

# ニアフィールド岩盤の 長期安定性評価手法の検討

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2004年2月

東京大学

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下さい。

〒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](mailto: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)  
2004

## ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

大久保誠介\*

## 要 旨

ナチュラルアナログ的アプローチによる岩盤の長期挙動評価手法について概念的な考えを示した。一つの例として、地圧測定結果を利用した長期強度の推定をおこなった。まず、主応力線図(  $\sigma_1$  -  $\sigma_3$  線図)上に、これまでに得られた地圧の測定結果をプロットしてみた。その結果では、一つの例外を除いて、全てのデータは  $\sigma_1 = 4 \sigma_3$  なる直線より下に位置することがわかった。比較的安定な岩盤で計測された地圧であることから、これは長期強度を示す直線であり、これより下の領域は、長期間安定な領域といえる可能性が高い。

幌延地域で採取されたボーリングコアを用いて、三軸圧縮応力状態におけるデータを取得し、周圧(拘束圧)が岩石の長期力学的変形挙動に与える影響について検討した。本研究では、まず三軸圧縮試験をおこなった。試験中に载荷速度を速めたり遅くしたりして、強度破壊点付近の応力の増減の程度から、供試体の粘弾性的性質を把握することを試みた。試験では、著者が独自に開発した可視化ベッセルを用い、新規開発した透明なアクリル製プラテンを使用した。試験中の試験片の変形や破断面の状態、そして、試験片からの水の出入りを観察することができた。さらに、三軸圧縮応力下で多段階クリープ試験をおこなった。試験片の変形と連動する写真撮影システムにより、クリープ破壊直前の観察に成功した。

これらの試験結果より、周圧下でのポアソン比を評価し、コンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求め、長期安定に関する計算を行った。

---

本報告書は、東京大学が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究の成果に関するものである。

機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

\*：東京大学

Investigation on Evaluation Methods for Long-Term Stability of Near-Field Rock Mass  
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Trust Contract)

Seisuke Okubo\*

Abstract

A concept for evaluation methods of long-term behavior of rock mass, based on natural analog approach, is proposed. For an example, long-term strength was estimated from the published data of in-situ rock stress. Data were plotted on  $\sigma_1$  vs.  $\sigma_3$  diagram (major vs. minor principal stress diagram). It was found that all data except one were plotted under the line  $\sigma_1 = 4\sigma_3$ . Data were measured in relatively stable rock mass, then, this line indicates the long-term strength, and the region below this line is considered to indicate stable region for quite long-term.

Sample rock was obtained in Horonobe area. Experimental works were carried out in the triaxial compression stress, and the effects of the confining pressure on long-term deformation or stability of the sample rock were examined.

At first, triaxial compression tests were carried out. In the test, loading rate (strain rate) was changed several times to obtain viscoelastic properties of the sample rock. Newly developed transparent platens made of acrylic acid resin were used together with a transparent triaxial cell recently developed by this author. By virtue of these transparent apparatuses, it was easy to observe gradual deformation of the sample, formation of faults and in/outflow of water from the sample during the tests. Multi-stage creep tests were also performed in triaxial compression stress. By the photographing system cooperated with the loading and measuring apparatuses, it was possible to observe deformation of the sample in the tertiary creep region.

The Poisson's ratio under confining pressure was evaluated, and the parameter set of a constitutive equation of variable compliance type was obtained based on the testing results.

---

This work was performed by The University of Tokyo under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute .

JNC Liaison: Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division,  
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works.

\*: The University of Tokyo

## 目 次

1 . はじめに .....	1
2 . ナチュラルアナログ的アプローチによる岩盤の長期挙動評価方法の提案 .....	2
2 . 1 岩盤の長期挙動評価の検討方法 .....	2
2 . 2 地圧測定結果と長期強度 .....	2
2 . 3 岩盤内構造物の長期安定性 .....	5
2 . 4 まとめ .....	6
3 . 周圧（拘束圧）下でのクリープ挙動の評価 .....	14
3 . 1 試料岩石と試験装置 .....	14
3 . 1 . 1 試料岩石 .....	14
3 . 1 . 2 載荷装置と周圧装置 .....	15
3 . 1 . 3 改良した可視化ベッセル .....	15
3 . 2 周圧（拘束圧）下で載荷速度を交互に切り替えた試験 .....	17
3 . 2 . 1 試験方法 .....	17
3 . 2 . 2 応力 - 歪曲線と破壊基準 .....	17
3 . 2 . 3 可変型コンプライアンスモデルの定数の取得 .....	19
3 . 2 . 4 破壊過程と試験片からの水の出入り .....	21
3 . 3 周圧下での多段階クリープ試験 .....	22
3 . 3 . 1 試験方法 .....	22
3 . 3 . 2 クリープ歪とクリープ歪速度の経時変化 .....	23
3 . 3 . 3 クリープ破壊直前の連続写真 .....	24
4 . 幌延コアによるポアソン比の評価および可変型コンプライアンスモデルへの適用 .....	81
4 . 1 周圧下での横歪の変化 .....	81
4 . 2 幌延コアのポアソン比の評価 .....	82
4 . 3 可変型コンプライアンスモデルへの適用 .....	84
4 . 4 長期安定性に関する試算 .....	84
5 . おわりに .....	94
参考文献 .....	96

## 目 次

図 2 - 1	短期から長期にわたる検証方法の概念図	10
図 2 - 2	主応力線上に描いた Kanagawa et al (1986) の地圧測定例	11
図 2 - 3	主応力線図上に描いた Obara & Sugawara(1997) と Oikawa et al (1997) の地圧測定例	12
図 2 - 4	主応力線図上に描いた Cai (1997) の 4 鉱山における地圧測定例と, Ljunggren & Amadei(1989) の地圧測定例	13
図 2 - 5	主応力線図上に描いた 新ら(1996), Haimson et al(1996), Hayashi et al(1997) の地圧測定例	14
図 2 - 6	地圧の経時変化の概念図	15
図 3 - 1	幌延泥岩のコア	29
図 3 - 2	試験片の写真	30
図 3 - 3	載荷装置	31
図 3 - 4	載荷システムと写真撮影システム	32
図 3 - 5	周圧装置	33
図 3 - 6	改良した可視化ベッセル	34
図 3 - 7	試験片の上下に密着させるプラテン	35
図 3 - 8 (a)	応力-歪曲線 周圧 0MPa	36
図 3 - 8 (b)	応力-歪曲線 周圧 2MPa	37
図 3 - 8 (c)	応力-歪曲線 周圧 4MPa	38
図 3 - 9 (a)	Mohr の応力円と包絡線 直線包絡線	39
図 3 - 9 (b)	Mohr の応力円と包絡線 放物線包絡線	40
図 3 - 1 0	最小主応力と最大主応力の 2 乗との関係と Janach の破壊基準	41
図 3 - 1 1	正規化に際して用いた記号の説明	42
図 3 - 1 2	載荷速度依存性を調べるための強度試験の概念図	43
図 3 - 1 3 (a)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3, 周圧 2 MPa ) 試験開始前	44
図 3 - 1 3 (b)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3, 周圧 2 MPa ) 差歪 0	45
図 3 - 1 3 (c)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3, 周圧 2 MPa ) 差歪 0.003	46
図 3 - 1 3 (d)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3, 周圧 2 MPa ) 差歪 0.005	47
図 3 - 1 3 (e)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3, 周圧 2 MPa ) 差歪 0.008	48

図3 - 1 3 (f)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3 , 周圧 2 MP a ) 差歪 0 . 0 1 1	49
図3 - 1 3 (g)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3 , 周圧 2 MP a ) 差歪 0 . 0 1 5	50
図3 - 1 3 (h)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3 , 周圧 2 MP a ) 差歪 0 . 0 1 8	51
図3 - 1 3 (i)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3 , 周圧 2 MP a ) 差歪 0 . 0 2 3	52
図3 - 1 3 (j)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3 , 周圧 2 MP a ) 差歪 0 . 0 2 8	53
図3 - 1 3 (k)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2__3 , 周圧 2 MP a ) 試験終了後(軸応力と周圧を除荷した後)	54
図3 - 1 4 (a)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 試験開始前	55
図3 - 1 4 (b)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 差歪 0	56
図3 - 1 4 (c)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 差歪 0 . 0 0 3	57
図3 - 1 4 (d)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 差歪 0 . 0 0 5	58
図3 - 1 4 (e)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 差歪 0 . 0 0 8	59
図3 - 1 4 (f)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 差歪 0 . 0 1 1	60
図3 - 1 4 (g)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 差歪 0 . 0 1 5	61
図3 - 1 4 (h)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 差歪 0 . 0 1 9	62
図3 - 1 4 (i)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 差歪 0 . 0 2 4	63
図3 - 1 4 (j)	試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4__2 , 周圧 4 MP a ) 試験終了後(軸応力と周圧を除荷した後)	64
図3 - 1 5 (a)	クリープ歪の経時変化 周圧 0MPa	65
図3 - 1 5 (b)	クリープ歪の経時変化 周圧 2MPa	66
図3 - 1 5 (c)	クリープ歪の経時変化 周圧 4MPa	67

図3 - 1 6 (a)	クリープ歪速度の経時変化 周圧 0MPa	68
図3 - 1 6 (b)	クリープ歪速度の経時変化 周圧 2MPa	69
図3 - 1 6 (c)	クリープ歪速度の経時変化 周圧 4MPa	70
図3 - 1 7 (a)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 試験開始前(周圧載荷後)	71
図3 - 1 7 (b)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後1s, クリープ歪み0	72
図3 - 1 7 (c)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後68s, クリープ歪み0.0014	73
図3 - 1 7 (d)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後823s, クリープ歪み0.0039	74
図3 - 1 7 (e)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後1097s, クリープ歪み0.0045	75
図3 - 1 7 (f)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後1233s, クリープ歪み0.0057	76
図3 - 1 7 (g)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後1236s, クリープ歪み0.011	77
図3 - 1 7 (h)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後1237s, クリープ歪み0.016	78
図3 - 1 7 (i)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後1239s, クリープ歪み0.023	79
図3 - 1 7 (j)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後1241s, クリープ歪み0.027	80
図3 - 1 7 (k)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後1243s, クリープ歪み0.033	81
図3 - 1 7 (l)	試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線 第5段階のクリープ開始後1245s, クリープ歪み0.039	82
図4 - 1	写真と平行な面と破断面の関係	89
図4 - 2 (a)	横歪と縦歪の関係 周圧 2MPa	90
図4 - 2 (b)	横歪と縦歪の関係 周圧 4MPa	91
図4 - 3 (a)	横歪と縦歪/軸歪みの関係 周圧 2MPa	92
図4 - 3 (b)	横歪と縦歪/軸歪みの関係 周圧 4MPa	93
図4 - 4 (a)	一定応力下での縦歪と横歪の経時変化 水平方向地圧 0MPa	94
図4 - 4 (b)	一定応力下での縦歪と横歪の経時変化 水平方向地圧 2MPa	95
図4 - 4 (c)	一定応力下での縦歪と横歪の経時変化 水平方向地圧 4MPa	96



表 目 次

表2 - 1	検討した地圧測定結果	9
表3 - 1	まとめ	18

## 1. はじめに

本研究は、高レベル放射性廃棄物の地層処分システムを考えるにあたり、現実に忠実な評価が必要な、ニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動を適切に評価する手法を検討するものであり、項目にわけると次のようになる。

- (1) ナチュラルアナログ的アプローチによる岩盤の長期挙動評価方法の提案
- (2) 三軸圧縮応力状態(周圧下)でのクリープ挙動の評価
- (3) 幌延コアによるポアソン比の評価および可変型コンプライアンスモデルへの適用

本報告書の最初に、ナチュラルアナログ的アプローチによる岩盤の長期挙動評価手法について概念的な考えを示す。一つの例として、地圧測定結果を利用した長期強度の推定をおこなったので、その結果について述べる。

幌延地域で採取されたボーリングコアを用いて、三軸圧縮応力状態におけるデータを取得し、周圧が岩石の長期力学的変形挙動に与える影響について検討した。三軸圧縮試験では、試験中に載荷速度を速めたり遅くしたりして、強度破壊点付近の応力の増減の程度から、供試体の粘弾性的性質を把握することを試みた。なお、試験では、著者が独自に開発した可視化ベッセルを用いた。さらに、三軸圧縮応力下で多段階クリープ試験をおこない、試験片の変形と連動する写真撮影システムにより、クリープ破壊直前の観察に成功した。これらの結果について、報告書の第3章で述べる。

試験結果より、周圧下でのポアソン比を評価し、コンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求めた結果についても述べる。また、コンプライアンス可変型構成方程式を用いて長期安定性に関する試算をおこなった結果についても述べる。

## 2. ナチュラルアナログ的アプローチによる岩盤の長期挙動評価方法の提案

### 2.1 岩盤の長期挙動評価の検討方法

岩盤の長期挙動を検討するのは容易なことではないが、今後そうとう長期にわたって使用することを前提とした地下構造物が建設されるはずであり、重要さはますます増していくであろう。一つの考えでは、図2-1の概念図に示すように、検討は大きく三段階(手段)に分けられる。一つは従来どおりの実験室実験であり、この手法により1秒程度より10年程度までの時間領域をまかなえる。次の時間領域は、人工物の調査である程度カバーできるのではないかと考えられる。古い人工物の調査にあたっては、初期状態や途中の境界条件など不明な点が多くあると指摘されており、乗り越えなければならぬ点はいくつかあると思われる。得られる情報の確度は、実験室実験に比べて下がるものの、数千年までの時間領域の情報が人工物の調査より得られるはずである。この点に関するもう少し詳しい議論には、今後の検討が必要である。

数千年を超える岩盤挙動を検討するには、自然物を調査する他にないと考えている。対象とする自然現象としては種々考えられるが、その内の一つであり、比較的定量的な扱いがし易い地圧現象をいかに利用するかについて考えてみた。まだまだ概念の提案程度のものであるが、この方面の研究が有望であることはある程度示すつもりである。

### 2.2 地圧測定結果と長期強度

実験結果を外挿した考え方によれば(大久保ら, 1999), 主応力線図上で原点より傾き2~6で引いた直線より下は、安定領域で長期にわたり破壊を起こさない。すなわち、次の直線より下の領域は長期に安定な領域であり、 $\sigma_1(\sigma_3, \tau)$ をその意味で長期強度と呼ぶことにした。

$$\sigma_1(\sigma_3, \infty) = f(\sigma_3) = a \cdot \sigma_3 \quad (2-1)$$

上式中の常数aの範囲2~6は岩石による相違をあらわしており、内部摩擦角 $10^\circ \sim 45^\circ$ に対応している。

しばしば起こることであるが、長期間にわたる現象を議論するときもっとも問題となるのは検証方法である。実験室での実験を長期にわたっておこなうことは不可能である。有

力と考えられるのは、長期の自然現象（地質現象）を利用した検証である。自然現象を活用できれば、実験室での実験よりはるかに長期間にわたる現象を把握できると考える。その方法は種々考えられるが、ここでは地圧の測定結果を利用して、提案した考え方が検証できるかどうかを検討してみることにする。

基本的な考え方は次のごとくである。地殻の変動などはあるが、多くの場合、地圧は安定領域ないしその近傍にプロットされるのではないだろうか。別の言い方をすれば、もしも安定領域でないとしたならば、かなりの時間が経過後破壊してしまい、その影響により応力が低下して安定領域に入るのではないかと考える。なお、発想が逆であるが、田中(1998)は、地圧の測定結果より地殻浅部の破壊の予測を論じている。

図2-2に主応力線図上に描いた地圧測定例を示す(Kanagawa et al, 1986)。測定方法は、ゲージをモルタル埋設してボアホールの変形を3次元的に測定する方式の応力解放法である。この方法では、オーバーコアリング後に、回収したコアを封圧下で試験して、個々の歪測定素子を較正するので測定の信頼性が高い。なお、図中の測定結果は各地点での平均値である。測定地点の岩盤の地質年代は、新生代、中生代、一部は古生代にわたっていることは判明しているが、各測定点の位置などの情報は公開されていない。図よりわかるように、1点を除いて  $\sigma_1/\sigma_3$  は4以下となっている。

より最近の測定結果のいくつかを引き続いて検討してみることにする。以下の測定例で採用されているのは、表2-1に示すように応力解放法、コア法、水圧破碎法である。

Obara & Sugawara(1997)は、応力解放法（円錐孔底歪法）による測定結果を報告している。彼らは、従来の16歪測定素子型と新規開発した24歪測定素子型との結果を比較している。図2-3に示した結果からわかるように、ともに  $\sigma_1/\sigma_3$  は3.5前後である。

Cai(1997)らは、中国内の4つの金属鉱山での地圧測定結果を報告している。その結果をまとめて図2-4に示す。採用した測定方法は、CSIROで開発された応力解放法(hollow inclusion technique)である。Xincheng 鉱山の深さ205~310 mにおける11地点での測定結果において、 $\sigma_1/\sigma_3$  は1.6~2.8の間に分布する。Ekou 鉱山の深さ310 mの地点における4地点での測定結果では、 $\sigma_1/\sigma_3$  は2.2~3.0の間に分布する。Meishan 鉱山の深さ210~420 mにおける8地点での測定結果において、 $\sigma_1/\sigma_3$  は1.8~2.7間に分布する。Jinchuan 鉱山の深さ580~790 mにおける10地点での測定結果において、 $\sigma_1/\sigma_3$  は1.9~3.1の間に分布する。

Oikawa & Matsunaga(1997)は、ボーリングコアを利用した地圧測定法の一つであるDSCA法(Differential Strain Curve Analysis)によって、深さ1477~2191 mの10地点で地圧を測定した。その結果を図2-3に示す。図よりわかるように  $\sigma_1/\sigma_3$  は2.

1以下となる。

新ら(1996)は、中国北京郊外にて、水圧破碎法により水平面内の地圧を測定した。その結果によれば、水平面内の地圧は相対的に節理頻度の多い一部の領域を除いて(密度)×(深さ)より計算される垂直応力の予測値より大きかった。そこで水平面内の2主応力と垂直応力のうち最大値を $\sigma_1$ ,最小値を $\sigma_3$ として測定結果をまとめてみると図2-5に示すようになる。図よりわかるように、ほとんどのデータで比 $\sigma_1/\sigma_3$ が3以下となっている。

水圧破碎法による地圧測定結果を、さらに3例ほど検討してみる。Ljunggren & Amadei(1989)は、バルト盾状地(フィンランド南西部 Lavia)にて測定をおこなったところ、深度500 mで50 MPaという大きな水平地圧を得たと報告している。図2-4に示すようにこの場合、 $\sigma_1 = 50 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3 = 0.026 \text{ MN/m}^3 \times 500 \text{ m} = 13 \text{ MPa}$ とすると、 $\sigma_1/\sigma_3$ は3.8となる。Haimson et al(1996)は、カナダ盾状地(モントリオール北東800 km)の深度220~255 mにて、平均値として水平地圧 $\sigma_H = 17.7 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_h = 11.0 \text{ MPa}$ と、垂直地圧 $\sigma_v = 7.5 \text{ MPa}$ を得た。図2-5に示す様に $\sigma_1 = \sigma_H$ ,  $\sigma_3 = \sigma_v$ とすると、 $\sigma_1/\sigma_3$ は2.4となる。Hayashi et al(1997)は、釜石鉱山の深度520 mで測定をおこない $\sigma_1 = 10.6 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_2 = 8.1 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3 = 6.4 \text{ MPa}$ の結果を得た。図2-5に示す様に、この場合の $\sigma_1/\sigma_3$ は、1.7となる。

以上で取り上げた地圧測定結果に関する限り、1地点を除いて比 $\sigma_1/\sigma_3$ が4以下となった。ここで問題となるのが、測定された地圧がどの位の期間にわたってほぼ一定であったかということである。この点が不明だと、長期強度の適用期間(検証された期間)が明瞭にならない。地圧は少しずつ変動していることは確かであるが、おそらく数万年程度の地質学的観点からすると比較的短期間における変動であり、その値は些少な場合が多いと、考えられる。不明な点が多いが、念頭においている地圧の変化の概念図を図2-6に示す。良く知られているように地殻は少しずつ歪み続けておりその速度の平均値は $10^{-14}/\text{s}$ 程度である(島崎ら,1997)。これは小さい歪速度であるが、単純に積算すると1万年では0.3%,10万年では3%の歪になる。しかしながら、応力の変化は、(歪の変化)×(ヤング率)で計算される値(図中の破線)よりずっと小さくなる可能性が高い。その原因はいくつか考えられるが、その一つとして、岩盤・地殻の応力緩和ないしクリープがある(大久保ら,1998)。また、図2-6の不定期な鋸歯状波で示される、地殻内の弱部(主として断層)の間欠的な滑りによっても、長期的な応力の変化は低減されると考えられる(宇津,1978)。この場合、鋸歯状波の振幅があまり大きいと問題が複雑になるが、これまでに観測

された地震などに伴う歪ステップ(strain step)は  $10^{-7} \sim 10^{-5}$  程度であり(力武, 1981; 浅田, 1980), これから推測すると応力の変化(鋸歯状波の振幅)は小さいことになる。この他にも, クリープと滑りの中間に位置付けられるエピソード的クリープ(episodic creep)が観測される場合もあり, 広い意味での地殻の持つ時間依存性や粘弾性はほとんどの場合, 応力変化を緩慢にする。以上で暫定的な地圧に対する考え方の一端を述べたが, 地圧の評価と解釈に関しては不明な点が多く, 今後検討を進める必要があると考える。

### 2.3 岩盤内構造物の長期安定性

岩盤ないし岩石のクリープは, ある程度の時間が経過すると収束すると考えられてきた。その根拠は, 実験室実験においても現場の変位計測においても, 多くの場合, 長くて数ヶ月すると測定精度以下の変化しか示さなくなることであった。したがって, 設計にあたって念頭におかれるのは, 歪がある値に収束していくようなモデルであった。このようなモデルの代表としてばねと Voigt モデルを直列にしたものがある。最近になって測定精度が向上してくると, わずかずつではあるが歪や変位の増加がいつまでも続くことがわかってきた。例えば, 田下凝灰岩の水中でのクリープでは, ピーク強度の30%という小さなクリープ応力にもかかわらず, 3年経過しても歪が徐々に増加し続けた(大久保, 1997)。歪や変位が長期にわたって変化し続けることを認めると, 長期にわたって使用する予定の構造物の設計にあたってはクリープ変形のできるだけ正確な評価が重要になってくる。最近, 放射性廃棄物の地下処分や大深度地下の利用などが話題となったこともあって, 長期にわたる岩盤の変形挙動が注目されるようになってきたことに呼応するものと考えている。十分長い時間が経過しても破壊に至らない安定領域は, 近似的に  $0 < \sigma_3$  で,

$$\sigma_3 < \sigma_1 < 2 \sim 6 \sigma_3 \quad (2-2)$$

のようにあらわせると仮定した。この考え方が成立するとしたら, この領域はいわば安定領域といえる。ただし, 高い応力レベルでの実験結果を外挿して得たものであり, 何らかの方法で検証する必要がある。

そこで, 比較的長期間大きな変動がなかったと考えられる地点での地圧測定結果を用いて, (2-2)式を検討した。さて, 地圧測定結果は, 1点を除いて次の範囲にプロットできた。

$$\sigma_3 < \sigma_1 < 4 \sigma_3 \quad (2-3)$$

長い間この応力状態で保たれてきた故、これは安定領域に入っているはずである。

(2-3)式の範囲は、(2-2)式の範囲とおおむね一致しているといつてよからう。ただし、限られた数のデータを用いた結論であり、さらに検証に用いた地圧の過去における変遷も不明であり、今後より精細な検討が必要なことはいうまでもない。

深度が浅い場合には、 $\sigma_1 / \sigma_3$ が4以上となる測定例が多数あることは良く知られている(山口, 西松, 1991)。その原因として、地表近辺は鉛直方向の地圧が小さいこと、また比較的変動し易く十分長い時間その状態にあったとは言えない可能性が高いことが考えられる。また、密接な関係があると思われる測定誤差や測定値のばらつきについて述べることにすると、測定値の標準偏差は深さによってさほど変わらないので(Leijon, 1989)、絶対値が小さい浅所の地圧の比  $\sigma_1 / \sigma_3$  は大きくばらつき易く、時によっては負値となる場合があることも見逃せない事実である(Cooling et al, 1988)。さらに、古い応力解放法による測定では、岩盤の異方性が適切に考慮されていない可能性があり、このような場合には Amadei (1984) が指摘したように大きな誤差を生ずる。いずれにしろ不明な点が多いので、応力の絶対値が小さい場合には  $\sigma_1 / \sigma_3$  が4以上でも十分長い間岩盤が耐えられるかどうかの議論は先送りすることにする。設計の立場からすれば、ここで提案した考えは、より安全側(conventional side)となるはずである。言葉を変えれば、今回提案した考えで岩盤内構造物を設計しても長期間の使用に耐えるはずであると考え。当然ながら今後も検討を進め、より合理的で安価な岩盤内構造物の設計・構築に役立つ長期強度を目指す予定である。

## 2.4 まとめ

安定領域に関する暫定的な考えを述べておく。  $t_F = 500$  s を基準としたクーロンの破壊基準を採用した場合、破壊限接近度  $S_R$  は次式で与えられる(西松ら, 1994)。

$$S_R = \frac{1 - a \cdot \sigma_3}{c(500)} \quad (2-4)$$

一方、大久保(1992)の提案した構成方程式の一つでは、岩石の変形速度ないし歪速度は破壊限接近度の  $n$  乗に比例するとした。このような考え方では、破壊限接近度が0になる

と当然のことながら、岩石は変形しなくなる。今回用いた地圧のデータは、 $a = 4$  とするとごく少数の例外を除いて、破壊限接近度が負の値をとる領域に入っている。破壊限接近度が負の領域では、変形は進むがその変形は破壊につながらない可能性がある。すなわち、変形は、クラックの進展などと結び付いており破壊につながるものと、空隙の縮小などと結び付いておりかえって強度の増加につながるもの (healing) とがあると考えられる (Smith & Evans, 1984)。ただし、これらの事項を、実験室実験で検討する手段が確立されているわけではなく、検討は今後の研究に委ねられる。

表 2 - 1 検討した地圧測定結果

文献	測定方法	場所
Kanagawa et al (1986)	応力解放法 (埋設式)	日本 2 3 箇所
Obara & Sugawara(1997)	応力解放法 (円錐孔底歪法)	1 箇所
Cai et al (1997)	応力解放法 (CSIRO)	中国金属鉱山 4 箇所
Oikawa et al (1997)	コア法(DSCA)	ドイツ 1 箇所
新孝一ら(1996)	水圧破砕法	中国 1 箇所
Ljunggren and Amadei(1989)	同上	フィンランド
Haimson et al (1996)	同上	カナダ
Hayashi et al (1997)	同上	釜石鉱山



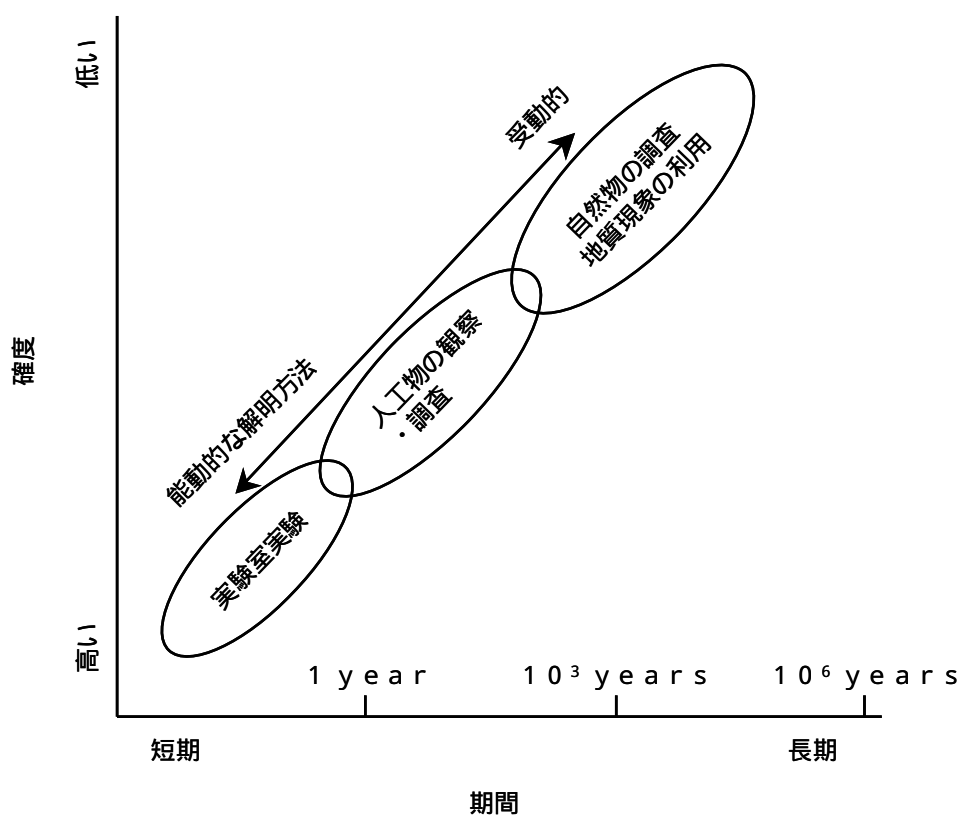


図 2 - 1 短期から長期にわたる検証方法の概念図．短期間の現象の検証は能動的に行えて確度が高いが，長期間になると方法が限られ確度は低くならざるを得ないことを概念的に描いた

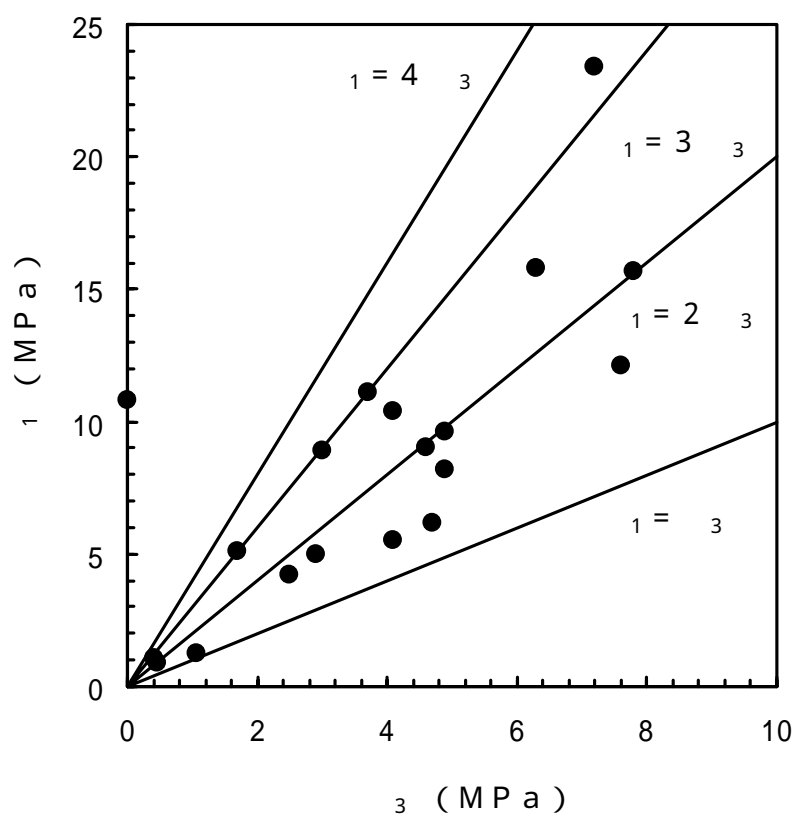


図2 - 2 主応力線図上に描いた Kanagawa et al (1986)の地圧測定例

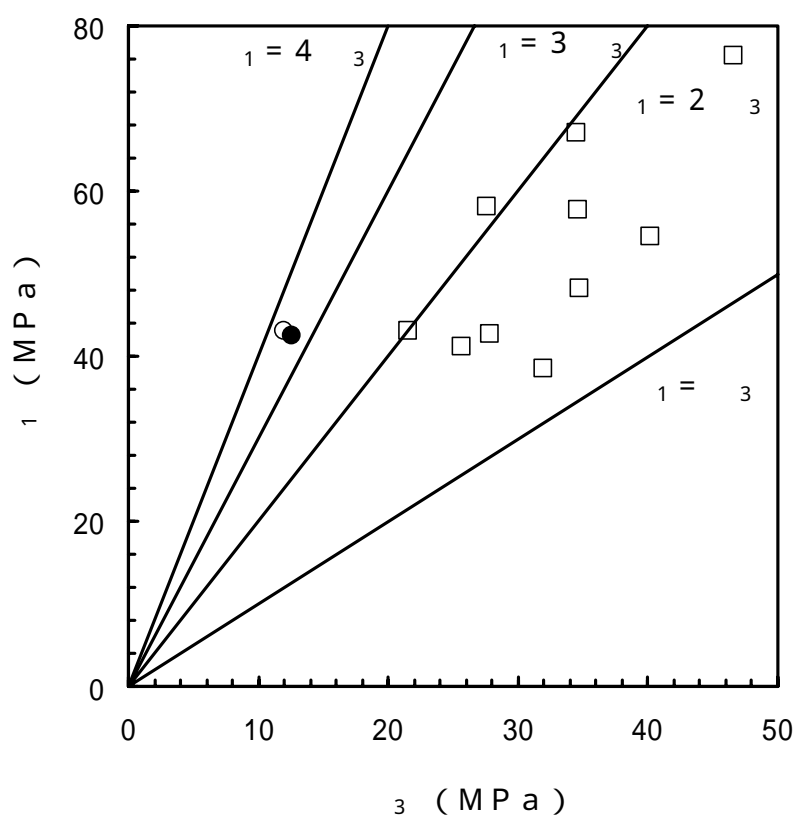


図 2 - 3 主応力線図上に描いた Obara & Sugawara(1997)と Oikawa et al (1997)の地圧測定例

Obara & Sugawara(1997) 1 6 歪測定素子

Obara & Sugawara(1997) 2 4 歪測定素子

Oikawa et al (1997)

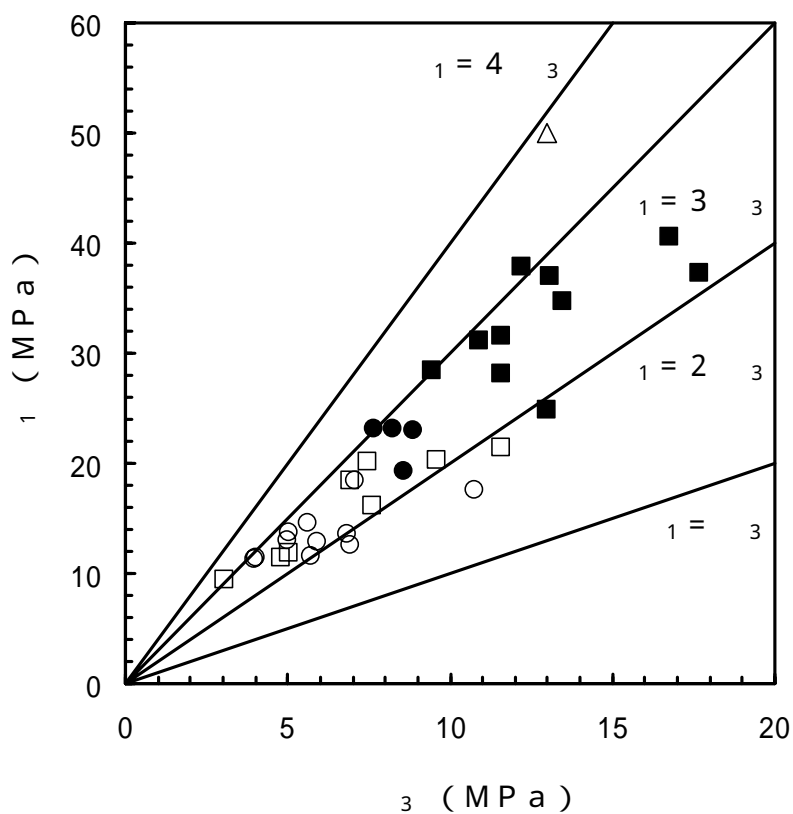


図 2 - 4 主応力線図上に描いた Cai (1997) の 4 鉱山における地圧測定例と ,  
Ljunggren & Amadei (1989) の地圧測定例

