

真空下での低温／高温環境に対応した摩擦試験機の提案

Proposal of Friction Tester Compatible with High/Low Temperature Under Vacuum

宮崎・山崎研究室

Miyazaki-Yamazaki Laboratory

萩原啓太

Keita Hagiwara

Tribology is one of the essential elements in mechanical design, but it is quite difficult to design the reliable tribology element especially in space. This is due to the changes in friction factors by the environmental change and the low repeatability of the dynamic behavior with friction. Therefore, we need to use the friction factors acquired by appropriate tests under required environment. This study investigates the cause of the dispersion of the friction factors for the establishment of reliable tribology elements in space, and proposes the design of a low cost and versatile test-equipment to judge the applicability of various tribology elements to for the space use.

1. 序論

1.1. 研究背景

機器において、摺動部が原因となった不具合が多い点は、宇宙機器においても例外ではなく、摺動部をなくするような非接触機構を用いる動きが盛んであるが、機械的剛性が低く、打ち上げ時の振動が避けられない宇宙機器にとっては短所となる。このため、軸受等のいわゆるトライボ要素は簡潔に可動部を構成できるため、小型軽量と高信頼性の両立が必須な宇宙機器にとって要となると考えられる^[1]。しかし、現在の技術では、高信頼性に応えることができていないため、この高信頼性を示すために摩擦係数の取りうる範囲を明確化する必要がある。

摩擦は、試験片形状とすべり形態によって多種多様な組み合わせが存在しているが基本的には点接触、線接触、面接触の3通りに分類されている。Fig.1に摩擦の形態を示す。



Fig.1 Classification of friction

1.2. 従来の課題

近年、宇宙活動は拡大・高度化し、それに伴いトライボロジーの課題も増加するが、その多くは十分な解決には至っていない。宇宙機器は、地上から軌道上に投入されるまでに、様々な環境にさらされ、その環境の変化により、摩擦係数が変化してしまう。そして、これらを解決するために、試験法の標準化等を目指した活動が行われてきたが、試験結果のバラつきと再現性の問題は解決されるには至っていない。その為、試験結果のバラつきと再現性に対する現実的な解決策は目的に応じた試験機を選定して利用する以外にはないと言われている。

つまり、あらかじめトライボロジー分野で予想される技術的な課題を抽出し、評価目的に応じて、その試験機に最適な試験法の標準化を図り明確な摩擦係数の数値を提示する事が必要

となっていると思われる。

1.3. 研究目的

実際の機械システムでは様々な機械要素が複雑に関与している。特定の摺動部分に着目したトライボロジーの特性を把握するためには、特定の摺動部分での、使用環境、使用目的にあった条件を模擬した摩擦試験を行う必要がある。それを行わなかった場合、製品製作の終盤に不具合が生じ、設計をやり直す可能性がある。それを防ぐために、事前に使用環境、使用目的にあった条件を洗い出して、その使用環境、使用目的を模擬して、摩擦係数の測定を行う必要がある。

このことを踏まえ、本研究は、地上にある様々な摩擦・潤滑関連の製品や、新しいアイデアに対し、それが宇宙機器に適用可能であるかを、安価かつ迅速に判断し明確な動摩擦係数の数値を提示できるような試験機を提案することを目的とする。

1.4. 研究の意義

トライボ設計は、多くの場合システムの機能設計がある程度出来上がった時点からのスタートになるので、摺動面を構成する接触して相対運動をする二つの固体と、それらを取り巻く環境条件は決定しているはずである^[3]。

そこで、本研究により、試験機が小型化され、実際に使用したい環境が再現され、目的に応じた試験方法が可能となり、かつ、安価で迅速に明確な動摩擦係数の数値を得ることができるようになることで、宇宙環境に適したトライボ要素の研究開発が促進されると考えられる。

