気泡浴槽における気液二相流応用の実情と今後の課題^{*}

Application of Gas-Liquid Two-Phase Flow to Whirlpool Bathtub and Subjects for Further Research

原 田 英 次^{**}
HARADA Eiji

Abstract In recent years, as people have become more and more health conscious, they have taken a greater interest in bathroom amenities. As a result, whirlpool baths have become increasingly popular, because consumers believe that whirlpool baths are effective for relieving fatigue. This report introduces TOTO's applied technique, which controls the jet stream mixed air(gas-liquid two-phase flow) according to somatic sensations, and in addition, submits subjects for further research.

Keywords : Gas-liquid two-phase flow, Amenity, Refresh, Whirlpool bath

1. はじめに

Fig. 1 にブローバスの基本構成を示す。ポンプ、浴槽、吸い込み口、噴出口、配管からなる浴槽水循環経路内でポンプによる加圧循環を行なう際、噴出口に設けたエジェクターノズルで気泡を混合し、浴槽内に噴出する先端混合方式を採用している。

Fig. 1 Mechanism of TOTO's whirlpool bathtub.

これら水と空気の先端混合方式によって作り出される気液2相流が、住設機器商品として使用者にどの様に受け入れられ、評価されているのかを調査して見た。(1992年)

Fig. 2 にブローバスの購入者の購入理由を、Fig. 3 に購入後のブロー入浴の効果(使用者体感アンケート)を示す。

Fig. 2 Replies to a question ; why did you buy a whirlpool bathtub.

* 1993.11.8 受付

** 東陶機器株式会社浴水槽開発部浴槽機器開発課

〒802 北九州市小倉北区中島2丁目1-1 TEL(093)952-3205 FAX(093)951-2731

Fig. 3 Replies to a question ; after using a whirlpool bathtub, what do you think its advantages are.

購入者はブローバスに疲労回復と体の温まりを期待して購入し、購入後のブロー入浴により実際の血行促進、疲労回復を体感している事が判る。

この購入目的と体感の一致が、ブローバスの商品評価を表わす「購入後の満足度」においても高い数字を示す(Fig. 4)理由であるとともに、ブローバスが住設機器商品として普及してゆく原動力となっていることが判る。

気液2相流を応用したブローバスにおいては「ユーザーの要求する体感を実現するための調整や評価をどう行なってゆくか」という事が非常に重要であり、最も苦勞する点でもある。

本稿では、気液2相流をブローバスとして商品に応用する段階で行なった数多くの検討課題の中から抽象的な物へのアプローチを中心に、次の2点の検討事例を紹介する。

(1) 快適性(好みの噴出モード)へのアプローチ

Fig. 4 Replies to a question ; are you satisfied with your TOTO's whirlpool bathtub.

(2) 疲労回復へのアプローチ

2. 快適性へのアプローチ

Fig. 5 に、当時(1988年)に行なったブローバスの体感評価モニター結果を示す。当時のブローバスを使用した人の66%の人は快適であると言っているが、24%の人は快適とは言えないという結果が出ている。快適でないと答えた人のコメントを見ると「もっと指圧感があった方が良い」「強すぎる」「もっと柔らかい感じの噴流が良い」「もっと空気が出た方が良い」等かなり抽象的で個人差のある言語データが得られた。これらのコメントに応えるため水と空気の混合の仕方では噴出のバリエーションを作り、個人差の大きいユーザー意見に応える検討を行なった。試験的に噴出口(ノズル)の開口率とポンプの加圧条件を変更することで、空気流量と水流量の異なる噴流状態を作り出し、開発者や社内の入浴モニターで数多くの入浴を繰り返した。その体感試験結果と各種の噴流状態を重ね合せた噴流MAPを作成した。(Fig. 6)

その結果、体感により次の3種の噴流タイプに区分できることが判った。

(指圧ゾーン)

ノズルを絞り、吐出圧が高く、噴出空気量が多い程体感的に指圧感のある噴流が得られる。

Fig. 5 Replies to a question after monitoring an old model of TOTO's whirlpool bathtub ; how did you like it.

Fig. 6 A map showing the relationship between the strength of jet stream and its strength bathers ranked in three after using the whirlpool bathtub.

