

導電性高分子面状発熱体の特徴とその応用

青 木 秀 敏*

Characteristic and Utilization of Electric Conductive Polymerized Film Type Heater

Hidetoshi Aoki

Abstract

This report describes the characteristic and utilization of electric conductive polymerized film type heater. As an example of the utilization of film type heater, two examples shows. One example is the soil heating characteristic for the purpose of agricultural electric heating, the other example is the snow melting on the concrete board buried film type heater. Film type heater shows high heat transfer efficiency because of the large heating surface area, in comparison with metal type heater.

はじめに

近年、カーボンブラック等の導電性粉体と高分子化合物とを複合した導電性高分子面状発熱体が開発されている。面状発熱体はニクロム線等の金属線発熱体と比較し伝熱面積が大きいため伝熱効率が良く、少ない消費電力ですむことから多方面で利用されつつある。

本稿では面状発熱体の概要、特徴にあげられる遠赤外線輻射について述べ、さらに具体的応用例として、土壌加温および路上雪の融雪の実験例をもとに面状発熱体の有利性を概説する。

1. 面状発熱体の概要と特徴

舗道の凍結防止のためのロードヒーティング、野菜などの発芽や生育促進のための育苗、フロアヒーティング、電気カーペット、電気毛布や電気敷毛布等の発熱体として、従来からニクロム線等の金属線発熱体が使用されてきた。しかし、これらの線発熱体は消費電力が多く、しかも劣化、断線しやすいために維持費が高かつ

く欠点を有している。

近年、ニクロム線等の金属線発熱体のこれらの欠点をカバーする新しい発熱体が開発され、全国各地のメーカーから発売されている。新しい発熱体は面状（フィルム状）のもので、その構造は炭素粉末（ファーネスカーボンブラック）、炭素繊維、金属粉等の導電性物質に各種の高分子を有機重合させ、これをガラス繊維、ポリエステル繊維、和紙等の芯材に特殊な手法によりコーティングし、両端に電極をつけたものとなっている。導電性物質を焼結することによりコーティングした製品もある。このような面状発熱体をポリエステル等の絶縁材料により絶縁シールし、各種の用途に合うように加工され、製品として市場に出ている。

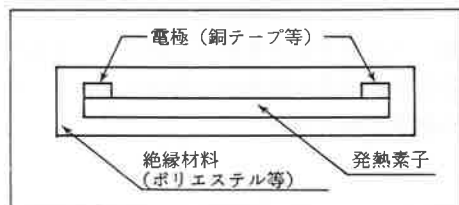


図1. 面状発熱体の構造

平成3年10月31日

*エネルギー工学科 食品工学研究所（併任）

図1に面状発熱体の構造を示した。発熱体をシールしている絶縁材料により、面状発熱体の許容発熱温度が区分されている。また導電性成分とモノマーの組み合わせ方、シート状にする芯体の材質および工法等が各製品のノーハウとなっている。このような面状発熱体の特徴は下記のとおりである。

- (1) 有機材料を主成分としているため、金属線発熱体よりはるかに軽量であり、取付け、施工が容易である。また、サビ、腐食を生じない。
- (2) ニクロム線と比較し、電気抵抗値がかなり高い。またニクロム線発熱素子が部分的に線状に発熱するのに比べ、面状発熱体の場合は、全面発熱のため発熱体の温度分布が均一である。そのため、広い面積を均一に加熱することができる。
- (3) 発熱体の劣化が少なく長時間使用できる。
- (4) 電圧と電流との直線関係、抵抗値の温度依存性、連続通電による抵抗値の変化など、発熱素子としての電気的特性はニクロム線と変わらず良好である。
- (5) 面状をいかして種々の用途に応用できる。

上記のような特性を持つ面状発熱体を製品化するにあたって、どのような種類、粒度のカーボンブラックが適切か、モノマーとしてどのようなモノマーが良いか、重合方式は塊状重合か溶液重合か、最適な抵抗値を得るのに何時間重合したら良いか等、多くの解決すべき点が山積みされていた。

そこで著者はカーボンブラックを導電性物質とし、モノマー及び反応条件を変えることにより種々の高分子面状発熱体を試作し、抵抗値および表面状態等の発熱体の特性に及ぼす生成条件の影響を検討した^{1)~4)}。

