

太陽熱・光および放射冷却などを複合したエネルギー自立住宅“ハービマンハウス”の研究

(第二報；理論解析とシミュレーション)

An Energy-Sufficient House (HARBEMAN HOUSE) Combining Solar Thermal, Photovoltaic and Sky Radiation Energies
(2nd Report; Method of Simulation and the Results)

齋藤 武雄^{*1}

Takeo S.SAITOH

藤野 哲爾^{*2}

Tetsuji FUJINO

Abstract

In the companion paper(1st report), the experimental results for the HARBEMAN^{*3} house during the past two years were described in detail. Further the validity of the proposed house was examined through annual primary energy consumption and reduction rate of carbon dioxide emissions. However, strictly speaking, the thermal performance is strongly dependent on the climate condition (location) and heat demands where the house is situated. Therefore the performance analysis is needed under the climate conditions and the heat demands for optimal designing of the proposed house. By virtue of the theoretical simulation analysis, the system parameters such as collector area, sky radiator area, tank capacities, insulation thickness, and flow rates will be determined appropriately. This article describes the theoretical formulation and the method of computer simulation for the HARBEMAN house and its results were compared with the annual experimental data. Further, optimal designs for three major cities (Sendai/Tokyo/Sapporo) with different climate conditions will be provided by using this computer code.

Key words: Solar Energy, Natural Energy Autonomous House, Sky Radiation Cooling, Underground Reservoir, Long-Term Thermal/Cool Energy Storage, Annual Simulation

1. 緒言

第1報において、96年夏に建設した太陽エネルギーと放射冷却を主として用いるエネルギー自立住宅(ハービマンハウス)の実験性能やその二酸化炭素(CO₂)削減効果および外部コストなどを明らかにした。しかし、このハウスの最適設計のためには、建設する場所の気象条件、暖・冷房負荷や生活様式など、多様なパラメータを任意に変化させて、集熱タンクの大きさ、断熱材の厚さ、ソーラーコレクタ・スカイラジエータの面積、ポンプ流量などを適宜定める必要があり、一か所に建設した実験住宅の性能を調べるのみでは不可能である。

そこで、本報ではハービマンハウスの理論解析手法を示すとともに、数値シミュレーション結果を示し、第1報で明らかにした実測結果と比較することによって、その妥当性を検証する。さらに、そのシミュレーション手法を用いて、代表的な日本の大都市(東京/仙台/札幌)を対象にしてハービマンハウスの最適設計を行う。

^{*1} 東北大学大学院工学研究科
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)

^{*2} 三菱重工業(株)エアコン製作所
(〒452-8561 愛知県西春日井郡西枇杷島町旭町三丁目1番地)
(原稿受付 平成10年3月26日)

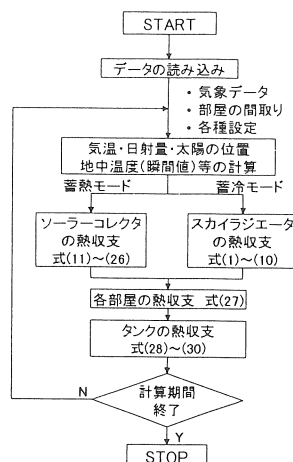


図1 フローチャート

2. 理論解析

2.1 年間シミュレーションの流れ

年間シミュレーションのフローチャートを図1に示す。なおフローチャート中の式番号は、本論文中で用いている式番号を示す。まず、気象データや各部屋の間取り、

^{*3} HARBEMAN: Harmony Between Man And Nature の略

暖・冷房などのタイムチャートなどを読み込む。次に計算ループに入り、まず気温・太陽高度・日射量・3次元地中温度場などの計算を行う。求めた地中温度場から、メインタンクの熱損失量を計算する。

蓄熱モードではソーラーコレクタ、蓄冷モードではスカイラジエータの熱収支式を解き、稼働できる条件ならば稼働し集熱量・冷却量を求める。次に各部屋の熱収支式をそれぞれ解き室温の変化を計算し、暖・冷房が必要ならば行い、負荷を求める。こうして求めた集熱量、冷却量、暖・冷房負荷および熱損失量からメインタンクの熱収支式を解き、タンク水温を計算する。給湯負荷は仙台の水道温度とタンク水温の温度差から求める。以下に計算に用いた主な基礎式を示す。

