

往復動シールのしゅう動抵抗に及ぼす表面デンプルの影響

The Effect of Surface Dimples on the Friction Coefficient of a Flooded Reciprocating Model Lip Seal

楼 黎明 L. LOU

In order to investigate the effect of surface dimples on the friction coefficient of a rod seal, model lip seals including six patterns of dimples and plane one were used to investigate the effect on friction coefficients. The differences of the friction coefficients between a plane model and dimple models, and the effect of the specification of dimples are discussed. Furthermore, in order to explain the mechanism of the effect of dimples, the processes of oil film formation on the contact surface have been observed by an optical interferometric method. It was found that the effects of dimples on the friction coefficient can be explained by the oil film formation on the contact surface.

Key Words: dimple, rod seal, friction coefficient, oil film

1. はじめに

低しゅう動抵抗はシール性能の良し悪しを評価する重要なファクターの1つである。油圧パワーステアリングシステムにおいて、ロッドシールのしゅう動抵抗が大きくなると、操舵フィーリングの特性が悪化される。ロッドシールのしゅう動抵抗を低減させるために、シールの緊迫力またはしゅう動摩擦係数を下げる必要がある。今まで、シールの密封性を維持しながら緊迫力を下げるさまざまな努力^{1), 2)}がなされてきた。たとえば、ばねの緊迫力を小さくしたり、接触面圧を保ちながら接触面積を小さくしたりしてきた。緊迫力の低減によるしゅう動抵抗の低下はすでに繰り返し実施されており、ほぼ限界にきている。そのために、摩擦係数を下げる試みが盛んに行われている³⁾⁻⁶⁾。たとえば、低摩擦材料やPTFEによる表面コーティング方法などが開発されている。しかし、それらの方法では、シールのコストを著しく上昇させる欠点を持ち合わせている。そこで、本研究ではしゅう動部に微小のデンプルを設けて摩擦係数の低減を試みた。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の模式図を図1に示す。モデルシールはガラス円盤とロードセルの間に取り付けてある。モデルシールに作用する荷重はロードセルで検出できる。軸の往復動をシミュレートするために、サーボモータでガラス円盤を反復揺動させる

ことができる。しゅう動部にある油膜は顕微鏡で観察できるようになっている。油膜の測定には、光干渉法⁷⁾を使用した。

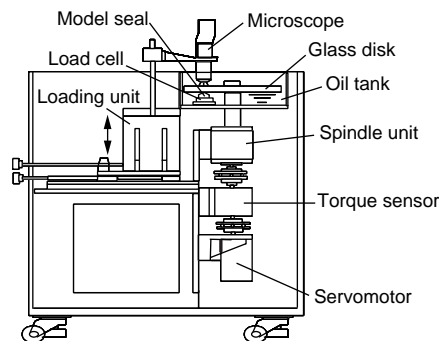


図1 実験装置の模式図

Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 モデルシールおよびデンプルのパターン

図2にモデルシールの模式図を示す。微小デンプルは密封面に設けた。微小デンプルの影響を考察するために、図3に示す6種類のデンプルパターンを設計した。その仕様を表1に示す。

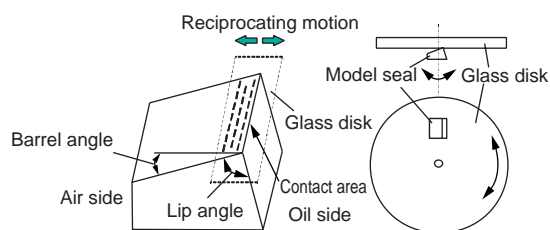


図2 モデルシールの模式図

Model seal

表1 デンプルの仕様
Specifications of dimples

No.	長さ, μm	幅, μm	円周方向 ピッチ, μm	軸方向 ピッチ, μm	配置角度, °	深さ, μm	
1	180	30	340	160	0	30~40	
2	180	100	340	160	0		
3	340	100	500	160	0		
4	340	100	680	320	0		
5	180	30	250	400	45		
6	340	100	410	400	45		
7	凹凸なし						

