

Short Report

断熱住宅に適用された地中熱ヒートポンプ空調システムの エネルギー効率に関する実証的研究

長谷川兼一¹, 松田芳輝², 竹内仁哉¹, 松本真一¹

¹ 秋田県立大学システム科学技術学部建築環境システム学科

² 株式会社 竹中工務店

地中熱ヒートポンプ空調システム（GSHP）は、建築物への地中熱利用手法の一つであるが、大規模な建築物に採用されることが多く、住宅への適用例は少ない。秋田県は地中熱に地の利を見出すことができるため、住宅でも GSHP を積極的に利用すること意義あることといえる。本研究グループでは、県内の GSHP を導入している住宅数件を対象とした現場測定を継続し省エネルギー性能を評価したが、居住状態での運用要用の影響を強く受けることもあり、所期の性能（成績係数 COP）が十分に発揮されていないことを確認した。そこで、本学構内の秋田スギ実験棟の試験室二室に GSHP を新規に設置し、送水温度や放熱器の稼働台数を変更するなど、運転方法を変化させる暖冷房実験を行った。実験により、GSHP のエネルギー消費効率を向上させる最適な運転方法を探った。その結果、COP の変動には負荷率や送水温度が大きく関係していることがわかった。この知見を実住宅に適用すれば、エネルギー効率を高く維持した運転の実現に期待できる。

キーワード：地中熱利用，地中熱ヒートポンプ空調システム，戸建住宅，省エネルギー，実大実験，実測調査

東北地方の日本海側地域では、地中熱のポテンシャルが高く再生可能エネルギーとしての活用が期待され、筆者らの分析結果によると、秋田での地中熱利用の優位性が示されている。

本研究で注目している地中熱ヒートポンプ空調システム（以降、GSHP）は、建築物への地中熱の利用手法の一つであるが、大規模な建築物に採用されることが多い。一方、住宅への適用例は少なく、省エネルギー性能を適切に評価した研究例も極めて少ない。秋田県の強みを活かすことを勘案すれば、住宅においても GSHP を積極的に利用することは、地の利を生かした環境建築の普及に展開することができ、たいへん意義深い。

申請者の研究グループでは、これまでに県内の GSHP を導入している住宅数件を対象とした現場測定を継続し省エネルギー性能を評価している。しか

しながら、居住者の住まい方の影響を強く受けることもあり、所期の性能（成績係数 COP）が十分に発揮されておらず、エネルギー効率が低い状態で運用されている実態を把握している。幸いにも、本学構内に建設されている秋田スギ実験棟の試験室二室に GSHP を新規に設置（H30 年 2 月下旬竣工予定）する機会を得た。そこで、本研究では、GSHP の送水温度や放熱器の稼働台数を変更するなど、運転方法を変化させる暖冷房実験を行い、エネルギー消費効率が定格値を下回った原因を探るとともに、GSHP の最適な運転方法を探ることを目的とする。

実験環境の概要

実大実験家屋の概要

図 1 に実大試験家屋の一階平面図と測定点を示す。

また、表 1 に実大試験家屋の概要を示す。

試験家屋の一階は、比較対照実験を可能とするため、規模や断熱・気密性能を同一仕様とした試験室二室（西側 A 室，東側 B 室）と、玄関ホール，機械室から構成されている。試験室二室は、両室ともに第一種換気方式を採用している。北側壁面にヒートポンプ式エアコンと GSHP の放熱器（以降，FCU：写真 2）が設置されており，機械室には GSHP 本体（写真 1）が設置されている。

実大試験家屋外の北西の部分には採熱設備として U 字状の熱伝導性の高いチューブが地中深さ 100m 地点まで 1 本埋設されている。実験期間中は各室の入口ドアは閉鎖し，南北面の窓にはカーテンなどの日射遮蔽物は施されていない。各試験室の断熱性能は，平成 25 年に改正された基準である外皮平均熱貫流率 U_A 値で $0.41\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ となり，対象家屋が位置する 4 地域の基準値 $0.75\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を満たしている。各試験室の気密性能を表す相当隙間面積 (C 値) は，複数の計測値を平均すると $1.64\text{cm}^2/\text{m}^2$ である。

