

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289200

研究課題名(和文) エクセルギー理論に基づく人 建築環境・コミュニティ環境システムの解明

研究課題名(英文) Research on the built environmental and community systems based on the theory of exergy concept

研究代表者

宿谷 昌則 (Shukuya, Masaonri)

東京都市大学・環境学部・教授

研究者番号：20179021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、人の適応を考慮した自然エクセルギー源を活かす建築環境システム、コミュニティ環境システムの最適なエクセルギー収支を解明することを目標として研究を行なった。その結果、1) 室温を下げるか否かの知覚は、放射エクセルギーの人体への入力と関係がある、2) 配管断熱は温暖地でも温エクセルギー消費を著しく削減する、3) 配管断熱は木質バイオマスの投入量を減らせる、4) オフィスにおける快適温度は外気温の月別平均値とよく対応する、5) 服を着るなどの行動的適応は人体エクセルギー消費を小さくするなどのことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A series of research made for the period of three years on the built-environmental and community systems for the rational use of natural exergy resources revealed the following: 1) preference of decreasing the room temperature in summer is very much related to the availability of cool radiant exergy; 2) thermal insulation of pipework brings about a significant reduction of exergy consumption; 3) thermal insulation of pipework is important in reducing the amount of biomass to be harvested; comfort temperature in office space was confirmed to correlate very well with monthly average outdoor temperature; 5) occupants' behavior such as putting on more clothing in winter results in a reduction of human-body exergy consumption rate.

研究分野：建築環境

キーワード：エクセルギー パッシブ型技術 行動的適応 建築環境 コミュニティ

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災や原子力発電所の事故を契機として、建築の暖冷房・照明などのための化石燃料使用の抑制が従前に増して重要視されるようになった。特に原子力発電所の安易な再稼働などは行わずに、また、化石燃料使用量を無理なく抑制しつつ、本来あって然るべき快適な建築環境などを実現していくことは、今後の日本社会や世界にとって極めて重要な課題である。

燃料使用量と快適性とは二律背反と捉えられがちである。暖冷房用の燃料使用量を減らせば、快適性は犠牲にせざるを得ないと考えられがちなのである。しかしながら、宿谷らの行なってきたエクセルギー研究によると、冬季に良好と考えられる温熱環境では人体エクセルギー消費が最小になることが明らかになっている。これは、断熱性向上が燃料使用量の抑制と快適性とを両立させることを理論的に示唆した成果だった。

以上は、定常的な熱環境を対象としての知見であったが、変動する実際の熱環境 非常熱環境 における人体エクセルギー収支の計算方法を開発していく必要性も新たに認識されるようになってきた。

また、関連して、実際の室内空間では、住まい手が窓の開閉やエアコンの入り切りなどを行なうが、これは、生理的・心理的適応に伴う行動的適応が現われているからに他ならず、このことを勘案して、住まい手の行動を反映した人体エクセルギー収支と冷暖房システムのエクセルギー収支がどのような関係にあるかなどを把握することは今後重要になってくるだろうと考えた。

住まい手の生理から行動に至る適応の違いは、単体の建築環境だけの問題ではなく、コミュニティ全体の暖冷房用エクセルギー消費量にも大きな影響を与えることをも考慮する必要があるとの認識を持っていた。

そこで、人の生理的・心理的・行動的適応と、建築環境システム、延いてはコミュニティ環境システムとの関係性を明らかにすることができれば、人の不自然でない生理的・行動的適応を誘発して、しかもエクセルギー消費が最適化されるだろうと考えた。また、これらのことが明らかになってくれば、日射や地中熱・風などの自然エクセルギー源の最適な活用方法を解明していくことにもなっていくだろうと考えた。

2. 研究の目的

住まい手に健康的な「快」をもたらし、しかも、地域に固有の自然エクセルギー源(日射・風・地中熱(冷)など)を活かせる暖房や冷房などの建築環境システムは、パッシブ型技術を基調として、これによく整合するアクティブ型技術によって構築される必要が

ある。このような統合技術は、人の環境への生理的・心理的適応に加えて行動的適応を考慮することで初めて実現すると考えられる。それは、温熱環境には人体エクセルギー消費が最小となる条件が存在し、この条件は住まい手の「快」とも概ね関係していることがこれまでのエクセルギー研究によって明らかにされてきたからである。

そこで、本研究では、住まい手の生理的・心理的適応に加えて行動的適応を考慮した人体エクセルギー収支の性質を解明し、その上で、自然エクセルギー源を活かせるパッシブ型・アクティブ型技術を統合した「建築環境システム」、その集合体としての「コミュニティ環境システム」の最適なエクセルギー収支とは何かを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

