

## 第5章 突起付与柔軟材料への流体潤滑の逆問題の適用

### 5.1 緒言

往復動用シールをはじめとして、ゴムや高分子などの柔軟材料で作製されたしゅう動材の使用は多岐にわたっており、その使用は今後ますます増加すると考えられる。そのため、その潤滑特性に関しては種々の視点から研究が実施されている。しかし、そのようなしゅう動材料が潤滑状態で使用された場合のトライボ特性としゅう動面のマイクロ形状との関係は必ずしも十分に究明されているとはいえない。

第4章では、ピストンの多段溝に装着されたくさび状の非対称接触形状をもつリップシールと往復運動する透明シリンダで構成される装置を用いて、多段往復動用シールの摩擦・密封特性を全反射を利用した密封面の直接観察を併用して把握し、シールの配置や向きの変遷、つまり、多段接触圧力分布形態の変遷によってもたらされるシール間圧力の発生の有無と程度および密封特性の変遷などが流体潤滑の逆問題によって説明できることを明らかにした。しかしながら、柔軟材料表面に凹凸が存在する場合に対しても、その凹凸によって生じる多段接触圧力分布のトライボ特性に及ぼす影響を逆問題によって説明できるか否かについては未だ明確にされていない。

本章は、柔軟材料表面の粗さが潤滑特性に及ぼす影響を究明するとともに、逆問題の適用可能性を評価することを目的として、しゅう動方向に直交する各種の規則的な人工突起を付与したゴム試料を作製し、これらの突起が往復運動下でのトライボ特性にどのような影響を及ぼすかについて、逆問題との関連のもとに言及する。

### 5.2 実験装置および実験方法

実験は、図3.1の装置を用いて第3章と同様の方法で実施したが、しゅう動域の油膜挙動は全反射を利用して直接観察を行った。

実験に用いた幅3mm、長さ125mmの帯状ゴム試料の概略図および突起形状とその寸法を図5.1および表5.1に示す。試料に用いたニトリル(NBR)ゴム材料は、その機械的性

質を表 5.2 に示すように第 3 章、第 4 章で用いたニトリルゴム材より若干軟らかい性質を有している。試料 A は突起を持たない平滑面であり、しゅう動方向両端部は半径 0.5mm の丸みがつけられている。他の試料には、図 5.1 に示されているように試料 A しゅう動面の長手方向に帯状の各種突起がしゅう動方向に一定のピッチで付与されている。実験に際しては試料長手方向両端部から突起間の溝に沿って潤滑油が流れ込むのを防止するため、両端部の溝部をゴムのりで埋めた。

試料油としては、3 種類のパラフィン系鉱油を使用した。その性状を表 5.3 に示す。実験は室温下で押付け力 80N、全振幅 30mm 一定とし、周期を 0.1~ 3.0Hz の範囲で変えることによって実施したが、行程長の影響を検討するため、一部の試料に対しては全振幅を 1mm から 30mm の範囲で変えた実験も実施した。

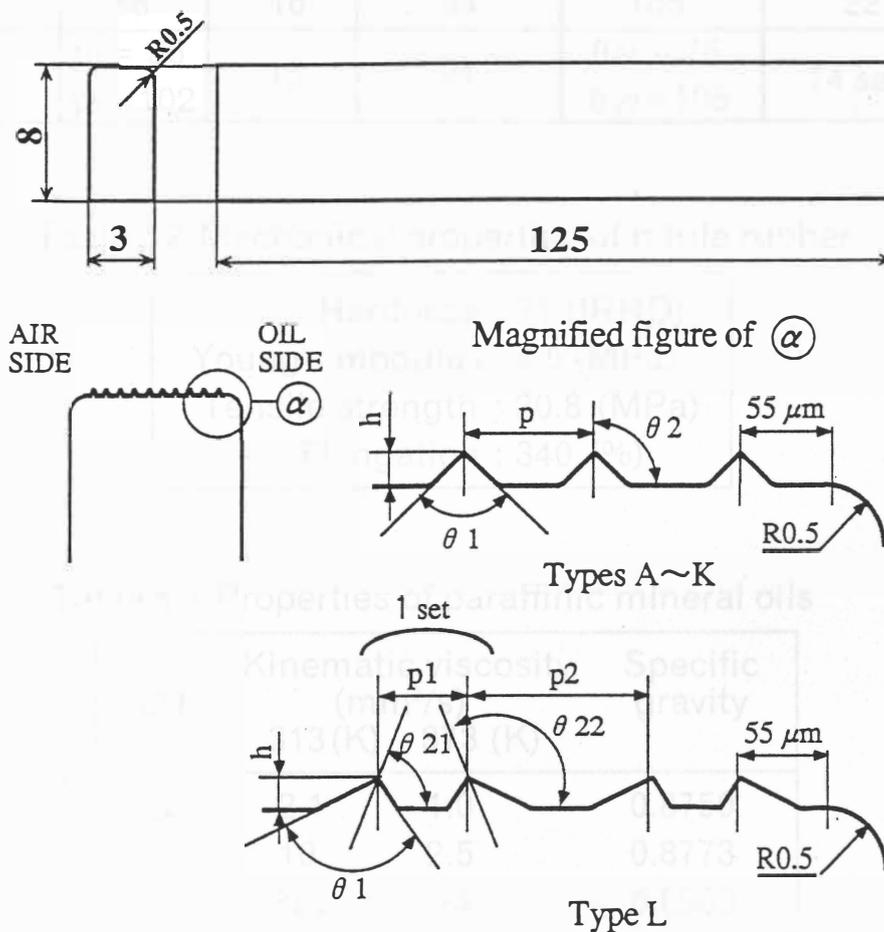


Fig.5.1 Shape of specimen

Table 5.1 Size of ridges on specimen

Type of seal	Pitch $p$ ( $\mu\text{m}$ )	Height $h$ ( $\mu\text{m}$ )	Peak angle $\theta_1$ (deg)	Inclination angle $\theta_2$ (deg)	Number of ridges
A	—	—	—	—	—
B	49	16	109	90	39
C	88	16	106	90	22
D	128	18	97	90	16
E	88	13	95	90	22
F	89	38	92	90	22
H	90	20	67	90	22
I	87	15	124	90	22
J	88	16	94	75	22
K	88	16	94	105	22
L	$p_1 = 36$ $p_2 = 102$	15	94	$\theta_{21} = 76$ $\theta_{22} = 105$	14 sets

