

潤滑油のトラクション特性

Traction Characteristics of Lubricating Oils

木村 好次*

Yoshitsugu KIMURA

歯車の代わりにころがり接触で動力を伝えようというトラクション・ドライブが、効率の高い無段変速機として注目されている。十分な耐久性をもつトラクション・ドライブは、接触面に潤滑油の膜を介在させ、なおかつ高いトラクション係数を得る必要がある。本研究は、高い接触圧力のもとでの潤滑油の非ニュートン流体としての挙動を解析し、潤滑油分子の化学構造とトラクション特性の関係を明らかにしようというものである。

1. トラクション・ドライブ

トラクション (traction) という言葉のもともとの意味は、面に沿って物を動かすことである。機関車の動輪をトラクション・ホイールというし、トラクターという語もこの意味から派生している。

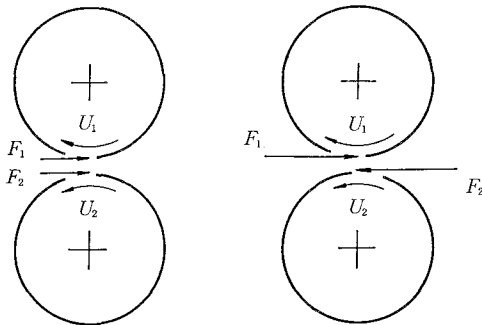
似て非なる言葉に、フリクション (friction) というのがある。こちらは、面に沿って物を動かすときに生ずる抵抗のことで、ふつう摩擦と訳しているけれども、正確には摩擦力に対応する英語である。だから、摩擦するという意味にフリクションが使われることはないし、フリクターなどという言葉も存在しない。多分、

さて、トラクション・ドライブなる代物は、すべりを伴うころがり接触における摩擦力を利用した動力伝達装置である。摩擦駆動装置と呼ばれたこともあるし、フリクション・ドライブなる語が使われたこともあるが、現在ではこの用語がほぼ定着した。ややまぎらわしいが、このときのすべりに伴う摩擦力をトラクションと称して、

厳密な意味でのころがり摩擦力と区別している。

図1は、話を簡単にするためにローラどうしの接触を例にとったものだが、同図(a)のように二つのローラが等しい周速で回転している場合にも、接触部には接線方向の抵抗力が発生する。これがころがり摩擦力で、両方のローラの面に同じ向きに働く。

これに対し、二つのローラの周速に差がある場合、同図(b)においては、周速の大きいほうのローラの表面にはそれを減速するように、周速の小さいほうのローラにはそれを加速するように、互いに逆向きの接線力が働き、これをトラクションと呼ぶのである。この場合にも上述



(a)ころがり摩擦 ($U_1 = U_2$) (b)トラクション ($U_1 > U_2$)

図1 ころがり摩擦とトラクション

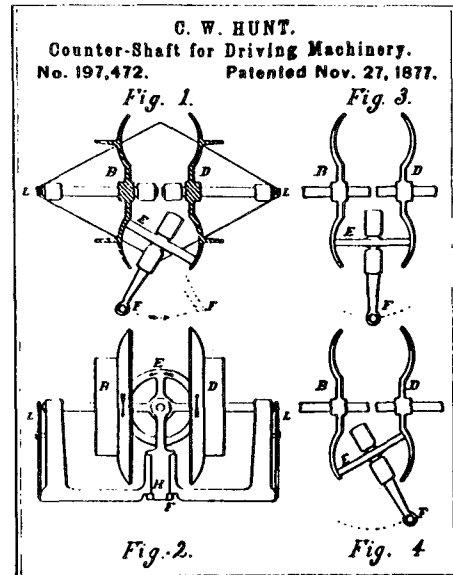


図2 フル・トロイダル・トラクション・ドライブの特許 (1877年)¹⁾

*東京大学生産技術研究所 第2部

したところが摩擦力は共存するが、ふつうトラクションに比べると高が知れているので無視してしまう。

このトラクションを利用すれば、歯車みたいにややこしい形状のものを作らないでも動力を伝えることができるのではないか、これがトラクション・ドライブの発想である。その上歯を切らないとなれば、接触部の半径が連続的に変化するようなメカニズムを使うことによって、無段変速ができるかも知れない。

こういうアイデアは、いわば月並みなものであって、たとえば前世紀の終わりごろ、すでに図2¹⁾のような特許が出ているし、図3¹⁾のように、今世紀のはじめにはトラクション・ドライブを売物にした自動車も登場している。それが順調な発展をとげ、というようには実はならず、何種類もの製品はあるが、知る人ぞ知るといふ状態が続いていた。

