

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⑦

平面同士の接触面を引き離すときの力

(株)クリーンテック工業 佐々木 徹

1. 平面同士を重ね合わせる

筆者が子供のころに聞いた左甚五郎の名人芸を伝える講談のくだりに、「左甚五郎がカンナをかけて仕上り面同士を合わせたところ、力自慢の男達が引き離そうとしても離れなかった」というのがあった。宮大工の修行をしたことのある父親が「これが名人芸というものだ」といって感心していたのを、平面接触での油の付着力を測定していたときに、懐かしく思い出した。これは講談の話ではあるが、トライボロジーの問題でもあるから、重ね合わせた平面を引き離すのにどれだけの力が必要かを検討する。

2. 重ね合わせた平面を垂直方向に引き離すときに必要な力

実験で2平面の引き離し力を測定するには、その平面の面粗さが小さく、平面度も保証されたものを使わなければならない。その条件に合う平面の代表的なものとして、ゲージブロックがある。

(1) 2平面を平面に垂直方向に引き離すときの引き離し力の大きさ

講談の話のように、名人の左甚五郎はカンナで鏡面仕上げをしていたので、鏡面同士を合わせた時の引き離しには大きな力が必要であることを経験から知っていたと思われる。しかし彼は科学者ではなかったので、その付着力の大きさを測定する必要はなかった。

1911年にイギリスのBudgettはゲージブロックの鏡面に各種の液体を塗布したときの垂直方向の引き離し力(付着力)を測定して発表した⁽¹⁾。彼が測定に使用したゲージブロックは中心に円形の穴があり、接触

第1表 パラフィン油の付着力

液体の種類	Budgettの測定	Bowdenの計算	津上の測定
パラフィン油	5.03kg/cnf	6.08kg/cnf	5.6kg/cnf(Max)
水	7.24kg/cnf	—	—

面積が0.7平方インチ(4.51612cnf)の円筒形であった。測定の結果、垂直方向の付着力は水で32.7kg、パラフィン油で22.7kg、潤滑油では13.6kgとなった。

ステック・スリップの話で紹介したBowden達の研究によると⁽²⁾、直径1インチの円板(面積は5.1cnf)が1000Å(オングストローム^(*))の油膜で隔てられていると、メニスカス^(**)の曲率半径^(***)rは500Åとなり、油の表面張力^(****)Tは約30dyne/cmであるから、付着力Fは次の式で与えられ、

$$F = \pi (d/2)^2 T / r \quad \dots(2)$$

(2)から、F=31kgとなると計算した。

1cnfあたりに換算すると、パラフィン油の付着力は、Budgettの測定では5.03kg/cnf、Bowden達の計算では6.08kgとほぼ近い値となった。津上の測定⁽³⁾では、石油の最大付着力は5.6kg/cnf、平均3.61kg/cnfであったという。これらをまとめて第1表に示す。

* 1 : 1 Å = 1 万分の 1 ミクロン = 0.1nm

* 2 : メニスカスとは液体を管の中に入れたときに管壁と液体の間にできる曲面をいう。

* 3 : 曲率半径とはメニスカスが作る接触円の半径。

* 4 : 表面張力とは液体がその表面をできるだけ小さくしようと働く力で、CGS単位系ではdyn/cmで、SI単位ではN/mで表され、1 dyn/cm = 1 mN/mである。

