

# 長期岩盤挙動の評価のための巨視的 観点による基礎的研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
T	J1602 97-004	1997 5.27.

この資料は技術管理室保存資料です  
閲覧には技術資料閲覧票が必要です  
動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

1997年3月

東京大学

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13  
動力炉・核燃料開発事業団  
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Technology Management Division, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

## 長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究

大久保 誠介<sup>※</sup>

## 要 旨

本研究は1994年度にはじめられた。1994年度には、空圧式クリープ試験機の改良を行った。1994年度の終わりに、稲田花崗岩を購入し、P波速度やシュミットハンマー試験などを行った。

1995年度には、空圧式クリープ試験機を使用して、湿潤状態の田下凝灰岩のクリープ試験を継続的行った。また、完全応力-歪曲線を求めるために、サーボ試験機を用いて一軸圧縮試験と一軸引張試験を行った。さらに、サーボ試験機を用いて稲田花崗岩の短期クリープ試験を行った。1995年度中に開始する予定である稲田花崗岩を用いたクリープ試験に備えて、油圧式クリープ試験機の改造をおこなった。狙いは、耐久性と安定性の向上である。特に測定装置は、完全に取替えて新しいものとした。

1996年度は、クリープ試験、圧縮試験および引張試験を行った。第2章にてクリープ試験の結果を述べる。前年度より引き続いて行った田下凝灰岩のクリープ試験では、設定したクリープ応力が一軸圧縮強度の30%と小さいにも拘わらず、2年以上経過してもクリープ歪は増加し続けた。しかしながら試験期間の途中で歪アンプが壊れてしまったので試験を中止した。1995年度に購入した砂岩を用いて短期クリープ試験を実施した。使用したのはサーボ試験機である。また、1995年度に長期の試験に耐えるように改良した油圧クリープ試験機を用いて稲田花崗岩のクリープ試験を実施した。

本年度は、サーボ試験機を使用して砂岩の一軸圧縮試験、一軸引張試験を行った。試験を実施した目的は、主として完全応力-歪曲線を得るためである。また、圧裂引張試験も比較のために行った。実験結果を第3章に示す。

2つの様式の周圧維持装置を検討した。一つは油圧式でもう一つは空圧式である。油圧式は従来より良く使用されてきた様式であるが、今回は長期にわたって使用されることが予測されたため計測システムの安定性と耐久性には十分留意を払って改造した。この油圧式周圧維持装置を試用してみたところ、正確な周圧制御が可能で信頼性が高いことがわかった。一方の空圧式周圧維持装置は安価であり取り扱いも簡単であるが、正確さや信頼性はやや劣ることが判明した。第4章にて検討結果を述べる。

コンプライアンス可変型構成方程式に関して検討した。この構成方程式は比較的簡単な形をしているが、従来の多くの構成方程式が適用できない強度破壊点以降の領域まで用いることができる。この構成方程式を組み込んだ有限要素法プログラムについて解説するとともにプログラムリストを示した。この構成方程式は以前大久保らによって開発され提案されたものである。この構成方程式には4つの常数が含まれているが、これらをいかに求めるかについて議論した。その結果、定歪速度試験が最も適していることが判明した。クリープ試験、定応力速度試験、応力緩和試験より常数を求めることは若干難しい。以前おこなった実験結果を利用して7種類の我が国産の岩石について、構成方程式の常数を求めてみた。また、試験的ではあるが、各常数に及ぼす周圧の影響や含水率の影響についても検討した。構成方程式に関する検討結果は第5章で述べる。

---

本報告書は、東京大学が動力炉・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：080D0120

事業団担当部課室および担当者：東濃地科学センター 地質環境研究室 坪田浩二

※：東京大学工学部 教授

Fundamental Study on long-term Stability of Rock  
from the Macroscopic Point of View.

Seisuke Okubo<sup>※</sup>

Abstract

In the fiscal year of 1994 when this project was started, a pneumatic creep testing machine was modified. At the end of the fiscal year of 1994, Inada granite was purchased, and the preliminary tests such as P-wave velocity measurement and Schmidt hammer testing were carried out.

Through the fiscal year of 1995, a specimen of Tage tuff under water-saturated condition had been loaded in uniaxial condition in the pneumatic creep testing machine. In the fiscal year of 1995, the uniaxial compression and tension tests, and the short-term creep test of Inada granite were also carried out in the servo-controlled testing machines to obtain the complete stress-strain curves. A hydraulic creep testing machine which was planned to use in the next year was modified for long-term creep testing. Finally, a constitutive equation of variable compliance type was examined based on the experimental results.

In fiscal year of 1996, creep, compression and tension tests were carried out. In chapter 2, the experimental results of creep tests are described. Though creep stress of Tage tuff was set at as low as 30% of the uniaxial compressive strength, creep strain was continuously increasing after elapsed time exceeded 2 years. Unfortunately, the strain amplifier failed and we had to stop this creep test. Creep tests of sandstone purchased in 1995 were performed in a servo-controlled testing machine at relatively high creep stress levels. Creep test of Inada granite was also carried out in the hydraulic creep testing machine modified for long-term creep testing in 1995.

Uniaxial compression, uniaxial tension tests of sandstone were carried out in servo-controlled testing machines to obtain the complete stress-strain curves. Also, indirect tension test was carried out to compare with the results obtained in uniaxial condition. The experimental results are given in chapter 3.

Two types of pressure maintenance equipment were developed and examined. One is hydraulic type and another is pneumatic type. The hydraulic type equipment modified for long-term creep testing especially in the measurement system to ensure durability and stability was found to be precise and reliable. The pneumatic type equipment newly developed was comparatively less precise and reliable, however, low in price and easy to handle. In chapter 4, two types of pressure maintenance equipment were described.

In chapter 5, a constitutive equation of variable compliance type was discussed based on the experimental results. Though the equation has relatively simple form, it can be applied beyond the strength failure point up to the post-failure region. The constitutive equation was implemented in two-dimensional FEM program. The variable-compliance-type constitutive-equation was formerly proposed by Okubo et al. Several ways how to obtain a set of four constants required to solve the equation were described. The constant strain-rate test, comparing with creep, constant stress-rate and relaxation tests, is recommended to be most appropriate for obtaining constants readily and easily. Based on some example sets obtained through experimental works on seven Japanese rocks, the effects of confining pressure and moisture content on the value of each constant were discussed.

---

Work performed by The University of Tokyo under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Geological Environment Research Section, Tono Geoscience Center  
Koji Tsubota

※:The University of Tokyo, Faculty of Engineering; Professor

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. クリープ試験 .....	2
2. 1 空圧式クリープ試験機を使用した長期クリープ試験 .....	2
2. 2 油圧式クリープ試験機を使用した中期クリープ試験 .....	4
2. 3 サーボ試験機を用いた短期間クリープ試験 .....	6
3. 強度試験 .....	29
3. 1 一軸圧縮試験 .....	29
3. 1. 1 試料岩石と試験条件 .....	29
3. 1. 2 試験結果 .....	30
3. 2 一軸引張試験 .....	31
3. 2. 1 試料岩石と試験条件 .....	31
3. 2. 2 試験結果 .....	32
3. 3 圧裂引張試験 .....	33
4. 周圧維持装置 .....	63
4. 1 油圧式周圧維持装置 .....	63
4. 2 空圧式周圧維持装置 .....	64
5. 構成方程式の検討 .....	82
5. 1 コンプライアンス可変型構成方程式の定数 .....	83
5. 2 構成方程式を組み込んだ有限要素法プログラム (2次元) .....	86
6. まとめ .....	106
参考文献 .....	107
付録 I 東濃鉱山北延 NATM 坑道付近コア弾性波測定結果 .....	108
付録 II 間隙水圧保持装置に関する予備調査 .....	118

## 1. はじめに

巨視的観点からの長期岩盤挙動の評価の確立を目指し、平成6年度よりこの委託研究は始まった。平成6年度は、比較的小さな荷重を簡便に加えられる、空圧式クリープ試験機に関する検討を中心に行った。また、今後検討するための岩石試料として稲田花崗岩を選定し、入手するとともに非破壊検査を実施した。

平成7年度の研究範囲は、以下に列挙するように平成6年度に比べてかなり広がった。①平成6年度に始めた空圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験を引き続き行った。②今後検討を進める予定の稲田花崗岩の基礎物性を把握するため一軸圧縮試験と一軸引っ張り試験を実施した。③本研究では、将来、花崗岩の長期クリープ試験を実施する予定であるが、それに先立って、既存のサーボ試験機を用いた短期クリープ試験を行った。④大きな荷重を長期間にわたって加え続けることができる油圧式クリープ試験機の改良と試用を行った。⑤従来の実験結果をまとめ、どのような挙動を再現することが構成方程式に期待されるかを調査し、ついで非線形構成方程式基礎式の紹介とその解析解について述べた。⑥堆積岩の長期時間依存性挙動も今後検討する予定である、その準備段階として3種類の砂岩について予備的検討を加えた。

本年度の研究範囲を大別すると、クリープ試験、強度試験、周圧維持装置の開発、構成方程式の検討の4つになる。第2章にてクリープ試験についてのべる。まず、平成6年度に始めた空圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験結果について述べ、さらにサーボ試験機を用いた短期クリープ試験と、油圧式クリープ試験機を使用した中期クリープ試験結果について述べる。第3章にて強度試験について述べる。強度試験として、一軸圧縮試験、一軸引張試験および圧裂引張試験を行ったのでその結果について述べる。第4章にて本年度より検討を開始した周圧維持装置について述べる。まず、従来よりしばしば使用されてきた油圧式周圧維持装置について述べる。ついで、より小型で安価に製作できる空圧式周圧維持装置の開発と試用を行ったのでその結果について述べる。第5章にて構成方程式の検討結果について述べる。昨年度は1次元の構成方程式評価用プログラムを報告書に添付したが、本年度は2次元有限要素法プログラムを添付しその使用方法について解説する。ただし、このプログラムを用いた計算結果の詳細な評価は次年度以降に行う予定である。また、構成方程式に含まれるパラメータの求め方と、いくつかの岩石におけるパラメータの値についても述べる。第6章は本年度の研究のまとめである。また付録として、東濃鉦山北延 NATM 坑道付近コア弾性波測定結果と、今後の研究で必要となる可能性の高い間隙水圧保持装置に関する予備調査結果を添付する。

## 2. クリープ試験

### 2. 1 空圧式クリープ試験機を使用した長期クリープ試験

空圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験を本年度も引き続いておこない、試験機の長期安定性・耐久性を検討するとともに、岩石の長期にわたる時間依存性挙動について調査をおこなった。平成8年7月までは、順調に測定が行われた。その時点までの結果を、図2-1に示す。クリープ歪は、昨年度の報告書で示した結果からほとんど変化していないことがわかる。クリープ歪を測定するためのストレイン・メータが、平成8年8月に故障した。故障は修理を依頼した共和電業(株)の修理報告により、零点調整用のアンプが劣化したものと判明した。

実験中にどのように測定に現れたかについて述べることにする。初期の兆候とし、それまで日変化のなかったクリープ歪が、1日あたり約 $6 \times 10^{-5}$ ずつ増加する現象が1ヶ月弱続いた。この現象が生じているときの処置として、かなりの疑問点はあったが、実際に岩石が破壊に近づいているのではないかということも考えられたため、そのまま放置して観測を行った。10日程度経過した段階で、装置の故障の可能性があると考えて、今までの経験で装置的に故障しそうな箇所として、歪ゲージ式の変位計における歪ゲージのはがれ、あるいは、ストレイン・メータへ入力するためのブリッジ・ボックスの接触不良が考えられたため、試験中に両者を丹念に調べた。その結果、全く異常がないことが確認できたため、そのまま実験を続行した。クリープ歪が増加する現象が現れ始めて1ヶ月弱経過した段階で、クリープ歪が急激に大きくなった。最終的にストレイン・メータの出力が、定格出力まで上昇したため、破壊したものと考え、岩石のクリープ応力を0として、試験片を取り出した。その結果、まったく破損していない事実が判明したため、何らかの計測装置が故障したことがこの時点で初めて確認できた。そのため、各装置を調べた結果、ストレイン・アンプの零点の異常(故障)であることが判明した。使用したストレイン・アンプは購入後10年程度経過したものであるが、最近のストレイン・アンプは従来のものに比べて性能が格段によくなっており、今までの経験の中でストレイン・アンプの故障は初めてであった。このように、クリープ歪が増加する方向に、しかも徐々に増加するという現象が現れた際には、実際に岩石が破壊していく過程と区別するのは難しく対策を考える必要があることがわかった。

ストレイン・メータの故障として、今回生じた零点の異常の他に、ゲインの異常も同様に考えられる。この両者に対する対策としては、以下の手段が最も簡単であると考えられる。

ストレイン・メータのキャリブレーション用のキャリブレータを用意する(図2-2参照)。キャリブレータは、基本的に精密な抵抗から成り立っており、経年変化には非常に強いと考えられる。図2-2に示すように、前面のつまみを回すことにより、任意の歪量を出力することができる。実験に際して、最初通常通り、変位計の出力をストレイン・メータにいれ、零点およびゲイン調整を終了した後、このキャリブレータをストレイン・メータに入力する。そこで、零をまず出力し、その時のストレイン・メータの出力を記録しておく。次に、キャリブレータのつまみを回し、任意の歪量を出力し、その際のストレイン・メータの値も記録しておく。この動作を1ヶ月に1回程度行うことにより、ストレイン・メータの零点およびゲイン変動があるのかを調べるのが可能である。もし、変動が生じた場合には、新しいストレイン・メータ

を用意し、実験を開始する前の段階で調べたキャリブレーションの値となるように、ストレイン・メータの零点とゲインを調整することにより、実験を継続することが可能である。

ストレイン・メータの他に、劣化したものは、データ記録用の5 inchのディスクであった。これについては、1週間に1回程度、クリーニング用のディスクによって洗浄することにより、ある程度は対応できると考えられるが、挿入口がオープンタイプであるため、ごみがつきやすいので、密閉タイプである、ハードディスクなどの方がよいかもしれない。

装置的に故障が現れたので、その対策などを検討するため、予備的に昨年度と同じ条件で1ヶ月程度のクリープ実験を行った。その結果を、図2-3に示す。図では、時間の経過とともに、クリープ歪が増加している。載荷してから $10^3 \sim 10^4$  sの間で、クリープ曲線は若干波立つ現象が見られた。これは、湿潤状態とするために使用した水の温度変化による岩石の膨張と収縮に起因しているのではないかと考えられる。すなわち、18 l入りのイオン交換水から水を取り出して実験に用いたが、水の温度が室温に近くなる以前に実験を開始してしまったからではないかと考えられる。その点以外についてはデータの安定性も非常によく、試験的には問題がないと考えられる。また、図2-1の結果と比較すると、両者とも $10^5$  s程度経過した時のクリープ歪は、 $5 \times 10^{-4}$ 程度であり、非常によく一致している。

以上のように、ある程度順調な測定が可能となったのを確認できたので、予備的な試験をいくつか行った後、以下に示すような、先ほどと同じ条件で本実験を来年度から再開することにする。

- 岩石：田下凝灰岩
- 環境：常温下、湿潤状態
- クリープ応力：一軸圧縮強度の30%
- 試験片：直径2.5 cm、高さ5 cmの円柱



## 2. 2 油圧式クリープ試験機を使用した中期クリープ試験

本節では、50 kNの油圧式クリープ試験機（装置については、昨年度の報告書第6章参照）により、稲田花崗岩のクリープ試験を気乾状態と湿潤状態で行った結果について述べる。なお気乾状態と湿潤状態に関する説明は3. 1節で述べる。装置に関しては、昨年度から変更していない。

変位の測定に関しても、昨年度の報告書のp. 30で述べたように

- 変位の分解能 : 約 $10^{-6}$  m（試験片の高さが40 mmとして、歪では $3 \times 10^{-5}$ ）
  - サンプリング時間 : 約0. 3 s
  - 経過時間の単位 : 1 s
- とした。

試験期間6ヶ月の気乾状態の稲田花崗岩のクリープ試験をまずおこなった。試験条件を以下に示す。

- 岩石 稲田花崗岩
- 環境 常温下, 気乾状態
- 試験片 直径20 mm×40 mmの円柱形
- 応力レベル 50%

気乾状態の一軸圧縮強度204 MPa（3. 1節参照）より、  
クリープ応力102 MPaとした。クリープ荷重では32 kNである。

その結果、クリープ変形は観測できなかった。すなわち、6ヶ月でのクリープ歪は $3 \times 10^{-5}$ （変位の分解能）以下であった。そのため結果を図に示していない。

続いて、湿潤状態でのクリープ試験の結果について述べる。

- 岩石 稲田花崗岩
- 環境 常温下, 湿潤状態
- 試験片 直径20 mm×40 mmの円柱形
- 応力レベル 30%, 50%

湿潤状態の一軸圧縮強度は190 MPa（3. 1節参照）より、  
クリープ応力はそれぞれ57 MPaおよび95 MPaとした。  
クリープ荷重ではそれぞれ17. 9 kNおよび29. 8 kNである。

図2-4に応力レベル50%の場合、図2-5に応力レベル30%の場合の歪の経時変化を示す。図の縦軸は弾性変形を含んだ載荷前からの歪を表している。載荷直後1 sでの歪みは応力レベル50%では $3. 75 \times 10^{-3}$ 、30%では $2. 6 \times 10^{-3}$ であり、3章の一軸圧縮試験でのそれぞれの応力に対する歪とほぼ一致している。図2-4を見ると片対数グラフ上で、クリープ歪は $10^4$  sまでは直線的に増加し、その後、若干下に凸の曲線を描いている。1 s後から $10^6$  s（約2週間）経過した時までの歪は約 $4 \times 10^{-4}$ である。先ほど述べた同じ応力レベルで気乾状態の場合には、6ヶ月を経過してもクリープ歪は $3 \times 10^{-5}$ 以下であったのに対

して、かなりのクリープ歪が現れたことになる。このことは稲田花崗岩の低応力レベルでのクリープ現象において水の有無によってかなり状況が変化することを表しており、重要な事項である。図2-5に示した応力レベル30%の場合にはほぼ対数クリープ則に従い、クリープ歪と経過時間の対数はほぼ直線関係が成立している。

図2-6に、応力レベル30%および50%時の荷重1s後の歪を0として表したクリープ歪の経時変化を示す。図を見ると、クリープ歪は明らかに応力レベル50%の時の方が大きくなっているが、 $10^5$ sまでのクリープ歪を見た場合、クリープ歪は応力レベルに比例しているように見える。 $10^5$ s以降では、応力レベル50%の方がクリープ歪の増加率が大きくなり、その応力レベルに比例する傾向からはずれ始めていることもわかる。

花崗岩というと、クリープは生じないというイメージを多くの実務者が持っている。その原因は圧縮強度が比較的高いため、相対的に見たクリープ応力（クリープ応力レベル）が低いことが多いからであるが、花崗岩でもクリープ現象は生じる。特に湿潤状態でのクリープ変形は予想した以上に大きいことが今回の結果から判明し、今後の研究においても重要な事項となるであろう。

## 2. 3 サーボ試験機を用いた短期クリープ試験

本節では、100 kNのサーボ試験機により、高クリープ応力下での一軸圧縮クリープ試験結果について述べる。サーボ試験機を用いたクリープ試験では、絶えず電気・油圧的に応力の制御を行っているので、停電に対する対策は難しく、かつ電氣的雑音による停止が生じやすいため、長期的な試験よりは、短期的な試験に向いている。そこで数時間程度で試験が終了するような高クリープ応力を作用させ、一次クリープから、破壊過程である三次クリープまでのデータを採取することにした。

昨年度は、稲田花崗岩の気乾状態での短期クリープ試験を行った。本年度は、稲田花崗岩の湿潤状態と、3種類の砂岩（白浜砂岩，諫早石，平島石）の気乾および湿潤状態での一軸圧縮クリープ試験を行った。試験条件などの要点は下記の通りである。

### ○試料岩石

- ・稲田花崗岩 昨年度の報告書3. 1節で述べた#3を使用した。
- ・白浜砂岩 昨年度の報告書8章で述べたブロックを使用した。
- ・諫早石 昨年度の報告書8章で述べたブロック1を使用した。
- ・平島石 昨年度の報告書8章で述べたブロック1を使用した。

### ○試験片

- ・稲田花崗岩 直径20 mm×高さ40 mmの円柱形試験片
  - ・白浜砂岩，諫早石，平島石 直径25 mm×高さ50 mmの円柱形試験片
- 砂岩に関しては、3. 2節で述べる一軸引張試験と同寸法とするためにこのようにした。  
コアはすべて天地方向に抜いた。端面は平面研削盤により平行度1/100 mm以内に仕上げた。

### ○気乾状態

空調をした実験室で2週間以上自然乾燥した後実験に供した。なお、実験室の温度は $20 \pm 5^\circ\text{C}$ で、湿度は $65 \pm 15\%$ に保たれている。

### ○湿潤状態

岩石を完全湿潤状態にさせ、試験に際しても水中で行う（詳細は3. 1節参照）。

### ○試験数

同一岩種で気乾状態，湿潤状態でそれぞれ3～5本とした。

### ○試験機

試験機は、独自に開発した容量100 kNのサーボ試験機を用いた。

### ○試験方法およびクリープ応力

2. 1節，2. 2節で述べたクリープ試験ではステップ状に一気にクリープ応力を作用させた。サーボ試験機ではステップ状にクリープ応力を作用させると、制御上の問題でオーバーシュート過渡応答の一種が生じて応力が瞬間的に設定荷重より高くなるので、歪速度 $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の定歪速度制御で徐々に応力を作用させ（載荷開始してから数十s後にクリープ試験が開始される），設定したクリープ応力になった時点でクリープ試験を開始した。ほとんどの試験でクリープ破壊が生じたが、数時間を経過しても破壊しなかったものに対しては、試験を中断し、その時点までの結果を示した。

また、同一条件でなるべくクリープ寿命を数十sから $10^5 \text{ s}$ （約1月）に変化させるために、

各岩石ごとのクリープ応力レベルは適当に変化させた。ここでいうクリープ応力レベルとは、クリープ応力と、3.1章で述べる荷重速度  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  での一軸圧縮強度の比である。各実験でのクリープ応力レベルは、実験結果にそれぞれ示している。

#### ○クリープ変位

・変位の分解能： $5 \times 10^{-7} \text{ m}$  (歪の分解能は、試験片の高さが40 mm, 50 mmでそれぞれ  $1.25 \times 10^{-6}$ ,  $10^{-6}$ )

・サンプリング時間：0.07 s

#### ○クリープ歪の原点

2.2節では荷重1 s後の歪をクリープ歪の原点とした。これは1 s後には確実にクリープ応力に達していることを前提として、弾性歪を分離した。本節の実験の場合には、クリープ試験を開始した時点で、クリープ応力に達しているため、クリープを開始した時点の歪をクリープ歪の原点として、そこからの歪の増加分をクリープ歪とした。

図2-7に気乾状態でのクリープ歪みの経時変化を示す。(b)の諫早石のクリープ応力レベル87%以外は、すべての試験で破壊が生じていることがわかる。傾向的には荷重直後から、クリープ歪は経過時間の対数にほぼ比例して増加していき、次第に傾きが増加し、破壊を迎えている。(a)の白浜砂岩ではクリープ応力が100%でもクリープ寿命が2000 s程度もあり、他の岩石に比べクリープ応力レベルに対する寿命が長い。これは一軸圧縮試験は湿度の高い夏場に行い、他方クリープ試験は湿度の低い冬場に実施したため、一軸圧縮強度が湿度の影響で数%程度低下していた可能性がある。この点に関してはこれ以上の考察は無理であるが、後述する湿潤状態では試験中水中下で実験を行うので、実験室の湿度の影響が現れないと考えられる。その結果ではクリープ応力レベルとクリープ寿命は問題がない。湿度は季節の他にも雨の日にもかなり変動するため、砂岩のように水分によって強度の変化しやすい場合には、気乾状態でのクリープ試験は比較的難しいといえよう。平島石の応力レベル95%と94%を除き、クリープ応力レベルの増加によってクリープ寿命は短くなっており妥当な結果となった。

図2-7では、三次クリープの様子がわかりにくいので、クリープ寿命から経過時間を引いた残存寿命によって図2-7を書き換えたのが図2-8である。図2-8では、時間の経過に従い、残存寿命は短くなり右から左に移行していく。最初、クリープ歪が急激に増加している右側の領域が一次クリープである。図ではすべての岩石でクリープ歪は、残存寿命の対数の減少に従い、直線的増加しておりこの部分が3次クリープといえる。これは当研究室で行った他の岩石についても成立しており、かなり一般的な特性である。傾向としては残存寿命が同じであれば、クリープ寿命が短くなると、クリープ歪が小さくなることが図からわかる。これは応力-歪曲線の形状と関係がある。詳細は文献(福井他, 1989)を参照されたい。

図2-9に、湿潤状態でのクリープ歪みの経時変化を示す。傾向的には先ほどの気乾状態でのクリープ曲線と類似しており、一次クリープでは経過時間の対数にほぼ比例してクリープ歪が増加して、徐々に傾きを増していきクリープ破壊している。他の砂岩に比べて、稲田花崗岩のクリープ歪が小さくなっていることがわかる。また図2-6に示した湿潤状態での稲田花崗岩の低クリープ応力レベルの場合に比べると、若干クリープ歪は大きくなっている。また稲田花崗岩では80%のクリープ応力で6時間程度の寿命しかない。これは気乾状態と同じクリープ

応力レベルの場合と比較してかなり寿命が短くなっており、水分の影響でクリープ現象も生じやすくなっている。

先ほどと同様に、三次クリープでのクリープ歪の変化を調べるために、経過時間の代わりに残存寿命を用いたものが図2-10である。砂岩では白浜砂岩の74%を除き、クリープ歪は残存寿命の対数にほぼ比例している。他方、(a)の稲田花崗岩ではすべての結果で、三次クリープで波打っているような曲線となった。これは文献(福井他, 1989)にも示したように稲田花崗岩の破壊では側面が局所的な破壊を繰り返しながら、最終破壊に至るため、このようになったものと考えられる。

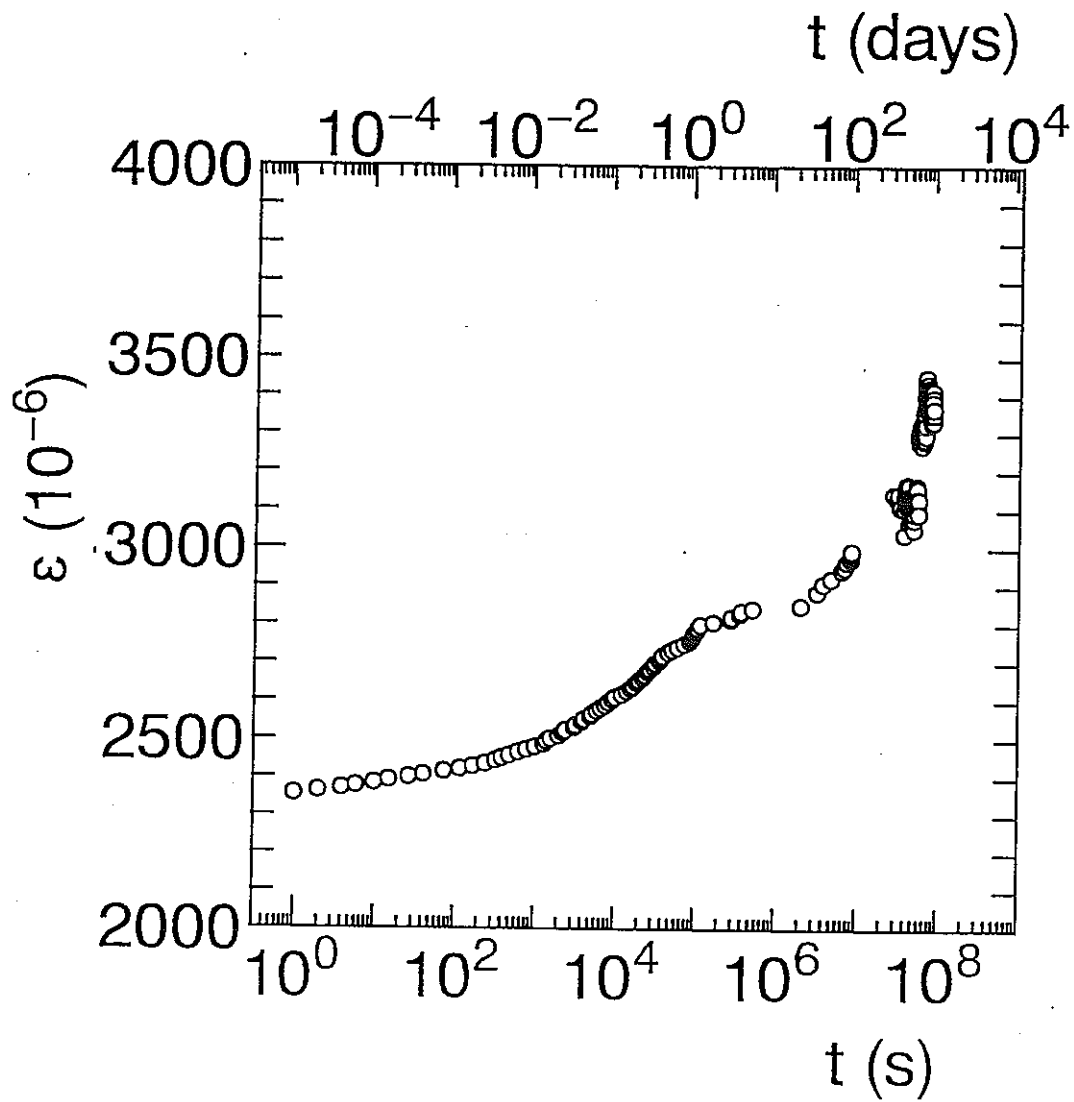


図 2-1 歪の経時変化  
 田下凝灰岩, 湿潤状態  
 クリープ応力レベル 30%

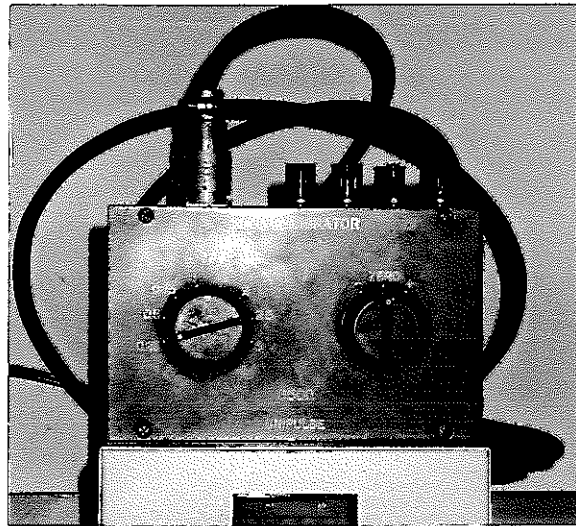


図 2 - 2 キャリブレータ  
ユニパルス製

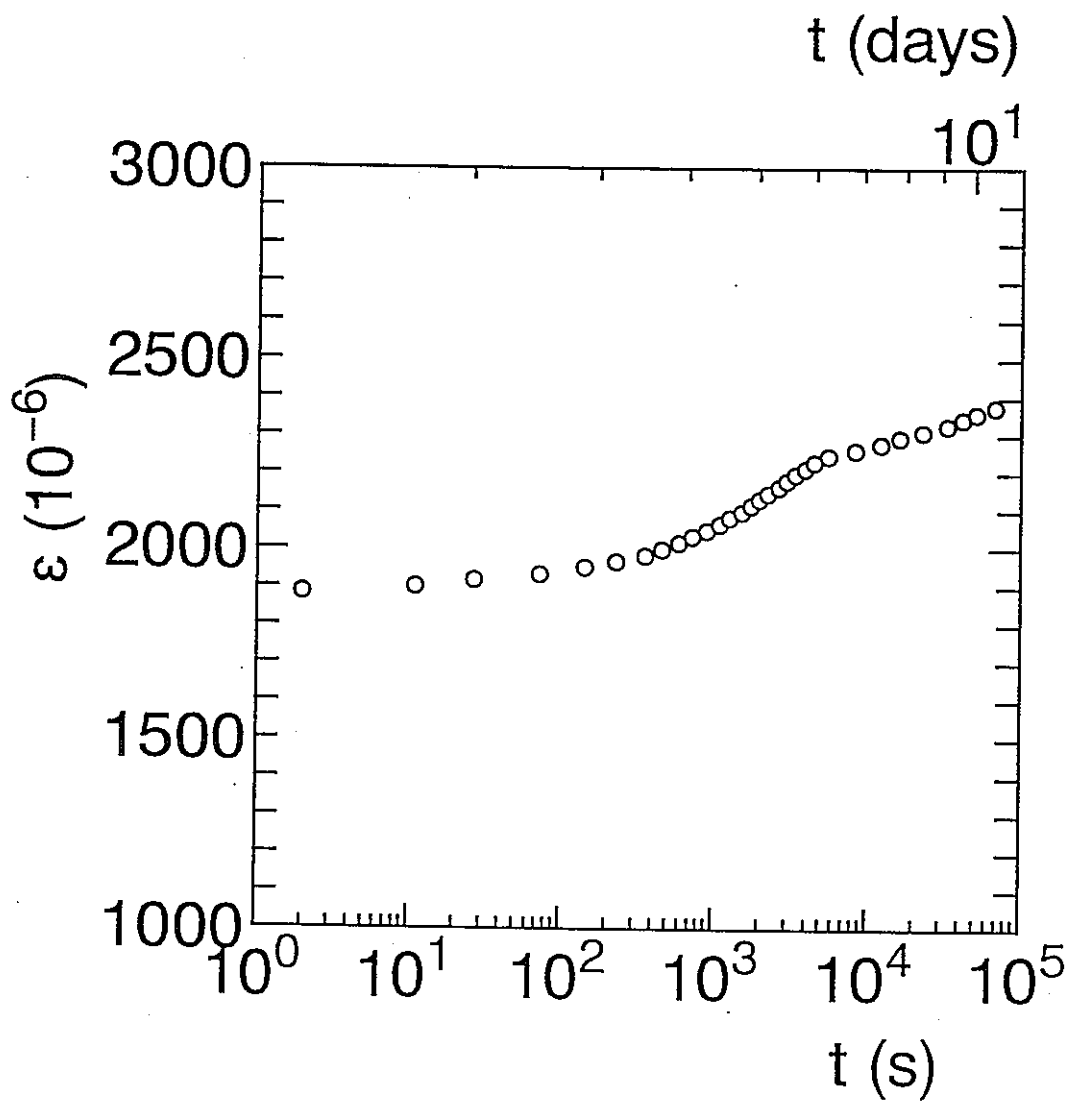


図 2-3 歪の経時変化  
 田下凝灰岩, 湿潤状態  
 クリープ応力レベル 30%



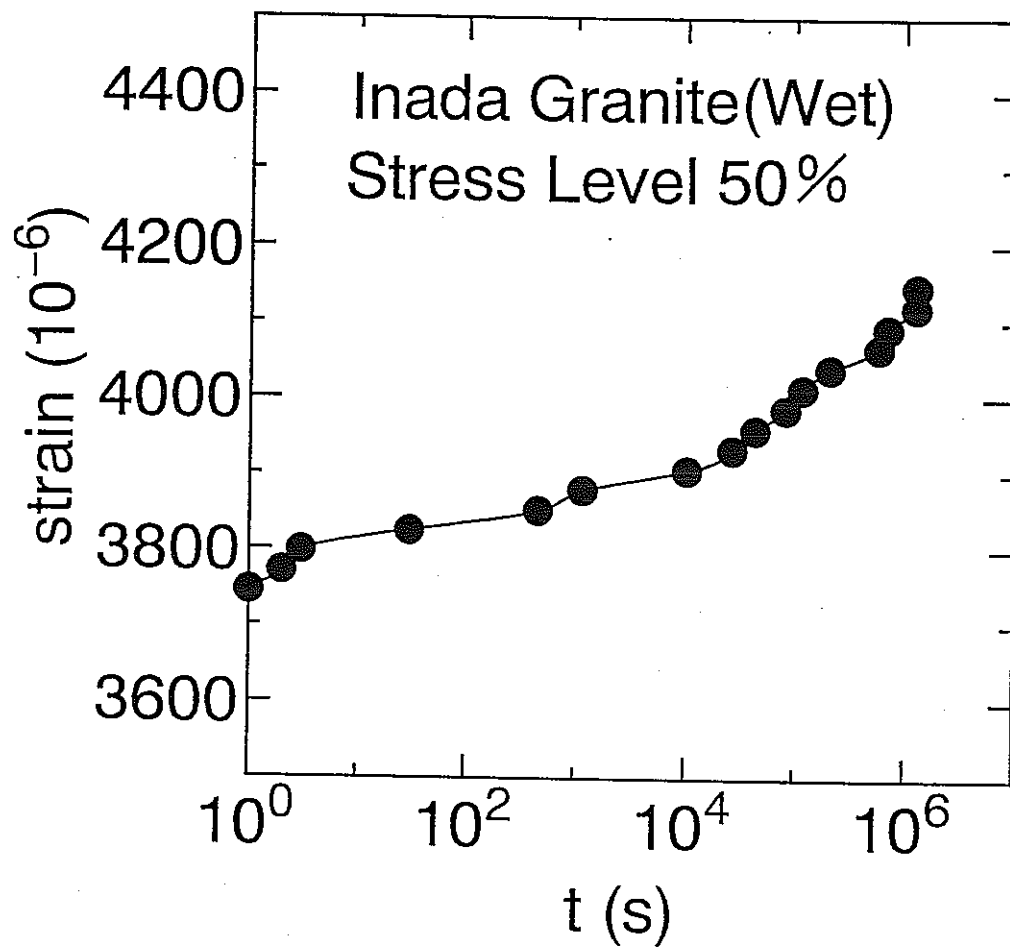


図 2-4 歪の経時変化  
 稲田花崗岩, 湿潤状態  
 クリープ応力レベル 50%

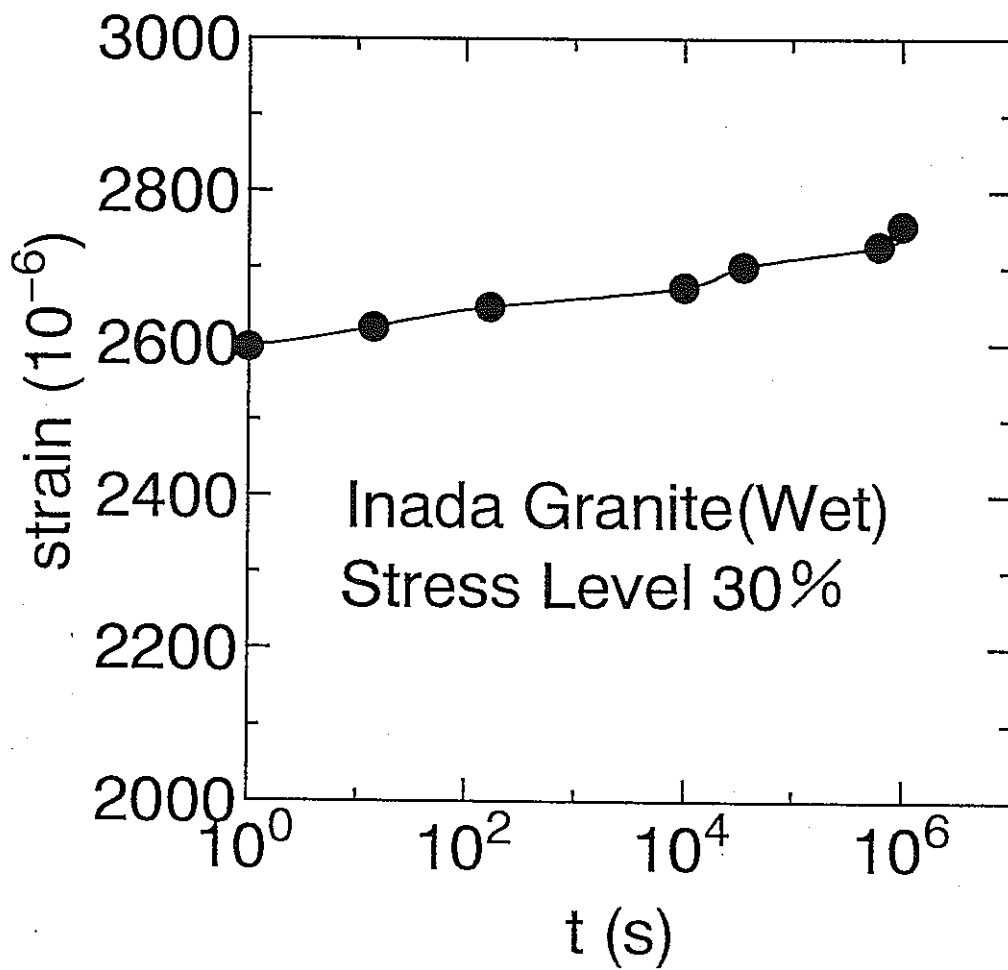


図 2-5 歪の経時変化  
 稲田花崗岩, 湿潤状態  
 クリープ応力レベル 30%

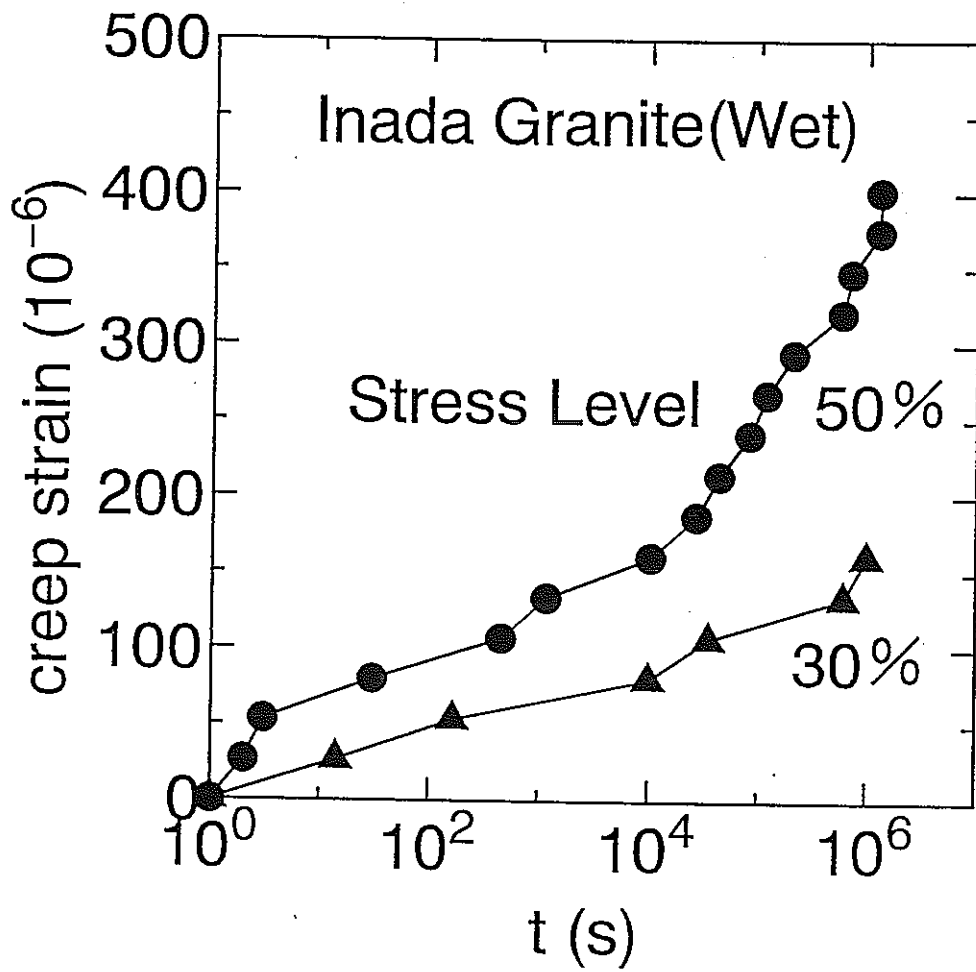


図2-6 クリープ歪の経時変化  
 稲田花崗岩, 湿潤状態  
 クリープ応力レベル30%及び50%

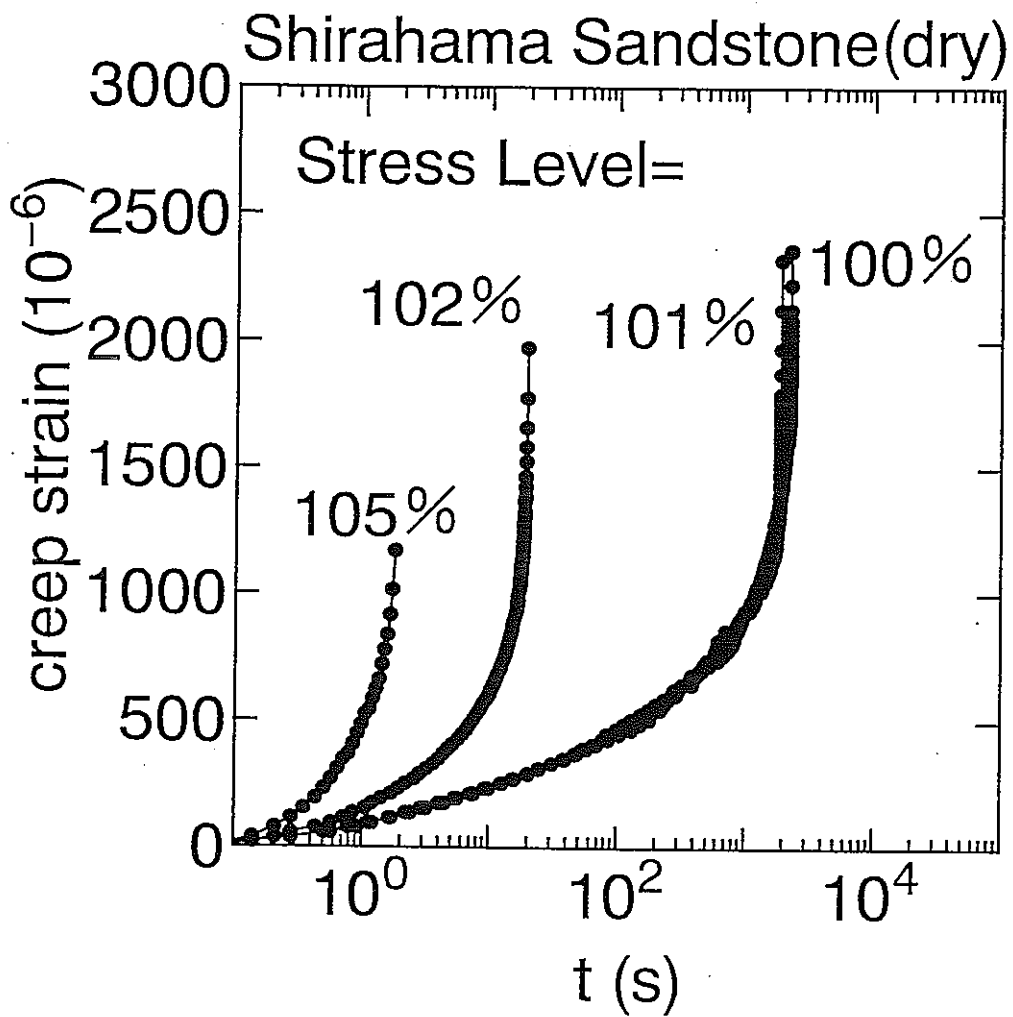


図 2-7 (a) クリープ歪の経時変化  
 白浜砂岩, 気乾状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

