

建築仕上技術者のための  
建築物理学講座

第19講「太陽熱利用(1)」

第20講「太陽熱利用(2)」

第21講「太陽熱利用(3)」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))

(株)工文社 **建築仕上技術** 2008年10、11、12月号より

## 建築仕上技術者のための

# 建築物理学講座

### 第19講「太陽熱利用(1)」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



#### はじめに

太陽から発する放射エネルギーは、およそ $0.3\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ 以上の固有の波長分布を持って地球大気圏外に到達する。大気圏を通過し地表面に達する際に空気分子、水蒸気、浮遊塵埃(じんあい)などにより散乱、吸収作用を受けて減衰する。大気圏外での太陽放射の総量 $I_0$ は、地球の軌道半径の変化のために季節によって多少変動する。この年間平均値 $I_0$ を太陽乗数と呼びおよそ $1353\text{W/m}^2$ である。東京の春分、夏至、秋分、冬至の各方位と水平面の日射量をFig. 1に示す。水平面においても夏至で最大が $900\text{W/m}^2$ 、冬至では $500\text{W/m}^2$ と単位面積当たりでは希薄なエネルギーであることがわかる。

#### 1. 太陽位置

各地に建つ建物の各方位の垂直壁への日射の入射角度( $\theta$ )、垂直壁と太陽のなす方位角( $\gamma$ )、太陽の方位角( $\phi$ )、太陽高度( $\beta$ )の計算式を示した(Fig. 2参照)。

太陽の位置は方位角( $\phi$ )と高度( $\beta$ )を知ればよいが $\phi$ と $\beta$ はその土地の地球上の緯度( $l$ )、および季節(月・日)と時間によって定まる。月日は日赤緯( $\sigma$ )と称する太陽の運動によって定まる春秋分からの偏差で示される。時刻は時角( $t$ )で示され、0時を $180^\circ$ 、12時を $0^\circ$ として計算を行なう。以上の互いの関係は球面三角法の公式で示されている。

$$\text{式) } 1 \quad \sin \beta = \sin \delta \cdot \sin l + \cos \delta \cdot \cos l \cdot \cos t$$

$$\text{式) } 2 \quad \sin \phi = \frac{\cos \delta \cdot \sin t}{\cos \beta}$$

$$\text{式) } 3 \quad \cos \theta = \cos \beta \cdot \cos \gamma$$

式) 3 の壁と太陽のなす方位角( $\gamma$ )、壁の向き( $\phi$ )により決まり、 $\phi$ は南面を $0^\circ$ とし東方向、西方向とも十度進むとする。西または東を向く壁は $\phi=90^\circ$ ということである。それゆえ壁と太陽のなす方位角( $\gamma$ )は

南北線より東方向に面する壁では

$$\text{午前は } \gamma = \phi - \varphi$$

$$\text{午後は } \gamma = \phi + \varphi$$

南北線より西方向に面する壁では

$$\text{午前は } \gamma = \phi + \varphi$$

$$\text{午後は } \gamma = \phi - \varphi$$

で表される。

計算で使われる時刻は太陽時であるので時計との差はその他の経度を $L$ とすると

$\frac{135^\circ - L}{15} \times 60 = \pm x$  分で表され、札幌では $-25$ 分 $20$ 秒、東京では $-19$ 分 $04$ 秒、名古屋では $-7$ 分 $52$ 秒、大阪では $-2$ 分 $08$ 秒、福岡では $+18$ 分 $28$ 秒の差があることになる。

#### 2. 日射量

各月の大気透過率の時刻による変化を知れば、このより年間の日射量の変化の様子を知ることができる。日射量の式は日本建築学会編、設計資料集成(環境編)によった。

太陽の高度と方位角は

$$\text{式) } 4 \quad \sin \beta = \sin l \cdot \sin \delta + \cos l \cdot \cos \delta \cdot \cos t$$

