

# オフライン荷重センサーの開発

焼結体による荷重測定素子の特性測定(その2)

1994年9月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

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ください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

# オフライン荷重センサーの開発

## 焼結体による荷重測定素子の特性測定(その2)

嶋守重人\*<sup>1</sup>, 小林孝良\*<sup>1</sup>, 鈴木惣十\*<sup>1</sup>,  
金城勝哉\*<sup>2</sup>, 奥田英一\*<sup>3</sup>, 加納茂機\*<sup>4</sup>

### 要 旨

オフ・ライン荷重センサーの開発に関して、「焼結体による荷重測定素子の特性測定(その1)(PNC SN9410 90-082)」で得られた基礎的特性データに基づき、原子炉環境下における実用化の観点から特性測定(Ⅱ)及び(Ⅲ)として以下の試験及び検討を行った。

#### (1) 特性測定(Ⅱ)

- 1) 初期条件調整圧縮試験
- 2) 形状パラメータ圧縮試験
- 3) 斜角圧縮試験
- 4) 圧縮クリープ試験

#### (2) 特性測定(Ⅲ)

- 1) 初期条件調整圧縮試験
- 2) 高温平行圧縮試験
- 3) 高温斜角圧縮試験

特性測定(Ⅱ)により、測定素子は530℃程度以下の原子炉環境下においてオフ・ライン荷重センサーとして実用に供しうるとの見通しが得られた。さらに特性測定(Ⅲ)では、ルースパーツ対策としてカバーを接合した測定素子の特性データ取得し、実用の可能性を確認した。

一連の特性測定試験と並行して、原子炉内における荷重測定素子としての実用化検討と汎用性の検討も加えた。

本報告書では、特性測定(Ⅱ)及び(Ⅲ)の期間に得られた成果を第1編、第2編で報告するとともに、第3編に実用化に関する検討結果を報告する。

---

\*1: 実験炉部 技術課、 \*2: 総務部 訴訟対策室、

\*3: 動力炉開発推進本部 もんじゅ管理課、 \*4: 基盤技術開発部 先進技術開発室

## Development of off-line load sensor

### Characterization of sintered-metal load gauge element (2)

Shigeto Shimamori\*<sup>1</sup>, Takayoshi Kobayashi\*<sup>1</sup>, Soju Suzuki\*<sup>1</sup>  
Katsuya Kinjo\*<sup>2</sup>, Eiichi Okuda\*<sup>3</sup>, Shigeki Kano\*<sup>4</sup>

### Abstract

Subsequent to the previous testing (PNC SN9410 90-082, June 1990), characterization has been made on the sintered-metal load gauge element.

The sintered-metal load gauge element was developed for use in off-line load measurement in the reactor environment.

The testing conducted is as follows :

• Characterization test phase II

- 1) Compression Tests for Initial Adjustment
- 2) Geometrical Parameter Compression Tests
- 3) Inclined Compression Tests
- 4) Creep Tests at Elevated Temperature

• Characterization test phase III

(For application in the reactor environment, the sintered-metal was covered with thin plates.)

- 1) Compression Tests for Initial Adjustment
- 2) Compression Tests at Elevated Temperatures
- 3) Inclined Compression Tests at Elevated Temperatures

The results have shown that the sintered-metal load gauge element is applicable in the reactor environment.

In association with the characterization tests, method for practical applications in JOYO and extended application have also been investigated.

---

\*1 : Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC, PNC

\*2 : Administration Division, Litigation Support Office

\*3 : Reactor Development Project, Monju Project Management Section

\*4 : Advance Technology Division, Frontier Technology Development Section

## 目 次

|  | 頁   |
|--|-----|
| 和文要旨 .....                             | I   |
| 英文要旨 .....                             | II  |
| 目 次 .....                              | III |
| 図表リスト .....                            | V   |
| <br>                                   |     |
| まえがき .....                             | 1   |
| <br>                                   |     |
| 第1編 焼結体による荷重測定素子の特性測定 (II) .....       | 2   |
| 1. 概 要 .....                           | 3   |
| 2. 荷重測定素子の初期条件調整 .....                 | 4   |
| 2.1 初期密度調整のための供試体の試作 .....             | 4   |
| 2.2 供試材初期条件調整圧縮試験 .....                | 4   |
| 3. 特性測定試験 .....                        | 10  |
| 3.1 形状パラメータ圧縮試験 .....                  | 10  |
| 3.2 斜角圧縮試験 .....                       | 20  |
| 3.3 圧縮クリープ試験 .....                     | 32  |
| 4. ま と め .....                         | 42  |
| <br>                                   |     |
| 第2編 焼結体による荷重測定素子の特性測定 (III) .....      | 44  |
| 1. 概 要 .....                           | 45  |
| 2. カバー及び取付座付荷重測定素子の設計・製作及び初期条件調整 ..... | 46  |
| 2.1 カバー付荷重測定素子の設計・製作 .....             | 46  |
| 2.2 初期条件調整圧縮試験 .....                   | 48  |
| 3. 特性測定試験 .....                        | 51  |
| 3.1 高温平行圧縮試験 .....                     | 51  |
| 3.2 高温斜角圧縮試験 .....                     | 58  |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 4. ま と め .....               | 63 |
| 第3編 焼結体による荷重測定素子の実用化検討 ..... | 65 |
| 1. 概 要 .....                 | 66 |
| 2. 原子炉の炉心構成要素荷重測定素子の検討 ..... | 67 |
| 2.1 荷重測定素子の仕様の検討 .....       | 67 |
| 2.2 設置対象集合体の検討 .....         | 68 |
| 2.3 P I Eでの寸法測定方法の検討 .....   | 69 |
| 2.4 照射特性試験カプセルの検討 .....      | 70 |
| 3. 焼結体の応用可能性の検討 .....        | 85 |

## 図表リスト

### < 第1編 焼結体による荷重測定素子の特性測定 (II) >

|                                    | 頁  |
|------------------------------------|----|
| 〔表リスト〕                             |    |
| 表2.1 初期密度を管理した供試体の試作結果 .....       | 7  |
| 表3.1 形状パラメータ圧縮試験結果 .....           | 15 |
| 表3.2 斜角圧縮試験結果 .....                | 23 |
| 表3.3 斜角圧縮試験結果 (詳細寸法) .....         | 24 |
| 表3.4 圧縮クリープ試験結果 .....              | 36 |
| 〔図リスト〕                             |    |
| 図2.1 圧縮調整試験前後の供試体長さ変化〔平均値〕 .....   | 8  |
| 図2.2 圧縮調整試験前後の供試体長さの最大値と最小値 .....  | 8  |
| 図2.3 圧縮調整試験前後の供試体外径変化〔平均値〕 .....   | 9  |
| 図2.4 圧縮調整試験前後の供試体密度変化 .....        | 9  |
| 図3.1 形状パラメータ圧縮試験結果の比較 .....        | 16 |
| 図3.2 外径／長さ変化の関係 .....              | 17 |
| 図3.3 圧縮歪／みかけの応力の関係 .....           | 17 |
| 図3.4 圧縮前密度／単位応力あたりの歪増分の関係 .....    | 18 |
| 図3.5 室温圧縮特性の統計処理 .....             | 19 |
| 図3.6 高温 (530℃) 圧縮特性の統計処理 .....     | 19 |
| 図3.7 斜角圧縮試験治具 .....                | 25 |
| 図3.8 斜角圧縮試験結果の比較 .....             | 26 |
| 図3.9 斜角圧縮試験結果 .....                | 27 |
| 図3.10 斜角圧縮試験後の供試体外観 .....          | 28 |
| 図3.11 斜角ケース1の荷重-変位曲線通常圧縮との比較 ..... | 29 |
| 図3.12 斜角ケース2の荷重-変位曲線通常圧縮との比較 ..... | 29 |

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 図3.13 | 斜角圧縮ケース1の結果の検討     | 30 |
| 図3.14 | 斜角圧縮ケース2の変形モード模式図  | 31 |
| 図3.15 | 圧縮クリープ試験装置         | 37 |
| 図3.16 | 全歪の変化(圧縮クリープ試験)    | 38 |
| 図3.17 | 初期歪後の歪変化(圧縮クリープ試験) | 38 |
| 図3.18 | クリープ歪の温度依存性        | 39 |
| 図3.19 | クリープ歪の荷重依存性        | 39 |
| 図3.20 | クリープ歪速度の温度依存性      | 40 |
| 図3.21 | クリープ歪速度の荷重依存性      | 40 |
| 図3.22 | クリープ歪マップ           | 41 |

< 第2編 焼結体による荷重測定素子の特性測定(Ⅲ) >

頁

[表リスト]

|      |            |    |
|------|------------|----|
| 表3.1 | 高温平行圧縮試験結果 | 54 |
| 表3.2 | 高温斜角圧縮試験結果 | 60 |

[図リスト]

|      |                        |    |
|------|------------------------|----|
| 図2.1 | カバー及び取付け座の寸法・形状        | 47 |
| 図2.2 | カバー及び取付け座付試験体の外観       | 47 |
| 図2.3 | カバー及び取付け座付試験体の寸法測定位置   | 49 |
| 図2.4 | 圧縮調整試験前後の供試体長さ変化〔平均値〕  | 50 |
| 図2.5 | 圧縮調整試験前後の供試体長さの最大値と最小値 | 50 |
| 図3.1 | 平行圧縮試験後供試体外観           | 56 |
| 図3.2 | 高温圧縮特性の統計処理            | 57 |
| 図3.3 | 圧縮特性の温度依存性             | 57 |
| 図3.4 | 斜角圧縮試験後供試体外観           | 61 |
| 図3.5 | 斜角圧縮試験結果の検討            | 62 |



< 第3編 焼結体による荷重測定素子の実用化検討 >

頁

〔表リスト〕

|      |                            |    |
|------|----------------------------|----|
| 表2.1 | 荷重測定素子のルースパーツ防止対策の検討 ..... | 73 |
| 表2.2 | PIEでの寸法測定方法の検討 .....       | 74 |

〔図リスト〕

|      |                        |    |
|------|------------------------|----|
| 図2.1 | カバー・素子一体焼結の試作体概観 ..... | 82 |
| 図2.2 | 荷重測定素子設置対象集合体の検討 ..... | 83 |
| 図2.3 | 荷重負荷カプセルの構造 .....      | 84 |
| 図2.4 | 無負荷カプセルの構造 .....       | 84 |
| 図2.5 | 温度測定カプセルの構造 .....      | 84 |
| 図3.1 | 温度測定素子の計画例 .....       | 88 |
| 図3.2 | 嵌合部漏洩抑制部品の計画例 .....    | 88 |

## ま え が き

オフ・ライン荷重センサーの開発に関して、「焼結体による荷重測定素子の特性測定（その1）（PNC SN9410 90-082）」で得られた基礎的特性データに基づき、1990年1月から1991年3月にかけて、原子炉環境下における実用化の観点から特性測定（Ⅱ）及び（Ⅲ）として以下の試験及び検討を行った。

### (1) 特性測定（Ⅱ）

- 1) 初期条件調整圧縮試験
- 2) 形状パラメータ圧縮試験
- 3) 斜角圧縮試験
- 4) 圧縮クリープ試験

### (2) 特性測定（Ⅲ）

- 1) 初期条件調整圧縮試験
- 2) 高温平行圧縮試験
- 3) 高温斜角圧縮試験

特性測定（Ⅱ）により、測定素子は530℃程度以下の原子炉環境下においてオフ・ライン荷重センサーとして実用に供しうるとの見通しが得られた。さらに特性測定（Ⅲ）では、ルースパーツ対策としてカバーを接合した測定素子の特性データを取得し、実用の可能性を確認した。これら特性測定（Ⅱ）及び（Ⅲ）により得られた成果は第1編、第2編でそれぞれ報告する。

また、第3編として既報告分（PNC SN9410 90-082）も合わせて荷重測定素子の特性を総合的にまとめた。

また、実用化に関する検討結果としては、特性測定（Ⅱ）及び（Ⅲ）の試験と並行して、原子炉（「常陽」）の炉心構成要素荷重測定素子としての実用性を検討し、また、焼結体の応用可能性についても検討を行ったので、その結果を第3編で報告する。

## 第 1 編

## 焼結体による荷重測定素子の特性測定（Ⅱ）

| 目 次                  |       | 頁  |
|----------------------|-------|----|
| 1. 概 要               | ..... | 3  |
| 2. 荷重測定素子の初期条件調整     | ..... | 4  |
| 2.1 初期密度調整のための供試体の試作 | ..... | 4  |
| 2.2 供試材初期条件調整圧縮試験    | ..... | 4  |
| 3. 特性測定試験            | ..... | 10 |
| 3.1 形状パラメータ圧縮試験      | ..... | 10 |
| 3.2 斜角圧縮試験           | ..... | 20 |
| 3.3 圧縮クリープ試験         | ..... | 32 |
| 4. ま と め             | ..... | 42 |

## 1. 概 要

原子炉の環境下においてオフ・ラインで荷重を測定するために考案された、焼結体による荷重測定素子の開発のため1988年度に実施した焼結体の基礎的特性把握試験に引続き、1989年度には荷重測定素子の製作時の初期密度管理を目的として供試体を試作するとともに、試験前の素子表面状態を整えるための初期条件調整圧縮試験を実施した上、以下の試験を実施した。

- 1) 形状パラメータ圧縮試験
- 2) 斜角圧縮試験
- 3) 圧縮クリープ試験

## 2. 荷重測定素子の初期条件調整

### 2.1 初期密度調整のための供試体の試作

1988年度（前年度）に実施した焼結体の基礎的特性把握試験の結果、供試体の初期空隙率（みかけの密度）を管理すれば、素子形状の効果によらない特性が得られることが示唆されている。

そこで、1989年度の荷重測定素子の特性測定試験に先立って、初期密度を管理した供試体の試作を行った。

製作時のみかけの密度は、所定の寸法の型に対し使用する粉体の重量を管理すれば、焼結時の圧縮率（収縮率）、すなわち突き棒の押し込み距離により管理できる。

試作は、 $[5\text{mm}\phi \cdot 6\text{mm}\phi \cdot 7\text{mm}\phi] \times 3\text{mm t}$  及び  $6\text{mm}\phi \times 6\text{mm t}$  の各種形状について行い、製作時の寸法と重量からみかけの密度を算出して比較した。その結果は表2.1に示すとおりであり、みかけの密度のばらつきは  $7\phi \times 3\text{t}$  のケースの密度のばらつきの影響で約6%程度と大きかったが、 $7\phi \times 3\text{t}$  を除くとばらつきは約2%以下であり、異なる形状でみかけの密度を揃えた供試体を製作することが可能であることが確認できた。

### 2.2 供試材初期条件調整圧縮試験

前年度の特性把握試験において、変形試験前後の寸法測定に際し、供試体表面の微小な凹凸が測定結果にかなりの影響を及ぼす可能性のあることがわかった。

マイクロメータのように面接触式の測定法では、測定子が接触している供試体表面の領域内で最も突起している部分で測定値が決定されてしまうため、圧縮前の寸法測定に与える影響が大きい。

そこで、変形特性試験の供試体全てに対して、試験前の初期条件調整を目的としてあらかじめ小さな荷重による圧縮を加え、供試体製作時の不要な突起をなくし表面の状態を整えることを試みた。

### 2.2.1 試験条件

微小な凹凸をならし初期表面状態の不揃い（すなわち寸法の不揃い）を整えることを目的として、供試体全体に有意な塑性変形は生じない程度の小さな荷重を用いる。

実際には、前年度の室温圧縮試験で得た荷重－変位曲線（6 mmφ × 3 mmt のもの）により、弾性変形の範囲とみなされる曲線初期の範囲の荷重で、形状パラメータ圧縮試験に用いる寸法の異なる供試体でも同等の圧縮処理がなされるよう、単位受圧面積当たりの荷重を 1 kg/mm<sup>2</sup> 相当とした。すなわち、各寸法の供試体に対して、以下を最大荷重とした。

| 供試体外径     | 最大荷重       |
|-----------|------------|
| 10 mmφ    | 78.5 kg    |
| 6 mmφ     | 28.3 kg    |
| 4.7 mmφ   | 17.3 kg    |
| ( 3 mmφ ) | ( 7.1 kg ) |

参考用供試体

圧縮速度は前年度の試験と同じ0.1mm/min、荷重履歴は所定の荷重まで圧縮したのち除荷して試験を終了するパターンAで、試験温度は室温である。

### 2.2.2 試験方法

試験機、圧縮試験治具、及び試験前後の供試体の寸法測定は前年度の試験と同じ器具及び方法によった。また、みかけの密度の変化を評価するため、重量測定を行った。測定機器は、前年度に用いたものと同じ読取り精度1/1000mmのマикроメータ及び読取り精度1/10mgの電子式天秤である。

### 2.2.3 試験結果及び考察

初期条件調整圧縮前後の供試体長さの測定結果は図2.1及び図2.2のとおりである。

図2.1は、予備も含めた供試体についての圧縮前後の長さ平均値の比較である。圧縮前の平均長さは供試体間でかなりばらついているのに対し、圧縮後の平均長さは各寸法グループごとにばらつきが小さくなっている。このことは6 mmφのグループでも顕著であり、図中に記載したように、供試体長さの標準偏差は圧縮処理によって大幅に低減していることがわかる。

図2.2は、各供試体の長さ測定値5点（周辺部の90° おき4点と中央の1点）の中

での最大値と最小値について圧縮前後の比較を示したものである。圧縮前に長さの最大値と最小値の間に大きな差があったのに対し、圧縮後では最小値はあまり変わらないの 비해最大値が大きく低下し、その結果、最大-最小の幅がかなり小さくなっている。これは前図と同様に6mmφグループで顕著である。

一方、供試体外径（平均値）の圧縮前後の比較を図2.3に示す。長さの変化に比べ、この試験で用いた程度の荷重では、供試体外径にほとんど変化が生じないことが示されている。

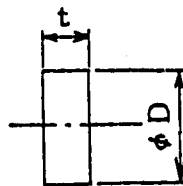
また、図2.4に圧縮前後での密度の変化を示す。密度の変化としては小さい。

なお、初期条件圧縮前後の寸法値及び密度計算値は、3章以降の各試験結果一覧表にそれぞれ記載している。

試験結果をまとめると、初期条件調整圧縮の前後で、供試体長さのばらつきが顕著に減少する一方で、長さ最小値、外径及び密度はほとんど変化しない。このことから、試験条件への影響を与えずに寸法測定の誤差の原因となる初期表面状態（凹凸）を整えるという初期条件調整圧縮の目的が達成されることを確認できた。

表2.1 初期密度を管理した供試体の試作結果

|                     |     | $\phi D$ (mm) | t (mm) | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------------|-----|---------------|--------|-----------------------------|
| $\phi 5 \times 3 t$ | A-1 | 5.13          | 3.05   | 3.81                        |
|                     | A-2 | 5.12          | 3.06   | 3.81                        |
|                     | A-3 | 5.14          | 3.02   | 3.84                        |
|                     | A-4 | 5.13          | 3.03   | 3.84                        |
|                     | A-5 | 5.14          | 3.01   | 3.84                        |
| $\phi 6 \times 3 t$ | B-1 | 6.06          | 2.98   | 3.85                        |
|                     | B-2 | 6.05          | 2.99   | 3.84                        |
|                     | B-3 | 6.06          | 3.00   | 3.82                        |
|                     | B-4 | 6.05          | 2.97   | 3.87                        |
|                     | B-5 | 6.06          | 2.99   | 3.83                        |
| $\phi 7 \times 3 t$ | C-1 | 7.17          | 3.03   | 3.76                        |
|                     | C-2 | 7.17          | 2.93   | 3.89                        |
|                     | C-3 | 7.17          | 3.01   | 3.78                        |
|                     | C-4 | 7.17          | 3.02   | 3.87                        |
|                     | C-5 | 7.17          | 2.92   | 3.99                        |
| $\phi 6 \times 6 t$ | D-1 | 6.07          | 6.00   | 3.81                        |
|                     | D-2 | 6.07          | 6.05   | 3.78                        |
|                     | D-3 | 6.07          | 5.99   | 3.81                        |
|                     | D-4 | 6.07          | 6.02   | 3.79                        |
|                     | D-5 | 6.07          | 6.01   | 3.80                        |





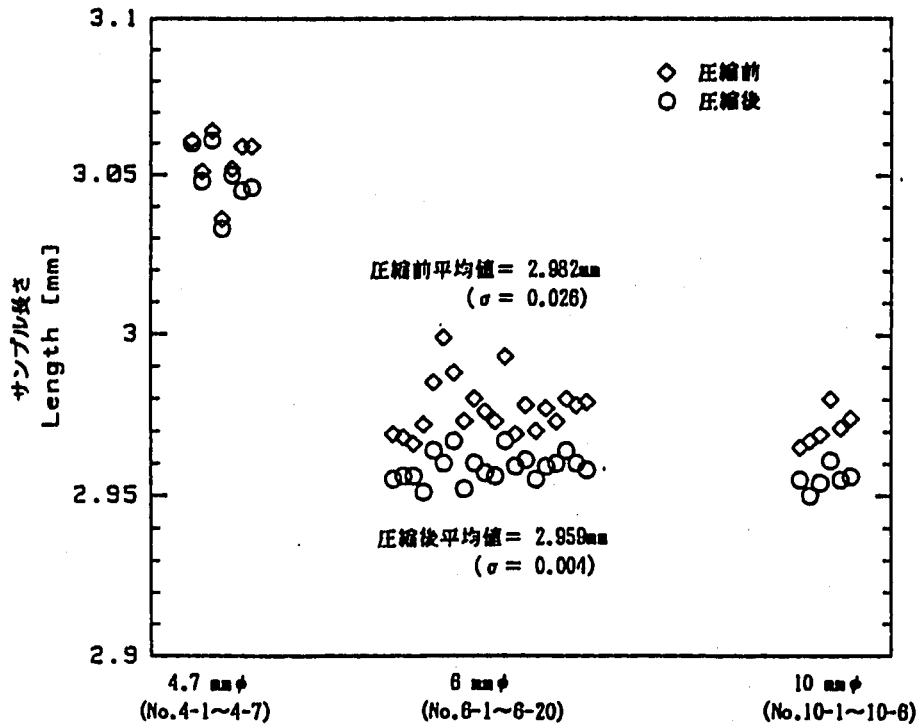


図 2.1 圧縮調整試験前後の供試体長さ変化 [平均値]

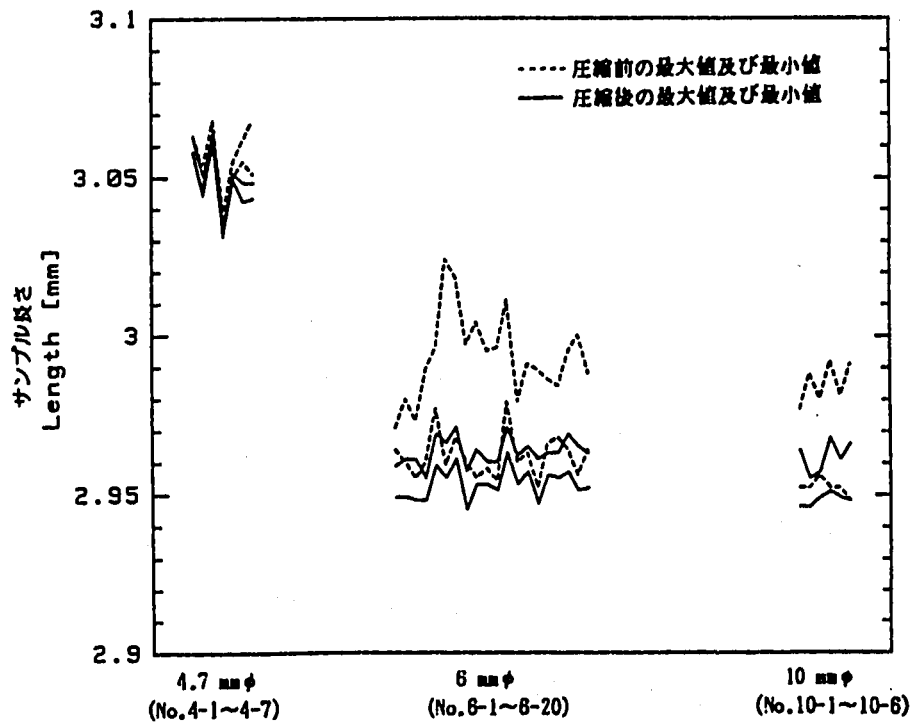


図 2.2 圧縮調整試験前後の供試体長さの最大値と最小値

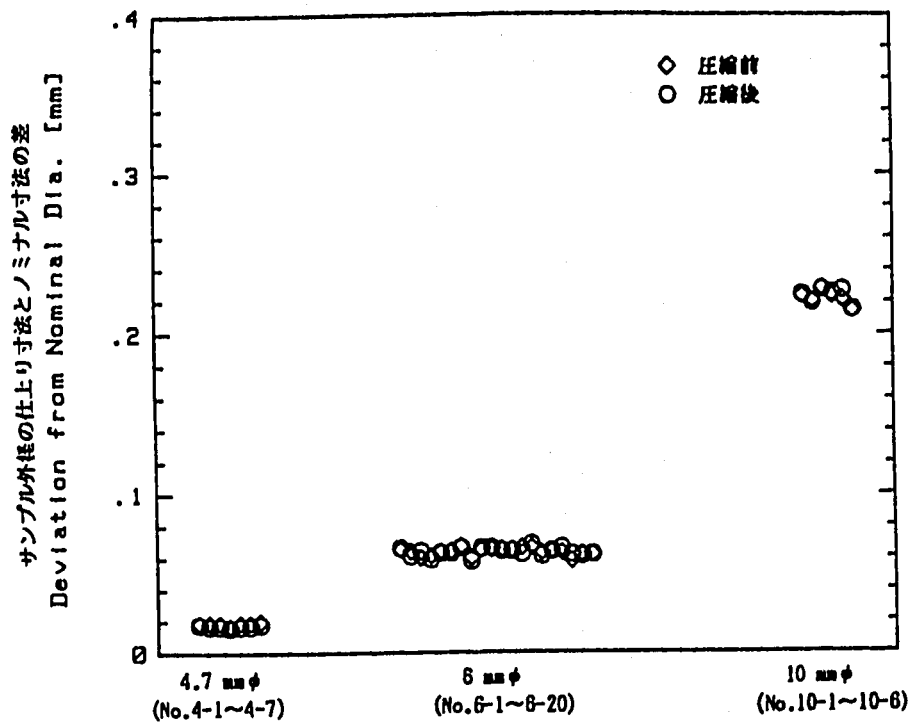


図 2.3 圧縮調整試験前後の供試体外径変化 (平均値)

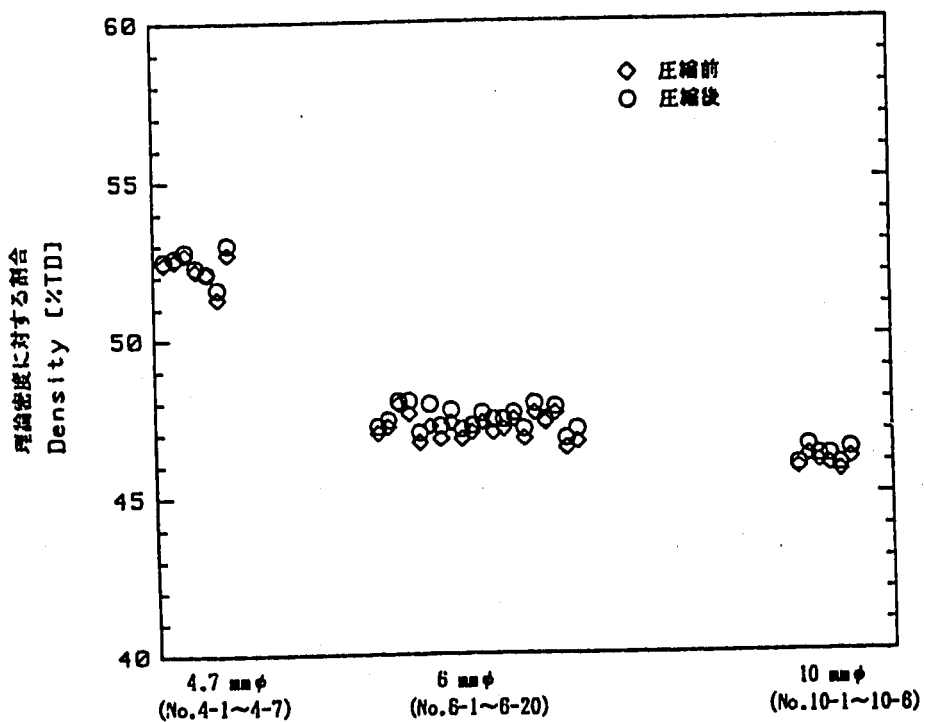


図 2.4 圧縮調整試験前後の供試体密度変化

### 3. 特性測定試験

#### 3.1 形状パラメータ圧縮試験

##### 3.1.1 試験条件

前年度も圧縮変形特性について供試体の形状（寸法）効果の予備的な試験を行ったが、供試体製作時の密度管理が重要であることが分かったため、今回は2章で述べたように初期条件を調整した供試体により形状パラメータ圧縮試験を実施した。

