

UDC 620.1.08:  
629.7.018.4

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-578

液体ヘリウム温度における伸び測定用クリップゲージ

浜 口 泰 正

1979年7月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 液体ヘリウム温度における伸び測定用クリップゲージ\*

浜 口 泰 正 \*\*

## A Clip Type Extensometer and Its Use in Liquid Helium

By Yasumasa HAMAGUCHI

### ABSTRACT

A clip type extensometer was newly developed in order to measure the elongation of test-pieces at cryogenic temperature. This device has a small, light and simple structure and uses electrical resistance strain gages as a sensor. Using this extensometer, satisfactory experimental results were obtained in measuring the elongation of the specimens, made of structural materials for a liquid hydrogen rocket tank, in a liquid helium environment.

#### 1. ま え が き

極低温下における金属材料の機械的性質および破壊じん性値を求める試験において、材料の降伏応力、伸び、弾性率およびき裂先端開口量を求めるためには、この環境下で十分な信頼性を持つ伸び計または微小変位計が必要となる。

筆者らは、既に $-196^{\circ}\text{C}$ の $\text{LN}_2$ （液体窒素）環境における材料の降伏応力や弾性率を求めるための標点間変位量を、鋼索により $\text{LN}_2$ 環境外（室温域）に設置している差動トランスに与えて求めてきた。さらに極低温である $-269^{\circ}\text{C}$ の $\text{LHe}$ （液体ヘリウム）環境における試験を進めるうえで、その試験装置は断熱性能を良くするために構造が複雑な密封容器（クライオスタッド<sup>1)</sup>）となり、かつ大型となる。そこでこの $\text{LHe}$ 引張試験装置（極低温構造要素特性試験装置）に適應できる伸び計が必要となった。

この目的のために作製した伸び計は、極低温用ひずみゲージを接着した特製のクリップゲージ型伸び計であり、 $\text{LHe}$ に浸っている試験片に直接取り付け、標点間（50mm）の伸び量を検出できる。

#### 2. クリップゲージ型伸び計

##### 2.1 仕 様

$\text{LHe}$ 環境で使用が可能であり、 $\text{LHe}$ 引張試験装置に適應できる伸び計に望まれる仕様を次に示す。

###### 2.1.1 性能仕様

- i 液体ヘリウムに浸された状況で使用できる。
- ii 標点間距離50mmの20%の伸び、つまり10mmの伸び量が測定できる。
- iii 0.005mm以下の微小変位量が検出できる。
- iv 再現性がある。

###### 2.1.2 一般仕様

- i  $\text{LHe}$ 引張試験装置（ここでは10ton負荷装置とクライオスタッド<sup>1)</sup>）に適應できる。
- ii 平板試験片に適應できる（ここでの板厚は0.4～6mm程度）。
- iii 小型・軽量である。
- iv 作業性が良い。
- v 安価に製作できる。

###### 2.1.3 感度較正に関する仕様

- i  $\text{LHe}$ 温度環境での感度較正が可能で、容易に行なえる。
- ii 感度較正装置は取り扱いが容易である。
- iii 感度較正装置は安価に製作できる。

$\text{LHe}$ 環境は特殊な環境であるために、伸び計の感度較正を各々の試験実施前と実施後に行い、伸び計の再現性、耐久性を調べ、測定値の信頼性を確認する必要がある。このために、上記のiおよびiiの仕様は特に重要な

\* 昭和54年6月6日 受付

\*\* 機体第二部

事項である。

## 2.2 クリップゲージ

### 2.2.1 構成

2.1 節の仕様を満たすものとして作製した伸び計が写真1および図1に示すクリップゲージ型伸び計である。構成部品は、リン青銅板(160×14×1mmの帯板)をU字形に変形したクリップ、銅製小型ナットおよび先端部を硬化させたトガリ先止めネジである。図に示すように単純な構造であるから、簡単に作製できる。作製の過程で注意すべき点は、対向する止めネジの中心軸が同一軸となるようにナットをハンダ付けすることである。なおハンダは極低温においても使用に耐えるものを用いた。

