

平成12年度卒業研究

合成エステル油に適する耐摩耗添加剤の検討

平成13年3月

高知工科大学

工学部 物質・環境システム工学科

1010072 長谷川 敏晃

目次

概要・・・1ページ

1. 研究の背景・・・1ページ

2. 合成エステルと耐摩耗添加剤の化学・・・2ページ

2.1 カルボン酸エステルの化学構造と特性・・・2ページ

2.2 基油と耐摩耗添加剤の化学・・・3ページ

3. 実験方法・・・5ページ

4. 実験結果と考察・・・6ページ

4.1 リファレンス油の耐摩耗性・・・6ページ

4.2 DBDSとODTの効果・・・8ページ

4.3 含リン添加剤の効果・・・8ページ

4.4 分子シミュレーション法を用いた有効濃度律速段階の解明・・・13ページ

5. まとめ・・・19ページ

6. 参考文献・・・19ページ

7. 発表実績・・・19ページ

謝辞・・・20ページ

概要

ホスホン酸エステル、リン酸エステル，スルフィドの合成エステルに対する耐摩耗効果を四球式摩耗試験で評価した．ホスホン酸エステルは優れた耐摩耗効果を示し，その効果は添加剤分子の化学構造によって異なる事が判明した．これらの効果を分子シミュレーション法を用いて考察した．一方，スルフィドは摩耗を促進した．

キーワード：ネオペンチル型エステル，耐摩耗添加剤，ホスホン酸エステル，濃度効果
有効濃度，分子デザイン，耐摩耗性

1．研究の背景

今日，我々の身の回りには自動車などの機械やその他動く部分の有る物が数多くある．物体が動く時には必ず摩擦が生じ，それによって摩耗が起こる．今日に至っても我々人類は様々な摩擦・摩耗の問題を解決するために努力している．それは機械の部品などの動作によって生じる摩擦を低減させてエネルギーロスを少なくしたり，摩耗を防いで材料の長寿命化を実現するためである．

このような摩擦と摩耗の改善の主な手段として潤滑油を用いることがある．紀元前 2400 年頃のエジプトの壁画に，水が潤滑剤として使われている様子が描かれたものがある¹⁾．更に時代が進むと動植物の油脂が潤滑剤として使われたようである．そして現代の潤滑油の主流は石油を精製することで得られる鉱油である．鉱油の優れている点は，燃料製造における副産物であるため安価であることや，長い間潤滑油として使われてきたために技術の蓄積があること等である．

しかし，鉱油以外にも今後優れた性能を発揮することが期待される潤滑油はある．合成油や植物油がその例である．植物油は潤滑油としての性能以外に，生分解性による環境調和が期待される．合成油はその名が示しているように，人工的に合成して得られる潤滑油である．従って油分子のデザインが可能である²⁾．

これらの潤滑油の問題点として，適する添加剤がほとんど無い事が挙げられる²⁾．添加剤とは潤滑油単独では十分な性能を得られない場合に，それを補うために加えられる化合物である．また，合成油や植物油はコスト面でも鉱油と比べると高価な場合がある²⁾．しかし，適する添加剤が開発されれば，広い分野で合成油や植物油が鉱油の代替油として使用でき，普及すればコストダウンにつながる．また実際にこれらの潤滑油が使われ始めている分野もある．本研究ではアルコールとカルボン酸から合成されるカルボン酸エステル³⁾に適する耐摩耗添加剤を検討した．

2. 合成エステルと耐摩耗添加剤の化学

2.1 カルボン酸エステルの化学構造と特性

図 1 に一般構造式を示したカルボン酸エステルは、合成原料であるポリオールとカルボン酸の組み合わせを選択することで分子構造のデザインが可能になる。この分子デザインによって鉱油よりも優れた特性を示すエステルを合成することができる。表 1 にエステルの特性と合成原料の構造の関係を示す。表 1 の特性は合成プロセスによって異なることもある。

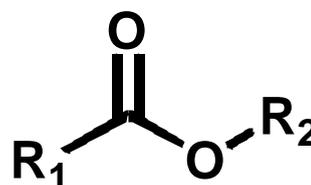


図1 カルボン酸エステルの一般構造式

表1 エステルの特性と合成原料の構造の関係^{3),4)}

エステルの特性	有効な構造の合成原料
熱・酸化安定性	位が四球炭素であるポリオール 不飽和結合が無い直鎖の短炭素鎖カルボン酸
潤滑性	ポリオール(ヒドロキシル基が多い方がよい) 分岐が無い長炭素鎖カルボン酸
流動性	不飽和結合が無い分岐炭素鎖カルボン酸
粘度指数	分岐が無い長炭素鎖カルボン酸

本研究で扱った基油エステルはネオペンチル型エステルに属する化合物である。ネオペンチル型エステルの一般構造式を図 2 に示す。ネオペンチル型エステルが汎用潤滑油として使用され始めている用途には、冷凍機油、自動車のエンジン油、金属加工油などがある。これらの用途は潤滑油が高温条件で使用される場合が多い。そこで、前述したカルボン酸エ

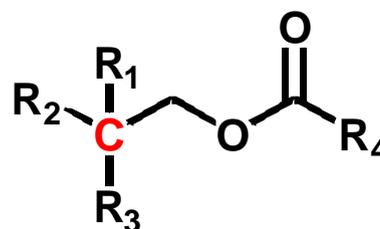


図2 ネオペンチル型エステルの一般構造式

ステルの特性である熱安定性が重要になる。エステルの熱分解反応の一つに 位水素原子の脱離によるものが挙げられる⁴⁾。図 3 に示すとおり、エステルは 位水素原子(赤色)

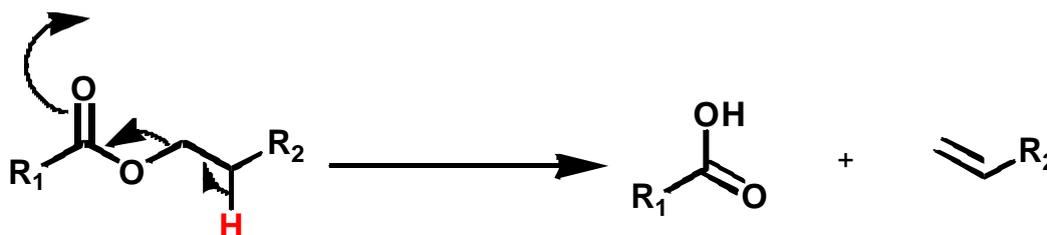


図3 エステルの 位水素脱離分解反応

が脱離する事によりカルボン酸とアルケンに分解する。しかし、図 2 に示すようにネオペンチル型エステルは 1 位が四級炭素であるために 1 位水素原子が存在しない。よって図 3 に示した分解反応は起こらない。

2.2 基油と耐摩耗添加剤の化学

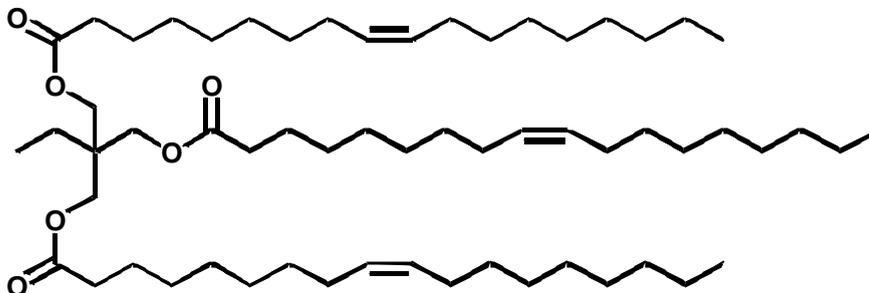


図4 TMP-Oの構造式

本研究で用いた基油は Trimethylolpropane triolate (TMP-O) である。その構造式を図 4、性状を表 2 に示す。TMP-O はトリメチロールプロパンと炭素数 18 の Octadec-9-enoic acid (オレイン酸) からなるトリエステルで、文献法⁵⁾に従って合成した。表 2 に示されている 4 種類の特性の説明を下記に述べる。

表2 TMP-Oの性状

全酸価, mgKOH/g	0.41	
過酸化物価, ppm	103.05	
粘度, mm ² /s	40	47.8
	100	9.4
粘度指数	186	

全酸価(Total acid number, TAN)：試料油 1g 中に含まれる遊離脂肪酸を中和するのに必要な水酸化カリウムの量を mg で表したもの。この数値が高いと、腐食摩耗の原因となる。

過酸化物価(Peroxide value, POV)：油脂の自動酸化の過程で生じる過酸化物の濃度を示す尺度。

粘度(Viscosity)：潤滑油の最も重要な性質の一つ。一般的には粘度の高い潤滑油ほど性能が優れている。潤滑油の粘度は低温になるほど高くなり、高温になるほど低くなる。

粘度指数(Viscosity index)：潤滑油は粘度指数の値が高いほど、使用環境の温度変化による粘度変化が小さい。この値が大きい潤滑油ほど、より広い温度範囲で使用できる。