2. 遠赤外線輻射

2.1 面状発熱体の効果

本項では面状発熱体の効果を伝熱工学的見地から説明する。一般に熱の移動量は移動抵抗(伝導伝熱の場合は熱伝導度、対流伝熱の場合は境界層の抵抗に基づく熱伝達係数、輻射伝熱の場合は熱放射率)と伝熱表面と接触している物体との温度差つまり推進力に比例する。推進力とは水が高い場所から低い場所に流れる際の勾配に相当し、高温部から低温部へ移動する伝熱量は移動抵抗と推進力の積に比例して増加する。また伝熱量は伝熱に関与する面積(伝熱面積)にも比例する。車のラジエーター、空調器のファンコイル等のフィンの実効の伝熱面積を増やして伝熱量の増大を図る装置とみなすことができる。

面状発熱体も温度差、移動抵抗を増大することなしに伝熱面積を増やすことによって伝熱量の増大を図る装置と考えられる。確かに通電量を増やしてヒーターを高温にし、温度差を増大することによっても伝熱量は増大するが、使用電氣量が増加し省エネルギー的ではない。3, 4で述べる土壌加温、融雪のための舗道加温等いわゆる伝導伝熱の形態をとる例を除いて、面状発熱体から被熱物への伝熱形態は輻射伝熱の場合が多い。

輻射伝熱は加熱物体から放出される電磁波によって熱エネルギーが伝播されるもので、実在の固体から射出される熱エネルギー量は式(1)で表わされる。

$$q = \epsilon E_b = \epsilon \cdot 5.67 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \text{式(1)}$$

ここで ϵ は固体表面の熱放射率(emissivity)で、同じ物質でも温度および表面状態によって異なる。輻射エネルギーが物体の表面に到達すると、一部は反射し(反射率 γ)、一部は透過し(透過率 d)、残部はその物体に吸収される。吸収率 $a=1$ 、つまり $\gamma=d=0$ なる場合、受けた輻

表1 各種物質の熱放射率 ϵ

炭素（粗面板）	0.77 (373~593 K)
アスベスト板	0.96 (310 K)
赤レンガ	0.93 (310 K)
セラミックス（アルミナ質）	0.70 (600 K)
アルミニウム	0.03 (300 K)
ニッケル	0.12 (600 K)
クロム	0.08 (600 K)
鉄	0.15 (600 K)

射エネルギーの全てを吸収し、少しも反射も透過もしない物体を完全固体という。熱放射率 ϵ は吸収率 α に等しいと考えることができ、 $\epsilon=1$ なる物体が完全黒体である。表1に各種物体の放射率 $\epsilon^{5)}$ を示す。金属等の電気良導体は一般に熱放射率が0.1以下と小さく、面状発熱体の材質の炭素、金属酸化物はかなり大きな値を示す。したがって式(1)より同じ温度の物質であれば、面状発熱体やセラミックヒーターは金属線より10倍から10数倍の熱エネルギーを伝播できることを示している。逆に面状発熱体は同じ熱を伝達する場合、表面温度を低く保つことができることを示している。このように面状発熱体は遠赤外線セラミックヒーターと類似しているが、面状発熱体は一方向のみに集中して伝播し、しかも高い放射率を示すことから、エネ

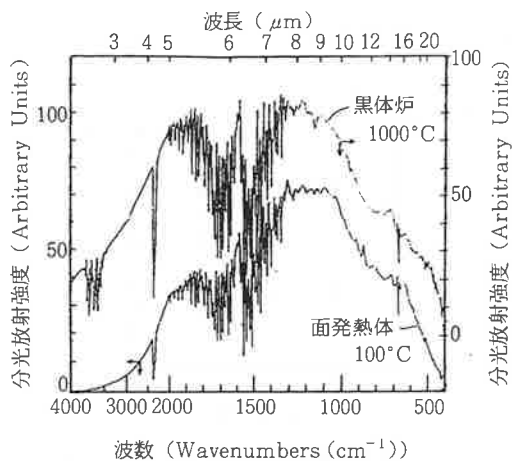
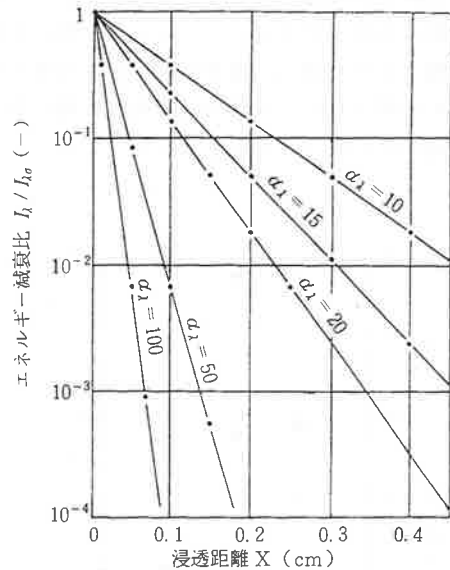


