昼光照明のエントロピー・エクセルギー解析

A NUMERICAL ANALYSIS OF ARCHITECTURAL DAYLIGHTING IN TERMS
OF ENTROPY AND EXERGY

浅田 秀男*, 宿谷 昌則**

Hideo ASADA and Masanori SHUKUYA

This paper describes a method to calculate the entropy and exergy associated with architectural daylighting. The purpose for using these concepts is to show explicitly the irreversible energy conversion process of solar radiation incident upon glazing during the course of daylighting, and to provide a global understanding of how a daylighting system works. This method has been tested for a room having a single window with single clear or reflective glazing, each under a clear and an overcast sky. The result indicates that the exergy contained in solar radiation admitted by any daylighting system is first consumed by illuminating the requisite room surfaces while the entropy produced is given off as waste. So-called energy-efficient daylighting systems therefore selectively admit solar exergy to meet the illumination requirements.

keywords : daylighting, exergy, consumption, entropy, disposal

昼光照明、エクセルギー、消費、エントロピー、廃棄

1. 研究目的

太陽エネルギーは、一般にどのような方法で利用しても環境汚染を引き起こすことはないと言われている。このようなことから、建築環境設備の分野においても様々な太陽エネルギー利用技術の研究・開発が行われている。それらの多くは太陽エネルギーの積極的利用による化石エネルギー消費の代替を目標としている。しかし、これらの研究・開発は「エネルギー消費」、「エネルギー利用」の意味がいまひとつ不明瞭なままで行われている。何故なら「エネルギーが消費される」と言うときの「エネルギー」は使えば減るエネルギーを指しているけれども、エネルギー保存則によれば「エネルギー」は形を変えるだけで、その量は常に一定なはずだからである。

減らない「エネルギー」が「消費される」と表現されていることが、「エネルギーが消費される」ことの意味を不明瞭に、また太陽エネルギー利用の意味をも不明瞭にしていると考えられる。このような不明瞭さは、エネルギーの流れをエネルギー保存則に基づく観点からしか見ていないために生じると考えられる。熱学にはエネルギー保存則のみならず、エントロピー増大則という重要な法則がある。エネルギー保存則に加え、エントロピー

増大則をも考慮した観点からエネルギーの流れを見ることにより、「エネルギーが消費される」、「エネルギーを利用する」と一般に言われていることがより総合的に理解できると考える。

以上のことから筆者らは建築環境論に関わる諸理論にエントロピー増大則を考慮すべきであると考えられる。具体的には、建築環境システムのあらゆる活動の源となるものの「資源性」および「消費」を明確に表わすのにエクセルギーを用い、消費の結果生みだされる廃熱・廃物の「廃棄」を視野に入れるためにエントロピーを用いる。このことにより、資源の投入・消費および、消費の結果としての汚染の発生・廃棄という一連の過程が定量的に把握できることになり、既存の様々な建築環境システムが、どのようにして成り立っているか、更には建築環境システムは本来どのようにして成り立たせるべきか等が明確になると考えるからである¹⁾²⁾³⁾。

本報では、太陽エネルギー利用の一方法である昼光照明を対象に、その計算理論にエントロピー・エクセルギー概念を組み込むことを試み、昼光照明システムはいかにして成立しているのかを定量的に明らかにすること

本研究の一部は、1993年度日本建築学会大会（東京）で発表している⁴⁾。

* (株)大林組本店設備部・修士（工学）

** 武蔵工業大学工学部建築学科 助教授・工博

Obayashi Corporation, Mechanical and Engineering Dept., M. Eng. Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.

