

発電システムを備えた省エネルギー住宅の エクセルギー経済評価（その1）

－エクセルギー負荷とエクセルギー単価の算出方法－

Exergoeconomic Evaluation of Low Energy Houses Equipped with Electric Generation Systems (Part 1)

－Calculation Method of Exergy Load and Specific Exergy Cost－

太田 勇 *1
Isamu OHTA

長野 克則 *2
Katsunori NAGANO

Abstract

Although energy performance or energy cost performance of a house is usually evaluated by amount of energy flow, amount of energy flow only expresses limited aspect of the performance. Not only gross but also quality of energy load in a house varies. Energy supplied for each load also varies such as electricity, gas and oil. Annual energy flow of a house can be reduced with high performance housing design and equipments. It can also be reduced by utilizing photo voltaic system, solar hot water system or co-generation system. Since each item is designed for different energy load or different energy quality, energy performance of a house should be evaluated by an index that considers quality of the energy. Taking into account qualitative aspects of energy leads to introduction of the concept of exergy. Exergy is energy that is entirely convertible into other types of energy. Electricity or mechanical workload consists of pure exergy. On the other hand heat close to room air temperature is low valued energy. Exergy, not energy, is consumed while energy is conserved according to the first law of thermodynamics. In that sense, energy cost performance of a house may be better expressed by exergy consumption versus economical cost. Exergoeconomics, an exergy based economics mainly used in chemical plants or energy conversion processes, may be effective to evaluate energy performance of a house. Calculation methods of exergy loads for every usage are shown in this paper, part 1.

キーワード：省エネルギー住宅、エクセルギー、太陽光発電、コージェネレーション、環境評価、コスト評価

Key Words : Low energy house, Exergy, Photo Voltaic system, Co-generation, Environmental evaluation, Cost evaluation

はじめに

化石燃料の減少、地球温暖化、環境汚染などの防止策としてエネルギー有効利用の必要性が指摘され、住宅分野において多くの「省エネルギー住宅」が開発されてきた。「省エネルギー」は、使用するエネルギーの量を削減することは意図しているが、そのエネルギーが質的に有効利用されているのかという観点では必ずしも論じられていない。

エネルギーの質を表す概念として、エクセルギーがある。エクセルギーは、有効エネルギーとも呼ばれ、与えられた周囲環境のもと

で任意のエネルギー形態に変換できるエネルギーを表す⁽¹⁾。例えば、環境の絶対温度 T_o において、絶対温度 T の熱源から得られる \dot{q}_H の熱（エネルギー）から機械的仕事に変換できる最大値 \dot{Ex} と、変換できない部分 \dot{Ea} とは、

$$\begin{aligned} \dot{q}_H &= \dot{Ex} + \dot{Ea} = \eta_c \cdot \dot{q}_H + (1 - \eta_c) \cdot \dot{q}_H = \\ &= \frac{T - T_o}{T} \cdot \dot{q}_H + \frac{T_o}{T} \cdot \dot{q}_H = \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) \cdot \dot{q}_H + T_o \cdot \dot{S}_H \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられる。 \dot{Ex} は熱エネルギー \dot{q}_H に対するエクセルギーであり、 η_c は有効比あるいはカルノー効率と呼ばれる。機械的仕事や電気エネルギーはそのままエクセルギーであるが、熱エネ

*1 (株)ミサワホーム総合研究所 研究員 (〒168-0071 東京都杉並区高井戸西1-1-19) e-mail:isamu_Ohta@home.misawa.co.jp

*2 北海道大学大学院教授
(原稿受付: 2007年4月11日)

ルギーに含まれるエクセルギーは、(1)式からも明らかのように限られた割合でしかなく、特に環境温度に近い温度の熱エネルギーに含まれるエクセルギーの割合は小さく、質の低いエネルギーである。エネルギーの中で、任意のエネルギー形態に変換できない部分は無効エネルギーと呼ばれ、エントロピー $S_H = (q_H / T)$ と環境の絶対温度 T_0 の積として表せる⁽¹⁾。

建築物の運用時のエネルギー需要には、暖房、冷房、給湯、厨房、照明・家電機器等電力などがあり、いずれも質の異なるエネルギーを必要としている。質の異なるエネルギー需要に対して、どのようなエネルギー供給、エネルギー変換が望ましいのか、については多くの既往研究がある。浅田らは、星光照明・電灯照明・暖冷房機器を一連の建築環境システムと捉え、システム全体の年間エクセルギー消費を求める、地域に応じて窓面積、ブラインド利用方法、電灯調光の有無が発電所におけるエクセルギー消費の削減につながることを示した^{(2), (3)}。森花らは、鉄筋コンクリートの生産時と運用時のエクセルギー消費を評価し、資源の有効利用を検討する上で建築部材の工夫が大きく影響することを示した⁽⁴⁾。海外においても建築物のエクセルギー評価を行った事例はある。Schmidtは、部位ごとの暖房エクセルギー負荷と、室温を維持するためのエクセルギー供給量を供給源別に表した⁽⁵⁾。Vossらは、住宅におけるエネルギー負荷に電力負荷が占める割合が大きいのに対して、太陽熱の蓄熱で得られるのは熱エネルギーであることに着目し、水素貯蔵と燃料電池を組み合わせた自立型ソーラー住宅の提案と実測を行った⁽⁶⁾。Rosenらは、地域暖冷房にコーチェネレーションシステムを用いた場合の評価にエクセルギー概念が有効であることを示した⁽⁷⁾。

エネルギーは本来保存されるものであり、消費されるのはエネルギーに含まれるエクセルギーである。従って、消費されるエクセルギーとそれに対する経済的コストの関係を明らかにすると、現象や問題点を評価しやすい場合がある。化学プラントやエネルギー変換システムにおいて、エネルギーを投入してから、いくつもの工程を経て製品を産み出す過程において、どの工程でエクセルギーの損失が大きいか、つまり改善の余地があるのか、という観点で評価する手法として、エクセルギー経済学(Exergoeconomics)がある。Tsatsaronis⁽⁸⁾は、化学プラントにおける製品の評価だけでなく、プラントの開発段階を含めた評価にエクセルギー経済学を導入し、この分野の発展に大きく寄与した。建築分野におけるエクセルギー経済の利用では、Ucarら⁽⁹⁾や、Ozgenerら⁽¹⁰⁾による太陽熱利用暖房システム評価がある。システムを構成するサブシステムごとのインシャルコストとエクセルギー消費には相関があるものの、エネルギーとの相関は少なく、より良いシステム設計を行うにはエクセルギーとコストの関係を明らかにすることが望ましいことを示した。