2. 摩擦係数の測定方法

2.1. はじめに

本項では、宇宙環境を模擬できるよう、温度条件を-50~50℃の範囲で、真空度を大気圧から9.3[Pa]の範囲で変化させることのできる摩擦試験装置を提案する。具体的には、恒温恒湿試験機を用いて温度を調節し、その中に真空槽を入れることによって、様々な温度・気圧条件において動摩擦係数を計測できる測定装置および方法を提案していく。

2.2. 摩擦試験機の原理

試験機の全体図を Fig.2 に、内部を Fig.3 に示す。

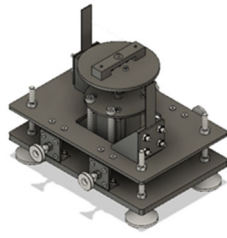


Fig.2 Friction tester

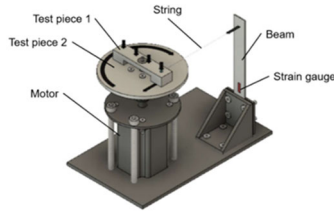


Fig.3 Principle of testing machine

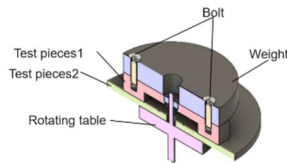


Fig.4 Load method

この試験機では、試験片 1 に一定の荷重を加えた状態で試験片 1 を試験片 2 の回転台に設置し、試験を行う。この状態でモーターを用いて回転台を回転させる事で、試験片 1 と試験片 2 の間に生じる摩擦力により、試験片 1 が回転方向に引っ張られる。その摩擦力の方向と逆の方向に梁がくるように設置し、索引用糸でつなぐ。そうすると、この動摩擦力が索引用糸を経由して、梁に伝わり歪むことにより、梁の根元に接着されているひずみゲージが歪の値をとることができる。その歪の値を用いて梁にかかる荷重を算出し、それを試験片 1 にかけられた荷重の値で割ることで動摩擦係数を算出する。

試験片の形状は、試験片による原因となる因子を極力排除するためには、試験片は一体加工するのが望ましい。その時、試験片 2 を直径 120mm の円盤を使用したとき、接触面を正方形にすると、最大 1 辺 40mm となる。荷重は、Fig.4 に示したように、試験片上に製作した円筒の錘を設置し、試験片にネジで固定する事ができる。これは、接触面積や必要な荷重を試験実施者が目的に応じて選定して、使用するためである。

本旨では、梁 1・梁 2 の根元の表と裏に貼って行う。使用用途としては、第一に、2 ゲージ法を用いるものである。これは試験中に使用し、引張ひずみや圧縮ひずみの影響を受けずに、曲げひずみのみの測定を行えるようにしている。第二に、1 ゲージ法を用いるものである。これは試験前に使用し、曲げひずみを除去し引張ひずみや圧縮ひずみのみの計測を行うものである。索引用糸が梁に対して垂直になってほしいのだが、索引用糸が斜めになっていたとき、摩擦力が分散して、梁が上下方向に引っ張られる現象が起きる。それを確認するために、

1 ゲージ法を用いて垂直になっているかを確認する。

これらを踏まえて、Fig.2 の様に取り付けて試験を行う。Fig.2 のように梁を二つ用いるのは、2 本の索引用糸が試験片 1 が自由に回転しないように抑える役割も担っている。

2.3. 動摩擦係数の導出

回転台が回転した時の、試験片 1 と試験片 2 の間に生じる摩擦力と梁 1・梁 2 に生じる荷重をモデル化させた図を Fig.4 に示す。

試験片 1 にかけられた荷重の値を $M[\text{kg}]$ とし、梁 1・梁 2 の幅、厚さ、長さ、ヤング率を $b[\text{m}]$, $h[\text{m}]$, $L[\text{m}]$, $E[-]$ とする。試験片 1 と試験片 2 の間に生じる動摩擦力を $F_{f1}[\text{N}]$, $F_{f2}[\text{N}]$ とし、梁 1 から得られる歪を $\varepsilon_1[\text{ST}]$ 、梁 1 に生じる力を $F_1[\text{N}]$ 、梁 2 で得られる歪を $\varepsilon_2[\text{ST}]$ 、梁 2 に生じる力を $F_2[\text{N}]$ とする。

