

エクセルギー概念を用いた環境共生建築の計画について

○八重森 琢磨*1 藤井 晴行*2

キーワード：環境共生建築 建築環境 エクセルギー

1. はじめに

本研究の目的は、「望ましいエクセルギーの流れを実現し、環境と共生する建築」の計画のために、有用な知見を得ることである。建築環境をエクセルギー概念でとらえることは、室内空気や建物躯体が室内環境にとって有効な資源性をどれくらい持っているのかを定量的に示すことができるという特徴を持っている。エネルギー概念に根ざした従来の建築環境評価に加えて、エクセルギー概念を取り入れ、自然エネルギーの室内環境への影響を「資源性」の変化の観点からより詳細に考察することは、環境共生建築の計画にとって有用であると考えられる。ここでの環境共生建築とは、自然エクセルギー^{注1)}を有効に活用し、化石燃料を動力としたエクセルギーを出来るだけ用いずに、正常な建築環境システムを備える建築のことを言う。

建築環境システムをエクセルギー概念で理解することの重要性は、宿谷¹⁾らによって提唱されている。中でも文献 2)~4)では様々な建築環境システムのエクセルギーの流れの定量的な評価方法が確立されている。また、文献 5)等においては建物のパッシブシステムの有効性をエクセルギー概念を用いて評価している。このように、建物におけるエネルギーの質の変化を物理量として算出し、躯体断熱・日射遮蔽・夜間換気・屋根散水等の代表的なパッシブ手法の効果を評価する試みは既に行われている。しかし、求められたエクセルギーの値を用いて建築環境をより快適なものに改善していく過程や方法について言及した研究は少ない。

そこで本稿では、エクセルギー概念を用いた建築計画方法の提案のための足がかりとして、まず、既存の研究における計算式を用いて断熱・日射遮蔽を工夫した場合の、建物躯体におけるエクセルギー保有量・消費量を算出した結果を報告する。そして、そこから自然エネルギーの持つ「資源性」を建物利用者の快適性を確保するためにより有効に活用できる建築、つまり、より環境共生に寄与する建築を計画する方法を考える。

2. 研究方法

エクセルギー概念を用いて建物の建築環境システムを評価する。まず、評価対象となる建築物の特徴を再現し

て単純化したモデルをつくる。次に、そのモデルについて熱回路網を作成し、外部気象条件を与えることで自然室温・躯体温度分布を算出する。その結果を元に、エクセルギーの保有量・消費量を算出して、そのシステムでのエクセルギーの流れを明らかにする。

本稿では建物の建築環境システムをエクセルギー概念を用いて評価し、そこから建築環境計画の際に有用な知見を得る一例として、熱エクセルギーの伝導と蓄積に着目した数値解析を行い、特に建物の躯体に短期的または長期的に蓄えられる温・冷エクセルギー（以下は蓄温・蓄冷）の働きについて検討した結果を報告する。

3. 計算条件

窓のある南壁面と床下だけが外気に接するモデルについて計算を行った。部屋の大きさは間口 4m、奥行き 4m、天井高 2.5m で、場所は東京都（経度:139.77°、緯度:35.69°）とした。このような条件の下で、暖冷房を行わない場合、すなわち自然状態の室温と外壁・窓・床の内部温度を計算した。計算に必要な外気温度・日射量は「拡張アメダス気象データ」における、東京都標準年のものとした。計算はその中の、一日を通した平均気温が最も高い7月25日の場合を行った。計算は2ケースについて行った。各計算ケースのモデルイメージを図1に、数値解析のための熱回路網を図2に示す。

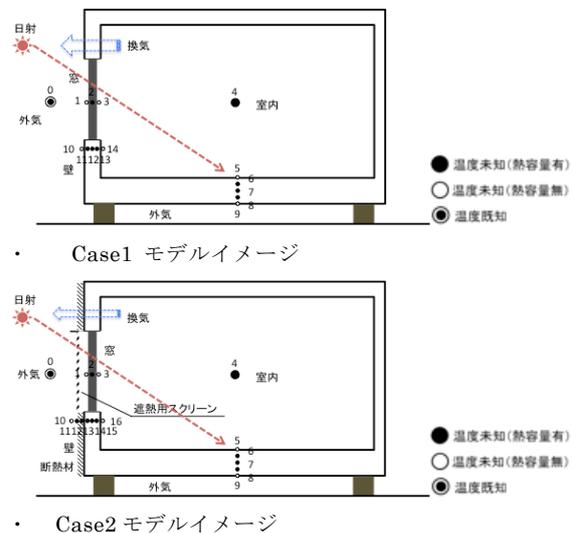
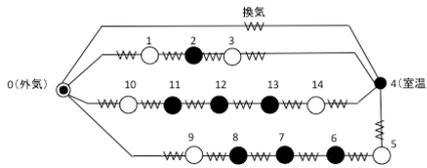
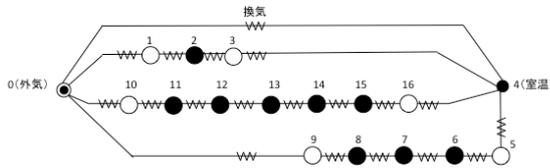


