

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03858

研究課題名（和文）高周波脈動流中の気液界面から飛散分裂する液滴群の挙動の統計評価とモデリング

研究課題名（英文）Statistical evaluation and modeling of droplet breakup from the gas-liquid interface in high-frequency pulsating flow

研究代表者

尾形 陽一（Ogata, YOICHI）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：10323792

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：直管内定常・脈動気流中の薄液膜から生じる飛散液滴発生条件を基に、曲管の液滴飛散・分裂計測を行った。曲り流入部で局所的な気相加速領域では大振幅の波が生成され、直管で飛散が生じない気相流速においても大サイズ・短い分裂時間での飛散が生じる一方、曲り部の気相が減速する剥離領域では飛散も生じず、直管での飛散分裂条件が曲管内で局所的に適用可能であることが分かった。脈動流下では気相流速が定常流の分裂発生流速より速い時間帯に分裂が生じるが、周波数増加に伴い液滴径・微小粒径割合が各々若干増加・減少が見られ、脈動周期時間と流体力学的分裂時間の大小、時間平均流速の飛散挙動への相関を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの直管での気液界面飛散分裂研究と併せて、本研究で得られた直管・曲管での気流・液膜における飛散分裂の発生機構、液膜分裂時間などの統計評価データ、および脈動流条件での気相速度振幅・時間平均流速・脈動周期・管形状が液滴群の飛散分裂挙動に及ぼす影響のメカニズムは、今後実機での吸排気系における高温気流中の蒸発の影響、近年研究が進展しているCFDへのデータ同化にも応用が期待出来る。

研究成果の概要（英文）：Experimental measurements and evaluations were made to construct numerical models for multiple droplets generated in airflow fields in straight and curved pipes. Large amplitude waves are generated in the local gas-phase acceleration region at the curved inlet, and breakup with large droplet size and short breakup time occurs even at gas velocities where no breakup occurs in straight pipes. However, no breakup occurred in the separation where the air decelerates in the bend, indicating that the splitting conditions in the straight pipe can be applied locally in the bend. Under pulsating flow, breakup occurs during the time when the air velocity is faster than the splitting onset velocity of the steady flow. It is found that the pulsation period and hydrodynamic breakup time, and gas velocity during pulsation acceleration and the flow velocity at the onset of splitting, and the time-averaged gas velocity affect droplet size distribution and splitting morphology.

研究分野：流体工学

キーワード：脈動流 気液界面 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

自動車エンジンシリンダ内外での気液界面からの液滴飛散は、燃料噴霧がピストン・排気バルブに衝突後生成された薄膜からの微小液滴群の再飛散、冷間始動時に吸排気マニホールドの様な複雑な曲がり管・分岐管および EGR 時の排気ガス中の水蒸気が低温雰囲気中で凝縮して水が溜まり、高周波・高速の脈動乱流場との相互作用等至るところで生じる。定常気流と液膜の相互作用においては図 1 の様な、気液界面から様々な形態の液滴飛散・分裂で生じる微小粒径～大粒径の液滴群が気流にエントレインされて追従し、飛散液滴群が管内の各種センサに衝突するとセンサの破損に繋がる等の問題が生じる可能性が考えられるが、実機吸排気系では気相流速が時間変動する脈動流であり、管路形状も曲がり部・分岐・管径が変わることから、従前の一様・定常気流中の単一液滴研究などでよく知られている分裂挙動特性との違いを把握することで、シミュレーション予測結果の妥当性・予実差評価の向上に繋がることが期待出来る。シミュレーション格子サイズ程度の大きさ・厚さの液滴・液膜および、格子サイズ未満の飛散・分裂液滴とマクロサイズの系を流れる高周波脈動乱流場の現象に対して、RANS・LES/DES の乱流モデルと整合して解く数値モデルを構築する為に、乱流場における液滴飛散・分裂発生条件の定量評価と、液滴群の時間・空間的統計評価が学術的・工学的に有用と考えられる。

