

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 05 月 15 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360242

研究課題名（和文） 「人—自然共生建築」系のエクセルギー消費最適化に関する研究

研究課題名（英文） Research on the optimization of exergy consumption for human-ecological system in architecture

研究代表者

宿谷 昌則（SHUKUYA MASANORI）

東京都市大学・環境情報学部・環境情報学科・教授

研究者番号：20179021

研究成果の概要（和文）：パッシブ型技術を基本として、それに整合するアクティブ型技術によって構成される建築環境とその住まい手たる人の感覚・知覚について実験・調査・数値解析を行なった。その結果、1）夏季における発汗蒸発は人体エクセルギー消費を小さくするのに需要であること、2）井水放射冷システムは実現可能であること、3）不快でない人（児童）の想像温度は不快な状況に比べて2℃程度低めであることなどが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：The thermo-physical and -physiological characteristics of the built environment to be realized by passive systems together with active systems being in harmony with the former systems were investigated. The findings were 1) the sweat secretion and evaporation play an important role in human-body exergy balance in summer; 2) a radiant cooling system making use of well-water is feasible; 3) occupants (children) who perceive no discomfort tend to imagine their surrounding temperature to be about two degrees lower than those perceiving discomfort.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	10,100,000	3,030,000	13,130,000

研究分野：建築環境学

科研費の分科・細目：建築学、建築環境・設備

キーワード：熱環境

1. 研究開始当初の背景

住宅建物の暖冷房・給湯などによる二酸化炭素の排出量を見ると、過去 20 年の間に漸増してきており、事務所や商業施設などに加え、住宅の化石燃料使用抑制は今まで以上に重要になっていくと考えられ、化石燃料使用抑制の方策を無理なく実現できるようにしていく必要がある。

暖冷房・照明などの燃料使用量と快適性と

は二律背反と捉えられがちで、燃料使用量を削減するのであれば、快適性はあるていど犠牲にせざるを得ないと考えられがちであるが、本研究の代表者（宿谷）らが 1990 年代初めころから進めてきたエクセルギー研究によると、冬季において良好と考えられる温熱環境では、人体の熱エクセルギー消費速さが最小になる。

これは、いわゆる省エネルギー性と快適性

とが互いに矛盾しない可能性を理論的に示唆したと考えられるので、このことを実測や実験によって更に検証していく必要がある。さらに、冷房や照明でも同様なことが言い得るか否かを解明できれば、人の快適性を確保しつつ身近な自然に存在する様々なポテンシャルを活用し得る—自然エクセルギーの有効な消費ができる—建築環境システムとは何かが明確になってくるに違いない。

人の身体には健やかな〈快〉を得る方向への「感覚-行動」プロセスが潜在していると考えられるが、それを十分に引き出せるような建築環境のハードウェア（建築外皮の設え）とソフトウェア（住まい方）の関係性を明らかにすることは、上述したような在るべき建築環境システムの姿形を浮かび上がらせることになると考えた。

2. 研究の目的

建築環境に着目して行なわれてきたこれまでのエクセルギー研究によって、人体エクセルギー消費が最小となる温熱環境が存在し、また快適性とも関係することが理論的に明らかにされてきたが、このことを出発点として、冬季や夏季の温熱環境に応じた人の〈快-不快〉の発現の仕方を、人の「感覚-行動」プロセスの中に改めて位置づけ直し、このことを人体エクセルギー収支とともに建築環境システムのエクセルギー収支と関係づけて解明することを第一の目的とする。その上で、身近な自然に存在するエクセルギーの最適な活用（消費）方法を見出すことを第二の目的とした。これらの目的達成を目指した研究は、持続可能な社会の発展に寄与する建築環境技術の基礎となるべき考え方（理念）を構築するのに役立つと考えた。

3. 研究の方法

宿谷は主として、人体エクセルギー収支の性質についての被験者実験、暖房方式の違いが人体エクセルギー収支に及ぼす影響についての被験者実験、人の明るさ知覚が暴露照度によってどのように変化するかについての被験者実験を行ない、それらの結果について考察を行なった。

高橋は主として自然エクセルギー源の活用方法に着目した実験・実測・数値計算を行なった。対象は、井水を冷エクセルギー源とする冷房システム、冷却塔による蒸発冷却を活用する冷房システム、太陽熱利用による天井・床放射暖房システムである。

