機関室の防火・消火対策のためのプール燃焼に関する研究

(その3) 機関室における熱・煙拡散状態

正員 鷹尾 潤* 正員 福地信義** 正員 胡 長洪***

The Characteristic Analysis of Oil Pool Fire Phenomena for Fire Safety Design in Engine Room (Part 3) Heat and Smoke Diffusion in Engine Room

by Jun Takao, *Member* Nobuyoshi Fukuchi, *Member*
Changhong Hu, *Member*

Summary

In order to establish the fire safety design of ship engine room, it is important to understand the characteristics of oil pool combustion, the properties of smoke, the conditions of fire spread and smoke movement with heat diffusion. In our previous study, the oil burning experiment was executed to investigate the distinctive features of pool combustion and smoke. And the experimental and numerical analyses of smoke movement were carried out using the 1.2m sized cubic box as a substitute for simplified engine room model.

In this study, the experiment of smoke movement and diffusion in the 1/15 scale model of engine room with smoke-producing agent was carried out for the fire safety design on fire detection, fire fighting and evacuation. Moreover, a three-dimensional numerical analysis using $k-\varepsilon$ based CFD model was performed to investigate the situation of smoke diffusion in an engine room.

Furthermore, the numerical analyses of smoke and heat diffusion in the full-scale engine room model were executed using the result of oil burning experiment and the numerical method that is already proved the validity to grasp the state of smoke movement. From the interpretation of these results, the phenomena of smoke diffusion in an engine room under several fire conditions can be clarified. By the experiment and the calculation on smoke movement in an engine room, a lot of useful information is obtained for the design of evacuation systems and the arrangements of smoke sensors.

1. はじめに

機関燃料管からの噴出油などによるプール燃焼に基づく機関室火災の防火・消火および避難対策のためには、油燃焼の発煙特性、火災拡大条件および煙流動現

象の十分な把握が不可欠である。さらに、火災時の機関室における熱・煙拡散予測を行って、火災感知器の取付け位置や避難経路を策定する必要がある¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

本研究は、機関室火災における火災感知、消火活動および避難などの火災安全設計のための火災状態解析を目的とし、第1報では灯油および軽油を用いたプール燃焼実験を行い、燃料支配型燃焼および酸素支配型燃焼の特性を調べた⁵⁾。また、第2報では発生した煙の

* 防衛庁技術研究本部(研究当時 九州大学大学院)

** 九州大学大学院工学研究院

*** 九州大学応用力学研究所

重量濃度と減光係数(以後Csと記す)の関係を求める実験を行い、さらに簡単な方形モデルと発煙剤煙を用いた実験によりCsを測定し、その状態をシミュレートする数値計算法を開発した⁶⁾。

本報では、方形モデルより複雑な形状の機関室模型を用いて煙拡散の可視化実験を行い、それに併せて第2報で開発した乱流熱・煙拡散の数値計算方法を改良し、実験結果と計算結果の比較を行った。さらに、実スケールでの計算を行って、種々の条件下での機関室火災の様相について調べた⁷⁾。

2. 機関室模型による煙流動実験と数値解析

ここでは、複雑な内部空間を持つ機関室模型における、発煙剤を用いた煙拡散実験および数値計算について述べる。なお、発煙剤は第2報で用いたものと同じものである。

2.1 実験装置と実験方法

実験に用いた機関室の可視化模型をFig.1に示す。模型は、74,900載貨重量トンのパナマックス型バルクキャリアの4層デッキ機関室部の1/15縮尺であり、内部をポリスチレンフォーム、スチレンボード、船側板および機関室前部壁を煙拡散状況の観察のためにプラスチック透明板を用いて製作し、主機や主発電機を模した艀装品を内部に設置した。また、実際に即した室内気流状態を模擬するために、実船を参考に13個の給気用のファンを取り付け、さらに後部に排気口を設けた。図ではファンの位置を○で示し、矢印により風向を示す。船側板右舷には、Cs算出のためのCdSセルをFig.2のように設置した。なお、後述する煙拡散に関する数値計算においても同じ個所の値を用いて実験結果と比較する。