2.2 放射冷却過程の理論解析

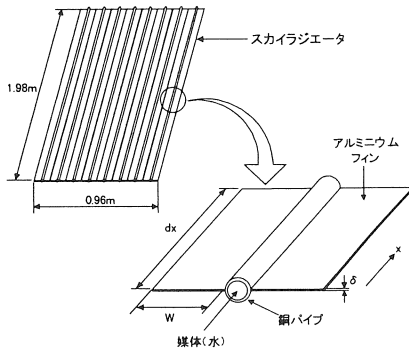


図2 スカイラジエータの概略図

図2に用いたスカイラジエータの概略図を示す。スカイラジエータは平板のフィンと媒体である水を流す中央の銅管から成る。スカイラジエータの解析にあたり以下の仮定を導入する。

1. スカイラジエータの厚さは薄く熱伝導率の高い金属製のため厚さ方向の熱抵抗は無視できる。
2. スカイラジエータの側面は完全に断熱されている。
3. スカイラジエータの光学特性は温度に対して変化せず一定であり、波長と天頂角にのみ支配され、方位角に依存しない。

解析は流れ方向に要素分割して行った。放射冷却過程の理論解析に用いた各要素*i*に対する基礎式を以下に示す。

スカイラジエータ:

$$(\rho_r c_r V_r) \frac{\partial T_{r,i}}{\partial t} = k_r V_r \frac{\partial^2 T_{r,i}}{\partial x^2} + q_{r,1} A_1 + q_{c1} A_1 + q_{c2} A_2 \quad (1)$$

媒体(水):

$$(\rho_w c_w V_w) \frac{\partial T_{w,i}}{\partial t} + m c_w dx \frac{\partial T_{w,i}}{\partial x} = k_w V_w \frac{\partial^2 T_{w,i}}{\partial x^2} - q_{c2} A_2 \quad (2)$$

上式中の A_1, A_2 は、それぞれスカイラジエータの表面

積、スカイラジエータと通水管の接触面積である。ここで、 $q_{r,1}, q_{c1}$ および q_{c2} は、それぞれ以下になる。

$$q_r = \sum_{i=1}^4 Z_i \quad (3)$$

$$q_{c1} = h_{a,r} (T_a - T_{r,i}) \quad (4) \quad q_{c2} = h_{w,r} (T_{w,i} - T_{r,i}) \quad (5)$$

式(3)の Z_1, Z_2, Z_3 および Z_4 は、それぞれ大気放射量、壁の放射量、日射量、およびラジエータの放射量であり、以下のように求められる。ただし、日射は天空日射のみを考え、赤外放射における吸収率と放射率は等しいとした。

$$Z_1 = (1 - (1 - \gamma_{t,wall}) F) \times 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} R_{sky}(\lambda, \theta) \epsilon_{t,r} \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda \quad (6)$$

$$Z_2 = 2\pi F \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{b,wall}(\lambda) \epsilon_{t,r} \epsilon_{t,wall} \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda \quad (7)$$

$$Z_3 = (1 - F) \alpha_{s,r} J \quad (8)$$

$$Z_4 = -2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{b,r}(\lambda) \epsilon_{t,r} \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda \quad (9)$$

Z_1, Z_2, Z_3 における F は、スカイラジエータに対する住宅の壁の形態係数である。 Z_1 における $R_{sky}(\lambda, \theta)$ は大気放射強度で波長と天頂角の関数であり、放射率 $\epsilon(\lambda, \theta)$ を用いて次式で与えられる。

$$R_{sky}(\lambda, \theta) = \epsilon_{sky}(\lambda, \theta) I_{b,a}(\lambda) \quad (10)$$

ここで、 $I_{b,a}(\lambda)$ は大気温度 T_a でのプランク関数である。

2.3 太陽熱集熱過程の理論解析

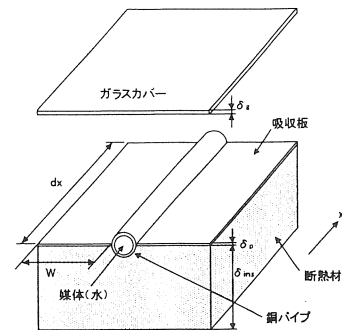


図3 平板型ソーラーコレクタの概略図

ソーラーコレクタは平板型を用いるものとする。図3に平板型ソーラーコレクタの概略図を示す。平板のフィンとガラスカバーと媒体である水を流す中央の銅管から成る。解析はスカイラジエータと同様の仮定の下で行う。ソーラーコレクタの解析に用いた基礎式を以下に示す。

