

Influence of the number of divisions and the calculation time interval
on the temperature distribution in a multi-connected complete mixing type
of hot water storage tank

完全混合槽列貯湯モデルにおける 分割数と計算時間間隔の温度分布に及ぼす影響

Hironobu MATSUO

松尾 廣伸*

Abstract

Heat pump water heaters have gained significant popularity in recent times due to their high efficiency and long-term cost-savings. However, in order to further increase the efficiency via practical simulation-based methods, it is necessary to accurately calculate the temperature distribution of the hot water storage tank. This distribution calculation must also take into account the use of multiple heat sources, and cases involving thermal stratification when using solar heat. In this work, we investigated how modeling the temperature distribution in a multi-connected complete mixing-type storage scenario is influenced by the calculation time interval, by the number of virtual divisions, and by the flow rate of the heated water. Our results revealed that: (1) simply using a short calculation time interval does not contribute to improved model accuracy; (2) although a larger number of divisions can contribute to accuracy, the contribution is not so large; and (3) if the individual temperature-distribution relationships of the number of deviations, the calculation time interval, and hot water flow rate are appropriate, an accurate temperature distribution can be computed (i.e., there is no change in temperature gradient due to interactions between the factors). Finally, I propose a variable-time calculation method using the individual relationships of these factors.

Keywords: Hot water storage, Temperature distribution, Numerical simulation, Heat pump

キーワード: 貯湯槽, 温度分布, 数値シミュレーション, ヒートポンプ

1. はじめに

家庭用の CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯機の普及に伴い、温度成層型貯湯タンクの温湯沸き上げシミュレーションがなされることが増えてきた^{1),2),3)}。ヒートポンプ給湯機では、貯湯タンクの底部から給水し、外付けのヒートポンプユニットで沸き上げを行い、65~90℃のお湯として頂部へと戻す。その際、温水の流量は 0.7~1.5 L/min 程度と非常に緩やかである。そのため、従来の太陽熱利用時と比較すると温度成層が崩れにくく、温度境界面を維持したまま順に降

下していくこととなる。このヒートポンプでの沸き上げに際しては、ヒートポンプ沸き上げ効率が熱源である外気温度や沸き上げの温度のみならず、給水温度（貯湯タンク底部温度）・流量の影響も大きく受けることから、製品の開発や効率の向上のために精度の良いシミュレーションを行うためには、貯湯タンクの正確な温度分布の算出が必要となる。

現在、ヒートポンプ給湯機とソーラーシステムとを併設した給湯システムが販売されており、また、太陽光発電による逆潮流の抑制のために日中にヒートポンプに沸き上げを行うことも検討されている。加えて、電熱併給ハイブリッドソーラーコレクタとヒートポンプ給湯機の組合せも研究されている。したがって、複数の熱源を用いる場合や、

* 静岡大学工学部助教 (〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1)

e-mail: matsuo.hironobu@shizuoka.ac.jp

(原稿受付: 2017 年 5 月 11 日, 受理日: 2017 年 11 月 9 日)

太陽熱を熱源として温度成層を維持した形でヒートポンプを用いた沸き上げを行う際にも適切な温度分布の把握が必要となる。

これまで、ソーラーシステムの貯湯タンクではタンク下部に熱交換器が設置され対流によって温度の均一化が図られることから、沸き上げ時における温度成層を強く意識することは少なかった。しかしながら、頂部から高温水を低流量で貯湯する際には、温度成層の影響を十分に考慮する必要がある。このように底部から給水し沸き上げて頂部に戻す方法に関する計算方法も新たなものでなく、基本的には建材試験センター規格⁴⁾と同様である。しかしながら、近年に取り上げられることが多くなったのは、ヒートポンプの温湯沸き上げ量の少なさ（すなわち、温度成層の崩れにくさ）、貯湯湯量の増加および温度分布の重要性が増したことによるものと考ええる。温度分布の重要性が増したのは、当該箇所の温度がヒートポンプのCOPや熱交換率に大きく影響を及ぼすことに加え、中間層からの出湯もされるようになり位置に対する温度の変化が急峻になったためであると考ええる。シミュレーションには貯湯タンクを n 分割し、分割したそれぞれの層の中においては完全混合槽とみなす完全混合槽列モデル⁴⁾が良く用いられている。これに対して分割数（体積要素数）や計算時間間隔についても検討がなされ、熱量としては大差ないが、温度分布は分割数や計算時間間隔によって変化することがわかっている^{3), 5)}。加えて、貯湯タンク内の温度分布を計算するために、槽内混合モデルや乱流モデルに関しても研究がなされている⁶⁾が、計算の複雑さや計算に長時間を要することから普及するには到っていない。