Xincheng 鉱山

Ekou 鉱山

Meishan 鉱山

Jinchuan 鉱山

Ljunggren & Amadei (1989)

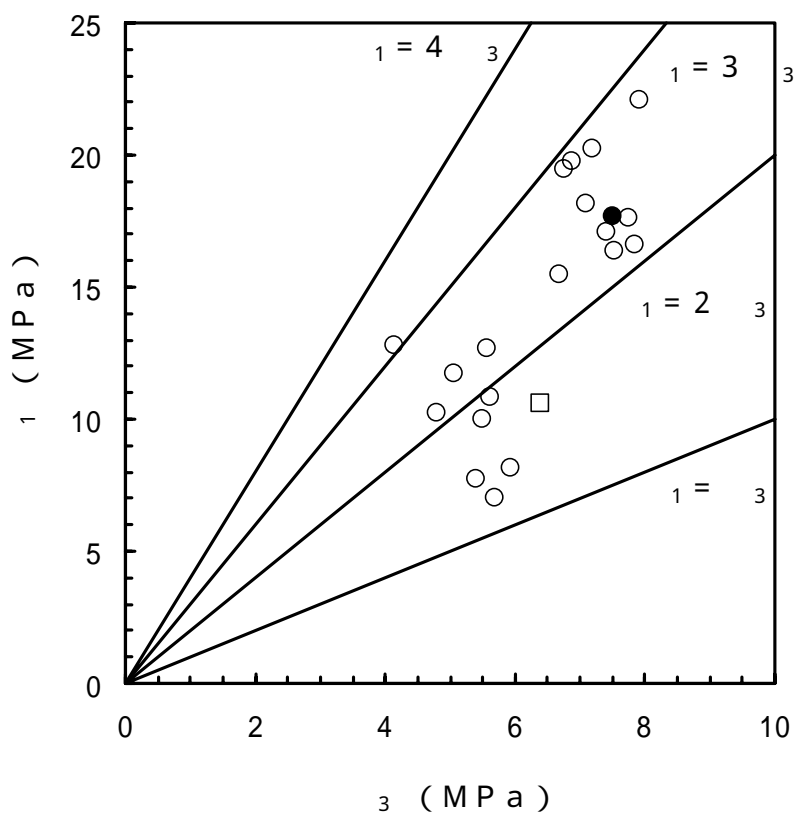


図2 - 5 主応力線図上に描いた新ら(1996) , Haimson et al(1996) , Hayashi et al(1997)の地圧測定例

新ら(1996)

Haimson et al(1996)

Hayashi et al(1997)

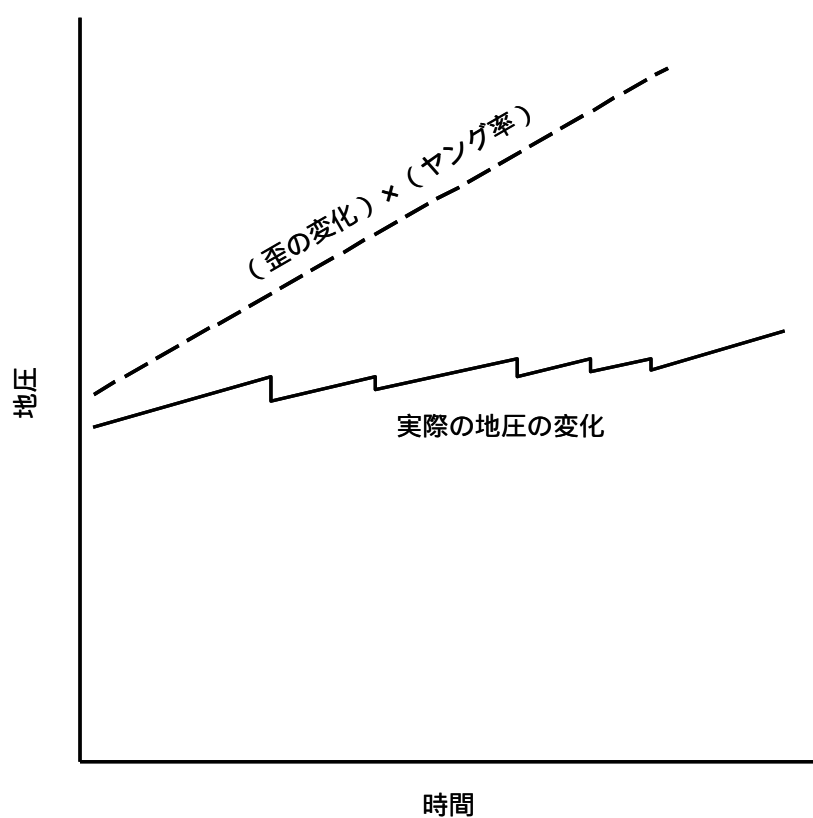


図 2 - 6 地圧の経時変化の概念図. 破線は (歪の変化) と (ヤング率) の積 .  
地圧変化は , 応力緩和や断層の滑り等により実線のように小さくなる

### 3. 周圧（拘束圧）下でのクリープ挙動の評価

#### 3.1 試料岩石と試験装置

##### 3.1.1 試料岩石

試料岩石として北海道天塩郡幌延町産の泥岩を用いた。2003年11月7日に本研究室に到着した直径約80 mmのコア(HDB-3)の写真を図3-1に示す。コアは3本あり、採取した深度はそれぞれ407.12~407.77 m, 407.77~408 m, 428.3~428.85 mである。いずれのコアも全体が湿っており、肉眼で多数のクラックが確認できた。

試験片は次のような手順で作成した。

コアを長さ約190 mmにカットした後、木箱に入れ、セメントモルタルで固める  
ボーリングの後、カッタで切断する

平面研削盤にて研磨を行う

乾燥を防ぐためラップで覆った後、真空パックで包み、水中で保存する。

試験片の寸法は直径25 mm, 高さ50 mmとし、端面の平行度は1/100 mm以内に仕上げた。試験の際には、図3-2(a)のように試験片の上下に同径の鋼製プラテンを密着させ、試験片とプラテンを透明な熱収縮性チューブで覆った。その後、チューブと鋼製プラテンの間に接着剤を流し込み、2時間ほど硬化を待った。硬化を待つ間にも試験片が乾燥するおそれがあるので、図3-2(b)のように水をしみこませた脱脂綿で試験片全体を包み保管した。試験をおこなう直前に脱脂綿をはずし、試験に用いた。

なお昨年度は一軸圧縮試験では試験片をラップで包んだが、試験片表面からの水の蒸発を防ぐため、図3-2(c)のように熱収縮性チューブの上下端部だけを熱で収縮させ、接着剤でチューブとプラテンを接着した。その結果、試験終了後も試験片表面は湿ったままであった。なお、試験片とチューブの間には空間があり、試験片はチューブの拘束の影響を受けない。

### 3.1.2 载荷装置と周圧装置

载荷には容量500 kNのサーボ試験機を用いた。写真を図3-3に、概略図を図3-4に示す。荷重の測定には、容量200 kNのロードセル(NTS社製, LRX 20T)を用いた。その出力は直流増幅器(ユニパルス社製, AM30)を経て, A/D変換器(デitel製, DPC 113 16A)に送られる。変位の測定は, シリンダ上部に設置された差動変圧器で行った。その出力も増幅器を経て, A/D変換器に送られる。A/D変換器は16 bitの分解能で, 1チャンネルあたりの変換時間は48  $\mu$ sである。フィードバック信号はD/A変換器(CONTEC製, DA16-2D(98))を経て, サーボ弁に送られる。D/A変換器も16 bitの分解能で, 変換時間は6  $\mu$ sである。A/D変換器, D/A変換器はパソコン(NEC製, PC 9801VX)に組み込んである。直流増幅器にはXYレコーダ(横河電機製)およびデジタルマルチメータ(アドバンテスト製)が接続されている。

周圧は, 図3-5に示す最大圧力35 MPaの周圧発生装置より加えた。周圧の測定には圧力変換器を用い, その出力は直流増幅器を経て, A/D変換器に送られる。フィードバック信号はD/A変換器を経て, 電磁比例圧力制御弁に送られる。周圧の値は, 直流増幅器に接続されたデジタルマルチメータで知ることができる。

写真撮影には, 画素数266万のデジタルカメラ(Nikon製, D1)を用いた。写真撮影システムは図3-4のように载荷システムに付け加える形で組み込んだ。写真撮影システムでは, 差動変圧器の出力が増幅器, 分解能16 bitのA/D変換器を経て, パソコンに送られる。パソコンでは, 変位が一定量増加する毎に写真の撮影ができるように, リレー出力ボードからカメラへ出力信号が送られる。

### 3.1.3 改良した可視化ベッセル

周圧ベッセルとして昨年度用いた可視化ベッセル(2003年3月報告書 JNC TJ8400 2002-062を参照されたい)を改良し, 使用した。改良した可視化ベッセルの概略図と写真を図3-6に示す。アクリル製厚肉円筒の高さを従来よりも20 mm高くし, 試験片の上下に密着させる鋼製プラテンの高さをそれぞれ10 mmずつ高くすることで, 試験片全体を観察できるようにした。従来は試験片の下部だけに設置していた位置決め用のピンを上部にも設置することで, 試験片の位置決めとベッセルの組み立てを容易にした。また, 油圧入力ポートの位置を従来よりも高くすることで, 周圧の制御に影響を与える空気を抜き



易くした。ピストンと2つのOリングとの間の摩擦力を測定したところ、たかだか60 N以内であり、今回の試験では軸応力の補正はおこなわなかった。

アクリルの引張強度は75 MPaであり、従来の可視化ベッセルは約55 MPaの周圧で破壊した。そのため安全率を5として周圧10 MPa以下で使用してきた。改良した可視化ベッセルではアクリル製円筒の高さを20 mm高くしているため、ベッセルの強度が低下するおそれがあると考えられる。そこで、新品のアクリル製円筒を用いてベッセルの破壊試験をおこなった。試験では、岩石試験片を入れた可視化ベッセルを試験機上に置き、ピストンを固定した上で、油圧入力ポートから手動ポンプで周圧を加えた。2つのアクリル製円筒を用いて破壊試験をおこなった結果、1つは周圧37.7 MPaで、もう1つは周圧41.6 MPaで破壊が起こり、従来のベッセルよりも15 MPa程度の強度の低下が見られた。破壊の際は油が勢いよく噴出したが、アクリルの破片などの飛散は見られなかった。そこで改良した可視化ベッセルでも安全率を5とし、周圧8 MPa以下で使用することにした。

ベッセルの組み立ておよび試験の手順は次のとおりであるが、従来の可視化ベッセルや通常の金属製ベッセルとほとんど変わらない。

下の金属板を適当な組み立て台にのせる。

熱収縮性チューブで覆った試験片を下の金属板にのせ、ピンで位置決めをする。

アクリル製円筒を下の金属板にのせた後、油を注ぎ込む。

押し棒を付けた金属板をアクリル製円筒にのせた後、6本のボルトを締める。

組み立てたベッセルを試験機にのせ、変位の零点を調節する。

ベッセル内の空気抜きのため、一旦0.5 MPa程度まで加圧後、油を抜く。この操作で、気泡は油とともに逆流してベッセルから排出される。

周圧を設定値まで増加させ安定した後、軸方向に载荷をおこなう。

排水状態で試験を行うため、昨年度と同様に、上下の鋼製プラテンには図3-7(a)のように直径3 mm、深さ1.1 mmの穴を5個設けた。今年度は、試験途中で試験片からの水の出入りを観察するため、図3-7(b)に示したアクリル製のプラテンを試作し、試験に用いた。アクリル製プラテンにも排水用の穴を3個もしくは1個設けた。なお、測定によるとアクリルの剛性は26 MN/mであり、幌延泥岩の剛性8.8 MN/mの3倍程度しかないため、アクリルの変形が試験結果に影響を与えられた。そこで、以下の試験結果でアクリル製プラテンを用いた場合は、変位の補正をおこなった。ただし、クリープ試験ではアクリルの変形の影響が大きいと考え、鋼製プラテンしか用いていない。

### 3.2 周圧（拘束圧）下で載荷速度を交互に切り替えた試験

#### 3.2.1 試験方法

試験条件を以下に示す．

環境 : 常温下，排水状態

周圧 : 0, 2, 4 MPa

歪速度 :  $3 \times 10^{-6}$  と  $30 \times 10^{-6}$  / s で切換

切換間隔 : 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎

1本の試験片で，上記の切替間隔ごとに，2種類の載荷速度を交互に切り替えた．試験では，周圧0 MPaでも可視化ベッセルを用いたが，ベッセル内に油を入れずに試験を行った．試験片番号と用いたプラテンの種類は表3-1に示した．

#### 3.2.2 応力 - 歪曲線と破壊基準

試験で得られた応力 - 歪曲線を図3-8に示す．図では，応力，歪とも周圧を加えた後の値を差し引いた差応力と差歪で示した．

図3-8(a)に示した周圧0 MPaでの試験のうち，試験片0\_1と0\_3，また，0\_2と0\_4ではそれぞれ似た傾向がみられた．前者の2本では，試験開始から応力が約3 MPaに達するまでは，グラフはほぼ直線的であり，その後，直線からずれ始める．2本とも強度は3.5 MPa程度であるが，強度破壊点付近ではかなり延性的な性質を示し，応力がほぼ一定のまま，歪が0.003程度増加している．その後，1.5 MPa程度の応力の急激な低下がみられ，残留強度は約2 MPaであった．後者の2本では，強度はそれぞれ約4 MPaと約5 MPaと違いがあるが，2本ともグラフは強度破壊点までほぼ直線的である．脆性的な破壊が起こった後，応力が急激に低下している．試験片0\_4では破壊が何段階かにわたっており，最終的な残留強度は約2 MPaと0\_1や0\_3とほぼ等しい値であった．0\_2の残留強度は他の試験片よりも若干小さく約1 MPaであった．

一軸圧縮強度の平均値は昨年度用いたコアの約50%であった．この原因として，まず，昨年度のコアが今年度よりも約100 m深い地点で採取された点があげられる．また，昨年度は試験片をラップで包み試験に用いたが，今年度は熱収縮性チューブで試験片を密封した．試験終了後の試験片は，昨年度よりも今年度の方が湿っており，乾燥状態の違いも強度が低下した原因の一つと考えられる．

図3 - 8 ( b )に示した周圧2 MPaでも、応力 - 歪曲線の形状は2種類に分けられた。まず試験片2\_3と2\_4では、試験開始から強度の約80%まではグラフはほぼ直線であるが、その後、上に凸の曲線を描き破壊に至っている。破壊は比較的延性的であり、強度破壊点以降徐々に応力が減少している。残留強度は試験片2\_3では約9 MPa、2\_4では約11 MPaであった。一方、試験片2\_1と2\_2はほぼ同じぐらいの強度であり、強度破壊点まではほぼ直線的に応力が増加している。その後、応力の低下がみられ、残留強度は2\_3とほぼ等しい約9 MPaであった。

図3 - 8 ( c )のように周圧4 MPaで得られた応力 - 歪曲線は、4本とも似た形状を示している。いずれの試験片でも強度の50%程度まではグラフはほぼ直線的であるが、その後上に凸の曲線となり破壊に至っている。試験前の観察により、比較的大きなクラックが観察された試験片4\_2では、強度が他の3本よりも5 MPa程度小さかった。強度破壊点に達した後、試験片4\_2では約2 MPa、その他の試験片では約5 MPaの応力の低下があり、4本の試験片とも1.2 ~ 1.4 MPaの残留強度を示している。

周圧0および2 MPaでは、破壊が延性的な試験片と脆性的な試験片の2種類に分けられたが、表3 - 1で示したようにプラテンの種類とは無関係であった。また、周圧0 MPaでは脆性的な試験片の方が強度が大きく、周圧2 MPaでは逆に延性的な試験片の方が強度が大きかった。

図3 - 9にMohrの応力円を示す。個々の試験結果を用いて描いた円を細線で、各周圧下での平均値を用いて描いた円を太線で示した。図3 - 9 ( a )には次式で表される直線包絡線も示した。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3 - 1)$$

ただし、 $\sigma_c$  はせん断応力、 $\sigma_n$  はせん断面に垂直な応力、 $c$  は粘着力、 $\phi$  は内部摩擦角である。なお図には、 $c = 1.2$  (MPa)、 $\tan \phi = 0.7$ としたときの直線を示した。細線および太線の円を見ると、周圧4 MPaまでは直線に接する円もあり、直線包絡線が適用できる可能性がある。

一方、放物線包絡線は次式で表される。

$$\tau^2 = \mu \sigma_t \left( \sigma_t + \sigma_c \right) \quad (3 - 2)$$

ただし、 $\sigma_t$ は一軸引張強度、 $\mu$ は定数である。図3 - 9 ( b )には  $\sigma_t = 0.05$  (MPa)

a),  $\mu = 100$ としたときの曲線を示した太線の円に着目してみると、いずれの円も(2)式で表される曲線にほぼ接しており、周圧4 MPa以下では放物線包絡線の適用も可能である。

図3-10には強度破壊点での最小主応力と最大主応力の2乗との関係を示した。図には次式で表されるJanachの破壊基準も示した。

$$\sigma_1^2 = \sigma_c^2 (1 + \sigma_3 / \sigma_t) \quad (3-3)$$

ただし、 $\sigma_1$ と $\sigma_3$ は最大および最小主応力、 $\sigma_c$ は一軸圧縮強度である。周圧が大きくなるに従いばらつきが大きくなっているが、試験結果は直線で表されるJanachの破壊基準のまわりに分布している。なお、図3-10の直線から求めた $\sigma_t$ は0.2 (MPa)であり、放物線包絡線からもとめた値0.05 (MPa)の4倍であった。

今回の結果では周圧4 MPa以下に関しては、直線包絡線、放物線包絡線、Janachのいずれの破壊基準でも適用が可能であることがわかった。どの破壊基準が最も適しているかの判断には引張試験などのデータが必要であり、今後の検討課題としたい。

### 3.2.3 可変型コンプライアンスモデルの定数の取得

大久保ら(1987)は次式であらわされるコンプライアンス可変型構成方程式を提案した(詳細は2003年3月報告書JNC TJ8400 2002-062を参照されたい)。

$$\frac{d^*}{dt^*} = \left( \frac{d^*}{dt^*} \right)^m \left( \frac{d^*}{dt^*} \right)^n \quad (3-4)$$

ここで、 $d^* = d / d_0$ は初期コンプライアンス $d_0$ で正規化したコンプライアンス、 $t^*$ は破壊限接近度である。 $t^*$ は正規化した時間で次式にて表される。

$$t^* = \frac{\left\{ m / (n + 1) \right\}^{m / (n - m + 1)}}{t_0} t \quad (3-5)$$

$t_0$ は定歪速度試験を行ったとき、図3-11で歪が $\epsilon_A$ に達するまでの所要時間で、載荷速度 $C = 1 / t_0$ に反比例する。 $m$ は延性の程度を決めるパラメータ、 $n$ は時間依存性の

程度を決めるパラメータである。(3-4)式によると一軸圧縮強度  $\sigma_c$  は荷重速度の  $1/(n+1)$  乗に比例するが、これは多くの岩石で得られている試験結果と矛盾しない(大久保ら, 1987)。

$$\sigma_c = C^{1/(n+1)} \quad (3-6)$$

強度の荷重速度依存性を調べる方法は種々あるが、今回は図3-12に模式的に描くように試験途中で歪があらかじめ定めた値だけ増加するごとに、歪速度を交互に変化させ、それぞれの歪速度で描く応力-歪曲線をなめらかに繋いだ。こうしてもとめた2本の曲線を、近似的にそれぞれの歪速度で得られた応力-歪曲線とみなしてデータ整理をおこなった(大久保ら, 2002)。なお、この試験方法は、Okubo et al. (1990) が10年ほど前に提案した方法を改良したものである。Okubo et al. (1990) が提案した方法では、強度破壊点の直前に歪速度を増加し、その時の応力の増加から荷重速度依存性を推定するが、この方法の実施にあたっては、歪速度を増加するタイミングの選定に工夫を要するなど、実験者がかなり試験方法に習熟している必要があった。一方、本研究で採用した試験方法では、歪速度の増減を機械的に行うだけでよく、実験技術の難易度は大幅に低下する。

図3-8から得られた、歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  $30 \times 10^{-6}$  / s での強度の推定値、強度の増加率、(3-6)式中の  $n$  を表3-1に示した。昨年度の一軸圧縮試験では、強度破壊点不明瞭な試験片が何本もあり、強度破壊点の特定が困難であったが、今年度は一軸応力下でおこなった4本の試験片とも強度破壊点不明瞭であった。この理由のひとつとして、今回は試験開始から試験終了まで試験片の湿潤状態がほぼ一定に保たれた点が考えられる。周圧の増加とともに強度の増加率が低下しており、他の岩石や幌延泥岩での昨年度の試験結果と同じ傾向を示している。周圧0 MPaでの  $n$  の平均値は3.9であり、昨年度の値3.0に近い値であった。周圧2 MPaでは  $n$  は5.8と一軸応力下よりも増加している。周圧0および2 MPaでは  $n$  の値と使用したプラテンの間には相関がみられなかったが、周圧4 MPaではアクリル製プラテンを用いたほうが  $n$  の値が大きかった。鋼製プラテンを用いた場合の  $n$  は5.7であり、周圧2 MPaと4 MPaでは幌延泥岩の  $n$  の値はほとんど変化していない。今年度の結果は昨年度の結果と近い値であり、やや軟質の堆積岩としては平均的な値であった。

$m$  は強度破壊点以降の応力-歪曲線の傾きから求められる(大久保ら, 1997)。表3-1には各試験片の  $m$  を示した。周圧0 MPaでの  $m$  は2.8、周圧2 MPaでは1.9、周圧4 MPaでは2.4と、周圧の変化による一定の傾向はみられず、いずれの周圧下でも2.5

程度であり、昨年度の結果30と近い値であった。他の岩石の結果から得られている「 $m$ の値は周圧によって大幅には変化しない」という経験則が、幌延泥岩でもあてはまると考えられる。

### 3.2.4 破壊過程と試験片からの水の出入り

昨年度の試験では試験終了後に、鋼製プラテンの穴に試験片からしみ出た水がたまっている様子が観察された。試験片からの水の出入りを調べることは非常に重要であり、試験片の応力状態や破断面の形状と、しみ出る水の量やその分布との関係を調べることは、岩盤と地下水との関係を評価する上で役立つと考えられる。そこで本研究では、試験片の上下に密着させるプラテンをアクリルで試作し、試験をおこなった。

図3-7(b)に試作したアクリル製プラテンの写真を示すが、今回は2種類のプラテンを作成した。1つはプラテンの中心に直径5 mm、深さ8 mmの穴を設けたもので、もう1つは直径4 mm、深さ8 mmの穴を3つ設けたものである。試験開始までの手順は鋼製プラテンの場合とほとんど同じである

一軸圧縮応力下での試験でアクリル製プラテンでの排水は観察されなかった。熱収縮性チューブと試験片を密着させていないため、試験片表面から水が排水されたと考えられる。

排水の様子が観察された試験片2\_\_3(周圧2 MPa)および試験片4\_\_2(4 MPa)の、試験途中の連続写真の一部と応力-歪曲線をそれぞれ図3-13と図3-14に示す。ここで示した周圧2 MPaでの試験では穴が3つのアクリル製プラテンを、周圧4 MPaでは穴が1つのものを用いた。

図3-13(a)に示すように、ベッセル内の試験片、アクリル製プラテン、そして、プラテンに設けた穴がはっきりと見える。プラテンの穴は、左右の穴が手前、中央の穴が奥に配置されている。試験開始前は穴には水はなく、熱収縮性チューブと試験片の間に若干のすきまがあり、しわができています。図3-13(b)で示した差歪0の写真では、周圧が載荷されたためチューブと試験片が密着している。また、プラテンの穴に水がたまっているのが観察でき、下部よりも上部からの排水が多いのがわかる。また、3つの穴に均等に排水されるのではなく、上のプラテンでは中央の穴に、下のプラテンでは右の穴に多く排水されている。その後、図3-13(g)の差歪0.015まで、軸応力が増加するに従い穴の中の水の量も増加しているが、図3-13(b)と同様に上部プラテンでは中央の穴での、下部プラテンでは右の穴での排水量が多い。強度破壊点付近の図3-13(h)で試験片の左上部にき裂が観察され、その後、図3-13(j)までそのき裂が進展して

いく様子が観察されるが、その間、穴にたまった水は徐々に減少していく。図3 - 13 ( j ) では、下部プラテンでは依然として右の穴の水が若干多いが、上部プラテンでは3つの穴の水の量がほぼ等しくなっている。軸応力と周圧を除荷した後の図3 - 13 ( k ) では、上部の中央の穴にしか水がたまっていない。

周圧4 MPaでは、試験前には水がたまっていなかった穴が、周圧をかけることによって上下の穴とも半分以上水に満たされている。軸応力の増加とともに試験片から水が排水されるが、上下でほぼ同じぐらいの量ずつ排水されている。図3 - 14 ( e ) で上下の穴ともほぼ水で満たされ、図3 - 14 ( f ) では穴にたまった水の中には気泡は見られない。強度破壊点に相当する図3 - 14 ( g ) では試験片の左側面にき裂ができ、下の穴にたまった水の中に気泡の存在が確認できる。その後、き裂は進展していき、下の穴の気泡も徐々に大きくなっている。軸応力と周圧を除荷すると、上下の穴とも水が減少し、試験片とチューブとの間の光沢のある部分に水の存在が確認できる。

アクリル製プラテンを用いることで、試験途中の試験片からの水の出入りの観察に成功した。いずれの周圧下でも試験開始前は排水は見られないが、周圧を加えることにより、試験片からかなりの水が排水される。その後、軸応力の増加とともに穴にたまる水の量は増加していく。強度破壊点付近で破断面が形成されると水は若干減少し、き裂の進展とともに徐々に水は試験片へと戻っていく。軸応力と周圧を除荷することにより、排水された水の大部分が試験片へと戻るため、試験終了後に取り出したプラテンで観察される水はごく少量である。また、穴を3つ設けたプラテンを使用した結果、水は均等に排水されるのではないことがわかった。この現象は興味深いので、今後も試験および検討を続けていく予定である。

### 3.3 周圧下での多段階クリープ試験

#### 3.3.1 試験方法

試験条件を以下に示す。

環境 : 常温下, 排水状態

周圧 : 0, 2, 4 MPa

クリープ応力: 強度の約20, 40, 60, 80, 100%で段階的に増加

それぞれの応力レベルで1時間ずつ

(強度として表3 - 1に示した歪速度 $30 \times 10^{-6} / s$ での強度の平均

値を用いた)

試験では、まず、第一段階のクリープ応力に達するまで一定応力速度  $0.05 \text{ MPa/s}$  で載荷を行った。各段階のクリープ試験が終了し、次の段階に移る際も、一定応力速度  $0.05 \text{ MPa/s}$  で載荷を行った。強度試験と同様に、周圧  $0 \text{ MPa}$  でも可視化ベッセルを用いたが、ベッセル内に油を入れずに試験を行った。なお、すべての試験片で鋼製プラテンを用いた。

### 3.3.2 クリープ歪とクリープ歪速度の経時変化

各周圧下での代表的な試験片での、クリープ歪の経時変化を図3-15に示す。図ではクリープの各段階に達した後1sの時点をもととしてある。

図3-15(a)で示した周圧  $0 \text{ MPa}$  では、応力レベル21%の第1段階では歪はほぼ直線的に増加し、約1時間で  $2.3 \times 10^{-4}$  程度のクリープ歪が生じている。第2段階から第4段階までは、クリープ開始後約100s間は若干上に凸の曲線を描いており、いずれの段階でも約100s間で  $2.3 \times 10^{-4}$  程度のクリープ歪が生じている。それ以降はいずれの段階でもほぼ直線的に歪が増加しているが、第4、第3、第2段階の順に傾きが大きく、第4段階ではクリープ開始から約1時間で  $4.8 \times 10^{-4}$  程度のクリープ歪が生じている。応力レベル105%の第5段階ではクリープ開始後約100s間は上に凸の曲線をえがき、その後は逆に下に凸となり破壊に至っている。

図3-15(b)で示した周圧  $2 \text{ MPa}$  では、第1、第2、第3、第4と段階を経るごとに、グラフは上方にきており、第1から第3段階まではグラフはほぼ直線的であり、第4段階では若干下に凸の曲線を描きながら歪が増加している。約1時間で生じたクリープ歪は第1段階では約  $7.0 \times 10^{-4}$ 、第4段階では  $17.6 \times 10^{-4}$  と、周圧  $0 \text{ MPa}$  の同じ段階でのクリープ歪の3~4倍であった。応力レベル98%の第5段階では、クリープ開始直後から下に凸の曲線をえがき、クリープ歪  $0.006$  程度で破壊に至っている。

図3-15(c)で示した周圧  $4 \text{ MPa}$  では、第1段階と第2段階ではグラフはほぼ直線であり、対数クリープ則にはほぼ従っている。一方、第3段階と第4段階ではグラフは若干下に凸の曲線を描いている。約1時間経過後のクリープ歪は、第1段階では約  $9.3 \times 10^{-4}$ 、第4段階では  $36.7 \times 10^{-4}$  と、周圧  $0 \text{ MPa}$  の同じ段階でのクリープ歪の4~8倍程度であった。周圧  $4 \text{ MPa}$  の第5段階の挙動は周圧  $2 \text{ MPa}$  の第5段階と非常に似ており、クリープ開始直後から下に凸の曲線をえがき、クリープ歪  $0.006$  程度で破壊に至っている。周圧  $2$  および  $4 \text{ MPa}$  では、第1段階のクリープ変形は他の段階が



ら類推される変形よりも若干大きかったが、これは昨年度の結果とほぼ同じ傾向を示している。原因として、負荷履歴や排水が影響した可能性がある。

図3 - 16には図3 - 15で示した試験片の、クリープ歪速度の経時変化を示す。図3 - 16 (a)で示した周圧0 MPaでは、第1段階から第4段階までは似たような傾向を示しており、グラフの傾きが急になったり緩やかになったりしながら、歪速度が減少している。また、第1、第2、第3、第4と段階を経るごとに、グラフは右上へとシフトしている。第5段階ではクリープ開始から約1000 s後まではグラフはほぼ直線的であり、歪速度が最小値約 $1.8 \times 10^{-7} / s$ をとった後増加に転じ、破壊が生じている。

図3 - 16 (b)で示した周圧2 MPaでも周圧0 MPaと似たような傾向を示しており、第1段階から第4段階まではグラフは若干波うっている。しかし、周圧0 MPaほど顕著ではなく、直線で近似することも可能である。また、第1、第2、第3、第4と段階を経るごとに、グラフの傾きは少し緩やかになっている。第5段階ではクリープ開始から約500 s後まではグラフはほぼ直線的であり、歪速度が最小値約 $1.5 \times 10^{-6} / s$ をとった後増加に転じ、破壊が生じている。歪速度の最小値は周圧0 MPaでの値の約10倍であった。

図3 - 16 (c)で示した周圧4 MPaでは第1段階から第4段階まではグラフは若干上に凸の曲線を描いており、応力レベルの増加とともにグラフが上方にきている。第5段階でも、クリープ開始から歪速度が最小値をとるまでは、グラフは上に凸であり、歪速度が最小値をとった後、破壊に至っている。歪速度の最小値は約 $3.5 \times 10^{-6} / s$ と周圧0 MPaでの値の20倍程度であった。

### 3.3.3 クリープ破壊直前の連続写真

図3 - 4に示したようなシステムにより、試験開始からクリープ破壊が生じるまでの試験片の写真撮影に成功した。

図3 - 17には図3 - 15 (b)および図3 - 16 (b)で示した試験片の、試験途中の連続写真の一部とクリープ歪曲線を示す。図に示したクリープ歪曲線は、応力レベル98%の第5段階のものである。図3 - 17 (a)は周圧を加えた後の写真、図3 - 17 (b)は第1段階から第4段階までのクリープを経て、第5段階のクリープ開始後1 sの時点での写真である。第5段階開始までに生じた歪は約0.013と比較的大きいが、写真ではほとんど変化は見られない。その後、クリープ変形が徐々に進行し、1097 s後には $4.5 \times 10^{-3}$ のクリープ歪が生じているが、試験片にはそれほど変わった様子は見られない。

しかし、その36 s後の図3 - 17 ( f )で示した写真では、試験片の左上から右下へと伸びる明瞭な破断面が生じている。それ以降はその破断面に沿って試験片の上部と下部がずれ、横方向へ張り出していっている。最終的には、図3 - 17 ( 1 )に示すようにチューブに大きなしわができるほど変形したが、チューブは破れておらず、試験片内には油は浸入していなかった。破断面の形成後、試験片の左右の側面付近が徐々に光沢をおびてくるが、この部分には水がたまっていると思われる。つまり、大きな変形により試験片とチューブとの間に隙間ができ、そこに試験片内部の水が入り込んだと考えられる。

図3 - 15で示したように、幌延泥岩ではいずれの周圧下でも、破壊直前のクリープ歪曲線の屈曲が顕著であった。すなわち、3次クリープ開始から最終的な破壊までの時間が短く、破壊が脆性的であった。図3 - 17によると、3次クリープの開始とともに明瞭な破断面が生じており、破断面の形成に、潜在的に存在している堆積層などの弱面が大きく影響している可能性がある。

表 3 - 1 試験条件と試験結果

試験片 番号	周圧 (MPa)	プラテン	推定した強度 (MPa)		強度の 増加率(%)	n	m	m/n
			歪速度 $3 \times 10^{-6}$ /s	歪速度 $30 \times 10^{-6}$ /s				
0_1	0	アクリル	3.7	3.9	5.4	43	25	0.58
0_2	0	アクリル	5.0	5.3	6.0	39	35	0.91
0_3	0	鋼	3.6	3.9	8.3	28	15	0.54
0_4	0	鋼	4.2	4.4	4.8	48	35	0.72
周圧 0 MPaの平均値			4.1	4.4	6.1	39	28	0.69
2_1	2	アクリル	11.7	12.2	4.3	54	25	0.46
2_2	2	アクリル	11.1	11.6	4.5	51	15	0.29
2_3	2	アクリル	14.7	15.2	3.4	68	25	0.37
2_4	2	鋼	12.5	13.0	4.0	58	10	0.17
周圧 2 MPaの平均値			12.5	13.0	4.0	58	19	0.32
4_1	4	アクリル	18.9	19.4	2.6	87	30	0.34
4_2	4	アクリル	14.2	14.6	2.8	82	20	0.24
4_3	4	鋼	17.7	18.4	4.0	58	20	0.34
4_4	4	鋼	19.5	20.3	4.1	56	25	0.44
周圧 4 MPaの平均値			17.6	18.2	3.4	71	24	0.34



