

# 論文内容の要旨

## 論文題目 摺動型制御機器における 摩擦力の測定とその応用

氏名 和田 将典

### 1. 緒言

本論文は、固体における摩擦を、物理現象の差異から、内部摩擦と外部摩擦の2つに大別し、外部摩擦については、利用方法の違いから、さらに、弱い摩擦力の場合と強い摩擦力の場合の2つに区別し、計3つの事例を扱っている。それぞれの事例において、摩擦が性能の支配要因となる機器を具体的に取り上げ、その摩擦力の測定と応用について述べている。具体的には、内部摩擦の例として、摩擦が測定分解能の主要因となる材料の構造減衰係数測定を、弱い外部摩擦の例としては、摩擦が位置決め精度の主要因となる光ファイバ自動組立を、強い外部摩擦の例としては、摩擦が密封能力の主要因となる自動調節弁グランドパッキン側圧測定を取り上げている。そして、最終的に、摩擦測定における共通見解をまとめている。

### 2. 材料の構造減衰係数測定

#### 2-1. 研究の目的

構造減衰係数は、材料の内部摩擦の大きさに依存しており、材料の減衰振動波形から減衰比を測定することで得ることができる。すでに、先行研究により、標準大試料を吊り下げ方式で支持し、加振方法に打撃方法を、振動測定にマイクロホンを用いた測定法による測定システムを開発し、空気減衰や支持部減衰の影響を抑えた高精度な測定が可能であることが報告されている。しかし、減衰比が小さい材料を測定する場合、加振による試料の揺れが測定波形に影響し測定精度が低下するという問題が生じていた。そこで、安定的な精密測定を可能にするための、試料の揺れを考慮した信号処理方法の構築を目的とする。

#### 2-2. 測定システムの概要

構造減衰係数を精密に測定するためには、空気抵抗損失、支持部損失をいかに低減するかが重要である。また、精度向上のためには、振動検出に非接触センサを用いる必要がある。これらを考慮して、マイクロホンを検出センサに用いた測定システムを用いている(図1)。

#### 2-3. 揺れを考慮した信号処理方法の提案

うねりを含んだ測定波形から高い精度で減衰比を求めるため、信号処理の方式として、試料の部材振動と加振による揺れを考慮した音圧モデルの理論式(1)をたて、測定波形に非線形逐次型最小二乗法

により，カーブフィットさせる方法を考案した．音圧は，音源となる物体の振動加速度に比例する．なお，マイクロホンの出力を  $V$ ，試料の揺れ幅を  $A$ ，試料の固有角振動数を  $\omega_0$ ，減衰比を  $\alpha$ ，試料の揺れ角振動数を  $\omega_1$ ，試料・マイクロホン間距離  $d$  と試料の揺れ振幅  $d_1$  の比  $d_1/d$  を  $m$ ，本測定における音圧が音源からの距離の  $d$  乗に反比例するものと仮定している．

$$V = A \cdot \{1 + m \sin(\omega_1 t + \lambda)\}^{-\alpha} \cdot e^{-\zeta \omega_0 t} \sin \omega_0 t \quad (1)$$

## 2-4. 揺れを考慮した信号処理方法の誤差評価

揺れの大きさの影響については，少なくとも，マイクロホンと試料間の距離によって規格化された揺れ振幅が 0.5 以下のときは，試料の揺れの大きさに影響されることはなく，減衰比が測定できることが示された．また，試料をつるす糸の長さについては，少なくとも，30mm から 100mm の間においては，その長さに関係なく，減衰比が測定できることが示された．そして，打撃位置の影響については，中央から 10mm，つまり，試料の幅長の 10 分の 1 以内ならば，高い精度の測定ができることが示された．

最終的に，減衰比の大きさの影響については，既知減衰波形での実験の結果，少なくとも，減衰比が  $1.0 \times 10^{-5}$  以上では誤差 2% 以内で測定可能であることが示された．

## 2-5. 測定実験

前節までで，その有効性を確認することができた揺れを考慮した信号処理方法を用いて，アルミニウム，真鍮，銅，鉄，ガラス，木材を試料として減衰比の測定を行った（表 1）．

## 2-6. まとめ

つり下げ試料の部材振動と揺れの両者を考慮した音圧モデルを考案し，測定波形にカーブフィットさせる信号処理方法を開発できた．そして，減衰比の大小に関わらず，材料の構造減衰係数を精密に測定する方法として，信号処理に，加振による試料の揺れを考慮した音圧モデルによるカーブフィット法が有効であることを示した．