図2. 分光放射スペクトル

ルギー効率の面からみると、少ない消費電力で大きな熱エネルギーを伝達することができる省エネルギー機器といえる。

2.2 遠赤外線効果

近年、遠赤外線ヒーターが各社より開発され、遠赤外線のもつ効果がいろいろ報告されている。果たしてそのとおりなのであろうか。図2に筆者が作成した面状発熱体の分光放射スペクトルをFT-IRで測定し、標準黒体炉⁶⁾と比較したものを示した。面状発熱体の場合、5~7 μ 領域に水の吸収変動があるものの、遠赤外線領域の7~11 μ にピークを示している。しかし、その輻射特性は温度は違うものの黒体炉の場合とほぼ



波 長	吸収係数	吸収係数	浸透距離
λ [μ m]	α_λ [cm^{-1}]	α_λ	X (cm)
2.2	17	10	0.460
2.5	105	15	0.307
3	4730	20	0.230
4	145	30	0.150
5	323	50	0.092
6	2415	100	0.046
7	585		

水の赤外線吸収係数

図3. 浸透距離と吸収係数との関係

同一である。輻射に関するウィーンの法則から、表面温度が下がるとピークは長波長側にずれることを考慮すれば、面状発熱体は特徴的に遠赤外線を放射しているのではなく、表面材質特有の、しかもその表面温度に相当する遠赤外線を放射しているといえる。

最近、遠赤外線加熱特性について農林水産省技術会議が3カ年にわたり実施した研究成果を報告している⁷⁾⁸⁾。図3は水の吸収係数をパラメーターとし、赤外線放射強度の減衰率を縦軸に示し、赤外線が表面からどの程度まで浸透するかを示したものである。ここで X は表面における放射強度が1/100に減衰した浸透距離を示している。この図から波長が 2.5μ の赤外線は0.46mmしか浸透しないことがわかる。この計算結果は水およびニンジンジュースを用いた実験結果とよく一致し、遠赤外線は表面近傍で吸収されて熱となり、内部へは通常の伝導伝熱で熱伝達が行われていることを示している。

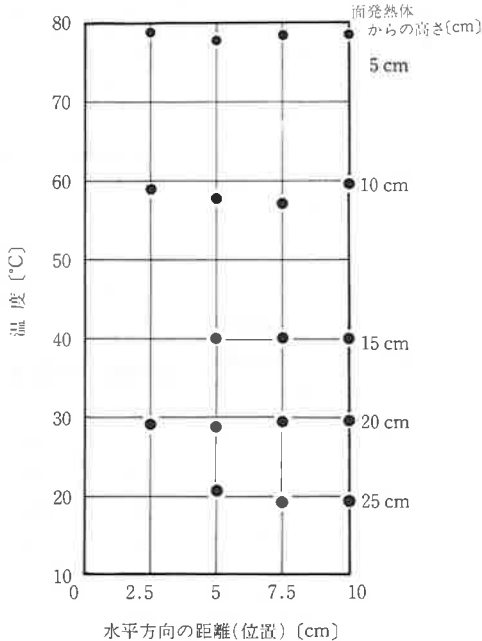


図4. 土壌内各断面の水平方向の温度分布
(面状発熱体の場合)

3. 土壌中に置かれた面状発熱体の加温特性

面状発熱体は野菜、果樹、花等の発芽、育苗、促成栽培の地温保持、ハウス栽培の室温保持にこれまでのニクロム線式の温床線に代って利用されつつある。その際散水した水や養分をさえぎらないようにボードには多数の穴があげられている。

本研究では、面状発熱体を用いた農業用ボードと従来から使用されている温床線をそれぞれ土壌内に設置し、その際の土壌内温度分布を比較することによって面状発熱体の加温特性を考察した。実験室内に箱(内寸 $630\times 450\times 300$ (mm))を2個製作し、一方の箱の下部に面状発熱体を、もう一方には市販の温床線(外径3mm)を5cm間隔に設置し、その上に同量の畑の土を入れた。周囲への熱放出を防ぐため箱の内側に断熱材を入れた。また土壌内温度分布を測定するため、土壌内120点に $0.2\text{mm}\phi$ のCu-Co熱電対を埋め込んだ。土壌の加温は面状