Table 5.2 Mechanical properties of nitrile rubber

<p>Hardness : 71 (IRHD)          Young's modulus : 4.5 (MPa)          Tensile strength : 20.8 (MPa)          Elongation : 340 (%)</p>
---

Table 5.3 Properties of paraffinic mineral oils

Oil	Kinematic viscosity ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )		Specific gravity
	313(K)	373 (K)	
a	2.1	1.0	0.8750
b	10	2.5	0.8773
d	320	24	0.8969

## 5.3 実験結果および考察

### 5.3.1 行程長の影響

図 5.2 は後述する図 5.5 の結果において流体潤滑が支配的であると考えられる  $G \approx 5 \times 10^5$  の場合の試料 A、H、I に対する摩擦力と行程との関係を各行程長に対して示したものであり、摩擦波形が安定する運転開始約 3 分後の結果が示されている。突起の存在しない試料 A と突起の存在する試料とで摩擦力-行程関係が大きく相違することが理解できる。

すなわち、試料 A の場合には、行程長  $s = 1\text{mm}$  では往復しゅう動振幅の大部分がゴムの弾性変形によって達成されていることが、図 5.2 および接触面の直接観測から分かる。図 5.3 は接触面の直接観察結果を示したものである。試料 A では接触面の一部にガラス板との完全密着 (Adhesion) 部分が存在している。 $s > 2\text{mm}$  では、摩擦力は滑り速度 0 の行程端で 0、滑り速度が最大の行程中央で最大値をとっており、油膜形成の影響が認められる。しかし、行程端を過ぎた時点でピークを持つ典型的な流体潤滑の往復しゅう動摩擦力波形を呈するのは、 $s > 15\text{mm}$  においてである (図 5.4 参照)。本研究の観測精度内では観察されなかったが、上記のような典型的摩擦波形になって初めて行程端においても直接接触が認められなくなることは平野、兼田によって報告されている<sup>(28)</sup>。

一方、突起を持つ試料の場合には、 $s = 1\text{mm}$  においてもガラス板との密着部分は観測されず、摩擦力は試料 A の  $s > 2\text{mm}$  の場合と同様に行程中央で最大値を取っており、行程中央付近では油膜が形成されていることを示している。しかし、行程端での摩擦力は有限の値を示しており、行程端ではガラス平面との直接接触が発生していることを示唆している。

平滑試料 A に対する上記の結果は、往復しゅう動面の油膜は接触幅に対する行程長の比  $n$  が接触圧力分布によって規定されるある限界値より低いと崩壊するとする平野、兼田の研究結果<sup>(26)~(28)</sup>を裏付けている。人工突起の形成は接触幅を分断することになるため、各突起に対する上記の  $n$  の値は増加することになり、接触面への潤滑油の導入を容易にすると考えられる。しかし、行程端においてはスクイズ作用による突起部の負荷能力の不足のために直接接触が発生するものと考えられる。その結果、前述したように、試料 H や試料 I の場合には試料 A の場合と相違して、 $s = 20\text{mm}$  の場合にも行程端で直接接触が発生するものと考えられる。

