

## 高断熱戸建て住宅への土壌熱源ヒートポンプ適用とその設計法

### An application of the ground-coupled heat-pump system to highly insulated detached houses and its design method

三重大学大学院工学研究科・建築学専攻

Division of Architecture, Graduate School of Engineering, Mie University

永井 久也

Hisaya NAGAI

キーワード：高断熱住宅(Highly insulated house)、蓄熱井戸(Thermal well)、土壌熱源ヒートポンプ(Ground-coupled heat pump)、省エネルギー(Energy saving)、熱水分同時移動方程式 (Simultaneous heat and moisture transfer equations)

#### 1. はじめに

建築における冷暖房に必要な年間のエネルギーは、冷房と暖房の熱負荷の絶対値和で求められ、これを時間的に平均化できれば、省エネルギー効果は極めて大きくなる。筆者らはこの観点から、年周期蓄熱媒体としての蓄熱井戸型ヒートポンプ熱源の利用およびその予測手法について検討を行ってきた<sup>1)~3)</sup>。これまでのフィールド実験及びその理論解析結果から、熱水分同時移動モデルにより降雨、放射等を含めた自然外界条件下での蓄熱井戸内および周辺地盤の熱水分性状を十分な精度で予測可能であることを明らかになっているが、実用的にはかなり大きな伝熱面積が必要となることが大きな課題であった<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、検討地域をⅢ～Ⅴ地域の全国 27 地点に設定し、埋設する蓄熱井戸の本数（容量）を想定する敷地面積を参考に統一することで空調用熱源容量を固定した場合において蓄熱井戸の設定水温条件を満たすために各地域に必要な高気密高断熱戸建て住宅の断熱性能（ $Q$  値・ $\mu$  値）を求め、その際の各地域における住宅の冷暖房負荷を数値シミュレーションで算出した。また、年間全室全日空調運転時における同性能の外気熱源システムに対する省エネルギー性および大気環境へ与える熱負荷についての比較検討を行った。さらに、より現実的な空調運転時における外気熱源システムに対する省エネルギー性および大気環境への熱負荷低減効果についての比較検討も併せて行い、熱源を考慮した高断熱戸建て住宅における蓄熱井戸型地盤熱源ヒートポンプを使用した地盤熱源型空調システム設計手法を示した。

#### 2. 土壌熱源ヒートポンプシステムの概要

シミュレーションで用いる蓄熱井戸を用いた土壌熱源ヒートポンプの装置概要を図 1 に示す。蓄熱井戸は直径 190mm、長さ 20m(水量 0.56 m<sup>3</sup>)の底付の構造用炭素鋼管である。地盤を長期蓄熱媒体として、冬期は暖房用ヒートポンプの温熱源、夏期は冷房用の冷熱源として地盤の利用を考える。シミュレーションで用いるヒートポンプの能力は、次々章で示す負荷計算結果から 6.0kW（定格 COP：暖/冷=3.53/3.38）<sup>5)</sup>の水熱源ヒートポンプとした。また、この水熱源ヒートポンプの部分負荷特性については文献<sup>6)</sup>の部分負荷特性を用いた。図 2・3 にヒートポンプ部分負荷特性の暖房、冷房時の一例を示す。図に示すように暖房時、冷房とも部分負荷率 0.5（50%）付近で最も効率が

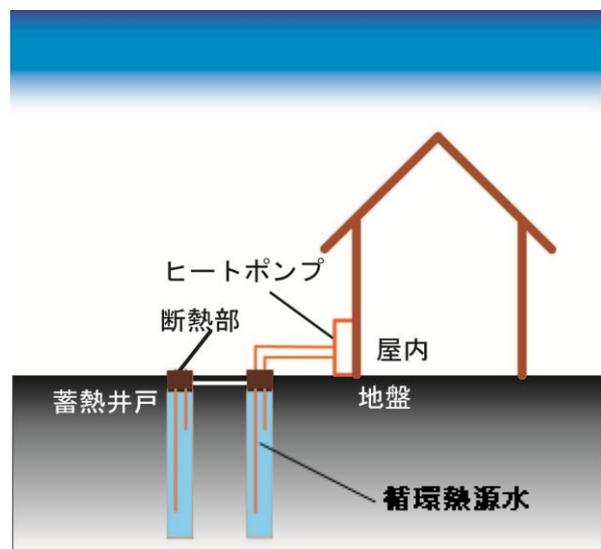


図 1：土壌熱源ヒートポンプシステムの概念図

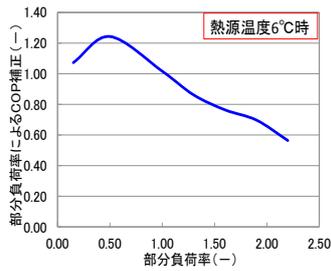


図 2：暖房部分負荷特性の一例

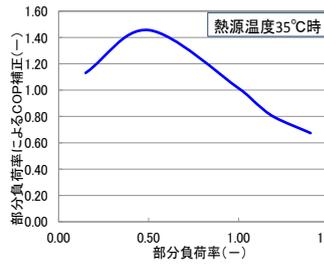


図 3：冷房部分負荷特性の一例

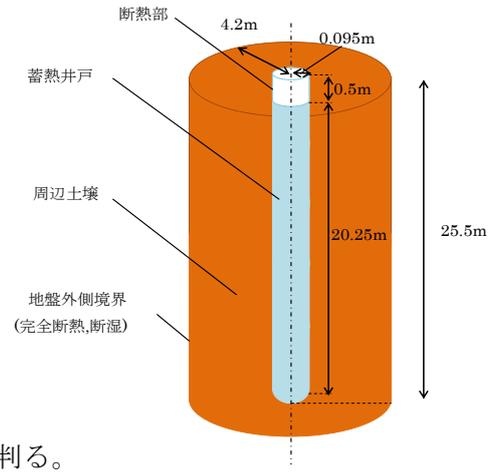


図 4：解析対象の形状

高く、1.0（100%）を超えると効率が大きく低下することが判る。

### 3. 理論解析基礎方程式

一般に、土壌は水分を含んだ多孔質媒体であり、熱と水分は互いに影響を与えあいながら移動する複雑な現象である。従って、土壌内の熱挙動を正確に予測するためには熱・水分の相互依存性を考慮した非線形過程問題としての取り扱いが必要となる。そこで、本研究では熱及び水分の移動ポテンシャルとして温度及び自由水基準の水分化学ポテンシャルを使用する松本の理論を用いた<sup>2)</sup>。用いた基礎方程式は非線形熱水分同時移動方程式である。また、井戸（熱源槽）の水温については水槽（蓄熱井戸）についての熱収支から導いた 1 質点の蓄熱井戸収支式を用いた。但し、式(5)における  $H(t)$  は蓄熱井戸への供給熱量であり、解析においてはこれを境界条件として計算を行った。計算対象は砂質地盤<sup>4)</sup>内に埋設した半径 9.5cm の蓄熱井戸を中心に蓄熱井戸一本当たり半径 4.2m の範囲とした。解析対象の形状を図 4 に示す。

[熱及び水分収支式]

$$\frac{\partial}{\partial t}(c\rho T) = \nabla(\lambda + r\lambda_{Tg}')\nabla T + \nabla r\lambda_{\mu g}'(\nabla\mu - F_w) \quad (1)$$

$$\rho_w \left( \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \lambda_{\mu}'(\nabla\mu - F_w) + \nabla \lambda_T' \nabla T \quad (2)$$

[地表面境界における熱及び水分境界条件]

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - r \left[ \lambda_{\mu g}' \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} - nF_w \right) + \lambda_{Tg}' \frac{\partial T}{\partial n} \right] = (\alpha + r\alpha_T')(T_0 - T) + r\alpha_{\mu}'(\mu_0 - \mu) + q_s + q_e \quad (3)$$

$$-\lambda_{\mu}' \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} - nF_w \right) - \lambda_T' \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\mu}'(\mu_0 - \mu) + \alpha_T'(T_0 - T) + J_R \quad (4)$$

[蓄熱井戸収支式]

$$(C_w \rho_w V_w + \Sigma C_s \rho_s V_s) \frac{T_w^{n+1} - T_w^n}{\Delta t} = -\Sigma \left[ \frac{\lambda + r\lambda_{Tg}'}{\Delta n} (T_w^n - T^n) + \frac{r\lambda_{\mu g}'}{\Delta n} (\mu_w^n - \mu^n) \right] + H(t) \quad (5)$$

