

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420611

研究課題名(和文) QOL向上と給湯用エネルギー消費削減のための家庭排水熱回収システムの構築

研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF CLEAN WATER PREHEATING SYSTEM USING HEAT EXCHANGE WITH WASTE WATER FROM BATHROOM TO IMPROVE QUALITY OF LIFE AND TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION

研究代表者

鍋島 美奈子(Nabeshima, Minako)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90315979

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：家庭の給湯負荷削減のための上水予熱システムを設計するために、排水熱回収のための熱交換器の性能に関する実験をおこなった。また、給湯システム全体を再現したシミュレーションモデルを構築し、効果試算をおこなった。その結果、一次エネルギーを最大で11.36MJ/日削減できることを示した。30名の被験者を使って14~45℃の水に関する温冷感と快適性の調査もおこなった。7段階温冷感尺度による申告は、水温と指先の皮膚温度と相関がみられた。水温が28℃以上になると冷たい側の申告がなくなった。つまり、冬期に28℃まで予熱した上水が供給されると快適性の向上につながると言える。

研究成果の概要(英文)：With the goal of designing home bath water heat recovery systems to reduce the water heating load of hot water supply system experiments in characteristics of the heat exchanger for drainage heat recovery were performed. By using simulation model of the whole hot water supply system the heat recovery rate and primary energy consumption were estimated. As a result, it is shown that 11.36 MJ/day of primary energy consumption could be reduced. Other experiments on hot-cold sensation and comfort for water temperatures of 14 to 45 degree C were performed on 30 test subjects. Hot-cold sensation on a 7-level vote scale strongly correlated with water temperature and skin temperature. At 28 degree C and above, there were no "cold" votes. A heat recovery system that stores warm water to save energy could also improve quality of life in winter if the set temperature is 28 degree C.

研究分野：都市・建築環境工学

キーワード：浴室 排水熱回収 上水予熱 給湯用エネルギー消費量 実験 熱交換器

1. 研究開始当初の背景

国内のエネルギー消費の約 16% を占める民生家庭部門は 1990 年比で約 4 割増加しており、省エネルギー対策が進んでいないといえる。家庭で消費されるエネルギー全体の約 1/3 を占める給湯用エネルギーの削減方法として高効率給湯機の普及が進められているが普及率は低いため、同時にコスト的に導入のハードルが低い削減方法の検討が必要である。そこで本研究では浴室排水熱を利用した上水予熱システムを検討する(図 1)。

本研究では日本人のライフスタイルに適した給湯用エネルギー消費削減に向けた排水熱回収システムの開発を目的として、温度レベルの低い排水熱を広く薄く、できるだけコストをかけずに回収し、給湯用エネルギー消費量の削減および QOL (生活の質) 向上の仕組みを提案する。

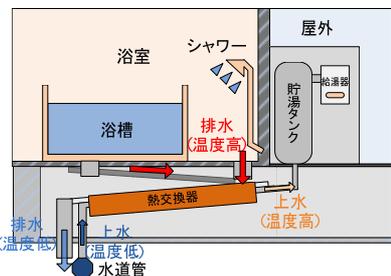


図 1 上水予熱システムイメージ図

2. 研究の目的

(1) 家庭排水熱回収システムに適した熱交換器の検討をおこなう。集合住宅等の PS (パイプスペース) 内に設置することを意図した上水管巻き付け型熱交換器と、浴室床下部分に設置することを意図した平板型熱交換器の性能試験をおこない、熱交換器に求められる条件や日本の住宅への適用条件について明らかにする。

