

研究論文

半地下型パッシブ・ソーラー・ハウス 「アースシップ」の熱的性能に関する研究 (自然室温状態における長期実測と数値シミュレーション)

Thermal Performance of an Earth Sheltered Passive Solar House "Earthship"
(Long-Term Measurement for the Test House without
Auxiliary Space Heating and Computer Simulation)

松本 真一^{*1}
Shin-ichi MATSUMOTO

吉野 博^{*1}
Hiroshi YOSHINO

古木 直人^{*2}
Naohito FURUKI

Abstract

An earthship developed by an American architect, M. Reynolds, is a kind of earth sheltered passive solar house utilizing recycled building materials such as used cans and rubber tires for the wall construction. To obtain fundamental information on the thermal performance under the climate of Japan, carried out were measurement without any space heating/cooling, using the test house constructed in Kagawa Prefecture, and a series of FEM simulations. Main findings are summarized as follows:

- 1) The annual and daily temperature fluctuations of indoor air of the test house are remarkably stable comparing with those of the outdoor air. However, the indoor air temperature during the summer fluctuates over 30°C. On the other hand, calculation results show that such problem can be solved by shading for the south-facing large window.
- 2) In case using shading devices and night insulation (Weather shutters) for the south-facing window, the estimated heating/cooling loads for the earthship model are remarkably smaller than those for a slab-on-grade model of which size is similar.

Key words : Passive Solar House, Earth Sheltered House, Thermal Performance, Free Temperature Fluctuation, Balanced Temperature, Heating/Cooling Loads, Energy Simulation, Finite Element Method

1. 序

アースシップ (Earthship, 以下 ES と略記する) とは、米国の建築家マイケル・レイノルズ (Michael Reynolds) 氏が「大量消費型の生活スタイルから、環境への負担をできるだけ少なくして自然と共生できる生活スタイルへの変革」を基本コンセプトとして考案した、南面に大きな集熱窓を持つ半地下型の形態の住居のこと、土壤の熱的特性と太陽エネルギーを利用した一種のパッシブ・ソーラー・ハウス (passive solar house) と言うことができる⁽¹⁾。また ES は、その主要構造体に土を詰めた古タイヤと空き缶を利用することに大きな特徴があり、資源の再利用と省エネルギー型の生活を指向したエコロジー・ハウス (ecology house), あるいは環境共生住宅と見ることもできる。

米国では現在、中西部や太平洋岸部など比較的乾燥した気候を持つ地域を中心に、200~300件の建設例があり、実際に居住空間として利用されているという⁽¹⁾。ま

た我が国においても、ES は環境共生住宅の概念の浸透とともに注目され、建設の機運が高まりつつある。

被土住居全般の室内熱環境については、この種の住宅建設の盛んな米国・カナダで研究調査例がいくつか見られるが⁽²⁾、ES に限定すれば、その熱的性能に関しては殆ど研究されておらず、熱環境計画に関わる基礎資料が不足している。特に、米国で考案された ES が、雨や湿気の多い日本の気候条件においてどのような性能を示すかは全く不明である。

このような状況の中、四国の香川県財田町に'93年11月、展示用の ES が日本で初めて試験的に建設された。これは、住民への環境共生の概念の啓蒙を兼ねた一種のイベントとして企画されたもので、その施工の一部は住民参加によって行われた。筆者らは、計画段階からその建設に関与する機会を得た。

そこで筆者らは、ES の熱的性能を明らかにし、我が国の気候条件の下での熱環境計画に関わる基礎的資料を得ることを目的として、①財田町の ES (以後「試験用 ES」と略記する) における熱環境の長期実測と、②数値シミュレーションによる性能予測の両面から一連の研究を行うことにした。

本報はその初報であり、まず第一に①試験用 ES の概

* 原稿受付、平成 8 年 6 月 20 日

*1 会員、東北大学工学部建築学科 (〒980-77 仙台市青葉区)

*2 (株)連印刷 (〒246 横浜市瀬谷区本郷 1-64-4)

要を示した後、②冷暖房を行わない自然室温状態における長期実測結果、及び③簡易な2次元有限要素モデルを用いて、試験用ESに日射遮蔽や夜間断熱を施した場合の効果に関する予測計算を行った結果について報告する。

2. 試験用アースシップの概要

2.1 建物概要

'93年11月に竣工した試験用ESは、香川県財田町の総合運動公園(北緯: 34°07.0', 東経: 133°46.9')内に位置する。建物の全景を写真1に、また、平面、南北方向の断面をそれぞれ図1、図4(b)に示す。試験用ESは公園内の丘の南斜面に横から差し込んだような半地下構造になっており、北壁は完全に地中に埋もれている。建設箇所周囲の土質はロームである。

屋内空間を便宜上「A室(Room A)」、「B室(Room B)」及び南面ガラス側の「温室(Greenhouse)」の3室に区別して呼ぶことにすると、室間に界壁はない。床面積はそれぞれ、30.7m²、14.0m²、17.4m²、室容積(内法)はそれぞれ、62.2m³、26.8m³、46.8m³である。A室とB室の東西北面は、土を詰めた古タイヤを利用した壁で囲まれている。また、温室の南側には全面はめ殺しの高断熱複層ガラス(low-e glass/low-emissivity glass、熱貫流率1.88W/m²K)が設置され、東西面は空き缶とモルタルで造られた壁となっている。A室に2ヶ所、B室には1ヶ所、開閉可能なトップ・ライト(sky light)が付けられ、南面ガラス下には直径200mm、長さ約20mのクール・チューブ(earth tube)が3本埋設されている。

屋内には、測定用コンピュータ、測定器具以外のものは置かれていないが、温室には花壇が設けられ、植栽が施されている。

ESの大きな特徴である古タイヤと空き缶を用いた壁の内部を写真2に示す。これは展示の目的で、あえて表面仕上げを行っていない部分である。この壁は、古タイヤの中に土を入れてハンマーで突き固めたものをレンガのように積み上げ、隣り合う古タイヤの間の隙間を空き缶と土を用いて埋めた上、最後に表面をモルタルで平坦に仕上げるという要領で造られている。室内側表面はさらに、結露対策・調湿対策のために、珪藻(けいそう)土で仕上げられている^{*3}。

