

平成 16 年度 卒業論文

フレッティングにおける  
摩擦・摩耗挙動に及ぼす  
水素環境の影響

機械材料学研究室

九州大学工学部 機械航空工学科

4 年 笛田 宗広

指導教員

近藤 良之 教授

栄 中 助教授

久保田 祐信 助手

平成 17 年 2 月 7 日提出

## 目次

1 章	緒言	1
1.1	研究の目的	1
1.2	研究の背景	1
1.3	フレットニングとは	3
2 章	実験方法	3
2.1	フレットニング摩耗試験装置	4
2.2	供試材	7
2.3	試験片	8
2.4	接触面圧	9
2.5	微小変位計	10
2.6	摩擦力	11
2.7	環境条件	11
2.8	安全対策	12
3 章	実験結果と考察	13
3.1	フレットニング摩耗試験結果及び考察	13
3.2	水素吸蔵量の分析	17
4 章	結言	20
付録		21
付録 A	面圧付与治具の較正	21
付録 B	微小変位計較正	24
付録 C	高真空装置	26
参考文献		28

# 1 章 緒言

## 1.1 研究の目的

本研究の目的は水素利用機器用材料のフレット特性に及ぼす水素環境の影響を明らかにすることである。

## 1.2 研究の背景

1997 年 12 月に京都で開催された気候変動枠組み条約第 3 回締結国会議 (COP3) において、通称「地球温暖化防止に関する京都議定書」と呼ばれる国際ルールが採択された。日本は 2002 年にこの議定書を批准している。議定書には地球温暖化を促進するとされる 6 種類の温室効果ガスを削減する数値目標が定められている。議定書が発効すれば、日本も 2008 年～2012 年までに、これらのガスを 1990 年を基準として 6 % 削減する義務を負うことになる。しかし、2003 年における日本の排出量は、1990 年を基準にして 8 % 上回っており、議定書の 6 % 削減約束との間には、14 % の開きがある<sup>2)</sup>。この削減目標を達成することは、このままでは日本にとって極めて厳しいと言える。

温室効果ガスのうち、その 9 割を占める二酸化炭素 (以下 CO<sub>2</sub>) の主な排出源は石油等の化石燃料の使用によるものであり、埋蔵された石油資源の枯渇が迫っていることともあいまって、CO<sub>2</sub> の排出源を削減し、エネルギーの供給を安定化できるエネルギー源が求められている。

日本では、京都議定書の目標達成に向け「地球温暖化対策大綱」が定められており、2002 年 3 月に、新たな大綱が策定された。

新大綱では、風力や太陽光などの新エネルギーの普及促進、家庭やオフィスなどを含めた省エネ機器の普及、自動車燃費の一層の改善、燃料電池などの技術開発の推進、吸収源となる森林の整備など、具体的な施策が盛り込まれてい

る<sup>2)</sup>。

燃料電池を始めとする水素エネルギーは、原理的にはエネルギーを取り出した後に水 ( $H_2O$ ) しか排出しない。このことから水素エネルギーは新エネルギーとして実用化が進められている。すでに燃料電池自動車は試験的に使用され、家庭でのコジェネレーションの計画も進められている。

このように水素燃料が一般に普及していく際、その安全性は大きな問題となる。特に水素ガスを輸送・供給する場合、配管やバルブの破損は重大な事故につながる可能性があり、これらに用いられる材料について水素環境中における疲労強度の評価が必要である。

水素が金属疲労に及ぼす影響に関する研究は、これまでに腐食疲労に関するもの、液体酸素・液体水素を用いたロケットエンジンなど特殊な水素利用機器に関するものなどが行われてきた。最近では超長寿命域での疲労破壊に及ぼす介在物にトラップされた水素の影響や、燃料電池などでの水素利用に関係したものなどが行われてきた。しかし、新しい水素社会に向けて、一般に使用される水素利用機器までも視野に入れた材料強度と水素の関係の には余地がある。

機械・構造物の疲労破壊はフレッティングを伴う部品の結合部、接触部で生じることが多く、水素利用機器においてもフレッティングを考慮することは重要である。Fig. 1-1 に示すように水素環境中ではフレッティング疲労強度が大気中よりも低下すること<sup>3)</sup> が報告されており、水素環境がフレッティングにどのように影響を及ぼしているのか、そのメカニズムを明らかにする必要がある。そのために、本研究では、詳細にフレッティングに影響を及ぼすパラメータの計測ができる実験装置を開発して、水素環境中でフレッティング摩耗試験を行った。比較として、窒素中でも同様の試験を行った。

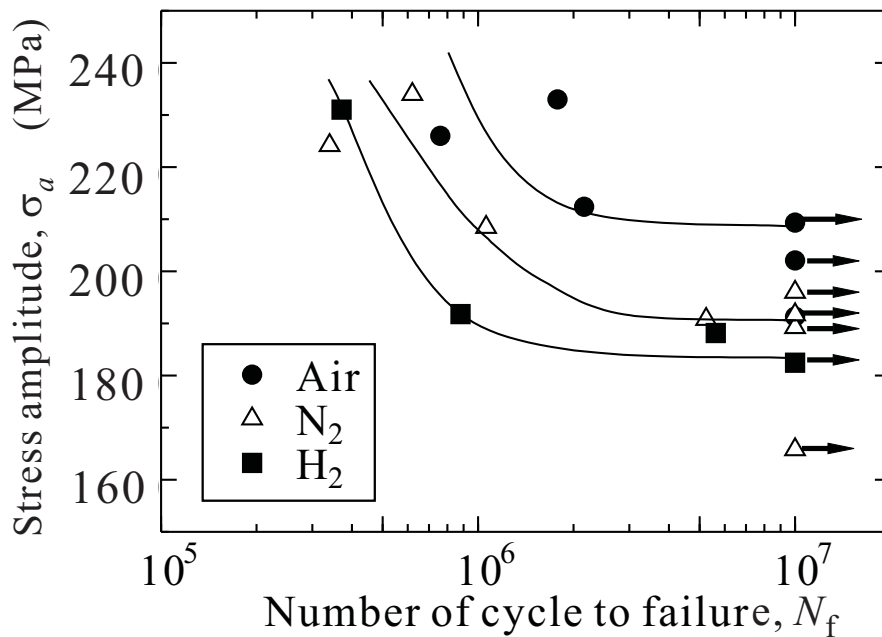


Fig.1-1 S-N diagrams <sup>3)</sup>

### 1.3 フレッシングとは

フレッシングとは、接触した2つの部品間に生じる振幅数  $\mu\text{m}$  以下～数十  $\mu\text{m}$  の相対的なすべりの繰返しであり、構造物が応力を受けるときに部品に生じる変形の差によって発生する。フレッシングが生じると、接触面に高い摩擦力が作用して疲労強度を顕著に低下させる。フレッシングが通常の摩耗と異なる点は、接触面の相対すべり振幅が微小であるために、摩耗粉の多くがフレッシングの部分に残留することにある。酸化摩耗粉に囲まれたピットが接触面に見られるのがフレッシングの存在の証拠となる <sup>4)</sup>。

