

# パッシブ・ソーラー・システムに関する研究

小宮 英孝

## Research on Passive Solar Systems

Hidetaka Komiya

### Abstract

Various types of passive solar systems have been proposed for diverse climatic conditions throughout the world. In this report, three basic types of passive solar heating systems which consist of facade elements were selected from among many such systems and evaluated by mathematical simulation techniques and by model experiments. By means of computer simulations the differences in thermal performances of these three types and the effect of thermal storage capacity and the climatic conditions were evaluated and discussed. The experimental model was built up in a room to simulate a Trombe-wall or a solar air collector, using electrical heating paper at the collector surface. The volumetric air flow caused by the natural thermocirculation and the convective heat transfer coefficient in the air space were found. These results can be used in the simulation program.

### 概 要

現在世界各国で広く応用されているパッシブ・ソーラー・システムを分類整理し、シミュレーション、模型実験によって、その熱性能評価を行なった。シミュレーションによる評価では、パッシブ・ソーラー・システム用計算プログラムを開発して、直接利用型、トロンプ壁型、温風式断熱集熱壁型の熱特性差を求めるとともに、気候差により熱的に有利となるタイプが異なることを示した。トロンプ壁、温風式断熱集熱壁型用の模型装置は、室内に設置され、日射集熱面を電導抵抗紙で加熱することによって、実際のシステムを模擬するものであり、自然循環風量、集熱壁面の表面熱伝達率を求めた。この結果は、シミュレーション・プログラムに応用できるものである。

### 1. はじめに

パッシブ・ソーラー・システムは、基本的に建物構成要素だけによって、冷暖房を行なうもので、通常の建物と比較すると以下の特色がある。

- (1) ガラス面積の増大とガラス面方位の最適化。
- (2) 温度レベル別ゾーニング。
- (3) 可動断熱の設置。
- (4) 蓄熱容量の増大。
- (5) 熱移動に関する特別な手法。

これらの特色を持つパッシブ・システムは、簡易性、快適性、経済性といった多くの長所を持つが、以下の点に注意する必要がある。

- (1) 窓面積増大に伴うオーバー・ヒートとグレアー。
- (2) 特別なスペースを必要とし、大量生産ができず、

コスト・アップの要因もあること。

(3) サン・スペースなどの夏期有効利用、大型建物への適用が若干難しいこと。

以上の点に着目しながら、3通りのシステムを選びシミュレーションと模型実験で、熱性能評価に行なった。

### 2. シミュレーションによる熱性能評価

#### 2.1. シミュレーション概要

多くのパッシブ・システムの中から、特別なスペースを必要としない基本的な3タイプを選定し、Köln・札幌・鹿児島島の気象データを用いて、各タイプの熱性能特性・蓄熱容量・夜間断熱の効果、気候区の影響を求めることを目的として、シミュレーションを行なった。図-1に、計算対象となった直接利用型(タイプA)、トロンプ壁型(タイプB)、温風式断熱壁型(タイプC)を示す。計

算プログラムは、熱伝導計算にインプリシット差分を用い、多元連立方程式を収束計算で解くものである。

集熱面の対流熱伝達率はASHRAEの垂直平板上の自然対流用の計算式<sup>2)</sup>により、タイプB、Cにおける自然循環風量は、主な抵抗が開開口部にあるものとし、(1)式より求めた。

$$V = a \cdot A \sqrt{g \cdot h \cdot (T_{ab} - T_{ai}) / T_{ab}} \dots\dots(1)$$

V: 風量 (m<sup>3</sup>/sec) a: 流量係数 (-) A: 開口面積 (m<sup>2</sup>) g: 重力加速度 (m/sec<sup>2</sup>) h: 壁高さ (m) T<sub>ab</sub>: 中空層平均温度 (K) T<sub>ai</sub>: 入口温度 (K)

以上の2式については、3章の模型実験で検討を加える。計算対象となった建物は、南面全体に各タイプのシステムを持ち、他の壁面は100mmの外断熱を有する床面積48m<sup>2</sup>のもので、設定温度20℃～24℃の範囲で、6時から22時までの間欠暖房を行なうものとした。