(2) 冬期の洗面所における QOL 向上の観点から、上水予熱温度の検討をおこなう。排水熱回収で予熱された上水を給湯器に供給すれば直接的に燃料消費量の削減が期待できる。また、日本人のライフスタイルや給湯設備を考えると、比較的低温の湯を必要とする場面も多く、給湯器を介さずそのまま水として使用しても、給湯器の無駄な発停を回避し湯の使用量を削減できる。たとえば、洗顔という行為は時間も短く、水温も比較的低温でも対応が可能な生活行為である。排水熱交換により予熱した上水を洗顔に使用すれば、給湯器を使わずに、水が冷たすぎて不快な状況も避けることができると考え、洗顔時に求められる水温と温冷感、快適感に関して調査する。

(3) 日本人のライフスタイルに適した排水熱回収システムを提案するために、給水スケジュールや給湯システムを含めた上水予熱システムのシミュレーションモデルを構築し、システム全体としての導入効果を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 熱交換器の性能試験

図 2, 図 3 に示すような実験装置を構築し、熱交換器の性能試験をおこなう。

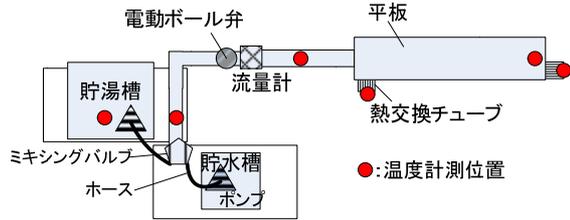


図 2 熱交換器実験装置平面図

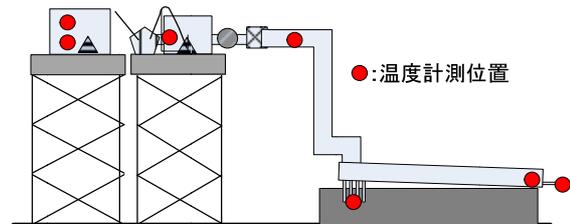


図 3 熱交換器実験装置立面図

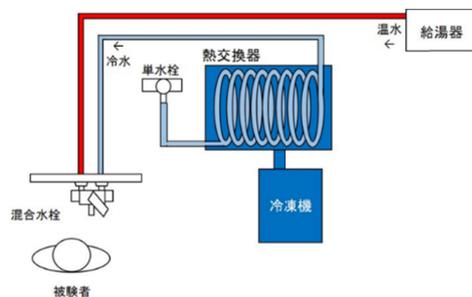


図 4 快適水温実験装置平面図

(2) 洗顔時の快適水温調査

図 4 に示す実験装置を構築し、QOL 向上の観点から上水予熱の効果の評価するため、大学生 22 名 (男性 10 名, 女性 12 名) を被験者として冬期の洗顔時に使用する水の温度に対する温冷感や快適感を調べる。

(3) 上水予熱システム導入効果の試算

Dymola (モデリング言語 Modelica®) をベースとした物理系複合モデリング・シミュレーションツールを用いたシミュレーションモデルを構築し、上水予熱システム導入効果を評価する。

シミュレーション条件を表 1, 表 2 に示す。給排水スケジュールは現実に即したものを作成した。Case1-1 と 1-2, Case2-1 と 2-2 を比較して熱交換器の性能変化の影響, Case1-2 と 1-3 と 1-4, Case2-2 と 2-3 と 2-4 を比較して導入建物の違いと季節の変化による影響, Case1-5 と 1-6 を比較して浴槽排水の流量制御による影響をそれぞれ検証する。熱交換器の性能である KA 値については後述の試算値 126W/K と熱交換器(e)の性能値 933W/K を用いる。熱交換器の長さは 1.5m とし、上水管の給湯器までの長さは単独世帯 2.0m, 複数世帯 8.0m, 排水管の熱交換器までの長さは単

独世帯で 0.5m, 複数世帯で 5.5m とする. 給湯器に貯湯タンクはない.

熱交換器モデルに熱容量と熱通過率を設定し熱交換量を求める. 熱交換器, 配管モデルともに熱伝導は一次元方向のみを考慮し, 熱交換器は周囲との熱損失を考慮せず, 配管は熱容量と周辺空気温度を境界条件として外表面からの熱損失を考慮する. 給湯器のモデルは給湯器内の熱交換器の熱容量と性能, 機器効率を設定する. 機器は外部との熱損失を考慮しない.

