

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

(第一報；稼働実績)

An Energy-Sufficient House (HARBEMAN HOUSE) Combining Solar Thermal,  
Photovoltaic and Sky Radiation Energies  
(1st Report; Operational Results)

齋藤 武雄<sup>\*1</sup>

Takeo S.SAITOH

藤野 哲爾<sup>\*2</sup>

Tetsuji FUJINO

**Abstract**

This article reports on the experimental results of a unique energy-sufficient house (HARBEMAN<sup>\*3</sup> house) incorporating solar thermal and sky radiation energies, photovoltaic electricity generation, rain water, and garbage waste heat, and so on. This natural energy autonomous house has been built in Sendai, Japan in July, 1996. The first part of our papers describes the experimental data obtained during the period between August, 1996 to March, 1998. The annual variations of water temperature in the underground main tank, heating/cooling/domestic hot water demands, collected and emitted heats by solar collector and sky radiator, were obtained by the measured data. This paper also clarifies the primary energy consumption, the external costs and the effect for reduction of carbon dioxide emissions. The primary energy consumption and carbon dioxide emissions of the proposed house are only one-tenth of those of the conventional standard house. Moreover, the thermal performance of this house will be compared with the results of the IEA Low energy house TASK 13. Finally, this paper validates the external costs (externalities) of this house, which have been intensively discussed in recent years in European countries.

**Key words:** Solar Thermal, Sky Radiation Cooling, Energy-Sufficient House, Underground Tank, Long-Term Thermal/Cool Energy Storage, Photovoltaic Cell

**1. 緒言**

昨年12月京都で開催された気候変動枠組条約の第3回締約国会議(COP3; Third Conference of Parties to the UN Framework Convention on Climate Change)では、我が国が議長国として、2008年から2012年にかけて1990年比、先進国平均で二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )を5.2%削減する議定書が採択された。

このような中、生活の基盤である住宅におけるエネルギー消費は現在でも約14%を占め、これが2010年では全体の24%に達するとの推測もある<sup>(1)</sup>。住宅でのエネルギーは照明など電気製品を除けば、温度レベルにして5~60°Cの比較的の低温度レベルのエネルギーが大宗を占める。したがって、これを太陽熱・光、放射冷却、天水、風力、地中熱など自然の恵みを主体としたエネルギーだけで自給できる可能性は十分にある。

筆者らは、20年前に太陽エネルギーと放射冷却を主とする自然エネルギー自立ハウス(別称:ハービマンハウス<sup>\*3</sup>)を提案し、大学の実験設備を用いて、基礎実験を継続して行い、蓄熱や蓄冷についての実験性能な

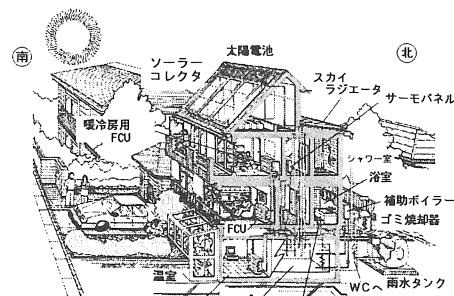


図1 ハービマンハウスの概要

どを明らかにしてきた<sup>(2),(3)</sup>。また、これに平行して理論解析を行い、パラメトリゼーションを含むシミュレーションを行って最適設計を行ってきた<sup>(4),(5),(6),(7)</sup>。このハービマンハウスの特徴は、大きく分けて2つある。1つは長期蓄熱・蓄冷を可能とするため大きな容量(30~60m³)の蓄熱(冷)槽を有することである。太陽エネルギーの蓄熱という観点からすると、水温の変動が大きいことと、補助加熱量が増えることとのデメリットを除けば、蓄熱槽容量は小さくても構わないが、3ヶ月以上に亘る長期蓄冷が必須の本システムの場合は、蓄熱(冷)槽容量は大きなければならぬ。

もう一つの特徴は、季間放射冷却を用いることであ

\*1 東北大大学院工学研究科  
(〒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 愛知県西春日井郡都把島町旭町三丁目1番地)  
(原稿受付 平成10年3月26日)

\*3 HARBEMAN: Harmony Between Man And Nature の略

ある。周知のように、放射冷却は気温が低く、湿度も低い風の弱い晴天の気象条件下で最もその効果が顕れる。しかし、あいにく我が国では冷房が必要な夏は気温も湿度も高く、放射冷却による冷却効果はほとんど期待できない<sup>4)</sup>。本システムでは、この抜本的対策として、放射冷却を気温も湿度も比較的低い4月に利用し、冷水(4~5°C)を造り、初夏まで長期蓄冷し、夏の全冷房需要を賄う季間放射冷却(Seasonal sky radiation cooling)利用技術を開拓した。

このような大容量の蓄熱槽を住宅に採用した例としては、古くは、Hoyt C. Hottelによって設計され、1939年に建てられたMITソーラーハウスがある<sup>(8)</sup>。地下には66トンの球状のスチール製蓄熱水槽があり、主に給湯用に用い、一部暖房も行った。その後、George O.G. Löfは、1959年デンバーにペブルベッド(花崗岩の碎石6トン)を蓄熱媒体とする7.2m<sup>3</sup>の垂直円筒状のタンクを有するレフソーラーハウスを自宅として建設し、これまで39年間にわたり、データを集積してきている<sup>(9)</sup>。日本においては、工学院大学の中島が提案し、国分寺市に建設した地中蓄熱式の小西ソーラーハウスがある<sup>(10)</sup>。地中にコンクリートの箱を設け、その中に多数の塩ビの円筒パイプを設けて蓄熱を行い暖房負荷を賄う。