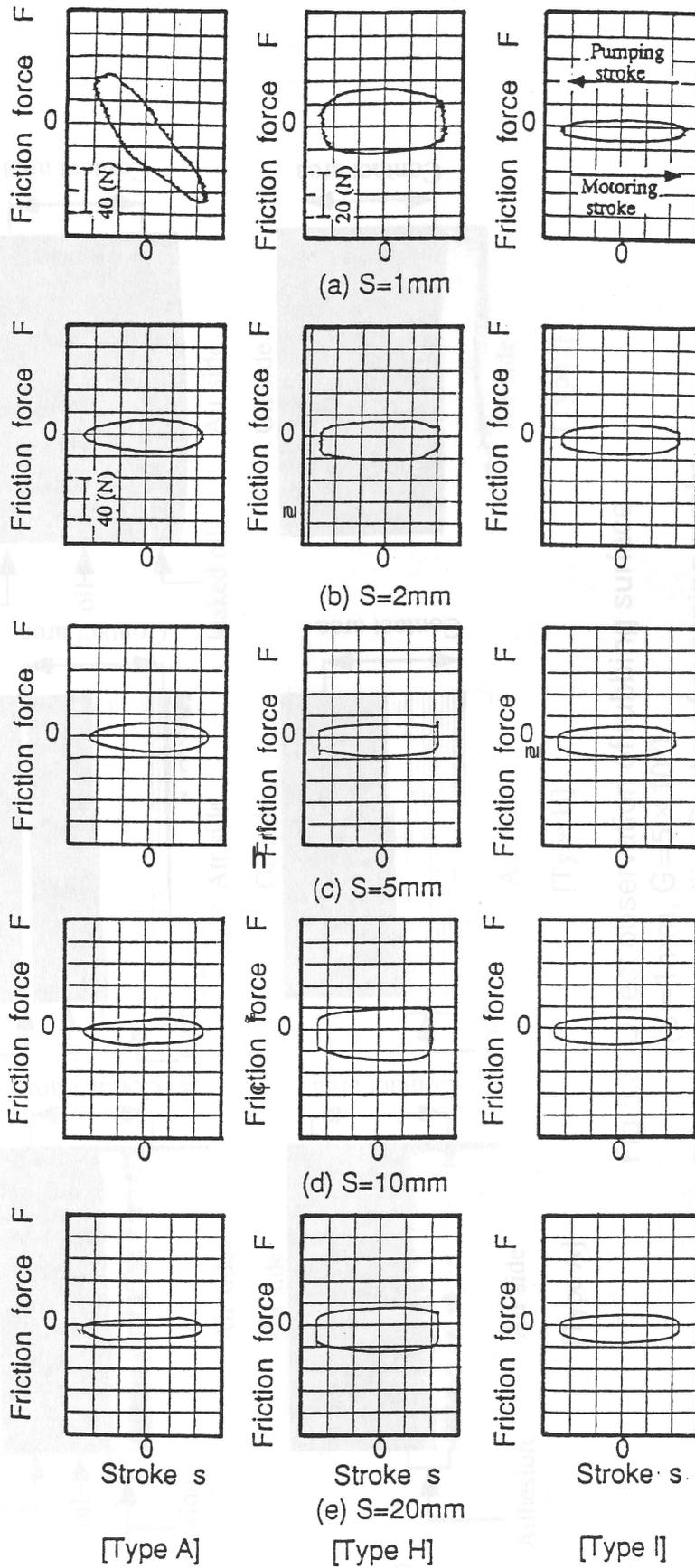


Fig.5.2 Effects of length of stroke on friction force ( $G=5 \times 10^{-5}$ )

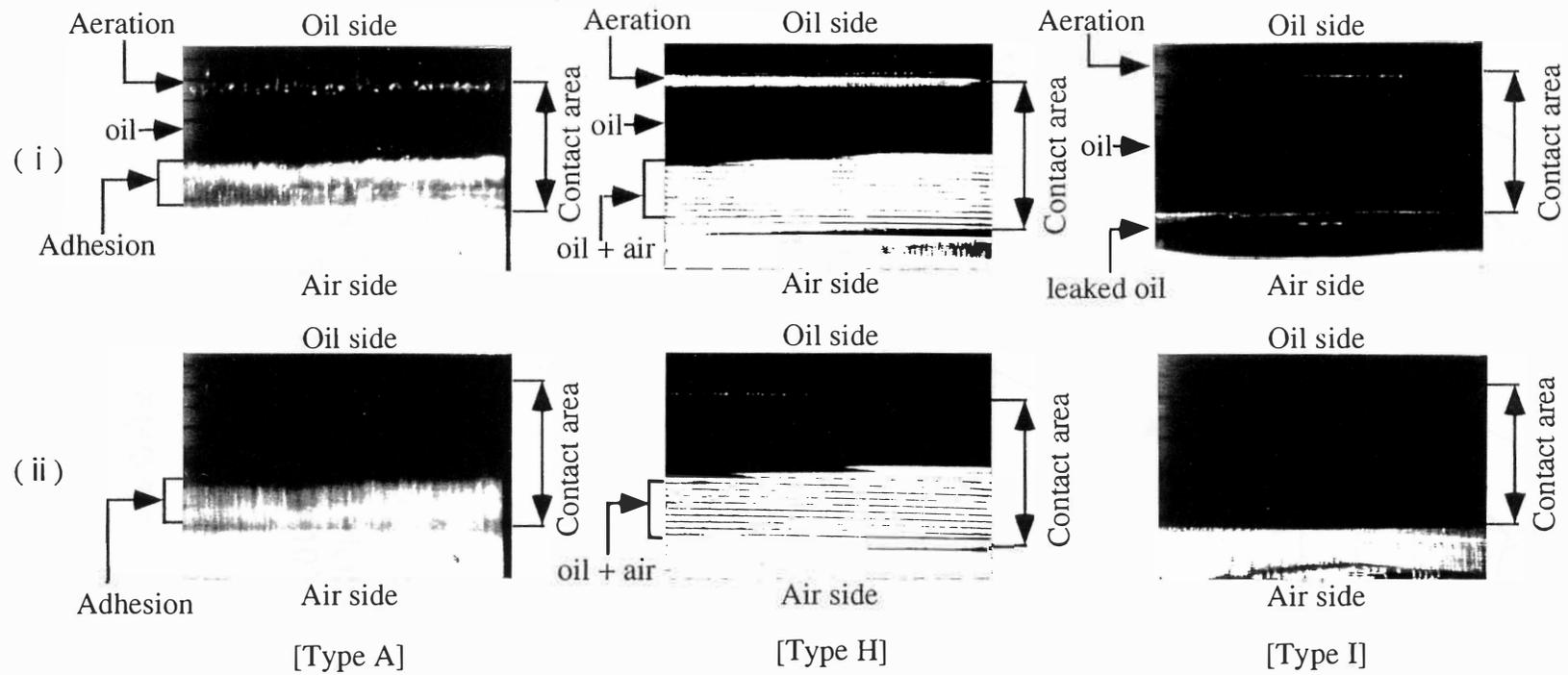


Fig.5.3 Direct observation of rubbing surface  
 $(S=1\text{mm}, G=5 \times 10^{-5})$   
 (i) : Top dead center (ii) : Center of pumping stroke