$$\text{式) } 5 \quad \sin \phi = \frac{\sin t \cdot \cos \delta}{\cos \beta}$$

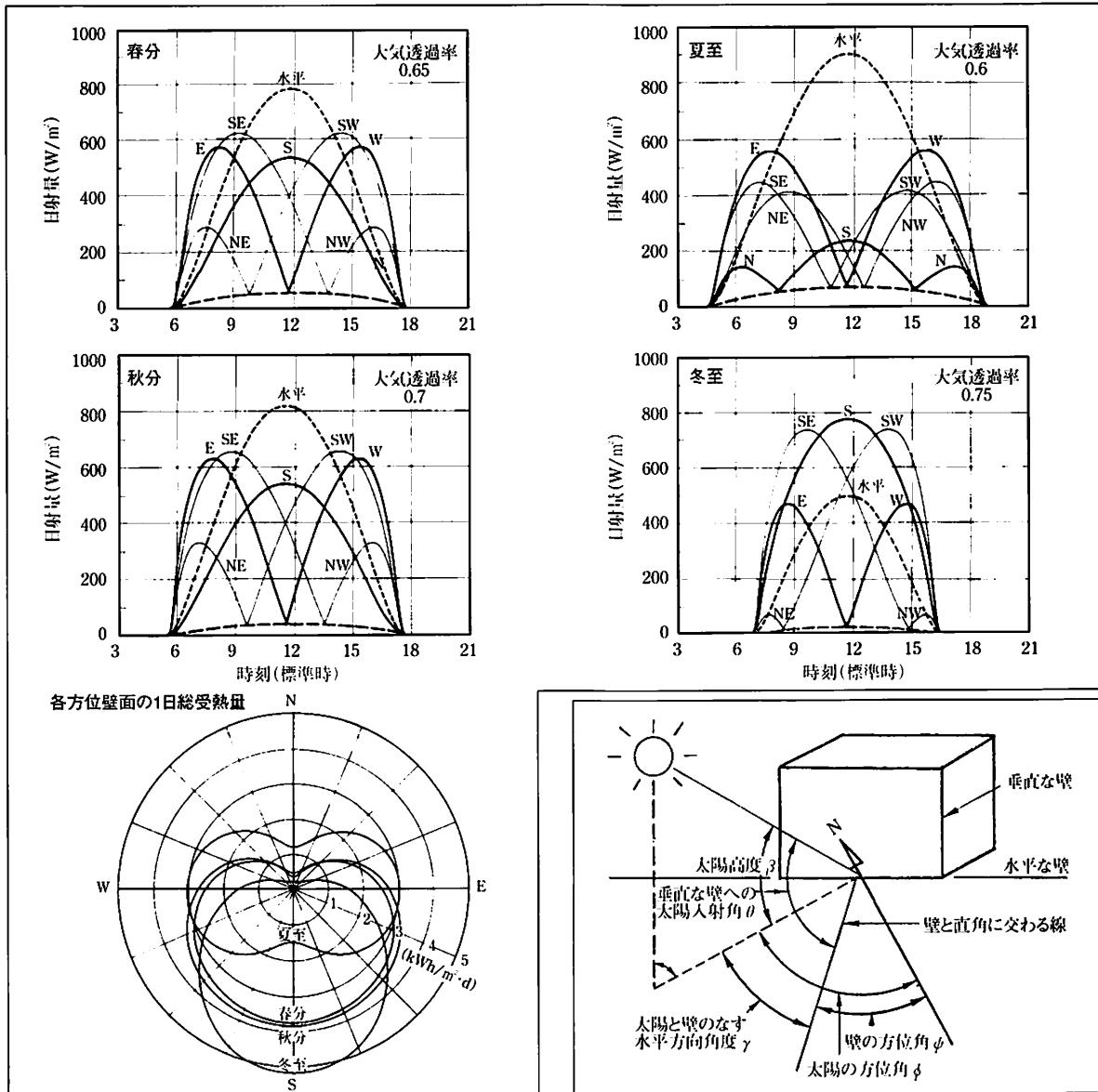


Fig. 1 東京(35.7°N, 139.8°E)の春分、夏至、秋分、冬至の各方位と水平面の日射量(日本建築学会編, 建築設計資料集成環1)<sup>1)</sup>

直達日射量は

$$\text{式)6 法線面日射量 } J_N = J_o \cdot P \cosec \beta$$

$$\text{式)7 水平面日射量 } J_H = J_o \cdot P \cosec \beta \cdot \sin \beta$$

$$\text{式)8 鉛直面日射量 } J_P = J_o \cdot P \cosec \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma$$

天空放射量は

$$\text{式)9 水平面天空放射量}$$

$$J_{HS} = 1.2 J_o \cdot \sin \beta \frac{1 - P \cosec \beta}{1 - 1.4 \log_e P} (1 - P)$$

$$\text{式)10 鉛直面天空放射量 } J_{PD} = \sqrt{2} J_{HS}$$

$I$ : その土地の緯度、 $\delta$ : 日赤緯、 $t$ : 時角、 $\beta$ : 太陽高度、 $\phi$ : 太陽方位角、 $\psi$ : 垂直壁の方位角、 $\gamma$ : 垂直壁と太陽のなす水平方向角度、 $P$ : 大気透過率、 $J_o$ : 太陽常数

#### <引用文献>

- 1) 日本建築学会編, 建築設計資料集成環1, 丸善株式会社(1978)
- 2) 田中辰明: 各地の太陽位置などに関する資料: 空気調和・衛生工学: Vol.41, No.1(1967/1)
- 3) 田中辰明: 東京の日射量に関する資料: 空気調和・衛生工学: Vol.41, No.7(1967/7)

## 建築仕上技術者のための

# 建築物理学講座

### 第20講「太陽熱利用(2)」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



#### はじめに

太陽熱の利用にはアクティブな利用とパッシブの利用がある。アクティブな利用とは太陽集熱器を設置し、ポンプやファン等の機械動力を用いて利用する方法である。パッシブな利用とは機械動力を使用しないで、建築的手法で太陽熱を利用する方法である。本来伝統的な建築では最も重要視された技術である。古民家などでは冬暖かく、夏涼しく生活できるような工夫が凝らされていった。

#### 1. アクティブソーラーハウス

アクティブの手法には配管からみると密閉型と開放型に分類される。密閉型の原理図をFig.1に、開放型の原理図をFig.2に示す。密閉型とは太陽集熱回路の循環ポンプは配管の抵抗に打ち勝つ能力を持っていれば良い。一方開放型は大気に向けて開放されているので、配管の抵抗と大気圧の合計に打ち勝つ能力を持つ循環ポンプを選定する必要がある。従って開放型の方が密閉式に比べ大型のポンプを用意する必要があり、運転費も嵩む。一方わが国のように夏は暑いが冬は寒いという土地では冬季に太陽集熱回路が凍結をする恐れもある。365日の内で1回でも凍結事故を起こすと、太陽集熱器が破裂したりして集熱システムそのものが破損してしまう。この対策として開放式は集熱ポンプが運転を停止すれば集熱回路中の水は蓄熱槽に戻ってしまい、一般に凍結は起こらない。

ここで一般的と書いたが、筆者の経験で開放式であっても集熱回路が凍結した事がある。この事故とは非常に大きな集熱面積を持つ太陽集熱器を勾配の緩い屋根に設置した時の例である。外気温度が急激に低下し、集熱

ポンプはセンサー $T_1$ がポンプの運転を停止する1°Cになり、ポンプは停止した。しかし太陽集熱器の中の水はゆっくり蓄熱槽に向かって流れ出し、落下するのに時間がかかった。その間にも外気温度は急激に低下していき、まだ太陽集熱器の水が残っているうちに氷点下をかなり下回るほどとなった。その結果太陽集熱器の中で凍結が起り太陽集熱器を破損させたのである。このときはセンサー $T_1$ が1°Cで集熱ポンプが停止するという制御をしてあったが、これを3°Cで停止するように改め、その後凍結事故発生はなくなった。一般に開放式の方が凍結事故は起こりにくい。その代わり、Fig.2に見るよう循環回路の水は蓄熱槽の中で大気に晒されている。それだけ大気中の酸素が太陽集熱の循環回路に入り込む可能性が高く配管の腐食が起りやすい。一方密閉式は常に太陽集熱循環回路に水が入っているので、凍結事故を起こしやすい。これを防止するには大きく分けて二つの方法がある。一つは太陽集熱循環回路に不凍液を混入する方法である。これは簡単ではあるが、蓄熱槽内で熱交換をし給湯を行なう場合、熱交換コイルに孔でもあれば不凍液が給湯回路に混入する懼もある。また不凍液が入る事で、配管内での熱伝導が悪くなり、水だけの場合に比べ集熱効率が下がるという欠点もある。不凍液を使用しない方法としてはFig.1で温度センサー $T_1$ の温度が1°Cになるとポンプが起動し、蓄熱槽内の温かい水を一時的に循環させるという方法である、昼間太陽集熱を行い60°C程度の温水を蓄えていた蓄熱槽から一時的にでも温水が太陽集熱器に回れば凍結は回避される。Fig.2の密閉式集熱回路では開放式膨張水槽を設置した例を示している。これは理解しやすいのでこの例を示した。実際には今日密閉式膨張水槽が用いられる。密閉式膨張水槽の方が回路内に酸素が混入する機会が無く、配管が腐食を起こす懼が極めて小さくなる。太陽熱利用は太陽熱の変換効率が太陽光発電に比べ高く、有効利

