

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21670

研究課題名(和文)低温低密度ガスプルームの性状解析と数値モデリング

研究課題名(英文) Characteristics Analyses and Numerical Modeling of Cryogenic Low density gas plumes

研究代表者

木村 新太 (Kimura, Arata)

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：30582556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：現在、低炭素社会の実現に向けて、豪州で採掘される褐炭から水素を製造・液化し、船舶によって輸送、供給することが検討されている。海上輸送中に船舶による衝突事故が発生した場合、タンクから流出した大量の液化水素は海上でプール状に拡がり、気化した水素は風下方向へ移流拡散し可燃性ガス雲を形成する。そこで本研究では、液化水素運搬船の衝突事故時のフィジカルリスク評価のための新規ハザードモデルを開発することを目的として、1次元積分型プルームモデルにおける空気連行モデルの開発を行い、既往の実験および数値流体力学モデルとの比較・検証を行った。

研究成果の概要(英文)：To realize a low-carbon society, it has been considered that hydrogen produced from brown coal mined in Australia is liquefied and transported to Japan by liquefied hydrogen carrying vessel. When a collision accident occurred during maritime transport, a huge amount of liquefied hydrogen leaks onto the sea, and vaporized hydrogen forms highly flammable gas clouds. If ignited by some sources, it may inflict severe outcomes to vessel, crews and circumstances.

In this study, in order to develop a dispersion model of buoyant plumes, air entrainment model for the one-dimensional integral plume model was studied. An air entrainment phenomena by buoyancy force was modeled by non-Boussinesq formulation of latest energy consistent entrainment model [M. Reeuwijk and J. Craske, "Energy-consistent entrainment relations for jets and plumes", J. Fluid Mech., Vol. 782, pp. 333-355, 2015]. We compared and verified our model with Helium plume experiments and 3D Computational Fluid Dynamics model.

研究分野：化学安全工学

キーワード：空気連行現象 空気連行モデル 浮力プルーム

1. 研究開始当初の背景

現在、低炭素社会の実現に向けて、豪州で採掘される褐炭から水素を製造・液化し、船舶によって輸送、供給することが検討されている。陸上輸送と比べて桁違いに大量の液化水素を運搬するため、海上輸送中に船舶による衝突事故が発生した場合、タンクから流出した大量の液化水素は海上でプール状に拡がり、海面からの入熱によって沸騰プールを形成することが予想される。気化して間もない約 20K の極低温の水素ガスは空気と密度がほぼ等しいものの、周囲の常温空気との混合に伴う温度上昇より密度が低下する。その結果、沸騰プール上に浮力を駆動力とする浮遊性ブルームを形成する。この水素を主成分とする混合ガスブルームは、海風によって風下方向へと移流拡散するが、風下における拡散範囲、濃度分布の精度良い予測は、火災・爆発・漏洩に係るフィジカルリスク評価に欠かせない重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、液化水素運搬船の衝突事故時のフィジカルリスク評価のための新規ハザードモデルを開発することを目的として、1次元積分型ブルームモデルにおける空気連行モデルの開発を行い、既往の実験および数値流体力学モデルとの比較・検証を行う。

3. 研究の方法

評価に用いた 1次元積分型ブルームモデルとして、各種物理量がガウス分布となることを仮定した Schefer のモデル[1]と、トップハット分布となることを仮定した Webber のモデル[2]を用いた。ブルーム断面で、質量、運動量、浮力を積分して断面を通過する流束とした質量流束 Q 、運動量流束 M 、浮力流束 B 、大気密度 ρ_a および重力加速度 g を用いて、ブルーム主軸 z 方向の 1次元積分型の支配方程式は以下のように与えられる。

$$\frac{dQ}{dz} = 2\alpha\sqrt{\rho_a M}$$

$$\frac{dM}{dz} = \frac{QgB}{M}$$

$$\frac{dB}{dz} = 0$$

ここで、係数 α は空気連行係数と呼ばれる、ブルームが周囲の空気を巻き込む現象を表現するためのモデル係数である。運動量が卓越する噴流の場合、周囲流体を巻き込む速度 u_e は噴流の主軸の速度 u_z に比例すると仮定して、

$$u_e = \alpha u_z$$

の式によって表現する Morton のモデル[3]が広く用いられ、噴流の場合は 0.05 程度から、ブルームの場合は 0.08 程度の数値が使用されている。実際に、米国 Sandia 国立研究所が公開している水素噴流の拡散計算コード

