

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420236

研究課題名(和文) 知的労働生産性向上のためのウェアラブル頭頸部冷却システムによる基幹脳活性化法の研究

研究課題名(英文) Activation of deep-brain functions by using a wearable head/neck cooling system for maintenance of high intellectual work productivity

研究代表者

片桐 祥雅 (KATAGIRI, YOSHITADA)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所グリーンICTデバイス先端開発センター・研究マネージャー

研究者番号：60462876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ストレスによる知的労働生産性低下の防止を狙いに、深部脳活動の減弱が暑熱環境暴露や高負荷印加状態でいかに注意機能を低下させるかについて神経生理学的方法に基づき調べ、頭頸部冷却刺激を中心とする深部脳賦活法を検討した。結果、注意機能維持に深部脳の高い定常的活動度と抑制・賦活パターンを呈する同期的活動が重要であり、頭頸部冷刺激はこの深部脳活動増強に寄与することを明らかにした。さらに、深部脳活動が最大となる条件を心理学的指標との相関において明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For preventing stress-induced decline in intellectual work productivity, the present study aimed to neurophysiologically investigate how decreasing the deep-brain activity (DBA) index degrades attentiveness and test how head/neck cooling contributes to maintenance of the activity in hot environments or under the high-load conditions. We found that high stationary values and synchronous up-and-down changes of the DBA index are essential for maintenance of high attentiveness. We have shown that the head/neck cold stimuli support this maintenance by improvement in the DBA index. We have also clarified the condition to obtain the maximal DBA index for each individual associated with psychological measures.

研究分野：人間情報科学

キーワード：頭頸部冷却 暑熱ストレス 注意ネットワーク モノアミン神経 前頭前皮質 後頭部脳波アルファ波  
エラー処理 事象関連深部脳活動

### 1. 研究開始当初の背景

激化しつつある競争社会は生活・労働環境を激変させ、テクノストレスをはじめとする様々な現代特有の病理をもたらすと同時に、知的労働生産性を低下させている。視床、視床下部、前脳基底部、上部脳幹および前部帯状回等から成る深部脳神経核群は、生命活動のみならず注意、認知、記憶といった高次脳機能を支えており、過度のストレスによる深部脳機能の障害が知的労働生産性低下を招くと考えられている (Ossewaarde L. et.al, 2011)。この問題を解決するため、認知行動療法、バイオフィードバック療法、あるいはポジティブ感情発現を誘導し健康状態を生成する首尾一貫感覚 (Antonovsky A., 1987) 等、様々なストレス緩和法が試みられてきた。しかしこれら臨床心理学的方法は個人毎に最適化し適用しなければならぬという問題があった。可聴域を超える広帯域の音の刺激により基幹脳が活性化するハイパーソニックサウンド (Oohashi T. et.al, 2000) やパーキンソン病や鬱病等脳深部の機能低下に伴う疾患に対して限定的ながら有効性が認められている電氣的な深部刺激法は物理的刺激により直接脳を活性化する方法であり、こうした臨床心理学的方法の問題を解決すると考えられた。一方申請者らは、頸部冷却が暑熱環境暴露下で発現する代謝制限が可能な神経興奮を抑制し認知活動の維持に貢献している可能性を見出し、持続的注意検査において単純反応時間が暑熱ストレスにより遅延するのを防止することを明らかにしていた。また、頭頸部冷却は頸動脈血流を介して直接脳の深部を選択的に冷却できることが知られていた (Cabanac M. et.al, 1979)。これらの知見から、頭頸部冷却がストレスを緩和して深部脳活動の抑制を排除することで注意機能維持に貢献するものと考えに至った。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、(1) 頭頸部冷却システムの生理学的基盤として、①共生機械として動作させたときの生理学的挙動を調べ、②安静時および課題遂行時のホメオスタシス機構を解明するとともに、(2) 認知制御における深部脳機能の神経生理学的基盤として、①注意機能検査課題遂行時のパフォーマンスと脳活動の特徴を調べ、②頸部冷却が暑熱ストレス下でも注意機能維持を支援する神経生理学的機構を明らかにすることである。その上でさらに、(3) 深部脳活動が最大となる条件を生体情報との相関において明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