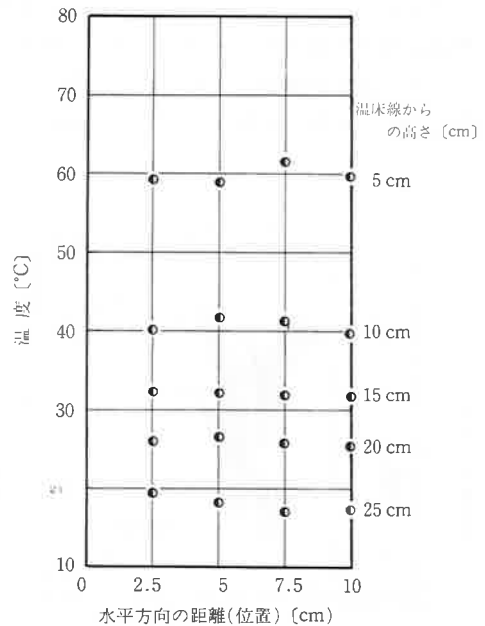


図5. 土壌内各断面の水平方向の温度分布
(温床線の場合)

発熱体と温床線の表面温度が等しくなるようにそれぞれ通電する電圧を調節して行った。通電後約 60 時間経過し、土壌内温度分布が時間的に変化しない準定常状態に保たれていることを確認した後、それぞれの土壌内各点の温度を測定した。

図 4 および 5 に面状発熱体および温床線の場合における土壌内各断面の水平方向温度分布の一例をそれぞれ示した。温床線の場合、温床線の真上（水平方向の距離 2.5 cm および 7.5 cm）

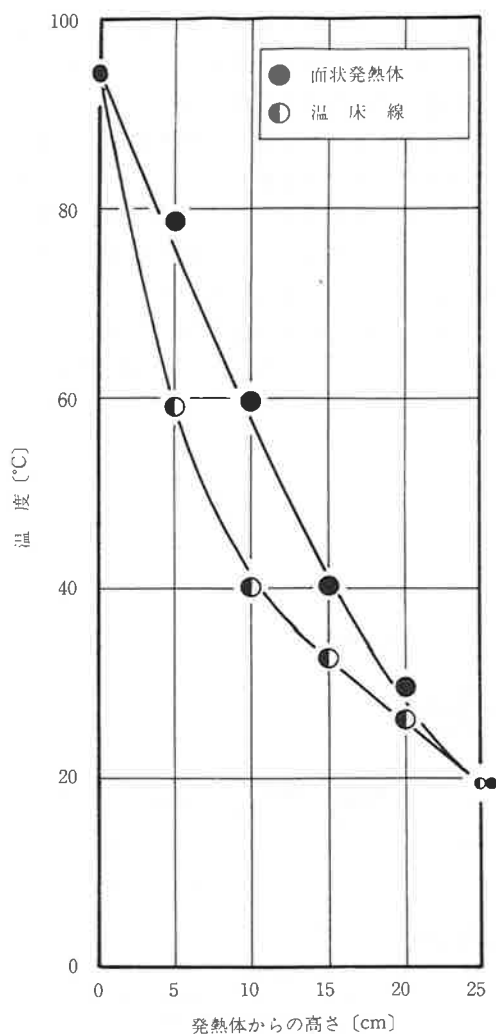


図 6. 土壌内垂直方向の温度分布
(表面温度が等しい場合)

に位置する地点の温度が高い傾向が若干見られるものの、全体的に温度の均一性はみられない。面状発熱体の場合、発熱体付近で若干温度の高低があるものの、土壌内温度は温床線に比較してやや均一に保たれている。

一方、垂直方向の温度分布を図 6 に示した。深さ方向いずれの位置においても、面状発熱体を設置した場合の方が土壌内温度が高くなっている。特に発熱体表面から 5 cm から 10 cm の高さの位置では温床線の場合より 20℃ も高い温度を保っていることがわかる。

これは面状発熱体の方が温床線より土に接触する伝熱面積が数十倍も大きいので土壌との熱伝導特性が良く、短時間で土壌を高い温度に保つ性能に優れているためと考えられる。完全断熱系で無限時間を経過した場合には同じ温度になることも考えられるが、土は熱伝導度がかかなり小さく 60 時間経過してもまだ加温途中である状態では、みかけの伝熱特性が良い面状発熱体の方が優れている。このことは面状発熱体の土壌内温度勾配が定常状態を表わす直線に近づいていることから裏付けられる。したがって、同じ温度に加熱するのであれば、面状発熱体の方が少ない消費電力ですむことになり、ランニングコストが節約される。

4. 面状発熱体埋設コンクリート盤における融雪特性

雪国において、面状発熱体は屋根雪の融雪（ルーフヒーティング）、路上雪の融雪や凍結防止（ロードヒーティング）等利用され、新しい雪氷技術を駆使して克雪する雪に強い街づくり（スノートピア）に貢献している。積雪は水と空気および融けた水とからなる多孔質物体である。したがって舗道上の積雪の融解凍結過程は熱と物質の同時移動現象で、発熱体の消費電力の他、外気条件すなわち大気温度、日射量、地中温度等の影響を受ける。

