船用ディーゼル機関の軸受早期磨耗の一原因(1)*

鍵 渡 徳 彦** 花 島 脩***

One Cause of Premature Failure of Bearings in Marine Diesel Engines (1)

By Norihiko Kagiwata and Osamu Hanashima

This paper describes the primary ways in which lubricant viscosity may vary. We then demonstrates, using models that take into account these lubricant properties, how changes in lubricant viscosity can have a major effect on the minimum oil film thickness in key engine components.

1. はじめに

エンジン油の粘度特性は、ディーゼル機関の軸受の設計に影響を与えます。

本稿は、船用小型高速ディーゼル機関を対象としています。その機関の具体的使用条件は、軽油(ISO-F-DMA)のような留出油を燃焼させ、潤滑油処理装置として、分離板型遠心式油清浄機を装備せずにフィルタのみで対応する場合です。

本稿で対象とするエンジン油は、SHPD (Super - high- performance Diesel engine oils) タイプのマルチグレードです。この種のエンジン油は、最高級エンジン油として、陸上車両に数十年前から使用されていました。然し、過去、船用燃料油の硫黄分が高かったため、船舶には使用されませんでした。

然し、最近、状況が変化してきました。即ち、

- (i) 世界的に船用燃料油が低硫黄化してきた事と、

- (ii) コスト低減(燃費低減、メンテナンスの手間と費用の削減等)の圧力が更に強くなったことや、

- (iii) 環境問題に対して、強い関心を持たざるを得なくなりつつあり、その結果、CO₂排出量の削減の動きの可能性等、

の見地から、今迄、船舶に使用されていなかった陸上車両用最高級エンジン油を船舶にも使用する機運が出てきました。

この種のエンジン油の特徴を下記にまとめます。

- (1) 高せん断速度下に於ける粘性抵抗を低減することによって燃料消費量を減少させ、CO₂排出量を削減します。尚、船用機関に於けるCO₂排出量の具体的減少量は、今後の検討課題です。
- (2) 従来使用していたシングルグレード(モノグレード)の船用エンジン油よりも油やフィルタ寿命を延長させます。即ち、SHPD タイプのマルチグレード油は、メンテナンスコストを削減できます。
- (3) 使用可能外気温範囲が、低温(-15~-20℃程度)から高温(+35℃程度)まで幅広い等の特長がある反面、水分離性が極めて悪い欠点があります。

尚、上記に触れましたSHPDタイプ油の特徴である潤滑油寿命やフィルタ寿命が長いこと及び水分

* 原稿受付 平成15年11月5日

** 昭和シェル石油株式会社
(神奈川県愛甲郡愛川町中津4052-2)

*** Shell Marine Products
(川崎市麻生区向原3-19-13)

離性が劣る点は、“マルチグレード”という粘度特性によるものではなく、酸化防止剤や無灰系分散剤等の潤滑油添加剤の量が従来のシングルグレード油よりも一般的に多く添加されていることに起因するものです。

この種のSHPDタイプの陸上車両用エンジン油は、粘度指数向上剤が添加されたマルチグレードが主流で、シングルグレード油はまれです。マルチグレード油は、軸受の様な高いせん断速度の下で使用されている間、その粘度は、一時的に基油(ベースオイル)の粘度に近づきます。

高せん断速度下で粘度が低減することは、悪いことではなく、地球環境上から望ましいことです。即ち、潤滑理論から、せん断速度が速くなると油膜の負荷能力が増加します。その結果、より低い粘度の潤滑油で十分な潤滑を行なえるようになります。不必要に高い粘度の潤滑油を使用すると、摩擦損失が増加して、燃費の増加をもたらします。これより、マルチグレード油は、環境問題を改善する観点から理にかなった望ましいエンジン油とすることができます。

陸上車両用機関は、長年にわたりこの種のマルチグレード油を使用してきたため、マルチグレード油の粘度特性に対応した軸受の設計になっています。

他方、船用小型高速機関は、従来からシングルグレードのSAE30のエンジン油を主として使用してきました。このシングルグレードのSAE30のエンジン油は、ニュートン流体(厳密には新油のみ)であるため、せん断速度が高い使用条件下に於いても粘度が低下することはありません。この結果、船用小型高速機関は、高いせん断速度の使用条件下で一時的に粘度が低下するような現象を過去には経験しませんでした。

然し、上記に述べましたような時代の変化のため、今後、陸上車両用ディーゼルエンジン油として使用されているSHPDタイプのマルチグレード油を船用ディーゼル機関にも使用したいと船主が希望するケースが多くなると予測します。この結果、マルチグレード油の粘度特性に対応した軸受の設計になっていない場合には、軸受金属のオーバーレイの早期損耗や軸受金属の焼付が発生する可能性があります。