斉藤は学校教室内の児童を対象として温熱知覚と想像温度が南北地域（熊本と札幌）でどの程度異なるかについて調査と分析を行なった。また寒冷地におけるヒートポンプによる地中の温エクセルギー活用がどの程度可能かについて実測と解析を行なった。

4. 研究成果

以下、(1)～(3)に宿谷の、(4)～(6)に高橋の、(7)～(9)に斉藤の主たる研究成果を述べる。

(1) 汗の蒸発速さと皮膚温度の下がり方が涼しさや不快感の知覚と関係しており、特に不快感の知覚が、人体エクセルギー消費速さの計算値とよく対応することを明らかにした。さらに人体エクセルギー収支の計算に、環境物理量の計測値と、各被験者の生理量入力とした場合について考察した。その結果、皮膚表面が汗である程度湿っており、断続的な自然の風によって蒸発が生じると、人体のエクセルギー消費速さは緩やかに減少していくことを明らかにした（図1）。

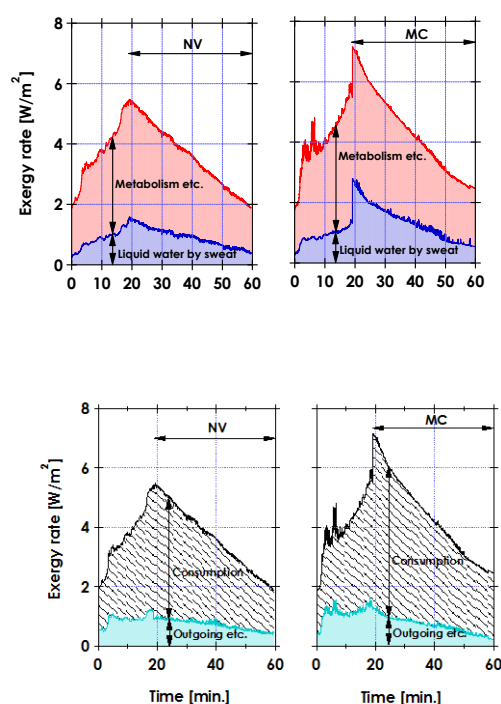


図1 夏季の非正常環境における人体エクセルギー収支（左が通風、右が冷房）

(2) 非正常な温熱環境における人体エクセルギー収支と温熱知覚・不快知覚の関係を解析した。特に、冬季における温熱環境の変化として、屋外空間から室内空間へと移動することによって変化する人体エクセルギー収支の考察を行なった。その結果、放射式床暖房と対流式暖房とでは人体エクセルギー収支には大きな違いは現れないことがわかった。しかし、人体を出入りする放射エクセルギーには大きな違いがあることが認められ、これは「温もり」の感覚・知覚と関係するだろうと考えられることが明らかとなった（図2）。

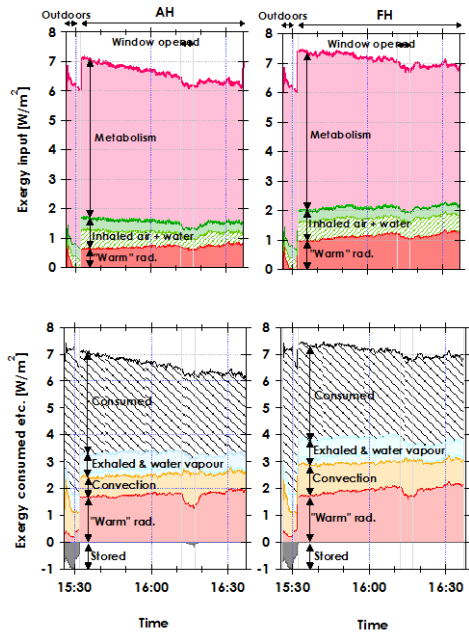


図 2 冬季の非正常環境における人体エクセルギー収支 (左がエアコン暖房、右が床暖房)

(3) ヒトの明るさ適応性に着目して、その性質を照明の計画・設計に反映させるための基礎的な知見を得るための実験とその解析を行なった。その結果、「ほどよく明るい」という申告が得られる光の強さには約 2000 倍の幅があること、曝露照度の移動平均値 \bar{E}_V と明るさ感申告との関係を調べたところ、 \bar{E}_V と申告の瞬時における曝露照度 E_V が $E_V = \bar{E}_V \sim 1.1$ の関係を持つときに約 9 割の申告が「暗くない」になることが明らかになった (図 3)。この知見に基づいた照明設計が行なえると、不快をもたらすことなく約 135 万 kW の電力容量削減が可能となる。

