高圧空気を直接の駆動源とする船舶用推進ノズル内の 流動現象に関する研究*

(水流速度の変化に伴うノズル内流れの変化に対する実験的考察)

田尻 慎 介^{*1}, 蔦原 道 久^{*1}, 小川 和 彦^{*2}
坂本 雅 彦^{*3}, 田嶋 正 和^{*4}, 東 啓 亮^{*4}

Study on Flow Phenomenon inside a Nozzle of a Ship Propulsion Equipment Directly Driven by High Pressure Air (Experimental Consideration of Flow inside a Nozzle According to Water-Flow Velocity)

Shinsuke TAJIRI, Michihisa TSUTAHARA^{*5}, Kazuhiko OGAWA,
Masahiko SAKAMOTO, Masakazu TAJIMA and Keisuke AZUMA

^{*5} Graduate School of Science and Technology, Kobe University,
1-1 Rokko-dai, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501 Japan

An experimental study by means of pressure measurements and flow visualization was performed to investigate unsteady flows inside a two-dimensional semi-open-type nozzle for a ship propulsion equipment directly driven by high-pressure gas. We found that ejected gas phase and water-flow phase are separated clearly of themselves, and the interface of these phase behave like interfacial waves. It is clarified by flow visualization with a high speed motion camera and a circulating water channel that these interfacial waves change their shapes according to water-flow velocity. The interfacial wavelength becomes longer in response to increasing water-flow velocity, and the mechanism that obtains thrust on the nozzle-wall changes. The thrust and flow patterns for the intermittent gas ejection according to water-flow velocity are also clarified.

Key Words: Ship Propulsion, Water Jet, Interfacial Wave, Unsteady Flow, Flow Visualization

1. 緒 言

スクリュプロペラ等の機械的アクチュエータを必要としない船舶用の推進装置として Witte⁽¹⁾あるいは Mottard⁽²⁾らによるウォータージェット推進装置が提案されている。これらは、ノズル内に高圧の空気を噴出し、水流を二相流ウォータージェットとして高速に加速するものであるが、彼らの提案したノズルが船舶の推進機構として実用化が試みられた報告は見あたらない。彼らの提案するノズルは軸対称となっており、水流はノズル前方のみから流入し、全体として加速させる水の流量が不足する。その結果、十分な推力が得られず、効率も低いものとなっていた。

蔦原^{(3)~(5)}らは推力を増加させるためにノズル内流体の密度を増加させる必要があると考え、これまでに下面が水流に開いた二次元半開ノズルを提案し、その

特性について調べてきた。半開ノズルを用いることにより、ノズル下面から流入する水量が増加し、推力が著しく増加した。水の流入を促す目的で高圧空気を間欠的に噴出することにより、より高い推進効率を得られることもわかった。高圧空気に代えて水蒸気を噴出することにより、大きな推力が得られることもわかっている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。またノズル形状も釣り鐘形にすることにより推力の増加が見られた⁽⁸⁾。

これまでにえい行水槽内に推進ノズルを固定させた場合の高速度ビデオカメラによるノズル内流れの観察実験を行うこと⁽⁹⁾によって、高圧空気により水流を加速する原理を明らかにしてきた。水流を加速する原理は、これまでに考えられていたような微小気泡の瞬間的膨張による乱流混合に起因した運動量輸送に基づくものではなく、図1に示すように噴出された空気の相と水流の相はほぼ完全に分離し、高圧の空気相が下流の水塊をウォータージェットとして加速させている。しかし、えい行水槽を用いた実験ではノズル内に流入する水流速度が増加した場合のノズル内流動現象については観察実験を行うことができなかった。そこで今回、神戸大学海事科学部に設置されている回流水槽を用いることにより水流速度が増加した場合についてもノズル内流れの観察を行い、同時に圧力計を用いてノ

* 原稿受付 2005年6月8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, 大阪産業大学交通機械工学科(〒574-8530 大東市中垣内3-1-1)。

