

自然力利用地下住居

一海 信男

Natural agency use subterrane

Nobuo ICHIKAI

要旨

本稿は、次世代の住居の在り方について考えたとき、省エネルギーやエコロジーの観点から、住居空間を地上から地下へ移し、自然の力である土壌や水の力の利用した住居についてその構造をはじめとする仕組みについて述べたものである。

基本的な仕組みについては、地表部分において太陽光がもたらす熱エネルギーを取り込み、そのまま、熱エネルギーをアルミニウムを主原料とした金属材料を用いて、水分を含んだ周辺の土壌に吸熱させて、制御装置にて放熱させることによって地下の住居部分を快適な状態に保つよう温度調節を行うものとなっている。

本稿においては地下に設置する住居の最大の利点として大規模な設備を投入することなく、土壌をはじめとする自然界に存在する水などを利用するということである。土壌には熱エネルギーを貯め込むということは以前からよく知られており、水分を多量に含んだ土壌にはその効果を更に伸ばすとされており、その特徴を自在に操ることにより地下住居の空調を制御するという考え方である。

本稿に述べる内容をさらに発展・応用し、また、実用化されていくことを望むものである。

キーワード：自然力地下住居、土壌蓄熱、集熱板、伝熱板

1. はじめに

我々の暮らしの基となる住居は、内部の居住性及び外観のデザインを追及して満足度を図ってきた。しかし、ひとたびその住居に住んでみると、我々は外観の満足性よりもむしろ居住性が最も大切であるということに気付くことが多い。住まいにおける日常生活においては、内部からは外の景色（外部）を見る事はそう多くなく、外部で物音や、異音を聞いた時などにカーテンを開けて見るぐらいであり、これが日頃の我々の所作ではないだろうか。普段、外部を見

ることが少なければ、住居を土中に移せば日常に使用するエネルギーの節約につながるのではないか。また、現代の「エコ」ブームと相成った居住性の実現できるのではないかと考えた。この発想は、20数年前にインドネシアで高床住居を見てこの逆を着目した点に基づき、自然のエネルギーを有効利用し比較的安価で出来ること、住居としての外観にこだわらず太陽や土地を生かした方法であり、それらを応用した住居であること、平地もしくは傾斜地でも利用でき、地上利用の場合の設備器具等の標準的なものについても応用すれば地上設備のもので充分対応可能である点が見いだせるのである。

それではなぜ地下住居なのか。例えば土中を3～4m掘り下げていくと、年間を通じて安定的な常温状態が維持され、更に1m下げて居住部を地底部において高床式にして室内高さを4mとし、深さ×縦×横を4×2×2mの室内を地中に沈めると、大きな省エネ効果が得られる試算になる。仮に、地表においては、風雨にさらされ夏季は地表の輻射熱の影響があり、朝日から夕日まで太陽からの光と熱の直射を受ける。これらの影響を避けるために地下に埋設することによってこれらを防ぐことが出来る。

地上と違って困る事は湿潤であり、カビや排水、つまり水に関する事で万全の考慮が計られなければならない。本稿においては居住空間をシェルターと呼ぶこととし、そこでカビなどの発生を押さえるためにこのシェルターをどのような状況、つまり環境にしておけばよいか。この事は、例えばまずこのシェルター内部の室温を何度とすれば湿度を下げられるかを実験的につかむことである。カビの発生は、温度が10～35℃で有機物などの栄養分があること、湿度が70%以上であること及び酸素がそろった時に生育するとされる。また、カビの種類も多様で、その対応も多岐にわたる。本稿において述べる実験シェルターに窓はなく、入口と天井が開放的になっているため内部は充分な乾燥状態であるが、外側が土もしくはこれに準ずるものと接触しているために直接的には乾燥状態は保てない。従って、このシェルターについて最適な温度環境をつくる方法について検討を行った。

2. 概 況

我々は、エネルギーを利用している現況を考えると、まず地上の住居においては、太陽を直接受け、風雨にさらされ、時には豪雪や台風の猛威にあい、それら複合的な要因によって著しい住居の劣化を招いてきた。このような劣化を最小限にとどめる方法の1つは住居を地下へ移設させることである。しかしながら、この方法を取るとどのようなデメリットがあるかを考えた時、以下のことがあげられる。

