

Effect of Solar Heat Acquisition and Hot Water Demand Prediction Errors on Performance of Heat Pump Water Heater with Heat Collector

太陽熱利用ヒートポンプ給湯機の運用における太陽熱取得量および給湯需要量予測誤差の影響

Takashi IKEGAMI
池上 貴志¹ ‡Tatsuya YANO
矢野 達也²

Abstract

Uncertainties of solar heat acquisition and hot water demand predictions should be considered in operation of a heat pump water heater (HPWH) combined with a solar heat collector, because it ordinarily operates before the hot water is used and solar heat is collected. In this study, we developed and combined the optimum scheduling model and the adaptive operation model to analyze the effect of solar heat acquisition and hot water demand prediction errors on the performance of a heat pump water heater with solar heat collector. Using predicted values with two types of prediction errors: daily quantity error and occurrence time error, we quantitatively evaluated economic impacts of prediction errors. It was found that daily quantity prediction is more important for operation of an HPWH.

Keywords:

キーワード：太陽熱集熱器，ヒートポンプ給湯機，予測誤差，計画運用

1. はじめに

地球温暖化問題への対策が世界的に急務となっている中、民生家庭部門におけるさらなる二酸化炭素排出量削減が必要である。日本における住宅のエネルギー消費の約3分の1は給湯に用いられており⁽¹⁾、給湯システムの低炭素化に向けて、太陽熱を利用した給湯システムが期待されている。太陽熱温水器は、同じ太陽エネルギーを利用する太陽光発電と比較しても安価に生産できることから、中国やアメリカ、EUにおいて近年急速に普及が進んでいるが、日本における販売台数は、石油危機直後の1980年代前半に年間販売台数が80万台のピークに達したのち急激に減少し、近年では年間約数万台と低迷が続いている⁽²⁻⁴⁾。販売方法やサービス・メンテナンス体制に問題があったことや、価格、デザイン、弱い普及施策なども理由として挙げられるが、給湯能力が天候に大きく左右される太陽熱温水器に対して、既存のガスや石油の給湯システムとの連携が

全く取られてこなかったことも大きな要因であったと言われている⁽⁵⁻⁷⁾。

近年は、太陽熱集熱器とガス給湯器を協調させた湯張りや追い焚き機能を持つ給湯システムが開発され⁽⁶⁾、省エネと利便性を両立させた製品の登場とともに太陽熱利用も再び注目を集め始めている。

ガス給湯器と太陽熱集熱器が協調した太陽熱給湯システムだけでなく、ヒートポンプ（HP：Heat Pump）給湯機と太陽熱集熱器が協調したシステムも登場している⁽⁷⁾。再生可能エネルギーで発電された電力を用いたヒートポンプ給湯機と太陽熱集熱器の併用により、二酸化炭素を排出しない給湯システムも可能となっている。

一般に、HP給湯機は、ガス給湯器等と比較して熱出力が小さく、給湯需要が発生する時刻に運転しても必要熱量を供給できないため、貯湯槽を設置して需要時刻より前に運転を行って十分な量をあらかじめ貯湯しておく。夕方から夜間に多い給湯需要に対して、気温の高い昼間にHP給湯機を運転した方が高効率に運転できるが⁽⁸⁾、現在は安価な夜間電力となる契約のもと、電力需給バランス調整に貢献するために電力需要の少ない深夜から早朝にかけて運転して貯湯されている。太陽光発電（PV：Photovoltaics）

*1 東京農工大学大学院 工学研究院 准教授
(〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16)
‡e-mail: iket@cc.tuat.ac.jp

*2 東京農工大学 工学部
(原稿受付：2016年3月15日，受理日：2016年4月28日)

システムが大量導入された将来では、PV 発電による余剰電力を吸収して電力需給バランスを調整する目的で、昼間に HP 給湯機の運転が行われることも期待されている⁽⁹⁾。

HP 給湯機と太陽熱集熱器を併用したシステムに関する研究は、これまであまり行われていない。細谷らの報告⁽¹⁰⁾では、システムのモデル化を行い、貯湯槽内の温度分布を用いた詳細な運転シミュレーションを行い、他の給湯システムとの経済性、省エネ性の比較評価が行われている。楠らの報告⁽¹¹⁾では、貯湯槽の断熱材の性能による影響の評価が行われている。また、筆者らの報告において、ガス給湯器と太陽熱集熱器の併用システムとの比較や、太陽熱集熱器の面積による効果の比較など、エネルギー需給解析が行われている⁽¹²⁾。

しかしこれらの研究では、HP 給湯機と太陽熱集熱器の併用システムの運用において最も重要な、需要予測や日射量予測の不確実性が考慮されていない。需要時刻より前に貯湯運転を行うという特徴から、効率的な運転には過不足なく貯湯するための給湯需要量予測が必要であり、また、貯湯時刻が太陽熱を取得する昼間よりも前である場合には、太陽熱の取得可能量も予測し、その分の沸き上げ量を減らしておく必要がある。このシステムの運用効率向上のためには、給湯需要量予測や日射量予測の精度向上だけでなく、これらの予測が外れた場合でも利便性を損なわない運用手法が必要である。

そこで本研究では、太陽熱集熱器と HP 給湯機の併用システムにおいて、予測外れに対応した利便性を損なわない HP 給湯機の運転計画や運用手法を検討するため、予測誤差の運用結果への影響を定量的に分析することを目的とした。本研究ではまず、予測の不確実性に対応する最も基本的な方法として、予測に依らず常に貯湯量を一定量以上維持しておく計画運用手法について、最低限維持する量の運用結果の経済性への影響の分析を行った。次に、どのような予測誤差が運用結果に大きな影響を与えるのかを分析するため、予測誤差の大きさを日量誤差と時刻誤差に分けて定量化する新しい方法を提案し、日量誤差および時刻誤差がそれぞれ運用結果の経済性に与える影響について分析を行った。

2. モデルの概要と研究方法

本研究では、Fig. 1 に示す太陽熱集熱器と HP 給湯機からなるシステムを評価の対象とした。予測の不確実性の影響を評価するため、給湯需要量や太陽熱集熱量の予測値に基づく HP 給湯機の運転計画を立案する「運転計画モデル」と、運転計画および給湯需要量や太陽熱集熱量の実際の値（以下、実値）に基づく HP 給湯機の運用を行う「適応運用モデル」を作成し、シミュレーションにより年間の電気

料金や太陽熱集熱量等を算出し、評価することとした。

毎日 0 時および 12 時に、翌 24 時間の給湯需要量の予測および太陽熱集熱量の予測値が利用できると想定し、それらの予測を用いて 0 時および 12 時に電気料金を最小化する HP 給湯機の運転計画の立案を行い、15 分毎の各時間ステップにおいては、運転計画の情報および給湯需要量や太陽熱集熱量の実値を用いて HP 給湯機の運転・停止を決定することとした。

本章では、運転計画モデルおよび運用モデルの概要および、本研究における分析方法や計算条件について述べる。

2.1 運転計画モデルの概要

本研究では、筆者らが既に関与している家庭内機器最適運転計画モデル^(8,12,13)を用いて、本研究では時間解像度を 15 分とし、Fig. 2 に示すエネルギーフローを考慮するモデルに改良して用いた。

