特集論文

家庭用エコキュートのマイクロバブル技術

柳本　圭*　竹内史朗**
坂上智樹*　古川誠司***
宮下章志*

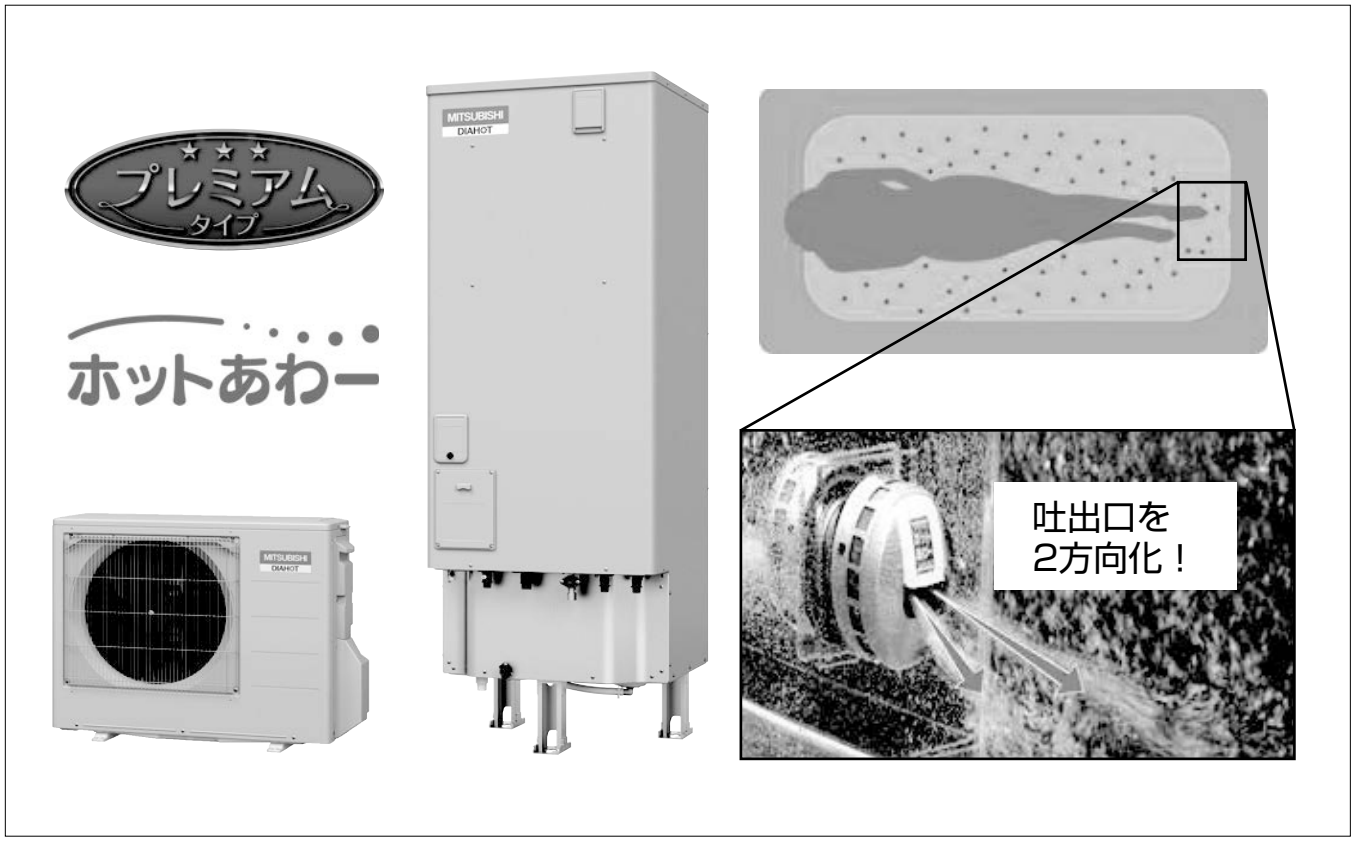
Micro Bubble Technology of Eco Cute for Household Use

Kei Yanagimoto, Tomoki Sakaue, Shoji Miyashita, Shiro Takeuchi, Seiji Furukawa

要　旨

三菱電機エコキュートは従来，マイクロバブル技術を応用して“バブルおそうじ”機能を製品に搭載している。これは直径約100μmのマイクロバブルによって配管を洗浄する機能であり，配管清掃の省手間や清潔性の点で大きな反響を呼んでいる。マイクロバブルはこの洗浄効果以外にも数多くの効果を持ち，入浴機能の促進効果がその１つである。この効果に着目した新機能“ホットあわー”を搭載したエコキュートを2012年12月に発売した。

