ディーゼル船排ガスエコマイザのスート燃焼*

西川 栄一** 河村 公平***

Soot Burning in Exhaust Gas Economizer of Diesel Ship

BY Eiichi Nishikawa, Kohei Kawamura

The so-called "soot fire", which is a heating surface melt-down failure of the exhaust gas economizer (EGE) of diesel ship, is so serious that it has been urgently waiting for effective countermeasures. This report develops a simulation model in order to investigate the soot-burning and heat transfer process in the EGE, of which heating surface consists of finned tubes with parallel arrangement. The heat transfer equation of the model takes into consideration 4 factors, that is, the heat transported by the gas flow, the heat transmitted from gasside to waterside, the heat being accumulated in the finned tube materials, and the heat released by the soot burning. The soot burning was modelled by a surface combustion of a soot layer deposited on heating surface. The simulation model can explain successfully various empirical facts reported so far regarding actual ship's soot fire failures. The calculation results give valuable informations regarding the influences of gasside and waterside heat transfer coefficients, gas flow rate, soot carolific value, soot deposition thickness etc. Among them, the waterside heat transfer coefficient, that is, the condition of water circulation shows the most definite influence on the soot burning, and it is made clear that the soot burning cannot occur the melt-down failure when the water circulation is sufficient to prevent the dryout.

1. 緒 言

ディーゼル船の排ガスエコマイザ（以下EGEという）において、堆積したすすが燃焼し、それが原因で伝熱面が溶損するというスートファイア事故は、以前から経験され、循環ポンプの運転要領やスートブロワなど、事故回避の方策も工夫されてきている。しかし最近でもなお少なくない頻度で事故が発生している。主機改良、燃料低質化、潤滑油使用量の増大などで排ガス中のすすが増大傾向にあること、排ガス温度の低下で汚れが発達しやすくなっている

こと、所要伝熱面積が増大していること、などが反映しているものと思われる。スートファイアは甚大な損害をもたらす、場合によっては航行の安全にも関わる重大事故であるから、その現象解明、事故対策はいよいよ重要になってきている。著者らはすでにスートファイア事故について一定の分析を行ってきたが^{1, 2, 3)}、それらはほとんど事故に関する経験的データに基づくもので、EGE内でどんな風にすす燃焼が進行するのか、実際の所わかっていない。そこで本研究では、フィン付き管群におけるすす燃焼について、簡単な燃焼・伝熱モデルをつくり、計算シミュレーションを行なって、すす燃焼がどの様に進行し、それに伴ってEGE内のガス温度、フィン温度、伝熱面熱負荷などがどの様に変化するか調べ、スートファイア発生機構解明の一助とすること

*原稿受付 平成4年12月14日

平成4年春季学術講演（平成4年5月27日）

**正会員 神戸商船大学（神戸市東灘区深江南町5-1-1）

***嘱託（大阪市北区堂島浜1-3-23）

を試みた。

2. すず燃烧のモデリング

既報^{1, 2, 3)}などによればストファイアは

- ① フィン付管使用の伝熱管群で発生する
- ② ガス流れ中、下流部、すなわちEGEの中部、出口付近で発生することが多い
- ③ 出入港など部分負荷運転時に発生することが多い
- ④ すずが発火燃焼し、煙突からは赤く火の粉が噴出し、蒸発量も増えるということはしばしば生じるが、このようなすず燃焼が起こったからといって必ずしも伝熱面が溶損するわけではなく、むしろその段階でとどまり、ストファイアに到らない場合も多い

などの特徴がみられる。これらの点に留意して以下のようなEGEのすず燃焼シミュレーションモデルを考える。

＜EGEモデル＞

- * 図1のような1次元ホモジニアスモデルを考え、EGEはガス流れ方向に連なる体積エレメントによって構成されている。
- * EGE内には一様な密度で、すなわち一定の伝熱面収容率（EGE内単位体積当たり収容されているガス側伝熱面面積）で、伝熱面が存在している。
- * 伝熱面の熱伝達率はどこでも同じ値である。
- * 伝熱面にはすずが一様な厚さで堆積している。

Fig. 1 Heat flow model of EGE

＜熱収支モデル＞

- * それぞれの体積エレメントでは瞬時に熱交換が行なわれ、常に熱平衡が成り立っている。
- * したがって流れ方向のガス温度変化は図のように、上流側隣接エレメントの温度が下流側隣接エレメントへの流入ガス温度となる。
- * エレメントの熱収支因子として、ガス流れによる入出熱量 Q_{gi} , Q_{go} , 管内への伝熱量 Q_w , 伝熱面の温度変化による熱容量変化 ΔQ_f , およびすずの燃焼熱量 Q_s を考え、隣接エレメント間の熱伝導は考えない。

