

平成 28 年度 補助事業 成果報告書

I. 基本情報

事業名： (日本語) 障害者対策総合研究開発事業
(英語) Research and Development Grants for Comprehensive Research for Persons with Disabilities

補助事業課題名： (日本語) 体温調整が困難な頸髄損傷者等の障害者に対する運動中の体温調整システムの開発
(英語) Development of body cooling systems for thermoregulatory dysfunctions in persons with spinal cord injury

補助事業担当者 (日本語) 国立障害者リハビリテーションセンター病院 障害者健康増進・運動医科学支援センター センター長 緒方徹

所属 役職 氏名： (英語) Center of Sports Science and Health Promotion, Hospital, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Director, Toru Ogata

実施期間： 平成 28 年 4 月 1 日 ～ 平成 29 年 3 月 31 日

分担研究 (日本語)

- 1) 生理指標と運動パフォーマンス・生活活動の関係性の解明
- 2) 統合システムのフィールドでの実証評価
- 3) 車椅子利用者の活動度を持続的にモニタリングするデバイスの開発

分担課題名： (英語)

- 1) Analysis of a relationship between physiological index and performance of sports
- 2) Clinical evaluation of a constructed cooling devices
- 3) Development of a long-term activity monitoring device for wheel chair users

補助事業分担者 (日本語) 国立障害者リハビリテーションセンター病院 障害者健康増進・運動医科学支援センター長 緒方徹

所属 役職 氏名： (英語) Center of Sports Science and Health Promotion, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Director, Toru Ogata

分担研究 (日本語) 温熱生理反応のモデル化
分担課題名: (英語) Characterization of a thermophysiological response of spinal cord injury persons

補助事業分担者 (日本語) 国立障害者リハビリテーションセンター研究所
福祉機器開発部長 井上剛伸
所属 役職 氏名: (英語) Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Director of Department of Assistive Technology, Takenobu Inoue

分担研究 (日本語) 熱循環型体温調節システムの開発
分担課題名: (英語) Development of a neck-wearing cooling system

補助事業分担者 (日本語) 国立障害者リハビリテーションセンター研究所 福祉機器開発部
福祉機器開発室長 硯川 潤
所属 役職 氏名: (英語) Department of Assistive Technology, Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Section Chief, Jun Suzurikawa

分担研究 (日本語) 熱伝導型体温調節システムの開発
分担課題名: (英語) Development of a cooling back support of a power wheel chair with high thermal conductivity material

補助事業分担者 (日本語) 国立障害者リハビリテーションセンター研究所 研究員 高嶋淳
所属 役職 氏名: (英語) Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Researcher, Atsushi Takashima

II. 成果の概要 (総括研究報告)

・ 補助事業代表者による報告の場合

本研究では、体温調節機能に障害のある頸髄損傷者の暑熱環境下での日常生活活動支援を最終目的として、身体冷却システムを開発した。また、同システムの効果的な駆動方法を明らかにするために、運動負荷下での頸髄損傷者の体温変動を予測するための温熱生理モデル構築を試みた。さらに、このようなモデルを有効に生活場面で活用するためには、ユーザの状態センシングも必要となるため、活動量および深部体温のウェアラブルなモニタリングシステムもあわせて開発した。

冷却システムとしては、手動車椅子利用者の頸部に装着する熱循環型システムと、電動車椅子バック

レストに実装する熱伝導型システムをそれぞれ開発した。頸部冷却用インターフェースとして分割流路構造と熱可塑性ウレタンエラストマーフィルムから成る冷却ユニットを作成した。内部の分割流路構造によりインターフェースを頸部皮膚表面に密着させることができ、真実接触面積を最大化と流路の閉塞防止ができる点が特徴である。実際に、頸髄損傷の車椅子マラソン選手を被験者とした運動負荷実験でその効果を評価したところ、頸部冷却により深部温上昇が抑制されたことが確認できた。

熱伝導型システムについては、熱伝導性と体圧分散性を兼ね備えたインターフェースを新たに開発した。そのために、電動車椅子のチルト状態を想定した姿勢による背部接触圧力分布を計測し、それを均一化する接触圧力分散曲面を算出する手法を提案した。算出した曲面をアルミニウム製の背板に彫刻し、彫刻面の裏側に 40W のペルチェ素子を 4 つ配置することで、熱伝導背部インターフェースとした。こうした作成した背もたれ部が実際に体にフィットし、優れた使用感が得られるかを健常者において検証し、良好な結果を得ている。

