太陽熱のパッシブ利用に関する研究（その１）
――パッシブシステムの性能評価――

岡　建雄

Passive Systems for Solar Heating and Cooling (Part 1)
――Evaluations of Performances of Passive System――

Tatsuo Oka

Abstract

A method of evaluating solar heat collectin performances and heat storage capacities of passive solar systems is described in this paper. Two types of direct gain heating and one type of indirect gain heating, Trombe Wall, were tested in a revolving air-conditioning test room. The fundamental method of evaluation was to obtain overall heat conductance of the room for the heat input —the incident solar energy— by regression analysis. The overall heat conductance for the heat input shows the rate at which the incident solar energy supplies heat to the room, and the weighting factors show the heat storage capacity.

概　要

本報告の目的はパッシブシステム自体が負荷であり，熱供給システムである点を重視して，その性能評価の客観的基準を見い出すことにある。パッシブシステムの性能評価の基準として集熱効率，蓄熱容量が挙げられる。本報告では Direct Gain 型２例，Indirect Gain 型１例のシステムを試作し，回転実験室を用いて実験を行なった。性能評価の基本的方法は日射を熱入力として，熱入力に対する室総熱コンダクタンスを実験データの重回帰分析によって得ることである。熱入力に対する室総熱コンダクタンスは太陽熱の集熱，蓄熱システムにより異り，入射した日射がどれ程有効に利用できているかを示しており，重み関数は蓄熱機能を表わすことになる。

1. はじめに

本報告の目的はパッシブシステム自体が負荷であり熱供給システムである点を重視して，その性能評価の客観的基準を見い出すことにある。パッシブシステムとして Direct Gain 型２例，Indirect Gain 型１例を試作し，回転実験室を用いて実験を行なった。性能評価の基本的方法は日射を熱入力として，熱入力に対する室総熱コンダクタンスを実験データの重回帰分析によって得ることである。熱入力に対する室総熱コンダクタンスは太陽熱の集熱，蓄熱システムにより異り，入射した日射がどれ程有効に利用できているかを示しており，重み関数は蓄熱機能を表わすことになる。

2. 実験装置

回転実験室は H×D×W＝2×4×4 m の大きさで南面は全面一重ガラス，他は 12 cm 厚のコンクリートに囲まれている。回転実験室内に試作したパッシブシステムは次の３例で図―１に示されるものである。

a．Direct Gain 型―コンクリート内壁

コンクリート床及び壁で蓄熱を行なうパッシブシステムで最も基本的な形態である。

b. Direct Gain 型―断熱内壁

コンクリート壁の室内側に5 cm 厚の断熱材を貼ったもので蓄熱機能を減少させたシステムである。

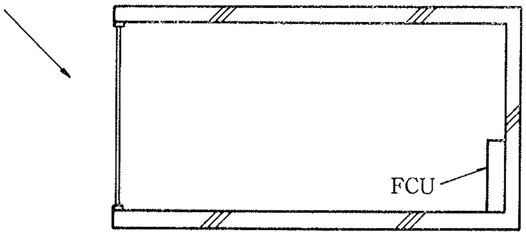
c. Indirect Gain 型―トロンブ壁

パッシブの代表的システムで熱容量，蓄熱機能が大きい。

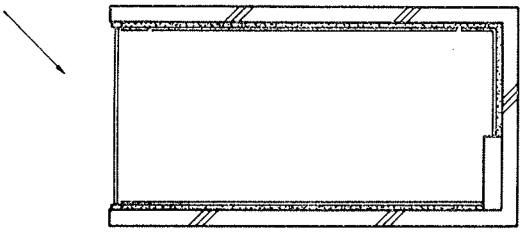
3. 実験結果

図―2にパッシブシステム3例の自然室温の実験結果を示す。コンクリート蓄熱による Direct Gain 型では熱容量が比較的大きいために室温は緩やかに変化しており，パッシブシステムとしては良好な結果となっている。これに対して内側を断熱した Direct Gain 型では蓄熱機能が小さいために冬季においても室温は40℃以上に達し，夜間は外気近くまで下降する。このために日中は冷房，夜間は暖房が必要で総合的な熱利用効果は減少する。一方，トロンブ壁では内壁断熱であるが，トロンブ壁が30 cm 厚のコンクリートで熱容量が大きく，集熱効率も小さいために概して室温は低いものとなっている。トロンブ壁と窓ガラスの間にある空気温は室温に比べて相当高温になっており，トロンブ壁の性能向上のためには2重ガラスや補助的なファンが特に有効であると考えられる。

