トランクピストン形エンジン油のフィルター 目詰まりに関する一考察*

横 松 威 尚*** 三 藤 享 士**
小 泉 武 男**

Study of Filter Clogging in Trunk Piston Type Engine Oils

By Takehisa Yokomatsu, Takashi Mitou, Takeo Koizumi

Oil purifier and oil filter play a role in purifying the lubricating oil of main engines and generators in marine vessels. The filters and oils of large trunk piston engines (TPE) after use were analyzed for determining the influence of lubricants on filterability. The filter clogged contained a large amount of carbon and CaSO_4 , and a small amount of CaCO_3 . Carbon and CaSO_4 could be removed easily from the filter by solvents washing. On the other hand, CaCO_3 , which was formed by hydrolysis of overbased detergents, could not be removed easily probably because it was in a large needle-like crystal form. In order to wash off the clogging materials containing CaCO_3 , it was necessary to wash by "ultrasonic washing method".

The CaCO_3 contained in fresh overbased detergents exists in amorphous form. However, the amorphous CaCO_3 is metastable thermodynamically and transforms to the needle-like crystal, calcite, on heating in contact with water during use. The period until the filter would be clogged depended upon the amounts of the particles that have equal to or larger than the mesh hole of the filter used. The small particles ranging from 3 to 4 μm which were made from carbon and CaSO_4 did not affect the clogging period. On the contrary, large particles from SiO_2 and CaCO_3 substantially shortened the clogging period.

In conclusion, it was shown that the most important factor of lubricant filterability was the hydrolytic stability, which controlled the formation of needle-like CaCO_3 crystals. The effects of the oxidation stability and the dispersion performance of lubricants were found to be negligible.

1. はじめに

近年、大型船用ディーゼル機関は高出力化、低燃費化を追求し、大きな発展を遂げてきたが、今後は、乗組員の少人数化に対応した開放期間の延長を目指した機関の開発と共に、保守、整備性の改善の重要性が指摘されている¹⁾。

潤滑油は船用ディーゼル機関の高効率化による熱負荷の増大や低質燃料の使用により、使用環境

が益々厳しくなっており、潤滑油自体も劣化や汚損をより受け易くなっている。このような状況下にある潤滑油の過度の劣化や汚損は軸受部の異常磨耗や焼付き事故を誘発する要因になるため、潤滑油の清浄管理は極めて重要である。

大型船用ディーゼル機関用潤滑油の浄化装置には遠心分離装置と濾過装置があり、一般には両者の併用で自動化されたシステムが採用されている。しかし、装置内の汚損が甚だしい場合は開放、分解して清掃する必要がある。船舶の経済運航を妨げると同時に乗組員の作業量を著しく増加させる。このため、浄油は潤滑油に係わる保守、整備の最重要項目の一つになっている。潤滑油の浄化に関しては、既にいくつかの報告^{2~5)}があるが、潤滑油

* 原稿受付 平成10年3月16日

第59回学術学術講演会 (平成9年10月22日)

** 正会員 日本石油株式会社 (横浜市中区千鳥町8)

*** 正会員 日本石油株式会社 (広島市)

との関係を性能や質的な面から詳細に調査した報告は見あたらない。

ここではトランクピストン形エンジンにおけるノッチワイヤフィルタ目詰まり物の分析と使用油を用いて自動逆洗目詰まり試験を行い、ノッチワイヤフィルタの目詰まりの原因を明らかにするとともに潤滑油からの対応について知見を得たので報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 自動逆洗目詰まり試験 実験装置を図1に示す。粘性抵抗を一定にするため、油温を調節して動粘度を $64\text{mm}^2/\text{s}$ とした供試油を所定のノッチワイヤフィルタ(目開き $50\mu\text{m}$ 、濾過面積 1.1767cm^2)に $184\text{ml}/\text{min}$ の流速で通油し、フィルタ出入り口の圧力損失が 68.65kPa に達した時点で逆洗回避に切り替える。一回の逆洗は目開き $30\mu\text{m}$ のノッチワイヤフィルタで濾過した供試油をフィルタエレメント内容積に相当する 11ml (流速 $184\text{ml}/\text{min}$)で連続4回通油して行った。この操作を4回繰り返し、逆洗差圧到達時間を測定し、フィルタ目詰まりの指標とした。なお、ステンレス製タンク内の供試油の攪拌は攪拌機(1000rpm)および攪拌ポンプ(流速 $10\text{l}/\text{min}$)で行った。

