

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：54601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04182

研究課題名（和文）衝撃波閉じ込め領域の制御に向けた壁面表面設計

研究課題名（英文）Wall surface design for shock wave confinement region control

研究代表者

福岡 寛（Fukuoka, Hiroshi）

奈良工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：40582648

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、工業、新エネルギー、材料開発で重要な課題である、衝撃波の多重閉じ込め現象を制御する壁面表面形状の設計指針の獲得と、その実験的実証を行った。閉じ込めに必要な物理条件を明らかにするために、衝撃波の物理条件を変えられると考えられる凹型形状の反射板を用いた測定実験を行った結果、実験的に衝撃波の収束位置と噴流の位置関係が明らかになった。これは、様々な強さの衝撃波を噴流に衝突させることができることを示しており、今後、形状設計する上で重要になる。さらに、衝撃波の噴流による反射は、定性的には音響インピーダンスで整理できる可能性を見出すことが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで衝撃波が壁面で反射する現象についての基礎的研究は行われてきたが、噴流との反射に関してはほとんど存在なかった。本研究では、噴流と様々な衝撃波を衝突させることで、反射の過程を明らかにした。その結果、噴流および衝撃波が衝突する直前の物理的状態が、衝撃波の反射に大きく影響し、衝撃波および噴流の制御が閉じ込めの指針になることを示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we obtained design guidelines for the wall surface shape that controls the multiple confinement phenomenon of shock waves, a crucial issue in industry, new energy, and material development. We experimentally demonstrated the design guidelines. In order to clarify the physical conditions necessary for confinement, measurement experiments using a concave-shaped reflector, which is thought to be able to change the physical conditions of the shock wave, revealed experimentally the positional relationship between the convergence position of the shock wave and the jet stream. This indicates that shock waves of various strengths can impinge on the jet, which will be important in the design of future geometries. Furthermore, we found the possibility that the reflection of the shock wave by the jet can be qualitatively organized in terms of acoustic impedance.

研究分野：流体力学

キーワード：圧縮性流体 超音速噴流 衝撃波 反射衝撃波 収束現象 閉じ込め 可視化 3D数値解析

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

衝撃波の制御は、工業、新エネルギー、材料開発で重要な課題である。筆者らは、衝撃波を多重に閉じ込めた領域が高温・高圧になることを見だし、衝撃波を利用すれば新材料を創出の反応場と活用できることを指摘している。閉じ込め過程の解明には衝撃波の進展過程への理解が重要である。これまで衝撃波が壁面で反射する現象についての基礎的研究は行われてきたが、噴流との反射に関して理論のみで実験的に調べられている例はほとんどなかった。筆者らもこれまで噴流と衝撃波の衝突現象については確認していたが、反射が起こるために必要な物理的な条件までは調べられていない状態であった。

2. 研究の目的

上述の背景を受けて、本研究では、衝撃波管から噴出する超音速噴流誘起衝撃波の壁面-噴流先頭間反射による多重閉じ込め現象の物理機構を明らかにする。明らかになった物理機構に基づいて、閉じ込め現象の必要条件を見出し、閉じ込めを制御する壁面表面の形状を設計し、実証することを目的とする。具体的には以下の3つを目的とする。

(1) 実験による衝撃波閉じ込め現象の時間分解観測

様々な壁面形状をもつ真鍮製の衝突平板を作製し、衝撃波管から噴出する超音速噴流によって衝撃波を発生させ、壁面と噴流の間で反射させることで閉じ込め領域を誘起する。閉じ込め現象の発生と消失過程を、実験的に観測する。閉じ込め現象の発生から消失までの過程を観測し、「閉じ込め現象の空間分布・寿命」と「壁面形状・衝撃波の位置・噴流の速度および密度」の関係を明らかにすることを目的とする。

(2) シミュレーションによる衝撃波の閉じ込め現象の必要条件の解明

実験による衝突平板の壁面形状と衝撃波および噴流の速度・密度の情報を用いて、超音速噴流および衝撃波の伝播、反射過程を任意に変化させた時のシミュレーションを実施する。観測とシミュレーションの比較から、閉じ込めに必要な物理条件を明らかにすることを目的とする。

