水中に注入したフロン[®]の沸騰を利用した 二相水力タービンのための基礎研究* (第2報, 加速機構の実験的研究)

斉藤 進^{*1}, 酒井 俊道^{*1}
石井 真一^{*2}, 原 健二郎^{*3}

Fundamental Study for a Two-Phase-Flow Water Wheel by Means of Boiling of Liquid Freon Injected in Water (2nd Report, Experimental Study on Acceleration Mechanism)

Susumu SAITO, Shin-ichi ISHII,
Toshimichi SAKAI, and Kenjiro HARA

A mechanism to accelerate hot water in a pipe by boiling of liquid freon injected in the hot water was developed with the final objective of driving a Pelton wheel. Convergent, convergent-parallel and two convergent-divergent nozzles were used as the two-phase nozzles. The effect of the nozzle shape and the location of the freon injection were investigated. The temperature characteristics of water and amount of freon injection were measured. The convergent-divergent nozzle showed good results in energy conversion. At high temperature, some results showed higher values than theoretically estimated maximum values which were derived by considering only the boiling of liquid freon. This phenomenon was assumed to be a result of vaporization of water by agitation by freon gas at the nozzle, and this was confirmed experimentally by injecting air instead of liquid freon.

Key Words: Low-Grade Heat Source, Energy Conversion, Two-Phase-Flow, Total Flow Turbine

1. 緒 言

現在, 太陽熱, 海洋温度差などを利用した発電システムでは, 蒸気およびフロンガスのタービンを使用したものが多い。また, それよりも温度の高い地熱, 産業排熱などにおいてはフラッシュシステムとともに熱の有効利用の観点から, 熱水とその蒸気を直接用いた熱水タービン(トータルシステム)の研究も行われ, 一部実用化されている^{(1)~(6)}。

本研究では, 低温度差熱源を利用する発電システムの開発を目的とし, 管路内を流動中の温水に低沸点液体であるフロンを注入してフロン[®]の気化により水を加速させる, 水とフロンガスの二相流による水力タービンのための基礎研究を行った。これは, 次のような利点が考えられるからである。(1)低沸点液体を用いることにより比較的低温度差での作動が有利になる。(2)熱エネルギーの運動エネルギーへの変換効率が良くなる。(3)気体よりも密度の高い水と共存させて作動させることにより, フロンタービンよりも小形化,

低速化が可能になる。(4)熱水タービンよりも低温での作動が可能になる。

本報では, 液体フロンの注入位置による加速区間について性能の比較を行い, また, 前報⁽⁷⁾よりもフロンの注入量をさらに増すことによる性能の変化を調査することを目的とした。また, 前報⁽⁷⁾でフロンの気化により水が加速されるだけでなく, フロンの気化が引き起こす攪はんによって水の気化が生じ, それにより水がさらに加速されていると推論したが, 本報でその検証をも行った。

2. 記 号

A : ノズル出口断面積 m^2

R : 反力 N

Q : 体積流量 m^3/s

E : 噴流のエネルギー J

P : 圧力 Pa

T : 温度(T_R :室温) $^{\circ}\text{C}$

ρ : 密度 kg/m^3

添 字

0: フロンもしくは空気を注入しない場合

A : 空気

AT : 水温に等しくなった空気

* 平成元年10月28日 山梨地方講演会において講演, 原稿受付 平成元年4月27日。

^{*1} 正員, 東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

^{*2} 学生員, 東京理科大学大学院。

^{*3} (株)東芝 (〒210 川崎市幸区小向東芝町1番地)。

FG: フロンガス

FL: 液体フロン

TH: 液体フロンが完全に気化したか空気が水温に等しくなった場合の理論値

TH0: 0°C における理論値

W: 水

Z: 0°C での値

3. 理 論

前報⁽⁷⁾で求めたように、フロンが完全に気化してガスの温度が水温まで上昇し、ガスの水に対する速度比であるスリップ比を1とする理論反力 R_{TH} (フロンガスのみによる加速を考慮した理論反力の最大値) は次式となる。

$$R_{TH} = \rho_w Q_w \{ (Q_w + Q_{FG}) / A \} + \rho_{FG} Q_{FG} \{ (Q_w + Q_{FG}) / A \} \quad \cdots \cdots (1)$$