2.2 断熱・気密性能

土壤に接していない地上部分の壁体の総括熱貫流率

*3 珪藻土の吸放湿能力は石こうボードの約10倍、木材の2.5~3.5倍と言われている⁽³⁾。



写真1 試験用アースシップ(香川県財田町)の外観

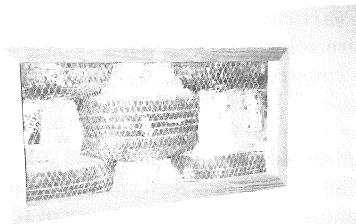


写真2 古タイヤと空き缶で造られた壁内部

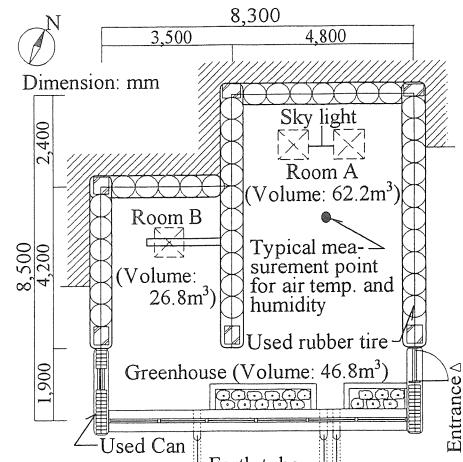


図1 試験用アースシップの平面

は、90.6W/K(単位床面積当たり1.4W/m²K)と見積もられる^{*4}。

気密性能は、'94年5月下旬に加圧法⁽⁵⁾により、3本のクール・チューブをシールした場合としない場合について実測した。その結果、シールした場合の単位床面積当たりの相当開口面積(αA)⁽⁵⁾は1.75cm²/m²、シールしない場合の $\alpha A'$ は6.96cm²/m²であった^{*5}。

*4 外気に面する地上部分の壁体のうち、天井や窓、ドアについては、設計図書より熱貫流率を計算することが可能である。しかし、土を詰めた古タイヤと空き缶を用いた壁の熱貫流率は、土の熱伝導率が不明である上、壁体を構成する材料が平面的な層を成していないため、算定が困難である。そこで、以下の手順で推定することにした。

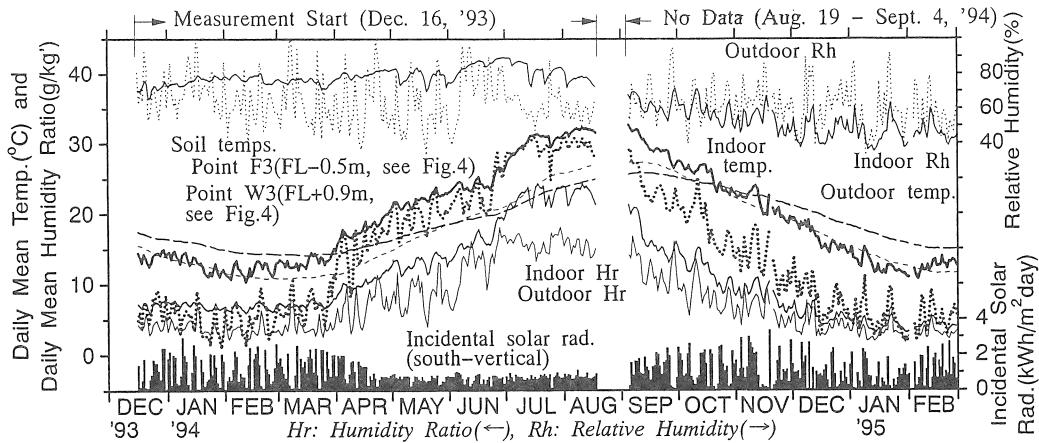


図2 日平均温湿度の長期変動(自然室温状態: '93年12月16日~'95年2月28日)

3. 試験用アースシップにおける熱環境の実測

3.1 実測概要

3.1.1 実測項目とセンサ配置

実測項目は、①外気の温湿度、②水平面全天日射量、③A室の温湿度とグローブ温度、④B室及び温室の温度、⑤南側窓からの透過日射量、⑥建物周りの地中温度、⑦各壁体(壁、床、屋根、南面窓ガラス)の内外表面温度である。

温度測定には0.3mmΦのCC熱電対(精度±0.1°C)、湿度測定には高分子膜型温湿度変換器(精度±3%RH)、また日射量の測定には光電池式日射計を用いる。各種センサをコンピュータで制御されたデータ・ロガに接続し、温湿度は20分刻みの瞬時値、日射量は20分間ごとの積算値として自動収録する。

- 1)異なる深さで実測した床下地中温度の年間変動の位相差に基づき熱拡散率を推定し^④、容積比熱は同じ土質(ローム)に対する既往の実測値^④と等しいものと想定することにより、土の熱伝導率を推定する。
- 2)土を詰めた古タイヤ壁が、モルタル、土、ゴム、珪藻土、密閉空気層で構成されるものとし、これらを実際に近い容積比で配分して層状に並べたモデルに置き換え、熱貫流率を計算する。容積比熱も同じ方法で推定することとする。
- *5 試験用ESのクール・チューブは、3本全てを開放しておくのが通常と想定される。従って、6.96cm²/m²が試験用ESの気密性能を代表すると想える。この値は気密グレード^⑤のグレード4に該当し、かなり気密性能が低く、隙間換気量が大きい建物の部類に属するが、窓を開放するなどしない限り、クール・チューブには大きな換気駆動力が働かないはずで、実際の自然換気量はかなり少ないと推察される。

ちなみに、気密性能の実測結果より、クール・チューブの相当開口面積は331.5cm²(1本当たり110.5cm²)、その他の隙間の相当開口面積は111.1cm²と見積もられるから、これらの隙間を単純な点開口と見なし、それぞれが床直上と天井高さの中央にある(開口間の距離1.1m)と考えて浮力をによる自然換気量を計算すると、室内外温度差10°Cのときに約34m³/h(換気回数0.25回/h)程度の値となる。

主な温度測定箇所は図4に●印で記した通りである(以下の記述において「A室温」、「A室湿度」などと言う場合は、A室中央床上1.1mにおける測定値を指す)。外気の温湿度は建物から南に約4m離れた箇所に設置した百葉箱の中で測定する。また、水平面全天日射量は百葉箱の上で、南鉛直面透過日射量は温室西側のガラス中央からやや下よりの箇所で測定する。

3.1.2 実測条件

実測は、冷暖房を一切行わない自然室温の状態で'93年12月16日より開始し、現在も継続中である。期間中はなるべく換気のない状態で実測を行うこととしたが、試験用ESは展示用でもあるため、人の出入りなどがあり、適宜、ドアや天窓が開放された^⑥。またクール・チューブは、'94年1月中旬から3月中旬までの期間、3本ともビニール・シートでシールしたが、それ以外の期間は開放した。従って実測期間中、換気を阻止した条件が厳密に実現した訳ではない。

3.2 年間温湿度変動の実測結果

実測開始時から'95年2月までの約14ヶ月間、各部の日平均温湿度の長期変動を実測した結果を図2に示す。

3.2.1 室内外温湿度

'94年の年間データによれば、年平均室温(A室温)は21.4°Cで、年平均外気温16.5°Cよりも約5°C高い。また、室温の年較差は21.9°Cで、外気温の年較差30.9°Cの約7割である。図によれば、冬期の室温は外気温よりも7~10°C高く、夏期には外気温にほぼ等しいか1~2°C

*6 特に'94年7月から8月にかけて、室内の湿気を除去するため、晴れた日中に天窓が適宜開放された。また、温室花壇への植栽は'94年9月に中止されたが、それ以前には水やりも適宜行われ、人の出入り、室内における水分発生もあった。しかし、これらの行為を行った日時、時間帯などの詳細は記録されていない。