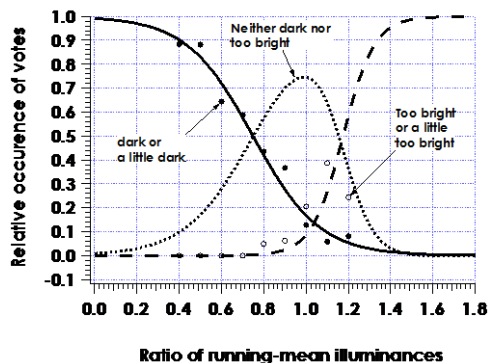


図 3 曝露照度の移動平均値と「明るさ感」申告の関係

(4) 導入外気の冷却と結露回避型の放射冷却を行なう井水放射冷却・外気予冷兼用シ

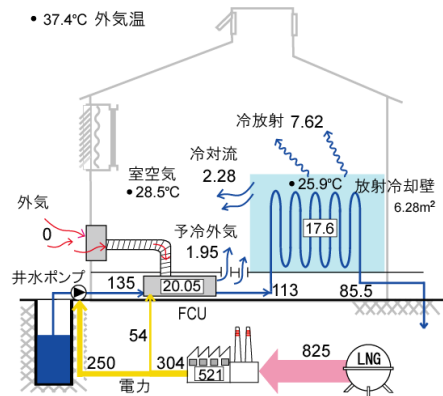


図 4 井水放射冷却・外気予冷兼用システムにおけるエクセルギーの流れ[W] (2010 年 8 月 16 日 13:30、□内は消費)

テムについて、埼玉県熊谷市のモデル住宅における室内熱環境調整の実測を行なった結果、以下のことが明らかになった。8 月にシステム導入室の SET*が 28°C 未満になる時間の割合は昼 3 時間に井水放射冷却・外気予冷の複合運転の場合で 80.1%、外気予冷を終日行なった場合に 63.1%、夜間通風を行った場合に 8.52% になった。設定温度 29°C のエアコン冷房の電力使用量は 6~26MJ/day であり、本システムを昼 3 時間運転した場合の電力使用量はこの 21.6% (期間平均) に相当する。

井水放射冷却・外気予冷システムについて実測調査とエクセルギー解析を行なった結果、記録的猛暑の 2010 年に「昼 3 時間複合運転」により日最高室空気が 30°C 以下に抑えられること、使用電力がエアコンの 56% 以下になること、井水に冷やされた放射冷却壁からの冷エクセルギーは外気温が高くなるほど増加することが明らかになった (図 4)。

(5) 東京に建つ次世代省エネ相当の断熱と室外日除け (簾) を施した戸建住宅を対象に、冷却塔放射冷房の数値シミュレーションを

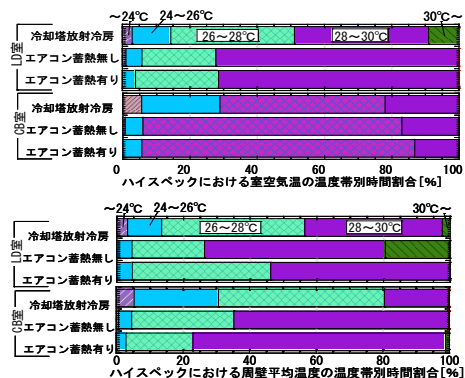


図 5 冷却塔放射冷房時における室内空気温度と周壁平均温度の温度帯別時間割合

行なった。その結果、冷房期間に 16:00～18:00 に 1.5 回/h、18:00～8:00 に 10 回/h で換気すると放射冷房時の壁面結露を回避できることや、放射冷却面を床と天井に設けて冷却塔放射冷房を 6 時間運転した場合に 1F 和室の空気温、周壁平均温度が 28℃以下になる時間割合はそれぞれ 78%、81%になり、パッシブ手法のみの場合(40 ポイント) の約 2 倍に拡大できることが明らかになった(図 5)。

(6) 鉄骨造住宅における水式太陽熱利用の天井・床放射暖房システムに関する実測とシミュレーションを行なったところ、最大太陽依存率 60% で最大上下気温差 1.5℃の室内熱環境が形成され、外皮の高断熱化により早朝 3 時間の運転のみで室温・MRT が常時 20～26℃になることがわかった(図 6)。