供試体外径は、10mmφ・6mmφ・4.7mmφ（当初3mmφで計画したが、取扱い及び寸法測定等の困難さから、4.7mmφへ変更した）の3種とした。

試験は室温での圧縮試験とし、1つのサンプルで多くの到達荷重について調べられる繰返し増加荷重パターン（パターンB）により、100kg、300kg、500kgで途中除荷して最大800kgまで荷重した。

##### 3.1.2 試験方法

試験機、圧縮治具、また荷重パターンBの試験中変位測定用電気出力付きダイヤルゲージ（試験中連続して記録）等の試験器具、試験方法及び測定方法は、前年度の試験と同じである。

##### 3.1.3 試験結果

形状パラメータ圧縮試験の結果を表3.1に示す。

測定寸法は、製作時寸法、初期条件調整圧縮試験後の寸法及び試験後の寸法を外径（D）と長さ（L）は平均値で示し、密度は平均径と平均長さから求められる体積と重量測定値から、理論密度（7.968g/cm<sup>3</sup>）に対する割合から算出したみかけ密度で示した。

縮み率は長さ平均値の初期値に対する変化の割合を示すが、初期値には初期条件調整圧縮試験の後の長さを用いた。試験中縮み率は、電気出力付きダイヤルゲージの記録から、各荷重到達時及び除荷時の寸法の初期値に対する変化を示したもので、一方、試験後縮み率は試験終了後にマイクロメータで測定した寸法の初期値に対する変化を示している。

この試験における各形状の供試体について得られた荷重－変位曲線は図3.1に示す

とおりであり、荷重に対する変位はほぼ単位面積あたりの荷重（応力）に対応した形で、相似した曲線を示す。試験後（最大荷重800kgを除荷後）の供試体長さ減少率と外径との関係は図3.2のとおりである。ここで、4.7mmφのケースが相関曲線からやや外れているが、これは4.7mmφの供試体の初期密度が他のものに比べ若干高く、そのためやや変形しにくかったことによるものと思われる。

### 3.1.4 形状パラメータについての考察

#### (1) 初期条件調整圧縮試験の影響

初期条件調整圧縮試験の影響を見るため、前年度の試験結果のうち今回の試験結果と比較できる粒度100μm、単純円柱、6mmφ×3mmtの室温圧縮試験結果を用いて初期密度と歪を以下に比較した。

|            | 本年度試験結果  | 前年度試験結果  |
|------------|----------|----------|
| 初期密度       | 47~48%TD | 49~50%TD |
| 100 kg圧縮後歪 | 4~5%     | ~6%      |
| 300 kg圧縮後歪 | 20~23%   | 23~24%   |
| 500 kg圧縮後歪 | 29~32%   | ~33%     |
| 800 kg圧縮後歪 | 40~41%   | 40~41%   |

前年度は、特に初期密度管理に留意しなかったものの初期密度はほぼ今回のサンプルと同じである。圧縮歪データは今回と前年度のものとはほぼ一致することから、今回実施した初期条件調整圧縮は、試験体の変形特性に何ら影響を与えないといえる。

#### (2) 応力と歪による整理

今回の試験では、形状によらず所定の荷重を与える試験としているため、試験後の永久歪は主に受圧断面積の相違による差が生じている。

ここで、荷重の代わりに単位面積が受ける荷重（応力）を用い、試験途中の除荷時のデータも取り込んで歪との関係を示すと図3.3のとおりとなり、外径の異なるサンプルに同一荷重、すなわち異なる応力を与えても、歪の発生は応力に対してほぼ同一の相関を示すことが確認できる。

ここで4.7mmφの供試体のデータに着目すると、初期密度が高めであったことの

影響は若干残っているが、ばらつきの範囲に収まってしまっているともみなすことができる。このことから、初期密度が同程度の焼結体が圧縮荷重を受けると、全受圧面積で評価した応力に応じた永久歪を残すということができる。

なお、ここでいう応力は、荷重を全受圧面積で割って求めたもので、空隙を考慮しないみかけの応力であり、試験途中の受圧面積は以下により外径を推定して計算したものである。

$$\begin{aligned} \text{試験途中外径} &= \text{初期外径} + [\text{試験後外径} - \text{初期外径}] \times \\ &\quad [\text{試験途中長さ} - \text{初期長さ}] / [\text{試験後長さ} - \text{初期長さ}] \\ &\quad (\text{外径増加分は試験中測定している供試体長さの減少分と比例すると仮定}) \end{aligned}$$

### (3) 初期密度と変形特性の関係の考察

任意の初期密度の場合の変形特性を考察する。

荷重パターンBの試験結果を用いて、各ステップで達した密度を初期値とすれば次のステップの荷重が焼結体が初めて受ける荷重に相当する。そこで、各ステップの初期密度を推定し、各ステップで受ける荷重に対して発生する歪と初期密度の関係を調べると図3.4のようになる。

ここで、荷重条件を揃えるため歪は単位応力あたりの量に規格化した（前図の相関に基づく）。密度の推定方法は、上記の外径推定法と同様で、

$$\begin{aligned} \text{試験途中密度} &= \\ &\quad \text{初期密度} / \{ [\text{試験途中外径}^2 \times \text{試験途中長さ}] / [\text{初期外径}^2 \times \text{初期長さ}] \} \end{aligned}$$

とした。

結果のばらつきが大きく顕著な傾向はつかめないが、本図に示されるように低密度では変形しやすいがデータのばらつきが大きく高密度ではその逆となることから、荷重測定素子の用途には供試体の初期密度を50～60%近辺とすることが適当であるといえる。

### (4) データの統計処理

前年度からのデータ蓄積により、焼結体の圧縮特性の統計的な評価が可能となってきたため、焼結体の変形と負荷荷重の相関、及び変形量から荷重を推定する場合の誤差について評価した。

全データのうち、統計処理に供せる数量を得ている  $6\text{ mm}\phi \times 3\text{ mm}$  焼結体の室温圧縮試験のデータ（但し、粒度： $100\mu\text{m}$ 、 $6\text{ mm}\phi \times 3\text{ mm}$ 、試験途中除荷時のデータは除外し、試験後の取り出し測定のみ）11点について荷重と圧縮歪の関係をプロットすると図3.5のとおりとなり、荷重と圧縮歪（長さ減少率）の相関を求めると、図中点線で示すような曲線（式は図中（注1）に示す）が得られる。この相関式による予測と実測値の一致はかなり良好で、予測-実測の差の全データについての平均はほぼゼロとなっている。また、予測-実測の差の標準偏差  $\sigma$  は0.527%である。ここで、誤差の範囲を  $\pm 2\sigma$  として、その圧縮歪のばらつき範囲が相関曲線上の代表的荷重に対してどの程度のばらつきに相当するかを見てみると、以下のとおりとなる。

|         |                                     |               |                            |
|---------|-------------------------------------|---------------|----------------------------|
| 100kg で | $4.86\% \pm 0.527\% \times 293.9$   | $\Rightarrow$ | 106.4kg(すなわち $\pm$ 約 6kg)  |
| 300kg で | $23.47\% \pm 0.527\% \times 2282.0$ | $\Rightarrow$ | 319.3kg(すなわち $\pm$ 約 20kg) |
| 500kg で | $32.12\% \pm 0.527\% \times 2470.0$ | $\Rightarrow$ | 532.3kg(すなわち $\pm$ 約 30kg) |
| 800kg で | $40.07\% \pm 0.527\% \times 2751.6$ | $\Rightarrow$ | 851.2kg(すなわち $\pm$ 約 50kg) |

次に、同じく  $530^\circ\text{C}$  高温圧縮試験結果（前年度のもの）全データ9点について整理すると、図3.6の通りとなる。ここでも、得られた相関式による予測と実測の差の全データについての平均はほぼゼロで、全体的によく一致している。しかし、予測-実測の差の標準偏差は0.800%で、室温の場合よりややばらつきが大きくなっている。誤差の範囲を  $\pm 2\sigma$  として、その圧縮歪のばらつきがどの程度の荷重のばらつきに相当するか調べてみると、以下のとおりとなる。

|         |                                     |               |                            |
|---------|-------------------------------------|---------------|----------------------------|
| 100kg で | $11.33\% \pm 0.800\% \times 291.1$  | $\Rightarrow$ | 109.8kg(すなわち $\pm$ 約 10kg) |
| 300kg で | $30.07\% \pm 0.800\% \times 2273.1$ | $\Rightarrow$ | 329.4kg(すなわち $\pm$ 約 30kg) |
| 500kg で | $38.79\% \pm 0.800\% \times 2455.2$ | $\Rightarrow$ | 549.1kg(すなわち $\pm$ 約 50kg) |
| 800kg で | $46.81\% \pm 0.800\% \times 2728.3$ | $\Rightarrow$ | 878.5kg(すなわち $\pm$ 約 80kg) |

以上から、 $\pm 2\sigma$  の範囲で圧縮歪がばらつくとすると、相関式を用いて求める荷重推定値は、それぞれの荷重レベルで、室温ならばその荷重値の6%程度、また  $530^\circ\text{C}$  ならば10%程度のばらつきを含むということができる。

また、ここで同一条件で繰り返し数が3以上のものについて、生データを用いて

同様の誤差評価を行うと以下のとおりとなる。

室温300kg データ数=3

圧縮歪平均值=22.9%

圧縮歪標準偏差=0.300 %

予測歪23.47 % $\pm$ 0.300 % $\times$ 2289.6  $\Rightarrow$  310.9kg(すなわち $\pm$ 約10kg)

室温800kg データ数=4

圧縮歪平均值=40.1%

圧縮歪標準偏差=0.435 %

予測歪40.07 % $\pm$ 0.435 % $\times$ 2759.8  $\Rightarrow$  842.0kg(すなわち $\pm$ 約40kg)

530°C500kg データ数=3

圧縮歪平均值=38.4%

圧縮歪標準偏差=0.624 %

予測歪38.79 % $\pm$ 0.624 % $\times$ 2464.7  $\Rightarrow$  537.9kg(すなわち $\pm$ 約40kg)

上記のどの条件においても相関曲線を基準にした誤差評価に包絡されており、相関曲線を基準とした誤差をもってばらつきの範囲としておけば十分と考えられる。

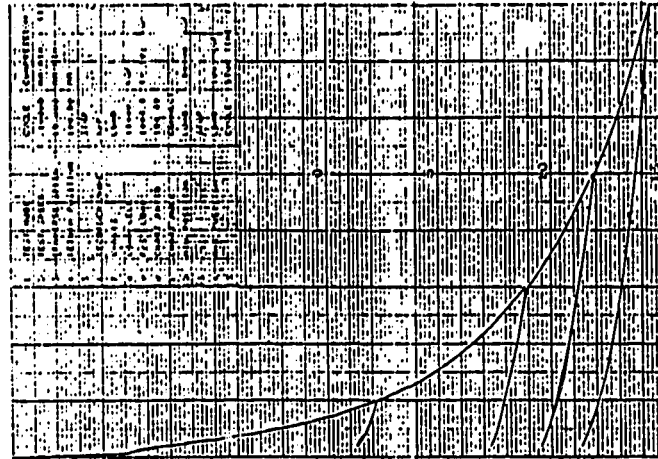
表3.1 形状パラメータ圧縮試験結果

| サンプル形状            | 4.7 mm D × 3 mm L   |               |               | 6 mm D × 3 mm L |               |               | 10 mm D × 3 mm L |                |                |
|-------------------|---|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|------------------|----------------|----------------|
| その他のサンプル仕様        | 粒度 100 μm, 単純円柱   |               |               |                 |               |               |                  |                |                |
| 試験条件              | 室温、荷重パターン B (0kg → 100kg → 0kg → 300kg → 0kg → 500kg → 0kg → 800kg → 0kg) |               |               |                 |               |               |                  |                |                |
| サンプル番号            | 4-1   | 4-2           | 4-3           | 6-1             | 6-2           | 6-3           | 10-1             | 10-2           | 10-3           |
| 試験前寸法 (mm)        | 4.7190×3.061L   | 4.7190×3.051L | 4.7190×3.064L | 6.0650×2.969L   | 6.0640×2.968L | 6.0600×2.966L | 10.2230×2.965L   | 10.2200×2.967L | 10.2280×2.969L |
| 試験前密度 (XTD)       | 52.4  | 52.5          | 52.7          | 47.0            | 47.2          | 47.9          | 45.8             | 46.2           | 46.0           |
| 初期調整圧縮後寸法 (mm)    | 4.7180×3.060L   | 4.7170×3.048L | 4.7170×3.061L | 6.0660×2.955L   | 6.0610×2.956L | 6.0640×2.956L | 10.2240×2.955L   | 10.2190×2.950L | 10.2270×2.954L |
| 初期調整圧縮後密度 (XTD)   | 52.5  | 52.6          | 52.8          | 47.2            | 47.4          | 48.0          | 45.9             | 46.5           | 46.2           |
| 圧縮試験後寸法 (mm)      | 5.4210×1.697L   | 5.3510×1.708L | 5.3600×1.723L | 6.5970×1.757L   | 6.6210×1.767L | 6.5970×1.787L | 10.5430×2.292L   | 10.5360×2.306L | 10.5230×2.304L |
| 圧縮試験後密度 (XTD)     | 71.6  | 73.0          | 72.7          | 67.1            | 66.4          | 67.1          | 55.7             | 55.9           | 56.0           |
| 試験中<br>縮み率<br>(%) | 0 kg  | 0.0           | 0.0           | 0.0             | 0.0           | 0.0           | 0.0              | 0.0            | 0.0            |
|                   | 100 kg  | 7.5           | 6.9           | 6.9             | 5.1           | 5.8           | 4.7              | 2.4            | 1.7            |
|                   | 0 kg  | 7.2           | 6.9           | 6.5             | 5.1           | 4.7           | 4.4              | 1.4            | 1.0            |
|                   | 300 kg  | 28.4          | 27.6          | 27.1            | 22.3          | 25.4          | 25.0             | 9.8            | 8.5            |
|                   | 0 kg  | 28.1          | 26.9          | 26.8            | 20.0          | 23.3          | 22.7             | 7.4            | 6.4            |
|                   | 500 kg  | 38.6          | 37.4          | 37.2            | 33.2          | 36.2          | 35.5             | 19.3           | 17.6           |
|                   | 0 kg  | 37.6          | 36.7          | 36.6            | 29.4          | 32.1          | 31.8             | 15.6           | 14.6           |
|                   | 800 kg  | 47.1          | 46.3          | 45.7            | 42.0          | 45.3          | 45.0             | 28.8           | 27.1           |
| 0 kg              | 46.1  | 45.3          | 44.8          | 37.2            | 40.3          | 39.9          | 24.0             | 22.7           |                |
| 試験後縮み率 (%)        | 44.5  | 44.0          | 43.7          | 40.5            | 40.2          | 39.5          | 22.4             | 21.8           | 22.0           |

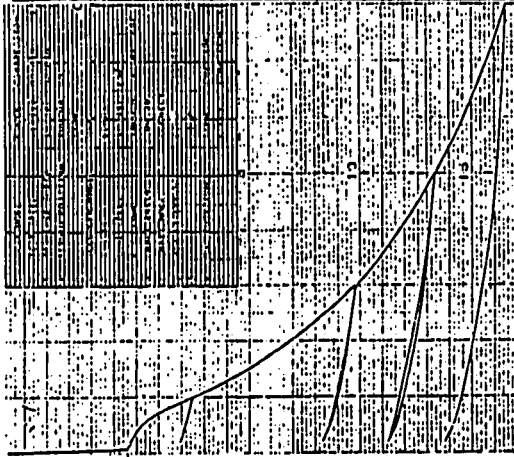
(注) 密度は、平均外径と平均長さから求める体積と理論密度 7.968g/cm<sup>3</sup> から求めた。



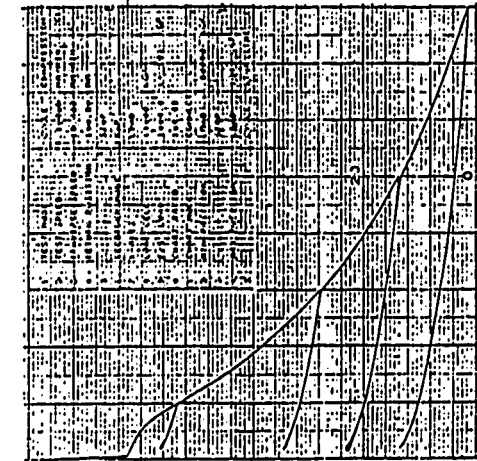
(1) 3mmφ (参考)



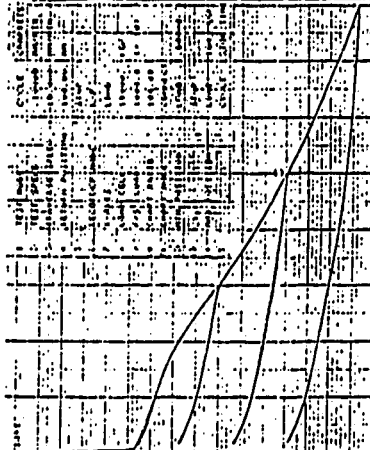
(2) 4.7mmφ



(3) 6mmφ



(4) 10mmφ



荷重  
↑  
→クロスヘッド変位

図3.1 形状パラメータ圧縮試験結果の比較

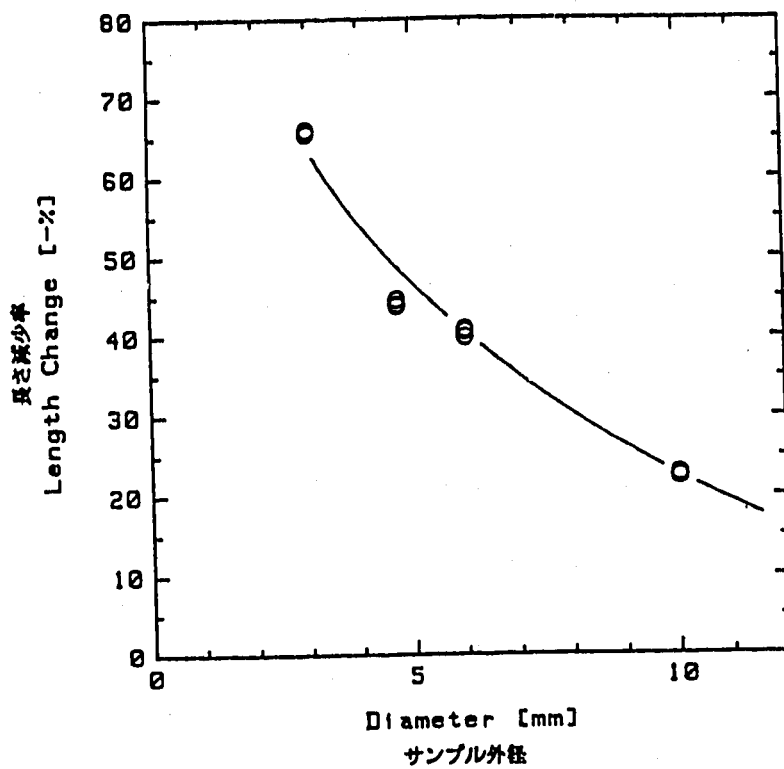


図3.2 外径/長さ変化の関係

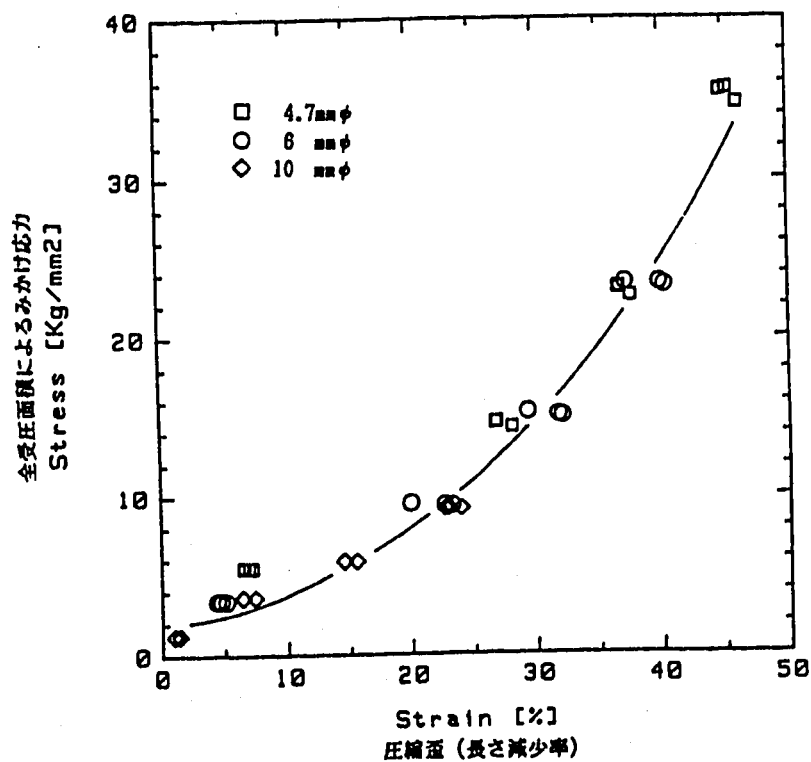
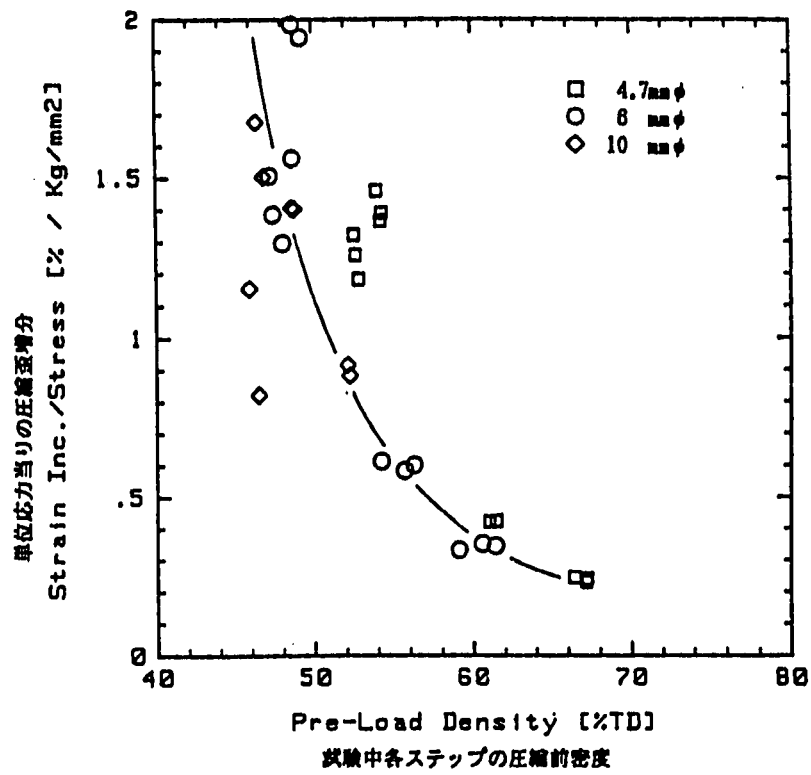
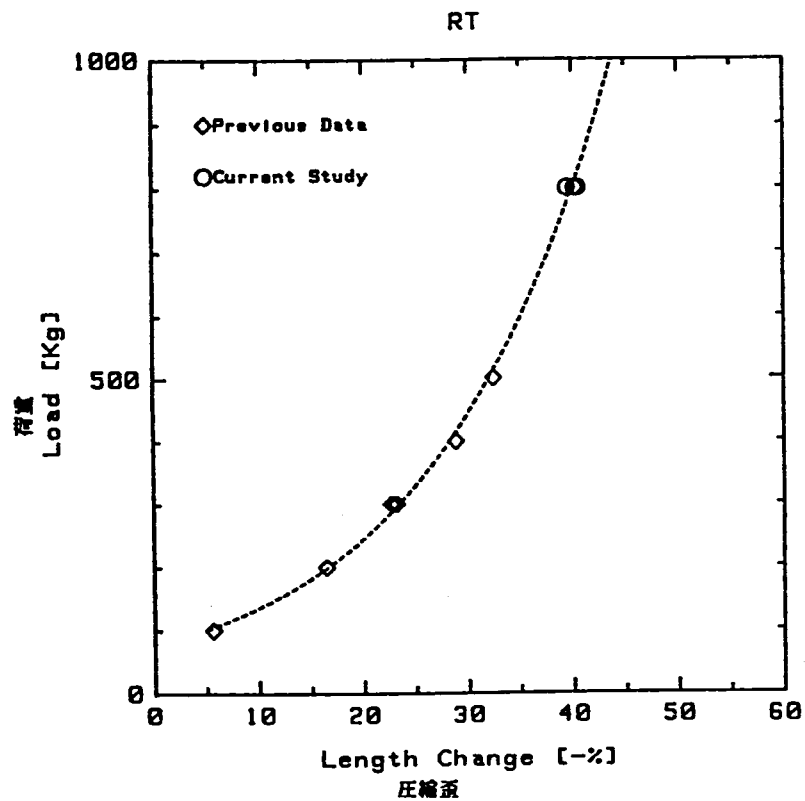


図3.3 圧縮歪/みかけの応力関係



(注) 試験途中の外径及び密度は、試験開始前及び終了後の値をもとに、試験中の長さ測定値の変化から順推して求めた。また、応力は、この外径推定値を用いて算出した。

図3.4 圧縮前密度／単位応力あたりの歪増分の関係



(注1) 相関曲線; 荷重[Kg]=75.03 $\cdot$ exp(0.05908 $\cdot$ 歪[%])

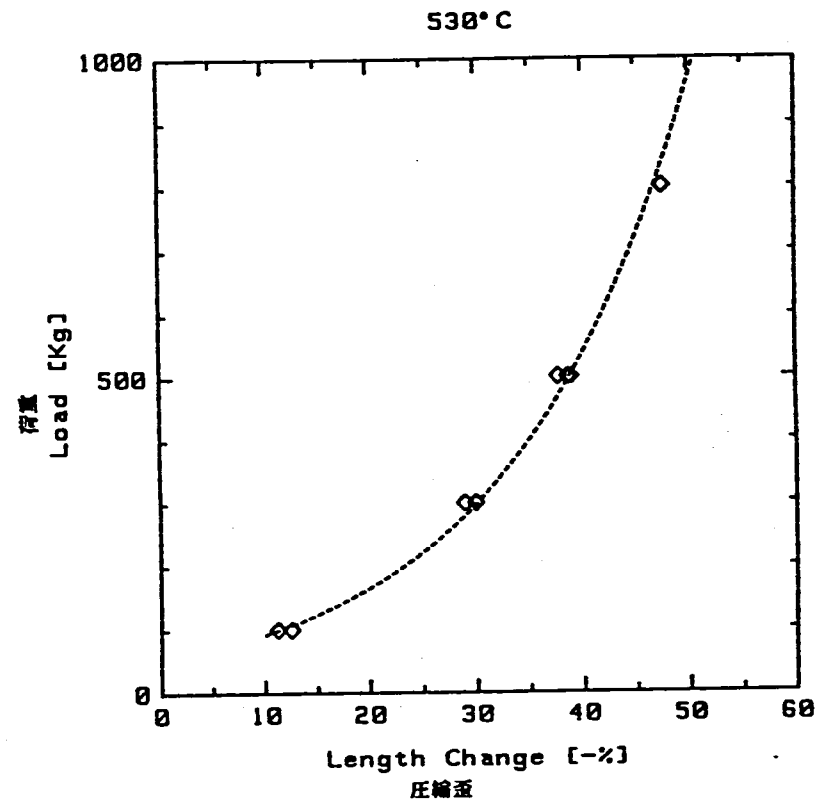
(注2) 同一荷重における歪の相関曲線予測値と実測値の差についての統計分析;

データ数= 11

(実測-予測) 平均値= -0.0009 %

(実測-予測) 標準偏差= 0.527 %

図3.5 室温圧縮特性の統計処理



(注1) 相関曲線; 荷重[Kg]=51.49 $\cdot$ exp(0.05860 $\cdot$ 歪[%])

(注2) 同一荷重における歪の相関曲線予測値と実測値の差についての統計分析;