国立研究開発法人情報通信研究機構倫理委員会の承認の下、以下に示す被験者試験を実施した。被験者は健康な男女延べ 26 人 (男 11 名、女 15 名、年齢 20~33 歳) 志願者と

し、書面と口頭により実験参加への同意を得た。

(1) 頭頸部冷却システムの生理学的基盤を得る

①断熱スーツ内で電子冷却デバイス (ペルチェ素子) を備えたウェアラブル頭頸部冷却システム、熱流補償型深部体温計 (前額下の深部脳温を計測)、衣服内温度計 (皮膚近接温を検出) を被験者に装着させる受動型温熱システムを構築し、頭頸部冷却システムを共生機械として動作させたときの体温生理学的挙動を調べた。なお、この受動型温熱システムは、冷却デバイスが発生する熱を水循環によりスーツ外に排出するため、スーツの断熱性により被験者自身の体温により衣服内を暑熱環境 ( $>30^{\circ}\text{C}$ ) とすることを可能とした。②受動的温熱環境下 (①で構築) で、認知課題遂行中の前頭部深部温 (脳温) 及び皮膚温の挙動を調べた。認知課題は PC を使った持続的注意検査 (CPT) とした。

(2) 認知制御における深部脳機能の神経生理学的基盤を得る

①注意機能検査課題遂行時のパフォーマンスと深部脳活動の特徴を調べた。注意機能検査課題は単一周波数の音 (1000Hz) のランダム提示に対して単純に反応する課題 (SRT-CPT) 及び 2 種類の音 (1000 及び 2000Hz) に対して音を聞き分けて反応する (X-CPT) 課題とし、タスク遂行中バックグラウンドで国際 10-20 法に基づく脳波計測 (24bit、512Hz サンプリング) を行った。耳電極基準での後頭部 (O1、O2) から抽出する  $\alpha 2$  帯域 (10-13Hz) の脳波強度の時系列データは深部脳活動を表すことが知られており、本研究でもその知見に基づき脳波から深部脳活動度を算定した。深部脳活動度は注意機能検査課題における反応をマーカーとして加算平均することで事象関連深部脳活動度を算出し、課題遂行時の深部脳活動の特徴を表出した。

②受動型温熱システム ((1)①) を用い、頸部冷却が暑熱ストレス下でも注意機能維持を支援するか検証した。注意機能は PC 制御 CPT の検査項目の中からランダムな数字提示に対して単純に反応する課題 (SRT-CPT) と一時記憶と認知処理を同時に必要とする持続的注意課題 (AX-CPT: 1~9 までのランダムな数字提示において特定の組み合わせ (A-X) が認められたときのみボタンを押すという課題) の二つを選定した、課題成績は反応時間の平均値及びエラーにより評価し、さらに成績と深部脳活動度との相関を頭頸部冷却の有無に分けて明らかにした。

(3) 深部脳活動が最大となる条件を生体情報との相関において明らかにする

①後頭部脳波  $\alpha$  波強度揺らぎにはその変動周波数帯域により異なる深部脳活動領域に対応し、0.04Hz を閾値として低周波数成分及び高周波数成分がそれぞれモノアミン神経系を含む視床・上部脳幹及び内側前部帯状

回の領域の活動に対応していることが報告されている (Omata K, 2013)。そこで、課題遂行中にこれら深部脳がどのように活動するかを調べた。

②課題を遂行していないデフォルト状態の深部脳活動は個々人の特性 (気質) を表している。この特性はモノアミン神経を含む深部脳活動と関連し、気分障害との関連することが報告されている (Drevets W. C., 2001)。そこで、状態不安と特性不安を分離して検査可能な不安尺度の検査 (STAI Form-JYZ) を行い、深部脳活動度と不安尺度との相関を調べ、ストレス下で注意機能を維持できる個人因子を明らかにした。

③可聴域を超える広帯域の音響 (ハイパーソニックサウンド) を含む揺らぎのある刺激が減弱した深部脳活動を賦活し得ることが報告されているが、注意機能の中心的役割を担う前頭部の活動が直接的に賦活することは明らかにされていない。そこで、非定常的刺戟印加時の前頭部血流を調べるとともに、事象関連電位により注意機能が維持されるかを検証した。