## 2 章 実験方法

### 2.1 フレッシング摩耗試験装置

試験部の組立概略図を Fig. 2-1 に示す．試験部は試験片，接触片，および接触面圧を付与するリング状のばねからなる．接触片に上下方向の数  $\mu\text{m}$  ～ 数十  $\mu\text{m}$  の繰返し変位を与えて，試験片との接触面に微小な相対すべりの繰返し，すなわちフレッシングを生じさせる．相対すべり量と摩擦力はフレッシング摩耗に影響を及ぼす因子であり，その測定方法については 2.5，2.6 で詳しく示す．

試験機の制御と接触荷重，すべり量，摩擦力及びロードセル荷重の測定には「Microsoft Visual Basic」を用いて開発したプログラムを用いた．

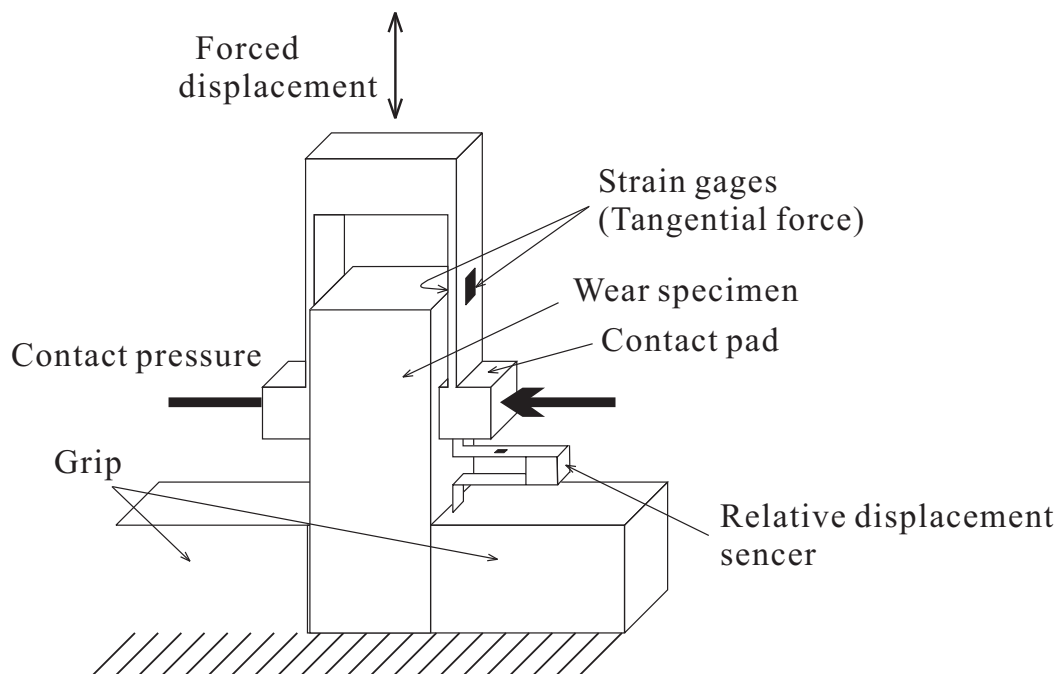


Fig.2-1 Fretting wear test method

本研究で用いたフレットング摩耗試験機全体の構造を Fig. 2-2 に示す．また，窒素中，水素ガス環境でのフレットング摩耗試験中の外観を Fig. 2-3 に示す．各環境での試験条件をそろえるために大気中においてもペローズを取付けて試験を行った．

モータには回転軸とカムを中心位置が異なる偏心カムが取り付けられており，モータが回転することにより，レバーに一定振幅の繰返し曲げ荷重を加える．レバーの一端には接触片が固定されており，支柱に取付けられたベアリングを支点として，接触片に一定振幅の繰返し変位を与える．支点となるベアリングを接触面と同じ高さに取り付けることにより接触片が鉛直方向に動くようにしてある．振幅はカムの偏心量及びカムがレバーと接触する位置を調整して制御した．下側チャックに試験片が固定されており，試験片と接触片の間に面圧を付与するためのリング状のばねが取付けられている．面圧付与の方法については 2.4 にて説明する．

試験条件を Table 2-1 に示す．

Table 2-1 Test condition

変位繰返し速度	18.7Hz
試験温度	室温
試験環境圧力	大気圧（大気中） 絶対圧 約 0.11 ~ 0.12MPa（窒素・水素環境ガス中）
接触面圧	25MPa

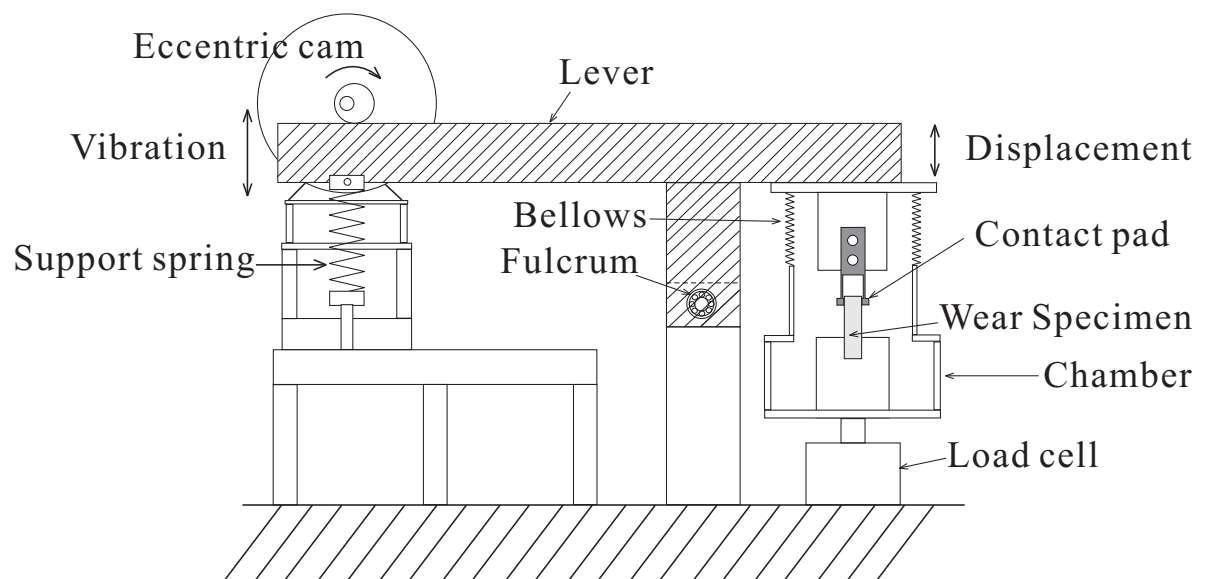


Fig.2-2 Fretting wear test machine



Fig.2-3 Appearance of retting wear test



## 2.2 供試材

供試材として，市販のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 溶体化処理材を用いた．供試材の化学成分を Table 2-2 に，機械的性質を Table 2-3 に示す．

Table 2-2 Chemical composition ( wt % )

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.05	0.53	0.93	0.030	0.004	8.11	18.12

Table 2-3 Mechanical properties

$\sigma_{0.2}$ ( MPa )	$\sigma_B$ ( MPa )	$\delta$ (%)	HB
273	619	59	169

## 2.3 試験片

試験片及び接触片の形状を Fig. 2-4 に示す．接触片は M4 のボルト 2 本で上側チャックに固定し，直方体の試験片は M4 のボルト 4 本で下側チャックに固定する．

