井戸水を用いる天井放射冷房の実測とそのエクセルギー解析

MEASUREMENT OF THERMAL ENVIRONMENT AND EXERGY ANALYSIS ON CEILING RADIANT COOLING SYSTEM USING GROUND WATER

浅田 秀男*, 武田 仁**
Hideo ASADA and Hitoshi TAKEDA

The purpose of this study is to utilize the concept of exergy to discuss the meaning of well water 'coolness' applied to a ceiling radiant cooling system. A house in Chiba was equipped with a ceiling radiant cooling system using well water, and with outdoor sun-shading on the South-facing window. We conducted measurements of indoor thermal environment and electric power consumption in the summer of 2001. The results showed the following: 1. The ceiling radiant cooling system consumed cool thermal exergy from well water and emitted a small part of it as cool radiant exergy from the ceiling radiant panel surface. 2. When cooling system was used, not only the ceiling radiant panel but also the surrounding walls and floor contributed to the radiant cooling effect by emitting cool radiation exergy. 3. The well water pump consumed about 56 times more exergy than the ceiling radiant panel and the circulation pump consumed about ten times more exergy.

Keywords : *Radiant cooling, well water, exergy analysis, thermal exergy, radiation exergy, thermal environment*

放射冷房、井戸水、エクセルギー解析、熱エクセルギー、放射エクセルギー、温熱環境

1. はじめに

身近にある自然のポテンシャルを活かし建築環境の調整を行なうことは、化石燃料を源とするエネルギー使用量の削減のみならず、建築が周囲の自然環境と調和し、持続可能となる上で重要と考える。井戸水を利用する天井放射冷房システムは、身近にある自然のポテンシャルのひとつである井戸水の「冷たさ」を利用するシステムである。井戸水を利用するためには、汲上げや循環用のポンプが不可欠である。一般に、ポンプの電力消費量は、天井放射パネルが室空間から除去する熱量に比べ小さい。これは、前者は電力、後者は熱と質の異なるエネルギー同士を直接比較しているからである。

井戸水の「冷たさ」という自然のポテンシャル利用にともなう資源性の「消費」を明確にすること、また、このような資源性の「消費」と、電力などの化石燃料を源とする資源の「消費」とを統一的に論じることは、従来とは異なる視点からの知見を与えてくれると考える。

このようなことは、従来のエネルギー保存則に加え、エントロ

ピー増大則を考慮したエクセルギーの概念を用いることで可能となる。外気温より温度の低い井戸水が持つ冷熱は、物を冷やす能力「冷エクセルギー」と表現できる¹⁾。また、天井放射冷却パネル表面に周囲の熱が吸収される現象は、パネルから冷やす能力である冷エクセルギーが放射されていると捉えられる²⁾。このことにより、放射冷房に関わる様々な形態のエネルギーの伝達現象や、水搬送などの力学的仕事をすべて「エクセルギー消費」として統一的に表現でき、天井放射冷房における井戸水や電力などの資源の投入・利用から廃熱に至る一連の過程を「エクセルギー投入・消費過程」として捉えることができる。

本研究は、千葉県柏市に建つ住宅T邸に備えられている井戸水利用天井放射冷房システムを対象に、夏期の熱環境および電力使用量を実測し、井戸水の「冷たさ」、井戸水搬送用の動力、放射冷却パネルからの冷放射といった形態の異なるエネルギーの流れや利用を、一連のエクセルギー投入・消費過程として明らかにし相互に比較・検討することを目的とした。

本論文は、既に発表している文献(11)(12)を修正・加筆したものである。

* デルフト工科大学建築学部 客員研究員・博士(工学)

** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

NWO (The Netherlands Organization for Scientific Research) Visiting Researcher,
Faculty of Architecture, Delft University of Technology (The Netherlands),
Dr. Eng.
Prof., Department of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo
University of Science, Dr. Eng.