本研究で扱った耐摩耗添加剤は市販試薬グレードの Dibenzyl disulfide (DBDS) と Octadecanethiol (ODT), Dibutylphosphonate (DBPo), Tributylphosphonate (TBPo), Triphenylphosphonate (TPPo), Triphenylphosphate (TPPa) である。Zinc dialkyldithiophosphate (ZDTP) はエンジン油によく添加される耐摩耗添加剤で、摩耗防止効果のリファレンスとして用いた。これらの構造式を図 5 に、摩耗防止メカニズムを図 6 に示した。そのメカニズムは、添加剤分子の摩擦(金

属)表面への吸着(Step1)と、摩擦熱による添加剤分子と摩擦面との反応(Step2)からなる。その結果、摩擦面に耐摩耗膜を形成し、摩耗防止効果が働く。

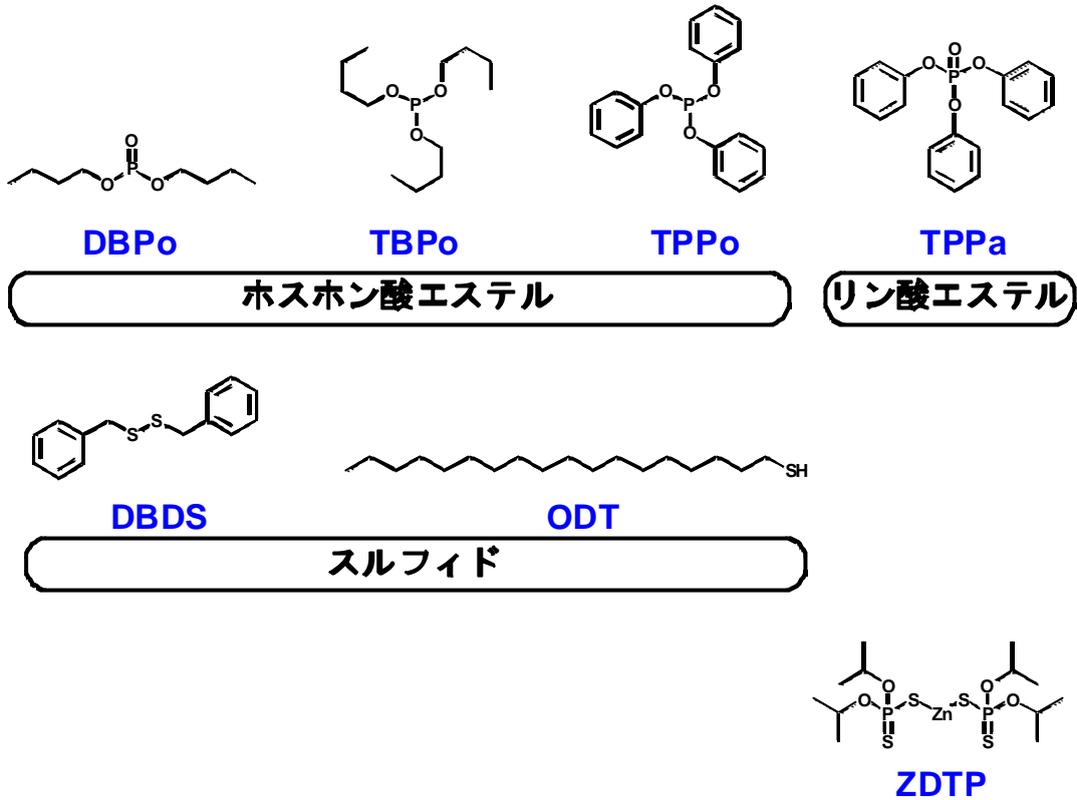


図5 耐摩耗添加剤の構造式

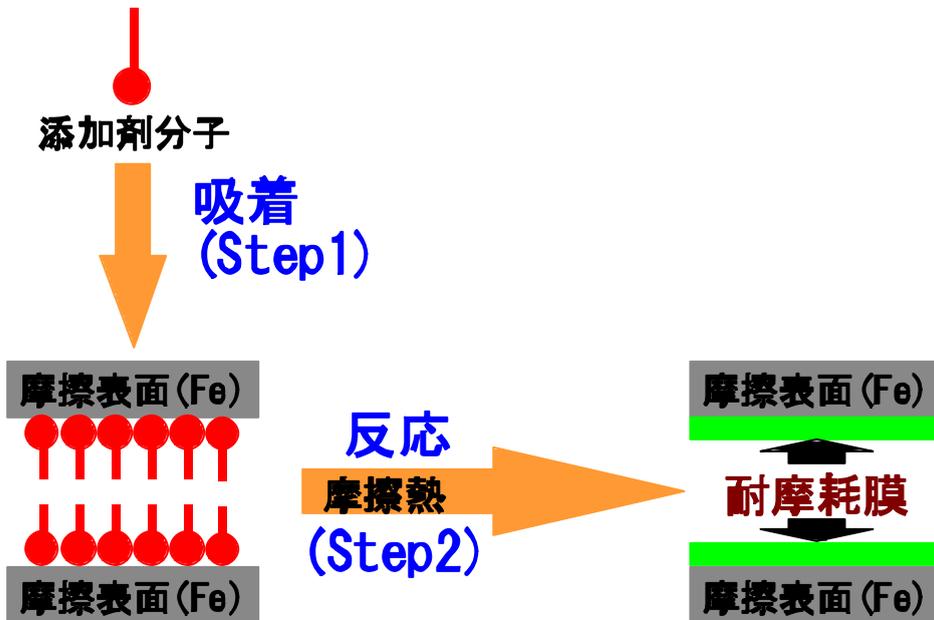


図6 耐摩耗添加剤の摩耗防止機構

3. 実験方法

試料油の性能評価には四球式摩耗試験を用いた。四球式摩耗試験とは潤滑油やグリースの耐摩耗性を評価する目的で用いられる摩擦試験方法である。この試験機の機構を図7に示す。

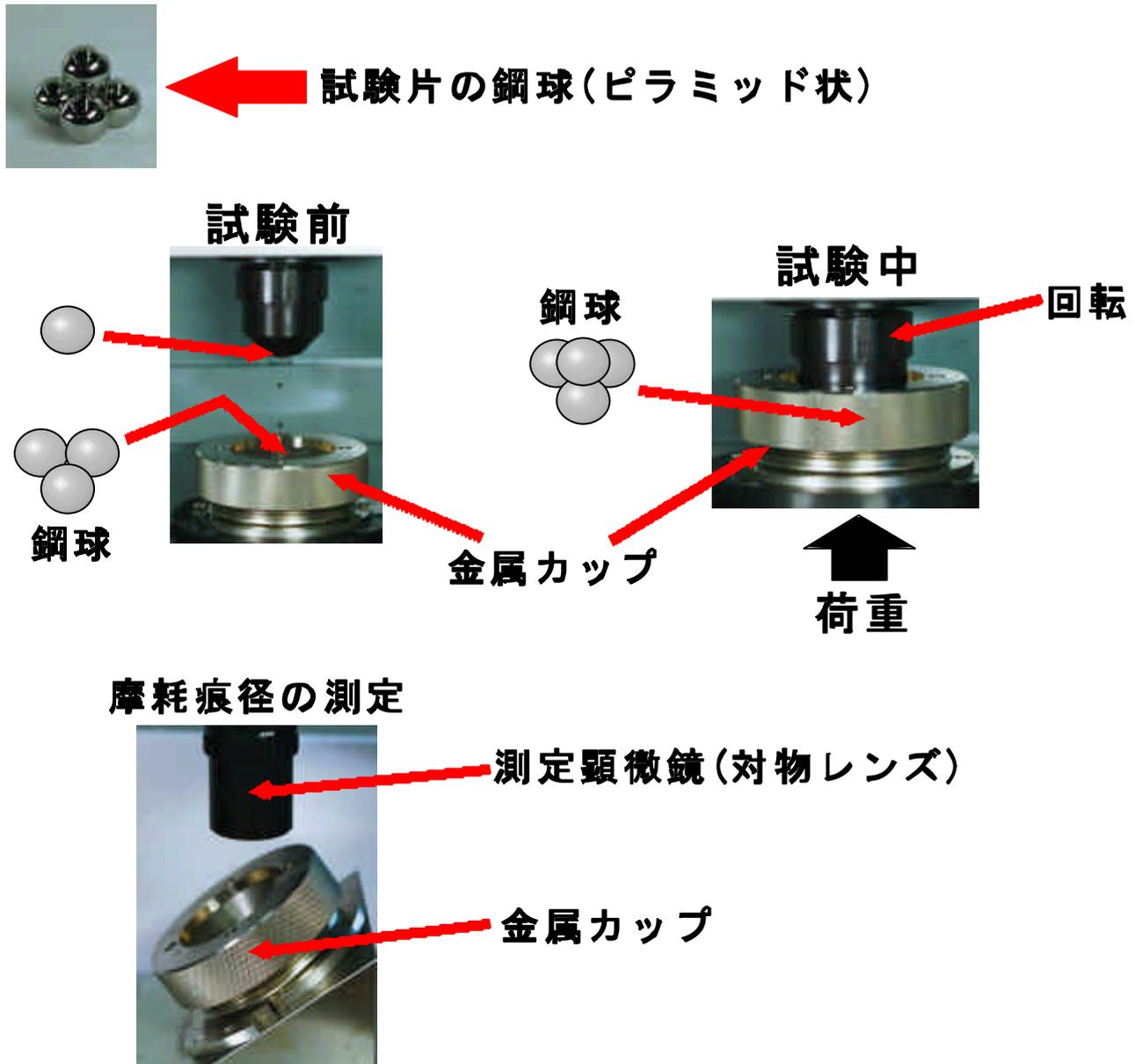


図7 四球摩耗試験機の機構

この実験で使用する試験片は四個の鋼球である。三個を金属カップの中に固定する。そして、このカップに試料油を注入する。残りの一個の鋼球を試験機に固定する。次に金属カップに鉛直上向きの荷重をかけて、この中に固定された三個の鋼球と試験機に固定された一個の鋼球がピラミッド型を形成するように押し当てる。この状態で試験機側に固定さ