### 2.2. 計算結果

図-2, 3, 4は各々Köln, 札幌, 鹿児島の一週間のデータを用いて、システム・タイプ、室内熱容量の暖房供給熱量、太陽熱依存率、最高最低温度への影響をみたものである。ここでは、どのタイプにおいても、18時から7時まで夜間断熱を用いている。室内熱容量は外壁のコンクリート厚を10, 100, 200mmとすることにより、軽量・中量・重量の3段階に変化させた。タイプBでは同様に、蓄熱壁のコンクリート厚を10, 150, 300, 450, 600mmと変化させ、蓄熱壁体熱容量の影響をみた。

図-2はKölnの例であるが、Kölnは一週間の平均外気温1℃、総南面日射量5.74kwh/m<sup>2</sup>が示すように、暖房負荷が多く日射量の乏しい地域である。このため太陽熱依存率は20～30%と低く、オーバー・ヒートはほとんど起らず室内熱容量による暖房供給熱量の差は見られない。また各タイプを比較すると、同様の理由から集熱効果よりも断熱効果の高いタイプCが有利になる。

図-3は札幌の例であるが、札幌は一週間の平均外気温-1℃、総南面日射量13.12kwh/m<sup>2</sup>が示すように暖房負荷も日射量も多い地域である。このため太陽依存率は30～65%であり、オーバー・ヒートが起る場合もある。したがって、各タイプとも室内熱容量が増すにつれて暖房供給熱量・太陽熱依存率・室温のいずれも改善されてくる。室内熱容量が少ない場合には当然タイプBが有利であるが、室内熱容量が増すと、どのタイプも概略同様な熱性能となってしまう。したがって、タイプB, Cだけを用いることは、意味を持たなくなる。また暖房供給熱量を最小にするとの観点から判断すると、タイプBでは蓄壁のコンクリート厚に最適値が存在する。室内熱容量が乏しい場合は、概略300mmであり、室内熱容量が増大すると150mmまで下がる。

図-4は鹿児島の場合であるが、鹿児島は一週間の平均外気温が7℃、総南面日射量が27.43kwh/m<sup>2</sup>であり、暖房負荷も少ないうえに日射量も多い温暖な地域である。このため、太陽熱依存率は50～100%までになり、オーバー・ヒートがかなり発生し、室内熱容量が少ない場合には、せっかくの日射を有効に利用できない。また各タイプの比較を行なうと、室内熱容量が少ない場合は、タイプA, Cが不利であり、室内熱容量が十分ある場合は、タイプA, Bともに熱性能が概略等しくなりタイプCが若干悪くなるのは札幌の場合と同様である。

札幌において、夜間断熱の効果を暖房供給熱量で評価すると、タイプAでは37%・タイプBでは27%減少できるものであった。いずれにしても、夜間断熱を利用することによって、南面の負荷を減少する効果はあるが、日射の利用量を増大することは期待できない。

図-5に、南面日射がない場合の暖房供給熱量と日射量との比と、太陽熱依存率との関係を各タイプについて示す。上図の横軸は、分子が南面全日射量で、分母が日射のない場合の暖房供給熱量とした比である。したがって、値が大きくなる程、負荷に対して日射量の多い地域や建物であることを示す。同図によると、タイプAでは横軸の値が2.5、タイプCでは横軸の値が3.5程度で、太陽熱依存率が100%となる。すなわち、これ以上の値の地域・建物では、太陽熱暖房が容易にできるが、オーバー・ヒートに注意する必要がある。0.5以下では太陽熱暖房をあまり期待できない地域・建物で、この中間が太陽熱暖房に特

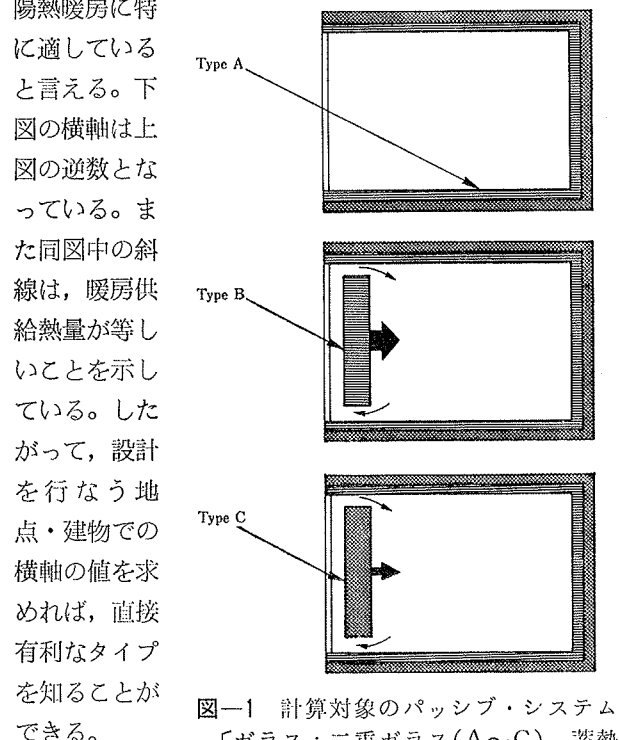


図-1 計算対象のパッシブ・システム [ガラス: 二重ガラス(A~C), 蓄熱壁: コンクリート(B), 断熱材(C)]

