

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500730

研究課題名(和文)長距離走における下肢の動作および筋活動に関する包括的研究

研究課題名(英文)Comprehensive study on the lower extremity motions and muscle activities during distance running

研究代表者

岡田 英孝 (OKADA, Hidetaka)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：20303018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では長時間走行中の走者の下肢動作および下肢筋活動の変化を明らかにし、長距離走におけるパフォーマンス向上に役立つ知見を得ることを目的とした。2つの研究課題(走速度の変化にともなう筋の動員変化の機序の解明、疲労時のパフォーマンス維持の方略の解明)を設け、光学式モーションキャプチャシステム、ワイヤレスEMGプローブを用いて、トレッドミル走行中の下肢動作および筋活動量を計測し、解析した。その結果、長距離走における走速度増加には特に股関節まわりの筋群が重要な役割を果たしていることや支持期における半腱様筋、前脛骨筋、腓腹筋、ヒラメ筋の活動が疲労の影響を受け易いことなどが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study were to clarify the changes in lower limb motions and muscle activities during the long distance running and to acquire the useful findings for improving the performance in long distance running. Two research themes were set. The one was to clarify the mechanism of change in muscle recruitment with change in running velocity. The other was elucidation of strategy for the maintenance of running performance at the time of fatigue. By using optical motion capture system and wireless EMG probes, lower limb motions and muscle activities during treadmill running were measured and analysed.

As a result, it became clear that muscles about hip joint played important role for increasing the running velocity in distance running and that muscle activities of semitendinosus, tibialis anterior, gastrocnemius and soleus in stance phase were easy to be affected by fatigue.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：キネマティクス 表面筋電図 走速度 疲労

### 1. 研究開始当初の背景

ランニングの動作分析では通常、1 サイクル(例えば、右足接地から次の右足接地まで)のみを分析区間とすることが多く、その区間の下肢、上肢や体幹の動作についてのキネマティクスやキネティクスについて考察を行う。このような手法では分析した1 サイクルにおける被験者の特徴を捉えることはできるが、連続する循環運動であるランニングの全容を捉えることはできない。すなわち、走周期の連続である走行中の動作の変動や長時間にわたる変化については言及できない。特に長距離走においては長時間にわたるパフォーマンスの維持が要求され、後半の動作の維持あるいは時間経過にともなう動作の変化がパフォーマンスの決定要因になると考えられる。しかしながら、ランニングの1 サイクルのみを分析する方法では、優れた長距離走者がどのようにして高い速度を長時間にわたって維持しているかという疑問に答えることはできない。

最大酸素摂取量や無酸素性作業閾値に関する研究に代表されるように、長距離走者の持続的な能力を生理学的側面からとらえようとした研究は多い。しかし、疲労にともなう長距離走者の動作や筋機能の変化・変動をバイオメカニクスの視点からとらえた研究はほとんどみられない。長時間走行中の下肢の動作のみならず、下肢筋活動の変化・変動を包括的に検討することにより、長距離走のパフォーマンスを高めるために有効な知見が得られると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では長時間走行中の走者の下肢動作および下肢筋活動を包括的に分析し、長距離走における下肢の動作と筋機能および疲労にともなうこれらの変化を明らかにし、長距離走におけるパフォーマンス向上に役立つ知見を得ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では2つの研究課題(走速度の変化にともなう筋の動員変化の機序に関する研究、疲労時のパフォーマンス維持の方略に関する研究)を設けた。研究課題 および には光学式モーションキャプチャシステム、ワイヤレスEMGプローブ、代謝測定装置を用いて、トレッドミル走行中の下肢動作、筋活動、有気的代謝による消費エネルギーを計測し、解析した。以下、各課題の詳細について述べる。

#### (1) 研究課題 - 走速度の変化にともなう筋の動員変化の機序に関する研究 -

日常的に長距離走トレーニングを行っている青年男性7名(年齢 22.4±1.8歳,身長 169.8±3.0 cm, 体重 59.6±3.9 kg, 5000mのシーズンベスト 16'00"68±39"35)を被験者とした。被験者にトレッドミルを用い

た4分間の一定速度走行を5セット行わせた。各セットの走速度は180, 210, 240, 270, 300 m/minとし、走速度の順序はランダムとした。なお、セット間には十分な休息を挟んだ。