煙の流入口、すなわち火源は円形1m径実火炎に相当する5cm径とし、主機右舷側の底部開口部から、発煙剤による煙の速度を調整して流入する。煙の流入速度に関しては、以前に行った油のプール燃焼に関する実験⁸⁾において、直径25cmのプール燃焼での容器直上の流速が約2.5m/sという結果から、フルード数を考慮して0.9～1.1m/sとした⁹⁾。

実験では、Fig.3に示すように遮光板で模型の正面と側面を覆い、内部の煙拡散の様子を正面および側面からビデオカメラにより撮影する。同時に左舷側からハロゲンランプ光を照射し、CdSセルの抵抗値の変化を記録する。

なお実験は、機関室内に給排気の換気流が無い状態と、ファンによる定常給気状態の2通りを行い、換気

流の有無による煙流動・滞留の違いを調べた。給気量は実船での給気量(区画内の換気必要量:30回/時)と同等となるように、各給気口での流速を相似則を用いて決定した。

各デッキ層については、上から2ndDeck、3rdDeck、Platform、LowerFloorと呼ぶこととする。

Fig.1 The experimental model of engine room

Fig.2 Positions of CdS photoresistors on the side plate of engine room model

2.2 実験結果と考察

(1) 給排気が無い場合

煙は機関室のオープニングを上昇し、上層部の2ndDeckから下層部のLowerFloorに順次拡散する。約30秒(実時間135秒)後には2ndDeckに煙がほぼ充満し、続いて3rdDeckが充満するが、PlatformおよびLowerFloorでは、エンジンを挟んだ煙流入口の反対側(左舷側)への拡散にかなりの時間遅れが生じる。また、エンジンが遮蔽物となり左舷側への煙拡散を妨げて、エンジンを迂回するように煙流動が起こるので、PlatformおよびLowerFloor後方(船尾側)への煙の拡散が顕著になる。

Fig.3 A schematic view of experimental model and measuring devices

Fig.4 Photographs of smoke diffusion with air supplied ventilation at time 60 sec.

Fig.5 The variation of smoke spread area in the experimental model with air supplied ventilation

(2) 給排気がある場合

給排気がある場合について、Fig. 4に煙流入60秒後の写真を示し、Fig. 5に時間ごとの拡散の様子を示す。Fig. 5に示す矢印は、給気口からの流入および排気口からの流出の方向である。給排気がある場合は、無い場合に比べて模型内の気流が複雑で拡散が早く、Fig. 4およびFig. 5から、ファンの給気により煙が押し流されて拡散が早まり、また2ndDeck天井からの排気により煙濃度が低下し、全体の濃度の均一化が早いことがわかる。

またFig. 6には、各デッキにおける煙の充満率の時間変化を示した。これは、煙が天井までほぼ円錐状に上昇拡散することを考慮して、正面と側面の画像からその体積を推算した。図では、点線が給排気の無い場合を示し、実線が給排気のある場合を示す。この図からも、給排気の無い場合は2ndDeckで煙が急速に充満し、PlatformおよびLowerFloorでは充満するのがかなり遅れることがわかる。一方、給排気のある場合には、2ndおよび3rdDeckへ煙が充満する度合いが遅く、逆にPlatformおよびLowerFloorへの充満は早い時間から満遍なく拡散が進んでいる。

なお本実験では、実際の機関室火災に比べ煙と模型内の空気の温度差が小さく浮力の効果が弱いため、上昇した煙が比較的短時間で降下していると考えられる。

Fig. 6 The smoke filling ratio in each deck space with air supplied ventilation

2. 3 煙流動の数値計算

第2報⁶⁾では、方形空間モデルでの実験とそれに対応した数値計算を行ったが、ここでも2. 2に述べた機関室内煙拡散実験に応じた数値計算を行い、実験で計測されたCsと比較することにより、模型実験と数値計算の対応性を検証する。計算にはFig. 7に示すモデルを用いるが、高さ、幅および長さの基本寸法は実験模型と同じとする。ただし、実験模型で設けた200mm間隔、深さ30mmの縦フレームは、煙拡散への顕著な影響が認