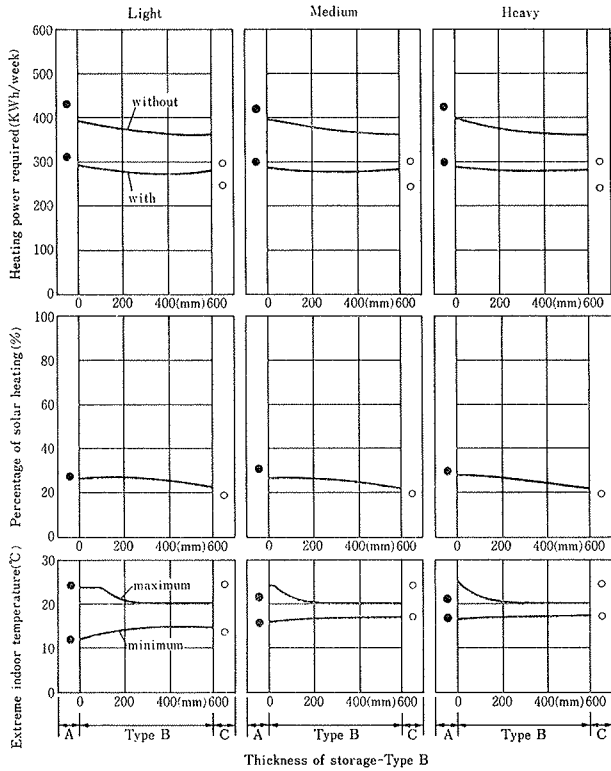


図-2 暖房供給熱量，太陽熱依存率，最高最低温度とシステム・タイプ，室内熱容量との関係(Köln)

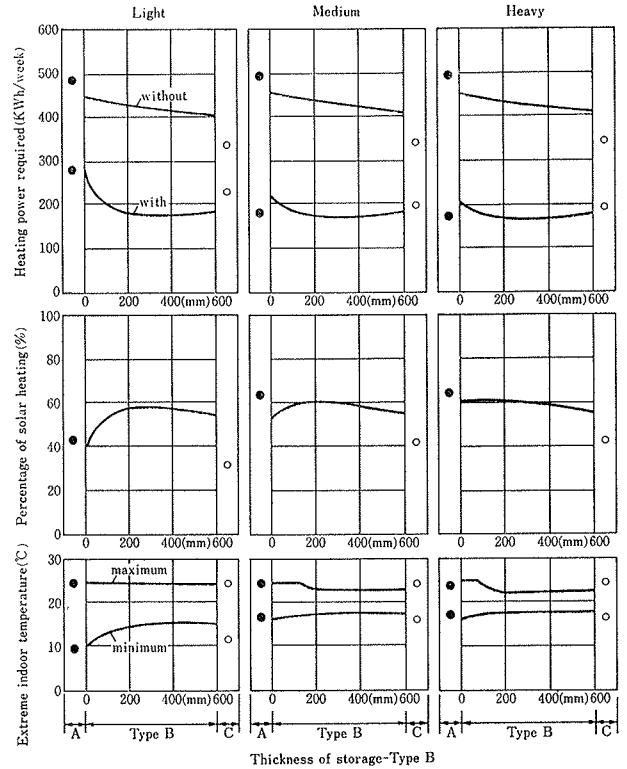


図-3 暖房供給熱量，太陽熱依存率，最高最低温度とシステム・タイプ，室内熱容量との関係(札幌)