そこで本研究では、実際に面状発熱体埋設コンクリート盤を製作し、コンクリート内部の温

度、および通過伝熱量等を測定することにより
コンクリート上の積雪の融解過程を分析し、冬
期における面状発熱体を用いた路上雪対策の基
礎的資料を提示した。

まず比較のため、面状発熱体を埋設しない同

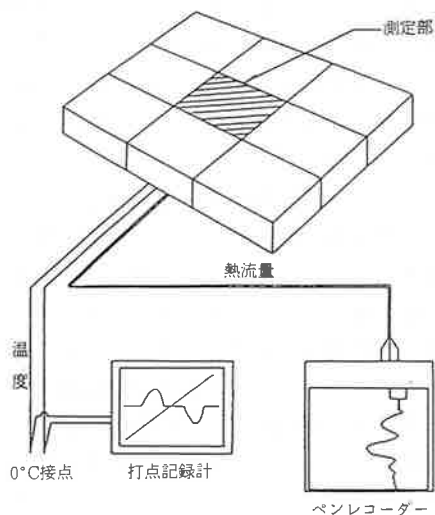


図 7. 実験装置概略図

規格のコンクリートブロックを製作し、どのよ
うな条件の時に雪が積もり始め、その積雪がど
のような過程で融け、どのような構造に変化し
ていくのかを観察した⁹⁾。図 7 に実験装置概略
図を示した。測定部コンクリート (300×300×
60 (mm)) 内部に熱流センサーと 6 本の熱電対
を埋設し、日当りの良い建物の南側と日当りの
悪い北側にそれぞれ設置した。設置場所を日当
りの良い南側と北側とに分けて設置したのは、
日射による影響がどの程度あるかを比較検討す
るためである。日射量は本学エネルギー棟屋上
に設置してあるネオ日射計により測定した。図
8 に熱流センサーにより測定されるコンクリー
ト内を通過する熱流量の経時変化を水平面全天
日射量と対応させて示した。熱流量の負の値は
熱流の向きが逆、すなわちコンクリートが冷却
されていることを示す。その日は夕方より雪が
降り出した日であるが、日向側熱流量は太陽の
日射によく対応して変化している。しかし日陰
側は日射よりむしろ外気温の変化に対応して午
後にピークを示している。しかし午後 3 時前(外

