

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22391

研究課題名（和文）気液二相デトネーションの伝播機構の解明：特性長による評価と伝播特性の体系的整理

研究課題名（英文）Elucidation of propagation mechanism for gas droplet two phase detonation: estimation based on characteristic lengths and systematic organization of propagation characteristics

研究代表者

渡部 広吾輝（Watanabe, Hiroaki）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：20881238

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：液滴の挙動を精度良く再現できるEulerian-Lagrangian手法に基づく二次元数値解析によって、初期液滴直径分布を有する水液滴群を含む気液二相デトネーションにおける伝播特性と液滴挙動を解析した。初期液滴直径に依らず液滴分裂の主要因は横波とジェットであり、初期液滴直径によってその貢献度は変化する事を明らかにした。また、分裂終了後の液滴直径が初期液滴直径により同一にならない事を示し、先頭波面と分裂終了時の動圧の平均値を用いる事で分裂時間及び分裂終了後の液滴直径の予測精度を向上させた。さらに、気相と液滴の特性長の比較より本条件では気相デトネーションと類似した伝播特性を有する事を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、液滴を含むデトネーションにおいて液滴の分裂が生じる物理機構の理解をより深化させた。そして、液滴の分裂時間や分裂後の液滴直径の予測精度を向上させる本研究の手法は、水液滴を用いたデトネーションの消炎及び被害低減手法の最適化に役立つと考えられる。また、本条件において液滴を含むデトネーションは気相デトネーションと類似した伝播特性を示す事を把握した事は、水液滴を用いたデトネーションの消炎及び被害低減手法に対するモデル化の糸口となる。さらに、本研究で得た知見はデトネーションを用いた高熱効率次世代燃焼器の実用化に向けた課題である液体燃料の使用の解決する事に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Two-dimensional numerical simulations based on Eulerian-Lagrangian method which can produce the behavior of droplets are conducted on gaseous detonation with water droplets with initial diameter distribution to analyze the behavior of detonation propagation and droplets. The main factors to cause the droplet breakup are the transverse wave and the jets regardless of the initial droplet diameter, and the contribution of two factors is affected by the initial droplet diameter. Also, the droplet diameter after the breakup is not uniform depending on the initial droplet diameter, and the accuracy of the prediction of the breakup time and the droplet diameter after the breakup can be enhanced using the average dynamic pressure between the front and the position where the breakup ends. Furthermore, the gaseous detonation with water sprays shows the similar structure to that without water spray from the comparison of characteristic lengths for the gas and droplets in the present conditions.

研究分野：反応性熱流体力学

キーワード：デトネーション 気液二相デトネーション 液滴分裂 伝播特性 特性長

1. 研究開始当初の背景

デトネーションとは予混合気中を衝撃波を伴い超音速で伝播する燃焼波である。デトネーションでは先行衝撃波により未燃混合気が断熱圧縮され化学反応が開始し、ラジカル種が多く生成される反応誘導後に発熱反応が開始する。その後、発熱反応による加熱によって流れは加速され衝撃波静止座標系において音速線に到達し、その状態は未燃混合気と比較して圧力は13-55倍、温度は8-21倍程度になる。そのデトネーションの性質により鉱山や発電所などで意図せずデトネーションが発生した場合には高い過圧により人や建物に甚大な被害を与える。そのため、デトネーションの開始や抑制に関する知見が安全工学的観点から求められている。デトネーションを消炎または低減する手法の1つとして水液滴を用いる方法(Allason et al., *J. Loss Prev. Proc. Ind.* 61 (2019) 66-81)があり、デトネーションを効率的に消炎させるための水液滴の条件を明らかにする事を主眼において様々な研究がなされている。