その雲行きが変わってきたのは、例によってエネルギー危機以来のことである。歯車にはかなわないが、無段変速機としては効率が高いこと、ノイズレベルが、特に高音域において低いこと、などの長所が見なおされて、内燃機関との組み合わせ、あるいは変動の著しい負荷への応用などが検討されるようになった。もっとも、今度は大々的に陽の目を見ることになるのか、あるいは雲の切れ目にすぎないのか、本当のところはよくわからない。

この、“見なおされて”という表現はかなり正確で、現在実用化されている、あるいはそれが検討されているトラクション・ドライブの基本的なメカニズムは、たとえば図2の例のように、昔から知られているものがほとんどである。ではあるが、目に見えないところで大きな進歩があった。刮目して待つべき代物にはなっているわけである。

第一の進歩は材料である。摩擦を利用しようというのだから、ころがり接触部はなるべく大きな垂直力——これを荷重と言う——で押しつけたい。事実、接触部の平

均圧力で、1 GPaとか2 GPaとかいう値が狙い目になっている。このように高い圧力が繰り返し局部的に作用すると、生半可な材料ではすぐに疲れ破壊を起こしてしまう。ところが幸いなことにここ20年ばかりの間に、ころがり軸受用の特殊鋼の製法が大幅に進歩して、従来に比べ3～5倍の長寿命をマークする材料が得られるようになった。

第二の進歩は潤滑油である。そういう材料を使ったにしても、鋼どうしを直接接させただけでは、やはり十分な長寿命は得られない。それはころがり軸受でも同じことで、玉やころと内・外輪のみぞとの間に潤滑油の膜を介在させるというのが、軸受の通常の使い方である。そういう、流体潤滑状態でトラクション・ドライブを運転したいのだが、そうすると当然トラクションは小さくなる。それが、まあまあ何とか使いものになるという潤滑油——トラクション・フルードとかトラクション油と呼ばれる——が、最初アメリカで開発された。しからばこれに追いつき、追い越そうではないかと、大変日本的な発想にもとづいた研究を、以下にかいつまんで紹介させていただきたい。なおこの研究は、三菱石油(株)研究所(現研究本部)からの委託研究として行ったものであり、同所 村木正芳君のご尽力によるところが大きい。

2. 弾性流体潤滑について

ころがり接触部に、どのような流体潤滑膜が形成されるか、この問題が解かれたのは、1960年代のことである。本題に入る前に、かいつまんで紹介しておこう。

ごく当り前の流体潤滑、たとえば円筒形のすべり軸受と軸との間の潤滑問題などは、固体面を変形しないものとみなし、潤滑油を一定粘度のニュートン流体と仮定した理論で、おおむね片づいてしまう。ところがころがり接触部は、前述したようにGPaのオーダーの圧力になるからこれでは駄目で、固体面の局所的な弾性変形と潤滑油の粘度の圧力による上昇、この二つを考慮する必要がある。これらの影響を加味した理論を、弾性流体潤滑理論と称する。

まず後者からいくと、石油系の潤滑油の粘度はたとえば図4²⁾のように、1 GPaになると常圧における値の $10^3 \sim 10^4$ 倍になり、その間の変化は片対数グラフ上でほぼ直線になる。その勾配 α を粘度—圧力係数と呼び、これが後々物を言うことになる。

一方弾性変形のほうは、通常接触部のごく近傍の変形のみを考慮すれば十分であり、したがって半無限体の表面に、ある分布をもった圧力が作用した場合の解を使う。

以下、ローラどうしの接触のような二次元問題に話を限るが、上記の関係を導入した弾性流体潤滑理論の結果は、たとえば図5³⁾のようになり、全体として、流体膜の存在しない状態での弾性接触、いわゆるヘルツ接触によ