本稿の目的は、SHPDタイプのマルチグレード油の粘度特性を船用機関メーカーに理解して頂くのが目的であり、SHPDタイプのマルチグレード油の使用を可能とする機関の開発を要望するのでは決してありませんので誤解のないようお願い致します。

従いまして、船用機関メーカーがSHPDタイプのマルチグレード油の使用を禁止するのか或は、使用可能な軸受を持った機関を開発するのかの何れを選択しても自由です。

2. 粘性について

2.1. 粘性とは 粘性の大きさは、潤滑油の最も重要な物理性状です。粘性とは、いわゆる「ねばさ」のことです。

「ねばさ」の大きさを表す「ものさし」が「粘度」および「動粘度」です。

17世紀末に英国の数学者、物理学者、天文学者であるSir Isaac Newton (1643-1727)は、図1¹⁾に示すような式を誘導し、粘度の定義をしました²⁾。図1は、二つの平行な平面(底面と上面)の間に液体、例えば、エンジン油が充満しており、底面に付着する油分子は、底面の壁の固体分子との間の引力、即ち、付着力により壁に付着していますので、この間にはすべりは生じることなく静止しています。他方、上面の板に付着する油分子は、上面の板の固体分子との間の引力によりその板に付着していますので、板と同一速度で動くことになります。今、上面の面積Aの板が力Fにより一定速度Vで動かされていると仮定します。底面と上面の間の流体は、底面からの距離に比例した速度で

図1 層流に関するニュートンの理論の概要¹⁾

動きます。尚、図1中の小さい円は、それぞれ油の1分子を表していると仮定します。上面の板を速度Vで動かすに要する単位面積当りの力(F/A)をせん断応力“ τ ”(又は、ずり応力)(shear stress)と言います。底面と上面の間隔“h”が十分小さければ、この間の流体部分は、板に平行に運動し、層流(laminar flow)をなし、その間の速度“Vn”は、底面の速度“0”から上面の速度“V”まで変化します。層流とは、流体がその分子の凝集を解し各部分が層状をなしてすべる運動をいい、これに対して流体の部分(その大きさは環境によりいろいろである)が互いに入り乱れ、回転しながら不規則な軌道をえがいて運動する流れを乱流(turbulent flow)と言います。ここでは、層流を対象とします。

図2中のV/hを、せん断速度(rate of shear又はvelocity gradient)と言います。せん断速度は、速度の勾配、ずり速度、せん断ひずみの生じる速さ、単位時間に生じるせん断ひずみ等とも言います。

図2 セン断速度(速度こう配)

Newtonは、せん断速度が流れの全ての層に於いて等しい($V/h=V_1/h_1=V_2/h_2$)、即ち、速度分布が直線的に変化すると考えました。然し、実際には、多くの場合、図2に示すように直線的には変化しません。従いまして、一般には、せん断速度は、 dV/dh となります。

Newtonは、図1の力“F”は、面積“A”とせん断速度“V/h”に比例し、その比例定数“ η ”を粘性係

数(coefficient of viscosity)又は、単に粘度(viscosity)と定義しました。即ち、 $F=\eta A(V/h)$ となります。この式から、 $\eta=(F/A)/(V/h)=[\text{せん断応力}]/[\text{せん断速度}]$ となります。前述の粘度“ η ”を“ μ ”と表す場合もあります。上記に述べたNewtonの粘度の定義を改めて式(1)に示します。

$$\eta = \frac{\tau}{dV/dh} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 η : 粘度(絶対粘度), Pa・s(又はN・s/m²)

τ : せん断応力, Pa(又はN/m²)

dV/dh : セン断速度, s⁻¹

上述した内容をまとめますと、流体(気体と液体)が層状をなして流れている時に、速度の相違する隣接する層間にせん断力または摩擦力が流れの方向と反対方向に働きます。即ち、流体内部に於ける相対運動を妨げようとする働きが生まれます。この摩擦力(せん断力)を内部摩擦力と言います。内部摩擦力のなす仕事は、流体が持っている機械的エネルギーの一部を熱に転換して、全く回収出来ない損失となります。

この内部摩擦は、流体の粘性に基づくものでこれを粘性抵抗とも言います。

ここで興味深いことは、どんな流体でも、それが静止している限り、粘性と言う性質は現れません。流体が多少なりとも流動を始めるときに、はじめて粘性と言う性質が生まれます。

2.2. 粘性の成因³⁾ 粘性は、上述のように流体がせん断力を受けるとき、①分子間引力と②分子運動との2つの作用によって、加えられた力に対して抵抗しようとする性質です。