宿谷は主として、人体エクセルギー収支の夏季における非常熱環境への対応を可能とするモデルの開発、また、熱環境履歴に関する熱環境測定と知覚計測を行なって、夏季の人体エクセルギー収支と知覚発現の関係性を考察した。

高橋は主として分散型とコミュニティ熱供給型の住宅における放射冷暖房に関する実測調査とエクセルギー解析を行ない、自然エクセルギー源を活かすようなシステム仕様・運用方法について分析した。

斉藤は宿谷とともに、主として、木質バイオマス資源の投入によるコミュニティ暖房を行う住宅群のエクセルギー解析を行なった。供給元の山から需要先の住宅までコミュニティ全体のエクセルギー収支を定量的に把握し、地域に備わる木質バイオマスを循環再生利用し持続可能で環境負荷が小さく、しかも快適性を十分に満足する都市・建築環境システムとは何かを考察した。

リジャルは主として、オフィスビルにおける実測調査、熱的快適性調査、環境調整行動調査などを行った。大規模なデータ分析から執務者の各季節の熱的満足度や快適温度を明らかにし、外気温度から室内快適温度を推定する適応モデルについて提案した。

伊澤は主として、人体エクセルギー収支と生理的適応・行動的適応の関係性について基礎的知見を得ることを目的として、屋外移動から室内滞在に伴う熱環境変化を対象にして、宿谷の開発した人体の非常熱エクセルギー収支解析モデルを用いて非常熱感度解析を行ない、その結果を考察した。

4. 研究成果

以下、(1)に宿谷、(2)に高橋、(3)に斉藤、(4)にリジャル、(5)に伊澤の主たる研究成果を述べる。

(1) 人体エクセルギー収支の非正常計算法を開発して、夏季の条件でその計算を行なった。その結果、人体エクセルギー消費速さは、皮膚の濡れ率と反比例するように変動することが明らかになった(図1-1)。

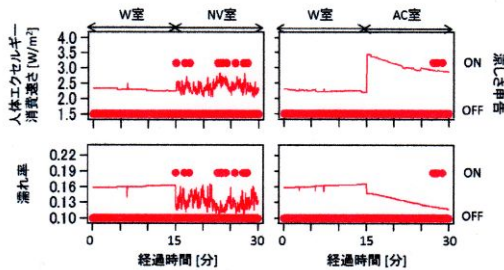


図 1-1 人体エクセルギー消費速さと皮膚の濡れ率

また、涼し感が発現するときの皮膚濡れ率と人体エクセルギー消費速さの関係を調べたところ、濡れ率 0.11~0.14 で涼しさ感が現われ、濡れ率が低くなる時の人体エクセルギー消費速さは 2.9W/m² 程度であることがわかった(図1-2)。

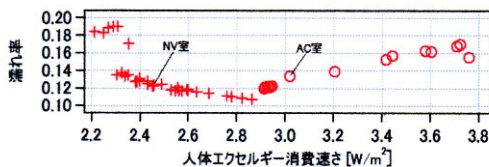


図 1-2 人体エクセルギー消費速さと皮膚の濡れ率

室温を下げたいか否かの申告は、放射エクセルギーの人体への入力に有意に関係していることが明らかとなり、特に経験温度が高めの人と低めの人とでは、50mW/m² 以下の冷エクセルギー入力に対して申告の違いが明確に現われた(図1-3)。

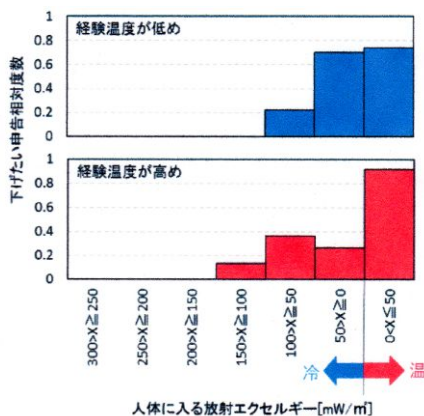


図 1-3 下げたい申告と人体への放射エクセルギー入力の関係

(2) 温暖地(東京)の木造住宅における温水床暖房では、配管断熱を、これまでよく使用されてきたポリエチレンフォーム 10 mmからウレタンフォーム 30mm に改善することにより起床時の室温を 19.5 から 21.5 に上昇させることができ、配管の温エクセルギー消費を 1/5 以下に削減できることがわかった(図2-1)。すなわち配管断熱が快適性向上と資源消費削減の両立に大きく寄与する。