GSHP の概要

GSHP は地中から熱を汲み上げ，空調の熱源として利用する空調システムである。地中は 10m 以深では年間を通して温度が安定するといわれており，この熱源を利用することで空調設備を高効率で稼働させることが可能となる。地中から採放熱するために地下約 100m 地点まで熱伝導性の高い U 字状のチューブを埋設し，そこに不凍液（プライン）を循環させることによって熱エネルギーを得る。エネルギー消費効率の評価指標には COP^{注2}が主に用いられる。COP とは，空調設備のエネルギー消費効率を表す指標で，暖冷房出力（以降，二次側出力^{注1}）をヒートポンプ消費電力で除した値である。

本報における GSHP 消費電力の計測値は採熱側と暖冷房側の搬送ポンプの消費電力を含んだ値であるため，GSHP 消費電力から採熱側と暖冷房側の搬送ポンプ消費電力を除くことでヒートポンプ消費電力を算出している。GSHP に循環する不凍液は，地中熱の採熱側（一次側）にエチレングリコール，室内の暖冷房側（二次側）にプロピレングリコールを希

釈したものを用いている。

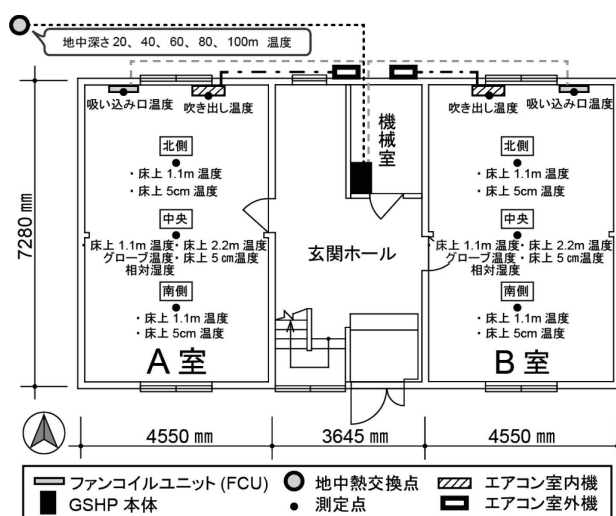


図 1 実大試験家屋の平面図と測定点



写真 1 GSHP 本体（左）と FCU（右）

表 1 実大試験家屋の概要

竣工	2003年3月		
構造	木造2階建		
試験家屋	面積	建築面積	115.9 m ²
		延床面積	176.6 m ²
		1F床面積	92.8 m ²
		2F床面積	83.8 m ²
		試験室(A,B室)床面積	33.1 m ²
	各試験室容積	89.4 m ³	
	各室の隙間相当面積(C値)	1.6~1.8cm ² /m ²	
	各室の外皮平均熱貫流率(U _A 値)	0.41W/(m ² ·K)	
GSHP	冷房	能力	5.4 kW
		定格消費電力	1.49 kW
	暖房	能力	5.5 kW
		定格消費電力	1.49 kW
	定格COP	4.2	
FCU	冷房	能力	1.85 kW
		定格消費電力	33 W
	暖房	能力	3.1 kW
		定格消費電力	33 W

実大試験家屋を対象とした暖冷房実験

実験の概要

表 2 に暖冷房実験の実験条件を示す。冬季の暖房実験では送水温度を 35~60℃の範囲を 5℃間隔で変更して運転する。さらに，放熱器の FCU を 1 台稼働

する場合と2台稼働する場合に分けて運転し、得られたエネルギー消費効率 COP を評価する。FCU を1室に1台だけ稼働させる実験条件の場合はもう一方の試験室でエアコンによる暖房をすることでエアコンの消費電力と比較をできるようにしている。冷房実験も暖房実験と同様に放熱器のFCUを1台稼働する場合と2台稼働する場合に分けて運転し、常時内部発熱 600W（電気ヒーターにて加熱）の状況下で送水温度 7℃と 14℃の場合に分けて実施した。