このモデルは、24 時間の 15 分毎（96 ステップ）の給湯需要量、太陽熱取得量、外気温度および給水温度の予測データ、HP 給湯機の性能データ、電気料金を入力データとし、混合整数線形計画法（MILP：Mixed Integer Linear Programming）を用いて、貯湯槽内の蓄熱量が設定した最低蓄熱率維持率 $x\%$ を下回らない範囲で 24 時間内の電気料金が最も安くなる運転方法を計画するものである。本研究では、HP 給湯機の成績係数（COP：Coefficient of Performance）に影響を与える外気温度や給水温度については予測が外れないと仮定した。第 3 章で詳述する。

2.2 適応運用モデルの概要

給湯需要量や太陽熱集熱量の予測が外れた場合、運転計画通りの運転では湯切れが生じる場合がある。本研究では、

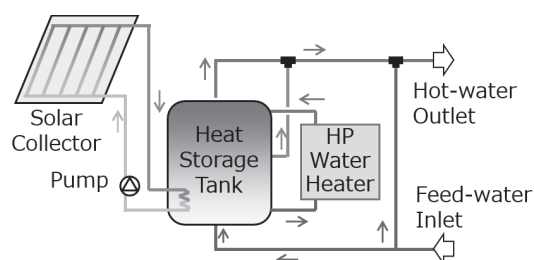


Fig. 1 Hot water supply system in this study.

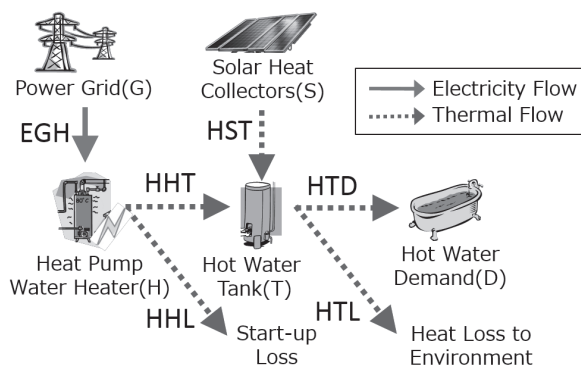


Fig. 2 Electricity and thermal energy flows in our model.

湯切れ防止を目的として、計画時と同様に最低蓄熱量維持率を設定した。貯湯槽内の蓄熱量が最低蓄熱量維持率 $y\%$ を下回った場合に、1時間の沸き増し運転を行う設定とした。また、運転を行うことが計画された時間ステップにおいては、貯湯量が貯湯槽の容量を超えない範囲において、貯湯運転するものとした。第4章で詳述する。

2.3 シミュレーション方法と計算条件

本研究では、2003年3月25日～2004年4月1日（閏日は除く）のデータを用いた。運転計画モデルを用いて24時間分の運転計画を行い、適応運用モデルにより12時間分の運用シミュレーションを行って時間を12時間進める。これを繰り返して1年分の運用シミュレーションを行った。評価期間は、2003年4月1日～2004年3月31日の365日とした。このとき、貯湯槽内の熱量の初期値の影響を排除するため、4月1日の7日前の3月25日から計算をスタートした。また、最後の運用シミュレーションは、3月31日12時～4月1日12時の運転計画結果を用いて、3月31日24時までの計算を行った。

関東地区にある4人家族の住む戸建住宅を想定し、日本建築学会のデータベース⁽⁴⁾より、ガス消費量および給水温度のデータを用い、ガス給湯機の効率を80%と仮定して給湯需要量を作成した。住宅に設置されている太陽熱集熱器の面積は4m²、HP給湯機の定格熱出力は3kW（2.7MJ/15min）、貯湯槽の容量は370Lと想定した。

太陽熱集熱量の実値は、気象庁による当該日の日射量等のデータを基に都道府県別に推計された1時間データ⁽⁵⁾より東京のデータを用いて作成した。南向き屋根、傾斜角26.6度のデータを用いた。本研究では簡単のため、直達日射量の65%を常時集熱できるものと仮定した。また、集熱量が1時間あたり600kJ以上の場合にのみ集熱ポンプを稼動して熱を貯湯槽に回収することとし、そうでない場合はポンプは稼動しないものとした。ポンプが稼動しない場合、集熱器内に熱が留まることになるため、貯湯槽からの熱損失率より大きい毎時20%の熱が失われるものと仮定した。太陽熱集熱ポンプの消費電力は、稼動開始の15分間は72W、それ以外の時間は24Wとした。

HP給湯機は太陽熱取得前に運転することが多いため、HP給湯機に入水する貯湯槽最下部の水温は給水温度に等しいと仮定し、HP給湯機のCOPは、外気温度、沸き上げ温度、給水温度、相対湿度より、橋本らの式を用いて算出した⁽⁶⁾。この式は、HP給湯機への高温の給水温度における運転データも用いてモデル化されたものであり、太陽熱取得後のHP給湯機の運転も想定されたものである。沸き上げ温度は65℃として計算し、外気温度、相対湿度は、気象庁の気象統計情報より当該日のアメダスデータ1時間値⁽⁷⁾を用いて15分平均値に内挿して用いた。HP給湯

機の補機動力として運転時には常に13W消費されるものとした。

2.4 分析目的と分析方法

本研究では、以下の4つの分析を行った。

2.4.1 分析1：最低蓄熱量維持率の影響評価 貯湯槽内の蓄熱量を常に多量に維持しておくことにより、突然の給湯需要にも対応でき、湯切れを防ぐことができる。一方で、常に多量に沸き上げておくことは、貯湯槽からの大きな放熱ロスを招き、また、太陽熱を取得し利用する妨げにもなる。そのため、需要家の給湯需要パターンや、太陽熱取得量、給湯需要量の予測精度によって、常に維持すべき湯量の割合、つまり、適切な最低蓄熱量維持率が存在すると考えられる。

本研究ではまず、最低蓄熱量維持率の影響を定量的に分析するため、予測が外れない理想ケースと、予測外れを想定して前日の実値をその日の予測値として利用する前日同値予測ケースの2つのケースについて、最低蓄熱量維持率に関する感度分析を行った。前日同値予測の手法については5.2節で詳述する。

2.4.2 分析2・3：予測誤差の影響 予測誤差の大小による影響を分析するため、本研究では正規分布に従う乱数を用いて誤差の大きさを変化させた擬似的な予測値を作成し、それを用いたシミュレーションを行った。予測誤差の与え方として、給湯需要量と太陽熱取得量の日量に誤差を与える日量誤差ケース（分析2）と、それぞれの発生時刻に誤差を与える時刻誤差ケース（分析3）の2つについて、誤差の大小を変化させて感度分析を行い、日量の予測誤差や時刻の予測誤差の影響をそれぞれ定量的に評価した。日量誤差を持つ予測値については5.3節で、時刻誤差を持つ予測値については5.4節で詳述する。