吸収板:

$$(\rho_p c_p V_p) \frac{\partial T_{p,i}}{\partial t} = k_p V_p \frac{\partial^2 T_{p,i}}{\partial x^2} + q_{r,1} A_1 + q_{c2} A_2 + q_{c3} A_3 + q_{c4} A_4 \quad (11)$$

ガラスカバー:

$$(\rho_g c_g V_g) \frac{\partial T_g}{\partial t} = q_{r,g} + q_{c1} + q_{c3} \quad (12)$$

媒体(水):

$$(\rho_w c_w V_w) \frac{\partial T_w}{\partial t} + \dot{m} c_w dx \frac{\partial T_w}{\partial x} = k_w V_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} - q_{c2} A_2 \quad (13)$$

上式中の A_1 , A_2 は、それぞれ吸収板表面積、吸収板と通水管の接触面積である。ここで、それぞれの q は以下のようになる。

$$q_{r,p} = \sum_{i=1}^3 Z_i \quad (14) \quad q_{r,g} = \sum_{i=4}^7 Z_i \quad (15)$$

$$q_{c1} = h_{a,g}(T_a - T_g) \quad (16) \quad q_{c2} = h_{w,p}(T_{w,i} - T_{p,i}) \quad (17)$$

$$q_{c3} = h_{g,p}(T_g - T_{p,i}) \quad (18) \quad q_{c4} = \frac{k_{ins}}{\delta_{ins}}(T_a - T_{p,i}) \quad (19)$$

$q_{r,p}$ および $q_{r,g}$ に含まれる Z_i は以下のように求められる。なお、赤外放射における吸収率と放射率は等しいとした。

$$Z_1 = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{b,g}(\lambda) \epsilon_{i,p} \epsilon_{i,g} \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda \quad (20)$$

$$Z_2 = (1 + \gamma_{s,p} \gamma_{s,g}) \tau_{s,g} \alpha_{s,g} J \quad (21)$$

$$Z_3 = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{b,p}(\lambda) (-1 + \epsilon_{i,p} \gamma_{i,g}) \epsilon_{i,p} \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda \quad (22)$$

$$Z_4 = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} R_{sky}(\lambda, \theta) \epsilon_{i,g} \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda \quad (23)$$

$$Z_5 = (1 + \gamma_{s,p} \tau_{s,g}) \alpha_{s,g} J \quad (24)$$

$$Z_6 = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{b,p}(\lambda) \epsilon_{i,p} \epsilon_{i,g} \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda \quad (25)$$

$$Z_7 = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{b,g}(\lambda) (-2 + \epsilon_{i,g} \gamma_{i,p}) \epsilon_{i,p} \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda \quad (26)$$

Z_2 および Z_5 の J は、ソーラーコレクタの方位角および傾斜角を考慮した日射量である。

2. 4 各部屋の温度変化の解析

住宅は間取りや各部屋の壁・窓の部材・厚さについて考慮して、各部屋について計算を行い空調負荷を求める。まず壁と窓について熱収支式を解き、室内側の壁面表面温度を求めた後、室温を求めるエネルギーバランス式を解き室温を求める。その際、各部屋の空調タイムチャートから設定温度になるように空調を行い、負荷を求める。各部屋のエネルギーバランス式を以下に示す。

$$Q_{ra} \frac{dT_{ra}}{dt} + \sum_{j=1}^N A_{wall,j} h_{c,j} (T_{ra} - T_{rs,j}) + Q_{va} (T_{ra} - T_a) = H_r \quad (27)$$

2. 5 メインタンク水温変化の解析

システムのできパラメータであるメインタンクの水温

変化を求めるには以下のようなエネルギーバランス式を解く。

$$\sum_{i=1}^4 Q_i = \rho_w c_w V_w \frac{dT_{tank}}{dt} \quad (28)$$

ここで、 Q_1, Q_2, Q_3 および Q_4 は、それぞれソーラーコレクタによる集熱量またはスカイラジエータによる冷却量、タンク6面からの熱損失、各部屋の冷暖房負荷、および給湯負荷である。

