空気-プロパン混合気の燃焼時に発生する圧力波を 直接の駆動源に用いた船舶用推進ノズルの研究*

田尻 慎介^{*1}, 葛原 道久^{*2}, 林 光一^{*3}
坂本 雅彦^{*4}, 東 啓亮^{*5}, 亀山 文雄^{*6}

Study of a Propulsive Nozzle for a Ship Directly Driven by High-Pressure Wave Generated by Air-Propane Mixture Combustion

Shinsuke TAJIRI^{*7}, Michihisa TSUTAHARA, Koichi HAYASHI,
Masahiko SAKAMOTO, Keisuke AZUMA and Fumio KAMEYAMA

^{*7} Graduate School of Science and Technology, Kobe University,
1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501 Japan

We propose a new type of propulsive equipment for a ship in this paper. It is directly driven by the high-pressure wave generated by air-propane mixture combustion. The propulsive equipment is a simple structure consisting of a combustion tube and a semi-open-type nozzle. In order to clarify the mechanism of thrust generation, we measured the pressure fluctuation on the nozzle wall and the thrust for various angles of ejecting the pressure wave, and also we observed the flow in the two-dimensional nozzle by using a high speed motion camera. Water flow in the nozzle is accelerated momentarily by the pressure wave, and the bubble is exhausted to downstream while their expansion. It was clarified that the thrust strongly depends on the nozzle-wall angle, and the thrust for the nozzle-wall angle 45 degrees is higher than others in this experiment. The thrust of the nozzle was 42 N when the 400 kPa pressure wave is driven with added oxygen.

Key Words: Ship Propulsion, Nozzle Flow, Pressure Wave, Combustion, Detonation

1. 結 言

船舶用の推進装置としてスクリーブローバ等の機械的なアクチュエーターを用いないものとして、圧縮された高圧の空気をノズル内に噴出し、ノズル内に流入する水流を二相流ウォータージェットとして高速に加速させる推進装置が提案されている。Witte⁽¹⁾や Mottard⁽²⁾によって提案されたこの種の推進装置は軸対象のノズルを用いていたため、上流側からのみ水流が流入するために加速させる水流量が不足し、結果として十分な推力が得られなかった。葛原⁽³⁾⁻⁽⁵⁾らはノズル内流体の密度を増加させるために推進ノズルを半開放にすることを提案し、推力が大幅に増大することを確認した。また同様の目的で駆動源となる高圧ガスに蒸気を用いることで

推力は増加した。しかし、圧縮空気を用いると噴射後瞬時に膨張する空気がノズル内への水の流入を妨げ、さらに連続運転する際にはコンプレッサーも規模の大きなものが必要となる。また、蒸気を駆動源として用いる場合は事前に純水を確保する必要があり実用化にいたる点で不利になる。

そこで著者らはパルス detonation エンジン (PDE) を半開放型ノズルに取り付けた新しい船舶用推進装置を提案し、駆動源となる圧力波を爆轟によって発

Fig.1 Image of a propulsive nozzle for a ship

* 原稿受付 2006 年 4 月 17 日.

^{*1} 正員, 神戸大学大学院自然科学研究科 (☎ 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1).

^{*2} 正員, フェロー, 神戸大学大学院自然科学研究科.

^{*3} 正員, フェロー, 青山学院大学理工学部 (☎ 229-8558 相模原市淵野辺 5-10-1).

^{*4} 正員, 奈良工業高等専門学校機械工学科 (☎ 639-1080 奈良県大和郡山形市矢田町 22).

^{*5} 准員, 神戸大学大学院自然科学研究科.

^{*6} 学生員, 神戸大学大学院自然科学研究科.