＜すずの着火と伝播モデル＞

- * 堆積したすずはEGE内のどこかで偶発的に発火して燃焼が始まるとし、そこを図の第1エレメントとする。着火条件は雰囲気温度（ここではガス温度に等しい）と考え、ガス温度がある温度（300℃とする）になったら着火するとする。
- * すず燃焼が始まり、その燃焼熱で第1エレメントの温度が上昇して300℃を越えると、第2エレメントのすずも着火し、燃焼が始まる。このようにしてすず燃焼が伝播していくとする。したがって第1エレメント出口の温度が300℃を越えなければ、燃焼は伝播していらず、すず燃焼は生じない。

3. 体積エレメントの熱収支と計算式

熱収支は図1において

$$Q_{gi} - Q_{go} - Q_w + \Delta Q_f + Q_s = 0 \quad (1)$$

である。各因子の計算は以下のものである。

＜ Q_w ; 管内（水側）への伝熱量＞

$$Q_w = 10 - 3 \cdot K \cdot S_v \cdot (\theta_g - \theta_w) \cdot \Delta V, \quad (\text{kJ/s}) \quad (2)$$

ここで K ; 熱貫流率（管壁の熱抵抗は無視する）

$$1/K = 1 / (h_o \cdot \phi_f) + k_s / h_i \quad (3)$$

ϕ_f ; フィン効率

h_i, h_o ; 管内、管外熱伝達率 $\text{W/m}^2\text{K}$

k_s ; 外内伝熱面積比（フィン付き管伝熱面拡大率）

θ_b ; 管壁（フィン根元）温度 K

θ_w ; 管内流体温度 K

S_v ; ガス側伝熱面収容率 m^2/m^3

ΔV ; 体積エレメント体積 m^3

フィン付管では式(3)のように外内面積比 k_s が入ってくるので、内面の熱負荷が大きくなる点に注意を

要することがわかる。

〈Qf; 伝熱面熱容量〉 ここではフィン厚さ一定の円形フィン付き管を想定し、文献⁴⁾を利用してフィン温度分布を求め、それからQfを求める。

〈Qs; すず燃焼熱〉 堆積したすずの燃焼は固体燃料の燃焼のように表面燃焼を考え、表面から一様に燃えていくとして下式で表す。

$$Zs = A \cdot \exp \{ B / (\theta g + 273) \} \quad (g/cm^2 \cdot s) \quad (4)$$

ZsがわかればQsは次式で求められる。

$$Qs = cs \cdot Zs \cdot Sv \cdot \Delta V \quad (kJ/s) \quad (5)$$

ここでcsはすずの発熱量である。

〈すず燃焼速度を求める電気炉実験〉 上式の係数A, Bを把握するために、実際のEGEのすずを用いて電気炉による燃焼実験を行なった。試料のすずは、2サイクル低速ディーゼル機関(出力17,800 kw NOR), 0.55/0.22MPa 2段圧力式、入口出口排ガス温度設計値242, 153.5°C、角形フィン付管群

のEGE、低圧蒸発部出口側伝熱面表面から採取してきたもので、その主要特性は図3に示すとおりであった。試料のすずを正方形の炭素鋼板(A)または高温耐熱材平板(B)(寸法はいずれも20×20×2 mm, 後者は高温の場合に使用)から成るテストピースに1 mm厚さでのせる。テストピースには温度計測用の熱電対が埋め込んである。これを所定の温度に設定してある電気炉に挿入し、テストピースの温度曲線から燃焼速度を概算した。図2は温度曲線の例である。図aは炉内温度300°Cにしておいて試料を挿入した場合である。この場合着火しないので温度を少し上げたら、図にみるように340°C程度で温度は急上し始め、410°Cを少し越えたところで下がり始めた。ここではこの急上昇開始点から下降開始点までを燃焼時間とし、この間燃焼速度一定とみなして平均燃焼速度を厚さで表わすことにした。図bは炉内温度510°Cにした場合である。こうして得られた燃焼速度は図3のようで、式(4)の関係がほぼ妥当することがわかり、A, Bはそれぞれ150/ρs, -7000と決められた。図中もう1本燃焼速度の大きいグラフが示されているが、これは比較のための例である。

Fig. 2 Examples of temperature record of soot burning test

Fig. 3 Relation between soot burning rate and soot temperature

4. 計算結果

4.1 計算条件 体積エレメント数20段としてシミュレーション計算を行い、すす燃焼速度、すすの発熱量、ガス流速、管内外熱伝達率、すす堆積厚さなどの影響を調べた。ガス流速によって主機負荷の影響が、管内熱伝達率によって管内水循環の影響が、それぞれ評価できると思われる。すすの密度は500kg/m³、伝熱面収容率、フィンの寸法は現在の排ガスエコノマイザで多用されている条件を採用することとし、

