

ISSN 0389-4010
UDC 621.892.9
62-26

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1060

振動測定による
すべり摩擦時の固体潤滑膜の破断予知

鈴木 峰 男・西村 允・佐川 寛

1990年3月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

振動測定による
すべり摩擦時の固体潤滑膜の破断予知*

鈴木 峰 男** 西 村 允**
佐 川 寛***

**DETECTION OF SOLID LUBRICANT FILM FAILURE DURING SLIDING
BY VIBRATION MONITORING.**

By
Mineo SUZUKI Makoto NISHIMURA Hiroshi SAGAWA

ABSTRACT

Pin-on-disk friction tests were carried out to examine the feasibility of acceleration vibration monitoring for detection of solid lubricant film failure during sliding. MoS₂ sputtered film on a steel disk and on a Si₃N₄ disk, and MoS₂ bonded film on a steel disk were rubbed against a 440C steel ball.

From the measured acceleration vibration signal, kurtosis of amplitude distribution and r.m.s. were calculated, and frequency analysis was made.

A partial failure of sputtered MoS₂ film can be clearly detected by the increase in kurtosis. A high value of kurtosis is due to an impulse-like shock imposed by a pin/substrate contact. At the same time, the r.m.s., the component of natural frequency of pin bending mode and the component of disk rotating frequency of envelop detected signal also increased. But the changes were small, indicating that these parameters were not relevant to detection of partial film failure. However, a marked increase of these parameters was observed as film failure progressed. These parameters are effective for detection of complete film failure.

For MoS₂ bonded film, many small metal contacts were observed from the initial stage of the test. The wear process seems to be different with bonded MoS₂ film. The appearance of a vibration wave was also different from that of sputtered film ; more continuous shocks seem to excite the arm. This leads to a lower value of kurtosis, thus resulting in ineffectiveness of kurtosis. However, the film failure can be detected by monitoring the r.m.s. value.

*平成2年2月28日 受付

**宇宙研究グループ

***慶應大学大学院（当時）

要 旨

ピンを保持するアームに加速度ピックアップを取り付けたピン／円板型摩擦試験機を用い、振動測定により円板に付着させた固体潤滑膜の破断を検出することを試みた。円板試料として、鋼製基板及びSi₃N₄基板に二硫化モリブデンをスパッタしたもの、及び鋼製基板に二硫化モリブデンの焼成膜(有機バインダ)を施したものを、鋼球ピン(SUS440C)に対して摩擦させた。

測定された加速度振動は、振幅分布のカートシス値及びrms値を算出すると同時に、周波数分析を行った。

二硫化モリブデンのスパッタ膜の場合には、摩擦力方向の加速度振動振幅のカートシス値の急激な上昇により、被膜の一部破断が検知できることがわかった。被膜の一部が破断すると、ピンと下地円板の接触部でインパルス的な衝撃が加わり、振動波形の鋭さが大きくなったためと考える。一方、rms値、ピンの曲げ固有振動の成分及び包絡線検波波形の回転同期成分も、この時点で増加する傾向がみられたが、その変化は小さく被膜の一部破断の検出には不適である。しかし、被膜の摩擦がさらに進むにつれて、これらの諸量は急激に増大していくため、被膜の完全破断の検知には有効である。

二硫化モリブデン焼成膜の場合には、摩擦初期から多数の金属接触が観察され、スパッタ膜とは摩擦過程が異なっていると推測される。振動の現れ方も、より連続的な衝撃が加わったような波形となったため、カートシスで被膜の破断を検出できなかった。しかし、被膜の破断時にはrms値が増大し、被膜破断の検知はrms値のモニタにより可能である。

1. まえがき

宇宙機器など油が使用できない苛酷な条件下や油の汚染を嫌うような潤滑部所に、固体潤滑剤を薄くコーティングする固体薄膜潤滑法が広く用いられている。固体薄膜潤滑の最大の問題は、いかに被膜の摩擦を少なく抑え、薄い潤滑膜を長持ちさせるかということであり、使用条件・用途に応じて、良好な

潤滑性と耐久性を示す固体潤滑剤やコーティング法を選択する必要がある。しかし、いかに耐久性に優れた固体潤滑膜でも、摩擦するにしたがって摩擦していくため、やがては被膜が破断し潤滑性を失う。近年では、破断した固体潤滑膜を再付着する機会が増えており、焼付きなど決定的な損傷が生じる前に固体潤滑膜の破断を予知する技術が要求されている。

一般に、固体潤滑膜を摩擦していくと被膜は次第に摩擦していき、やがて被膜の一部が破断する。この状態は、固体潤滑膜が存在する部分と下地同士が摩擦している部分とが混在した一種の境界潤滑の状態である。さらに摩擦を続けると、被膜の破断・修復を繰返しながら、ついには膜の完全破断に達する。曾田らは、部分破断が生じるまでを連続膜型摩擦範囲、部分破断から完全破断にいたる過程を不連続型摩擦範囲と名付けている⁽¹⁾。

上述したような固体潤滑膜の摩擦の進行過程は、実験室的にはピン／円板型などの摩擦試験機を用い摩擦係数の測定により、また、下地が金属のように導電性があり固体潤滑膜が不導体であれば接触電気抵抗の測定により把握することができる。二硫化モリブデンのスパッタ膜については、摩擦係数の推移と接触電気抵抗の推移がよく対応しており、また、被膜の摩擦過程を上述したように二分できることが、西村らにより報告されている⁽²⁾。

しかし、実機で摩擦係数や接触電気抵抗を測定できることは稀である。また、固体潤滑膜の摩擦過程は、被膜と下地材料の組み合わせ、雰囲気、形状、摩擦粉の再付着など種々の要因が影響を及ぼし、実機での応用と実験室での摩擦摩擦試験との対応は必ずしもよくない。このため、実機でも簡単に適用しうる固体潤滑膜の破断検知技術が望まれている。

実機にも比較的容易に適用し得るモニタ法としては、振動加速度やAE (Acoustic Emission) の測定などが挙げられる。油潤滑の軸受については、既にこれらの手法を使用して軸受損傷を検知する試みが行われており、振動波形の実効値とピーク値の比較⁽³⁾、包絡線検波波形の周波数分析^{(4) - (6)}、振動振幅のカートシス値のモニタ^{(1) - (2)}が有効であるという報告や、AE法により損傷の検知⁽²⁾だけでなく、損傷位置の標定が可能^{(1) - (3)}だという報告が

る。また、加速度振動の新しい信号処理法も提案されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。一方、軸受以外では、工具の『耗をカートシス値で検知できるという報告⁽¹⁶⁾や、『擦形態が異なるとAEの発生状況が異なるという報告⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾がある。

これらの報告では、振動やAEにより材料の表面に生じた傷による衝撃を検知したり、材料内部の破断の進行を検知しているわけで、固体潤滑膜における被膜の破断検知と類似性があると思われる。しかし、固体潤滑膜に関しては、これらの手法を用いて破断を検知しようという試みは行われておらず、油潤滑軸受などの場合と同様の手法で固体潤滑膜の破断が検知し得るかどうかは明かではない。

本研究は、実機にも比較的容易に適用し得る振動測定速度の測定により、固体潤滑被膜の破断の検出を試みたものである。すなわち、上述した連続膜型摩擦範囲から不連続膜型摩擦範囲へと変化する時点、及び被膜が完全に破断し焼付き直前の時点の検出に適した振動加速度の信号処理法を選定し、その妥当性を検討した。

固体潤滑膜としては、摩擦過程が摩擦係数、接触電気抵抗の測定から明らかになっている二硫化モリブデンのスパッタ膜を用い、ピン/円板型摩擦試験機を使用して実験をおこなった。また、比較のため、市販の二硫化モリブデン焼成膜についても実験をおこなった。

2. 実験装置と実験方法

本実験に用いたピン/円板型の摩擦試験機⁽²⁰⁾の構造の概略を図1に示す。試料円板は回転軸上部に固定されており、ベルトを介して可変速モータにより駆動される。摩擦面間の接触電気抵抗の測定のために、ピンホルダは電気的に絶縁された状態でアームに固定されており、回転軸下端には水銀貯めが設けられている。ピンへの荷重は、アームを介し重錘により負荷する。ピンを支えるアームには荷重方向（垂直方向）および摩擦力方向（水平方向）の振動測定用に2個の加速度センサが取り付けられている。本実験では、摩擦力測定のためのばね系をもたない高剛性アーム⁽²⁰⁾を用いた。このため摩擦力

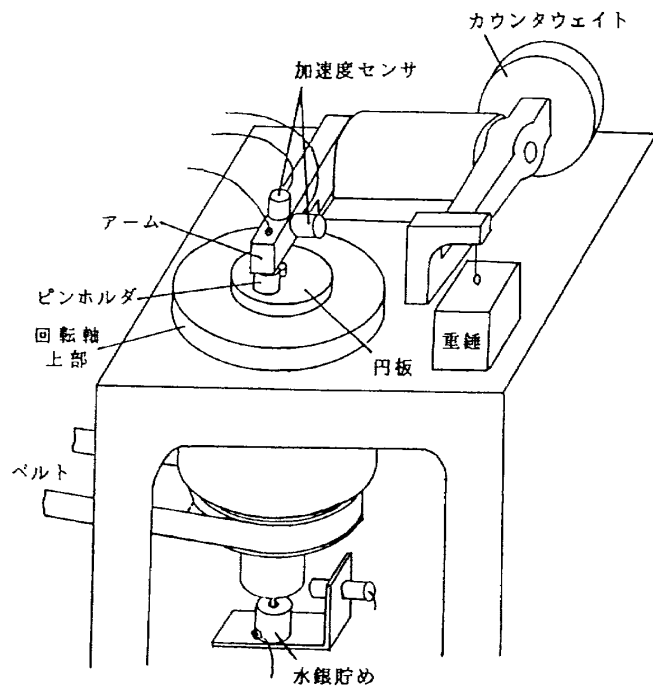


図1 摩擦試験機

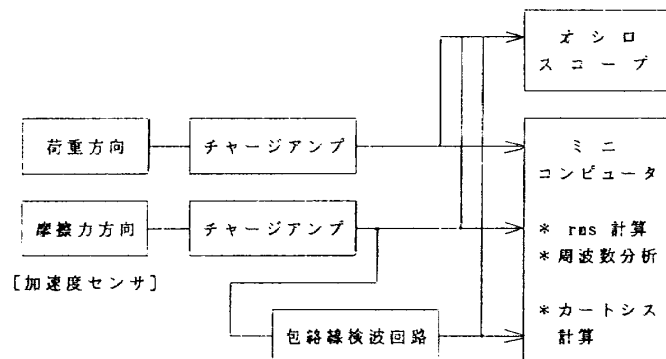


図2 加速度測定系のブロック図

は測定していない。試験機の周囲はアクリル製のカバーで密閉し、種々の雰囲気で行うことができるようになっている。

加速度振動測定系のブロック図を図2に示す。加速度計によって検出された振動波形及びそれを包絡線検波した波形は、オシロスコープで観測すると同時に、回転同期のトリガを用い、ミニコンピュータに収録される。収録された振動波形は一回転分の波形について実効値、カートシス値（波形振幅分布の