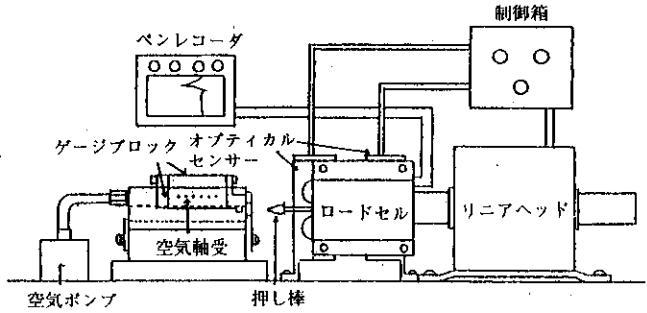
(ロ) 左甚五郎のカナナ仕上げ面の付着力

講談の左甚五郎の話からは接触面積の大きさがわからないので、仮に一辺10cmの正方形であったとすると、その見かけ上の接触面積は100cm²である。第1表から、この接触面に水がついていたら、その付着力は700kg以上、油膜から500kg以上になる。一辺10cmの正方形という、小さい柱の底面程度であり、大工さんがカナナをかける板の表面積はこのような小さいものは滅多にない。もし甚五郎が一辺30cm、長さが2mの板にカナナをかけたとすると、その面積は6000cm²となり、その面に油が付いていたら、引き離しに必要な力は30000kg=30トン、水なら42トンになる。これではオリンピック重量級の重量上げの優勝者が束になっても引き離しは不可能である。「講師師見てきたように嘘をいう」というが、この件に関しては誇張ではなかったようだ。

(ハ) 真空力の強さ

話はちょっとわき道にそれるが、左甚五郎の生年は不詳だが⁽⁴⁾、1636年に完成した日光東照宮の東回廊の潜り門に飾られている眠り猫は左甚五郎の作といわれている⁽⁴⁾ので、東照宮建立当時に活躍した人だったとしよう。それとほぼ同時代のヨーロッパにも似たような話があった。

1654年にドイツの物理学者で、マンデンプルク市の市長でもあったゲーリケが、レーゲンスブルグという町で国王や貴族達を前にして、「マンデンプルクの実験」として知られる公開実験を行った。直径40cmの半



第1図 面接触ですべり出し時の静摩擦試験機の概要図

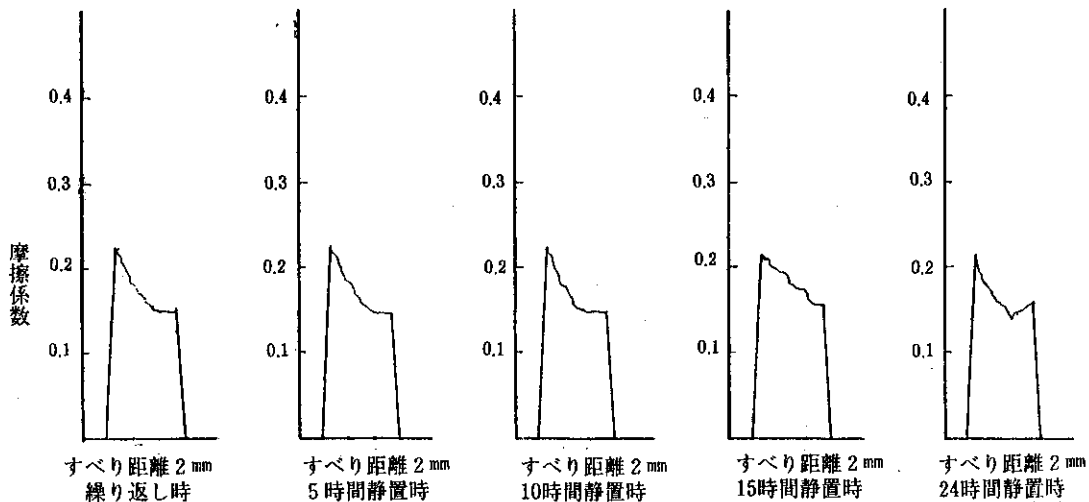
球を2つ合わせてその中の空気を抜いて、8頭ずつ合計16頭の馬で両側から引っ張らせたが離れなかった。この真空球には5トンの大気圧がかかっていたからである。しかし空気を入れたら半球は簡単に外れたという⁽⁵⁾。全く交流のない遠く離れた2つの地で、ほぼ同時代に同じようなことがなされていたというのは偶然としても面白い。