そこで、本論文では、普及性の高い完全混合槽列モデルを用いつつ、計算精度を向上させることを検討する。まず、数値計算上のパラメータである貯湯タンク分割数、計算時間間隔および物理パラメータである温水沸き上げ流量をパラメータとして計算による異温度水混合による温度分布におよぼす影響を評価する。この際、他の物理パラメータである熱損失や上下層の熱伝達を除外し、計算により発生している問題を明確化する。一般に実験結果とのマッチングをとることが研究されているが、後述するように結果的に合致することもあるため、本論文では主に理論計算の理想値との計算パラメータを変えた場合の結果の相違という観点から検討する。次いで、理論的な検討、実験結果との対比、既往研究の検証を行う。これらのことを通して、温度分布の差異の原因を明らかとし、より差異の少ない計算方法の提案を行おうとするものである。

2. 検討対象とするシステムと内容

現在市販され最も普及しているタイプのヒートポンプ給湯機では、底部からの給水、頂部への湯入れに加えて、低温のお湯を積極的に使うための中間部からの出湯、およびタンクから外気への放熱を考慮する必要がある。加えて暖房機能や沸き増し機能がある場合には、頂部からの採湯と

中間層へのリターンもある。さらには太陽熱併用型のエコキュートにおいては、下部の太陽熱交換器を含んでいる。近年の論文においては、これらの影響の一部が含まれている形でシミュレーションを行っているものが多い。しかしながら、それでは何が原因でどのような変化が生じるのかが不明瞭となる。そこで本論文では、シミュレーションにおける温度境界層における異温度温水の混合による温度計算の影響だけに着目し、放熱損失や貯湯槽内部の熱伝導及び対流による影響を除外し、単純化して検討を行う。Fig.1に対象とするシステムモデルを示す。すなわち、温度成層型の1タンクの円筒形の貯湯タンクであり、貯湯タンクからの放熱損失はなく、底部から給水し、外付けのヒートポンプで沸き上げたお湯を頂部に戻すものとする。貯湯タンクはタンク内を n 等分して考え、完全混合槽が連続した完全混合槽列型とする。給湯によるお湯の使用に関しても対象としない。また、上下の層への熱伝導による熱量の移動も考慮しない。なお、水の比重・比熱は、温度に依らないものとした。

3. 計算方法

計算方法の概念図をFig.2に示す。総容量 V の貯湯槽を n 分割し、上から順に位置番号をつけた。水の比重・比熱は

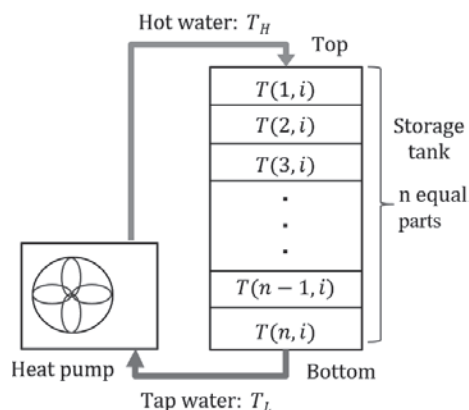


Fig. 1 Target system

図1 対象とするシステム

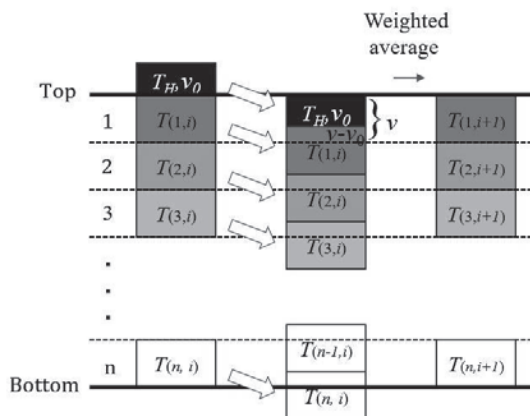


Fig. 2 An illustration of calculation method

図2 計算方法の概念

温度によらないとしたため、熱量換算せずとも温度のみで計算することができ、1 番目の体積要素における $i+1$ 回目の温度は i 回目の要素に $v_0 T_H$ を加重平均して

$$T_{(1,i+1)} = \frac{v_0 T_H + (v - v_0) T_{(1,i)}}{v} \quad (1)$$

となり、同様に j 番目の体積要素における $i+1$ 回目の

$$T_{(j,i+1)} = \frac{v_0 T_{(j-1,i)} + (v - v_0) T_{(j,i)}}{v} \quad (2)$$

となる。ここで、

$T_{(j,i)}$: i 回目の計算時における j 番目の体積要素の温度
[°C]

T_H : ヒートポンプからの給湯温度 [°C]

T_L : 貯湯槽初期温度 (給水温度) [°C]

V : 貯湯槽の総容積 [m³]

n : 分割数

v : 分割した一層あたりの体積 = V/n [m³]

v_0 : ヒートポンプからの計算時間間隔当たりの給湯量
= $u \times t_s$ [m³]

t_s : 計算時間間隔 [s]

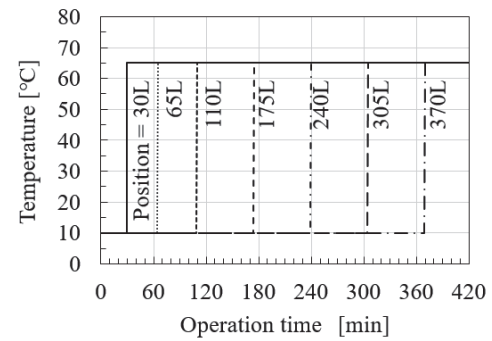
u : 沸き上げ流量 [m³/s]

