高圧気泡の膨張を応用した船舶推進用ウォータージェット*

薦原 道久^{*1}, 木村 雄吉^{*1}, 橋本 潔^{*2}Characteristics of a Water Jet Driven by Expansion
of High-Pressure Bubbles

Michihisa TSUTAHARA, Takeyoshi KIMURA and Kiyoshi HASHIMOTO

A new type of nozzle generating a two-phase high-speed water jet is presented. The structure is of simple convergent and divergent type. High pressure air is injected into the water flow through thin holes opened downstream of the throat. The increasing ratio of the momentum is higher than 10. As the pressure of the air increases, the speed of the jet increases, but the efficiency decreases. The nozzle with a small opening angle seems to be better, and the holes should be opened near the throat. The speed of the water phase is, in general, higher than that of the air phase. The pressure upstream of the nozzle is not necessarily high, so that this nozzle can work by itself for ship propulsion. The mechanism of generating the water jet is also considered qualitatively.

Key Words: Water Jet, Two-Phase Flow, Ship Propulsion, Nozzle Flow

1. 緒 言

船舶の推進装置として現在用いられているのは圧力的にスクリュープロペラで、いくつかの改良はあるものの、基本的な原理は 200 年ほど変化していない。また一風変わったものとして、フォイトシュナイダープロペラがあるが、これは横流推進器であり原理として新しいものではない⁽¹⁾。浅い河川や湖沼で用いられるウォータージェット推進は推進機が上記のものと異なり、船体内部に設置されているというだけで、流体の加圧および加速に通常のターボポンプを用いており、原理的には新しいものではない⁽²⁾。

本論文で報告するウォータージェットとそれを発生するノズルは、基本的にこれらの推進装置と異なっており、機械的なアクチュエータを必要とせず、きわめて単純な構造をしているのが特徴である。すなわち、通常のノズル内を水流が通過する際、スロートの下流に高圧のガスを気泡として吹き込み、その膨張を利用して水を高速に加速する。これに似たものに、高温の水の沸騰を利用して噴流を加速する二相流のノズルがあ

るが⁽⁴⁾、本論文でのノズルは、高圧の気泡として外部からエネルギーを注入するとともに、後述するように運動量も注入することであり、噴流を加速する目的でノズル上流の圧力を高くするという必要はない。これは船舶の推進装置として使う場合、ポンプであらかじめ加圧しておくという必要もなく、このノズル単体で推進機として機能する。

このようなウォータージェット推進はすでに 20 年ほど以前に、Witte によりウォータラムジェット⁽⁵⁾という名で理論的に研究されたようであるが、実験的な研究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。Van Wijngaarden の解説⁽⁵⁾にもあるように、理由は不明であるが、著者らの最近の報告でも十分な推力が発生することが確かめられており⁽³⁾、特に実用化に対する障害があるとは考えられず、この以後も実用化への研究を進めていくことができると考えている。ここでは、広がり角の影響など、ノズルの諸特性について考察する。

2. 原 理

先に述べたが、ここで述べるウォータージェットは空

* 原稿受付 平成 2 年 4 月 2 日。

^{*1} 正員、神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町)。

^{*2} 正員、航空大学校 (〒880 宮崎市大学赤江)。

気の膨張を利用するのであるが、この場合の噴流は、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のは原理的に異なっている。後者の場合気流を加速するのはノズル内の軸方向の圧力こう配であり、圧縮性気体の定常ベルヌーイ式が成立する⁽⁷⁾。しかし、前者においてはエネルギーを外部から注入しているので、流れの前後を関連付ける簡単な式はない。また Witte の論文では、気泡の膨張により与えられたエネルギーにより流体の速度が増すという表現だけで、運動量についての考察はなされていない。エネルギーだけでは、気泡が水を下流へと加速することの説明はつかず、上流へと逆流する可能性もある。現実には Witte の推進装置が現実的に作動したか、あるいはするかは不明であるが、彼の装置では気泡はディフューザのすぐ下流で、スロートのいくぶん上流側から注入している。気泡は後述するように、きわめて早い時間で膨張を終えるので、水の実質的な流路面積はスロート部できわめて小さくなっており、これを通すのにスロート前後の十分な圧力差が必要となろう。さもないと、さきに述べたように水の逆流が起こるに違いない。

本論文で紹介するノズルでは、気泡の初期圧力が大気圧の数倍程度で、水の運動量が 10 倍近く増加する。また後述するようにノズル上流の総圧は水柱でたかだか 1 m であり、あきらかに圧力こう配によらず水が加速されている。この原理について十分に説明できるわけではないが、次のようなモデルを考えた。