表 2 暖冷房実験の条件

暖房	室	空調機	送水温度設定	室内温度設定
実験1	A室	エアコン		22℃
	B室	GSHP	35℃	
実験2	A室	GSHP	35℃	
	B室	GSHP	35℃	
実験3	A室	エアコン		
	B室	GSHP	40℃	
実験4	A室	GSHP	40℃	
	B室	GSHP	40℃	
実験5	A室	エアコン		
	B室	GSHP	45℃	
実験6	A室	GSHP	45℃	22℃
実験7	A室	エアコン		
実験8	A室	GSHP	50℃	
	B室	GSHP	50℃	
実験9	A室	エアコン		
	B室	GSHP	55℃	
実験10	A室	エアコン		
	B室	GSHP	60℃	

冷房	室	空調機	送水温度設定	室内温度設定
実験1	A室	エアコン		25℃
	B室	GSHP	7℃	
実験2	A室	GSHP	7℃	
	B室	GSHP	7℃	
実験3	A室	エアコン		25℃
	B室	GSHP	14℃	
実験4	A室	GSHP	14℃	
	B室	GSHP	14℃	

実験の結果

図2に暖房実験における COP と負荷率^{注3)}の関係、図3に冷房実験における COP と負荷率の関係を示す。図3、4より、暖房では送水温度が低いほど COP が高く、冷房の場合は送水温度が高いほど COP が高い傾向が見られた。また、放熱器の台数が多いほど負荷率が上がり、暖房の場合は送水温度が 35～40℃までは COP の変化はなく、送水が 45℃以上となると負荷率が上昇するとともに COP はやや減少している。冷房の場合、FCU1 台稼働 14℃送水した時の平均 COP は 6.5、FCU が 2 台になると平均 COP は 6.9 となり、負荷率の上昇とともに COP はやや上昇傾向が見られた。

GSHP を備えた戸建住宅の長期実測

住宅の概要

表3に長期実測の対象住宅の概要を示す。対象は秋田県能代市内に建設されている戸建住宅である。暖房は主に温水パネルで行い、冷房はFCUを使用し

ている。温水パネルは各部室に取り付けられており、温水パネルに付属しているバルブを回すことによってパネル内の流量を調整し、室温を調節することができる。採熱設備は、実大試験家屋における採熱設備と同様であり、U字状のチューブが地中深さ 100 m地点まで1本埋設されている。

