

## 浴室排水熱回収による上水予熱システムの開発

—実験に基づくシステム提案と導入効果の試算—

### DEVELOPMENT OF CLEAN WATER PREHEATING SYSTEM USING HEAT EXCHANGE WITH WASTE WATER FROM BATHROOM

- SYSTEM PROPOSAL BASED ON EXPERIMENTAL DATA AND ESTIMATION OF IMPACT OF THE SYSTEM-

地域環境計画分野 阿部敏也

家庭の給湯負荷削減のための上水予熱システムは、熱回収率向上とシステム全体での評価が課題となっている。そこで本研究では排水特性を把握し、排水流量の制御により熱回収率が1.3ポイント向上することを実験で示し、既存熱交換器は約3倍の性能向上が見込めることを試算で示した。更に住宅への適用条件の整理も行った。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、様々な条件の影響を整理し、一次エネルギーを最大11.36MJ/日削減できることを示した。

Our clean water preheating system has not been evaluated the whole system. Improving the heat recovery rate has been remained an issue. This study has been experimented in drainage characteristics to improve the heat recovery rate and shows some optimum conditions for Japanese style bathroom on the basis of the experimental data. Using simulation model of the whole hot water supply system, the heat recovery rate and primary energy consumption are estimated.

#### 1. はじめに

##### 1.1 研究の背景

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、普及率は低いためそれと同時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。

##### 1.2 研究の目的

筆者らはこれまで簡易浴槽モデルの実験装置を構築し、製作した熱交換器の性能を評価して熱交換器立て管設置時のKA値42.9W/K、横引き管設置時のKA値25.5W/Kであることを示した。また上水予熱システムの導入効果(熱回収率)を実験によって明らかにし、単独世帯で最大1.5%の熱回収率であることを示した<sup>1)</sup>。しかし現状の熱回収率では導入が難しく、熱回収率の向上が課題となった。また給水スケジュールや給湯システム(給湯器・配管)を含めたシステムの評価が出来ておらず、実際の給湯使用状況においてどの程度予熱された上水が有効に使われ、給湯負荷の削減に

寄与するかは明らかとなっていない。また配管等での熱損失が考慮されていないという問題点がある。

以上より本研究では実験によって熱交換器の性能向上以外の熱回収率向上の方法を検討する。また上水管巻き付け型熱交換器の性能向上の可能性を試算により示し、これらの実験と試算を踏まえて上水管巻き付け型熱交換器の日本の住宅への適用条件を明らかにすることを目的とする。

また実環境により近い条件で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、シミュレーションによりシステム全体としての導入効果(一次エネルギー削減量・CO<sub>2</sub>削減量・給湯負荷削減率・ランニングコスト)を明らかにすると同時に、導入建物(単独世帯・複数世帯)、給排水スケジュール、熱交換器の性能向上による影響を明らかにすることを目的とする。

#### 2. 排水流量制御実験

##### 2.1 実験概要

これまでの実験<sup>1)</sup>では排水の流量を浴槽からの排水を想定して0.9L/sで実験を行ってきたが熱回収率の向上が課題となっていた。それに対し、排水の流量を制御して小さくすることで熱交換時間が長くなり、熱回

収率の向上が見込めると考えた。そこで排水流量を上水流量である 0.16L/s と同程度まで小さくして実験を行う。表 1 に実験条件、図 1 に熱交換器立て管立面図、図 2 に熱交換器縦方向断面図、図 3 に実験装置立面図を示す。

表 1 実験条件

熱交換器設置状況	排水温度	排水流量	上水流量
立て管 (条件 1)	翌朝排水 ケース(31℃)	0.16L/s	0.16L/s
横引き管 (条件 2)	入浴直後排水 ケース(43℃)		

