

統計学的手法によるフレッティング下における摩耗量の評価

Evaluation of Wear Volume under Fretting by Statistical Method

海洋大・工（院）*小野 拓海 海洋大・工（正）地引 達弘 海洋大・工（正）藤野 俊和 海洋大・工（非）矢野 海人

Takumi Ono*, Tatsuhiro Jibiki*, Toshikazu Fujino*, Kaito Yano*

*Tokyo University of Marine Science and Technology

1. 緒言

フレッティング摩耗は、2個体が接触してしゅう動する箇所で発生する微小な表面損傷である¹⁾。フレッティング摩耗を防止する手段として、設計による改善、潤滑剤の選定導入および表面処理等の実施が挙げられる²⁾。従来、フレッティング摩耗に関する研究は数多くあるが、その中でMerhejらは、設計変更によりフレッティング摩耗を防止することを念頭に研究を進め、2個体が接触する領域の大きさがしゅう動する際に生じる摩擦係数と摩耗率に影響を及ぼすことを示した³⁾。

本研究では、軸受鋼製の平面と大きさの異なる軸受鋼球が荷重を受けて接触し微小振幅にてしゅう動した際、すなわちフレッティング下における摩耗量を解析した。そして、得られた摩耗量に対して、軸受鋼球の大きさ、負荷荷重およびしゅう動振幅に加え摩擦係数がどの程度影響を及ぼすのかについて、統計的手法の一つである主成分分析(Principal Component Analysis; PCA)を用いて評価したので報告する。

2. 試験方法

Figure 1は、フレッティング摩耗試験機を示す。荷重を負荷して上部ホルダに固定された軸受鋼製の平面試験片と下部にあるカンチレバーに固定された軸受鋼製の球試験片を接触させる。そして、モータによる回転運動を偏心機構とリンク機構を用いて、カンチレバーの水平運動に変換することにより、平面試験片に対して球試験片を往復しゅう動させる。この際、偏心機構にて球試験片が固定されたカンチレバーの微小振動振幅(これを、設定振幅と称する)を調整しているが、実際には平面試験片と球試験片が接触したことにより生じる両試験片の変形やしゅう動した際の摩擦などにより、この設定振幅下で往復しゅう動しない。そこで、平面試験片と球試験片の相対的な距離を渦電流式変位センサにて計測し、摩擦力を上部ホルダにある板バネに貼り付けたひずみゲージにより得る。Table1は、試験条件を示す。

3. 結果

Figure 2は、負荷荷重と鋼球の大きさを変化させた際の摩耗量と平均相対振幅の関係を示す。平均相対振幅は、前述の渦電流式変位センサにて得られた平面試験片と球試験片の相対距離を得たものである。ここで、ベクトル \vec{e}_1 を摩耗量が増加する方向にとり、それと直交する方向にベクトル \vec{e}_2 をとる。同図より、平均相対振幅が大きくなると、摩耗量はベクトル \vec{e}_1 の方向に大きくなる傾向を示す。負荷荷重と球試験片の大きさに注目すると、負荷荷重または球試験片が大きくなると、平均相対振幅に対する摩耗量の増加率は、より大きくなる。つまり、負荷荷重または球試験片が大きくなると、摩耗量はベクトル \vec{e}_2 の方向に大きくなる傾向を示す。

4. 考察

前章にて示したように、摩耗量は、球試験片の大きさ、負荷荷重および平均相対振幅の影響を受ける。負荷荷重または平均相対振幅が大きくなると、摩耗量は大きくなる。すなわち、摩耗量と平均相対振幅または負荷荷重の関係は、Archardの凝着摩耗理論に基づいていると考える。一方、摩耗量と球試験片の大きさの関係には幾何学的な相似則があると考える。

Table 1 Test condition ⁴⁾	
Plate test piece	SUJ2 (Ra 0.02 to 0.03, HV760)
Sphere test piece	SUJ2 (G40, $s\phi$ 5, $s\phi$ 9.525, $s\phi$ 15)
Contact configuration	Point Contact
Atmosphere	Dry, $24 \pm 3^\circ\text{C}$, RH $30 \pm 5\%$
Relative total amplitude	5 to 200
$\Delta re, \mu\text{m}$	
Frequency F, Hz	9.5
Normal load P, N	4.9, 9.8 and 19.6
Number of cycles, times	25000