また、低エネルギーハウスのプロジェクトとしては、IEA(International Energy Agency)が提唱し、世界12ヶ国を対象にしたIEA低エネルギーハウスタスク13(IEA Low Energy House Task 13)の報告がある<sup>(11)</sup>。

本報では、1996年7月に仙台市に個人住宅として建設したエネルギー自立ハウス;ハービマンハウスの約2年間の詳細な稼働実績を明らかにするとともに、第2報では、主に、このハウスの理論解析とシミュレーション結果を詳しく報告するものである。このハウスは、これまでの稼働実績からみて、住宅で使うエネルギーならびにCO<sub>2</sub>排出量の90%を削減できるものであり、これから環境優先の時代に有用である。

この他、本報では一次エネルギー削減効果は勿論、近年に主にヨーロッパ諸国で鋭意検討が進められている外部コスト(External costs)についても試算した結果を示す。

## 2. ハービマンハウス

### 2.1 ハービマンハウスの概要

図1に建設したハービマンハウスの概要を、図2に外観を示す。本ハービマンハウスは住宅の地下に設置した31m<sup>3</sup>のメインタンクおよび1.6m<sup>3</sup>のサブタンクを中心にしてシステムが組まれている。両方とも蓄熱媒体として水を

<sup>4)</sup> ただし、最近小規模ではあるが夏の条件下で深夜および朝方に放射冷却を利用し冷熱貯蔵する方法が筆者の1人によって提案されている<sup>(12)</sup>。

用いている。蓄熱・蓄冷槽であるメインタンクは、防水処理を施したコンクリート壁の内側に、FRPによって両面防水された厚さ15cm(一部10cm)の断熱材(ポリウレタン)により断熱が行われている。その他に庭の土中に2m<sup>3</sup>の雨水タンク(トイレ、散水、洗車などの用途)が設置してある。

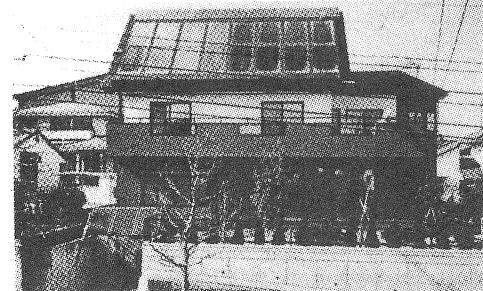


図2 ハービマンハウスの概観

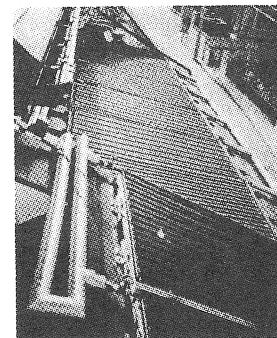


図3 スカイラジエータの概観

これら2つのタンクは南側の屋根に傾斜角45°で設置した面積30.4m<sup>2</sup>のソーラーコレクタと北側の屋根に傾斜角10°で設置した面積15.2m<sup>2</sup>のスカイラジエータ(図3参照)、各部屋のファンコイルユニット(FCU)やトイレ・廊下のサーモパネル(TP)、風呂の床暖房コイルなどと銅配管などで結ばれている。これらの装置に地下の機械室に設置したポンプによって直接水を送る。本ハウスには、これらの主要システムのほかにも様々な補助システムがあり、ポンプは全部で12個、電磁バルブは三方弁も含めて28個に及ぶほか、バルブの総個数は100個を超える。

南側屋根のソーラーコレクタの上部には1.5kWの太陽電池が設置されており、ソーラーポンプやコンピューターなど補機類の電力を補う。

上述のほかの要素の仕様を含め、表1に仕様一覧を示した。

配管総延長が600m以上、熱電対などセンサー類の長さが2000m以上に及ぶなど、本システムは極めて複雑な系を構成するため、その運転・制御は3000行以上の専用プログラムコードを作成し、コンピュータおよびマイクロプロセッサーを用いて行った。このように施工および制御が困難を極めたため、1995年12月中旬に着工

後、完成まで8ヶ月以上を要した。

表1 ハービマンハウスの仕様

建設地	仙台(北緯38°17'00" 東経140°50'14" 海抜124m)	
ソーラーコレクタ (平板型)	面積 傾斜角 方位角 流量 ポンプ消費電力	30.4 m <sup>2</sup> 45° 25°(南南東) 16.2 L/min 190 W
スカイラジエータ (北側の屋根)	面積 傾斜角 流量 ポンプ消費電力	15.2 m <sup>2</sup> 10° 11.7 L/min 95 W
メインタンク	体積	31.0 m <sup>3</sup> (7.0×2.1×2.1)
	断熱材(ポリウレタン)厚さ (底面の厚さ)	15 cm
	コンクリート厚さ	10 cm
サブタンク	体積	25 cm 1.6 m <sup>3</sup>
太陽電池	種類 面積 出力 最適動作電圧	単結晶シリコン 11.5 m <sup>2</sup> 1.5 kW 45.6 V
建物	空調面積 全面積	185 m <sup>2</sup> 230 m <sup>2</sup>
部屋の断熱材 (グラスウール)	天井・床 その他 熱貫流率(K-値, 代表値)	25~35 cm 10 cm 0.24 kcal/m <sup>2</sup> ·hr·°C
窓	熱貫流率(K-値, 代表値) 面積(南面) 面積(東西面) 面積(北面)	すべてペアガラス 0.85 kcal/m <sup>2</sup> ·hr·°C 18.0 m <sup>2</sup> 9.0 m <sup>2</sup> 4.3 m <sup>2</sup>
Low Emission Film	太陽光に対する透過率 赤外線反射率 熱貫流率(K-値)	0.5 0.78 3.9 kcal/m <sup>2</sup> ·hr·°C
雨水タンクの ヒートポンプ	体積 方式 容量 成績係数(COP)	2.0 m <sup>3</sup> 液体-液体式・電動 600 W 2.0~3.0