である。これを計算時間間隔毎に計算する。分割数と計算時間間隔との関係で複数の層をまたぐ場合には温度境界となる層のみで温度境界層における異温度温水の混合による温度計算を行うものとした。ヒートポンプの供給可能な熱量は当然ヒートポンプによって制限されるが、一般的なヒートポンプ給湯機における供給熱量範囲で扱うこととし、本論文では問題としない。なお、実際の計算に当たっては、 $T_H = 65$ °C, $T_L = 10$ °C, $V = 420$ Lとし、 n : 1~2000, t_s : 0.1~60 min, u : 0.7~2.0 L/minを変化させた。

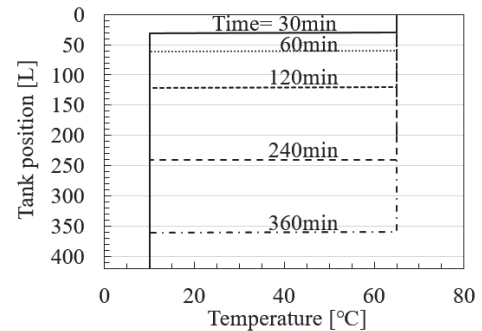
4. 計算結果

4.1 基準計算結果

Fig.3 に 420 分割 (1.0 L/層), 計算間隔 1.0 min, 沸き上げ流量 1.0 L/min とした際の結果を示す。(a)は時間に応じてある特定の位置で温度がどのように変わるかを表したものであり、(b)はある時刻におけるタンク内の温度分布がどのようになるかを表したものである。(a)のパラメータは貯湯タンクの上端からの位置であり、(b)のそれは経過時間である。両図ともある特定の時刻・容積において温度変化が瞬時に生じており、温度境界が維持されたまま移動していることがわかる。本論文の計算においては、外周への熱損失も上下層間の熱伝達も考えないのであるから、他の層と混ざらない時間間隔で計算したものが理想的な結果となり、いわゆる押し出し流れの場合の計算結果に相当する。これらの条件であれば、計算間隔毎に一つの層分の流量が上層から投入され順次計算されていくために境界層付近の位置に対する温度勾配の緩和が起こらない。本計算においては初期温度を 10 °C一定として計算したが、初期温度が違っていたとしても混合なく順次下層に送られることになるた



(a) Time history of the temperature



(b) Temperature distribution

Fig. 3 Ideal temperature distribution (plug-flow) of calculated results

図3 基準温度分布 (押し出し流れ) の計算結果例
($n = 420$, $u = 1.0$ L/min, $t_s = 1.0$ min)