このように、エネルギーシステムの評価を行う際にエクセルギーを指標とすることの重要性が認知されるようになり、建築の分野においても利用され始めているが、省エネルギー住宅の総合的な評価

にエクセルギー経済評価を用いた例はない。太陽光発電に代表される、いわゆる自然エネルギー設備や、ガス・灯油を利用して熱と電気を供給するコーチェネレーションシステムが住宅にも採用され始めており、エネルギーの質を考慮したエクセルギー経済評価を用いることで、より適切な評価につながると考えられる。

本論文(その1)でははじめに、住宅の暖房、冷房、給湯、厨房、照明・家電機器等電力の各用途負荷に対し、エネルギーの質を考慮した負荷(エクセルギー負荷)を求める基礎式をまとめる。続いて、各エクセルギー負荷に対するエネルギーコスト(エクセルギー単価)の求め方を示すことで、質を考慮した住宅のエネルギー需要に対する経済性評価指標を提案する。

1. 住宅の用途別エクセルギー負荷

1.1 暖冷房エクセルギー負荷(表面熱伝達)

室内温度 T_r と外壁室内側表面温度 T_{sur} が異なる時、外壁室内側表面では熱伝達 q_{co} の熱量が出入りする。外壁室内側表面を境界とした室内を考えた場合、室内温度を T_r に維持するためには、 q_{co} に相当する熱量 q_{ci} を暖冷房で供給することで收支が保たれるため、室内のエネルギー収支は以下のようになる。

$$\dot{q}_{ci}(t) = \dot{q}_{co}(t) \quad (2)$$

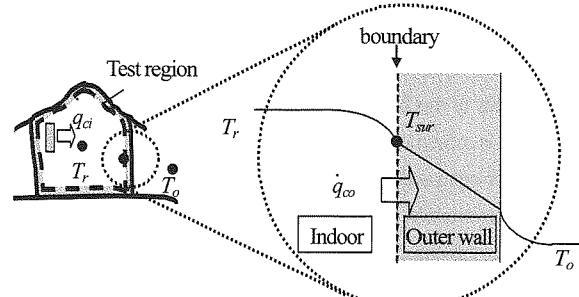


Fig.1 Heat flow at outer wall

外壁での熱の出入り q_{co} は熱伝達率 h を用いて以下のように記述できる(室内から外壁室内側表面に流れる熱流の方向を正とする。 $T_r > T_{sur}$ の時、 $q_{co} > 0$)。

$$\dot{q}_{co}(t) = h \cdot (T_r(t) - T_{sur}(t)) \quad (3)$$

q_{co} は、室内温度を T_r に維持するための熱伝達エネルギー負荷である。従って、伝達に伴うエクセルギー負荷も外壁室内側表面を境界面として算出することを念頭に、以下、エントロピー収支、エクセルギー収支を導く。伝達負荷を満たすために暖冷房することによるエントロピー収支は下式のように記述できる。

$$\dot{S}_{ci}(t) + \Delta \dot{S}_c(t) = \dot{S}_{co}(t) \quad (4)$$

熱伝達や熱伝導などの熱移動に伴うエントロピーの移動量は、移動熱量を境界面の絶対温度で割ったものと定義される⁽¹⁾ため、上式は以下のように表される。

$$\dot{S}_{ci}(t) + \Delta\dot{S}_c(t) = \frac{h \cdot (T_r(t) - T_{sur}(t))}{T_{sur}(t)} \quad (5)$$

次に、伝達負荷を満たす暖冷房によって室内に入るエクセルギーを \dot{Ex}_{ci} 、室内で消費されるエクセルギーを $\Delta\dot{Ex}_c$ 、外壁室内側表面を出るエクセルギーを \dot{Ex}_{co} とするとき、エクセルギー収支は、下式のように記述できる。

$$\dot{Ex}_{ci}(t) - \Delta\dot{Ex}_c(t) = \dot{Ex}_{co}(t) \quad (6)$$

エクセルギーは、エネルギーから無効部分(環境温度×エントロピー)を差し引いたものと定義される⁽¹⁾ため、上式右辺は以下のように記述できる。なお、環境温度には外気温度 $T_o(t)$ を用いた。

$$\dot{Ex}_{co}(t) = \dot{q}_{co}(t) - T_o(t) \cdot \dot{S}_{co}(t)$$

$$= h \cdot (T_r(t) - T_{sur}(t)) \cdot \left(1 - \frac{T_o(t)}{T_{sur}(t)}\right) \quad (7)$$

\dot{Ex}_{co} のエクセルギー流によって、室温は上昇または下降することになり、室温を T_r に維持するためには最低限このエクセルギー流に見合うエクセルギー流を供給する必要がある。伝達に伴う暖冷房熱負荷は、室温と各部位の表面温度によって決まるが、伝達エクセルギー負荷は、さらに環境温度(外気温度)にも関係する。環境温度 T_o 、室温 T_r 、表面温度 T_{sur} に伴う外壁室内側表面の熱流、エクセルギー流、及び負荷の関係は、Fig.2、Table.1、2のようになる。

熱は常に高温部から低温部に向かって流れるが、エクセルギーは環境温度に向かって流れると表現される⁽¹⁾。例えば、 $T_r < T_{sur} < T_o$ の時(図及び表中の①)、外壁室内側表面では「冷エクセルギー」が流出している。 $T_o < T_{sur} < T_r$ の時(図及び表中の②)、外壁室内側表面では「温エクセルギー」が流出している。 $T_r < T_o < T_{sur}$ あるいは $T_o < T_r < T_{sur}$ の時(図及び表中の③、④)、外壁室内側表面では「温エクセルギー」が流入している。 $T_{sur} < T_r < T_o$ あるいは $T_{sur} < T_o < T_r$ の時(図及び表中の⑤、⑥)、外壁室内側表面では「冷エクセルギー」が流入している。それぞれ、環境に対して「冷」または「温」なポテンシャルを持ったエクセルギーの流入流出を意味している。このエクセルギー流の符号はエクセルギー流の方向を示し、熱流同様室内から外壁室内側表面に向かって流れる方向が正である。一方、このエクセルギー流が暖冷房に対して負荷を増加させるものか、減少させるものかは、そのエクセルギー流の方向だけでなく「冷」、「温」

