

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820285

研究課題名(和文)半屋外環境における滞在者の温熱環境適応および熱的快適域に関する研究

研究課題名(英文)Thermal Adaptation and Comfort Zone of Occupants in Semi-Outdoor Environment

研究代表者

中野 淳太(Nakano, Junta)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：30350482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、半屋外環境を環境グレードの区分として定義し、建築温熱環境計画における位置づけを整理した。外乱による環境変動をあえて許容し、滞在者自身による温熱環境への適応も考慮して、建築・設備による一体的な熱的快適性の実現を目指す点に半屋外環境の特徴がある。これまで筆者らが行ってきた公共空間及び駅空間の熱的快適性調査のデータを統一した手法により再整理した。非空調駅ではSET*で19～29、空調駅では23～29となることを導いた。また、非空調公共空間では14～32、アトリウムでは18～30となった。これらの結果は、用途や気候といった文脈要素が類似していれば他の空間にも適用できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Semi-outdoor environment is defined as a grade of environmental control in thermal environmental planning, falling in between indoor and outdoor environment. Thermal adaptation of occupants, together with design of building and equipment, needs to be taken into account for planning such environment. Field surveys conducted in public spaces and train stations were reanalyzed to derive thermal comfort conditions in each space. Thermal comfort zone in SET* was found to be 19-29 degC in train station without HVAC and 23-29 degC with HVAC. For public spaces, thermal comfort zone was 14-32 degC without HVAC and 18-30 degC with HVAC. These results were much wider than the PPD prediction of 23-28 degC in SET*. Higher degree of behavioral and psychological adaptation was found to be the reason for tolerance of a wider range of thermal environment. These results may be applied to thermal comfort zone of spaces with a similar context as in the filed survey.

研究分野：建築環境学

キーワード：熱的快適性 温熱環境適応 半屋外環境 熱的快適域 adaptive model 日射 駅 アトリウム

1. 研究開始当初の背景

PMV や SET*といった温熱環境指標は人間を環境に対して受動的な発熱体として扱っており、周囲環境との熱収支の結果から熱的快適性が予測できるという考えに基づいている。現在も温熱環境設計・評価ツールとして広く用いられているものの、現実の環境での実測調査結果が指標の予測結果とは異なる事例も多く報告されていた。特に、空調による環境制御の行われていない自然換気オフィスではその傾向が顕著であることが指摘されていた。この不一致を説明するため、環境に対して積極的に適応しようとする能動的な存在として人間を捉える adaptive model (環境適応モデル) という概念が提唱された。Adaptation (環境適応) には大きく分けて、行動的 (着衣や活動量の調節等)、心理的 (期待の緩和等)、生理的 (気候順化等) 適応があると言われており、現実の環境では従来の温熱環境指標により定まる熱的快適条件より広い環境範囲で熱的快適を実現できると指摘されている。

Adaptive model は 2004 年から米国暖房冷凍空調学会の熱的快適基準 ASHRAE 55 に採用されている。滞在者の環境適応を考慮することで、狭い範囲内に規定されていた快適環境条件の緩和が可能となり、建物の省エネルギーにつながる事が期待されている。反面、気候の異なる世界各国の測定結果を集約して導かれているため、adaptive model に基づく快適基準は必ずしも日本の気候に適用できるとは限らない。また、適用対象となる建物の環境調整手法は一年を通じて自然換気のみでなくてはならず、建物用途もオフィスビルに類したものに限定される。夏季に高温多湿となる日本国内オフィスビルの大半には事実上使用できないのが実情であった。

Adaptive model に基づく基準をそのまま日本に適用できないとしても、環境適応の概念は省エネルギー性と快適性を両立させる可能性を秘めた概念である。そこで、日本でも環境適応の成立しうる環境として、不特定多数の使用する非空調の建築空間を対象とすることとした。

2001~2003 年にかけて、滞在者による行動的適応の自由度の高い公共空間を調査対象として実測調査を行った。空調されていない空間 2 件、そして環境制御水準の異なる比較対象として空調されたアトリウム 2 件を選定した。2 千人を超える滞在者アンケート及び対応する温熱環境データより、これらの環境における SET*の受容範囲は PPD の予測結果よりも広くなり、空調されたアトリウムで 2 倍、非空調の公共空間で 3.5 倍広くなることを明らかにした。