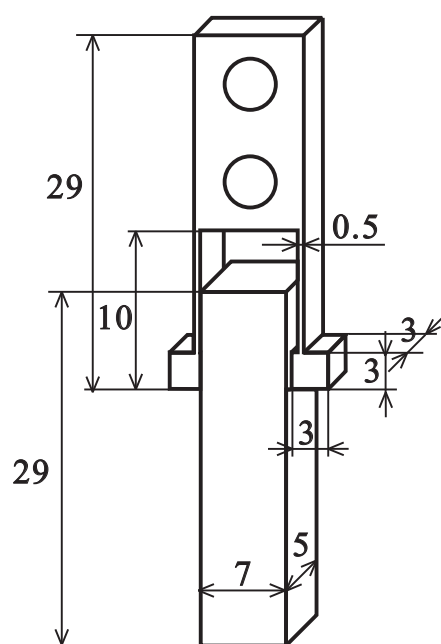


Fig.2-4 Shape and dimensions of specimen and contact pad

## 2.4 接触面圧

接触面圧を与えるリング状のばねを Fig. 2-5 に示す．2 本のボルト③を締め，円柱型のブロック⑤を 2 本のネジで押し付けることにより面圧を与えた．リングの外面中央部に貼り付けたひずみゲージによって出力されたひずみを以下の式に代入して算出した．接触荷重を  $P_c$ ，比例係数を  $k$ ，ひずみを  $\varepsilon$  とすると，

$$P_c = k \times \varepsilon \quad (2-1)$$

比例係数  $k$  は較正試験を行って求めた．この較正試験についての詳細は付録 A で述べる．

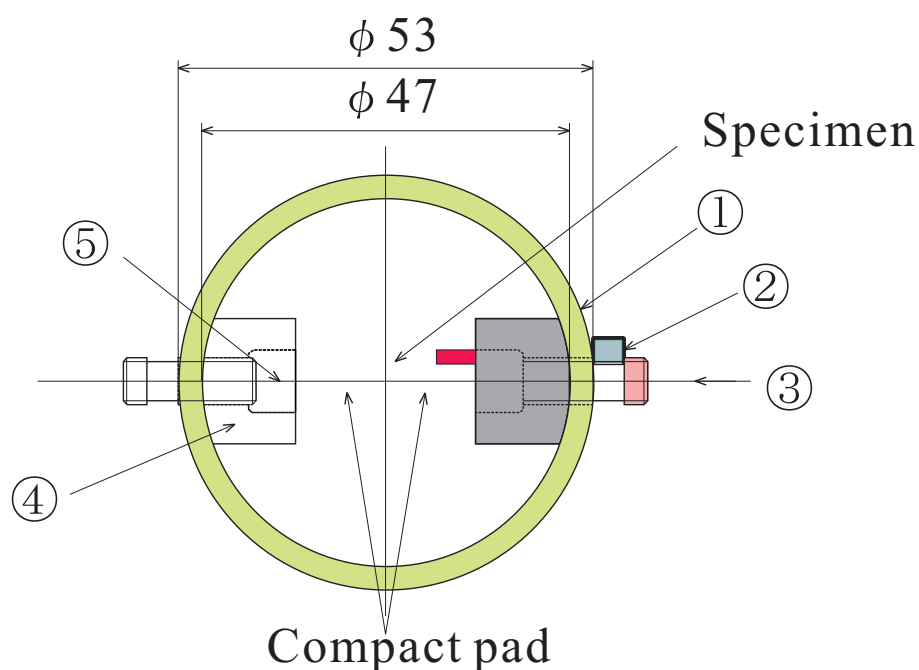


Fig.2-5 Ring spring for contact pressure loader

## 2.5 微小変位計

相対すべり量は自作のクリップゲージ型の微小変位計で測定した．微小変位計の外観と構造を Fig. 2-6 に示す．Fig. 2-6(b) のように，微小変位計は板バネ部 (SUS304 板厚 0.3mm) とワッシャー (S45C 板厚 2mm) より成る．

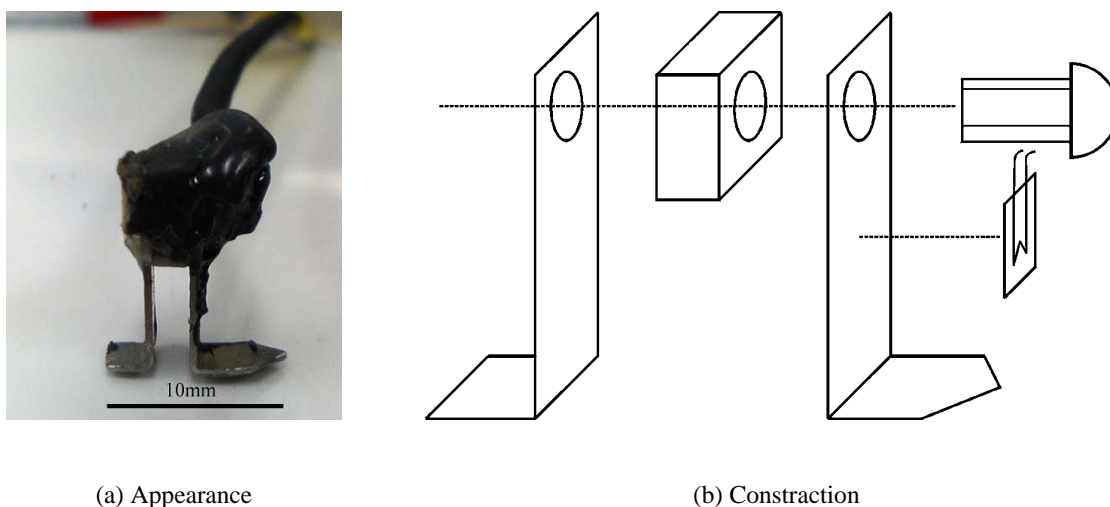


Fig.2-6 Micro slip sensor

微小変位計は接触片と下側チャック部との間に取り付けられる．下側チャックには深さ 0.5mm，角度  $90^\circ$  のノッチが入れてあり，接触片にはリユーターで深さ約 0.5mm のくぼみが入れてある，下側チャックで線接触，接触片側で点接触させるように取り付ける．下側チャックに固定されている試験片と接触片との間に相対すべりが生じたとき，相対すべり量に比例したひずみが板バネに生じる．このひずみを貼られたひずみゲージで測定することにより，試験片と接触片の間の相対すべり量を測定することができる．微小変位計の較正については付録 B で述べる．

## 2.6 摩擦力

摩擦力は P.4 の Fig. 2-1 のように接触片の厚さ 0.5mm の部分（以下，腕と言う）に貼ったひずみゲージにより測定した．ひずみゲージは腕の表裏に 2 枚貼ることによって，曲げによるひずみを消去して，すべり方向の力のみを測定した．

## 2.7 環境条件

窒素ガス環境を実現するにはチャンバ内を高真空装置を用いて排気し，そののち窒素ガスを 1 気圧より高い圧力で十分な量だけチャンバ内に流す．チャンバ内の酸素濃度を十分に薄くするために，この操作を数回繰り返す．その後，窒素ガスを充填する．水素ガス環境を実現するにはまずチャンバ内を窒素環境にした後に，小型高真空装置を用いて窒素ガスを排気し，その後水素ガスを充填する．小型高真空装置は油回転真空ポンプと油拡散ポンプからなり，それぞれ付録 C にて詳しく説明する．真空装置を用いて排気した後の到達圧力は  $8.0 \times 10^{-3}$  Pa 程度であった．環境置換に用いた窒素ガス，水素ガスの成分を Table 2-4，Table 2-5 に示す．

