固体粒子の摩擦面への進入機構*

梅原 徳次^{*1}, 金川 一朗^{*2}, 加藤 康司^{*1}The Entry Mechanism of Solid Particle
to the Interface between Sliding Surfaces

Noritugu UMEHARA, Ichiro KANAGAWA and Koji KATO

The entry mechanism of solid particle to the interface between sliding surfaces in unlubricated condition was experimentally investigated by the in-situ observations of entry processes with optical microscope. The number of solid particles which entered to the interfaces between sliding surfaces immediately decreased at a certain entrance angle of pin specimen. This entrance angle was named critical entrance angle. The critical entrance angles were changed with the surface roughness of sliding surfaces, the materials of specimens and the load. It was found that the roughness, the materials of specimens and the load affected the friction coefficient between particle and sliding surface and the deformation of specimens respectively. And we discussed the results with the simple model which neglected the deformation of specimens. Then we compared experimental values of critical entrance angle and theoretical values based on the model.

Key Words: Tribology, Surface Roughness, Friction Coefficient, Solid Particle, Sliding Surface, The Entry of Particles, Entrance Angle, Load, Materials of Specimens, Deformation of Specimens

1. 緒 言

摩擦する2面に硬い固体粒子がはさみ込まれた場合に生ずる問題は、各種機械の案内面や軸受等のしゅう動部で認められるものである。このような問題は、磁気記録装置、例えば、フロッピーディスクとヘッド間の摩擦や、スラリー環境で使用するポンプ等の軸受の摩擦において重要視されている⁽¹⁾⁽²⁾。また遊離砥粒による研磨においても、研磨量、および加工精度は砥粒の進入量に依存している。また、上記した土砂やダスト等の外部から進入する固体粒子のほかに、摩擦によって生じる摩擦粉の摩擦面への進入により、摩擦係数や摩擦量が大きく変化するという実験結果も報告されている⁽³⁾。

このように、固体粒子の摩擦面への進入の問題は、その対象が、摩擦、摩擦、潤滑といった問題すべてに影響を与える基本的な問題であることがわかる。また、もし接触面への粒子の進入を制御することが可能となれば、これら多くの現象を、よりよく制御するこ

とができる。

しかし、従来行われている研究^{(4)~(6)}は、いずれも固体粒子が摩擦面へ進入した後の議論が主であり、粒子の進入形態や進入のメカニズムについての研究は、ほとんど行われていない。そこで本研究においては、乾燥状態における固体粒子の摩擦面への進入機構を明らかにすることを目的とする。そのために、粒子の摩擦面への進入形態のその場観察を行い、入口角と進入率の関係を示す。さらに、その入口角と進入率の关系到及ぼす、摩擦面表面粗さと荷重の影響を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

図1に本研究用で用いられた実験装置の概略図を示す。実験装置において、上部試験片のピンは、上下方向にのみ可動であり、下部試験片のプレートは、水平方向に移動することが可能なスライダの上に固定されている。固体粒子は、プレート上に1個のせ、プレートをスライドさせることにより、ピンとプレートの試験片間の摩擦面に進入させる。粒子がピンとプレートの試験片間の摩擦面に進入していくようすは、水平方向から実体顕微鏡(1~53倍)によりその場観察され、同時に写真撮影される。

* 原稿受付 1998年2月17日。

^{*1} 正員、東北大学大学院工学研究科(☎980-8579 仙台市青葉区若巻字青葉01)。^{*2} ソニー(株)仙台テクノロジーセンター(☎985-0842 多賀城市桜木3-4-1)。

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Fig. 2 Shape and dimension of specimens

図2, 表1に試験片の寸法と形状およびその諸特性をそれぞれ示す。図2に示したピン試験片の角度 θ を, 本研究において入口角と呼ぶ。粒子形状は, 円筒状のものをを用い, その長手方向がプレートのスライド方向に垂直になるようにのせ実験を行った。

実験はすべて, 大気中乾燥状態でい, 一つの実験条件につき5回以上行った。本研究においては, ある実験条件における全実験数に対する, 摩擦面に粒子が進入した実験数の割合を百分率で表したものを進入率と定義する。

本研究の実験条件を表2に示す。

3. 実験結果

3・1 入口角と進入率の関係 本研究で得られた典型的な入口角と進入率の関係を図3に示す。

図3より, 入口角が小さいときは進入率は大きい, ある入口角以上で, その進入率は急激に減少し, 進入しなくなることがわかる。このことは, 進入率が100%から0%に遷移する臨界の入口角が存在することを示している。