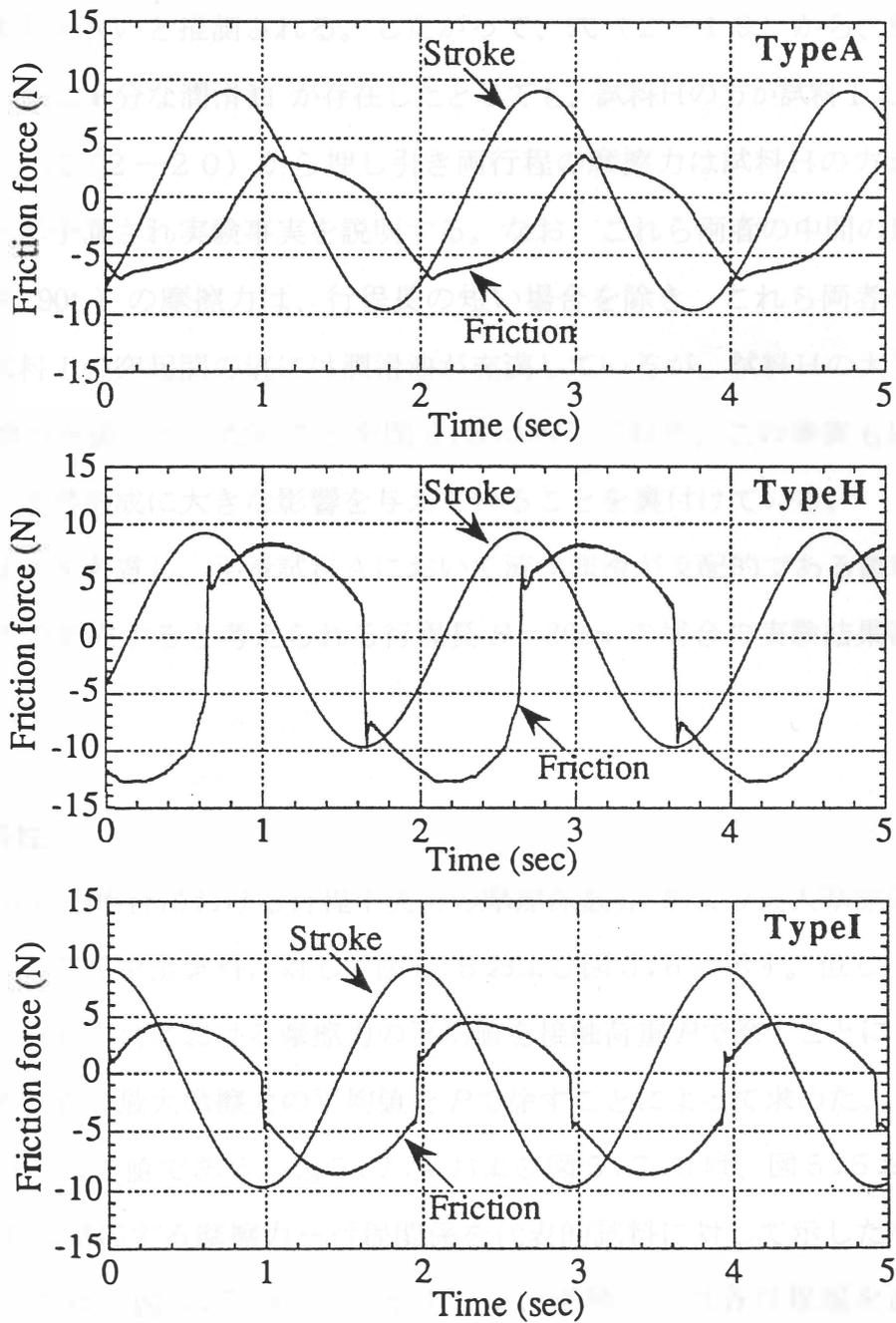


Fig.5.4 Time variation in friction force  
( $S=20\text{mm}$ ,  $G=5 \times 10^{-5}$ )

ところで、図5.2に示されている試料H（突起頂角 $67^\circ$ ）と試料I（突起頂角 $124^\circ$ ）の行程中央における摩擦力は、前者の方が後者よりも高い。頂角以外の寸法は両者ともほぼ同じであるので、このような摩擦力の相違は突起頂角に関係する最大圧力こう配  $|dp/dx|_{\max, P}$ 、 $|dp/dx|_{\max, M}$  に依存するものと考えられる。突起は対称であるので押し引き

両行程における最大圧力こう配はほぼ同じと考えられる。頂角から試料Hの $|dp/dx|_{\max}$ は試料Iのそれより大きいと推測される。したがって、式(2-19)から、例え押し・引き両行程の入口側に十分な潤滑油が存在したとしても、試料Hの方が試料Iよりも両行程の油膜厚さは薄く、式(2-20)から押し引き両行程の摩擦力は試料Hの方が試料Iよりも高くなることが予測され実験事実を説明する。なお、これら両者の中間の頂角を持つ試料C(突起頂角 $90^\circ$ )の摩擦力は、行程長の短い場合を除き、これら両者の中間値を示した。また、試料Iの突起間の溝には潤滑油が充満しているが、試料Hの大気側に存在する溝には潤滑油が充満していないことを図5.3は示しており、この事実も圧力こう配の大小が接触面の油膜形成に大きな影響を与えていることを裏付けている。

以下、上記結果を考慮し、平滑試料Aにおいて流体潤滑が支配的である領域で流体力学的に安定な油膜を形成すると考えられる行程長 $S=30\text{mm}$ の場合の実験結果について議論する。

### 5.3.2 摩擦特性

行程長 $S=30\text{mm}$ の場合における行程中央での摩擦係数 $f_m$ および最大摩擦係数 $f_{\max}$ と無次元特性数 $G$ との関係を全試料に対して図5.5および図5.6に示す。但し、摩擦係数 $f_m$ は押し・引き両行程中央における摩擦力の平均値を接触荷重 $P$ で徐すことによって、 $f_{\max}$ は押し・引き両行程の最大摩擦力の平均値を $P$ で徐すことによって求めた。なお、計測値は運転開始10分後の値である。図5.7.aおよび図5.7.bは、図5.5および図5.6中の(I)(II)(III)に対応する摩擦力-行程関係を代表的試料に対して示したものである。 $G$ の大きい領域では、図5.7から分かるように、摩擦波形は各行程端を通過した後にピークを示している。これは、行程端での薄膜がくさび作用によって急激に厚膜へ変化することによって誘起される粘性抵抗の低下によって引き起こされる現象であり<sup>(26)</sup>、往復しゅう動摩擦特性の特徴の一つである。突起を持たない試料Aと比較して突起を持つ試料のピークは顕著であることは注目に値する。 $G$ の小さい領域においては、行程端部で摩擦波形は鋭いピークを持っているが、このピークは、前節で述べたように直接接触に起因するものであり、行程端で油膜が崩壊状態にあることを示すが、摩擦力は全体的に突起を持つ試料の方が平滑試料Aよりも大きく、油膜崩壊の程度が高いことが理解できる。