3. HP給湯機の運転計画モデル

本最適化モデルで決定すべき事項は、各時間ステップにおけるHP給湯機の運転量であり、太陽熱は最大限取得すべきである。式(1)～式(14)に、最適化モデルの目的関数および制約条件を示す。大文字の変数は決定変数を、小文字の変数は入力データを、添え字の t は時間ステップを表している。また HR は最適化期間の時間ステップ数を表し、本研究では96である。(1)式に示すように、HP給湯機の電力消費に伴う電気料金の最小化を目的関数とした。ただし、右辺第1項のペナルティ項を加えた。このペナルティ項については後述する。

式(2)～式(6)は、HP給湯機の運転に関する制約条件である。決定変数 O はバイナリ変数であり、式(2)により、HP給湯機が運転中に1、停止中に0となる。決定変数 U 、 D は連続変数であるが、式(4)～式(6)により0または1し

か取らない変数となり、 U は運転開始時にのみ 1、 D は運転停止時にのみ 1 となる。これにより最適化計算におけるバイナリ変数の個数を減らすことができ、計算時間を短縮することができる。式(2)および式(3)により、HP 給湯機は運転開始時以外の時間ステップでは定格運転を行い、1 回の運転時間は 15 分以上となるようにしている。

式(7)は HP 給湯機の電力消費量を決定する式である。HP 給湯機の COP は時間帯毎に算出した値を用いることとし、HP 給湯機運転中には常に補機動力として 13 W (中間期における標準的な消費電力の約 2%) の電力を消費することとした。また、HP 給湯機の運転開始時における様々なエネルギー損失を、定格出力で 6 分間 HP 給湯機を運転した場合の必要電力消費量と形式的にみなして考慮することで、頻繁な機器の ON/OFF 切り替えが起らない設定とした。

貯湯槽に蓄えられる熱量に関する制約条件として式(8)～式(10)を用いた。貯湯槽からの放熱ロスを考慮することとし、毎時 1% (1 日で約 20%) の熱が失われるものと仮定した。式(9)により需要発生の前時刻までに蓄熱しておくものとした。式(10)は、湯切れを防止するため最低蓄熱維持率 $x\%$ をパラメータとし、貯湯槽内の熱量が容量の $x\%$ 分を下回らないよう計画を立てるものとした。

式(11)～式(14)により、適応運用モデルによって計算された最適化対象期間の直前における HP 給湯機の運転状況や蓄熱残量を、最適化計算の初期条件として用いた。最適化対象期間初期に大きな給湯需要が予測されている場合や、最低蓄熱維持率が大きい値の場合に、式(10)の制約条件を満たすことができず、実行可能解が得られない可能性がある。そこで、式(14)により実行不可能ペナルティとして初期蓄熱量に P MJ を加えて解を得た。この P は、1 MJ あたり 1,000 円として目的関数に加え、極力発生しないようにした。

【目的関数】

$$obj = 1000 \cdot P + \sum_{t=1}^{HR} (prc_t \cdot E_t) \quad (1)$$

【制約条件】

$$rsl \cdot cph \cdot (O_t - U_t) \leq H_t \leq rsl \cdot cph \cdot O_t \quad (2)$$

$$H_t + H_{t-1} \geq rsl \cdot cph \cdot U_{t-1} \quad (3)$$

$$O_t - O_{t-1} = U_t - D_t \quad (4)$$

$$U_t \leq O_t \quad (5)$$

$$D_t \leq 1 - O_t \quad (6)$$

$$E_t = 13 \cdot rsl \cdot O_t + \frac{H_t + 0.1 \cdot cph \cdot U_t}{ce \cdot cop_t} \quad (7)$$

$$S_t = (1 - lst) \cdot S_{t-1} + H_t + shg(F)_t - dmh(F)_t \quad (8)$$

$$(1 - lst) \cdot S_{t-1} \geq dmh(F)_t \quad (9)$$

$$S_t \geq \frac{x}{100} \cdot vlt \cdot (65 - tmf_t) \cdot cw \quad (10)$$

$$H_0 = ih \quad (11)$$

$$O_0 = io \quad (12)$$

$$U_0 = iu \quad (13)$$

$$S_0 = is + P \quad (14)$$

($t = 1, 2, 3, \dots, HR$) (All variables are ≥ 0)

【入力・設定データ】

prc : 電気料金 [¥/kWh],

$dmh(F)$: 給湯需要量予測値 [kWh],

$shg(F)$: 太陽熱集熱量予測値 [MJ],

cph : HP 給湯機加熱能力 [MJ/h],

cop : HP 給湯機の成績係数,

vlt : 貯湯槽容量 [m^3],

lst : 貯湯槽放熱ロス率,

tmf : 給水温度[degC],

ce : 変換係数 3.6 [MJ/kWh],

cw : 水の比熱 4.1868 [MJ/ m^3 /degC],

rsl : 時間解像度 0.25 [h],

x : 最低蓄熱維持率[%].

【決定変数】

H : HP 給湯機による熱供給量 [MJ],

O : HP 給湯機運転バイナリ変数 (運転中 1, 停止中 0),

U : HP 給湯機運転開始指標 (運転開始時 1, それ以外 0),

D : HP 給湯機運転停止指標 (運転停止時 1, それ以外 0),

S : 貯湯槽内の蓄熱量 [MJ],

E : HP 給湯機の電力消費量 [kWh],

P : 実行不可能ペナルティ[MJ].

4. HP 給湯機の適応運用モデル

前章で述べた運転計画モデルによって決定された運用計画を用いて、実際の状況に対応するための運用シミュレーションを行うモデルである。最適化対象期間の 24 時間のうち、前半 12 時間について本モデルで HP 給湯機の運転状況や、太陽熱の取得状況、貯湯槽内の蓄熱量を決定し、各時間ステップにおける電力消費量を計算した。アルゴリズムを Fig. 3 に示す。入力・設定データは運転計画モデルと同じ変数名を用いている。ただし、給湯需要量および太陽熱集熱量については、ここでは予測値ではなく実値を用い、それぞれ $dmh(A)$ 、 $shg(A)$ とした。また、決定変数 H 、 O 、 U 、 S 、 E に $s_$ を付したものは運転計画によって得られた計画値を、 $o_$ を付したものは本モデルによって決定した運用値を表している。

$t = 0$ における初期値を設定した上で、 $t = 1$ から $HR/2$ まで順に計算していく。

各時間ステップにおいて、まず最初に、貯湯槽に蓄熱できる熱量の上限を $vmax$ 、前ステップから繰り越された蓄熱から給湯で消費される熱量を減じたものを tmp を算

