車両積載区画を模擬した可燃性ガス風洞における 水素の移流拡散シミュレーション*

岡 秀 行** 緒 方 雄 二***
岡 泰 資**** 太 田 進**

Numerical Analysis of Hydrogen Dispersion in Wind Tunnel Modeled on Vehicle Space of Pure Car Carriers

By Hideyuki OKA **, Yuji OGATA ***, Yasushi OKA ****, and Susumu OTA **

Seaborne transportation of hydrogen fuel cell vehicles (HFCVs) by pure car carriers is highly expected to increase due to rising demand for environmental protection in the world. When hydrogen leaks from a HFCV, it may accumulate near the ceiling of a vehicle space, since stiffening members referred to as longitudinal girder, web beams and longitudinal frames act as so-called “smoke barriers”. When carrying out safety assessment of the carriage of HFCVs with possible hydrogen leakage, it is necessary to validate numerical simulation tools to accurately predict ventilation flow properties and hydrogen behavior near the ceiling of a vehicle space. For this purpose, large-eddy simulation (LES) on ventilation flow and hydrogen dispersion in a wind tunnel has been carried out using Fire Dynamics Simulator (FDS), which is one of the well-validated computational fluid dynamics (CFD) codes. The sensitivities of computational grid size and subgrid-scale (SGS) models in the LES technique have been investigated by comparing measurement data. The results indicated that when ventilating the wind tunnel without releasing hydrogen, the present CFD calculations could reproduce the measurement data on velocity profiles without dependence on the SGS models by assigning more than about 10 computational grids to the “smoke barriers” in the depth direction. On the other hand, in the case of ventilation with releasing hydrogen, numerical results with the same grid size considerably underestimated experimental data on hydrogen concentrations. Therefore, care should be taken for the interpretation of real-scale simulation results with relatively coarse, computational grids. The present numerical results also point to a need to improve SGS models in such a way that the effects of stratification of hydrogen/air mixture due to buoyancy can be taken into consideration.

1. 緒言

1. 1 研究の背景

地球温暖化の抑制策として二酸化炭素排出量の削減が国際的に求められており、様々な分野において一層の省エネルギー化が望まれている。自動車分野では米国カリフォルニア州の「Zero Emission Vehicle 制度」等をはじめとする世界的な環境保全に向けた取り組みを背景に、今後水素燃料電池自動車 (HFCV) や圧縮天然ガス自動車 (CNGV) の輸出需要が増大すると見込まれている。

自動車専用船 (PCC) の車両積載区域で事故等により HFCV から水素が漏洩した場合、水素は周囲空気と比べ分子量が小さく作用する浮力が大きい、ガーター (girder) やビーム (beam) など甲板下に設置された補強部材が「垂れ壁」と同様の役割を果たすことにより、水素濃度が可燃範囲となる領域が天井近傍に形成及び維持される可能性がある。

このような背景から国際海事機関 (IMO) 海上安全委員会 (MSC) は、HFCV 等の海上輸送に対する安全基準の整備を防火小委員会 (FP) で審議すべき新規課題として取り上げ、2010 年 4 月より審議が開始された¹⁾。その結果、HFCV 等の海上輸送に対して 2016 年 1 月から新たな安全基準が適用され、水素自動車を運送する PCC は携帯式水素濃度センサーを 2 個以上備えること、ならびに新造 PCC の船倉及び船倉用通

*原稿受付 平成 29 年 3 月 20 日。

**正会員 海上・港湾・航空技術研究所 (三鷹市新川 6-38-1)。

*** 産業技術総合研究所 (つくば市小野川 16-1)。

**** 横浜国立大学 (横浜市内保土ヶ谷区常盤台 79-7)。

風設備には防爆型以外の機器を用いないことが新たな要件として加えられた²⁾。しかし、車両積載区画における通風は可燃性ガスや排気ガスの滞留の防止に重要であるにも関わらず、機械式通風装置の詳細に踏み込んだ基準化は現実的ではないことから、海上人命安全条約 (SOLAS 条約) で要求される通風に対して新たな基準を策定するには至らなかった。

