

# 流体潤滑の限界と部分接触発現のダイナミクスについて

## How Lubrication Fails: From Full Films to Partial Contact

Science Tokyo (正) \*桃園 聡      NSK (正) 相川 文明

Satoshi Momozono \*, Fumiaki Aikawa \*\*

\*Institute of Science Tokyo, \*\*NSK Ltd.

### 1. はじめに

流体潤滑膜の膜厚が薄くなり、粗さのスケールになると、粗さが接触をはじめ、流体潤滑膜と粗さ突起で荷重を分担する。この状態は「境界潤滑と流体潤滑が混在している」潤滑状態は混合潤滑と定義され<sup>1)</sup>、またその接触状態は部分接触と呼ばれる。工業的な仮定の下、部分接触が発生する前提での混合解析は広く利用されており、多くの場合、必要な範囲で問題なく所定の目的を果たしている<sup>2,3)</sup>。ところで、部分接触の接触部に着目すると、そこでは既に流体潤滑の限界に達しているため接触に至っている訳であるが、どのように流体潤滑の限界に達し、接触が開始されるかについては、良くわかっていないのが実情である。そこで、本稿では混合潤滑や部分接触に関する現時点での流体潤滑の限界、すなわち部分接触発現前後の粗さ突起や流体潤滑膜のダイナミクスについて論じる。

### 2. 粗さ突起先端での流体潤滑の限界と粗さ突起の運動

#### 2.1 静止側表面の単一突起における流体潤滑の限界

流体潤滑状態から部分接触に至る場合、表面の粗さ突起のうち、相手面に最も近い突起から接触を始めるものと考え、その単一の粗さ突起に着目して流体潤滑の限界（接触の開始）を考察する。流体潤滑下にある粗さ突起が、相手面に近づき接触に至る過程では、粗さ突起と相手面との間にある潤滑剤を排除する（すきまを 0 にする）ことが接触のための条件である。例えば Fig.1 のように、すべり面の固定側にある（つまりくさび作用のみを受ける）粗さ突起と相手面とのすきまを 0 に近づけると、流体潤滑理論からその点の圧力が無限大になるため、すきまを近づけて直接接触させることが困難ではないか、という疑問が提示されている<sup>4)</sup>。その疑問に対する反論として、剛体等粘度の理論解を用いると、油膜厚さが 0 では圧力は無限大になるものの、圧力の発生範囲領域（面積）もゼロに近づくため、流体圧力の積分値である突起荷重の極限值が有限の値を取りうるということが指摘され、流体潤滑の範囲内でも接触を表現するという考察<sup>5)</sup>もなされている。この考察は、粗さ突起の接触に至る過程を説明する上で参考になるが、圧力粘度上昇の影響が考慮されていない点、粗さ突起の弾性変形まで考慮すると、マイクロ EHL 膜の存在が否定できず、結局流体潤滑の限界を説明できていない点などには注意が必要である。

#### 2.2 突起の移動に伴う過渡的な挙動と接触

次に、粗さをもつ表面側が動く場合を考える。例えば弾性流体潤滑 (EHL) 状態にある転がり接触の例 (Fig.2) を考えると、粗さ突起は入口の比較的厚い部分から、非常に薄いヘルツ接触域を通過したのち、潤滑領域外に移動するという過程をたどる。空間に固定した検査空間から見ると、平滑表面の定常なくさび作用に加えて、粗さ突起の侵入に伴う油膜厚さの変動がスクイズ作用として加わることになる。スクイズ作用は多くの場合突起が接触するのを妨げる方向に作用する。粗さ突起が、ヘルツ域に侵入する前後では、突起によるスクイズ作用の影響が相対的に増大するとともに、接近に伴って突起が変形し、さらにその影響による潤滑膜の流量の変化が下流に影響するため、複雑な挙動を示す。鋼球側に突起をつけた転がりすべり状態の観察では、突起はヘルツ域を通過する際につぶれて平坦化され、突起の侵入によりできた薄膜部分は、その厚さをほぼ保ったまま、突起の速度と異なる両面の平均速度で移動することが観察されている<sup>6)</sup>。ヘルツ域では潤滑膜が薄く粘度も上昇するため、レイノルズ方程式のポアズイユ流れの項がクエット流れの項に対して十分小さくなる。それに伴い、ヘルツ域の入口流量（膜厚）がヘルツ域内に平均速度で侵入するためと考えるのが合理的であり<sup>7)</sup>、Greenwood らの直交規則粗さに対するモデル<sup>8)</sup>で定性的に説明されている。また、突起の純スクイズで観察される閉じ込め膜<sup>9)</sup>や、両面に粗さがある場合の複雑な流れ<sup>10)</sup>といった過渡現象の考慮も必要であろう。さらに突起が接触に至る過程では、固体接触部と流体の境界（三重界線）での濡れや浸透、固体間の凝着などの界面化学的な作用や、マイクロキャピテーションなど他の現象の影響も考える必要がある。