データ数= 9

(実測-予測) 平均値= 0.001 %

(実測-予測) 標準偏差= 0.800 %

図3.6 高温(530°C)圧縮特性の統計処理

### 3.2 斜角圧縮試験

#### 3.2.1 試験条件

荷重測定素子としての実用を考え、供試体に対し接触体が斜めにあたる場合、及び供試体と接触体は平行であるが力の方向が斜めにずれている場合を想定した試験（斜角圧縮試験）を行った。

斜角は代表例として $10^\circ$ とし、供試体に対し接触体が $10^\circ$ 傾いてあたるケース（斜角ケース1）と供試体と接触体は平行の状態サンプル面の垂直軸から $10^\circ$ 傾いた方向に荷重が作用するケース（斜角ケース2）の2ケースとした。供試体は、代表形状の $6\text{ mm}\phi \times 3\text{ mm}$ tを用いた。また、試験温度は室温で、荷重パターンBの方式を用いた。

#### 3.2.2 試験方法

斜角圧縮のための圧縮治具は図3.7に示すものを用いた。図3.7は斜角ケース1の試験用のもので、下部圧縮治具の供試体配置面が水平であるのに対し、上部圧縮治具は水平より $10^\circ$ 傾けてある。斜角ケース2の場合は、図の上部圧縮治具と同じものを下部圧縮治具にも用いて上下圧縮治具の面の両方が水平より $10^\circ$ 傾くようにする。

以上の他は、試験機、試験中及び試験後の寸法測定等はこれまでに用いているものと同じである。なお、斜角ケース1においては、サンプル長さ測定の周辺部の $90^\circ$ おき4カ所のうち、 $0^\circ$ と $180^\circ$ の位置が最大傾斜方向に向くように配置し、変形の最大及び最小の位置を測定できるように配慮した。

#### 3.2.3 試験結果

初期条件調整圧縮試験の結果も合わせて、斜角圧縮試験の結果を表3.2及び表3.3に示す。

表3.2では表中に記載した各数値の意味及び算出法等は表3.1で説明したのと同じであるが、試験中縮み率については、斜角ケース1及び2ともに通常圧縮のそれと意味が異なるので、それを補正した数値\*を（ ）内に示した。

\* 表3.2の下に示したとおり、斜角ケース1では変位測定の出発点は最大傾斜位置で治具がサンプルにあたった所であり、長さ平均値で整理する縮み率の算出に用いる変位よりも半径 $\times \tan$ （傾斜角）分かさ上げされている。また、斜角ケース2では変位測定の比較の対象となる初期治具間距離がサンプル長さ $/\cos$ （傾斜角）となっている。

表3.2の長さ測定値は全て平均値で示したが、各位置での測定値も意味が大きいいため表3.3に詳細な寸法測定結果を示すとともに、比較のため形状パラメータ圧縮試験の6mmφ供試体のデータを併記した。

斜角圧縮試験の代表的な荷重-変位曲線を通常圧縮のそれと比較して図3.8に示す。通常圧縮の形状パラメータ圧縮試験で得た6mmφの荷重-変位曲線(図の(1))と、斜角ケース1(図の(2))を比較した場合、斜角ケース1では変形が供試体の片端から始まり徐々に広がることから、通常圧縮の初期に見られる弾性変形から降伏を示す変曲点の部分までの様子が全く見られず、変位の増加に対応して荷重がなめらかに上昇するだけである。これと対照的に、斜角ケース2の荷重-変位曲線は通常圧縮のものと似た経過をたどる。

斜角圧縮試験の試験後の長さ減少率を通常圧縮のケースと比較して図3.9に示す。通常圧縮の場合に比べ、斜角ケース1の長さ減少率は1割程度小さく、逆に斜角ケース2では極くわずかながら大きい結果となっている。

図3.10は、試験後のサンプルの側面外観を示したものである。斜角ケース1の場合は斜めに圧縮された通りの永久変形を残し、斜角ケース2の場合は、剪断方向の変形の結果、斜円柱状に変形している。

### 3.2.4 斜角圧縮特性についての考察

#### (1) 荷重-変位曲線

斜角圧縮ケース1の荷重-変位曲線を通常圧縮のものと比較して図3.11に示す。

斜角圧縮ケース1は、傾斜の突端で接触した位置を基準に変位を測定するため、通常圧縮よりはるかに手前より変位が発生している。そして、通常圧縮の降伏以降のどの部分をとっても、同荷重において変位に対する荷重の上昇の傾きは、斜角ケース1の方が大きい。

斜角ケース2については図3.12に示すように、荷重-変位曲線は通常圧縮のものと似たような経過をたどるものの、斜角ケース2の変位は通常圧縮のそれよりもわずかながら大きい(各曲線の始点-終点間距離に着目)ことが認められる。

#### (2) 荷重-歪相関式の適用性

斜角圧縮試験の荷重-圧縮歪に対して、通常圧縮試験により得られた相関式の適

用性について評価する。

斜角圧縮試験の斜角ケース1では、荷重-変位曲線に示されるように変形過程が特殊であるため、台形に変形した断面においてこの断面を領域分割して各領域の荷重を評価し、それを合計すると全体が受けた荷重となるとの想定により評価すると、供試体No. 6-4について図3.13のような結果を得る。

ここでは、最大傾斜方向の直径を4等分にして各領域の平均長さ（単純に直径方向の中央位置での長さとした）を求め、試験前長さに対する減少率（圧縮歪）をそれぞれ求めた。

各領域の圧縮歪が6mmφ×3mmtの場合にどの程度の荷重で得られるかは、通常圧縮試験により得られた相関式から推定することができる。それに全面積に対する各領域の面積の比を乗ずれば、各領域が受けた（支えた）荷重が求められる。こうして推定した各領域の荷重を合計すると839kgとなった。これは、実際に負荷した荷重800kgと比較すると室温での誤差荷重値の約6%であったことを考慮すると良く一致しているといえ、用いた相関式の外挿性があることも推察される。（ただし、4領域のうち変形の大きい側では、6mmφの場合に換算して、951kg、あるいは1599kgもの過大な荷重を受けたこととなり、高歪側で荷重が急激に立ち上がる（硬化する）特性から考えて、これら変形の大きい側の影響によって全体の変形が抑制されていることが予想される。）

斜角ケース2の変位が通常圧縮のそれよりもわずかながら大きいことの原因は、変形モードの差によるものと推測される。図3.14に示すように、斜め圧縮の場合、圧縮力のほかに剪断力が働くが、焼結体のような粗なる結合体は金属塊のような密なる連続体より剪断荷重に弱く、同じ焼結体の垂直圧縮のときの緻密化変形よりも抵抗力が弱いことが考えられる。

斜角ケース1における領域分割の詳細化や、斜角ケース2における変形モードのシミュレーションを行うためには、通常圧縮試験で得た非線形材料特性（応力-歪）曲線を用いた有限要素法等による解析が有効となる。

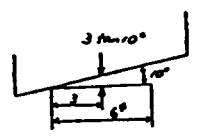
表3.2 斜角圧縮試験結果

(注) 密度は、平均外径と平均長さから求める体積と理論密度  $7.968\text{g/cm}^3$  から求めた。

| 斜角ケース             | ケース 1 (上部圧縮治具のみ水平より10° 傾斜)   |               |               | ケース 2 (上下圧縮治具とも水平より10° 傾斜) |               |               |             |
|-------------------|--|---------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------|-------------|
| サンプル仕様            | 6mmD × 3mmL, 粒度 100μm, 単純円柱  |               |               |                            |               |               |             |
| 試験条件              | 室温、荷重パターンB (0kg → 100kg → 0kg → 300kg → 0kg → 500kg → 0kg → 800kg → 0kg) |               |               |                            |               |               |             |
| サンプル番号            | 6-4  | 6-5           | 6-6           | 6-7                        | 6-8           | 6-9           |             |
| 試験前寸法(mm)         | 6.0610×2.972L  | 6.0640×2.985L | 6.0640×3.089L | 6.0670×2.988L              | 6.0600×2.973L | 6.0650×2.980L |             |
| 試験前密度(XTD)        | 47.6   | 46.7          | 45.8          | 46.8                       | 47.3          | 46.8          |             |
| 初期調整圧縮後寸法(mm)     | 6.0590×2.951L  | 6.0630×2.964L | 6.0630×2.960L | 6.0660×2.967L              | 6.0580×2.952L | 6.0660×2.960L |             |
| 初期調整圧縮後密度(XTD)    | 48.0   | 47.0          | 47.9          | 47.2                       | 47.7          | 47.1          |             |
| 圧縮試験後寸法(mm)       | 6.5970×1.920L  | 6.6300×1.950L | 6.5770×1.974L | 6.6970×1.744L              | 6.7120×1.738L | 6.6650×1.735L |             |
| 圧縮試験後密度(XTD)      | 62.2   | 59.8          | 61.0          | 65.8                       | 66.0          | 66.5          |             |
| 試験中<br>縮み率<br>(%) | 0 kg   | 0.0           | 0.0           | 0.0                        | 0.0           | 0.0           |             |
|                   | 100 kg   | 25.1 (7.1)    | 25.0 (7.1)    | 25.0 (7.1)                 | 7.1 (7.0)     | 6.8 (6.7)     | 6.8 (6.7)   |
|                   | 0 kg   | 24.7 (6.8)    | 24.3 (6.4)    | 24.3 (6.4)                 | 6.7 (6.6)     | 6.4 (6.3)     | 6.4 (6.3)   |
|                   | 300 kg   | 42.7 (24.7)   | 42.5 (24.6)   | 42.6 (24.7)                | 28.3 (27.9)   | 27.4 (27.0)   | 27.7 (27.3) |
|                   | 0 kg   | 41.3 (23.4)   | 41.2 (23.3)   | 41.2 (23.3)                | 26.3 (25.9)   | 25.7 (25.4)   | 25.7 (25.3) |
|                   | 500 kg   | 52.9 (34.9)   | 52.6 (34.8)   | 52.4 (34.5)                | 38.4 (37.8)   | 37.9 (37.4)   | 37.8 (37.3) |
|                   | 0 kg   | 50.8 (32.9)   | 50.1 (32.7)   | 50.3 (32.4)                | 35.7 (35.2)   | 35.2 (34.7)   | 35.5 (34.9) |
|                   | 800 kg   | 61.7 (43.7)   | 61.1 (43.2)   | 60.8 (42.9)                | 47.2 (46.5)   | 47.1 (46.4)   | 46.6 (45.9) |
|                   | 0 kg   | 59.0 (41.0)   | 58.4 (40.5)   | 58.4 (40.5)                | 43.8 (43.1)   | 44.0 (43.4)   | 43.6 (42.9) |
| 試験後縮み率(%)         | 34.9   | 34.2          | 33.3          | 41.2                       | 41.1          | 41.4          |             |

注: ( )内は下図の考えに従って補正したもの

変位測定値はサンプル中央の変位(平均値)より  $3 \tan(10^\circ)$  大きいと見なせる



サンプル長さLに対し初期治具間距離(変位の基準値)は  $L / \cos(10^\circ)$  である

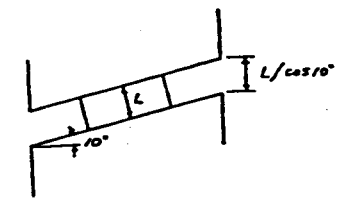
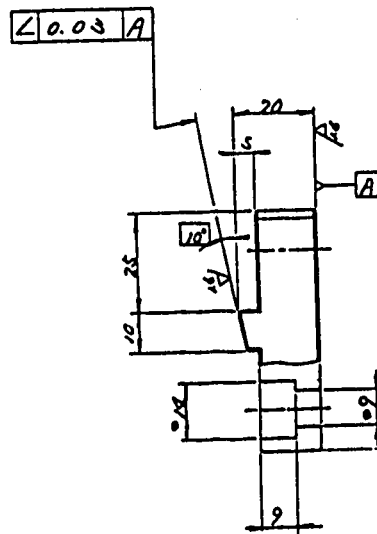
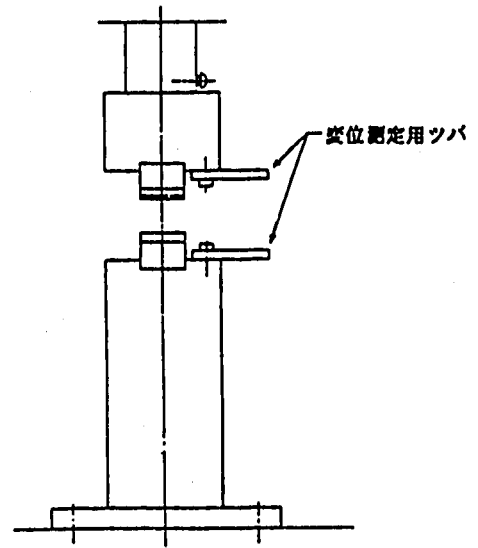
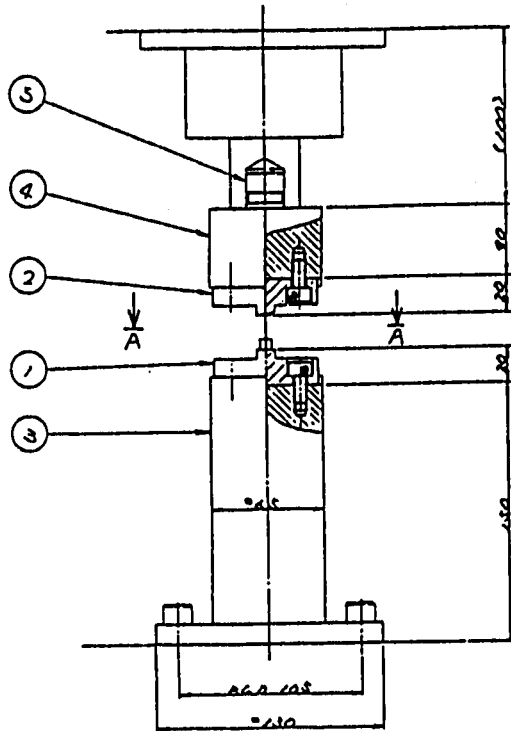




表 3.3 斜角圧縮試験結果 (詳細寸法)

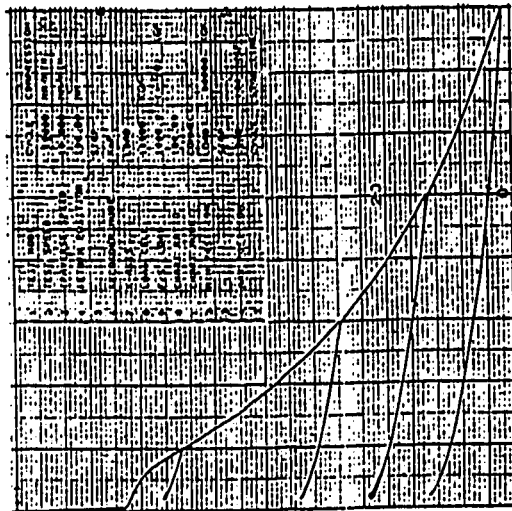
| サンプル<br>No.          | 長さ平均値 | 最大値<br>(0°) | 中間値<br>(90°, 270°) | 最小値<br>(180°)     | 最大・最小値<br>と平均値の差                  |
|----------------------|-------|-------------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 通常<br>圧縮             | 6 - 1 | 1.757 mm    | 1.762 mm           | 1.752 mm<br>1.760 | 1.749 mm<br>+ 0.005 mm<br>- 0.008 |
|                      | 6 - 2 | 1.767       | 1.774              | 1.763<br>1.770    | 1.754<br>+ 0.007<br>- 0.013       |
|                      | 6 - 3 | 1.787       | 1.792              | 1.787<br>1.787    | 1.775<br>+ 0.005<br>- 0.012       |
| 斜角<br>圧縮<br>ケース<br>1 | 6 - 4 | 1.920 mm    | 2.335 mm           | 1.778 mm<br>1.849 | 1.291 mm<br>+ 0.415 mm<br>- 0.629 |
|                      | 6 - 5 | 1.950       | 2.316              | 1.809<br>1.949    | 1.338<br>+ 0.366<br>- 0.612       |
|                      | 6 - 6 | 1.974       | 2.334              | 1.790<br>2.032    | 1.378<br>+ 0.360<br>- 0.596       |
| 斜角<br>圧縮<br>ケース<br>2 | 6 - 7 | 1.744 mm    | 1.750 mm           | 1.742 mm<br>1.742 | 1.738 mm<br>+ 0.006 mm<br>- 0.006 |
|                      | 6 - 8 | 1.738       | 1.746              | 1.734<br>1.741    | 1.721<br>+ 0.008<br>- 0.017       |
|                      | 6 - 9 | 1.735       | 1.744              | 1.733<br>1.736    | 1.718<br>+ 0.009<br>- 0.017       |

|   |         |               |          |   |
|---|---------|---------------|----------|---|
| 1 | 爪       | 14.25108-1002 | S.F.D.11 | 1 |
| 2 | 爪 (9-A) | 1002          | °        | 2 |
| 3 | 長軸爪     | 1002          | SUS304   | 1 |
| 4 | 短軸爪     | 2005          | °        | 1 |
| 5 | ガイドピン   | 2005          | °        | 1 |



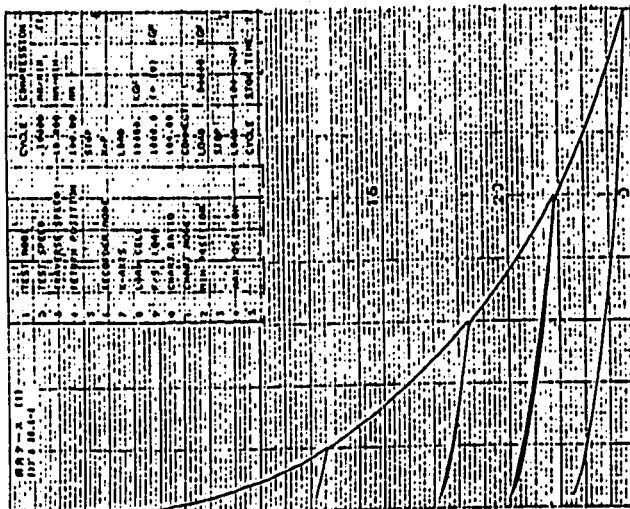
◎の詳細

図3.7 斜角圧縮試験治具



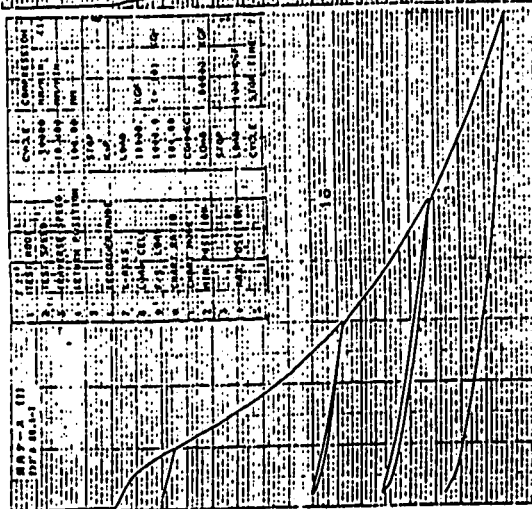
(1) 通常圧縮 :

上下部圧縮治具とも水平



(2) 斜角ケース1 :

上部圧縮治具のみ水平より  
10° 傾いている場合



(3) 斜角ケース2 :

上下部圧縮治具とも水平より  
同一方向に 10° 傾いている場合

荷重  
↑  
→クロスヘッド変位

図3.8 斜角圧縮試験結果の比較

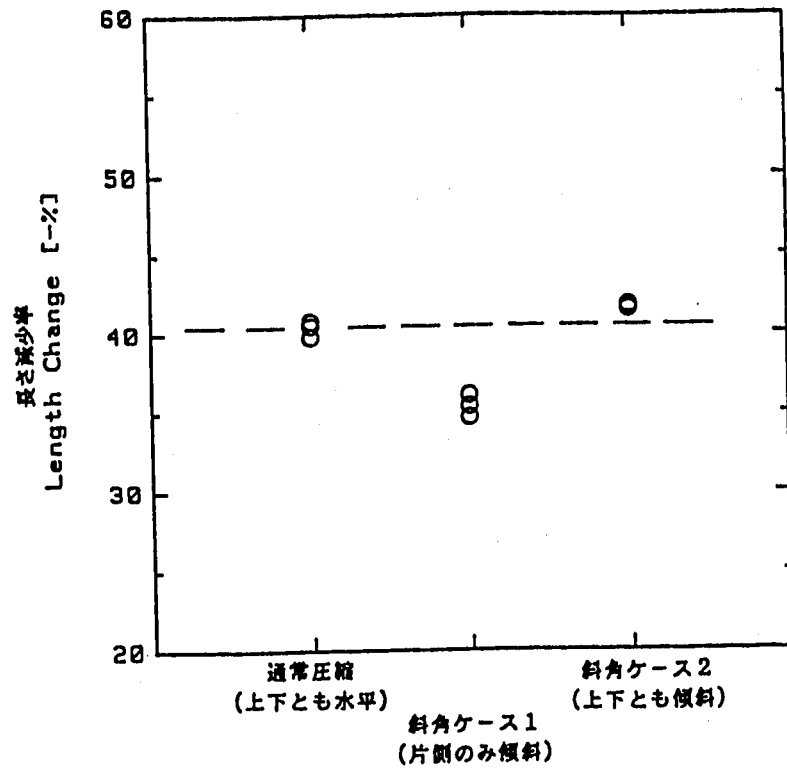
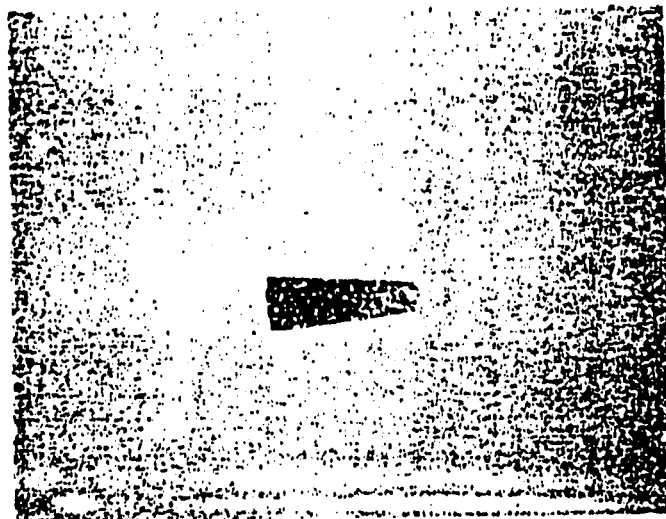
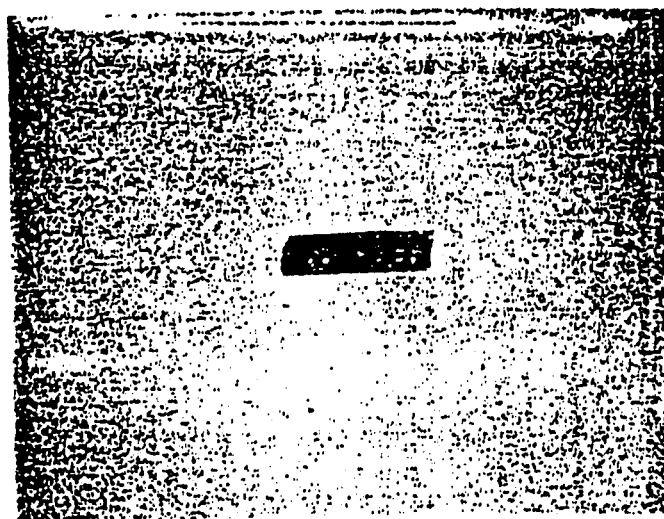


図3.9 斜角圧縮試験結果

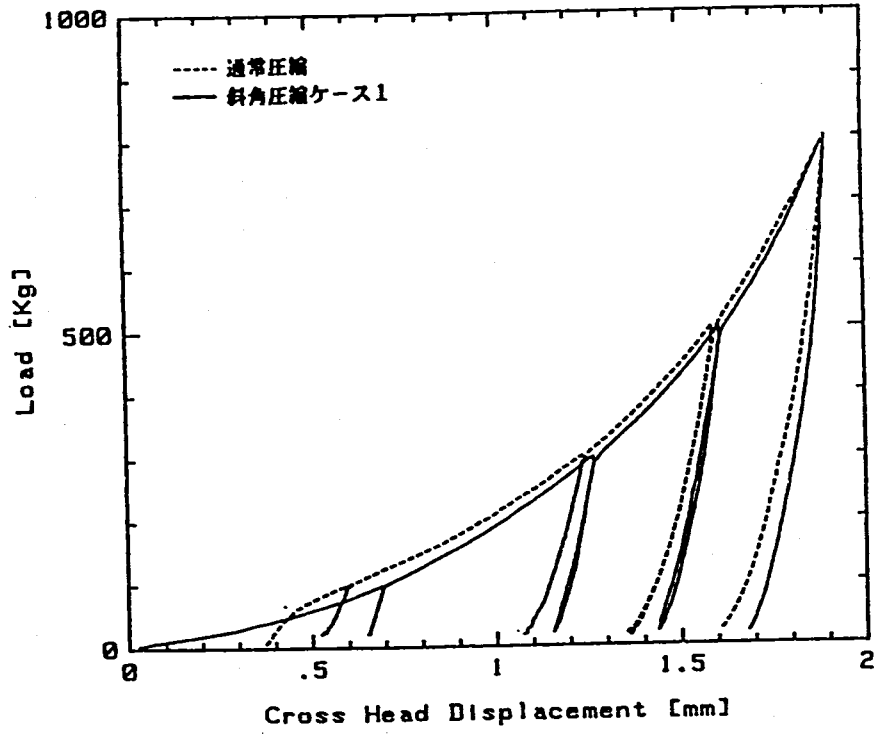


(1) 斜角ケース1：上部圧縮治具のみ水平より  
10° 傾いている場合

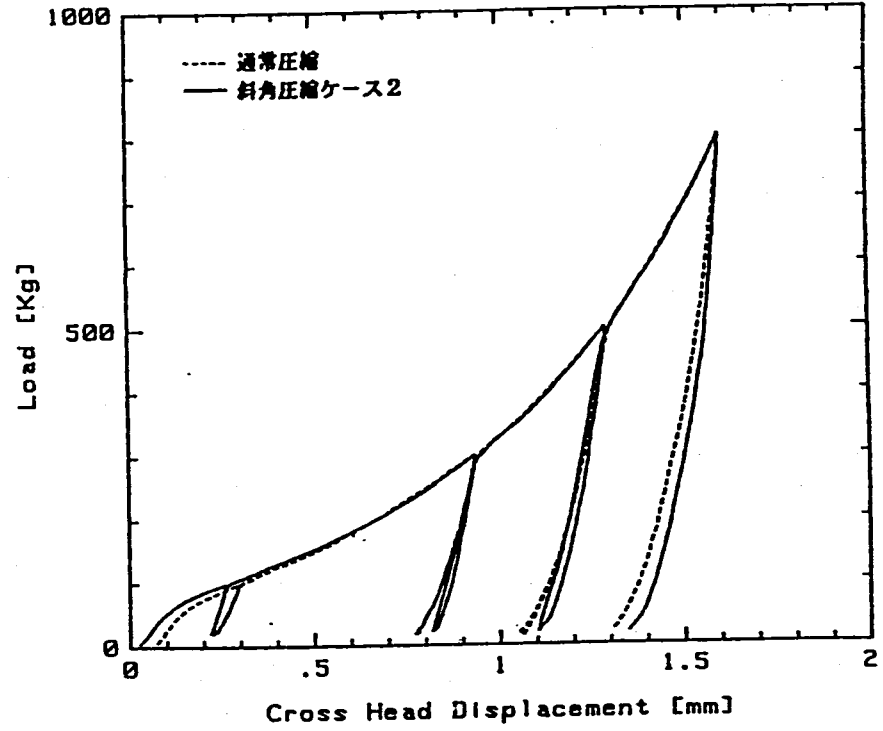


(2) 斜角ケース2：上下部圧縮治具とも水平より  
同一方向に10° 傾いている場合

図3.10 斜角圧縮試験後の供試体外観



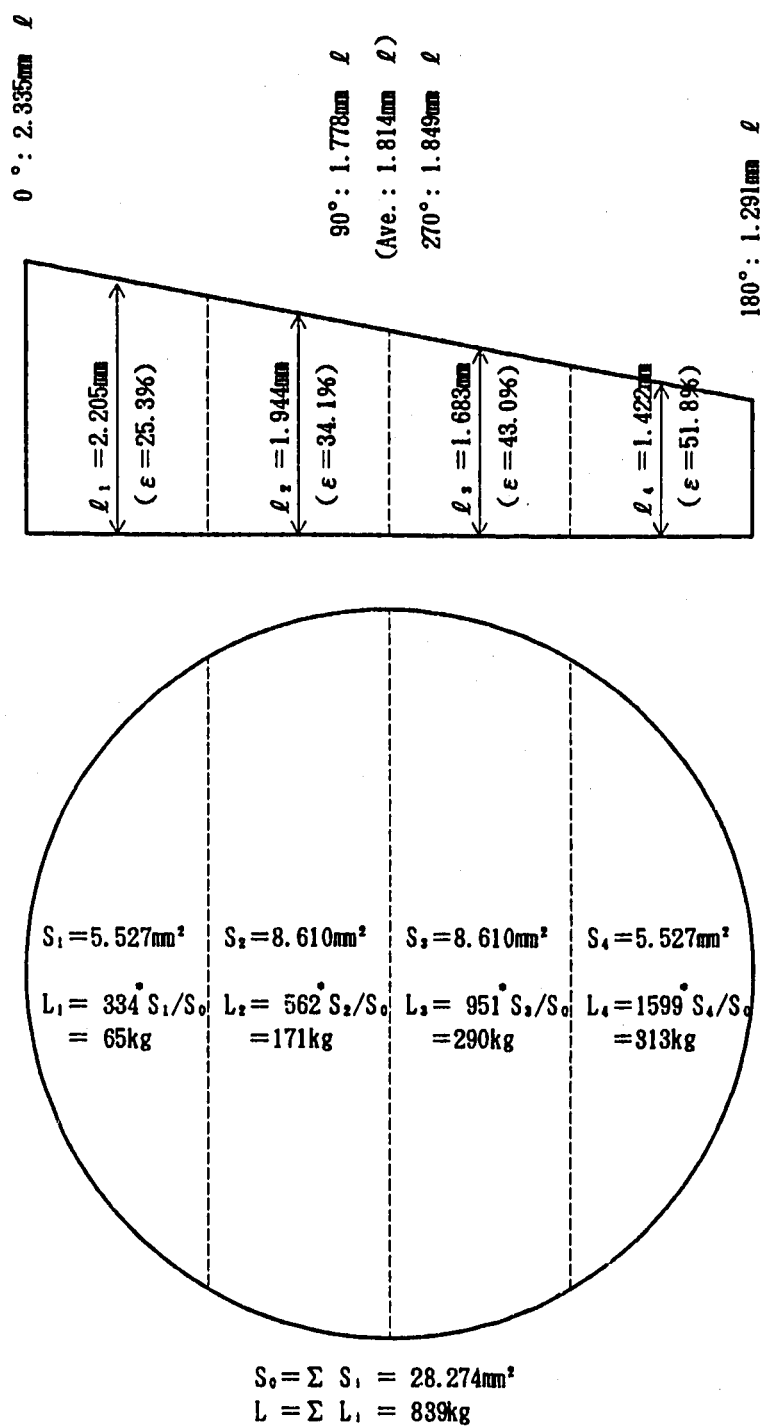
(通常圧縮 対 斜角圧縮ケース1:片側のみ傾斜)



