

ソーラーコレクターを兼ねた屋根融雪チューブ

Tubing for A Roof Snow-melting for Use as A Solar Collector

神 山 隆* 梅 宮 弘 道**
 Takashi KAMIYAMA Hiromichi UMEMIYA
 羽 賀 恵 寿*** 池 田 宏****
 Eiji HAGA Hiroshi IKEDA

Abstract

In snow fall districts roofs are almost always made of galvanized steel sheets for the purpose of allowing snow to slip in winter, and in summer the surface temperature of such roofs reaches over 70°C in Yonezawa City. Galvanized steel sheet has excellent heat conductivity, so that tubes overlaying such a roof suitable for a roof serve as a simplified solar collector utilizing the fin effect of the roof. This system is suitable for roof snow melting.

An outdoor roof experiment using several types of tube with a circular cross-section flattened on one side, has been conducted in Yonezawa City. The experimental results showed that:

- 1) In a comparison of several types of collector tubes, tubing with a D-shaped section was the most cost-effective.
- 2) From the snow melting process in the climatic condition of Yonezawa, the most economic tube pitch was estimated to be 200mm.
- 3) The initial cost of the collector was reduced to ¥3000 / m². This is considerably less than that of a standard collector.
- 4) We proposed a roof snow melting system utilizing a single well coupled with a permeable hole, and studied its economy by calculating the period of capital return.

Key Words : Roof snow melting, Tube-type collector, Fin effect of galvanized roof, Cost-effectiveness, Economic pitch, Single well, Permeable hole

1. 緒 論

雪国では一般民家の屋根は雪下ろしの必要上トタン製のものが多く、その表面温度は夏期米沢で70°Cに達する。トタン板は熱伝導率が良くその上にチューブを敷設するだけでトタンのフィン効果を利用した簡易のソーラーコレクターを兼ねた屋根融雪器に使用できる。

冬期の屋根の雪下ろしは重労働であること、高所作業による危険が伴う事、高齢化や核家族化による人手不足、家屋の密集による雪捨て場の減少などにより社会問題になっている。そのため多数の雪処理の方法が考案されているがコストが高いために普及するに至っていない。よってその低コスト化が求められている。また地下帯水層を利用した季節蓄熱法のように大容量

の集熱を行うシステムにおいてもその経済性を考える時、低コストのコレクターは必要不可欠である。

本研究では、1) 数種類のチューブについて屋外集熱実験により性能評価を行った。2) 融雪実験より経

- * 東芝プラント建設(株)技術開発部
Research Group, Advanced Technology Department, Toshiba Engineering & Construction Co., Ltd.
- ** 山形大学工学部精密工学科, 教授
Department of Precision, Yamagata University, Professor
- *** 山形大学工学部精密工学科, 技官
Department of Precision, Yamagata University, Technical Official
- **** 東芝プラント建設(株)技術推進部 部長
Engineering Development Division, Toshiba Engineering & Construction Co., Ltd., Manager