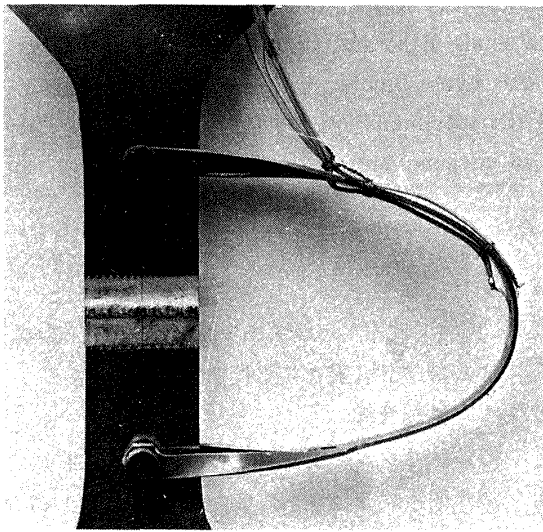


写真1 試験片に取り付けたクリップゲージ

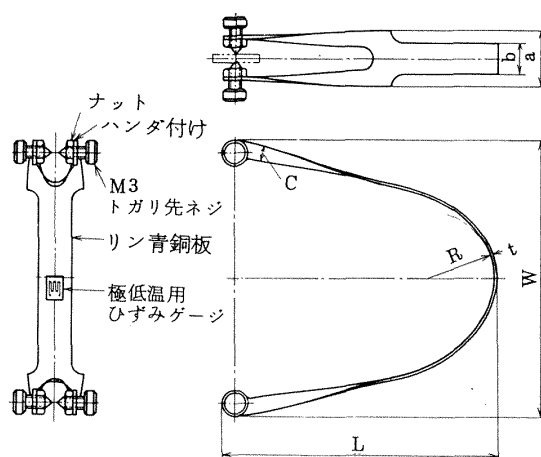


図1 クリップゲージの形状

### 2.2.2 機構上の特長

このクリップゲージの特長は、リン青銅板の弾性力と止めネジの締め付け力を利用して、試験片の標点間にク

リップゲージの取り付けが直接できることである。図に示すように、クリップゲージの先端部は2分割して90°ねじってある。この機構がリン青銅板の弾性力を利用した2枚の板バネで試験片をはさむ状態をつくる。このことにより、試験片の断面収縮が生じて、クリップゲージは標点位置に取り付いた状態が保持される。またこのクリップゲージは、冷却のために冷媒の沸騰液中に置かれ、不安定な状況にさらされる。そのために試験片には4個の止めネジで確実に取り付けられており、沸騰液中の気泡によって試験片から外れたり、標点位置からのずれが生じない状態になっている。

### 2.2.3 形状寸法

作製したクリップゲージは試験片の板厚に適應させるためにE-IとE-IIの2種類あり、これらの形状寸法および重さを表-1に示す。このなかでLはLHe引張試験装置に適應させるために定まる値である。Wは標点間距離が50mmで、ひずみ測定量が20%以上という条件を満たすことによって定まる値である。a, b, cは試験片の板厚を考慮して定めた。なお試験片の板厚が4mm以上の場合はE-Iクリップゲージでナットを外側にハンダ付けした形状のものを用いた。

さらに、標点間位置に取り付ける時(W≒56mm)のクリップゲージのたわみ反力、つまりクリップゲージを試験片に取り付けた時にクリップゲージが試験片に与える引張力をたわみ反力と称して表-1に伴せて示す。

表-1 クリップゲージの諸元

種類	適応板厚(mm)	形状寸法 (mm)							重量(g)	たわみ反力(g)
		L	W	R	a	b	c	t		
E-I	1~6	68	70	16	14	9	4	1	18.5	450
E-II	0.4~1	69	68	16	12	6.2	4	1	16	250

(注) 形状寸法中の記号は図1を参照

### 2.3 ひずみゲージおよびゲージ接着剤

このクリップゲージの変位量は円弧部に接着した電気抵抗線ひずみゲージを介して電気量に変換して検出する。ここで使用するひずみゲージおよびゲージ接着剤は、LHeに浸されても十分な機能を有し、このクリップゲージに適應できる必要がある。

上記の条件を満足すると推察され<sup>2),3)</sup>、入手の比較的容易であった3組のひずみゲージおよびゲージ接着剤を表2に示す。なお、AおよびB組の実用的な使用が十分に保証されたので、C組は使用していない。ところで、B組