図1 各計算ケースのモデルイメージ



・ Case1 熱回路網



・ Case2 熱回路網

図2 各ケースの熱回路網

Case1 は壁に断熱材を付けない場合で、Case2 が断熱・日射遮蔽を工夫した場合である。躯体はいずれのケースも壁厚 150mm、床厚 300mm の普通コンクリートでできていて、窓は 3mm の単板ガラスとした。断熱を施したケースは外壁の外気側に 50mm の発砲ポリスチレンがあると設定した。また、Case2 については日射遮蔽のために、窓ガラスの外側に透過率 0.25 で吸収率 0.4 のスクリーンがあると設定した。

計算に用いた物性値を以下に示す。

・ 普通コンクリート

熱伝導率 (W/mK) : 1.637

容積比熱 (kJ/m³K) : 2013

・ 断熱材 (発砲ポリスチレン)

熱伝導率 (W/mK) : 0.037

容積比熱 (kJ/m³K) : 35.0

・ 窓ガラス

熱伝導率 (W/mK) : 1.000

容積比熱 (kJ/m³K) : 2022

日射吸収率 (-) : 0.1

日射透過率 (-) : 0.7

空気の容積比熱 (kJ/m³K) : 1206

室内側総合熱伝達率 (W/m²K) : 9

外気側総合熱伝達率 (W/m²K) : 23

換気回数 (1/h) : 1.0

4. 躯体のエクセルギーの保有量と消費の計算

4-1. エネルギー収支式

熱容量質点系モデルに基づくエネルギー収支式を後退差分法によって解いた。図2の熱回路網のように空間を離散化し、各検査体積の熱容量を温度質点で代表させる。そして、各温度質点 (Case1 なら 1~14、Case2 なら 1~16) に関して熱収支式を立てる。全ての温度質点に関する熱収支式ができたなら、それらをまとめてベクトル・マトリクス方程式で表現する。

$$M \cdot \frac{d\theta}{dt} = C \cdot \theta + C_0 \cdot \theta_0 + f$$

ここで、左辺は熱容量マトリクス、右辺第1項は熱コンダクタンスマトリクス、右辺第2項は温度規定質点により決まる境界条件を表すベクトル、右辺第3項は境界面に熱量を付与するベクトルである。最後に時間離散化を行う。これは、無限小の時間 dt を有限小の時間 Δt に置き換え、時間ステップで温度を計算できるようにすることである。まず、熱容量マトリクスについて考えると、

$$M \cdot \frac{d\theta}{dt} \rightarrow M \cdot \frac{1}{dt} \cdot (\theta_{i+1} - \theta_i)$$

θ_{i+1} , θ_i は時間方向を離散的に見たときの i+1 番目のステップ、i 番目のステップのベクトルの値である。このとき、 θ 、 θ_0 、 f を離散化した時間ステップの i+1 番目にとるとすると (後退差分)、

$$M \cdot \frac{1}{dt} \cdot (\theta_{i+1} - \theta_i) = C \cdot \theta_{i+1} + C_0 \cdot \theta_{0i+1} + f_{i+1}$$

よって、i+1 番目のベクトルの値は、

$$\theta_{i+1} = \left[M \cdot \frac{1}{dt} - C \right]^{-1} \cdot \left\{ \left[M \cdot \frac{1}{dt} + C \right] \cdot \theta_i + C_0 \cdot \theta_{0i+1} + f_{i+1} \right\}$$

以上より、 θ_i が分かれば θ_{i+1} を求めることができる。これより、ベクトル・マトリクス方程式を解けば、Case1 なら $\theta_{1\sim14}$ 、Case2 なら $\theta_{1\sim16}$ の値を求めることができる。