められなかったので計算モデルでは省略した。計算については、状態方程式の離散化を有限体積法で行い、SIMPLE法⁹⁾を用いて計算したが、これらについては、Csの算出法と併せて第2報⁶⁾3. に詳述してある。

Fig. 7 The simplified model of engine room for numerical calculation

2. 4 実験結果との比較

(1) 給排気が無い場合

煙発生源(火源)が実験と同じく主機右舷側正横にあり、給排気が無い場合の計算結果について、120秒後の煙の重量濃度分布をFig. 8に示す。濃度の境界は、実験結果と計算による煙の形が相似形になる濃度を選び、 0.32g/m^3 以上の領域を示している。

Fig. 9には、Csについて計測値と計算値の比較を示す。低層部(Platform, LowerFloor)の後部(船尾側)では若干の差があるが、他は煙流入からの立ち上がり、増加時の傾き、ピーク時の変動の様子などについて両者は概ね一致している。

Smoke weight density $\geq 0.32 \text{ g/m}^3$ (Time: 120sec.)

Fig. 8 Computed volume of smoke without operating ventilation fans

Fig.9 Comparison calculated extinction coefficients to experimental values without operating ventilation fans

Smoke weight density $\geq 0.24 \text{ g/m}^3$ (Time: 120sec.)

Fig.10 Computed volume of smoke with air supplied ventilation

(2) 給排気がある場合

給排気がある場合の煙の重量濃度分布をFig.10に示す。給気量は、2.2(2)と同じ量である。煙発生源は(1)と同じく主機右舷側正横にある。Fig.10もFig.8と同じく分布の形が比較的实验の画像と近い値を示しており、 0.24g/m^3 以上の領域を示している。給排気がある場合には、ファンの周りでは煙が押しのけられ複雑な煙濃度分布になっている。特に、Upper Deck (2nd Deck 空間天

井)からの下向きの流入換気流と、Platform床前部にある後ろ向き(船尾向き)の流入換気流によって煙の上昇が抑えられ、後方に流される様子がわかる。

給排気がある場合のCsの比較をFig.11に示す。給排気のために模型内の気流が複雑な場合でも、Fig.9と同じく低層部後方で若干ずれがある他は、計算値と計測値はよく一致している。この計算値と計測値の差は、本数値計算では標準 $k-\epsilon$ モデルおよびBoussinesq近似を用いており、煙発生源(熱源)付近では計算条件とのずれの影響が大きいと考えられる。

(3) 数値計算の有用性

(1) および(2)から、それぞれの実験結果と数値計算結果はよく一致しており、本計算手法の有用性が確かめられた。

3. 実スケールモデルによる数値計算

ここでは、実スケールの機関室における様々な火災状況についての煙流動・拡散を調べる。なお本研究では、火炎と煙からの壁面への熱放射および煙による放射減衰は煙流動状態には大きな影響を与えないと考えられるため、熱放射による壁温の上昇およびそれに伴う境界条件の変化を無視している⁷⁾。

Fig. 11 Comparison calculated extinction coefficients to experimental values with air supplied ventilation

3. 1 計算モデルと諸設定

計算モデルは、2. で考察した計算モデル (Fig. 7 参照) と相似形で実船相当の大きさとし、高さ 18m (各デッキ間 4.5m)、長さ 21m、最大幅 27m とした。また、メッシュは $64 \times 73 \times 51$ の不等間隔格子で、給気口はより実際に即した配置とし、計 23 個とした。給気量はモデルとした実船と同等とし、流速は最大 (2nd Deck 天井から主機へ向けての下向き給気) で 10.2m/s、最小で 5.3m/s である。

