すべり摩擦開始時の動的挙動*

小川 欽也^{*1}, 樋田 晃宏^{*2}
野村 雅彦^{*2}, 杉山 文子^{*3}

Onset of Kinetic Friction and Its Dynamic Characteristics

Kinya OGAWA, Akihiro HITA,
Masahiko NOMURA and Fumiko SUGIYAMA

Transient behaviour from static to kinetic friction and the dynamic response of a contact surface were experimentally investigated on two bodies with a large contact area. Slip and tangential force at several locations over the contact surface were measured. Slip is initiated locally in a small region associated with a sudden decrease of local tangential force and propagates over the surface generating a stress concentration to break junctions in adjacent regions, finally followed by a large-scale slide between the two bodies. Propagation of slip depending on the intrinsic strength of junctions and their distribution on the contact surface can be increased to as high as the elastic stress wave velocity. It is also found that the unloading stress wave which is emitted from the slip region is reflected at specimen boundaries to the contact surface and plays an important role in its dynamic response.

Key Words: Tribology, Micromechanics, Stress Wave, Transient Behaviour, Slip Propagation

1. 緒 言

接触している物体が接線力を受けて動き出す, すなわち静止摩擦状態から動摩擦状態へ移る際の挙動については多くの研究が行われてきており, その結果, 巨視的なすべり出しに先行して微視的なすべりが生じることが明らかになった^{(1)~(4)}. しかしながら, この微視的なすべりが巨視的なすべりへと変化する過程は動摩擦状態を理解する上で最も本質的なものであるにもかかわらず, いまだに十分な説明が行われていない. 接触面の力学的状況は微視的には一様でないと考えられるから, 静止摩擦状態から動摩擦状態への変化が局所的に生じることが予測され, そのような局所的なすべりがいわゆる微視的なすべりと密接な関係を持っていることが考えられる. 従来行われてきた, すべり出し時のすべり量と外力との巨視的な関係にのみ注目する方法^{(5),(6)}では, このような局所的な挙動を明確にすることはできない. そこで本研究では比較的大きな接触面積をもつ二物体について, 動摩擦開始時の接触面近傍

でのひずみを計測するとともに, 極めて短時間内に起こる相対変位の局所的な変化をも捉え, 微視的なすべりから巨視的なすべりへと移行する過程とその際に生じる動的な挙動を明らかにした.

2. 試験片および試験方法

図1に試験装置と試験片を示す. 試験片はPMMA(ポリメチルメタクリレート)平板であり表1にその力学的性質を示す. 幅300 mm, 高さ180 mm, 厚さ10 mmの2枚の試験片を, 幅10 mm, 長さ118 mmにわたって上下に接触させ, すべり方向を平板面内にして, すべらせる. 試験片の接触面近傍での応力状態を知るため, ①から④の位置に45°-45°ロゼットゲージ(ゲージ長1 mm)を表裏両面に貼り, 面内ひずみを測定し, 接線力の負荷により生じるせん断ひずみを正の値にした. 上下の試験片の局所的な相対変位の測定には, 厚さ0.3 mmのスチロール板を図に示す形状に加工し, 表裏にひずみゲージ(ゲージ長3 mm)を貼った小形変位計を用いた. 変位の測定範囲は0.15 mmまでであり, この範囲では出力の線形性が保たれている. ①から④のロゼットゲージをそれぞれ跨ぐ位置に, これらの変位計の脚部を小さな台部を介して上下の試験片に取付け, 変位計に引張ひずみが発生するよう試験

* 原稿受付 平成6年1月28日.

*¹ 正員, 京都大学工学部 (〒616 京都市左京区吉田本町).*² 京都大学工学部学生[現:三菱自動車(株)].*³ 京都大学工学部.