( a ) 深度 4 0 7 . 1 2 ~ 4 0 7 . 7 7 m



( b ) 深度 4 0 7 . 7 7 ~ 4 0 8 m



( c ) 深度 4 2 8 . 3 ~ 4 2 8 . 8 5 m

図 3 - 1 幌延泥岩のコア



( a ) 熱収縮性チューブで覆った  
三軸圧縮試験用の試験片



( b ) 水をしみこませた脱脂綿で  
包んだ試験片



( c ) 熱収縮性チューブで覆った  
一軸圧縮試験用の試験片

図 3 - 2 試験片の写真

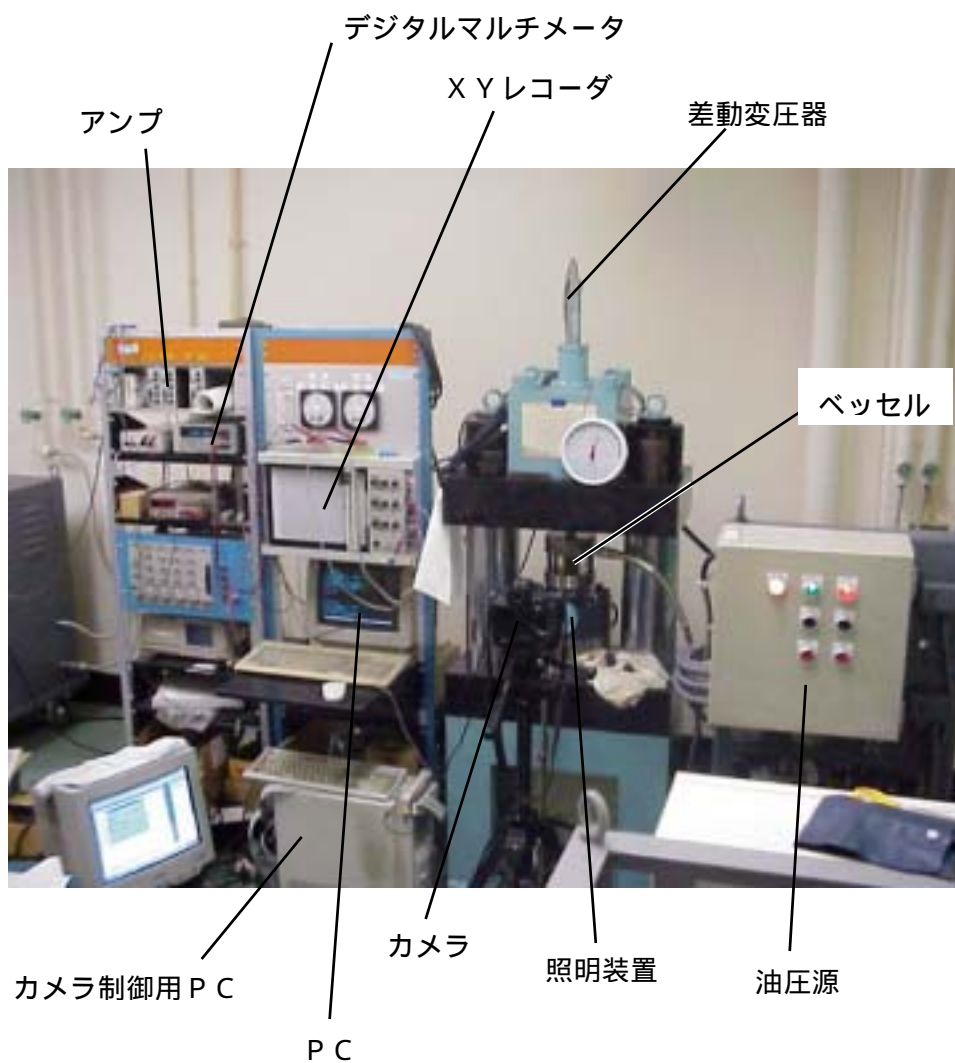


図3 - 3 載荷装置

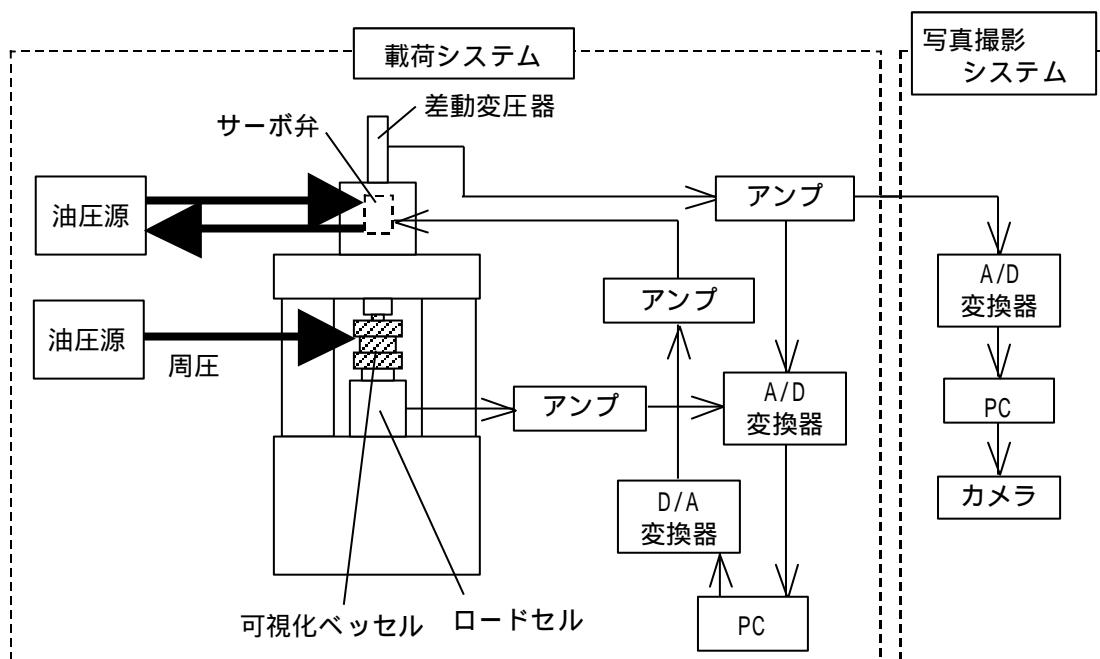
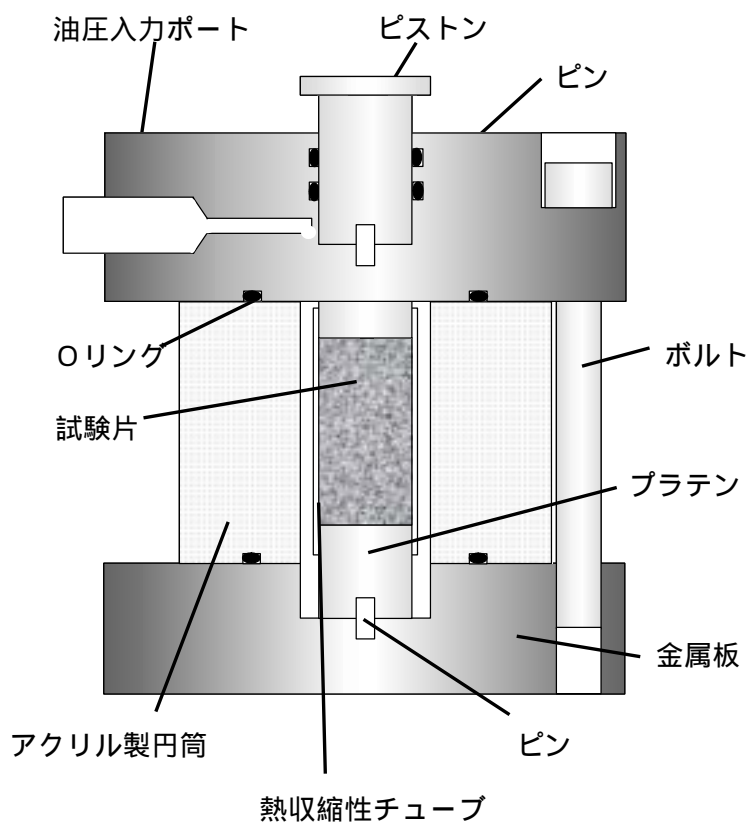


図3 - 4 载荷システムと写真撮影システム



図3 - 5 周圧装置





( a ) 概略図



( b ) 写真

図 3 - 6 改良した可視化ベッセル

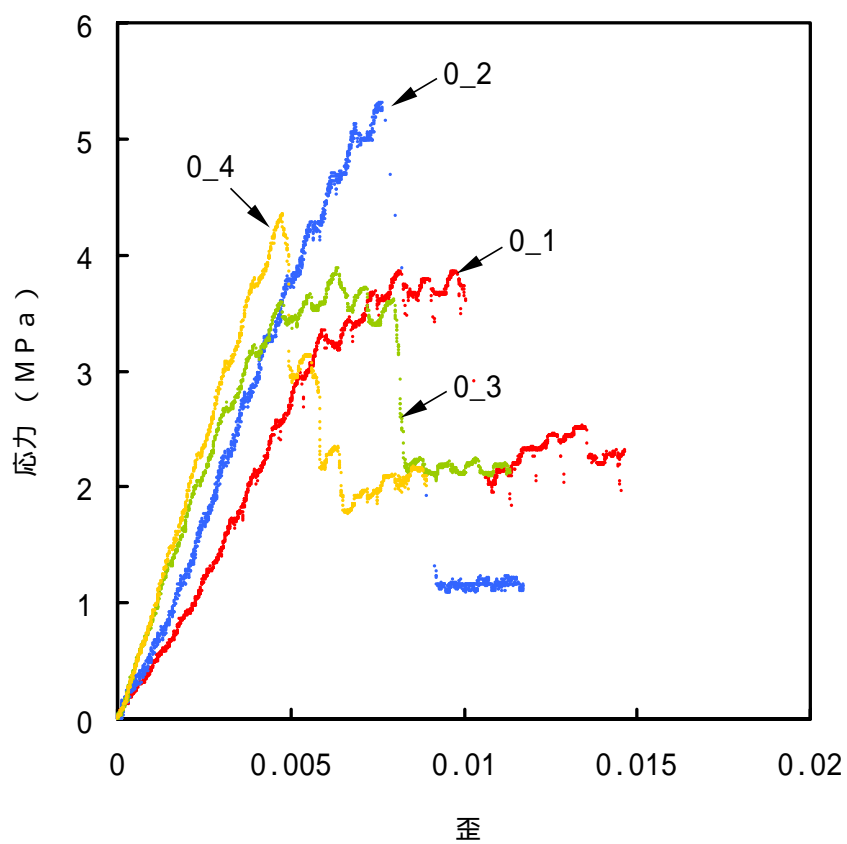


( a ) 鋼製プラテン



( b ) アクリル製プラテン

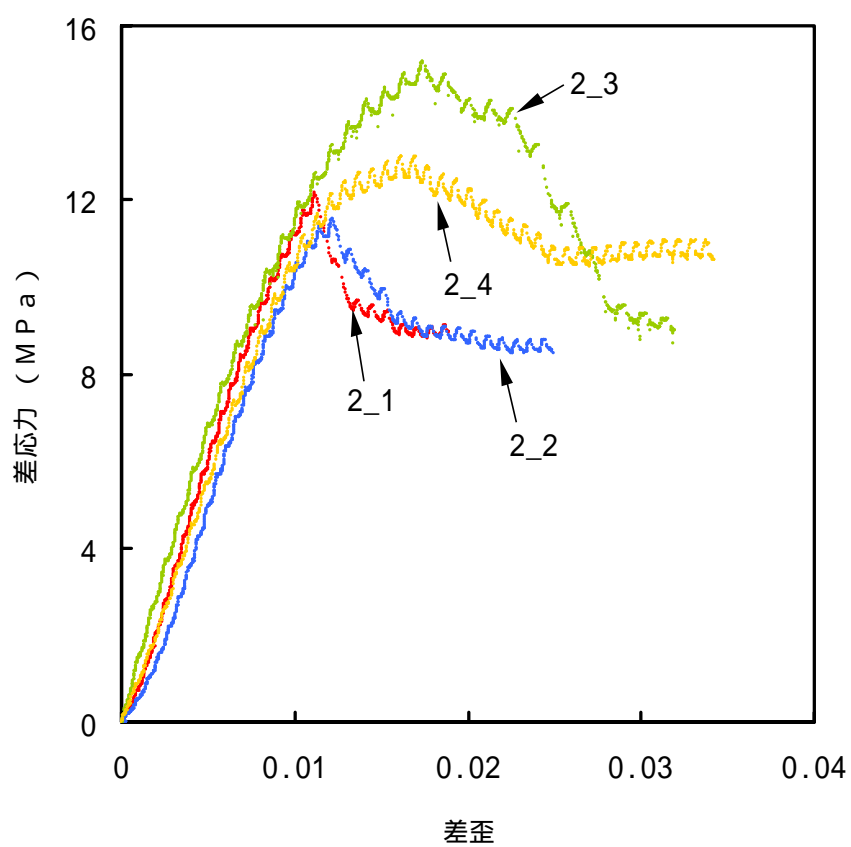
図 3 - 7 試験片の上下に密着させるプラテン



( a ) 周圧 0 MP a

図 3 - 8 応力 - 歪曲線

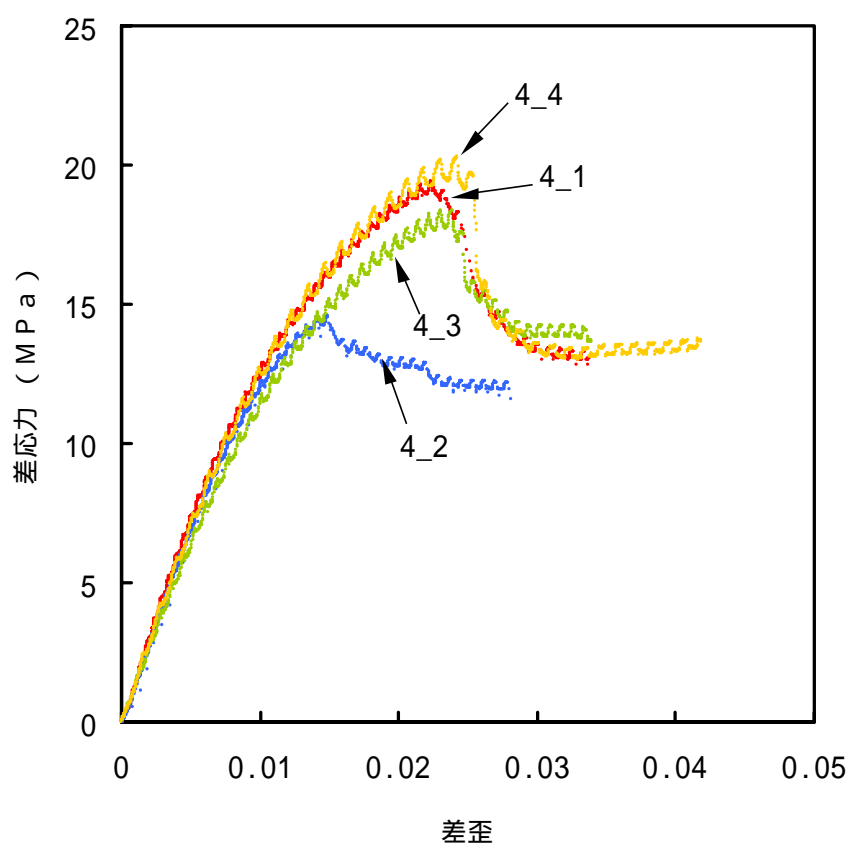
歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  $30 \times 10^{-6} / s$  で切替



(b) 周圧 2 MP a

図3 - 8 応力 - 歪曲線

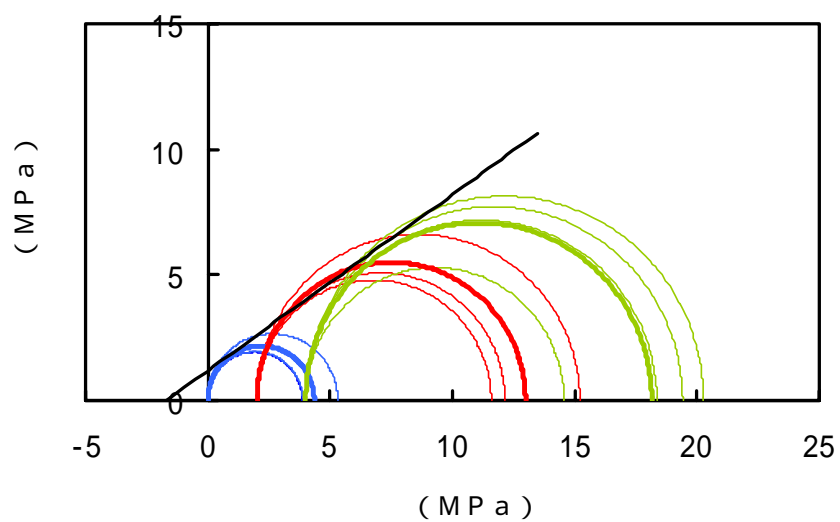
歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  $30 \times 10^{-6} / s$  で切替



(c) 周圧 4 MPa

図3 - 8 応力 - 歪曲線

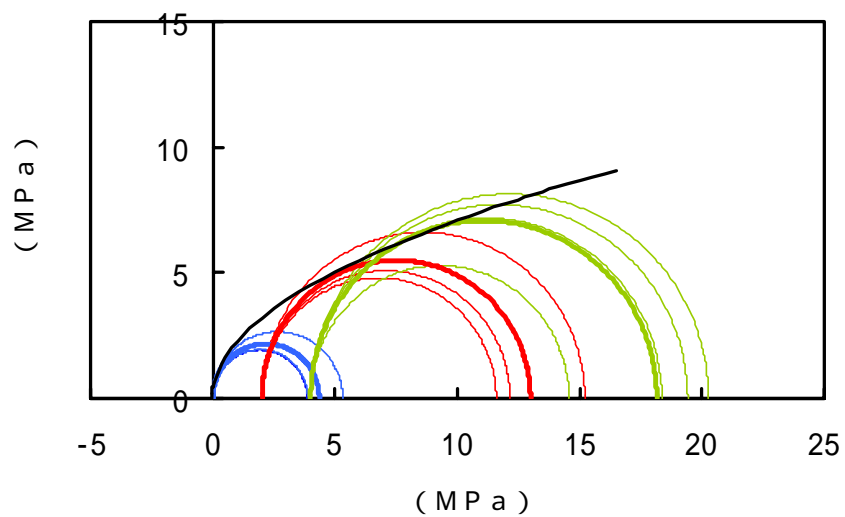
歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  $30 \times 10^{-6} / s$  で切替



( a ) 直線包絡線

図 3 - 9 Mohr の応力円と包絡線

細線はすべての試験結果で太線は各周圧での平均



( b ) 放物線包絡線

図 3 - 9 Mohr の応力円と包絡線

細線はすべての試験結果で太線は各周圧での平均

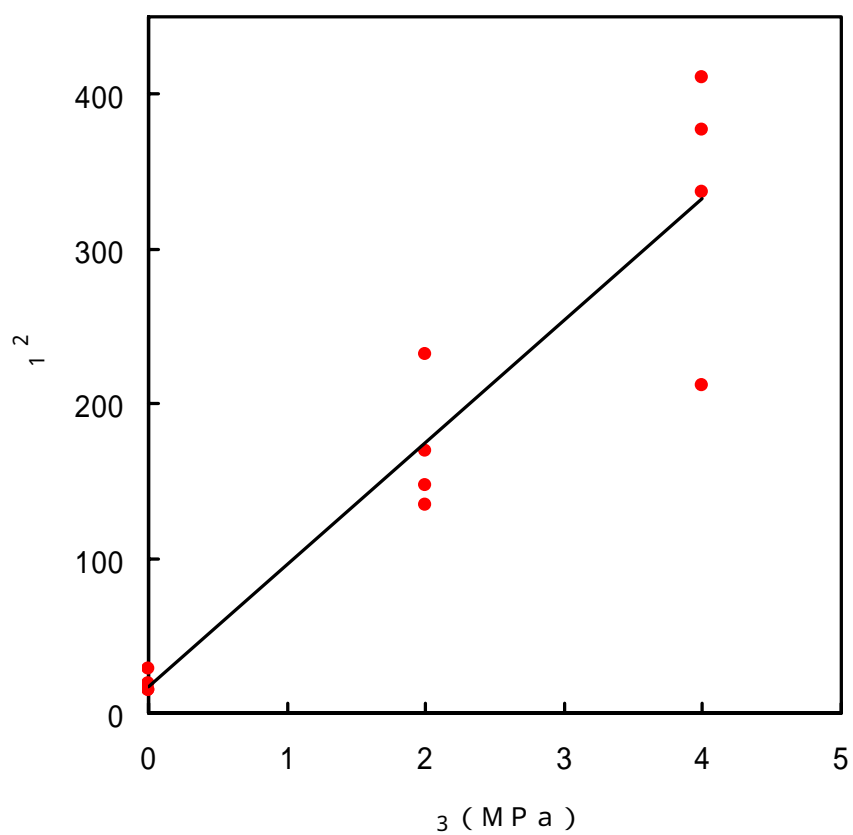


図3 - 10 最小主応力と最大主応力の2乗との関係とJanachの破壊基準



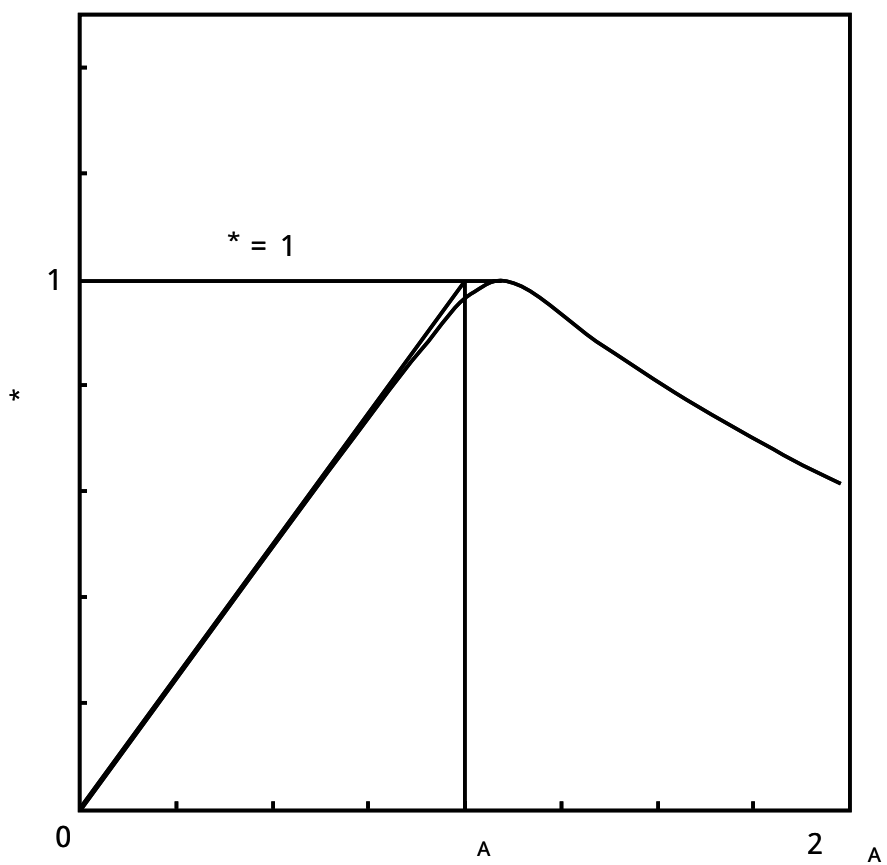


図3 - 1 1 正規化に際して用いた記号の説明

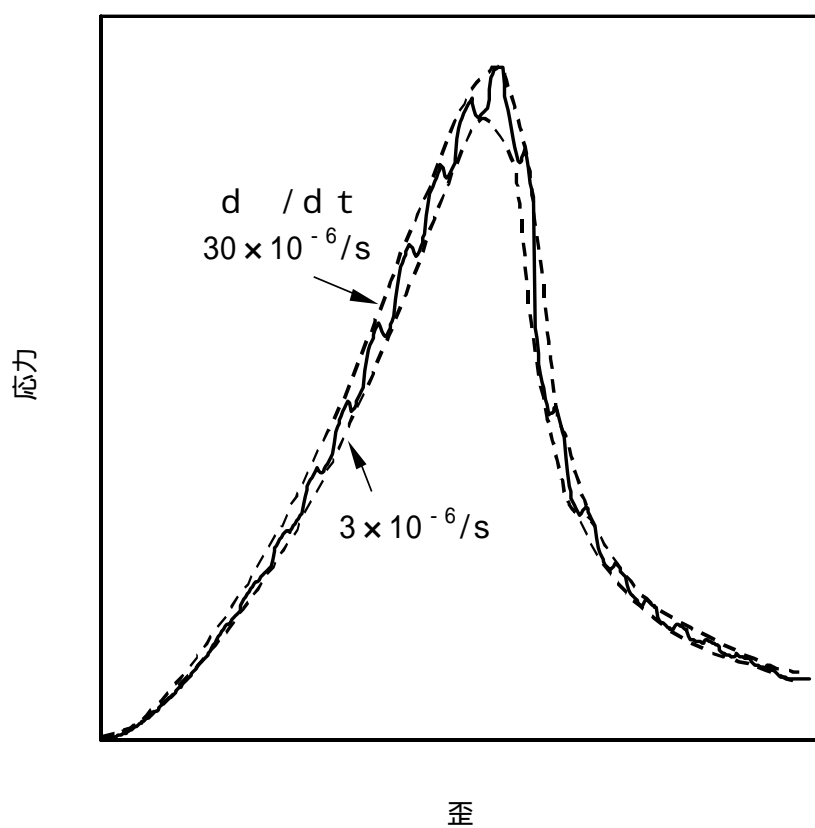
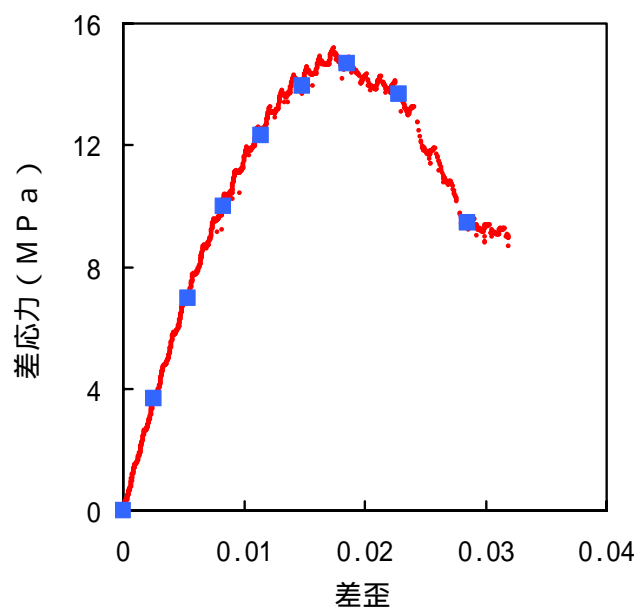
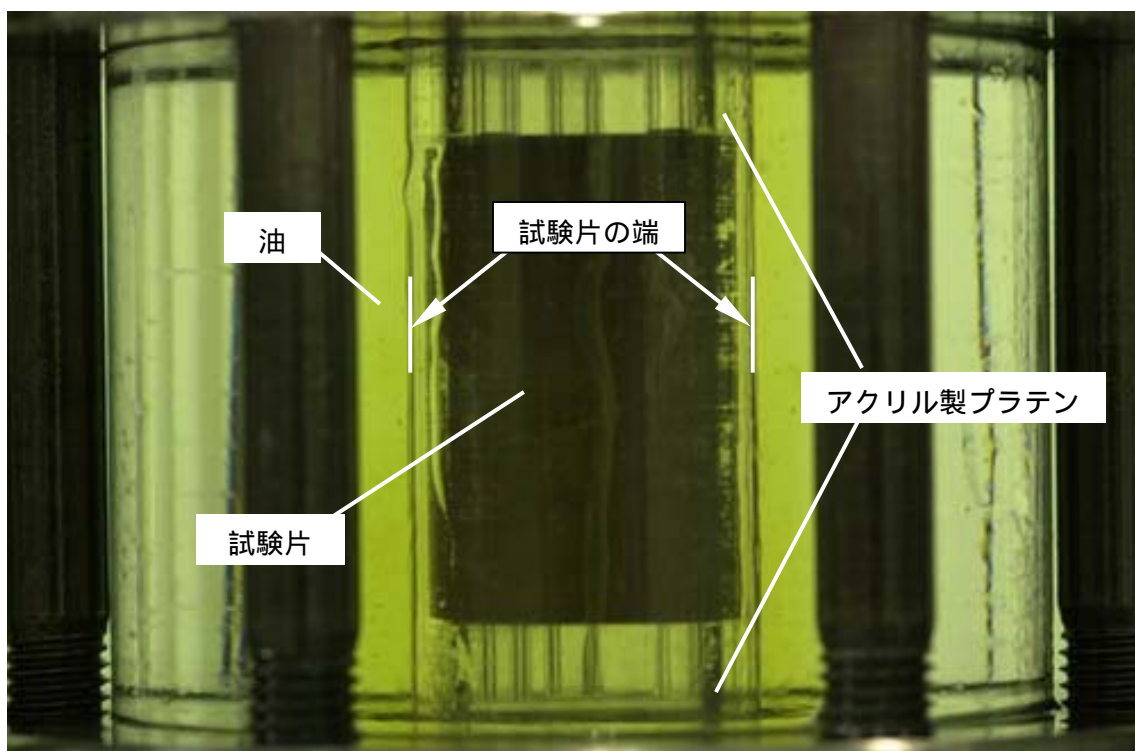
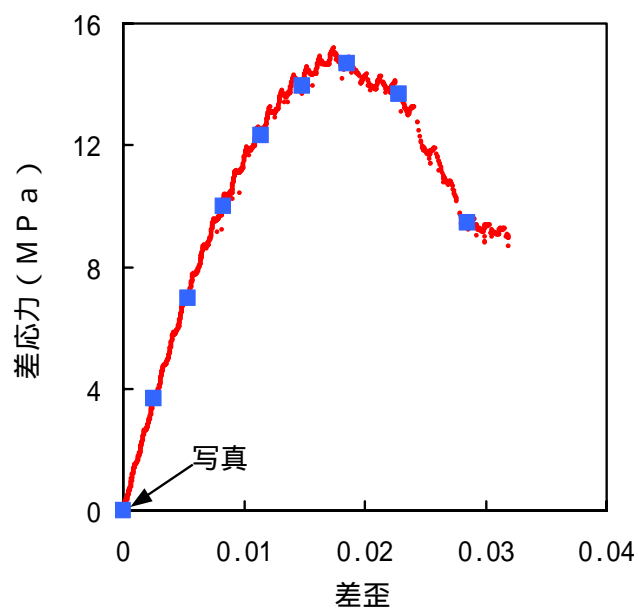
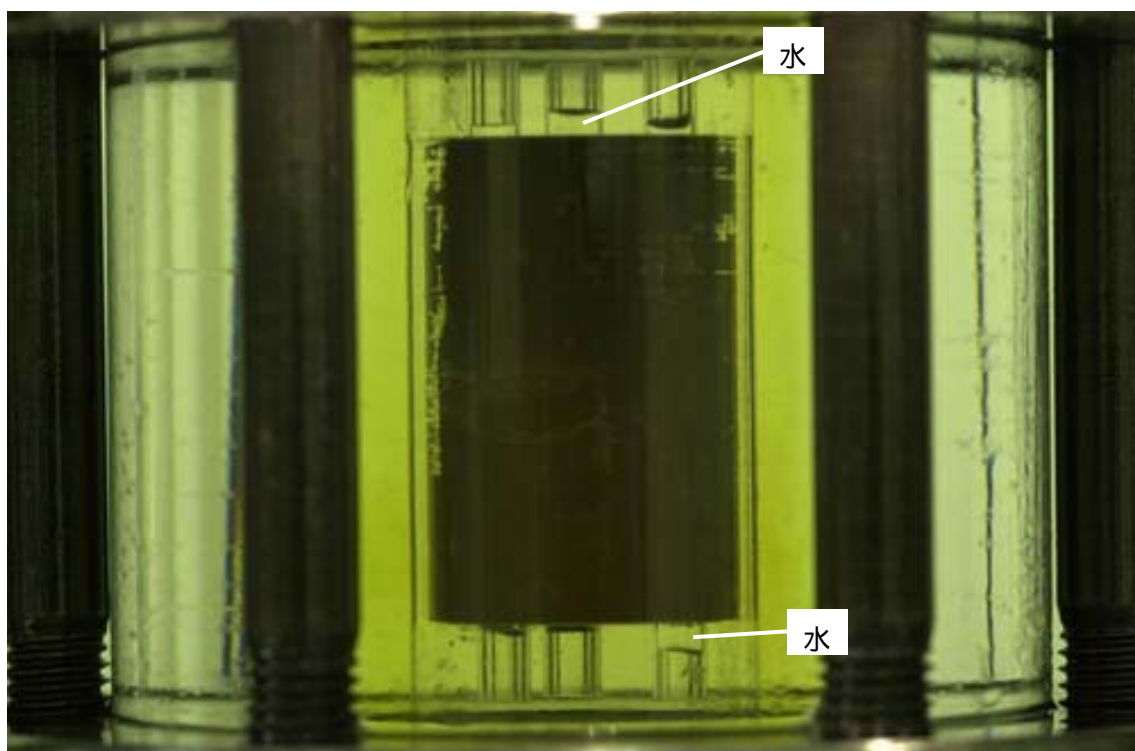


図3 - 1 2 载荷速度依存性を調べるための強度試験の概念図



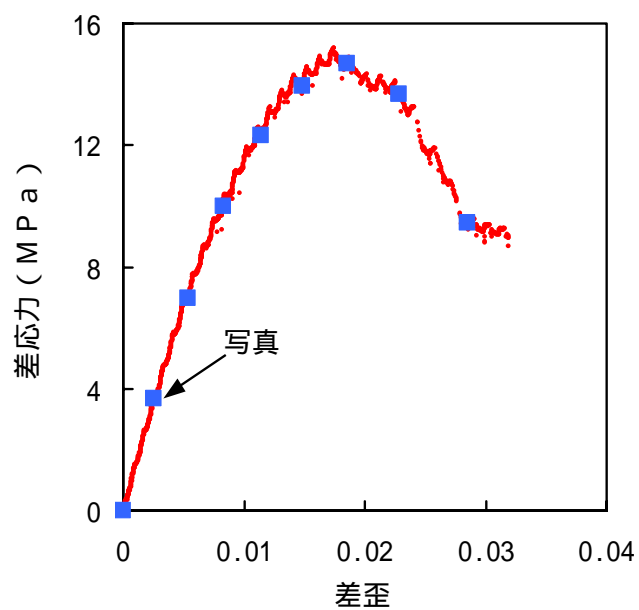
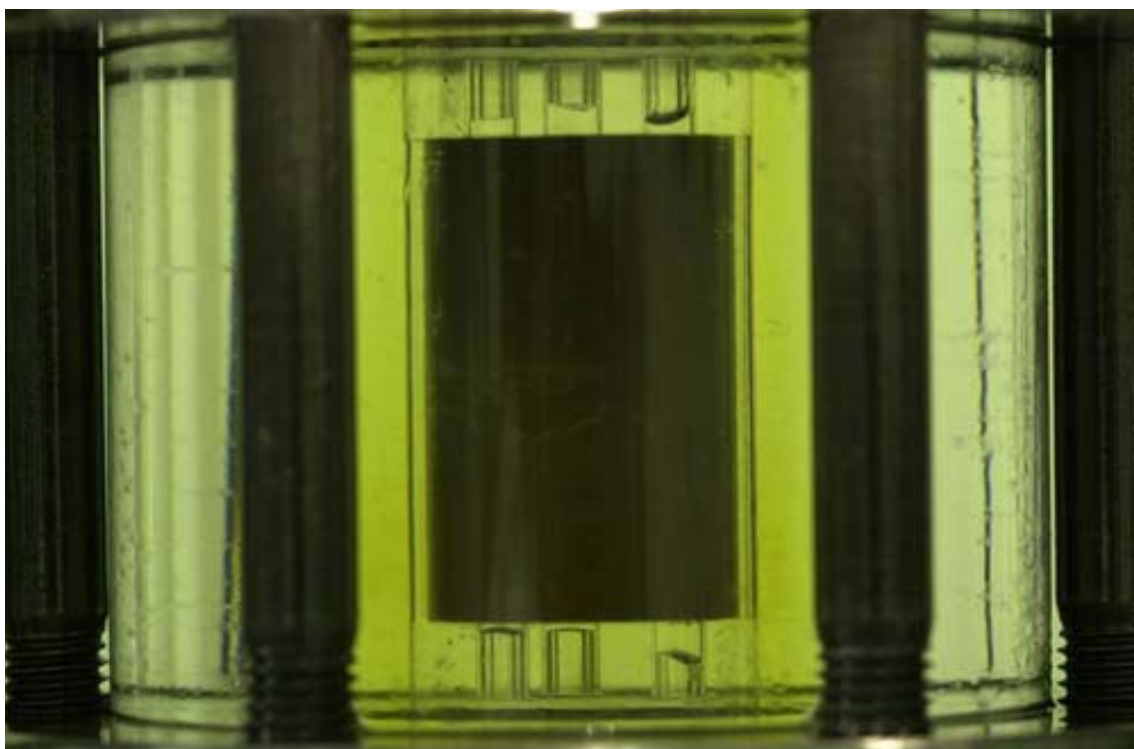
( a ) 試験開始前