本研究は次のような手順で行なった。まず、T邸を対象に、外付け日除けにより日射遮へいを行っている場合の、室内温熱環境およびポンプの電力消費量を実測した。次に、井戸水の伝熱と循環に関わるエネルギー収支を基に、それぞれに対するエクセルギー収支式を整理した。それらの式に、実測で得られた室内の空気温度や井戸水流量・ポンプ電力消費量を利用して、天井放射冷房システムの井戸水の流れと循環に関わる一連のエクセルギー投入・消費過程を求めた。最後に、天井放射パネルなどでの冷水の冷エクセルギー消費と、汲上げ・循環用ポンプでのエクセルギー消費などとの関係について比較・考察した。

以下では、まず、実測対象住宅であるT邸とそこに備え付けられている天井放射冷房システムの概要について述べたのち、2001年夏季に行なった実測の概要について述べる。次に、天井放射冷房システムのエクセルギー解析の概要について述べ、最後に、温熱環境実測とエクセルギー解析の結果について述べる。

2. 住宅と天井放射冷房の概要

図1はT邸の1階と居間部分の平面図である。建物は木造2階建ての戸建て住宅で、外壁には100 mmのグラスウール、床には140mmのポリスチレンフォーム、窓面には透明複層ガラスを用いた高断熱建築である³⁾。図1の下部に示した居間が実測対象室で、南面に幅3620 mm×2200 mmの複層ガラスの窓面がある。点線で囲んだ部分の天井面に放射冷房用のパネルが設置されている。放射パネルは、長さ2700mm×幅188 mmのアルミ製パネルを36枚連結（合計18.3 m²）したもので、パネル裏面に取り付けられた配管内に井戸水を循環させることでアルミ製パネルを冷却し放射冷房を行なう。

図2は、井戸水利用天井放射冷房システムの構成と井戸水の流れの模式図である⁴⁾。図の上部は室空間、右下は深井戸（深さ：66 m）、左下は井戸水を放流する浸透枡である。まず、深井戸に設置した水中ポンプで井戸水を地上まで汲上げる。次に三方弁で、汲み上げた井戸水と、天井放射パネルから排出された井戸水とを混合する。こ

図1 対象住宅の1階平面と天井放射冷房を行なう居間

図2 井戸水利用天井放射冷房システムの構成と井戸水の流れ
T：水温計、M：流量計

れは、天井放射パネルに送る井戸水の温度を任意の設定温度に調節するためである。三方弁での混合量は、天井放射パネル入口側の配管に取り付けられた温度センサーによって制御されている。三方弁で温度調節された井戸水は、循環ポンプを用いて天井放射パネルに送られる。放射冷房運転中の放射パネルへの送水流量は、約0.32 l/sでほぼ一定である。天井放射パネル内を循環してアルミパネルを冷やすことにより温度が上昇した井戸水はパネルから排出され、一部は三方弁へ、残りは浸透枡へ放流される。

3. 実測概要

図1に示した居間を対象に、室内温熱環境およびポンプ電力消費量に関する実測を行なった。日射遮へいなどのパッシブ手法によって冷房の負荷をできるだけ小さくし、残った負荷を、できるだけ高い温度の冷水を利用して放射冷房を行なうことを想定し、放射冷房を運転中は常に窓面の外側に草簀を設置することにし、天井放射パネルの表面設定温度を22℃とした。

温熱環境実測は、2001年8月下旬から9月中旬にかけて行なった。表1は、実測項目である。実測項目は、屋外の日射量・外気温、室内の空気温度・グローブ温、床・窓ガラスの表面温度、三方弁や放射パネルを出入りする冷水の水温、汲上げ用と循環用ポンプの電力消費量で、合計約30点を1分間隔で連続測定した。床面・天井表面温、室内空気温度・グローブ温度は、図1の下部の居間中央の●印で示した位置で計測した。また冷水の水温と流量は、それぞれ図2中のTおよびMで示した位置で計測した。なお、天井放射冷房は10時～16時まで運転し、外付け日除けも同じ時間帯のみ取り付けた。なお、8月末から9月にかけては天候が不順な日が多かったので解析から除き、比較的外気温が高く日射量が大きかった8月24日のデータを用いることにした。