(ニ) 付着力の研究の広がり

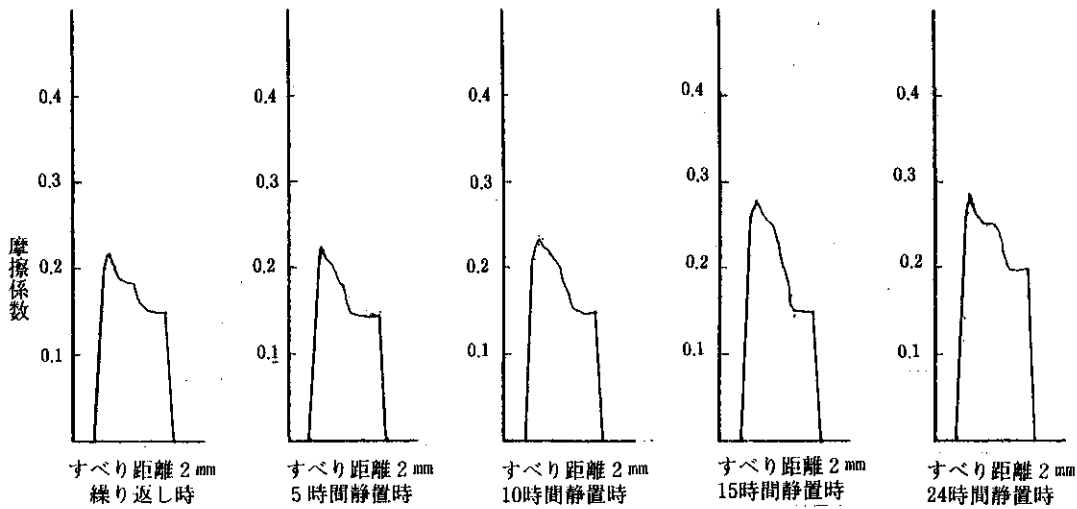
油の付着力は、その後McBain/Lee⁽⁶⁾、Hardy/Nottage⁽⁷⁾、McFarlane/Tabor⁽⁸⁾達によって詳細に研究されている。

3. 重ね合わせた平面同士を水平方向にすべらせて引き離すときの力

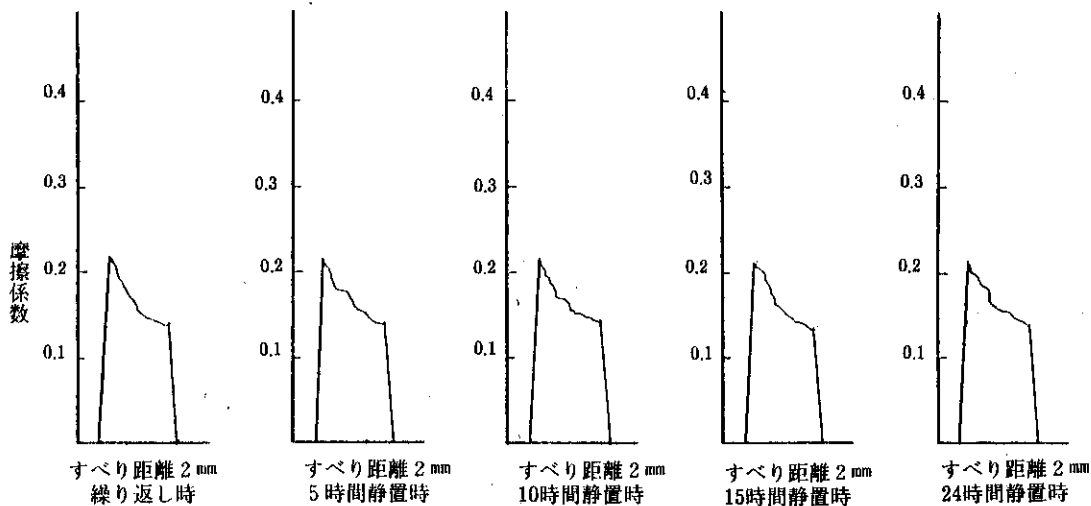
平面に対し垂直方向に引き離そうとすると、非常に大きな力を必要とすることがわかったので、平面に沿ってすべらせるときの引き離し力を調べてみる。



