寒冷地における住宅用給湯設備の効率性に関する研究

A STUDY ON EFFICIENCY OF HOT WATER SUPPLY SYSTEMS IN COLD CLIMATE AREA

小澤明也*, 浅野良晴**, 高村秀紀***, 久保田敏史****, 安部祐樹*

Akiya OZAWA, Yoshiharu ASANO, Hideki TAKAMURA,

Toshifumi KUBOTA and Yuuki ABE

The authors investigated how to use three kinds of hot water supply systems which were condensing type gas water heater systems, CO₂ heat pump water heater systems and residential gas engine co-generation systems (GE-CGS) in four detached houses of Nagano prefecture. GE-CGS was installed in house A and house B. Condensing type gas water heater systems were installed in house B and house C. CO₂ heat pump water heater systems were installed in house C and house D.

We analyzed the energy efficiency of these systems. As a result, GE-CGS of house A was the highest in the annual energy efficiency, and it followed that CO₂ heat pump water heater system of house D was the lowest.

Keywords : Hot water supply, City gas, Electricity, Energy efficiency

給湯, 都市ガス, 電気, エネルギー効率

1. はじめに

1. 1 研究の背景

日本の家庭部門でのエネルギー消費量は年々増加傾向にあり、家庭用機器の省エネルギー化が進められている。住宅のエネルギー消費量は、給湯分野が30%を占めるとされており¹⁾、その省エネルギー化を図る為に、潜熱回収型ガス給湯器、CO₂ヒートポンプ給湯機、家庭用ガスエンジンコージェネレーションシステム(以下GE-CGSと略記)等の高効率給湯設備が開発され、普及が促進されている。潜熱回収型ガス給湯器は排気ガス中の潜熱を回収することで従来型に対して高効率化した。また、電気をエネルギー源とするCO₂ヒートポンプ給湯機は、ヒートポンプ技術を導入することで高効率化を達成した。そして、都市ガスを燃料にガスエンジンで発電し、発電時の排熱を利用して熱供給を行うGE-CGSも実用化している。

これらの給湯設備は、一定の条件下で試験された定格効率により高効率であることが示されているが、住民のライフスタイルの多様化、外気温度等の外界気象条件によって、実使用下での効率と定格効率とは異なることが予想される。

1. 2 研究概要及び既往研究

本研究では、寒冷地に立地する戸建住宅に潜熱回収型ガス給湯器とCO₂ヒートポンプ給湯機を設置し、切り替えて運転することで、両給湯設備の年間エネルギー効率を明らかにする。²⁾また、寒冷地

の戸建住宅にGE-CGSと潜熱回収型ガス給湯器を設置し、切り替えて運転することで、両給湯設備の年間エネルギー効率を明らかにする。³⁾さらに、寒冷地の戸建住宅におけるCO₂ヒートポンプ給湯機の年間エネルギー効率を明らかにする。²⁾そして、これら3種の給湯設備のエネルギー効率について効率性の検討を行う。

2009年4月に施行された新しい住宅省エネ基準「住宅事業建築主の判断の基準」⁴⁾では、実住宅における湯消費実態の調査に基づき、実使用を反映させた試験方法を開発し、一般に普及している給湯設備の実証実験を行っている。評価方法は4人家族の標準的な湯消費を再現した修正M1モードを用いて、給湯設備の年間1次エネルギー消費量を推計している。しかし、評価に用いている湯の消費パターンは湯張りを行うことを基本としたものであるため、湯張りの頻度が少ない住宅等は対象とせず、基準適用範囲が狭いものとなっている。また、寒冷地・準寒冷地における効率についても実測などを含めた検討が重要であると記述している。本論文では、寒冷地の実際の湯消費状況における効率の基礎データに資するものとして効率性の検討を行う。3種の給湯設備における既存の知見として、GE-CGSの効率性は、清水ら⁵⁾や木谷ら⁶⁾がGE-CGSを設置した北海道・北陸・関東・関西・中国に立地する戸建住宅において実測調査を行い、熱利用システム稼働効率等を定義し、発電利用効率と熱利用システム稼働効率の関係を明らかにしている。潜熱回収型ガス給湯器の効率

* 信州大学大学院工学系研究科 大学院生

** 信州大学工学部建築学科, 信州大学山岳科学総合研究所 教授・工博

*** 信州大学工学部建築学科, 信州大学山岳科学総合研究所 准教授・博士(工学)

**** 榎大林組 工修
(当時 信州大学大学院工学系研究科)

Graduate Student, Faculty of Eng., Univ. of Shinshu

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Univ. of Shinshu and Institute of Mountain Science, Univ. of Shinshu, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Univ. of Shinshu and Institute of Mountain Science, Univ. of Shinshu, Dr. Eng.

Obayashi Corporation, M. Eng.