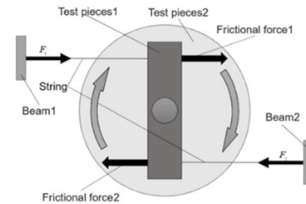


Fig.4 Power model

試験機では、曲げ歪の値を得るためには、2 ゲージ法を用いているため、梁のひずみゲージ接着位置の表面応力 $\sigma_1[\text{Pa}]$, $\sigma_2[\text{Pa}]$ は、

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\varepsilon_1 E}{2} \\ \sigma_2 &= \frac{\varepsilon_2 E}{2}\end{aligned}\quad (1)$$

となり、梁にかかる力 $F_1[\text{N}]$, $F_2[\text{N}]$ は、

$$\begin{aligned}F_1 &= \frac{\varepsilon_1 b h^2 E}{12 L} \\ F_2 &= \frac{\varepsilon_2 b h^2 E}{12 L}\end{aligned}\quad (2)$$

梁 1・梁 2 に生じる力と試験片 1 と試験片 2 の間に生じる摩擦力の関係は、

$$\begin{aligned}F_1 &= F_{f1} \\ F_2 &= F_{f2}\end{aligned}\quad (3)$$

であり、試験片 1 と試験片 2 の間に生じる動摩擦力 $\mu Mg[\text{N}]$ は、

$$\mu Mg = F_{f1} + F_{f2}\quad (4)$$

となり、(2)(4)式より、動摩擦係数 $\mu Mg[\text{N}]$ は、

$$\mu Mg = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \frac{b h^2 E}{12 L}\quad (5)$$

と表すことができる。よって、動摩擦係数 μ は、

$$\mu = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \frac{b h^2 E}{12 L M g}\quad (6)$$

となり、試験片 1 と試験片 2 の間に生じる動摩擦係数の値を求めることができる。

2.4. 試験機器

今回用いる、環境試験機（SH-661）の外観を Fig.5 に、諸元を Table.1 に示し^[4]、真空槽のモデルを Fig.6 に、仕様を Table.2 に示す。摩擦試験機のモデルは 2.2 節の Fig.2 に示されている。そして、摩擦試験機の最大寸法を Table.3 を示す。



Fig.5 Environmental testing machine

Table1 Environmental testing machine specifications

温度制御範囲	-60~150[°C]
温湿度制御範囲	30~95[%rh]
温度変動幅	(-60~100°C) ±0. 3[°C] (+100. 1~150°C) ±0. 5[°C]
温度分布	(-60~100°C) ±0. 5[°C] (100. 1~150°C) ±0. 8[°C]

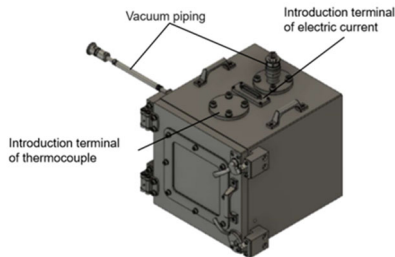


Fig.6 Vacuum chamber

Table 2 Vacuum chamber specifications

幅	240 [mm]
奥行き	285 [mm]
高さ	240 [mm]
到達圧力	9. 3 [Pa]

Table 3 Dimensions of friction tester

幅	240 [mm]
奥行き	275 [mm]
高さ	220 [mm]

2.5. 摩擦係数のバラつき

摩擦係数のバラつきや不安定さの問題は、解決されてない。トライボロジーに関する試験をする際には、極力バラつきを抑えるような試験をしなければならない。ここでは、一般的に言われている摩擦係数のばらつく原因を Table 4^[2] に示し、その原因に対して今回おこなった対策を Table .5 に示す。