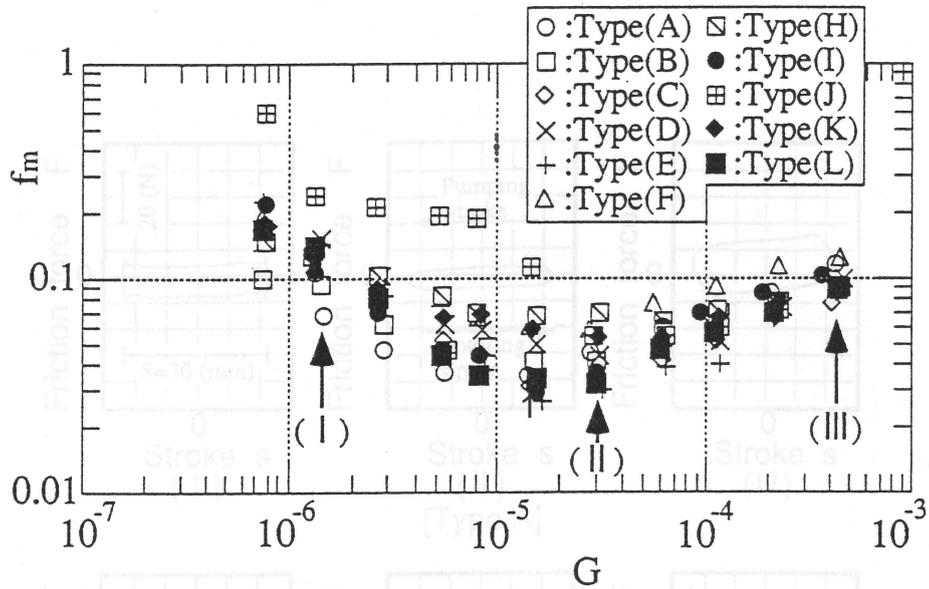


Fig.5.5 Relationship between coefficient of friction at stroke center and duty parameter ( $S=30\text{mm}$ )

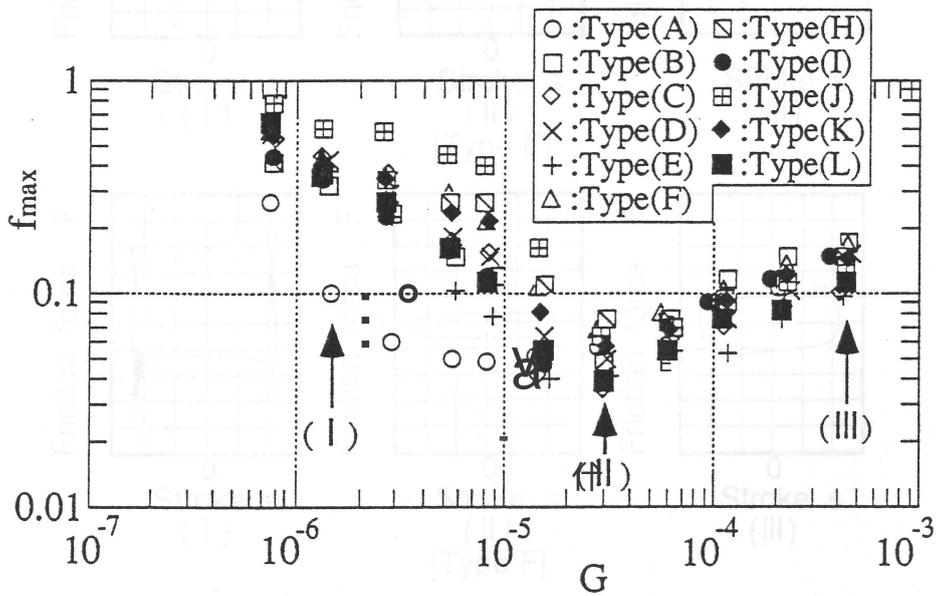


Fig.5.6 Relationship between maximum coefficient of friction and duty parameter ( $S=30\text{mm}$ )