を目的とした⁹⁾。以下ではまず、昼光照明を行っている室におけるエクセルギーの投入・消費、エントロピーの生成・廃棄の一連の流れを求める計算方法について述べ、次にこの計算方法に基づいた簡単な数値計算を行い、検討した結果について述べる。

2. 日射エネルギーのエントロピー・エクセルギー

太陽エネルギーはその利用目的によって「昼光」や「日射熱」などと表現されることが多いけれども、太陽エネルギーはそもそも可視域を主成分とする放射エネルギーであるから、以下では放射エネルギーという意味で「日射エネルギー」または「日射量」と表記する。

一般に、エクセルギー流 e_x [W/m²] は、エネルギー流 e_n [W/m²] とそれに伴うエントロピー流 s [W/m²K] から次のように表わされる³⁾。

$$e_x = e_n - s \cdot T_0 \quad (1)$$

ここで、 T_0 ：熱の捨て場の温度[K]。日射のエネルギー流は、日射量として容易に与えられるから日射のエントロピー流を求めることができれば(1)式から日射エクセルギー流が求められる。ここでは、日射のエントロピー流の計算にKabelacらの式⁹⁾を用いることにした。法線面直達日射のエントロピー流 s_{DN} [W/m²K] は、

$$s_{DN} = 0.000462 \cdot (I_{DN})^{0.9} \quad (2)$$

ここで、 I_{DN} ：法線面直達日射量[W/m²]。

同様に、水平面天空日射のエントロピー流 s_{dif} [W/m²K] は、

$$s_{dif} = 0.0014 \cdot (I_{SH})^{0.9} \quad (3)$$

ここで、 I_{SH} ：水平面天空日射量[W/m²]。(2),(3)式はPlanckによって導かれた平衡系における黒体放射のエントロピーの式を、非平衡系の放射である日射エネルギーに応用するため、日射の分光分布、天空の放射輝度分布、大気による偏光の影響をいくつかの代表的な天気状態について検討した結果から得られた簡易式である⁹⁾。

図1 法線面直達日射および水平面天空日射のエネルギーとエクセルギーの計算例
(熱の捨て場温度 288 K)

図2 窓面におけるエネルギーの流れ

図1は快晴時を想定して、法線面直達日射および水平面天空日射のエネルギー流とエクセルギー流の関係を求めてみたものである。熱の捨て場の温度は、288 Kで一定と仮定している。横軸は太陽高度、縦軸はエネルギー流とエクセルギー流である。日射エネルギーに対する日射エクセルギーの割合は、直達日射の場合約90%、天空日射の場合約80%である。このことより、日射エネルギーは非常に質の高いエネルギーであることが改めて確認できる。

3. 昼光照明を行っている室におけるエクセルギーの投入・消費とエントロピーの生成・廃棄

エネルギーの移動・形態変化のあるところでエクセルギーが消費され、エントロピーが生成される³⁾。そこで、昼光照明を行っている室において日射エネルギーの移動・形態変化のある各部位におけるエクセルギーの投入・消費ならびにエントロピーの生成・廃棄をまず求め、その結果を総合して室全体におけるエクセルギーの投入・消費過程、エントロピーの生成・廃棄過程を求めることにした。なお簡単のため室温、外気温等は一定であると仮定し、窓ガラスを透過する直達日射は一樣拡散とした。

3-1. 窓における光から熱への形態変化に伴うエントロピー生成

図2は窓面におけるエネルギーの流れを模式的に示したものである。 A_w は窓面積[m²]、 I_{TV} は窓面に入射する全日射量[W/m²]、 τ 、 α 、 ρ はそれぞれ全日射に対する透過率、吸収率、反射率である。 q_i 、 q_o はそれぞれ窓ガラスの内表面熱流、外表面熱流[W/m²]である。いずれも室外側へ向かうものを正としている。 T_o 、 T_g 、 T_r はそれぞれ外気温、ガラス温度、室温[K]である。

窓面では1) 日射エネルギーの吸収により光から熱へ

図3 窓ガラスの日射吸収の際のエントロピー流とエントロピー生成

の形態変化、2) 室内空気から窓ガラスを貫流して外気への熱伝達による熱エネルギーの移動がある。エネルギー保存則より、窓ガラス面におけるエネルギー収支は、

$$\alpha \cdot I_{TV} = q_a \quad (4)$$

ただし、 q_a [W/m²]は日射が窓ガラスに吸収された結果の熱である。図3を参照して、日射エネルギーが温度 T_G [K]のガラスに吸収される際に生成されるエントロピーを s_{gGa} [W/K]と表わすことにすると、窓ガラス面におけるエントロピー収支は、

$$\alpha \cdot s_{TV} \cdot A_w + s_{gGa} = \frac{q_a}{T_G} \cdot A_w \quad (5)$$