表2 極低温用ひずみゲージおよびゲージ接着剤

組	極低温用ひずみゲージ	ゲージ接着剤	コーティング剤	メーカー
A	WK-15-125AD-350 (-270℃) ・ゲージ長 3.18 ・グラスファイバー強化エポキシ樹脂 ・modified カルマ箔	M-610 (-270℃) ・エポキシ系 ・2液性 ・加熱・加圧硬化	M-610 (ここでは、C-5を) 使用した	マイクロ・メジャメント
B	KFL-2-350-C1-16 (-200℃) ・ゲージ長 2.0 ・ポリイミド樹脂 ・ニッケルクロム合金カルマ箔	UC-27 (-200℃) ・ポリウレタン系 ・1液性 ・24時間常温加圧硬化	C-5 (-200℃) ・ブチルゴム系	共和電業
		UC-26 (-200℃) ・ポリウレタン系 ・2液性 ・24時間常温加圧硬化		
C	FSM-12-35S13 (-270℃) ・ゲージ長 3.0 ・ポリイミド樹脂	PLD-700 (-252℃) ・ポリイミド樹脂 ・1液性 ・加熱・加圧硬化	バリーヤG (-270℃) (ボルドウィン製) ・トリルゴム系	新興通信

(注) ( )内はメーカー保証の使用温度を示す。

のひずみゲージおよびゲージ接着剤は-200℃までの使用しか保証されていないが、このクリップゲージに接着してLHe環境での使用を試みた結果、B組もA組と同じ性能を持つこと、つまり-269℃で使用できることが認められた。ただしここでひずみゲージに作用する最大ひずみ量はほぼ  $2500 \times 10^{-6}$  である。

また、A組のひずみゲージ接着には接着剤が加熱硬化タイプのために恒温槽などの特別な装置を必要とするが、B組の接着剤は常温硬化タイプであるために接着作業が容易に行える。さらにB組は入手が比較的容易である。これらのことから、この伸び計に使用するひずみゲージとしてはB組が適していると考えた。

コーティング剤はブチルゴム系のC-5を使用した。コーティング剤を厚めに塗布するとコーティング剤に割れが生じて伸び計の再現性を悪化させる場合があるので注意を要する。なおコーティング剤を使用しなくても安定した計測ができた。

### 2.4 ひずみ測定系

クリップゲージの変形は円弧部において曲げひずみとなる。このひずみ量を検出するために、図2に示すように円弧部の内・外面に表2で示したひずみゲージを接着した。ひずみ測定回路は、ひずみゲージの温度補償を行い、出力を2倍にするために、図3に示す2アクティブゲージ法を用いた。ここでは円弧部におけるゲージの接着作業が困難のために2ゲージ法を用いたが、曲げひずみの出力が4倍となる4ゲージ法を採用する方がより望ましいと考えられる。