$S_v=106\text{m}^2/\text{m}^3$ 、管外径38.1mm、フィン高さ20mm、フィン厚さ3mmとした。

図4は計算結果の1例で、上の図は、着火時点からの各エレメントのガス温度の変化を示す。各エレメントは上流側隣接エレメントのガス温度が300℃になると着火し、温度が上昇し始めるのが読みとれる。グラフが折れ曲がって下降する点はすすが燃えつきた点である。着火初めの頃は温度はなかなか上昇しないが、温度上昇とともにすす燃焼速度が速くなり、ある程度温度が上がってくると急激に燃焼が進行する。下流段ほどつまり出口に近い伝熱面ほど温度の上昇速度は急激で、温度自体も高くなり、すす燃焼の影響が強く現れる。

Fig. 4 Example of simulation result

すすが燃焼すると伝熱面の熱負荷が増大する。図中1点鎖線は、熱負荷の増大量をすす燃焼が起こっていない通常時のそれとの比、熱負荷増大率 k_q で表したものである。すす燃焼が生じると、生じていない管と比べてこれだけの不均等加熱が生じるとみることができる。なお k_q は、時点 t に対して、次式で計算した。

$$k_q = \frac{\left[\sum_{j=1}^{20} (\theta_{gs} \cdot j - \theta_w) \cdot K \cdot S_v \cdot \Delta V \right]_{T \text{ TIME} = t}}{\sum_{j=1}^{20} (\theta_{go} \cdot j - \theta_w) \cdot K \cdot S_v \cdot \Delta V}$$

ここで $\theta_{gs} \cdot j$ 、 $\theta_{go} \cdot j$ すす燃焼時、およびすす非燃焼時の j 段目の体積エレメントのガス温度である。

下の図はフィンの温度分布を示している。上の図のすす燃焼で20段目のすすが燃えつきた瞬間、すなわちガス温度が最高の時の、20段目のエレメントのフィン温度を計算したものである。図の例では、ガス温度はすすの燃焼で400℃程度に上がっているがフィン温度はごく普通であり、すすが燃焼しても水側の伝熱が正常であれば、フィン温度の上昇はわずかなでることがわかる。

4.2 各因子の影響

〈すす発熱量の影響〉 図5は発熱量の影響をみたものであるが、それはかなり大きい。8400kJ/kgではガス温度は400℃程度、熱負荷増大率は1.6程度であるが、12600ではそれぞれ460℃、2.3程度まで上昇している。流動、伝熱条件が同じであっても、すすの性状によってすす燃焼の熱的影響は相当異なることがわかる。

〈ガス流速の影響〉 図6は流速が13m/sの場合(左側)と6.5m/sの場合(右側)を比較したものである。前者は通常航海時、後者はハーフロードで出入航時や減速運転時を想定しているが、注目される結果が現れている。ガス流速が遅いと燃焼の進行がかなり速くなり、温度上昇も熱負荷増大も大きくなる。このことは、フル運転時よりも部分負荷運転時の方がすす燃焼の熱的影響が厳しいことを意味している。実船でも既述のように、スートファイア事故は出入航時や何かの事情で部分負荷で運転されている時に多く発生しているが、図の結果はこの事実とよく対応している。

〈管外(ガス側)熱伝達率の影響〉 図7は管外熱伝達率の影響を比較したもので、右側は通常の大

Fig. 5 Effect of soot calorific value
(Gas temperature θ_g and Increase ratio of heat load kq)

きさの場合、左側は高く右の2倍程度の場合であるが、この影響も注目される。熱伝達率が高い左の場合は熱除去効果が大きく、すす燃焼は1段階だけにとどまり、2段階以後へ伝播して行かない。つまり、たとえ着火しても燃え広がって行かず、すす燃焼は生じないという結果になっている。したがって管外伝熱を良好に保つことはすす燃焼を抑える。あるいはその過程を緩和する上で効果がある。

〈すす堆積厚さの影響〉 図8の左側は厚さ2mm、右側は1mmの場合であるが、厚さの影響も大きい。図の条件の場合、厚さが1mm程度であると温度上昇はわずかである。ただその場合でも熱負荷は1.5倍程度にまで増大しており、注目される。