(マイルドゾーン)

また逆に、ノズルの開口を大きく取り、大流量の水を流した場合、吐出圧力の低下のわりに大流量で、ベローズ後流等の影響で不安定な周期性のある末広りの旋回成分を持った流れができる。そのため、低圧でも多量の空気を取り込み易く、空気混合効率が良くなり、ソフトでたっぷりとした体にやさしい感じのする噴流が得られる。

(無指圧ゾーン)

水流量の割に空気流量が少ない状態の噴流でマイルド感もない状態となる。

我々は、この指圧ゾーンの噴流をスポットブロー、マイルドゾーンの噴流をマイルドブローとして採用した。Fig. 7にスポットブロー

Fig. 7 A photo of cut away model of TOTO's whirlpool bathtub V showing spot jet stream.

Fig. 8 A photo of cut away model of TOTO's whirlpool bathtub V showing mild jet stream.

の状態図を、Fig. 8にマイルドブローの状態図を示す。

商品化においては、噴出口の開口制御を行なう自動噴流可変ノズル、インバーターによるポンプモーターの可変速制御機構、バルブによる流量制御機構を開発し、6種類の噴流パターン(ブローバリエーション)と5段階の強弱変化、噴出場所の切替を実現している。Fig. 9にその一例として自動流量可変ノズルの構造を示す。ボールスクリュー式モーターの駆動により、ベローズが移動し、実質的な噴出開口部の開口率を制御する機構となっている。

これらの数多くのブローバリエーションを実現したブローバスV(商品名)で行なった体感モニター評価結果をFig. 10に示す。(1990年)

Fig. 9 Construction of microcomputer-controlled nozzle which open-close is fine adjusted by a sub-miniature ball-screw motor.

Fig.10 Replies to a question after monitoring TOTO's new whirlpool bathtub V; how did you like it.

Fig. 5 に比べて全体が快適の方にシフトしており、不快を表現する人がほとんどいない事が判る。

これは、人によって異なる体感評価に対して自分の好みに合わせることでできるバリエーションを実現した事によるものであると考えている。ブローバスV以降の商品にもこのブローバリエーションの考え方を導入することで、TOTOブローバスのユーザー評価は高まっている。

3. 疲労回復へのアプローチ

ブローバスによる入浴で、ユーザーは、疲労回復感を感じている。このことから、ブロー入浴は疲労回復へ効果があることは推定できるが、この効果の度合を定量的に捕らえるための実験例を紹介する。

疲労にはいくつかのメカニズムがあることが知られているが、その中で、いわゆる肩こり等は静的筋疲労といわれ、体内に疲労物質、乳酸等が蓄積する説による。日本には「四十肩、五十腰」という言葉があるように、多くの人が肩こりや腰痛に悩まされている。長時間同じ姿勢を続けたり、目を使い過ぎたり、細かい字を書いたり、読んだり、ワープロやコンピューターに向かっていたり、現代人の周囲には肩こりや腰痛になる要素が蔓延している。我々は、こうした静的筋疲労にとって浴槽＝ブローバスによる入浴(以下ブロー

入浴)と普通入浴のどちらが効果があるのかを比較実験によって検証してみた。

本実験は国立公衆衛生院生理衛生学部の栃原博士の協力を得て行なったもので、Table 1 に実験概要を示す。

(1) 血流量

レーザードップラー血流計により、血流量を測定した。計測は、実験開始後2分間隔で行なわれた。Fig. 11に入浴による血流量の変化を示す。

血流量の変化は、普通入浴、ブロー入浴ともに同様のパターンであり、入浴により急激に上昇し、出浴後、減少傾向となる。しかし、ブロー入浴では普通入浴と比べて血流量の上昇が著しく認められる。このことは、ブロー入浴により血行が促進され、乳酸等老廃物の排出が盛んになったことを示すものと思われる。つまり、筋肉中の老廃物である乳酸の排出が盛んになり、筋疲労が減少するといえるだろう。また、温熱作用への増大により、よ

Table 1 Outline of experiments with regular hot tub bathing and whirlpool bathing, to compare their effects in relieving muscle fatigue.

1. 目的
 - ・皮膚温および深部体温におよぼす影響の検証。
 - ・筋疲労回復への効果の検証。
2. 方法
 - ・被験者：健康な成人 5名(25～35才)
 - ・場所および設定条件
 - ①場所：TOTO茅ヶ崎工場
総合研究開発棟2F 人間生活工学実験室
 - ②設定条件：実験は食後1時間を除いて行なう
 - ③環境条件：室温 $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$
湿度 $50 \pm 5\%$
 - ④浴室条件：ブローバスVを使用
湯温 43°C
 - ⑤筋負荷作業：5kgの荷重にて静的筋負荷1分・休み1分のセットを4回行なった。
 - ⑥手順：10分の安静の後、負荷作業を行ない、10分安静後、10分の入浴。
3. 測定項目
 - ①血流量
 - ②皮膚温
 - ③直腸温
 - ④筋電図周波数分析

Fig. 11 The blood circulation rate, as monitored by a laser Doppler perfusion monitor.