片をすべらせた。直流ブリッジよりのひずみゲージの出力は周波数帯域 1 MHz の増幅器によって 100 倍に増幅された後、7 ビット、8 チャンネルのデジタルメモリーに記憶され、 GPIB を介してパーソナルコンピュータに取り込まれた。長時間の記録はサンプリング速度 20 ms、短時間の記録はサンプリング速度 1 μ s で行い、得られた結果にはそれぞれ 50 Hz、200 kHz 以上のノイズを除くための移動平均操作を施した。座屈を防ぎ、垂直に保持するため、試験片を両面 16 箇所 に設けたローラにより滑らかに支持した。また、接触面内の垂直応力分布を任意に調節できるよう、上下の端面には左右に滑らかに移動できる金属板とローラを組合せた調整板 (A) を設置した。垂直力をオートグラフのクロスヘッドの移動により加え、接線力を油圧ジャッキ (B) により与えた。なお、接線力によるモーメントの発生を防ぐため、図に示したジグにより対向する負荷点を接触面の延長上に位置させた。接触面は機械加工後、バフ研磨し、鏡面状態に仕上げた。

3. 試験結果

3.1 接触面上の圧力分布 試験片の上下端に設置した調整板の厚さおよび位置を変化させ、接触面にはほぼ一様な垂直力が負荷されていることを試験片両面の 8 箇所のひずみゲージの出力より確認した後、接触面に感圧紙 (商品名プレスケール、富士フィルム製) を

図 1 試験片および試験装置

挿入し、垂直応力分布を測定するとともに接線力を増加して、試験片に相対すべりを生じさせた。偏心垂直力の場合には、①での垂直応力が④での値のほぼ 5 倍になるように負荷した。図 2 には、(A)一様垂直力を負荷した場合、(B)偏心垂直力を負荷した場合について得られた接触面内の圧力分布を示す。一様垂直力を負荷した場合においても、必然的に左右端部に高い濃度の高圧力部が見られるが、大部分の領域ではほぼ一様な圧力状態であり、この状況はすべりを生じさせた場合にも変化しない。偏心垂直力の場合、右端が高圧力部であり左方に行くほど連続的に圧力が減少している。なお、(A)では低圧用 (感度 10~100 kgf/cm²)、(B)では超低圧用 (5~25 kgf/cm²) フィルムをそれぞれ用いた。

3.2 すべり開始前後の巨視的挙動

図 3 (a) には一様垂直力の場合に、垂直力の負荷、接線力の負荷、試験片のすべり、接線力の除荷、垂直力の除荷までの過程について④の位置で生じた相対変位および垂直ひずみの挙動を示す。A 部では、垂直力のみを 200 kgf まで段階的に増加させた。垂直力の増加に伴い直ひずみは増加するが、相対変位は若干減少するのが認められる。これは垂直力により試験片のずれが生じたことによるものと考えられる。B 部は垂直力 200 kgf の状態であり、C 部では接線力を徐々に増加させた。これに伴い直ひずみが若干減少するが、これは接線力の増

表 1 試験片 PMMA の力学的諸性質

E (Young's modulus)	4.1×10^3	MPa
G (Shear modulus)	1.4×10^3	MPa
ν (Poisson's ratio)	0.42	
ρ (Density)	1.21	g/cm ³
$C_E = \sqrt{E/\rho}$ (Longitudinal wave velocity)	1.8×10^3	m/s
$C_G = \sqrt{G/\rho}$ (Shear wave velocity)	1.1×10^3	m/s
$C_L = \sqrt{E/\rho(1-\nu^2)}$ (Longitudinal wave velocity in an infinite plate)	2.0×10^3	m/s

(A) 一様垂直力の場合
(B) 偏心垂直力の場合

図 2 接触面の圧力分布

加により接触面全面が左方に移動する際、試験片の上下端は摩擦により左方への移動を多少とも阻止されるため上部の試験片には右回りの、下部の試験片には左回りのモーメントが生じ、このため接触面の左部分では主として直ひずみの減少が、右部分では直ひずみの増加が発生した結果であると考えられる。D部では巨視的なすべりが急激に生じ、相対変位が急増する。直ひずみの変化はこの図からは明確でなく、後に詳しく示す。図3(b)に示した偏心垂直力の場合もほぼ同じ

挙動が見られるが、図中のA部での相対変位の減少とC部での増加が特徴的である。前者の原因は不明であるが、後者は接触面内の低圧部分で徐々にすべりが生じたためであると考えられる。すべりの発生に伴う垂直ひずみの変化は一樣垂直力の場合と偏心垂直力の場合のいずれにおいても極めてわずかである。したがって、以下ではすべり発生に伴う直ひずみの変化、すなわち垂直力の変化はないとして考慮しない。