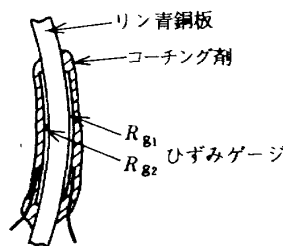


図2 ひずみゲージの接着

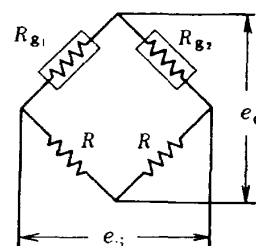


図3 ゲージ回路

ひずみゲージを介した変位量の検出はX-Yレコーダで行った。クリップゲージからX-Yレコーダまでの測定系を図4に示す。

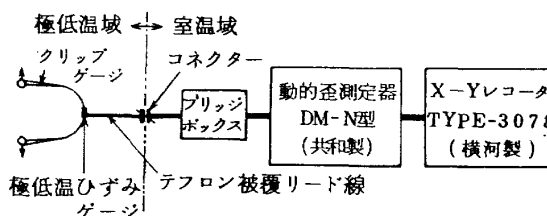


図4 測定径路

## 3. 感度較正

### 3.1 感度較正装置

このクリップゲージは特殊な環境であるLHe中で使用されるのでLHe環境での感度較正が必要である。この目的のために、LHe環境においてクリップゲージに変位

を与え、その変位量を精密に検出する装置として製作した感度較正装置の概略図を図5に、全体の外観を写真2に示す。

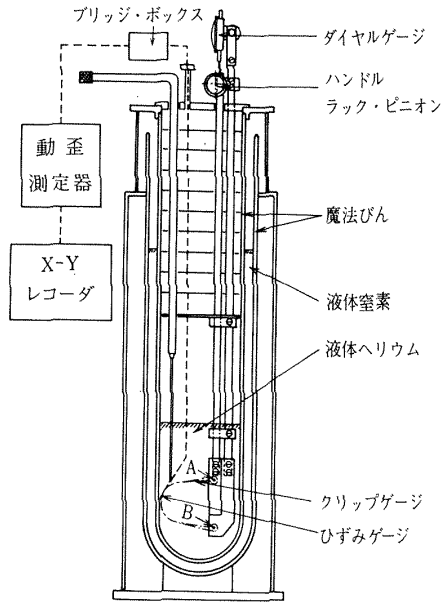


図5 感度較正装置 断面概略図

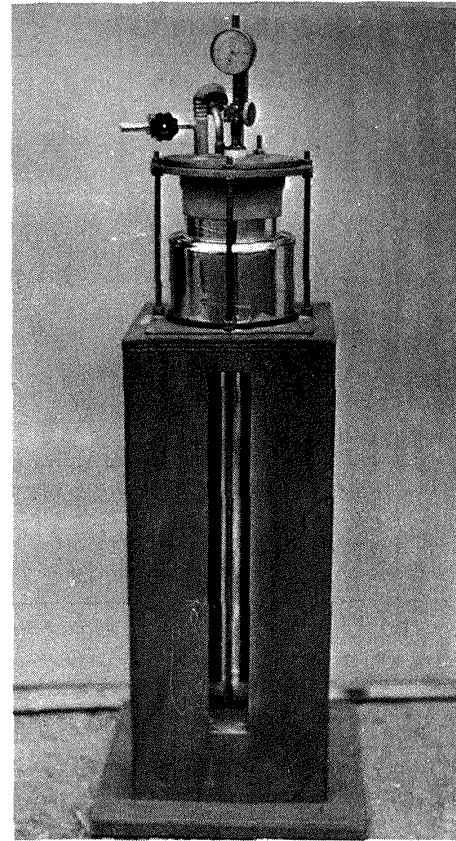


写真2 LHe 温度感度較正装置

この装置は、クリップゲージ先端部の変位をピニオンとラックにより与え、その変位量を測定する測長部と、測長部の一部分をLHe環境にするために魔法びんを二重に組み合わせた断熱槽とで構成したものであり、2.1.3節で示した仕様をほぼ満足する構造である。

概略図に示すように、LHeに浸されたクリップゲージ先端AおよびB(A-B間は標点間距離に相当)の変位は、ハンドルを回し、ピニオンとラックを介して与えられる。さらにこの変位量がダイヤルゲージ(標示性能0.01mm)で読み取れる機構となっている。また、A-B間の変位量は2.4節で説明した測定系によりX-Yレコーダ上に表示される。

なお、本較正装置はA-B間の変位量とダイヤルゲージの指示値が等値になるように慎重に組立を行った。また、本較正装置を用いてLHe環境で感度較正を行うために必要としたLHe量は5~7リットルであった。

### 3.2 較正結果

クリップゲージ先端A-B間の変位量を $\Delta l$ 、円弧部の曲げひずみ量を $\epsilon_M$ とすると、 $\Delta l - \epsilon_M$ 関係を、室温-196℃(LN<sub>2</sub>)、-269℃(LHe)の各温度で測定した結果を図6に示す。この図から $\Delta l - \epsilon_M$ 関係は直

線関係にあると言える。このことは本測定系において、X-Yレコーダ上に表示されるA-B間の変位量が線形で表わされることを示すものである。なお、 $\Delta l - \epsilon_M$ の直線関係はほぼ15mmの変位量までであった。

表3には各温度についての代表的な $\Delta l$ に対応する $\epsilon_M$ の比較値を示す。この表から、LHe温度での $\epsilon_M$ の対室温比率は、E-I型がほぼ1.05、E-II型がほぼ1.08と異なった値を示すこと。また、対LN<sub>2</sub>温度比率はE-I型もE-II型もほぼ1.00の値を示し、その偏差は1%以内であることがわかる。これらのことから、LHe温度での感度較正は較正作業の容易なLN<sub>2</sub>温度で十分に代用できること、また、室温の $\Delta l - \epsilon_M$ 関係からLHe温度の $\Delta l - \epsilon_M$ 関係を推定するのは適切でないと判断できる。

弾性率を求めるためには、荷重-伸び線図の弾性域での良好な精度の変位測定が望まれる。このために、0から1mmまでの微小変位区間の変位量 $\Delta l$ を0.001mmの指示精度を持つデジタルマイクロメータで与えて、微小変位区間の $\Delta l - \epsilon_M$ 関係を測定した結果を図7に示す。この測定結果から、微小変位区間においても十分に直線関係があり、安定した測定結果が得られることがわかる。