#### 4. 研究成果

(1) 頭頸部冷却システムの生理学的基盤を得る

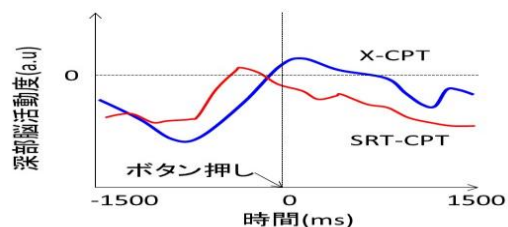
①断熱スーツ内での体温生理学的挙動：断熱スーツ装着により被験者はすべて 30 分以内に衣服内温度を 30°C (実験開始条件) まで上昇させた。実験開始後の衣服内温度は飽和傾向にあり、飽和値は暑熱環境温度条件の範囲 (30~35°C) で若干の被験者依存性を示した。衣服内温度が 30°C に達した後、頭頸部冷却システムの稼働を開始した。稼働開始後、前額部に装着した深部体温計により提示される深部脳温は速やかに低下 (3 分で -0.5°C) した。この結果から冷却デバイスは温熱システム内でも有効に脳深部を冷却できることを確認した。

②認知課題遂行中の体温生理学的挙動：暑熱ストレス下で頭頸部冷却がある場合、注意課題の負荷によらず課題開始とともに脳温は上昇するとともに、その後、深部脳温と近接皮膚温は相反的に変化する体温生理学的挙動が見られた。一方、頭頸部冷却なしの場合にはこの挙動は見られなかった。これらの結果から、頭頸部冷却は暑熱ストレス下で働く体温調整機構よりも課題遂行を優先し脳温を上昇させながらも脳に血流を集中させるなんらかの神経機構を起動することが推察された。

(2) 認知制御における深部脳機能の神経生理学的基盤を得る

①注意機能検査課題遂行時のパフォーマンスと深部脳活動の特徴：音響刺激による持続的注意検査を行い、並行して取得した脳波から刺激に対する反応 (ボタン押し) を基準に事象関連深部脳活動度をすべての被験者について加算平均して算出した結果、選択的課題 (X-CPT) において反応前に深部脳活動度が抑制された後上昇するという特徴が見出された。一方、単純反応課題 (SRT-CPT) では選択的課題に比べ抑制度は小さくまた早い時間段階で抑制後の上昇が開始していることが見出された (図 1)。こうした認知課題遂行に伴う深部脳活動度の同期的変化は、前部帯状回を中心とするサリエンスネットワークの活動及びデフォルトモードネットワークの脱賦活と関連していることが示唆された。図 1 事象関連深部脳活動度の課題依存性 (被験者 11 名 (男 8 人, 女 3 人) のデータをボタン押し基準で 90 刺激を加算平均。活動度のゼロ基準はレスト時の平均活動度)

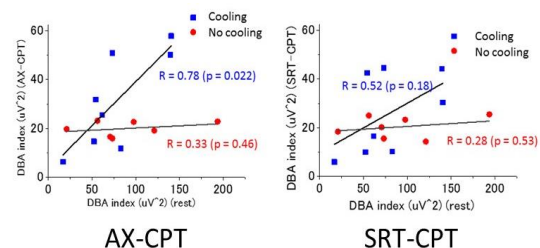
題 (X-CPT) において反応前に深部脳活動度が抑制された後上昇するという特徴が見出された。一方、単純反応課題 (SRT-CPT) では選択的課題に比べ抑制度は小さくまた早い時間段階で抑制後の上昇が開始していることが見出された (図 1)。こうした認知課題遂行に伴う深部脳活動度の同期的変化は、前部帯状回を中心とするサリエンスネットワークの活動及びデフォルトモードネットワークの脱賦活と関連していることが示唆された。図 1 事象関連深部脳活動度の課題依存性 (被験者 11 名 (男 8 人, 女 3 人) のデータをボタン押し基準で 90 刺激を加算平均。活動度のゼロ基準はレスト時の平均活動度)



者 11 名 (男 8 人, 女 3 人) のデータをボタン押し基準で 90 刺激を加算平均。活動度のゼロ基準はレスト時の平均活動度)