《記号》

$\mu$ ：自由水基準の水分化学ポテンシャル(J/kg),  $T$ ：温度(K),  $t$ ：時間(s),  $\lambda, \lambda_{\mu}'$ ：ポテンシャル勾配による水分伝導率(kg/msJ/kg),  $\psi$ ：含水率(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),  $\rho_w$ ：液水密度(kg/m<sup>3</sup>),  $\lambda_{Tg}'$ ：ポテンシャル勾配による気相水分伝導率(kg/msJ/kg),  $c_p$ ：地盤の熱容量(J/m<sup>3</sup> K),  $F_w$ ：外力(= -g(鉛直上向き正))(N/kg),  $\lambda T'$ ：温度勾配による水分伝導率(kg/msJ/kg),  $r$ ：水分の相変化熱(J/kg),  $\lambda$ ：熱伝導率(W/mK),  $\lambda Tg'$ ：温度勾配による気相水分伝導率(kg/msJ/kg),  $\alpha$ ：熱伝達率(W/m<sup>2</sup> K),  $\alpha_{\mu}'$ ：ポテンシャル勾配による水分伝導率(kg/m<sup>2</sup> sJ/kg),  $n$ ：固体表面の内向き法線ベクトル、 $n$ はその方向、 $\alpha T'$ ：温度勾配による水分伝導率(kg/m<sup>2</sup> sJ/kg),  $J_R$ ：降雨量(kg/m<sup>2</sup> s),  $T_0$ ：外気温(K),  $q_s$ ：日射量(W/m<sup>2</sup>),  $q_e$ ：実効輻射量(W/m<sup>2</sup>),  $C_w$ ：水の定圧比熱(J/kgK),  $C_s$ ：土の定圧比熱(J/kgK),  $\rho_s$ ：土の密度(kg/m<sup>3</sup>),  $V_w$ ：井戸の容積(m<sup>3</sup>),  $V_s$ ：井戸に接する土の容積(m<sup>3</sup>),  $T_w$ ：水温(=井戸の表面温度)(K), 井戸表面の水分化学ポテンシャル(J/kg),  $T_s$ ：隣接する土の表面温度(K),  $H(t)$ ：井戸への投入熱量(W),  $\mu_s$ ：隣接する土の水分化学ポテンシャル(J/kg),  $\mu_0$ ：外気の水分化学ポテンシャル(J/kg)

### 4. 熱源を固定した場合の各地域における住宅性能の検討

本章では、シミュレーションに用いる、全国各地域の外界気象、高気密高断熱住宅の詳細、熱源量を固定した場合の各地域における住宅断熱性能の設定条件および設定した断熱性能を有する住宅において熱負荷計算プログラム SMASH から算出した住宅の暖冷房負荷について示す。

#### 4.1 対象とする高気密高断熱住宅の概要

対象とする高気密高断熱住宅は既往の研究と同様とし、「住宅の省エネルギー基準の解説」のIV地域モデルプランとした<sup>7)</sup>。図 5 に住宅の平面図を示す。延床面積は 121.74 m<sup>2</sup>、天井高は 2.425m である。また、熱損失係数(Q 値)および夏期日射取得係数( $\mu$  値)は、後述の設定条件を満たす値を各地域において検討し、設定した。なお、各地域の気象データは拡張アメダス気象データを用いた。表 1 に

各地域の気象条件を示す。

#### 4.2 各地域における住宅の断熱性能の検討

本システムを適用する場合、住宅の断熱性能と暖冷房システムの熱源設計を同時に検討することが、トータルでの省エネルギー設計の観点から極めて重要となる。これまで、平成11年度省エネ基準の断熱性能を有する高断戸建て住宅を対象に検討を行ってきた<sup>3)</sup>。しかし、省エネ法に基づく断熱性能基準は基本的には年間の暖冷房負荷の積算値で地域区分がなされており、同じ地域区分内でも暖冷房負荷の比率が異なることがある。本システムのような年周期型システムを採用する場合、極端な暖冷房負荷のアンバランスが生じると熱源温度の年変動がシステムの適用範囲外におよぶ恐れがあるため、暖冷房負荷のバランスを考慮しなくてはならない。

そこで本節では、Ⅲ～Ⅴ地域の全国各対象地域において、これまでの検討結果から蓄熱井戸埋設本数を現実的な本数である4本に設定することで、空調用熱源容量を固定した。そして井戸内水温の年変動が10年間を通して大略の外気温年変動と同程度の5～36℃の範囲に収まるように住宅の性能(Q値、μ値)を決定し、この時の住宅の暖房負荷に対する冷房負荷の割合を求めた。なお、性能決定時の年間暖冷房負荷は、暖房期間は22℃以上(湿度はなりゆきとする)、冷房期間は26℃以下(相対湿度は60%以下)、換気回数0.5回/h、内部発熱条件を顕熱4.65W/m<sup>2</sup>、潜熱1.16W/m<sup>2</sup>一定として、SMASHにより算出した。空調条件は全室空調とし、空調時間帯は、1日24時間空調を行う全日空調とした。

各地域において算出した設定Q値、μ値を表2に示す。表2に示すように、Ⅲ地域における設定Q値は1.45～2.0(W/m<sup>2</sup>K)となり、大半の地域(青森・秋田・山形・十日町を除く)でⅡ地域における基準値(省エネ法平成11年度基準)である1.9(W/m<sup>2</sup>K)を若干上回る断熱性能の標準規模住宅であれば、この想定井戸本数で住宅全体の空調が行える結果となった。また、Ⅳ地域においては平成11年度次世代省エネ基準のⅢ地域における基準値である2.4W/m<sup>2</sup>Kを若干上回る断熱性能、Ⅴ地域における設定Q値は平成11年度次世代省エネ基準のⅣ・Ⅴ地域における基準値である2.7W/m<sup>2</sup>Kを若干上回る断熱性能の標準規模戸建て住宅であれば、十分に条件を満たすことが明らかとなった。なお、μ値に関してはⅢ地域の対象地域およびⅣ地域の中でも寒冷な地である新潟・金沢以外の検討地において、Ⅲ～Ⅴ地域の平成11年度次世代省エネ基準値である0.07より数値を小さくする必要があった。これを庇の軒の長さだけで達成させる場合には非現

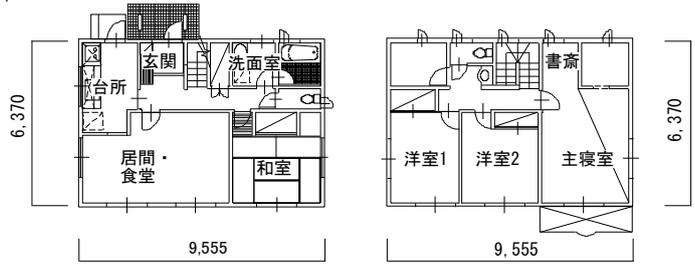


図5：対象住宅平面図

表1：各地域における気象条件

地域区分	都道府県	市町村	年平均気温(℃)	降水量(mm)	平均日射量(W/m <sup>2</sup> )
Ⅲ	青森県	青森市	10.84	1310	133.91
Ⅲ	秋田県	秋田市	12.09	1867	137.65
Ⅲ	岩手県	釜石市	11.39	1504	134.63
Ⅲ	宮城県	仙台市	12.66	924	171.55
Ⅲ	山形県	山形市	11.97	914	136.7
Ⅲ	福島県	福島市	13.27	933	137.65
Ⅲ	群馬県	沼田市	11.73	961	155.97
Ⅲ	長野県	長野市	12.19	952	155.58
Ⅲ	山梨県	北州市	11.01	1019	165.02
Ⅲ	岐阜県	郡上市	12.45	2455	145.52
Ⅲ	新潟県	十日町市	11.92	2323	130.02
Ⅲ	岡山県	新見市	12.22	1044	142.54
Ⅲ	広島県	廿日市市	12.63	1693	149.85
Ⅲ	島根県	邑南町	11.96	2062	134.33
Ⅳ	東京都	新宿区	16.09	1550	166.79
Ⅳ	愛知県	名古屋市	15.89	1441	156.33
Ⅳ	三重県	津市	16.13	1450	192.36
Ⅳ	新潟県	新潟市	13.96	1675	142.59
Ⅳ	石川県	金沢市	14.94	2142	142.28
Ⅳ	大阪府	大阪市	17.08	1289	165.95
Ⅳ	広島県	広島市	16.55	1456	159.08
Ⅴ	高知県	高知市	16.96	1779	159.57
Ⅴ	山口県	下関市	16.75	1718	154.57
Ⅴ	福岡県	福岡市	17.08	1753	172.72
Ⅴ	長崎県	長崎市	17.33	1467	158.52
Ⅴ	宮崎県	宮崎市	17.88	2429	169.47
Ⅴ	鹿児島県	鹿児島市	18.57	2120	163.01