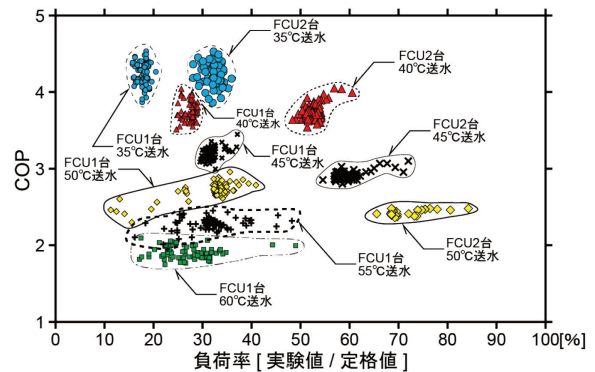


図2 暖房実験の COP と負荷率の関係

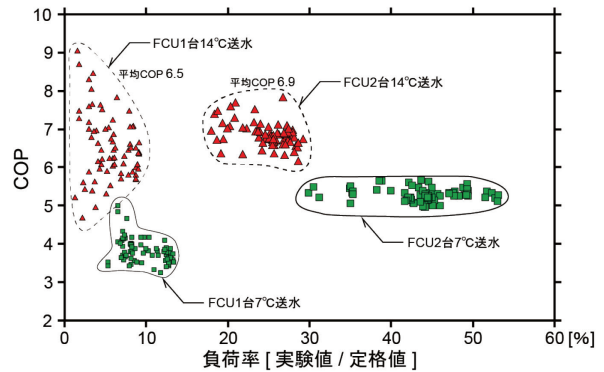


図3 冷房実験の COP と負荷率の関係

GSHP のエネルギー消費量

図4に、2017年と2018年の対象住宅と秋田県の一般住宅における統計値(住環境計画研究所(2012))による床面積(総務省統計局(2014))当たりのエネルギー消費量(二次換算)を示す。対象住宅においては2017年と2018年の消費量に大きな差は見られない。対象住宅の消費量は全体で統計値の0.62倍、空調のみでは0.40倍程度となっており、GSHPによる省エネルギー効果が見て取れる。

夏季における運転状況

図5に2018年の冷房期における COP と HP 消費電力の変動を示す。対象住宅のGSHPにおける定格

冷房 COP は 3.2 であるが，2017~2018 年度の冷房期の COP は 2.3~3.6 程度となっており，定格値に近い状態で運転をしている。

冬季における運転状況

図 6 に 2017 年度の暖房期における COP と HP 消費電力の変動を示す。対象住宅の GSHP における定格暖房 COP は 3.7 であるが，11 月下旬頃から定格を下回る運転をしており，運転方法の改善の余地が見られた。

暖房期の COP と採熱側往還温度の関係

図 7 に 2017 年度暖房期における COP と採熱側往還温度の関係を示す。採熱側往還温度は HP が稼働している時間帯の値を 1 時間単位で平均したものをを用いている。図より，往還温度差が常に 3℃程度であることから，期間を通じて地中から 3℃程度採熱できていることが確認できる。また，COP が減少する場合には，行き温度ならびに還り温度とも下がっていることが確認でき，この原因として居住者が暖房側の送水温度を高く変更したことが大きく影響していると考えられる。

暖房期の COP と負荷率の関係

暖冷房実験結果より，COP の変動には送水温度設定が大きく関わるということがわかったため，2017 年度の暖房期における二次側送水温度と COP の変動に着目した（図 8）。図における二次側送水温度は日平均したものであり，HP が稼働していない時間帯の送水温度も平均値に含まれている。図より，11 月末頃から居住者が送水温度設定を高く変更したと考えられ，それとともに COP が定格 COP3.7 を下回る様子が確認された。

図 9 は，2017 年度の暖房期における居住者によって送水温度が変更されたと思われる 3 つの期間ごとに COP を分類し，負荷率との関係を示したものである。図より，送水温度を高くすれば負荷率は上昇するものの，送水温度が低い場合と比べて COP が向上しにくい傾向が見て取れる。また，この傾向は実験結果と比較的近い。

表 3 対象住宅の概要

所在地	秋田県能代市	
竣工	2015年12月	
構造	木造2階建	
住宅形式	戸建住宅	
家族構成	1階:祖母 2階:夫婦+子(3人)	
延床面積	241.0 m ²	
設備	給湯	自然冷媒(CO ₂)ヒートポンプ
	換気	第3種機械換気
	暖房	温水パネル
	冷房	ファンコイルユニット, 空冷式エアコン
GSHP	定格能力	暖房 10.0 kW 冷房 10.0 kW
	定格COP	暖房 3.7 冷房 3.2
断熱材	壁	フェノールフォーム1種2号:50 mm
	基礎	押出法ポリスチレンフォーム3種:30 mm
	天井・屋根	高性能グラスウール24K:150 mm
窓	サッシ	樹脂サッシ
	ガラス	Low-e複層ガラス
外皮平均熱貫流率(U ₀ 値) [W/(m ² ·K)]	設計値	基準値
	0.57	0.75