なお、式(1)の右辺第二項は第一項に比べ無視できる。

また、噴流のエネルギー E は、衝突した噴流の垂直速度成分が零になるとすれば、

$$E = \rho_w Q_w V^2 / 2 = R^2 / (2 \rho_w Q_w) \quad \cdots \cdots (2)$$

さらに、フロンに代わり常温の空気を注入した場合の理論反力 R_{TH} を求める。

注入した空気が水温と等しくなると仮定して、

$$Q_{AT} = Q_A (273 + T_w) / (273 + T_R) \quad \cdots \cdots (3)$$

式(1)と同様に、

$$R_{TH} = \rho_w Q_w (Q_w + Q_{AT}) / A + \rho_{AT} \cdot Q_{AT} \times (Q_w + Q_{AT}) / A \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 ρ_{AT} は ρ_w に比べて無視できるので、

$$R_{TH} = R_0 \{ (Q_w + Q_{AT}) / Q_w \} \quad \cdots \cdots (5)$$

4. 実 験 方 法

図1に実験装置の概略を示す。ヒータで40°C~70°Cに加熱された水を渦巻ポンプで循環させ、直径3mmのパイプの横に上向きに設け、直径1.5mmの穴からフロンR11[沸点23.8°C、(1気圧)]を加圧して噴射した。噴射位置は図1に示す3箇所(ノズル側からH, M, Lと呼ぶことにする)設定した加速区間の違いによる性能の比較を行った。フロンの気化によって加速された水を、図2に示した出口径をφ24mmに統一した4種類のノズル[先細ノズル: ノズル1, 先細平行ノズル: ノズル2, 先細末広ノズル(2種類): ノズル3, 4]からほぼ大気圧に保たれた装置内に噴出させた。

また、フロンの気化による加速に加えて、水の一部気化による加速もあると考えられることから、水の気

化の検証を行うために、フロンの代わりに常温の空気を注入した。

フロンの気化による水の加速を測定するために、ノズル上方の円盤に噴流を衝突させ、その衝突力を測定した。その衝突力の測定は、円盤を固定した軸の捻りをひずみゲージにより検出し、アナライジングレコーダで記録することにより行った。なお、前報⁽⁷⁾ではノズルを横向きに設置したが、フロンガスが多くなると管路上部にガスが偏るため、本報ではノズルを鉛直に設置し、より気体の割合が多い状態での測定を可能なるように改良した。

また、スポンジシートにより、吸込み管へのガスの混入を防止した。フロンは凝縮器により液化、回収して再利用した。

図1 実験装置

図2 ノズル形状

5. 実験結果および考察

図3, 4は, 70°Cと40°Cにおける各ノズルでの噴流のエネルギーの比(E/E_0)と, 水と液体フロンの流量比(Q_{FL}/Q_W)との関係を示したものである。また, 図中の実線は注入したフロンの完全に気化し, 気液のスリップがないと仮定した場合の理論値(E_{TH}/E_{TH0})を表している。

まず, 図3より40°Cの場合ではノズル2, 3がほぼ同様の特性を示して最も性能が良く, フロンの注入量が少ないときにはほぼ理論値どおりの値を示しているが, ノズル4についてはノズル1を下回っている。これは, ノズル4ではのど部の径がノズル2, 3に比べて細いため, ノズル上流の管路内での静圧圧が高くなりフロンの気化し難いためと考えられる。

図4の70°Cの場合では, ノズル1を除いたすべてのノズルでフロンの注入当初から実験値が理論値を大きく上回っている。特にノズル4では, 40°Cにおいては理論値を大きく下回るのに対し, 70°Cでは逆に上回る。しかし, フロンが完全に気化しただけでは理論値を超えることはあり得ず, この原因は, フロンが完全に気化することに加えて, 気化したフロンの気泡によるノズルののど部における激しい流れの攪はんが影響するものと考えられる。つまり, 攪はんとそれに伴う激しい振動により水が一部気化をし, フロンガスと混合し, 気相の体積が増加することにより水をさらに加速すると考えられる。この検証については, 後に詳しく述べる。

図4より, 熱エネルギーを運動エネルギーに変換する場合, ノズル2またはノズル3が良い結果を示すことがわかる。ノズル4ではフロンの流量比がある値を超えると, 急にフロンの増加に対するエネルギーの増加の割合が小さくなるが, これは水と気体のスリップの影響によると考えられる。

図5は, ノズル3の各温度における反力とフロンの流量の関係を示したものである。また, 実線と破線はそれぞれ70°C, 40°Cにおける理論反力を示す。これから明らかなように, 温度が高くなるに従い一部で理論値を上回り, 特に60°C, 70°Cと温度が高くなるほど反力が伸びることがわかる。

図4 各ノズルにおける噴流の反力の比較(70°C)