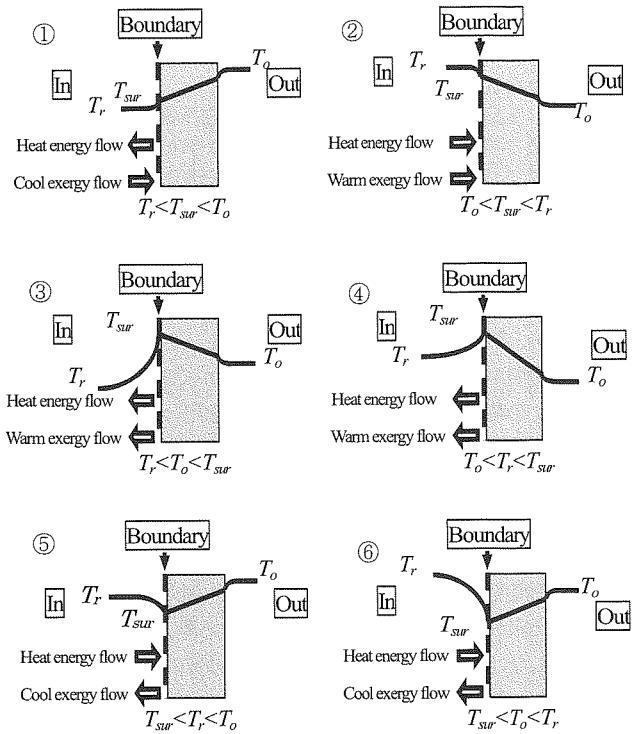


Fig.2 Correlation of heat flow and exergy flow at wall surface

Table.1 Heat flow and exergy flow in relation to outdoor air, indoor surface and indoor air temperature (Wall surface, cooling period)

	Temperature correlation	\dot{q}_{co}	$1 - \frac{T_o(t)}{T_{sur}(t)}$	Expression of Exergy flow	Exergy load (Cooling)
①	$T_r < T_{sur} < T_o$	—	—	Outlet of cool exergy	Increase
②	$T_o < T_{sur} < T_r$	+	+	Outlet of warm exergy	Decrease
③	$T_r < T_o < T_{sur}$	—	+	Inlet of warm exergy	Increase
④	$T_o < T_r < T_{sur}$	—	+	Inlet of warm exergy	Increase
⑤	$T_{sur} < T_r < T_o$	+	—	Inlet of cool exergy	Decrease
⑥	$T_{sur} < T_o < T_r$	+	—	Inlet of cool exergy	Decrease

Table.2 Heat flow and exergy flow in relation to outdoor air, indoor surface and indoor air temperature (Wall surface, heating period)

	Temperature Correlation	\dot{q}_{co}	$1 - \frac{T_o(t)}{T_{sur}(t)}$	Expression of Exergy flow	Exergy load (Heating)
①	$T_r < T_{sur} < T_o$	—	—	Outlet of cool exergy	Decrease
②	$T_o < T_{sur} < T_r$	+	+	Outlet of warm exergy	Increase
③	$T_r < T_o < T_{sur}$	—	+	Inlet of warm exergy	Decrease
④	$T_o < T_r < T_{sur}$	—	+	Inlet of warm exergy	Decrease
⑤	$T_{sur} < T_r < T_o$	+	—	Inlet of cool exergy	Increase
⑥	$T_{sur} < T_o < T_r$	+	—	Inlet of cool exergy	Increase

のポテンシャルにも関係する。伝達エクセルギー流を暖冷房に対する負荷として表す場合には以下の式で表現され、Table.1、Table.2 に示す関係となる。

$$\dot{E}_{Exco}(t) = h \cdot (T_r(t) - T_{sur}(t)) \cdot \left| \left(1 - \frac{T_o(t)}{T_{sur}(t)} \right) \right| \quad (8)$$

エクセルギー流の表現は、外壁以外の天井、床、窓についても同様であるため、各部のエクセルギー負荷を積算し、さらに時間積算することで期間エクセルギー負荷を求めることができる。

$T_r \neq T_{sur}$ の時には、境界面温度として室温を用いても結果に与える誤差は小さい ($1 - T_o/T_r \approx 1 - T_o/T_{sur}$)。このことから、便宜上境界面温度を T_r として計算する例もあるが、室温に対してエネルギー流を発生させるのは各面の表面温度であり、また、その表面温度によってエネルギー流だけでなくエクセルギー流も変わることから、境界面温度には T_{sur} を用いるべきである。例えば、日射によって温まった床からのエクセルギー流を計算する際、床表面温度を境界条件としなければ、温度の異なる表面からの質の異なるエネルギー（エクセルギー）を評価したことにならないのである。

1.2 暖冷房エクセルギー負荷（換気）

1.2.1 自然換気及び熱交換を伴わない機械換気

Fig.3 にある様に、住宅の換気に伴い、エンタルピー \dot{H}_{vin} が室内に入り、エンタルピー \dot{H}_{vout} が屋外に流出する。室内では機器発熱、水蒸気発生に伴うエンタルピー \dot{H}_{vg} が流入し、一部が室内空気に蓄熱され (\dot{H}_{vea})、空調機器を用いた冷却、加熱、除湿 (\dot{H}_{va}) によって室温と湿度が維持される。従って、住宅の外皮を境界とした室内空気のエンタルピー収支は、以下のようなになる。

$$\dot{H}_{vin}(t) + \dot{H}_{vg}(t) + \dot{H}_{va}(t) = \dot{H}_{vout}(t) + \dot{H}_{vca}(t) \quad (9)$$

