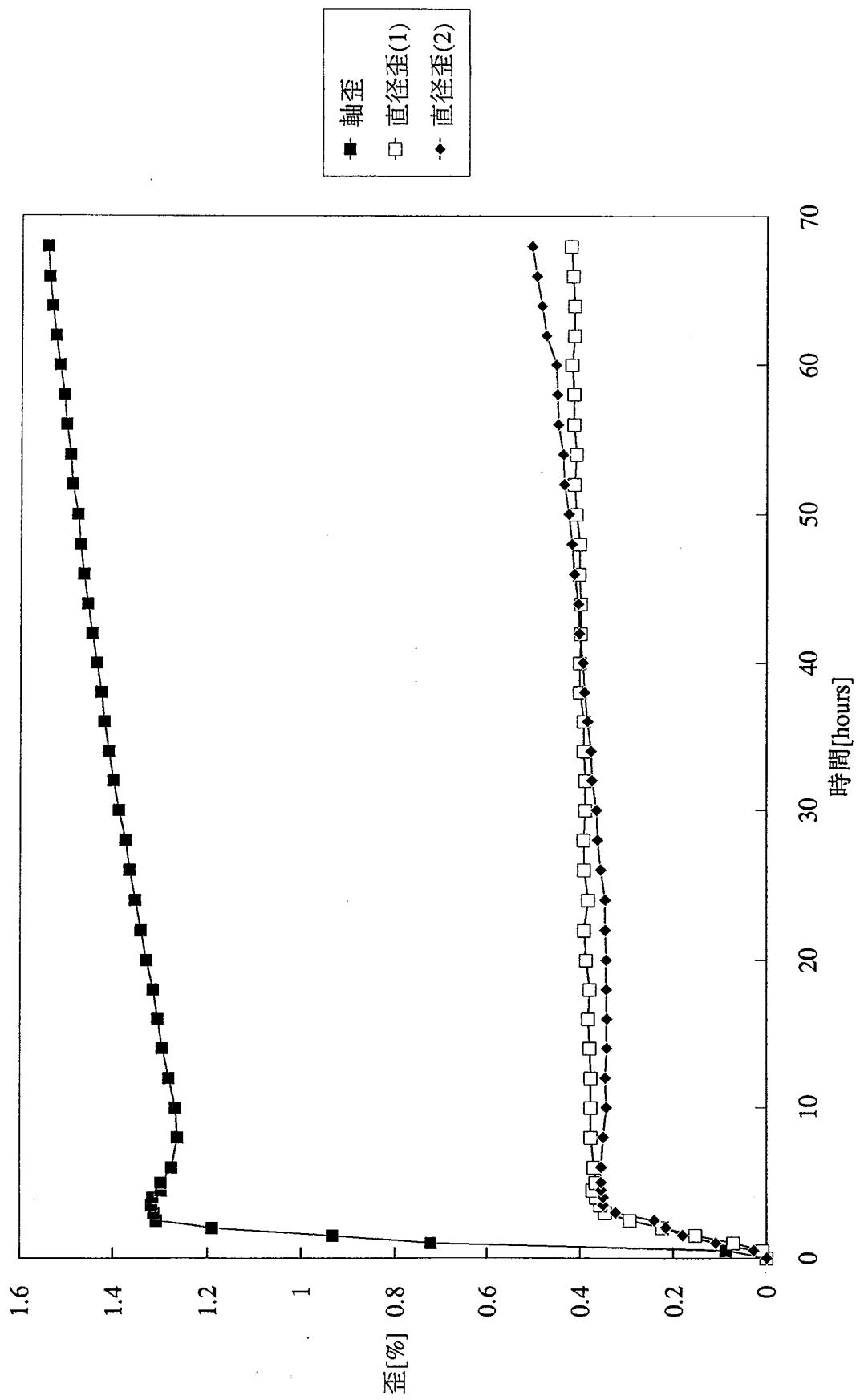


図2.3-5(2) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-2)

グラフ (金) HE-3



グラフ (歪) HE-4

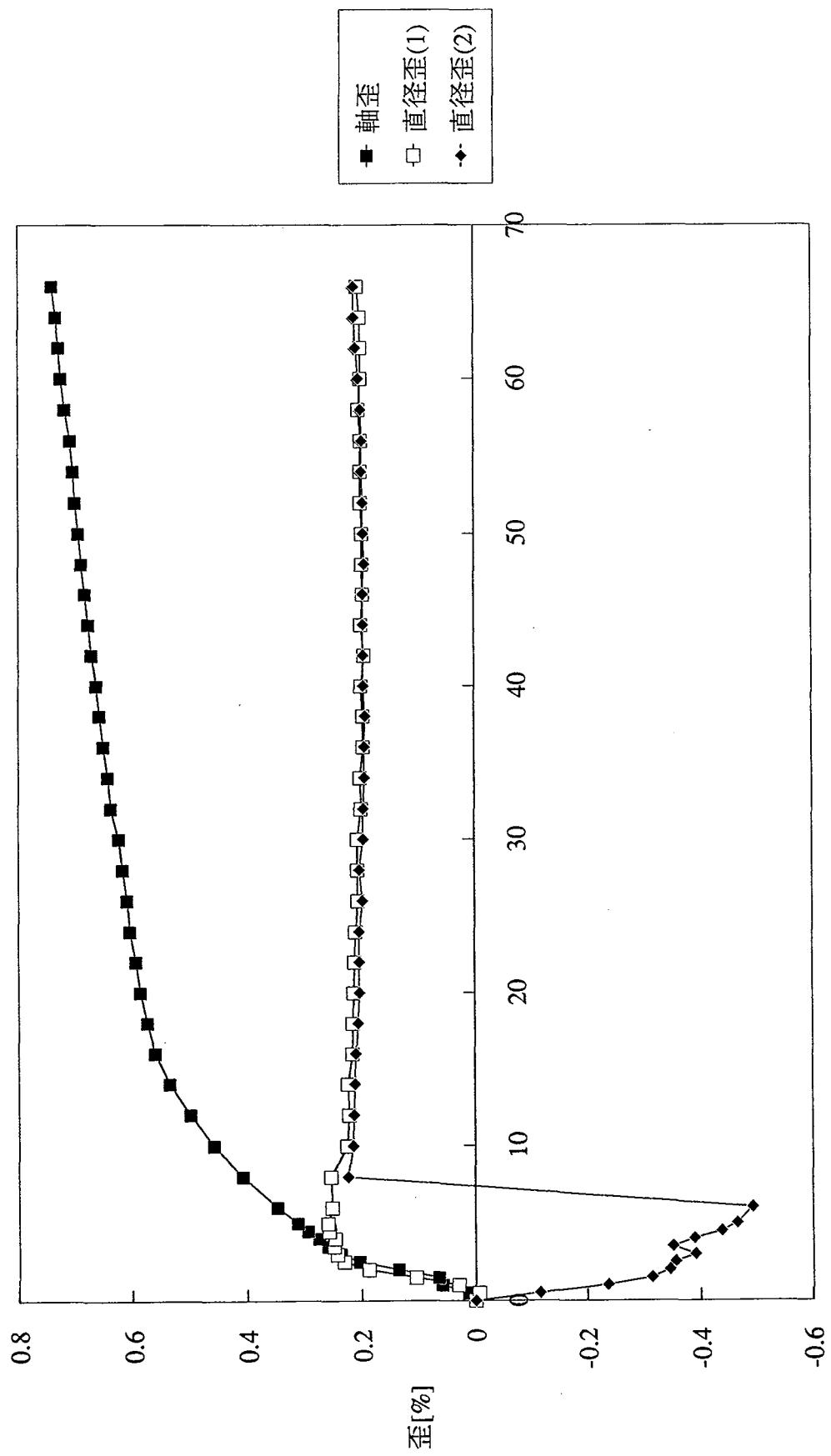


図2.3-5(4) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-4)

グラフ(歪)HE-5

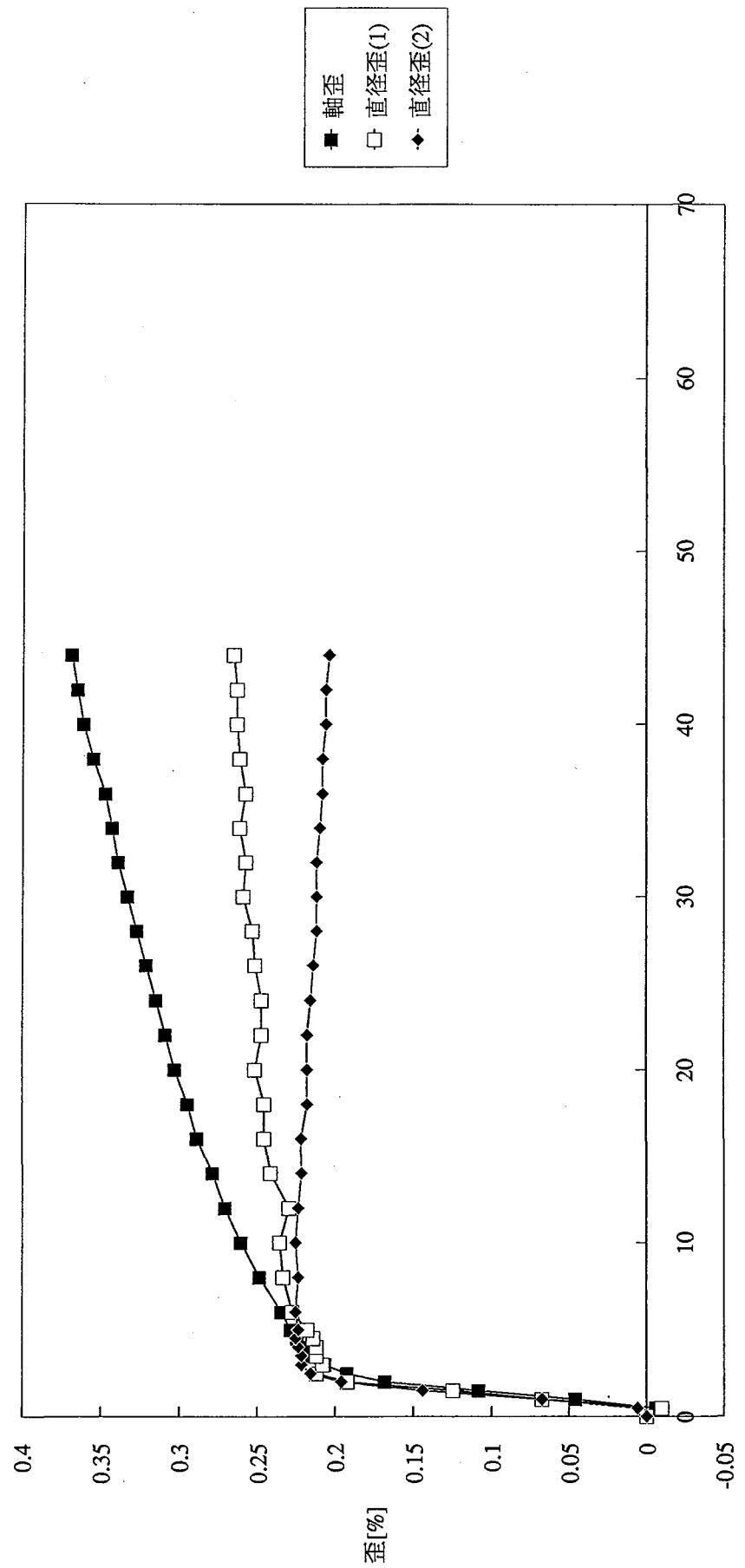


図2-74 等温回復試験における歪の回復曲線(HE-5)

グラフ(歪) HE-6

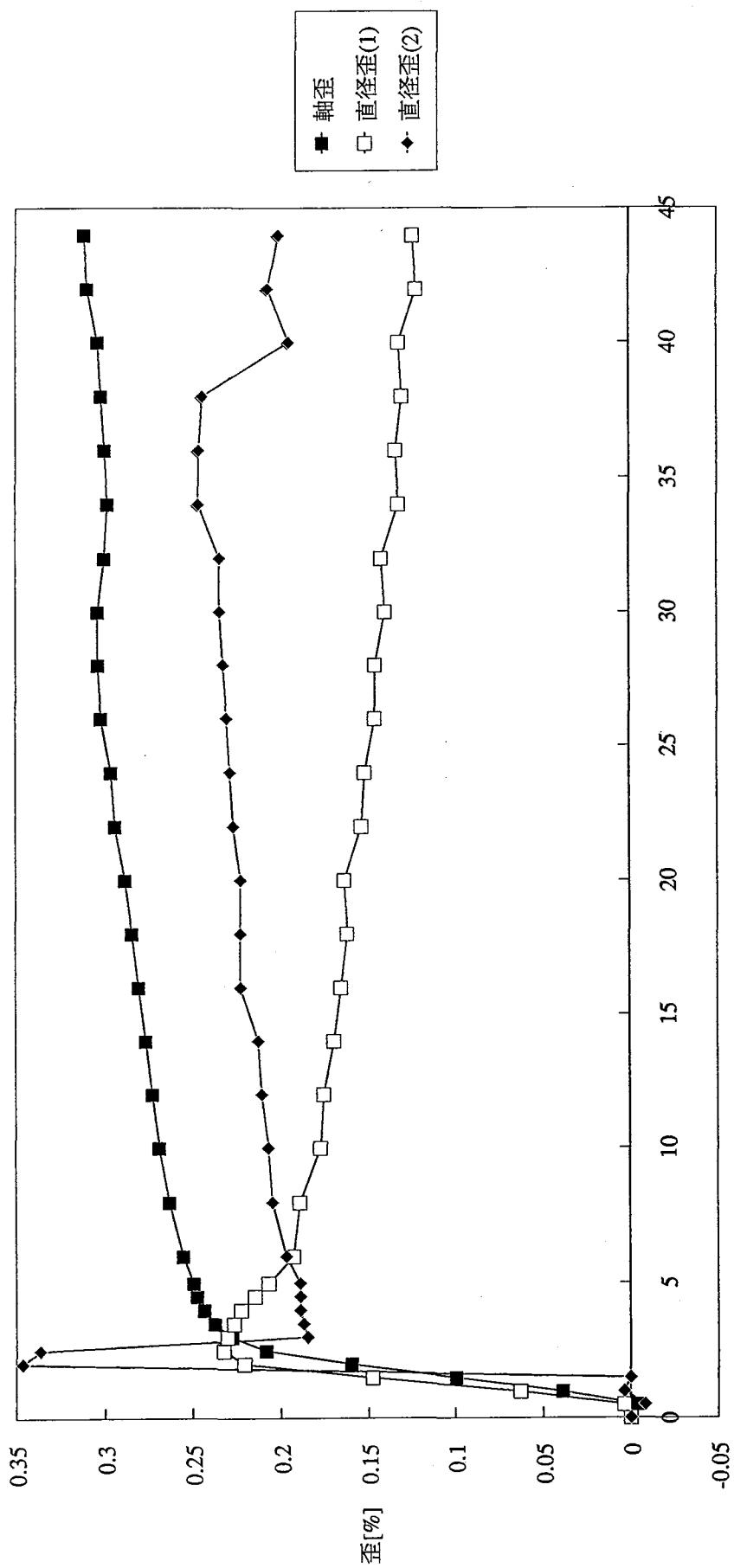


図2.3-5(6) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-6)

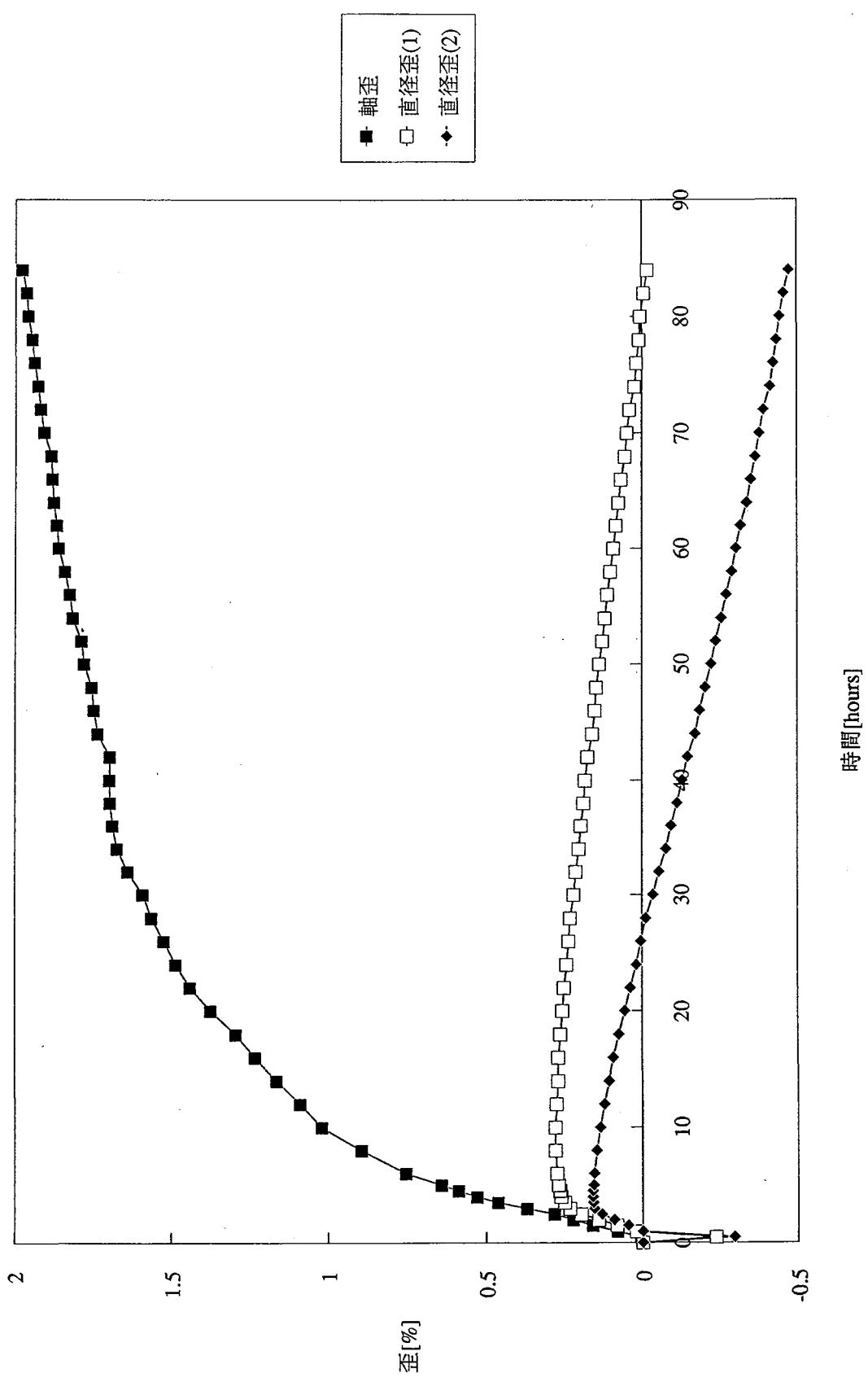
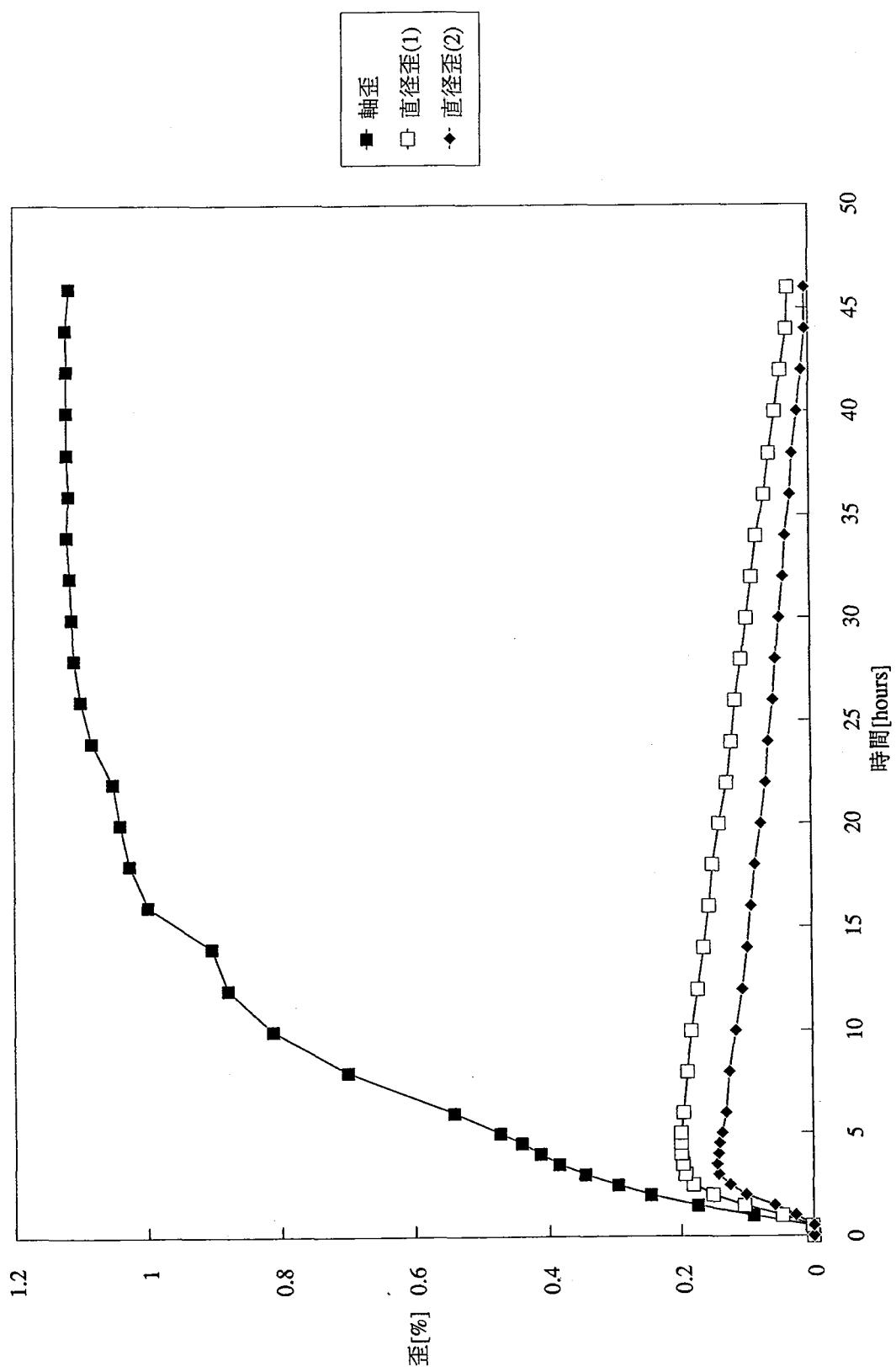


図2.3-5(7) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-7)

図2.3-5(8) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-8)



グラフ(歪) HE-9

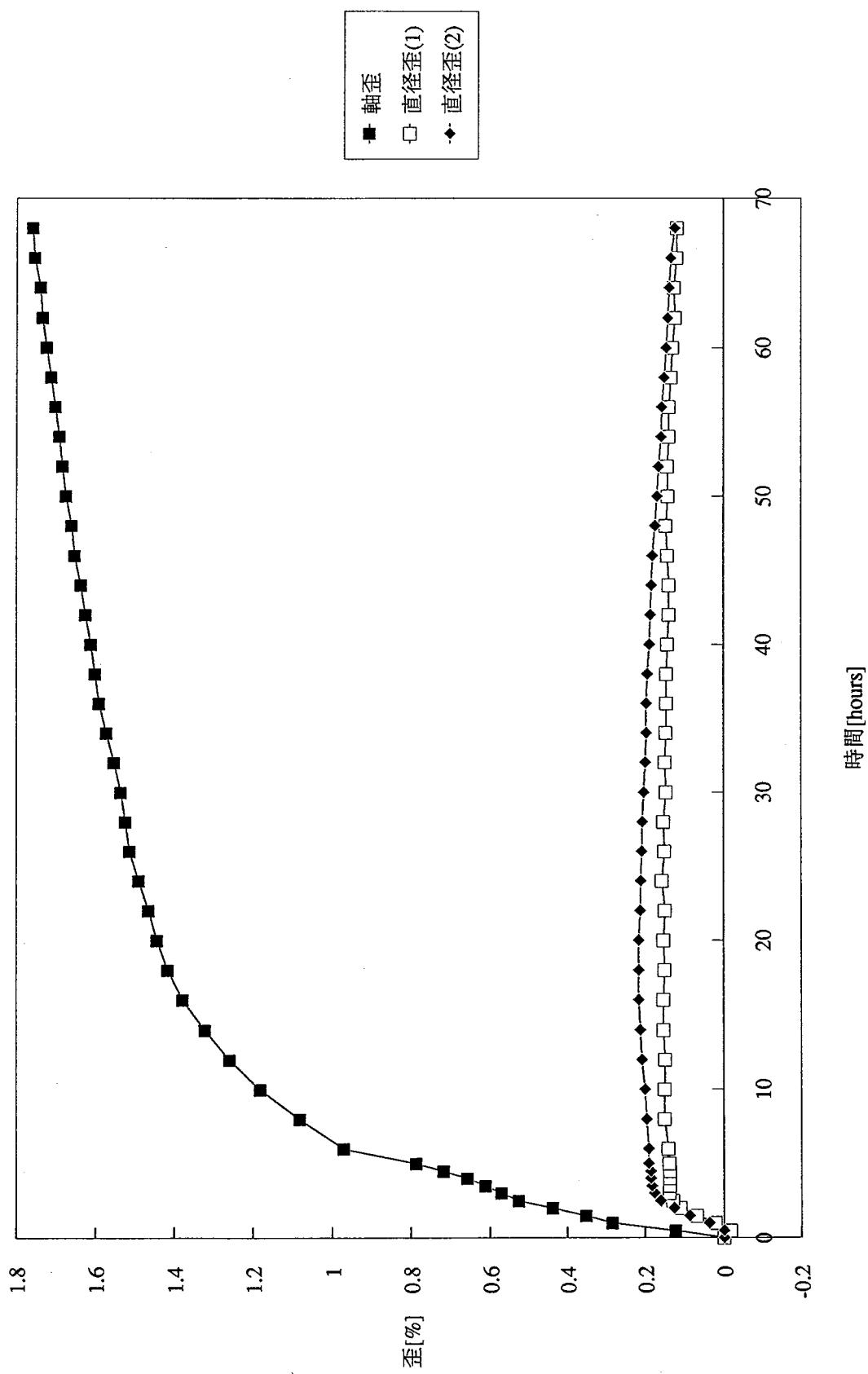


図2.3-5(9) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-9)