Thomas et al.(Thomas et al., *Combust. Sci. Tech.*, 71 (1990) 233-245)はN₂またはAr希釈された様々な気体種の量論混合気を用いて水液滴群によるデトネーションの消炎に関して実験を行った。500 μm から 1100 μm の範囲で直径分布を有する大きい水液滴群を用いた場合にはデトネーションは消炎せずインパルスが減少するのみであった事に対して、150 μm から 300 μm の範囲で直径分布を有する細かい水液滴群を用いた場合にはデトネーションが消炎した事を報告している。一方で、Niedzielsk et al.(Niedzielsk et al., *J. Loss Prev. Proc. Ind.*, 50 (2017), 229-236)の実験では直径 215 μm の細かい水液滴群ではデトネーションは消炎せず、直径 500 μm の大きい水液滴群を用いた場合にデトネーションが消炎した。上記のように先行研究では異なる傾向の結論が出ており、デトネーションの消炎に必要な水液滴群の条件は未だ十分に解明されていない。そこで、Watanabe et al.(Watanabe et al., *J. Fluid Mech.* 887 (2020) A4)は二次元数値解析によって水液滴を含む混合気中を伝播する気相デトネーションにおける平均構造を調査し、彼らの計算条件では気相と液滴の特性長さの比較から水液滴を含む混合気中を伝播する気相デトネーションは水液滴を含まない気相デトネーションと同様の平均構造を示し、水液滴の蒸発によって発生する水蒸気は混合気の反応性に影響を与えない事を示した。

Watanabe et al.の先行研究では結果の解析を容易にするために初期条件における液滴直径を一定として解析を行っていた。しかし、実際の液滴群では初期条件においても液滴直径分布を有する事が知られており、初期の液滴直径に多分散性を有する事で蒸発、分裂、速度平衡、温度平衡に幅広い時間スケールを含む。先行研究では、初期の液滴直径に多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーション中において多分散性を有する水液滴群がどのように挙動するか十分に解明されていない。また、初期の液滴直径に多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションの平均構造に関する知見はない。

2. 研究の目的

本研究では、二次元数値解析により初期の液滴直径に多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションにおける平均構造と多分散性を有する水液滴群の挙動を明らかにする事を目的とする。具体的には下記の3点に注目して解析を実施した。

(1) 多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションの平均構造

Watanabe et al.の先行研究で提案した気相デトネーションの特性長(反応誘導距離、反応距離、流体力学的厚さ)と液滴の特性長(分裂終了長さ、蒸発完了長さ、温度平衡長さ、速度平衡長さ)の比較より、多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションの平均構造に関して考察する。

(2) 多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションにおける水液滴の分裂挙動

どのような物理機構で多分散性を有する水液滴の分裂が気相デトネーション後方で生じているか未解明である。Watanabe et al.の先行研究より液滴直径が15.9 μm の場合にはジェットと横波により分裂が生じる事が判明しているため、二次元数値解析結果を基に同様に瞬時場の流れ場を解析する事で分裂が生じる物理機構を特定する。

(3) 多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションの液滴分裂時間及び分裂終了後の液滴直径の予測

先頭衝撃波通過後の状態量を基に衝撃波誘起流れにおける経験式から分裂時間及び分裂終了後の液滴直径を予測すると過小評価する。本研究により得た気相デトネーション後方における分裂の物理機構を基に、分裂時間と分裂後の液滴直径に関する精度が良い予測手法を新たに提案する。

3. 研究の方法

本研究では水液滴を含む混合気中を伝播する気相デトネーションを対象に液滴の挙動を精度良く再現できる Eulerian-Lagrangian 手法に基づく二次元数値解析を実施した。用いた数値モ