図 3 - 1 3 試験片の写真と応力 - 歪曲線 ( 試験片 2 \_ 3 , 周圧 2 M P a )  
 歪が  $4 0 0 \times 1 0^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 1 0^{-6}$  と  
 $3 0 \times 1 0^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



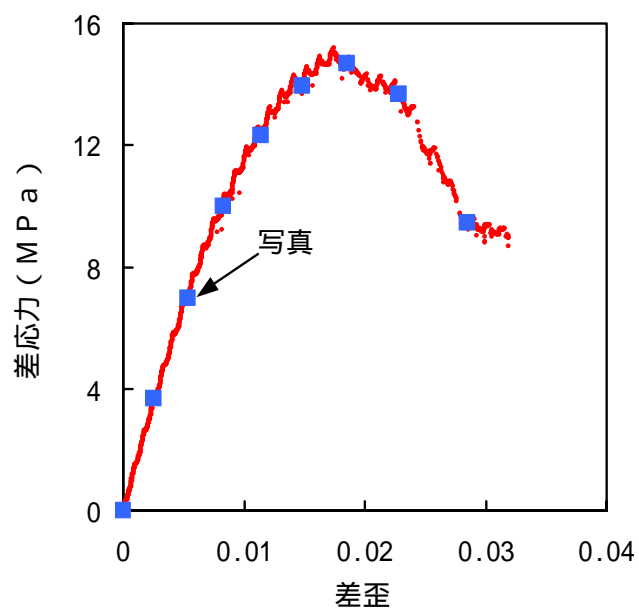
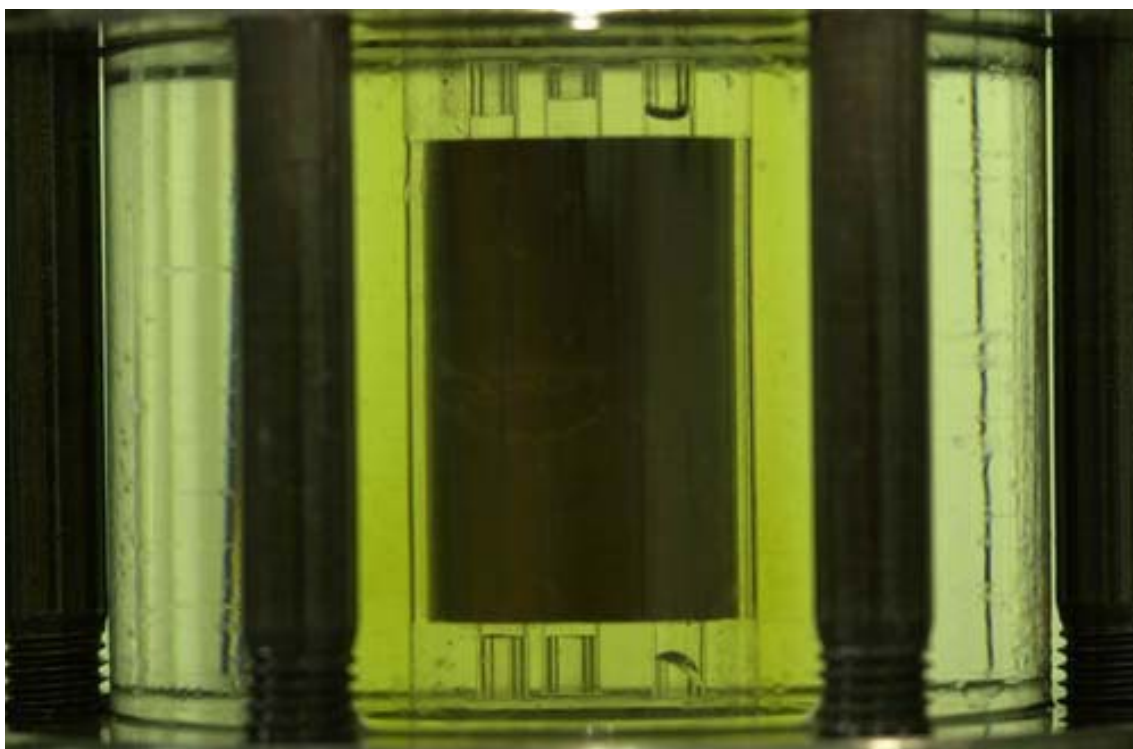
(b) 差歪 0

図3 - 1 3 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2\_3, 周圧 2 MP a)  
 歪が  $4.00 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $3.0 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



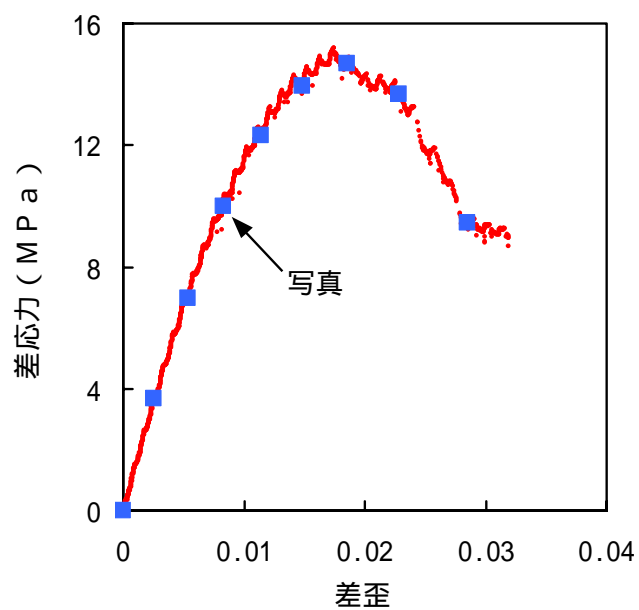
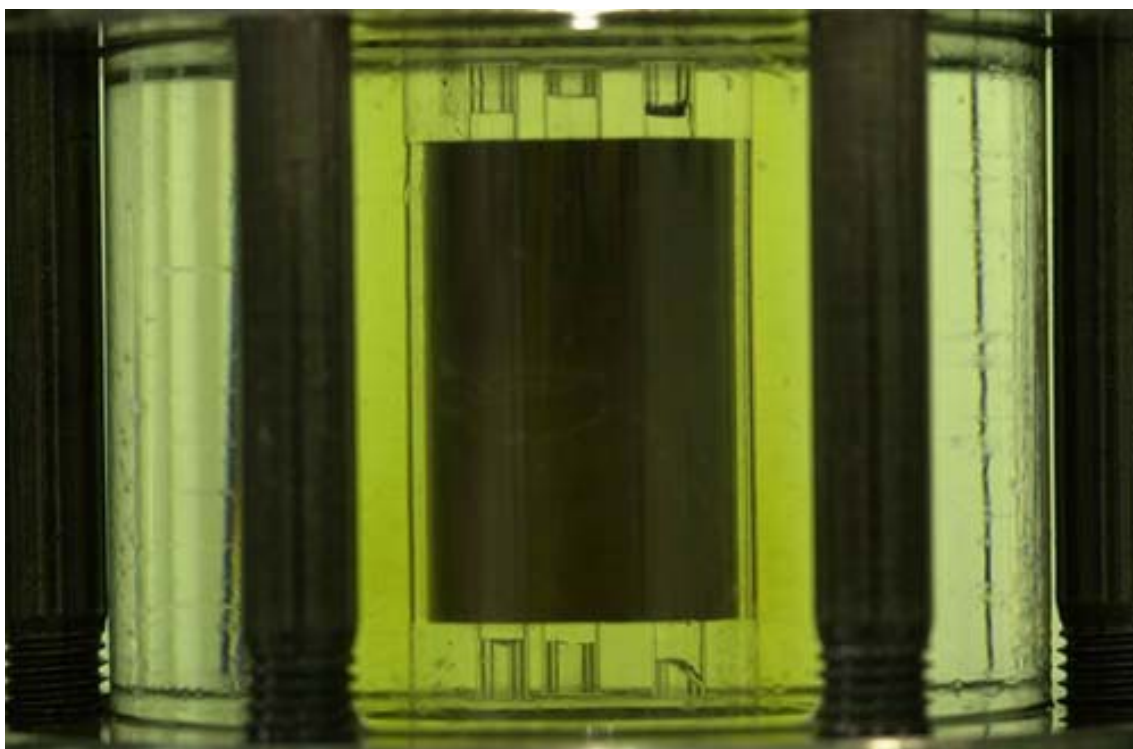
(c) 差歪 0.003

図3 - 13 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2\_3, 周圧 2 MPa)  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



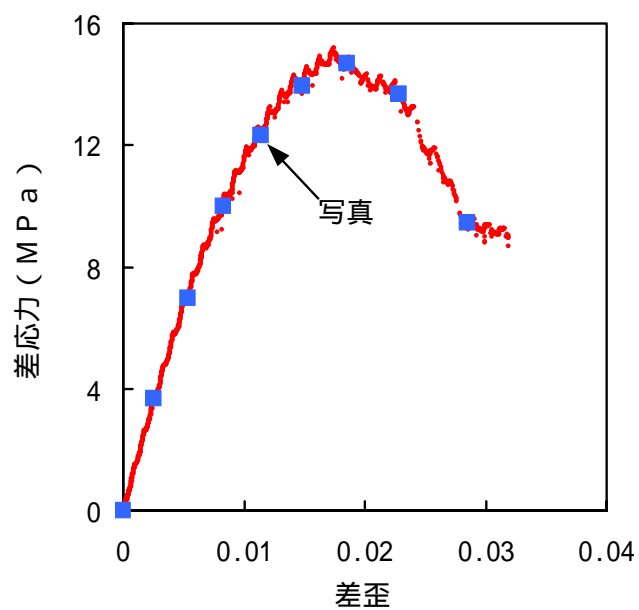
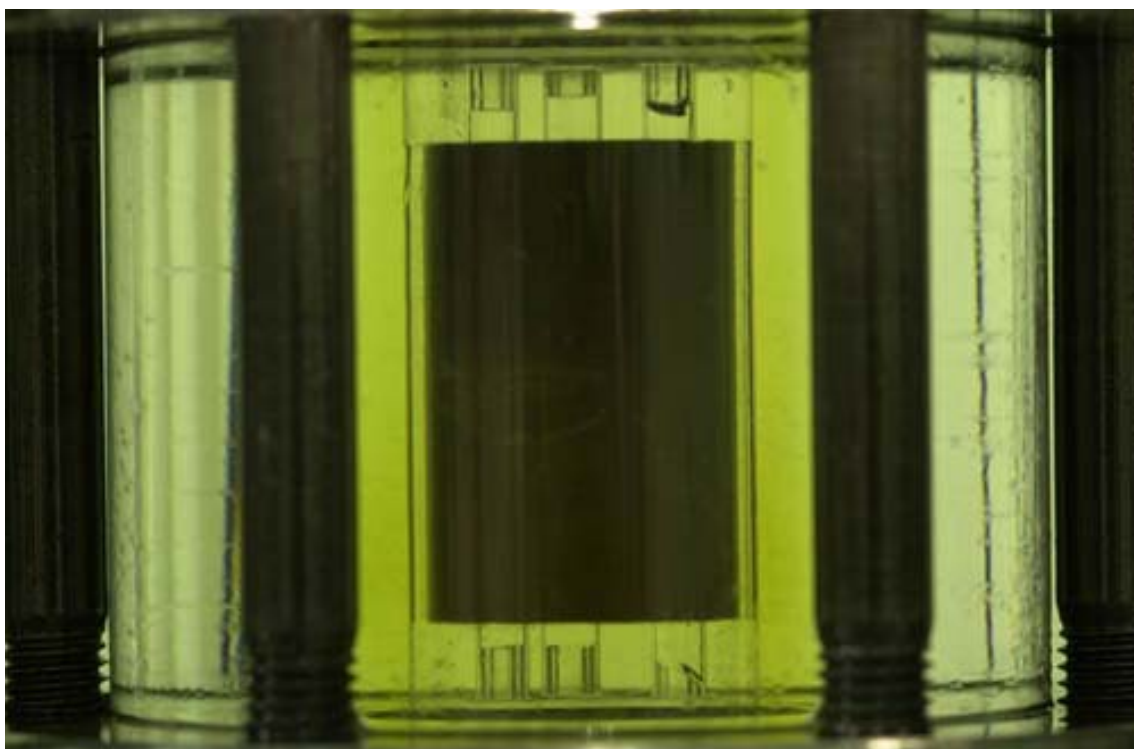
(d) 差歪 0.005

図3 - 13 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2\_3, 周圧 2 MPa)  
 歪が  $4.00 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $3.0 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



( e ) 差歪 0 . 0 0 8

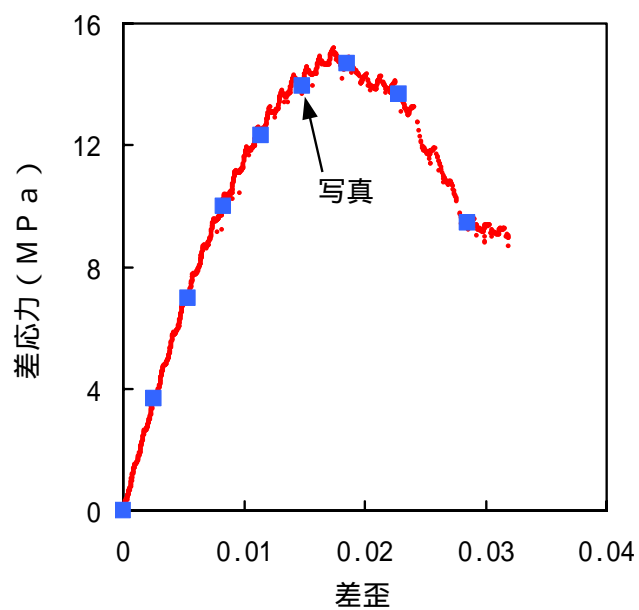
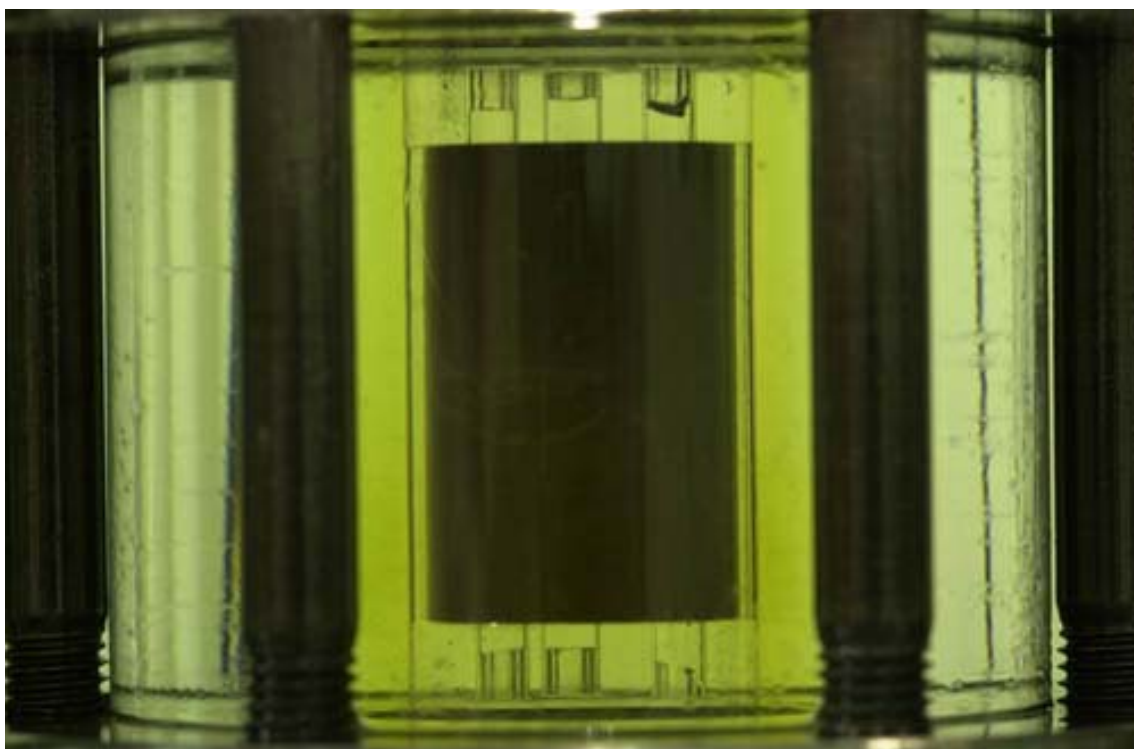
図 3 - 1 3 試験片の写真と応力 - 歪曲線 ( 試験片 2 \_ 3 , 周圧 2 M P a )  
 歪が  $4 0 0 \times 1 0^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 1 0^{-6}$  と  
 $3 0 \times 1 0^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



( f ) 差歪 0 . 0 1 1

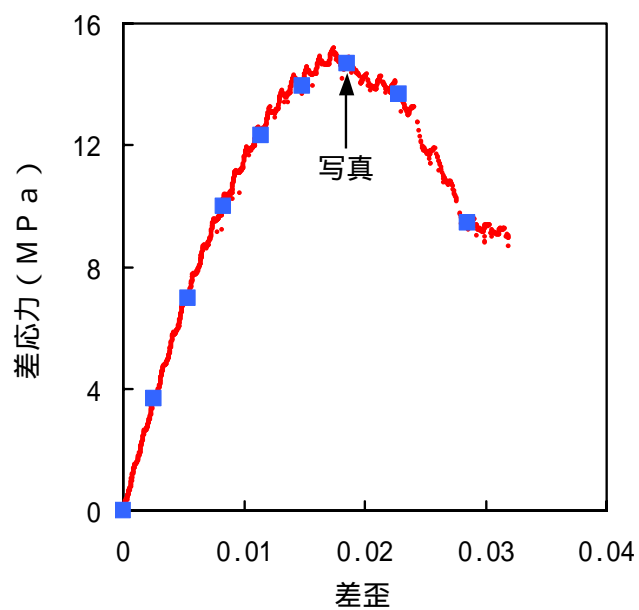
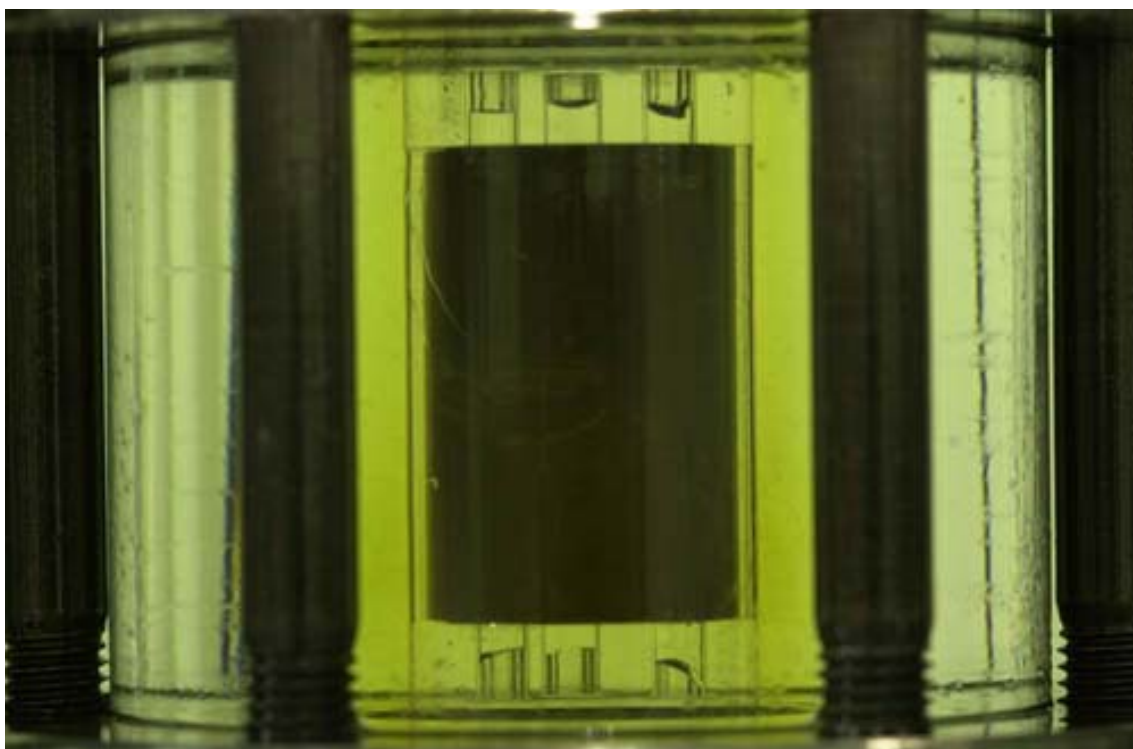
図 3 - 1 3 試験片の写真と応力 - 歪曲線 ( 試験片 2 \_ 3 , 周圧 2 M P a )  
 歪が  $4 0 0 \times 1 0^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 1 0^{-6}$  と  
 $3 0 \times 1 0^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点





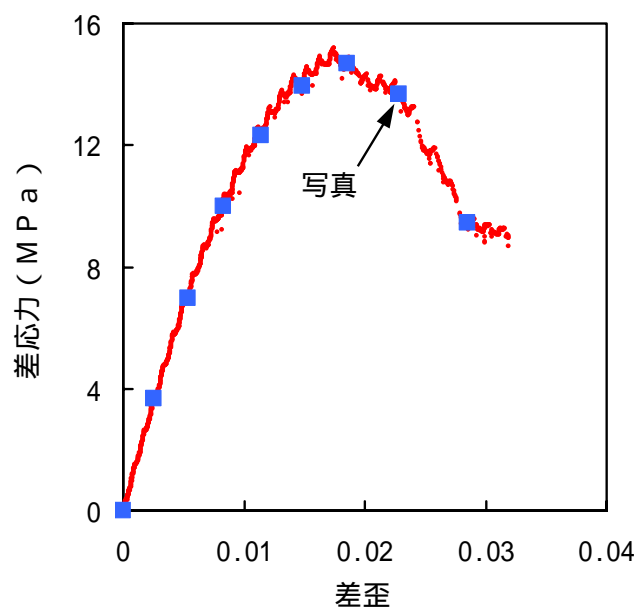
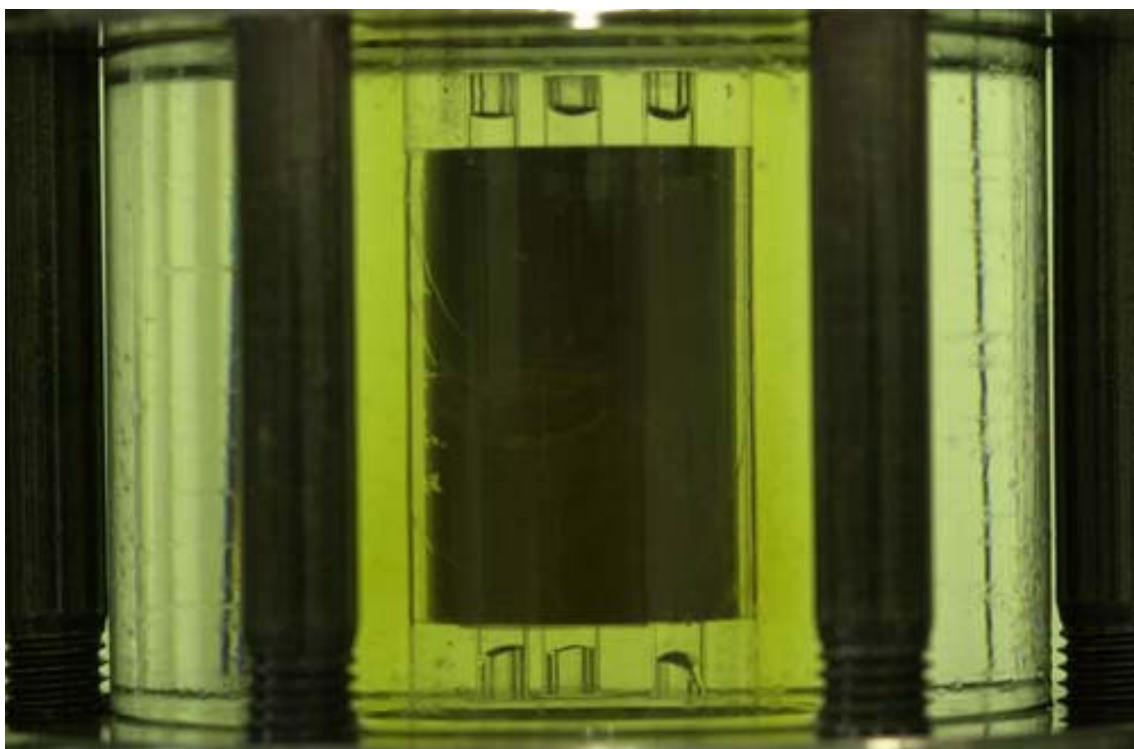
(g) 差歪 0.015

図3 - 13 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2\_\_3, 周圧 2 MPa)  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



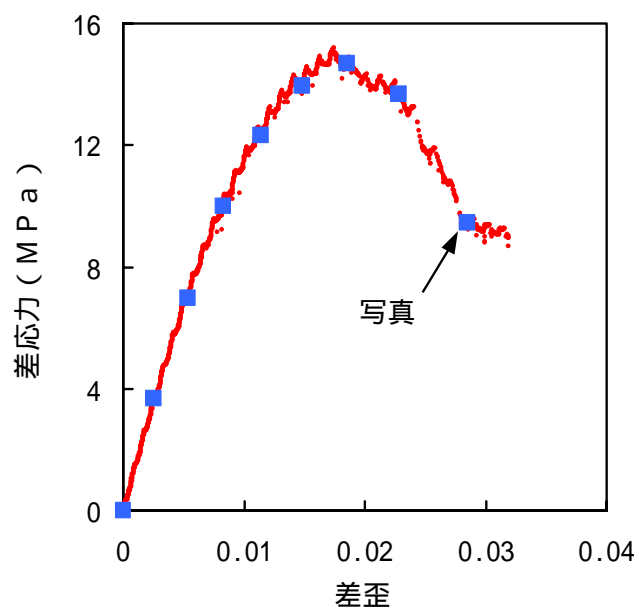
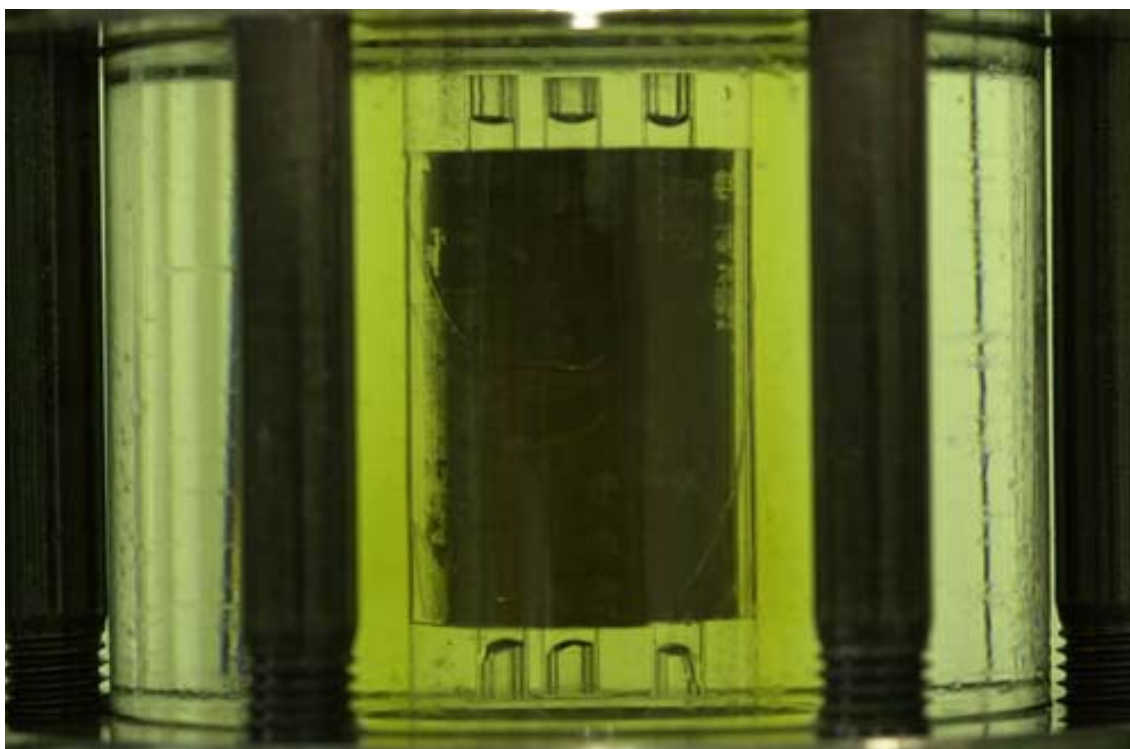
(h) 差歪 0.018

図3 - 13 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2\_3, 周圧 2 MPa)  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



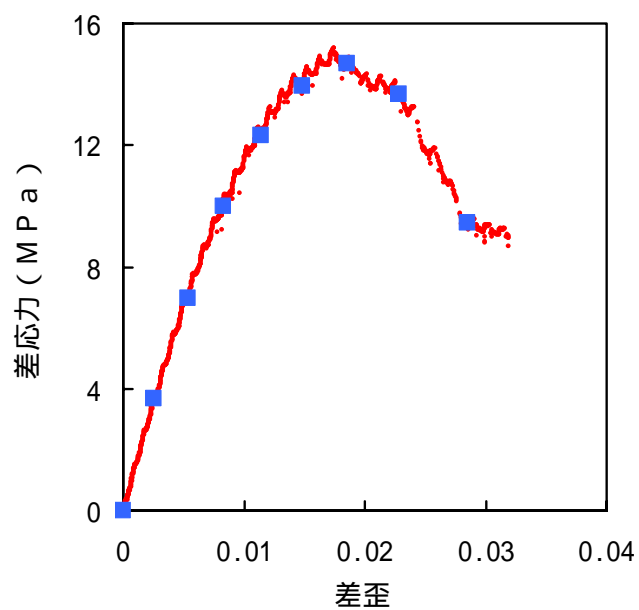
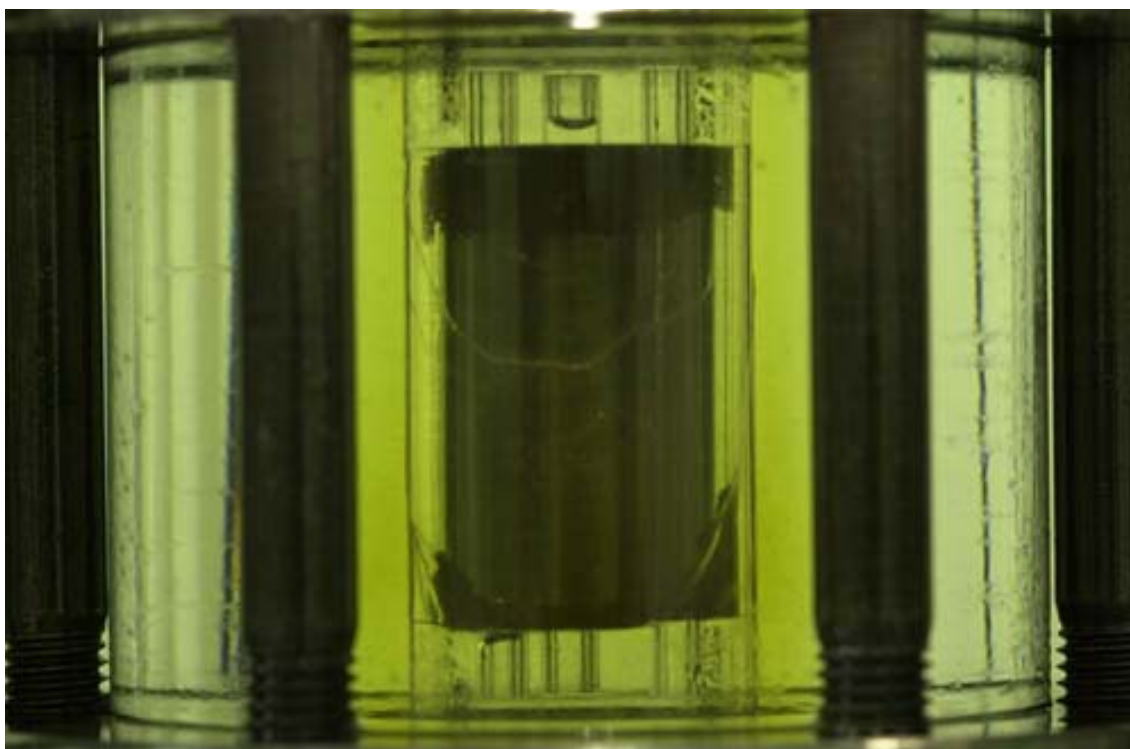
( i ) 差歪 0 . 0 2 3

図 3 - 1 3 試験片の写真と応力 - 歪曲線 ( 試験片 2 \_ 3 , 周圧 2 M P a )  
 歪が  $4 0 0 \times 1 0 ^ { - 6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 1 0 ^ { - 6}$  と  
 $3 0 \times 1 0 ^ { - 6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



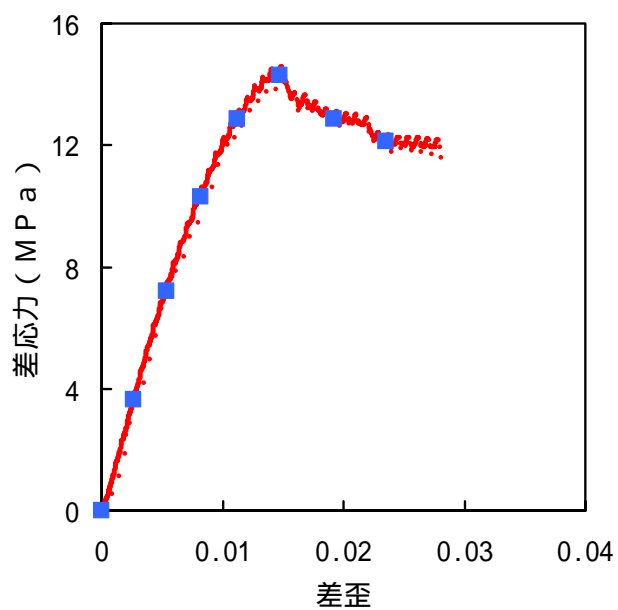
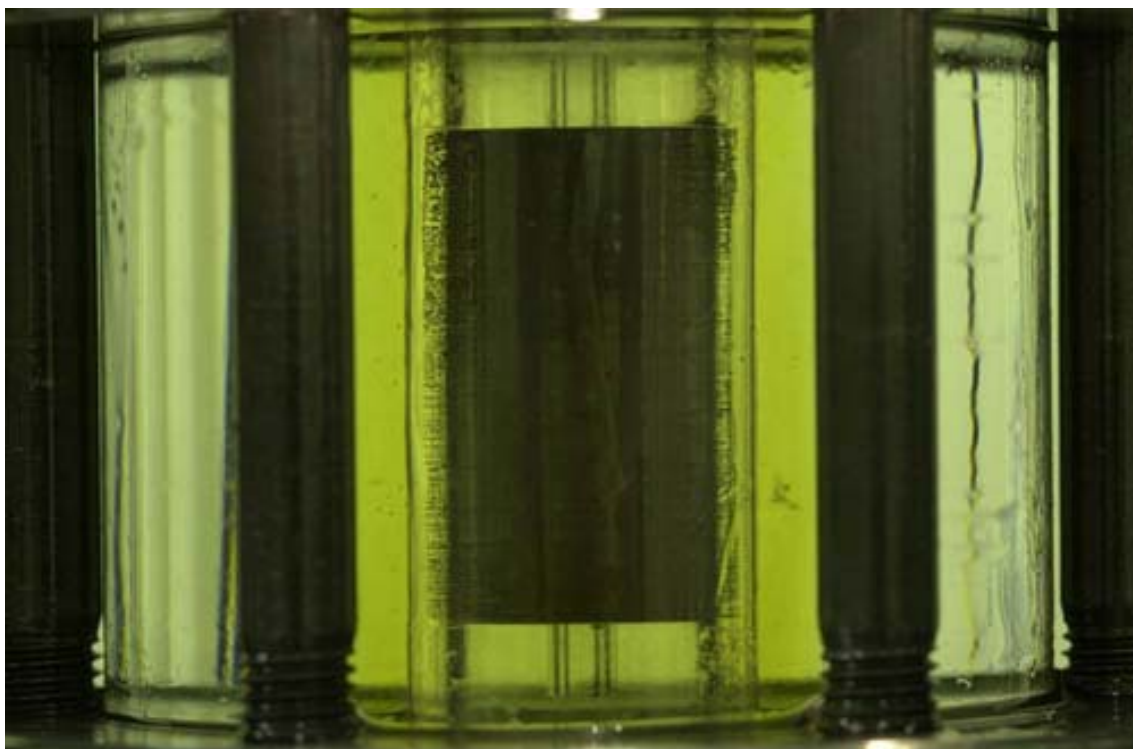
(j) 差歪 0.028

