

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02373

研究課題名（和文）希薄予混合気における衝撃波を利用した点火方法の開発

研究課題名（英文）Development of ignition method using shock waves for lean burn gas engines

研究代表者

鶴 大輔（TSURU, Dasiuke）

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：10614620

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

研究成果の概要（和文）：研究の主な成果は、ガスエンジンに近い条件下での点火プラグから発生する衝撃波の挙動を観測した。その結果、副室内の衝撃波は、衝撃波と壁面での反射波との干渉により、局所的に密度変化の強い波を生成できることを確認した。また、高圧噴射された気体から、定常的に衝撃波が生じることが確認できた。壁形状を変更することにより、衝撃波の伝播をある程度制御できることと20MPa以上の高圧に気体を圧縮して噴射することにより、複数の衝撃波を発生させることが確認でき、さらに噴射圧を高くすることで、大きい密度変化を伴う衝撃波を形成できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガスエンジンの筒内圧相当条件で衝撃波を副室形状により、反射波より密度変化の大きい波が観測でき、それらを制御できる可能性がある。よって、エンジンの効率向上を阻む原因であるホットスポット由来のノッキング回避へとつながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The behavior of shock waves generated by the spark plug was observed under the same conditions as in gas engines. As a result, it was confirmed that shock waves in the pre-chamber were generated locally with strong density changes due to the interference between shock waves and wall reflected waves. It was also confirmed that shock waves were continuously generated from gas injected at high pressure exceeding 20 MPa.

研究分野：機械工学

キーワード：船用機関 ガスエンジン 火花点火 衝撃波

1. 研究開始当初の背景

船用エンジンの効率は、既に 50%を超えており、エンジンとしての構造上の違いはあるが、自動車用のエンジンに比べると 10%以上も高く、既に改善の余地は非常に少ない。しかし、排気ガス規制を含め、さらなる機関効率の向上を求められている。ここ数年、産学官が連携して、自動車用エンジンの効率を 50%にしようとする大型研究プロジェクトが推進された。このプロジェクトにより、燃焼エネルギーを効率よく運動エネルギーに変換するには、壁面等への熱損失を低減することが重要であると認識されるようになった。このことを考慮して、船用エンジンの効率を更に向上させるために、熱損失を低減する方法として、希薄予混合ガスエンジンの採用とそのガスエンジンの点火位置の制御が挙げられる。点火を燃焼室の中心で行うことができれば、その後の火炎の成長において、壁面へ接触する時間が小さくなるために、燃焼室壁への熱損失が小さくなることと、火炎が冷却されないため燃焼時間の短縮による等容度の増加となることが予想され、熱効率の向上が可能となる。

近年、計算能力の向上により、燃焼計算の数値解析においても対象とする気体に圧縮性を考慮して計算することが可能となった。寺島ら(北海道大学)が行った圧縮性を考慮した 1 次元の火炎伝播計算の研究において、圧縮波が通過する期間は、瞬間的な圧力や温度上昇が生じ、短い時間ではあるが、化学反応が進行していることが分かった。その結果、閉空間で反射し往復する衝撃波が、予混合燃焼におけるノッキング現象の "hot-spot" の発生源を誘発していることが解明された。さらに複数の衝撃波を与えてみた結果、圧縮波が通過する度に、化学反応が進行し、予混合気の着火を促進させる可能性を確認した。また、最近の高速度カメラの向上により、エンジン内での圧縮波の往復が確認されるようになってきており、この数値解析の知見は、実証されつつある。

これまで、エンジンの研究において、ノッキング発生後の圧力振動について計測することはあっても、それ以外で作動流体に圧縮性を考慮することは少なかったため、衝撃波を考慮することは無かった。ただし、高压に噴射されるディーゼル噴霧から衝撃波が生じることは確認されていたが、拡散火炎のために、着火・燃焼への影響はなかった。他の分野での研究では、トンネル内での爆発による衝撃波が、トンネル内に残存している燃焼ガスの点火させることがある可能性は実験的に理解されていたが、温度条件や圧力条件がエンジン内のものとは大きく異なるために、衝撃波による点火機構は解明されてこなかった。近年、数値解析にて 3 次元解析を行い、衝撃波が予混合気・着火機構へ及ぼす影響を解明しようとしているが、現在においても、計算能力不足により 1 次元の範囲にとどまっている。