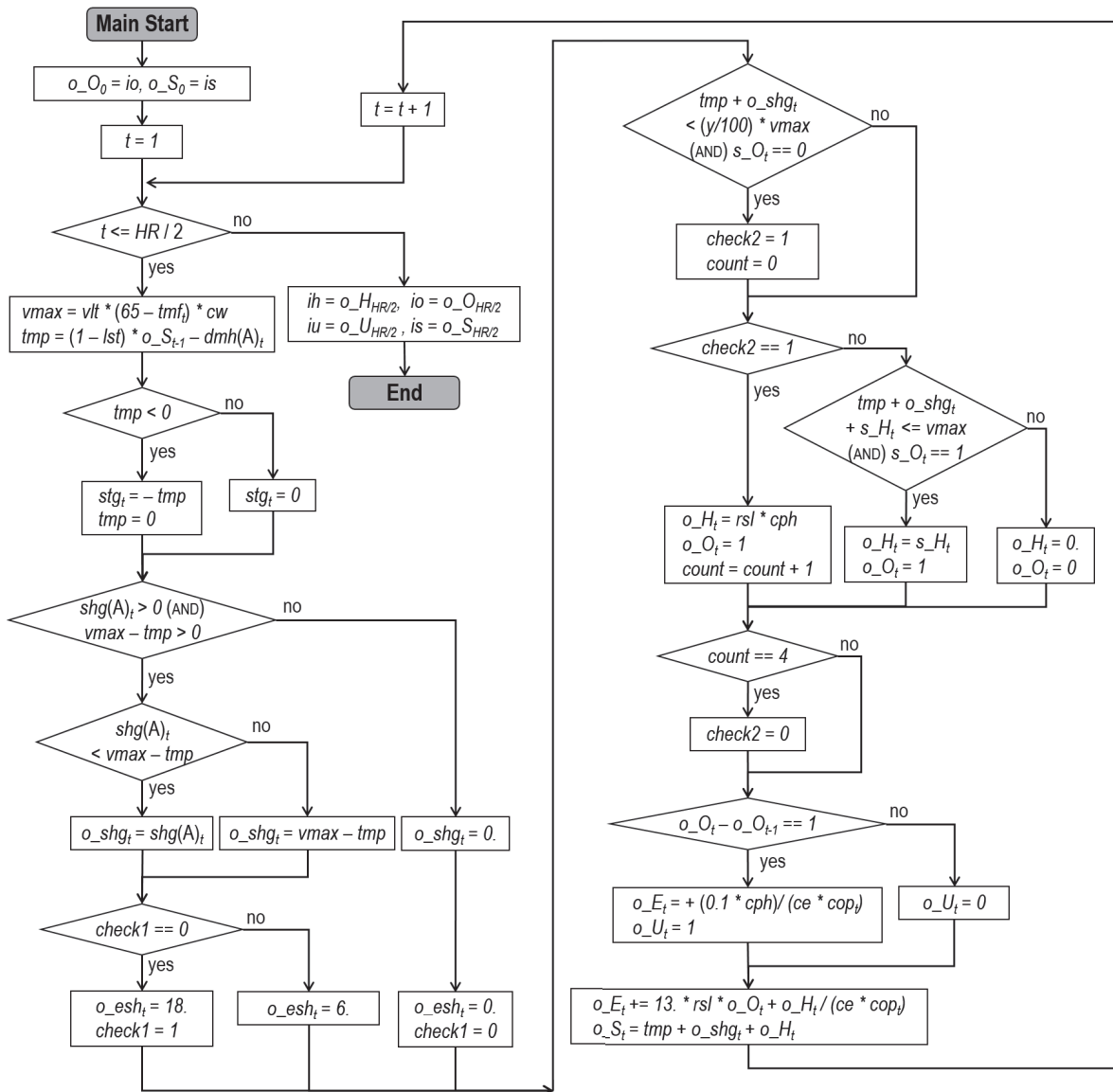


Fig. 3 Flow chart of our adaptive operation algorithms for a heat pump water heater.

出する。tmp が負、つまり湯切れ状態となる場合、湯切れ量を stg に格納した後、tmp = 0 と修正する。

次に、太陽熱の集熱量 o_shg を決定する。集熱量は、貯湯槽の容量の範囲内で、最大限集熱する。このとき、集熱開始時にはポンプの消費電力として 18 Wh、それ以外で集熱している時間帯は 6 Wh が消費されるものとして o_esh に太陽熱集熱ポンプの電力消費量を格納する。

次に、HP 給湯機の運転量 o_H および運転状態 o_O を決定する。計画段階と同様に、湯切れを防止する目的で最低蓄熱量維持率 y % を設定する。太陽熱集熱を考慮しても貯湯槽内の蓄熱量が v_max の y % を下回る場合で、HP 給湯機の運転が計画されていない場合には、HP 給湯機の計画外運転として継続して 1 時間（4 ステップ）、定格出力で熱供給運転を行うこととする。また、HP 給湯機の運転が計画されている場合で、計画通りに運転しても蓄熱量が v_max を超えない場合に、計画通りの運転を行うものとし、

そうでない場合には運転しないものとする。

最後に、決定した運転状態から、HP 給湯機の電力消費量 o_E をおよび貯湯槽内の蓄熱量 o_S を決定する。

t = HR/2 まで計算したら、次の運用計画における初期値として t = HR/2 のときの値を保持して計算終了となる。

以上により、各時間ステップにおける湯切れ量とともに、太陽熱集熱ポンプおよび HP 給湯機の電力消費量が計算され、これを用いて年間の電気料金を計算した。

5. 予測誤差の定量化と予測値の作成

5.1 予測誤差の定量化手法

本研究では時間解像度 15 分の分析を行っているが、給湯需要量や太陽熱取得量の予測において、雲の発生時刻、雲の移動速度、生活リズムの変化などにより、これらを発生時刻まで予測して 15 分毎の値を正確に得ることは難し

いと考えられる。一方、貯湯槽を持つ給湯システムのため、太陽熱の取得時刻や給湯需要の発生時刻について誤差があっても貯湯槽がバッファとなる可能性がある。そのため、予測誤差の定量化において、発生時刻が外れているだけの予測とそうでないものを区別する必要がある。

そこで本研究では、1日の発生量の誤差（日量誤差）と発生時刻の誤差（時刻誤差）を区別して定量化する方法を提案し、これを用いて定量評価することとした。

0時～24時までの積算値を日量データとし、365日分の日量データの二乗平均平方根誤差（RMSE：Root Mean Square Error）で次式のように日量誤差を定義した。添え字の d は日を表す。

$$QE = \sqrt{\sum_d (dayQ(A)_d - dayQ(F)_d)^2 \cdot 365} \quad (15)$$

QE ：日量誤差 [MJ/day],

$dayQ$ ：給湯需要量・太陽熱集熱量の日量 [MJ/day],
 (A) は実値, (F) は予測値を表す。

時刻誤差についてはまず、日量誤差の影響を除くため、各時間ステップの量を日量で除し、日量が1となるように規格化した。4月1日0時から順に時刻のずれが発生している量を選択し、その量の大きさ amt_k と時刻方向のずれ Δt_k を用いて次式のように時刻誤差を定義した。給湯需要量や太陽熱集熱量の重みを付けた二乗平均平方根誤差（RWMSE：Root Weighted Mean Square Error）である。添え字の k はずれが発生している k 番目の量を表す。

$$TE = \sqrt{\sum_k amt_k \cdot (\Delta t_k)^2 \cdot \sum_k amt_k} \quad (16)$$

TE ：時刻誤差 [step],

amt ：規格化した給湯需要量・太陽熱集熱量における時刻のずれが発生している量 [MJ],

Δt ：時刻のずれ[step].