性は、中濱ら⁷⁾が短時間出湯の割合が大きい世帯で効率は低下し、特に追い焚きの効率が低いことを明らかにしている。しかし、給湯設備の電力消費量による効率への影響については十分に検討されていない。また CO₂ ヒートポンプ給湯機の効率性は、高田ら⁸⁾が CO₂ ヒートポンプ給湯機を設置した全国 14 戸のモニタ住宅において実測調査を行い、HPCOP 及びシステム COP の変動要因を検討している。

本研究では、GE-CGS の効率性に関して、エネルギー効率と日平均外気温度及び家庭内消費電力割合との関係を明らかにする。潜熱回収型ガス給湯機の効率性は、エネルギー効率と日平均外気温度及び給湯設備における電力消費量との関係を明らかにする。また、CO₂ ヒートポンプ給湯機の効率性は、タンク効率、HP 稼働時出湯温度別のエネルギー効率とタンク効率との関係を明らかにする。

1. 3 研究の目的

本研究は、寒冷地の戸建住宅 3 棟と GE-CGS 及び太陽光発電システム（以下、PVS と略記）を設置した戸建住宅 1 棟を加えた計 4 棟を対象に、GE-CGS、潜熱回収型ガス給湯器、CO₂ ヒートポンプ給湯機の 3 機種について実測する。そして、各住宅における消費湯量、熱需要及び電力需要、各給湯設備のエネルギー消費量及び稼働状況を分析する。また、給湯設備の出力エネルギーを投入エネルギーで除したエネルギー効率を算出する。そして、寒冷地の給湯設備を高効率で利用することを目的として、効率性の検討を行う。

2. 計測対象住宅の概要

計測対象住宅の概要を表 1 に示す。住宅 B 及び C では 2 種の給湯設備を交互に切り替えて運転している。そして、住宅 D では CO₂ ヒートポンプ給湯機を 2 年間計測したため、1 年目と 2 年目を分けて分析する。

3. 計測概要

3. 1 給湯設備の仕様

住宅 A 及び住宅 B の GE-CGS の仕様を表 2 に示す。住宅 A の GE-CGS は給湯及び床暖房に対して熱出力し、住宅 B では給湯、床暖房及び浴室暖房乾燥機に対して熱出力する。住宅 B 及び C の潜熱回収型ガス給湯器の仕様を表 3 に示す。住宅 B の潜熱回収型ガス給湯器は、給湯、床暖房及び浴室暖房乾燥機に対して熱出力する。住宅 C 及び D の CO₂ ヒートポンプ給湯機の仕様を表 4 に示す。

3. 2 給湯系統及び計測箇所

計測対象住宅における給湯設備の系統図及び計測箇所を図 1～図 4 に示す。住宅 B 及び C は、給湯配管、給水配管、風呂循環配管、暖房循環配管にバルブを設置し、給湯設備の切り替えを行う。また、各流量、温度、ガス消費量、電力消費量の計測は 1 分間隔で行う。

3. 3 計測期間

各住宅における分析使用日数及び計測期間を表 5 に示す。分析する際の季節区分は、6 月から 8 月を夏期、9 月から 11 月と 3 月から 5 月を中間期、12 月から 2 月を冬期とする。住宅 B は、GE-CGS の運転を 2 週間、潜熱回収型ガス給湯器の運転を 1 週間として切り替えている。住宅 C は、CO₂ ヒートポンプ給湯機及び潜熱回収型ガス給湯器を 2 週間毎に切り替えている。CO₂ ヒートポンプ給湯機への切り替え後の 1 週間は、学習期間として分析からは除外している。各給湯設備の設定内容を表 6 に示す。

表 1 計測対象住宅の概要

住宅	給湯設備	所在地	延床面積	家族構成	備考
A	GE-CGS	長野市	252m ²	6人	太陽光発電パネルを併設
B	GE-CGS	長野市	146m ²	4人	給湯設備の切り替え運転
C	潜熱回収型ガス給湯器 CO ₂ ヒートポンプ給湯機	上高井郡 小布施町	143m ²	5人	給湯設備の切り替え運転
D	CO ₂ ヒートポンプ給湯機	長野市	161m ²	4人	計測1年目 計測2年目

表 2 GE-CGS の仕様

住宅A及びB			
発電ユニット		貯湯ユニット	
発電出力	1kW	タンク容量	140L
排熱出力	2.8kW	加熱能力	給湯 24号 追い焚き 12kW 暖房 17kW
定格効率	発電20.3% 排熱56.9% (HHV)	最大消費電力	293W
		凍結防止ヒータ	184W

表 3 潜熱回収型ガス給湯器の仕様

住宅B		住宅C
給湯能力	2.2～24号	2.8～28号
暖房能力	11.6～22.4kW 比例制御 2.44～0kW ON-OFF制御	-
定格効率	給湯95%、暖房87%	95%
消費電力	290W	190W

表 4 CO₂ ヒートポンプ給湯機の仕様

住宅C			
ヒートポンプユニット		貯湯ユニット	
加熱能力	定格 6.0kW 冬季高温 6.0kW	タンク容量	460L
定格効率	4.6	熱交換循環ポンプ	11W
消費電力	定格 1.30kW 冬季 1.79kW	消費電力	風呂循環ポンプ 105W 積層ポンプ 8W 制御用 5W
待機電力	11W		

住宅D			
ヒートポンプユニット		貯湯ユニット	
加熱能力	定格 6.0kW 夏季高温 4.5kW 冬季高温 6.0kW	タンク容量	430L
定格効率	4.9	消費電力	循環ポンプ 161W 凍結防止ヒータ 96W 制御用 20W
消費電力	定格 1.22kW 夏季 0.89kW 冬季 1.78kW