### 3. 混合潤滑解析における接触部の境界条件と接触の発現

混合潤滑の解析手法としては、表面形状をそのまま利用する決定論的方法と、表面の統計的な性質を利用して潤滑流れや接触状態を粗視化した形で解く確率論的方法に大別される。しかし、確率論的な取り扱いに必要な流量係数などは決定論的な方法で定量的に求める必要がある<sup>3)</sup>ので、どの方法にとっても決定論的なアプローチによる解析が必要で、その計算精度も重要である。決定論的な混合潤滑解析では、固体接触部分の取り扱い、特に固体接触部の判別と境界条件を適切に実装する必要がある。この境界条件は LCIC (Lubrication-Contact Interface Conditions: 潤滑 - 接触界面条件) と呼ばれ、固体接触部分に流体が侵入しない流量境界条件に加え、流体圧力や接触圧力と変位に関する条件などが含まれる。例えば、Chang や Jiang は接触部の境界での潤滑膜厚さを 0、流体圧力と固体接触圧力を等しいと置

き、流体領域と接触領域を別に解析を行っている<sup>11,12)</sup>。また、Liuは接点上で離散化された潤滑と接触の構成式に対し、条件ごとに分類した離散形式の境界条件(LCIC)を提案している<sup>13)</sup>。一方で明示的なLCICを用いないケースも多く、(a)膜厚が正である流体領域では、接触圧力をゼロ、(b)接触域(または計算上両面が干渉する場合)では流体圧力と流体膜厚をゼロ(または分子膜程度の値)になるように修正した上で、混合潤滑の解析を行っている例も報告されている<sup>14,15)</sup>。しかし、多くの方法では接触部近傍で流体潤滑解析が不安定になることが知られている。これは油膜厚さが薄いと流体圧力を変数とした潤滑の離散式における対角成分が小さいため、計算が不安定になりやすい上に、境界の移動などの不安定要素も加わるためである。そこで、Huらは、接触領域近傍ではレイノルズ方程式中のポアズイユ流れの項が相対的に小さくなるため、ポアズイユ項を省略したレイノルズ方程式(reduced Reynolds equation: RRE)が成り立つものとして、混合潤滑領域全域にレイノルズ方程式を適用して統一的处理する方法を提案した<sup>16)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial(\rho U h)}{\partial x} + \frac{\partial \rho h}{\partial t}, \quad h > \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U h}{\partial x} + \frac{\partial \rho h}{\partial t} = 0, \quad h = \varepsilon_0 \quad (2)$$

ここで $\rho$ は密度、 $\eta$ は粘性係数、 $p$ は圧力、 $h$ はすきま、 $U$ は引き込み速度である。流体と固体の圧力は区別しない。接触部 $\varepsilon_0$ は、流体潤滑と固体接触を判別するための閾値となる表面間のすきまであり、潤滑油分子の大きさを考慮して最大数 nm 程度の値を与えている。流体潤滑下の領域にある計算ノードにおいて、所定回数の計算後もすきまが $\varepsilon_0$ 未満となる場合、強制的にすきまの値を $\varepsilon_0$ にして接触領域である式(2)の領域を定めている。また、式(2)には陽には圧力が変数として含まれていないため、別の方法(式(2)の $h$ に弾性変形と圧力の関係を代入して解くなど)によって圧力を求めている。この統一的混合潤滑解析法は、油膜が薄い条件でも解析可能だとして、広く用いられている。この方法に対し、Vennerらは、潤滑膜が薄くなるほどメッシュサイズによって計算結果が大きく影響を受けることを指摘し、また接触ノードに一定のすきまを与えて簡易的な流体潤滑解析を行うことに対する物理的意味について否定的な考察をしていた<sup>17)</sup>。これに対してZhuは、従来方法とRREで統一化した解析法について、同じ条件での解析結果を比較し、大きな違いがないことを確認し<sup>18,19)</sup>、解析法が有効であると主張している。なお、最近混合潤滑のいくつかのソルバーについて比較・評価が行われ、ソルバーによって解にばらつきがみられるなどの指摘<sup>20)</sup>がなされている。以上より、解析結果の定量的評価や接触部の物理的意味などには、まだまだ様々な留意点が残されている。

