

機関番号：14501

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20686039

研究課題名（和文） 着衣における3次元熱水分同時移動モデルに関する研究

研究課題名（英文） A study on three-dimensional heat and moisture model in clothing

研究代表者

高田 暁 (TAKADA SATORU)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20301244

研究成果の概要（和文）：建築環境を設計・制御する際、着衣での熱水分移動を考慮した体温予測モデルが必要であるが、着衣内部における空気層形状の複雑さが、モデル開発のネックとなる。本研究では、着衣内空気層の形状をレーザースキャナで測定し、そのデータに基づく熱・湿気抵抗推定法の提案、空気層内外での気流性状解析を行った。また、着衣内空気層での換気を考慮した着衣-人体熱水分同時移動モデルを開発し、着衣内の換気が体温調節に及ぼす影響を評価する方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：It is necessary to overcome the complexity of the shape of the air layer in clothing to build up a heat and moisture transfer model in and around clothing adapted for the human thermal model. From this viewpoint, the shape of the air layer in clothing was measured with laser scanner. Based on the data, the heat resistance of the air layer was estimated, and the ventilation characteristics in the air layer were analyzed with computational fluid dynamics. The simultaneous heat and moisture transfer model of clothing was developed taking into account the ventilation in the air layer, and the influence of ventilation was evaluated with using the measured shape data and CFD results. The base of the methodology to analyze the heat and moisture transfer around human body was developed taking into account the complexity of the shape of the air layer in clothing.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：建築環境工学

科研費の分科・細目：建築環境・設備

キーワード：着衣、空気層、熱抵抗、3次元座標データ、熱水分同時移動、人体熱モデル、数値流体解析、通気抵抗

1. 研究開始当初の背景

人体熱モデル（体温調節モデル）の研究は、人体表面を詳細に分割し、部位ごとの特性を検討するフェーズに入ってきている。しかし、人体熱モデルに着衣の影響を考慮する際、着

衣の熱湿気抵抗や換気量を部位ごとに推定する方法論が十分でない。この点を克服し、不均一な温熱環境における熱的快適性の予測など、多様な用途に対して人体熱モデルの応用を可能とすることが期待されている。

着衣における熱水分移動のモデル化に対しては、着衣と着衣の間、あるいは着衣と皮膚の間に形成される空気層（以下、着衣内空気層と呼ぶ）の形状の複雑さがネックとなっている。また、着衣内空気層での換気に関しては、微小かつ開口の多い系での気流分布測定の高難度さが定量化を阻んでいる。これまでに、形状の単純なモデルによる実験、あるいは、形状を単純化した数値解析が行われてきているが、実際の形状を考慮した場合に、同一の結果が得られるかという疑問が付きまとう。もう一つのアプローチは、実際の人間を被験者として用いた実験的研究であるが、細部にわたり必要な精度でデータを取得することが非常に困難である。これらの問題点をクリアし、人体熱モデルへの適用方法を示した研究は、これまでに見当たらない。

2. 研究の目的

着衣の形状を測定し、実際の着衣形状を踏まえて着衣における熱水分移動をモデル化し、体表面での詳細な分布を考慮した人体熱モデルに対応した着衣の熱水分移動モデルの基礎を築く。具体的には以下を行う。

- (1) 着衣内空気層の形状・寸法測定方法の開発
- (2) 着衣内空気層の形状・寸法の特徴の把握
- (3) 空気層の熱抵抗測定
- (4) 空気層の熱・湿気抵抗の推定
- (5) 着衣内空気層での換気を考慮した着衣-人体熱水分同時移動モデルの開発
- (6) 着衣内空気層での数値流体解析
- (7) 着衣内換気が皮膚温などの生理量に及ぼす影響の評価

3. 研究の方法

- (1) 着衣内空気層の形状測定

レーザースキャナにより、対象とする空気層の外側に衣服の有る場合と無い場合の二つの形状データを採取し、空気層の形状データを取得する。得られたデータを解析し、空気層の形状、寸法の特徴を抽出する。