## 2.2 ハービマンハウスの稼働モード

ハービマンハウスの稼働には大きく分けて長期蓄熱モードと長期蓄冷モードがある。ここでは、その2つの稼働モードの概略を示すとともに、この家で補助加熱および冷却に用いているヒートポンプシステムと、トイレ、散水および洗車などの中水源として重要な要素である雨水利用システムなどについても触れる。

### 2.2.1 長期蓄熱モード

図4に長期蓄熱モードにおける主な配管図を示す。長期蓄熱モードとは、8月末または9月初旬から翌年3月の終わり頃までの稼働モードである。まず、南の屋根に設置したソーラーコレクタと地下のメインタンクを結び、ポンプにより水を汲み上げ、太陽の日射により集熱、蓄熱する。ソーラーコレクタの傾斜角が45°であるのは、日射の集熱が一番必要な冬の太陽高度が低いためで、最も効率よく集熱できる角度として設定した。タンクの温水はポンプにより冬期に各部屋のファンコイルユニット(FCU)やサーモバネル(TP)、風呂の床暖房用コイルに導き暖房し、また、直接、風呂・シャワー(2F)に用いる。さらに、市水をタンク内のコイル型熱交換器に導き、通年で給湯お

よび風呂のシャワーに用いる。また、ゴミ焼却器<sup>5</sup>からの燃焼熱も回収できるようになっている。暖房・給湯負荷を賄えないときは補助ボイラ(都市ガス)を用いる。補助ボイラを含め、これらの制御はすべてコンピュータとマイクロプロセッサーにより行っている。

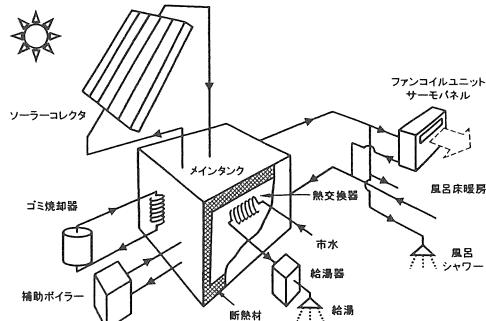


図4 長期蓄熱モード

### 2.2.2 長期蓄冷モード

図5に長期蓄冷モードにおける主な配管図を示す。長期蓄冷モードとは3月末頃から8月下旬または9月初旬までのモードである。まず、3月末から5月初旬にかけて北の屋根に設置したスカイラジエータと地下のメインタンクを結び、ポンプにより水を汲み上げ、放射冷却現象を利用し冷却しておき、初夏まで蓄冷する。これを各部屋のFCUに導き、夏期の全冷房負荷を賄う。

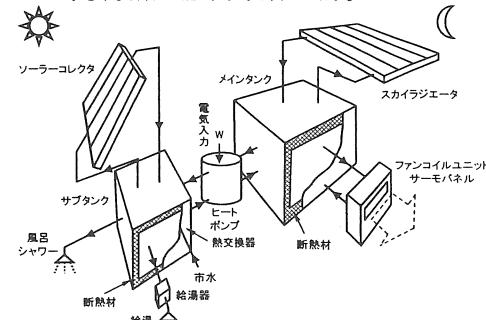


図5 長期蓄冷モード

図6にLandro and McCormickの文献<sup>(13)</sup>に示されているBell et al.<sup>(14)</sup>により測定されたColorado(山岳気候)とFlorida(亜熱帯気候)における大気放射強度の波長分布および天頂角の関係を示す。8~13μmの波長域では、大気放射は気温と同じ温度の黒体放射よりも小さく、この比較的透明な波長域を“大気の窓(Atmospheric window)”という。スカイラジエータは、この特徴を活かし、電磁波による宇宙空間への放射熱伝達を利用したシステムであり、従来の冷房システムの様に熱を直接大気に逃がさないようにし

<sup>5</sup> ただし、現在はダイオキシンの問題があるので、ほとんど使用していない。

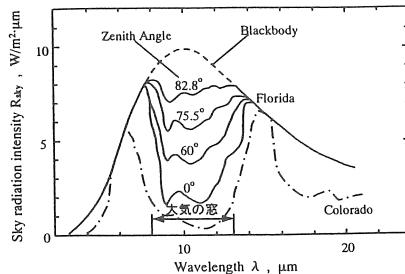


図6 大気放射強度の波長分布および天頂角の関係

たシステムである<sup>(5),(6),(15),(16)</sup>。

日本のように高温多湿な気候では、夏期における放射冷却は弱く、大阪や福岡など地域によっては、春先の放射冷却による冷却量のみでは冷房負荷を賄えない場合は、補助として深夜電力を用いてヒートポンプにより、冷却量の不足を補う。