れた鋼球を回転させ、摩擦試験を行う。この動作を試験時間の間続け、実験終了後に金属カップに固定された三個の鋼球にできる摩耗傷(摩耗痕)の直径(Wear Scar Diameter, WSD)を顕微鏡で測定する。また試料油の耐摩耗性は三個の摩耗痕径の平均値で評価される。この摩耗痕径が小さいほど試料油の性能が良い。本研究では摩耗痕を顕微鏡に取り付けたカメラで撮影し、その摩耗状態からも試料油の性能を評価した。

今回適用した四球式摩耗試験の条件を表 3 に示す。この試験条件は ASTM D 4172 の規格に準じている。表 3 中のヘルツ直径とは、押し付けられた鋼球の接触部分が弾性変形することで形成される円形接触面の直径である。このヘルツ直径より小さな摩耗痕は理論上ありえない。つまり摩耗痕径とヘルツ直径の差が小さいほど潤滑油の性能は優れている。

試験片は使用前にヘキサンとアセトンで 10 分間づつの超音波洗浄を行い、実験を一回する毎に新品に取り替えた。試験片を固定する器具も実験前後にヘキサン、2-プロパノール、アセトンの順番で 10 分間づつの超音波洗浄を行った。

表3 四球試験条件

規格	ASTM D 4172
荷重, N	392
接触圧, Gpa	3.0
回転速度, rpm	1200
滑り速度, m/s	0.8
試験時間, min	60
油温,	75
試験片材質	SUJ2 (JIS)
試験片硬度, HRc	62
試験片直径, mm	12.7
ヘルツ直径, mm	0.299

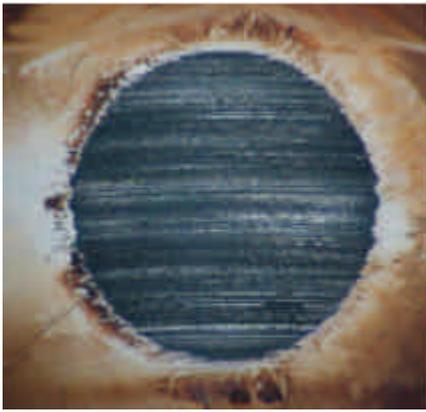
4. 実験結果の考察

4.1 リファレンス油の耐摩耗性

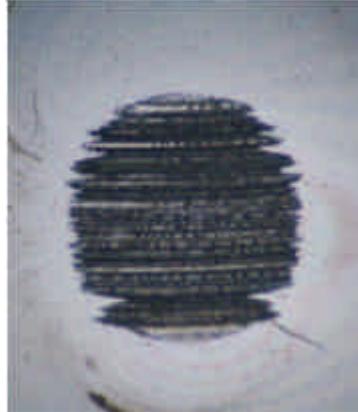
図 8 に無添加の TMP-O の摩耗痕と、表 3 の条件の実験で得られた無添加鋳油と ZDTP 添加鋳油の摩耗痕を示す。図 8 から鋳油に ZDTP を添加すると明らかに摩耗が低減している事が分かる。無添加 TMP-O の摩耗痕と ZDTP 添加鋳油のそれを比較すると、摩耗痕径、摩耗状態ともに大きな差はない。すなわち無添加 TMP-O は ZDTP を加えた鋳油に匹敵する耐摩耗性を示している。

次に ZDTP 添加 TMP-O の摩耗痕を図 9 に示す。この図から ZDTP により摩耗が低減している事が分かる。しかしながら、ZDTP 添加 TMP-O の摩耗痕径はヘルツ直径よりも大きく、更なる耐摩耗性の向上が必要である。

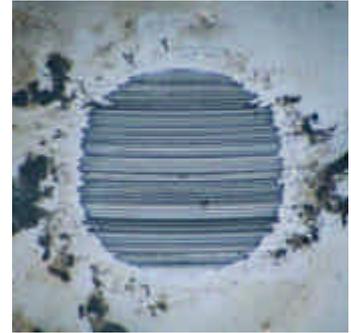
そこで図 5 に示した ZDTP 以外の添加剤を TMP-O に 5 mmol/kg 添加した試料油の実験を行った。その結果を図 10 に示す。このグラフの縦軸の「摩耗差」とは、測定された摩耗痕径とヘルツ直径の差である⁶⁾



鉱油（無添加）
WSD = 0.818 mm

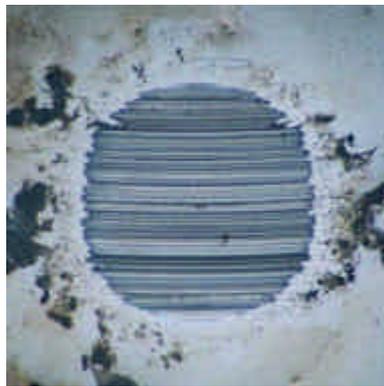


鉱油 + ZDTP
WSD = 0.573 mm



TMP-0（無添加）
WSD = 0.546 mm

図8 無添加TMP-0と鉱油の摩耗痕



TMP-0（無添加）
WSD = 0.546 mm



TMP-0+ZDTP (5mmol/kg)
WSD = 0.437 mm

図9 ZDTP添加TMP-0の摩耗痕

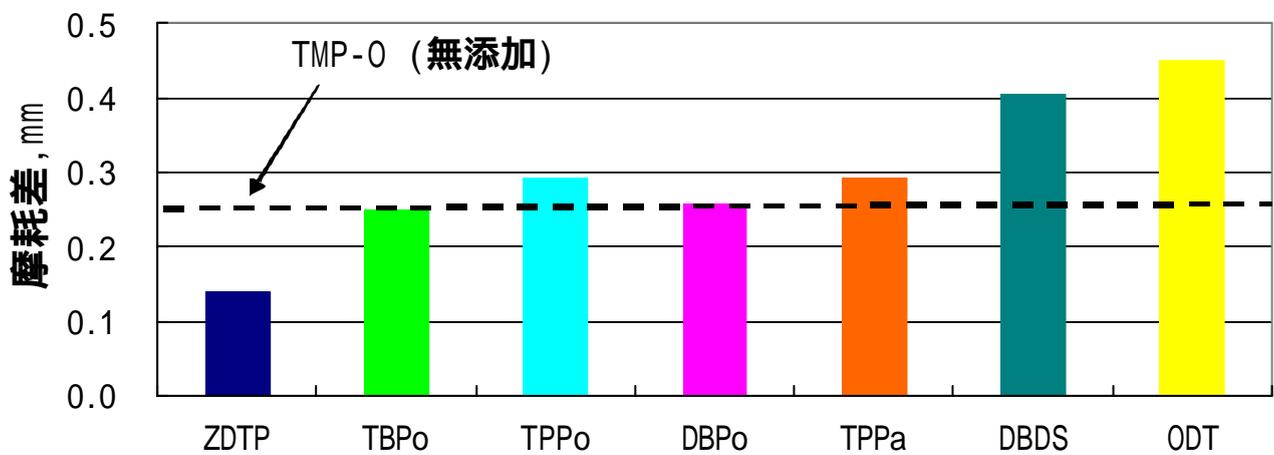
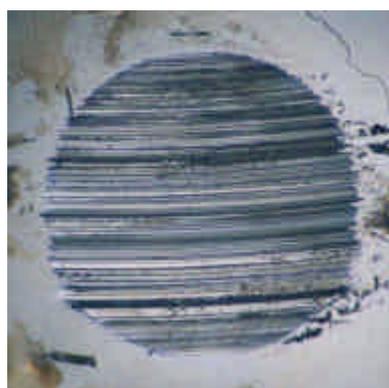


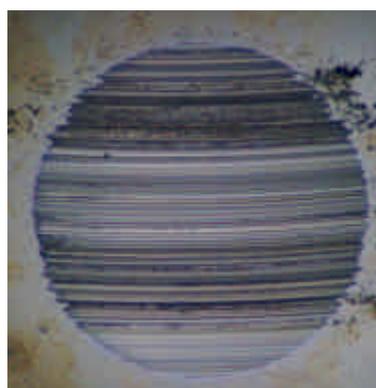
図10 添加剤濃度5 mmol/kgの耐摩耗性

4.2 DBDSとODTの効果

図 10 のグラフより DBDS , ODT を加えた試料油は , 無添加 TMP-O に比べ明らかに摩耗が増大している事が分かる . 図 11 にこれらの摩耗痕を示した . 図 11 の摩耗痕の形状と摩耗面を無添加 TMP-O のものと比較すると , 前者の方がやや平滑である . この摩耗状態は化学摩耗による摩耗促進を示している . 化学摩耗の原因となる反応式を図 12 に示す . エステルが加水分解されるとカルボン酸を生じる . このカルボン酸と DBDS や ODT が反応すると酸性度の高いチオカルボン酸が生成され , これが金属表面を腐食し化学摩耗が起こる⁷⁾ . これはスルフィドをトリグリセリド(植物油)に添加した研究報告⁸⁾と一致する .