②頭頸部冷却が暑熱ストレス下でも注意機能維持を支援するか：被験者 15 名を頭頸部冷却あり/なしの 2 群にランダムに分け、暑熱ストレス下での認知課題の成績及び深部脳活動の特徴を調べた結果、深部脳活動度に寄らず頭頸部冷却により単純反応課題及び選択的注意課題の両方においてエラーが顕著に抑制されることが見出された。一方、課題遂行中の深部脳活動度は頭頸部冷却がある場合に増大するとともに、その増大度は課題負荷が多きいほど、また安静時の深部脳活動度変動の平均値が大きいほど顕著であった (図 2)。

図 2 暑熱ストレス下でタスク遂行時における頭



頭頸部冷却による深部脳活動度の賦活効果

これらの結果から、課題遂行に対するモチベーションが深部脳活動を増大させエラー発生を防止すること、頭頸部冷却はこのモチベーション維持に繋がることを示唆された。一方、このモチベーションは安静時の深部脳活動度の平均値と関連するものと考えられることから、暑熱ストレス下で注意機能の維持力に個個人の気質も関与していることが示唆された。

(3) 深部脳活動が最大となる条件を生体情報との相関において明らかにする

①課題遂行中の深部脳活動：被験者 11 名に対する音による持続的注意検査遂行中の脳

波から抽出した事象関連深部脳活動度の反応前抑制度と深部脳活動度の平均値との関係を単純反応課題及び識別課題（周波数弁別）に分けて調べた結果、課題に依存せず、両者に正の相関があった。この結果は(2)②の結果とも一致し、深部脳活動度の平均、即ち、モノアミン神経を含む上部脳幹近傍の活動度が高いほど深部脳活動の変動が高いほど課題遂行のための前部帯状回を含む前頭部の活動も高いことが示唆された。

②深部脳活動度と不安尺度との相関：被験者15名に対し実施した不安尺度検査では、状態不安と特性不安は正の相関（ピアソン相関係数  $R=0.66$ ,  $p=0.019$ ）であった。そこで特性不安と安静時の脳波から算定した深部脳活動の平均値との関係を調べたところ、特性不安尺度に対して深部脳活動の平均値は山形（凸型）の特徴を呈することが見出された。特性不安尺度の高い領域では、不安尺度の増大とともに深部脳活動が低下することから、従来の知見に示されているようなストレスによるモノアミン神経系を中心とする深部脳活動の減弱として説明可能であるものの、不安尺度の小さい領域での不安尺度の低下とともに深部脳活動度も低下する挙動を従来の知見から説明することは困難であった。深部脳の活動は認知とも関連し認知の減弱と不安尺度の低下に相関があると考えられることから、現在深部脳活動と不安認知との関連性を更に検討している。

③非定常的刺激の注意機能維持効果：刺激間隔 500ms（刺激持続時間 200ms）の連続刺激及び、刺激の一部をランダムに消失させた非定常連続刺激の二つの刺激パターンを提示し、前頭部脳活動の変化を近赤外分光による脳血流計測及び脳波計測により調べた。刺激パターンの作製は分担研究者の川原が行った。刺激持続時間が短いことから内耳を介して脳深部まで振動が伝わる純音（659Hz）による聴覚刺激とした。結果、定常連続刺激で前頭部脳血流が低下する一方、非定常刺激では血流が維持される場合があることを認めた。刺激をマーカーとして加算平均により求めた事象関連電位の解析の結果、刺激のブランクの後の刺激に対して P300 が顕著に増大していた。これにより、ブランクにより引き起こされる非定常刺激が意識下の注意を喚起し注意の維持に繋がったことが示唆された。動脈血循環を利用した脳冷却において高速に冷却デバイスを変調しても熱に係る時定数が大きい直接脳深部に高速変調刺激を印加することはできない。しかし、冷却デバイスの刺激が皮膚感覚系の一部としての上行性網様体賦活系から注意を喚起することも考えられることから、頭頸部冷却刺激においても同様の効果を得ることができると考えられた。

## 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)Emiko Imai, Yoshitada Katagiri, Hiroshi Hosaka, Kiyoshi Itao, Individual differences in cognitive performance regulated by deep-brain activity during mild passive hyperthermia and neck cooling, Journal of Behavioral and Brain Science, 査読有, To be published in July, 2016.