計算では、火災個所に発熱源と発煙源を置き、ここから発生する煙の流動・拡散状態を調べる。熱源温度は、第 1 報⁵⁾における実験の結果を踏まえ 900K とし、実際の火災を模して柱状熱源とした。煙の発生速度は、油燃焼煙の Cs 測定実験⁶⁾ で得られた Cs と、その時の発煙速度に関する予備的な計算から $2.0 \sim 3.0 \text{ kg/m}^3\text{s}$ 程度と推定され、ここでは直径 1m の火災からの煙発生速度を $3.0 \text{ kg/m}^3\text{s}$ と仮定した。発生する煙の密度は、油燃焼実験⁶⁾ により得られた結果から 1.56 kg/m^3 とする。また、主機の表面温度を常時 100℃ とした。

浮力項については、第 2 報と同様に Boussinesq 近似を用いる¹¹⁾。また、Cs は、2. の機関室模型の場合と同様の箇所で計算した。

以下に、給排気の有無および火災規模が異なる場合について、Cs の変化と煙濃度分布、温度分布および流

速分布を調べ、その結果について考察する。

3. 2 火災時の給排気の影響

火災時の給排気の影響と効果を調べるために、給排気が無い場合 ([A] とする) と、火災発生後も連続して給排気がある場合 ([B] とする) について計算を行った。[A]、[B] とともに火災の発生場所は主機の右舷側正横とし、火災の大きさは直径 1m の火災とする。

Cs の変化を Fig. 12 に示すが、図には [A] と [B] の両方の Cs の変化を示している。また計算結果の例として、煙発生 30 秒後と 300 秒後の煙濃度分布と温度分布および 30 秒後の流速ベクトル分布を、[A] については Fig. 13 および Fig. 14 に示し、[B] については Fig. 15 および Fig. 16 に示す。

Fig. 12 で Cs の変化を見ると、最上層の 2nd Deck では [A]、[B] とともに $Cs=6.0$ 付近まで一気に上昇する。その後、[A] では煙の充満に従い Cs も漸次上昇するが、[B] では発生する煙と給排気による換気が釣合って、 $Cs=7.0$ 付近で定常となる。3rd Deck の Cs の変化も同様の傾向を示す。Lower Floor では、[A]、[B] とともに煙発生後 150 秒程度は Cs の上昇が無く、見通しが確保されている。150 秒以降は視界が悪くなってくるが、換気が行われている場合には、給排気が無い場合よりも煙の充満は遅く、また Cs も低い値に留まるので避難には有利である。ただ

Fig.12 Computed extinction coefficient in CASE [A] and [B]

Fig.13 Computed volume of smoke density and temperature in CASE [A]

Fig.14 Computed flow pattern at time 30sec. in CASE [A]

(1) Volume of smoke : Smoke density $\geq 1.0\text{g/m}^3$
(30sec.) (2) Volume of hot gases : Temperature $\geq 80^\circ\text{C}$
(30sec.) (3) Volume of smoke : Smoke density $\geq 1.0\text{g/m}^3$
(300sec.) (4) Volume of hot gases : Temperature $\geq 100^\circ\text{C}$
(300sec.)

Fig.15 Computed volume of smoke density and temperature in CASE [B]

Fig.16 Computed flow pattern at time 30sec. in CASE [B]

し実際の火災では、給排気を停止して酸欠状態とし、延焼を防止することがあるので、このケースが常に当てはまるとは限らない。

濃度分布と温度分布および流速ベクトルを見ると、Fig.13の[A]では換気流が無いため熱い煙はほぼ真上に上昇しているが、Fig.15の[B]では給気ファンからの気流により、発生した煙が前方へ押し流される様子がわかる。また[A]の場合、Fig.13(1)の30秒では右舷側から煙が立ち昇っているため、2ndDeckでの拡散は右左舷に差がある。しかし、Fig.13(3)の300秒過ぎに煙が下層に降りてくる頃には、右舷と左舷でそれほどの差はなくなる。Fig.14の流速ベクトルを見ると、30秒後では火炎からの上昇流が顕著であるが、これは時間を経るに従い定常状態に近づいてくる。Fig.15(3)の[B]の300秒後の濃度分布では、3rdDeckのエンジンオープニングから煙が溢れ出ている様子がわかる。このとき3rdDeckのハッチオープニング上部には下向きの気流が生じ、オープニングの下では水平方向に近い気流が生じていることがFig.16の流速ベクトル分布からわかる。また、Fig.14およびFig.16の正面図(右側の図)を見ると、[A]、[B]ともにコアンダー効果により煙がエンジン上部に引き寄せられており、流速ベクトルがエンジン側に傾いている様子が観察される。