5.2 前日同値予測

簡易な予測手法として、式(17)および式(18)のように、前日（96ステップ前）の実値を予測値として用いた。

$$dmh(F)_t = dmh(A)_{t-96} \quad (17)$$

$$shg(F)_t = shg(A)_{t-96} \quad (18)$$

なお、作成した前日同値予測の誤差を前節の手法で定量化すると、給湯需要量の日量誤差は 14.6 MJ/day、時刻誤差は 17.7 step であり、太陽熱取得量の日量誤差は 19.2 MJ/day、時刻誤差は 5.2 step であった。

5.3 日量誤差を持つ予測

給湯需要量や太陽熱取得量の発生時刻は正確だが、1日の合計量に誤差が含まれる予測値を次のように作成した。

0時～24時の給湯需要量、太陽熱取得量の合計量をそれぞれの日量とする。まず1日ごとに、平均0、標準偏差

s の正規分布に従う乱数 α を生成した。このとき一様乱数の生成には擬似乱数生成法の1つである Xorshift 128⁽¹⁸⁾ を用い、ボックス=ミュラー法⁽¹⁹⁾ を用いて正規分布に従う乱数を生成した。Fig. 4 左図に例を示すように、この乱数を用いて日量を α % 増加（ α が負の場合は $-\alpha$ % 減少）させることとし、式(19)、式(20)および Fig. 4 右図に示すように、その割合だけ各時間ステップの給湯需要量または太陽熱取得量を一様に増加または減少させた。ただし $\alpha < -100$ となる場合には $\alpha = -100$ とした。

$$dmh(F)_t = (1 + \alpha \cdot 100) \cdot dmh(A)_t \quad (19)$$

$$shg(F)_t = (1 + \alpha \cdot 100) \cdot shg(A)_t \quad (20)$$

5.4 時刻誤差を持つ予測

給湯需要量や太陽熱取得量の日量は正確だが、その発生時刻に誤差が含まれる予測値を次のように作成した。

乱数 α と同様に、各時間ステップごとに、平均0、標準偏差 s の正規分布に従う乱数 β を生成した。Fig. 5 に例を示すように、その時間ステップの給湯需要量や太陽熱取得量を β だけ時間ステップが遅れて（ β が負の場合は $-\beta$ ステップ早まって）発生するとした。ただし $t + \beta$ の日付が t の日付と変わってしまう場合には乱数 β を再度生成し、日付をまたいだ時刻の予測誤差は生じず、日量は変化しないものとした。また、発生時刻が移動した先に複数ステップ分の給湯需要量や太陽熱取得量が集まる場合は、その時刻に移動してきた値をすべて加えることとした。

$$dmh(F)_{t+\beta} \leftarrow_{add} dmh(A)_t \quad (21)$$

$$shg(F)_{t+\beta} \leftarrow_{add} shg(A)_t \quad (22)$$

なお、このような時刻誤差の与え方では、Fig. 5 の例の

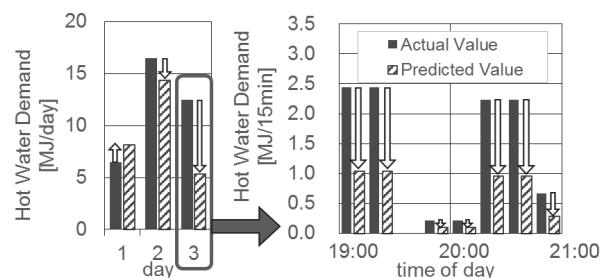


Fig. 4 Predicted values with daily quantity errors.

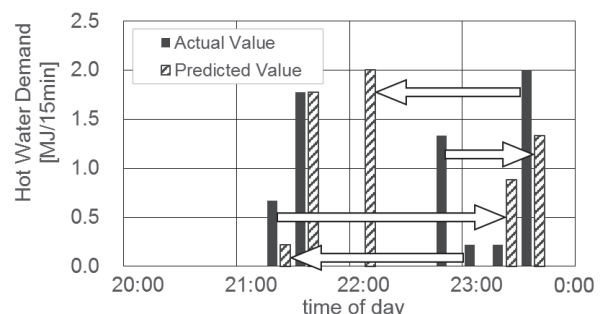


Fig. 5 Predicted values with occurrence time errors.

ように、21:15の実値は23:30に予測値として移動し、23:00の実値が21:15の予測値として移動しており、正味の誤差は標準偏差で与えた程は大きくならない。式(16)で定義した時刻誤差では、21:15における実値から予測値を引いたものを日量で規格化したものが amt となり、時刻のずれ Δt は、次に予測値が実値より大きくなっている 22:00 とのずれ 3 step となる。式(16)を用いることで正味の誤差を定量化できるといえる。

6. 分析結果

6.1 分析1：最低蓄熱量維持率の影響評価

最低蓄熱量維持率の影響を定量的に分析するため、予測が全く外れない理想ケース (Case 1A) と、予測外れを想定して前日の実値を予測値として利用する前日同値ケース (Case 1B) の2つのケースについて、運転計画時の最低蓄熱量維持率 $x\%$ および適応運用時の最低蓄熱量維持率 $y\%$ をパラメータとし、それぞれを5%ずつ0~50%の範囲で変化させてシミュレーションを行った。

Case 1A における年間の電気料金の計算結果を Fig. 6 に示す。横軸を運転計画時の最低蓄熱量維持率 $x\%$ としている。電力消費量は HP 給湯機 (HPWH) の電力消費量と太陽熱集熱用ポンプ (SHCP) の電力消費量を合わせたものである。図中の各曲線は、適応運用時の最低蓄熱量維持率 $y\%$ の小さい方から順に下から並んでいる。予測が外れない理想的な場合であるので、どの結果においても湯切れは生じていなかった。また、計画時の維持率 $x\%$ より運用時の維持率 $y\%$ が小さい場合には、計画通りの運転を行うことで運用時にも結果として蓄熱量が維持されるため、 $x=y$ のときの結果とほぼ同じであった。

最低蓄熱量維持率の増大に伴い、計画時あるいは運用時の HP 給湯機の運転が増加し、電気料金が増加していることが分かる。また、運用時の維持率の増大による影響に比べ、計画時の維持率の増大による影響が小さいことが分かる。最低蓄熱量を維持するために計画に反して運用時に HP 給湯機の運転を行うよりも、深夜の電気料金単価の安い時間帯であらかじめ計画して多く沸かしておく方が電気料金の低減につながることを反映しているといえる。

次に、Case 1B における年間の電気料金の計算結果を同様に Fig. 7 に示す。Fig. 6 と同様に図中の曲線は、 y の小さい方から順に下から並んでいる。湯切れが生じたケースについては、プロットを白抜きにして点線でつないで区別している。理想的な Case 1A と比較すると、Case 1B では運転計画時の最低蓄熱量維持率を大きくすることによる電気料金の低減効果が小さく、運転計画時だけでなく、適応運用時の最低蓄熱量維持率も適切に設定することが重要であるといえる。