図1 自動逆洗・目詰まり試験装置

2.2 フィルター目詰まり物の分析方法

観察および分析に用いた主要な機器を以下に示すが、いずれの測定も常法に従い実施した。

- (1) 走査電子顕微鏡; 日本電子(株)JMS-6300F
- (2) 蛍光X線分析; 日本フィリップ(株)PW1480
- (3) 赤外吸収スペクトル分析; 日本分光(株)

FTIR

2.3 供試試料

(1) 供試油 自動逆洗目詰まり試験にはトランクピストンエンジン搭載のカーフェリー等より採取した6種類の使用油(SAE40グレード, TBN30相当, C重油使用)を用いた。供試油の性状を表1に示す。なお、 $8\mu\text{m}$ 以下の粒子の分画量は、ペンタン不溶分から $8\mu\text{m}$ 以上の粒子量を減じたものとした。

表1 供試油の性状

供試油		A	B	C	D	E	F
動粘度 mm^2/s	40°C	156.0	158.3	197.5	180.9	157.9	173.2
	100°C	15.50	15.44	18.09	17.13	16.25	16.59
全酸価 mgKOH/g		3.40	3.26	2.59	5.24	5.46	3.05
全塩基価 mgKOH/g	HCl	17.7	17.2	11.1	15.5	11.1	17.3
	HClO_4	30.1	29.7	23.9	27.6	18.6	31.0
ペンタン不溶分 mass ppm		1304	989	7473	1700	771	1209
粒径 μm	$8 >$	1269	930	7171	1639	750	1159
mass ppm	$8 \sim 25$	32.0	56.0	299	60.3	16.5	48.2
	$25 \sim 50$	1.00	0.90	1.00	0.03	1.00	0.33
	$50 <$	2.33	1.78	2.00	0.67	2.00	1.33

(2) 目詰まりフィルタ F丸(中速トランクピストン型エンジン, 遠心清浄機搭載, 使用油F)の二次フィルタで、開放洗浄のため取り出したノッチワイヤフィルタ(開口径 $40\mu\text{m}$ 、長さ 40cm 、直径 3cm)を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 フィルタ目詰まり性に及ぼす不溶分の影響 実機使用油の自動逆洗目詰まり試験果を表2および図2に示したが、 n -ペンタン不溶分とフィルタ目詰まり性に相関関係はない。そこで、不溶分の粒径を考慮して、総濾過時間(4回測定の総計)と各粒子分画の濃度との相関式(1)を設定した。

$$T = k_1 \cdot (r_1 \cdot C_1)^a + k_2 \cdot (r_2 \cdot C_2)^a + k_3 \cdot (r_3 \cdot C_3)^a + k_4 \cdot (r_4 \cdot C_4)^a + b \cdots (1)$$

ここで、

表2 実機使用油・自動逆洗目詰まり試験結果

供試油		A	B	C	D	E	F
逆洗到達差圧時間 sec	1回目	450	837	590	2022	1383	1248
	2回目	425	606	470	1554	1131	981
	3回目	423	587	466	1320	1010	870
	4回目	396	484	462	1186	966	807
	総計	1694	2514	1988	6082	4490	3906
平均		423	629	497	1521	1123	977

図2 自動逆洗目詰まり試験結果（測定4回の平均値）

T：総濾過時間 s

k：各粒子区画に於ける目詰まり係数

k1：8 μ m>，k2：8～25 μ m，k3：25～50 μ m，k4：50 μ m<

r：粒径に関する係数

r1=4，r2=16，r3=30，r4=60

C：各粒子区画における粒子濃度 ppm

a：粒径および濃度に対する指数項

b：定数項

式(1)に表2のデータを入れて非線形最小自乗法でk，aおよびbの解を求めた。

k1=8.696E+11，k2=2.336E+10，

k3=-15278，k4=8.594E+8，

a=-2.878，b=972

この解を用いて相関式(1)より求めた総濾過時間Tと実験データの比較を図3に示したが、両者は良く一致している。このことは、相関式(1)の適用範囲が本実験の粒子濃度内という制約はあるが、aの値がほぼ-3であり、フィルタの目詰まり性は粒子の体積に関係すること、フィルタ閉塞に対する粒子の寄与度は50 μ m以上が最も高く、次いで8～25 μ m粒子，8 μ m以下の順で，50 μ m以上を1と