高めで、30°Cを越える。

室内相対湿度は'94年前半には70~90%RHと高湿であるが、'95年1月以降は40~60%RHまで低下している。月平均絶対湿度を'94、'95両年の2月について比べると、前者が6.7g/kg¹、後者が5.2g/kg¹であり、明確な違いが認められる。その原因として、建設直後に躯体に含まれていた余剰水分が減ってきたことと、温室花壇への植栽を'94年9月に取りやめたことが考えられる⁶。

3.2.2 地中温度

図2によれば、A室中央床下0.5mの地中温度は、A室北壁脇の地中温度(床上0.9m)よりも年変動幅が小さく、室温に比べ、冬期に最大で約6°C高く、夏期に最大8°C程度低い。床下土壤の屋内空気に対する温冷熱源としての寄与は、壁脇部分の土壤よりも大きいことが推察される。

3.3 冬期における温湿度性状

冬期における例として、'94年1月15日から17日までの3日間の各部温湿度の日変動を図3に示す。また、この3日間において、外気温が最低値を記録した16日7時20分における地中温度分布を図4に示す。

3.3.1 室内外温湿度

図3(a)によれば、A室温は、日射量の多い1月15、16両日に朝方に約12°C、日中に約8°C外気温より高くなっている。外気温の日較差は、15日に10.4°C、16日に14.6°Cであるのに対し、A室温のそれは両日でそれぞれ、5.8°C、5.4°Cであり、外気温の1/3~1/2程度に抑えられている。A室温は、外気温に比べ、高温で安定していると言える。特に日射量の少ない17日は、外気温が一日の間に9°C程度変動しているのに対し、A室温は一日中約13°Cで安定している。

図3(b)より、外気の相対湿度は40~100%RHの範囲を変動し、一方室内(A室)の相対湿度は、温度が日変動するにも関わらず約75~80%RHの間で安定していること、また、絶対湿度が室温の日変動に追随して変動していることが判る。これは、表面仕上げに用いた珪藻土による調湿効果によるところが大きいものと考えられる。室内の絶対湿度は、外気側よりも平均して約4g/kg¹高い。

3.3.2 地中温度

図3(a)によれば、地中温度は殆ど日変動せず安定している。床下地中温度は全体的に壁脇の地中温度よりも高く、深さが増すほど高温である。室温と床下地中温度の差に注目すると、日射量の少ない日中や夜間に後者の方が2~4°C高い。また壁脇地中温度も、日射量の多い日の夜間にわずかながら室温を上回る。

3.3.3 地中温度分布

図4によれば、床や壁表面温度は室温よりも高く、日中、躯体に蓄えられた熱が放熱されているのが判る。北側タイヤ壁の土壤側表面温度は、壁脇地中温度や室内側壁表面温度よりも高く、壁の外側から室内と壁脇の土壤の両方に熱が流れていることが推察される。床下地中温度は、床下1.0m、0.5m、床スラブ下端の順に温度が低くなり、床下土壤から床スラブ、室内へと熱が流れていることが推察される。土を詰めた古タイヤ、床スラブといった躯体は、蓄熱体として温度の日変動緩和に寄与していると言えよう。

3.4 夏期における温湿度性状

図5に'94年7月23日から25日までの3日間の日変動を例示する。また期間中、外気温が最高を記録した23日15時における地中温度分布を図6に示す。

3.4.1 室内外温湿度

図5(a)より、7月23、24両日の日中におけるA室の温度は、外気温よりも1~2°C低いものの、約33°Cにまで達しているのが判る。夜間の室温は逆に、外気温よりも4°C高い。また、比較的の日射量が少なく外気温も低い25日には、A室温は約31°Cで安定し、外気温より5~6°C高い。夏期においても室温の日変動は小さいと言えるが、夜間に外気温が下がっても室温はあまり下降しない。

図5(b)によれば、外気の相対湿度が30~100%RHの範囲を大きく変動するのに対し、室内の相対湿度は約78%RHで安定しているのが判る。室内の絶対湿度は、相対湿度を安定させるように室温変化に伴って変動し、日中に上昇している。夏期においても、珪藻土の吸放湿性による調湿効果が認められる。絶対湿度を室内外で比較すると、日射量の多い23、24両日には室内の方が平均で7~8g/kg¹高く、より高湿である。

3.4.2 地中温度

図5(a)の通り、地中温度は殆ど日変動せず安定している。しかし冬期と異なり、床下地中温度は全体的に壁脇地中温度よりも低く、深さが増すほど低温である。室温と比較して地中温度は概して低いため、躯体周りの土壤は夏期の冷熱源として寄与していることが推察される。

3.4.3 地中温度分布

図6によれば、床や壁の表面温度は室温よりも低くなってしまっており、室空気から壁に向う熱流が生じるのが判る。壁脇地中温度は土壤側の壁表面温度よりもさらに低く、建物から壁脇の土壤に熱が流れていることが推察される。また、床下地中温度の垂直分布からも熱が

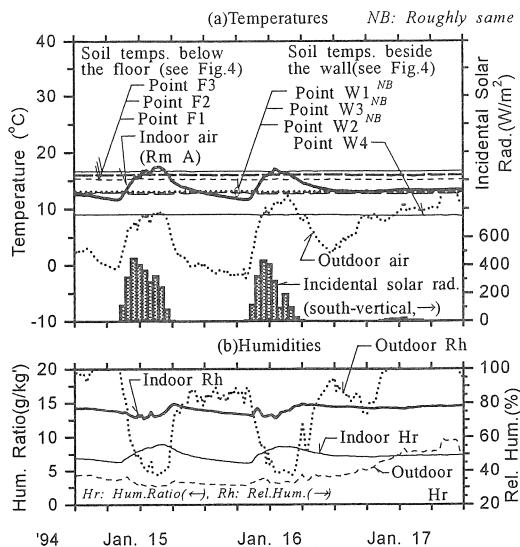


図3 冬期における各部温湿度の日変動例
('94年1月15日~17日)

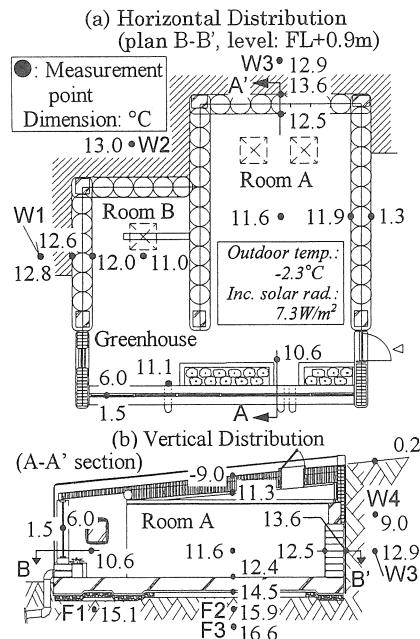


図4 冬期における地中温度分布の例
('94年1月16日 7時20分)