グラフ (歪) HE-10

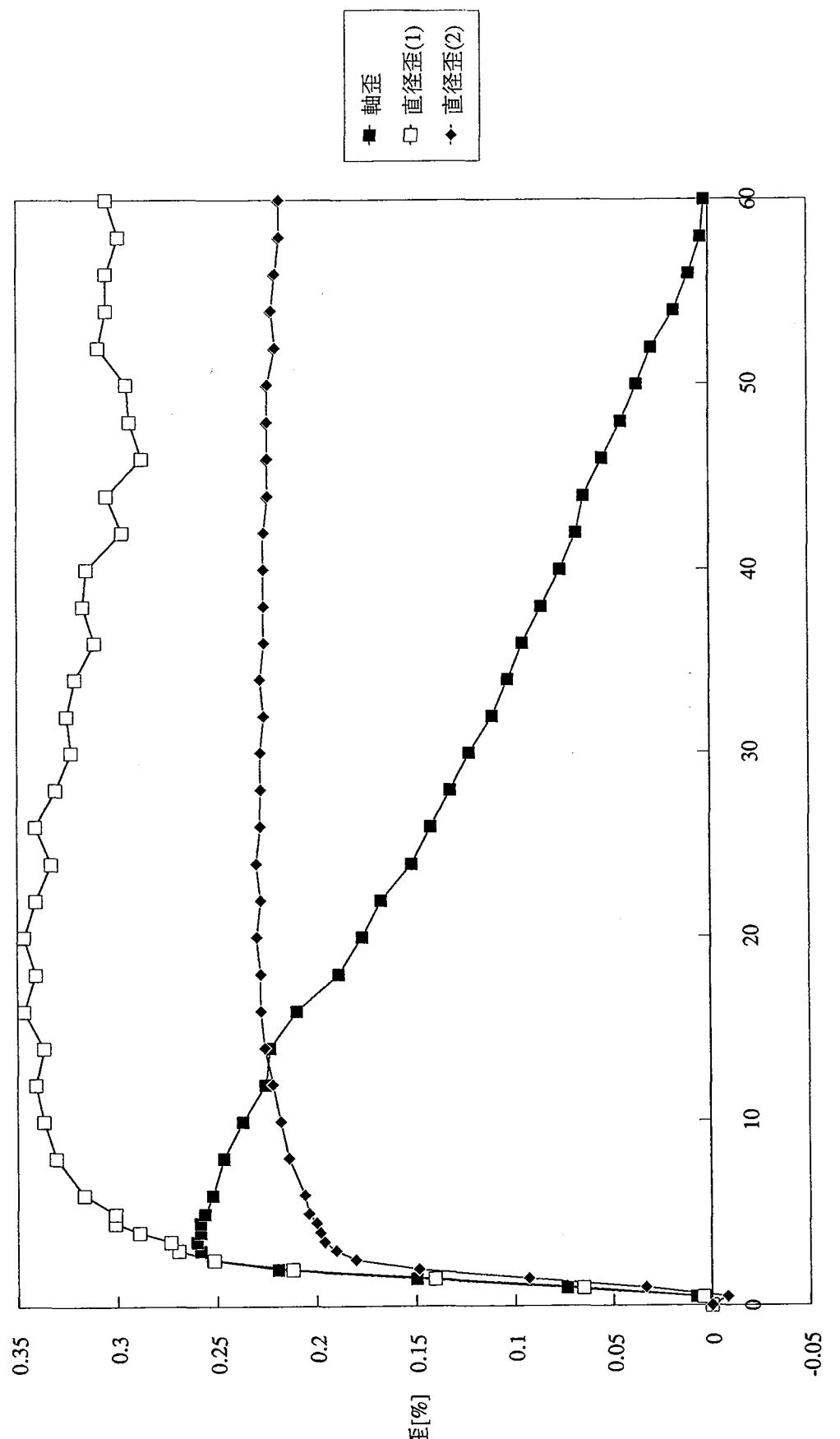


図2.3-5(10) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-10)

グラフ(歪) HE-11

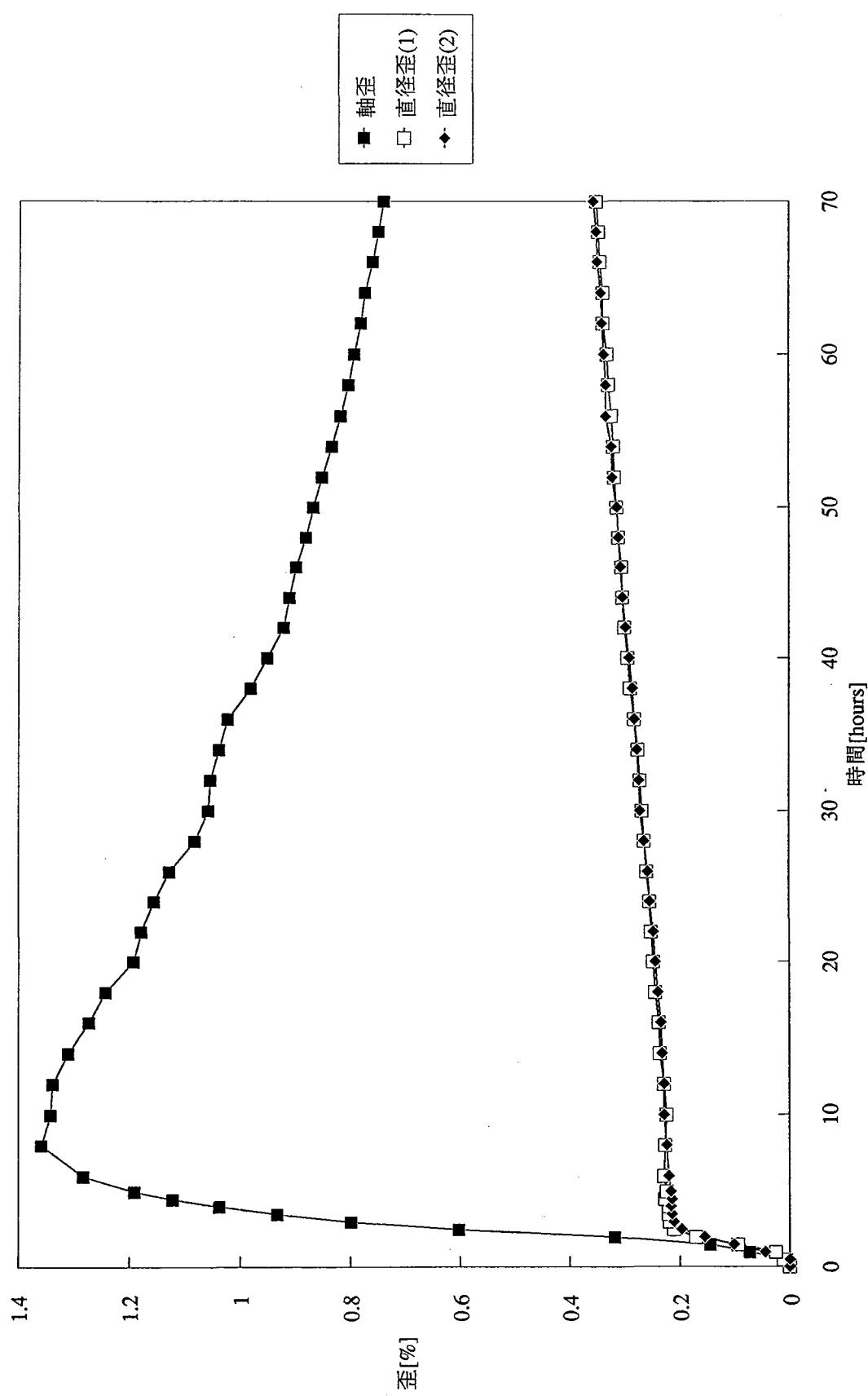


図2.3-5(11) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-11)

グラフ(歪) HE-12

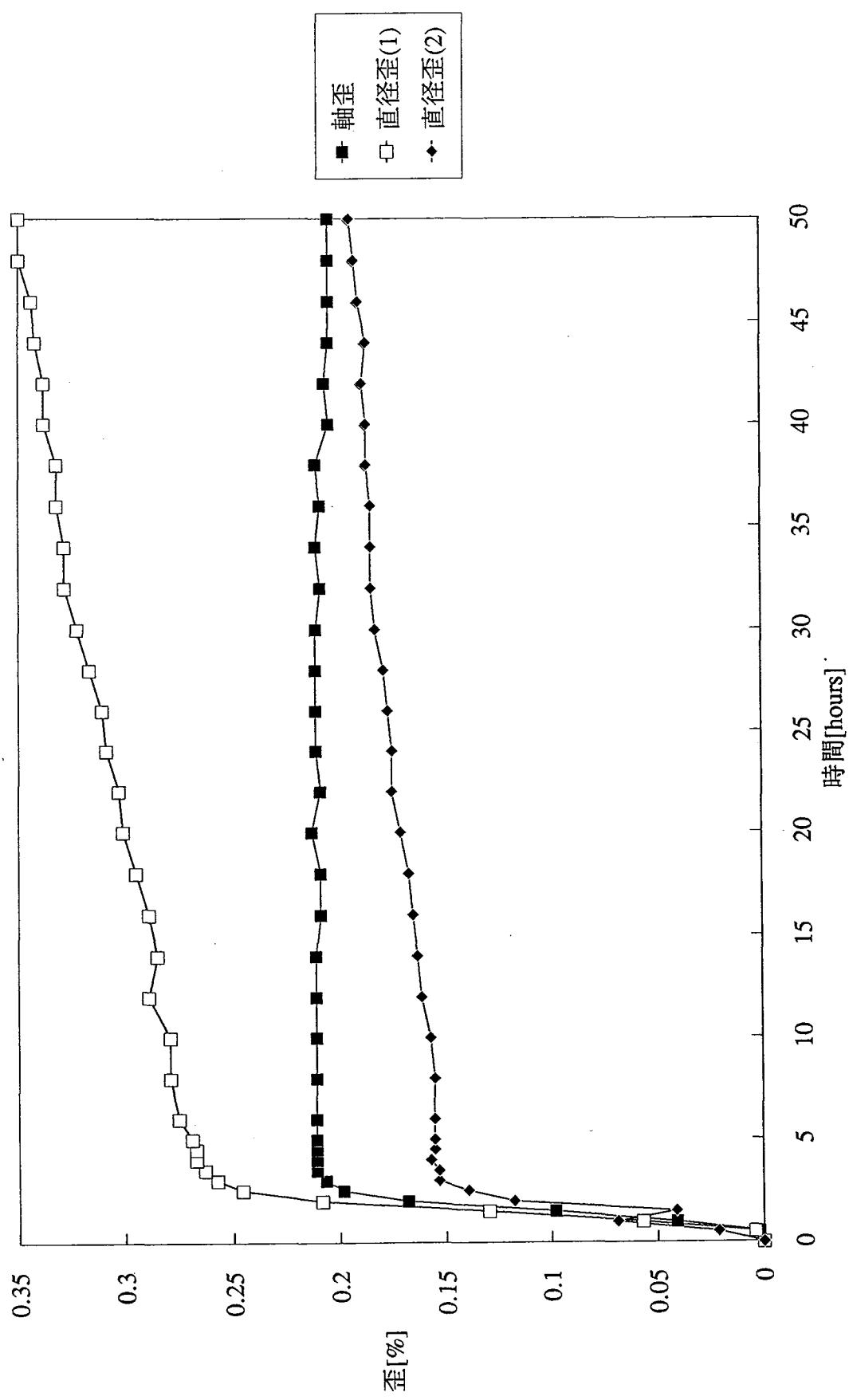


図2.3-5(12) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-12)

グラフ(歪) HE-13

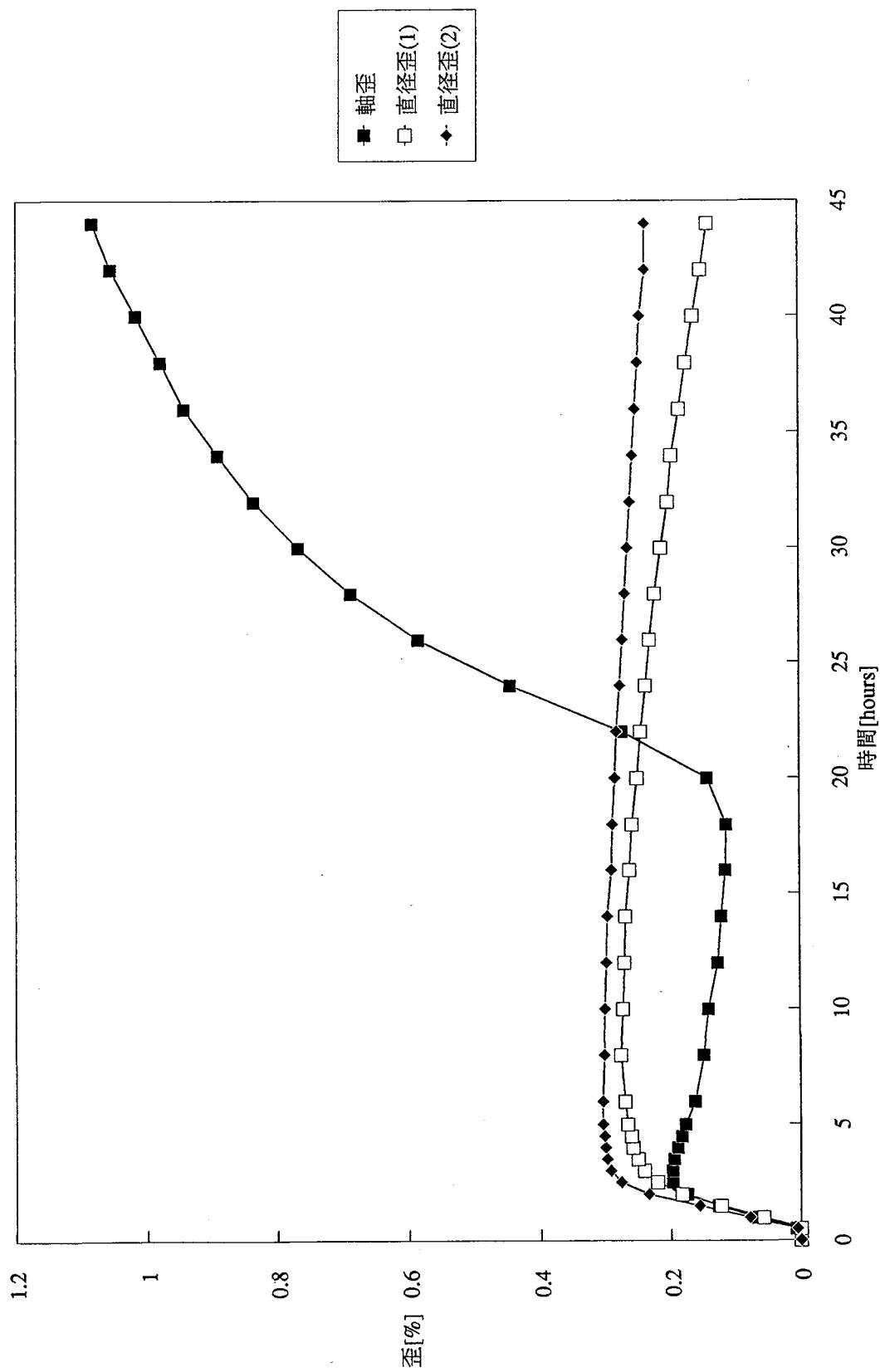
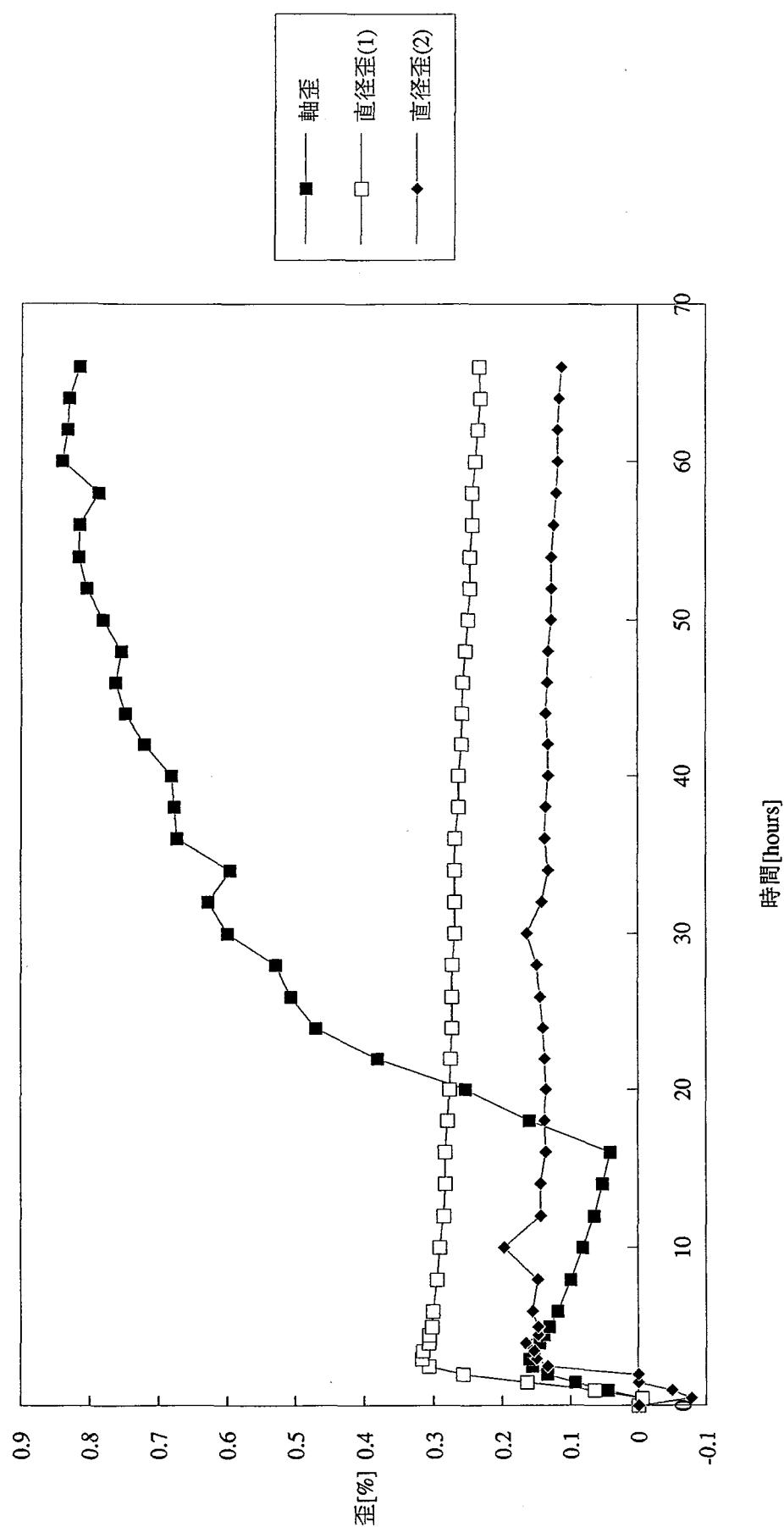


図2.3-5(13) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-13)

図2.3-5(14) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-14)



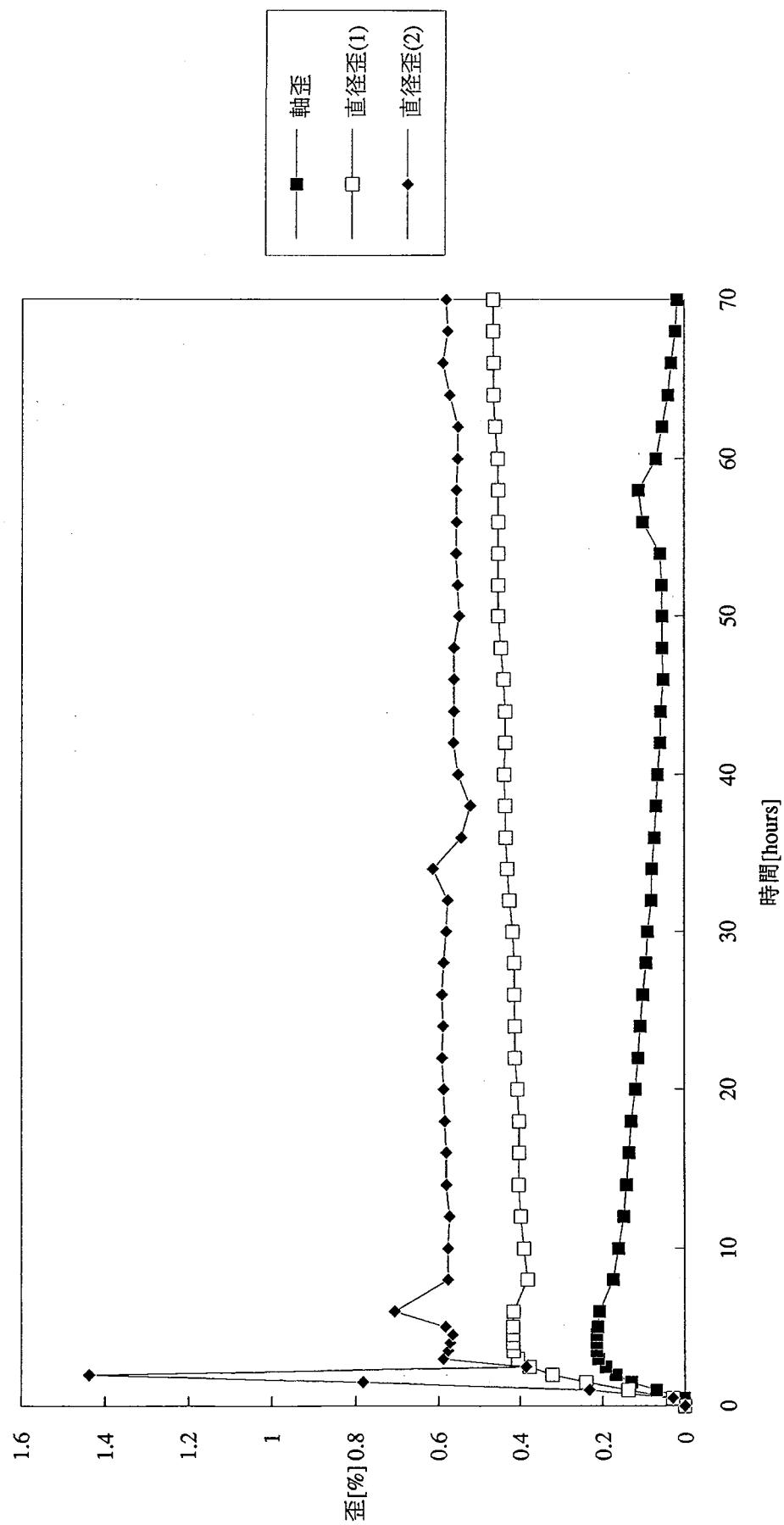
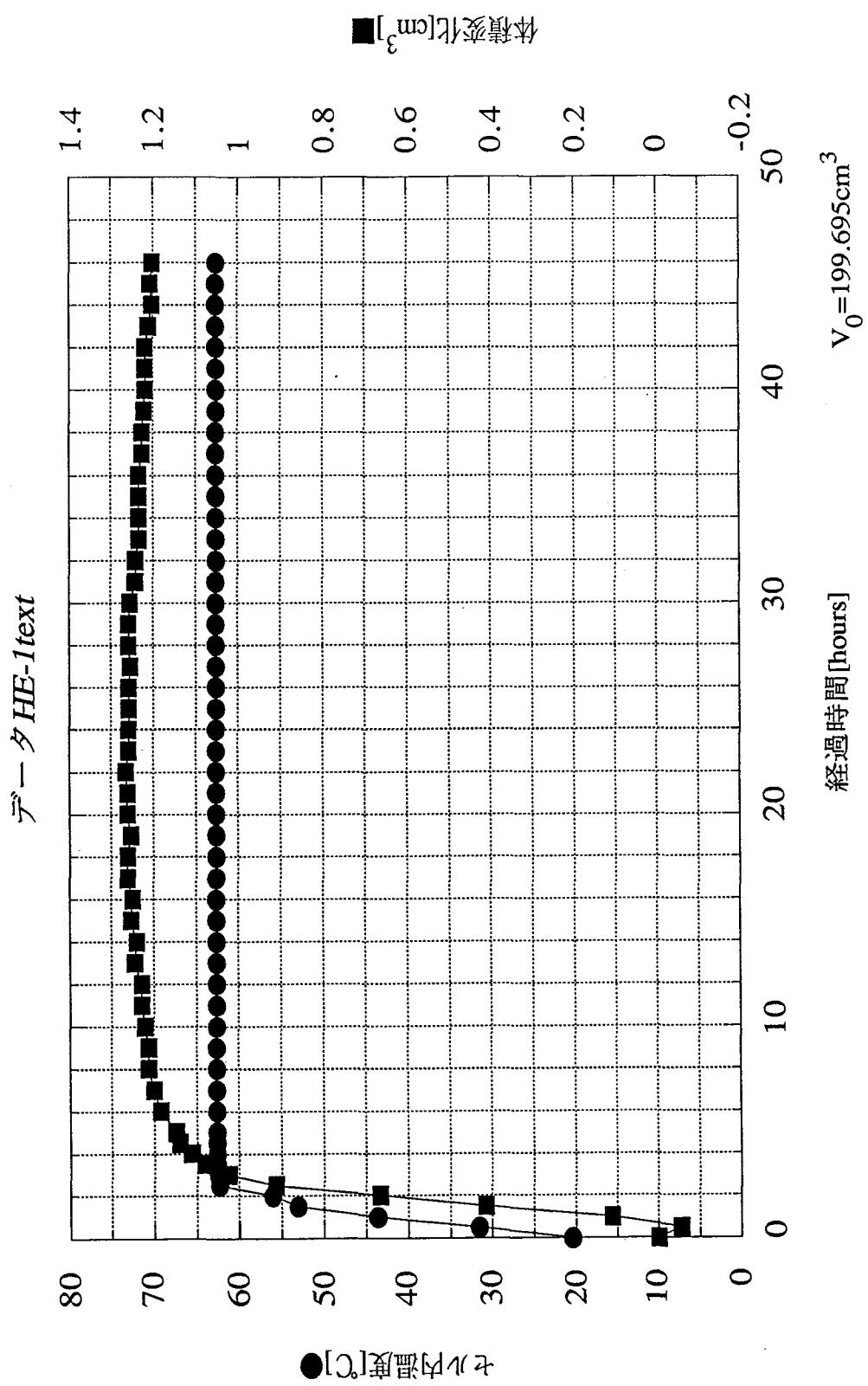


図2.3-5(15) 試料の軸方向及び半径方向の長さ変化 (HE-15)

図2.3-6(1) 試料の体積変化 (HE-1)