4. エクセルギー解析の概要

一般に、エネルギーの移動または形態変化のある部位・機器でエ

表1 計測項目の概要

場所	計測項目	計測点数
屋外	外気温、水平面日射量	計2点
室内	室温 (FL+0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.75m)	計7点
	表面温度 (ガラス内外表面、床面、天井面)	計9点
	グローブ温 (FL+1.2m)	1点
	相対湿度、気流速度、床下表面温、床下空気温	計4点
	上下方向の放射熱伝達量	1点
	床下空気温	1点
配管内	水温 (井戸水、三方弁の入口2ヶ所)	計3点
	流量 (井戸水汲上げ、三方弁入口側)	計2点
ポンプ	電力消費 (水中ポンプ、循環ポンプ)	計2点

クセルギーは消費される。そこで、まず天井放射冷房システム内で、エネルギーの移動・形態変化のある部位・機器をひとつひとつサブシステムと定義した。次に、各サブシステムごとにエネルギー・エントロピー収支式を立て、両者よりエクセルギー収支式を導きエクセルギー消費を求めた⁴⁾。あるサブシステムからのエクセルギー出力は、別のサブシステムへの入力になるので、サブシステムごとのエクセルギー投入・消費・出力を連ね合わせれば、天井放射冷房システム全体のエクセルギー投入・消費過程が求められる⁵⁾。ここで定義したサブシステムは、図2を参考に井戸水の流れの源から順に、深井戸中の汲上げ用水中ポンプ (以下、水中ポンプと記す)、三方弁、冷水循環用ポンプ (以下、循環ポンプと記す)、天井放射パネルの4つである。水中ポンプと循環ポンプは、ポンプに電力を投入して井戸水を汲み上げたり循環させるといった力学的仕事を行なっている。また、三方弁は異なる温度の水の混合による熱移動、放射パネルの低温の冷却面には室内空間の熱が放射および対流の形で移動している。

天井放射パネルを例としてエネルギー・エントロピーおよびエクセルギー収支式を付録1)に示す。なお、天井放射パネルや床・壁表面から放たれる長波長放射のエクセルギーの計算は、文献6)7)、また、放射冷房を行なう室空間のエクセルギー解析は、文献8)9)10)を参考にした。

5. 結果及び考察

図3の上図は解析に用いた8月24日の外気温、下図は屋外水平面日射量の時刻変化である。外気温は24～31℃、水平面日射量は200～800 W/m²程度であった。12時以降はやや雲が多かったため、日射量が全体的に小さく、かつ変動が大きくなっている。

5-1 温熱環境

図4は、室内の空気温・グローブ温・相対湿度の実測値とSET*の計算値の時刻変化を示したものである。横軸は時刻、左縦軸は温度、右縦軸は相対湿度[%]である。空気温・グローブ温は床上1.2mの高さの値である。SET*の計算は、空気温・グローブ温・相対湿度および室内気流速の実測値を用い、着衣量を0.45 clo、代謝量を1.0 metと仮定して求めた。その際、人体に吸収される日射量は無視した。

10～16時の天井放射冷房運転中、床上から1.2mの空気温度は28～28.7℃程度で、小刻みに上下変動しているものの放射冷房運転開始時から終了時までの温度上昇は1℃未満であった。一方、同じ高さのグローブ温は天井放射冷房の効果により約27.5～28℃と常に空気

図3 実測日の外気温と日射量

温より約1℃低くなっている。このときのSET*の計算値は28.5～29℃で、ほどほどの涼房効果があったことを示している。SET*の計算値は、どの時刻においても空気温よりわずかに高くなっている。これは、室内の相対湿度が約75%とやや高かったことが影響していると考えられる。