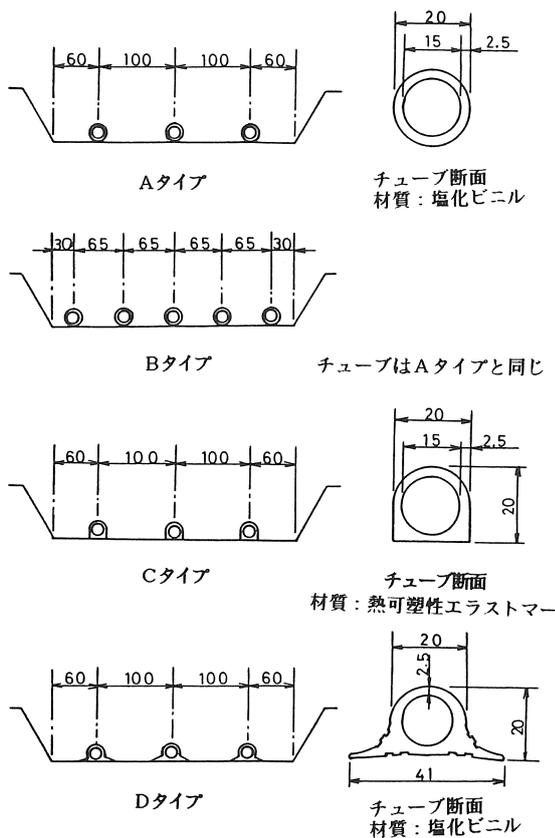


図1 各種コレクターチューブ

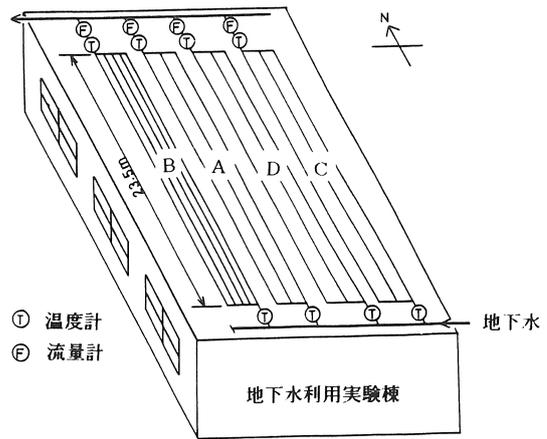


図2 実験設備

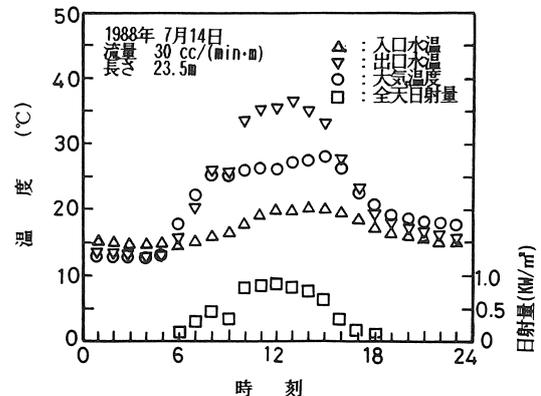


図3 Cタイプの1日の温度変化

済的なピッチを検討した。3) 簡易屋根融雪システムを考案しその経済性を検討したのでここに報告する。

2. 実験方法と結果

図1に実験を行ったチューブの断面形状及び図2に実験設備を示す。Cタイプ、Dタイプはトタンとの接触面積が増えるような形状としフィン効果の増大を狙った。材料は耐候性を考慮してカーボンブラックを添加した合成樹脂を用いた。弾性のある合成樹脂を用いることによりかなりの長尺でもロール状に巻いて運搬及び設置できるため継手材および接続作業の削減によるコストダウンの効果が大きい。

実験期間は1988年1月～8月、実験場は山形県米沢市山形大学工学部地下水利用実験棟の屋根上で行った。そのため常に安定した地下水を通水できた。融雪実験を観察するため屋外実験とした。チューブの長さは23.5mとし各々の入口出口温度、流量及び日射、風速、外気温を測定した。

図3に夏期晴天日の温度変化の例を示す。集熱温度は晴天日で40°C前後の低温集熱タイプである。夏の正午付近では最高60°C近くまで上昇可能である。

伝熱チューブにおける夏期の集熱量の関係は次式で

表される。(1)

$$q = \alpha I + K (\theta_a - \theta_w) \quad (1)$$

$$\theta_w = (\theta_i + \theta_o) / 2 \quad (2)$$

$$q = m C \rho (\theta_o - \theta_i) / A \quad (3)$$

またコレクター集熱効果 η (－) は、次式となる。

$$\eta = q / I = \alpha - K (\theta_w - \theta_a) / I \quad (4)$$

q : 集熱量 (W/m^2) I : 日射強度 (W/m^2)

m : 流量 (m^3/s) K : 熱通過率 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

θ_a : 外気温 ($^\circ C$) α : 日射吸収率 (－)

θ_w : 通水温度 ($^\circ C$) C : 水の比率 ($J/kg \cdot ^\circ C$)

θ_i : 入口水温 ($^\circ C$) ρ : 水の比重 (kg/m^3)

θ_o : 出口水温 ($^\circ C$) A : 評価面積 (m^2)

ここで q 、 K の単位にある m^2 は A であり、チューブ表面積と屋根設置面積の2つの場合を考えることにする。 A をチューブ表面積とした場合は I の単位面積と異なるため I がチューブ全表面に入射していると仮定する。またトタンからの伝熱もチューブ全表面に均一に加わっていると仮定する。