く温まるという効果も示されている。

(2) 皮膚温

体温の測定は全身5ヶ所①前額(おでこ)②手甲(手の甲)③背中④大腿部⑤足背(背の甲)にサーミスタを貼り付けて測定し、さらに直腸温も測定した。計測は実験開始後、10秒間隔で行なわれた。Fig. 12に入浴による皮膚温の変化を示す。

皮膚温(背中)は普通入浴、ブロー入浴ともに同様の傾向を見せたが、入浴中ではブロー入浴のほうがより上昇している。

このことが温熱効果の差を生む原因の一つと考えられる。また温熱の残存性(保温効果)

Fig. 12 Body surface temperature measured every ten seconds at five points.

においてもブロー入浴のほうが優れていることがサーモグラフから読みとることができる。この差は、ブロー入浴では気泡による湯の流れによって体の表面や抹消組織が刺激され、熱交換率が増加し、さらにマッサージ効果により血流量の増加が促進されるためだと考えられる。

(3) 直腸温

直腸温は、直腸にセンサーを12cm押しして皮膚温と同様に10秒間隔で計測した。Fig. 13に直腸温の変化を示す。

直腸温についても温度の変化は同様の傾向をみせたが、ブロー入浴の方が体温の上昇により増大傾向がみられた。直腸温、つまり深部体温の上昇は、ブロー入浴が「いわゆる体のシンまで温まる」効果があることを示している。

(4) 筋電図周波数分析

筋電図周波数分析は、筋肉に電極を2cmの間隔で取り付け、流れる電気の周波数を分析した。計測は、負荷作業前の安静時、負荷作業後の安静時、出浴後20分の3回実施した。この分析は、筋疲労を定量化するものとして一般に使用されている。

Fig. 14に筋電図周波数成分を示す。

筋肉は、疲労すると筋電図の低周波成分(30~50Hz)が増加する(除波化と呼ばれる)。このことを利用した実験であるが、入浴後の

Fig. 13 Rectal temperature measured every ten seconds.

Fig. 14 Analysis of electromyogram frequency showing the relationship between bathing and relieving muscle fatigue.

周波数成分を比較すると、ブロー入浴では普通入浴に比べ低周波成分の減少(筋疲労の回復)がみられる。つまり筋電図周波数の分析においてもブロー入浴の方が筋疲労の回復に効果があることが実証された。

以上のように適切な条件下であれば、血流量、皮膚温、筋電図のそれぞれにおいてブロー入浴の方が普通入浴よりも静的筋疲労に効果があることが実証された。しかしこのほかにも、湯温や浴室温や脱衣所の室温等が入浴者の血圧変動に影響を与えることも分かっており、快適な入浴や疲労回復を目的とした入浴のためには、未だ多くのデータの積み重ねが必要である。

4. まとめ

以上述べて来た事は、気液2相流を住設機器としてのブローバスに応用する上での商品上の検討事例である。混相流に対しての論理

的な追求や解析のための数値計算とは全く関係ない。この事は、上記内容を本紙に発表するか否か、筆者をかなり悩ませた。

しかし、我々混相流を住設機器商品に応用する立場としては、ユーザーからのニーズに応じて混相流の応用を進めていく事で混相流に対する新たなニーズを提示することが我々の重要な役割であると考えており、「この様な一見全く混相流とは無縁の様な応用検討から、混相流に対する新たなニーズが生まれてくる。その新しいニーズが混相流をさらに発展させる可能性」という事を考えて、あえて発表させて頂いた。御理解頂きたい。

最後に、現時点での我々の立場から混相流応用としてのニーズとしての技術課題を2点挙げさせて頂くことで本稿のまとめとしたい。

(1) 気泡径制御技術

体感バリエーションの観点からのニーズである。数 μm ～数 cm の気泡を自由に作り分けることは、従来と異なった体感バリエーションを実現できる可能性がある。

(2) 低騒音混合技術

水と空気を混合させる時の衝撃音は、住設機器商品化の上でかなり大きなネックになっている。本稿では述べていないが、ブローバスの音対策については最重点課題として取り組んでいる。また、それなりの成果もでている。しかし、ユーザーの要求品質に対して十分応えることができているとは考えていない。本質的に低騒音の混合技術があれば非常に有難い。

参考文献

- [1] 原田：特集健康な住まいとHA(入浴機器)、ALICE FORUM VOL.14(1993)。