2. 研究の目的

本研究では、希薄予混合気の点火方法と点火位置の制御を同時に行うことを提案する。その方法として、衝撃波を利用することである。船用ガスエンジンでの副室の形状を利用し衝撃波を特定の位置に収束させることにより、燃焼室の中心で混合気を着火させることを試みる。すなわち、単一もしくは複数の衝撃波によって希薄予混合気の点火が可能であるかを実験的に解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)火花点火プラグからの衝撃波観察 本研究では、まずは、衝撃波の観測を行う。副室内の火花放電時に生じる衝撃波の伝播挙動をシュリーレン法によって、可視化し、高速度カメラを用いて撮影を行う。図 1 に、放電時に副室内の点火プラグのプラグギャップから伝ばする衝撃波の挙動観察に用いる可視化定容容器(容器 A)を示す。単純円筒形(115 mm × D37 mm)の主燃焼室の周壁に点火プラグを装着し、その電極部を端点とする主室と平行な小円筒で覆うことで、副室を構成する。主室との連絡孔は、点火電極の対向位置に設置した。副室内と連絡孔からの衝撃波伝播に着目するので、両室の中心を直径上に含む 78mm の領域を、互いに対向する石英製光学窓により、可視化計測する。

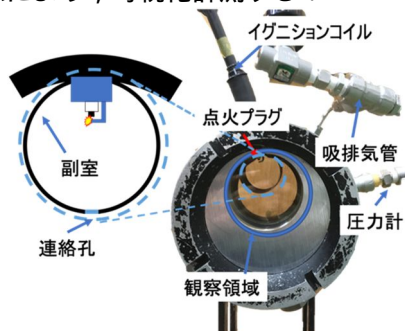


図 1 可視化定容容器の外観
(容器 A, 衝撃波伝播観察用)の概要

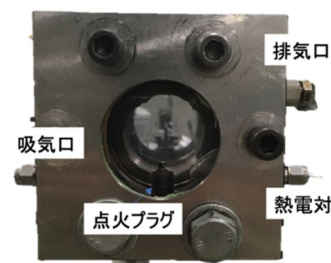


図 2 可視化定容容器の外観
(容器 B, 火炎伝播観察用)

(2) 高圧定容容器 図2は、予混合火炎伝播が生じている時に、プラグギャップで発生する衝撃波の伝播過程の観察に用いる可視化定容容器(容器B)を示す。容器Bは、単純円筒形(70mm × D40mm)の燃焼室を有し、周壁の上下端に2本の点火プラグを装着する。直方体状の容器本体内に電気ヒータを内蔵し、必要に応じて壁面冷却の影響を軽減できるようになっている。燃焼室の両端面に石英製光学窓を装着し、ほぼ燃焼室全域が可視化計測できるようになっている。表1に、容器Aの副室諸元の一覧を示す。容器Aでは、副室を構成する小円筒を交換して、副室直径、副室隔壁の厚さ、連絡孔径(孔数は1を基準)を変更可能で、全部で7諸元を設定した。表2は、両容器における雰囲気および点火条件を示す。なお、点火プラグや点火コイル、放電回路は計測を通じて同仕様のものを使用した。容器Bで2本の点火プラグを用いる計測では、プラグギャップを上方のプラグで1.2mm、下方で0.7mm(標準)として、同一点火駆動パルスでも上方プラグの放電時期を遅延させ、点火エネルギーを強化している。

表1 供試副室諸元 (容器A)

諸元番号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
副室内径 [mm]	Ø40		Ø71	Ø21			
隔壁厚さ [mm]	1t	5t	3t				
連絡孔径 [mm]	Ø7			Ø5	Ø3	Ø3.5×2	