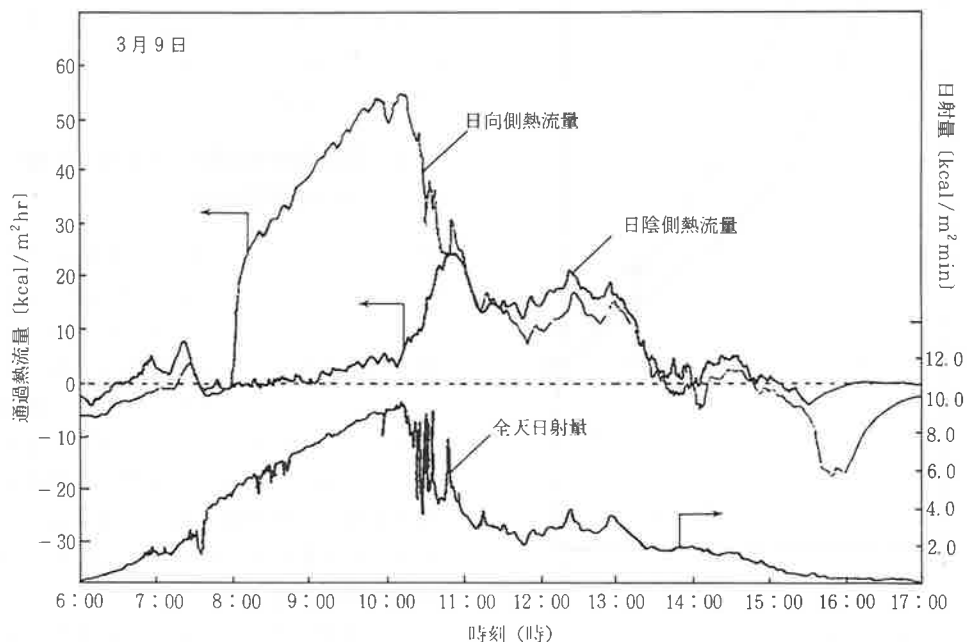


図 8. 通過熱流量と全天日射量との関係

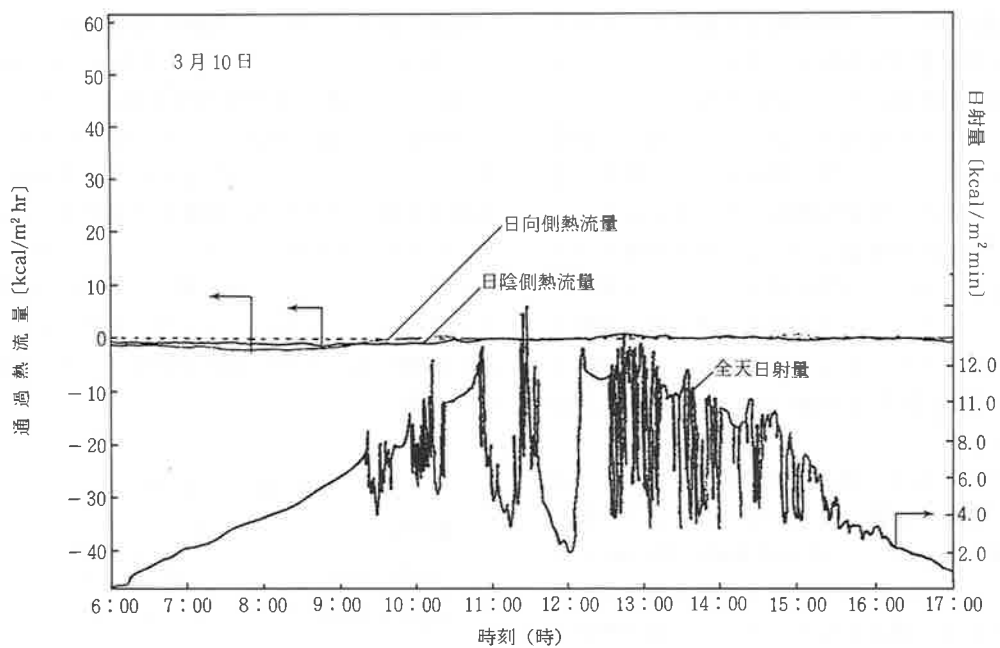


図 9. 通過熱流量と全天日射量との関係

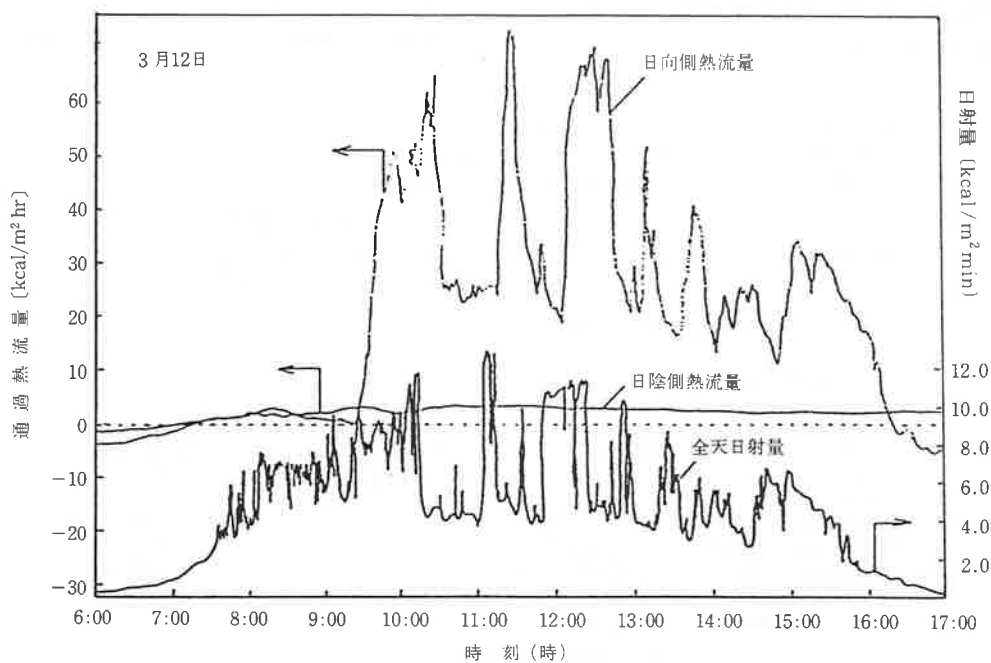


図 10. 通過熱流量と全天日射量との関係

気温 1.4℃) よりコンクリートは冷却され始め、コンクリート温度が 0℃ に下がった午後 4 時(外気温 0.5℃) には雪が積もり始めた。それとともに熱流量はなめらかに零に近づいて雪により熱的に遮断されることがわかる。

