

内燃機関の高温海水冷却について—I.

塩類析出量に及ぼす影響

米 盛 亨*

High Temperature Cooling in the Sea Water circulated Diesel Engines—I.

On the Quantity of Scale educed from Salt

Tōru YONEMORI

Abstract

It is well know that a cold engine causes a heavy wear of cylinder inside.

On the other side, it is also said that the hot coolant above approximately 50°C, accelerates cohesion of scale and corrosion of cooling system.

Therefore, the author performed a preparative experiment (Fig. 2), and obtained a result shown in Table 1. In the next experiment applied a forced convection (Fig. 3), an ideal performance is expected. The corrosion trouble in salt water cooling system appears the greatest difficulty, because the scale is removable by mechanical or chemical treatments.

So, a series of corrosion tests shall be continued with iron surface, and finally with engines.

1. 緒 言

わが国の船用小中型ディーゼル機関は、その殆んど全部に海水直接冷却方式が採用されている。

欧米においては 500ps 以下の船用機関についても、早くから清水—海水二次冷却法が普及しているので、スケールの付着や腐食の発生に起因する障害は余り問題にならない。

最近、船用機関の分野にも軽量高速化の機運が起り、特に漁船等の小型船用機関にこの傾向が著しくなってきた。

そのために運転条件の苛酷度は高まる一方であり、従って燃焼法・潤滑法等の研究改善は活発に進められているにも拘らず、冷却法のみは旧態依然たるものがある。

また、硫黄分の多い低質重油使用の要請が高まりつつある今日、機関の過冷却がシリンダ内壁の摩耗（いわゆる低温腐食）や効率に密接な悪影響を及ぼすことは既に常識であり、自動車用ガソリン機関においてさえも 80°C 前後に規定されているが、漁船機関では大多数が 30~40°C の低い出口温度で運転されている実情にある。

これは、入口温度がその海域の水温に左右されるために、出口温度だけを高めるわけにいかない事情¹⁾を積極的に改善しようとしなない機関メーカーの不親切な設計と、機関を出来る限り低温で運転しようとする漁船機関士の誤まった安堵感に原因があると思われる。

更なるその根底には、“冷却海水温度が 50°C を超えると塩類の析出によるスケールが急増する”との通説に基づく警戒心がある。

* 漁業機械学研究室 (Laboratory of Fishing Machinery, Faculty of Fisheries, Kagoshima University)

然し、この説に関する系統的な研究は全くなされていないので、筆者は種々の温度に対するスケールの付着量を求めて、冷却海水温度の上昇可能限度を解明し、併せて理想的温度を維持するための新しい冷却法の開発を研究する目的で実験を行なった。

蒸気ボイラーや製塩関係のスケールについては盛んに研究が行なわれ文献も豊富で参考になったが、内燃機関の場合とは用水の質や温度圧力条件及び流通サイクル(濃縮過程の有無)が異なるので、それらの理論をそのまま適用することは困難であった。

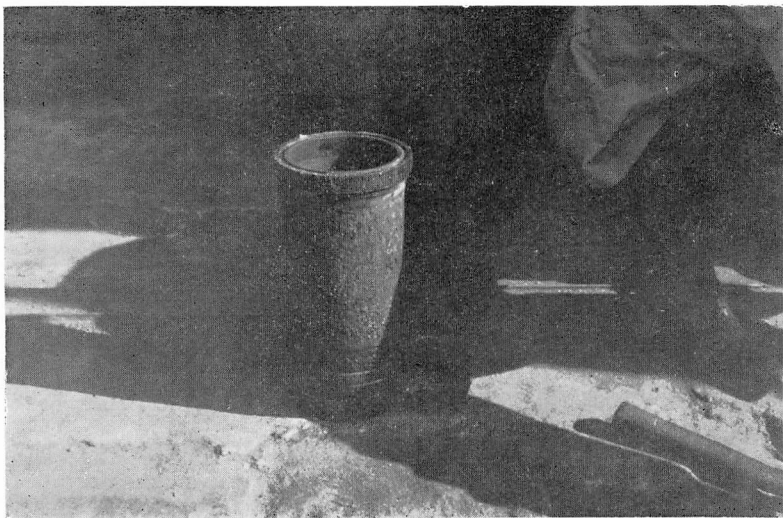
2. スケールの種類と分布

海水直接冷却式機関の冷却系統に付着する物質を大別すると次の通りである。この四つを広義にスケールと総称することもあるが、本報では主として(1)をスケールと呼ぶことにする。