図5は、ガラス面室内側表面温・床表面温および天井表面温の時刻変化である。比較のため、図4に示した床上1.2mの空気温も図中に記した。10～16時のガラス面の室内側表面温度は、10～16時の間29～32℃と温度上昇が比較的小さい。10～12時ごろに温度上昇が小さいのは、居間東側の母屋の影響で直達日射が窓面に直接入射しないため、12時以降に温度上昇が小さいのは日射量がやや小さく、かつ、外付け日除けを用いて日射遮へいを行なったことによると考えられる。床表面温度は10～16時の間約27℃でほぼ一定で、常に空気温より約1℃低くなっている。このことは、放射熱伝達により天井放射パネルが床表面から直接熱を受け取っている、すなわち床表面から熱を除去していることを示している。天井表面温度は上下1℃程度の小刻みな変動があるが、平均するとほぼ23℃程度であった。

以上より、天井表面温度設定22℃ (実際の表面温度は約23℃) と比較的高温であるにもかかわらず、天井放射冷房運転中は、空気温

図4 室温・グローブ温・相対湿度とSET*の時刻変化

図5 ガラス表面温・床表面温・天井表面温の時刻変化

一方、10～16時における天井放射パネルのエクセルギー消費は、約7～8 Wとほぼ一定である。これは、図4や5に示した室内温熱環境は、天井放射パネルで7～8 Wの冷エクセルギーを消費し続けることで維持されていたことを示している。

ここで、天井パネルを出入りする冷水の熱量（エネルギー）の差、すなわち天井放射パネルが室内から除去した熱量は、流量を0.32 ℓ/s 、天井パネル出入口の冷水の温度差を約1℃とすると約1300 Wである。1300 Wという熱エネルギーの値と比べると、図6に示した汲上げ及び循環ポンプへの投入電力（435 Wと75 W）は、それ程大きくは見えない。しかしながら、図6に示した天井放射パネルでのエクセルギー消費（7 W）と、水中・循環ポンプのエクセルギー消費（それぞれ398 Wと66 W）とを比べることで、両ポンプのエクセルギー消費が全体の中で著しく大きいことが明確になった。

最後に、天井放射パネルから排出された冷水に伴う冷エクセルギー154 Wのうち、126 Wは三方弁へ、残りの28 Wは浸透枳に放流されている。結局、汲上げ時に井戸水が持っていた冷エクセルギー62 Wの約半分に相当する冷エクセルギーは、消費されることなく地中へ捨てられている。

5-2-2 床表面での放射の冷エクセルギー消費 天井放射パネルから放たれた放射の冷エクセルギーは、床や壁面などに入射し消費される。ここでは一例として、床表面でのエクセルギー投入・消費を示す。

図8は、天井放射パネルからの放射の冷エクセルギーが床表面に入射して消費される模式図である。時刻は図6と同じ13時である。白抜き矢印は冷エクセルギー、黒塗りの矢印はものを温める能力を持つエクセルギーである。また、波形の矢印は放射エクセルギー、弧になった矢印は対流のエクセルギーである。□内の数値はエクセルギー消費である。

床表面には、窓面を透過した日射（短波長放射）エクセルギーのうちの14.3 W^{注1)}と窓ガラス表面からの放射（長波長放射）のエクセルギー0.2 Wが入射している。両者ともに床面を温める能力を

図8 床表面におけるエクセルギー投入・消費の様子

持っている。日射は床表面に入射し吸収されることで短波長放射から熱に変化する。この変化に伴いすべての日射エクセルギーが消費される。窓ガラス表面からの長波長放射も同様に床表面に吸収され熱になることで全て消費される。一方、床表面では、日射吸収による熱と、窓ガラスからの長波長放射を吸収したことによる熱を床表面から除去するために、天井放射パネルおよび周壁面からの放射の冷エクセルギー3.5 Wと1.2 W^{注2)}の一部が消費される。したがって、合計15.5 Wのエクセルギーが床表面で消費されている。15.5 Wの内の14.3 Wは日射エクセルギーを消費したことによるもの、残りが天井放射パネルと周壁面からの放射の冷エクセルギーを消費したことによるものである。日射の熱を床表面から取り除く際に入射した放射の冷エクセルギーのすべてが消費されなかったことから、床表面からは放射の冷エクセルギー3.0 Wと対流熱伝達による冷エクセルギー1.3 Wを放っている。このことは、外付け日除けなどを用いて室内に入射する日射を小さくして床表面での日射エクセルギー消費を小さくすることは、床表面から放たれる冷エクセルギーを大きくし、冷房効果を高める上で重要であることを示している。