(3) 閉じ込めの検証

実験およびシミュレーションにより得られた結果より、衝撃波の噴流による反射が閉じ込め現象に与える影響を調べるために、反射板に平板を用いた実験およびシミュレーションを実施し、閉じ込めの検証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、噴流先頭における噴流誘起衝撃波の反射現象を確認するため、実験および数値解析を行う。図1に実験装置の概略図を示す。実験装置は、開放型の小容積衝撃波管、反射板、圧力センサおよび可視化システムから構成されている。衝撃波管は、低圧室および高圧室が隔膜によって隔てられている。高圧室に高圧ガスを充てんし、隔膜を破膜することで、超音速のガスが低圧室へ移動する。この時に噴流および衝撃波は発生する。低圧室の端が解放されていることにより、衝撃波および噴流(高圧ガス)は大気中に放出される。高圧ガスには空気を使用し、隔膜にはPETフィルムを用いる。破膜は再現性を保つため、撃針を用いる。反射板はアルミニウム凹板、凸板および平板を使用した。衝撃波が反射することによる壁面静圧の上昇量を調査するため、反射板中央に圧力センサを取り付ける。噴流誘起衝撃波が反射板-噴流先頭において複数回反射していることを確認するため、流れ場の可視化にシュリーレン法を採用する。図2に計算領域および境界条件を示す。本計算では噴流誘起衝撃波と噴流の衝突を再現するため、圧縮性ナビエ-ストークス方程式に基づき数値解析を行う。使用する流体解析ソフトはANSYS Fluentである。計算領域はx軸を中心とした二次元軸対称モデルとする。

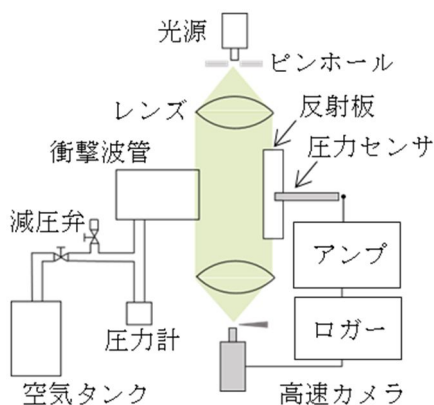


図1 実験装置概略図

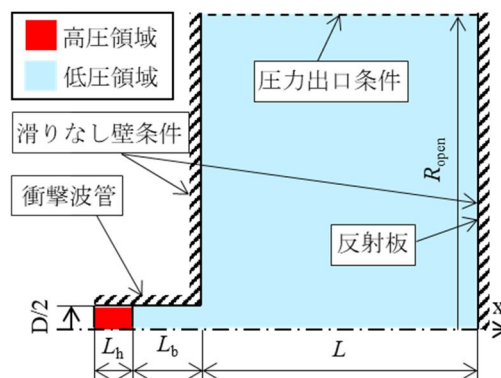


図2 計算領域および境界条件

4. 研究成果

(1) 実験による衝撃波閉じ込め現象の時間分解観測

閉じ込めに必要な物理条件を明らかにするために、衝撃波の物理条件を変えることができると思われる凹型形状の反射板を用いた測定システムを用いた実験を行った。その結果、収束に向かう衝撃波および収束後の広がる衝撃波が噴流に衝突した場合、反射板における壁面静圧に変化が現れることがわかった。これは壁面形状を変化させることで、衝撃波の特性を変えることができたことを示しており、閉じ込めの物理条件を詳細に調べる上で重要である。さらに詳細に条件を変えて実験を繰り返し、収束過程にある衝撃波と噴流の衝突について調べた結果、噴流と収束過程にある衝撃波を衝突するタイミングを変えることに成功した。このことは、様々な強さの衝撃波を噴流に衝突できることを意味しており、反射の物理条件を調べる上で極めて重要になる。また、形状を追加し、凹凸形状をパラメータとして実験を行い、形状の特性を調べた。これにより、実験的に衝撃波の収束位置と噴流の位置関係が明らかになった。これは、様々な強さの衝撃波を噴流に衝突させることができることを示しており、今後、数値計算と比較する上で重要になる。以上のように、形状をパラメータとして実験を行い、衝撃波の閉じ込め現象を実験的に解明するために必要な、収束衝撃波の収束過程を詳細に調べた。