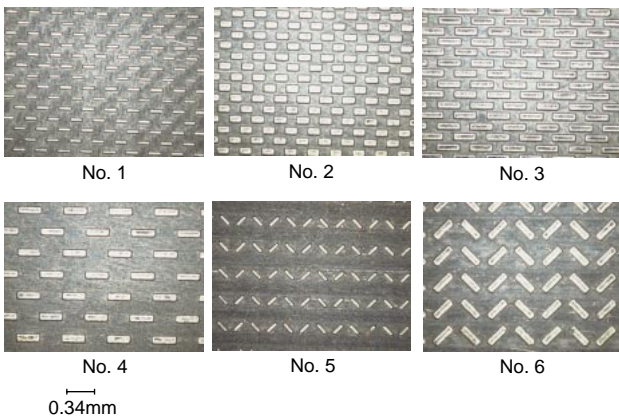


図3 微小デンプルの写真
Patterns of dimples

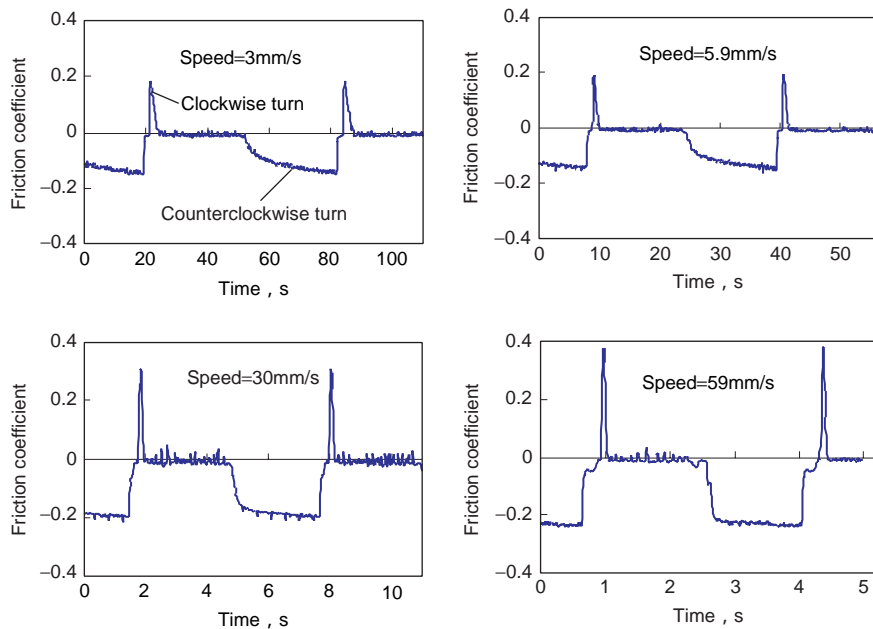


図4 プレーンモデルの摩擦係数の経時変化
Friction coefficient histories (plane model)

2.3 実験条件

実験条件を表2に示す。

表2 実験条件
Experimental conditions

モデルシールの材料	シリコンゴム
硬度, IRHD	55
接触部の長さ, mm	30
バレル角度, °	20
温度	室温
潤滑油	スピンドル油(VG10)
油の屈折率	1.47
荷重, N	32
速度, mm/s	3, 5.9, 30, 59
ガラス円盤回転半径, mm	85

3. 結果および考察

3.1 プレーンモデルの場合

3.1.1 摩擦係数の経時変化

異なる速度の条件下で得たプレーンモデルの摩擦係数の経時変化を図4に示す。図4では、正の摩擦係数はガラス円盤が時計回りの時に得たものであり、負の摩擦係数はガラス円盤が逆時計回りの時に得たものであった。図4から正の摩擦係数は最初に急激に大きくなるが、その後、ほぼゼロラインの近傍に変化した。負の摩擦係数は時間とともに増加し、最大値は行程の最後に現れた。

