

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18170

研究課題名(和文) 建築系と人体系の熱・水分・空気複合移動解析に基づく住環境評価に関する研究

研究課題名(英文) Prediction of hygrothermal environment based on heat and moisture transfer and airflow in combination with the building system and the human system

研究代表者

李明香 (Lee, Myonghyang)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：00734766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、実大住宅による実測および数値計算により、多様な空調方式(放射式および対流式)を用いた居住性能およびエネルギー性能を予測できる計算手法を提案した。その結果、床暖房時の不均一放射環境が精度良く再現され、接触熱伝導および床からの放射熱により快適性が向上すること、対流式に比べて省エネルギーを達成できる可能性を示した。また、放射パネルを用いた住宅においては、放熱面積が確保されれば、低質熱源でも空調制御可能であることを明らかにし、断熱性能が向上することで放射空調の効率が向上する。さらに、CFDにより温度分布を計算することで、熱環境シミュレーションでエアコン気流の影響を再現できるモデルを考案した。

研究成果の概要(英文)：The human sensation and the energy performance using the various air-conditioning system (convective (CAC) and radiative (RAC)) is considered by measurement of the real housing and the numerical simulation. As the main results, the non-uniform radiative environment during the floor heating system was accurately calculated and the human sensation was improved by thermal conduction and the radiant from the hot floor to a body part, and RAC is possible to achieve the energy saving. Then the other housing which uses the vertical-type radiation panel system clarified, if the radiative area is enough, the air-conditioning system is possible even with a low-quality heat source, and the high insulation performance housing improves RAC efficiency. Furthermore, in order to consider the influence of CAC (air-conditioner airflow), a simple model that can easily predict the influence of the air-conditioner airflow was formulated by analyzing the temperature distribution using the CFD.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：居住環境解析 省エネルギー 熱的快適性 連成解析 空調制御 不均一環境

1. 研究開始当初の背景

省エネルギー基準の改正により建築の断熱気密性能は格段に向上しており、建築のエネルギー性能を定量的に説明することが求められている。また、住宅のエネルギー効率を向上させるために、先進的な省エネルギー技術が開発、実用化されている。しかし、これらの効果の評価方法は物理現象を詳細に検討したものは少ないため、在室者の快適性を考慮した建築の省エネルギー性能の評価が難しい。建築の省エネルギーと在室者の快適性評価には、建築環境・熱負荷シミュレーションを行う方法がある。開発されている数値シミュレーションの多くは空間を単質点系として捉えた非定常計算により最大熱負荷および在室者の居住性能などの算出を行っている。しかし、実際の環境においては建築表面および空間に分布が生じていることから、厳密に建築の居住性能を再現するためには、空間を多質点として検証する方法の提案が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、様々な環境制御方法として、対流式空調および放射空調時の居住性能およびエネルギー性能を評価可能な数値シミュレーションの計算手法の提案を目的とする。いくつかの実大実験棟を対象として、詳細な温度分布を測定する実測実験および熱環境予測シミュレーションを活用し、空調機器の選定および制御方法の定量的な指針を提案する。

3. 研究の方法

本研究は、多様な空調方式の熱環境を予測できる数値シミュレーションを開発するために、まず、住宅における放射冷暖房システムに着目している。放射面の表面温度変化による対流熱伝達率の時変性や配管の2次元熱移動、長波放射の非線形性を再現できるアルゴリズムを検討し、その精度について実験棟における実測を行った。冬季は温水床暖房と立型放射暖房パネル、夏季は立型放射冷房パネルについて検討している。また、不均一な放射環境における人体の生理量については、接触面と非接触面の収支点を分離して、伝導、放射、対流の熱交換をそれぞれ考慮することで、従来の単質点系である新標準有効温度SET*では解析困難であった不均一放射環境の温熱的快適性について解析した。

次に、空間のゾーニングを従来のMacroモデル(単質点系)からMesoモデル(多質点系)へ拡張するために、空間を多質点系に変更できるように建築熱環境シミュレーションソフトのアルゴリズムを更新する。特に、空間分割ゾーン毎のエアコン気流の影響による熱量の分配量については数値流体解析(CFD)により求め、その結果を熱環境シミュレーション(エネルギーシミュレーション、以下、ES)に連成させることで、空間ゾーン毎の熱環境分布の計算が可能となる。放射冷暖房などの不均一熱環境下や対流空調時の空気温湿度分

布に応じた温熱感指標の算出により、室内空間の居住性について詳細に評価できるツールの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 温水床暖房の温熱環境解析