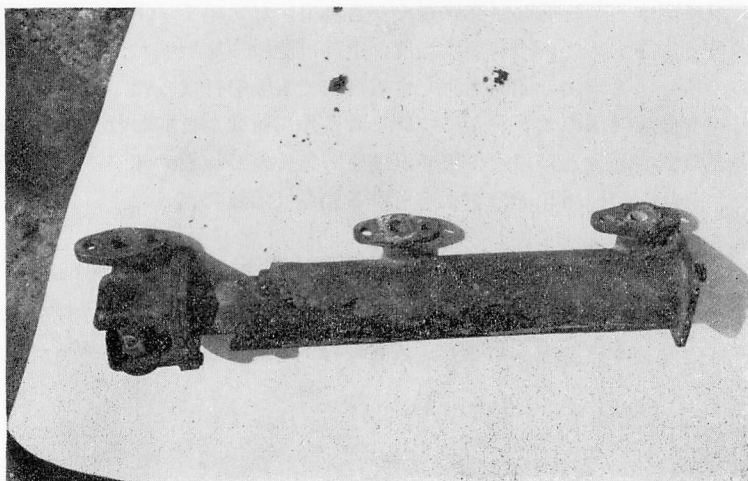
- (1) 塩類の析出によるもの。
- (2) 金属の腐食(電食を含む)によるもの。
- (3) 動植物の棲息及びその遺骸。(主に貝類)
- (4) 土砂その他の浮遊物の堆積によるもの。

Fig. 1 は約7年間漁船に使用後廃棄されたこの形式の機関の主要部であるが、(1)は構造的に水流の停滞し勝ちな個所即ち特に高温となる伝熱面のみに硬質のものが微量付着している。(2)は錆であって高温部には全面的に軟質スケールと混在の形で見られたが、特に潤滑油冷却器の周囲は鑄鉄の黒鉛化腐食が甚だしく、冷却水通路もない程多量の黒錆が堆積していた。これは冷却器本体が銅製であることから明らかに電食によるものと考えられる。

(3)(4)は冷却水入口附近即ち低温部に多く見られた。土砂は外部より吸い込むものであり、貝類は高温部では生育出来ないためであろう。(このことは貝類の棲息条件によって逆に伝熱面の温度分布をある程度、推測し得て興味深い)。以上の観察結果によっても、冷却水温度上昇に伴う障害の原因になり得るものは(1)と(2)である。



(a)



(b)

Fig. 1. Scrapped engine parts coated with scale and rust.

- (a) cylinder liner.
 (b) Oil cooler assembly.

3. 実験の方法

前述の如くスケールと称される物質は種類が多く、生成の原因や過程もまちまちであるので、これらの付着実験を同時に行なって解析することは非常に困難である。

そこで第一段階として、(1) 即ち塩類析出による本来の意味のスケール付着量だけを取りあげて実験を行なった。

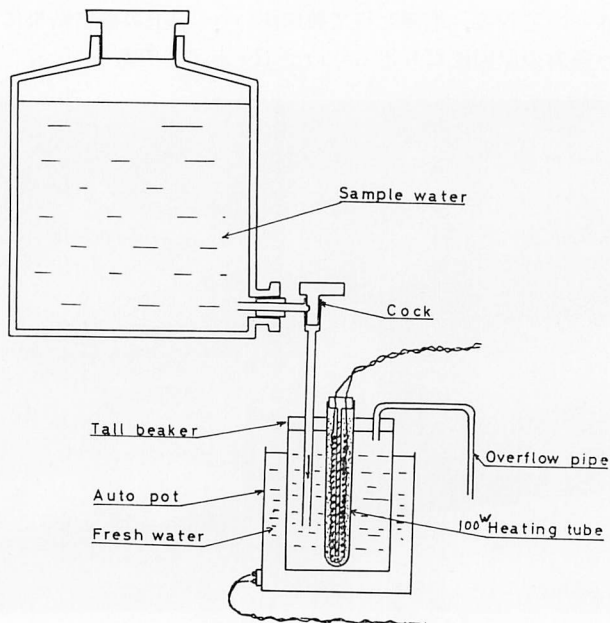


Fig. 2. An apparatus used in this experiment.