(2)Tomomi Bohgaki, Yoshitada Katagiri, Makoto Usami, Pain-relieving effects of aroma touch therapy with Citrus junos oil evaluated by quantitative EEG occipital alpha-2 rhythm powers, Journal of Behavior and Brain Science, 査読有, 4, 2014, 11-22. DOI: 10.4236/jbbs.2014.41002.

(3)Chenghong Hu, Yoshitada Katagiri, Yoshiko Kato, Zhiwei Luo: Brain response to aversive taste for investigating taste preferences, Journal of Behavior and Brain Science, 査読有, 4,2014, 43-48. DOI: 10.4236/jbbs.2014.41006.

(4)今井 絵美子, 片桐 祥雅, 関 啓子, 川又 敏男, プロソディ産生と前頭-基幹脳活動との関係, 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, Vol.J97-D(1), 2014, 126-134.

〔学会発表〕（計26件）

(1)大谷啓尊, 片桐祥雅, 二重課題における脳の応答と優位性, 第18回日本ヒト脳機能マッピング学会, 2016.3.8, 京都大学船井哲郎記念講堂(京都府京都市)

(2)新木安里子, 片桐祥雅, 川又敏男, 音楽家と非音楽家におけるメロディを用いた短期記憶効果の比較, 第18回ヒト脳機能マッピング学会, 2016.3.7.2016, 京都大学船井哲郎記念講堂(京都府京都市)

(3)今井 絵美子, 片桐祥雅, 川又敏男, ポジティブな情動的行動は深部脳活動を賦活する, HCG シンポジウム 2015, 2015.12.16, 富山国際会議場(富山県富山市)

(4)石井十三, 川原靖弘, 片桐 祥雅, 感覚ゲートを発生させる音刺激の提示間隔特性について, HCG シンポジウム 2015, 2015.12.18, 富山国際会議場(富山県富山市)

(5)新木 安里子, 片桐祥雅, 川又敏男, 周波数を変調させた信号に対する感覚ゲートと短期記憶効果, HCG シンポジウム 2015, 2015.12.18, 富山国際会議場(富山県富山市)

(6)北村剛, 片桐祥雅, 高橋淳二, 戸辺義人, 韻律による感情理解の深部脳活動, HCG シンポジウム 2015, 2015.12.16, 富山国際会議場(富山県富山市)

(7)今井絵美子, 片桐祥雅, 川又敏男, 動詞産生タスクにおけるエラーの系統的構造と関連する深部脳活動, 第21回人間情報学会, 2015.9.10, 東京大学(東京都文京区)

(8)川原靖弘, 石井十三, 片桐祥雅, 音刺激に対する脳反応のフラクタル次元依存性, 第

21 回人間情報学会, 2015. 9. 10, 東京大学(東京都文京区)

(9)施嫺, 大谷啓尊, 羅志偉, 片桐祥雅, 認知制御の二重脳機能ネットワークモデル仮説と検証, 第 20 回人間情報学会, 2015. 4. 23, 東京大学(東京都文京区)

(10)片桐祥雅, 今井絵美子, 川又敏男, 暑熱環境下で頸部冷却が脳活動に及ぼす効果, 第 20 回人間情報学会, 2015. 4. 23, 東京大学(東京都文京区)

(11)今井絵美子, 片桐祥雅, 川又敏男, 深部脳活動度を指標とする語産生課題におけるエラー処理の特徴評価, 第 20 回人間情報学会, 2015. 4. 23, 東京大学(東京都文京区)

(12)今井 絵美子, 片桐祥雅, 川又敏男, 情動的 / 非情動的 認知課題における phasic/tonic 深部脳活動: 電子情報通信学会 HCG シンポジウム 2014, 2014. 12. 17, 海峡メッセ下関 (山口県下関市)

(13)片桐祥雅, 今井絵美子, 川又敏男, 頸部冷却により熱ストレス下で認知機能を維持できるか—ヒューマンファクタの検討, 第 18 回人間情報学会, 2014. 9. 9, 東京大学(東京都文京区)

