

機関番号：13901

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360259

研究課題名（和文） 非定常・非対称温熱環境における物理・生理・心理統合モデルの構築

研究課題名（英文） Construction of the physical, physiological and psychological integrated model for unsteady and asymmetric thermal environment

研究代表者

久野 覚 (KUNO SATORU)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号：70153319

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は非定常・非対称温熱環境における環境物理、人体生理および心理状態を統合した新しい温熱環境評価指標を構築することである。被験者実験による生理・心理反応の把握、数値流体力学CFDを用いた不均一環境下での温熱快適性予測、数値シミュレーションによる局所の熱伝達係数・代表温度の同定、および二次元温冷感モデルの数値モデル化を行った。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to construct the physical, physiological and psychological integrated model for unsteady and asymmetric thermal environment. We estimated physiological and psychological responses by subjective experiments, predicted thermal comfort under asymmetric environment by using CFD, identified heat transfer coefficients and equivalent air temperatures of local body segments by numerical simulation, and constructed numerical model for the two-dimensional thermal sensation model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：建築環境工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：温熱環境、非定常、非対称、人体生理モデル、心理モデル、数値流体力学、シミュレーション、被験者実験

## 1. 研究開始当初の背景

定常環境かつ均一な環境下での温熱環境評価指標としては、Gagge らの SET\*（標準新有効温度）と、Fanger の PMV（予想平均申告）という、ともに 1970 年頃に開発された極めて有名な指標が既にある。Gagge らは、Two-node model を開発し、人体生理を考慮した等価温度指標として SET\* へと発展させた。さらに、心理量と対応させた DISC という指標も開発されている。一方、Fanger は、中立環境を示した快適方程式を開発し、さらに心

理量と対応させた PMV を開発し、また全員が満足する環境がないことから PPD（予想不満率）へと発展させた。SET\*系では PPD に対応して、Acceptability（温熱環境許容度）がある。PMV の基礎となっている快適方程式は中立状態のみを示しており、また人体が静穏状態では発汗していない。したがって、PMV は不快状態、特に蒸暑環境では理論的にあまり合わない。SET\*では発汗が考慮されており理論的に優れているが、簡便性の面からは PMV の方が優れているため、現在では PMV が

ISO の基準として採用され広く使われている。

前述 2 指標は、定常な環境に一定時間滞在した後の状態を示す指標であるが、実際に人が定常で均一な環境に長時間滞在することは多くなく、人体が新しい温熱環境に順応するには時間がかかる。しかしながら、空間の空調条件は一般に定常状態で考えざるを得ず、これらの指標は空調設計に大きく貢献してきた。その後、非対称の問題、すなわち冬期冷たい窓面の影響や足元冷風などについては、PPD や許容度に補正をかける形で対処法が検討されてきたが、熱授受を数式的に表現する根本のモデルの改良には至っていない。また、非定常状態およびその生理心理過渡応答については、研究代表者の久野が二次元温冷感モデルを開発し、Gagge が指摘した先行現象や McIntyre が述べた積極的/消極的熱的快適性などの心理状態を説明できるようになったが、数式化は進んでいなかった。しかし、非定常温熱環境における心理生理過渡応答については、世界的に見ても久野の二次元温冷感モデル以外にさしたる理論はない。

非定常・非対称の研究が進んでこなかった理由は、人体形状が複雑なため放射や対流の正確な予測が困難であったこと、また人体内の熱の流れをうまくモデル化できなかったことによる。また非定常温熱環境における心理過渡応答を示す久野の二次元温冷感モデルも全身温冷感であり、非対称問題に対しては改良の余地を残している。しかしながら、計算機的能力および計算技術の向上により、近年の数値シミュレーションの発展は目覚ましいものがあり、CFD (数値流体力学) による人体各所の対流熱伝達率の予測、相互放射熱伝達の計算が可能になり、また生理モデルの研究も進んできた。