DBDS (5 mmol/kg)
WSD = 0.703 mm



ODT (5 mmol/kg)
WSD = 0.751 mm

図11 DBDS,ODT添加TMP-Oの摩耗痕

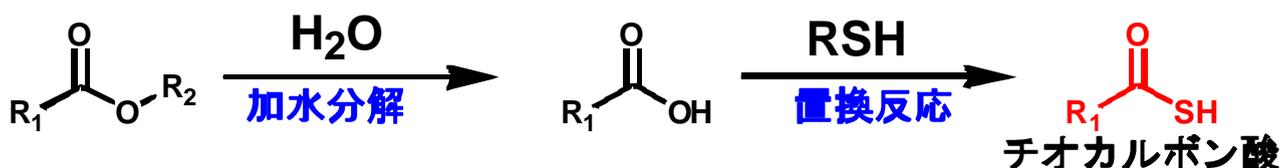


図12 チオカルボン酸の生成反応

一方 , トリメチロールプロパンエステルに含硫黄添加剤を加えると四球式摩耗試験で摩耗を低減した事が報告されている⁵⁾ . そこで DBDS の濃度を 10 ~ 20 mmol/kg に変化させ実験を行った . その結果を図 13 に示す . これにより TMP-O では DBDS の濃度上昇は摩耗の増大につながる事が分かった .

4.3 含リン添加剤の効果

TBPo , TPPo , DBPo , TPPa は図 10 で無添加 TMP-O とほぼ同等の耐摩耗性を示している . そこで含リン添加剤の濃度を 10 ~ 50 mmol/kg に変化させて耐摩耗性を比較した . その結果を図 14 に示す . 含リン添加剤が ZDTP(5 mmol/kg)とほぼ同等かそれ以上の耐摩耗性を示し

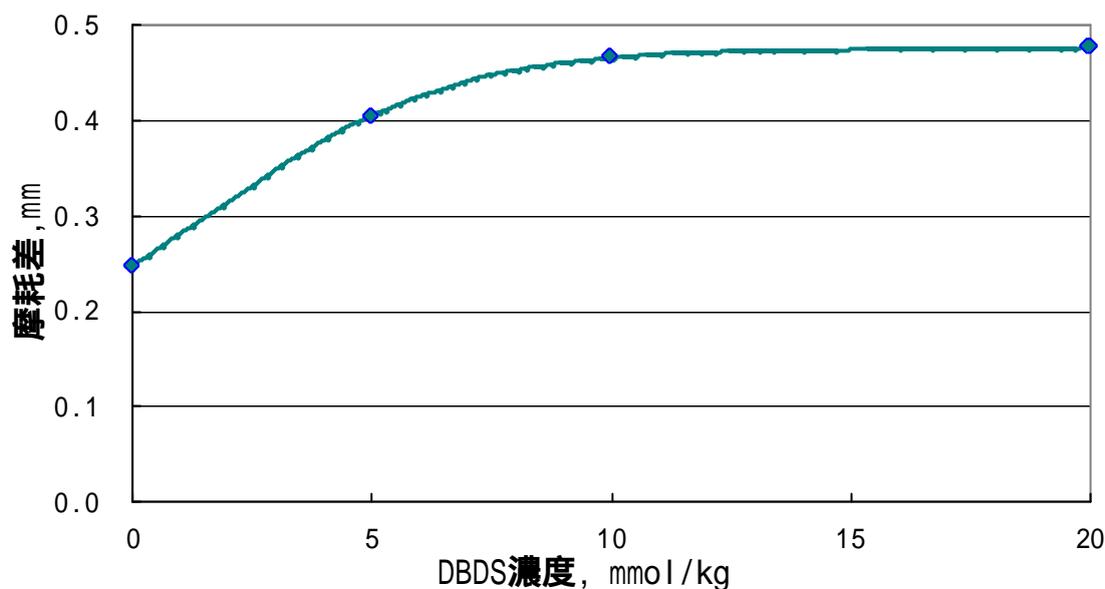


図13 DBDSの濃度変化と耐摩耗性の関係

た濃度を有効濃度と定義し，グラフ上に で示した．

図 15 に TBPo 添加油の摩耗痕を，耐摩耗効果が三段階に区別できる様に示した．20 mmol/kg 添加の摩耗痕は形状，摩耗面ともに粗く，無添加 TMP-O の摩耗痕と比較すると摩耗状態の改善は全く見られない．30mmol/kg 添加だと少し摩耗が低減している．そして TBPo の有効濃度である 40 mmol/kg 添加の摩耗痕は無添加 TMP-O よりも摩耗状態が大幅に改善されている．また摩耗面の横しま模様が薄くなっているのは，摩耗深さが浅いことを示している．この添加剤濃度の上昇に伴う耐摩耗性の向上と摩耗状態の改善が濃度効果である．