1. 2 研究の目的

現行の SOLAS 条約は、車両積載区域に対して 1 時間当たり 6 回以上の換気を行える機械式通風装置を要求しているが、車両積載区域の気流については規定していない。これを踏まえ、川越ら³⁾は停泊している複数の PCC 船倉内において航海中と同様の機械通風状態を再現し、通風条件と気流性状の関係を調査することを目的に PCC 船倉内の気流計測を行った。その結果として、車両積載区域の換気量が規定を満足していても、給排気ダクトの設置位置や給気口の向きの違いから僅かな風速しか得られない領域が多数存在することが報告されている。また、車両積載区域に設置されている複数の給排気設備のうち、使用する給排気口の配置を工夫することにより車両積載区域の気流速度を全体的に高くし、無風に近い場所を低減できることを示した。篠田ら⁴⁾は、引き渡し直前の PCC において荷役中を想定して全てのファンを起動し、車両デッキ上での流速分布ならびに給排気状況の計測を行うと共に、計算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) に基づく数値シミュレーションにより汚染物質の排出率ならびにデッキ内での換気効率の改善案について検討している。

このように車両積載区域の気流場に着眼して得られた知見は、排気ガスのように汚染物質と周囲空気との密度差があまり大きくなく、汚染物質が気流場に追従して移流拡散する場合には有効であると考えられる。しかし、HFCV からの漏洩が懸念される水素のように周囲空気との密度差が大きく、作用する浮力が強い場合には気流性状を把握するだけで車両積載区域における漏洩物質の挙動を予測することは難しい。一方、実際の PCC 船倉内で水素やヘリウムなどの低密度ガスを漏洩させた実験を行うことは現実的に不可能である。

近年の計算機性能の向上と CFD 技術の高度化により実験計測の代替として換気・空調気流の数値シミュレーションが広く行われている。しかし、低密度ガスの移流拡散現象に対する CFD コードの検証については、住宅用車庫のように部分的に開口部を有する閉鎖区画を対象に自然換気条件下で評価されているが^{5,8)}、PCC の車両積載区画のように機械式通風装置が作動

した条件下で、かつ天井近傍の気流場に影響する補強部材が多数存在する大規模空間を対象とした研究例は著者らの研究^{9,10)}以外には見当たらない。

そこで本研究では、低密度ガスの移流拡散現象に対する現状の CFD 技術の有効性と問題点を確認することを目的として車両積載区域の一部分を模擬した実大規模の水素放出実験¹¹⁾を対象に数値シミュレーションを実施し、計算格子幅及び乱流モデルが数値解に及ぼす影響を評価した。

2. 解析対象及び計算条件

本研究では、国立研究開発法人産業技術総合研究所が所有する可燃性ガス風洞を用いた水素滞留実験¹¹⁾を計算対象としている。実際の PCC 船倉内で水素を漏洩させた実験を行うことは現実的に不可能であるため、風洞の天井面に垂れ壁を設置し、車両積載区域の一部分を模擬したものである。この実験で使用した可燃性ガス風洞は、一定通気量のもとでメタンや水素などの可燃性ガスを放出することが可能な国内唯一の大型実験風洞である。風洞長 20 m、風洞幅 3.6 m、高さ 1.8 m の長方形断面を有するトンネル状の構造となっている。この可燃性ガス風洞には二機の防爆型排気用ファンが設置されており、最大通気速度は約 3.0 m/s である。二機の排気ファンは風洞の風下側に設置されており、吸い出し方式の風洞となっている。排気ファンが防爆構造の機器であるため、可燃性ガスを使用しても安全に実験を行うことが可能である。通気速度は二機の防爆ファンの回転数から設定し、0.1 Hz 単位で回転数を制御できる機構となっている。また、可燃性ガス風洞の上流側は整流構造となっており、一様な気流場を生成することが可能である。車両積載区域の一部を模擬した風洞内試験区間の模式図を図 1 に、深さ 0.45 m の垂れ壁を 4.5 m 間隔で設置した風洞内の様子を図 2 に示す。