Table 4 Factor to vary of the coefficient of friction

プロセス	No.	項目	原因となる因子
試験片の準備	C-1	素材	純度、組成、均一性、内部欠陥、試験履歴
	C-2	加工	形状精度、表面粗さ、加工変質層、加工ダメージ

試験方式 条件	C-3	表面処理	プロセス条件、 処理深さ、膜厚、酸化
	C-4	洗浄	清浄度、再汚染 洗浄液の滲み込み、
	C-5	取り付け	取り付け不良、 試験片の汚染、損傷
	C-6	雰囲気	湿度、雰囲気組成、 有機汚染物質、粉塵
	C-7	温度	温度測定法、測定点、 温度制御方式
	C-8	荷重	荷重負荷方式、 荷重制御方式
	C-9	速度	駆動方式、速度検出方法 速度制御方法
	C-10	潤滑	潤滑油性状、 供給方式、油量、 コンタミの混入
	C-11	摩擦測定	摩擦力測定方法、 固有振動数、剛性
	C-12	外乱	振動、電磁ノイズ、 漏電流
試験後の 計測	C-13	形状測定	測定方法、測定精度、 測定箇所
	C-14	データ数	測定回数

Table 5 Measures to the factor to vary of the coefficient of friction

C-1	試験を行うに連れて摩耗し、表面処理が変化するため、加工された試験片に対して回数を計測し、一番初めに得られたデータと比較する。
C-2	加工業者に表面粗さを支持する。
C-3	皮膜形成も温度などの環境で変化するため、ある環境条件での摩擦係数が知りたい場合は、環境を揃えて行う。
C-4	洗浄度等の評価は、今回はできないため、加工業者に洗浄方法を一律にってもらう。
C-5	加工洗浄後、試験面を触らずに維持し、試験を行う。
C-6	真空の時は、関係ないとする。真空でない時は、環境試験機により温湿度を制御する。
C-7	環境試験機を、用いて制御すると共に、熱電対を真空槽内に複数取り付け、確認する。
C-8	ボール・オン・ディスク方式、ピン・オン・ディスク方式では、文鎮方式を用いる。（天秤を用いて重さを計測し、必要な重さを乗せる。） ブロック・オン・リング方式では、ネジの締め付けによる軸力によって荷重をかける。
C-9	ステッピングモーターを使用し、制御する。
C-10	宇宙用を考えているため、本旨では考慮していない。
C-11	歪ゲージの 2 ゲージ法を用いる。
C-12	モーターの振動が発生するため、歪ゲージと離すと共に壁に固定する。
C-13	加工精度と組立精度、測定装置(歪ゲージ)の精度に依存する。摩擦力が大きい場合でも小さい場合でもフルスケールが同じもので測定する。
C-14	複数回測定を行い、平均と分散を求める。

2.6. 摩擦試験機の利点

今回、考えられている摩擦試験機の長所は汎用性の高さと小型でスペースを取らないことである。

目的に応じて、実機と対応させるためには汎用性の高い方が良い。そして、目的・環境を変化させたとしても、同一の試験機を用いて行った方が摩擦係数のバラつきが極力抑えることができる。

第二に、この摩擦試験機は、モーター軸より上のパーツを変更することにより、ボール・オン・ディスク方式（点接触）、ピン・オン・ディスク方式（面接触）、ブロック・オン・リング方式（線接触）が可能だと思われる。これらの図を、Fig.7-9 に示す。

第三に、一般的に販売されているボール・オン・ディスク方式やピン・オン・ディスク方式に関しては軸から接地面までの距離が固定となっている物が多いが、本旨の摩擦試験機は、試験片の形状を変えることで、軸から接地面までの距離や接地面の大きさを試験実施者の目的にあった試験方式に変更して試験を行うことができる。