(通常圧縮 対 斜角圧縮ケース2:両側とも傾斜)

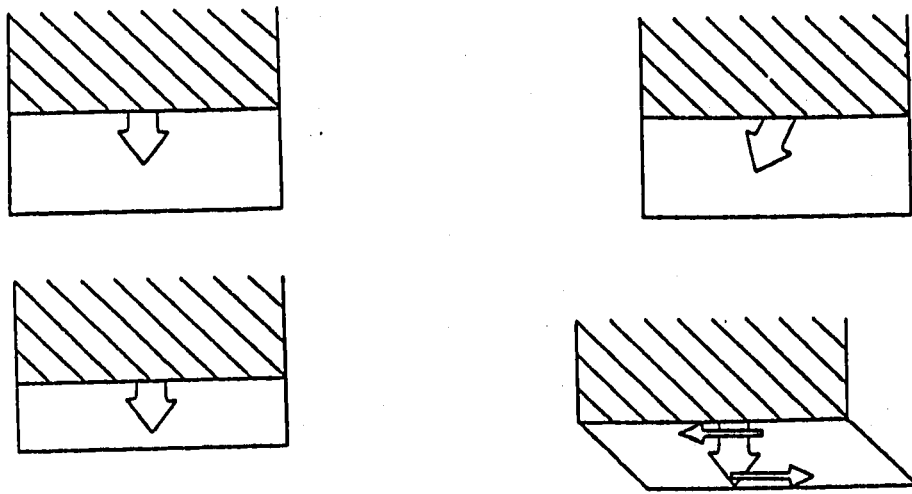
図3.11 斜角ケース1の荷重-変位曲線通常圧縮との比較

図3.12 斜角ケース2の荷重-変位曲線通常圧縮との比較



(注) \*印の値は各領域の平均歪に対する受圧面積 6 mm φ の場合の荷重を相関式から求めたもの。

図3.13 斜角圧縮ケース1 の結果の検討



(1) 通常圧縮の場合

(2) 斜め圧縮の場合

図3.14 斜角圧縮ケース2の変形モード模式図



### 3.3 圧縮クリープ試験

#### 3.3.1 試験条件

前年度の600℃、300kg/20日間のクリープ試験で有意のクリープ歪の発生が認められ、かつ、20日間の保持時間経過後も飽和せずさらに進行していく可能性を示すデータが得られた。そこでより実際的な温度及び荷重の範囲を対象としてパラメトリックに調べるため、以下の温度/荷重条件で試験を実施した。

| 温度 (°C) \ 荷重 (kg) | 500 | 530 | 550 | 600   |
|-------------------|-----|-----|-----|-------|
| 200               | ○   | ○   |     | ○     |
| 300               | ○   | ○   | ○   | 前年度実施 |

いずれの試験条件においても保持時間は20日間である。また、供試体は全て6mmφ×3mmtである。

試験パラメータの選定にあたっては、低温・低荷重でもクリープ歪発生の特候が認められることを重視して、クリープ歪を無視しうる条件の把握のための試験に重点をおいた。

#### 3.4.2 試験方法

試験に用いた圧縮クリープ試験機は図3.15に示すもので、前年度の試験に用いた装置と同様に、てこ方式で分銅による一定荷重を負荷する方式のクリープ試験機である。試験中の供試体の変位測定は、圧縮試験と同じ方式のダイヤルゲージ（読取り精度1/1000mm）によるもので、随時指示値を読取る方式とした。

試験温度の制御は、供試体が小さく試験ごとに熱電対を供試体に直接接触させて温度測定することが困難なため、近傍に配置した熱電対によった。温度較正は予備試験で、供試体に接触させた熱電対と供試体近傍の熱電対のそれぞれの指示値を、試験温度を包絡する範囲で読取り、両者間の較正曲線を求めた。両熱電対の指示値の差は500～600℃の範囲で4～6℃程度である。

#### 3.4.3 試験結果

圧縮クリープ試験の試験結果は表3.4に示すとおりである（寸法、密度、縮み率の定義は通常圧縮試験の試験結果に記載したものと同一）。試験中縮み率の0日の欄に

記した数値は、試験温度到達後を基準として、荷重負荷した直後（荷重負荷に要する時間は高々10秒程度）の変位の初期条件調整圧縮後の寸法に対する割合で、時間非依存の瞬間歪、すなわち塑性歪に相当するものである。この0日の値から20日の値への増分がクリープによる歪増分であるので、これをクリープ成分の欄に記した。参考のため、前年度の高温圧縮試験結果で同じ温度・荷重条件のデータがあるものは表に併せて記載した。

クリープデータの試験後縮み率から試験中縮み率のクリープ成分を除くと、圧縮試験における縮み率に概ね一致する。

供試体の寸法の経時変化は図3.16に示すとおりである。荷重200kg（◇印）及び300kg（○印）の各グループとも、500℃では試験開始時の瞬間歪からクリープによる歪の増分はさほどないが、530℃あたりからクリープ歪の発生が認められ、550℃及び600℃では顕著となる。歪の増分に注目して、試験開始時の荷重負荷直後を原点として、その後の寸法変化率（初期条件調整圧縮後の長さに対する縮み率）の経時変化を示すと図3.17のとおりとなる。この図の後半で、500℃-200kg及び530℃-200kgではクリープ歪の増加がほぼ飽和に近づいているように見えるが、530℃-300kg以上では20日以降も定常クリープ状に歪が増加するものと推察される。

#### 3.4.4 圧縮クリープについての考察

##### (1) クリープ式の適用性

図3.17にはSUS316金属塊に対する熱クリープ式<sup>2)</sup>による予測計算（クリープ式は、大きなクリープ歪を与えるSUS316-ST（溶体化処理）材に対するもの、また、20日保持後のクリープ歪が一致するような荷重値を推定\*して作成した。）の結果を破線で記載し、焼結体データと比較して示した。予測曲線と試験結果は大きく異なっている。20日後のクリープ歪が一致する所要荷重の推定値は実荷重の3～6倍となり、この荷重推定値の実荷重に対する比は、歪値が小さい方が倍率が大きいという傾向が表れている。この現象は、変形の小さい段階では粒同士の接触面が小さい状態で荷重が加えられるため局所応力が高く、変形が進むと接触面が広がることで荷重を支える部分も大きくなって局所応力は低くなることによるものと考えられる。クリープ曲線の不一致についても、変形が進むにつれ局所応力が

低下して見掛け上クリープ硬化の顕著な曲線となって表れるという可能性が強い。  
したがって、焼結体に対して、金属塊の熱クリープ式を応用できない。

\* 前年度の予測計算では、受圧面積を空隙率に応じて減ずる（体積密度の2/3乗を乗ずる）ことで実効応力が高いことの補正を試みたが、予測結果は焼結体データの1/10以下となったため、今回は、20日保持後のクリープ歪が一致するような同温度条件下の荷重値を推定して予測計算を行う（微視的な粒同士の結合部に作用する局所応力のレベルを推定するための試み）ことにした。

## (2) 温度・荷重依存性

今回の試験により、焼結体のクリープ変形の温度・荷重依存性がある程度調べられたので、これについて整理してみる。

図3.18は温度依存性（20日保持後のクリープ歪）、図3.19は荷重依存性を示したものである。これらの図から、焼結体のクリープ特性にはかなりきれいな温度・荷重依存性があることが認められる。また、クリープ試験の後半（10日から20日の間）の歪増分から求めたクリープ歪速度についても、図3.20及び図3.21に示す通りの温度・荷重依存性が認められる。

## (3) 荷重測定素子のクリープ歪の制限

焼結体のクリープ変形は必ずしも無視できないものであるが、荷重測定素子としての実用を考えた場合、測定対象となる事象における荷重負荷の発生時期、負荷期間が推定できる場合は、図3.18及び図3.19（または図3.20及び図3.21）に示される相関を定式化したクリープ式を用意しておけば、全永久歪（瞬間歪（塑性歪）とクリープ歪の和）の測定値に対応する荷重を求めることができる。これに対し、荷重負荷の時期、期間が推定できない場合は、クリープ歪の計算による推定ができないので、クリープ歪を無視できるような温度-荷重範囲に測定素子の使用条件を制限する必要がある。このような使用限界を設定するには、精度要求条件に応じた許容誤差範囲を別途詳細に検討する必要がある。

ここで、70日後のクリープ歪の測定要求条件として3.2.3の考察で誤差評価した2 $\sigma$ 以内の値の1%歪（530°C圧縮特性相関式によれば、100~300kgの荷重範囲で10~20kgの誤差を許容することに相当する）まで許容できるとすれば、まず20日経過後のクリープ歪は図3.18及び図3.19より500°Cで300kg程度までの荷重範囲では十分に、また、530°Cで200kg程度までの荷重範囲ならなんとか1%以下に収まる。さ

らに図3.20及び図3.21から20日以降70日までのクリープ歪増分を推定すると、530℃以下でかつ200kg以下の荷重ならば歪増分を+1%以下に収めることが可能であるが、300kgの荷重では500℃であっても+1%を越える歪増分となりそうである。温度と荷重を座標軸にとって、70日後のクリープ歪を予測すると図3.22のようになる(20日以降70日までのクリープ歪増分は10日~20日間のクリープ速度から推定し、20日後のクリープ歪との合計を全クリープ歪とする)。図から、70日後の全クリープ歪が1%以下になるのは破線以下(500℃で200kg、530℃で150kg、550℃で100kg程度)の領域ということになる。

表3.4 圧縮クリープ試験結果

| サンプル仕様                      |         | 6mmD × 3mmL, 粒度 100 μm, 単純円柱 |               |               |               |               |               |
|-----------------------------|---------|------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| サンプル番号                      |         | 6-13                         | 6-12          | 6-15          | 6-10          | 6-14          | 6-11          |
| クリープ<br>試験<br>条件            | 温度(℃)   | 500                          | 500           | 530           | 530           | 550           | 600           |
|                             | 荷重(kg)  | 200                          | 300           | 200           | 300           | 300           | 200           |
|                             | 期間(日)   | 20                           | 20            | 20            | 20            | 20            | 20            |
| 試験前                         | 寸法(mm)  | 6.0660×2.969L                | 6.0650×2.993L | 6.0630×2.970L | 6.0650×2.976L | 6.0660×2.978L | 6.0650×2.973L |
|                             | 密度(XTD) | 47.1                         | 47.0          | 46.8          | 47.0          | 47.4          | 47.3          |
| 初期調整<br>圧縮後                 | 寸法(mm)  | 6.0620×2.959L                | 6.0640×2.967L | 6.0610×2.955L | 6.0660×2.957L | 6.0680×2.961L | 6.0640×2.956L |
|                             | 密度(XTD) | 47.4                         | 47.4          | 47.1          | 47.2          | 47.6          | 47.0          |
| クリープ<br>試験後                 | 寸法(mm)  | 6.3030×2.305L                | 6.4670×2.054L | 6.3810×2.221L | 6.4760×2.003L | 6.4620×1.972L | 6.4880×2.084L |
|                             | 密度(XTD) | 56.2                         | 60.2          | 58.5          | 61.2          | 63.0          | 59.0          |
| 試験中<br>縮み率<br>(%)           | 0日      | 22.1                         | 29.9          | 24.3          | 31.7          | 30.7          | 24.8          |
|                             | 1日      | 22.3                         | 30.0          | 24.6          | 32.4          | 31.9          | 27.6          |
|                             | 2日      | 22.3                         | 30.1          | 24.7          | 32.6          | 32.3          | 28.2          |
|                             | 3日      | 22.4                         | 30.1          | 24.7          | 32.7          | 32.6          | 28.8          |
|                             | 4日      | 22.4                         | 30.2          | 24.7          | 32.7          | 32.8          | 29.1          |
|                             | 5日      | 22.4                         | 30.2          | 24.7          | 32.8          | 33.0          | 29.3          |
|                             | 6日      | 22.5                         | 30.2          | 24.7          | 32.9          | 33.2          | 29.5          |
|                             | 7日      | 22.5                         | 30.3          | 24.7          | 32.9          | 33.4          | 29.6          |
|                             | 8日      | 22.5                         | 30.3          | 24.7          | 33.0          | 33.5          | 29.8          |
|                             | 9日      | 22.5                         | 30.3          | 24.8          | 33.0          | 33.6          | 29.9          |
|                             | 10日     | 22.5                         | 30.3          | 24.8          | 33.1          | 33.7          | 29.9          |
|                             | 11日     | 22.6                         | 30.4          | 24.8          | 33.2          | 33.8          | 30.1          |
|                             | 12日     | 22.6                         | 30.4          | 24.8          | 33.2          | 33.9          | 30.2          |
|                             | 13日     | 22.6                         | 30.4          | 24.8          | 33.2          | 33.9          | 30.2          |
|                             | 14日     | 22.6                         | 30.4          | 24.8          | 33.3          | 34.0          | 30.2          |
|                             | 15日     | 22.6                         | 30.5          | 24.8          | 33.3          | 34.1          | 30.3          |
|                             | 16日     | 22.6                         | 30.5          | 24.8          | 33.4          | 34.1          | 30.3          |
|                             | 17日     | 22.6                         | 30.5          | 24.8          | 33.4          | 34.2          | 30.3          |
|                             | 18日     | 22.6                         | 30.5          | 24.8          | 33.5          | 34.2          | 30.4          |
|                             | 19日     | 22.7                         | 30.6          | 24.8          | 33.5          | 34.3          | 30.4          |
| 20日                         | 22.6    | 30.6                         | 24.9          | 33.6          | 34.3          | 30.5          |               |
| 同上クレー成分(%)                  |         | 0.5                          | 0.7           | 0.6           | 1.9           | 3.0           | 5.8           |
| 試験後縮み率(%)                   |         | 22.1                         | 30.8          | 24.8          | 32.3          | 33.4          | 29.5          |
| 同条件圧縮試験<br>縮み率(%)           |         | —                            | —             | 20.0<br>~20.7 | 28.2<br>~29.0 | —             | 22.1<br>~22.7 |
| 10日~20日間の<br>クレー速度<br>(%/日) |         | 0.01                         | 0.03          | 0.01          | 0.05          | 0.06          | 0.06          |

注) 密度は、平均外径と平均長さから求める体積と理論密度 7.968g/cm<sup>3</sup>から求めた。

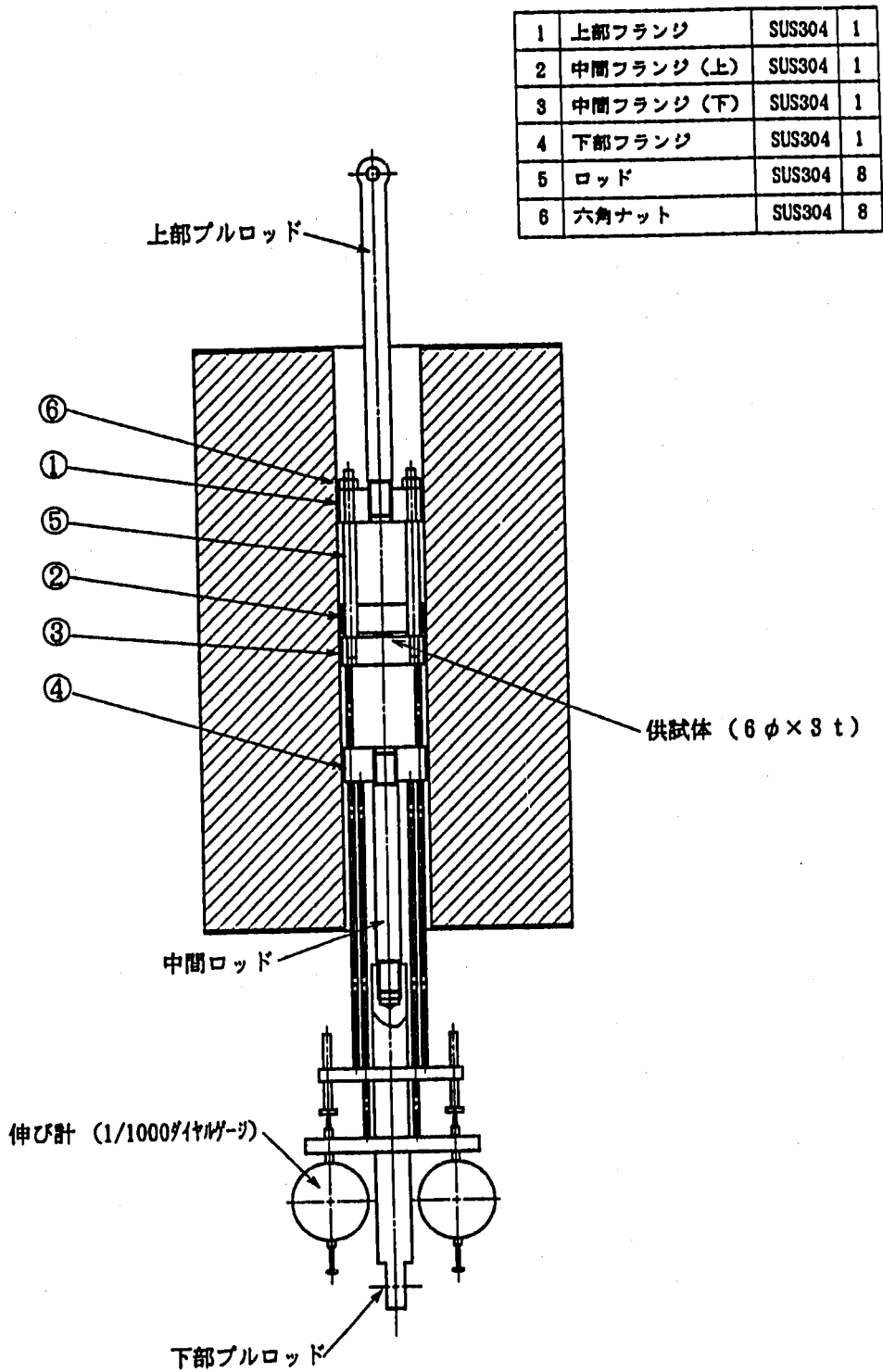


図3.15 圧縮クリープ試験装置

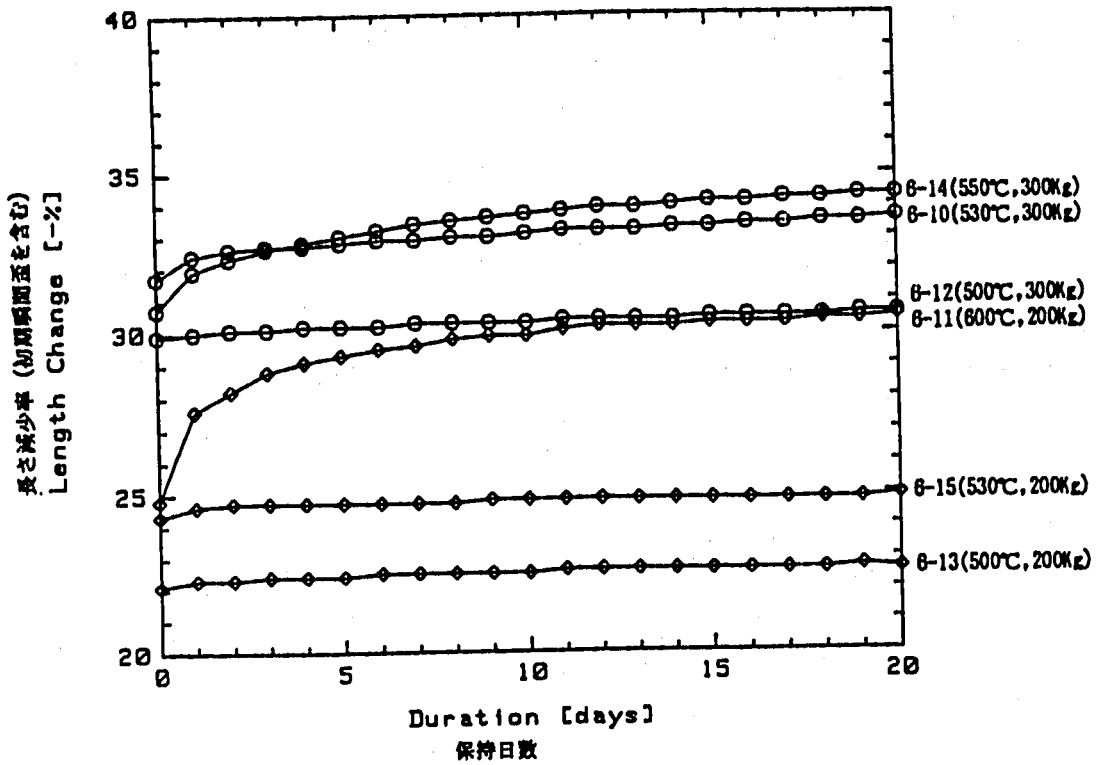


図3.16 全歪の変化 (圧縮クリープ試験)

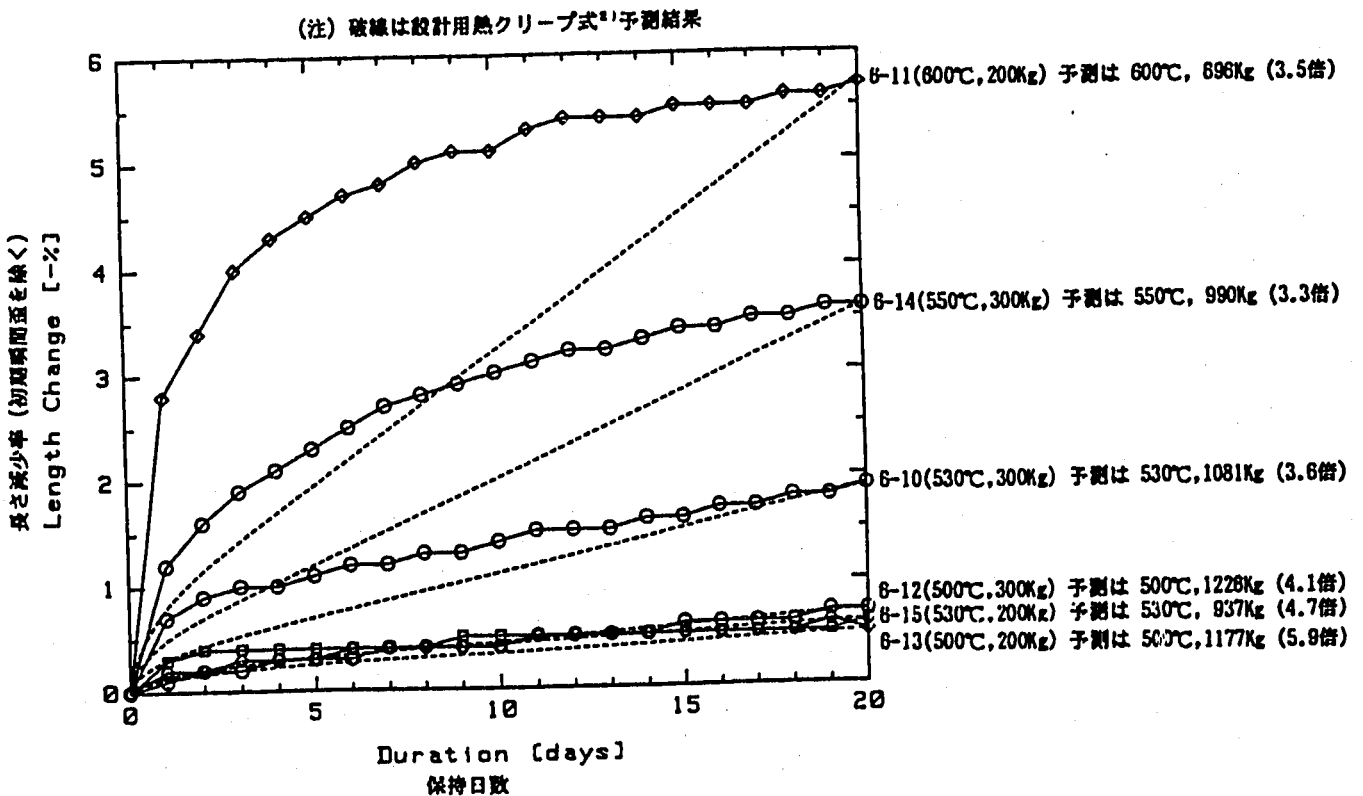


図3.17 初期歪後の歪変化 (圧縮クリープ試験)