3. 3 火災規模と熱・煙拡散

火災規模による熱・煙拡散の違いを調べるために、比較的小規模な火災で火炎直径が0.25mの場合([C]とする)と、主機横一面が火炎の場合([D]とする)を調べる。火災発生場所は、3. 2と同じく主機右舷側正横とする。煙の発生速度は、[C]では $2.0 \text{ kg/m}^3\text{s}$ とし、[D]は直径1mの火炎の場合と同じ $3.0 \text{ kg/m}^3\text{s}$ とする。

Csの変化をFig.17に示す。図には[C]と[D]の両方のCsの変化を示している。また、煙発生30秒後の煙濃度分布と温度分布および流速ベクトル分布を、[C]についてはFig.18およびFig.19に示し、[D]についてはFig.20およびFig.21に示す。

Csの変化を見ると、[C]では最も煙が溜まる2ndDeckでも約4.0までしか上がらず、LowerFloorでは給排気がある場合には上昇はわずかである。しかし、火炎の径が小さく煙の上昇流速も小さいため、Fig.18でわかるようにファンからの気流による拡散への影響が大きい。またFig.19からも、火災による上昇気流が小さく勢いが無く、ファンからの気流によって流されている様子がわかる。よって、煙感知器などの設置場所を考える場合には煙拡散に対する十分な考慮が必要である。また、Fig.17の[C]のCs変化のグラフでは、Csは煙の濃度変化に応じて敏感に変化しており、煙の濃度とCsの関係が的確に把握できていれば、Csを煙感知のパラメータとして用いることができる。

Fig.17 Computed extinction coefficient of CASE [C] and [D]

(1) Volume of smoke : Smoke density $\geq 0.1 \text{ g/m}^3$
(30sec.)

(2) Volume of hot gases : Temperature $\geq 80^\circ\text{C}$
(30sec.)

Fig.18 Computed volume of smoke density and temperature in CASE [C]

Fig.19 Computed flow pattern at time 30sec. in CASE [C]

(1) Volume of smoke : Smoke density $\geq 10.0 \text{ g/m}^3$
(30sec.)

(2) Volume of hot gases : Temperature $\geq 200^\circ\text{C}$
(30sec.)

Fig.20 Computed volume of smoke density and temperature in CASE [D]

Fig.21 Computed flow pattern at time 30sec. in CASE [D]

[D]の場合には、[C]や[B]と比べ多量の煙が発生することになる。Fig.17に示す[D]のCsの変化を見ればわかるように、この場合には2ndDeckに一気に煙が充満し、Csもほとんど瞬時に上昇する。LowerFloorでも1分程でCsが8.0程に達する。Fig.20の濃度分布および温度分布を見ても、短時間で煙と熱が充満する様子がわかる。またFig.21の流速ベクトルからも、機関室内に大きな流れが生じていることがわかる。

この様な大規模な火災が発生した場合は、煙探知器の設置場所等については、早期感知能力よりも、火災のダメージを受けずに煙を的確に探知できるかが問題となる。避難については、LowerFloorでも1分程の猶予がある程度であり、エスケープトランクへの脱出も間に合わない状況となる。消火についても、可搬式消火器等を用いた人力での消火はほぼ不可能と考えられ、機関室閉鎖および二酸化炭素消火剤等の注入による窒息消火が必要と考えられる。