ここで、 s_{TV} は鉛直面全日射量に伴うエントロピー流[W/m²K]。 s_{TV} は、付録1の(A.1.1)式から求められる。(5)式の右辺は日射エネルギーがガラスに吸収された後の、即ち日射熱 q_a のエントロピー流である。(4)式、(5)式を整理すると、

$$s_{gGa} = \frac{\alpha \cdot (I_{TV} - s_{TV} \cdot T_G) \cdot A_w}{T_G} \quad (6)$$

(6)式右辺の分子の()内は、ガラス面を熱の捨て場と見なしたときの日射エクセルギーである。

3-2. 窓における熱伝達に伴うエントロピー生成

窓の室内側表面における熱移動に伴うエントロピーの移動と生成を模式的に図4に示す。この熱移動は総合熱伝達率 h_i [W/m²K]を用いることにすれば、

$$q_i = h_i \cdot (T_r - T_G) \quad (7)$$

(7)式で表わされる熱伝達によるエントロピー生成を s_{gi} [W/K]とすれば、(7)式に対応するエントロピー収支式は図4を参照して、

$$\frac{q_i}{T_r} \cdot A_w + s_{gi} = \frac{q_i}{T_G} \cdot A_w \quad (8)$$

図4 窓ガラス室内側表面におけるエントロピー流とエントロピー生成

(7),(8)式を整理すると次式が得られる。

$$s_{gi} = A_w \frac{h_i \cdot (T_r - T_G)^2}{T_r \cdot T_G} \quad (9)$$

以上と同様に T_G [K]の窓ガラス外気側表面と T_o [K]の外気の間には、 q_o [W/m²]の熱移動がある。この熱伝達に伴うエントロピー生成を s_{go} [W/K]とすると、 s_{go} は次式で表わすことができる。

$$s_{go} = A_w \cdot \frac{h_o \cdot (T_G - T_o)^2}{T_G \cdot T_o} \quad (10)$$

ここで、 h_o は外表面総合熱伝達率[W/m²K]である。ただし、(10)式を導くにあたり簡単のために実効放射はないと仮定している。

図5は窓ガラス外気側におけるエントロピーの流れを模式的に示したものである。窓ガラスの内部には日射エネルギーの吸収で生成されたエントロピー（図3の s_{gGa} ）

図5 窓ガラス外気側表面におけるエントロピー流とエントロピー生成

図6 窓ガラス全体におけるエントロピー流とエントロピー生成

よび(6式)と、窓ガラス室内側の熱移動で生成されたエントロピー(図4の s_{gi} および(9式)が流入する。ガラスの温度 T_G [K]は一定としているので、流入エントロピーはガラスに溜まらず熱伝達に伴って外気に廃棄されなければならない。このエントロピー廃棄にも(10式)に示した s_{go} のエントロピー生成が伴い、結局 $\frac{Q_o}{T_o} \cdot A_w$ [W/K]のエントロピーが外気に廃棄される。図6は窓面全体のエントロピーの流れと生成の様子を示したものである。

3.3 エクセルギーの消費

エントロピーの生成は、エクセルギーの消費に比例する³⁾。最終的な熱の捨て場を仮に外気とすれば、窓面での日射吸収による光から熱へのエネルギーの形態変化の際のエクセルギー消費 e_{cGa} [W]は(6式)の両辺に外気温 T_o を乗じることによって求められる。

$$\begin{aligned} e_{cGa} &= T_o \cdot s_{gGa} \\ &= A_w \cdot \alpha \cdot \left(\frac{T_o}{T_G} \right) \cdot (I_{TV} - s_{TV} \cdot T_G) \end{aligned} \quad (11)$$

同様に室内側および外気側の熱伝達によるエクセルギー消費をそれぞれ e_{ci} , e_{co} [W/K]とすると、

$$e_{ci} = T_o \cdot s_{gi} = A_w \cdot \left(\frac{T_o}{T_G} \right) \cdot \frac{h_i \cdot (T_r - T_G)^2}{T_r} \quad (12)$$

$$e_{co} = T_o \cdot s_{go} = A_w \cdot \frac{h_o \cdot (T_G - T_o)^2}{T_G} \quad (13)$$