3・3 すべり開始前後の微視的挙動 図4には一

図3 相対変位および垂直ひずみの変化

図4 位置①～④での相対変位(a)およびせん断ひずみ(b)の変化(一樣垂直力の場合)

様垂直力の場合の①～④の各位置で観測した相対変位とせん断ひずみの時間変化を示す。まず時刻 A において①でのせん断ひずみが急激に減少し、やや遅れて①の位置での相対変位が増加しはじめる。この時点では他の位置ではせん断ひずみ、相対変位のいずれも変化しておらず、①の近傍で局所的なすべりが開始したことがわかる。次いで時刻 B において②の位置のせん断ひずみが急激に減少し、わずかに遅れて相対変位が増加しはじめる。同様に時刻 C で③でのせん断ひずみが減少し、相対変位が増加し、時刻 D において④のせん断ひずみが減少し、少し遅れて相対変位が増加する。これ以後すべての位置での相対変位は急激に増加し続け、接触面全体がほぼ一様な速度ですべる巨視的なすべりが生じている。この間せん断ひずみはほぼ一定である。時刻 E 以後では相対変位の増加がやや緩くなり、せん断ひずみも①ではやや減少しはじめ、②～④ではやや増加する。これはすべりによって開放された接触面での応力が弾性除荷波として試験片中を伝ばし、これが周辺で反射された後再び接触面に到達したことによって引き起こされた結果であり、この点については後に考察する。なお、すべりの開始場所は一定しているわけではなく、②あるいは③の近傍で開始することもある。その場合にはすべりは両方向に拡大するが、伝ばの状況は上に述べた場合と同様である。

図 5 には偏心垂直力の場合の結果を示す。時刻 A に

において、垂直力が最も低い④の位置のせん断ひずみが急激に減少し、やや遅れて相対変位が緩やかに増加し始める。しかし、他の位置ではせん断ひずみ、相対変位のいずれも変化しておらず、④の近傍でのみ局所的なすべりが生じていることがわかる。時刻 B において③の位置でのせん断ひずみが減少し、これに伴って相対変位が緩やかに増加する。この時点では①②の位置では相対変位は変化していないが、せん断ひずみは増加している。時刻 C では②の位置でのせん断ひずみが減少し、やや遅れて相対変位が増加し始める。③④の位置での相対変位の増加は依然として緩やかであるが、①の位置でのせん断ひずみは急激に増加する。時刻 D において①の位置でのせん断ひずみが急激に大きく減少し、これに応じて相対変位は急激に増加し始める。これ以後②～④の各位置での相対変位は急速に増加し始め、巨視的なすべりが生じていることがわかる。また、せん断ひずみはいずれの位置においても緩やかに減少し続ける。時刻 E 以後の挙動は一樣垂直力の場合とほぼ同じであるが、①および②でのせん断ひずみが大きく増加した後、減少するのが認められる。この点については後に考察する。

図 6 には同じく偏心垂直力の場合について、①と④の位置での相対変位の時間変化を 20 ms のサンプリングで記録した結果を示す。巨視的なすべりの生じる時刻 C より十分以前の時刻 A において、④の位置で

図 5 位置①～④での相対変位(a)およびせん断ひずみ(b)の変化(偏心垂直力の場合)

はすべりが生じ始めているが、①ではすべりが起こっていない。その後、接線力を段階的に増加すると、これに応じて相対変位も段階的に増加する。すなわちこの際の局所的なすべりは接線力が一定であると停止することを示している。時刻 B において①の位置でもすべりが生じるが、やはりこのすべりも一定の接線力では停止する。これに対し、図 4, 5 について述べた局所的なすべりは一定の接線力で進行し続ける動的なすべりであり、巨視的なすべりを引き起こす本質的な現象である。

図 7 には⑤の位置で観測した水平方向の直ひずみと、①と③での相対変位の時間変化の一例を偏心垂直力の場合について示す。③での局所的なすべりが時刻 A で生じて①でのすべりが生じない限り、①の近傍にある⑤の位置での水平方向のひずみはほとんど変化しない。①でのすべりが生じ始める時刻 B でわずかに減少する傾向が認められるが、巨視的なすべりが生じた