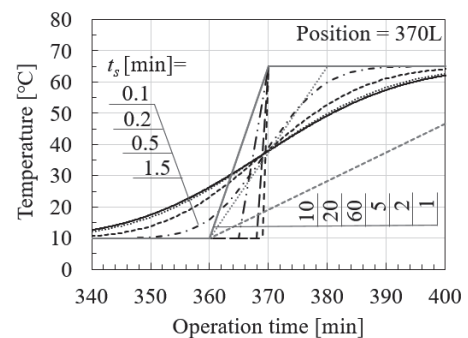


Fig. 4 Temperature variations with calculation time interval

図4 計算時間間隔による温度の変化

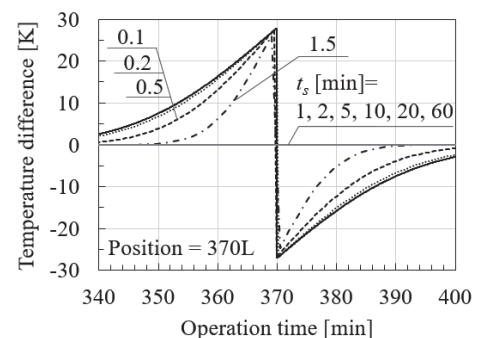


Fig. 5 Temperature differences with calculation time interval

図5 計算時間間隔による温度の差異

め温度勾配の緩和は生じない。なお、算出に用いた位置は後述の実験で用いたものとした。

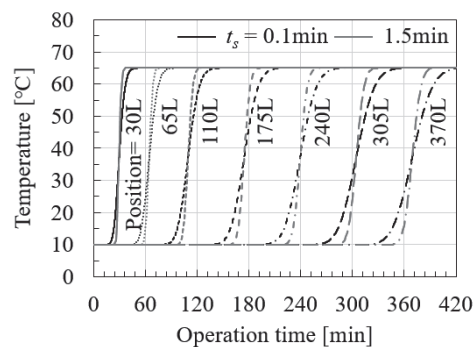
4.2 計算時間間隔依存性

前節と同様に 420 分割、沸き上げ流量 1.0 L/min とし、計算時間間隔を 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 5, 10, 20, 60 min と変えて計算した。その結果の 370 min 前後の温度変化を Fig. 4 に示す。計算点をそのまま結んでいるために、間隔が長いときの表記は適切でないが、2 分を超えた計算結果は 1 分のそれと同じであり、間隔が開いているだけで計算点における値は正しいものとなっている。それに対して、1 min 未満の場合と 1.5 min 間隔で計算した場合は時間に対する温度勾配(dx/dt)が緩和されている。さらに、これらを Fig. 3 と比較し、温度差を求めたものを Fig. 5 に示す。最大で温度差の 1/2 に相当する 27 °C の差が生じており、基準計算の変化点である 370 min 付近での差異が非常に大きくなっている。0.1, 0.2, 0.5, 1.5 min と時間当たりの貯湯量が層容量と合致しない場合には混合が起こるために、このように温度勾配が緩和されることになる。1.5 min の場合に 0.1~0.5 min の場合よりも誤差が少なくなるのは、1 回の計算における貯湯量が 1.5 層分に相当し、当該地点に到達するまでの異温度温水の混合による温度計算回数が少ないためである。

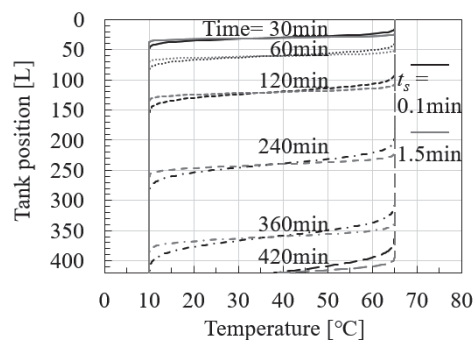
次に、0.1 min と 1.5 min の計算結果を Fig. 6 に示す。計算毎に混合・再計算が行われるために、その繰り返し計算によって、時間が経つほど、位置が下がるほど基準値との差異が大きくなることが分かる。Fig. 3 と比べると時間方向で最大 40 分程度、容量で最大 40 L 程度の差異が生じている。これだけの差異が生じるとヒートポンプの COP にも十分に影響を及ぼすものと思われる。

4.3 分割数(層容量)依存性

計算間隔を 1.0 min、沸き上げ流量を 1.0 L/min とし、分割数を 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 層(層容量 420~0.21 L)まで変えて計算した結果を Fig. 7 に示す。同図には、(a)に代表値として 30 L を含む層と 370 L を含む層とを、(b)に 120 min と 360 min の時刻における温度分布を示した。分割数が増えるにしたがって基準値との差異が小さくなる傾向があるものの、組合せによっては逆転している個所もある。分割数が極端に少ない時には温度に大きな差異が生じるのはやむを得ないが、50 分割、100 分割でも最大で 150 min、100 min もの差異が発生しており、この計算間隔、流量に対してはさらに大きな分割数が必要であることが分かる。420 分割(およびその倍数)の時には層容量と合致するために誤差はなくなり、さらに 500 分割以上と大きくなっても差異は発生するものの、その差は小さくなる。層容量と時間間隔当たりの供給湯量が合わないとき時間及び位置に対する温度勾配が緩和し、計算回数が増えるに伴い(下層に行くに従い)、温度勾配の緩和は激しくなる。370 L の位置における 370 min 前後の差異を詳細に検



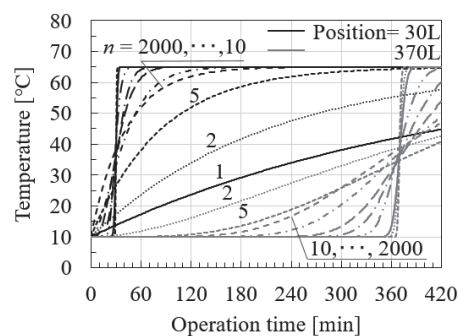
(a) Time history of the temperature



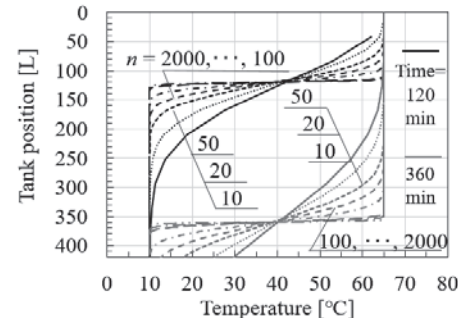
(b) Temperature distribution

Fig. 6 Temperature distributions with calculation time interval

図6 計算時間間隔による温度分布の変化
($n = 420, u = 1.0$ L/min)



(a) Time history of the temperature



(b) Temperature distribution

Fig. 7 Temperature distributions with number of partitions

図7 分割数の違いによる温度分布の変化
($u = 1.0$ L/min, $t_s = 1.0$ min)

討した結果を Fig. 8 に示す. 同図から, 分割数が単純に多ければ良いのではなく, 計算時間に相当する温水沸き上げ量と層容量との差分が小さくなるほどに差異が小さくなることがわかる.