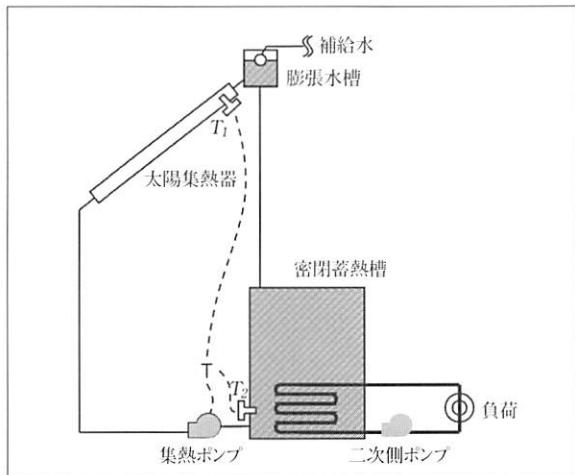


Fig. 1 密閉型の原理図

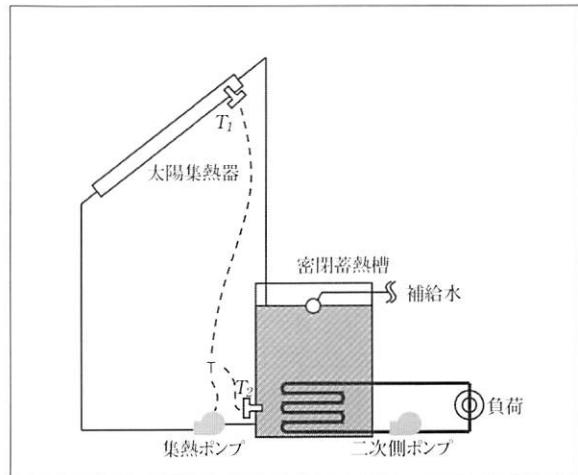


Fig. 2 開放型の原理図

用は行なえるが、配管腐食と、冬季の凍結問題が付き纏う欠点がある。

## 2. パッシブソーラーハウス

筆者は米国住宅都市開発省、米国エネルギー省が1979年に出版した『The First Passive Solar Home Awards』の翻訳権を取得し、1981年に『パッシブソーラーハウス設計事例集・すぐ応用できる自然エネルギー利用住宅』という本を出版した事がある<sup>2)</sup>。これによるとパッシブの太陽熱利用においては次のような分類が行なわれる。

- ・直接太陽熱利用型
- ・間接太陽熱利用型
- ・付設温室型
- ・サーモサイフォン型
- ・そして断熱、特に外断熱

パッシブの方法で最も大切なものは断熱・特に外断熱である。しかし断熱とはまさに受身の存在で、それだけでは何も出来ないのである。建物に立派な外断熱を施しても、その中に「熱源」が無ければ温まらない。その熱源として太陽熱の恵みを受ける、もしくは人体や機器の内部発熱を利用しようとするのが、パッシブソーラーハウスである。

初期の取り組み者は必ずしも正統派の建築家とは言えない人たちが多かった。軽量構造の建築ではなく、建物に蓄熱を行なう事からマッシブな建築、重量構造的な建築であった。太陽熱を捕らえ、蓄え、居住空間に分配

するように建築材料をたくみに使用して住宅を造っていく物である。パッシブの設計には全てのディテールと要素にいたるまで、太陽熱と熱の流れの配慮が必要である。床の平面計画、熱や空気の循環パターン、窓の配置、壁や床材料の選択がパッシブの設計がうまくいくか否かのポイントになってくる。窓は単に明かりを取り入れ、室内からの眺望を良くするだけでなく、集熱の機能を持つ。もちろん窓は設計を誤れば室内の熱を外部に逃がす孔にもなりうる。「窓は太陽集熱器かそれとも熱を逃がす孔か?」と問われる事もある。外壁も単に室内と外界を区画するだけでなく、蓄熱と放射熱を放熱する機能を持つ。

伝統的な建築ではその土地の材料を使用し、パッシブソーラーハウスを建設してきた。わが国の民家にもその事は窺われる。白人の植民者がアメリカ大陸に入植する前に大陸南西部に住んでいたプエブロのインディアン達は全集落をパッシブ的に建設し、太陽熱暖房を行なっていたのである。1933年にシカゴで開催された世界博での「水晶宮」ではパッシブ暖房システムによる近代的な太陽熱直接利用に成功させた。大きなコンクリートブロックと、南面するガラスで建てられたこの建物は、機械的な補助無しに太陽熱を集め、蓄熱し、快適に居住空間に熱を分配している。この建物の設計者であるジョージ(George)氏とウィリアム・ケック(William Keck)氏は1940年から1950年にかけ太陽熱直接利用の建物を設計し、成功を収めている。しかし当時は石油価格が非常に安価で太陽熱利用による燃料費の節約は大した話題にもならなかった。1973年に第一次の石油危機が起

り、やっと話題になるようになったのである。しかしその後石油価格は比較的安定し、一方パッシブソーラーハウスに利用される建築材料が高価であるなどの理由により忘れかけた技術になってきた。近年急激なエネルギー価格の高騰により再度の見直しが行われるようになってきたものである。この本が出版された1979年にはパッシブソーラーハウスのコンペに米国全土から550件の応募があり、145件が優秀作品として認定されている。その後更にパッシブソーラーハウスに適した建築材料の開発も行われ、またこの為のシミュレーションプログラムの開発も行われるようになった。