図3 各ノズルにおける噴流の反力の比較(40°C)

図5 各温度における噴流の反力(フロン注入)

図6, 7, 8はフロンの噴射位置(H, M, L)による違いを比較したもので、図中の実線と点線は、それぞれ70°Cと40°Cにおける理論値(R_{TH}/R_{TH0})を示す。いずれのノズルにおいても40°Cの場合は、Lから注入したものが加速効果が高くなっていることがわかる。これは、40°Cにおいては管路内でのフロンの気化が徐々に行われ、フロンの完全に気化するためには噴射位置からノズルまでにある程度の距離が必要であることを示している。

70°Cの場合、どのノズルでも噴射位置による反力の比の差がほとんどない。これは、水温が高いために

フロンの気化が極めて起こりやすく、また短時間で終わるので、噴射位置からノズルまでの加速距離はそれほど必要とせず、むしろノズルの違いにより水の加速が大きく左右されることがわかる。

次に、水の気化について検証するために、液体フロンの代わりに空気を注入した場合について述べる。

ここで空気を注入した主な理由は、フロングスの場合体積測定が不可能なのに対し、空気においては体積測定を正確にできること、および気泡により流れを強制的に攪はんすることにある。すなわち、空気の注入によってフロングスが生じたことによる流れの攪はんに近い条件をつくり、流れの攪はんとそれに伴う激しい振動(音波の発生)により、水の気化が実際に生じているのかを確認することを目的としている。

この攪はんであるが、空気を注入しないときには静かに流れていたものが、空気を注入することにより大きな音が発生するようになり、かなり激しい攪はんが起きているものと思われる。

図9は、ノズル4における0°C, 40°C, 70°Cでの反力の比(R/R_0)と、空気と水の流量比(Q_A/Q_W)との関係を示したものである。また図中の実線、破線、一点鎖線は、注入した常温の空気が水の温度に達したと仮定し、かつ気液のスリップがないとした理論値(R_{TH}/R_{TH0})を示したものである。

まず0°Cの場合は、水の気化が生ずることはほとんどないといってよく、実験値は理論値に近くやや下回った値を示す。

40°Cでは、空気の流量比が小さいときには、実験値がほぼ理論値に近い値を示しているが、空気流量比が

図6 フロン注入位置による性能の比較

図7 フロン注入位置による性能の比較

図8 フロン注入位置による性能の比較

大きくなると理論値を越えるようになる。これは、40°Cでは温度が低いために水の気化は起き難いが、空気の流量比を上げて流れの攪はんを激しくしたことにより、水が気化するようになったことを示していると考えられる。

さらに70°Cでは、空気を少量注入した場合においても実験値が理論値を大きく上回り、反力の理論値と実験値の比は最大で1.41(エネルギー比で2.0)と約40%も水の気化による加速によって反力を伸ばしていることが明らかとなった。この温度では、水の飽和蒸気圧が高くなるために、空気の流量比が小さく攪はんがそれほど激しくなくても、水が十分気化されると考えられる。

図10は、各ノズルの水温70°Cにおける反力の比(R/R_0)と、空気と水の流量比(Q_A/Q_W)との関係を示したものである。また、図中の実線は図9の場合と同様に理論値の比を示している。

ここでまずノズル1についてみると、このノズルは他のノズルと異なり、平行部や末広部のような静圧力を大気圧程度や大気圧以下に低くする部分がなく、管路内で静圧力が高い。また、のど部もないために他のノズルのようにとくにのど部付近で攪はんが激しくなることもない。したがって、水の気化は起こってもごくわずかであるといえる。このことは、実験値が理論値と等しいかわずかに上回る程度であることから明らかである。これに対して、ノズル2, 3, 4では実験値が理論値を大きく上回っており、これらのノズルでは空気の注入による水の加速に加えて、水の気化による加速も生じていることは明らかである。

さらに、ノズル2, 3, 4を比較してみると、ノズル4, 3, 2の順に反力の比が大きくなっており、これから先細平行ノズルよりも先細末広ノズルのほうが水の気化について有利であり、同じ先細末広ノズルでも末広角が大きいのほうが有利である。これは、ノズル4のようにのど部が狭いほうがそこの静圧が低く、攪はんも激しいことにより説明される。

図11は、一定流量の常温の空気を注入しながら水温を0°Cから75°Cまで連続的に変化させていった場合の各温度における反力の比(R/R_0)と水温(T)との関係である。