- (2) 着衣内空気層の熱抵抗推定

着衣内の換気が無視できる場合について、空気層の厚さに基づき熱抵抗を推定する。

- (3) 着衣内空気層での換気を考慮した熱水分同時移動モデル開発

着衣の開口や布面を通しての換気を考慮した熱水分同時移動モデルを開発し、その妥当性を検討する。

- (4) 着衣内空気層における数値流体解析

レーザースキャナを用いて得た形状データを用いて、CFD解析を行い、着衣内空気層での流れの特徴及び換気量を把握する。

- (5) 着衣内空気層での換気量の影響評価

CFD解析により得られた換気量を、着衣-人体熱水分同時移動モデルに入力して、その

影響を評価する。

4. 研究成果

- (1) 着衣内空気層の形状・寸法測定方法の開発
レーザースキャナを用いて着衣内空気層の形状・寸法を測定する方法を提案するとともに、表面形状データから空気層の形状・寸法を得るためのプログラムを開発した。マネキンを用いた測定より、測定精度の確認、データ処理方法の検討を行い、本方法により必要な精度で着衣が形成する空気層の形状および寸法が得られることを確認した。

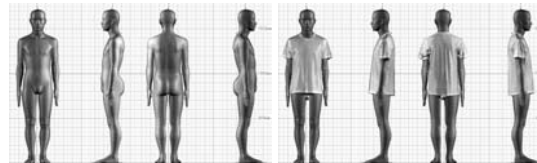


図1 マネキンのスキャン画像(左:裸体時、右:着衣時)

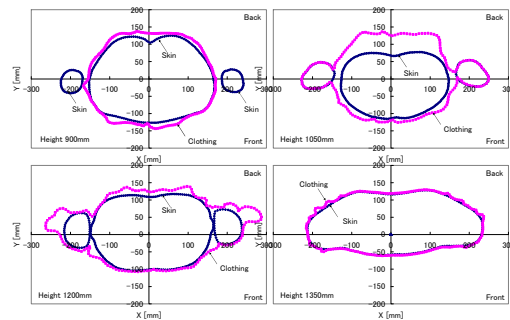


図2 スキャン結果の水平断面

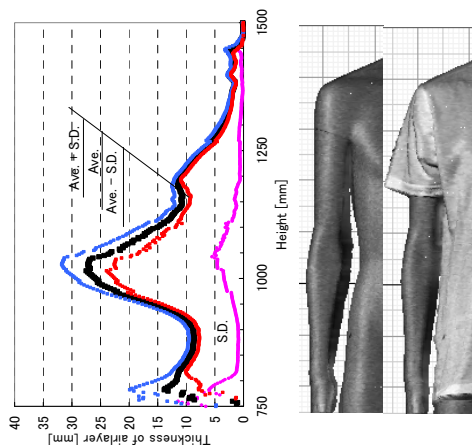


図3 空気層厚さの鉛直分布(各高さでの平均値・標準偏差)

- (2) 着衣内空気層の形状・寸法の特徴の把握

(1)の方法を用いて、成年男女の平均的な体格を模したマネキンを用いて、典型的な着衣条件に対して、着衣内空気層の形状・寸法

を測定し、その特徴を把握した。また、被験者を用いて、同様の測定を行い、マネキンを用いた実験で得られた空気層の形状・寸法の分布の特徴が、概ね、実人体に対しても当てはまることを確認した (図 4)。

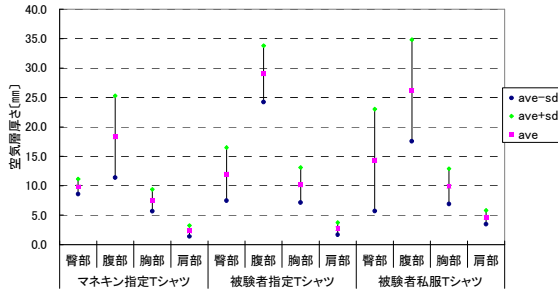


図 4 部位別の空気層厚さ (各高さでの平均値・標準偏差、マネキンと被験者の比較、マネキンについては 10 回の平均、被験者については 11 人の平均。私服については最外の着衣と皮膚の間で定義される空気層の値。空気層厚さの鉛直分布)