春先の放射冷却を利用し、スカイラジエータによって直接、十分にメインタンクの水を冷却した後、ヒートポンプを稼働する。ヒートポンプによってメインタンクから熱を奪い、サブタンク下部に設置した凝縮器で放熱する。その熱をスカイラジエータによって放射冷却を利用して放出する。つまりスカイラジエータによってヒートポンプの冷熱源をつくり成績係数(COP)を向上させる。このようなシステムが、とくに西日本の都市で有効に機能することは、すでに齋藤・丸島によって、実験およびシミュレーションを通して、その実用性が確かめられている<sup>(12)</sup>。

ヒートポンプ(600W)で夜間(23:00~7:00)の安価(通常電力の約1/3)な深夜電力を用いて少しづつ蓄冷する本補助冷却システムは、電力の平準化にも貢献する。

この期間、ソーラーコレクタはサブタンクと連結され、集熱・蓄熱が行われる。このサブタンクーコレクターラープにより、春先の暖房や期間を通しての給湯などの負荷を補うことができる。

### 2.2.3 高断熱性

ハービマンハウスは当然のことながら得られる自然エネルギーを最大限有効に利用するために高断熱化を目指している。まず、壁材にグラスウールを用いて断熱を行っている。軸体壁は10cm、天井・床は25~35cmの厚さの断熱材を用いており、熱貫流率(K-値)は外壁で0.375kcal/m²·h·°C、天井で0.125(同)である。また、この住宅は全ての窓にペアガラスを用いており、さらに内側に低エミッショングルーブ(太陽光に対する透過率0.5/K-値3.9(同))を貼り、さらに窓の内側に防湿ポリエチレンフィルムを張り空気層を設けている。また、和室はさらに障子と遮音用のガラスによって、7重構造の断熱の工夫がなされている。窓のK-値は0.98(同)、和室で0.69(同)である。

メインタンクにはコンクリート壁の内側にFRPによって両面防水加工した断熱材(ポリウレタン)を全面に用いて

おり、底面を除き断熱材の厚さは15cm(底面10cm)である。

### 2.3 その他のシステム

ハービマンハウスの雨水システムは、屋根に降った雨水を雨水升・濾過升に通した後、庭に埋設した2m³の雨水タンクに貯める。その雨水をトイレ、庭の散水、および洗車などの中水源として利用する。

太陽光発電システム(1.5kW)の太陽電池モジュールは単結晶シリコンのものを用いている。系統連携型になっており、年間を通して太陽電池からの電力は、ソーラーコレクタ、スカイラジエータ、FCU、コンピュータ、および温度ロガーなど補機類の電力を賄い、余剰電力は電力会社に売電している。また、タンク内の水の浄化のために濾過器を各タンクと繋ぎ、深夜電力等によって、定期的に浄化を行っている。

将来は、家庭から出る生ゴミや紙類をコンポスト化して発酵させることにより、メタンガスを回収するとともに、その発酵熱も熱源として回収利用する方法が考えられる。

## 3. ハービマンハウスの稼働実績

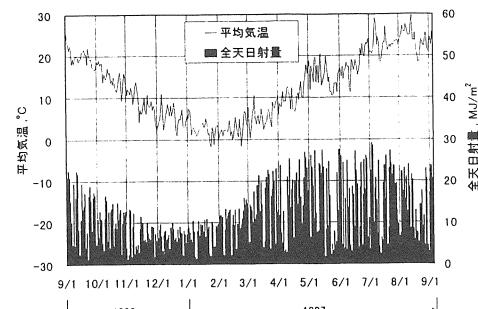


図7 仙台管区気象台による平均気温と全天日射量の変化

建設したハービマンハウスは、1996年8月に住人が入居すると同時に稼働を開始した。すべてコンピュータ1台とマイクロプロセッサー128基によって制御され、同時に計測されたデータを逐次パソコンのハードディスクに記録・保存している。

これまで筆者の大学の研究室の実験棟に設置されたシステムでの実測は行ってきたが、実用的な住宅での実測例はない。

図7に仙台管区気象台で計測された1996.9.1.から1997.9.1.までの一周年の平均気温と全天日射量の変化を示す。その期間の年平均気温は12.7°Cであった。

本ハウスの設置場所の標高は124mと管区気象台より約85m高いため、平均気温は若干低く出る。とくに、冬期の最低気温は1.5~2°C低い値となった。

### 3.1 蓄熱モードにおける実測結果

図8に蓄熱モードにおけるソーラーコレクタによる集熱

量の季間変化、図9にメインタンク平均水温の季間変化を示す。集熱は季間を通して可能であるが、メインタンク平均水温は1月から2月にかけてが最も低くなる。1996年9月から順調にコレクタによる集熱・蓄熱が行われ、10月30日に最高平均水温62.1°Cを記録した。その後、11月に入り天候が不順だったこともあって低下した。FCUやTPによって十分な暖房を行うには43°C以上必要で、1996年度は何度か43°Cを下回りガスボイラによる補助加熱を行った。3月に入ると日射の回復とともにタンク平均水温は上昇し、3月29日には52.1°Cを記録した。蓄熱モード(1996/9/1~1997/3/30)におけるソーラーコレクタによる集熱量は、26GJであった。

1997年9月以降の二年目の蓄熱モードは、その年の蓄冷モードを9月14日まで続けたため、二週間程遅れて開始した。このように、稼働モードの期間は、その立地条件と気候条件に応じて、ハービマンハウスの住人が自由に選択できるようになっている。自然を相手にしているだけに、住まい手の意志によって主要な設定パラメータを自由に変更できるシステムにする必要があり、本ハウスはそのように設計されている。1997年度は9月15日に蓄熱モードに切り換えたため、水温の立ち上がりが遅れている。9月は雨が多く集熱量が少なかったが、10月と11月は天候に恵まれ11月11日に最高平均水温64.4°C(前年より2.3°C上回った)を記録した。