Table 2-4 Composition of N<sub>2</sub> gas

N <sub>2</sub> ( % )	O <sub>2</sub> ( PPM )
99.99	< 10

Table 2-5 Composition of H<sub>2</sub> gas

H <sub>2</sub> ( % )	O <sub>2</sub> ( PPM )	N <sub>2</sub> ( PPM )
99.97	< 10	< 200

## 2.8 安全対策

水素ガスは可燃範囲が広い，燃焼速度が速い，拡散しやすいなどの特徴から，爆発などの事故を起こさないためにはその取扱いに十分な安全対策が必要である．本研究における実験では，以下のような安全対策を行い，実験の安全性を確保した．

### 2.8.1 水素実験区画

実験は実験室内を透明ビニールシートで仕切った水素実験区画内で行った．壁面を透明にした理由は区画外部から区画内部の観察ができるようにするためと，照明は漏洩ガスの引火の原因となるため区画内に照明を設置しないようにするためである．区画内の上部には換気扇とガス検知警報機の拡散式ガス検知部を取り付けた．区画の天井は傾斜が付いており，ガス検知部はその最頂点に設置した．これは水素ガスが空気に較べて軽い気体なので，拡散は上方に向かうためである．換気扇は常置作動しており，万一ガスがチャンバ及び配管から漏れた場合にも，すみやかに外気中に排出され実験室内に残留しない．ガス検知警報機は水素ガス濃度が 50 ppm 以上になると 1 段目の警報が，100 ppm 以上になると 2 段目の警報が作動する（作動テスト済み）．

### 2.8.2 ガス給排気における安全対策

実験終了後の試験装置内の水素ガスの排気は窒素ガスによって押し流すようにした．水素ガスは，排気口から逆火を防ぐため屋外に置かれた水封器を通して大気中に放出される．

水素ガスレギュレータと配管の間には逆火防止器を取り付けた．これによって試験装置や配管で水素ガスの燃焼が起こっても，水素ガスポンペの手前で炎が遮断される．

### 3 章 実験結果と考察

#### 3.1 フレッシング摩耗試験結果及び考察

##### 3.1.1 すべり量と摩擦係数

相対すべり量と摩擦係数の繰返しに伴う値の変化を Fig. 3-1 に示す．試験開始直後，相対すべり量は比較的大きい値を示したが，繰返し数百回以内で急激に低下し，その後はほぼ一定の値を示した．摩擦係数は相対すべり量と反対の挙動を示し，急激に上昇した後ほぼ一定の値を示した．このような傾向は環境に関係なく見られた．

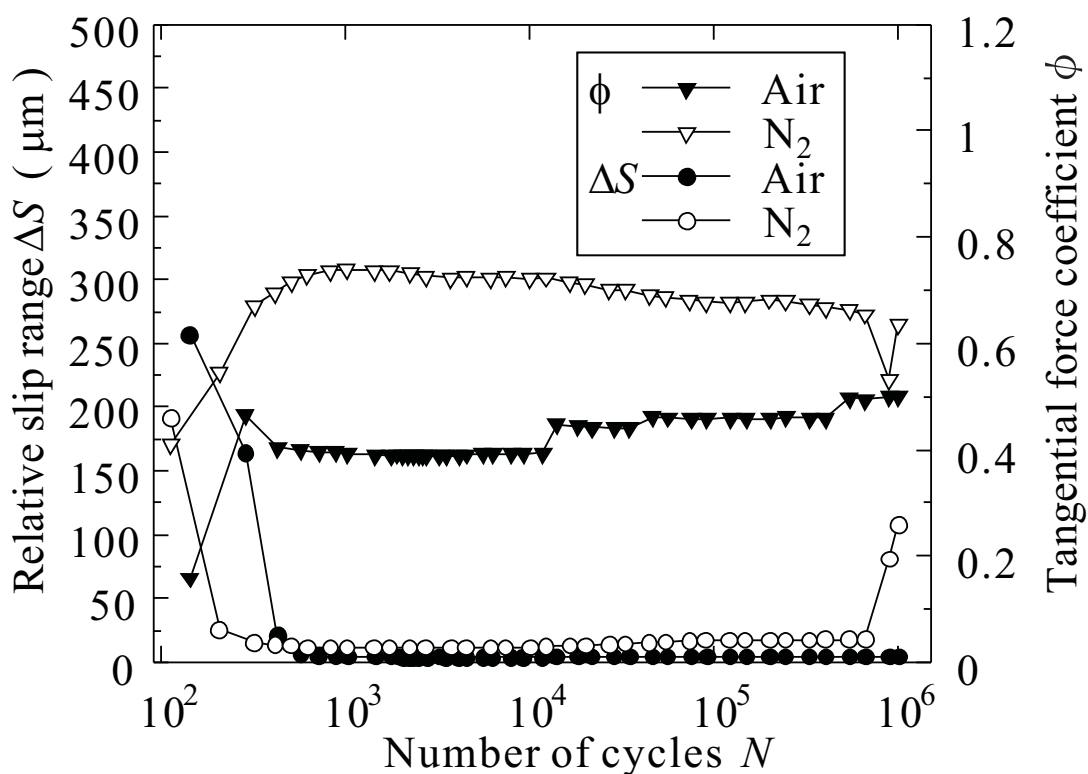


Fig.3-1 Change of relative slip range and tangential force coefficient with the change of number of fretted cycles

### 3.1.2 摩擦係数と相対すべり量の関係

摩擦係数と相対すべり量の関係を Fig. 3-2 に示す．ここでの摩擦係数と相対すべり量の値は各実験において，摩擦係数および相対すべり量が安定した部分の値を用いた．摩擦係数は相対すべり量の増加に伴い増加し，その後一定値となる傾向を示した．また窒素中，水素中の摩擦係数は大気中よりも高い傾向を示した．