各温度質点の初期値は 0 とする。先述したように気象データは 1 日分が付与されている。計算では、この 1 日を繰り返し境界条件に与えて、初期条件の影響がなくなるまで繰り返し計算を行い、日周期定常解を得る。

以上の方法で、各質点におけるエネルギー収支式を解き、各質点の時刻毎の温度を算出した。この結果をもとに、各質点のエクセルギー保有量と各質点間にある熱抵抗の部分で起きるエクセルギー消費を計算する。

4-2. エクセルギー保有量とエクセルギー消費の計算

「自然エクセルギー」を定義し、具体的な値を求めるためには、まず「環境」を定める必要がある。エクセルギーの概念の「環境」とは、対象システムの外側にあるシステムのことである。

建物利用者にとって最も身近な外界は、壁や窓・天井・床で囲まれた建築の内部空間であり、人間にとっての外側のことを「環境」というから、これを「建築環境」という。この建築環境を人間にとって望ましいものにするために「自然エクセルギー」を利用する様々な建築的装置は、それら全体が一つの目的のために機能するシステムという意味で、これを「建築環境システム」と呼ぶ。「建築環境システム」にとっての「環境」は、建築を取り巻いている屋外空気 (外気) である。⁴⁾

文献2)を参考として M 個の熱容量を持つ躯体に蓄えられる熱エクセルギーを計算する。質点 i が持つエクセル

ギー E_i は、

$$E_i = Q_i(T_i - T_0) - Q_i \cdot T_0 \cdot \ln \frac{T_i}{T_0}$$

で計算する。 Q_i は質点 i の熱容量、 T_i は質点 i の温度、 T_0 はエクセルギー計算で基準とする温度（環境温度）である。躯体に蓄えられる熱エクセルギー E は、

$$E = \sum_{i=1}^M E_i$$

で計算する。

この式にエネルギー収支式を解いて得た値を代入して、エクセルギー保有量を導く。質点温度が環境温度より高い場合は「蓄温」、低い場合は「蓄冷」である。

文献3)を参考として M 個の熱容量を持つ躯体が、熱伝達の際に消費するエクセルギーを計算する。

ある温度質点 k におけるエネルギー収支式は、

$$Q_k \cdot \frac{dT_k}{dt} + q_{-1k} = q_{+1k}$$

ここで、 Q_k は熱容量、 q_{+1k} は温度質点 $k+1$ を出て温度質点 k に向かう貫流熱量で、 q_{-1k} は温度質点 k を出て温度質点 $k-1$ に向かう貫流熱量を表している。 T_{rk} は温度質点 k の温度である。

次に温度質点 k におけるエントロピー収支式を導くと、

$$Q_k \cdot \frac{dT_k}{dt} \cdot \frac{1}{T_k} + \frac{q_{-1k}}{T_k} = \frac{q_{+1k}}{T_{k+1}} + S_g$$

式(2)の左辺第1項はエントロピーが増大する速さ、第2項は温度質点 k から出て行くエントロピー流を示す。右辺第1項は温度質点 k に入るエントロピー流、第2項は温度質点 $k+1$ からと温度質点 k への熱伝達で生成されるエントロピーを示す。

エントロピー収支式の両辺に外気温 T_0 を乗じ、その左辺、右辺をそれぞれエネルギー収支式の左辺、右辺から引くと、

$$Q_k \cdot \frac{dT_k}{dt} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) + q_{-1k} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) = q_{+1k} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{k+1}}\right) - S_g \cdot T_0$$

式(3)の左辺第1項は温度質点 k に蓄えられるエクセルギー、第2項は温度質点 k から出て温度質点 $k-1$ に向かうエクセルギー流を示す。右辺第1項は温度質点 $k+1$ から出て温度質点 k に向かうエクセルギー流で、その一部 $S_g \cdot T_0$ が消費される。

この式にエネルギー収支式を解いて得た値を代入して、エクセルギー消費量を求める。

5. 計算結果と考察

まず、図3、図4に各ケースにおける室温と窓・外壁・床の平均温度及び外気温の経時変化を示す。Case1 と比べてCase2では、日中における窓と外壁の温度上昇が小さく、外気温より低い値を示している。これは、窓への日射遮蔽と外壁への断熱の効果であると考えられる。