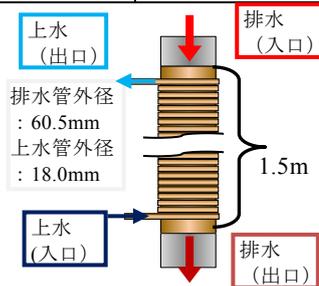


図 1 熱交換器  
立て管立面図

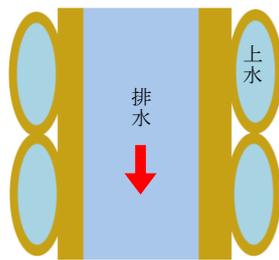


図 2 熱交換器  
縦方向断面図

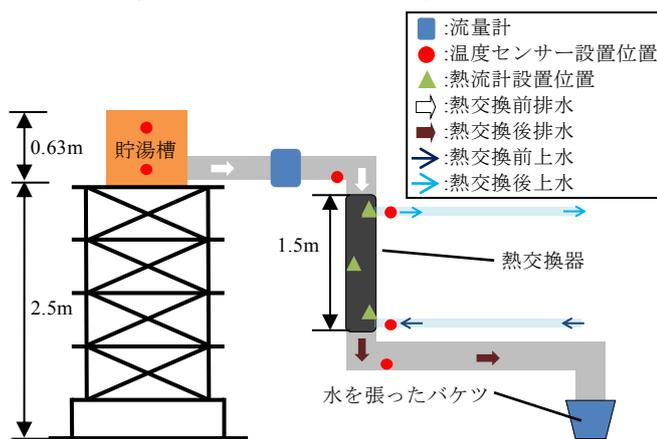


図 3 実験装置立面図

表 2 KA 値算出式

$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$ ...式 1	$Q_T = KA \Delta T_{lm}$ ...式 2
$Q_{排} = V_{排} C_{排} \Delta T_{排}$ ...式 3	$Q_{上} = V_{上} C_{上} \Delta T_{上}$ ...式 4
$\Delta T_1$ : 熱交換前の浴槽排水の温度 - 熱交換後の上水の温度(K)	
$\Delta T_2$ : 熱交換後の浴槽排水の温度 - 熱交換前の上水の温度(K)	
$Q_T$ : 総熱交換量(W)	$K$ : 熱通過率 (W/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)
$Q_{排}$ : 排水損失熱量(W)	$Q_{上}$ : 上水取得熱量(W)
$V_{排}$ : 排水流量(m <sup>3</sup> /s)	$C_{排}$ : 排水比熱(J/m <sup>3</sup> K)
$V_{上}$ : 上水流量(m <sup>3</sup> /s)	$C_{上}$ : 上水比熱(J/m <sup>3</sup> K)
$\Delta T_{排}$ : 熱交換前後の排水温度差(K)	
$\Delta T_{上}$ : 熱交換前後の上水温度差(K)	

表 3 熱回収率の定義

熱回収率 (%) = $(Q_{上} / Q_{直後排}) \times 100$ ...式 5
$Q_{直後排}$ : 排水が持つ熱量(kJ) = $V_{排} \times t \times C_{排}$ × 入浴直後湯温と上水温度の差(K)
$t$ : 熱交換時間(s)

## 2.2 実験結果

図 4 に立て管設置時の上水取得熱量の比較、図 5 に横引き管設置時の上水取得熱量の比較、図 6 に熱回収率の比較を示す。上水取得熱量は表 2、熱回収率は表 3 より算出した。