図3 - 13 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 2\_3, 周圧 2 MPa)  
 歪が  $4.00 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $3.0 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



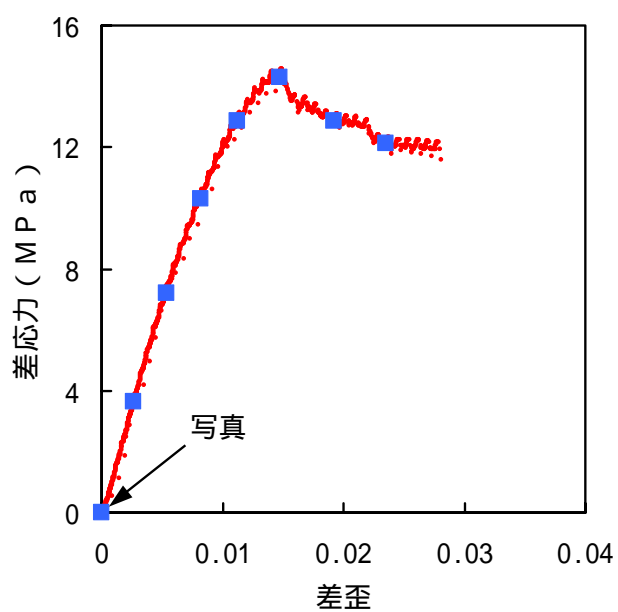
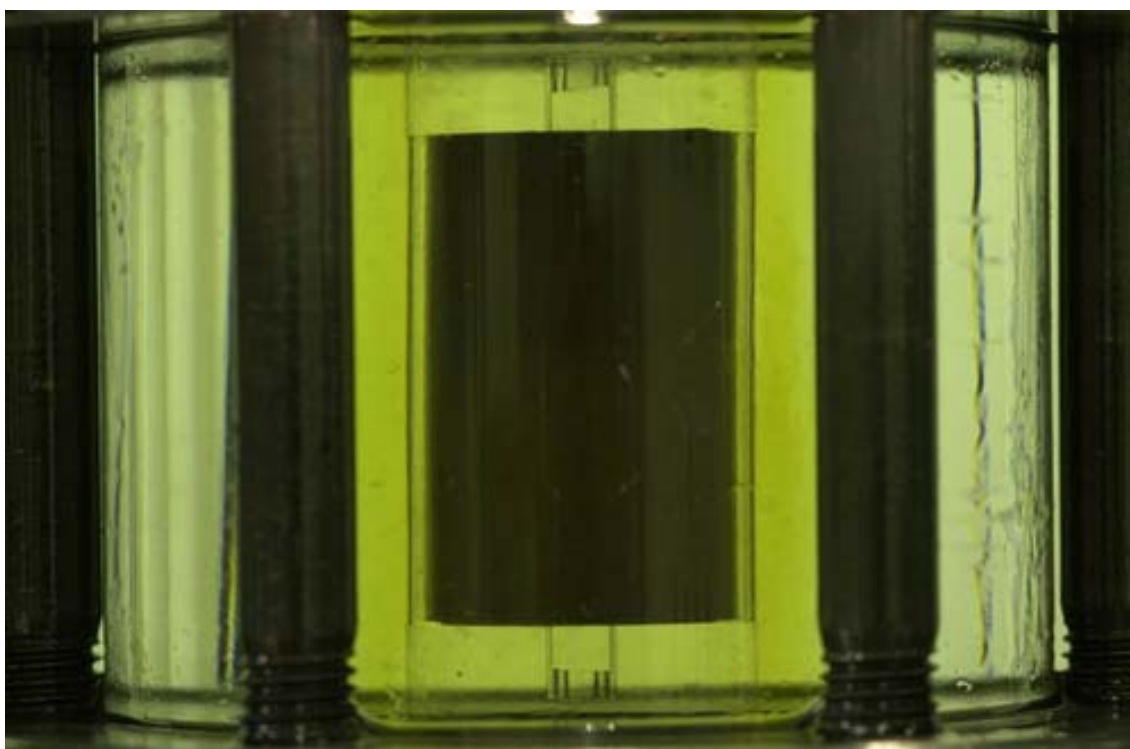
(k) 試験終了後（軸応力と周圧を除荷した後）

図3 - 1 3 試験片の写真と応力 - 歪曲線（試験片 2\_\_3 , 周圧 2 MP a )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



( a ) 試験開始前

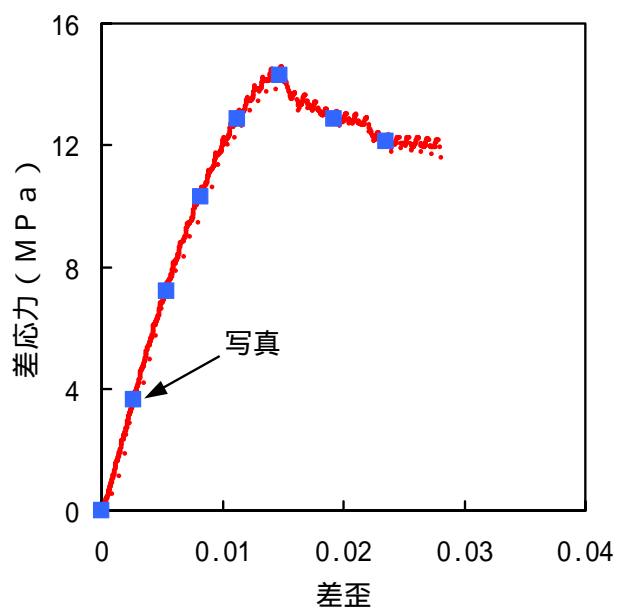
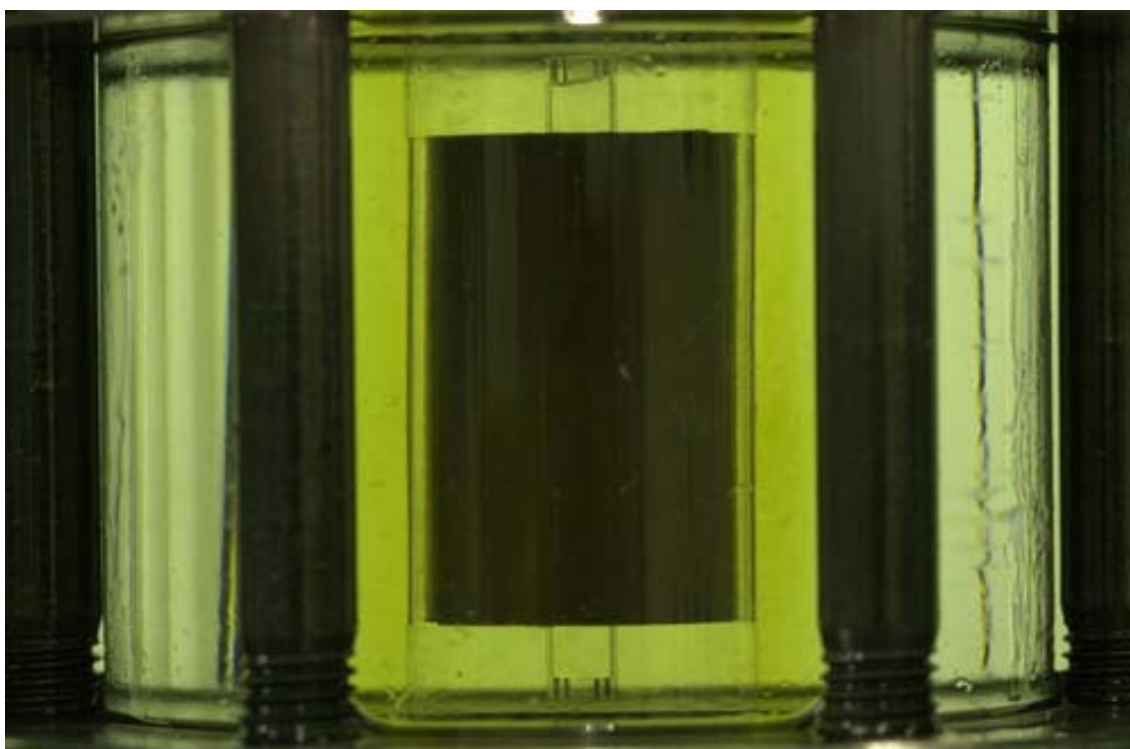
図 3 - 1 4 試験片の写真と応力 - 歪曲線 ( 試験片 4 \_ 2 , 周圧 4 M P a )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



(b) 差歪 0

図3 - 1 4 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4\_\_2 , 周圧 4 MP a )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の 写真は掲載した写真を撮った点

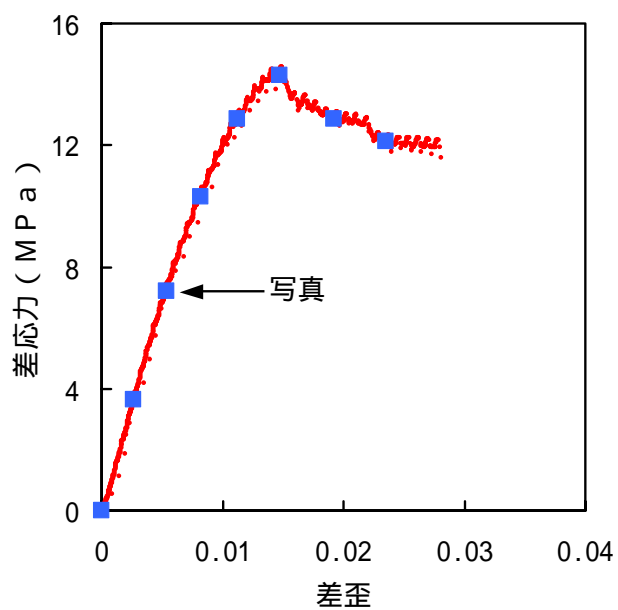
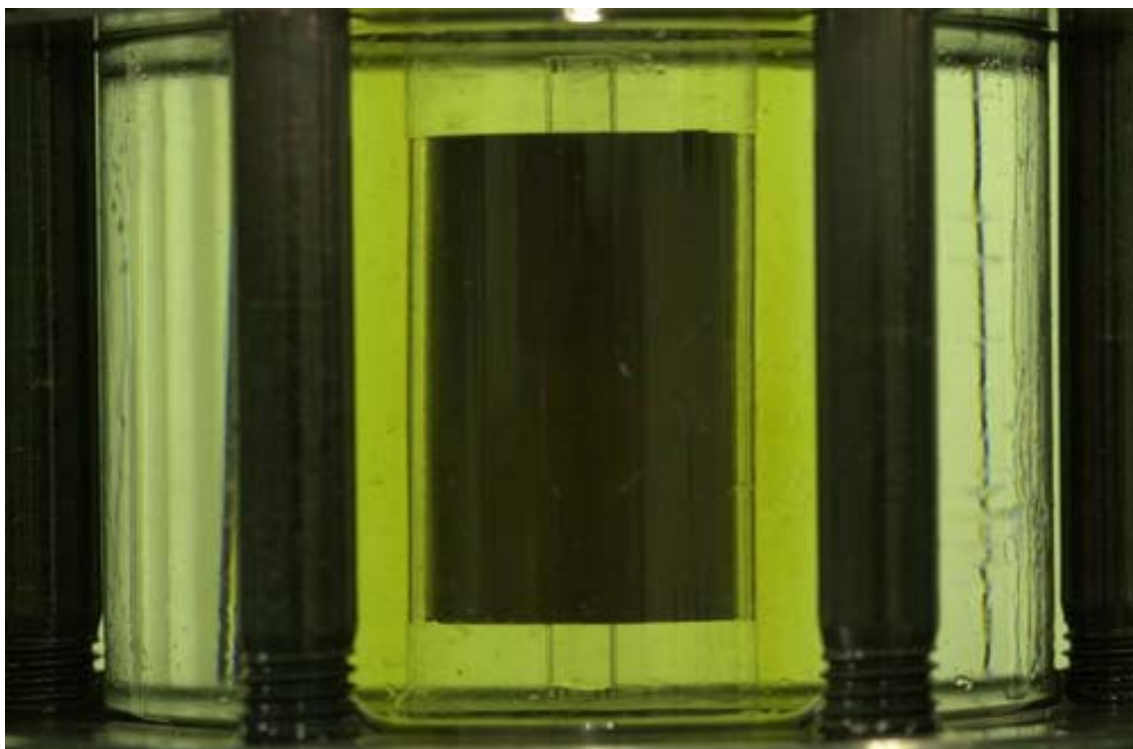




(c) 差歪 0.003

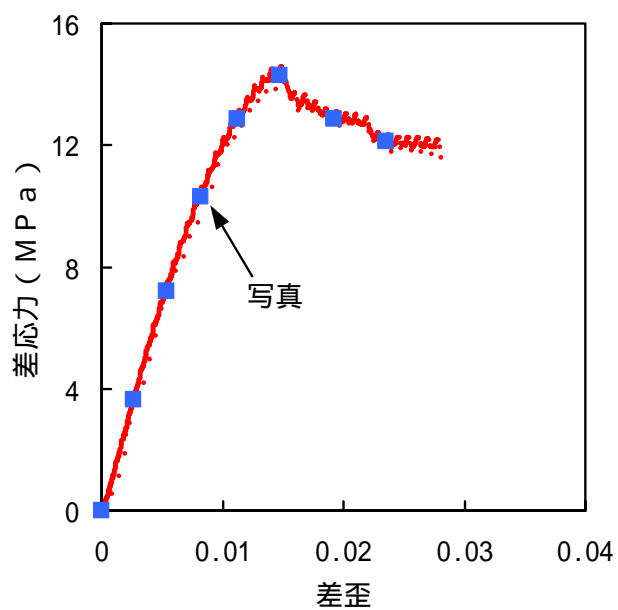
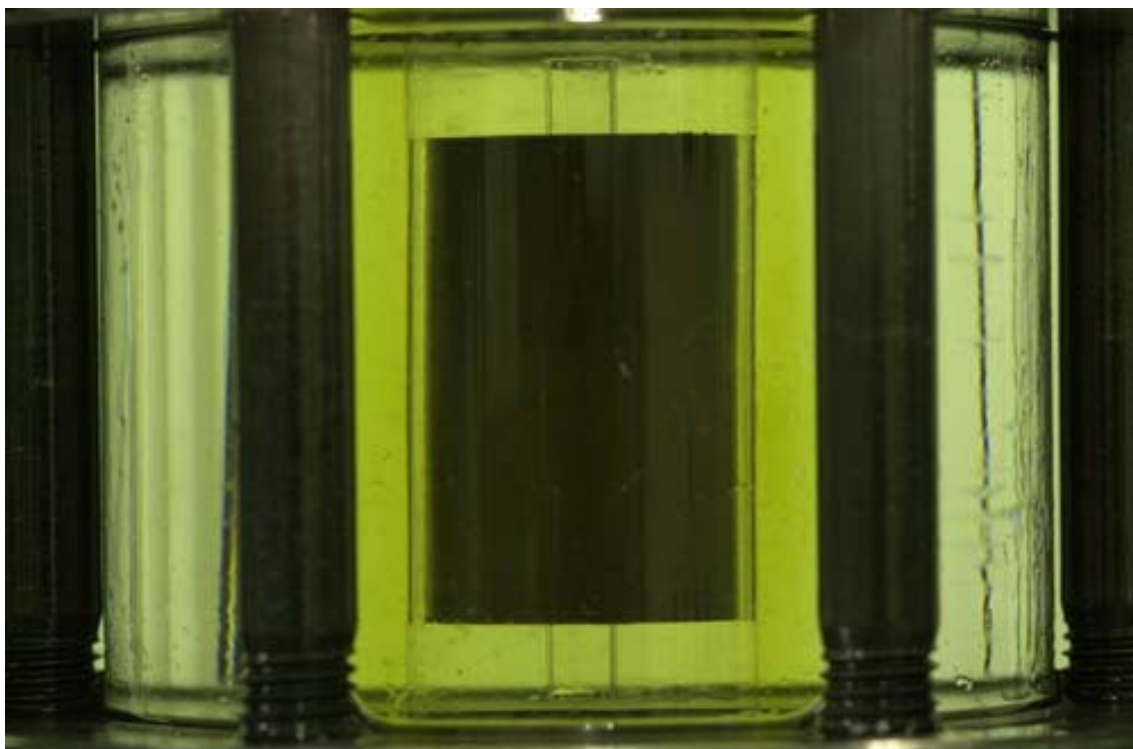
図3 - 14 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4\_\_2 , 周圧 4 MPa )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の 写真は掲載した写真を撮った点





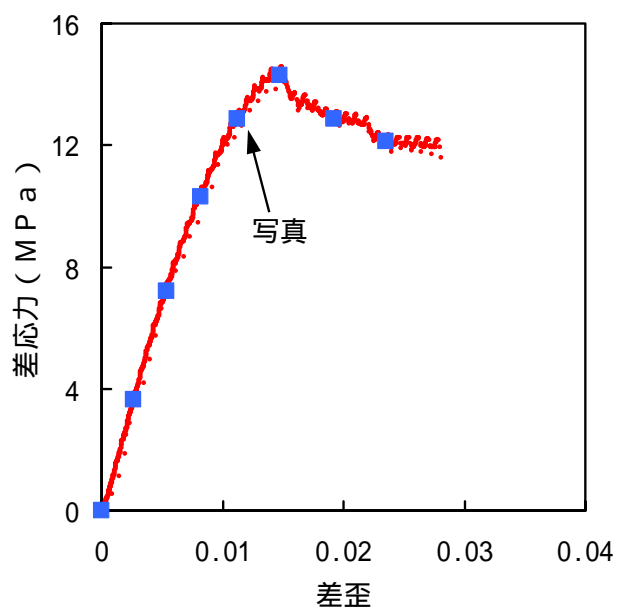
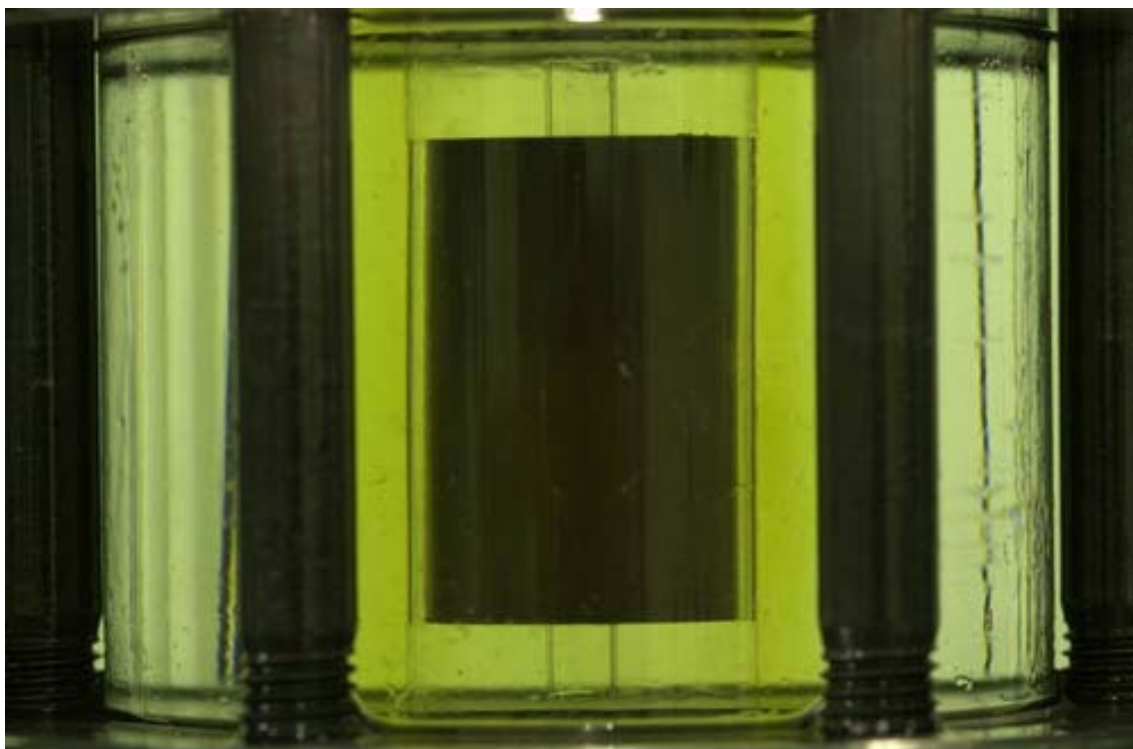
(d) 差歪 0.005

図 3 - 1 4 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4\_\_2 , 周圧 4 MP a )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



(e) 差歪 0.008

図3 - 14 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4\_\_2 , 周圧 4 MPa )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の 写真は掲載した写真を撮った点



( f ) 差歪 0 . 0 1 1

図 3 - 1 4 試験片の写真と応力 - 歪曲線 ( 試験片 4 \_ 2 , 周圧 4 M P a )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点

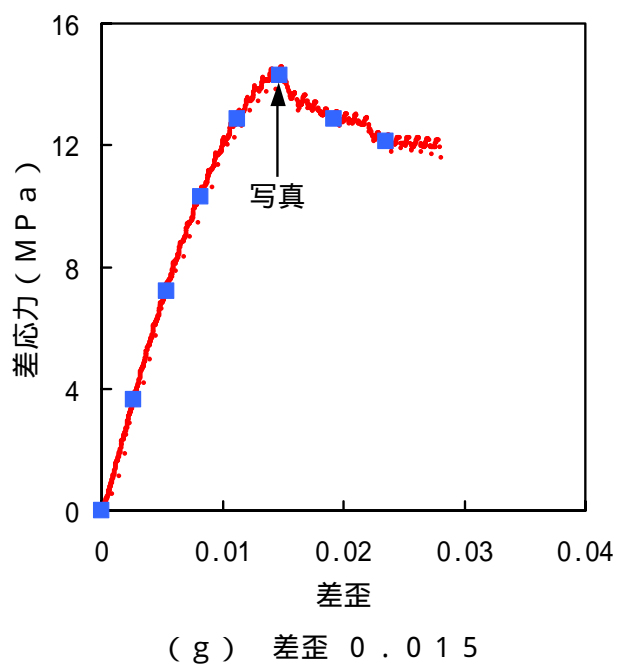
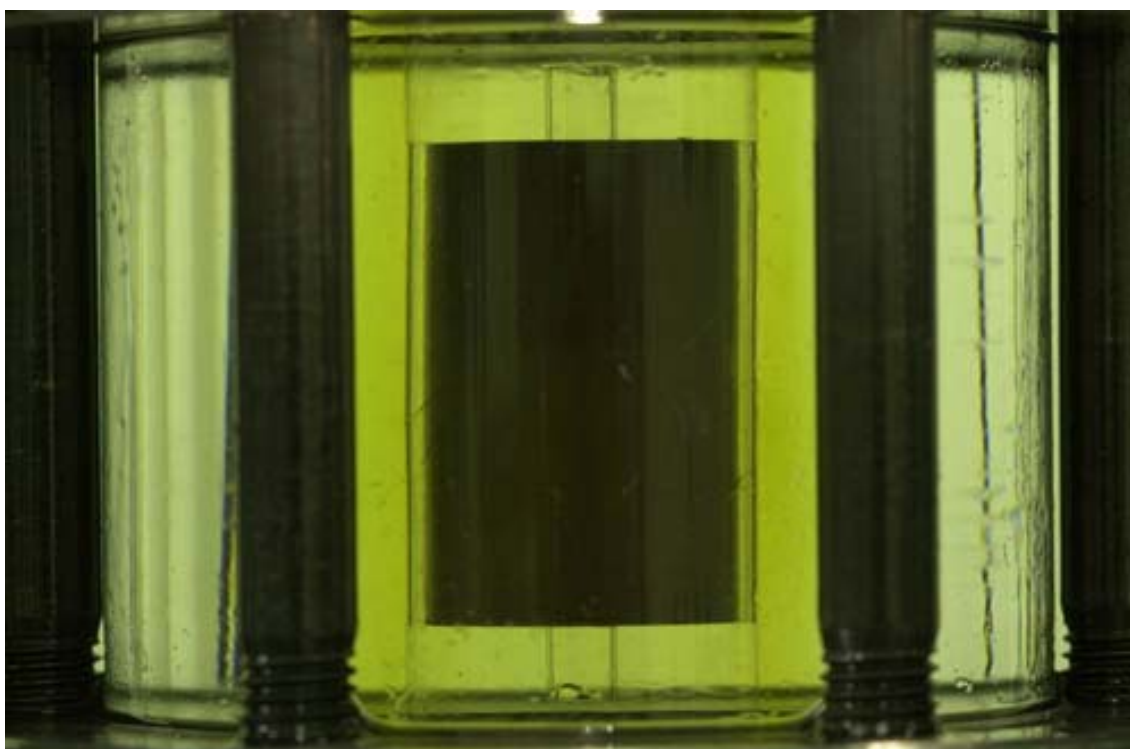
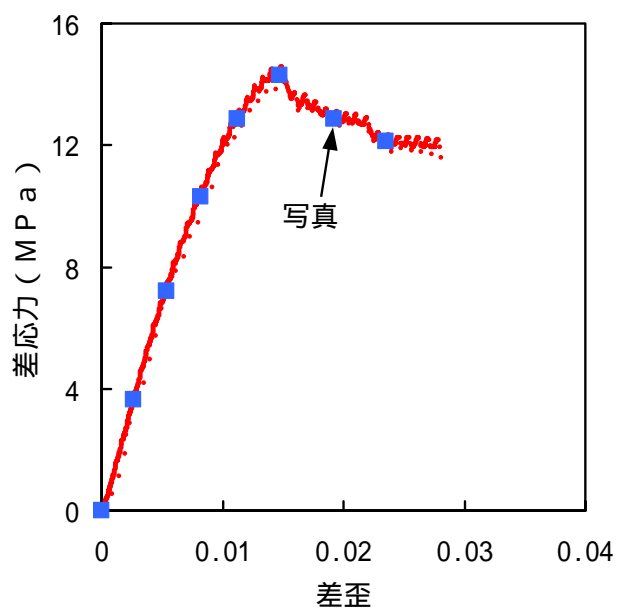
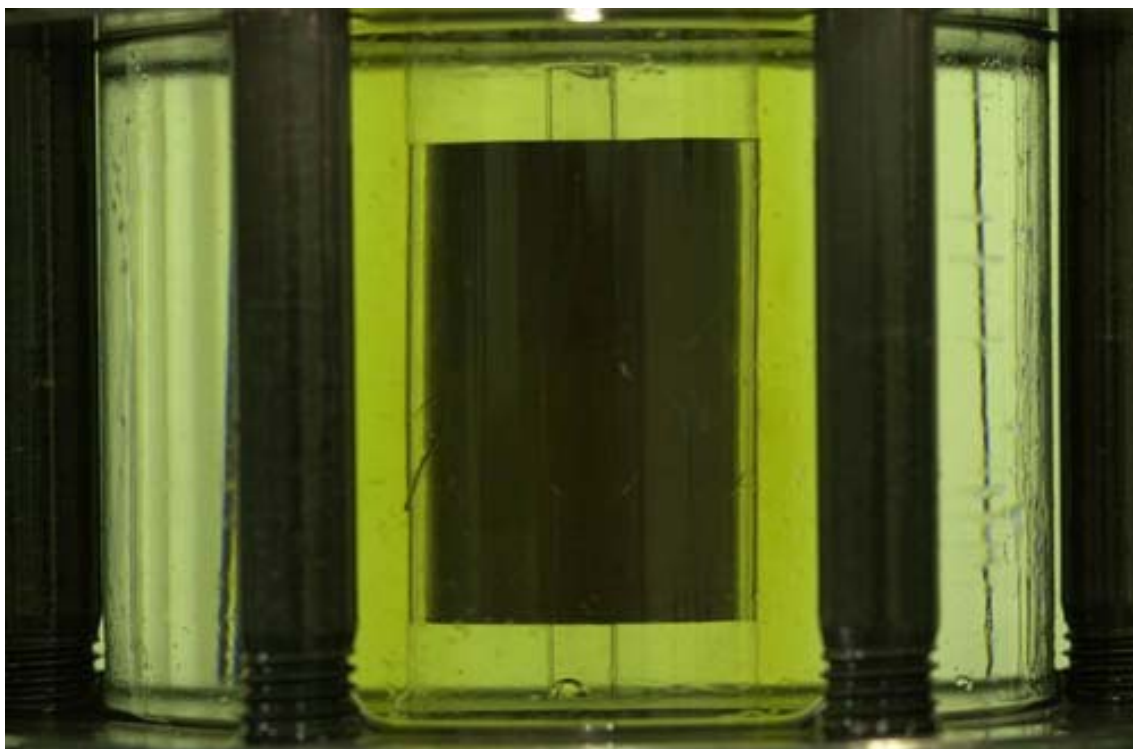
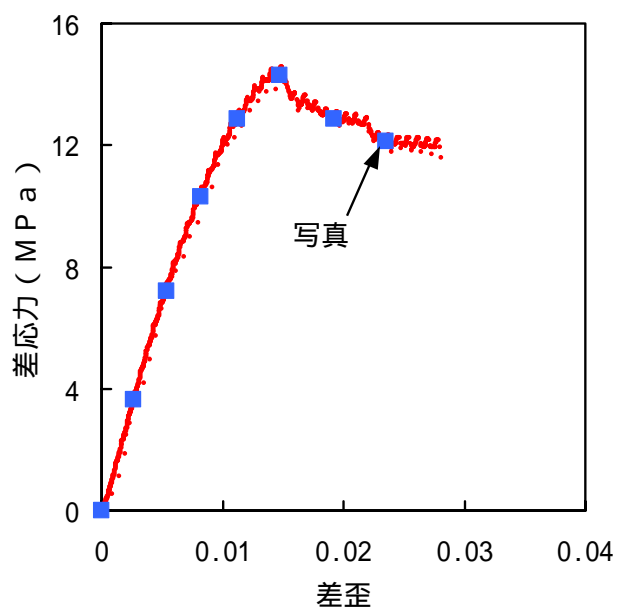
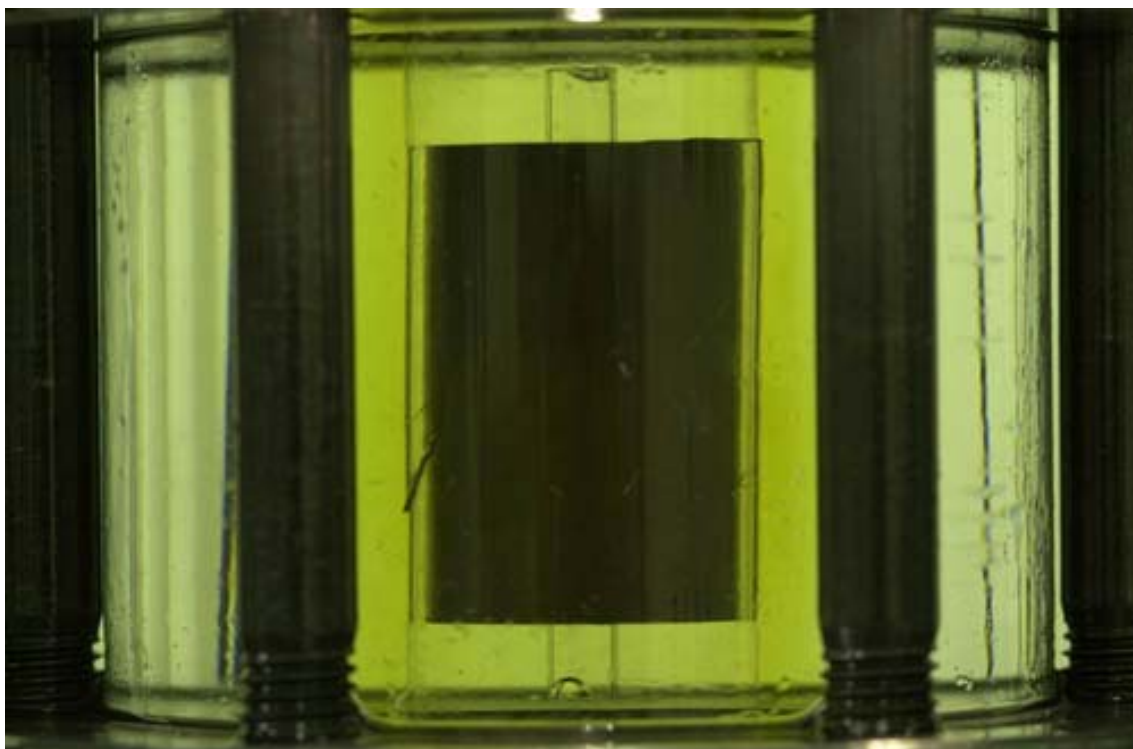


図3 - 14 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4\_\_2 , 周圧 4 MP a )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の 写真は掲載した写真を撮った点



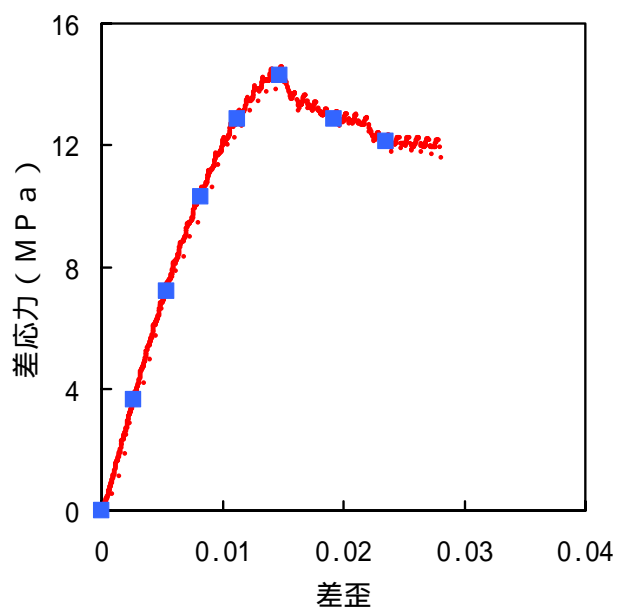
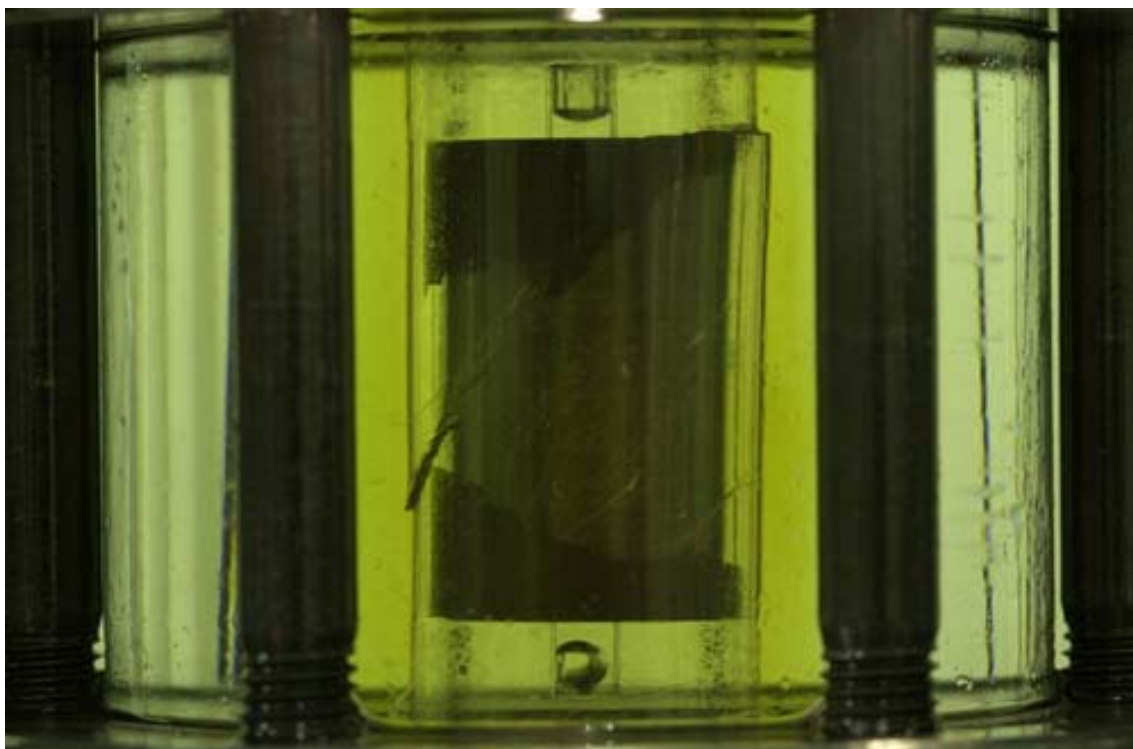
(h) 差歪 0.019