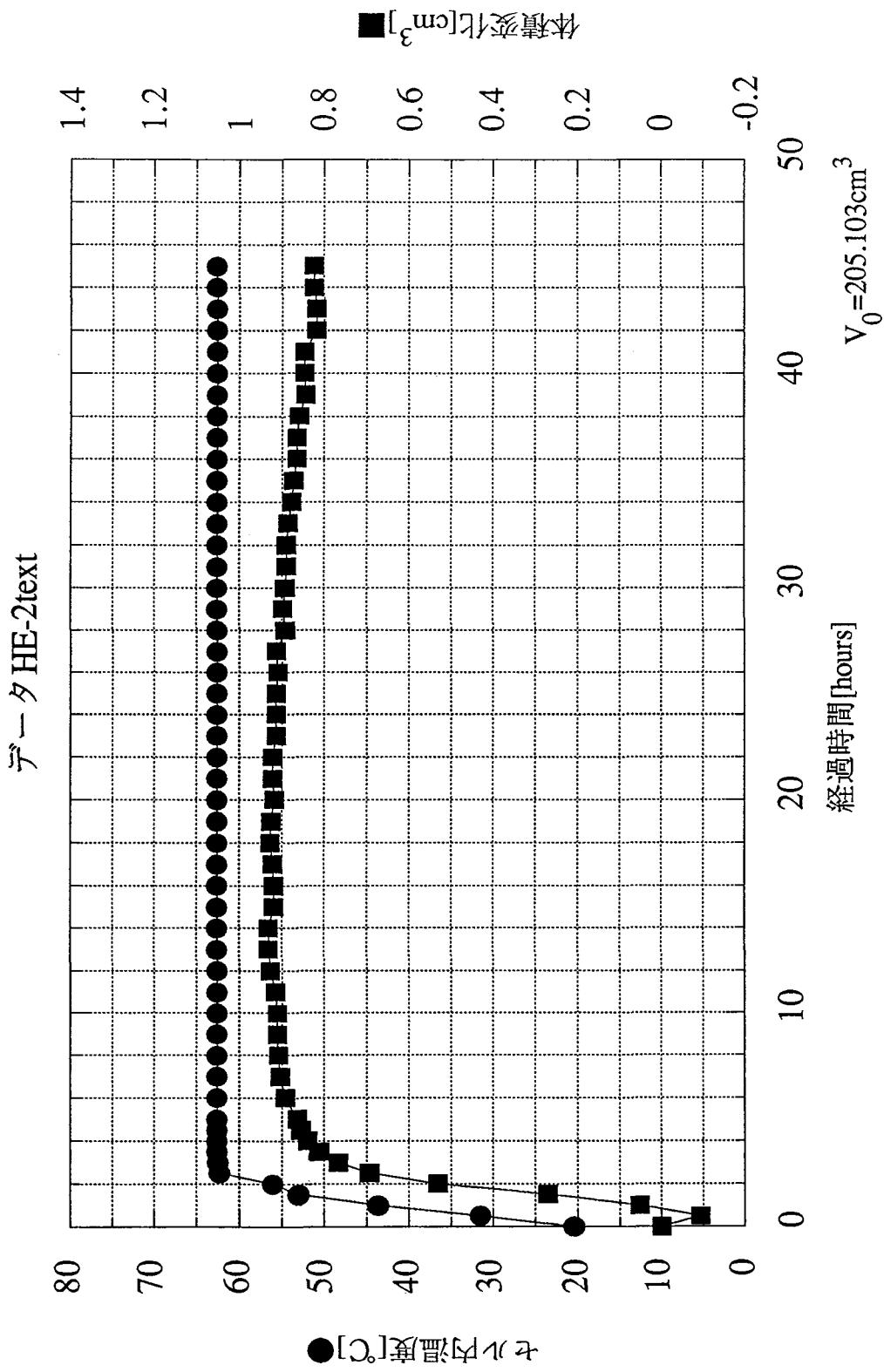
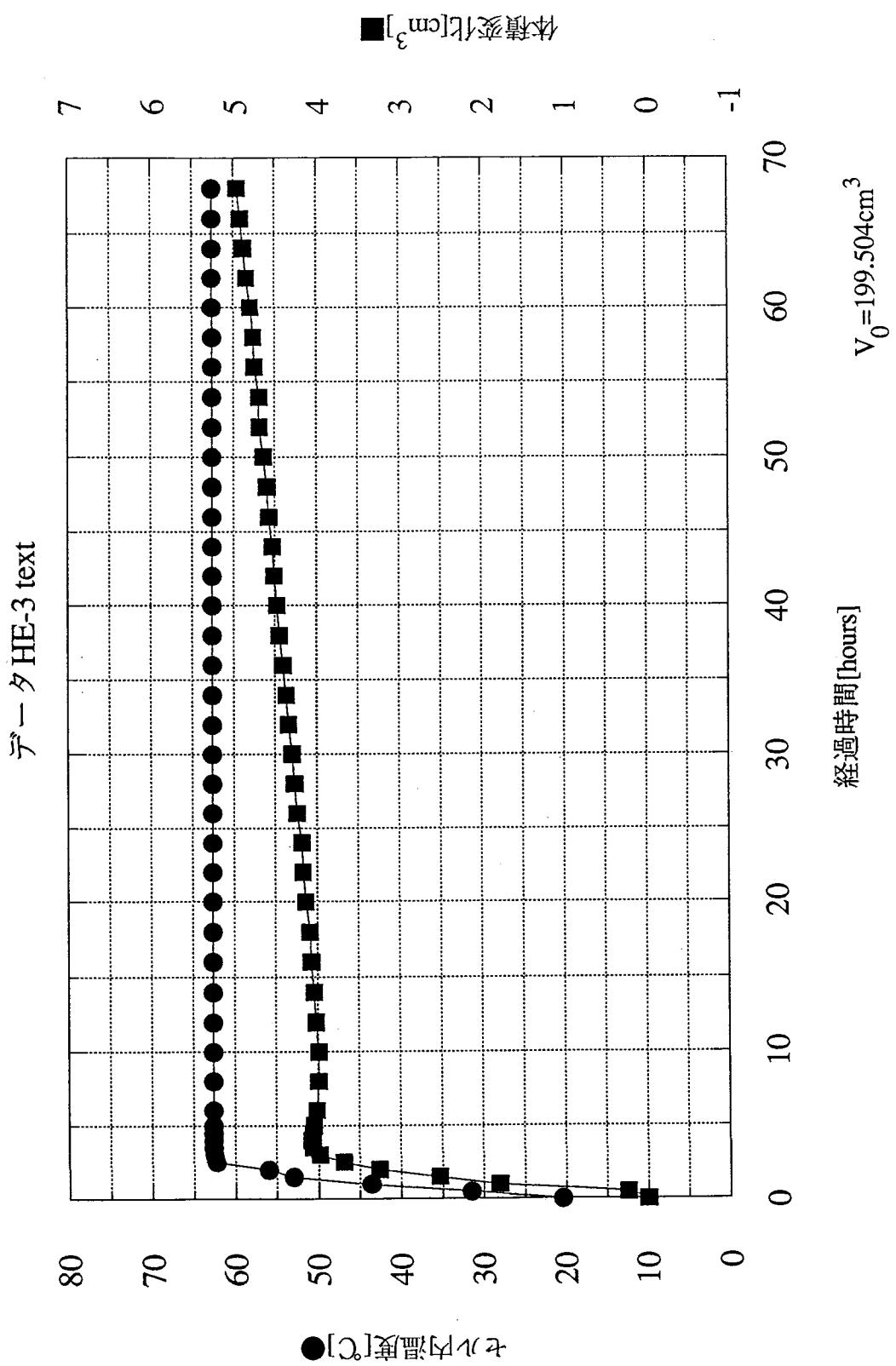


図2.3-6(2) 試料の体積変化 (HE-2)

図2.3-6(3) 試料の体積変化 (HE-3)



データ HE-4 text

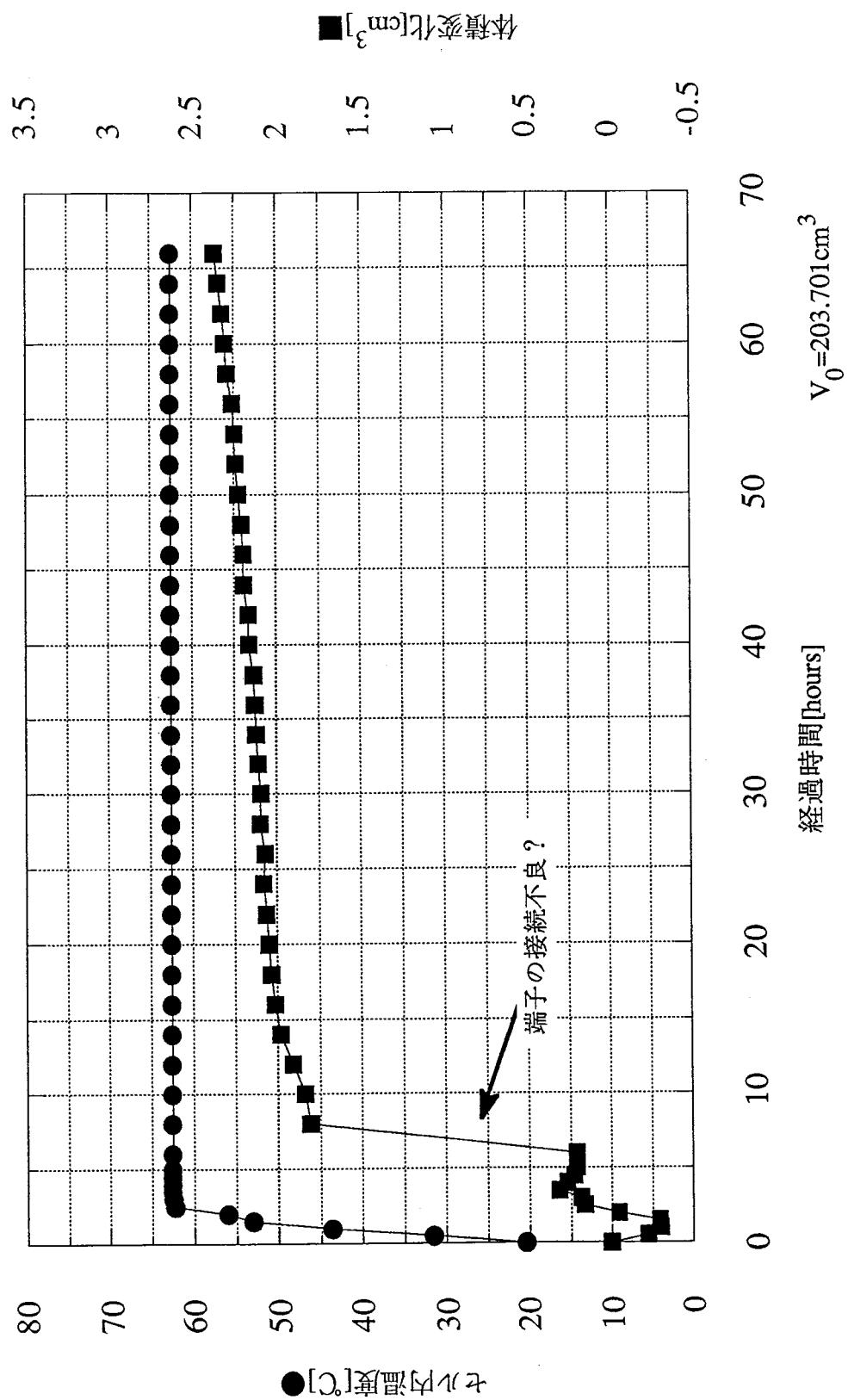
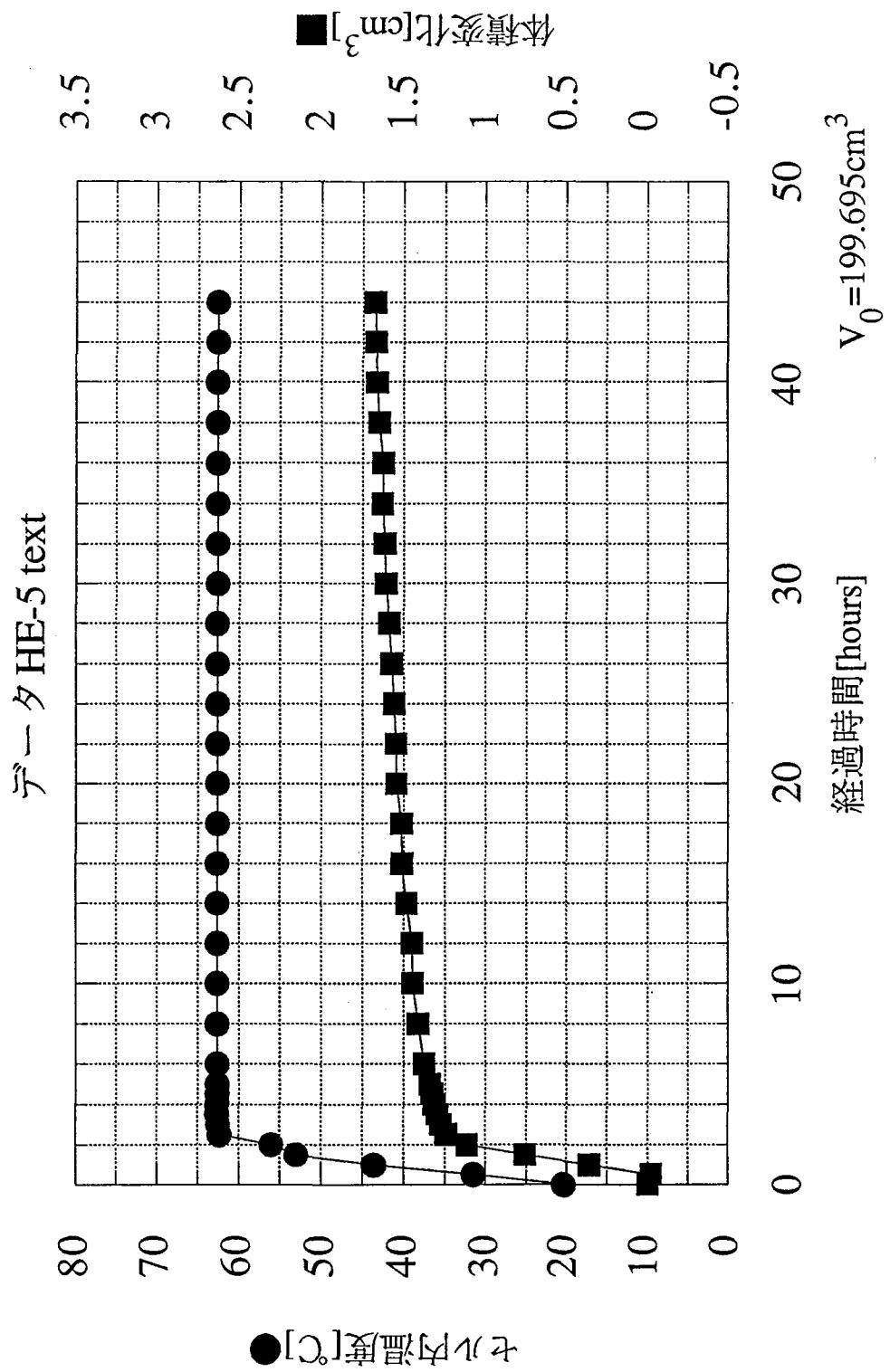


図2.3-6(4) 試料の体積変化 (HE-4)

図2.3-6(5) 試料の体積変化 (HE-5)



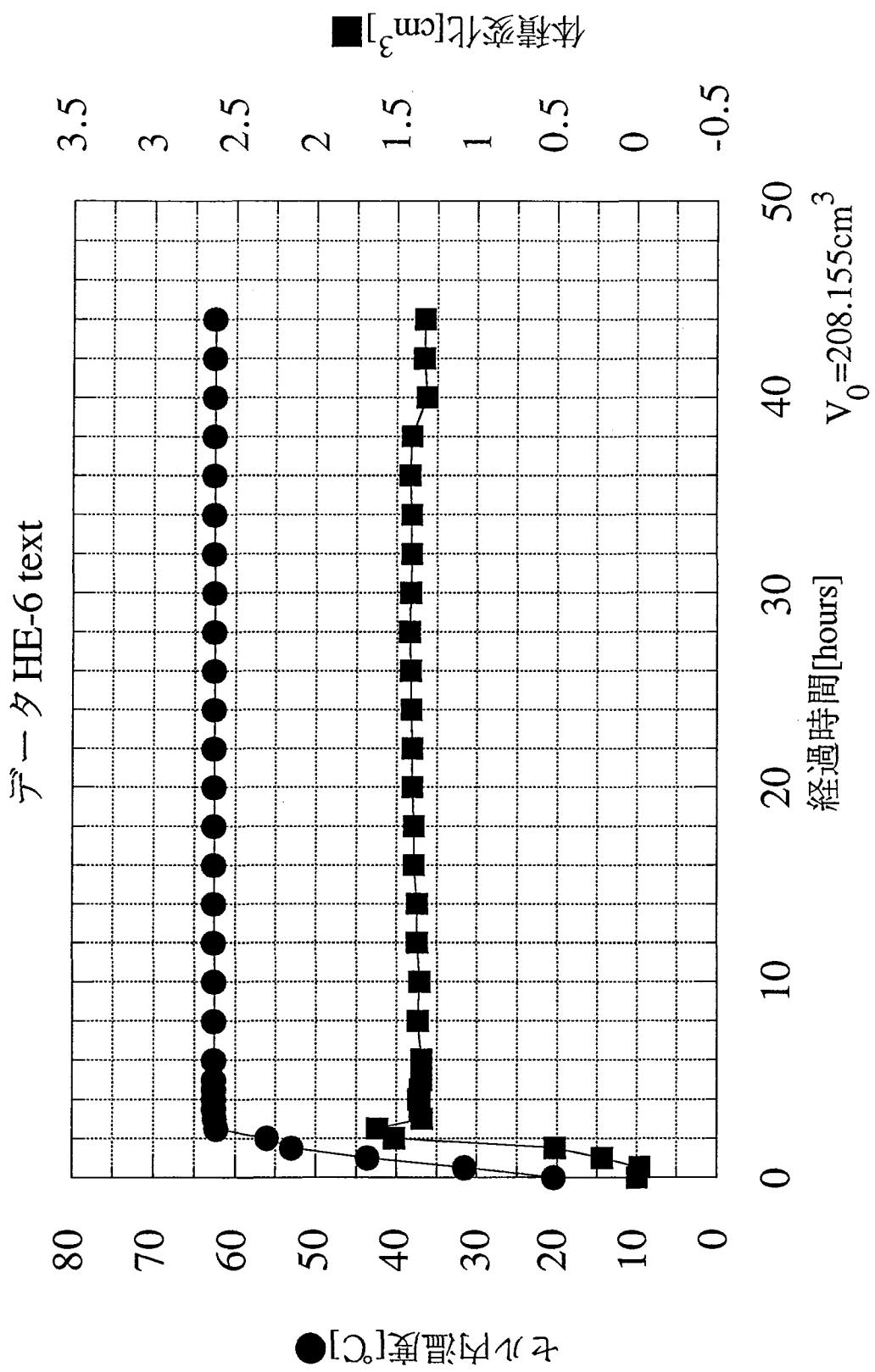


図2.3-6(6) 試料の体積変化 (HE-6)

データ HE-7text

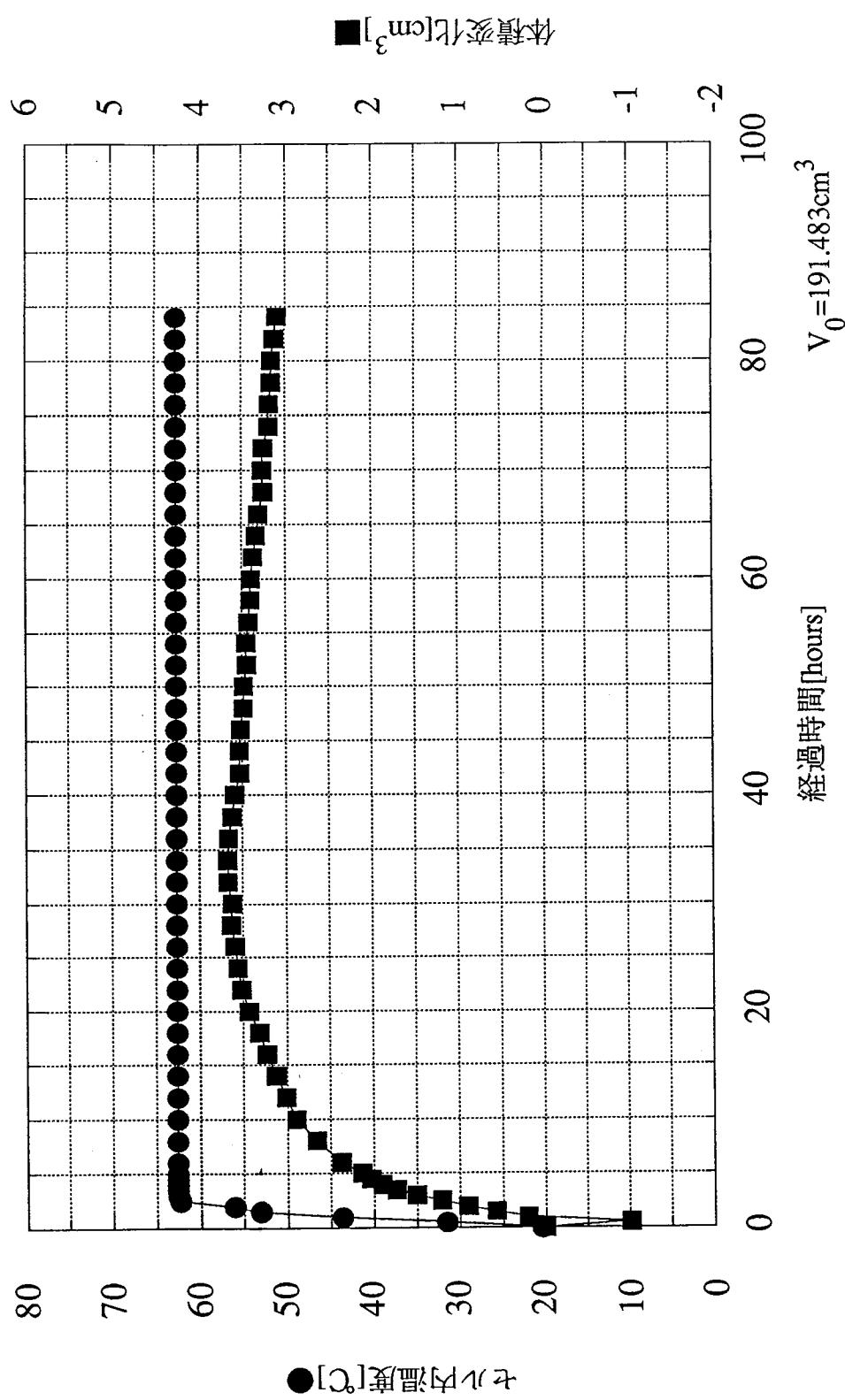
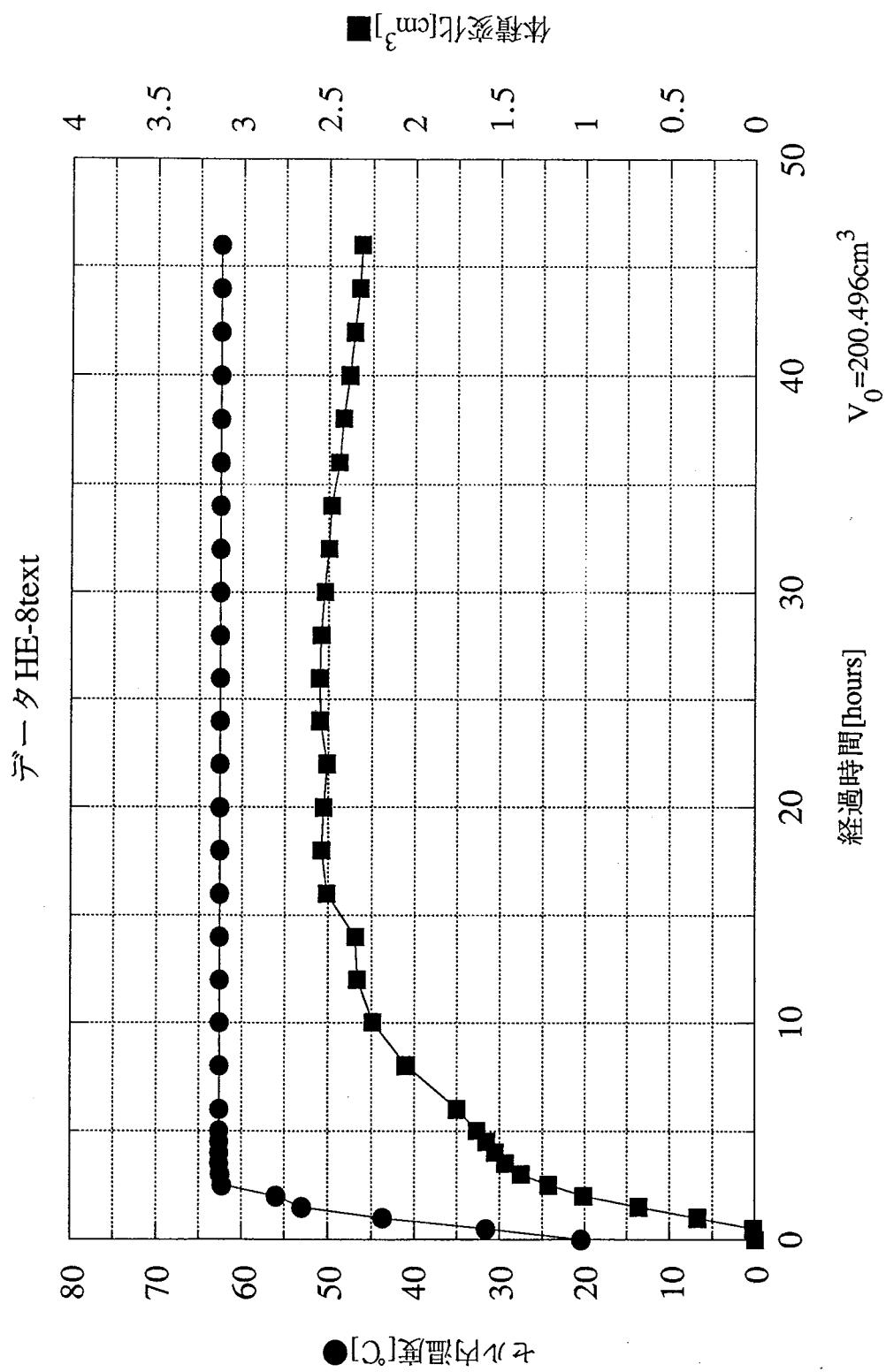