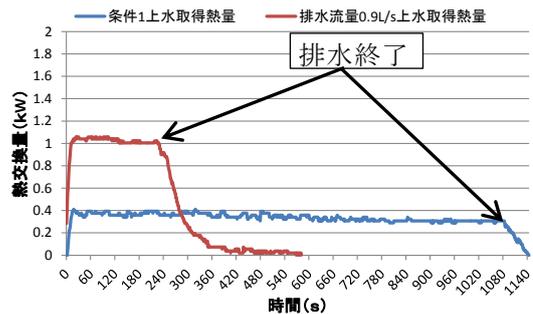


図 4 立て管設置時の上水熱交換量の比較

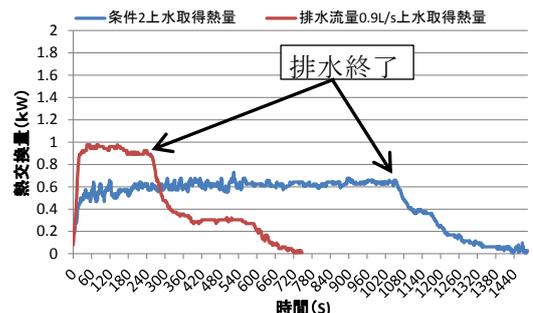


図 5 横引き管設置時の上水熱交換量の比較

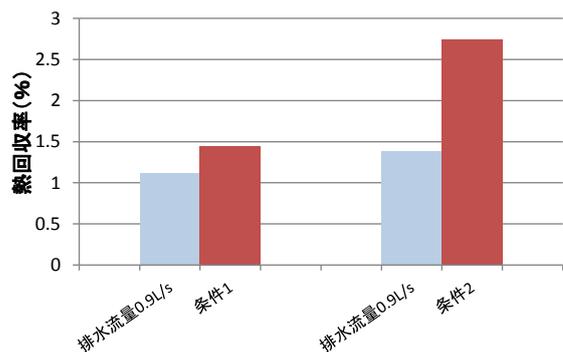


図 6 熱回収率の比較

図 4、図 5 において排水中の上水取得熱量は条件 1・2 とともに排水流量を小さくした方が低くなった。これは排水流量が小さくなることで熱交換器内の排水管に接触する排水の面積が小さくなり、性能が低下したからであると考えられる。図 6 において熱回収率は条件 1 で 0.32 ポイント、条件 2 で 1.34 ポイント向上した。以上より排水流量を小さくして熱交換時間を長くする事で熱回収率の向上が可能であることが分かった。

### 3. 性能向上の試算

#### 3.1 本熱交換器の問題点と接触熱抵抗の算出

2.において排水流量を制御することで熱回収率の向上が可能であることを示したが、更なる熱回収率向上の方法として熱交換器の性能向上が挙げられる。そこで本熱交換器の形状の問題点を明確にし、改良を加えることで、性能の向上がどの程度見込めるかを試算していく。

本実験で使用した熱交換器では構造上の問題により排水管と上水管は隙間なく密着できておらず、接触熱抵抗が生じていると考えられる。そこで排水管と上水管が全面密着している理想状態の伝導熱抵抗と対流熱抵抗を算出し、実験の抵抗値と比較することで密着できていないことによって生じる接触熱抵抗を求める。排水の流量によって熱交換器の性能が変化するため、今回は排水管の先端にトラップを設け、熱交換器内を満水状態にして行った。実験時の排水流量は 0.16 L/s で熱交換器は横引き管に設置した。

表 4 の式 6～式 9 より算出した排水の対流熱伝達率は  $449\text{W/m}^2\text{K}$ 、上水の対流熱伝達率は  $5.00 \times 10^4\text{W/m}^2\text{K}$  となった。銅の熱伝導率は  $398\text{W/mK}$ 、厚さは  $0.025\text{m}$  なので、式 10 より伝熱熱抵抗は  $2.25 \times 10^{-3}\text{m}^2\text{K/W}$  となる。熱交換器内満水状態の  $KA$  の実験値は  $16.5\text{W/K}$  なので式 11 より接触熱抵抗は  $15.0 \times 10^{-3}\text{m}^2\text{K/W}$  と算出できた。よって接触熱抵抗は伝熱熱抵抗の約 6.7 倍であることが分かった。更に全熱抵抗は  $1.70 \times 10^{-2}\text{m}^2\text{K/W}$  となった。また  $40^\circ\text{C}$  の空気の熱伝達率  $2.72 \times 10^{-2}$  と算出した接触熱抵抗より式 12 を用いて空気層の厚みを算出すると、 $4.08 \times 10^{-4}\text{m}$  となった。

#### 3.2 接触状況改善による性能向上の展望

3.1 より接触熱抵抗が非常に大きく、上水管と排水管の接触状況を改善することが性能向上のために有効であることが分かった。そこで接触熱抵抗となっている排水と上水の隙間の空隙部分を銀ろうのろう付けによってすべて埋めたと想定して、どの程度性能向上が見込めるか算出する。空気層が全て銀ろうになると仮定して銀ろう厚さ  $4.08 \times 10^{-4}\text{m}$ 、銀の熱伝導率  $429\text{W/mK}$  を用いて式 13 より銀ろうの熱抵抗を算出すると  $9.52 \times 10^{-7}(\text{m}^2\text{K/W})$  となる。以上より全熱抵抗は  $2.26 \times 10^{-3}\text{m}^2\text{K/W}$  となり改良前の全熱抵抗を大きく下回る結果となった。また  $KA$  値は  $126\text{W/K}$ 、伝熱面積が排水管全面であるとすると伝熱面積は  $0.28\text{m}^2$  であるため熱通過率は  $443\text{W/m}^2\text{K}$  となる。既往研究 1 より現状の熱交換器における  $KA$  の実験値は最大  $42.3\text{W/K}$  であるため、排水管と上水管の接触状況を改善することで性能が大幅に向上することが分かった。

