

IV. 面白い温熱環境 温もり・涼しさの創出と放射エクセルギー

特集：住まい手が選ぶ、おもしろい温熱環境

宿谷昌則◎東京都市大学名誉教授, LEXS design研究室

◎はじめに

暖房とは室内空間を暖めること、冷房とは室内空間を冷やすこと。これらはいちいち問い質すまでもなく定義は自明……そう思う読者が大多数だろう。暖房にせよ冷房にせよ、資源の投入なしには不可能だ。資源の浪費は環境汚染の原因の一つともなるから、暖房や冷房の負荷、ひいては投入される資源の量はできるだけ小さくすべきだ。そう思う人の数は玄人に限らず素人でも、一昔前に比べると、随分増えたように思える。関連する宣伝広告が、SNSやTVなどで流され、人々の耳目に、関心の有無に拘わらず頻りに飛び込んでくるからかもしれない。

そういうわけもおそらくあって、住宅の高断熱化・高気密化は大いに進んできたように見える。しかし、そのほとんどは新築住宅の話であり、既設住宅の断熱性・気密性向上の取組みは、皆無ではないが、遅々としている。取り組むべき課題は少なくない。

住宅の壁・窓が無断熱・無気密でよいわけではない。これに異を唱える人はいないと思うが、断熱・気密はどの程度とすべきかとなると、意見の違いがかなりあるように思える。「高い」とか「低い」とかの形容詞は、何かと何かを比べて一方が他方より高い、あるいは低い。そういうことははずだが、よく耳にした目にする“高断熱・高気密”なる語は(暗黙のうちに)高ければ高いほどよいといったニュアンスを随伴してしまっていないだろうか。

筆者は、住まい手が生き活きと暮らせる建築環境とは何かを、いわゆるエネルギー・環境問題を背景として読み解いていくためにエクセルギー概念に基づく研究に長いこと取り組んできたが、その過程で低断熱・低気密性の壁・窓は、より高く、しかし、ある程度を超えてさらに高断熱・高気密性ばかりを追い求めても仕方がない。重要なのは「ほどよさ」だと認識

するに至った。本稿ではそのエッセンスを述べて、読者の参考に供したい。

◎放射エクセルギー

「エクセルギー」概念とは何かを知らない読者が少なくはないと思うので、その大略をまずは説明しておきたい。いわゆるエネルギー問題というときの“エネルギー”は、正確を期せば「エクセルギー」といわねばならない。エクセルギーは、エネルギー・物質に内在する「資源性」とともに「消費」とは何かを曖昧さなしに表現可能にしてくれる。資源性とは「拡散を引き起こす能力」を指し、必然的に生じる「拡散」が消費に他ならない。私たちの身体の内でも、身近に広がる住環境空間でも、また、屋外空間でも熱現象が絶えず起きている。熱現象は大きく分けて放射・対流・伝導・蒸発から成るが、これらは互いに関係し合いながら、拡散を伴いつつ、さまざまに振る舞っている。エクセルギーは、保存を本質とするエネルギー、生成(増大)を本質とするエントロピーに加えて、考察の対象とする「系」としての環境温度を3本の柱として鼎立する概念である。

本稿で特に取り上げたい放射エクセルギーについてその計算事例を図1に示す。図1左は外気温5°Cの冬の場合、図1右は32°Cの夏の場合である。両図ともに横軸に壁体表面温度、縦軸に放射エクセルギーの出力速さを示す。縦軸の値は壁表面積1m²あたり1秒あたりにエクセルギーが放射(=電磁波)によって何J(ジュール)出るかを表わしている。

放射エクセルギーは、冬でも夏でも、表面温度が外気温と等しい場合にゼロであり、表面温度が外気温より高くても低くても正の値となる。放射エクセルギーは、表面温度と外気温の差に対して二次曲線状に大きくなる。表面温度が外気温より高い場合には「温」放射エクセルギー、低い場合には「冷」放射