下方に流れていることが判る。軸体周りの土壤の冷熱源として寄与は、地中温度分布図からも推察できる。

3.5 部位別熱流の推定

以上に示した実測結果より、試験用ES周りの土壤が冬期の温熱源、夏期の冷熱源として寄与していることが推察された。本節では、実測データに基づき、部位

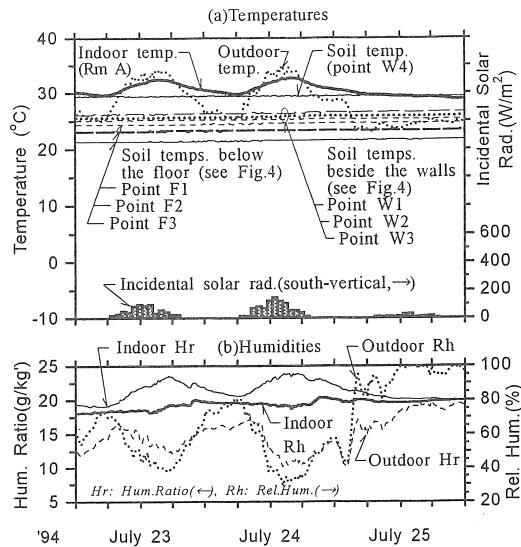


図5 夏期における各部温湿度の日変動例
('94年7月23日~25日)

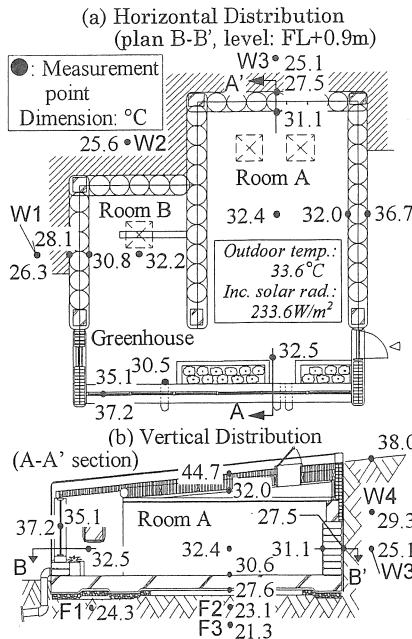


図6 夏期における地中温度分布の例
('94年7月23日 15時00分)

ごとに月別の熱取得量・熱損失量を定量的に推定し、土壤に接した床スラブや地下壁における熱流性状を分析することにより、土壤の寄与について考察する。

3.5.1 推定方法

室空気について、次式で表される定常状態での熱平衡が成り立つものと仮定する。

$$I = Q_{CG} + Q_{UW} + Q_{LW} + Q_F, \quad (1)$$

ここに、

I : 透過日射量,

Q_{CG} : 屋根・窓部分からの熱流出量,

Q_{UW} : 地上の外気に接する壁部分からの熱流出量,

Q_{LW} : 土壤に接する壁部分からの熱流出量,

Q_F : 床スラブ部分からの熱流出量,

であり、いずれも月積算値 (kWh/month) と考える⁷.

式(1)左辺の I は日射量の実測値から算定できる。 Q_{CG} は 1 次元定常熱伝導を仮定して、室内外の表面温度差の実測値と、設計図書・カタログなどより求めた熱コンダクタンス及び面積から算定できる。 Q_{UW} も熱コンダクタンスの推定値⁸に基づいて同様に算定するものとする。これらが算定されれば、差し引きとして $Q_{LW} + Q_F (= I - Q_{CG} - Q_{UW})$ が推定されたことになる。さらに床部分の熱流は、土壤に接する壁部分の熱流に比べれば 1 次元的と考えられるから、 Q_F についても Q_{CG} と同様の方法で月ごとの 1 次元定常値として計算することにする。このようにすれば、 Q_{LW} を熱平衡式(1)における残差 ($I - Q_{CG} - Q_{UW} - Q_F$) として見積もることができる。

3.5.2 推定結果

'94 年 1 年分について推定した結果を図 7 に示す。図によれば、床部分 (Q_F) では冬期に熱流入、夏期に熱流出となっており、温冷熱源としての寄与がうかがえるが、地下壁部分 (Q_{LW}) では常に熱流出となるのが判る。この部位別熱流の分析結果によれば、特に冬期における壁脇の土壤からの熱流出量は意外と大きく、この部分は冬期の温熱源としては機能していないと言える。また、夏期における透過日射量そのものの多さも無視できない。より安定した室温を年間にわたって形成するには、地下壁部分の断熱や日射遮蔽などの工夫が必要と思われる。

4. 年間自然室温変動と熱負荷に関する数値シミュレーション

4.1 計算の目的

前章では試験用 ES における自然室温状態での実測結果を示し、シェルターの断熱性能、蓄熱性能の反映としての室温の安定性を明らかにしたが、冷暖房を行った場合のエネルギー消費量などの実測にまでは至っておらず、省エネルギー性は不明のままである。また、

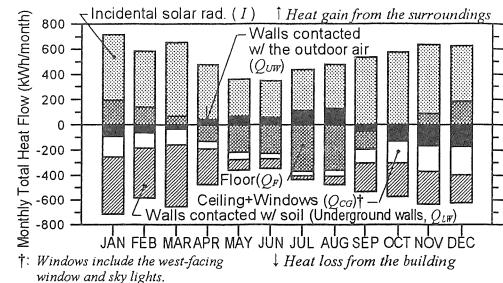


図 7 月積算部位別熱流の推定結果

('94 年 1 月 ~12 月)

ES の熱的性能を他の形態の建物の性能と対比することにより、相対的な評価も行いたいところである。さらには、より居住に適した水準まで自然室温を近づけるには日射遮蔽などの工夫が必要であることが、実測結果から示唆された。そこで、数値シミュレーションにより、以下の点を検討することにする。

- 1) シミュレーション・モデルの妥当性を検討するため、実測条件に基づく年間自然室温変動を計算し、実測値と照合する。
- 2) 試験用 ES 及びこれと同規模の床接地型建物に対する計算を行い、年間自然室温変動の安定性と熱負荷(省エネルギー性)を相対的に評価する。
- 3) 試験用 ES に夏期の日射遮蔽と冬期の夜間断熱の手法を適用した場合の、年間自然室温変動と年間熱負荷への影響を検討する。

4.2 計算方法と計算モデル

計算には、Galerkin 有限要素法による熱伝導問題の解法⁹に基づき、地下室や半地下室の自然室温と熱負荷の非定常問題を扱えるように、境界条件を独自にモデル化・定式化して作成した簡易な 2 次元計算プログラム¹⁰を用いる。

試験用 ES の南北断面を想定して作成した 2 次元有限要素メッシュ・モデルを図 8 に示す。要素は全て 3 角形 1 次要素である。計算領域左右の鉛直線は断熱境界、地表面は日射と夜間輻射を考慮した相当外気温による熱伝達境界、底辺は年平均相当外気温による固定温度境界とする¹¹。床接地型を扱う場合には、ES のメッシュを真中で縦に切断したときの左半分を計算領域とするメッシュ・モデルを用いる¹²。