表 4 接触熱抵抗と算出式

$Re=vL/\omega$	…式 6	$Pr=C\mu/k$	…式 7
$Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{0.2}$	…式 8	$Nu=hL/k$	…式 9
$R_1=(1/h_c)+(l_{CO}/\lambda_{CO})+(1/h_D)$			…式 10
$(R_1+R_2)/A_D=1/KA$			…式 11
$Da=R_2ka$	…式 12	$R_3=(l_{si}/\lambda_{si})$	…式 13
$\omega$ : 動粘性係数( $\text{m}^2/\text{s}$ )		$v$ : 流速( $\text{m/s}$ )	
$L$ : 代表長さ( $\text{m}$ )		$k$ : 熱伝導率( $\text{W/mK}$ )	
$\mu$ : 粘度( $\text{Pas}$ )		$h_c$ : 上水対流熱伝達率( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	
$h_D$ : 排水対流熱伝達率( $\text{W/m}^2\text{K}$ )		$l_{CO}$ : 銅の厚さ( $\text{m}$ )	
$\lambda_{CO}$ : 銅の熱伝導率( $\text{W/mK}$ )		$A_D$ : 排水管表面積( $\text{m}^2$ )	
$R_1$ : 伝導熱抵抗+対流熱抵抗( $\text{m}^2\text{K/W}$ )			
$R_2$ : 接触熱抵抗( $\text{m}^2\text{K/W}$ )		$ka$ : 空気熱伝導率( $\text{W/mK}$ )	
$R_3$ : 銀ろうの熱抵抗( $\text{m}^2\text{K/W}$ )		$l_{si}$ : 銀ろうの厚さ( $\text{m}$ )	
$\lambda_{si}$ : 銀ろうの熱伝導率( $\text{W/mK}$ )		$Da$ : 空気厚さ( $\text{m}$ )	
管内の水の温度は $h_{\#}$ 算出時 $40^\circ\text{C}$ 、 $h_{\uparrow}$ 算出時 $5^\circ\text{C}$ とし、管内の流量は排水・上水ともに $0.16\text{m}^3/\text{s}$ として流量と管の代表長さ(内径) $L$ から流速 $v$ を算出した。			

### 4. 実験と試算を踏まえた今後の展望

#### 4.1 上水管巻き付け型熱交換器の適用条件

##### ・単独世帯への適用

単独世帯に導入する場合は立て管に熱交換器を設置する事が難しいため、熱交換器の設置場所は浴室床下の横引き管に限られる。しかし参考文献 1 より横引き管設置時は性能が低下するため導入効果は小さくなってしまふ。また戸建て住宅へ導入した場合は熱交換器のメンテナンス費用が新たに維持コストとして必要となる。以上より単独世帯に本熱交換器を適用すると導入効果が小さくなってしまふため不向きであると言える。

##### ・複数世帯への適用

複数世帯で一つの熱交換器を共有する場合は排水集合管の立て管への設置となる。立て管については横引き管より性能が高くなる事が分かっているが、排水流量が小さい場合排水管全面に排水が流れないため性能が低下してしまふ。しかし集合住宅の集合管であると排水管全面に排水を沿わせる配管が設置されているため高い性能を維持でき、導入効果はより大きくなると考えられる。その他に集合住宅に導入するメリットとして集合住宅では定期的に配管のメンテナンスが行われるため、熱交換器のメンテナンス費用が不要となるため導入への障壁は小さいと言える。これらから上水管巻き付け型熱交換器は、複数世帯で共有する熱交換器として用いる方が導入効果が大きいと考えられる。

## 4.2 導入効果の向上に向けて

導入効果向上の方針として熱交換器の熱通過率Kの向上、熱交換面積Aの向上、熱交換時間tの延長が考えられる。以下にそれぞれの方針の展望を述べる。

### ・熱通過率Kの向上

上水予熱システム用の熱交換器は、排水と上水のクロスコネクションの危険性を出来る限り低減させるために排水管と上水管が独立した形状である必要がある。このような形状の熱交換器においては、排水管と上水管の接触面の隙間に生じる接触熱抵抗を低減することが熱通過率の向上に有効である。

接触熱抵抗低減の方法として、本研究ではろう付けを提案しその効果について示したが、他にも上水管の形状を円管から角管に変更することで接触面の隙間を小さくすることも有効であると考えられる。また熱交換器に漏水センサーを設置することで、一枚の管壁での熱交換を行う製品も検討可能となり、より熱通過率の高い熱交換器の導入ができると考えられる。