(3) 空気層の熱抵抗測定

被験者を用いて、体表面上の数点で、皮膚表面熱流および皮膚温、着衣内側温度を測定し、空気層の熱抵抗を推定した。また、空気層の層厚と熱抵抗の関係を検討し、従来の実験式との比較を行った。ばらつきが大きい、既往の実験式と大略対応することを示した。

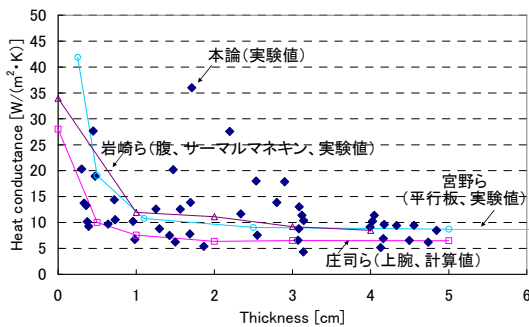


図 5 空気層厚さと熱コンダクタンスの関係 (測定値および文献値)

(4) 空気層の熱・湿気抵抗の推定

レーザースキャナによる測定結果を用いて、着衣内空気層の熱・湿気抵抗の典型値を提案した。着衣内の空気層厚さと熱抵抗の関係式を既往の実験結果から引用し、空気層の厚さ分布を熱抵抗の分布に変換し、多様な人体熱モデルへの適用が可能なマップとして表現した (表 1)。得られた熱抵抗は、対流・放射成分に分解し、対流成分について相似則を適用し、湿気抵抗とも導くことが可能と考えられる。提案した熱抵抗値が、数種の組み合わせ着衣について、従来の測定値と概ね一

致することを確認した (図 6)。

表 1 部位ごとの空気層厚さ (mm) と熱抵抗 (上: 成年男性の場合、下: 成年女性の場合、いずれもスーツ着用時)

男性 マネキン	部位	床上高さ(mm)	トランク クス	半袖 Tシャツ	カット Tシャツ	ズボン	ジャ ケット	各部位 の熱抵 抗 (m²· K/W)
頭	1480-							0.000
首	1460-1480		2.13					0.025
肩 上	1400-1460		5.46					0.153
肩 部	1262.5-1400	2.40		4.15		7.55		0.156
前 胸	1180-1262.5	6.98		-0.20		18.75		0.223
面 腹	1000-1180	11.01		3.21		15.71		0.286
腰 上	850-1000	4.03	3.40			-7.22	14.69	0.189
腰 下	775-850	7.95	5.44			-0.73	19.20	0.298
肩 上	1400-1460	1.94		5.40		5.92		0.166
肩 部	1262.5-1400	3.62		3.10		2.34		0.130
背 中上	1230-1262.5	11.30		0.35		8.88		0.230
後 背 中 中	1120-1230	18.24		4.09		3.33		0.226
面 背 中 下	970-1120	44.33		0.71		7.45		0.234
腰 上	850-970	2.96	18.02			-11.41	4.28	0.196
腰 下	775-850	1.83	13.67			-10.21	15.74	0.232
上腕 上	1155-1262.5	4.10		6.10		-10.32		0.050
上腕 下	1050-1155		16.46			-8.46		0.109
腕 前腕 上	962.5-1050		9.72			-3.26		0.095
腕 前腕 下	830-962.5		7.47			4.52		0.144
手 先	630-830							0.000
太もも 上	685-775	5.65		6.03				0.127
太もも 中	592.5-685			10.45				0.108
太もも 下	500-592.5			11.03				0.113
脚 膝	380-500			14.44				0.127
ふくらは ぎ	265-380			10.71				0.111
すね	90-265			29.63				0.128
足先	0-90							0.000

