燃焼による高圧空気を駆動源とする船舶用推進装置の開発*

蔦 原 道 久**

1. はじめに

現在船舶用の推進装置として用いられているのは大部分がスクリュプロペラであり、高速船等に用いられるウォータージェット推進も、軸流あるいは斜流ポンプ等の、いわゆるターボ機械を応用したものである¹⁾。

われわれは、高圧空気を水中に噴射して水を加速し、ノズルによって推力を得る装置を開発してきた。この装置では、高圧空気の供給は別として、推力発生部分は単なるノズルであり、アクチュエーターを必要としない構造となっている。

高圧空気を吹き込んで水を加速すると聞くと、読者の中にはインジェクターを思い浮かべられる方が多いかもしれない、インジェクターは乱流混合により運動量交換を行い流体を加速するもので、本質的に極めて効率が悪い。しかしわれわれが提案している推進装置は、高圧空気により直接水を加速するもので、理想的には流れを乱さず加速が実現されれば高い効率での運転が可能である。本小論のはじめにインジェクター等とは異なっていることを強調したい。著者はこの装置に関連した装置の研究を足掛け16年行っており、これまでの研究を総括した概要を報告する。

2. これまでの研究経過

高圧空気を水中に噴出することによる船舶用推進装置については、1960年代からこれまでにいくつか提案されている^{2), 3)}。たとえばWitte³⁾は図1に示すような「ウォーターラムジェット」と呼ばれる装置を提案している。軸対称なノズルを水流に設置し、スロート下流から高圧の空気を導入するものであり、理論的な研究を行ったが、実験的な検証は行っていないようである。おそらく、実験結果が思わしくなかったので発表を控えたのではないと思われる。

このウォーターラムジェットの性能が悪い原因とし

て次のことが考えられる。まずスロート下流のノズル拡大部に高圧ガスを導入することであり、その下流でノズル径が小さくなっている。こうなっている理由は不明であるが、この部分では壁面に働く圧力は抵抗として働く。また気泡の膨張とともに水流が加速されると考えているようであるが(気泡が徐々に膨張するような概念図となっている)、実際には気泡はミリ秒のオーダーで膨張を終了し(水流が10 m/sでも数cmで膨張を終える)、水流の加速は基本的に、インジェクターと同じと考えられる。すなわち、乱流混合による運動量交換をおこなっており、損失が大きい。

また軸対称ノズルを用いていることが、致命的な問題である。というのは、水の流入は管の前方からのみ可能であるが、スロート下流の気泡の膨張により水の流入が妨げられ、実質的にスロート下流は気体で占められることになる。これはランキン(あるいはフルード)の推進効率^{4), 5)}から、密度の小さい流体を加速することとなり、効率が悪い。

そこで我々は下部が水流に開いた半開ノズルを用いることにより、これらの問題点を解決したと思っている⁶⁻¹¹⁾。ノズル形状は図2に示すように2次元で末広がりとなっており、壁面の勾配が大きな部分に水で高圧のガスを閉じ込めることにより推力を得るものである。

運動量理論で考えるなら、高圧ガスで水を下流に加速し、その反力(推力)をノズルで受ける装置である。

多くの実験的な研究を行ったが、結論として、ガスはノズル下方から噴出するのがよく、これはノズル内への水の流入を促すことによる。この際ノズル内流れ

図1 Witte によるウォーターラムジェットの概念図

*原稿受付 平成 21 年 9 月 29 日.

**正会員 神戸大学(神戸市灘区六甲台町1-1).

図4 パルスデトネーションによる圧力波を用いた推進器の実験装置概要

図5 半開ノズル形状

図6 平均推力とパルス周波数との関係 ($\theta_1=45[\text{deg}]$, $\theta_2=15[\text{deg}]$)

3. 3 実験結果および考察 燃焼パルスの周波数を 1 Hz から 20 Hz 間で変化させ、ノズルによって得られる推力を求めた。図5におけるノズル壁面の傾き角を $\theta_1=45[\text{deg}]$, $\theta_2=15[\text{deg}]$ と設定した場合の結果の一部を、図6に示す。図6(a)から推力はパルス周波数の増加に伴い単調に増加するのではなく、今回の装置では流速にもよるが、10 Hz あたりで最小となり、あとは単調に増加する結果となった。