上水温度は冬期 8.1, 中間期 16.0, 夏期 24.3 とし, 気温は冬期 6.7, 中間期 17.2, 夏期 27.2 と設定した(上水温度は東京都水道局 2014 年水道水の水温, 気温は気象庁 2014 年の東京都気象データ参照).

表 1 単独世帯シミュレーション条件

	KA 値	入浴スタイル	季節
Case1-1	126(W/K)	浴槽入浴	冬期
Case1-2	933(W/K)	浴槽入浴	冬期
Case1-3	933(W/K)	浴槽入浴	中間期
Case1-4	933(W/K)	浴槽入浴	夏期
Case1-5	933(W/K)	夜と翌朝シャワ ー, 翌朝浴槽排水	冬期
Case1-6	933(W/K)	夜と翌朝シャワ ー, 翌朝浴槽排水 (制御)	冬期

表 2 複数世帯シミュレーション条件

	KA 値	5 世帯構成人数	季節
Case2-1	126(W/K)	4・4・3・2・2 人	冬期
Case2-2	933(W/K)	4・4・3・2・2 人	冬期
Case2-3	933(W/K)	4・4・3・2・2 人	中間期
Case2-4	933(W/K)	4・4・3・2・2 人	夏期

#### 4. 研究成果

##### (1) 熱交換器の性能試験

上水管巻き付け型熱交換器(図 5)

上水管を巻き付ける形状の銅製熱交換器を試作した. 熱交換器(a)の性能試験をおこなった結果, KA 値は最大 42.9W/K となった. 上水管と排水管の隙間を口付けすると KA 値は 126W/K 程度まで向上する可能性があることがわかった. また, 立て管の排水流量が 0.4L/s 以上の場合, 管壁全体を沿うように排水が流れるため, 横引き管より立て管に設置した方が熱交換器の性能が高くなることがわかった. 以上より, 集合住宅のパイプスペースに設置し, 複数世帯で共有する熱交換器に適している.

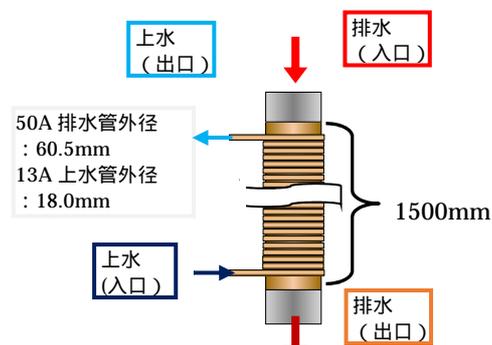
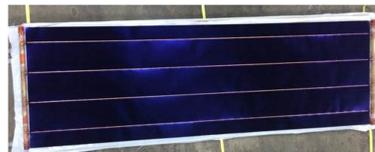
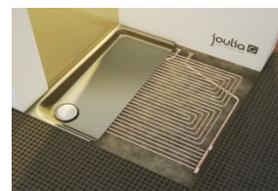


図 5 上水管巻き付け型熱交換器試作器(a)  
立て管立面図



平板: アルミ, 外形(mm)1900×400×0.3, 上水管: 銅

図 6 平板型熱交換器(d)



平板: 銅, 外形(mm)900×900×10, 上水管: 銅

図 7 平板型熱交換器(e)