実験装置を Fig. 2 に示すが、ガラス器具を選んだ理由は錆の影響 (2) を完全に無視出来るよう考慮したためである。

装置は 2 組しか作れなかったため、設定温度を (A) 80°C, (B) 40°C とした。

試料海水は学部沖棧橋突端にて満潮時に採取したものを、東洋濾紙 No. 2 で濾過して (3) (4) の影響を除き、同一試水を両装置に平等に供給した。供給量はそれぞれ 350 cc/h、実験は 250 時間にわたって継続した。

実験終了時にもスケール付着は微量であったので、その測定法を次のようにした。試験管より電熱線や砂等を全部取り出し、軽く水洗して食塩その他可溶性のものを除いた後、試験管を十分に乾燥して重量を精密化学天秤で計測し、次に稀塩酸を用いてスケールを完全に溶解して水洗乾燥後再び試験管のみの重量を求め、両者の差をスケール付着量とした。

Fig. 2 の装置について説明する。

材料はすべて有り合わせのもので自作した。

即ち、市販の自動電気湯沸器の中にトルビーカーを固定して間隙に清水を満たした。

ビーカーの中には自作の加熱管を吊るし、試験管壁を伝熱面即ちシリンダ壁に見立てた。

ビーカー内には下口試料瓶より設定量の試海水が供給されるように調節し、ビーカーから溢れる排水は別の試料瓶に回収される。

加熱管には連続通電し、自動湯沸器は適温に調整して置く。

実験中の試水温度は深度部位によって (A) 装置は 80~87°C, (B) では 28~44°C と大巾な変化があった。

尚、(A) 装置では間接加熱用液としての清水の蒸発が激しいために、途中で植物油と入れ換えた。

4. 実験結果と考察

本実験は冬期に行なわれたためもあって装置よりの放熱量が多く、設定温度を維持するためにやむを得ず湯沸器による補助加熱手段をとった。

このことはスケール付着面としての試験管壁のほかに、ビーカー壁を通じての伝熱が行なわれたことになって、得られた結果の定量的な解析を困難なものとした。

Table 1. Comparison of scale in high and low temperature.

		(A) 80°C	(B) 40°C
a. Quantity of scale	gr	0.169	0.028
b. Area of heating surface	cm ²	109.90	111.47
c. a+b	mg/cm ²	1.54	0.25

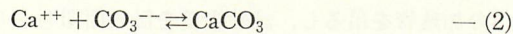
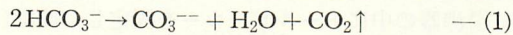
然し、Table 1 からわかるように 80°C においては 40°C の場合に比べて、明らかに数倍の付着量を示して居り、緒言に述べた通説は一応裏付けされた。

海水直煮式製塩装置において、海水予熱器の伝熱面に付着するスケールの組成は、炭酸カルシウム [CaCO₃]、水酸化マグネシウム [Mg(OH)₂] 及び硫酸カルシウム [CaSO₄] だけで 90% 以上を占めると云われる²⁾。このうち CaSO₄ の析出は 12°Bé 以上の高い濃縮条件を必

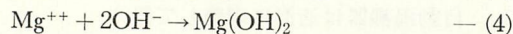
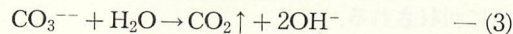
要とするため、内燃機関冷却系における析出は常識的には考えられない。然し前述の実機観察結果によって、局部的に認められる硬質スケールは CaSO_4 である可能性が高い。この付着機構は、Partridge 及び White の唱える沸騰作用説と、Hall の溶解度作用説³⁾ によって説明し得る。

即ち、実機のシリンダ内面温度が $120\sim 180^\circ\text{C}$ 程度と云われること⁴⁾、及び大気圧に於ける標準海水の沸点が 100.5°C 程度であり、伝熱面負荷が後述する通り $12000\text{ kcal/m}^2\text{ h}$ 位であることから、シリンダ外面と冷却水間の熱伝達の様相は第一段階の核沸騰⁵⁾ に相当し、 CO_2 、 O_2 及び水蒸気泡の発生の盛んな個所では局部的な温度上昇と海水の濃縮が起り、溶解度の温度勾配が負である CaSO_4 の析出、付着の原因となるのであろう。

CaCO_3 と $\text{Mg}(\text{OH})_2$ は量的に最も多いが、その付着機構は次のように化学作用説が適用出来る。海水中の重炭酸イオン $[\text{HCO}_3^-]$ は約 80°C 付近で分解して炭酸イオンを生じ、海水 1 kg 中に約 0.4 gr 存在するカルシウムイオンと結合して CaCO_3 を生じる。