気体の場合、気体を構成する分子間の間隔は比較的大きい^{注1)}ため、分子と分子の間の引力、即ち、凝集力は殆ど無視できる程度の極めて小さい値しかありません。例として、永久磁石同士を近づけるとある距離までは、引き合う力を示しますが、ある距離以上に離すと急激に引力を示さなくなります。これと同様に、気体の粘性の場合、分子間引力の影響は殆どありません。

次に分子運動に関して触れます。気体を構成する各分子は、それぞれ独立して、大きな速度^{注2)}で

飛び回っています。これに対して、液体を構成する分子は、互に殆ど触れ合う程度に接近^(注3)していますので分子間の引力の影響が気体のそれに比較して遥かに大きい値を示します。然し、このため液体を構成する分子は、全く動けない状態ではなく、気体の分子のようにやはり飛び回っています。即ち、気体の分子の方が液体の分子より、より活発に動いています。即ち、流体を構成している各分子は、各方向に不規則に動きながらマクロ的にある一定方向に流れます。この分子運動が流体の内部摩擦の成因の一つです。今、流体が層状をなしてある速度でマクロ的にある一定方向に流れている場合を考えます。層状をなして流れている分子が、隣のより速い流れの層(図1では、下から上の層)に飛び込むと、その分子は加速されることになり、逆に、隣のより速度の遅い層(図1では、上から下の層)に飛び込むと減速させられることになります。ニュートンの運動の第2法則から派生的に考えられることですが、加速度、減速度の方向と逆向きに慣性力が働きます。この慣性力がせん断力を形成し、内部摩擦の原因の一つとなります。他の一つが分子間引力です。

気体の粘性は、上記で述べた分子間の運動に基づく内部摩擦に主として支配されています。他方、液体の粘性は、分子運動に基づく内部摩擦の外に、前述の分子間引力の影響がとりわけ大きく支配します。即ち、液体の分子間距離は、気体のそれより、遥かに近接しているため、液体の内部摩擦(粘性抵抗)の殆どは、分子間引力に起因しています。

一般に流体は、温度を高めると、分子運動は激しくなり、その結果、分子運動に基づく内部摩擦は増加しますが、これに反して熱膨張により分子間々隔が広がるため、分子間引力は、温度の上昇に伴って著しく減少します。

この様に温度の変化は、①分子間引力と②分子運動とに対して全く反対の影響を及ぼすと共に、温度変化が粘性抵抗に与える度合いは、前者①が、後者②より著しく影響を受けます。

この結果、エンジン油のような液体の粘性抵抗は、温度の上昇に伴って急激に減少します。

他方、空気のような気体の粘性抵抗は、温度の上昇に伴って僅かずつ増加します。

注1)：温度0℃、気圧760mmHgに於いて、分子の大きさの凡そ10倍程度。

注2)：一例として、温度0℃の下での酸素分子の場合、各分子間で異なるが、平均値が377m/sと言った高速度になることが理論上判明しています。

注3)：液体が圧縮され難く、気体が圧縮されやすいのはこのためです。

2.3. 粘性の大きさの表し方 粘性の大きさを表す量として、④粘度、或は、絶対粘度(absolute viscosity)或は、dynamic viscosity)と、⑤動粘度(kinematic viscosity)の二種類があり、両者共に①温度、②せん断速度、③圧力の三つの要因を受けて変化します。

文献に「粘度」と記述されている場合には、(i)絶対粘度を指す場合、(ii)粘性の大きさ、即ち、絶対粘度と動粘度の両者を指す時と、(iii)動粘度を、ただ単に、粘度と表現する場合がありますので、文章の前後の意から、何れを指すのか類推する必要があります。筆者は、このような曖昧さを避けるため、粘性の大きさ(絶対粘度と動粘度の両者を含む)を指す場合にのみ「粘度」と表現し、「絶対粘度」を意味する場合には、「粘度」と記述せずに「絶対粘度」と、「動粘度」の場合にも省略せず「動粘度」と表現することを提案します。

然し、本稿では、一般的に行われている方法に従って、絶対粘度を粘度と記述することにします。

粘度は、前述しましたように[流体に与えたせん断応力]/[せん断速度][参照：式(1)]なる比を考え、この値を粘度と称しています。粘度は、式(4)から分かりますように、動粘度に密度を乗じて計算により求めることが出来ます。また、直接、粘度を実測することも出来ます。粘度を実測する場合には、重力が影響を与えないような条件下で測定します。具体的測定方法例として、回転粘度計等で、多くの場合、速いせん断速度下、例えば 10^6sec^{-1} で測定します。粘度測定試験法例として、