図2.3-6(8) 試料の体積変化 (HE-8)



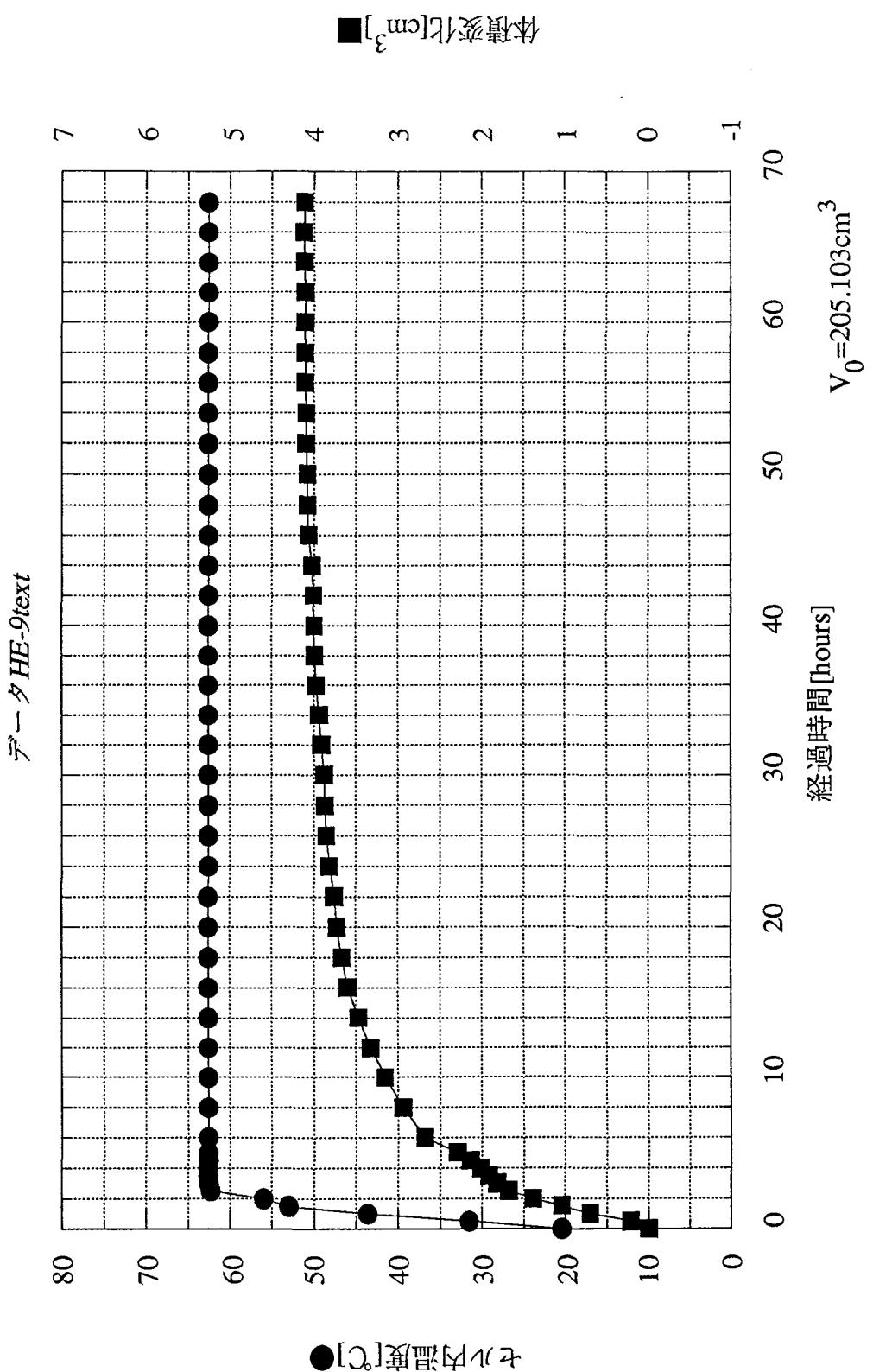


図2.3-6(9) 試料の体積変化 (HE-9)

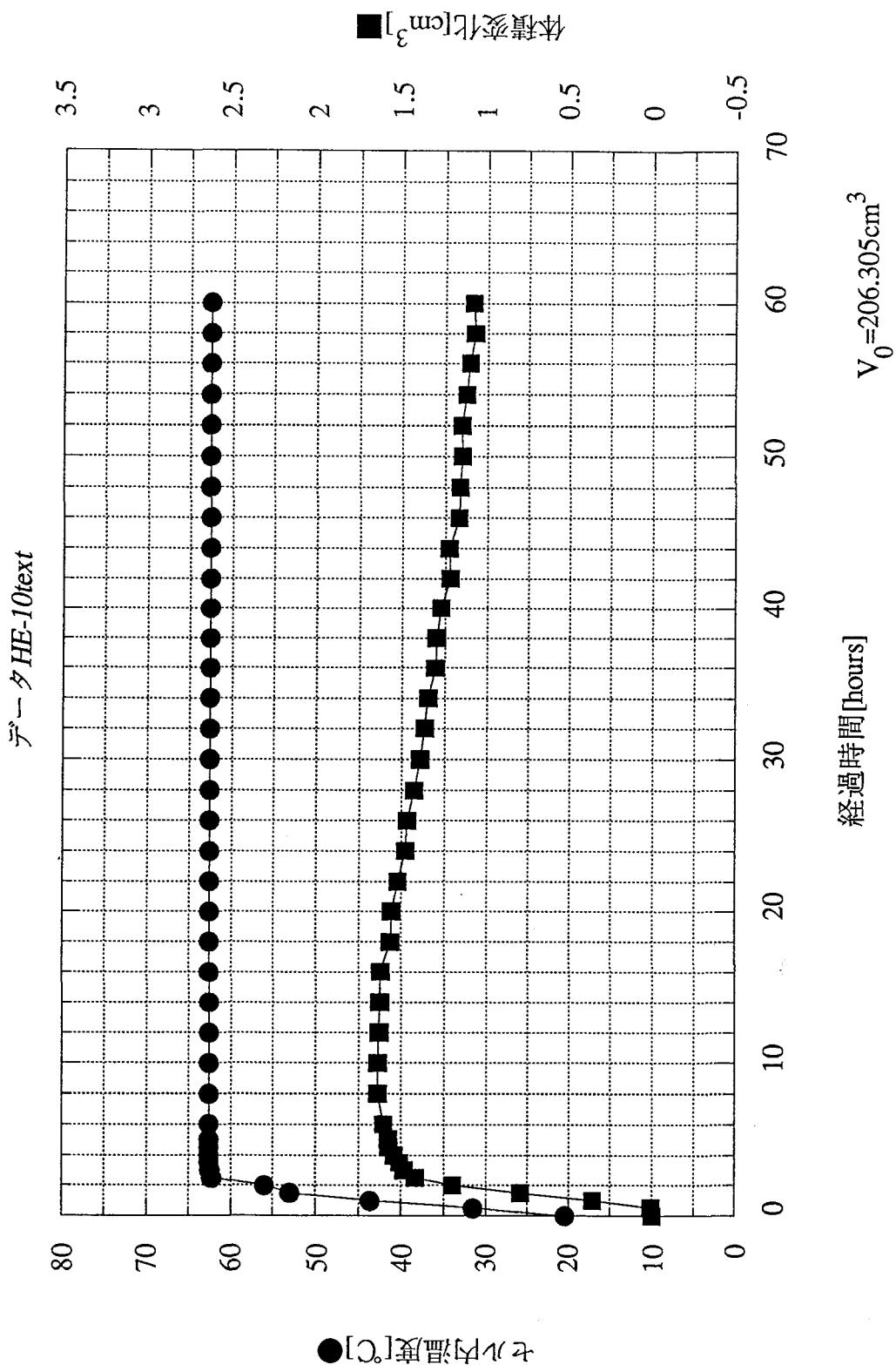


図2.3-6(10) 試料の体積変化 (HE-10)

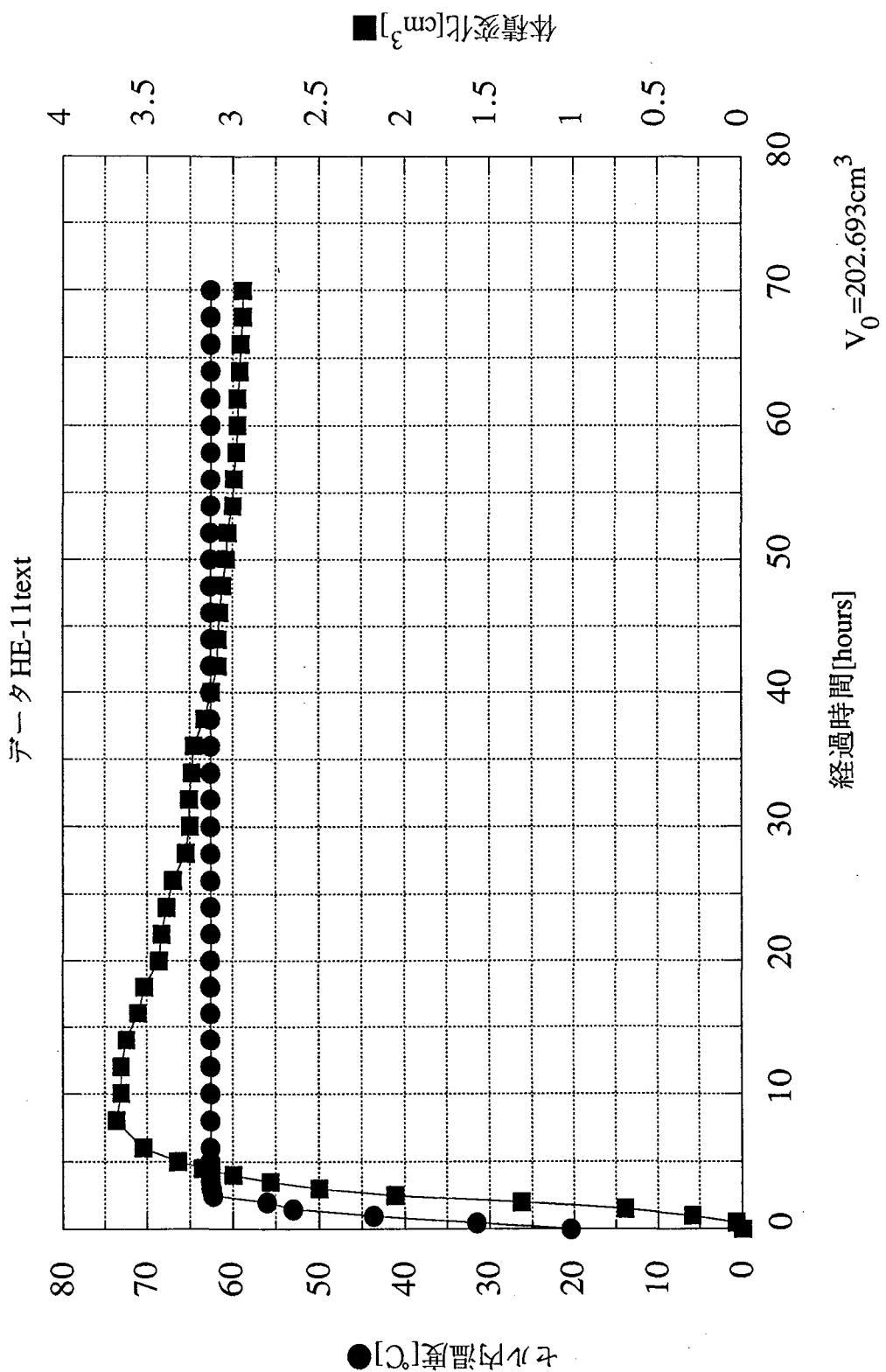
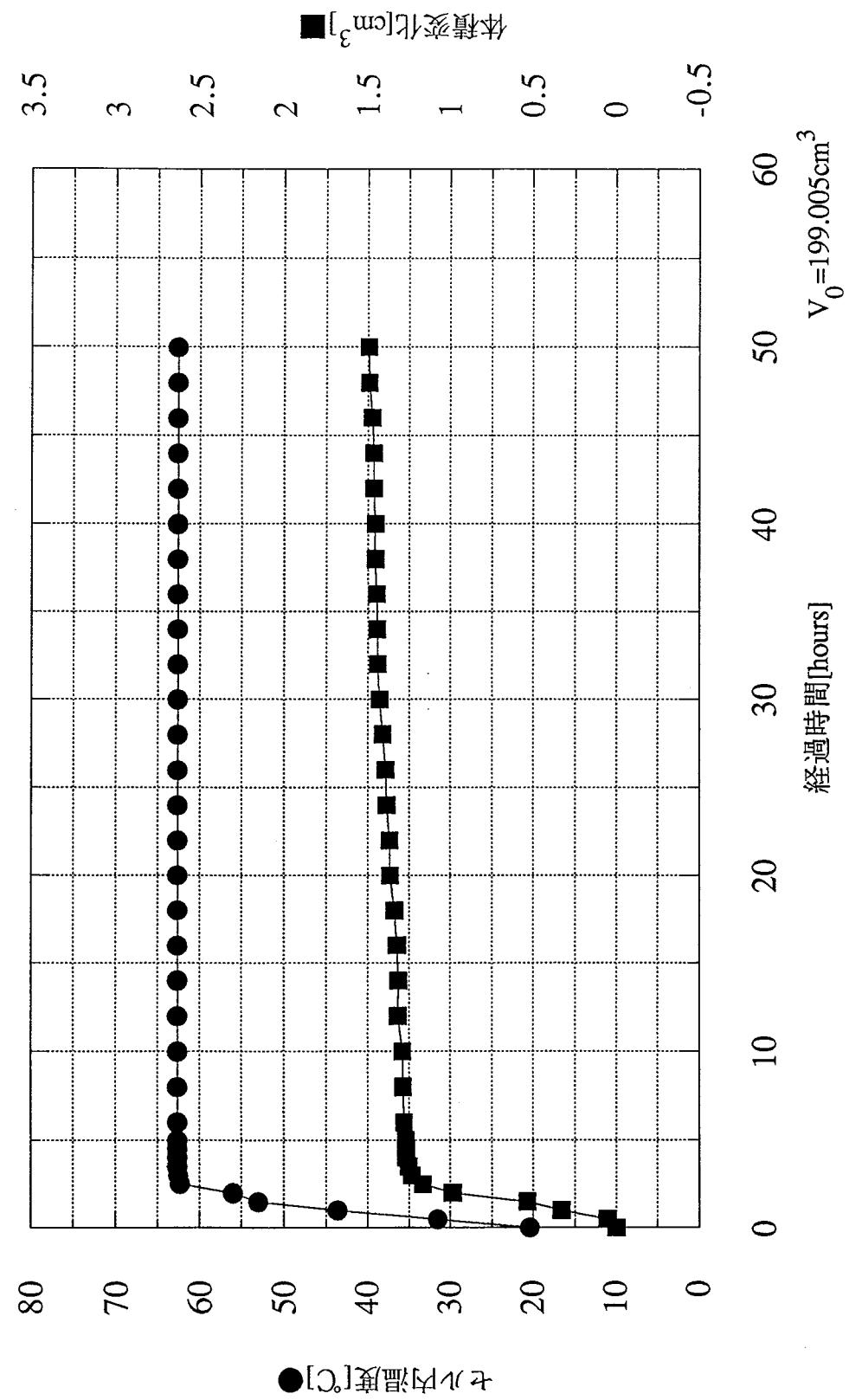


図2.3-6(11) 試料の体積変化 (HE-11)

データ HE-12 text



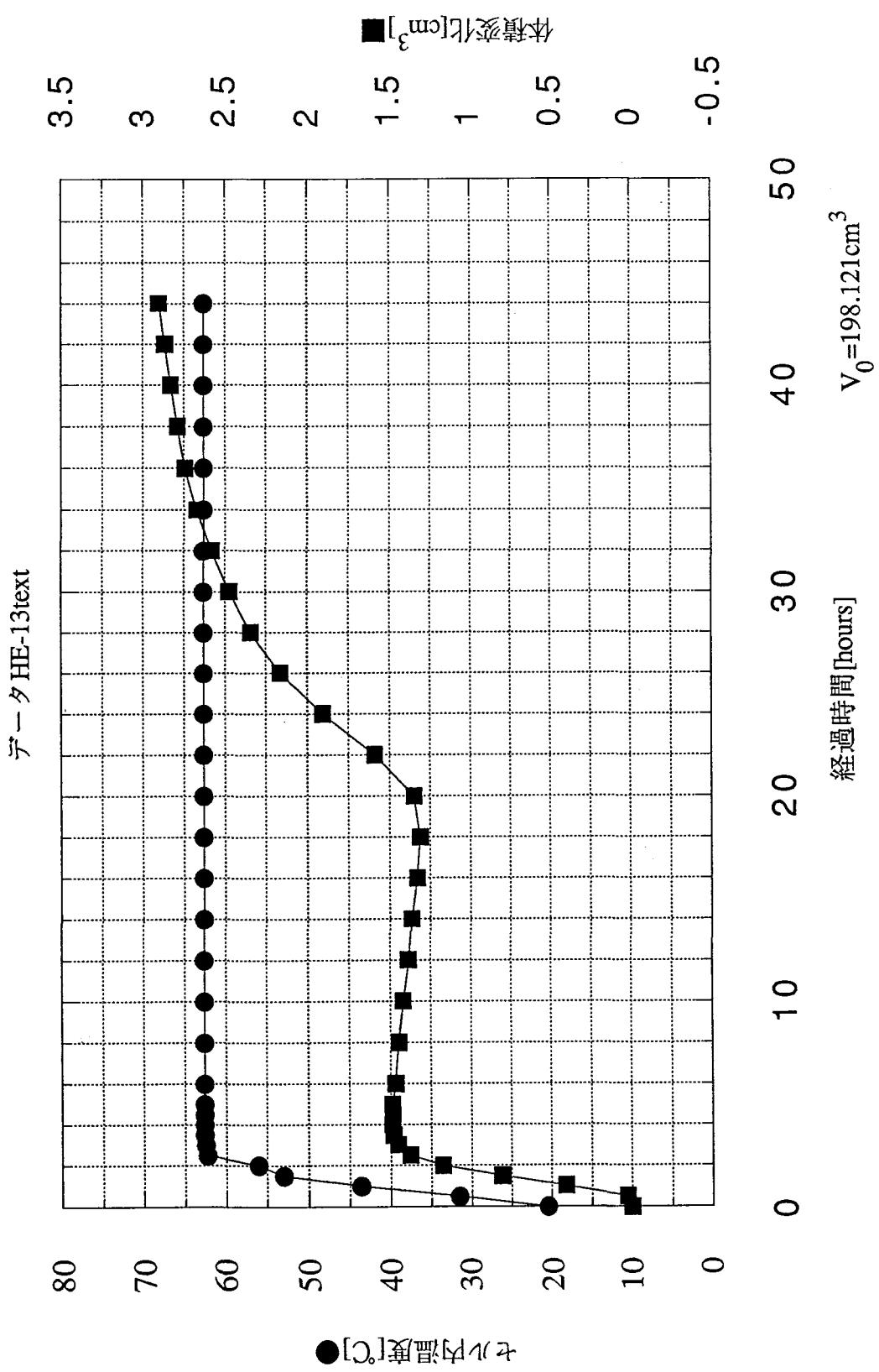


図2.3-6(13) 試料の体積変化 (HE-13)

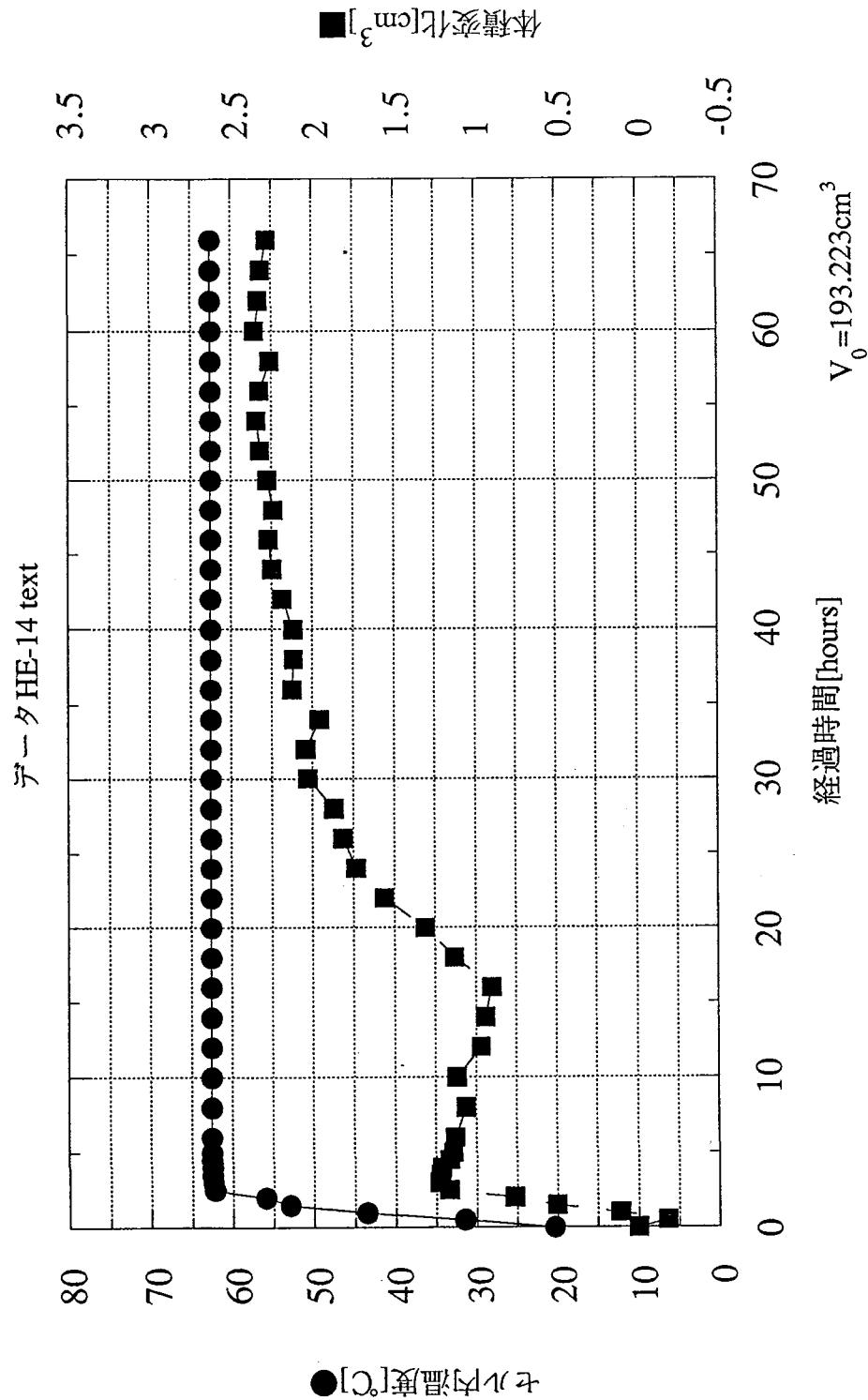


図2.3-6(14) 試料の体積変化 (HE-14)

データ HE-15 text

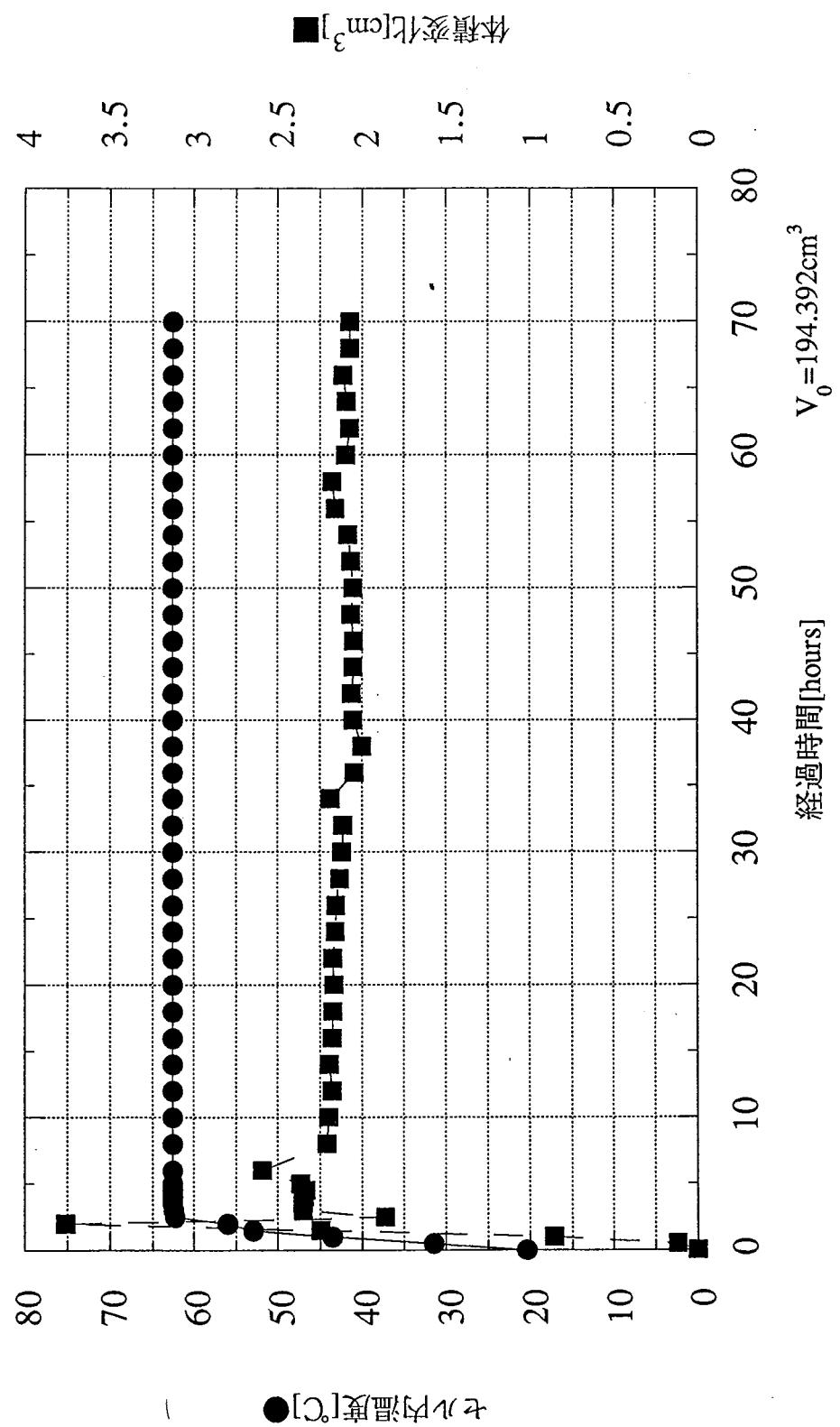


図2.3-6(15) 試料の体積変化 (HE-15)