図1 車両積載区域の一部を模擬した風洞内試験区間の模式図。

風洞内の流速分布の計測には、日本カノマックス製のリニア出力タイプアネモマスター風速計 Model 6141 タイプを使用した。気流の主流方向成分の鉛直方

図2 風洞内に設置した垂れ壁の様子。

向分布を計測するため、図3に示すように風洞長手方向の中央鉛直断面（対称面）上の7箇所に設置し、最も上流側の垂れ壁の更に上流側2 mの地点から0.5 m間隔で下流側8 mの地点まで計測した。安定した通気速度が確保できる0.4 m/secに設定し、気流場が十分発達した後の50秒間のデータを使用して時間平均流速を算出した。

図3 気流速の計測位置の例（対称面上）。

水素の放出量は、UN/ECE, TRANS, WP.29によって規定されている衝突試験時の最大許容漏洩量120 NL/minとし、図4に示すように天井面から約0.1 m下方に設置した4つのノズルから放出させた。また、すみやかに漏洩させるため、図5に示すようなメタルメッシュをノズル出口に取り付けて30分間水素を放出した。水素濃度は、接触燃焼式のセンサーである理研機器製MULTI GAS MONITORを使用し、図6に示すように対称面上に濃度計を配置した。

図4 水素放出ノズルの設置位置（平面図）。

図5 メタルメッシュ製水素放出口。

図6 濃度計測点の概略図。

次に、風洞内の計測区域を模擬した計算領域を図7に示す。主流方向に15 m、垂れ壁の深さを0.45 mとした。風洞幅方向 (y 方向) は、実寸法と同じく3.6 mとしている。実際の風洞においては外気流の変化や風洞内設置物の影響により流入境界において理想的な一様流を生成することは困難であり、数値計算においても流入側境界において適切な変動成分を設定することが必要となる。本計算で使用するCFDコードFire Dynamics Simulator Version 6.2.0 (FDS6)¹²⁾では流入境界での気流の変動成分を生成する手法として、synthetic method¹³⁾が実装されている。なお、FDS6については次節で言及する。

図7 風洞実験を模擬した計算対象領域。

実際の風洞実験では既に示したように天井面から約 10 cm 下方の 4 箇所にメタルメッシュ製のノズル出口を設置し、水素を風洞内に放出している。しかし、メタルメッシュの効果など実験条件と完全に一致させた数値シミュレーションを行うことは現実的に不可能であるため、その代替として数値計算では水素放出口を簡略化し、天井面の 4 箇所にそれぞれ 1 セル分の放出口を与え、実験条件相当分の水素を下方に放出させた。また、計算領域内の気流場が十分発達した状態を初期条件として水素を流入させるため、事前に 300 秒分の通風のみの計算を行った。

3. 数値計算手法

本計算で使用した CFD コードは、米国商務省 National Institute of Standards and Technology (NIST) で開発された Fire Dynamics Simulator Version 6.2.0 (FDS6)¹²⁾である。OpenFOAM¹⁴⁾などの他の CFD コードに比べて高速で、かつ建築物内の換気・空調気流への適用にも豊富な実績を持つ¹⁵⁾。その主な特徴を以下に示す。

- 低 Mach 数近似が成り立つ流れ場を対象。
- 乱流場の解析は Large Eddy Simulation (LES) によって行い、4 種類の subgrid-scale (SGS) モデルが選択できる。
- 空間微分項の離散化には 2 次精度中心差分スキーム、熱及び物質の輸送方程式の移流項には 2 次精度の TVD スキーム¹⁶⁾が用いられている。
- 時間積分は 2 次精度の予測子・修正子法を使用。
- 計算格子は矩形の直交格子であり、マルチブロック格子にも対応。
- OpenMP 及び MPI (Message Passing Interface) ライブラリを利用した並列計算が可能。
- 速度の境界条件には Werner and Wengle モデル¹⁷⁾が採用されている。