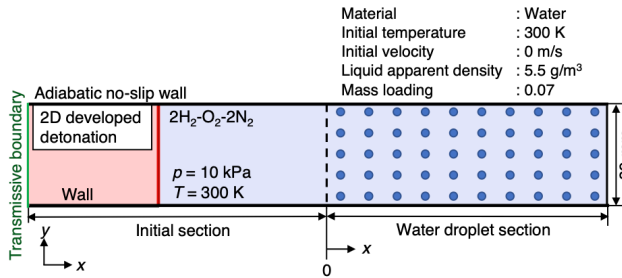


図1 計算対象と計算条件

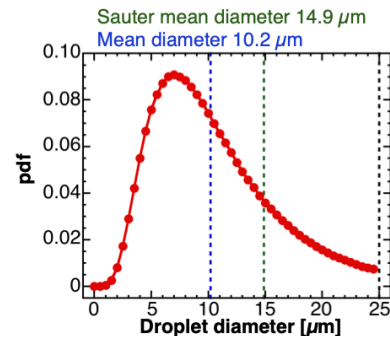


図2 液滴直径分布

デルと計算手法は参考文献(Watanabe, PhD thesis,

Keio University, 2020)に詳細

に記されている。気相は圧縮性、粘性を有し、化学反応する熱的完全気体を仮定した。気相の支配方程式には体積平均化された二次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式と化学種保存方程式を用い、理想気体の状態方程式によって系を閉じた。対流項と拡散項の離散化には Modified WENO-Z によって五次精度化された AUSMPW+ と二次精度中心差分をそれぞれ用いた。時間積分には、三次精度の TVD Runge-Kutta 法を適用した。H₂-O₂系の化学反応の模擬には Hong et al.によって提案された 9 化学種 (H₂, O₂, H, O, OH, H₂O, HO₂, H₂O₂, N₂) 20 素反応を考慮する詳細化学反応モデルを使用した。化学反応による生成項は Multi-timescale 法によって時間積分を行った。輸送係数に関しては、粘性係数及び熱伝導係数は温度依存性を、拡散係数は温度と圧力依存性を考慮した。

液滴に関しては、粒子追跡法によって解析を実施する事で液滴の挙動を再現した。液滴に対する支配方程式は、ニュートンの運動方程式、エネルギー保存式、質量保存式と数密度保存式である。液滴の蒸発は Abramson et al のモデルを、分裂は Chauvin et al.(Chauvin et al., Shock Waves, 26 (2016) 403-415)のモデルを用いて評価した。

計算対象と初期条件を図 1 に示す。二次元直管内において十分に発達した気相 detonation が水液滴群を含む混合気中を伝播する系を対象とする。対象とする混合器は量論窒素 40% 希釈水素酸素混合気(2H₂-O₂-2N₂)であり、初期圧力および温度はそれぞれ 0.01 MPa, 300 K とした。最小格子幅は 50 μm であり、格子解像度は半反応距離(*hrl*)におよそ 34 点である。管幅は 39 mm であり、管幅あたりのセル数は 1.5 となる。静止した水液滴群は対象混合気中に均一に配置され、そのかさ密度は 0.0055 kg/m³ である。本研究では、水液滴の直径分布は Jarsalé et al.(Jarsalé et al., Shock Waves, 26 (2016) 561-572)の実験を参照し、数値計算モデルの制約により 25 μm 以上の液滴を除いた直径分布を初期条件として図 2 のように与えている。初期条件における平均直径は 10.2 μm, ザウター平均直径は 14.9 μm である。Recycling block technique を用いて水液滴群を含む混合気中において気相 detonation を 2 m 以上伝播させて統計データを取得した。

4. 研究成果

前節の研究の目的に対応する研究成果について順番に示す。

(1) 多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相 detonation の平均構造

得られた計算結果に対して瞬時場の二次元流れ場に Favre 平均処理を施して特性長を算出した。取得した気相の Favre 平均一次元分布を図 3 に示す。流体力学的厚さは水液滴との干渉による伝播速度低下と蒸発による吸熱により水液滴を含む気相 detonation では 33.0 *hrl* から