このホットあわーは，浴槽アダプタに設けた旋回流ノズルが浴水循環時に空気を吸気し，浴槽にマイクロバブルを発生させる機能である。発生させるマイクロバブルの最頻径は直径10μm程度（バブルおそうじで発生させるマイクロバブル径の約1/10）で，マイクロバブルの個数も600個/mL以上（バブルおそうじで発生させる個数の約10倍増）である。浴槽に発生したマイクロバブルは入浴者の肌に付着して入浴時の快適性を向上させ，入浴による保湿作用を促進する。入浴時の快適性に関する検証では，さら湯に対してホットあわー湯の方が，出浴後の快適感が高いという結果が得られ，保湿作用促進に関する検証では，さら湯に対してホットあわー湯の方が，1.5倍以上肌水分量が増加することが確認できた。また，直径10μm以下が最頻径となるマイクロバブルの温浴効果を検証したところ，さら湯に対してマイクロバブル湯の方が約0.08℃上昇し，血流量は約30%増加したため，バブルの持つ温浴効果が確認できた。



新機能“ホットあわー”を搭載した当社家庭用エコキュート

浴槽アダプタに設けた旋回流ノズルによって空気を吸気し，浴槽にマイクロバブルを発生させる（バブルの最頻径は10μm程度）。また，マイクロバブルの吐出口は2方向化しており，入浴者の全身にバブルを付着させることを可能にした。発生させたマイクロバブルは入浴者の肌に付着し，入浴時の快適性向上や湯上がり後の保湿作用を高める。

*群馬製作所　**住環境研究開発センター　***先端技術総合研究所

1. まえがき

ヒートポンプの原理を利用してお湯を沸かすヒートポンプ式給湯機(以下“エコキュート”という。)を，2001年に発売し，2011年8月には累計出荷台数が300万台を突破した。発売から10年以上が経過した現在，エコキュートの機能も多様化しており，当社でも，ふろ配管に直径約100μmのマイクロバブルを発生させて配管洗浄を行う“バブルおそうじ”など独自の技術を搭載したエコキュートを発売してきた。

今回はこのマイクロバブル技術を更に発展させ，従来のマイクロバブルと比較して，マイクロバブルの最頻径を直径10μm程度に微細化し(従来の約1/10)，発生するバブル個数も600個/mL(従来の約10倍増)を実現した。この新しいマイクロバブルを浴槽に発生させる新機能“ホットあわー”は，浴槽に発生させる新マイクロバブルが入浴者の肌に付着することによって，入浴時の快適性向上や出浴後の保湿作用を促進する。このホットあわーで使用する浴槽アダプタは吐出口を2方向化しており，入浴者の姿勢によらず全身にマイクロバブルを付着させることができる。

本稿では，ホットあわーが持つ入浴機能の促進効果(入浴時の快適性向上や湯上がり後の保湿作用)及びマイクロバブルが持つ温浴効果の検証結果について述べる。

2. ホットあわーの基本的な構成と動作

図1は当社エコキュートのホットあわーの構成を示す。タンクユニット内にはふろ循環ポンプ，水位センサ，循環フロースイッチ，マイクロバブルノズル，熱交換器を搭載している。また，ふろ配管と浴槽を接続する浴槽アダプタは，空気を吸気し浴槽にマイクロバブルを発生させる旋回流ノズル機構を持つ。この旋回流ノズルは，空気チューブを介してタンクユニット内の空気電磁弁に接続しており，空気電磁弁を開状態にすれば旋回流ノズルに空気を供給することが可能になる。

ホットあわーの動作は，まず，ふろ循環ポンプを動作させることで浴槽水をふろ循環回路内で循環させ，旋回流ノズルに湯水の流れを発生させる。旋回流ノズルの内部形状は，流路の1次側から徐々に内径が小さくなり，最縮径部からまた内径が大きくなる構造となっている。そのため，旋回流ノズル内部では，最縮径部で最も流速が大きくなり，最縮径部は大気圧よりも圧力の小さい負圧状態が形成される。その際，空気電磁弁を開状態にすると，空気チューブを介して旋回流ノズル内部に空気が吸気される。こうして吸気された空気はマイクロバブルとなり，旋回流ノズルから浴槽アダプタを通過し浴槽水へ吐き出される。また，マイクロバブルの発生とともに，熱交換器で浴槽水を温める機能(ほんのりあたため運転)を持たせることによって，入浴によって低下する浴槽水の温度をふろ設定温度に維持する。