また、この様な大規模な火災の場合は、今回の計算では省略している放射熱についての考慮が必要になる場合がある。さらに、数値計算におけるBoussinesq近似の妥当性の検証が必要となる。

4. 結 論

機関室模型での煙拡散実験と数値計算および実スケールでの機関室火災について数値計算を行い、以下のことがわかった。

- 1) 実験から得られた煙粒子の重量濃度とCsの関係および煙拡散の数値計算を組み合わせることにより、任意の場所におけるCsの計算が可能となった。
- 2) 機関室内への給気ダクトからの気流は、煙の上昇流や攪拌に大きな影響を与え、押し出し式の換気システムを用いると、火災が発生した場合の煙によるCsの上昇(視距離の低下)を2.0~4.0(1/m)程度下げられる。
- 3) 計算例では、直径1m相当のプール火災がエンジン横で起きた場合、LowerFloorでは発生から3分間程まではCsの上昇は少なく、避難時の視認性は余り低下しないが、3分以上過ぎるとCsが上がり始める。一方、Platformでは1分半程で視界が悪くなり始めるので、LowerFloorに素早く避難することが必要である。
- 4) 小規模な火災では、発生する煙が機関室内の換気流の影響を大きく受け拡散が早く希釈され、避難や消火時の視界低下などの影響は少ない。このため煙感知器の設置場所は、高い煙濃度部分を的確に予測して決めることが必要となる。
- 5) 火災規模が大きい場合は、計算ではどのデッキにもすぐに煙が充満し、避難は非常に困難である。LowerFloorでも視界を維持できるのは1分弱程であり、

前後に火災および煙から防護された独立した避難経路があることが望ましい。

6) 1) から5) の結論を踏まえ、開発した計算方法を用いて避難時の視認性の予測等が可能となり、また煙探知器の取り付け位置の決定などにも役立つ。

今後の課題としては、これらの結果を踏まえた消火および避難についてのより詳細な検討が必要である。特に消火については、空気遮断による窒息型消火へのアプローチが重要となり、これまでに得られた知見、特にプール燃焼実験で得られた消炎に対する知見と数値計算が活用できるものと思われる。

また避難については、複雑な空間でのCsの推定が可能となったことから、実際の避難時の視界変化のシミュレーションへの応用などが考えられる。

参考文献

- 1) 佐々木、桑田他：船舶機関室の火災探知器配置に関する研究(第1報)、マリンエンジニアリング学会第65回講演論文集、(2001)
- 2) 佐々木、桑田他：船舶機関室の火災探知器配置に関する研究(第2報)、マリンエンジニアリング学会第66回講演論文集、(2001)
- 3) 鎌田、岩上他：船舶機関室の火災探知器配置に関する研究(第3報)、マリンエンジニアリング学会第66回講演論文集、(2001)
- 4) 原、横井他：火災煙流動における自由ブルームの標準 $k-\epsilon$ モデルに基づく数値予測、日本建築学会計画系論文、第530号、(2000)
- 5) 福地、鷹尾他：機関室の防火・消火対策のためのプール燃焼に関する研究(その1) プール燃焼実験、日本造船学会論文集、第192号、(2002) pp. 427-437
- 6) 鷹尾、福地他：機関室の防火・消火対策のためのプール燃焼に関する研究(その2) 油火災の煙生成と拡散、日本造船学会論文集、第194号、(2004)
- 7) 鷹尾潤：機関室の火災安全のためのプール燃焼、発煙特性および煙拡散に関する研究、九州大学博士学位論文、(2004)
- 8) 江守一郎、D.J.シェーリング：第3版 模型実験の理論と応用、技報堂出版、(2000)
- 9) S. V. Patanker: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York (1980)
- 10) 胡長洪、福地信義：機能システムに係わる非等温乱流場の現象解析(その1) 自然対流による乱流熱拡散、日本造船学会論文集、第181号、(1997)
- 11) 胡長洪、福地信義：高温場の圧縮性を考慮した乱流熱対流の解析(その1) 低マッハ数近似による数値解析、日本造船学会論文集、第186号、(1999)