更に高温では (1) 式の CO_3^{--} は加水分解して



H. Hillier も 80°C 以上で $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の析出が急上昇することを実験によって明らかにしている。これらの反応は温度以外に海水の pH、全アルカリ度 (HCO_3^- 、 CO_3^{--} 、 OH^- 等の総和) 及び炭酸ガスの分圧等に左右される。従って 80°C と云う一線は重大な意味をもつと考えられるが、これは海水の平均加熱温度と思われるので、伝熱面における境界層の理論を加味した場合には、ある程度高温側に修正されるべきであらう。

今回の実験では 100 W 電熱線を用いたのでその発熱量は毎時 86 kcal となる。

また、実機において冷却水損失 $\varphi=25\%$ 、燃料消費率 $b_e=0.2\text{ kg/ps}\cdot\text{h}$ 、燃料の低発熱量 $H_u=10^4\text{ kcal/kg}$ 、馬力を $N\text{ps}$ と仮定した場合に、冷却水によって取り去るべき熱量は、

$$Q = b_e \cdot H_u \cdot \varphi \cdot N = 0.2\text{ kg/ps}\cdot\text{h} \times 10^4\text{ kcal/kg} \times 0.25 N\text{ps}$$

$= 500N\text{ kcal/h}$ 即ち、毎時毎馬力当り 500 kcal であり、冷却水出入口の適正温度差を 10°C とすれば $50\text{ l/ps}\cdot\text{h}$ の流量を必要とする。事実、各メーカーは $40\sim 60\text{ l/ps}\cdot\text{h}$ の範囲で設計するのが普通である。本実験装置でもこの割合で海水を流すとすれば 8.6 l/h の供給を要するが、これだけの試海水を用意するのは長期実験では不可能である。現実には 350 cc/h の補給量であったため、試水の攪拌も起らず緩やかな対流があったのみで、境界層又は伝熱面ではかなりの温度上昇があったと想像される。

5. 実験装置の改良

そこで、実験装置を Fig. 3 のように循環式に改良して、試水補給量を節約すると同時に流量即ち流速を増大し、要すれば攪拌機も併用して伝熱面温度を平均水温に近づける考えである。現在の海水直接冷却機関においては冷却水の再循環という方法は全く採用されていない。そのため、海水出口温度を高く保つには各シリンダの出口調節弁を絞る方法しかなく、海水入口温度が日本近海では $10\sim 30^\circ\text{C}$ の範囲にあるから、出口温度を $70\sim 80^\circ\text{C}$ に保つた

めには出口弁を殆んど締切りの状態に調節せねばならないので極めて危険である。また、 50°C に及ぶ温度差を機関に与えることは熱的歪みによる軸受その他の異常摩耗や焼損等重大事故の原因ともなる。

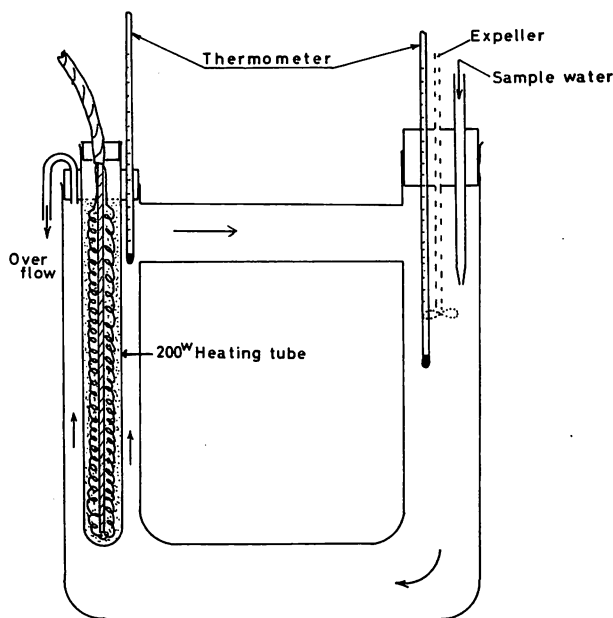


Fig. 3. A reformed apparatus for testing re-circulation.

