

人体の熱環境適応性とエクセルギー収支にかんする考察

正会員 ○ 宿谷 昌則*

人間生物学 熱力学 適応
エクセルギー パッシブ型技術 アクティブ型技術

1. はじめに 壁や窓・床・屋根などの構成による環境形成の技術—すなわちパッシブ型技術—が発現させる建築環境の性状は、住まい手の温冷感覚から知覚・認知・行動にいたる一連のプロセスに影響し、延いてはアクティブ型暖冷房システムのエクセルギー消費パターンにも影響する。これらの関係性を理解することは、デザインされて然るべき住まい手のためのパッシブ型・アクティブ型建築環境システムの描像を明確にしていく。

建築環境の熱的快適性は、従来、人体のエネルギー収支を基本として導かれ、その結果を、制御された実験室空間に現われる温熱環境に対する人の申告に対応させて作られた指標（例えば PMV）によって、あるいは放射や空気温湿度・気流の影響を仮想空間の温度に（エネルギー収支が不変であるように）換算して得られる指標（例えば ET*）によって評価されてきた。

人体のエネルギー収支は、その名の示すとおりで、熱力学の二法則のうち一方だけを対象にして導かれる。したがって、人体の熱的振る舞いは、もう一方のエントロピー生成則を考慮し、また熱力学的な系（システム）にとつての環境温度概念を加味して得られるエクセルギー概念に基づいて記述する必要がある。これまでの10数年にわたる人体エクセルギー収支に関する研究によると、人体エクセルギー収支と人の不快・快には対応関係があることが明らかになってきた^{1) 2)}。

建築内外の熱環境に対する人の応答を調べる方法は大きく分けて二つある。実験室内で行なう (in vitro) 測定と現実の建物内外で行なう (in-vivo) 測定である。

前者 (in vitro) では、熱環境の条件を実験者の意図に応じて整えやすいが、被験者は（例えば無窓のかなり狭い空間に居て行動もかなり制限されるような）日頃とは異なる環境に曝されるため、被験者の申告にはその影響が大なり小なり現われるだろう。

後者 (in vivo) では、熱環境の条件を予め実験者の意図に応じて整えることはできないが、実際の住居・仕事場空間だからこそ現われるべき被験者の温冷感覚から知覚・行動に至るまでの性質が得られやすいだろう。

In vivo の条件下で得られる人の熱環境に対する応答は、多くの人々から得られた申告と外気温などの関係が統計解析によって整理され纏められる。これは適応モデルと称されている³⁾。その結果は、前者 (in vitro) から得られる結果とは必ずしも一致しない³⁾。したがって、両者の相同・相違に関わるメカニズムを人間生物学的・熱力学

的な観点から明らかにしていくことは重要だと考える。

本稿では、以上のことから、人体の熱環境適応性を理解するための基本として、脳の働きを含む人の身体の成り立ちを概観するとともに、人体・建築環境のエクセルギー収支に関するこれまでの知見を概観して、今後の研究や開発すべき技術を展望したい。

2. 人の身体の成り立ち 生物学的な視点から考えれば、人の感覚や知覚・意識のすべては神経系の働きである。したがって、神経生物学の知見を建築環境学に取り入れて総合的な考察をしていくと、人（住まい手）と建築環境の関係が明確になってくるであろう。

人は身近な環境空間に現われる照度や温度・湿度などの物理的变化に応じた「感覚」を入力として、末梢と中枢から成る神経系を働かせて、明るい—暗い、温かい—寒い、涼しい—暑いなどを知覚・認知する。その結果、必要に応じて環境を改変するために、窓の開閉や暖冷房システムのスイッチの入り切りといった「行動」を出力する。「行動」はすべて筋肉の働きによる。以上を「感覚—行動」プロセスと呼ぶ。その全体像を図1に示す。