3・2 粒子の摩擦面への進入形態 粒子の摩擦面への進入形態は, 実験条件, 例えば, 入口角度, 摩擦面の表面粗さ, 荷重などを変化させることにより, さまざまに変化することが観察された。その結果, 図4に示すように, 進入する場合は3種類(a)~(c), 進入しない場合は4種類(d)~(g)の形態に大別できることがわかった。

3・3 プレート表面粗さと臨界入口角の関係 3・1節において示した臨界入口角は, 固体粒子の摩擦面への進入しやすさ(しにくさ)を示すパラメータと考える

Table 1 Materials properties of specimens

	Pb	Bs	SUS304
Young's modulus E ,GPa	14	95	197
Yield stress Y ,MPa	33	110	265
Vickers hardness H _v ,MPa	55.9	1250	2260

Table 2 Experimental conditions

Particle(size)	Pb(ϕ 0.25mmx1mm) (ϕ 1.0mmx1mm) Bs(ϕ 0.2mmx1mm) SUS304(ϕ 0.2mmx1mm)
Pin	Pb ,Bs
Entrance angle θ ,degree	Pb : 10 ~ 83 Bs : 14 ~ 76
Maximum surface roughness of pin , μ m	Pb : 2.0 Bs : 2.8
Plate	Pb ,Bs
Maximum surface roughness of plate , μ m	Pb : 2.0 Bs : 16 2.8 0.95 0.40
Load , N	0.5,1.0,1.5,2.0,3.0,3.5
Lubrication condition	Unlubricated

Fig. 3 Relationship between entry rate and entry angle

ことができる。ここで, 進入率が0%から100%に急激に遷移する入口角を臨界入口角とすべきであるが, 本実験においてある入口角の場合, 0%と100%の間の割合を示したため, 本研究では, 進入率が50%になる入口角を臨界入口角と定義した。そのように定義された臨界入口角に及ぼすプレート表面粗さの影響を次に示す。

図5に, プレート表面粗さと臨界入口角の関係を示

Fig. 4 (1/2)

Fig. 4 (2/2) Entry mode of particle to the interface

Fig. 5 Effect of surface roughness of plate specimen on critical entrance angle

Fig. 6 Effect of contact load on critical entrance angle

す。図5より、臨界入口角はプレート表面粗さが、 $2\sim 3\mu\text{m } R_{\text{max}}$ までは、急激に増加し、その後は、緩やかに増加することがわかる。

3.4 荷重と臨界入口角の関係 荷重と臨界入口角の関係を図6に示す。図6より、荷重がある値までは臨界入口角は、荷重によらず、ほぼ一定であるが、荷重がさらに増加すると、臨界入口角は、減少することがわかる。

4. 考 察

4.1 表面粗さの摩擦係数に及ぼす影響 3.3節において、プレートの表面粗さが、臨界入口角、つまり固体粒子の進入に大きく影響を及ぼすことを示した。その原因としては、摩擦面の表面粗さを変えることにより、粒子とプレート間の摩擦係数が変化することが考えられる。

そこで、まずはじめにプレートとピンに用いた試験片と粒子との間の滑り摩擦の摩擦係数を摩擦力を測定することにより算出し、摩擦係数の臨界入口角に及ぼす影響について検討する。

図7に、表面粗さと摩擦係数の関係について示す。図7より、表面粗さが $3\mu\text{m } R_{\text{max}}$ より小さいとき、表面粗さの増加とともに、急激に摩擦係数が増加し、その後緩やかに増加していることがわかる。このような摩擦係数と表面粗さの関係は、図5と比較することにより、臨界入口角とプレートの表面粗さの関係に、非常に似ていることがわかる。

このような結果をもとに、摩擦係数と臨界入口角の

Fig. 7 Relationship between friction coefficient and surface roughness

Fig.8 Effect of friction coefficient between plate and particle on critical entrance angle

関係を図8に示す。図8より、摩擦係数と臨界入口角の関係は、ほぼ比例関係であることがわかる。このことは、摩擦係数の値が、直接、臨界入口角の値に影響を及ぼしていることを示している。

以上より、固体粒子の摩擦面への進入において、摩擦面表面粗さは、粒子と摩擦面間の摩擦係数に影響を及ぼすため、その結果、臨界入口角に影響を与えていると考えることができる。