〈管内（水側）熱伝達率の影響〉 図9は管内熱伝達率の影響をみたものである。a, bは正常な二相流伝熱が行なわれている場合を、c, d, eはドライアウトした状態を、fは熱伝達率が極端に小さい完全な空吹き状態を、それぞれ想定した場合である。これらの図をみると、水循環による熱除去効果は決定的な影響をもつことがわかる。aの場合には、すす燃焼が後段に広がり、目に見えるほどに温度が上

がってくるまでには30分以上も要しているが、熱除去が行なわれないfの場合は、すすの堆積量もガス流速もその他すべて同じなのに、わずか20秒か30秒、あっという間に事態が進行する。図10はフィン温度であるが、こちらへの影響の方がより注目される。

a, bの管内伝熱が正常な場合は、すす燃焼によってガス温度が上昇しても、フィン温度の上昇はわずかである。しかしb, c, dのように管内熱伝達率が小さいとフィン温度は大変高くなり、さらにfの完全な空吹きを想定した場合は、フィン温度はガス温度と同じ1000°Cオーダにも達している。

管内伝熱状態はすす燃焼に対して決定的な影響を及ぼす。周知のこととはいえ、水循環がいかに重要か、図から理解される。

5. 結 言

スートファイアの機構解明の手がかりを得るために、簡単なすす燃焼のシミュレーションモデルをつくった。計算結果は実船のスートファイア事故の経験的特徴とも矛盾していないので、ある程度実際の

Fig. 6 Effect of gas velocity (Gas temperature θ_g and Increase ratio of heat load kq)

すす燃烧過程をシミュレートできていると思われる。
その結果によれば、

- ★EGE内に堆積したすすがどこかで着火すれば、
燃烧が下流へ広がっていく場合が少なくない。この場合下流の伝熱面ほど、また段数が多いほどすす燃烧の影響は大きくなる。
- ★着火点から燃え広がっていくかどうかにはいろいろな因子が関係するが、とくに管内（水側）、管外（ガス側）の熱伝達率の影響が大きい。
- ★ストファイア事故、すなわちメルトダウンに到る可能性に関しては、管内伝熱が決定的な影響を及ぼす。水循環が安定で、正常な熱伝状態にあれば、すす燃烧が生じててもメルトダウンには到らない。

い。

★だが注目されるべきは、すす燃烧が生じるとその管の熱負荷が増大することで、シミュレーション結果によれば通常時の1.5～2倍程度に増大するのはまれではない。不均等加熱が生じると図11のようにその管の流量が減り、乾き度が増えるから、ドライアウトが引き起こされる危険性が高まる。水循環条件を検討する場合、このことを考慮しておく必要があろう。図11は、すす燃烧によって並列管群の一部の管（図ではその管数比率を kn で表わしてある）の熱負荷が kq 倍になった時、熱負荷増大管の質量流速がどれだけ減少するか、出口渴き度 Xe がどれだけ増大するか、および管内

Fig. 7 Effect of gasside heat transfer coefficient
(Gas temperature θ_g and Increase ratio of heat load kq)

Fig. 8 Effect of soot deposition thickness
(Gas temperature θ_g and Increase ratio of heat load kq)

Fig. 9 Effect of waterside heat transfer coefficient
(Gas temperature θ_g and Increase ratio of heat load kq)

圧力損失がどれだけ増大するかを示したものである。計算方法は既報³⁾に述べたものと基本的に同じである。

本研究を進めるに当たり、日本海事協会、および同協会のディーゼル機関吸排気系の汚れ防止に関する研究委員会に、またとくに大阪ボイラ会社にご多大なご援助と有益なご意見を賜りました。また実験や計算で神戸商船大学の学生であった財田武彦、小谷修一、馬目淳一の諸君にご多大の協力を頂きました。深甚なる謝意を表します。

文 献

- 1) 西川, 舶機誌18巻9号(1983・9), 691
- 2) 西川, 舶機誌21巻5号(1986・5), 330
- 3) 西川, 舶機誌23巻9号(1988・9), 594
- 4) 日本機械学会編「伝熱工学資料4版」(昭和62)

う確保するか、というあまりにも当然のことであった。しかしディーゼルの排ガスであること、船舶用であること、拡大伝熱面使用の並列蒸発管であることなど、いくつかの条件がストファイアという重大事故をもたらすことになった。だが水循環が確保されていれば排エコプラントは極めて有用な省エネ策である。船では以前から当然になっているこの技術

が、陸ではコージェネ技術としてなお広がっていくだろう。船での“苦い”経験が陸でも活かされるよう望まれる。また船でも省エネはますます厳しく要求されてくるだろう。省エネ一辺倒でなく、今回の経験を活かして信頼性確保技術の研究開発を第1に、排エコプラントの一層の活用が期待される。