4次モーメントで、波形の鋭さを現わす一つの指標。その計算法を付録に示す)を計算すると共に、周波数分析をおこなった。使用した加速度センサの固有振動数は約32kHzであるが、予備実験で10kHz以上の振動成分が検出されなかったため、周波数分析の範囲を最高10kHzまでとした。

表1 実験に用いた円板試料

試料番号	円板 (直径 43 mm、厚さ 7 mm)		
	材質	固体潤滑被膜	膜厚
1	SUJ2	MoS ₂ スパッタ膜 (通常方式)	0.3 μm
2		MoS ₂ スパッタ膜 (両面方式)	0.3 μm
3		MoS ₂ スパッタ膜 (両面方式)	0.3 μm
4		MoS ₂ スパッタ膜 (両面方式)	1.0 μm
5	440C	MoS ₂ スパッタ膜 (両面方式)	0.3 μm
6	Si ₃ N ₄	MoS ₂ スパッタ膜 (通常方式)	1.0 μm
7	440C	MoS ₂ 焼成膜 (有機バインダ)	6~7 μm

(注) スパッタリング方式は文献(2)を参照
 通常方式：試料を水冷された保持台に取付けてスパッタリングを行なう一般的な方法。
 両面方式：2つのターゲットの間に試料を保持しスパッタリングを行なう方法で、複雑な形状の試料にも被膜を生成させることが出来るが、スパッタ中に試料の温度は上昇する。

摩擦試験に用いた試料円板を表1に示す。表中、試料1～5の円板は鋼製基板 (SUJ2 または SUS440C) に、また試料6は窒化珪素基板に二硫化モリブデン (MoS₂) をスパッタリングしたものである。スパッタ方式は、既報⁽²⁾と同様に、対向する2つのターゲットの間に試料を保持してスパッタリングを行う両面方式と、ターゲットを1個とし試料を水冷しながらスパッタリングを行う通常方式の2つの方式を用いた。試料7は鋼製基板 (SUS440C) に有機系バインダの二硫化モリブデン焼成膜を施したものである。

実験は、静止側のピンに直径7.9375mm (5/16") の鋼球 (SUS440C) を用い、すべり速度1.5m/s、荷重10Nの条件で、乾燥空気中でおこなった。なお、予備実験では、すべり速度を0.67~2 m/sに変化させ振動振幅への影響を調べた。

3. 実験結果と検討

3.1 すべり速度の振動振幅への影響

摩擦時の加速度振動には、すべり速度が大きく影響すると考えられる。本項では、予備実験として、440Cピン/SUJ2+MoS₂スパッタ膜0.3 μm円板について、すべり速度を変化させ、荷重方向及び摩擦力方向の加速度がどの様に現れるかを調べた結果について述べる。なお、本項で述べる予備実験では、前節で述べたミニコンピュータを用いた測定系を使用しておらず、振動振幅の平均値 (正弦波の時にピーク値と一致する平滑回路を通したものを) をペンレコーダで記録すると共に、試験中の適時に市販のFFTアナライザで振動波形を周波数分析した。

図3は、すべり速度0.67~2 m/sにおける荷重方向、摩擦力方向の加速度を摩擦回数に対してプロットしたものである。荷重方向の加速度は、摩擦初期、いずれのすべり速度に対しても大きく4~6Gにも達するが、その後振動は小さくなり安定する。同様の傾向は、摩擦力方向の加速度にも見られる。この加速度が低下し安定するまでが、いわゆる「なじみ」に相当するものと思われる。図4に、摩擦初期の加速度の最大値と安定時の加速度をすべり速度に対して示したが、なじみが完了するまでは、すべり速度が比較的小さくても、特に荷重方向においてかなり高いレベルの加速度が生じていることがわかる。

しばらく安定状態が続いた後、摩擦力方向の加速度が増加し、摩擦状態に変化が起こったことを示唆する。ただし、加速度の増加→安定状態という変化を繰り返す場合もあった (図3(b))。さらに摩擦を続けると、摩擦力方向の加速度が急上昇し、また荷重方向の加速度も増大した。この時点で、肉眼でMoS₂スパッタ膜の破断を確認したため、試験を停止した。このような加速度の推移は摩擦係数の推移⁽²⁾と類似しており、運転途中で摩擦力方向の加速度がわずかに増加したのは被膜の一部に破断が生じたためと推測される。

図5は、試験時間が進むにつれて、荷重方向と摩擦力方向の加速度、及び接触電気抵抗の波形のパワースペクトルがどのように変化していくかを、すべり速度1.0 m/sの場合について示したものであ

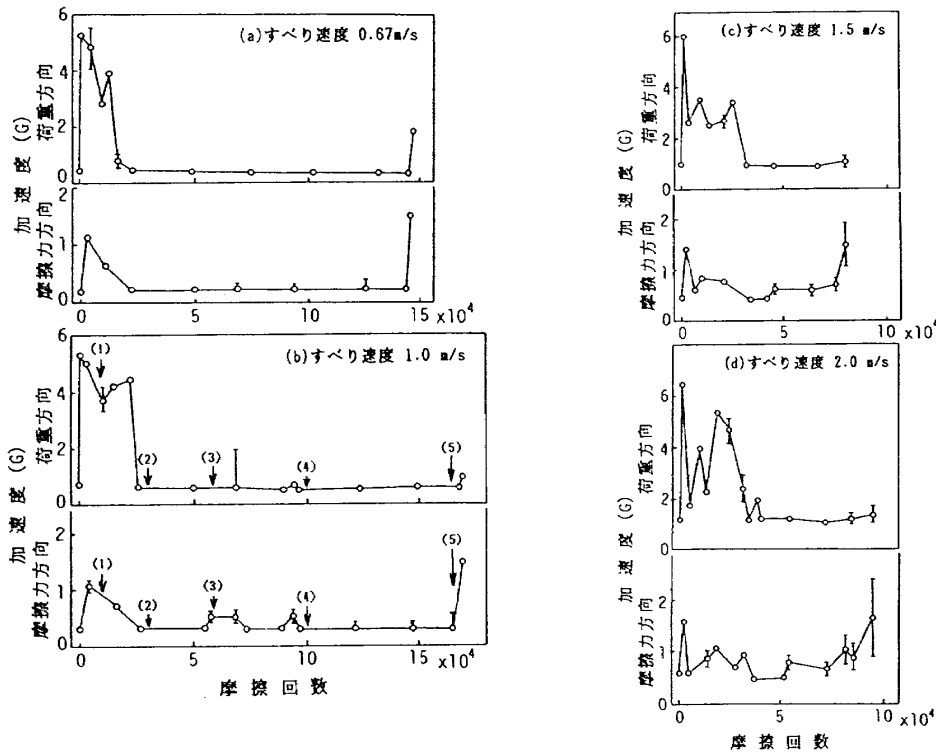


図3 荷重方向、摩擦力方向の加速度の推移

440C/SUJ2+MoS₂スパッタ膜 (両面式) 0.3 μm
 w=10N, v=0.67~2.0m/s, dry air

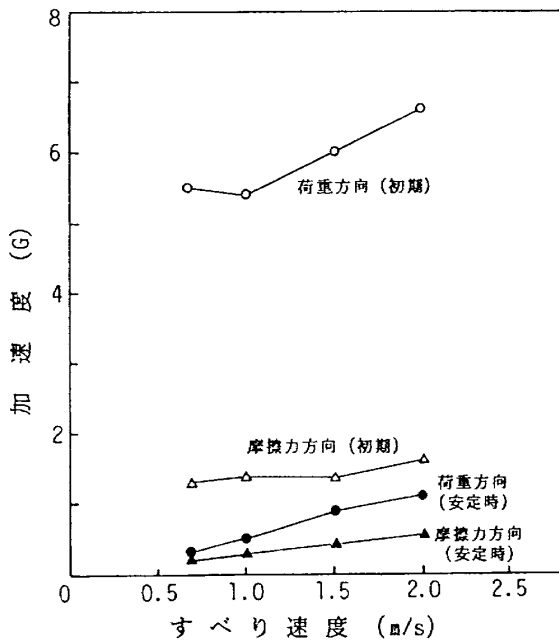


図4 すべり速度の加速度振幅への影響

440C/SUJ2+MoS₂スパッタ膜 (両面方) 0.3 μm
 w=10N, v=0.67~2.0m/s, dry air

る。図5 (1) ~ (5) は図3の (1) ~ (5) の摩擦回数に対応する。摩擦初期の加速度が大きい時 (図5 (1)) は、摩擦力方向、荷重方向共に1.1~1.2kHz, 1.4kHz付近の周波数が支配的である。また、接触電気抵抗の周波数成分もこれらの加速度の周波数成分と一致している。このことは、荷重方向の加速度が1Gを越えていることを考慮すると、ピンの飛び跳ね現象が起こっていたことを示唆する。本試験を含め、ピン/ディスク型などの摩擦試験では、荷重方向の加速度による接触状態の変化が含まれていることに注意する必要がある⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。その後、荷重方向加速度が0.4G程度に下がった時点 (図5 (2)) では、接触電気抵抗と加速度の相関性がほとんど認められなくなり、また、加速度振動も300 Hz程度の低周波成分が支配的となっている。