- ① 外観におけるデザイン性の喪失
- ② 受光性、換気の問題
- ③ 排水構造

まず、①に対しては、地上における外観のデザイン性は失われていくが、シェルター内部の内装においてその独自性、独創性が追求されていくであろう。一方で、地下を利用することによって、地熱利用や建物の外観にかかる経費はほとんど必要とならない。

②および③に対しては、多額の費用を要するがFig. 1 に示す地下住居模式図に示すように、まず、太陽光の採光を考える必要があり、地下の天井部に障壁を作らずガラスを使って光を誘導する。また、換気面についても通気性に考慮した設計と最適な建築材料を用いることにより対応が可能となる。

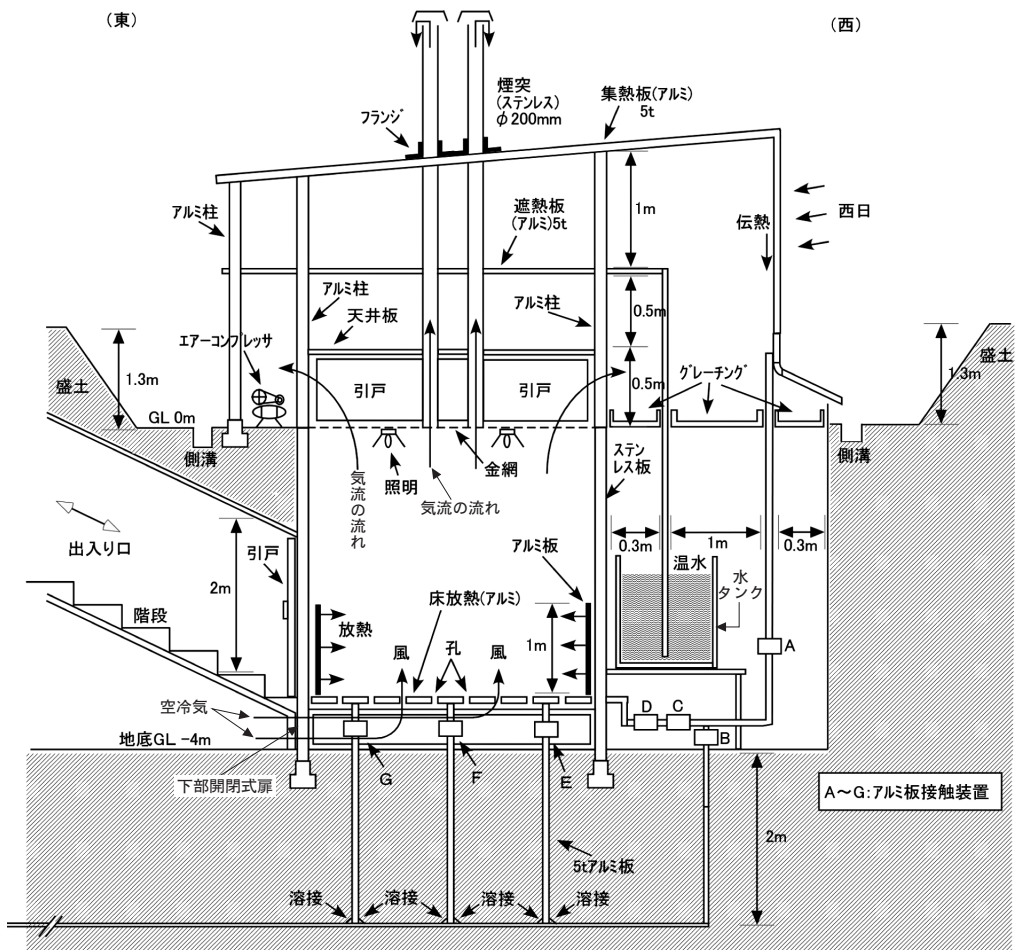


Fig. 1 A total cross section

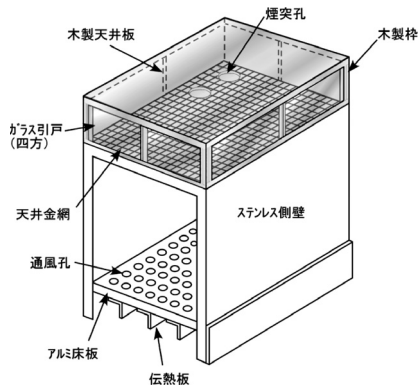


Fig. 2 The shelter residence department

ステンレス製のシェルター居住部 (Fig 2) の天井に剛性金網、床にアルミ製のパンチングメタルをはめ込み床面材とし地下1階の居室とする。この居室を支持する床面の下に土壌全体が蓄熱層となり、更に土壌加熱する伝熱板のアルミ板が2 m下に埋設し、居住部の外側には礫質の砂利を敷き詰めて通気性を確保する。