また水槽の流速すなわち船体の進行速度を変えて、推力の変化を調べた。その結果図7に示すように、我々の今回の実験範囲において、推力は進行速度によらずほぼ一定の値を保ち、これは速度の増加に伴い、ノズル内への水流量が増加するためと考えられる。

図8に(a) $U=0.9[\text{m/s}]$, $f=2[\text{Hz}]$ の結果、(b) $U=0.9[\text{m/s}]$, $f=12[\text{Hz}]$ の結果および(c) $U=0.9[\text{m/s}]$, $f=30[\text{Hz}]$ のノズル内流れを示す。ここでは次式で定義されるストローハル数 $St = fD/U$ (ここで D として気流噴出孔の直径を取っている) で整理している。右側の図は差分格子ボルトツマン法による数値シミュレーションにより得られた結果であるが、今回は紙面の都合で説明を省略する。

これらの図から、パルス周波数 2 Hz においては、高圧ガス (高圧のパルス波としてノズルに導入される)

図7 平均推力と流速 (走行速度) との関係 ($\theta_1=45[\text{deg}]$, $\theta_2=15[\text{deg}]$)

は、水中に柱状に突入する。この場合ノズル流入部で流れは剥離しており、気柱の半径方向の膨張が顕著でないことから、ここでの圧力はそれほど大きくない。この結果ノズル内圧力の上昇が十分でないことが分かる。

図 8 ノズル内流れ。可視化写真と数値計算結果
($\theta_1=45[\text{deg}]$, $\theta_2=15[\text{deg}]$)

周波数が 10 Hz において、推力が下がる理由については難しいが次のように考えている。ノズル内はほぼ気泡流で占められ、水による高圧部の閉じ込めが起こらず、また高圧波の水中への突入が起こっている。そのためノズル内の圧力が下がることによる。

一方周波数が 30 Hz となると、高圧波の水中への突入は弱くなり、気泡の軌跡から水流が大きく加速されているのが分かる。

今回のデータを比推力を用いて整理した。比推力 I_{sp} は推進剤の重量に対する推力の値として次式で定義される。

$$I_{sp} = \frac{Th_{ave}}{mg} \frac{1}{f} \quad [s]$$

mg が推進剤の重量を表し、ここでは一回の燃焼のために注入したプロパン、空気および酸素の総重量とした。

パルスの周波数の増加に伴い比推力は減少するが、10Hz を超えて徐々に増加しあとはほぼ一定となる。また進行速度が増加しても比推力はあまり変化せず、広い範囲の速度で比推力は一定値となることが分かる。

(a) 比推力とパルス周波数との関係

(b) 比推力と流速との関係

図 9 比推力 ($\theta_1=45[\text{deg}]$, $\theta_2=15[\text{deg}]$)

4. 問題点と考察

間歇的な燃焼による高圧ガスの供給は、非常に強い非定常性を持ち、ノズル内の圧力は 1 サイクルの間に大きな正圧から負圧にまで変化する。

これまでの知見では、ノズル内が負圧に下がった際には、ノズル上流の管に水が吸入される、次の圧力波がノズルに達する際にこの水はノズル内に排出されるが、実はこの水流は推力発生にあまり貢献せず、ノズルの入り口で大きく剥離し、ノズル内の圧力を減少させている。

これは水の噴射とノズルとの組み合わせでは、上記の理由から性能低下をもたらすが、ノズルを用いない場合は、水流の加速は有効である、これは管内の水が燃焼管の高圧ガスを閉じ込め、燃焼管背後（図 4 では最右側壁面）が比較的長時間力を受けることによる。

またノズルの性能を上げるには、高圧の空気ができるだけ水流を乱さずに下流へと加速することが必要である。実際には気液界面は低周波の高速噴流に対してはまったく脆弱で容易に局所的に変形し高圧を支える

ことができない。

水面の変形を考慮し、かつ負圧にたいする適切な処置を考えるには、ノズル内流れを積極的に非定常な流れであると捉え、この非定常性をうまく利用したノズルの開発が必要となる。これについては、パルスの1サイクル中に変形するノズルを用いた実験を行い、性能向上の可能性を見出しているが、詳細な検討はこれからである。

ノズル内に水流を強制的に導入する方法はこれまでも推力を増加させることがわかっているが⁸⁾、水流を増加させるために消費されるエネルギーにまさる推力増加が得られるかについても、今後検討してゆきたい。