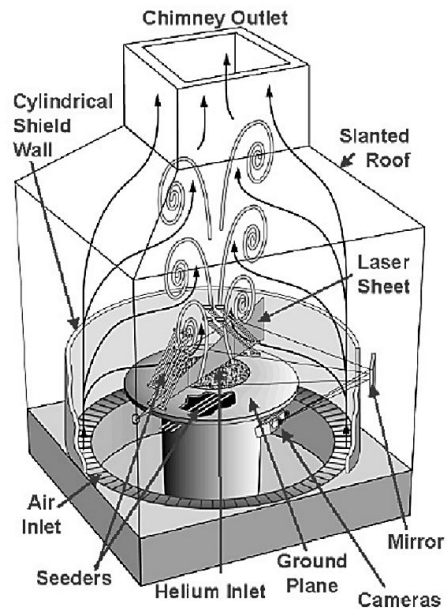


図1 FLAME 装置と PIV/PLIF 測定の概略図

HyRAM[4]には主軸の速度に空気連行速度が比例するモデルが実装されている。しかし、本研究において対象とする浮力が卓越する浮力ブルームでは、空気連行は運動量ではなく浮力によって生じるため、初期の運動量が小さい浮力ブルームに既存の空気連行モデルを適用することで空気連行を過少評価することが分かっている。

そこで、本研究では Reeuwijk らのエネルギー保存式から空気連行係数を導出する最新の空気連行モデル[5]について、その適用性を調査した。その際に、Reeuwijk のオリジナルのモデルでは、密度差が小さい場合に適用される Boussinesq 近似を用いているが、評価の対象は密度差が大きいことから Boussinesq 近似を行わずに空気連行係数モデルを定式化した、独自のモデルを用いた。

なお、本研究では上記モデルの適用性を検討するため、3次元数値流体力学コード Fire Dynamics Simulator[6]を用いて数値解析を行った結果を積分型モデルの解析に用いた。

次に、評価の対象として、当初、実験室スケールでのヘリウムブルームの速度場、濃度場計測を予定していたが、ヘリウム濃度の計測がセンサーの精度が不十分だったこと、粒子画像速度測定においてヘリウムブルームに巻き込まれる空気に対して乱すことなくトレーサー粒子をシーディングすることがうまくいかなかった。

そこで、米国 Sandia 国立研究所の the Fire Laboratory for Accreditation of Models and Experiments (FLAME) facility で実施された図1のような直径 1m のヘリウムブルーム発生装置を用いて実施された粒子画像速度測定 (PIV) およびレーザー誘起蛍光法 (LIF) によるヘリウム濃度測定結果[7]を、評価の対象にすることとした。

4. 研究成果

既存の1次元積分型プルームモデルである、Schefer モデル、Webber モデル、および FDS による数値結果と、FLAME による実験結果との比較を図2に示す。これより、既存の積分型モデルでは浮力の効果によってソース源に近い位置で速度が最大となっており、実験より早い段階で流れが発達している結果となった。これに対して、FDS では最大速度の絶対値には差異があるものの、概ね実験値に近い結果となった。

このことから、既存の1次元積分型モデルでは、プルームの発達過程を再現できていないことが分かった。

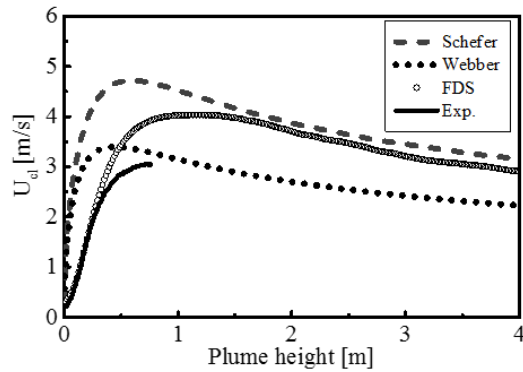


図2 主軸上における数値解析と実験との速度場の比較

1次元積分型モデルとFDSとの差異を調べるため、プルーム断面で物理量を積分した質量流束 Q および空気連行係数 α を求め、その比較を図3および4に示した。これより、既存の1次元積分型モデルではソース源近傍において空気連行を過小に評価しており、その結果、質量流量の増加も緩やかとなっていることが分かった。