3. 原理

太陽熱を (Fig. 3) の集熱板により吸熱させその熱を伝熱板 (Fig. 4) で半年間 (5～10月迄) 土壌に蓄熱し、熱制御により冬季 (12月～3月迄) に放熱させる。この原理を用いて居住部を地下に埋設させ、埋設アルミ板で周辺の土壌を熱して蓄熱する方法である。埋設アルミ板に熱伝熱板を接触させて蓄熱と放熱、それぞれ温度制御のために接触又は解放を繰り返して自動的に室温を調整させて快適環境を保つ構造である。

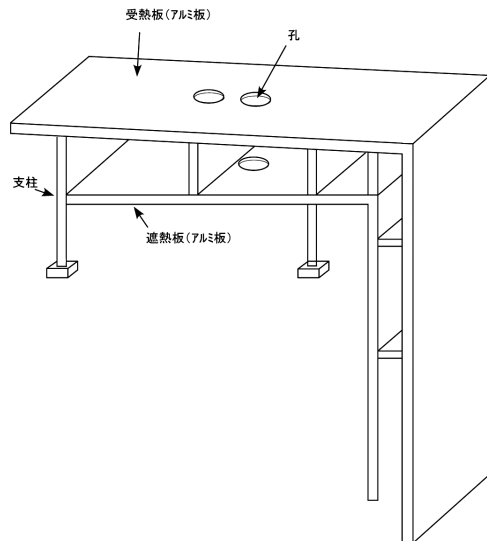


Fig. 3 A collection of fever board

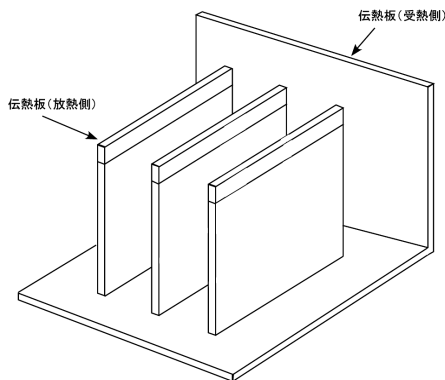


Fig. 4 A heat transfer board

気温は年間を通じて大きく変動するものであり、雨の多い年などは上昇気流も発生せず、気流は停滞しがちになるが、室内で発生する熱エネルギーより、静風圧が発生しており気流の流れを感じる事ができるため自然換気で充足できる。

蓄熱機構については一般的な顕熱蓄材の蓄熱量式を用いて次式のように表せる。

$$Q = M \times G_p \times \Delta T \quad \dots \dots \dots (1)$$

Q：蓄熱量 [kJ]
M：蓄熱材質量 [kg]
 G_p ：比熱（質量） [kJ/kg・K]
T：蓄熱材の温度差 [K]

一方、蓄蔵エネルギーは次式のように表せる。

$$E = \sigma \times V \times T \times \alpha \times Z \quad \dots \dots \dots (2)$$

E：蓄蔵エネルギー [kJ]
 σ ：密度 [kg/m³]
コンクリート：2,300 [kg/m³]
土壌：1,700 [kg/m³]
V：体積 [m³]
T：温度 [°C]
 α ：伝熱係数 0.5（実験値）
Z：損失 0.84（実験値）

3.1 土壌蓄熱

土壌蓄熱は一般的にコンクリートや水を用いるが、土壌そのものにも蓄熱機能があり蓄熱材であるといえる。土壌の蓄熱力は容積比熱で表われ、土質や含水率によって変化があり、特に含水率が高い方が蓄熱力は大きくなる。

含水率の高い土壌は900 kcal/m³・°C程度であり、乾燥土壌は300 kcal/m³・°C程度であるといわれているが、コンクリートは乾燥土壌の1.5倍程度を有する、地表面約－2 mから下の層では優秀な蓄熱層といえる。