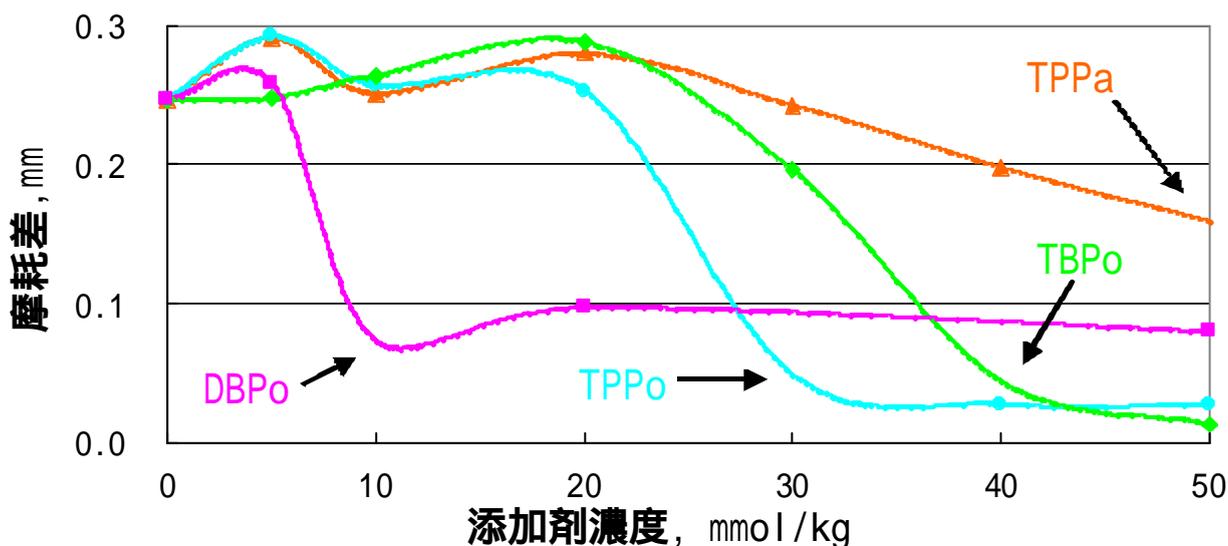


図14 含リン添加剤の濃度効果



TBPO (20 mmol/kg)
WSD = 0.587 mm

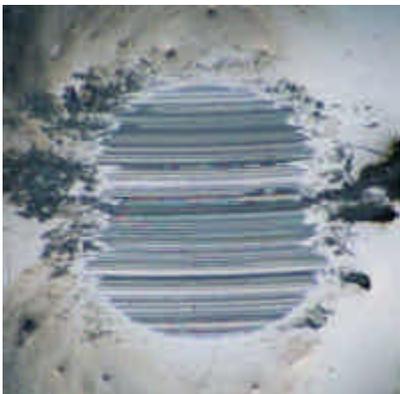


TBPO (30 mmol/kg)
WSD = 0.495 mm



TBPO (40 mmol/kg)
WSD = 0.343 mm

図15 TBPO添加TMP-0の摩耗痕



TPPo (20 mmol/kg)
WSD = 0.552 mm

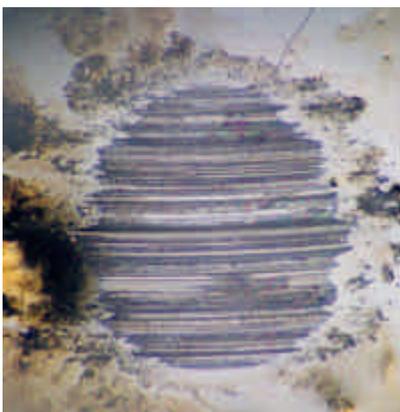


TPPo (30 mmol/kg)
WSD = 0.348 mm

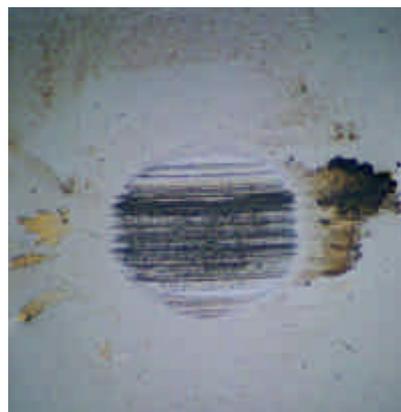


TPPo (40 mmol/kg)
WSD = 0.327 mm

図16 TPPo添加TMP-0の摩耗痕



DBPO(5 mmol/kg)
WSD = 0.557 mm



DBPO(10 mmol/kg)
WSD = 0.372 mm



DBPO(50 mmol/kg)
WSD = 0.379 mm

図17 DBPO添加TMP-0の摩耗痕



TPPa (30 mmol/kg)
WSD = 0.542 mm



TPPa (50 mmol/kg)
WSD = 0.458 mm

図18 TPPa添加TMP-0の摩耗痕

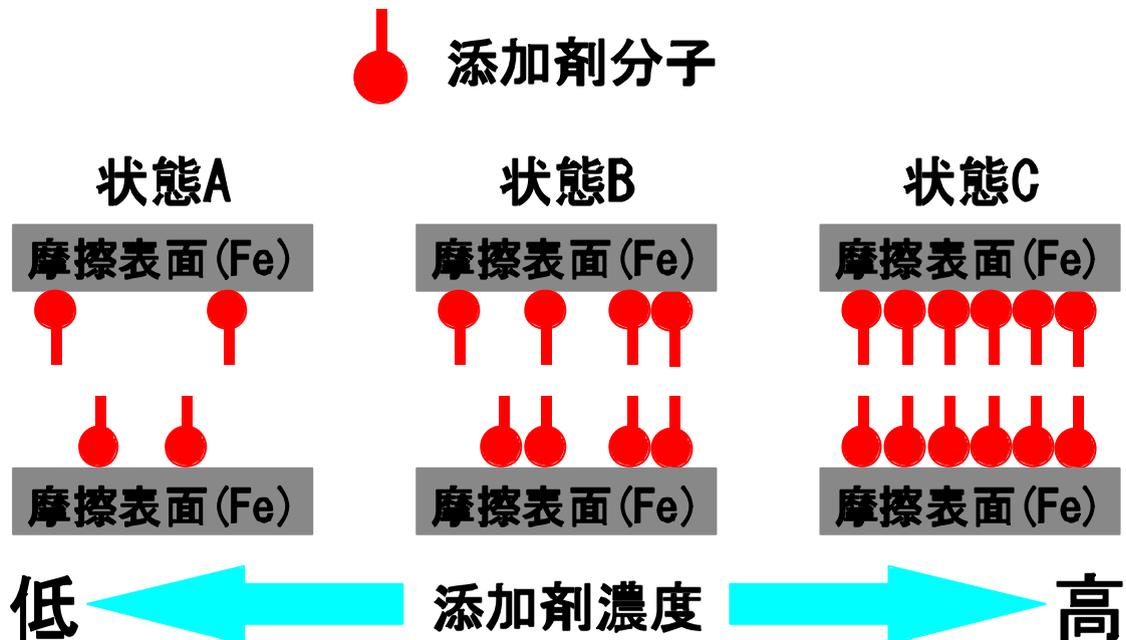


図19 添加剤分子の吸着性と濃度の関係

TPPo, DBPo の摩耗痕も図 16, 図 17 に示すように TBPo とよく似た濃度効果が見られた。また図 18 に示す様に, TPPa の濃度効果はホスホン酸エステルより劣った。そこで濃度効果が生じる理由を, 含リン添加剤分子の摩擦面(金属面)への吸着性と濃度の関係に着目して考察した。

図 19 は Bowden が表した境界潤滑模式図⁴⁾の形式を用いて, 添加剤分子が摩擦面に吸着した状態を三段階に区別した物である。

図 19 の状態 A は摩擦面に吸着している添加剤分子がほとんど無く, 耐摩耗効果を示さない状態である。本研究で用いた含リン添加剤は有効濃度より低い濃度で状態 A あると推定した。つまり低濃度では基油中の添加剤分子が少ないので, それらがすべて摩擦面に

吸着しても耐摩耗性が向上しないのである。

状態 B は添加剤分子がある程度摩擦面に吸着し、耐摩耗効果を示し始める状態である。この状態 B に当てはまるのは TBPo を 30mmol/kg 添加した場合である。

状態 C は添加剤分子が摩擦面に十分に吸着し、優れた耐摩耗効果を示す状態である。状態 C に当てはまるのは、含リン添加剤を有効濃度以上で添加した場合であると推定した。すなわち含リン添加剤は有効濃度以上で十分な量の添加剤分子が摩擦面に吸着し、優れた耐摩耗効果を発揮するのである。

ところで、図 14 より各含リン添加剤の有効濃度に差がある事が分かる。この差が生じる理由を添加剤の溶解度と吸着性の関係から考察した。

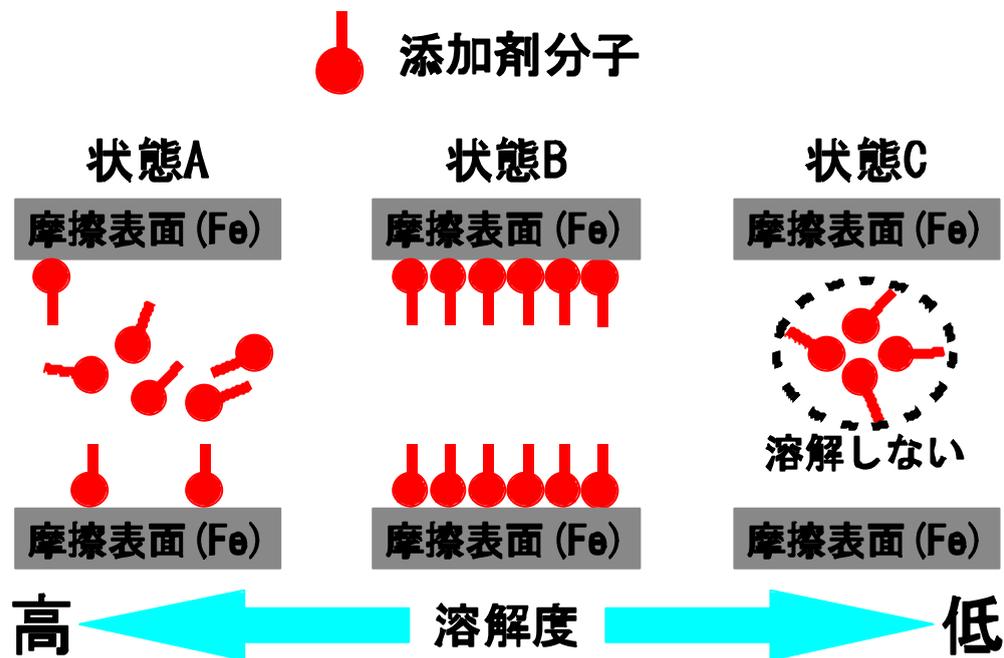


図20 耐摩耗添加剤の溶解度と吸着性の関係

図 20 は耐摩耗添加剤の基油に対する溶解度と摩擦表面への吸着性の関係を示した図である。耐摩耗添加剤の溶解度が高すぎると、図 20 の状態 A の様に添加剤分子が摩擦面に吸着せずに基油中に溶解したままになる。逆にこの溶解度が低過ぎると、図 20 の状態 C のように添加剤の基油への溶解が困難になってしまう。従って図 20 の状態 B の様に適度な溶解度で、優れた摩擦面吸着性をもつ耐摩耗添加剤が望ましい。

TMP-O は極性溶媒なので、炭化水素基の数が多い耐摩耗添加剤の溶解度が高い。そこで TBPo、TPPo、DBPo、TPPa の炭化水素基の数と有効濃度を表 4 にまとめた。

表 4 よりブチル基を二つ持つ DBPo に比べて、ブチル基またはフェニル基を三つ持つ TBPo、TPPo、TPPa の方が有効濃度が高いことが分かる。この差はアルキル基、アリール基の数の差による溶解度の差から生じたと説明できる。また、TBPo と TPPo の炭化水素基の数は同じなので、有効濃度の差はブチル基とフェニル基の違いにより生じたと推定した。

一方，TPPaはその分子中にフェニル基が三個存在するのに，TBPo，TPPoよりも有効濃度が高い．この事から，含リン添加剤の有効濃度の差は炭化水素基数だけで説明できないことが分かった．そこで含リン

表4 含リン添加剤の炭化水素基数と有効濃度の関係

添加剤	炭化水素基数	有効濃度，mmol/kg
DBPo	2	10
TBPo	3	30
TPPo	3	40
TPPa	3	50

添加剤の分子全体に視点を通し，分子シミュレーション法を用いて有効濃度の差が生じる理由を考察した．

4.4 分子シミュレーション法を用いた有効濃度律速の解明

分子シミュレーション法とはコンピュータ上で目的の分子を操作することによって，観察された実験結果を説明するための近似解を得る手法である．ここでは，含リン添加剤分子の摩擦面への吸着活性だけでなく，摩擦熱によって起こる吸着分子と摩擦面の反応にも着目した．そこで有効濃度の差を説明するための仮説1，2を立てた．

