

住宅 冷蔵庫 消費電力 推定精度確認

1 はじめに

家庭における用途別エネルギー消費のうち家電用途の割合はエネルギー消費全体の約 1/3 を占めている (図 1^{[1])}。これは家電機器の普及・大型化・多様化や生活様式の変化などに伴い、動力・照明他用のシェアが増加した^[2]ことが要因であり、今後も増加する傾向が予想される。

自立循環型住宅への設計ガイドライン^[3]では、エネルギー消費の多くを占める家電製品のうち、長時間使用していることで消費電力量が大きくなりがちな電気冷蔵庫、テレビ、温水暖房便座を「重点家電」と定義しており、特に冷蔵庫は 1 世帯当たりのエネルギー消費量全体の 6.8% を占め、住宅内で最も電気使用量の多い家電機器である。カタログに記載されている冷蔵庫の消費電力量は、JIS^[4]で定められた電力消費量試験の条件下で測定された数値である。2006 年に JIS が改正^[5]されたことによって、消費電力表示が月間表示から年間表示へと変わり、実際の家庭での使い方を模した試験方法となった。しかし冷蔵庫の使い方や設置場所、冷蔵庫の周辺温度等は各家庭で異なると考えられるため、実際の消費電力と JIS に基づいて測定された値では差が出るのが考えられる。したがって実使用条件下で冷蔵庫の消費電力を調査し、既往の研究による消費電力推定手法の実用性を検証することが重要である。

そこで本研究では冷蔵庫の消費電力と周辺温度の関係に基づいた消費電力推定手法を使用し、実使用時の冷蔵庫の消費電力の実測値と推計値の比較をすることで推定式の精度確認を行った。

2 研究概要

2.1 冷蔵庫の消費電力推定に関する既往研究

佐藤ら^[6]は冷蔵庫の冷却作用に影響を与える要因を整理するために、I) 扉開閉と周囲温度の影響度合い II) 周囲温度と平均消費電力 III) 庫内温度と消費電力量の 3 つの検討を行い、冷蔵庫には①冷凍室と冷蔵室の同時冷却、②冷凍室のみ冷却、③霜取り機能が稼動している時の 3 つの運転があり^[7]、庫内温度の実測値から冷蔵庫の 3 機能が移り変わって稼動している様子を確認した。また時系列の周囲温度と消費電力量の関係から、食事や買い物時に消費電力の大きな増減が見られなかったこと、さらに凝縮器からの排熱性能による冷却効率の違いから、扉開閉による庫内温度の影響は小さく周囲温度や設置環境による影響の方が大きいと仮定し、冷却設定を変更した際の庫内温度と消費電力量の関係性を分析した。以上の分析より、2006 年以

前に製造された冷蔵庫を主対象として消費電力推定式を構築している。以下に佐藤らの推定式の概要を示す。

$$W_{ratio} = 1.50 \times 10^{-3}t^2 - 2.77 \times 10^{-2}t + 7.53 \times 10^{-1} \quad (1)$$

(推奨使用温度範囲 10°C ≤ t ≤ 30°C)

$$W_{ratio} = W_t / W_{25}$$

W_{ratio} : 平均消費瞬時電力比[-]

W_t : 周囲温度 t における平均消費瞬時電力[W]

W_{25} : 周囲温度 25°C における平均消費瞬時電力[W]

2.2 消費電力測定概要

一般住宅 4 件で冷蔵庫の消費電力と周辺温度の測定データを入手した。測定対象とした冷蔵庫の概要を表 1 に、周辺温度の測定結果の箱ひげ図を図 2 に示す。冷蔵庫 D のみが 1996 年製であり、他は全て 2014 年製であった。冷蔵庫の消費電力と周辺温度の測定間隔は 1 秒～5 分まで様々あったが、検討の結果 1 時間平均値に変換し測定間隔による消費電力推定の差の分析を行った。