頸髄損傷者の温熱生理モデルとしては、健常者モデルである **Stolwijk** モデルと **Two-node** モデルを比較検討した。健常者および頸髄損傷者を対象とした実験データへのフィッティング結果から、こうしたモデルは車椅子駆動の運動場面に対しては適合性が低いことが新たに明らかとなった。実際には全体的な深部体温上昇トレンドをベースに、運動負荷に対して使用する筋群への血流再分布が生じるため、運動開始時点では一過性に頭部皮膚温が下がるという知見が得られた。また、パラメータ探索手法を応用した検討から、従来の **Two-node** モデルに熱の蓄積を表現するレイヤーを追加することで、運動負荷下での頸髄損傷者の体温変動を再現できる可能性があることを指摘できた。

田村による深部体温モニタリングの開発は、既存の機器とは異なり、断熱・熱伝導複合体プローブにおける熱流束測定から熱伝導方程式を解いて深部体温を推定する手法を採択することで、大幅な小型化を実現することができた。さらに実証試験の場で既存製品との比較試験を行い、その精度も十分であることが確認された。すでにポータブルなサイズまで改良が進み、一連の冷却システムのモニタとしてだけでなく、単体として利用できるものとなっている。障害者だけでなく、高齢者も含め、簡便に深部体温をモニタできる方法が確立した。

体温調節の介入の目的は直接的に体温を下げるだけでなく、体温調節を通じて障害当事者がより活動的な生活・運動を実現することである。そのための客観的指標を整備するため、H28 年度より新たに車いす利用者の活動量モニタリングを課題に加えた。そのために、着衣型の心拍計、体幹・上肢の慣性モーメント、車椅子車輪の回転からデータを収集し、統合することで活動量を推定するモデルを構築した。上肢装着の心拍計は車椅子駆動動作により精度が落ちることを確認し、利用者の負担を減らして使用可能な着衣に回路を組み込んだ心拍計を考案し、開発を進めている。着衣に回路を組み込んだ心拍計を用いて健常者と頸髄損傷者に対して車椅子駆動動作中の心拍波形計測を実施した。これにより、健常者に対して頸髄損傷者は心拍信号に対するノイズ成分が過大に検出される傾向があり、皮膚と回路との接触条件を特別に改質する必要があることが分かった。ここでは電解質を塗布することで改質とし、これにより十分な精度で心拍信号が計測可能となった。

以上まとめると、頸髄損傷者に代表される、体温調節困難者に対する体温調節システムの基盤技術として、深部体温モニタリング法、体温変化に関する基礎的法則、冷却の方法、ユーザビリティ向上のための必要事項の開発が行われ、実証面では車椅子陸上選手の練習場面での詳細なデータが得られたとともに、実際に体温上昇を抑制する効果も確認することができている。現状の熱循環型のシステムは冷媒として冷却水を使用しており、熱交換の詳細なデータが得られる反面、ポータブルにはなっていないため、さまざまな日常生活の中での利用シーンに対応した検討は今後の課題となった。

The goal of this project was to facilitate active social participation of persons with spinal cord injury (SCI) by a novel assistive technology that compensate for dysfunction in thermoregulation. For this purpose, we developed two types of body cooling system with a controlling algorithm based on a calculation model of thermophysiological parameters in persons with SCI. To precisely control body temperature, we also developed a novel core temperature sensor and a activity monitoring system for wheelchair users.

The body cooling systems developed include a neck-wearing coolant circulator and a wheelchair-mounted back cooling system. We developed a neck cooling belt for the coolant circulator that consists of a urethane elastomer film and a 3D-printed flexible flow channel structure. This configuration enabled the belt to tightly contact along the neck without blocking the flow channel, and thus maximized the true contacting area for heat exchange. The cooling effect of this system was evaluated by the experiment with wheelchair athletes as subjects. The comparison of core temperature in the cooling and non-cooling trials demonstrated that the neck cooling with the developed system successfully suppressed the increase of body temperature during exercise.