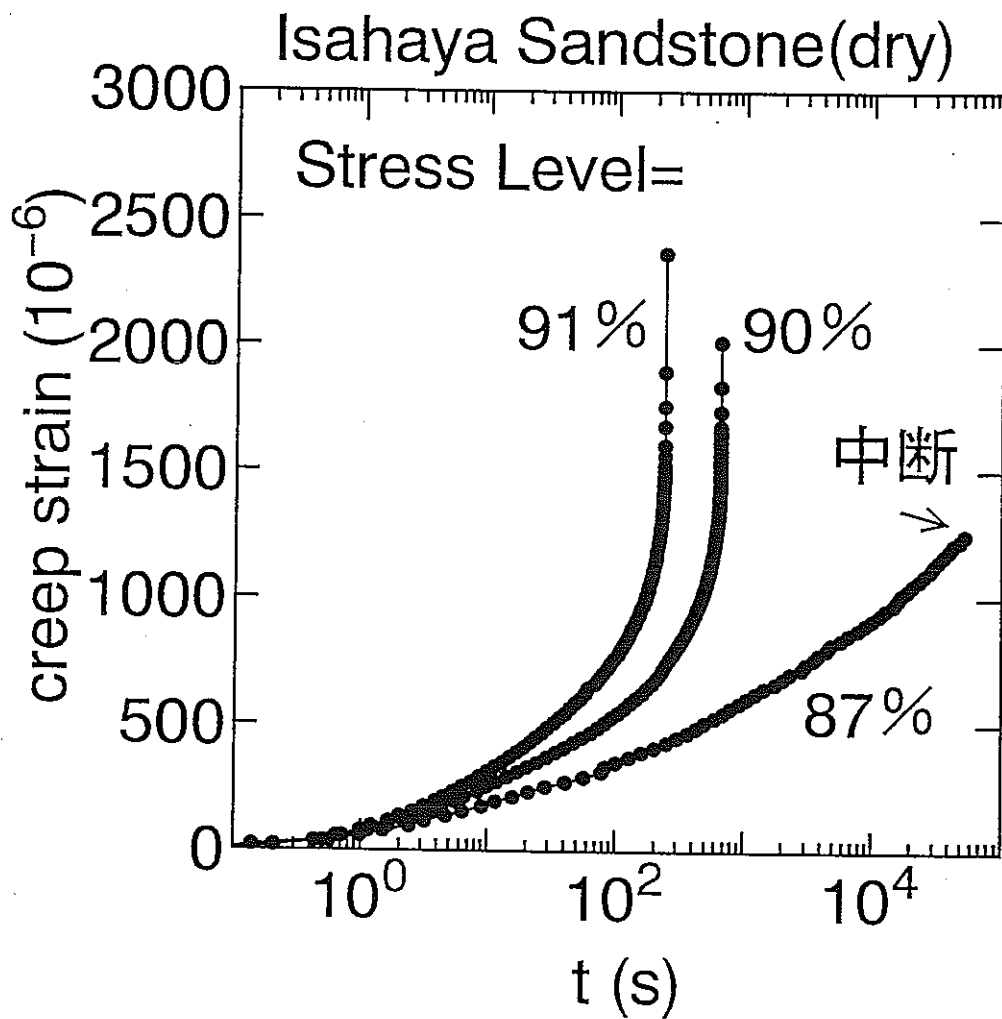


図2-7 (b) クリープ歪の経時変化  
 諫早石, 気乾状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

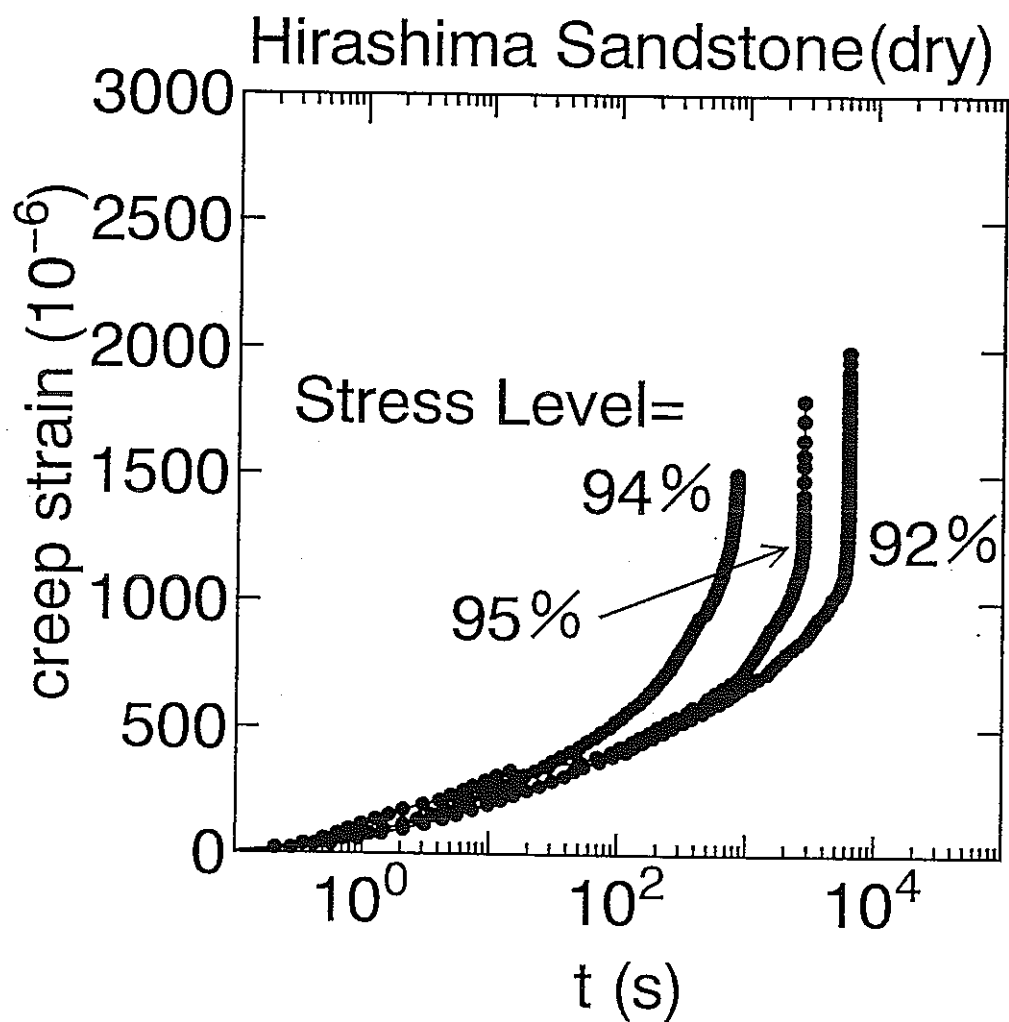


図2-7 (c) クリープ歪の経時変化  
 平島石, 気乾状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

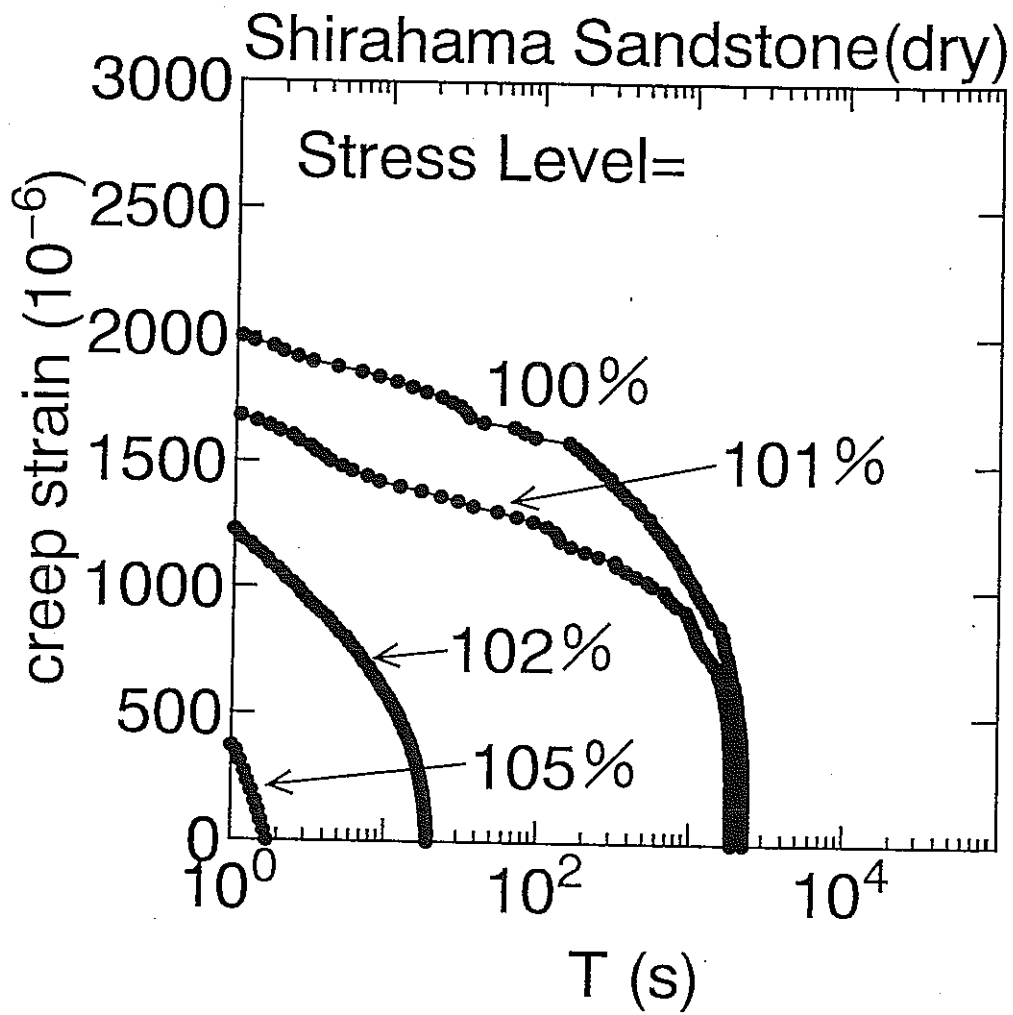


図2-8 (a) クリープ歪と残存寿命Tとの関係  
 白浜砂岩, 気乾状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

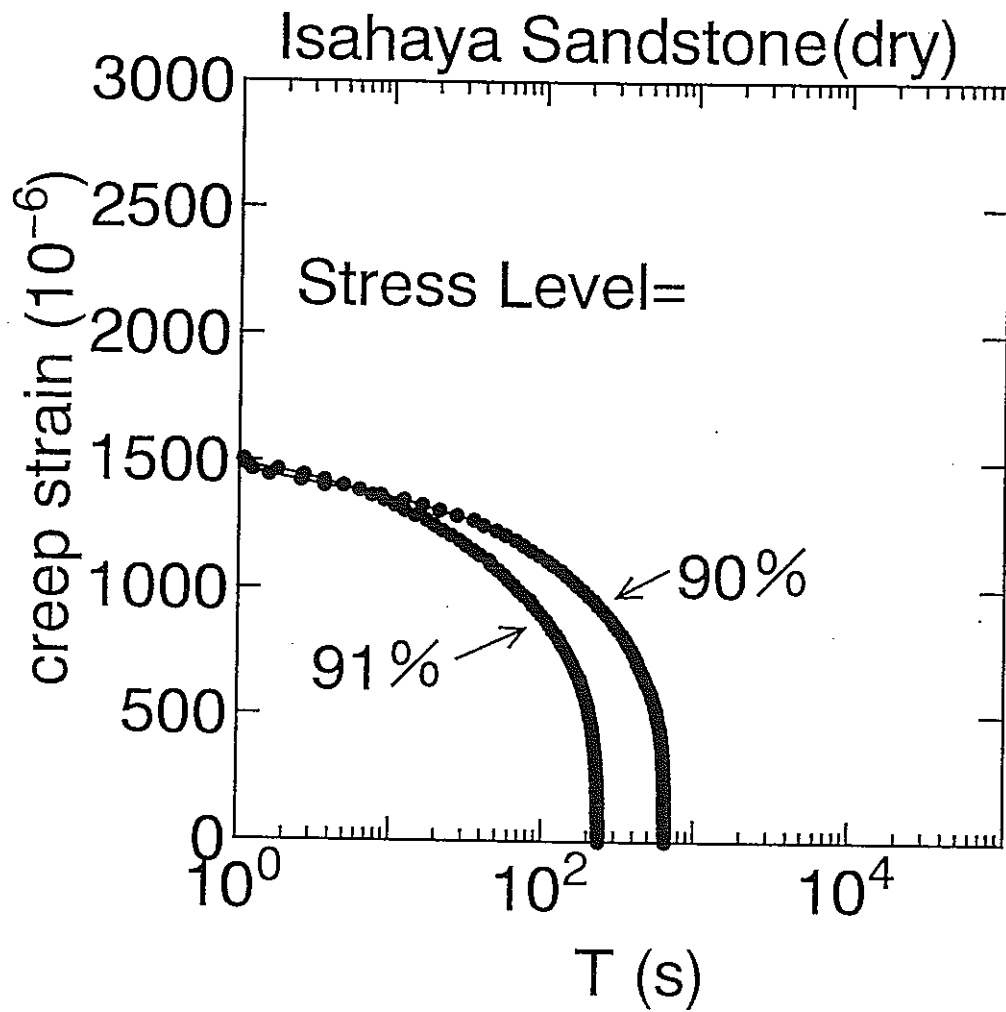


図2-8 (b) クリープ歪と残存寿命Tとの関係  
 諫早石, 気乾状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す



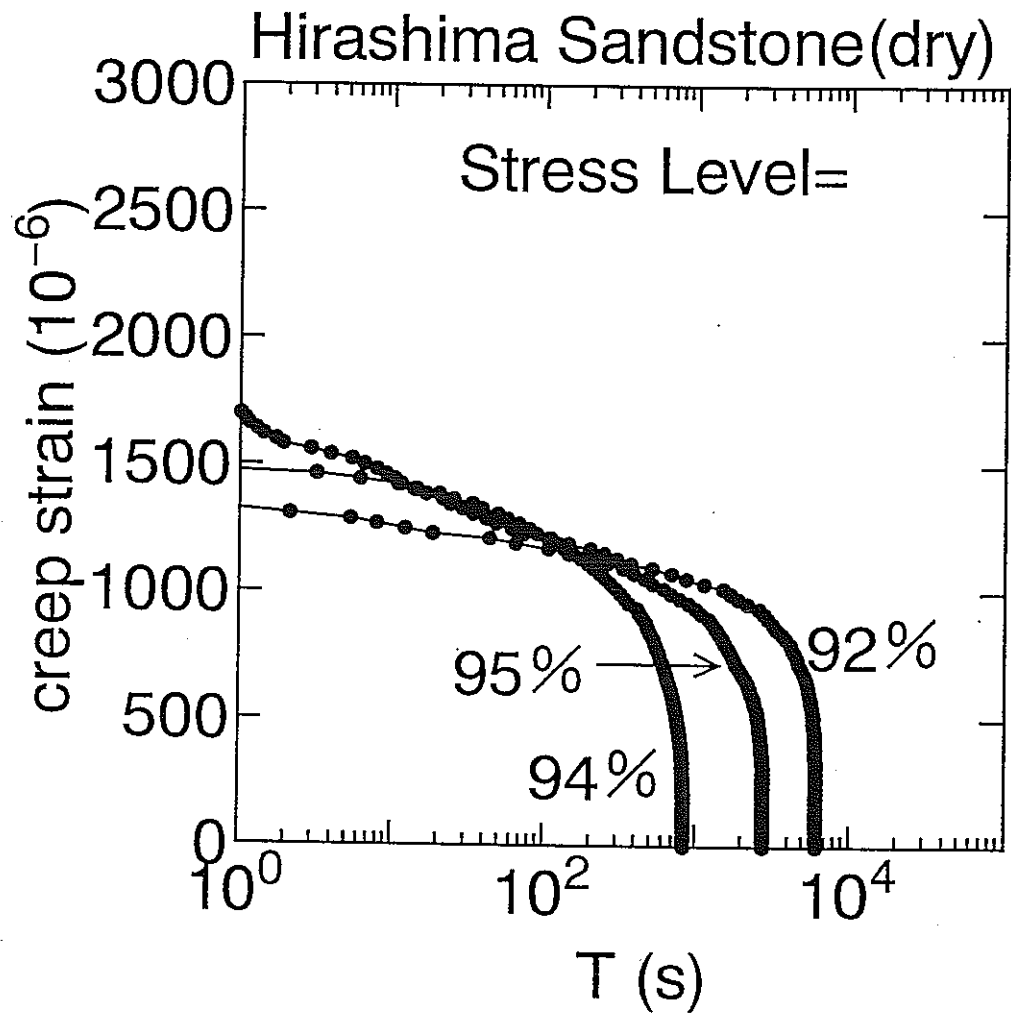


図2-8 (c) クリープ歪と残存寿命Tとの関係  
 平島石, 気乾状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

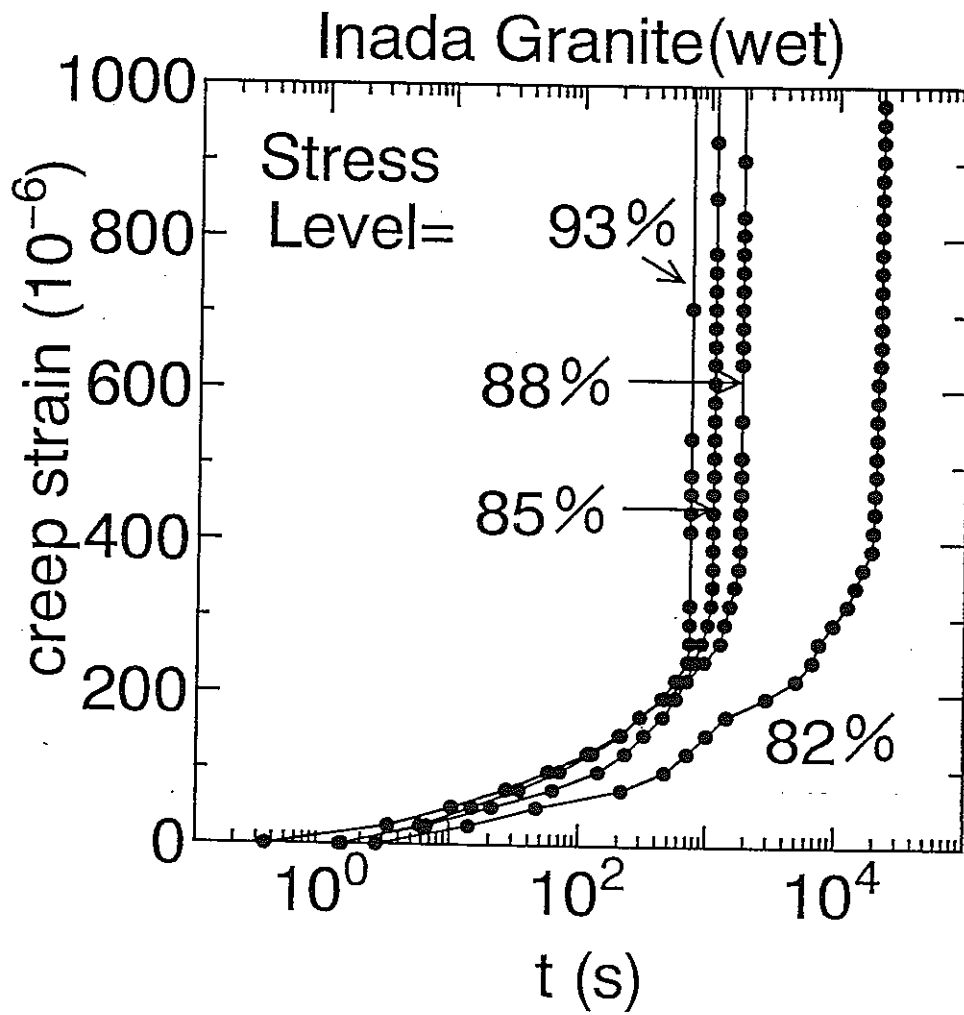


図2-9 (a) クリープ歪の経時変化  
 稲田花崗岩, 湿潤状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

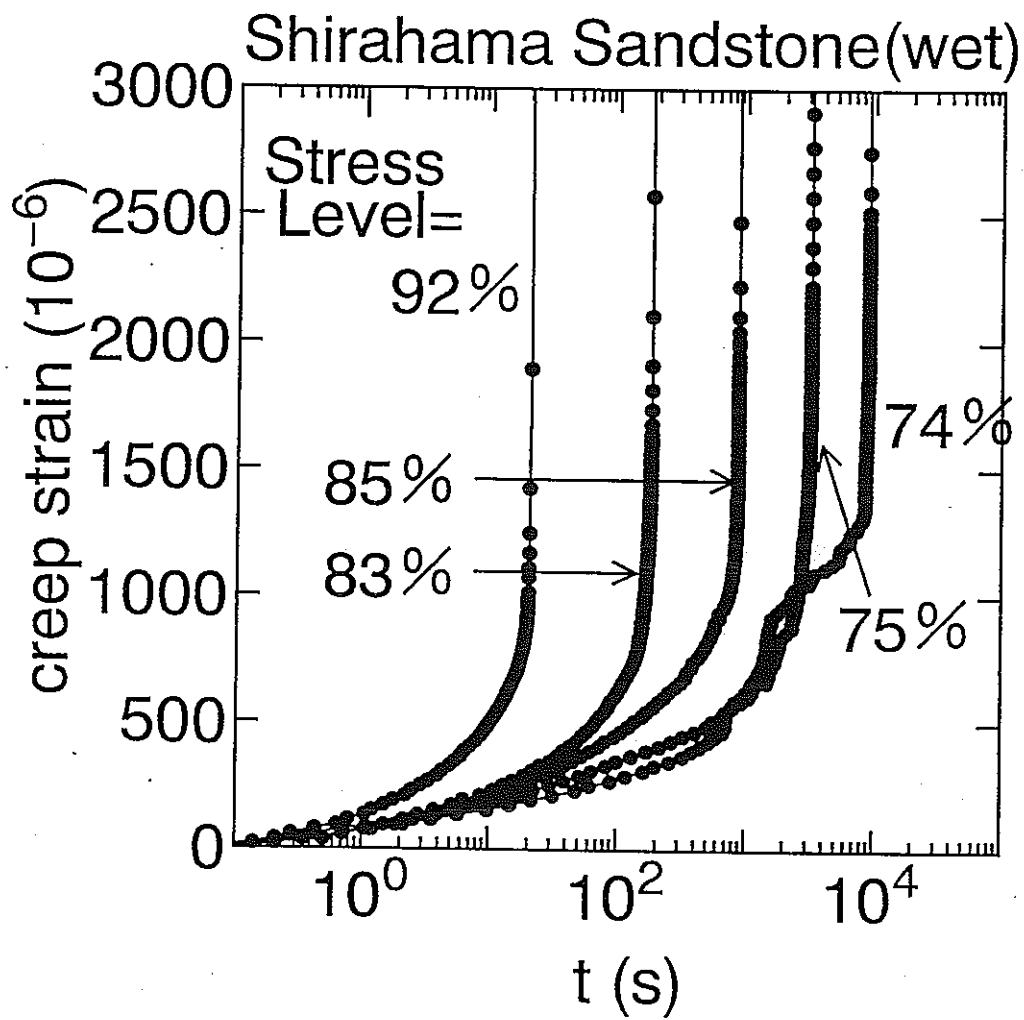


図2-9 (b) クリープ歪の経時変化  
 白浜砂岩, 湿潤状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

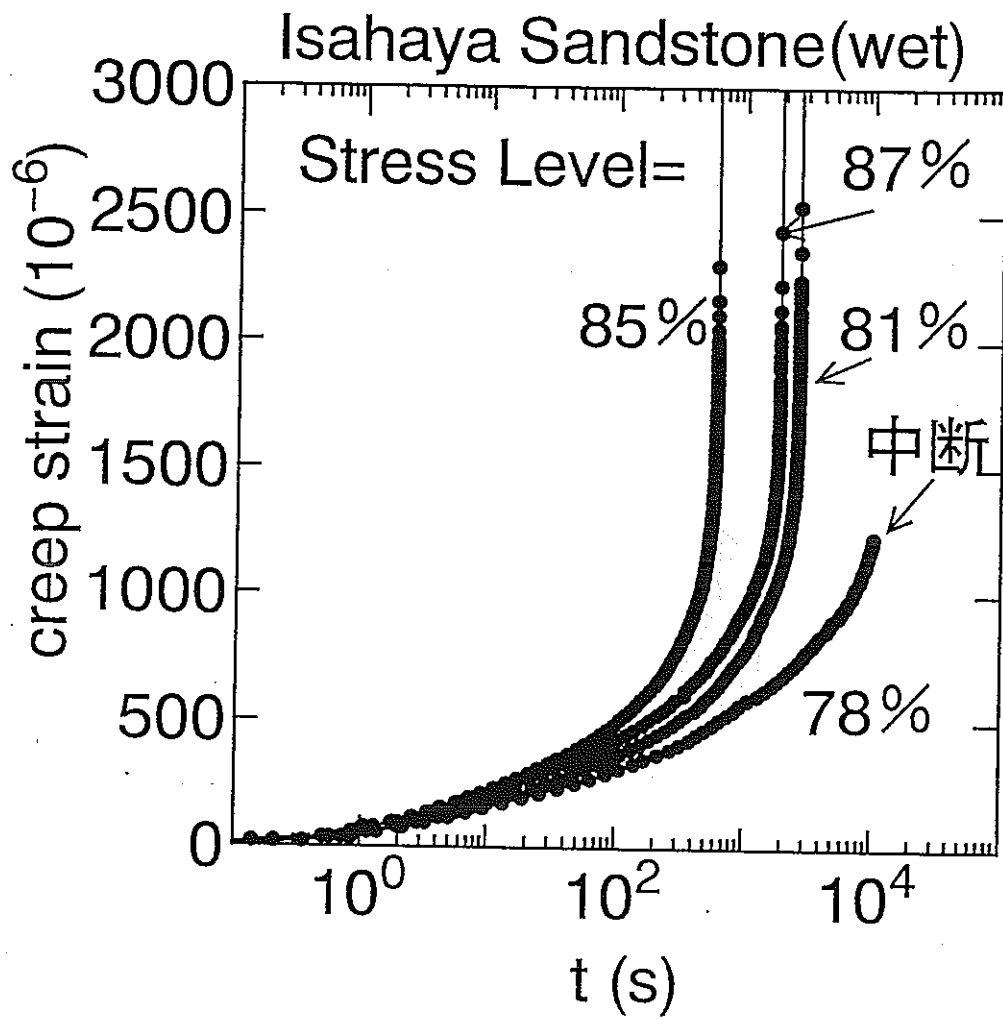


図2-9(c) クリープ歪の経時変化  
 諫早石, 湿潤状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

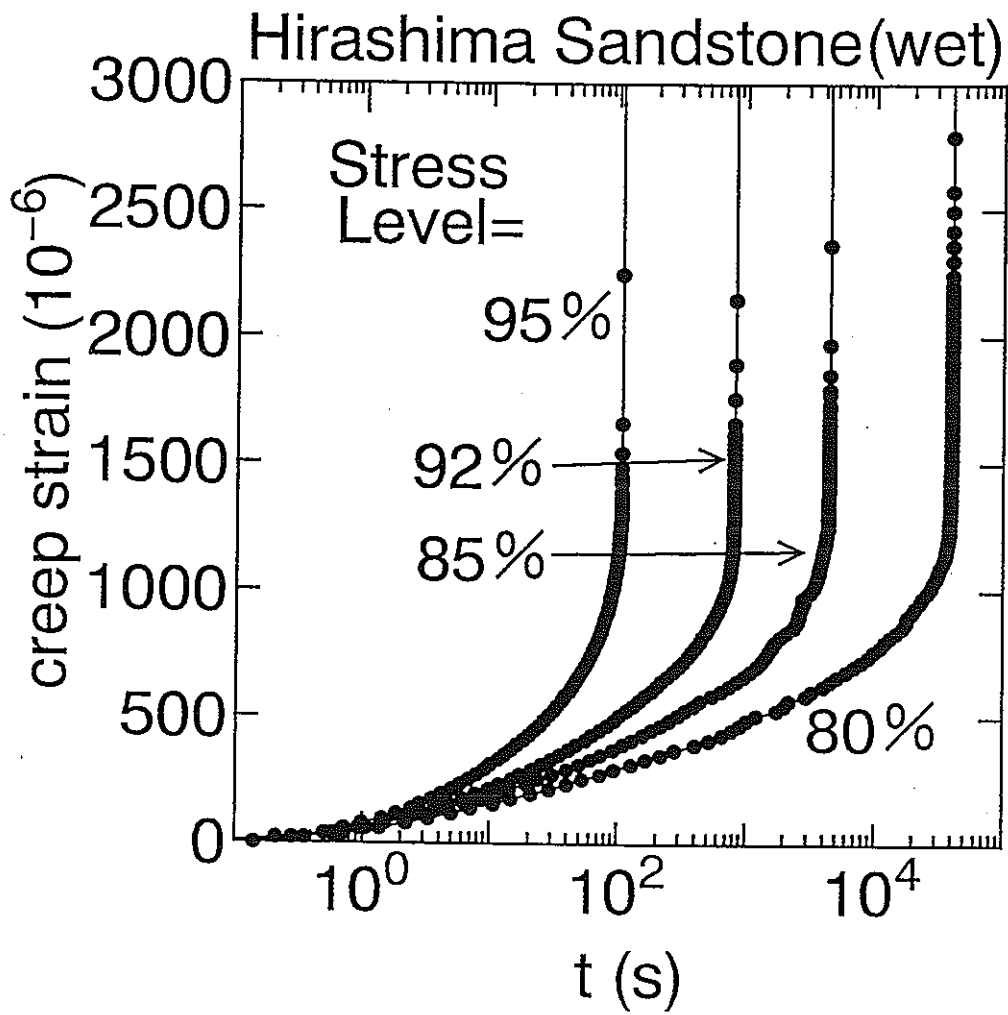


図 2-9 (d) クリープ歪の経時変化  
 平島石, 湿潤状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

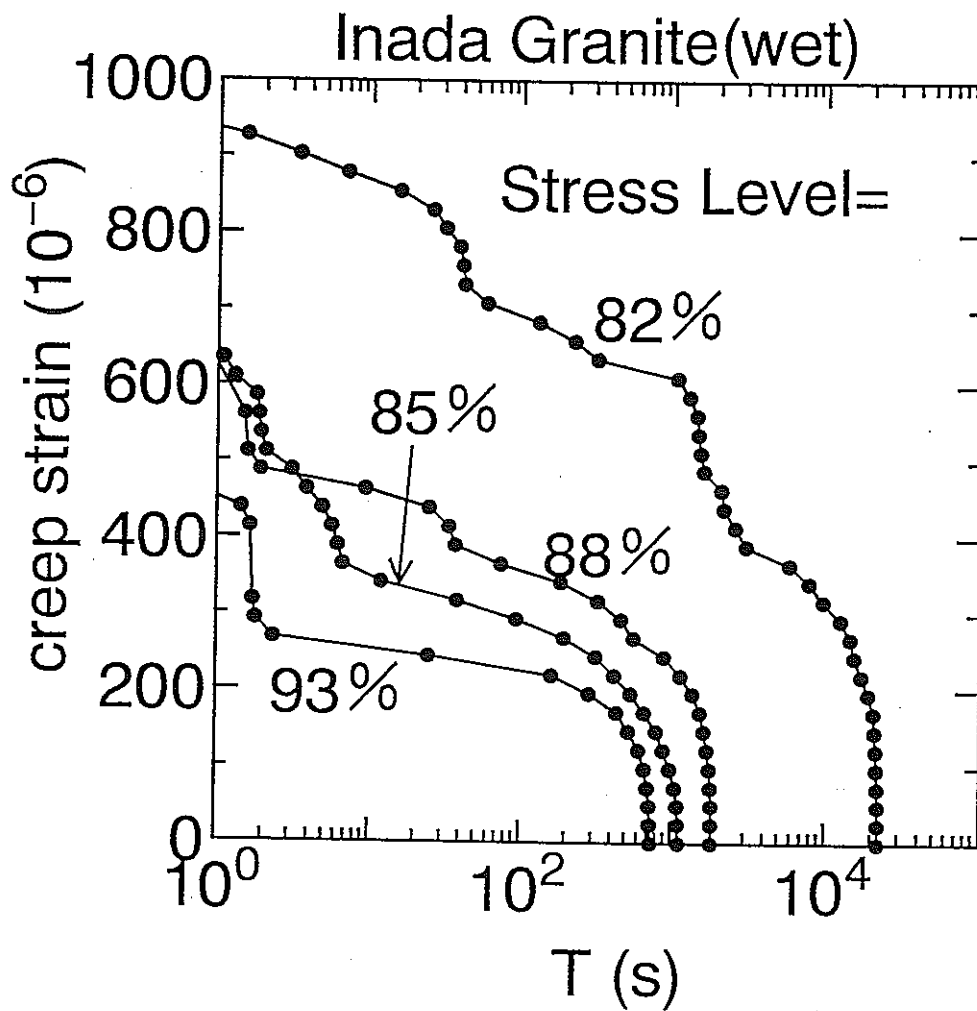


図2-10 (a) クリープ歪と残存寿命Tとの関係  
 稲田花崗岩, 湿潤状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

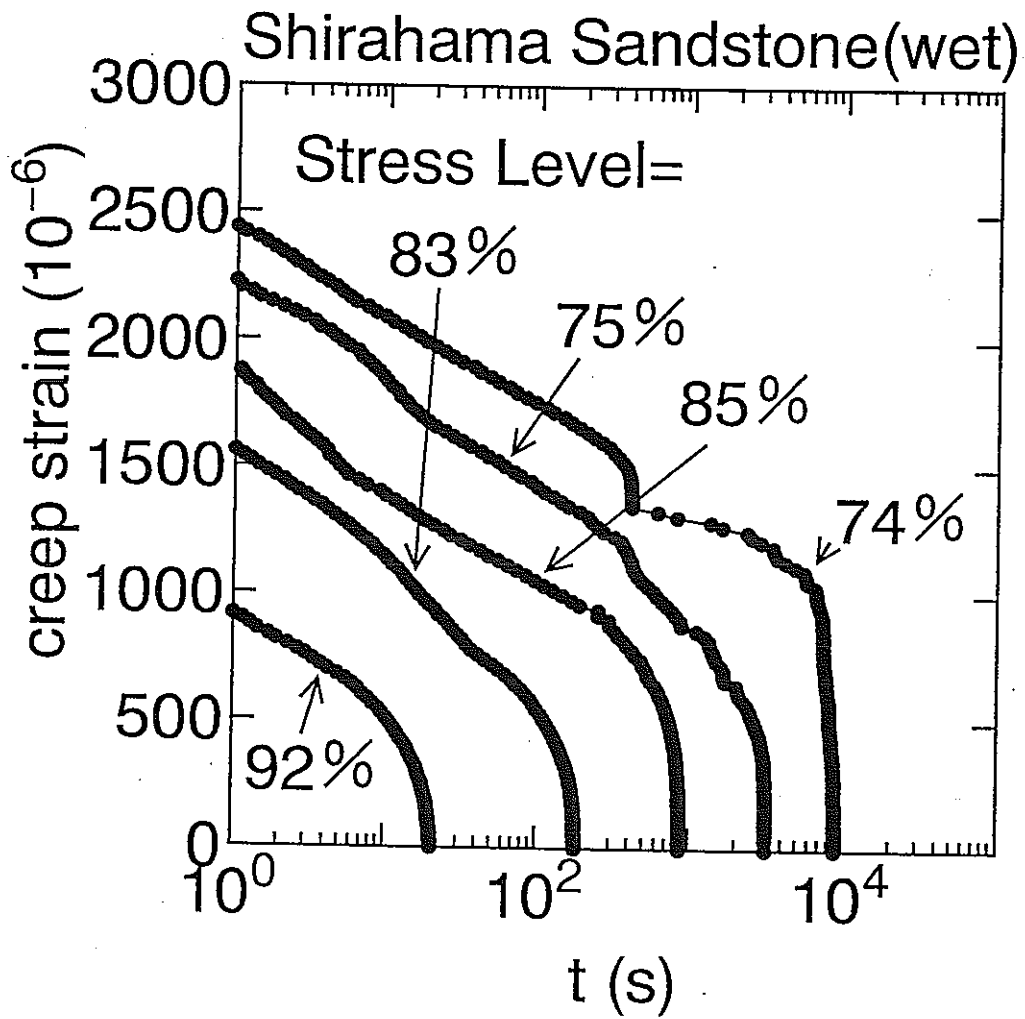


図2-10 (b) クリープ歪と残存寿命Tとの関係  
 白浜砂岩, 湿潤状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

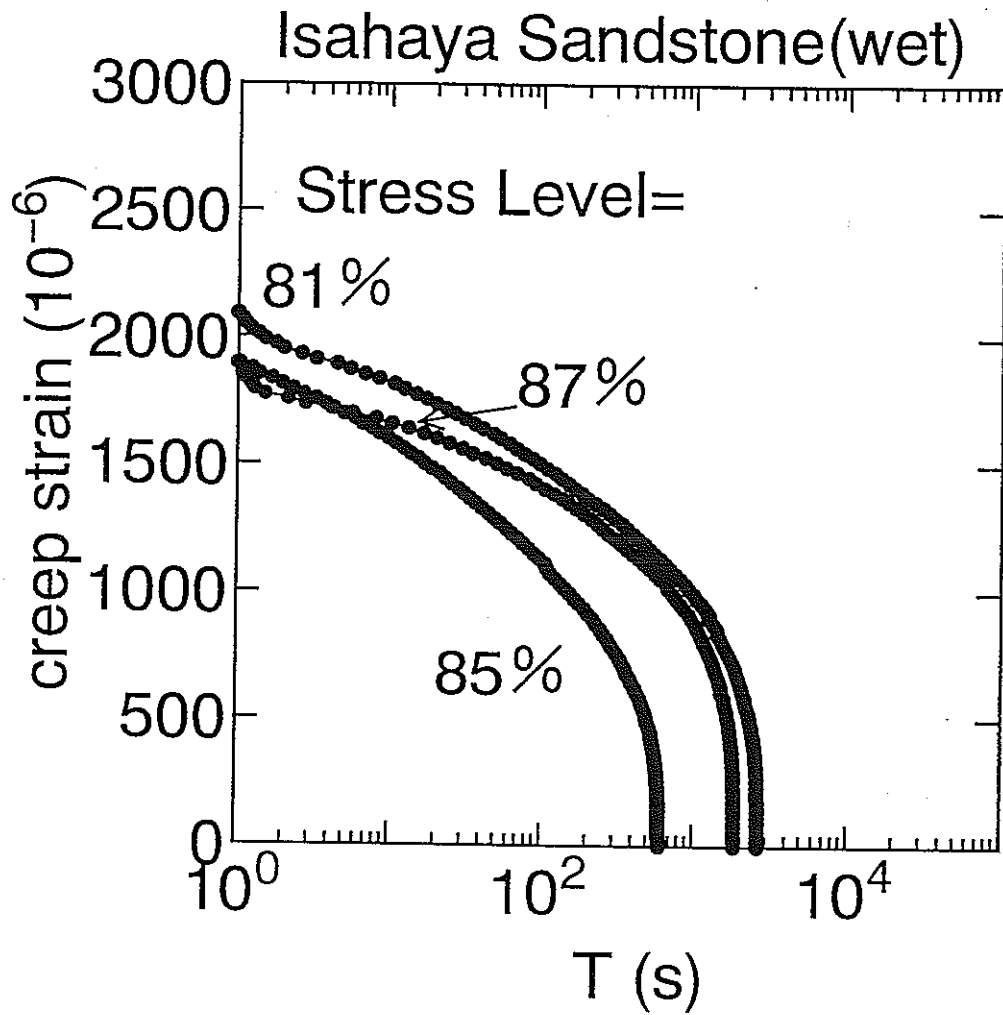


図2-10(c) クリープ歪と残存寿命Tとの関係  
 諫早石, 湿潤状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す



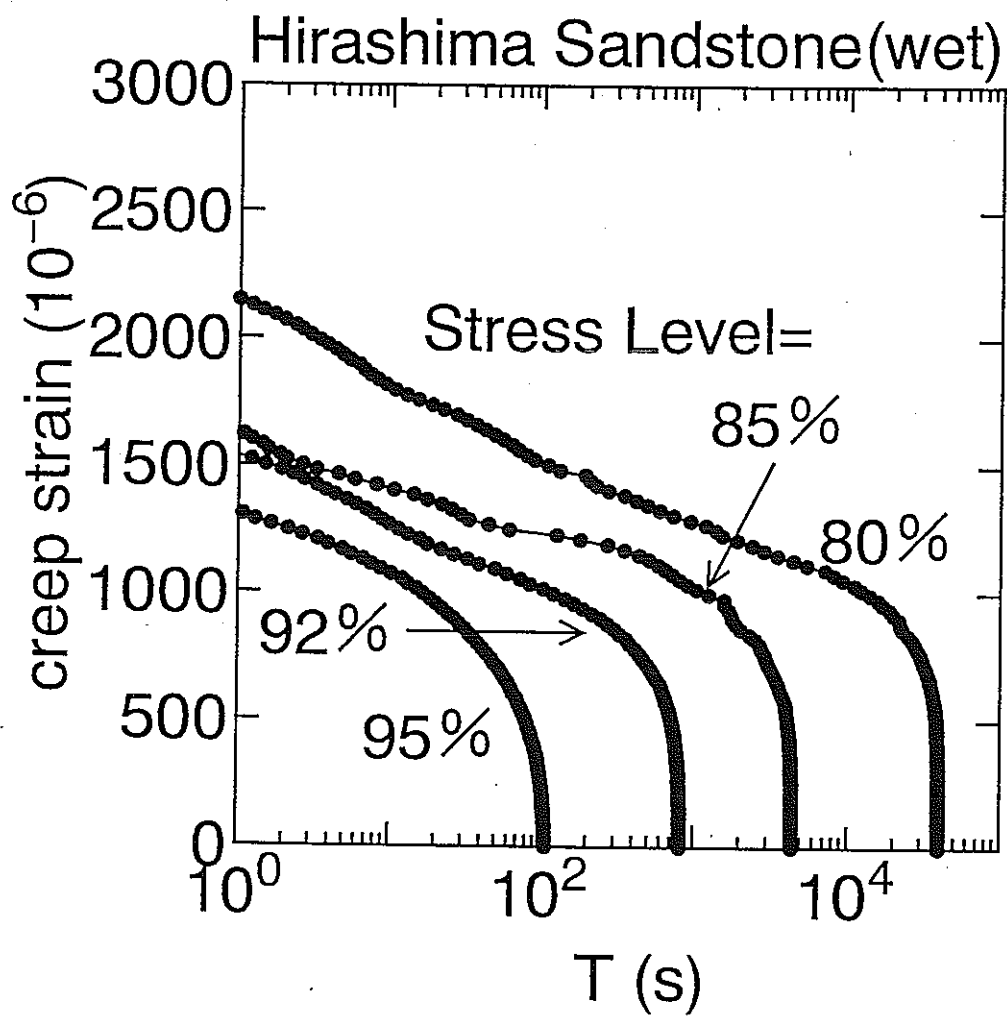


図2-10 (d) クリープ歪と残存寿命Tとの関係  
 平島石, 湿潤状態  
 図中の数字はクリープ応力レベルを表す

### 3. 強度試験

#### 3. 1 一軸圧縮試験

##### 3. 1. 1 試料岩石と試験条件

昨年度は、稲田花崗岩の気乾状態での一軸圧縮試験を行った。本年度は、稲田花崗岩と3種類の砂岩（白浜砂岩、諫早石、平島石）の気乾および湿潤状態での一軸圧縮試験を行った。試験条件などの要点は下記の通りである。