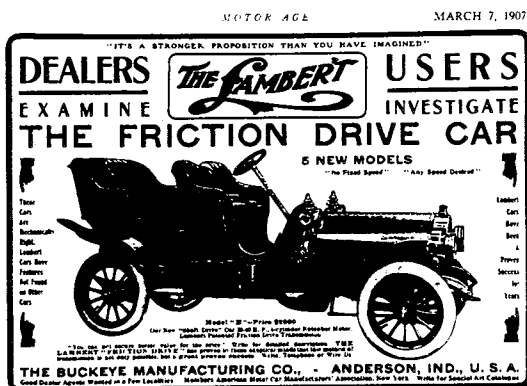


図3 トラクション(フリクション)・ドライブを備えた自動車の広告(1907年)¹⁾

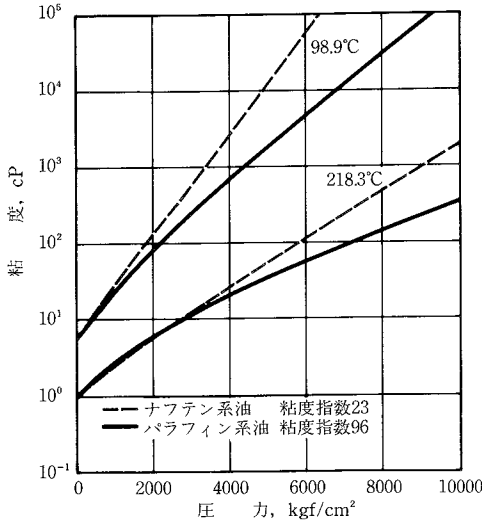


図4 潤滑油の粘度の圧力による変化²⁾

く似ている。まず流体膜の形状は、その接触部を一定距離だけ平行に引き離れたような形をしていて、出口のところがちよっとくびれており、そこで膜厚は最小値をとる。その値は、弾性変形・粘度変化を無視した解よりも、ふつう幾けたか大きくなる。

流体膜に発生する圧力の分布も、だ円形のヘルツ圧とかなりの部分で一致していて、入口部で少し前方から圧力が発生している点と、膜のくびれたところに生ずるピーク、その後のえぐったような部分が違うだけである。この圧力の測定はなかなか難物であるが、膜厚のほうは光干渉法などで理論の妥当性が確かめられている。

では、このような弾性流体潤滑状態におけるトラクションのほうも、上述した理論によって推定できるかという、それが全然だめなのである。図6は誇張して描いてあるけれども、潤滑油がニュートン流体だったらば、トラクションは周速の差に比例して、直線的に上昇するはずである。ところが実測してみるとそうはならない。まず上昇のしかたが何となくかたがるく、しかもだんだん比例関係からずれていって、ついには極大値をとって低下を始める。

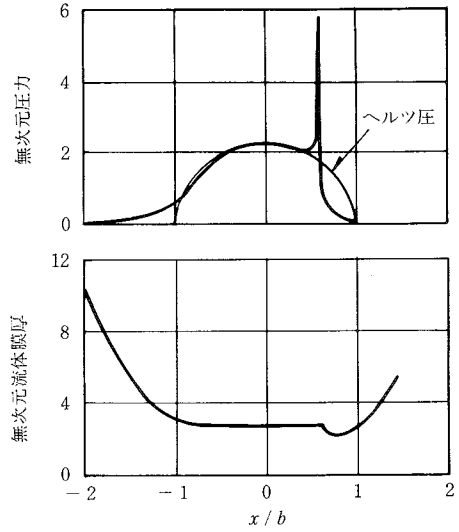
そこで、今述べた弾性流体潤滑理論の成果をふまえながら、このような一見奇妙にみえる特性を説明すべく、さまざまなアプローチが試みられるに至った。

3. トラクションの理論

さて本題に入る。

流体膜の形状や圧力分布を的確に予測しえた理論によって、何故にトラクションが説明できないのか、そこには大雑把に言って次のような事情があった。

図5に示したような流体膜の形成を支配しているのは、



無次元座標 (b はヘルツ接触幅の1/2)

図5 弾性流体潤滑理論による計算例³⁾

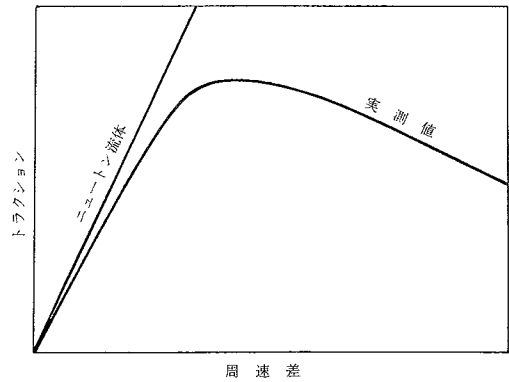


図6 周速差 (せん断速度) とトラクション

もつばら図の左端、平行部に入る前の部分の流れである。なぜなら、平行部に入れば物質不滅の法則によって、潤滑油はただおとなく流れていくほかはないのである。で、問題の入口部では圧力があまり高くないから、潤滑油をニュートン流体とみなすという仮定はそのまま、粘度上昇を考えておけばまあよかった。ところがトラクションに関しては、ずっと高いヘルツ圧の下にある、平行部の流体膜の寄与が大部分を占めることになる。となると、1~2 GPaの高圧の下で、 $10^4 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$ に達する高速のせん断を受ける潤滑油の振る舞いは、もはや等温のニュートン流体として取り扱うことが無理なようなのである。