4.3 計算条件の設定

4.3.1 パラメータとする条件

想定した 2 種類(試験用 ES 及び床接地型)の建物モデルに対する熱物性値を表 1 の通り設定する。

*7 予め、*5 に記したものと同様の仮定に基づき、月ごとの温度差換気による熱流出・流入量の積算値を算定したところ、高々月積算透過日射量の 0.3% 程度であることが判った。この結果に基づき、熱平衡式(1)においては換気による熱移動の項は無視できると考えた。

計算モードとして、①年間の自然室温計算(Mode 0)、②室温を一年中20°C一定に保つ場合の年間熱負荷計算(Mode 1)、③室温が18~26°Cの範囲に収まるように、自然室温が18°C未満の場合には18°Cまで暖房し、自然室温が26°Cを越える場合には26°Cまで冷房する、間欠的な冷暖房運転による熱負荷の年間計算(Mode 2)の3通りを設定する。

また、建築的な熱環境制御の条件として、①日射遮蔽と夜間断熱を両方とも行わない(Case 0)、②夏期3ヶ月間(7月1日~9月31日)に日射遮蔽を行う(Case 1)、③

表1 計算における各部位の熱物性値の設定

| Building Element/ Material | Heat Conductivity (W/mK) | Volumic Heat Capacity (kJ/m ³ K) |
|---|--|--|
| Setting for Earthship Model | | |
| Surrounding Soil | 0.76 (see *4) | 2637.2 (see *4) |
| R. C. Floor Slab | 1.63 | 2013.5 |
| Soil-filled Wall | 0.66 (see *4) | 2465.4 (see *4) |
| Construction Directly Contacted with the Outdoor Air (see *8) | This portion is not devided into finite elements and dealt with total heat transmission rate, 11.3W/K[NB] (i.e., the heat capacity is neglected. However, the half of that (2275.0 kJ/K) is taken into account of the heat capacity of indoor air. | |
| Heat Capacity of the Indoor Air (see *8) | Actual heat capacity of the building volume (161.5kJ/K) and that of the partition wall (15148.4 kJ/K) are summed and the summed value is converted to be equivalent to the two-dimensional model. The value described in the above row (2275.0kJ/K) is added to the summed value. Finally, the value for the model becomes 4188.7kJ/K. | |
| Setting for Slab-on-Grade Model | | |
| Surrounding Soil | 0.76 (see *4) | 2637.2 (see *4) |
| R. C. Floor Slab | 1.63 | 2013.5 |
| Construction Directly Contacted with the Outdoor Air (see *8) | This portion is not devided into finite elements and dealt with total heat transmission coef. (4.4W/K, see *9). | |
| Heat Capacity of the Indoor Air (see *8) | Actual heat capacity of the building volume (192.5kJ/K) is converted to be equivalent value for the two-dimensional model. The value is 12.1kJ/K (see *9). | |

NB: For the case with the night insulation, the total heat transmission rate for the walls directly contacted with the outdoor air is setted to be 8.11W/K, assuming that weather shutters with R=1.43(m²K/W) are installed on the south-facing glazings.

*8 土上部分の外気に接する壁体は熱容量を無視して要素分割せず、2次元モデル当たりの総括熱貫流率で与える(但し熱容量の半分は、後述する通り2次元モデル当たりの室空気の熱容量に加味する)。その場合、先ず実際の建物の外気に接する壁体の総括熱貫流率を計算し、床面積で除して単位床面積当たりの総括熱貫流率を求め、これに奥行1mとして得られる2次元モデルの床面積を乗じて、モデル地上部分の壁体の総括熱貫流率と考える。また、2次元モデルにおける室空気の熱容量は、実際の建物における室空気の熱容量(ESモデルの場合、土の詰まった古タイヤでできた間仕切壁の熱容量と地上部分の外気に接する壁体の熱容量の半分をさらに加える)を単位床面積当たりで表し、これに2次元モデルの床面積を乗じた値とする。

*9 この場合、切断線部分はモデルの対象軸と考えて断熱境界とする。床接地型建物の外壁としては、ESの古タイヤ壁を厚さ100mmの発泡ポリスチレン断熱板に置き換えたものを想定し、また南窓、西

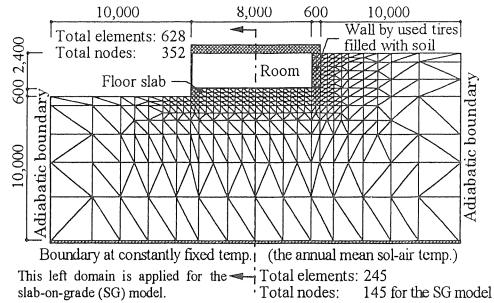


図8 アースシップの2次元有限要素モデル

表2 パラメータとする計算条件の設定(計算種類)

| Run No. | Building Type | A/C Mode (Room Air Temp.) | Strategic Case | | |
|---------|---------------|---------------------------|----------------|---------|-------------|
| | | | Case No. | Shading | Night Insu. |
| 1[NB] | Earthship | 0 (Free temp.) | 0 | No | No |
| 2 | | 0 (Free temp.) | 0 | No | No |
| 3 | Earthship | 1 (20°C) | 0 | No | No |
| 4 | | 2 (18~26°C) | 0 | No | No |
| 5 | Slab-on-Grade | 0 (Free temp.) | 0 | No | No |
| 6 | | 1 (20°C) | 0 | No | No |
| 7 | | 2 (18~26°C) | 0 | No | No |
| 8 | Earthship | 0 (Free temp.) | 1 | Yes | No |
| 9 | | 1 (20°C) | 1 | Yes | No |
| 10 | | 2 (18~26°C) | 1 | Yes | No |
| 11 | Earthship | 0 (Free temp.) | 2 | Yes | Yes |
| 12 | | 1 (20°C) | 2 | Yes | Yes |
| 13 | | 2 (18~26°C) | 2 | Yes | Yes |

NB: Measured Weather Data are inputted only for Run 1.

表3 統一する計算条件の設定

| Item for Condition | Description |
|--|---|
| Incidental Solar Radiation | After calculating the actual amount based on an incident angle-transmission coefficient properties for the glazings of test house, the amount is converted to a value for space heating to the two-dimensional model. |
| Ventilation | Neglected (0.0m/h, see *5 and *7). |
| Internal Heat Generation | Neglected (0.0W). |
| Input Data for Driving Force | Standard weather data for Takamatsu City, distributed by SHASEJ ⁽⁸⁾ [NB]. |
| Calculation Step and Period | Step time: 1h, Repetition: 5 years (43,800 steps = 8760 steps/year * 5 years). |
| Initial Temp. for the First Calc. Step | An annual mean sol-air temp., which should be calculated on basis of the standard weather data, is given to the all nodes of the models meshed by finite elements. |
| Radiant Heat Transfer Property of Ground Surface | Solar absorptivity: 0.84, Emissivity: 0.90. Heat Transfer by Water/Vapor and the phase change are neglected. |
| Over-All Heat Transfer Coef. | Outdoor side: 23.0W/m K, Indoor side: 9.0W/m K. |

NB: Measured data for 1994 are applied only to validate the calculation models by comparison with measurement results.