3.1.2 油膜の形成状態

正の摩擦係数のピークが行程の最初の所に現れる理由はしゅう動部に形成する油膜状態から説明できる。図5に速度59mm/sの条件下で、しゅう動部に油膜がどのように形成されるのかを示す。ここで、 t はガラス円盤の移動時間であり、油膜がしゅう動部に形成しようとする時のタイミングをゼロとした。しゅう動部に油膜が形成されると、干渉縞が現れる。静止時にはしゅう動部に干渉縞が観察されていないため、しゅう動部に油膜が形成されていないと推定できる。ガラス円盤が右側に向けて移動し始めると、しゅう動部に干渉縞が現れた。これはしゅう動部に油膜が形成し始めたことを意味し、図4に示すように摩擦係数の低下をもたらした。図5の条件下では、全しゅう動部に油膜を形成させるのに約0.09秒しかかからな

った。この行程の最後に、しゅう動部に厚さが約960nmの油膜が形成された。ここで注意すべきことは、油膜が全しゅう動部に形成するまでの時間がちょうど図4に示す正の摩擦係数のピークが現れた時間と一致する。これは正の摩擦係数のピークの現れがしゅう動部の潤滑状態で説明できることを意味する。図6に一旦しゅう動部に形成された油膜がどのようにプレーンモデルのしゅう動部からなくなっていくかの様子を示す。図6から、油膜がしゅう動部から完全になくなるのに必要な時間が約0.27秒であることが分かる。この行程で、油膜がなくなっていくことはしゅう動部の摩擦係数を増加させ、最大摩擦係数が行程の最後に現れることをもたらした。そして、これは次の行程で摩擦係数のピークが最初の所に現れることを来したのである。

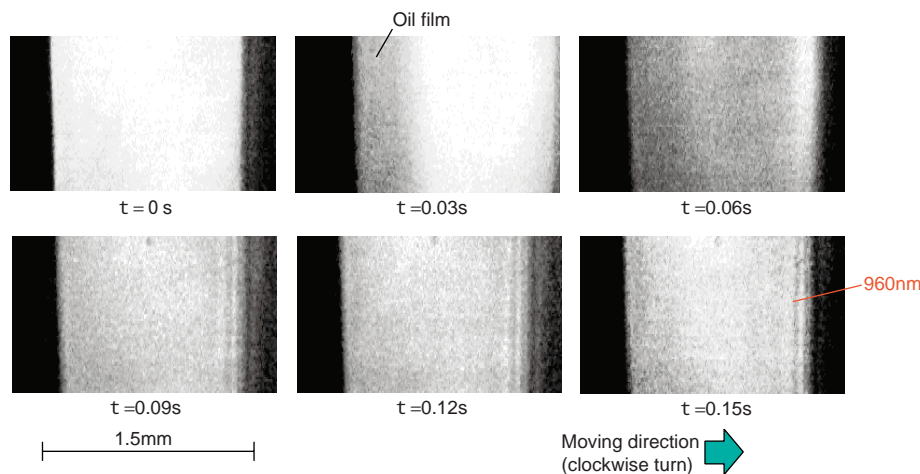


図5 プレーンモデルの油膜形成状態(速度 = 59mm/s)
Process of oil film formation (plane model, speed=59mm/s)