更に、流量を数分の一に絞るため流速低下によるスケール付着量の増大もあり得る。従って、現状の設計では実機による高温運転は、試験的に実施することさえ不可能である。海水一部再循環方式は、適正温度保持を可能にする目的のほかに次の利点を持つと期待される。

即ち、①新規に外から供給される海水量が少ないので主なスケールの生成要因である重炭酸イオンや炭酸ガスの補給量が減る。②冷却水系は通常、大気に開放されているから、酸素や炭酸ガス等の腐食性ガスは高温によって分離放出され易くなる。尚、実機にこの方式を採用する際の改造は、自動温度調整弁及び連絡管を各1個増設するだけで、経費とスペースの増加は問題にならない。

次に、予備実験に用いた試験管加熱器の伝熱面負荷は $q = 86/0.011 \div 7800\text{kcal/m}^2\text{h}$ となるが、二、三の実機について試算した結果によると、 $12000\text{kcal/m}^2\text{h}$ が実機の標準である。

実験装置においては前述のように室温への放熱量割合が大きいこと、ガラス壁の厚みは薄いがその熱伝導率が著しく小さいことなどを勘案すれば、改良装置においては200W以上の電熱線が適当であろう。勿論これは試水の補給量、装置の大きさ及び室温によって決定される。そして種々の設定温度はすべて試水補給量の調節によってのみ保持されるべきである。このほか、追加試験項目として必要なものは ①伝熱面温度の実測（技術的には最も困難）②スケールの分析試験 ③塩素量やpHの測定等試水の完全検査（今回は比重のみ）④流量及び流速の測定 ⑤ 60°C 前後の設定温度も加える ⑥実験時間の延長等で、これによってキメの細かい考察も可能となる。

6. 実験継続の意義

内燃機関の冷却海水系にあっては、ボイラーや製塩装置に対する清缶剤補給に類するスケール防止法は適用し難いから、一般的には冷却水温を高めるとスケール付着量は確実に増加する。然し 80°C においてもその絶対量は極めて少ない。廃却エンジンの観察結果によっても塩類析出に原因するスケール量は問題にならなかったし、 CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を主とするスケールは比較的軟質であり塩酸等にもよく溶解するので、機械的又は化学的洗滌法を定期に実施すればこの程度のスケール除去はそれ程困難ではない。

むしろこのエンジンの寿命を決定したものは冷却水系統に発生した激しい腐食にあるのではなかろうか。

従って腐食問題こそ第一義的に重視されるべき課題であるが、それに取り組む前に塩類析出によるスケール問題に一応のメドをつけて置く必要がある。

一般には腐食特に電食は高い冷却水温度によって著しく促進されると予想せねばならないが、シリンダライナーに起るキャビティ腐食に対しては、可能な限り高水温が推奨されて居り、腐食問題も実に複雑である。

このように錯綜した問題は系統的に基礎実験を重ねて行くことによってのみ解析が可能であって、理論的計算のみによって解決することは不可能である。

また、最初から実機試験に依存すれば徒らに膨大な運転時間と費用を要することになる。

7. 結 び

廃品エンジンについて海水直接冷却機関に起る冷却系の障害を検討した結果、従来第一義的に問題点とされていた塩類析出によるスケールの害はそれほど重要でないと推測されたので、その付着量を確かめる目的で二つの設定温度について比較実験を行なった。

その結果、冷却水温度 80°C においては 40°C のときの約 6 倍に当る付着量を見た。

然し、80°C においても付着の絶対量は少ないので致命的な障害とは考えられない。適切な掃除法の採用によって除去は可能である。

そして、次の段階で直面する腐食問題は更に重大な課題になると思われるので、将来は鉄製伝熱面を用いて実験を続け、電気防食法や新しい鑄鉄材料の適用効果も検討して、最終的には実機試験にまで進みたい考えである。とは云うものの、今回の実験は極めて初歩的なもので、貧弱な設備をもとに得られた僅かの資料によっては考察もいたるところ推論のみ多くて危険であるので、先ず実験装置を改良して新しい構想による独特の海水サイクルを行なわせ、最も理想的な運転条件（温度及び温度差）のもとで冷却系統に発生する障害やこのサイクルの持つ得失を解明したい。

文 献

- 1) 大道寺達 (1964): “ディーゼル機関ハンドブック”, 107-108 (日刊工業新聞社, 東京, 日本).
- 2) 杉 二郎 (1961): “海塩の化学”, 205-206 (日本塩学会, 東京, 日本).
- 3) 永井彰一郎・杉 二郎・緒方英世・中山道夫 (1963): “海水化学”, 94-96 (日刊工業新聞社, 東京, 日本).
- 4) 狩野・大西・時実・上野・高崎 (1965): 試験機関 T5Z 48/80. 三菱重工技報, 2 (4), 419.
- 5) 谷下市松 (1964): “工業熱力学応用篇”, 215-216 (裳華房, 東京, 日本).