

曳糸性の潤滑効果(第18報)

—なぜ弾性流体潤滑は現れないのか?—

The Spinnability Effect under Lubrication (Part 18)

—Why EHL does not appear?—

静岡県立横須賀高等学校 (正) *小田 芳仁

Yoshihito Oda

Shizuoka Prefectural Yokosuka High School

1. はじめに

1.1 弾性流体潤滑

前回はチタニウム合金製流体潤滑型人工関節の設計概念について解説した。本研究は生体関節、人工関節、潤滑理論などの解説が前後するので、研究の全体像については前報を順に読んでもらえると分かりやすいと思う。今回はあらためて弾性流体潤滑(Elastohydrodynamic Lubrication: EHL)の原理とはどのようなものか見直してみたい。弾性流体潤滑を直訳すると弾性体の水による動圧力潤滑とでもなるだろうか。水潤滑下において物体が摩擦するとき、摩擦面の弾性変形により発生した窪みに水が保持される。荷重がかかると窪みに保持された水に内圧が発生する。発生した内圧により水の膜が荷重を支え流体潤滑状態となる。日常生活において雨で濡れた鉄板が滑ることは誰でも経験するところである。また自動車のタイヤが雨水によってスリップし制動の取れない状態となるハイドロプレーニング現象もその類と考えられる。そうしてみるとゴム状弾性体が EHL になることはごくありふれた現象であり、現象自体は否定されるものではない。生物の潤滑で考えてみても、多くの生物は有機体であり弾性に富む体を持っていることから魚類や両生類の体表では EHL が成立しそうである。また生物の関節表面は軟骨に覆われており EHL が発生していると考えるのも無理からぬことである。長年、関節の潤滑については研究されてきているが、その研究のほとんどが軟骨の機能に着目したものであり、軟骨の特殊な物性により関節もまた EHL に導かれているという主張である。ならば人工関節でも EHL を実現させたいと考えるのが科学の道理である。そしてその EHL 軸受を最も必要としている場面こそ人工関節である。弾性流体潤滑型人工関節が完成すれば、従来の人工関節での様々な不具合が解消され不可能だったスポーツも可能となる。それどころか生体関節と同様あるいはそれを超える可能性すらあるのだ。そのような夢の人工関節こそ弾性流体潤滑型人工関節である。前報で詳しく紹介した前沢式軸旋型人工股関節^{1,2)}は EHL が成立したと標榜する人工関節である。前沢式人工関節は深い屈曲角を持ち術後の生活においての自由度が高い優れた人工関節である。しかし筆者が見た限りでは、長期の臨床を終了した前沢式人工関節のポリエチレン骨頭は大きく摩耗していた。そのことはつまり生体内部で人工関節が弾性流体潤滑されていないことを示している。

1.2 表面ゲル水和潤滑

弾性流体潤滑が発現しないという事実を突きつけられ、次に笹田らが考案したのは、ポリエチレンに表面処理を施すことであった。池内らの研究³⁾では親水性高分子を摩擦面に林立させることができる。林立した親水性高分子を水和させることで低摩擦面を得るというものであった。笹田はこのゲル状物質を骨頭表面に作成することで低摩擦・低摩耗を実現することを考えた。ゲルによる潤滑がもはや EHL と呼べるのかという問題もある。そこで笹田らはこの潤滑方式を表面ゲル水和潤滑(Surface Gel Hydration Lubrication: SGHL)と名付け研究を行ってきた⁴⁾。親水性ゲルをポリエチレン表面に化学結合させるというのは技術的にはとても困難である。ポリエチレン表面は化学的に極めて安定である。酸やアルカリ水溶液の保存容器に使用されることを考えればいかにポリエチレン表面を反応させることができないか理解できるであろう。ポリマーの表面に化学結合させるためには何らかの方法で表面にエネルギーを与えラジカルを発生させなくてはならない。表面に発生させたラジカルにモノマーを反応させポリマー鎖を林立させる。池内らが考案したところによると、ウレタン表面をオゾンで暴露しラジカルを発生させ、そこにジメチルアクリルアミド鎖を化学結合させる。これによりポリウレタン表面にジメチルアクリルアミド鎖が林立した水和ゲル表面を得ることができる。この技術をポリエチレン骨頭に応用した実験では摩擦係数の値は 0.01 を示し人工関節での流体潤滑に可能性が見えてきた。しかし、この水和ゲル表面にはいくつかの重大な問題点があった。その一つに摩耗の問題がある。摩耗試験を行ったならば、どの程度までゲル状物質は保持されるのか。筆者の研究では PVA 含水ゲルは水潤滑下で典型的な疲労摩耗を示している。グラフト重合したゲルが大荷重に耐えられるという科学的な根拠はどこにあるのか。

2. 絞り膜減少時間

高速回転する軸受けがオイルの粘性によって発生する動圧力によって浮き上がることで流体潤滑となる。このくさび膜作用は関節の動きが遅いため望むことができない。そのため関節では絞り膜が支配的であると考えられる。絞り膜とは潤滑液によって隔てられた二平面が互いに接近するとき流動抵抗によって発生した圧力が荷重を支える現象のことという。具体的には絞られる潤滑液の維持時間を計算することで絞り膜の挙動を把握することができる。