温水床暖房システムによる室内熱環境への影響を予測するため、温水配管からの2次元熱伝導、床温度の上昇にともない発達する対流熱伝達の時変性、放射熱伝達の非線形性について考慮できるように建築全体の熱環境解析ソフトTHERB for HAM(以下、THERB)のアルゴリズムを拡張した。また、建築系と人体系の伝熱モデルを連成することで、空調方式の違いによる不均一熱放射および接触熱伝導が在室者の温熱感に及ぼす影響について検討した。さらに、人体温熱感を中立(予想平均温冷感申告 $PMV\pm 0.5$)とした場合の熱的快適性に基づいて暖房制御した場合の熱環境とエネルギー性能について解析した。

図1と図2に、人体温熱感指標COMSET*(多質点系)およびSET*(単質点系)、LDKの室内温度と床内部温度の3日間(1月20日~1月22日)の経時変化を示す。空調時のCOMSET*は同じになるように空調制御したのにも拘らず、室内温度はエアコン、床暖房の立位、座位の順番に低くなる。SET*は床温の上昇による影響は少ないが、COMSET*は床暖房時にSET*より高くなる。人体においても単質点ではなく多質点モデルとした場合には不均一な放射環境を再現できると言える。

図3にLDKの1月の期間暖房負荷の積算値を示す。床暖房負荷は、エアコン暖房と比較して立位(接触なし)、立位(接触あり)、座位(接触あり)でそれぞれ約0.9GJ、約1.2GJ、約2.2GJ減少している。床暖房による人体の温熱感、エアコンによる暖房とは明らかに異なるため、床暖房の熱負荷計算には接触熱伝導や人体各部位の長波放射の影響を考慮する必要があり、その場合には一般的な空調暖房負荷より、省エネルギーを達成できる可能性がある。

(2) 立型放射冷暖房パネルの放熱特性

放射式空調には温水床暖房だけでなく、独立式の立型放射パネルを利用する方法もある。本方式は、温水のみならず冷水を通水させることで冷房時にも空調が可能である。本研究では、放射パネル計算に必要な伝熱モデルを整理し、放射パネル仕様および建物性能が室内温度に及ぼす影響について検証している。

対象住宅は、延べ床面積172.87m²の鉄骨造3階建ての住宅である。放射パネルはルーバー状(タテ型)の立型放射パネルであり、1階のリビング・ダイニング間に2枚設置されている。放射パネルの大きさは幅898mm、高さ2,441mm、奥行150mmであり、面積は隙間も含めて1枚当たり2.19m²である。

表1と表2に、放射パネル仕様および建物性能の検討項目を示す。放射パネルの冷水制

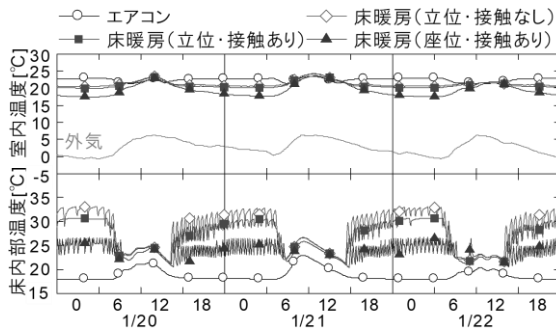


図1 室内および床内部温度の経時変化

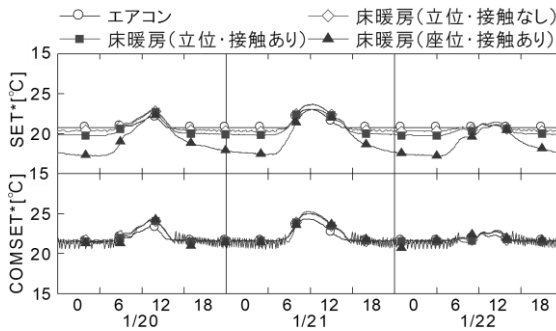


図2 人体の評価指標の経時変化

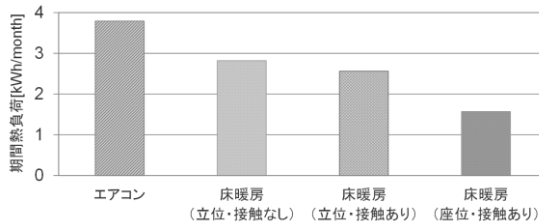


図3 LDKの暖房負荷

表1 放射パネル仕様の検討項目

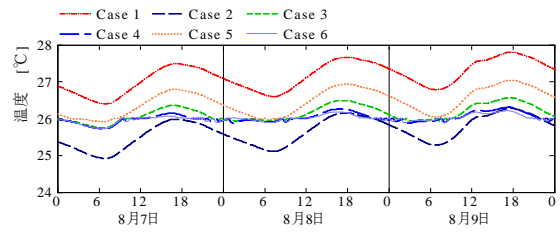
	空調制御方法	給水温度	パネル設置枚数
Case 1	なし	-	-
Case 2	終日	12°C	2枚
Case 3	室温 26°C 以上で冷水	12°C	2枚
Case 4		7°C	2枚
Case 5	ON	12°C	1枚
Case 6			3枚