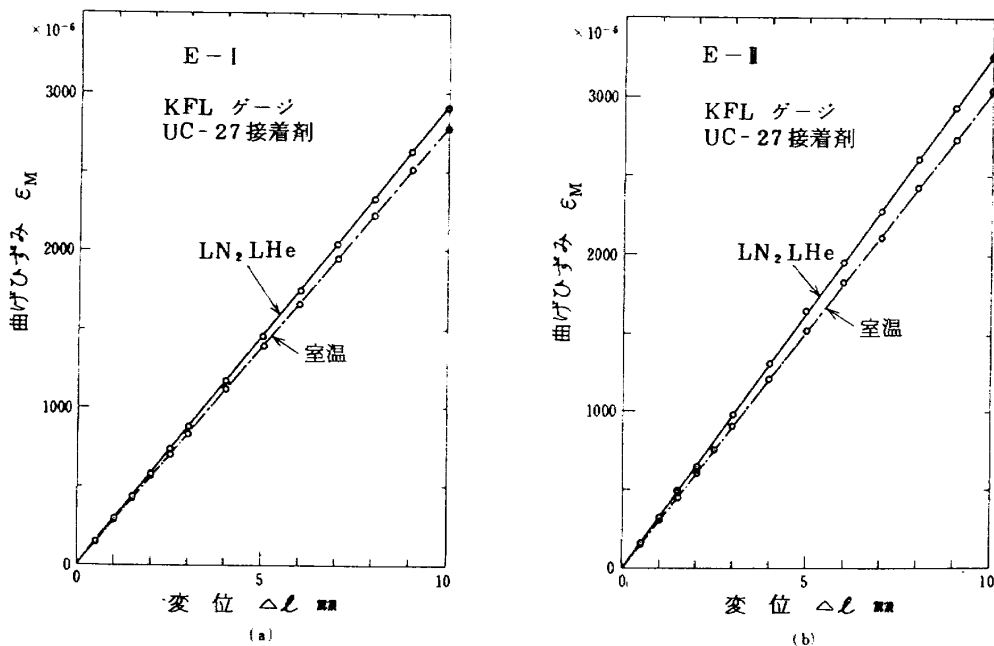


図6 クリップゲージの変位-曲げひずみ関係

表-3 各温度についての曲げひずみ量の比較値

クリップゲージ	変位量 $\Delta l$ mm	曲げひずみ量とその比較値			
		室温 $\epsilon_M \times 10^{-6}$	LN <sub>2</sub> /室温	LHe/室温	LHe/LN <sub>2</sub>
E-I	1	275	1.05	1.05	1.000
	5	1395	1.05	1.04	0.990
	10	2770	1.05	1.05	0.995
E-II	1	303	1.07	1.08	1.009
	5	1515	1.08	1.08	1.000
	10	3030	1.07	1.07	0.997

(注) 室温: 8~10℃, LN<sub>2</sub>: 196℃, LHe: -269℃

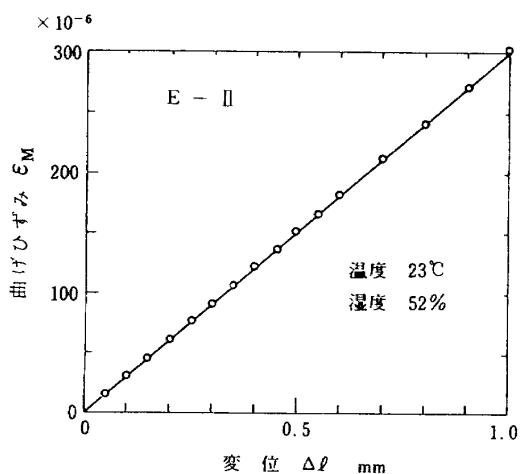


図7 微小変位区間の変位-曲げひずみ関係

のひずみ  $\epsilon_e$  についての変位-ひずみ ( $\Delta l - \epsilon$ ) 関係を測定したものである。この結果から、曲り梁の応力理論で解明されているように、 $|\epsilon_i| > |\epsilon_e|$  の関係が示される。なお、ここでのクリップゲージの曲げひずみ  $\epsilon_M$  は、2.4節で述べたように2ゲージ法により検出しており、 $\epsilon_M = \epsilon_i - \epsilon_e$  である。