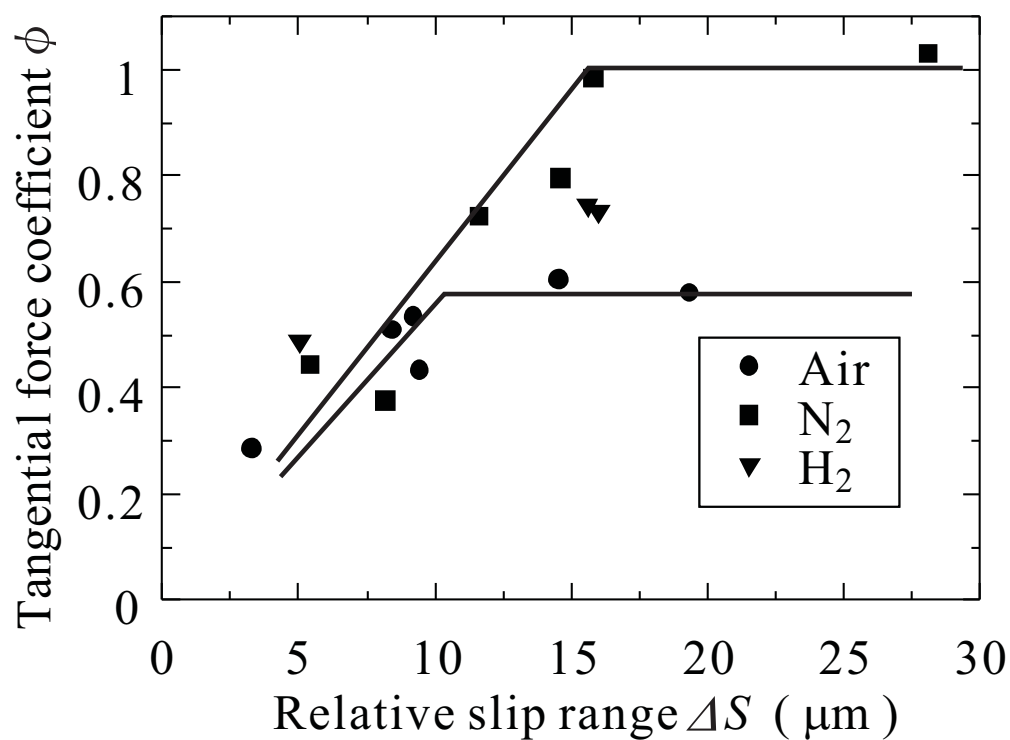


Fig.3-2 Relative slip range vs. tangential force coefficient



### 3.1.3 環境置換に伴う摩擦係数，相対すべり量の推移

Fig. 3-2 において窒素ガス環境における摩擦係数が大気中よりも大きい値を示したことを確かめ，環境による相対すべり量と摩擦係数の変化を明らかにするために窒素ガス環境におけるフレッティング摩耗試験中に環境を窒素ガスから大気に変化させる試験を行った．この試験結果を Fig. 3-3 に示す．最初の窒素ガス環境では比較的高い摩擦力と低い相対すべり量が測定されたが，環境を大気と置換すると，わずかに時間が経過した後ですべり量は急激に増加し，摩擦係数は減少して，その後，ほぼ一定の値を示した．これは大気中の実験では酸化摩耗粉が発生し，この摩耗粉が摩擦力を下げる作用をもつためであると考えられる．さらに，窒素，水素中の実験では酸素が存在しないために新生面同士の接触が生じており，これが窒素ガス環境で比較的高い摩擦係数を示した原因と考えられる．

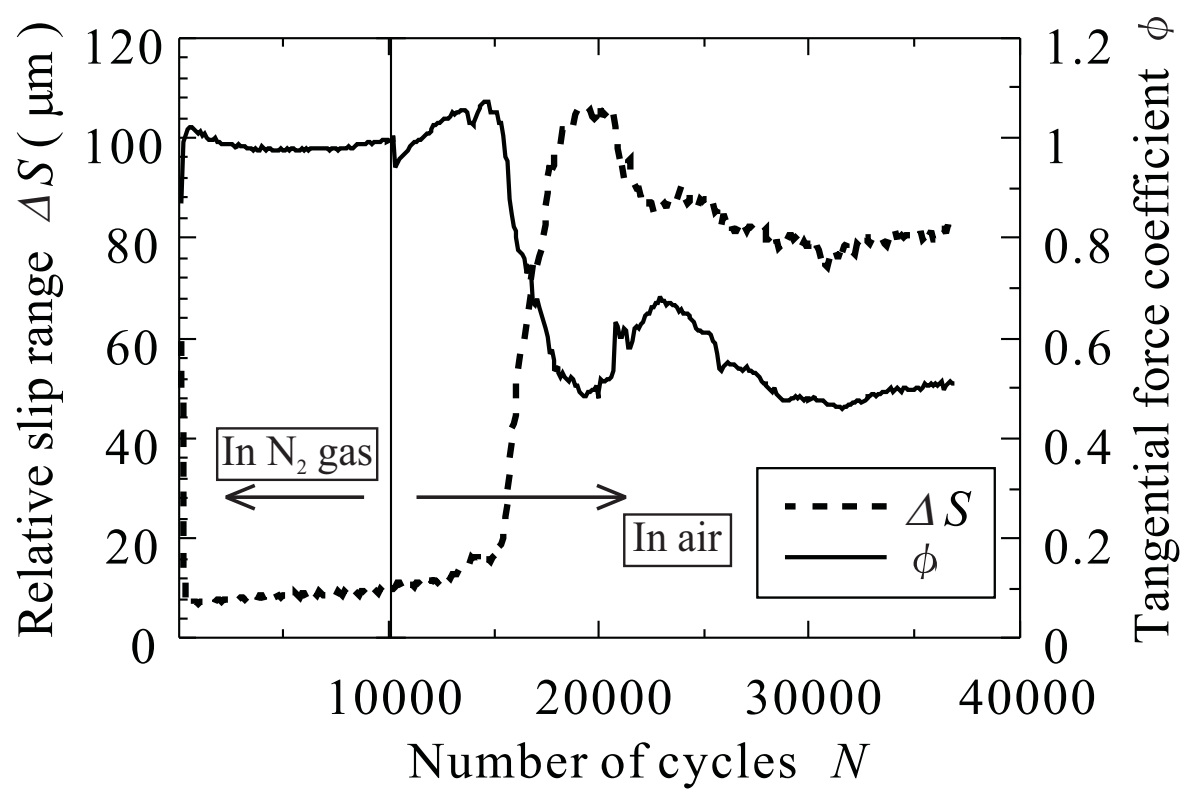


Fig.3-3 Change of tangential force coefficient and relative slip range with the change of environment

## 3.2 水素吸蔵量の分析

### 3.2.1 分析方法と分析装置

水素ガス環境中でのフレッティング摩耗試験中に水素が材料に吸蔵され得るかどうかを材料中の水素量を実験前後で分析することにより検討した．分析は接触片の摩耗面を含む立方体の部分 ( $3 \times 3 \times 3\text{mm}$ ) を水素ガス環境中試験直後に切断し、摩耗粉が付着したまま分析を行った．

水素量の測定には昇温脱離質量分析装置 (TDS : Thermal desorption spectroscopy) を用いた．昇温のコントロールは分析試料を載せる石英ステージに埋め込まれた熱電対によって測定した温度により行った．これにより、試料の実際の温度とステージの温度には差が生じるが、測定の際、熱電対を試料の上面に接触させて、その昇温状態をモニタした．装置の概要は以下の通りである．

- ・メインチャンバー内圧力  $-5 \times 10^{-7}(\text{Pa})$  以下
- ・ロードロックチャンバー内圧力  $-1.0 \times 10^{-4}(\text{Pa})$  以下
- ・測定可能分子量 1 ~ 200

脱離した分子の分析のために、容器内は高真空に保たれており、メインチャンバー内で赤外線により試験片を加熱することによって、試験片から脱離した分子の質量数を四極質量分析計 (Qmas : Quadrupole mass analyze sensor) によって測定する．

四重極質量分析計は4本の平行に置かれた円柱状の電極からなり、それぞれに正負の直流と高周波交流電圧をかけ電場を生じさせる．その中をイオン群が通過するとイオンは振動する．電圧、周波数に応じある質量電荷比を持ったイオンのみ安定な振動をして電極内を通過し、それ以外のイオン群は振動が大きくなり電極に衝突し検出器に到達することができなくなる．したがって、四重

