

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350467

研究課題名(和文) 高密度ガス拡散モデルの高度化 - 浅層モデルの高精度数値解析手法の開発

研究課題名(英文) Numerical Study on the Improvement of a Heavy Gas Dispersion Model Based on a Shallow Layer Approach

研究代表者

岡 秀行 (OKA, HIDEYUKI)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80399518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高密度ガスの大気拡散挙動を予測する数値モデルの内、浅水方程式に基礎を置く浅層モデルに着目し、その数値計算コードの一つであるTwodee-2 (Folch, et al., 2009) を改良した。このコードでは、周囲の気流によって高密度ガスの流れが誘起される現象については計算可能なものの、無風条件下で自重によって流れが誘起される場合には計算を実行できないため、浅層モデルを構成する要素モデルの一つである空気連行モデルを改良すると共に、浅層モデル方程式の移流項の離散化手法として2次精度の上流差分法であるドナーセル法を採用することで、重力流にも対応できるように高度化した。

研究成果の概要(英文)：This study is concerned with computer models for atmospheric dispersion of denser-than-air gas. In particular, we focus on a shallow-layer approach based on shallow water equations out of three types of modeling approaches. One of available computer codes based on a shallow-layer model, Twodee-2 (Folch, et al., 2009), is employed to evaluate and improve this model. This code can deal with heavy gas dispersion phenomena induced by surrounding airflow. However, it has been confirmed that it does not work in the simulation of a heavy gas current under its own weight on a sloping terrain. Therefore, a discretization scheme for advection terms of model equations is modified to a simple, second-order upwind scheme. In addition, an air entrainment model is modified to take account of the heavy gas flow velocity instead of the surrounding airflow. As a result, it has been found that numerical results by this modified Twodee-2 code can nicely reproduce wind tunnel experimental data.

研究分野：計算流体力学

キーワード：浅層モデル 高密度ガス 大気拡散

### 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の影響によって、国内の原子力発電所は稼働を停止していることから、火力発電のための液化天然ガス (LNG) の需要が増大している。また、米国におけるシェールガス生産量の増加に伴い、世界の LNG 取引量は今後も増大する見通しとなっている。このような世界的な天然ガスの需要増大を背景として、LNG の海上輸送量は一層増加すると見込まれている。

海上輸送時の事故により大量の LNG が海面上に流出した場合、流出地点での火災あるいは蒸発した天然ガスが遠方へ移流拡散することにより蒸気雲火災に至る可能性がある。蒸発直後の低温の天然ガスは常温の周囲空気よりも密度が約 1.5 倍高く (以降、高密度ガスと呼ぶ)、地面あるいは海面上を這うように流れる。このような高密度ガスを対象とした大気拡散モデルは、積分モデル、数値流体力学 (CFD) モデル、浅層モデルの 3 つに大きく分類される。

### 2. 研究の目的

積分モデルは最も広く使用されている実用モデルであるが、ガス濃度の分布形状を仮定し、1 次元の方程式系に簡略化されているため、地形変化や障害物の影響のみならず、気流場の時空間変化を考慮することが難しい。一方、近年の計算機性能の向上に伴い CFD モデルが広く使用され始めている。このモデルでは流れの基礎方程式に基づいた解析が行われているため、詳細な物理モデルを組み込むことが可能であるが、計算負荷が極めて大きいため実用には適していない。これに対し、浅層モデルは比較的詳細な物理モデルを組み込むことが可能な上に、鉛直方向 (深さ方向) に物理量を平均化した 2 次元モデルであるため計算負荷が比較的小さく、CFD モデルに比べて高速に数値解を得ることができる。

そこで本研究では浅層モデルに着目し、高密度ガスの拡散挙動を調べた風洞実験を対象に解析を行った。実験結果、積分モデルによる結果及び CFD モデルによる結果との比較から浅層モデルの性能を評価した。

### 3. 研究の方法

本研究で用いる高密度ガス大気拡散モデルの概要を述べる。

#### (1) 積分モデル

SLAB[1]や DEGADIS[2]に代表される積分モデルは計算負荷が極めて小さく、多数のシナリオを検討する必要があるリスク評価等で広く利用されている。浅層モデルとの比較のため、本研究では米国環境保護庁 (EPA) の「大気汚染モデルに関する指針」において次善モデルとして登録されている無償の DEGADIS モデルを使用した。

