

放射冷却の基礎実験

Fundamental Experiment of Radiative Cooling

松 田 守 弘*

Morihiro MATSUTA

寺 田 重 雄**

Shigeo TERADA

伊 藤 博***

Hiroshi ITO

Abstract

New radiators for radiative cooling have been developed and experimentally evaluated in Japan.

The radiator consists of a thermal insulating box, an emitting plate in the box, and a polyethelene cover as a windshield. The emitting plate is specular aluminum plate coated with one of 4 films described below. One is a 12 μm thick TEDLAR film, which have been used in a conventional radiator. KF-Film (9 μm), and AFLEX (25 μm), which were selected by us, are also used. The other is black-paint as a nonselective emitting material. The three films except black-paint have a strong emission predominantly in the atmospheric transparent window (8-13 μm).

By use of a micro-computer, measurement were made automatically every minute for the temperature of the back surface of the emitting plate and some relevant weather conditions.

The obtained results are as follows ;

- (1) The cooling rate of the three selective emitting plate is better than that of the nonselective black-paint/Al plate.
- (2) The cooling rate of KF-Film/Al is about equal to that of TEDLAR/Al, and AFLEX/Al is better than TEDLAR/Al.
- (3) The cooling rate is affected remarkably by weather conditions such as humidity, clouds, and solar radiation.
- (4) The emitting plate was cooled rapidly at night under a very clear sky and a low humidity.
- (5) The experimental result of the radiative power of TEDLAR/Al agreed well with theoretical one.
- (6) A maximum radiative power of 47kcal/m²h was obtained, which is about equal to the cooling load of highly insulated domestic houses.

In addition, investigation was also made of the atmospheric conditions of the radiative cooling in Japan.

1. はじめに

「放射冷却」という言葉は冬期の天気予報でなじみ深いものである。これは良く晴れた風の無い夜間に大地と大気との間の熱の授受が放射だけで行われ、地表付近の温度が低下する現象である。この現象には大気分光特性が深く関与しており、「大気の窓」と呼ばれる8~13 μm の非常に透過率の高い波長範囲に、20°C前後の黒体の熱放射のピーク波長が含まれることによる。したがってこの現象は冬期に限られるものではなく1年中おこり得るものであり、物を冷すのにエネルギーを必要としないという非常に省エネルギーの冷却方法である。放射冷却現象を人為的に制御し冷房に利用するためには大気の窓を十分に活用する必要があり、そのためには物質の波長選択性を利用しなければ

ならないと考えられる。このような考えに基づいた実験・研究はA. K. Head(オーストラリア)の提案¹⁾以来世界各地^{2)~8)}で行われているがその数は少なく、日本ではまだ実施されていないようである。そこで本論文では放射冷却の理論検討を行い、選択放射面と無選択放射面の放射冷却特性の違いを明らかにするとともに、日本で最初の放射冷却実験の結果及び各種放射

* (株)豊田中央研究所 主任研究員
Toyota Central Research & Development
Laboratories, Inc. Senior Research Scientist

** (株)豊田中央研究所 副研究員
Toyota Central Research & Development
Laboratories, Inc.

*** (株)豊田中央研究所 研究員
Toyota Central Research & Development
Laboratories Inc. Research Scientist.

面材料の評価結果について述べる。

2. 放射冷却の原理

ここでは放射冷却の原理についての簡単な説明と、放射冷却能についての理論式及び計算結果について述べる。

地表付近に置かれた物体をよく断熱し伝導・対流を抑えると、その物体の熱バランスは大気との間の熱放射だけで成り立つ。大気分光特性には8~13 μmの波長範囲に透過率の高い(放射率の低い)領域があり「大気の窓」と呼ばれている。地表付近の物体からの熱放射はこの波長範囲で大きいため、物体から出ていく放射パワーが入ってくる放射パワーを上回り、物体は冷却されることになる。その放射スペクトル分布を図1に示す。次に放射冷却のエネルギー強度について文献³⁾に基づき(1)~(9)式において理論的に検討する。