また、床平均温度に関しては各ケースとも室温と同じかやや低い値を示している。

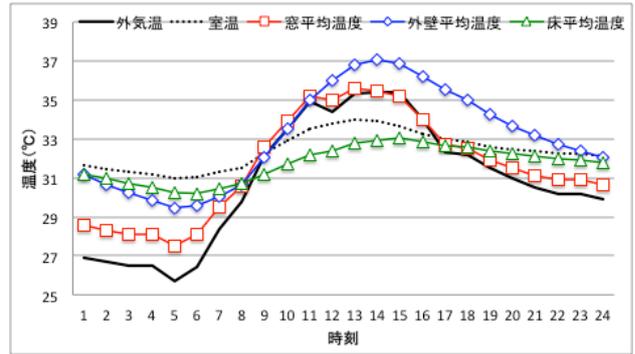


図3 Case1(断熱+日射遮蔽無し)の室温と躯体平均温度

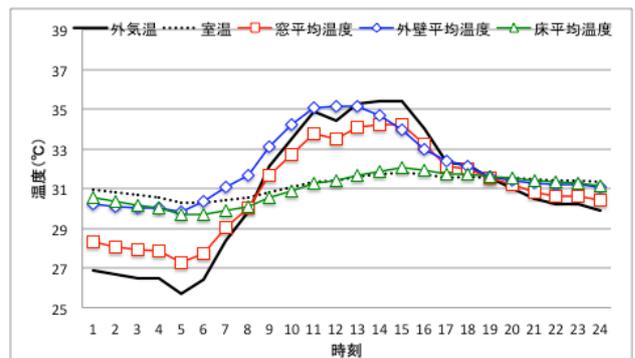


図4 Case2(断熱+日射遮蔽有り)の室温と躯体平均温度

図5に各ケースにおける室温と外気温の経時変化の関係性を示す。

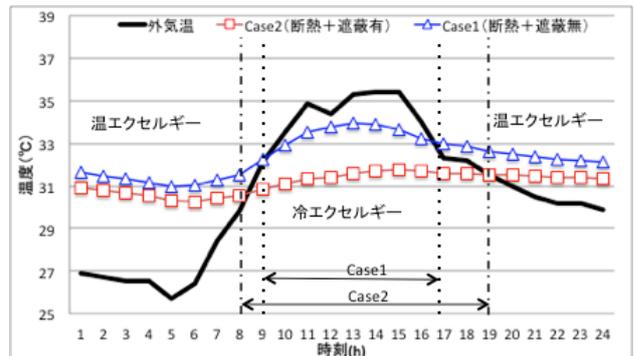


図5 外気温度と各ケース室内温度

これを見ると、Case2の室温はCase1のそれに比べて一日を通して低くなっているのが読み取れる。また、外気温と比較すると、Case1は9~17時の間は室温が外気温以下になっている。Case2は8~19時の間は室温が外気温以下になっている。この結果から、断熱・日射遮蔽を工夫することで、夏の室温の上昇をある程度抑制できることが分かる。

次に、各ケースにおける室内空気が外気に対して持つエクセルギー量(状態量)の経時変化を図6に示す。

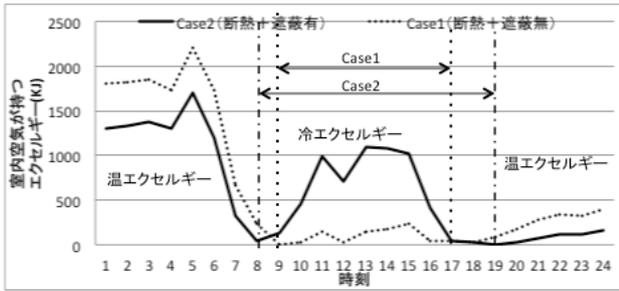


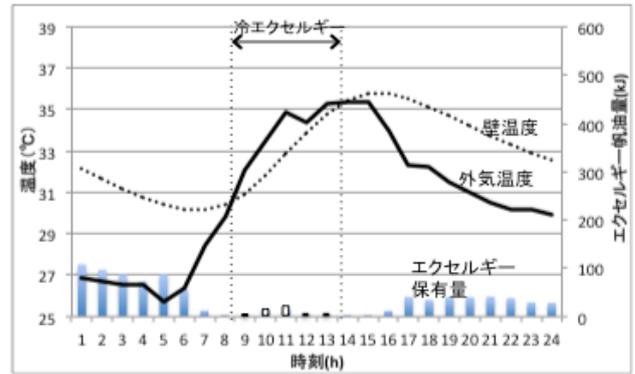
図6 室内空気の持つエクセルギー

各ケース室温が外気温以下になっている時刻に関しては、室内空気は外気に対して涼しさを持つ資源性である「冷エクセルギー」を持っていると言える。逆に、室温が外気温以上になっている時刻に関しては、外気に対して暖かさを持つ資源性である「温エクセルギー」を持っていると言える。