##### ○試料岩石

- ・稲田花崗岩 昨年度の報告書3. 1節で述べた#3を使用した。
- ・白浜砂岩 昨年度の報告書8章で述べたブロックを使用した。
- ・諫早石 昨年度の報告書8章で述べたブロック1を使用した。
- ・平島石 昨年度の報告書8章で述べたブロック1を使用した。

##### ○試験片

- ・稲田花崗岩 直径20mm×高さ40mmの円柱形試験片
- ・白浜砂岩、諫早石、平島石 直径25mm×高さ50mmの円柱形試験片  
直径20mm×高さ40mmの円柱形試験片では、現在装置的に一軸引張試験（3. 2節）を行うことができないので、砂岩に関しては一軸引張試験にあわせた。  
コアはすべて天地方向に抜いた。端面は平面研削盤により平行度1/100mm以内に仕上げた。試験片の写真を図3-1に示す。

##### ○気乾状態

空調をした実験室で2週間以上自然乾燥した後実験に供した。なお、実験室の温度は $20 \pm 5^\circ\text{C}$ で、湿度は $65 \pm 15\%$ に保たれている。

##### ○湿潤状態

岩石を完全湿潤状態にさせ、試験に際しても水中で行う。

岩石を完全湿潤状態にする装置を図3-2に、概略図を図3-3に示す。使用方法としては以下の通りである。

- 1) 図3-4(a)に示すデシケーターに岩石を挿入する
- 2) 図3-4(b)に示す真空ポンプで1時間以上、デシケーター内部および岩石の空隙中の空気を除去する
- 3) 真空ポンプを作動させたまま、岩石が完全に水没するまでデシケーター上部から水を加える
- 4) そのまま数時間保持した後、真空ポンプを止める
- 5) 試験に供するまで1日以上は放置する

岩石を単純に水に浸けたのでは、岩石内部の空隙中の空気は水と置換されにくい。三城目安山岩の場合には空隙中の約半分程度である。よって、空隙に存在する空気を水を入れる前に抜き取ってから置換する必要がある。

##### ○試験数

同一条件で5本以上とした。ただし、気乾状態の稲田花崗岩は昨年度も実施したので、3本とした。

#### ○試験機

試験機は、MTS社製で容量1500kNのサーボ試験機を用いた（昨年度の報告書3.1節参照）。

#### ○制御方式

定歪速度試験を改良した、応力帰還制御を採用した。応力帰還制御の基礎式は次式である。

$$\varepsilon - \alpha \cdot \sigma / E = C \cdot t$$

ここで、 $\varepsilon$ は歪、 $\sigma$ は応力、 $E$ はヤング率、 $C$ は載荷速度を決める定数、 $t$ は経過時間である。 $\alpha$ は応力の帰還量を決定する定数で、本実験では0.3とした。 $\alpha$ を0とすれば、定歪速度試験となる。なお、応力帰還制御は、定歪速度試験では制御できないきわめてぜい性な岩石に対して用いられる。

#### ○載荷速度

載荷速度 $C$ は、 $10^{-5}/s$ とした。このような載荷速度を選ぶと、多くの岩石で試験時間が10分前後となる。載荷速度が速すぎると破壊状況を観察することや、制御自体も困難である。一方、載荷速度が遅すぎると試験時間が長くなり実際面で問題となる。 $10^{-5}/s$ が通常の場合、適度と考える。

### 3.1.2 試験結果

表3-1に試験結果を示す。表には、各状態での一軸圧縮強度、ヤング率の平均値を示す。ヤング率は強度の50%での接線勾配より求めた。各値の下の括弧内の数字は標準偏差を表す。また、気乾状態に対する湿潤状態での各値の低下率も表に示した。稲田花崗岩のヤング率を除いて、湿潤状態にすることにより一軸圧縮強度、ヤング率ともに低下している。稲田花崗岩では、3種類の砂岩に比べて低下率の絶対値が比較的小さく、水による影響は小さいことがわかる。他方、砂岩の場合には、一軸圧縮強度は37~49%、ヤング率は29%~60%も低下している。このように砂岩の場合には、水によって強度、ヤング率ともに低下することがわかる。

図3-5に気乾状態、図3-6に湿潤状態の応力-歪曲線を示す。強度に対して、20%までの応力-歪曲線は下に凸となっているのは、試験片端面の凹凸がつぶれるためである。稲田花崗岩では、強度の90%に達するまで応力と歪はほぼ直線的である。他方、砂岩では直線領域は80%程度までで、稲田花崗岩に比べて弾性領域からずれ始める応力レベルが小さい。気乾状態の強度破壊点以降では、稲田花崗岩だけが、Class II特性（応力の低下している領域で、歪も減少するタイプ）を示し、砂岩はClass I特性（応力の低下している領域で、歪は増加するタイプ）を示している。湿潤状態では、平島石において強度の50%以下になってから、Class I特性からClass II特性に転じている。

### 3. 2 一軸引張試験

引張応力下での挙動に関する研究は比較的少ないが、大規模地下空間の開発では、部分的ではあるが引張応力の生ずることが避けがたいと考える。将来的には、引張クリープ試験も必要と考えるが、まず最も基礎的と考える一軸引張試験をおこなった。

#### 3. 2. 1 試料岩石と試験条件

##### ○試料岩石

一軸圧縮試験と同じであるが、稲田花崗岩については昨年度、実施したため3種類の砂岩を用いた。

- ・白浜砂岩 昨年度の報告書8章で述べたブロックを使用した。
- ・諫早石 昨年度の報告書8章で述べたブロック1を使用した。
- ・平島石 昨年度の報告書8章で述べたブロック1を使用した。

##### ○試験片

直径25mm×高さ50mmの円柱形試験片

コアはすべて天地方向に抜いた。端面は平面研削盤により平行度1/100mm以内に仕上げた。

##### ○気乾状態

空調をした実験室で2週間以上自然乾燥した後実験に供した。なお、実験室の温度は $20 \pm 5^\circ\text{C}$ で、湿度は $65 \pm 15\%$ に保たれている。現在、引張試験中に湿潤状態にすることが困難であるため、湿潤状態の試験は行わなかった。

##### ○試験数

同一条件で3本とした。

##### ○試験機

試験機は、自作の容量500kNのサーボ試験機を用いた(図3-7参照)。昨年度、稲田花崗岩の一軸引張試験を行ったサーボ試験機と容量のみが異なるだけで、制御機構などはほぼ同じである。

##### ○制御方式

一軸圧縮試験と同様に、応力帰還制御を採用した。応力帰還制御の基礎式は次式である。

$$\varepsilon - \alpha \cdot \sigma / E = C \cdot t$$

ここで、 $\varepsilon$ は歪、 $\sigma$ は応力、 $E$ はヤング率、 $C$ は载荷速度を決める定数、 $t$ は経過時間である。 $\alpha$ は応力の帰還量を決定する定数で、本実験では一軸圧縮試験と同様に0.3とした。

##### ○载荷速度

载荷速度 $C$ は一軸圧縮試験の $1/10$ である、 $10^{-6}/\text{s}$ とした。これは圧縮試験に比べ、引張試験では破壊に要する歪が数~数十分の1程度であるので、試験時間を合わせたことを意味する。引張試験では $10^{-6}/\text{s}$ が通常の場合、適度と考える。

### 3. 2. 2 試験結果

図3-8に白浜砂岩, 図3-9に諫早石, 図3-10に平島石の応力-歪曲線を示す. 今回の実験では, 試験の途中で十数回の除荷・載荷を行ったので, 応力-歪曲線にはその結果も示されている. 白浜砂岩の応力-歪曲線は, 諫早石や平島石と明らかに異なる. まず強度破壊点に達した時の歪が, 諫早石では $5 \times 10^{-4}$ , 平島石では $8 \times 10^{-4}$ であるのに対して, 白浜砂岩では $2 \times 10^{-3}$ と3~4倍程度と非常に大きい. これまでかなり多種類の岩石に関して一軸引張試験を行ったが, 最も大きくても $10^{-3}$ であった. また強度破壊点以前の応力-歪曲線は, 強度の20%までは直線的であるが, この応力を越えてからの応力-歪曲線の曲がり具合が他に比べて異なっており勾配が緩やかに変化していることもわかる. これは最初の載荷曲線と除荷・載荷曲線を見た場合にずれ始める応力が, 諫早石では強度の60%, 平島石では40%であるのに対して, 白浜砂岩では十数%でもうずれていることから理解できる. このように白浜砂岩では強度破壊点以前での非弾性的(塑性的)な歪が非常に大きく, かなり特殊な特徴であり, その機構は今後の研究課題となると考える. 白浜砂岩と諫早石は, 強度破壊点以降では応力の低下によって, 歪の変化はほとんどなく, Class IとClass IIの中間的な特性を持っている. 他方, 平島石は, 強度破壊点以降では応力の低下にともない, 歪は増加しており, Class I特性を示していることがわかる.

### 3. 3 圧裂引張試験

一軸引張試験は試験方法は難しいため、引張強度のみを求める際には通常、圧裂引張試験が行われる。ここでも、3. 2節の一軸引張強度と比較することを目的として、圧裂引張試験の結果について述べる。

#### ○試料岩石

一軸圧縮試験、一軸引張試験と同じである。

- ・白浜砂岩 昨年度の報告書8章で述べたブロックを使用した。
- ・諫早石 昨年度の報告書8章で述べたブロック1を使用した。
- ・平島石 昨年度の報告書8章で述べたブロック1を使用した。

#### ○試験片

直径25mm×高さ13mmの円柱形試験片

コアはすべて天地方向に抜いた。

#### ○気乾状態

空調をした実験室で2週間以上自然乾燥した後実験に供した。なお、実験室の温度は $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ で、湿度は $65 \pm 15\%$ に保たれている。

#### ○試験数

同一条件で5本以上とした。

#### ○試験機

試験機は、容量10kNの万能試験機を用いた。

#### ○载荷速度

载荷時間が、1～2分程度で破壊するように設定した。

圧裂引張強度を表3-2に示す。表には、3. 2節で行った一軸引張強度も参考に示している。白浜砂岩では、一軸引張強度は2.3MPaであるのに対して、圧裂引張強度は3.6MPaと50%程度大きくなっている。この原因としては、载荷方向が異なる点がまず考えられる。今回の試験は、すべて岩石ブロックに対して天地方向にボーリングを行い、それから得た試験片で試験を行った。よって、一軸引張試験では、堆積面に沿って破断が生じるのに対して、圧裂引張試験では堆積面に垂直に破断が生じる。砂岩のような堆積岩の場合には、堆積方向が弱面となりやすいため、一軸引張強度の方が、圧裂引張強度に比べて小さくなりやすいと考えられる。よって異方性の影響で値が異なったという可能性がある。また白浜砂岩の場合には、図3-8に示した応力-歪曲線に影響の可能性も考えられる。すなわち、白浜砂岩では、強度破壊点以前での非弾性（塑性）的な歪がかなり多く発生した。圧裂引張試験では、载荷荷重が最大となった時点での荷重から、弾性論に基づいて中央点の引張応力を求め、これを圧裂引張強度としている。しかし圧裂引張試験では、試験片内部の応力状態が複雑であり、試験片中央部が弾性領域から離れた場合には、応力緩和現象が生じ、最大となる荷重が増加する可能性が存在する。

次に、諫早石では一軸引張強度が5.9MPaに対して、圧裂引張強度は6.8MPaと10%程度大きくなっている。これは従来からの結果とほぼ一致している。よって、この岩石の

場合には異方性はさほどないことがわかる。

平島石では、一軸引張強度が2.5MPaに対して、圧裂引張強度は4.9MPaと2倍程度大きくなっている。これも破断する方向が異なることによる異方性の影響であると考えられる。本年度は、基本的にブロックに対して天地方向にボーリングを行うことを基本としたため、このような結果となったが、来年度は水平方向にボーリングを行い、検討する予定である。

表 3 - 1 一軸圧縮試験結果

括弧内は、標準偏差を表す

ヤング率は、強度の 50 % 時の接線勾配より求めた

	気乾状態		湿潤状態		低下率	
	一軸圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	一軸圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	一軸圧縮強度	ヤング率
稲田花崗岩	204 (7.1)	22.4 (1.6)	190 (8.8)	23.1 (2.9)	6.5%	-3%
白浜砂岩	50.4 (1.7)	4.99 (0.19)	29.2 (0.27)	2.00 (0.069)	42%	60%
諫早石	108 (3.7)	9.59 (1.2)	55.27 (0.66)	5.46 (0.43)	49%	43%
平島石	93.8 (4.1)	6.80 (0.63)	59.5 (1.1)	4.84 (0.31)	37%	29%