3.4 室内で生成されるエントロピーおよび消費されるエクセルギー

以上と同様の理論式の展開を行うことにより、窓面を透過し室内に入射する日射 $(\tau \cdot I_{TV}) \cdot A_w$ [W]に含まれる日

射エクセルギーが、室内の各部位で消費されてエントロピーが生成され、廃棄される過程が導ける。ここでは、その概要を説明する。

まず、ここでは窓面を透過する直達日射はすべて一様拡散するとしたので、直達日射が透過の際に拡散し、方向性を失うことによりエントロピーが生成(エクセルギーが消費)される。このときのエントロピー生成 s_{gGr} [W/K]、およびエクセルギー消費 e_{cGr} [W]は付録2の(A.2.1), (A.2.2)式より求められる。

次に、室内に入射した日射のうち照明という目的に寄与する成分を R_{sf} [W]とすると、 R_{sf} は図7に示すように窓面から直接受照面に入射する直接成分と、室内表面で相互反射したのち受照面に入射する間接成分の和となる。一方、相互反射の過程で室内の壁体に吸収される日射 R_m [W]は、照明にまったく寄与することなく熱 H_m [W]になる。 R_m [W]は、

$$R_m = H_m = (\tau \cdot I_{TV}) \cdot A_w - R_{sf} \quad (14)$$

この日射吸収による光から熱への形態変化を「室内表面第一次吸収」と表現すると、この現象によるエントロピー生成 s_{gm} [W/K]およびエクセルギー消費 e_{cm} [W]は付録2の(A.2.3), (A.2.4)式から求められる。

照明として寄与した日射 R_{sf} [W]も、最終的には室内の壁体に吸収され熱 H_{sf} [W]に形態変化する。これを「室内表面最終的吸収」と表現すると、この現象によるエントロピー生成 s_{sf} [W/K]およびエクセルギー消費 e_{cf} [W]は付録2の(A.2.5), (A.2.6)式より求められる。壁体に吸収された熱のエネルギー $H_m + H_{sf} (= (\tau \cdot I_{TV}) \cdot A_w)$ [W]は、壁体に溜まることなく熱伝達によって室内空気に伝わり、壁体の温度 T_m [K]は一定で定常状態とすると、このときのエントロピー生成 s_{gr} [W/K]およびエクセルギー消費 e_{cr} [W]は付録2の(A.2.7), (A.2.8)式から求められる。

冷房により室内から除去される熱を H_e [W]とすると、室内空気のエネルギー収支より、

図7 窓透過日射の受照面に入射する成分と壁体に吸収される成分

$$H_m + H_{SF} = h_i \cdot (T_r - T_G) \cdot A_w + H_E \quad (15)$$

H_E [W]の熱が温度 T_r [K]の室内から、温度 T_G [K]の外気に廃棄される際のエントロピー生成 s_{gH} [W/K]、エクセルギー消費 e_{cH} [W]は付録2の(A.2.9), (A.2.10)式から求められる。ただし、冷房設備の運転のためのエクセルギーの投入と消費、エントロピーの生成と廃棄の評価についてはここでは論じないことにする。

窓面で反射した日射エネルギー $(\rho \cdot I_{TV}) \cdot A_w$ [W]は、地表面などに吸収され結局は熱になり、熱伝達によって外気に伝わる。このときの日射吸収による光から熱への形態変化の際にもエントロピー生成 $s_{gG\rho}$ [W/K]およびエクセルギー消費 $e_{cG\rho}$ [W]がある。それらは付録2の(A.2.11), (A.2.12)式から求められる。

以上より、窓面に入射する日射 $(I_{TV} \cdot A_w)$ [W]による全エントロピー生成 s_{gU} [W/K]は、上記のエントロピー生成をすべて合計したものとなる。

$$s_{gU} = s_{gGr} + s_{gGa} + s_{gG\rho} + s_{gm} + s_{gF} + s_{gH} \quad (16)$$