極のロッドに与える高周波電位と直流電位を重ね合わせた電位を制御することによって必要なイオンのみ検出できる<sup>5)</sup>。

### 3.2.2 分析結果及び考察

分析結果を Fig. 3-4 に示す。横軸は試料の下面温度、縦軸は水素の検出強度である。図に実線で示すように溶体化処理のステンレス鋼にはもともと水素が吸蔵されている。水素中のフレットング摩耗試験後の分析試料には破線で示すようにもともと含まれていた水素とは異なる温度範囲に水素のピークが検出された。これにより、フレットング摩耗試験中に材料に水素が吸蔵されると考えられる。ここで見られた低温側のピークはその温度範囲から転位にトラップされている水素<sup>6)</sup>と考えられる。一方で、低圧の水素中に放置しただけのステンレス鋼には水素が吸蔵されないことが示されており<sup>3)</sup>、フレットング摩耗により接触面に活性の高い新生面が生じることが原因と考えられる。

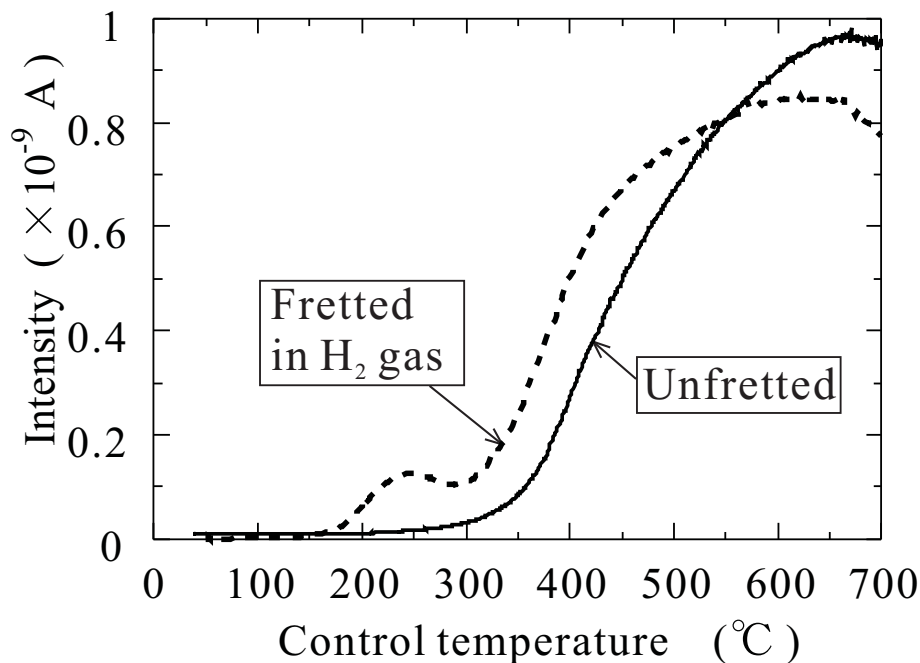


Fig.3-4 Hydrogen desorption profile of contact pad fretted in H<sub>2</sub> gas environment

また，吸蔵水素はステンレスのねじり疲労限度を下げる<sup>7)</sup>ことや水素を吸蔵させた高強度材では， $\Delta K_{th}$  が低下すると共に疲労き裂進展速度を加速させる<sup>8)</sup>ことが報告されており，フレットィング疲労試験においてもフレットィング面に吸蔵された水素が疲労限度を下げた可能性があると考えられる．

## 4 章 結言

フレッティングにおける摩擦・摩耗挙動に及ぼす水素環境の影響を明らかにするためにフレッティング摩耗試験を行った．結果を要約して以下に示す．

- (1) 窒素ガス，水素ガス環境中での摩擦係数は大気中での摩擦係数より大きい傾向を示した．
- (2) 水素ガス環境中で試験を行った接触片に水素が吸蔵されている結果が得られた．

## 付録

### 付録 A 面圧付与治具の較正

面圧付与治具の較正試験の様子を Fig. A-1 に示す．脚立の両脇に図のように剛性の大きな棒を渡し，両端に針金を取り付けた面圧リングを吊るした．吊るされた面圧リングを Fig. A-2 に示す．そして，おもりを 0kg から 25kg まで載せ，そのときひずみゲージが示した値を記録していった．この試験は数回行い，各較正曲線の平均値を比例係数  $k$  とした．荷重試験の結果を Fig. A-3 に示す．面圧リングにおもりを吊ると，ひずみゲージは圧縮されるので，Fig. A-3 では右下がりの線になっている．較正試験の結果，接触荷重  $N$  とひずみ  $\varepsilon$  の関係は次のようになった．

$$N \text{ (kgf)} = -0.07558 \times \varepsilon \text{ (}\mu\text{strain)} \quad (\text{A-1})$$

接触面積を  $A_s$  とすると，接触面圧  $P_c$  は，

$$P_c \text{ (MPa)} = \frac{N \text{ (kgf)}}{A_s \text{ (mm}^2\text{)}} \times 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (\text{A-2})$$