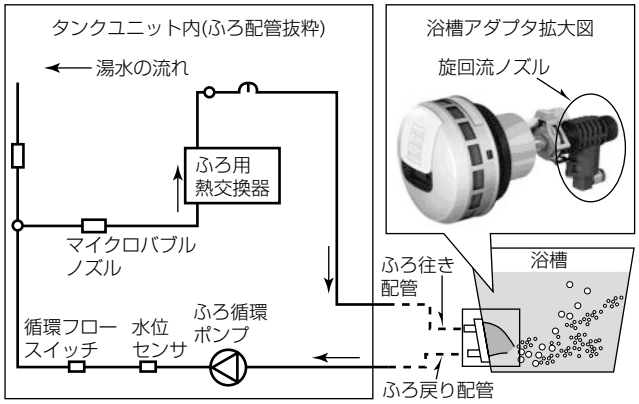


図1．ホットあわーの構成

3. 入浴快適性の効果検証

3.1 従来の入浴快適性評価

入浴には精神的なストレスの緩和や身体的な疲労の軽減といった心身のリラックス効果があり，これらの効果を促進するための様々な方法が提案されている。その1つが浴槽にマイクロバブルを発生させる方法であり，従来の研究でも生理指標や主観評価を用いた評価が実施されている。しかしながら，生理指標を用いた評価では低次の生体反応について客観的な指標を提供することはできても，高次の評価を測定することはできず，高次の評価を測定するためには主観評価が不可欠となる(生理指標では“緊張状態か緩和状態か”の検出はできるが，“高揚感があって気分が良い”といった高次の評価はできない)。一方，従来の主観評価は気分調査を目的とする複数の尺度を統合して作成されたことから質問数が多く，正確な評価ができていない可能性がある。そこで今回は入浴の効果を扱った先行研究で主観評価に用いられた形容語を収集し，新たな心理尺度を作成することでより正確な主観評価を実施するために実験を行った。実験は関西学院大学 長田典子教授の研究室と共同で実施した。

3.2 実験内容

この実験では入浴が気分状態に及ぼす影響を，心理尺度によって主観評価から検討した。主観評価に用いた形容語は7語(“さわやかな気分だ”“体が温かい”“気分が落ち着いている”“リラックスしている”“快適である”“体が軽い”“気分が高揚している”)で，各項目について8段階のLikert尺度で回答を求めた。

湯の条件は，さら湯とホットあわー湯(ほんのりあたため運転なし)の2条件で，入浴条件に関しては順序効果が生じることのないよう，各湯に入浴する順序は被験者ごとに異なるよう設定し，心理的状態の日内の変動を考慮して2回の入浴を同一時間帯で実施した。被験者は“気分”や