4・2 荷重の各試験片の変形に及ぼす影響 3・4節において示された臨界入口角に及ぼす荷重の影響が、荷重による各試験片(粒子、ピンおよびプレート)の変形に起因していると考え、各試験片の変形の影響について検討する。

本研究における進入実験においては、摩擦面と粒子の接触状態は、平面と円筒の接触である。一般に、このような平面と円筒の接触において、接触点の平均接触圧力を P_m とし、平面および円筒の降伏応力のうち小さい方の降伏応力を Y とすると、 P_m が

$$P_m = 1.1Y \quad \dots\dots\dots (1)$$

を超えたとき、弾性限度を超し、塑性変形を開始し

$$P_m = cY \quad (c \approx 3) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で、塑性域は、急激に大きくなり、接触域まわりの材料のすべてが塑性変形をおこし流動するということが知られている⁽⁷⁾。

また、一般に、

$$H_v = 3Y \quad \dots\dots\dots (3)$$

と考えることができる⁽⁸⁾ ので、式(2)は、

$$P_m = H_v \quad \dots\dots\dots (4)$$

と考えられる。

そこで、 $P_m \geq H_v$ の塑性変形が生じる条件において、

Fig.9 Plastic deformation in contact

その変形量を次のように評価する。まず、粒子と摩擦面において、摩擦面の硬さのほうが小さい場合、塑性変形は図9に示すように硬さの小さい摩擦面のみで生じると考える。このとき、粒子の半径を r 、粒子の摩擦面への食い込み量を h とすると h/r というパラメータにより摩擦面の塑性変形の程度を評価することができる。ここで、 h は接触面の幾何学的条件から、接触幅 a より次式で表される。

$$h = r - (r^2 - a^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、加工硬化の生じない場合、硬さと接触面積の関係により、

$$H_v = W/(2al) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。ただし、 l は粒子の長さ、 H_v は摩擦面のビッカース硬さである。式(5)、(6)より a を消去することで、 h/r は、次式で表される。

$$h/r = \begin{cases} 1 - \left(1 - \left(\frac{W}{2lH_v}\right)^2\right)^{1/2} & (P_m \geq H_v) \\ 0 & (P_m < H_v) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

一方、粒子の硬さの方が摩擦面より小さい場合には、式(7)の H_v に粒子の硬さを代入することで、粒子の塑性変形の程度を表す量として h/r を求める。また、粒子と摩擦面の硬さが等しい場合は、式(7)の H_v に、どちらかの H_v を代入し、得られる h/r の1/2の値をそれぞれの塑性変形の程度と考える。

図10に h/r と臨界入口角の関係を示す。接触部における各試験片の塑性変形の有無を、計算した P_m と H_v の値を比較し判別した結果、ここで示す h/r の値は、ピン、粒子およびプレートの各試験片において、塑性変形した試験片における h/r の値を示している。図10より、変形が生じていても、ある h/r の値までは、臨界入口角は、一定であるが、その値を超えると、臨界入口角が低下することがわかる。また、臨界入口角が低下し始める h/r の値を、変形する試験片の違いによって比較すると、ピン試験片が変形する場合は、その h/r の値は小さいが、粒子が変形する場合は大きく、プレート試験片が変形する場合は、 h/r が増加し

Fig. 10 Relationship between h/r and critical entrance angle

Fig. 12 Comparison of theoretical critical entrance angle pith experimental critical entrance angle

Fig. 11 Forces for a particle

変形が生じても臨界入口角が低下しないことがわかる。つまり、塑性変形の臨界入口角に及ぼす影響は、塑性変形する試験片により異なると考えられる。

ピン試験片、粒子およびプレート試験片のうち、二つ以上が変形する場合については、上述した臨界入口角へ及ぼすピン、粒子およびプレートそれぞれの試験片の変形の影響が、複雑にからみあうことが考えられる。

4・3 進入のメカニズム 粒子や摩擦面の変形等を見無視した図 11 のような場合において、粒子が摩擦面へ進入する条件を考える。粒子の進入する条件は、進入実験およびその場観察の結果を参考にして、図 11