仮説1の有効濃度の律速は含リン添加剤分子の摩擦面への吸着である．その概要を図21に示す．添加剤分子の吸着活性はその極性が大きいほど高い．そこで含リン添加剤分子の極性を双極子モーメントを用いて比較した．



図21 仮説1の概要

双極子モーメントとは極性の強さを表すベクトルで，その単位は debye(略号：D)である．
 図 22 に双極子モーメントの値を求める計算式(カルボニル基の例)と分子全体の値の算出
 法(酢酸分子の例)を示した．

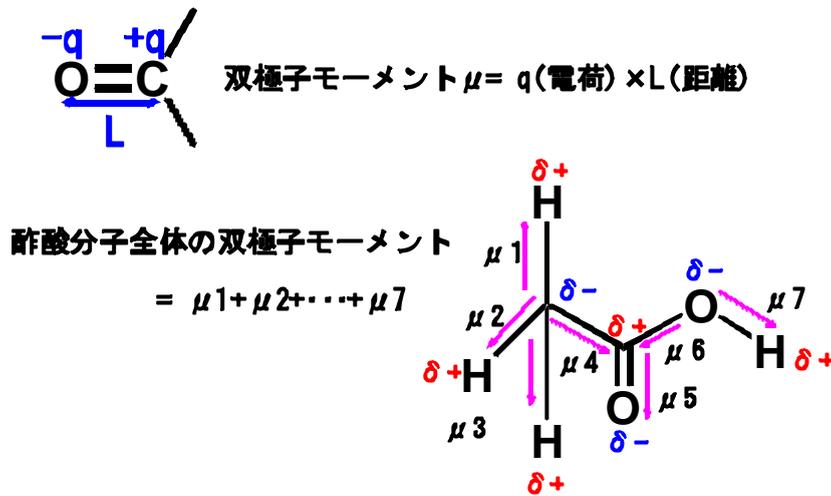


図22 双極子モーメントの算出法

一方，仮説 2 の有効濃度の律速は吸着分子と摩擦面との反応である．その概要を図 23
 に示す．吸着した含リン添加剤分子は摩擦面と反応した後にリン酸鉄の耐摩耗膜を形成す
 る．この反応過程で，添加剤分子中の酸素原子と炭化水素基の結合が開裂する．この炭素-
 酸素結合エネルギーが低いほどリン酸鉄膜を形成しやすく，有効濃度が低くなる事が分か
 る．そこで各含リン添加剤の炭素-酸素結合エネルギーを比較した．

有効濃度の律速 = 反応

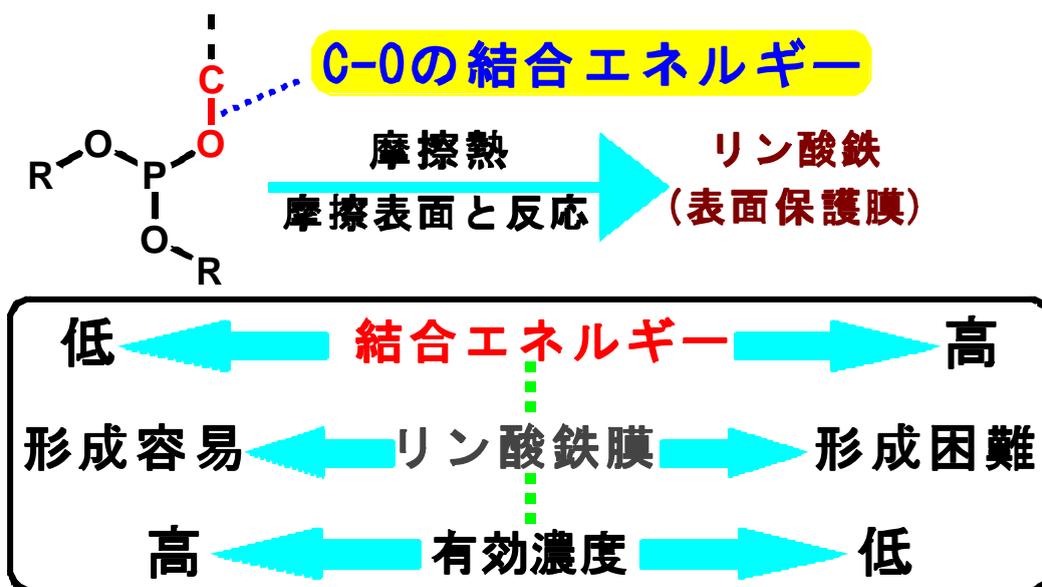


図23 仮説2の概要

今回使用した分子シミュレーションソフトは富士通(株)のWinMOPAC3.0である。このソフトで分子シミュレーションを行うには、幾つかのキーワードの入力が必要である。表5に今回使用したキーワードとその解説を示す。また、ディスプレイ上の添加剤分子の画像のみでは分子構造の把握が困難であるため、分子模型を使用した。

表5 使用したキーワードの解説

キーワード	解説
AM 1	半経験的な分子軌道法。この計算法で分子シミュレーションを行う。
EF	分子構造を最適化する方法
PRECISE	シミュレーション結果の詳細化
ENPART	分子中の結合エネルギーの算出

この分子シミュレーションは各含リン添加剤の基本骨格となるホスホン酸やホスホン酸トリメチルなどの分子の構造最適化から始めた。最初に分子中で分子内回転ができる部分を調べた。この作業には分子模型が必須である。そして図24に示す様に回転可能な部分を一つだけ固定しておき、他の部分で分子内回転を行った。この作業によって最も生成エネルギーが低い立体配座が求められた。次に構造最適化された基本骨格分子を元に、含リン添加剤分子を作成する。図25、図26にTBPoとTPPoの例を示す様に、これらの分子も基本骨格分子と同様の手法で構造を最適化した。