本計算では燃焼現象を考慮する必要は無く、等温場を対象としているため、数値的に解かれる流れ場の支配方程式は質量保存式、運動量保存式及び質量分率の保存式である。

以下では本研究で比較する SGS モデルについて概説する。Version 5 (FDS5) までデフォルトの SGS モデルとして採用されてきた標準 Smagorinsky モデル (SSM)¹⁸⁾は、簡潔であること及び数値計算の安定性が良いことから工学的に広く用いられており、SGS 渦粘性係数 μ_{sgs} は次式で表される。

$$\mu_{sgs} = \rho C_s \Delta^2 \left[\frac{\partial u_l}{\partial x_m} \left(\frac{\partial u_l}{\partial x_m} + \frac{\partial u_m}{\partial x_l} \right) \right]^{\frac{1}{2}}.$$

ここで、 ρ は密度、 u_i ($i = 1, 2, 3$) は直角座標系 x_i ($i = 1, 2, 3$) における grid-scale (GS) の速度成分を表している。 C_s はモデル定数で、壁乱流に対しては 0.1、混合層乱流では 0.16、一様乱流では 0.2 程度の値がそれぞれ推奨されている。 Δ は SGS 長さスケールで、各方向の計算格子幅 Δ_i ($i = 1, 2, 3$) を用いて $\Delta = \sqrt[3]{\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3}$ により定義される。SSM の欠点として、異なる種類の流れに適用する場合に C_s の値を変更しなければならないこと、非乱流域や壁近傍で修正を要することが挙げられる。

FDS6 から導入されているダイナミック Smagorinsky モデル (DSM)¹⁹⁾は、SSM の問題を解決したモデルである。Germano 恒等式を通してモデル係数 C_s が流れ場の解として決定され、壁面近傍で減衰関数を導入する必要がある。しかし C_s はしばしば負値を取り、計算が不安定となるため強制的に零とする処置 (clipping) などが施される。

FDS6 では Deardorff モデル²⁰⁾がデフォルトの SGS モデルとして採用されている。SSM と同様に SGS 応力に対して渦粘性型のモデルが用いられるが、次式のように SGS 渦粘性係数 μ_{sgs} の評価に SGS エネルギー k_{sgs} が使用される。

$$\mu_{sgs} = \rho C_v \Delta \sqrt{k_{sgs}},$$

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} \left\{ (\bar{u}_1 - \hat{u}_1)^2 + (\bar{u}_2 - \hat{u}_2)^2 + (\bar{u}_3 - \hat{u}_3)^2 \right\}.$$

ここで、 C_v はモデル定数で 0.1 に設定されている²¹⁾。 $\bar{u}_i$ はセル中心での速度の GS 成分を表しており、 $\hat{u}_i$ は GS 成分にフィルタ幅 2Δ のテストフィルタを施したものである。例えば、 x_1 座標の離散点を $x_{1,I} = \Delta_1 I$ ($I = 0, 1, 2, \dots$) とすると、 $\bar{u}_{1,I}$ 及び $\hat{u}_{1,I}$ はそれぞれ次式のように平均した形で表される。

$$\bar{u}_{1,I} = \frac{u_{1,I} + u_{1,I-1}}{2}; \quad \hat{u}_{1,I} = \frac{\bar{u}_{1,I}}{2} + \frac{\bar{u}_{1,I-1} + \bar{u}_{1,I+1}}{4}.$$

Deardorff モデルは元来 SGS エネルギーの輸送方程式を解くことで k_{sgs} を求める 1 方程式モデルとして知られているが、それに代わり FDS6 ではスケール相似則モデル²²⁾の考え方に基づいて代数的に k_{sgs} を評価するモデルとなっている。なお、DSM と Deardorff モデルでは壁面近傍で整合性のあるテストフィルタ操作が困難となるため、壁面から第 1 点目の計算セルにおける SGS 渦粘性係数 μ_{sgs} は Van Driest 型の減衰関数を適用した SSM で代用されている²³⁾。