6. まとめ

本研究では、井戸水を利用する天井放射冷房システムを備えた住宅を対象に、夏期の温熱環境およびポンプ電力消費に関する実測を行ない、天井放射冷房における井戸水や電力などの資源の投入・利用から廃熱に至る一連のエクセルギー投入・消費過程を明らかにし相互に比較・考察した。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 井戸水利用天井放射冷房システムは、水中ポンプと循環ポンプで電力のエクセルギーを消費することで、冷エクセルギーを持つ井戸水を汲上げ循環させている。井戸水の冷エクセルギーは、一部が三方弁で、一部が天井放射パネルで消費される。これらの消費の結果として天井放射パネル表面からは冷エクセルギーが放射および対流の形で室空間に放たれている。システム内で消費されなかった冷水の冷エクセルギーは、そのまま放流枳に捨てられている。
- 2) 井戸水を汲上げるために水中ポンプで消費される電力のエクセルギーは、天井放射パネルなどでの冷水の冷エクセルギー消費と比べ著しく大きく、かつ、天井放射冷房システム内で最大となっている。
- 3) 天井放射パネルから放たれた放射の冷エクセルギーは、室内表面を冷却する際に消費される。例えば、床表面では、日射が吸収され熱に変わることで日射エクセルギーのほぼすべてが消費され、その結果生じた熱を床表面から除去するため、天井面及び周壁面からの放射の冷エクセルギーの一部が消費される。結局、床表面でのエクセルギー消費は日射によるものが大部分を占めている。このことは、日射遮へいなどを行ない床表面での日射エクセルギー消費を小さくすることは、床表面から放たれる冷エクセルギーを大きくし、放射の冷エクセルギーによる冷房効果を高める上で重要であることを示している。
- 4) 井戸から汲上げた冷水の冷エクセルギーの約半分に相当する冷エクセルギーは、システム内で消費されることなく放流される冷水にともない地中に捨てられている。

謝辞

本論文の大部分は、筆者が当時所属していた東京理科大学理工学部建築学科で行ない、解析の一部はNWO (The Netherlands Organization for Scientific Research) 協力を得てDelft University of Technology, Faculty of Architecture (The Netherlands)で行ないました。また、本論文執筆に際し宿谷昌則教授(武蔵工業大学環境情報学部)に貴重なご意見をいただきました。高橋達氏(福岡工業大学・専任講師)には、放射の冷エクセルギーの流れの方向と消費される場所との関係について数々の助言をいただきました。Elisa C. Boelman氏(デルフト工科大学・講師)には、本論文全般に対するご意見・助言を頂きました。夏期実測およびデータ整理に際し、奈良憲晃さん(当時、東京理科大学理工学部卒論生)に多くのご協力を得ました。記してこれらの方々に謝意を表します。

記号表(式(A1)~(A4)に対応)

A_i	: 面 i (ここでは天井面) の面積 [m^2]
A_j	: 面 j ($j=1,2,\dots,i,\dots,N$) の面積 [m^2]
a_{ji}	: 面 j から放たれ面 i に吸収される放射の割合(放射吸収係数) [-]
C_p	: 水の比熱 [$J/(kg \cdot K)$]
h_{ci}	: 天井表面と室内空気との対流熱伝達率 [$W/(m^2 \cdot K)$]
R_i	: 天井面に入射する日射エネルギー [W/m^2]
s_{grp}	: 天井放射パネルでのエントロピー生成 [W/K]
s_{Ri}	: 日射に伴うエントロピー [$W/(m^2 \cdot K)$]
T_j	: 面 j の表面温度 [K]
T_r	: 室温 [K]
T_{win}	: 天井放射パネルに入る井戸水の温度 [K]
T_{wout}	: 天井放射パネルから出てくる井戸水の温度 [K]
V	: 天井放射パネルに入る(出る)井戸水の流量 [m^3/s]
$\bar{E}_j$ ($\bar{E}_i$)	: 面 j (面 i) の平均放射率 [-]
ρ_w	: 水の比重 [kg/m^3]
σ	: シュテファン・ボルツマン定数 [$W/(m^2 \cdot K^4)$]