2. 6 メインタンク周りの3次元地中温度場の解析

メインタンクからの熱損失を計算する上で、地中の3次元温度場の解析を行った。解析を行う上で以下の仮定を導入した。

1) 土壌中の湿分の移動、および地下水の影響はない。

2) 伝熱機構は3次元熱伝導のみである。

地中温度場解析を行う上で用いた各要素 i に対する基礎式を示す。なお、東西方向を x 軸、南北方向を y 軸、深さ方向を z 軸とし、計算領域を $(x_1, y_1, 0) - (x_1, -y_1, z_1)$ とする(図6参照)。なお、原点は図6(b)の+記号の位置としてある。

$$\frac{\partial T_{soil,i}}{\partial t} = \frac{k_{soil}}{c_{soil} \rho_{soil}} \left(\frac{\partial^2 T_{soil,i}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{soil,i}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{soil,i}}{\partial z^2} \right) \quad (29)$$

境界条件は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} z=0 & : \rho_{soil} c_{soil} \delta_{soil} \frac{\partial T_{soil,i}}{\partial t} \\ & = h_a (T_a - T_{soil,i}) + \frac{k_{soil}}{\delta_{soil}} (T_{soil,i-1} - T_{soil,i}) \\ & + \alpha_{soil,gl} I_{b,gl} + \epsilon_{i,gl} \epsilon_{sky} I_{b,sky} \\ z=z_1 & : T_{soil,i} = T_{const} \\ x=x_1, -x_1 & : \frac{\partial T_{soil,i}}{\partial x} = 0 \\ y=y_1, -y_1 & : \frac{\partial T_{soil,i}}{\partial y} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

3. シミュレーション

前節で述べた基礎式を用い、計算のフローチャートに基づきシミュレーション解析を行う。

まず、シミュレーションの妥当性を示すために、1996年7月に建設したハービマンハウスの実測結果との比較を行う。そのため建設したハービマンハウスと同じパラメータ(第1報:表1)、および間取りを用いる。計算条件を表1に示す。また、図4(a),(b)に建設したハービマンハウスの一階と地下の平面図を示す。

メインタンクは一階の中央下、地下室の隣りに位置する。シミュレーションに用いる気象データは仙台管区気象台の値を用いる。また、メインタンクの限界水温は、こ

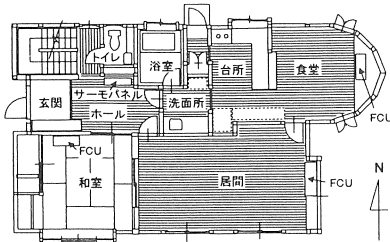


図 4(a) 一階平面図

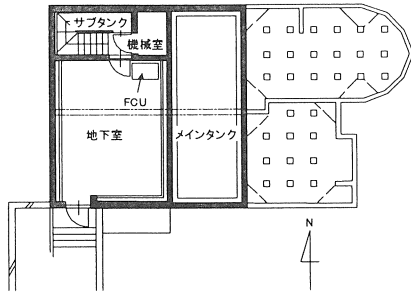


図 4(b) 地下平面図

れまでの稼働で用いた経験値である43℃とした。このメインタンクの水温が本システムの特徴を示すパラメータであり、蓄熱モードでは限界水温以上の温水であれば暖房・給湯負荷を賄うことができ、蓄冷モードでは限界水温(17℃)以下の冷水であれば冷房負荷を賄うことができる。

表 1 シミュレーション条件

蓄冷モード	1996.9.1	～	1997.3.29
蓄熱モード	1997.3.30	～	1997.8.31
気象データ	仙台:1996.9.1	～	1997.8.31
主タンクの初期水温(9/1)	19℃		
冷房限界水温	17℃		
暖房限界水温	43℃		
各部屋の冷房設定温度	26℃		
暖房設定温度	23℃		
給湯負荷	200 t/day		

3.1 スカイラジエータ

放射冷却現象を利用した季節蓄冷は本システムの特筆すべき点であり、他に類をみない。また、蓄冷モードにおいて、スカイラジエータは冷熱を造る機器として重要である。ここでは、スカイラジエータのシミュレーションを行い、実験結果と比較し、解析手法の妥当性を検証する。

ここでは1998年3月18～19日に行われた実験結果と比較する。詳しい実測結果は第1報の図13に示した。図5にスカイラジエータの積算冷却量の時間変化を示す。第1報でも述べたが、本住宅のスカイラジエータは南側の垂直壁等の影響を受けている。そこで、壁に鏡面加工したアルミ板を貼付することにより放射条件の改善を行った。シミュレーション結果から約1割冷却能力が向上することがわかる。