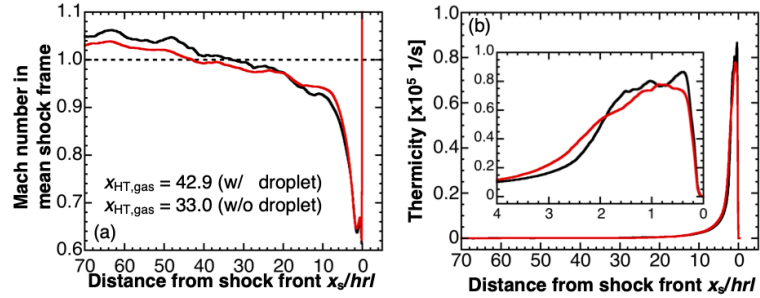


図3 気相の一次元 Favre 平均分布

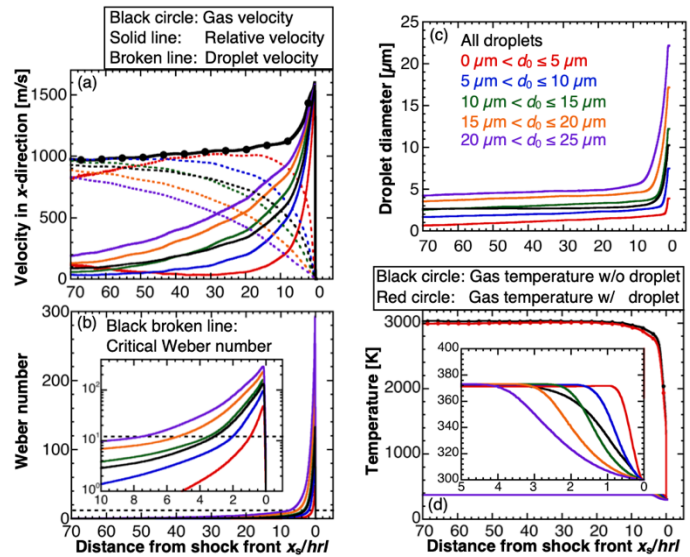


図4 水液滴の一次元 Favre 平均分布

42.9 *hrl*に増加した。また、水液滴の存在によって、thermicityが最大値となる位置は衝撃波後方へと移動したが、thermicityの分布の幅は大きく変化していない。その結果、反応誘導距離は0.4 *hrl*から0.7 *hrl*に増加したが、反応距離は13.6 *hrl*から13.7 *hrl*と大きく変化していない。

水液滴に関して特性長を算出するため、水液滴の Favre 平均一次元分布を図4に示す。初期液滴直径の影響を調査するため、初期液滴直径を5 μm ごとに水液滴をグループ化して初期液滴直径が0-5 μm , 5-10 μm , 10-15 μm , 15-20 μm , 20-25 μm の水液滴の分布も図4に合わせて示している。図4(a)より気相の速度は先頭衝撃波の通過によって速度が誘起された後に既燃ガスの膨張によって実験室座標系における気相速度は低下する。水液滴は気相デトネーションの先頭衝撃波通過後、運動量輸送により水液滴の速度が誘起され気相の速度へと近づいている。初期液滴直径の減少によって粒子緩和時間が短くなり、初期液滴直径が小さい水液滴ほど早く気相の速度へと近づく。液滴直径は波面通過後に液滴の分裂によって急激に減少し、その後は液滴の蒸発によって緩やかに減少している(図4(c))。この傾向は初期液滴直径に依らず同じである。また、液滴直径は初期液滴直径が小さいほど小さくなった。図4(b)に示す Weber 数分布より、初期液滴直径が小さいほど Weber 数はより早く臨界 Weber 数以下に低下し、分裂は波面後方から短い領域で終了する。初期液滴直径が小さいほど液滴直径は小さく粒子緩和時間が短いため相対速度がより早く減少し、Weber 数は早期に減少する。液滴の温度に関しては、初期液滴直径が小さいほど熱容量の低下によって飽和温度に達する時間が短くなり、早期に蒸発を開始する。