表2：各地域における設定Q値・μ値

地域区分	都道府県	市町村	Q値(W/m <sup>2</sup> K)	μ値(-)
Ⅲ	青森県	青森市	1.45	0.07
Ⅲ	秋田県	秋田市	1.5	0.07
Ⅲ	岩手県	釜石市	1.6	0.07
Ⅲ	宮城県	仙台市	2.0	0.07
Ⅲ	山形県	山形市	1.8	0.07
Ⅲ	福島県	福島市	2.0	0.07
Ⅲ	群馬県	沼田市	1.75	0.07
Ⅲ	長野県	長野市	1.8	0.07
Ⅲ	山梨県	北州市	1.7	0.07
Ⅲ	岐阜県	郡上市	1.8	0.07
Ⅲ	新潟県	十日町市	1.6	0.07
Ⅲ	岡山県	新見市	1.8	0.07
Ⅲ	広島県	廿日市市	1.85	0.07
Ⅲ	島根県	邑南町	1.65	0.07
Ⅳ	東京都	新宿区	2.4	0.05
Ⅳ	愛知県	名古屋市	2.4	0.054
Ⅳ	三重県	津市	2.35	0.05
Ⅳ	新潟県	新潟市	2.0	0.07
Ⅳ	石川県	金沢市	2.2	0.07
Ⅳ	大阪府	大阪市	2.35	0.041
Ⅳ	広島県	広島市	2.4	0.044
Ⅴ	高知県	高知市	2.55	0.05
Ⅴ	山口県	下関市	2.55	0.054
Ⅴ	福岡県	福岡市	2.55	0.046
Ⅴ	長崎県	長崎市	2.7	0.05
Ⅴ	宮崎県	宮崎市	2.7	0.05
Ⅴ	鹿児島県	鹿児島市	2.7	0.043

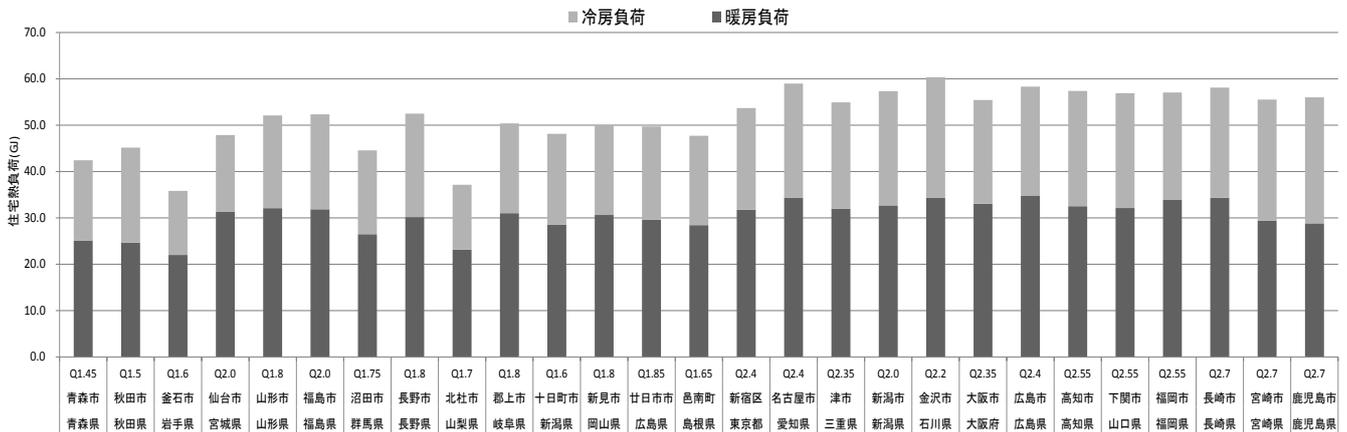


図 6：各地域における全日空調時の年積算住宅暖冷房熱負荷

的な長さとなるため窓の種類、ブラインド等による対応が必要となる。参考として、軒の形状を基準住宅と同様とした場合に各地域において設定した 2 種類の窓および日射侵入率を表 3 に示す。

#### 4.3 各地域における住宅熱負荷および暖冷房負荷の比率

各地域に対して設定した断熱性能の住宅および気象条件下において、前節で算出された全日空調条件時における年間暖冷房積算負荷を図 6 に示す。図 6 より、前節で設定した断熱性能を持つ住宅における各地域の住宅暖冷房負荷積算値は、全日空調条件時にⅢ地域で 36~52GJ/年程度、Ⅳ・Ⅴ地域で 54~60GJ/年程度であり、Ⅲ地域における同地域区分内の熱負荷積算値の差は、Ⅳ・Ⅴ地域の場合と比べて大きい。

また、全日空調条件時のⅢ地域における暖房負荷に対する冷房負荷の比率は、大半の地域（仙台市・秋田市を除く）で 60~70%程度になっており、積算値の場合と比べて同地域区分内での差は小さくなった。Ⅳ・Ⅴ地域における暖房負荷に対する冷房負荷の比率は、Ⅴ地域の幾つかの地域（宮崎市・鹿児島市）を除き 70%~80%程度となった。

表 3：住宅性能変更後の窓の種類および日射侵入率

地域区分	市町村	窓の種類 & 日射侵入率(-)	
		窓①	窓②
Ⅲ	青森市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	秋田市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	釜石市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	仙台市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	山形市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	福島市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	沼田市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	長野市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	北杜市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	郡上市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	十日町市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	新見市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	廿日市市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅲ	邑南町	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅳ	新宿区	普通複層:0.79	普通複層(内ブラインド):0.45
Ⅳ	名古屋市	普通複層:0.79	普通複層(レースカーテン):0.53
Ⅳ	津市	普通複層:0.79	普通複層(内ブラインド):0.45
Ⅳ	新潟市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅳ	金沢市	普通単板:0.88	低放射複層A(as=12mm):0.75
Ⅳ	大阪市	遮熱複層C(as=6mm):0.55	遮熱複層C(as=6mm,内ブラインド):0.35
Ⅳ	広島市	低放射複層C(as=6mm):0.58	低放射複層C(as=6mm,内ブラインド):0.41
Ⅴ	高知市	普通複層:0.79	普通複層(内ブラインド):0.45
Ⅴ	下関市	普通複層:0.79	普通複層(レースカーテン):0.53
Ⅴ	福岡市	低放射複層C(as=12mm):0.59	低放射複層C(as=12mm,内ブラインド):0.43
Ⅴ	長崎市	普通複層:0.79	普通複層(内ブラインド):0.45
Ⅴ	宮崎市	普通複層:0.79	普通複層(内ブラインド):0.45
Ⅴ	鹿児島市	遮熱複層C(as=6mm):0.55	遮熱複層C(as=6mm,レースカーテン):0.39

### 5. 本システムの省エネルギー効果および大気環境負荷低減効果の検討

本章では、前章で設定した断熱性能を有する標準規模高断熱住宅において算出された住宅暖冷房熱負荷を入力条件とし、第 3 章で示した理論解析基礎方程式を用いて 1 日 24 時間空調する全日空調条件時における消費電力量を数値シミュレーションにより求め、外気熱源ヒートポンプ適用時と比較した場合の省エネルギー性の検討を行う。また、大気環境への負荷低減効果も併せて検討する。

#### 5.1 全日空調条件における省エネルギー効果の検討

本節では全日空調条件における消費電力量を示し、本システムの省エネルギー効果を検討する。

図 7~9 にシミュレーションによる各地域区分の代表地として青森県青森市(Ⅲ地域)・三重県津市(Ⅳ地域)・鹿児島県鹿児島(Ⅴ地域)の全日空調条件における各地域の年間蓄熱井戸内水温(3年目)と外気温度の変動を示し、表 4 に全日空調条件時の地盤への採・放熱量を示す。