これから明らかなように、一定量の空気を注入した場合でも水温が上昇するにつれて反力の比も大きくなり、その伸びも水温が高くなるにつれて大きくなっている。

この反力の増加の要因としては、第一に注入した常温の空気が水温が上がるにつれて加熱され、体積膨張することによって水を加速すること、第二に水温が高くなって水の気化が生じやすくなり、それによっても水が加速されたことの二点が考えられる。

ここでノズルごとの特性でみると、ノズル1については反力の伸びは単調で緩やかであり、また理論計算による0°Cと70°Cの反力の比が1.05であるのに対し、実験値も1.06と非常に近い。これから前にも述べたように、ノズル1では水の気化による影響が少ないと考えられ、その反力の伸びの大部分は、注入した空気の温度による体積膨張によるものであると言える。

もし水の気化の影響が加わらないとすると、ノズル2, 3, 4においても同様の値を示すはずであるが、

図9 各温度における噴流の反力(空気注入)

図10 各ノズル間の噴流の反力の比較(空気注入)

図 11 一定空気量注入における各ノズルの温度特性

これらのノズルでは温度が上昇するに従い、ノズル 1 に比べてかなり大きい値を示している。したがってこのノズル 1 とその他のノズルの反力の比の差は、ほとんど水の気化による増加分であると言える。また、ノズル 4 など水温が高くなるにつれて反力の比の増加が比例的でなく 40°C 以上で温度上昇につれて急激に伸びている。これは水の飽和蒸気圧が高くなり、水の気化が起こりやすい形状のノズル 4 などにおいて水の気化が促進されたことにより説明される。

さらに数値で各ノズルを比較すると、ノズル 1 において 0°C と 75°C の反力の比は 1.07 で約 7% の増加であるのに対し、ノズル 4 での比は 1.2 とノズル 1 の実に約 3 倍の 20% の増加を示している。これはエネルギー比にすれば約 44% の増加である。また、特にノズル 4 の反力の比の伸びは、60°C 前後から温度が上がるに従い急激になってきており、さらに温度を 80°C 以上に上昇させた場合、水の気化がより激しくなり熱エネルギーの運動エネルギーへの変換量がかなり大きくなると予想される。

このように、空気の注入による水の気化がによる水の加速については、先細末広ノズルが性能が良く、とくに末広角が大きいものが優れていることが明らかとなった。

この水の気化の機構であるが、音波を伴う攪はんにより、液中での超音波によるキャビテーションや液表面での霧化と同様な機構により、水が気化すると考えられる。なお、水噴流に空気を注入した場合、超音波を

含む音波が発生することが良く知られている。

これらの結果から液体フロンの代わりに空気の注入によっても、熱エネルギーの運動エネルギーへの変換が可能であると言え、従来の熱水のみを用いるトータルフローノズルに比べ、空気を注入することによってより低温で作動させる可能性があると言える。

6. 結 論

低温度差発電を想定して、管路中を流れる熱水に液体フロンを注入し、フロンの沸騰により水を加速する機構の開発を行い、次のような結論を得た。

(1) 水温 40°C 程度の比較的低温においては、加速区間が長いほど大きな反力が得られた。これは、低温ではフロンを十分に気化させるにはある程度の距離が必要なためであると考えられる。

(2) 水温 70°C 程度の比較的高温においては、フロンの気化しやすいために、加速区間はそれほど必要とせず、加速区間による違いはほとんどない。

(3) 液体フロンの代わりに空気を注入した実験値が理論的に考えうる最大値を超えたことや、一定量の空気を注入しながら水温を上げていくと、高温になるにつれて反力が急激に伸びることなどから、水の一部が気化し、それによっても水が加速されていることが確認された。

(4) 熱エネルギーの運動エネルギーへの変換については、液体フロンの注入に対して先細平行ノズル、または拡がり角の小さい先細末広ノズルが良く、空気注入に対しては先細末広ノズルが良い。

終わりに、本研究を行うにあたって協力いただいた学生、松本辰一君に対し深く感謝する。

文 献

- (1) 土方・ほか 3 名, 機論, 51-463, B(1985), 1017.
- (2) 赤川・浅野, 機論, 51-465, B(1985), 1451.
- (3) 池田・福田, 機誌, 83-745, B(1980), 1528.
- (4) 日本機械学会編, 機械工学便覧 C 7—エネルギー機器システム (1989).
- (5) Steidel, R. F. Jr., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Eng. Power.*, (1982), 104, 231-240.
- (6) 赤川・ほか 3 名, 機論, 54-502, B(1988), 1509.
- (7) 斉藤・ほか 2 名, 機論, 53-489, B(1987), 1580.