#### (2) 数値流体力学 (CFD) モデル

大気拡散解析の分野においても CFD モデ

ルを用いた研究が進んでおり、商用の流体解析ソフトウェアだけでなく OpenFOAM[3]や FDS[4]など無償の数値流体解析コードが広く利用されている。米国商務省の National Institute of Standards and Technology (NIST) で開発された Fire Dynamics Simulator (FDS) [4]はソースコードが無償で公開されており、火災現象のみならず空調解析や大気拡散解析においてもこれまで多くの検証が行われ、実用的に満足いく結果が得られている[5]。また、高密度ガスの大気拡散挙動に関する風洞実験を対象に FDS により解析した研究例[6]があり、本研究では浅層モデルとの比較にその結果を引用している。

#### (3) 浅層モデル

浅層モデルには Twodee-2[7]を使用した。これは、英国 Health and Safety Laboratory (HSL) で開発された Twodee[8]のソースコードを Fortran90 言語で書き換え、二酸化炭素を主成分とする火山ガスの大気拡散解析を目的に開発されたものであり、インターネット上で無償で公開されているソフトウェアである。このコードは周囲の気流によって高密度ガスの流れが誘起される現象について計算可能であるが、無風条件下において傾斜面を自重によって流れる場合には計算を実行できないことを確認している。つまり、地形変化の影響や障害物を乗り越える流れを適切に再現することができないことを意味している。

そこで、本研究では Twodee-2 のモデル方程式の移流項に対し、その離散化手法として採用されている Flux-Corrected Transport 法[9]を 2 次精度上流差分であるドナーセル法[10]に変更するためソースコードを書き換えた。これにより、本研究では無風条件下でも高密度ガスの大気拡散現象を取り扱うことが可能となっている。

#### (4) 計算対象及び計算条件

高密度ガスの一つである六フッ化硫黄 ( $\text{SF}_6$ ) の大気拡散挙動を模擬した風洞実験 [11]を計算対象とした。この実験は瞬間流出あるいは連続流出させた高密度ガスの拡散挙動に対する地形変化の影響を調査することを目的に実施されたもので、風洞床面の形状、風洞内通気流速及び  $\text{SF}_6$  の漏洩量を変化させ、合計 133 回の異なる測定が行われた。風洞の大きさは 164 分の 1 の縮尺模型で行われ、測定部の風洞の大きさは幅 1.5 m、高さ 1 m、長さ 4 m である。

次に、計算条件を表 1 に示す。各コードの性能評価のため、比較的簡単な条件下で行われた 3 ケースの実験を選択した。このうち 1 ケースは気流の影響のみを評価するため、風洞床面に障害物が無い水平面の場合とした (ケース A)。残りの 2 ケースは地形変化の影響を最も簡潔に評価するため、床面の傾斜

角度が一定の条件とし、4.9°及び6.6°の2通りについて検討した(ケースB,C)。

表1 計算条件<sup>[11]</sup>

ケース	A	B	C
漏洩物質	SF <sub>6</sub>		
温度 [K]	293		
漏洩範囲半径 [m]	5.74		
粗度 [m]	0.0164		
傾斜角度 [°]	0	4.9	6.6
風速 [m/s]	6.92	0	0
漏洩量 [kg/s]	60	60	60

#### 4. 研究成果

##### (1) 水平床面の場合

まずケースAについてSF<sub>6</sub>濃度の風下方向への変化を図1に示す。縦軸は十分に発達した気流場における体積濃度、横軸は漏洩源の中心点から風下方向への距離を表している。本研究で示す計算結果は全て実大スケールに換算したものである。Twodee-2及びFDSによる計算結果は、漏洩源の中心から100m程度までの比較的近傍の領域で実験値を再現できておらず、過小評価する結果となっている。しかし、約150m以降ではTwodee-2、FDS共に実験値に近い結果を示した。一方、DEGADISによる計算値は漏洩源からの距離に依らず実験値を大きく下回る結果となった。