図 7~9 より、Ⅲ~Ⅴ地域の各代表地において、蓄熱井戸内水温は外気温度に比して温度変動が小さい。

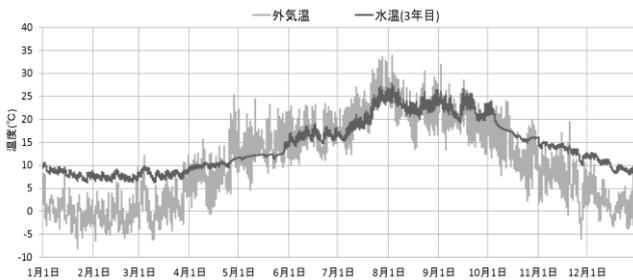


図 7：全日空調条件での蓄熱井戸内水温および外気温度（青森市）

表 5 にシミュレーションによる各地域の全日空調条件における消費電力量（3 年目）を示す。なお、表中には本水熱源ヒートポンプと同じ能力特性を想定した空気熱源ヒートポンプによる年間消費エネルギー、本システムを使用した場合の空気熱源ヒートポンプを使用した場合に対する省エネ効果を示す<sup>注 1)</sup>。表 5 より、外気熱源システムと比較した場合における土壌熱源システムの省エネルギー効果は、特に暖房期間に大きく見られた。これは熱源として使用する蓄熱井戸内水温の下限値が 5℃と、日本各地域の冬期における最低外気温よりも高い値であったため、ヒートポンプが高効率で運転可能であることが要因であると考えられる。それに対し、冷房期間における省エネ効果はさほど小さくなく、IV 地域の東京都新宿区、V 地域の山口県下関市、長崎県長崎市および鹿児島県鹿児島市においては、外気熱源システムによる消費電力量の方が本システムを運用した場合よりも小さくなった。これは熱源である蓄熱井戸内温度の上限値が 36℃となっており、水温が高くなる傾向にある温暖地の幾つかの地域においては外気温度を上回る期間が長くなったため、空調システムの効率が低下したことが要因である。

各地域での外気熱源システムに対する本システムの省エネルギー効果をまとめると、暖房期間において約 13.0～18.6%、冷房期間において約 -1.7～7.9%となり、年間積算値で比較すると約 6.6%～15.0%であった。よって年間の積算値で考えれば、全検討地域において外気熱源時に比して消費電力量が削減され、省エネ効果が得られた。

## 5.2 全日空調条件における経年変化の検討

次に、各地域の本システムにおける経年変化を示す。各地域区分の代表都市として青森県青森市・長野県長野市（Ⅲ地域）・新潟県新潟市・三重県津市（Ⅳ地域）・山口県下関市・鹿児島県鹿児島市（Ⅴ地域）のみ経年結果を比較するものとする。表 6 に各地域における 3・5・10 年目の消費電力量および APF の経年変化を示す。本研究で用いる APF の定義は、年間暖冷房負荷積算値／年間消費電力量とする。表 6 より、各地域における年間 APF の減少率は、地域区分に関わらず 1%未満であった。よって、仮に同じ暖冷房負荷が続いた場合、全日空調条件時の 10 年経過後の本システム運用における能力低下・消費電力量の増加はわずかであり、装置に不具合が生じない限り本システムの長期運用(10 年程度)は可能であると言えよう。

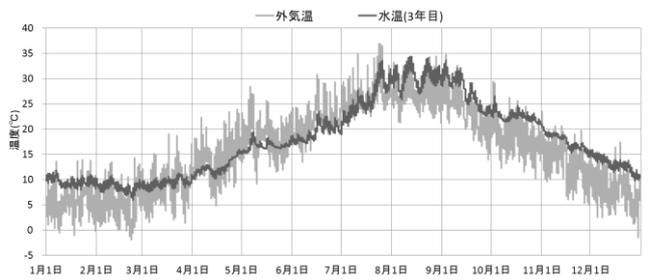


図 8：全日空調条件での蓄熱井戸内水温および外気温度（津市）

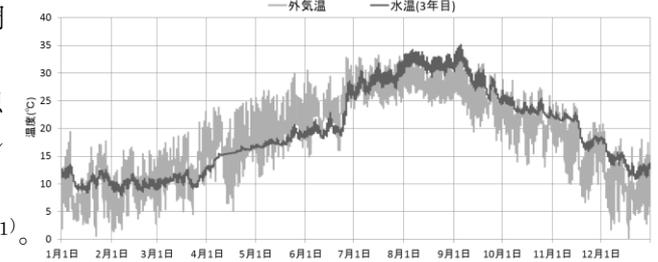


図 9：全日空調条件での蓄熱井戸内水温および外気温度（鹿児島市）

表 4：各地域の地盤への採・放熱量（全日空調）

地域区分	都道府県	市町村	採熱量(GJ)	放熱量(GJ)	年間(GJ)
Ⅲ	青森県	青森市	-19.50	20.82	1.32
Ⅲ	秋田県	秋田市	-19.16	25.00	5.84
Ⅲ	岩手県	釜石市	-17.06	16.37	-0.69
Ⅲ	宮城県	仙台市	-24.08	20.19	-3.89
Ⅲ	山形県	山形市	-24.73	24.60	-0.14
Ⅲ	福島県	福島市	-24.54	25.24	0.70
Ⅲ	群馬県	沼田市	-20.45	21.80	1.35
Ⅲ	長野県	長野市	-23.25	27.49	4.24
Ⅲ	山梨県	北村市	-17.85	16.62	-1.23
Ⅲ	岐阜県	郡上市	-23.94	23.31	-0.63
Ⅲ	新潟県	十日町市	-22.10	23.48	1.38
Ⅲ	岡山県	新見市	-23.61	23.42	-0.20
Ⅲ	広島県	廿日市市	-22.80	24.24	1.44
Ⅲ	島根県	邑南町	-22.01	23.21	1.19
Ⅳ	東京都	新宿区	-24.49	26.69	2.20
Ⅳ	愛知県	名古屋市	-26.26	30.20	3.94
Ⅳ	三重県	津市	-24.70	27.86	3.17
Ⅳ	新潟県	新潟市	-25.29	30.36	5.07
Ⅳ	石川県	金沢市	-26.51	32.21	5.70
Ⅳ	大阪府	大阪市	-25.52	27.09	1.57
Ⅳ	広島県	広島市	-26.72	28.42	1.70
Ⅴ	高知県	高知市	-24.72	30.53	5.82
Ⅴ	山口県	下関市	-24.81	30.30	5.49
Ⅴ	福岡県	福岡市	-26.03	28.26	2.23
Ⅴ	長崎県	長崎市	-23.31	28.76	2.45
Ⅴ	宮崎県	宮崎市	-22.53	31.67	9.15
Ⅴ	鹿児島県	鹿児島市	-22.27	33.04	10.76

表 6：消費電力量および年間 APF の経年変化（全日空調）

地域区分	都道府県	市町村	期間	消費電力量(GJ)		
				3年目	5年目	10年目
Ⅲ	青森県	青森市	暖房	5.256	5.287	5.301
			冷房	3.034	3.010	2.999
			年間	8.291	8.297	8.300
			APF	4.052	4.049	4.048
Ⅲ	長野県	長野市	暖房	6.912	6.924	6.914
			冷房	5.169	5.181	5.194
			年間	12.081	12.105	12.108
			APF	4.345	4.336	4.335
Ⅳ	新潟県	新潟市	暖房	7.417	7.423	7.426
			冷房	5.759	5.751	5.748
			年間	13.176	13.175	13.174
			APF	4.350	4.350	4.350
Ⅳ	三重県	津市	暖房	7.323	7.309	7.310
			冷房	4.966	5.014	5.055
			年間	12.289	12.323	12.365
			APF	4.469	4.456	4.441
Ⅴ	山口県	下関市	暖房	7.312	7.292	7.284
			冷房	5.532	5.557	5.568
			年間	12.844	12.849	12.852
			APF	4.429	4.427	4.427
Ⅴ	鹿児島県	鹿児島市	暖房	5.665	5.648	5.640
			冷房	4.626	4.649	4.660
			年間	10.291	10.297	10.300
			APF	3.872	3.870	3.869

5.3 全日空調条件における大気環境への負荷低減効果

前節までと同様の蓄熱井戸条件での年間全室全日空調条件時における大気環境への熱負荷低減効果を検討する。

図 10 に地域を東京と設定した場合の全日空調条件における大気への環境負荷の模式図（3年目）を示す。図 10 より、外気を熱源とするヒートポンプの場合、年間の大気への環境負荷は消費電力量となり、年間の大気への環境負荷は約 13.31GJ となる。一方、蓄熱井戸型土壌熱源ヒートポンプを使用した場合は、外気を熱源とした場合と異なり、排熱を蓄熱井戸に蓄熱することになる。すなわち、年間の大気への熱負荷は年間の住宅の積算熱負荷(絶対和ではなく単純和である)と、排熱を投入した地盤の表面から大気への熱流の和に等しくなる。