### ・熱交換面積Aの向上

配管スペースやメンテナンスの観点から単独世帯に導入する場合は横引き管に、複数世帯に導入する場合は立て管に熱交換器を設置することを想定して、それぞれに適した熱交換器を製作する必要がある。

単独世帯用熱交換器で熱交換面積を向上させるには床下スペースで熱交換面積が大きくなる平板型熱交換器が適していると考えられる。また複数世帯用熱交換器はスペースの制限から上水管巻き付け型熱交換器のような形状の熱交換器が適している。実験で用いた上水管巻き付け型熱交換器の排水管は50Aのサイズであるが、集合管であると径が50Aより大きくなるため、より大きな熱交換面積を確保できると考えられる。

### ・熱交換時間tの延長

2.の実験結果より排水の流量調節による熱交換時間の延長で導入効果向上が可能となることが分かっている。そこで排水の制御機構の設置により排水を制御し開放型貯湯槽の設置により上水の制御を行う。これにより熱交換時間が延長され更に排水時に常に上水と熱交換可能となるため、導入効果向上が可能であると思われる。

## 5. シミュレーションによるシステム導入効果の試算

### 5.1 シミュレーション概要

これまでの実験では考慮できていなかった給水スケジュール、配管熱損失、上水予熱による給湯器の省エネルギー効果について検討するため、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。また給排水スケジュール、導入建物、季節の

違い、熱交換器の性能向上による影響も検証していく。表5に熱交換器モデル内計算式、表6に給湯器モデル内計算式、表7に配管モデル内計算式を示す。

本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。また熱交換器は熱交換器の配管内が常に水で満水である状態での計算となっているため、排水後も配管内に排水が留まる状態となってしまう実際の排水状況を再現できない。そこで配管内空気の換気による外部との熱移動と同程度の熱量が外部に移動するように、シミュレーション上は排水終了後に気温と同じ温度の排水を微小流量流して換気による熱移動を再現した。換気により移動する熱量は排水管温度の実験値を参考に決定した。次に本給湯器のモデルは給湯器内の熱交換器の熱容量と性能、機器効率をパラメータとして設定する。機器の効率曲線は外部との熱損失を考慮しない。ここでは機器効率は0.9とした。

表5 熱交換器モデル内計算式

$c_w m_w (T_b - T_a) = Q_a + Q_b$ …式14	$m_w = \rho_w A_h s_w$ …式15
$Q_a = A_h (k_w / s_w) (T_a - T_w)$ …式16	
$c_w$ : 壁材料の比熱容量(J/kgK)	
$T_a$ : 排水側配管温度(°C)	$T_b$ : 上水側配管温度(°C)
$Q_a$ : 排水側ポートの熱流量(W)	$T_w$ : 壁温度(°C)
$Q_b$ : 上水側ポートの熱流量(W)	$m_w$ : 壁の質量(kg)
$\rho_w$ : 壁材料の密度(kg/m <sup>3</sup> )	$A_h$ : 伝熱面積(m <sup>2</sup> )
$k_w$ : 壁材料の熱伝導率(W/m <sup>2</sup> K)	

表6 給湯器モデル内計算式

$Q = (y Q_0 \eta) / \eta_0$ …式17	$\eta = Q / Q_f$ …式18
$m_f = Q_f / h_f$ …式19	$V_f = m_f / \rho_f$ …式20
$Q$ : 流体への入熱量(W)	$y$ : 負荷率(-)
$Q_0$ : 定格出力(W)	$\eta$ : 機器効率(-)
$\eta_0$ : 負荷率1での機器効率(-)	
$Q_f$ : 燃料の燃焼によって放出される熱(W)	
$m_f$ : 燃料質量流量(kg/s)	$h_f$ : 燃料発熱量(kg/J)
$V_f$ : 体積流量(m <sup>3</sup> /s)	$\rho_f$ : 燃料質量密度(kg/m <sup>3</sup> )

