

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889057

研究課題名(和文)都市の熱的快適性評価のための革新的計測評価システムの開発

研究課題名(英文)Development of new assessment tool for urban thermal comfort

## 研究代表者

仲吉 信人(Nakayoshi, Makoto)

東京理科大学・理工学部・講師

研究者番号：90706475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：アジアのメガシティの劣悪な暑熱環境はそこで生活する市民の熱中症リスクを増加させクオリティオブライフを低下させている。都市は非一様な熱環境場であるが、気象の測定点数が限られており、その実態把握は容易でない。

本研究では、(1)人に装着できる熱環境・装着者の健康状態のリアルタイムモニタリングツール、(2)市民の温熱感覚を用いた環境評価の試みとして温熱感覚収集スマートフォンアプリを開発し、人の動線に沿って熱環境を測定・評価するシステムを構築した。本システムを用いた実都市での温熱生理の被験者実験から、本評価システムが都市熱環境の詳細把握に有用であることが示された。

研究成果の概要(英文)：Severe thermal condition in Asian mega-cities increases heat stroke risk and deteriorates citizen's quality of life. Despite of the importance of understanding the detailed urban thermal portraits, the conventional measurement method, or fixed-point meteorological observation, is weak to obtain the spatially rich information due to the limiting measurement points.

We proposed a new research framework for the urban thermal comfort, where collecting the big data on citizens' perceptions for the micro climate and analyzing them statistically to obtain spatially-rich information on urban thermal environment. We developed a smartphone application for easy-collecting such data. We also developed a wearable measurement instrument for recording meteorological and sensor-carrier's physiological data along human pathway. A study for outdoor thermal comfort using the wearable instrument and smartphone app demonstrated an advantage of this tool for obtaining urban thermal portrait.

研究分野：都市気象

キーワード：熱中症 装着型測定器 深部体温 ヒートアイランド ラグランジュ

1. 研究開始当初の背景

気候変動に伴う猛暑被害、及びヒートアイランドに起因する都市の暑熱化により我々が曝される熱環境は悪化の一途を辿っており、それに伴う熱中症被害もまた増加傾向にある。気候変動の改善は長い時間スケールを要する難問であり、それに如何に適応するかが今後ますます重要な研究課題となってくるだろう。気候変動の作用にヒートアイランド効果が嵩上げされたものが我々の曝される熱環境とすれば、都市スケールの熱環境改善は有力な適応策であり、そのためには都市熱環境の実態調査が不可欠である。都市での実態調査は多くの研究者により国内外問わず様々な都市で実施されてきたが、その多くが短期集中的なものであり、経年変化を追えない、データの共有が困難であるなどの理由から、データの蓄積は十分とは言えない。

2. 研究の目的

本研究では、都市熱環境を詳細に測定・評価する新技術を開発することを目的に、以下の個別技術の構築を行う。

(1) 装着型の熱環境・健康モニタリング機器の開発

(2) 市民一人一人の温熱感覚から都市熱環境を評価する手法の構築

(1)は、市民の動線に沿ってそれぞれが暴露される熱環境・それによる健康状態を計測・評価を可能にすることで、定点観測点設置の難しい都市での熱環境把握を可能とする。(2)は、測定器さえも必要とせず、人の温熱感覚を大量に収集することで、ホットスポット・クールスポットや、不快地点を可視化することを可能にする。

3. 研究の方法

目的(1)に関しては、装着型計測システムの試作機は、本研究課題より以前に作成していた。研究期間内では、各センサの精度向上、適切な装着位置の決定、及び健康状態の評価因子として、深部体温・皮膚温度の小型・高精度センサの開発を新たに行った。

目的(2)では、市民の温熱感覚の収集を容易にする専用スマートフォンアプリの開発、及び市民の気象に関する体感値(体感気象)と計測器で測定された個別気象値(客観気象)の相関性を確認する被験者実験を行った。体感気象としては、温熱感、快適感、体感日射、体感風速、体感湿度、体感温度の6項目を評価した。評価尺度を表1に記す。