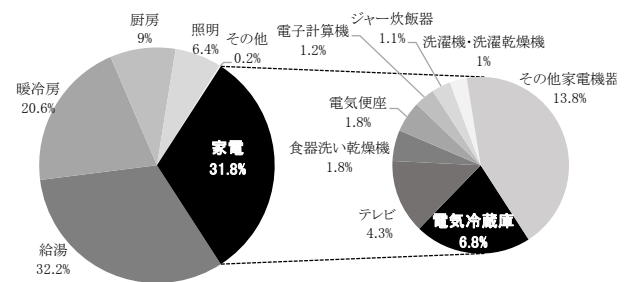
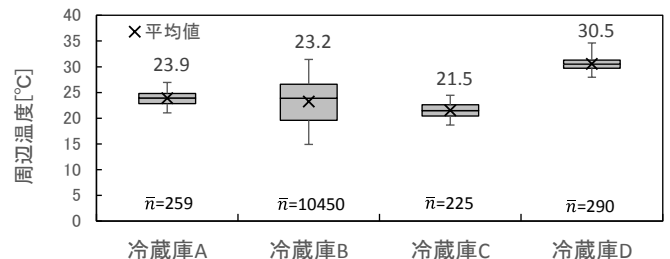


図 1 家庭部門のエネルギー消費量の割合



※図中の箱ひげ図上部の数字は平均値、 \bar{n} は 1 時間平均値のデータ数を示す。

図 2 冷蔵庫周辺の空気温度

表 1 冷蔵庫の機器特性と消費電力測定期間

機器名	製造年	定格内容積[L]	カタログの年間消費電力[kWh/年]	測定期間	データ数 (1 時間平均)
冷蔵庫 A	2014	510	180	2015/4/7～2015/4/18	259
冷蔵庫 B	2014	375	270	2015/4/9～2016/6/18	10450
冷蔵庫 C	2014	315	250	2015/4/21～2015/5/1	225
冷蔵庫 D	1996	445	48 ^{注 1)}	2017/8/13～2017/8/25	290

注 1) 冷蔵庫 D は JIS 改正前に製造されており、カタログ値として消費電力量が月間で表示されている

2.3 研究手法

本研究で検討する冷蔵庫の消費電力量推定値は自立循環型住宅開発委員会で提案されている推定式により消費電力・周辺温度・年間消費電力（カタログ値）を用いて算出され、稼働率を変化させることで冷蔵運転時と除霜運転時それぞれの消費電力量を算出することができるものとなっている。以下、時刻 t における冷蔵庫の消費電力 $E_{E,APrf,d,t}$ [Wh/h] の推定式を式(2)に示す。

$$E_{E,APrf,d,t} = k_{APrf,m1,d,t} \left(\frac{E_{E,APrf,d} - \tau_{APrf,m2,d} \cdot 0.9 \cdot X_{APrf,v1}}{24 - \tau_{APrf,m2,d}} \right) + k_{APrf,m2,d,t} \cdot 0.9^{**1} \cdot X_{APrf,v1} \quad (2)**2$$

$$\tau_{APrf,m2,d} = \sum_{t=0}^{23} k_{APrf,m2,d,t} \quad (3)$$

- $E_{E,APrf,d,t}$: 日付 d 時刻 t における冷蔵庫の消費電力量 [Wh]
- $k_{APrf,m1,d,t}$: 冷蔵庫の冷蔵運転の日付 d 時刻 t における稼働率 [-]
- $k_{APrf,m2,d,t}$: 冷蔵庫の除霜運転の日付 d 時刻 t における稼働率 [-]
- $E_{E,APrf,d}$: 冷蔵庫の日積算消費電力量の予測値 [kWh/日]
- $X_{APrf,v1}$: 冷蔵庫の電熱器定格消費電力 [W]
- $\tau_{APrf,m2,d}$: 日付 d における冷蔵運転稼働率の日積算値 [-]

ここで、日積算消費電力量の推定値は

$$E_{E,APrf,d} = (3.283 \cdot 10^{-3} - 2.0 \cdot 10^{-6} \cdot X_{APrf,v2}) \times (\theta_{r,d}^2 - 30 \cdot \theta_{r,d}) + 1.85 \cdot 10^{-3} \cdot X_{APrf,v2} + 1.329 \quad (4)$$