### (1) 直接太陽熱利用型(Direct Solar Gain)

直接太陽熱利用型は最も一般的なパッシブ・ソーラーの手法であって、多くの歴史的な前例がある。単純な図式では太陽熱が居住空間で蓄熱され、熱容量のあるものに蓄熱される形態を言う。つまり、居住空間が直接太陽熱により暖められ、集熱器となっているのである。直接太陽熱利用型の建物が基本的に必要とするものは、大きな南面するガラス(これこそ太陽集熱器である)、すぐその後方にある居住空間、太陽熱を蓄熱する熱容量のある壁や床、蓄えられた熱を外部空間へ逃がさないための断熱システム等である。太陽集熱器の役割を果たす大きなガラス窓は日射を最大限有効に捉えられるように南に向けられる。一方熱の損失を最小限にするように二重ガラス、場合によっては特殊なガスの入った三重ガラスが用いられる。夏季には太陽は高い所を回るので、南面からの日射は少なくなるが、皆無ではない。夏の日射は冷房負荷を増大さすので、日射の日よけのひさし、ルーバーなどを用いて防止する。在来の建築では熱容量が小さいもののが多かった。大きな窓から日射が入っても蓄熱する事ができなかった。建物に用いられる蓄熱体と居住空間との熱の制御が大切であり、ここに設計の技が示される。熱容量のある蓄熱体と外部空間、大地との間の断熱は不要な熱損失を防ぐのに必要である。直接太陽熱利用のパッシブシステムでは一連のバリエーションと制御の方法がある。最も一般的なバリエーションは、熱容量のある材料の位置変化である。最良の熱容量の配置は自然の熱移動における物理法則により決められる。太陽エネルギーの吸収と蓄熱を最適にするため、太陽熱を直接蓄熱体に当てれば、間接的に当てるのに比べ4倍の効果がある。太陽熱を拡散させるガラスを用い、入ってき

た日射を床や壁にぶつけければ、蓄熱や分配の効果を最大にすることができる。太陽放射の分配を最適にするため、居住者自身が放射を出す蓄熱容量に接近して生活することも重要である。

蓄熱体の代表的なものとして a) 建物の外壁、b) 床表面、c) 天井表面、d) 内壁、その他自立する蓄熱体などがある。どれも熱容量の大きいことを前提とするので、在来の一般的なわが国の建築部材とは異なるものである。蓄熱体の位置に加え、蓄熱材料のバリエーションや、熱容量の違いにより、異なった時間遅れを可能にする各種蓄熱材料の集合といったバリエーションもある。しかしこれらは居住空間へ熱を放射させる為に用いられるものである。直接太陽熱利用、または他のパッシブシステムの熱効率を向上させるためには、いくつかの制御方法がある。冷房負荷になってしまうような歓迎されない日射熱の取得を防止するためには、南面する大きなガラス窓に日射の遮蔽装置が必要になる。できればこれはガラス窓の外側に取り付けられる事が望ましい。夏季の南側からの高い位置から入射してくる日射を防止するには、ひさしが用いられるが、斜めからの日射、例えば、東側や西側からの日射(太陽位置が低い場合)の浸入を防止するためには他の解決方法を導入する必要がある。例えば格子状のルーバーを用いるのも一つの方法である。また室内空気の廃気を行う、通風を良くすると言ったことも室温上昇を防止するのに役立つ。熱損失の防止にはガラスの断熱性を増すこと、ガス入りの断熱ガラスを用いることも有効である。当然窓枠やサッシュも熱損失の防止に影響する。できれば木製の断熱サッシュを用いたい。可動の断熱パネル、カーテン、シャッターなども日射の無い冬の日、そして夜間の熱損失の防止に役立つし、夏の熱取得防止に役立つ。いろいろの熱の制御方法をあげたが、このような方法なしでは直接太陽熱利用システムは冬の熱損失、夏の過熱により不快な状態をもたらしてしまうことを忘れてはいけない。

居住者が、太陽熱直接利用のパッシブ・ソーラーハウスを理解するには、直接採熱、蓄熱、そして太陽熱暖房の熱分配の要素に直接触れて理解を深めることも大切である。直接太陽熱利用型の代表的な7つの概念図をFig.3に示す。

### (2) 間接太陽熱利用型(Indirect Solar Gain)

太陽エネルギーの間接利用システムとは、建物の構造

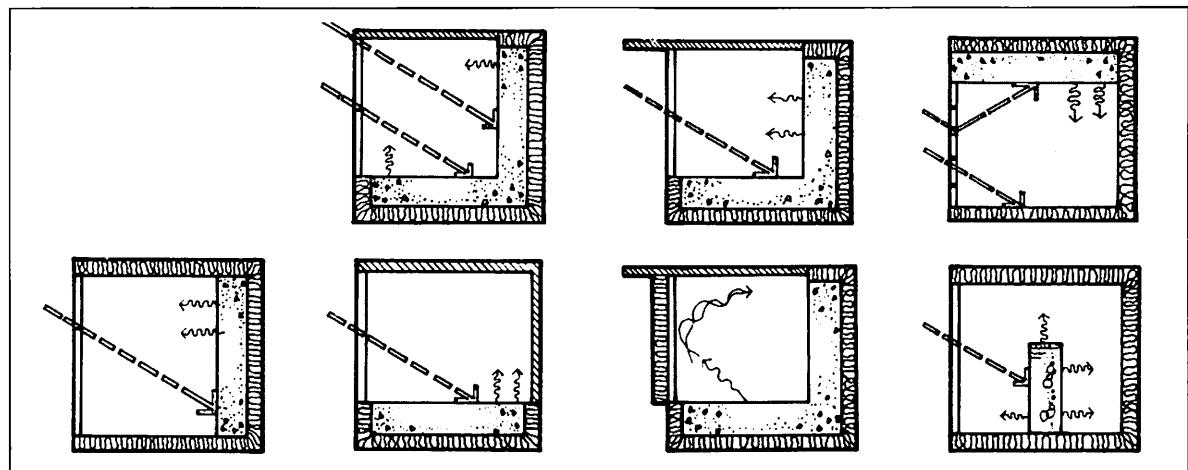


Fig. 3 代表的な直接太陽熱利用型その1

自体は前項の直接利用型と変わらず、太陽エネルギーを集め、そのエネルギーを蓄える方式である。間接利用型とは太陽光線が直接居住スペースに当たらない方式である。もちろん、太陽エネルギーは、直接トロンプ壁や厚い壁に当たり、蓄熱される。いいかえれば、日射を直接居住空間に入れることによって起こる弊害を極力少なくし、必要な太陽エネルギーを居住スペースを通さずに、熱として屋内に取り入れる工夫をしたものである。太陽エネルギーをまず蓄熱機能を持つ厚い壁に集め、厚い壁に蓄えられたエネルギーを間接的に居住スペースに送るシステムが間接型太陽熱利用型である。