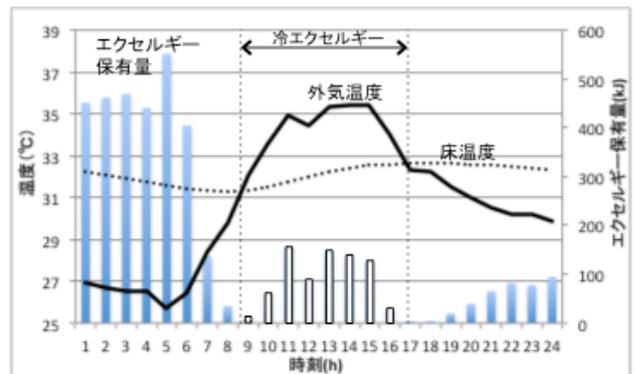
図6をみると、Case1の室温が外気温以下になっている9～17時の間は、Case2の室内空気のエクセルギーはCase1のそれに比べて大きい。それ以外の時刻に関してはCase1の室内空気のエクセルギーのほうが大きい。これは、9～17時の間は、Case2の室内空気が大きな「冷エクセルギー」を持っていて、それ以外の時刻はCase1のほうが大きな「温エクセルギー」を持っていることを示している。また、各ケースとも1～6時頃においては、他の時刻と比べて大きな「温エクセルギー」を持っている。

次に各ケースの躯体室内側質点の温度とエクセルギー保有量の経時変化を図7に、各ケースの躯体におけるエクセルギー消費量の経時変化を図8, 図9に示す。ここでは、各躯体（外壁、床、窓）の最も室内側の質点における計算結果を示す。

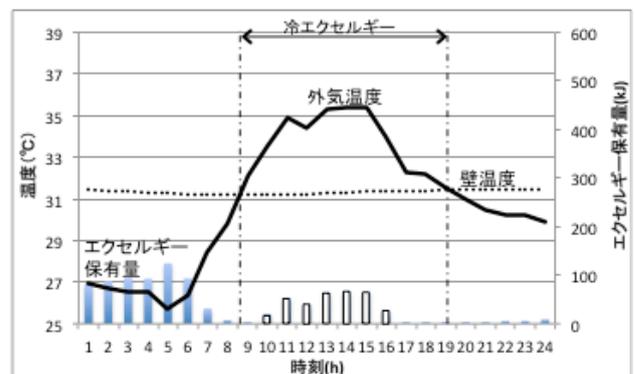
Case1のエクセルギー保有量を見てみると、床は室内空気とよく似た変化を示し、9～17時の間は「冷エクセルギー」を、それ以外の時刻は「温エクセルギー」を持っている。1～6時頃における床の「温エクセルギー」の保有量は大きい。消費量を見てみると、9～17時の間における床と壁の消費は大きく、1～6時頃の床と壁における消費も大きい。また、17～24時の間は壁における消費が比較的大きい。Case2のエクセルギー保有量を見てみると、床は室内空気とよく似た変化を示し、8～19時頃の間は「冷エクセルギー」を、それ以外の時刻は「温エクセルギー」を持っている。Case1と比べると1～6時頃における床の「温エクセルギー」の保有量はやや小さく、日中の「冷エクセルギー」保有量は床壁ともにCase1よりも大きい。これは、日射遮蔽による床の温度上昇の抑制と外断熱による壁の温度上昇の抑制の効果と考えられる。