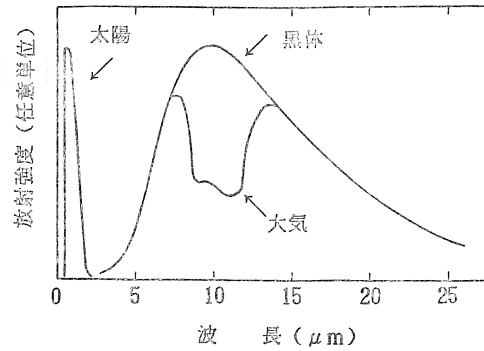


図1 太陽・黒体・大気の放射スペクトル

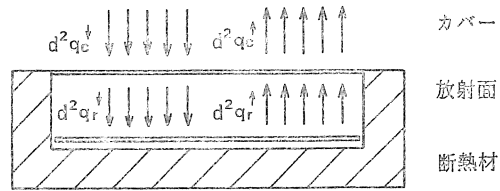


図2 ラジエータの構造と放射束の出入り

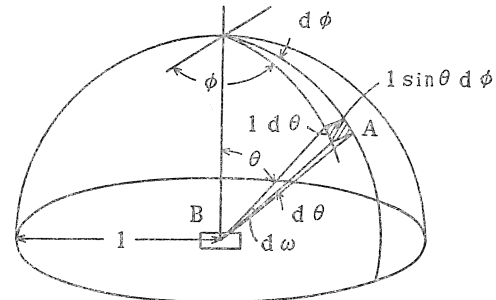


図3 座 標 系

平板型のソーラー・コレクターに類似の構造をもち、熱媒を冷却させる放射面と断熱容器及びカバーからなるシステムをラジエータと呼ぶことにする。伝導・対流に対する断熱が理想的である場合にはラジエータの熱収支は図2に示すように放射だけとなる。大気からカバーに入射する放射束を $d^2q_c\downarrow$ とすると、これは

$$d^2q_c\downarrow(\lambda, \theta) = \varepsilon_a(\lambda, \theta) \cdot e(\lambda, T_a) \cdot \cos \theta \cdot d\lambda d\omega \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表わされる。ここで

- $\varepsilon_a(\lambda, \theta)$: 大気分光放射率
- $e(\lambda, T_a)$: 温度 T_a の黒体の分光放射発散度
- T_a : 大気温度
- λ : 波長
- $d\omega$: 立体角 (= $\sin \theta d\theta d\phi$)
- θ : 天頂角
- ϕ : 方位角

同様に図2に示されるカバーから大気へ出ていく放射束 $d^2q_c\uparrow$ 、放射面に入射する放射束 $d^2q_r\downarrow$ 、放射面から出ていく放射束 $d^2q_r\uparrow$ はそれぞれ次のように表わされる。

$$d^2q_c\uparrow(\lambda, \theta) = \tau_c(\lambda, \theta) d^2q_r\uparrow(\lambda, \theta) + \varepsilon_c(\lambda, \theta) e(\lambda, T_c) \times \cos \theta d\lambda d\omega + r_c(\lambda, \theta) d^2q_c\downarrow(\lambda, \theta) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$d^2q_r\downarrow(\lambda, \theta) = \tau_c(\lambda, \theta) d^2q_c\downarrow(\lambda, \theta) + \varepsilon_c(\lambda, \theta) e(\lambda, T_c) \times \cos \theta d\lambda d\omega + r_c(\lambda, \theta) d^2q_r\uparrow(\lambda, \theta) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$d^2q_r\uparrow(\lambda, \theta) = \varepsilon_r(\lambda, \theta) e(\lambda, T_r) \cos \theta d\lambda d\omega + r_r(\lambda, \theta) d^2q_r\downarrow(\lambda, \theta) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで $\varepsilon_c(\lambda, \theta)$ 、 $\tau_c(\lambda, \theta)$ 、 $r_c(\lambda, \theta)$ はそれぞれカバーの分光放射率、分光透過率、分光反射率で

$$\varepsilon_c(\lambda, \theta) + \tau_c(\lambda, \theta) + r_c(\lambda, \theta) = 1 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$\varepsilon_r(\lambda, \theta)$ 、 $r_r(\lambda, \theta)$ はそれぞれ放射面の分光放射率、分光反射率で

$$\varepsilon_r(\lambda, \theta) + r_r(\lambda, \theta) = 1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

T_c 、 T_r はそれぞれカバー温度、放射面温度である。カバーと大気の間には自然対流があるのでその温度はほぼ等しく $T_c \approx T_a$ 、従って

$$e(\lambda, T_a) \approx e(\lambda, T_c) \quad \dots\dots\dots(7)$$

である。

放射面から正味出ていく放射パワーを Q_n とすると

$$Q_n = \int \lambda \int \omega \{ d^2q_r\uparrow(\lambda, \theta) - d^2q_r\downarrow(\lambda, \theta) \} \quad \dots\dots\dots(8)$$

(1)~(4)式から $d^2q_c\uparrow$ 、 $d^2q_c\downarrow$ を消去整理して Q_n を求めると次式が得られる。

$$Q_n = \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\lambda=0}^{\infty} \pi \sin 2\theta \frac{\varepsilon_r(\lambda, \theta)}{1 - r_c(\lambda, \theta) r_r(\lambda, \theta)} [\{ 1 - r_c(\lambda, \theta) \} \times e(\lambda, T_r) - \{ \tau_c(\lambda, \theta) \varepsilon_a(\lambda, \theta) + \varepsilon_c(\lambda, \theta) \} \times e(\lambda, T_a)] d\lambda d\theta \quad \dots\dots\dots(9)$$

(9)式で示されるようにカバーと放射面の光学特性、温度などのパラメータを与えれば、正味の放射パワー Q_n を計算できる。 Q_n は放射面が冷却される能力を表わすので以後放射冷却能と呼ぶことにする。