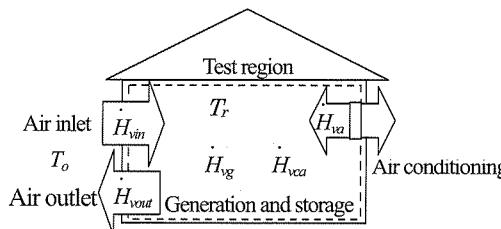


Fig.3 Enthalpy inlet and outlet by ventilation

\dot{H}_{va} は、室内の温湿度を一定に保つために必要な換気エンタルピー負荷である。 $(\dot{H}_{va} > 0$ は暖房負荷、 $\dot{H}_{va} < 0$ は冷房負荷。) \dot{H}_{va} は外気の湿り空気（環境）を基準に考えれば下式のように記述される。なお、ここでは外気の湿り空気を基準とするため、 \dot{H}_{vin} はゼロとなる。

$$\begin{aligned} \dot{H}_{va}(t) &= \dot{H}_{vout}(t) + \dot{H}_{vca}(t) - \dot{H}_{vg}(t) = \\ &\quad \{ \dot{Q}_v(t) \cdot (c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot (T_r(t) - T_o(t)) \\ &\quad + \dot{Q}_v(t) \cdot r(T_r(t)) \cdot (m_{vr}(t) - m_{vo}(t)) \} \\ &\quad + \left\{ (c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot V \cdot \frac{\Delta T_r(t)}{\Delta t} \right. \\ &\quad \left. + V \cdot r(T_r(t)) \cdot \frac{\Delta m_{vr}(t)}{\Delta t} \right\} \\ &\quad - \{ c_{pv} \cdot \dot{m}_g(t) \cdot (T_r(t) - T_o(t)) + \dot{m}_g(t) \cdot r(T_r(t)) + \dot{q}_g(t) \} \end{aligned} \quad (10)$$

水蒸気（凝縮水）の質量保存は以下のように記述される。

$$\dot{m}_w(t) = \dot{Q}_v(t) \cdot (m_{vo}(t) - m_{vr}(t)) + \dot{m}_g(t) \quad (11)$$

\dot{m}_w は冷房期にのみ室内の湿度を維持するために排出する水蒸気（凝縮水）量であり、中間期、暖房期はゼロである。(11) を用いて(10) を整理すると、以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \dot{H}_{va}(t) &= \\ &\quad \dot{Q}_v(t) \cdot (c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot (T_r(t) - T_o(t)) \\ &\quad + \left\{ (c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot V \cdot \frac{\Delta T_r(t)}{\Delta t} \right. \\ &\quad \left. + V \cdot r(T_r(t)) \cdot \frac{\Delta m_{vr}(t)}{\Delta t} \right\} \\ &\quad - \{ c_{pv} \cdot \dot{m}_g(t) \cdot (T_r(t) - T_o(t)) + \dot{m}_w(t) \cdot r(T_r(t)) + \dot{q}_g(t) \} \end{aligned} \quad (12)$$

一方、換気に伴うエントロピー収支は、以下のように表せる。

$$\dot{S}_{vin}(t) + \dot{S}_{vg}(t) + \dot{S}_{va}(t) + \Delta \dot{S}_v(t) = \dot{S}_{vout}(t) + \dot{S}_{vca}(t) \quad (13)$$

なお、住宅に入る空気は、基準とする環境の温度と分圧を持つた空気であることから、流入するエントロピー S_{vin} はゼロである。

暖冷房に伴うエントロピー流入と生成 $\dot{S}_{va} + \Delta\dot{S}_v$ は、環境との温度差に伴う熱エントロピーと環境との分圧差に伴うエントロピーの和として以下のように表すことができる⁽¹⁾⁽²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

$$\dot{S}_{va}(t) + \Delta\dot{S}_v(t) = \dot{S}_{vout}(t) + \dot{S}_{vca}(t) - \dot{S}_{vg}(t) =$$

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_v(t) \cdot \left[(c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot \ln \frac{T_r(t)}{T_o(t)} \right. \\ & \quad \left. - \left\{ \frac{m_{ar}(t)}{M_a} \cdot R \cdot \ln \frac{P_{ar}(t)}{P_{ao}(t)} + \frac{m_{vr}(t)}{M_v} \cdot R \cdot \ln \frac{P_{vr}(t)}{P_{vo}(t)} \right\} \right] \\ & + \left\{ (c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot V \cdot \frac{\Delta T_r(t)}{\Delta t} \right. \\ & \quad \left. + V \cdot r(T_r(t)) \cdot \frac{\Delta m_{vr}(t)}{\Delta t} \right\} \cdot \frac{1}{T_r(t)} \\ & - \left[\left\{ c_{pv} \cdot \dot{m}_g(t) \cdot \ln \frac{T_r(t)}{T_o(t)} - \frac{\dot{m}_g(t)}{M_v} \cdot R \cdot \ln \frac{P_s(T_r(t))}{P_{vo}(t)} \right\} \right. \\ & \quad \left. + \dot{m}_w(t) \cdot \frac{r(T_r(t))}{T_r(t)} + \frac{\dot{q}_g(t)}{T_g(t)} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

右辺第一項は、流出空気のエントロピーである。右辺第二項は蓄熱に伴って室内空気に蓄えられるエントロピー、右辺第三項は発生水蒸気、凝縮水潜熱、及び機器発熱のエントロピーである。

なお、水蒸気と乾き空気の全圧は室内外で大気圧一定とする。

$$P_{ao}(t) + P_{vo}(t) = P_{ar}(t) + P_{vr}(t) \quad (15)$$

暖冷房により供給されるエクセルギー、住宅内で消費されるエクセルギー、屋外に出るエクセルギー、室内に蓄えられるエクセルギー、屋外から入るエクセルギー、機器発熱・水蒸気発生により供給されるエクセルギーによる収支は下式のように記述できる。

$$\dot{E}_{Exv}(t) - \Delta\dot{E}_{Exv}(t) = \dot{E}_{Exvout}(t) + \dot{E}_{Exvca}(t) - \dot{E}_{Exvin}(t) - \dot{E}_{Exvg}(t) \quad (16)$$

環境の湿り空気を基準とすることから、 \dot{E}_{Exvin} はゼロである。湿り空気のエクセルギーは、エンタルピーから無効な部分 ($T_o \times S$) を差し引いたものと記述されるため、上式は以下のように記述できる。

$$\left\{ \dot{H}_{va}(t) - T_o(t) \cdot \dot{S}_{va}(t) \right\} - \Delta\dot{E}_{Exv}(t) = \left\{ \dot{H}_{vout}(t) - T_o(t) \cdot \dot{S}_{vout}(t) \right\}$$

$$+ \left\{ \dot{H}_{vca}(t) - T_o(t) \cdot \dot{S}_{vca}(t) \right\} - \left\{ \dot{H}_{vg}(t) - T_o(t) \cdot \dot{S}_{vg}(t) \right\} \quad (17)$$