表2 雰囲気および点火条件

■ 容器 A			
雰囲気圧力 [MPa]	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5		
プラグ本数 [本]	1 (or 2)		
■ 容器 B			
空気過剰率 [-]	∞ (Air)	1.3	
混合気圧力 [MPa]	1.0		
副室の有無 [-]	無	有	無
プラグ本数 [本]	1	2	

火花放電で生じた衝撃波は、測定部の密度勾配に比例した明暗像が得られるシュリーレン法で可視化した。光学系は、容器前後に2面の凹面鏡を置き、光源とカメラ側焦点を容器中心から点対称の位置に置く"Z"形配置とした。撮像には、モノクロ高速カメラ(Photoron製, FASTCAM Mini AX200)を用い、撮影条件は、速度20000~60000fps、露光2.50μsとした。必要に応じて記録した画像に種々のソフトウェアフィルタを施し、衝撃波の波面の抽出や強調を試行した。

(3) 高圧ガス噴射装置からの衝撃波観察 気体を高圧に圧縮し定容容器に噴射した際に生じる衝撃波を観察する。衝撃波を観測するために、高速度カメラを用いて100000fpsで撮影を行う。雰囲気圧を3MPaに設定し、噴射圧をそれぞれ高圧10MPa, 20MPa, 30MPaとして噴射した。噴口径は、1.4mmとした。

(4) 高温高圧試験 実際の点火条件に近づけるために、加熱用コイルを用いて雰囲気温度を上昇させ、衝撃波による着火を確認する試験を行う。

4. 研究成果

研究の主な成果は、ガスエンジンに近い条件下での点火プラグから発生する衝撃波の挙動を観測した。その結果、副室内の衝撃波は、衝撃波と壁面での反射波との干渉により、局所的に密度変化の強い波を生成できることを確認した。また、高圧噴射された気体から、定常的に衝撃波が生じることが確認できた。よって、衝撃波を1点に集中させることにより、着火を試みたが、予混合気を加熱している間に、局所的に熱源によって着火に至ってしまう結果となった。よって、今後の展望としては、壁形状を変更することにより、衝撃波の伝播をある程度制御できることと20MPa以上の高圧に気体を圧縮して噴射することにより、複数の衝撃波を発生させることが確認でき、高圧であればあるほど衝撃波による密度変化が大きいという結果より、さらに高い噴射圧で、衝撃波を作り出し、着火点に集中させることにより、高温条件でなくても着火できる可能性がある。

(1) 図3上段は、副室諸元#1の大気圧雰囲気における撮影例である。図では副室内のみ切り出して表示している。放電直後の画像にはプラグギャップにプラズマを示すコントラストの強い明暗が観察されるが、衝撃波は視認できない。同図下段は、原画像に除算フィルタを施した例である。放電と同時に発生した衝撃波の波面がプラグギャップを中心として球状に伝播していること、点火後148μsには副室内を往復し、伝播方向が異なる波面が重畳していること、257μsには過半の波面が減衰していること等が確認できる。また、148μsでは連絡孔付近を中心として衝撃波が集中しており、衝撃波による自着火制御の可能性が示されている。さらに、雰囲気圧の増加に応じて衝撃波が強くなり、画像処理無しで衝撃波が視認できるようになること、副室諸元を変更することで、副室内部の衝撃波の伝播挙動や衝撃波の主室への射出時期や強度を制御可能であることなどが判明した。

図4は、雰囲気圧0.3MPaの条件での後続の9枚の写真(55.6μsから204μsまで)を示す。衝撃波の大まかな挙動は大気圧下と同じである。初めに点火した際に生じる衝撃波が同心円状に伝播する。同心円状に伝播する波は、区切られた小さい孔を通して、副室の外に弱い圧力波が伝搬する。(111.1μs)しかし、点火プラグが装着されている壁方向への衝撃波の伝播は、すぐに壁で反射し、凹面の形をして反対方向へ伝播する(74.1μs)。74.1μsと92.6μsの写真では、波が