図3 自動逆洗目詰まり試験結果
総ろ過時間：実測値と計算値の比較

した場合のフィルタ閉塞寄与度は、それぞれ1/100と1/1000のオーダーであることが分かった。また、k3のマイナスは、25～50 μ m粒子が極微量のため計測の正確さが欠けたもので、実際のフィルタ閉塞寄与度は50 μ m以上の粒子に次ぐ高さと考えられる。

供試油Bで、粒子の絶対量を変えず、50 μ m以上の粒子を減少させた場合の総濾過時間の変化を相関式(1)でシミュレートした結果を表3に示したが、50 μ m以上の粒子を半減すると総濾過時間は約5倍延びる。このことは、フィルタ目詰まりの抑制には、フィルタ目開き径近傍以上の大粒子の濃度を極力減少させること、すなわち、遠心清浄機による効果的な浄油が重要であることを示している。

表3 総濾過時間に及ぼす50 μ m<粒子の影響

粒子 μ m	濃度 mass ppm				総濾過時間 sec
	8>	8～25	20～50	50<	
供試油B	930	56.0	0.90	1.78	2514
Case 1	930	56.8	0.90	1.00	7647
Case 2	930	57.1	0.90	0.70	19395

フィルタによる濾過処理を長時間安定に行うための重要な要素の一つに目詰まり物の脱離性がある。図4はフィルタに目詰まりした粒子が逆洗により除去される度合いを表す洗浄率（濾過時間(4回目/1回目)×100）と不溶分の濾過処理量の関係を示したもので、洗浄率は不溶分量に関係なくほぼ一定である。短時間の試験であるため微細粒子の成長因子に係わる議論はできないが、少なくとも不溶分の99%以上を占める8 μ m以下の微粒子のフィルタからの脱離性は比較的良く、微量含まれている8 μ m以上の粒子が脱離性を低下させている

図4 不溶分処理量とフィルター洗浄率の関係
* 洗浄率: 濾過時間(4回目/1回目)×100

可能性が示唆された。

3.2 使用油不溶分の分析 使用油の各分画粒子を走査電子顕微鏡(以下, SEMと略す)と蛍光X線(以下, EDSと略す)で分析した。いずれの使用油の分画粒子も形状, 組成は類似しており, 詳細は後述(3.3項)するが, 次のような特徴がある。

(1) $8\mu\text{m}$ 以下の粒子は約 $10\sim 50\text{nm}$ のカーボンと CaSO_4 を主体とした球形粒子の凝集体で, 硫酸中和生成物である CaSO_4 は微細な粒子として存在している。

(2) $8\mu\text{m}$ 以上の粒子は4つのタイプに分類でき, いずれのタイプも広い粒径分布を持っている(()内は主要構成元素)。

a. 約 $10\sim 50\text{nm}$ 球形粒子の凝集体で前述 $8\mu\text{m}$ 以下の粒子が $\sim 20\mu\text{m}$ 程度まで成長したもの(Ca, C, O>S)

b. $1\sim 2\mu\text{m}$ の針状結晶糸巻き状に絡み合った球状粒子(Ca>C, S, O)

c. 表面が比較的平滑な $2\sim 5\mu\text{m}$ 粒子の凝集体($\text{Si} \gg \text{Ca} > \text{S}, \text{C}, \text{O}$)

d. 緻密な表面の不定形粒子(Si, O)これら成分のうち, aとbは燃料と潤滑油に起因したもので, dは塵埃等外部からの混入異物, cはこれらの成分が混合した凝集体である。図5は使用油Aの $25\sim 50\mu\text{m}$ 分画粒子のSEM像で, 前述したbとcに相当する捕集物の平均的な粒子である。針状粒子(b)は微細な針状物が絡み合って成長したもので, 塊状粒子(c)の多くは金属表面から剥離したような平滑な表面を有しており, 他の使用油にもこの様な形状の粒子が幅広い粒径で存在していることが分かった。