被験者の右脚の8つの筋(大腿直筋, 外側広筋, 大殿筋, 大腿二頭筋長頭, 半腱様筋, 前脛骨筋, 腓腹筋内側頭, ヒラメ筋)に表面電極(ディスプレイブル電極)を貼り、その上にEMGワイヤレス電極プローブ(Free EMG, BTS社製)を装着し、走行中の表面筋電図を2000 Hzで記録した。また、左右第五中足骨粗面, 左右足関節外側, 左右膝関節外側, 左右大転子, 胸骨上縁, 頸椎点に再帰性反射マーカ―を貼付し、光学式三次元モーションキャプチャシステム(Optitrack S250e, Natural Point社製)を用いてマーカ―の三次元座標を250 Hzで計測した。

トレッドミルのベルト速度は設定値に達するまで時間がかかるため、ベルト速度が各セットの設定速度に達し、かつEMGが安定して計測できた30サイクルを解析区間とした。得られた筋電図に通過帯域10-500 Hzのバンドパスフィルターをかけ、平均電圧を引くことによってバイアスを取り除き、全波整流を行った。その後、遮断周波数10 Hzのローパスフィルターをかけ、1サイクル毎の包絡線を求めた。サイクル時間を100%として時間を正規化した後、30サイクルの平均包絡線を求めた。また、筋電図振幅のRMS(RMS振幅)を1サイクル、支持期、遊脚期のそれぞれについて求めた。

なお、得られた包絡線およびRMS振幅は180 m/minでの走行における1サイクルのRMS振幅の大きさを100%として正規化した。

#### (2) 研究課題 - 疲労時のパフォーマンス維持の方略に関する研究 -

日常的に長距離走トレーニングを行っている青年男性7名(年齢 21.3±1.0歳,身長 169.6±2.8 cm, 体重 59.2±3.0 kg, 5000mのシーズンベスト 16'03"85±35"13)を被験者とした。被験者にトレッドミル上で疲労困憊に至るかその直前まで一定速度走行を行わせた。設定した速度は3種類(290, 310, 330 m/min)で各走速度における実験は最低でも3日以上の間隔を空けて実施した。また、各速度での走行前には200 m/minで3~5分間の予備走行を行わせた。

研究課題の実験と同様に右脚の8つの筋の表面筋電図(2000 Hz)および下肢動作(100 Hz)を計測した。得られた筋電図の包絡線および平均振幅は各一定速度走行前に行った予備走行(200 m/min)における各筋平均振幅を100%として正規化した。

各走行において疲労困憊もしくはその直前までに至る時間(走行時間)は走速度および被験者ごとに異なるため、トレッドミルのベルトを動かし始め、走速度が設定速度に到達した時点を0%時刻、走行終了時点を100%時刻とし、0%, 20%, 40%, 60%, 80%時刻を先

頭とした各 30 サイクルを解析区間とした。以下、それぞれの区間を 0%区間、20%区間、40%区間、60%区間、80%区間とする。

#### 4. 研究成果

(1) 研究課題 - 走速度の変化にともなう筋の動員変化の機序に関する研究 -

図1は走速度増加に伴う支持期の RMS 振幅の変化を示したものである。前脛骨筋を除く全ての筋において有意な走速度の影響がみられ、走速度の増加に伴い筋活動量が増加していた。特に大殿筋、大腿二頭筋、半腱様筋の増加率が顕著であった。大殿筋、大腿二頭筋、半腱様筋は股関節伸張筋群であることから、高い走速度を維持するためには支持期に股関節を伸展させる動作が重要であると考えられる。一方で、大腿直筋、外側広筋、腓腹筋およびヒラメ筋では走速度増加に伴う RMS 振幅の増加率は小さかった。これらの筋は、低い走速度において既に比較的大きな筋活動を行っている可能性が考えられる。

遊脚期の RMS 振幅は外側広筋を除くすべての筋において走速度の影響が有意であり、走速度の増加に伴い筋活動量が増加していた。特に、大腿直筋、腓腹筋、大殿筋、ヒラメ筋の増加率が顕著であった。走速度の増加に伴い大腿の前後へのスイング動作が増大し、股関節の伸展屈曲を担っている大腿直筋と大殿筋の筋活動が増大したと考えられる。腓腹筋およびヒラメ筋は走速度に伴い増加する着地衝撃に耐えるために接地前の局面から足関節のスティフネスをより大きくするように働いていると考えられる。