図 1 住宅 A における給湯設備の系統図及び計測項目

図 2 住宅 B における給湯設備の系統図及び計測項目

4. 住宅毎の熱需要及び電力需要

4. 1 住宅毎の 40℃換算消費湯量

40℃換算消費湯量は、湯張り量、足し湯量、給湯量の合計であり、追い焚きを含まない。季節毎の日積算 40℃換算消費湯量を図 5 に示す。既往研究⁹⁾では全国の集合住宅と戸建住宅を含む 229 住戸で世帯人数別の 40℃換算消費湯量の平均値を明らかにしている。4 人世帯の住宅 B 及び D における年間の日積算 40℃換算消費湯量は、既往研究の平均値 448.2L よりも少ない。また、6 人世帯の住宅 A 及び 5 人世帯の住宅 C においては、既往研究⁹⁾の平均値 536.7L よりも多い。これは住宅 A 及び C の場合、住民が通年で湯張りしていたことによるものと考えられる。

4. 2 住宅毎の熱需要

追い焚き負荷割合とは、湯張り負荷に対する追い焚き負荷の比率であり、追い焚き負荷割合 R_{rh} を (1) 式で表す。そして、季節毎の日積算給湯負荷及び暖房放熱量、追い焚き負荷割合を図 6 に示す。

$$R_{rh} = (Q_{rh}/Q_{bath}) \times 100 \quad \dots (1)$$

住宅 A は床暖房を長時間使用していたため、冬期の床暖房放熱量が増大している。住宅 B は、浴室暖房乾燥機に重点をおいて給湯設備の暖房機能を使用している。そして、住宅 B の夏期はシャワーだけを使用しており、湯張りは行われていない。また、住宅 B の年間追い焚き負荷率は 100% 超えている。これは、湯張りを行った際の残り湯を、翌日に追い焚きすることによって再加熱し、入浴していたからである。住宅 C の冬期における追い焚き負荷割合は、両給湯設備ともに 40% を超えている。これは、住宅 B と同様に浴槽の残り湯を追い焚きによって再加熱していたと考える。

4. 3 住宅毎の電力需要及び発電量

住宅 A 及び B における日積算家庭内消費電力量、購入電力量及び発電寄与率の季節変動を図 7 に示す。家庭内消費電力量とは、GE-CGS 及び PVS から家庭内へ供給される電力量を表す。発電寄与率とは、住宅の全電力消費量に対する GE-CGS 及び PVS の家庭内消費電力量の比率を表す。住宅 A の場合、家庭内消費電力量 (GE-CGS) が住宅の全電力消費量の 31% を占めており、家庭内消費電力量 (PVS) も合わせると 52% である。家庭内消費電力量 (PVS) が減少する冬期においても、発電寄与率 (GE-CGS+PVS) は 50% である。また、住宅 B の年間の日積算家庭内消費電力量 (GE-CGS) は住宅 A に対して 3kWh 少ない。

5. 給湯設備のエネルギー消費量及び稼働状況

5. 1 給湯設備毎のガス消費量及び電力消費量

給湯設備毎の日積算ガス消費量及び電力消費量の季節変動を図 8 に示す。給湯設備の電力消費量とは、各種ポンプ及び制御管理用、凍結防止ヒータ等、給湯設備内における電力消費量の合計を表す。GE-CGS の全ガス消費量に対して補助ボイラが占める割合は、住宅 A で 23% であり、住宅 B では 21% である。住宅 A、住宅 B、住宅 C のガス給湯設備の電力消費量は、冬期に増大している。これは、給湯設備に内蔵されている凍結防止ヒータによるものと考えられる。

5. 2 GE-CGS 発電ユニットの稼働状況

住宅 A 及び B における GE-CGS の稼働状況を表 7 に示す。システム内消費電力量とは、GE-CGS が発電した電力のうち、発電ユニット内のヒータで熱に変換される電力量を表している。

図 3 住宅 C における給湯設備の系統図及び計測項目

図 4 住宅 D における給湯設備の系統図及び計測項目

表 5 各住宅における分析使用日数及び計測期間

住宅	給湯設備	分析使用日数	湯張り日数	床暖房使用日数	浴室暖房乾燥機使用日数	計測期間
住宅A	GE-CGS	364	352	179	-	2009年6月25日から 2010年6月25日
住宅B	GE-CGS	219	32	31	13	2009年6月27日から 2010年6月25日
	潜熱回収型ガス給湯器	109	18	95	52	2009年6月27日から 2010年6月25日
	潜熱回収型ガス給湯器	153	116	-	-	2007年10月2日から 2008年9月29日
住宅C	CO ₂ ヒートポンプ給湯機	211 学習期間除く (148)	155 (108)	-	-	2007年10月2日から 2008年9月29日
住宅D	CO ₂ ヒートポンプ給湯機	344	247	-	-	2008年6月1日から 2009年5月31日
		292	226	-	-	2009年6月1日から 2010年4月12日

表 6 各住宅における給湯設備の設定内容

住宅	給湯設備	設定温度	湯張り	給湯	備考
住宅A	GE-CGS	40℃	41℃	-	-
住宅B	GE-CGS	41℃	35℃	-	-
	潜熱回収型ガス給湯器	42℃	42℃	-	-
住宅C	CO ₂ ヒートポンプ給湯機	42℃	42℃	-	沸き上げ湯量の設定は「多め運転」
住宅D	CO ₂ ヒートポンプ給湯機	40℃	50℃	-	沸き上げ湯量の設定は「おまかせ運転」 2年目夏期のみ「少なめ運転」