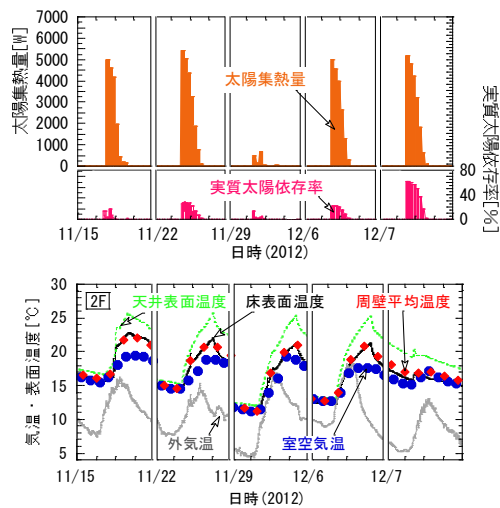


図 6 水式太陽熱利用の天井・床放射暖房システムを導入した住宅の太陽依存率(上)と室温(下)

(7) 人が後得的に獲得するとされる温熱認識を理解するために「想像温度」を対象にした研究を行なった。札幌と熊本の小学生を対象に、夏と冬の温熱的不快と想像温度・実際室温の関係を明らかにした。夏に温熱的不快を申告した児童の想像温度は、札幌、熊本ともに不快でない児童のそれよりも 2～2.5℃ほど高いことがわかった。一方、冬については、熊本では不快を申告した児童の想像温度は、不快でない児童よりも 2～2.5℃低かったが、札幌では終日暖房のため同じ傾向は見られなかった(図 7)。ヒトの想像温度は、建物の暖冷房をどのようにするかを決める上で重要な要素であることが示唆され、人体エクセルギー収支の関係を明らかにするための基礎資料になることが予想された。

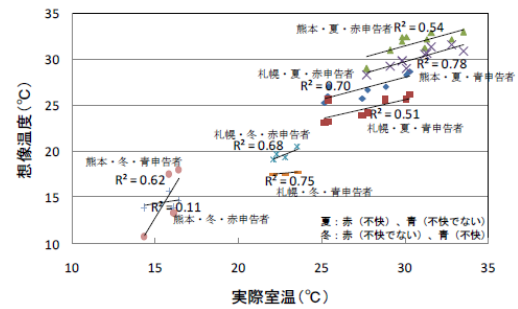


図 7 札幌・熊本の夏・冬の教室の実際室温に対する児童の想像温度

(8) ヒトの温冷感は温熱環境の物理要素と代謝量と着衣量によって決まるが、「後得的」な温冷感がそれぞれ培われるので個人差も無視できない。そこで舌下温と代謝量の関係に着目し、それらが任意の温熱環境下でヒトの温冷感、想像温度に与える影響を被験者実験により明らかにした。その結果、以下のことが確認できた。室温 20℃以上では、舌下温の低い群は対照群よりも「暑い」と感じやすい(図 8)。また、室温 20℃以下では、低代謝群は高代謝群に比べて血管収縮による皮膚温低下が顕著で、「寒さ」を感じやすい。低代謝群は、高代謝群よりも低い室温を想像する傾向にあることがわかった。

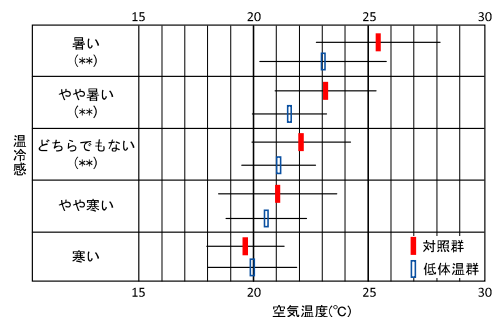


図 8 基礎代謝でみた各温冷感に対応する室温 (N=18)

(9) 北海道の小樽に建つ外断熱工法と地中熱ヒートポンプ暖房システムを採用した住宅を対象に、室内温熱環境と地中熱ヒートポンプの稼働状況の実測を行なった。その結果、冬季間全体を通じて室温と周壁平均温度は概ね 20℃以上を保ち、建物の熱損失係数は 1.0W/(㎡・K)で、地中熱ヒートポンプの SCOP は概ね 4.0～4.5 に達することがわかった。また、最寒日(1 月末)の地中熱ヒートポンプのエクセルギー収支を計算したところ、地中熱エクセルギー134Wと電力エクセルギー1000Wがヒートポンプに投入され、ヒートポンプ内部(搬送系ポンプを含む)で 344