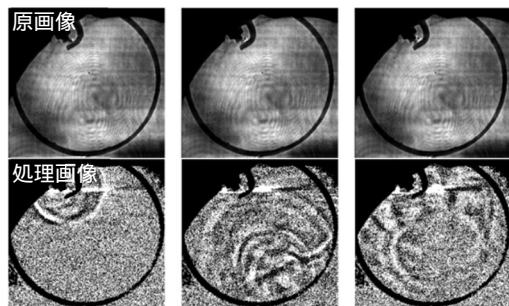
前の波に追いつき、この時にくさび形の波がはっきりと形成される。その後、この反射は、小さい孔を通して、副室の外に伝播する。この波は、111.1us 時に観測された波よりも濃淡が強いので、密度差の大きいと推測できる(166us)。条件 1 では衝撃波の密度変化が弱いため、これらの反射波を観測することができなかった。また、185us と 204us の時、副室外の空間で小さい孔から出てきた孔が伝播してるのが観測できる。以下に、他の条件を含めて測定結果まとめる。

雰囲気圧の影響

- ・雰囲気圧力を上げてても圧力波の伝播速度を含めて伝播挙動はほとんど変わらない。
- ・雰囲気圧が高くなると、圧力波による密度の変化が大きくなる。

副室形状の影響

- ・衝撃波の反射形態は、副室の形状によって大きく変化する。
- ・副室の直径が小さい場合、波の干渉がより多く発生し、よりくさび形の波が生成されやすい。
- ・衝撃波と壁面での反射波との干渉により、局所的に強い波を生成できる。

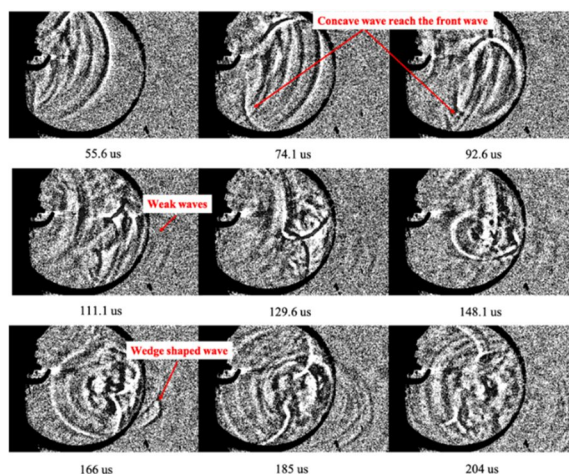


点火直後(0ms) 148 μs 257 μs

図 3 副室内衝撃波伝播過程の可視化例 (容器 A)

図 4 衝撃波の伝播過程

(Pa=0.3MPa, 55.6us ~ 204us, @54000fps)



(2) 図 5 は、プラグギャップの異なる 2 本の点火プラグを容器 B に装着し、衝撃波と予混合火炎の伝ば過程を撮影した例である。図では火炎面の成長過程を示している。放電時期が遅延した上方からの火炎より下方の火炎の成長が速く、上方からの火炎面先端が凹形に変形し、しわ状火炎がより発達していることがわかる。このことは、僅かな点火時期の相違でも火炎の成長や伝ば方向に大きく影響することを示している。次に、メタン予混合気火炎伝播中における衝撃波の観測結果をまとめる。

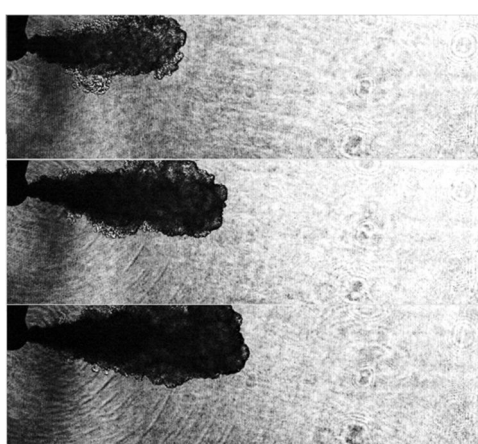
- ・メタン混合気中の衝撃波の伝播速度は、空気のものに比べて小さい。
- ・衝撃波は対向の壁に反射し往復を繰り返す。
- ・火炎伝播速度は、衝撃波の伝播速度に比べると非常に小さい。
- ・火炎伝播中の未燃領域に、くさび上の形ではなく、さざ波状の密度の不均一場が形成される。