図5 使用油A不溶分($25\sim 50\mu\text{m}$)走査電子顕微鏡観察

3.3 ノッチワイヤフィルタ目詰まり物の分析

(1) 表面観察 フィルタに付着ないし目詰まりしている不溶分と不溶分のフィルタからの脱離性を調べるため, F丸で使用している開放洗浄のため取り外したノッチワイヤフィルタの目詰まり物を分析した。目詰まり物の回収方法を図6に, 洗浄効果を示すフィルタの表面観察結果を図7に示した。図7から明らかなように, 石油エーテル洗浄, 超音波洗浄と洗浄が進むにつれて目詰まり物の脱離が進んでおり, 超音波洗浄10分でほぼ完全に脱離す

図6 実機使用フィルター・目詰まり物の回収

図7 実機ノッチワイヤフィルタの顕微鏡観察

図8 実機フィルター目詰まり物の走査電子顕微鏡観察

図9 実機ノッチワイヤフィルタ目詰まり物の走査電子顕微鏡観察
(超音波洗浄 10min)

ることが分かった。すなわち、目詰まり物のフィルター脱離性は、捕集物2>捕集物1>使用油不溶分の順で悪くなる。回収物のSEM像を図8に示したが、使用油不溶分はフィルタ近傍ないしは表面に付着している粒子で、20～100nm球状微粒子の凝集体に10～300nmの薄片状粒子が散見された。捕集物1(石油エーテル洗浄物)はフィルタに付着ないしは比較的簡単に除去できる目詰まり物で、大部分は10～50nm粒子の凝集体で、他に1～2 μ mの針状結晶が散見される。捕集物2(超音波洗浄5min)脱離物は比較的強固に目詰まりした物質で、0.1～1 μ mオーダの粒子と1～2 μ mの針状結晶が混在している。図9は超音波洗浄(10min)の脱離物を観察したもので、～50 μ mの粒子(左図中央)のいたる所に針状結晶が他粒子を取り込み(右拡大図)凝集し、巨大化した様子が観察される。このことは、フィルタに捕捉される粒子の多くは0.1～1 μ mオーダの粒子が凝集、成長したもので、針状結晶が粒子の成長に重要な役割を果たしていることを示唆している。また、粒子の成長の主要な場としてフィルター開口径内が考えられるが、この推論を支持する有力な知見を得ることはできな

かった。

(2) 組成分析 フィルタより回収した目詰まり物の元素分析と赤外吸収スペクトル(以下、IRと略す)分析結果を図10に示す。元素含有量でみると、使用油不溶分はCが多く、Caは少ないが、逆に超音波洗浄・捕集物2では、Cは少なく、Caが多くなっている。IR等から推定される回収物の主成分はいずれもカーボン、 CaSO_4 (●印)および CaCO_3 (○印)であるが、超音波洗浄・捕集物2は、 CaCO_3 の吸収が他の回収物に比べ強く、 CaCO_3 の含量が多いことを示している。図11に示す回収物の組成から明らかなように、フィルタに対する目詰まり度合いが弱いものはカーボンが多く、強固になると CaCO_3 が多くなる傾向が認められた。また、SEM-EDS分析より、この CaCO_3 は針状結晶で、潤滑油由来の成分であることが確認された。

3.4 針状結晶の起源と潤滑油からの対応
フィルタの目詰まりはフィルタ開口径前後の巨大粒子により加速され、引き起こされるが、この粒子は塵埃等外部からの混入異物や燃料と潤滑油の燃焼等に係わる生成物が凝集した燃焼残渣類に大別でき、前者は潤滑油の使用環境に依存する。

図10 実機フィルター目詰まり物のIRスペクトル

図11 実機使用フィルター目詰まり物の組成

一方、燃焼残渣類はカーボン、 CaSO_4 および CaCO_3 を主体とするもので、大部分は10~50nm径の微粒子として油中に分散しており、一部が凝集、巨大化しフィルターの目詰まりを引き起こす。

従来、これら微粒子の凝集は、燃料や潤滑油の酸化劣化物のバインダー的な働きにより起こるものと考えられていたが、本検討では1~2 μm の CaCO_3 の針状結晶物が凝集により重要な働きをし

表4 各種金属系清浄剤の加水分解安定性

清浄剤	A	B	C	A+B*	B+C*
不溶分 mass%	0.465	0.095	0.034	0.332	0.042

* TBN負担率5:5

表5 市販TPO(TBN30級)の加水分解安定性

油種	A	B	C	D	E	F
不溶分 mass%	0.03	0.17	0.03	2.50	0.14	0.05

試験は表3条件で実施

図12 加水分解試験・不溶分の走査電子顕微鏡観察

(E社・TPO, B系清浄剤, 93℃, 24h)