また、現在は燃料としてプロパンを使っているが、水素を燃料として使えば、先に述べた水蒸気による性能向上と同様の効果が期待できる。すなわちノズル内で水蒸気が凝縮し、下面からの水流の増加、ひいては推力増加が期待できるが、我々の研究室では安全性の見地から、水素使用には踏み切っていない。

著者もあと定年まであまり年月がないという状況になった。この研究を実用段階に持って行くには、かなり時間的にきつくなってきたというのが本音である。現在の推力を1桁上げるべく、なりふりかまわず研究を進める覚悟である。どこかにかならずブレークスルーがあるはずだと信じている。

謝辞

本研究に共同研究者として参加いただき、またパルスデトネーションエンジンを導入する際に多くのノウハウを伝授いただいた青山学院大学林光一教授、長年共同研究を行ってきた奈良工業高等専門学校坂本雅彦准教授、また以前の研究スタッフであった大阪産業大学小川和彦教授、研究を推進する上で大きな貢献をいただいている神戸大学道脇昭技術職員に感謝いたします。また神戸大学海事科学専攻の内田誠教授、油木代一技術職員には実験にご協力いただきました。またこれまで学生として、海のものとも山のものともわからないこの研究を、興味深く進めていただいた多くの方々に、特に最近の6年間、この研究の長足の進歩に主役を演じてくれた現三菱重工業株式会社田尻慎介氏には、彼の存在なくしては得られなかった多くの知見に対し、深く感謝するとともにお礼申し上げます。この研究が実用の目を見ない場合は、著者の力不足によるものです。

参考文献

- 1) 例えば丹羽, 高速艇工学, 舵社, (昭 54).
- 2) E. J. Mottard and C. J. Shoemaker, *NASA Technical Note*, D-991, (1961), 1-36.
- 3) J. H. Witte, *AIAA Paper*, Vol.69, No.406, (1969), 1-10.
- 4) L. Prandtl et al., *Stroemungslehre*, Vieweg (1969) 390-391. あるいは, プラントル (白倉, 橋訳), 流れ学(下) コロナ社 (昭 47) 159-160.
- 5) カルマン (谷訳), 飛行の理論, 岩波 (昭 29) 161-162.
- 6) 薦原ほか4名, 機論B, 59-565 (平 5) 2868-2874
- 7) 薦原ほか3名, 機論B, 61-583, (平 7) 1029-1034
- 8) 坂本ほか3名, 機論B, 61-590 (平 7) 3728-3734
- 9) 薦原ほか3名, 機論B, 65-631 (平 11) 934-939
- 10) M. Tsutahara, T. Kimura, K. Ogawa and S. Ueda, , *Int. Journal of JSME*, B, 43-3 (2000) 427-433.
- 11) M. Tsutahara, K. Ogawa and M. Sakamoto, *Proceedings of IWSH2001* (2001) 94-100.
- 12) 薦原ほか6名, 機論B, 71-707 (平 17). 1782-1788. (English translated edition for *Journal of Fluid Science and Technology*, 2, 1 (2007) 120-129).
- 13) 田尻ほか5名, 機論B, 72-715 (平 18) 662-669. (English translated edition for *Journal of Fluid Science and Technology*, 2-1 (2007) 120-129.)
- 14) 田尻ほか5名, 機論B 73, 725 (平 19) 190-197.
- 15) S. Tajiri, M. Tsutahara, K. Hayashi, M. Sakamoto, K. Azuma, F. Kameyama and T. Miyaoka, *Proceedings of IWSH 2007, Zhenjiang, China* (2007) 58-65.
- 16) 例えば, 新岡ほか2名編, 燃焼現象の基礎, オーム社 (平 13) 52-59.
- 17) 遠藤, 滝, 「ながれ」, 26 (平 19) 163-170. この号には他にもデトネーションに関する解説がある。
- 18) A. K. Hayashi and T. Fujiwara, *AIAA paper*, Vol.02, No.0475, (2002).

著者紹介

薦原 道久

- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
- ・1947 年生
- ・所属, 神戸大学
- ・最終学歴, ミシガン大学博士課程

・専門分野, 流体力学, 数値流体力学

その他の特記事項, 日本機械学会, および日本流体力学会フェロー