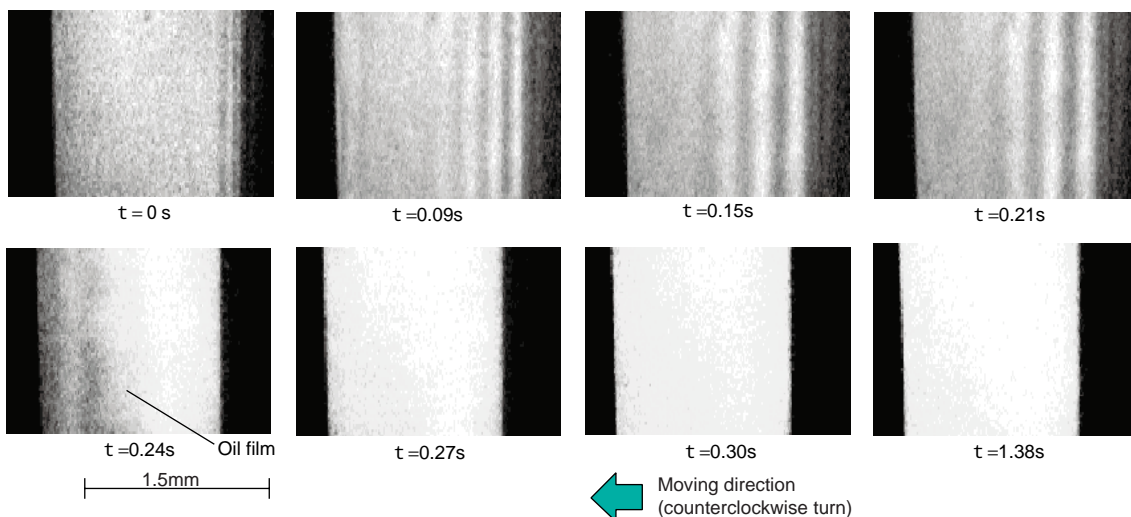


図6 プレーンモデルの油膜除去状態(速度 = 59mm/s)
Process of oil film removal (plane model, speed=59mm/s)

3.2 デンプルモデルの場合

3.2.1 摩擦係数の経時変化

異なる速度の条件下で、6パターンのデンプルモデルの摩擦係数の経時変化を図7 - 図10に示す。図7 - 図10に示す摩擦係数を図4に示す摩擦係数と比較して分かるように、速度が高い場合には、デンプルモデルの最大摩擦係数がプレーンモデルの最大摩擦係数に比べてかなり小さいことが

分かる。しかし、速度の低下につれて、デンプルモデルの最大摩擦係数が次第にプレーンモデルの最大摩擦係数より大きくなっていく。これは、速度の低下がモデルシールとガラス円盤との間のくさび効果を弱めて、しゅう動部に流入する油の量を減らし、油膜がデンプルモデルの全しゅう動部に形成できなくなることを引き起こした結果である。

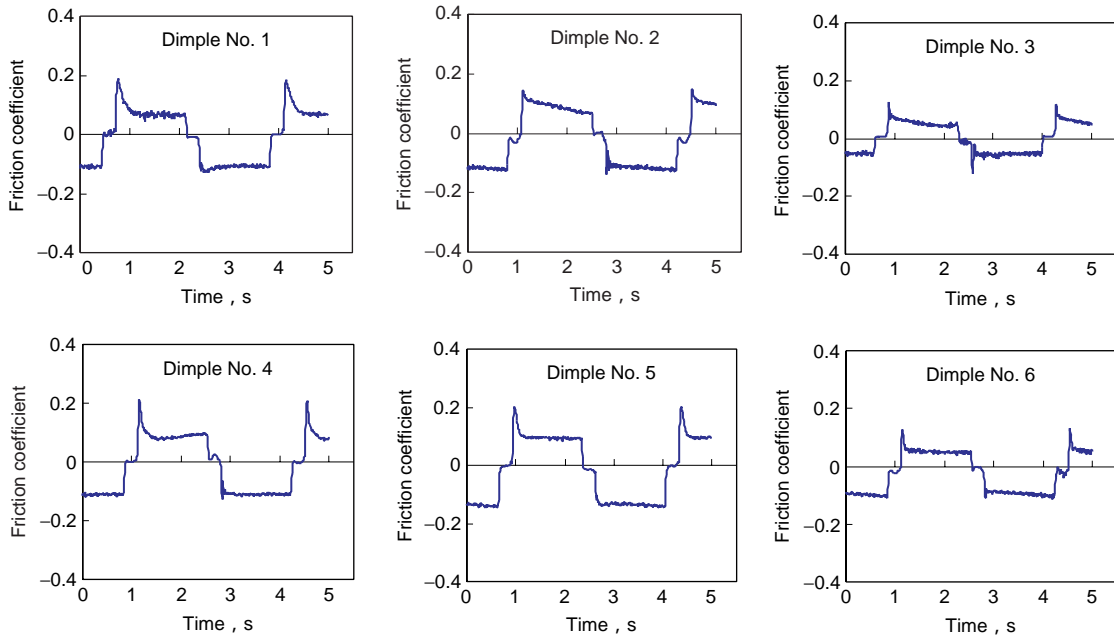


図7 デンプルモデルの摩擦係数の経時変化(速度 = 59mm/s)