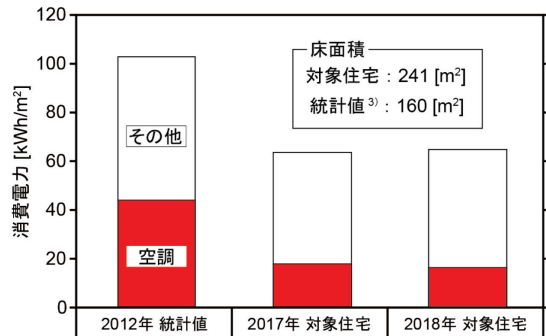


図 4 エネルギー消費量の比較

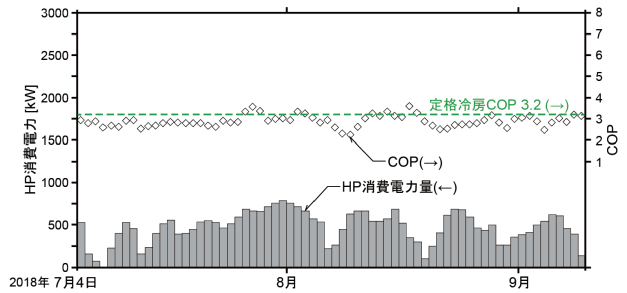


図 5 冷房期の COP とヒートポンプ消費電力の変動

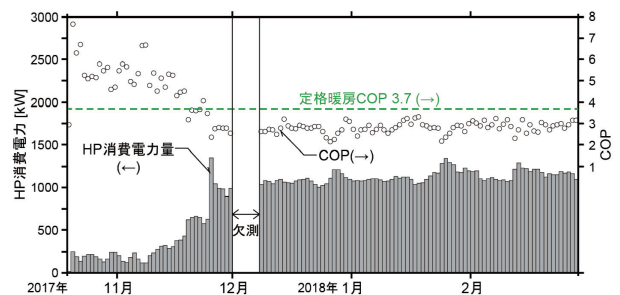


図 6 暖房期の COP とヒートポンプ消費電力の変動

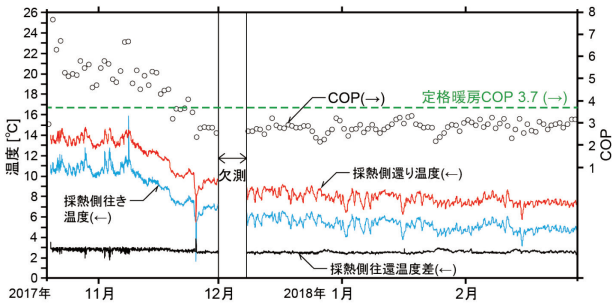


図7 暖房期の COP と採熱側往還温度の変動

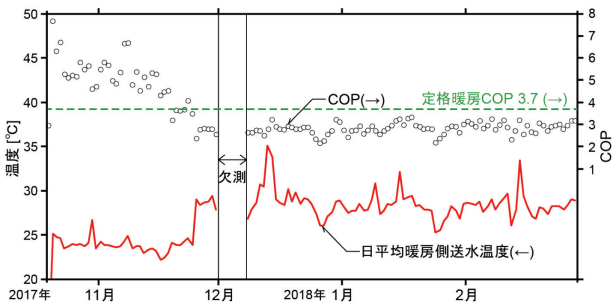


図8 暖房期の COP と暖房側送水温度の変動

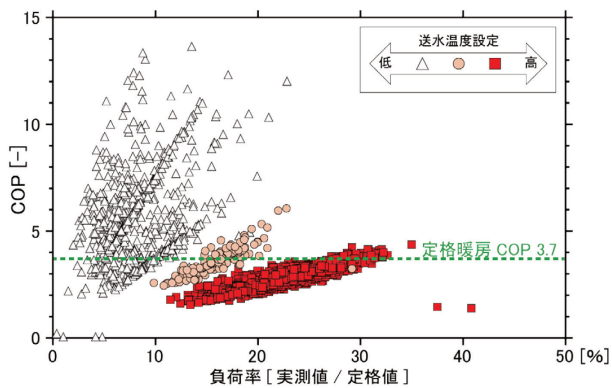


図9 暖房期の COP と負荷率の関係

まとめ

GSHP を備えた住宅において、冷房期の COP は定格に近く、暖房期は定格を下回ることを確認した。COP の変動には負荷率や送水温度が大きく関係しており、冷房の場合は送水温度が高いほど、暖房の場合は送水温度が低いほど定格 COP を満たすことができると実験より確認した。さらに、放熱器の台数が増加するほど負荷率が高くなる傾向も実験で確認できたため、実測住宅においては、負荷率を上昇させれば、COP がさらに向上することが期待される。今後は、実験により得られた成果を実測住宅に適

用し、より効果的な GSHP の運用方法に資する知見を蓄積する。

謝辞

本研究は、平成 30 年度 秋田県立大学・部局提案型研究推進事業の一環として研究補助を受けて実施している。実測調査を実施するにあたっては、対象住宅のご家族の皆様にご理解とご協力をいただきました。また、サンポット株式会社の関係各位には、多くの貴重なご助言をいただきました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。なお、実測調査の実施に対しては、秋田県立大学・研究倫理審査委員会の承認（受付番号倫第 15-16 号）を得ている。

文献

住環境計画研究所 (2012). 『家庭用エネルギー統計年報』. 住環境計画研究所.
 総務省統計局 (2014). 「平成 25 年度住宅・土地統計調査」総務省.

注

1 二次側出力を次の式で算出した。

$$Q_2 = |T_{2in} - T_{2out}| \cdot V_{b2} \cdot c_{b2} \cdot \rho_{b2}$$

T_{2in} : 温度[°C] T_{2out} : 還温度[°C]

V_{b2} : 流量[L/min] c_{b2} : 不凍液の比熱[kJ/kg · K]

ρ_{b2} : 不凍液の密度[kg/L] Q_2 : 出力[kW]

2 COP を次の式で算出した。 $COP = Q_2 / W_{HP}$

Q_2 : 出力[kW] W_{HP} : HP 消費電力[kW]

$$W_{HP} = W - (W_{P1} + W_{P2})$$

W : GSHP 消費電力[kW]

W_{P1} : 採熱側搬送ポンプ消費電力[kW]

W_{P2} : 暖冷房側搬送ポンプ消費電力[kW]

3 負荷率 η を次の式で算出した。 $\eta = Q_2 / Q \cdot 100$