^{*3} 正員, 奈良工業高等専門学校(〒639-1080 大和郡山形矢田町22)。

^{*4} 神戸大学大学院自然科学研究科。

E-mail: tutahara@mech.kobe-u.ac.jp

Fig. 1 Principle of thrust generation

ノズル壁面での圧力測定を行うことによってノズル内流れの詳細について考察を行った。

2. 推進ノズル性能実験

2.1 実験装置 実験に用いた推進ノズルの構造は図2に示すように全長453 mm, 全幅150 mm, スロート導入部の高さ50 mmのノズル, 外部からの高圧ガスをノズル内に供給する円筒管からなる。ノズル側面には透明なアクリルボードを使用しており, ノズル内流れを側面から観察することが可能である。なお, 本実験ではノズル内に噴出させる高圧ガスにはコンプレッサより供給される圧縮空気を使用した。高圧空気はノズルスロート部(導入部終端)下方20 mmの位置に設けられた円筒管から噴出される。円筒管は内径8 mm(外径9 mm)のアルミニウムパイプに直径2 mmの円形噴出口を直線上に合計9個設けたものである。高圧空気をノズル下方から上方のノズル広がり部に噴出させるのは, 下方からの水流を誘起することによりノズル内の水流量を増加させることを意図しており, これまでに有効な方法であることを確認している。噴出角度は水平方向を 0° とし, 反時計回りの角度を表記する(図4中 Ejection angle 参照)。実験は回流水槽内の水中に推進ノズルを固定して行った。図3上部は実際に使用した回流水槽の写真, 図3下部はこの回流水槽のふかん概略図を示す。回流水槽の水路断面の寸法は1500 mmW×1200 mmD, 側面と底面に取付けられた観測窓の寸法は5550 mmLである。実験では観測窓の中心, 水深270 mmの位置に推進ノズルを固定した。この回流水槽は閉水路中に設置されたモータ(主循環30 kW×1, 分流3.7 kW×2)によりポンプを駆動して水流速度を制御し, 0.00~2.00 m/sの任意の流速で水を循環させることが可能となっている。また整流装置としてエアバルブによる表面境界層吸込ダクトや側面境界層加速ノズルなどを備えており, 水路内で一様な流速を得ることが可能である。

Fig. 2 Two-dimensional semi-open-type nozzle

Fig. 3 Circulating water channel

2.2 推力測定実験 本実験では回流水槽のポンプにより水を循環させると図2のノズルに相対的に左(上流側)から右(下流側)へ水流が生じるが, 本研究ではノズルから発生する推力(ノズル推力)とは高圧空気を噴出した効果による推力と定義している。以下にその測定方法と手順を示す。

ノズル推力は図4に示すようにノズルを設置し, まずノズル内に高圧空気を噴出せずに一定流速 U [m/s] で水を循環させる。このとき, 回流水槽に設置された台座とノズルを固定する直径30 mmのステンレス棒の間に取付けられたロードセルを介してノズル抵抗

Fig. 7 Relation of between Compressor-pressure and Ejection-pressure

Fig. 8 Relationship between thrust and flow velocity (Compressor-pressure 0.7 MPa)

圧空気による境界層が発達し、間欠的に噴出する場合に比べて損失が大きくなったと考えられる。なお、本論文では高圧空気の圧力値の表記として、コンプレッサの圧力値を用いる。

3・2 推力 高圧空気の噴出角度によって推力を得る機構は多少異なる。本論文では、3・4節で述べる界面波が水流速度の増加に伴い変化していくようすが最も顕著にみられた噴出角度 45° の実験結果を示す。空気のコンプレッサ圧力を 0.7 MPa と設定して、高圧空気を連続的に噴出した場合と間欠的に噴出した場合のノズル推力測定結果を図8に示した。ノズル推力は間欠的に噴出する場合に比べ連続的に噴出する場合のほうが大きく、船体抵抗の発生しない水流速度 0.0 m/s の場合を除いて水流速度が増加するに從い推力はほぼ単調に増加した。連続噴出の場合は、水流速度 0.5 m/s から推力が単調に増加するが、水流速度 1.75 m/s のとき推力は著しく減少し水流速度 2.00 m/s で推力値は再び上昇した。この流速 1.75 m/s のときに推力が減少する理由については、ノズル内流れの観察結果および圧力変動測定結果とともに3・4節で考察す