窓、天窓、屋根、床スラブはESと同等と考えた上で2次元モデルに対する総括熱貫流率と室空気の熱容量を設定する。但しESのモデルと異なり、地上の壁体の熱容量は小さいため無視し、室空気の熱容量に加えない。

夏期の日射遮蔽に加えて、冬期3ヶ月間(12月1日~2月28日)，夕方17時から翌朝7時までの時間帯に夜間断熱を行う(Case 2)の3条件を設定する^{*10}。

これらの建物モデル、計算モード、熱環境制御の条件をパラメトリックに組み合わせ、表2に示す13通りの計算を行う。但しRun 1は実測値との照合のための設定であり、Run 2~13とは意図が異なる。

4.3.2 統一する条件

その他、全ての計算で統一して扱う計算条件は前頁の表3の通りである。外乱気象データには主として、試験用ESの建設地に近い高松の標準気象データ⁽⁸⁾を用いるが、実測値との照合を目的とする計算(表2のRun 1)では、前章で実測したデータを用いる^{*11}。

4.4 実測値との照合結果

自然室温の年変動の計算結果を実測値と比較した結果を図9に示す。温度は月平均値で表示している。図によれば、計算値は実測値よりも全般的に高めで、4月と9月に差が最大(2.5°C)となっているのが判る。但し、冬期には実測値との差は相対的に小さく、1°C未満である。計算結果は実測された室温変動性状を概ね再現しており、作成した計算プログラムと計算モデルによって、自然室温の年変動性状に関しては十分な予測結果を得ることが可能であると言えよう。

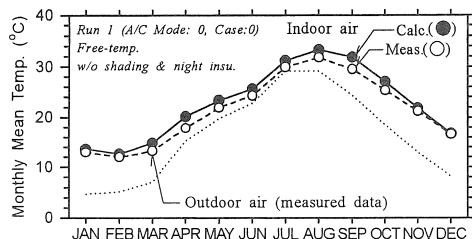


図9 自然室温年変動の計算結果と実測値の比較

*10 計算プログラム上、透過日射量を無視した計算を行うことによって、日射遮蔽がある条件を取り扱う。現実には、日射遮蔽を完全に行える建築的工夫(庇やブラインドの設置)はあり得ないから、この設定による計算結果は日射遮蔽効果の極限を示すことになるので注意が必要である。なお夜間断熱は、南窓外気側に50mm厚の発泡ポリスチレン断熱板からなる雨戸(R値1.43m²K/W)を想定し、外気に接する地上の壁体の総括熱貫流率を時変的に設定することによって取り扱う。

*11 相当外気温の設定に必要な夜間放熱量の算定は、雲高を一年中3km一定とする既往の方法⁽⁷⁾によった。実測では雲量も不明なため、別途実測した年平均地表面温度を最もよく再現する値を推定し、時不変定数(6.29)として与えることにした。

*12 同じ理由により、室温の日変動幅にも差異が生じるはずである。別途、日変動の計算結果を詳細に比較したところ、顕著な差異があり、アースシップの方が室温の日変動の安定性に関しては優れていることが確認された。

4.5 アースシップと床接地型の比較結果

4.5.1 自然室温の年変動

ES(Case 0)と床接地型の自然室温年変動に関して、年較差と年平均値の関係をプロットした結果を図10に示す。図によれば、室温の年較差(縦軸)に関しては両者の間で大差がないものの、年平均室温(横軸)に差異が認められ、床接地型(図中のSlab-on-grade)の方が1.6°C高温となっている。これは、透過日射による暖房効果がESと床接地型では異なることによるものと推察される。つまり、床接地型は熱容量が小さく、地上部分の断熱性が高いため、透過日射熱によって室温が相対的に上昇しやすいことが原因と考えられる^{*12}。

4.5.2 年間熱負荷

後掲の図12において、ES(Case 0)と床接地型(SG Case 0)を比較すると、室温を一年中20°Cに保つ場合(Mode 1)には、床接地型の方が僅かに冷暖房負荷が小さいことが判る。熱負荷全体における暖房負荷と冷房負荷の構成比は、ESが4:6、床接地型が3:7程度である。室温を18~26°Cに制御する場合(Mode 2)の熱負荷は、両建物ともMode 1に比べて激減し、ESの場合はMode 1の18%，床接地型の場合は38%となり、前者の方が冷暖房条件の違いに関して敏感である。その結果、Mode 2における年間冷暖房負荷は、Mode 1の場合と異なり、ESの方が少なく、床接地型の約半分となっている。室温設定あるいは冷暖房の運転条件次第で熱負荷の計算結果は大きく異なる訳であるが、より現実に近い運転条件の下では、床接地型よりもESの方が冷暖房負荷が小さく、省エネルギー的と考えてよからう。

4.6 日射遮蔽及び夜間断熱の影響に関する予測結果

4.6.1 自然室温の年変動に及ぼす影響

日射遮蔽・夜間断熱の条件を違えた3つの場合の自然室温年変動の計算結果を図11に示す。図によれば、夏期に日射遮蔽を行うと(Case 1)，月平均室温が2~4.5°C低くなり、月平均室温の最大値が約27°Cに抑えられることが判る。図10に、各条件(Case)における室温年較差と年平均室温をプロットしたが、図によれば、日射遮蔽と夜間断熱を行わない場合(Case 0)の年平均室温は外気温よりも7.2°C高く、年較差は外気温年較差(22.6°C)の73%の16.5°Cであるが、日射遮蔽(Case 1)により年平均室温は外気温よりも6.1°C高く、年較差が外気温のそれの58%(13.0°C)になるのが判る。日射遮蔽は、室温の年較差を外気温のそれの6割に抑え、年平均室温を1.1°C低める効果があると見ることができる。

図11において、夏期の日射遮蔽に加えて冬期に夜間断熱を施す場合(Case 2)に注目すると、夜間断熱期間の

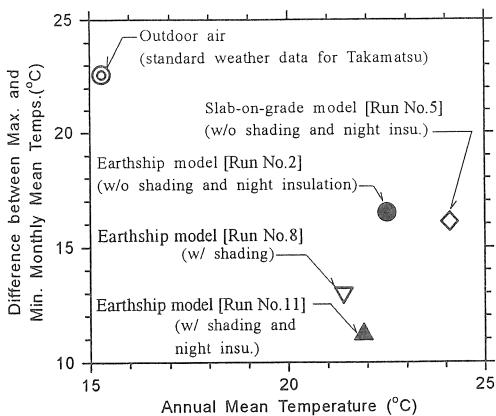


図10 室温年較差と年平均値に関するアースシップと床接地型の比較(日射遮蔽・夜間断熱条件の違いが室温年較差と平均値に及ぼす影響)