表2 建物性能の検討項目

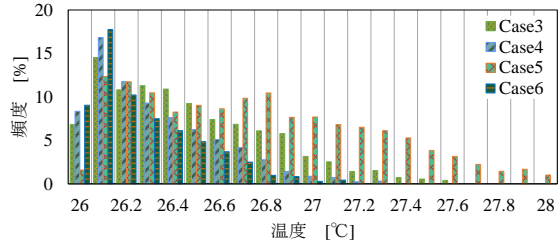
	外壁	窓ガラス	ブラインド
Case 7	GW16K 100mm	複層ガラス	なし
Case 8			内
Case 10	標準仕様	標準仕様	内
Case 11			外

御方法、給水温度、面積、建物の断熱・遮熱性能を変更した場合の放熱特性を解析した。

図4に、制御方法および冷水温度とパネル枚数を変更した場合のリビング室温の3日間の変化および空調時のリビング室温の頻度分



(1) リビングの室内温度



(2) 空調稼働時のリビングの室内温度の頻度分布
図4 放射パネルの影響

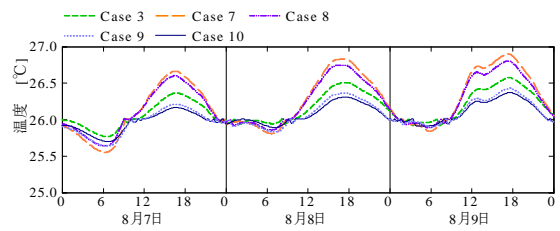


図5 建物性能を変更した場合の
リビングの室内温度

布を示す。自然状態(Case 1)は、26.5°C~27.9°Cの範囲を推移している。また、終日運転(Case 6)は放射パネルの冷却能力により自然状態(Case 1)に比べて約1.5°C低い温度で同様に変動している。室温を26°Cに制御した場合は、パネル枚数(面積)の影響が大きく、空調稼働時のリビング室温分布は1枚の場合(Case 5)では28°Cまで出現している(図4(2))。冷水温度を比較すると、12°C(Case 3)と7°C(Case 4)の空調稼働時の室温差の最大値は0.4°C程度であり、大きな差は見られなかった。したがって、本実験棟では面積が確保されれば低質熱源でも十分な冷却能力を有すると考えられる。

図5に、外壁と窓性能の変更および内外ブラインドの設置によるリビング室温の3日間の変化を示す。外壁と窓性能を低下させた場合(Case 7, Case 8)は、外気負荷の影響により空調時にも温度が上昇している。また、Case 7とCase 8の室温の推移は同程度となり、外壁より窓性能の影響が大きい。ブラインドを設置した場合(Case 9, Case 10)の空調稼働時の温度変動は小さく、特に外ブラインド(Case 10)することで、日射熱を遮蔽し効率よく放射冷房している。

(3) ESとCFDの連成解析によるエアコン気流の影響

本研究では、吹抜け空間を有する実在住宅を対象に、ESにおいてエアコン気流の影響を考慮できる計算手法を提案した。

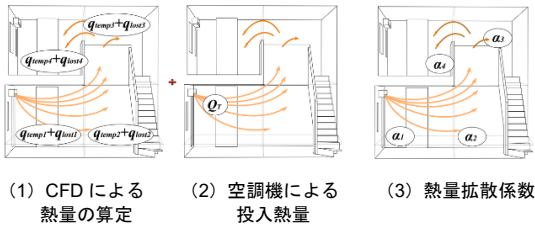


図6 提案手法の概念図

提案する連成手法の概念を図6に示す。提案手法はESでは考慮できないエアコン気流による温度分布をCFDにより解析することで、任意に分割した各ゾーンの熱量の分配係数について算出する。

熱量分配係数は、エアコンの総投入熱量が各ゾーンへ分配される割合を表したものである。ゾーン毎の熱量分配係数は式(1)で計算される。

$$\alpha_i = \frac{C_p \gamma V_i (T_i' - T_s) + q_{losti}}{Q_i} = \frac{q_{ti} + q_{losti}}{Q_i} \quad (1)$$