表7 配管モデル内計算式

$Q_1 = k_p A_{out} \Delta T_1$ …式21	$Q_2 = h A_{in} \Delta T_2$ …式22
$Q_{storage} = C_p (dT/dt)$ …式23	
$Q_1$ : 外部流出熱量(W)	$k_p$ : 配管熱通過率(W/m <sup>2</sup> K)
$A_{out}$ : 配管の外側面積(m <sup>2</sup> )	$A_{in}$ : 配管の内側面積(m <sup>2</sup> )
$\Delta T_1$ : 配管温度と配管周辺温度の差(K)	
$Q_2$ : 対流熱伝達量(W)	$h$ : 対流熱伝達率(W/m <sup>2</sup> K)
$\Delta T_2$ : 配管内流体と配管温度の差(K)	
$Q_{storage}$ : 配管の蓄熱量(W)	$C_p$ : 配管熱容量(J/kgK)
$dT/dt$ : 配管温度の時間微分(K/s)	$m$ : 配管質量(kg)

表 8 に単独世帯シミュレーション条件、表 9 に複数世帯シミュレーション条件、図 7 に上水予熱システムを導入していない住宅のシミュレーションモデル接続図、図 8 に上水予熱システムを導入した住宅のシミュレーションモデル接続図を示す。

表 8、表 9 における給排水スケジュールは参考文献 2 と 3 を基に作成した。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していく。熱交換器の性能である KA 値については 3. で示した性能の試算値 126W/K と海外製熱交換器の性能値 933W/K を使い、給湯器の機器効率 は 0.9 とした。熱交換器の長さは 1.5m、上水管の長さは単独世帯 2.0m、複数世帯 8.0m、排水管の長さは単独世帯で 0.5m、複数世帯で 5.5m とし、熱交換器は長さ方向の分割数を 20、上水管の分割数は単独世帯で 10、複数世帯で 40、排水管の分割数は単独世帯で 10、複数世帯で 110 とし て計算を行った。また上水温度は冬期 8.13℃、中間期 16.0℃、夏期 24.33℃とし、気温は冬期 6.67℃、中間期 17.22℃、夏期 27.23℃とした(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)。

図 7 において上水は上水管を通して給湯器に給水されており、図 8 において上水は熱交換器と上水管を通して給湯器に給水され、排水は排水管と熱交換器を通して排水されている。

表 8 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 9 複数世帯シミュレーション条件

	KA 値	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

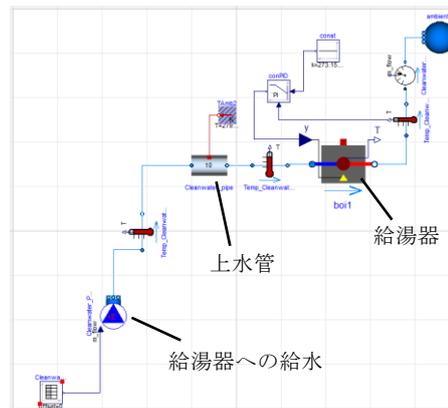


図 7 上水予熱システムを導入していない住宅のシミュレーションモデル接続図

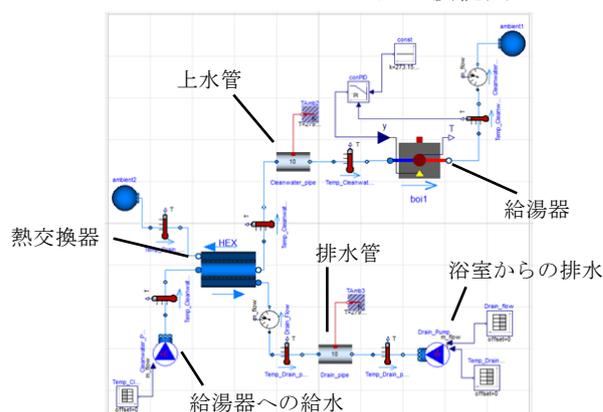


図 8 上水予熱システムを導入した住宅のシミュレーションモデル接続図

## 5.2 シミュレーション結果

図 9 に各 Case における給湯負荷削減率、図 10 に各 Case における一次エネルギー削減量、図 11 に各 Case における CO<sub>2</sub> 削減量、図 12 に各 Case におけるランニングコスト削減量を示す。

