

# 真空断熱材と地中熱ヒートポンプシステムの導入による低コスト ZEH 化の検討 Investigation on low-cost net-zero energy houses by applying vacuum insulation panels and ground source heat pump systems

○鎌田 泰地\*<sup>1</sup> (北海道大学) 正会員 葛 隆生\*<sup>1</sup> (北海道大学) 正会員 長野 克則\*<sup>1</sup> (北海道大学)

Taichi KAMADA Takao KATSURA Katsunori NAGANO

\*1 Hokkaido University

The purpose of this study is evaluation of a house which applied vacuum insulation panels and ground source heat pump systems and simulating the initial cost of 3 types of heat loss coefficient. The way of evaluation is measuring indoor thermal environment, underground temperature and power consumption. The result for measuring, in January 20th, room temperature was kept to 20 degrees, but average PMV was -0.58 which was lower than ideal PMV range. GSHP performed average SCOP 3.5. It is 1.4 times higher than ASHP which assumed SCOP 2.5. As the result of simulating, heat loss coefficient 0.8 is the lowest cost ZEH. And walls of applying VIP was 1.2 times more expensive than not applying VIP. It is necessary to reduce the cost or improve thermal insulation properties of VIP.

## はじめに

地球温暖化や石油資源の枯渇等が世界的な問題となるなかで、家庭部門のエネルギー消費量を削減する方法の一つとしてネット・ゼロ・エネルギー・ハウス (ZEH) が推進されている一方、寒冷地では暖房負荷が大きいことから ZEH の実現が難しいという課題がある。その対策として挙げられるのが真空断熱材と地中熱ヒートポンプシステムである。本研究では、2019年12月に竣工した真空断熱材と地中熱ヒートポンプ適用の戸建住宅を対象として実測を行い、真空断熱材を適用した住宅の温熱環境と地中熱ヒートポンプの稼働状況を評価した。また、ZEH化におけるイニシャルコストのシミュレーションを実施した。

## 1. 建物概要

本住宅は建築面積 64m<sup>2</sup>、延床面積 120m<sup>2</sup> の木造 2階建戸建住宅で、居住者は夫婦 2人、子供 2人の計 4人である。

本住宅では ZEH 化を目指すための省エネ技術を導入しており、主に挙げられるのは外壁の内断熱として一部に適用した真空断熱材と地中熱ヒートポンプシステムである。断熱性能の高い真空断熱材を適用したため、外断熱材は通常よりも薄い 40mm としている。地中熱ヒートポンプシステムは二次側直膨方式・ダクト式暖冷房を採用しており、地中熱交換器はスパイラル型口径 400mmφ、3m×10本である。また、消費電力量をカバーする創エネ技術として発電容量 4.6kW、発電効率 21% の 20m<sup>2</sup> 太陽光パネルが適用されている。

断熱仕様から各外皮熱貫流率を計算すると外壁 0.0940W/(m<sup>2</sup>・K)、天井 0.115 W/(m<sup>2</sup>・K)、1階床 0.166 W/(m<sup>2</sup>・K) となり、窓の熱貫流率は 0.91 または 0.97W/(m<sup>2</sup>・K) である。ここで換気量を 120m<sup>3</sup>/h (0.40