$d_{\text{all},0-25}$: all droplets, $0 \mu\text{m} < d_0 \leq 25 \mu\text{m}$
 d_{0-5} : $0 \mu\text{m} < d_0 \leq 5 \mu\text{m}$
 d_{5-10} : $5 \mu\text{m} < d_0 \leq 10 \mu\text{m}$
 d_{10-15} : $10 \mu\text{m} < d_0 \leq 15 \mu\text{m}$
 d_{15-20} : $15 \mu\text{m} < d_0 \leq 20 \mu\text{m}$
 d_{20-25} : $20 \mu\text{m} < d_0 \leq 25 \mu\text{m}$

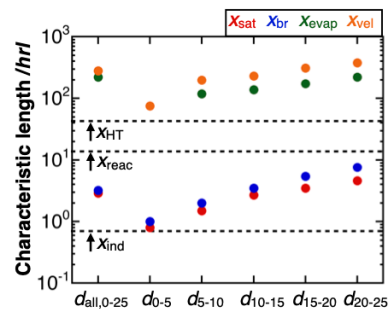


図5 特性長の比較

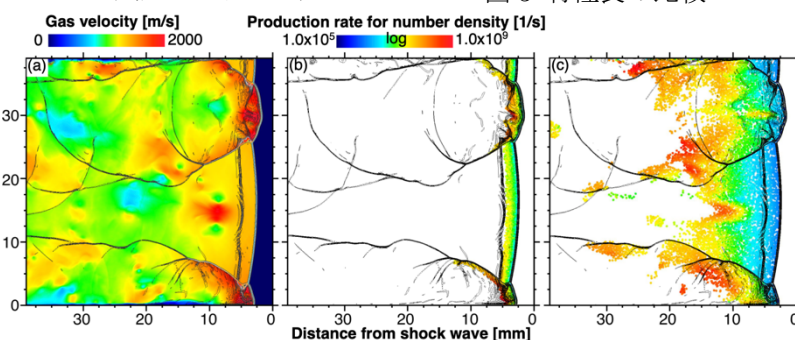


図6 気相速度(a)と数密度の生成率(b,c)

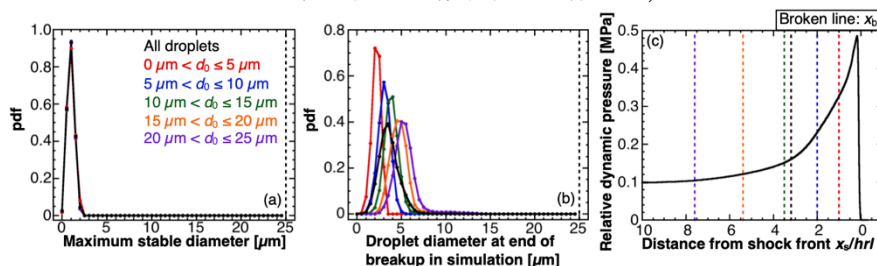


図7 液滴分裂に関する pdf と動圧分布
(a)最大安定直径の pdf, (b)分裂終了時の液滴直径の pdf,
(c)相対速度を用いた動圧の一次元 Favre 平均分布

図3と図4に示す Favre 平均一次元分布より取得した気相と水液滴の特性長の比較を図5に示す。本計算条件では分裂終了の特性長は反応誘導距離よりも長いため、蒸発によって生じる水蒸気は気相の反応性に影響を与えないと考えられる。加えて、水液滴の量は少ないため、図3に見られたように水液滴を含む気相デトネーションは水液滴を含まない気相デトネーションの平均構造と類似している。水液滴の特性長は初期液滴直径に依存し、初期液滴直径が大きくなるほど水液滴の特性長は増加した。