人の感覚から行動へ至るプロセスは、脳を含む神経系が張り巡らされた身体が担うわけであるが、その全体がどのように構成されていくかを、個体発生（人の一生）と系統発生（生物進化のプロセス）の関係に注意して概観する^{4) ~ 9)}。

2-1 身体の全体構成 人は誰でも一個の受精卵細胞から始まって、約60兆個の細胞からなる多細胞生物へと成長していく。神経系を構成する細胞群はまず、神経管とよばれる管状の構造を形成し、その後、その上部が膨らんでいき、そこが脳になり、残りが脊髄になる。脳と脊髄をまとめて「中枢神経系」といい、脳からは左右12

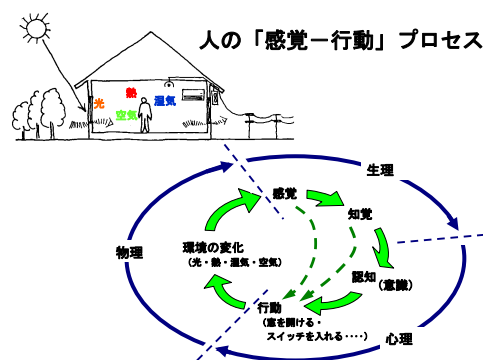


図1 人の「感覚—行動」プロセス²⁾

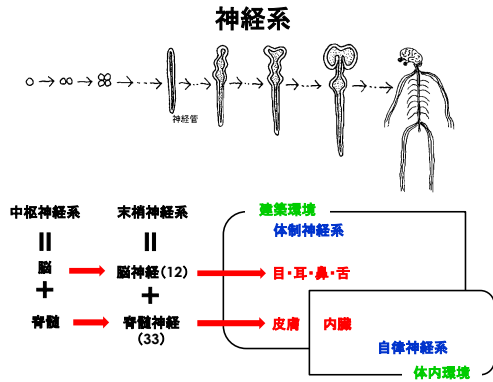


図2 人の神経系の成り立ち²⁾

対、脊髄からは左右 33 対の神経線維が体内に張り出す。図2は以上を一つの描像として示したものである。

神経線維の多くは体表に向かって張り出すが、一部は内臓にも張り出す。頭部を含めて体表に向かう一群の神経線維を「体性神経系」、内臓に張り出す一群を「自律神経系」という。両者をまとめて「末梢神経系」と呼ぶ。体性神経系は「建築環境」につながり、自律神経系は内臓という脳にとっての「体内環境」につながっている。

2-2 三層入れ子構造の脳 中枢神経系の中核たる脳は、図3に示すように、大雑把に言って三層の入れ子構造を成す。最も深部の第一層を構成するのは、脊髄の上端に位置する延髄・橋とその背側にある小脳である。第一層は魚類・両生類・爬虫類の段階で発達した脳に相当する。延髄・橋は、呼吸、心臓の拍動、栄養の消化・吸収、血圧の制御、咳・くしゃみ、嚥下・嘔吐にかかわる。小脳の古い部分は水泳や自転車乗りなどの殆んど無意識的に行なわれる全身筋肉群の動きに、新しい部分は言語表現に係わる咽頭・顔面筋肉群の動きに関係する。

第二層は、視床・視床下部・乳頭体・脳弓・扁桃体・海馬などと呼ばれる部分から構成されている。系統発生との関係で考えると、第二層は、原始哺乳類の段階で発達した脳に相当する。第二層は「大脳辺縁系（大脳古皮質）」とも呼ばれる。

生命は、魚類・両生類から爬虫類への系統発生プロセスで、環境を構成する物質が水から大気へと変化したのに対応して、体液の質と量を維持できるしくみ（水分調節）を確保し、爬虫類から哺乳類へのプロセスで、環境温度の変動に左右されずに体温を恒常化できるしくみ（体温調節）を確保した。体温調節の中核は視床下部にある。