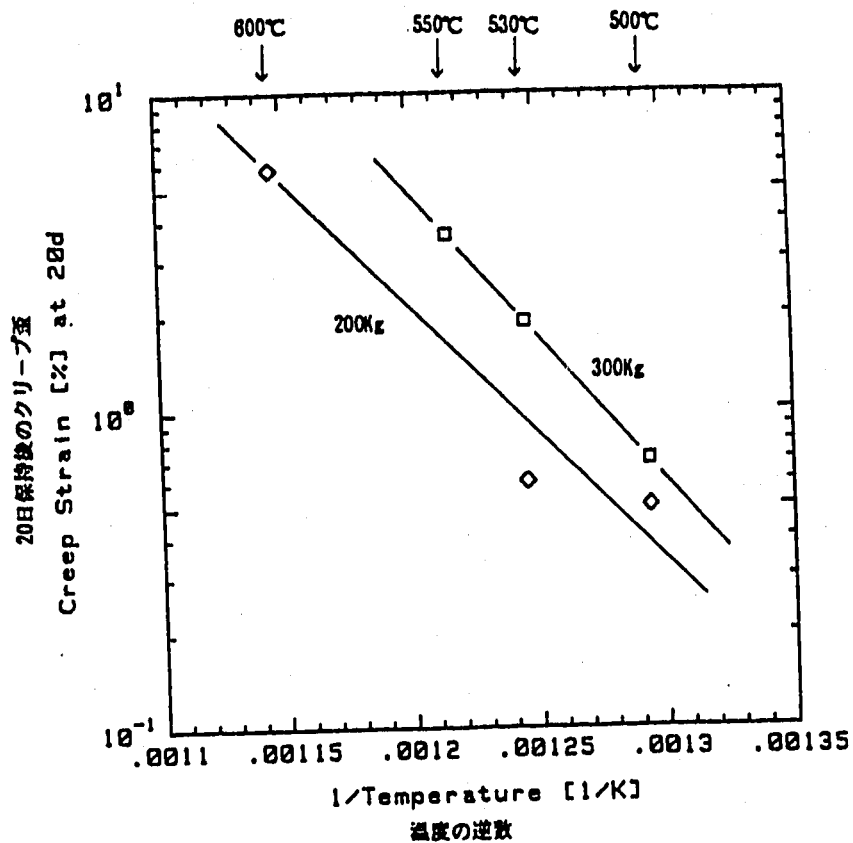


図3.18 クリープ歪の温度依存性

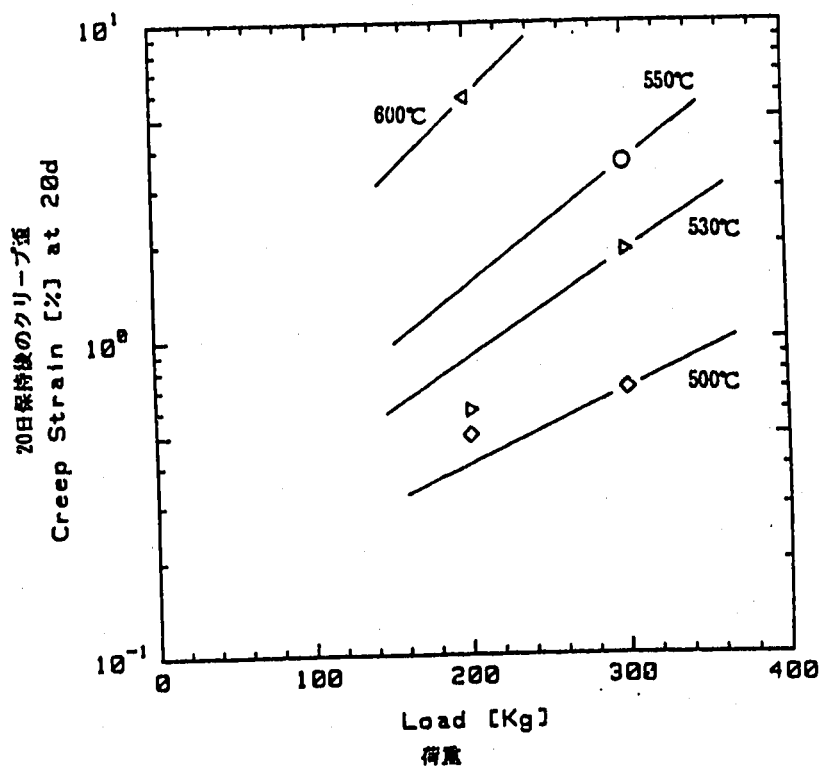


図3.19 クリープ歪の荷重依存性



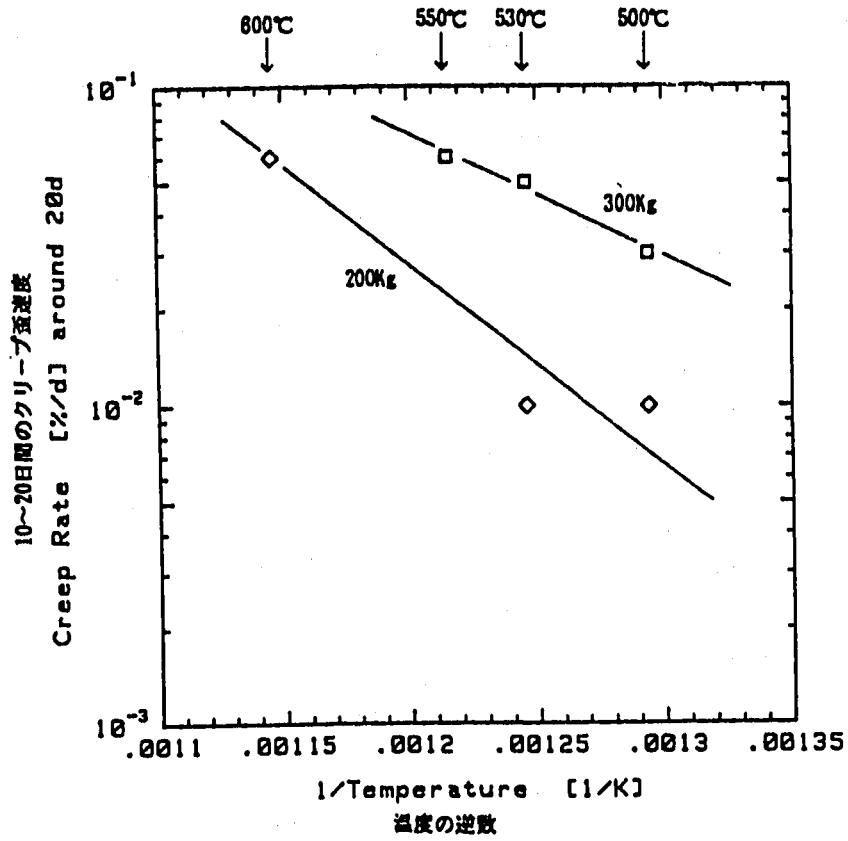


図3.20 クリープ歪速度の温度依存性

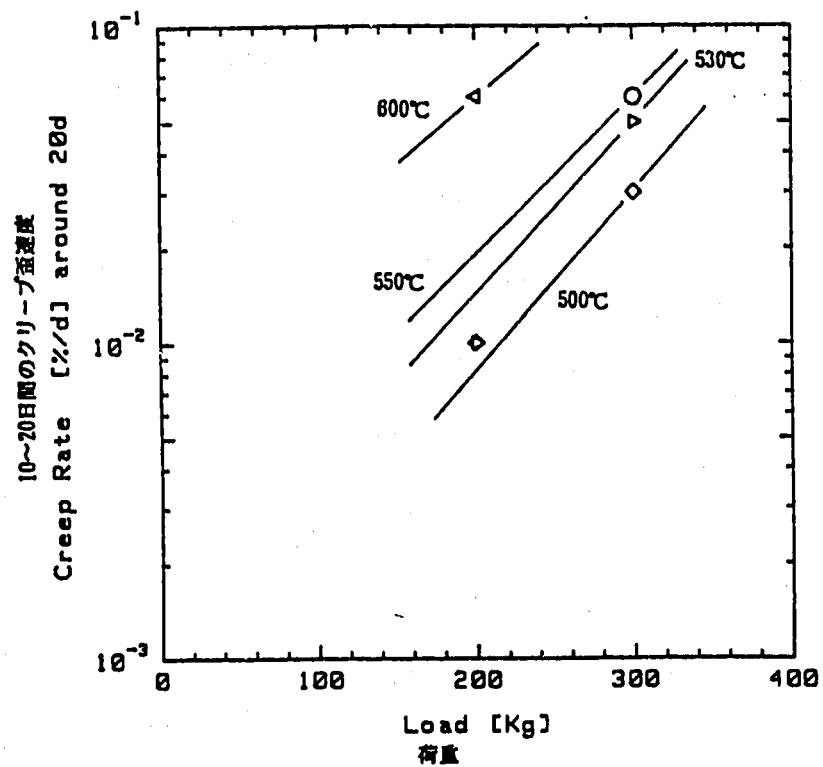


図3.21 クリープ歪速度の荷重依存性

(注)  $[\dot{\epsilon} \text{ at } 20d] + [\dot{\epsilon} (20d) \times (70-20)d]$   
 $=$  (total creep strain)

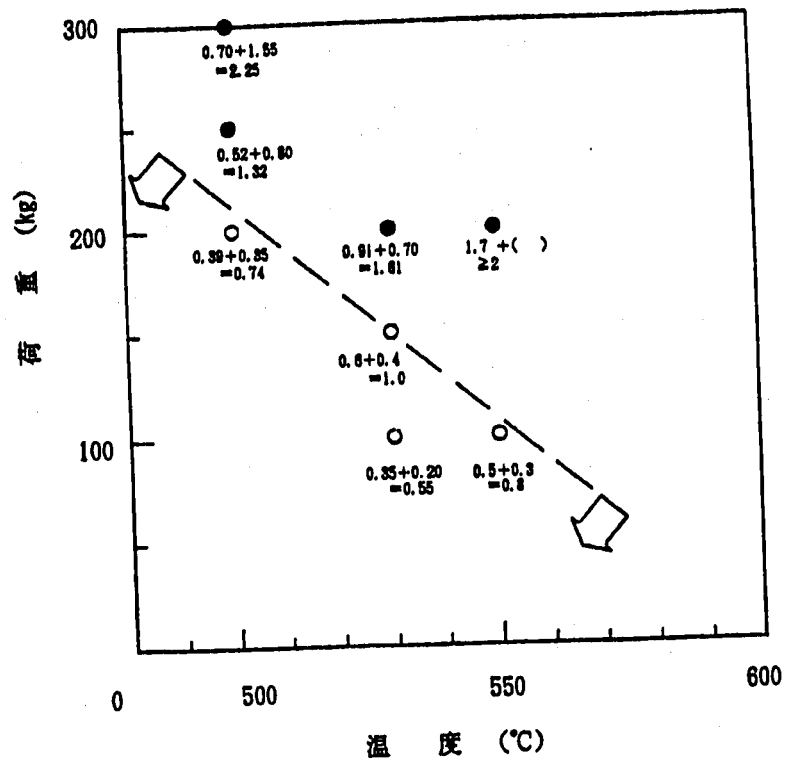


図3.22 クリープ歪マップ

#### 4. ま と め

特性測定(Ⅱ)により、以下の成果及び知見が得られた。

- (1) 焼結体供試体に対して、圧縮変形特性に影響を与えない程度の微小な荷重(受圧面の全面積で算出したみかけの応力で $1\text{ kg/mm}^2$ 程度)をあらかじめ負荷すると、供試体表面状態の不揃い(特に突起)を整えて長さのばらつきを低減し、寸法変化率算出時の初期寸法の誤差が小さくなることから荷重測定精度の向上に有効である。

今回試作した $6\text{ mm}\phi \times 3\text{ mm}$ tの20個の供試体を統計処理すると、初期寸法の誤差 $2\sigma$ の平均値に対する割合は、圧縮前が1.7%であるのに対し圧縮後は0.3%である。これは、今回得た相関式(530°C)によれば、300kg負荷時で圧縮前が約30kgに対し圧縮後が約5kgの荷重の誤差に相当する。すなわち、初期調整圧縮によって荷重誤差を $1/6$ に低減できたことになる。

- (2) 形状効果については、受圧面の全面積で算出するみかけの応力で整理して荷重と変位の関係进行评估すれば、供試体の外径に依存せず統一的に扱える。
- (3) 圧縮変形特性データを統計的に処理して、室温及び530°Cにおける荷重と変形(圧縮歪)の相関式を作成した。これらの相関式の予測性能はかなり良好である。また、これらの式を用いて誤差評価を行った結果、圧縮歪のばらつきによる荷重推定値のばらつきは、負荷荷重値の約6%(室温)ないし約10%(530°C)となることがわかった。
- (4) 斜角圧縮試験において、供試体に対し接触体が傾斜して圧縮する斜角ケース1では、通常の垂直方向圧縮と異なる荷重-変位曲線を示し、圧縮後における長さ平均値で定義された永久変位は同じ荷重における通常圧縮の場合の永久変位より小さい。これは、平均より変形の大きい側の歪硬化(荷重-変位曲線の高荷重での立ち上がりに示される)の寄与で説明される。

一方、供試体と接触体は平行のまま荷重が垂直方向より傾斜して圧縮する斜角ケース2では、通常圧縮の場合とほぼ同じ荷重-変位曲線を示すが、圧縮後の永久変位は同じ荷重の通常圧縮の場合に比べほんのわずかながら大きい。これは、通常圧縮の変形モードが緻密化(空隙率減少)のみによることに対し、この斜角圧縮の変形モード緻密化よりもむしろ、剪断荷重による全体形状の変形によっているため同じ変位を与えるのに後

者は前者より小さな荷重で済むものと考えられる。

変位量の誤差の点では、斜角ケース2は影響が小さい（全歪40%に対し1%程度）が、斜角ケース1では、今回の試験で採用した傾斜角 $10^\circ$ という小さな傾斜でも大きな差（全歪40%に対し5%程度）となる。この差は硬化則の非線形性で評価できるので、斜角ケース1の形状が得られたときは、詳細寸法測定を行うことにより、実荷重により傾斜角の推定を行うとともに、可能であればあらかじめ圧縮後の形状を再現する実荷重校正試験を実施すれば誤差の低減に有効である。

なお、測定の目的等により明らかに斜角ケース1の荷重負荷モードが予想される場合は、あらかじめ実荷重校正試験や有限要素法を用いた解析手法の開発等により、荷重-変位曲線あるいは評価式を求めておくことが望ましい。

- (5) 焼結体の圧縮クリープ特性には比較的明瞭な温度・荷重依存性があり、定式化は可能と思われる。また、クリープ歪の影響を無視できる制限条件として、例えば70日後のクリープ歪1%までを許容範囲とすると $500^\circ\text{C}$ で200kg、 $530^\circ\text{C}$ で150kg、また、 $550^\circ\text{C}$ では100kg程度までが荷重測定素子としての適用限界ということとなる。

なお、焼結体のクリープ式の定式化を計るためには、かなり広範囲の試験条件（温度・荷重の範囲拡大、及び特に長時間側）にてクリープ試験を行う必要がある。また、照射条件下ではよりクリープしやすくなると考えられるので、原子炉内での環境を考慮した照射クリープ試験を行うことが望ましい。また、照射クリープ試験のほか、圧縮変形特性についても照射下での特性変化を確認する必要があり照射済の焼結体を用いた、ホットセルでの室温及び高温圧縮試験を行うことが望ましい。

## 第 2 編

### 焼結体による荷重測定素子の特性測定（Ⅲ）

#### 目 次

|  | 頁  |
|--|----|
| 1. 概 要 .....                               | 45 |
| 2. カバー及び取付座付荷重測定素子の設計・製作及び<br>初期条件調整 ..... | 46 |
| 2.1 カバー付荷重測定素子の設計・製作 .....                 | 46 |
| 2.2 初期条件調整圧縮試験 .....                       | 48 |
| 3. 特性測定試験 .....                            | 51 |
| 3.1 高温平行圧縮試験 .....                         | 51 |
| 3.2 高温斜角圧縮試験 .....                         | 58 |
| 4. ま と め .....                             | 63 |

## 1. 概 要

原子炉の環境下においてオフ・ラインで荷重を測定するために考案された焼結体による荷重測定素子の開発にあたり、1988年度に焼結体の基礎的特性把握試験を実施（特性測定（Ⅰ）：PNC SN9410 90-082 で報告）、1989年度には荷重測定素子の製作時の初期条件調整圧縮試験と形状パラメータ圧縮、斜角圧縮、圧縮クリープの各試験（特性測定（Ⅱ）：前第1編参照）を実施した。

引き続き1990年度に、焼結体による荷重測定素子の特性測定（Ⅲ）として、原子炉内での使用を想定したカバー付荷重測定素子を考案し、試作により製作性を確認するとともに、以下の各試験を実施した。

- 1) 高温平行圧縮試験
- 2) 高温斜角圧縮試験

## 2. カバー及び取付座付荷重測定素子の設計・製作 及び初期条件調整

### 2.1 カバー付荷重測定素子の設計・製作

前年度の研究開発では特性測定試験（前付録A）と並行して、原子炉内での荷重測定素子の使用を想定して、ルースパーツ対策としてカバー付荷重測定素子を摘出するなどの実用化検討を行い、また、カバー付荷重測定素子の試作により加工性の確認を行った。これに引き続いて今回（1990年度）は、カバー及び取付け座付荷重測定素子の設計具体化と製作及び初期条件調整を行い、次節の各試験を実施した。

カバー及び取付け座付荷重測定素子の設計については付録Cに示すが、その結果として選定された供試体の仕様は以下のとおりである。

荷重測定素子の基本形状  $6\text{ mm}\phi \times 3\text{ mm t}$ 、荷重適性範囲  $100\text{ kg} - 300\text{ kg}$  に対する最大変位量約  $1.2\text{ mm}$  を考慮し、また、カバーを一体で焼結させた場合の荷重-変位特性に与える影響を抑えるためカバーの板厚を可能な限り薄くすることとし、また、取付け座については被測定物にガタ等がなく取付けられれば良いので形状は平板としてカバー及び取付け座の形状寸法を図2.1のように設定した。

上記カバー及び取付け座を施した  $6\text{ mm}\phi \times 3\text{ mm t}$  SUS316焼結体の荷重測定素子を製作した。製作は、素子の焼結時にカバー及び取付け座をあらかじめセットして一体で焼結する。素子の粒度及び密度は、従来通りそれぞれ  $100\mu$ 、 $3.8\text{ g/cm}^3$  を目標とした。製作した荷重測定素子の外観を図2.2に示す。焼結体の密度は、 $3.88 \sim 4.03\text{ g/cm}^3$  の間に分布しており、従来の裸の焼結体（前年度の形状パラメータ試験、斜角圧縮試験等に用いた供試体）の密度  $3.65 \sim 3.82\text{ g/cm}^3$  と比較して、やや高めの値であった。

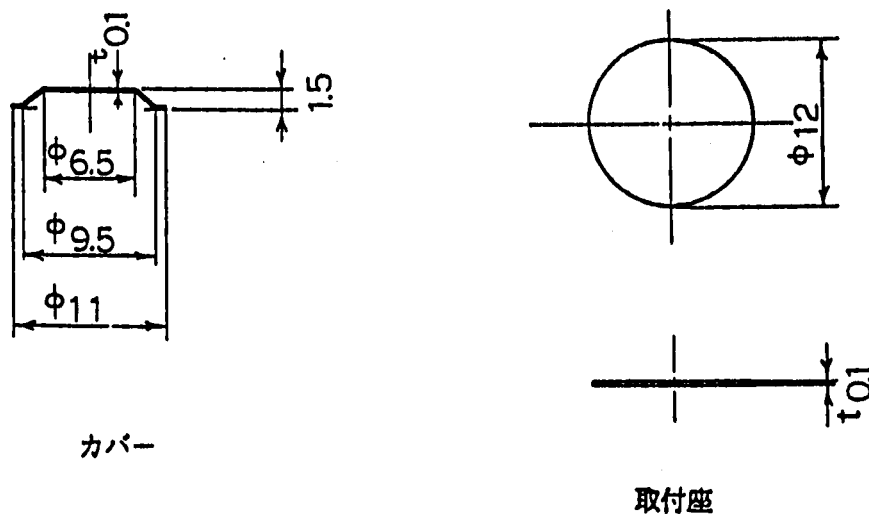


図2.1 カパー及び取付け座の寸法・形状

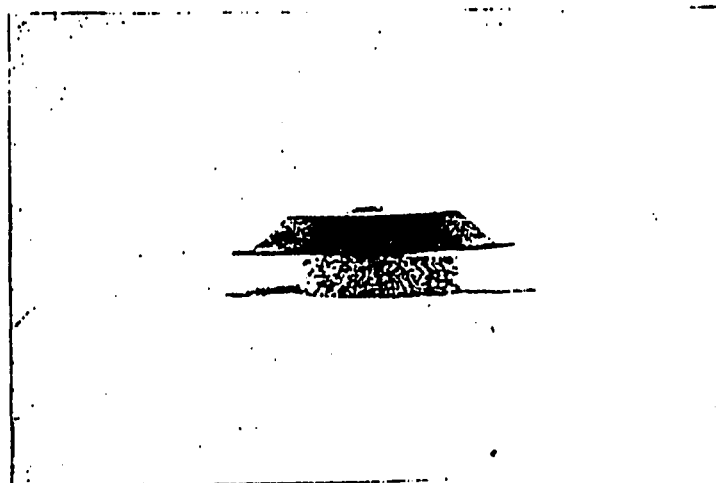


図2.2 カパー及び取付け座付試験体の外観



## 2.2 初期条件調整圧縮試験

### 2.2.1 試験方法

カバー及び取付け座付き焼結体の高温圧縮特性を試験するに先立ち、カバー及び取付け座を取付けた状態であっても、焼結体表面の微小な凹凸が寸法測定結果に影響を与えることが考えられたので、前年度と同様に初期条件調整のための圧縮処理を施すことにした。

前年度と同様に、受圧面積に対して $1\text{ kg/mm}^2$ 相当の荷重となる $28.3\text{ kg}$ を最大荷重し、圧縮速度は $0.1\text{ mm/min}$ で、温度は室温とした。

試験機及び圧縮試験治具は、これまで圧縮試験に用いてきたものと同じである。試験前後のサンプルの寸法測定は、前年度までの方法に準じ図2.3に示す要領で行った。今回の供試体にはカバー及び取付け座が付いており、焼結体部分の密度を正確に算出することはできないが、参考データとして把握するため重量測定を行った。測定機器はこれまで用いている電子式天秤である。寸法測定に用いたマイクロメータ及び電子式天秤の読取り精度はそれぞれ $1/1000\text{ mm}$ 及び $1/10\text{ mg}$ である。

### 2.2.2 試験結果

高温圧縮試験に供する全供試体の初期条件調整圧縮後の高さの測定結果を図2.4及び図2.5に示す。

図2.4は高さ平均値による圧縮前後の比較で、圧縮前の平均高さがかかなりばらついていたのに対し、圧縮後ばらつきが小さくなっており、圧縮処理によって供試体高さの標準偏差は大幅に低減している。

また、図2.5は、高さ測定値5点（周辺部の $90^\circ$  おき4点と中央の1点）のうちの最大値と最小値について圧縮前後の変化を示したものであり、圧縮処理によって最小値はさほど低下しないのに比べ最大値が大きく低下し、最大-最小の幅がかかなり小さくなっていることが分かる。

なお、測定値データは、後掲の高温圧縮試験結果の表中に全て記載した。

$$\text{平均径} = (\text{A} + \text{B}) / 2$$

$$\text{平均厚} = (\text{1} + \text{2} + \text{3} + \text{4} + \text{5}) / 5$$

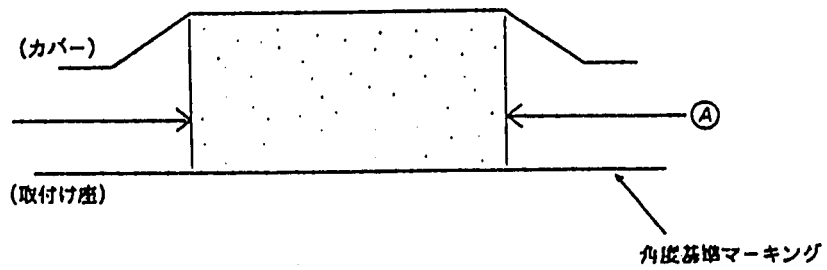
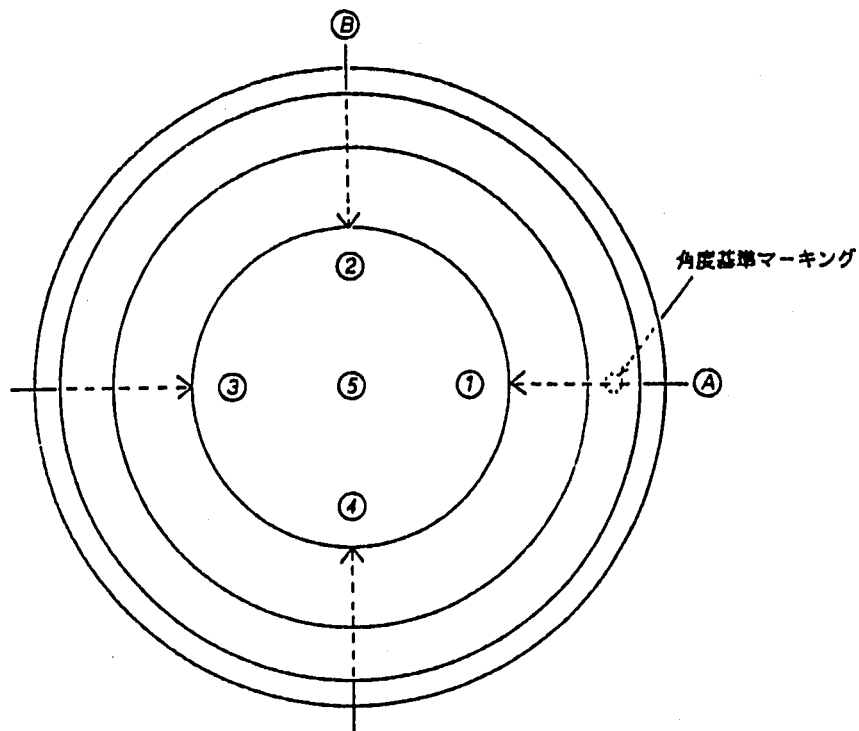


図2.3 カバー及び取付け座付試験体の寸法測定位置

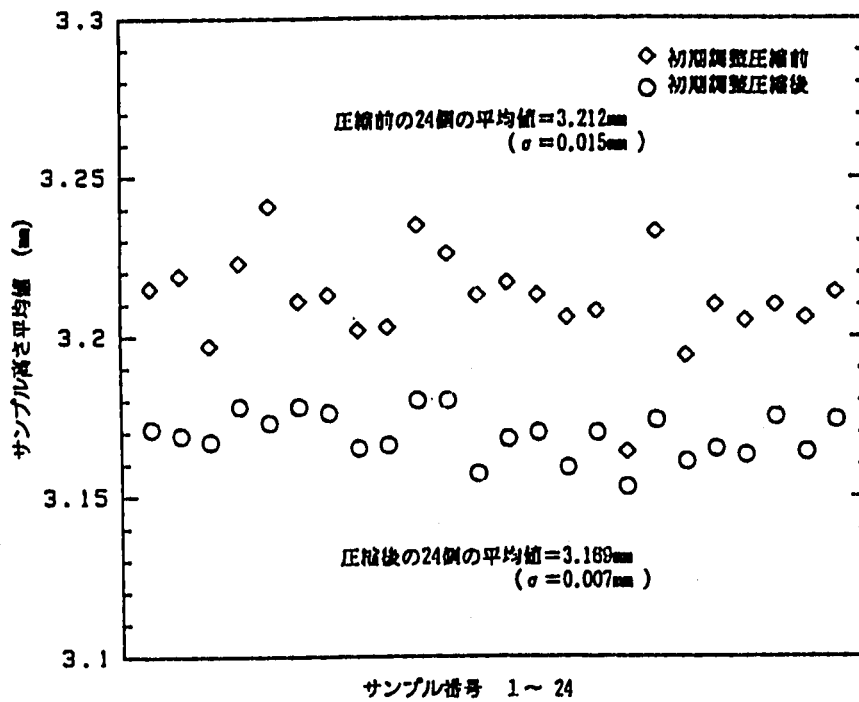


図2.4 圧縮調整試験前後の供試体長さ変化〔平均値〕

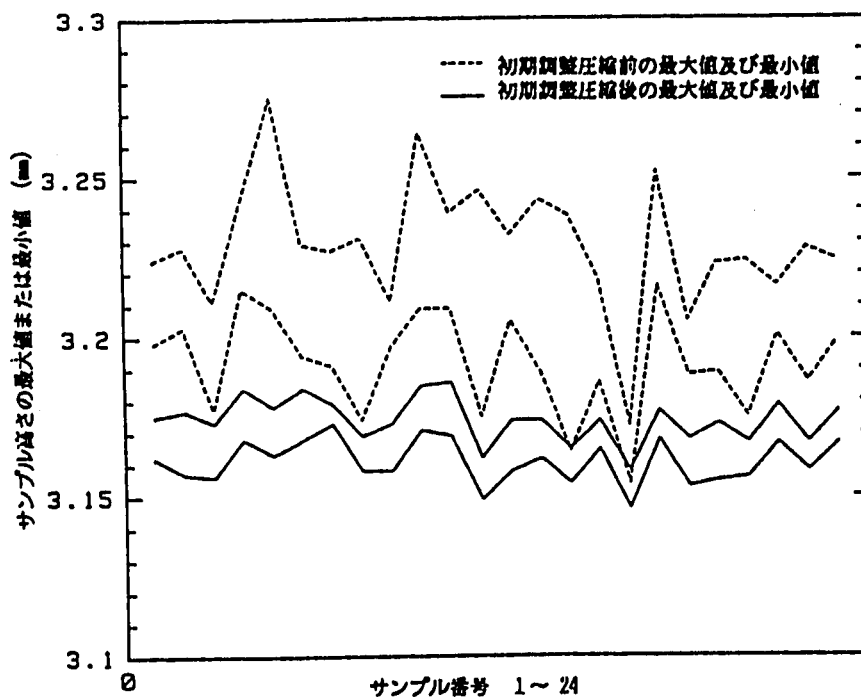


図2.5 圧縮調整試験前後の供試体長さの最大値と最小値

### 3. 特性測定試験

今回の試験の目的は、焼結体による荷重測定素子の実用化のため、カバー及び取付け座を付けた状態での高温圧縮特性を把握することで、その目的に応じて注目すべき温度、荷重を中心に以下のような試験条件とした。

| 荷重 (kg) \ 温度 (°C) | 100 | 200 | 300 | 500 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|
| 400               |     |     | ○   |     |
| 500               |     |     | ○   |     |
| 530               | ○   | ○   | ◎   | ○   |
| 550               |     |     | ○   |     |

