高圧空気により駆動される船舶用推進装置*

蔦原 道久^{*1}, 坂本 雅彦^{*2}, 木村 雄吉^{*1}
橋本 潔^{*3}, 美濃 雅彦^{*4}

Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas

Michihisa TSUTAHARA, Masahiko SAKAMOTO, Takeyoshi KIMURA,
Kiyoshi HASHIMOTO and Masahiko MINO

This paper proposes a new type of nozzle which generates a high-speed two-phase water jet as a propulsion device for a ship. The high-pressure gas accelerates the two-phase jet by temporal and local pressure gradients; therefore, the principle of accelerating water flow is different from that of jet pumps. A two-dimensional nozzle was set in a towing tank, and the thrust was measured for various parameters such as pressure of the injection gas, towing speed, air injection angle, and front and/or rear opening angle. The thrust increases monotonically as the gas pressure increases for all flow velocities, but it converges to a maximum value. The propulsion efficiency increases as the flow velocity increases, but it is higher when the gas pressure is lower. It was proven that the proposed device is applicable to ship propulsion by operation of a model ship using this device.

Key Words: Ship Propulsion, Bubble, Multiphase Flow, Water Jet, Nozzle Flow

1. 緒 言

本研究は高圧空気を駆動源とする船舶の新しい推進装置を提案したものである。これはノズル内を一定の流速で水流が通過する際、ノズルのスロート下流より高圧のガスを吹き込み、注入された気泡の膨張を利用して水流を二相流ジェットとして高速に加速させ、その反動を推力として利用するものである。したがって、本推進装置ではあらかじめノズルに流入する水流をポンプ等により加圧・加速する必要がなく、極めて単純な構造をしているのが特徴で、この推進機単体で推進装置として機能する。

このようなウォータジェット推進はすでに20年ほど以前、Witteによりウォータラムジェット⁽¹⁾という名で理論的な研究が行われているが実験的な報告については見られず、以後研究も続けられている様子もない。また、実際に船舶の推進装置として実用化が試みられた報告も見あたらないのが現状である。

前報⁽²⁾ではほぼ直管の形状を有する軸対称ノズル

を用いて二相流ジェットを大気中に放出し、ウォータジェット発生メカニズムならびにノズルの諸特性について考察した。その結果、水の速度の増大率が10倍以上と極めて大きく、ノズル内の軸方向の圧力こう配によらず水を加速しており、その加速原理は高圧の貯気槽からノズルを通して高速の気流を発生するものとは本質的に異なっていることを明らかにした。

本報では、水の流れに垂直なく形断面流路を有する二次元ノズル(これを以下有底ノズルと呼ぶ)とこの二次元ノズルの底を抜いたノズル(これを以下無底ノズルと呼ぶ)の2種類のノズルを用いて推力を測定するとともにノズル内の高圧空気噴出状態を観察し、推力発生メカニズムならびにその特性を調べた。また、本推進原理を利用した推進装置を模型船に設置しその走行特性実験を行い推進装置として機能することを確認したので以下に報告する。

2. 実験装置と方法

実験に用いた有底ノズルの構造は図1に示すように全長420 mm、全幅150 mm、スロート部の高さ30 mmであり、このノズルの底を抜いたノズルを無底ノズルとして使用した。高圧空気は圧縮機により圧縮された後、高圧ホースを介してノズルスロート上部に設

* 原稿受付 平成4年12月28日。

*¹ 正員, 神戸大学工学部(〒657 神戸市灘区六甲台町)。

*² 正員, 奈良工業高等専門学校(〒639-11 大和郡山市矢田町)。

*³ 正員, 航空大学校(〒880 宮崎市大学赤江)。

*⁴ 学生員, 神戸大学大学院。

けられた直径 15 mm のパイプである高圧空気室に供給された後、内径 1 mm の小孔を通して流路幅方向 7 箇所からノズル内の水流に注入される。

実験は有底と無底の 2 種類のノズルを図 2 に示す流路幅 500 mm のえい行水槽に設置し、ノズル本体上部に固定した直径 10 mm のステンレス棒のひずみゲージよりノズル推力を測定するとともに、ノズル側壁からビデオカメラを用いて高圧空気の噴出状態を観察した。なお、えい行中ノズル本体は、姿勢が変化しないよう台車よりつり下げている。