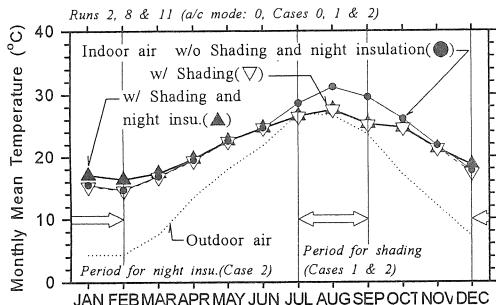


図11 日射遮蔽・夜間断熱条件の違いが自然室温年変動に及ぼす影響

室温が 2°C 弱上昇し、2月に生じる最低月平均室温が 16°C をやや上回るようになることが判る。図10によれば、Case 2における年平均室温は外気温よりも 6.6°C 高く、年較差は外気温年較差(22.6°C)の半分の 16.5°C である。日射遮蔽と夜間断熱を組み合わせれば、夏期の室温も最大で約 5°C 低下するため、その結果として、年間の室温変動範囲は概ね $15\sim28^{\circ}\text{C}$ の間となる。

4.6.2 年間熱負荷に及ぼす影響

図12に、日射遮蔽・夜間断熱の条件を違えた場合の年間負荷をまとめて示す。比較のため、2次元の計算モデルに対する熱負荷をモデルの床面積で除し、単位床面積当たりで整理した。図によれば、日射遮蔽を行うことにより(Case 1)、これがない場合(Case 0)に比べて冷房負荷が低減することが判る。これに伴う年間熱負荷の低減は、Mode 1で8%、Mode 2で39%であり、低減の度合いは冷暖房条件で大きく異なる。日射遮蔽に加えて夜間断熱を施した場合(Case 2)とこれらを施さない場合(Case 0)を比べると、夜間断熱により暖房負荷も

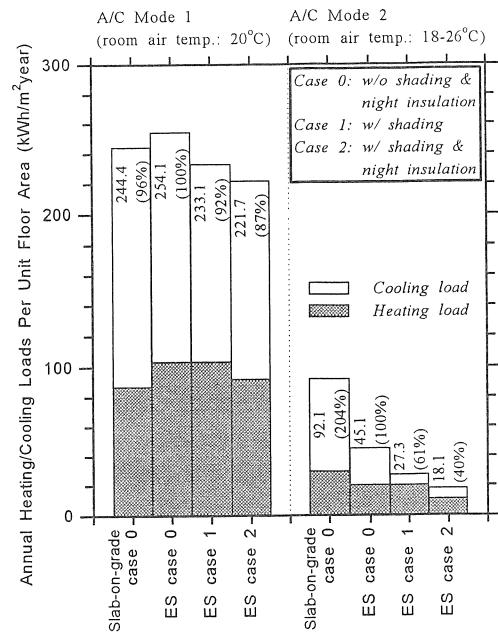


図12 日射遮蔽・夜間断熱条件の違いが年間熱負荷に及ぼす影響

低減し、その低減の度合いはMode 2の場合の方が大きいのが判る。Mode 2の年間負荷は、日射遮蔽・夜間断熱のない場合の40%の $18.1\text{kWh}/\text{m}^2$ にまで抑えられる。この熱負荷は、床接地型(日射遮蔽・夜間断熱なし)の場合に必要な熱負荷の $1/5$ に過ぎない。Mode 2は相対的に現実の冷暖房条件に近い設定であるから、夏期の日射遮蔽や冬期の夜間断熱の手法は、ESの省エネルギー計画において大きな意味があると言えよう。

5. まとめ

ES(アースシップ)の熱的性能を明らかにし、我が国の気候条件の下での熱環境計画に関わる基礎的資料を得ることを目的として、①香川県財田町に建設された試験家屋を用いて、冷暖房のない自然室温状態における熱環境を約14ヶ月間実測した結果、並びに②簡易な2次元有限要素法により、試験用ESを想定したモデルの自然室温の年変動と年間熱負荷の予測計算を、高松の気象条件下で系統的に行った結果を報告した。

- 実測より得られた知見は以下のようにまとめられる。
- 1) 試験用ESの年平均室温は、年平均外気温よりも約 5°C 高い。また室温の年較差は、外気温年較差 30.9°C の約 $2/3$ である。この温度の安定性は特に、床下土壤の温冷熱源としての寄与によるところが大きいと推察される。

- 2) 夏・冬における室温の日較差は、外気温日較差の1/2~1/3と小さく安定している。日射量の少ない日に外気温が大きく変動しても、室温は殆ど変動しない。室温日変動の安定性には、床スラブ、土を詰めた古タイヤによる軸体の熱容量が寄与している。
- 3) 日平均室温は、日平均外気温よりも冬期に7~10°C高く、夏期には1~2°C高いかほぼ同じであり、年間を通して10~30°Cの範囲を変動する。夏期の室温は瞬時値で33°Cまで達し、日射遮蔽などの対策が必要と考えられる。また冬期においては、土壤に接する壁部分からの熱流出が大きいことが推定され、より居住に適した温度水準を達成するには、その部分の断熱などの方策も必要と思われる。
- 4) 室内の相対湿度は、表面仕上げ材に用いた珪藻土の調湿作用により、安定している。但し、外気に比べて高湿である。
- 5) 試験用ESをモデルとした場合、室温の年較差は外気温較差の約7割であり、規模の同等な床接地型建物の年較差と大差ない。しかし、夏期に南面窓からの透過日射を遮蔽すると、室温年較差は、外気温のそれの6割に抑えられ、さらに、冬期に夜間断熱を併用すれば、半分程度にまで抑えられる。その結果、一年を通しての自然室温が15~28°Cの範囲を変動するようになる。
- 6) 日射遮蔽による夏期の冷房負荷の低減効果は、冷暖房時の室温設定によって度合いが異なる。室温を一年中20°Cに保つ条件では年間熱負荷が約8%低減するに留まるが、18~20°Cの間に幅を持たせて制御する条件では39%低減する。
- 7) 夏期の日射遮蔽に加えて、冬期に夜間断熱を施すことによって冷暖房負荷の低減を計れば、これらの方策のない場合に比べて、室温を一年中20°Cに保つ条件で約13%，室温を18~20°Cの間に制御する条件で約60%年間熱負荷が低減する。その場合の床面積1m²当たりの年間負荷は18.1kWh/m²yearと見積もられ、通常の住居形態に近い床接地型（日射遮蔽・夜間断熱なし）の場合に必要な熱負荷の1/5に過ぎない。

上記の知見は、特定の試験家屋を用いて香川県財田町という特定の気象条件の下で得られたもの、あるいは特定の計算モデルを用いて高松の気象条件の下で行った計算結果から得たものであり、一般化して捉えることはできない。しかし、これらはESの熱環境計画に関する基礎資料として有用な知見である。

今後、実測と数値シミュレーションの両面から研究を進め、日本の気候条件に適応したESの熱環境計画に関する基礎資料を整備していく予定である。今回の実測及び数値計算では未だ、古タイヤや空き缶がESの熱的あるいは湿気的な環境形成に如何なる影響を及ぼしているのか、あるいは一般的な建物等と対比したときのESの熱的性能の特徴について十分な分析がなされたとはいひ難く、今後の研究ではこれらの視点を重視したい。成果が得られ次第、続報として報告したい。