2004-2007 には用途の異なる空間の事例として、非空調の駅舎 4 駅を対象とした同様の調査を行った。延べ 5 千人を超える旅客アンケートに基づく熱的快適域の調査を行い、受容範囲が作用温度 11-32℃、快適範囲が

11-26℃となることを示した。

2001 年より行ってきた用途および温熱環境制御水準の異なる空間における熱的快適性実測調査から、すべての結果をつなぐ熱的快適性の原理として再整理ができないかと考えた。そして、そのキーワードが「半屋外環境」にあると考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究は、半屋外環境における滞在者の環境適応特性および熱的快適域を明らかにすることを目的とする。本研究では、空調設備のみで熱的快適の実現を目指すのではなく、滞在者自身による適応も考慮して建築・設備による一体的な温熱環境計画の行われる対象を半屋外環境と定義する。「半屋外」は容器としての建築空間ではなく、中身たる環境のグレード (質) として位置づけられる。

滞在者による環境適応は無制限に発揮されるものではない。本研究では行動的適応の限度、また心理的適応につながる要因について整理する。滞在環境の関数として行動的適応の法則性を明らかにすることで、お温熱環境計画の資料となりうる。これまでは空気温度を環境の代表値とした関数が多く導かれてきたが、屋外では日射の影響も大きい。滞在者に選択されやすい環境の特徴を明らかにするため、放射環境特性を簡易に予測する方法について検討を行う。

以上を踏まえ、半屋外環境における滞在者の熱的快適域をケースごとに示し、それが成立するための条件をまとめる。

3. 研究の方法

3.1 環境適応に関する文献調査

Humphreys と Nicol、Auliciems と de Dear による 2 つの研究グループが、環境適応研究を牽引してきた。各々の取り組み関する文献は多いが、全体を網羅して環境適応研究の成り立ちを解説した文献は少ない。そこで、環境適応に関する 2 つのアプローチを整理した上で、本研究における環境適応の位置づけを明確にした。また、国内の環境適応関連研究をレビューし、熱的快適域に関する知見と問題点を明らかにした。

3.2 放射環境特性の簡易予測

温湿度に比べて放射は平面的な分布が生じやすく、同じ時間でも場所により特性が大きく異なる。滞在者に選択されやすい場所を評価する上で、その放射環境の特性を簡易に予測する手法について検討した。放射環境の代表値として、日射を考慮した放射温度である SOL_MRT を用いた。

T 大学敷地内のグラウンドに挟まれて東西方向に走る杉並木と、道幅の広い道路に面した楠木に囲まれて周りの建物の影響を受けない木蔭の 2 カ所を対象とした (図 1)。測定地点の杉は落葉樹、楠木は常緑樹であった。測定は夏季、秋季、冬季の各 3 日間とし、測定時間帯は、10:00~15:30 とした。最も屋外

日射の安定していた日を各季節の代表日とし、考察を行った。

緑陰内温熱環境の経時変化を把握するため、各ポイントにて1日約10回の測定を杉と楠木交互に移動し行った。長波・短波の波長別に2方向の放射を測定できる4成分放射収支計を用い、4分ごとに90°回転させることで高さ1.1mの上下左右前後6方向の日射・赤外放射を10秒間隔で測定した。同時に、放射よけをつけたセンサーにより温湿度を1分間隔で記録した。また、滞在位置から見た周囲面（樹木等含む）の形態係数や日射遮蔽率を正射影レンズを用いた撮影により評価した。SOL_MRTの実測値と予測値を比較し、簡易予測式の精度検証を行った。

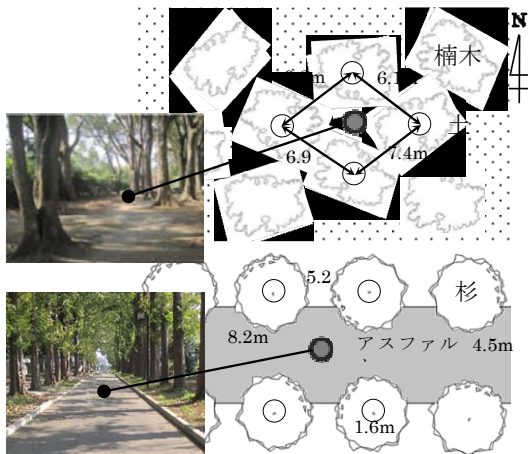


図1 緑陰内放射測定点

3.3 過去の実測調査データの再分析

環境適応に関する調査はその性質上、執務者・滞在者にとって日常に近い環境にてフィールド調査を行う必要があり、かつデータ数も多い方が有効な結果を抽出できると考えられる。