図1 温熱感覚収集用スマートフォンアプリのインターフェース。

(a)地図, (b)被験者属性入力, (c)着衣入力, (d)体感気象入力

表1 体感気象尺度表

	0	1	2	3	4	5	6
温熱感(夏)	非常に涼しい	涼しい	やや涼しい	中立	やや暑い	暑い	非常に暑い
温熱感(冬)	非常に寒い	寒い	やや寒い	中立	やや暖かい	暖かい	非常に暖かい
快適感	非常に不快	不快	やや不快	中立	やや快適	快適	非常に快適
体感風速	無風	風を感じる	葉が揺れる	細い枝が揺れる	太い枝が揺れる	—	—
体感日射(新)	日陰	曇天	薄雲り	晴れ(雲, 7~8割)	晴れ(雲, 3~6割)	快晴①	快晴②肌が痛みを感じる(新旧共通)
体感日射(旧)	(新旧共通)	(新旧共通)	(新旧共通)	(新旧共通)	晴れ(雲, 3~6割弱)	晴れ(雲, 3~6割強)	
体感気温	体感気温[°C]を入力						
体感湿度	非常に乾燥	乾燥	やや乾燥	中立	ややじめじめ	じめじめ	極端にじめじめ

#### 4. 研究成果

##### (1) 装着型の熱環境・健康モニタリング機器の開発

ここでは、新たに開発した体温センサに焦点を当てて成果を紹介する。低消費電力で行動制限が少なく、かつ高い応答性を持つ深部体温センサと皮膚温度センサを開発した。開発した体温センサの外観、回路図を図2に示す。また、図3、図4に皮膚温度センサの応答性能、屋外での精度検証の結果を記す。図3は暖房の効いた屋内から寒い屋外環境へ移動(4:50)した際の、3つの温度センサによるシグナルを示している(熱電対:0.02mmの極細熱電対、開発センサ:図2(a)、サーモクロン:工業用のボタン型温度センサ、皮膚温度測定への応用例多数)。極細熱電対は張力のみで皮膚に装着しており、皮膚上に発達する温度境界層内での測定であること、及びセンサ熱容量が超微小であることから皮膚温度の真値をとっているものとする。開発センサの皮膚温度は、真値に追随出来ているのに対し、サーモクロンは顕著な応答遅れを持ち皮膚温度評価の誤差に繋がることから分かる。時定数は熱電対、開発センサ、サーモクロンでそれぞれ、104秒、119秒、303秒であった。また、図4は日射による皮膚温度測定の誤差影響を評価したものであるが、ここでもサーモクロンは日射環境下で、皮膚温度を過大評価しており、日陰に移動後も高い時定数のため、過大評価が続いている。

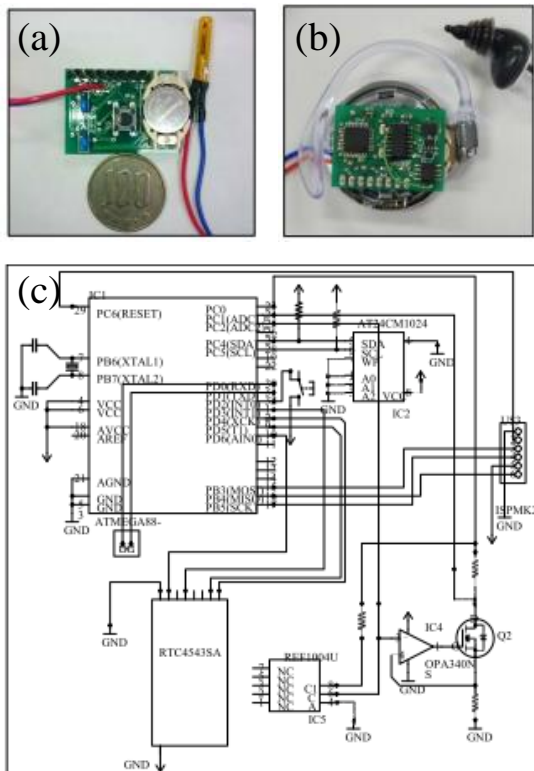


図2 開発した体温センサ  
(a)皮膚温度、(b)深部体温、  
(c)ロガー回路部(皮膚・深部体温共通)