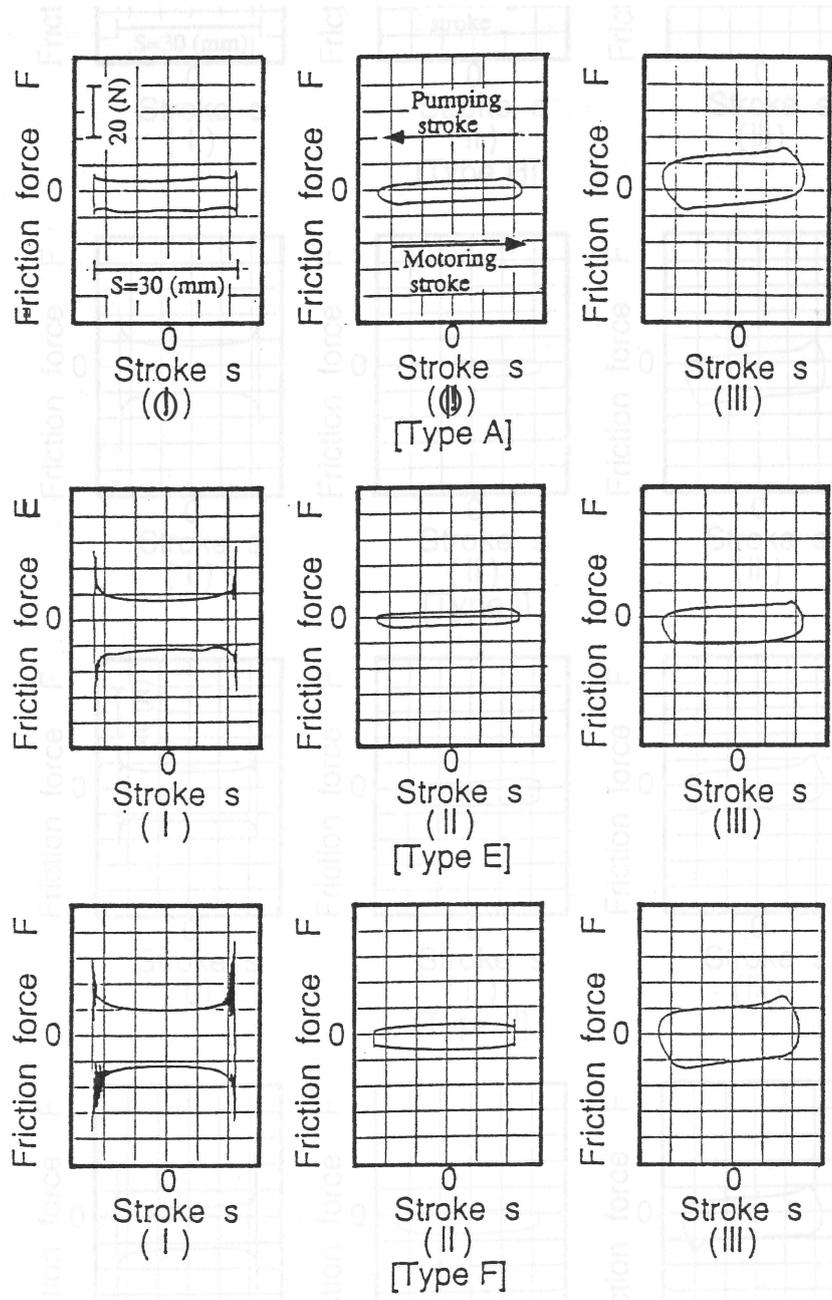


Fig.5.7.a Friction force  $F$  vs. stroke  $s$  ( $S=30$ mm)  
(Types A, E, F)

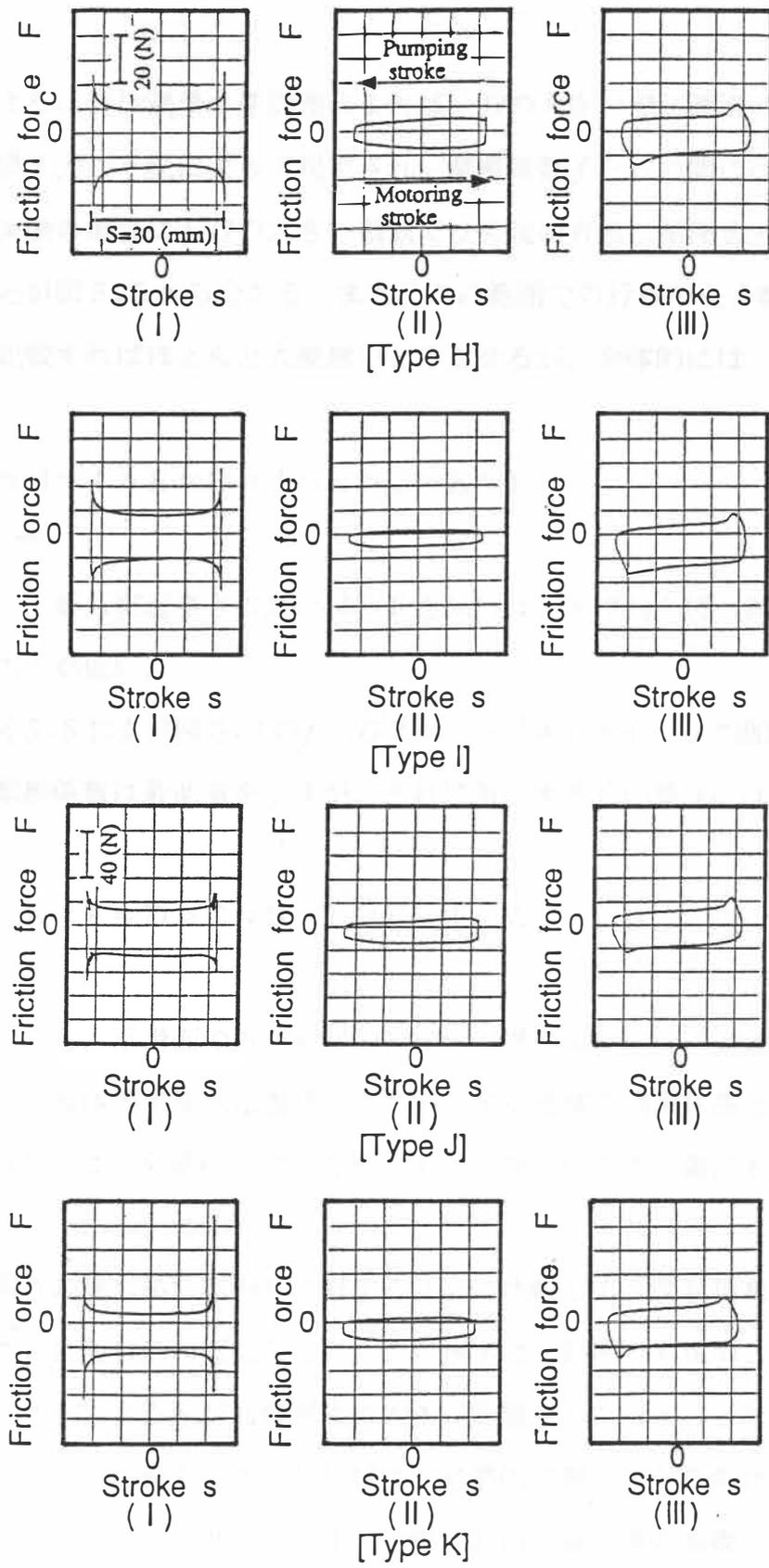


Fig.5.7.b Friction force  $F$  vs. stroke  $s$  ( $S=30$ mm)  
(Types H, I, J, K)