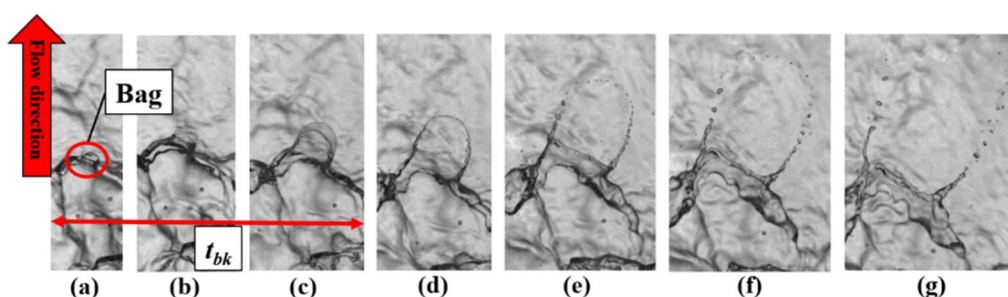


図 1 気液界面上で生じる Bag Breakup の時間変化①

2. 研究の目的

気液二相流の数値解析は数多くのモデリングが提案され、気液界面捕捉手法を用いた数値解析が行われてきたが、エンジンの様な複雑形状において実機条件に近い高速・高周波の脈動乱流下では、例えば排気管直径が数 cm 程度のオーダーに対し界面から生じる Breakup で更に分裂した後の液滴径は数十～数百 μm オーダーとは言え、気相流速が最大数十 m/s に達する排気管内脈動流下では飛散液滴数・分裂発生頻度も多くなることから、液滴群のエントレインメント量・運動量は、液膜自体の流量に対して無視できないものとなる。また、飛散液滴群の粒径自体も分裂形態に応じて幅広い粒径・ストークス数分布となるが、高周波変動・脈動気流下での液滴群の発生機構・液膜からの飛散分裂形態を整理することで、実機エンジンでの大規模解析とモデリングに向けた統計的な評価と現象メカニズム解明を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、直管・曲管内の定常気流およびエンジン運転条件を模擬した高周波脈動気流場の気液界面で生じる液滴飛散分裂の基礎的挙動特性を明らかにし、数値モデルの構築に向けた実験計測と評価を行うため、一様な定常気流を作る風洞、および孔の空いた円盤の回転周波数を変えて様々な周波数に設定可能な脈動気流を矩形断面の管内に流し、ポンプで供給された一定厚さの液相（液膜）から生じる飛散分裂を高速度カメラで撮影・画像解析を行う。

4. 研究成果

矩形断面直管内の定常・脈動気流中を流れる薄液膜から生じる飛散液滴の発生条件を基に、曲管での液滴飛散・分裂挙動計測を行い、曲り部の気相分布との相関性を調査した。矩形直管では分裂発生の際の閾値気相流速を超えると、液膜から空間分布に偏り無く管内で飛散が発生するが、曲り流入部の局所的に気相が加速される領域では大振幅の波が生成され、直管で飛散が生じない流入気相流速においても、単一液滴条件よりも大サイズ・短い分裂時間での飛散分裂が生じる一方、曲り部の気相剥離領域では気相流速が減速し飛散も生じず、気相流速に空間分布が有る場合も直管での飛散分裂条件が局所的に適用可能であることが分かった。直管では生じない壁面からの反射波、波同士の干渉の効果も現れ、曲り部角度が大きい管路では顕著になることから、曲