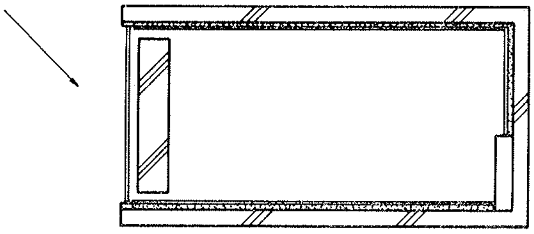
トロンブ壁は上下のスリットから対流で室内に熱を送り込む他にトロンブ壁を通して伝熱により熱を供給する。自然室温の場合，トロンブ壁の室内側表面温度は室温より平均2.5℃高く，これは1日単位では窓から入射する太陽熱の10%に相当する。トロンブ壁の集熱効率は35%程度であったので，集熱量の30%がトロンブ壁を通した伝熱量となっている。



(1) Direct gain ― コンクリート内壁
12cm 厚コンクリート

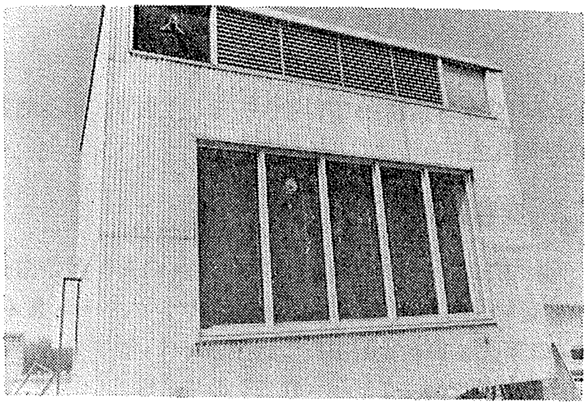


(2) Direct gain ― 断熱内壁
12cm 厚コンクリート
5cm 厚断熱材 + 0.4cm 厚合板

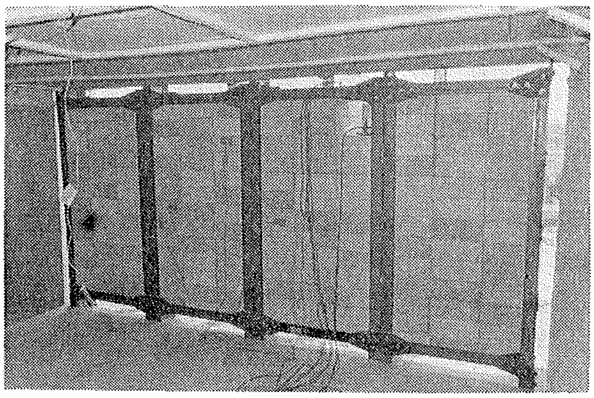


(3) Indirect gain ― トロンブ壁
12cm 厚コンクリート
5cm 厚断熱材 + 0.4cm 厚合板
30cm 厚トロンブ壁

図―1 実験に用いたパッシブシステム3例



写真―1 回転実験室の外観



写真―2 トロンブ壁のある室内

4. パッシブシステムの性能評価

4.1. 性能評価のための分析手法

室温を非定常解析するために重み関数を用いた計算法がある。最も単純な熱的系として，各部材両表面間の温度差に比例して熱が移動する部屋がある。熱平衡式は室温 θ_R，部材に作用する外乱温度 θ_i を用いて，

$$\frac{\partial\theta_R}{\partial t}=\lambda(\sum K_i\theta_i-\theta_R) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

但し，K_i: $k_i/\sum_i k_i$ （k_i は部位の熱コンダクタンス）

ここで，(2)式で示される重み関数 $\varphi_a(\tau)$ を用いると，室温 θ_R は(3)式で表現できる。

$$\varphi_a(\tau)=\lambda K_i e^{-\lambda\tau} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

$$\theta_R=\int_0^t\sum_i\theta_i(t-\tau)\varphi_a(\tau)d\tau \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

室温 θ_R 及び部材に作用する外乱温度 θ_i を実験データとして与え，K_i を重回帰分析によって求めることができる。ここで λ は未定係数であるが，計算室温と測定室温の残差平方和が最小となる λ をもって，その室の熱定数とする。