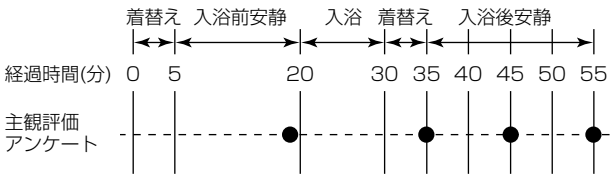


図2．実験プロトコル

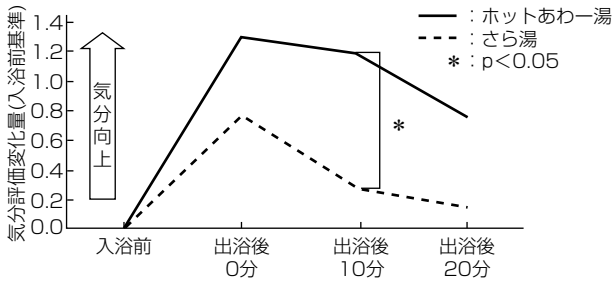


図3．主観評価の変化量比較

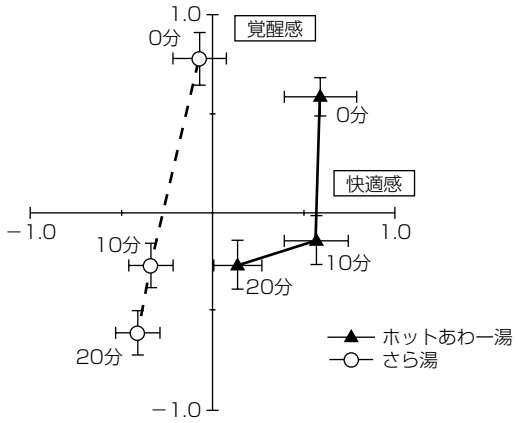


図4．主成分得点の二次元プロット

“心地よさ”に対して最も感度が低いと考えられる20代男性とし，普段の入浴で湯船に浸(つ)かることを習慣としている12名を対象とした。

実験プロトコルを**図2**に示す。被験者は着替後，前室(25℃)で椅座位で15分間安静状態を保ち，安静状態終了直前に入浴前の気分についての主観アンケートに回答を行った。安静状態終了後，被験者はすぐに浴室へ移動し，脇下までの全身浴(湯温40℃)を10分間行った。出浴後，被験者は身体を拭いてから着替え，前室で椅座位での安静状態を開始した。この間，安静開始後0分，10分，20分の時点で気分状態の主観評価を測定した。

3.3　実験結果の考察

この実験では，主観評価の実施に際し入浴前の気分状態の影響が少ない方法で評価する必要があるため，入浴前の主観評価の評価値を基準として入浴後の主観評価の変化量を検討指標とした。**図3**は，入浴前を基準とした主観評価の変化量の入浴後の推移を，湯条件ごとに評価形容語7項目の平均値を算出したものである。出浴後10分時点の条件の単純主効果についてLSD(Least Significant Difference)法による多重比較を行った結果，ホットあわー湯の主観評価の変化量がさら湯よりも有意に高かった($p<0.05$)。

次に，入浴による気分状態の変化に見られた湯条件間の違いを詳細に検討するため，入浴前を基準とした変化量のデータに基づき7評価形容語(7項目)について主成分分析を行った。そして，因子負荷量に基づいてこれら7項目を2つの主成分で構成される平面上に表すと，Russel(1980)による感情の円環モデル内に布置された形容語とよく対応し，抽出された2成分は感情の円環モデルにおける“快・不快”“覚醒・睡眠”とそれぞれ対応すると考えられた。そのため，2成分によって表現される次元を“快適感”次元(x軸)と“覚醒感”次元(y軸)と命名し，2つの湯条件の入浴後各測定時点における主観評価の主成分得点を二次元平面上に布置したところ(**図4**)，各測定時点における“覚醒感”次元の評価に大きな差は見られないものの，“快適感”次元の評価が入浴によって大きく向上したことが分かった。

4.　保湿作用の効果検証

4.1　実験内容

3章で述べたとおり，マイクロバブルには心身のリラックス効果など入浴機能を促進する効果が様々あるが，マイクロバブルが及ぼす肌への作用が解明されているものは少ない。そこで今回は，マイクロバブルによる肌への水浸透促進作用に関して検証するため，ホットあわーで発生させるマイクロバブル水流が表皮角層水分量(以下“肌水分量”という。)に及ぼす影響を確認した。実験は愛知医科大学岩瀬敏教授の研究室と共同で実施した。

被験者は20～30代の健常男性8名を対象とし，湯条件はホットあわーで発生させるマイクロバブル水流(バブルの最頻径が10μm程度(以下“ホットあわー湯”という。))と水流だけとした。実験では，各湯条件に設定した水槽内に，手首から末梢(まっしょう)部を10分間浸漬させ，浸漬前，浸漬終了直後及び浸漬終了後2分ごとに肌水分量(SKICON-200EX，IBS社製)を測定した。水流はどちらの条件も8L/minとし，水温は34.5℃に設定した。また，左右の手をそれぞれ異なる条件で同時に実験を実施し，各湯条件への浸漬は左右ランダムに行った。

4.2　実験結果の考察

図5は各湯条件の肌水分量の変化を示している。この図から，出浴直後の肌水分量に関して，ホットあわー湯の方が水流だけより約1.6倍高い肌水分量を示している。また，出浴6分後まではホットあわー湯の方が水流だけよりも肌水分量が有意であると確認でき，ホットあわー湯による肌水分量の持続性を確認した。