まず、水流の中に高圧の気泡が注入されると膨張を始めるが、気泡自体は流れに乗って下流へ流れているので、気泡上流の水はほとんど減速することなく流れ続ける。そしてその下流に新たに導入された高圧の気泡は、下流の膨張した気泡より圧力が高く下流側の水塊を下流へと加速する。この気泡の上流側の水塊も加速を受けるが、上流側の水は気泡を含まないか、含ん

でいてもそれらの体積は下流側のそれに比べずっと小さく、慣性が高い。したがって気泡は下流側へと膨張しつつ水を下流へと加速する。下流側ではかなり気泡が混入しており実質の密度が低下しており、気泡の圧力により圧力こう配を形成するよりも、直接的に流速の変化として現れるものと考えられる。

これは、通常のノズル流れよりもむしろ水路内のプロペラの作用ににている。プロペラを通過する流体は、翼の負圧面が通過したあと負の圧力こう配により翼の回転面に流れ込むが、そのあとに通過する翼により加速される。一次元モデルで考えると、翼面上流、下流での圧力こう配はあるものの、翼回転面での負の圧力こう配は流体の減速を意味しない。すなわちこの場合翼回転面は一種の運動量面と考えられる。

今回のノズルもこれと同様、一次元で考えると気泡はエネルギー源であると共に運動量源でもある。ただ、翼と異なるのは負圧面がなく、上流の流体はノズルに流入するのにいくぶん運動エネルギー、より正確には気泡を流すだけの流速が必要である。これは Witte のノズルおよびここで報告するノズルでも、気泡は下流方向に注入されているのでそのエゼクタ効果、すなわち運動量の交換により水を加速することで十分である。したがってこのノズルはなんら補助装置を必要とせず単体で発進することができる。

3. 実験装置と方法

実験で用いたノズルは 3 種類で図 1 に示すように、長さ 220 mm、スロート部の内径は 30 mm で、ノズルの広がり角をそれぞれ 5、10、15° としている。ノズル本体と外部ケースとは取外しが可能で、それらの間に高圧空気室があり O リングにより気密を保っている。

図 1 ノズルの構造

図 2 実験装置概略図

高圧空気室から空気は内径 1.5 mm, 軸方向に 45° 傾いて開けられた孔からノズル内部に気泡として噴出する。孔はスロート下流に開けられており, 3 段で 1 段にノズル周方向均等に 8 個, 合計 24 個開いている。

実験装置全体の概観は図 2 に示されている。水流は貯水タンクからパイプを通してノズルに流れ込む。また空気はコンプレッサーにより圧縮され, 容積 1m³ の貯気槽に貯えられたのち, バルブを開くことによりノズルの高圧空気室に送られる。

ウォータージェットの推力は, ノズルの前方 5 cm に 40cm×30cm の平板を設置しこれに働く衝撃力を測定しこの値を用いた。目視で判断する限り, 噴流の平板での跳返りはなくほぼ平板で速度零となつて下の水槽へ流れ落ちていた。平板に働く衝撃力は平板を上部から支えている直径 10 mm のステンレス棒に取付けたひずみゲージにより測定した。

水の流量は単位時間の貯水タンクの水量的変化から読取り, 空気の質量流量は同じく, 貯気槽の単位時間の圧力減少から, 断熱変化を仮定して求めた。高圧室と貯気槽の圧力は高圧空気用のホースでつないでいるが, ホースの抵抗から両者の圧力には差があるので高圧室の圧力も測定し, これを気泡の初期圧力とした。

実験の手順は, まず貯水タンクを開いて水を流し, 流れが定常になり貯水槽のヘッドがノズルの軸から 1 m の高さになった所で, 空気バルブを開けて気泡を注入する。平板に働く衝撃力を測定するとともに, 3~5 s 経ったのちの貯水槽の水位の変化および貯気槽の圧力の変化を読んだ。この間の水位の変化は最大で 3 cm ほどで, 貯気槽の圧力変化も最大 10 % 程度であった。

ノズルの出口でのジェットのうち水の速度は, 平板に働く衝撃力 F から

$$F = \rho_w Q_w v_{wo} \dots\dots\dots (1)$$

から逆算した。ここで ρ_w , Q_w はそれぞれ水の密度および体積流量であり, U_{wo} は水の流速で添字 o はノズル出口での値を表す。上式において空気の運動量も含めて考えるべきであるが, 今回の実験範囲では, 空気の質量流量は水のそれに比したかだか 3 % ぐらいで, 実験の誤差範囲に入るので無視した。また後で述べるが一般に水と空気のそれぞれの平均速度は異なっており, 空気を含めて考えるとなんらかの仮定を必要とする。

空気のノズル出口での速度 U_{ao} は次のようにして計算した。高圧室から気泡として注入された空気は水と熱交換を行い, 水温が大気圧まで等温膨張するとし, ノズル出口での体積流量 Q_{ao} を求めた。これを式(1)