で求められる．

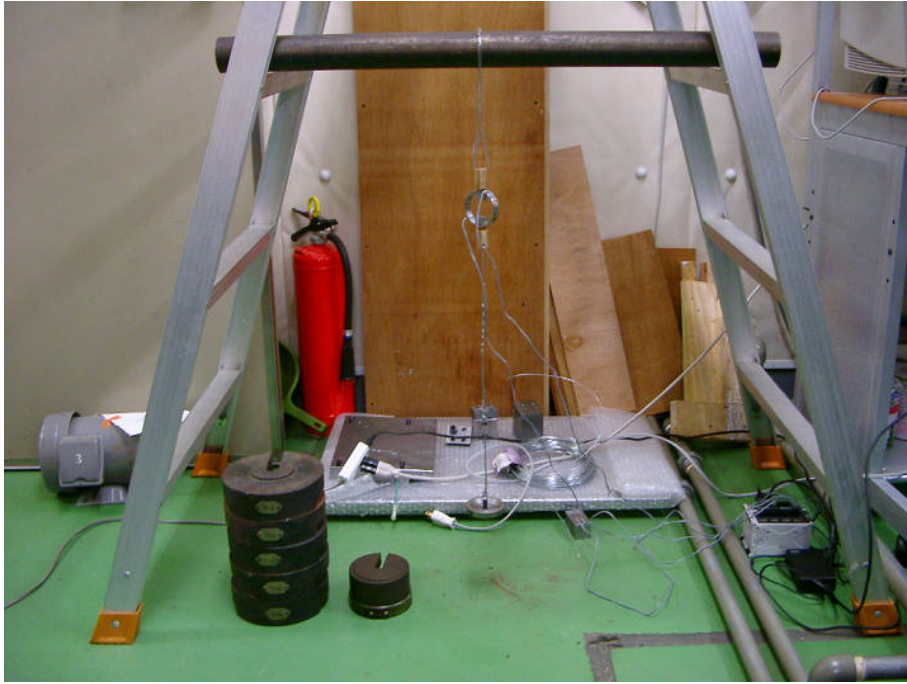


Fig.A-1 Appearance of the load test



Fig.A-2 Appearance of the load test



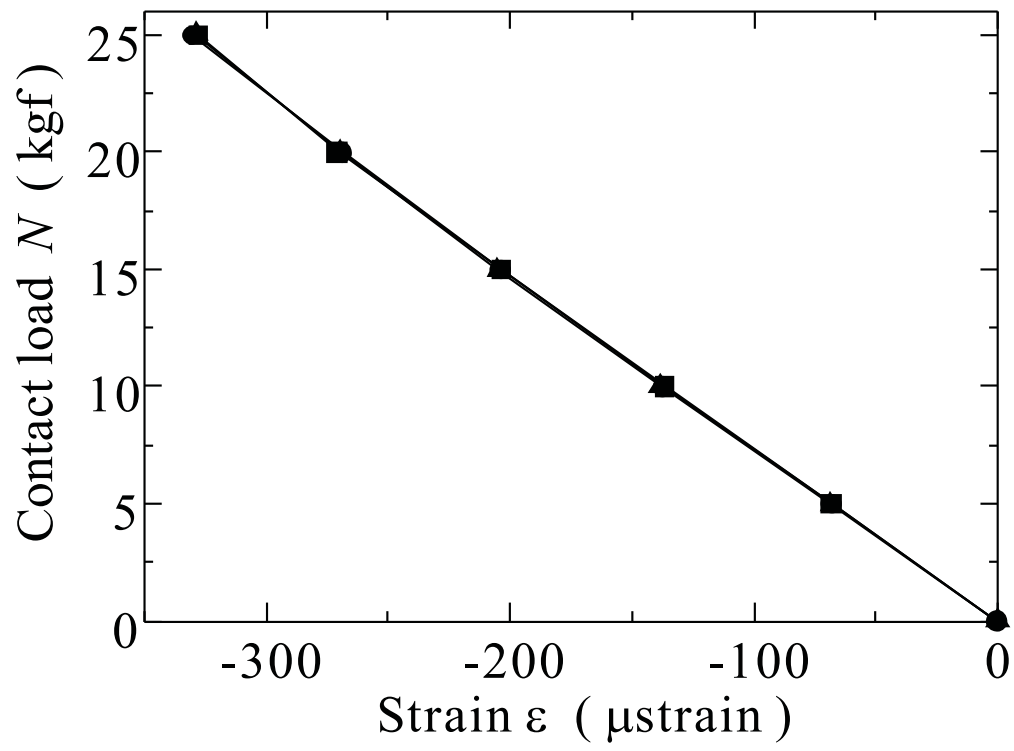


Fig.A-3 Calibration test result of the ring spring

## 付録 B 微小変位計較正

微小変位計の較正試験の様子を Fig. B-1 に示す．較正試験は，定盤の上に x-y ステージと固定ブロックを取り付け，さらに x-y ステージの上に Fig. B-1 のようにブロックを取り付けた．両ブロックにはそれぞれ深さ 0.5mm のノッチが入れており，その間に微小変位計が取り付けられている．ステージを移動させることにより，微小変位計に貼られたひずみゲージに変位量に比例したひずみが生じるので，その値を読み取ることにより，較正試験を行った．変位量については，ダイヤルゲージを x-y ステージの可動部に押し当てることにより測定した．

方法としては，x-y ステージを動かし，ダイヤルゲージが 10 $\mu$ m 変位したところで，ひずみゲージの値を記録し，同様に基準点 (0 $\mu$ m) より 0  $\rightarrow$  100 , 100  $\rightarrow$  -100 , -100  $\rightarrow$  0 $\mu$ m の間で記録した．試験は 4 回行った．その較正試験結果の一部をグラフを Fig. B-2 に示す．

この較正試験から次のような関係式が得られ，プログラムに組み込み本試験で用いた．

$$\text{Displacement} = 0.250228 \times \text{Strain} \quad (\text{B-1})$$

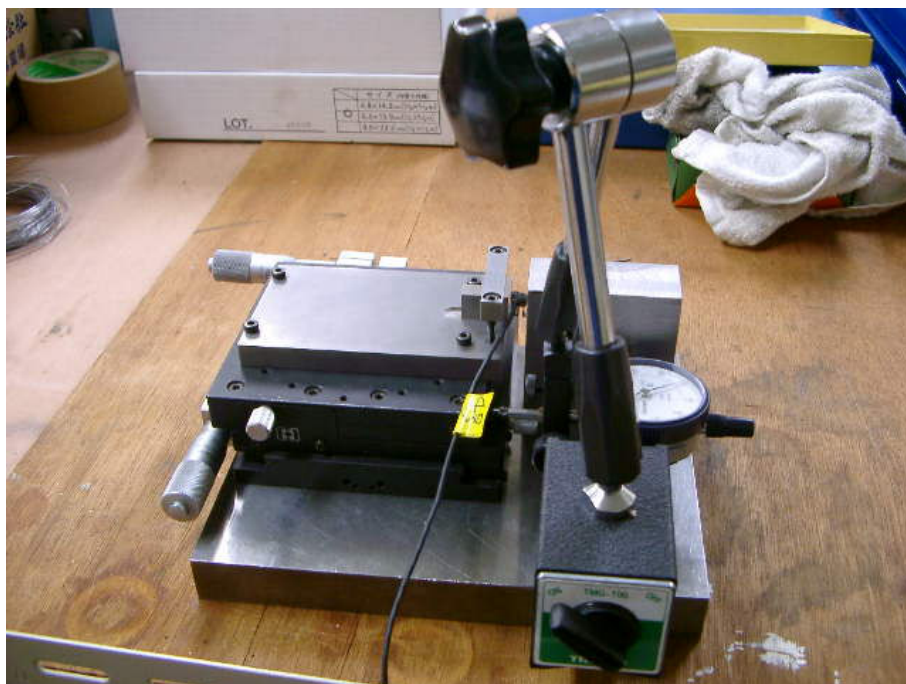


Fig.B-1 Appearance of the displacement sencer calibration device

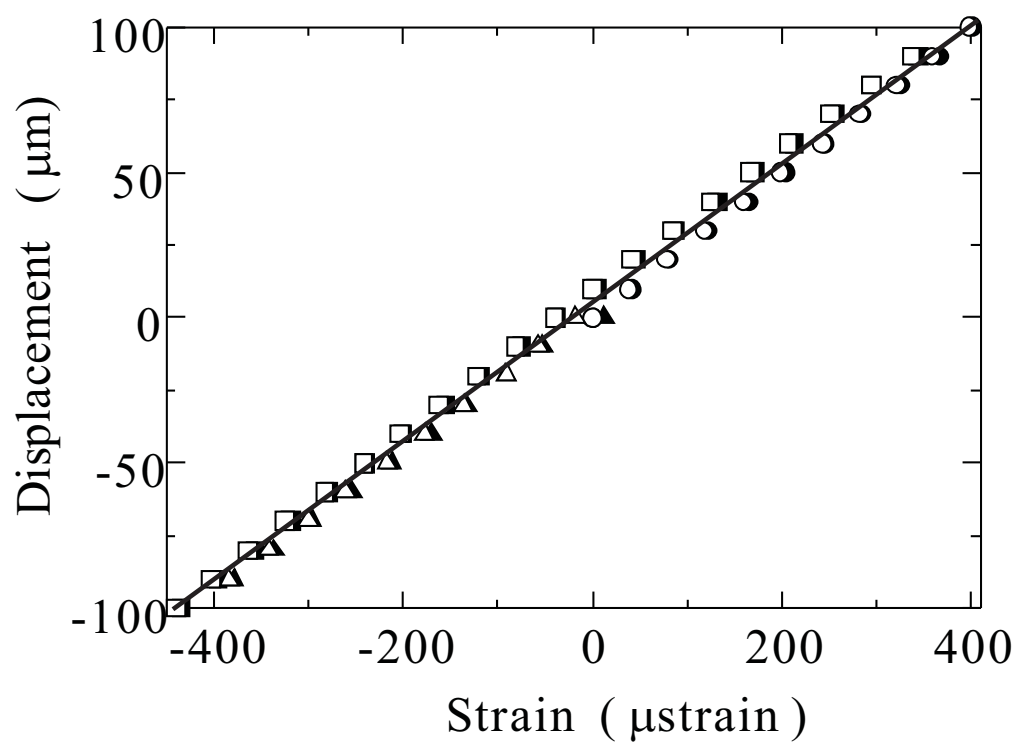


Fig.B-2 Calibration test result of the displacement sensor

## 付録 C 高真空装置

本研究での窒素ガス環境，水素ガス環境中における実験にはアルバック機工株式会社製の小型高真空排気装置を用いた．この外観を Fig. C-1 に，諸元を Table C-1 に示す．また，小型高真空装置は油回転真空ポンプと油拡散ポンプからなり，それぞれ諸元を Table C-2，Table C-3 に示す．