E-mail: tajiri@mh-1.scitec.kobe-u.ac.jp

生させノズル内に撃ち込む推進装置を作製した。今回、チャップマン-ジュゲ (C-J) デトネーションには至らなかったものの、超音速で伝播する圧力波を用いて本推進装置の基礎性能を実験的な解析により明らかとしたので報告する。

本推進装置は図 1 のような駆動機関と推進器が一体となった簡単な構造であり、推進装置自体は吸気弁以外の機械的なアクチュエーターを用いない。駆動機関となる燃焼管は片側に閉口端をもつ管であり、閉口部にてスパークプラグによる着火を行う。着火された可燃性混合気は一般に極めて薄い反応領域からなる火炎面が形成されて混合気中をデフラグレーションとして伝播する。伝播する燃焼波面に何らかの乱れが生じると、燃焼波面の面積が増大し、生じた圧縮波が重なり合って高圧、高速の圧力波が形成される。反応領域と未反応領域のエネルギー伝達および物質伝達が、燃焼反応を維持するのに適切な場合には、火炎は加速されついには衝撃波を形成しデトネーションに遷移する。このデトネーションを利用したパルスデトネーションエンジンは 1940 年代に Hoffmann が推進器への応用を提唱したことに始まり、高効率の次世代航空宇宙用推進システムとして実践的な研究が盛んに行われている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

著者らは次のような観点からパルスデトネーションエンジンを船舶用推進装置として利用することが有効であるとする。

- PDE は定容燃焼過程のハンフリーサイクルに近く熱効率が低い⁽⁹⁾
- 機械的なエネルギー伝達損失がない
- 大気中に伝播する騒音を軽減できる
- 大気中で用いられる PDE は推力が生まれるデュ

レーションタイムが極めて短く、実用化にいたるには 100Hz 以上の運転条件が必要といわれているが、船舶用に用いた場合は水の慣性によって推力発生継続時間が増加すると予想する

- 燃料として天然ガスを用いることが可能であり、この場合一酸化炭素の排出が大幅に減少することが知られている
- 複雑な機構を要せずメンテナンスが容易である
- 水素-酸素混合気を運転に用いるとデトネーション波は 30cm 程度の燃焼管でも生成されるので、将来的に推進器のコンパクト化が期待できる
- 水素-空気混合気を用いた場合でもターボエンジンより低 NOx 排出であることが期待できる⁽¹⁰⁾

本論文にて報告する実験ではより実用的な条件を想定して、燃料に安価で安全面からも扱いやすいプロパンを用い、酸化剤には空気および空気-酸素混合気を用いて部分予混合拡散燃焼させた。推進ノズルは矩形断面を有する 2 次元半開放型ノズルを用いて圧力波の噴射角度を変化させてノズル内圧力や推力の測定を行った。同時に、高速度ビデオカメラを用いてノズル内流れを観察することで流動現象についての考察を行った。

2. ノズル性能実験

2-1 実験装置 図 2 に実験で用いた装置の概要を示す。実験に用いた燃焼管は内径 22mm、外径 25mm、全長 3000mm のステンレス製円管で、図 3 に示した (a)-(d) の燃料、酸化剤それぞれを注入する位置にチェックバルブを設けた。注入部分の形状は図 3 に示す通り、(a)(b) が Type1、(c)(d) は Type2 のように加工し、Type2 は注入位置を偏心させている。これは注入気体の回転に

Fig.2 Experimental system for a propulsive nozzle directly driven by a High-pressure wave

Fig.3 Combustion tube configuration

Fig.4 Shchelkin spiral

よる混合促進を意図している。また Type.2 の注入部は下流側の管にも混合気を満たすために 45 度の傾斜を設けた。燃焼管の開放端には推進ノズルを取り付け、閉口端に自動車のスパークプラグ (DENSO 社製 VQ/6)、さらにイグニッションコイル (DENSO 社製 90919-02113) を取り付けた。イグニッションコイル内の昇圧回路に流れる電流を直流安定化電源 (KENWOOD 社製 PR18-5A) と電磁リレーを用いて制御し、スパークプラグを放電させた。

酸化剤となる空気はコンプレッサーで加圧し、管内への流入量を 180cc/sec に設定して連続的に供給した。燃料となるプロパンはタンク内の加圧された状態からタンク出口のレギュレーターで減圧し、電磁弁を用いて着火直前に燃焼管内に供給した。今回、最も圧力値の安定した圧力波を得たプロパン流量 13cc/pulse (噴射時間 9msec) の条件を用いて実験を行った。また、燃焼を促進させる目的で酸素を添加する場合は、図 3 の (a)(c) へ空気を連続的に供給した状態で、(b)(d) の位置へ着火直前に酸素 (流量 150cc/pulse) を注入した。

