

## PS-3 LPG 燃料の使用に伴う機関室における漏洩ガスの 換気シミュレーション

海洋リスク評価系 \* 木村 新太、工藤 潤一、柚井 智洋、伊藤 博子、岡 秀行

### 1. はじめに

液化石油ガス (LPG) は、船舶の燃料に関する環境規制に準拠した有望な代替燃料の 1 つであるとされている。一方、LPG の主成分であるプロパンは空気よりも分子量が大きいため、漏洩すると床に滞留しやすく、漏洩に伴う火災事故が懸念される。本研究では、数値流体力学 (CFD) モデルを用いて、機関室内に燃料が漏洩した場合における換気解析を行った。機関室内での滞留の様子を確認するとともに、CFD と単純な完全混合モデルによって計算されたエンジンルーム内のプロパンの平均濃度の時間変化の比較を行い、漏洩源の直径、漏れるガスの温度および換気ダクトの方向の 3 つのパラメータが換気効率に及ぼす影響について考察した。

### 2. シミュレーション方法

#### 2.1 計算コード

シミュレーションに使用した数値計算コードとして、米国 NIST が開発した Fire Dynamics Simulator (以降 FDS と略す) [1] のバージョン 6.5.3 を用いた。機関室内温度は 20 °C とし、サブグリッドスケールモデルには FDS のデフォルトである Deardorff モデルを用いた。なお、その他のパラメータについては FDS のデフォルトのまま解析を実施した。

#### 2.2 評価対象船舶

評価対象船舶は、ディーゼルエンジンを主機とする従来船型のバルクキャリアを対象とした、その要目を表 1 に示した。本解析においては、代替燃料の使用に伴うレイアウトの変更等を考慮していない。本解析では、Stefanidis 氏が公開している機関室の CAD データ [2] を、本人から使用許可を受けて利用した。FDS は構造格子しか扱えないため、格子幅を x, y, z 方向に対して 0.2 m の等間隔に設定した。なお、総格子数は約 660 万セルであった。

表 1 評価対象船舶の要目

DWT	176000 T
LBP	280.00 m
BM	45.00 m
THB	9.00 m
TFL	18.00 m
Minimum Power Line	15000 kW
Installed Power	17000 kW (+13.3%)

#### 2.3 評価シナリオ

本シミュレーションでは、IGF コードにおいて規定される「ガス安全機関区域」を適用しているものとする。すなわち、燃料配管は内管の損傷が発生しても直ちに外部へ燃料が漏れないよう二重管構造となっている。ゆえに、内管と外管が同時に損傷する事象の発生頻度は極めて低くなることが予想されるが、着火した場合の影響は深刻になる可能性が高く、ワーストケースのひとつとして考えることができる。本シミュレーションでは、内管と外管が同時に損傷した場合を想定して、漏洩した燃料ガスが機関室内でどのような拡散挙動を示すか把握する。

漏洩源は、シリンダーヘッド付近から、少量漏洩となる流出穴直径 2 mm、および比較的深刻な損傷のケースとなる穴直径 10 mm のピンホールからの漏洩とし、配管内の流体は 20 Bar-G の圧力で流れているものとした。プロパンの放出速度については、別途 DNVGL の影響解析ソフトウェア Phast を用いて、放出する気相状態のプロパンの温度が 20 °C と -42.04 °C のときの質量流量を求め、これを流出面の境界条件として与えることとした。これに加えて、換気方法の影響を調べるため換気ダクトの向きについて床にむかって鉛直下向きと、エンジンに向かって水平方向に換気風が吹き出されるよう設定した。なお、本シミュレーションでは高温のエンジン表面からの熱の影響を含めていない。換気風量は、IGF コードに規定されている 1 時間あたり 30 回の換気回数を満足するよう、その値を決定した。

### 3. 数値シミュレーションの結果と考察

#### 3.1 換気流場の計算結果

これより、機関室をファンネル等のある上部の A ゾーン、燃料ガスの漏洩源である燃料配管等がある B ゾーン、クランクケースやクランクシャフトがある C ゾーンの 3 つのゾーンに分けて議論する。図 1 に船体中央を通る断面における気流の様子を示す。よどんでいる領域を可視化するため、コンターの最大値を 3 m/s に設定しているが、実際には最大 11 m/s の気流速度が得られている。換気風が合流する A ゾーンは最大 11 m/s、漏洩源がある B ゾーンでは概ね 1~2 m/s、C ゾーンでは 0.3 m/s (水平)、0.3~0.6 m/s (下向き) となった。これより、換気ダクトの向きによって滞留性に違いが現れることが予想される。

### 3. 2 ガス拡散計算結果

図2に、流出穴径10mm、換気ダクトが下向きの場合のプロパンガスの体積濃度分布を示す。低温ガスの流出の場合、Cゾーンにおいて燃焼範囲(0.021~0.095)の可燃性混合気が滞留していることから、常温流出より密度が高い低温流出ではより滞留しやすくなる可能性があることが示唆された。次に、図3に換気ダクトが水平方向の場合のプロパンガスの体積濃度分布を示す。この場合においても、低温流出条件において、Cゾーンにも広く燃焼範囲の可燃性混合気が滞留している様子が確認された。また、換気ダクトが下向きの条件よりも水平方向の場合のほうがより高濃度のプロパンガスが滞留していることから、換気方法によってもプロパンガスの滞留性状に大きく影響を及ぼすことが示唆された。