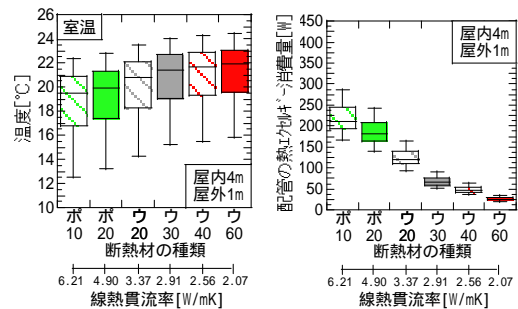


図 2-1 温水床暖房における配管断熱と室温 (左) 配管断熱と温エクセルギー消費の関係 (右)

(3) 木質バイオマス資源を活用したコミュニティ暖房システムのエクセルギー解析を行なった。その結果、建物・配管の断熱性能の向上によりエクセルギーの無駄な消費を減らせば、木質バイオマスのもつエクセルギーの投入・消費を小さくできることが明らかになった(図3-1)。

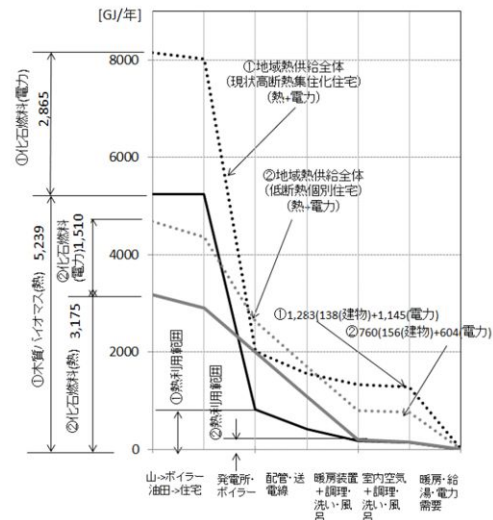


図 3-1 電力供給を含めたコミュニティ暖房のエクセルギー消費過程

また、建築外皮からの熱損失が同じでエネルギー収支が変わらなくても、温水の供給温度を下げると、エクセルギー消費パターンは変化し、配管熱損失が小さくなって木質バイオマスの投入エクセルギーを減らせるとともに、室内でのエクセルギー消費が小さくなり、放射面と室温の差が小さい快適で穏やか

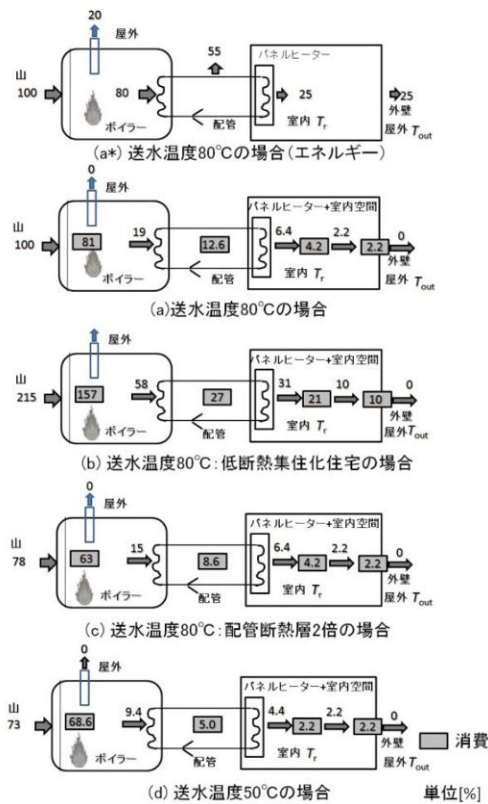


図3-2 外壁・配管の断熱性・送水温度と木質バイオマス投入エクセルギーの関係

な室内環境が形成されることが明らかになった(図3-2)。

(4) オフィスビルにおける執務者の快適温度とグローブ温度の関係を検討した結果、両者の相関係数は高く、執務者はオフィス内で経験している温度に対応して快適に感じている傾向があり、これは、快適温度には季節差のあることが改めて確認された(図4-1)。