①行動観察、②アンケートによる心理量調査、③温熱環境測定という3つの手法を用いるが、これらを組み合わせた実測調査を実施した(図2)。

①行動観察：公共空間では、対象空間内で実際に座った人を滞在者とし、滞在時間および滞在者数を調査した。駅では構内で立ち止まった人を短時間滞在者とした。滞在時間は無作為に滞在者を選び、着席・離席時刻を記録した。また、滞在者数を10分毎に記録し、1日の変動を調査した。

②心理量調査：実際の滞在者に熱的快適性アンケートを依頼した。様々な人から回答を得るために平易な表現を用い、答えやすいインターフェースを心がけた。

③物理環境調査：滞在者周辺の物理環境を、なるべく滞在者の近傍で時間のずれを少なくして測定するため、移動計測カートを用いた。空気温度及び気流速度、相対湿度、放射計を同時に10秒間隔で記録させた。特に屋外に近い環境では放射環境が室内とは大きく異なるため、長波長放射、短波

長放射を上下左右前後の6方向のベクトル成分を測定し、詳細な評価を行った。すべての機器はバッテリー駆動とした。

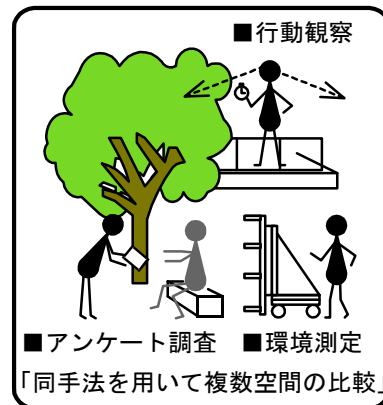


図2 環境適応調査手法

対象空間を温熱環境の文脈要素に応じてグループ化して分析を行った。空間の用途として、公共空間と駅空間の2群とした。公共空間は通常、明確な用途を指定されておらず、利用者が自由に使えるようになっている。そのため、滞在環境の選択、着衣の調節等の行動的適応の自由度が高いと言える。滞在しないことも選択できるという点で、オフィスなど長時間滞在する空間とは異なる。駅空間は公共空間と比較すると、行動的適応の自由度は制限される。しかし、オフィスのように長時間の滞在を強いられることはない。以上を整理すると、オフィス>駅空間>公共空間の順に高い快適性が求められると考えられ、熱的快適域としてはオフィスが最も狭く、公共空間が最も広くなると考えられる。ここに空調/非空調という環境制御の水準を加え、熱的快適域の再分析を行った。

再分析に際し、3.2の結果を踏まえて滞在環境の代表値であるSET*の計算を統一的に見直した。大きな変更点は、日射を考慮した平均放射温度の計算方法である。PMV-PPD理論、公共空間、駅空間で導かれた熱的快適域を元に、半屋外環境における熱的快適域について考察した。

4. 研究成果

4.1 環境適応と環境の文脈を考慮した熱的快適性概念の提案

「半屋外環境」を環境グレードの区分として定義し、建築温熱環境計画における位置づけを明らかにした。外乱による環境変動をあえて許容し、滞在者自身による温熱環境への適応も考慮して、建築・設備による一体的な熱的快適性の実現を目指す点に半屋外環境の特徴がある。

次に、半屋外環境における温熱環境計画の要となる温熱環境適応研究をレビューした。行動的・生理的・心理的適応のなかで、行動的適応と共に心理的適応が熱的快適性評価に及ぼす影響が大きいことがわかった。また、環境適応を左右する要因と言われている「環

境の文脈」を理解する上で、①社会、②建物、③個人の3種の文脈要素に分類することを提案した。

以上を踏まえ、半屋外環境における環境適応を考慮した熱的快適性の概念図を示した(図3)。中央の縦軸は、従来の温熱環境指標における評価の流れを示している。温熱環境6要素が自律性体温調節を惹起し、人体と環境の熱授受の結果として熱的快適性が判断される。従来の温熱環境指標は主に定常を前提としているため、評価の流れは上から下への一方向で完結している。しかし、ここに環境適応を考慮することで、フィードバックループが生じる。環境の文脈は、適応機会として行動的適応に作用する一方、環境に対する期待や行動的適応に対する心づもりなどの心理的適応にも作用する。そして、心理的適応はアウトプットである熱的快適性の捉え方に影響を与える。このとき、熱的不快を感じれば、行動的適応により温熱環境6要素の再調節が行われる。このループが収束した時点で、温熱環境が期待に見合わなければ不快と感じ、見合っていれば快適と感じるというモデルになっている。