日射のないときのデータ (放射冷却の影響が少ない

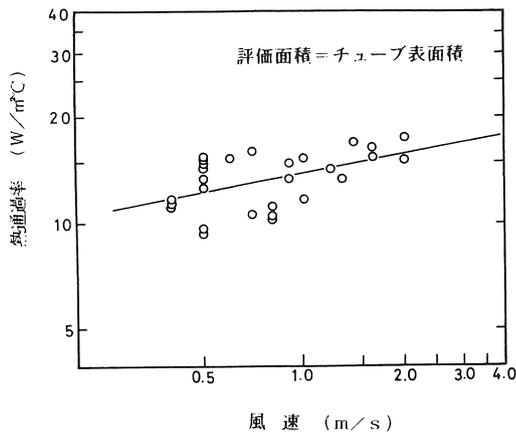


図4 Aタイプの風速に対する熱通過率

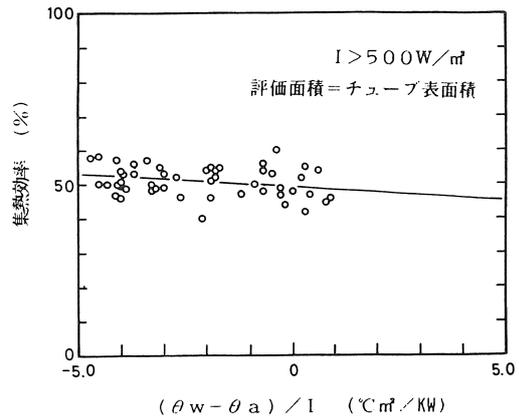


図5 Aタイプの集熱効率

夜間の30分平均値、トタン表面温度と外気温の差がない時)から(1), (3)式を用いて熱通過率をA=チューブ表面積として求めた。熱通過率は風速に影響される。Aタイプの風速と熱通過率の関係を図4に示す。またηのばらつきを少なくするためI > 500 W/m²のデータと(3), (4)式よりηをA=チューブ表面積として求めた。Aタイプの集熱効率と(θw - θa) / Iの関係を図5に示す。通水温度は算術平均を使用しているため流量に注意した。入口温度が低めであったためθw - θaが0付近の値となった。また外気温は屋根上1.5 mで測定したため地上での値より高めであった。特に日射が強く風速が弱く屋根上の空気が澱んでいるときに5~7℃の差があり屋根全体が集熱器の役目を果たしていた。管内は層流で実験したため乱流の場合には多少の向上が見込まれる。

3. 性能評価

以上の結果より各タイプの性能比較を試みる。まず2章で整理したK, ηを最小二乗法で直線近似した後、Kは風速1 m/sの値、αは(θw - θa) / I = 0の時のηとして求め比較する。各タイプの性能比較を図6に示す。日射吸収率は0.5前後となっているが評価面積をチューブ表面積としているため実際にチューブに入射する日射量に対しては1以上になっていると予想されトタンのフィン効果の影響がわかる。同じ種類のチューブであるAタイプとBタイプの比較でBタイプの方が低いのは、ピッチが短いために一本あたりのフィン効果が減少したためと考えられる。Cタイプ、Dタイプはチューブ表面積が違うためにこのままでは比較できない。よって評価面積をすべて屋根設置面積(23.5m × 0.32m)と置換えて比較してみる。評価面積を屋根設置面積としたものを図7に示す。同一設置