り角もしくは曲率半径の組込みが必要と考えられる。

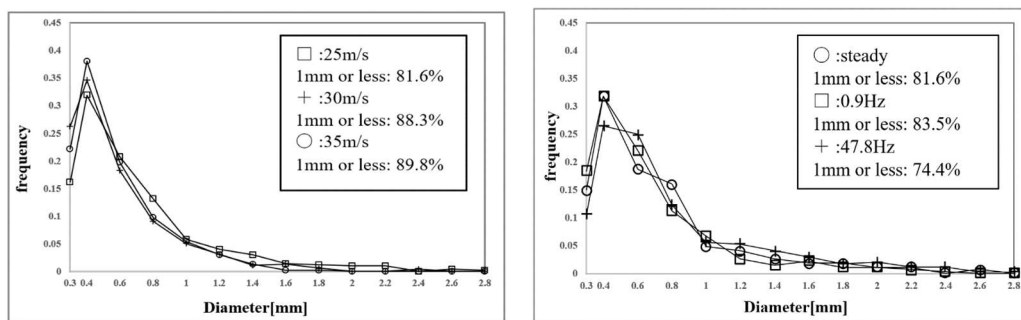


図 2 (左) 気相流速と液滴径分布, (右) 定常流と脈動流における液滴径分布②

一様定常気流を受ける単一液滴の Bag-breakup から生じる液滴は, bag の薄膜から微小粒径の液滴と太い rim から比較的大きな粒径の液滴が生じることが知られている③。図 2 は気流を受けた気液界面から図 1 の様に成長した bag の rim 部分から生じる液滴径分布比較であり,

(左)直管内の気相流速と液滴径分布, (右)定常気流および低周波数(0.9Hz)・高周波数(47.8Hz)の脈動気流での液滴径分布を示す。気相流速が遅い条件では気液界面上に 2 次元または 3 次元波のみが生じるが, 本条件では気相流速に関わらず液滴径が 0.4mm 付近にピーク値を持つ主に 1mm 以下の液滴群が発生する。気相流速の増加に伴い小粒径割合が増加, bag の生成から分裂・液滴生成までの分裂時間は短くなり, 単一液滴の流体力学的時間スケールに対する気相流速の依存性と整合する一方, 分裂が生じる臨界ウェーバー数は液膜の方が大きく, 分裂時間は曲り部で直管より短くなる傾向も得られた。また, 脈動気流周波数の増加に伴い液滴径が若干増加し, 1mm 以下の微小粒径の割合が若干減少することも分かる。脈動気流中では, 気相流速が定常流の分裂発生流速より速い時間帯に分裂が生じるが, 気相流速の周波数に伴い, bag 分裂に要する流体力学的分裂時間より脈動周期が短くなると bag の薄膜成長前に分裂が開始し, 時間平均流速が大きい脈動流では rim からの分裂で生じた大きい液滴径割合の増加に繋がると考えられる。

図 3 に曲り部を垂直に立てた管内に流入する気流と, 管底面に張られた初期厚さ 10mm の液膜との相互作用シミュレーションを示す④。液滴群の飛散は更に細かい格子サイズ・解適合格子などの応用が必要であり, 本研究期間後の現在も継続研究であるが, 実験で飛散挙動が生じる管路下流で気液界面の 3 次元波・気液界面上での 3 次元渦の発展がシミュレーションで把握出来たことから, 実現象でのバラつきまで入れた液膜存在時の飛散分裂を表す実験相関式, および研究開始当初の目標の一つである統計評価を入れたモデリングの明確化までには至らず, 課題が残されているが, 脈動周期時間と流体力学的分裂時間および気相の加速・最大流速と定常気流で分裂発生が生じる閾値流速との大小関係と, 粒径分布・分裂形態の相関データを整理して実用的な研究開発への応用に繋げる。