図5 (3) は、さらに摩擦を続け、摩擦力方向の加速度にわずかな増加が認められた時点の周波数分析結果である。荷重方向では0.4kHz, 0.8~1.2kHz, 1.5kHz付近、摩擦力方向では0.3kHz, 1.85kHz付近の周波数成分が大きい。これに対し、再び摩擦力

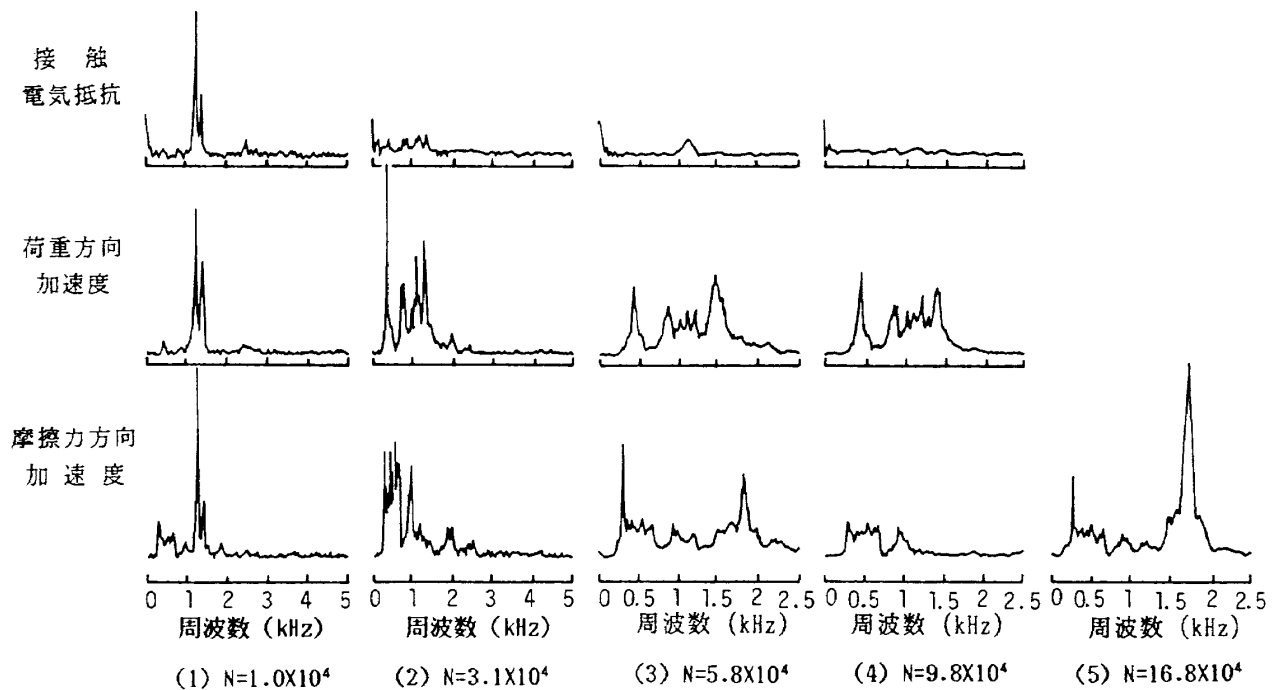


図5 加速度、接触電気抵抗の周波数分析
 440C/SUJ2+MoS₂スパッタ膜 (両面式) 0.3 μ m
 w=10N, v=1.0m/s, dry air

方向の加速度が小さくなった時点 (図5(4)) では、荷重方向の振動成分にはあまり変化がみられないが、摩擦力方向の加速度から1.85kHz付近の振動成分が消えている。また、膜の破断が目視で観察された時 (図5(5)) には、摩擦力方向の振動の1.85kHz付近の成分がきわめて大きくなっている。この振動成分が膜の破断と関係があると推測される。

1.85kHz付近の振動成分は、摩擦試験機のピン・アーム系の何等かの固有振動数であろうと思われる。表2は、アーム、ピンをインパルスハンマーで打撃して固有振動数を調べた結果である。表から、アームの一次固有振動数が摩擦力方向約300Hz、荷重方向約200Hzであることがわかる。アームに荷重10Nを加えた場合、これらが450Hz、840Hzに上昇しており、また、荷重方向に1.1~1.2kHz、1.4kHzの振動成分が現れる。これらはピン/円板間のヘルツ接触を含めたアーム系の固有振動数と推定される。

しかしながら、約1.85kHzの振動は、アームが自

由な状態でも、10Nの荷重で円板に押し付けられた状態でも現れない。そこで、アームの先端をバイスで固定して、ピン及びアームを打撃してみた。その結果が表2の最下段である。ピンを打撃した場合には1.96kHzの振動成分が現れるが、アームを打撃した時にはみられず、この振動成分はピンの曲げ方向の固有振動と考えられる。アーム先端をバイスで固定しないときには、ピンを打撃した場合でも、アームの固有振動成分が大きくピンの固有振動が埋もれてしまったのであろう。この結果から、試験中に観察された1.85kHzの振動は、ピンの曲げ方向の固有振動と推定した。

以上の結果は、加速度の振動振幅測定によりMoS₂スパッタ膜の破断が検出できそうなこと、また、荷重方向よりも摩擦力方向の加速度の測定が適していることを示している。ただし、振幅の増加から膜の一部破断を検出するのは、特にすべり速度が

表2 摩擦試験機のピン・アーム系の固有振動数

アーム先端の状態	ハンマー打撃位置	打撃方向	検出された振動数 (kHz)	
			垂直方向センサ	水平方向センサ
自由	アーム	垂直	0.20 [‡] , 0.33	0.30
		水平	0.20 [‡] , 0.30, 0.34, 0.37, 0.70	0.30
	ピン	水平	0.20 [‡] , 0.30, 0.33, 0.37, 0.70	0.30
荷重10Nで円板と接触	アーム	垂直	0.85, 1.2, 1.55 [‡]	0.35, 0.45 [‡] , 0.85, 1.15, 1.30, 1.75
		水平	0.35, 0.85, 1.10, 1.20, 1.40 [‡]	0.35 [‡] , 0.45 [‡]
	ピン	水平	0.35, 0.84, 1.10, 1.20, 1.40 [‡] , 2.10	0.35
	円板	垂直	0.84, 1.20, 1.43 [‡]	0.45
水平		0.84 [‡] , 0.95, 1.30, 1.43 [‡]	0.45	
バイスで固定	アーム	水平	-----	0.33 [‡] , 0.48, 0.55, 1.22, 1.52
	ピン	水平	-----	0.33 [‡] , 0.48, 0.55, 1.22, 1.52, 1.96, 3.50

* 最大ピークを示した振動数

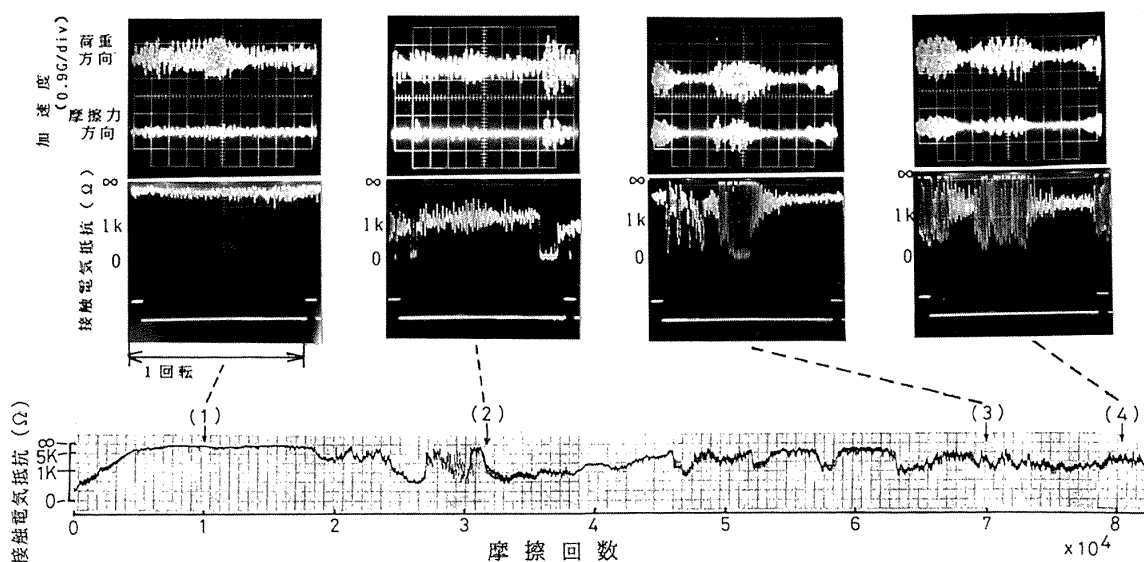


図6 接触電気抵抗の推移
 440C/SUJ2+MoS₂スパッタ膜 (通常方式) 0.3μm
 w=10N, v=1.5m/s, dry air

速い場合には振幅の変化が小さく、きわめてむずかしい。一方、周波数分析から、良好に潤滑されていた時点ではアームと一体になって振動していたピンが、被膜に一部破断が生じ金属接触が起きると、ピンの曲げ固有振動が支配的となる振動モードに変化することが推定された。