第2図 静置時間を変えて測定した新油の静摩擦係数



第3図 静置時間を変えて測定したろ過前の酸化油の静摩擦係数



第4図 静置時間を変えて測定した0.8ミクロンのメンブラン・フィルタでろ過後の酸化油の静摩擦係数

(イ) 筆者の実験

点接触条件で付着力を測定した時と同じく、各種の試料油をゲージブロックの鏡面に塗布して重ね合わせ、繰り返ししゅう動させたときのすべり出し時の摩擦係数と、5時間、10時間、15時間、24時間静置した後の最初のすべり出し時の摩擦係数とを測定した。

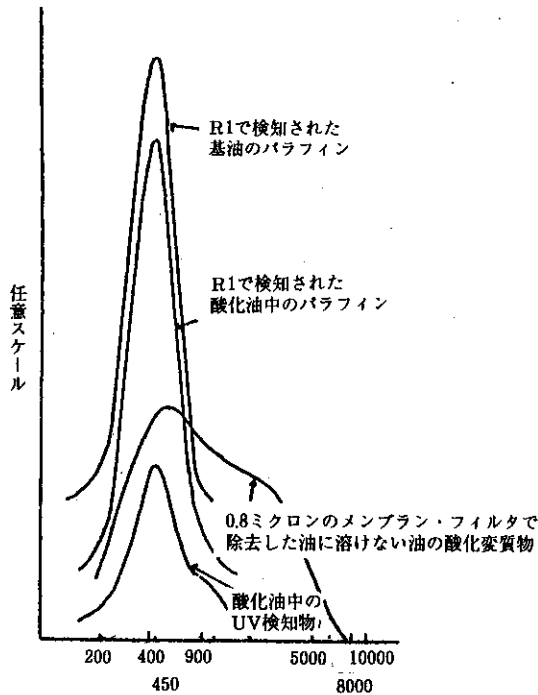
実験に使用した装置の概略図を第1図に示す。この試験ではゲージブロックを後ろから押すため、しゅう動するゲージブロックは蛇行する可能性がある。そこでゲージブロックの蛇行を避けるために、しゅう動するゲージブロックの両側を空気軸受で支え、ゲージブロックの両側がフレームとのすき間を各25ミクロンに維持できるようにした。実験に使用したゲージブロッ

クは、上下同寸法のものであった。

パラフィン基油P-150を塗布したときと、同油をR BOT試験機で3時間酸化させたままの油、同酸化油を0.8ミクロンのメンブラン・フィルタでろ過した油を塗布したときのゲージブロックがすべり出してから停止するまでの摩擦力をペンレコーダで記録した。その記録の例を第2図、第3図、第4図に示す。

(ロ) 実験結果に現れる摩擦係数

摩擦係数には「静摩擦係数」と「動摩擦係数」がある。静止しているしゅう動体に力を加えていき、静止時の最大摩擦力に打ち勝って動き出したときの力をFとし、しゅう動体の自重をWとしたとき、FをWで割った値 μ ($\mu = F/W$)を「静摩擦係数」という。一旦



第5図 新油と酸化油中の物質の分子量分布

しゅう動体がすべり出した後、すべりを続けさせるために加える力 F' を、自重 W で割った値 ($\mu' = F'/W$) を「動摩擦係数」という。

4. 実験結果を考える

(イ) この実験結果から、静摩擦係数は0.2~0.3の範囲であった。

実験に使用したゲージブロックの重量は20gであったので、これらの数値を $\mu = F/W$ に代入して計算すると、ゲージブロックをすべらせる力は、わずか4~6gという小さい値であった(実際は、すべり出し時の力をgとして測定して摩擦係数を算出した)。重ね合わせた平面同士を面に対して垂直に引き離すときの引き離し力は接触面積に比例したが、すべり出し時の静摩擦力は重さが同じであれば、接触面積とは無関係である⁽⁹⁾。このことから小さい力で機械に仕事をさせるためにすべりや転がり運動を利用するのは理に適っていることがわかる。