図 5 日積算 40℃換算消費湯量の季節変動

そして、発電利用効率 η_{epg} 、排熱・ヒータ回収効率 η_{eer} 、GE-CGS 発電ユニット総合効率 $\eta_{GE-CGSunit}$ を(2)～(4)で示す。また、1 日の GE-CGS の総発電量に対する家庭内消費電力量(GE-CGS)の割合を表した、家庭内消費電力割合 $R_{GE-CGS,house}$ を(5)式で示し、1 日の GE-CGS の総発電量を(6)式で示す。

$$\eta_{epg} = \frac{b \cdot W_{GE-CGS,house}}{a \cdot G_{GE}} \quad \dots (2)$$

$$\eta_{eer} = \frac{Q_{eer}}{a \cdot G_{GE}} \quad \dots (3)$$

$$\eta_{GE-CGSunit} = \eta_{epg} + \eta_{eer} \quad \dots (4)$$

$$R_{GE-CGS,house} = \frac{W_{GE-CGS,house}}{W_{GE-CGS,total}} \times 100 \quad \dots (5)$$

$$W_{GE-CGS,total} = 1kWh \times h \quad \dots (6)$$

$$a = 43.14[MJ/kWh]^{10}) \quad b = 3.6[MJ/kWh]^{11)}$$

年間ガスエンジン稼働時間は、住宅 B より住宅 A が 3.2 時間長く 8.45 時間である。既往研究⁶⁾における関西及び関東都市部の 2 棟の戸建て住宅の年間ガスエンジン稼働時間は、1 日当たり 5.2～5.5 時間である。寒冷地では給湯及び暖房需要が増大するため、ガスエンジン稼働時間が長時間になると考える。しかし、住宅 B では床暖房を長時間使用していないため、給湯負荷が主な熱負荷となり、住宅 A の様に長時間稼働していない。

また、既往研究⁶⁾における年間家庭内消費電力割合は 70%～71% であり、住宅 A での 85%は高い値である。しかし、住宅 B では年間 66%と低い値である。よって、住宅 A では GE-CGS によって発電した電力を高い割合で家庭内消費し、電力を有効利用していたことにに対し、住宅 B では GE-CGS によって発電した電力を家庭内で消費しきれず、発電ユニット内のヒータで熱に変換する割合が高い状況であったと考える。また、GE-CGS ユニット総合効率は、住宅 A 及び B 共に定格値を満たしている。

5. 3 ヒートポンプユニットの稼働状況

住宅 C 及び D の CO₂ ヒートポンプ給湯機の稼働状況を表 8 に示す。除霜運転時電力消費量は、HP 稼働時電力消費量に含まれている。また、表の各項目は日平均値を表している。

住宅 C 及び D における CO₂ ヒートポンプ給湯機の年間 HPCOP は 2.23 ～2.64 である。住宅 D の 1 年目の夏期における HPCOP は 2.29 と中間期よりも低い。そして、住宅 D の 1 年目の夏期の HP 稼働時平均出湯温度は、86.75℃と高温である。また、1 年目の夏期の HP 稼働時平均入水温度も 48.79℃と高温である。よって、1 年目の夏期ではタンク内の残湯が再度貯湯されていたと考える。

2 年目の計測では、夏期における CO₂ ヒートポンプ給湯機の運転モードを「おまかせ」から「少なめ」へと変更した。運転モードの設定変更を行った住宅 D の夏期における HPCOP は、設定変更前の 2.29 から 4.07 に上昇している。そして、年間 HPCOP は 2.23 から 2.63 に上昇している。また、住宅 D の 2 年目の夏期における HP 稼働時平均出湯温度は 1 年目の 86.75℃から 70.68℃へ低下している。そして、住宅 D の 2 年目の夏期における HP 稼働時平均入水温度は、1 年目の 48.79℃から 28.06℃へ低下している。

図 6 日積算給湯負荷、暖房放熱量及び追い焚き負荷割合の季節変動

図 7 日積算家庭内消費電力量、購入電力量及び発電寄与率の季節変動

図 8 日積算ガス消費量及び電力消費量の季節変動

表 7 住宅 A 及び B における GE-CGS の稼働状況

		ガス エンジン 稼働時間	ガス エンジン 消費電 力量 (kWh/日)	家庭内 消費電 力量 (GE-CGS) (kWh/日)	システム 内消費 電力量 (kWh/日)	排熱・ ヒータ 回収率 (MJ/日)	発電利用 効率	排熱・ ヒータ 回収効率	GE-CGS ユニット 総合効率	家庭内 消費電力 割合
		$Q_{\text{h}}(\text{日})$	Q_{GE}	$W_{\text{GE-CGS, system}}$	Q_{GE}	Q_{heat}	η_{epg}	η_{eer}	$\eta_{\text{GE-CGS unit}}$	$R_{\text{GE-CGS, house}}$
住宅A	夏期	5.05	1.86	4.06	0.54	51.15	0.18	0.59	0.77	85%
	中間期	8.22	3.11	6.55	1.18	79.60	0.17	0.59	0.77	84%
	冬期	12.04	4.72	10.30	1.27	121.97	0.18	0.60	0.78	89%
	年間	8.45	3.23	6.88	1.09	82.89	0.18	0.59	0.77	85%
住宅B	夏期	2.93	1.08	1.67	1.02	32.01	0.13	0.68	0.81	62%
	中間期	5.28	1.93	3.20	1.67	56.13	0.13	0.67	0.80	66%
	冬期	7.57	2.79	5.00	2.05	79.28	0.15	0.65	0.79	72%
	年間	5.25	1.93	3.26	1.60	55.66	0.14	0.67	0.80	66%