翌日のデータを図 9 に示した。日向、日陰側ともコンクリートが雪に埋もれている状態であるが、太陽の日射量が増加しているにもかかわらず日向側の熱流量はほとんど零の状態のままである。このことは雪に埋めれると、太陽の日射熱はコンクリートまで到達せず、雪の融解のみに消費されていることを示している。実際、日向側の積雪深さは 8 cm から夕方には 2.7 cm に減少した。

その日から 2 日経過した 12 日のデータを図 10 に示した。降雪後 3 日目になると日向側では積雪も薄くなり、午前 9 時半頃に雪が融け、コンクリート面が露出したことが熱流量の急上昇よりわかる。露出したコンクリート面の熱流量は再び太陽の日射に対応して変化している。しかし日陰側は積雪深さが減少しているものの、まだ雪に埋もれているため熱流量はほぼ零に近い値を示している。

以上のような基礎実験結果をふまえ、翌年実際に面状発熱体をコンクリート内に埋設し、融雪実験を試みた。図 11 に実験装置概略図を示した。測定用コンクリート (620×320×100 (mm)) の中心部に面状発熱体を埋設し、その上下 10 mm の位置に熱流センサーをそれぞれ設置した。コンクリート内部温度および発熱体表面温度を測定するため、熱電対を垂直方向 5 カ所、水平方向 3 カ所計 15 カ所設置した。測定はコンクリート上に一定量の積雪が堆積した後、その上にカバーを覆い、外気温の変動および日射の影響がない深夜に融解実験を行った。実験条件を表 2 に示す。

表 2 融雪の実験条件

積雪深さ	7 cm
外気温の経時変化	-4.9℃～-7.6℃
地温の経時変化	5.0～5.8℃
コンクリート内部の平均温度	表面 3.9～底部 8.3℃
面状発熱体表面温度	平均 9.2℃
発熱体の消費電力	100 V×0.2 A=20 W