その、等温でなくなる、という点についてだが、いくら非ニュートン性を導入しても、せん断速度の増加に伴って、図6みたいにトラクションが低下してくるとい

う結果は出るはずがない。だからその原因を、流体のせん断にもとづく温度上昇に求めようと、こういうわけである。

潤滑油の非ニュートン性を表すために、いろいろなモデルが提案されているが、筆者らの解析⁴⁾では、精度が比較的高いわりに取り扱いの簡単な、Johnson-Tevaarwerkモデル⁵⁾を使った。これは、アイリング粘性要素をもつ非線形マクスウェル・モデルであって、ついでに温度の影響も含めてしまうと、構成方程式はつぎのようになる。

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau_0}{\eta_{N0} \exp(\alpha p - \beta \theta)} \sinh \frac{\tau}{\tau_0} \quad (1)$$

ここで $\dot{\gamma}$ はせん断速度、 G はせん断弾性係数、 τ はせん断応力、 t は時間、 τ_0 は特性応力、 η_{N0} は常圧・基準温度・低速で測定したニュートン粘度、 α と β はその粘度-圧力係数と粘度-温度係数、 p が圧力で θ が温度上昇である。

このモデルは、5つのパラメタ $G, \eta_{N0}, \alpha, \beta, \tau_0$ によって流動特性を表している。右辺の第1項は $\dot{\gamma}$ の弾性成分であって、 G が有限であることにより、図6に見られる立ち上がりの遅れが説明される。粘性成分は第2項で与えられ、まずニュートン粘度の η_{N0} からの変化の生じやすさを、 α と β によって表している。最後の双曲線関数がいわゆるアイリング粘性で、 τ が小さい間はほぼニュートン流体として振る舞うが、ある値 τ_0 の付近からずれが目立ち始め、せん断速度の上昇に伴うせん断応力の増加はしだいにゆるやかになっていく。この τ_0 が特性応力で、それが小さい潤滑油ほど、低い応力から非ニュートン性を示すというわけである。うるさいことを言えばこの τ_0 や、前に述べた G にも温度は影響を及ぼすが、ここでは面倒だから無視してしまう。

さて式(1)を、図5に示したような二次元弾性流体潤滑膜に適用し、圧力分布を一定の平均値で置き換える等々、われながら乱暴だと思ふ仮定をいくつも置き、近似をいくつか用いると、ともかく次のような一つの式で、

トラクションの特性を表すことができる。

$$\bar{S} = [D_i \phi \ln 2 \Sigma_i - 2(1 + \phi \Sigma_i) + 2\{(1 + \phi \Sigma_i)^2 - D_i \phi \ln 2 \Sigma_i\}^{1/2}] / D_i \phi^2 \Sigma_i \quad (2)$$

計算結果を図7に示す。ここで \bar{S} は、接触部における平均せん断応力を無次元化した量、 Σ_i は流体膜のせん断速度を無次元化した量で、両者の関係を表す図7が、いわゆるトラクション曲線、図6に対応することになる。また D_i は等温デボラ数と称する量で、 η_{N0}, G などの流動特性を表すパラメタと運転条件からきまり、これが大きければ流体は弾性体に、小さければ粘性体に近い挙動を示すことを意味する。温度上昇を表すのがもう一つの無次元量 ϕ で、上述したパラメタのほかに流体および固体の熱伝導に関連する物性値を含み、流体膜中でなされる単位せん断仕事あたりの、流体膜の平均温度の上昇を示している。

4. 流動特性とトラクション係数

トラクション特性は、速度を制御した円筒間に作用する接線力を測定することによって、実験的に求めることができる。得られた結果に上述した理論曲線をあてはめた例が図8で、こう見ると式(2)がまずまずの一致を示すことがわかる。

しかしこれだけでは面白くない。早い話が、物性値だけでも十個ほどの値をぶち込んでいるのだから、やみくもに実験結果と合わせるだけならば相当あごぎなこともできるわけで、一致したからといってどうということもない。そこで、次のような作戦をたてた⁶⁻⁸⁾。

(1) いろいろな潤滑油について、上述の実験で得られる周速差の小さい部分のデータに理論曲線をあてはめ、流動特性を表すパラメタの値を求める。周速差が小さいところでは温度上昇が無視できるから、話のあやふさはかなり減る。