4.4 温水沸き上げ流量の違い

既存のシステムの動作シミュレーションを行う場合には HP の温水沸き上げ流量は実験条件から与えられるものとなるが, 制御の最適化やシステム的设计のためにシミュレーションを行う際には流量の影響に対する評価も必要となる. そこで, 流量をパラメータとして計算し, その影響

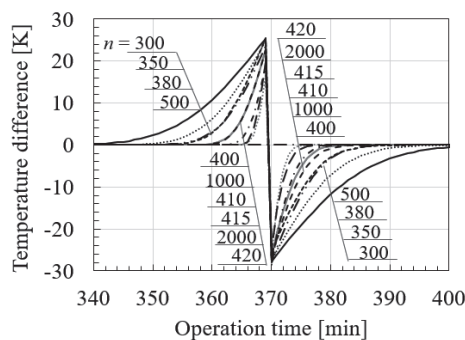
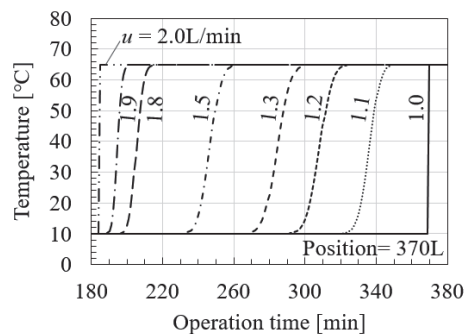
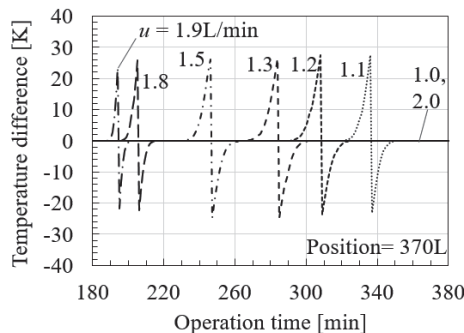


Fig. 8 Influence of calculation time interval on temperature difference

図8 分割数の誤差に及ぼす影響



(a) Time history of the temperature



(b) Temperature difference

Fig.9 Time history of the temperature with hot water flow rate

図9 流量の温度変化に及ぼす影響
($n = 420, u = 1.0 \text{ L/min}$)

を評価する. 420 分割, 計算間隔 1 min として, 流量を 1.0 ~ 2.0 L/min まで変えて計算した. その結果を Fig. 9 に示す. 流量が大きくなるに従い時間が短くなるのは当然であるが, それのみならず時間に対する温度勾配が変化していることが分かる. 1.0 および 2.0 L/min では差異は生じていない. 差異は, 中間の 1.5 L/min で大きく, 2.0 L/min に向かって小さくなっている.

5. 検討及び考察

5.1 計算における異温度水混合の温度分布への影響

前章で示したように, 計算パラメータの変更により, 貯湯タンク内の温度分布が大きく変化することが明らかとなった. 実験結果とフィッティングするだけであれば良いが, 実験パラメータの変更に合わせて毎回シミュレーションの計算パラメータ (分割数, 計算時間間隔) を求めなければならないようでは本末転倒である. 今回の試算は, 温度境界における混合によるものであるため, 1 回の計算において混合する高温湯量が 1 層に占める割合を混合率 m として, それをパラメータとして変化を考える.

$$m = \frac{\Delta v}{v} = \frac{F \cdot t_s}{V} = \frac{\Delta z \cdot t_s}{Z/N} \quad (3)$$

ここで, Z : 貯湯タンク高さ [m], Δz : 一層あたりの高さ [m].

混合率が低ければ少しずつしか混ざらないので, 計算回数を増やしても容易に高温に到達しない. 単純計算では混合率に計算回数を掛けたものが 1 となると境界層に到達する (すなわち, 高温になる) ことになる. 単純化のために混合量が 1 層の体積を超えないものとして (層を超えた混合部分の層に対する比と考えても同様であるが, 計算箇所が異なることとなる), j 層の i 回目の関係式を m を用いて書き直すと,

$$T_{(j,i)} = mT_{(j-1,i-1)} + (1-m)T_{(j,i-1)} \quad (4)$$

となる. ここで, 計算の簡便な, 最も低い位置にある混合温水の温度とタンク最頂部層 (第 1 層) の温度を考える.

① 最も低い位置にある混合温水の温度計算

初回の混合では, 第 1 層が,

$$T_{(1,1)} = mT_H + (1-m)T_L \quad (5)$$

続いて 2 回目の計算では, 第 2 層が,

$$\begin{aligned} T_{(2,2)} &= mT_{(1,1)} + (1-m)T_L \\ &= m^2T_H + (1-m^2)T_L \end{aligned} \quad (6)$$

となり, 同様に i 回目の計算では, 第 i 層が,

$$\begin{aligned} T_{(i,i)} &= mT_{(i-1,i-1)} + (1-m)T_L \\ &= m^iT_H + (1-m^i)T_L \end{aligned} \quad (7)$$

となる. m の i 乗となり, すなわち混合率の計算回数の指数乗で温度が低下し, 混合温水の領域が広がっていくことがわかる.