(2) 多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションにおける水液滴の分裂挙動

水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーション後方での水液滴の分裂挙動を示すため、図6に瞬時の二次元流れ場の拡大図を示す。気相デトネーションにおいて気相速度は横波とジェットで高くなっており、これらの箇所では気相と水液滴の相対速度が最大となる。相対速度が高くなる事で水液滴の全分裂時間が短くなり水液滴の分裂が活発に生じている。初期の液滴直径に多分散性を有する水液滴群を含む混合器中を伝播する気相デトネーション中においても初期液滴直径に依らず数密度生成率の分布から水液滴の分裂は横波とジェットによって主に生じている事が確認された。

分裂終了後の液滴直径分布を示すため、図7に最大安定直径の pdf, 計算結果から取得した分裂終了後の液滴直径の pdf, 相対速度を用いた動圧の分布を示す。最大安定直径は初期液滴直径に依らず同じであり、その分布はセル不安定性から生じる気相物理量の変動によって生じている(図7(a))。一方で、計算における分裂終了後の液滴直径分布は初期液滴直径に依存し、初期液滴直径が小さいほど分裂終了後の液滴直径は小さくその分布の幅も小さい(図7(b))。デトネーシ

ョンでは波面後方で動圧は減少し、相対速度を用いた動圧は運動量輸送による相対速度の減少によって、初期液滴直径が小さいほど低くなる。先頭衝撃波通過から液滴の分裂を終了するまでの距離は図 4(b)に示す Weber 数分布より初期液滴直径が大きいほど長くなり、図 7(c)より先頭衝撃波通過から液滴の分裂が終了するまでの動圧の変化は大きい。動圧の変化の大きさによって、初期液滴直径が小さいほど分裂終了後の液滴直径は最大安定直径に近づいている。また、液滴の分裂時間は液滴直径に比例するため、セル不安定性から生じる気相物理量の変動による分裂時間の変化が大きくなり、初期液滴直径が大きいほど分裂終了後の液滴直径の分布は幅広くなったと考えられる。

(3) 多分散性を有する水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションの液滴分裂時間及び分裂終了後の液滴直径の予測

図 7(c)により確認された通り先頭波面通過後に相対速度を用いた動圧は減少する。そのため、先頭波面通過直後の状態に基づき衝撃波誘起流れの液滴分裂の経験式から液滴の分裂時間及び分裂後の液滴直径の予測精度は低い。そこで、本研究では Dabora et al.(Dabora et al., Proc. Combust. Inst., 12 (1969) 19-26)が示唆しているように先頭波面通過直後の状態と液滴の分裂終了地点における相対速度を用いた動圧の平均値を用いて、衝撃波誘起流れの液滴分裂の経験式から液滴の分裂時間及び分裂後の液滴直径の予測を実施した。図 8 に提案手法による液滴分裂時間と分裂終了後の液滴直径の予測値と計算結果の比較を示す。液滴分裂時間に関して予測値と計算値の比の平均値が従来手法では 2.20 に対して提案手法で 1.05 と予測精度が向上した。また、分裂終了後の液滴直径についても予測値と計算値の比が従来手法では 4.14 に対して提案手法では 1.40 となり、本手法の優位性が確認された。