(2) 熱伝導に関連した物性値は、なるべくすでに発表

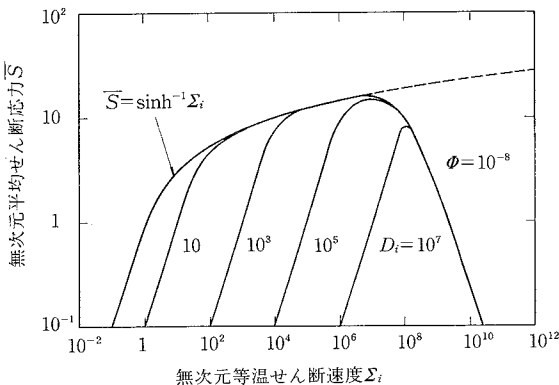


図7 筆者らの理論による計算結果⁴⁾

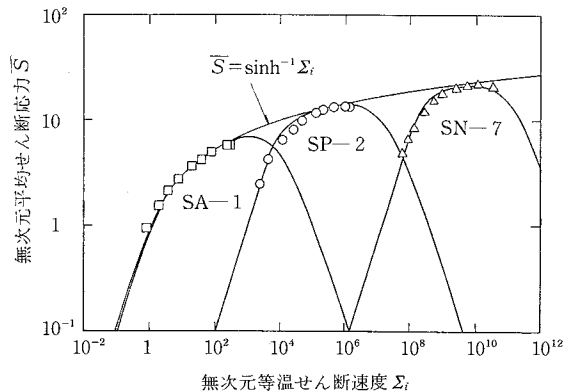


図8 計算結果と実験結果との比較

された数値ないしは経験式を用いる、といっても、トラクション・ドライブを念頭において熱物性を研究したというような篤志家はいないから、かなり“外”する必要がある。

(3) こうして得られる、周速差の高い部分までを含んだ理論曲線を実験結果と比較し、その妥当性をチェックする。その例が図8である。

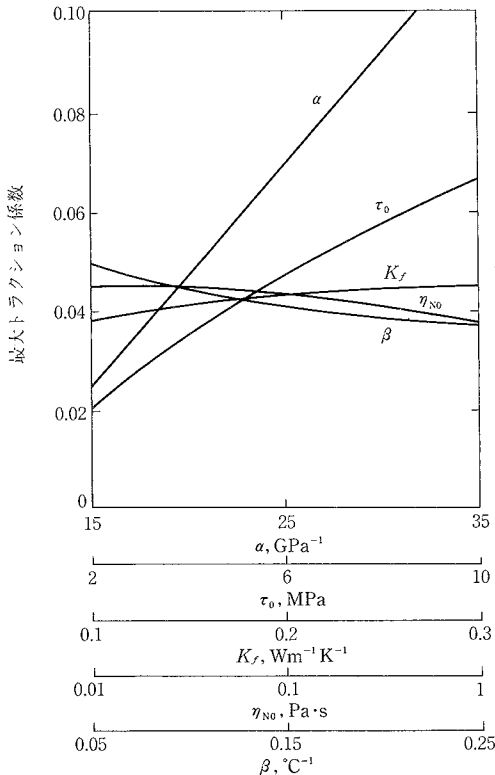
(4) トラクション曲線そのものは、同じ潤滑油を使っても、実験条件あるいは運転条件次第で変化する。しかし(1)で求めたパラメタの値は、その潤滑油に固有のものであるから、それらと潤滑油分子の化学構造との関係を探る。うまくいけば、トラクション・ドライブに適した潤滑油を、演繹的に見つけることができるかも知れない。

ところで前述したように、流動特性を表すパラメタだけで5個あった。これを片端から調べていくローラー作戦もありうるわけだが、効きの良いパラメタとそうでもないパラメタとがあろうから、できれば重点爆撃でいきたい。何しろ話の発端はエネルギーの節約だったのである。そこで典型的な条件の一つを設定し、それを標準にパ

ラメタを一つずつ、大体予想される範囲で変化させたときに期待される、最大トラクション係数を試算したのが図9である。ここでトラクション係数というのは、トラクション、すなわち図1(b)の $F_1 (=F_2)$ を、接触部を押しつけている荷重で割った量で、摩擦係数と同じ意味であり、図6の実測値と書いた曲線の最大値に対応するトラクション係数が、最大トラクション係数である。