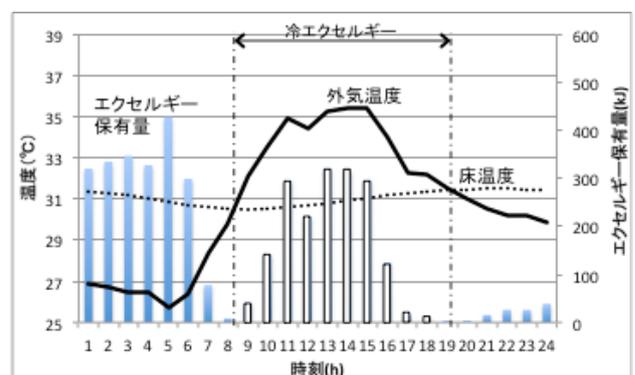
・Case1 (断熱+日射遮蔽無し) 壁



・Case1 (断熱+日射遮蔽無し) 床



・Case2 (断熱+日射遮蔽無し) 壁



・Case2 (断熱+日射遮蔽無し) 床

図7 躯体室内側質点の温度とエクセルギー保有量

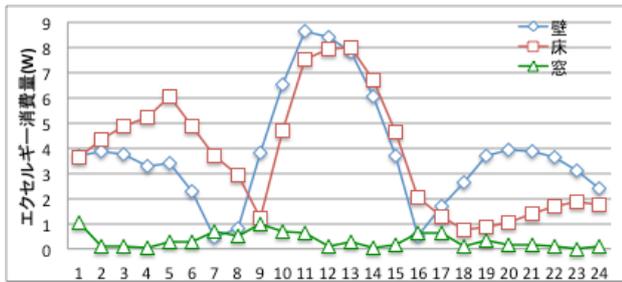


図8 Case1 (断熱+日射遮蔽無し) 躯体エクセルギー消費量

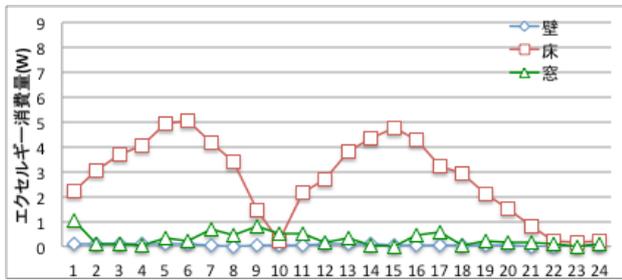


図9 Case2 (断熱+日射遮蔽有り) 躯体エクセルギー消費量

各ケースとも消費量が多くなっている時刻は、躯体に蓄えられたエクセルギーの室内への流れが大きくなって、結果的に消費量も大きくなっていると考えられる。Case1では9~17時頃の間に床では「冷エクセルギー」が大きく消費され、同時刻頃は壁でも「冷エクセルギー」が大きく消費されている。しかし、Case2と比べてそれ以外の時刻（早朝・夜間）の壁における「温エクセルギー」の消費が大きく、このことが9~17時頃の室温の低下を抑制していると考えられる。壁における1~8時頃のエクセルギー保有量を見ると、Case1とCase2で目立った差はない。しかし、その時間の消費量はCase1の方がかなり大きくなっている。この時間帯Case1の壁は室内環境の快適性に対して有効ではないエクセルギー消費傾向を見せていると言える。

以上の計算結果より、建物躯体の持つエクセルギー保有量、保有されるエクセルギーの質（温/冷）、エクセルギー消費量を明らかにすることによって、その建物の室内温度が熱源としての壁と床の資源性の組み合わせり方に左右されていることを確認した。

室内の快適性はPMVなどに代表される評価指標が既に存在し、これは環境共生建築の計画の際にも有用であると考えられる。これに加えて、建物躯体におけるエクセルギーの消費過程を明らかにすることで、快適な室内環境を保つために望ましいエクセルギーの流れが、どの程度実現できているのかを定量的に比較検討できると考える。これによって、室内温度や周壁温度の情報だけでは捉えきれない、自然環境のもつ資源性の活用度合いを建物の計画の際に利用できると考える。

6. 建築計画への応用

前章の計算結果から得た特徴は、建物躯体を室内環境をより快適にするための「冷たさの源」として活用する方法を示していると考えられる。今回のモデルをより環境共生に寄与するモデルに改良するならば、以下のような工夫が考えられる。

- ・ 床をより熱容量の大きい仕様に変更し、床における冷エクセルギーの保有・消費を大きくする。
- ・ 窓面に庇を設け、直達日射の床室内表面への入射を防ぎ、床での温エクセルギー保有を小さくする。
- ・ 早朝・夜間に躯体の温エクセルギー保有・消費を小さくするため、夜間換気を行う。

躯体に蓄積された冷エクセルギーの室内への流れを大きくするためには、躯体の室内側表面付近での消費が必要である。躯体を「冷たさの源」として活用するには、単に躯体温度を下げるだけではなく、躯体が温エクセルギーを持つ場合はそれをなるべく室外側で消費し、冷エクセルギーを持つ場合はそれをなるべく室内側で消費するような計画が効果的である。