室に入射する日射の影響は日射に対する室温の重み関数 $\varphi_S(\tau)$ を用いることができ，この場合室温 θ_R は(5)式で表現できる。

$$\varphi_S(\tau)=\mu K_S e^{-\mu\tau} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

$$\theta_R=\int_0^t\sum_i\theta_i(t-\tau)\varphi_a(\tau)d\tau+\int_0^t S(t-\tau)\varphi_S(\tau)d\tau \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

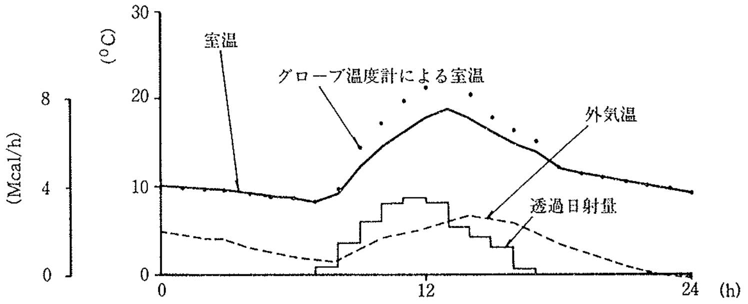
計算室温と測定室温の残差平方和が最小となる λ と μ の組み合せを求め，λ, μ, K_i, K_S を実験データから(5)式を用いて算出することができる。日射を熱入力すれば，(6)式で示される重み関数から定義の室総熱コンダクタンスWが求められる。

$$\int_0^\infty\varphi_S(\tau)d\tau=\frac{1}{W} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

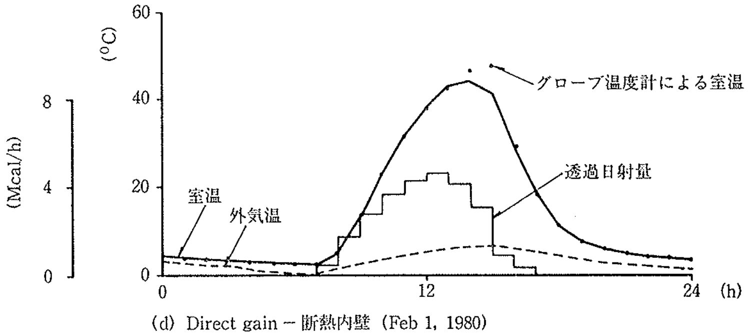
この室総熱コンダクタンスWは集熱，蓄熱システムにより異り，Wが大きい程，熱入力に対する熱損失が大きくパッシブ効果が低いことになる。蓄熱効果は μ で示され，室の熱容量Qは次式で表せられる。

$$Q=\frac{1}{\varphi_S(0)}=\frac{W}{\mu} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

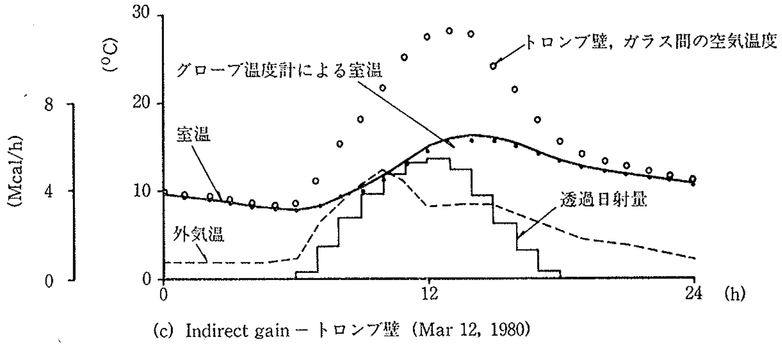
以上の分析手法により Direct Gain 2例，Indirect Gain 1例の室総熱コンダクタンス，室熱容量を算出し，各パッシブシステムの基本的熱特性を明らかにする。