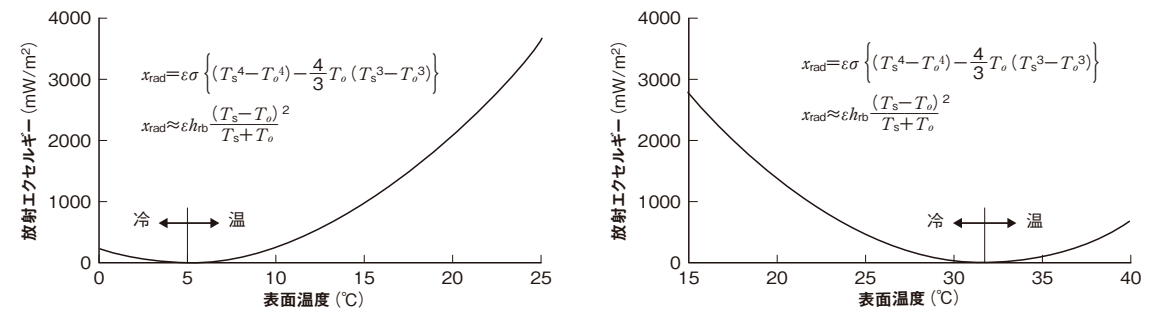


図1 放射エクセルギーの定量的性質(左:冬(外気温5°C), 右:夏(外気温32°C))

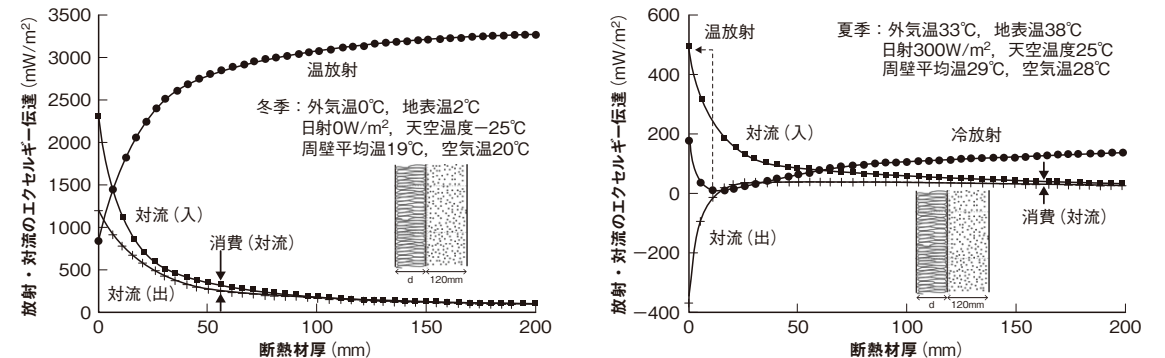


図2 外壁の高断熱化と放射エクセルギー、そして対流によるエクセルギー伝達(左:冬, 右:夏)

エクセルギーが出る。

冬の室内環境では温放射エクセルギーがほどよく大きめに、夏では温放射エクセルギーは小さければ小さいほどよく、できれば冷放射エクセルギーがほどよく得られるのがよい。冬における温放射エクセルギーは1000~3000mW/m²(=1~3W/m²)、夏には温・冷いずれも0~300mW/m²のオーダーである。図中に掲げてある二式は上が放射エクセルギーの精算式、下が略算式である。エクセルギーの「温」と「冷」は対流や伝導にも現われる。蒸発には「湿」と「乾」、空気・水の流れには「高圧」と「低圧」が現われる。理論の詳細に興味ある読者は参考文献1)~4)を参照してほしい。

◎断熱性向上と放射・対流エクセルギー伝達

図2は、厚さ150mmのコンクリート躯体に付加される断熱材の厚さに応じて壁体内表面から室内空間に向けて出力される放射エクセルギーがどのように変化するか、また、室内空気とのあいだで生じる対流によって伝搬されるエクセルギーがどのように変化するかを、冬と夏のそれぞれについて計算した結果を示す。図2左が冬の夜の場合(外気0°C、天空-25°C、地物2°C、室内の周壁19°C、空気20°C)、図2右が夏の昼の場合(外気33°C、天空25°C、地物38°C、日射