点火後 42.6 ms 63.7 ms 93.4 ms

図 5 副室内衝撃波伝播過程の可視化例 (容器 B)

図 6 高圧噴射の可視化画像
(上段から 10MPa, 20MPa, 30MPa)



(3) 図 6 は、メタンではなく空気を高圧に圧縮して噴射した噴流発達過程を可視化した結果である。可視化手法には、シャドウグラフ法を用いている。上段から噴射圧 10MPa, 20MPa, 30MPa と高くしている。すると、10MPa では確認できないが、20MPa から噴孔を中心に同心円状の密度変化が確認できる。さらに、30MPa に高圧にすると同心円状の密度変化が鮮明に見えているのが確認できる。さらに高圧にすることによって、強い衝撃波が作れると考えられる。

(4) 雰囲気温度を上げ、エンジン条件に近づけようとしたが、加熱用コイルにより、熱量が着火条件に至ってしまい着火が生じた。このことより、温度が低くても時間を保持し熱量が蓄えられたら着火する結果が得られた。このことは、衝撃波を複数回与えることにより、与えた熱量が着火条件に至れば、着火する可能性が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Wakasugi, H. Tashima, D. Tsuru	4. 巻 2022-01-1060
2. 論文標題 Knock Resistance Evaluation of Methane-Based Two-Component Gases by Combustion Visualization and Analysis using RCEM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SAE Technical Paper	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4271/2022-01-1060	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 Takuya Wakasugi, Daisuke Tsuru, Hiroshi Tashima	4. 巻 190
2. 論文標題 Influences of the pre-chamber orifices on the combustion behavior in a constant volume chamber simulating pre-chamber type medium-speed gas engines	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Combustion Engines	6. 最初と最後の頁 3-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.19206/CE-148171	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 -
1. 著者名 E. A. Elsharkawy, Takahide Aoyagi, Hiroshi Tashima, Daisuke Tsuru	4. 巻 1
2. 論文標題 PIV measurements of entrainment process of directly injected media in internal combustion engines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 14th International Symposium on Particle Image Velocimetry	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18409/ispiv.v1i1.184	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 -
1. 著者名 Daisuke Tsuru	4. 巻 56
2. 論文標題 補助軽油噴射を用いたアンモニア直接噴射燃焼に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 マリンエンジニアリング学会	6. 最初と最後の頁 624-627
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5988/jime.56.624	査読の有無 無
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 青柳 享秀, 鶴 大輔, 田島 博士	4. 巻 56
2. 論文標題 中速ガスエンジンにおける副室起源の異常燃焼に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 マリンエンジニアリング	6. 最初と最後の頁 606-611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5988/jime.56.606	査読の有無 無
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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 青柳享秀, 鶴大輔, 田島博士
2. 発表標題 中速ガスエンジンにおける副室起源の異常燃焼に関する研究
3. 学会等名 第90回日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke Tsuru, Hiroshi Tashima
2. 発表標題 Study on combustion of ammonia direct injection assisted by diesel spray
3. 学会等名 the 90th conference of the japan institute of marine engineering
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 若杉拓也, 鶴大輔, 佐古 孝弘, 田島博士
2. 発表標題 副室式ガスエンジンの副室内点火位置がトーチ火炎および主室内燃焼に与える影響
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 若杉拓也, 鶴大輔, 田島博士
2. 発表標題 副室式ガスエンジンの点火放電に伴う衝撃波の伝ば過程の可視化計測
3. 学会等名 第91回日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鶴大輔, 田島博士
2. 発表標題 船用低速機関におけるアンモニア噴霧の燃焼特性の考察
3. 学会等名 第91回日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鶴大輔, 田島博士
2. 発表標題 アンモニア噴霧拡散燃焼の熱発生過程と排出物特性の数値予測
3. 学会等名 第92回日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笠田奏世, 鶴大輔, 田島博士
2. 発表標題 急速圧縮膨張装置を用いた天然ガス模擬3成分混合燃料のノック耐性評価
3. 学会等名 第92回日本マリンエンジニアリング学会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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