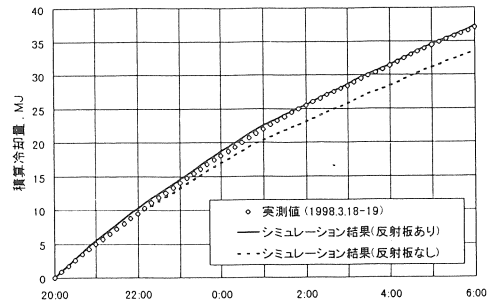
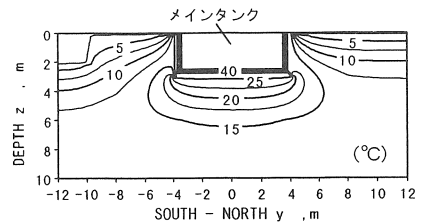


図 5 スカイラジエータの積算冷却量の時間変化

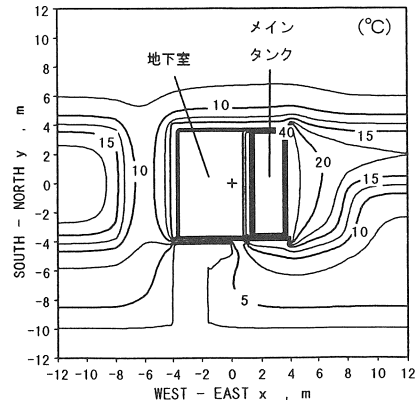
3.2 地中温度分布

ハービマンハウスにおいてシステムの中心となるのはメインタンクであり、そのメインタンクを長期蓄熱・蓄冷のために地中に埋設してある。そこで、メインタンクからの熱損失を求めるために、タンク周りの3次元地中温度場の計算を行った。計算は前章で示した基礎式を用い、計算領域は東西・南北長さ24m、深さ10mとし、境界条件として深さ10mの地中温度を年平均気温12.7℃とした。その他、地表面等の条件は建設した住宅周りと同じにした。また、蓄冷モードからの影響もあるため、まず地中温度の初期値を適当に与えて1年分計算し、正しい初期温度場を求めた後、3次元シミュレーションを開始した。

地中温度場のシミュレーション結果を図6に示す。ここでは、2月1日午前0時における温度場を示す。図6(a)は



(a) 垂直断面地中温度分布



(b) 水平断面地中温度分布(深さ1m)

図 6 地中温度分布(1997年2月1日)

タンクを中心とした南北断面、図6(b)は地下1mでの水平断面における温度分布である。図6(a)の地表面近くの温度分布が複雑になっているのは地表面における条件の相違による。図6(b)のメインタンクの西隣が地下室である。厳寒期の2月1日は蓄熱モードが開始してから5ヶ月が経っており、メインタンクからの熱が拡散し地中の温度場が緩やかになっている。

3.3 シミュレーション結果と実測結果の比較

図7にソーラーコレクタによる集熱量とスカイラジエータによる冷却量の比較を示す。上側が実測結果、下側がシミュレーション結果である。計算値はほぼ実測値と一致している。

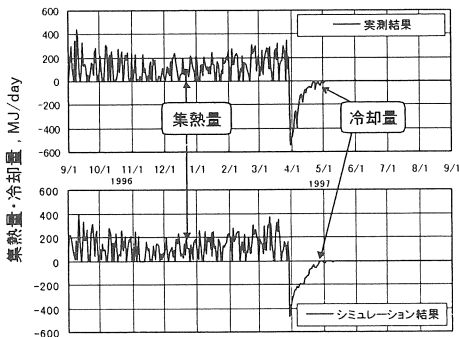


図7 集熱量・冷却量の年変化

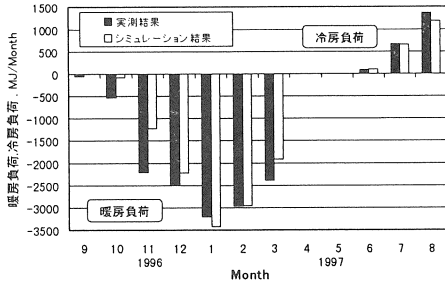


図8 暖・冷房負荷の変化

図8に暖・冷房負荷の年変化を示す。10月および11月は実測値の方が計算値より大きい、これは計算で用いた暖房のタイムチャートと天候変化による実際の暖房負荷との違いによる。

図9に熱損失の年変化を示す。計算値と実測値を比較して値の動きは似ているが、概して実測値の方が大きい。冬季において計算値が小さい原因は、計算では隣り合う部屋をタイムチャートから定期的に暖房して比較的室温を高くするため熱損失が小さくなるが、実際には室温をそれほど高くまで暖房しないため熱損失が大きくなるためである。また、計算では蓄冷モードに移った際の熱損失が一時大きくなっている。これは蓄熱モードによる地中蓄熱の影響と思われる。実測値では地中蓄熱が