図 6 位置①, ④での相対変位の変化

図 7 位置⑤での水平方向ひずみと位置①, ③での相対変位の変化(偏心垂直力の場合)

と推定できる時刻 C に至って始めて水平方向の直ひずみは急激に減少する。このことは接線力の負荷点近傍ですべりが生じた場合にはただちに接線力の変化としてすべりをとらえることができるが、そうでない場合には接触面全体にわたっての巨視的なすべりが起こって初めて接線力の変化としてすべり出しをとらえることができることを意味している。

3・4 局所的すべりの伝ば速度 相対変位計により測定した相対変位、速度は接触面での値ではなく、それよりわずかに離れた接触面近傍のものであるが、ここでは接触面でのすべり量、すべり速度であるとする。局所的すべりの伝ばする速度が一定であるとは必ずしもいえないが、局所的すべりが 2 番め以降に到達した区間における平均速度をすべりの伝ば速度とした。各位置での局所的すべりの開始時刻として、(1)せん断ひずみの急激な減少が生じる時刻、(2)相対変位の増加が開始する時刻の二つが考えられるので、それぞれ五例について伝ばの平均速度を求め表 2 に示した。一様垂直力の場合には、板厚に比べ長い波長の縦弾性波が板を伝わる速度 $C_L^{(7)}$ に近いことがわかる。一方、偏心垂直力の場合は、これに比べて約 1/10 と小さい。

3・5 すべりの速度(相対速度) 表 3 にはそれぞれ五例について求めた局所的なすべりと巨視的なすべりの平均速度を示す。一様垂直力の場合には、図 4 に示したように局所的すべりの持続時間は非常に短く、その速度を正確に求めるのは困難である。偏心垂直力

表 2 すべりの伝ば速度

	Uniform normal force	Eccentric normal force
$V_{ps}(\text{m/s})$	$(1.9 \sim 2.0) \times 10^3$	$(2.2 \sim 2.7) \times 10^2$
$V_{pr}(\text{m/s})$	$(1.4 \sim 1.6) \times 10^3$	$(1.6 \sim 2.2) \times 10^2$

V_{ps} : Propagation velocity of local slip measured by strain gauge

V_{pr} : Propagation velocity of local slip measured by relative displacement gauge

表 3 すべりの速度(相対速度)

	Uniform normal force	Eccentric normal force
$v_l(\text{m/s})$	—	$(2 \sim 4) \times 10^{-2}$
$v_m(\text{m/s})$	$(2 \sim 5) \times 10^{-1}$	$(3 \sim 5) \times 10^{-1}$

v_l : Velocity of local slip

v_m : Velocity of large scale slip

の場合には持続時間の十分長い局所的なすべりが観測でき、局所的なすべり速度は巨視的な速度に比べ1けた小さいことがわかる。

4. 考 察

4・1 試験片周辺からの反射応力波の影響 局所的なすべりが生じ接触面の上下の粒子が接線力方向への運動を開始すると、その領域のひずみは開放され、これが試験片の全域に弾性波として伝ばされる。接触面近傍では縦波⁽⁷⁾が水平方向へ伝ばし、左右の自由端で反射されて再び接触面に入射してくる。局所的なすべりが生じてから反射波が到達し始めるまでの時間は位置によって異なるが、伝ば速度の大きい縦波の場合を考えると、①、④では約100 μs 、②、③では約140 μs である。一方、上下方向へ伝ばする弾性波はほぼ横波と考えられ、これも試験片上下端で反射され、約360 μs 経過後に再び接触面へと入射してくる。したがって、一様垂直力の場合の局所的なすべりの伝ばはいずれの反射波も到達していない時間内に行われており、接触面内の隣接する領域でのすべりによって直接引き起こされた現象である。また、局所的なすべりが発生してから巨視的なすべりが発生するまでにも反射波は寄与していない。このことは、外力が一定のもとで局所的なすべりの発生から巨視的なすべりの発生への過程が進行すること、すなわち、動的な現象であることを意味している。これに対して、偏心垂直力の場合には、局所的なすべりが1箇所が生じてから他に伝ばするまでに十分な時間経過があり、この間に試験片端部より反射してきた弾性波は繰返し接触面に入射している。すなわち、局所的なすべりが外力とほぼ静的な釣合い状態で進行している。