As a main component of the wheelchair-mounted back cooling system, we developed a backrest component both with high thermal conductivity and good pressure dispersion. We proposed a novel surface design method to model an optimized form for pressure dispersion by measuring the contact pressure distribution on the backrest and calculating a surface form that makes the measured distribution flattened. The experiment with the fabricated surface made of duralumin after the calculation proposed confirmed that the surface form can disperse the contact pressure on the backrest.

To construct a thermal model for persons with SCI, two standard thermal models, i.e., Stolwijk's model and the Pierce two-node model, were compared. Fitting of the simulated and measured trends of core and skin temperatures during exercise suggested that these models are not suitable for body temperature estimation during wheelchair propulsion, exercise with upper limbs. Characterization of these models with a parameter search method also indicated that additional nodes that can express the speed and extent of heat transfer in the body will be effective for construction of a thermal model for persons with SCI.

The novel core temperature sensor developed by Tamura in Waseda University adopted an estimation method using a composite probe made of heat conducting and insulating materials and was downsized. The comparative evaluation with a commercial core temperature sensor confirmed the high accuracy of the proposed sensor. This sensor has many possible applications as an easy-to-wear and versatile core temperature sensor.

Because the purpose of body cooling is not only suppression of body temperature increase but also facilitation of activity and participation of persons with SCI. To quantitatively evaluate this effect of the body cooling system, we also developed an activity monitoring system for wheelchair users. The proposed system consists of a wearable heart rate sensor, accelerometers for body trunk and upper limbs, and a tachometer for the wheels, and estimates the amount of activity with data collected from these sensors. The trial experiment showed that artifacts in heart rate estimation caused by the movement for wheelchair propulsion. The, we developed a novel heart rate sensor

attached on the inside of a shirt. Although the propulsion-induced artifact was still large in the dry condition, application of electrolyte improved the signal-to-noise ratio that was sufficient for stable heart rate monitoring during activity.

In summary, we developed series of approaches for body temperature control, consisting of core temperature monitoring, thermal model and cooling methods. As application for users, we collected data from wheelchair athletes and succeeded in preventing core temperature increase during exercise. Further developments are required for a portable model and for fitting the device to various setting in daily life where body temperature control is needed by people with disabilities.

III. 成果の外部への発表

(1) 学会誌・雑誌等における論文一覧（国内誌 件、国際誌 件）

(2) 学会・シンポジウム等における口頭・ポスター発表

1. 脊髄損傷者の機能訓練と健康増進のこれから、緒方徹、第 53 回日本リハビリテーション医学会、2016/6/11、京都
2. ロコモティブシンドロームと障害者、緒方徹、第 41 回日本運動療法学会、2016/6/18、国内
3. Practices of health promotion for people with disabilities in NRCD、緒方徹、リハビリテーション研究に関する国際シンポジウム 2016、2016/6/23、韓国
4. 障害者の体温調節支援をめざした体温シミュレーションモデルの検討，滝澤健太，硯川潤，樋口幸治，黄銘，田村俊世，倉林大輔，井上剛伸，緒方徹，高嶋淳，第 34 回日本ロボット学会学術講演会、2016/9/7，山形。
5. 体温調節が困難な障害者の為の人体熱モデルの検討，滝澤健太，硯川潤，樋口幸治，黄銘，田村俊世，倉林大輔，井上剛伸，緒方徹，高嶋淳，第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，2016/12/16，札幌。
6. 脊損・頸損者に対する体温制御の試み，高嶋淳，ヒューマンセントリックロボティクス研究専門委員会 第 9 回若手研究会、2017/1/28，武雄。

(3) 「国民との科学・技術対話社会」に対する取り組み

(4) 特許出願

出願番号 特願 2017-028897

発明の名称 熱中症予防装置

平成28年度 委託研究開発成果報告書

I. 基本情報

事業名： (日本語) 障害者対策総合研究開発事業
(英語) Research and Development Grants for Comprehensive Research for Persons with Disabilities

研究開発課題名： (日本語) 体温調整が困難な頸髄損傷者等の障害者に対する運動中の体温調整システムの開発
(英語) The development of body temperature management system for spinal cord injury patients