ここで、エネルギー保存式から導出される最新の空気連行モデルに関して、本研究では Boussinesq 近似を施さずに数式を整理し、以下の式を導出した。

$$\alpha = \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\gamma} \right) \sqrt{\frac{(Q+B)}{Q}} Ri_p + \frac{Q}{2\sqrt{\rho_a M}} \frac{d \log(\gamma/\beta^2)}{dz} - \frac{\delta}{2\gamma} \sqrt{\frac{Q}{(Q+B)}}$$

β , γ および δ は乱流の影響を加味した係数であり、 Ri_p は浮力と慣性力の比を表すリチャードソン数と等価のプルームリチャードソン数と呼ばれるパラメータであり、以下の式で表される。

$$Ri_p = \frac{Q^2 g B}{M^{2.5}} \sqrt{\frac{Q}{\rho_a (Q+B)}}$$

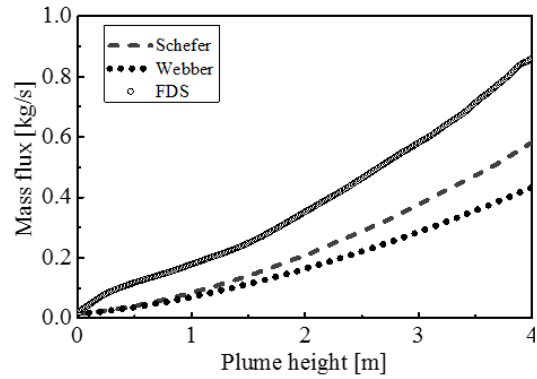


図3 積分モデルとFDSの質量流束の比較

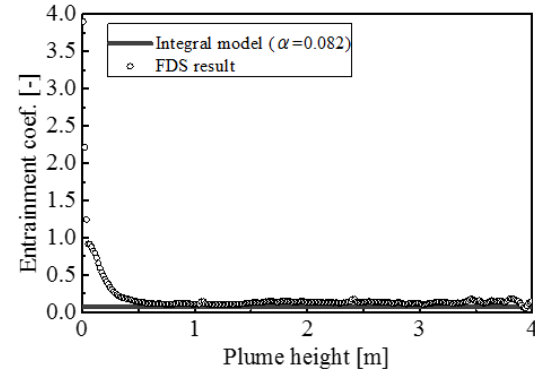


図4 積分モデル(0.082一定)とFDSの結果から算出した空気連行係数の比較

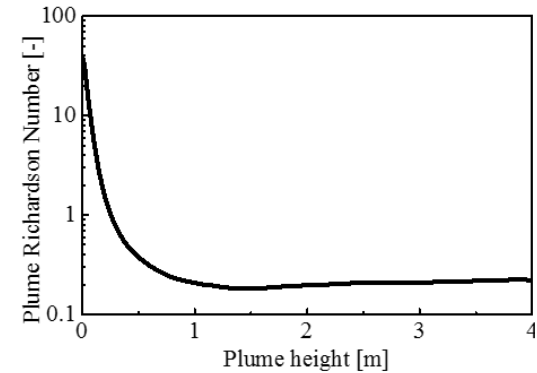


図5 プルーム主軸z方向に対するプルームリチャードソン数の変化

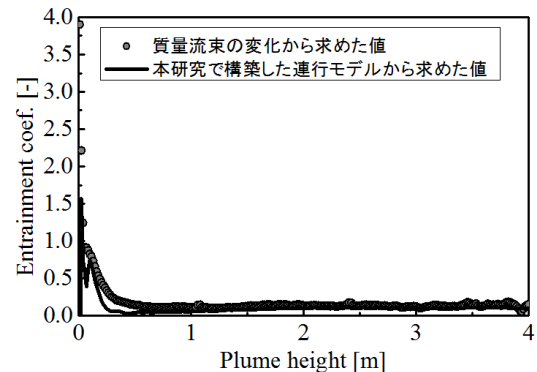


図6 質量流束の変化から求めた空気連行係数と本研究で構築した空気連行係数式から算出した係数の比較

新しい空気連行係数の式の意味として、空気連行係数に浮力の影響の項 (Ri_p) が含まれていることから、空気連行が浮力によっても起こることを示しており、本モデルを用いることで浮力の影響を空気連行係数へ反映させることが可能となることを期待できる。ここで、ブルームリチャードソン数の z 軸に対する変化を図 5 に示す。これより、ソース源近傍ではブルームリチャードソン数が大きく、浮力が卓越していることを示しており、発達とともに一定に漸近していく挙動を示している。

最後に、FDS によって得られた結果を用いて空気連行係数を求めた結果と、質量流束の変化から得られた値との比較を図 6 に示す。これより、質量流束の変化から求めた空気連行係数と概ね一致していることがわかった。参考までに、表 1 に各パラメータが一定となる十分に発達した位置での値をまとめた。

表 1 ブルームが十分に発達した位置での各種パラメータ

Parameter	Present work
Ri_p	0.22
α	0.151
β	1.00
δ	-0.42
γ	1.30

以上より、本研究によって構築した Boussinesq 近似を施さない空気連行モデルは浮力によって空気連行を起こす浮力ブルームに対して、その適用可能性を見出すことができた。現状では、 β 、 γ および δ のモデル係数に関する方程式が無く、積分モデル自身が閉じた方程式系になっていない。よって、今後はこれらの係数を同時に解けるよう追加する乱流による変動成分の項を求める式等の構築を行い、1次元積分モデルの方程式を完全に閉じるための研究と、モデルの検証を行っていく。

<引用文献>

W. G. Houf and R. W. Schefer, "Analytical and experimental investigation of small-scale unintended releases of hydrogen", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 1435-1444, 2008