土壌は長期に渡り蓄積が可能となり低温かつ、大容量の無駄な放熱のない効率の高い蓄熱方法であると考えられ土壌を蓄熱材とすると、そのコストはゼロであり特別な土壌改良も不要であるため、水分の多い所を選定の方が好ましいことになる。5～6 m深層の平坦地であれば水気は十分に存在しており、土壌は5～6 m深層では温度が平均0.2～0.3°C/m程度の変動幅で安定している。実験に際して試算してみると次式のように表せる。

$$\begin{aligned}\text{暖房負荷} &= Q \text{ 値} \times \text{温度差} \times \text{暖房面積} \times \text{暖房時間} \times \text{安全率} \cdots \cdots (3) \\ &= 2.7 \times 2 \times 4 \times 24 \times 1.0 = 518.4 \text{ [kcal]}\end{aligned}$$

Q 値 (熱損失係数) : 2.7 [kcal/m²h°C]

暖房面積 : 2 × 2 [m]

暖房時間 : 24 [h]

温度差 : 2 [°C]

安定率 : 1.0

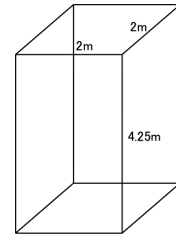


Fig.5 Shelter external form dimensions

※ Q 値 : 1 m² の床面積から室外室内温度差が 1 °C ある時に 1 時間当たりでどの程度熱量が失われるかを数値化したもの。(熱損失係数)

$$\text{必要蓄熱量 (日当)} = \text{密度} \times \text{体積} \times \text{比熱} \times \text{温度差} \cdots \cdots (4)$$

密度 : 1.7 [kg/m³] (土の密度)

比熱 : 1.36 [kg/m³・k]

温度差 : 26°C - 20°C = 6 [°C]

蓄熱量 : 518.4 [kcal] (暖房負荷値)

$$\begin{aligned}\text{体積 [m}^3\text{]} &= \text{蓄熱量} / (\text{密度} \times \text{比熱} \times \text{温度差}) \\ &= 518.4 / 13.9 \\ &= 37.3\end{aligned}$$

3.2 熱制御

熱制御を実施する期間を12月～3月までとすると、37.3×4ヶ月×30日=4,476m³となり、これは地底に一辺あたり約16.5mの正方形の土壌ユニットが必要であるということになる。保温層は、地表より－2m程度以深から地表の温度に影響されなくなるとされているため、熱制御を28°C付近で蓄熱すれば、年間を通してこの温度付近を維持できる。この蓄熱量を放熱した場合、室内は23°C程度になり、暖まった空気は上部に溜まって通気する。シェルター周辺の土中の温度は地中温度が上昇することによって20°C前後の箇所も生じてくる。地下－3m～－5m付近では地熱の差は季節に左右されず約0.2～0.3°Cの変動幅である。したがって、春季～秋季は地下－4mのシェルター床下の風洞部で20～23°C位の冷気を維持させ、これを上昇する空気の自然の流れを利用して室温制御を行う。

夏季の夜間においては、昼間の気流の上昇は見込めないため夜間の外気が室温より下がったときに、野外の集熱板を使用したプログラムシーケンサーによるアルミ板接触装置を稼働し、床と内壁の放熱板から吸熱させて室内の温度を放熱する。また、冬季の暖房については土壌蓄熱を利用した制御を行う。

4. 特徴の整理

ここに述べる地下住居の主な特徴について、下記のとおりに整理した。

- ① 居住部の地下への移設
- ② 自然通気
- ③ 太陽熱の蓄熱
- ④ 従来の屋根を受熱部材として利用
- ⑤ シェルターの主な材質はステンレス
- ⑥ 地上部は庭、駐車場等の有効利用が可能
- ⑦ 排水、湿気、害虫対策が重要