(16)式に建物各部分におけるエネルギー収支式を代入して整理すると、次式が得られる。

$$s_{gU} = \frac{(I_{TV} - s_{TV} \cdot T_G) \cdot A_w}{T_G} \quad (17)$$

(17)式の右辺の分子は、温度 T_G [K]の外気を熱の捨て場とした場合の窓面に入射する日射エクセルギーそのものである。つまり、(17)式は窓面に入射する日射エクセルギーは最終的にすべて消費され、エントロピーになってしまうことを示している。

4 計算例と考察

計算対象とした室は間口と奥行きが共に5m、天井高が2.6m、窓面積が8.5m²、天井・壁・床の反射率がそれぞれ

0.5、0.3、0.1の室である。外気温は10℃、窓以外の部分は完全に断熱されており室温は20℃に保たれているとした。また、以下では簡単のため室内の壁体表面温 T_m と空気温 T_r が等しくなるよう理想的に冷房が行われているとした。

4-1. エクセルギーの投入とその消費

図8は日射エクセルギーが消費されてゆく過程を具体的に計算した結果の一例である。横軸はエクセルギーが消費される部位と起きている現象を表わし、横軸右方向が現象の起こる方向である。縦軸はエクセルギー流[W]である。横軸の各項目に対応して縦軸で階段状となっている部分が、それぞれの現象によって消費されるエクセルギーである。

窓面には1530 Wの日射エネルギーが入射している。これは、鉛直面直達日射が100 W/m²、鉛直面天空日射が80 W/m²を想定した場合で、水平面全日射量が218 W/m²の曇天時に相当する。縦軸左端に矢印で示した部分は窓面に入射する日射エクセルギーで、この場合約1300 Wである。ここでは、窓ガラスの透過率を透明ガラスと同等なものとしているので、ガラスを透過する成分が大きく、吸収および反射される成分は小さい。そのため、窓面に入射する日射エクセルギーの約70%が光として室内に透過する。室内平均照度は約1600 lxである。また窓面に入射した日射エネルギーは、3-4.に述べた「室内表面 最終的吸収」という現象によって、すべて室温と同じ温度の熱に形態変化する。その結果、はじめに持っていたエクセルギーの約97%が消費される。つまり、室温と同じ温度の熱となった1530 Wの日射熱の持つエクセルギーは、窓面に入射した日射エクセルギーの約3%である。この3%分のエクセルギーも、結局伝熱によってすべて消

図8 昼光照明を行っている室におけるエクセルギー消費

図9 昼光照明を行っている室におけるエントロピー生成

図10 窓ガラスの日射吸収に伴うエントロピー流とエントロピー生成

費される。図8の右端に矢印で示した部分は、最終的に消費される全エクセルギーである。これは、窓面に入射する日射エクセルギーと等しい。

4-2. エントロピー生成とその廃棄

図9は、図8のエクセルギー消費過程に対応するエントロピー生成過程である。横軸はエントロピーが生成される部位と起きている現象で、横軸右方向が現象の起こる方向である。縦軸はエントロピー流[W/K]である。横軸の各項目に対応して縦軸で階段状となっている部分が、それぞれの現象によって生成されるエントロピーである。図10は、図3に示した窓面における日射吸収に伴うエントロピー生成の具体的な数値を示したものである。窓面には0.8 W/Kのエントロピーが入射している。そのうち0.1 W/Kは窓ガラスで反射され、0.65 W/Kは透過する。残りの0.05 W/Kは窓ガラスに吸収されるエントロピー流であり、吸収という現象により0.45 W/Kのエントロピーが生成され合計0.5 W/Kのエントロピー流がガラス内部に入ることになる。図9の「窓 吸収」の項の右側のエントロピー流は、図10に示したエントロピー流0.1, 0.5, 0.65 W/Kの和1.25 W/Kである。ここではガラスの温度を一定としているので、生成されるエントロピーはガラス内に溜まらずにすべて外気に捨てられなければならない。以上のようなエントロピーの廃棄は窓ガラスだけでなく室の各部位で行われ、結局図9の右側に矢印で示した部分のエントロピーが外気に廃棄される。室温を20℃に保ちつつ、昼光照明を行うためには図8に示した日射エクセルギーの投入・消費と同時に、図9の右側に矢印で示したエントロピーの廃棄が常に行われなければならない。