最後に、提案した試験機は、真空槽に固定するためのアジャスターを最小にしたところ、試験機の最小寸法は、高さ：216mm、幅：230mm、奥行き：255mm とすることができ、アジャスターを左右の側面に用いて、試験機と固定しているため、取り外しが容易であり、摩擦試験機を他の環境試験機に移動しやすくなっているのも長所と言える。



Fig.7 Ball on disc

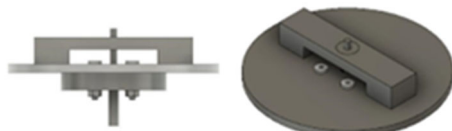


Fig.8 Pin-on disk

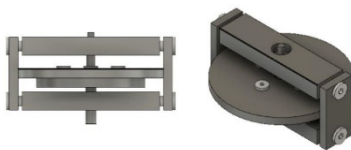


Fig.9 Block on ring

2.7. 評価方法

摩擦係数はバラつきを持つため、必ずこの値が真値であると示すことができない。その為、複数回測定をし、その試験条件下での標準化をしていく必要がある。

その為、以下の二つのデータを作り、試験ごとの摩擦係数の比較を行っていく。

- ① 得たデータに対して、度数分布図を用いて、グラフ化をする。
- ② 平均値、最小値、最大値、分散を数値化する。この数値を環境別に比較し、グラフ化する。

3. 今後の課題

摩擦試験の結果というのは、摩擦係数という数値として示され、その数値をもとに性能の評価が行われている。しかし、一つの使用目的に対して行われた試験での得られた数値には、汎用性がなく、あくまで、ある試験機の試験条件で使用するための数値となっている。つまり、今回の目的となっている宇宙機器に適用可能であるかを判断し、明確な動摩擦係数の数値を提示するためには、評価対象とする摩擦現象の使用条件を的確に抽出し、一つ一つの試験ごとにその使用条件の対策を行うと共に、その試験環境が同時に作用したときにも、どのような変化が生じるのかを実際には考慮しなければならない。

そして、今回提案した試験方法も、試験片の準備に限っては素材の製造・加工や表面仕上げ、洗浄など、試験実施者が直接かかわっていない箇所がある。そこでも、多くのバラつきの原因となる因子が関わっていて、試験実施者が直接排除する事ができない箇所である。解決策として、データ点数を増やし、統計的にデータを取ることで試験片の準備段階でのバラつきを緩和するという事も考えられるが、データ点数を増やすことは、どの程度増やせばいいのか明確に提示する事ができなく、限界があると考えられる。

その為、目的を達成させるためには、製作面では試験実施者が直接かかわっているところでの、バラつきの原因となる因子を明確に抽出し、原因を極力排除する。それと共に、どのような形態、目的でもカスタマイズできるような汎用性の高い摩擦試験機を製作する事が摩擦試験機を製作する上での課題となる。そして、試験方法では、どのような環境で使用するかをどのように明確に抽出するか考慮する必要がある。そして、抽出した環境を限りなく模擬した試験を行うことが、試験を実施しバラつきの少ない動摩擦係数の値を提示する上での課題となると考えている。

謝辞

本研究は文科省・宇宙航空科学技術推進委託費の補助を受けて行われました。

参考文献

- [1] 小原新吾, 宇宙空間のトライボロジーの展開, 似内昭夫, トライボロジー設計マニュアル, p689-693, 株式会社テクノシステム
- [2] 佐々木信也, トライボ試験, 似内昭夫, トライボロジー設計マニュアル, p131-138, 株式会社テクノシステム
- [3] 似内昭夫, MP設計・トライボ設計, 似内昭夫, トライボロジー設計マニュアル, p673-686, 株式会社テクノシステム
- [4] エスペック株式会社, ハンディガイド 小型環境試験機, p69-70, エスペック株式会社