厳密な環境制御を求めない半屋外環境において、重要なのは制御点としての快適温度(熱的中立温度)ではなく、制御範囲としての熱的快適域である。滞在時間が短いなどの文脈要素によって適応機会が限定される場合、完全に環境に適応する前に評価が完結してしまうこともある。各々の環境の文脈における現実的な適応の収束点があり、その時点での温熱環境と期待される温熱環境の合致する範囲が実際の熱的快適域となる。

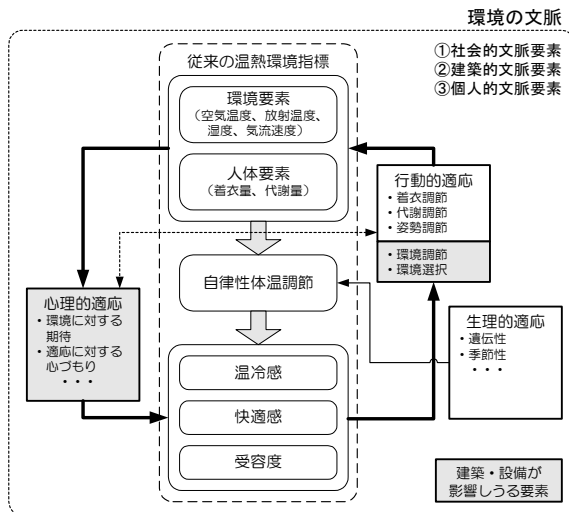


図3 半屋外環境における熱的快適性の概念図

建築は敷地と切り離すことができないため、気候や文化といった社会的文脈は立地により決まる。しかし、空間用途、環境制御手法、個人調節の自由度等の設定は、建築温熱環境計画の範疇である。建築や設備の計画は、建築的文脈要素として行動的適応と心理

的適応に寄与しうることを示している。環境の文脈に応じた熱的快適域を満たすように建築・設備の計画を行なうことが、半屋外環境における温熱環境計画の目標となる。

室内・屋外・半屋外の環境グレードについて、熱的快適域に関する既往研究をレビューした。既存の adaptive model に基づく温熱環境基準では、日本の環境の文脈が考慮されていない点を指摘した。また、日本国内でも半屋外環境の熱的快適域を導いた研究事例は少ないことを示した。日本という国及び地域の建築条件に対応した社会的・建築的文脈要素を整理し、それらを考慮した実測調査に基づく研究を進めていく必要がある。包括的な温熱環境指標を用い、快適や満足の申告から導かれる adaptive な熱的快適域、そして行動的適応に関する調査を平行して行うのが望ましい。これらの成果は、調査された環境の文脈の定義と共に示されることが重要だといえる。

4.2 日射を含む放射環境特性の簡易予測

杉と楠の上空緑被率を図4に示す。樹木による上方向日射は杉・楠木ともに夏季には80%以上の高い低減効果が認められた。天空放射に比べ、緑陰内の上方向赤外放射は夏季には10%、秋季、冬季は25%増加したため、樹木による天空放射を遮る効果も認められた。外気温に比べ各 SOL_MRT は常に高かったが、日向の SOL_MRT に比べ杉、楠木では、緑被率の高い夏季には30~40℃低くなっていた。しかし太陽高度の下がる秋季、冬季では緑被率の低下が著しい杉並木は強い日射が差し込み、日向の SOL_MRT と同程度となる時間帯が生じていた。

上空の緑被率、全天日射、空気温度、相対湿度から緑陰内放射環境の簡易予測式を提案した。夏季の杉、楠木では緑陰内に強い木漏れ日が入り込む時間帯を除けば、SOL_MRT を平均誤差1℃未満で予測できた(図5)。しかし、太陽高度の低くなる秋季、冬季には強く差し込む日射が増え、落葉し東西に延びる形状の杉並木では、誤差が大きくなった。秋季の SOL_MRT の平均誤差は14.5℃、突出値を除いても8.2℃と最大になった。