で得られた水の流速と, 体積流量から計算した水の占める断面積とノズル出口での断面積から, 空気の占める断面積を計算し, 空気の体積流量をこれで割って求めた。

推力は一応平板に働く衝撃力で定義したが, これは貯水槽からの静水圧力が含まれているので, この分についてはあらかじめ水だけを流して, 平板の衝撃力を出しておきこれを全体の衝撃力から差引いたものを, 正味の推力として

$$F_n = F - F_w \dots\dots\dots (2)$$

とした。 F_w は水だけの場合の衝撃力で, F に対する割合は空気の流入圧力が小さいとき, またノズルの広がり角が大きいとき大きい。以下これら正味の値を用いるので省略して推力とのみ呼ぶ。

推力係数として, ノズルのスロート部での断面積と水の動圧を用いて無次元化し

$$C_{Tn} = \frac{F_n}{1/2 \rho_w u_{wt} A_t} \dots\dots\dots (3)$$

と定義する。ここで添字 t は, スロートでの値を表す。

ノズルの効率としてここでは力学的な要素のみを考え, ノズル出口および入口を通過する力学的エネルギーの差と, 空気の流入および膨張による仕事との比と定義した。すなわち流入エネルギーは

$$E_i = P_i A_i u_{wi} + 1/2 \rho_w Q_w u_{wi}^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで添字 i は, ノズル入口での値を表す。また, 流出エネルギーは

$$E_o = P_o A_o \{ \alpha u_{ao} + (1 - \alpha) u_{wo} \} + 1/2 \rho_w Q_w u_{wo}^2 \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで α はノズル出口でのボイド率で, 出口断面での空気の占める面積比として定義している。また空気の運動エネルギーは小さいので無視した。高圧空気のなす仕事率は

$$E_a = P_h A_h u_h + \rho_a Q_a R T \log (P_h / P_o) \dots\dots (6)$$

と表される。ここで R は空気の気体定数, T は絶対温度での水温, 添字 h は気泡が流入してくる穴の出口での値であり, P_h は孔での圧力損失を無視して高圧室での圧力を用いた。また u_h は空気の質量流量と, 状態方程式から得られる高圧室での空気密度から求めた。また u_h による空気の運動エネルギーはきわめて小さく無視している。他の圧力はそれぞれの点での静圧を表しているが, ノズルの軸は水平面に一致させており, 軸に沿っての静圧測定によるとノズル内では変化がなく実質的にすべての点で大気圧であった。式(4)~(6)でもこれらの値には大気圧を用いて計算している。結局効率は次式で与えられる。

$$\eta = \frac{E_o - E_i}{E_a} \dots\dots\dots (7)$$

実験は上記3種類のノズルについて、空気流入の孔を3段24個と、下流側2段をセロテープでふさいで8個で行い、空気圧を3段階に変えてデータをとった。

4. 結 果

図3に一例として推力を水の流量の関数として、高圧室の圧力すなわち空気の流入圧をパラメータにとり示した。水の流量が増加するに従い、また空気の流入圧が増加するに従い推力は単調に増加する。これはすべてのノズルについて成り立つ。

式(3)で定義した推力係数を、ノズル出口での空気の体積流量と水の体積流量の比を用いて表すと、図4のようになる。ここでは広がり角5°の場合のみ示すが、他の場合も単調増加関数であり、推力係数はノズルの広がり角が小さいほうが、また孔の数が少ないほうが高い値となった。後者の理由としては孔の数が少ない場合、高圧室の圧力が上がり気泡の初期圧が上昇するためであり、同じ空気圧力であれば孔の数の多いほうが推力係数は高い。

広がり角5°のノズル内での水の速度の上昇を、出口速度とスロートでの速度の比で表したものを図5に示した。ここでスロートでの水の流速は流量 Q_w をスロートの断面積 A_t で割ることにより求めている。水の質量流量をかけたものが運動量流束であるからこれは水の運動量変化と等価で高圧室の圧力が高いとき10以上に達する。これらもここでは示していないが、推力係数と同じ傾向を示している。

ノズル出口での空気の流速と水の流速の比を図6に示すが、一般的には水の流速のほうが大きいことがわかり、特にノズルの広がり角が大きいとき顕著である。これは気相はかなり早い時期に大気圧まで膨張しほぼ平衡に達してその時点で水の加速は終わり、後は広がり角が大きいと空気は連続の式を満足するように