いずれにしても、接触と非接触の境界や、接触に至った場合の界面の状態、など混合潤滑に残された多くの課題に対しては、連続体力学からだけではなく、他の視点を加えた新しいアプローチからのブレークスルーが望まれている。

#### 4. おわりに

流体潤滑から混合潤滑に遷移する過程で生じる粗面の粗さや油膜の運動、混合潤滑解析における接触部の条件について概観した。シンポジウムでは、上記の様々なケースを紹介して接触に至るダイナミクスについて議論する。部分接触は、境界潤滑膜の形成や摩耗などの損傷にも関連する非常に重要なテーマであり、今後のますますの発展が期待されている。本稿が現象理解の一助になれば幸いである。

#### 文献

- 1) 日本トライボロジー学会編：トライボロジー辞典(1995) 養賢堂。
- 2) 桃園：トライボロジスト, 60, 1 (2015) 38.
- 3) 相川・桃園：トライボロジー会議 2025 秋 函館 予稿集 (2025)。
- 4) 中原：トライボロジスト, 61, 11 (2016) 720.
- 5) 市丸：トライボロジスト, 62, 9 (2017) 585.
- 6) M. Kaneta, T. Sakai & H. Nishikawa: Tribology Transaction 36, 4 (1993) 605.
- 7) C. H. Venner & A. A. Lubrecht: Trans. ASME J. Tribology, 116, 2 (1994) 186.
- 8) J.A. Greenwood & G. E. Morales-Espejel: Proc. Int. Mech. Pt.J J. Eng. Tribology, 208, 2 (1994) 121.
- 9) 西川・半田・手嶋・松田・兼田：日本機械学会論文集, 59, 561 (1993) 1496.
- 10) I. Krupka et. al: Tribology Letters, 155 (2018) 106801.
- 11) L. Chang: Tribology International, 28, 2 (1995) 75.
- 12) X. Jiang, et al: Trans. ASME J. Tribology, 121, 2 (1999) 481.
- 13) S. Liu, Q.J. Wang, YW Chung, Tribol Lett 69, (2021) 164.
- 14) M.J.A. Holmes, H.P. Evans & R.W. Snidle: Trans ASME J. Tribology, 127, 1 (2005) 61.
- 15) N. Deolalikar, F. Sadeghi & S. Marble: Trans. ASME. J. Tribology 130, (2008) 011004.1
- 16) Y. Z. Hu & D. A. Zhu: Trans ASME J. Tribology, 122, 1 (2000) 1.
- 17) C. H. Venner, Proc. Int. Mech. Pt.J J. Eng. Tribology, 219, 4 (2005) 285.
- 18) D. Zhu: Proc. Int. Mech. Pt.J J. Eng. Tribology, 221 (2007)。
- 19) W.Z. Wang, Y.Z. Hu, Y.C. Liu & D. Zhu: Proc. Int. Mech. Pt.J J. Eng. Tribology, 224, 10 (2010) 1049.
- 20) Y. Wang, et. al: Trans. ASME J. Tribology, 143, 1 (2021) 011601.

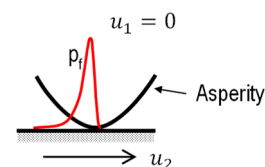


Fig. 1 Rigid single asperity under pure sliding

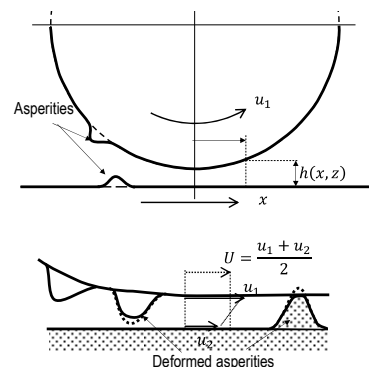


Fig. 2 Rolling-sliding between lubricated surfaces with asperities