② タンク最頂部層 (第 1 層) の温度

同様に

$$\begin{aligned} T_{(1,2)} &= mT_H + (1-m)T_{(1,1)} \\ &= (2m-m^2)T_H + (m-m^2)T_L \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T_{(1,i)} &= mT_H + (1-m)T_{(1,i-1)} \\ &= \{1 - (1-m)^i\}T_H + (1-m)^i T_L \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

一方基準値は、それぞれ以下ようになる。

$$\begin{aligned} T_{(i,i)} &= T_H (im \geq 1) \\ &= T_L (im < 1) \end{aligned} \quad (10)$$

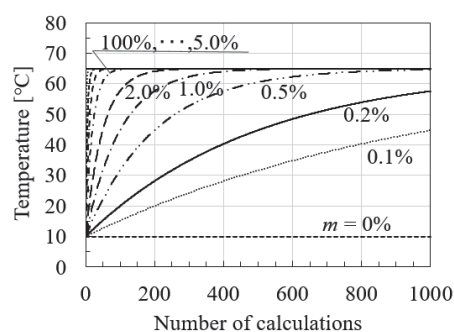
$$\begin{aligned} T_{(1,i)} &= T_H (im \geq 1) \\ &= imT_H + (1-im)T_L (im < 1) \end{aligned} \quad (11)$$

これらの結果のうち、第1層の温度の混合回数に対する変化を Fig.10(a)に示す。同図から、混合回数の増加と共に温度は上昇する傾向にあり、混合率が高いほど温度変化が速いことが分かる。これを層容量に対する貯湯量の割合(混合率×計算回数)に規格化したものを Fig.10(b)に示す。層容量に対して規格化することである程度以上の分割数であればほぼ同じ線上に載ることが分かる。この式は第1層に対して求めたものであるが、これを貯湯槽全体に対するものとして捉えたと、 $im \geq 1$ の領域において中島ら⁷⁾の過渡応答図と合致する(ただし、表記の仕方は変化量に対する割合で示されているため異なる)。これらは化学工学で取り扱われる槽列モデルおよび混合拡散モデル⁸⁾におけるステップ応答と類似の結果を示している。Fig. (b)に示した到達率も同様であるが、 $im < 1$ で異なるのは基準値が T_H ではなく混合平均温度に対して計算しているためである。

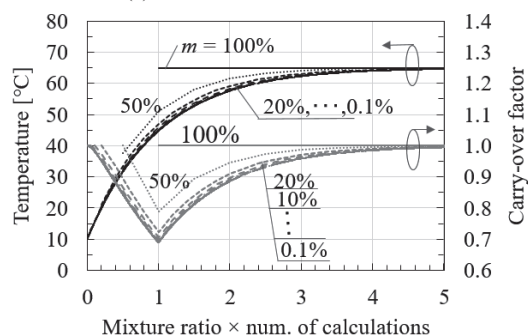
5.2 実験結果との比較

CO₂ ヒートポンプによる沸き上げ実験を行った。出湯時の混合が起こり難いように低流量で高温出湯し、貯湯槽内を均一温度の水道水で満たし、深夜電力を用いて「控えめモード」で沸き上げた。温度計測箇所は、貯湯タンク缶体外部に既設のサーミスタを用いた。結果を Fig.11 に示す。夜23時過ぎに沸き上げを開始し、午前3時30分ごろに自動的に停止した。また、各所の温度変化が順に生じていることがわかる。

これに計算パラメータを調整して実験結果と近似のものを求めることを考える。 T_H 、 T_L および沸き上げ流量は実験結果から定まるため、検討すべきは分割数及び計算時間間隔の2点となる。類似の結果の例を示す。最小二乗法等でマッチングをとったものではなく、目検討で選んだものである。この結果は上下層の熱伝達、対流および外部への熱損失を考慮していないため最初の部分の温度勾配の変化の近似が不十分であるものの、パラメータフィッティングでここまで近似できることを示している。しかしながら、現在未考慮の熱移動を考慮した場合には、温度勾配が緩和することが想定されるため、その際には計算パラメータを再設定する必要がある。本来この変化は、層間の熱移動量や熱損失によって示されるべきものであるが、それを考慮していないにも関わらず、計算時間間隔、分割数(層容量)、温水流量の設定値による温度境界層における異温度温水の混合による温度計算によって、このように模擬される。



(a) Number of calculations



(b) Standardized by layer capacity

Fig. 10 Relationship between the number of calculations and the temperature to be reached