量300W/m²、室内の周壁29°C、空気28°C)である。いずれも横軸は断熱材(熱伝導率0.04W/(mK)のセルロースファイバー)の厚さ、縦軸はエクセルギー伝達の速さ(単位はmW/m²)を表わす。

まず、冬の場合(図2左)をみてほしい。無断熱では900mW/m²の「温」放射エクセルギーが出力されている。その一方で、室内空気から壁表面に向けて2300mW/m²ほどの「温」エクセルギーが入力される。室内側表面温度が室内空気温よりかなり(8°Cほど)低いために下降気流が生じるからである。气流に乗って運ばれる温エクセルギーは壁表面に到達するまでに一部が消費され、壁内部へと出力されるのは1100mW/m²である。2300mW/m²の入力と1100mW/m²の出力の差、1200mW/m²は壁表面と室内空気とのあいだで生じる対流によるエクセルギー消費である。

図2左の全体をみてわかるのは、断熱性向上が温放射エクセルギーを増加させるとともに、対流によって壁体内に流れ込む温エクセルギーを、ひいては対流によるエクセルギー消費を著しく減小させることである。したがって、断熱性向上は重要なわけだが、注意したいのは、温放射エクセルギーの増加と対流によるエクセルギー伝達の減少が、断熱材厚と比例関係にないことである。断熱材厚0mmから100mmへの

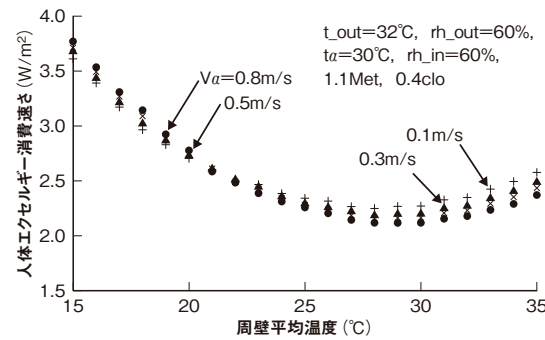
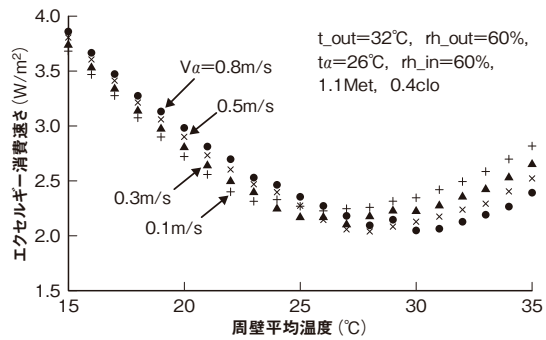


図3 夏の人体エクセルギー消費速さの計算例 (左:室内空気温26°C, 右:室内空気温30°C)

変更では著しい効果が期待できるが、100mmから200mmへの変更では効果はあまり大きくない。

次に図2右をみてみよう。断熱材厚10mmほどのところを境にして薄い側では「温」放射エクセルギー、厚い側では「冷」放射エクセルギーが出力される。断熱材厚10mm未満では日射の影響によって壁表面温度が外気温より高くなるので「温」となる。材厚10mm以上になると、壁表面温度が外気温より低くなって「冷」となるのだが、その理由は対向する周壁平均温度(29°Cと想定)から出力される「冷」放射エクセルギーが入力されるとともに対流によっても「冷」エクセルギーが壁表面に入っていくからである。「冷」放射エクセルギーの出力は断熱材厚の増加とともに増すが、次第に頭打ちとなる。