4-3. 透明ガラスと熱線反射ガラスの比較

図11は透明ガラスおよび熱線反射ガラスのある室におけるエクセルギー消費過程を示したものである。なお、ここでは晴天時を想定し、窓面には直達日射が500 W/

図11 透明ガラスと熱線反射ガラスのエクセルギー消費過程

m²、天空日射が50 W/m²、窓面全体で4675 Wの日射エネルギーが入射しているとした。また、透明ガラスおよび熱線反射ガラスのいずれの場合も、簡単のため透過した直達日射は一樣拡散すると仮定した。透明ガラスの場合、ガラスの透過率が高いため窓面で消費されるエクセルギーが小さく、室内に透過するエクセルギーが大きくなり、室内の平均照度は4878 lxと高くなっている。室内の光環境は良好ではないと考えられる。

一方、熱線反射ガラスの場合、ガラスの透過率が低く吸収率が高いため窓面で消費されるエクセルギーが大きくなっている。そのため、室内には照明に必要な約1000 Wの日射エクセルギーだけが入射することになり、室内平均照度は約1400 lxとほぼ適切な照度が得られることになる。この約1000 Wというエクセルギーの値は、図8に示した曇天時の場合とほぼ同じである。つまり日射が多い日の場合、熱線反射ガラスは余分な日射エクセルギーを窓面で積極的に消費させるので、室内の光環境を損ねることなく昼光照明を行うことができることを意味する。透明ガラスのある室と熱線反射ガラスのある室の双方に投入される日射エクセルギーと、最終的に消費されるエクセルギーは等しい。このことから、適切な昼光照明とは、日射エクセルギーが最終的にすべて消費されるまでの消費の過程を照明という目的に合うような過程に積極的に変えることだと言える。

5. 結論

昼光照明システムの計算理論にエントロピーとエクセルギーの概念を組み込むことを試み、簡単な数値計算例を挙げて考察を行った。その結果をまとめると、

- 1) 日射エネルギーの中に含まれるエクセルギー（日射エクセルギー）は、直達日射の場合その約90%、天空日射の場合その約80%である。

- 2) エントロピー・エクセルギーを用いることにより、日射エネルギーの光から熱への不可逆的なエネルギー変換過程を定量的に示すことができた。
- 3) 昼光照明は日射エクセルギーが室内に投入され、そのすべてが消費され、消費の結果生成されるエントロピーが周囲の環境に廃棄されることによって成立していることを具体的に示すことができた。
- 4) 透明ガラスの場合、窓面に入射する日射エクセルギーの約70%は、室内の照明用光源としてのポテンシャルを持っている。しかしながら、このエクセルギーも日射エネルギーが室内で常温付近の熱に形態変化する過程で、そのほとんどが消費される。
- 5) 適切な昼光照明とは、日射エクセルギーが最終的にすべて消費されるまでの消費の過程を照明という目的に合うような過程に積極的に変えることである。

付録1

鉛直窓面に入射する全日射エネルギーに伴うエントロピー流 s_{TV} [W/m²K]は、

$$s_{TV} = s_{DN} \cdot \cos \theta_i + 0.5 s_{dy} + 0.5 s_{RH} \quad (\text{A.1.1})$$

s_{DN} は(2)式、 s_{dy} は(3)式より求められる。また、 s_{RH} は地表面反射日射のエントロピー流であり、(3)式で I_{SH} の代わりに地表面反射日射量を代入して求めることにした。 θ_i は直達日射の窓面に対する入射角[rad]。

付録2

窓面に入射する直達日射($I_{DV} \cdot A_w$) [W]が、窓ガラスで拡散透過する際に生成されるエントロピー $s_{G\alpha}$ [W/K]は、拡散した後日射のエントロピー流の計算に(3)式を用いることにすると、

$$s_{G\alpha} = \left\{ 0.0014 \cdot (\tau_{D\theta_i} \cdot I_{DV})^{0.9} - \tau_{D\theta_i} \cdot s_{DN} \right\} \cdot A_w \quad (\text{A.2.1})$$

ここで、

$\tau_D(\theta_i)$: 窓ガラスの直達日射に対する透過率[-]