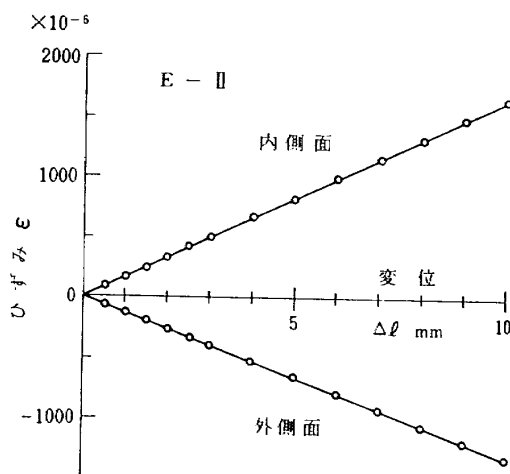


図8 内・外側面の  $\Delta l - \epsilon$  関係

### 3.3 感度較正値の出力

図8はクリップゲージの内側面のひずみ  $\epsilon_i$  と外側面

実際の荷重-伸び測定では、上記した校正装置を用いて、クリップゲージ先端A-Bにおける10mmの変位量がX-Yレコーダ上において200mmのペン先移動量になるように測定系を調整した。この場合のX-Yレコーダの感度は0.1V/cmを用いた。弾性率を求める測定では、

X-Yレコーダの感度を上げて10 mV/cmを用いたのでクリップゲージ先端A-B間の0.01 mmの変位量は、X-Yレコーダ上において2 mmのペン先移動量に相当した。

#### 4. 実測結果および伸び計の評価

##### 4.1 実測結果

この伸び計をLHe引張試験装置に設置した試験片に取り付けた状態（試験装置断面）と荷重-伸び測定系の概略を図9に示す。

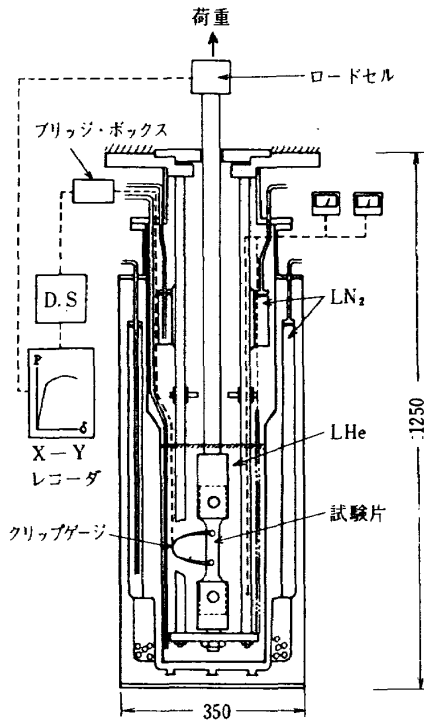


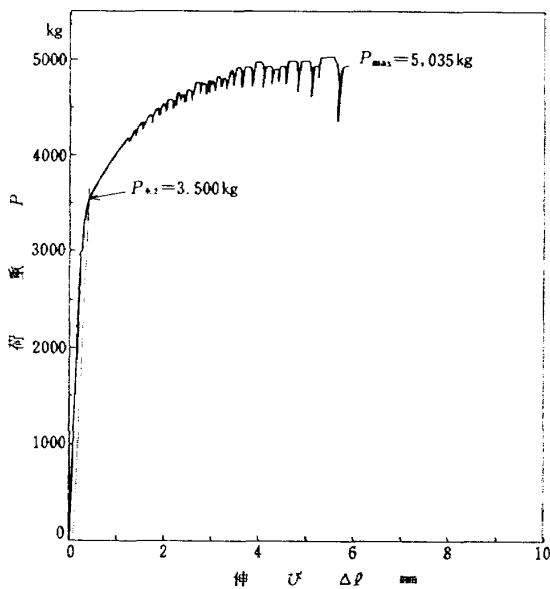
図9 LHe引張装置概略図および荷重-伸び測定系

これらの試験系から求めた液体ロケットタンク構造用材料2219-T87アルミニウム合金およびSUS301-Hステンレス鋼のLHe温度における荷重-伸び線図を図10および11に示す。それぞれの図の(b)は材料の弾性率を測定するために変位量の感度を上げて測定した弾性域内の荷重-伸び線図を示し、(c)は試験片形状を示す。また、図10はA組のひずみゲージを使用し、図11図はB組のひずみゲージを使用して求めたものである。なお、2024-T651およびZK141アルミニウム合金の荷重-伸び線図も図10と同様の傾向を示した。

破断までの荷重-伸び関係を求めた線図（図10, 11, の(a)図）から、塑性変形が生じてくると荷重-伸び線図は不連続に変化し鋸歯状になっていることがわかる。この不連続な変化は、セレーション<sup>5)6)</sup>と称されており、種々の金属や合金において極低温環境下でみられる特有の現象である。なお実測時において、これらの荷重-伸び線図にみられるような荷重低下が生じるたびに試験片から突発音が聞えてきた。破断した試験片を観察すると平行部全体に荷重方向に対してほぼ60°の傾きを持ったすべり線と多重くびれ部が見られた。