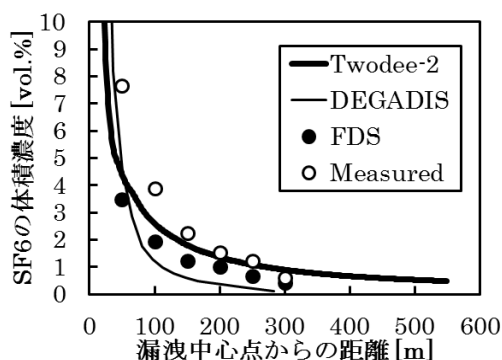


図1 体積濃度の風下方向への変化。FDS及び実験値はそれぞれ文献[6]、[11]より引用。

次に、Twodee-2及びFDSで求められた風洞床面上の濃度分布を図2に示す。図2(a)はFDSによる計算結果[6]、(b)はTwodee-2による本計算結果である。風上側境界から100m下流側の対称軸上に漏洩源を設定し、濃度分布に大きな変化が現れなくなった漏洩開始300秒後から1000秒後までの濃度を時間平均したものを示している。図2(a)と(b)を比較すると良く似た分布形状が得られている

ものの、FDSの方がより広範囲に分布した結果を示している。既に図1で示したように、漏洩源から離れた範囲では対称軸上の濃度分布はFDSよりもTwodee-2による計算結果の方が実験値に近いことを考慮すると、CFDモデルによる結果は床面上におけるSF<sub>6</sub>の広がりを幾分過大に評価していると推察される。

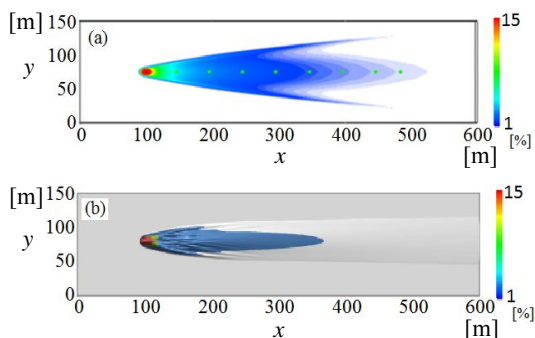


図2 風洞床面上のSF<sub>6</sub>の濃度分布(ケースA)。(a) FDS<sup>[6]</sup>；(b) Twodee-2。

##### (2) 傾斜床面の場合

次に、一定角度で床面が傾斜している場合についてTwodee-2及びFDSによる計算値と風洞実験の結果を比較した。DEGADISは濃度分布形状を仮定した1次元モデルであり、傾斜床面の影響を考慮できないため除外している。前節で示したようにSF<sub>6</sub>の流動を誘起する支配的要因が風洞内に生成された気流である場合、Twodee-2を構成するモデル方程式の移流項に対し、その離散化スキームを修正することである程度実験値を再現する結果を得ることが可能となった。しかし風洞内で気流が生じていない傾斜床面の場合、高密度ガスの流れの表層に不自然な脈動が見られた。ケースAとは異なり、この場合SF<sub>6</sub>と周囲空気の密度差によって流れが誘起されるため、周囲空気の流れによって高密度ガスが流動することを想定した空気連行モデルでは現象を適切に再現できないと考えられる。

Twodee-2に組み込まれている空気連行モデルは、周囲の気流場の影響を考慮した代表流速 $v$ に比例する形で次式のように表される[7, 8]。

$$w_i = \frac{a}{1 + bRi} v \quad (1)$$

ここで $Ri$ はRichardson数、 $a$ 及び $b$ は経験定数でそれぞれ0.4、0.125に設定されている[8]。一方、高密度ガスが自重によって流動し、その結果として周囲空気を巻き込む場合には、ブルーム噴流の理論解析[12]で成功を収めている空気連行モデルが適用できると考えられる。そこで、Taylorの仮定に基づいた次式で表されるモデル[12]を組み込むことにした。

$$w_i = Ev' \quad (2)$$

ここで、 $v'$  は高密度ガスの流速、 $E$  は空気連行係数で 0.02 とした。

ケース B 及び C における  $SF_6$  濃度の風下方向への変化をそれぞれ図 3(a)及び(b)に示す。Twodee-2 による計算結果は両ケースとも漏洩源に近い領域で実験値に対し過大に評価しているが、漏洩源の中心から 200 m 以上離れた領域では比較的良く実験値を再現しており、CFD モデルである FDS よりも予測性能が高いことを示している。