参考文献

- 宿谷昌則：温エクセルギーと冷エクセルギーに関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp. 453-454、1996年9月。
- 高橋達、近藤大翼、伊澤康一、宿谷昌則：放射エクセルギーの計算方法、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp. 487~488、2000年9月。
- 武田仁：井戸水利用天井輻射冷暖房システムの研究 その1 システムおよび建物の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、pp. 911-912、1999年9月。
- 武田仁、山本未生：井戸水利用天井輻射冷房に関する研究—快適性と省エネルギー性の検証—、日本建築学会技術報告集 第11号、pp. 139~144、2000年12月。
- 浅田秀男、宿谷昌則：昼光照明のエントロピー・エクセルギー解析、日本建築学会計画系論文集 第461号、pp. 43~50、1994年7月。
- 宿谷昌則：外壁外表面のエントロピー・エクセルギー収支、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp. 429~430、1994年9月。
- 高橋達、近藤大翼、伊澤康一、宿谷昌則：放射エクセルギーの計算方法、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp. 487~488、2000年9月。
- 宿谷昌則：光と熱の建築環境学、丸善、pp. 90~100、1993年。
- 近藤大翼、小溝隆裕、伊澤康一、湯沢映子、高橋達、宿谷昌則：住宅の放射冷房に関する実測とエクセルギー解析、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp. 489~490、2000年9月。
- 森一顕、伊澤康一、直井隆行、高橋達、宿谷昌則：放射冷房パネルによる採冷の研究(その1. パネルの自作と実測結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、pp. 457~458、2001年9月。
- 宿谷昌則：光と熱の建築環境学、丸善、pp. 90~100、1993年。
- 浅田秀男、武田仁：井戸水を用いる天井放射冷房に関する実測とエクセルギー解析、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、2002年8月。
- H. ASADA, H. TAKEDA: *Thermal Environment and Exergy Analysis of a Ceiling Radiant Cooling System, Sustainable Building 2002, International Conference (Oslo, Norway), No. 651, September 23-25 2002.*

注1) 床表面に入射する日射エクセルギーは、以下のようにして求めた。まず、屋外水平面日射量を宇田川らによる方法で直散分離したのち、太陽高度・方位角の計算値から鉛直面に入射する直達および天空日射を時々刻々求めた。次に、外付け日除けと複層ガラスとを組み合わせた窓面の総合透過率の計算値と、鉛直面に入射する直達および天空日射の計算値とから室内に透過する日射量を求めた。床表面に入射する日射量は、窓面を一樣拡散面と仮定し、窓面と床面との形態係数とから求めた。この日射に含まれるエクセルギーは、文献10)に示した方法を用いて求めた。ただし、窓面の総合透過率を求める際、葦簀の直達および天空日射に対する光学特性は、スラット角60°の水平ブラインドで代用した。これは、葦簀の日射遮へい特性の詳細を求めるのは本研究の主旨外であること、また、このように仮定して求めた日射量の値を用いても、図8から導き出した結論は概ね変わらないと考えるからである。

注2) 周壁面から床面に入射する放射の冷エクセルギーは、以下の様にして求めた。実測対象となった居間では、どの面の平均放射率も0.85~0.9程度である。この場合、放射率を1.0と仮定し、放射吸収係数の代わりに形態係数を用いても、大きな誤差は生じないと考えられる¹¹⁾ので、放射吸収係数の代わりに形態係数を用いて放射に関する伝熱計算を行なうことにした。まず、床表面におけるエネルギー収支式を付録1と同様な方法で導いた。床表面に入るエネルギーは、窓面からの日射、窓面からの長波長放射、天井面および周壁面からの長波長放射である。また、床面から出るエネルギーは、床表面からの長波長放射と、床表面と室内空気との対流による熱伝達、床下空間との伝導による熱伝達成分である。床表面に入射し吸収される日射は注1)の方法を用いて与え、天井面から床面に入射する長波長放射は、天井表面温度と、天井面と床面との形態係数とから求めた。また、床下空間との伝導による熱伝達は、床の熱貫流率(約0.24 W/($m^2 \cdot K$))と床表面温度と床下空間側の表面温度とから求めた。