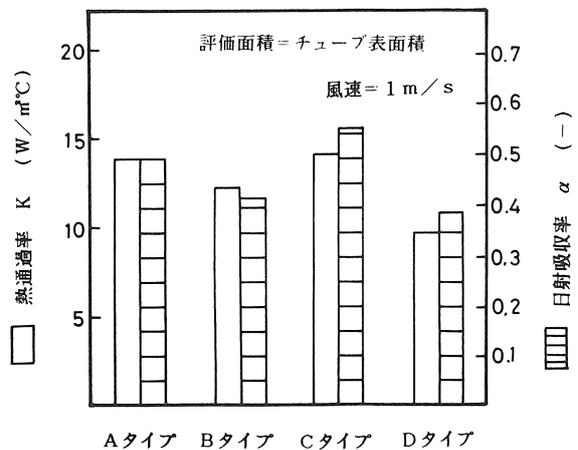


図6 各タイプの性能比較

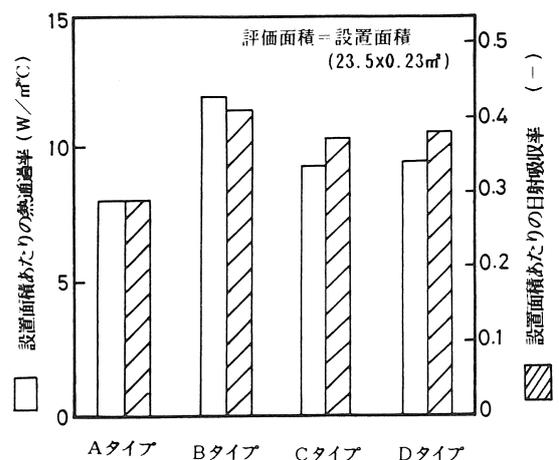


図7 設置面積あたりの性能比較

面積での性能はBタイプが一番よく以下D, C, Aの順番となった。Bタイプがよいのは同一設置面積での使用数量が多いためである。フィン効果の影響でCタ

タイプ、DタイプはAタイプと比べて熱通過率で約15%、日射吸収率で約30%良くなっている。K、 α が分れば(3)式より η が求められるので設置面積あたりの集熱効率を図8に示す。図より $(\theta_w - \theta_a) / I$ が $20^\circ\text{C}^2/\text{KW}$ 以上ではBタイプとCタイプ、Dタイプの η が逆転している。これは(3)式より $\eta = 0$ となるのは、 $(\theta_w - \theta_a) / I = \alpha / K$ の時でありBタイプの α / K が小さいためである。 α / K が大きいほど高い温度の集熱が可能になるが、図よりフィン効果の大きいものほど α / K も大きくなっているのがわかる。またCタイプとDタイプの性能はほとんど差がないことがわかった。

そこでコストあたりの集熱性能を検討した。チューブのコストがその使用材料体積に比例すると仮定して前記集熱効率をその評価面積分の使用材料体積で割った値を図9で比較した。Aタイプに比べてCタイプDタイプの断面積は1.3倍、1.5倍であるためそれ以上性能アップされなければならない。図より $(\theta_w - \theta_a) / I$ の広い範囲でCタイプが良いことがわかった。Dタイプは性能的にはCタイプと同じになったことより接触状態によってはDタイプのフィン部は不要であることがわかった。フィン効果はトタンとの接触状態により左右されるため冬期の融雪時に接触面に水分が浸透し接触抵抗が減少した時の性能アップが期待できる。

4. 融雪実験

集熱実験に先立ちピッチ65mmのCタイプのチューブについて融雪実験を行った。

冬期の融雪時の放熱量は(1)式の日射の項を降雪に置換えることにより次式の関係となる。(1)

$$q = L F + K (\theta_w - \theta_a) \quad (5)$$

L : 氷の融解熱 (J/kg) F : 降雪強度 (kg/m²s)

また降雪強度が強くと外気温が低くなると降雪を瞬時には融雪できずにコレクター上に冠雪する。このときは次式となる。

$$q = K (\theta_w - \theta_s) \quad (6)$$

θ_s : 雪温度 (°C)

図10に放熱量 q と $(\theta_w - \theta_a)$ の関係を整理した結果を示す。ここで面積の単位は設置面積としている。図中の空洞化とはコレクター上の冠雪が進行し内部だけが融雪して空洞化している状態を示している。空洞化すると放熱量が低下し、雪が断熱材として働くために外気温の影響を受けなくなる。

図より降雪のない時、 q は $\theta_w - \theta_a$ におおよそ比例し、降雪時にはLFが加わっている関係が予想できる。そこで降雪時のデータを用いて(5)式より計算した