Friction coefficient histories of dimple models (speed=59mm/s)

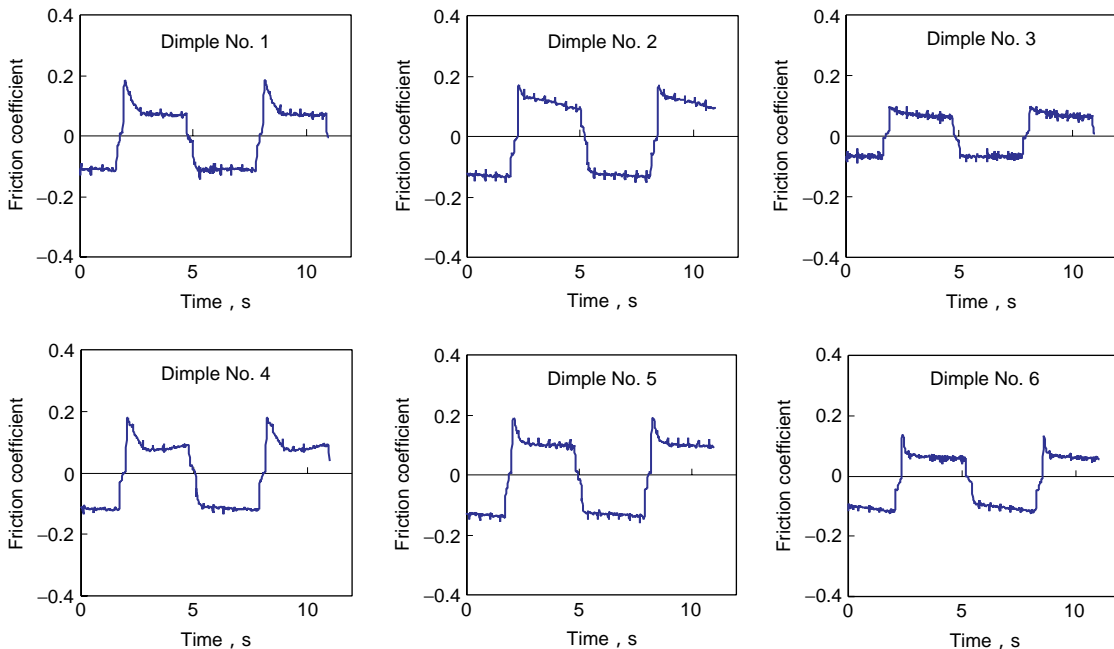


図8 デンプルモデルの摩擦係数の経時変化(速度 = 30mm/s)

Friction coefficient histories of dimple models (speed=30mm/s)