式(2)で表現されるように、各ゾーンの熱量分配係数を足し合わせると1となる。

$$\sum_{i=1}^n \bar{\alpha}_i = 1 \quad (2)$$

実際にESで各ゾーンに投入される熱量を式(3)に示す。ES側で事前に算出した時々刻々の全熱負荷に熱量分配係数を乗じて各ゾーンに分配する。

$$q_i = q \cdot \bar{\alpha}_i \quad (3)$$

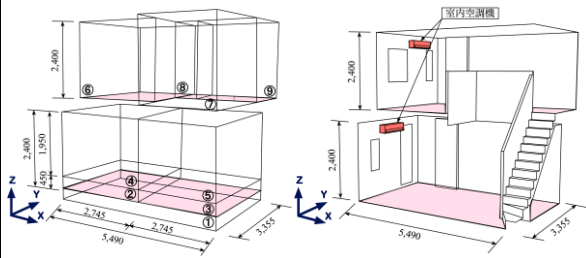
空間の熱収支は、壁体表面からの対流による熱輸送、外気との熱交換、各ゾーンへの投入熱量により次式で表される。

$$V_o c \bar{\gamma} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^J S_{i,j} h_{i,j} (T_{i,j} - T_i) + V_o c \gamma (T_o - T_i) + q_i \quad (4)$$

解析モデルを図7に示す。ES(使用ソフトTHERB)では、1階は床近傍のコールドドラフトの影響を確認する目的で、FL+450mmで上下に分割した(図7(1)参照)。

THERBの気象データおよびSTEP1の空調機投入熱量は実測値を用いている。CFDの吹き出しの境界条件に関してはTHERBで計算した全熱負荷から吹き出し・吸込温度を既知条件として吹き出し流速を算出している。本研究で提案する解析手法は壁面からの熱損失を計算する必要があるため、CFDモデルでは壁面第一層を細かく分割している。

図8に、CFDと実測による各ゾーンの温度比較を示す。CFDの計算値は実測値を高い精度で補足している。Room8の温度に0.8°C程度の乖離が見られるが、体積加重平均した温度では測定点が多い場合には測定機器の誤差が生じるため許容範囲内だと判断した。吸込



(1) THERB 解析モデル図 (2) CFD 解析モデル図
図7 THERB 解析モデル

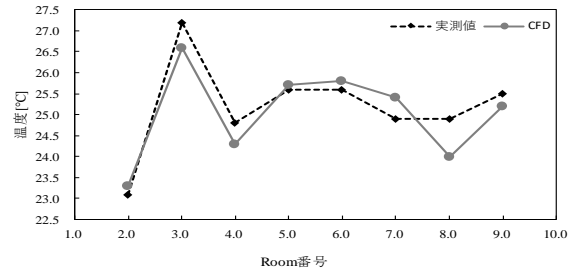
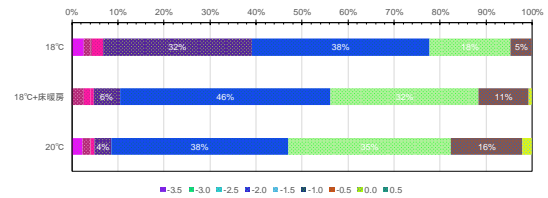


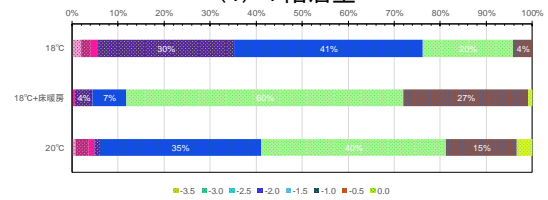
図8 各ゾーンのCFDの計算値と実測値

表3 計算条件

	対流式空調機			放射式空調機
	1階	2階	設定温度[°C]	
Case1			18	
Case2	○	○	18	○
Case3			20	



(1) 1階居室



(2) 1階居室足元空間

図9 期間内PMV出現割合(冬季)

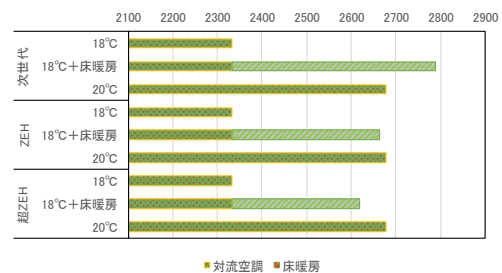


図10 期間中積算暖房負荷

温度の実測値(25.7°C)と計算値(26.0°C)の誤差は0.3°Cで高い精度で実測値を捕捉(図

7) しており, THERB により算出した流速と熱負荷が正しいことが確認できた。表 3 に対流式と放射式空調機の運転条件を示す。Case1,3 では 1,2 階の対流式空調機のみ運転させ, Case2 では対流空調に加えて放射空調を運転させている(位置は図 9 参照)。また, 建物の断熱性能は外皮平均熱貫流率 U_A 値:0.87(次世代), 0.58(ZEH), 0.48(超 ZEH) [$W/(m^2 \cdot K)$] について計算した。