次に放射冷却能 Q_n の計算結果について述べる。入力すべきパラメータのうちカバーの光学特性には現状で最適と思われるポリエチレン・フィルム(厚さ $50 \mu\text{m}$)の値を用いた。放射面の光学特性としては図4に示すような大気の窓の波長範囲で放射率が1, その他の波長範囲で反射率が1の理想的な放射面の値と, すべての波長範囲で放射率が1のブラック放射面の値を用いた。大気分光放射率は米国Cocoa-Beachでの実測値⁹⁾を用いた。外気温 T_a が $290 \sim 310\text{K}$ ($17 \sim 37^\circ\text{C}$) のときの放射冷却能を, 外気温と放射面温度との温度差を横軸としてまとめたのが図5である。図5より理想的放射面とブラック放射面との差が非常に大きいことがわかる。たとえば $T_a = 310\text{K}$, $T_a - T_r = 10 \text{ deg.}$, すなわち外気温が 37°C , 放射面温度が 27°C のとき, 理想的放射面では 52W/m^2 の放射冷却能があるのに対して, ブラック放射面では 5W/m^2 と理想的放射面の約10分の1にすぎない。ただし放射面温度が外気温と等しい場合, すなわち縦軸との交点においては理想的放射面の 69W/m^2 に対してブラック放射面は 59W/m^2 とかなり近い値である。したがって放射面温度が外気温と近い場合にはブラック放射面も有効に使い得ると考えられる。放射面の到達温度についてみると外気温 37°C のとき, 理想的放射面では $T_a - T_r = 47 \text{ deg.}$, ブラック放射面では同じく 11 deg. である。すなわち理想的放射面では -10°C まで冷却されるのに対して, ブラック放射面では 26°C までしか冷却されず, その差は 36 deg. にもなる。

3. 実 験

3.1 ラジエータ

ラジエータは先に述べたように放射面, 断熱容器, カバーなどから構成されるが, 実験に用いたラジエータの構造を図6に示す。断熱容器は厚さ 50mm の発泡スチロールからなり, 内面には厚さ 0.1mm の Al 箔が貼られ, 中に放射面が置かれている。放射面上約 50mm の位置に対流損失を推えるためのカバーが置かれ外箱に Al 製のカバー押えで固定されている。カバーには赤外線に対して透過率が高くかつ安価なポリエチレン・フィルムを使用した。このフィルムは三菱油化のユカロン® YK-30 で厚さは $20 \mu\text{m}$ である。図7に

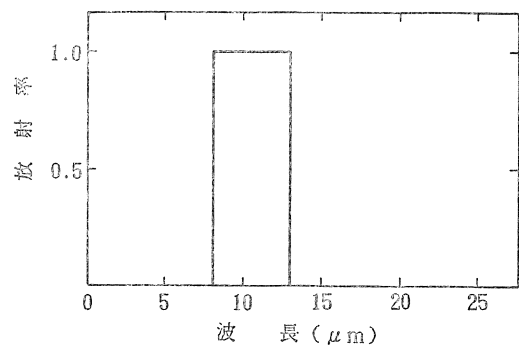


図4 理想的な選択放射面

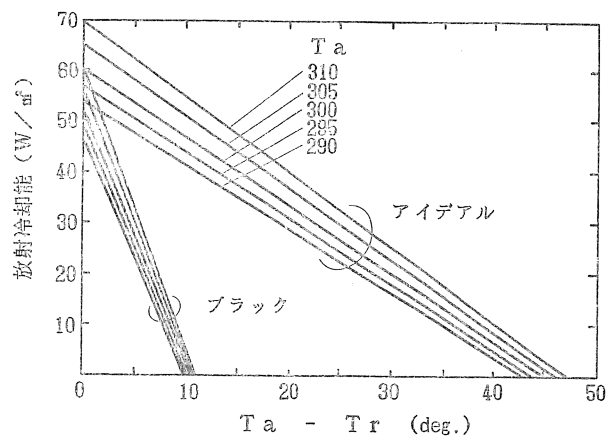
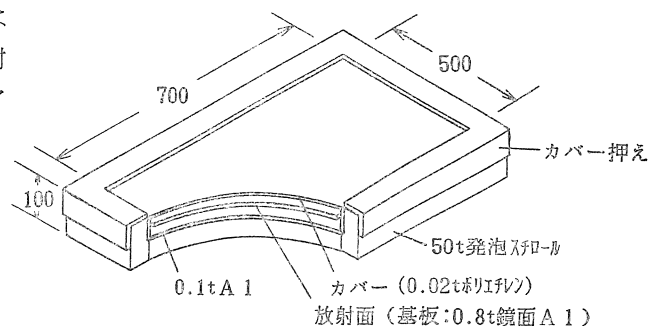