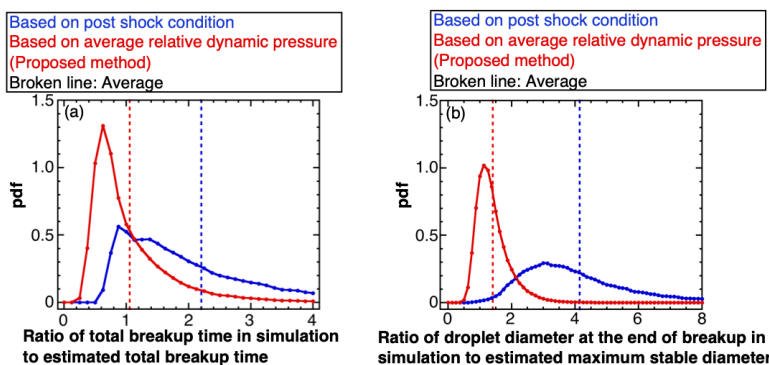


図 8 液滴分裂時間と分裂終了時の液滴直径に関する予測精度の比較

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 0件）

1. 著者名 Watanabe Hiroaki, Matsuo Akiko, Chinnayya Ashwin, Matsuoka Ken, Kawasaki Akira, Kasahara Jiro	4. 巻 38
2. 論文標題 Numerical analysis on behavior of dilute water droplets in detonation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3709 ~ 3716
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.proci.2020.07.141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Hiroaki Watanabe, Akiko Matsuo, Ashwin Chinnayya, Ken Matsuoka, Akira Kawasaki, Jiro Kasahara
2. 発表標題 Numerical analysis on behavior of dilute water droplets in detonation
3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Watanabe, Akiko Matsuo, Ashwin Chinnayya, Ken Matsuoka, Akira Kawasaki, Jiro Kasahara
2. 発表標題 Mean structure and droplet behavior in gaseous detonation with dilute water spray
3. 学会等名 Young researchers' forum on detonation: from fundamentals to application（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部広吾輝, 松尾亜紀子, Ashwin Chinnayya, 松岡健, 川崎央, 笠原次郎
2. 発表標題 初期直径分布を有する希薄な水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションに関する数値解析
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡部広吾輝, 松尾亜紀子, Ashwin Chinnayya, 松岡健, 川崎央, 笠原次郎
2. 発表標題 初期直径分布を有する希薄な水液滴群を含む気相デトネーションの平均構造と液滴挙動に関する数値解析
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡部広吾輝, 伊藤志朗, 伊東山登, 川崎央, 松岡健, 松山行一, 笠原次郎, 松尾亜紀子, 船木一幸, 竹内伸介, 岩崎祥大, 和田明哲, 増田純一, 荒川聡, 羽生宏人, 山田和彦
2. 発表標題 S-520-31号機によるデトネーション実験の進捗状況：飛行経路および姿勢予測
3. 学会等名 令和2年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Watanabe, Koichi Matsuyama, Ken Matsuoka, Akira Kawasaki, Noboru Itouyama, Keisuke Goto, Kazuki Ishihara, Valentin Buyakofu, Tomoyuki Noda, Shiro Ito, Jiro Kasahara et al.
2. 発表標題 Flight Demonstration of Detonation Engine System Using Sounding Rocket S-520-31: Flight Path and Attitude
3. 学会等名 AIAA Scitech Forum and Exposition 2022 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Watanabe, Koichi Matsuyama, Ken Matsuoka, Akira Kawasaki, Noboru Itouyama, Keisuke Goto, Kazuki Ishihara, Valentin Buyakofu, Tomoyuki Noda, Shiro Ito, Jiro Kasahara et al.
2. 発表標題 In-Space Flight Demonstration Results of a Detonation Engine System on Sounding Rocket S-520-31: Flight Path and Attitude
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Watanabe, Akiko Matsuo, Ashwin Chinnayya, Ken Matsuoka, Akira Kawasaki, Jiro Kasahara
2. 発表標題 Numerical analysis on the breakup of dilute water spray in gaseous detonation
3. 学会等名 28th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Watanabe, Akiko Matsuo, Ashwin Chinnayya, Noboru Itouyama, Akira Kawasaki, Ken Matsuoka, Jiro Kasahara
2. 発表標題 The comparison of Favre average procedure for the gaseous detonation from Eulerian and Lagrangian point of view
3. 学会等名 28th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡部広吾輝, 松尾亜紀子, Ashwin Chinnayya, 伊東山登, 川崎央, 松岡健, 笠原次郎
2. 発表標題 粒子追跡法を用いた気相デトネーションの平均構造に関する数値解析
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

申請者 個人業績 https://researchmap.jp/hiroaki.watanabe

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------