また、快適温度と外気温度の関係を分析して適応モデルを提案した。この回帰式を用いることにより、外気温度に対応した室内快適温度を推定することができる(図4-2)。

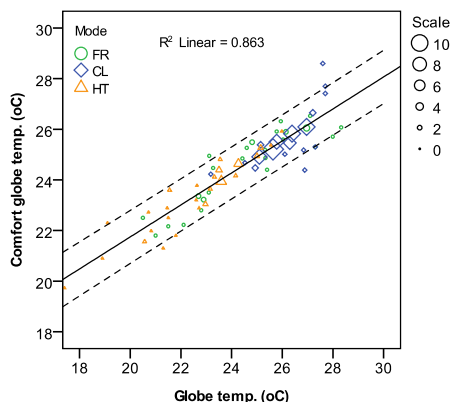


図4-1 快適温度とグローブ温度の関係

(5) 冬季の条件で人体エクセルギー収支の

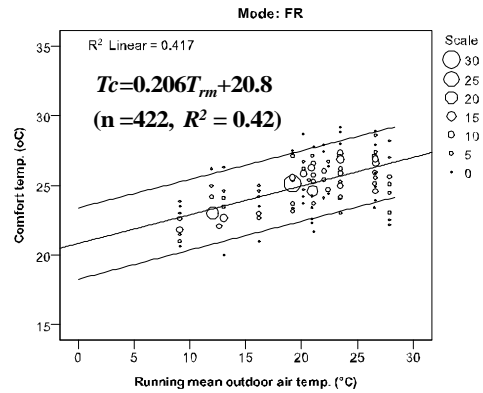


図4-2 快適温度と外気温度の関係

非常計算を行なった。その結果、震え等による生理的適応メカニズムがエクセルギーの観点から、どのような意味を持つかがある程度明らかになり、また、服を着る、エアコンのスイッチを入れるなどの行動的適応が人体エクセルギー消費速さを小さくすることを確認することができた。使用頻度の低い部屋に関しては、木造など比較的熱容量の小さい躯体や内装木質化された場合に化石燃料を浪費しない(好ましい)行動的適応と熱的快適性が発現する可能性が示唆された。これは使用頻度の低い部屋では室内表面温度が使用開始後になかなか上昇せず、その間の人体エクセルギー消費速さが大きいままに維持されてしまうからだと考えられた(図5-1)。

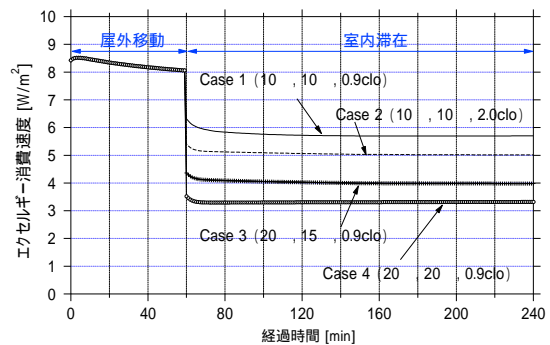


図5-1 人体エクセルギー消費速さの比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

山崎慶太・斉藤雅也・宿谷昌則：木質バイオマスを活かす地域熱供給システムのエクセルギー解析 北海道下川町を事例として、日本建築学会環境系論文集，第81巻 第721号，査読あり，2016.3，pp.295-305.

<http://doi.org/10.3130/aije.81.295>
Marcel Schweiker, Jakub Kolarik, Mateja Dovjak, Masanori Shukuya, Unsteady-state human-body exergy

consumption rate and its relation to subjective assessment of dynamic thermal environments, 査読あり, 2016, No.116 pp.164-180

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.02>

松尾悠佑・菊田弘輝・齊藤雅也・羽山広文：パッシブ換気住宅における薪ストーブを用いた全室暖房時のエクセルギー評価, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻 第 719 号, 査読あり, 2016.1, pp.73-82.

<http://doi.org/10.3130/aije.81.73>

I. Takahashi and S. Nemoto, The influence of piping thermal insulation on indoor climate and exergy consumption related to hot water floor heating in Tokyo, Energy Procedia, 査読あり, Vol.78, pp. 2632-2638, 2015.11.

doi:10.1016/j.egypro.2015.11.329

Koichi Isawa, Sensitivity Analysis on the Relationship between Building Envelope Material and Human Body Exergy Balance, Energy Procedia, 査読あり, 78, 2015, pp.2826-2831,

doi:10.1016/j.egypro.2015.11.642

Rijal H.B., Humphreys M. and Nicol J.F. Adaptive thermal comfort in Japanese houses during the summer season: Behavioral adaptation and the effect of humidity, Buildings, 査読あり, 2015, Vol. 5, No. 3, pp.1037-1054.

doi:10.3390/buildings5031037

Koichi Isawa, Human Body Exergy Balance: Numerical Analysis of an Indoor Thermal Environment of a Passive Wooden Room in Summer, Buildings, 査読あり, Vol.5, No.3, 2015, pp.1055-1069

doi:10.3390/buildings5031055

Imagawa H. and Rijal H.B., Field survey of the thermal comfort, quality of sleep and typical occupant behaviour in the bedrooms of Japanese houses during the hot and humid season, Architectural Science Review, 査読あり, 2015, Vol. 58, No.1, pp.11-23
<http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2014.970611>

勝野二郎, リジャル H.B., 宿谷昌則: 夏季のリビングにおける居住者の快適温度と熱的適応に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 80 巻, 第 707 号, 査読あり, 2015.1., pp.13-20.