本研究においては、暖房負荷に対する冷房負荷の割合は全ての地域において 50%を上回っており、地盤への冬期夏期の負荷のアンバランスによる地表面から大気への熱流は極めて小さいと言え、全ての地域において地盤の表面から大気への熱流は考慮しないこととした。東京における本システムを用いた場合の年間の大気環境負荷は約 9.82GJ となり、本システムは外気熱源ヒートポンプを使用した場合に対して、約 26.2%の大気環境負荷を低減する結果となった。

表 7 に全日空調条件における各地域の大気環境負荷を示す。なお、表中には外気熱源を利用した時の大気環境への負荷、および外気熱源を利用した時の大気環境負荷に対する本システムの大気環境への負荷削減率を示す。また、削減率の値が負の場合は外気熱源を使用した場合に対する増加率、正の場合は削減率とする。

表 5：消費電力量および省エネ効果（全日空調）

地域区分	市町村	期間	消費電力量(GJ)		省エネ効果
			土壌	空気	
Ⅲ	青森市	暖房	5.63	6.90	18.4%
		冷房	3.51	3.68	4.5%
		年間	9.15	10.58	13.5%
Ⅲ	秋田市	暖房	5.48	6.75	18.9%
		冷房	4.50	4.68	3.9%
		年間	9.98	11.44	12.8%
Ⅲ	釜石市	暖房	4.95	6.05	18.2%
		冷房	2.56	2.78	7.9%
		年間	7.51	8.83	15.0%
Ⅲ	仙台市	暖房	7.19	8.72	17.5%
		冷房	3.61	3.77	4.3%
		年間	10.80	12.49	13.5%
Ⅲ	山形市	暖房	7.37	8.95	17.6%
		冷房	4.62	4.81	4.1%
		年間	11.99	13.76	12.9%
Ⅲ	福島市	暖房	7.32	8.90	17.8%
		冷房	4.76	5.00	5.0%
		年間	12.07	13.91	13.2%
Ⅲ	沼田市	暖房	6.03	7.39	18.3%
		冷房	3.72	3.92	5.2%
		年間	9.75	11.31	13.8%
Ⅲ	長野市	暖房	6.91	8.49	18.6%
		冷房	5.17	5.27	2.0%
		年間	12.08	13.76	12.2%
Ⅲ	北杜市	暖房	5.29	6.44	17.9%
		冷房	2.60	2.75	5.5%
		年間	7.89	9.19	14.2%
Ⅲ	郡上市	暖房	7.09	8.61	17.6%
		冷房	3.95	4.32	8.7%
		年間	11.04	12.93	14.6%
Ⅲ	十日町市	暖房	6.40	7.85	18.4%
		冷房	3.85	4.17	7.6%
		年間	10.26	12.02	14.7%
Ⅲ	新見市	暖房	7.01	8.50	17.5%
		冷房	4.06	4.27	5.1%
		年間	11.06	12.77	13.4%
Ⅲ	廿日市市	暖房	6.83	8.24	17.1%
		冷房	4.14	4.44	6.7%
		年間	10.97	12.68	13.5%
Ⅲ	邑南町	暖房	6.41	7.82	18.1%
		冷房	3.91	4.20	6.8%
		年間	10.32	12.02	14.2%
Ⅳ	新宿区	暖房	7.26	8.57	15.2%
		冷房	4.76	4.74	-0.3%
		年間	12.02	13.31	9.7%
Ⅳ	名古屋市	暖房	8.12	9.73	16.5%
		冷房	5.63	5.77	2.5%
		年間	13.75	15.50	11.3%
Ⅳ	津市	暖房	7.32	8.81	16.9%
		冷房	4.97	4.99	0.4%
		年間	12.29	13.79	10.9%
Ⅳ	新潟市	暖房	7.42	8.98	17.4%
		冷房	5.76	5.85	1.6%
		年間	13.18	14.83	11.1%
Ⅳ	金沢市	暖房	7.88	9.38	16.0%
		冷房	6.25	6.36	1.8%
		年間	14.13	15.74	10.3%
Ⅳ	大阪市	暖房	7.51	8.82	14.9%
		冷房	4.69	4.83	2.9%
		年間	12.20	13.65	10.6%
Ⅳ	広島市	暖房	8.12	9.55	15.0%
		冷房	4.94	5.08	2.7%
		年間	13.06	14.63	10.7%
Ⅴ	高知市	暖房	7.79	9.24	15.8%
		冷房	5.66	5.77	1.9%
		年間	13.45	15.01	10.4%
Ⅴ	下関市	暖房	7.31	8.32	12.1%
		冷房	5.53	5.44	-1.7%
		年間	12.84	13.75	6.6%
Ⅴ	福岡市	暖房	7.83	9.00	13.0%
		冷房	5.08	5.17	1.8%
		年間	12.91	14.18	8.9%
Ⅴ	長崎市	暖房	8.01	9.13	12.3%
		冷房	4.99	4.96	-0.6%
		年間	13.00	14.09	7.7%
Ⅴ	宮崎市	暖房	6.90	8.03	14.0%
		冷房	5.60	5.67	1.2%
		年間	12.50	13.69	8.7%
Ⅴ	鹿児島市	暖房	6.55	7.56	13.4%
		冷房	5.87	5.83	-0.6%
		年間	12.42	13.40	7.3%

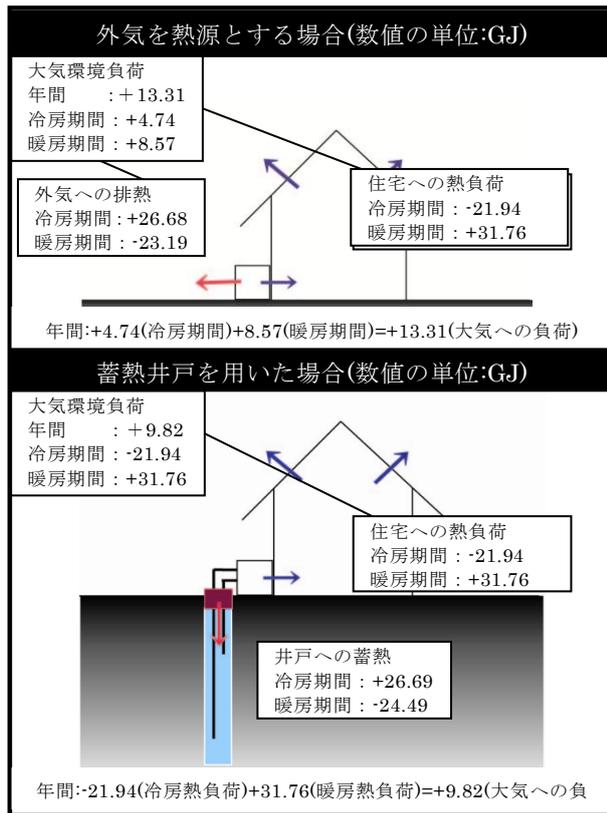


図 10：全日空調条件における大気環境負荷の模式図（東京）

表 7：各地域における大気環境への負荷低減効果（全日空調）

地域区分	都道府県	市町村	大気環境負荷(GJ)		負荷削減率(%)
			土壌熱源	空気熱源	
Ⅲ	青森県	青森市	7.827	10.580	26.0%
Ⅲ	秋田県	秋田市	4.136	11.437	63.8%
Ⅲ	岩手県	釜石市	8.199	8.832	7.2%
Ⅲ	宮城県	仙台市	14.686	12.488	-17.6%
Ⅲ	山形県	山形市	12.126	13.764	11.9%
Ⅲ	福島県	福島市	11.372	13.907	18.2%
Ⅲ	群馬県	沼田市	8.406	11.312	25.7%
Ⅲ	長野県	長野市	7.839	13.762	43.0%
Ⅲ	山梨県	北杜市	9.114	9.192	0.9%
Ⅲ	岐阜県	郡上市	11.667	12.932	9.8%
Ⅲ	新潟県	十日町市	8.872	12.018	26.2%
Ⅲ	岡山県	新見市	11.262	12.772	11.8%
Ⅲ	広島県	廿日市市	9.530	12.678	24.8%
Ⅲ	島根県	邑南町	9.125	12.018	24.1%
Ⅳ	東京都	新宿区	9.822	13.308	26.2%
Ⅳ	愛知県	名古屋市	9.811	15.498	36.7%
Ⅳ	三重県	津市	9.121	13.793	33.9%
Ⅳ	新潟県	新潟市	8.107	14.828	45.3%
Ⅳ	石川県	金沢市	8.428	15.743	46.5%
Ⅳ	大阪府	大阪市	10.629	13.649	22.1%
Ⅳ	広島県	広島市	11.365	14.632	22.3%
Ⅴ	高知県	高知市	7.631	15.013	49.2%
Ⅴ	山口県	下関市	7.353	13.755	46.5%
Ⅴ	福岡県	福岡市	10.680	14.176	24.7%
Ⅴ	長崎県	長崎市	10.556	14.092	25.1%
Ⅴ	宮崎県	宮崎市	3.352	13.693	75.5%
Ⅴ	鹿児島県	鹿児島市	1.655	13.396	87.6%