女性 マネキン	部位	床上高 さ (mm)	長袖 Tシャツ	ブラウ ス	ズボン	ジャ ケット	各部位 の合計熱 抵抗 (m²· K/W)
頭	1365-						0.000
首	1335-1365		0.27				0.006
肩 上	1290-1335		9.90				0.136
肩 部	1180-1290	2.80	2.37		9.17		0.165
前 胸	1070-1180	3.50	3.21		9.90		0.185
面 腹	920-1070	3.29	10.08		13.63		0.268
腰 上	800-920			5.20	9.31		0.168
腰 下	705-800		7.04				0.073
肩 上	1290-1335	0.46	4.09		3.29		0.108
肩 部	1180-1290	0.55	4.12		-1.85		0.064
背 中上	1125-1180	-1.16	2.16		-2.38		0.034
後 背 中 中	1030-1125	2.40	15.26		-0.75		0.171
面 背 中 下	900-1030	5.05	9.91		2.37		0.192
腰	800-900			5.40	1.38		0.100
尻	705-800		7.38				0.076
上腕 上	1095-1180	2.79	2.44		1.33		0.097
上腕 下	1000-1095	2.64	3.62		3.32		0.123
腕 前腕 上	910-1000	1.15	4.34		6.50		0.145
腕 前腕 下	770-910	3.89	3.08		14.64		0.211
手 先	600-770						0.000
太もも 上	625-705		7.68				0.079
太もも 中	540-625		9.16				0.092
太もも 下	460-540		11.31				0.111
脚 膝	370-460		15.15				0.122
ふくらは ぎ	250-370		16.32				0.122
すね	85-250		43.72				0.124
足先	0-85						0.000

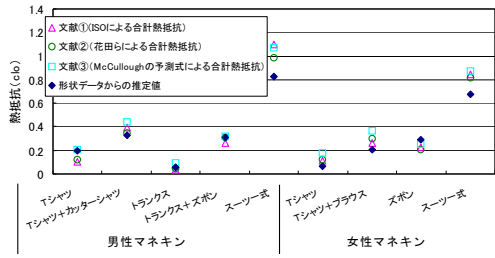


図6 推定した熱抵抗と文献値との比較

(5) 着衣内空気層での換気を考慮した着衣-人体熱水分同時移動モデルの開発

着衣内空気層における換気を考慮した熱水分移動モデル(図7)を開発し、着衣の水分容量及び着衣内空気層での換気が、着衣における熱水分同時移動過程や体温調節系に及ぼす影響について検討を行った。既往の実験結果を解析し、提案しているモデルにより、複数の条件下での実験結果を大略説明できることを示した(図8)。

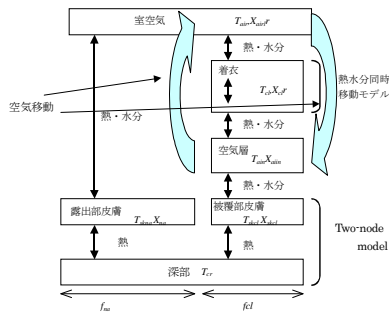


図7 解析モデル(着衣内換気を考慮した着衣-人体熱水分同時移動モデル)

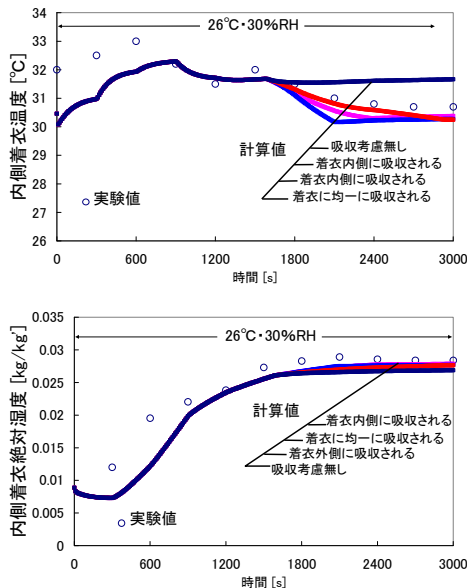


図8 運動に伴う発汗過程の実験・解析結果(上:内側着衣温、下:内側着衣絶対湿度、液相の汗の吸収形態別の比較)