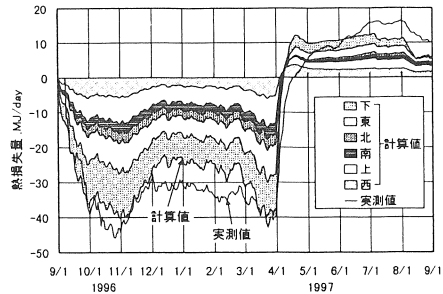


図9 メインタンクからの熱損失の年変化

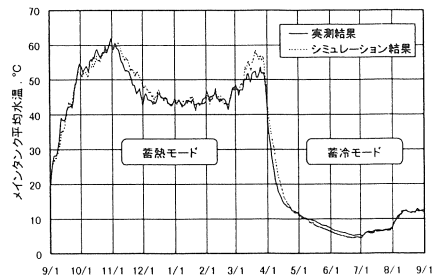


図10 メインタンク水温の年変化

4月上旬の雨・雪により早く減少した。

図10にはメインタンク平均水温の年変化を示す。メインタンクの水温は、前述のようにソーラーコレクタによる集熱量・スカイラジエータによる冷却量、暖・冷房負荷、給湯負荷、熱損失等の熱収支から決定される。

蓄冷モードでのスカイラジエータによる冷却が終わった後のヒートポンプによる冷却は、ヒートポンプに関する実測値からCOPをメインタンク平均水温の関数として求めた値を使用している。

実測値と計算値は、よく一致することがわかる。11月のメインタンク平均水温の実測値が急激に低下したのは暖房負荷が計算値よりも大きかったためである。これらのシミュレーション結果と実測値の比較から本シミュレーション手法の妥当性が検証できた。

4. ハービマンハウスの最適設計シミュレーション

4.1 仙台におけるハービマンハウスの最適設計

自然エネルギーは無尽蔵ではあるが、希薄なエネルギーであり、自然エネルギーを利用するにあたって一番大切なことは、住宅で用いるエネルギーを最小限にすることである。そのためには暖・冷房負荷を減少させる。つまり断熱性・気密性を高める必要がある。ハービマンハウスは断熱材(グラスウール)を壁に10cm、天井・床に25cm～35cm用い、窓はペアガラスと低エミッションフィルムを用いて十分に断熱を行い、IEAの低エネルギー

住宅と比較しても、ソーラーハウスとして妥当であることは第1報でも述べた。しかし、仙台は、とくに1~2月は寒く、理想的ハービマンハウスとして見た場合まだ断熱が不十分ではないかと思われる。そこで、まず、断熱材を厚くして、また窓ガラスも、さらに断熱効果の高いものにする必要がある。

1996年度のメインタンク平均水温変化からわかるように、仙台におけるハービマンハウスは、蓄熱モードがより重要であり、住宅の断熱材を厚くするとともに、タンクの断熱をさらに強化することにより熱損失を減らす必要性がある。

一般住宅において得られる自然エネルギー、とくに太陽エネルギーはエネルギー密度が小さい。そこで効率よく集熱することが大切である。第1報で述べたようにハービマンハウスでは暖房限界温度を43℃としたが、給湯などの必要性から実際には快適な生活を保障するために、50℃以上の温水が望ましい。

しかし、タンクの水が高温になると現在のソーラーコレクタ(1枚ガラス+背面断熱材5cm)では集熱効率が大幅に落ち、集熱量が減少する。そこで、仙台のような暖房負荷が大きく、冬の外気温の低い地域ではソーラーコレクタからの熱損失を極力抑える工夫が必要になる。

ここでは住宅の断熱を変えた場合およびソーラーコレクタの性能を改善した場合について、それぞれシミュレーションを行う。

理想住宅として、断熱については30cm(天井50cm)の断熱材と真空窓を用い、一方、タンクについては断熱を30cmとする。さらに、ソーラーコレクタについては2重ガラスにして、その空隙を真空にした上、背面断熱材を30cmにしたものを用いる。これを、1枚ガラスソーラーコレクタと置き換えた場合についてシミュレーションを行った図11に住宅の躯体の断熱およびソーラーコレクタを改善した場合のシミュレーション結果を示す。住宅の躯体