7. まとめ

エクセルギー概念を用いた環境共生建築の計画に向けて、外断熱・日射遮蔽を施した場合の建物躯体のエクセルギー保有量・消費量の経時変化を算出し、その値の建築計画への利用方法について考察した。

注1) 太陽光や風のように自然環境から直接与えられるエクセルギーを自然エクセルギーと呼ぶ。

【参考文献】

- 1) 宿谷昌則；「エクセルギーと環境の理論 流れ・循環のデザインとは何か」、2004年、北斗出版
- 2) 宿谷昌則、松縄堅、前川哲也；「建築環境システムのエクセルギー評価（その9. 壁体の非定常熱伝導とエクセルギー）」、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）1992年8月
- 3) 小室大輔、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3. 室温変動のメカニズム）」、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）1993年9月
- 4) 西川竜二、宿谷昌則；「自然エクセルギーの賦存量の計算」、日本建築学会計画系論文第504号 39-46 1998年2月
- 5) 呉志成、伊澤康一、宿谷昌則；「環境温度が変動する場合の壁体内部のエクセルギー蓄積と消費の検討」、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）2004年8月
- 6) 西川竜二、高橋達、宿谷昌則、浅田秀雄；「エクセルギー計算における環境温度に関する考察」、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）1997年9月
- 7) 宿谷昌則；「自然エクセルギーの生成と移動に関する考察」、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）2007年
- 8) 金子桂大 藤井晴行；「ピクトグラムを用いた環境共生建築の設計支援方法に向けて」、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）2009年8月
- 9) 田中俊六、武田仁、岩田和枝、土橋喬雄、寺尾道仁；「最新 建築環境工学 改訂3版」、2006年、井上書院

- *1 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻、修士2年
- *2 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻、准教授、日本建築学会（正会員）

Plan of the environmental symbiosis architecture using the exergy concept

○Takuma YAEMORI*¹ Haruyuki FUJII*²

Keywords : Environmental symbiosis architecture, Architectural environment, Exergy

The purpose of this study is that for the plan " to achieve the desired flow exergy , Environmental symbiosis architecture " , to obtain a useful knowledge . It has the characteristic that it can show quantitatively how long a room air and a building skeleton have effective resources characteristics for an indoor environment to catch building environment in an exergy concept. In addition to the conventional architecture environment evaluation that came from an energy concept, I take in an exergy concept, and it thinks that it is useful for a plan of the environment symbiosis architecture to consider the influence on indoor environment of the natural energy from the viewpoint of change of "resources characteristics" in greater detail. The environmental symbiosis architecture in this paper, without using it to make effective use of natural exergy, as a possible exergy was powered by fossil fuel, it refers to a building with a normal Architecture and Environment System.

The study of the past calculates a change of the quality of the energy in the architecture for physical quantity and thereby tries an evaluation by an effect of the representative passive technique such as a skeleton insulation, a sunlight cover, night ventilation, roof sprinkling. However, there are few studies that mentioned a method in a process improving building environment to a more comfortable thing using a value of demanded exergy.

Therefore at first this reports the result that calculated exergy possession quantity, the consumption in the architecture skeleton when we devised a skeleton insulation, a sunlight cover using the calculating formula in the existing study as a clue for suggestion of the construction plan method using the exergy concept. And from there, how to plan the architecture which can utilize effectively the " resources characteristics " which natural power sources have since a architecture user's comfortable nature is secured is considered in this report.

The calculation result clarified quantity of exergy possession, quality of held exergy, the exergy consumption to have of the architecture skeleton. In this way the indoor temperature of the building of resources characteristics of a wall and the floor as the heat source it was confirmed was combined, and to depend on the one.

There is already an evaluation index represented by PMV in the indoor comfort, and we think when this is useful in the case of the plan of the environmental symbiosis architecture. In addition, we think when we can weigh it quantitatively how you can realize a flow of desirable exergy to keep a comfortable indoor environment by clarifying a consumption process of the exergy in the architecture skeleton. In the case of the plan of the architecture, we in this way think about the resources-related utilization degree to have of the natural environments that we cannot catch only in information of the indoor temperature and enclosure temperature if available.

*1 Postgraduate, School of architectural engineering, Tokyo Institute of Technology.

*2 Associate Professor, School of architectural engineering, Tokyo Institute of Technology.