ノズル推進効率を η として、ここでは力学的な要素のみを考え、ノズル出力 E_o と高圧空気の流入および膨張による仕事 E_i との比と定義し、次式を用いて計算した。

$$\eta = E_o / E_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、ノズル出力 E_o は測定により得られるノズル推力 T_n [N] とノズル前方の水の流速 U_o [m/s] の積で与えられ、次式で表される。

$$E_o = T_n \cdot U_o \quad \dots\dots\dots (2)$$

一方、入力値である高圧空気のなした仕事 E_i は高圧空気がノズル内に注入される瞬間の圧力から大気圧まで等温変化すると仮定し、次式で与えた。

$$E_i = G_a \cdot R \cdot T \cdot \ln(P_h / P_o) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで R は気体定数 [N・m/(kg・K)]、 T は絶対温度 (K)、 P_o は大気圧 (Pa) を示す。なお、 G_a は高圧空気の質量流量 (kg/s) を表し空気室孔より噴出する空気を容器に取り込むことにより測定し、 P_h はノズル内空気室の噴出孔出口での全圧 (Pa) とし噴出孔出口に設置した圧力センサにより直接測定した。

実験は高圧空気圧力と高圧空気注入角度 ϕ 、ノズル前部開き角 θ_1 と後部開き角 θ_2 、そしてノズルのえい行速度 U_o (ノズル前方の水の流速に相当) を実験のパラメータとし、有底ノズルのノズル推力を測定するとともに無底ノズルの結果と比較した。

3. 実験結果

3.1 空気圧力と空気注入角度 ϕ による影響 ノズルに注入される空気圧力とノズル推力の関係を空気注入角度 ϕ をパラメータに図 3 に示す。図 3 中、 0.515×10^5 Pa におけるノズル側壁からの流動パターンを、空気注入角度が 30° の場合を図 4(a) に、 60° の場合を図 4(b) に模式図と併せてそれぞれ示す。模式図中の斜線部が気泡を、斜線部内の矢印が噴流の流れの方向を表す。

空気注入角度が一定の場合、空気圧力が増加するに伴いノズル推力は単調に増加するが、空気圧力が一定

の場合空気注入角度が 15° と 30° のノズル推力は 60° の場合に比べおよそ 2.0～3.4 倍増加していることがわかる。空気注入角度が 30° の流動パターン (空気注入角度が 15° の場合においてもほぼ同様な結果を示す) では、ノズルの後方ほぼ全域にわたって気泡が均一に分布しているが、空気注入角度が 60° の流動パターンでは注入された高圧気泡がノズル底板の壁面に直接衝突しノズルに流入する水流量が低下し、またノズル後方には急激に気液の混合が起こる領域が存在していることがわかる。これは一種のミキシングショック⁽³⁾であろうと考えられるが、供給圧力の低下に伴いノズル上流側へ移動しており、後述するようにノズル推力の低下に関連していると考えられる。

3.2 ノズル前部開き角 θ_1 と後部開き角 θ_2 による影響

ノズル前部開き角 θ_1 とノズル推力の関係を図 5 に示す。ノズル前部開き角が小さくなるに伴いノズル推力は低下する。これは図 6 に示すように前部開き角が -10° の流動パターンが図 4(b) とほぼ同様な結果を示すことから、ノズルに流入する水流量の減少により推力の低下をもたらしていると考えられる。

一方、ノズル後部開き角 θ_2 とノズル推力の関係を図 7 に示す。ノズル後部開き角が増加するに伴いノズル推力は単調に増加する。図 8 に示すようにノズル後部開き角が 0° の流動パターンは図 4(a) とほぼ同様な結果を示すがノズル推力は低下している。これは、高圧気泡に加速された水流の反作用の力をノズル後部

1. High Pressure Air Chamber 2. Hose (to Compressor)
3. Air Feeding Hole [ϕ : Air Injection Angle, θ_1 : Front Opening Angle, θ_2 : Rear Opening Angle]

図 1 二次元ノズルの構造

図 2 実験装置概略図

開き角が 0° のため回収されず、結果としてノズル推力が低下していると考えられる。このことからノズル推力を向上するためにはある程度の板の傾き角が必要であると考えられるが、ノズル後部開き角が大きいと後述するようにむしろノズル推力の低下をもたらすと考えられる。

図3 空気圧力とノズル推力の関係
($U_0=0.15$ m/s, $\theta_1=10^\circ$, $\theta_2=15^\circ$)

図4 ノズル内流動パターン

3.3 ノズル前方の水の流速 U_0 による影響
ノズル前方の水の流速(船の推進速度に対応している)とノズル推力の関係を、ノズルに注入される空気圧力をパラメータとして図9に示す。空気圧力が一定の場合、水の流速が増加するに伴いノズル推力はやや減少したあと増加し、さらに流速の高速域でノズル推力は最大値をもち、その最大推力時の流速は空気圧力が増加するに伴い高速側に移動することがわかる。推力が、流速の増加に伴いいったん低下するのは、静止推力から移動推力に移るためであり、その後増加に転じるのはノズルに流入する水の流量が増加するためであると考えられる。上記は通常のターボジェットエンジン等に見られる性能曲線⁽⁴⁾と同様な傾向を示している。この傾向からノズル前方の水の流速つまり船の推進速度と空気圧力をさらに増加することにより、ノズル推力増加が期待できる。