(6) 着衣内空気層での数値流体解析

着衣内空気層の形状データを用いて着衣内空気層での気流性状を解析した。衣服の下端・上端・袖口等の開口部での換気、衣服表面での通気を考慮し、男性がTシャツを着用した立位静止状態、静穏気流条件について検討を行った。皮膚表面での上昇気流の方向が体の表面形状に左右され、それが布面を通しての通気性状に影響を及ぼすなどの特徴を明らかにした(図11~14)。また、布の通気抵抗の感度解析を行い、今回検討を行った静穏気流・立位静止状態に関しては、通気性が着衣内換気量に及ぼす影響は小さいことを示した。

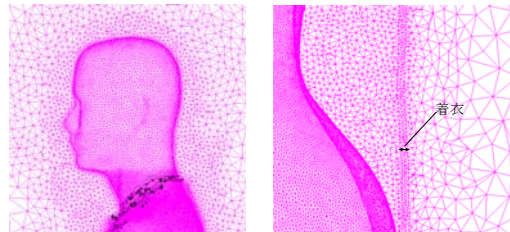


図9 非構造格子を用いたメッシュ分割図(左:頭付近、右:腰付近)

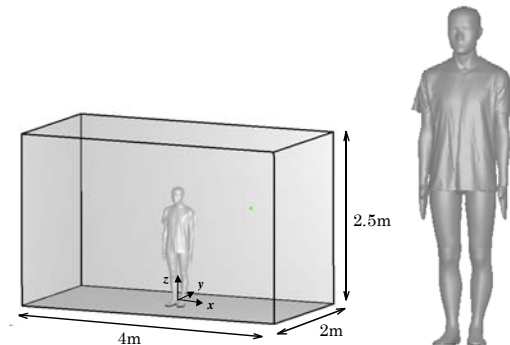


図10 解析対象室と着衣-人体のモデル

表2 CFDの解析条件

解析対象	4.0m x 2.0m x 2.5m
総メッシュ数	約2300万メッシュ
壁関数y+	人体表面: 1.0以下, 壁面表面: 5.0以下
乱流モデル	非線形低Re数型k-εモデル
計算アルゴリズム	安定解法
移流項	MUSCL法
放射	VF法
壁面境界条件	【速度】対数則 【温度】乱流熱伝達(温度の対数則) 体表面温度 35°C 壁表面温度 28°C
着衣条件*	厚さ 4.0mm
*着衣は多孔質体で模擬する	比熱 1380 J/(kg·K)
	密度 150 kg/m³
	熱伝導率 0.222 W/(m·K)
	通気抵抗度 249 Pa·s/m

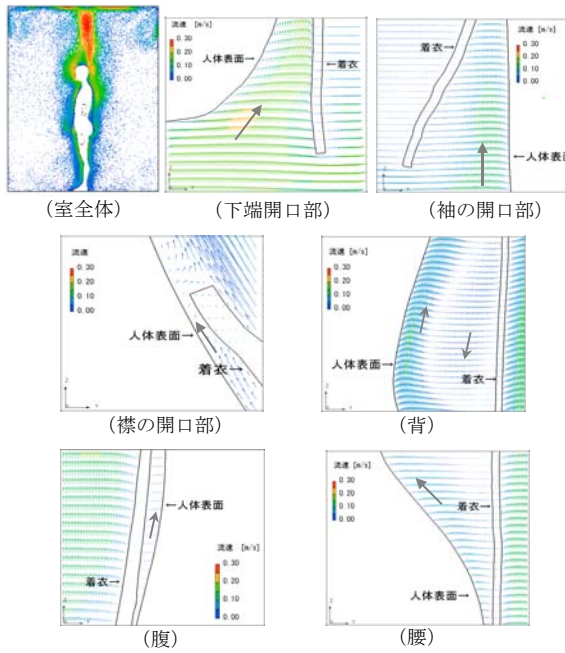
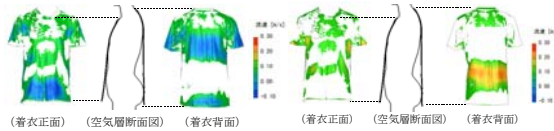