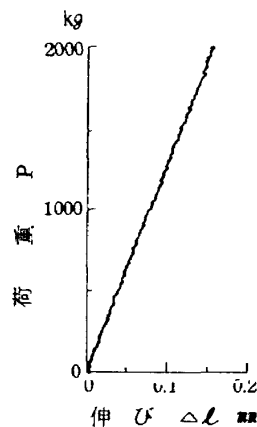
##### 4.2 測定性能

この伸び計はセレーションを標点間で正確に測定していること。記録したセレーションの包絡線は通常の荷重-伸び線図の状態を示すこと。また、この伸び計と差動トランス型伸び計を併用して測定した結果、両者の線図は同じ様相を示した。これらのことから、この伸び計の追従性および応答性は良好であると判断できる。また測定値の直線性は3.2節で述べたように良好である。

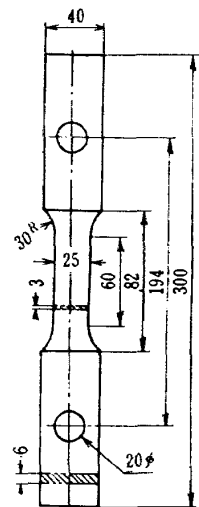


(a)

実験材料：2219-T87  
 実験温度：-269℃ (LHe)  
 クリップゲージ：E-I  
 ひずみゲージ：A組

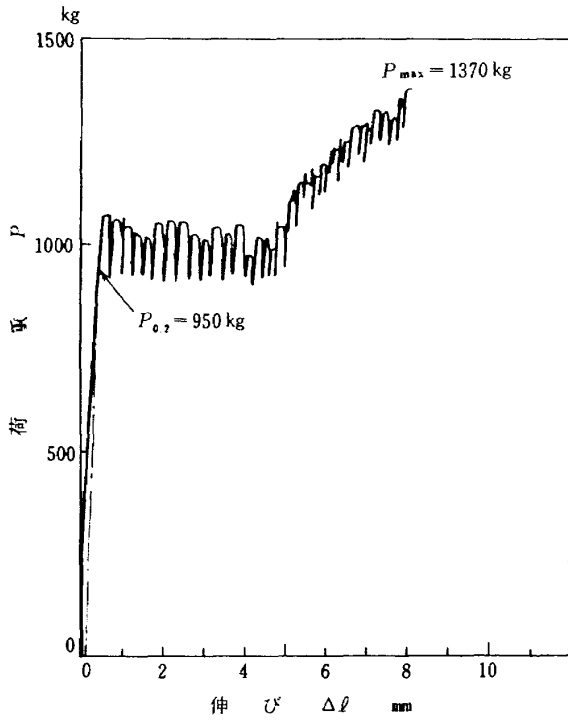


(b)



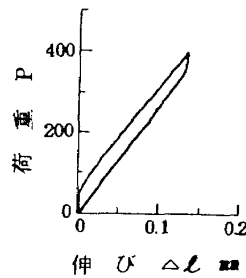
(c)

図10 2219-T87材の荷重-伸び線図と試験片形状

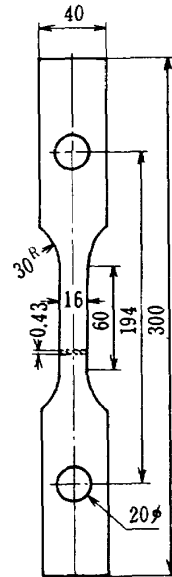


(a)

実験材料; SUS301-H  
 実験温度;  $-269^{\circ}\text{C}$  (LHe)  
 クリップゲージ; E-Ⅱ  
 ひずみゲージ; B組



(b)



(c)

図11 SUS301-H材の荷重-伸び線図と試験片形状

### 4.3 測定精度

材料の弾性率を求めるために測定した荷重-伸び線図(図10, 11の(b)図)から、変位量( $\Delta l$ )は0.005mm単位まで測定できると判断できる。また、LHe温度における標点間距離は材料の熱収縮を考慮した補正值を用いており、これらの値から算出したひずみ値および弾性率は高い信頼性を持っている。なお、これらの値は米国で求めた値<sup>7)</sup>と同じ様な傾向を示した。

図11(b)図では負荷時と除荷時の荷重-伸び線図のずれが見られるが、これはクリップゲージ取付部のずれによるものであるから、慎重な取り付け作業をすることにより、このずれの発生を除くことができる。