I_{DV} : 窓面に入射する直達日射[W/m²]

また、消費されるエクセルギー $e_{G\alpha}$ [W]は、

$$e_{G\alpha} = T_o \cdot s_{G\alpha} \quad (\text{A.2.2})$$

照明に全く寄与されことなく壁に吸収される日射 R_m [W]が、熱 H_m [W]に形態変化する際のエントロピー生成 s_{gm} [W/K]および、エクセルギー消費 e_{cm} [W]は、

$$s_{gm} = \frac{H_m}{T_m} - \frac{R_m}{(\tau \cdot I_{TV}) \cdot A_w} \cdot ((\tau \cdot s_{TV}) \cdot A_w + s_{G\alpha}) \quad (\text{A.2.3})$$

$$e_{cm} = T_o \cdot s_{gm} \quad (\text{A.2.4})$$

ここで、 T_m : 壁体の平均表面温[K]。

一方、室内で照明に寄与した成分 R_{SF} が壁体に吸収され熱 H_{SF} [W]になる際のエントロピー生成 s_{SF} [W/K]およびエクセルギー消費 e_{SF} [W]は、

$$s_{SF} = \frac{H_{SF}}{T_m} - \frac{R_{SF}}{(\tau \cdot I_{TV}) \cdot A_w} \cdot ((\tau \cdot s_{TV}) \cdot A_w + s_{G\alpha}) \quad (\text{A.2.5})$$

$$e_{SF} = T_o \cdot s_{SF} \quad (\text{A.2.6})$$

壁体に吸収される日射エネルギー $(\tau \cdot I_{TV}) \cdot A_w (= R_m + R_{SF})$ が熱 $H_m + H_{SF}$ となり、室内空気に伝わる際のエントロピー生成 s_{gr} [W/K]およびエクセルギー消費 e_{gr} [W]は、

$$s_{gr} = \frac{h_i \cdot (T_m - T_r) \cdot A_r}{T_r} - \frac{h_i \cdot (T_m - T_r) \cdot A_r}{T_m} \\ = \frac{h_i \cdot (T_m - T_r)^2}{T_m \cdot T_r} \quad (\text{A.2.7})$$

$$e_{gr} = T_o \cdot s_{gr} \quad (\text{A.2.8})$$

ここで、 A_r : 室内の全表面積[m²]。

冷房による除去熱量 H_E [W]が温度 T_r [K]の室内から温度 T_o [K]の外気へ伝達される際のエントロピー生成 s_{gH} [W/K]、エクセルギー消費 e_{gH} [W]は、

$$s_{gH} = \frac{H_E}{T_o} - \frac{H_E}{T_r} \quad (\text{A.2.9})$$

$$e_{gH} = T_o \cdot s_{gH} \quad (\text{A.2.10})$$

冷房装置の運転によるエクセルギー消費がなければ、上記の H_E を室内から外気へ運ぶことはできないけれども、それについてはここでは論じないことにする。

窓面で反射する日射エネルギー $(\rho \cdot I_{TV}) \cdot A_w$ [W]は、地表面などに吸収され熱になり熱伝達によって外気に伝わる。このときの日射吸収により光から、温度 T_o [K]の熱への形態変化の際のエントロピー生成 $s_{g\phi}$ [W/K]およびエクセルギー消費 $e_{g\phi}$ [W]は、

$$s_{g\phi} = \frac{(\rho \cdot I_{TV}) \cdot A_w}{T_o} - (\rho \cdot s_{TV}) \cdot A_w \quad (\text{A.2.11})$$