表 8 住宅 C 及び D の CO₂ ヒートポンプ給湯機の稼働状況

		HP稼働時 電力 消費量 (kWh/日)	除霜 運転時 電力 消費量 (kWh/日)	HP生産 熱量 (MJ/日)	HPCOP	HP稼働時 平均出湯 温度 (℃)	HP稼働時 平均入水 温度 (℃)	HP稼働時 平均外気 温度 (℃)
		W_{HP}	W_{def}	Q_{HP}	$Q_{HP}/(W_{HP}+3.6)$	$T_{Hot,in}$	$T_{Hot,in}$	T
住宅C	夏期	6.27	0.00	69.50	3.12	78.47	35.82	20.13
	中間期	12.45	0.14	113.10	2.58	79.00	30.39	8.07
	冬期	18.81	1.05	135.74	2.02	74.51	29.52	-0.42
	年間	11.34	0.30	99.27	2.64	77.78	33.04	11.10
	夏期(1年目)	6.60	0.00	54.92	2.29	86.75	48.79	21.55
住宅D	中間期(1年目)	9.77	0.25	79.85	2.32	86.89	38.89	10.80
	冬期(1年目)	13.41	0.38	91.49	1.94	87.21	37.30	1.38
	年間(1年目)	9.77	0.33	76.01	2.23	86.93	41.10	11.47
	夏期(2年目)	3.96	0.00	49.91	4.07	70.68	28.06	20.90
	中間期(2年目)	9.32	0.05	76.69	2.40	83.55	37.85	10.00
	冬期(2年目)	13.87	0.29	92.47	1.85	82.02	35.37	1.42
	年間(2年目)	9.44	0.11	75.14	2.63	80.02	34.76	9.97

6. 給湯設備の効率性に関する検討

6. 1 エネルギー効率の算出

6. 1. 1 1次エネルギー効率の算出

GE-CGSの1次エネルギー効率 $\eta_{GE-CGS1}$ を(7)式に示し、潜熱回収型ガス給湯器の1次エネルギー効率 η_{CGWH1} を(8)式に示す。また、CO₂ヒートポンプ給湯機の1次エネルギー効率 η_{CO2HP1} を(9)式に示す。

1次エネルギー効率の季節変動を図9に示す。年間1次エネルギー効率は、住宅AのGE-CGSが0.87と最も高い値であり、住宅DのCO₂ヒートポンプ給湯機が0.49と最も低い値である。そして、季節毎の1次エネルギー効率は、住宅DにおけるCO₂ヒートポンプ給湯機の2年目の夏期が1.10と最も高い。

また、全ての給湯設備において冬期の1次エネルギー効率が最も低い、計測対象住宅の中では住宅AのGE-CGSの0.85が最も高い値である。

6. 1. 2 2次エネルギー効率の算出

GE-CGSの2次エネルギー効率 $\eta_{GE-CGS2}$ を(10)式に示し、潜熱回収型ガス給湯器の2次エネルギー効率 η_{CGWH2} を(11)式に示す。またCO₂ヒートポンプ給湯機の2次エネルギー効率 η_{CO2HP2} を(12)式に示す。

2次エネルギー効率の季節変動を図10に示す。住宅A及びBにおけるGE-CGSの2次エネルギー効率は季節変動が小さく、年間では0.63~0.65である。また、CO₂ヒートポンプ給湯機の年間2次エネルギー効率は1.33~1.89である。

6. 2 GE-CGSと潜熱回収型ガス給湯器の1次エネルギー効率

6. 2. 1 住宅BのGE-CGSと潜熱回収型ガス給湯器における

1次エネルギー効率の比較

住宅BのGE-CGSと潜熱回収型ガス給湯器の1次エネルギー効率について、夏期・中間期・冬期・年間で有意水準5%の母平均の差の検定¹⁰⁾を行う。夏期・中間期・年間のエネルギー効率には差がみられ、冬期の1次エネルギー効率には差があるとはいえない。

6. 2. 2 住宅Bにおける給湯設備の熱出力及び電力出力の合計

熱量と給湯設備の全エネルギー消費量との関係

住宅BのGE-CGS及び潜熱回収型ガス給湯器の運転期間を給湯のみ出力している期間と、給湯と暖房を出力している期間に分類する。そして、それぞれの期間におけるGE-CGS及び潜熱回収型ガス給湯器の熱出力及び電力出力の合計熱量と給湯設備の全エネルギー消費量との関係を図11に示す。熱出力及び電力出力の合計熱量とは、GE-CGSの場合は熱出力と電力出力の合計出力を表しており、潜熱回収型ガス給湯器は熱出力のみを表している。また、給湯設備の全エネルギー消費量とは、給湯設備のガス消費量のエネルギー換算値と電力消費量の1次エネルギー換算値の合計を表している。

給湯のみ出力している期間において①のGE-CGSの回帰直線と②の潜熱回収型ガス給湯器の回帰直線は、熱出力及び電力出力の合計熱量が正の範囲で交わることはない。しかし、給湯と暖房を出力している期間における③のGE-CGSの回帰直線は、④の潜熱回収型ガス給湯器の回帰直線と熱出力及び電力出力の合計熱量が98.52MJの点で交わる。これは、熱出力及び電力出力の合計熱量が98.52MJ/日を超えると潜熱回収型ガス給湯器の効率をGE-CGSが上回ることを表している。