- $X_{APrf,v2}$: 冷蔵庫の年間消費電力量 [kWh/年]
- $\theta_{r,d}$: 冷蔵庫の周囲空気の温度の日平均値 [°C]
- ※1 式(2) 右辺第1項の「0.9」は冷蔵庫の電熱器定格消費電力に対する実消費電力の割合であり、実測結果を考慮して0.9とした
- ※2 冷蔵庫の運転稼働率について、冷蔵運転時は $k_{APrf,m1,d,t}=1$ 、 $k_{APrf,m2,d,t}=0$ 、除霜運転時は $k_{APrf,m1,d,t}=0$ 、 $k_{APrf,m2,d,t}=1$ を代入して算出した

出典：自立循環型住宅 冷蔵庫消費電力算定式^[8]

以上の式を用いて、以下の2項目の実測値と推定値の比較を行った。

- I) 時刻 t における消費電力量 [Wh]
- II) 日積算消費電力量 [kWh]

3 実測値と推定値の比較

3.1 時刻 t における消費電力量

推定式の精度を確認するために佐藤式(式(1))、自立式(式(2))を用いて算出した時刻 t における消費電力量の推定値と実測値の結果を図3に示す。いずれも自立式で算出した推定値と実測値のRMSEが佐藤式より小さい値となり、既往の式と比べて推定精度の高さを確認できた。またどの冷蔵庫も実測値が推定値よりも大きくなる時間帯が多い結果となった。これは除霜運転が働いている時の消費電力を推定に反映できていないためであると考えられる。そこで除霜運転時の消費電力の違いを推定に反映するために1日における除霜運転の稼働時間の長さを変えて、推

定値と実測値の決定係数が大きくなる条件の検討を行った。1日のうちで1時間ごとの消費電力量の平均値が大きい上位2位の時間帯で除霜運転が計2時間働いていると仮定し、冷蔵・除霜運転の稼働率を変化させて算出した推定値と実測値を図4に示す。RMSEは冷蔵庫AとDではより小さい値となり、冷蔵庫BとCでは大きくなった。これは1日当たりの除霜運転の稼働時間が冷蔵庫の機種により様々であることが1つの要因であると考えられる。

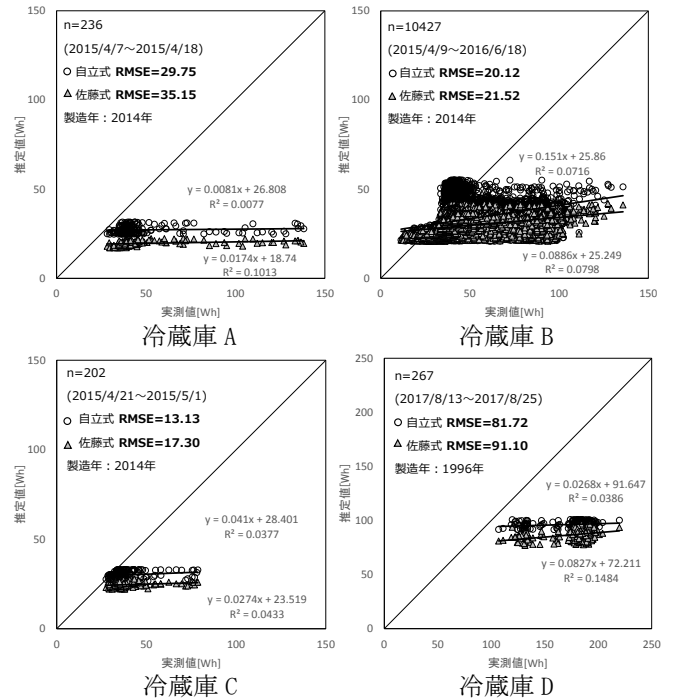


図3 時刻 t における消費電力量の実測値と推定値 (除霜運転を考慮しない場合)