3. 2 鋼製基板+二硫化モリブデンスパッタ膜の振動測定による破断予知

二硫化モリブデンスパッタ膜に関する西村らの実験⁽²⁾によれば、ペンレコーダで記録された接触電気抵抗が低下する時点は摩擦係数が増大する時点とよく対応しており、また、オシロスコープによる接触電気抵抗の観察から、その時点で被膜に破断が生じていたことが確認されている。このため、本項では、接触電気抵抗の測定を被膜破断の指標とし、鋼製基板+二硫化モリブデンスパッタ膜について、固体潤滑被膜の破断を検出するのに最も適した加速度振動信号の処理法について検討する。

検討した信号処理法は、振動振幅のrms値、振幅分布のカートシス値、試験中支配的であった1.4kHz（荷重方向の固有振動数）及び1.85kHz（ピンの曲げ方向の固有振動数）のパワースペクトル、及び包絡線検波波形の軸回転同期周波数成分（15 Hz）のパワースペクトルである。振動振幅のrms値は振動のエネルギーの指標であり、振動レベルの大きさを示すものである。振動振幅のカートシス値は波形の鋭さを表すため、金属接触などにより衝撃的な力がアームに加わったことを知ることが出来ると予測される。ピンの曲げ方向の固有振動数は、予備実験で被膜に一部破断が生じたとき以降に顕著になることが認められている。また、包絡線検波波形は、後述するように軸受損傷が認められた場合と固体潤滑被膜が一部破断した際の振動波形が類似していたため、検討に加えた。

なお、前項の予備実験の結果を踏まえ、被膜の破断に敏感な摩擦力方向の加速度のみを検討対象とした。

図6は、SUS440Cピン/SUJ2円板+MoS₂スパッタ膜0.3μmの組合せで行なった実験における接触

電気抵抗の推移を示したもので、接触電気抵抗と加速度のオシロスコープ写真も示してある。摩擦開始直後、接触電気抵抗は数十Ωであるが、摩擦するにしたがい抵抗値が増大してゆき、約 1×10^4 回摩擦後には $\infty \Omega$ 付近で安定する。その後、しばらくは接触電気抵抗が高く安定した状態が続く。図6(1)は、この時点での振動波形と接触電気抵抗をオシロスコープで観察したものであるが、円板一回転中での変動も少なく、MoS₂スパッタ膜により潤滑が良好に行われていることが推察される。

摩擦回数約 2×10^4 回頃から僅かに接触電気抵抗が減少し、約 3×10^4 回で突然数十Ωの低い値を示した。この時の波形は、図6(2)に示すように、接触電気抵抗が一回転中に一ヶ所0Ω付近を示し、それに対応する位置で振動振幅が大きくなっている。摩擦痕中に一ヶ所金属接触が生じ、その金属接触部でピンに衝撃的な力が加わっていることが推定できる。この時の振動波形を見ると、転がり軸受に傷がある場合に検出される振動波形⁽⁶⁾⁽⁹⁾と類似している。すなわち、ある固有振動数で振動していたアームが金属接触部の衝撃的な加速度により振幅変調されたような形をしている。このような状態を検知するには、振動波形を包絡線検波するのが有効である⁽⁶⁾。

さらに摩擦を続けると、図6(3)に示すように、一回転中数カ所で接触電気抵抗がほぼ0Ωとなり、これに対応して振動波形の突発的変動の数が増えていくのが見られるようになる。被膜の修復、破断を繰り返しながら、次第に破断の程度や破断個所が増加するためと考えられる。

このような接触電気抵抗の推移は、西村らのMoS₂スパッタ膜に関する実験⁽²⁾とほぼ同一の傾向を示している。上述した被膜の破断状況は、西村らの実験結果を踏まえて推定したものである。

次に、接触電気抵抗の推移に対応して、加速度振動の性質にどのような変化があったかを検討してみよう。

図7に、摩擦力方向の振動加速度のrms値、カートシスの推移を摩擦回数に対して示す。摩擦初期、rms値は前項で述べたと同様にやや高い値を示すが、接触電気抵抗が $\infty \Omega$ 付近になったあたりで安定

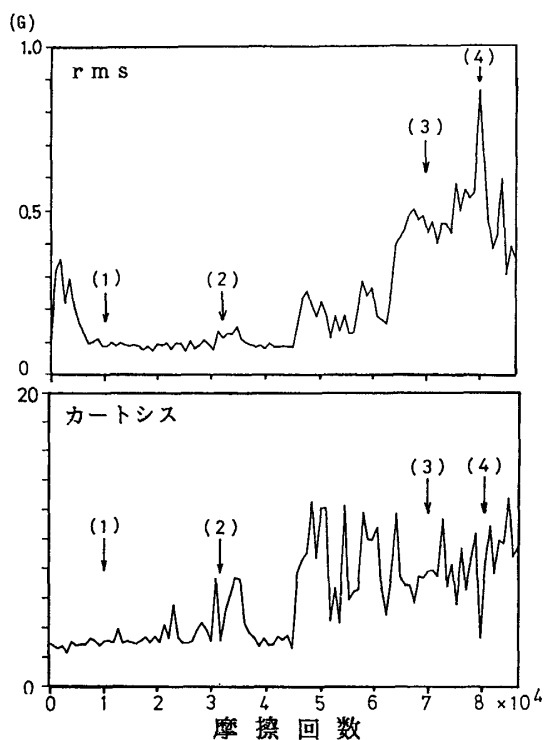


図7 加速度rms値とカートシス値の推移
440C/SUJ2+MoS₂スパッタ膜 (通常方式) 0.3 μm
w=10N, v=1.5m/s, dry air

する。一方、カートシスは振動振幅が大きい摩擦初期でも、良好に潤滑されている時期と同じほぼ3の値で安定しており、いずれの場合も振動振幅分布が正規分布に近いことを示している。

被膜に一部破断が生じたと考えられる摩擦回数約 3×10^4 回ころに、カートシスの値は3から7に急増した。振動波形の鋭さが大きくなった(図6(2)参照)ためであることがわかる。この時、振動振幅のrms値も僅かに上昇する傾向がみられるが、あまり顕著な変化ではない。

さらに摩擦を続けると被膜の一部破断から完全破断へと摩擦が進み、rms値は急増するが、カートシス値はあまり変化せず4~14の値で変動している。数カ所で破断が生じるにつれて全体的に振幅が大きくなるため、波形の鋭さが小さくなるためである。

図8は、ミニコンピュータで収録した波形と、その波形を周波数分析した結果を示したものである。(a)は摩擦初期の加速度がやや高い時期、(b)は

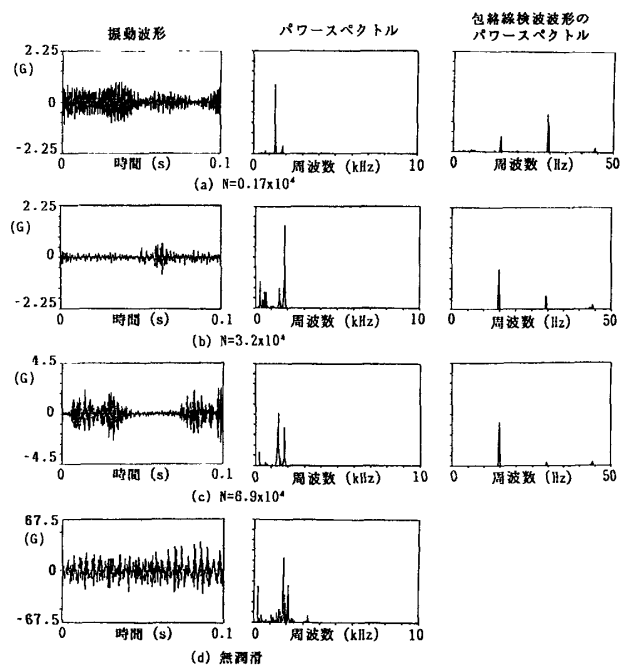


図8 振動波形とパワースペクトル
440C/SUJ2+MoS₂スパッタ膜 (通常方式) 0.3 μm
w=10N, v=1.5m/s, dry air

被膜に一ヶ所破断が生じた時期、(c)は被膜に数カ所破断が生じ被膜の完全破断直前の場合である。比較のために、金属同士を無潤滑で摩擦させた場合の波形とパワースペクトルを(d)に示した。摩擦初期(a)は、荷重方向の固有振動数である1.1~1.4kHz付近の振動が支配的であり、摩擦力方向にも荷重の動的な変化を通して振動が伝わっているものと推測される。しかし、被膜に部分破断が生じると(b)、1.85kHz付近の周波数成分が大きくなり、ピンの振動が大きくなっていることがわかる。一方、(d)に示した金属同士の摩擦の場合の振動には、部分破断が生じた以降と同様に1.85kHz付近の周波数成分が卓越していることが認められる。前項の予備実験と同様に、金属接触が生じるとピンが振動するような振動モードに変化したことがわかる。

包絡線検波した波形のパワースペクトルには、円板の回転数と同期した周波数及びその2次及び3次の周波数成分が検出された。図6(2)に示した接触電気抵抗と加速度の波形の対応性を考えると、被膜の一部が破断した以降は、包絡線検波により1回転中に被膜が破断した箇所数が推定できる可能性