2.3.6 热膨胀率

以上の測定データから温度変化による体積膨張率 β を求める。なお、 β は以下の式から求めた。

$$\beta = \frac{(\Delta V - \Delta V_{gum})}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta T} \quad (2.3.1)$$

ここで、 ΔV は温度上昇による体積変化、 ΔV_{gum} は試料に巻いたゴムスリーブの体積変化、 V_0 は試験開始前の試料の体積、 ΔT は試験前後の温度変化(40°C)である。表2.3.2にそれぞれの試料に対する V_0 、 ΔV 、 β 、また、測定前後の試料重量をまとめた。なお、ゴムスリーブは厚さ2mmで温度膨張率は弾性ゴムの値 $77 \times 10^{-6}[1/^\circ C]$ を用いると、

$$5.05 \cdot \pi \cdot 0.2 (77 \times 10^{-6} \times 3) \cdot 40 \approx 0.03 [cm^3] \quad (2.3.2)$$

となる。なお、軸方向の長さ変化にステンレスなどの材質の温度膨張が含まれているが、それぞれの材質がどのような温度分布の下でどれだけ伸びたか厳密に計算するのは困難であるため、 ΔV の計算から除外した。因みに、セル内に含まれるステンレス棒の長さは数cmであり、長さの変化は40°Cの温度変化で0.05mm(ステンレスの温度膨張率 $\alpha = 13.6 \times 10^{-6}$)以下となる。

sample	乾燥密度 g/cm3	含水比 %	空隙率 %	飽和度 %	ΔV cm3	V_0 cm3	β 1/°C	初期重さ g	終了重さ g
HE-1	1.62	9.2	40.0	37.3	1.25	199.695	1.53E-04	352.7	353.6
HE-2	1.56	9.2	42.2	34.0	0.92	205.103	1.08E-04	349.9	349.9
HE-3	1.81	9.2	33.0	50.5	4	199.504	4.97E-04	395.3	407.5
HE-4	1.78	9.2	34.1	48.1	2	203.701	2.42E-04	394.7	396.9
HE-5	1.99	9.2	26.3	69.6	1.6	199.695	1.97E-04	434.2	434.8
HE-6	1.91	9.2	29.3	60.1	1.4	208.155	1.65E-04	433.1	433.9
HE-7	1.52	28.4	43.7	98.8	3.5	191.483	4.53E-04	371.6	366.9
HE-8	1.51	28.4	44.1	97.3	2.5	200.496	3.08E-04	388.9	384.8
HE-9	1.74	19.8	35.6	96.9	4	205.103	4.84E-04	427.0	425.4
HE-10	1.76	19.8	34.8	100.1	1.6	206.305	1.90E-04	433.2	431.8
HE-11	2.00	13.0	25.9	100.3	3.7	202.693	4.53E-04	455.9	456.9
HE-12	2.01	13.0	25.6	102.2	1.3	199.005	1.60E-04	450.6	450.4
HE-13	1.73	18.9	35.9	91.0	1.45	198.121	1.79E-04	406.8	403.6
HE-14	1.77	18.9	34.4	97.1	1.2	193.223	1.51E-04	406.2	403.0
HE-15	1.77	18.9	34.4	97.1	1.2	194.392	1.50E-04	406.5	404.4

表2.3.2 圧縮固化ペントナイトの体積膨張率

2.3.7 考察

表2.3-2から言えることは、

- a) 圧縮固化ペントナイトの熱膨張率は飽和度依存性が大きい。
- b) 乾燥密度が1.6~2.0程度の範囲では、温度膨張率との依存性は認められない。
- c) 飽和した圧縮固化ペントナイトの熱膨張率は 10^{-4} の数倍の大きさである。
- d) 線膨張の割合は圧縮固化する方向に大きく依存し、圧縮固化の方向により大きく伸びる。

である。得られたデータについて他の文献と比較してみる。

SKB technical report 88-30[2]では飽和した固化Naペントナイト(MX-80)の熱膨張率の測定結果について記述している。それによると、20°Cから60°Cの温度変化において、表2.3.3に示される結果を得ている。なお、この測定では試料の大きさは $\phi 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ であり、今回の測定試料の半分の大きさであるが、試料にゴムスリーブを巻いたりして水分の逃げがないようにした点などは同じ条件であると思われる。

飽和密度 g/cm ³	乾燥密度 g/cm ³	間隙比 %	熱膨張率[1/°C]	
			α	α_w
1.8	1.24	125	3.1E-04	5.6E-04
1.9	1.56	80	3.0E-04	6.8E-04
2	1.71	64	2.2E-04	5.6E-04

表2.3.3 MX-80飽和固化体の熱膨張率

ここで、 α_w は間隙はすべて水で満たされているとして、以下の式から求めた水の熱膨張率である。

$$\alpha_w = \alpha \cdot \frac{1+e}{e} \quad (2.3.3)$$

今回の測定結果と上のデータと比較してみると、オーダー的には共に 10^{-4} で、大きな差はないといえる。また、今回の飽和試料の測定データから同様に α_w を計算してみると、

$7 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ となり、文献中で述べられている傾向「同じ温度範囲で求めた水の熱膨張率は 3.8×10^{-4} であり、間隙水の膨張率 α_w はこれよりも50%程度大きい」とほぼ同じ結果となっている。

また、SKBテクニカルレポート90-45[3]では緩衝材の熱構造的な応答を以下の3つに分けて考察している。

- 1) 間隙水の熱膨張
- 2) 固体の熱膨張
- 3) 構造の変化（温度による膨潤圧の発生）

今後はこれらの応答を考慮できるような試験方法が必要である。

2.3.8 結言

圧縮固化ペントナイトの温度膨張率の測定を行ない、その大きさが 10^{-4} オーダーであり、飽和度が大きくなるに従って大きくなることがわかった。また圧縮固化の方法が熱膨張の性状に大きく影響することもわかった。これについてはその影響程度と合わせて考え、必要ならば、緩衝材の生産ラインになんらかの工程を考慮する等の検討が必要であろう。また、測定で確認されたような水分の再分布による局所的な膨潤の発生は、過渡現象を明らかにするうえで今後確認を行なっていく必要がある。

なお、今回の測定を行うに当たり、当初は飽和試料の熱膨張率の測定は膨潤圧相当の拘束圧を作成させた状態で測定することとなっていたが、拘束圧を作成するためにはシリコンオイルはセル内に封じ込めておく（ドレンは閉じておく）必要があり、この条件で温度を上昇させるとオイルの熱膨張で試料自身の形状変化がわからなくなってしまうといった現象が確認できた。比較的大きな拘束圧にさらされる処分環境の下での熱膨張率を測定するためには、新しい試験装置の設計から始める必要がある。

【参考文献】

- [1]熱分析実験技術入門 第2集 長崎誠三監修 科学技術社
- [2]L.Börgesson et al. ; Rheological properties of sodium smectite clay ; SKB Technical Report 88-30 (1988)
- [3]L.Börgesson ; Interim report on the laboratory and theoretical work in modelling the drained and undrained behavior of buffer materials; SKB Technical Report 90-45 (1990)

3. シーリング概念の構築

3.1 概念構築の考え方

シーリングの概念を構築するに際しては、我が国の条件として地質環境が多岐にわたるものであることや地層処分の対象となる地質環境が特定されていないことなどから、堆積岩系岩盤と結晶質岩系岩盤のそれぞれについて考慮されなければならない。また、処分形態についても坑道定置方式と処分孔定置方式の2種類が候補となっていることから、それぞれに対応するシーリングシステムを幅広く考える必要がある。

ここではこれらの要件を踏まえるとともに、現状の知見等から前提条件を以下のように設定しシーリングシステムの概念を構築する。

① シーリング材料

候補材料としてはセメント系材料と粘土系材料の2種類が挙がっているが、前者の材料については化学的影響の危惧からその使用を極力避けることとし、粘土系の複合材料を当面の基本材料とする。

② 覆工・支保の取扱い

結晶質岩系岩盤については、空洞安定解析より覆工・支保工なし、もしくは軽微な支保工で、その安定性が図られるとの結果から、閉鎖前に覆工・支保を撤去することを基本とする。

堆積岩系岩盤については、空洞の安定性が図られないことから覆工・支保は残したまま閉鎖することとする。後者の場合、特にコンクリートあるいは、鋼材とベンタナイトとの化学的相互作用を考慮する必要がある。

③ 緩み領域の対応

立坑の緩み領域の改善については、ある間隔でプラグ（プラグの周囲には、その性能を補完するという観点からグラウトが施される）を設置することにより核種の移行遅延効果を高めることができるとの予備解析の結果から、本部位については全断面でのグラウトは実施しないこととする。一方、主要・連絡坑道及び処分坑道周辺における緩み領域については、坑道全域にわたりグラウトを施工するか否かは今後の研究課題であるものの、ここでは処分坑道についてのみ全断面グラウトを施すことを基本とする。

④ 亀裂、断層、破碎帯の対応

これらの部位に対しては基本的にグラウトを施工することとする。

⑤ 坑道定置方式の場合の緩衝材はらみだしの対応

坑道定置方式においては、処分坑道に緩衝材が設置されることになり、操業期間中（関し期間を含める）は連絡坑道は閉鎖されず存在することから、緩衝材の膨潤による連絡坑道部へのはらみだしが危惧される。したがって、本期間中のみを対象とした借りコンクリートプラグを設置することとする。（連絡坑道閉鎖時においては撤去される）

⑥ 立坑坑口部の処置

立坑坑口部については、埋戻し材の膨潤による流出や地表水との直接的接触及び人間の侵入等を阻止するため、コンクリートプラグを設置する。

個々では廃棄体からの距離が十分離れていることからその影響が極めて少ないこと、また膨潤圧に耐えうる力学的強度を有する必要があることなどからコンクリートをしようすることとした。

以上の要件及び図-3.1に示す地層処分におけるバックフィル材料の要求性能をふまえて、部位毎のシーリング概念の考え方及び問題点等を表-3.1にまとめて示す。

これらの前提条件は、データの少ない現状での予測解析や定性的検討などから決定したものであり、あくまでも第一次の概念であることから今後の研究開発の進展に応じた改善が必要である。

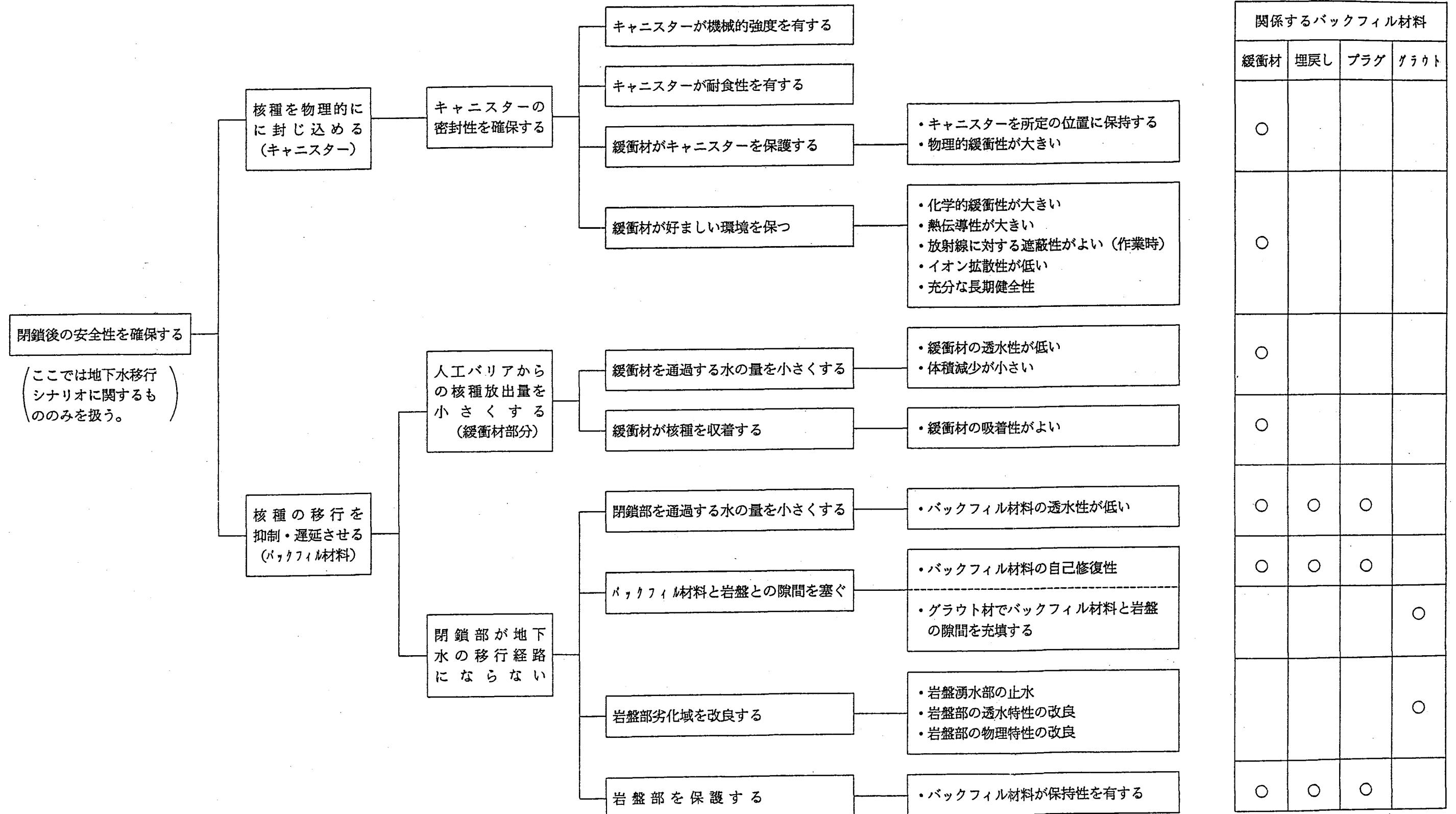


図-3.1 地層処分におけるバックフィル材料の要求性能

表-3. 1(1) シーリング概念の構築

対象部位	概念		問題点及び今後の課題
	基本的な考え方	概念図	
1. 立坑 (1) 坑口部	<p>① 埋戻し材の膨潤によるはらみ出し防止及び地表水の埋戻し材への直接流入を防ぐためにプラグを設置し、カーテングラウトを施す。</p> <p>② プラグ材料としては、処分区画からの距離が十分確保されていることからコンクリートを、またグラウトにはセメント系材料を使用する。</p> <p>③ コンクリートプラグは、地表環境に直接曝されないように覆土する。なお、処分場位置を示すためのメモリアルは別途考慮する。</p> <p>④ 埋戻し方法としては、粘土系の粒状複合材料（複合ベントナイト）を転圧締めにより施工することを基本とする。</p> <p>⑤ 概念図に示すように、対象岩種に応じ若干概念が異なるが、これは周辺岩盤と埋戻し部との境界の密着性に対して対象岩盤の性状を考慮した結果である。すなわち、結晶質岩系岩盤では堆積岩系岩盤に比べ、長期的挙動の面で立坑に作用する地圧の増大は少ないと思われる所以、立坑壁面に高圧縮ベントナイトブロック（固化ベントナイト）を定置して積極的に密着性の向上を図る。</p> <p>⑥ 堆積岩系岩盤において、掘削時の力学的安定性確保のために設置されるコンクリート覆工は、処分区画からの距離が十分確保されていることから撤去しない。また、結晶質岩系岩盤においては、力学的安定性の検討結果より無支保での掘削が可能と考える。</p>		<p>① 坑口付近の地盤は透水性が大きいことが予想され、埋戻し材料も比較的早い時期に膨潤するものと思われる。この膨潤による影響を把握し、プラグの構造を検討するとともに、膨潤後の長期的シール機能の予測が必要である。</p> <p>② コンクリートプラグの長期健全性</p> <p>③ 固化ベントナイトによる密着性の向上効果の確認</p> <p>④ 複合ベントナイトの混合材料、混合率等の詳細検討</p>
(2) 低透水ゾーン ・割れ目の少ない比較的良好な岩盤部	<p>① 上記と同様、まず以下のように考える。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・複合ベントナイトの転圧締めによる埋戻しを基本とする。 ・結晶質岩系岩盤では、立坑壁面に固化ベントナイトを定置して、岩盤との密着性を良好にする。 ・堆積岩系岩盤のコンクリート覆工は撤去しない。 <p>② 以下の目的で、止水性・長期安定性・核種吸着性に優れる固化ベントナイトプラグを、ある間隔で設置する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・埋戻し材の圧密沈下抑制 ・核種の移行ルートにおける水理バリア <p>プラグの設置間隔は、立坑部を対象とした地下水流动解析・核種移行解析結果より概ね150mに1ヶ所を目安と考える。また、万一プラグが沈下した場合の対応策として、プラグ上部を張り出して設置する。</p> <p>③ 岩盤に潜在する亀裂及び掘削に伴う緩み域をカバーするために、グラウトを施工する。グラウト材料としては、セメント系材料では透水性の改良に限界があることから、粘土系材料とする。</p>		<p>① 粘土グラウト注入工法（動的注入工法）の開発</p> <p>② 粘土グラウトによる透水性の必要改良値の評価及びその効果の確認</p> <p>③ 立坑内埋戻し材の長期変形挙動予測</p> <p>④ 固化ベントナイトによる密着性の向上効果の確認</p> <p>⑤ 固化ベントナイトプラグのプラグ効果及び膨潤に伴う周辺岩盤への影響確認</p> <p>⑥ 複合ベントナイトの混合材料、混合率等の詳細検討</p>

表-3.1(2) シーリング概念の構築

対象部位	概念		問題点及び今後の課題
	基本的な考え方	概念図	
(3) 高透水ゾーン ・割れ目が多く 破碎帯や断層 が存在する岩 盤部 ・湧水を伴う	<p>① 概念の考え方は、以下に示すように低透水ゾーンと基本的に同じである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 複合ベントナイトの転圧締めによる埋戻しを基本とする。 結晶質岩系岩盤では立坑壁面に固化ベントナイトを定置して、岩盤との密着性を良好にする。 堆積岩系岩盤のコンクリート覆工は撤去しない。 固化ベントナイトプラグを設ける。このとき、万一プラグが沈下した場合の対応策として、プラグ上部を張り出して設置する。 岩盤に潜在する亀裂及び掘削に伴う緩み域をカバーするために、グラウトを施工する。グラウト材は、粘土系材料を基本とする。 <p>② 高透水ゾーンの規模が大きい場合には、立坑掘削時にグラウトによる止水措置を施す。閉鎖時には、強度的に弱いと思われる高透水ゾーンへのベントナイトの膨潤圧による影響を避け、高透水ゾーンの両側に固化ベントナイトプラグを設ける。</p>		<p>① 粘土グラウト注入工法（動的注入工法）の開発</p> <p>② 粘土グラウトによる透水性の必要改良値の評価及びその効果の確認</p> <p>③ 立坑内埋戻し材の長期変形挙動予測</p> <p>④ 固化ベントナイトによる密着性の向上効果の確認</p> <p>⑤ 固化ベントナイトプラグのプラグ効果及び膨潤に伴う周辺岩盤への影響確認</p> <p>⑥ 複合ベントナイトの混合材料、混合率等の詳細検討</p> <p>⑦ 高透水ゾーンにおいて、突発湧水など多量の湧水がある場合の、グラウト材料及び工法の検討（粘土グラウトで対応可能か）</p>

表-3.1(3) シーリング概念の構築

対象部位	概念		問題点及び今後の課題
	基本的な考え方	概念図	
2. 処分坑道 (1) 坑道定置方式	<p>廃棄体は、基本的に亀裂の少ない低透水性の良好な岩盤部に定置される。</p> <p>① 廃棄体が定置される処分坑道全体を、緩衝材（高圧縮ベントナイトブロック）で閉鎖する。</p> <p>② 坑道上部あるいは、緩衝材のブロック間の隙間には、ベントナイトパウダーを吹込み空隙をなくす。</p> <p>③ 操業期間中一時的に緩衝材の膨潤によるはらみ出しを防止するためにコンクリートプラグを設置する。この仮設コンクリートプラグは、最終的処分段階においては、性能評価上の化学的影響の危惧から撤去する。</p> <p>④ 堆積岩系岩盤においては、坑道掘削時の力学的安定性を確保するため支保工が必要である。支保工の材質としては還元雰囲気をもたらす鋼製のものを採用することとし、この支保工は閉鎖時にも撤去しない。一方、結晶質岩系岩盤においては、坑道の力学的安定性の検討結果より無支保での掘削が可能と考える。</p> <p>⑤ 処分坑道掘削に伴う周辺岩盤の緩み域の透水性を改善するために、グラウトを実施する。グラウト材料としては粘土系材料を考える。</p>		<p>① 掘削に伴う緩み域の透水性評価。及び緩衝材の膨潤やオーバーパックの腐食膨張等の相互作用が長期的な透水性の変化に及ぼす影響予測。</p> <p>② 粘土グラウト注入工法（動的注入工法）の開発</p> <p>③ 粘土グラウトによる透水性の必要改良値の評価及びその効果の確認</p>
(2) 処分孔定置方式 ・この処分形態の対象岩種としては、結晶質岩系岩盤のみを考える	<p>① 廃棄体が定置される処分孔は、緩衝材(高圧縮ベントナイトブロック)で閉鎖する。このとき、孔壁と緩衝材ブロックとの隙間には、ベントナイトパウダーを吹込み空隙をなくす。</p> <p>② 坑道下部は複合ベントナイトを転圧し締固めることにより埋戻す。一方、坑道上部は転圧締固めが困難であることにより、密度の均質化を図るために下部とは混合率を変え吹込みにより埋戻す。</p> <p>③ 埋戻し材の岩盤との密着性を良好にするために、複合ベントナイトの周囲に固化ベントナイトを設置する。</p> <p>④ 一定監視期間後一斉に閉鎖されることから、坑道定置方式のような、処分坑道における埋戻し材のはらみ出し防止用のプラグは不要である。但し、監視期間中処分孔上部に仮の蓋は必要である。</p> <p>⑤ 処分坑道掘削に伴う周辺岩盤の緩み域の透水性を改善するために、グラウトを実施する。グラウト材料としては、粘土系材料を考える。</p>		<p>① 掘削に伴う緩み域の透水性評価。及び緩衝材の膨潤やオーバーパックの腐食膨張等の相互作用が長期的な透水性の変化に及ぼす影響予測。</p> <p>② 粘土グラウト注入工法（動的注入工法）の開発</p> <p>③ 粘土グラウトによる透水性の必要改良値の評価及びその効果の確認</p> <p>④ 複合ベントナイト材料の最適混合率の検討</p> <p>⑤ 複合ベントナイトの転圧締め、吹込み試験による施工性及び性能確認</p>

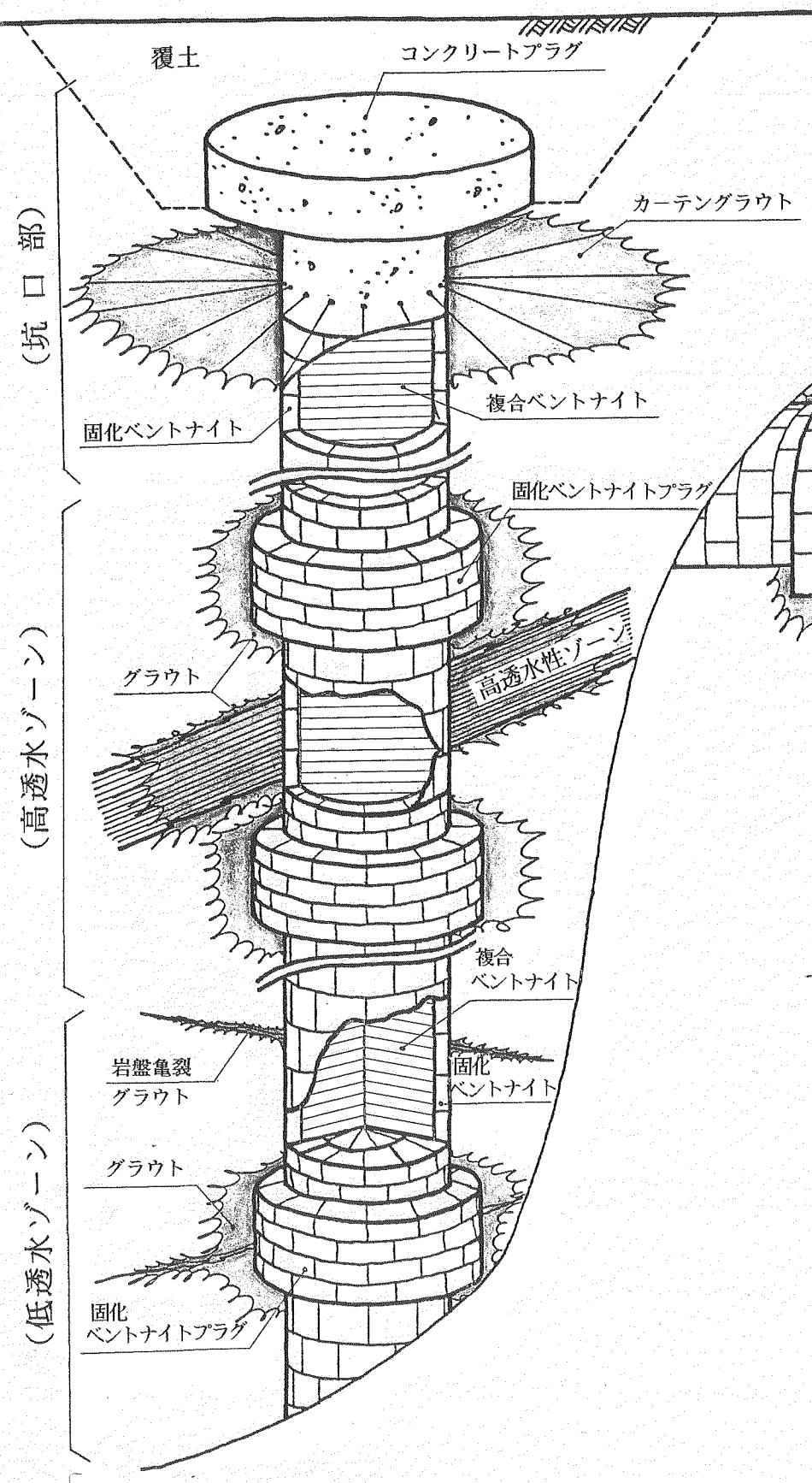
表-3.1(4) シーリング概念の構築

対象部位	概念		問題点及び今後の課題
	基本的な考え方	概念図	
3. 主要・連絡坑道 (1) 低透水ゾーン ・割れ目の少ない比較的良好な岩盤部	<p>① 処分孔定置方式の場合の処分坑道の閉鎖と同様に、まず以下のように考える。</p> <ul style="list-style-type: none"> 坑道下部は転圧締固めにより、坑道上部は吹込みにより埋戻す。 岩種の特性を考慮し、結晶質岩系岩盤の場合には複合ベントナイトの周囲に固化ベントナイトを設置して、岩盤との密着性を良好にする。また、堆積岩系岩盤のコンクリート覆工は撤去しない。 <p>② 岩盤に潜在する亀裂に対して、グラウトを施す。グラウト材料としては粘土系材料とする。</p> <p>③ 低透水ゾーンでは小規模亀裂のみしか存在しないので、プラグの設置は不要と考える。</p>	<p>(結晶質岩系岩盤)</p> <p>(堆積岩系岩盤)</p>	<p>① 粘土グラウト注入工法（動的注入工法）の開発</p> <p>② 粘土グラウトによる透水性の必要改良値の評価及びその効果の確認</p> <p>③ 堆積岩の場合、コンクリート覆工とベントナイトの化学的相互作用の検討</p> <p>④ 複合ベントナイトの混合材料、混合率等の詳細検討</p> <p>⑤ 複合ベントナイトの転圧締固め・吹込み試験による施工性及び性能確認</p>
(2) 高透水ゾーン ・割れ目が多く破碎帯や断層が存在する岩盤部 ・湧水を伴う	<p>① 概念の考え方は、以下に示すように低透水ゾーンと基本的に同じである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 坑道下部は転圧締固めにより、坑道上部は吹込みにより埋戻す。 岩種の特性を考慮し、結晶質岩系岩盤の場合には複合ベントナイトの周囲に固化ベントナイトを設置して、岩盤との密着性を良好にする。また、堆積岩系岩盤のコンクリート覆工は撤去しない。 岩盤に潜在する亀裂に対して、グラウトを施す。グラウト材料としては粘土系材料とする。 <p>② 高透水ゾーンの規模が大きい場合には、坑道掘削時にグラウトによる止水措置を施す。閉鎖時には、強度的に弱いと思われる高透水ゾーンへのベントナイトの膨潤圧による影響を避け、高透水ゾーンの両側に固化ベントナイトプラグを設ける。</p>	<p>(結晶質岩系岩盤)</p> <p>(堆積岩系岩盤)</p>	<p>① 粘土グラウト注入工法（動的注入工法）の開発</p> <p>② 粘土グラウトによる透水性の必要改良値の評価及びその効果の確認</p> <p>③ 堆積岩の場合、コンクリート覆工とベントナイトの化学的相互作用の検討</p> <p>④ 複合ベントナイトの混合材料、混合率等の詳細検討</p> <p>⑤ 複合ベントナイトの転圧締固め・吹込み試験による施工性及び性能確認</p> <p>⑥ 高透水ゾーンにおいて、突発湧水など多量の湧水がある場合の、グラウト材料及び工法の検討（粘土グラウトで対応可能か）</p>