表 7 より、全日空調時の空気熱源システムに対する土壌熱源システムの大気環境負荷は、Ⅲ地域の仙台市以外の全検討地域で低減効果が見られた。これは環境負荷の考え方が土壌熱源時は年間の住宅積算熱負荷(単純和)であるとしているため、暖房負荷に対する冷房負荷の割合が唯一 60%を下回っていた仙台市では大気環境への負荷が大きくなってしまったのが要因である。暖房負荷に対する冷房負荷の割合が 60.2%となっているⅢ地域の山梨県北杜市では、大気環境負荷の削減率が 0.9%となり、若干ではあるが負荷の削減がなされている。

よって、暖房負荷に対する冷房負荷の割合と大気環境への負荷低減効果とを併せて考えると、暖房負荷に対する冷房負荷の割合が 60%を上回っていれば、全ての地域において蓄熱水温条件を満たし、かつ大気環境への負荷を低減できると言える。

## 6. 現実的な空調条件における本システムの有効性の検討

前章では、1日 24 時間家全体を空調する全日空調条件における省エネルギー効果および大気環境への負荷低減効果について述べた。

本章では、より現実的な空調パターンを考え、6:00~9:00&18:00~23:00 の 1 日計 8 時間空調を行う間欠空調条件において第 4・5 章と同様の断熱性能の住宅を対象として数値シミュレーションを行い、外気熱源時に対する省エネ効果および大気環境への負荷低減効果について検討を行う。

### 6.1 間欠空調条件における各地域での住宅熱負荷

各地域に対して設定した断熱性能の住宅および気象条件下において、間欠空調条件時における年間暖冷房積算負荷を図 11 に示す。図 11 より、前節で設定した断熱性能を持つ住宅における各地域の住宅暖冷房負荷積算値は、全間欠空調条件時にⅢ地域で 27~40GJ/年程度、Ⅳ・Ⅴ地域で 39~44GJ/年程度であり、Ⅲ地域における同地域区分内の熱負荷積算値の差は、Ⅳ・Ⅴ地域の場合と比して大きい。

また、間欠空調条件時のⅢ地域における暖房負荷に対する冷房負荷の比率は、大半の地域（仙台市・秋田市を除く）で 50~60%程度になっており、積算値の場合と比して同地域区分内での差は小さくな

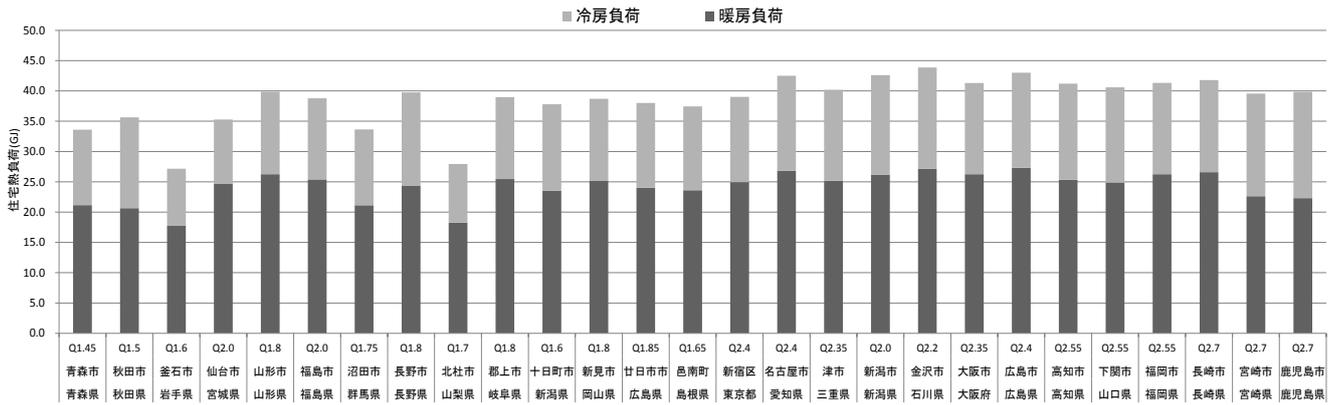


図 11：各地域における間欠空調時の年積算住宅暖冷房熱負荷

った。IV・V地域における暖房負荷に対する冷房負荷の比率は、V地域の幾つかの地域（宮崎市・鹿児島市）を除き60%~70%程度となった

### 6.2 空調パターンによる住宅熱負荷の差について

本節では、前節で示した間欠空調条件時の住宅暖冷房熱負荷を、第4章で示した全日空調条件時の住宅暖冷房負荷と比較する。図12にIII、IV、V地域からそれぞれ代表として1地点ずつ選定した全日・間欠両空調条件における住宅暖冷房負荷を示す。なお、III地域における代表地は青森県青森市、IV地域における代表地は三重県津市、V地域における代表地は鹿児島県鹿児島市とした。図12より、間欠空調時の空調時間は全日空調時の約3割であるが、全日空調条件に対する間欠空調条件の空調負荷の割合は青森で79.2%、津で73.2%、鹿児島で71.2%となり、全日空調時に比して空調稼働時間あたりの負荷が増大しているのが判る。これは、間欠空調時における空調立ち上がり時の蓄熱によるものであり、たとえ木造住宅のような比較的熱容量の小さな住宅においても、効率的には間欠空調は必ずしも有効ではないことを示している。但し、全日空調条件は住人がいない場合においても24時間空調を行うため、単純な効率性だけでどちらに優位性があるかを判断することは難しく、居住者の生活パターンによって空調時間帯を考慮する必要があると言えよう。

また、暖房負荷に対する冷房負荷の割合は、全ての地域において全日空調条件時に比して小さくなった。例えば三重県津市における暖房負荷に対する冷房負荷の比率は全日空調条件時には約71.5%なのに対し、間欠空調条件時には約59.7%となった。