ASTM D4624「Measuring Apparent Viscosity by Capillary Viscometer at High-Temperature and High-Shear Rates」,

ASTM D4683「Measuring Viscosity at High Shear Rate and High Temperature by Tapered Bearing Simulator」,

ASTM D4741「Measuring Viscosity at High Temperature and High Shear Rate by Tapered-Plug Viscometer」や

ASTM D5481「Measuring Apparent Viscosity at High-Temperature and High-Shear Rate by Multicell Capillary Viscometer」等があります。

ISO (国際標準化機構) の試験法を含み、各国の石油製品に関する試験法は、世界的にその殆どが ASTM に準拠しています。ASTM は、ASTM International が規定する試験法及び製品規格で、American Society for Testing and Materials (アメリカ材料試験協会) の略です。

その他、粘度の測定法として、超音波粘度計、振動粘度計や落球型粘度計等があります。

他方、動粘度は、流体が重力によって自然流下する時に示す抵抗の値です。尚、流体を自然に流れ落とそうとする重力による力は、流体の密度と流体の高さ(厚さ)によって生じる圧力です。

新油や使用油の粘性を表す場合には、粘度ではなく、動粘度を測定します。測定温度は、一般に 40℃或は、100℃です。エンジン油の使用油の場合には、40℃の動粘度は、一般に酸化劣化度合いを評価するために測定され、100℃の動粘度は、一般に不溶解分による粘性の変化を評価するために使用されます。動粘度は、ガラス製毛管式粘度計(内径: 0.22~6.25mm)を使用して測定します。即ち、動粘度は、毛管内を重力で非常に低いせん断速度(1~2sec⁻¹程度)で一定量の流体が流れ落ちる時間(秒)を測定し、その値(秒)をハーゲン・ポアズイユの法則(Hagen-Poiseuille law)を応用した式に代入して動粘度を求めます。

粘度の旧単位のパアズ(poise, 記号 P)は、円管を通る粘性流体の流れに関するフランスの研究者 J. L. Poiseuille (1799-1868) の名前に因んで付けた単位名です。ついであるが触れますと、動粘度の旧単位のストークス(stokes, 記号 St)は、粘性流体力学に貢献した英国の数学者であり物理学者でもある Sir George Stokes (1819-1903) を記念して付けた単位名です。

動粘度の測定法は、ASTM D445「Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the Calculation of Dynamic Viscosity)」や JIS K2283「原油及び石油製品—動粘度試験方法及び粘度指数算出方法」に規定されています。

Newton が「粘度」を定義した後に、更に新たに「動粘度」と言う量を作った理由は、流体の運動を取り扱う場合、粘度より動粘度の方が便利なが多いからです。即ち、粘性のある流体の流れの状態や、またその流れの中に置かれた物体の抵抗は、流れのレイノルズ数(流体に働く慣性力と粘性力との大きさを表す無次元の数)により大きく変化します。レイノルズ数が大きくなると、流れが層流から乱流になったり、またうずが生じたりする場合、流体の慣性が大きいほどこの傾向が強くなり、また粘性が大きい程、うずが消えやすくなります。このレイノルズ数は、粘度より動粘度を使用したほうがより簡単に計算ができます。

粘度(μ)の次元は、重力単位系(力の次元: K, 長さの次元: L, 時間の次元: Tとする)では、

$$[\mu] = \left[\frac{\tau}{dV/dh} \right] = \left[\frac{K/L^2}{(L/T)/L} \right] = \left[\frac{KT}{L^2} \right] \dots \dots \dots (2)$$

動粘度(ν)の次元は、重力単位系では、式(2)と式(4)から、

$$[\nu] = \left[\frac{KT/L^2}{KT^2/L^4} \right] = \left[\frac{L^2}{T} \right] \dots \dots \dots (3)$$

となります。

粘度の単位は、SI (Le Système International d'Unités, 国際単位系) 単位では、Pa・s (パスカル秒)、旧単位では、P (ポアズ) で、この両者の単位の関係は、1mPa・s (ミリパスカル秒) = 1 cP (センチポアズ) です。

尚、純水の 20.000℃に於ける粘度は、1.002mPa・s です。即ち、20℃の純水の粘度は、ほぼ 1.0mPa・s です。

動粘度の単位は、SI 単位では、m²/s (平方メートル毎秒)、旧単位では、St (ストークス) で、この両者の単位の関係は、1mm²/s (平方ミリメートル毎秒) = 1cSt (センチストークス) です。