巨視的なすべりが発生すると、接触面のひずみが全面にわたって解放されるため強い弾性除荷波が伝ばし、これが試験片端部で反射される。左右の端部は自由端であるから、ここで反射された波は接触面をさらに同方向にすべらせるが、上下端部は調整板に働く摩擦によってその動きが多少とも妨げられるため、固定端に近いと考えられる。したがって、上下方向に伝ばした弾性波が接触面に入射すると、すべりを阻止するように働く。実際、図4の③、④の位置あるいは図5の①、②の位置で巨視的なすべりが生じた時刻より360 μs 経過したEの時刻で、すべりが減速し始めているのがわかる。これらの位置では局所的なすべりの発生が遅れていることから、他の場所に比べるとすべりにくく、上下端からの反射波によって、すべりは阻止されやすいと考えられる。他の位置では最初に到達する

反射波によってはすべりは減速されないが、引き続き到達する反射波によって徐々にすべり速度は低下し、すべての位置において停止後、逆方向にすべり始める。図7について述べたように巨視的なすべりが生じ、試験片が急激に移動すると、これによって加えていた外力が減少しこれがすべりを減速する要因ともなるが、この外力の減少によって逆方向のすべりを生じることは考えられない。したがって、ここに述べた逆方向のすべりは上下端部での拘束によるものと結論できる。図5の①～④の位置での相対変位から、すべりが停止する時刻はそれぞれ異なっている。すなわち、すべり出しの時と同様に停止する際にも接触面全域が同時に停止するのではなく、すべりにくい場所が停止しても、すべりやすい部分ではすべりが続行する。したがって、すべり続ける部分は停止した部分に対して力を及ぼすことになり、せん断ひずみの増加をもたらす。①でのすべりは最も早く時刻Fで停止するが、②でのすべりは継続している。これにより①でのせん断ひずみは増加している。ここで時刻Eにおいて既にせん断ひずみが増加し始めているのは、②でのすべり速度が①での速度より大きくなり始めたことによると考えられる。①でのすべりが停止することで、あるいはさらに逆方向にすべりを生じることで、②には逆方向にすべりを生じる力が働くが、一方では③の位置ではすべりが続行しておりこれによって②にはすべりを続行させようとする力も働く。結局これら互いに逆に働く力によって時刻Gで②でのすべりはいったん停止し、継続して入射してくる上下端部からの反射波によって逆方向にすべり始める。したがって、②でのせん断ひずみの増加は①の場合ほど著しくはない。同様な状況が③、④においても生じるが、逆方向に顕著なすべりが起こる④では、時刻GからIにおいてせん断ひずみが減少し続ける。時刻H以後の①でのせん断ひずみの減少は②での逆方向へのすべりが継続することによって生じていると考えられる。

4・2 すべり出しの過程 局所的なすべりの発生から巨視的なすべりへの発達過程は次のように描くことができる。接触面のある微小な部分において局所的なすべりが発生したとすると、せん断ひずみは減少し、その領域に蓄積されていたひずみエネルギーの一部は解放される。解放されるひずみエネルギーが十分大きければ、これによって隣接する領域の接合部は切断され、局所的なすべりが伝ばする。接触面全域で局所的なすべりを起こすに要する力が極端には違わない場合には、すべりを生じた領域から付加される力によって隣接した領域が次々とすべり、局所的なすべりが高速

で伝ばすることになる。一様垂直力の場合に得られた結果はこのような状況に対応していると考えられる。ただし、その伝ば速度が弾性波速度に近いことを考えると、局所的なすべりの領域が連続的に広がるとするよりも、むしろ弾性波によって伝えられた付加的な力によってそれぞれの領域で局所的なすべりが発生し、見かけ上、連続的なすべりの伝ばが観測されたものと考えるべきであろう。なお、このように局所的なすべりが高速で伝ばすることは、3・2・2項で述べた試験片の上下端の拘束により生じる垂直力分布の変化がすべり過程に影響を及ぼすほどには大きくないことをも示している。