表 3 - 2 圧裂引張試験結果

	圧裂引張強度 (MP a)	一軸引張強度 (MP a)
白浜砂岩	3. 6	2. 3
諫早石	6. 8	5. 9
平島石	4. 9	2. 5



図3-1 (a) 稲田花崗岩の試験片  
直径20mm×高さ40mm

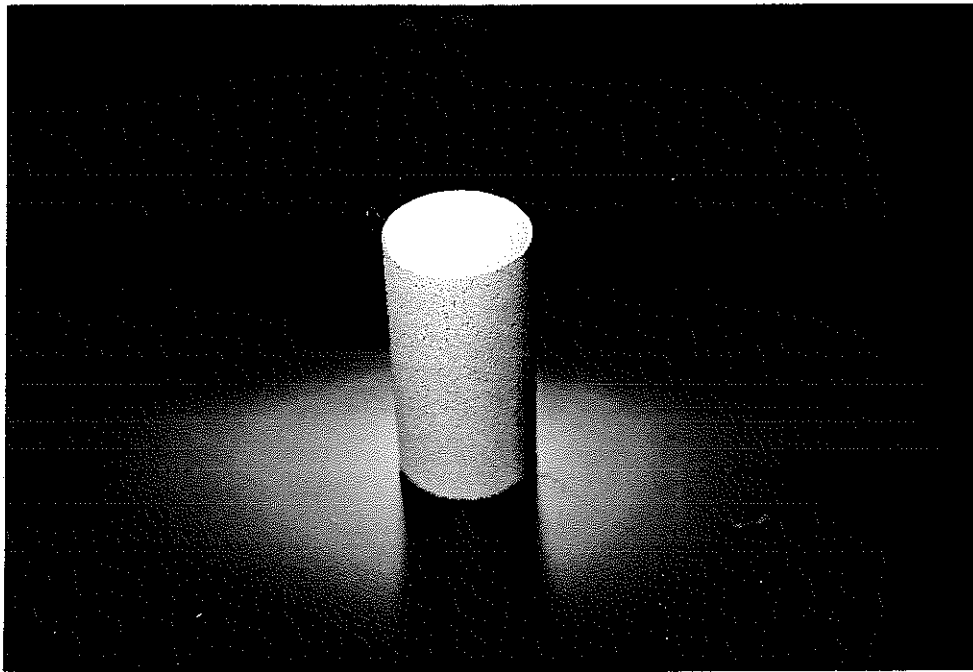


図3-1 (b) 白浜砂岩の試験片  
直径25mm×高さ50mm

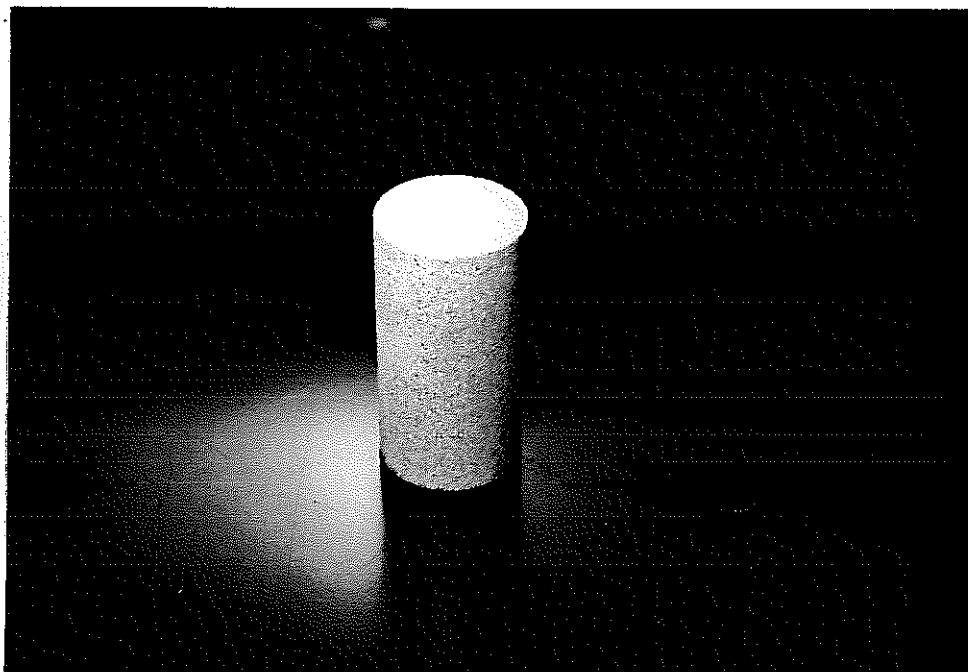


図 3 - 1 (c) 諫早石の試験片  
直径 25 mm × 高さ 50 mm

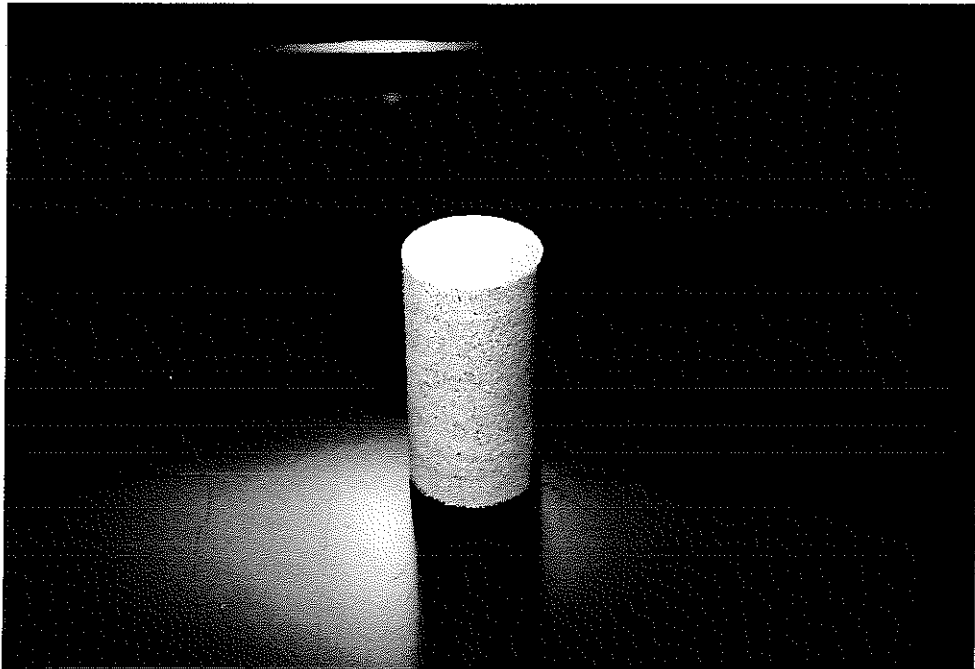


図 3 - 1 ( d ) 平島石の試験片  
直径 2 5 mm × 高さ 5 0 mm

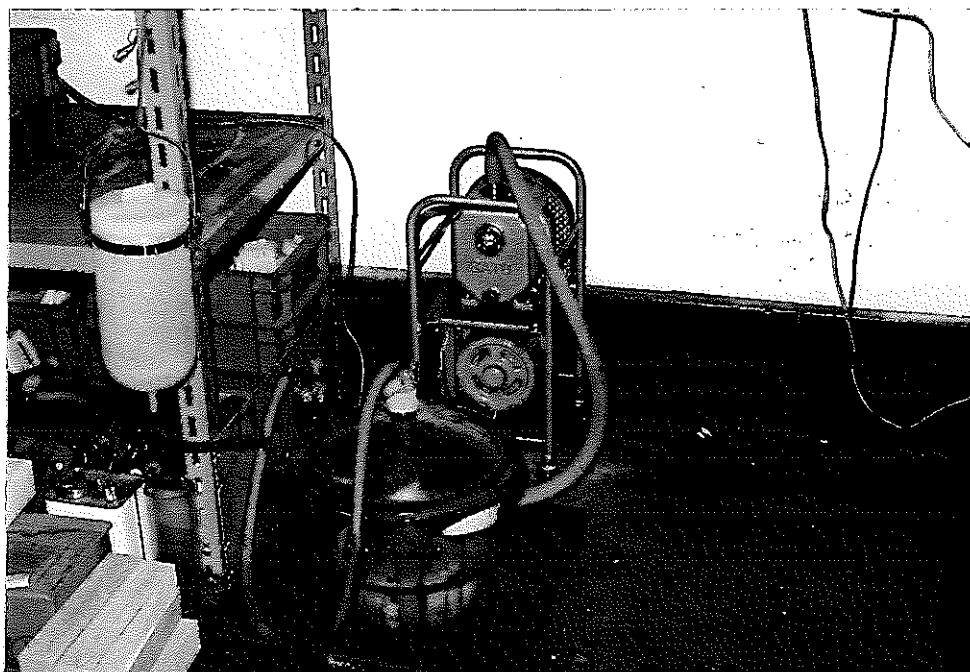


図 3 - 2 岩石の完全湿潤化を行う装置

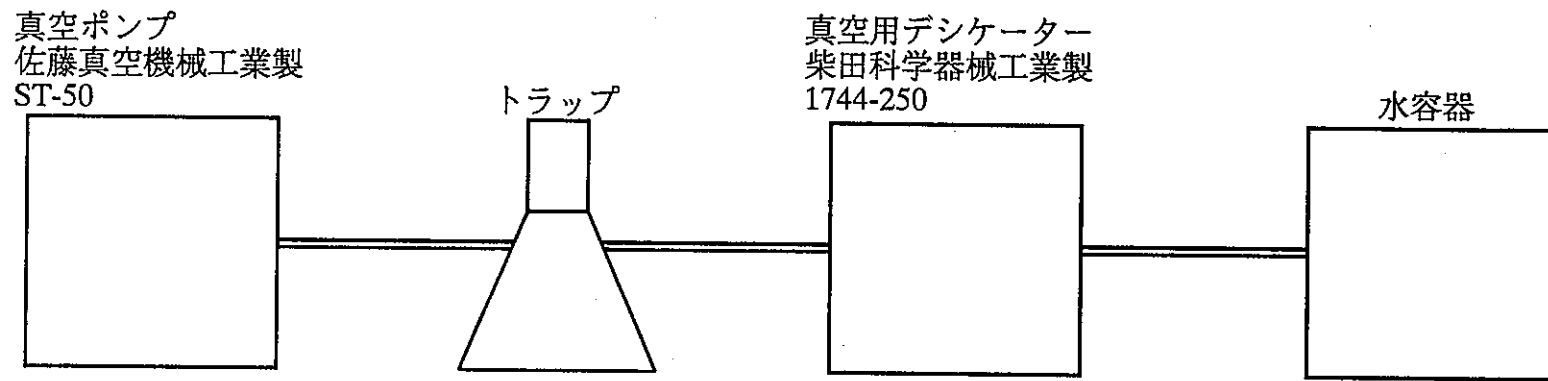


図 3 - 3 装置の概略図

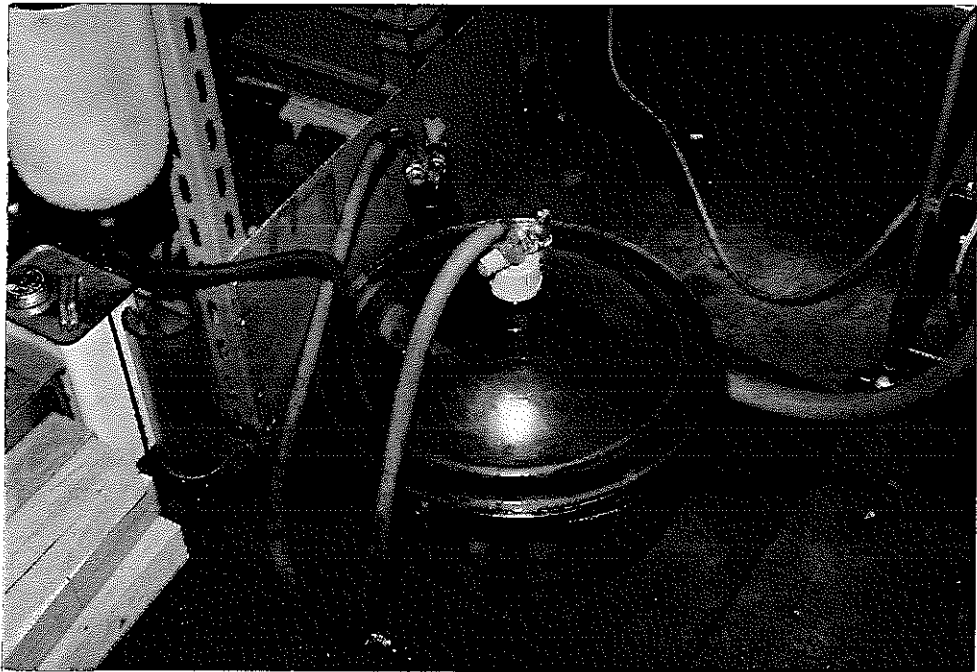


図 3-4 (a) 空圧用デシケーター  
柴田科学器械工業製  
1744-250



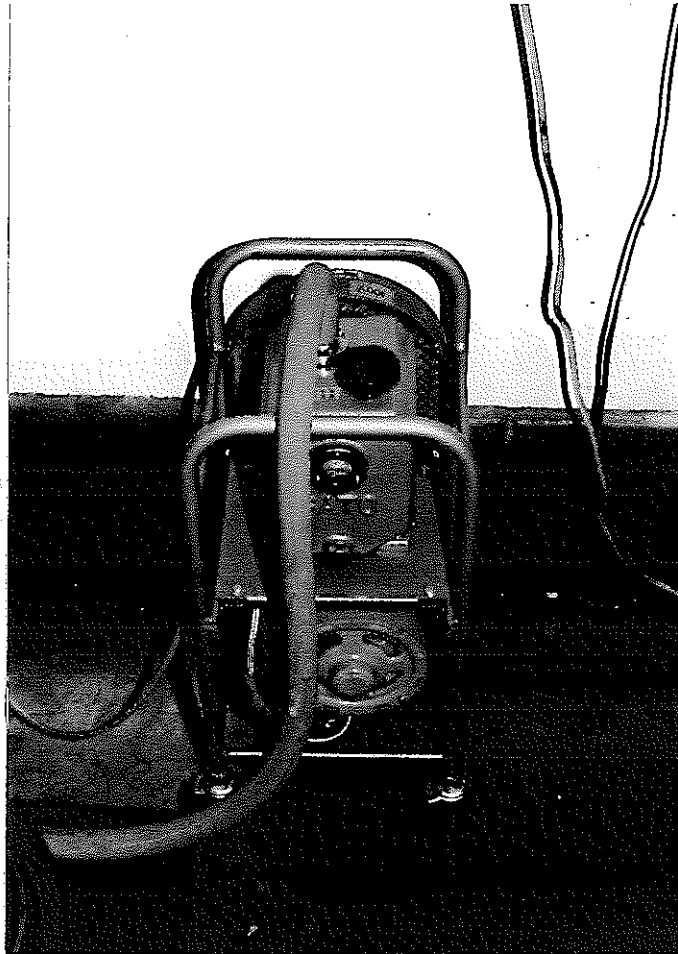


図 3 - 4 ( b ) 真空ポンプ  
佐藤真空機械工業製 ST-50

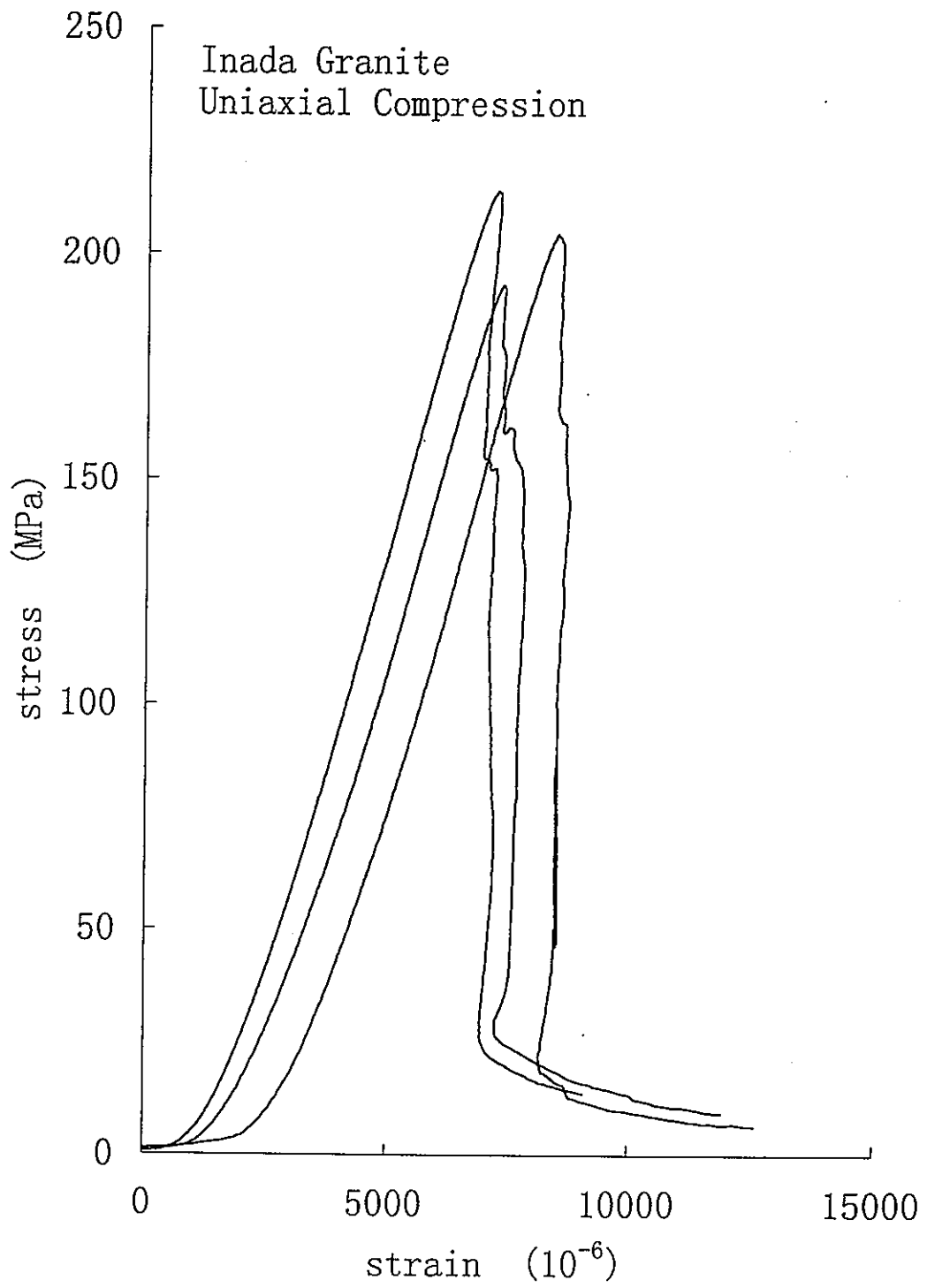


図3-5 (a) 一軸圧縮応力下での応力-歪曲線  
 稲田花崗岩, 気乾状態

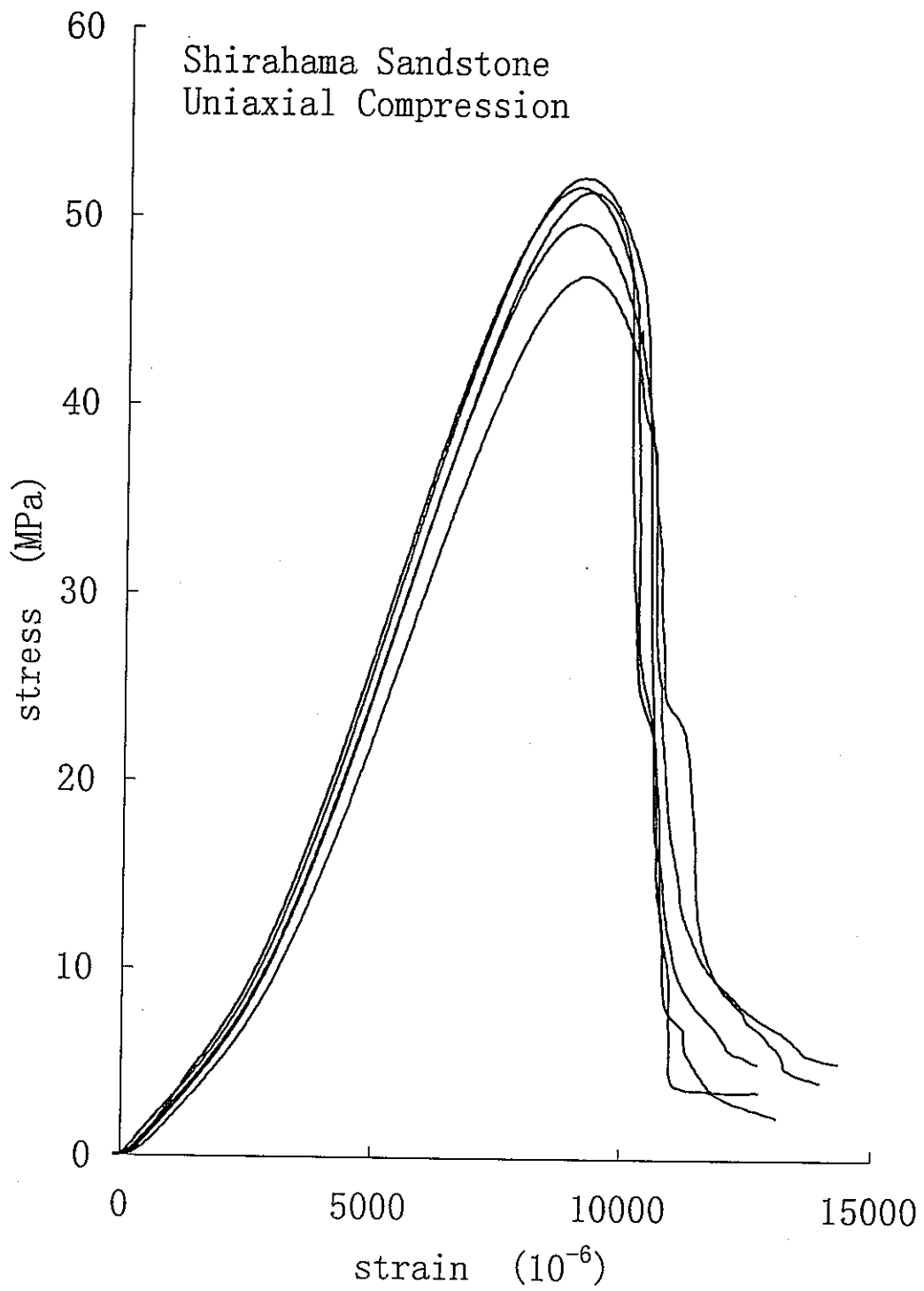


図3-5 (b) 一軸圧縮応力下での応力-歪曲線  
白浜砂岩, 気乾状態

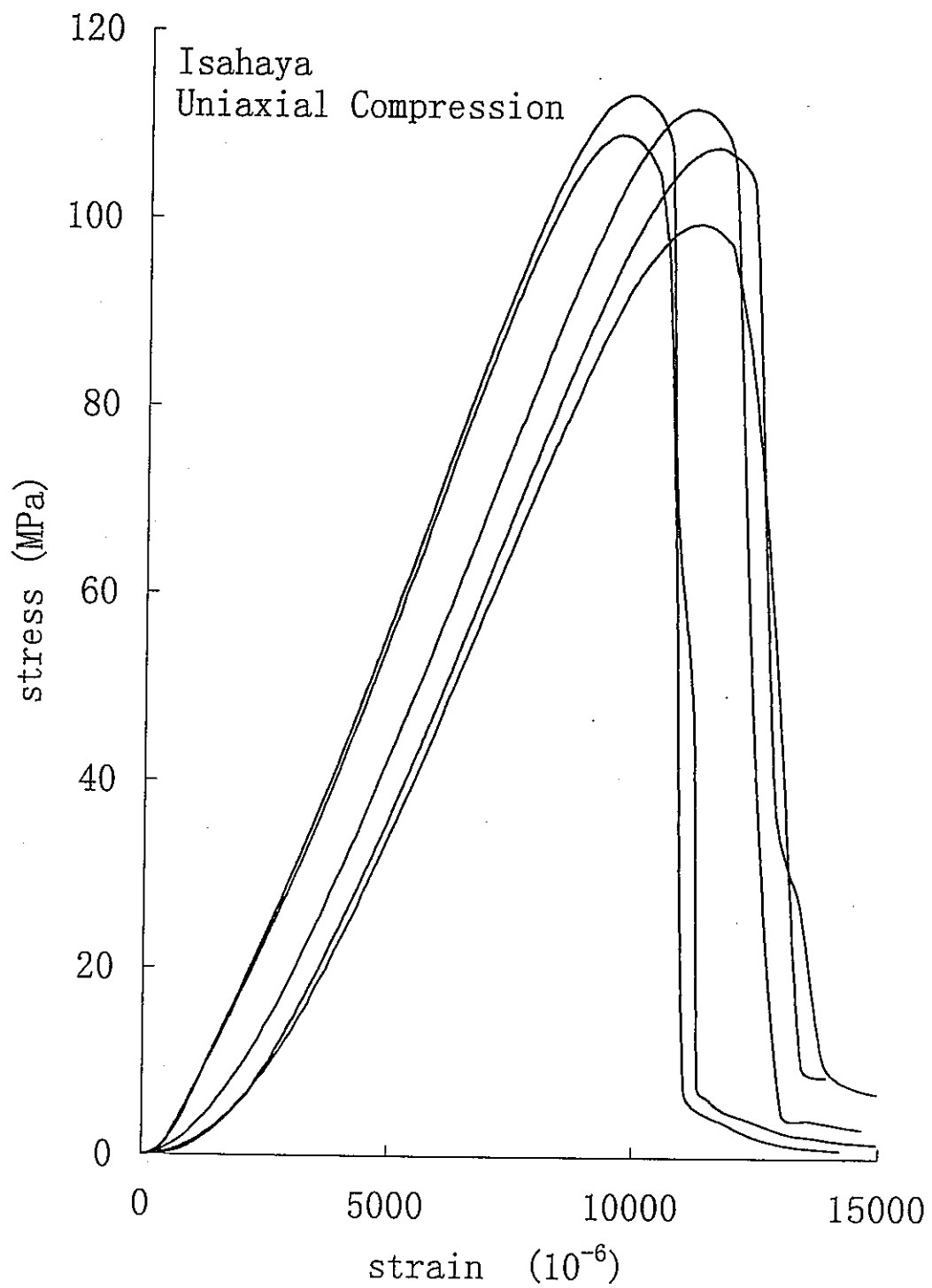


図3-5(c) 一軸圧縮応力下での応力-歪曲線  
諫早石, 気乾状態

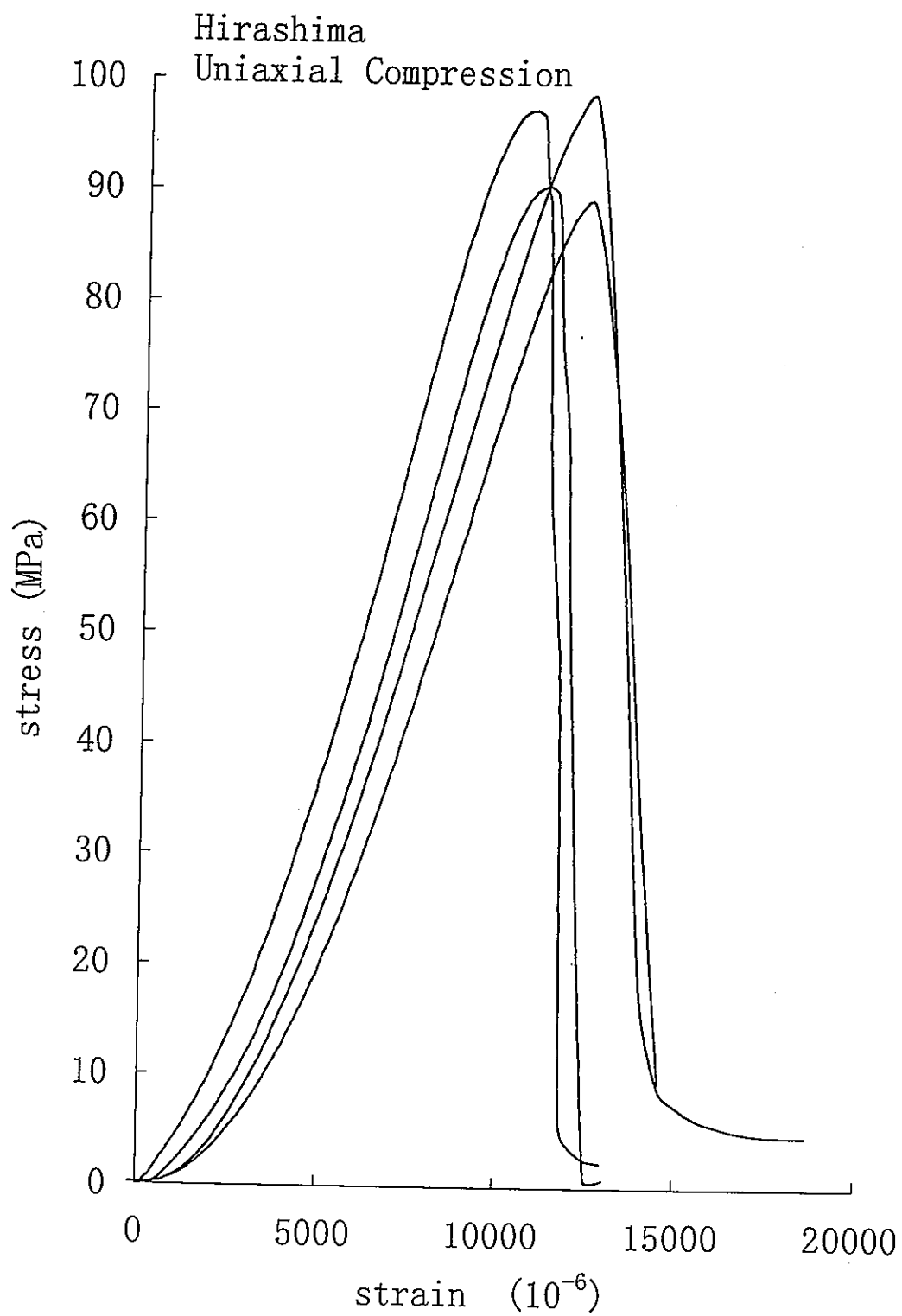


図3-5 (d) 一軸圧縮応力下での応力-歪曲線  
平島石, 気乾状態

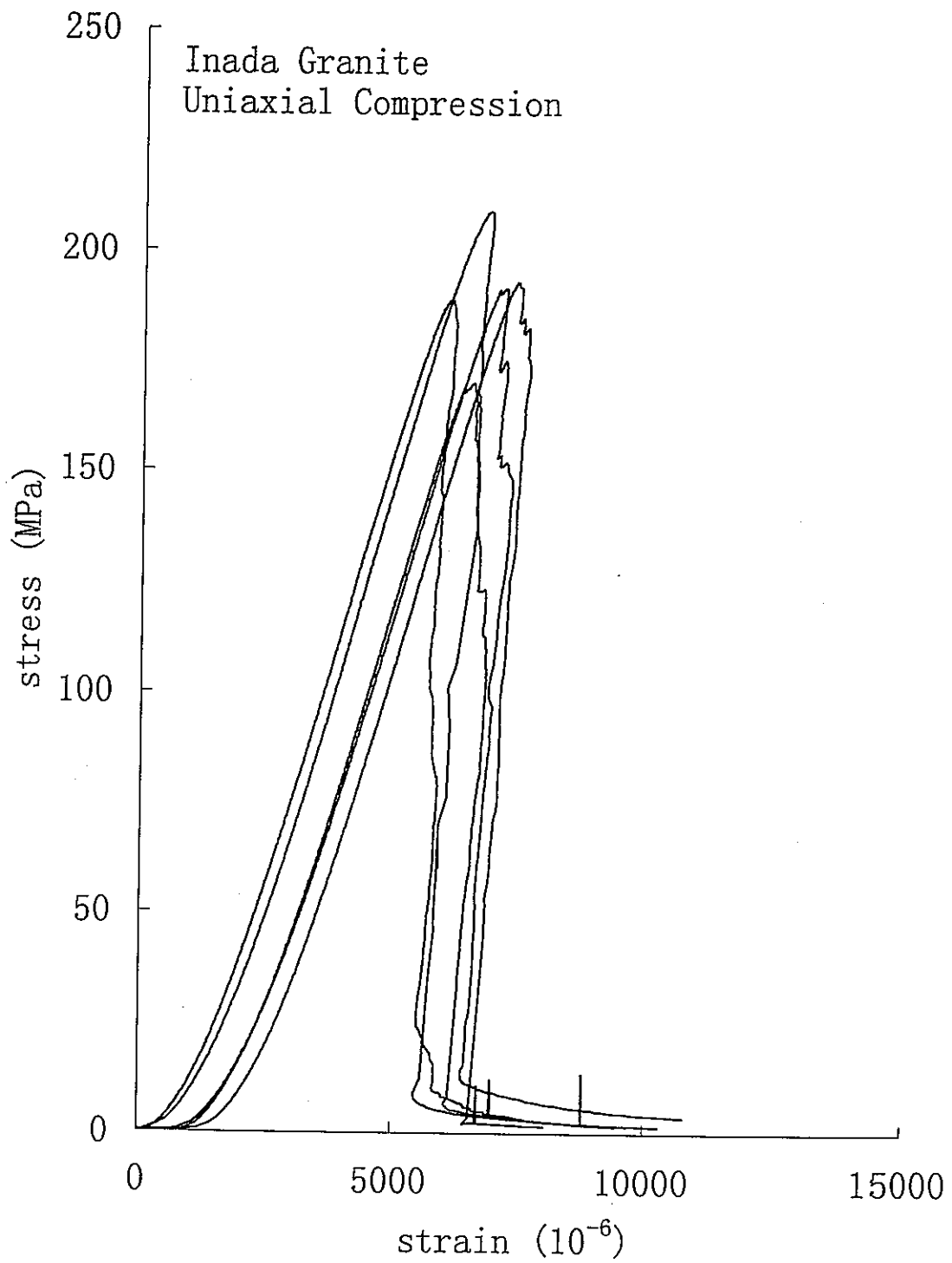


図3-6 (a) 一軸圧縮応力下での応力-歪曲線  
 稲田花崗岩, 湿潤状態

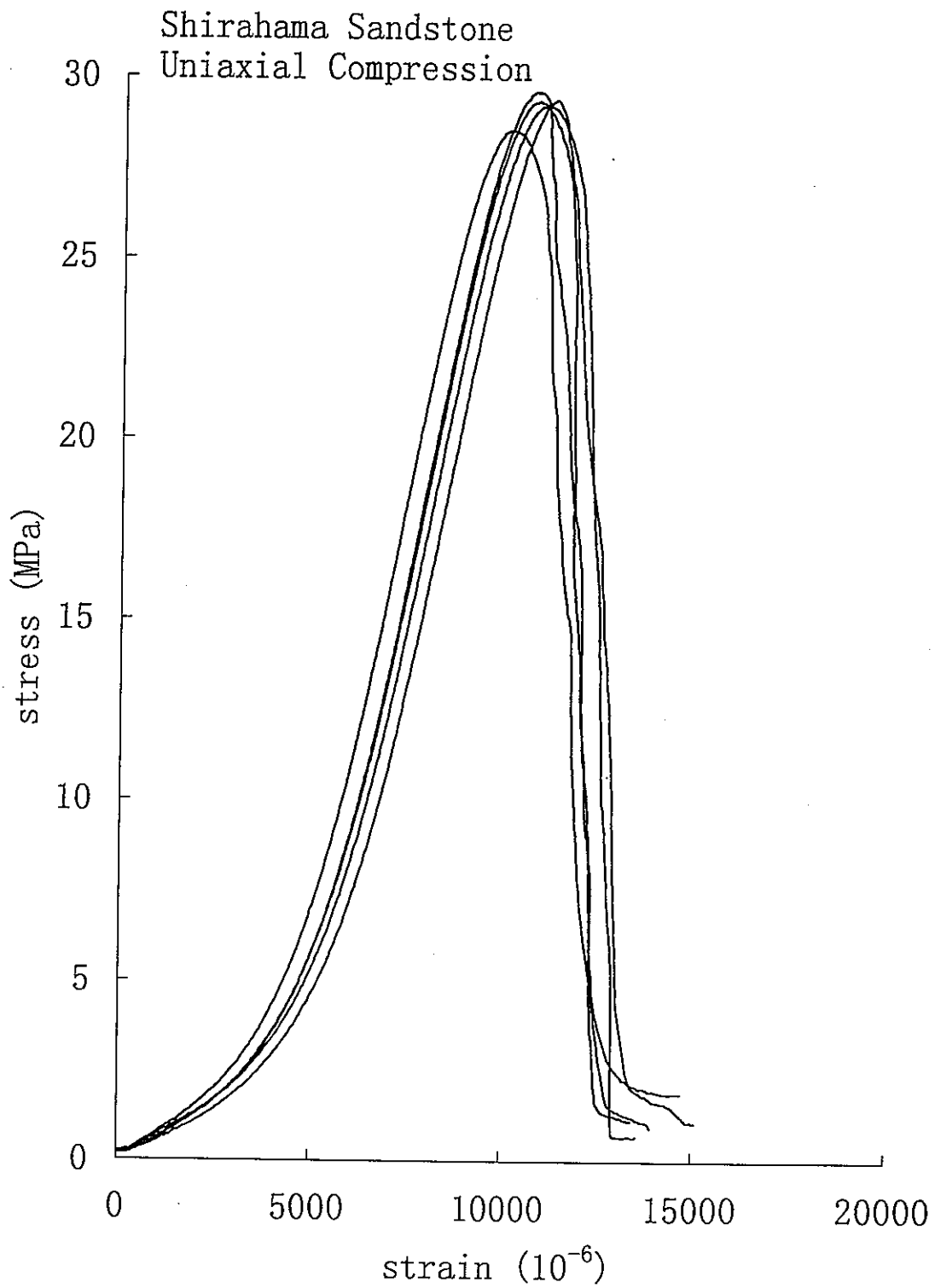


図3-6 (b) 一軸圧縮応力下での応力-歪曲線  
白浜砂岩, 湿潤状態

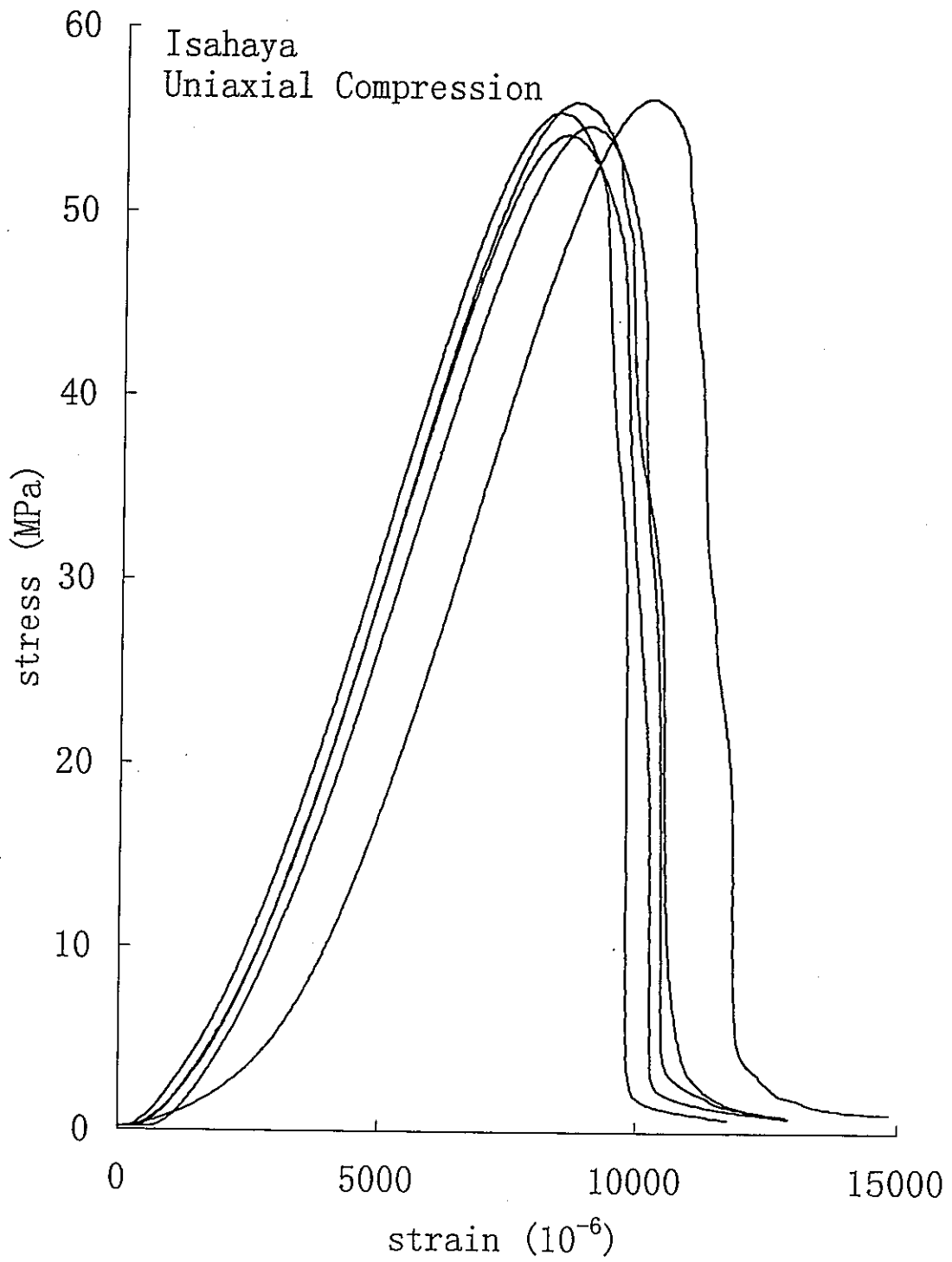


図3-6 (c) 一軸圧縮応力下での応力-歪曲線  
諫早石, 湿潤状態



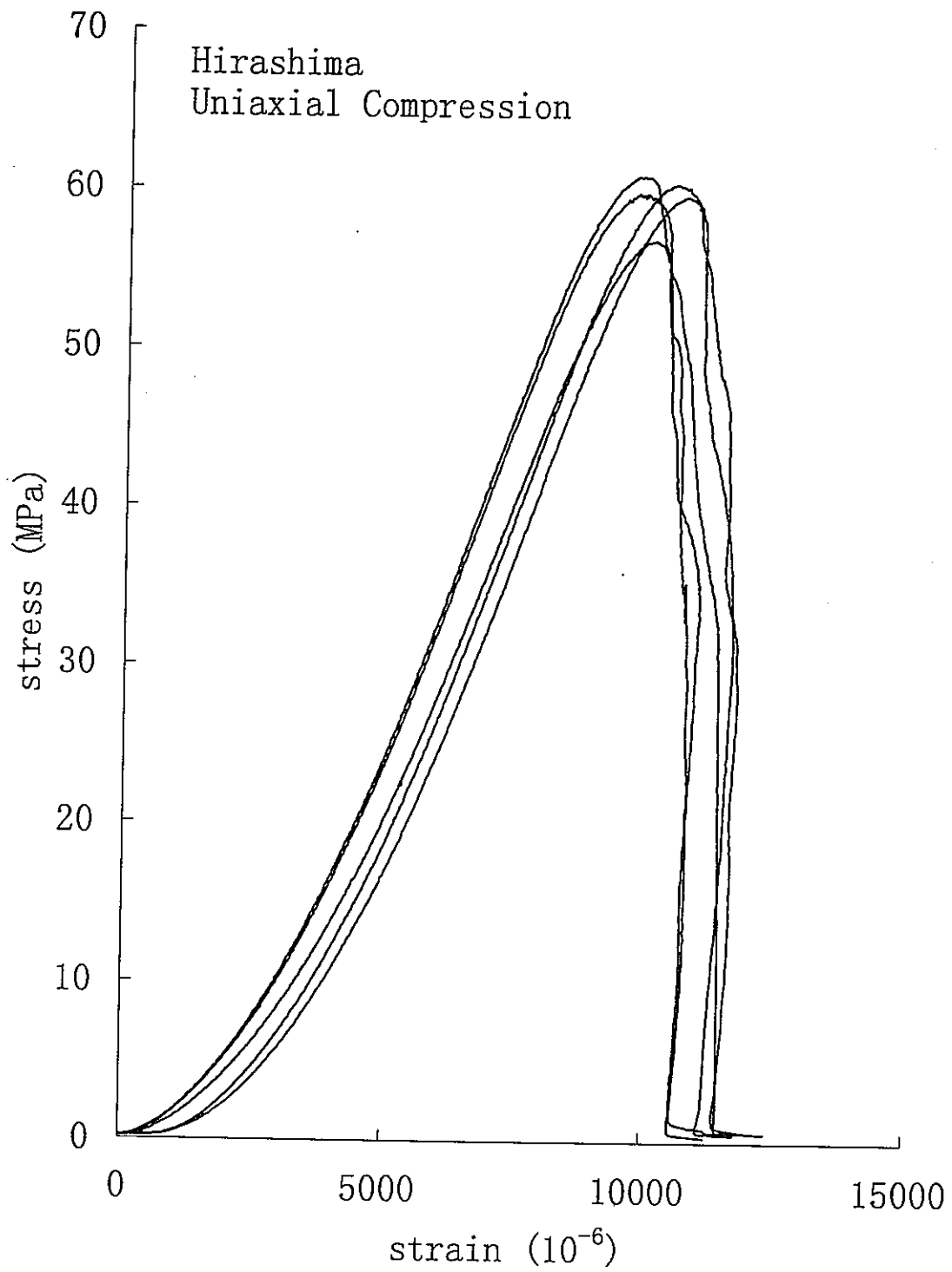


図3-6 (d) 一軸圧縮応力下での応力-歪曲線  
平島石, 湿潤状態

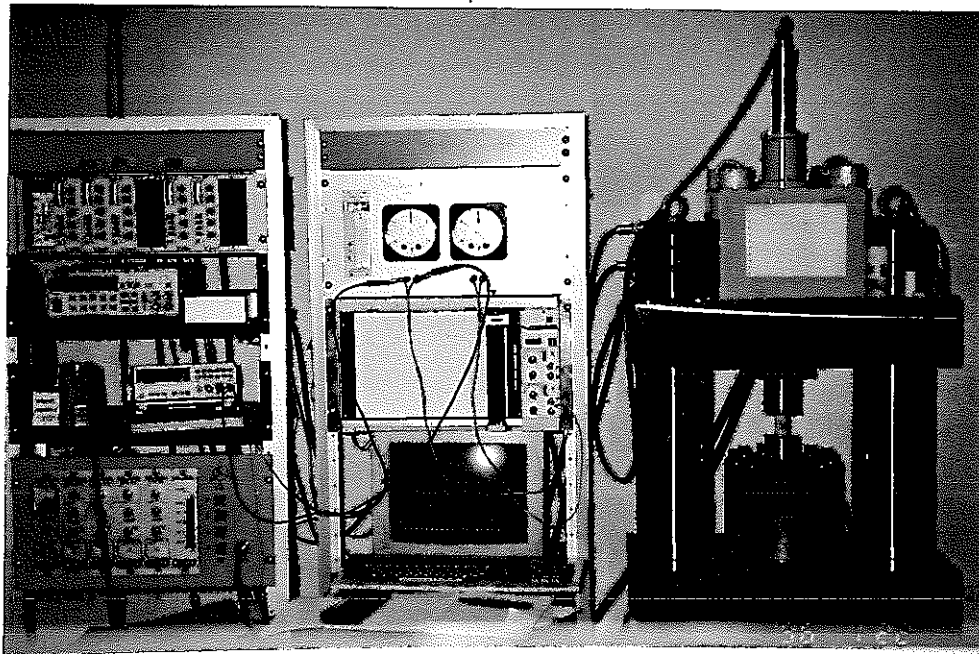
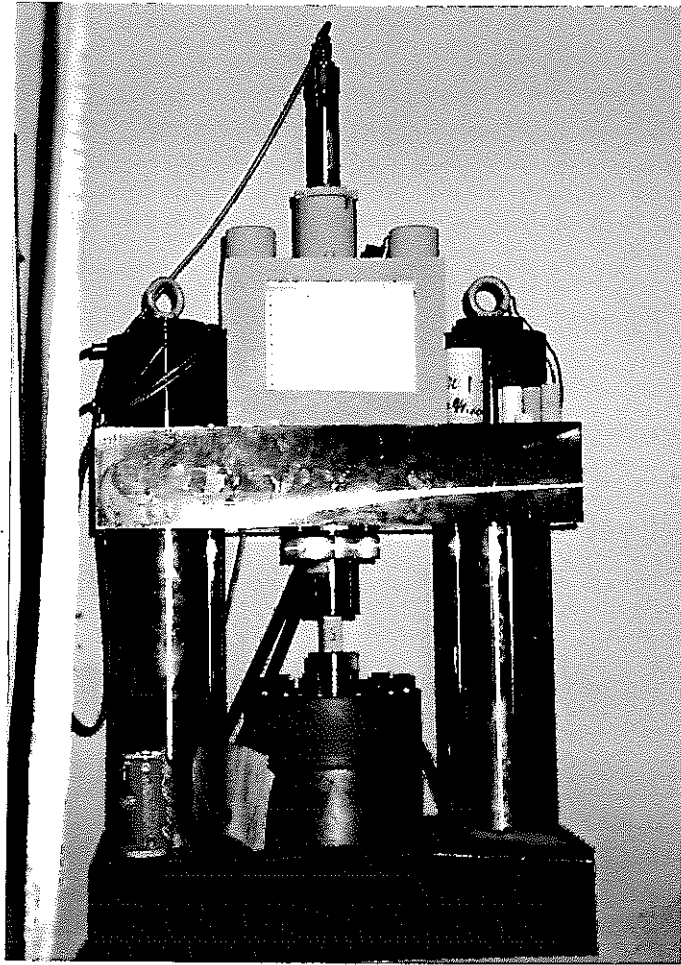


図 3 - 7 サーボ試験機 (自作 容量 500 kN) の写真

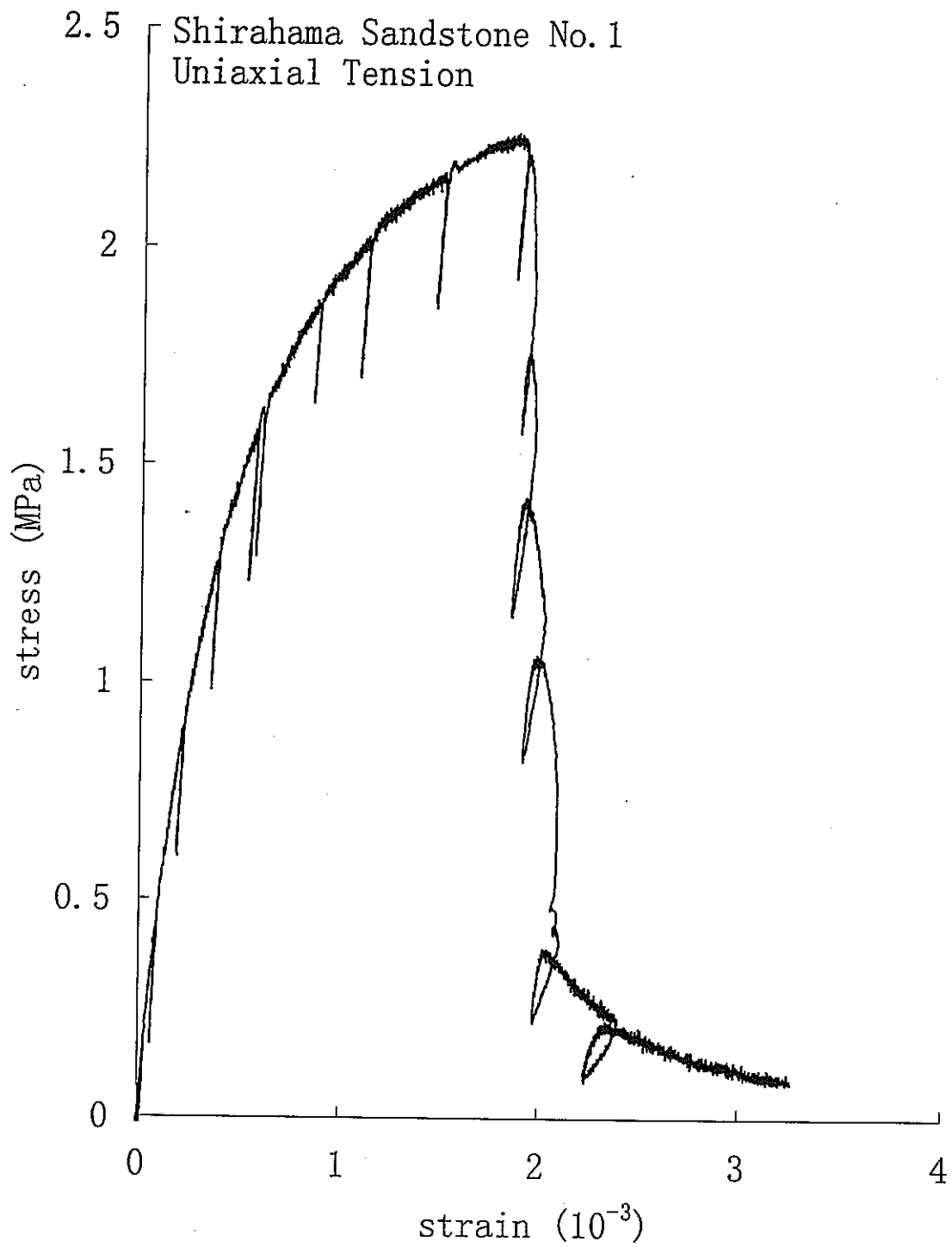


図3-8 (a) 一軸引張応力下での応力-歪曲線  
白浜砂岩 (No. 1), 気乾状態

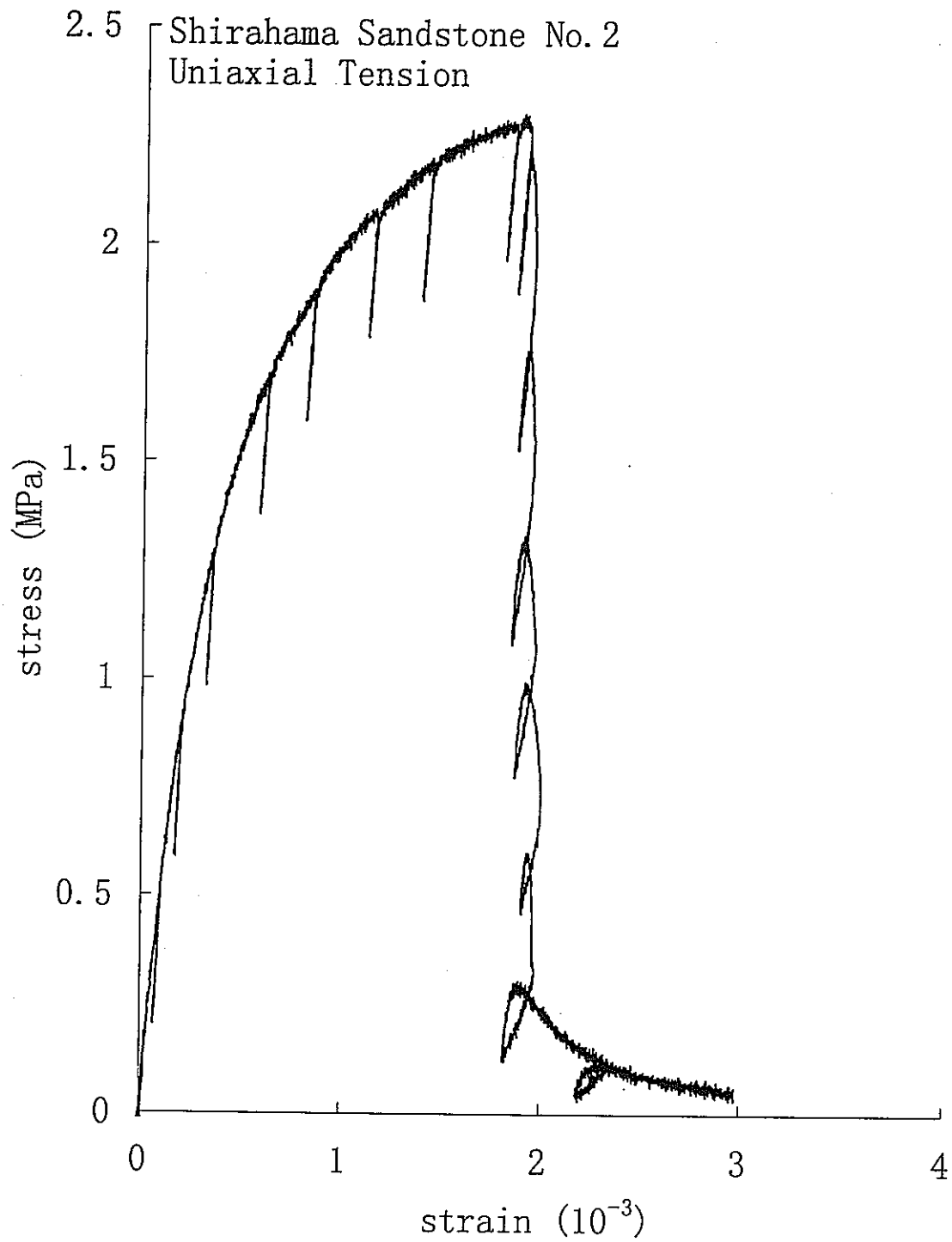


図3-8 (b) 一軸引張応力下での応力-歪曲線  
白浜砂岩 (No. 2), 気乾状態

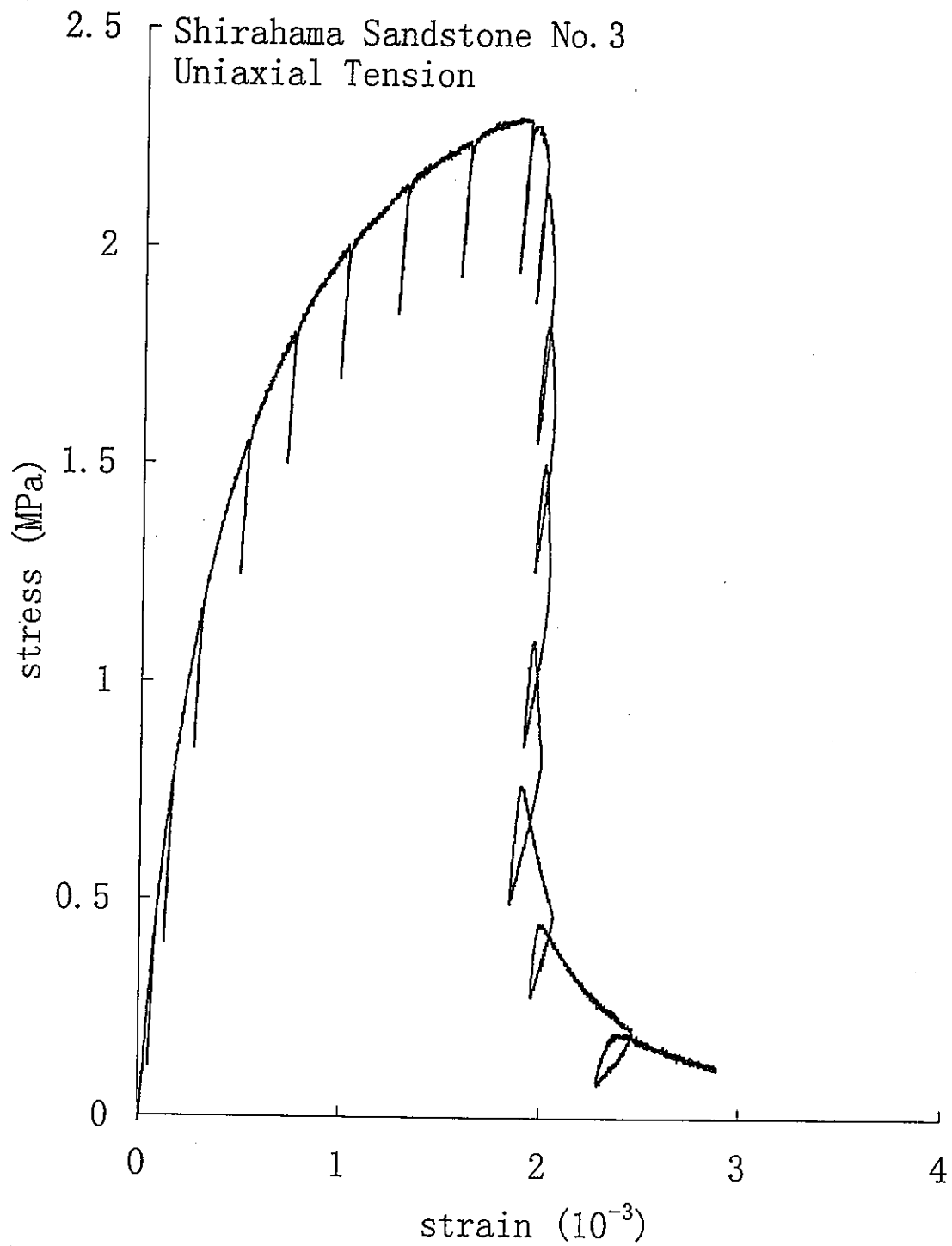


図3-8 (c) 一軸引張応力下での応力-歪曲線  
白浜砂岩 (No. 3), 気乾状態

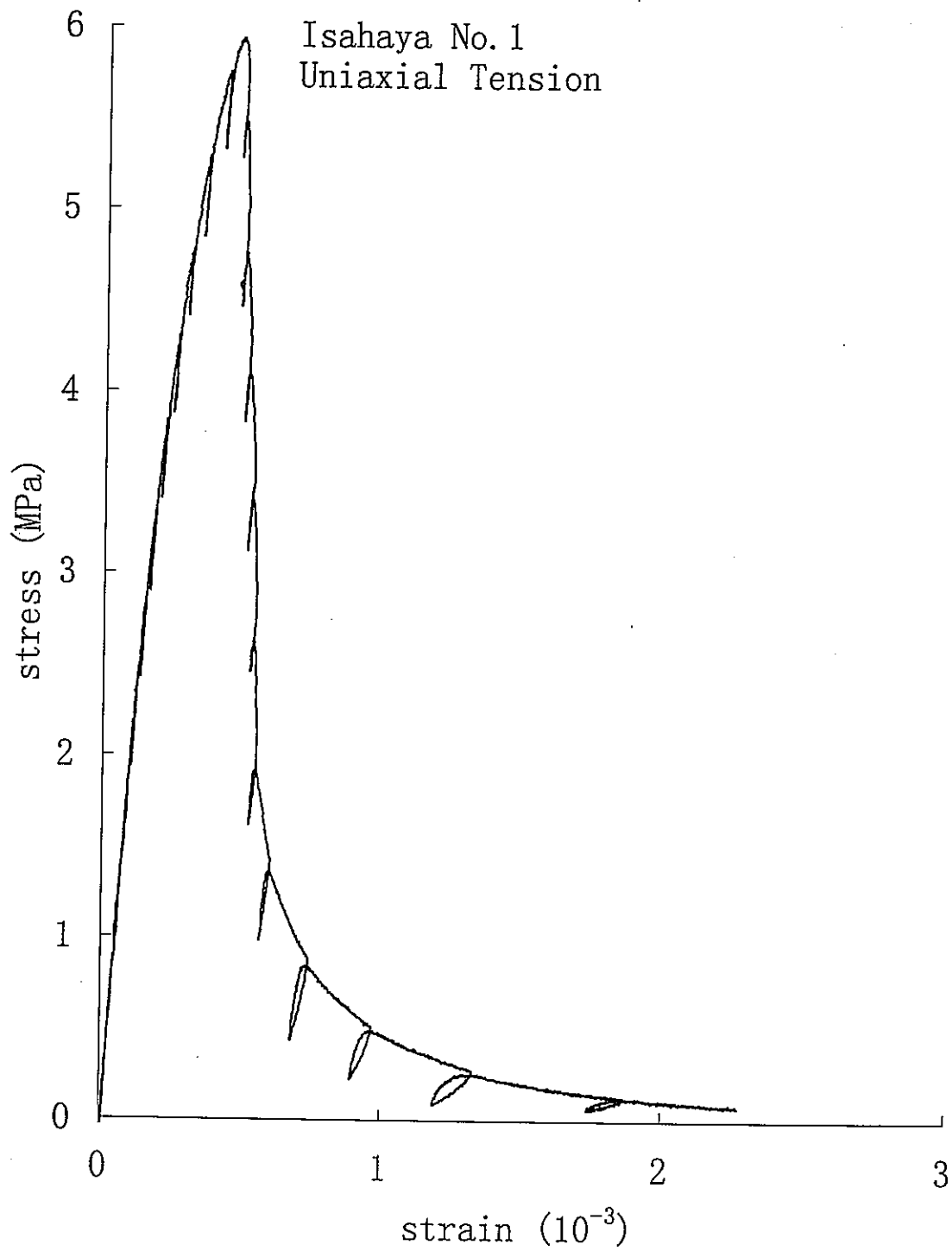


図3-9 (a) 一軸引張応力下での応力-歪曲線  
諫早石 (No. 1), 気乾状態

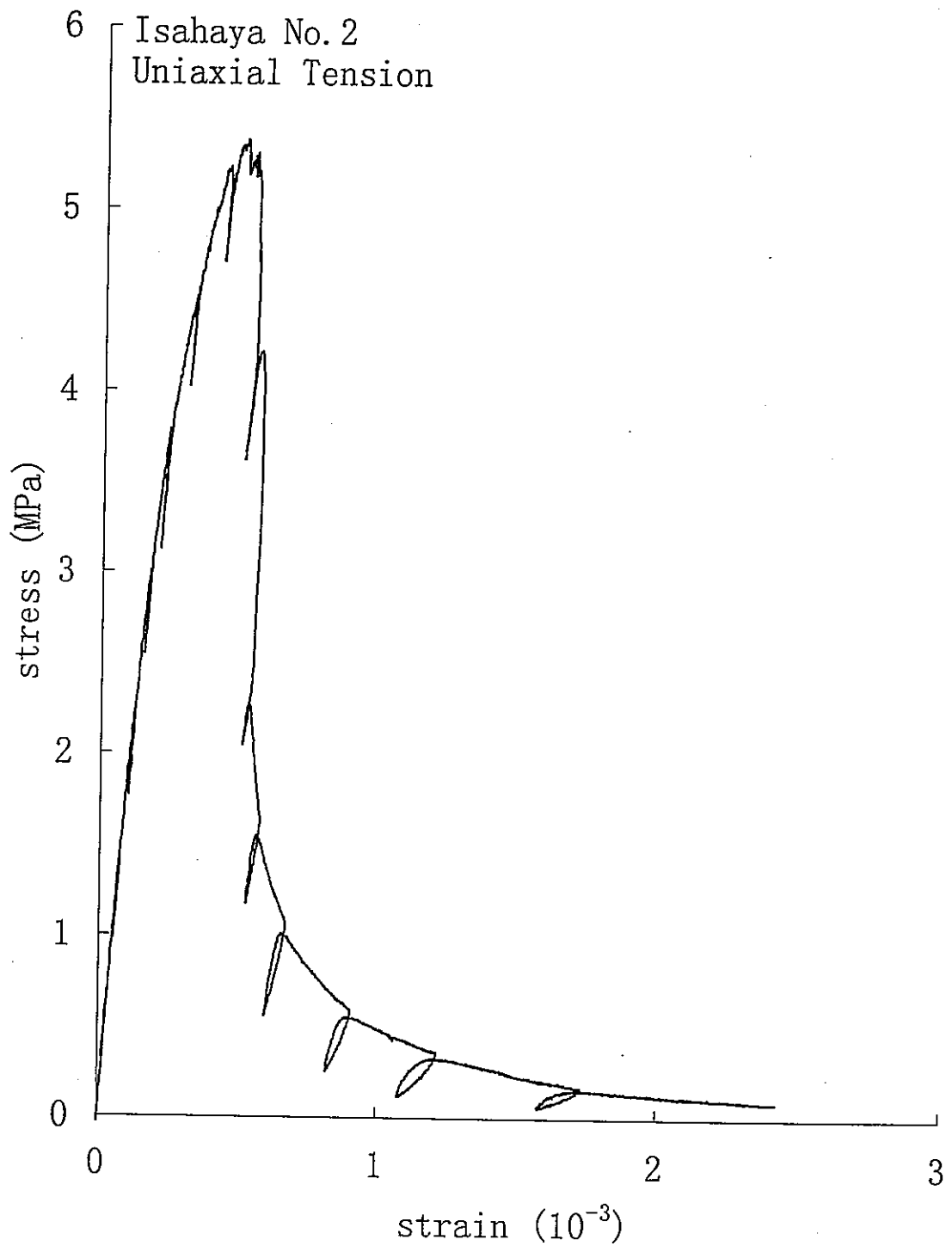


図3-9 (b) 一軸引張応力下での応力-歪曲線  
諫早石 (No. 2), 気乾状態

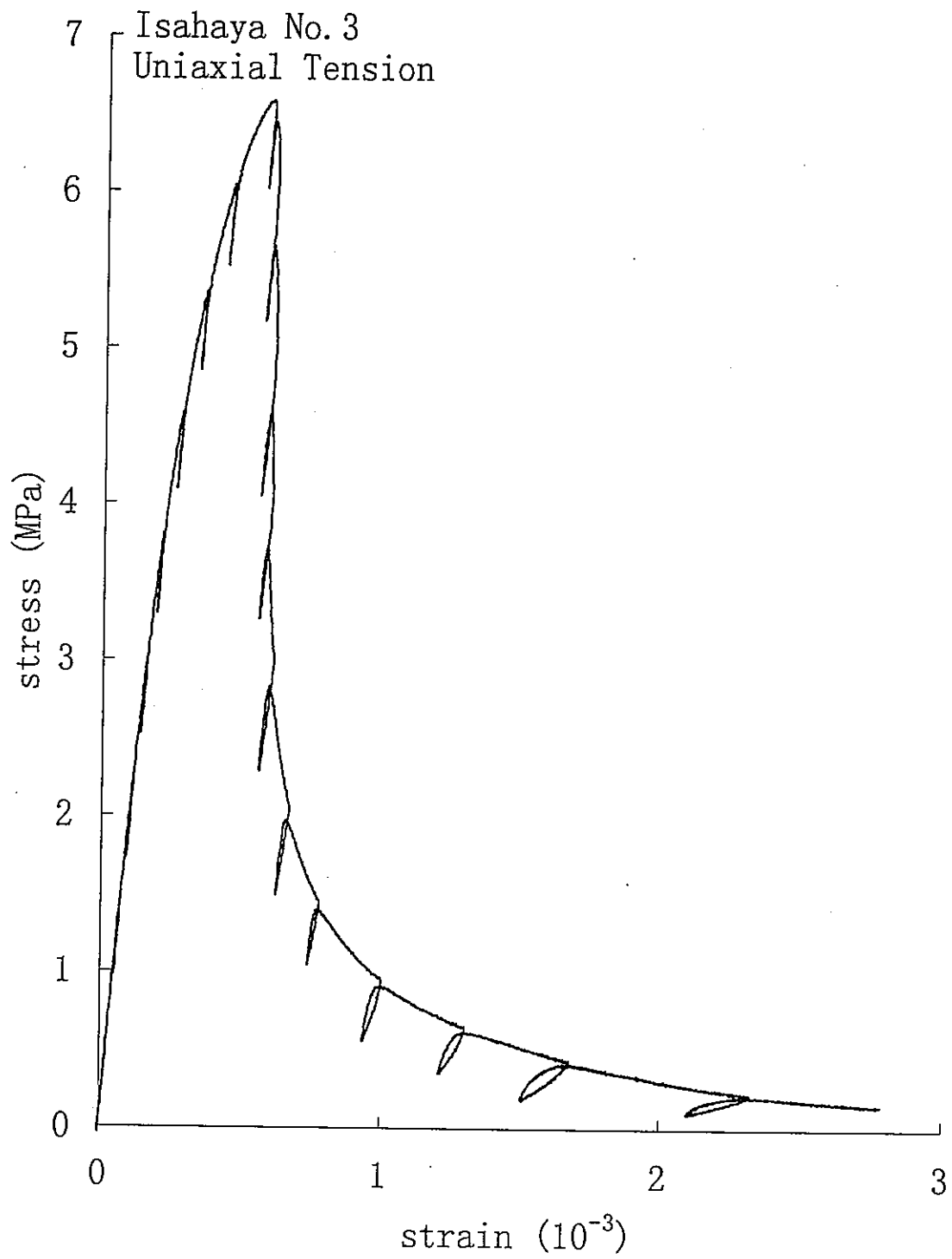


図3-9 (c) 一軸引張応力下での応力-歪曲線  
諫早石 (No. 3), 気乾状態



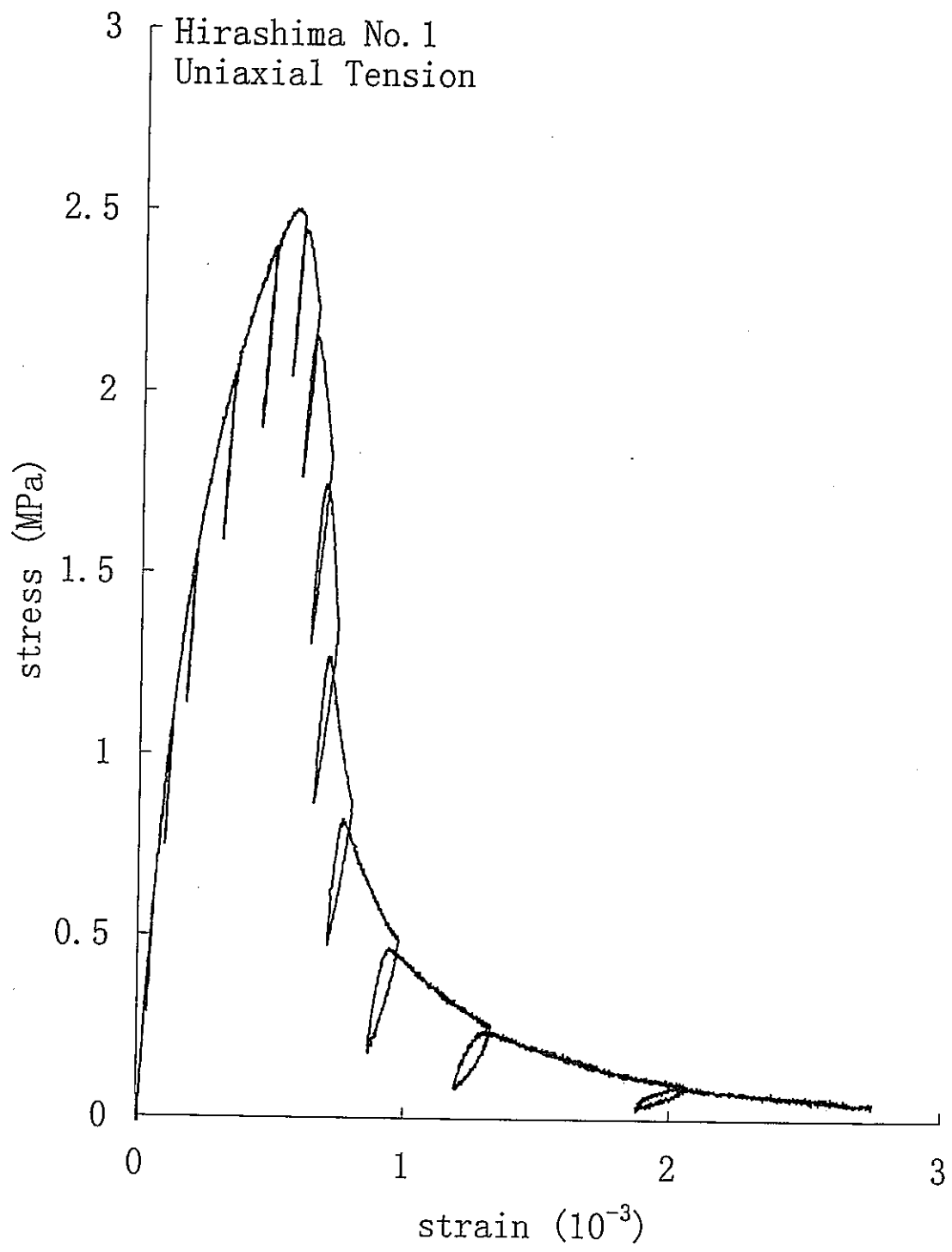


図3-10 (a) 一軸引張応力下での応力-歪曲線  
平島石 (No. 1), 気乾状態

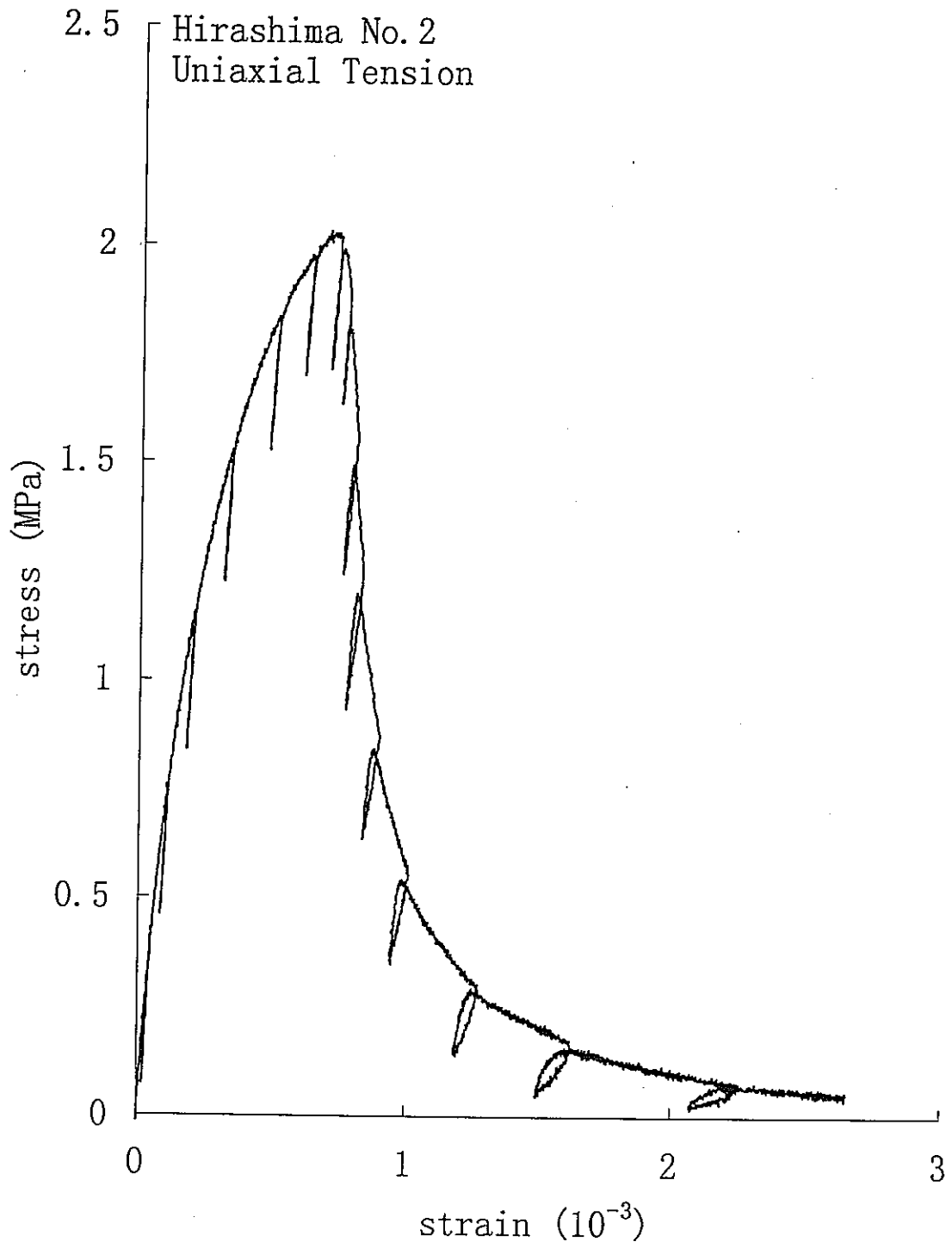


図3-10 (b) 一軸引張応力下での応力-歪曲線  
平島石 (No. 2), 気乾状態

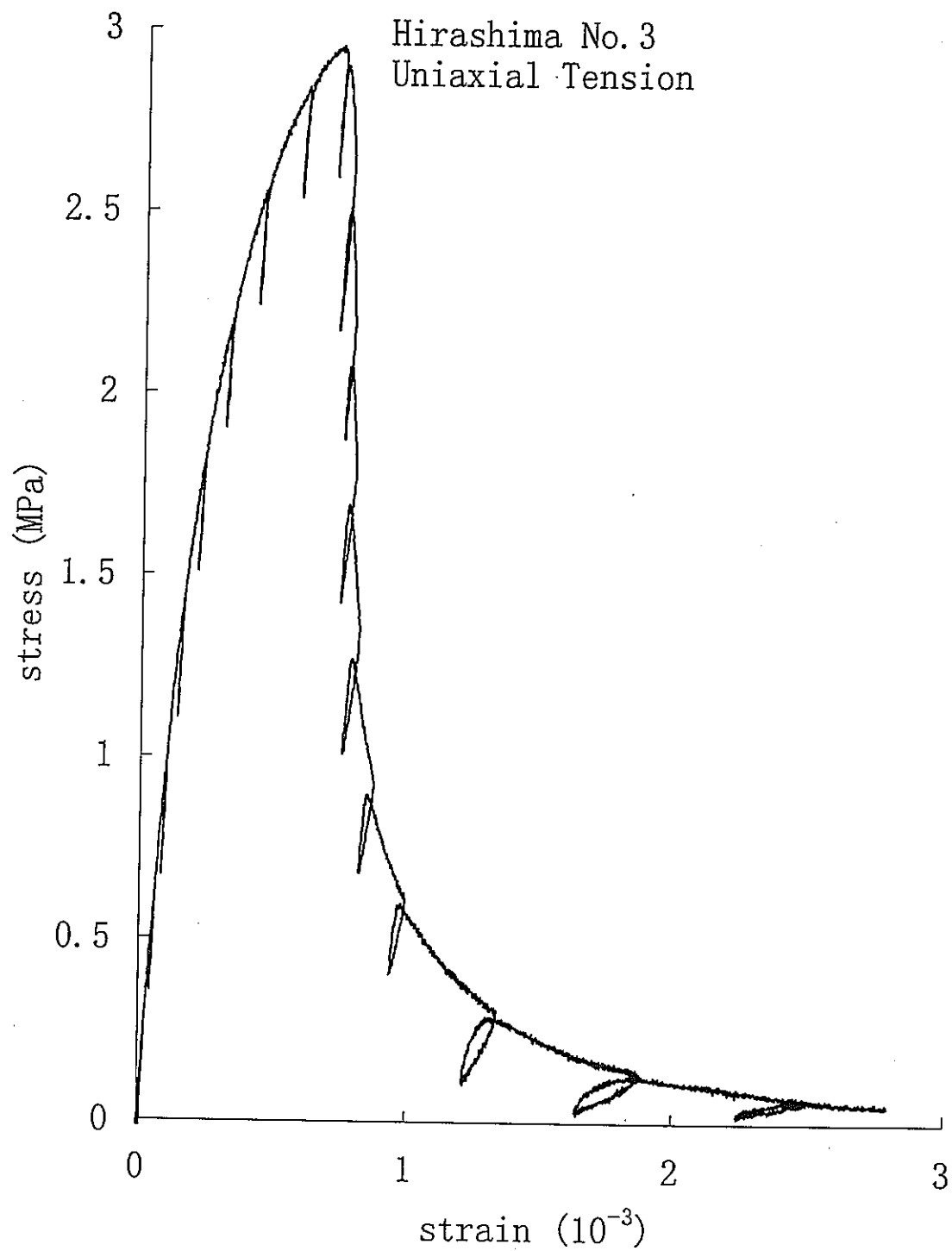


図3-10(c) 一軸引張応力下での応力-歪曲線  
平島石 (No. 3), 気乾状態

## 4. 周圧維持装置

### 4. 1 油圧式周圧維持装置

図4-1に油圧式周圧維持装置の概略図を示す。基本的な考え方は、すでに報告した油圧式クリープ試験機の圧力維持装置と同じである。図4-2(a)と(b)に示す東衡テスタック製の油圧源は、図4-2(c)の圧力設定器によってON-OFF制御される。図4-2(d)には、周圧ベッセルの写真を示した。これは、機能を絞るかわりに、取り扱いの簡便さを高めるためできる限り小型化を図ったものである。