## 2. 研究の目的

前述したように、定常で均一な環境に長く滞在することは少なく、以前から非定常・非対称温熱環境を評価する指標が必要とされてきており、技術的にも可能になってきたと考えられる。これら一連の状況、時代の流れ、研究の進歩から、非定常・非対称温熱環境における物理・生理・心理モデルを統合する時期が来たと考え、本研究では非定常・非対称温熱環境における環境物理、人体生理および心理状態を統合した新しい温熱環境評価指標を構築することを目的とした。

## 3. 研究の方法

研究代表者らのもつ理論・技術を組み合わせ、非定常・非対称温熱環境においても環境の物理状態から人間の生理心理状態を数式的に推定できる方法を確認するため、研究分担者の加藤・大岡は、数値計算によって人体と環境との熱移動をシミュレートする数値

サーマルマネキンをさらに改良発展させた。佐古井は、佐古井の 3 次元人体熱モデルを改良発展させ、飯塚は CFD を用いた人体周りの熱移動に関する検討を行なった。久野は二次元温冷感モデルの改良・発展を検討し、齋藤は久野と共に非定常温熱環境における被験者実験を担当した。

## 4. 研究成果

### (1) 非定常温熱環境における生理・心理反応

まず、夏期および冬期における非定常時の深部温変化のデータを得るため、ディスクリート型チェンジにおける被験者実験を行った。夏期では屋外において発汗がある場合に、入室後、皮膚温が一旦低下し、その後速やか

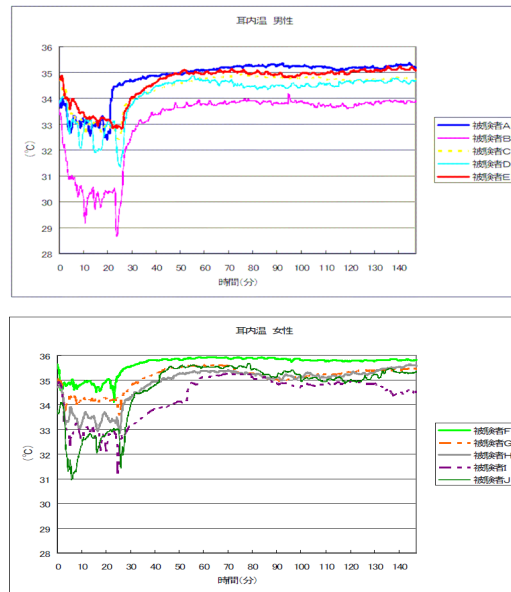


図 1 冬期における手指部皮膚温の経時変化

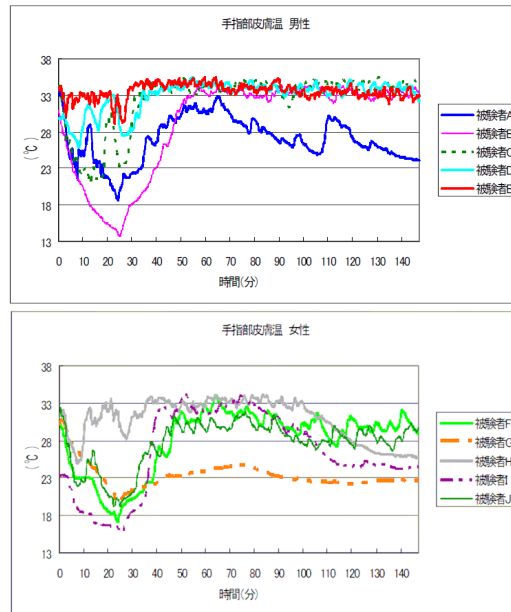


図 2 冬期における耳内温の経時変化

に上昇して元の状態へ戻るのに対し、耳内温には特徴的な変化が見られないことを確認した。一方、冬期には末梢部皮膚温・血流量および耳内温に男女差が見られた。男性被験者の多くは入室後すぐに皮膚温が上昇し、そのまま一定を維持したが、女性被験者は入室後も皮膚温があまり上昇せず低い状態を維持するか、入室後一旦上昇するものの時間経過と共に再び低下する傾向を示した。耳内温に関しても、多くの女性被験者が元の温度に戻るまで比較的時間を要しており、また、上昇後数十分して再び低下する傾向を示した。これらより、冬期屋外曝露によって女性は抹消部に大きな影響を受けるとともに、耳内温にもその影響が現れやすく、室内入室後も回復まで時間を要することを明らかにした。