一方、開発センサは真値と考えられる熱電対のシグナルとほぼ一致しており、高精度に皮膚温度を評価できることが確認された。

深部体温は高精度サーミスタを用いた耳栓型に成型したセンサ(日機装サーモ)を皮膚温度と同様のロガー基盤に接続し作成した。深部体温は直腸温度で評価するのが一般的であるが、直腸温度プローブでは、測定者の負担が大きい。耳栓型とすることで測定データが集めやすくなる。

図5に、開発した体温センサ、及び装着型気象センサを装着し得られた、被験者の日常生活時の温熱生理データを示す。図5のSET\*は、気温、湿度、風速、短波・長波放射を入力値とし人体熱収支を解くことで推定される熱負荷指標である。開発した機器を用いることで、日常生活時に人が曝される詳細な熱環境・熱負荷、及びそれによる人体生理応答を評価することが可能になった。

##### (2) 市民一人一人の温熱感覚から都市熱環境を評価する手法の構築

体感気象値を効率良く収集するスマートフォンアプリケーションを開発した。スマートフォンのインターフェースを図1に示す。ユ

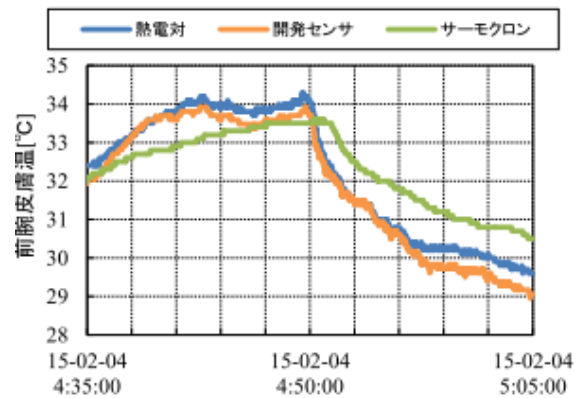


図3 皮膚温度センサの応答性能。暖房された屋内から寒い屋外へ移動時の皮膚温度シグナル

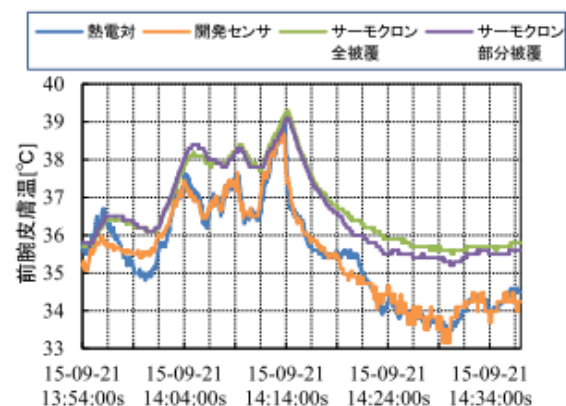


図4 皮膚温度センサに及ぼす日射影響。日向から日陰へ14時14分に移動。サーモクロンは皮膚への接着テープの厚さを変え2種類測定している。

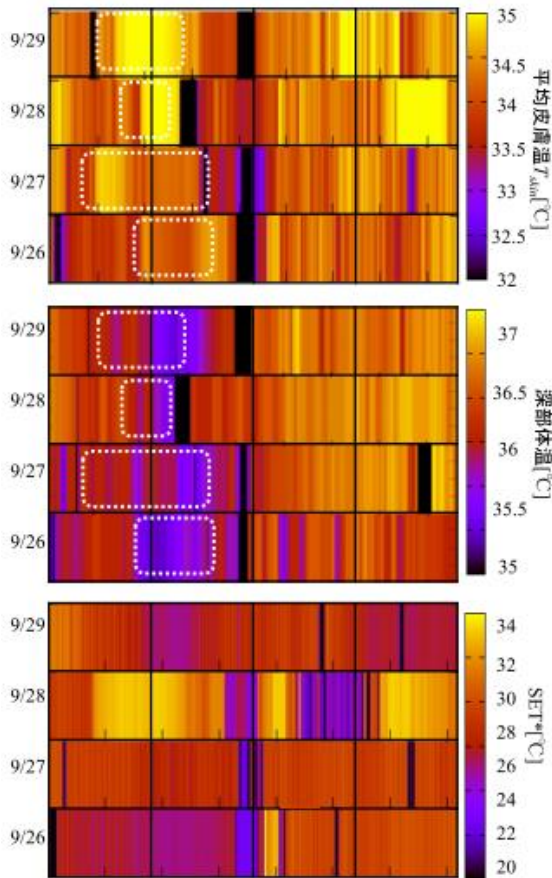


図5 被験者の日常生活中の温熱生理データ

ユーザーは画面下部のスライダーを左右に動かすことで体感気象値を入力する。入力と同時にGPSで捕捉された位置情報・端末の時刻情報がともに記憶される。また、入力が確認されると地図上にアイコンが表示され、アイコンをタップすることで入力時の情報が確認できる。入力項目の切り替えは画面右下吹き出し型シンボルのボタンで切り替え可能である。また、また身体情報や性別等の個人属性を端末に登録できる機能も有する。さらに、ユーザーの着衣を選択できる機能も追加した。