図 10 計算回数と到達温度の関係

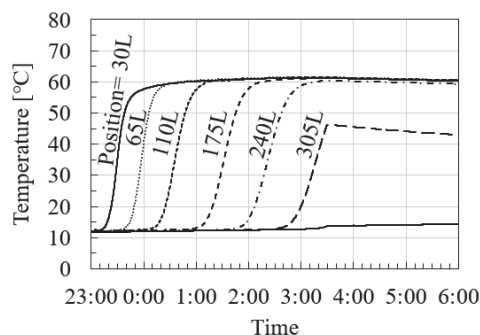


Fig.11 Experimental result of water heating

図 11 沸き上げ実験結果

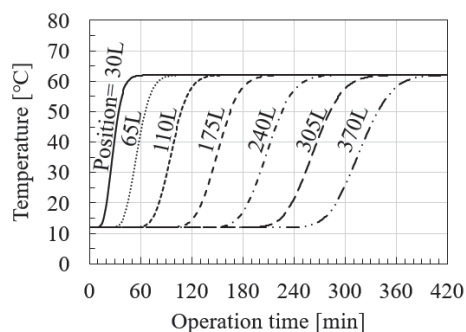


Fig. 12 Relationship between the number of calculations and the temperature to be reached

図 12 近似計算結果

($n = 100$, $u = 1.2$ L/min, $t_s = 1.5$ min)

5.3 既往研究結果の検討と考察

これらの点の検討は、特に文献 3) に詳しい。同付録 A 計算精度に、A.1 格子間隔、A.2 時間刻み、A.3 計算時間の短縮とあり、本論文と関係するところの要約をすると以下のようになる。格子間隔では格子点数(本論文では分割数)を 100~2000 まで変化させたときの温度分布の変化を比較し、格子点数 1000 点(格子間隔 1.885 mm)で十分収束としている。また、これと格子点数 100 点(同 18.85 mm)とでは大きな違いが見られたとしている。時間刻みでは、(1)熱伝導方程式の離散化による時間刻みの上限、(2)出湯モデル、(3)給湯モデルを検討し、時間刻みを 1 秒と 0.1 秒で比較して 1 秒で十分であるとしている。最後に格子間隔と時間刻みを調整して精度を確保しつつ計算時間の短縮を図っている。まず、A.1 格子間隔について比較検討すると、4.3 節で計算したように分割数は小さい方が良い傾向にあることは確かであるが、これは計算間隔と沸き上げ湯量との関係で決まるものであり、単純にどの程度分割すればよいというものではないと考える。また、次の A.2 時間刻みに関しては、本論文では熱伝導を考慮しておらず、(2),(3)は複数槽にまたがる計算をアルゴリズムで可能にしておき、1 計算当たりの沸き上げ流量が一層に収まる必要はない。しかしながら、文献 3) で指摘されているように、時間刻みの上限は次式⁹⁾であらわされ、 Δz の二乗(すなわち、 $1/n^2$)で制限されるということは注意する必要がある。従って閾値に分割数を増やせば良いというものではない。

$$t_s < \frac{\rho c (\Delta z)^2}{2k} \quad (12)$$

ここで、 ρ : 密度 [kg/m³], c : 比熱 [J/(kg·K)], k : 熱伝導率 [W/(m·K)]。

ただし、流体の移動を伴う熱計算においては、実際の物質の熱伝導率ではなく、境界面を通過した熱量に対する仮定の熱伝導率による制限が発生するものとする。1 秒か 0.1 秒かに関しては 4.2 節で示したように時間だけの問題でなく他の要素に依存すると考える。最後に格子間隔と時間刻みの選定に関しても 4.2~4.4 節で示したようにこれらの組み合わせが影響すると考える。

次に横山ら¹⁾の結果を見ると、計算結果の温度勾配が実験結果のそれよりも緩和している。これは、貯湯槽 300 L に対して分割数が 120 で、一層当たりの容量が 2.5 L に対し、計算間隔が 30 秒であるため、CO₂ ヒートポンプの温水沸き上げ湯量を想定すると一層当たり 4~5 回の温度境界層における異温度温水の混合による温度計算を行っていると考えられ、そのために緩和されたのではないかと考える。

最後に、今川ら²⁾の結果と比較する。この結果は、ほぼ完全にシミュレーションと実験結果とが合致している。その際、詳細な計算条件は未記載であるものの、境界層における熱抵抗を 0.85 倍することで実験結果と良い一致を示したとある。計算結果の方が実験結果よりも鋭敏であったということから、分割数、流量、時間間隔に対してマッチングが取れており、混合の影響の少ない状態で計算がなされ、

自然対流による熱移動量の不足分を熱抵抗の補正という形で修正したと推察する。したがって、一般的に 0.85 倍すると良いということではなく、倍率は特定の条件に対するものである。

以上のように本研究の結果は、既往研究と矛盾するものではなく、その結果を補完し、より詳細な検討へと資するものであると考える。

5.4 計算方法の提案

上述したように、シミュレーションにおいて、流体の移動に伴う温度の再計算を行うと位置に対する温度勾配が緩和される。さらにそこに層間の熱移動による計算を加えると、両者の影響を受け、必要以上に位置に対する温度勾配が緩和されることになる。したがって、これらを分離し、計算パラメータである分割数と計算時間間隔による温度勾配への影響がない状態で、計算することで計算精度の向上と物理現象の解明・模擬に結びつくものとする。