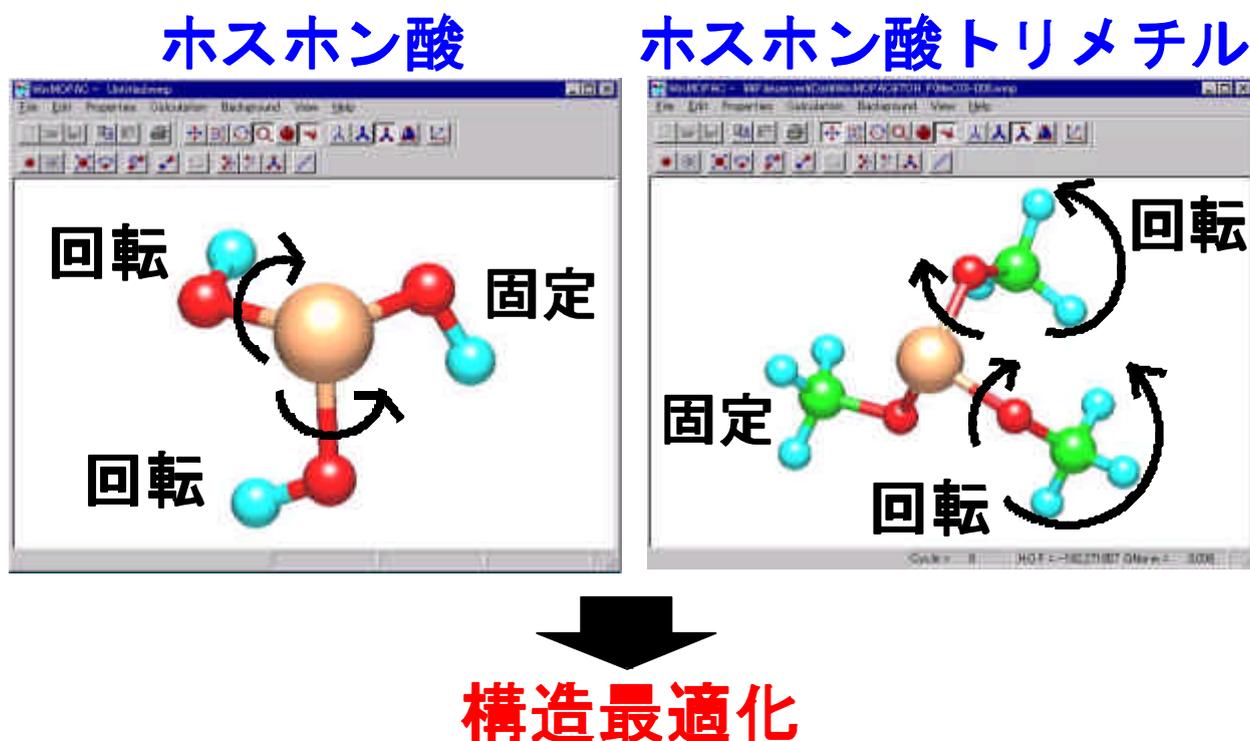


図24 基本骨格分子の構造最適化

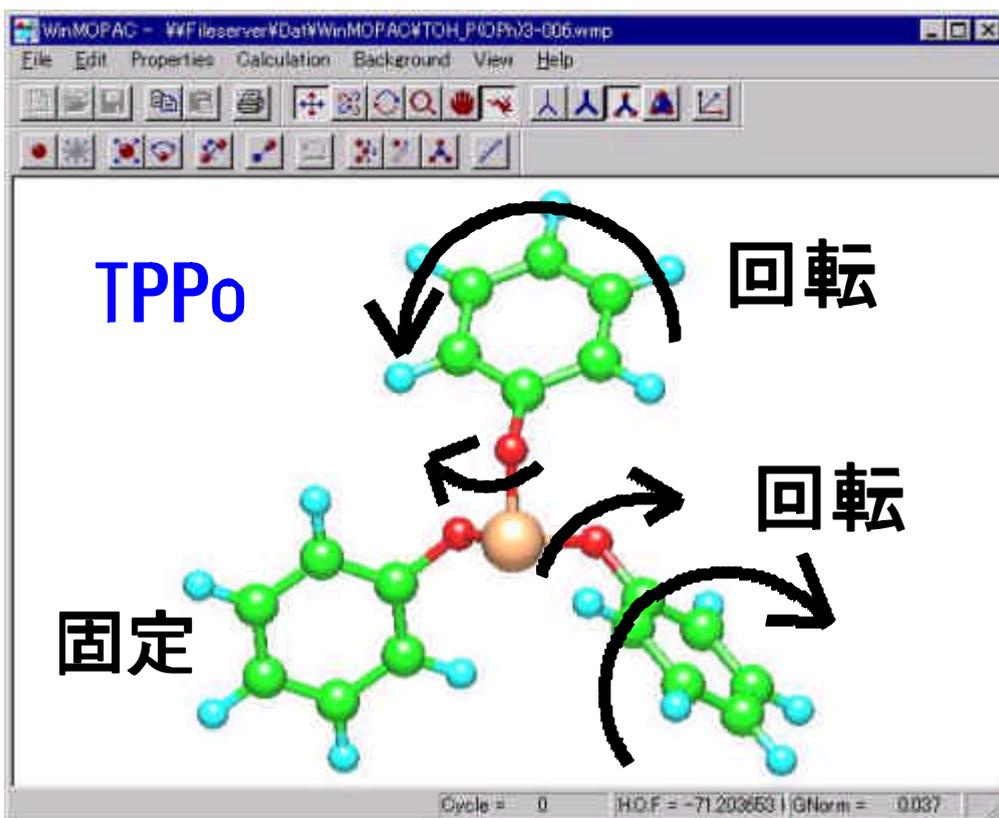


図25 TPPo分子の構造最適化

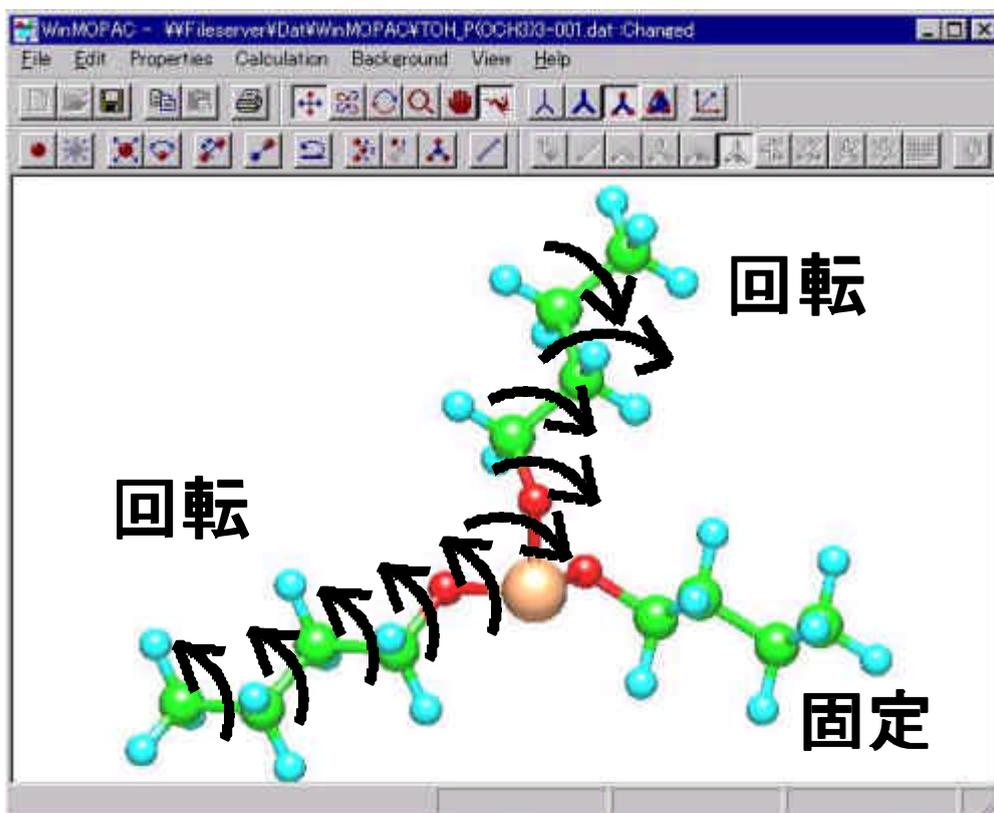


図26 TBPo分子の構造最適化

ここまでのシミュレーション作業が終了すれば、双極子モーメントと炭素-酸素結合エネルギーが自動的に計算される。図 27 に双極子モーメントの計算結果を示す。パソコンディスプレイ上に表示された双極子モーメントの値(赤円内)は読みにくいので黄色い枠内に拡大表示した。

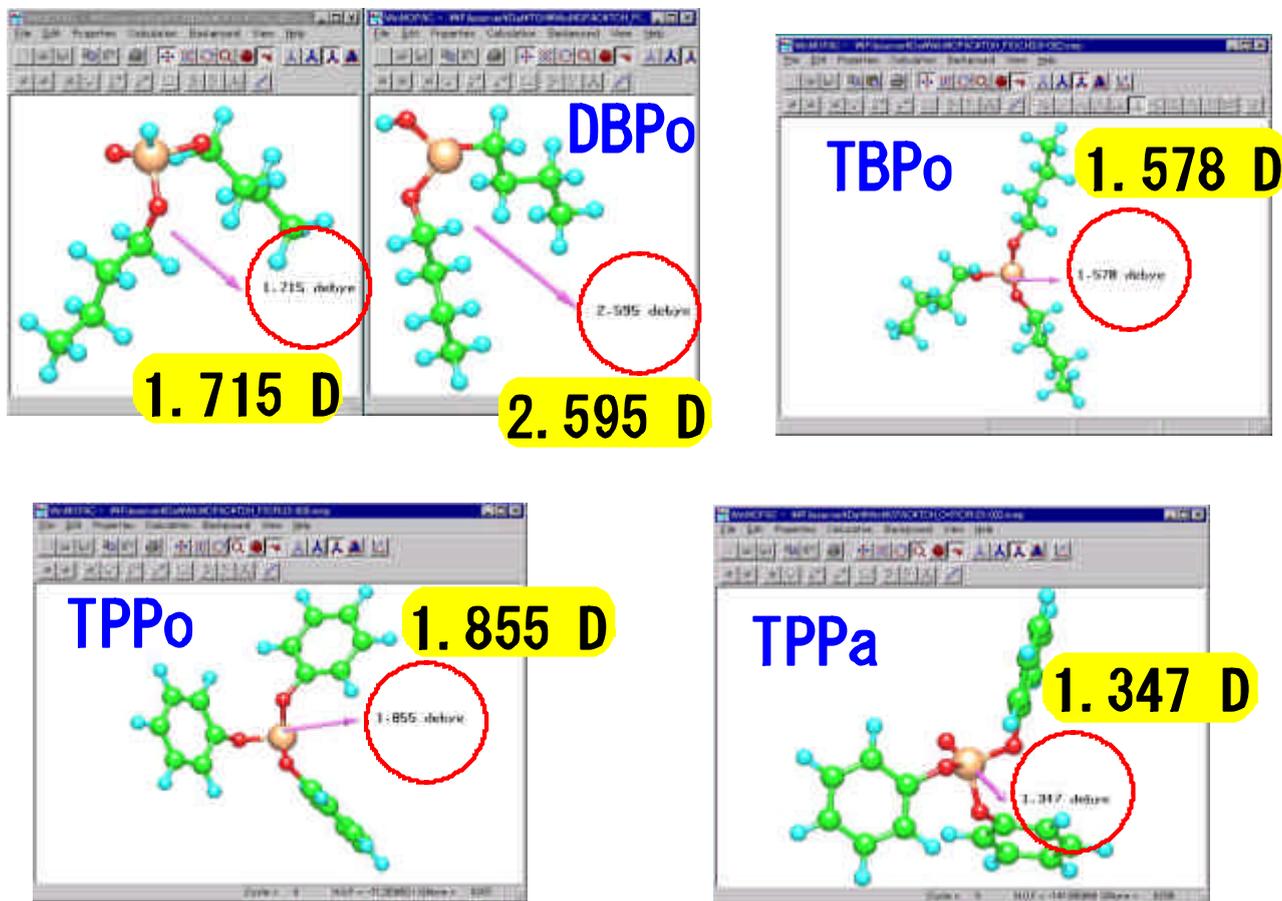


図27 双極子モーメントの計算結果

DBPo は図 28 に示すとおり三価リン型と五価リン型の異性体が存在するため、双極子モーメントの値も二つある。

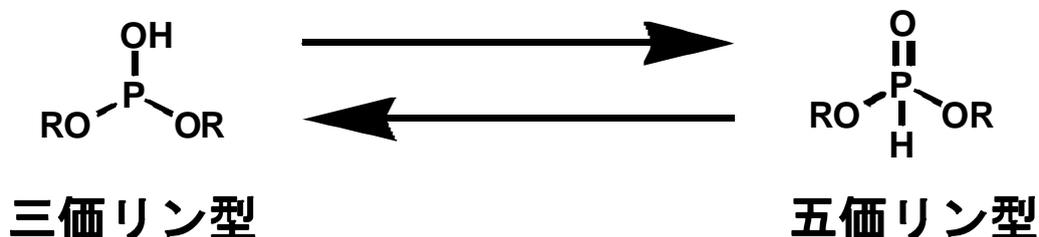


図28 DBPoの異性体

図 29 で各含リン添加剤の双極子モーメントを比較したところ、その値が大きい添加剤ほど有効濃度が低いことが分かった。一方、図 30 で各含リン添加剤分子の炭素-酸素結合エネルギーを比較すると、有効濃度の差とは関係が見られなかった。これらの結果から有効