図5 放射冷却能の計算結果



放射面

- TEDLAR/A1 これまでの選択放射面
- KFフィルム/A1 } 新選択放射面
- アフレックス/A1 }
- ブラック・ペイント/A1 無選択放射面

図6 ラジエータの構造

その分光透過率を示す。

放射面は厚さ 0.8mm の鏡面 Al 板を基板とするもので図6に示す4種類である。このうちTEDLAR®/Al はこれまでに発表された内で最も性能が良いものであり⁹⁾ KFフィルム®/Al とアフレックス®/Al は分光特性的に新たに見いだされた選択放射面材料である¹⁰⁾。ブラック・ペイント/Al は無選択の放射面である。

TEDLARは一ふっ化ビニル, KFフィルムは二ふ

化ビニリデン、アフレックスは四ふっ化共重合でいずれもふっ素系の高分子フィルムであり、それぞれデュポン、呉羽化学、旭硝子が製造している。高分子フィルムの Al 基板への接着にはラビングによる静電気を利用した。ブラック・ペイント/Al は市販のつや消黒のペンキを鏡面 Al 基板にスプレーしたものである。

図 8 に選択放射面の一例として K F フィルム/Al の分光反射率特性を示す。K F フィルムは 8~13 μm で吸収率が高くその他の波長では透過率が高い。一方、Al 基板はすべての波長に対して反射率が高いため、両者の組合せにより図に示すような分光特性が合成される。なお吸収率は膜厚に依存するため、8~13 μm では吸収率が大きくその他の波長では小さくなるようにフィルムの厚さを最適にする必要がある。本実験では TEDLAR, K F フィルム、アフレックスの厚さをそれぞれ 12 μm, 9 μm, 25 μm にした。

3. 2 実験システム

放射冷却実験システムのブロック図を図 9 に示す。放射冷却は気象条件の影響を大きく受けると考えられ、ラジエータ間の比較を容易にするため 2 台のラジエータを同時に実験できるようにした。ラジエータ面の温度は鏡面 Al 板の裏面に貼りつけた半導体温度センサ (米アナログ・デバイセス社 AD-590 C F) で測定された。外気温の測定にも同じセンサが用いられた。日射はネオ日射計 (英弘精機 MS-42), 湿度は通風湿度計 (英弘精機 MH-020 S), 風向と風速は微風向風速計 (小笠原製作所 P R-450) をそれぞれ用いて測定された。

これらの測定器からのデータは放射面温度 (6 ch), 外気温 (1 ch), 湿度 (2 ch), 日射 (1 ch), 風向 (3 ch), 風速 (1 ch) の計 6 項目, 14 ch である。この信号はすべてマイクロ・コンピュータ (日立トレーニング・モジュール 6800) によって自動計測された。できるだけ広い範囲の空を見込める場所で実験する必要があるため、実験場所に AC 100V 電源を供給できなかったため、測定器とマイコンは自動車用の 12V バッテリーで駆動できるように改造された。これにより電源に関する実験場所の制約はなくなった。

実験開始に先立って実験を行うラジエータを 50mm 厚の発泡スチロールの板でおおい、水平にセットしてラジエータ全体の温度が外気温と平衡状態になるまで放置する。実験はこの蓋を取り去ることによって開始され、同時にマイコンの自動計測プログラムを実行させる。このプログラムはコンソール (図中の KBD-D

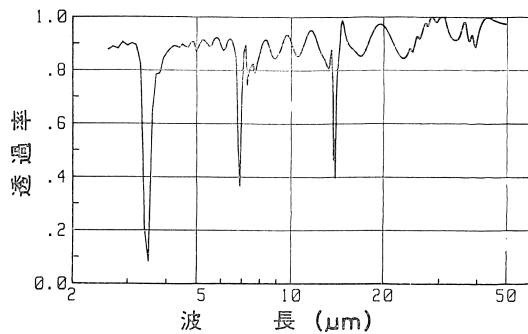


図 7 ポリエチレン・フィルムの分光透過率

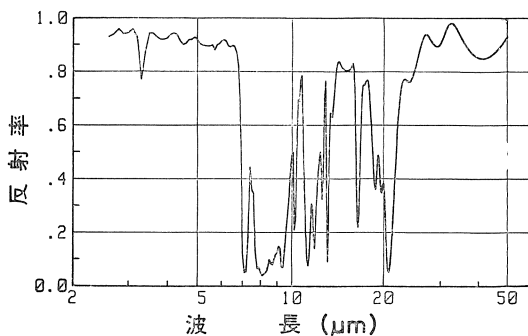


図 8 K F フィルム/Al の分光反射率

SPLY) から実験開始の命令が入力されると、1 分毎に 14 ch の各信号を RAM に記録し、16 分毎に RAM 中のデータを外部メモリであるカセット・テープに転送記録する。従って実験は 16 分単位で行われることになる。実験終了時にはやはりコンソールから実験終了の命令を入力し自動計測プログラムを終了させる。実験終了後はカセット・テープを取り出し、実験室内のホスト・コンピュータにかけてデータ解析を行った。

実験は昼夜を問わず行ったが日中の実験では直達日射を防ぐため簡単な日除けを用いた。これは手で太陽を追尾しラジエータに直接太陽光が当たるのを防止する小面積 (0.35 m²) の板で、ラジエータの上方約 3 m の高さにセットされた。