$$e_{g\phi} = T_o \cdot s_{g\phi} \quad (\text{A.2.12})$$

記号表

A_r	: 室内の全表面積[m ²]
A_w	: 窓面積[m ²]
e_i	: エクセルギー流[W/m ²]
e_n	: エネルギー流[W/m ²]
$e_{G\alpha}$	: ガラスの日射吸収に伴うエクセルギー消費[W]
e_{ci}, e_{co}	: 窓ガラスの室内側および外気側の熱伝達によるエクセルギー消費[W/K]
$e_{G\alpha}$	: 窓ガラスで日射が拡散透過する際のエクセルギー消費[W]
$e_{G\phi}$	: 窓ガラスで反射する日射が熱になる際のエクセルギー消費[W]
e_{cf}	: 日射が室内表面で最終的に吸収される際のエクセルギー消費[W]
e_{cH}	: 室内の熱除去の際のエクセルギー消費[W]
e_{cm}	: 日射が室内表面で第一次吸収される際のエクセルギー消費[W]
e_{cr}	: 壁体内の熱が室内空気に流れる際のエクセルギー消費[W]
H_E	: 冷暖房により室内から除去される熱[W]
h_i, h_o	: 窓ガラス室内側および外気側の総合熱伝達率[W/m ² K]
I_{DN}	: 法線面直達日射量[W/m ²]
I_{DV}	: 鉛直窓面に入射する直達日射量[W/m ²]
I_{SH}	: 水平面天空日射量[W/m ²]
I_{TV}	: 鉛直面に入射する全日射量[W/m ²]
q_a	: 窓ガラスに吸収された日射熱[W/m ²]
q_i, q_o	: 窓ガラスの室内側および外気側の熱伝達によって移動するエネルギー[W/m ²]
H_m	: 室内に入射した日射エネルギーの一部が、照明に寄与せずに壁体に吸収された結果の熱[W]

H_{SF} : 照明に寄与した日射エネルギーが壁体に吸収された結果の熱[W]
 R_m : 照明に寄与することなく壁内表面に吸収される日射エネルギー[W/m²]
 R_{SF} : 照明に寄与する日射エネルギー[W/m²]
 s : エントロピー流 [W/m²K]
 s_{DN} : 法線面直達日射エントロピー流[W/m²K]
 s_{dif} : 水平面天空日射エントロピー流 [W/m²K]
 s_{RH} : 水平面に入射する地表面反射日射エントロピー流 [W/m²K]
 s_{TV} : 鉛直面全日射量に伴うエントロピー流[W/m²K]
 s_{Ga} : ガラス内の日射吸収に伴うエントロピー生成 [W/K]
 s_{GF} : 日射が室内表面で最終的に吸収される際のエントロピー生成 [W/K]
 $s_{G\tau}$: 窓ガラスで日射が拡散透過する際のエントロピー生成 [W/K]
 s_{GP} : 窓ガラスで反射する日射が熱になる際のエントロピー生成 [W/K]
 s_{gi}, s_{go} : 窓ガラスの室内側および外気側の熱伝達によるエントロピー生成[W/K]
 s_{gH} : 室内の熱除去の際のエントロピー生成[W/K]
 s_{gm} : 日射が室内表面で第一次吸収される際のエントロピー生成[W/K]
 s_{gr} : 壁体内の熱が室内空気に流れる際のエントロピー生成[W/K]
 s_{gu} : 窓面に入射する日射による全エントロピー生成 [W/K]
 T_o, T_g, T_r : 外気、窓ガラス、室内空気の温度[K]
 T_m : 壁体の平均表面温度[K]
 θ_i : 直達日射の窓面に対する入射角[rad]
 $\tau_D(\theta_i)$: 窓ガラスの直達日射に対する透過率[-]
 τ, α, ρ : 窓ガラスの全日射に対する透過率、吸収率、反射率[-]

参考文献

- 1) 宿谷昌則；建築環境システムとエントロピー・エクセルギー（その1.建築環境システムの持続可能性）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.49-50、1993年。
- 2) 宿谷昌則；エントロピー・エクセルギー概念の建築環境論への応用とその課題、空気調和衛生工学会学術講演論文集、pp.265-268、1993年。
- 3) 宿谷昌則；光と熱の建築環境学、丸善、pp.235-269、1993年。
- 4) 浅田秀男、宿谷昌則；建築環境システムとエントロピー・エクセルギー（その2.照明システム成立のメカニズム）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.51-52、1993年。
- 5) Kabelac, S. and Drake, F.-D. ; THE ENTROPY OF TERRESTRIAL SOLAR RADIATION, Solar Energy, Vol.48, No.4, pp.239-248, 1992.

(1993年9月30日原稿受理、1994年4月20日採用決定)