(2) シミュレーションによる衝撃波の閉じ込め現象の必要条件の解明

シミュレーションは、実験的に得られた条件を用いて、3次元および2次元の解析を実施した。3次元解析においてパラメータには、これまでの実験と同様に反射壁面形状および衝撃波管の圧力比、反射板と衝撃波管の距離を採用した。2次元の解析においては、衝撃波の噴流による反射のメカニズムを詳細に調べるために行った。パラメータには、形状を固定し、衝撃波管噴口-平板間距離および、衝撃波管の圧力を変えて行った。その結果、衝撃波の噴流による反射は、定性的には音響インピーダンスで整理できる可能性を見出すことが出来た。これは、衝撃波の閉じ込めを制御するうえで極めて重要となるパラメータを特定できたことを意味しており、その価値は大きい。

(3) 閉じ込めの検証

実験およびシミュレーションにより得られた結果より、衝撃波の噴流による反射が閉じ込め現象に与える影響を調べるために、反射板に平板を用いた実験およびシミュレーションを行った。その結果、図3に示すように噴流により複数回の反射を確認し、その条件を明らかにした。また、同時に測定した壁面静圧より閉じ込め領域の形成による圧力上昇も確認することが出来た。

以上のように、壁面で反射した衝撃波および噴流の衝突過程を明らかにし、衝撃波の噴流による反射が閉じ込めに重要であることを示した。これらの結果から衝撃波閉じ込めモデルの指針を得た。本研究では、衝撃波の収束に注目し閉じ込め現象について研究を行ってきたが、衝撃波の拡散に注目することで、衝撃波を消滅および減衰への応用が可能である。したがって、本研究で得られた結果は、工業、新エネルギー、材料開発ならびに新素材などへ広く応用可能であると考えられる。

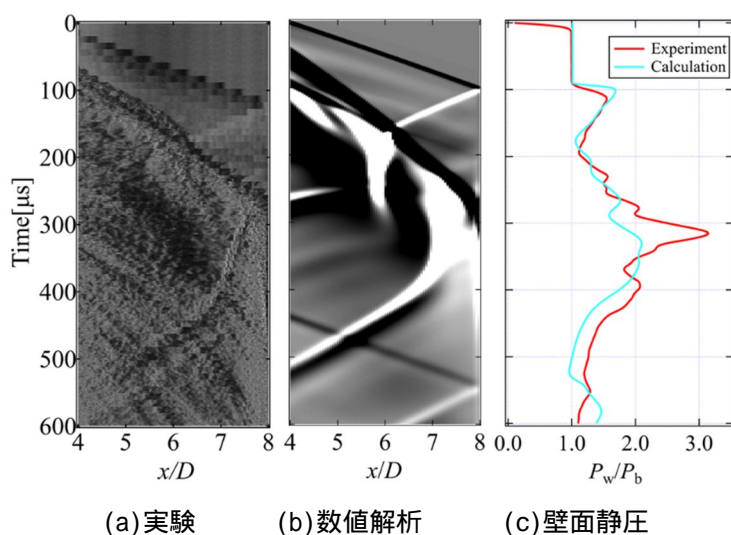


図3 $x-t$ 線図および壁面静圧の比較 ($P_h/P_b = 46.0$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Ryu Bomura, Hiroshi Fukuoka, Atsushi Suda, Nao Kuniyoshi, Minoru Yaga, Eri Ueno, Toshio Takiya, Naoaki Fukuda	4. 巻 3086
2. 論文標題 Effect of exit diameter of elliptical cell attached to small shock tube on shock wave-induced vortex ring and unsteady jet	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0206131	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 -