(a) Direct gain－コンクリート内壁（Jan 10, 1980）



(d) Direct gain－断熱内壁（Feb 1, 1980）



(c) Indirect gain－トロンブ壁（Mar 12, 1980）

図―2 室温の日変動

4.2. 測定室温と計算室温の比較

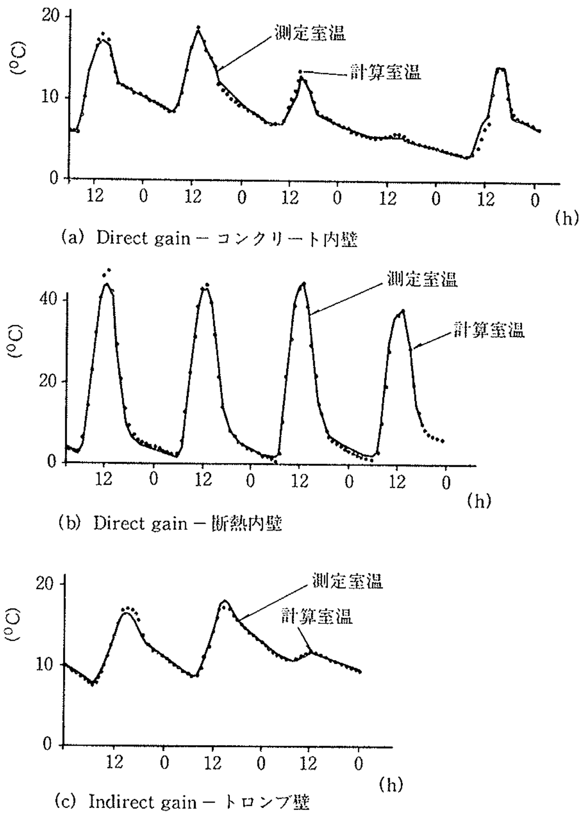
図―3は入射日射量，外気温，ガードルム温度の3成分を要因として用いたもので，測定室温と計算室温はよく一致している。

計算室温と測定室温の残差平方和は0.04～0.11である。図―4は24時間分の実験データで係数を決定し，2～3日分の室温予測を行なったもので，この場合も予測値と測定値は大略一致している。図―3，4から本分析手法を性能評価法に用いることは概ね妥当であると考えられ，各パッシブシステムの性能評価を行なった。

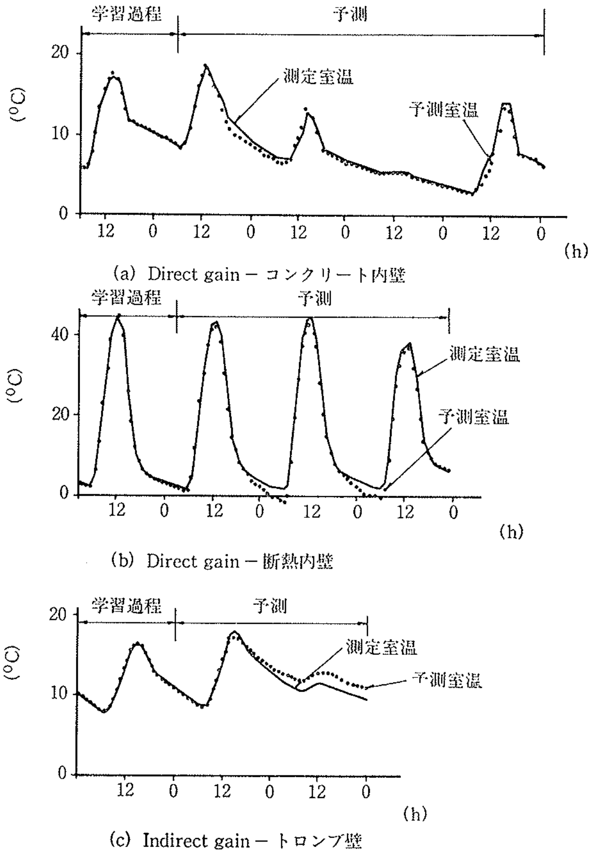
4.3. 性能評価

コンクリート及び断熱材の熱伝導率を1.4，0.03とし，内外表面熱伝達率を各々8，20とした場合の実験室各部の熱コンダクタンスを表―3に示す。

表―1，2は各々図―3，4に対応する



図—3 入射日射量，外気温，ガードルーム温度を要因とした場合の計算室温と測定室温の比較



図—4 入射日射量，外気温，ガードルーム温度を要因とした場合の計算室温と測定室温の比較（学習時間：24 h）

	W	Q	λ	μ
Direct Gain コンクリート内壁	288	571	0.5	0.7
Direct Gain 断 熱 内 壁	103	205	2.0	0.7
Indirect Gain ト ロ ン ブ 壁	336	2,326	0.05	0.15

表—1 入射日射量，外気温，ガードルーム温度を要因とした場合の W, Q, λ, μ 値

（W：室総熱コンダクタンス(Kcal/h℃)
Q：室熱容量(Kcal/℃)）

	W	Q	λ	μ
Direct Gain コンクリート内壁	313	565	0.4	0.8
Direct Gain 断 熱 内 壁	117	213	1.2	0.8
Indirect Gain ト ロ ン ブ 壁	556	2,500	0.18	0.25