3.2 シーリング概念

前節での概念構築の考え方に基づき、対象岩種及び処分形態毎のシーリング概念図を図-3.2に示す。

立坑



主要・連絡坑道

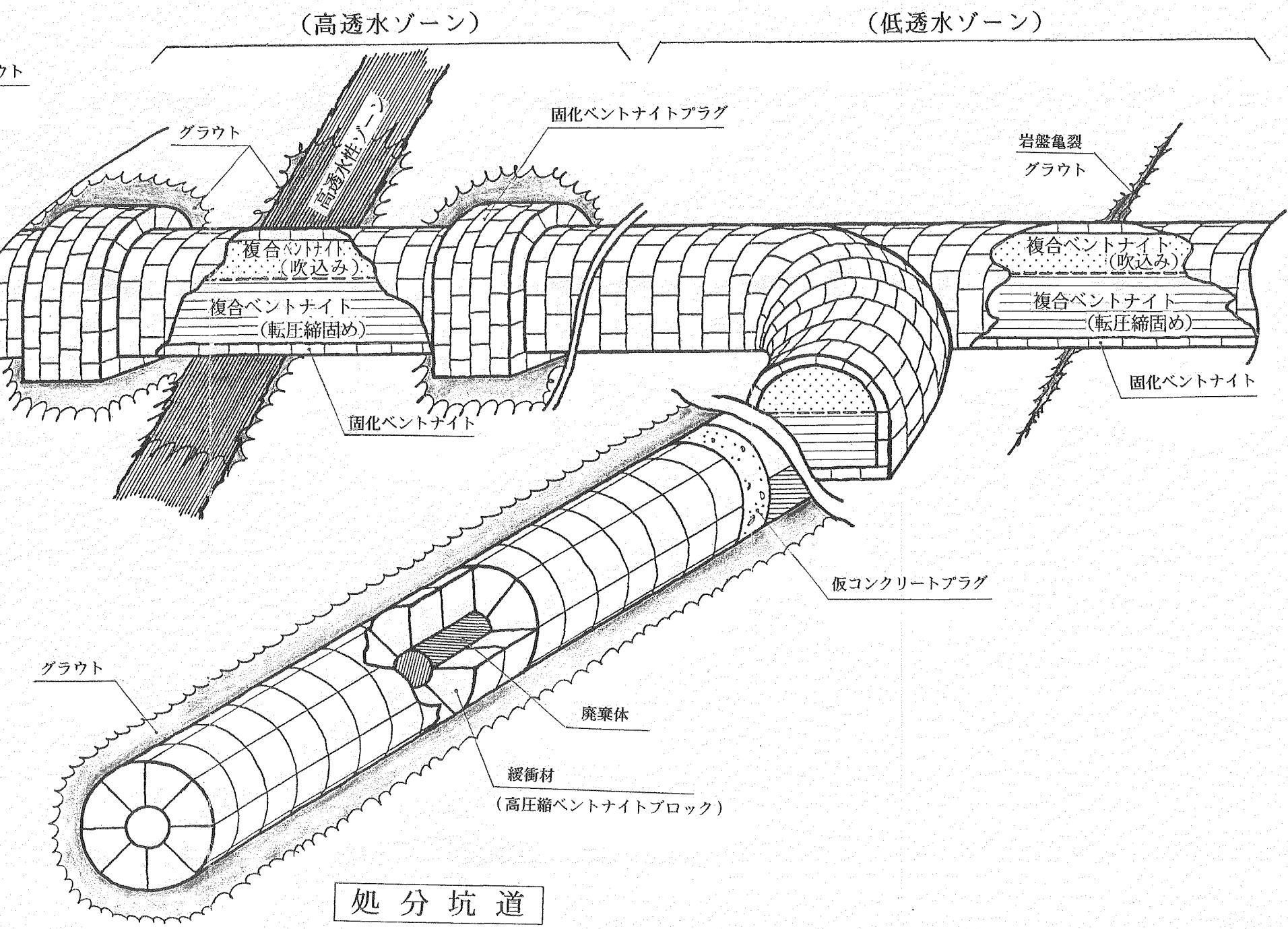


図-3.2(1) シーリング概念図 (結晶質岩系岩盤：坑道定置方式)

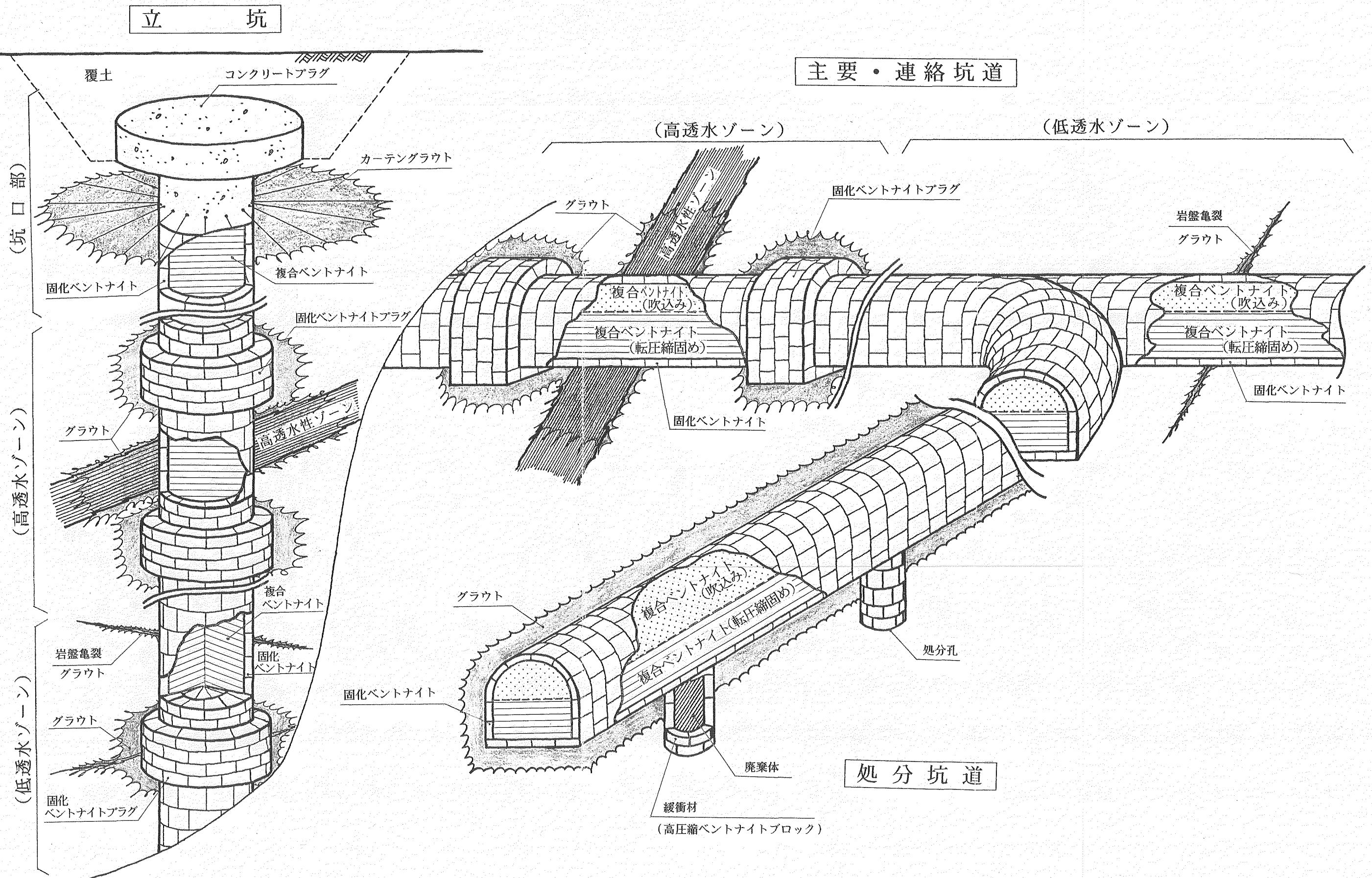


図-3. 2 (2) シーリング概念図 (結晶質岩系岩盤：廻分孔定置方式)

立 坑

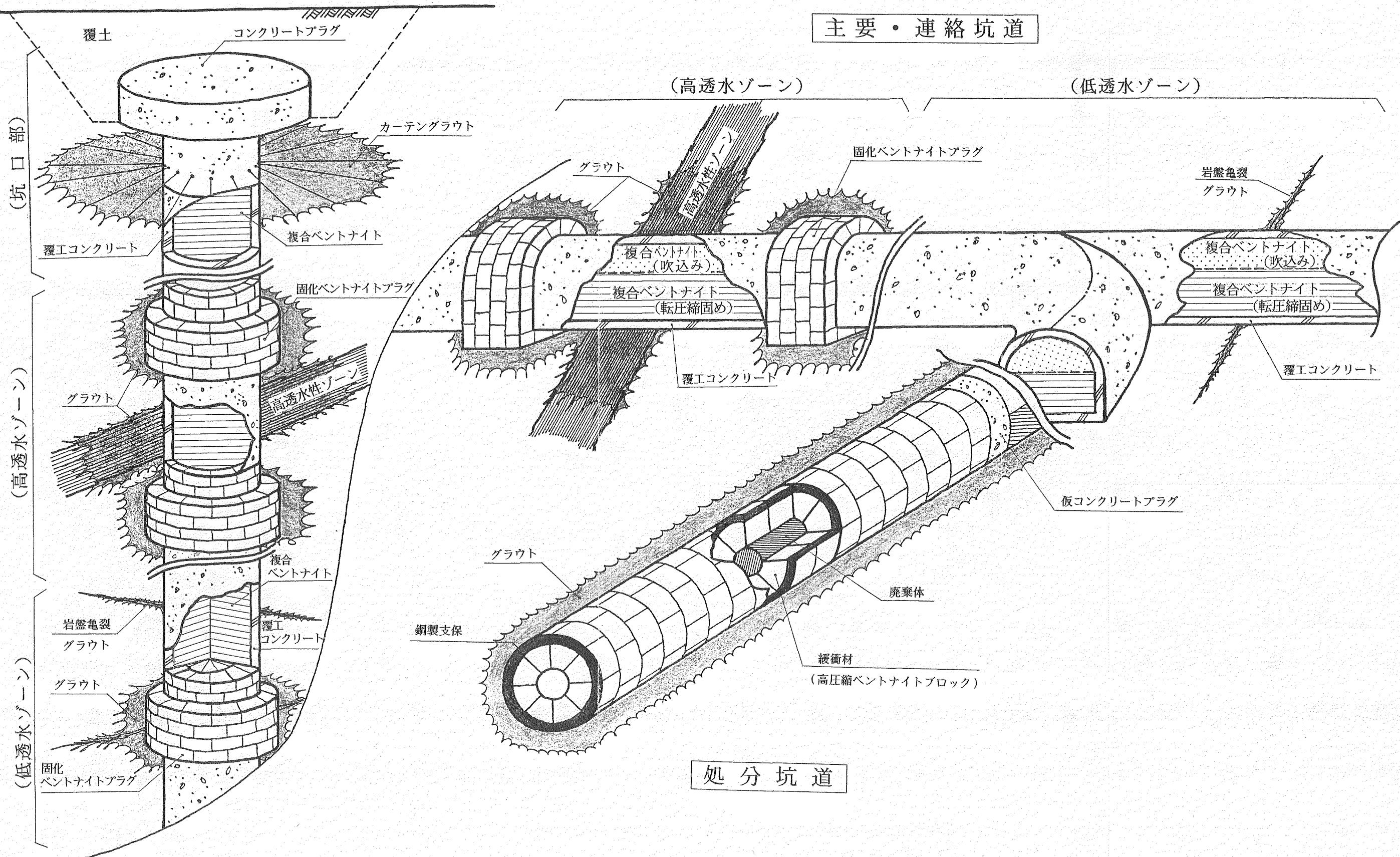


図-3. 2 (3) シーリング概念図（堆積岩系岩盤：坑道定置方式）

4. 試験設計

4.1 シーリングにおける事象の整理

シーリングシステムの包括的な安全評価を行う場合にでてくる問題の中に、将来起こる可能性が否定できない事象がある。このような事象とプロセス、いわゆるシナリオは長期的な安全評価を網羅的に実施するという意味で重要となってくる。

したがって、ここでは下記の目的で想定される事象を整理する。

- ① 自然現象等の諸現象によってシーリングシステムが影響を受ける可能性とその影響を評価する。
- ② 上記検討結果を受けて、シーリング研究の評価対象を明確にすると共にシーリングシステムの概念が適切であることを明らかにする。

シーリングにおけるシナリオを考える場合、考慮すべき事項として下記が挙げられる。

① 時間軸

処分場の状態は時間と共に建設段階、操業段階、閉鎖段階、閉鎖後の段階と変化していくことを考慮する。

② 事象の分類

シーリングシステムは環境の変化によって種々の影響を受けるため、事象を考えるに当たっては、「環境の変化」と「シーリングシステムへの影響」の2つにわけて考えることとする。

環境の変化については変化の生じる場所に着目して天然バリア部分と人工バリア部分に分けて考える。また、シーリングシステムへの影響は内容によって構造的影響、科学的影响、水理的影响に分けて考える。

以上を考慮してシーリングシステムにおけるシナリオを検討した結果を図に示す。

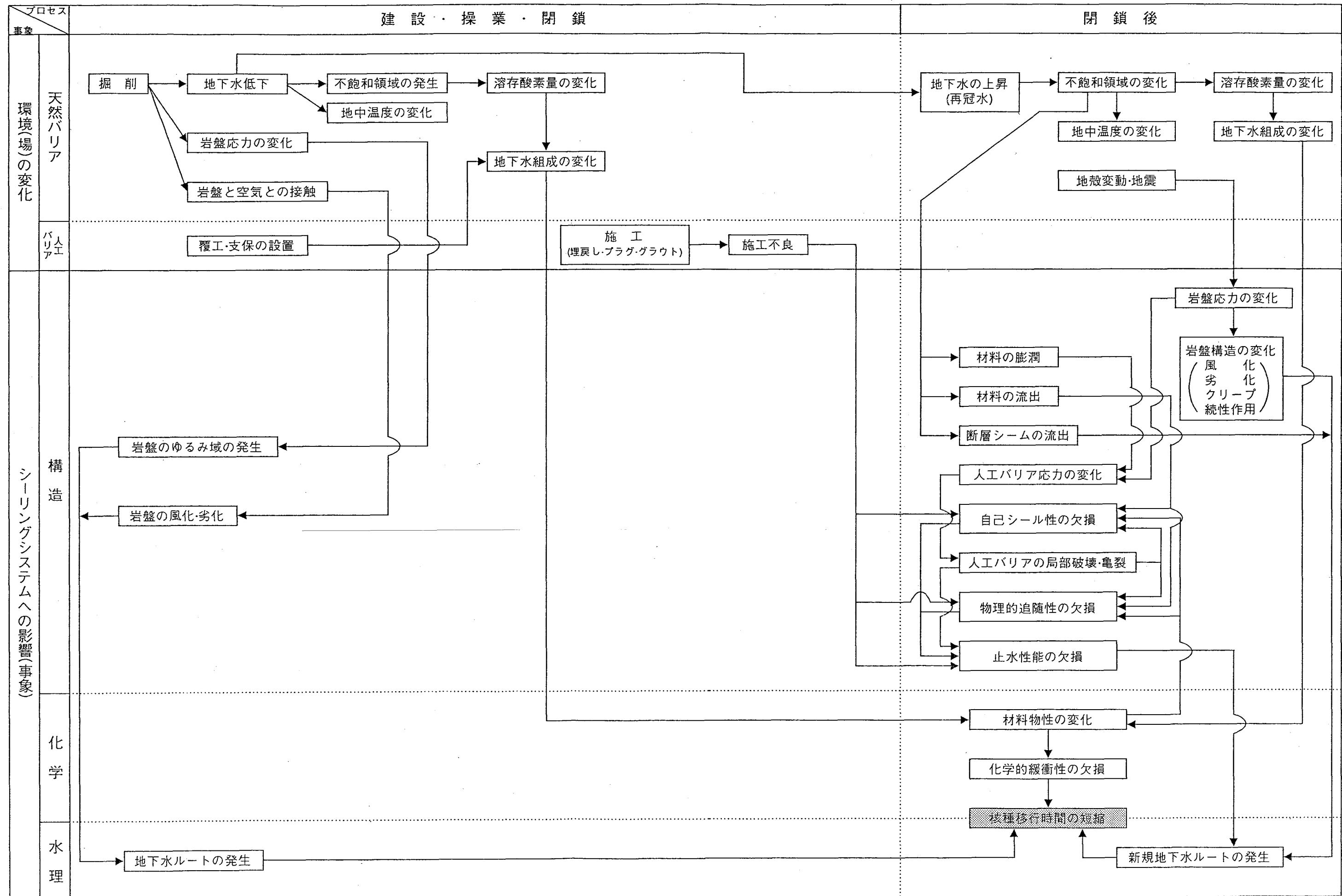


図-4.1 シーリングシステムにおけるシナリオ

4.2 解析コードの調査

シーリング概念の成立性の検討と実際のシーリングに係わる設計法の確立のために、シーリングの性能評価を行っていく上には、実現象を実験的に解明するとともにこれを解析的にもシミュレートできる予測評価手法が不可欠である。ここでは、シーリングにおける事象及び概念を評価し、今後の検討課題を克服していくために必要な既存解析コードについて調査した。

シーリング概念を評価していくための評価項目を整理して、それぞれに対応する代表的解析コード及び問題点を以下に示す。また、個々のコードについての特徴等については添付資料-3に示した。但し、シーリングに係わる種々の挙動を予測評価する上で、どの解析コードが最も適切であるかを一概に判断することは難しい。今後、実験的挙動の解明を推進するとともに、解析コードの相互比較による検証が必要であると思われる。

表-4.1 シーリング概念の評価項目と解析コード

評価項目	解析コード	問題点・改良点
地下水挙動評価 ・地下水流下、再冠水挙動 ・人工バリアに要求される透水特性評価 ・プラグによる止水効果の確認 ・グラウトによる止水効果の確認	USGS2-3D, TAGSAC, MAGNUM2-3D, FEMWATER, UNSAT2, VS2D, TRUST, TRACR3D, GEOTHER, SHAFT79, FTRANS, REGM, CCC, MOTIF, FracMan, 等	地盤を多孔質媒体として扱うのであれば程度実用化の域には達しているが、亀裂ある媒体とする場合には亀裂のモデル化が問題である。
熱挙動評価 ・シーリング材料の熱的影響評価	ADINAT, ANSYS, MARC, ABAQUS, NASTRAN, STEALTH, TRUMP, TEMPEST, 等	温度分布の評価については特に問題ないと思われるが、熱の及ぼす化学面への連成影響が重要である。
力学的挙動影響評価 ・埋戻し材料の膨潤特性の評価 ・プラグに作用する埋戻し材料の膨潤圧評価	ANSYS, ADINA, PISCES, GEOTEC, STEALTH, MARC, ABAQUS, 等	埋戻し材料の膨潤圧が及ぼす水理・化学面への連成影響が重要である。
化学的挙動評価 ・地下水による埋戻し材料の変質 ・覆工コックトによる埋戻し材料の変質 ・シーリング材料の長期健全性評価	KONBRED, CFEST, SWIFT, CHAINT, NUTRAN, FENWASTE, TRANSONE, SEGOL, FERM, 等	化学的因素として放射性崩壊や吸着を考慮しているものは多いが、化学反応を考慮できるものは少ない。
連成挙動評価 ・応力変形による透水性変化の評価 ・膨潤圧による透水性変化の評価 ・シーリング材料中の核種移行評価	ROCMAS, THAMES2-3D, MEFISTO, FEHMS, FLAC, UDEC, 3DEC, FINAS, 等	弾塑性理論の適用や、亀裂性岩盤のモデル化及び膨潤に伴う应力-ひずみ-水分構成関係の導入が必要。

4.3 予備解析

予備解析として、以下に立坑内における埋戻し材の圧密沈下量の概略検討を行う。

(1) 検討方法

埋戻し材の材料としては、現段階で最も有望であると考えられているベントナイトと砂の混合材を考える。この材料で立坑内を埋戻した場合の沈下量の推定は、以下の理由により土を対象とした通常の圧密理論の適用ができない。

- ① 立坑坑底より徐々に転圧締固めを行った閉鎖後の応力状態はほぼ釣合っており、正規圧密状態に近いものと考えられるので、立坑閉鎖後埋戻し材の自重以外の荷重が作用しないとすると沈下は生じない。
- ② 施工中ドライの状態で埋戻された立坑内に周辺地下水が再冠水すると、立坑内の有効応力は減少することとなるので沈下は生じない。
- ③ 埋戻し材中のベントナイトが、周辺地下水の再冠水により膨潤することを考えると沈下は生じない。

このように、実現象を考慮すると通常の圧密理論にはあてはまらない。また、埋戻し材の圧密特性に関するデータ自体も揃っていないのが現状である。そこで、立坑を閉鎖し埋戻し材が膨潤した後の超長期を対象として、統成作用に基づく検討を行うこととする。なお、このときプラグの影響及び立坑周辺岩盤の影響等は無視するものとする。

(2) 統成作用に基づく検討

資料-4に示す埋戻し材の諸特性より閉鎖当初の空隙率を33%とし、資料-5に示す統成作用によりこれが10%になるとすると、埋戻し材の沈下量は以下のようになる。

$$\Delta H = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} H , \quad e_i = \frac{n_i}{100 - n_i}$$

ここに、 ΔH : 埋戻し材の沈下量

e_1 , n_1 : 閉鎖当初の埋戻し材の間隙比及び空隙率

e_2 , n_2 : 統成作用後の埋戻し材の間隙比及び空隙率

H : 埋戻し材の層厚（立坑の長さ）

$$e_1 = \frac{33}{100-33} = \frac{33}{67} \quad e_2 = \frac{10}{100-10} = \frac{1}{9}$$

$$\therefore \Delta H = \frac{33/67 - 1/9}{1 + 33/67} H = 0.256H$$

したがって、立坑の長さを1000mとすると、空隙率の変化（体積減少）により閉鎖後の埋戻し材は256mmの沈下を生ずることになる。

しかし、続成作用は超長期に亘るものであり資料-5によりこの期間を1億年とすると、年間の沈下量は0.003mm(3mm/千年, 3cm/万年)である。一方、我が国における国土の隆起／沈降あるいは浸食速度は一般的に0.1～1.0mm/年といわれており、これに比べると続成作用に基づく埋戻し材の沈下量は非常に小さい。また、続成作用は広範囲に沈積した堆積層を対象としたものであり、今回のような立坑内の埋戻し材に対しては、プラグが設置されることや、埋戻し材と周辺岩盤との摩擦抵抗等を考慮すると、上記の沈下量は保守的な値であるといえる。したがって、立坑内における埋戻し材の沈下は、自然現象の中のごく一部として見なすことができると思われる。

なお、この埋戻し材の沈下現象に関し、東京大学東畠助教授にコメントを戴いた。その主な点を以下に示す。

- ① 有効応力が一定でも続成作用により圧密現象は常に起こると考えられる。なお、二次圧密以降はテルツァギーの圧密理論は当てはまらない。
- ② 埋戻し材の沈下量予測のためには、考え得る挙動メカニズムを整理した上で、実験的アプローチを行っていくことが必要である。
- ③ 例えば、埋戻し材が冠水し膨潤しようとする際の、立坑周壁の摩擦抵抗が有効応力に及ぼす影響評価など。
- ④ また、超長期の挙動を予測するためには、地質年代・荷重履歴の比較的明らかなベントナイト鉱山の調査を行うことも必要である。