## (1) 突起の影響

第2章で述べたように流体潤滑の逆問題によれば、 $G$ の大きい流体潤滑域における平滑面の油膜厚さは油膜圧力こう配によって規定され、摩擦係数 $f$ と $G$ の間には $f \propto G^{1/2}$ の関係が成立する。本実験の場合にも $G$ の大きい領域では突起の有無に関係せず、上記の関係がほぼ成立することが図5.5から分かる。また、この範囲での行程中央の摩擦係数 $f_m$ は、 $G$ の小さい領域と比較すればほとんど大差無いとみなせるが、全体的には

$$\text{試料 } F > A \doteq H \doteq I > B \doteq D \doteq J \doteq K > C \doteq E \doteq L \quad (5-1)$$

の順に低下しており、最も突起高さの高い試料Fを除けば、平滑面を持つ試料Aよりも突起の存在する試料の方が低い。

また、各試料は図5.5および図5.6の $f-G$ プロット（ストライベック曲線）において、 $G \geq 10^{-5}$ の範囲で摩擦係数は最低値を示すが、それに対応する $G$ の値 $G_c$ は

$$\text{試料 } J \doteq H \geq K \geq F \doteq D > C \doteq B \doteq L \geq E \geq I > A \quad (5-2)$$

の順に小さい。すなわち、平滑面の方が突起の存在する場合よりも $G_c$ の値は小さく、平滑面の方が粗面よりも流体潤滑領域に遷移しやすいとする通常の潤滑状態と一致している。無論、 $G > G_c$ の範囲では、全試料において押し・引き両行程の入口側に十分な潤滑油の存在が観察された。

ところで、突起高さの最も高い試料Fに対する $G_c$ に比較して、突起頂角が小さい試料Hの $G_c$ が大きいことに注目せねばならない。この事実は、前節でも説明したように、突起頂角に依存する最大圧力こう配が油膜形成に大きい影響をもたらすことを示すものである。突起が対称で突起頂角が最も小さい試料Hは、必然的に押し・引き両行程において最も大きい圧力こう配をもつため、押し・引き両行程において最も薄い油膜をもたらすと考えられ、 $G_c$ の値も全試料の中で最も大きくなり、式(5-1)に示したように、 $G > G_c$ における平均的な $f_m$ の値も最も高い部類に属するといえる。すなわち、 $G > G_c$ の流体潤滑が支配的である領域では油膜厚さを支配するのは接触面の全体的形状であるが、油膜

厚さが薄くなると突起形状が油膜厚さを支配して摩擦力に影響を与えられとされる。つまり、次項で述べる実験事実を総合して、潤滑面のマイクロ形状に対する流体潤滑の逆問題の適用は全体的油膜厚さが低下したときに有効になると結論できる。

一方、 $G < G_c$  領域での最大摩擦係数  $f_{max}$  の値は

$$\text{試料 } J > F \cong H \cong K > C \cong D > B \cong I \cong L \geq E > A \quad (5-3)$$

の順に小さい。この大小関係は、概略、式(5-2)と同じであり、上記結論とも合致する。

なお、接触面の全体的形状、特に接触面の往復しゅう動方向端部の形状によって油膜形成が達成されとされる  $G > G_c$  では、突起の存在する場合の方が突起の存在しない場合よりも突起間の溝の影響で平均油膜厚さは厚いとされ、これが  $G > G_c$  で平滑面に比較して突起面の方が摩擦係数が低い原因とされる。

## (2) 突起形状の影響

図5.5、図5.6に示した試料B、C、Dの比較から、本実験範囲での突起間隔は摩擦特性にほとんど影響を及ぼさないといえる。

さて、前述したように、突起頂角が小さい場合(ガラス面に対する突起接触角が大きい場合)には、突起頂角が大きいものと比べ油膜厚さが薄く摩擦係数も高くなるのが流体潤滑の逆問題から予測される。突起高さが同一で頂角の相違する試料C、H、Iを比較すると、突起の影響が顕著であると考えられる  $G < G_c$  の比較的  $G$  の大きい領域では確かにこの傾向が認められるが、 $G > G_c$  の領域では必ずしもこの順序と一致していない。また、突起の傾斜方向が互いに逆である試料J、Kの摩擦力は  $G < G_c$  の領域では大きく相違しており、試料Jの摩擦係数は試料Kよりも大きい。すなわち、ガラス面に対して油側の方が大きく、大気側の方が小さい突起傾斜角を持つ試料Jは、押し行程では式(2-20)から試料Kよりも摩擦係数は高いことが予測される。また、押し行程で各突起の大気側に潤滑油が供給されにくいと、引き行程での油膜形成も困難になり摩擦力は大きくなると考えられ、逆問題による帰結と一致するが、 $G > G_c$  においては両者間に顕著な相違は認められない。なお、 $G = 3 \times 10^{-5}$  おいてしゅう動面に潤滑油がゆきわたるに必要な運転開

始時からの往復しゅう動回数は、試料 J の 6.5 往復に対して試料 K ではわずか 8 往復であった。これらの実験事実は前述した結論を裏付けるものといえる。ところで、突起高さが高いと、ガラス板との直接接触の頻度が高くなり摩擦係数は上昇すると考えられる。突起頂角が同じで突起高さの相違する試料 C、E、F の比較から  $G > G_c$  の領域では確かにこの傾向が認められるが、 $G < G_c$  の特に  $G$  の小さい領域での摩擦係数値は突起高さにあまり影響を受けていない。直接接触の頻度が高いと摩擦力の大部分はこの直接接触部に支配され溝部の影響は無視できるためと考えられる。つまり、直接接触領域が大きくなる範囲において流体潤滑の逆問題を適用することは妥当でないといえる。