エネルギー効率の算出

1 エネルギー効率の算出式

$$\eta_{GE-CGS1} = \frac{Q_{hw} + Q_{sp} + W_{GE-CGS,house} \cdot c}{(G_{GE-CGS} + G_{BUB}) \cdot a + W_{GE-CGSAUX} \cdot c} \quad \dots (7)$$

$$\eta_{CGWH1} = \frac{Q_{hw} + Q_{sp}}{G_{CGWH} \cdot a + W_{CGWHAUX} \cdot c} \quad \dots (8)$$

$$\eta_{CO2HP1} = \frac{Q_{hw}}{W_{CO2HP} \cdot c} \quad \dots (9)$$

2 次エネルギー効率の算出式

$$\eta_{GE-CGS2} = \frac{Q_{hw} + Q_{sp} + W_{GE-CGS,house} \cdot b}{(G_{GE-CGS} + G_{BUB}) \cdot a + W_{GE-CGSAUX} \cdot b} \quad \dots (10)$$

$$\eta_{CGWH2} = \frac{Q_{hw} + Q_{sp}}{G_{CGWH} \cdot a + W_{CGWHAUX} \cdot b} \quad \dots (11)$$

$$\eta_{CO2HP2} = \frac{Q_{hw}}{W_{CO2HP} \cdot b} \quad \dots (12)$$

$$a = 43.14^{10)} \quad b = 3.6^{11)} \quad c = 9.76^{11)}$$

図9 1次エネルギー効率の季節変動

図10 2次エネルギー効率の季節変動

図11 住宅BのGE-CGS及び潜熱回収型ガス給湯器における熱出力及び電力出力の合計熱量と給湯設備の全エネルギー消費量との関係

6. 3 GE-CGS の 1 次エネルギー効率における効率性の検討

6. 3. 1 1 次エネルギー効率と日平均外気温度との関係

住宅 A 及び B の GE-CGS における 1 次エネルギー効率と日平均外気温度との関係を図 12 に示す。住宅 A 及び B の 1 次エネルギー効率について母分散の比の検定を有意水準 5% で行う¹²⁾。住宅 A 及び B の 1 次エネルギー効率の分散に差があるとはいえない。住宅 A 及び B の 1 次エネルギー効率を同一母集団からの標本として扱う。GE-CGS の 1 次エネルギー効率と日平均外気温度の相関係数は 0.21 と小さい。また、1 日の中で貯湯を使いきらずに翌日へ繰り越した場合、繰り越した当日の 1 次エネルギー効率は低くなるが、翌日の 1 次エネルギー効率は繰り越した貯湯を使用できるため高くなり、見かけ上 1.0 以上の値がみられる。

6. 3. 2 1 次エネルギー効率と家庭内消費電力割合との関係

住宅 A 及び B の GE-CGS における 1 次エネルギー効率と家庭内消費電力割合との関係を図 13 に示す。

GE-CGS の 1 次エネルギー効率と家庭内消費電力割合の相関係数は 0.54 と正の相関がみられる。住宅 A における GE-CGS の家庭内消費電力割合は、住宅 B に対して高い値であることから、住宅 A の GE-CGS は高効率で稼働していたと考える。

6. 3. 3 1 次エネルギー効率の重回帰分析

GE-CGS の 1 次エネルギー効率を目的変数にとり、日平均外気温度及び家庭内消費電力割合を説明変数として重回帰分析を行う。分析方法は、ステップワイズ法を用いる。GE-CGS の 1 次エネルギー効率に対する重回帰式を表 9 に示す。そして、分析結果を表 10 に示す。算出した重回帰式の重相関係数は 0.64 であり、決定係数は 0.41 である。また、家庭内消費電力割合の標準化係数は日平均外気温度の標準化係数より高い。GE-CGS の 1 次エネルギー効率の効率性として、外気温度によるエネルギー効率への影響は小さく、家庭内消費電力割合の影響が大きいと考える。

6. 4 潜熱回収型ガス給湯器における効率性の検討

6. 4. 1 1 次エネルギー効率と日平均外気温度との関係

住宅 B 及び C の潜熱回収型ガス給湯器の 1 次エネルギー効率と日平均外気温度との関係を図 14 に示す。潜熱回収型ガス給湯器の 1 次エネルギー効率と日平均外気温度との関係には、二次多項式の当てはまりが良く、相関係数は 0.78 と強い負の相関がみられる。GE-CGS の 1 次エネルギー効率と日平均外気温度との相関係数は小さい値であるが、潜熱回収型ガス給湯器と日平均外気温度との相関係数は大きいことが明らかとなった。

6. 4. 2 1 次エネルギー効率と給湯設備の電力消費量の関係

住宅 B 及び C の潜熱回収型ガス給湯器の 1 次エネルギー効率と給湯設備の電力消費量との関係を図 15 に示す。潜熱回収型ガス給湯器の 1 次エネルギー効率と給湯設備の電力消費量との関係には、二次多項式の当てはまりが良く、相関係数は -0.80 と強い負の相関がみられる。これは、外気温度が低下した際に、給湯設備に内蔵された凍結防止ヒータの電力消費量が増大したことによるものとする。