図4-3に、油圧の測定結果を示す。雑音が若干のっているが、精度1%以内で問題なく油圧が保持されている。なお、油圧源は1日に数回運転されるだけであり、長期試験には有利なシステムと考えている。

#### 4. 2 空圧式周圧維持装置

図4-4に空圧式周圧維持装置の概略図を示す。油圧式周圧装置より安価で小型の周圧維持装置の開発を狙ったものである。ただし、比較的周圧の小さい時に限る。機構は甚だ簡単であり、コンプレッサーで発生した空圧（一次圧）は圧力調整器（弁）に導かれる。その後、増圧器にて増圧される（二次圧）とともに油圧に変換される。試験装置全景の写真を図4-5（a）に、コンプレッサの写真を図4-5（b）に、増圧器の写真を図4-5（c）、圧力調整器を図4-5（d）、（e）に示す。最初は安価な（d）を用いていたが、実験の結果、油圧の精度は圧力調整器に影響を受けることがわかったため、（e）の精密な調整器に変更した。またコンプレッサ、増圧器とも市販品で、簡単に入手できる。

図4-5（d）の圧力調整器を用いた場合の実験結果を図4-6に示す。（a）は空気圧、（b）は油圧の経時変化である。圧力調整弁はごく普通のものを使用したもので、空気圧の設定精度はあまり良くなく、実験開始の後、2日間は若干の圧力の低下がみられた。これに伴って、油圧にもかなりの変化がみられた。

次に、図4-5（e）の圧力調整器を用いた実験結果を図4-7に示す。（a）は空気圧、（b）は油圧の経時変化である。先ほどと異なり、長期的に見た場合の圧力変動は小さくなった。図4-7（b）に示した油圧がわずかながら下がっていくのは、増圧器油圧シリンダからの油もれのためと思われる。しかし、数時間の周期で空圧が変化している。これに同調するように、油圧も変化していることが（b）からわかる。これは一次圧を供給しているコンプレッサーがON・OFFする周期と一致しており、一次圧の変化により二次圧が変化している。これは図4-5（e）の圧力調整器の特性であり、一次圧が高い場合には二次圧が若干小さくなり、一次圧が低くなると、二次圧が若干大きくなる。カタログに掲載されている特性図を図4-8に示す。カタログに示されている特性図を見ると、もっと高価な圧力調整器を用いれば、改善することは可能である。空気の圧力調整器はさほど価格が高くないので、実用上二次圧の安定性は得られるものと考えられる。

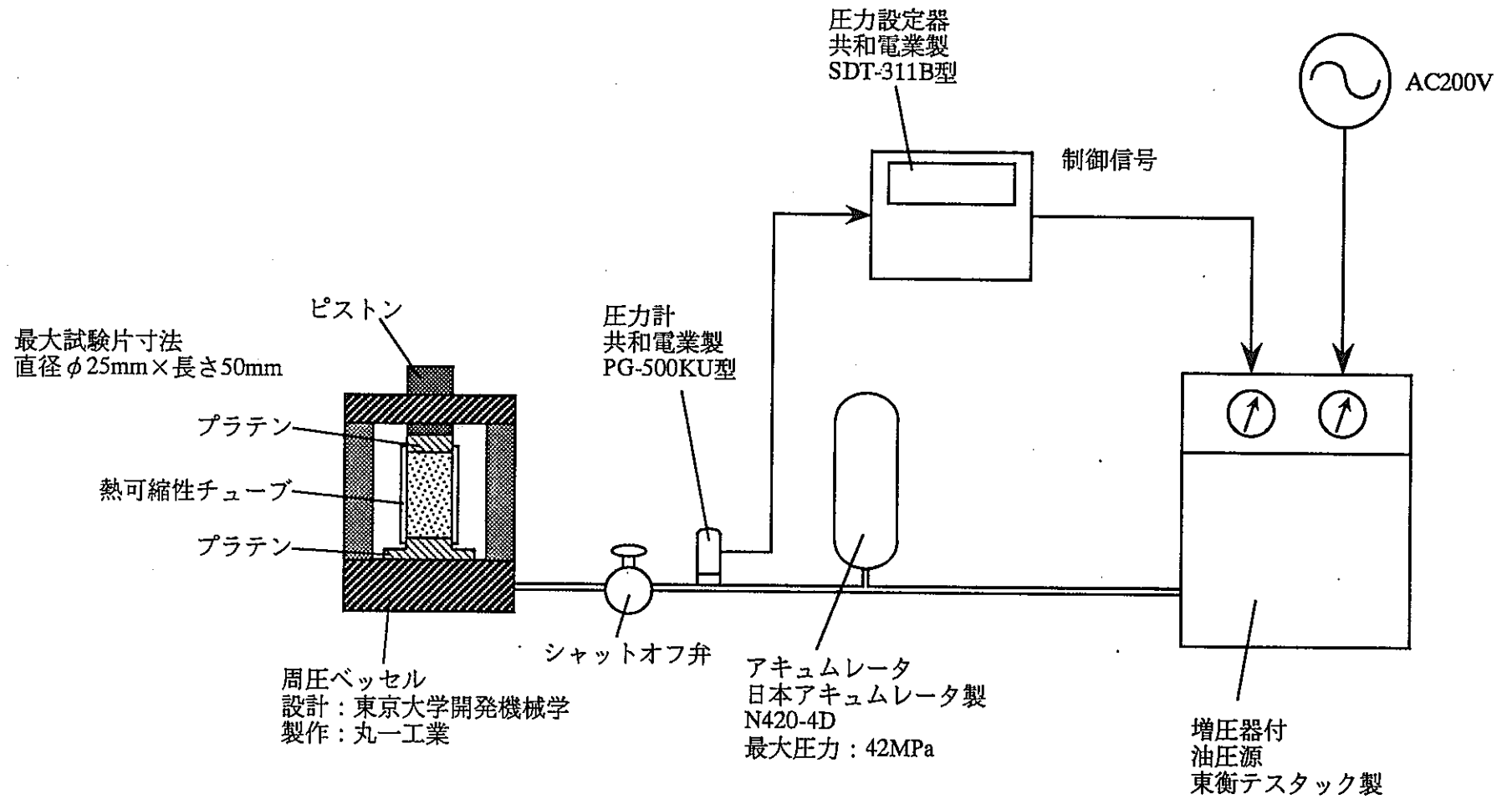


図4-1 油圧式周圧維持装置の概略図

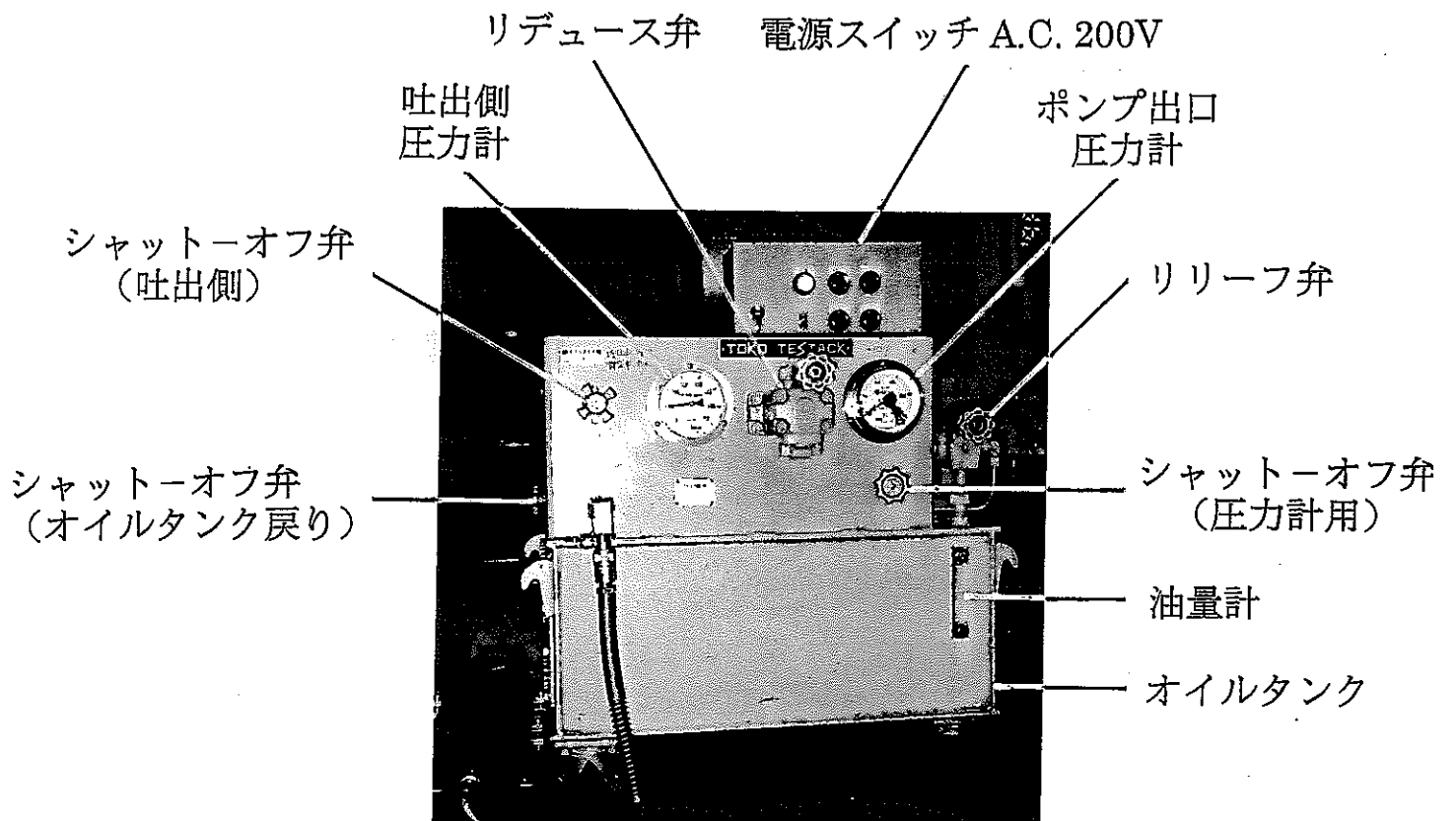


図4-2 (a) 油圧式周圧維持装置油圧源の写真 (正面)

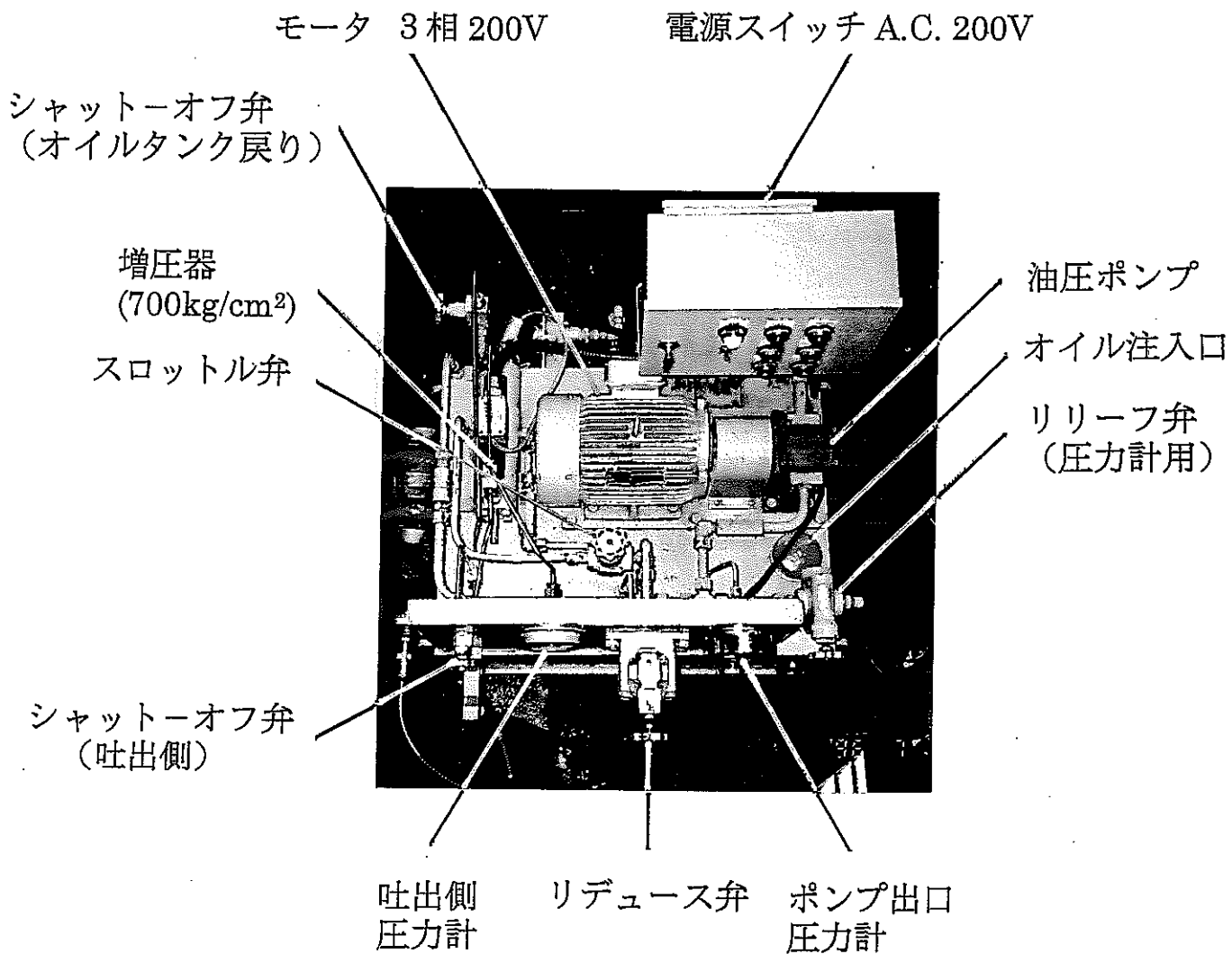


図 4 - 2 ( b ) 油圧式周圧維持装置油圧源の写真 (平面)



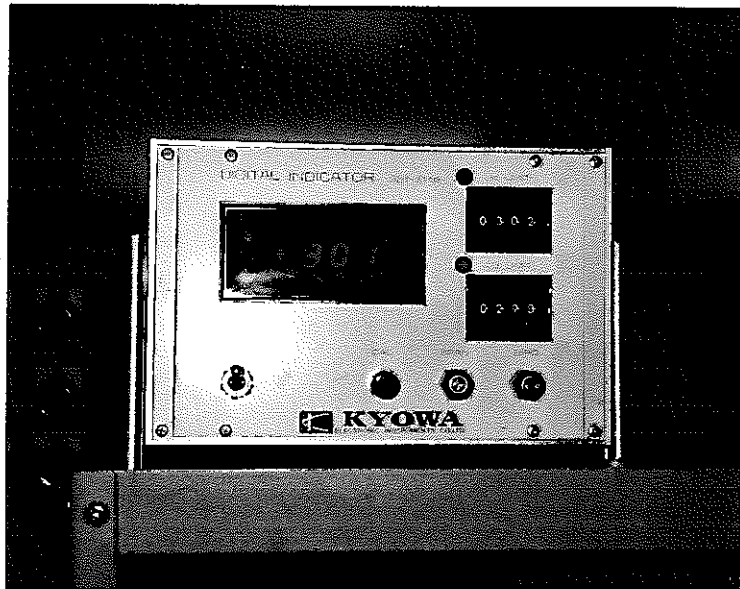
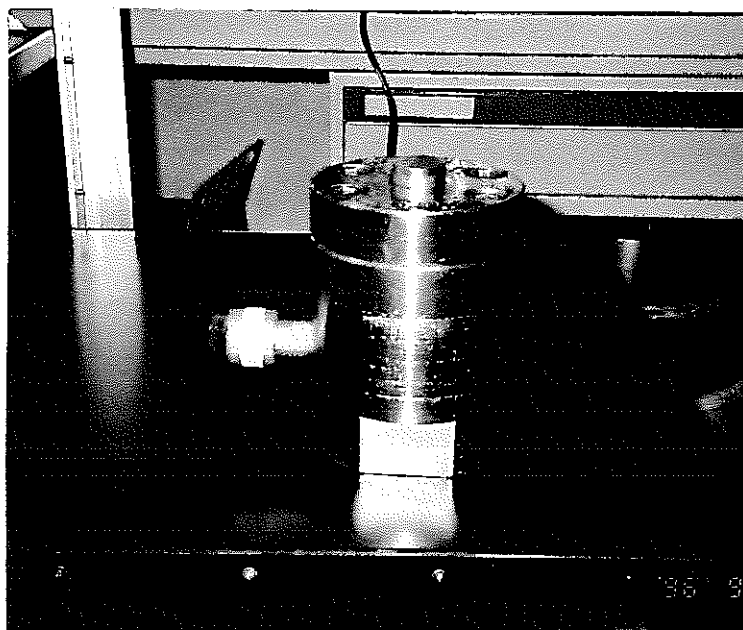


図4-2(c) 圧力設定器



仕様

外形寸法  $\phi 100 \text{ mm}$

内径寸法  $\phi 40 \text{ mm}$

最大圧力  $60 \text{ MP a}$

図4-2 (d) 周圧ベッセル

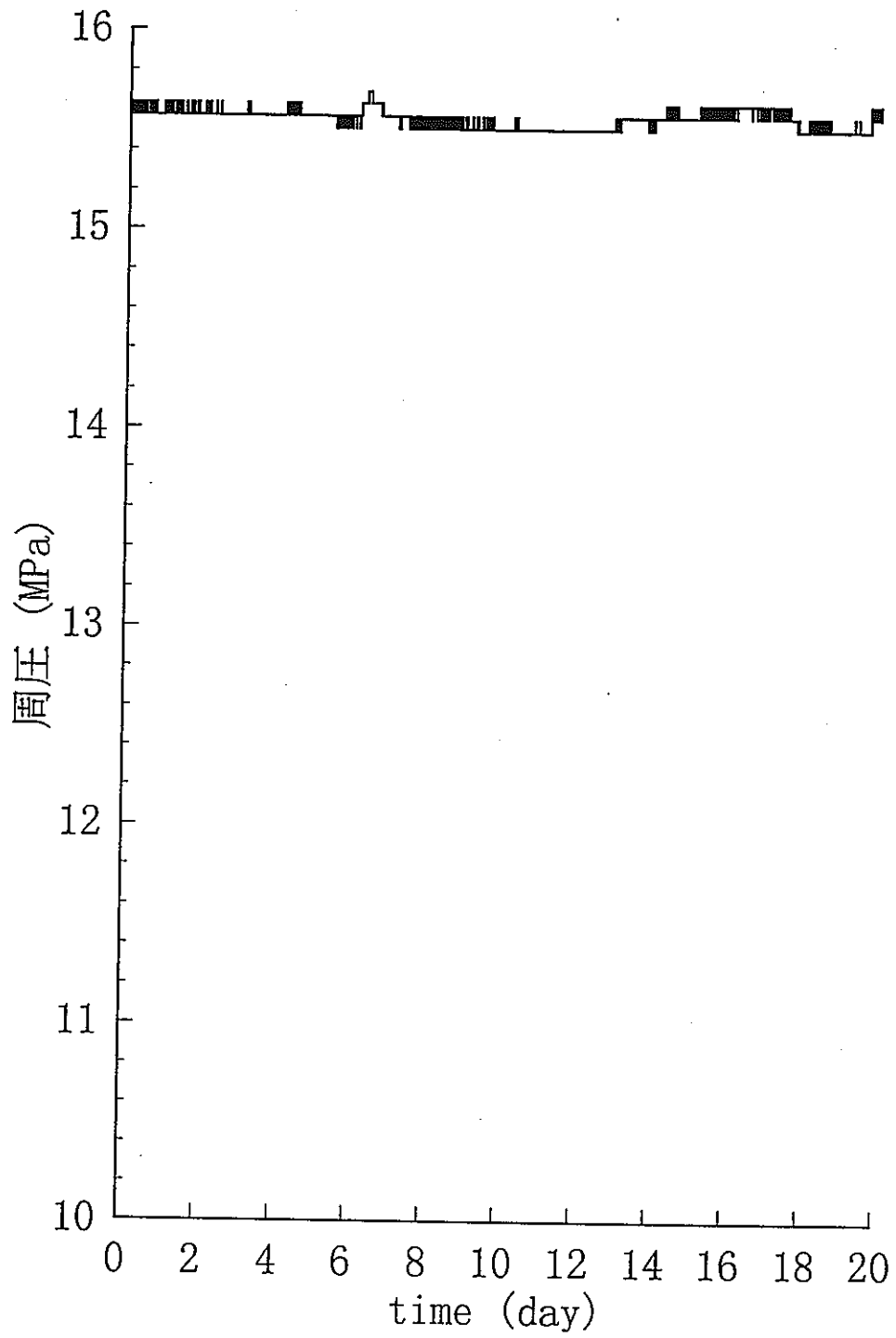


图 4-3 油压式周压维持装置 试验结果

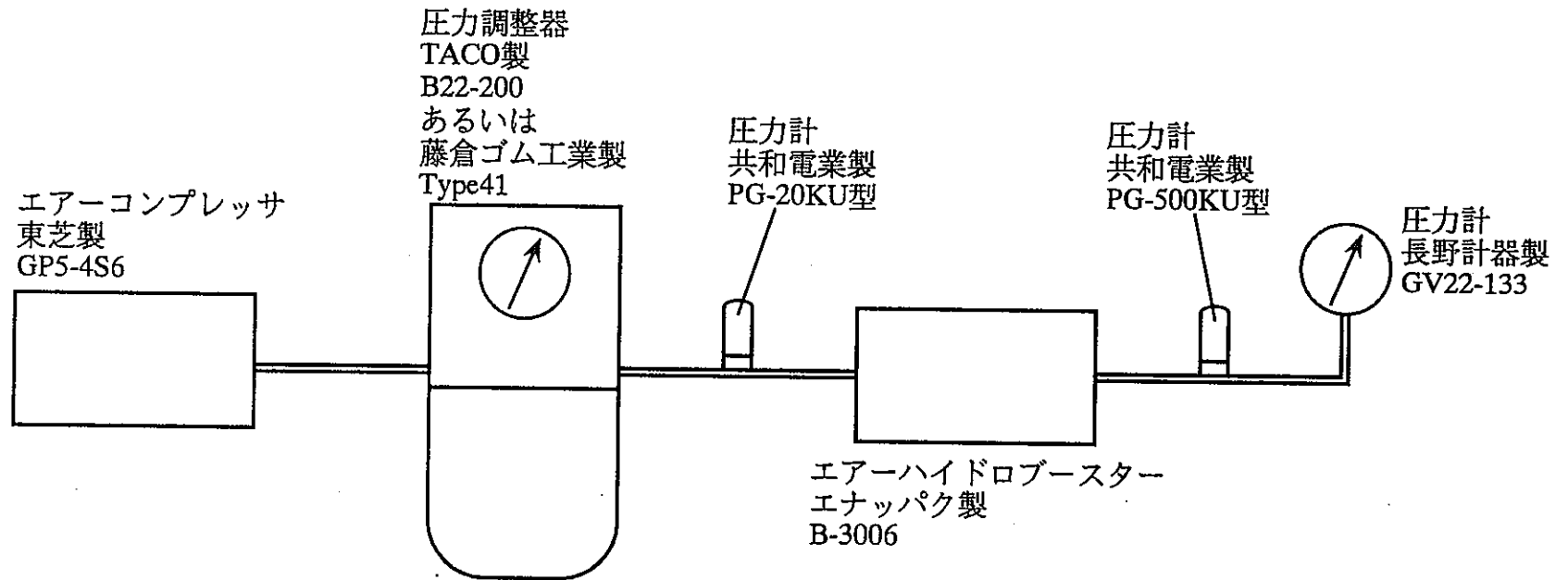


図 4 - 4 空圧式周圧維持装置の概略図

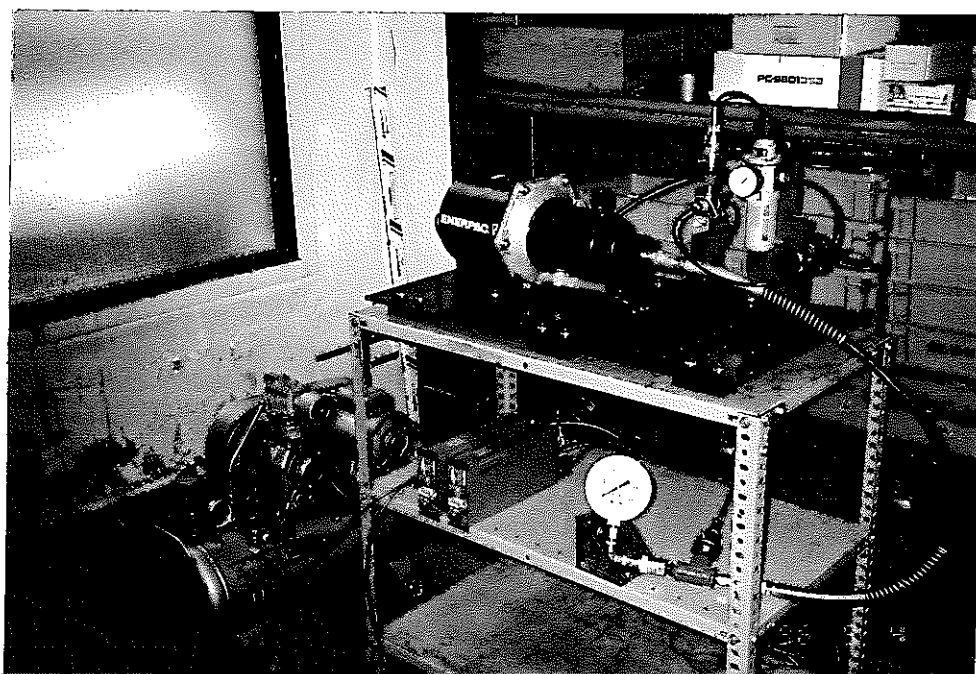
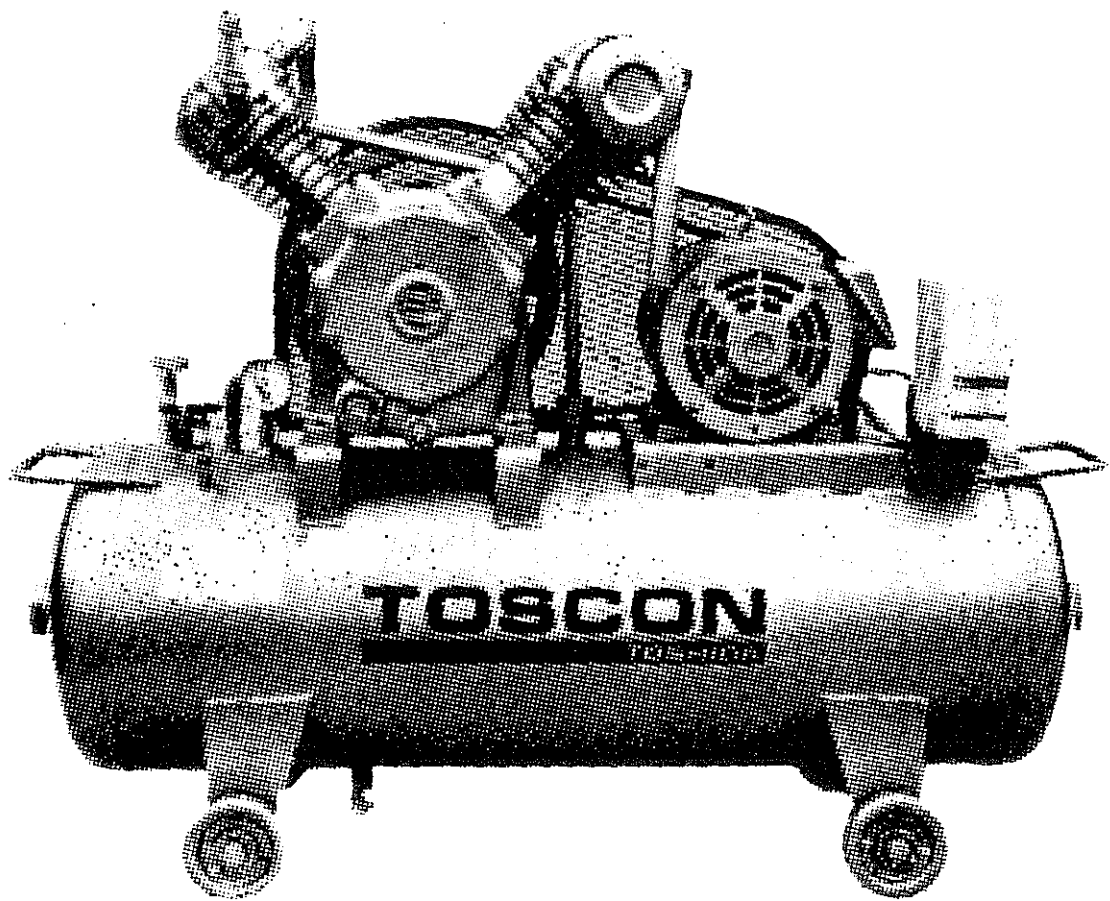


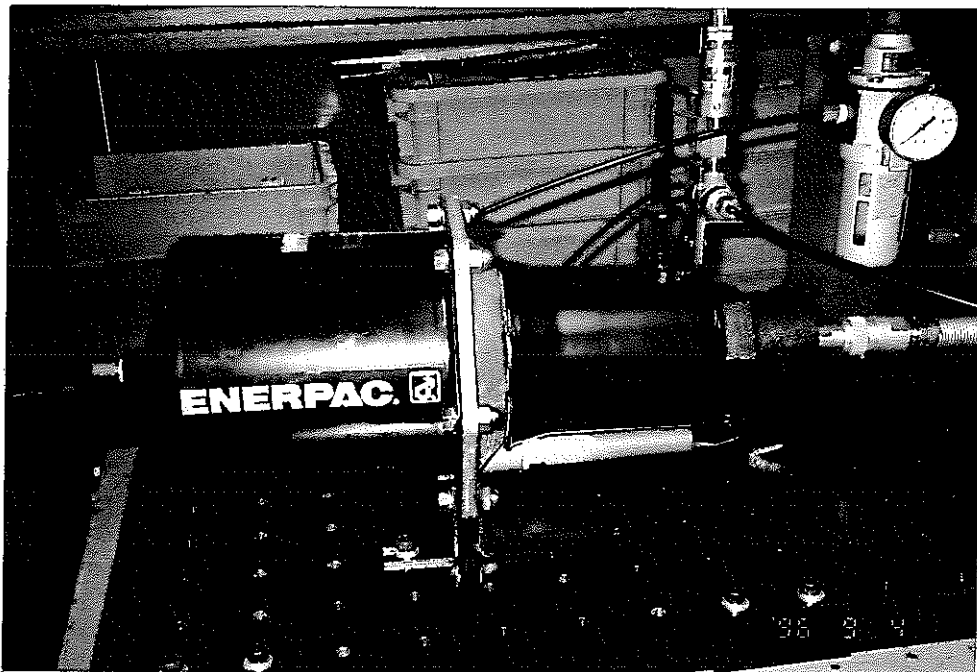
图4-5 (a) 全景



仕様

作動圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	回転数 (rpm)	吐出し空気量 (l/min)	タンク容量 (l)	圧縮機形式	最大圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	電 源
9.9	950	77	30	CS1-4P6	11	単相 100V

図 4 - 5 ( b ) エアーコンプレッサー  
東芝製 GP5-4S6



仕様

増圧比 30 : 1

油圧吐出量  $81 \text{ cm}^3$

エアーストン径 直径  $\phi 180 \text{ mm}$

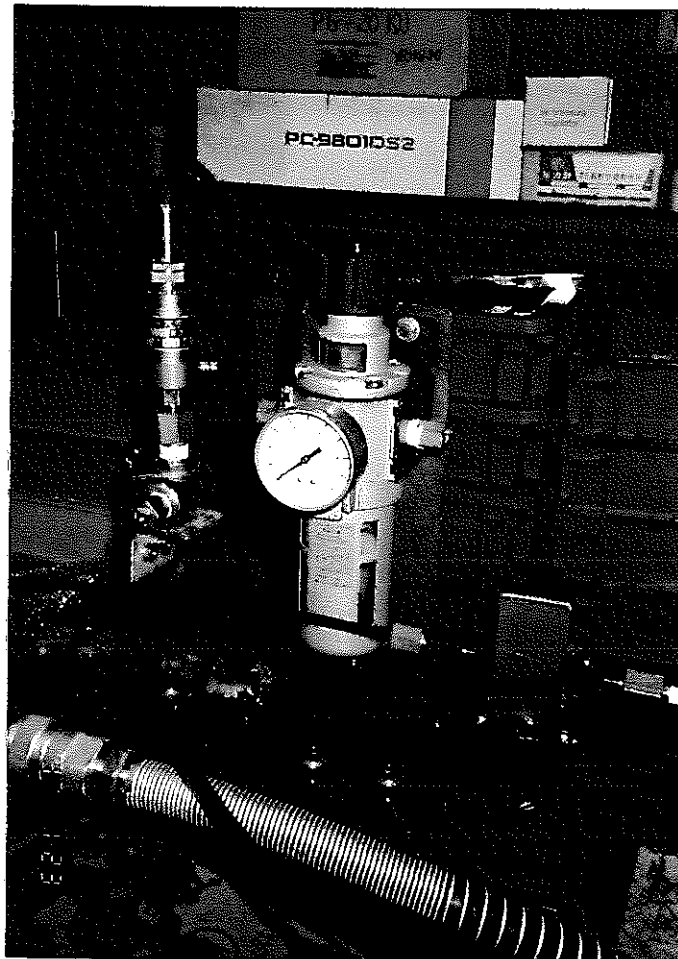
油圧ピストン径 直径  $\phi 31 \text{ mm}$

油圧ピストンストローク 134mm

エア- $7 \text{ kgf/cm}^2$ のときの油圧  $210 \text{ kgf/cm}^2$

図4-5 (c) 増圧器

エナパック製 B-3006



仕様

1次圧力 MAX 9.9 kgf/cm<sup>2</sup>

2次圧力 0.5~8.5 kgf/cm<sup>2</sup>

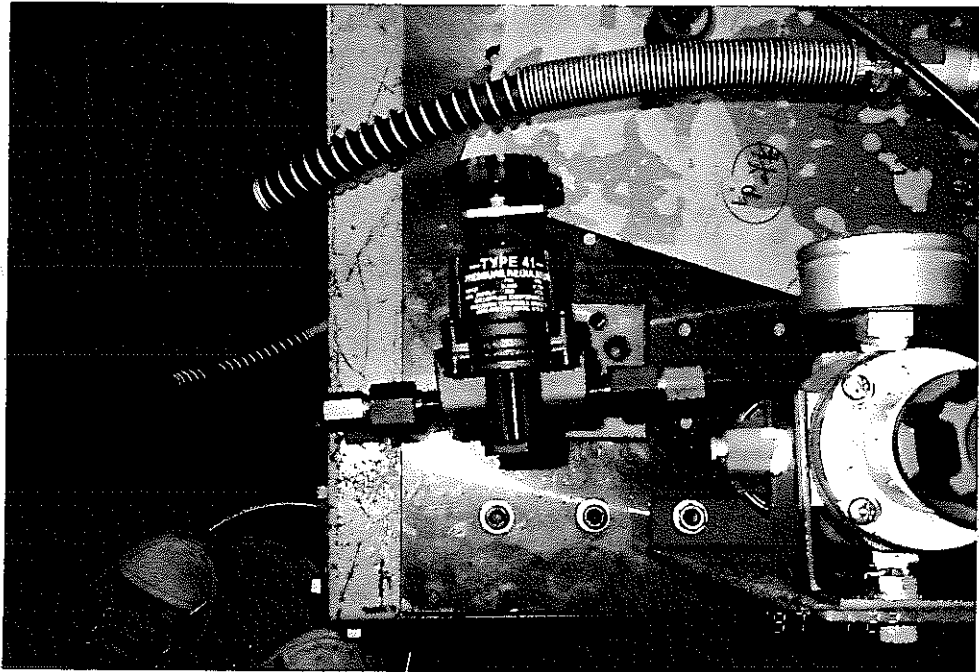
接続口径 PT 1/4インチ

重量 1.4 kg

図4-5 (d) 圧力調整器

TACO 製 B22-200





仕様

1次圧力 17.5 kgf/cm<sup>2</sup>以下

2次圧力 0~7 kgf/cm<sup>2</sup>

接続口径 1/4インチ NPT

重量 320g

図4-5(e) 圧力調整器  
藤倉ゴム工業製 Type41

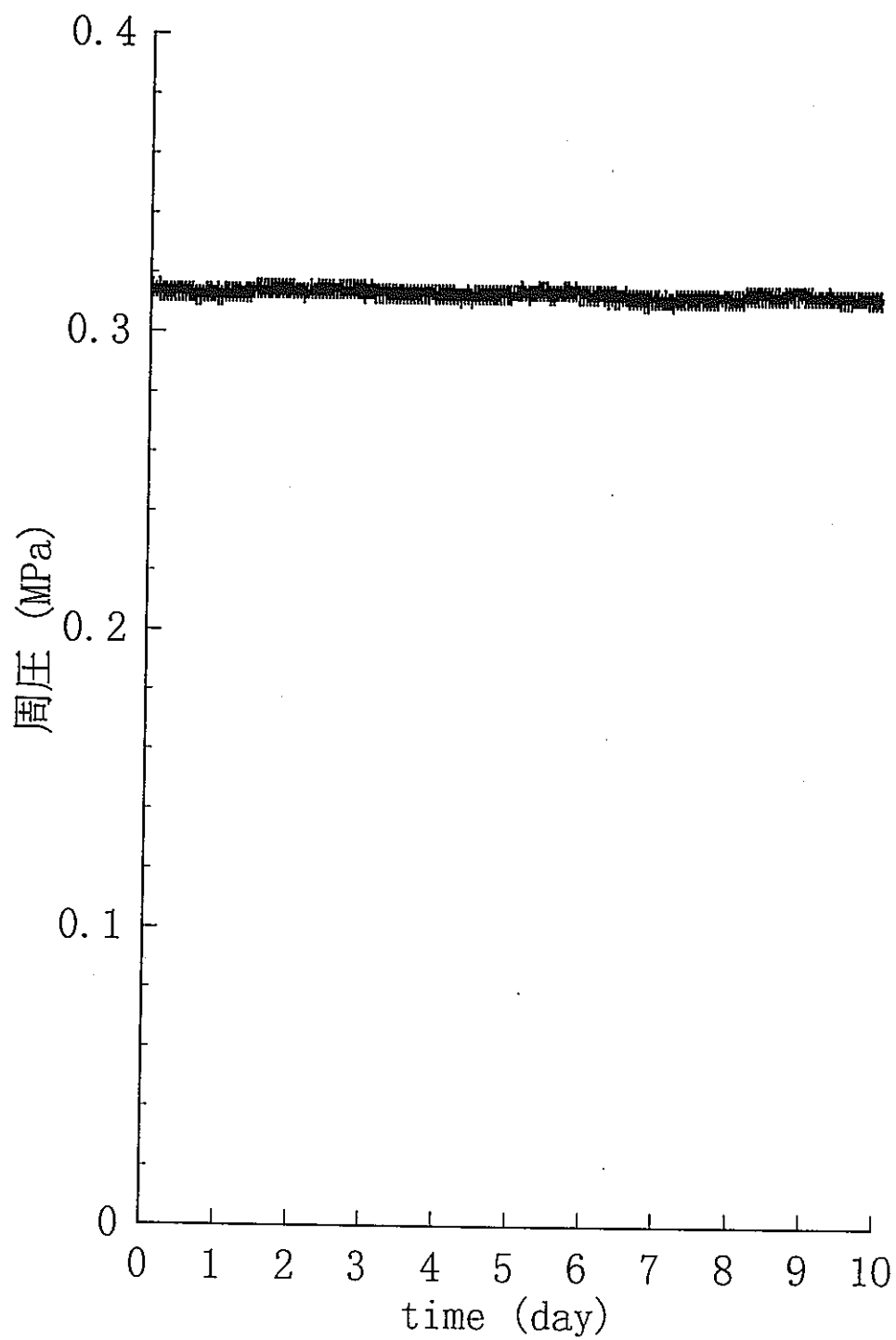


図4-6 (a) 空気圧の経時変化 (TACO製 B22-200 を用いた場合)