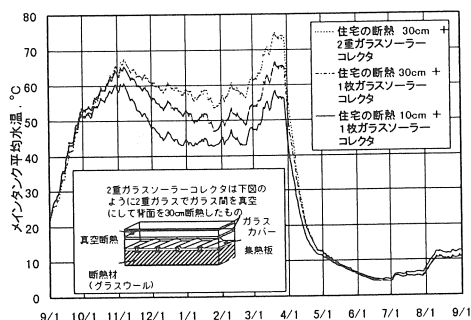


図 11 住宅の断熱およびソーラーコレクタを改善した場合のメインタンク平均水温の年変化(仙台)

およびタンクの断熱を強化することによってタンク平均水温が暖房限界水温(43℃)を下回らなくなることがわかる。さらに、ソーラーコレクタからの熱損失を極力抑えることによって、タンク平均水温が常に50℃以上で、蓄熱されたエネルギー量に十分余裕があり、快適な生活を保障した自然エネルギー自立ハウスを構築することができる。

4. 2 気象条件によるハービマンハウスの最適設計

ハービマンハウスは自然エネルギーに依存するところが大きいので、建設する土地の気象条件の違いに合わせて設計しなければならない。ここでは仙台と違う気象条件である札幌と東京を代表都市として取り上げ、ハービマンハウスの最適設計を行う。

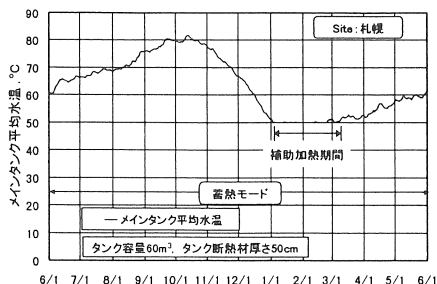
計算に際して、対象住宅は仙台に建設したハービマンハウスと同じ間取りとした。また空調タイムチャートや暖房温度も同じとした。札幌については暖房・給湯負荷がかなり大きく、逆に冷房負荷は小さいため、札幌では蓄熱を年間を通して行うシステムを考える。各都市の計算条件は表2のようになる。

表 2 各都市のシミュレーション条件

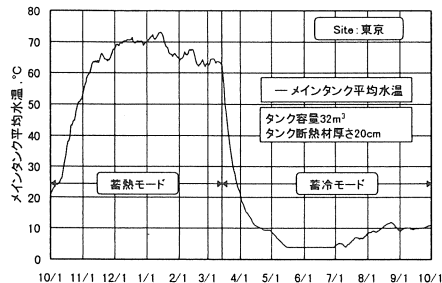
札幌	初期水温	60	°C
	メインタンク	体積	60 m ³
		断熱材厚さ	50 cm
	住宅の断熱	壁・床	40 cm
		天井	60 cm
東京	ソーラーコレクタ	窓	真空窓
			2重ガラスで空隙を真空にした背面断熱材厚さ30cmの平板型
		傾斜角	50 °
		面積	30.4 m ²
	暖房限界温度	50	°C
東京	初期水温	20	°C
	メインタンク	体積	32 m ³
		断熱材厚さ	20 cm
	住宅の断熱	壁・床	15 cm
		天井	30 cm
東京	ソーラーコレクタ	窓	樹脂製窓
			1ガラス平板型
		傾斜角	40 °
		面積	30.4 m ²
	スカイラジエータ	面積	15.2 m ²
ヒートポンプ	容量	0.8	kW
	COP	2~3	

シミュレーション結果を図12(a),(b)に示す。上図が札幌、下図が東京である。札幌の場合、暖房・給湯負荷は37.4GJ/年になり、厳寒期の補助加熱量は6.5GJであった。このことから、暖房・給湯負荷の約8割を太陽熱によって賄うことが可能であることがわかる。札幌の場合、積雪の影響が考えられるが、ソーラーコレクタの傾斜角を50°とし、温水を流すことにより融雪を行うとし、計算にはその融雪に用いる熱量も加味してある。

次に、東京の場合、蓄熱モードは問題ないが、蓄冷モードにおいて冷房負荷が大きく補助冷熱源であるヒートポンプシステムの寄与が重要になる。シミュレーション結果からヒートポンプの電力料金は深夜電力のみで年間を通して、約4100円に収まることがわかった。



(a) メインタンク平均水温の年変化(札幌)



(b) メインタンク平均水温の年変化(東京)

図 12 気象条件を変えた場合のメインタンク平均水温の年変化(札幌・東京)