Fig. 9 Relationship between propulsive efficiency and flow velocity (Compressor-pressure 0.7 MPa)

る。

一方、連続的に噴出する場合に比べて、間欠的に噴出するときの水流速度に從う推力増加の割合は、微小ではあるが増大しており、連続噴出の際にみられたような推力の落込みはなく、単調に増加した。また、間欠的に噴出する周期を変化させても推力の傾向はほぼ同様の傾向を示したが、噴出周期 0.41 s の推力値は周期 1.15 s より少し大きい値が得られた。以上の噴出方法の違いによって推力値が異なる理由についても、3・4節にてノズル内流れの観察結果および圧力変動測定結果とともに考察する。

3・3 推進効率 同じ圧力で空気を噴出した実験において、間欠的に噴出を行うと連続的に噴出した場合に比べて、推進の駆動源として噴出する空気の量は少なくなる。そこで連続噴出および間欠噴出の推進効率について噴出される空気の量を考慮して定義し、推進ノズルの性能を考察する。

推進効率は式(2)で表される。

$$\eta = \frac{E_N}{E_A} \times 100[\%] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで E_N は出力(W), E_A は入力(W)である。

入力とは単位時間に供給される圧縮空気の仕事量をとる。圧縮空気が定温膨張するものと仮定すると、圧縮空気が噴出口よりノズル内に噴出される瞬間の圧力から大気圧まで膨張する際になされる仕事量は式(3)で与えられる。

$$E_A = Q \times R \times T \times \ln(P/P_0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで Q はあらかじめ実験により測定した質量流量 (kg/s), T は気体の温度(K), P は気体注入圧力(Pa), P_0 は大気圧(Pa), R は気体定数 [$\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$] である。一方、出力は式(4)で表される。

$$E_N = Th \times V \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで Th は推力(N), V は流速(m/s)である。

以上の定義より、圧縮空気の噴出圧力を 0.7 MPa としたときの推進効率を水流速度の関数として図 9 に示す。推進効率は圧縮空気の噴出方法にかかわらず水流速度の増加に応じて上昇する傾向にある。空気を連続的に噴出する場合に比べ間欠的に噴出する場合の推進効率は大きく、噴出周期 0.41 s の場合では連続噴出した場合の 2 倍程度の推進効率となっている。また、噴出周期 0.41 s に比べて小さいものの、噴出周期 1.15 s の推進効率も連続噴出の推進効率よりも増大した。これは高圧の空気をノズルスロート下部から連続的に噴出することによって、ウォータジェットとして加速させる水流がノズル広がり部に流入することを妨げているのに対して、間欠的に空気を噴出することでノズル内を水で満たした状態で圧縮空気を噴出し、推力を得るのに十分な水流を加速させることが可能となり効率が増大する。

3・4 水流速度に伴うノズル内流れと圧力変動

3・4・1 圧縮空気を連続的に噴出する場合 コンプレッサの空気圧 0.7 MPa において、噴出角度を 45° に固定し、連続的に高圧空気を噴出した場合の観察および圧力測定の実験結果を図 10 に示す。水流速度を 0.25 m/s ごとに増大させて行った実験のうち、図 10(a) は水流速度 0.00 m/s 、(b) は 0.25 m/s 、(c) は 0.50 m/s に水流速度を設定して得られた実験結果を示す。また、図 10(d) には水流速度 1.50 m/s 、(e) は 1.75 m/s 、(f) は 2.00 m/s の比較的水流速度が大きい場合の実験結果を示す。図 10(a)～(f) の上図は界面波が最も顕著に現れたときのノズル内の流れを示し、下図はそれぞれの水流速度で測定した圧力分布(ゲージ圧) 1.00 s 間の履歴である。図 10 中の①～⑥は図 6 に示した位置に取付けた圧力計の位置番号に対応している。