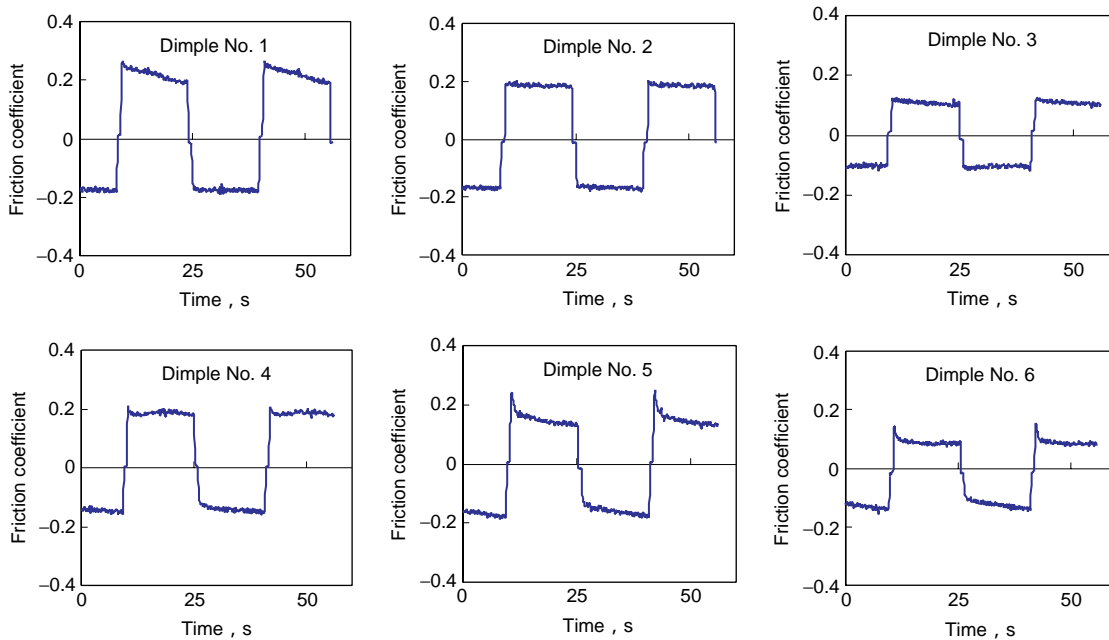


図9 デンプルモデルの摩擦係数の経時変化(速度 = 5.9mm/s)
Friction coefficient histories of dimple models (speed=5.9mm/s)

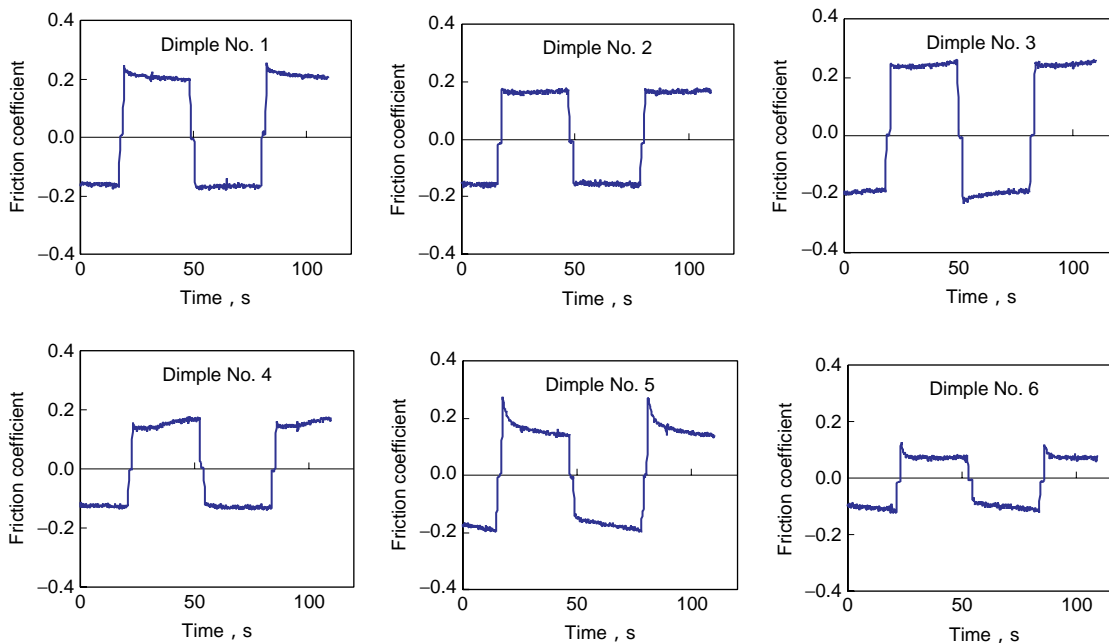


図10 デンプルモデルの摩擦係数の経時変化(速度 = 3 mm/s)
Friction coefficient histories of dimple models (speed=3mm/s)