図3 - 14 試験片の写真と応力 - 歪曲線 (試験片 4\_\_2 , 周圧 4 MPa )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



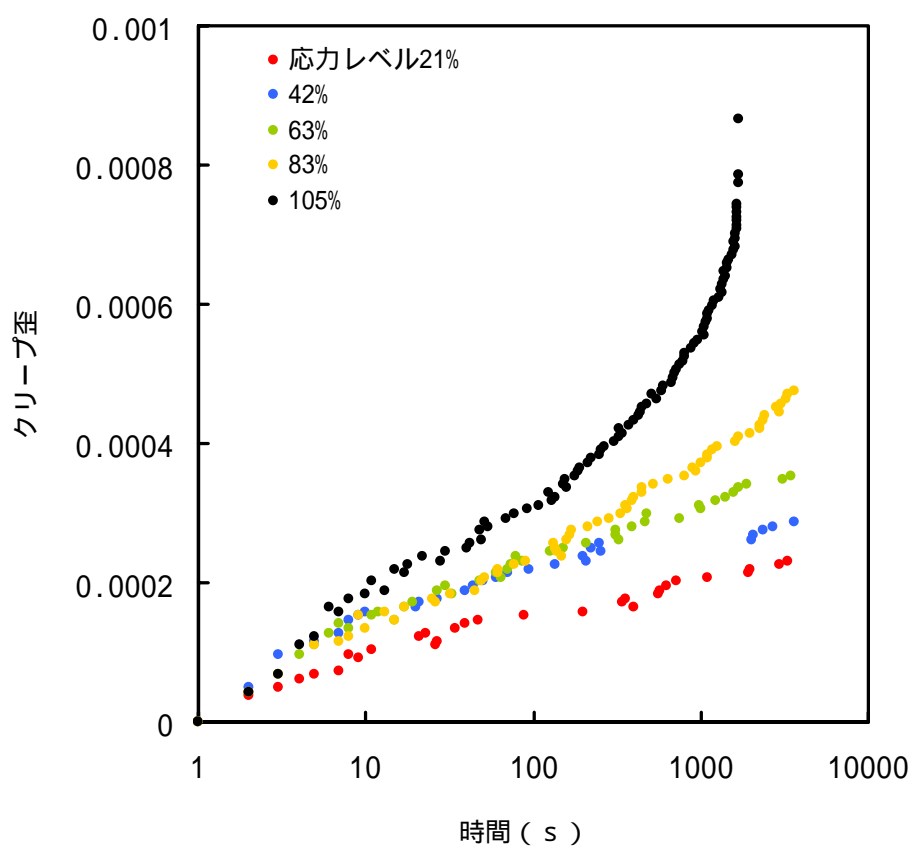
( i ) 差歪 0 . 0 2 4

図 3 - 1 4 試験片の写真と応力 - 歪曲線 ( 試験片 4 \_ 2 , 周圧 4 M P a )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



( j ) 試験終了後 ( 軸応力と周圧を除荷した後 )

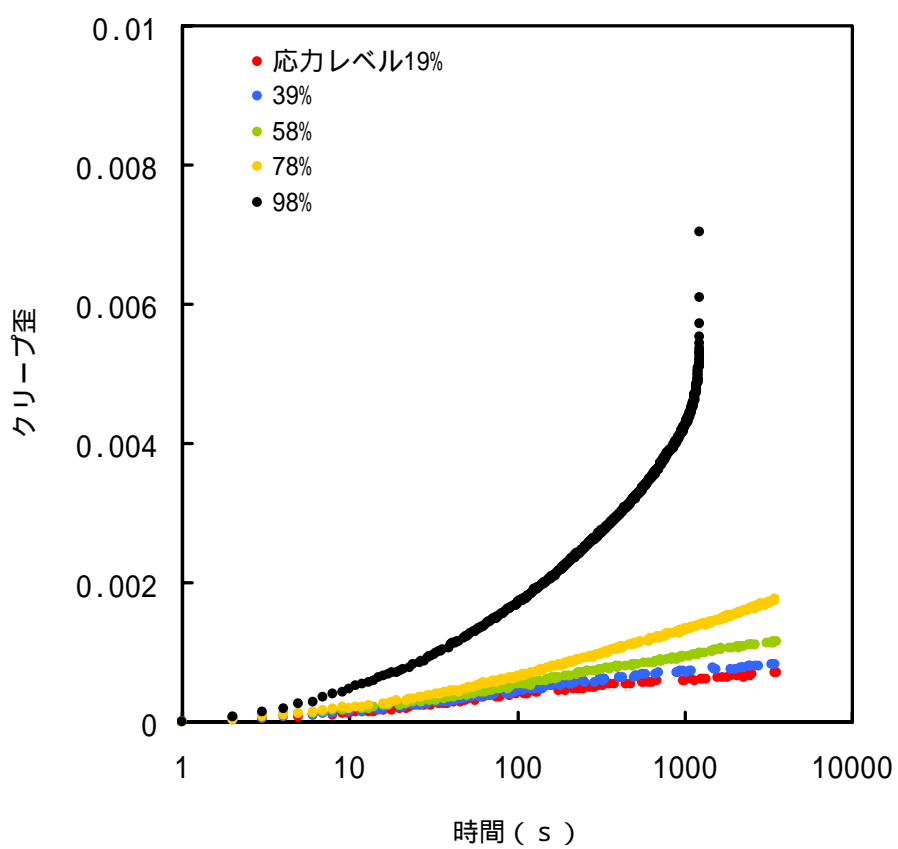
図 3 - 1 4 試験片の写真と応力 - 歪曲線 ( 試験片 4\_\_2 , 周圧 4 MP a )  
 歪が  $400 \times 10^{-6}$  増加する毎に歪速度  $3 \times 10^{-6}$  と  
 $30 \times 10^{-6} / s$  で切替  
 応力 - 歪曲線上の は掲載した写真を撮った点



( a ) 周圧 0 MP a

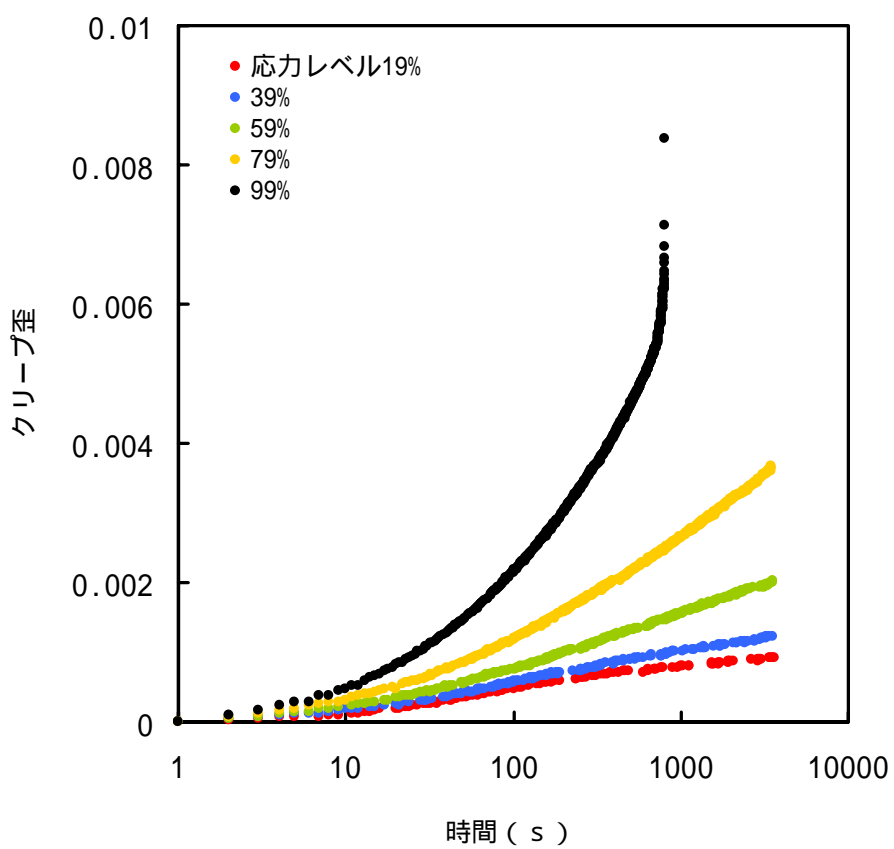
図 3 - 1 5 クリープ歪の経時変化





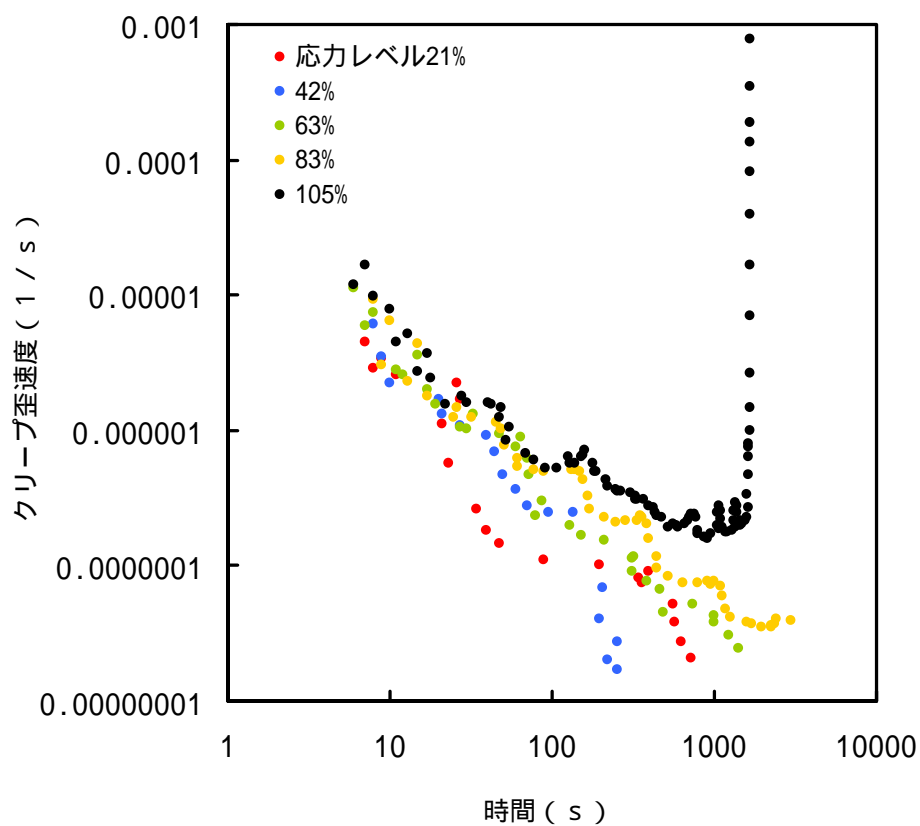
(b) 周圧 2 MPa

図3 - 15 クリープ歪の経時変化



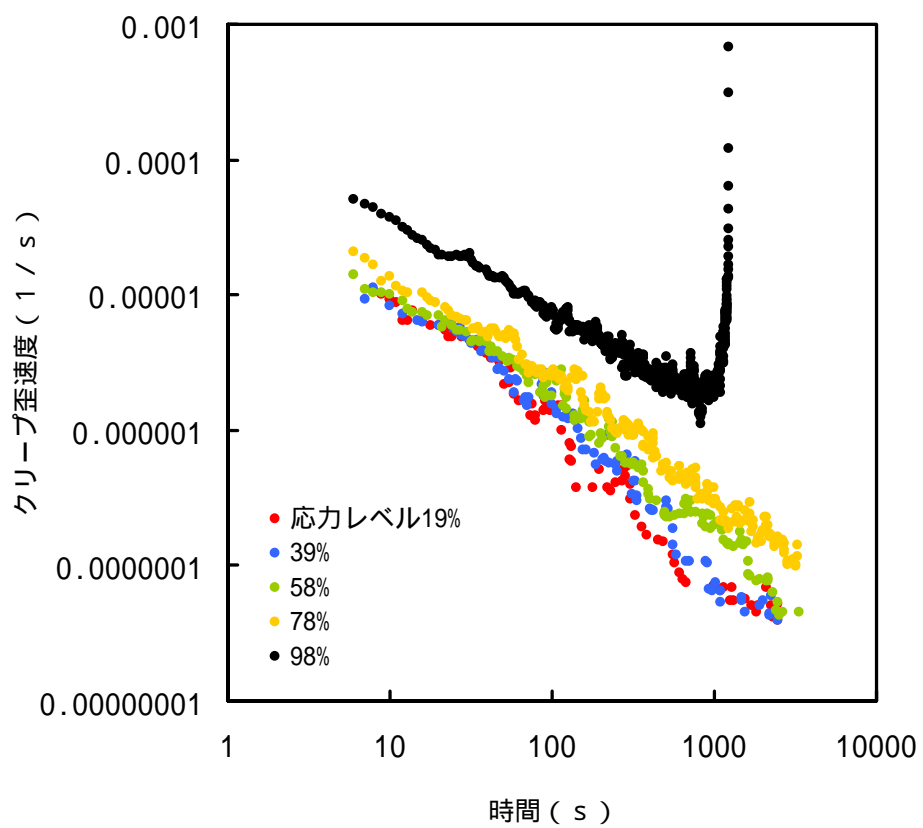
(c) 周圧 4 MPa

図3 - 15 クリープ歪の経時変化



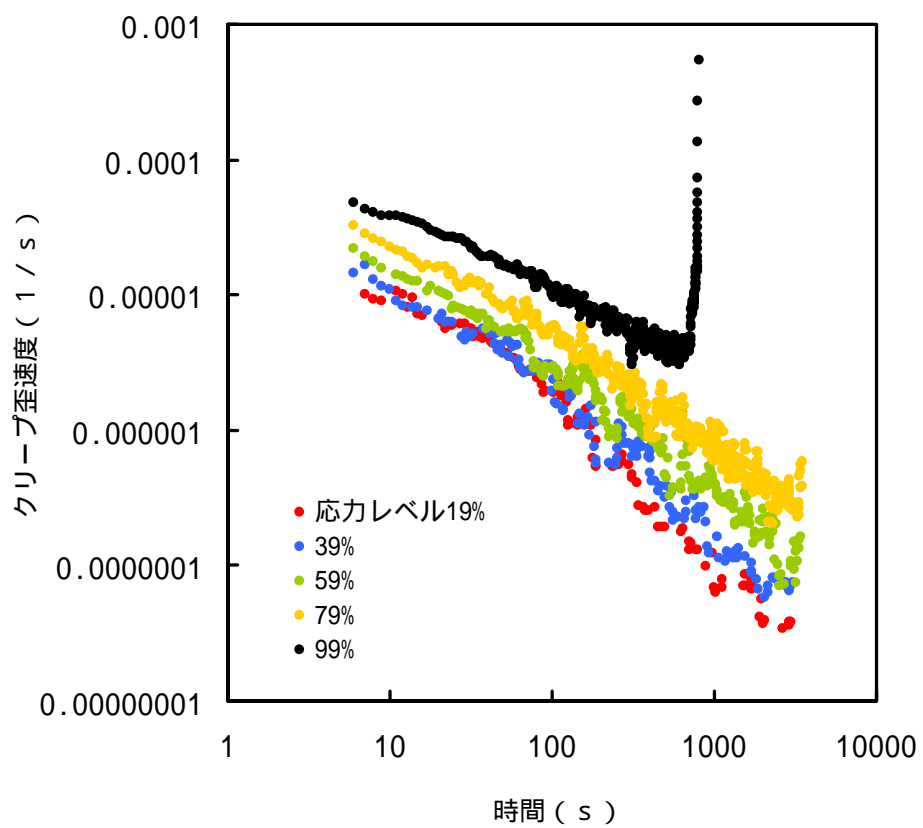
( a ) 周圧 0 MP a

図 3 - 1 6 クリープ歪速度の経時変化 ( 図 3 - 1 5 と同じ試験片 )



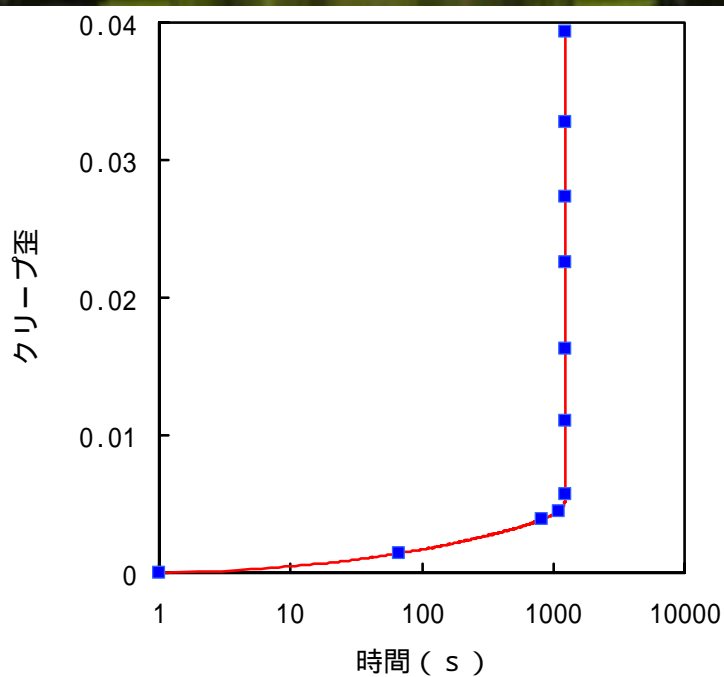
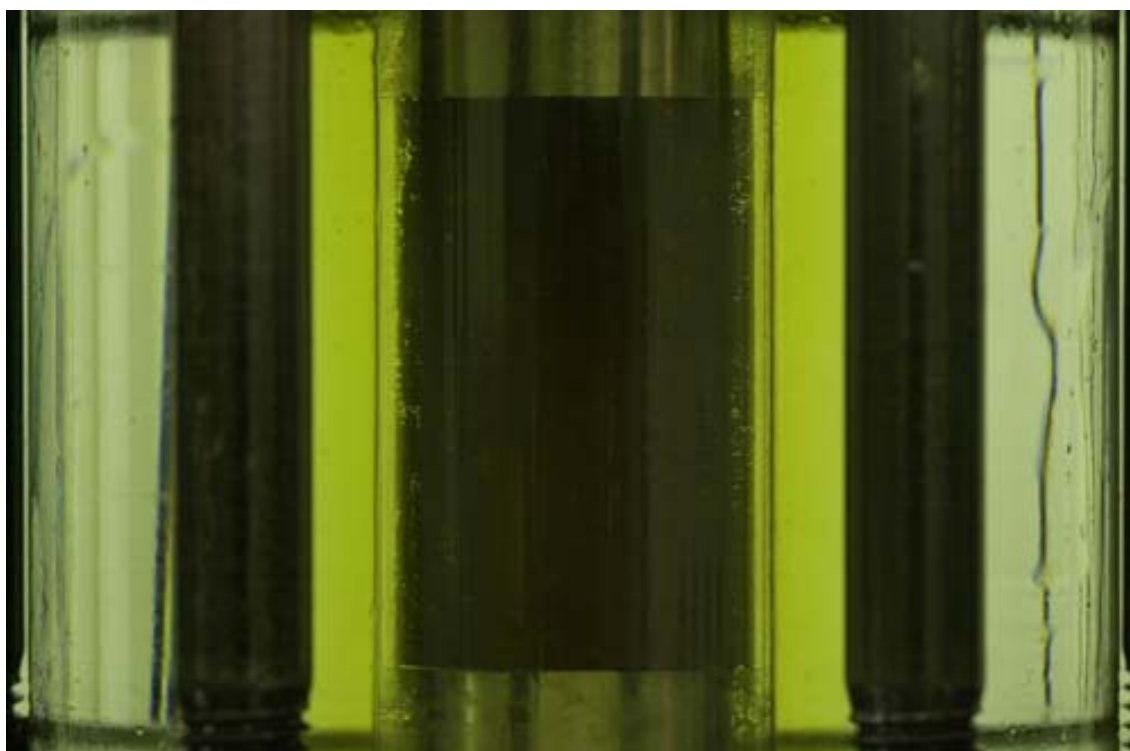
(b) 周圧 2 MP a

図3 - 16 クリープ歪速度の経時変化 (図3 - 15と同じ試験片)



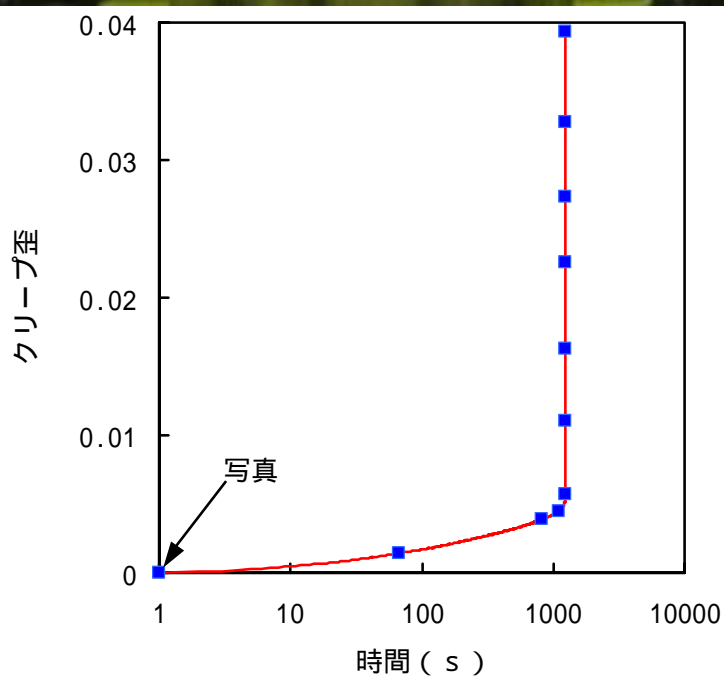
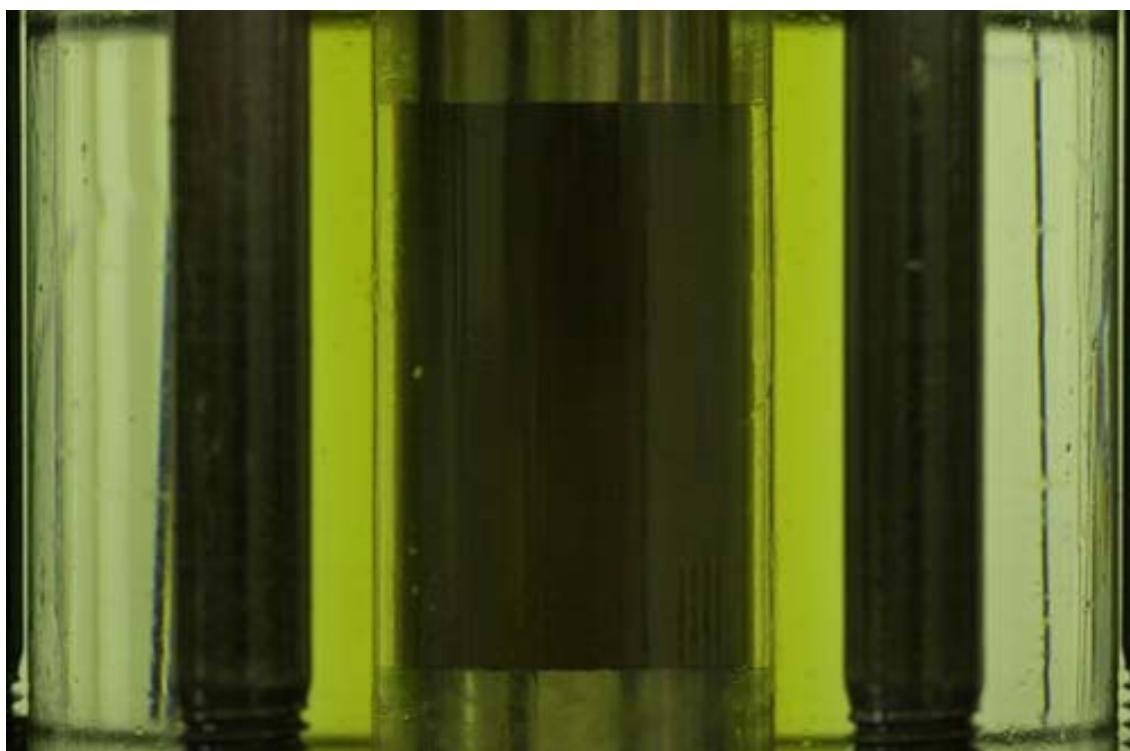
(c) 周圧 4 MPa

図3 - 16 クリープ歪速度の経時変化 (図3 - 15と同じ試験片)



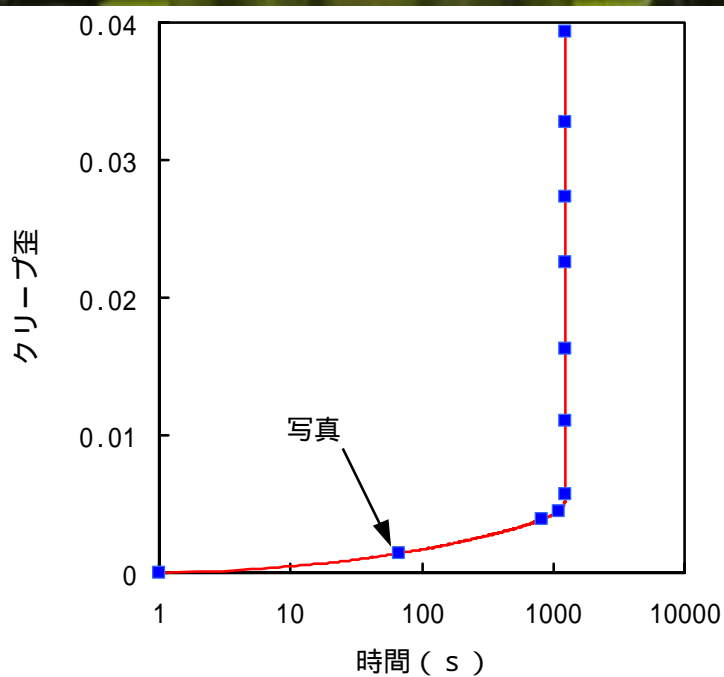
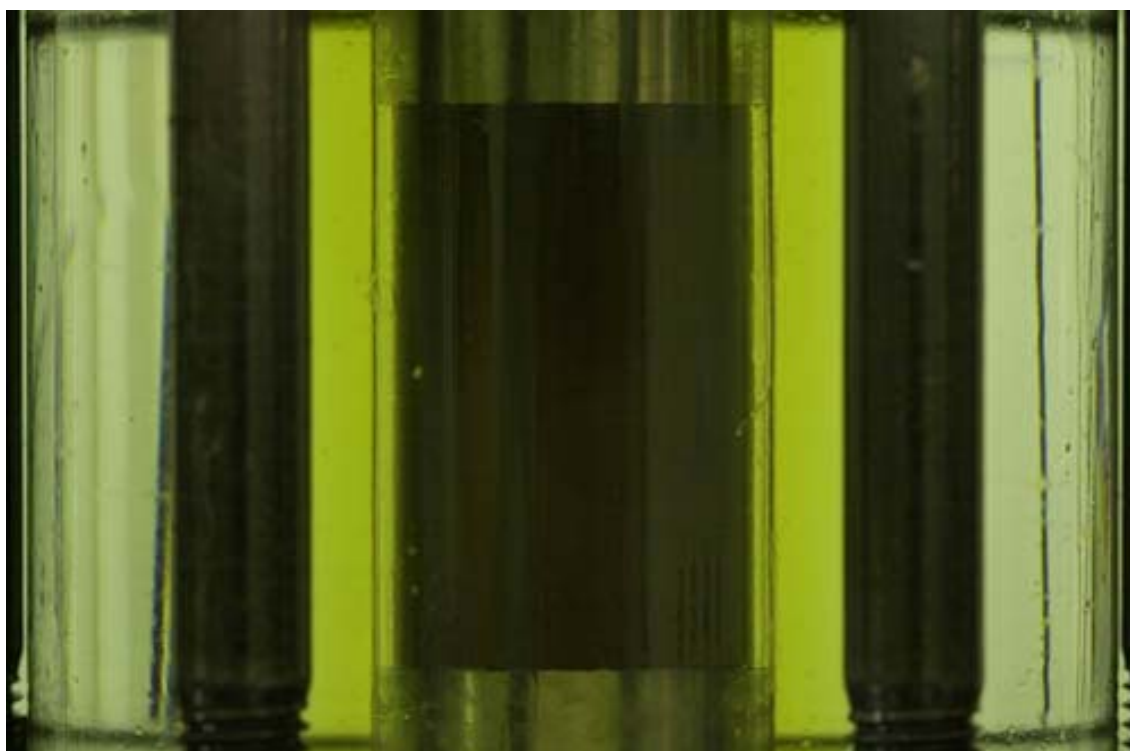
( a ) 試験開始前 ( 周圧载荷後 )

図 3 - 1 7 試験片の写真と第 5 段階 ( クリープ応力レベル 9 8 % ) でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図 3 - 1 7 に掲載した写真を撮った点  
 ( 周圧 2 M P a で図 3 - 1 5 ( b ) と同じ試験片 )



(b) 第5段階のクリープ開始後1 s , クリープ歪 0

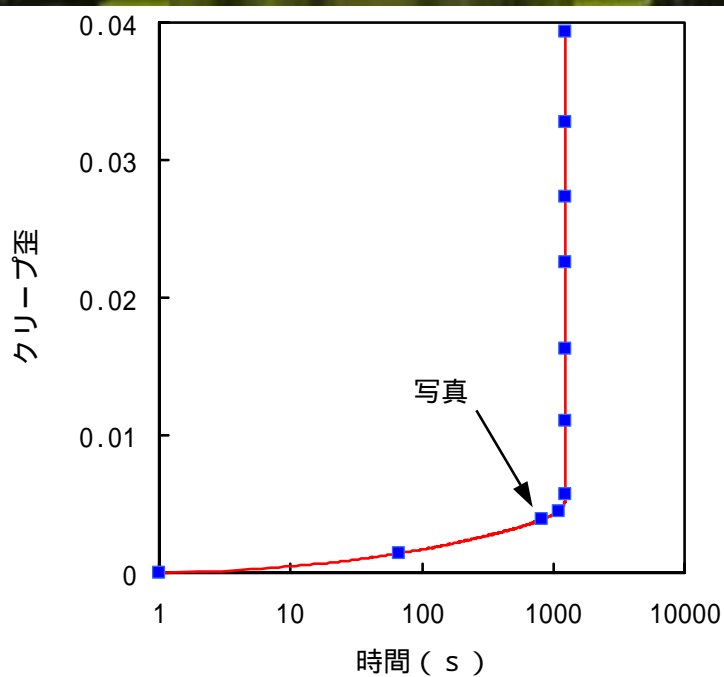
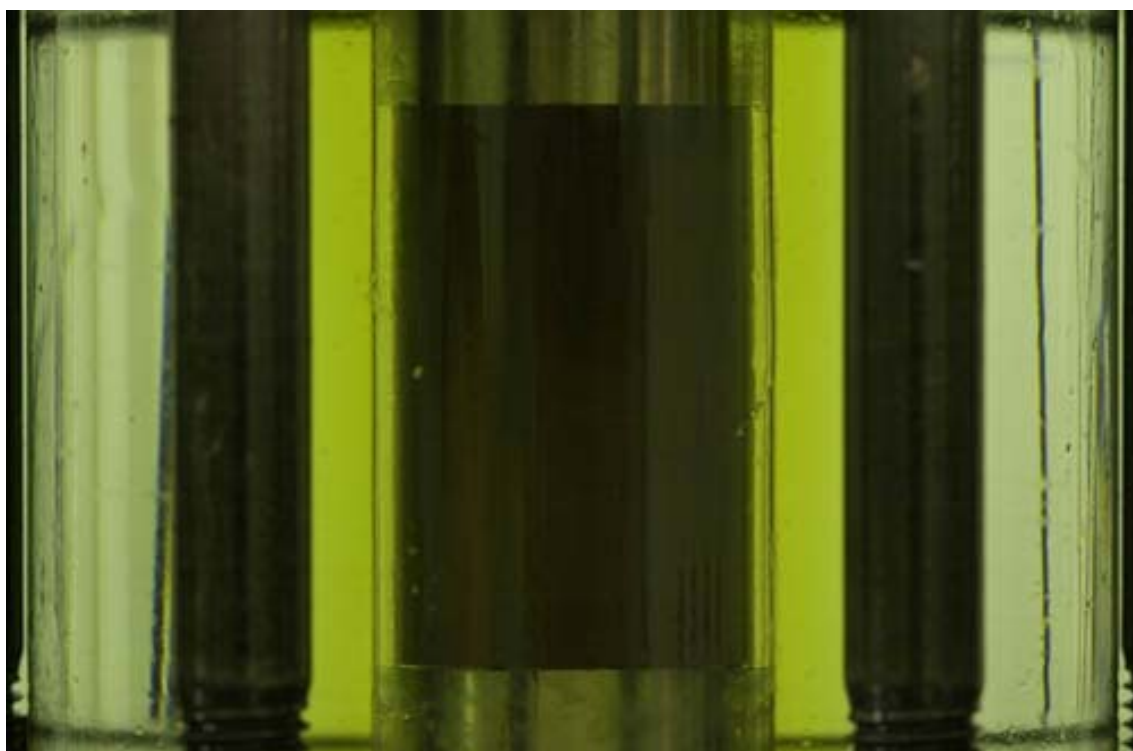
図3 - 17 試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 (b)と同じ試験片)