図 11 室全体と着衣内空気層の気流分布 (解析結果)



(着衣内空気層からの流出方向) (着衣内空気層への流入方向)
図 12 着衣面法線方向の流速成分の着衣面上での分布 (着衣内空気層への流入方向を正とする、解析結果)

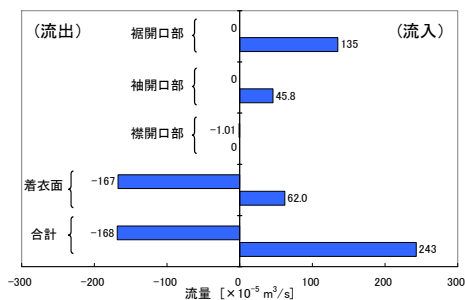


図 13 各開口部・着衣面での流量 (解析結果)

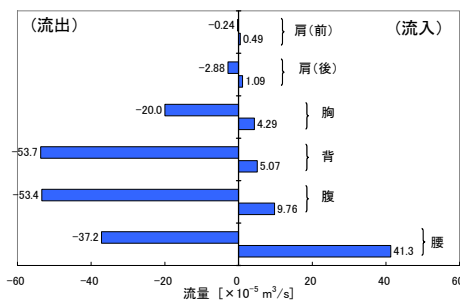


図 14 各部位の着衣面での流量 (解析結果)

(7) 着衣内換気が皮膚温などの生理量に及ぼす影響の評価

数値流体解析により得られた着衣内空気層での換気量を、着衣-人体熱水分同時移動モデルに入力し、発汗後の蒸発過程について、換気が皮膚温等の生理量に及ぼす影響の評価を行った。今回検討した条件下では、換気の影響が甚大とは認められないことを示した (図 15)。ただし、蒸発過程の最初に関しては、着衣内空気層と室空气の温湿度差が大きく、換気の影響が比較的大きい。

今回検討したのは、静穏気流条件下でシャツ一枚を着用した人が立位安静を保つ場合であるが、通常のオフィスワーク時などを考慮すると、シャツの裾をズボンの中に入れる、アンダーシャツの上にカッターシャツを重ねて着るなど、衣服の開口がより小さく、通気抵抗がより大きい条件が多いと考えられる。その意味で、通常の場合、換気の影響は、今回の結果より小さくなる。一方、室内気流がより高速の場合や身動きのある場合を考えると、逆に、換気の影響が大きくなる。それぞれの場合について、本研究で提案した手法を用いて、着衣内換気の影響を定量的に明らかにし、人体熱モデルを用いた体温調節系の予測に反映させることが今後の課題である。

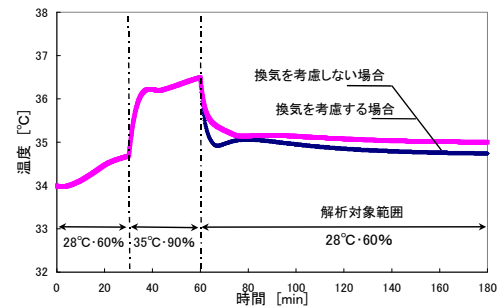


図 15 被覆部皮膚温 (衣服内の換気を考慮する場合としない場合の比較、解析結果)

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 0 件)