において、粒子に左方向の力が作用し、かつ、粒子が左回転をするような力が作用したときと考えることができる。図 11 に示したように、粒子と上下面の摩擦係数を μ_1 、 μ_2 とし、粒子に作用する上下面からの垂直力 F_1 、 F_2 、および粒子に作用する摩擦力 $\mu_1 F_1$ 、 $\mu_2 F_2$ を考えると、粒子の進入する条件は、水平方向の力の和が F_2 方向に正でなければならないから、次のようになる。

$$\mu_2 F_2 > F_1 \sin \theta - \mu_1 F_1 \cos \theta \quad \cdots \cdots (8)$$

また、進入する際の粒子の回転は時計方向、あるいは回転なしでなければならないから、モーメントの釣合により、

$$\mu_2 F_2 \geq \mu_1 F_1 \quad \cdots \cdots (9)$$

となる。また、荷重を W とすると垂直方向の力の釣合より、

$$W = F_2 = \mu_1 F_1 \sin \theta + F_1 \cos \theta \quad \cdots \cdots (10)$$

$$\therefore F_2 / F_1 = \mu_1 \sin \theta + \cos \theta \quad \cdots \cdots (11)$$

となる。式(11)を式(8)、(9)に代入し、 F_1 、 F_2 を消去すると、進入するときの μ_1 、 μ_2 および θ の関係は、次の式で表される。

$$\mu_2 > \frac{\tan \theta - \mu_1}{1 + \mu_1 \tan \theta} \quad \cdots \cdots (12)$$

$$\mu_2 \geq \frac{\mu_1}{\mu_1 \sin \theta + \cos \theta} \quad \cdots \cdots (13)$$

摩擦係数 μ_1 , μ_2 が、既知であれば、同様にその μ_1 , μ_2 を式(12), (13)に代入することにより、その摩擦係数の条件での臨界入口角を求めることができる。そこで、このように推定される臨界入口角の理論値と、実験値の比較を図12に示し、検討を行う。ここで、式(12), (13)に代入した摩擦係数 μ , μ_2 の値は、4・1節において示した、実測の摩擦係数の値である。図12より、いずれの試験片材質の組合せにおいても実験値は、理論値より、荷重が0.5 Nの場合、10°から最大30°、荷重が3.5 Nの場合、最大60°程度小さい値になっていることがわかる。この実験値と理論値の差の原因としては、実際の進入実験においては、転がり滑り摩擦における摩擦係数を考えなくてはならないところを、滑り摩擦の実験により得た摩擦係数 μ_1 , μ_2 の値を用いたことや、粒子や摩擦面の変形を考慮しなかったことが考えられる。

5. 結 言

摩擦面への固体粒子の進入形態のその場観察を行い、固体粒子の摩擦面への進入に及ぼす入口角、表面粗さおよび荷重の影響を明らかにした。以下に本研究で得られた結論を記す。

(1) 進入率(ある実験条件における、全実験数に対する摩擦面に粒子が進入した実験数の割合)が、100%から0%に遷移する臨界入口角が存在する。

(2) プレーットの表面粗さ(最大高さ粗さ R_{max})が増加すると、プレートと粒子間の摩擦係数が増加し、

その結果臨界入口角が増加する。

(3) 臨界入口角は、固体粒子とプレート間の摩擦係数に比例して大きくなる。

(4) ピンあるいは固体粒子が塑性変形する条件においては、臨界入口角は荷重とともに減少する。一方、ピンおよび固体粒子が変形せずに、プレートのみが変形する条件においては、臨界入口角は荷重に無関係である。

(5) 粒子および摩擦面の変形を考慮しないモデルにおいて、滑り摩擦における摩擦係数を用いて臨界入口角の理論値を求め、実験値と比較すると、荷重0.5 Nの場合、実験値は理論値より10~30°小さく、荷重3.5 Nの場合、実験値は理論値より10~60°小さくなる。

文 献

- (1) Bhushan, B., *Wear*, **136**(1990), 169-197.
- (2) 涌川朝宏・相吉澤俊一・高木清和・紺野大介, 機論, **53-491**, B(1987), 2094-2098.
- (3) Iwabuchi, A., Hori, K. and Kubosawa, H., *Wear*, **128**(1988), 123-137.
- (4) Xuan, J. L., Hong, I. T. and Fitch, E. C., *Trans. ASME, J. Tribol.*, **111**(1989), 35-40.
- (5) Rabinowicz, E., *Wear of Materials*, (1983), 12-18.
- (6) 笹田直・尾池守・江森信彦, 潤滑, **27-12**(1982), 922-929.
- (7) バウジン, F. P., テーパ, D., (曾田範宗訳), 固体の摩擦と潤滑 (1961), 11, 丸善.
- (8) ホーリング, J.編 (松永正久監訳) トライボロジー, (1984), 51, 近代科学社.