### 4.4 再現性および耐久性

試験片の伸びの実測前と実測後に感度較正を行った結果、実測前後の較正值の偏差はいずれの場合も1%以内であった。さらに、1年間にわたる一連の実験において、①室温、②LN<sub>2</sub>に30分から4時間浸漬、③LHeに30分間浸漬、④室温とする温度サイクルを数十回繰り返した結果、ひずみゲージの剝離は一度もなく、1年後に測定した感度較正值は最初の較正值と一致した。これらのことから、この伸び計は安定した再現性を示し、耐久性も十分であると判断できる。

### 4.5 作業性

伸び計の取り付け作業は慎重に行う必要があるが、小型、軽量であるため作業性は比較的良いと言える。

ところで、クリップゲージを試験片に取り付けるために、平板試験片の表裏両面の標点位置に小さなポンチ穴を標す必要がある。ここでは自動ポンチを用いて適切な打撃力でポンチ穴を標した。なおこのポンチ穴が破壊の起点となる破断は実験した材料では現われなかった。

### 4.6 感度較正の容易性

この伸び計のLHe温度における感度較正( $\Delta l - \epsilon_M$ 関係)はLN<sub>2</sub>温度における感度較正から類推できることが実験結果から判明した。このことによりこの形式の伸び計の較正は安価で容易に行えると言える。

## 5. まとめ

この伸び計は液体ロケット・タンク構造材として提案されているアルミニウム合金(2219-T87, 2014-T651 ZK141)およびステンレス鋼(SUS301-H)のLHe温度( $-269^{\circ}\text{C}$ )における機械的性質を求めることを目的として製作したものである。

LHe温度における試験片標点間の伸びを求める方法として、1) LHe温度での使用が可能な差動トランスを用いる方法、2) アームを介してLHe環境外に設置している差動トランスを動かして求める方法<sup>9)</sup>、3) 引張試験装置の断熱槽に内部が透視できる窓を設けて試験片の標点変位を光学的に測定する方法<sup>6)</sup>、等がある。これらの測定系は比較的大型で複雑な構造となっている。

ここで作製したクリップゲージ型伸び計は、小型・軽



量で単純な構造であり、一般的な引張試験装置に適応し、測定精度、追従性、再現性、耐久性、安定性等は満足のゆくものであり、感度較正も簡単に行えることから、極低温（ $-269^{\circ}\text{C}$ ）域から室温域における平板金属材料（板厚  $0.4 \sim 10 \text{ mm}$  程度）の機械的性質を求める伸び計として適切である。また、極低温における破壊じん性試験の変位計としても応用できると考えられる。

この伸び計を作製するにあたり、有益な御助言をいただきました本所の中井暎一部長、江川幸一室長、下河利行主任研究官および電気通信大学機械工学科の高松徹氏に感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 飯田宗四郎；20トン極低温構造要素特性試験装置，航技研ニュースNo.214（1977）pp.9
- 2) 江川幸一；ひずみゲージによる高低温ひずみ測定，金属材料，16巻10号（1976）pp.71
- 3) 荒井宏範，鈴木康平；低温応力計測法，日本海事協会誌，No.152（1975）pp.371
- 4) 中原一郎；材料力学上巻，（1965）pp.195-199，養賢堂
- 5) 福島英二，後藤 昭；極低温における各種金属，合金のセレーション変形，日本金属学会誌，39巻2号（1975）pp.182
- 6) 栗林一彦，岸 輝雄，堀内 良，名取通弘，砂川 恵；極低温におけるアルミニウム合金の力学的性質日本航空宇宙学会誌，26巻290号（1978）pp.158
- 7) F. R. Schwatzer; Cryogenic Materials Data Handbook, Technical Documentary Report of U. S. Air Force Materials Lab., (1975/2).
- 8) 浜口泰正，飯田宗四郎，中井暎一，寺田博之，角田義秋，堀 武敏；液体ロケット燃料タンク構造用材料の極低温（4K）における強度特性，航技研資料TM380（1979）
- 9) 福島英二，後藤 昭，伏見光造；18-8ステンレス鋼の $-269^{\circ}\text{C}$ の荷重-伸び線図にみられる serration およびそれに及ぼすマルテンサイト変態の影響，日本金属学会誌，37巻2号（1973）pp.186

---

## 航空宇宙技術研究所報告578号

昭和54年7月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)

---

Printed in Japan

This document is provided by JAXA.