Vreman の渦粘性モデル²⁴⁾は、Taylor 級数展開した速度場にテストフィルタを施し、保存則あるいは座標系の変換に関する不変性など流体方程式が満足すべき物理的あるいは数学的制約条件からモデルパラメータの値を決定した解析的な SGS モデルで、次式のよう表される。

$$\mu_{sgs} = \rho c \sqrt{\frac{B_\beta}{\alpha_{ij} \alpha_{ij}}},$$

$$B_{\beta} = \beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}^2 + \beta_{11}\beta_{33} - \beta_{13}^2 + \beta_{22}\beta_{33} - \beta_{23}^2,$$

$$\beta_{ij} = \Delta_m^2 \alpha_{mi} \alpha_{mj} \quad ; \quad \alpha_{ij} = \frac{\partial u_j}{\partial x_i}.$$

モデル定数 c は Smagorinsky 定数 C_s と $c \approx 2.5C_s^2$ のように関連付けられ、一様等方性乱流に対する C_s の理論の見積値 ($= 0.17$) から $c = 0.07$ に設定されている。

本研究では FDS ver. 6.2.0 に実装されている 4 つの SGS モデルに加えて、コヒーレント構造モデル (CSM)²⁵⁾ をソースコードに組み込み、他の SGS モデルと合わせて評価した。CSM は、SSM の問題を解決した SGS モデルの一つである。局所的に負のモデル定数が現れる DSM とは異なり、モデル定数が常に正値を取るため計算安定性が良く、かつ定数値が流れ場の種類に依存しないという特徴を有している。CSM では、無次元化した速度勾配テンソルの第 2 不変量 F_{CS} を用いて Smagorinsky 定数 C_s が次のように求められる。

$$C_s = \sqrt{\frac{1}{20} |F_{CS}|^{3/2}} \quad ; \quad F_{CS} = \frac{Q}{E} \quad (-1 \leq F_{CS} \leq 1),$$

$$Q = -\frac{1}{2} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad ; \quad E = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2.$$

本研究では SGS プラントル数 Pr_{sgs} 及び SGS シミット数 Sc_{sgs} を共にデフォルト値 ($= 0.5$) とし、上述した 5 つの SGS モデルの比較検討を行った。

4. 結果及び考察

4. 1 気流場の再現計算

まず FDS6 による風洞内気流場の再現性を調べるた

め、風洞内に水素を漏洩させず、空気のみが流れている場合の流速分布を実験値と比較する。図 8 は対称面上における時間平均流れ場の流線図を示しており、主流方向 (x 方向) 及び高さ方向 (z 方向) とも垂れ壁の深さ h ($= 0.45$ m) で規格化している。SGS モデルにはデフォルトの Deardorff モデルを使用し、計算格子には格子幅 5 cm の等間隔格子を用いた。それゆえ、垂れ壁の深さ (z 方向) に対して 9 セル、奥行き (y 方向) に対して 72 セル、厚み (x 方向) に対して 1 セルを割り当てた。実験で設定した通気速度は 0.4 m/s で、流入した気流は垂れ壁 ($x/h = 0$) により流路を遮られ、垂れ壁の背後 ($x/h > 0$) に伴流域が形成されている。また、流路が狭くなっているため主流速度が上昇し、流線の間隔が狭まっていることが分かる。

図 8 十分発達した流れ場の流線図 (対称面上)。

計算結果を定量的に評価するため、実験値と比較した結果を図 9 に示す。流入境界側の垂れ壁 ($x/h = 0$) から 50 cm 上流側 ($x = -0.5$ [m])、50 cm 下流側 ($x = 0.5$ [m]) ならびに 2 m 下流側 ($x = 2$ [m]) における主流方向成分の大きさ $|u|$ の鉛直方向分布を比較している。また、計算格子幅の依存性を調べるため、格

図 9 主流方向成分の大きさ $|u|$ の鉛直方向分布。(a) 最も上流側の垂れ壁 ($x = 0$ [m]) から 50 cm 上流側；(b) 同じく 50 cm 下流側；(c) 同じく 2 m 下流側。

図10 異なるSGSモデルによる $|u|$ の比較. (a) $x = -0.5$ m ; (b) $x = 0.5$ m ; (c) $x = 2.0$ m.