このコンペで入賞した太陽エネルギーの間接利用型には基本的に2つの方式がある。1つはトロンプ壁といわれる蓄熱機能を持つ厚い壁である。もう一つは、水を蓄熱材とした水の壁である。2つのタイプとも太陽エネルギーが太陽集熱器以外のところで厚い壁や水の壁に当たり吸熱、蓄熱することでは共通するが、蓄熱のための材料やメンテナンスの方法は全く異なる。

### (3) トロンプ壁

トロンプ壁システムの構成要素は、広いガラス面を持つ太陽集熱面積と、その内側のコンクリートやれんがで築いた厚い壁である。トロンプ壁になる材料はコンクリート、日干しレンガ、石、れんがブロックなどであるが、実際に建築する場合は居住空間それぞれの材料に合ったものにしなければならない。トロンプ壁からの再放射熱は、壁の材料、厚さによって異なる。自然対流によって生じる空気分布はガラス面と厚い壁との間隔、温

度、空気量によっても異なる。厚い壁には通常上部と下部に通風口が付いており、上部の通風口は温かい空気を居住空間に送り込み下部の通風口は低めの温度の空気を太陽集熱スペースに送り込む役割を果たす。そこで上下の通風口に開閉が出来るダンパーを取り付ければ、このダンパーの開閉で室内空気温度の調節を行うことも可能になる。トロンプ壁の構造、設置する位置、通風口、ダンパー等の組み合わせにはいろいろの種類があり、この組み合わせの良し悪しによって太陽エネルギーの利用効率も異なってくる。太陽エネルギー直接利用型のソーラーハウスと異なり、間接利用型では集熱の為に居住スペースは直接日射の影響は受けない。しかし、トロンプ壁を利用したソーラーハウスでは蓄熱、放熱の制御が必要である。例えばトロンプ壁が太陽熱を集熱しても、それを外部に放熱しないように例えばトロンプ壁前面に透明断熱材を張ることも考えられる。夏には日射遮蔽の庇やルーバーを設けることも必要になってくる。またダンパーを操作して余分な熱が壁に入ってこないような制御も必要になる。トロンプ壁は上部に排気用の換気口を設ければそこから暖かめな空気を排気し、その分涼しみな空気を下部から吸い込み室内を自然循環することも可能になる。空気の流れが室内に生じることで、人間は涼しさを感じるのである。

### (4) 水蓄熱壁

水蓄熱壁に必要な要素は、前述のトロンプ壁と同様に広いガラス面と、これに接する蓄熱の厚い壁である。蓄熱材となる水やその他液体は適当な容器に入っている

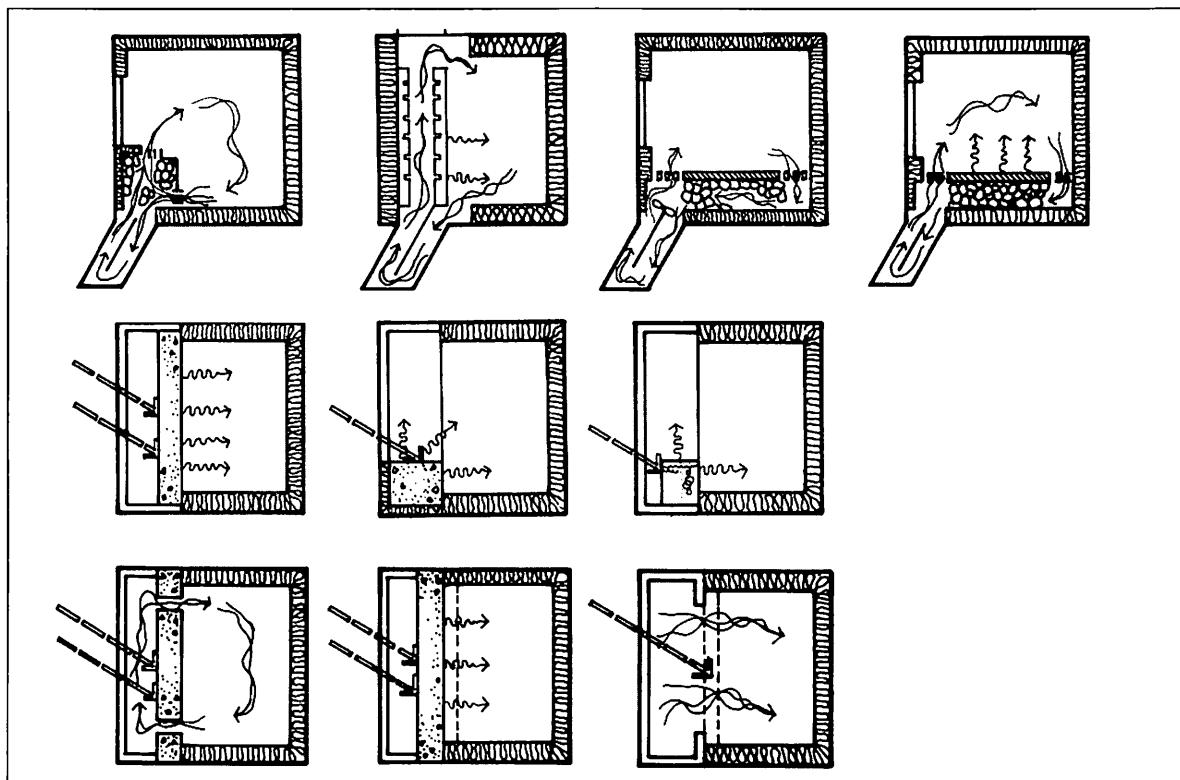


Fig. 4 代表的な間接太陽熱利用型

わけだが、蓄熱材の蓄熱容量に対して表面積が大きければ比較的短時間の蓄熱に、表面積が小さければ長時間の蓄熱に適するものとなる。しかし蓄熱材、蓄熱量、表面の熱交換面積との関係はまだ十分に解明されたわけではない。蓄熱槽容器には鋼板、びん、チューブ、たる、ドラム缶、袋など様々なものが使用可能である。蓄熱材料とこれら容器の組み合わせもまた水蓄熱壁の効果に影響を与える。水蓄熱壁での制御を考えると、水は対流での熱移動が速いことに注意を払う必要がある。トロンブ壁は熱容量が大きく蓄熱から放熱までタイムラグがあるが、水蓄熱壁はトロンブ壁に比べタイムラグは少ない。冷え込みの来る夜まで暖房用の放熱が不要である地域では、水蓄熱システムの場合、暖房が必要になる時刻まで保温制御が必要になる。透明断熱材の使用も一つの方法である。夜間に外面に断熱壁を設けるなどの工夫も必要である。トロンブ壁の場合と同様に上部と下部に開口を設けることも良い効果をもたらせる。屋外に向けて設けた排気用の換気口は室内の空気循環を促す効能を持つ。Fig.4に間接太陽熱利用型の概念図を示す。