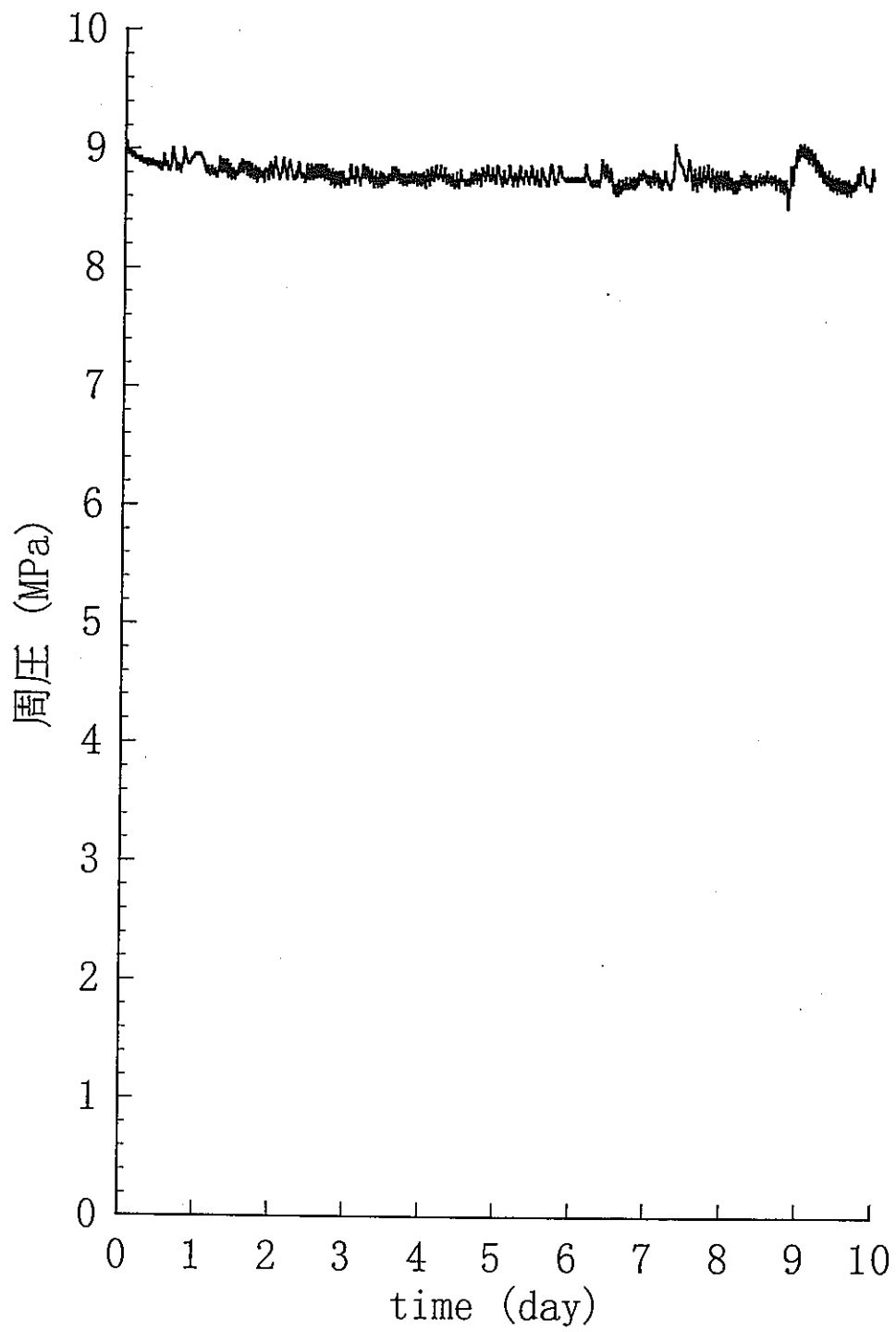


図4-6 (b) 油圧の経時変化 (TACO製 B22-200 を用いた場合)

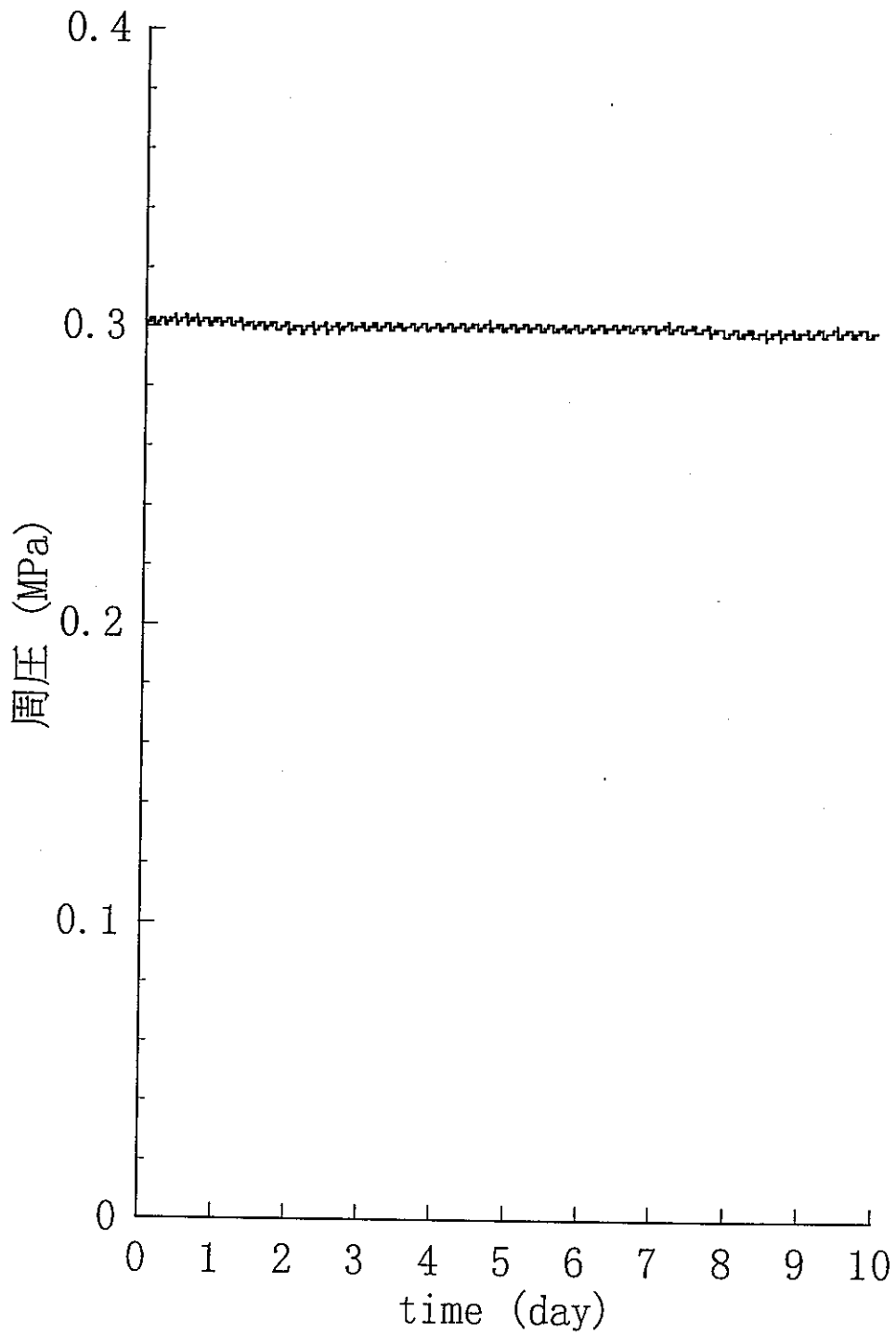


図4-7 (a) 空気圧の経時変化 (藤倉ゴム工業製 Type41 を用いた場合)

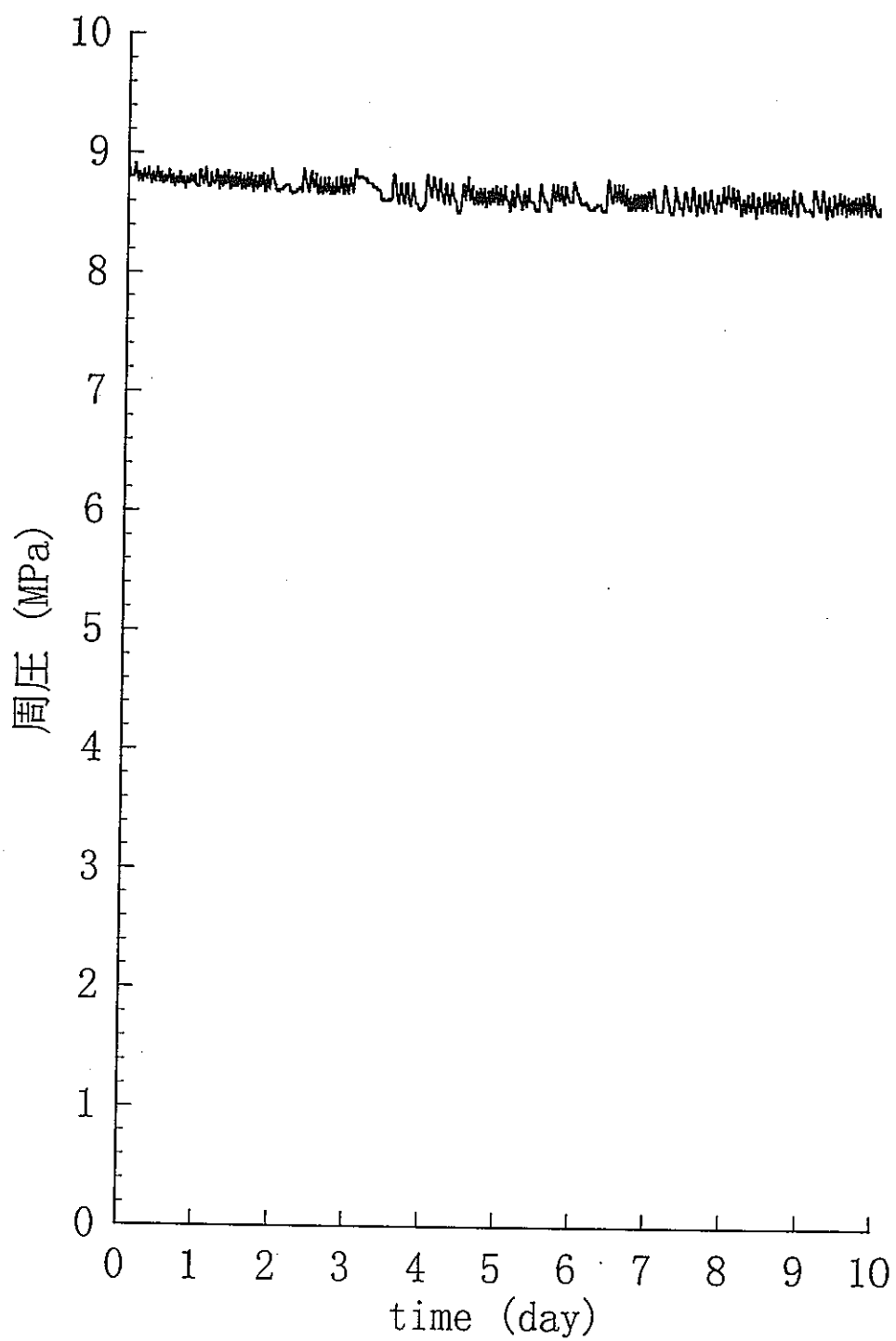


図4-7 (b) 油圧の経時変化 (藤倉ゴム工業製 Type41 を用いた場合)

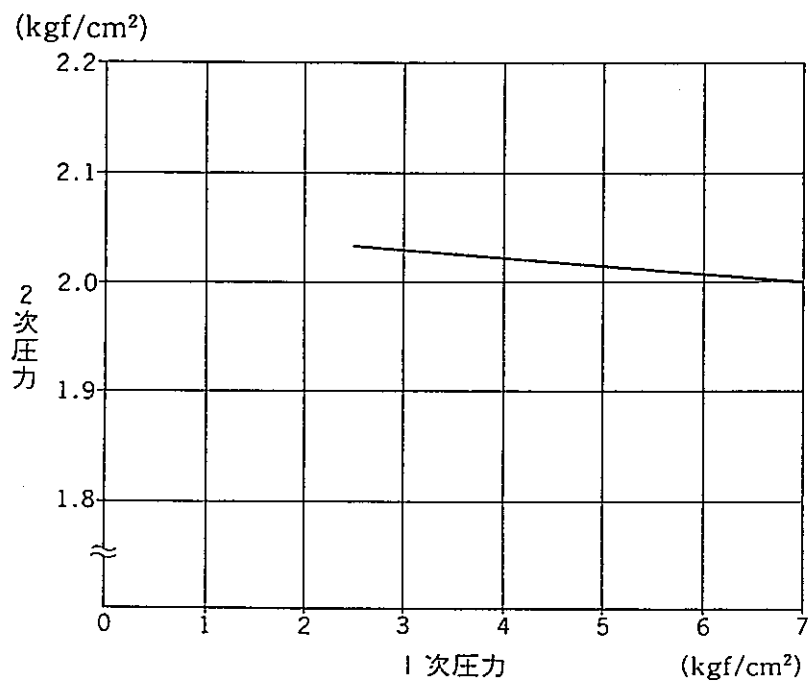


図4-8 圧力調整器の圧力特性 (藤倉ゴム製 Type41)

## 5. 構成方程式の検討

昨年度は、これまでに得られた実験結果を参考にして、岩石の長期挙動を表現できる非線形粘弾性構成方程式の基礎的検討をおこない、その構成方程式の評価用のプログラム（1次元）を作成した。

本年度は、構成方程式中の定数について検討した結果を報告する。ついで、構成方程式評価用の簡単な有限要素法プログラム（2次元）について説明する。

## 5. 1 コンプライアンス可変型構成方程式の定数

昨年度の報告書において、最近の研究成果を踏まえてコンプライアンス可変型構成方程式（大久保ほか，1987b）の検討をおこなった。この構成方程式は、実用の便を図るため、含まれる定数の数をできる限り減らしたものである。開発後、いくつかの岩石に対し、構成方程式中の定数を求める試みをくり返しおこなった。その経験にもとづいて、本報告では定数の求め方について解説するとともに、求められた定数を示し若干の検討をする。その際に注目したのは次の2点である。①周圧の影響、②水分の影響。

（一軸応力下での構成方程式と定数）

著者の提案したコンプライアンス可変型構成方程式は、一軸応力下では次のようになる（大久保，1992a）。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a\lambda^m \sigma^n \quad (5.1)$$

$\lambda$  はコンプライアンスで、歪  $\varepsilon$  を応力  $\sigma$  で除した値 ( $\varepsilon/\sigma$ ) である。  $t$  は時間である。  $n$  は時間依存性の程度を決める定数で、定歪速度試験におけるピーク強度の載荷速度依存性や、クリープ試験における寿命の応力依存性を決定する。  $m$  はピーク強度以降の応力-歪曲線の傾きを決める定数で、この値が大きいほどピーク強度以降の応力の低下が急激となる。  $a$  はピーク強度を決める定数で、この値が大きいほど強度が低下する。

この構成方程式を一軸応力下で解くには、 $\lambda$  の初期値  $\lambda_1$  と、構成方程式に含まれる3定数  $n$ 、 $m$ 、 $a$  の値が必要である。なお、各定数の範囲は、既報（大久保，1992a）と同じく下記のごとくである。

$$a > 0, \infty > m > -\infty, n \geq 1$$

$\lambda_1$  の求め方についてまず述べる。表5.1に示すように、 $\lambda_1$  は通常各試験の途中で得られるピーク強度の50%の位置で得られる接線ヤング率の逆数でよい。岩石によっては、応力の低いうちから応力-歪曲線が非線形となるが、このような岩石の変形特性をより正確に表すには(5.1)式の右辺に項を追加する必要がある。本稿ではそこまで踏み込まないことにする。

$n$  の値は、クリープ試験、定応力速度試験、定歪速度試験、応力緩和試験のいずれからも求めることができる。クリープ試験では、クリープ応力  $\sigma_1$  と寿命  $t_c$  の関係がわかれば、表5-1に示した次式より  $n$  が計算できる。

$$n = \frac{\delta(\ln t_c)}{\delta(\ln \sigma_1)} \quad (5.2)$$

具体的には、両対数線図の縦軸と横軸を、それぞれ寿命とクリープ応力とし、両者の関係を直線で近似したときの傾きを求めればよい。適用範囲は、 $m > 0$  である。 $m \leq 0$  では、歪硬化が



生じるのみで破壊が生じないので  $t_c$  が求められない。破壊せず  $t_c$  が求められないときは、実験より求めたクリープ曲線と計算結果とが一致するよう、計算機を使用して試行錯誤をする必要がある。以下で述べる他の試験でも、破壊しないときは、計算機を使用した試行錯誤が必要である。

定応力速度試験の場合、載荷速度  $C$  とピーク強度  $\sigma_c$  の関係がわかれば、表 5-1 に示した式より  $n$  が計算できる。適用範囲は、 $m > 1$  である。 $m \leq 1$  では破壊が生じないのでピーク強度  $\sigma_c$  が求められない。定歪速度試験の場合も、表 5-1 に示した式より  $n$  を計算できる。適用範囲は、 $m > 0$  である。 $m \leq 0$  では破壊が生じないのでピーク強度  $\sigma_c$  が求められない。応力緩和試験の場合には、 $m$  が  $(n+1)$  より大きい場合、表 5-1 に示した式から  $n$  を求めることができる。 $m$  が  $(n+1)$  より小さいと、試験片の破壊が生じない。試験開始より破壊するまでの時間  $t_c$  は、応力緩和を開始した応力  $\sigma_1$  に依存するので、この関係を利用して  $n$  を求めることができる。

$m$  は、定歪速度試験より求める。原理的には他の試験からも求まるはずであるが実際は困難である。定歪速度試験の場合、 $m$  はピーク強度以降の応力-歪曲線の傾きと関係がある。 $m$  を求めるため、実験結果と計算結果とが一致するまで、計算機を使用したくり返し計算をおこなうことが考えられるが、やや面倒である。簡便に  $m$  を求める方法を図 5-1 のように提案する。ここで、A 点は、ピーク強度の 50% の位置 B 点における接線と、応力をピーク強度に保った直線との交点である。C 点は、線分 AB と AC の長さが等しくなるように決めた。水平な直線 ( $\sigma = \sigma_c$ ) より右回りに測った角度  $\alpha'$  を図のように求め、 $\alpha = \arctan(\tan \alpha' / \tan \theta)$  を計算する。当然ながら、50% 接線の傾き  $\theta$  を  $45^\circ$  とした場合には、 $\alpha'$  と  $\alpha$  は一致する。こうして求めた  $\alpha$  と、 $m/n$  の関係を図 5-2 に示す。なお、 $\alpha$  が負の値となるのは、ピーク強度を示さず、応力-歪曲線が右上がりに上昇していく場合である。

各試験で得られた結果 (例えば定歪速度試験では載荷速度  $C$  とピーク強度  $\sigma_c$ ) と、 $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$  の値を、表 5-1 に示した式に代入すると  $a$  の値が計算できる。

以上では簡単のため一軸圧縮応力下での構成方程式について述べたが、 $\lambda_1$ ,  $a$ ,  $m$ ,  $n$  の求め方は、周圧下でもほとんど変わらない。これまでの歪  $\varepsilon$  と応力  $\sigma$  を、周圧相当分を差し引いた差歪、差応力として扱うだけである。

(いくつかの岩石における定数の値)

表 5-2 に検討した岩石と諸値を記す。差応力で表したピーク強度 (最大主応力差) および  $\lambda_1$  は、定歪速度試験より求めた。表中の  $n$  の値は、歪速度を何段階かに変えて定歪速度試験をおこない、表 5-1 に示した式より計算した。なお、一部の岩石では、クリープ試験の結果からも  $n$  を求めたが、定歪速度試験より求めた値と大差なかった。 $\alpha$  は図 5-1 に示した方法で求めた。構成方程式中の  $a$  と  $m$  は、それぞれ表 5-1 中の式、図 5-2 を利用して簡単に求めるので割愛した。

図 5-3 は、縦軸を  $n$  とし、横軸を  $\alpha$  とし、周圧  $\sigma_3$  により位置がどのように変化するかを示したものである。なお、 $n$  の値が大きいほど、時間依存性は弱くなる。例えば、定歪速度試験におけるピーク強度載荷速度依存性が小さくなり、次第に塑性的な振る舞いに近づく。また、 $\alpha$  が小さいほど、ピーク強度以降の応力の低下が緩やかになり、延性的な挙動を示す。なお、横軸として  $m$  ないし  $m/n$  をとることも考えたが、 $\alpha$  の方が直裁的でわかり易いと思ったので横

軸にとつた。

まず、○で表した稲田花崗岩の結果を検討する。大気圧下での試験より、周圧が5, 10, 20, 40 MPaと大きくなるにしたがって、延性的になるとともに時間依存性が顕著に減少する。周圧の増加により延性的となることはよく知られているが、時間依存性に関する報告は少ない。●で三城目安山岩の結果を示す。花崗岩と比較して、周圧による $n$ の値の変化はやや少ないが、 $\alpha$ の値の変化は大きい。△で河津凝灰岩の結果を示す。この場合には、 $n$ の変化は少ないのに対し、 $\alpha$ はかなり変化する。

鋼材をはじめとする工業材料においても、まわりの環境、特に水分の有無により腐蝕の進行が大いに異なることが知られている。しかし、多くの場合、材料内部への水の浸透は極めて微小であり、表面近傍の変化のみを議論すれば事足りる。他方、多くの岩石では、水分が内部まで浸透するので、水の有無によって、力学的性質が大きく左右される。

図5-4に、一軸圧縮応力下でおこなった定歪速度試験の結果をまとめてみた。○で気乾状態での結果を、●で完全湿潤状態での結果を示す。これよりわかるように、多少のばらつきはあるものの、気乾状態の結果の下方に湿潤状態の結果が位置する傾向がみられる。

コンプライアンス可変型構成方程式を解くのに必要な定数の求め方を表5-1に示した。多くの場合、定歪速度試験より緒値を求めるのが最も簡単である。その際計測すべきデータは、応力と歪である。定数を求める順序は、 $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $a$ である。まず50%接線ヤング率の逆数として $\lambda_1$ を求める。次に載荷速度を変えた時のピーク強度の変化より $n$ を求める。ついで、図5-1に示したように $\alpha$ を求め $m/n$ の値を得る。最後に、 $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$ , 載荷速度 $C$ , ピーク強度 $\sigma_c$ より $a$ を計算する。

幾つかの岩石の試験結果より定数を求め表5-2に示した。図5-3～図5-5に示すように、縦軸を $n$ （時間依存性の指標）、横軸を $\alpha$ （延性・ぜい性の指標）として、周圧の影響、水分の影響を検討してみた。その結果次の傾向がみられた。①周圧の増加とともに図上の位置が右上方に移動する。②水分があると位置が下方に移動する。

今後の研究目標として考えている仮説の一例を図5-5に示す。この図を描くのに以下の2つの仮定を加えた。③温度が高いと、時間依存性が増し、延性的な性質を示す。④弱い岩石・岩盤ほど、時間依存性が増し、延性的な性質を示す。なお、B,  $C_H$ ,  $C_L$ は電力中央研究所の方式にならった岩盤分類である。このような仮説を念頭において、室内試験、原位置試験、計算機シミュレーションを合わせておこない、真実の姿がどの仮説に近いかを今後検討する予定である。

## 5. 2 構成方程式を組み込んだ有限要素法プログラム (2次元)

構成方程式の評価を目的とした簡単な有限要素法プログラムのリストを本章末に掲載しておく。このプログラムは、使い勝手と簡明さを優先して考えたものであり、大抵のフォートランコンパイラで動くと思う。その特徴と使用方法を下記に箇条書きにして示す。なお、このプログラムを用いた詳しい計算結果は今後行なう予定である。

(使用法)

○Fortran77 で記述。特殊な命令は一切使用していない。

○MS-DOS, Windows, Unix, Mac 等で使用可能。

○入力はない。

○出力は、応力、縦歪、横歪である。行番号148以下。書式はWRITE(\*,\*)。

○注意：ヤング率を1.0としているので縦歪、横歪とも大きすぎるように感じるかもしれないが誤りではない。入力パラメータ、出力結果の数値ともできる限り1.0前後とする方が若干ではあるが計算精度が増すのでこうしてある。

○コンパイルして実行するだけで、標準出力に結果が出力される。

(解析モデル)

○2次元有限要素法モデル。

○メッシュを図5-6に示す。

○要素は全て三角形である。

○長方形の試験片を対象として定歪速度試験をおこなった時をシミュレートする。

(解析条件)

○平面応力。板厚は単位厚さとする。行番号25。

○構成方程式の定数  $n=20$ ,  $m=10$ 。行番号27

○周圧は行番号50で設定。このプログラムでは引張を正としているので、周圧は普通負の値を与える。

○歪速度は行番号56で与える。現在 STRATE=1.0/120.0 となっている。この意味はピーク強度までの試験時間が約120秒との意味である。従って、ピーク強度までの試験時間を1200秒としたければ次のようにする。STRATE=1.0/1200.0

○一軸圧縮強度の平均値と標準偏差は行番号554で与える。このプログラムでは、強度が要素毎にばらつく場合も扱える。現状では、AY=1.0, SY=0.0となっている。AYは強度の平均値で、SYが標準偏差である。例えば、強度の平均値1.0で標準偏差0.1の場合を検討したければ、AY=1.0, SY=0.1とする。

○一軸引張強度は行番号114で与えている。現状では一軸圧縮強度の10分の1としている。

○ヤング率は行番号571で与えている。現状は全要素を通じて、ヤング率は1.0。

○ポアソン比は行番号558で与えている。現状は全要素を通じて、ポアソン比は0.2としている。

○破壊基準として Janach の提案した式を採用した。行番号123付近が相当する。なお、Janach の破壊条件式については、昨年度報告書 p. 53 の (16) 式を参照されたい。

簡単なプログラムであるが検討すべき（出来る）条件や定数は多数である．まとめてみると次のようになる．

（試験条件）歪速度，周圧

（物性値）ヤング率，ポアソン比，一軸圧縮強度，一軸引張強度，定数  $n$  と  $m$ ．

（その他）破壊条件式の選定（他にも種々の破壊条件式が提案されている）

要素毎の強度のばらつき（プログラム中の  $S Y$  の値）

種々条件を変えた時の計算結果については，次年度以降検討し紹介する．

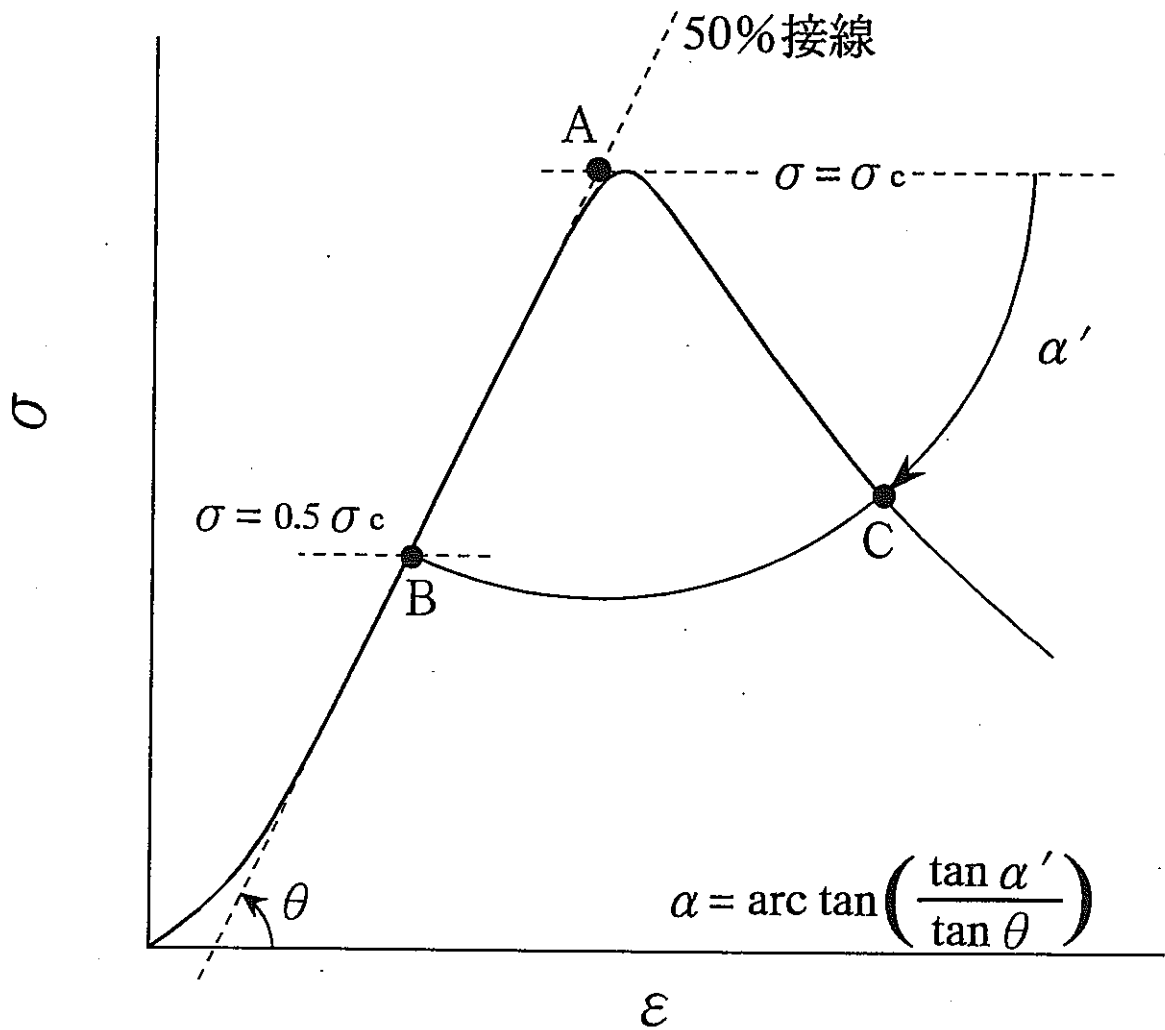
表 5-1 構成方程式の定数の求め方

Constitutive Equation		$\frac{d\lambda}{dt} = a\lambda^m\sigma^n \quad \lambda = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad a > 0, +\infty > m > -\infty, n \geq 1$		
Test (Condition) Initial Condition	Creep ( $\sigma = \sigma_1$ ) $\varepsilon = \varepsilon_1 = \lambda_1\sigma_1$	Constant Stress Rate ( $\dot{\sigma} = c$ ) $\lambda = \lambda_1, \sigma = 0$	Constant Strain Rate ( $\dot{\varepsilon} = c$ ) $\lambda = \lambda_1, \varepsilon = 0$	Relaxation ( $\varepsilon = \varepsilon_1$ ) $\sigma = \sigma_1 = \varepsilon_1/\lambda_1$
$\lambda_1$	inverse of 50% tangential Young's modulus			
$n$	$m > 0$ $\frac{\delta(\ln t_c)}{\delta(\ln \sigma_1)}$	$m > 1$ $\frac{\delta(\ln c)}{\delta(\ln \sigma_c)} - 1$	$m > 0, m \neq n + 1$ $\frac{\delta(\ln c)}{\delta(\ln \sigma_c)} - 1$	$m > n + 1$ $\frac{\delta(\ln t_c)}{\delta(\ln \sigma_1)}$
$m$	not feasible		refer to Fig.1	not feasible
$a$	$m > 1$ $\frac{1}{m-1} \lambda_1^{1-m} \cdot \sigma_1^{-n} \cdot t_c^{-1}$	$m > 1$ $\left(\frac{n+1}{m-1}\right) \lambda_1^{1-m} \cdot \sigma_c^{-(n+1)} \cdot c$	$m > 0, m \neq n + 1$ $\left(\frac{m}{n+1}\right)^{\frac{m}{n-m+1}} \lambda_1^{-m} \cdot \sigma_c^{-(n+1)} \cdot c$	$m > n + 1$ $\frac{1}{m-n-1} \lambda_1^{1-m} \cdot \sigma_1^{-n} \cdot t_c^{-1}$

$\sigma_c$ : peak strength,  $t_c$ : life time,  $\delta(\ln t_c)$ : finite difference of  $(\ln t_c)$

表 5-2 検討した岩石の諸値

岩石	実験条件	最大主応力差 (MPa)	$\lambda_1$ (1/GPa)	n	$\alpha$ (°)	出典
稲田花崗岩	一軸圧縮(気乾)	193	1/37.6	51	99	何(1989a)
	〃 (湿潤)	185	1/37.6	38	99	何ほか(1989b)
	三軸圧縮(気乾)					Okubo ほか(1990)
	周圧 5MPa	274	1/39.7	72	62	
	10MPa	348	1/39.7	92	56	
	20MPa	422	1/40.4	112	42	
	40MPa	556	1/40.4	147	38	
三城目安山岩	一軸圧縮(気乾)	93.9	1/9.3	37	91	何ほか(1989b)
	〃 (湿潤)	73.4	1/8.4	28	88	Okubo ほか(1990)
	三軸圧縮(気乾)					大久保ほか(1992b)
	周圧 5MPa	141	1/13.7	48	66	
	10MPa	167	1/14.2	56	48	
	20MPa	207	1/14.2	70	27	
	40MPa	244	1/14.5	83	17	
河津凝灰岩	一軸圧縮(気乾)	33.3	1/6.3	57	68	何(1989a)
	〃 (湿潤)	22.3	1/5.2	37	74	何ほか(1989b)
	三軸圧縮(気乾)					Okubo ほか(1990)
	周圧 2.5MPa	36.0	1/6.4	62	9	
	5MPa	37.7	1/6.4	64	3	
	10MPa	39.5	1/6.4	67	0	
大谷凝灰岩	一軸圧縮(気乾)	12.2	1/2.7	35	32	大久保ほか(1992b)
	〃 (湿潤)	5.63	1/1.3	16	31	
田下凝灰岩	一軸圧縮(気乾)	16.8	1/3.6	42	20	秋(1995)
	〃 (湿潤)	9.74	1/2.5	23	34	
	一軸引張(気乾)	1.87	1/2.8	42	19	
秋吉大理石	一軸圧縮(気乾)	124	1/35.1	63	38	大久保ほか(1987a) 何(1989a), Okubo ほか(1990)
和泉砂岩	一軸圧縮(気乾)	214	1/25.0	61	102	ibid.



- 手順 1) 50%接線と、 $\sigma = \sigma_c$ との交点Aを求める。  
 2) A点を中心として、半径ABの円弧を描き、交点Cを求める。  
 3) 直線ACと、 $\sigma = \sigma_c$ とのなす角を $\alpha'$ とする。  
 4)  $\alpha = \arctan \left( \frac{\tan \alpha'}{\tan \theta} \right)$ を計算する。

図5-1 ピーク強度以降の応力-歪曲線の傾きの代表値 $\alpha$ の求め方

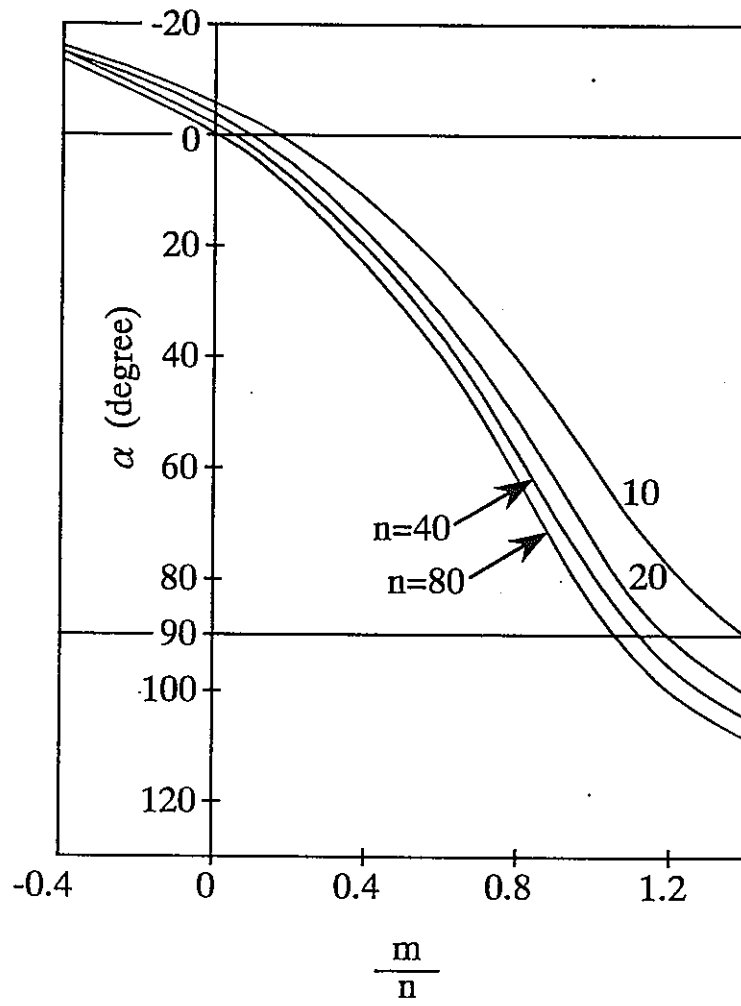


図 5-2  $\alpha$  と  $m/n$  の関係



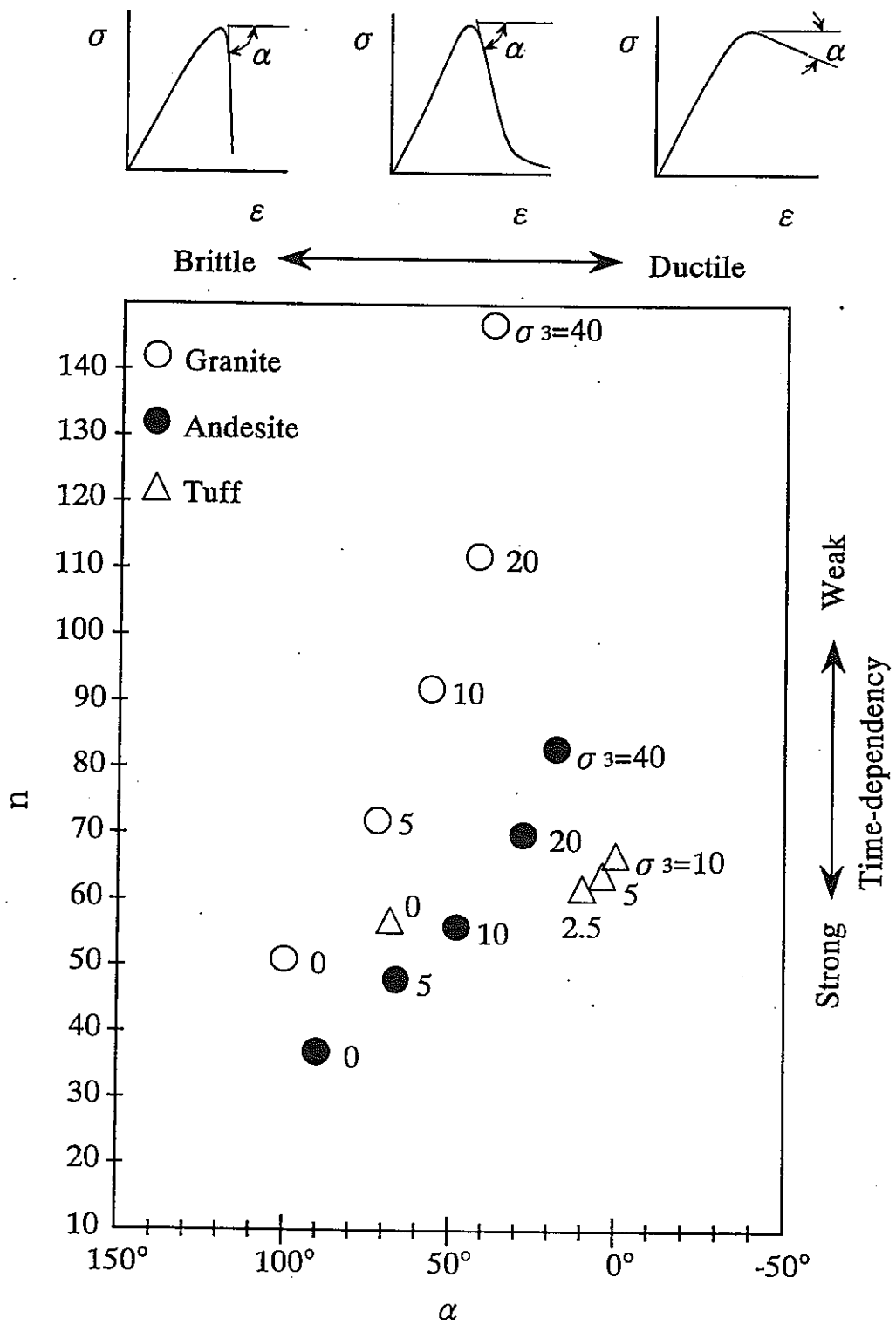
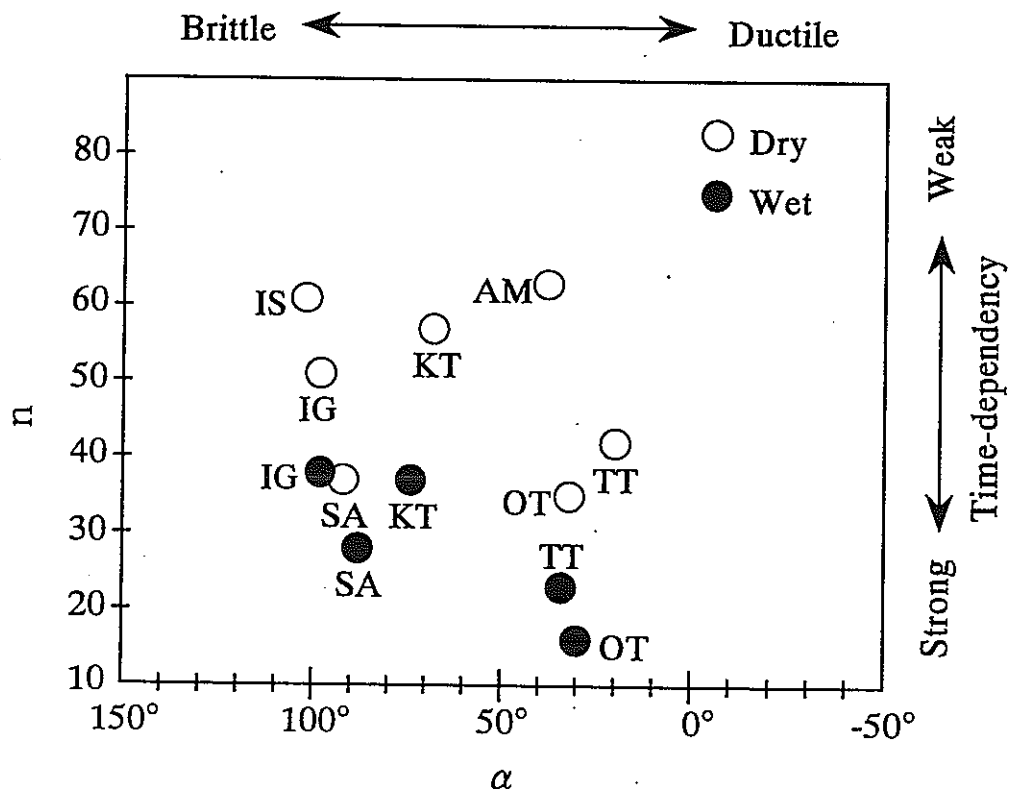


図 5-3 時間依存性の指標  $n$  と延性・ぜい性の指標  $\alpha$  の関係 (周圧  $\sigma_3$  の影響)  
 ○ : 稲田花崗岩 ● : 三城目安山岩 △ : 河津凝灰岩



AM:Akiyoshi Marble      IG :Inada Granite  
 IS :Izumi Sandstone      KT :Kawazu Tuff  
 OT :Oya Tuff              SA :Sanjome Andesite  
 TT :Tage Tuff