6. 5 CO₂ ヒートポンプ給湯機における効率性の検討

6. 5. 1 タンク効率

残湯・ヒートロスの影響を評価する指標として、湯張り負荷、足し湯負荷、追い焚き負荷、給湯負荷の合計熱量をヒートポンプに

図 12 GE-CGS の 1 次エネルギー効率と日平均外気温度との関係

図 13 GE-CGS の 1 次エネルギー効率と家庭内消費電力割合との関係

表 9 GE-CGS の 1 次エネルギー効率の重回帰式

重回帰式	$Y = 3.60 \times 10^{-3} X_1 + 0.41 X_2 + 0.47$		
変数	Y: エネルギー効率 X_1 : 日平均外気温度 X_2 : 家庭内消費電力割合		

表 10 GE-CGS の 1 次エネルギー効率の重回帰分析結果

重相関係数: R	決定係数: R ²	調整済み R ²	推定値の標準誤差	データ数
0.64	0.41	0.41	0.07	583

説明変数	非標準化係数	標準化係数	t 値
日平均外気温度	3.60×10^{-3}	0.358	10.9
家庭内消費電力割合	0.410	0.621	18.9
定数	0.470		25.1

図 14 潜熱回収型ガス給湯器の

1 次エネルギー効率と日平均外気温度との関係

図 15 潜熱回収型ガス給湯器の

1 次エネルギー効率と給湯設備の電力消費量との関係

よる生産熱量で除したタンク効率を用いる。タンク効率の季節変動を図 16 に示す。住宅 C の場合は、夏期から冬期にかけてタンク効率が増加しているが、住宅 D の場合は増加していない。

よって、住宅Cでは、冬期において給湯負荷が増加したため、タンク内の残湯が減少していたが、住宅Dでは冬期においてもタンク内の残湯が多く、タンク効率が増加していない。また、住宅Dの2年目の夏期におけるタンク効率は、運転モードの設定変更を行ったことによって1年目の0.53から0.77に増大している。

6. 5. 2 1次エネルギー効率とタンク効率との関係

夏期におけるHP稼働時平均出湯温度別の1次エネルギー効率とタンク効率との関係を図17に示す。HP稼働時平均出湯温度とは、ヒートポンプユニットからの出湯温度の平均値を表している。また、図において1日の中で貯湯を使いきらずに翌日へ繰り越した場合、繰り越した当日のタンク効率は低くなるが、翌日のタンク効率は高くなり、見かけ上1.0以上の値がみられる。住宅Cの夏期における1次エネルギー効率とタンク効率には、相関係数0.90の強い正の相関がみられる。また、住宅Dの1年目及び2年目の夏期における1次エネルギー効率とタンク効率には、共に強い正の相関がみられる。住宅Dの2年目の夏期における運転モードの設定変更を行った③の期間は、HP稼働時平均出湯温度が60℃以上65℃以下の範囲となり、エネルギー効率が増加している。住宅Dの2年目の夏期におけるHP稼働時平均出湯温度が1年目に対して低下したことにより、タンク内の残湯を減少させ、1次エネルギー効率が増加したと考える。

7. まとめ

本研究では、寒冷地の戸建住宅における給湯設備を高効率で利用するために、GE-CGS、潜熱回収型ガス給湯器、CO₂ヒートポンプ給湯機の3機種を対象に実測調査を行った。そして、エネルギー効率を算出し、給湯設備毎に効率性の検討を行った。

・年間1次エネルギー効率は、住宅AのGE-CGSが最も高く、住宅DのCO₂ヒートポンプ給湯機が最も低い結果である。冬期のエネルギー効率についても、住宅Aが0.85と高効率で稼働していた。よって、住宅AのGE-CGSが最も高効率で利用できたと考える。

・住宅BにおいてGE-CGSと潜熱回収型ガス給湯器の1次エネルギー効率の比較を行い、冬期には差があるとはいえないことを明らかにした。また、GE-CGSの1次エネルギー効率は、日平均外気温度による影響が小さく、家庭内消費電力割合の影響が強いことを明らかにした。よって、外気温度が低下する寒冷地においては、他の機種に対してGE-CGSは高効率で稼働することができると考える。しかし、発電した電力を家庭で有効に消費できないと、潜熱回収型ガス給湯器の方が高効率で稼働すると考える。

・CO₂ヒートポンプ給湯機の実測によって、夏期においてもエネルギー効率は低下してしまうことが明らかとなった。住宅Dの夏期においてタンク効率が低下していたことから、タンク内の残湯が多いことが明らかとなった。タンク内の残湯が夏期における効率低下の要因となっていたと考える。また、夏期の効率低下は運転モードの変更によって、対処できることを明らかにした。よって、寒冷地において給湯需要が低下する夏期には運転モードを「少なめ」に変更し、残湯を減らす対処を行うことが高効率利用となる。

今後は、実用化段階に達した家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの実住宅における実測調査を行い、本研究で調査を行った3機種を含め、寒冷地における高効率給湯設備の効率性及び省エネルギー性についてさらに分析を行っていく。