### (5) 付設温室型 (Solarium)

付設温室型はサンルーム型とも呼ばれる。ドイツでは冬の庭(Wintergarten)とも呼ばれている。これはサンルーム(温室)を居間に隣接して設け、サンルームに日射熱を蓄え、日射が無くなった夕方から夜に備えるものである。付設温室型とは居住スペースに直接太陽エネルギーを取り入れる直接太陽熱利用型と、居住スペースに厚い壁や水の蓄熱体を設ける間接太陽熱利用型の中間の存在ということが出来る。付設温室型バッシリソーラーハウスの条件は付設温室(サンルーム)それ自体が居住スペースに接していて、太陽エネルギーを集める部分との間にはガラス戸や一般的の間仕切りが設けられるものである。南を向いた太陽集熱を行うスペースは蓄熱と暖房機能を持つ厚い壁と同じような関係を持つ。付設温室の位置や大きさによって居住スペースとの関わりにバラエティーをもたらすことも可能になる。

例えば居住スペースと付設温室が接する面積を小さくすれば、居住スペースに取り込む熱量が減少するし、南側前面を付設温室にすると居住スペースに取り込む熱量は増大する。中庭に付設温室を設けることも可能で

ある。この場合サンルームの周囲に居住スペースを設けることが可能になる。付設温室の設置場所や大きさは、建物のデザイン、間取り、冷暖房負荷、太陽の位置、日射量などによってそれぞれ異なる。付設温室内の温度設定を何度もするかも重要な事で、これにより付設温室の設置場所や大きさにも影響を与える。付設温室は夜間や曇天日のために備えて太陽熱を蓄えておく蓄熱装置が必要である。これにはれんがやコンクリートの厚い壁や床、水蓄熱槽が用いられる。また潜熱蓄熱体が用いられることがある。

蓄熱する温度範囲は付設温室が通常人間が立ち入らないスペースであればできるだけ高温で蓄熱することが望ましい。しかし、そこが植物を植えておくスペースであればその生育に適した温度でなければならない。付設温室内に水泳プールを取り入れるならば水温が水泳に適した範囲になるように設定するのは当然である。付設温室型パッシブソーラーハウスの制御は付設温室と居住スペースとの関係で決まる。付設温室と居住スペースとの間にガラスや間仕切壁は付設温室で集められた熱を居住空間へ十分に供給したり、場合によっては遮断できる機能を持つ必要がある。

付設温室型の場合、放射、対流、伝導による熱の供給や分配方法は居住空間を直接太陽熱で暖房する直接太陽熱利用型とは異なる。夏季は付設温室内の過熱を防止するために日射遮蔽の日よけを設けたり、付設温室の熱が居住空間に侵入しないような配慮も必要になる。逆に冬季でも夜間や曇天日に付設温室内の室温低下を防止するために断熱装置を設ける事も必要である。晴天時には日射があり、曇天時には熱の放射を防止する透明断熱材の設置も奨められる。付設温室内の温度が低下すれば相対湿度は上昇する。そのような場合、カビ発生の危険性も出てくる。このようなことにならないような室温保持制御も必要である。付設温室型パッシブソーラーハウスは太陽日射が直接居住空間に差し込む太陽熱直接利用型や、太陽熱を厚い壁や水蓄熱壁で受けて、暖房用のエネルギーを得る間接太陽熱利用型とは異なるものである。付設温室型パッシブソーラーハウスは、サーモサイフォンの原理を応用したエネルギー自然循環系のある、太陽熱利用システムである。

## (6) サーモサイフォン型

サーモサイフォンの自然循環原理を応用したパッシ

ブソーラーハウスは太陽エネルギーを集める集熱装置が建物とは別な場所にあるソーラーハウスである。集熱装置の中にある空気や水は熱を運搬する熱媒であるが、太陽エネルギーを吸収して暖まると密度が小さくなり、上昇し居住空間に入り放熱し、室内で温度が下がった空気や水は密度が大きくなることから集熱装置の下方へ戻る。このように熱を運搬する空気や水をサーモサイフォン作用で自然に循環するシステムをサーモサイフォンパッシブソーラーハウスと呼ぶ。原理や考え方には、自然循環型の給湯用太陽熱温水器と同じであるが、さらに大掛かりな自然循環型の太陽熱利用方法といえる。サーモサイフォンパッシブソーラーハウスを構成する基本的要素は集熱装置、厚い壁、もしくは碎石と熱の分配装置である。集熱装置は太陽光の吸収を良くするために表面が黒く塗られた金属板で、この金属板中には水や空気などの熱輸送媒体が入っていて、サーモサイフォン現象で自然循環をし厚い壁や放熱装置へ導かれるものである。

サーモサイフォンパッシブソーラーハウスでは、集熱装置を建物に直接取り付ける必要は無く、建物の隣接する場所で最も太陽熱を取得しやすい場所に設置すればよい。集熱装置が建物と分離しているので、設計が自由であり、建物の外観を損なうことも無い。集熱装置で集めた太陽熱は、床、壁、窓の下の壁などに蓄えることが出来、蓄熱装置の設置場所や材料の選択にも自由性が広がる。居住空間への熱供給は、厚い壁や床からの放射や対流によるが、太陽熱の有効利用という観点からは蓄熱装置の位置と間取りの関係が重要なポイントとなる。サーモサイフォンパッシブソーラーハウスでは集熱装置のスペースと厚い壁との接触面積が小さいので、この間の熱移動の制御は比較的簡単である。しかし厚い壁などの蓄熱装置と居住スペースの接触面積が大きい場合は、大量の熱が居住空間に流れ込む事もあり、過暖房による弊害が生じることもある。この制御も考慮しておく必要がある。居住空間の温度制御は前項のトロンブ壁の場合と同様に厚い壁からの放熱量を制御できるダンパーや断熱板を設置する必要がある。