3.2.2 デンプルの幅と長さの影響

図7 - 図10に示すNo. 1とNo. 2の結果を比較して、デンプルの幅の摩擦係数に及ぼす影響を知ることができる。それらの図から、デンプルの幅が大きい方が摩擦係数が比較的に小さくなることが分かる。

図7 - 図10に示すNo. 2とNo. 3の結果を比較して、デンプルの長さの摩擦係数に及ぼす影響を知ることができる。それらの図から、デンプルの長

さが長い方が摩擦係数が比較的に小さくなることが分かる。

ゆえに、デンプルの長さが長いほど、幅が広いほど摩擦係数が小さくなることが言える。

3.2.3 デンプルの配置方法と軸ピッチの影響

図7 - 図10に示すNo. 4とNo. 6の結果を比較して、デンプルの配置方法の摩擦係数に及ぼす影響を知ることができる。それらの図から、No. 6の方がNo. 4に比べて摩擦係数が比較的小さくなる事が分かる。ゆえに、デンプルの配置方法も摩擦係数に影響を及ぼす事が分かる。

図7 - 図10に示すNo. 3とNo. 4の結果を比較して、デンプルの軸ピッチの影響を知ることができる。それらの図から、No. 3の方がNo. 4に比べて摩擦係数が小さい事が分かる。ゆえに、デンプルの軸方向のピッチが摩擦係数に大きな影響を及ぼす事が分かる。軸ピッチが小さいほど摩擦係数が小さくなる。

3.2.4 油膜の形成状態

図11に油膜がどのようにデンプルモデルのしゅう動部からなくなっていくのかの様子を示す。図11と図6を比較して分かるように、油膜がし

ゅう動部から完全になくなるのに必要な時間がデンプルモデルの方がプレーンモデルに比べて長い事が分かる。プレーンモデルの場合には、油膜がしゅう動部から完全になくなるのに必要な時間がわずか0.27秒であるのに対して、デンプルモデルの場合には、行程の最後まで(1.35秒)しゅう動部に若干の油膜が依然として残っている。つまり、デンプルモデルの方が潤滑時間がプレーンモデルに比べて比較的長いのである。これはデンプルモデルの最大摩擦係数が比較的小さくなる理由である。

図12にデンプルモデルのしゅう動部に油膜がどのように形成されるのかの一例を示す。図5に示すプレーンモデルの結果と比較して分かるように、デンプルモデルの場合は一部のしゅう動部に油膜が形成されていない。これがこの行程の後半にデンプルモデルの摩擦係数がプレーンモデルの摩擦係数に比べて大きくなる理由である。

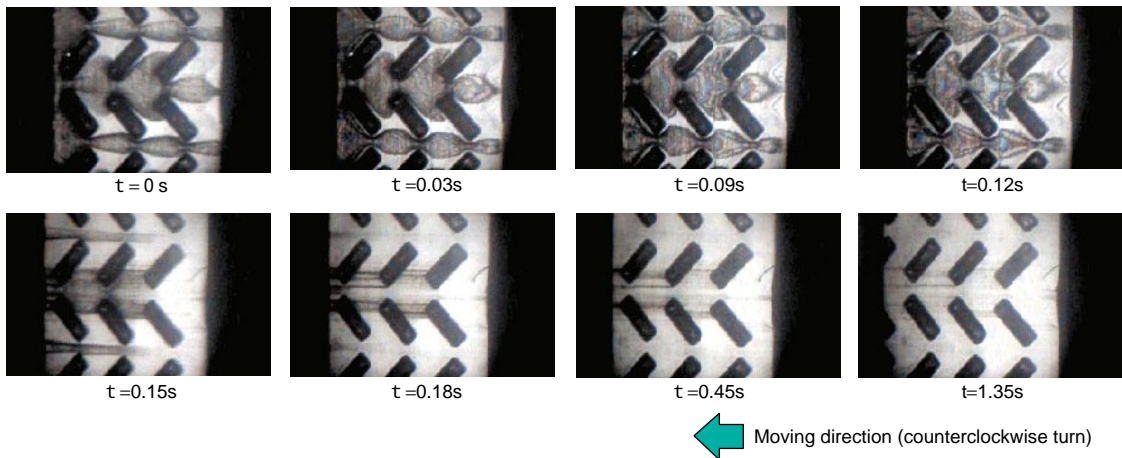


図11 デンプルモデルの油膜除去状態(速度 = 59mm/s)
Process of oil film removal (dimple model, speed=59mm/s)