すなわち、柔軟材料潤滑面のマイクロ形状に対する流体潤滑の逆問題の適用は全体的油膜厚さが低下する  $G_c$  近傍に限定されることになる。

なお、大気側と油側のそれぞれに傾いた一対の突起を多段に有している試料 L は、第 4 章で示された多段組合せシールにおける実験事実のように両突起間に潤滑油を蓄積して、 $G < G_c$  における摩擦を減少させることが期待されたが、そのような結果は得られなかった。溝に沿う側方漏れの影響で十分な蓄圧作用が得られないことが原因と考えられる。

### 5.3.3 漏れ特性

無次元漏れ量  $Q$  と  $G$  との関係を図 5.8 に示す。漏れ量は  $G_c$  点を境に大きく変化している。そこで、便宜上  $G > 2 \times 10^{-5}$  の領域での全ての実験点における漏れ量の総和を取り各試料間の漏れ量を比較すると

$$\text{試料 B} > \text{A} \doteq \text{I} > \text{J} > \text{C} > \text{E} > \text{K} \doteq \text{L} > \text{D} > \text{F} \doteq \text{H} \quad (5-4)$$

の順になる。また、 $G < 2 \times 10^{-5}$  の領域では、

$$\text{試料 I} > \text{B} > \text{E} > \text{K} > \text{A} \doteq \text{D} > \text{H} \doteq \text{L} > \text{C} > \text{F} = \text{J} \quad (\doteq 0) \quad (5-5)$$

の順である。漏れ量の測定に関しては改善の余地が多々残されてるが、突起潤滑状態を主として支配する  $G < G_c$  の領域においては、押し・引き両行程で油膜形成を促進する突起

形状を持つ試料 I の漏れ量が最も多く、流体膜の形成を妨げやすい形状を持つ試料 H や J の漏れ量が極端に低いことなど、全体的には逆問題によって漏れ特性も評価できるといえる。

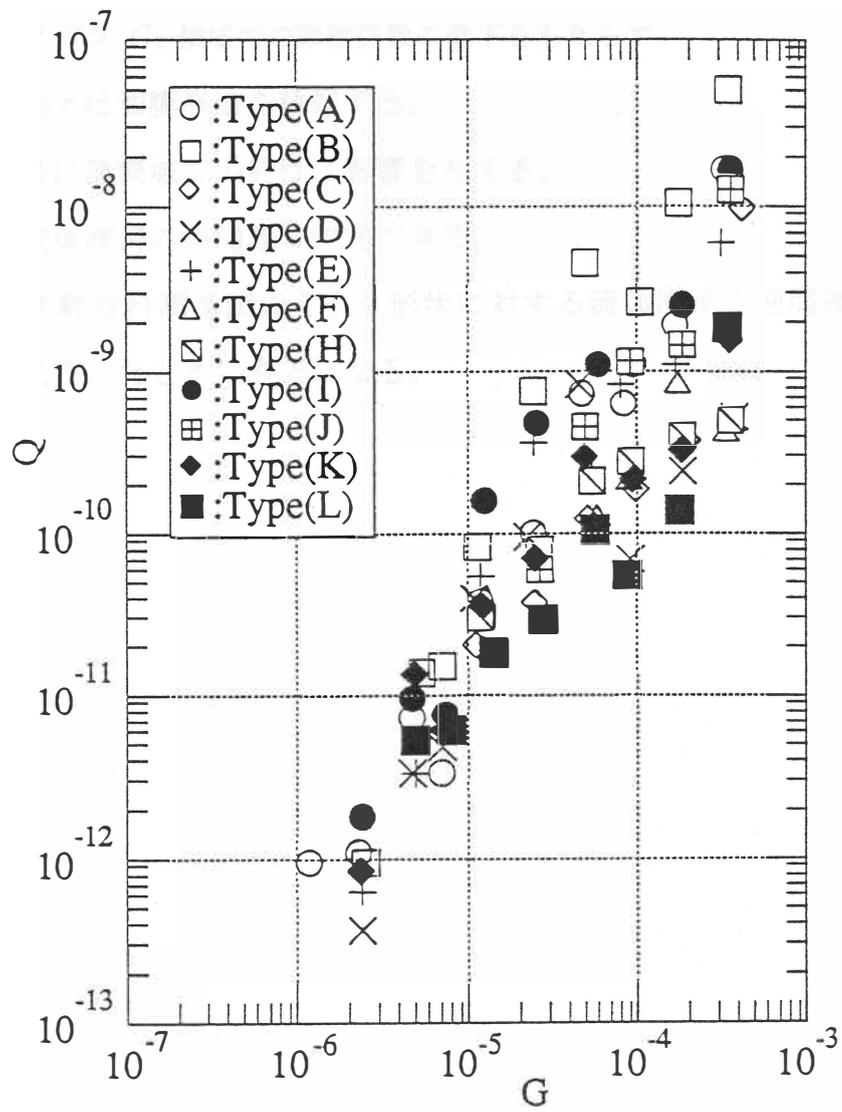


Fig.5.8 Relationship between dimensionless net flow rate  $Q$  and duty parameter

## 5.4. 結 言

正弦波状の往復運動をするガラス板に間隔、高さ、頂角、傾斜角などの相違する規則的な人工突起をもつゴム試料を押付け、その潤滑特性を実験的に把握するとともに、実験結果を流体潤滑の逆問題を用いて議論した。得られた主な結論は以下のようにまとめられる。

- (1) 粗さの存在は  $G > G_c$  領域での摩擦係数の低下をもたらす。
- (2) 突起高さの増大は油膜崩壊を誘起する。
- (3) 突起形状は特に薄膜域での特性に影響を与える。
- (4) その影響は流体潤滑の逆問題で説明できる。
- (5) すなわち、柔軟材料潤滑面のマイクロ形状に対する流体潤滑の逆問題の適用は全体的油膜厚さが低下したときに有効になる。