(14)片桐祥雅, 今井絵美子, 川又敏男, 言語刺激に対して脳はいかにすばやく反応するか, 第 18 回人間情報学会, 2014. 9. 9, 東京大学(東京都文京区)

(15)植村真帆, 片桐祥雅, 川又敏男, 中枢神経活動同期の速度依存性の検討—精神テンポを評価するために—, 第 18 回人間情報学会, 2014. 9. 9, 東京大学(東京都文京区)

(16)今井絵美子, 片桐祥雅, 川又敏男, 語産生における深部脳活動—後頭部  $\alpha$  波パワーに基づく予備実験—, 電子情報通信学会 HCG シンポジウム 2013, 2013. 12. 19, 松山市総合コミュニティセンター (愛媛県松山市)

(17)片桐祥雅, 坊垣友美, 瀬藤乃理子, 脳波による深部脳活動度評価法と快適性制御への応用, 電子情報通信学会 HCG シンポジウム 2013, 2013. 12. 18, 松山市総合コミュニティセンター (愛媛県松山市)

(18)今井絵美子, 片桐祥雅, 川又敏男, 語産生における皮質—視床システムについての一検討—go/nogo パラダイムに基づく脳波計測実験—, 第 15 回人間情報学会, 2013. 9. 19, 東京大学(東京都文京区)

(19)片桐祥雅, 脳波によるストレス・疼痛・快適性制御, 第 15 回人間情報学会, 2013. 9. 19, 東京大学(東京都文京区)

(20)Yoshitada KATAGIRI, and Tomomi BOHGAKI, Dual pathway for controlling attention ability in the central nerve system, ACBIT2013, 2013. 9. 17, 会津大学(福島県会津若松市)

(21)Ariko Araki, Yoshitada Katagiri and Toshio Kawamata, Involuntary attention enhancement by melody: neurophysiological evidence, ACBIT2013, 2013. 9. 17, 会津大学(福島県会津若松市)

(22)Tomomi BOHGAKI, Yoshitada KATAGIRI, and Makoto USAMI, Optimal neural activity for reducing chronic pain ratings by using aromatic touch therapies, ACBIT2013, ACBIT2013, 2013. 9. 16, 会津大学(福島県会津若松市)

(23)Chenghong HU, Yoshitada KATAGIRI, Yoshiko KATO, and Zhiwei LUO, Early neurological markers for unconscious detection of bitter and sour taste for investigating taste preferences, ACBIT2013, ACBIT2013, 2013. 9. 16, 会津大学(福島県会津若松市)

(24)Yi SH, Yoshitada KATAGIRI, and Zhi-Wei LUO: Modulation of Central Fatigue is Dependent on Music-induced Mood and Affection, ACBIT2013, 2013. 9. 16, 会津大学(福島県会津若松市)

(25)Yasuhiro Kawahara and Yoshitada Katagiri, Selective brain cooling affects regional brain temperature and cognitive performances, ACBIT2013, 2013. 9. 16, 会津大学(福島県会津若松市)

(26)片桐祥雅, 頸部冷却により暑熱環境下でいかに注意機能を維持できるか—神経科学的アプローチ快適性制御の脳機能モデル, 2013 年度精密工学会 秋季大会, 2013. 9. 12, 関西大学(大阪府吹田市)

[図書] (計 2 件)

(1)片桐祥雅 (分担)、生活環境と情報認知、NHK 出版、2015、総ページ数 235、ISBN978-4595315497

(2)片桐祥雅 (分担)、パーソナルヘルスケア～ユビキタス、ウェアラブル医療実現に向けたエレクトロニクス最前線～、2013、総ページ数 398、ISBN978-4864690805

[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

片桐 祥雅 (KATAGIRI YOSHITADA)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所・グリーン ICT デバイス先端開発センター・研究マネージャー

研究者番号: 60462876

### (2) 研究分担者

川原 靖弘 (KAWAHARA YASUHIRO)

放送大学・教養学部・准教授

研究者番号: 10422403

### (3) 連携研究者

高田 哲 (TAKADA SATOSHI)

神戸大学・大学院保険学研究科・教授

研究者番号: 10216658

川又 敏男 (KAWAMATA TOSHIO)

神戸大学・大学院保険学研究科・教授

研究者番号: 70214690