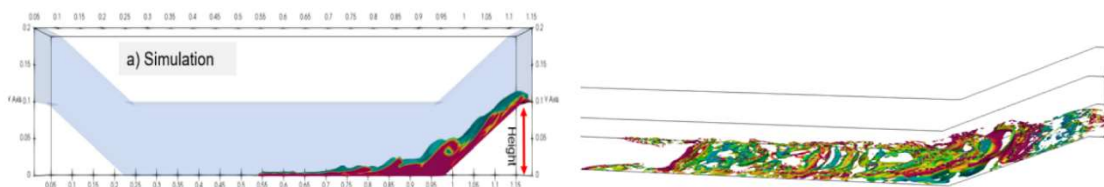


図 3 空気流動で生じる曲管内の液膜飛散分裂挙動。(左)気液界面, (右)気液界面上の渦度④

本研究で用いた様な曲管の曲り部では, 層流の Dean 渦に代表される二次流れの発生がよく知られているが, レイノルズ数の大きい脈動乱流場でも時間平均流速場を POD (主成分分析), DMD (動的モード分解) を用いた解析で Dean 渦・Lyne 渦に類似した二次流れ構造⑤が見えてくる。LES と壁面近傍を十分細かい計算格子を用いた単相流の流動場は実験と整合することから⑥, 気液二相流解析において, 曲り部の曲率半径・曲りを繋ぐ管路の長さや管路直径比などの管路形状にも影響する気相流動構造下での気液界面飛散解析にも展開を進める。

<引用文献>

①丸岡, 川口, 西田, 尾形, 中島, 長野, 西川:「水平矩形管の曲がり気液界面の飛散・分裂に及ぼす影響」, 日本機械学会 第 100 期流体力学部門講演会(2022)

②丸岡, 謝, 西田, 川口, 長野, 幸徳, 中島, 尾形:「矩形管内の定常・脈動気流を受ける液膜飛散分裂挙動の研究」, 日本機械学会中国四国支部 第 60 期総会・講演会(2022)

③Pilch, M. and Erdman, C. A. : Use of break-up time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration induced break-up of a liquid drop, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 13, No. 6, pp. 537-553(1987).

- ④N. Kumar Ashit, M. Kawaguchi, Y. nagano, A. Nakashima, Y. Ogata, : Investigation of two-phase flow dynamics in a vertical bend duct with different water levels and air velocities, 第 37 回数值流体シンポジウム(2023)
- ⑤Oki, J., Kuga, Y., Yamamoto, R., Nakamura, K., Yokohata, H., Nishida, K., and Ogata, Y. : Unsteady Secondary Motion of Pulsatile Turbulent Flow through a Double 90°-Bend Duct. Flow. Turbulence and Combustion, 104: 817-833(2020).
- ⑥Kato, Y., Guo, G., Kamigaki, M., Fujimoto, K., Kawaguchi, M., Nishida, K., Koutoku, M., Hongou, H., Yanagida, H., and Ogata, Y.: Experimental Investigation on Effects of Turbulence and Temperature Variation of Pulsating Flow on Heat Transfer in a Pipe, International Journal of Heat and Technology, 41, No. 4, pp. 815-826(2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kato Yuki, Guo Guanming, Kamigaki Masaya, Fujimoto Kenmei, Kawaguchi Mikimasa, Nishida Keiya, Koutoku Masanobu, Hongou Hitoshi, Yanagida Haruna, Ogata Yoichi	4. 巻 41
2. 論文標題 An Examination of Heat Transfer Dynamics in Pulsating Air Flow within Pipes: Implications for Automotive Exhaust Engines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Technology	6. 最初と最後の頁 815 ~ 826
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18280/ijht.410404	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Ashit Kumar NATH, Mikimasa KAWAGUCHI, Yoshie NAGANO, Akira NAKASHIMA, Yoichi OGATA
2. 発表標題 Investigation of two-phase flow dynamics in a vertical bend duct with different water levels and air velocities
3. 学会等名 第37回数値流体シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki MARUOKA, Mikimasa KAWAGUCHI, Nishida KEIYA, Yoichi OGATA, Yoshie NAGANO, Akira NAKASHIMA, Jun NISHIKAWA
2. 発表標題 水平矩形管の曲がり気液界面の飛散・分裂に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会第 100 期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丸岡 朋貴, 謝哲也, 西田 恵哉, 川口 幹祐, 長野 祥江, 幸徳 正信, 中島聖, 尾形 陽一
2. 発表標題 矩形管内の定常・脈動気流を受ける液膜飛散分裂挙動の研究
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第60期総会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	西田 恵哉 (NISHIDA Keiya) (90156076)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・名誉教授 (15401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------