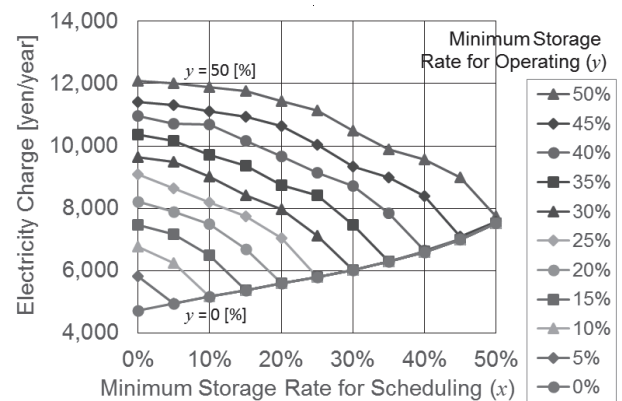


Fig. 6 Results of electricity charge in Case 1A.
(Case 1A: without prediction errors)

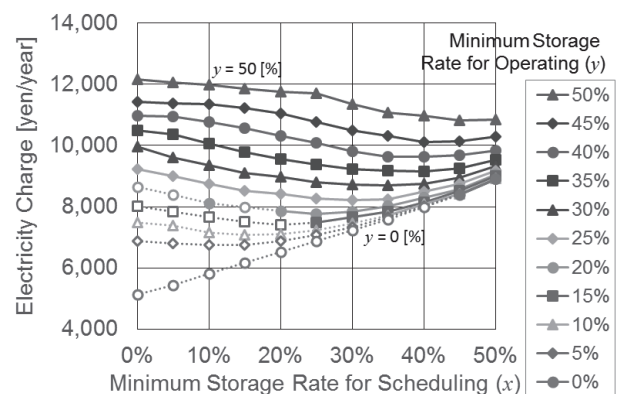


Fig. 7 Results of electricity charge in Case 1B.
(Case 1B: use of one day before values as predictive values)

Case 1A, Case 1B における、 x, y をともに 0%, 25%, 50%とした場合についての詳細な計算結果を Table 1 に示す。給湯需要量は年間で 9,678 MJ であり、Case 1B の 0%時の供給熱量がこれを下回っているのは、湯切れが生じて供給できなかったことを意味する。蓄熱量維持率を大きくすることによる電気料金の増加は、太陽熱利用量の低下が要因の一つとなっていることが分かる。あらかじめ深夜に多めに沸かしておくことで、貯湯槽がいっぱいになり、太陽熱を十分に取得できないことによるものである。予測誤差がある Case 1B ではその影響は顕著で、HP 給湯機の運転量が昼夜を問わず大きくなっていることが分かる。

Case 1A の最低蓄熱量維持率 0%の場合に、電気料金は年間 4,732 円、電力消費量は 418 kWh であったが、Case 1B において湯切れが生じず、年間電気料金が最も安くなったのは、計画時の維持率 25%、運用時の維持率 15%の場合であった。この結果を Table 1 に合わせて示した。今回用いた予測は、前日同値という予測精度が良いとは言えない予測であるが、予測が当たるとした場合 (Case 1A-0%0%) と比較して、予測誤差を考慮した場合 (Case 1B-25%15%) では、電気料金が 58%増、電力消費量が 40%増、太陽熱利用量が 6.3%減となっており、システム全体の成績係数 (COP : Coefficient of Performance) も 6.44

Table 1 Details of calculation results in Case 1A and Case 1B.

	x %	y %	Electricity Charge [yen/year]			Electricity Consumption [kWh]			Supplied Heat [MJ]	Solar Heat Usage [MJ]	Produced by HPWH [MJ]	Heat Loss from Tank [MJ]	Total System COP [-]
			Day*	Night*	Total	Day*	Night*	Total					
1A	0%	0%	1,357	3,375	4,732	49	368	418	9,678	6,507	5,219	2,047	6.44
1A	25%	25%	1,356	4,444	5,800	49	485	534	9,678	6,466	6,907	3,695	5.03
1A	50%	50%	2,512	5,229	7,741	99	570	670	9,678	6,093	8,890	5,305	4.01
1B	0%	0%	2,142	2,989	5,131	83	326	409	8,873	6,454	5,146	1,921	6.02
1B	25%	15%	3,325	4,147	7,472	135	452	587	9,678	6,097	7,728	4,147	4.58
1B	25%	25%	4,508	3,766	8,274	185	411	596	9,678	6,041	7,876	4,238	4.51
1B	50%	50%	6,140	4,698	10,838	255	512	767	9,678	4,900	10,386	5,608	3.50

* Day means from 7 am to 11 pm. Night means from 11 pm to 7 am.

から 4.58 に低下していた。このことから、予測誤差の影響を考慮した分析の重要性が確認された。また、給湯負荷パターンや予測精度に応じた最低蓄熱量維持率の最適値が存在することが確認された。

6.2 分析 2：予測の日量誤差の影響評価

予測の日量誤差の大小による運用結果への影響を分析するため、給湯需要量や太陽熱取得量について、5.3 節の手法を用いて、日量誤差を持つ擬似的な予測値を作成し(5.3 節)、予測誤差の大きさに関する感度分を行った。その際、誤差を与える正規分布の標準偏差をパラメータとし、標準偏差を日量の 0%~160% の範囲で 5% ずつ変化させて計算した。なお、以後の分析では、最低蓄熱量維持率について、運転計画時、適応運用時ともに 25% とした。

6.2.1 給湯需要量予測の日量誤差の影響

まず、給湯需要量予測の日量誤差の影響を評価するため、太陽熱取得量予測には誤差が含まれず、給湯需要量予測にのみ日量誤差を含む予測値を作成して感度分析を行った (Case 2HW)。

計算結果を Fig. 8 に示す。横軸に標準偏差として 0%~160% を取り、棒グラフが年間電気料金 (左軸)、プロットが (15) 式で定量化した日量誤差 (右軸) を示している。日量誤差の増加に伴い、年間電気料金が増加しており、その増加量は大きかった。日量誤差に対する年間電気料金を線形近似すると、決定係数 $R^2 = 0.997$ で次式を得た。1 MJ/day の日量誤差に対して約 120 円の電気料金増加の影響がでることが分かった。

$$AEC = 117.3 \cdot QE + 5807.3 \quad (23)$$

AEC : 年間電気料金 [yen/year].

給湯需要量では、実値が予測値よりも大きい場合、湯切れを防止するため昼間の沸き増し運転が行われ、電気料金への影響が大きい。一方、予測値が実値よりも大きい場合も、深夜に十分な量を沸かすだけでなく、湯切れを見込んで昼間に運転する計画が立てられ、過剰な昼間の沸き増し運転が行われる。このことから、電気料金増加への影響が大きくなっていると考えられる。

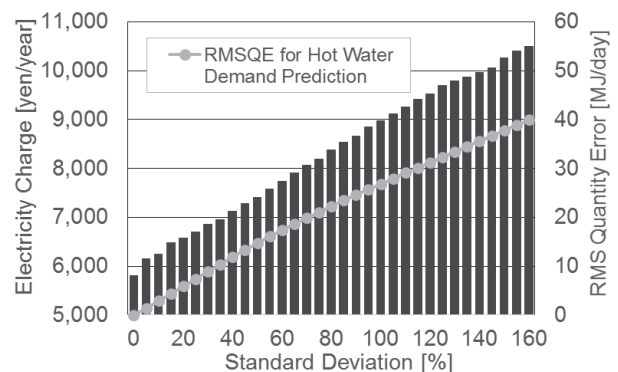


Fig. 8 Results of electricity charge and root mean square quantity error in Case 2HW.