### <引用文献>

- 1) 米国住宅都市開発省・米国エネルギー省編纂、株 ソーラーシステム訳、田中辰明日本語版監修：パッシブソーラーハウス設計事例集：創文館(1981/8)

## 建築仕上技術者のための

# 建築物理学講座

### 第21講「太陽熱利用(3)」



田中 辰明

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))

柚本 玲

#### はじめに

平成20年7月に開催された北海道洞爺湖サミットでの最大のテーマは環境問題であった。二酸化炭素排出削減問題が討議された。これを機会に経済産業省はサミット会場となった「ザ・ウィンザーホテル洞爺」から約30km離れたメディアセンターの屋外駐車場に「二酸化炭素排出ゼロ」の住宅「ゼロエミッションハウス」を建設し日本の環境技術を披露した。電力は太陽光発電、風力発電で貯い、最新の省エネルギー技術を駆使した冷蔵庫やエアコンを展示した。また燃料電池を利用した熱で暖める「足湯」も披露された。わが国は確かに省エネルギーに対する要素技術は素晴らしいものを保有している。しかしこの住宅自身にどれだけの省エネルギー技術が盛り込まれたかとなると残念ながら疑問も湧いてくる。住宅や建築そのものの省エネルギー策が本来は一番大切であるにもかかわらず、単に住宅に省エネルギー機器を配置しましたというのでは問題である。

#### 1. ドイツにおける住宅・建築の省エネルギー

住宅や建築に対する省エネルギーの取り組みはやはりドイツが進んでいる。早くから政府がフランホーファー研究所に委託し、建築物、住宅の省エネルギーを図るために新築時や中古でも住宅に関しては「エネルギー証明書:Energieausweis」を添付しなければ売買ができないようにした。他のEU諸国もこれに倣っている。ドイツの国土交通省が発行しているエネルギー証明書の解説本によると

- ・2007年10月1日新しい省エネルギー法が発効。ここでエネルギーパス(現在のエネルギー証明書)という言葉

が使用された。2004年末までに4000戸の住宅でエネルギーパスの適用を調査検討した結果だそうである。

- ・2008年7月1日から1965年以前に建築された住居の売買、賃貸にエネルギー証明書を必要とする。エネルギー証明書を添付しないで売買した場合は最高で15,000 Euroの罰金が科せられる。
- ・2009年7月1日から非住宅建築の売買にエネルギー証明書を必要とする。

このような解説書を読むとドイツの省エネルギー住宅には次のようなランクがある。

- ・Niedrigenergiehäuser(低エネルギー住宅)
- ・Niedrigstenenergiehäuser(最低エネルギー住宅)
- ・Ultra-Energiehäuser(ウルトラエネルギー住宅)
- ・Synergiehäuser(共生住宅)
- ・Passivhäuser(パッシブハウス)
- ・3-Liter-Häuser(3リットル住宅)

エネルギー証明書の公的な解説書によると、現在のドイツ住宅の平均的なエネルギー消費はリフォームなしの戸建中古住宅の場合で400kWh/m<sup>2</sup>a、リフォームなしの集合住宅の場合で350kWh/m<sup>2</sup>a、平均的な住宅の場合で300kWh/m<sup>2</sup>a、省エネルギー的にリフォームされた戸建住宅の場合で200kWh/m<sup>2</sup>a、新築戸建住宅の場合で150kWh/m<sup>2</sup>a、新築集合住宅の場合で100kWh/m<sup>2</sup>a、パッシブハウスの場合30kWh/m<sup>2</sup>aとなっている。3リットル住宅で30kWh/m<sup>2</sup>aのエネルギー消費を行うので、パッシブハウスはほぼ3リットル住宅を目指しているといえる。決してゼロエネルギー住宅ではないのである。わが国ではゼロエネルギーhausという言葉も最近よく使用されるが、言葉だけが先行していて実際の到達は極めて困難である。ドイツのように3リットルハウスを目指すのが妥当であろう。

3リットル住宅とはドイツで省エネルギー住宅の目



Photo1 真空断熱板

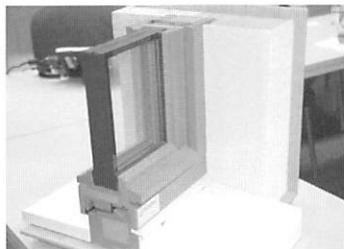


Photo2 3重ガラスにし、熱伝導の悪いガスを封入した窓ガラスと断熱的な窓枠

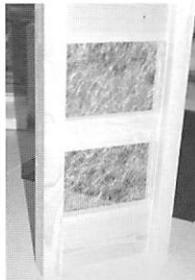


Photo3 日射透過率を変更できるガラス

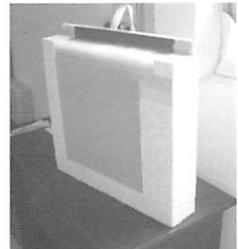


Photo4 透明断熱材



Photo5 付設温室に設置する潜熱蓄熱体

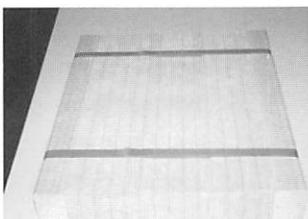


Photo6 木質繊維断熱材



Photo7 相対湿度により水蒸気の透過率が変化するシート



Photo8 ドイツの住宅展示場におけるハイブリッド住宅の例

標値として使用され、年間に床面積1m<sup>2</sup>当たり灯油3リットルを消費することで維持できる住宅という意味である。1リットルが凡そ10kWh/m<sup>2</sup> aに換算されている。パッシブハウスを目指して多くの住宅構成要素も開発されている。そのいくつかを紹介する。Photo 1に真空断熱板を示す。これはドイツ製であるが、板の中が真空になっているので、究極の断熱材といえよう。このような断熱材は平成11年度から14年度の間(社)日本建材産業協会が「エネルギー使用合理化技術開発補助事業」として実施をし、わが国でも開発された。しかしこれを実際に使用すると、間違えて釘を断熱材に打ち込んでしまうだけで断熱性能は無くなってしまう事も判明し、実使用には至らなかった。