体表にある感覚受容器（脳から皮膚まで繋がっている一連の神経細胞群の末端）から入力される体性感覚・味覚・嗅覚・聴覚・視覚の情報は、第二層の視床を中継して扁桃体に入るとともに第三層に入る。扁桃体への入力は、第三層への入力と並行して行なわれる。第二層を包み込むように存在する第三層は、第二層が大脳古皮質と呼ばれるのに対応して、「大脳新皮質」と呼ばれる。

大脳新皮質は、系統発生との関係で考えると、高等哺乳類で発達した脳の部分に対応し、特に前頭葉と呼ばれる

前方部分のさらに前方部分「前頭前連合野」は、人の脳で最も発達が見られる部分であり、人が自らを人間として意識したり、人間らしい理性的な行動を起こしたりすることに関係する。人間の行動の一つたる「住まい方」は、前頭前連合野の働きと言えらる。

第一層・第二層の働きはまったく「無意識」、第三層の働きは、一部が無意識、残りが「意識」と考えられる。私たちはみな睡眠が無意識であることを知っているが、これは人の一生を 80 年として 27 年ほどが無意識だけであることを意味する。意識に基づく行動は、身体全体の無意識な働きを基本として、その上に成り立っている。人の身体のエクセルギー収支は「無意識」と関係し、住まい方の結果として現われる建築環境のエクセルギー収支は「意識」と関係する。環境への適応メカニズム理解には、これらの関係をつなげて考える必要がある。

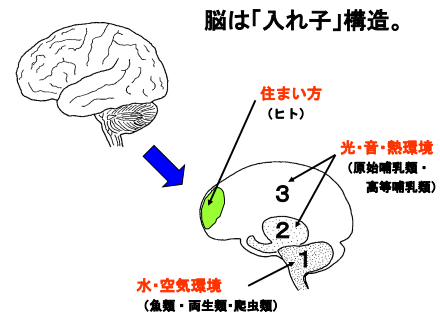


図3 三層の入れ子構造をなす人の脳²⁾

2-3 「不快」・「快」の評価 体性神経系によって脳に入力された情報は、脳で評価され、脳を含む身体は、「不快」あるいは「快」と価値づけて新たに情報を出力する。出力の多くは、筋肉の運動として表現される。表現の形式は、内臓の働き（不随意性筋肉の運動による体内環境への働きかけ）や、顔の表情の変化（顔面筋肉の運動）であったり、また顔面に加えて喉頭などにある筋肉の統合的な運動による言語音声であったり、手・腕 筋肉の運動による書字や、四肢を含む身体全体の運動であったりする。

意識に上る「不快」・「快」の価値付け評価は、図4に示すように、感覚入力に応じて、まず第二層（扁桃体）で、次いで第三層（新皮質）で行なわれ、その結果が扁桃体にフィードバックされ再評価される。脳は、いずれの価値付け評価も、脳に蓄積されている過去に経験した環境情報と、新しく入力される環境情報との比較によって行なう。第二層での価値付けは大雑把だが素早く、第三層でのそれは精緻だが遅いのが特徴である。

人は、環境の中で起きること（情報）を刺激として受け取るとき、まず素早く第二層を働かせる。第二層で「快」評価が行なわれると、第三層の働きは活性化しやすい。逆に第二層で「不快」評価が行なわれると、第三層は活性化しにくい。

脳に蓄積されている情報は、脳を含む身体

学習・記憶・(比較)評価の循環

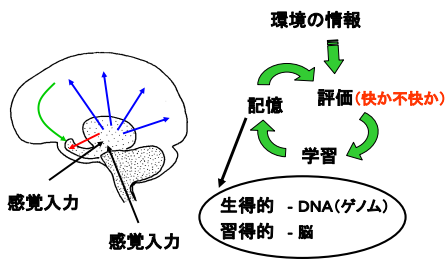


図4 環境情報の比較評価・学習・記憶の循環²⁾

ひとつの核内 DNA に遺伝情報(ゲノム)として収められた 38 億年にわたる過去の環境から得た情報と、その人が誕生から現在までに曝された環境から得る情報の二つに分けられる。前者を「生得的(先験的あるいは先天的)情報」、後者を「習得的(経験的あるいは後天的)情報」と呼ぶ。これらはいずれも「学習」の結果として得られた「記憶」である。学習と記憶・評価は、図4に示すように循環する。この一連のプロセスの中で「適応」と称される現象が時間発展していく。