一方、局所的なすべりによって解放されるひずみエネルギーが隣接する領域でのすべりを引き起こすほどには大きくない場合には、局所的なすべりの伝ばは一時的に止められることになる。しかし、同じ領域で局所的なすべりが続行するか、あるいは外力が増加し続けられれば、隣接する領域に働く接線力は増加し、最終的にすべりを生じることによって局所的なすべりが伝ばする。局所的なすべりが進行するにつれて、局所的なすべりが生じていない領域に働くせん断ひずみが増加する状況は既に、偏心垂直力の場合について観察した結果と合致している。

以上いずれの場合にも、すべり領域が拡大し、接触面全域に及ぶと巨視的なすべりの発生となる。すなわち、いわゆるすべり出しは、局所的なすべりと本質的に同じ過程である。なお、この巨視的なすべり状態においてもすべり速度が局所的に異なっていることが推測できるが、これについてはさらに詳細な研究が必要である。

一般に局所的なすべりは既に形成されていた接合部の切断過程だけではなく、新たに接合部を形成する過程をも伴っていると考えられる。したがって、すべり出しに先行して生じる局所的なすべりが主として、より強固な接合部を形成する過程であれば、すべりの進行とともにそこでのすべりは一時的に停止し、せん断ひずみは増加するはずである。Simkinsは何回かのスティックスリップ状の微小すべりの後に、巨視的なすべりが生じることを観察しており⁽⁶⁾、江口らも接触面粗さを大きくすると同様の現象が生じることを述べている⁽⁸⁾。また、局所的なすべりの伝ば現象として接触の

離脱した部分が接触面を伝ばするいわゆる Schallamach 波がゴムについて観測されているが⁽⁹⁾、その場合にも波頭の通過した位置では局所的なすべりは一時的に停止する。本研究で観察した局所的なすべりでは、このようなすべりの一時的な停止とせん断ひずみの増加は認められなかったから、主として切断過程である。

ここでは偏心垂直力を与えることですべりにくい場所とすべりやすい場所とを実現したが、現実の摩擦面では粗さの分布によって凝着が強固に生じているすべりにくい場所とそうでない場所とが存在している。したがって、程度の差はあっても本質的には偏心垂直力下でのすべり出しおよび停止の挙動が静止摩擦状態から動摩擦状態へあるいは動摩擦状態から静止摩擦状態への過渡現象の本質を表していると考えられる。

5. 結 論

比較的広い接触面積をもつ二物体について、動摩擦開始時の接触面近傍での局所的なひずみおよび相対変位を計測した。得られた結果は次のとおりである。

- (1) 巨視的なすべりが生じる以前に接触面内で局所的なすべりが発生し、これが接触面内を伝ばする。
- (2) 局所的なすべりの伝ば速度はすべりによって解放されるひずみエネルギーの大きさと接触面の接合部の破断強度の分布に依存し、この破断強度の分布が一樣な場合には伝ば速度は弾性波速度と同程度となり得る。
- (3) 局所的なすべりが生じた領域が拡大するに従って、すべりを生じていない領域に働く接線力は増加する。局所的なすべりが接触面全域に広がったとき、巨視的なすべりが生じる。

文 献

- (1) Johnson, K. L., *Proc. R. Soc., Ser. A*, **230** (1955), 531.
- (2) Courtney-Pratt, J. S. and Eisner, E., *Proc. R. Soc., Ser. A*, **238** (1957), 529.
- (3) 池田, 応用物理, **32**-10 (1963), 793.
- (4) 久門・築添・大島・秋山, 機論, **44**-382 (1978), 2080.
- (5) 江口・山本・宇佐美, 潤滑, **31**-2 (1986), 94.
- (6) Simkins, T. E., *Lubric. Eng.*, **23**-1 (1967), 26.
- (7) Kolsky, H., *Stress Waves in Solids*, (1963), 83, Dover, N. Y.
- (8) 江口・山本, トライボロジスト, **34**-11 (1989), 787.
- (9) Barquins, M. and Courtel, R., *Wear*, **32** (1975), 133.