研究開発担当者 (日本語) 緒方 徹

所属 役職 氏名： (英語) Toru Ogata

実施期間： 平成28年4月1日～平成29年3月31日

分担研究 (日本語) 熱流束計測型深部体温モニタの開発

開発課題名： (英語) Development of dual-heat type thermometry

研究開発分担者 (日本語) 藤本 浩志、 田村 俊世

所属 役職 氏名： (英語) Hiroshi Fujimoto, Toshiyo Tamura

II. 成果の概要（総括研究報告）

・ 研究開発代表者による報告の場合

・ 研究開発分担者による報告の場合

研究開発代表者：国立身障者リハビリテーションセンター病院 障害者健康増進・運動医科学支援センター長 緒方 徹 総括研究報告を参照。

III. 成果の外部への発表

(1) 学会誌・雑誌等における論文一覧（国内誌 0件、国際誌 3件）

1. Huang, M, Tamura, T, Tang, Z, Chen, W, Kanaya, S; **A Wearable Thermometry for Core Body Temperature Measurement and Its Experimental Verification** IEEE J Biomed and Health Informatics 21(3) In press May 2017 DOI: [10.1109/JBHI.2016.2532933](https://doi.org/10.1109/JBHI.2016.2532933)
2. Tamura T, Maeda Y, Sekine M and Huang M. The role of wearable monitor for healthcare Advances in Science and Technology 100 159-165 (2016)
3. Huang M, Tamura T, Tang Z, Chen W, and Kanaya S: Structural optimization of a wearable deep body thermometer: From theoretical simulation to experimental verification. Journal of Sensors (2016) Volume 2016. [dx.doi.org/10.1155/2016/4828093](https://doi.org/10.1155/2016/4828093)

(2) 学会・シンポジウム等における口頭・ポスター発表

1. Evaluation of a heat stroke preventing air-cooling vest based on the change of deep body temperature. 口頭 Huang M, Yoshimura T, Tang Z, Tamura T, Yoshida M, and Uchida M LIFE2015 飯塚 Sept 2015 国内
2. 空冷ジャケットを用いた高温環境下の運動による 深部体温変動の計測（口頭）、吉村拓巳，黄銘，唐 尊一，内田光也 田村俊世，第 31 回ライフサポート学会大会，小倉 Sept. 2015 国内
3. Ubiquitous Monitoring: Past, Present and Future: 口頭 Tamura T 12th International Conference on Ubiquitous Healthcare (u-Healthcare 2015) Osaka Japan Dec 2015 大阪 国内
4. Current topics of unobtrusive and wearable monitoring systems 口頭 Tamura T. International conference for innovation in biomedical engineering and life sciences Kuala Lumpur Malaysia Dec 2015 国外
5. The role of wearable monitor for healthcare 口頭 Tamura T, Maeda Y, Sekine M and Huang M.: CIMTEC N6 IL01 2016 Perugia Italy, June 9 2016 国外
6. Future home healthcare system focused on blood pressure changes for improving quality of life. 口頭 Tamura T, Mizukura I, Kimura Y, Huang M, Kanaya S 2nd International Conference on Movement and Nutrition in Health and disease. Regensburg, Germany, July 9, 2016 国外

7. Monitoring of Heat Strain based on Wearable Sensors under Hot/Wet Environment 口頭
Huang M, Tamura T, Tang Z, Kanaya S. 2nd International Conference on Movement and Nutrition in
Health and disease. Regensburg, Germany, July 9, 2016 国外
8. Wearable Deep Body Thermometers and Their Uses in Continuous Monitoring for Daily
Healthcare, 口頭 Huang M, Tamura T, Kanaya S, Yoshimura T : 38th Annual International
Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society pp 177180,2016 Orland
FL USA. August 2016 国外
9. A personalized model to predict human thermal state based on sequential physiological
measurements, 口頭 Huang M, Tamura T, Yoshimura T : 13th International Conference
on Ubiquitous Healthcare (u-Healthcare 2016), Aizu-Wakamatsu Oct. 2016 会津若松 国内
10. 脊髄損傷者の体温モニタリングにおけるウェアラブル深部体温計の実証実験 (口頭) 黄 銘、
吉村拓巳、田村俊世、硯川潤、高嶋淳、緒方徹、井上剛伸 第55回日本生体医工学会 仙台
2017年5月3日 国内

(3) 「国民との科学・技術対話社会」に対する取り組み
なし

(4) 特許出願

特願 2015-1000332