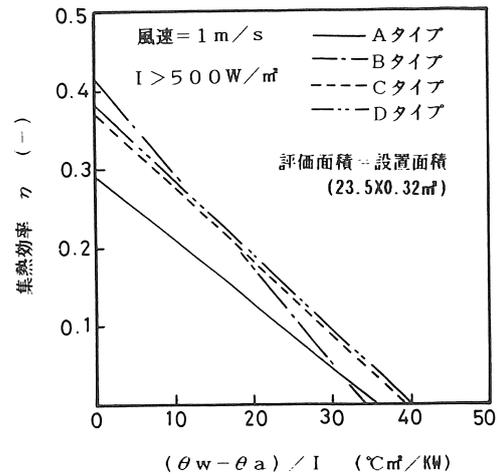


図8 設置面積あたりの集熱効率

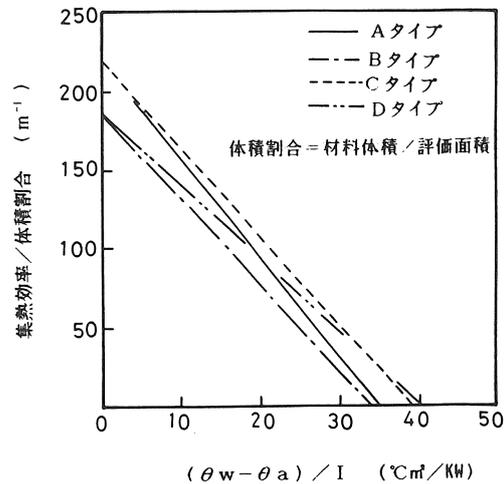


図9 材料体積あたりの集熱効率

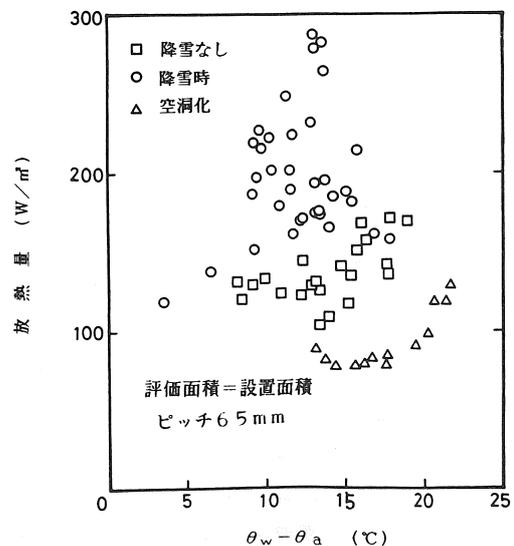


図10 融雪時の放熱量

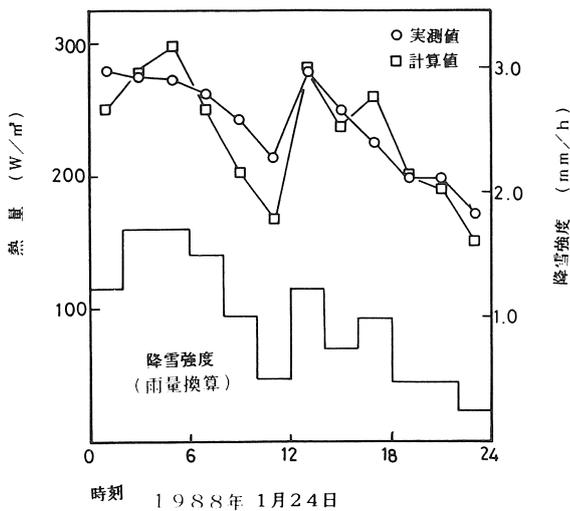


図11 放熱量の実測値と計算値

放熱量と実際の放熱量の比較を図11に示した。この時、Kはあらかじめ降雪のない時のデータを風速との関係に整理した値を用いた。瞬間的には差があるため2時間あたりの平均値を用いることによりほぼ一致した。また降雪強度は雨量換算で1.7mm/hを処理できた。

次に空洞化した時の各データと(6)式より求めた熱通過率の経時変化を図12、13に示す。ここで $\theta_s = 0^\circ\text{C}$ とした。図より完全に空洞化したとき $K = 8 \text{ W/m}^2\text{C}$ となった。これは $\theta_w = 10^\circ\text{C}$ で 80 W/m^2 の放熱量であり新雪密度 0.08 g/cm^3 とすると1日に26cmの降雪を処理する能力に相当する。