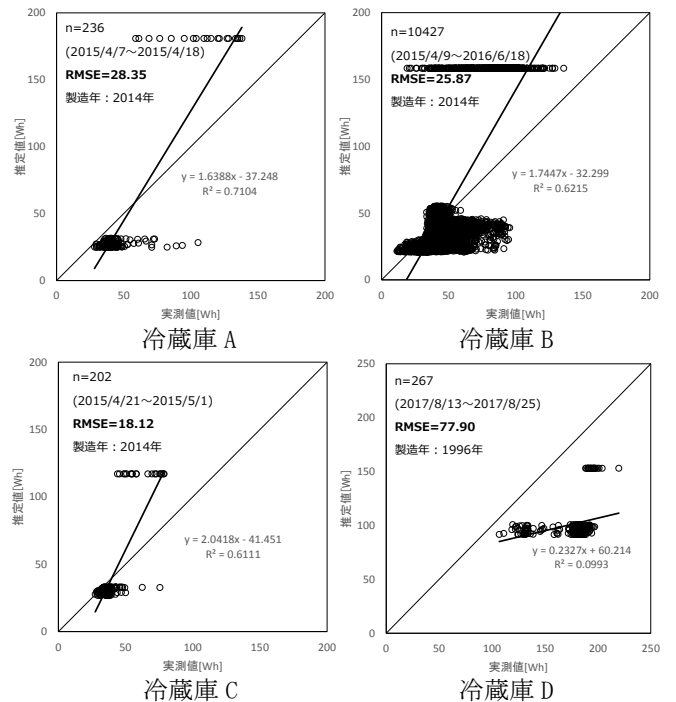


図4 時刻 t における消費電力量の実測値と推定値 (除霜運転2時間稼働時)

3.2 日積算消費電力量

日積算消費電力量の実測値と推定値を図5、実測値と推定値の平均値の比率を表3に示す。実測値は消費電力量の24時間積算値の1時間ごとの移動平均データを用いた。ここで冷蔵庫Bは測定期間が最も長く、外れ値とみなせるデータも多く含んでいると考えられたため、マハラノビス距離を用いて外れ値を5%検出し、95%のデータから回帰直線を算定する試行を繰り返した結果を示す。冷蔵庫A、BおよびCの実測値と推定値の乖離は比較的小さく、冷蔵庫Dは推定値と実測値の乖離が大きくなった。これは冷蔵庫Dの消費電力のカタログ値は旧JISにより周辺温度が25℃の条件で試験を行って求められたものであり、周辺温度が変化する条件下で自立式を使用しても正確に消費電力量が推定できないためと考えられる。図6に示すように、ある代表日3日間の消費電力を見ても冷蔵庫Dは他の冷蔵庫と消費電力の推移に違いが見られた。

表3 各冷蔵庫の実測値と推定値の平均値の比率^{注1}

冷蔵庫A	冷蔵庫B	冷蔵庫C	冷蔵庫D
1.16	1.01	1.03	1.75

注1) 比率 = $\frac{\text{日積算消費電力量の実測値の平均値}}{\text{日積算消費電力量の推定値の平均値}}$

4 自立式の精度確認

自立式の精度を別サンプルで確認するため、高知県内の住宅を対象に実使用時の冷蔵庫の消費電力量の実測を行い、日積算消費電力量の実測値と推定値の比較を行った。対象住宅の測定概要を表4に、冷蔵庫周辺の空気温度の測定結果の箱ひげ図を図7に示す。冷蔵庫E、F、Gは冬期に1週間程度消費電力を測定しており、H、Iは夏期と冬期において1~2週間程度の期間で測定を行った。H、Iについてはそれぞれ夏期の測定結果をHs、Is、冬期の測定結果をHw、Iwと表す。

表4 対象住宅の冷蔵庫の機器特性と消費電力測定期間

機器名	製造年	定格内容積 [L]	カタログの年間消費電力 [kWh/年]	測定期間	データ数 (日積算)
冷蔵庫E	2006	357	350	2017/12/27 ~ 2018/1/6	220
冷蔵庫F	2012	501	230	2017/12/27 ~ 2018/1/12	359
冷蔵庫G	2017	470	325	2017/12/8 ~ 2018/1/13	836
冷蔵庫H	2012	427	250	2017/1/23 ~ 2018/1/13	181
冷蔵庫I ^{注1}	2004	456	190 ^{注2}	2017/7/30 ~ 2017/9/9	971
				2017/12/23 ~ 2018/1/13	487
冷蔵庫J	1997	325	45 ^{注3}	2017/8/1 ~ 2017/8/31	721