図10(a)、図10(b)、および図10(c)に1996年12月15日(快晴日)の日射量、気温などの気象要素と、集熱量、集熱効率およびメインタンク水温変化などの実測結果を示した。

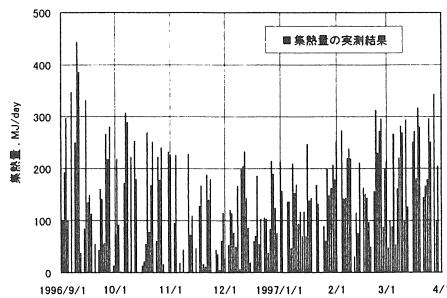


図8 蓄熱モードにおける集熱量の季間変化

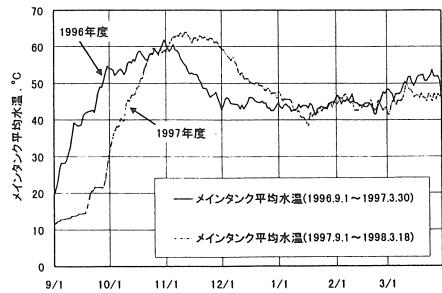


図9 蓄熱モードにおけるメインタンク平均水温の季間変化

図10(a)は、測定日の気温・湿度・1階の居間と2階の寝室の各室温の時間変化である。この日は快晴で気象台の計測による雲量は0であり、また最高気温が9.3°C、最低気温が0.7°Cであった。

図10(b)は、同じ日のソーラーコレクタ入口・出口水温とメインタンク平均水温の時間変化である。

また、図10(c)は、日射量と図(b)のソーラーコレクタの入口・出口水温差とポンプの流量から求めた集熱量をソーラーコレクタの面積で割った単位面積当たり集熱量と、それと日射量の比である集熱効率の時間変化である。日射量はソーラーコレクタを設置した同じ南側の屋根に取り付けられている日射計から実測したものである。日射量が10:30に最大となっているのはソーラーコレクタの方針が真南から25°東に向いているためである。この日の日射によりソーラーコレクタの入口水温と出口水温との差は44.0°Cから57.1°Cに、最高で13.1°C上昇している。集熱効率は、最高で54.8%であった。この日の集熱量は234MJにのぼり、メインタンク平均水温は

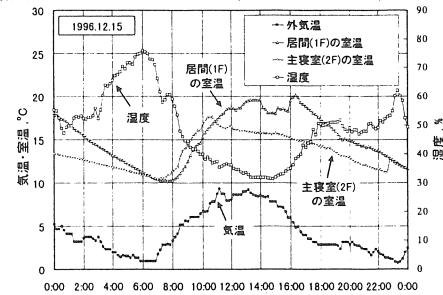


図10(a) 気温・湿度・室温の時間変化

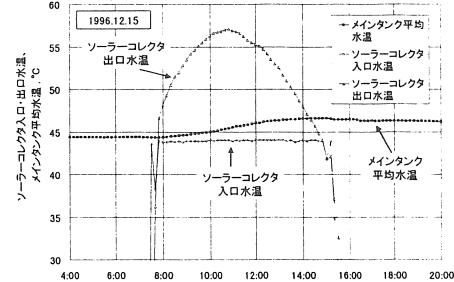


図10(b) コレクタ入口・出口水温、メインタンク平均水温の時間変化

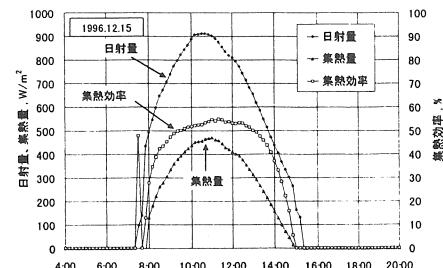


図10(c) 日射量・集熱量・集熱効率の時間変化

2.4°C上昇した。

### 3.2 蓄冷モードにおける実測結果

図11に蓄冷モードにおけるスカイラジエータによる冷却量の季間変化、および図12にメインタンク平均水温の季間変化を示す。1997年3月31日から8月31日まで蓄冷モードであった。スカイラジエータによる冷却は春先の気温も湿度も低い時期に行う。これにより、メインタンク水温が、50.9°Cから11.0°Cまで下がる。この間のスカイラジエータによる総冷却量は、4.9GJであった。その後、5月3日にスカイラジエータをサブタンク側に切り替え、深夜電力(23:00～7:00)を用いてヒートポンプ(600W)によって冷却する。安価な深夜電力を利用することで家計への負担を低減し、電力の平準化につながる。7月2日にはメインタンク最低平均水温5.1°Cを記録した。その後、7月初旬から冷房負荷がかかり始めたが、1997年はそれほど冷房負荷がかからず十分に余力を残したまま蓄冷モードを終えた。深夜電力量は約290kWhであった。