潤滑油を取り扱う上で、粘度の単位 Pa・s は、実用上大き過ぎるので、その 1/10³ の mPa・s の単位で表します。

他方、動粘度の単位 m²/s も、実用上大き過ぎるので、その 1/10⁶ の mm²/s の単位で表します。

動粘度と粘度との間には、次式のような関係があります。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ν ：動粘度、 $\frac{m^2}{s}$ (平方メートル毎秒)

μ ：粘度 (絶対粘度), $Pa \cdot s$ (パスカル秒)

ρ ：油の密度、 $\frac{kg}{m^3}$ (キログラム毎立方メートル)

更に、動粘度に関する詳細は、JIS K2283 及び、JIS K2010「自動車エンジン油粘度分類」を参照すると良いと思います。

次に粘度及び動粘度の単位をまとめて表1に示します。

2.4. ニュートン流体と非ニュートン流体

Newton は、図1に示す粘度の定義を発表した後に更に、図3¹⁾に示しますように、ある液体の粘度は、せん断速度に関係なく、ある温度と圧力に於いて一定であると推論しました。¹⁾

このような条件の下では、当然ながら、せん断応力は、せん断速度と、図3に示しますように一定な直線的比例関係にあります。このNewtonの推論に由来して、図3に示すように、せん断速度が変化しても粘度が変化しない流体をニュートン流体 (Newtonian Liquid) と呼称するようになりました。¹⁾

他方、非ニュートン流体 (non-Newtonian Liquid) とは、図4¹⁾に示しますように、せん断速度により粘度が変化する流体を指します。

エンジン油の粘度分類番号で、SAE30やSAE40等のシングルグレードの新油の場合は、「曇り点」

図3 ニュートン流体¹⁾

図4 非ニュートン流体とニュートン流体におけるせん断速度に対する粘度⁴⁾

(cloud point) 以上の温度では、ニュートン流体であるため、せん断速度が異なっても同一粘度を示します。

曇り点とは、石油製品を規定の方法で冷却したとき、パラフィンワックスやその他の物質が析出して白く濁り始める温度を言います。試験法は、ASTM D2500やJIS K 2269等に規定されています。

然し、使用油の場合には、SAE30やSAE40等のシングルグレードも、燃焼ススや酸化劣化物を含有するため、非ニュートン流体となり、せん断速度が速い下では低い粘度を示しますが、軽質燃料油の混入が無い限り新油の粘度より下がることは決してありません。従いまして、使用油分析結果で動粘度がかなり高くとも、機関内の潤滑系統を流れている時には、せ

表1 粘度及び動粘度の単位

	粘度 (絶対粘度) (absolute viscosity 又は, dynamic viscosity)	動粘度 (kinematic viscosity)
旧単位	1 P (poise) = 100 cP (centipoise)	1 St (stokes) = 100 cSt (centistokes)
SI 単位	1 Pa · s = 1 × 10 ³ mPa · s = 1 N · s / m ² (Pa · s : pascal · second)	1 m ² /s = 1 × 10 ⁶ mm ² /s (m ² · s ⁻¹ : meter squared per second)
関係	1 cP = 1 mPa · s ; 1 Pa · s = 1 × 10 ³ cP 1 P = 0.1 N · s / m ² = 0.1 Pa · s	1 cSt = 1 mm ² /s ; 1 St = 10 ⁻⁴ m ² /s

せん断速度が速い程、より低い粘度を示しますので、そう不安になることはありません。

他方、SAE10W/30やSAE15W/40等のマルチグレード油は、新油でも、非ニュートン流体であるため、せん断速度が変化すると、異なった粘度を示します。即ち、マルチグレード油は、せん断速度が非常に速い場合、例えば、 10^6s^{-1} では、粘度は、せん断速度が高い間のみ一時的(可逆的)に低下して潤滑油の基油の粘度に近づき、せん断速度が再度、低い値に戻りますと、再び元の高い粘度を示します。但し、せん断速度が如何に高くともニュートン流体である基油の粘度より下がることは決してありません。

非ニュートン流体は、ある一つ特定の温度の下で、せん断速度が変わることによって、無限の数の粘度の値を持つことになります。非ニュート

ン流体のこのような粘度の特徴を表すため「見かけ粘度」(Apparent Viscosity) という用語が使用される場合があります。¹⁾ 「見かけ粘度」は、或る特定のせん断速度に於ける粘度を意味しますから、温度のみならず、せん断速度の値も必ず併記する必要があります。

参考文献

- 1) : Viscosity, "Lubrication", Vol.52 (1966), No.3, page 22
- 2) : 文献1) の頁21
- 3) : 池森亀鶴, 水力学 (昭和32年), コロナ社, 頁102-103.
- 4) : 文献1) の頁24