着火部直後には管内の燃焼を促進させる目的で、図 3 および図 4 に示す鋼線スプリング (直径 19.8mm, 線径 2mm, ピッチ 14mm, 全長 120mm) を設置した。これは、一般的に Shchelkin Spiral と呼ばれる乱流燃焼促進器であり、デフラグレーションからデトネーションへの遷移時間、遷移距離を短縮させることが知られている⁽¹⁾。

実験用に作製した推進ノズルの構造を図 5 に示す。全長 370mm, 全幅 142mm, 高さ 137mm。下部が水流中に開いた半開放型の二次元末広ノズルとなっている。水槽 (水路断面 800mm×800mm, 全長 9000mm) の中間

Fig.5 Experimental nozzle

Fig.6 Position of Pressure Sensor

に支持台を設置し、推進ノズル上部が水深 50mm となる位置に固定して実験を行った。ノズル壁面角度 θ (図 5 参照、水平方向を 0 度とする) は 30~90 度の範囲で変化させることが可能であり、ノズル壁面に垂直に取り付けられた燃焼管から噴出される圧力波の噴出角度も壁面の角度変化に伴い変化することになる。以下、角度の表記はノズル壁面の角度 θ を指す。

2・2 圧力測定および推力測定実験 圧力波をノズル内に撃ち込む際の圧力値を燃焼管末端部において圧力計を用いて測定した。さらに、図 6 に示すノズル壁面上の管開放部周囲の 4 点 (図中 1~4) に圧力計 (共和電業社製 PGM-2KC) を設置してノズルが受ける圧力を測定する。圧力計はそれぞれ真鍮の台座によって固定されている。共和電業社の PCD-300A (ブリッジ回路・アンプ・A/D 変換ボード内蔵) を介して、圧力計からの電位信号を増幅、A/D 変換し、圧力値を記録した。

推進ノズルの推力測定はノズルを支えるステンレス棒に取り付けたひずみゲージを用いて測定した。推力は、一定水流流速中においてノズルに生じる抗力 $R1[N]$ と、圧力波を撃ち込んだ時にノズルにかかる力 $R2[N]$ を測定し、それらの差をとって、

$$Thrust = |R1 - R2| \quad [N] \quad (1)$$

で定義する。今回、水流が静止状態で全ての実験を行ったため $R1$ の値は 0 である。

パルスデトネーションエンジンは燃焼管自体が推進器としての役割を果たすが、本実験では推進ノズルにのみに働く推力の測定を行うために、燃焼管と推進ノズルの間にフレキシブルホースを設け、燃焼管と推進ノズルの相互影響を軽減した上で、ノズル推力計測のキャリブレーションを行った。

2・3 ノズル内観察実験 ノズル内の気流と水流の様子を観察するために、高速度ビデオカメラ (Redlake Imaging Cooperation 製 PCI2000) による撮影を行った。図 2 に示したように水槽の傍に高速度ビデオカメラと照明装置を設置し、電磁リレー (OMRON 製 G7L-1A-T) を用いて圧力測定および推力測定とトリガータイミングを合わせた。シャッタースピードは $1/500\text{sec}$ 、フレームレートは 250frame/sec に設定して撮影を行った。

3. 実験結果および考察

3・1 燃焼管内圧力測定結果 図 7 はプロパン-空気を用いて同実験条件下において、上述した鋼線スプリング (全長 120mm) を使用した場合と使用しなかった場合の燃焼管内の圧力値結果であるが、スプリングを使用した場合の方が高い圧力値を得ていることは明らかである。また、330mm のスプリングを用いて同様の実験を行った結果も図 7 に示してあるが、120mm の場合