続いて夏期に青年男性被験者を用い、屋外空間、やや高め室温の執務空間、および快適空間(採涼空間)の間の移動を想定した非常温熱環境における被験者実験を行った。この実験により、採涼空間の効果と有用性を確認するとともに、身体の状態によっては十分な採涼効果が得られない場合があること、および最適な採涼空間の条件を検討するために必要な知見を得た。さらに被験者数を増やし、青年男性および青年女性の被験者を用いた実験より、採涼空間の効果における生理的・心理的な男女差を確認するとともに、非常態にある男女それぞれにとって、適切な採涼空間の設定条件を検討した。暑い屋外から冷房された室内へ入った場合、男性は24℃採涼空間に10分~20分間、女性は10分間の滞在で採涼の効果が得られること、および採涼空間の最適な設定温度が23℃から25℃の範囲にあることを示し、採涼空間の設計方法を提案できるまでに至った。

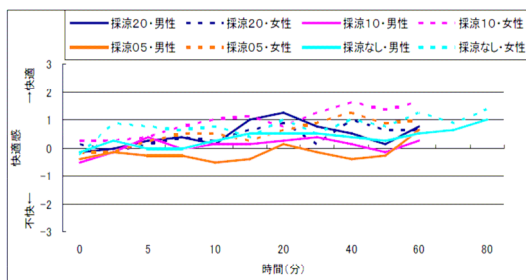


図3 執務空間における快適感の経時変化

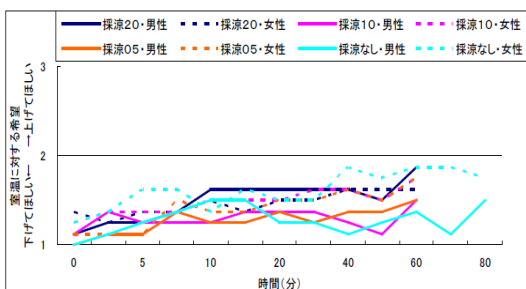


図4 執務空間における室温希望の経時変化

(2)CFD による不均一環境下での温熱快適性の予測

不均一温熱環境の評価についてCFD解析を行い、等価温度と全身快適感 OTC 二つの指標を用いて以下の結果を得た。

①解析対象空間に均一温熱環境を作り、サーマルマネキンにより皮膚温と顕熱放熱量を測定することにより、CFD を用いて不均一環境下の等価温度を算出することが可能である。サーマルマネキン実験から得られた全身総合熱伝達率は7.673 W/(m<sup>2</sup>・℃)であった。

CFD 解析により対流式暖房時と床暖房時の部位別等価温度を比較した。対流式暖房の吹出し条件は温度26℃、速度1m/s；床暖房は冬期換気として吹出し条件を温度16℃、速度0.03m/s、床暖房の表面温度を28℃とした。対流式暖房時の全身平均顕熱放熱量は118.17 W/m<sup>2</sup>であり、床暖房時は96.27 W/m<sup>2</sup>であった。等価温度の全身平均値は、対流式暖房の場合16.80℃であり、床暖房の場合20.87℃であった。また、対流式暖房時において部位による等価温度のバラツキがより大きかった。対流式暖房では床面付近の空気温度が低く天井面付近ほど高くなり、足元や人体が面している冷熱パネルまで暖気が到達しにくいと考えられる。