回/h)、換気効率を 64.8% として熱損失係数 (Q 値) を計算すると 0.61 W/(m<sup>2</sup>・K) となった。

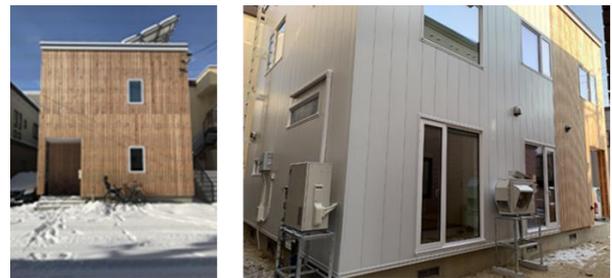


写真 1 住宅外観

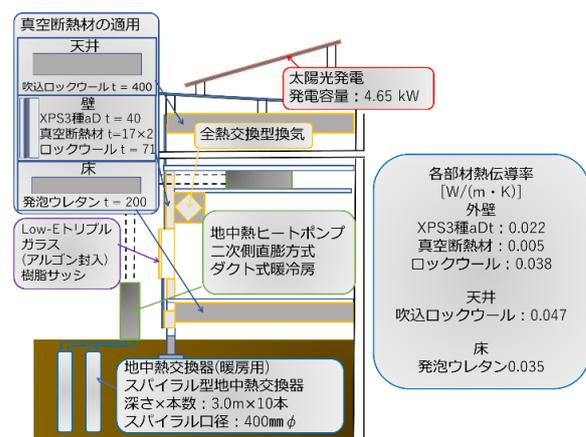


図 1 実測住宅概要

## 2. 室内温熱環境実測

### 2.1 実測概要

ZEH 化には省エネ性と合わせて居住者の快適性も求められる。2章には住宅の快適性に関する実測結果を示す。まず図 2 に住宅の平面図と計測点を示す。

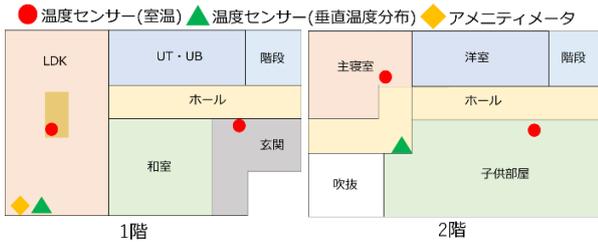


図2 実測住宅の平面図と計測点

2.2 室内温熱環境評価

1月20日を代表日として温熱環境に関する実測を行うと、結果は図3~6のようになった。図5より、代表日において室温は4点平均で18.9℃から20.1℃に保たれた一方で、PMVは-0.83から-0.35であった。望ましいとされるPMVの値が-0.5から0.5であるのに対して、1時間平均で24時間中22時間が-0.5以下であったことから、今回の計算条件では1階居間におけるPMVはやや低いことが分かった。続いて、1階と2階それぞれの垂直温度分布は以下のようになった。図3、図4より、2階ではいずれの高さでも一定の温度を保っているのに対し、1階では床面から10cmの高さにおいて他の高さよりも温度が低くなっていた。

この原因としては真空断熱材を適用したことによって外断熱が少なくなり、真空断熱材が適用されていない下部からの熱損失が大きくなったことが挙げられる。

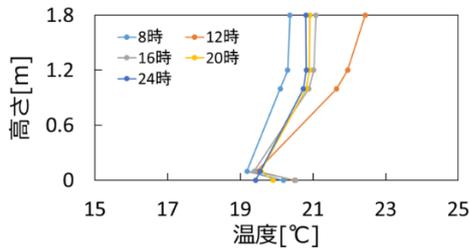


図3 垂直温度分布(1階)

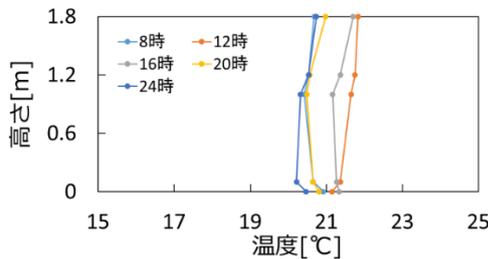


図4 垂直温度分布(2階)

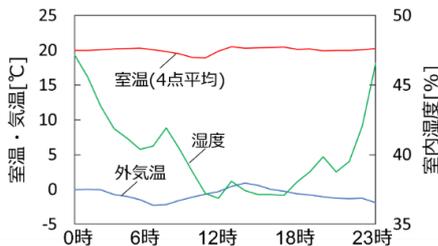


図5 室内温湿度、外気温変化(1月20日)

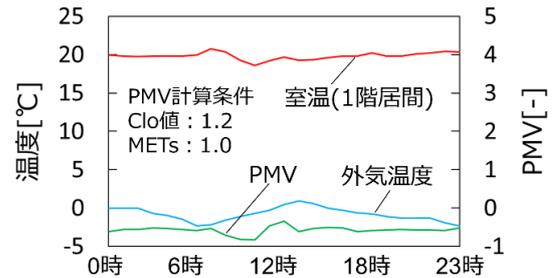


図6 室温、外気温、PMV(1月20日)

3. 地中熱ヒートポンプ運転実測

3.1 実測概要

本住宅には冷暖房用として地中熱ヒートポンプシステムを採用している。地中熱は年間を通して温度変動が小さいため、寒冷地において冬期の消費電力量削減が期待できる。以下に地中熱ヒートポンプシステムの計測点と地中熱交換器配置図を示す。