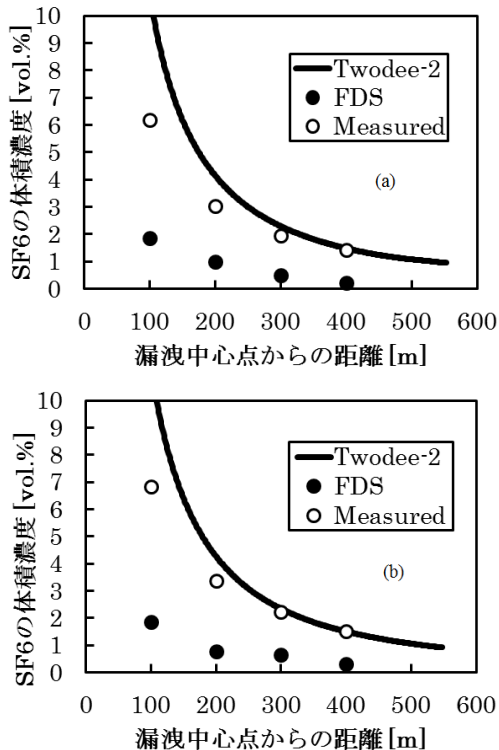


図3 体積濃度の風下方向への変化。(a) ケース B; (b) ケース C. FDS 及び実験値はそれぞれ文献[6], [11]より引用。

次に、床面上の濃度分布についてケース B 及びケース C の結果をそれぞれ図 4 及び図 5 に示す。各図の(a), (b)はそれぞれ FDS 及び Twodee-2 による結果で、流れ場が十分に発達した 700 秒後から 1000 秒までの濃度の時間平均値を示している。また、それぞれ風上側境界から 100 m 下流側の対称軸上に漏洩源を設定している。ケース B, C ではケース A の結果とは異なり、楕円形のような丸みを帯びた分布形状となっている。またケース A の場合とは逆に、Twodee-2 で得られた濃度は FDS の結果よりも広範囲に広がった分布となった。

### (3) まとめ

代表的な 3 つの高密度ガス大気拡散モデルを取り上げて風洞実験と比較したところ、浅層モデルを基礎とする Twodee-2 が最も実験値に近い結果を示した。

無風の条件下において高密度ガスと周囲空気の密度差により流れが誘起される場合に対して、ブルーム噴流の理論解析で成功を収めている空気連行モデルを Twodee-2 に組み込むことにより CFD モデルよりも実験値に近い結果が得られるようになった。

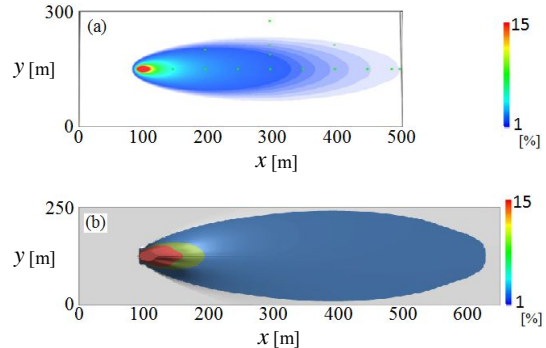


図4 風洞床面上の  $SF_6$  の濃度分布 (ケース B). (a) FDS<sup>[6]</sup>; (b) Twodee-2.