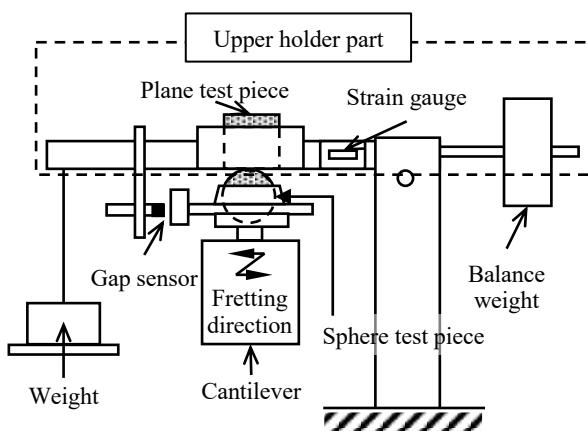


Fig. 1 Overview of fretting apparatuses⁴⁾

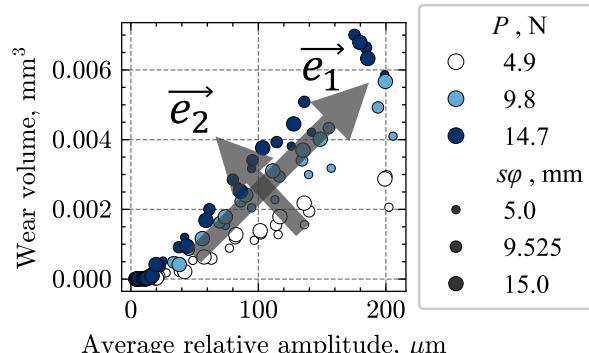


Fig. 2 Scatter plots of wear and mean relative amplitude, where the two vectors \vec{e}_1 and \vec{e}_2 indicate the direction of the main variance in the data.
(Partially modified from citation 4))

そこで、これらの影響度合いについて評価すべく主成分分析（以下、PCAと称する。）を行った。PCAとは、例えば、一個あたり n 個の因子を持つサンプルが m 個ある場合、 n 行 m 列の行列 A の分散共分散行列 S を用いて、以下の方程式を満たす固有値 λ とそれに属する固有ベクトル \vec{x} を求める線形変換に基づく分析方法である。

$$S\vec{x} = \lambda\vec{x} \quad (1)$$

ここで、第一主成分（1st Principal Component; PC1）は、最大の固有値に対応する固有ベクトルであり、続く第二（PC2）、第三主成分（PC3）等も固有値の大きい方から順に各固有値に対応する固有ベクトルである⁵⁾。

Figure 3(a)は、Fig. 2 に示す各種条件下における摩耗量の試験結果に対して PCA を実施した結果を示す。同図には青色の濃淡にて摩耗量の大きさも示す。同図において、本研究の目的変数である摩耗量が大きいほど、○印は右上に集まる。

Figure 3(b)は、球試験片の大きさ、負荷荷重、平均摩擦係数、設定振幅および平均相対振幅の各因子が、各主成分 PC1 と PC2 に及ぼす影響度合いを表す負荷ベクトルを示す。同図より、摩耗量の負荷ベクトルに着目すると、同ベクトルは、PC1 と PC2 いずれにも影響を及ぼす。次に負荷荷重と球試験片の大きさの負荷ベクトルに着目すると、これらのベクトルは PC2 に大きく影響を及ぼす。一方、設定振幅と各種条件下で生じる平均摩擦係数、平均相対振幅の負荷ベクトルに着目すると、両ベクトルは PC1 に大きく影響を及ぼしている。ここで、PCA の考え方に基づくと、摩耗量に対する球試験片の大きさ、負荷荷重、平均摩擦係数、設定振幅および平均相対振幅の影響度合いを、摩耗量の負荷ベクトルと、球試験片の大きさ、負荷荷重、平均摩擦係数、設定振幅および平均相対振幅の各負荷ベクトルのなす角度の大小により評価できる。

Figure 4 は、摩耗量の負荷ベクトルに対する球試験片の大きさ、負荷荷重、平均摩擦係数、設定振幅および平均相対振幅の各負荷ベクトルのコサイン類似度を示す。同図より、摩耗量の負荷ベクトルに対するコサイン類似度は大きい方から設定振幅、平均摩擦係数、平均相対振幅、負荷荷重、球試験片の大きさの各負荷ベクトルの順になるので、摩耗量の負荷ベクトルと、設定振幅、平均摩擦係数、平均相対振幅、負荷荷重、球試験片の大きさの各負荷ベクトルのなす角度は小さい方から設定振幅、平均摩擦係数、平均相対振幅、負荷荷重、球試験片の大きさの順となる。よって、摩耗量に及ぼす影響度は、大きい方から設定振幅、平均摩擦係数、平均相対振幅、負荷荷重、球試験片の大きさの順となる。