子幅を2.5 cmと9 cmに設定した場合の計算結果も合わせて示している. 格子幅が2.5 cm及び5 cmの場合, 垂れ壁の上流側及び下流側共に計算値と実験値は定量的に良く一致しており, 本計算による気流場は実験を良く再現していることが分かる. しかし格子幅が9 cmの場合, $x = -0.5$ [m]では天井近傍の流速が不自然な分布形状となっており, $x = 0.5$ [m]と $x = 2$ [m]では伴流域において再現性が低下している.

次に, 前節に示したSGSモデルの違いが流れ場に及ぼす影響を評価した. 実用的な解析では計算精度に加え, 計算に要する時間も重要な要素であることを考慮し, 前述の計算格子幅依存性を踏まえて格子幅を5 cmとした. 図9と同じ計測位置における流速分布の比較結果を図10に示す. ここではFDS6を使用したSGSモデルの差異を評価するだけでなく, SGSモデルとしてCSMを組み込んだFDS5 (version 5.5.1) による結果⁹⁾も比較の対象に加えている. いずれのSGSモデルによる結果も実験値を比較的良く再現しているが, 特に $x = 2$ [m]の伴流域ではSGSモデル間で有意な差異が生じていることが分かる. そこで, 伴流域での再現性に加え, 全体を通じて実験値と良く一致しているCSMを採用し, 水素を漏洩させた場合の数値シミュレーションを行った.

4. 2 水素放出実験の再現計算

風洞内気流場について計算結果の妥当性が示されたことを踏まえ, 風洞内に水素を放出させた数値シミュレーションを行った. 風洞実験に合わせて通気速度を0.5 m/sとし, 水素を毎分120 NLで30分間放出した. 水素放出開始から30分後の水素の移流拡散結果を図11に示す. 対称面上における濃度分布を示して

おり, 燃焼下限値(4 vol%)以上の範囲を全て黒色で表している. SGSモデルとしてCSMを採用し, 計算格子幅が5 cmの等間隔格子を用いたFDS6の結果である. 水素は分子量が小さいため拡散速度が大きく, また浮力の影響も大きいことから, 垂れ壁背後の循環流の影響を受けながらも天井面に沿って水素と空気の混合気体が層状に分布していることが分かる.

図11 水素放出開始から30分後の濃度分布(対称面上).

次に定量的な評価を行うため, 水素濃度の時間変化について風洞実験値と比較する. 風洞内に設置した水素濃度計の位置については図6に示したとおりである. 図12に各計測点における水素濃度の時間変化を示す. 計測点②では濃度センサーの不調のため, 実験データが欠損している. 実線は風洞実験値を示しており, ○を付した実線は格子幅を5 cmとしたFDS6による結果である. 計測されている7点で計算値と実験値を比較すると, 数値シミュレーション結果は水素濃度を極めて過小に評価しており, 実験値を全く再現できていないことが分かる. これは格子解像度の不足が主要因と考えられるため, 計算格子幅を2.5 cmとした計算を行い, その結果を△を付した実線で示した. 同じく計算格子幅を2.5 cmとし, SGSモデルとしてCSM

図12 各計測点における水素濃度の計算値と実験値の比較.