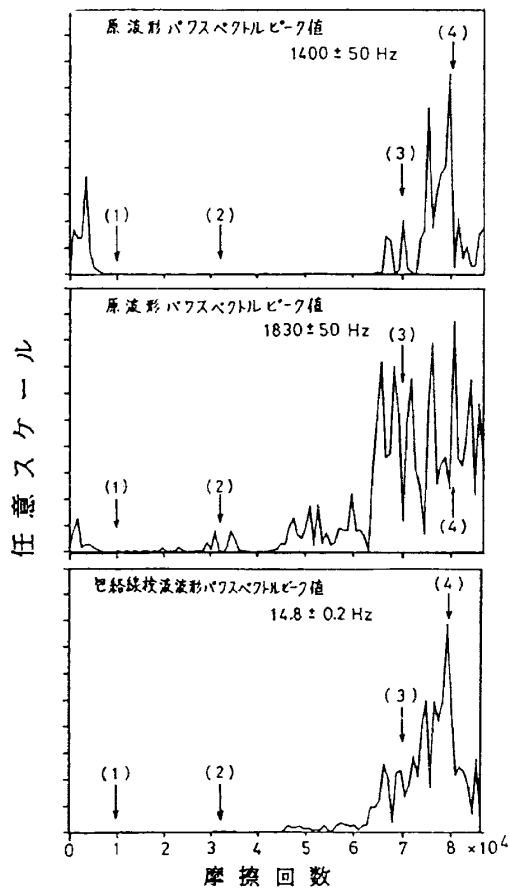


図9 パワースペクトルピーク値の推移
440C/SUJ2+MoS₂スパッタ膜 (通常方式) 0.3 μ m
w=10N, v=1.5m/s, dry air

がある。

図9は、荷重方向の固有振動数1.4kHz付近、ピンの曲げ固有振動数1.85kHz付近及び包絡線検波波形の回転同期成分15Hz付近のピーク値の変化を、摩擦回数に対しプロットしたものである。1.4kHz付近の周波数成分のピーク値は、摩擦初期と被膜の破断がかなり進んだ 6.5×10^4 回以降で大きくなっているが、被膜の一部破断が生じたと思われる 3×10^4 回の前後ではピークは小さい。一方、1.85kHz付近の振動及び包絡線検波波形の回転同期成分は、図7に示したrms値の推移と類似しており、被膜が一部破断した時点でわずかに増加し、破断が進むにつれて急増する。

以上の結果は、被膜の一部破断の検出にはカートシスが最も有望であること、及び一部破断から完全

破断への進行状況を把握するにはカートシスは不適で、rms値、ピンの曲げ方向の固有振動数成分及び包絡線検波した波形の回転同期成分のモニターが有効であることを示している。

振動振幅のカートシスが被膜の一部破断の検出には最も有望であることを上で述べたが、接触電気抵抗の測定に比べ、検出の確実度はどうであろうか？

図10、11は、両面方式⁽²⁾でMoS₂をスパッタしたSUJ2円板に対し440Cピンを摩擦させた実験における接触電気抵抗、rms値及びカートシスの変化である。図10には接触電気抵抗のオシロスコープ写真を併せて示した。

図10に示した接触電気抵抗のペンレコーダ記録からは、約 7.9×10^4 回摩擦させた時④に、全体的に0 Ω 付近まで下がっており、この時点で被膜が破断したと推定される。しかし、オシロスコープの写真を見ると、④の時点の波形は摩擦初期の①と類似しており、全面的に金属接触が生じたとは考えられない。さらに摩擦を続けた 8.5×10^4 回の時⑤に、1回転中に数カ所、抵抗値が0 Ω 付近に低下するのが観察された。このような経過から、オシロスコープの観察からは 8.5×10^4 回で被膜の一部破断が生じたと判定した。

これに対し、図11に示したカートシス値は約 5×10^4 回で一度、5程度まで上昇するが、すぐ3の値に戻る。被膜破断以前に、カートシスが5程度まで一時的に上昇する現象は図7でも観察されており、カートシス値7～8が被膜一部破断の判定基準と思われる。さらに摩擦を続けた 8.5×10^4 回で、カートシス値が8付近まで上昇し、カートシス値からは、この時点で被膜の破断が生じたものと推定できる。

表3は、一連の実験において、上述と同様の方法で接触電気抵抗値 (ペンレコーダ記録及びオシロスコープ観察)、及びカートシス値から推定した被膜の一部破断の摩擦回数を比較したものである。カートシス値から判定した破断時の摩擦回数は、接触電気抵抗波形のオシロスコープ観察から推定した摩擦回数とよく一致する。また、多少の差はみられるものの、接触電気抵抗のペンレコーダの記録から推定した摩擦回数とも比較的よく一致する。

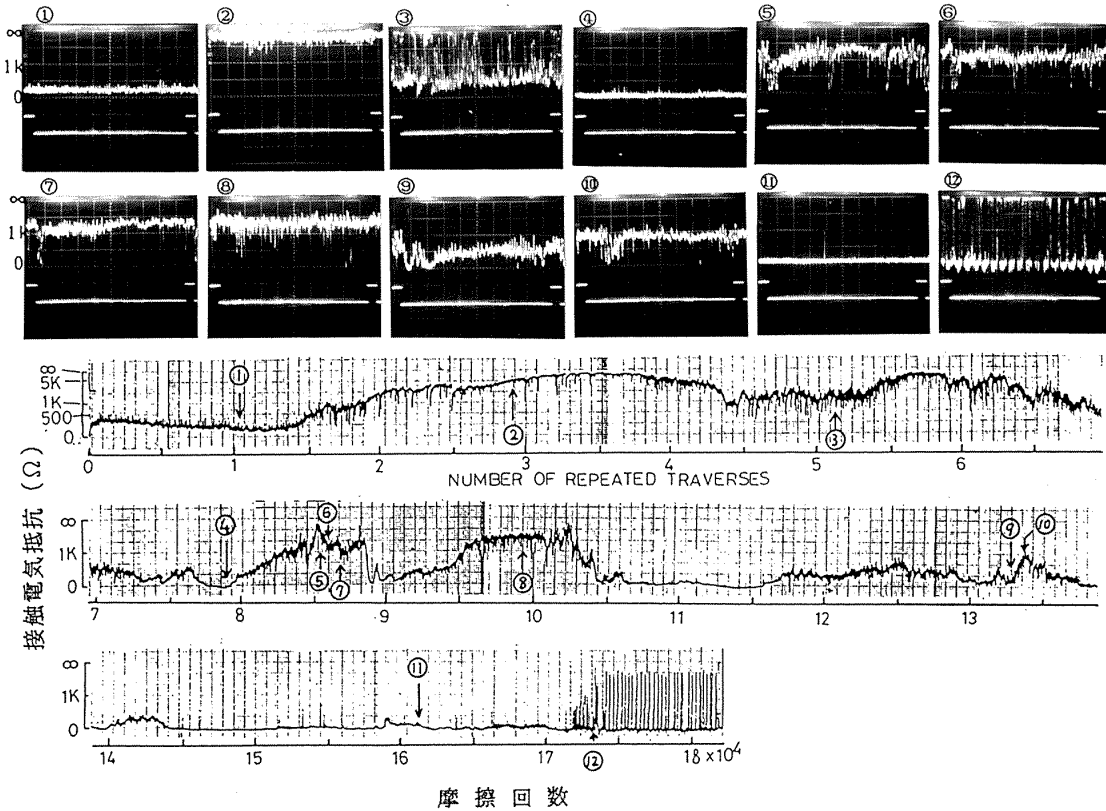


図10 接触電気抵抗の推移 440C/SUJ2+MoS₂スパッタ膜 (両面方式) w=10N, v=1.5 m/s, dry air

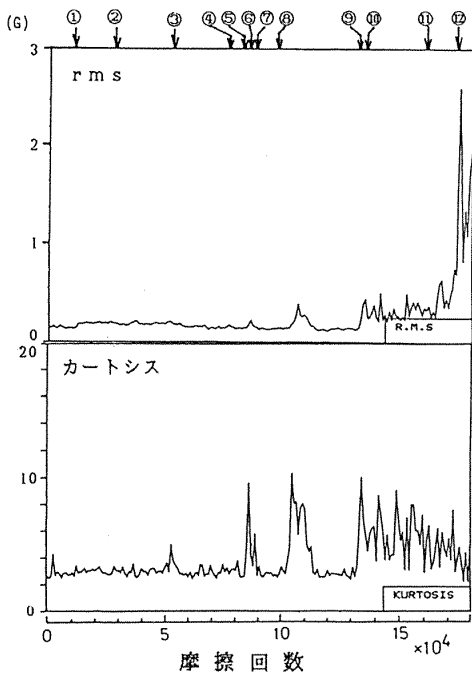


図11 加速度rms値とカートシス値の推移 440C/SUJ2+MoS₂スパッタ膜 (両面方式) 0.3 μm w=10N, v=1.5m/s, dry air

ただし、表中、下地材料が440Cの場合に、これら3種の測定量から推定した被膜破断摩擦回数が大きく食い違っている。この試験の接触電気抵抗のペンレコーダ記録では徐々に抵抗値が低下し、チャート上の記録では被膜破断はほとんど検出できなかった。図12は、この試験におけるカートシス値の推移と接触電気抵抗のオシロスコープ写真を示したものである。図中の写真に示すように、摩擦回数 6.9×10^4 の時、円板1回転中に1ヶ所抵抗値が0 Ωを示したため被膜の一部破断と判定したが、カートシス値はこの時点で大きな変化がみられない。図6 (2)に比べると非常に軽微な破断であり加速度の変化には至らなかったためと思われる。一方、カートシスが増大した摩擦回数 9.9×10^4 の時には、接触電気抵抗は1回転中に1ヶ所 $\infty \Omega$ 付近の値を取っている。この部分での潤滑不良のためにピンへ衝撃が加わっていると推測される。 $\infty \Omega$ 付近の値を取った位置(最初に金属接触が生じた位置とほぼ同じ)で、下地金属が酸化され潤滑不良となったものと思われる。

表3 被膜破断が検出された摩擦回数の比較

試験条件: $W = 10 \text{ N}$, $V = 1.5 \text{ m/s}$, dry air

試験 番号	試験円板			実験 番号	接触電気抵抗による検出		カートシス による検出
	基板	スパッタ方式	膜厚		ペンレコーダ使用	オシロスコープ使用	
1	SUJ2	通常方式	$0.3 \mu\text{m}$	1	3.9×10^4	3.8×10^4	3.8×10^4
				2	2.6×10^4	3.1×10^4	3.1×10^4
2	SUJ2	両面方式	$0.3 \mu\text{m}$	3	6.3×10^4	6.1×10^4	6.0×10^4
				4	3.7×10^4	-----	4.2×10^4
3	SUJ2	両面方式	$0.3 \mu\text{m}$	5	7.9×10^4	8.5×10^4	8.6×10^4
4	SUJ2	両面方式	$1.1 \mu\text{m}$	6	6.3×10^4	8.0×10^4	7.8×10^4
				7	12.9×10^4	12.2×10^4	12.7×10^4
5	440C	両面方式	$0.3 \mu\text{m}$	8	* 15.4×10^4	6.9×10^4	9.9×10^4