図 10(a) から船体の走行速度 0.00 m/s 、すなわち水流速度 0.00 m/s のときは水流と気流の二相は完全に分離していることがわかる。さらに、この気液二相界面は前方からノズル内に流入してくる水流と、ノズルスロート下部から噴出する気流との作用による水面波(本論文では界面波と表記)として現れる。流動は以下のように周期的に繰返された。まず、高圧の空気をノズル広がり部に噴出するとノズル内の圧力は上昇し、下流の水流を加速させる(おおむねこのとき、界面波が顕著に現れた)。その後、ノズル内の圧力が降下し、膨張した気流をノズル後方へと排気しながら水流がノズル内に流入する。この際、噴出口から高圧空気噴流も水流の流入に伴い押し上げられ、噴流角度は 45° 以上になりノズル広がり部へと噴出し、気流の領

域は水流の領域に閉じられる。ノズル広がり部への空気噴出によって再び圧力が上昇し、下流の水流を加速させることとなる。この流動の周期はノズル壁面での圧力変動の周期と一致し、水流速度 0.00 m/s の場合の周期は 0.23 s であった。

水流速度 0.25 m/s のとき、 0.00 m/s の界面波の波長よりも長い波長をもつ流動パターンとなるがほぼ同じように周期的な流動を繰返した。またこのとき、ノズル内圧力値は他の水流速度に比べ最も高い値が得られた [図 10(b)]。これは水流がノズル前方から速度をもって流入することで、空気噴流のせん断力によってノズル広がり部へ誘起される水流量が増し、かつ高圧空気が水流に完全に閉じられるために他の水流速度に比べ高い値が得られたと考えられる。水流速度 0.50 m/s [図 10(c)] も界面波の波長が流速に応じて長くなったが、ノズル内はほぼ同様の流動となった。水流速度 1.50 m/s [図 10(d)] になると、これまでと同様に周期的な流れを繰返すものの、界面波の山の部分がノズル内でも下流の部分で現れるようになり、噴出した気流の領域が増大し、その結果としてノズル内での圧力は減少していく傾向にあった。さらに高速域では界面波の波長がノズル長さ 353 mm より長くなり、噴出した高圧空気は水流に閉じられることなくノズル後方へと流れていった [図 10(e), (f)]。水流速度 1.50 m/s では周期が不規則なものの圧力変動が生じていたが、 1.75 m/s 以上の流速では圧力変動は極めて小さくなる。

以上から、低速域では閉じられた空気が直接圧力差によって水流を加速させていたが、流速が増加し界面波の波長が長くなるに従い、水流の加速原理は噴出された圧縮空気との乱流混合による運動量交換に移行していく。図 8 で示したように水流速度 1.75 m/s において著しく推力が減少したのは、加速原理の移行過程によるものと考えられる。このとき、噴出空気のエネルギーは界面を乱すことに消費され、水流の加速が不十分になると推測できる。

3・4・2 圧縮空気を間欠的に噴出する場合 前述のように、界面波の波長は水流速度に依存し、空気が水流に閉じられるか否かについては噴出角度、噴出圧力およびノズルサイズが複雑に関係するが、気流を間欠的に噴出することにより、ノズル内に十分水が流入したときに空気を噴出すれば、液相が気相を閉じこめ気相部分の圧力が上昇すると考えられる。

水流速度 1.75 m/s のときの間欠的噴出周期 1.15 s 、噴出時間 0.55 s および周期 0.41 s 、噴出時間 0.20 s としたノズル内観察結果と圧力測定結果を図 11, 12

Fig. 10 Flow inside the nozzle and history of pressures on the nozzle wall with continuous gas ejection

Fig. 11 Flow inside the nozzle and history of pressures on the nozzle wall with intermittent gas ejection of period 1.15 s on flow velocity 1.75 m/s

Fig. 12 Flow inside the nozzle and history of pressures on the nozzle wall with intermittent gas ejection of period 0.41 s on flow velocity 1.75 m/s

に示した。

(1) 噴出周期が長い場合 噴出周期 1.15 s, 噴出時間 0.55 s の場合, ノズル内流れはノズル内に水が十分流入した後は連続噴出の場合と同様に噴出した気泡の塊が水流を下流へ加速する。噴出周期が長い場合の空気噴出時間は連続噴出の場合の界面波の発生周期よりも長いので, 1 回の噴出時間で界面波は 2 回発生した後に無噴出状態となり再びノズル内が水流で満たされる。ただし, この場合の空気無噴出時間は 0.60 s であり, 水がノズル内に流入するためには十分すぎる無噴出時間であるために, 噴出周期が短い場合よりも推力が減少した。また, ノズル内圧力分布においては推力に寄与する①～③での圧力値が高くなった。連続