遠い過去の環境情報は、意識できるか否かに係わらず「記憶」となって脳に蓄積されている。体温調節のしくみはそのような一例である。人の体温に見られる微かな日変動は過去に存在した環境温度の変動の「記憶」と言える。無意識のうちに働いている体温維持のしくみは、原始哺乳類の時代に生じた「学習」内容が DNA の塩基配列という形式で書き込まれ「記憶」となり、それが現在に至って人の身体で発現しているのだと考えられる。

私たちが「寒い」とか「暑い」とかの言葉を発するのは行動出力の一つであるが、温冷感覚が知覚・認知を省略して直ちに行動となって現われることもある。いわゆる無意識な行動である。寝ているときに寒く感じれば、身体は独りでに縮こまり、暑ければ布団を剥ぐ。これらの行動は、生得的な熱環境情報といま現在の熱環境情報を比較評価した結果に応じた出力である。

人が環境から新たに入力する情報は、脳によって「学習」され、未来に比較されるべき「記憶」として蓄積されていく。このような記憶が習得的信息であり、脳の特徴はこの可塑性にある。習得的信息は、未来のある時点で現われる環境からの情報と比較評価され、その後の行動が判断される。習得的信息が生得的情報の一部となるには、生物進化が生じるような長時間を要する。

建築環境には、以上の議論から、人の脳における第二層と第三層の働きを同調させ得るような性質が求められる。これは、「空間」という側面に偏ってデザインされがちだった建築とその環境が、実は「時間」という側面についてもデザインされるべきことを意味する^{8) 9)}。

アクティブ型の照明・暖房・冷房の技術はこれまでで一定で均質な明るさ・温かさ・冷たさを得ることを目標にして開発されてきた。この開発はそれなりの成功を収め、人の「快」を「適」える建築環境が実現されてきたかに

思われる。しかし、上述した人の身体の成り立ちから考えると、脳を含む人の身体は「快」を求めるのではなく、むしろ「不快」を避けるよう絶えず振る舞っていると言えよう。

人の脳には「不快」の記憶が多々あるが、それは不快を避ける行動が生きていくうえの安全確保に有利だからである。このような生命の基本を見誤った技術開発がいわゆるエネルギー・環境問題を引き起こすだと考えられる。今なお進行中の原発震災はその極みである。

3. 人体エクセルギー消費の性質 上述した人の身体の成り立ちを背景として暖房や冷房の在り方を改めて考え直していくにあたって、人体エクセルギー収支の性質を考察することはその手掛かりとして重要である。

冒頭に述べたように、適応モデルは例えば快適温度が外気温の関数として表現されてきたが、エクセルギー収支には必然的に外気温が現われるので、両者を繋げて考察していくことが可能となるだろう。

ここでは、人体に関するエクセルギー研究が明らかにしてきた適応性に関係するであろう知見の一つを紹介しよう。図5は、夏季の典型的条件について、室内の周壁平均温度(放射温度)と人体近傍の平均気流速の組み合わせが人体内のエクセルギー消費にどのように関係するかを計算した一例である^{1) 2)}。この例では、屋外の空気温度 33℃; 相対湿度 60%、室内は 30℃; 65%で、人は軽装で座って本を読んでいるような状況を想定している。

縞模様状に見える線群は、その一本一本が等エクセルギー消費速さを表わす。太めの鎖線は人体の濡れ面積率が 0.25 となるような状態を示している。皮膚の濡れ面積率が 0.25 を超えると、不快の度合いが大きすぎるので、濡れ面積率 0.25 の線は我慢しては不健康な限界条件を示していると考えられる。