表 3 KA 値と熱交換量算出式

$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$ ... 式 1	$Q = KA \Delta T_{lm}$ ... 式 2
$Q_w = V_w C_w \Delta T_w$ ... 式 3	$Q_c = V_c C_c \Delta T_c$ ... 式 4
$\Delta T_1$ : 熱交換前排水温度 - 熱交換後上水温度(K)	
$\Delta T_2$ : 熱交換後排水温度 - 熱交換前上水温度(K)	
$Q$ : 熱交換量(kW)	$K$ : 熱通過率 (kW/m <sup>2</sup> K)
$A$ : 熱交換面積(m <sup>2</sup> )	$\Delta T_{lm}$ : 対数平均温度差(K)
$Q_w$ : 排水損失熱量(kW)	$Q_c$ : 上水取得熱量(kW)
$V_w$ : 排水流量(m <sup>3</sup> /s)	$C_w$ : 排水比熱(kJ/m <sup>3</sup> K)
$V_c$ : 上水流量(m <sup>3</sup> /s)	$C_c$ : 上水比熱(kJ/m <sup>3</sup> K)
$\Delta T_w$ : 熱交換前後の排水温度差(K)	
$\Delta T_c$ : 熱交換前後の上水温度差(K)	

平板型熱交換器(図 6, 7)

2 種類の既製品について性能試験をおこなった. 熱交換器(d)は太陽熱集熱器として市販されている製品で, 集熱板の表面に排水を流して上水予熱用の熱交換器としての使用する. 熱交換器(e)は EU で市販されているシャワーブース用の熱交換器である. 実験の結果, 平板型熱交換器(d)の KA 値は 255W/K, 熱交換器(e)の KA 値は 957W/K となった. 熱交換面積 A を上水配管内側面積基準として熱通過率 K を算出したところ, 熱交換器(d)は 1,120W/(m<sup>2</sup>・K), 熱交換器(e)は 1,410W/(m<sup>2</sup>・K) となった. 熱交換器(d)と(e)の差は 290W/(m<sup>2</sup>・

K)はあるが、どちらも高い熱交換性能であることがわかった。設置スペースに余裕があれば、熱交換器(d)のようなシンプルな構造が望ましい。今回得られた性能値は今後の製品開発の目安となる。

### (2) 洗顔時の快適水温調査

実験条件の水温は 16~45 で、1 きざみでランダムに水温を変化させた。被験者は指先に皮膚温度センサーをつけて 60 秒間流水に触れて、指先の温冷感や洗顔を想定した温冷感と快適感を申告する。

被験者に水温を調節させて、普段の洗顔時の水温を調べたところ、日常的に水で洗顔をする被験者の平均は 18.4、日常的に湯を使用する被験者の平均は 25.8 であった。

冬期洗顔を想定した快適温度の幅は比較的広く、下限の平均値は 21、上限の平均値は 41 であった。

指先の温冷感は初期皮膚温度と瞬間皮膚温度との温度差との相関が強く、初期皮膚温度から約 2 下がると指先の温冷感は「やや冷たい」、約 5 下がると「冷たい」、約 8 度下がると「非常に冷たい」となり、初期皮膚温度からの温度上昇が 1 程度の時に「どちらでもない(中立)」、約 3 上がると「やや暖かい」、約 6 上がると「暖かい」、約 9 上がると「熱い」となった。指先の温冷感が「やや暖かい」「暖かい」と答えた被験者のうち約 95%がその状態を快適と答えた。指先の温冷感が「やや冷たい」では 86%、「どちらでもない」では 62%が快適と答えた。

指先の温冷感申告について、水温が 28 以上では冷たい側の申告がなくなり、「どちらでもない」から暖かい側の申告のみとなった。

実験とヒアリング調査から、被験者 22 人中 6 名は通常の洗顔水温が 13~19 と低く、各人の快適温度の下限値より低い温度で洗顔し、洗顔継続時間は平均 10 秒と短いことがわかった。当該被験者 6 人のうち 3 人は、自宅で洗顔する際に湯で洗顔するつもりでも水栓から湯がでるまで待たずに冷たい水で洗顔を始めると回答している。