5. 結言

本論文では、太陽熱・光および放射冷却などの自然エネルギーを有効に利用したハービマンハウスの理論解析手法を示し、シミュレーションを行い、以下の知見を得た。

- 1) ハービマンハウスの性能シミュレーションのための理論を構築し、シミュレーション手法を示すとともに、建設したハービマンハウスの実測値と比較し、シミュレーション手法の妥当性を検証した。
- 2) 第1報で示した実験ハウスの実測値と本シミュレーションコードを用いたシミュレーションの結果から、札幌・仙台などの寒冷地における断熱施工やソーラーコレクタの性能に改善の余地があることを指摘した。理想的なシステムを構築することにより、所期の暖房・給湯負荷を賄えることを示した。
- 3) 寒冷地の代表都市として札幌、温暖地の代表都市として東京を選びハービマンハウスの最適設計を行い、ハービマンハウスは仕様を適宜選定することにより、気象条件に対応して機能しうることを示した。

おわりに、前報と本報で、実験・理論両面でその機能を明らかにしたエネルギー自立住宅は、システムが極めて複雑であることや設備コストが高む難点はあるが、太

陽エネルギーを始めとする自然エネルギーの低密度性および間欠性を補うことが可能で、多様性および多機能性があり、また、豊かな先進国として相応しい安全性、健康面、および快適性などの点、さらには、外部コストの点からも評価できるものであることを付記し、将来の普及を願うものである。

謝辞

本ハウスの建設にあたり多大の御支援・御助力を戴いた山内建業(株)、仙都工業(株)、川名理材(株)、昭和アルミ(株)、三協アルミ(株)、三洋電機(株)、東レ(株)、森永エンジニアリング(株)の各社に深甚なる謝意を表する。また、本ハウスの基礎となる研究は、20年に亘り東北大学で行われたものであり、歴代の担当者小野富男(現 東芝)、松橋博基(現 三菱電機)、山浦継明(現 東北電力)、桑原公仁(現 松下電器)、吉岡正浩(現 川崎重工)、篠宮純三(現 日立製作所)、柳本陽太郎(現 三菱重工)、山口明徳(現 松下電器)、丸島敬(現 東芝)諸氏に感謝の意を表する。本論文の資料の整理など支援を戴いた本学大学院の鈴木雅教君に感謝の意を表する。

記号表

A : 面積	ギリシャ文字
c : 比熱	α : 吸収率
dx : 計算格子間隔	γ : 反射率
F : 形態係数	δ : 厚さ
h : 熱伝達率	ϵ : 放射率
H_r : 空調機等により発生する熱	θ : 天頂角
I_b : プラント関数	λ : 波長
J : 日射量	π : 円周率
K : 熱伝導率	ρ : 密度
m : 流量	t : 透過率
q : 熱流束	略字
q_r : 放射による熱流束	a : 大気
q_c : 対流熱伝達または熱伝導による熱流束	c : 対流
Q : 熱負荷、熱容量	f : 熱媒体
Q_{in} : 室内空気と家具等の熱容量の合計	g : ガラス
Q_{out} : 換気、すきま風等により出入りする熱容量	gl : 地表面
R_{ext} : 天空放射強度	i, j : 要素番号
T : 温度	in : 入口
t : 時間	ins : 断熱材
V : 体積	l : 赤外
W : フィン幅	out : 出口
x, y, z : 座標軸	p : アブソーバープレート
Z : 放射熱流束	r : スカイラジエータまたは放射
	ra : 室内空気
	rs : 室内壁面
	s : 短波長
	sky : 天空
	$soil$: 土
	$tank$: タンク
	w : 水
	$wall$: 壁

参考文献

- (1) 齋藤武雄, 数値伝熱学, 養賢堂 (1986).
- (2) John A. Duffie, William A. Beckman, SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES - Second Edition, JOHN WILEY & SONS, INC. (1991).
- (3) 宿谷昌則, 光と熱の建築環境学, 丸善 (株) (1993).
- (4) 宮野秋彦, 建物の断熱と防湿, 学芸出版社 (1981).
- (5) 日本太陽エネルギー学会編, 太陽エネルギー利用ハンドブック (1985).
- (6) 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂4版 (1986).
- (7) 近藤純正, 「水環境の気象学-地表面の熱収支-」, 朝倉書店 (1994).
- (8) 近藤英美, 御園生雅郎, 河原英美, 「真空ガラス」窓の断熱・防音評価, 太陽エネルギー, 23-5 (1997), 40.