このように、立坑内における埋戻し材の圧密沈下現象を予測評価するためには、実験や調査によるアプローチが不可欠であり、挙動メカニズムを解明していくことが重要である。

4.4 基本設計

高レベル放射性廃棄物地層処分場におけるシーリング我要求機能を満足するためには、種々の課題を解決していく必要がある。

課題の主なものについては表-4.2に示し、それぞれの課題に対し対応方法を

- 解析的検討を必要とするもの
- 試験室レベルでの実験で対応すべきもの
- 原位置における試験が必要なもの

の3種類に分類した。

ここでは、このうち原位置試験の基本設計として下記の項目について、考え方を整理した。（表-4.4）

- シーリング試験計画
- プラグ性能試験
- グラウト性能試験
- 埋戻し性能試験

表-4.2 シーリング原位置試験基本設計

試験項目	シーリング試験計画	プラグ性能試験	グラウト性能試験	埋戻し性能試験
内 容	<ul style="list-style-type: none"> • 岩盤調査 • シーリングの設計 <ul style="list-style-type: none"> ・ 岩盤状況(岩質、割れ目状況)に対応させて設計する。 • 試験順序と試験計画 <ul style="list-style-type: none"> ・ わが国で初めての本格的な原位置試験であり、第一段階としてワンスルー実施することが望ましい。 ・ 基本的に下記の個々の性能が確認できるように試験計画を作成する。 <ul style="list-style-type: none"> ① プラグ 試験 ② グラウト試験 ③ 埋戻し試験 	<ul style="list-style-type: none"> • 岩盤調査 <ul style="list-style-type: none"> ・ ゆるみ状況の把握 ・ 透水特性の把握 • プラグ材料の評価(別途室内試験) <ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリート ・ 粘土系 ・ 岩石 • プラグの設計(透水ゾーンを対象) • 解析(地下水挙動の予測) • 掘削技術の評価 <ul style="list-style-type: none"> ・ 何種かの掘削方法を検討 ・ 岩盤のゆるみ状況を評価 • プラグの性能評価(止水効果の評価) <ul style="list-style-type: none"> ・ 圧力水を注水(水圧を変化させる)し、トンネル部から岩盤深部の間の地下水挙動を計測する。 ・ プラグ設置前後で上記地下水挙動を計測し、止水効果を評価する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 岩盤調査 <ul style="list-style-type: none"> ・ 破碎帯、割れ目状況、透水特性の把握 • グラウトの充填性の評価(原位置及び室内大規模) <ul style="list-style-type: none"> ・ 室内試験(Stripa Project スロット注入試験のイメージ)及び別途岩体を切り出して、下記工法別・材料別に充填制、物理特性、化学特性を評価する。 • 工法 <ul style="list-style-type: none"> ① 動的注入 ② 超音波注入 ③ 高圧小流量注入 ④ 既存技術 • 材料 <ul style="list-style-type: none"> ① セメント系 ② 粘土系 ③ 化学系 • グラウトの設計 <ul style="list-style-type: none"> ・ 破碎帯、割れ目状況に対応させてグラウトを設計する。 • グラウト性能試験 <ul style="list-style-type: none"> ・ グラウト性能試験を実施し、止水効果を設計と対応させて評価する。(グラウト注入量の測定、地下水挙動の評価) ・ コアを切り出し、グラウトの充填状況を評価 	<ul style="list-style-type: none"> • 岩盤調査 <ul style="list-style-type: none"> ・ ゆるみ状況の把握 ・ 透水特性の把握 • 埋戻しの施工性評価 <ul style="list-style-type: none"> ・ プラグ設置(左記プラグ試験、グラウト試験の後実施) ・ 埋戻し(転圧、吹きつけ) ・ 密度管理 • 埋戻し部の性能評価 <ul style="list-style-type: none"> ・ 圧力水を注水 ・ 地下水挙動の評価(岩盤部) ・ 埋戻し部の含水量変化の測定 ・ 埋戻し部の膨潤特性の評価 ・ 岩盤との境界部の圧力測定 ・ 岩盤内間隙水圧測定 ・ 埋戻し材の膨潤圧に対するプラグの健全性評価(応力測定)
備 考				

資料 - 1

SKB Technical Report 90-43 : GMM...A general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays , pp. 82-89 (1990)

資料 - 2 SKB Technical Report 88-30 pp.60-61 (1988)

資料-3 解析コード調査結果

表一資3-1(1) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

コード名	項目	開発機関 時期(国名)	解析手法	連成項目						特徴	備考
				F 差分法	E 理論	B その他	1 D	2 D	3 軸対称	熱 水 応 力 化 学	
1. ADINAT			O				O			・線形及び非線形の非定常温度分布解析の汎用温度分布及び熱応力(非定常、弾塑性を含む)計算が可能で、良く使い込まれている。	
2. ANSYS		1983	O				O	O		・結果の画像処理などが充実しているものが多いため。	
3. MARC		1981	O				O	O			
4. ABAQUS			O				O	O		スバルコンピュータ・オリエンテッドで作成され原子炉から用いられている。	
5. NASTRAN	NASA (米)	O					O			温度分布計算に用いられる代表的汎用コード"ABAQUS"と同様の機能を有しているが、ABAQUSでは温度分布計算が得意である。	応力計算部を有しているが、応力計算問題に限られる。
6. STEALTH		1981	O				O	O	O	非線形・非定常問題を扱え、応力解析部を持っている。	
7. TRUMP	ローレンスリバーモア研究所 (米)	O		O	O	O	O	O	O	非線形放物型偏微分方程式を解くための大型外用コード"TRUMP"と同種の機能を扱える。	熱伝導率に関する異方性は考慮できなない。
8. DOT			O				O	O		かね"AECL"における処分場の概念設計に適用された1985	

表一資3-1(2) H.L.WN. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

(1/3)

項 目 コ ード 名	開 発 機 関 時 期 (国 名)	解 析 手 法						次 元	連 成 項 目			特 徴	備 考	
		F E M	E E M	B E M	そ の 他	1 D	2 D	3 D	軸 対 称	熱 水	応 力	化 学		
1. SALT4					○				○				空洞の間隔・熱荷重や形状をパラメータとした設計プロセスの初期段階で適用する。	
2. BEP2D					○				○				{ 2 次元境界要素法プログラム ・線形弹性有限要素法プログラム }	
3. SAPIV					○				○					
4. SANGRE									○				より詳細な設計段階の為の特殊用途FE Mプログラム。	
5. JPLAXD									○				単純化された材料非線形性を考慮。	
6. NONSAP		○			○	○			○					
7. ADINA	1981 (米)MIT	○			○				○				より詳細な設計段階の為の特殊用途FE Mプログラム。	
8. ANSYS	1983	○			○	○			○				単純化された3次元解析モデル。	
9. MARC	1981	○			○	○			○					
10. ABAQUS	AECL (加)	○			○	○			○				より詳細な設計段階の為の特殊用途FE Mプログラム。	
11. PISCES		○			○				○				掘削による周辺岩盤への影響解析(爆破 損傷に関するある程度の知見)ができる。	
12. STEALTH	1981	○	○		○	○			○	○	○	○		

表-3-1(3) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

(2/3)

コード名	項目	開発機関 時期(国名)	解析手法 E 差分法 M	解析手法 F 有限要素法 M	その他 B 理論 M	連成項目				特徴	備考
						1	2	3	軸対称 D	熱 D	
13. TENSOR			○						○		掘削による周辺岩盤への影響解析(爆破損傷にに関するある程度の知見)ができる。
14. FLUSH									○		地震時の地盤-構造物相互作用を扱うコード。本来地震応答解析用。
15. GEOTEC			○			○	○	○	○		地盤工学専用の非線形解析用コードに有効。設計用に開発された詳細な地盤応答解析用。
16. BMINES		1981	○			○	○	○			地盤に開場の細かい分離された地盤の挙動を主目とした地盤応答解析用。
17. FLAC			○			○		○			
18. JAC		1984	○			○	○	○			
19. MINAQ				○		○		○			
20. REPOS				○		○	○	○			
21. ROCKMAS			○			○		○			
22. SAFE			○			○		○			
23. SANCH0		1985	○			○	○	○			
24. SPECTROM32			○			○		○			

表一 資3-1(4)

H. H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

应力·变形解析口一(3/3)

表一資3-1(5) H.L.W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧
浸透流解析コード

(1/5)

コード名	項目	開発機関	解析手法	連成項目						特徴	備考	
				FEM	BEM	その他	1D	2D	3D	軸対称	熱水	応力
1. USGS2D	サンディア国立研 (米)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
②. USGS3D	サンディア国立研 (米)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3. CCC	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4. MAGNUM2D, 3D	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
⑤. FEMWATER	英地質調査所 Atkins R., NRC(英,米)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
⑥. UNSAT2	サンディア国立研 (米)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7. VS2D	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8. TRUST	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9. TRACR3D	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10. GEOTHER	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

ただし、コード名番号に付けられた○印は、HYDROCOIN参加コードを示す。

表一資3-1(6) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

コード名	項目	開発機関	解析手法	解析次元	達成項目						備考	
					F 差分法	E EM 理論	B その他	1 D	2 D	3 D	軸対称	
11. SHAFT 79		○			○	○	○	○	○	○	○	圧力と温度によつて有孔性が変化する多孔質媒体中の流体流れと熱輸送を計算する。
12. FTRANS		○			○		○	○	○	○	○	非等温二相コード。廃棄物処分場周辺の流れを解析する。
13. TRUMP	ローレンスリバモア研究所(米)	○			○	○	○	○	○	○	○	破碎多孔質媒体中の地下水流れと、一重or多重核種移行を解析する。
14. PHREEQE	米国地質調査所(米) 1983						○	○	○	○	○	汎用非線形放物型微分方程式の解析コード。← 破碎媒体中の溶質移行コード
15. EQ 3/6							○	○	○	○	○	化質量移行の進展に応じてPH値、酸化還元力、水溶液の加熱・冷却及び不溶性反応結果などを計算する。
16. WATEQF							○	○	○	○	○	水溶液中の無機物質と化合物の熱力学を解析できる。
⑩. MOTIF	AECL (加)	○					○	○	○	○	○	溶波中の無機物質と化合物の熱力学を解析する(廃棄物ヤニックスの温度が100°C以下のとき)
18. ADINAT	アルバータ大	○					○	○	○	○	○	地盤内の地下水流动、熱移動及び溶解物質の運動を連成させた解析コード
⑪. FEGM	電中研(日)	○					○	○	○	○	○	ニアワールドにおける飽和・不飽和地下水流动を詳細に予測できる。
⑫. 3DSEEP	原研(日)	○					○	○	○	○	○	連続的な流速が算出可能。

ただし、コード名番号に付けられた○印は、HYDROCOIN参加コードを示す。

表一資3-1(7) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

コード名	項目	開発時期(国名)	解析手法	解析次元	連成項目						特徴	備考					
					F E M	E M	B E M	その他 理論	1 D	2 D	3 D	軸称 熱	水 応	化 学			
②1. 2DSEEP	原研	(日)	○					○	○	○	○				S.P. Newmanらの飽和-不飽和浸透流モデルを取り入れた。		
②2. UNSAF2D	京大	(日)	○					○			○						
②3. UNSAT	間組	(日)								○							
②4. ANGEL 2D 3D	奥村組	○						○	○	○	○				動水勾配、流速の評価は1次のアイバーラメトリック要素を用いているため精度が落ちる。		
②5. CYLTRAN	英・地質調査所	(英)								○							
②6. TRANSFLO	英・地質調査所	(英)							○	○	○				連続的な流速が算出可能		
②7. NAMMU	U.K. Atomic Authprity (英)							○		○							
②8. SWENT	Atkins R&D (英)							○		○							
②9. METCEA	CEA (仏)							○	○	○	○						
③0. METIS	E.N.S (仏)										○						
③1. FEFLOW2	フインランド 中央技術研究所 (フィンランド)									○		○					

ただし、コード名番号に付けられた○印は、HYDROCOIN参加コードを示す。

表一資3-1(8)

H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

浸透流解析コード一覧 (4/5)

コード名	項目	開発機関	解析手法		解析次元		連成項目				特徴	備考	
			E 差分法	E M 理論	B M	その他	1 D	2 D	3 軸対称	熱	水		
③2. SWIFT	ベルン技大 (独)					O				O			
③3. FAST	ベルン技大 (独)								O				
④1. FEM301	Neuchatel 大 (スイ)						O						
④5. FREESURF	Motor- Columbus (スイ)						O						
④6. MRTROPOL	RIVM (スイ)						O						
④7. GWHRT	The Royal Institute of Tech. (スウェーデン)						O						
④8. CFEST	S. R. P. O. N. W. I. (米)						O			O			
④9. FE3DGW	Battelle (米)								O				
⑤0. STOKES	Battelle (米)						O			O			

ただし、コード名番号に付けられたO印は、HYDROCOIN参加コードを示す。

表一 資3-1(9)

H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

ただし、コード名番号に付けられた〇印は、HYDROCOIN参加コードを示す。

表一 資3-1(10)

H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

溶質移行解析コード一覧 (1/3)

コード名	項目	開発機関 時期(国名)	解析手法		解析次元		連成項目		特徴		備考
			FEM 差分法	BEM 理論	その他 D 理論	1 D	2 D	3 軸称	熱 応力	化 学	
1. KONBRED			○	○	○	○	○	○	○	○	饱和水中的溶質の濃度を任意の位置・時間で 解析・混合を取扱う。
2. CFEST			○			○	○	○	○	○	流れ伊ネルギー、不均質媒体内の溶質移行の結合 解析をするコト。
3. SWIFT			○		○	○	○	○	○	○	等温or非等温多孔隙離脱の保存を考慮。 等温or吸着、質量の崩壊には、 核種の崩壊には、 相当汎用的なコード。
4. CHAINT			○		○	○	○	○	○	○	移流・分散・拡散・吸着・崩壊系列・物質放 出流速場データはMAGNUM2Dより。
5. NUTRAN									○	○	処分後のリスク評価、天然ガスと人口ガスの結 合各核種の時間的濃度変化を計算する。
6. FEMWASTE			○		○				○	○	変化する多孔質中の移行を計 算する。
7. TRANSOME			○		○				○	○	飽和・不飽和の両条件を取扱える。
8. SEGOL					○	○	○	○	○	○	地下水流れはDarcy則である。 Kdモデルによる解析解をベースに、瞬時漏洩 状況を扱う。
9. GETOUT		PNL 1970年代半ば	(米)		○				○	○	帯列
10. ANRAW			(米)						○	○	吸着反応についてはKdモデル

表一資3-1(11) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

(2/3) 溶質移行解析コード

コード名	項目	開発機関 時期(国名)	解析手法 EM法	その他 理論	解析次元				連成項目		特徴	備考
					1 DD	2 DD	3 軸対称	熱水力	応力	化		
11. AT123D	(米)			○ ○ ○					○	吸着反応についてはKdモデル。		
12. NAMMU	(米)								○	多次元移行解析コード、基本的にはクロマトグラフ理論。		
13. NAMSOL	(米)								○	多次元移行解析コード、基本的にはクロマトグラフ理論。		
14. NAMTAR	(米)								○	多次元移行解析コード、基本的にはクロマトグラフ理論。		
15. TRANSFLOW	(米)								○	多次元移行解析コード、基本的にはクロマトグラフ理論。		
16. METIS	(仏)								○	多次元移行解析コード、基本的にはクロマトグラフ理論。		
17. MICOF	(ハ)ギー			○					○	1次元ではあるが、複雑な吸着反応式を取扱える。		
18. NAMID	(英)			○					○	1次元ではあるが、複雑な吸着反応式を取扱える。		
19. SIMRAP	(仏)			○					○	1次元ではあるが、複雑な吸着反応式を取扱える。		
20. COLUMN	(デンマーク)			○					○	1次元ではあるが、複雑な吸着反応式を取扱える。		
21. エロイドモデルコード									○	Kdモデルで扱えないエロイド粒度分布を考慮した移行モデル。		
22. GARD2	AECL, DOE 1979 (加, 米)								○	流れ軸に沿う分散までを考慮した解析解に基づき開発された。		

表一資3-1(12)

H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

溶質移行解析コ一ダ (3/3)

表-3-1(13) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧 (1/9)

コード名	項目	開発機関 時期(国名)	解析手法	解析次元						達成項目	特徴	備考	
				F 差分法	E M	B 理論	その他 M	1 D	2 D	3 軸対称	熱 水	応 力	化 学
1. EQUILIB		1977								○			
2. EQ3/EQ6		1979						○	○	○	○		
3. GEOCHEM		1980						○	○	○	○		
4. MINTEQ		1982						○	○	○	○		
5. PHREEQE		1980						○	○	○	○		
6. TRANSCHEM		1986						○	○	○	○		
7. WATEQ3		1979						○	○	○	○		
8. FTRANS		1983						○	○	○	○		
9. GROUNDWATER PACKAGE		1978						○	○	○	○		
10. GROVE/GALERKIN		1977	○					○	○	○	○		
11. GWTERM		1979	○					○	○	○	○		

表3-1(14)

H. L. VN. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

熱-力学-流れ-化学結合プロセス解析コード (2/9)

コード名	項目	開発機関	解析手法	達成項目						参考	
				FEM	BEM	M	その他	1D	2D	3D	
12. KONBRED	1974							○	○	○	応力学
13. MAGNUM ^{2D} -CHAPNT	1981				○			○	○	○	塩素系化合物挙動・塩素の集積・核種移行等の様々な問題に適用された。
14. PTC	1982					○		○	○	○	解析解と比較照合されてい る。
15. RESTOR	1981						○	○	○	○	解析解・フィールド”試験によつ て実証
16. SALTRP	1981							○	○	○	地下水流れ中の溶質移行を計算するために利 用される。
17. SHALT	1979										専有コード
18. VCHFLD	1981										3つの解析的手法と、フィールド”試験によつ て部分的に実証された。
19. AT123D	1982										専有コード
20. CFEST	1984						○				このコードのベースはFE3DGW
21. PORFLOW	1975						○	○	○	○	常水層の化学汚染、地下水資源管理、核廃棄物 処理、地熱貯蔵にも利用される。
22. SWENT	1982						○	○	○	○	流体流れ、熱流・不活性物質移行及び放射性 核種移行の解析に適用。
23. SWIFT	NRC 1981 (米)						○	○	○	○	流れ・熱・移行のプロセスを評価するための 利用頻度も多い。

表-3-1(15) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

(3/9) 热-力学-流れ-化学結合プロセス解析コード

コード名	項目	開発機関	解析手法	連成項目						備考	
				F E M	E M	B E M	その他 理論	1 D	2 D	3 D	
24. DPCT											処分場の長期効果の研究に適用された。
25. MMT		1980				○ ○					さまざまな1次元問題の解析結果にに対して照合された。
26. NUTRAN		1977				○					地下水中の汚染物質移行、放射性廃棄物移行に利用された。
27. NWFT/DVM		1978				○					いくつかの1次元問題に對して照合する。
28. PATHS		1981				○					予備的評価ができる汚染物質の放出に利用される。
29. TRANS		1980				○					他の2種類のコードと照合された。
30. FEMWATER-FEMWASTE		1978				○					地下水汚染問題に利用された。
31. FLOWS		1976				○					流れと溶質移行を別々に計算し、両者が密接に連携の研究に利用された。
32. SATURN		1982				○					不飽和破碎多孔質媒体中の流れに利用された。
33. SUTRA		1983				○ ○					他のコードと比較され、実験解と照合。
34. WAFF		1984				○ ○					4つの解析解、他のコードと試験によって実証。
		1986				○ ○					8つの解析解と比較照合。

表一資3-1(16)

H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

熱-力学-流れ-化学結合プロセス解析コード (4/9)

コード名	項目	開発機関	解析手法	連成項目						備考
				E 基 礎 法	F 理 論	B そ の 他	1 2 3 軸 對 称	熱 水 力	化 学	
35. CHAMP	1986							○	○	廃棄物処分における化学物質移行に利用
36. HCTM	1964 (米)	○		○	○	○	○	○	○	露天掘鉱山の地下水汚染、トリチウム移行、鉱山排水の浸出の研究に利用。
37. SWANFLOW	1985						○	○	○	不飽和域及び飽和域中で異なる密度の汚染物質移行を研究するための剤用。
38. TOUGH	1984					○	○	○	○	熱的に多相流れを解析する多孔質媒体中の核分裂性物質処分に適用。
39. TRACER3D	1984					○	○	○	○	3つの解析手法と比較照合。
40. 3DS/UT.M.	1976					○	○	○	○	3次元飽和・不飽和移行モデル。
41. CHEMTRN	1983						○	○	○	核廢棄物隔離と、化学的汚染物の移行に適用される。
42. CPT	1982						○	○	○	2つの解析手法とフィールド試験との比較による実証。
43. FIESTA	1983						○	○	○	多くの試験によって実証。
44. CTMID	1985						○	○	○	地球化学的コードとしてMINTEQを使い、地球化學的溶質移行問題に利用される。
45. CHMTRANS	1985						○	○	○	核廢棄物隔離と、放射性炭素年代推定に利用試験により実証。

表-3-1(17) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

コード名	開発機関 時期(国名)	解析手法	連成項目						特徴	参考		
			F 差分法	E M	B M	その他 理論	1 D	2 D	3 軸対称	熱 水 応 力 化 学		
46. DYNAMIX	1985						○	○	○	○	TRUMP(移行に関するコード)とPHREEQE(平衡の漫反射や化学物質移行に適用)。	詳細なアルゴリズムと比較して実証。
47. TRANQL	1985						○	○	○	○	多元的化学反応性物質の移行に適用	室内試験、ワイルド"試験との比較で照合、部分的に実証。
48. THCC	1987						○	○	○	○	流体化学物質移行で熱の効果を考慮する2つの1つ(うちの1つ)の変化を含む化学的物質移行等に適用。	4つの解析解と比較照合。
49. CCC		○					○	○	○	○	流れ一熱一凝固、地熱、水の蓄熱、廃棄物隔離	
50. Dequid		○					○	○	○	○	2重多孔質、陸水学	
51. O'Neill		○					○	○	○	○	2重多孔質、地熱	
52. FINI		○					○	○	○	○	廃棄物隔離	
53. CFEST		○					○	○	○	○	流れ一熱一溶解、陸水学、廃棄物隔離	
54. Coats		○					○	○	○	○	2相、地熱、石油	
55. Faust-Mercer		○					○	○	○	○	2相、地熱	
56. MUSHRM		○					○	○	○	○	流れ一熱一溶解、2相、地熱、地下圧力	

表一資3-1(18)

H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

熱一力学一流れ一化学結合ゾ口セ又解析コード (6/9)

コード名	項目	開発機関 時期(国名)	解析手法						解析次元						連成項目						特徴	備考
			F 差分法	E M 理論	B M 理論	その他	1 D D	2 D D	3 軸 対称	熱 水 力	応 化 学	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
57. SHAFT 79			○																			
58. SALT				○				○				○	○	○	○	○	○	○	○	○		
59. SALT ²					○							○	○	○	○	○	○	○	○	○		
60. BASUM						○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	局所性	
61. EXPAR							○					○	○	○	○	○	○	○	○	○	非線形性、局所性	
62. REPOS								○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	非線形性、局所性	
63. BEH2D									○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	非線形性、結合性、詳細性、局所性	
64. DMBIT										○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	非線形性、結合性、詳細性、局所性	
65. FINEL										○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	非線形性、結合性、詳細性、局所性	
66. DAMSWEL											○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	非線形性、結合性、詳細性、局所性	
67. BASEFH												○	○	○	○	○	○	○	○	○	詳細性、局所性	
68. RSI/TRANCO												○	○	○	○	○	○	○	○	○	非線形性、詳細性	

表一資3-1(19) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

コード名	項目	開発機関 時期(国名)	解析手法		解析次元			達成項目			特徴	備考	
			F 差 分 法	E M	B E 理 論	その他の 理 論	1 D	2 D	3 軸 称	熱 水 応 力	化 学		
69. RSI/TEPCO			○				○			○		非線形性、詳細性	
70. RSI/TEVCO			○				○			○		非線形性、詳細性	
71. RSI/NOMOR			○				○			○		非線形性、詳細性	
72. CDC/ANSYS			○				○	○	○	○		非線形性、結合性、詳細性	
73. CDC/MARC			○				○	○	○	○		非線形性、結合性、詳細性	
74. Rock structure interaction			○				○	○		○		非線形性、結合性、詳細性	
75. ADINA, ADINAT			○				○	○	○	○		非線形性、結合性、詳細性、局所性	
76. SAP			○				○	○		○		詳細性	
77. NONSAP			○				○	○		○		非線形性、詳細性	
78. SANDIA-ADINA			○				○	○	○	○		非線形性、結合性、詳細性、局所性	
79. JAC	1984		○				○	○		○		非線形性、結合性、詳細性、局所性	
80. SANCHO	1985		○				○	○	○	○		非線形性、結合性、詳細性、局所性	

表一資3-1(20)

H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

熱力学-流れ-化学結合プロセス解析コード (8/9)

項 目 コ ード 名	開 発 機 関 時 期 (國名)	解 析 手 法			解 析 次 元			連 成 項 目			特 徴	備 考	
		F E M	E M	B E M	その 他	1 D	2 D	3 D	軸 対 称	熱 水	応 力		
81. COUPLE FLOW		○				○		○	○	○	○	非線形性、詳細性	
82. WULFF		○				○	○	○	○	○	○	非線形性、詳細性、局所性	
83. BMINES		○				○	○	○	○	○	○	非線形性、結合性、詳細性、局所性	
84. BMINES (Modified)		○				○	○	○	○	○	○	非線形性、結合性、詳細性、局所性	
85. DIFFUS 2		○					○					局所性	
86. KO/HEMP		○				○	○	○	○	○	○	非線形性、詳細性	
87. DAMSEL		○				○	○	○	○	○	○	非線形性、詳細性	
88. STEALTH	1981	○				○	○	○	○	○	○	非線形性、結合性、詳細性、局所性	
89. GWTERM, PORFOW		○				○		○	○	○	○	結合、熱流応力	
90. CONVEC		○				○		○	○	○	○		
91. GENESIS	ローランド・モア 研究所 (米)	○	○							○	○		

表-資3-1(21) H. L. W. 地層処分場施設の設計解析用コード一覧

熱-力学-流れ-化学結合プロセス解析コード (9/9)