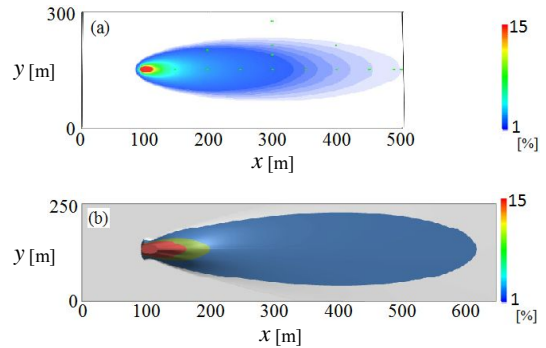


図5 風洞床面上の  $SF_6$  の濃度分布 (ケース C). (a) FDS<sup>[6]</sup>; (b) Twodee-2.

### 引用文献

- [1] D. L. Ermak, User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air Releases, UCRL-MA-105607, (1990).
- [2] T. O. Spicer and J. A. Havens, Field Test Validation of the DEGADIS Model, Journal of Hazardous Materials, 16 (1987), 231-245.
- [3] OpenFOAM, The open source CFD toolbox, OpenCFD Ltd (ESI Group), <http://www.openfoam.com/>.
- [4] K. McGrattan, S. Hostikka, and J. Floyd, Fire Dynamics Simulator (Version5) User's Guide, NIST Special Publication 1019-5, (2009).
- [5] A. Musser and K. McGrattan, Evaluation of a Fast Large-Eddy-Simulation Model for Indoor Airflows, Journal of Architectural Engineering, 8-1, (2002), 10.

- [6] A.J. Kohout, Evaluation of Fire Dynamics Simulator for Liquefied Natural Gas Vapor Dispersion Hazards, Master's Thesis for Graduate School of the University of Maryland, (2011), 130-162.
- [7] A. Folch, A. Costa, R.K.S. Hankin, TWODEE-2: A Shallow Layer Model for Dense Gas Dispersion on Complex Topography, Computers & Geosciences, 35-3, (2009), 667-674.
- [8] R.K.S. Hankin and R.E. Britter. TWODEE: The Health and Safety Laboratory's Shallow Layer Model for Heavy Gas Dispersion Part1. Mathematical Basis and Physical Assumptions, Journal of Hazardous Materials, A66, (1999), 211-226.
- [9] S.T. Zalesak, Fully Multidimensional Flux-Corrected Transport Algorithms for Fluids, Journal of Computational Physics, 31-3, (1979), 335-362.
- [10] 日本機械学会編:熱と流れのコンピュータアナリシス, コロナ社, 1989.
- [11] M. Nielson and S. Ott, A Collection of Data from Dense Gas Experiments, Riso-R-845 (EN), Riso National Laboratory, Denmark, (1995).
- [12] B.R. Morton, G. Taylor and J.S. Turner, Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 234, (1956), 1-23.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計6件)

木村 新太, 岡 秀行, 岡 泰資, 液化天然ガスの海上漏えいにおけるガス拡散予測に関する研究, 化学工学会第79年会, 2014.3.18, 岐阜大学(岐阜県).

木村 新太, 岡 秀行, 可燃性液体の洋上漏えいによる被害影響度評価に関する研究, 化学工学会第46回秋季大会, 2014.9.18, 九州大学伊都キャンパス(福岡県).

木村 新太, 岡 秀行, 岡 泰資, 液化天然ガスの海上流出に伴う大気拡散予測コードの精度比較, 安全工学シンポジウム, 2015.7.3, 日本学術会議(東京都).

木村 新太, 岡 秀行, 海上輸送事故に伴う可燃性液体の漏えい・火災影響評価に関する検討, 平成27年日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2015.11.16, 東京大学生産技術研究所(東京都).

日向 賢也, 岡 秀行, 岡 泰資, 浅層モデルに基づく高密度ガスの拡散予測モデルの改良とその評価, 安全工学シンポジウム, 2016.7.7, 日本学術会議(東京都).

岡 秀行, 日向 賢也, 岡 泰資, 浅層モデルに基づく高密度ガス大気拡散モデルの評価, 第86回(平成28年度)マリンエンジニアリング学術講演会, 2016.10.26, 姫路商工会議所(兵庫県).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡 秀行 (OKA, Hideyuki)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 その他部局等・研究員

研究者番号: 80399518

### (2) 研究分担者

岡 泰資 (OKA, Yasushi)

横浜国立大学 環境情報研究科(研究院)・准教授

研究者番号: 10240764