○：平行圧縮のみ  
◎：平行圧縮及び斜角圧縮

荷重負荷方法は基本的に、上下の圧縮治具が平行でこれらに垂直の方向に荷重をかける平行圧縮であるが、温度530°C－荷重300kgのケースについては斜角圧縮試験も行った。この斜角圧縮試験は、前年度に実施した同種の試験のケース1（下部圧縮治具は水平で、上部圧縮治具のみこれに対して10°傾いた状態で鉛直方向に圧縮する）の方法で実施した。

試験体数は1条件あたり3体とし、合計24体試験した。

圧縮速度は、全て0.1mm/minである。

#### 3.1 高温平行圧縮試験

##### 3.1.1 試験方法

試験機、圧縮治具及び寸法測定方法等はこれまでに実施した平行圧縮試験で用いた器具及び方法によった。

試験前寸法は、初期条件調整圧縮試験において測定した。

##### 3.1.2 試験結果

高温平行圧縮試験の結果を表3.1に、また試験後の供試体外観を図3.1に示す。ここで高さ縮み率は、高さ平均値の初期値に対する変化の割合を示すが、初期値には初

期条件調整圧縮試験の後の高さを用いた。表に示した縮み率のデータ及び供試体外観から、荷重に応じて縮み率に差が見られるが、温度に対しては顕著な差は現れない。

### 3.1.3 高温平行圧縮試験結果の考察

#### (1) 荷重-歪相関式

高温平行圧縮試験結果について、圧縮歪（高さ縮み率）と荷重の関係を図示すると図3.2のとおりとなる。

前年度と同じ要領で相関曲線を求めると、

$$L = 61.73 \exp(0.06169 \varepsilon) \quad [\text{at } 530 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $L$  = 荷重 (kg)

$\varepsilon$  = 圧縮歪 (%)

が得られる。

上記(1)式が各試験荷重で予測する圧縮歪と実測値の差について統計処理を行うと、平均値が0.000%で、標準偏差 $\sigma$ は0.722%となる。

ここで、誤差を $\pm 2\sigma$  (95%信頼限界)として、圧縮歪の誤差が相関式から求める荷重においてどの程度の誤差となるかを調べると、

$$100\text{kgで} \quad 7.82\% \pm 0.722\% \times 2 \quad \Rightarrow \quad 91.5 \sim 109.3\text{kg} \quad (\text{すなわち} \pm \text{約} 10\text{kg})$$

$$200\text{kgで} \quad 19.1\% \pm 0.722\% \times 2 \quad \Rightarrow \quad 183.5 \sim 219.2\text{kg} \quad (\text{すなわち} \pm \text{約} 20\text{kg})$$

$$300\text{kgで} \quad 25.6\% \pm 0.722\% \times 2 \quad \Rightarrow \quad 274.0 \sim 327.4\text{kg} \quad (\text{すなわち} \pm \text{約} 30\text{kg})$$

$$500\text{kgで} \quad 33.9\% \pm 0.722\% \times 2 \quad \Rightarrow \quad 457.1 \sim 546.3\text{kg} \quad (\text{すなわち} \pm \text{約} 50\text{kg})$$

となり、圧縮歪の誤差 $\pm 2\sigma$ のばらつきは、荷重推定値に対して $\pm 10\%$ 程度のばらつきとなる。

#### (2) 圧縮歪と温度の関係

圧縮歪と温度の関係は図3.3のとおりである。ここでも上記と同じように相関式を求めると、

$$\varepsilon = 19.71 + 0.01024T \quad [\text{at } 300\text{kg}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\varepsilon$  = 圧縮歪 (%)

$T$  = 温度 ( $^\circ\text{C}$ )

が得られる。相関式の温度の係数から、 $100^\circ\text{C}$ の温度変化に対して圧縮歪は高々1

%程度であり、圧縮歪の温度依存性は極めて小さい。

相関式が予測する圧縮歪と実測値の差について統計処理を行うと、平均値が0.025%、標準偏差 $\sigma$ は0.702%となり、この $\sigma$ の値は荷重-圧縮歪の相関式の予測評価で得た $\sigma$  (0.722%) 以下で、荷重-圧縮歪の誤差に包絡される。

### (3) 荷重の推定法

本試験に用いた仕様のカバー及び取付け座付き焼結体で試験をする場合、圧縮歪実測値から荷重値を推定するには温度530°Cでは(1)式を適用し、温度条件が530°Cでないときは、(2)式により530°Cにおける圧縮歪にあらかじめ補正すればよい。

荷重の推定値の誤差は±10%を見込めばよい。

なお、(1)式は前年度に求めた6 mm $\phi$  × 3 mmtの裸の焼結体に対する530°Cにおける荷重-圧縮歪相関式に比べ、同じ荷重で若干小さい圧縮歪予測値を与えるが、誤差( $\sigma$ )はほぼ同等である。この要因は、カバー及び取付け座と焼結体の接合部での拘束、あるいは初期密度が高かったことが考えられるか、初期密度に関してはカバー及び取付け座を外した状態での試験前及び試験後の寸法及び重量の値は不明なため確認できない。

表 3.1 高温平行圧縮試験結果 (1/2)

| VFA<br>番号 | 試験温度<br>(℃) | 最大荷重<br>(Kg) | 寸法測定<br>の時点 | 高  さ (mm) |       |       |       |       |       | 高さ縮み率<br>(%) | 外径 (mm) |       | 重 量<br>(wg) |       |
|-----------|-------------|--------------|-------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|---------|-------|-------------|-------|
|           |             |              |             | ①         | ②     | ③     | ④     | ⑤     | 平均    |              | Ⓐ       | Ⓑ     |             |       |
| 1         | 400         | 300          | 試験前         | 3.218     | 3.212 | 3.198 | 3.224 | 3.224 | 3.215 | 24.3         | 5.983   | 5.989 | 493.1       |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.175     | 3.168 | 3.162 | 3.175 | 3.175 | 3.171 |              | 5.986   | 5.987 |             |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.397     | 2.397 | 2.403 | 2.401 | 2.404 | 2.401 |              | 6.217   | 6.310 |             |       |
| 2         |             |              | 試験前         | 3.203     | 3.225 | 3.224 | 3.215 | 3.228 | 3.219 | 23.5         | 5.991   | 6.001 | 501.3       |       |
|           |             |              |             | 初期調整後     | 3.166 | 3.157 | 3.168 | 3.175 | 3.177 |              | 3.169   | 5.987 |             | 5.995 |
|           |             |              |             | 試験後       | 2.419 | 2.424 | 2.425 | 2.423 | 2.427 |              | 2.424   | 6.231 |             | 6.284 |
| 3         |             | 試験前          | 3.211       | 3.192     | 3.177 | 3.192 | 3.211 | 3.197 | 24.3  | 6.006        | 5.984   | 496.4 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.173     | 3.163 | 3.156 | 3.169 | 3.173 |       | 3.167        | 6.003   |       | 5.981       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.398     | 2.392 | 2.395 | 2.398 | 2.398 |       | 2.396        | 6.196   |       | 6.252       |       |
| 4         | 500         | 300          | 試験前         | 3.215     | 3.224 | 3.218 | 3.217 | 3.243 | 3.223 | 24.5         | 5.984   | 5.972 | 499.0       |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.175     | 3.168 | 3.179 | 3.184 | 3.184 | 3.178 |              | 5.991   | 5.977 |             |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.399     | 2.402 | 2.399 | 2.397 | 2.404 | 2.400 |              | 6.252   | 6.258 |             |       |
| 5         |             | 試験前          | 3.273       | 3.209     | 3.231 | 3.219 | 3.275 | 3.241 | 24.2  | 5.995        | 5.986   | 500.7 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.173     | 3.163 | 3.174 | 3.178 | 3.178 |       | 3.173        | 5.985   |       | 5.978       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.406     | 2.406 | 2.402 | 2.402 | 2.408 |       | 2.405        | 6.274   |       | 6.258       |       |
| 6         |             | 試験前          | 3.204       | 3.206     | 3.224 | 3.194 | 3.229 | 3.211 | 23.7  | 5.961        | 5.996   | 498.7 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.174     | 3.168 | 3.179 | 3.184 | 3.184 |       | 3.178        | 5.953   |       | 5.978       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.425     | 2.422 | 2.426 | 2.428 | 2.428 |       | 2.426        | 6.275   |       | 6.271       |       |
| 7         | 530         | 100          | 試験前         | 3.216     | 3.191 | 3.206 | 3.224 | 3.227 | 3.213 | 6.99         | 5.991   | 5.992 | 506.0       |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.173     | 3.175 | 3.178 | 3.173 | 3.179 | 3.176 |              | 5.992   | 5.997 |             |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.955     | 2.954 | 2.952 | 2.951 | 2.958 | 2.954 |              | 6.078   | 6.071 |             |       |
| 8         |             | 試験前          | 3.174       | 3.193     | 3.231 | 3.192 | 3.218 | 3.202 | 8.72  | 5.985        | 6.002   | 490.6 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.162     | 3.158 | 3.169 | 3.168 | 3.169 |       | 3.165        | 5.974   |       | 5.987       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.887     | 2.889 | 2.889 | 2.889 | 2.892 |       | 2.889        | 6.092   |       | 6.084       |       |
| 9         |             | 試験前          | 3.203       | 3.197     | 3.205 | 3.201 | 3.211 | 3.203 | 8.15  | 5.998        | 5.988   | 497.5 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.162     | 3.158 | 3.169 | 3.168 | 3.173 |       | 3.166        | 5.987   |       | 5.997       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.908     | 2.909 | 2.906 | 2.906 | 2.903 |       | 2.908        | 6.097   |       | 6.091       |       |
| 10        | 530         | 200          | 試験前         | 3.264     | 3.223 | 3.209 | 3.224 | 3.256 | 3.235 | 19.0         | 5.995   | 5.964 | 492.7       |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.185     | 3.181 | 3.171 | 3.178 | 3.185 | 3.180 |              | 5.987   | 5.987 |             |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.574     | 2.573 | 2.578 | 2.576 | 2.586 | 2.577 |              | 6.214   | 6.217 |             |       |
| 11        |             | 試験前          | 3.227       | 3.234     | 3.209 | 3.222 | 3.239 | 3.226 | 20.2  | 5.988        | 5.989   | 490.4 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.186     | 3.176 | 3.169 | 3.184 | 3.186 |       | 3.180        | 5.983   |       | 5.994       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.537     | 2.539 | 2.538 | 2.535 | 2.539 |       | 2.538        | 6.190   |       | 6.206       |       |
| 12        |             | 試験前          | 3.246       | 3.204     | 3.175 | 3.206 | 3.233 | 3.213 | 18.5  | 5.978        | 5.995   | 492.3 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.157     | 3.162 | 3.154 | 3.149 | 3.162 |       | 3.157        | 5.988   |       | 5.991       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.578     | 2.572 | 2.566 | 2.576 | 2.578 |       | 2.574        | 6.194   |       | 6.213       |       |
| 13        | 530         | 300          | 試験前         | 3.223     | 3.209 | 3.205 | 3.215 | 3.232 | 3.217 | 25.4         | 5.989   | 5.954 | 492.5       |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.158     | 3.168 | 3.174 | 3.168 | 3.174 | 3.168 |              | 5.993   | 5.986 |             |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.359     | 2.358 | 2.365 | 2.369 | 2.369 | 2.364 |              | 6.302   | 6.215 |             |       |
| 14        |             | 試験前          | 3.243       | 3.189     | 3.193 | 3.213 | 3.228 | 3.213 | 24.8  | 5.996        | 5.985   | 497.3 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.166     | 3.162 | 3.173 | 3.174 | 3.174 |       | 3.170        | 5.977   |       | 5.996       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.381     | 2.386 | 2.386 | 2.382 | 2.387 |       | 2.384        | 6.347   |       | 6.258       |       |
| 15        |             | 試験前          | 3.193       | 3.238     | 3.204 | 3.164 | 3.232 | 3.206 | 25.2  | 5.992        | 5.974   | 492.2 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.154     | 3.155 | 3.164 | 3.155 | 3.165 |       | 3.159        | 5.992   |       | 6.003       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.362     | 2.361 | 2.364 | 2.367 | 2.367 |       | 2.364        | 6.248   |       | 6.317       |       |

表3.1 高温平行圧縮試験結果 (2/2)

| VJ法<br>番号 | 試験温度<br>(℃) | 最大荷重<br>(Kg) | 寸法測定<br>の時点 | 高 さ (mm) |       |       |       |       |       | 高さ縮み率<br>(%) | 外径 (mm) |       | 重 量<br>(mg) |       |
|-----------|-------------|--------------|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|---------|-------|-------------|-------|
|           |             |              |             | ①        | ②     | ③     | ④     | ⑤     | 平均    |              | Ⓐ       | Ⓑ     |             |       |
| 16        | 530         | 500          | 試験前         | 3.218    | 3.186 | 3.204 | 3.216 | 3.218 | 3.208 | 34.8         | 5.977   | 5.998 | 490.7       |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.172    | 3.174 | 3.167 | 3.165 | 3.174 | 3.170 |              | 5.984   | 5.970 |             |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.062    | 2.071 | 2.071 | 2.063 | 2.072 | 2.068 |              | *       | *     |             |       |
| 17        |             |              | 試験前         | 3.158    | 3.171 | 3.166 | 3.154 | 3.172 | 3.164 | 34.4         | 5.985   | 5.982 | 491.5       |       |
|           |             |              |             | 初期調整後    | 3.151 | 3.157 | 3.153 | 3.146 | 3.158 |              | 3.153   | 5.978 |             | 5.995 |
|           |             |              |             | 試験後      | 2.063 | 2.072 | 2.068 | 2.062 | 2.072 |              | 2.067   | *     |             | *     |
| 18        |             | 試験前          | 3.252       | 3.216    | 3.222 | 3.234 | 3.243 | 3.233 | 33.1  | 6.001        | 5.982   | 501.5 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.168    | 3.173 | 3.177 | 3.175 | 3.177 |       | 3.174        | 5.984   |       | 5.991       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.127    | 2.119 | 2.116 | 2.122 | 2.127 |       | 2.122        | *       |       | *           |       |
| 19        | 550         | 300          | 試験前         | 3.192    | 3.192 | 3.188 | 3.195 | 3.205 | 3.194 | 25.4         | 5.969   | 5.984 | 492.2       |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.168    | 3.155 | 3.153 | 3.163 | 3.168 | 3.161 |              | 5.973   | 5.958 |             |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.359    | 2.357 | 2.354 | 2.357 | 2.362 | 2.358 |              | 6.244   | 6.255 |             |       |
| 20        |             |              | 試験前         | 3.195    | 3.223 | 3.219 | 3.189 | 3.223 | 3.210 | 25.0         | 5.971   | 5.981 | 498.0       |       |
|           |             |              |             | 初期調整後    | 3.155 | 3.165 | 3.173 | 3.158 | 3.173 |              | 3.165   | 5.973 |             | 5.976 |
|           |             |              |             | 試験後      | 2.378 | 2.373 | 2.372 | 2.376 | 2.378 |              | 2.375   | 6.268 |             | 6.296 |
| 21        |             | 試験前          | 3.197       | 3.218    | 3.211 | 3.175 | 3.224 | 3.205 | 27.0  | 5.982        | 5.983   | 486.5 |             |       |
|           |             |              | 初期調整後       | 3.162    | 3.156 | 3.164 | 3.167 | 3.167 |       | 3.163        | 5.995   |       | 5.967       |       |
|           |             |              | 試験後         | 2.307    | 2.305 | 2.308 | 2.309 | 2.309 |       | 2.308        | 6.263   |       | 6.285       |       |



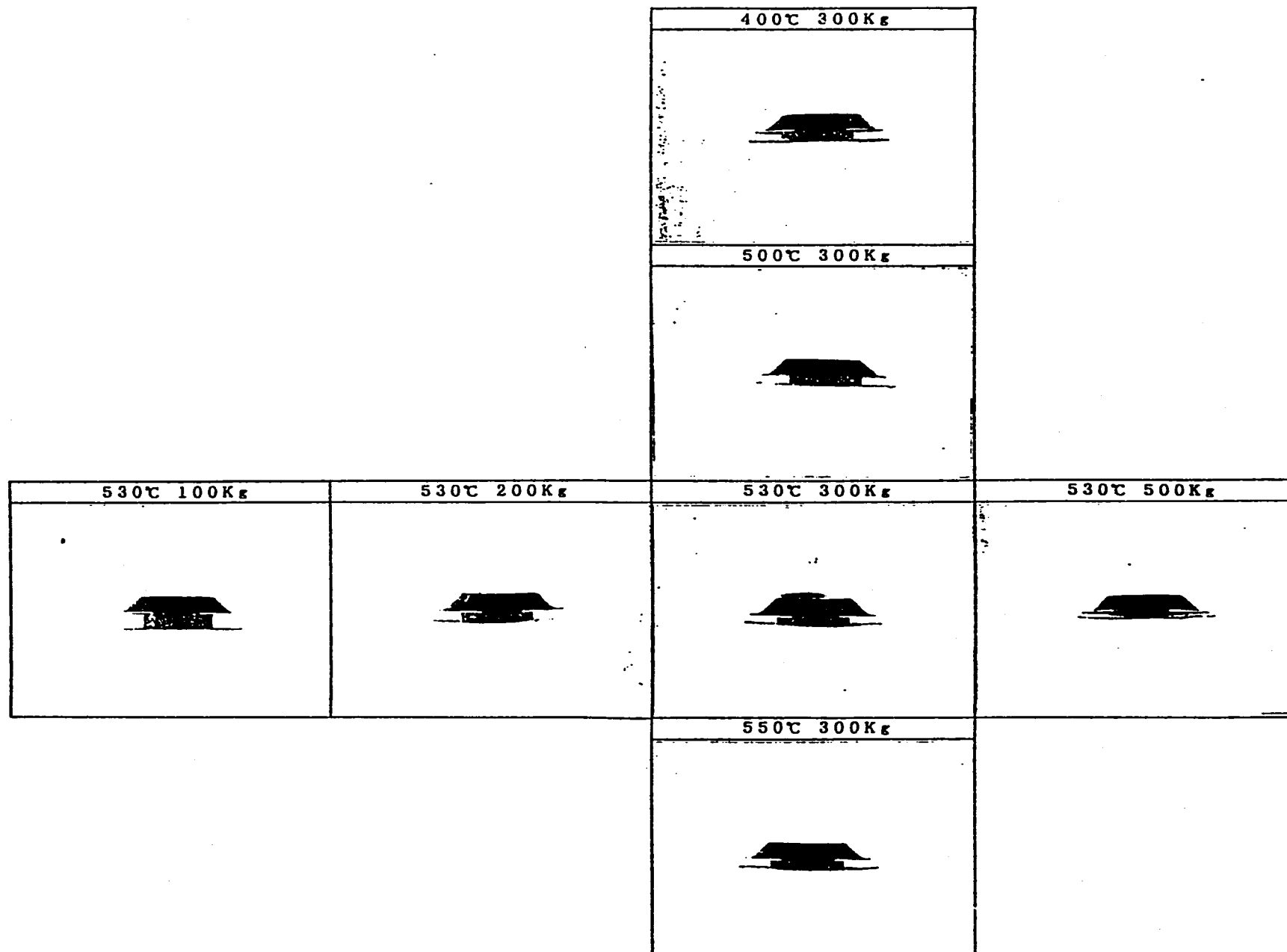
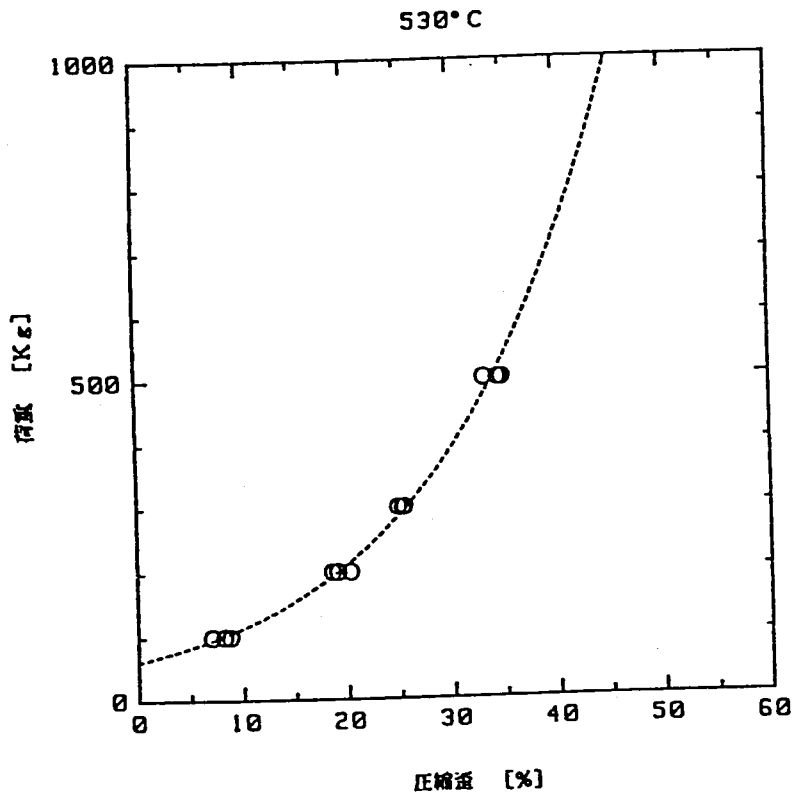
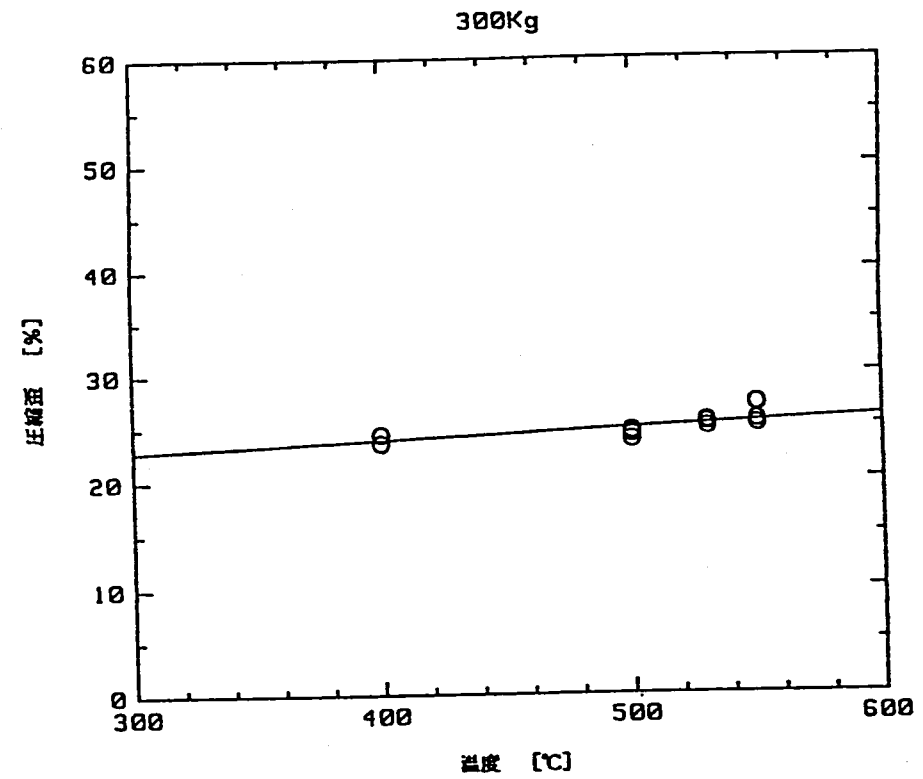


図3.1 平行圧縮試験後供試体外観



(注1) 相関曲線; 荷重 $[kg] = 81.73 \cdot \exp(0.06169 \cdot \text{歪}[\%])$   
 (注2) 同一荷重における歪の相関曲線予測値と実測値の差についての統計分析;  
 データ数=12  
 (実測-予測)の平均値 = 0.000 %  
 (実測-予測)の標準偏差 = 0.722 %

図3.2 高温圧縮特性の統計処理



(注1) 相関曲線; 歪 $[\%] = 19.71 + 0.01024 \cdot \text{温度} [°C]$   
 (注2) 同一温度における歪の相関曲線予測値と実測値の差についての統計分析;  
 データ数=12  
 (実測-予測)の平均値 = 0.025 %  
 (実測-予測)の標準偏差 = 0.702 %

図3.3 圧縮特性の温度依存性

## 3.2 高温斜角圧縮試験

### 3.2.1 試験方法

試験機、圧縮治具及び寸法測定方法等はこれまでに実施した斜角圧縮試験で用いた器具及び方法によった。

試験前寸法は、初期条件調整圧縮試験において測定した。なお、斜角圧縮において特に試験後の寸法測定では、形状を正確に把握するため周辺部の測定位置①～④をできるだけ6mmφの焼結体の外縁に相当する位置となるように配慮した。

### 3.2.2 試験結果

高温斜角圧縮試験の結果を表3.2に示す。ここでも高さ縮み率は、高さ平均値の初期値（初期値は初期条件調整圧縮試験の後の高さ）に対する変化の割合で示す。また、斜角圧縮試験後の供試体外観を図3.4に示す。

図3.4に示したように、試験後にはカバーと取付け座は片側で接触しており、試験後の焼結体の外径の測定はできなかった。

### 3.2.3 高温斜角圧縮試験結果の考察

#### (1) 歪-荷重の関係の評価

表3.2に示した高温斜角圧縮試験の平均圧縮歪の約21%という値は、高温平行圧縮試験結果のうち同条件（温度530℃-荷重300kg）の圧縮歪約25%と比較すると、16%程小さく、相関式(1)から歪21%に対する荷重を計算すると約225kgで、実荷重を25%程過小評価することになる。

荷重の補正のため、受圧面を6領域分割（前年度は4領域分割）して前年度同様の計算処理（各領域の圧縮歪から荷重を求めるには(1)の相関式を用いた。）をすると図3.5のとおりとなる。計算の結果、荷重は273~278kgでこれでも実際に負荷した荷重に比べ約10%小さい。すなわち、傾斜角が10°の場合に得られた歪から微小領域分割（6領域分割）評価法を用いて荷重を推定する場合は計算値に約10%の過小評価分を上乗せする必要がある。

#### (2) 過小評価の要因

微小領域分割評価法で、前年度の4領域を今回は6領域に増やして評価してみたが、カバー及び取付け座付の供試体の荷重計算値は、完全には補正できなかった。

この理由として、カバー及び取付け座の接触により除荷後に弾性変形分が戻って歪が小さく表れることが考えられるが、試験後の3体の各供試体の受圧面の傾斜角はそれぞれ、 $9.69^\circ$ 、 $9.77^\circ$ 、 $9.74^\circ$ と、若干 $10^\circ$ を下回る程度でほぼ圧縮治具の傾斜角を保っており、その影響は有ったとしても小さいものとみなせる。また、3つの供試体で再現性が非常に良く、データのばらつきの影響もない。その他の理由としてカバーや取付け座と焼結体との接合部の拘束等の影響が考えられるが定量化は困難である。