3.4 無底ノズルによる結果 無底ノズルによる

図5 ノズル前部開き角とノズル推力の関係
($U_0=0.15$ m/s, $\phi=30^\circ$, $\theta_2=10^\circ$)

図6 ノズル内流動パターン($\theta_1=-10^\circ$)

空気圧力とノズル推力の関係を有底ノズルの実験結果と併せて図 10(a) に示す。同じ空気圧力において無底ノズルのノズル推力は有底ノズルの結果に比べおよそ 1.5~2.0 倍増加していることがわかる。これは図 10(b) に示す流動パターンからわかるように、ノズル

に注入された高圧空気により発生する気泡流と水流との界面に生じる大きな振幅の波が多量の水を液相として巻き込み、ノズル後方へこれをジェットとして加速しており、これが推力を増加している原因であると考えられる。ノズル前方の水の流速とノズル推力の関係を有底ノズルの結果と併せて図 10(c) に示す。全流

図 7 ノズル後部開き角とノズル推力の関係 ($U_0=0.15$ m/s, $\phi=30^\circ$, $\theta_1=10^\circ$)

(a) 空気圧力とノズル推力の関係

図 8 ノズル内流動パターン ($\theta_2=0^\circ$)

(b) ノズル内流動パターン

図 9 ノズル前方の水の流速とノズル推力の関係 ($\phi=30^\circ$, $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=10^\circ$)

(c) ノズル前方の水の流速とノズル推力の関係

図 10 無底ノズルによる実験結果 ($\phi=30^\circ$, $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=10^\circ$)

速域で無底ノズルの推力は有底ノズルの結果に比べおよそ1.5~2.5倍増加しており、その増加は流速の高速域でより顕著となっている。

3.5 ノズル推進効率 無底ノズルおよび有底ノズルのノズル推進効率とノズル前方の水の流速との関係を図11に示す。ノズル推進効率はノズル前方の水の流速が増加するに伴い単調に増加し、注入される空気圧力の増加に伴い低下していることがわかる。前者はノズルに流入する水の流速が増加するに伴いノズルに流入する水流量が増加するためであり、後者は高压空気圧力の増加に伴いノズルから流出するジェットは大きく加速されるものの水の流量は増加せず、ジェットとまわりの流れの速度との差が増加するためランキンの運動量理論からノズル推進効率の低下をもたらす。

このノズルでは推進効率はノズル前方の水の流速が増加するに伴い単調に増加していることから、高速走行時でノズル推進効率の向上が期待できる。

4. 考 察

以上の結果からノズル推力を向上するためには、ノズルに流入する水流量の増加が本質的であると考えられる。このノズルでは、発生する推力は前にも述べたようにジェットを噴出するときの反力であり、これはノズル内の圧力によるノズル内面に働く力の流れ方向成分を積分することにより与えられる。一方、ノズル内の流れは、注入された高压の気泡が極めて短い時間(10^{-3} sのオーダー)で膨張を終え、圧力波が下流方向へ伝ばし出口からの反射波も混在する非定常かつ非平衡な流れであると考えられる。

しかし、平均的な力である推力等を考察するには、ノズル内の平均圧力を考えれば十分であり、これを流

動パターンから推力と関連づけて以下に考察する。

スロート部とノズル出口の圧力差を一定としてノズル内の流れ方向の圧力こう配のみに注目する。ある断面に働く力はその断面の圧力(水圧は関係ないからこの場合一定とする)と断面積との積となり、この力の流れ方向のこう配がジェットを加速すると考える。

これにより、ノズルの面積が下流に向かって増加するとき、ジェットの加速がなくても、下流に向かって圧力の負のこう配が生じることになり、これは断面積一定の直管とは異なる。代表的な例が図12の破線(a)で示される圧力分布で、これはノズル後方に気泡がほぼ全域にわたり均一に分布する流れ[図4(a)]に対応している。

一方、一種のミキシングショックが観察された流動パターン[図4(b)と図6]ではスロート下流で液相と気相が分離し、気相を多く含む噴流が有底ノズルの底面に沿って流出している。このとき、気相は急速に膨張加速を行い、恐らく大気圧以下まで膨張する、そして急激な液との混合(ここではミキシングショックと呼んでいる)により減速および圧力上昇が起こりノズル出口の大気圧と釣り合う。このときの圧力分布は図12の一点鎖線(b)に示されたものとなり、結果としてノズル推力は低下するものと考えられる。