 T. K. Fanelop and D. M. Webber, "On buoyant plumes rising from area sources in a calm environment", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 497, pp. 319-334, 2003

B. R. Morton, G. I. Taylor and J. S. Turner, "Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources.", Proc. R. Soc. Lond., A 234, pp. 1-23, 1956
 K. M. Groth, E. Hecht, J. T. Reynolds, M. L. Blaylock and E. Carrier, "HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Models), Version 1.1.1", Sandia National Laboratories, (2/28/2017); software available at <http://hyram.sandia.gov>
 M. Reeuwijk and J. Craske, "Energy-consistent entrainment relations for jets and plumes", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 782, pp. 333-355, 2015

FDS-SMV,

<https://pages.nist.gov/fds-smv/>

T. J. O'HERN, E. J. WECKMAN, A. L. GERHART, S. R. TIESZEN and R. W. SCHEFER, "Experimental study of a turbulent buoyant helium plume", Journal of Fluid Mechanics, Volume 544, pp. 143-171, 2005

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 4 件)

木村 新太, 岡 秀行, 岡 泰資, 低密度ガスブルームの発達過程における空気連行に関する数値解析, 安全工学シンポジウム 2016, 2016.7.8, 日本学術会議(東京都).

木村 新太, 岡 秀行, 岡 泰資, 低密度ガスブルームの発達過程に関する数値解析, 第 49 回安全工学研究発表会, 2016.12.1, 産業技術総合研究所(茨城県).

木村 新太, 岡 秀行, 岡 泰資, 低密度浮力ブルームの数理モデリングに関する検討, 安全工学シンポジウム 2017, 2017.7.5, 日本学術会議(東京都).

Arata Kimura, Hideyuki Oka, Yasushi Oka, Numerical study of the near-field entrainment phenomena of buoyant plumes, Asia Pacific Symposium on Safety 2017, 2017.11.30, 北九州国際会議場(福岡県).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

木村 新太 (KIMURA, Arata)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

研究者番号：30582556