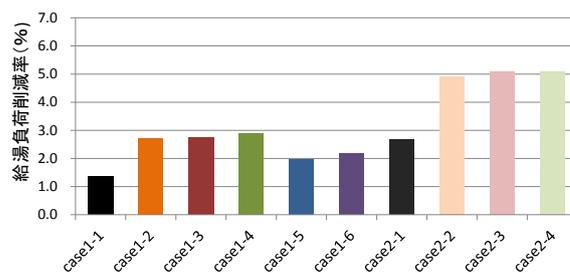


図 9 各 Case における給湯負荷削減率

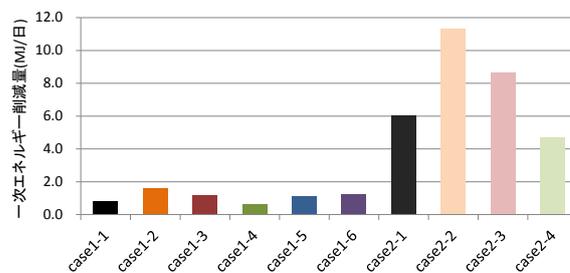


図 10 各 Case における 1 日の一次エネルギー削減量

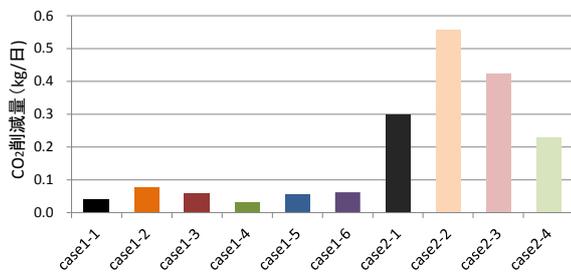


図 11 各 Case における 1 日の CO<sub>2</sub> 削減量

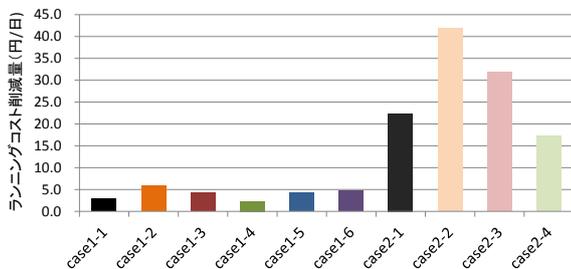


図 12 各 Case における 1 日のランニングコスト削減量

図 9 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分かった。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分かる。冬期では上水温度の方が気温より低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を大きくでき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 2.67%、Case2-2 は 4.92% 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 2.25 ポイント向上することが分かった。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 2.2 ポイント向上することが分かった。最後に Case2-2 は 4.92%、Case2-3 は 5.07%、Case2-4 は 5.09% 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。

図 10 において Case1-2 は 1.59MJ、Case1-3 は 1.18MJ、Case1-4 は 0.64MJ の一次エネルギー削減となり、Case2-2 は 11.36MJ、Case2-3 は 8.66MJ、Case2-4 は 4.69MJ の一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る結果となった。また CO<sub>2</sub> 削減

減量、ランニングコスト削減量についても同様の傾向がみられ、ランニングコストは単独世帯で年間 1539 円、複数世帯で年間 11344 円の削減となった。図 13 にランニングコスト削減量を示す。上水予熱システムにおいてインシャルコストの大部分を熱交換器の価格が占めることから、今後はこのようなランニングコストの削減による投資回収年数も考慮して熱交換器の開発を行う必要がある。

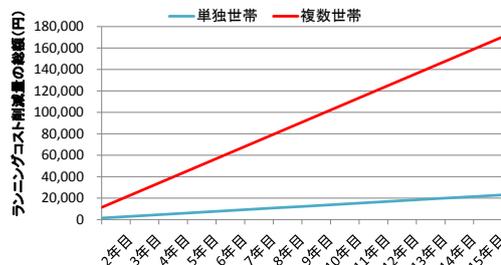


図 13 ランニングコスト削減量

## 6. まとめと今後の課題

- (1)排水の流量を上水と同程度まで落とすことで熱回収率は 1.3 ポイント向上することを示した。
- (2)熱交換器の上水管と排水管の隙間を銀ろうでろう付けすることで 42.3W/K から 126W/K までの性能向上が見込めることを示した。
- (3)上水管巻き付け型熱交換器の適用条件を整理し、複数世帯で共有する熱交換器として適していることを示した。また導入効果向上に向けた熱交換器とシステムの提案を行った。
- (4)上水予熱システムの導入効果を評価し、単独世帯では最大 1.59MJ、複数世帯では最大 11.36MJ の一次エネルギー削減ができ、年間のランニングコスト削減量は単独世帯で 1539 円、複数世帯で 11344 円であることを示した。また導入建物・給排水スケジュール・季節の違いと熱交換器の性能向上の影響を明らかにした。