室内温湿度を維持するためには、エントロピー生成 $\Delta\dot{S}_v$ (エクセルギー消費 $\Delta\dot{Ex}_v$) がゼロとしても、最低限 \dot{Ex}_{va} に相当するエクセルギーを室内に供給する必要があり、これが換気エクセルギー負荷である。 \dot{Ex}_{va} は(12)、(14)より以下のように記述できる。

$$\dot{Ex}_{va}(t) = \dot{H}_{va}(t) - T_o(t) \cdot \dot{S}_{va}(t) =$$

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_v(t) \cdot \left[(c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot \left\{ (T_r(t) - T_o(t)) - T_o(t) \cdot \ln \frac{T_r(t)}{T_o(t)} \right\} \right. \\ & \quad \left. + T_o(t) \cdot \left\{ \frac{m_{ar}(t)}{M_a} \cdot R \cdot \ln \frac{P_{ar}(t)}{P_{ao}(t)} + \frac{m_{vr}(t)}{M_v} \cdot R \cdot \ln \frac{P_{vr}(t)}{P_{vo}(t)} \right\} \right] \\ & + \left\{ (c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot V \cdot \frac{\Delta T_r(t)}{\Delta t} \right. \\ & \quad \left. + V \cdot r(T_r(t)) \cdot \frac{\Delta m_{vr}(t)}{\Delta t} \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{T_o(t)}{T_r(t)} \right\} \\ & - \left[\left[c_{pv} \cdot \dot{m}_g(t) \cdot \left\{ (T_r(t) - T_o(t)) - T_o(t) \cdot \ln \frac{T_r(t)}{T_o(t)} \right\} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + T_o(t) \cdot \frac{\dot{m}_g(t)}{M_v} \cdot R \cdot \ln \frac{P_s(T_r(t))}{P_{vo}(t)} \right] \right. \\ & \quad \left. + \dot{m}_w(t) \cdot r(T_r(t)) \cdot \left\{ 1 - \frac{T_o(t)}{T_r(t)} \right\} + \dot{q}_g(t) \cdot \left\{ 1 - \frac{T_o(t)}{T_g(t)} \right\} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

右辺第一項 [] 内の一項目は、室内空気が状態量として持つ「熱エクセルギー」の流出量である。 $T_r=T_o$ の時「熱エクセルギー」=0となる。 $T_r>T_o$ の時の「熱エクセルギー」は「温エクセルギー」となり、 $T_r<T_o$ の時には「冷エクセルギー」となるが、いずれの場合も「熱エクセルギー」>0 である。[] 内の二項目は分圧の差に伴うエクセルギーで、宿谷ら⁽¹²⁾は「分離エクセルギー」と呼び、環境の湿り空気とは異なる絶対湿度を持つ湿り空気が、環境と分離されているときに持つエクセルギーと表現できる。 $P_{ar}=P_{ao}$ 、 $P_{vr}=P_{vo}$ の時「分離エクセルギー」=0 となる。 $P_{ar}>P_{ao}$ 、 $P_{vr}<P_{vo}$ の時の「分離エクセルギー」は「乾エクセルギー」と呼ばれ、 $P_{ar}<P_{ao}$ 、 $P_{vr}>P_{vo}$ の時は「湿エクセルギー」と呼ばれる。いずれの場合も「分離エクセルギー」>0 となる⁽¹²⁾。右辺第二項は、空気蓄えられた熱エクセルギー、第三項は発生水蒸気の熱エクセルギーと分離エクセルギー、湿度を維持するために排出する水蒸気の潜熱エクセルギー及び

機器発熱に伴って流入する熱エクセルギーである。

なお、機械換気の場合には、電力エクセルギー負荷 W_e が別途加わる。(1.6 節参照)

1.2.2 熱交換換気

熱交換換気の場合、還気温度(室温)と外気温度の差に対する給気温度と外気温度の差を温度交換効率 ξ_T として以下のように表現できる。⁽¹⁵⁾

$$\xi_T = \frac{T_s - T_o}{T_r - T_o} \quad (19)$$

上式を用いれば給気の温度 T_s は、以下のように表すことができる。

$$T_s(t) = \xi_T \cdot (T_r(t) - T_o(t)) + T_o(t) \quad (20)$$

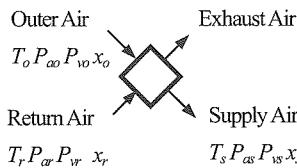


Fig.4 Thermal condition of vent heat recovery device

全熱交換換気の場合には、湿度も交換するが、その場合の給気の絶対湿度 x_s は、還気絶対湿度 x_r 、外気絶対湿度 x_o 、湿度交換効率 ξ_v とすると、以下のように表すことができる。⁽¹⁵⁾

$$x_s(t) = \xi_v \cdot (x_r(t) - x_o(t)) + x_o(t) \quad (21)$$

さらに、乾き空気と水蒸気の全圧は、給気と還気で変わらず一定と仮定し、絶対湿度 x 、分圧 P 、密度 m は比例関係にあるとすれば、給気の水蒸気分圧 P_{vs} と乾き空気分圧 P_{ao} 、水蒸気の密度 m_{vs} と乾き空気の密度 m_{ao} は、湿度交換効率 ξ_v から以下のように記述できる。

$$P_{vs}(t) = \xi_v \cdot (P_{vr}(t) - P_{vo}(t)) + P_{vo}(t) \quad (22)$$

$$P_{as}(t) = P_{ao}(t) + P_{vo}(t) - P_{vs}(t) \quad (23)$$

$$m_{vs}(t) = \xi_v \cdot (m_{vr}(t) - m_{vo}(t)) + m_{vo}(t) \quad (24)$$

$$m_{as}(t) = m_{ao}(t) + m_{vo}(t) - m_{vs}(t) \quad (25)$$

以上の関係を踏まえ、全熱交換換気エクセルギー負荷は、以下のようになる。なお、熱交換換気に伴い電力エクセルギー負荷 W_e が別途加わる。(1.6 節参照)