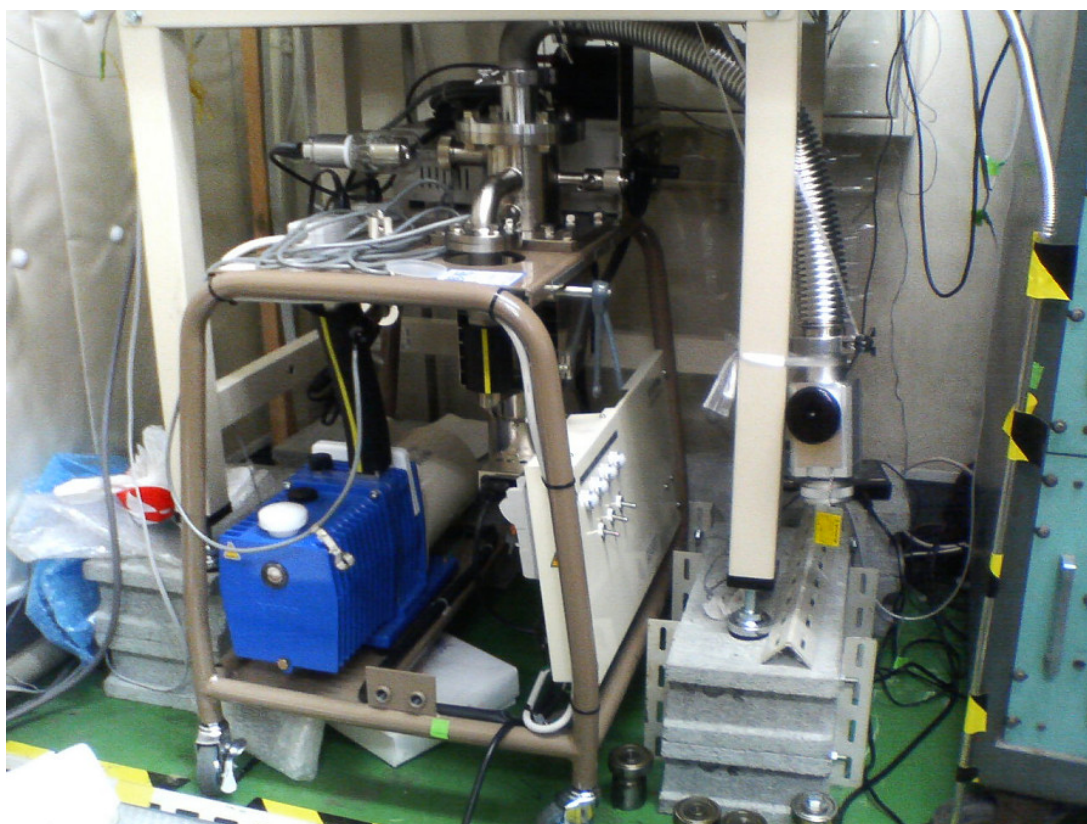


Fig.C-1 Appearance of high vacuum pump

Table C-1 Items of the high vacuum pump

到達圧力	$10^{-4}$ Pa
排気時間	$10^{-4}$ Pa まで 10 分以内
所要電気量	100V 単相 1.35 kVA
外觀寸法	幅 530mm × 奥行 480mm × 高 735mm
質量	約 55 kg (標準型)
作動油	SMR-100 0.8L

Table C-2 Items of the rotary pump

型式	G - 100D
排気速度	100 L/min
到達圧力	$6.7 \times 10^{-2}$ Pa
所要電力	0.4 kW
作動油	SMR-100 0.8L

Table C-3 Items of the Diffusion pump

型式	DPF - 200
排気速度	200 L/sec
到達圧力	$10^{-5}$ Pa
吸排気口	VG65 相当, $\phi 27$
所要電力	0.45 kW
作動油	SX 0.07L

## 参考文献

- (1) 最新の水素技術 日本工業出版
- (2) [http : //www.env.go.jp](http://www.env.go.jp)
- (3) 久保田・納山・笛田・栄・近藤，フレットティング疲労に及ぼす水素ガス雰囲気の影響，日本材料学会第 27 回疲労シンポジウム講演論文集，218，p.169-172，2004
- (4) フレットティング摩耗と疲労要覧 フレットティング摩耗と疲労要覧編集委員会，研良社，1998
- (5) 長友崇，カソードチャージによる金属材料の水素吸収挙動 九州大学工学部機械航空工学科卒業研究論文，2003
- (6) 高井・本間・井筒・南雲，日本金属学会誌，**60**, 1155-1162 (1996)
- (7) 大熊・久保田・栄・近藤，ステンレス鋼のねじり疲労に及ぼす水素チャージの影響，九州学生会第 36 回学生員卒業研究発表講演会予稿論文，長崎，2005
- (8) 柳原・大柳・久保田・栄・近藤，高強度鋼の疲労き裂進展に及ぼす水素と応力比の影響，日本材料学会第 27 回疲労シンポジウム講演論文集，120，p.117-120，2004

## 謝辞

本研究を勧めるにあたり，多くの方の多大な御指導，御助言を頂きました．ここに深い感謝の意を表します．

本研究室の近藤良之教授には研究を進める際に多くの御助言を頂きました．輪講・中間発表でも細やかなご指導・ご指導を頂きました．また試験機に不具合があった際は実験室までお越しいただき，一緒に試験機を調べて頂きました．本当に感謝しております．

本研究室の栄中助教授には，輪講，中間発表などにおいて，御指摘，御指導を頂きました．また，日本語コミュニケーションの授業を通して，文章の組み立てから，論述方法まで細やかな御指導を頂きました．

本研究室の久保田祐信助手には試験機設計から加工，実験，観察，論文の作成に至るまで，細やかな御指導を頂きました．また，試験機を制御するプログラムを開発して頂くと共に改良もして頂き，真に感謝しております．

嶋田勝也技官には試験機部品の製作にあたり，親切なご指導頂きました．また，材料棟の職員の方々にも工作機械や計測装置の使用法など，細かい御指導を頂きました．

本研究室の先輩方，同輩方には私の研究に関して，ご協力，助言を頂きました．

本研究室で学んだ1年間は，自らの技術者としての基礎となるかけがえのないものとなりました．改めて感謝いたします．ありがとうございました．