表—2 入射日射量，外気温，ガードルーム温度を要因とした場合の W, Q, λ, μ 値
（学習時間：24 h）

（W：室総熱コンダクタンス(Kcal/h℃)
Q：室熱容量 (Kcal/℃)）

a．ガラス面	46kcal/h°C
b．内　壁　(断熱無し)	215kcal/h°C
c．内　壁　(断熱あり)	72kcal/h°C

表—3 実験室各部の熱コンダクタンス

室総熱コンダクタンスW，室熱容量 Q，λ，μ を示したものである。時系列表示の実験データは Direct Gain では10時間，Indirect Gain では24時間である。

表—1の場合，室総熱コンダクタンスはコンクリート内壁で 288 kcal/h℃，断熱内壁で 103，トロンブ壁で336 となっている。表—3からはコンクリート内壁 261，断熱内壁 118，トロンブ壁 118 と算出できる，これを実験

データの分析結果と比較すると，Direct Gain では10％程度の差異しかなく，入射した太陽熱は100％室温上昇に寄与していると考えられる。しかしながらトロンブ壁の場合，実験結果による室総熱コンダクタンスが断熱内壁の3倍前後あり，入射した太陽熱の3分の1程度しか室温上昇に使われていないことが示された。従って本実験から Direct Gain では集熱された太陽熱は100％有効に利用されているものの，トロンブ壁では集熱された太陽熱の35％が有効に利用されて，残りはトロンブ壁への集熱，蓄熱時にガラスを通して外部へ逸散していることが示された。

表一1に示される室熱容量ではコンクリート内壁571 kcal/℃，断熱内壁205，トロンブ壁2,326で，トロンブ壁が特に大きい熱容量を有しているという結果が得られた。μは日射に対する蓄熱機能を示しており，コンクリート内壁，断熱内壁では入射した太陽熱は3～4時間でその影響が10分の1以下になるが，トロンブ壁は応答が遅く，一日中室温を一定にする働きが強いことを表している。

表一2の要因は3成分であるが，24時間の学習過程で係数を決定したものである。表一1の結果と比較するとトロンブ壁のW値が40％程度異っているが，他は概ね一致している。

本実験の結果からパッシブシステムは3～4日の実験から重み関数を用いて性能評価することが可能であると考えられる。しかしながらシステム全体を室総熱コンダクタンスで評価するために気象条件や室温条件が著しく異る場合については本実験の分析結果を適用することはできない。

5. 結論

本報告では回転実験室を用いて Direct Gain 2例，Indirect Gain 1例のパッシブシステムについて実験を行ない，実験データの分析結果から得られた係数によって性能評価を行なった。結果を要約すると，

(1) コンクリート内壁では室温は居住域内に収まっており，パッシブシステムとしては良好である。断熱内壁では熱容量が小さいために日中室温は40℃以上に達し，夜間は外気近くまで下降する。トロンブ壁は室温は概して低く，巨大な熱容量のために室温変動は小さい。自然室温の場合，トロンブ壁を通して室内に貫流熱として侵入する熱量は窓を透過した日射量の約10％であるが，暖房時にはこの割合が減少する。

(2) 重み関数を用いた重回帰分析を行ない，実験データから室総熱コンダクタンス，熱容量，蓄熱効果を求め，入射した太陽熱がどれ程有効に室温に寄与しているかを算出した。自然室温を対象とした分析結果は良好で，室総熱コンダクタンスから Direct Gain では窓を透過した日射の100％が室温上昇に使われているのに対して，トロンブ壁の場合は日射の35％しか有効利用されていないことが示された。また蓄熱機能に関しては Direct Gain では3～4時間後に集熱された日射の影響は10分の1以下になるのに対して，トロンブ壁では12時間以上必要で蓄熱機能が大きい事を示している。

(3) 本報告で述べた性能評価法を今後は他のパッシブシステムや実際の建物に適用し，改良を進めていく必要があろう。学習過程を伴う性能評価法では影響要因項目を極力少くすることが大切で，すきま風等要因が増すと分析が困難になる点やシステム全体を室総熱コンダクタンスで評価するために気象条件や室温条件が実験と著しく異る場合は分析結果が適用できない点に注意する必要がある。

参考文献

1) 松尾　陽：測定にもとづく室温予測および暖房性能の評価法について，日本建築学会大会学術講演梗概集，(昭和51.10)
2) 松尾　陽，他：同上（第2報），同上，(昭和52.10)