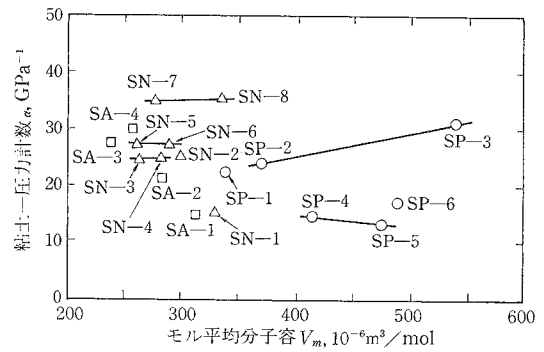
図9を見ると、式(1)に用いたパラメタの中で、粘度—圧力係数 α と特性応力 τ_0 が、抜群に大きな影響をもっていることがわかる。圧力上昇に伴う粘度の増加が著しい潤滑油ほど、非ニュートン性の現れる応力が大きな潤滑油ほど、トラクション・ドライブに適しているというわけである。

ちょっと意外なのは常圧粘度 η_{N0} の影響で、これを単独で見ると、粘度の高いものほど最大トラクション係数が低い。これは、 η_{N0} が高いと図5に示した流体膜が厚くなり、熱の放散が妨げられるのが効いているためらしい。ただし、似たような化学構造をもつ潤滑油で比べると、常圧粘度の高いものほど粘度—圧力係数 α も大きくなる傾向があるし、大体 η_{N0} の影響は小さいから、実際には η_{N0} の高い潤滑油のほうが高いトラクション係数を示すことになる。

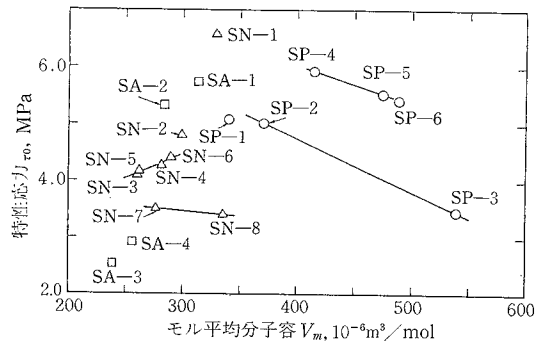


$\alpha = 19.4 \text{ GPa}^{-1}$, $\tau_0 = 5.3 \text{ MPa}$, $K_f = 0.221 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\eta_{N0} = 0.084 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\beta = 0.110 \text{ K}^{-1}$ を標準とし、一つずつ図中のパラメタを下のスケールのように変化させた計算値

図9 最大トラクション係数のパラメトリック・スタディ⁹⁾



(a) 粘度—圧力係数



(b) 特性応力

図10 実験から求めた粘度—圧力係数と特性応力⁹⁾

粘度—温度係数 β と、これは流動特性ではないが、潤滑油の熱伝導率 K_v も、式(2)中の ϕ を通じて影響を及ぼし



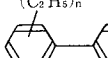



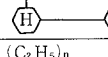
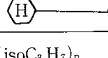


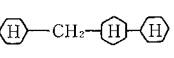
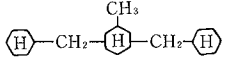
ているが、いずれも僅かなものである。

5. 潤滑油の化学構造とトラクション

さて問題は、 α と τ_0 であることがわかった。そこで、表1に示した化学構造をもつ合成炭化水素についてトラクションを測定し、前章の手順で求めた α 、 τ_0 の値と化学構造との関係を調べることにする⁸⁾。なお表中、SPは脂肪族、SAは芳香族、SNは脂環族の炭化水素を示している。

図10は、横軸に分子の大きさをとって、 α と τ_0 をプロットしたものである。結果はみごとに散らばっているが、いくつかの規則性は認められる。まず第一に、同じような化学構造をもつもの——それらを線でつないである——では、分子が大きいほど、 α はやや大きく、 τ_0 は小さくなる傾向を示している。このように、 α が大きいと τ_0 が小さいという特性は全般的に見られるもので、図の(a)で上にあるものは(b)では下に来ている。トラクション・ドライブ用の潤滑油としては、 α も τ_0 も大きいものほど都合が良かったわけだから、この結果は多少具合が悪