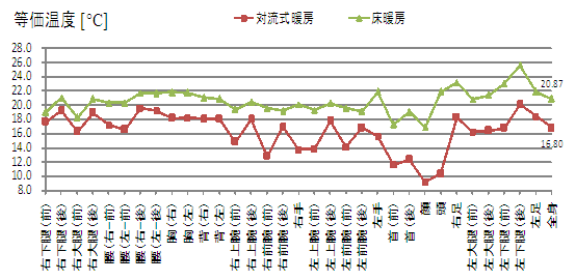


図5 部位別等価温度

②均一温熱環境、対流式暖房、床暖房の3ケースについて、全身快適感 OTC の計算により快適性を評価できるかどうかを検討した。全身平均顕熱放熱量がほぼ46W/m<sup>2</sup>で、全身平均皮膚温が一致する時、均一環境では各部位の放熱量のばらつきがより小さく、OTC 指標は他のケースよりも高くなった。全身平均皮膚温が一致すれば皮膚温度分布の変化も微

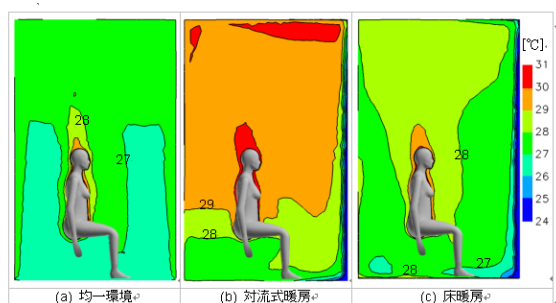


図6 空気温度分布

小となり、皮膚温分布と顕熱放熱量分布に依存する OTC 指標は暖房方式の違いによる快適性の差を反映しにくいものの、環境の不均一性による不快感がある程度表現できることを確認した。

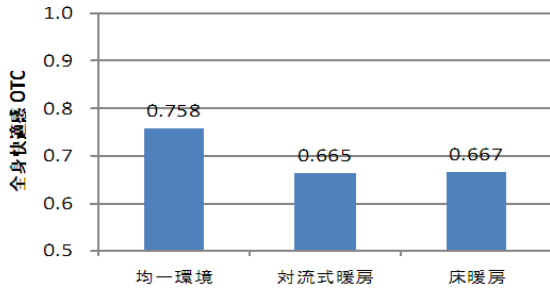


図 7 全身快適感 OTC

③対流式暖房と床暖房の 2 ケースについて、実大居室を対象とした全身快適感 OTC の解析結果と被験者実験結果を比較した。暖房方式に関わらず手と足の予測精度が悪いものの、全身平均皮膚温は解析と被験者実験で一致する結果となった。

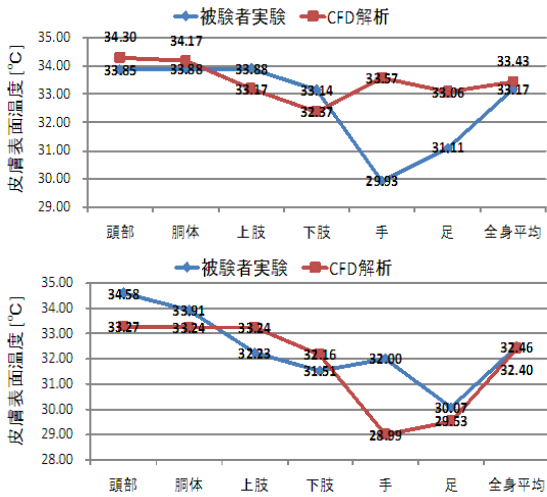


図 8 皮膚温の比較(上:対流式暖房、下:床暖房)

また、ハイブリッド空調システムにおける熱的快適性の不均一性評価として、以下の 4 ケースについて放射モデルを連成した CFD 解析を行い、人体モデルの部位別に PMV 値を算出した。

- Case 1: 全空調方式。天井面にそれぞれ 2 つの吹出し口と吸込み口を持つ。
- Case 2: 全空調方式。床面に 5 つの吹出し口、天井面に 4 つの吸込み口を持つ。
- Case 3: 放射パネル併用型のハイブリッド空調システム。Case 2 と同様の給排気経路に放射パネルを追加。
- Case 4: 放射パネル併用型のハイブリッド空調システム。放射パネルと自然通風を組み合わせた空調方式。