5. 経済ピッチの検討

設置面積あたりのコストはチューブのピッチに反比例するためどれだけピッチを広くできるかが重要である。そこで前述の融雪実験よりピッチを変えた場合の融雪性能を予想する。65mmピッチの融雪能力を基に融雪能力がピッチに反比例すると仮定する。また100mm以上を対象としているためピッチが広がったことによるフィン効果の増加を15%加えた。図14に融雪能力とピッチの関係を示す。

屋根融雪システムの目的は屋根積雪荷重を設定値以下に押えることであり一時的な冠雪は問題ない。一般的には1.5m程度の積雪になると荷重的に問題になってくる。米沢市の過去24年間(昭和32~56年)の新積雪深出現頻度によると降雪量が1日に10cm以下の日が降雪日の62%であり20cm以下の日では84%となる。これは雪国といえどもほとんどの日が20cm以下の降雪量であることを意味している。また降雪日の合間には晴れる日もありこのような日の融雪効果が大きい。よっ

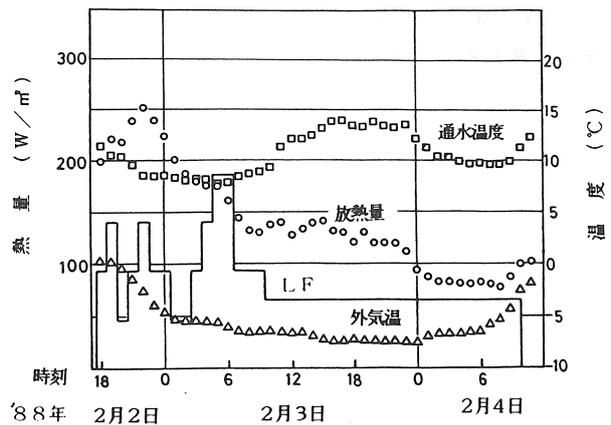


図12 空洞化の経時変化

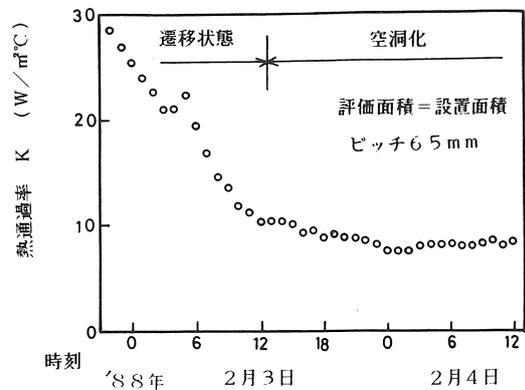


図13 空洞化時の熱通過率

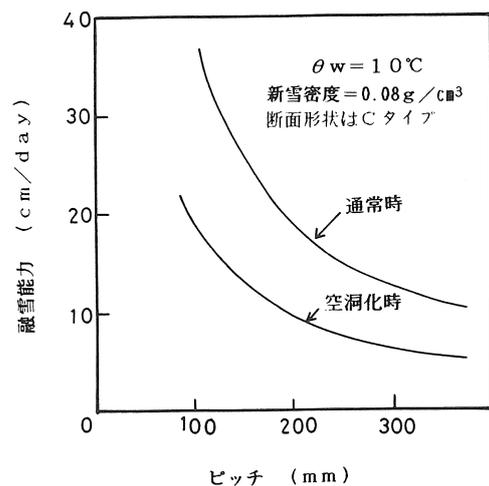


図14 融雪能力とピッチの関係

て長時間連続運転するシステムにおいては通常時の融雪能力で 20 cm/day 、空洞化時が 10 cm/day と設定する。問題は一時的なドカ雪であるが降雪量が 50 cm/day 以上の日は0.2%である。確かに日本全国の観測記録上