(c) 第5段階のクリープ開始後68s, クリープ歪 0.0014

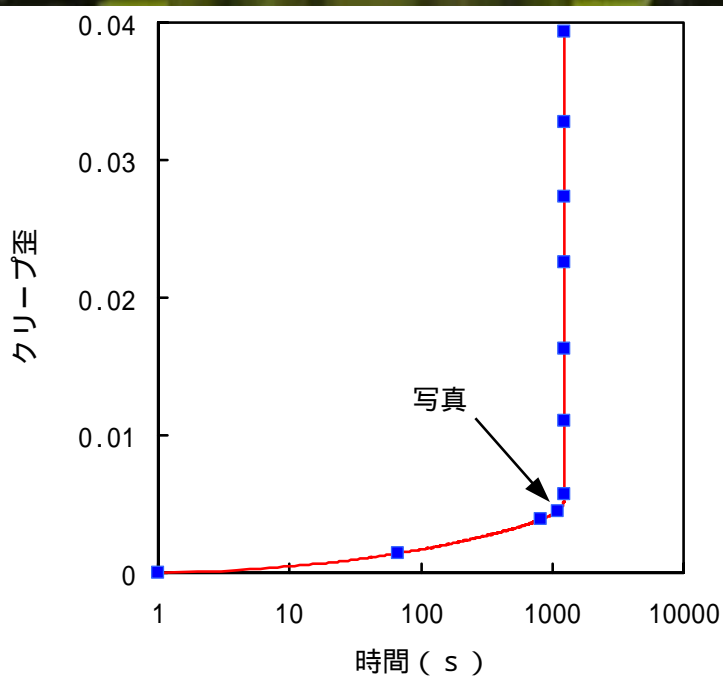
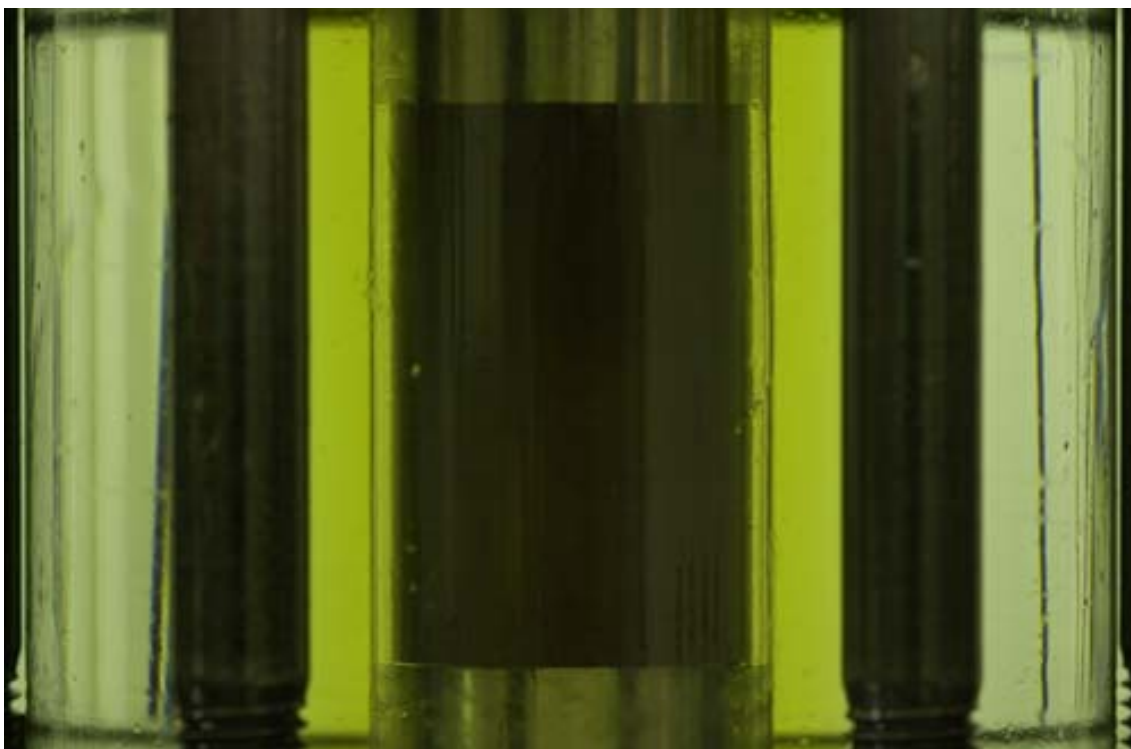
図3 - 17 試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 (b)と同じ試験片)





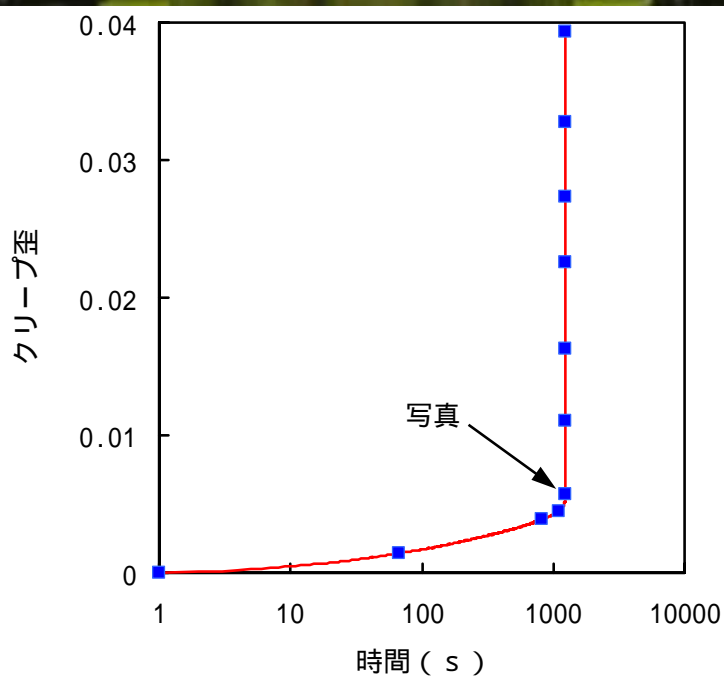
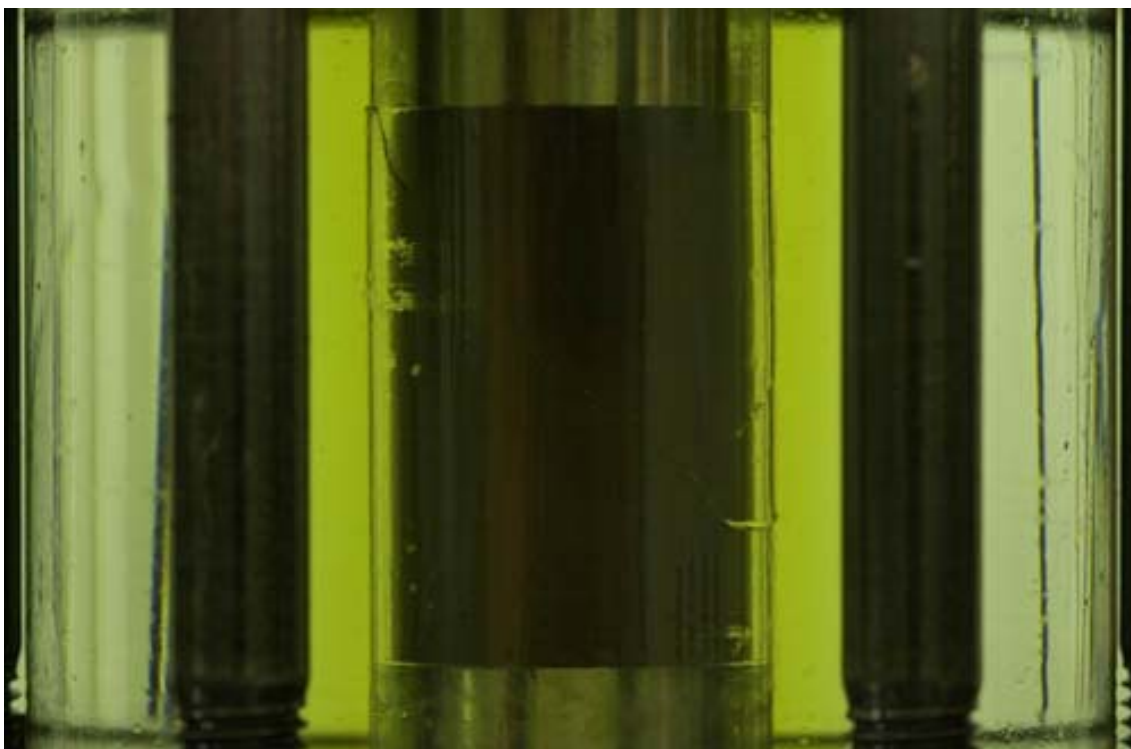
(d) 第5段階のクリープ開始後823s, クリープ歪 0.0039

図3 - 17 試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 (b)と同じ試験片)



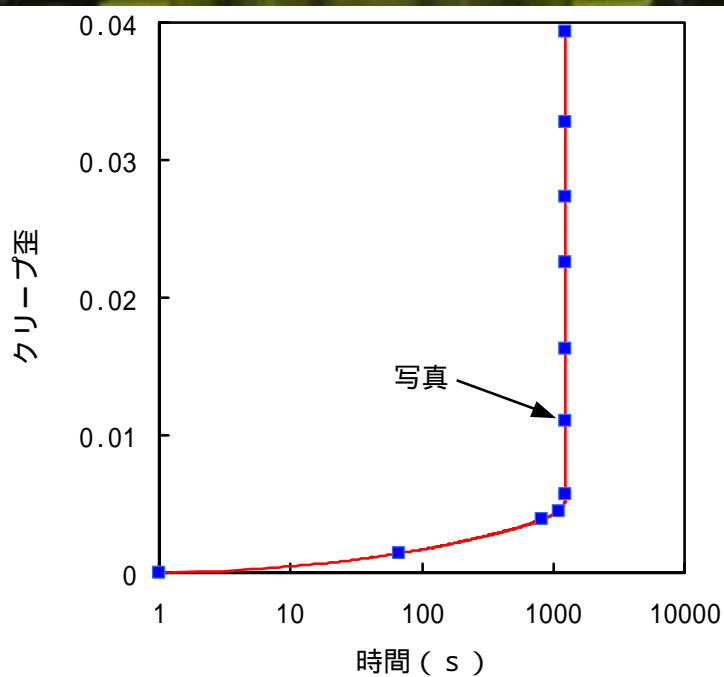
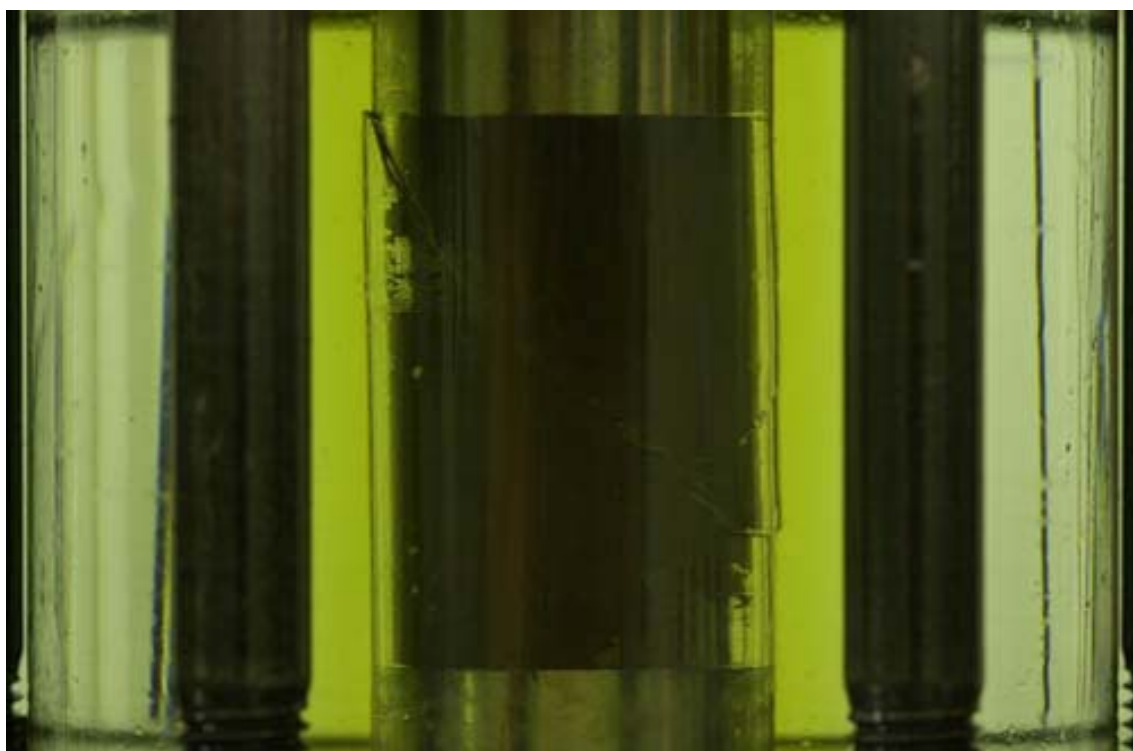
( e ) 第5段階のクリープ開始後1097 s , クリープ歪 0 . 0045

図3 - 17 試験片の写真と第5段階 (クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 ( b )と同じ試験片)



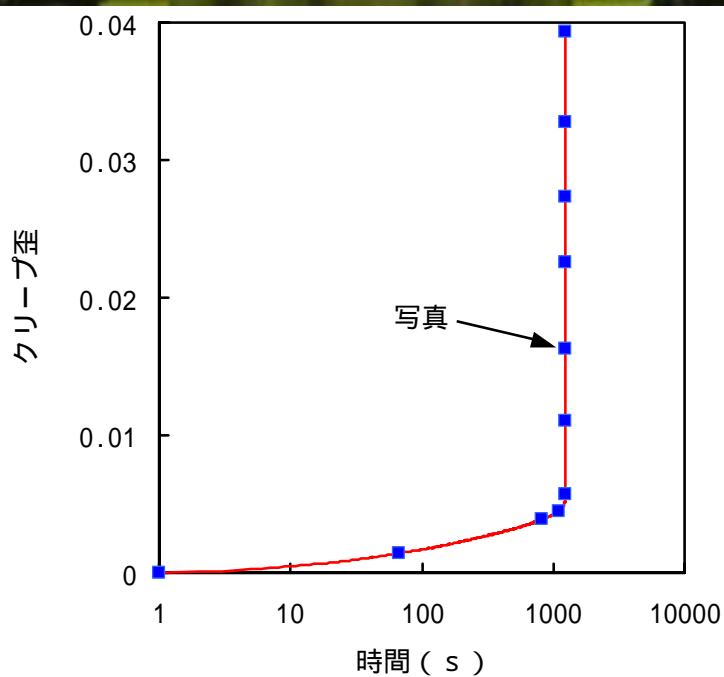
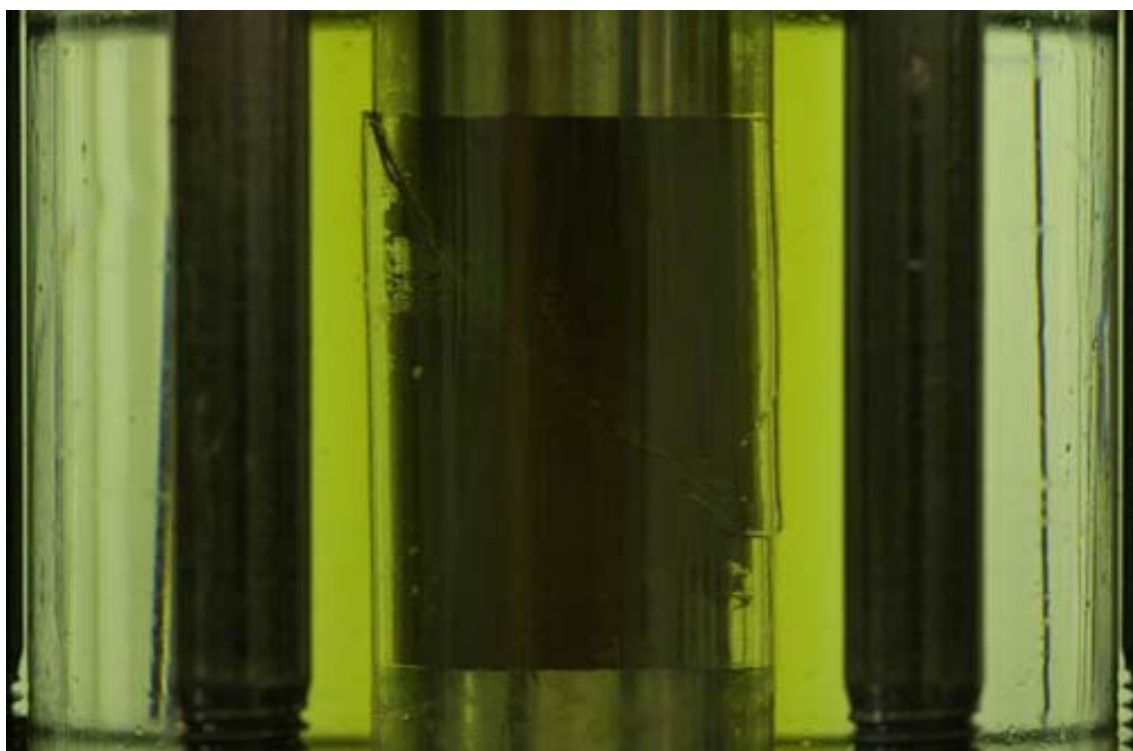
( f ) 第5段階のクリープ開始後1233 s , クリープ歪 0 . 0057

図3 - 17 試験片の写真と第5段階 (クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 ( b )と同じ試験片)



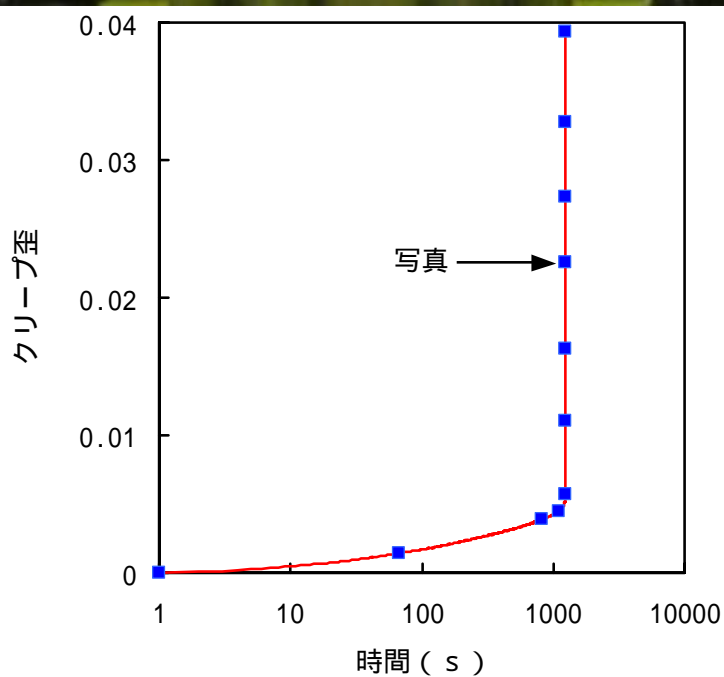
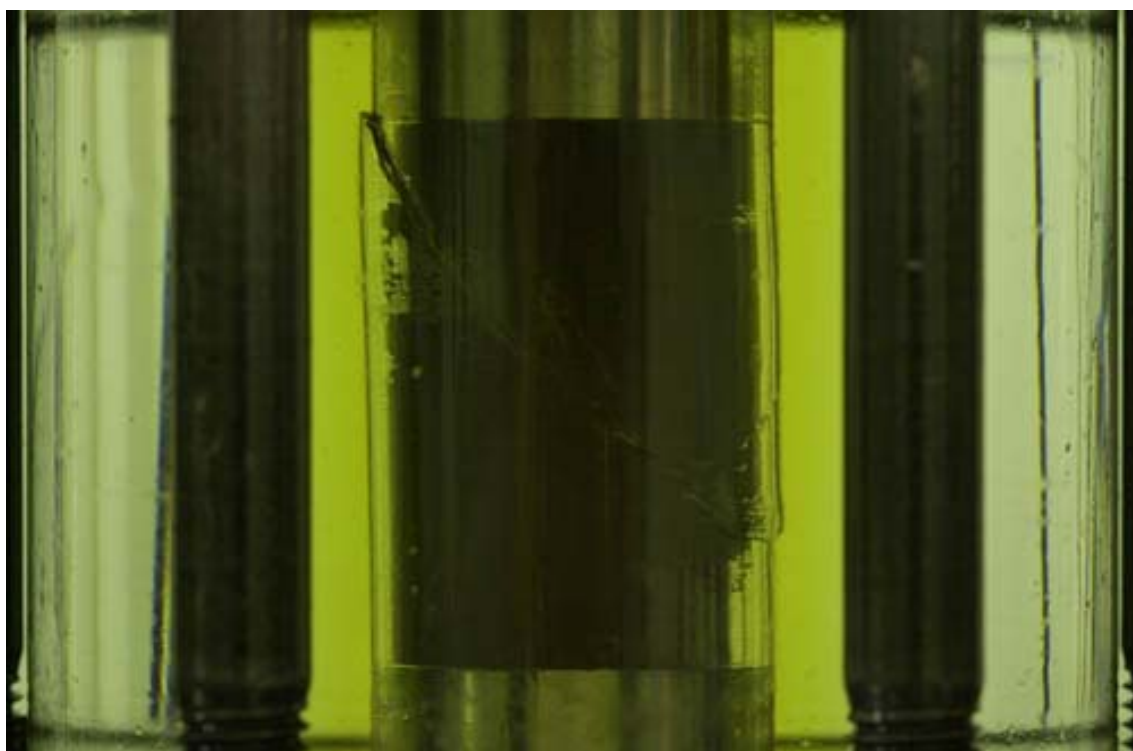
(g) 第5段階のクリープ開始後1236s, クリープ歪 0.011

図3 - 17 試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 (b)と同じ試験片)



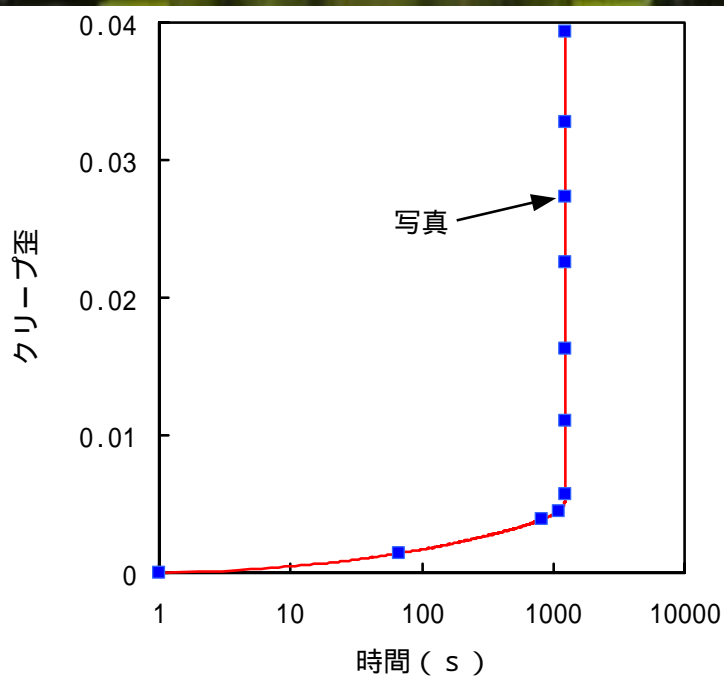
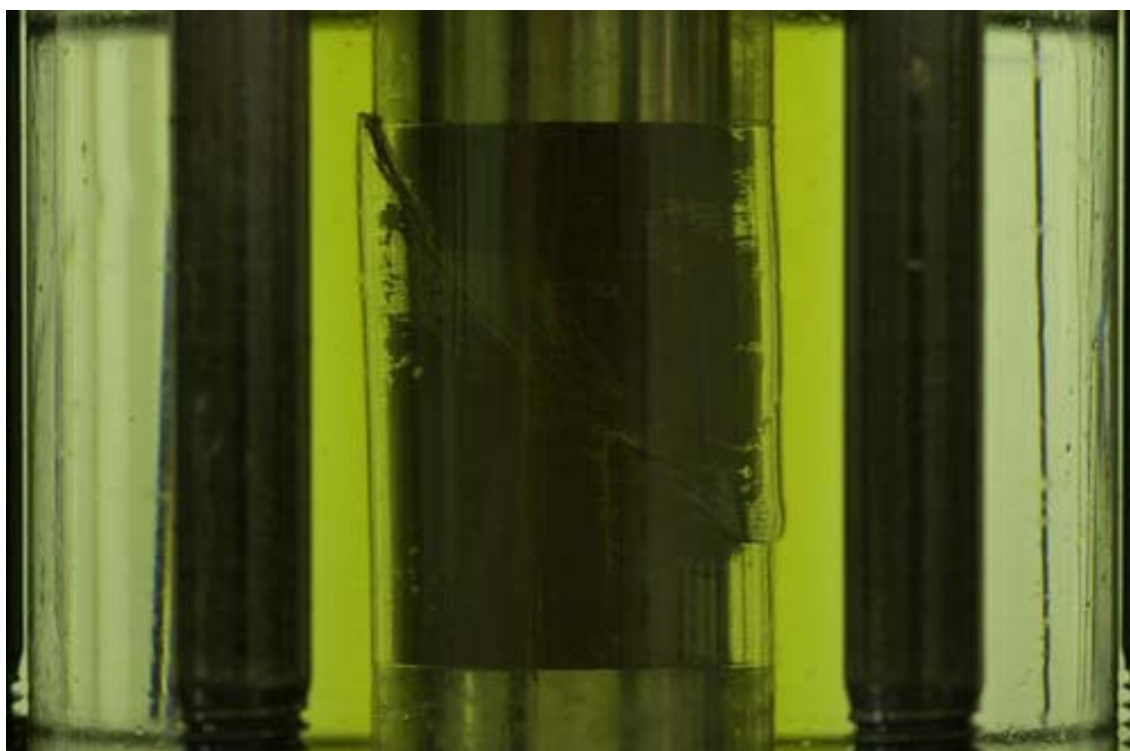
(h) 第5段階のクリープ開始後1237s, クリープ歪 0.016

図3 - 17 試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 (b)と同じ試験片)



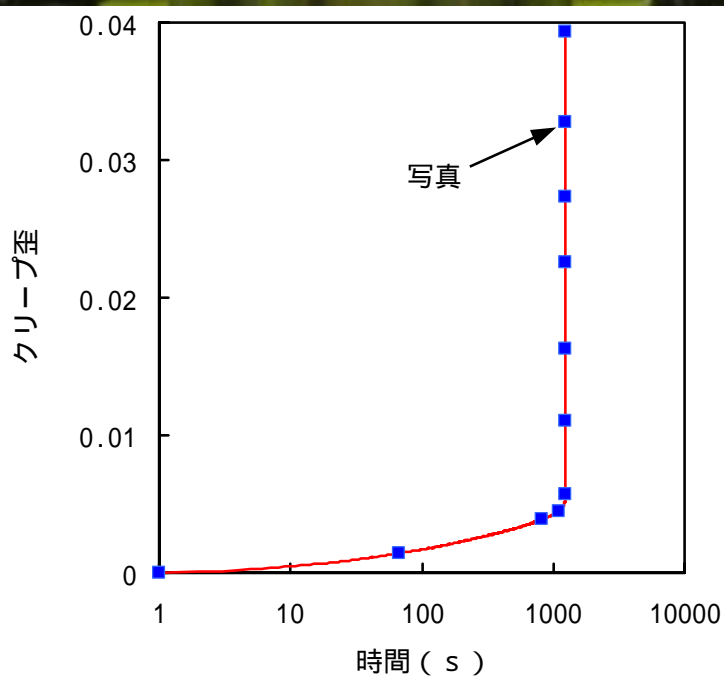
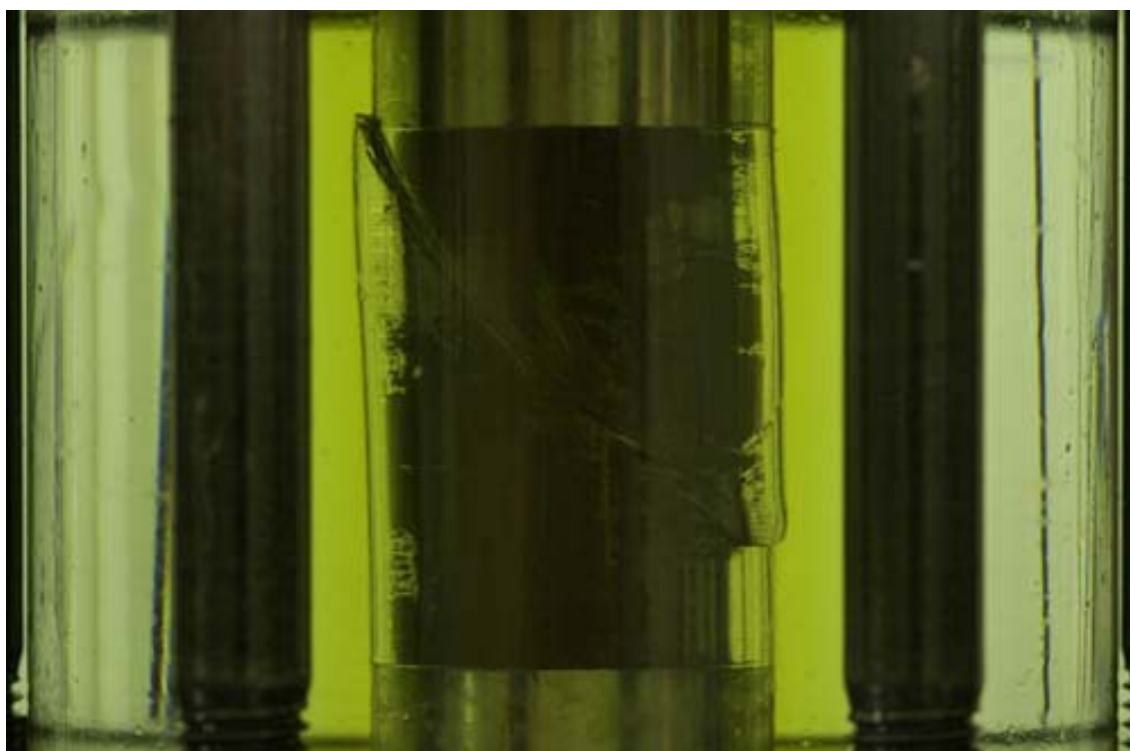
( i ) 第5段階のクリープ開始後1239 s , クリープ歪 0 . 0 2 3

図3 - 17 試験片の写真と第5段階 (クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 (b)と同じ試験片)



( j ) 第 5 段階のクリープ開始後 1 2 4 1 s , クリープ歪 0 . 0 2 7

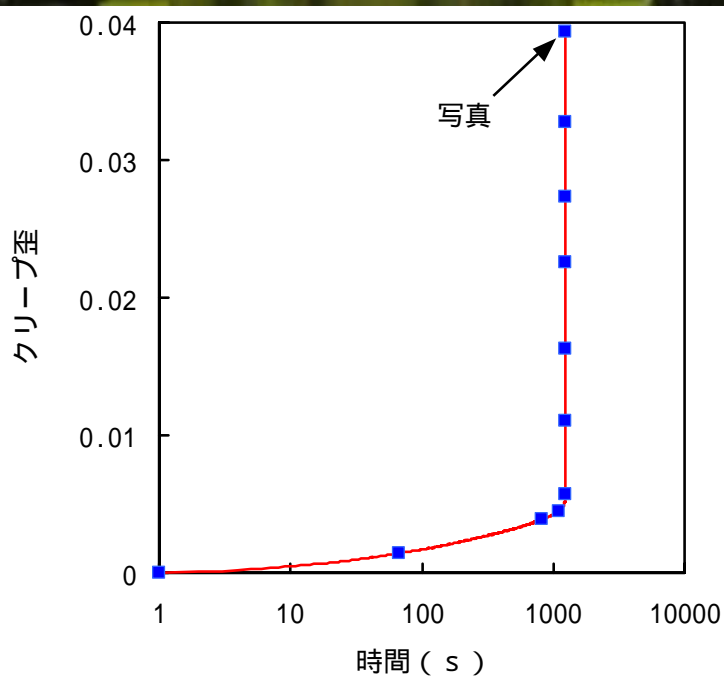
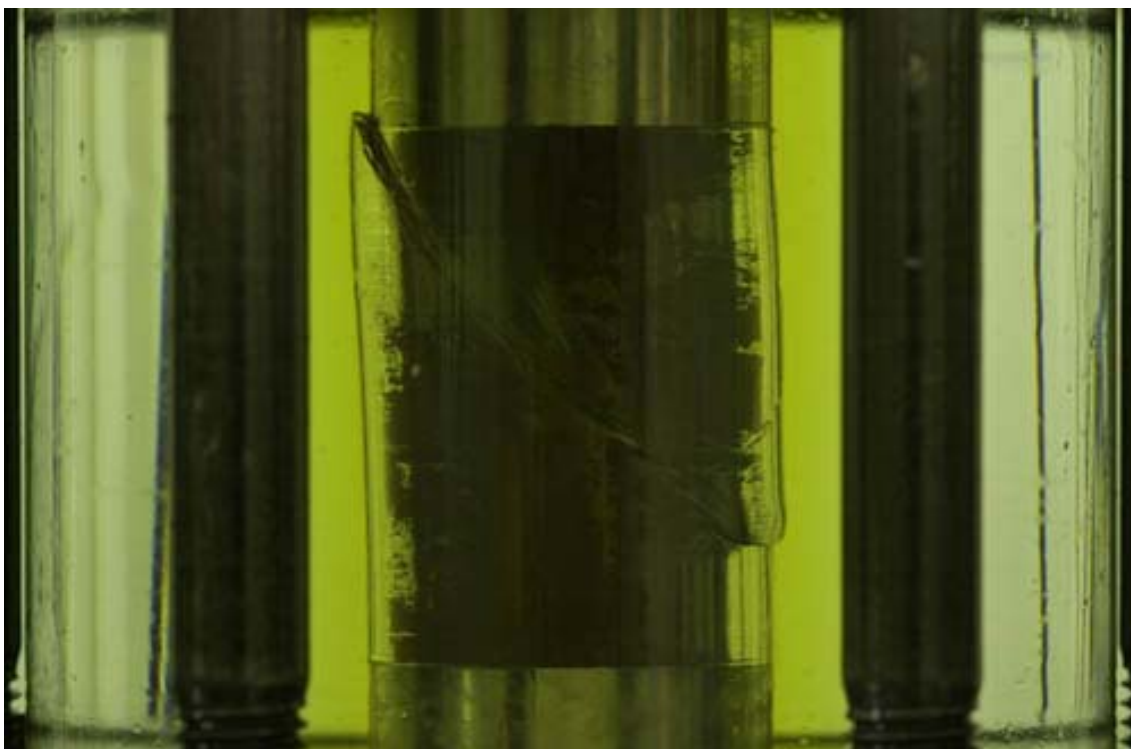
図 3 - 1 7 試験片の写真と第 5 段階 ( クリープ応力レベル 9 8 % ) でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図 3 - 1 7 に掲載した写真を撮った点  
 ( 周圧 2 M P a で図 3 - 1 5 ( b ) と同じ試験片 )



(k) 第5段階のクリープ開始後1243 s , クリープ歪0.033

図3 - 17 試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 (b)と同じ試験片)





(1) 第5段階のクリープ開始後1245 s , クリープ歪 0.039

図3 - 17 試験片の写真と第5段階(クリープ応力レベル98%)でのクリープ歪曲線  
 クリープ歪曲線上の は図3 - 17に掲載した写真を撮った点  
 (周圧2 MPaで図3 - 15 (b)と同じ試験片)

## 4. 幌延コアによるポアソン比の評価および可変型コンプライアンスモデルへの適用

### 4.1 周圧下での横歪の変化

ベッセル内に試験片を設置する三軸圧縮試験では、横変位の測定が困難である。齋藤ら(1998)はエンドピースに設置した多数の片持梁式変位計により、試験片中央断面の横変位を測定した。また、山口ら(2000)はデュアル平均値伸び計(軸方向)とローラーチェーン型伸び計(周方向)を組み合わせて測定をおこなった。しかし、これらの方法は装置の準備や試験の実施が容易ではなく、また、試験片の一部分の横変位しか測定できない。そこで本研究では、羽柴ら(2003)のように試験途中に撮影した写真に画像処理を施すことで、横変位を測定することにした。

測定では、まず、メディアンフィルタにより画像のノイズを除去した。次に、試験片の左右側面付近において、横方向に関して、隣接する画素間の輝度値の差を計算した。その差の絶対値が最大となる点、つまり、輝度値の変化が最も激しいところを試験片の端とした。これを試験片の上端から下端まで約450箇所でおこなった。このようにして定めた左右側面間の距離から横変位を算出した。なお、撮影した写真はカラーであるが、今回は簡単に測定をおこなうために白黒画像に変換をおこなった。コンピュータプログラムによる自動化により、写真1枚から1s以内に、試験片の高さ方向の約450点での横変位を求めることができた。横歪は、上記のように測定した横変位から求めたが、歪の算出には初期長さを基準とした微小変形の場合の式を用いた。横変位の分解能は約0.04 mm、すなわち、歪に換算して約 $1.6 \times 10^{-3}$ であった。なお、軸歪は縮む方向を、横歪は伸びる方向を正とした。