表-3-2 既存の連成解析コードの概要

整理番号	解析コード名	主な開発団体	解法	次元	飽和	不飽和	蒸発	熱伝導	対流	弹性	非弹性	亀裂	潤滑	備考
1	ROCMAS	Lawrence Berkeley Laboratory	有限要素法 2次元軸対称	○	×	×	○	○	○	○	×	○	×	
2	ROCMAS (改)	Lawrence Berkeley Laboratory	有限要素法 2次元	○	×	×	○	×	○	○	×	○	×	
3	ROCMAS II	Lawrence Berkeley Laboratory	有限要素法 2次元	○	×	×	○	○	○	○	○	×	○	亀裂の非線形挙動を扱える
4	THAMES	Kyoto University, Hazama Corporation	有限要素法 2次元軸対称	○	○	×	○	○	○	○	×	○	○	現在はソリューション要素も扱い可
5	THAMES3D	Kyoto University, Hazama Corporation	有限要素法 3次元	○	○	×	○	○	○	○	×	○	○	
6	MEFISTO	Bureau de Recherches Geolog. et Minieres	有限要素法 2次元	○	×	×	○	○	○	○	×	○	○	
7	FEHMS (改?)	Los Alamos National Laboratory	有限要素法 2次元	○	×	×	○	○	○	○	×	○	×	
8	(FLAC?)	Itasca Consult. Group	差分法 2次元軸対称	○	×	×	○	○	○	○	○	×	×	
9	UDEC	Univ. of Minnesota Itasca Consult. Group	個別要素法 2次元	○	×	×	○	○	○	○	○	×	○	弾塑性(モール・クーロン)
10	3DEC	Univ. of Minnesota, Itasca Consult. Group	個別要素法 3次元	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	弾塑性(モール・クーロン)

(PNC SJ4449 90-008 地震処分におけるバケツ型候補材料に関する調査1990.9より)

表-3-3 既存連成解析コードの非線形挙動対応一覧

整理番号	解析コード名	非線形挙動						不連続面の 非線形性
		① 応力変形による透水性変化	② 膨脹圧による透水性変化	③ 粘性係数の温度依存性	④ 熱伝導・熱容量の温度依存性	⑤ 力学的定数の温度依存性	⑥ 不飽和透水関数の非線形性	
1	ROCMAS	○	×	○	×	△	×	×
2	ROCMAS(改)	○	×	○	×	△	×	×
3	ROCMAS II	○	×	(○?) 文献にはない	×	(△?) 文献にはない	×	○
4	THAMES	○	○	○	○	△	○	○
5	THAMES 3D	○	○	○	○	△	○	×
6	MEFISTO	○	×	○	×	×	×	×
7	FEHMS(改?)	(○?) 文献にはない	×	×	×	×	×	×
8	FLAC?	○	×	○	×	×	×	○
9	UDEC (FRIP)	○	×	×	×	×	○	○
10	3DEC	×	×	×	×	×	○	○

(PNC SJ4449 90-008 地層処分におけるバックワイルド候補材料に関する調査1990.9より)

表一資3-4(1) OECD/NEA(Nuclear Energy Data Bank) より入手可能な主要コード

コード名		機能
1	AMROAW (AMRAW-A, AMRAW-B)	陸地処分施設から漏洩した放射性核種による公衆への被曝線量を評価すると共に(AMRAW-A)、被曝線量に基づく健康影響及び経済的損失を計算する(AMRAW-B)。
2	CHEMTRN	熱力学的原理に基づき、地下水系中での化学種移行を解析する。 (データベースは利用者が用意する。)
3	DEIS	低レベル放射性廃棄物の浅地層処分に起因する被曝線量を評価する。
4	EQ3/6 (EQ3NR, EQTL, MCRT, EQ6)	熱力学的原理に基づき、地下水系における元素の化学形及び溶解度を計算し(EQ3NR)、元素の保持現象を支配する物理・化学的機構を決定する(EQ6)。さらに、データベースを作成する機能を有している(EQTL, MCRT)。
5	FFSM	長期間にわたる放射性廃棄物処分場周辺の地質・気候状態を予測する。
6	GETOUT	地層中における放射性核種(崩壊系列)の1次元移行を解析する。
7	LISA	長期にわたる放射性廃棄物の地層処分に起因する被曝線量(リスク)を評価する。極めて簡易なモデルを採用し、パラメータの分布に関する確率論的評価が可能である。いわゆる「安全評価」を目的としたものではなく、パラメータ値のサンプリングによる感度解析を目的としたものである。(地下水シナリオ)
8	NUTRAN (ORIGEN1, BIODOSE, WASTE, PLOT)	長期にわたる高レベル廃棄物の地層処分に起因する被曝線量を評価する。(地下水シナリオ)
9	PRESTO-II	低レベル廃棄物の浅地層処分に起因する被曝線量(リスク)を評価する。(米国環境保護庁)
10	SYVAC2	放射性廃棄物の地層処分に関する確率論的評価を行う。極めて簡易なモデルが採用されている。(地下水シナリオ)

表－資3-4(2) OECD/NEA(Nuclear Energy Data Bank) より入手可能な主要コード

Index of Programs for Radioactive Waste Management

AMRAW, risk assessment method for radioactive waste management
AT123D, 1-D,2-D,3-D transient waste transport simulation in groundwater
BWIP-RANDOM-SAMPLING, probability distributions for waste management
CHEMTRN, chemical species transport in groundwater systems
COLUMN, 1-D migration for various physico-chemical processes
DEIS, impact measures of low level radioactive waste disposal
DIFMOD, radionuclide leaching & cement corrosion in brine
DISPERS, radioactive release into surface water & ground water
DOT-BPMD, non-linear heat transfer in 2D planar or axisymmetric structures
EQ-3 EQ6, thermodynamic equilibrium for aqueous solution mineral systems
FE3DGW, ground water flow model using finite elements method
FEMWASTE FEMWATER, finite element method waste transport through porous media
FEWA-FEMA, FEM model of material transport in ground water
FFSM, long term nuclear waste repository site simulation by Monte Carlo
FTRANS, radionuclide flow in groundwater & fractured rock
GEOETHER, 2-D heat transport & 2-phase fluid flow in porous rock
GETOUT, radioactive release & decay chain calc. for nuclear waste disposal
GSM, Columbia-plateau geologic repository site long-term evolution simulation
IMPACTS-BRC, de minimis radioactive waste management impact analysis
INTRUDE, radiation risk from intrusion into shallow land waste storage site
INVENT, dose rates, inhalation, ingestion risk from closed waste storage site
LHS, multivariate sample generation by latin hypercube sampling
LISA, hazard assessment of nuclear waste disposal in geological formations
MATLOC, transient non-linear deformation in fractured rock
MINEQL, chemical equilibrium composition of aqueous systems
MMT, 1-D radionuclide groundwater transport
NEARSOL, aqueous speciation & solubility of actinides for waste disposal
NETFLO, 3-D steady-state ground-water flow in heterogeneous medium
NUTRAN, doses by radionuclide migration from nuclear waste storage
PART61, low level radioactive waste impact analysis
PHREEQE, modelling of geochemical reactions, calc. of P-H, redox potential
PREP SPOP, random sampling, uncertainty & sensitivity anal. waste management
PRESTO-II, low level radioactive waste transport & risk assessment
PSACON, standard output format for probab. sys. assess. in waste management
RANCH, radionuclide migration in geological media
SALT-4, temperature & stress from radioactive waste disposal in bedded salts
SHAFT-79, 2 phase flow in porous media for geothermal energy systems
SOLGASMIX-PV, chemical system equilibrium of gaseous & condensed phase mix
SORA, radionuclides analysis data storage & retrieval
SOLUPLOT, EH-PH diagram, A02-PH diagram plots for aqueous chemical systems
STAFAN, fluid flow, mech. stress in fractured rock of nuclear waste repository
STFLO, steady-state H₂O flow in porous media
SWENT, fluid, heat, radionuclide transport in heterogeneous geologic media
SWIFT, 3-D fluid flow, heat transfer, decay chain transport in geological media
SYVAC, assessment of nuclear fuel waste management sys with param variability
SYVAC-A/C, risk assessment from underground radioactive waste disposal in UK
TRIPM, isothermal transport & decay of radionuclides in aquifer
UCBNE10.2, radionuclide migration in porous media
UCBNE25, radionuclide migration in geologic media
UTAH-2, thermoplastic response in anisotropic rock
UTAP, probabilistic assessment of long-term effects of uranium tailings
UTMTOX, toxic chemical transport in atmosphere, groundwater, sediments
VERTPAK-1, fluid flow, rock deformation, solute transp in porous media
VISCOT, viscous mechanical behaviour of rock mass under thermal stress
WADOSE, radiation source in vitrification waste storage apparatus
WAPPA, waste package performance assessment
WHATIF-AQ, geochemical speciation & saturation of aqueous solution
ZZ-HATCHES, thermodynamic data for radiochemical modelling

資料-4 埋戻し材の諸特性

(PNC SJ4449 90-002(3) 地層処分システムの設計研究1990.3より)

2.3 埋戻し材の諸特性

埋戻し材の候補材料としては、粘土系材料、セメント系材料、天然アスファルト系材料等多様のものが考えられている。これらの材料は、使用部位及び岩盤状況に応じて使い分ける必要があり、現段階で一概に埋戻し材の物性値を特定することは難しいが、ストリーパの例に見られるように、基本的には我国においてもベントナイトと砂の混合材が有望であると考えられる。

そこで、ストリーパで用いられている充填材の性能に対して、日本の現状の製造技術で製造された充填材がどの程度の性能を確保できるかをまとめた報告書^{A10)}があるので、以下これに基づき埋戻し材の解析用パラメータを設定することとする。

2.3.1 物理特性

埋戻し材の密度や空隙率等は、施工方法によって左右されると思われるが、ここでは実際の施工面を考慮し、20cm毎に60kg振動タンパーを用い5～15回転圧した場合の、含水率と湿潤密度の試験結果より、以下の如く乾燥密度(ρ')と、空隙率(n)を設定する。

表-A.2.3.1 埋戻し材の乾燥密度と空隙率の設定

	試験結果		含水比 ω (%)	乾燥密度 ρ'	間隙比 e	空隙率n(%)
	湿潤密度 ρ (t/m ³)	含水率 ω (%)	= $\frac{\omega}{100-\omega} \times 100$	= $\frac{\rho}{1+\frac{100}{\omega}}$ (t/m ³)	= $\frac{\rho - \rho'}{1-(\rho - \rho')}$ (飽和状態 を仮定)	= $\frac{e}{1+e} \times 100$
上限値	1.54	20	25.0	1.23	0.449	31
代表値 (中間値)	1.45	22.5	29.0	1.12	0.493	33
下限値	1.36	25	33.3	1.02	0.515	34

2.3.2 水理特性

埋戻し材の水理特性として、室内透水試験による各種埋戻し材料の透水係数を下表に示す。

表-A.2.3.2 室内透水試験による埋戻し材の透水係数

材 料	ベントナイト /ケイ砂	ベントナイト /鉄物廃砂	下限値	代表値 (平均値)	上限値
ベントナイト 含有率 (%)	20	60			
透水係数 k (cm/s)	10^{-7}	10^{-8}	10^{-7}	5×10^{-8}	10^{-8}
密 度 (t/m ³)	1.6	1.95	1.65	1.85	1.8

但し、これらの値は、室内試験による供試体の透水係数であるため、実際の施工面を考慮するとかなり小さめの値であると思われる。

例えば、上表の密度は $1.6 \sim 1.95 \text{ t/m}^3$ (平均 1.8 t/m^3) であるが、2.3.1 に示した実際の施工状態に近いと思われる密度 $1.36 \sim 1.54 \text{ t/m}^3$ (平均 1.45 t/m^3) に比べるとやや大きめの値となっている。

そこで、密度と透水係数の関係をプロットすると図-A.2.3.1のようになり、実際の施工面を考慮した場合の密度に相当する透水係数は、上表に比べ1オーダーから2オーダー近く透水性が増すものと予想される。

また、既往のレポート^{A11)}にも、材料は異なるが、圧縮ベントナイトの透水係数について、その値は密度に影響され同様の傾向のあることが示されている。(図-A.2.3.2) なお、埋戻しに際し、施工上最大限の注意を払わなければならないのは埋戻し材と母岩との境界部であり、この境界部に隙間が生じたとすると埋戻し材の見掛けの透水係数は、さらに大きくなる。この境界部の隙間の影響がどれ程かは不明であるが、概念設計を行う上では、考慮すべき点であると思われる。

埋戻し材の透水係数は、原地盤と同等かそれ以上の性能を有することが原則と考えられるが、それは埋戻し材自体の透水係数である。ここでは、境界部の隙間の影響も加味した上で、今回の解析用の透水係数として、図-A.2.3.1に示すように、表-A.2.3.2の下限値 10^{-7} cm/s を上限値として設定し、パラメータの幅を3オーダー程考えて、 $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ と設定することとする。

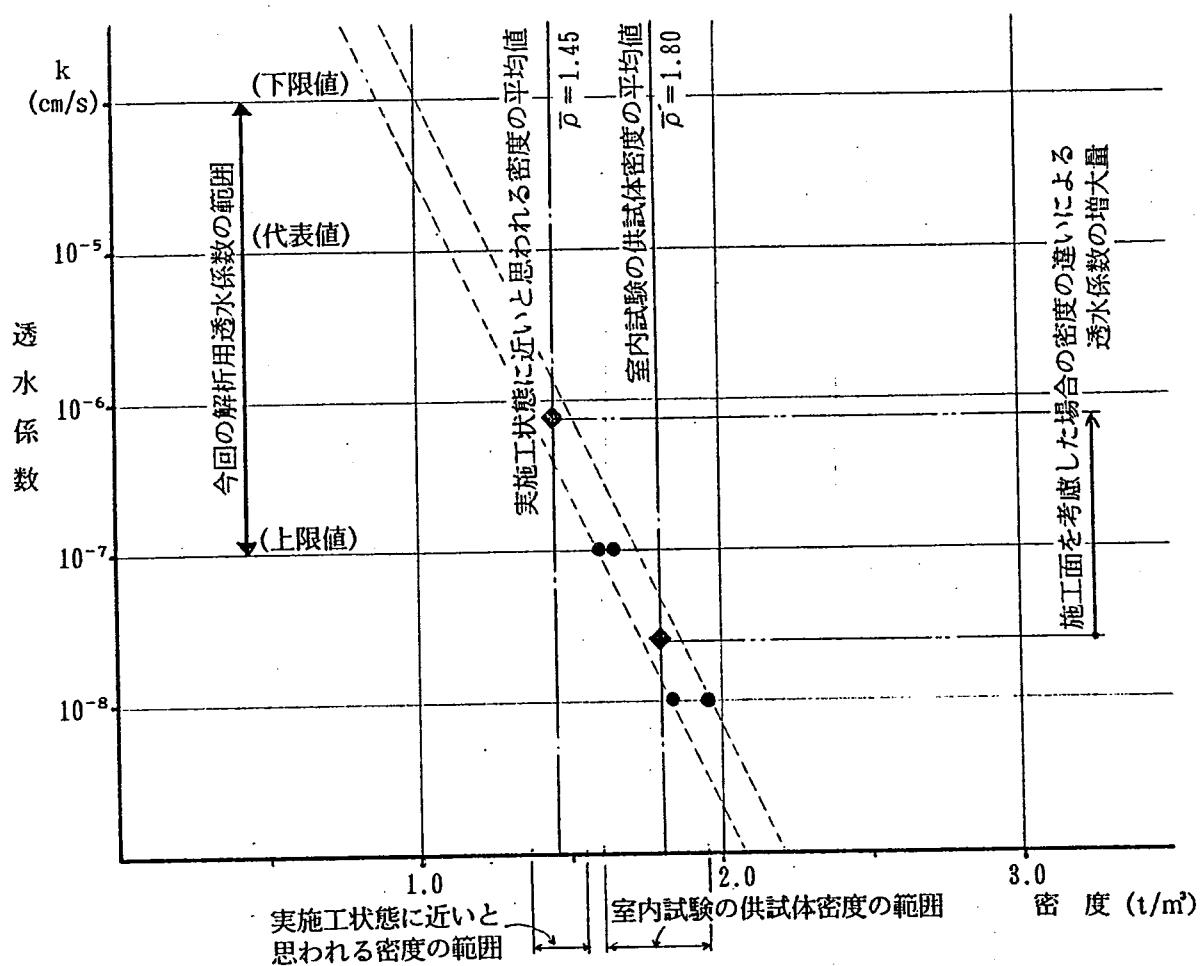


図-A.2.3.1 埋戻し材の密度と透水係数の関係

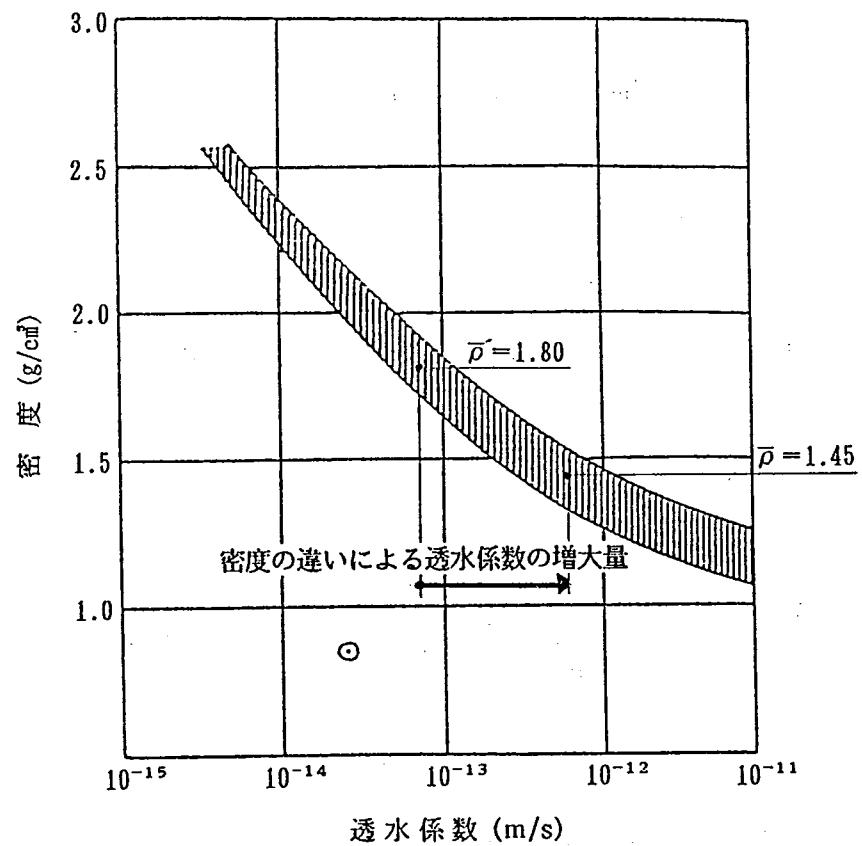


図-A.2.3.2 Na-ペントナイトの密度と透水係数の関係^{A11)}
(PUSCHのデータ)

2.3.3 熱特性

埋戻し材の比熱に関する試験データは、セメント系材料（セメント+水ガラスの複合材料）の値として、花崗岩とほぼ同様の0.18~0.22 kcal/kg°Cが得られている^{A11)}が、今後のデータの蓄積が望まれる。

そこで、ここではストリーパにおけるトンネル上部及び下部の埋戻し材の値に基づき以下の如く、熱拡散性に関するパラメータとして比熱（C）と熱伝導率（λ）を設定する。

表-A.2.3.3 埋戻し材の比熱と熱伝導率の設定

材料 物性	トンネル上部 (ベントナイト 含有率20%)			トンネル下部 (ベントナイト 含有率10%)			下限値	代表値 (平均値)	上限値
比熱 C (kcal/kg°C)	0.27	0.34	0.21	0.20	0.33	0.27 → 0.20		0.27	0.34
熱伝導率 λ (kcal/mh°C)	0.40	0.56	0.30	0.30	0.95	0.90 → 0.30		0.57	0.95

また、熱容量（Cb）は、NAGRA NGB 85-09 (9-7) 式^{A6)} より、以下の如くその代表値を設定する。

$$C_b = \frac{\rho}{1 + \omega} (\omega \cdot C_w + C_s)$$

$$= 630 \text{ kcal/m}^3\text{°C}$$

ここに、 ρ : 密度 (1450kg/m³)

ω : 含水比 (29%)

C_w : 水の比熱 (1.0kcal/kg°C)

C_s : 固相の比熱 (0.27 kcal/kg°C)

資料-5 続成作用について

(PNC SJ4449 90-001廻分場の閉鎖技術に関する調査・試験研究 H1.3.31より)

資 1.1 続成作用

ひとたび水底に沈積した未固結状態にある沈積物は、石化作用 (lithification) を被って岩石になる過程を通じて、地殻運動とは無関係に地表部において低温・低圧下の物理的、物理化学的及び生物化学的作用を受け、沈積当初からかなり変化した状態を生ずる。この過程に連続的に発生する諸作用及び変化を総称して続成作用 (diagenesis) と呼んでいる。

しかし、続成作用の定義は多くの研究者によってかなり異なったニュアンスをもって使われているが、大方の意見として続成作用とは、沈積から变成に至る過程に対して用いられるべきであり、続成作用と变成作用 (metamorphism) は連続的関係にあるとしている。

① 続成段階の分類

砂質、泥質、硅質及び石灰質などの堆積物は種類によってその中に発生する続成作用はかなり違ってくるが、一般に続成作用は次の経緯をたどると考えられる。

第1段階として、圧密 (compaction) を受けるに先だって、未固結状態の堆積物には、埋没を通じあるいはその直後に酸化-還元の反応が活発に発生する。その結果、水域が海水か淡水かにより異なるが、水の化学成分と沈積物及び懸濁物を構成する鉱物及び有機物との間に物理化学的及び生物作用が働いて、化学反応の顕著に現れる続成過程を生ずる。従って、この段階は、酸化-還元作用の活発に働く化学変化に対する鉱物変化、特に粘土鉱物の転換及び生成が特徴的である。

第2段階として、未固結堆積物は次々に重なる堆積物の積載荷重による荷重圧と横圧力を受けて圧密し、その結果、同堆積物中には間隙水 (interstitial water) の脱水、移動及び堆積粒子の再配列が起こる。

しかし、圧密作用によって堆積物が凝固する過程を通じて、堆積物の間隙に含まれる水が各種の多孔質堆積物、即ち、砂礫、軟泥、火山碎屑物及び凝灰岩などを間隙水あるいは層間溶液 (pore solution) として流通する。そして、その通路の岩石をつくる鉱物成分の溶解により、各種の成分が間隙水中に溶存される。この固相と液相の間に行われる化学反応は、続成的にそこに発生する

圧力と熱に影響され、やがて堆積物の間隙に新たな鉱物の沈殿を生じ、それによって鉱物粒子を固結する膠結作用 (cementation) を発生して、堆積物を一層結合硬化させる。

しかし、地向斜堆積の場合には、地層の累積の増大につれ地熱と地圧の増加を生じ、これに影響されて間隙水の移動と化学反応がいっそう活発になる。その結果生ずる間隙水の pH と E h は造岩鉱物を溶解し、ときには膠結物を溶かす脱膠結作用 (decementation) を発生し、例えば間隙粘土がシリカにより、石英が方解石により置換されるごとく交代作用 (replacement) がこの段階において顕著に行われる。

第3段階として、やがて埋没深度が約500 m程度以上に達すると地熱及び地圧がより増大し、造岩鉱物の溶解につづいて、再結晶作用 (recrystallization) と粒子成長 (grain growth) が行われる。この続成末期の段階には各種の造岩鉱物の再溶解と転移 (inversion) が活発となり自生の長石類及び雲母類の生成など自生鉱物 (authigenic minerals) の形成が特徴的である。この段階は変成作用に連続的であって両者の境界をはっきりしないが、地向斜形成などに伴う火成活動の熱水性の各種作用の堆積物に対する効果は続成作用のものでない。

実際的には、堆積物の種類、堆積環境の相違により極めて複雑なプロセスをたどる堆積物の続成作用について、各種続成作用の発生する経緯を根幹にして、総合的に検討し、庄司氏は続成過程を大きくみて圧密を受ける以前で酸化-還元反応の顕著に現れる未凝固状態の堆積物の続成期、次に圧密効果が次第に大きくなり、間隙水の移動と化学反応が堆積物の膠結と交代の再作用を特徴的にもたらす続成期、さらに埋没深度の増大につれ地熱と地圧による効果が続成に強く働き、再結晶作用を顕著に生じ、かつ自生鉱物を優勢に形成する続成作用の3つの段階に分けて続成過程を議論することが適当であるとして、それぞれの段階を埋没前続成段階、浅所続成段階及び深所続成段階に分類した。

その他、続成段階の区分に関し多くの学者は、粒子や孔隙の変化あるいは埋没深度の面より、続成作用をいくつかの段階に分けている。(図資1) 例えば、Hedberg は、泥質堆積物の圧密段階について、その孔隙率が90~75%の機械的再配列段階、脱水段階(75~30%)、機械的変形段階(35~10%)及び再結晶段階(10%以下)の4つに区分した。Weller は、孔隙率が80~45%、45~35%、35~10%及び10%以下の4段階を考えた。Burst は、孔隙率が77~30%の第1段階、30~16%の第2段階及び16~5%の第3段階に区分した。また、前述の如く、Fairbridge は続成作用を3つの段階に分け、初期続成作用は1000

～10万年、1～100m、中期統成作用は1000～1億年、1～10,000m、後期統成作用は1000～10億年、1～3000mの時間及び深度にわたって続くと説明した。その後、青柳らはモンモリロナイト粘土の圧密実験の結果より、泥質岩の孔隙率が30%以上の初期圧密段階及び30%以下の後期圧密段階を考えた。星野・井波は、泥質岩の圧縮係数と圧密との関係より、圧密段階を粘性圧密段階（孔隙率が30%以上）、塑性圧密段階（30～10%）及び弾性圧密段階（10%以下）に3区分した。

以上に述べた各研究者の報告によると、泥質岩の孔隙率が30%及び10%に意味があることがわかる。また、泥質堆積物の原始孔隙率は、太平洋の現世堆積物やガルフコーストのデルタ堆積物などの研究結果より、ほぼ80%と考えられる。そこで青柳・浅川は、泥質岩の統成作用の過程を初期圧密段階（孔隙率が80～30%）、後期圧密段階（30～10%）及び再結晶質段階（10%以下）に区分することを提案した。

Porosity (%)	Hedberg (1936)	Weller (1959)	Burst (1969)	Hoshino & Inami (1977)	Aoyagi & Asakawa (1977)
9.0					
8.0	Mechanical Rearrangement				
7.0		(Plastic)			
6.0	Dewatering		I	Viscous Compaction	Early Compaction
5.0					
4.0		(Grain Contact)			
3.0	Mechanical Deformation	(Grain Distortion)	II	Plastic Compaction	Late Compaction
2.0					
1.0	Recrystallization	(Crushing)	III	Elastic Compaction	Recrystallization

図資1 泥質堆積物の孔隙率変化からみた統成作用の区分

資料 - 6

Operating Phase Experiments Planned for Atomic Energy of
Canada Limited's Underground Research Laboratory