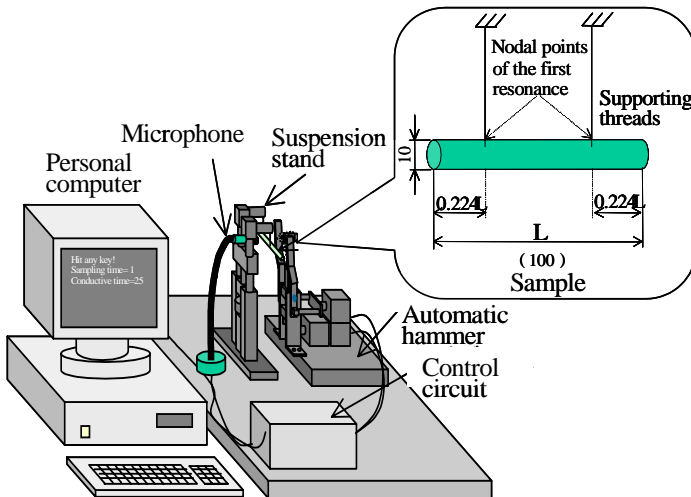


図 1 構造減衰係数測定システム

表 1 各種材料の減衰比

	固有角振動数(Hz)	カーブフィットによる減衰比
アルミニウム	2555	$1.97 \times 10^{-5}$
真鍮	1808	$1.19 \times 10^{-5}$
銅	1137	$2.51 \times 10^{-4}$
鉄	1555	$6.59 \times 10^{-5}$
ガラス	4997	$5.00 \times 10^{-4}$
木材	4463	$3.44 \times 10^{-3}$

## 3. 光ファイバアレイ組立

### 3-1. 研究の目的

本研究では，多芯光ファイバアレイの量産に対応した組立の自動化，高速化，高精度化，低コスト化を追求した自動組立装置の開発を目的とする．実際の光ファイバの挙動は複雑にも考えられるが，これをピンジョイントモデルに置き換えることで，梁状弾性体が剛性平面に摺動する場合の摩擦力と押し付け力との関係式を作成し，それを利用した摩擦係数の測定法を開発する．また，自動組立は，

画像処理を用いて行う。

### 3-2. ピンジョイントモデルによる関係式の作成

実際の挿入状態では直接計測するのが難しい摩擦抵抗力を変位などから得ることができるピンジョイントモデルの構築をした(図2)。そして、これより幾何的にファイバの滑り出し条件式を求めた(2)。なお、摩擦面傾斜角を $\theta$ 、ファイバ挿入角を $\alpha$ 、ファイバの変形面がV溝斜面に垂直な面となす角を $\beta$ 、傾斜面上のファイバ射影とV溝方向のなす角を $\varphi'$ としている。

$$\tan \varphi' \frac{\sin \beta}{\cos \alpha} \geq \mu_s \quad (2)$$

### 3-3. 摩擦係数測定

上記のモデルを利用して、摩擦係数測定装置を開発し、実験を行った結果、計測される最大静止摩擦係数はどのような押し付け圧状態でも一定の値が得られ、ファイバがV溝に挿入されるかどうかは、ファイバとV溝の相対的幾何的關係により決まるということが分かった。

### 3-4. 画像処理を用いた制御による自動組立

実際に組立に用いる12芯テープファイバを用いて、位置決め実験を行い、許容相対ズレ量が $\pm 20 \mu\text{m}$ 程度であることが確認した。 $\pm 20 \mu\text{m}$ 程度の横ズレは、ファイバのくせや取り付け誤差により発生しうる。一方、画素数 $640 \times 480$ に対し撮像範囲が $2.3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 程度であるので、X軸方向の測定分解能は $7\mu\text{m}$ /画素程度となる。よって、CCDカメラによる画像計測を行い、位置決め精度が1~2画素分以内になるようにアクチュエータを駆動させて位置補正を行った。画像処理を用いた制御の過程を図3に示す。

### 3-5. まとめ

梁状弾性体が剛性平面に摺動する場合の摩擦力と押し付け力との関係式を作成し、それを利用した摩擦係数の測定法を開発できた。また、画像処理を用いた自動機組立装置を開発し、高速での自動組立を実現した。さらに、ファイバとV溝の関係を明らかにできたことから、より製造コストの低いV溝の設計指針を示すことができた。