これら 4 ケースの比較検討の結果、放射パネルを併用したハイブリッド空調システムは全空調方式に比べて人体全体の平均的な熱的快適性を向上させるものの、部位毎の不均一さは増加させることを定量的に確認した。

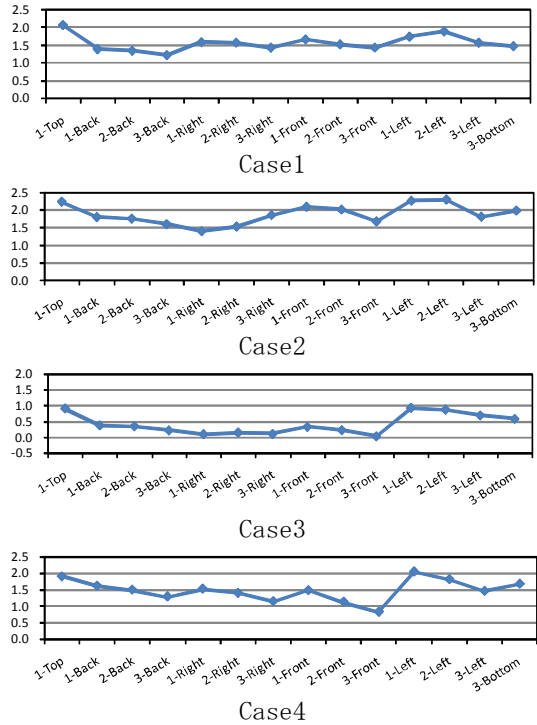


図 9 人体モデル各部位の PMV 値

### (3) 局所の熱伝達係数・代表温度の同定

数値シミュレーションによって、局所等価気温、局所等価水蒸気圧、局所対流熱伝達率、および局所水蒸気拡散係数を同定する方法を提案した。不均一な熱環境においてもこれらの値を理論的に決定することが可能であり、代表温度を用いた局所対流熱損失量の算

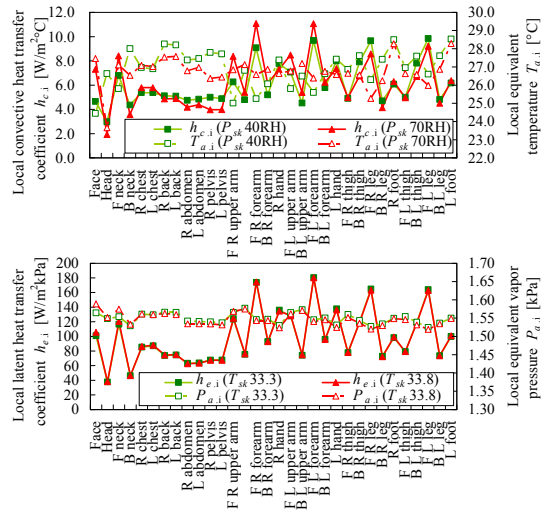


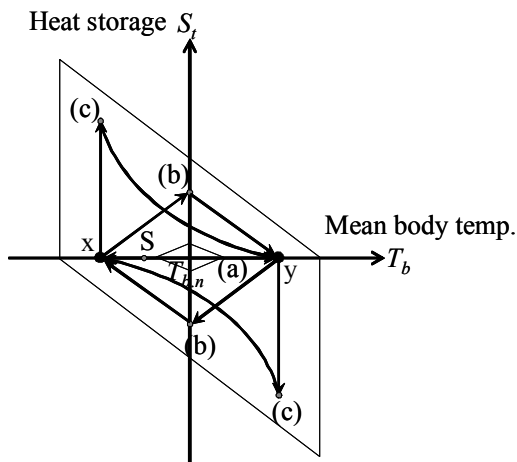
図 10 局所対流熱伝達率、局所等価温度、局所水蒸気拡散係数、局所等価水蒸気圧



出方法を提示した。

(4) 二次元温冷感モデルの数値モデル化

Kuno の二次元温冷感モデルを元に、温熱的な快と適（積極的な快適性と消極的な快適性）、および不快さを説明する新しい二次元温冷感モデルの概念を提案した。これは2つの変数「平均体温  $T_b$ 」および「人体の蓄熱量  $S_t$ 」を用いるものであり、これらの変数の導入によって、人体の温熱生理的状态が中立に戻る時に積極的あるいは消極的な快適性を感じることを、および温熱的生理状态が中立から離れた状態にあるとき、もしくは中立から離れるときに不快感を感じることを示した。