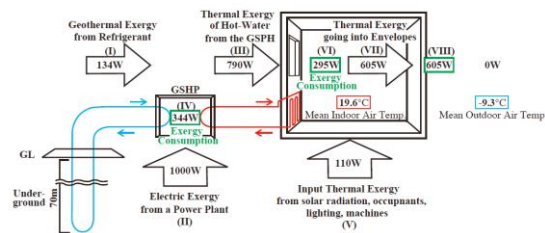


図9 地中熱ヒートポンプのある外断熱工法の建築の暖房システムのエクセルギー消費過程

Wのエクセルギーが消費された結果、室内に790Wの温エクセルギーが供給されていることがわかった。発電所まで遡った場合の発電所への投入エクセルギーに対するヒートポンプまでの消費エクセルギーの割合は70%程度に相当することがわかった(図9)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① 石原衣梨、高橋達、戸建住宅における冷却塔放射冷房の仕様・運用条件に関する研究、日本建築学会環境系論文集、査読有、No.78、2013、141-148
- ② Marcel Schweiker, Masanori Shukuya, Study on the effect of preference of air-conditioning usage on the exergy consumption pattern within a built environment, International Journal of Exergy, 査読有、No.11, 2012, 409-421
- ③ Marcel Schweiker, Masanori Shukuya, Adaptive thermal comfort from the viewpoint of human-body exergy consumption, Building and Environment, 査読有、No.51, 2012, 351-360
- ④ 宿谷昌則、エクセルギーと人の温熱環境、日本の科学者、査読有、Vol.46, No.1, 2011、pp.36-41
- ⑤ A. Simone, J. Kolarik, T. Iwamatsu, H. Asada, M. Dovjak, L. Schellen, M. Shukuya, and B. Olesen, A Relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation, Energy and Buildings, 査読有、No.43, 2011, 1-9
- ⑥ Kayo Tokunaga, Masanori Shukuya, Human-body exergy balance calculation under un-steady state conditions, Building and Environment, 査読有、No.46, 2011, 2220-2229
- ⑦ 高橋達、辻康昭、伊藤教子、井水放射冷

却・外気予冷兼用システムの開発と室内熱環境調整に関する実測調査、日本建築学会環境系論文集、査読有、Vol.76、No.670、2011、1043-1050

- ⑧ 宿谷昌則、人の内なる自然と建築環境、熱と環境、査読無、2010、2-6

[学会発表] (計5件)

- ① 酒田健、斉藤雅也、菊田弘輝、尾身佳樹、地中熱利用・外断熱住宅の冬季実測とエネルギー・エクセルギー解析、空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集、2012年9月、札幌
- ② 富田麻未、斉藤雅也、低体温・基礎代謝が温冷感に与える影響、日本建築学会北海道支部研究報告集No.84、2011年7月、札幌
- ③ 徳永佳代、小野間萌、長沢俊、宿谷昌則、「涼しさ」感をもたらす熱環境とエクセルギー収支に関する研究(その3. 非常人体エクセルギー収支)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2010年9月、富山
- ④ 藤井廣男、辻康昭、伊藤教子、高橋達、甲斐徹郎、井水放射冷却・外気予冷を補助設備とした住宅のパッシブクーリングの研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、2010年9月、富山
- ⑤ 町口賢宏、斉藤雅也、辻原万規彦、ヒトが快適・不快に感じる温度の地域性に関する研究(夏季の札幌・熊本の小学校児童を対象にして)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2010年9月、富山

[図書] (計2件)

- ① Masanori Shukuya, Exergy: theory and applications in the built environment, Springer-Verlag London, 2013, 365
- ② 宿谷昌則、西川竜二、高橋達、斉藤雅也、浅田秀男、伊澤康一、岩松俊哉、マーセル シュバイカ、エクセルギーと環境の理論一流れ・循環のデザインとは何か—改訂版、井上書院、2010、345

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宿谷昌則 (SHUKUYA MASANORI)
 東京都市大学・環境情報学部・教授
 研究者番号：20179021

(2) 研究分担者

高橋達 (TAKAHASHI ITARU)
 東海大学・工学部・教授
 研究者番号：50341475
斉藤雅也 (SAITO MASAYA)
 札幌市立大学・デザイン学部・准教授
 研究者番号：20342446