5. 結論

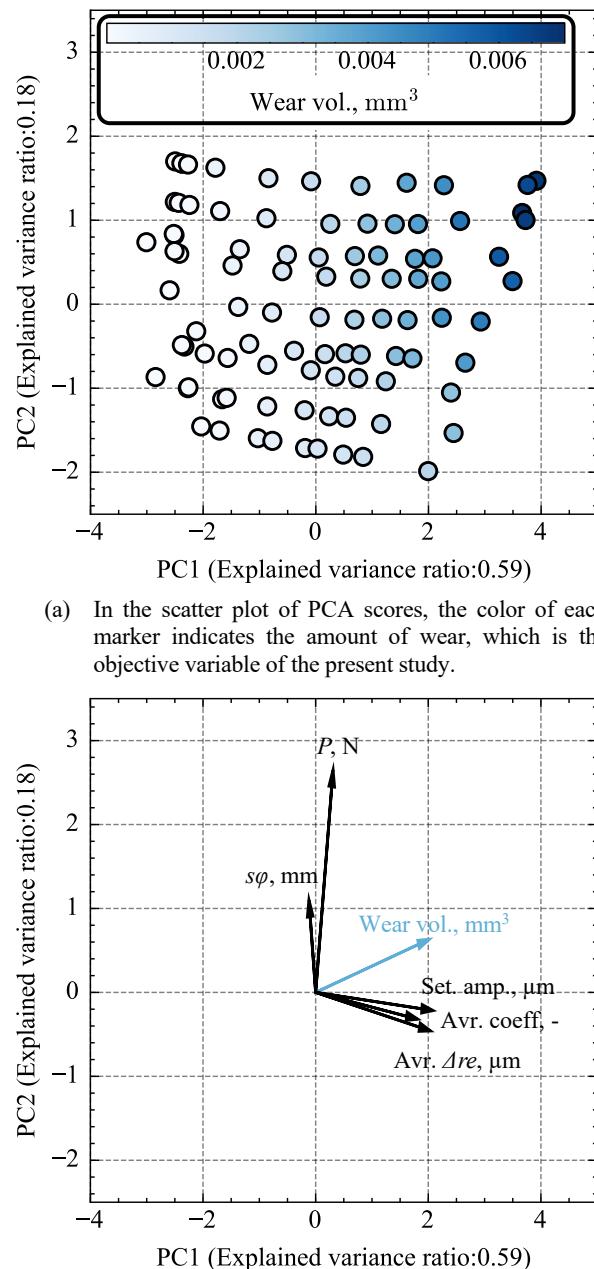
本研究では、フレッチング下における摩耗量を解析した。そして、得られた摩耗量、軸受鋼球の大きさ、負荷荷重、摩擦係数およびしゅう動振幅に対して、主成分分析を実施した。その結果、摩耗量に及ぼす影響度は、大きい方から設定振幅、平均摩擦係数、平均相対振幅、負荷荷重、球試験片の大きさの順となる。

謝辞

本研究の一部は、高橋産業経済研究財団の助成を受けて実施したものである。ここに深く感謝いたします。

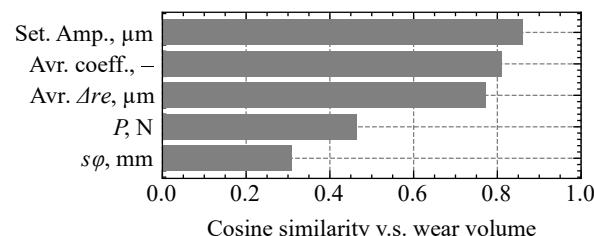
参考文献

- 志摩・地引：フレッチング摩耗。トライボロジスト, 53, 7, (2008), pp. 462–468.
- 佐藤：フレッチング摩耗の発生機構と防止に関する最近の研究。日本機械学会論文集 C 編, 64, 627, (1998), pp. 4109–4114.
- R. Merhej・S. Foutry : Contact Size Effect on Fretting Wear Behavior: Application to an AISI 52100/AISI 52100 Interface. Lubrication Science, 21, 3, (2009), pp. 83–102.
- 矢野・藤野・地引：球/平面のフレッチング摩耗特性に及ぼす材料のスケール効果。,講演番号：S113-11 日本機械学会年次大会講演論文集, (2021), pp. 2307–2311.
- 水野：多変量データ解析講義、朝倉文庫, (1996), pp.113–135.



- (a) In the scatter plot of PCA scores, the color of each marker indicates the amount of wear, which is the objective variable of the present study.
- (b) The loading vector shows how much each factor affects PC1 and PC2. For clarity, the lengths of the vectors are multiplied by 4 in the PC1 direction and by 3 in the PC2 direction.

Fig. 3 Results of PCA



- Fig. 4 Cosine similarity of the loading vector for each factor concerning the loading vector for wear. The longer the bar of a factor, the higher the cosine similarity of that factor to the amount of wear.