あとがき

研究実施に当たり、香川県財田町役場、並びに（株）浜野総合研究所より援助を頂いた。特に、試験用アースシップにおける実測に際しては、財田町役場 大西 守氏、丸戸研二氏、浜野総合研究所 下田明宏氏、玉本哲也氏に多大なご協力を頂いた。また、本研究の一部は、（財）旭硝子財團平成8年度研究助成（第3分野奨励研究課題：半地下居室用付設温室の最適な環境設計手法に関する研究 - 地域気候特性を考慮した自然エネルギーの有効利用の観点から）、研究代表者：松本真一）によった。ここに記して関係各位に謝意を表する。

なお、本報は、既往の口頭発表論文⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾を修正・加筆し、再編成したものである。

文 献

- (1) M. Reynolds, *Earthship*, Vol.1 (1990), 1-26, 199-226, Solar Survival Press, Taos, N.M. and Personal Communication on May 24, 1993.
- (2) The Underground Space Center, University of Minnesota, *Earth Sheltered Housing Design* (1979), 301-307, Van Nostrand Reinhold, New York, N.Y.
- (3) 岩佐 宏、古賀一八、舟崎 譲、早川和男、水野智之、ケイソウ土を利用した内装材の吸放湿性能に関する研究（その1 濕度変化に対する吸放湿性能）、日本建築学会大会学術講演梗概集、A（材料施工）(1993-9), 287-288, 関東（八王子）。
- (4) 松本真一、吉野 博、長友宗重、半地下試験家屋の敷地内における土壤の熱的特性に関する実測、日本建築学会計画系論文集, 462 (1994), 21-30.
- (5) 吉野 博（木村建一編）、建築環境学（第6章 住宅の換気と暖房）、第1巻 (1992), 155-165, 丸善、東京。
- (6) 例えば、矢川元基、流れと熱伝導の有限要素法入門、有限要素法の基礎と応用シリーズ8 (1983), 塔風館、東京。
- (7) 長谷川房雄、長友宗重、吉野 博、松本真一、半地下居室の自然室温・負荷に及ぼす地中断熱方法の影響に関する数値実験、日本建築学会計画系論文報告集, 386 (1988), 25.
- (8) 空気調和・衛生工学会 空調設備基準委員会 第二小委員会 標準気象データ分科会、標準気象データに関する研究、空気調和・衛生工学, 48-7 (1974), 603-625.
- (9) 古木直人、吉野 博、松本真一、半地下型住居「アースシップ」の熱的性能に関する研究 その1 建物の概要と初年度冬期の実測結果、日本建築学会東北支部研究報告集, 57 (1994-6), 55-58, 仙台。
- (10) 古木直人、吉野 博、松本真一、半地下型住居「アースシップ」の熱的性能に関する研究 その2 自然室温状態における冬期実測の結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、D（環境工学）(1994-9), 441-442, 東海（名古屋）。
- (11) 古木直人、吉野 博、松本真一、半地下型住居「EARTHSHIP」の熱的性能に関する研究 その3 自然室温状態における長期実測と数値計算、日本建築学会東北支部研究報告集, 58 (1995-6), 157-162, 郡山。
- (12) 松本真一、吉野 博、古木直人、半地下型住居「アースシップ」の試験家屋における自然室温状態の熱環境に関する長期実測と数値計算、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2（環境工学II）(1995-8), 493-494, 北海道（札幌）。

ミニラボ・ネットワークニュースNo.5.

拠点（ミニラボ）活動の新展開に際して
～我がミニラボに太陽光発電システムを設置～
安濃恒友

§ 1. これからの方針の変更について

前号，“ミニラボ・ネットワークニュース”（MLN）No.4の§2で、A・B・C各シリーズ毎に、今後の課題の進め方について述べた。

丁度、その原稿を書き終えた頃（8/31）に、住宅用太陽光発電システムモニター事業補助金（所謂、半額補助事業）の、交付決定通知が届いた。

以前から、議論・推論だけでは無く、実証的な面も強化したいと考えてはいたが、このMLNを始めて以来、同様の意見を複数の方からも頂いた。そこで、まさか一回目での当選は？と思いつら応募した処、早速当選するとは！

その後の進展の様子や、メール発信の状況等の報告は§2に譲る事とする。

次に、§3では、拠点活動の一例として、Cシリーズの中で述べた一つのテーマを多少詳しく説明し、併せて、MLNの「号外」を作製して去る10/31に酒田で開かれた研究発表会の折りに配付させて頂いた顛末等を報告する。

終に、§4では、この転換期に当たり、MLNの新しい方向に就いて申し上げたい。

§ 2. 9・10月のメールの発信状況

この間のメールの発信状況は、太陽光発電システムの設置関連の諸要件に取り紛れて、下記の二件だけであった。

Cシリーズ：No.C-05及びC-06

No.C-05：「来年度以降の住宅用太陽光発電補助事業に関する」の題で、前記の光発電システムの工事中等に多くの方々と会った折りの話題の中から、懸念を感ずる2点をあげて、来年度以降の計画に対する希望を述べた。

No.C-06：「我がミニラボ（拠点）活動の新展開」として、システムの概要を述べ、今後これを活用すべき拠点活動の具体的なテーマとして(1)・(2)・(3)の3件を説明した。

即ち2Fの前面（方位角南から西へ約6度）に傾斜角約57度の傾斜を作り、2.6kWのシステムを折半して東西両区に1.3kW宛を取り付けた事、東北電力の系統への連系も10/25に完了した事などを述べた。尚、ここでは(1)・(3)の説明は省略し、(2)については次節に譲る。

§ 3. 拠点群の連携による協同活動の提案

前号（No.4）の§2では、Cシリーズに関しては簡単に触れただけであったが、No.C-06では、自宅で準備中の3件のテーマを述べた。

その中の(2)については、上記の「号外」でも実質的な主要記事として取り扱った。

これは、住宅用の太陽光発電のピークカット価値を、実証的に評価する為の協同実験、研究を提案するものである。

全国的には、太陽光発電を実践している方は（半額補助の有無を問わず）数千人と考えられるが、その中の数十人以上の協力を得る事が出来れば、各所在地の1時間毎の発生電力量を測定し、これを集積し・総合する事によって、全国規模の大規模実証試験の価値を生じ、貴重な資料となり、多くの貢献を成しうるでしょう。

しかし、当初は数人からでも発足し、これをボランティア的に進める準備段階として、簡素な形の実験方法・測定機器の研究を始め、協力関係の促進法等々を検討し乍ら、次の段階に進む事も必要であろう。

この提案について、ご協力・ご意見等をお願いし、更に、多くの地域の多くの拠点からの拠点群の活動に関する新提案も望んでいます。

§ 4. MLNのこれからの進め方

前号（No.4）の§2.で今後の課題を述べた許りであるが、この2ヶ月間の我が拠点の大変換期？に当たり、同時に、近く法人化が予定される学会の動向も考慮し乍ら、MLNも新生面を開くべき好機と考えられる。詳細は、今後のメール及びMLNで申し上げるが、積極的なご意見を賜りたいと存じます。

992 山形県米沢市太田町2-1-11 安濃恒友
E-mail anno@dip.yz.yamagata-u.ac.jp