	夏	秋	冬
杉	0.90	0.82	0.66
楠木	0.89	0.87	0.86

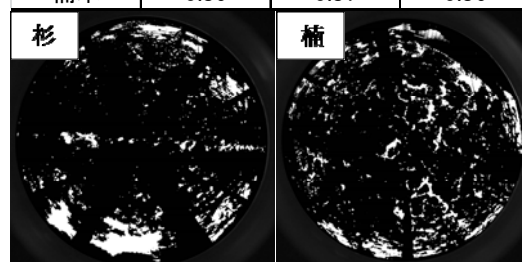


図4 緑陰上空の緑被率

常緑樹に囲まれた環境の楠木でも秋季、冬季に強く差し込む日射が増え、4℃の誤差が生じていた。本手法は、緑陰の日射遮蔽効果の大きい夏季日中の太陽高度の高い時間帯において、放射環境を予測するのに有効と考えられる。

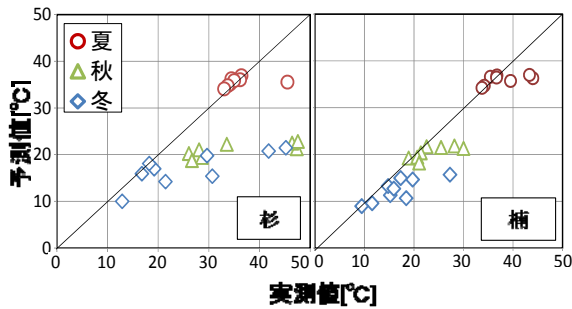


図5 緑陰 SOL_MRT の実測値と予測値

4.3 環境適応と環境の文脈を考慮した熱的快適域

空調、そして非空調の半屋外環境において、滞在者の環境適応と環境の文脈を考慮した熱的快適域を求めた。

全季節の各回答者の SET* を 0.5℃ 刻み（公共空間の場合は 1℃ 刻み）に丸め、同じ温度カテゴリに属するアンケート回答の申告者率を求めた。なお、温度カテゴリに該当する回答数が 10 未満の場合は、分析対象から除外した。

まず、適温感申告を元に「いまより暖かい方がよい」を暖要望申告、「いまより涼しい方がよい」を涼要望申告とし、熱的中立の判断に用いた。ただし、非適温の申告であっても不快とは限らない、そこで、快適感で「やや不快」「不快」「非常に不快」を同時に申告していた者の割合を「熱的不快」と見なした。全季節のデータを涼・暖側に分けてプロビット回帰を行い、合計することで単一の申告者率曲線を求めた。既存の温熱環境基準に習い、申告者率 20% を判断基準に設定した。また、オフィスのように長時間の滞在を前提とした一般空調空間における熱的快適域の代表値として、SET* の標準条件 (ta=tr、v=0.1m/s、RH=50%、0.6clo、1.0met) により PPD を求め、実測結果と比較した。公共空間の分析結果を図 6、駅空間の結果を図 7 に示す。

PPD 20% 未満となる熱的快適の予測値が 23~28℃ に対し、公共空間では、空調されている場合は SET*18~30℃、非空調では SET*14~32℃ が熱的快適域となることがわかった。つまり、空調空間では PPD 予測値の 2 倍、非空調空間では 3 倍も広い範囲で熱的に快適であることがわかった。また、PPD は熱的中立温度から左右対称に不満足者率が上昇するのに対し、実測結果では暑い側の不快の上昇率が寒い側よりも高いことがわかった。