- Central lozenge is neutral zone.
- Outer parallelogram is living conditions.
- Vertical axis ( $S_t = 0$ ) corresponds to steady state.
- (a) Environment changes gradually
- (b) Environment changes rapidly
- (c) Environment changes suddenly

図 11  $T_b$  および  $S_t$  による人体生理状態の表現

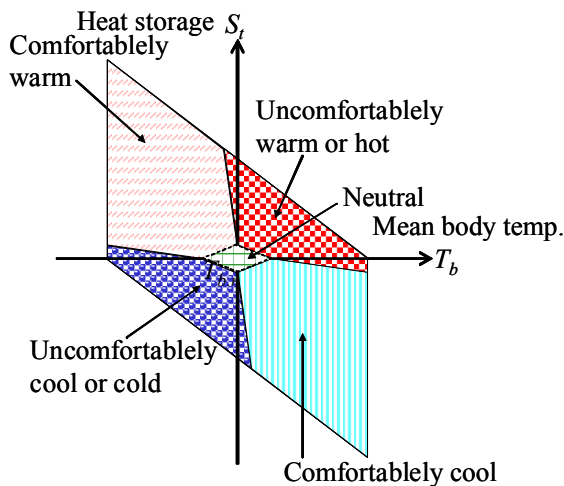


図 12 温冷感と人体生理状態の対応

- From sedentary to 20%WR(26°C)
- From sedentary to 40%WR(26°C)
- ▲ From sedentary to 20%WR(21°C)
- △ From 20%WR to Sedentary(21°C)
- ▲ From sedentary to 40%WR(21°C)
- △ From 40%WR to Sedentary(21°C)
- ◆ From 20%WR to 20%WR(26°C)

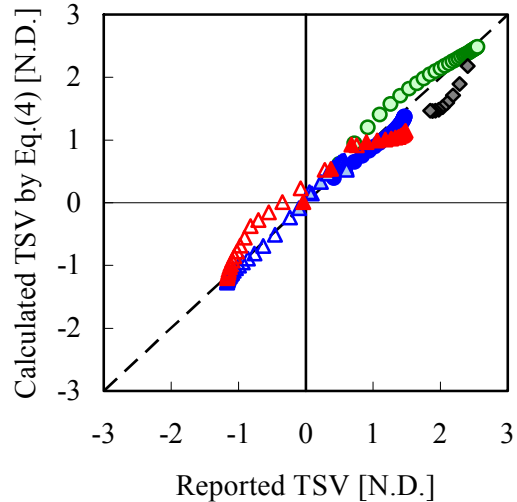


図 13 二次元温冷感モデルに基づく温冷感予測と被験者実験結果の比較

以上より、今後、計算精度を高める必要はあるものの、本研究により統合モデルの形が整った。これにより今後、建築設計・空調設計に大きく貢献できると考えられる。

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 4 件)

- ① Tomonori SAKOI, Shinsuke KATO, Ryozo OOKA, Kazuyo TSUZUKI, and Satoru KUNO, Concept of thermal index for evaluating pleasantness, comfort, discomfort, and the correspondence of thermal sensations to the mean body temperature and heat storage rate of a human body under sudden changes in activity, Proceedings of ROOMVENT 2009, Busan, 査読有, 2009, 1143-1150
- ② Tomonori SAKOI, Shinsuke KATO, Ryozo OOKA, Hideaki NAGANO, Shengwei ZHU, and Toshiaki OMORI, Identification of heat and vapor transfer coefficients, equivalent air temperatures, and vapor pressures for local body segments in nonuniform thermal environments, Proceedings of ICEE2009, Boston, 査読有, 2009, - (CD)