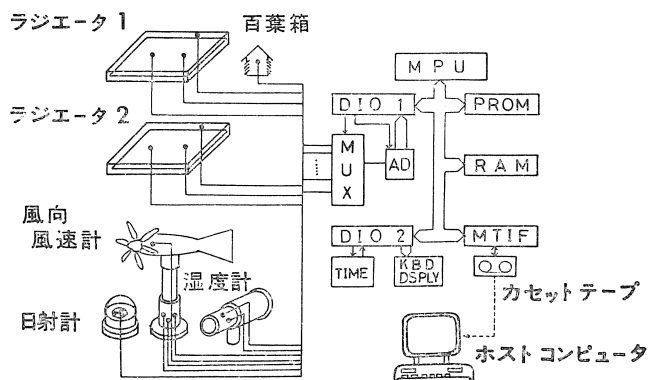


図 9 実験システムのブロック図

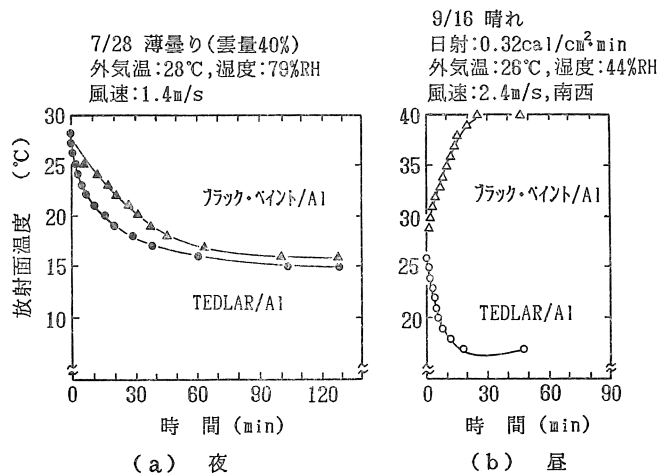


図10 冷却特性
—TEDLAR/Alとブラック・ペイント/Al—

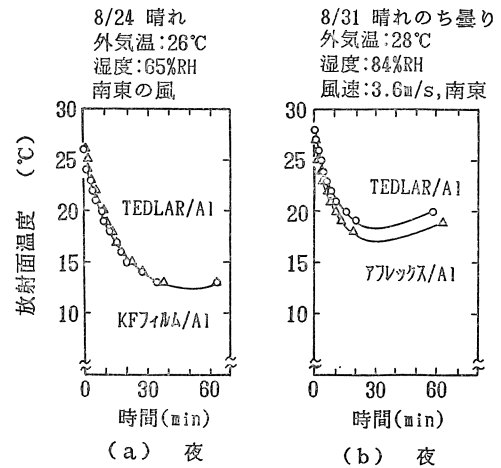


図11 冷却特性
—TEDLAR/Al対KFフィルム/Al
及びアフレックス/Al—

実験は当所の敷地内から選ばれたできるだけ広い範囲の空を見込める場所で行われた。当所は名古屋市の東に位置し、北緯 35°10′, 東経 136°58′である。なお本実験は1981年7月～9月に行われたものである。

4. 実験結果

4.1 放射面の比較

図10(a), (b)に TEDLAR/Al とブラック・ペイント/Al を同時に実験し横並び比較した結果を示す。いずれも実験開始時点からの放射面温度の時間経過を示したものである。図中には同時に 外気温, 相対湿度, 風向, 風速, 日射量等も示した。夜間においては両者とも冷却されるが, ブラック・ペイント/Al の方が温度低下が遅いことがわかる。実験開始時点の外気温 28°C から放射面が 20°C まで冷却される時間は, TEDLAR/Al では10分間かかるのに対して, ブラック・ペイント/Al では30分かかる。昼の実験においては両者の差は非常に大きく, 直達日射をさえぎったにもかかわらずブラック・ペイント/Al のラジエータは温度が上昇してしまった。

次に TEDLAR/Al に対するKFフィルム/Al とアフレックス/Al の比較結果を図11(a), (b)に示す。これらはいずれも夜間の実験結果であるが, これらを比較したとき, KFフィルム/Al と TEDLAR/Al はほとんど同じ冷却特性を示し, アフレックス/Al は TEDLAR/Al よりやや早く温度が低下し, 冷却特性がやや優れていると判断される。

4.2 気象条件の影響

図12には TEDLAR/Al の選択放射面について昼と夜における相対湿度の影響をまとめて示した。昼・夜

とも相対湿度が低い程放射面温度が急速に低下することがわかる。たとえば相対湿度が51%と低い快晴の夜(8/6)と, 73%と高い晴れの夜(8/13)とを比較すると次のようなことがわかる。放射面温度は実験開始時に 25°C, 26°C とほぼ同じであったものが, 30分後には 8°C と 16°C, 60分後には 5°C と 16°C となり, 大きな差が生ずる。この傾向は昼の実験結果についても同様である。なお昼については直達日射を日除けでカットしても波長選択性が不完全なため, 夜に比べ冷却特性が悪くなる。