被験者に対するヒアリング調査から、自宅洗面所の水栓から湯が出るまでの時間は最大 90 秒、最小 8 秒、平均 25 秒、標準偏差は 18 秒であった。また、自宅洗面所での洗顔継続時間は最大 115 秒、最小 5 秒、平均 22 秒、標準偏差は 23 秒であった。

### (3) 上水予熱システム導入効果の試算

給湯器を介して予熱上水を使用する場合システムシミュレーションの結果、図 8 の単独世帯において Case1-1 は 1.37%、Case1-2 は 2.72%となり、熱交換器の性能が 807W/K 向上すると給湯負荷削減率は 1.35 ポイント向上することがわかった。また Case1-2 は 2.72%、Case1-3 は 2.76%、Case1-4 は 2.89%となり、季節が冬期から中間期、夏期となる

に従って給湯負荷削減率が大きくなっている事がわかる。冬期では上水温度の方が気温より低いいためシステム内で上水の熱損失が発生するが、中間期・夏期では気温の方が上水温度より低くなり、システム内で上水の熱取得が発生するためこのような結果となった。次に Case1-5 は 1.97%、Case1-6 は 2.16%、となった。これより浴槽排水の流量を制御することで給湯負荷削減率が向上することを確認できた。複数世帯についてみていくと Case2-1 は 2.61%、Case2-2 は 4.88%となり、熱交換器の性能が 807W/K 向上すると給湯負荷削減率は 2.27 ポイント向上することがわかった。また Case1-2 と Case2-2 より複数世帯で熱交換器を共有することで給湯負荷削減率は 2.16 ポイント向上することが分かった。最後に Case2-2 は 4.88%、Case2-3 は 5.00%、Case2-4 は 5.00%となり、季節が冬期から中間期、夏期となるに従って給湯負荷削減率が大きくなっている事が分かる。単独世帯の条件より季節間の差が小さくなっているのは、複数世帯の排水が重なり排水がない時間が短くなることで熱交換器の熱容量の影響が小さくなるからである。また、年間のランニングコスト削減量は単独世帯で 1,539 円、5 世帯合計で 11,344 円となった。

図 9 より、Case1-2 は 1.59MJ/日、Case1-3 は 1.18MJ/日、Case1-4 は 0.64MJ/日の 1 次エネルギー削減となり、Case2-2 は 11.36MJ/日、Case2-3 は 8.66MJ/日、Case2-4 は 4.69MJ/日の 1 次エネルギー削減となった。給湯負荷削減率の比較では冬期の方が低くなったが給湯負荷の全体量は冬期が大きく、夏期になると小さくなるため削減量では冬期の方が高くなった。

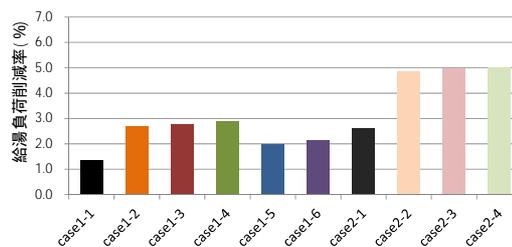


図 8 給湯負荷削減率

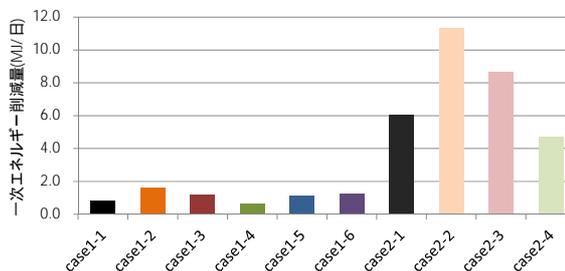


図 9 1 次エネルギー削減量

給湯器を介さず予熱上水を使用する場合冬期洗顔時の快適性を上げるために、洗顔

時の水温 28℃ を目標にし、洗面所下のスペースに熱交換後の上水を貯める低温水タンクと電気ヒーターを設置する排水熱回収システム(図 10)を提案する。このシステムでは、冬期水道水温が 10℃ の時に、浴槽排水熱との熱交換で 25℃ 程度まで上水を予熱し低温水タンクに貯めておき、使用時にヒーターで加熱して 28℃ に上げることを想定した。本システムでは洗顔 1 回あたりのランニングコストが 1.1 円となり、従来型のガス給湯器では 5.9 円と試算されたので、差額は 4.8 円/回となった。洗面台での洗顔を 1 日 1 回、4 人家族を想定すると、冬期 90 日間の洗面行為だけで 1,728 円のコスト削減につながる可能性を示した。