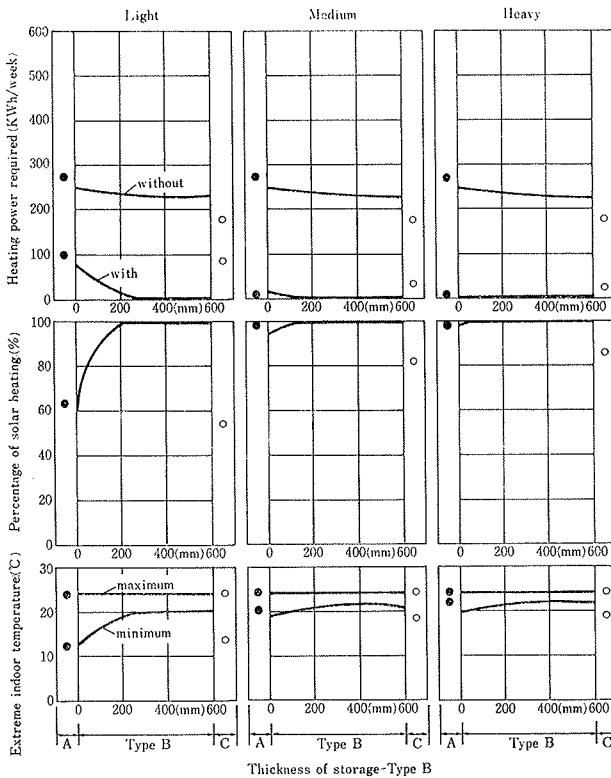


図-4 暖房供給熱量，太陽熱依存率，最高最低温度とシステム・タイプ，室内熱容量との関係(鹿児島)

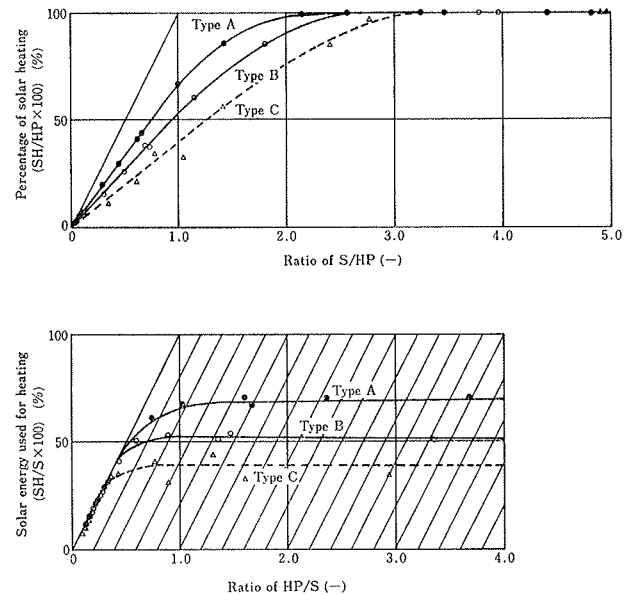


図-5 日射のない場合の暖房供給熱量(HP)と日射量(S)との比と，太陽熱依存率，太陽熱利用率との関係

### 3. 模型実験による熱性能評価

#### 3.1. 模型実験概要

2章のタイプ B, C における自然循環量，対流熱伝達

率算出方法の妥当性を検討するために模型実験を行なった。模型実験装置の断面および測定点を図一6に示す。模型は、2 m (高さ) × 1 m (幅) × 0.5 m (奥行き) の木製枠で作成され、上下に吸い込み・吹出し口となる水平ダクトを有し、外側は0.1 m厚のスチロポール板により断熱されている。上下ダクト間の壁体は、内側から断熱材・合板・電導抵抗紙・銅板により構成され、循環空気の通過する中空層をはさんで、前面は二重ガラスで覆われている。壁面で吸収される日射量を模擬する電導抵抗紙の発熱により、実験室内の空気が集熱壁の模型内部を自然循環する。電導抵抗紙の出力は100, 200, 400, 600 w/m<sup>2</sup>と変圧器により制御し、中空層間隔は5, 7.5, 10, 15 cmと吸い込み、吹き出し口の高さは5, 7.5, 10 cmと変化させた。

すべての測定は、定常状態となる発熱開始8時間後に行なった。温度測定は、図一6に示されているように中空層部の高さ別温度分布、出入温度、熱損失を求める17点であり、10分間の平均値を用いた。また各面からの熱損失は熱流計によっても測定を行なった。風量は、吸い込み口と中空層中央(入口から高さ1 m)における断面風速分布を熱線風速計(温度による較正はソフトで)を用いて測定し、求めた。例えば、断面積0.1 m<sup>2</sup>の吸い込み口の場合は、左右対称性を確認の後、左半分につき25点(5点×5点)の風速を1点につき1分半測定し平均値を用いた。