表1 供試サンプル

略 称	化合物名	化学 構 造
SP-1	プロピレン 7 量体水素化物	$\text{H}-(\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}})_7-\text{H}$
SP-2	ブテン 5 量体水素化物	$\text{H}-(\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{C}})_5-(\text{CH}_2-\underset{\text{C}_2\text{H}_5}{\text{CH}})_2-\text{H}$
SP-3	ブテン 8 量体水素化物	$\text{H}-(\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{C}})_5-(\text{CH}_2-\underset{\text{C}_2\text{H}_5}{\text{CH}})_3-\text{H}$
SP-4	(ヘプテン~オクテン) 3 量体水素化物	$\text{H}-(\text{CH}_2-\underset{\text{C}_n\text{H}_{2n+1}}{\text{CH}})_3-\text{H}$ $n=5\sim 6$
SP-5	(ノネン~デセン) 3 量体水素化物	$\text{H}-(\text{CH}_2-\underset{\text{C}_n\text{H}_{2n+1}}{\text{CH}})_3-\text{H}$ $n=7\sim 8$
SP-6	スクアラン	$\text{C}_{30}\text{H}_{62}$
SA-1	直鎖状トリデシル ベンゼン	$\text{CH}_3-\text{CH}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_5-\text{CH}_3$ 
SA-2	分岐状ドデシルベ ンゼン	$\text{CH}_3-\text{CH}-(\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}})_3-\text{CH}_3$ 
SA-3	トリエチル ビフェニル	$\text{(C}_2\text{H}_5)_n \text{---} \text{(C}_2\text{H}_5)_m$  $n+m=3$
SA-4	(ジ~トリ)イソプロピ ルナフタレン	$\text{(isoC}_3\text{H}_7)_n \text{---} \text{(isoC}_3\text{H}_7)_m$  $n+m=2\sim 3$
SN-1	直鎖状トリデシル シクロヘキサン	$\text{CH}_3-\text{CH}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_5-\text{CH}_3$ 
SN-2	分岐状ドデシル シクロヘキサン	$\text{CH}_3-\text{CH}-(\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}})_3-\text{CH}_3$ 
SN-3	ジエチル ビスシクロヘキシル	$\text{(C}_2\text{H}_5)_n \text{---} \text{(C}_2\text{H}_5)_m$  $n+m=2$
SN-4	トリエチル ビスシクロヘキシル	$\text{(C}_2\text{H}_5)_n \text{---} \text{(C}_2\text{H}_5)_m$  $n+m=3$
SN-5	ジイソプロピル デカリン	$\text{(isoC}_3\text{H}_7)_n \text{---} \text{(isoC}_3\text{H}_7)_m$  $n+m=2$
SN-6	(ジ~トリ)イソプロピ ルデカリン	$\text{(isoC}_3\text{H}_7)_n \text{---} \text{(isoC}_3\text{H}_7)_m$  $n+m=2\sim 3$
SN-7	ビスシクロヘキシル シクロヘキシルメタン	$\text{(H)-CH}_2-\text{(H)-(H)}$ 
SN-8	ビス(シクロヘキ シルメチル)メチ ルシクロヘキサン	$\text{(H)-CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{(H)-CH}_2-\text{(H)}$ 

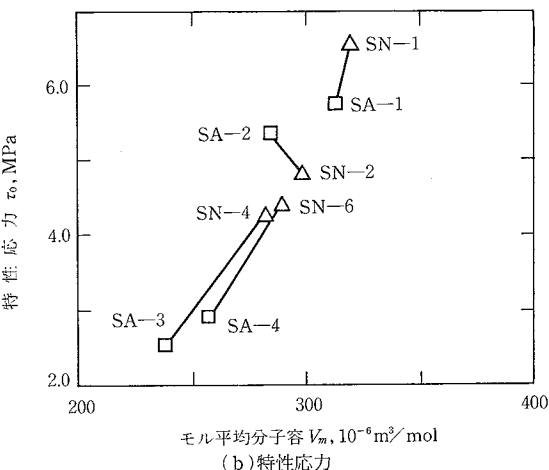
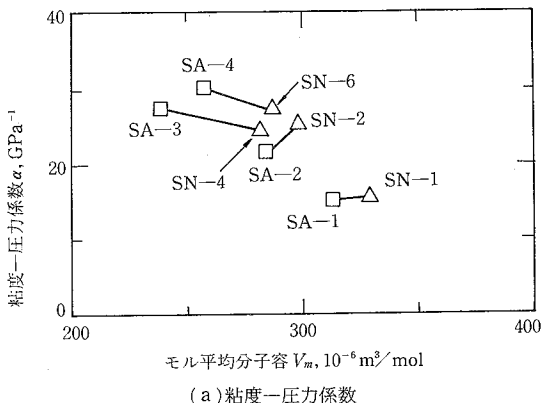