図3-13と図3-14で示したように、幌延コアの三軸圧縮試験では明瞭な破断面が形成される場合が多い。今回は写真撮影を一方向からおこなったため、写真に平行な面と破断面との関係により、試験片間での横変位のばらつきが大きくなると考えられる。そこでまず、すべての試験片を、図4-1のように破断面が試験片の左上部から右下部に、または、右上部から左下部に写っている試験片と、図4-1のように破断面が奥上部から手前下部に、または、手前上部から奥下部に写っている試験片の2種類に分けた。なお、試験片によってはとの中のものもあったが、慎重な観察の末、かにより近い方へ分類した。図4-2には軸歪と横歪の関係を示すが、凡例の試験片番号後の丸囲み数字は、この分類番号である。なお、横歪として試験片の上端から下端までの平均値(平均横歪)を採用した。

図4-2(a)に示すように、に分類された試験片2\_1では、強度破壊点に相当する軸歪約0.011まで、グラフは若干下に凸の曲線を描いている。軸歪0.011から0.012で横歪が急激に増加した後はほぼ直線となっている。に分類された試験片2\_2, 2\_3, 2\_4では、軸歪約0.005までは変形が小さく、その間に生じた横歪は試験片2\_1と同程度である。その後は、緩やかな勾配でほぼ直線的に横歪が増加している。2\_1と比べ横歪は小さく、軸歪約0.018での横歪は試験片2\_1の1/10~1/5程度であった。

図4-2(b)で示した周圧4 MPaの結果では、軸歪約0.007までは4本ともほぼ似たように横歪が増加している。に分類された試験片4\_1と4\_4では、それ以降もほぼ同じ傾きを保ったまま直線的に横歪が増加していく。一方、に分類された4\_2と4\_3に関しては、試験片4\_2は軸歪約0.007から、4\_3では軸歪約0.018から傾きが急になっている。

周圧2 MPaおよび4 MPaでの結果のうち、に分類された3本に着目してみると、いずれの試験片でも試験途中でグラフの傾きが変化していた。周圧2 MPaでは、傾きが変化する点での軸歪(約0.011)は強度破壊点での軸歪とほぼ等しかったが、周圧4 MPaの4\_2と4\_3では、傾きが変化する点での軸歪(約0.007と約0.018)は強度破壊点での軸歪(約0.015と約0.024)よりも小さかった。

#### 4.2 幌延コアのポアソン比の評価

測定した平均横歪を用いて、弾性論のポアソン比に相当する横歪/軸歪を求めた。なお、軸歪は差動変圧器で測定した値を用い、アクリル製ブラテンを使用した試験片では補正をおこなった。

図4-3には軸歪と平均横歪/軸歪の関係を示す。いずれの周圧下でも、軸歪0.005程度までは、横歪の分解能の影響でばらつきが大きく、確たることは言えないが、それ以降については図4-1で示したとで大きく異なる結果が得られた。に分類された5本の試験片では、周圧2 MPaでは軸歪0.01以降、周圧4 MPaでは軸歪0.005以降で、平均横歪/軸歪の値がほぼ一定となっている。一定となった後の値は、周圧2 MPaでは0.1程度、周圧4 MPaでは0.2程度と、多くの岩石で得られている弾性領域でのポアソン比よりも若干小さかった(山口ら:1991)。

一方、に分類された試験片2\_1では、試験開始から軸歪0.011までと軸歪0.012以降での傾きはほぼ等しいが、軸歪0.011から0.012で平均横歪/軸歪の

急激な増加がみられた。周圧 4 MPa での 2 本に関しては、軸歪約 0.005 以降、ほぼ直線的に平均横歪 / 軸歪が増加しており、2\_1 と同様に値が収束する様子はみられなかった。

大久保ら (1994) は、コンプライアンス可変型構成方程式を用いた有限要素法で、ポアソン比  $\nu$  の変化を次式のように仮定した。

$$\nu = 0.5 - (0.5 - \nu_0) / \epsilon^* \quad (4-1)$$

ただし、 $\nu_0$  はポアソン比の初期値 (弾性領域での値)、 $\epsilon^* = \epsilon / \epsilon_0$  は初期コンプライアンス  $\epsilon_0$  で正規化したコンプライアンスである。この仮定は体積弾性率を一定としたことと同じであり、ダイラタンシーをとともなう岩石の変形挙動とは厳密にはあわないものの、この仮定を用いた計算結果が、多くの試験結果をうまく再現するという研究結果が報告されている (趙ら: 1995)。

そこで図 4-3 には、(3-4) および (4-1) 式を用いた計算結果と  $\nu = \nu_0$  で表される直線とを示した。ただし、 $n$  と  $m$  は表 3-1 の値を用い、 $\nu_0$  は周圧 2 MPa では 0.1、周圧 4 MPa では 0.2 とした。いずれの周圧でも  $\nu_A = 0.007$  としたときの結果を示した。上記のように試験結果に関しては、軸歪 0.005 程度まではばらつきが大きいため確たることは言えないが、それ以降に関しては、 $\nu$  に分類された試験片の挙動は  $\nu = \nu_0$  でうまく再現できている。一方、 $\nu$  に分類された試験片では、2\_1 では軸歪約 0.011 まで、4\_2 では軸歪約 0.014 までは計算結果と比較的あっているものの、それ以降は試験結果の方が計算結果よりも大きくなっている。4\_3 での結果は  $\nu = \nu_0$  と (4-1) 式の計算結果との間に入っていた。

今回の結果のように、巨視的な破断面や異方的な横方向変形を、有限要素法などの数値シミュレーションで表現するのは難しいが、横歪 / 軸歪の変化に関しては、多くの試験片で、従来から用いられている (4-1) 式、もしくは  $\nu = \nu_0$  でうまく再現できることがわかった。

#### 4.3 可変型コンプライアンスモデルへの適用

周圧によるポアソン比の変化に関しては、発表済のデータがきわめて少ない。本研究では、可視化ベッセルを使用して、ポアソン比の周圧依存性についても検討した。その結果によれば、初期（荷重の小さい間）のポアソン比  $\nu_0$  は、周圧 2 MPa では 0.1、周圧 4 MPa では 0.2 程度であった。また、変形・荷重が大きくなってもポアソン比が変化しない場合と、(4-1) 式のように増加する場合とがあることがわかった。

試験片も少なく、本研究では、周圧下でのポアソン比を測定する有力な実験手段を見出し、ポアソン比の挙動はかなり複雑なことが判明したことしかいえない。今後の追加実験が是非とも必要といえる。

差し迫って、数値計算をする必要があるとき、考えられるポアソン比の仮定を、最後に考えてみる。

(案1) 従来どおり (4-1) 式を仮定する。その際、 $\nu_0 = 0.1$  とする。

(案2) ポアソン比は常に一定で、0.15 (平均値) とする。

ポアソン比を周圧により変えることも考えられるが、これまでの経験によれば、計算が不安定になりがちであった。この点については、さらなる検討が必要といえる。

#### 4.4 長期安定性に関する試算

実験結果より、(3-4) 式であらわされる構成方程式のパラメータがもとまったので、岩盤の長期安定性を次のような条件のもとに計算してみる。

n と m

	圧縮強度 (差応力)		
	MPa	n	m
周圧 0 MPa	4.1	3.9	2.8
周圧 2 MPa	12.5	5.8	1.9
周圧 4 MPa	17.6	7.1	2.4

ポアソン比

ポアソン比は、(案1) 従来どおり (4-1) 式を仮定する。その際、 $\nu_0 = 0.1$  とする。

地圧

水平方向地圧(周圧) 0, 2, 4 MPa で、垂直方向地圧をそれぞれでの強度の 70, 80, 90% とした。

水平方向地圧 0 , 2 , 4 MP aとして数値計算した歪の経時変化を、それぞれ図 4 - 4 ( a ) , ( b ) , ( c ) に示す。圧縮歪を正としたので次第に上昇するのが縦歪であり、次第に減少するのが横歪である。図 4 - 4 から次のことがわかる。

縦歪は時間経過とともに、最初は緩やかに上昇するが、次第に歪速度が上昇してやがて破壊する。定性的な傾向は周圧により変わらないが、細かくみると周圧が高いほど急激に歪速度が上昇する。

横歪も時間経過とともに、最初は緩やかに上昇するが、次第に歪速度が上昇してやがて破壊する。縦歪と比べると、いずれの周圧でも、横歪の方が急激に歪速度が上昇する。

寿命は、当然ながら、垂直方向地圧が大きいほど短くなる。

同じ応力レベルにおける寿命を比較すると、周圧が高いほど長寿命である。これは、周圧が大きいほど  $n$  は大きくなり、その結果、同じ応力レベル = (垂直方向地圧)/(強度) では (3 - 4) 式右辺の  $(\quad)^n$  の値が小さくなるからである。例えば応力レベル 90% とし、0.9 の 3.9 乗は 0.016 であるのに対して、0.9 の 7.1 乗は 0.00056 となる。

応力レベルが 10% 異なったときの寿命は、周圧が高いほど大きく変化する。これも、周圧が大きいほど  $n$  は大きくなるためといえる。試しに計算してみると、応力レベル 0.8 と 0.7 の時の寿命の比は、次のようになる。

$$\text{周圧 0 MP a で } n = 3.9 \quad \text{寿命の比} = (0.8 / 0.7)^{3.9} = 1.83$$

$$\text{周圧 4 MP a で } n = 7.1 \quad \text{寿命の比} = (0.8 / 0.7)^{7.1} = 13.105$$

～ は基礎的な事項であるが、周圧下における実験結果が少ないので、実験的な検証は難しい。このような基礎的な事項についてすら、周圧下では信頼性の高い実験データが少ない現状といえる。殊に、3次クリープ領域における横歪の増加については、知見が少ない。

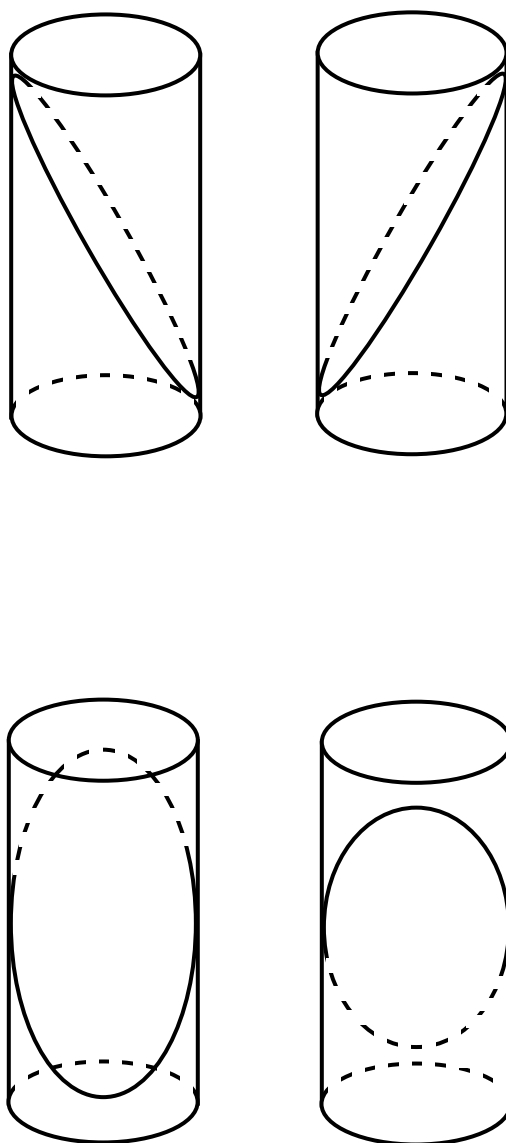
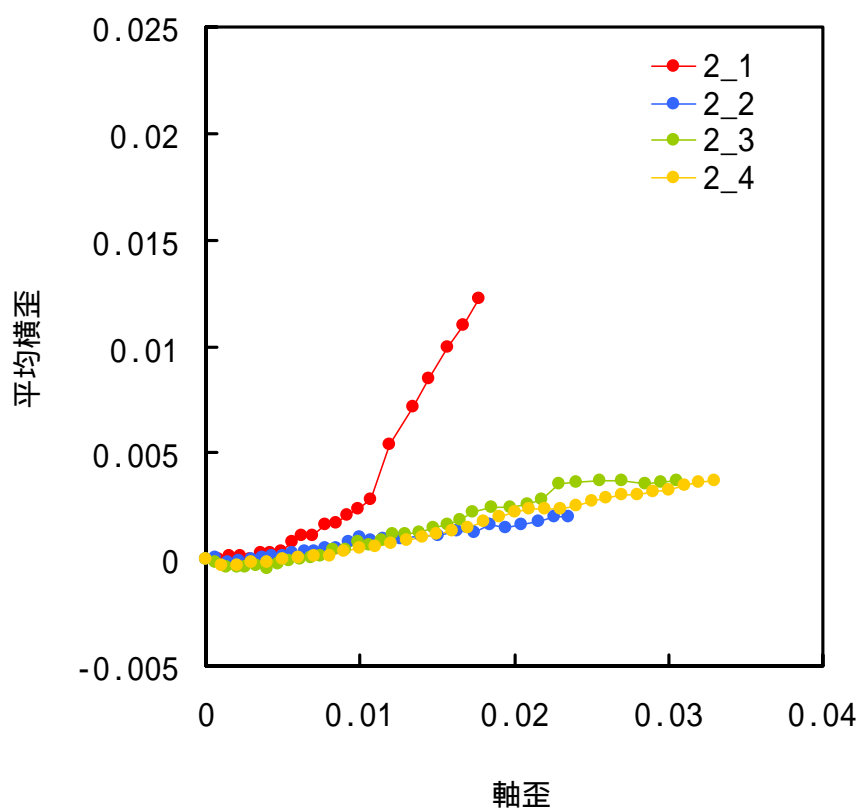


図4 - 1 写真と平行な面と破断面との関係

破断面が試験片の左上部から右下部に、または、  
右上部から左下部に写っている場合

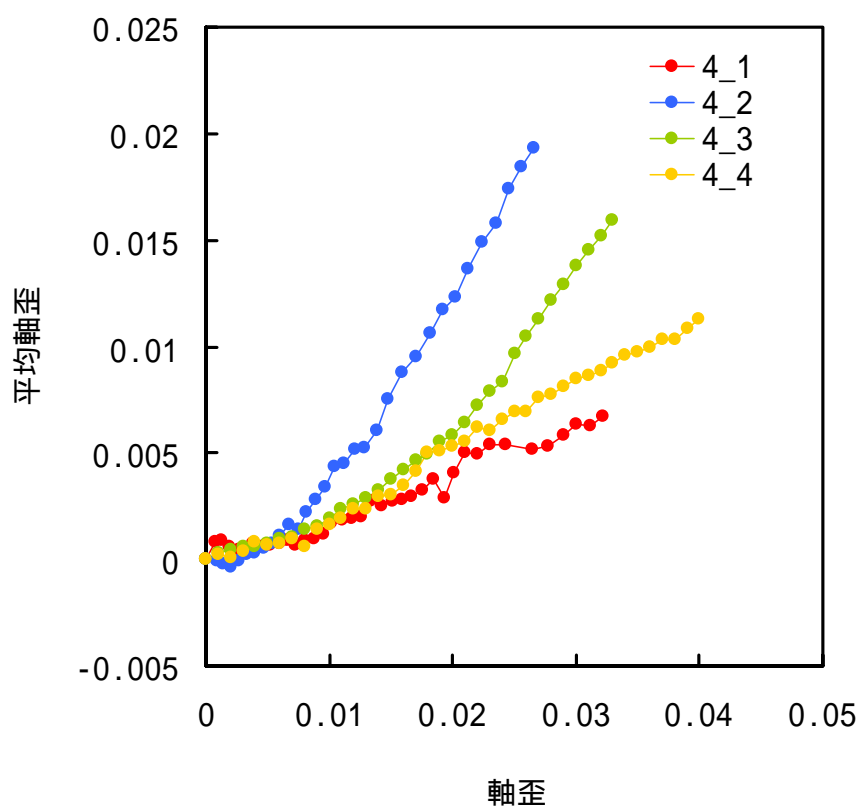
破断面が試験片の奥上部から手前下部に、または、  
手前上部から奥下部に写っている場合



( a ) 周圧 2 M P a

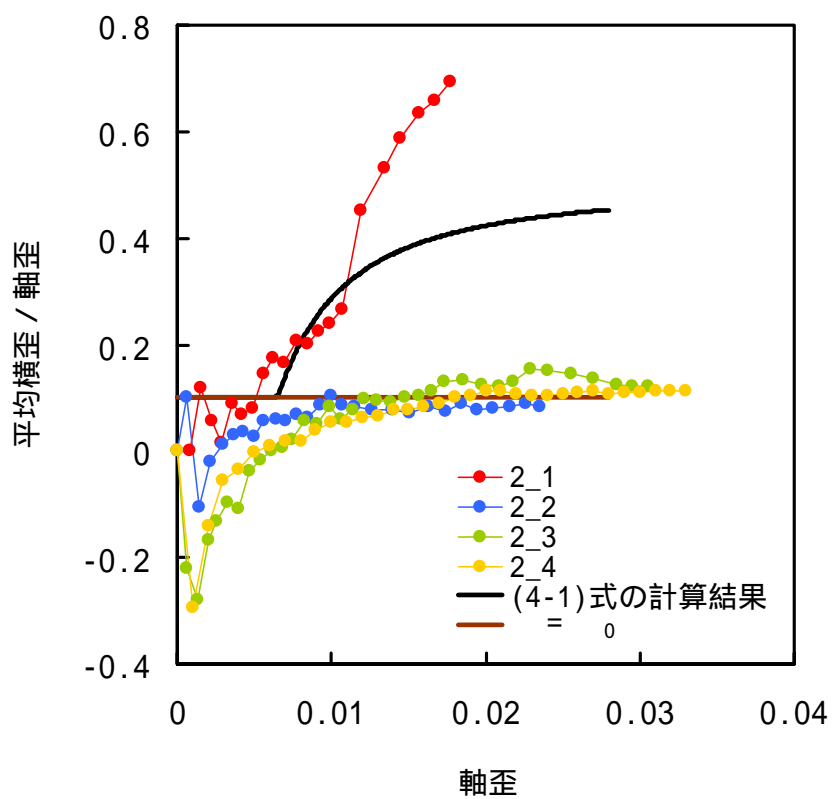
図 4 - 2 軸歪と横歪の関係





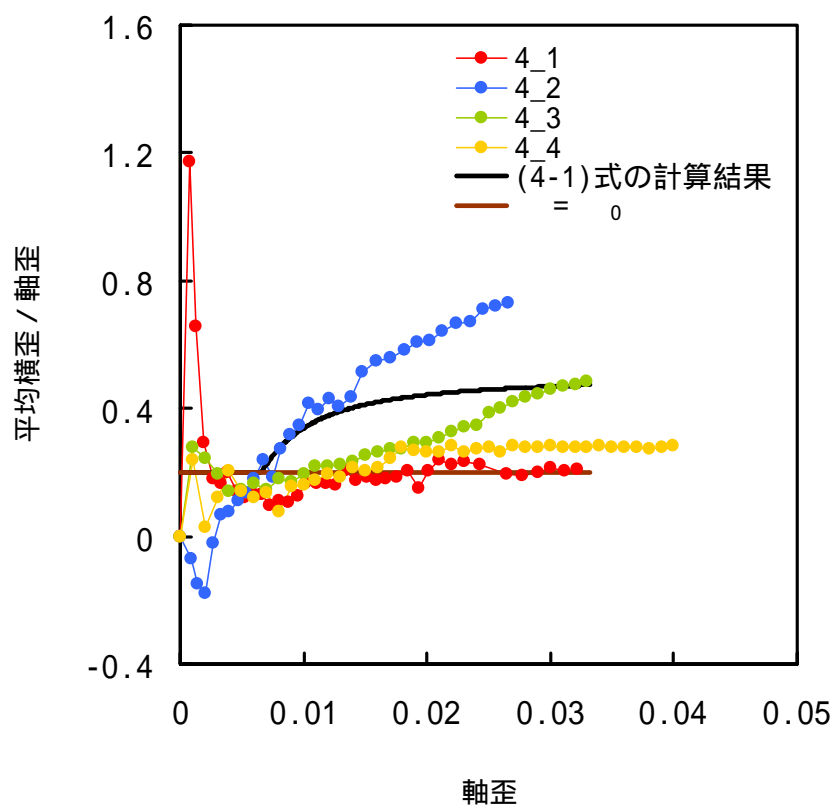
( b ) 周圧 4 MP a

図 4 - 2 軸歪と横歪の関係



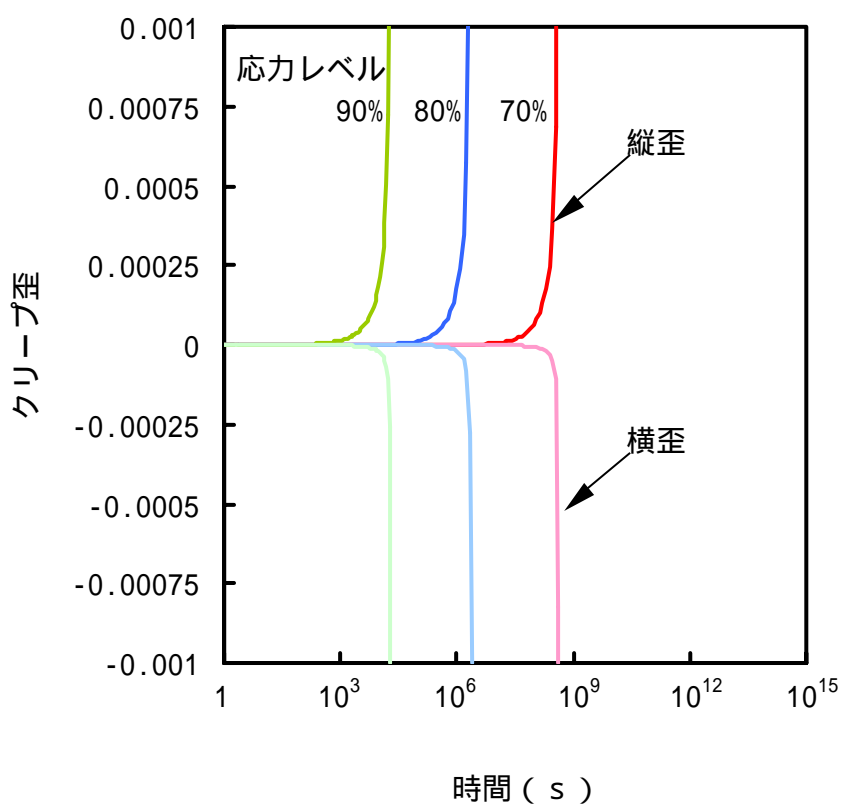
( a ) 周圧 2 MP a

図 4 - 3 軸歪と横歪 / 軸歪の関係



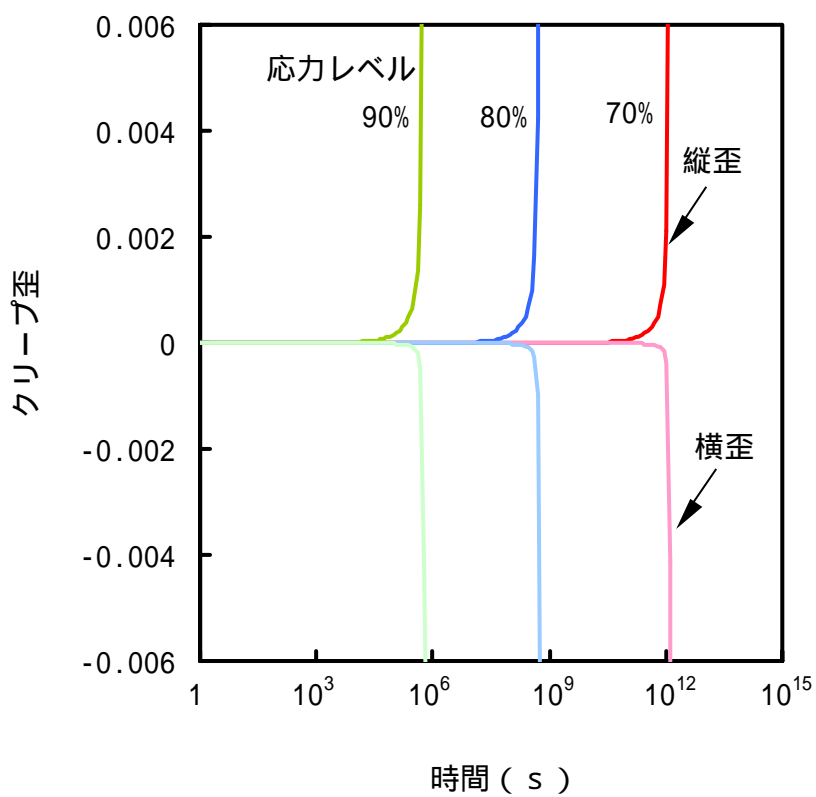
(b) 周圧 4 MP a

図4 - 3 軸歪と横歪 / 軸歪の関係



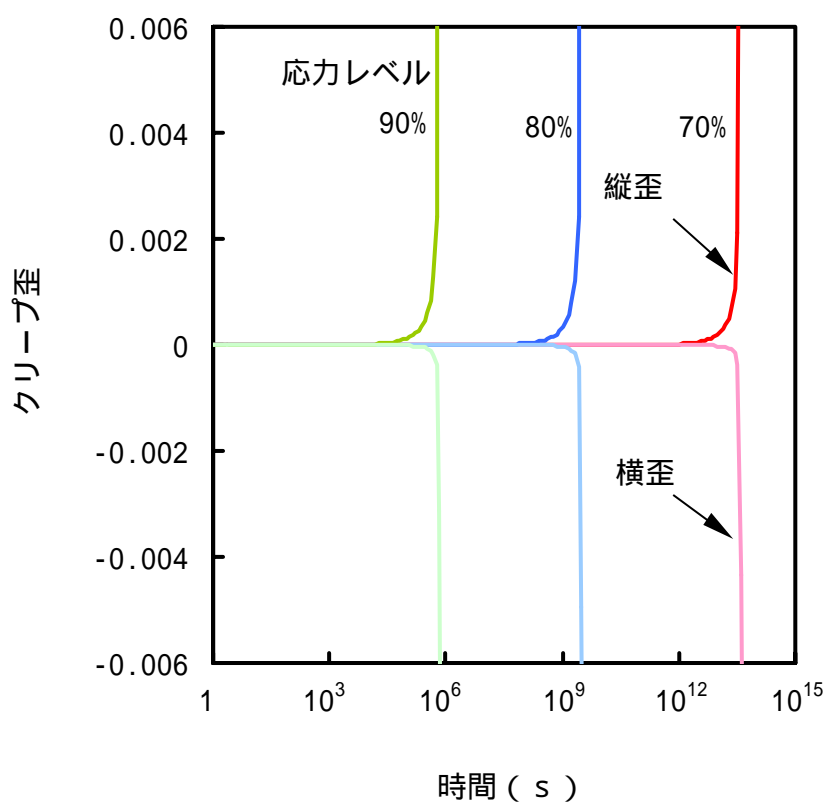
( a ) 水平方向地圧 0 M P a

図 4 - 4 一定応力下での縦歪と横歪の経時変化  
 応力レベル = (垂直方向地圧) / (強度) は、左から右に 90 , 80 , 70 % である



( b ) 水平方向地圧 2 M P a

図 4 - 4 一定応力下での縦歪と横歪の経時変化  
 応力レベル = (垂直方向地圧) / (強度) は、左から右に 90, 80, 70% である



(c) 水平方向地圧 4 MPa

図4-4 一定応力下での縦歪と横歪の経時変化  
 応力レベル = (垂直方向地圧) / (強度) は、左から右に 90, 80, 70% である

## 5. おわりに

ナチュラルアナログ的アプローチによる岩盤の長期挙動評価手法について概念的な考えを示した。一つの例として、地圧測定結果を利用した長期強度の推定をおこなった。まず、主応力線図（ $\sigma_1 - \sigma_3$ 線図）上に、これまでに得られた地圧の測定結果をプロットしてみた。その結果では、一つの例外を除いて、全てのデータは  $\sigma_1 = 4 \sigma_3$ なる直線より下に位置することがわかった。比較的安定な岩盤で計測された地圧であることから、これは長期強度を示す直線であり、これより下の領域は、長期間安定な領域といえる可能性が高い。

幌延地域で採取されたボーリングコアを用いて、三軸圧縮応力状態におけるデータを取得し、周圧が岩石の長期力学的変形挙動に与える影響について検討した。

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムを考えるにあたり、ニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動を適切に評価することが重要である。多くの研究が発表されているが、一軸圧縮応力状態における岩石の長期力学的変形挙動について述べたものが主である。しかしながら、実際の処分環境においてニアフィールド岩盤は、三軸圧縮応力下にあると推測されるので、今後、三軸圧縮応力状態における長期力学的変形挙動について検討する必要がある。

本研究では、三軸圧縮応力状態での試験を実施した。最初におこなった三軸圧縮試験では、試験中に载荷速度を速めたり遅くしたりして、強度破壊点付近の応力の増減の程度から、供試体の粘弾性的性質を把握することを試みた。試験では、著者が独自に開発した可視化ベッセルを用い、新規開発した透明なアクリル製プラテンを使用した。試験中の試験片の変形や破断面の状態、そして、試験片からの水の出入りを観察することができた。さらに、三軸圧縮応力下で多段階クリープ試験をおこなった。試験片の変形と連動する写真撮影システムにより、クリープ破壊直前の観察に成功した。これらの試験結果より、周圧下でのポアソン比を評価し、コンプライアンス可変型構成方程式のパラメータを求めた。また、コンプライアンス可変型構成方程式を用いて長期安定性に関する試算をおこなった結果についても述べた。

幌延地域で採取されたボーリングコアを用いた試験結果をまとめると次のようになる。  
周圧に伴う強度の増加は、他の岩石と比較して、やや大きめと思われる。

構成方程式のパラメータ中の  $n$ （粘弾性の程度を決める）は、一軸圧縮応力下で 3.9（昨

年度：30)であった。この値はやや軟質の堆積岩としては平均的なものである。

周圧の増加にともなって $n$ は増加した。これは、従来の結果と定性的に一致する。

構成方程式のパラメータ中の $m$ (応力 - 歪曲線の形を決める)は、20 ~ 30(昨年度：30前後)であった。

三軸圧縮試験，多段階クリープ試験をあわせて考えると，今回の試験対象岩石は，軟質堆積岩として平均的な粘弾性的性質をもっていると判断した。

以上の結果は，定性的には，昨年度実施した同じ幌延地域で採取されたボーリングコアを用いた試験結果と，ほぼ一致する。目立った相違は，昨年度の一軸圧縮強度が8.3 MPaであるのに対して，本年度は4.1 MPaと半分程度であったことである。それにもかかわらず，構成方程式中の定数 $n$ と $m$ の値の差異は比較的小さかった。



## 参考文献

- Amadei, B.: In Situ Stress Measurements in Anisotropic Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.21, p.327-338,(1984)
- 浅田敏編：地震予知の方法，初版3刷，東京大学出版会(東京)，p.137-139，(1980)
- Cai.M., Qiao.L., Li.C. and Wang.S.: Improvement on hollow inclusion technique and its application to in situ stress measurement in four Chinese metal mines, Proc. Int. Symp., Rock Stress (Kumamoto), p.89-93, (1997)
- Cooling C.M., Hudson J.A. and Tunbridge L. W.: MEASUREMENT IN THE U.K.---PART . SITE EXPERIMENTS AND STRESS FIELD INTERPRETATION, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, p.371-382, (1988)
- Haimson B. C., Lee M.Y., Feknous N.and Courval P: Stress Measurements at the Site of the SM3 Hydroelectric Scheme Near Sept Iles, Quebec, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.33, p.487-497, (1996)
- Hayashi K., Sato A. and Ito T.: In situ Stress Measurements by Hydraulic Fracturing for a Rock Mass with Many Planes of Weakness, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.34, p.45-58,(1997)
- Kanagawa T., Hibino S., Ishida T., Hayashi M. and Kitahara Y.: In Situ Stress Measurements in the Japanese Islands: Over-coring Results from a Multi-element Gauge Used at 23 Sites, Int. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23, p.29-39 (1986)
- Leijon B. A.: RELEVANCE OF POINTWISE ROCK STRESS MEASUREMENTS --- AN ANALYSIS OF OVERCORING DATA, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, p.61-68, (1989)
- Ljunggren C. and Amadei B.: Estimation of Virgin Rock Stresses from Horizontal Hydrofractures, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, p.69-78, (1989)
- 西松裕一，大久保誠介，福井勝則：破壊限接近度と局所安全率に関する考察と拡張，資源と素材，Vol.110, No.4, p.343-346, (1994)
- Obara Y. and Sugawara K.: Improvement in accuracy of the conical-ended borehole technique, Proc. Int. Symp. Rock Stress (Kumamoto), p.77-82, (1997)

- Oikawa Y. and Matsunaga I: Differential strain curve analysis to estimate stress state around Soultz EPS-1 well, Proc. Int. Symp. Rock Stress (Kumamoto), p.177-180, (1997)
- 大久保誠介:コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討,資源と素材,Vol.108, No.8, p.601-606, (1992)
- 大久保誠介: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(PNC TJ1602 97-004), 第2章,動力炉・核燃料開発事業団,(1997)
- 大久保誠介,福井勝則:岩盤挙動の過去へのシミュレーション,資源と素材, Vol.114,p.763-768,(1998)
- 大久保誠介,福井勝則,新孝一:岩盤の破壊基準と長期強度に関する一考察,資源と素材, Vol.115, p.213-218,(1999)
- 力武常次:地震予知論,初版4刷,共立出版, p.79-81, (1981)
- 島崎英彦,新藤静雄,吉田鎮男編:放射性廃棄物と地質科学,第2刷,p.12-14,東京大学出版会,(1997)
- Smith D.L. and Evans B.: DIFFUSIONAL CRACK HEALING IN QUARTZ, J.Geophys.Res., Vol.89, No.B6, p.4125-4135, (1984)
- 新孝一,李方全,大久保誠介:水圧破砕による中国房山地点の岩盤応力測定 - 不連続面の少ない中国の花崗岩地域での水圧破砕実験(第2報) -,資源と素材,Vol.112, p.921-928, (1996)
- 田中豊:応力測定による地殻浅部の破壊の予測,第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p.251-256, (1998)
- 宇津徳治:地震学,初版3刷,共立出版, p.229-235, (1978)
- 山口梅太郎,西松裕一:岩石力学入門,東京大学出版会,3.1節および9.1節,(1991)
- 大久保誠介・何昌栄・西松裕一:一軸圧縮応力下における時間依存性挙動 - 岩石の Post-failure Region での挙動(第1報) -,日本鉱業会誌,103, p.177-181, (1987)
- Okubo S., Nishimatsu Y. and He C.: LOADING RATE DEPENDENCE OF CLASS ROCK BEHAVIOUR IN UNIAXIAL AND TRIAXIAL COMPRESSION TESTS - AN APPLICATION OF A PROPOSED NEW CONTROL METHOD, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27, p.559-562, (1990)
- 大久保誠介・福井勝則:コンプライアンス可変型構成方程式の定数について,資源と素材, 113, p.561-564, (1997)

大久保誠介・福井勝則・木村有仁：土丹の力学的特性と構成方程式，トンネルと地下，32，  
1，p.45-50，（2002）

趙顕・福井勝則・大久保誠介：岩石の寸法効果と時間依存性挙動の計算機シミュレーションによる検討，資源と素材，111，p.595-600，（1995）

羽柴公博・大久保誠介・福井勝則：可視化ベッセルを用いた周圧下でのクリープ試験と破壊直前までの連続写真，第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，p.95-100，  
（2003）

大久保誠介・趙顕：計算機シミュレーションによる岩石の寸法効果の検討，資源と素材，  
110，p.109-114，（1994）

齋藤敏明・村田澄彦・今村雅弘・笹尾春夫：岩石の三軸圧縮試験における強度破壊点以降の横方向変形，資源と素材，114，p.901-908，（1998）

山口勉・大久保誠介・エンリコ マラニーニ・成田孝：稲田花崗岩の周圧下の多段階クリープ試験と長期寿命予測，資源と素材，116，p.91-96，（2000）

山口梅太郎・西松裕一：岩石力学入門，第3版，p.134，東京大学出版会，（1991）