このような静摩擦係数も何か条件が変われば、静置時間によっては変化することがある。この問題は機械のトライボロジー現象を考えるのに役立つので、第5図の分子量分布とそのような分子量分布をもつ物質の性質を考慮して検討してみる。

(ロ) 新油のすべり出し力

新油で実験した場合、第2図のように、しゅう動体に接線力を加えて繰り返しすべらせたときの静摩擦係数としゅう動体を5時間、10時間、15時間、24時間静置させた後の最初のすべり出し時の静摩擦係数はほとんど同じだった。

新油の分子量を考えると、約400を中心にして狭い範囲で分布している。基油は無極性であるから配向しない。このような分子量分布をもった新油で潤滑した場合、比較的サイズの揃った油分子が勝手気ままな方向を向いたバルク状の油膜を作っている。そのためしゅう動体の静置時間が長くなり、しゅう動体の自重で油膜が薄くなっても、バルク状の油でできた油膜を維持している。そのため、しゅう動体がすべり出すとき、両方のしゅう動面から最も遠く、表面力の影響の最も弱いこのような油膜の中央部でせん断されるので⁽¹⁰⁾、しゅう動面でくっ付かないと考えられる。

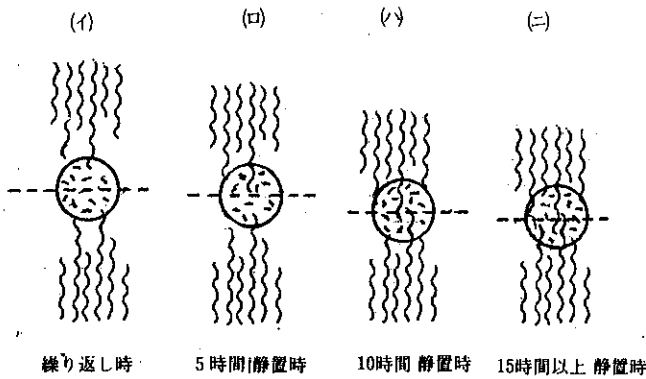
(ハ) 0.8ミクロンのメンブラン・フィルタでろ過前の酸化油のすべり出し力

RBOT試験機で3時間酸化させた試料油で潤滑した場合、第3図に示すように、繰り返しすべらせたときの静摩擦係数と5時間静置後の最初のすべり出し時の静摩擦係数はほぼ同じであったが、10時間以上静置した後の最初のすべり出し時の静摩擦係数は静置時間に比例して高くなった。

ゲージブロックの面間の油膜にはその表面を最小にしようとする表面張力が働いてメニスカスを作り、最も安定した状態にある。油の表面張力と沈み込み時の抵抗とを考え合わせると、しゅう動体が自重によって沈み込むとき、油膜の油を押し出そうとし、油膜は油の表面張力により最も安定した状態を維持しようとしてメニスカスを作って抵抗する。従って、平面接触条件でしゅう動体が沈む速度は非常に小さい。

実験結果を油膜を形成している物質の分子量の大きさで考えてみる。第5図からわかるように、酸化油の中には新油と同じ分子量分布をもつ無極性の油が大部分を占め、その他に分子量が450と900にピークをもつ油に溶ける油の酸化生成物分子と、分子量が1000以上8000未満というように、高分子化して油に溶けなくなった油の酸化生成物が少量あった。

油の酸化生成物は極性をもち、金属表面に吸着して吸着膜を形成する。しゅう動体の沈み込みによる油膜



第6図 しゅう動体の沈み込みによる吸着膜とバルク油の状態の模式図
せん断部分(円内)とせん断ライン(破線)円内のランダムな小線は油の分子のイメージ

の状態を、模式第6図の(イ)、(ロ)、(ハ)、(ニ)で考えてみる。繰り返ししゅう動させている時の油膜は第6図の(イ)のように吸着膜間に十分なバルク状の油膜がある。静置時間が5時間になると、しゅう動体が少し沈み込むが、(ロ)のようにせん断部にはバルク状の薄い油膜があり、それを破線部でせん断しているので、繰り返し時の摩擦係数と変わらない。静置時間が10時間になると、さらに沈み込みが進み、(ハ)のように吸着膜の一部が繋がる。その繋がった部分をせん断するには少し大きな力が必要になる。静置時間が15時間、24時間と長くなると、(ニ)のように吸着膜の繋がった部分が多くなり、せん断に必要な力は大きくなる。これが静摩擦係数として現れる。