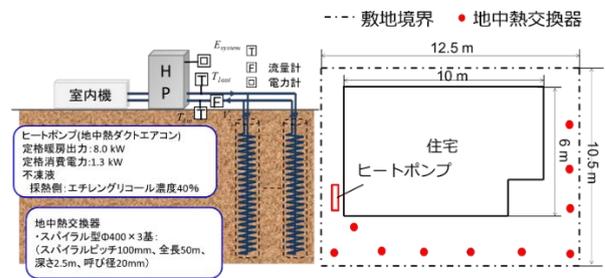


図7 地中熱ヒートポンプ計測点と地中熱交換器配置図

3.2 地中熱ヒートポンプ性能評価

代表日を1月20日として地中熱ヒートポンプに関する実測を行ったところ図8、図9のようになった。代表日において室温は20℃程度を維持していた一方で、午前10時の運転再開時に暖房出力が大きくなるとともにSCOPの低下が見られる時間帯があった。一方でそれ以外の出力が2kW前後の時間帯は4.0程度のSCOPが得られることが分かった。

続いて一定期間の運転状況について見たところ、表1、図10~12のようになった。測定期間を通して室温は20℃程度を維持し、一次側入口温度も日平均で-5℃以上を維持していた。また、SCOPは1月24日から5日程度低い日が続いたが、2月以降は特に寒冷であった2月9日、10日を除くとSCOPは3.5以上の安定した運転がなされていた。

表1 地中熱ヒートポンプの各期間における暖房出力、システム消費電力、GSHP消費電力、SCOP、COP

日平均値	1/20~2/12	1/20~1/31	2/1~2/12
暖房出力[kW]	2.10	2.05	2.15
システム消費電力[kW]	0.60	0.61	0.58
GSHP消費電力[kW]	0.56	0.57	0.56
SCOP	3.5	3.3	3.7
COP	3.7	3.6	3.9

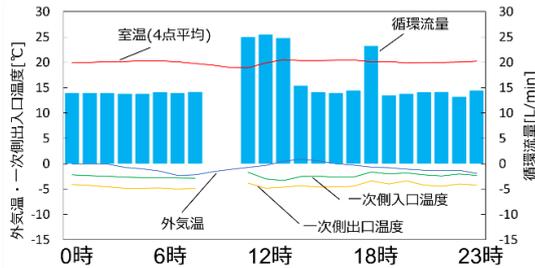


図8 室温、一次側出入口温度、外気温、循環流量の変化 (1月20日)

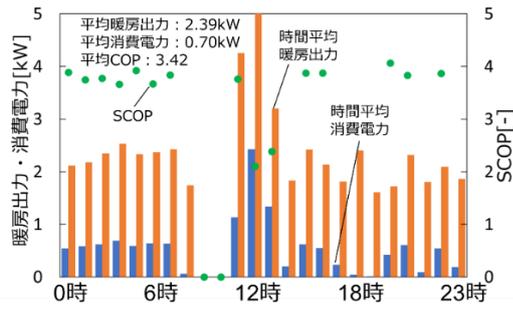


図9 暖房出力、消費電力、SCOPの変化 (1月20日)

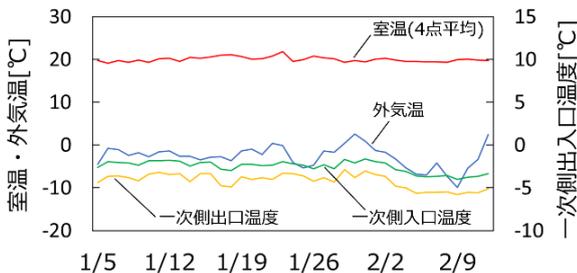


図10 室温、外気温、一次側出入口温度 (1月5日～2月12日)

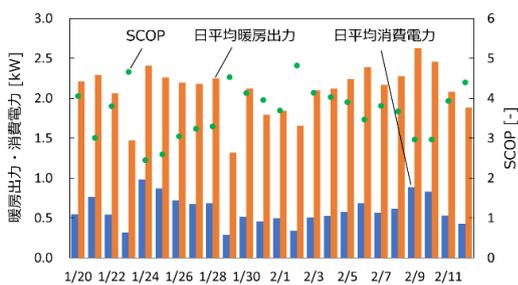


図11 暖房出力、消費電力、SCOPの変化 (1月20日～2月12日)

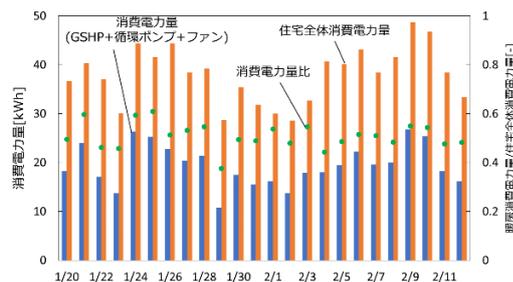


図12 住宅全体消費電力量、暖房消費電力量、消費電力量の比(1月20日～2月12日)