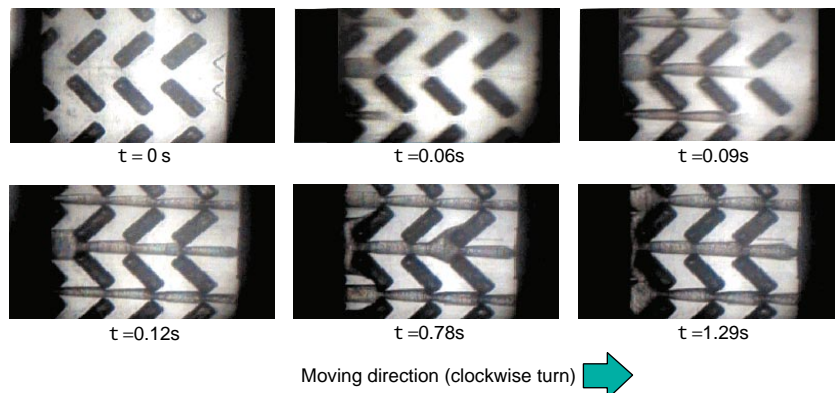


図12 デンプルモデルの油膜形成状態(速度 = 59mm/s)
Process of oil film formation (dimple model, speed=59mm/s)

4. おわりに

しゅう動部に設けた微小デンプルの摩擦係数に及ぼす影響を検討するために、プレーンモデルシールと6種類のデンプルモデルシールの摩擦係数を実測し、光干渉法でしゅう動部にある油膜分布の形成状態を観察した結果、下記のことが分かった。

- 1) 表面デンプルはしゅう動部の摩擦係数に大きな影響を及ぼす。適切なデンプルはしゅう動部の最大摩擦係数を大きく低減できる。
- 2) デンプルの仕様により、摩擦係数に及ぼすデンプルの影響が大きく変化する。これは最適なデンプルパターンが存在することを意味する。より大きな面積をもち、小さなピッチを有するデンプルの方が摩擦係数が比較的小さくなる。
- 3) デンプルの摩擦係数に及ぼす影響は速度に依存する。速度が高いほどその影響が顕著となる。
- 4) プレーンモデルシールの場合は、最大摩擦係数が速度の増加とともに増加する。

(本論文は2003年4月8日～10日まで英国のヨーク市で開催された第17回シール国際大会(BHRG主催)にて発表した論文⁸⁾を編集したものである。)

参考文献

- 1) B. S. Nau : Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 213 Part J (1999) 215.
- 2) 安井啓剛, 尾島照夫, 満丸敏道 : Koyo Engineering Journal, no. 127 (1985) 40.
- 3) Hirano, F. and Kaneta, M. : Proceedings of the Fifth BHRG International Conference on Fluid Sealing, 1971, paper G2 (BHRG Cranfield, Bedfordshire).
- 4) 沖 芳郎, 平田正和, 伊藤健二 : トライボロジスト, vol. 45, no. 1 (2000) 41.
- 5) Bertolet, E. C. : Proceedings of the 12th National Conference on Industrial Hydraulics, vol. 10 (1956) 56
- 6) 楼 黎明 : トライボロジー会議前刷集(2001春) 269.
- 7) Lou, L. : Lubrication Engineering (Dec. 2001) 15.
- 8) Lou, L. : Proceedings of the 17th International Conference on Fluid Sealing (2003) 187 (BHRG, York).

筆 者



楼 黎明*
L. LOU

* 総合技術研究所 トライボロジー研究部