図13には昼の実験において雲の影響をまとめた結果を示す。実験開始時には雲量約30%で晴れていたが徐々に雲が増え, 終了時には雲量約75%の曇天であった。放射面温度は最初の10分間は低下するが, その後は雲量の増加とともに上昇している。一方散乱日射も雲量の増加とともに大きくなっているが, 外気温はほぼ一定である。雲はいわば水蒸気のかたまりであり, その温度と放射率によって決まる熱放射を行うため放射面の冷却性能が低下する。また雲によって散乱日射が増加するためやはり冷却性能が低下する。雲の影響としてはこの2つが考えられるが, 昼の場合は後者の影響が大きいと思われる。

なお放射面温度が低下したときに, 放射面に結露することがあった。

3.3 終夜連続モニタ

図14に放射面と外気の温度を終夜連続モニタした結果の一例を示す。実験は9月16日17時に開始し17日7時まで連続して行われた。実験開始直後の温度低下状況は省略した。放射面温度は2～3時頃に最低温度 1°C を記録している。放射面温度が時々上がるのは雲がかかったためと思われる。5時頃から温度が上がる

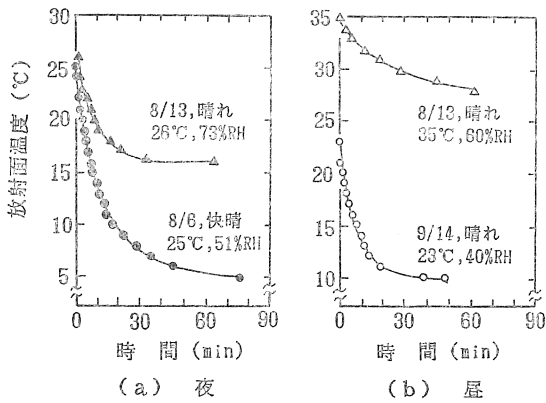


図12 冷却特性
—気象条件の影響 (TEDLAR/Al)—

のは日除けをしなかったことにより、放射面が直達日射を受けたためである。なお9月17日の日の出は5時36分頃である。

5. 冷却能

ここでは実験の結果得られた冷却特性曲線から実際の放射冷却能を求め、先に述べた理論計算と比較する。

5.1 放射面での熱バランス

図6に示す構造を有するラジエータの放射面における熱バランスについて文献²⁾に基づき検討する。熱バランスは(10)式のように表わされる。

$$(mc + X) \frac{dT_r}{dt} = d\eta N_s + \beta(T_m - T_r) + R_a - R_r \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで

- mc : 放射面の熱容量
- (m : 質量, c : 比熱)
- X : ラジエータの等価熱容量
- α : 放射面の太陽光吸収率
- τ : カバーの太陽光透過率
- N_s : 日射
- β : 熱伝達率
- T_m : 放射面の周囲温度
- R_a : 放射面に吸収される大気放射
- R_r : 放射面から放出される熱放射

T_r は2章と同じく放射面温度である。(10)式では左辺は放射面の熱量の時間変化、右辺はそれぞれ放射面に吸収される散乱日射量、伝達熱量、大気の大気放射、そして放射面から放出される熱放射を表わす。放射冷却能 Q_n は放射面から放射によって正味奪われる熱量であるから、ここでは次のように定義される。