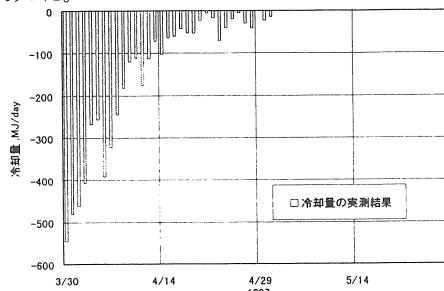


図11 蓄冷モードにおける冷却量の季間変化

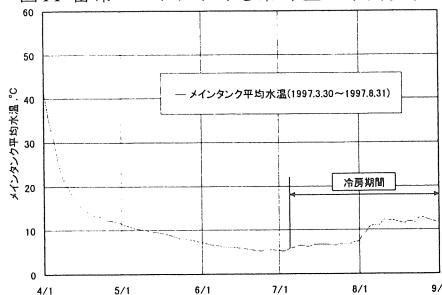


図12 蓄冷モードにおけるメインタンク平均水温の季間変化

スカイラジエータによる冷却実験結果を図13に示す。スカイラジエータは住宅の北側の屋根に取り付けられている(図3)。1996年度の蓄冷モードでのスカイラジエータの性能は予想されたほど発揮されなかった。屋根の都合から6枚は傾斜角10°、残り2枚は傾斜角30°で取り付けられているが、傾斜角10°のものは南側の垂直壁などの障害物の影響を受けている。そこで壁の影響を考慮し形態係数を加味した実際の設置状態に対応するシミュレーションを行ったところ、壁の影響によって冷却能力に

差異が生まれることがわかった。このため1996年度の蓄冷モード終えた後、壁に表面を鏡面加工したアルミ板を貼付することによって放射条件の改善を行った。

図13(a),(b)に、1998年3月18日～19日に行った、スカイラジエータの実験結果を示す。図13(a)に、スカイラジエータ入口温度と出口温度、表面温度、気温および湿度の実験結果を示す。図13(b)に入口・出口温度差と流量(12.4ℓ/min)から求めた単位面積当たりの冷却能力を示す。計算から冷却能力のうち約8割が放射熱伝達によるものであることがわかった。

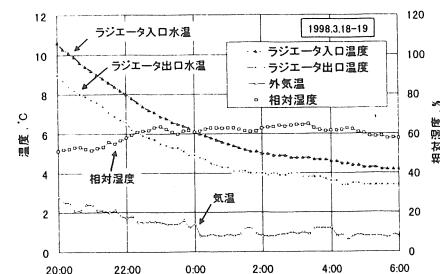


図13(a) 気温、湿度、ラジエータ入口・出口水温の時間変化

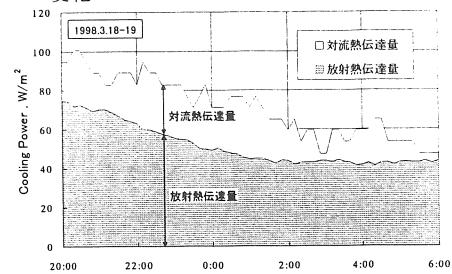


図13(b) 冷却能力の時間変化

### 3.3 暖・冷房負荷およびタンクの熱損失

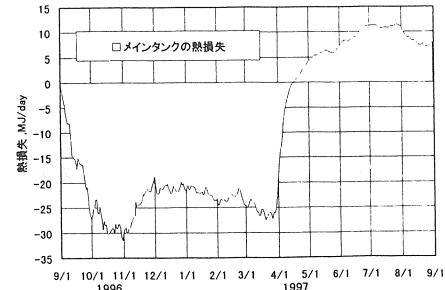


図14 メインタンクの熱損失の年変化

図14にメインタンクの熱損失の年変化を示す。熱損失はメインタンクの水温と土の温度によって変化する。そのため温度差の大きい蓄冷モードの方が、蓄冷モードより熱損失は大きくなる。メインタンクの西面と上面は住宅に面しており、メインタンクの熱損失のうち1/3は居間や地下室の暖房や冷房負荷の一部を賄っていると言える。このように配管は複雑になるが、タンクはなるべく居室に隣接する面積が大きい方がよい。図15にハーピマンハウ

スで実測された暖房および冷房負荷の年変化を示す。暖房負荷は、13.9GJ/年、冷房負荷は、2.1GJ/年であった。

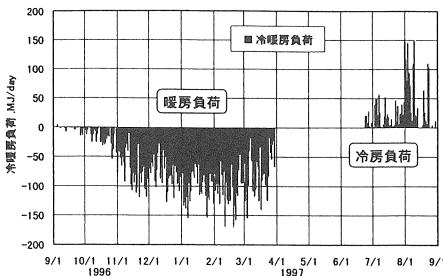
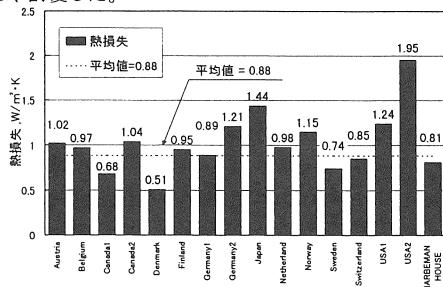


図15 暖房負荷、冷房負荷の年変化

次に、図16に、IEA(International Energy Agency)の提唱によって建設された世界各国の低エネルギーハウス<sup>(11)</sup>とハービマンハウスの熱損失の比較を示す。ハービマンハウスは1997年2月19日の計測から求めた数値である。これらのIEAの低エネルギーハウスと比較しても、ハービマンハウスは遜色のない性能を示している。なお、暖・冷房負荷その他についても比較したが、ここでは、割愛した。