気流速が 0 から 0.2 m/s までのあいだを見ると、人体のエクセルギー消費(すなわち熱ストレス)は周壁平均

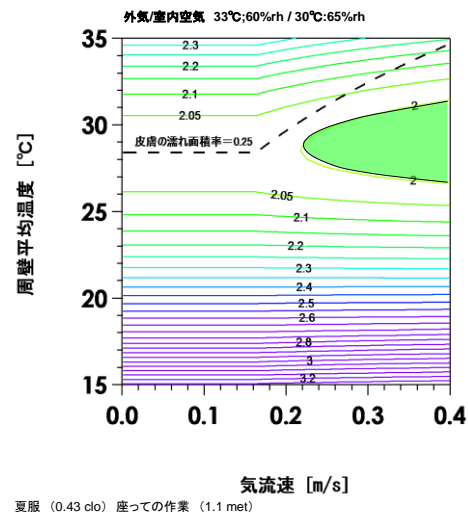


図5 人体エクセルギー消費と気流速・周壁平均温度の関係(夏季: 外気温湿度33℃;60%)^{1) 2)}

温度が 29℃より高くなると大きくなり、また 28℃より低くても大きくなる。言い換えると、人体エクセルギー消費は、周壁平均温度 28~29℃で最も小さい。これは、皮膚の濡れ面積率 0.25 の場合とほぼ一致している。発汗は、水の蒸発冷却を利用して皮膚表面温度を下げるための人体に備わった熱環境への適応の現われで、熱的なストレスを小さくするための行動出力の一つと言える。

気流速が 0.2m/s 以上では人体エクセルギー消費はさらに小さくなり得る。その場合の周壁平均温度は上限値が 31℃ほどである。これは、従来の適応モデルにおける外気温に応じた快適温度の上限値³⁾にかなり近い。

対向する二つの窓が開放され風通しがよくて心地よい。そのような「涼しい」という言葉がまさに相応しい建築環境を「涼房」¹⁾と呼ぶが、その創出にはほどよく揺らぎながら室内空間を通り抜ける（温度はそれほど低い必要のない）外気とともに、壁や天井・床の表面温度がほどよく低いことが肝要である。

室外側日除けによる日射遮蔽や昼光照明は、周壁平均温度を 上述した値の程度まで抑えるのにたいへん効果的である。適正なパッシブ型技術は、人体エクセルギー消費を最小化するための基本として重要なのである。

4. 人の行動と冷房システムのエクセルギー消費 以上のような人体の熱力学的な性質に対して、行動学的な性質は暖冷房システムのエクセルギー消費とどのような関係にあるだろうか。その検討の一例を図6に示そう。

これは、建築外皮の断熱性の良し悪しとエアコン使用の多少とが冷房システム全体のエクセルギー消費とどのような関係にあるかを検討したものである。エアコン使用の多少は、東京のある建物（留学生会館）において行なわれた住まい手の行動調査と室温測定の結果を分析して得られたエアコンの使用率と外気温の関係¹⁰⁾に基づいている。例えば、外気温 25℃の場合、エアコンを使用しがちな人が 100 人いたとすると、そのうちの 70 人は冷房のスイッチを入れ、エアコンをすぐに使用するのではなく窓を開けるなどの行動を取る傾向の 100 人では、20 人だけが冷房のスイッチを入れる。この調査からはさらに、エアコンを使用しがちの人は、そうではない人に比べて設定温度を 1℃ほど低めにするとも明らかになっている。

以上のことを仮定条件として、エアコンを使用しがちの 100 人と、そうではない 100 人が、外気温 30℃の条件でそれぞれの個室を冷房している場合について求めたシステム全体のエクセルギー消費パターンが図6である¹¹⁾。