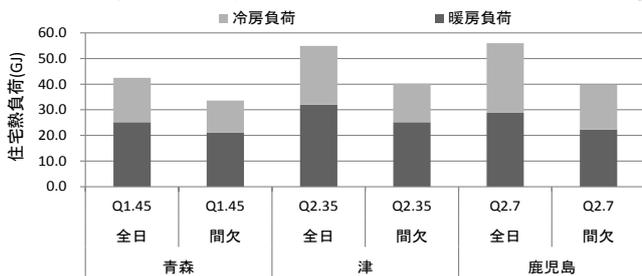


図 12：空調パターンによる年積算暖冷房熱負荷の差について

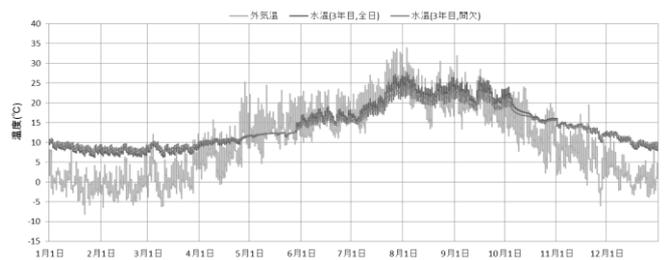


図 13：蓄熱井戸内水温および外気温度（青森市）

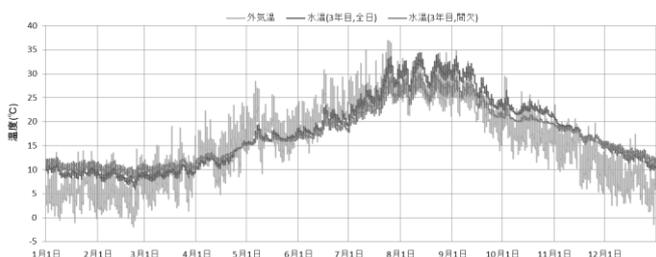


図 14：蓄熱井戸内水温および外気温度（津市）

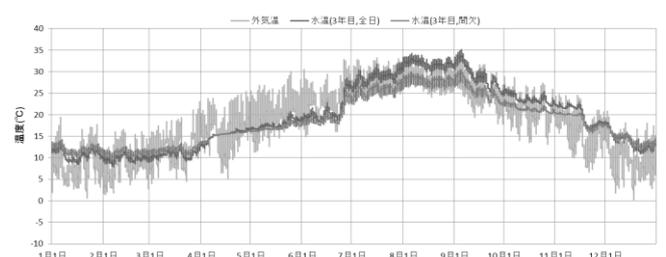


図 15：蓄熱井戸内水温および外気温度（鹿児島市）

### 6.3 間欠空調条件における省エネルギー効果の検討

本節では間欠空調条件における消費電力量を示し、本システムの省エネルギー効果を検討する。

図13~15にシミュレーションによる各地域区分の代表地として青森県青森市(Ⅲ地域)・三重県津市

(Ⅳ地域)・鹿児島県鹿児島市(Ⅴ地域)の間欠空調条件における各地域の年間蓄熱井戸内水温(3年目)と外気温度の変動を示し、表8に間欠空調条件における各地域の地盤への採・放熱量を示す。なお、図13~15には比較対象として全日空調条件における蓄熱井戸内水温(3年目)も併せて示す。

図13~15より、Ⅲ~Ⅴ地域の各代表地において、全日空調条件時と同様に蓄熱井戸内水温は外気温度に比して温度変動が小さい。また、間欠空調条件時は全日空調条件に対して住宅の冷暖房積算負荷が7~8割程度になるため地盤からの採・放熱量が小さくなり、それにもなると年間の水温変動も全日空調条件に比して小さくなっている。

表9にシミュレーションによる各地域の間欠空調条件における消費電力量(3年目)を示す。なお、表中には本水熱源ヒートポンプと同じ能力特性を想定した空気熱源ヒートポンプによる年間消費エネルギー、本システムを使用した場合の空気熱源ヒートポンプを使用した場合に対する省エネ効果を示す。表9より、外気熱源システムと比較した場合における土壌熱源システムの省エネルギー効果は、全日空調条件時と同じく暖房期間に大きく見られた。また、冷房期間における省エネ効果は暖房期間ほど大きくないが、全ての地域において外気熱源システム運用時よりも消費電力量は低減された。これは年最高水温値が年最高外気温よりも低く、ヒートポンプ運転効率が外気熱源時に比して向上しているためである。

各地域での外気熱源システムに対する本システムの省エネルギー効果をまとめると、暖房期間においては約13.7~19.4%、冷房期間においては約2.8~7.8%となり、年間積算値で比較すると約10.0%~15.5%であった。よって暖房期間・冷房期間・年間積算値のいずれの場合で検討しても、全ての検討地域で外気熱源システムに比して省エネルギー効果が得られることが明らかとなった。なお、水温の年変動が全日空調時よりも小さく、より安定した熱源として利用できたため、外気熱源時と比較した場合の消費電力量削減率は間欠空調条件時(10.0%~15.5%の削減)の方が全日空調条件時(6.6%~15.0%の削減)に比して大きくなった。なお、間欠空調条件時のAPFの減少率も、

表8: 各地域の地盤への採・放熱量(間欠空調)

地域区分	都道府県	市町村	採熱量(GJ)	放熱量(GJ)	年間(GJ)
Ⅲ	青森県	青森市	-15.89	15.48	-0.41
Ⅲ	秋田県	秋田市	-15.59	18.83	3.24
Ⅲ	岩手県	釜石市	-13.32	11.62	-1.70
Ⅲ	宮城県	仙台市	-18.32	13.14	-5.18
Ⅲ	山形県	山形市	-19.44	17.09	-2.35
Ⅲ	福島県	福島市	-18.82	16.83	-1.99
Ⅲ	群馬県	沼田市	-15.61	15.62	0.01
Ⅲ	長野県	長野市	-17.99	19.35	1.36
Ⅲ	山梨県	北杜市	-13.47	12.00	-1.48
Ⅲ	岐阜県	郡上市	-18.78	16.87	-1.91
Ⅲ	新潟県	十日町市	-17.67	17.62	-0.05
Ⅲ	岡山県	新見市	-18.53	17.02	-1.52
Ⅲ	広島県	廿日市市	-17.61	17.50	-0.11
Ⅲ	鳥根県	邑南町	-17.62	17.32	-0.30
Ⅳ	東京都	京(新宿区)	-18.57	17.63	-0.95
Ⅳ	愛知県	名古屋市	-19.62	19.72	0.10
Ⅳ	三重県	津市	-18.74	18.89	0.15
Ⅳ	新潟県	新潟市	-19.51	20.66	1.14
Ⅳ	石川県	金沢市	-20.04	21.10	1.07
Ⅳ	大阪府	大阪市	-19.63	18.87	-0.77
Ⅳ	広島県	広島市	-20.02	19.84	-0.18
Ⅴ	高知県	高知市	-18.48	19.99	1.51
Ⅴ	山口県	下関市	-18.56	19.78	1.22
Ⅴ	福岡県	福岡市	-19.43	18.99	-0.44
Ⅴ	長崎県	長崎市	-19.61	19.29	-0.32
Ⅴ	宮崎県	宮崎市	-16.64	21.32	4.68
Ⅴ	鹿児島県	鹿児島市	-16.63	22.18	5.54

表9: 消費電力量および省エネ効果(間欠空調)

地域区分	市町村	期間	消費電力量(GJ)		省エネ効果
			土壌	空気	
Ⅲ	青森市	暖房	5.26	6.48	18.9%
		冷房	3.03	3.19	5.0%
		年間	8.29	9.67	14.3%
Ⅲ	秋田市	暖房	5.07	6.29	19.4%
		冷房	3.84	4.05	5.2%
		年間	8.91	10.34	13.8%
Ⅲ	釜石市	暖房	4.41	5.43	18.9%
		冷房	2.17	2.32	6.2%
		年間	6.58	7.75	15.1%
Ⅲ	仙台市	暖房	6.40	7.88	18.7%
		冷房	2.58	2.74	6.1%
		年間	8.98	10.62	15.5%
Ⅲ	山形市	暖房	6.82	8.37	18.5%
		冷房	3.48	3.69	5.7%
		年間	10.30	12.05	14.6%
Ⅲ	福島市	暖房	6.57	8.09	18.8%
		冷房	3.45	3.68	6.4%
		年間	10.02	11.78	14.9%
Ⅲ	沼田市	暖房	5.53	6.83	19.1%
		冷房	3.11	3.28	5.3%
		年間	8.64	10.12	14.6%
Ⅲ	長野市	暖房	6.39	7.92	19.3%
		冷房	3.98	4.09	2.8%
		年間	10.37	12.01	13.7%
Ⅲ	北杜市	暖房	4.79	5.88	18.6%
		冷房	2.32	2.43	4.7%
		年間	7.11	8.31	14.5%
Ⅲ	郡上市	暖房	6.67	8.20	18.6%
		冷房	3.33	3.61	7.8%
		年間	10.00	11.81	15.3%
Ⅲ	十日町市	暖房	5.88	7.27	19.1%
		冷房	3.38	3.62	6.7%
		年間	9.26	10.89	15.0%
Ⅲ	新見市	暖房	6.61	8.10	18.5%
		冷房	3.46	3.66	5.7%
		年間	10.06	11.77	14.5%
Ⅲ	廿日市市	暖房	6.42	7.83	18.1%
		冷房	3.51	3.76	6.8%
		年間	9.93	11.60	14.4%
Ⅲ	邑南町	暖房	5.98	7.36	18.7%
		冷房	3.49	3.69	5.4%
		年間	9.47	11.05	14.3%
Ⅳ	新宿区	暖房	6.38	7.66	16.7%
		冷房	3.55	3.70	4.0%
		年間	9.93	11.36	12.6%
Ⅳ	名古屋市	暖房	7.18	8.76	18.0%
		冷房	4.02	4.26	5.6%
		年間	11.21	13.02	13.9%
Ⅳ	津市	暖房	6.43	7.86	18.1%
		冷房	3.87	4.05	4.6%
		年間	10.30	11.91	13.5%
Ⅳ	新潟市	暖房	6.69	8.19	18.4%
		冷房	4.25	4.46	4.7%
		年間	10.94	12.65	13.5%
Ⅳ	金沢市	暖房	7.09	8.57	17.2%
		冷房	4.37	4.65	6.0%
		年間	11.46	13.22	13.3%
Ⅳ	大阪市	暖房	6.63	7.95	16.6%
		冷房	3.83	4.07	5.9%
		年間	10.46	12.03	13.0%
Ⅳ	広島市	暖房	7.30	8.80	17.1%
		冷房	4.16	4.42	5.9%
		年間	11.46	13.22	13.3%
Ⅴ	高知市	暖房	6.86	8.29	17.3%
		冷房	4.12	4.35	5.3%
		年間	10.98	12.64	13.2%
Ⅴ	下関市	暖房	6.33	7.34	13.7%
		冷房	4.08	4.23	3.6%
		年間	10.42	11.58	10.0%
Ⅴ	福岡市	暖房	6.82	8.04	15.1%
		冷房	3.93	4.17	5.7%
		年間	10.76	12.21	11.9%
Ⅴ	長崎市	暖房	6.97	8.14	14.3%
		冷房	4.08	4.23	3.5%
		年間	11.06	12.37	10.6%
Ⅴ	宮崎市	暖房	5.99	7.12	15.9%
		冷房	4.38	4.61	5.0%
		年間	10.37	11.73	11.6%
Ⅴ	鹿児島市	暖房	5.67	6.68	15.1%
		冷房	4.63	4.82	4.0%
		年間	10.29	11.50	10.5%