には1.5m/day以上という記録もあるがこの様な記録は異常気象であり、あきらめなければ経済的な設計は不可能である。

よって経済的なピッチは約 200mmであると予想される。

6. 融雪システムの経済性

そこで浸透マス利用一本井戸による屋根融雪システムを考案し、その経済性の評価を試みる⁽²⁾。図15に屋根面積 100㎡の一般住宅システムの概略図を示す。冬期浅井戸より汲み上げた地下水をポンプで循環し融雪に使用した後、浸透マスに放流することにより地下に還元する。浸透マスへの放流実験の結果より地下水流の影響により井戸水温の急激な温度低下が起こらないことがわかっている。本システムの特徴はa. 地下水の熱を使用することによりランニングコストの低減ができる。b. 4月～9月はソーラーシステムとして給湯に使用できる。c. 井戸は水資源として生活用水として使用できる。d. 地下水の使用が可能な地域に限定される。f. 冬期停止した場合、凍結防止対策が必要である。

表1にシステムのコスト表を示す。設備費は屋根融雪部であるコレクター設備費とソーラー追加設備費と井戸設備費とからなる。コレクター設備費はトタンフィン効果によるチューブ数量の低減と市販ホースニップル等の安価な接続材料の使用により3000円/㎡と非常に安価である。これは既存の設備と比較して一桁違う価格である。

これより設備の回収年数を次の方法で算出した。

$$IC = PC + HC + WC - EC \quad (7)$$

IC : N年間の定額返済による設備費 (円)

PC : N年間の除雪人件費の累積 (円)

HC : N年間のエネルギー節約費の累積 (円)

WC : N年間の水道料金の累積 (円)

EC : N年間のポンプ電力費の累積 (円)

N : 回収年数 (年)

ここでシステムのランニングコストはポンプ電力費のみと考え除雪人件費(雪下ろしと雪捨て)とソーラー利用による給湯エネルギー節約費と水道料金節約費との差額が利益と考え回収年数を求めた。計算に用いた各種条件を表2に示す。

回収年数と年間除雪費の関係を図16に示す。井戸設備を1～4軒で共同出資した場合を考えた。除雪人件費は場所により違ってくるため横軸で表わした。米沢では雪下ろし回数は年平均3回であり1回 15000円とすると1軒で行った場合回収は11.2年となるが4軒で

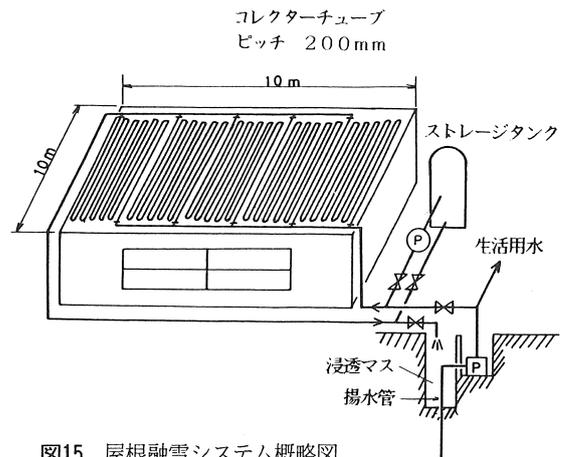


図15 屋根融雪システム概略図

表1 屋根融雪システムコスト表

屋根融雪コレクター設備費			
項目	規格	数量	金額(円)
コレクターチューブ		500m	150,000
硬質塩ビ管及び継手	H1	70m	20,000
ホースニップル	P11/2	10ヶ	3,000
ホースバンド	φ20	10ヶ	1,000
バルブ		2ヶ	4,000
ポンプ	200W	1台	40,000
取付け工事費			85,000
小計			303,000
ソーラー追加設備費			
ストレージタンク	230ℓ	1台	85,000
循環ポンプ	50W	1台	20,000
バルブ		2ヶ	4,000
小計			109,000
井戸設備費	深さ20m 浸透マス6m		505,000
合計			917,000

表2 経済性の検討条件

1. 給湯エネルギーの節約費	16000円/年
給湯負荷	1685Mcal (4~9月)
給水温度	14℃
給湯温度	50℃
給湯量	260ℓ/日
太陽熱依存率	55%
ボイラー効率	80%
エネルギー単価	1.4円/Mcal (都市ガス換算)
2. 年間水道料金	42000円/年
使用水量	720ℓ/日
単価	1.60円/ℓ
3. ポンプ電力費	8600円/年
運転時間	2160時間 (約90日)
単価	2.0円/KWh
4. 各種上昇率	
金利	5.5%
除雪人件費の上昇率	5.0%
エネルギー費の上昇率	5.0%
水道料金の上昇率	1.0%