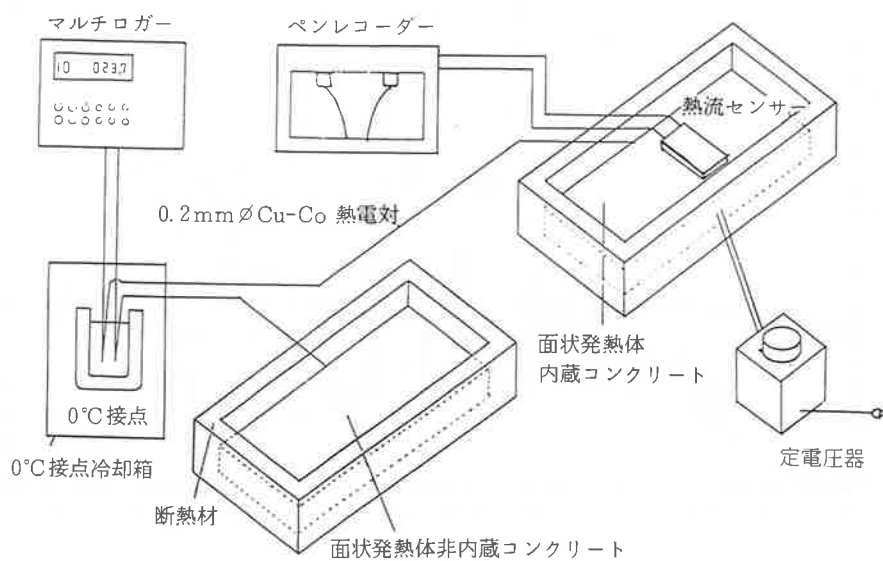


図 11. 実験装置概略図

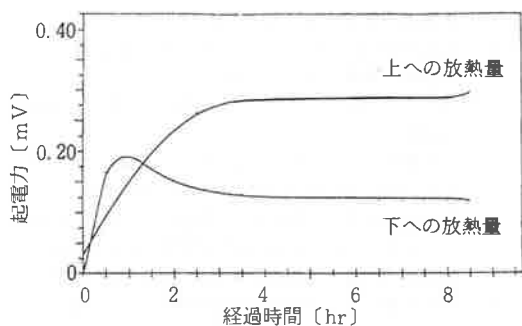


図 12. 放熱量の経時変化

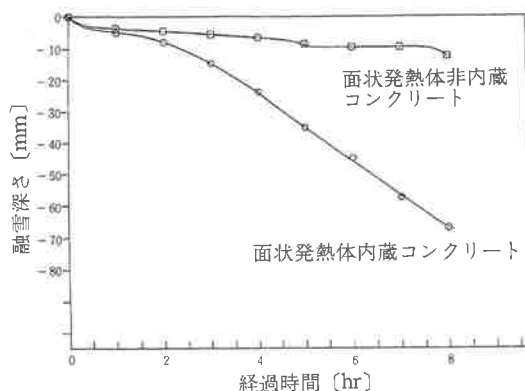


図 13. 融雪深さの経時変化

図 12 に熱流センサーより測定された発熱体から上（積雪）方向および下（地面）方向への放熱量の経時変化を指示電圧の変化として示した。面状発熱体は熱的応答性が良いため、電源を入れると同時に発熱体近傍の温度が急激に上昇する。発熱体から発生する熱はコンクリートに蓄熱されながら放熱を続け、約 3 時間後、蓄熱量が一定になるとともに通過伝熱量も定常状態に達する。このことは図 13 に示す融雪深さの経時変化が直線的に減少していることから明らかにである。

また図 12 の結果から面状発熱体からの放熱量は、融雪に消費される上方向へ約 70% 下方向へ約 30% の割合であることがわかった。上方向の放熱率の値は、雪温を 0°C まで加温する顕熱を無視し、降雪深さ、雪の密度および氷の融解熱から求まる融解熱量と消費電力から計算さ

れる融雪効率¹⁰⁾ 70% の値とほぼ同程度となり、融雪に必要な熱量の 30% 増の熱を供給すれば良いことがわかる。

これらの結果より、熱的応答性の良い面状発熱体は通電量を気象条件および降雪量に対応させて制御すれば、かなりの省エネルギーが期待できるものと思われる。

おわりに

面状発熱体をロードヒーティング、ルーフヒーティング、フロアヒーティングの発熱体として利用する場合、イニシャルコストの占める割合はかなり大きいものと思われる。また発熱体のもつ高い熱放射率も積層される絶縁材、表面材によってかなり減少する。しかし面状発熱体は面状であることより伝熱面積が大きく、そのため熱的応答性すなわち伝熱効率が良く、少ない消費電力ですむことから、ランニングコストが節約される利点がある。

通産省が提言した 21 世紀エネルギービジョン¹¹⁾によると、エネルギーは充足のための利用から快適性（アメニティ）のための利用へ転換しつつある情勢で、そのため二次エネルギーの中で、クリーンで安全で使いやすい電気の占める割合は 2030 年には 50% を越える予想している。このような状況下において、今後省エネルギー的な面状発熱体がい러ろんな分野で利用されることを望むものである。

付 記

本稿は先に発表した報文¹²⁾にデータを加え、面状発熱体の応用面に重点をおいてまとめ直したものである。

謝 辞

本研究は、八戸市の昭和 61 年度「21 はちのへ研究奨励金」の助成を受けました。日本分光工業 (株) IR システム課長川崎雅嗣氏には面状発熱体の分光放射スペクトルを測定して頂きました。本学土木工学科教授庄谷征美氏、技術員磯

島康雄氏にはコンクリート盤の製作を御指導頂きました。ここに記して関係の方々に感謝の意を表します。

最後に実験指導を行ってくれたエネルギー工学科技術員中谷勝美氏，実験に協力された当時学生 of 竹山隆裕，本間憲裕，鈴子英一，稲部英則，村元 等の各氏に感謝致します。

引用文献

- 1) 青木秀敏ほか，化学系7学協会連合東北地方大会講演予稿集，p. 91 (1986)
- 2) 青木秀敏ほか，化学系7学協会連合東北地方大会講演予稿集，p. 195 (1987)
- 3) 青木秀敏ほか，化学系7学協会連合東北地方大

会講演予稿集，p. 174 (1989)

- 4) 青木秀敏ほか，化学系7学協会連合東北地方大会講演予稿集，p. 24 (1990)
- 5) 化学工学協会，化学工学便覧，丸善，p. 362 (1988)
- 6) 川崎雅嗣ほか，第21回応用スペクトロメトリー東京討論会講演要旨集，p. 137 (1985)
- 7) 農林水産技術会議事務局，電磁波利用による食品の効率的加工・貯蔵技術の開発，p. 69 (1989)
- 8) 渡辺敦夫ほか，MOL, 26, No. 2, p. 64 (1988)
- 9) 青木秀敏，21はちのへ研究概要，八戸市，p. 17 (1987)
- 10) 高橋 博ほか，雪氷防災，白亜書房，p. 204 (1986)
- 11) 通商産業省，21世紀エネルギービジョン (1986)
- 12) 青木秀敏，機能材料，9, No. 12, p. 35 (1989)