図16 IEA低エネルギーハウス<sup>(11)</sup>とハービマンハウスの熱損失の比較

#### 4. ハービマンハウスのCO<sub>2</sub>削減効果および外部コストなど

##### 4.1 1/10コンセプト

ハービマンハウスは、人口増加とそれに伴うエネルギー問題を解決するため、エネルギー消費量を従来の10分の1の量で賄おうという考え方(1/10コンセプト<sup>(17)</sup>)のもと建築された。表2に本研究室が試算したハービマンハウスと従来の一般住宅の一次エネルギー(水も含む)消費量の比較を示す。一次エネルギー供給量とは一般住宅では、電気、ガス、灯油、水道等の外部からのエネルギー供給量を示し、ハービマンハウスでは自然エネルギー(太陽熱・光・放射冷却・雨水など)の最大可採量に外部からのエネルギー供給量を加えた値を示す。また、スカイラジエータによる放熱も正の供給量として加えている。表2に示すように化石燃料消費量において1/10コンセプトを実現している。この考え方方が一般に普及すれ

ば、一般家庭で消費するエネルギーを太陽エネルギー等のみで十分に賄うことが可能になり、資源の枯渇化や人口問題の解決にも寄与する。

表2 一次エネルギー消費量の比較

住宅	一次エネルギー供給量(GJ/年)	床面積あたり一次エネルギー供給量(MJ/m <sup>2</sup> ・年)	暖房・冷房・給湯電気・ガス(調理)水道(上・下)料金(万円/年)	化石燃料消費量(石油換算)(×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /年)
一般住宅*(旧省エネ基準ケース)	73.3	874.9	65	5312
HARBEMAN HOUSE	117.2***	581.9***	16	494**

(註) 石油の発熱量は38.9 MJ/m<sup>3</sup>とした

\*「環境共生住宅」による \*\*PVシステムの発電を含む \*\*\*期待可採量を示す(電気、ガス、灯油等を含む)

##### 4.2 外部コスト

太陽エネルギーの普及は、期待されるところとは遠い現状にあり、競合する既存エネルギー(とくに化石エネルギー)と比較し割高なコストがその普及の阻害要因となっている。しかし、便利な割に価格の安い化石燃料エネルギーは、資源の枯渇、CO<sub>2</sub>放出を主因とする地球温暖化の元凶となっている。また、原子力発電は使用済み核燃料の管理等の問題があり、新設はますます困難な状況にある。従つて、このような環境や健康等社会に負担を強いいるコスト(外部コスト: External Costs または、Externalities)を加え、総合的に評価する必要がある。外部コストの概念は、1912年にPigionによって初めて提唱され、1980年代に入ってヨーロッパで鋭意研究が進められてきている<sup>(19),(20)</sup>。外部コストに関して多数の研究が行われているが、その導出過程や手法はそれぞれのプロジェクトにより異なっている。したがつて、我々も外部コストの試算に独自の手法を用いた。算出方法については文献<sup>(21)</sup>に示す。その結果、削減できる外部コストは年平均約337万円という結果が得られ、この数値自体まだ確立されていないものの、環境や健康に与える負担をかなり軽減していると考えられる。

##### 4.3 CO<sub>2</sub>削減効果

現在、民生部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は増加の一途をたどっており、削減目標を達成するには住宅におけるCO<sub>2</sub>をいかに削減するかが大きな課題となっている。しかし、実際に家庭においてどのくらいCO<sub>2</sub>が排出されていて、生活のレベルを落とさずにどのくらい削減が可能なのかがはっきりしていない。そこでモデル住宅を設定し、現在年間どのくらいCO<sub>2</sub>を排出しているのかエネルギー機器の点から算出し、削減可能性を試算した。そこからハービマンハウスがどのくらいCO<sub>2</sub>削減に貢献できるか試算を行つてみた。

モデル住宅は3LDKの木造の一戸建て住宅(延べ床面積100m<sup>2</sup>、断熱材(グラスウール:50mm)とし、居住地は仙台で4人家族とした。また家庭における電気機器・ガス機器等のエネルギー消費機器を石油ファンヒーター・エアコン・冷蔵庫・テレビ・ビデオ・ガス給湯器・乗用車(1800cc)など26品種に亘って設定した。

計算にあたり、表4に示すような家庭におけるCO<sub>2</sub>削減への3つのシナリオを考え、比較した。

内容	
シナリオ0 (現況)	一般的なエネルギー消費機器を用いる
シナリオ1 (現況)	現況で用いている製品を消費エネルギー(待機電力・使用水量等を含む)の最小の製品に置き換える(トップランナ方式)
シナリオ2	シナリオ1に加えて以下のよう省エネ努力をする ・住宅の断熱材を150mm相当にする ・待機電力・保温時電力をなくす ・給湯器の効率を上げる ・洗濯には風呂の残り湯を用いる
シナリオ3	シナリオ2に加えて自然エネルギーを積極的に取り入れる(ハービマンハウス化) ・太陽熱集熱器を用いて、暖房・給湯負荷を太陽熱によって100%賄う ・太陽電池を1.5kW設置し、電力を一部賄う ・冷房負荷を放射冷却(深夜電力)を用いて賄う ・電気自動車を用いる

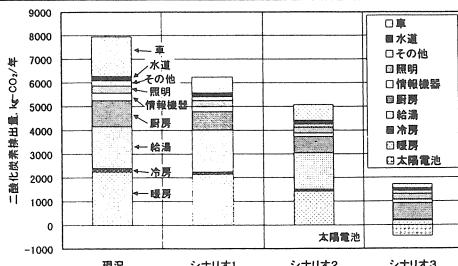


図17 一般家庭のエネルギー消費機器による二酸化炭素排出量

図17に一般家庭のエネルギー消費機器によるCO<sub>2</sub>排出量の試算結果を示す。この試算から現況から性能の良い製品に置き換えた(シナリオ1)だけで、20%以上のCO<sub>2</sub>排出量を削減でき、さらに省エネ努力(シナリオ2)を行うと現況より35%以上、さらに住宅をハービマンハウス化すると、暖・冷房・給湯負荷を現況より90%以上削減することができる。