注1) 冷蔵庫Iの測定期間とデータ数は上部が夏期、下部が冬期を示す
 注2) 冷蔵庫IはJIS改正後の消費電力量試験に基づいて測定されており、カタログ値も年間消費電力量で表示されている
 注3) 冷蔵庫JはJIS改正前に製造されており、カタログ値として消費電力量が月間で表示されている

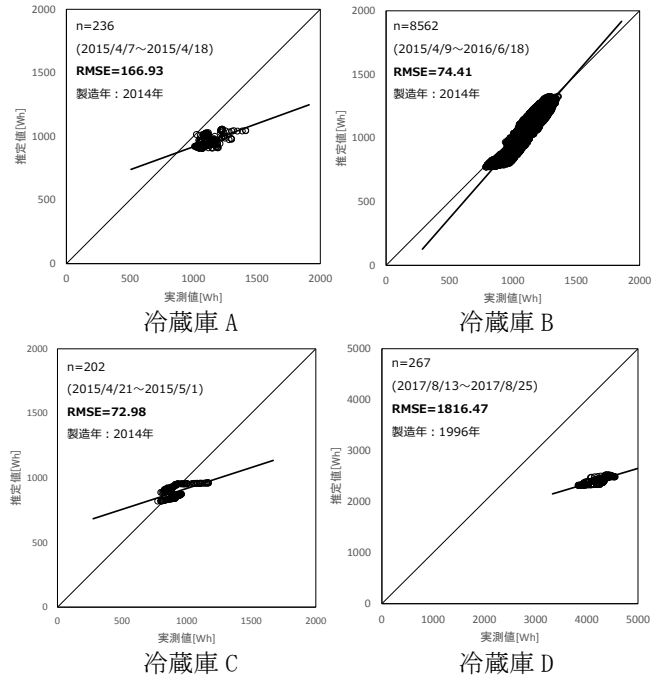


図5 各冷蔵庫の日積算消費電力量の実測値と推定値

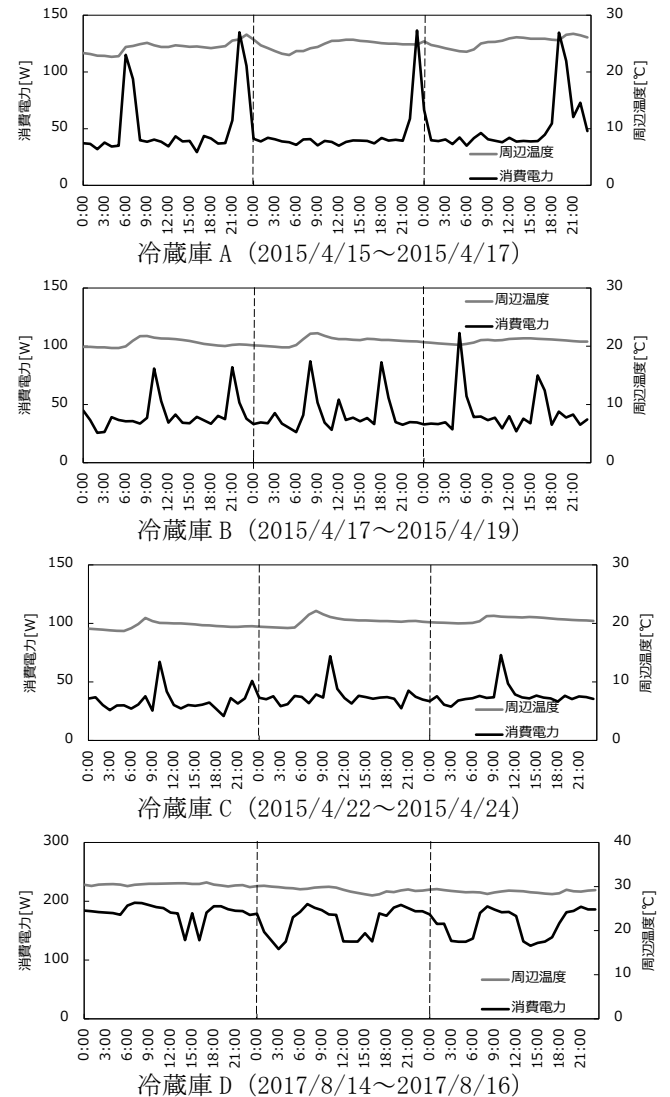


図6 各冷蔵庫の代表期間における消費電力と周辺温度

4.1 冬期の消費電力推定

冷蔵庫 E、F、G、H、I について、日積算消費電力量の推定値と実測値を図 8、推定値に対する実測値の比率を表 5 に示す。JIS 改正前後の冷蔵庫の消費電力量を高い精度で推定できることを確認した。全ての冷蔵庫で実測値に比べて推定値が小さく算出される結果となった。この要因の一つとして、冷蔵庫の設置環境により、熱交換機能にかかる消費電力に影響を与えた可能性が考えられる。推定値に対する実測値の比率が最も大きい冷蔵庫 H を例に挙げると、実測値は推定値に対して 43% (1.6GJ) 大きく、省エネルギー基準における 6 地域の一次エネルギー消費量基準値 80.7GJ と比較して約 2%のずれとなった。

表 5 推定値に対する実測値の比率(冬期)

冷蔵庫 E	冷蔵庫 F	冷蔵庫 G	冷蔵庫 H	冷蔵庫 Iw
