

連載

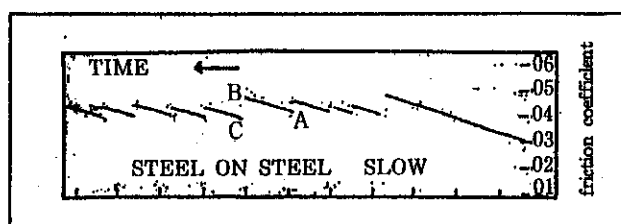
トライボロジーにとりつかれた男の遊油ぶらぶらトーク④

スティック・スリップの話

(株)クリーンテック工業 佐々木 徹

スティック・スリップ (stick-slip) という言葉をご存じの方は少ないと思うが、これでもれっきとした学術用語である。文部省学術用語集、機械工学編を参照すると、英語のstick-slipに「付着滑り」という変な日本語訳がついているが、最近の学術論文ではスティック・スリップで通っている。この言葉が最初に使われたのは、故曾田範宗先生の名訳になる「固体の摩擦と潤滑」の著者としても有名なイギリスのBowden達が1939年に発表した論文<sup>(1)</sup>上であった。

機械は動くことによって仕事をする。機械が仕事をするときの動きには滑りと回転があるが、スティック・スリップという現象は、機械のすべりと密接な関係がある。機械が停止している状態からすべり出そうとするとき、トライボロジー的に非常に興味深い現象が見られる。ご存じの方も多いと思うが、金属の面同士がぴったりと接触していても、本当に接触している部分(真実接触面)は非常に少ないことが知られている。機械が運動していると、機械の動く部分の荷重を真実接触の部分で受けている。真実接触部分は非常に小さいと言われているので、そこには大きな荷重がかかっていると考えられる。停止状態の機械にすべりを起こすための接線力(接線方向に動かそうとする力)を加えると、すべり始める前に真実接触部分での摩擦により接触部分に微小な変位が起こることから、この変位の研究は19世紀末から行われており、19世紀末には無潤滑条件下のすべり出しで、真実接触部に $10^{-6} \sim 10^{-8}$  cmの弾性変形(負荷を除くと元の状態に戻るような変形)が生じると考えられていた<sup>(2)</sup>が、この真実接触部分の大きさ、荷重、すべり出し力等から、現在では



第1図 スティック・スリップの例(参考文献(1)より)

すべり出し時に真実接触部で塑性変形(負荷を除いても元の状態に戻らない変形)が起こっていると考えられている。

静止状態を維持させる摩擦力を振り切ってすべり出す力は、最大摩擦力と等しく「静摩擦力」とも呼ばれ、動き出した後の摩擦力は「動摩擦力」である。機械が効率の良い仕事をするには、静摩擦力だけでなく、動摩擦力を小さくする必要がある。無潤滑条件下でのしゅう動を維持するために必要な平均的な力を測定していたとき、Bowden達はこのしゅう動体の滑りが、第1図に示すように、連続的でないことを見つけた。この論文<sup>(1)</sup>の中で、このときの現象を「滑りのプロセスは連続的ではなく、この運動はけいれんを起こすような急な動きをする」(the motion proceeds by jerk)と表現している。それに続けて、金属面が“stick together”(両面がしっかりとくっつき)し、次第に引張り力が大きくなると、くっ付いていたものがbreakして、急に“slip”(すべる)するとこの現象を具体的に細かく記述している。面白いことに、この現象をこの論文の中程で、“stick and slip”とし、最後の方では“stick-slip”と簡潔に表現している。Bowden達は無潤滑条件下でのしゅう動時のしゅう動面の温度

を測定し、スリップと同時に温度上昇が瞬間的に起こり、すぐに冷えることを確認した。この現象をtemperature flash (温度のフラッシュ=ピカリと光るような一瞬の温度上昇というニュアンス)と呼んでいる。また、無潤滑条件でのスティック・スリップ現象は、きれいに磨いた面でも起こることから、しゅう動面の傷ではなく、しゅう動する金属面間の真実接触部で起こる溶着 (welding together and a formation of metallic junction) と溶着部のむしれ (tearing and deformation of the metal) によって起こると考えた。彼等はこの論文中で、鉱物油で潤滑した場合でも無潤滑の場合と同様にスティック・スリップ現象が起こるが、鉱物油の中に長鎖の脂肪酸を添加することによってスティック・スリップ現象は起こらないことを確認した。