3.2. 実験結果

3.2.1. 風量 吸い込み口と中空層中央とで測定された風量の違いは、概略±10%以内に収まっていた。また中空層と水平ダクトの断面積が等しい場合でも、吸い込み口での測定結果が5%程度多くなっていたが、これは中央部の測定では温度による較正が十分にできない為である。したがって以下の解析では、吸い込み口での測定結果を用いている。

3.2.2. 平均対流熱伝達率 図一7に、平均対流熱伝達率と発熱量および中空層間隔(または同間隔と水平ダクトの高さ)との関係を示す。平均対流熱伝達率は、(2)式より求めた。

$$\alpha = Q / \{A_c \times (T_{sc} - T_{ab})\}$$

$$T_{ab} = T_{ai} + Q / (2 \cdot C_p \cdot G) \quad \dots\dots(2)$$

$\alpha$ : 平均対流熱伝達率 (w/m<sup>2</sup>k), Q: 発熱量一壁面からの熱損失 (w), A<sub>c</sub>: 銅板表面積 (m<sup>2</sup>), T<sub>sc</sub>: 銅板平均温度 (K), G: 風量 (kg/h), C<sub>p</sub>: 比熱 (J/kg·K), T<sub>ab</sub>, T<sub>ai</sub>: 式(1)の説明参照

平均対流熱伝達率は、4.5~8 w/m<sup>2</sup>Kで、発熱量により大きく左右される。中空層と水平ダクトの断面積が等しい場合のG<sub>r</sub>数とNu数の関係を式(3)、図一8に

示す。

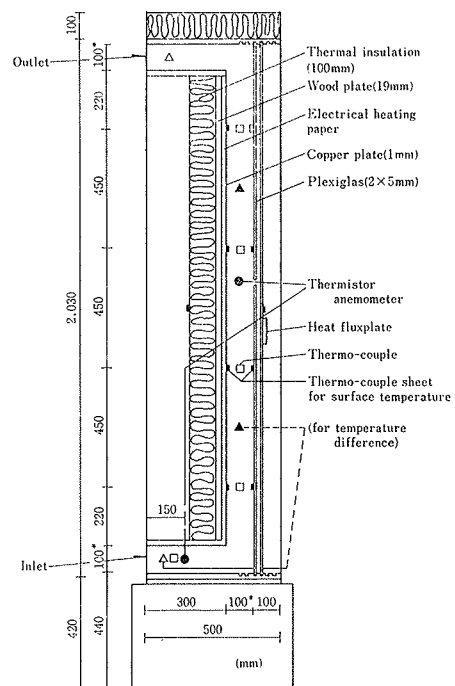
$$Nu = 0.985 \times G_r^{0.204} \quad (\text{相関係数 } 0.986) \quad \dots\dots(3)$$

3.2.3. 自然循環風量 図一9に自然循環風量と発熱量および中空層間隔(または同間隔と水平ダクト高さ)との関係を示す。中空層間隔・水平ダクト高さともに増した場合は(下側)比例して風量も増加するが、中空層間隔だけを増した場合は(上側: 水平ダクト高さは10 cm)風量の増加はわずかである。本温風式集熱壁に(1)式が適用可能とした場合の、内外平均温度差と流量係数との関係を図一10に示す。同図から、中空層断面積が吸い込み吹き出し口断面積よりも小さくなる場合を除き、流量係数が約0.5になることがわかる。中空層と水平ダクトの断面積が等しい場合のG<sub>r</sub>数とR<sub>o</sub>数との関係を式(4)、図一11に示す。

$$R_o = 217 \times G_r^{0.142} \quad (\text{相関係数 } 0.975) \quad \dots\dots(4)$$

4. 結論

シミュレーションと模型実験によって、パッシブ・システムの熱性能評価を行なった。トロンブ壁などの蓄熱容量のある温風式集熱壁は室内熱容量が乏しい場合効果的であり、日射が乏しく暖房負荷も大きい地域では断熱効果と集熱効果のある温風式集熱壁が有利である。日射も室内熱容量もある場合は、直接利用型と他のシステムは熱性能が同様となり、総合的には直接利用型が優れていることになる。模型実験により温風式集熱壁のシミュレーションで必要とされる中空層内の対流熱伝達率、流量係数の値を明らかにした。