を組み込んだ FDS5 による計算結果⁹⁾も比較のため示しており、□を付した実線で表している。このように計算格子を密に設定することにより計算結果が格段に改善されており、特に天井面に最も近い計測点①及び④ならびに真中に位置する計測点⑤では実験値に近い結果が得られている。しかしながら、前節で示したように流速分布については再現性が良いにも関わらず、天井面から離れた計測点③及び⑥ならびに下流側の垂れ壁の前面に位置する計測点⑦及び⑧では実験値に比べて計算値は過小評価した結果となっている。

一般に密度成層が形成されている乱流場では鉛直方向の混合作用が抑制され、水平方向と鉛直方向で乱れの特性が異なる成層流になっている。しかし、本 CFD 解析で採用している SGS モデルは等方的に乱れた場を前提にしたモデルであるため、乱流拡散の影響が過大に評価され、計測点③及び⑥で実験値を大きく下回っていると考えられる。また計測点⑦及び⑧の近傍では、上流側の垂れ壁によって生じた伴流と下流側の垂れ壁が干渉し、瞬時局所的な流れ場は複雑な状態になっているため、計測点⑦での FDS5 の結果を除き、実験値と大きな差異が生じていると考えられる。

最後に、同じ計算格子を用いた FDS5 と FDS6 の結果の差異について言及する。流れの基礎方程式の数値解析法については FDS5 と FDS6 の両方で基本的に差異は無く、流れ場の時間発展に対して同じ計算アルゴリズムが用いられているものの、FDS6 では予測精度の向上を目的に幾つかの点で FDS5 に改良が加えられている。本研究で対象としている流れ場の解析に関係する主な相違点は以下の二点である。

- ・移流項の離散化スキーム
- ・圧力の Poisson 方程式の定式化

FDS5 では、低 Mach 数近似を施した運動量方程式の対流項ならびに質量分率や顕エンタルピー (sensible enthalpy) のようなスカラー量の輸送方程式の移流項に対し、各セルにおける局所 Courant 数をパラメータとして一次精度の上流差分法と二次精度の中心差分法を組み合わせた離散化スキームが用いられている²⁰⁾。それに対し、FDS6 ではスカラー量の輸送方程式のみを対象に、流束制限関数として Superbee を用いた二次精度の TVD (Total Variation Diminishing) スキーム¹⁶⁾が採用され、FDS5 で見られた数値解の非物理的な変動を低減している²³⁾。

また、圧力の Poisson 方程式において FDS5 では計算を高速化するため、密度勾配と動圧勾配のクロス積に比例した項 (baroclinic torque) を無視しているが、FDS6 では支配方程式に忠実にこれを考慮した計算を行っている²³⁾。そのため、FDS6 による解析に要した計算時間は FDS5 の場合の約 3.6 倍であった。

このように FDS6 は FDS5 に改良が加えられたものであるにも関わらず、図 12 から判断すると FDS5 の方が全体的に実験値に近い結果を示している。密度成層が形成されている領域では概ね鉛直方向に密度勾配が生じ、また前述のように流れ場が二次元的になることから動圧勾配は概ね水平方向に作用していると考えられ、これらのクロス積で生じる渦度ベクトルの向きも水平方向となる。つまり、密度成層に沿ったせん断作用が働くことになるが、FDS5 ではこれを無視しているため水素濃度の拡散が抑制され、FDS6 よりも高い数値を示していると考えられる。

5. 結言

HFCV 等の海上輸送に対して 2016 年 1 月から新たな安全基準が施行された。これを踏まえ、PCC の車両積載区域における水素の漏洩を想定した影響評価手法として CFD 技術に基づく数値シミュレーションに着目し、その適用可能性について検討した。具体的には、車両積載区域の一部を模擬した実大スケールの風洞実験を対象に LES 解析を実施し、SGS モデル及び計算格子幅が風洞内の流速分布ならびに水素の濃度分布に及ぼす影響を調べた。計算値と実験値の比較から得られた結果は以下のとおりである。