別途加わる。(1.6 節参照)

$$\dot{E}_{Xva}(t) =$$

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_v(t) \cdot \left[(c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot \left\{ (T_r(t) - T_o(t)) - T_o(t) \cdot \ln \frac{T_r(t)}{T_o(t)} \right\} \right. \\ & - (c_{pa} \cdot m_{as}(t) + c_{pv} \cdot m_{vs}(t)) \cdot \left\{ (T_s(t) - T_o(t)) - T_o(t) \cdot \ln \frac{T_s(t)}{T_o(t)} \right\} \\ & + T_o(t) \cdot \left\{ \frac{m_{ar}(t)}{M_a} \cdot R \cdot \ln \frac{P_{ar}(t)}{P_{ao}(t)} + \frac{m_{vr}(t)}{M_v} \cdot R \cdot \ln \frac{P_{vr}(t)}{P_{vo}(t)} \right\} \\ & \left. - T_o(t) \cdot \left\{ \frac{m_{as}(t)}{M_a} \cdot R \cdot \ln \frac{P_{as}(t)}{P_{ao}(t)} + \frac{m_{vs}(t)}{M_v} \cdot R \cdot \ln \frac{P_{vs}(t)}{P_{vo}(t)} \right\} \right] \\ & + \left\{ (c_{pa} \cdot m_{ar}(t) + c_{pv} \cdot m_{vr}(t)) \cdot V \cdot \frac{\Delta T_r(t)}{\Delta t} \right. \\ & + V \cdot r(T_r(t)) \cdot \frac{\Delta m_{vr}(t)}{\Delta t} \left. \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{T_o(t)}{T_r(t)} \right\} \\ & - \left[\left[c_{pv} \cdot \dot{m}_g(t) \cdot \left\{ (T_r(t) - T_o(t)) - T_o(t) \cdot \ln \frac{T_r(t)}{T_o(t)} \right\} \right. \right. \\ & \left. \left. + T_o(t) \cdot \frac{\dot{m}_g(t)}{M_v} \cdot R \cdot \ln \frac{P_s(T_r(t))}{P_{vo}(t)} \right] \right. \\ & \left. + \dot{m}_w(t) \cdot r(T_r(t)) \cdot \left\{ I - \frac{T_o(t)}{T_r(t)} \right\} + \dot{q}_g(t) \cdot \left\{ I - \frac{T_o(t)}{T_g(t)} \right\} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

水蒸気(凝縮水)の質量保存は以下のようになる。

$$\dot{m}_w(t) = Q_v(t) \cdot (m_{vs}(t) - m_{vr}(t)) + \dot{m}_g(t) \quad (27)$$

1.3 暖冷房エクセルギー負荷の合算

各部位の伝達エクセルギー負荷と換気エクセルギー負荷を加えることで、暖冷房エクセルギー負荷 \dot{E}_{xa} が求まる。 i は、壁、床、天井、窓など熱伝達が発生する部位の数である。

$$\dot{E}_{xa}(t) = \sum_i \dot{E}_{Xco}(t) + \dot{E}_{Xva}(t) \quad (28)$$

1.4 給湯エクセルギー負荷

給湯機では、 \dot{q}_{wc} の熱エネルギーを持つ水が入り、熱量 \dot{q}_h が加わり、一部が放熱ロス \dot{q}_l として失われ、 \dot{q}_{wh} のお湯が得られる。給湯

機の境界をFig.5 のようにとると、エネルギー収支は次のように表すことができる。

$$\dot{q}_{wc}(t) + \dot{q}_h(t) - \dot{q}_l(t) = \dot{q}_{wh}(t) \quad (29)$$

\dot{q}_h は給湯エネルギー負荷であり、以下のように書き換えられる。

$$\dot{q}_h(t) = c_{pw} \cdot \dot{Q}_w(t) \cdot (T_{wh}(t) - T_{wc}(t)) + \dot{q}_l(t) \quad (30)$$

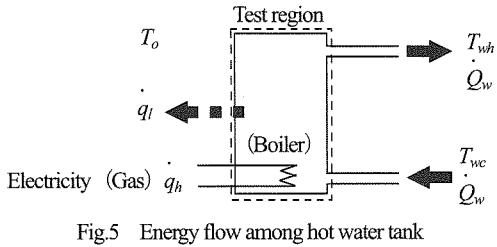


Fig.5 Energy flow among hot water tank

また、給湯機内のエントロピー収支は、

$$\dot{S}_h(t) + \dot{S}_{win}(t) + \Delta \dot{S}_w(t) = \dot{S}_{woout}(t) + \dot{S}_l(t) \quad (31)$$

上式を具体的に記述すれば、

$$\begin{aligned} \frac{\dot{q}_h(t)}{T_h(t)} + c_{pw} \cdot \dot{Q}_w(t) \cdot \ln \frac{T_{wc}(t)}{T_o(t)} + \Delta \dot{S}_w(t) \\ = c_{pw} \cdot \dot{Q}_w(t) \cdot \ln \frac{T_{wh}(t)}{T_o(t)} + \frac{\dot{q}_l(t)}{T_{wh}(t)} \end{aligned} \quad (32)$$

給湯エクセルギー負荷 \dot{Ex}_w は、給湯エネルギー負荷から無効エネルギー負荷を差し引いたものとして、貯湯式、瞬間式を問わず下式で表せる。

$$\dot{Ex}_w(t) = \dot{q}_h(t) - T_o(t) \cdot \dot{S}_h(t) =$$

$$\dot{q}_h(t) - T_o(t) \cdot \frac{\dot{q}_h(t)}{T_h(t)} = \dot{q}_h(t) \cdot \left(1 - \frac{T_o(t)}{T_h(t)} \right) \quad (33)$$