## 2. パッシブハウスの方法

Photo 2に3重ガラスにし、熱伝導の悪いガスを封入した窓ガラスと断熱的な窓枠を示す。ドイツでは外断熱が発達し、かつ断熱材の厚さが厚くなってきている。その結果外壁そのものの熱損失は極端に少なくなっている。ガラス窓を含む開口部からの熱の損失の割合が増大している。このような開口部からの熱損失を減少させようとしたものがこの窓ガラスである。ガラスの窓枠は木製が一番上等で、性能も良い。しかしあが国で

は木は燃えるものとして考えられ、木製サッシは使用されにくい。実際には火災になった際にはアルミニウムサッシの方が先に溶解してしまうのも関わらずである。Photo 3に日射透過率を変更できるガラスを示す。冬には日射が室内に入り、夏季は日射を遮蔽するようになっている。Photo 4に透明断熱材を示す。

Photo 5に付設温室に設置する潜熱蓄熱体を示す。これは日射により付設温室の温度が上昇すると蓄熱体が吸熱し液化する。逆に温室内の温度が低下すると蓄熱体は放熱し、固体に変化する。このようなことを繰り返し、温室内はほぼ一定の温度を保たれるのである。Photo 6に木質繊維断熱材、Photo 7に相対湿度により水蒸気の透過率が変化するシートを示す。パッシブハウスを完成するのには当然建設費が嵩む。省エネルギーの為に余計にかかった建設費を運転費が安くなったことにより何年で回収できるかといった計算も行いバランスの取れた住宅を建設するのが得策である。その為にはパッシブ手法だけでなくアクティブの手法も取り入れたハイブリッドの太陽熱利用も大切であろう。ドイツの住宅展示場におけるハイブリッド住宅の例をPhoto 8に示す。

## 3. パッシブハウス

1973(昭和48)年秋に第一次石油危機が発生した。こ

のときに石油価格が突然4倍ほどになり、石油を使用して生産されている物資が突然市場から消えてしまったことがある。石油から自立して日本もやっていけるようにという考え方で当時の通産省が太陽熱で暖房と給湯を行える住宅や建築の開発を行なう「サンシャイン計画」を立ち上げ、太陽熱利用の研究が開始された。ここでパッシブソーラーハウス、アクティブソーラーハウスという言葉が使われるようになった。ポンプやファンなど機械動力を使用しないで、太陽熱を利用する建物をパッシブソーラーハウスという。

ここで「太陽熱を利用」と書いたが、パッシブとは「受身の、消極的な、無抵抗の、言いなりになる」などの意味があるので、「太陽熱の恵みを受ける」と言った方がベターであろう。従来各国や地方で育成されてきた民家の類はパッシブソーラーハウスであった。

パッシブの方法で大切なものは断熱、特に外断熱である。しかし断熱とは正に受身の存在で、それだけでは何も出来ないものである。建物に外断熱を施しても、その中に「熱源」が無ければ温まらない。その熱源として自然エネルギーである太陽熱の恵みを受ける、もしくは人体や機器の内部発熱を利用しようとするのが、パッシブソーラーハウスである。民家がパッシブハウスであったことは述べたが、Photo 9に長野県美麻村・中村家住宅を示す。1698(元禄11)年建設である。屋根を萱葺きにする事で、梅雨時に降った雨を茅が吸い込み梅雨があがり強い日差しが照るようになるとこの水分が蒸発し蒸発潜熱により室内が冷却される。外周は縁側が取り巻き、これが熱的緩衝帯になり、冬の寒さ、夏の暑さが直接室内に影響することを防いでいる。建物外周の床付近には外気の取り入れ口があり、室内外で温度差があるときには煙突効果により換気が促される工夫もされている。床の畳は十分な断熱材として機能する。このようなことは松尾芭蕉の俳句にも見られる。

“すずしさの指図にみゆる住まいかな”。指図は設計図のこと、日本の住宅は夏の蒸し暑さを凌ぎやすくするように建てられた。設計図を見るだけで涼しく夏をすごせるような住宅である。

原油価格が著しく上昇してしまった現在わが国が「サンシャイン計画」として培った太陽エネルギー利用技術も経済的に見合うようになってきたはずである。サンシャイン計画が進行していた時代には多くの太陽集熱



Photo 9 長野県美麻村・中村家住宅



Photo 10 太陽熱で暖房と給湯を行い、かつ外断熱を施した著者宅

器メーカーがわが国に存在した。しかしその殆どは現在市場から撤退をしてしまっている。現在政府は太陽光発電の普及に力を入れている。またわが国の匠が伝承してきた「パッシブハウス」の技術も再考する必要がある。パッシブの中で特に有効なのは外断熱工法である。筆者は太陽熱で暖房と給湯を行い、かつ外断熱を施した住宅(Photo 10)に28年住んでいる。太陽熱利用と外断熱の素晴らしさを機会あるごとに紹介してきたつもりではあるがわが国ではなかなか普及しないのが実情である。ドイツではエネルギー証明書の添付をしないと住宅の売買が出来なくなってきたことから中古物件であっても外断熱を施すことによる省エネルギー改修が盛んになっている。

外断熱工法は断熱材が建物躯体の外側にあるので、建物が服を着たようになり外気温度や日射の変動から保護される。したがって建物躯体の温度変動が小さくなり、温度による伸縮が小さくなりひび割れが入りにくい。従って建物の寿命の長期化に役立つ。コンクリートの熱容量が室内側に入るので、暖房が切れても急激に室温が低下する事もなく、冷房が切れても急激に室温が上昇する事もない。すなわち快適性に富む。壁体の内部に結露を起こすことがない。既存の建物に断熱改修を行いやすいなどの長所がある。

建物による環境負荷軽減には外断熱を含むパッシブの手法を再度見直すことが重要と考える。

#### <引用文献>

- 1) Hans-Dieter Hegner: Energiepass(EnEV) Die neue Energieeinsparverordnung für Gebäude : Haufe, Auflage : 1.A.(2007/10)
- 2) 米国住宅都市開発省・米国エネルギー省編纂、(株)ソーラーシステム訳、田中辰明日本語版監修：パッシブソーラーハウス設計事例集：創文館(1981/8)