次に、空調駅の熱的快適域は SET*23~29℃ となり、上限は 1℃ 高いものの PPD 予測値と

ほぼ一致することがわかった。それに対し、非空調駅では SET*23~29℃ となり、熱的快適域の下限値が空調駅よりも低くなることがわかった。

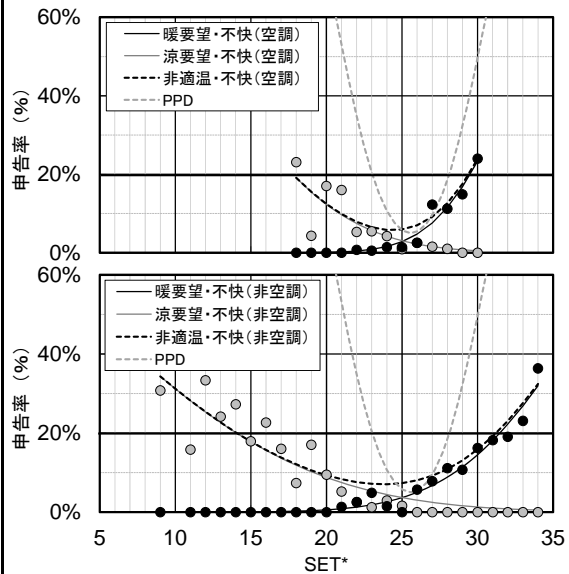


図6 公共空間における滞在環境の SET* と熱的不快申告者率

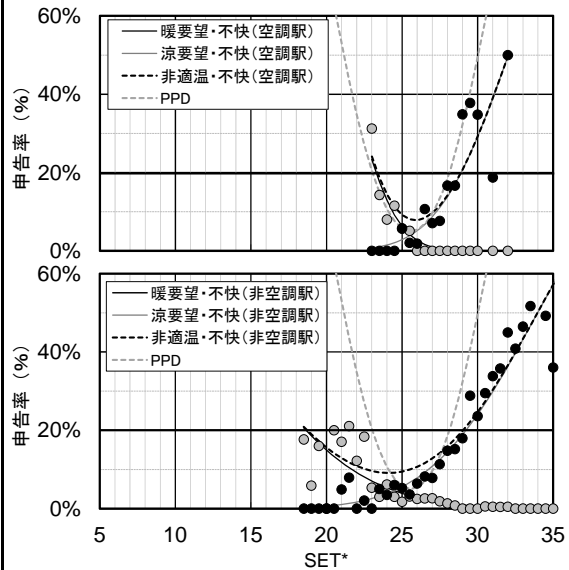


図7 駅空間における滞在環境の SET* と熱的不快申告者率

以上を総合すると、熱的快適域の広さは以下の順になる：非空調公共空間 > 空調公共空間 > 非空調駅 > 空調駅 > PPD。憩いの空間として使われている公共空間では駅よりも熱的範囲が広く、また空調されているよりも非空調の場合により広範囲の温熱環境が許容されることがわかった。いずれの結果も、温熱環境適応を考慮することでも PPD 予測値より熱的快適域が広がることを示している。

ただし、これらの熱的快適域を適用できるケースは、根拠となっている実測調査で対象とした環境と同等の文脈であることが前提

となる。熱的快適域に影響を及ぼしうる文脈要素として、以下が考えられる。

a) 社会的文脈要素

- ・文化的背景（日本）： 利用者の着衣調節等の行動様式、環境に対する意識に影響するため
- ・気候（関東地域）： ベースとして利用者が想定する環境に影響するため

b) 建築的文脈要素

- ・用途（公共空間／駅）： 利用状況（滞在時間・目的）に対して利用者が期待する環境に影響するため
- ・環境制御レベル（空調／非空調）： 利用者がその空間に期待する環境や行動的適応に影響するため
- ・利用者による行動的適応の自由度（着衣・滞在状況）： 個人で調節できる温熱環境の範囲に影響するため

これらの因子が利用者の行動的適応及び心理的適応に複合的に作用し、半屋外環境における実態としての熱的快適域を形成していると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

1. 中野 淳太、田辺 新一: 半屋外環境の熱的快適性に関する考察 — 温熱環境適応研究の日本における温熱環境計画への応用とその課題 —, 日本建築学会環境系論文集, 査読有, Vol. 701, 2014, pp.597-606

[学会発表] (計 5 件)

1. Nakano, J, Tanabe, S.: Thermal Comfort Zone of Semi-Outdoor Public Spaces, Indoor Air 2014, 2014/7/7-12, The University of Hong Kong (Hong Kong, China)
2. 中野淳太: 最新の温熱環境の動向, 室内環境学会大会, 2014/12/5-6, 工学院大学 (東京都新宿区)
3. 中野淳太、田辺新一: 環境適応研究の半屋外環境温熱環境計画への展開 鉄道駅舎における熱的快適域と熱的受容域, 日本建築学会大会, 2014/9/12-14, 神戸大学 (兵庫県神戸市)
4. 中野淳太、加藤駿、池田直樹、高橋晃久、大石洋之、田辺新一: 駅空間の快適な温熱環境制御に関する研究 (第 19 報) 地方観光駅の利用特性及び熱的快適域, 空気調和・衛生工学会大会, 2014/9/3-5, 秋田大学 (秋田県秋田市)
5. 畠中祐輝、中野 淳太: 緑陰が居住域放射環境に与える影響の簡易予測に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会, 2013/9/25-27, 信州大学 (長野県長野市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 淳太 (NAKANO JUNTA)
東海大学・工学部建築学科・准教授