表 3.2 高温斜角圧縮試験結果

| 試験<br>番号 | 試験温度<br>(℃) | 最大荷重<br>(Kg) | 寸法測定<br>の時点 | 高 さ (mm) |       |       |       |       |       | 高さ縮み率<br>(%) | 外径 (mm) |       | 重 量<br>(g) |       |       |
|----------|-------------|--------------|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|---------|-------|------------|-------|-------|
|          |             |              |             | ①        | ②     | ③     | ④     | ⑤     | 平均    |              | Ⓐ       | Ⓑ     |            |       |       |
| 22       | 530         | 300          | 試験前         | 3.208    | 3.211 | 3.216 | 3.201 | 3.216 | 3.210 | 20.9         | 6.002   | 5.993 | 509.7      |       |       |
|          |             |              | 初期調整後       | 3.178    | 3.176 | 3.167 | 3.173 | 3.179 | 3.175 |              | 6.000   | 5.985 |            |       |       |
|          |             |              | 試験後         | 1.962    | 2.529 | 2.986 | 2.526 | 2.557 | 2.512 |              | *       | *     |            |       |       |
| 23       |             |              | 530         | 300      | 試験前   | 3.206 | 3.221 | 3.191 | 3.186 | 3.228        | 3.206   | 21.1  | 5.997      | 5.995 | 497.5 |
|          |             |              |             |          | 初期調整後 | 3.163 | 3.158 | 3.166 | 3.165 | 3.167        | 3.164   |       | 5.985      | 5.982 |       |
|          |             |              |             |          | 試験後   | 1.938 | 2.530 | 2.971 | 2.524 | 2.515        | 2.496   |       | *          | *     |       |
| 24       | 530         | 300          |             |          | 試験前   | 3.208 | 3.221 | 3.219 | 3.199 | 3.224        | 3.214   | 21.0  | 5.992      | 5.966 | 509.9 |
|          |             |              |             |          | 初期調整後 | 3.177 | 3.175 | 3.167 | 3.175 | 3.177        | 3.174   |       | 5.986      | 5.948 |       |
|          |             |              |             |          | 試験後   | 1.956 | 2.534 | 2.986 | 2.535 | 2.522        | 2.507   |       | *          | *     |       |

\* 測定不可

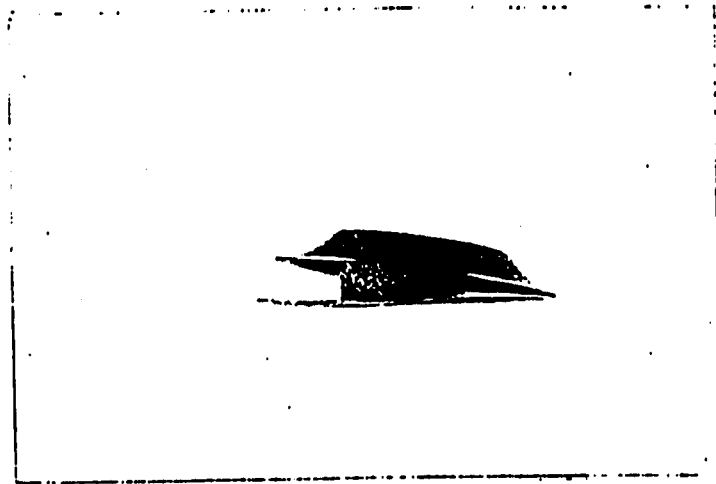
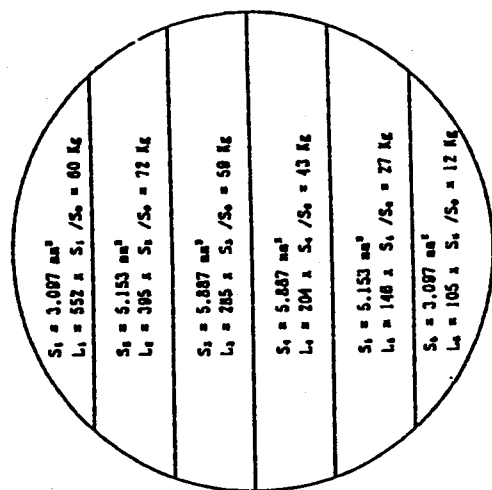
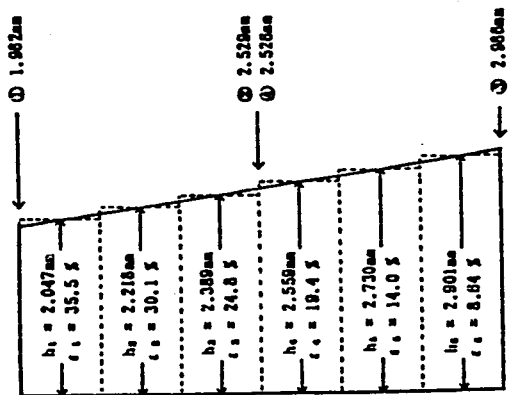
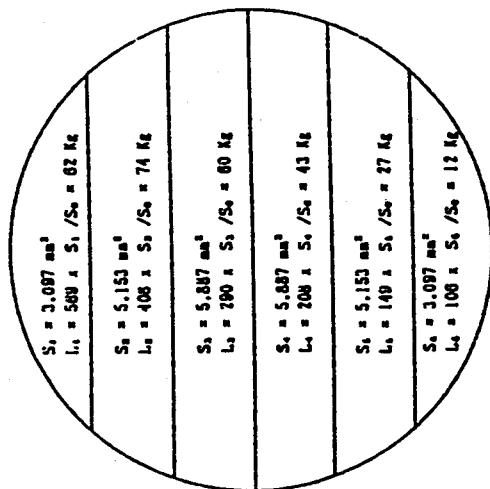
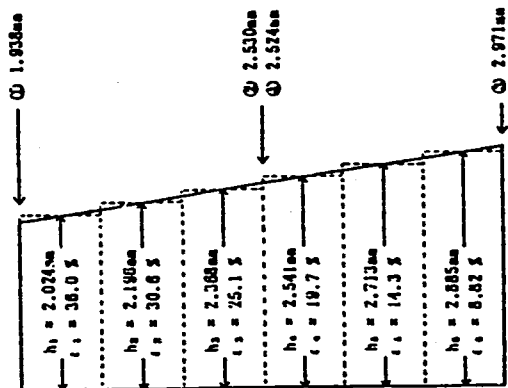


図3.4 斜角圧縮試験後供試体外観



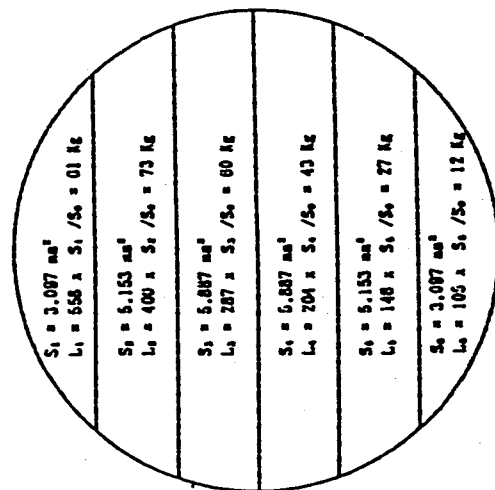
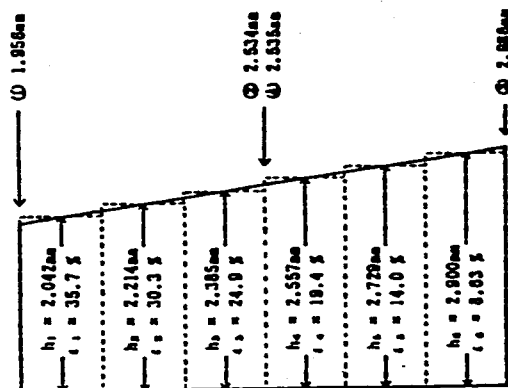
(177 & No.22)

$\Sigma S = 28.274 \text{ mm}^2$   
 $\Sigma L = 273 \text{ Kg}$



(177 & No.23)

$\Sigma S = 28.274 \text{ mm}^2$   
 $\Sigma L = 278 \text{ Kg}$



(177 & No.24)

$\Sigma S = 28.274 \text{ mm}^2$   
 $\Sigma L = 276 \text{ Kg}$

(注) 6分割した各領域の平均径に対して、受圧面積  $6\text{mm}\phi$  の場合の相関式による予測荷重を求め、面積割合でその領域が支えた荷重を算出し、総和を求めて、全領域で支えた荷重を導いた。

図3.5 斜角圧縮試験結果の検討

#### 4. ま と め

特性測定(Ⅲ)では、カバー及び取付け座付きの6mmφ×3mm焼結体(粒度100μm初期密度約50%TD)の圧縮特性試験を実施し、以下の成果及び知見が得られた。

- (1) 初期条件調整圧縮は、裸の焼結体の場合と同様に、カバー及び取付け座付き焼結体に対しても初期寸法のばらつきを整える効果がある。
- (2) カバー及び取付け座付き焼結体の平行圧縮の場合の530℃における圧縮特性は下式で表わされる。

$$L = 61.73 \exp(0.06169 \varepsilon)$$

L : 荷重 (kg) ( $100\text{kg} \leq L \leq 500\text{kg}$ )、 $\varepsilon$  : 圧縮歪 (%)

また、温度が異なる場合は下式で補正できる。

$$\varepsilon = 19.71 + 0.01024 T$$

T : 温度 (°C) ( $400^\circ\text{C} \leq T \leq 550^\circ\text{C}$ )

上式を用いて推定する荷重の誤差 ( $\pm 2\sigma$ ) は $\pm 10\%$ を見込めばよい。

- (3) カバー及び取付け座付き焼結体が圧縮された後に傾斜角を持つ形状を残した場合、高さの最大値と最小値を測定し、微小領域分割評価法によって平行圧縮の荷重評価式を用いてカバー及び取付け座付きの効果と傾斜角の効果を補正する方法で荷重の推定ができる。今回得られた平行圧縮特性式により傾斜角 $10^\circ$ の斜角圧縮試験結果を微小領域分割(6領域分割)評価法を用いて荷重を評価すると、推定荷重値は10%の過小評価となっており、このケースでは補正值は10%である。
- (4) カバー及び取付け座付きの定量的な効果は不明であり、また、カバー及び取付け座付きという特殊用途の条件で任意の角度に対する特性を得るためには、さらに多くの試験データを蓄積する必要がある。

微小領域分割による平行圧縮の荷重評価式から推定した斜角圧縮荷重値と実荷重との誤差(補正值)に対する領域分割数の影響について、有限要素法等で非線形解析を行うことも興味あるところであるが、そのためには解析に使用する物性データを整備する必要がある。

このように、種々の条件での焼結体の圧縮特性を一元的に評価できる体系を築こうと



すれば相当数の試験を実施する必要があるということになるが、焼結体の良好な荷重-変位特性を利用した荷重測定素子としての実用を考えれば、事前に荷重測定素子の材料、形状、製作過程が同一の実機材での圧縮試験により特性評価曲線を得ておくことと、斜角圧縮のケースに備えた予備材を確保して事後に斜角特性再現試験を行うことにより合理的かつ最も精度のよい測定が可能である。

## 第 3 編

### 焼結体による荷重測定素子の実用化検討

#### 目 次

|                              | 頁  |
|------------------------------|----|
| 1. 概 要 .....                 | 66 |
| 2. 原子炉の炉心構成要素荷重測定素子の検討 ..... | 67 |
| 2.1 荷重測定素子の仕様の検討 .....       | 67 |
| 2.2 設置対象集合体の検討 .....         | 68 |
| 2.3 P I Eでの寸法測定方法の検討 .....   | 69 |
| 2.4 照射特性試験カプセルの検討 .....      | 70 |
| 3. 焼結体の応用可能性の検討 .....        | 85 |

## 1. 概 要

原子炉の環境下においてオフ・ラインで荷重を測定するために考案された焼結体による荷重測定素子の特性測定試験（Ⅱ）～（Ⅲ）と並行して、「常陽」での炉心構成要素荷重測定のための実用化検討及び焼結体の応用可能性について以下の検討を実施した。

- 1) 荷重測定素子の仕様の検討
- 2) 設置対象集合体の検討
- 3) P I E での寸法測定方法の検討
- 4) 照射特性試験カプセルの検討

## 2. 原子炉の炉心構成要素荷重測定素子の検討

### 2.1 荷重測定素子の仕様の検討

#### (1) 原子炉内でのルースパーツ防止対策

焼結体は、ステンレス鋼の粉体をプレスして焼き固めたものであり、衝撃荷重や摩擦荷重により欠落を生じる可能性がある。原子炉の炉心構成要素荷重測定素子は冷却材中で使用するため、測定素子が炉内でルースパーツとならないような配慮が必要で、欠落を防止しつつ荷重測定を阻害しない対策を講じる必要がある。

この対策として焼結体にカバーを付ける方法の検討を行うとともに、変位置測定時の取扱性及び測定精度を考慮して焼結体・カバー一体化の技術的可能性を確認するために試作を実施した。図2.1が試作体で、6mmφ×3mm t（粒度100μm）の焼結体と0.1mm tのステンレス製円板とを一体焼結したものである。焼結体とカバーの結合状態は良好で、かつ、カバーの形状が単純な円板でなくともカバーを粉体の上に載せられれば焼結が可能であることが確認できた。

#### (2) 炉心構成要素荷重測定素子の仕様

ルースパーツ防止対策は焼結体にカバーを一体焼結する方法によるものとし、炉心構成要素のパッド部へ取り付け荷重測定素子の仕様を検討した。

表2.1に各種案の検討結果を示す。

表2.1においてNo.1は段付測定素子の場合で、つばを固定することにより位置ずれが防止できるが、測定素子が一部露出（ただし、突出部が剪断により切断することは考えにくい）する。No.2は測定素子を完全に埋め込む形であり、ルースパーツ防止対策としては万全であるが、取り付けられるパッド部が厚肉であることが要求される。No.3～5はひさし状のカバーを取り付けるもので、取付け座の形状がNo.3は薄板円板、No.4及びNo.5は取付け座自体を反力壁としている。

各種案の評価ではそれぞれ一長一短があるが、対象とする「常陽」の炉心構成要素のパッド部へ取り付け荷重測定素子としては、取り付け方法が比較的簡便なNo.3が適当であると考えられ、リファレンスとして選定した。

### (3) 炉心構成要素荷重測定素子の設計

ここで選定されたカバー及び取付け座一体型のNa 3の素子について、「常陽」の炉心構成要素に設置する条件で設計を行った。

焼結体の基本形状は測定荷重条件から設定された6 mmφ × 3 mm tであり、荷重適性範囲は100kg - 300kgに対する最大変位量約1.2mmである。

この焼結体にテーパ付のカバーを取り付ける場合の条件として、焼結体の最大変位量約1.2mmに余裕をみて1.5mmのカバーの変位代を確保する。カバーの板厚は、一体焼結が荷重-変位特性に多少の影響を与え得ることを考慮し、剛性を低減する観点からできる限り薄くする方向で検討し、材料の入手性及び製作性から0.1mmとした。カバーの外径は、焼結体の外径6 mmφに対しテーパ及びつばの寸法を加味して11mmφとした。

取付け座については、被測定物にガタ等がなく取り付けられれば良いので板厚はカバーと同じ0.1mmとし、外径は、カバーの外径11mmφに対し位置決め用のくわえ代を見込んで12mmφとした。

寸法を付録Bの図2.1に、製作した供試体の外観を付録Bの図2.2にそれぞれ示す。

## 2.2 設置対象集合体の検討

炉心変形解析コードの炉内試験検証用として「常陽」の炉心構成要素に荷重測定素子を供する場合について、効果的な設置対象集合体を検討した。

### (1) 検討条件

炉心変形解析の検証に使用する荷重測定素子は、炉心構成要素のパッド部に取り付けて素子の永久変形からパッド部の反力を推定するもので、設置対象集合体は以下の点を考慮して選定する。

- ① 変形量（パッド干渉力）が大きいと予想されること。
- ② 集合体の引抜き・挿入時に、荷重測定素子に過大な荷重が作用しないこと。
- ③ パッド部への荷重の作用方向はパッド面に垂直に近いこと。

「常陽」へ設置する時期は準備期間を見込み、MK-Ⅲ移行時を想定する。

## (2) 検 討

パッド干渉力が大きい集合体は、温度勾配及び中性子束勾配が大きい集合体であり、この条件から制御棒を囲む6本の集合体が特に温度勾配、また、最内層の反射体や最内層の中性子遮へい体は温度勾配及び中性子束勾配が大きい。

集合体の引抜き・挿入時に荷重測定素子に過大な荷重が作用しないという条件に対しても、炉停止時にはこれら集合体の温度勾配がほぼ解消されるため特に問題は無い。

パッド部への荷重の作用方向に関しては、最内層反射体や最内層中性子遮へい体では炉心の対角線上の集合体の対角線方向に対して垂直なパッド面、制御棒を囲む集合体の制御棒方向に対して垂直なパッド面が素子の設置場所として候補となる。

制御棒を囲む6本の集合体、最内層反射体及び最内層中性子遮へい体の3候補を比較すると、まず燃料体及び制御設備である制御棒（制御棒下部案内管）あるいはそれを囲む燃料集合体（一部は反射体）に対しては荷重測定素子のような部品を取り付けることは避けたい（また制御棒下部案内管の挿入・引抜時の回転操作等も考慮すると設置対象として好ましくない）ため設置対象としては除外する。

最内層反射体及び最内層の中性子遮へい体では特別な問題はないと判断されるので、設置対象の第一候補としては、炉心燃料集合体と隣接し、温度勾配及び中性子束勾配がより大きいと予想される最内層反射体とする。

最内層反射体で炉心の対角線上にあるもののうち、さらに荷重の方向がパッド面に垂直になる条件として隣接集合体の配置が対角線に対して線対称である（材料照射用反射体等と隣接しない）ことも考慮に入れて、移行炉心の炉心構成例（第32及び35サイクル）から荷重測定素子の設置対象候補を選定すると図2.2に斜線の集合体となる。

荷重測定素子は100～200kgの荷重測定に適し、特性測定試験でレファレンスとして選定している6mmφ×3mm t程度とし、反射体の上部パッドへ取り付けるものとし、炉内での取り付けパッド面は炉心中心に対して垂直になるようにする。

### 2.3 P I Eでの寸法測定方法の検討

荷重測定素子の供用後の寸法測定に関して、各種の方法を摘出しその適用性を評価する。

## (1) 検討条件

荷重測定素子の供用後寸法の測定機器は、照射後の炉心構成要素（反射体）の取り扱いが可能であることが必要で、素子を取り付けたまま測定するか、または、素子を取り外して測定するかにより設備対応が異なってくるが、放射線下のため寸法測定機器には遠隔操作でかつ高精度の測定が要求され、その精度は $1\mu\text{m}$ オーダーが目標とされる。

## (2) 測定方法の選定

遠隔操作で高精度の測定を行う方法として一般的に考えられるのは、非接触式では超音波あるいはレーザによる方法、また接触式では差動インダクタンスによる方法が代表的である。

測定方法の候補を表2.2に摘出してそれぞれの特徴を整理し、比較する。

PIEでの寸法測定方法として総合的にみると、レーザ三角測量法が最も適しているといえる。この方法は、荷重測定素子を炉心構成要素に取り付けたままでも測定可能であり、設備計画の裕度もある。

## 2.4 照射特性試験カプセルの検討

荷重測定素子に関してこれまで実施した一連の特性測定試験において、大気中における常温から $600^{\circ}\text{C}$ までの温度領域での特性、ナトリウムの影響（影響無し）及び高温クリーブ特性（ $500^{\circ}\text{C}$ を超えると影響あり）が概ね把握できている。

さらに、原子炉内での使用において把握すべき荷重測定素子の照射による特性変化を調べるため、「常陽」の照射リグを使用して調べることを計画する。

また、後述するように荷重測定素子は、照射による影響が小さければ温度測定素子としても利用可能であり、この観点の実証用カプセルの設計も合わせて実施する。

## (1) 検討条件

前提として、中性子束条件は別途計測あるいは計算により既知で、また温度条件は照射リグの装荷位置とリグ側での冷却材流量調節機構により調整されるものとし、荷重測定素子の照射による特性変化を把握することを試験カプセルの目的とする。

特性変化は、照射供試体と未照射供試体との比較により把握する。（荷重測定素子

の高温ナトリウムによる影響がないことはすでに確認されており、変化があれば、純粹に照射によるものとみなせる。)

温度測定素子としての実証用カプセルの設計も合わせて実施するものとし、照射リグ装荷用カプセルは、①荷重負荷状態での照射効果を見るもの（負荷カプセル）、②無負荷状態の照射効果を見るもの（無負荷カプセル）及び③温度測定を行うもの（温度測定カプセル）の3種類を検討する。

それぞれのカプセルは、ナトリウムに接していた方が温度分布の設定精度が高いと思われるので、ナトリウム浸漬型で考える。

寸法条件は「常陽」の照射カプセル設計例を参照し、カプセル外径を22mmφで計画する。

## (2) 荷重負荷カプセルの設計

荷重測定素子は、荷重が負荷されると永久変形を生じる特性を利用しているので、初期荷重が照射、あるいは昇温で変化しないようにする必要がある。このためには熱膨張差を生じないようにナトリウム浸漬型とすることに加え、供試体とカプセルは同じ材質とする。

荷重負荷カプセルにおける供試体への初期荷重の負荷は、組立時に予歪を与えることとする。予歪の大きさは、供試体に生じる応力に応じて決定する。

カプセルは供試体からの反力に対し十分小さい変形に抑える必要がある。6mmφ×3mm tの荷重測定範囲は100kg～300kgが適性範囲であり、余裕を見て400kgの荷重に対しカプセルの設計を行うものとする。カプセルの許容応力は、クリープ等による変形が生じないようにするため4kg/mm<sup>2</sup>程度とする。

カプセル径を約15mmとし、ナトリウム流入用の穴径を約4mmとして欠損効果は周長比例で補正すると、カプセルの必要板厚は、次の通りとなる。

$$400 / ((14 * 3.14 - 4 * 2) * 4) = 2.78 \text{ mm}$$

カプセルの材質をSUS316とすると、歪は約0.02%であり供試体の歪20数%に比較して十分小さい。

荷重負荷カプセルの構造を図2.3に示す。



(3) 無負荷カプセルの設計

無負荷カプセルには、基本形状である  $6\text{ mm } \phi \times 3\text{ mm t}$  の焼結体と、実機供試体（カバー及び取付け座付）を装荷したカプセルとする。

照射後の特性測定のためには、それぞれ最低3ピース必要であること、照射場所の誤差を小さくするため、これら供試体は1つのカプセルに装荷するものとする。

供試体は単純に積み重ね、熱膨張差による荷重が作用しないように同材料で構成するカプセルに、押し込み荷重が作用しないように組み込む。

無負荷カプセルの構造を図2.4に示す。

(4) 温度測定カプセルの設計

温度測定は、カプセル材料と温度測定素子との熱膨張差を利用するものであり、カプセルと供試体の熱膨張差はできる限り大きいことが好ましい。ナトリウムとの共存性に優れ、かつ熱膨張係数が小さな材料は、モリブデンであるので、カプセルの材料は、モリブデンを採用する。その他の設計の考え方は、荷重負荷カプセルの場合と同じである。

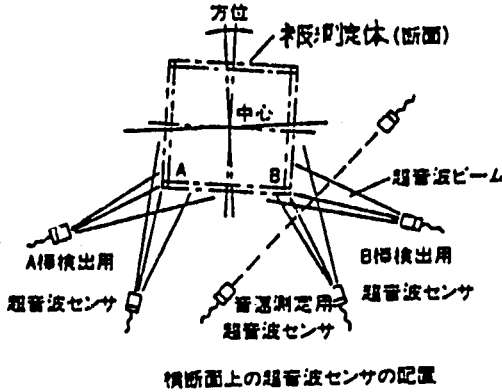
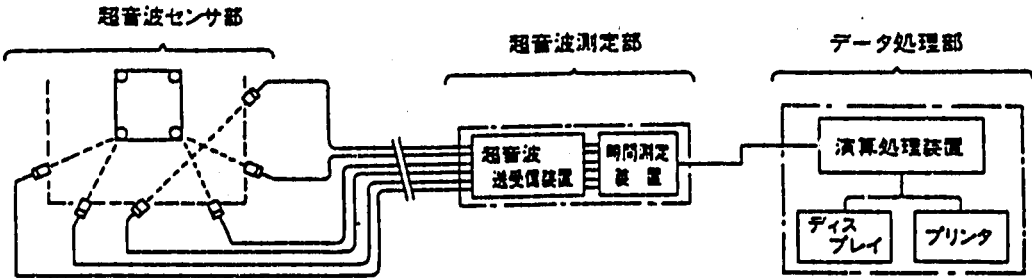
温度測定カプセルの構造を図2.5に示す。

表2.1 荷重測定素子のルースパーツ防止対策の検討

| No  | 1   | 2  | 3   | 4  | 5  |
|-----|---|--|---|--|--|
| 取付例 |   |  |   |  |  |
| 特徴  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 段付測定素子採用</li> <li>○ 測定素子は一部露出</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 段付一体カバー採用</li> <li>○ 測定素子は完全埋込み</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ひさし付き一体カバー採用</li> <li>○ 一体座を抑えで固定</li> <li>○ 測定素子の露出防止</li> </ul>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ひさし付き一体カバー採用</li> <li>○ 測定素子の露出防止</li> <li>○ 一体取付座採用</li> </ul>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ひさし付き一体カバー採用</li> <li>○ 測定素子の露出防止</li> <li>○ 内面側一体取付座採用</li> </ul>                                |
| 長所  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ コスト低減</li> <li>○ 位置ずれ防止対策向上</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ルースパーツ対策向上</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ルースパーツ対策向上</li> <li>○ 位置ずれ防止対策向上</li> <li>○ ひさしの形状は自由 (テーパ付ひさしも可能)</li> <li>○ 取付・取外しが容易</li> </ul> | 同 左  |  |
| 短所  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ルースパーツ対策低下</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ハンドリングヘッド等厚肉化</li> <li>○ 抑え, 一体カバーの加工数増加によりコスト増</li> <li>○ 測定素子の位置ずれが生じ得る。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ひさし付きカバーの工数増加によりコスト増</li> <li>○ 焼結後の一体座の形状に不安有</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ひさし付きカバーの工数増加によりコスト増</li> <li>○ 3枚合せの固定となるので, 固定時の精度に不安有</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ひさし付きカバーによるコスト増</li> <li>○ ハンドリングヘッドの内面加工が必要となる場合がある。</li> <li>○ 取付が内面からとなり, 作業性に難がある。</li> </ul> |

表2.2 P I Eでの寸法測定方法の検討

| 特 徴  | 非 接 触  |  |   |   |  | 接 触   |
|------|--|--|---|---|--|---|
| 測定原理 | <ul style="list-style-type: none"> <li>超音波を用いて測定対象に反射して戻ってくるまでの時間によって測定する方法<br/>(レーザーでも同様の方法がある。)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>レーザー干渉稿投影法<br/>レーザーによって等高線モアレ稿を投影。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>レーザー三角測量法<br/>測定対象物のレーザー散乱光を三角測量法で測定する方法。</li> <li>光マイクロを使用するものもある。</li> </ul>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>光ファイバセンサ(フォトリックセンサ)<br/>測定対象物からの反射する光の光量で測定する方法</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>静電容量方式<br/>測定対象物との間で生じる電気的静電容量と距離の関係から測定する方法。</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>差動インダクタンス<br/>近接した2点における電磁誘導による電圧の違いから測定する方法。</li> </ul>     |
| 測定精度 | 波長に依存<br>0.1mm位  | レーザーの波長に依存<br>0.1μm位   | 0.1μm~10μm  | 0.1%<br>(0.1μm~)  | 0.01%<br>(0.001μm~)  | 0.1μm~  |
| 長 所  | <ul style="list-style-type: none"> <li>構造物が大きくても可。</li> <li>遠隔測定可。</li> <li>対象物が水でも可。</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>形状の変化が一目でわかる。</li> <li>遠隔測定可。</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>高速連続測距に向く。</li> <li>センサと本体をケーブルで結ぶと2~10mで遠隔測定可。</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>高速連続測距に向く。</li> <li>微小点の測定に向く。</li> <li>遠隔測定可。<br/>(センサと本体は1m程分離)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>高速連続測距に向く。</li> <li>耐高温、耐高圧</li> <li>センサによっては狭い箇所の測距に向く。</li> <li>遠隔測定可(1m程)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>高速連続測距に向く。</li> <li>表面あらし測定に向く。</li> <li>断面輪郭に向く。</li> </ul> |
| 短 所  | <ul style="list-style-type: none"> <li>2組以上のセンサ(送受信部)がないと測距できない。</li> <li>高精度測定は無理。</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>位置決め、測距には向かない。</li> </ul>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>受光/発光一体型はセンサと対象物とのギャップは大きくできない。(15~100mm)</li> <li>受光/発光分離型は基準位置の測定が必要。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>1mm以上の変位に向かない。<br/>(センサヘッドと対象物とのギャップ制限)</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>1mm以上の変位に向かない。<br/>(センサヘッドと対象物とのギャップ制限)</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>位置決めには向かない。</li> </ul>                                       |
| 情 考  | Sheet No.1 参照<br>(Sheet No.7 参照)   | Sheet No.2 参照  | Sheet No.3 参照   | Sheet No.4 参照   | Sheet No.5 参照  | Sheet No.6 参照   |

|   |         |
|---|---------|
| 測定機器  | 超音波距離測定 |
| <p data-bbox="226 495 403 533"><b>測定原理</b></p> <p data-bbox="229 564 1437 651">超音波距離測定は、超音波センサから発信された超音波が被測定体に当たって返ってくるまでの時間を計測することにより、超音波センサと被測定体との間の距離を求める。</p> <div data-bbox="478 824 1024 882" style="text-align: center;"> <p>図-1 測定原理<br/>Measurement Method of Fuel Ass'y Shape</p> </div>  <div data-bbox="330 1467 826 1529" style="text-align: center;"> <p>図-2 モックアップシステムの構成<br/>Block Diagram of the Mock-up System</p> </div>  |         |
| <p data-bbox="245 1977 392 2011"><b>出典</b></p> <p data-bbox="300 2018 1278 2056">岸 憲義：「燃料集合体形状測定装置の開発」三菱原子力技報 No.55, 1990</p>   |         |