1.31	1.27	1.16	1.43	1.04

4.2 夏期の消費電力推定

冷蔵庫 I、J について、日積算消費電力量の推定値と実測値を図 9、推定値に対する実測値の比率を表 6 に示す。いずれも推定値が小さく算出される結果となり、特に冷蔵庫 I は推定値に対する実測値の比率が 1.54 となっているが、これは 1997 年製の冷蔵庫を使用しているためだと考えられる。また冷蔵庫 I の実測値は推定値に対して 33% (1.2GJ) 大きく、基準値 80.7GJ と比較して約 1.5%のずれとなった。

表 6 推定値に対する実測値の比率(夏期)

冷蔵庫 Is	冷蔵庫 J
1.33	1.54

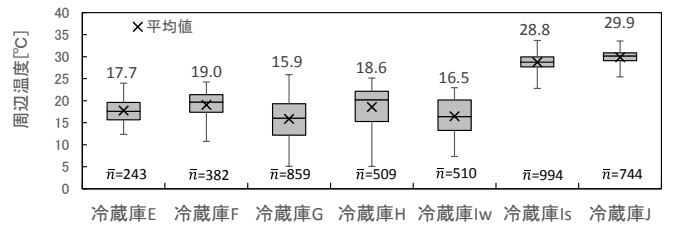
5 おわりに

本研究では冷蔵庫の消費電力推定として提案されている自立式を用いて、実測値と推定値の比較を行うことで推定式の精度を確認した。除霜運転時の消費電力の違いを推定に反映するため 1 日に除霜運転が計 2 時間稼働すると設定し検討を行い、除霜運転時の消費電力を適切に評価できれば推定精度の向上につながることを確認した。

また自立式が日積算消費電力量で実測値に近い値を推定できることを確認した上で、高知県内の住宅で使用されている冷蔵庫の消費電力の実測値と推定値を比較し、実使用時の精度確認を行った。その結果、冬期夏期いずれも、推定値が実測値よりも小さくなる傾向を確認した。