* 抵抗値が連続的に徐々に低下したため、ほぼ 0Ω になった時点をとった。
ペンレコーダによる記録からは破断の検出はむずかしい。

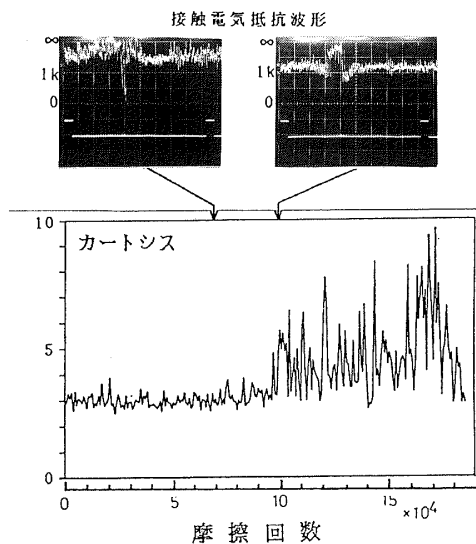


図12 カートシス値の推移と接触電気抵抗波形
440C/440C+MoS₂スパッタ膜 (両面方式) $0.3 \mu\text{m}$
 $w=10\text{N}$, $v=1.5\text{m/s}$, dry air

上述した結果は、カートシス値のモニタにより、接触電気抵抗のオシロスコープ観察と同程度の確実性で被膜の一部破断の検出が可能であることを示している。また、接触電気抵抗を測定してもペンレコーダのように平均的な値を記録する場合には、軽微な金属接触や酸化膜の形成による潤滑不良は検出できないため、カートシスの方が優れたモニター法である。

被膜の一部破断はカートシスにより、また、完全破断に対しては振動振幅のrms値、及びピンの曲げ固有振動数とその包絡線検波波形の周波数分析によって検出できることがわかったが、1つの量をモニタすることにより一部破断、完全破断共に検出できれば便利である。図7、11のrms値及びカートシス値の推移を見ると、両者を加算した信号を作り出すことにより、これを実現できる可能性がある。す

なわち、一部破断時にはカートシスが急増し、完全破断時にはrms値が急増するため、いずれの場合もカートシス+rms信号は増加する。この方法により、rms値単独でモニタする場合に比べ、一部破断検出の明瞭度が格段に上がるものと推測される。

以上の結果から、加速度振動の測定により鋼製基板上のMoS₂スパッタ膜の破断を検知できる可能性は、次のように言える。

- (1) カートシスが7程度に大きくなった時点は、接触電気抵抗の波形で1カ所被膜に破断が生じた時点とよく一致しており、カートシスにより被膜の一部破断の検出が可能である。また、振動振幅が大きな値を示す摩擦初期でもカートシスはほぼ3の値で安定しており、被膜の一部に潤滑不良が生じて初めて7前後の値に増大するため、被膜の一部破断を明瞭に検知し得る。
- (2) 振動振幅のrms値、及びピンの曲げ固有振動数とその包絡線検波波形の周波数分析では、被膜の一部破断が生じたときにわずかに大きな値を示すが、その変化は小さく、被膜の一部破断を検出するには適さない。しかし、破断が進むにつれて、これらの測定量は急速に大きくなるため、被膜の完全破断を検出するのに適している。
- (3) カートシス値とrms値を加算した信号を作り出すことにより、被膜の一部破断、完全破断を同時に検出できる可能性がある。

3. 3 下地基板が窒化珪素 (Si₃N₄) の場合

スパッタ膜はサブミクロンの厚さであり、下地円板材料の弾性変形の性質が摩擦系の振動に大きな影響を与えると考えられる。このため、鋼製基板に比べ弾性変形しにくい窒化珪素 (Si₃N₄) 上にMoS₂をスパッタした円板に対し鋼製ピンを摩擦させ、前項の鋼製基板と同様に加速度振動により被膜破断の検出が可能かどうか調べた。試験条件は前項と全く同一である。なお、Si₃N₄が不導体のため、接触電気抵抗による被膜破断検出はできない。

図13は、試験時間に対し振動加速度のrms値、カートシス値の推移を示したものである。鋼製基板の場合と異なり、摩擦初期の加速度振幅レベルがや

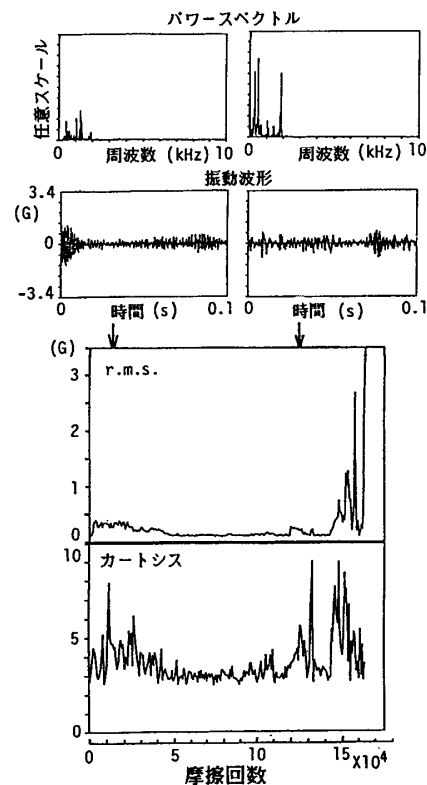


図13 加速度rms値とカートシス値の推移

440C/Si₃N₄+MoS₂スパッタ膜 (通常方式) 1.0μm
w=10N, v=1.5m/s, dry air

や高い時期にカートシスも高い値を示している。図13上部に示したこの時点の振動波形を、鋼製基板の場合の図9(a)と比較してみると、より単発的な衝撃が多数加わっている傾向が認められる。また、この時はアームの荷重方向の固有振動数が支配的な振動となっている。

その後、カートシスが3程度で安定した状態がしばらく続くが、rms値の上昇と共に、12×10⁴回摩擦した頃から再び上昇する。この時点のカートシス値は摩擦初期の値と同じレベルであるが、図13上部に示すように振動波形は摩擦初期とは明らかに異なる。カートシスで検出できる波形変化の限界を示している。

しかし、この場合の振動は図13上部のパワースペクトルに示したように、ピンの曲げ固有振動が支配的であり、摩擦初期とは異なる振動モードであることがわかる。このことは、ピンの曲げ方向の振動に着目すれば、鋼製基板の場合と同様にカートシスに

よる被膜の一部破断の検出が可能であることを示唆する。摩擦初期に、鋼製基板の場合にはカートシスが小さく、 Si_3N_4 基板で大きくなる原因は次のように考えることが出来る。すなわち、 Si_3N_4 基板では振動の減衰が大きいため、比較的小さな衝撃がパルス状に加わった場合、アームの振動もパルス状に発生し波形の鋭さが大きくなるのに対し、鋼製基板ではパルス状の衝撃が減衰する前に次のパルスが加わるため振動が連続的になり波形の鋭さが小さくなる。

さらに摩擦を続けると、カートシスが低下するのに対し、rms値は急増し、鋼製基板と同様の傾向を示す。図14は試験後の摺動痕の顕微鏡写真とあらさ形状であるが、二硫化モリブデン膜が完全に摩耗しており、摺動痕中央部には Si_3N_4 基板とSUS440Cピンが直接摺動したと思われる痕が観察される。この

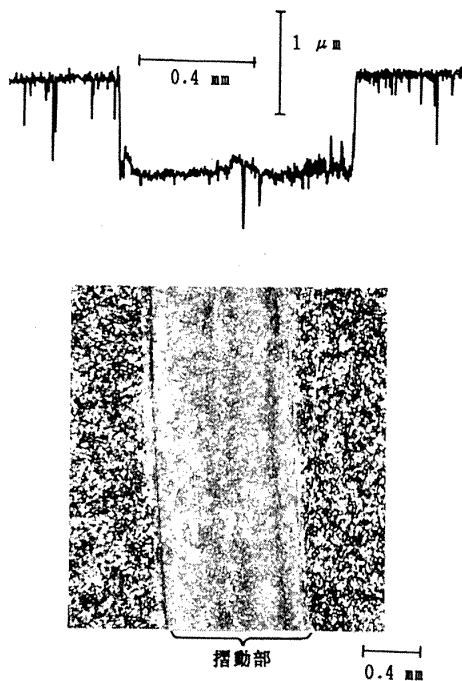


図14 摺動痕の顕微鏡写真とあらさ形状

440C/ Si_3N_4 + MoS_2 スパッタ膜 (通常方式) $1.0\ \mu\text{m}$
 $w=10\text{N}$, $v=1.5\text{m/s}$, dry air

ことは、rms値の急上昇が下地とピンの直接摺動により生じたことを示唆する。rms値による被膜の完全破断の検出は、 Si_3N_4 基板に対しても可能であることを示している。

3.4 二硫化モリブデン焼成膜

振動の現れ方は、表面あらさ、被膜の付着性や膜補修性など膜と基板の界面での状態などに依存すると考えられる。このため、同じ MoS_2 被膜でも、スパッタリングによる被膜と他の方法による被膜では被膜破断時の振動が異なると思われる。そこで、二硫化モリブデンの焼成膜(有機バイнда)を鋼製基板に施した円板に対し前節と同じ条件下で摩擦試験を行い、被膜破断が振動のモニタで可能かどうかを検討した。