5. 実験・機構

5.1 実験用シェルターの概要

太陽熱の受熱板は、受けた熱を伝熱板によって地下の土壌に蓄熱する。この蓄熱量を年間を通じて主に、冬季の暖房用として利用し、室温を20～23℃付近で伝熱板の開閉及び床の伝熱板（パンチングメタル）より室内放熱をさせ、温度制御を感熱センサーで室温を検知して制御する。春季～秋季は小孔の空いたアルミ床板から空気の上昇によって自然通気で室内の温度管理を行う。夏季には通気の量を増やす意味もあり煙突を設置する構造にしており、通気径路は約4 mの深さで空冷状態をつくり、この床下の空冷気を床の小孔を通じて室内の天井へ導き、地表に向けて採光部である開閉窓と煙突部によって屋外へと放出させる。

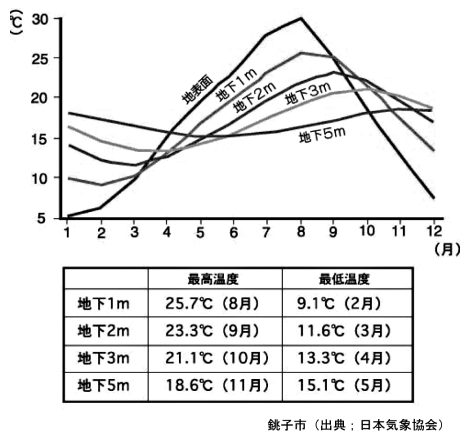


Fig. 6 A change of the underground temperature

ンレス製のものを使用することとした。

Fig. 6 に示すとおり地表より－5 mにおいては年間を通じて15～18℃で推移しており日本国内の土中は概ね同じであるといわれているため、国内であれば立地場所については基本的に問われないであろう。核となる部材としては太陽熱の受熱板をアルミ性耐腐食板を用い、煙突もステンレス製を用いるが屋外の受熱板の表面温度は最高で夏季において70℃付近まで上昇することもあるが熱を伝達・放熱するのに伝導度の高い銅を用いてもよいがコスト面において課題が残る。シェルターについては2 m(縦)×2 m(横)×4 m(深さ)のステ

5.2 機 構

(1) アルミ板の接触装置

構造は10ミリの間隙をもつ2枚のアルミ平行板の間を別の6 tの平板がエアシリンダーによって出入れさせる細長い単独の装置である。この装置は感温センサー、温度制御用シーケンサー、エアシリンダーエアソレイドバルブ、配管等が付設された精密装置であり、5組必要となる。

(2) 屋外集熱板

逆L型の幅3 m×長さ6 mの樹脂加工製であり、雨よけの屋根、蓄熱層の5 tアルミ板に熱を伝達する太陽熱の集熱板である。この集熱板には4ヶ所支柱を立て、根元部を地表付近で固定している。また、ほぼ中央部に直径20cmのステンレス製の煙突を取り付けられる孔がある。

(3) 換気用煙突

20cm×3.5mのステンレス製パイプであり、シェルター内の換気を促す働きをさせるもの。

(4) 遮熱板

3 m×8 m×5 tの樹脂加工済のアルミ板を集熱板同様、逆L型である。直接、太陽熱を受熱する集熱板の下で、下部のシェルターへの副射熱を遮る役割をするもの。

(5) 居住部（シェルター）

ステンレス製で上部に旧木製の開閉窓と天井をつけたもので天井中央に煙突取り付け孔が空けられたものである。シェルター底部に直径6 mmの小孔を無数に空けたアルミ板が付帯している。