図11 芳香核の水素化による粘度—圧力係数と特性応力の変化

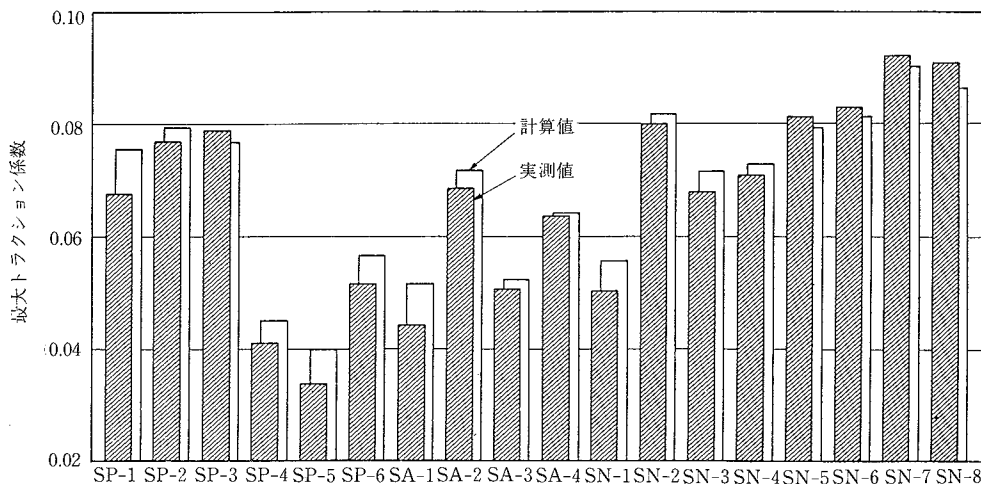


図12 各サンプルの最大トラクション係数⁹⁾

いもので、もう少しいいに調べてみなければならない。

筆者は機械畑で育った人間だから、たとえば表1を見ると、もう少し規則的に構造を変えたサンプルが使えないものかと思うけれど、そううまくはいかないものらしく、必然的にいろんな構造上の特徴の影響がまざってしまう。そういうサンプルについて検討した結果、芳香核の水素化が、多少例外的な影響をもつことがわかった。

芳香核の水素化というのは、SA-1 → SN-1, SA-4 → SN-6 の例のように、ベンゼン環に水素をくっつけてシクロヘキシル環に変え、芳香族を脂環族に化けさせることをいう。その結果が図11で、まず(b)のように、 τ_0 は一例を除いて増加する。これに対し α は、同図(a)に見られるように、増加するものも減少するものもあるが、その減少は比較的小さい。化学構造の他の特徴と違って、少なくとも α と τ_0 が明瞭に逆の変化を示してはいないのである。

ともかくこういう事情がいろいろあって、結局最大トラクション係数は、たとえば図12のようなバラエティを示すことになる。これは、平均ヘルツ圧0.86GPa、平均周速3.56m/sで運転した直径40mmの鋼ローラどうしの接触部に、30°Cの潤滑油を供給した場合の実測値を、前章(3)の意味での計算値と共に示したものであって、0.09あたりというのが現在の到達点である。

石油系の潤滑油の場合には、同様の条件で得られる最大トラクション係数が、高いものでも0.076程度だから、適当な化学構造の合成潤滑油を用いることにより、18%あまりの改良になったというわけである。しかしながら、

無段変速を実現するためには、たとえば図2のような構造をとる必要があって、接触部にはスピンが生ずる。その分だけ、動力の伝達には寄与しないせん断がおこるわけで、無駄な発熱によってトラクション係数が下がることを覚悟しなくてはならない。また、潤滑油として実用に供する場合には、酸化防止剤など、二次的な性能を維持ないし向上させる添加剤が加えられるから、その影響も考慮しておく必要がある。

こう考えると、現在のレベルは必ずしも満足できるものではない。化学機械、製紙機械をはじめ、産業機械に用途が広がっているが、目標は何とんでも自動車であり、そこでは特に軽量・大容量の変速機が要求される。さらに高いトラクション係数をもつ潤滑油が望まれるゆえんである。

(1987年11月4日受理)

参考文献

- 1) Loewenthal, S.H.: NASA CP 2210 (1983), p. 79.
- 2) Pressure-Viscosity Report, ASME (1953)による.
- 3) Dowson, D. and Higginson, G.R.: Elasto - Hydrodynamic Lubrication, Pergamon Press (1966), p. 83.
- 4) 村木正芳・木村好次: 潤滑, vol. 28, no. 10 (1983), p. 753.
- 5) Johnson, K.L. and Tevaarwerk, J.L.: Proc. Roy. Soc. Lond., A, vol. 356, no. 1685 (1977), p. 215.
- 6) 村木正芳・木村好次: 潤滑, vol. 29, no. 3 (1984), p. 216.
- 7) 村木正芳・木村好次: 潤滑, vol. 30, no. 1 (1985), p. 45.
- 8) 村木正芳・木村好次: 潤滑, vol. 30, no. 10 (1985), p. 767.