噴出の場合は水流速度 1.75 m/s 以上になると圧力の変動は生じなくなったが, 間欠的に空気を噴出することで圧力の変動が生じた(図 11 下図)。

(2) 噴出周期が短い場合 周期 0.41 s 噴出時間 0.20 s の場合でも, 無噴出時間は 0.21 s であり水がノズル内に流入するには十分な時間となっている。この噴出周期が短い場合は, 連続噴出で界面波が発生する周期と噴出時間はほぼ同じ時間であり, 噴出した気流が水流を加速するときに空気の噴出を停止し, ノズル前方から水が流入することで再びノズル内が満たされる。

図 12 下図に示すようにノズル内の圧力分布は水流速度 1.75 m/s であっても噴出周期が長い場合と同様に圧力は変動した。このことから, 噴出した空気が水流によって閉じられた状態になってから水流を加速することで, 水流速度 1.75 m/s においても連続噴出の場合のような推力の著しい減少が生じなかったといえる。

このように, 流速が増加しても間欠噴出を行うことによってノズル壁面で圧力を回収し推力を得ることが可能となるが, さらに有効にノズルを利用して推進力を得るためには最適な噴出角度やノズル形状等を求める研究が必要である。

4. 結 論

回流水槽を用いて高速度ビデオカメラによるノズル内流れの観察とノズル壁での圧力分布を測定することにより水流速度が 0.00 m/s でない場合の船舶推進用二次元ノズル内流れの詳細なようすを明らかにした。得られた結論を以下に示す。

(1) 噴出角度 45° でノズル内に連続的に高圧空気を噴出した場合, 低速域では気相と液相は完全に分離し, 界面には界面波が生じることを確認した。界面波の波長は水流速度に依存し, 1.75 m/s 以上の流速では波長がノズルサイズの 353 mm を超えるために気流は水に閉じられることなく後方へ抜けていきノズル内の圧力が低下した。

(2) 高圧空気の噴出を間欠的にすると, 推力自体は低下したが, 空気流量を考慮した推進効率を増大させることができた。間欠的に噴出することで流速が増加しても噴出した高圧空気を水が一時的に閉じ込め, 空気を高圧に保つことが可能となりノズルを有効に利用できることがわかった。

回流水槽による実験の場を提供していただいた神戸大学海事科学部海事安全管理学講座の皆様にて感謝を表す。

文 献

- (1) Witte, J. H., Predicted Performance of Large Water Ramjets, *AIAA 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., ほか 4 名, Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. B*, **59**-565 (1993), 268-274.
- (4) Tsutahara, M., ほか 2 名, Performance Improvement of Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas (Effect of Increasing Water Flow Rate in the Nozzle), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. B*, **61**-583 (1995), 245-250.
- (5) Sakamoto, M., ほか 2 名, Performance Improvement of Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas (Effect of the Device with Which an Actuator Was Equipped), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. B*, **61**-590 (1995), 3728-3734.
- (6) Tsutahara, M., ほか 3 名, Performance improvement of Ship Propulsion Equipment Driven by Injecting Moist air, *JSME Int. J. Ser. B*, **43**-3 (2000), 427-433.
- (7) Tsutahara, M., Ogawa, K. and Sakamoto, M., Study of Ship Propulsion Equipment Directly Driven by Steam, *Proc. 2nd Int. W. S. Ship Hydro.*, IWSH 2001 (2001), 94-100.
- (8) Tsutahara, M., About a Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas (in Japanese), *Turbomachinery*, **24**-11 (1996), 40-45.
- (9) Tsutahara, M., ほか 3 名, Nozzle flow of a ship propulsion equipment driven by high-pressure gas, *Proc. FEDSM '03 : 4th ASME-JSME Joint Fluids Eng. Conf.*, Honolulu, Hawaii, USA, (2003-7), CD-ROM.