被験者の温熱感、快適感、体感風速、体感日射、体感湿度、体感温度と市販センサーで計測した客観気象値との整合性の確認のために被験者実験を千葉県野田市東京理科大学野田キャンパス(北緯:35.9181°, 東経:139.9072°)にて行った。本報告では観測日2014年11月から2015年8月にかけての計6日間のデータを使用する。被験者は20代の男女合わせて総勢14名である。

図6に被験者の温熱感覚とSET\*の関係を記す。温熱感には表1の尺度表に基づき冬季、夏季に分けて解析を行った。図中のシンボルは、SET\*を2°C毎に区分しその間の区間平均値を示しており、誤差バーは区間ごとの標準偏差を示している。決定係数は夏季0.70、冬季0.94と共に相関を得ており被験者の温熱申告を用いることで熱環境を評価できる可能性が示された。ただし夏季においては夏の快適さ

の境目とされる30~35°Cのデータが不足しているなど不十分な点もあり、詳細な議論は実験を重ねデータの追加が求められる。

図7に全観測期間中の被験者快適感とSET\*の相関を示す。快適感には山なりの外形を示しSET\*の上昇に連れて快適さの強度が増し、20~30°C前後を境に再び不快側に転じている。快適感にはSET\*に対し2値を持つため、そのみではホット・クールスポットの評価は出来ないが、温熱感と組み合わせることで都市環境評価に活かせる可能性が示唆された。

図8に体感風速と超音波風速センサーで得られたスカラー風速の相関を示す。体感風速の比較対象は10Hz計測した3成分風速値から算出した1分平均スカラー風速、平均区間は0.2 m/sとした。決定係数は0.60と、他の体感気象に比べばらつきが目立つ結果となった。これは風速の非定常性が原因と考えられる。風速は1分間の中でも強く変動しており、申