<http://doi.org/10.3130/aije.80.13>

根本晋吾、高橋達、配管断熱が温水床暖房の室内熱環境・資源消費に与える影響
夜間冷え込み防止運転にかかわる検討
、日本建築学会環境系論文集(査読あり)

り) 第 714 号, pp.639-646, 2015-8.

<http://doi.org/10.3130/aije.80.639>

Mateja Dovjak, Masanori Shukuya, and Ales Krainer, Connective thinking on building envelope - Human body exergy analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読あり, No.90, 2015, pp.1015-1025

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.021>

Rongling Li, Ryoza Ooka, and Masanori Shukuya, Theoretical analysis on ground source heat pump and air source heatpump systems by the concepts of cool and warm exergy, Energy and Buildings, 査読あり, 75, 2014, pp.447-455

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.019>

[学会発表](計 12 件)

Rijal H.B., Humphreys M.A., Nicol J.F., Towards an adaptive model for thermal comfort in Japanese offices, Proceedings of 9th Windsor Conference: Making Comfort Relevant, Cumberland Lodge, Windsor(UK), 7-10 April 2016

松尾悠佑・菊田弘輝・青柳志歩・齊藤雅也・羽山広文・森 太郎: 積雪寒冷地における住宅群を対象としたコミュニティ暖房の検討, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 50 回学術講演会、北海道大学(北海道・札幌市) 2016 年 3 月 22 日

清水麻央, リジャル H.B., 吉田一居: 快適温度に関する研究 その 1 関東のオフィスビルにおける快適温度に関する研究, 第 86 回 日本建築学会関東支部研究発表会、建築会館(東京都・港区), 2016 年 3 月 5 日

Masanori Shukuya, An Overview of the Cyclic Process from Sensation to Adaptive Behaviour, 日本建築学会大会、東海大学 湘南キャンパス(神奈川県・平塚市), 2015 年 9 月 4 日

奥野恭子、永井倫人、峯尾暢大、リジャル H.B.、宿谷昌則、温熱環境の相違が涼しさ感・熱的知覚に与える影響に関する研究(その 2. 涼しさ感とエクセルギー消費・短期熱的履歴)、日本建築学会大会、東海大学 湘南キャンパス(神奈川県・平塚市) 2015 年 9 月 4 日

永井倫人、奥野恭子、峯尾暢大、リジャル H.B.、宿谷昌則、温熱環境の相違が涼しさ感・熱的知覚に与える影響に関する研究(その 3. 長期の熱的履歴が与える影響と調整行動に関する考察)、日本建築学会大会、東海大学 湘南キャンパス(神奈川県・平塚市) 2015 年 9 月 4 日

高橋達、下関市における木質ペレット利用コミュニティ熱供給システムの事例調

査、日本建築学会大会、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市) 2015年9月4日

伊澤康一・宿谷昌則: 冬季躯体蓄冷が誘発する行動的適応の人体エクセルギー収支分析, 空気調和・衛生工学会大会、大阪大学(大阪府・豊中市) 2015年9月17日

山崎慶太・斉藤雅也・宿谷昌則: 木質バイオマスを活かす地域熱供給システムのエクセルギー解析 - 北海道下川町を事例として -, 空気調和・衛生工学会大会、大阪大学(大阪府・豊中市) 2015年9月17日

宿谷昌則、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、日本建築学会大会、神戸大学(兵庫県・神戸市) 2014年9月4日

Koichi Isawa, Human body exergy balance numerical analysis of the indoor thermal environment in a passive wooden house in winter, GRAND RENEWABLE ENERGY 2014, Tokyo Big Site(Tokyo), July 27th, 2014

Takahashi, I., Tsuji, Y. and Itou, N., Thermal Environment of the Low-Exergy System Combined with Pre-Cooling of Ventilation Air and Radiative Cooling Using Well Water and Its Exergy Analysis, International Conference CLIMA2013, Prague(Czech Republic), June 13th, 2013

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

リジャル ホム バハドゥル (RIJAL HOMBAHADUR)

東京都市大学・環境学部・准教授
研究者番号: 20581820

伊澤 康一 (ISAWA KOICHI)
福山大学・工学部・講師
研究者番号: 60530706