断熱材厚0mmでは、日射の吸収(300W/m²)によって壁体内表面が外気より4°Cほど高くなって、この表面に沿った上昇気流が生じる。断熱材厚0mmでは対流(出)が負の値(-370W/m²)となっているが、これは入り(=負の出)を意味する。対流によって温エクセルギーが壁表面から室内空気の方へ向かって出てくるのである。上昇気流は室内空気が保持している冷エクセルギーの一部を壁表面に向かわせる。その値は断熱材厚0mmでは467mW/m²である。これらのことは次のようにも言える。壁体内表面近くにある空気の薄層(厚さ2mmほど)内部で起きる対流によって温エクセルギー 370W/m²と冷エクセルギー 467mW/m²が互いに消費し合って無に帰する(エクセルギー出力がゼロになる)。消費合計は837(=370+467) W/m²である。

断熱材厚が増すと、対流(入)と対流(出)の差、すなわちエクセルギー消費速さが著しく減小する。この減小が冷放射エクセルギーの増加をもたらすといえ

る。不要な温放射エクセルギーの解消が「冷」放射エクセルギーの発出を可能にするといえよう。断熱材厚0mmから100mmへの変更では著しい効果が期待できるが、100mmから200mmでは効果は大きくない。この傾向は冬と同様である。

◎人体エクセルギーの消費の速さ

人体では体温調節のためにエクセルギーが消費される。夏における人体のエクセルギー消費速さと窓や壁・床・天井の平均温度(周壁平均温度)の関係を計算した二例を図3に示そう。図3左は室内空気温26°C、図3右は室内空気温30°Cの場合である。いずれも人は軽装で座して事務仕事を行っており、外気温32°C、相対湿度は室内外ともに60%と想定している。図中にある4種類のプロット群は各々人体まわりの気流速が0.1, 0.3, 0.5, 0.8m/sの場合に対応する。

人体のエクセルギー消費速さは、着衣・代謝といった人体条件と室内外環境条件とに応じてさまざまな値を取り得るが、多くの場合、小さめになるのがよい。例外は、人体周囲の温湿度が著しく高い場合である。エクセルギー消費速さが大き過ぎず、また、小さ過ぎないような室内環境が人体に対して熱的なストレス(不快)を与え難い。図3は以上のことをエクセルギー概念に基づいて定量的に表わしている。室内空気温26°Cの場合(図3左)をみると、エクセルギー消費速さが最小となる周壁平均温度は、気流速が大きくなるにしたがって高めに移り、しかもエクセルギー消費速さの値をも小さくさせている。例えば、気流速0.1m/sではエクセルギー消費速さは、周壁平均温度25°Cで最小となって2.25W/m²、0.8m/sでは30°Cで最小となって2.05W/m²である。

図3右の室内空気温30°Cの場合も全体的な傾向は図3左と同様である。注意したいのは、周壁平均温度

が高いと、気流速の違いがエクセルギー消費速さに与える影響が相対的に大きくなることである。周壁平均温度が高くなれば、私たちは思わず首元を扇ぐ動作を取るようになるが、これは人体のエクセルギー消費速さを小さくするための行動といえる。

図3では外気温32°Cを想定しているので、周壁平均温度が32°Cより低ければ、周壁からは冷放射エクセルギーが出力される。周壁平均温度が28~30°Cの範囲にあれば、人体エクセルギー消費速さはほぼ最小になるといってよいだろう。

◎冷放射エクセルギーと通風

夏の室内空間に出力される「温」または「冷」放射エクセルギーは“室内の温度を下げたい”と思う人たちの数とどのような対応関係にあるだろうか? 筆者らがかつて(2007年と2014年に)行なった被験者実験二つの測定結果を整理したところ図4が得られた。横軸の中心をゼロとして、左側に「冷」、右側に「温」放射エクセルギー、縦軸は「温度を下げたい」と思う人の割合(百分率)を示している。