図15は接触電気抵抗を試験時間に対して示したものであるが、スパッタ膜の場合と全く異なった推移を示している。比較的一定な値を示していた抵抗値は、ある時点で急激に低下し、ついで緩やかに上昇するという推移の繰り返しである。このような推移を何回か繰り返すに従い、平均の抵抗値としてはゆっくりと低下していく。図16に、接触電気抵抗をオシロスコープで観察した波形を振動波形と共に示

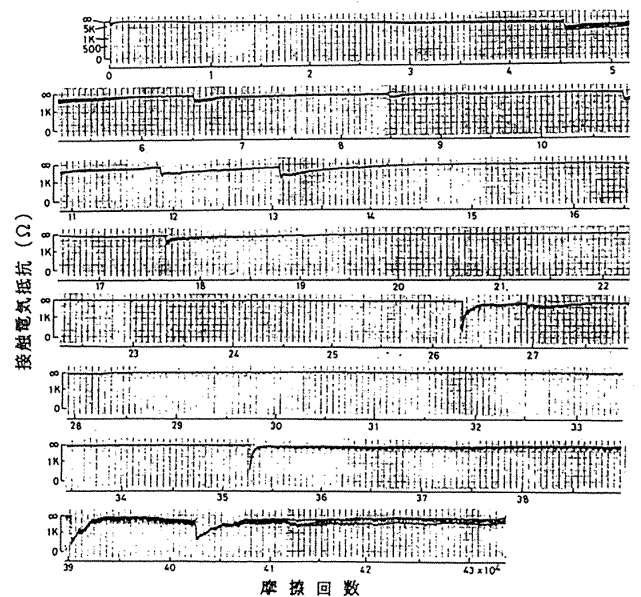


図15 接触電気抵抗の推移

440C/440C+ MoS_2 焼成膜 $6\sim7\ \mu\text{m}$
 $w=10\text{N}$, $v=1.5\text{m/s}$, dry air

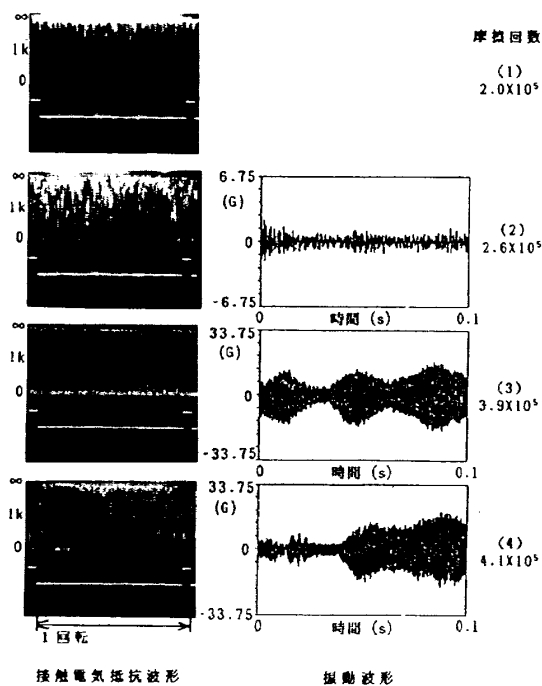


図16 円板1回転中の振動波形と接触電気抵抗の変化

440C/440C+MoS₂ 焼成膜 6~7 μm
w=10N, v=1.5m/s, dry air

す。スパッタ膜の場合と異なり、接触電気抵抗は0と0 Ω以外の値をとる割合が少なく、図15のペンレコーダでの記録値は0 Ωの値を取っている時間割合を示す一つの指標⁽²²⁾となっていることがわかる。また、チャート上では比較的高い値で安定している時期でも瞬間的に0 Ωになっている。このことから、ペンレコーダで記録された抵抗値が低下する時には摩擦面でかなり多くの小さな金属接触が生じるが、それがすぐに補修されていくことが推測できる。

図16の振動波形を見ると、正弦波状にうなりが生じたような波形となっている。この被膜の場合、表面あらさはRaで0.82 μm、Rmaxで4.71 μmと、図6~9に示したスパッタ膜のRa=0.024 μm、Rmax=0.16 μmに比べかなり大きい。表面あらさの凸部が断続的にピンと接触することにより断続的なパルスがピンに加えられ、図に示すような振動波形になったと考えると説明がつく。また、補修性が良いのも、面があらいため凹部のMoS₂が破断した部分へ運ばれ付着したと考えれば、接触電気抵抗の推移とも符合する。

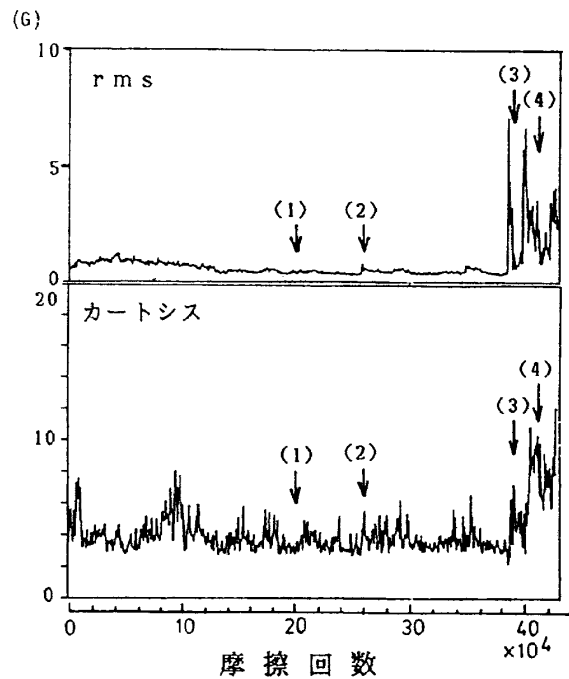


図17 加速度rms値とカートシス値の推移

440C/440C+MoS₂ 焼成膜 6~7 μm
w=10N, v=1.5m/s, dry air

図17は摩擦回数に対しrms値とカートシスの推移を比較して示したものである。カートシスは試験初期から時々上昇し、定まった傾向を示していない。カートシス値のモニタにより被膜が破断した時点を推測することは困難である。

以上述べた観察は、3.1、3.2項で述べたスパッタ膜の場合と全く異なっている。焼成膜の場合、スパッタ膜とは異なる摩耗過程となっていることが推測される。

図18は、試験後の摺動痕を示したものである。摺動痕のところどころで被膜にクラックが生じており、被膜の剥がれが観察された部分ではX線分析からFeが多く検出されており、下地が現れていることが確認された。図17に示した摩擦回数38×10⁴の時点でのrms値の急増が、被膜の破断に対応していたと推定できる。rms値のモニタにより、摩耗過程が異なる焼成膜の場合でも被膜破断検出ができることを示唆している。

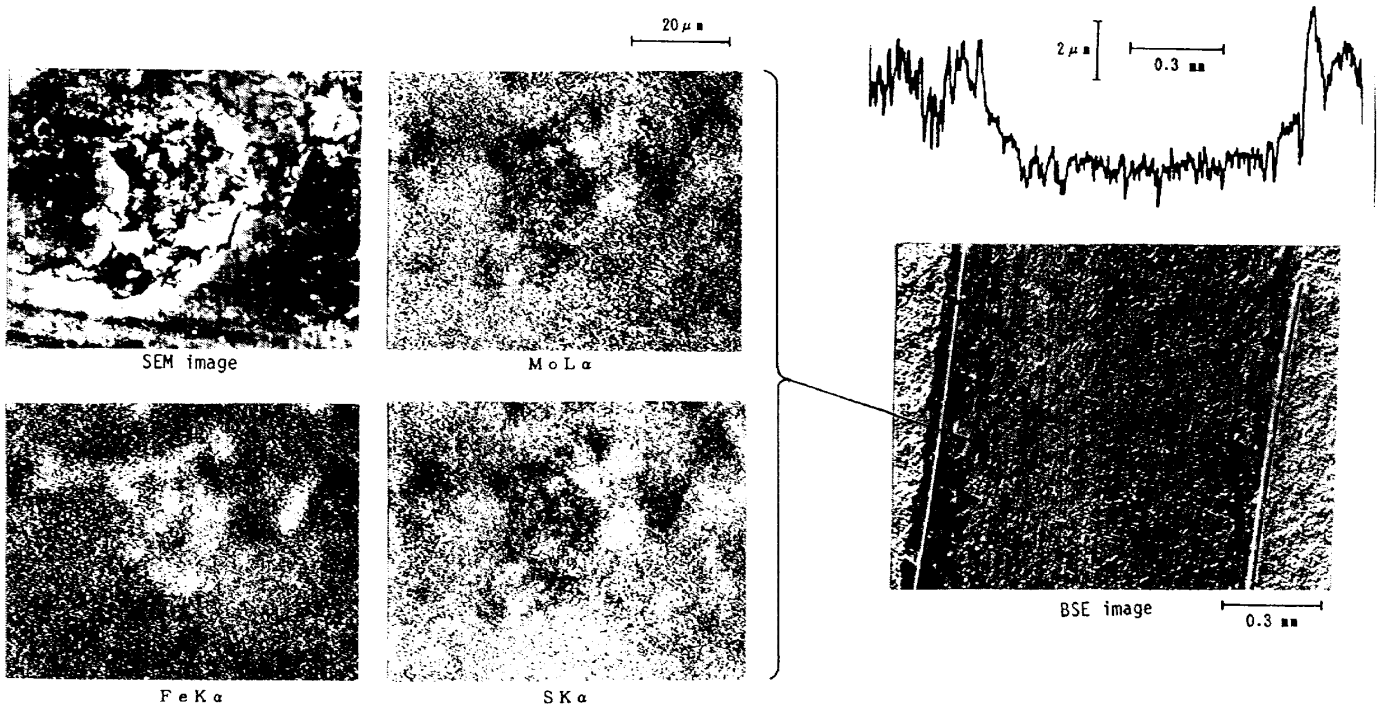


図18 摺動痕の電子顕微鏡写真、X線分析とあらさ形状
 440C/440C+MoS₂ 焼成膜 6~7 μm
 w=10N, v=1.5m/s, dry air

4. まとめ

ピン/ディスク型摩擦試験機を用い、おもに二硫化モリブデンのスパッタ膜について乾燥空气中で摩擦試験を行い、固体潤滑被膜が破断する状態を振動加速度で検出することを試みた。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 摩擦するにともない被膜の一部が破断する時点は、二硫化モリブデンスパッタ膜については、摩擦力方向の加速度振動のカートシス値により検知できる。
- (2) 実効値、ピン・アーム系の固有振動数の周波数分析では、摩耗が進行し金属接触が相当の部分を占めるまでは変化が小さく、被膜の一部破断を検知するには適さない。しかし、これらの諸量は被膜が完全破断へと進むにつれて急増するため、被膜の完全破断の予知を行なうには有効である。
- (3) 二硫化モリブデン焼成膜（有機バインダ）の場合には、振動、接触電気抵抗の現れ方が、スパッタ膜の場合と全く異なっており、スパッタ