図16 タンク効率の季節変動

図17 夏期におけるHP稼働時平均出湯温度別の1次エネルギー効率とタンク効率との関係

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁: エネルギー白書 2009 年度版, 経済産業省資源エネルギー庁ホームページ, 2009-8-29, <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2009energyhtml/index2009.htm> (参照 2011-01-28).
- 2) 久保田敏史 他 3 名: 寒冷地における潜熱回収型ガス給湯器と CO₂ ヒートポンプ給湯機の年間効率に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 16 巻, 第 32 号, pp. 201-204, 2010. 2
- 3) 小澤明也 他 5 名: 寒冷地における家庭用ガスエンジンコージェネレーションシステムの運用時性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2 分冊, pp. 1431-1432, 2010.
- 4) 財団法人建築環境・省エネルギー機構: 住宅事業建築主の判断の基準, 財団法人建築環境・省エネルギー機構, 2009-4, <http://ees.ibec.or.jp/index.php> (参照 2011-04-20).
- 5) 清水康成 他 5 名: 住宅用貯湯式給湯システムの機器稼働実態と性能評価に関する研究 (その 10) 家庭用ガスエンジン・コージェネレーションシステムの年間実測結果の解析, 第 25 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 223-226, 2009.
- 6) 木谷健一 他 4 名: 家庭用ガスエンジン・コージェネレーションシステムの特性分析, 第 25 回エネルギー資源学会研究発表会講演論文集, pp. 269-272, 2006. 6.
- 7) 中濱諒他 3 名: 新時代の省エネ型給湯設備の計画・評価手法に関する研究 第 5 報 実住戸における湯消費の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp. 889-890, 2009. 8
- 8) 高田宏 他 5 名: 住宅における CO₂ ヒートポンプ給湯機の使用実態とその評価に関する研究 (その 6) 年間データによる CO₂ ヒートポンプ給湯機の稼働実態, 第 26 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文要旨集, pp. 173-176, 2007. 6
- 9) 前真之 他 2 名: 多様な家族構成を対象とした住宅の給湯消費実態に関する実測調査 その 1) 世帯人数別の湯消費量, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp. 573-574, 2007. 8
- 10) 東京ガス株式会社: 都市ガスの CO₂ 排出係数, 東京ガスホームページ, 2010-10-1, <http://www.tokyo-gas.co.jp/env/gas/category08.html> (参照 2011-01-28).

- 11) 経済産業省: エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則,
2010-3-19, 経済産業省ホームページ,
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S54/S54F03801000074.html>
(参照 2011-01-28).
- 12) 小森尚志 他 3 名: 統計学の基礎と演習, 東海大学出版会, 2006. 7

記号表

Q_{hw} : 湯張り負荷、足し湯負荷、追い焚き負荷、給湯負荷の合計熱量 $[MJ/日]$

Q_{bath} : 湯張り負荷 $[MJ/日]$

Q_{rh} : 追い焚き負荷 $[MJ/日]$

Q_G : 排熱・ヒータ回収熱量 $[MJ/日]$

Q_{sp} : 床暖房及び浴室暖房乾燥機の合計放熱量 $[MJ/日]$

Q_{HP} : ヒートポンプ生産熱量 $[MJ/日]$

G_{GE} : ガスエンジンガス消費量 $[m^3/日]$

G_{BUB} : 補助ボイラガス消費量 $[m^3/日]$

G_{CGWH} : 潜熱回収型ガス給湯器ガス消費量 $[m^3/日]$

$W_{GE-CGS,house}$: 家庭内消費電力量 $(GE - CGS) [kWh/日]$

$W_{PVS,house}$: 家庭内消費電力量 $(PVS) [kWh/日]$

$W_{GE-CGS,total}$: $GE - CGS$ 総発電量 $[kWh/日]$

W_{pe} : 購入電力量 $[kWh/日]$

W_{HP} : ヒートポンプ稼働時電力消費量 $[kWh/日]$

W_{df} : 除霜運転時電力消費量 $[kWh/日]$

$W_{GE-CGSAUXS}$: $GE - CGS$ 電力消費量 $[kWh/日]$

$W_{CGWHAUXS}$: 潜熱回収型ガス給湯器電力消費量 $[kWh/日]$

W_{CO_2HP} : CO_2 ヒートポンプ給湯機電力消費量 $[kWh/日]$

R_{rh} : 追い焚き負荷割合 [%]

$R_{gcr,case1}$: 発電寄与率 $(GE - CGS + PVS) [%]$

$R_{gcr,case1r}$: 発電寄与率 $(GE - CGS) [%]$

$R_{gcr,case2}$: 発電寄与率 $(GE - CGS) [%]$

$R_{GE-CGS,house}$: 家庭内消費電力割合 [%]

η_{epg} : 発電利用効率 [-]

η_{eer} : 排熱・ヒータ回収効率 [-]

$\eta_{GE-CGSunit}$: $GE - CGS$ ユニット総合効率 [-]

$\eta_{GE-CGS1}, \eta_{GE-CGS2}$: $GE - CGS$ のエネルギー効率 [-]

$\eta_{CGWH1}, \eta_{CGWH2}$: 潜熱回収型ガス給湯器のエネルギー効率 [-]

$\eta_{CO_2HP1}, \eta_{CO_2HP2}$: CO_2 ヒートポンプ給湯機のエネルギー効率 [-]

a: 都市ガス(天然ガス)のエネルギー換算値 $(HHV) [MJ/m^3]$

b: 電力の 2 次エネルギー換算値 $[MJ/kWh]$

c: 電力の 1 次エネルギー換算値 $[MJ/kWh]$

s: クーラントの比熱 $[J/kg \cdot K]$

h: 発電時間 $[時間/日]$

T_{HPout} : HP 稼働時平均出湯温度 $[^{\circ}C]$

T_{HPin} : HP 稼働時平均入水温度 $[^{\circ}C]$

(2011年2月8日原稿受理, 2011年7月12日採用決定)