Fig.7 Pressure profile with Shchelkin spiral

に比べて測定された圧力値は小さいことが確認できる。Shchelkin Spiral の効果は層流燃焼を乱流燃焼に遷移させ、燃焼境界面が増加し、生じる圧力波が重なり合った結果、デトネーションへの遷移を促進させると考えられている。しかし、部分予混合拡散燃焼を行った本実験では燃料と空気の混合が不十分であるために、長いスプリングの途中で燃焼自体が不可能になり、スプリング下流側では乱れによるエネルギー損失のために燃焼管末端部での圧力値が減少したと思われる。

推力測定および観察実験を行った 120mm のスプリングを用いた場合の燃焼管内の圧力値は、以下に述べるノズル壁面角度を変化させた場合の実験においてもほぼ同様の値であり、ゲージ圧 60~70kPa 程度であった。

3・2 ノズル壁面角度を変えた実験結果 プロパン-空気を用いた部分予混合拡散燃焼により発生するゲージ圧 60~70kPa 程度の圧力波をノズル内水流中に撃ち込む。その際、次の(i)~(iv)ようにノズル壁面の角度を変化させてノズル壁面圧力測定や推力測定および高速度ビデオカメラによる撮影を行った。

- (i) ノズル壁面角度 90 度に固定
- (ii) ノズル壁面角度 60 度に固定
- (iii) ノズル壁面角度 45 度に固定
- (iv) ノズル壁面角度 30 度に固定

図 8 に示す結果(i)~(iv)は上記のそれぞれの角度に対応している。また、それぞれの結果は上からノズル内に圧力波が撃ち込まれたときのノズル内の様子、ノズル壁面 4 点の圧力履歴、ノズルの推力履歴をあらわしている。圧力と推力の履歴は圧力波がノズルに噴射される 20msec 前を起点として時間軸を示してある。

いずれの場合にもノズル内に撃ち込まれた圧力波が水流を下流へと加速させ、水中に撃ち込まれた後の気相は離散的な微小気泡となってノズル後方へと排気されていく様子が観察された。撃ち込まれた気相が離散的な微小気泡となるのは、圧力波によって生じた水撃の影響によるものであろうと思われる。また、圧力波の撃ち込みによってノズル壁面での圧力値が上昇した後にノズル推力を得ている。ノズル推力の波形が壁面圧力の波形より遅れを生じて測定されるのは、推進ノズルの慣性によるものである。

ノズル壁面角度ごとに考察すると、ノズル壁面の角度が 90 度に固定してある(i)の実験においては、ノズル壁面測定 4 点の圧力値は燃焼管末端部の圧力値より 50%程度の 30kPa に減少した。この理由はノズル内に圧力波が撃ち込まれるまでに、水深の関係からフレキシブルホース内に進入している水を押し出す量が他の角度のノズル壁面より多いため、圧力波をノズル壁面で十分

Fig.8 Flow inside the nozzle, time history of pressure fluctuation on the wall and thrust when the high-pressure wave ejected

に回収できていないためであると考えられる。また、噴出された圧力波はジェット噴流のように下流へと流れていく様子がみてとれる。そのため、圧力波によりノズル壁面に作用する力を十分得られていないといえる。ノズル壁に作用する圧力値が小さいため、ノズル推力の値も最大 5N 程度と小さかった。このノズル壁面の角度では、圧力波によって生じる推進方向に働く力を有効に利用できないために、ノズル推力が低くなっていると考えられる。

ノズルの壁面の角度が 60 度に固定してある(ii)の実験においては、ノズル壁面の圧力は(i)の場合に比べて大きな値が得られた。この値は(iii)、および(iv)のノズル壁面における圧力とほぼ差がない。壁面角度 90 の場合、圧力値は全ての測定位置でほぼ同じ値であったが、(ii)～(iv)の結果では微小ではあるがノズル壁面上方の圧力が大きいことがわかった。また、撃ち込まれた高压の気相は(i)のジェット噴流のような流動とは異なり、噴射された瞬間の気相は球面状に広がる様子がみてとれた。この場合、気液二相流の界面で圧力波が反射し、反射波がノズル壁面に作用するため、ノズルが有効に働いているのではないかと思われる。ノズル壁面角度が 60 度の場合、ノズル推力の最大値は 13～15N と角度 90 度の場合の 2 倍以上の値を得ることができた。