1.5 廚房エクセルギー負荷

調理の際のエネルギー収支は、加熱する食品を境界と仮定した場合、加熱調理に必要な熱エネルギー \dot{q}_{kin} が、ガスレンジやIHクッキングヒーターによって食品に加えられ、 \dot{q}_{kout} の熱として排出されると表現できる。食品の温度上昇や酸化に利用されるエネルギーを無視すれば、定常的に以下のように表現できる。この場合、 \dot{q}_{kin} を厨房熱エネルギー負荷と考える。

$$\dot{q}_{kin}(t) = \dot{q}_{kout}(t) \quad (34)$$

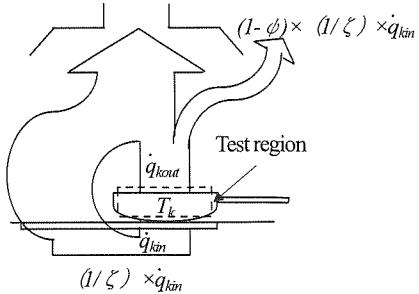


Fig.6 Energy flow of cooking heater

食品の加熱に伴うエントロピー収支は、食品に入るエントロピーを \dot{S}_{kin} 、食品を出るエントロピーを \dot{S}_{kout} とすれば以下のようになる。

$$\dot{S}_{kin}(t) + \Delta \dot{S}_k(t) = \dot{S}_{kout}(t) \quad (35)$$

上式の \dot{S}_{kin} は、食品の加熱に必要なエネルギーと、調理温度から、

$$\dot{S}_{kin}(t) = \frac{\dot{q}_{kin}(t)}{T_k(t)} \quad (36)$$

以上の関係から、厨房エクセルギー負荷は以下のように表現できる。

$$\dot{Ex}_k(t) = \dot{q}_{kin}(t) - T_o(t) \cdot \dot{S}_{kin}(t) = \dot{q}_{kin}(t) \cdot \left(1 - \frac{T_o(t)}{T_k(t)} \right) \quad (37)$$

\dot{q}_{kin} は、効率 ζ の電磁（またはガス）調理器具で供給されると考えられ、厨房排気効率 ϕ に伴って、 $(1 - \phi)$ の熱が室内にもたらされ、暖房負荷を削減または冷房負荷を増大させる。

$$\Delta \dot{q}_{load}(t) = (1 - \phi) \cdot \frac{1}{\zeta} \cdot \dot{q}_{kin}(t) \quad (38)$$

暖冷房エクセルギー負荷の増減量 $\Delta \dot{Ex}_a$ も同様に以下のように計算できる。

$$\Delta \dot{Ex}_a(t) = (1 - \phi) \cdot \frac{1}{\zeta} \cdot \dot{q}_{kin}(t) \cdot \left(1 - \frac{T_o(t)}{T_k(t)} \right) \quad (39)$$

1.6 照明・家電機器等電力のエクセルギー負荷

住宅のエネルギー用途で、暖房、冷房、給湯、厨房以外に照明や家電機器類、換気設備等の電力がある。（以下、照明・家電機器等電力。）照明・家電機器等電力の用途負荷は全て電力負荷（エネル

ギー負荷=エクセルギー負荷) と仮定する。

$$\dot{Ex}_e(t) = \dot{W}_e(t) \quad (40)$$

1.7 各エクセルギー負荷の合算

暖冷房、給湯、厨房、及び照明・家電機器等電力のエクセルギー負荷を期間積算し、合算することで住宅全体のエクセルギー負荷を求めることができる。

$$Ex_{load} = \sum_{At} (\dot{Ex}_a(t) + \dot{Ex}_w(t) + \dot{Ex}_k(t) + \dot{Ex}_e(t)) \cdot At \quad (41)$$

2. エクセルギー経済評価

ある用途 j に対する年間エネルギーコスト K_T^j を、変動費 K_V^j と固定費(減価償却費) K_F^j を足したものとして表す。

$$K_T^j = K_V^j + K_F^j \quad (42)$$

また、エクセルギー負荷 Ex_p^j に対するコスト K_p^j を、エクセルギー単価 k_p^j として以下のように定義する。

$$k_p^j = \frac{K_T^j}{Ex_p^j} \quad (43)$$

エクセルギー単価 k_p^j は、エネルギー負荷の量だけでなく、質を考慮した経済評価を可能にするものである。

3.まとめ

住宅のエクセルギー経済評価を行うため、住宅の各エネルギー用途に対するエクセルギー負荷の算出方法についてまとめた。さらに、このエクセルギー負荷に対するコストをエクセルギー単価として表現することで、質の異なる様々なエネルギー負荷に対して、それぞれの質を考慮した経済性評価を行うことが可能になった。続報(その2)においてモデル住宅の評価を行う予定である。

記号表

c_{pa}	乾き空気の定圧比熱 (J/g · K)	Ex_{ea}	室内空気に蓄熱されるエクセルギー (W)
c_{pw}	水蒸気の定圧比熱 (J/g · K)	Ex_a	暖冷房エクセルギー負荷 (W)
c_{pv}	水の定圧比熱 (kJ/kg · K)	Ex_{ew}	外壁室内側表面におけるエクセルギー流(エクセルギー負荷) (W)
Ex	エクセルギー (W)	Ex_{eg}	機器発熱・水蒸気発生により供給されるエクセルギー (W)
Ea	無効エネルギー (W)	Ex_k	厨房エクセルギー負荷 (W)
Ex_d	伝達負荷を満たすために室内に流入するエクセルギー (W)	Ex_w	換気エクセルギー負荷 (W)
Ex_{in}	換気により流入するエクセルギー (W)	Ex_e	照明・家電機器等電力エクセルギー負荷 (W)
Ex_{out}	換気により流出するエクセルギー (W)	Ex_{load}	住宅全体のエクセルギー負荷 (J)
		ΔEx_a	換気により室内で消費されるエクセルギー (W)
		ΔEx_c	暖冷房エクセルギー負荷の増減 (W)
		ΔEx_v	伝達に伴い室内で消費されるエクセルギー (W)
		H_{ext}	換気エンタルピー流出量 (W)
		H_{in}	換気エンタルピー流入量 (W)
		H_{ig}	機器発熱・水蒸気発生に伴うエンタルピー流入 (W)
		H_{ia}	暖冷房により供給されるエンタルピー(換気エンタルピー負荷) (W)
		H_{iv}	室内空気に蓄えられるエンタルピー (W)
		h	外壁室内側表面熱伝達率 (W/(m² · K))
		K_T	年間エネルギーコスト (円/年)
		K_V	年間変動費 (円/年)
		K_F	年間固定費(原価償却費) (円/年)
		k_p	エクセルギー単価 (円/J)
		m_{or}	室内乾き空気密度 (g/m³)
		m_{ow}	室内水蒸気密度 (g/m³)
		m_{ar}	外気乾き空気密度 (g/m³)
		m_{aw}	外気水蒸気密度 (g/m³)
		m_{sr}	給気乾き空気密度 (g/m³)
		m_{sw}	給気水蒸気密度 (g/m³)
		m_g	水蒸気発生量 (g/s)
		m_w	冷房時凝縮水量 (g/s)
		Δm_r	室内水蒸気密度の変化 (g/m³)
		M_o	乾き空気の分子量=28.97 (g/mol)
		M_v	水蒸気の分子量=18.05 (g/mol)
		P_{∞}	(屋外) 乾き空気の分圧 (Pa)
		P_{∞}	(屋外) 水蒸気の分圧 (Pa)
		P_{or}	(室内) 乾き空気の分圧 (Pa)
		P_{ir}	(室内) 水蒸気の分圧 (Pa)
		P_{ar}	(給気) 乾き空気の分圧 (Pa)
		P_{av}	(給気) 水蒸気の分圧 (Pa)
		P_s	飽和水蒸気圧 (Pa)
		q_g	機器・人体からの顯熱量 (W)
		q_h	給湯加熱量 (W)
		q_{wc}	給水熱量 (W)
		q_{wh}	給湯熱量 (W)
		q_{kn}	調理熱負荷 (W)