(6) 下部開閉式扉

シェルター下部を0.5m持ち上げた間にはめ込み、夏冬で開閉させるアルミ枠付扉である。

(7) 4 支柱枠

シェルター部を0.5m持ち上げた4つの支柱枠である。

(8) 小型エアーコンプレッサー

エアシリンダーで伝熱板相互間の伝熱板作動に用いる。

(9) 埋設用T型アルミ板

1×2 mのアルミ板を14板使用し、水平に6枚並べて溶接で接ぎ、Fig. 7のようにT型に3枚のアルミ板を溶接して製作したものである。

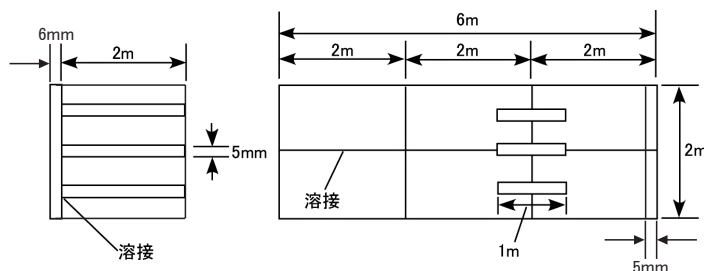


Fig. 7 A Model T aluminum board for underground

(10) 熱制御用シーケンサー

5 台のアルミ板接触装置を感熱センサーの情報を基にプログラムされたシーケンスコントローラーである。

(11) 害虫対策

アリやナメクジなどには超高圧のチョッパー回路とコイルでパルス電圧を発生させて防ぐことができる。防止堤においてはアルミ板で絶縁材の上に堰堤を作り、パルス電圧を高抵抗器を通すことにより印荷させる。

6. 実験結果

上述した材料および方法により実証実験した結果を示す。

(1) 夏季

夏季（7～8月上旬）の晴天時の午後1時から2時頃の受熱板は、表面温度が最高68℃に達する日が10日間程度ある一方で、冬季においては－4℃を観測することがある。しかしながら地中温度は深度－4.0mにおいては年間を通じて15～16℃であったことから、夏季は、室温調整を通気して循環させ、その位置にある空冷気をシェルター床面の孔より上昇通気し、天井金鋼を通過し天井部付近の33℃程度の滞留気と混合させることにより室温は全体（中間部付近）として23～25℃となった。

(2) 冬季

7～10月の間にかけた蓄熱制御により、頻繁にエアシリンダーを作動して放熱させたことによって28℃付近になったことから、一定の暖房効果を得ることができており、制御を12月上旬にかけて冬向きに切替えて接触装置を作動させたところ、シェルター下部の熱が床面に伝わり、足元にも暖かさを感じることができた。

(3) まとめ

4月末頃までは伝熱板接触装置を作動させているエアシリンダーのエア作動が継続し、1年目の実験を終えて次の夏季へ向けて制御を切替えて作動させたところ、2年目の夏季も被験者に評価を得ることができ一定の実証効果は示せた。しかし、冬季は21～23℃程度とやや肌寒い感触もあったが、夏季の床面下の温度を上げすぎると、夏のシェルター内がやや暑くなるためにこの周辺の温度になったものと思われる。熱管理用制御プログラムでエアシリンダーの作動を制御するシーケンサーのプログラムを何度も組みなおし、センサー情報から今後変化していくだろうと思われる温度の上昇および低下を予測する内容の制御をより緻密なものへと改良

する余地はあるものと考えられる。

前述してきた結果として、概ね想定していた結果を得ることができた。しかしながら、人の温度の感覚は様々であり個人差があるためシェルター内の温度を適温とは肯定できない場合がある。また、先述したように夏季においては11時～15時の時間帯で集熱板の表面温度が70℃（晴天時）近くまで上昇するため、集熱板に直接手が触れることは、やけどをする危険があるため、人の手に触れられないような設計上の工夫が必要になってくると考えられるが、過剰な余熱をさらに長期にわたって蓄熱する技術課題が求められる可能性があり、その一つとして土壌よりも蓄熱効果の高い水を利用することも今後検討されるべき課題であると思われる。

7. おわりに

今回、このような実験を実施するにあたり、幸いにも利用できる空間・設備が会社敷地内にあった。試行錯誤を経て次々と設計や部材を変更し、また、改造する事が多く、また時間的な制約もあったものの、社内関係者等の協力を得て実験を重ねることができた。実験を数年にわたって繰り返す必要性もあり、更なるデータの蓄積が求められると考えている。また、地中に埋設する伝熱板は長年にわたりその耐久性が問題になる。そこで炭素繊維を使用するなど部材の改良等に関しても今後、研究の余地があると考えている。

参考文献

- 1) 関信弘、蓄熱工学1 基礎編、森北出版、P24～55, p.94～117, p.208～230
- 2) 関信弘、蓄熱工学2 応用編、森北出版、P29～33, p.117～126
- 3) (株)日建設計 東京オフィス構造設計室、性能設計と検証法、(株)オーム社、p.50～57
- 4) 桑原文夫、地盤工学、森北出版、p.11～26, p.76～116
- 5) 平井利一、土質工学をかじる、理工図書、p.55～180
- 6) 袖山研一、21世紀の民家をつくるシラス物語、財団法人農山漁村文化協会、p150～169