図一6 実験装置(断面図)と測定点

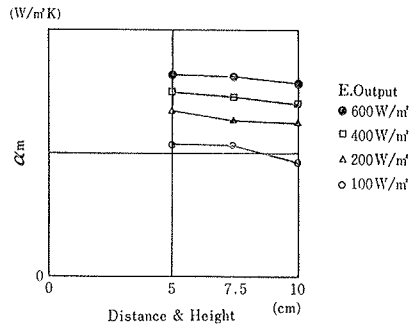
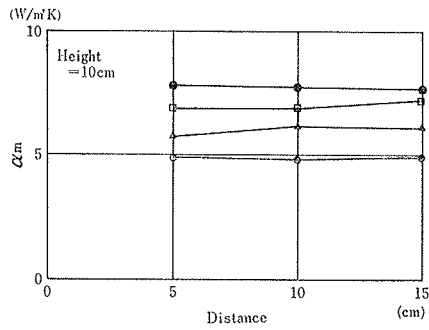


図-7 平均対流熱伝達率と発熱量・間隔(高さ)との関係

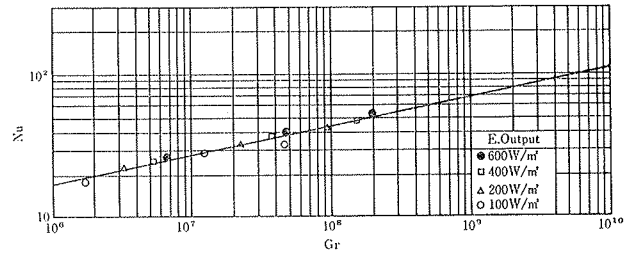


図-8 Gr 数と Nu 数との関係

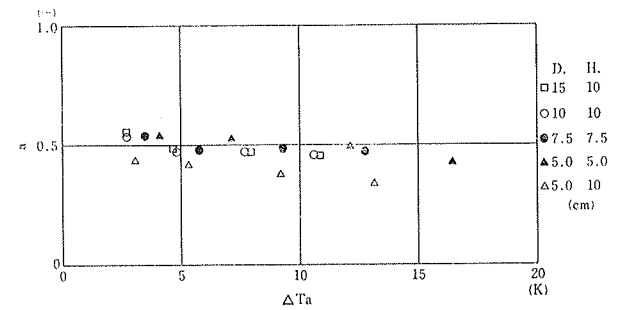


図-10 内外平均温度差( $\Delta t_a$ )と流量係数との関係

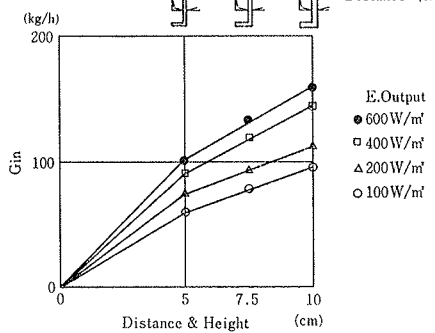
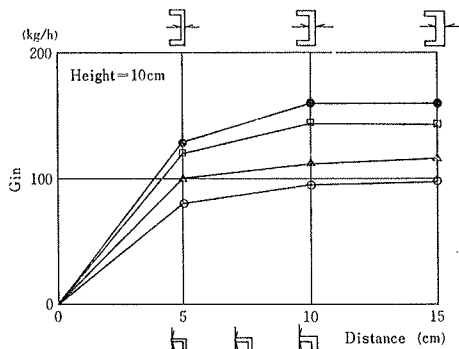


図-9 自然循環風量と発熱量・間隔(高さ)との関係

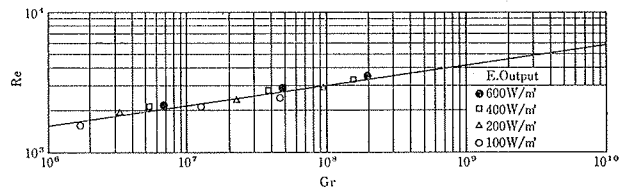


図-11 Gr 数と Re 数との関係

### 謝辞

本研究は、筆者が西ドイツ・エッセン大学留学中に行なったものであり、御指導いただいた Gertis 教授をはじめ、同研究室の方々に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Komiya H.: How passive solar systems perform, Building Research & Practice, (Mar./Apr. 1982), pp. 110~119
- 2) ASHRAE: Handbook of Fundamentals, ASHRAE Headquarters, New York, (1977)