エアコン使用の多・少と建築外皮の断熱性が普通・良好の組み合わせで4つのケースを想定している。エアコン使用が「多」で断熱性が「普通」（ケース1）、「少／普通」（ケース2）、「多／良好」（ケース3）、「少／良好」（ケース4）の4つである。

発電所に投入されるエクセルギーは、ケース1で最も大きく、ケース4で最も小さくなっている。ケース2とケース3の結果はほぼ同等だが、これは、エアコンが少

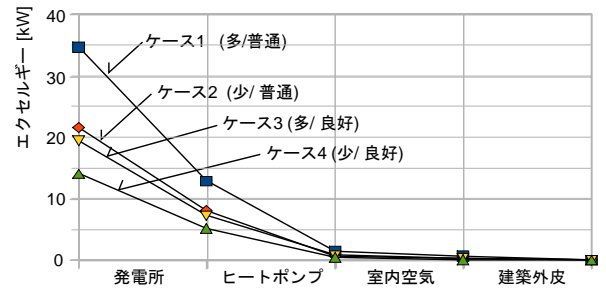


図6 冷房のエクセルギー消費（多・少はエアコンの使用率、普通・良好は断熱性）^{1) 2)}

しだけ使用され、そのときの設定温度が高めであることが、建築外皮の断熱性改善と同等であることを意味する。

このように住まい手のエアコン使用が「多」から「少」になると、エクセルギー消費がかなり減少することから、エアコンの使用を控えてもらえばよいかのように見えるが、ただ単にエアコンの使用を控えれば、住まい手は我慢を強いられることになり、そのような建築環境に曝され続けると、住まい手は「不快」の記憶を脳裏に刷り込むことになる。

5. おわりに 以上の考察から、1) 人体の熱環境適応性、2) 建築外皮の断熱・遮熱・蓄熱性を活かすパッシブ型技術、3) 2) に整合すべきアクティブ型技術の基本的関係性が確認できたと考えるが、このような考察はさらに深めていく必要があり、その上で人の適応性を一殺すのでない—活かせる技術を見出していく必要がある。

参考文献

- 1) 宿谷昌則編著：エクセルギーと環境の理論—改訂版、井上書院、2010年。
- 2) M. Shukuya, Exergy-theory and applications in the built environment, Springer-Verlag London, 2013
- 3) F. Nicol, M. Humphreys, and S. Roaf, Adaptive Thermal Comfort, Routledge, 2012
- 4) 三木成夫：生命形態学序説—根原形象とメタモルフォーゼ、うぶすな書院、1992年
- 5) 松本元：脳とはどんなコンピュータか、日本物理学会編（松本元 責任編集）：脳・心・コンピュータ 所収、1996年、pp. 207-233。
- 6) 宿谷昌則：自然共生建築とヒトの「感覚—運動」系にかんする考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、2001年9月、pp. 437-438
- 7) 宿谷昌則：人の内なる自然と建築環境、熱と環境、2010年、pp. 2-6
- 8) 宿谷昌則：自然エクセルギー利用と時間デザインにかんする考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013年8月、pp. 423-424
- 9) 宿谷昌則：感覚・行動と時間デザイン、自然・人間・建築と環境—連載 第3回—、ARCHITECT(日本建築家協会東海支部雑誌)、2013年10月
- 10) M. Schweiker and M. Shukuya, Investigation on the Relationship between Occupants' Individual Difference and Air-Conditioning Usage during Nighttime in Summer, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 73 No. 633, November 2008, pp. 1275-1282.
- 11) M. Schweiker and M. Shukuya, Comparison of Theoretical and Statistical Models of Air-conditioning Unit Usage Behaviour in a Residential Setting under Japanese Climatic Conditions, Building and Environment, No. 44, 2009, pp. 2137-2149.

*東京都市大学 環境学部 環境創生学科 教授、工博

* Professor, Dept of Restoration Ecology and Built Environment, Tokyo City University