<参考文献>

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁「平成 28 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2017)」: 部門別エネルギー消費の動向, <http://www.enecho.meti.go.jp/about/t/whitepaper/2017html/2-1-2.html> [2] 経済産業省資源エネルギー庁: 家庭エネルギー消費の実態, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/actual/ [3] 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所監修『蒸暑地版 自立循環型住宅への設計ガイドライン』, 2010.10 [4] 日本規格協会 日本工業標準調査会審議: JIS C 9801 電気冷蔵庫及び電気冷凍庫, 1999 制定 [5] 日本規格協会 日本工業標準調査会審議: JIS C 9801 家庭用電気冷蔵庫及び電気冷凍庫の特性及び試験方法, 2006 改正 [6] 河野佑輔 古賀ひろ子 佐藤春樹: 住宅に置かれた冷蔵庫の消費電力推定法, 日本建築学会環境系論文集 第 76 巻 第 667 号, p799-807, 2011.9 [7] 社団法人 日本冷凍空調学会: 冷凍空調便覧 第 II 巻 機器編, 1993.6 [8] 自立循環型住宅 技術情報・関連書籍, <http://www.ijj-design.org/>, 2018.2



※図中の箱ひげ図上部の数字は平均値、 \bar{n} は 1 時間平均値のデータ数を示す。

図 7 対象住宅の冷蔵庫周辺の空気温度

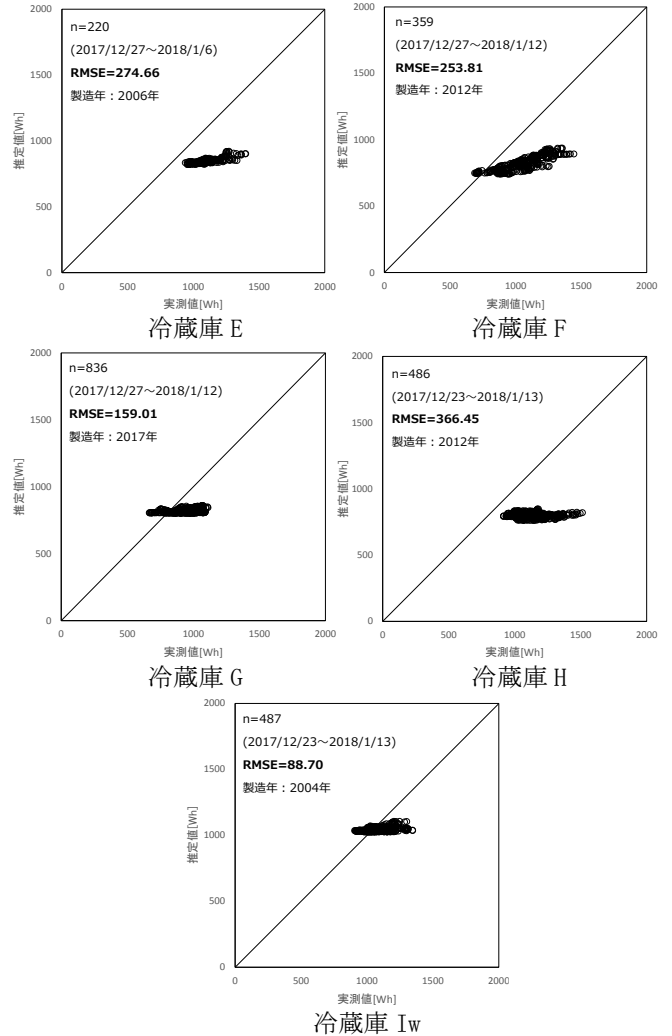


図 8 日積算消費電力量の実測値と推定値 (冬期)

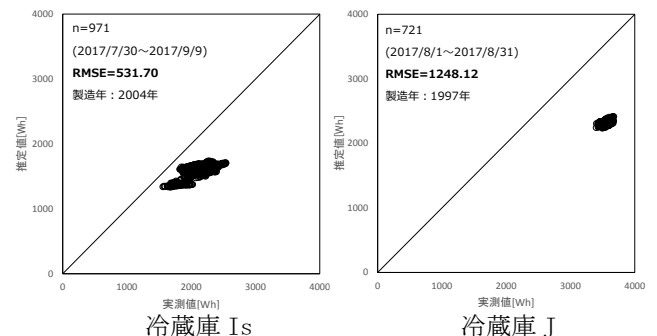


図 9 日積算消費電力量の実測値と推定値 (夏期)