図5-4 時間依存性の指標  $n$  と延性・ぜい性の指標  $\alpha$  の関係 (水分の影響)  
 ○ : 気乾状態   ● : 湿潤状態

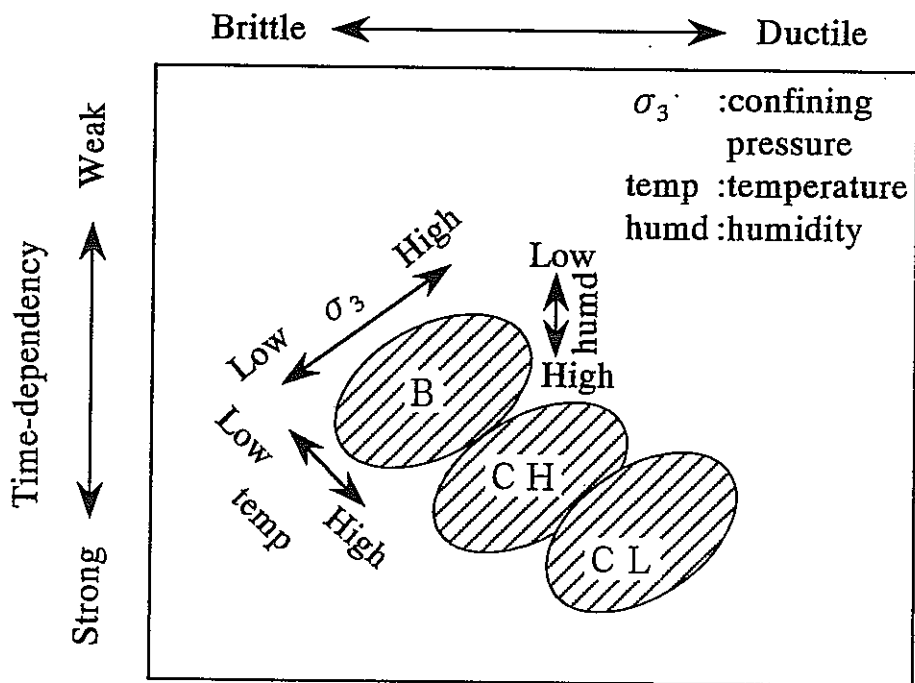


図5-5 岩石・岩盤における $n$ と $\alpha$ の関係の仮説の例で次の4つの仮定を置いて描いた。

- ①周圧の増加とともに図上の位置が右上方に移動する。
- ②水分があると位置が下方に移動する。
- ③温度が高いと、右下方に移動する。
- ④強度が弱いと、右下方に移動する。

なお、B、 $C_H$ 、 $C_L$ は電力中央研究所の方式にならった岩盤分類である。

252 (1. 4)

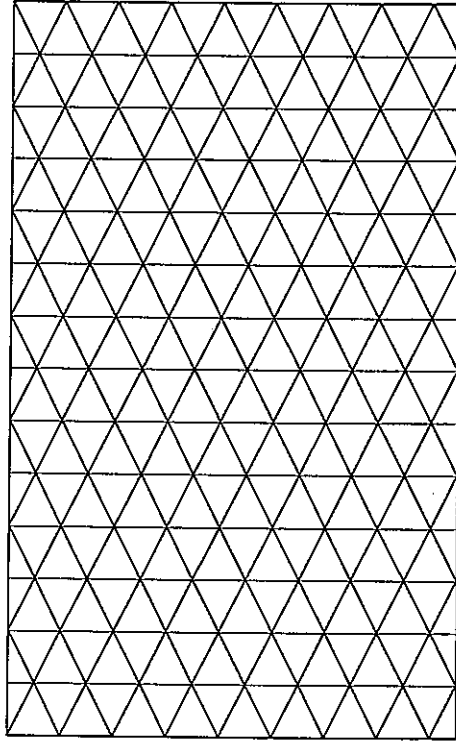


図5-6 有限要素法モデルのメッシュ分割

```

1 C
2 C 2次元有限要素法プログラム
3 C コンプライアンス可変型構成方程式を組み込み
4 C
5 C 長方形の試験片の定歪速度圧縮試験（周圧も考慮できる）
6 C 三角形要素使用
7 C 目的は主として構成方程式のパラメータの影響をみること
8 C 要素ごとの強度のばらつきの影響をみること
9 C
10 C 平成9年3月PNC東濃地下学センターに納付
11 C 連絡先 東京大学 大久保誠介
12 C tel 03-3812-2111 fax 03-3818-7492 ttokubo@ecc.u-tokyo.ac.jp
13 C
14 C 入力データはなし（使用を簡単にするための配慮）
15 C 出力は、応力、縦歪み、横歪み
16 C 入出力は簡単に変更可能
17 C
18 C 特別な命令は使用していないのでコンパイラは大抵のものが使用可能
19 C
20 C ----- MAIN -----
21 C PLANE STRAIN(NSTRES=0), PLANE STRESS(NSTRES=1).
22 C T:THICKNESS
23 C
24 C 平面応力、厚さ1
25 C PARAMETER(NSTRES=1, T=1.0)
26 C 構成方程式のパラメータnとm
27 C PARAMETER(RNO=20.0, RM=10.0)
28 C 長方形の解析モデル
29 C PARAMETER(NGYO=15, NRETSU=10, NODT=150, NELT=252, NT=300)
30 C バンド幅、未知と既知の変数の数
31 C PARAMETER(NBAND=24, NUNKNW=279, NKKNOWN=21)
32 C
33 C DIMENSION OLDYNG(300), OLDP01(300)
34 C COMMON /A1/E(300), INDEX(300), P01(300), DISPLM(300)
35 C COMMON /A2/KAKOM(300,3), X(150), Y(150), B(300), FORCE(300)
36 C COMMON /B1/TSM(300,24), ANGLE1(300), NST(300)
37 C COMMON /B2/AMX(300,24), SEVRT1(300), SWE(252)
38 C COMMON /B3/ST(300,3,6), SM(300,6,6)
39 C ----- WORK -----
40 C DIMENSION WS(3), WD(6)
41 C ----- DATA -----
42 C DO 10 I=1,NT
43 C DO 10 J=1,NBAND
44 C AMX(I,J)=0.0
45 10 CONTINUE
46 C
47 C 周圧（引っ張りが正であることに注意）
48 C READ(*,*) CONFPR
49 C
50 C CONFPR=-0.0
51 C WRITE(*,*) CONFPR
52 C MAXITR=190*SQRT(1.0-10.0*CONFPR)
53 C 歪み速度と時間刻み
54 C INITL=1
55 C HEIGHT=SQRT(3.0)*7.0
56 C STRATE=1.0/120.0
57 C DT=0.010/STRATE
58 C D INCRM=-HEIGHT*STRATE*DT
59 C DELTA=0.6*CONFPR*HEIGHT
60 C ----- ELEMENT -----
61 C NODAL POINT
62 C INDEX=0 IF DISPLM IS GIVEN
63 C 要素、接点、境界条件
64 C CALL ELDEF1(NODT, KAKOM, X, Y)
65 C CALL ELDEF2(NELT, P01, SWE, E, NST)
66 C WRITE(*,*) SWE

```

```

67     CALL NODEF (NODT, INDEX, DISPLM, FORCE)
68     DO 12 I=1, NELT
69         OLDPOI (I)=POI (I)
70     12     OLDYNG (I)=E (I)
71 C ----- ROOP ----- ROOP ----- ループ上端
72     1000 CONTINUE
73 C ----- TOTAL MATRIX (TSM)
74 C 剛性マトリックス
75     DO 20 I=1, NT
76     DO 20 J=1, NBAND
77         TSM (I, J)=0.0
78     20     CONTINUE
79     DO 30 I=1, NRETSU
80         N=2*I
81         DISPLM (N)=DELTA
82     30     CONTINUE
83         DO 40 I=1, NELT
84             PO=POI (I)
85             CALL PLANSM (NSTRES, I, KAKOM, X, Y, E, T, PO, SM, ST)
86             CALL ASMAT (KAKOM, SM, I)
87     40     CONTINUE
88 C ----- REARRANGE OF TSM TO AMX
89     CALL REARRA (NUNKNW, NT, INDEX, NBAND, B, DISPLM)
90 C ----- SOLUTION -----
91         CALL CONF (B, CONFPR)
92         NS=0
93         CALL COL (NUNKNW, B, NS, NBAND)
94         N=0
95         DO 60 I=1, NT
96             IF (INDEX (I).EQ.0) GO TO 60
97             N=N+1
98             DISPLM (I)=B (N)
99     60     CONTINUE
100        CALL SUBFOR (NKNOWN, FORCE, NT, INDEX, NBAND, DISPLM)
101 C ----- CALCULATE STRESS OF ELEMENTS
102        DO 80 I=1, NELT
103            CALL STRESS (I, KAKOM, DISPLM, ST, WS, WD)
104            CALL PRST (WS (1), WS (2), WS (3), SA, SB, ANGLE)
105 C            IF (MOD (I, 20).EQ.0) WRITE (*, *) I, SA, SB, ANGLE
106 C
107 C 構成方程式の組込み
108 C
109         S1=MIN (SA, SB)
110         S3=MAX (SA, SB)
111         S1=-S1
112         S3=-S3
113         CONSTG=SWE (I)
114         TENSTG=0.1*CONSTG
115         TEMP2=1.0+S3/TENSTG
116         IF (TEMP2.LT.0.0001) TEMP2=0.0001
117         TEMP=CONSTG*SQRT (TEMP2)-S3
118         IF (S3.GT.0.0) THEN
119             RN=TEMP/CONSTG*RNO
120         ELSE
121             RN=RNO
122         END IF
123         SEVRTY=(S1-S3)/TEMP
124 C
125         C=OLDYNG (I)/E (I)
126         SC=SEVRTY*C** (RM/RN)
127         IF (SC.LT.0.2) SC=0.2
128         IF (SC.GT.5.0) SC=5.0
129         A=(RM/(RNO+1.0))** (RM/(RNO-RM+1.0)) / 120.0
130         DC=A*SC**RN*DT
131         IF (DC.GT.0.2) DC=0.2
132         C=C+DC

```

```

133             IF(C.GT.100.0) C=100.0
134 C
135 C ポアソン比とヤング率の変更
136 C
137             POI(I)=0.5-(0.5-OLDDPOI(I))/C
138             E(I)=OLDYNG(I)/C
139 C             IF(I.NE.1) E(I)=E(I)
140 80 CONTINUE
141 C
142             F=0.
143             I90=NKNOWN-NRETSU
144             DO 90 I=2, I90
145 90 F=FORCE(I)+F
146             F=F/8.5
147             SUX=(DISPLM(159) - DISPLM(141))/8.5
148 C
149 C 出力
150 C
151             WRITE(*,*) F, DELTA/HEIGHT, SUX
152             DELTA=DELTA+DINCRM
153             INITL=INITL+1
154             IF(INITL.LE.MAXITR) GO TO 1000
155             STOP
156             END
157 C
158             SUBROUTINE CONF(B,CONFPR)
159 C 周圧を接点力に加える
160 C -----
161             DIMENSION B(*)
162             CP=0.866025*CONFPR
163             DO 10 I=10,250,20
164                 B(I)=B(I)-CP
165                 B(I+18)=B(I+18)+CP
166 10 CONTINUE
167                 B(9)=B(9)+CP/2.0
168                 B(270)=B(270)-CP/2.0
169                 B(279)=B(279)+CP/2.0
170             RETURN
171             END
172 C
173             SUBROUTINE PRST(SGMAX,SGMAY,TAUXY,PS1,PS2,ANGLE)
174 C 主応力の計算
175 C*****
176             SXPY=0.5*(SGMAX+SGMAY)
177             SXMY=0.5*(SGMAX-SGMAY)
178             TEMP=SQRT(SXMY**2+TAUXY**2)
179             PS1=SXPY+TEMP
180             PS2=SXPY-TEMP
181             IF(SXMY) 100,101,100
182 100 TMP=28.64789*ATAN(TAUXY/SXMY)
183             IF(SXMY) 102,101,103
184 102 ANGLE=TMP+90.
185             GO TO 110
186 101 IF(TAUXY) 104,105,106
187 104 ANGLE=135.
188             GO TO 110
189 105 ANGLE=360.
190             GO TO 110
191 106 ANGLE=45.
192             GO TO 110
193 103 IF(TAUXY) 107,108,108
194 107 ANGLE=TMP+180.
195             GO TO 110
196 108 ANGLE=TMP
197 110 RETURN
198             END

```

```

199 C
200     SUBROUTINE ASMAT (KAKOM, SM, N)
201 C*****
202     DIMENSION KAKOM(300, 3), SM(300, 6, 6)
203     COMMON /B1/TSM(300, 24), ANGLE1(300), NST(300)
204     DO 10 I=1, 3
205     DO 10 J=1, 3
206     KI=(KAKOM(N, I)-1)*2
207     KJ=(KAKOM(N, J)-1)*2
208     IS=(I-1)*2
209     JS=(J-1)*2
210     DO 10 K=1, 2
211     DO 10 L=1, 2
212     KIK=KI+K
213     KJL=KJ+L
214     IF(KIK.GT.KJL) GO TO 10
215     KJL=KJL-KIK+1
216     ISK=IS+K
217     JSL=JS+L
218     TSM(KIK, KJL)=TSM(KIK, KJL)+SM(N, ISK, JSL)
219 10 CONTINUE
220     RETURN
221     END
222 C
223     SUBROUTINE PLANSM (NSTRES, NE, KAKOM, X, Y, Z, TH, PO, SM, STR)
224 C 各要素の剛性マトリックス
225 C*****
226     DIMENSION KAKOM(300, 3), X(150), Y(150), Z(300),
227     1 SM(300, 6, 6), STR(300, 3, 6), B(3, 6), D(3, 3)
228     DIMENSION T(3, 3), T1(3, 3), D1(3, 3)
229     COMMON /B1/TSM(300, 24), ANGLE1(300), NST(300)
230     E=Z(NE)
231     I=KAKOM(NE, 1)
232     J=KAKOM(NE, 2)
233     K=KAKOM(NE, 3)
234     XI=X(I)
235     XJ=X(J)
236     XK=X(K)
237     YI=Y(I)
238     YJ=Y(J)
239     YK=Y(K)
240     AREA=0.5*((XK-XJ)*YI+(XI-XK)*YJ+(XJ-XI)*YK)
241     IF(AREA.LE.0.) GO TO 100
242     DO 10 I=1, 3
243     DO 10 J=1, 6
244 10 B(I, J)=0.
245     B(1, 1)=YJ-YK
246     B(1, 3)=YK-YI
247     B(1, 5)=YI-YJ
248     B(2, 2)=XK-XJ
249     B(2, 4)=XI-XK
250     B(2, 6)=XJ-XI
251     B(3, 1)=B(2, 2)
252     B(3, 2)=B(1, 1)
253     B(3, 3)=B(2, 4)
254     B(3, 4)=B(1, 3)
255     B(3, 5)=B(2, 6)
256     B(3, 6)=B(1, 5)
257     DO 15 I=1, 3
258     DO 15 J=1, 6
259 15 B(I, J)=B(I, J)*0.5/AREA
260     DO 20 I=1, 3
261     DO 20 J=1, 3
262 20 D(I, J)=0.
263     IF(NSTRES.EQ.0) GO TO 30
264     D(1, 1)=E/(1.-PO**2)

```



```

265     D(1, 2)=P0*D(1, 1)
266     D(2, 1)=D(1, 2)
267     D(2, 2)=D(1, 1)
268     D(3, 3)=E*0. 5/(1. +P0)
269     GO TO 35
270 30 D(1, 1)=E*(1. -P0)/((1. +P0)*(1. -2. *P0))
271     D(1, 2)=E*P0/((1. +P0)*(1. -2. *P0))
272     D(2, 1)=D(1, 2)
273     D(2, 2)=D(1, 1)
274     D(3, 3)=E*0. 5/(1. +P0)
275 C *****
276     IF (NST(NE). EQ. 0) GO TO 24
277     IF (NST(NE). EQ. -2) GO TO 24
278     IF (NST(NE). EQ. 1) GO TO 25
279     D(1, 1)=0. 01*E
280     D(2, 2)=E/(1. -P0**2)
281     D(1, 2)=0. 01*E/(1. -P0)
282     D(2, 1)=D(1, 2)
283     D(3, 3)=0. 01*D(3, 3)
284     A=ANGLE1 (NE)*1. 74532E-2
285     GO TO 26
286 25 CONTINUE
287     D(3, 3)=0. 01*D(3, 3)
288     A=ANGLE1 (NE)*1. 74532E-2-3. 141592/4.
289 26 CONTINUE
290     T(1, 1)=COS(A)**2
291     T(1, 2)=SIN(A)**2
292     T(1, 3)=-SIN(A)*COS(A)*2.
293     T(2, 1)=T(1, 2)
294     T(2, 2)=T(1, 1)
295     T(2, 3)=-T(1, 3)
296     T(3, 1)=T(2, 3)/2.
297     T(3, 2)=-T(3, 1)
298     T(3, 3)=T(1, 1)-T(1, 2)
299 C *****
300     DO 27 I=1, 3
301     DO 27 J=1, 3
302 27 T1(I, J)=T(J, I)
303     DO 28 I=1, 3
304     DO 28 J=1, 3
305     D1(I, J)=0.
306     DO 28 K=1, 3
307 28 D1(I, J)=D1(I, J)+D(I, K)*T1(K, J)
308     DO 29 I=1, 3
309     DO 29 J=1, 3
310     D(I, J)=0.
311     DO 29 K=1, 3
312 29 D(I, J)=D(I, J)+T(I, K)*D1(K, J)
313 24 CONTINUE
314 C ***** STRESS MATRIX *****
315 35 DO 40 I=1, 3
316     DO 40 J=1, 6
317     STR(NE, I, J)=0.
318     DO 40 K=1, 3
319 40 STR(NE, I, J)=STR(NE, I, J)+D(I, K)*B(K, J)
320 C ***** STIFFNESS MATRIX *****
321     DO 45 I=1, 6
322     DO 45 J=1, 6
323     SM(NE, I, J)=0.
324     DO 45 K=1, 3
325 45 SM(NE, I, J)=SM(NE, I, J)+B(K, I)*STR(NE, K, J)
326     DO 60 I=1, 6
327     DO 60 J=1, 6
328 60 SM(NE, I, J)=SM(NE, I, J)*AREA*TH
329     GO TO 70
330 100 CONTINUE

```

```

331 70 CONTINUE
332 RETURN
333 END
334 C
335 SUBROUTINE REARRA (NUNKNW, NT, INDEX, NBAND, B, DISPLM)
336 C*****
337 DIMENSION INDEX(300), B(300), DISPLM(300)
338 COMMON /B1/TSM(300, 24), ANGLE1(300), NST(300)
339 COMMON /B2/AMX(300, 24), SEVRT1(300), SWE(252)
340 DO 50 I=1, NUNKNW
341 B(I)=0
342 50 CONTINUE
343 N=0
344 DO 55 I=1, NT
345 IF (INDEX(I).EQ.0) GO TO 55
346 N=N+1
347 M=0
348 DO 56 J=1, NBAND
349 N1=I+J-1
350 IF (N1.GT.NT) GO TO 56
351 IF (INDEX(N1).EQ.0) GO TO 57
352 M=M+1
353 AMX(N, M)=TSM(I, J)
354 GO TO 56
355 57 CONTINUE
356 B(N)=-TSM(I, J)*DISPLM(N1)+B(N)
357 56 CONTINUE
358 DO 58 K=2, NBAND
359 N2=I-K+1
360 IF (N2.LE.0) GO TO 58
361 IF (INDEX(N2).EQ.1) GO TO 58
362 B(N)=B(N)-TSM(N2, K)*DISPLM(N2)
363 58 CONTINUE
364 55 CONTINUE
365 RETURN
366 END
367 C
368 SUBROUTINE SUBFOR (NKNOWN, FORCE, NT, INDEX, NBAND, DISPLM)
369 C*****
370 DIMENSION FORCE(300), INDEX(300), DISPLM(300)
371 COMMON /B1/TSM(300, 24), ANGLE1(300), NST(300)
372 DO 65 I=1, NKNOWN
373 FORCE(I)=0.
374 65 CONTINUE
375 N=0
376 DO 70 I=1, NT
377 IF (INDEX(I).EQ.1) GO TO 70
378 N=N+1
379 DO 71 J=1, NBAND
380 N1=I+J-1
381 IF (N1.GT.NT) GO TO 71
382 FORCE(N)=FORCE(N)+TSM(I, J)*DISPLM(N1)
383 71 CONTINUE
384 DO 72 J=2, NBAND
385 N2=I-J+1
386 IF (N2.LE.0) GO TO 72
387 FORCE(N)=FORCE(N)+TSM(N2, J)*DISPLM(N2)
388 72 CONTINUE
389 70 CONTINUE
390 RETURN
391 END
392 C
393 SUBROUTINE COL (N, B, NS, NB)
394 C コレスキー法による方程式の解
395 C*****
396 DIMENSION B(300), X(300)

```

```

397      COMMON /B2/A(300, 24), SEVRT1(300), SWE(252)
398 C      *****
399      DO 1 I=1, N
400          IN=N-I+1
401          IF(NB. LE. IN) IN=NB
402          DO 6 J=1, IN
403              JN=NB-J
404              IF(I-1. LE. JN) JN=I-1
405              SM=A(I, J)
406              IF(JN. LE. 0) GO TO 3
407              DO 4 K=1, JN
408                  IK=I-K
409                  KK=K+1
410                  JK=J+K
411                  SM=SM-A(IK, KK)*A(IK, JK)
412          4 CONTINUE
413          3 IF(J. NE. 1) GO TO 7
414              IF(SM. LE. 0. 0) GO TO 5
415              TM=1. 0/SQRT(SM)
416              A(I, J)=TM
417              GO TO 6
418          7 A(I, J)=SM*TM
419          6 CONTINUE
420          1 CONTINUE
421          DO 10 I=1, N
422              J=I-NB+1
423              IF(I+1. LE. NB) J=1
424              SM=B(I)
425              I1=I-1
426              IF(J. GT. I1) GO TO 11
427              DO 12 K=J, I1
428                  I2=I-K+1
429                  SM=SM-A(K, I2)*X(K)
430          12 CONTINUE
431          11 CONTINUE
432              X(I)=SM*A(I, 1)
433          10 CONTINUE
434          DO 20 M=1, N
435              I=N-M+1
436              J=I+NB-1
437              IF(J. GT. N) J=N
438              SM=X(I)
439              I1=I+1
440              IF(I1. GT. J) GO TO 21
441              DO 22 K=I1, J
442                  K1=K-1+1
443                  SM=SM-A(I, K1)*X(K)
444          22 CONTINUE
445          21 CONTINUE
446              X(I)=SM*A(I, 1)
447          20 CONTINUE
448          DO 40 I=1, N
449              B(I)=X(I)
450          40 CONTINUE
451          RETURN
452          5 NS=1
453          WRITE(*, 41) I, J
454          41 FORMAT(2X, 'MATRIX IS INVARID ELEMENT I=', 15, 2X, ' J=', 15)
455          RETURN
456          END
457 C
458      SUBROUTINE RANDUN( IX, X )
459 C 乱数発生
460 C*****
461      INTEGER*4 IX, I
462      REAL*8 R, RIX, RIX1, RIX2

```

```

463      RIX=FLOAT (IX)
464      R=2147483648. 0D0
465      RIX1=5960*RIX
466      RIX2=3805*RIX
467      I=RIX1/R
468      RIX1=(RIX1-I*R)*8192
469      I=RIX2/R
470      RIX2=RIX2-I*R
471      RIX=RIX1+RIX2
472      I=RIX/R
473      RIX=RIX-I*R
474      X=RIX*0. 4656613E-9
475      IX=RIX
476      RETURN
477      END
478 C
479      SUBROUTINE GAUSS (IX, S, AM, V)
480 C 正規乱数
481 C*****
482      INTEGER*4 IX
483      A=0. 0
484      DO 50 I=1, 12
485      CALL RANDUN (IX, Y)
486      50  A=A+Y
487      V=(A-6. 0)*S+AM
488      RETURN
489      END
490 C
491      SUBROUTINE ELDEF1 (NODT, KAKOM, X, Y)
492 C *****
493 C ***** ELEMENT DEFINE *****
494 C *****
495 C KAKOM: 三角形要素の接点を与える
496 C X, Y: 接点のX, Y座標
497 C
498      PARAMETER (NGYO=15, NRETSU=10)
499      DIMENSION KAKOM (300, *), X (*), Y (*)
500 C
501      M=NRETSU-1
502      NGYOM1=NGYO-1
503      DO 10 I=1, NGYOM1, 2
504      DO 10 J=1, M
505      N=2*(I-1)*(NRETSU-1)+2*(J-1)+1
506      KAKOM (N, 1)=(I-1)*NRETSU+J
507      KAKOM (N, 2)=KAKOM (N, 1)+NRETSU
508      KAKOM (N, 3)=KAKOM (N, 2)+1
509      L=N+1
510      KAKOM (L, 3)=KAKOM (N, 3)
511      KAKOM (L, 1)=KAKOM (N, 1)+1
512      KAKOM (L, 2)=KAKOM (N, 1)
513      L=N+2*(NRETSU-1)
514      KAKOM (L, 1)=KAKOM (N, 3)
515      KAKOM (L, 2)=KAKOM (N, 3)-1
516      KAKOM (L, 3)=KAKOM (N, 3)-1+NRETSU
517      L=L+1
518      KAKOM (L, 1)=KAKOM (N, 3)
519      KAKOM (L, 2)=KAKOM (N, 3)-1+NRETSU
520      KAKOM (L, 3)=KAKOM (N, 3)+NRETSU
521      10 CONTINUE
522      DO 11 I=1, NGYOM1, 2
523      DO 12 J=1, M
524      N=(I-1)*NRETSU+J
525      L=I*NRETSU+J+1
526      X (N)=J
527      X (L)=J+0. 5
528      Y (N)=(I-1)*3. ** 5/2

```

```

529      Y(L)=I*3.**.5/2.
530      12 CONTINUE
531      N=I*NRETSU
532      L=N+1
533      X(N)=M+0.5
534      Y(N)=Y(N-1)
535      X(L)=1.
536      Y(L)=Y(L+1)
537      11 CONTINUE
538      DO 13 J=1, NRETSU
539      N=(NGYO-1)*NRETSU+J
540      X(N)=X(J)
541      Y(N)=(NGYO-1)*3**0.5/2.
542      13 CONTINUE
543      DO 14 I=1, NODT
544      14 Y(I)=-Y(I)
545      RETURN
546      END
547 C
548      SUBROUTINE ELDEF2(NELT, POI, SWE, E, NST)
549 C
550 C   ここで各要素の平均強度AYと強度の標準偏差SYを与えているので注意
551 C   ポアソン比も与えている
552 C   構成方程式のポアソン比の項と関連があるので注意
553 C*****
554      PARAMETER(AI=1.0, SY=0.0)
555      INTEGER*4 IY
556      DIMENSION POI(*), SWE(*), E(*), NST(*)
557      DO 10 I=1, NELT
558      10      POI(I)=0.2
559 C
560 C   IY:乱数発生のためのシード
561 C   SWE:各要素の強度
562 C
563      IY=3707
564      DO 20 I=1, NELT
565      CALL GAUSS(IY, SY, AY, VY)
566      IF(VY.LE.0.001) VY=0.001
567      SWE(I)=VY
568      20 CONTINUE
569 C
570      DO 30 I=1, NELT
571      E(I)=1.0
572      30 CONTINUE
573 C
574      DO 40 I=1, NELT
575      NST(I)=0
576      40 CONTINUE
577 C
578      RETURN
579      END
580 C
581      SUBROUTINE NODEF(NODT, INDEX, DISPLM, FORCE)
582 C
583 C   境界条件を与える
584 C
585      PARAMETER(NRETSU=10)
586      DIMENSION INDEX(*), DISPLM(*), FORCE(*)
587 C
588      NT=2*NODT
589      DO 10 I=1, NT
590      INDEX(I)=1
591      DISPLM(I)=0.0
592      FORCE(I)=0.0
593      10 CONTINUE
594 C

```

```

595     INDEX(1)=0
596     DO 20 I=1, NRETSU
597         N=2*I
598         M=NT-2*(I-1)
599         INDEX(N)=0
600         INDEX(M)=0
601     20 CONTINUE
602 C
603     RETURN
604     END
605 C
606     SUBROUTINE STRESS(I, KAKOM, DISPLM, ST, WS, WD)
607 C
608     DIMENSION KAKOM(300, *), DISPLM(*), ST(300, 3, 6), WS(*), WD(*)
609 C
610     DO 10 J=1, 3
611         N=KAKOM(I, J)
612         WD(2*J-1)=DISPLM(2*N-1)
613         WD(2*J)=DISPLM(2*N)
614     10 CONTINUE
615     DO 20 J=1, 3
616         WS(J)=0.0
617         DO 30 K=1, 6
618             WS(J)=WS(J)+ST(I, J, K)*WD(K)
619     30 CONTINUE
620     20 CONTINUE
621 C
622     RETURN
623     END

```

## 6. まとめ

試験機ないし試験法に関する研究事項についてまとめてみると次のようになる。

(平成6年度) 空圧式クリープ試験機

(平成7年度) 油圧式クリープ試験機

(平成8年度) 油圧式周圧維持装置と空圧式周圧維持装置

平成6年度に検討した空圧式クリープ試験機を用いて長期クリープ試験を実施してきた。クリープ試験装置自体に異常は認められないが、計測装置の一部(歪アンプ)が故障し試験を中止した。試験装置全体の信頼性、万一の故障の際のバックアップ体制が超長期の試験では是非必要と思われる。この点について今後検討すべきであろう。

岩石を使用した強度試験とクリープ試験を行ってきた。その結果かなりのデータが蓄積できたと考える。このデータを基礎として昨年度より非線型構成方程式の検討を開始した。これまでの検討事項についてまとめてみると次のようになる。

(平成6年度) 超長期クリープ試験開始

(平成7年度) 超長期クリープ試験続行。短期クリープ試験

非線型構成方程式の提案。1次元プログラムの開発

(平成8年度) 超長期クリープ試験続行(途中で中止)。中期・短期クリープ試験

非線型構成方程式のパラメータの導出。2次元プログラムの開発

構成方程式は非線型粘弾性論に基づいたものであり、これまでに得られた強度試験結果やクリープ試験結果をかなり良く再現することができることがわかった。ただし、まだまだ基礎データが不足しており粘り強く基礎データを採取していく必要があると考える。この構成方程式は有限要素法プログラムに組み込みやすいことを、当初から念頭において開発されたものであり、2次元有限要素法プログラムへの組み込みはいたって簡単であった。今後、種々の条件下での計算を実施する予定である。

研究開始より3年間を経過した。試験装置の開発、データの蓄積、理論的な検討を行ってきたが、従来の工学で視野としていた期間と比較してはるかに長期にわたる岩盤の挙動を解明することには、多大の努力と長期にわたる粘り強い検討が是非とも必要であることをあらためて痛感している。

## 参考文献

- 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一 (1989) : 資源と素材, Vol. 105, p. 521-526.
- 秋哲淵 (1995) : 岩石の湿潤状態における時間依存性, 東京大学博士論文.
- 何昌栄 (1989a) : 岩石の圧縮荷重下での変形・破壊の時間依存性, 東京大学博士論文.
- 何昌栄, 大久保誠介, 西松裕一 (1989b) : 材料, Vol. 38, p. 216-220.
- 大久保誠介, 何昌栄, 西松裕一 (1987a) : 日本鉱業会誌, Vol. 103, p. 177-181.
- 大久保誠介, 西松裕一, 緒方義弘 (1987b) : 日本鉱業会誌, Vol. 103, p. 293-296.
- Okubo, S. , Nishimatsu, Y. and He, C. (1990): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, No. 6, p. 559-562.
- 大久保誠介 (1992a) : 資源・素材学会誌, Vol. 108, p. 601-606.
- 大久保誠介, 西松裕一, 何昌栄, 秋哲淵 (1992b) : 材料, Vol. 41, p. 403-409.



## 付録 I 東濃鉱山北延 NATM 坑道付近コア弾性波測定結果

東濃鉱山北延 NATM 坑道の掘削に際して、発破およびロードヘッダによる機械の 2 種類の掘削方法によって、周辺岩盤の損傷度合などを調査されている。これに関連して、発破および機械掘削で行った区間の壁面からのボーリングによって、1 m のコアを 5 本送付していただいた。そのコアの弾性波速度を測定した結果について述べる。

坑道におけるボーリングの位置を図 A I - 1 および図 A I - 2 に示す。図 A I - 2 からわかるように MO - 1, 2, 3 は発破区間であり、MO - 4, 5 は機械掘削区間である。

岩石の種類としては、図 A I - 2 から細粒砂岩であることがわかる。

図 A I - 3 に、コアの写真を示す。(a) ~ (c) の発破区間を見ると、吹き付けコンクリートと岩盤の境から 30 cm 程度までは、ボーリング方向と鉛直な亀裂の頻度が多くなっている。一方、機械掘削区間は、その頻度がかなり小さく、コアに見られる亀裂は掘削以前から存在していたように感じられる。このように、コアからも発破によって坑道壁面から 30 cm 程度までは亀裂が生じていることがわかる。

次に、チタン酸バリウムセンサを使用して、ボーリング方向に垂直な方向のコアの弾性波速度の測定を行った。すなわち、コアの径方向に測定を行った。測定方法は、パルス法で、弾性波速度の分解能は約 10 m である。予備的に、径方向で、測定する位置を変化させて測定した結果、弾性波速度には最大値と最小値が存在し、異方性を若干示すことがわかった。最大値に対する、その差は約 6 % 程度であり、最大値を取る位置と最小値を取る位置はほぼ 90 度のずれがあり、ほぼ直交異方性を表していることがわかった。これは、堆積にともなうものと判断して、コアが切断していてその方向が判断できないときには、弾性波速度を測定する位置を変えながら、最も値が大きくなる方向が一致するように、コアをあわせた。最大値を取る方向を高速度方向、最小値を取る方向を低速度方向として測定した結果を、表 A I - 1 に示す。弾性波速度は、いずれも 2 km/s 強であり、コアや場所による違いはさほど見られなかった。このように、今回の結果では発破区間と、機械掘削区間とで差は見られなかった。これは掘削によってさほど損傷していないことを表している。コア観察から、発生した亀裂頻度は多く、明らかに亀裂自体は発破の方が多く形成されるが、東濃鉱山の砂岩では亀裂が発生していない部分はさほど損傷していないことがわかった。また、発破終了して、側壁でかなり損傷している場合には危険であることから、コンクリートを吹き付ける前に、通常はつることが考えられる。そのためにコンクリートと岩盤の境についてもさほど損傷していない結果となったのではないかと考えられる。

表A I - 1 動燃中部での発破および機械掘削における坑道近傍での  
弾性波速度の変化 (その1)

MO2(発破)

坑壁からの距離 (cm)	高速度方向		低速度方向	
	到達時間 ( $\mu$ s)	弾性波速度 (km/s)	到達時間 ( $\mu$ s)	弾性波速度 (km/s)
14	27.5	2.36	29.8	2.18
19	27.5	2.36	29.3	2.22
24	27.5	2.36	29.0	2.24
29	27.5	2.36	29.0	2.24
34	27.5	2.36	29.5	2.20
39	27.5	2.36	29.5	2.20
44	28.0	2.32	30.0	2.17
49	28.0	2.32	30.0	2.17
54	28.0	2.32	29.5	2.20

MO3(発破)

坑壁からの距離 (cm)	高速度方向		低速度方向	
	到達時間 ( $\mu$ s)	弾性波速度 (km/s)	到達時間 ( $\mu$ s)	弾性波速度 (km/s)
3	26.0	2.50	28.5	2.28
8	27.0	2.41	29.0	2.24
20	28.0	2.32	29.5	2.20

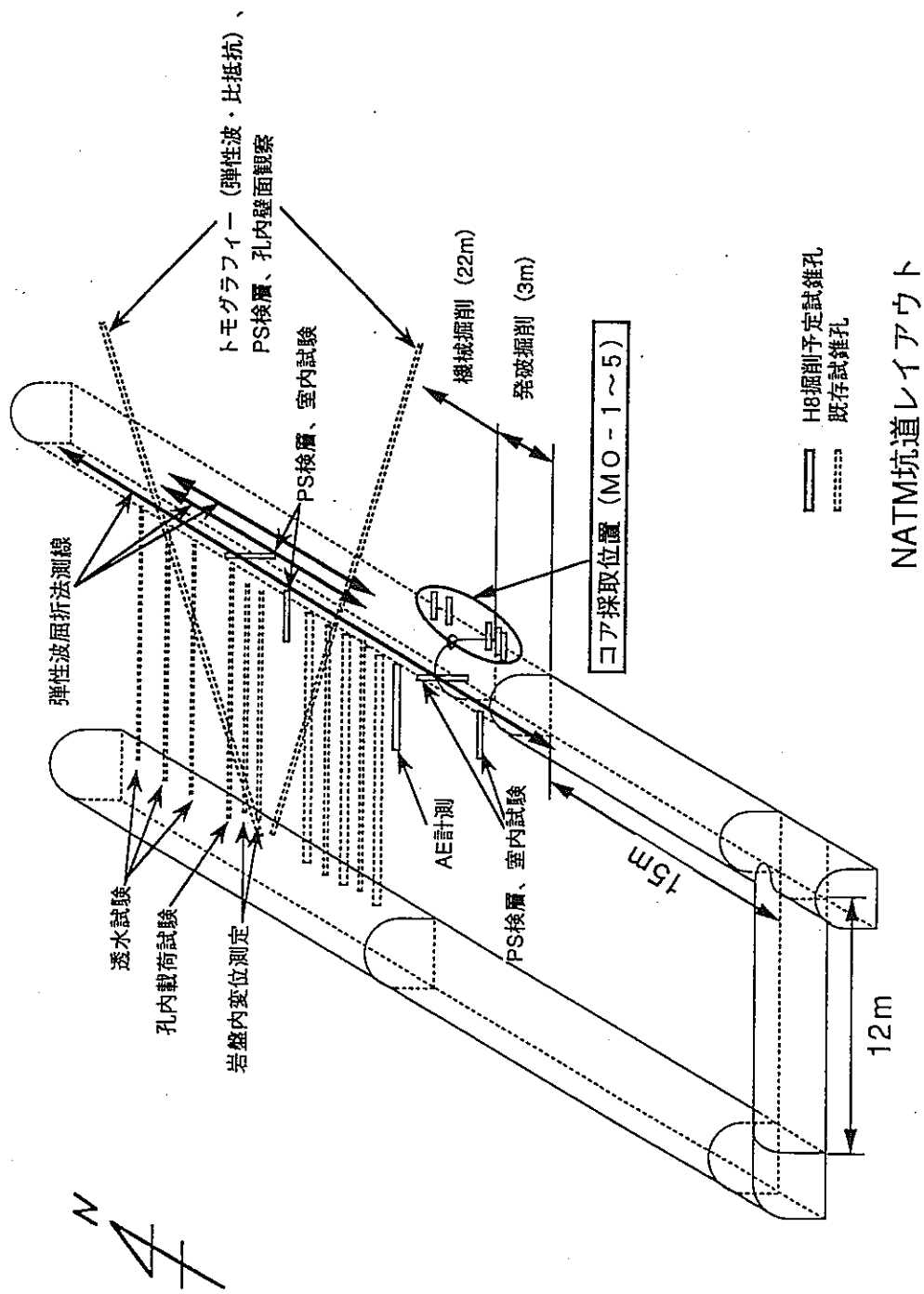
MO4(機械)

坑壁からの距離 (cm)	高速度方向		低速度方向	
	到達時間 ( $\mu$ s)	弾性波速度 (km/s)	到達時間 ( $\mu$ s)	弾性波速度 (km/s)
10	27.5	2.36	29.8	2.18
15	27.5	2.36	30.0	2.17
20	27.7	2.35	29.0	2.24
25	27.7	2.35	29.0	2.24
30	27.3	2.38	29.0	2.24
35	-	-	-	-
40	27.0	2.41	28.8	2.26
45	27.0	2.41	28.8	2.26
50	27.0	2.41	28.5	2.28
55	27.0	2.41	29.0	2.24
60	26.5	2.45	29.5	2.20
65	26.5	2.45	28.5	2.28
70	26.8	2.43	29.0	2.24
75	28.0	2.32	30.0	2.17

表A I - 1 動燃中部での発破および機械掘削における坑道近傍での  
弾性波速度の変化 (その2)

MO5(機械)

坑壁からの距離 (cm)	高速度方向		低速度方向	
	到達時間 ( $\mu$ s)	弾性波速度 (km/s)	到達時間 ( $\mu$ s)	弾性波速度 (km/s)
1	27.0	2.41	28.5	2.28
4	28.0	2.32	30.0	2.17
7	27.7	2.35	29.5	2.20
10	27.5	2.36	28.5	2.28
13	27.7	2.35	29.0	2.24
16	-	-	-	-
19	27.0	2.41	29.0	2.24
22	26.5	2.45	29.0	2.24
25	27.0	2.41	28.5	2.28
28	26.0	2.50	28.5	2.28
31	27.5	2.36	29.0	2.24
34	27.5	2.36	29.7	2.19
37	27.5	2.36	29.0	2.24
40	27.0	2.41	29.0	2.24
43	26.5	2.45	29.0	2.24
46	26.5	2.45	29.0	2.24
49	27.0	2.41	29.0	2.24
52	27.0	2.41	28.8	2.26
55	27.0	2.41	29.0	2.24
58	26.6	2.44	28.6	2.27
61	27.0	2.41	28.5	2.28
64	27.0	2.41	28.5	2.28
67	27.0	2.41	29.0	2.24
70	26.8	2.43	28.5	2.28
73	26.7	2.43	28.8	2.26



図A I - 1 コア採取位置

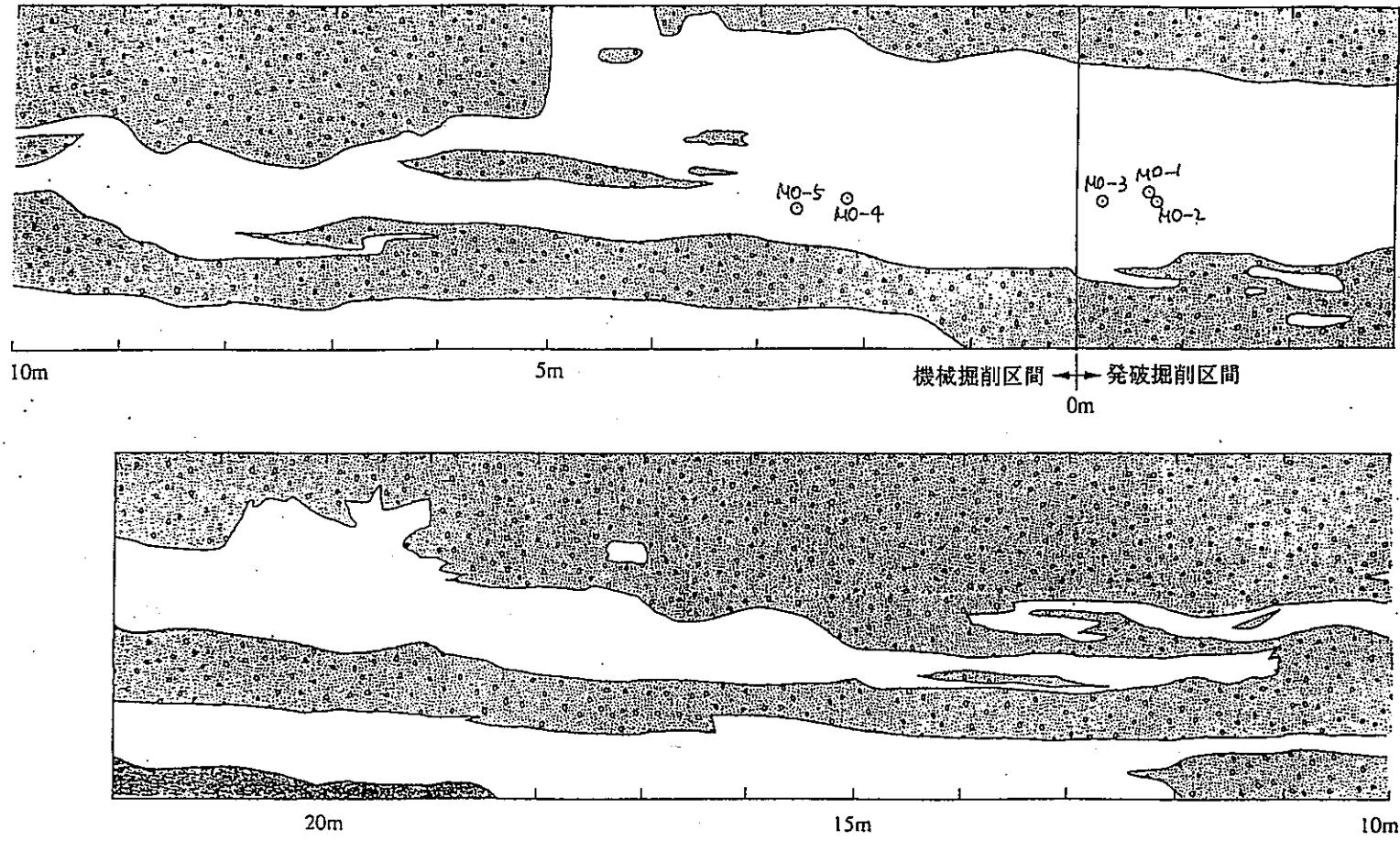



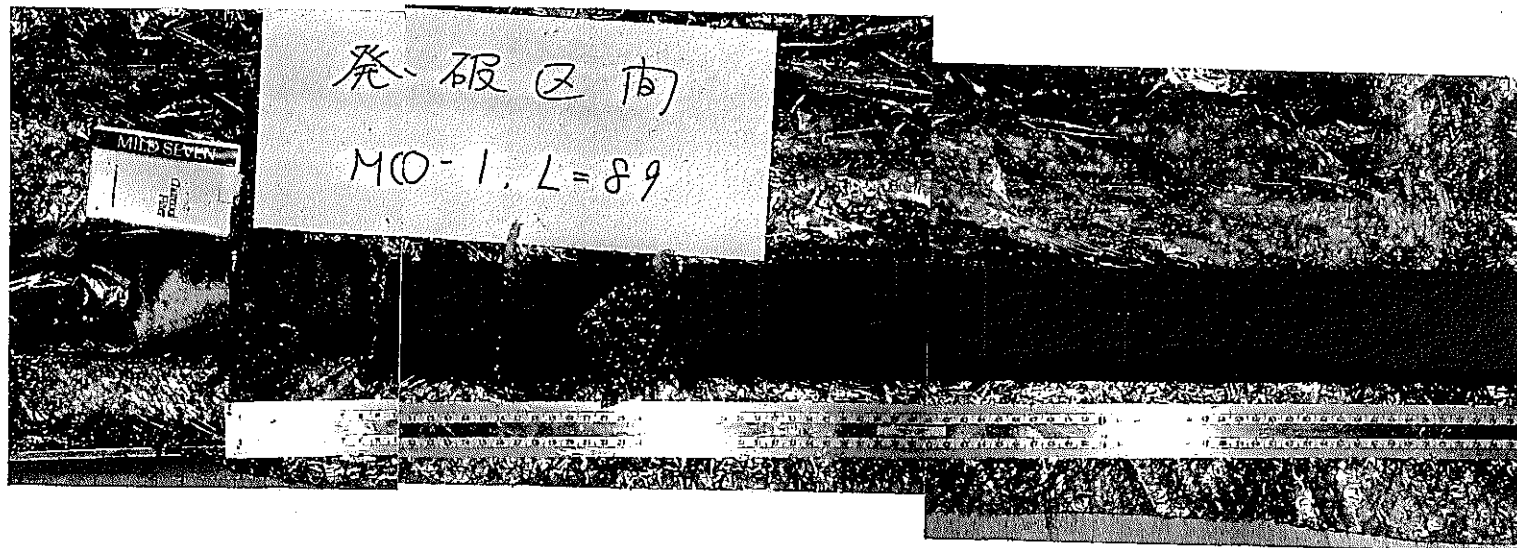


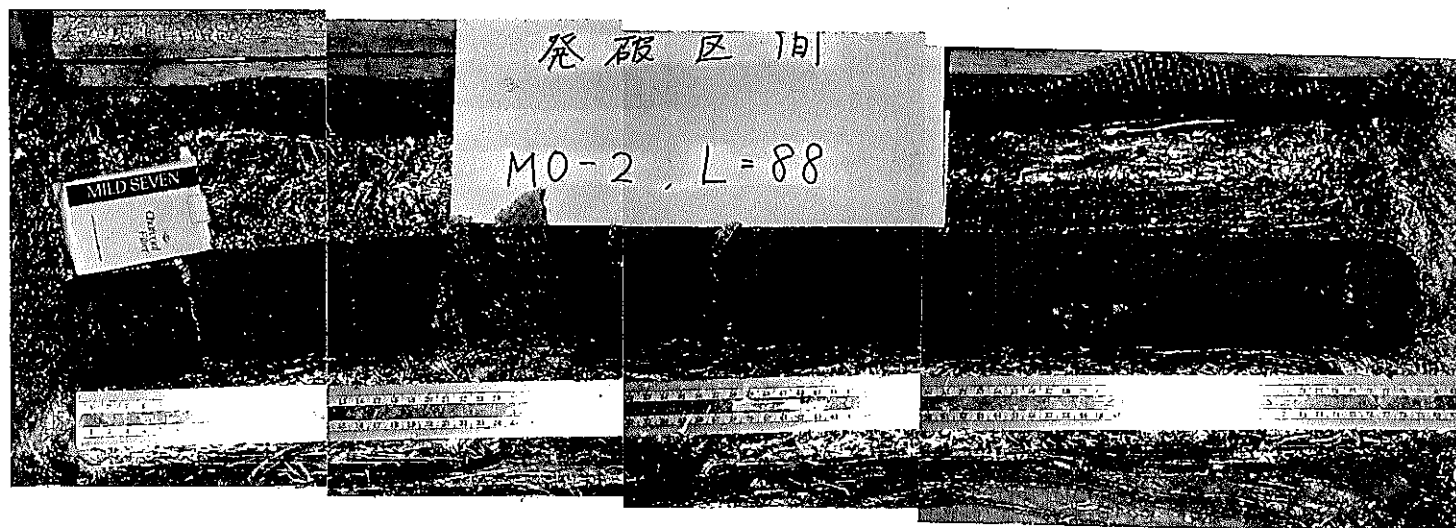
図3. 2(2) 側壁観察図(東側壁)