## 5. 結 言

太陽エネルギー(熱・光)、および放射冷却を主軸とする自然エネルギーで住宅の暖・冷房・給湯・給水の90%以上を自給することを目的として建築された自立住宅"ハービマンハウス"について約2年間に亘る実測を行ったところ、以下の結論が得られた。

- 建設した実験住宅の稼働モードの詳細を示し、2年間に亘る長期蓄熱・蓄冷モードにおけるタンク平均水温や供給エネルギー量などの実験性能を明らかにした。
- 長期蓄熱・蓄冷モードにおける集熱量・冷却量、暖・冷房負荷、タンクからの熱損失などの基本性能の詳細を示した。
- 近年重要になりつつあるCO<sub>2</sub>排出量削減効果について示した。また、本ハウスの外部コストを試算し、新たな評価基準として考える価値があることを指摘した。

おわりに、本ハウスは、現状では極めて複雑な系から構成され、その建設費も高価で施工および制御もコンピ

ュータと多数のマイクロプロセッサー群に頼らざるを得ないが、本質的にエネルギー密度の小さい自然エネルギーを利用してする場合は、このような複雑かつ多機能性を持たせることが一つの解決策であると考えられる。

システムの各要素は、未だ改善の余地があり、建設コストも大幅に低減できる可能性があり、将来の産業や技術の創出にも寄与するものと考える。

## 参考文献

- 資源エネルギー庁、最近のエネルギー情勢と我が国のエネルギー政策の課題について(1998),6
- 齋藤武雄、地下大型蓄熱槽を用いた太陽エネルギーの長期蓄熱法の研究、第18回日本伝熱シンポジウム講論集(1981),39.
- T.S.Saitoh, An Autonomous House Using Long-Term Storage of Solar Energy, Chapt.IV, "Power Production and Storage Techniques of Alternative Energy", RC59(Report I), JSME (1982),144.
- (4) T.S.Saitoh,H.Matsuhashi and T.Ono, An Energy-Independent House Combining Solar Thermal and Sky Radiation Energies, *Solar Energy*, 135-6(1985),541.
- (5) T.S.Saitoh and T.Ono, Utilization of Seasonal Sky Radiation Energy for Space Cooling, *Trans. ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 106(1984),403.
- (6) T.S.Saitoh and T.Ono, Simulative Analysis for Long-Term Underground Cool Storage Incorporating Sky Radiation Cooling, *Trans. ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 106(1984),493.
- (7) T.S.Saitoh, Natural Energy Autonomous House with Underground Water Reservoir, *Bulletin of JSME*, 27-226(1984),773.
- (8) H.C.Hottel et al., The Performance of Flat-Plate Solar-Heat Collectors, *Trans. of the ASME*, 64(1942),91.
- (9) G.O.G.Löf et al., Residential Heating with Solar Heated Air -the Colorado Solar House-, *ASHRAE Journal*(1983).
- (10) 中島康孝ほか、小西ソーラーハウス、太陽エネルギー,4-1(1978),26.
- (11) IEA, SOLAR LOW ENERGY HOUSES OF IEA TASK 13 (1985).
- (12) 齋藤武雄・丸島敬、放射冷却冷房システムに関する研究、太陽エネルギー, 24-1(1998),46.
- (13) B.Landro and P.G.McCormic, Effect of Surface Characteristics and Atmospheric Conditions on Radiative Heat Loss to a Clear Sky, *Int.J.Heat Mass Transfer*, 23(1980),613.
- (14) E.E.Bell, L.Einsner,J.Young and R.A.Oetjen, Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelengths between 1 and 20 Microns. II.Sky Measurements, *J.Opt.Soc.Am.*, 50(1950),1313.
- (15) T.S.Saitoh, K.Kuwabara, Experimental Performance for Long-Term Sky Radiation Cooling Using Prototype Sky Radiator, *ASME-JSME-JSES Solar Conf.*, Hawaii(1987),512.
- (16) T.S.Saitoh, J.Shinomiya and Y.Yanamoto, A Theoretical Model for an Open System with Sky Radiation Cooling and Solar Radiation, *Solar Engineering*(1995),1047.
- (17) 齋藤武雄、ヒートアイランド—灼熱化する巨大都市、講談社ブルーバックス(1997).
- (18) 地球環境・住まい研究会、環境共生住宅 計画・建築編、ケイブン出版(1994.9).
- (19) O.Hohmeyer, Social Costs of Energy Consumption, External Effects of Electricity Generation in the Federal Republic of Germany, Berlin:Springer-Verlag(1988).
- (20) R.Ottinger et al., Environmental Costs of Electricity, New York:Oceana(1990).
- (21) 齋藤武雄・鈴木雅教、自然エネルギー自立ハウス(ハービマンハウス)の外部コスト、第8回環境工学総合シンポジウム講演論文集,(1998),46.
- (22) 科学技術庁資源調査会編、家庭生活におけるエネルギー有効利用、大蔵省印刷局(1994).
- (23) 資源エネルギー庁省エネルギー石油代替エネルギー対策課、省エネルギー総覧、省エネルギーセンター(1994).
- (24) (社)環境情報科学センター、環境家計簿、環境庁地球環境部(1997).