減速する。水は慣性が高いのでほとんど減速がなく高速で流出するものと考えられる。

ノズル出口でボイド率の一例を図7に示した。いずれの場合も流入空気の圧力が上昇すると、噴流の大部分を空気が占めるようになる。

広がり角5°および15°の場合のノズルの効率を、それぞれ図8および図9に示す。全体に流入空気の圧力が上昇すると効率は減少する。この理由として、推力には水の流量が大きくかわっており、これは空気の圧力を上げてほとんど変化がない。また流入空気の圧力を上げると水の上昇よりも空気がノズルに流入する際の仕事の量が増加し効率に低下が生じるものと考えられる。図9において、空気流入孔が多いほうが効率が高いように見えるが、これは同じ Q_{ao}/Q_w の

(a) 空気流入孔数8

(b) 空気流入孔数24

図4 推力係数(広がり角5°)

図3 推力と水流量との関係(広がり角5°, 孔数24)

図5 水の流速増加率(広がり角5°, 孔数24)

値において流入圧力が下がっているためである。

ノズル出口のウォータージェットの流れの様子を図10に示す。これはストロボによる撮影で露光時間はほぼ $1/1000\text{ s}$ ぐらいである。気相と液相はそれほど一様には混ざっておらず、かなり大きな構造をもっており、液相は気相内にカーテン状に分布している。

5. 考 察

今回の実験では、ノズルの広がり角は小さいほうが良いという結果が得られたが、これは一般の二相流ノズルと同様の傾向を示している。また空気流入孔も1段のほうが良い。しかしこれらの結果はむしろ今回の限られた実験条件に由来するものではないかと考えられる。特にノズル上流の圧力を低く抑えており、これ

により水の流量は実質的に決まっていた。したがって流入空気の圧力を上げて水の加速は大きくなるものの水の流量は増加せず、効率の低下をもたら

(a) 空気流入孔数8

(b) 空気流入孔数24

図8 ノズルの効率(広がり角5°)

(a) 空気流入孔数8

(b) 空気流入孔数24

図6 ノズル出口での空気と水の速度比(広がり角5°)

図7 ボイド率(広がり角5°, 孔数24)

(a) 空気流入孔数8

(b) 空気流入孔数24

図9 ノズルの効率(広がり角15°)

(a) 広がり角 5
($P_h = 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$, $Q_w = 0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$)

(b) 広がり角 15
($P_h = 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$, $Q_w = 0.0026 \text{ m}^3/\text{s}$)

図 10 噴流の様子

した。またこの場合、ランキンの噴流の推進効率に照らしても、船舶の推進装置として考えた場合、推進効率が低下することになる。

しかし、ノズル上流の圧力が増加すれば、流入空気の圧力の増加に対して効率は増加しその際気泡の十分な膨張にはある程度の広がり角の増加が必要となると思われる。

これまでの議論において、高圧空気は気泡として水流中で大気圧まで膨張するとしているが、ミクロに見れば気泡は振動、変形、合体など複雑な運動を行う。しかし、マクロには下流にいくに従い圧力が下がり、ほぼ大気圧で平衡に達すると考えてよいであろう。実際にノズル出口では、体積比で大部分が気相であり、水

のもつ慣性は空気の圧力に大きな影響をもたないと思われる。いずれにせよ、ノズル内流れは非帯に複雑で実験的にも解析的にもまだまだ調べるべき点が多すぎるが、ともかく今回の実験でこのノズルがウォータージェットの発生にきわめて有効であることが示された。

6. 結 論

船舶推進への応用を意図して、気泡の膨張を応用してウォータージェットを発生するノズルを提案しその特性を調べ、その有効なことを確認した。得られた結論は次のとおりである。

(1) 流入する空気の圧力が高いほど噴流の速度は増大する。

(2) 水の速度の増大率は 10 倍以上できわめて大きい。

(3) ノズルの広がり角は普通の超音速ノズルに比べ小さく、二相流のノズルに近いところで性能が良い。

(4) 流入圧力の増大に伴い、ノズルの効率は低下するが、これは水の流量が増えないことによるもので、空気、水の二相間のすべりには関係ない。

実験などいろいろとお手伝いいただいた、神戸大学学生の安藤哲、喜田淳文両君に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 大串, 理論船舶工学(下), (1958), 海文堂.
- (2) 丹羽, 高速艇工学, (1971), 舵社.
- (3) Tsutahara, M., ほか 2 名, *ISME '90, Technical Paper A-3-1* (1990).
- (4) Akagawa, K., ほか 4 名, *Proc. ASME JSME Therm. Eng. Joint Conf.*, (1987), 403.
- (5) Witte, J. H., *AIAA Paper*, No. 69-406 (1969).
- (6) Van Wijngaarden, L., *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 4 (1972), 369.
- (7) Liepmann, H. W. and Roshko, A., *Elements of Gas-dynamics*, (1957), John Wiley.