 : 粗粒砂岩  : 細粒砂岩  : 挟炭砂岩

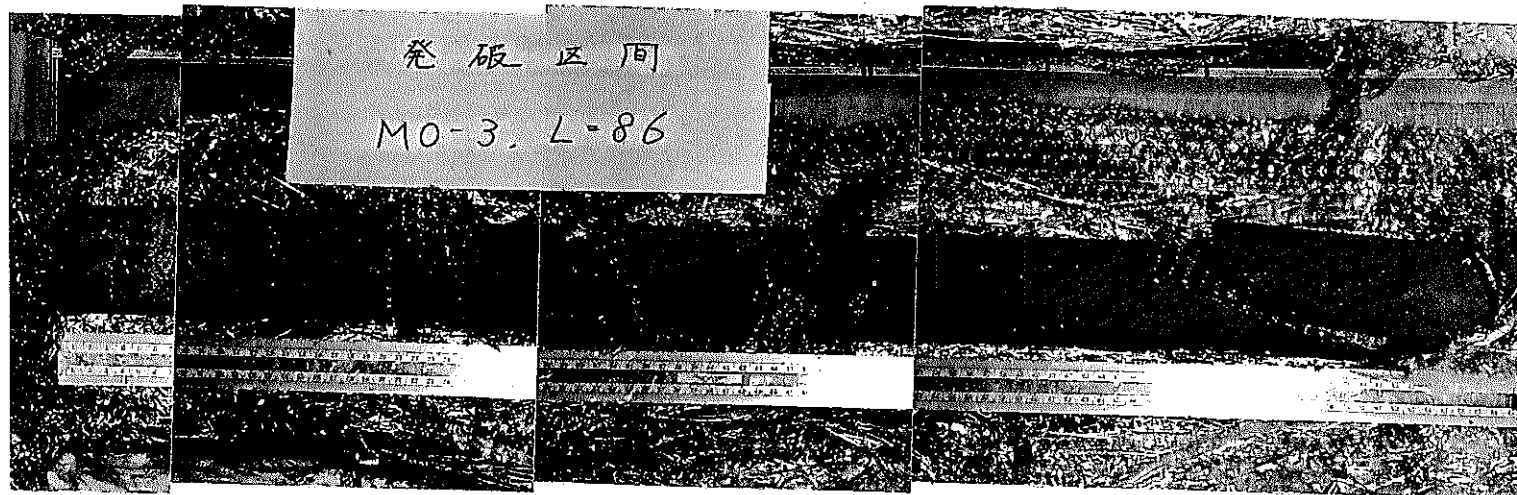
図A I - 2 東側壁におけるコア採取位置



図A I - 3 (a) MO-1のコアの写真 (発破区間)

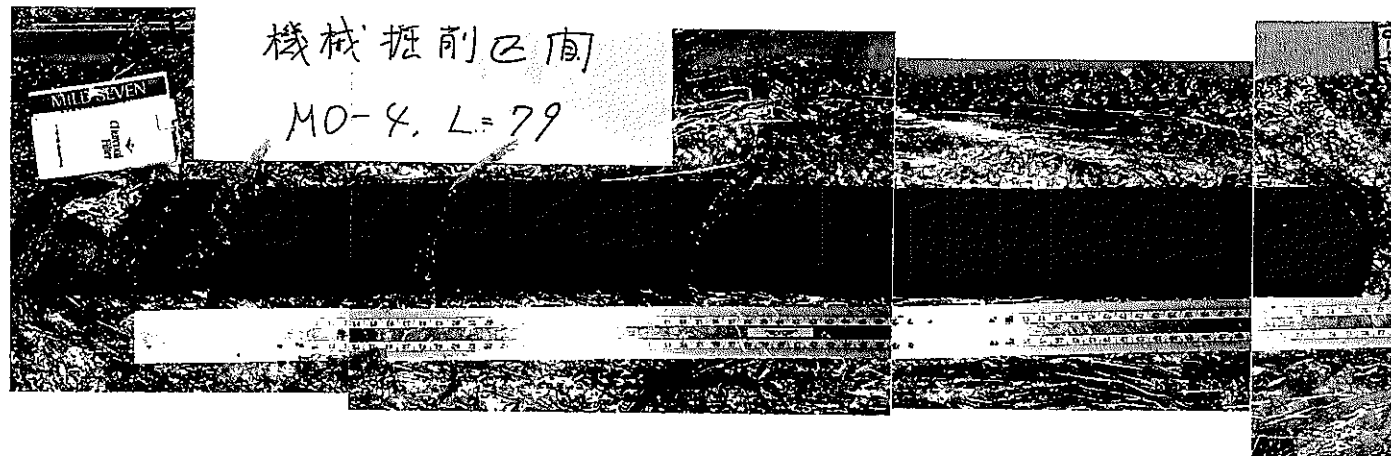


図A I - 3 (b) MO-2のコアの写真 (発破区間)

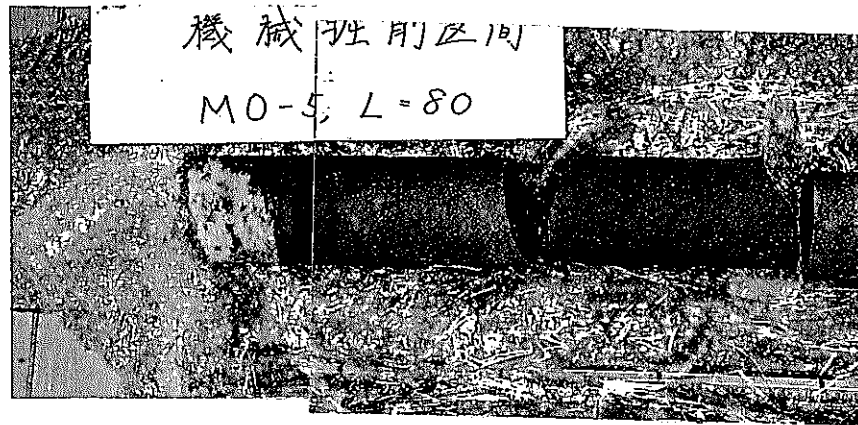


図A I - 3 (c) MO-3のコアの写真 (発破区間)





図A I - 3 (d) MO-4のコアの写真 (機械掘削区間)

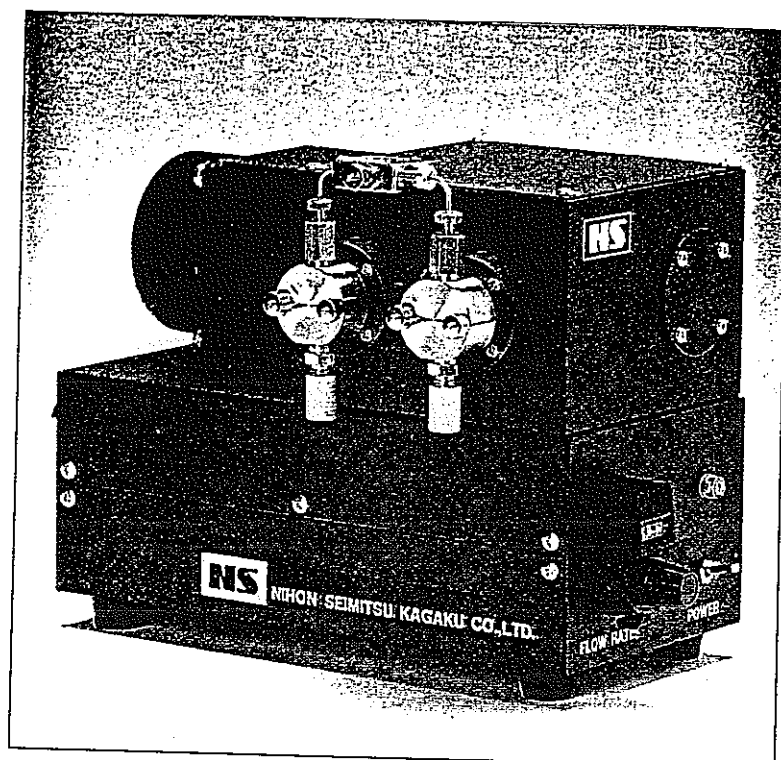


図A I - 3 (e) MO-5のコアの写真 (機械掘削区間)

付録Ⅱ 間隙水圧保持装置に関する予備調査

間隙水圧保持装置に関する予備調査表

番号	製品名	型式	会社名
1	ミニケミカルポンプ	NP-FX-20	日本精密科学
2	テフロンホース	A300-02	豊中ホット研究所
3	ナイロンホース	A200-02	豊中ホット研究所
4	エアレス塗装用ホース	R215-4	豊中ホット研究所
5	ブレード被覆付 フレキシブルチューブ	MR07	アイ・ディ・ケイ
6	スーパーミニボールバルブ	FUBV-715-6.35	ファビック
7	ディスクストップバルブ	UD-11500-HPA	ファビック
8	超微量調整弁 ニードルバルブ	UN-115pB	ファビック
9	パネルナット付 ニードルストップバルブ	US-126PA	ファビック
10	ティューユニオン	F900-T-3.2	ファビック
11	チューブアダプターメイル	F900-AT-3.2A <sup>F</sup>	ファビック
12	グローブ形ニードルバルブ	GUH-916-2	ファビック
13	クイックカップリング	CTL01	長堀工業
14	クイックカップリング	CSP01	長堀工業
15	超高圧マイクロポンプ	NPX-3(U)	マイクロテック・ニチオン
16	アキュームレータ	N110-1PL	日本アキュームレータ
17	フローコントロールバルブ	EFB10SS	東都興業
18	ニードルバルブ	NB10SS	東都興業
19	超微量流量調節バルブ	SS-22RS4	WHITEY
20	ネジ込み型流量調節バルブ	SS-2RF4	WHITEY
21	ステンレス鋼製 フレキシブルホース	SS-4BHT-12	C A J O N
22	クイックコネクター	DES0-QC4-4PF	Swagelok
23	周圧容器		開発機械学研究室設計 丸一工業



使用流体 : 接液部材質による

ポンプ形式 : 変芯カム駆動プランジャー

最大圧力 : 150kg/cm<sup>2</sup>

流 量 : 0.6~24ml/min

接液部材料 : SUS 316, ルビー, サファイア, セラミック, テフロン

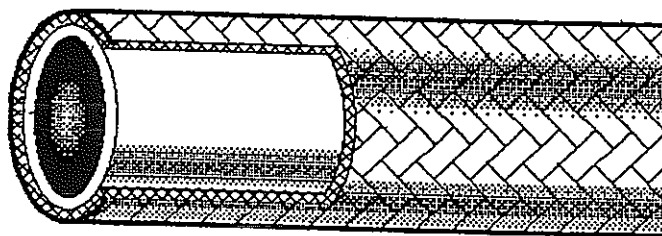
重 量 : 4.5kg

電 源 : AC100V 50/60Hz 2A

価 格 : 35万円

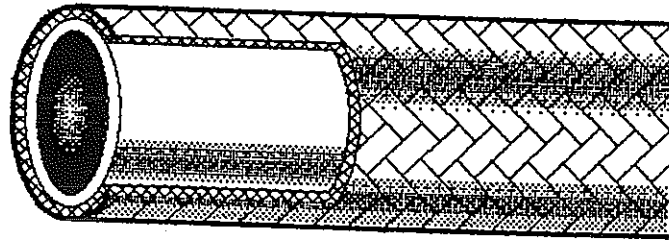
番号1 ミニケミカルポンプ NP-FX-20 (日本精密科学製)

この他に、流量0.02~1ml/minのNP-FX-1等がある。



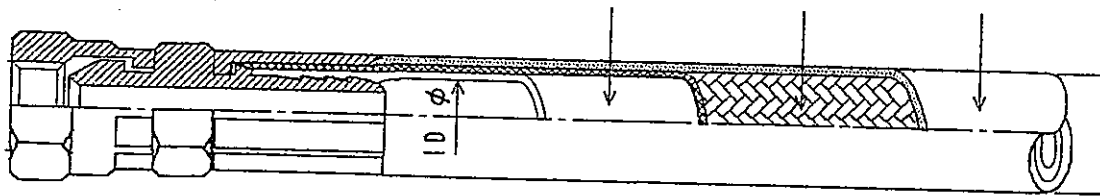
ホース内径 : 4mm                      ホース外径 : 7.4mm  
常用圧力 : 250kg/cm<sup>2</sup>  
最小曲げ半径 : 80mm  
重            量 : 100g/m  
使用温度範囲 : -70~204℃

番号2 テフロンホース A300-02 (豊中ホット研究所製)  
この他に、ホース内径 6mm の A300-04 等がある。



ホース内径 : 4mm                      ホース外径 : 7.4mm  
常用圧力 : 250kg/cm<sup>2</sup>  
最小曲げ半径 : 80mm  
重                      量 : 95g/m  
使用流体温度 : -40~60°C

番号3 ナイロンホース A200-02 (豊中ホット研究所製)  
この他に、ホース内径 6mm の A200-04 等がある。



ホース内径 : 6mm

ホース外径 : 11.2mm

最大使用圧力 : 210kg/cm<sup>2</sup>

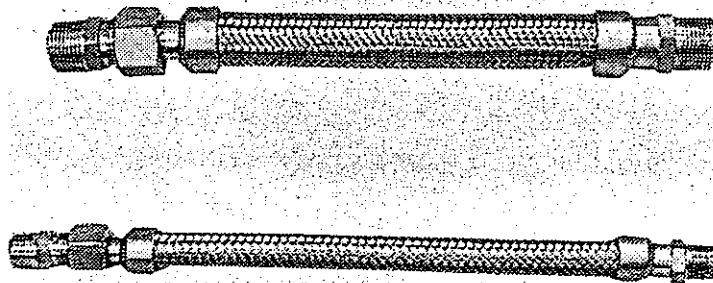
材質 : ナイロン, ステンレスワイヤーブレード, PVC コーティング

最小曲げ半径 : 55mm

重 量 : 132g/m

番号4 エアレス塗装用ホース R215-4 (豊中ホット研究所製)

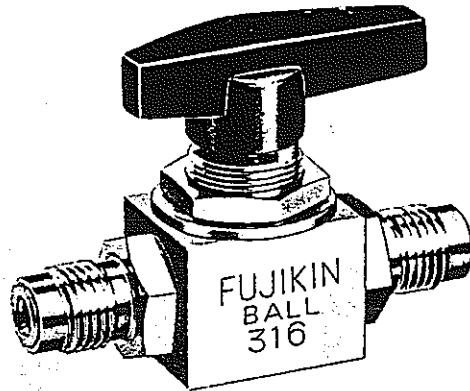
この他に、ホース内径 8mm の R215-6 等がある。



内 径：7mm                      ブレード外径：12.5mm  
最高使用圧力：20kg/cm<sup>2</sup>  
材 質：SUS304  
最小曲げ半径：25mm

番号5 ブレード被覆付フレキシブルチューブ MR07 (アイ・ディ・ケイ製)  
この他に、内径 10.5mm の MR10 等がある。





最高使用圧力：165kg/cm<sup>2</sup>

材 質：SUS 316, PTFE, ZDC1

呼 び 径：6.35mm

重 量：0.22kg

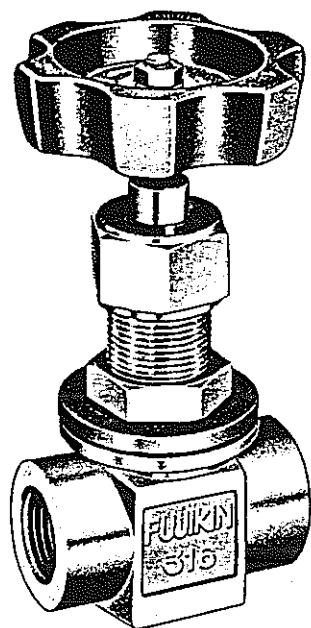
オリフィス径：4.0mm

Max Cv値：0.66

使用流体温度：10～80℃

番号6 スーパーミニボールバルブ FUBV-715-6.35 (ファビック製)

この他に、呼び径 9.52mm の FUBV-715-9.52 がある。



最高使用圧力：253kg/cm<sup>2</sup>

材 質：SUS 316, PCTFE, フッソゴム

呼 び 径：1/8”

重 量：0.45kg

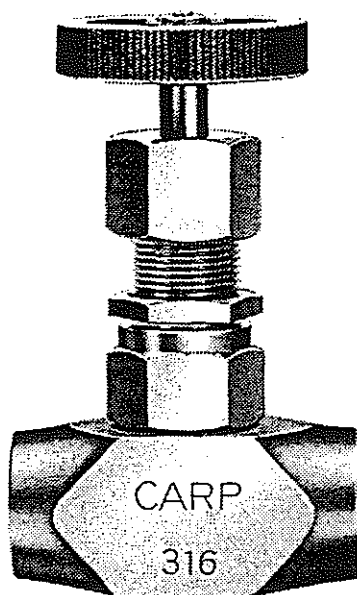
オリフィス径：5mm

Max Cv値：0.35

使用流体温度：-50～80℃

番号7 ディスク ストップバルブ UD-11500HPA (ファビック製)

この他に、呼び径 1/4” の UD-11500HPA 等がある。



最高使用圧力：150kg/cm<sup>2</sup>

材 質：SUS 316, PCTFE, PTFE

呼 び 径：1/4"

重 量：0.27kg

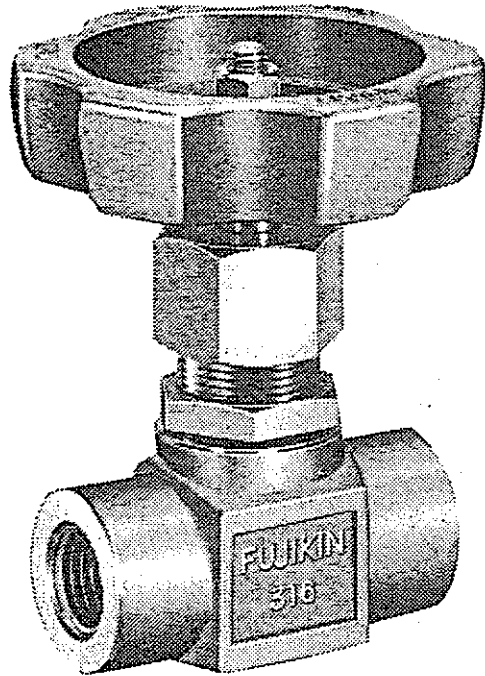
オリフィス径：1.6mm

Max Cv値：0.019

使用流体温度：-20～80℃

番号8 超微量調整弁 ニードルバルブ UN-115pB (ファビック製)

この他に、アングルバルブ UN-315pB がある。



最高使用圧力：260kg/cm<sup>2</sup>

材 質：SUS 316, PTFE+PFA

呼 び 径：1/8"

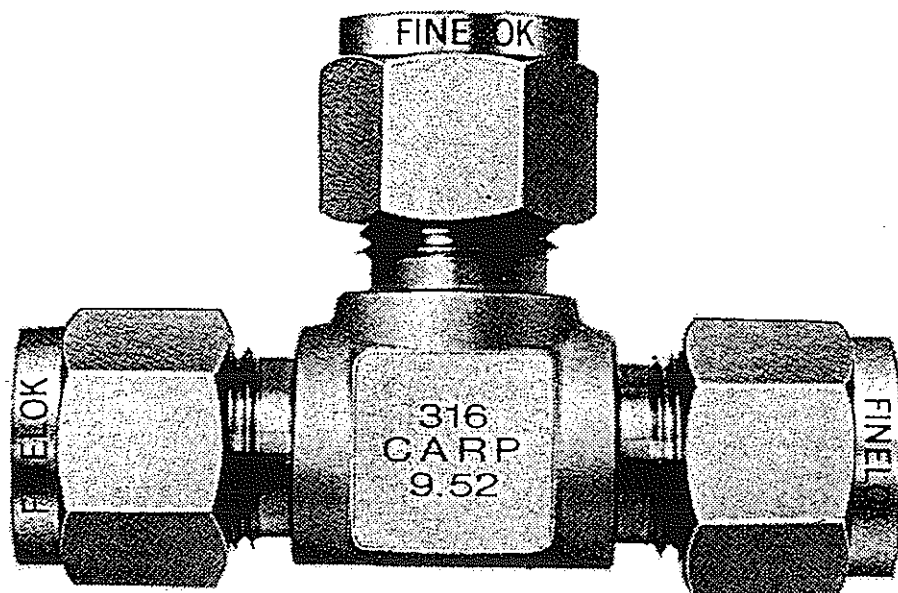
重 量：0.29kg

オリフィス径：5mm

Max Cv 値：0.34

使用流体温度：-20～150℃

番号9 パネルナット付ニードルストップバルブUS-126PA（ファビック製）  
この他に、呼び径1/4"のUS-126PB等がある。



使用流体：水, 原油, 燈油, アルコール, 酢酸, 鉱油

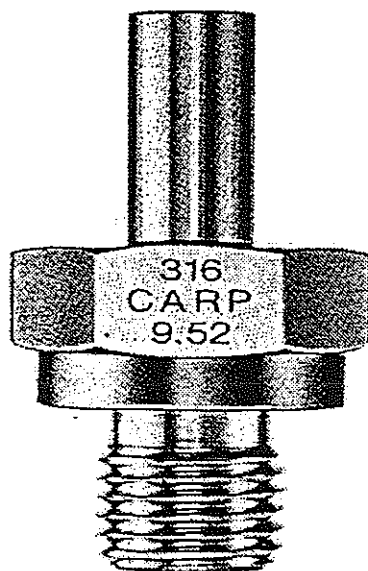
呼び径：3.2mm

使用温度範囲：使用流体による

最高使用圧力：呼び径による

番号10 ティーユニオン F900-T-3.2 (ファビック製)

この他に、呼び径 6.35mm の F900-T-6.35 等がある。



使用流体：水, 原油, 燈油, アルコール, 酢酸, 鉍油

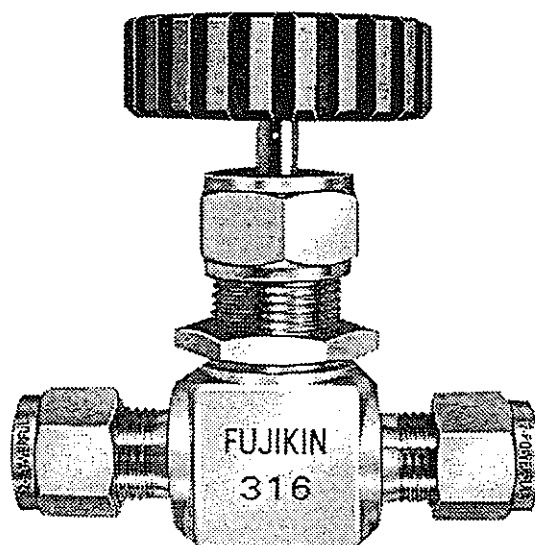
呼び径：3.2mm

使用温度範囲：使用流体による

最高使用圧力：呼び径による

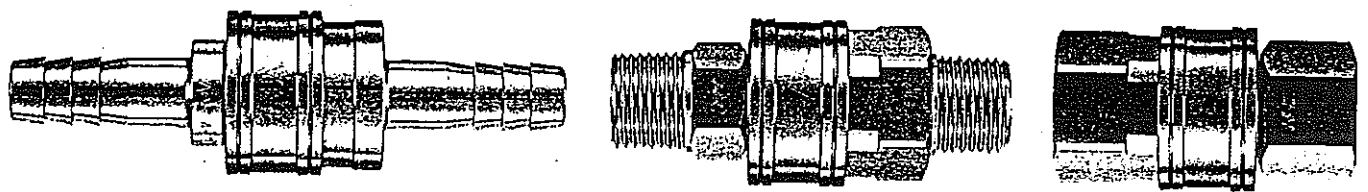
番号11 チューブアダプターメイル F900-AT-3.2A<sup>F</sup> (ファビック製)

この他に、呼び径 6.35mm の F900-AT-6.35A<sup>F</sup> 等がある。



最高使用圧力 : 165kg/cm<sup>2</sup>  
材 質 : 316 ステンレス鋼  
呼 び 径 : 3.2mm  
重 量 : 0.13kgf  
使用流体温度 : -20~150°C  
オリフィス径 : 5mm  
C v 値 : 0.10

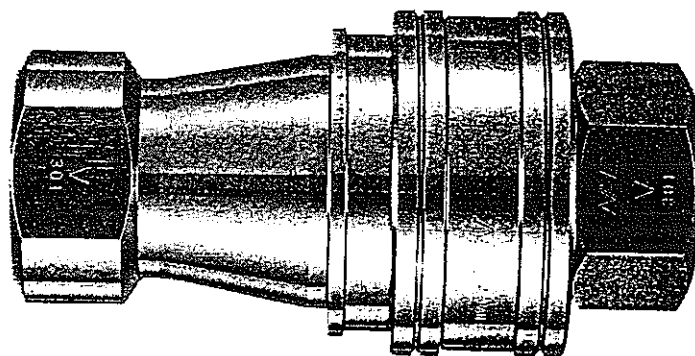
番号12 グローブ形ニードルバルブ GUH-916-2 (ファビック製)  
その他に、呼び径 6.35mm 等がある。



最高使用圧力：100kg/cm<sup>2</sup>  
材 質：BSBM, SUS304  
サ イ ズ：1/8”  
使用流体温度：-20～180℃

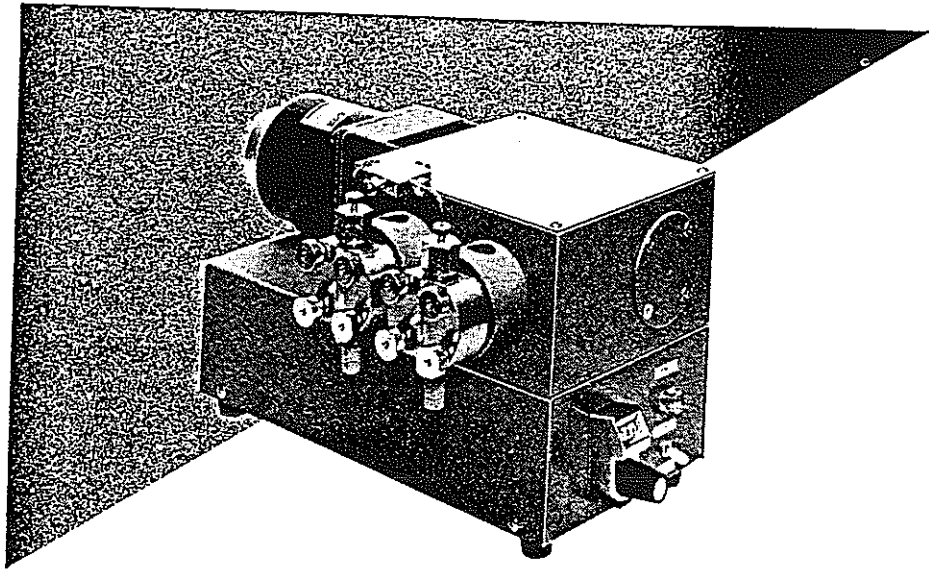
番号13 クイックカップリングCTL01（長堀工業製）  
この他に、サイズ1/4”のCTL02等がある。





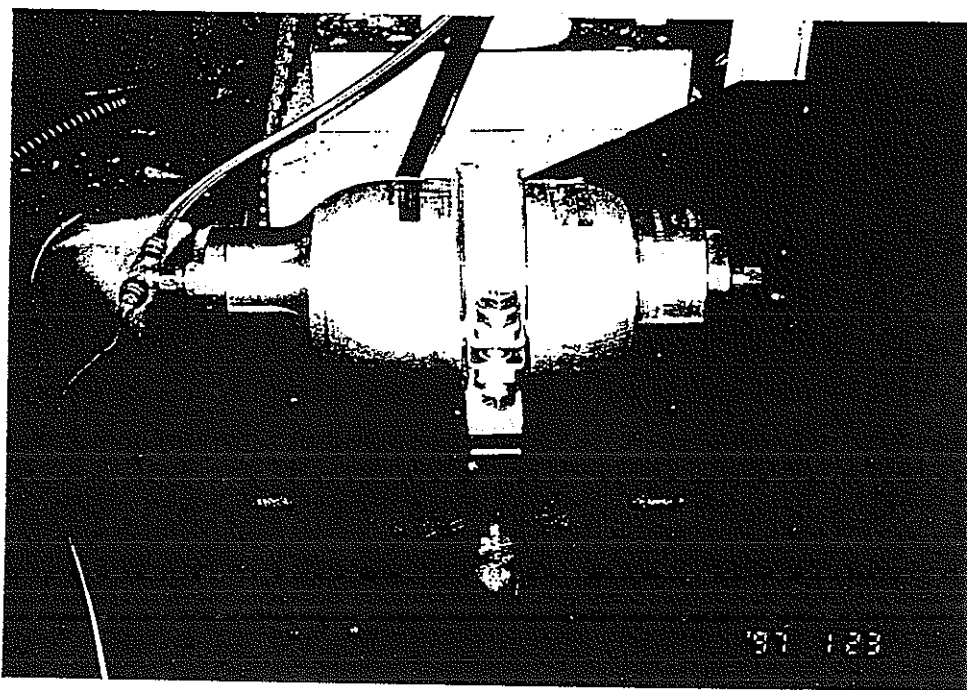
最高使用圧力：100kg/cm<sup>2</sup>  
材 質：BSBM, SUS304  
呼 び 径：1/8”  
使用流体温度：-20～180℃

番号14 クイックカップリング CSP01（長堀工業製）  
この他に、呼び径 1/4” の CSP02 等がある。



使用流体 : 全溶媒  
ポンプ形式 : 変芯カム駆動プランジャ  
最大圧力 : 200kg/cm<sup>2</sup>  
流 量 : 0.11~1.8ml/min  
接液部材料 : SUS316, ルビー, サファイア, テフロン, テフゼル  
重 量 : 約 5kg  
電 源 : AC100V 50/60Hz 40W  
価 格 : 55万円

番号15 超高圧マイクロポンプNPX-3(U) (マイクロテック・ニチオン製)  
この他に、流量0.005~0.1ml/minのNPX-1(U)等がある。



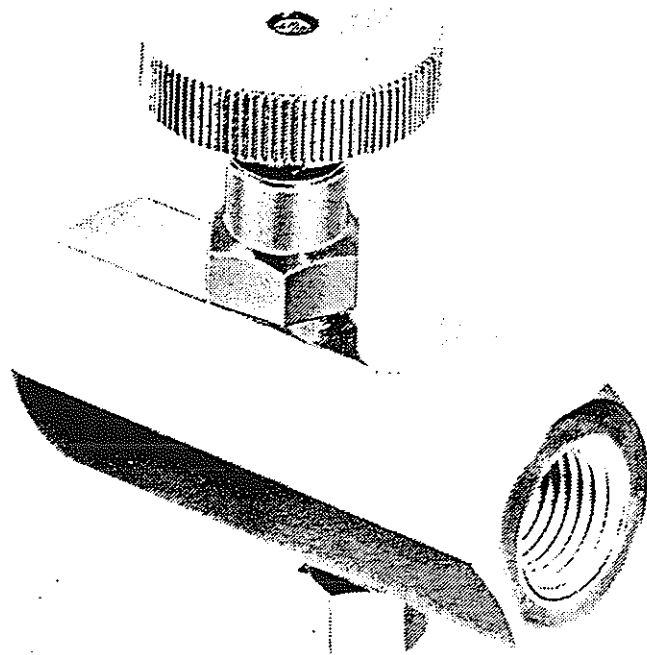
呼称容積 : 1 l

最大使用圧力 : 110kg/cm<sup>2</sup>

本体材質 : SA-312TP316L (ステンレス鋼)

接液部材質 : SUS316, 合成ゴム

番号 16 アキュムレータ N110-1PL (日本アキュムレータ製)



サイズ : 1/8"

最高使用圧力 : 35MPa

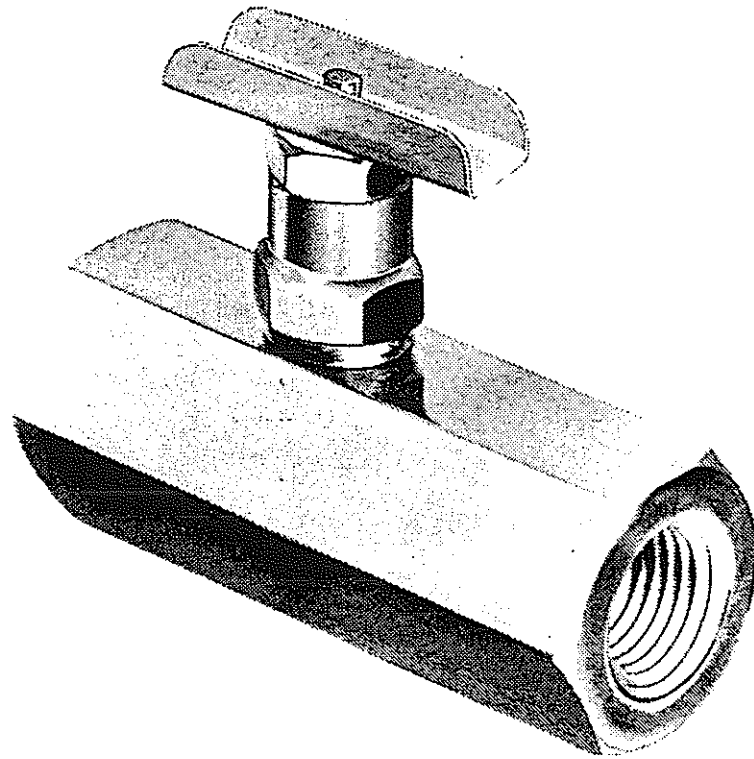
最低破壊圧 : 140MPa

使用温度範囲 : -40~100℃

材質 : ステンレス スチール, アルミニウム, ブナN, テフロン, デルリン

番号17 フローコントロールバルブ EFB10SS (東都興業製)

この他に、サイズ 1/4" の EFB20SS 等がある。



サイズ : 1/8"

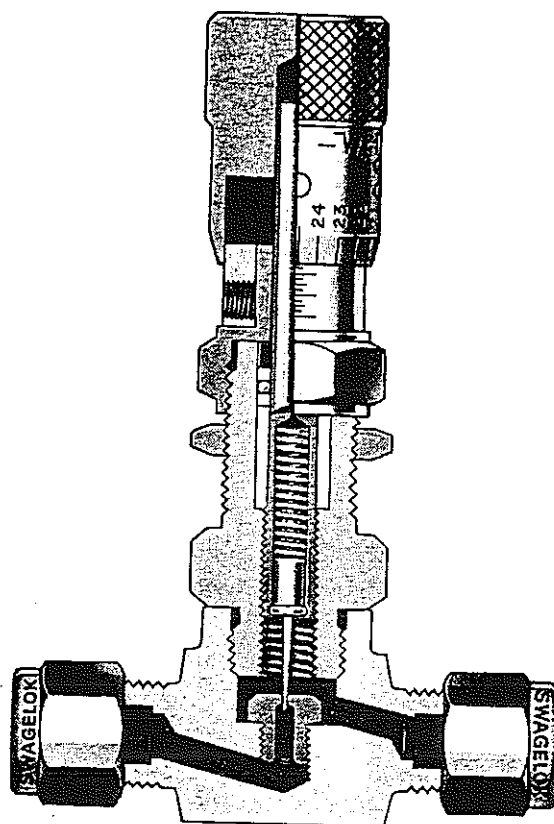
最高使用圧力 : 35MPa

○リング : -40~100°C

材質 : ステンレス スチール, テフロン, アルミニウム, スチール

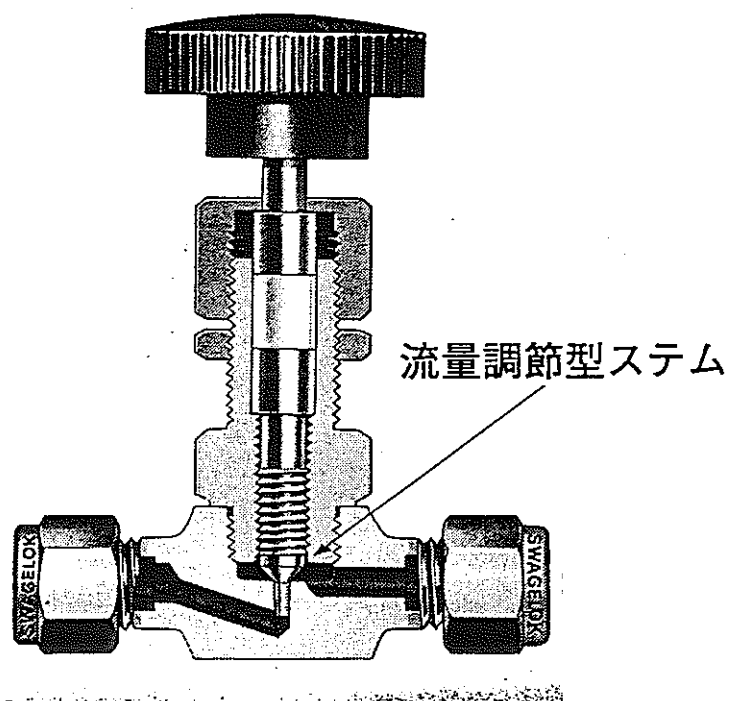
番号18 ニードルバルブNB10SS (東都興業製)

この他に、サイズ1/4"のNB20SS等がある。



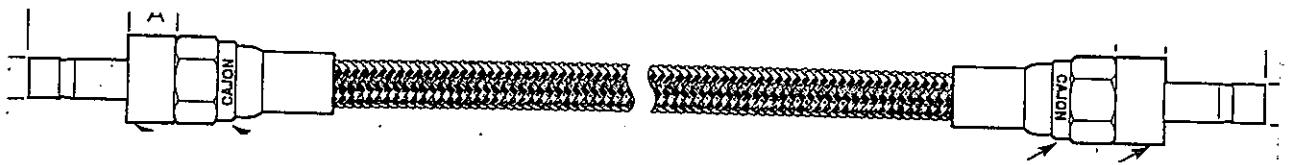
使用流体 : 液体・ガス圧システム, ゲージ, 計器, 試験装置  
接液部材質 : 316 ステンレス鋼又は真鍮, バイトン, テフロン  
使用圧力 : 210kg/cm<sup>2</sup>  
温度範囲 : -29~232℃  
オリフィス径 : 0.51mm  
Cv値 : 0.007

番号 1 9 超微量流量調節バルブ SS-22RS4 (WHITEY 製)



使用流体 : 液体・ガス圧システム, ゲージ, 計器, 試験装置  
接液部材質 : 316 ステンレス鋼又は真鍮  
使用圧力 :  $210\text{kg}/\text{cm}^2$   
温度範囲 :  $-29\sim 232^\circ\text{C}$   
オリフィス径 : 2.4mm  
Cv値 : 0.15

番号20 ネジ込み型流量調節バルブ SS-2RF4 (WHITEY 製)  
この他に、オリフィス 5.1mm 等がある。



使用流体 : 水・油圧, 化学薬品, 冷却システム, 溶剤,  
腐食性ガス・液体, 燃料, 空気圧

材 質 : ホース—純テフロン樹脂  
オーバーブレード—304 ステンレス鋼  
その他の部品—316 ステンレス鋼  
リング—バイトン

ホース内径 : 4.8mm, ホース外径 : 12.7mm

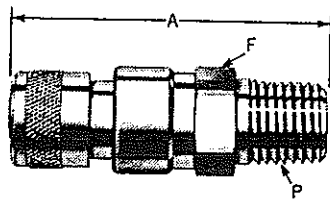
使用圧力 : 液体の場合 ホース呼びサイズ 1/4" 210kg/cm<sup>2</sup>

温度範囲 : -53~232℃

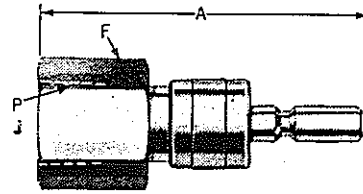
番号 2 1 ステンレス鋼製フレキシブルホース SS-4BHT-12 (CAJON製)

この他に、ホース呼びサイズ 1/2", 1" がある。





MALE NPT



FEMALE NPT

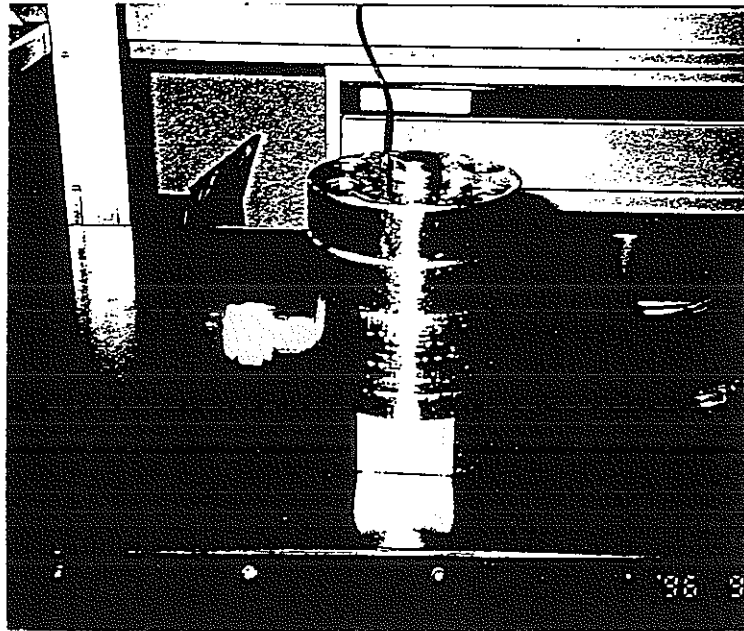
接液部材質 : 316 ステンレス鋼又は真鍮

使用圧力 : 316 ステンレス鋼 20.6MPa, 真鍮 13.7MPa

Cv値 : 0.19

番号22 クイックコネクター-DES0-QC4-4PF (Swagelok製)

この他に、ホース継接口 1/8 等がある。



外径寸法 :  $\phi$  100mm

内径寸法 :  $\phi$  40mm

最大使用圧力 : 600kg/cm<sup>2</sup>

材 質 : SUS630H 又は S55C

番号 2 3 周圧容器 (開発機械学研究室設計, 丸一工業製)