さらに、無底ノズルで観察された流動パターン[図10(b)]では、ノズル内に多量の水が供給されるため、ジェットの密度が増加し、力のこう配の絶対値が増加する。すなわち、図12の実線(c)に示されるように、圧力分布曲線は図12の破線(a)よりも全体に傾きの大きな上側の曲線となる。これは明らかに推力の上昇となる。

ノズルの推力上昇には、ノズル内の圧力をできるだけ高く保つのがよく、出口付近で急激に大気圧まで降

図11 ノズル推進効率とノズル前方の水の流速の関係($\phi = 30^\circ$, $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 10^\circ$)

図12 流動パターンから考察したノズル内流れ方向の圧力こう配

下するようなノズルがよい。このためにはノズル出口付近で急激に水流量が増加するタイプのものがよいことがわかる。

なお、ノズル後部開き角が過度に大きい場合、特に有底ノズルにおいては、ノズル内の質量が決まっておりました空気の膨張も終わっているから、連続の式を考えるとある点からは下流に向かって流速は減少し、圧力の上昇をもたらす。これは出口圧力を大気圧としているからノズル内の圧力減少となり、このときの圧力分布は図12の二点鎖線(d)に示されたものとなり、結果として推力低下となる。

本ノズルでは、空気の圧力で質量の大きい水を加速することが本質であり、効率はもとより、推力の上昇においても水流量の増加が重要であると思われる。

5. 模型船の走行特性実験

本推進原理が推進装置として機能することを検証するため、模型船を試作しその走行特性実験を行った。

試作した模型船の構造を図13に示す。模型船の推進機部は前述の無底ノズルと同じ構造であり、なら補助装置を必要とせず、この模型船単体で自力走行する。高压空気は圧縮機により圧縮された後、高压ホースを介して直径15mmのパイプより内径1.5mmの小孔を通して船体幅方向3箇所から注入されるが、今回はその注入角度を 30° とした。

実験は2mの助走区間を設け、船体の走行速度がほぼ安定する3mの測定区間にて推進速度をストップウォッチにより計測した。また、その速度における船体抵抗をばねばかりにより測定し、走行中は抵抗と推力が釣り合っているとして船体抵抗を推力とした。走行中模型船の姿勢を一定とし、ノズルの後部開き角は変化しないようにした。

推進速度と船体に供給される圧縮機圧力の関係を、ノズル後部開き角 θ_2 をパラメータに図14に示す。高压空気圧力が増加するに伴い推進速度はほぼ単調に増加しており、今回の実験範囲では最大0.8m/sに達した。圧縮機圧力を一定とした場合、後部開き角が 15° で推進速度は最も高いが、これは前に述べたように後部開き角が 30° において流路面積の増加率が大きくなるため、結果としてノズル推力が低下すると考えられる。模型船の走行状態を図15に示すが、注入された高压空気が船体後部より流出していることがわかる。

6. 結 論

2種類のノズルを用いて推力発生メカニズムならびに推力特性について検討を行った。得られた結論は

以下のとおりである。

- (1) ノズル推力は高压空気圧力の増加に伴い単調に増加する。
- (2) ノズル前後部板の開き角が増加するに伴いノズル推力は単調に増加する。
- (3) ノズル推力はノズル前方の水の流速のある値において最大値をもつが、この最大時の流速は高压空気の圧力の増加に伴い増加する。
- (4) ノズルに流入する水の流量を増加することはノズル推力を向上するうえで本質的なものであり、こ

1. High Pressure Air Chamber [Φ : Air Injection Angle, θ_1 : Front Opening Angle, θ_2 : Rear Opening Angle]

図13 試作した模型船の構造

図14 走行速度と圧縮機圧力の関係

図15 試作した模型船の走行状態

れを無底ノズルで確認するとともに、この特性を物理的なモデルで明らかにした。謝の意を表す。

(5) 本推進原理が推進装置として機能することを模型船による走行特性実験により確認した。

実験などいろいろお手伝いいただいた元神戸大学学生の小倉, 中川君, 神戸大学学生の石崎, 栗山君ならびに元奈良高専学生の今西, 小西, 杉本, 高野君に感

文 献

- (1) Witte, J. H., *AIAA Paper*, No. 69-406(1969).
- (2) 葛原・木村・橋本, 機論, 57-535, B(1991), 977-982.
- (3) Witte, J. H., *J. Fluid Mech.*, 36(1969)639-655.
- (4) 小倉, 航空原動機, (1990), 137-140, 共立出版.