続いて，水質による肌水分量変化を確認するため，水道水(電気伝導度：16mS/m)とイオン交換水(電気伝導度：

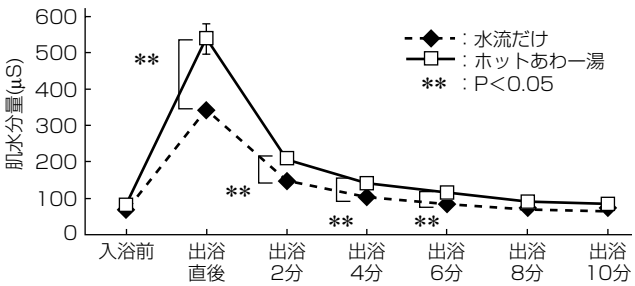


図5．被浴による肌水分量の変化

5.5mS/m）を用いて，ホットあわー湯と水流だけの肌水分量変化を検証した。その結果，水道水ではで肌水分量に差が確認できたが，イオン交換水では2つの湯条件間の肌水分量にほとんど差がない結果となった。このことから，肌水分量の増加・持続に寄与しているのはマイクロバブルと水中のイオン成分であると考えられ，次のメカニズムによってこの効果が発生すると考えられる。

まず，マイクロバブルが負帯電していることによって，バブル界面に陽イオンが吸着し，またそのバブルが肌表面に付着する。そのため，バブルが付着した表皮近傍で陽イオン濃度が高くなり，陽イオンと表皮のカルボン酸との塩交換が行われる。これによって表皮表面に油脂膜が形成され，肌水分量の増加（水浸透促進作用）又は肌水分量の持続（保湿作用）が発生すると考えられる。

5. マイクロナノバブルの温浴効果検証

5.1 実験内容

従来の温浴効果を検証する研究では，バブル径が100μm程度のバブルを対象としているものやマイクロバブルを多量に発生させて湯を白濁させるものを対象としているため，視覚が与える心理的作用とバブルそのものの温浴効果を分離して考えることが難しかった。そのため，今回は視覚効果を取り除き，バブル単独の温浴効果を検証するため，バブル径が10μm以下のマイクロバブル（以下“マイクロナノバブル”という。）の温浴効果を，愛知医科大学 岩瀬敏教授の研究室と共同で検証した。

被験者は20代の健常男性6名を対象とした。室温26℃に設定した脱衣室で長座位姿勢で10分間の安静後，浴槽内にマイクロナノバブル水流を発生させながら，39℃の湯温で10分間の全身浴を行った。入浴中にサーミスタによる鼓膜温，レーザドプラー法による前腕部皮膚血流量（接触式及び非接触式）及びカプセル換気法による上腕部局所発汗量を連続測定した。別の日に同じ条件下のさら湯での全身浴を行い，マイクロナノバブル水流浴との比較を行った。

5.2 実験結果の考察

10分間のマイクロナノバブル水流浴によって鼓膜温は0.37±0.04℃の上昇が見られたのに対し，さら湯浴では0.29±0.04℃上昇とマイクロナノバブル水流浴が約0.08℃高い値を示した。また，皮膚血流量の変化に関して，接触式プローブを用いた場合は入浴条件間で差が認められなかったが，非接触式プローブを用いた場合はマイクロナノバブル水流浴がさら湯浴よりも約30%増加した。このことから，マイクロナノバブルが肌に付着すると，角質層内への湯水浸透が促進され，さら湯よりも毛細血管へ伝わる湯熱が多量となるため，さら湯よりも温浴効果が高まると考えられる。

6. むすび

2012年12月に新機能“ホットあわー”を搭載したエコキュートの発売を開始した。この機能は浴槽にマイクロバブルを発生させ（バブルの最頻径は10μm程度），入浴時の快適性向上や出浴後の保湿作用を高める機能である。この開発では，その入浴快適性と保湿作用を第三者機関と共同で検証し，効果を確認した。併せて，マイクロナノバブルの温浴効果の検証も行った。マイクロバブルが持つ機能は多岐にわたるため，今後も技術革新に努め，ユーザーにとって魅力的な製品開発を行っていく。

参考文献

(1) 片平建史，ほか：微細気泡の主観評価に基づく快適性評価と体表温に対する影響の検討，平成24年度日本人間工学会関西支部大会講演論文集2012，21～24（2012）
(2) 逸見憲一，ほか：マイクロナノバブル水流が肌水分量に及ぼす作用，第78回日本温泉気候物理医学会総会・学術集会抄録集，53（2013）
(3) 竹内史朗，ほか：マイクロナノバブル水流による温浴効果の検証，第78回日本温泉気候物理医学会総会・学術集会抄録集，52（2013）