Q_2 : 二次側出力[kW] Q : 定格暖冷房出力[kW]

〔 2019 年 6 月 30 日受付 〕
 〔 2019 年 7 月 9 日受理 〕

Empirical Study of the Energy Saving Performance of a Detached House with a Grand Source Heat Pump System

Kenichi Hasegawa¹, Yoshiaki Matsuda², Jinya Takeuchi¹, Shin-ichi Matsumoto¹

¹ *Department of Architecture and Environment System, Faculty of Science and Technology, Akita Prefectural University*

² *Takenaka Corporation*

A grand source heat pump system (GSHP) is an energy saving technology for space heating and cooling in large scale buildings. The authors think that GSHP could save home energy consumption in Akita. The energy consumed by space heating and cooling has been measured in several houses with GSHP in Noshiro city, Akita. The energy performance (COP) did not reach the expected GSHP performance. This paper described the outcomes of an experiment investigating spatial heating and cooling in a test house with GSHP. The test house was two story detached house at Honjyo campus where the temperature of two rooms on the first floor could be controlled using GSHP. Several experiments indicated that COP was associated with the supply temperature from GSHP to FCU in each room, and the loading factor indicated a secondary side output of GSHP / rated output of GSHP. Adjusting the supply temperature had a great effect on GSHP energy performance.

Keywords: Geothermal heat utilization, Grand source heat pump system, Detached house, Energy saving, Real scale test house, Field measurement