地域区分に関わらず 10 年間で 1%未満であった。

#### 6.4 間欠空調条件における大気環境への負荷低減効果

表 10 に間欠空調条件における各地域の大気環境負荷を示す。全日空調時の暖房負荷に対する冷房負荷の割合が概ね 60~80%となっていたのに対し、間欠空調時の暖房負荷に対する冷房負荷の割合が概ね 50~70%となり、全体的に暖房負荷の割合が増大している。よってやや暖冷房の負荷にアンバランスが生じて大気環境への負荷低減効果は小さくなっており、Ⅲ地域の釜石市・仙台市・山形市・福島市・北杜市・郡上市においては、外気熱源システム時に比して大気環境負荷が若干大きくなる結果となった。

間欠空調条件において、暖房負荷に対する冷房負荷の割合と大気環境への負荷低減効果とを併せて考えると、暖房負荷に対する冷房負荷の割合が 54%を上回っている地域においては蓄熱水温条件を満たしかつ外気熱源システムよりも大気環境への負荷を低減できると言える。全日空調条件時における結果と併せて考えると、外気熱源時に比して大気環境負荷を低減するためには、暖冷房負荷の割合のアンバランスをある程度解消し、暖房負荷に対する冷房負荷の割合を約 6 割以上にすると必要があると言える。

表 10：各地域の大気環境負荷低減効果（間欠空調）

地域区分	都道府県	市町村	大気環境負荷 (GJ)		負荷削減率(%)
			土壌熱源	空気熱源	
Ⅲ	青森県	青森市	8.705	9.671	10.0%
Ⅲ	秋田県	秋田市	5.670	10.336	45.1%
Ⅲ	岩手県	釜石市	8.282	7.753	-6.8%
Ⅲ	宮城県	仙台市	14.157	10.620	-33.3%
Ⅲ	山形県	山形市	12.642	12.054	-4.9%
Ⅲ	福島県	福島市	12.013	11.776	-2.0%
Ⅲ	群馬県	沼田市	8.630	10.116	14.7%
Ⅲ	長野県	長野市	9.015	12.013	25.0%
Ⅲ	山梨県	北杜市	8.584	8.313	-3.3%
Ⅲ	岐阜県	郡上市	11.913	11.807	-0.9%
Ⅲ	新潟県	十日町市	9.311	10.892	14.5%
Ⅲ	岡山県	新見市	11.578	11.767	1.6%
Ⅲ	広島県	廿日市市	10.035	11.598	13.5%
Ⅲ	島根県	邑南町	9.777	11.054	11.6%
Ⅳ	東京都	新宿区	10.880	11.361	4.2%
Ⅳ	愛知県	名古屋市	11.102	13.018	14.7%
Ⅳ	三重県	津市	10.152	11.912	14.8%
Ⅳ	新潟県	新潟市	9.792	12.648	22.6%
Ⅳ	石川県	金沢市	10.396	13.216	21.3%
Ⅳ	大阪府	大阪市	11.233	12.026	6.6%
Ⅳ	広島県	広島市	11.642	13.221	11.9%
Ⅴ	高知県	高知市	9.470	12.642	25.1%
Ⅴ	山口県	下関市	9.198	11.575	20.5%
Ⅴ	福岡県	福岡市	11.196	12.208	8.3%
Ⅴ	長崎県	長崎市	11.381	12.371	8.0%
Ⅴ	宮崎県	宮崎市	5.690	11.729	51.5%
Ⅴ	鹿児島県	鹿児島市	4.747	11.496	58.7%

#### 7. 結論

本研究では、検討地域をⅢ~Ⅴ地域の 27 地点に設定し、埋設する直径 190mm、長さ 20m のヒートポンプ熱源用の密閉型蓄熱井戸の本数を統一(ここでは 4 本)することで空調用熱源容量を固定し、その際に蓄熱井戸の設定水温条件を満たすために各地域に必要な高断熱戸建て住宅の断熱性能 (Q 値・μ 値) を数値計算で求めた。また、年間全室全日空調および間欠空調条件において、蓄熱井戸を用いた土壌熱源ヒートポンプを使用した場合のシステム性能、省エネ性および大気環境負荷低減効果をシミュレーションにより検討し、高断熱戸建て住宅における地盤熱源型空調システム設計手法の検討を行った。以下に本論で得られた知見をまとめる。

- ・ 検討地域における設定 Q 値は 1.45~2.7(W/m<sup>2</sup> K)となり、大半の地域で平成 11 年度次世代省エネ基準基準値を若干上回る断熱性能の標準規模高断熱戸建て住宅であれば、十分に条件を満たす。
- ・ 本システム導入の目安は年間暖冷房負荷で決定するのではなく、暖房負荷に対する冷房負荷の比率とすべきであり、ここで検討を行った蓄熱井戸容量の場合には全日空調時で 60%程度以上であった。また、本システム導入による大気環境に与える負荷についても概ね同様の暖冷房負荷比率とすれば、従来の空気熱源システムと比して削減することができる。
- ・ 空調消費電力量は、同性能の外気熱源時に比して全日空調条件において 6.6~15.0%程度、間欠空調条件において 10.0~15.5%程度低減され、全ての検討地域において省エネルギー効果が得られた。

【注】

注 1) 近年、空気熱源ヒートポンプの性能は極めて向上しているが、ここでは、水熱源ヒートポンプと同等の性能とした。

【参考文献】

- 1) 松本衛・永井久也・牛尾智秋：年周期蓄熱媒体としての地盤利用に関する研究（その 1）、密閉型蓄熱井戸による年周蓄熱実験，日本建築学会計画系論文集（1994.10）第 464 号，pp.31-38
- 2) 松本衛・永井久也・牛尾智秋：年周期蓄熱媒体としての地盤利用に関する研究（その 2）、密閉型蓄熱井戸およびその周辺地盤の熱水分性状解析，日本建築学会計画系論文集（1995.4）第 470 号，pp.37-44
- 3) 中川純一・永井久也・北野博亮：蓄熱井戸型土壌熱源ヒートポンプの適用可能性に関する研究 その 3. 部分負荷特性を考慮した場合の検討，日本建築学会学術講演梗概集（2011）D-2,p.497-498
- 4) Jury, W. Simultaneous transport of heat and mass through a medium sand, Ph thesis, University of Michigan, (1973)
- 5) 日本ピーマック <http://www.pmac.co.jp/>
- 6) 財団法人電力中央研究所 研究報告 R06024, (2007.8)
- 7) 次世代省エネルギー基準の解説、財団法人日建築環境・省エネルギー機構、(2004.6)