図 9 に, ZEH 基準の冬季条件下の計算期間内における PMV の出現割合を示す。対流空調のみを運転した Case1,3 では 1 階居室と足元で PMV-3.5 以下が出現している。対流空調の設定温度を上げた Case3 においても PMV-3.5 以下が出現している一方, 設定温度は 26°C のままで床暖房を導入した Case2 では PMV-3.5 以下は見られなかった。また, PMV-1.0 以上に着目すると, Case2 は居室空間(図 10 (1))と比較し, 足元空間(図 9 (2))において大幅に出現割合が増えていることが確認できる。

図 10 に期間中の積算暖房負荷を示す。ZEH と超 ZEH 基準では, 対流式空調の設定温度を 2.0°C 上昇させるよりも床暖房を導入した場合の方が暖房負荷が小さい。次世代基準では熱損失が多いため, 床暖房の負荷が大きくなった。このことから, 放射空調を併用するには ZEH 程度の断熱性能を備えることで, 居住性能を損なわずに省エネルギー効果が期待できると推測される。

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 3 件)

- ① Yamamoto Tatsuhiro, Ozaki Akihito, Lee Myongyang, Kusumoto Hideki: Fundamental study of coupling methods between energy simulation and CFD, Journal of Energy and building, 査読有, Vol.159, pp.587-599, 2018
DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.11.059
- ② 李明香, 尾崎明仁, 近本智行: 人体温熱感を指標とした温水床暖房の室内環境解析, 日本建築学会環境系論文集, 査読有, 第 81 巻, 第 719 号, pp.65-71, 2016
DOI: 10.3130/aije.81.65

[学会発表] (計 50 件)

- 1) Lee Myonghyang, Akihito Ozaki, Yosuke Chiba, Tadasu Ohishi: Analysis of the Hygrothermal Environment in High-insulation Houses Using Stand-type Radiation Panel System, The 15th IBPSA Conference San Francisco, 2017
- 2) 李明香, 尾崎明仁, 千葉陽輔, 大石匡, 平田紗彩, 川端将大: 吹抜け空間を有する住宅における対流・放射空調併用時の温熱環境に関する研究 その 3 対流・放射空調併用時の居住性能解析, 日本建築学会大会, 2017

- 3) 山本竜大, 楠元秀規, 尾崎明仁, 李明香: エネルギーシミュレーションと CFD の連成による熱環境解析手法に関する基礎的検討 その 1 完全連成による温水床暖房システムの熱環境の再現, 日本建築学会大会, 2017
- 4) 楠元秀規, 尾崎明仁, 李明香, 山本竜大: エネルギーシミュレーションと CFD の連成による熱環境解析手法に関する基礎的検討 その 2 吹き抜け空間における移流量と空調負荷の連成解析, 日本建築学会大会, 2017
- 5) 平田紗彩, 尾崎明仁, 李明香, 千葉陽輔, 大石匡: 立型放射冷暖房パネルを用いた高断熱住宅の住環境解析, 日本建築学会九州支部研究報告集, 2016
- 6) Lee Myongyang, Chikamoto Tomoyuki, Ozaki Akihito: The effect of the Physiological Response of the Human Body and the Human Sensation by using the Directional or the Diffusible Airflow of the Personal Air-conditioning System, Proc. Of the 3rd Asia conference of International Building Performance Simulation Association, 2016
- 7) 李明香, 尾崎明仁, 近本智行, 千葉陽輔, 大石匡, 平田紗彩: 高断熱住宅における立型放射冷房パネルの温度特性に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 2016
- 8) 平田紗彩, 尾崎明仁, 李明香, 千葉陽輔, 大石匡: 立型放射パネルを用いた高断熱住宅の住環境解析, 日本建築学会大会, 2016
- 9) 山本竜大, 尾崎明仁, 李明香, 千葉陽輔, 大石匡: エネルギーシミュレーションと CFD の連成による大空間の温熱環境解析手法の開発, 空気調和・衛生工学会大会, 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

李明香 (LEE, Myonghyang)
立命館大学・理工学部・准教授
研究者番号: 00734766