測定機器 レーザ干渉縞投影法

測定原理

被測定対象全体の大まかな形状も同時に観測する方法で、図1に示すように、トワイマングリーン干渉計の一方の反射鏡をわずかに傾けてできる等傾角干渉縞が光軸と平行な縞状になることを利用して、被測定体の表面に等高線状の縞を形成する。

(縞の間隔： $d = \lambda / 2\epsilon$ ， $\lambda$ ：波長)

光切断法（図2）もこの部類に入り、長焦点レンズと円筒面反射鏡によって平面状のレーザービームを形成し、被測定物を低面と直角方向に一定間隔で移動して写真撮影し、等高線像を作って測定する。

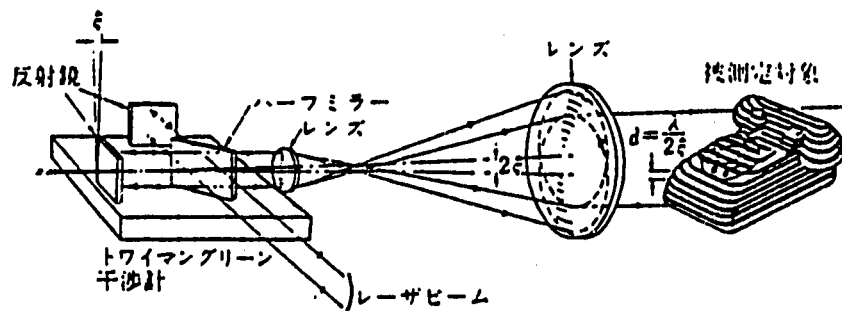


図1 レーザによる干渉縞投影法<sup>1)</sup>

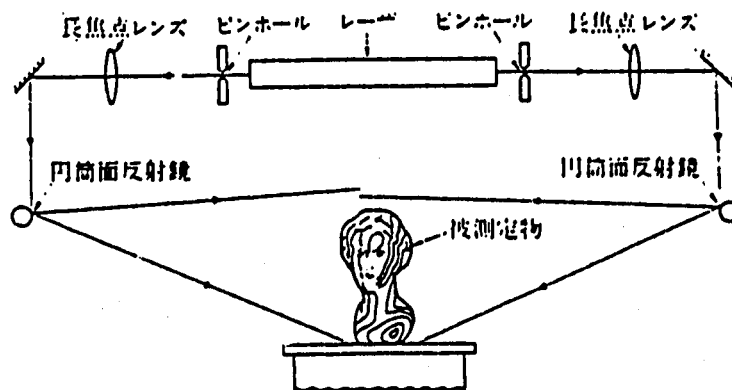
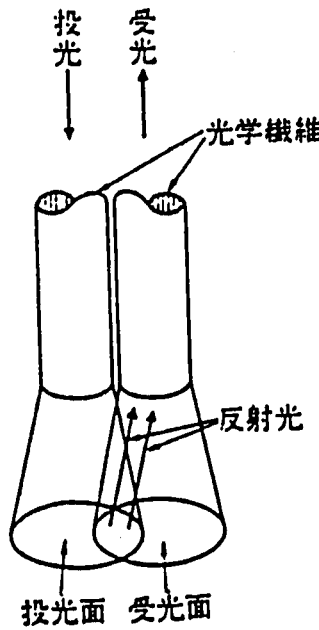
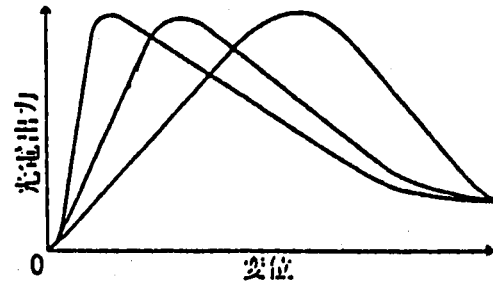


図2 レーザによる光切断法<sup>2)</sup>

出典

安東 滋：「レーザによる形状測定」精密機械 39, 5月1973年

|   |          |
|---|----------|
| 測定機器  | レーザ三角測量法 |
| <p><b>測定原理</b></p> <p>半導体のレーザから放射された光を投光レンズで集光させ、被測定体の表面上に光スポットとして照射する。このスポット像からの反射または散乱光の一部を光位置検出素子で検出する。被測定体の変位すると、三角測量原理により光検出素子上のビームスポットが移動し、この移動量に対応した電気信号を取り出し、演算処理して変位を求める。</p> <p><b>市販製品例</b></p> <p>1) 三菱電機株式会社 : 三菱レーザ式変位計 MD-1211/MD-2211<br/> 2) アンリツ株式会社 : 光マイクロレーザ変位計 KL130A 他<br/> 3) 横河ヒューレットパッカード(株) : 超精密レーザ測定システム 5528A 他</p> <p><b>備 考</b></p> <p>添付資料参照。(カタログ抜粋)</p> <div data-bbox="606 1209 1085 1792" data-label="Diagram"> </div> <p>図1. 三角測量方式の測距原理図</p> |          |
| <p><b>出 典</b></p> <p>高嶋和夫 他：「レーザ応用測距装置」三菱電機技報 Vol 63 No.4 1989</p>  |          |

|  |  |
|--|--|
| 測定機器   | 光ファイバセンサ (フォトニックセンサ)   |
| 測定原理   |  |
| <p>図1に示すように、隣接する投光用、及び受光用ファイバをおり混ぜて構成される。投光用ファイバから出た光は被測定対象物の表面に当って反射し、受光用ファイバに入光する。この時受光した光量を光電変換して距離に換算する。ファイバ先端と被測定対象物表面との変位と受光光量の関係を図2に示す。</p> |  |
| 市販製品例  |  |
| <p>1) M T I (メカトロ商事株) : MTI1000-FOTONIC SENSOR<br/>非接触精密微小変位計 (光ファイバセンサ)</p>   |  |
| 備 考  |  |
| 添付資料参照 (カタログ抜粋)  |  |
|   |  |
| 図 3 フォトニックセンサ <sup>3)</sup> の原理図   | 図 4 フォトニックセンサ <sup>3)</sup> の特性  |
| <p>出 典<br/>安東 滋 : 「レーザによる形状測定」精密機械 39, 5月1973年</p>   |  |

|   |              |
|---|--------------|
| <b>測定機器</b>   | 静電容量方式非接触変位計 |
| <b>測定原理</b>   |              |
| <p>静電容量をC、誘電エリアの誘電率をK、計測機器先端と被測定対象物表面とのギャップをD、測定電極面積をAとすると、次式が成り立つ。</p> $C = K \frac{A}{D}$ <p>静電容量Cは、ギャップDと反比例することから、静電容量から電圧に変換し、変位に換算する。</p> |              |
| <b>市販製品例</b>  |              |
| <p>1) MTI (メカトロ商事株) : ACCUMEASURE SYSTEM 1000<br/>静電容量方式非接触変位計</p>  |              |
| <b>備 考</b>  |              |
| <p>添付資料参照 (カタログ抜粋)</p>  |              |
| <p>図1 変位・出力特性</p>   |              |
| <b>出 典</b>  |              |
| カタログより抜粋  |              |



|      |                       |
|------|-----------------------|
| 測定機器 | 差動インダクタンス (差動変圧器式検出器) |
|------|-----------------------|

**測定原理**

ダイヤモンドの先端子を持った差動変圧器式検出器で被測定対象物表面をトレース(触針式)し、表面の凹凸に従って差動変圧器により電気量に変換する。

差動変圧器は、図1及び図2に示すように、1次コイルPと2次コイル $S_1$ 、 $S_2$ 並びにコア(可動鉄心)から成る。コアの変位に比例した2次コイルの誘起起電力が生じ、この起電力より変位を求める。

**市販製品例**

- 1) 株式会社ミットヨ：サーフテスト402 (表面粗さ測定器)

**備 考**

添付資料参照 (カタログ抜粋)

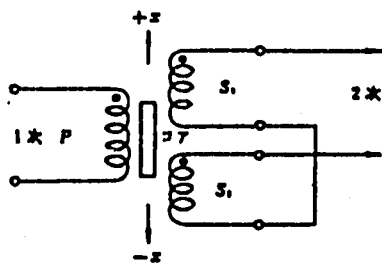


図1 差動変圧器の基本構成

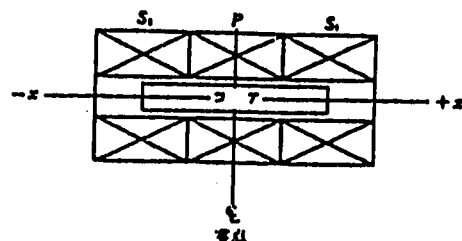


図2 差動変圧器の基本構造

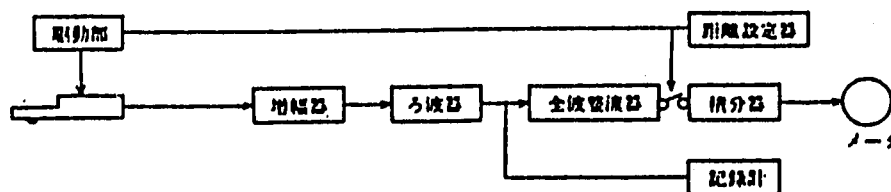


図3 積分値指示形表面粗さ測定機

**出 典**

柳田博明 他：「最新検知システム総覧」5月1982年

|      |          |
|------|----------|
| 測定機器 | レーザー時間差法 |
|------|----------|

**測定原理**

電波を用いたレーダと原理は同様で、測距装置内部で高いせん頭値を持つレーザーパルスを生じさせて、これを目標に向けて送信する。ここでレーザーパルスを送信した時刻と、目標からの反射光を受信した時刻との時間差を測定することにより、目標までの距離を求める。

$$R = C \cdot \frac{t}{2}$$

R : 距離    C : 光速    t : 送受信パルスの時間差

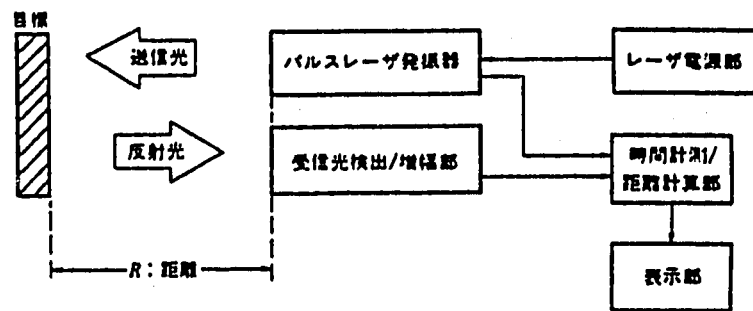


図2. 時間差方式レーザー測距装置の系統図

出典

高嶋和夫 他：「レーザー応用測距装置」三菱電機技報 Vol 63 No.4 1989

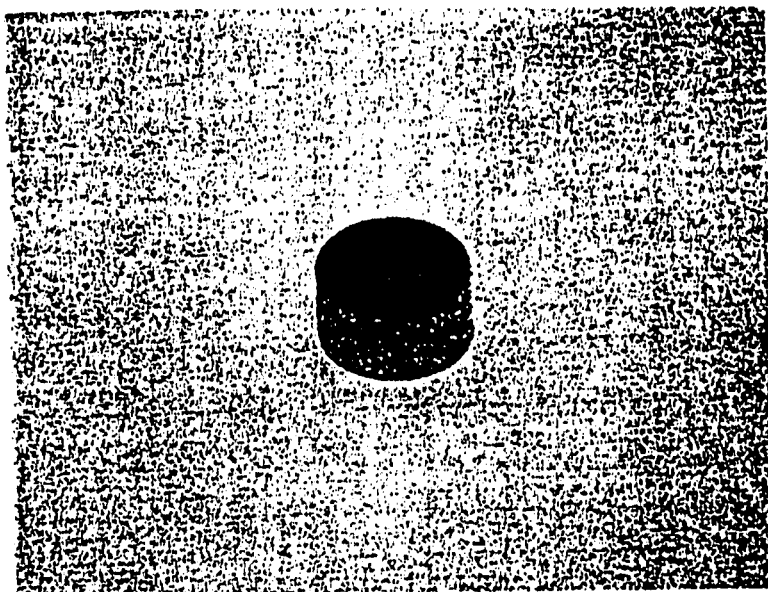
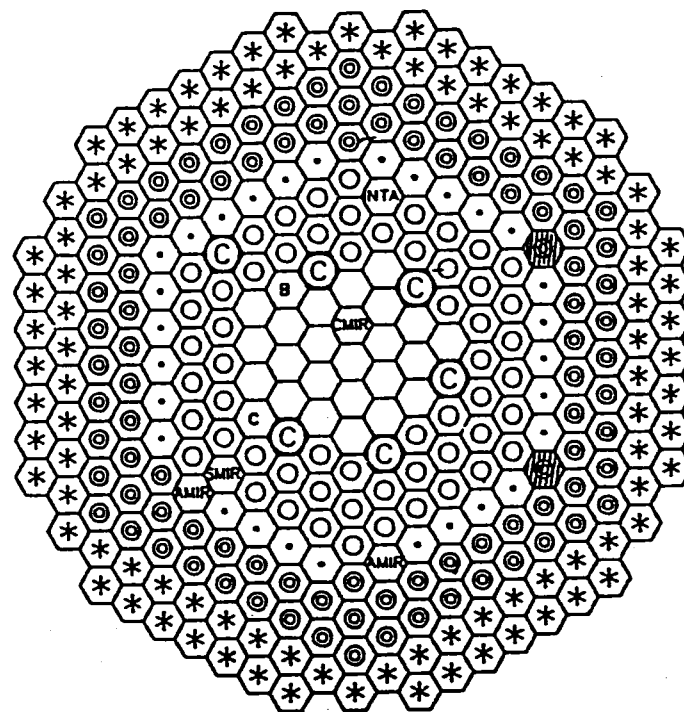
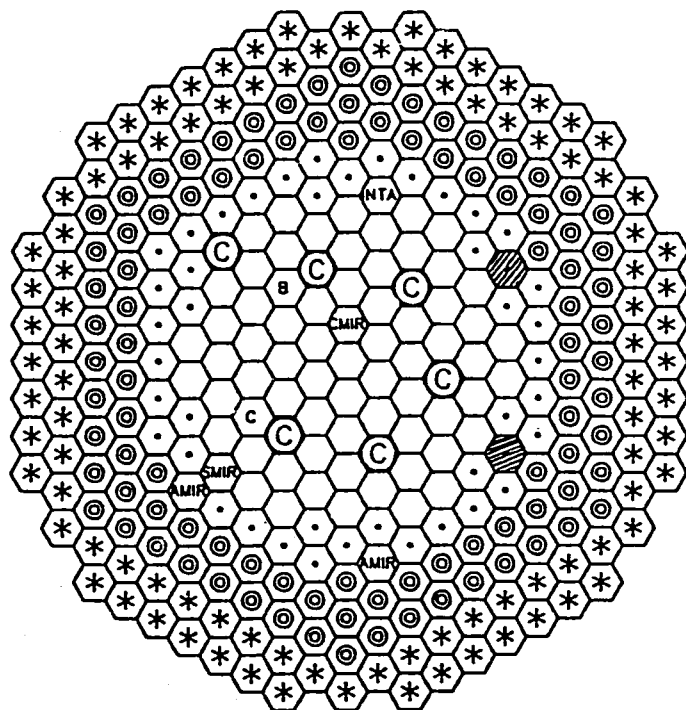


図2.1 カバー・素子一体焼結の試作体概観



- : 炉心燃料 (65体)      \* : 中性子遮蔽体 (B,C)
- ⊙ : 制御棒 (6体)      ⊞ : 特殊燃料集合体
- : 内側反射体      ⊞<sub>AMIR</sub> : 材料照射用集合体
- ⊙ : 外側 (A) 反射体      ⊞<sub>NTA</sub> : 計測線付集合体

- : 内側炉心燃料      \* : 中性子遮蔽体 (B,C)
- ⊙ : 外側炉心燃料      ⊞ : 特殊燃料集合体
- ⊙ : 制御棒 (6体)      ⊞<sub>AMIR</sub> : 材料照射用集合体
- : 内側反射体      ⊞<sub>NTA</sub> : 計測線付集合体
- ⊙ : 外側 (A) 反射体

— 第 3 2 サイクル —

— 第 3 5 サイクル —

図2.2 荷重測定素子設置対象集合体の検討

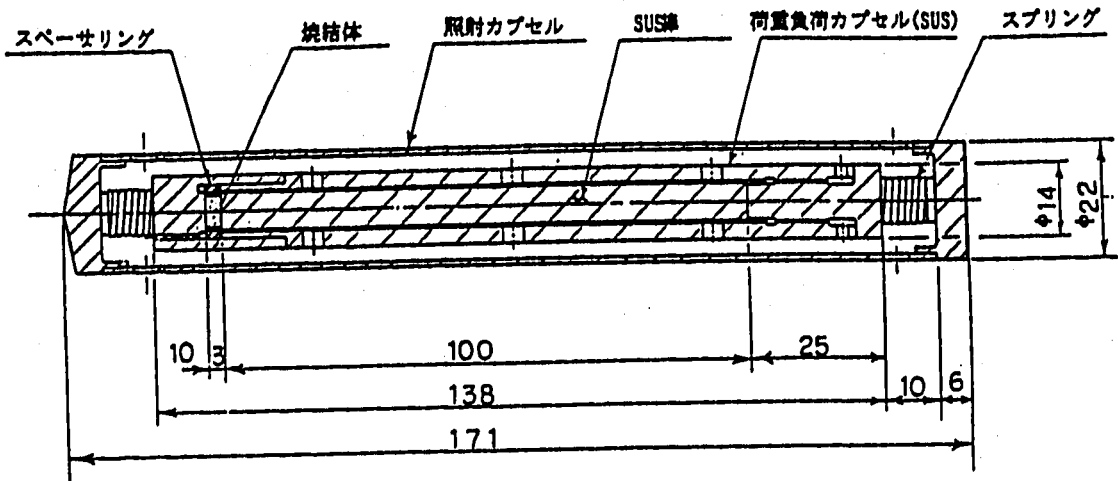


図2.3 荷重負荷カプセルの構造

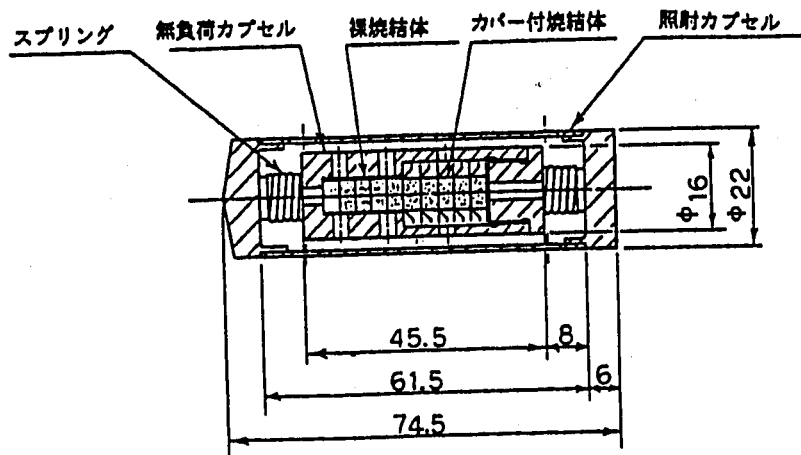


図2.4 無負荷カプセルの構造

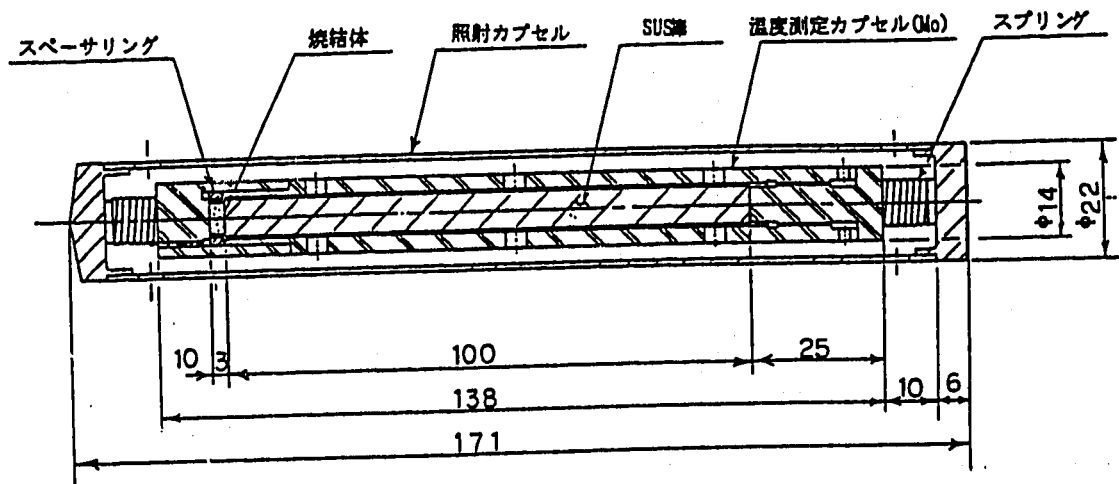


図2.5 温度測定カプセルの構造

### 3. 焼結体の応用可能性の検討

これまで、原子炉の環境下においてオフ・ラインで炉心変形反力を測定する目的で焼結体による荷重測定素子についての特性測定試験を実施し、その実用性が実証された。

ここで改めて焼結体の特徴を整理し荷重測定素子以外の用途への応用の可能性を検討する。

#### (1) 焼結体の特徴

焼結体の特徴としては、ろ過性がこれまでも注目されているところであり、一般的な用途として既に多方面に活かされており、この特徴は原子炉内の条件でも応用が可能である。

原子炉内での荷重測定素子としての焼結体の応用は、容易に塑性変形を生じ永久変形を残すという超塑性による荷重-変位特性を利用したものであるが、原子炉内のように近接性の悪い環境でなければ荷重及び変位の測定は多くの方法が実用化されている。したがって、近接性の悪い条件で最大荷重あるいは最大変位を測定する目的に効果を発揮するものである。

ろ過性と関連して通気性、また超塑性と関連して耐熱応力性及びエネルギー吸収性が応用可能な特徴として認められる。

#### (2) 応用可能性

##### ① ろ過性

一般的にフィルター等の用途として活用されている。

原子炉内での用途として、

- ・ コールドトラップ
- ・ デポジションサンプラー

等に応用可能である。

##### ② 通気性

焼結体の圧力損失は、水と空気と比較すると同じ流量条件で水が空気の50倍程であ

る。したがって、完全な気水分離は期待できないものの、流体の漏洩を抑制しつつガス抜きが可能である。

原子炉内での用途として、

- ・ 高圧プレナム等のガス抜き構造
- ・ 集合体内B、C遮へい部のガス抜き構造

等に応用可能である。

### ③ 超塑性

原子炉（あるいは近接性の悪い環境条件下）での用途として、

- ・ 荷重測定素子（炉心変形反力の測定その他、炉心群振動試験の패드反力測定あるいは分節型制御棒の挿入時片あたり反力測定等）
- ・ すきまゲージ
- ・ 内径測定ゲージ
- ・ 温度測定素子
- ・ 嵌合部漏洩抑制部品

等に応用可能性がある。

温度測定素子及び嵌合部漏洩抑制部品への応用例を図3.1及び図3.2に示す。温度測定素子としての応用は、前節で温度測定カプセルとして照射リグへ装荷する検討を実施した。

### ④ 耐熱応力性

焼結体の粉体の熱膨張が完全には拘束されないため、発生熱応力が小さいことから、原子炉内での用途として、構造体としては大型になるが、

- ・ 熱遮へい板（原子炉容器壁等）
- ・ 耐ストライピング構造（炉心上部機構整流板等）

等に応用可能性がある。

また、この特徴は原子炉環境以外にも応用可能性がある。

### ⑤ エネルギー吸収性

粉体の塑性変形によるエネルギー吸収が可能であり、また空隙部は流体の運動量変化によるエネルギー吸収が可能であることから原子炉内での用途として、やはり構造

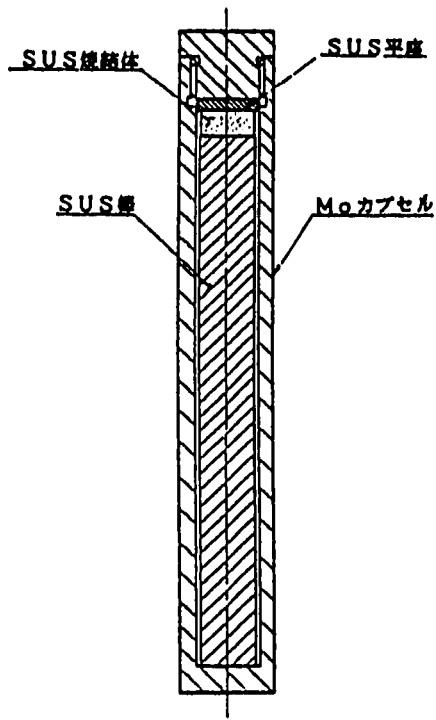
体大型であるが、

- スロッシング防止板
- 遮へいプラグ下部断熱板（H C D A時のエネルギー吸収）

等に応用可能性がある。

この特徴も原子炉環境以外での応用可能性もある。





SUS焼結体変形量試算  
(20℃→450℃)

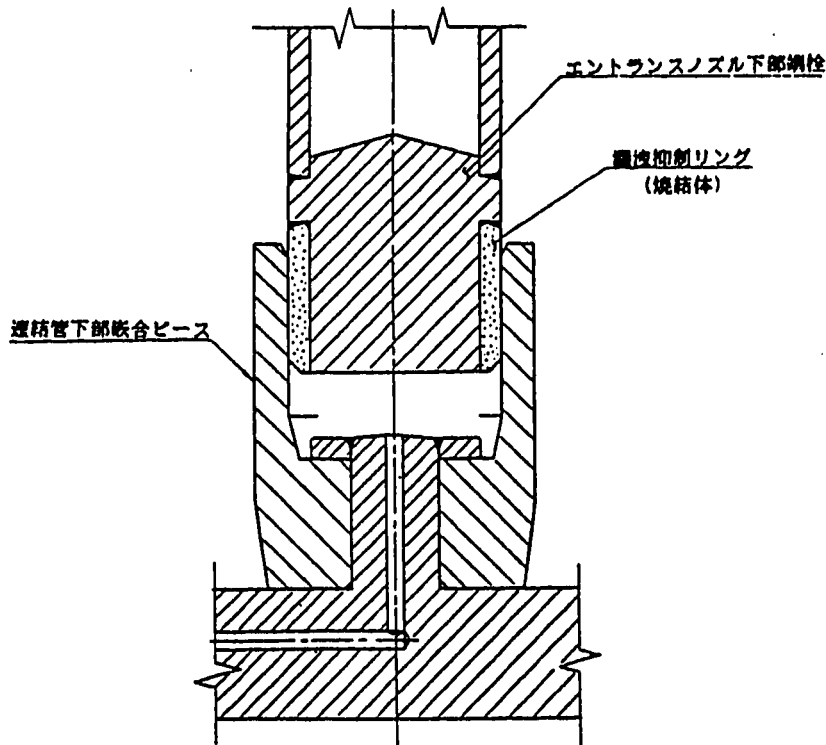
(1) 変形量

$$100\text{mm} \times 430\text{℃} \times (18-6) \times 10^{-6}\text{℃}^{-1} = 0.52$$

(2) 精度

$$\frac{0.01\text{mm}}{100\text{mm} \times 12 \times 10^{-6}\text{℃}^{-1}} = 8.33\text{℃}$$

図3.1 温度測定素子の計画例



効 果

嵌合すきま無し



嵌合部漏洩微小



地震時上向力に対しピストン効果でホールドダウン



炉心浮上り防止



上下動加速度2.7G対応可能

図3.2 嵌合部漏洩抑制部品の計画例