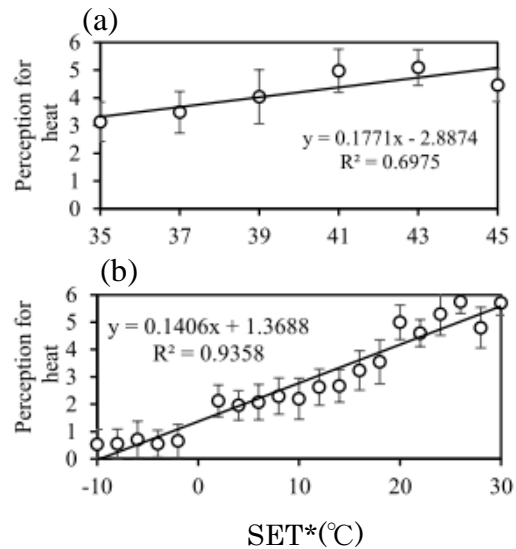


図6 被験者温熱感とSET\*の相関

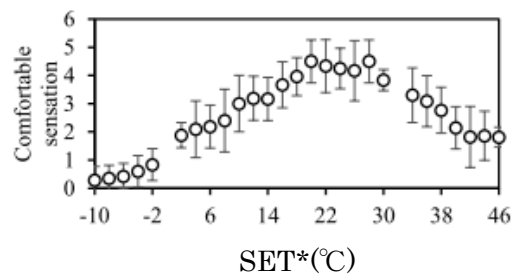


図7 被験者快適感とSET\*の相関

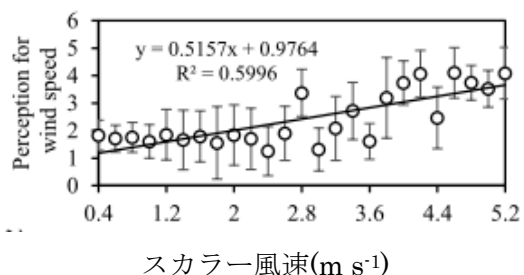


図8 被験者体感風速とスカラー風速の相関

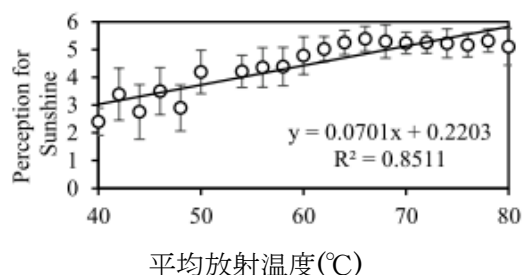


図9 被験者体感日射と平均放射温度

告時の瞬間風速と1分平均値との差異の影響が大きかった。

図9に体感日射と平均放射温度の相関を示す。体感日射と短波放射自体は相関が低く(図略)、人の日射感覚は、日射のみならず、輻射熱も考慮されている可能性が示唆された。体感日射より、市民が曝される放射環境が評価できる可能性が示唆された。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 24 件)

1. 鈴木智之, 仲吉信人, 2016: 長期連続計測を可能とする小型・低消費電力・装着性の高い体温センサの開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, I\_67-I\_72 (査読あり)  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020758450>
2. 伊藤淳史, 仲吉信人, 山城拓登, 小川憲人, 高根雄也, 日下博幸, 2016: 統計解析及び現地微気象観測に基づく四万十市での国内最高気温発生要因の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, I\_73-I\_78 (査読あり)  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020758457>
3. 酒井遼, 仲吉信人, 板倉拓哉, 下澤弘哉, 2016: 体感気象申告を用いた都市熱環境評価の試み, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, I\_85-I\_90 (査読あり)  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020758478>
4. Nakayoshi M., Kanda M, 2015: Development of Globe Anemo-Radiometer, Proceedings of the 13th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (査読なし)
5. 仲吉信人, 2015: ウェアラブルセンサ群を用いた街区空間の快適性評価, 日本ヒ

ートアイランド学会第10回全国大会予稿集, pp25-26 (査読なし)

6. 酒井遼, 仲吉信人, 2015: 都市熱環境評価のための温熱感マッピングツールの開発, 日本ヒートアイランド学会第10回全国大会予稿集, pp78-79 (査読なし)
  7. Nakayoshi M., Kanda M., and de Dear R., 2015: Globe Anemo-radiometer, *Boundary-layer Meteorology*, vol.155(2), pp.209-227, DOI: 10.1007/s10546-014-0003-7. (査読あり)
  8. Nakayoshi M., Kanda M., Shi R., and de Dear R., 2015: Outdoor thermal physiology along human pathways: a study using a wearable measurement system, *International Journal of Biometeorology*, vol.59 (5), pp.503-515, DOI: 10.1007/s00484-014-0864-y. (査読あり)
  9. Varquez A.G.C, Nakayoshi M., and Kanda M, 2015: The Effects of Highly Detailed Urban Roughness Parameters on a Sea-Breeze Numerical Simulation, *Boundary-layer Meteorology*, vol. 154 (3), pp449-469, DOI: 10.1007/s10546-014-9985-4. (査読あり)
  10. 寝占祐太, 神田学, 仲吉信人, 2015: 東京-熊谷間における夏期東京湾海風進入時間の長期年代変化, 土木学会論文集 B1, Vol.71, No.4, I\_403-I\_408 (査読あり)
  11. 神田学, 仲吉信人, Varquez, ACG: 都市の集中豪雨の数値シミュレーションと対策, 天気, 61巻5号, pp.362-370, 2014 (査読あり)
- 他 13 件