(Case 2HW: use of hot water demand prediction with daily quantity errors)

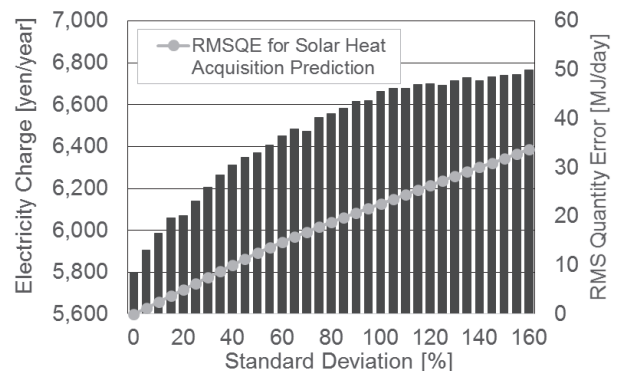


Fig. 9 Results of electricity charge and root mean square quantity error in Case 2SH..

(Case 2SH: use of solar heat acquisition prediction with daily quantity errors)

なお、前日同値予測における日量誤差は、14.6 MJ/day であったが、式(23)による電気料金の推計値は年間 7,522 円となり、誤差が無い場合と比べ 1,722 円増加していた。

6.2.2 太陽熱取得量予測の日量誤差の影響

次に、太陽熱取得量予測の日量誤差の影響を評価するため、同様に、太陽熱取得量予測にのみ日量誤差を含む予測値を作成して感度分析を行った (Case 2SH)。

結果を Fig. 9 に示す。日量誤差の増加に伴い、年間電気

料金は増加するが、誤差が大きくなると料金増加の割合は減少してきていることが分かる。また、金額の増加は給湯需要量の日量誤差と比較して小さいことも分かる。日量誤差の大きさが 0~10 MJ/day, 10~20 MJ/day, 20 MJ/day 以上で区間分割して線形近似すると、それぞれ決定係数 $R^2 = 0.978, 0.985, 0.919$ で次式を得た。式(23)と比較して、式(24)~式(26)は 1 次の係数が小さく、日量誤差の増加に対する電気料金増加の影響が小さいことが分かる。

$$AEC = 49.5 \cdot QE + 5836.5 \quad (0 \leq QE < 10) \quad (24)$$

$$AEC = 28.0 \cdot QE + 6029.2 \quad (10 \leq QE < 20) \quad (25)$$

$$AEC = 10.0 \cdot QE + 6424.4 \quad (20 \leq QE) \quad (26)$$

太陽熱取得量においては、予測値が実値よりも大きい場合には湯量が不足し、昼間に沸き増し運転が行われて電気料金に大きな影響がでるが、予測値が実値よりも小さい場合には、HP 給湯機であらかじめ深夜早朝に沸かしておくため、HP 給湯機を追加で昼間に運転する必要がなく、予測外れによる電気料金への影響が小さくなる。これは、給湯需要量の予測より影響が小さい理由の一つと考えられる。

なお、前日同値予測における日量誤差は、19.2 MJ/day であったが、式(25)では電気料金の推計値は年間 6,566 円となり、誤差が無い場合と比べ 766 円増加していた。

6.3 分析 3：予測の時刻誤差の影響評価

予測の時刻誤差の大小による運用結果への影響を分析するため、同様に正規分布に従う乱数を用いて時刻誤差を持つ擬似的な予測値を作成し (5.4 節)、予測誤差の大きさに関する感度分析を行った。正規分布の標準偏差を 0 step~32 step (8 時間に相当) の範囲で 1 step ずつ変化させて計算を行った。

6.3.1 給湯需要量予測の時刻誤差の影響 給湯需要量予測の時刻誤差の影響を評価するため、給湯需要量予測にのみ時刻誤差を含む予測値を作成して感度分析を行った (Case 3HW)。

計算結果を Fig. 10 に示す。横軸に標準偏差として 0 step~32 step を取り、棒グラフが年間電気料金 (左軸)、プロットが(16)式で定量化した時刻誤差 (右軸) である。時刻誤差の増加に伴い、年間電気料金は増加するが、時刻誤差が 9 step を超えたあたりから、6,200~6,300 円程度で収束していることが分かる。前日同値予測における給湯需要量の時刻誤差 17.7 step 程度の誤差の場合でも、400~500 円程度の増加で収まると考えられ、日量誤差の場合と比べ、時刻誤差の影響は小さくなるといえる。

6.3.2 太陽熱取得量予測の時刻誤差の影響 同様に、太陽熱取得量予測にのみ時刻誤差を含む予測を作成して分析を行った (Case 3SH)。

結果を Fig. 11 に示す。太陽熱取得量の日量誤差は、電気料金への影響がさらに小さく、時刻誤差は 3 step を超え

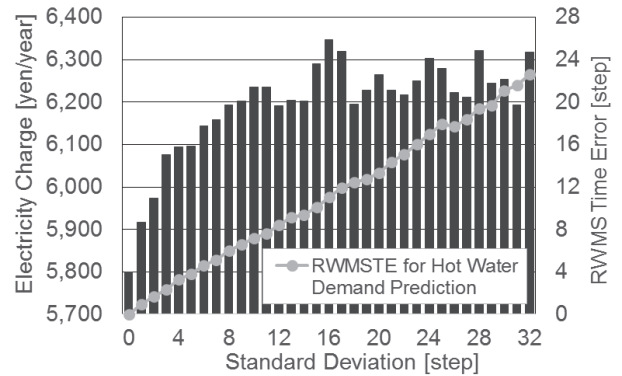


Fig. 10 Results of electricity charge and root weighted mean square time error in Case 3HW. (Case 3HW: use of hot water demand prediction with occurrence time errors)

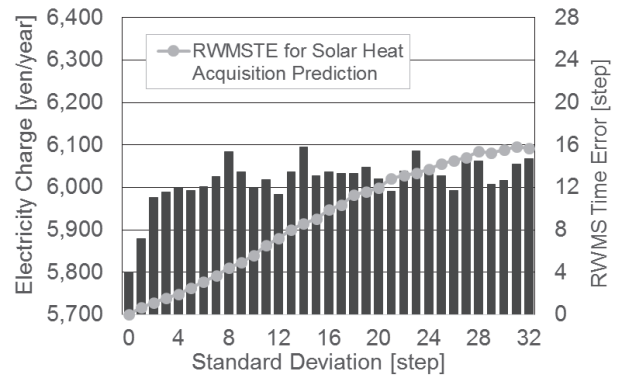


Fig. 11 Results of electricity charge and root weighted mean square time error in Case 3SH. (Case 3SH: use of solar heat acquisition prediction with occurrence time errors)