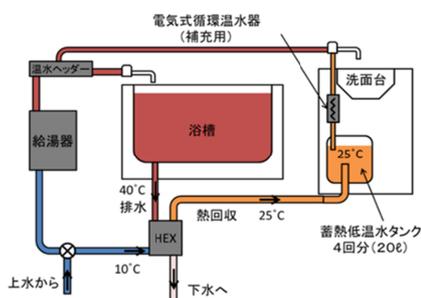


図 10 洗面台下で蓄熱タンクとヒーターを設置するシステムイメージ図

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

阿部敏也, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 西岡真稔, 三毛正仁, 澤部孝一「家庭の排水熱を利用した上水予熱システムの開発-浴槽排水熱回収用熱交換器の製作と性能評価-」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2013 年 9 月 25 - 27 日信州大学(長野県松本市)

大森雅貴, 阿部敏也, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 西岡真稔, 三毛正仁, 澤部孝一「排水熱回収による上水予熱システムの開発-集合住宅における熱回収システムの評価-」空気調和・衛生工学会近畿支部学術講演論文集 2014 年 3 月 11 日大阪大学中之島キャンパス(大阪府大阪市)

大森雅貴, 阿部敏也, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 西岡真稔, 三毛正仁, 澤部孝一「家庭の排水熱を利用した上水予熱システムの開発(第 2 報)複数世帯で熱交換器を共有する場合の効果に関する実験的研究」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2014 年 9 月 3 - 5 日秋田大学(秋田県秋田市)

阿部敏也, 大森雅貴, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 西岡真稔, 三毛正仁, 澤部孝一「家庭の排水熱を利用した上水予熱システムの開発

(第 3 報)トイレ・浴槽一体型ユニットバスを持つ住宅における導入効果の算出」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2014 年 9 月 3 - 5 日秋田大学(秋田県秋田市)

阿部敏也, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 西岡真稔, 三毛正仁, 澤部孝一「浴室排水熱回収による上水予熱システムの開発-実験とシミュレーションによる導入効果の試算-」空気調和・衛生工学会近畿支部学術講演論文集 2015 年 3 月 10 日大阪大学中之島キャンパス(大阪府大阪市)

柿田祐佑, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 西岡真稔, 三毛正仁, 澤部孝一「浴室排水熱回収による上水予熱システムの開発-実験による平板型熱交換器の特性把握とシステム性能の試算」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2015 年 9 月 16 - 18 日大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

上田奈々, ファーンナム・クレイグ, 鍋島美奈子「洗顔時の温度設定と温冷感に関する基礎的研究」空気調和・衛生工学会近畿支部学術講演論文集 2016 年 3 月 9 日大阪大学中之島キャンパス(大阪府大阪市)

〔その他〕  
特になし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

鍋島 美奈子 (NABESHIMA, Minako)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 9 0 3 1 5 9 7 9

### (2)研究分担者

西岡 真稔 (NISHIOKA, Masatoshi)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 4 0 2 8 7 4 7 0

中尾 正喜 (NAKAO, Masaki)  
大阪市立大学・複合先端研究機構・特命教授  
研究者番号: 6 0 3 8 1 9 7 7

ファーンナム クレイグ (Farnham, Craig)  
大阪市立大学・大学院生活科学研究科・講師  
研究者番号: 6 0 6 3 8 2 4 5