#### 4. ZEH 化イニシャルコストのシミュレーション

##### 4.1 シミュレーション概要

本研究では、実測住宅の図面と断熱仕様、札幌市の気象条件などをもとに AE-CAD による冷暖房負荷をシミュレーションし、求めた負荷から Ground Club (地中熱ヒートポンプ性能予測ツール) によってある条件下における地中熱ヒートポンプの運転状況や消費電力量等のシミュレーションを行った。

真空断熱材を用いない ZEH 基準住宅において外断熱材の厚さを 100mm、25mm、0mm に変えて AE-CAD によるシミュレーションを行うと、Q 値はそれぞれ 0.72、0.83、1.06 となった。ここではこれらの Q 値における住宅の断熱、地中熱ヒートポンプ、太陽光パネルにかかるコストを推定し、最適な Q 値を考える。

##### 4.2 各コストの比較

まず断熱コストについて調べると、Q 値 1.06、0.83、0.72 の断熱コストはそれぞれ 252.6 万円、278.2 万円、354.9 万円で外断熱材の厚さを増やすにつれ熱損失は減り、Q 値が減少する一方その分コストが増えた。

次に地中熱について見ると、結果は図 13、図 14 のようになった。Q 値の減少は暖房負荷、消費電力量の削減につながるため必要な地中熱交換器の本数は減少する。最低地中出口温度 $-5^{\circ}\text{C}$ 以上を最適とすると各 Q 値に対する地中熱交換器本数ごとの最低地中出口温度は図 13 のようになった。これより  $Q=1.06$ 、 $0.83$ 、 $0.72$  の最適地中熱交換器本数はそれぞれ 8 本、10 本、12 本となり、予想冷暖房年間消費電力量はそれぞれ 2208kWh、1592kWh、1282kWh となった。さらに給湯・その他の年間消費電力量について既往研究<sup>1)</sup>のシミュレーションから Q 値によらず 4000kWh とすると、 $Q=1.06$ 、 $0.83$ 、 $0.72$  の住宅全体の年間消費電力量はそれぞれ 6208kWh、5592kWh、5282kWh であった。ZEH 化には求めた年間消費電力量をカバーするだけの太陽光パネルが必要となる。

太陽光コストは、既往研究<sup>2)</sup>より喜茂別で行った実測結果において発電容量 4.0kW 太陽光パネルの単位面積当たり発電量が  $167.65\text{kWh}/\text{m}^2$  であったことから、発電容量 4.6kW 太陽光パネルの単位面積当たり発電量を  $192.79\text{kWh}$  とすると、単位面積当たりのパネルコストを 6 万 9000 円として Q 値に対する必要太陽光パネル面積は図 15 のようになった。

以上から合計イニシャルコストは図 16 のようになった。これより、合計イニシャルコストは Q 値 0.83 において最低の 749 万円となり、Q 値 1.06 よりも 39 万円安くなった。ZEH 化を実現するには従来の断熱技術では Q 値 0.8 程度が最適となったことから、断熱性の向上がイニシャルコストの削減につながる可能性が示された。

ここで、実測住宅外壁の設計熱貫流率を計算すると外壁全体で  $0.115\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$  となった。これは真空断熱材を使わない場合、外断熱材 130mm としたとき

の熱貫流率に等しい。真空断熱材を 4000 円/枚としたとき、実測住宅に 350 枚用いたとすると外壁の断熱施工にかかるコストは真空断熱材を用いた場合が 204.4 万円、用いなかった場合が 167.6 万円となり、真空断熱材を用いた方が低コストになるのは真空断熱材が 2900 円/枚の場合で計 165.9 万円だった。

これより、現状では真空断熱材を用いたほうが 36 万円以上高額になり、現在の性能でコストを下回するには 1 枚あたりの価格を 1100 円下げることが分かった。したがって、今後は性能向上や製造工程の効率化による真空断熱材のコスト低下が不可欠であると考えられる。