[学会発表] (計 17 件)

1. 鈴木智之, 仲吉信人, 2016: 長期連続計測を可能とする小型・低消費電力・装着性の高い体温センサの開発, 土木学会・第60回水工学講演会, 東北工業大学(宮

- 城県仙台) 2016年3月15日
2. 伊藤淳史, 仲吉信人, 山城拓登, 小川憲人, 高根雄也, 日下博幸, 2016: 統計解析及び現地微気象観測に基づく四万十市での国内最高気温発生要因の検討, 土木学会・第60回水工学講演会, 東北工業大学(宮城県仙台) 2016年3月15日
  3. 酒井遼, 仲吉信人, 板倉拓哉, 下澤弘哉, 2016: 体感気象申告を用いた都市熱環境評価の試み, 土木学会・第60回水工学講演会, 東北工業大学(宮城県仙台) 2016年3月15日
  4. Nakayoshi M., Kanda M, 2015: Development of Globe Anemo-Radiometer, the 13th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality, Kobe (Japan), 2015年11月11日
  5. 田中俊洋, 仲吉信人, 2015: ステレオ画像を用いた街路樹の高さ・位置同定アルゴリズムの検討, 土木学会第70回年次学術講演会, 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市) 2015年9月16日
  6. 酒井遼, 仲吉信人, 2015: 都市熱環境評価のための温熱感マッピングツールの開発, 土木学会第70回年次学術講演会, 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市) 2015年9月16日
  7. 伊藤淳史, 仲吉信人, 山城拓登, 2015: 四万十市高温化の原因解明に向けた微気象解析, 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市) 2015年9月16日
  8. 田中俊洋, 仲吉信人, 2015: ステレオ画像を用いた街路樹の高さ・位置同定アルゴリズムの検討, 日本ヒートアイランド学会第10回全国大会, 日本工業大学(埼玉県) 2015年8月30日
  9. 伊藤淳史, 山城拓登, 仲吉信人, 高根雄也, 日下博幸, 2015: 四万十市高温化の原因解明に向けた微気象観測, 日本ヒートアイランド学会第10回全国大会, 日本

- 工業大学(埼玉県) 2015年8月30日
10. 鈴木智之, 仲吉信人, 2015: 屋外温熱生理評価のための小型皮膚温度センサの開発, 日本ヒートアイランド学会第10回全国大会, 日本工業大学(埼玉県) 2015年8月30日
  11. 仲吉信人, 2015: ウェアラブルセンサ群を用いた街区空間の快適性評価, 日本ヒートアイランド学会第10回全国大会, 日本工業大学(埼玉県) 2015年8月30日  
**招待講演**
  12. 酒井遼, 仲吉信人, 2015: 都市熱環境評価のための温熱感マッピングツールの開発, 日本ヒートアイランド学会第10回全国大会, 日本工業大学(埼玉県) 2015年8月30日
  13. Nakayoshi M., Kanda M, de Dear R.: Human Biometeorology along Human Pathway using Wearable Measurement System, 20th International Congress of Biometeorology, USA (Cleveland), , 2014年9月30日  
他4件

[図書] (計 1件)

1. 仲吉信人, 他, 2014: ウェアラブル・エレクトロニクス～通信・入力・電源・センサから材料開発、応用事例、セキュリティまで～, NTS, 総ページ数 262. ISBN9784860434052

2.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲吉 信人 (NAKAYOSHI Makoto )

東京理科大学・理工学部土木工学科

研究者番号: 講師 研究者番号: 90706475

(2) 研究分担者

なし ( )

(3) 連携研究者

なし ( )