③佐古井智紀、加藤信介、大岡龍三、永野秀明、朱晟偉、大森敏明、局所熱伝達係数と等価気温を入力とした温熱生理予測と連成計算による予測の比較、第33回人間-生活環境系シンポジウム報告集、査読無、2009年、163-166

④佐古井智紀、加藤信介、大岡龍三、都築和代、久野覚、2次元温冷感モデルの軸変換の考え方と修正TNMによる高体温時、低体温時の温冷感特性の検討、第32回人間-生活環境系シンポジウム報告集、査読無、2008年、73-76

[学会発表] (計9件)

①張興輝、岩田香織、松原裕子、齋藤輝幸、久野覚、夏期に屋外から入室後の生理・心理反応に関する研究 その3「屋外が暑い」場合における24℃採涼空間の効果に関する検討、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会、2011年3月16日、東桜会館(愛知県)

②松原祐子、岩田香織、張興輝、齋藤輝幸、久野覚、夏期に屋外から入室後の生理・心理反応に関する研究 その4採涼空間利用時に男女が感じる熱的快適性の違いについての検討、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会、2011年3月16日、東桜会館(愛知県)

③岩田香織、齋藤輝幸、久野覚、夏期に屋外から28℃の室内へ入室後の生理・心理反応に関する研究-入室後に暑側の申告をした被験者に対する採涼空間の効果-、日本建築学会大会、2010年9月9日、富山大学

④張興輝、久野覚、齋藤輝幸、岩田香織、夏期に屋外から入室後の生理・心理反応に関する研究 その1採涼空間の効果の検討、空気調和・衛生工学会大会、2010年9月2日、山口大学

⑤岩田香織、張興輝、齋藤輝幸、久野覚、夏期に屋外から入室後の生理・心理反応に関する研究 その2個人による採涼空間の必要性についての検討、空気調和・衛生工学会大会、2010年9月2日、山口大学

⑥岩田香織、張興輝、齋藤輝幸、久野覚、屋外からの入室時における生理・心理反応に関する研究-採涼空間の効果の検討-、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会、2010年3月15日、東桜会館(愛知県)

⑦佐古井智紀、2次元温冷感モデルの軸変換の考え方と不均一条件下での人体の非定常解析のための局所熱伝達係数、局所等価気温の提案、日本建築学会シンポジウム「人間と温熱環境における非定常性のとらえ方」-変動要素の取り扱いについて考える-、2010年3月8日、建築会館(東京都)

⑧張興輝、齋藤輝幸、久野覚、屋外から入室

後の快適な温熱環境に関する研究-生理・心理反応の男女差-、日本建築学会大会、2009年8月28日、東北学院大学

⑨佐古井智紀、加藤信介、大岡龍三、永野秀明、朱晟偉、大森敏明、不均一温熱環境における局所の熱伝達係数、等価気温、等価水蒸気圧の同定、日本建築学会大会、2009年8月27日、東北学院大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

久野 覚 (KUNO SATORU)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号：70153319

### (2) 研究分担者

齋藤 輝幸 (SAITO TERUYUKI)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授

研究者番号：30281067

飯塚 悟 (IIZUKA SATORU)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授

研究者番号：40356407

(→ H20 は連携研究者)

加藤 信介 (KATO SHINSUKE)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：00142240

大岡 龍三 (OOKA RYOZO)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90251470

佐古井 智紀 (SAKOI TOMONORI)

信州大学・ファイバーナテック国際若手研究者育成

拠点・特任助教

研究者番号：70371044

(→ H22 は連携研究者)

### (3) 連携研究者

飯塚 悟 (IIZUKA SATORU)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授

研究者番号：40356407

(H20のみ)

佐古井 智紀 (SAKOI TOMONORI)

信州大学・ファイバーナテック国際若手研究者育成

拠点・特任助教

研究者番号：70371044

(H22のみ)