たあたりから、年間電気料金は 6,000~6,100 円の範囲内であることが分かる。太陽熱取得量については、前日同値予測においても時刻誤差が 5.2 step と小さかったが、これと同程度の時刻誤差の場合においても 200~300 円の電気料金の増加で収まると考えられ、太陽熱取得量においても、日量誤差よりも時刻誤差の影響が小さいことが定量的に示された。

7. まとめ

本研究では、太陽熱集熱器と HP 給湯機の併用システムにおいて、給湯需要量や太陽熱取得量の予測の不確実性の影響を評価するため、HP 給湯機の運転計画モデルおよび適応運用モデルの 2 つを作成し、これらを連携して用いたシミュレーションにより分析を行った。

予測に不確実性が含まれる場合、湯切れを防ぐために、計画時の最低蓄熱量維持率を高く設定することにより、電気料金の安い深夜に多めに沸かしておくことができるが、一方で貯湯槽の容量の制約により太陽熱を十分に取得できなくなってしまうため、運転計画時だけでなく、適応運

用時の最低蓄熱量維持率も適切に設定することが重要であることが分かった。前日と同じ値という簡単に作成した予測値を用いた場合、最も電気料金の安くなる最低蓄熱量維持率は計画時 25%、運用時 15%であり、このとき、予測が外れないと仮定した理想的なケースと比較した結果、電気料金は 58% の増加、電力消費量は 40% の増加であった。予測精度によって運用効果に大きな影響を与えており、予測誤差の影響を考慮した分析の重要性が確認された。

また、擬似的に日量誤差や時刻誤差を与えてシミュレーションを行い、それぞれの誤差の大きさによる影響を明らかにした。日量誤差の影響は、太陽熱取得量の予測誤差よりも給湯需要量の予測誤差の方が大きいことが分かった。これは、太陽熱取得量の場合、予測値が実値よりも小さい側に外れた場合にも、十分な湯量が貯湯槽内に確保されており、HP 給湯機の沸き増し運転が行われないため電気料金への影響が小さいためと考えられる。時刻誤差の影響は、給湯需要量予測の場合も、太陽熱取得量予測の場合も、日量誤差の影響と比べて、電気料金への影響は小さくなった。これは、貯湯槽が予測の時間のずれを吸収するバッファとなり、予測外れの影響を緩和する効果があるためと考えられる。

太陽熱取得量や給湯需要量を予測する際、各時刻別の値を正確に予測することは、雲の発生等のタイミングや、風呂等の生活時間の予測を正確に行う必要があり、一般に、非常に難しいと考えられる。時刻誤差より日量誤差の影響が大きくなるという本研究の結果より、時刻まで正確に予測する精度の向上を目指すことよりも、日量の予測精度の向上を目指すことが重要であるといえる。

今後は、これらの予測値を利用する側においても、詳細な時刻別の予測値を用いず、日量の予測値のみを用いて計画、運用を行う手法を検討する必要があると考える。また、本研究で設定した最低蓄熱量維持率の数值は、需要家の給湯需要パターンや、太陽熱取得量や給湯需要量の予測精度によって大きく異なると考えられる。様々な需要パターンや、より精度の高い予測手法に対して、適切に維持率を決定する手法も必要である。これらは今後の課題である。

参考文献

- 1) 前真之, 給湯消費エネルギーの動向, 空気調和・衛生工学, **84** (9), 737-743 (2010).
- 2) 浅井俊二, 基調講演・最近の太陽熱利用の動向 (民生用太陽熱利用), 太陽/風力エネルギー講演論文集, 19-26 (2010).
- 3) 中上英俊, 住宅における太陽熱利用の動向, 太陽エネルギー, **36** (3), 3-5, (2010).
- 4) ソーラーシステム振興協会資料, ソーラーシステム・太陽熱温水器地域別設置実績 (都道府県別・H27年まで), <http://www.ssda.or.jp/energy/result.html> (アクセス: 2016/2/1)
- 5) 佐瀬毅, 省エネルギー給湯システム (1) ガス給湯器, 空気調和・衛生工学, **84** (9), 745-749 (2010).
- 6) 吉田竜介, 太陽熱利用ガス給湯器の開発, クリーンエネルギー, **17** (12), 35-40 (2008).
- 7) 浅井俊二, 省エネルギー給湯システム (5) 太陽熱利用給湯システム, 空気調和・衛生工学, **84** (9), 771-775 (2010).
- 8) T. Ikegami, K. Kataoka, Y. Iwafune, and K. Ogimoto, Optimal Demand Controls for a Heat Pump Water Heater under Different Objective Functions, Proc. of 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 1-6 (2012).
- 9) 環境省中央環境審議会地球環境部会中長期ロードマップ小委員会, 中長期の温室効果ガス削減目標を実現するための対策・施策の具体的な姿 (中長期ロードマップ) (中間整理) 別添 4.6 エネルギー供給 WG, 平成 22 年 12 月 (2010).
- 10) 細谷佳文, 藤井康正, 井上貴至, 福田桂, 渡邊裕美子, 太陽熱併用ヒートポンプ給湯器の経済・環境性能に関するシステム分析, 第 18 回日本エネルギー学会大会講演要旨集, 6-2-4, 344-345 (2009).
- 11) 楠崇史, 宇田川光弘, 太陽熱給湯システムの補助熱源方式の検討—太陽熱ヒートポンプシステム—, 太陽/風力エネルギー講演論文集, 47-50 (2010).
- 12) T. Ikegami, K. Kataoka, Y. Iwafune, and K. Ogimoto, Home Energy Supply-demand Analysis for Combined System of Solar Heat Collector and Heat Pump Water Heater, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research), **67** (6), II_351-II_362 (2011).
- 13) T. Ikegami, Y. Iwafune, and K. Ogimoto, Development of the Optimum Operation Scheduling Model of Domestic Electric Appliances for the Supply-Demand Adjustment in a Power System, IEEE Transactions on Power and Energy, **130** (10), 877-887 (2010).
- 14) 日本建築学会, 住宅内のエネルギー消費量に関する調査専門委員会, 住宅内のエネルギー消費量データベース, 関東戸建 03, ガス消費量, 給水温度 15 分データ (2006).
- 15) 独立行政法人産業技術総合研究所, 広域分散電源としての太陽光発電システムの利用可能性の調査, 平成 19 年度 NEDO 委託業務成果報告書 (2008).
- 16) R. Hashimoto, H. Yano, K. Kudo, T. Ikegami, K. Kataoka, and K. Ogimoto, Novel Planning and Control Method of Heat Pump Systems Based on Estimation of the Instantaneous Coefficient of Performance for Demand Response, Proceedings of the CIGRE AORC Technical Meeting 2014, 1119, 1-6 (2014).
- 17) 気象庁, 気象統計情報, アメダスデータ 1 時間値, 観測点 (練馬), 気温, 相対湿度 (2003, 2004).
- 18) G. Marsaglia, Xorshift RNGs, Journal of Statistical Software, **8**, Issue 14, 1-6 (2003)
- 19) G. E. P. Box and M. E. Muller, A Note on the Generation of Random Normal Deviates, The Annals of Mathematical Statistics, **29** (2), 610-611 (1958).