ノズルの壁面の角度が 45 度および 30 度に固定してある(iii)、(iv)の実験においては、推力が他の実験に比べて、正の方向に出ている時間が長いことが確認できた。これは、排気されていく膨張しきっていない気泡が後方のノズル壁面を流れていく際に膨張し、下流の水を押す反力を受けつづけているためだと考えられる。壁面角度 30 度の場合はノズル壁面で回収される水平方向成分の反力が 45 度の場合と比べておよそ 70% であるため、45 度の場合よりも推力が低くなっていると考えられる。実験結果より壁面角度 45 度の場合に 15～20N と他の壁面角度に比べて最も大きな推力が得ることができた。

(i)～(iv)の実験において正の推力を得た後、推力が負の方向に働いた。この要因としては、推進ノズル自体が前後に揺動し、ひずみゲージが逆方向にひずんだ結果、推力が負の方向に出ると考えられる。さらに、燃焼管の圧力が燃焼後に大気圧以下に下がり、フレキシブルホース内に水が逆流する現象も確認できた。この現象も、負の方向に推力が働く要因の 1 つと考えられる。

3・3 酸素を添加した場合の実験結果 酸化剤として空気のみを用いたときに最も大きな推力を得たノズル壁面の角度 45 度に固定し、さらに燃焼反応を促進するために酸素を添加して燃焼させたときの、ノズル内の様子、壁面での圧力、燃焼管末端部の圧力、および推力

Fig.9 Flow inside the nozzle, time history of pressure fluctuation on the wall, in the combustion tube and thrust when the high-pressure wave ejected with O_2

を図 9 に示す。図 9 では燃焼管末端部での圧力が 400kPa 程度までと空気のみときより大幅に上昇していることが確認できる。このときの推力はおよそ 42N であり、空気のみを注入するときと同じ条件で行った実験結果より 2 倍程度高い推力を出していることが確認できる。この比推力をプロペラ推進器の理論式を用いて比較すると、推進効率 0.4、直径 0.2m、回転数 17rps のプロペラ推進器に相当している。ノズル壁面での圧力値も 2 倍程度になっており、酸素の供給によって燃焼が著しく促進されることを確認した。

ノズル内の流動現象は、圧力波による高压気相の領域がノズルの大きさを超えるほど大きくなったものの、空

気のみを用いた場合と同様に、撃ち込まれた高圧の気相領域が下流へと離散的な気泡となって排気された。燃焼管末端部の圧力測定結果から圧力値に二度のピークがみられる。これは高圧の圧力波が水面で反射したためであると思われる。また、空気の場合でも述べたように、管内の圧力値が燃焼によって負に働き、管内の圧力が連続的に注入されている空気によって回復するまでに、水がフレキシブルホース内に逆流した。その結果、推力は負の値を得ていると思われる。水流に流速がある場合、つまり船体が前進する場合や連続的（周期的）に圧力波を撃ち込んだ場合について、ノズル内水流がどのような流れとなるかについては今後研究が必要である。

管全体における酸素、空気およびプロパンガスの混合について考察を加えると、空気は連続的に注入し続けているので管全体の体積より、酸素(150cc)、プロパン(13cc)を除いた体積を管内の空気量と考えると、空気中の酸素量と酸素ボンベより添加している酸素の合計とプロパンの管内体積比はおおよそ $O_2:C_3H_8=25:1$ となっている。完全燃焼をさせるための理論体積比は $O_2:C_3H_8=5:1$ であるため管全体で考えるとプロパンが希薄になっている。しかし、プロパンの混合比率を高めるためプロパンの注入量を増やしても点火することができなかった。これは管の構造上点火する燃焼室で局所的にプロパンが過濃になってしまっているため燃焼できなかったと考えられる。管下流では希薄なプロパンと酸素との混合比にムラができ、均一な燃焼が持続できず C-J デトネーションに至らなかったのではないと思われる。