したがって、床表面におけるエネルギー収支式中では、周壁面からの長波長放射成分のみが未知数なので収支式を解くことで求められる。この長波長放射エネルギーが、天井面・窓面および床面以外の平均表面温度 T_m [K] の周壁面から放射されると仮定して T_m を求めたのち、周壁面からの放射の冷エクセルギーを付録1の(A1)～(A3)と同様な方法で求めた。

付録1

図A1は、天井放射パネルのエネルギーの出入りを模式的に示したものである。簡単の為、天井放射パネルの天井裏側の面は完全に断熱されているとし、アルミ製の放射パネルの熱容量は考えないことにした。まず、天井放射パネルには井戸水 V [m³/s] が温度 T_{win} [K] で入り T_{wout} [K] ($T_{win} < T_{wout}$) で出てくるとすると、エネルギー収支式は以下の様になる。

$$A_i R_i + C_p \rho_w V (T_{win} - T_o) + \sum_{j=1}^N A_j a_{ji} \bar{\epsilon}_j \sigma T_j^4 \\ = C_p \rho_w V (T_{wout} - T_o) + A_i h_{ci} (T_i - T_r) + A_i \bar{\epsilon}_i \sigma T_i^4 \quad (A1)$$

ここで、 A_i ：面 i (天井面) の面積 [m²]、 R_i ：天井面に入射する日射 [W]、 C_p ：水の比熱 [J/(kg·K)]、 ρ_w ：水の比重 [kg/m³]、 V ：井戸水流量 [m³/s]、 A_j ：面 j ($j=1,2,\dots,i,\dots,N$) の面積 [m²]、 a_{ji} ：面 j から放たれ面 i (天井面) に吸収される放射の割合 (=放射吸収係数) [-]、 T_j ：面 j の表面温度 [K]、 σ ：シュテファン・ボルツマン定数 [W/(m²·K⁴)]、 $\bar{\epsilon}_j$ ：周壁面 j の平均放射率 [-]、 T_r ：室温 [K]、 h_{ci} ：天井表面と室内空気との対流熱伝達率 [W/(m²·K)]。

(A1)式左辺第1項は、天井面に入射する日射、第2項が放射パネルに入る井戸水が温度 T_o [K] の環境に対して持っている熱エネルギー、第3項は周壁面から発せられる長波長放射のうち天井表面に入射する成分である。また、右辺第1項は放射パネルから排出される井戸水が温度 T_o [K] の環境に対して持っている熱エネルギー、第2項は放射パネル表面と室空気との対流により伝達される熱エネルギー、第3項は天井面から放たれる長波長放射である。

ところで、文献6) 7) で述べられているようにエクセルギーは、エネルギーや物質が環境に対してどれだけ拡散できるかを示す概念で、環境の温度や濃度を基準にした物理量である。そのため、エクセルギー収支式を導く過程で必要となるエネルギー収支式やエントロピー収支式においても、状態量の項を環境基準にしたかたちに変

図A1 放射パネルのエネルギー収支の模式図

える必要がある。井戸水のもつ熱エネルギー（(A1)式の左辺第2項と右辺第1項）は既に環境温度 T_o 基準の形になっているので、長波長放射エネルギーの項（左辺と右辺の第3項）を環境基準の形にする。まず、(A1)式左辺第3項に放射の相反則（ $A_j a_{ji} \bar{\epsilon}_j = A_i a_{ij} \bar{\epsilon}_i$ ）を適用し整理したのち、(A1)式の両辺に（ $-A_i \bar{\epsilon}_i \sigma T_o^4$ ）を加えて放射エネルギーの項を環境温度 T_o を基準にした形にする⁶⁾。

$$A_i R_i + C_p \rho_w V (T_{win} - T_o) + A_i \bar{\epsilon}_i \sigma \sum_{j=1}^N a_{ij} (T_j^4 - T_o^4) \\ = C_p \rho_w V (T_{wout} - T_o) + A_i h_{ci} (T_i - T_r) + A_i \bar{\epsilon}_i \sigma (T_i^4 - T_o^4) \quad (A2)$$