$$Q_n \equiv R_r(R_a - \alpha\eta N_s) \quad \dots\dots\dots(11)$$

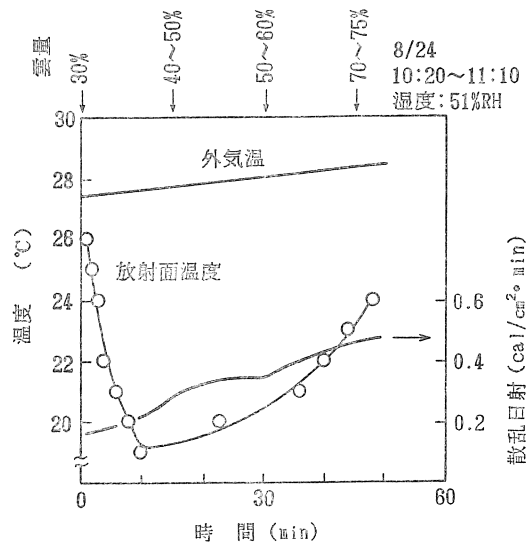


図13 冷却特性
—雲の影響 (KF フィルム/Al)—

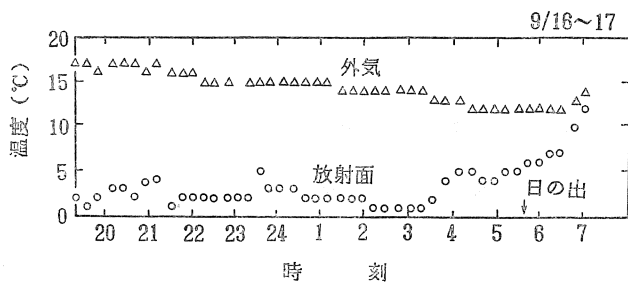


図14 放射面温度の終夜連続モニタ

(10) 式より

$$Q_n = \beta(T_m - T_r) - (mc + X) \frac{dT_r}{dt} \quad \dots\dots\dots(12)$$

外気温は T_a であるから放射面の周囲温度は

$$T_m \approx \frac{T_a + T_r}{2} \quad \dots\dots\dots(13)$$

と考えられ(12)式は以下のようなになる。

$$Q_n = \frac{\beta}{2}(T_a - T_r) - (mc + X) \frac{dT_r}{dt} \quad \dots\dots\dots(14)$$

温度差として $\tau = T_a - T_r$ とすると $d\tau/dt = -dT_r/dt$ となり Q_n は最終的に次式で表わされることになる。

$$Q_n = \frac{\beta\tau}{2} + (mc + X) \frac{d\tau}{dt} \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここで m, c は既知であり、 τ と $d\tau/dt$ は実験結果から求められるので、 β と X がわかれば放射冷却能 Q_n を計算することができる。

5.2 β と X の決定

放射面を鏡面 Al 板で置き換えると、 $\alpha \approx 0, R_a \approx 0, R_r \approx 0$ となり(10)式は

$$(mc + X) \frac{dT_r}{dt} = \beta(T_m - T_r) \quad \dots\dots\dots(16)$$

となる。ここで前記 T_m , τ を代入すると

$$-(mc+X)\frac{d\tau}{dt}=\frac{\beta\tau}{2}\dots\dots\dots(17)$$

この微分方程式を解き、初期温度を T_i として両辺の対数をとると次式が得られる。

$$\ln\tau=-\frac{\beta}{2(mc+X)}t+\ln(T_a-T_i)\dots\dots(18)$$

従って初期温度 T_i の鏡面 Al 板の温度変化を測定し、縦軸に $\ln\tau$, 横軸に t をとってプロットすればその直線の傾きから β と X が求められる。なお未知数が 2 つあるため 2 種類の質量の鏡面 Al 板について測定し、連立方程式を解く必要がある。

756 g と 378 g の鏡面 Al 板を 3~4°C に冷却したのち、室温雰囲気中で温度上昇を測定した結果を図 15 に示す。冷却特性の傾きは $\ln\tau \approx 2.2$ を境にして異なるため各々に β と X を求める必要がある。しかし $\ln\tau > 2.2$ すなわち $\tau > 9^\circ\text{C}$ のときは測定開始直後で誤差が大きいと考えられるため、 $\ln\tau \leq 2.2$ の場合についてのみ β , X を計算した。その結果 $\beta = 1.6\text{W/deg}$, $X = 37\text{J/deg}$ の値が得られた。

5.3 放射冷却能

前章で示した実験結果について温度差 τ が 0, 5, 9 度のときの $d\tau/dt$ を求め、 β , X の値を使って (15) 式から放射冷却能を計算した。その結果を表 1, 図 16 に示す。図 16(a) の夜についてみると相対湿度が高い程傾きが大きくなり、温度差 τ が大きくなるにつれ放射冷却能が急速に低下することがわかる。また同じ傾きを示す場合には天気が良い程上に平行移動することがわかる。これらの結果は放射冷却の原理から予想されることである。図 16(b) の昼についてみると傾きは夜の高湿度の場合に近いが又はさらに急である。表 1 で明らかなようにこの 2 ケースとも相対湿度はかなり低いときの実験であり、この原因は散乱日射のためと推定される。

図中の点線はアメリカ Cocoa-Beach で測定された快晴時の大気分光放射率を用いて、TEDLAR/Al の選択放射面について理論計算をした結果である。この傾きは相対湿度が高いときの傾きに近く、実験結果とかなり良く一致していると考えられる。図からわかるように計算結果を上回る実験結果も得られており、この結果を見る限り湿度が高いと言われる日本の夏においても、Cocoa-Beach を上回る放射冷却を期待できると考えられる。

温度差が 0 のときの冷却能として最大 55W/m^2 ($47\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}$), 平均 40W/m^2 ($35\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}$) が得られ