これは、HP 沸き上げ時は、その流量に応じて時間間隔を対象システムに合わせるか分割数を合わせることを意味する。しかし、シミュレーションの途中で分割数(層容量)を変えれば、その際に再混合による垂直方向の位置に対する温度勾配の変化が緩和されることになる。したがって、現実には計算時間間隔を、層容量と沸き上げ湯量との関係から変化させる必要がある。計算時間間隔における沸き上げ湯量は、次式で表される。

$$v_0 = u \cdot t_s = kv = k \frac{V}{n} \quad (12)$$

ここで k は自然数である。したがって、沸き上げ時の計算時間間隔を次式となるように設定するのが望ましい。

$$t_s = k \frac{V}{u \cdot n} \quad (13)$$

その上で、他の要素による計算で適正化をする必要がある。この適正化は、今川らの方法²⁾に通じるものであるが、熱伝導率の項目を対流等の影響を考慮して、沸き上げの流量と缶体(想定する層)の断面積と側面積との比から補正するなどが考えられる。これが一般化されれば、都度実験結果との整合を取らずとも理論計算が可能となる。

タンクからの出湯時においても計算時間間隔の調整をすることが好ましい。しかしながら、出湯流量は、沸き上げ流量に加えて数倍から十倍以上であり、計算回数に及ぼす影響は少ない。したがって、まずは、HP 沸き上げ時の時間制御を行うべきである。その際、計算時間間隔は分割数の二乗分の一で制限されるため、必要以上に分割数を増やしてはならない。

このようにして、貯湯タンク内の温度分布の精度が高まることで、CO₂ ヒートポンプのような空気を熱源としたヒートポンプによる温水沸き上げだけでなく、太陽熱や土壌熱を熱源としたヒートポンプによる温水沸き上げやソーラーシステムとヒートポンプ併用時におけるシミュレーション精度の向上やシステム運用の検討に役立つものとする。

6. まとめ

ヒートポンプ給湯システムの効率向上のために簡便かつ正確性の高いシミュレーションが実施できるようになることを目的として、完全混合槽列型貯湯シミュレーションにおける層分割数、計算時間間隔、沸き上げ流量の貯湯タンク内温度分布に及ぼす影響について調べた。その際、計算による影響のみを調べるために、外気や上下層への熱伝達を除外した。その結果、計算時間間隔は単純に短い方が良いというものではなく、分割数は多い方が良い傾向にあるものの単純に多い方が良いわけではなく、沸き上げ流量、計算時間、分割数の三者間の関係が適切であると混合による温度勾配の変化がなくなることを示した。その上で、既往研究結果の検討を行い、前述の結果からこれまでの結果の説明が可能であることを示した。さらに、実験結果との比較によって計算パラメータの調整だけで温度勾配の傾きが近似できることを示した。最終的にこれまで示した結果から沸き上げ時に前述の関係を用いて時間間隔を変えて計算を行う方法を提案した。物理パラメータである熱伝導率や熱損失を組み込み、その補正方法を適正化することで、貯湯タンクの寸法や沸き上げ流量に依存せず、ヒートポンプによる沸き上げ時のみならず、太陽熱併用時等もより精度の高いシミュレーションができるものとする。今後、太陽熱源ヒートポンプの効率的運用方法の検討に活用していきたいと考える。

参考文献

- 1) 横山良平, 清水猛, 武村和久, 伊藤弘一: 「CO₂ ヒートポンプ給湯システムの数値シミュレーションによる性能分析(第2報, 貯湯槽のモデル化とシステムの分析)」, 日本機械学会論文集(B編), 第71巻, 第712号 pp.151-158 (2005)
- 2) 今川常子, 山本照夫: 「CO₂ ヒートポンプ給湯機の熱回路網シミュレーションによるシステム効率の解析」, 冷凍, 第85巻, 第988号 pp.3-6 (2010)
- 3) 若松裕紀, 橋本克己: 「CO₂ ヒートポンプ給湯システムの高効率化を目指した貯湯タンク内温度分布計算手法の開発 ―給湯・ふろ湯張システム用モデルの構築―」, 電力中央研究所報告, M12003 (2013)
- 4) 「強制循環型太陽熱給湯システムの利用熱量の計算法」, 建材試験センター規格, JSTM V9275-1992 (1992)
- 5) 佐藤誠, 宇田川光弘: 「太陽熱給湯シミュレーションにおける計算時間間隔の検討」, 太陽/風力エネルギー講演論文集(1997), pp.129-132 (1997)
- 6) 北野博亮, 岩田剛, 相良和伸: 「温度成層型蓄熱槽の変動入力条件に対応した槽内混合モデルに関する研究」, 空気調和・衛生工学会論文集, No.96, pp.31-40 (2005)
- 7) 中島康孝: 「蓄熱槽の熱的重みに関する研究(その1) ―基礎理論解析―」, 日本建築学会論文報告集, 第199号, pp.37-47 (1972)
- 8) 伊藤章: 「第6回 流通装置内混合の槽列モデルと混合拡散モデル」, 化学工学, 第79巻, 第4号, pp.1-4 (2015)
- 9) S.V Patankar 原著, 水谷幸雄, 香月正司 訳: コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, p.59 (1985)