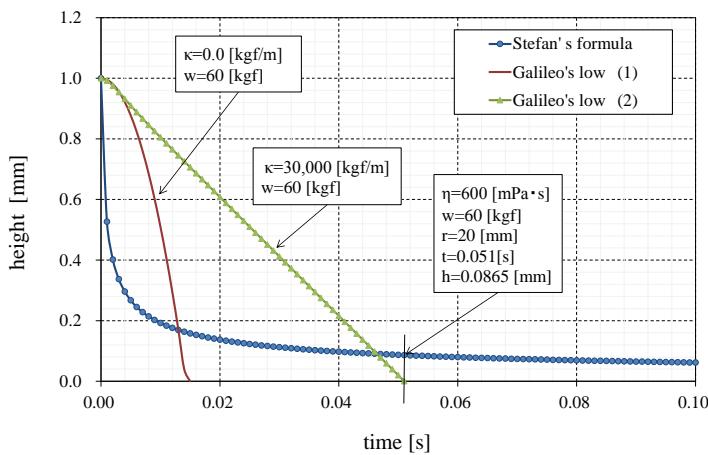


Fig.1 Comparison of reduction time of lubricant film

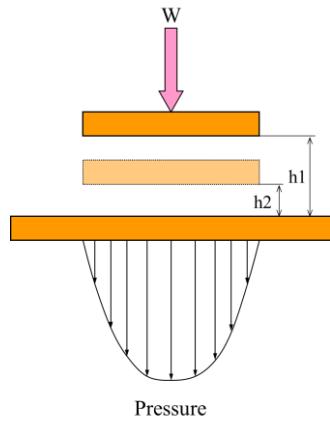


Fig.2 Pressure generated by squeeze effect

Figure1 は円盤間の液体が絞られていく様子をグラフ化したものである。縦軸が高さ h [mm]、横軸が時間 t [s]である。計算には三つの式を用いた。

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad (1)$$

一つ目はガリレオ落体の法則(1)である。この式は落下する物体の高さ h が重力加速度 g と落下時間 t のみで決まる簡単な式である。落体の質量は 60kgf、高さは 1mm とした。空気抵抗を考慮しない落体の式では、物体は加速されるためグラフは上向きに凸の曲線を描き即座に着地してしまう。着地までの時間は 0.015[s] と計算された。

$$v = \frac{mg}{\kappa} \left(1 - e^{-\frac{\kappa t}{m}} \right) \quad (2)$$

二つ目の法則(2)は空気抵抗 κ [Kgf/m] を考慮したものである。空気抵抗を考慮することで、より現実に近い落下状態を計算することができる。通常、空気抵抗は 1[Kgf/m] であるが、水の粘度は空気の約 50 倍、関節液は水の 600 倍と考え $50 \times 600 = 30,000$ [Kgf/m] とした。つまり関節液と同程度の抵抗があるとして計算した。グラフは最初わずかに上向きに凸の傾向を示すが、すぐに直線状態となった。これは終端速度と呼ばれる速度に到達したことを意味している。終端速度とは、物体が十分な高さから落下する場合に到達する速度である。終端速度は落下する物体の質量 m と重力加速度 g そして空気抵抗 κ のみで決まる値である。終端速度に到達すると物体はそれ以上加速しない。ゆえにグラフは直線状になる。空気抵抗を考慮しない場合と比較して、はるかに長時間落下を続けることがグラフから分かる。この場合、着地までの時間はおよそ 0.051[s] と計算された。

$$t = \frac{3\pi\eta r^4}{4W} \left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) \quad (3)$$

物体が一定の速度で落下するようになると粘性抵抗の領域となり圧力が発生する。この領域を計算するためにはステファンの式(3)を用いる。ステファンの式では粘性 η [mPa · s] を直接使用することができる。今回の計算では $\eta = 600$ [mPa · s] とした。グラフは大きく下向きに凸の曲線を描き 0.051[s] の段階では 0.0865 [mm] の膜厚を維持している。絞り膜が発生すれば関節液は体重を支えることができる。実際に実験を行うと、高さに依存するものの、Fig.1 とほぼ同様のグラフを描くことが分かっている。絞り膜が発生するためにはクリアランスが重要となる。クリアランスが大きいとステファンの式が成立せず、ガリレオ落体の式に従うことになる。これでは絞り膜は発生しない。では、クリアランスを狭めれば良いのか。残念ながらそれでもステファンの式は成立しない。なぜ人工関節ではステファンの式が成立しないのか。Figure2 の絞り膜の模式図を見てほしい。ステファンの式が成立するためには数学的理平行面でなくてはならない。ところが人工関節では骨頭の半径 r_1 と球窩の半径 r_2 を同一にすることは出来ない($r_1 \neq r_2$)。クリアランスゼロでは人工関節は動かないからだ。つまり人工関節では、すでに前提としてステファンの式が破綻していることを意味している。ところが生体関節ではそれが可能である。ここで初めて軟骨の持つ応力緩和の意味が明確になるだろう。応力緩和によって軟骨表面のせん断応力は均等化する。せん断応力の均等化は平行の成立を意味している。平行では有り得ない球面同士の摩擦面において数学的理平行面を成立させる($r_1=r_2$)。ここで初めて絞り膜が発生する。一見すると不可思議で物理の法則が成立しないかのように思える生体関節は、物理の法則を成立させることで絞り膜を発生させ流体潤滑を導いている。

文献

- 1) 前沢忠良：人工関節、特開平6-319758 (1994).
- 2) 笹田直、塙本行男、馬渕清資：バイオトライボロジー、産業図書 (1988) 81.
- 3) 池内健：生体関節のトライボロジー、トライボロジスト、45, 2 (2000) 108.
- 4) 平塙健一：水和潤滑とその展開、トライボロジスト、52, 8 (2007) 1.