強いデトネーション波を発生させることはできなかったが、推進ノズルで得た比推力は小型のプロペラ推進器に匹敵し、今後の実用化に向けた取り組みに期待できるものと思われる。

4. 結 言

片閉端燃焼管内でプロパンを燃料とする部分予混合拡散燃焼により生じた圧力波を直接水流に撃ち込むことによって推進力を得る新しい船舶用推進ノズルについて、二次元半開放の実験用推進ノズルを作製した。実験用推進ノズルを用い観察実験、圧力測定実験、推力測定実験を行うことで、ノズル内の静止水流中に圧力波を撃ち込んだときのノズルの特性を明らかにした。以下に得られた結論を示す。

1. ノズル内の静止水流中に撃ち込まれた圧力波を伴う高圧の気相領域は、水流を下流へと加速させ、その反動によりノズルが推力を得た。観察実験を行うことにより、気相領域はノズル内部に留まら

ず、離散的な微小気泡となって下流へ排気されることがわかった。

2. 燃焼管内でゲージ圧 60~70kPa の圧力波を静止水流中に撃ち込んだとき、ノズル壁面角度 90 度の場合に得られた推力が最も小さく 5N 程度であった。また、壁面角度 45 度の場合の推力が最も大きく最大 20N を得た。
3. 静止水流中に圧力波を撃ち込んだあと、燃焼管内の圧力は大気圧以下に低下し、ノズル内水流がフレキシブルホース内を逆流した。
4. 酸素を添加し、燃焼を促進させることによって燃焼管内にてゲージ圧 400kPa 程度の圧力波を生じさせることができた。その結果、壁面角度 45 度の場合では、空気の場合に比べ 2 倍のノズル壁面圧力を観測し、ノズル推力も約 2 倍の最大 42N を得ることができた。

謝 辞

(株)ナカシマプロペラから資料の提供を受けた。ここに記して謝意を表する。なお本研究は、造船学術研究推進機構の助成を受けていることを記し、関係者各位に謝意を表する。

文 献

- (1) Witte, J. H., "Predicted Performance of Large Water Ramjets", *ALAA Paper*, No.69-406 (1969), 1-10.
- (2) Mottard, E. J. and Shoemaker, C.J., Preliminary Investigation of an Underwater Ramjet, *NASA Tech. Note*, D-991, (1961), 1-36.
- (3) Tsutahara, M. et al., Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.59, No.565 (1993), pp.268-274.
- (4) Tsutahara, M. et al., Performance Improvement of Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas (Effect of Increasing Water Flow Rate in the Nozzle), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.61, No.583 (1995), pp.245-250.
- (5) Sakamoto, M. et al., Performance Improvement of Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas (Effect of the Device with Which an Actuator Was Equipped), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.61, No.590 (1995), pp.3728-3734.
- (6) Kailasanath, K., Review of propulsion applications of detonation waves. *American Institute of Aeronautics and Astronautics J.*, Vol.38, No.9, (2000), pp.1698-1708.
- (7) Lindstedt R. P., and Michels H. J., Deflagration to detonation transitions and strong deflagrations in alkane and alkene air mixtures, *Combustion and Flame*, Vol.76, No.2, (1989), pp.169-181.
- (8) Hayashi, K. and Fujiwara, T., Recent Progress of Japanese PDE Research, *American Institute of Aeronautics and Astronautics paper*, 02-0475, (2002)

- (9) Hutchins T.E. and Metghalchi M., Energy and Exergy Analyses of the Pulse Detonation Engine, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.125, (2003), pp.1075-1080
 - (10) Hayashi, K. et al., Fundamental Study on Detonation Propulsion for Marine Transportation, *25th International Symposium on Shock Waves*, July 17-22, (2005), Bangalore, India
 - (11) Lu F. K., Meyers. J. M., and Wilson D. R., Experimental study of a pulse detonation rocket with Shchelkin spiral, No.1054, *24th International Symposium on Shock Waves*, July 20-25, (2003), Beijing, China
-