1. 著者名 Miyaku Koki, Fukuoka Hiroshi, Nakamura Shigeto, Yao Masanori, Hiro Kazuki	4. 巻 Vol. 886, Num. 012037
2. 論文標題 Improvement of Background Oriented Schlieren Method Focused on Amplitude of Wavelet Transform	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/886/1/012037	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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 出山敬太郎, 福岡寛, 中村篤人, 廣和樹, 矢尾匡永
2. 発表標題 小容積衝撃波管から放出された噴流誘起衝撃波および噴流の衝突過程の観測
3. 学会等名 2023年度日本設計工学会関西支部研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 坂倉 哲史, 福岡 寛, 須田 敦, 矢尾 匡永
2. 発表標題 対向壁を有する反射衝撃波の閉じ込め現象に関する数値解析
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会2023 年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名	Bomura Ryu, Fukuoka Hiroshi, Suda Atsushi, Kuniyoshi Nao, Yaga Minoru, Ueno Eri, Takiya Toshio and Fukuda Naoaki
2. 発表標題	Effect of Exit Diameter of Elliptical Cell attached to Small Shock Tube on Shock Wave-Induced Vortex Ring and Unsteady Jet
3. 学会等名	The 12th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 15 December 2022, Phuket, Thailand. (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Keitaro Deyama, Hiroshi Fukuoka, Atsushi Suda, and Shigeto Nakamura
2. 発表標題	Experimental Observation of Collision Process between Converging Shock Wave and Supersonic Jet
3. 学会等名	9th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science(AJWTF2022), 4058, (2022.11.27-30, MYSTAYS Utsunomiya, Japan) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	松川航大, 福岡寛, 中村篤人, 須田敦
2. 発表標題	W-BOS法を用いた小容積衝撃波管より流出する超音速流れの可視化
3. 学会等名	2022年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 1A3-2, (2023.3.8-10, 産業技術総合研究所)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	庄野 晴人, 福岡 寛, 須田 敦, 矢尾 匡永
2. 発表標題	収束衝撃波および超音速噴流の可視化実験について
3. 学会等名	日本機械学会関西学生会2022 年度学生員卒業研究発表講演会前刷集, 11033, (2023.3.15, 京都工芸繊維大学)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名 Matsukawa Kota, Fukuoka Hiroshi, Nakamura Shigeto, Suda Atsushi
2. 発表標題 Study of Shock Wave Confinement Phenomenon Using Small Chamber Shock Tube
3. 学会等名 Proceedings of the 32th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP32) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 出山 敬太郎、福岡 寛、須田 敦、松川 航大
2. 発表標題 小容積衝撃波管を用いた衝撃波閉じ込め現象に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会2021年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 MIYAOKU Koki, FUKUOKA Hiroshi, NAKAMURA Shigeto, ENOKI Shinichi, HIRO Kazuki and YAO Masanori
2. 発表標題 STUDY ON SHOCK WAVE CONFINEMENT USING SMALL HIGH-PRESSURE CHAMBER SHOCK TUBE
3. 学会等名 31th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 宮奥晃希, 福岡寛, 中村篤人, 榎真一, 廣瀬裕介, 廣和樹, 矢尾匡永
2. 発表標題 小容積衝撃波管を用いた超音速噴流および収束衝撃波の干渉
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 松川 航大, 宮奥 晃希, 福岡 寛, 矢尾 匡永, 須田 敦, 中村 篤人
2. 発表標題 高圧小容積衝撃波管を用いた衝撃波閉じ込め現象の解明
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会2020年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 宮奥晃希, 福岡寛, 中村篤人, 榎真一, 太田匡則, 廣瀬裕介, 廣和樹, 矢尾匡永
2. 発表標題 高圧小容積の衝撃波管から噴出する超音速噴流および反射衝撃波の干渉に関する研究
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Miyauku Koki, Fukuoka Hiroshi, Nakamura Shigeto, Yao Masanori and Hiro Kazuki
2. 発表標題 Improvement of Background Oriented Schlieren Method Focused on Amplitude of Wavelet Transform
3. 学会等名 The 10th TSME International Conference on Mechanical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Miyauku Koki, Fukuoka Hiroshi
2. 発表標題 Study of Interference between Supersonic Jet and Reflected Shock Wave Ejected from Small High-Pressure Chamber Shock Tube
3. 学会等名 Yellow Sea Rim Workshop on Explosion, Combustion and Other Energetic Phenomena for Various Environmental Issues: YSR2020 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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