今後の課題は以下の 3 点である。

- ・ランニングコスト削減による投資回収年数も考慮した単独世帯・複数世帯用の 2 種類の熱交換器の製作
- ・複数世帯における排水流量制御の効果の検証
- ・開放型貯湯槽を設置した場合の導入効果の評価

### 【参考文献】

- 1)阿部敏也他「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
- 2)大森雅貴他「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
- 3)前真之他「エネルギー消費量推定に必要となる設備・機器の性能指標の要件と活用方法の検討」

## 討議

### 討議[遠藤先生]

熱回収率の向上が必要であると発表の中であったがどのくらいの回収率まで向上できれば導入可能となるのか。

#### 回答

熱回収率によって導入可能となる基準を設定するのは難しい。本システムの目指す方向としては導入のハードルが低いシステムとして展開していきたいため、熱回収率よりシミュレーション結果で示した投資回収年数で評価すべきと考えている。投資回収年数は目安として5年程度が良いと考えている。

### 討議[梅宮先生]

海外では製品化されているとの事ですが、日本と海外の入浴スタイルの違いとはどのようなところか。

#### 回答

上水予熱システムが製品化されている国はアメリカとスイス等が挙げられるが、その2か国はシャワー入浴が一般的である。シャワー入浴の場合は給湯と排水が同時に発生するため予熱した上水を直接給湯に用いることができる。しかし日本の場合はシャワー以外に浴槽に湯張りを行うため、排水が発生しない時に大きな給湯負荷が発生してしまい、上水予熱システムのメリットが小さくなってしまう。

そこで本研究では複数世帯で一つの熱交換器を共有し、排水が発生しない湯張りの給湯時にも他の世帯の排水を利用することで日本の入浴スタイルでもメリットが大きくなるようにすることができた。

### 討議[梅宮先生]

入浴中の排水(シャワー等)は考えていないのか。

#### 回答

給排水スケジュールはM1スタンダード<sup>3)</sup>という給排水スケジュールを参考に作成し、浴槽とシャワーの両方を考慮している。

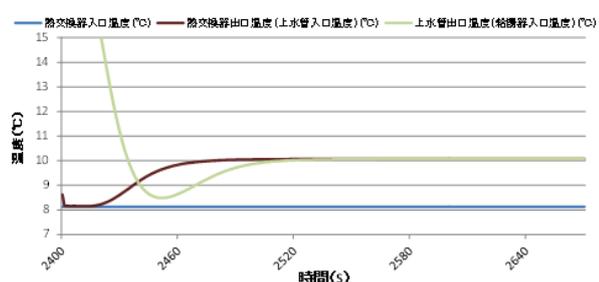
### 討議[西岡先生]

熱回収した後の上水は給湯器までの間の配管の熱損失は考慮しているのか。

#### 回答

シミュレーションでは配管の熱損失を考慮している。

①のグラフはCase1-1のシミュレーション結果よりシャワー排水時の上水の温度を取り出したものである。2520s前後までは上水管の熱容量の影響で上水管の出入り口温度の応答に差が生じているがその後は出入り口温度にほぼ差が見られないことから上水管部での熱損失は小さいと思われる。



①Case1-1 シャワー時上水温度

### 討議[鍋島先生]

複数世帯で熱交換器を共有する場合誰が所有・管理をするのか。

#### 回答

基本的には集合住宅の区分所有者がシステムを共有することが適していると考えている。導入の際は設計事務所やゼネコン等が設計段階で上水予熱システムを組み込んでおくことが必要であると思われる。

### 討議[鍋島先生]

集合管の場合浴室以外の雑排水も混ざるため排水の温度が低下すると考えられるが、それに対してはどのように考えているのか。

#### 回答

トイレの排水がシャワーや浴槽排水と同じタイミングで行われた場合はその影響もあると考えられる。しかしキッチンや手洗い等の給湯・排水に対しても上水予熱システムのメリットが出るため一概に過大評価しているとは言えない。今後は雑排水も考慮した給排水スケジュールでシミュレーションを行う必要がある。

### 討議[西岡先生]

集合管で回収する場合、排水が重なって流量が非常に大きくなった時に管壁に沿わずに熱交換されないまま排水される量が多くなってしまおうと考えられるがその点に関してはどのように考えているのか。

#### 回答

現在の実験設備では設定できる排水流量に上限があるためその点に関する検討は出来ていない。今後実験装置を改良し、排水流量と熱交換量の関係を明らかにする必要がある。