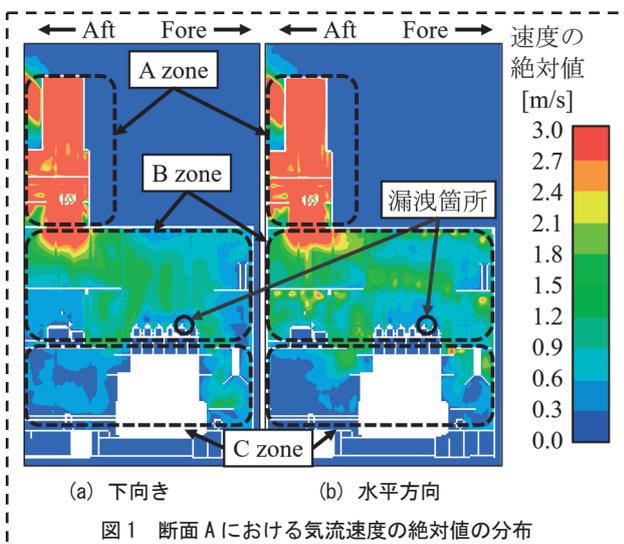


図1 断面Aにおける気流速度の絶対値の分布

### 3. 3 換気効率評価

図4に、室内空調分野において用いられる簡便な完全混合モデルと本数値シミュレーションから算出される、機関室内のプロパンガスの平均濃度の時間変化の一例を示す。これより、換気ダクトが下向きのほうが完全混合モデルの結果に最も近く、より効率的に換気が行われていることが分かる。一方、低温流出かつ水平方向の換気ダクトの向きの場合において最もプロパンガスの平均濃度が高く、十分な換気効率が得られていないことが示された。流出穴径2mmの条件でも同様の傾向が得られている。現行規則では、換気回数のみが規定されており、詳細な換気流設計は設計者に委ねられる。したがって、数値シミュレーション手法を用いて実質的な換気効率の評価を行うことは、換気流設計において非常に有効であるといえる。

## 4. おわりに

数値シミュレーションによるLPG燃料漏洩時におけるガス拡散、換気解析を行った結果、漏洩ガス流出穴径、ガス温度、換気ダクトの向きが換気効率に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。なお、本解析結果の詳細については、参考文献3を参照されたい。

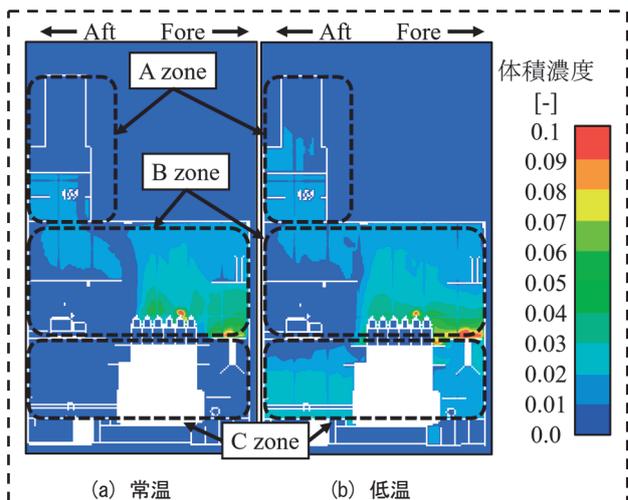


図2 断面Aにおけるプロパンガスの体積濃度分布(下向き)

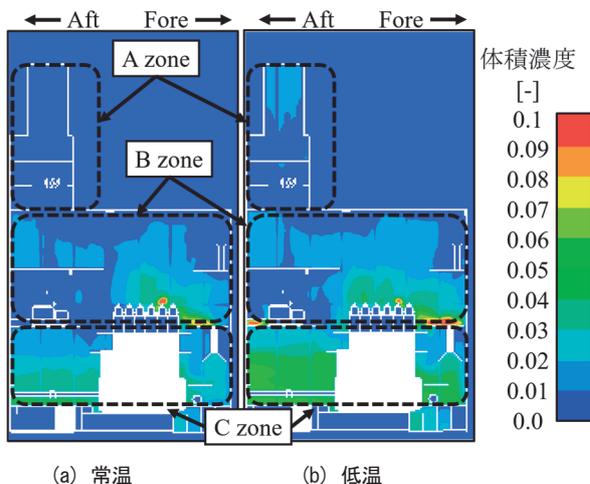


図3 断面Aにおけるプロパンガスの体積濃度分布(水平方向)

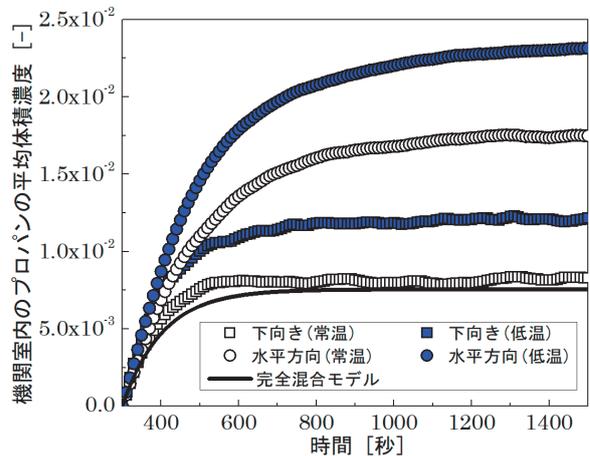


図4 機関室内のプロパンガスの平均体積濃度の推移 (流出穴径10mmの場合)

### 参考文献

- 1) FDS-SMV : <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- 2) F. Stefanidis : Bulk Carrier Engine Room, <https://grabcad.com/fotios.stefanidis-1>
- 3) 木村新太, 工藤潤一, 柚井智洋, 伊藤博子, 岡秀行 : 代替燃料船における漏洩ガスの換気シミュレーション, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第56巻4号予定(2021).