ここで、(A2)式に現われるそれぞれの温度には $T_{win} < T_{wout} < T_o$ 、また T_j ($j=1,2,\dots,N$) $< T_i < T_r < T_o$ の関係があるので、両辺の温度差の各項はいずれも負である。このことは、井戸水は温度 T_o の環境に対して熱エネルギーが不足した状態、つまり環境と同じ温度の熱を吸収することを、また、放射パネルは温度 T_o の環境に対して放射エネルギーを放つのではなく受け取ることを表している。

(A2)式に対応するエントロピー収支式は、エネルギーの場合と同様に、まず(A1)式に対応するエントロピー収支式を導いた後、両辺に（ $-A_i \bar{\epsilon}_i \sigma \frac{4}{3} T_o^3$ ）を加え放射のエントロピーの項を環境温度 T_o 基準の形する^{6) 7)}。

$$A_i s_{Ri} + C_p \rho_w V \ln \frac{T_{win}}{T_o} + A_i \bar{\epsilon}_i \sigma \frac{4}{3} \sum_{j=1}^N a_{ij} (T_j^3 - T_o^3) + s_{grp} \\ = C_p \rho_w V \ln \frac{T_{wout}}{T_o} + A_i h_{ci} \frac{(T_i - T_r)}{T_i} + A_i \bar{\epsilon}_i \sigma \frac{4}{3} (T_i^3 - T_o^3) \quad (A3)$$

ここで、 s_{Ri} ：日射エントロピー [W/(m²·K)]である⁵⁾。また、(A3)式左辺第4項の s_{grp} [W/K]は、放射パネル表面における放射の吸収によって生成されるエントロピーである。

エクセルギー収支式は、(A2)式から、(A3)式の両辺に T_o を乗じたものを引くことで求められる。

$$A_i \{ R_i - s_{Ri} T_o \} + C_p \rho_w V \left\{ (T_{win} - T_o) - T_o \ln \frac{T_{win}}{T_o} \right\} \\ + A_i \bar{\epsilon}_i \sigma \sum_{j=1}^N a_{ij} \left\{ (T_j^4 - T_o^4) - T_o \frac{4}{3} (T_j^3 - T_o^3) \right\} - s_{grp} \cdot T_o \\ = C_p \rho_w V \left\{ (T_{wout} - T_o) - T_o \ln \frac{T_{wout}}{T_o} \right\} + A_i h_{ci} \frac{(T_i - T_r)(T_i - T_o)}{T_i} \\ + A_i \bar{\epsilon}_i \sigma \left\{ (T_i^4 - T_o^4) - T_o \frac{4}{3} (T_i^3 - T_o^3) \right\} \quad (A4)$$

左辺第4項の ($s_{grp} \cdot T_o$) が天井パネルでのエクセルギー消費の項である。(A4)式左辺第2項と右辺の第1項は、天井放射パネルに入る（出る）井戸水の持つエクセルギーである。 $T_{win} < T_{wout} < T_o$ の場合でも {} 内は正である。これは井戸水が温度 T_o の環境に対して冷エクセルギー（冷やす能力）を持っていることを示している。また同様に、(A4)式左辺第3項と右辺第3項の放射エクセルギーの項は、 T_i と T_j が T_o より小さい場合でも正で、(2)式に示した放射エネルギーの向きが逆となっている。これは、それぞれの面から放射の冷エクセルギー（物を冷やす能力）を持つ放射が放たれていることを示している。

(2002年6月10日原稿受理、2002年11月1日採用決定)