[学会発表] (計 16 件)

- ① 今井亜希子, 高田暁, 松下敬幸, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル (その3) 形状データに基づく着衣内空気層の熱湿気抵抗の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, 41056, 査読無, 2011.8.
- ② 夕部貴史, 高田暁, 松下敬幸, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分

- 移動モデル (その4) 着衣内空気層の形状データに基づいたCFD解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, 41057, 査読無, 2011. 8.
- ③ 今井亜希子, 高田暁, 松下敬幸, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル (その3) 形状データに基づく着衣内空気層の熱湿気抵抗の推定, 日本建築学会近畿支部研究報告集 (環境系), 査読無, 第51号, 2011. 6.
- ④ 夕部貴史, 高田暁, 松下敬幸, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル (その4) 着衣内空気層の形状データに基づいたCFD解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集 (環境系), 査読無, 第51号, 2011. 6.
- ⑤ 夕部貴史, 高田暁, 着衣内空気層における換気性状のCFD解析, 第34回人間-生活環境系シンポジウム報告集, 査読無, pp. 5-8, 2010. 11.
- ⑥ 高田暁, 松下敬幸, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル (その1) 着衣内空気層の形状測定と空気層内での熱水分移動のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, 査読無, pp. 605-606, 2010. 9.
- ⑦ 夕部貴史, 高田暁, 松下敬幸, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル その2 着衣内空気層における換気性状に関するCFD解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, 査読無, pp. 607-608, 2010. 9.
- ⑧ 高田暁, 松下敬幸, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル (その1) 着衣内空気層の形状測定と空気層内での熱水分移動のモデル化, 日本建築学会近畿支部研究報告集 (環境系), 査読無, 第50号, pp. 277-280, 2010. 6.
- ⑨ 夕部貴史, 高田暁, 松下敬幸, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル その2 着衣内空気層における換気性状に関するCFD解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集 (環境系), 査読無, 第50号, pp. 281-284, 2010. 6.
- ⑩ 高田暁, 山内なつ子, 着衣と皮膚の間に存在する空気層の形状測定と空気層内での熱水分移動のモデル化, 第33回人間-生活環境系シンポジウム報告集, 査読無, pp. 159-162, 2009. 11.
- ⑪ 夕部貴史, 高田暁, 発汗条件における着衣周辺の熱水分移動の解析-液相の汗の移動モデル-, 第33回人間-生活環境系シンポジウム報告集, 査読無, pp. 205-208, 2009. 11.
- ⑫ 高田暁, 着衣と皮膚の間に存在する空気層の形状と伝熱性状に関する検討, 第30回日本熱物性シンポジウム講演論文集,

査読無, pp. 151-153, 2009. 10.

- ⑬ 夕部貴史, 高田暁, 換気を考慮した着衣の熱水分同時移動モデルに関する研究-発汗を伴う条件下での被験者実験結果に基づくパラメータ推定-, 第30回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 査読無, pp. 148-150, 2009. 10.
- ⑭ 高田暁, 松下敬幸, 着衣と皮膚の間に存在する空気層における熱水分移動に関する研究 空気層の形状および熱コンダクタンスの測定, 空気調和・衛生工学会平成21年度学術講演会講演論文集II, 査読無, pp. 1315-1318, 2009. 9.
- ⑮ 夕部貴史, 高田暁, 松下敬幸, 着衣における熱水分同時移動の解析 着衣の水分容量が人体の温熱生理反応に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, 査読無, pp. 407-408, 2009. 8.
- ⑯ 夕部貴史, 高田暁, 松下敬幸, 着衣における熱水分同時移動の解析 着衣の水分容量が人体の温熱生理反応に及ぼす影響, 日本建築学会近畿支部研究報告集 (環境系), 査読無, 第49号, pp. 145-149, 2009. 6.

〔図書〕 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.arch.kobe-u.ac.jp/~en4/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 暁 (TAKADA SATORU)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20301244

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し