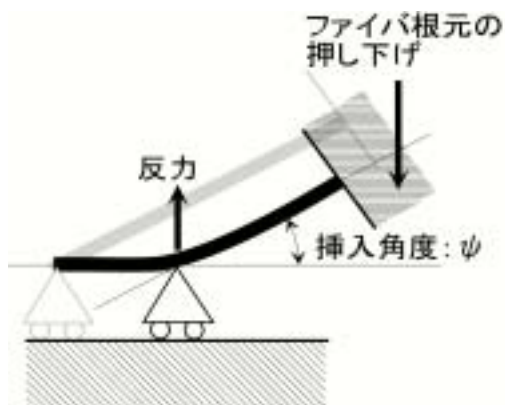


図2 ピンジョイントモデル

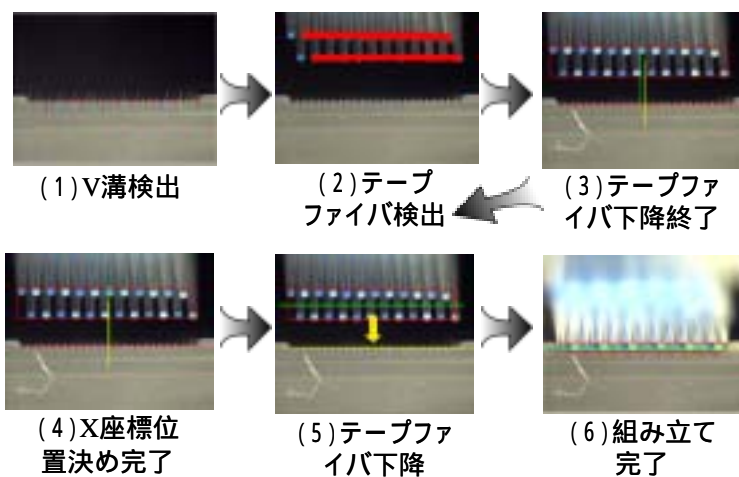


図3 画像処理による自動組立

## 4. グランドパッキンの圧力測定

### 4-1. 研究の目的

自動調節弁のグランドパッキン圧力は、グランドパッキンの応力緩和により、締め付け直後から低下してゆく。そのため、実際の調節弁の使用にあたっては、何度も締め付けを繰り返す"増し締め"が行われる。こうした増し締めと、漏洩を防ぐ上で重要な半径方向の圧力回復との関係は必ずしも明らかではなく、漏洩のメカニズムの解明には、パッキンの軸方向圧力と半径方向圧力の間を明らかにする必要がある。すなわち、グランド

パッキンの磨耗・摩擦状況を把握するため、従来測定困難とされてきたグランドパッキン圧力分布の動的測定をすることを旨とする。以下では、この半径方向圧力、すなわちパッキンと弁軸およびボンネットとの接触面応力の垂直成分を側圧と呼ぶ。

#### 4-2. グリスを介した側圧測定方法とその評価

グランドパッキンの新たな側圧測定方法として、流体圧力測定用センサを用い、グリスを介して側圧を測定するという方法を提案した。提案した新たなグランドパッキン側圧測定方法を図4に示す。ボンネット側面部分にセンサ用の穴を明け、グリスを介して、側圧を測定する。用いたセンサは、流体用の半導体圧力トランスデューサである。グリスは時間とともに徐々に漏洩していつてしまう。これによる測定時間の定量的な有効性の評価を、類似の構造をしているスラスト軸受モデルの理論式を用いて行った。また、歪ゲージを用いて測定した値と比較することで、測定値の定量的な妥当性を証明した。

#### 4-3. 実機モデルにおける側圧測定

有効性が確認された測定システムを用い、実機モデルにおいて積層されたパッキン 10 個の側圧分布を測定した(図5)。結果、弁軸のしゅう動により側圧が変動すること、締め付け側と固定端側とで圧力変動の位相が反転することを測定することができた。また、側圧の変動をより正確に把握するため、変動の平均値を0とし、そこからの増減を図示した。結果、積層パッキンの上下部の側圧変動が激しく、この部分のパッキンについては、シール機能の有効性に疑問が呈せられることが分かった。

#### 4-4. まとめ

この測定方法を適用することにより、積層パッキンの弁軸駆動時における側圧の挙動が測定可能となった。本測定を利用すれば、今後、パッキンの挙動を解明し、理想的なパッキンの材質、形状、積層の組み合わせ等を開発するための基礎データの取得することができる。

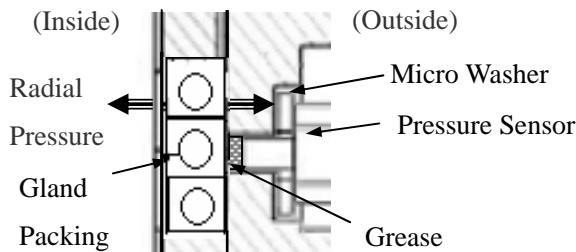


図4 グリスを介した側圧測定方法

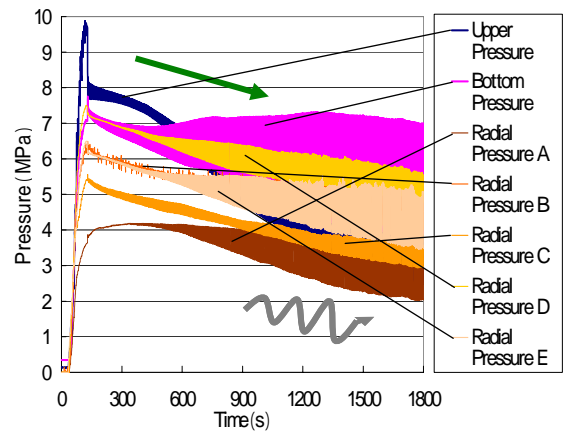


図5 摺動時の圧力分布の変化

### 5. 結言

それぞれの事例における特徴は、試料の部材振動と打撃による揺れの双方を考慮した音圧モデルの理論式を作成したこと、光ファイバの挙動をピンジョイントモデルに置き換え梁状弾性体が剛性平面に摺動する場合の摩擦力と押し付け力との関係式を作成したこと、(スラスト軸受モデルにより妥当性の証明を行った)グリスを介した測定方法を考案したことである。これらから、摩擦力の測定においては、これを直接測定しようとすれば、界面条件に影響を与えてしまうことから、力学モデルによる変換を介させるなどの工夫をして間接測定を行うことが必要であるといえる。