膜とは異なる摩耗過程であったと推測される。ただし、被膜の破断の検出はrms値のモニターにより可能である。

- (4) カートシス値とrms値を加算した信号をモニターすることにより、被膜の一部破断、完全破断を同時に検出できる可能性がある。

5. 謝辞

本研究の振動測定は原動機部構造研究室の振動測定解析システムを使用して行った。同システムを利用させて頂き、かつ振動解析に有益な助言を頂いた宮地敏雄室長に深く感謝します。また、周波数分析器を使用させて頂いた原動機部齊藤喜夫主任研究官、摩擦痕の写真撮影と元素分析にあたりEPMAを使用させて頂いた構造力学部寺田博之室長、青木由雄主任研究官に感謝します。さらに、二硫化モリブデン焼成膜を提供して頂いた(株)川邑研究所、実験に協力された慶応大学生（当時）平野周、松崎公彦の両君に感謝します。

参考文献

- (1) 曾田範宗、宮原儀芳、深谷敏夫：二硫化モリブデンの潤滑作用（第2報）—MoS₂混入油の境界潤滑性能と固体潤滑膜の摩耗—，潤滑，21,2（1976） pp.82-89
- (2) 西村允、野坂正隆、鈴木峰男、関勝美、宮川行雄：高周波スパッタリング法による二硫化モリブデン膜の潤滑特性に関する研究、航空宇宙技術研究所報告TR-903（March 1986）
- (3) 五十嵐昭男、野田万朶、松島英一：転がり軸受の異常予知—損傷の形態と振動パターンとの関係—、NSKベアリングジャーナル No.639（Feb.1980） pp.1-9
- (4) M. S. Darlow and R. H. Badgley : Early detection of defects in rolling-element bearings. SAE Paper 750209（1975）
- (5) M. S. Darlow and R. H. Badgley : Application for early detection of rolling-element bearing failure using the high-frequency resonance technique, ASME Paper 75-DET-46（1975）
- (6) 西尾健二、星谷昌二、宮地敏雄：振動の監視による転がり軸受の故障の早期発見に関する研究（第1報 40番タービン油潤滑玉軸受）、航空宇宙技術研究所報告TR-601（Feb.1980）
- (7) 星谷昌二、関勝美、西尾健二、宮地敏雄：振動の監視による転がり軸受の故障の早期発見に関する研究（第2報 グリース潤滑玉軸受）、航空宇宙技術研究所報告 TR-675（July1981）
- (8) P. D. McFadden and J. D. Smith : Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique, a review. Tribology international, 17, 1（Feb. 1984） pp. 3-10
- (9) 宮地敏雄、関勝美：振動の監視による転がり軸受の故障の早期発見に関する研究（第3報はく離の検出限界）、航空宇宙技術研究所報告 TR-902（March 1986）
- (10) D. Dyer and R. M. Stewart : Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis, Trans. ASME, J. Mechanical Design, 100（April 1978）, pp.229-235
- (11) A. A. Ruth : Kurtosis — a crystal ball for maintenance engineers, Iron and Steel International,（Feb. 1979） pp.23-27
- (12) L. M. Rogers : The application of vibration signature analysis and acoustic emission source location to on-line condition monitoring of anti-friction bearings, Tribology International 12,（April 1979） pp.51-59
- (13) T. Yoshioka and T. Fujiwara : A new acoustic emission source locating system for the study of rolling contact fatigue Wear, 81（1981） pp. 183-186
- (14) S. Braun and B. Datner : Analysis of roller / ball bearing vibration, Trans. ASME, J. Mech. Design, 101（Jan. 1979）, pp.118-125
- (15) J. D. Smith : Vibration monitoring of bearings at low speeds, Tribology International, 16（June 1982）, pp.139-144
- (16) E. Kannatey-Asibu, Jr and D. A. Dornfeld : A study of tool wear using statistical analysis of metal-cutting acoustic emission, Wear, 76（1982） pp.247-261
- (17) V. A. Belyi, O. V. Kholodilov and A. I. Sviridyonok : Acoustic spectrometry as used for the evaluation of tribological systems, Wear, 69（1981） pp.309-319
- (18) 和田正毅、水野萬亀雄：A Eによる摩擦・摩耗の観測、精密工学会誌，52，10（Oct. 1986） pp.53-58
- (19) 和田正毅、水野萬亀雄：A Eによる摩擦・摩耗の研究、精密工学会誌，55，4（April. 1989） pp.673-678
- (20) 宮川行雄、関勝美、西村允：摩耗に及ぼす湿度とピン支持部剛性の影響、潤滑，18，4（1973） pp.323-334

- ①) D. Godfrey : Vibration reduces metal to metal contact and causes an apparent reduction in friction, ASLE Trans., 10
(1967) pp.183-192
- ②) M. J. Fury : Metallic contact and friction between sliding surfaces, ASLE Trans., 4
(1961) p. 1

(付録) カートシスの定義と計算法

カートシスは連続分布データの4次のモーメントで、通常は分散で規準化し、以下のように定義されている。

$$\text{カートシス} = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^4 f(x) dx$$

ここで、 σ^2 : 分散 \bar{x} : 平均
 $f(x)$: 確率密度関数

本研究のように、コンピュータによりデジタル化されたデータ（離散化データ）からカートシスを計算する場合には、以下のようになる。

x_i を振幅分布とし、N個のデータがあるとすれば、この一群のデータのモーメントは以下のようになる。

$$1 \text{ 次のモーメント} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} = \bar{x} \text{ (平均値)}$$

$$2 \text{ 次のモーメント} = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N} = \sigma^2 \text{ (分散)}$$

$$J \text{ 次のモーメント} = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^J}{N}$$

上式から明らかなように、1次のモーメントは平均、2次のモーメントは分散を表す。また、3次のモーメント、4次のモーメントをノーマライズした値は、それぞれ、分布の偏りを現わす指標であるスキューネス (skewness)、波形の鋭さを現わす指標であるカートシス (kurtosis) とよばれ、以下の式により計算される。

$$\text{スキューネス } \beta_1 = \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^3}{N}$$

$$\text{カートシス } \beta_2 = \frac{1}{\sigma^4} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^4}{N}$$

スキューネスは「偏り度」、カートシスは「尖り度」ともよばれている。

カートシスの値の例を以下に示す。

$$\text{方形波 } \beta_2 = 1.0 \quad \text{正弦波 } \beta_2 = 1.5$$

$$\text{三角波 } \beta_2 = 1.8 \quad \text{正規分布 } \beta_2 = 3.0$$

既 刊 報 告

TR-1050T	A sensitive Test for Accuracy in Evaluation of Molecular Collision Number in the Direct-Simulation Monte Carlo Method	Jan.1990	Katsuhisa KOURA
TR-1051	マイクロ波動力航空機の飛行経路に関する一考察 A Consideration on Flight Paths for Microwave-Powered Airplanes	1990年1月	高澤金吾, 伊藤婦美子
TR-1052T	Practical Flight Paths for Microwave-Powered Airplanes	Jan.1990	Takeshi ITO
TR-1053	高密度炭化水素燃料/酸素の比推力性能の相対比較 Specific Impulse Comparison of High Density Hydrocarbon Fuel Burned with Oxygen	1990年2月	熊谷達夫 植田修一 佐藤政裕 須藤孝幸 宮島 博 渡辺篤太郎 山川正紀
TR-1054	レーザ流速計校正風洞の残留乱れと騒音測定及びその評価 Evaluation of Flow Quality in Newly Constructed Low-Turbulence Calibration Wind-Tunnel for Laser Velocimeters	1990年2月	高木正平
TR-1055	バイアスエラーを考慮した二次元ベクトル量計測における最適観測軸配置について Optimum Orientations of the Observation Axes for 2-Dimensional Vector Sensing under consideration of Bias Errors	1990年2月	木村武雄
TR-1056	直径14m風車のシステム設計とフィールド実証試験 A System Design and Demonstrative Field Test of Wind Turbine with a 14M Dia Rotor	1990年2月	外立政隆, 伊藤 忠 半澤麻雄, 野中 修 野原利雄, 小松行夫 遠藤 浩
TR-1057	CFRP箱形構造模型の静強度試験 Strength Test of CFRP Box Beam Model	1990年2月	多田保夫, 小野幸一 野原利雄, 青木由雄 林 洋一, 角田義夫 松嶋正道, 藤田久夫 岩崎和夫, 木部勢至朗
TR-1058	複合材構造試験設備を用いた熱膨張制御テーラリング技術の基礎的実証 Fundamental Verification of Tailoring Technology for Control of a Coefficient of Thermal Expansion by composite Testing Facilities	1990年3月	石川隆司, 福永久雄 林 洋一, 松嶋正道 野口 建
TR-1059	大迎角における細長物体のコーニング運動 Coning Motion of Slender Bodies at High Angles of Attack in Low Speed Flow	1990年3月	楯 篤志, 吉永 崇 井上健二