- ・水素の漏洩が無く、空気のみが流れている場合には天井面に設置した垂れ壁の深さ方向に対し、概ね 10 メッシュ以上の計算格子を割り当てることにより SGS モデルに依らず、CFD 解析で得られた流速分布は実験値を良く再現する。
- ・垂れ壁によって仕切られた空間に水素が滞留し、密度成層が形成されている流れ場では空気の場合に比べ、より高い格子解像度の計算が必要となる。

車両積載区域の換気量が SOLAS 条約の規定を満足していても、給排気口の設置位置や給気口の向きの違いから十分な風速に達していない領域が多数存在することが実船計測から明らかにされている³⁾。使用する給排気口の配置を工夫することにより PCC 船倉内気流場の全体的な流速を高め、無風に近い場所を低減するためには数値シミュレーションによる事前の評価が重要と思われる。しかし、補強部材に囲まれた天井近傍の領域で水素が滞留する現象を定量的に予測するには極めて多くの計算格子が必要であり、現状の一般的な計算機では膨大な計算時間を要することになる。それゆえ、実用的な計算時間内で結果が得られるように計算格子数を調整した場合、水素濃度を過小に評価している可能性があるため結果の解釈には注意が必要で

ある。また、低密度ガスの漏洩によって形成される成層乱流場に適した実用的な SGS モデルの開発が望まれる。

謝辞

本研究の一部は、日本財団の助成により（財）日本船舶技術研究協会が2009年度から2011年度に設立したプロジェクト、「水素燃料電池自動車等の海上輸送に関する調査研究（HFCV等の海上輸送プロジェクト）」において実施されたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) IMO document, FP 55/INF.2, (2011).
- 2) IMO document, SDC 2/INF.9, (2014).
- 3) 川越他 2 名, 日本航海学会論文集, 125, (2011), 123.
- 4) 篠田他 2 名, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 平成 26 年 11 月.
- 5) A.G Venetsanos., et al., *Int. J. Hydrogen Energy*, **34**-14, (2009), 5912.
- 6) E.A. Papanikolaou, et al., *Int. J. Hydrogen Energy*, **35**-10, (2010), 4747.
- 7) K. Prasad, et al., *Int. J. Hydrogen Energy*, **36**-8, (2011), 5200.
- 8) K. Matsuura, et al., *Int. J. Hydrogen Energy*, **37**-2, (2012), 1972.
- 9) H. Oka, et al., *Proc. 6th Int. Conf. Hydrogen Safety*, (2015), Paper ID: 161.
- 10) H. Oka and S. Ota, IMO document, FP 55/INF.2 Annex 5, (2011).
- 11) S. Ota and Y. Ogata, IMO document, FP 55/INF.2 Annex 3, (2011).
- 12) FDS-SMV, <http://firemodels.github.io/fds-smv/>.
- 13) N. Jarrin, Synthetic Inflow Boundary Conditions for the Numerical Simulation of Turbulence. PhD thesis, The University of Manchester, (2008).
- 14) firefoam-dev, <https://github.com/fireFoam-dev>.
- 15) A. Musser and K. McGrattan, *J. Architectural Eng.*, **8**-1, (2002), 10.
- 16) P. L. Roe, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **18**, (1986), 337.
- 17) H. Werner and H. Wengle, *Proc. 8th Symp. Turbulent Shear Flows*, (1991), 155.
- 18) J. Smagorinsky, *Mon. Wea. Rev.*, **91** (1963) 99.
- 19) M. Germano, et al., *Phys. Fluids A*, **3** (1991) 1760.
- 20) J.W. Deardorff, *Boundary-Layer Meteorol.*, **18** (1980) 495.
- 21) S.B. Pope, *Turbulent Flows*, Cambridge Univ. Press, (2000).
- 22) J. Bardina, et al., *AIAA Paper*, 80-1357 (1980).
- 23) K. McGrattan, et al., Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1 Sixth Edition, (2015).
- 24) B. Vreman, *Phys. Fluids*, **16** (2004) 3670.
- 25) H. Kobayashi, *Phys. Fluids*, **17** (2005) 045104.
- 26) K. McGrattan, et al., Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-5, (2009).