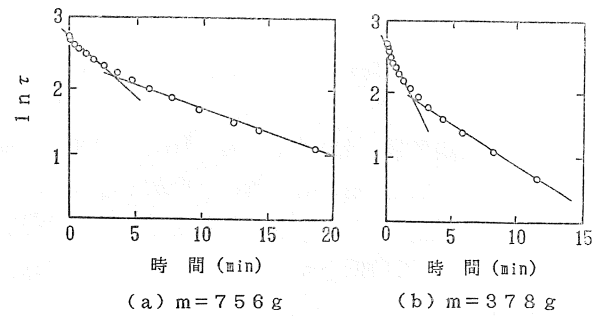


図 15 ラジエータの熱特性

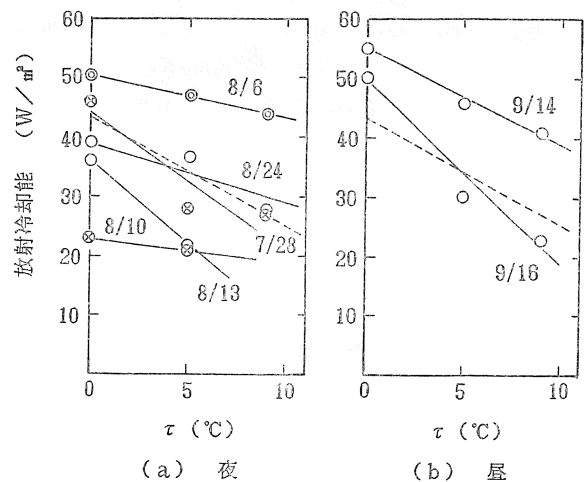


図 16 放射冷却能

表 1 気象条件と放射冷却能

昼・夜	月/日	気象条件				冷却能 (W/m^2)			図16の記号
		天気	湿度	散乱日射	風速	$\tau=0$	$\tau=5$	$\tau=9$	
夜	7/28	薄曇	79% RH	0	1.4 m/s	46	28	27	⊗
	8/6	快晴	51	0	1.5	50	47	44	⊙
	8/10	薄曇	69	0	3.5	23	21	—	⊗
	8/13	晴	73	0	2.0	36	22	—	○
	8/24	↑	65	0	—	39	37	28	○
昼	8/13	↑	60	237 W/m^2	3.4	22	—	—	○
	9/14	↑	40	—	3.4	55	46	41	○
	9/16	↑	44	223	2.4	50	30	23	○

ており、前者は断熱を良くした住宅の冷房負荷¹¹⁾にほぼ匹敵する値である。

6. ま と め

日本における放射冷房の可能性を追及し、新しい選択放射面材の評価を行うため放射冷却の基礎実験を行った。4種類の放射面材について冷却特性と実験条件を自動計測し、一部については冷却能を求め理論計算結果と比較した。主な結果を次に記す。

- (1) 無選択放射面に対する選択放射面の優劣性が確認された。
- (2) 新しい選択放射面 (KF フィルム/Al とアレ

ックス/Al)はこれまでの放射面(TEDLAR/Al)と同等あるいはそれより若干優れた冷却特性を有することがわかった。

- (3) 冷却特性は気象条件(雲・湿度・日射)に強く影響され、直達日射があると冷却されない。
- (4) 冷却能は外気と放射面の温度差が大きい程小さくなり、その低下のしかたは湿度が高い程急である。
- (5) 冷却能は実験と理論計算とがかなり良く一致する。
- (6) 実験の結果、断熱の良い住宅の冷房負荷(40~60kcal/m²・h)に近い冷却能が得られた。

日本のような湿度の高い夏でも、断熱の良い住宅の冷房負荷に匹敵する冷却能が得られたが、今後は冷房システムとしての評価や、コレクタとラジエータのハイブリッド・システムの評価実験などを行う予定である。

文 献

- 1) A. K. Head ; Method and means for refrigeration by selective radiation, Australian Pat. No. 239364 (1959)
- 2) S. Catalanotti, V. Cuono, G. Piro, D. Ruggi, V. Silvestrini, G. Troise ; The radiative cooling of selective surfaces, *Solar Energy*, 17 (1975), 83
- 3) B. Bartoli, S. Catalanotti, B. Coluzzi, V. Cuomo, V. Silvestrini, G. Troise ; Nocturnal and diurnal performances of selective radiators, *Applied Energy*, 3 (1977), 267
- 4) T. E. Johnson ; Radiation cooling of structures with infrared transparent wind screens, *Solar Energy*, 17 (1975), 173
- 5) A. W. Harrison, M. R. Walton ; Radiative cooling of TiO₂ white paint, *Solar Energy*, 20 (1978), 185
- 6) B. Landro, P. G. Mc Cormick ; Effect of surface characteristics and atmospheric conditions on radiative heat loss to a clear sky, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 23 (1980), 613
- 7) A. Hjortsberg, C. G. Granqvist ; Radiative cooling with selectively emitting ethylene gas, *Applied Physics Letters*, 39 (1981), 507
- 8) Ph. Grenier ; Réfrigération radiative. Effet de serre inverse, *Revue de Physique Appliquée*, 14 (1979), 87
- 9) E. E. Bell, L. Eisner, J. Young, R. A. Oetjen ; Spectral radiance of sky and terrain at wavelengths between 1 and 20 microns, *J. Opt. Soc. Amer.*, 50 (1960), 1313
- 10) 松田守弘 ; 特願昭56—180169
- 11) 空気調和・衛生工学会編 ; 空気調和衛生工学便覧第10版第Ⅱ篇第6章, (昭和56年)Ⅱ—646
(昭和58年6月21日 原稿受理)