同年、彼等は加熱温度と加熱時間を変えた実験結果も発表した<sup>(3)</sup>。潤滑面に鉱物油を塗布して加熱し、加熱温度を変えて実験を行った。全く加熱してない場合や100℃で2時間加熱した後のすべり出し実験ではスティック・スリップ現象が現われたが、150℃30分間、200℃で15分間、300℃で2分間加熱した後のすべり出し実験ではスティック・スリップ現象は起こらなかった。このことは加熱によって油が酸化され、脂肪酸によく似た極性をもった油の酸化生成物が出来て潤滑性を高めたことを示している。しかし300℃で20分間加熱した後の実験では、しゅう動面上に出来たゴム状の物質が摩擦係数を大きくし、スティック・スリップ現象を再現させた。このことは酸化生成物が潤滑性を高めるのは一時的であり、そのような酸化生成物は熱に曝され続けると、高分子化してゴム状物質になり、潤滑性を低下させることを示している。200℃に加熱してスティック・スリップ現象が起こらなくなったところで、表面の油を除去し、アセトンで拭きとって新油を塗布して測定したらスティック・スリップ現象が再現した。このことはアセトンに油の酸化生成物のような極性物質が溶解し、取り除かれたことを示している。

彼等は続いて、脂肪酸の潤滑性について詳しい研究を発表した<sup>(4)</sup>。この研究によると、基油だけの油膜では油膜厚さが十分であってもスティック・スリップ現象は起こること、鎖の短い脂肪酸で潤滑してもスティック・スリップ現象は起こるが、鎖の長さが長くなり室

温で固体の脂肪酸で潤滑すると、スティック・スリップ現象が起こらないことを確認した。単分子膜でも、摩擦を減少させるが、すぐに単分子膜は引き裂かれてしまうことや、安定な潤滑性を得るには、複数の分子層からできたある程度の厚さをもった境界潤滑膜が必要であることも明らかにした。スティック中ではしゅう動面の温度は変わらないが、スリップが起こると直ちに温度は上昇し、その後すぐに表面温度は下がることも確認した。

この論文は英国人の論文としては珍しく、大胆にも鉱物油は油性 (oiliness) の点から考えると、潤滑性の悪い潤滑剤 (bad lubricant) だとはっきり言い切り、その理由として、鉱物油は金属表面への付着力が弱いことを上げている。脂肪酸の潤滑性が高いのは、COOH基が強い極性を持ち、金属と塩 (エン) を作って金属表面に吸着して配向するからであり、脂肪酸を少量添加するだけで脂肪酸が金属表面の鉱物油を押し退けて吸着膜を形成するからである。液状のアルコールはOH基をもっているため無極性の基油と較べると少し吸着力は強いが、それでもどちらかという、他の飽和炭化水素化合物や鉱物油と同様潤滑性は乏しいという。また、脂肪酸の炭素原子数が16を超え、アルコールでは炭素原子数が18を超えなければ十分な配向が得られないという。鉱物油も高温に曝されると、酸化生成物ができて潤滑性がよくなり、スティック・スリップ現象を起こさなくなるが、一方、脂肪酸の添加剤が入った鉱物油が高温に触れると、無添加油よりも潤滑性が悪くなるとも言っている。蛇足ながら、筆者は油の酸化変質物が油圧バルブのスプールのしゅう動に与える影響の研究をしたが、そのとき鉱物油の中にオレイン酸という炭素の二重結合を1つもつ脂肪酸を使って実験した。その結果、この論文が指摘したと同様に、常温では摩擦係数が0.12で潤滑性がよかったが、150℃で30分間酸化させただけで摩擦力が急増し、摩擦係数が1.17にもなった。

これらの論文以降、すべり出し時の摩擦係数の急変現象に関する論文で“stick-slip”という用語が定着し、今日に至っている。

このように原典を読むことによって、スティック・スリップという現象を正確に表現しようとする著者の苦労がわかるだけでなく、1つの学術用語が定着するまでの軌跡がわかり、いろいろな角度からの立体的な

### スティック・スリップの話…(3)

研究成果を知ることによって、単なる用語以上に「スティック・スリップ現象」を正確に理解できる。ここに要約して紹介した3つの論文は、スティック・スリップの基礎研究に関するものであるが、これらの研究成果を基礎にしたその後の多くの研究によって、研削盤、ブローチ盤、中ぐり盤その他の工作機械のしゅう動面のビビリ、低速トルクモーターのぎこちない回転等々、工場現場で起こっている問題の中にはスティック・スリップ現象に起因するものが多いことが明らかになっている。

#### <参考文献>

(1) Bowden, F. P. and Leebn, L., Proc. Roy. Soc. Lond.,

Ser. A 169 (1939), 371.

(2) Stevens, J. S., Phys. Rev., 8 (1899), 49.

(3) Bowden, F. P., Leebn, L. and Tabor, D., Trans Faraday Soc. Ser. A. 35 (1939), 900.

(4) Bowden, F. P. and Leebn, L., Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 239, A799 (1940), 1.

---

#### 筆者連絡先

佐々木 徹

(株)クリーンテック工業 常務取締役

米国STLE Technical Committee 1995/96油圧部門chairman

〒140 東京都品川区東大井2-7-7 品川テクノビル4F

TEL:(03)3740-4141 FAX:(03)3740-4966

---