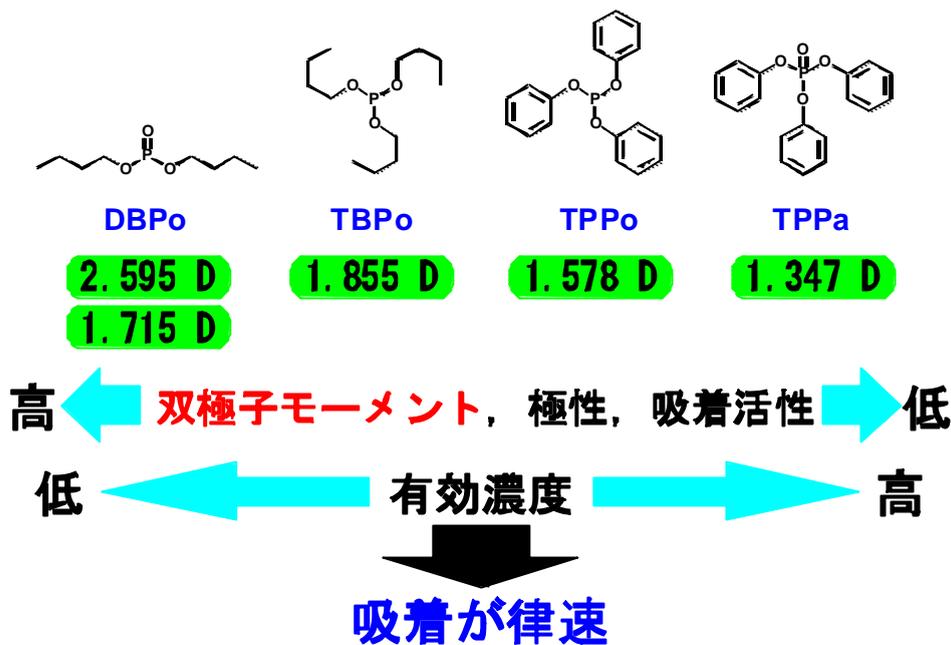


図29 双極子モーメントと有効濃度の関係

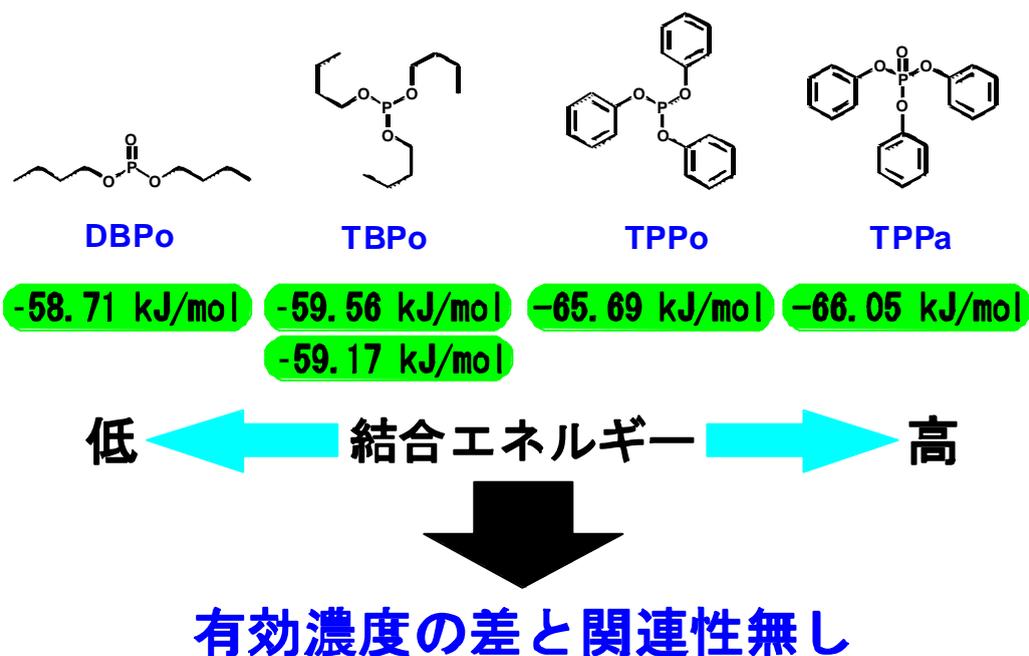


図30 炭素-酸素結合エネルギーと有効濃度の関係

濃度の差は添加剤分子の吸着活性で説明できる事が分かった。

ところで、最も吸着活性の高い DBPo は 10 mmol/kg より高濃度だと摩耗防止効果が少し低下している(図 14)。そこで DBPo を 50 mmol/kg 添加した試料油の摩耗痕(図 18)を同図中の他の摩耗痕と比較すると、前者の方が摩耗面がやや平滑である事が分かる。これは高濃度では DBPo 分子が過剰に摩擦面に吸着したため過剰反応が起こり、化学摩耗または腐食摩耗によって摩耗が促進されたことを示している。従って DBPo の高濃度での耐摩耗性は TBPo, TPPo に劣ったと説明できる。

5. まとめ

1. TBPo, TPPo, DBPo は有効濃度で優れた耐摩耗性を示し, 摩耗状態も改善した. また, これらの有効性は TPPa よりも優れていた.
2. 含リン添加剤の濃度効果は, 摩擦面に吸着する添加剤分子の量で説明できた.
3. 含リン添加剤の有効濃度の差は, 分子シミュレーション法によりその分子の吸着活性の強さで説明できた. また, 過度な吸着活性は化学摩耗または腐食摩耗の原因になることが分かった.
4. スルフィドは化学摩耗により磨耗を促進させた. またその濃度上昇は摩耗の増大につながるということが分かった.

今後の課題: 今後は本研究で得たデータを基に, もっとシンプルな分子構造で, 低濃度で優れた耐摩耗効果を発揮する添加剤を検討するつもりである.

6. 参考文献

- 1) D. Dowson : History of Tribology, 2nd Edition, Professional Engineering Publishing (1998) 41.
- 2) 木村 好次, 岡部 平八郎 : トライボロジー概論, 養賢堂 (1982) 81.
- 3) G. van der Waal: The Relationship Between the Chemical Structure of Ester Base Fluids and their Influence on Elastomer Seals, and Wear Characteristics, J. Synthetic Lubrication, **1**, 4 (1958) 280.
- 4) 小西 誠一, 上田 亨 : 潤滑油の基礎と応用, コロナ社 (1992) 50.
- 5) R. S. Barnes & M. Z. Fainman : Synthetic Ester Lubricants, Lubrication Engineering, **13**, (1957) 454.
- 6) D. E. Weller, Jr. & J.M. Perez: A Study of the Effect of Chemical Structure on Friction and Wear: Part I - Synthetic Ester Base Fluids, Lubrication Engineering, **56**, 11 (2000) 39.
- 7) M.J. JANSSEN: Thiolo, thiono and dithioacids and esters in The chemistry of carboxylic acids and esters, edited by S. PATAI, John Wiley & Sons Ltd., London (1969) 705.
- 8) I. Minami, H. S. Hong & N. C. Mathur: Lubrication Performance of Model Organic Compounds in High Oleic Sunflower Oil, J. Synthetic Lubrication, **16**, 1 (1999) 3.

7. 発表実績

1999/10 トライボロジー会議 (高松)

発表タイトル: 合成エステル油に適する添加剤の検討

2000/10 International Tribology Conference (長崎)

発表タイトル： INVESTIGATION OF ANTI-WEAR ADDITIVES FOR SYNTHETIC ESTERS

2000/5 (予定) トライボロジー会議 (東京)

発表タイトル： 合成エステル油に対する含リン添加剤の耐摩耗メカニズム

2000/10 (予定) International Tribology Conference (San Francisco, USA)

発表タイトル： INVESTIGATION OF ANTI-WEAR ADDITIVES FOR SYNTHETIC
ESTERS

謝辞

本研究の遂行にあたってサンプル提供および学会発表に協力していただいた日本油脂(株)油化学研究所に感謝します。また、本研究にて指導していただいた南 一郎助教授と、研究活動に協力してくれた TriboLab メンバーに感謝します。