井戸を共同利用した場合には 6.4年となり実用化の可能性がある。また将来的には除雪作業員の人手不足が予想され人件費が急激に上昇する可能性もある。

7. 結 論

- (1) 屋根トタン板のフィン効果を利用したコレクターチューブのコストあたりの性能比較を行った結果、半円形のものの方が優れていた。
- (2) 融雪実験より求めた融雪性能と米沢の気象データを検討した結果、経済ピッチは200mmとなった。
- (3) コレクター設備費は3000円/m²と非常に低コストである。
- (4) 浸透マス利用一本井戸による屋根融雪システムを提案しその経済性の検討を行い回収年数を求めた結果 6.4年となった。

参考文献

- (1) 梅宮ほか, 太陽熱コレクターを兼ねた無雪屋根の研究, 太陽エネルギー, Vol. 9, No. 2, 1983
- (2) 梅宮ほか, 地下水と土壌蓄熱効果を利用した無雪

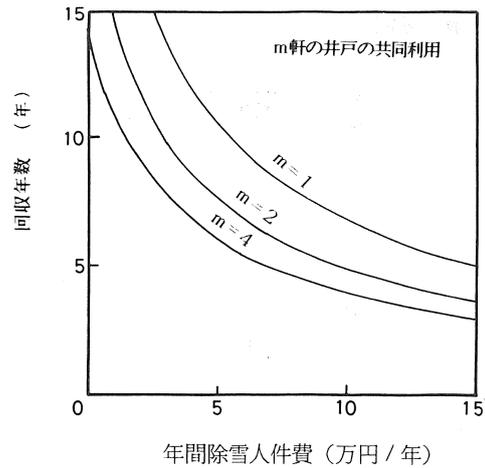


図16 システムの回収年数

道路の研究, 第23回伝熱シンポジウム講演論文集, P 361

- (3) 太陽エネルギー利用ハンドブック, 第Ⅱ編第4章 給湯・給熱システム, 日本太陽エネルギー学会 (平成元年3月4日 原稿受理)

海外情報

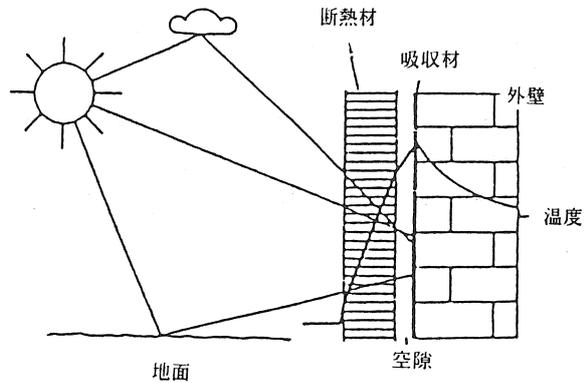
透明断熱材—太陽熱暖房システム用としての新しい適用

1980年代における太陽エネルギー利用技術の最も重要なものの一つに、いわゆる透明断熱材といわれているものの導入が挙げられる。この名称が示すとおり、その目的は対流を抑えて断熱し、しかも太陽放射の透過がなされるようにすることである。

過去10年間、西独のフラウンホッフ太陽エネルギー研究所において基礎理論および実験が行われてきている。この研究において、U値は1 w/m²K以下、拡散透過率は80%以上であることを示している。

この材料を適用した平板型集熱器の効率は、真空管型集熱器よりも高く、また住宅の壁の前面に適用すると北に面した壁では壁の熱損失をかなり補うことができる。透明断熱材を使用した住宅では、冬季僅かな日数しか補助熱を必要としない。

今日透明断熱材を適用したデモンストレーションプロジェクトが西独、英国、スイス及びス



カンジナビア諸国などで数多く進められており、太陽熱暖房の分野の変革をもたらし、化石燃料に取って代ろうとしている。

太陽エネルギー変換用透明断熱材技術の第3回国際ワークショップが、ISES西独支部主催で、本年9月18-19日、西独のTitiseeで開催される予定である。

(W. Stahl: SUN AT WORK IN EUROPE NO. 7, Apr, 1989)