プロット群と太めの横棒群は、二つの実験それぞれから得られた結果に対応している。プロット群は、通風を行なっている部屋での結果、太めの横線群は、冷房なしで窓を閉め切っている場合と通風を行なっている場合の双方をまとめたものである。太めの横実線は日ごろの生活でエアコン冷房に頻繁に曝されている人たち、太めの横点線はエアコン冷房に曝されることが少なめの人たちの結果である。

図4の全体をみて、まず分かるのは、「温」放射エクセルギーが少しでも生じていると、75%を越える人たちが「温度を下げたい」と思うことである。エアコン冷房に曝されることが少なめの人たちは20mW/m²ほどの「冷」放射エクセルギーでも「室温を下げたい」と思わない。ところが、日ごろエアコン冷房によく曝されている人たちは大きめの「冷」放射エクセルギー20~60mW/m²が得られても「室温を下げたい」と思いがちである。冷やし過ぎの冷房は、人に現われるべき涼しさ知覚を麻痺させているように思われる。図4の横軸に記した放射エクセルギーの下には壁表面と外気との温度差を示しておいた。外気温よりも2°C低ければ、十分な「冷」放射エクセルギーが得られるので、夏の室内環境としては十分だ。そう言うては言い過ぎ

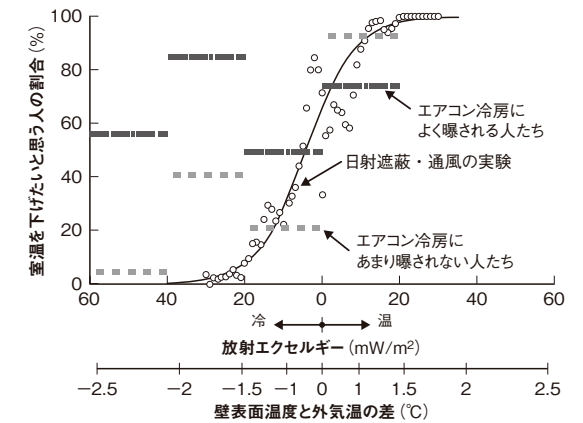


図4 放射エクセルギーと「温度を下げたい」人の割合との関係

なら、少なくとも凌ぎやすい室内環境にはなるだろう。

◎おわりに

暖房も冷房も空調(エアコン)が行なう。そう認識している人が素人・玄人を問わず多い。筆者も25年ほど前までは、そのように思っていた。ところが、エクセルギー研究を筆者なりに展開してきてみたら、伝熱現象の理解が深まって、建築外皮の断熱・遮熱性の向上は実のところ放射の調整(放調, ラジコン)のためにあると考えるようになった。

冬の断熱性向上は、現われるべき「温」放射エクセルギーで室内空間を満たす。そこに私たちは「温もり」を知覚する。夏に放射の調整を上手に行なうと、不要な「温」放射エクセルギーが解消され、現われるべき「冷」放射エクセルギーが室内空間を満たす。そうすると、風力・浮力を活用した換気や穏やかな空調が可能となる。そこに私たちは「涼しさ」を知覚する。冬にせよ夏にせよ、空調(エアコン)に頼る前に壁・窓などの設(しつら)えと備(そな)えを、放調(ラジコン)のために整える。この道筋が重要だと考える。(しゆくや まさのり)

【参考文献】

- 1) M. Shukuya: Exergy-Theory and applications in the built environment, Springer Verlag, London, <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4573-8>, 2013
- 2) 宿谷昌則: 連載講座「エクセルギーの読み方・考え方」(1)~(6), 空気調和・衛生工学会誌, 2015年10月号~2016年04月号
- 3) M. Shukuya: Bio-climatology for Built Environment, CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9781315120362>, 2019
- 4) M. Shukuya: Exergetic approach to the understanding of built environment—state-of-the-art review, Japan Architectural Review, pp.1-10, <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12082>, 2019
- 5) 宿谷昌則: 放調のすすめ, 月刊リフォーム, pp.12-18, 2022年6月号
- 6) 宿谷昌則: エクセルギーで考える家づくり, 建築技術, pp.64-67, 2023年1月号