q_{load} : 調理排熱 (W)
 q_{load} : 暖冷房熱負荷 (W)
 q_{ci} : 伝達負荷を満たす暖冷房エネルギー (W)
 q_{co} : 外壁室内側表面における熱流 (W)
 Δq_{load} : 暖冷房熱負荷の増減 (W)
 q_H : 热エネルギー (W)
 Q_v : 換気量 (m^3/s)
 Q_w : 給湯流量 (kg/s)
 r : 蒸発潜熱 (J/g)
 R : 気体定数=8.314 (J/(mol · K))
 S_{win} : 給湯機に入る水のエントロピー (W/K)
 S_{wout} : 給湯機を出るお湯のエントロピー (W/K)
 S_h : 給湯加熱により流入するエントロピー (W/K)
 S_H : 热エネルギーと共に流れるエントロピー (W/K)
 S_f : 貯湯タンクからの放熱により流出するエントロピー (W/K)
 S_{kin} : 調理時流入エントロピー (W/K)
 S_{kout} : 調理時流出エントロピー (W/K)
 S_g : 機器発熱・水蒸気発生に伴う流入エントロピー (W/K)
 S_{vex} : 室内空気に蓄えられるエントロピー (W/K)
 S_{ci} : 室内に入るエントロピー (W/K)
 S_{co} : 外壁室内側表面で流入出すエントロピー (W/K)
 S_{vad} : 換気により室内から出る空気のエントロピー (W/K)
 S_{va} : 暖冷房に伴う流入流出エントロピー (W/K)
 S_{vin} : 換気により室内に入る外気のエントロピー (W/K)
 ΔS_k : 調理時生成エントロピー (W/K)
 ΔS_c : 伝達に伴う室内生成エントロピー (W/K)
 ΔS_w : 給湯加熱に伴う生成エントロピー (W/K)
 ΔS_v : 換気に伴う生成エントロピー (W/K)
 T_r : 室内温度 (K)
 T_g : 機器等の発熱温度 (K)
 T_o : 外気 (環境) 温度 (K)
 T_k : 調理温度 (K)
 T_h : 給湯機内加熱温度 (K)
 T_s : 熱交換換気給気温度 (K)
 T_{se} : 外壁室内側表面温度 (K)
 T_{wc} : 流入水温度 (K)
 T_{wh} : 給湯温度 (槽内温度) (K)
 ΔT_r : 室内温度の変化 (K)
 Δt : 時間差分 (s)
 V : 室内空気の体積 (m^3)
 W_e : 供給電力、電力負荷 (W)
 X_o : 外気絶対湿度 (g/g)
 X_r : 室内空気絶対湿度 (g/g)
 X_s : 給気絶対湿度 (g/g)
 η_c : 有効比 (カルノー効率) (—)

ζ : 廉房機器効率 (—)
 ϕ : 廉房排気効率 (—)
 ξ_T : 温度交換効率 (—)
 ξ_v : 湿度交換効率 (—)
 i : 壁、床、天井、窓など熱伝達が発生する部位の数
 j : エネルギー用途

参考文献

- (1) H.D.Baehr, Thermodynamik, (久我修訳)、1983年、丸善
- (2) 浅田秀男・宿谷昌則、星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報告集、第461号、43-50、1994年7月
- (3) 浅田秀男・宿谷昌則、Exergy-Entropy Process of Electric Lighting Systems Using Fluorescent Lamps、日本建築学会計画系論文集 第483号、91-100、1996年5月
- (4) 森花朋弘・高橋達・宿谷昌則、鉄筋コンクリート壁体の生産と運用におけるエクセルギー消費、日本建築学会計画系論文集 第520号、99-105、1999年6月
- (5) Dietrich Schmidt, Design of Low Exergy Buildings - Method and a Pre-Design tool, International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, Vol.3, 2003
- (6) K.Voss · A.Goetzberger · GBopp · A.Haberle · A.Heinzel · H.Lehmberg, The Self-Sufficient Solar House in Freiburg - Results of 3 Years of Operation, Solar Energy, Vol.58, p17-23, 1996
- (7) Marc A. Rosen, · Minh N. Le · Ibrahim Dincer , Thermodynamic assessment of an integrated system for cogeneration and district heating and cooling, International Journal of Exergy, Vol.1 No.1, 94-110, 2004
- (8) Tsatsaronis G, Thermo-economic Analysis and Optimization of Energy Systems, Prog Energy Combust Sci, 227-257, 1993
- (9) A.Ucar · M.Inalli, Exergoeconomic analysis and optimization of a solar-assisted heating system for residential buildings, Building and Environment, June 2005
- (10) Onzer Ozgener · Arif Hepbasli, Exergoeconomic analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system, Applied Thermal Engineering 25 1459-1471, 2005
- (11) 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、日本建築学会学術講演梗概集、453-454、1996
- (12) 西川竜二・宿谷昌則・鈴木浩史、蒸発冷却のエクセルギー・エントロピー過程に関する試算、日本建築学会計画系論文集、第489号、47-55、1996年11月
- (13) 沼野正溥、熱エネルギー工学入門、1982年、オーム社
- (14) 押田勇雄、エクセルギー講義、1986年3月、図書刊刷
- (15) (財) ベターリビング、優良住宅部品性能試験方法書 BLTVU:2000⑤ 換気ユニット、2001年10月