ていることが分かった。

船用エンジン油の必須の添加剤である金属系清浄剤中の CaCO_3 が加水分解で粗粒化し針状結晶となり析出することは磯部⁶⁾により報告されている。この粗粒化は CaCO_3 結晶形の変化を伴い、アモルファスからカルサイトへ移行し析出⁷⁾する。表4に各種金属系清浄剤の加水分解安定性試験結果を示したが、析出物の量は金属系清浄剤のタイプにより異なるが、ある程度の加成性が認められ、形状は総て棒状ないし針状の結晶であった。また、同じタイプの金属系清浄剤でも金属比や加水分解条件により析出物の量や形状が異なり、必ずしも針状結晶を生成するとは限らない。しかし、一方では、粗粒化した CaCO_3 粒子の析出は、塩基価の低下や、摩擦係数を増大させ、ざらつき磨耗を誘発する⁷⁾など潤滑油の性能を低下させる。表5に市販トランクピストンエンジン油(以下、TPEOと略す)の加水分解安定性を示したが、油種により析出量に大きな違いがあることが分かる。図12はE社TPEO(SAE40グレード, TBN30)の加水分解試験後の不溶分のSEM像であるが、10 μm 前後の粗粒化した CaCO_3 の針状結晶が明確に観察される。

以上のことはTPEOの濾過性能向上には加水分

解安定性に優れた金属系清浄剤を用いることが重要であることを示している。

4. ま と め

低質燃料油の使用が進む中で、船用エンジン機関の性能を長期間にわたり安定的に発揮させるため、潤滑油の清浄管理がより重要になってきている。

ここでは、使用油からの不溶分の除去、とくにフィルタ目詰まりに関する検討を行い、潤滑油の加水分解生成物である針状の CaCO_3 が(1)微細粒子の凝集を促進させ、巨大粒子化し、フィルタの目詰まりを加速し、(2)かつ目詰まり物の脱離性を低下させる重要な役割を果たしていることを明らかにした。

船用エンジン油の浄化システムの多くは遠心清浄機とフィルタが併用されており、大部分の不溶分は遠心清浄機で除去される。このため、潤滑油に求められる性能も、本報告で述べた加水分解安定性以外に、遠心分離効果の向上に対する粘度増加の抑止力、不溶分の流動性維持に係わる分散性なども重要であるが、これらの性能とフィルタビリティの関係については次の機会に報告したい。

終わりに、本検討に際し、ご協力頂いた神奈川機器(株)高橋取締役部長、桐ヶ谷課長はじめ、関係の方々に深く謝意を表します。

引用文献

- 1) 中野克彦, 徳岡哲夫, 船機誌, 29-12(1994-12)892
- 2) 沢田幸治, 宮本貞夫ら, 川崎技報, 62, (12), 91 (1976)
- 3) 多田正巳, 日石レビュー, 23, (4), 12(1981)
- 4) 小田健一, 船機誌, 27-12(1992-12)953
- 5) 磯部登, 小泉武男ら, 日本船用機関学会第52回学術講演会予稿集, 155
- 6) 磯部登, 日石マリンシンポジウム'85, 49P(1985)
- 7) 井上清, 湯本清, 未発表
- 8) The Motor Ship, 1997-12, 17

~~~~~メッセージ~~~~~

横 松 威 尚

三 藤 享 士

小 泉 武 男

IMOの燃料硫黄の規制などにみられるように、地球環境に対する昨今の関心の高まりは船用エンジン油に対しても新たな課題を提起しております。例えば、燃料硫黄分が1~4.5%と広く分布している中で、“一油種での対応は如何になすべきか”があります。具体的には硫黄分の高い燃料で発生する問題と硫黄1%レベルの燃料の使用で懸念される現象など、硫黄含有の変動に対する適応力の強化、特に耐磨耗性と清浄性を強化したバランスの良いシリンダ油の開発であります。

二律背反的で、難しいテーマであり、かつコスト面での制約が益々厳しくなっている中での商品開発ではありますが、技術開発の楽しさを少しでも多く味わえるように努力し、進めてゆきたいと考えております。