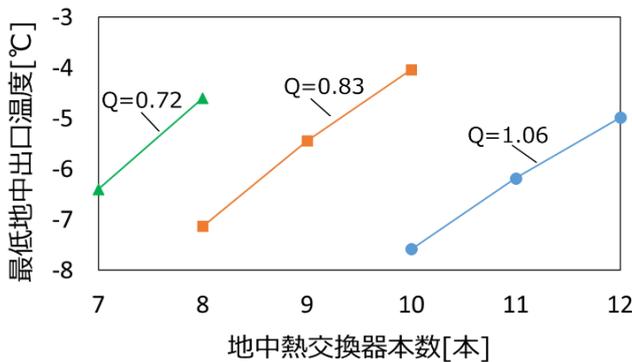


図 13 各 Q 値に対する地中熱交換器本数と最低地中出口温度

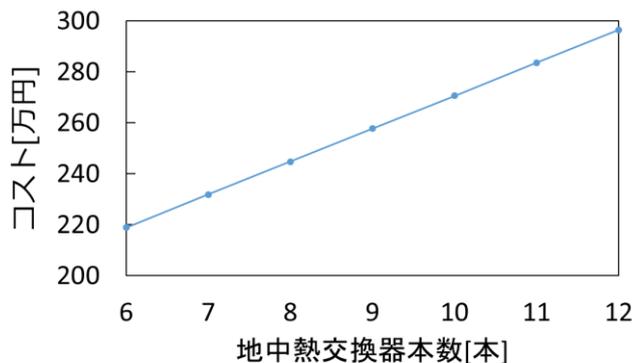


図 14 各地中熱交換器本数に対する地中熱トータルコスト

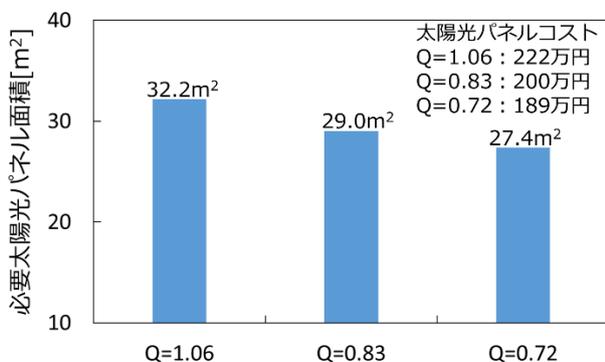


図 15 各 Q 値に対する必要太陽光発電面積

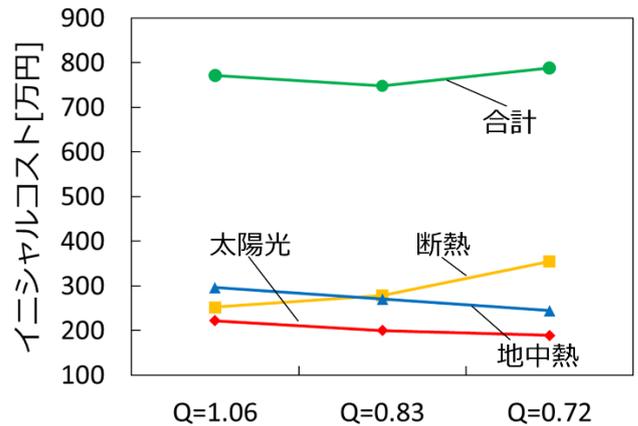


図 16 各 Q 値に対する合計イニシャルコスト

### 5 まとめ

真空断熱材と地中熱ヒートポンプシステムを導入した戸建住宅の実測から以下のことが分かった。

温熱環境については、室温が一定期間 20°C 程度に維持されていた一方で、1 階床面付近で温度が下がり、足元が冷えやすいなどの課題が見られた。

地中熱ヒートポンプの運転性能については、1 月 20 日から 2 月 12 日までの期間で平均 SCOP3.5 となり、冬季でも高い運転効率が見られた。1 月 24 日から 5 日程度は SCOP の低下が見られたが、2 月 1 日から 12 日までの期間では平均 SCOP3.7 と運転効率の改善が見られた。一方で暖房出力と室内外の気温差から求めた熱損失係数は 0.77 W/(m<sup>2</sup>・K)と、理論値である 0.61 W/(m<sup>2</sup>・K)より約 26%高く、断熱性は想定より低くなった。

ZEH 化のイニシャルコストについては、断熱性の向上による熱負荷の低減と地中熱ヒートポンプによる消費電力量の削減がイニシャルコストの低下につながる可能性があることが分かった。一方で、現状では真空断熱材を用いた場合のイニシャルコストは通常の外断熱材のみを用いたコストよりも高くなることから、今後は真空断熱材の改良による断熱性の向上と製造過程の自動化などによるコストの削減が必要であると考えられる。

### 謝辞

本研究の一部は八洲環境技術振興財団およびパワーアカデミー研究助成(研究代表者：葛隆生)によるものである。また、本研究を行うにあたって北海道電力株式会社、棟晶株式会社、サンポット株式会社、株式会社イノアック住環境よりご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 八木裕紀子 『地中熱とヒートポンプ・蓄熱・蓄電を利用したスマートコミュニティに関する検討』空間性能システム専攻修士論文(2015)
- 2) 瀧上采香 『地中熱ヒートポンプシステムを導入したネットゼロエネルギーハウスに関する検討』衛生環境工学コース学士論文 p39(2013)