(ニ) 0.8ミクロンのメンブラン・フィルタでろ過後の酸化油のすべり出し力

RBOT試験機で3時間酸化させた試料油を0.8ミクロンのメンブラン・フィルタでろ過して潤滑した場合、第4図に示すように、繰り返しすべらせた時の静摩擦係数と5時間、10時間、15時間、24時間静置後の最初のすべり出し時の静摩擦係数はほとんど同じであった。

0.8ミクロンのメンブラン・フィルタでろ過した後の油の中には、新油と同じ分子量分布をもつ無極性の部分と、分子量450と900にピークをもち油に溶ける少量の油の酸化生成物分子があった。このような分子量的に大きな差のない油の酸化生成物が吸着膜を形成する場合、すべり出しを繰り返しているうちに、しゅう動体が沈み込んでも、分子サイズが揃っているため、第6図の(ハ)や(ニ)のように長い吸着膜分子同士の結合が起こらず、常にバルク状の油膜をせん断しているため、

静摩擦係数も一定の値を維持すると考えられる。

5. 平面同士の接触を引き離す力のまとめ

- (イ) 平面同士が接触しているとき、接触面に対して垂直方向に引き離そうとすると非常に大きな力が必要であるが、接触面に沿ってすべらせながら引き離しをすると、垂直方向の力の千分の一という小さい力で済む。
- (ロ) 酸化油の場合、分子量の大きな高分子ができると、しゅう動体の長時間静置でしゅう動面を固着させるようになり、固着部をせん断するために大きな力が必要になる。
- (ハ) 新油や浄油によって高分子化した油の酸化変質物のない油で潤滑すると、しゅう動体を何時間も静置しても、すべり出しに必要な力は変わらない。
- (ニ) 油管理では、固形の汚染物だけでなく高分子化した油の酸化生成物も取り除くことが重要であることが確認された。

<参考文献>

- (1) Budgett, H. M., "The Adherence of Flat Surfaces", Proc. Roy. Soc. London, Vol.86 (1911), pp.25~35.
- (2) Bowden, F. P. and Tabor, D., 「固体の摩擦と潤滑」(曾田範宗訳)丸善 第15章。
- (3) 津上研蔵「ブロックゲージ」工場測定器講座8、日刊工業新聞社、pp.31~40。
- (4) 日本百科事典、小学館、昭和39年、p.420。
- (5) 広瀬立成・細田昌孝、「真空とはなにか」ブルーバックス、講談社、昭和59年、pp.28~31。
- (6) McBain, J. W. and Lee, W. B., "Adhesives and adhesion: True Chemical Compounds as Adhesives", Proc. Roy. Soc. London, A Vol.113 (1927) pp.606~620.
- (7) Hardy, W. and Nottage, M., "Studies in Adhesion", Proc. Roy. Soc. Lond., A. Vol.112 (1926), pp.62~754, Vol.118 (1928) pp.209~229, Vol.118 (1928), pp.607~616.
- (8) McFarlane, J. S. and Tabor, D., "Adhesion of solids and the effect of surface films", Proc. Roy. Soc. Lond., A. Vol.202 (1950), pp.224~243.
- (9) 曾田範宗、「摩擦の話」岩波新書、G33、1971。
- (10) Needs, S. J., "Boundary Film Investigations", Trans. ASME, 62 (1940), pp.331~345.

筆者連絡先

佐々木 徹

(株)クリーンテック工業 常務取締役

〒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