上述のような各局面の筋活動量の変化に加え、包絡線について検討することで1サイクル中の詳細な局面における筋活動量の変化について検討することができた。ここではより特徴的な変化が確認できた大腿二頭筋について述べる。図2は1サイクル中の大腿二頭筋長頭の包絡線を示したものである。図中の黒い実線は離地(Off)を示している。支持期中盤と遊脚期中盤から終盤にかけて大きな筋活動がみられ、走速度の増加に伴って筋活動が増大していることが分かる。二関節筋である大腿二頭筋長頭は、支持期中盤では股関節伸張に貢献し、遊脚期中盤では下腿の大腿への引き付け(膝関節屈曲)に貢献していると考えられる。また、遊脚期後半では

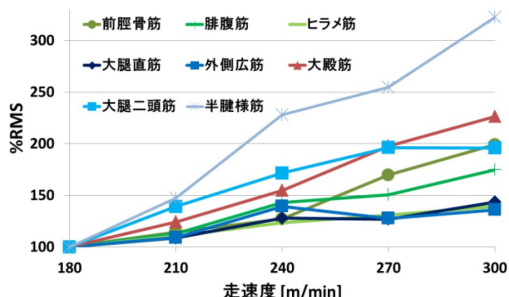


図1 支持期の RMS 振幅

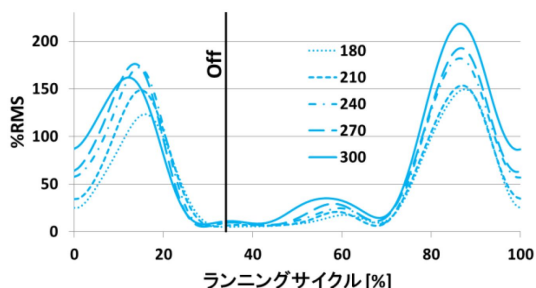


図2 大腿二頭筋の包絡線

下腿の振り出しを制御し、振り戻すことに貢献していると考えられる。

以上のことから、支持期における大殿筋、大腿二頭筋、半腱様筋の筋活動および遊脚期における大腿直筋、大殿筋、腓腹筋、ヒラメ筋の筋活動が主に走速度増加に貢献していると考えられ、走速度増加には特に股関節まわりの筋群が重要な役割を果たしていることが示唆された。

(2) 研究課題 - 疲労時のパフォーマンス維持の方略に関する研究 -

支持期時間、遊脚期時間

支持期時間(図3)はランニングの経過時間に伴い有意に増加し、遊脚期時間(図4)は有意に減少した。このことは、いずれの速度においても、ランニングの経過時間の増加に伴いより長い時間をかけて地面を蹴り、より短い時間で脚のリカバリーを行うように

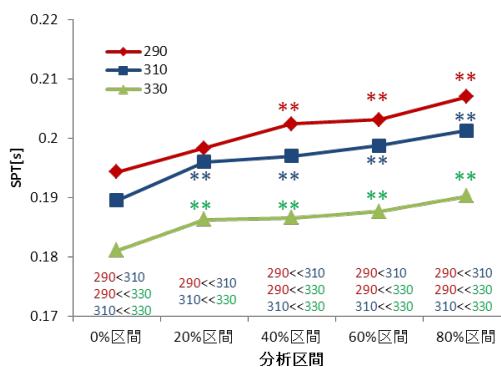


図3 支持期時間

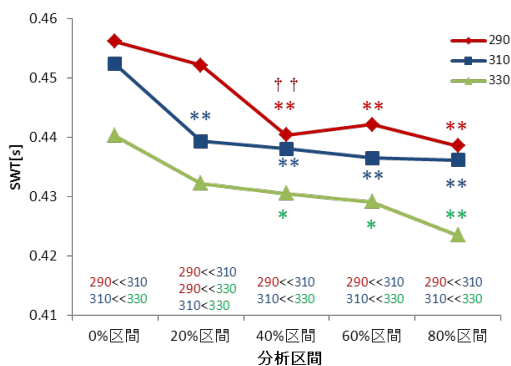


図4 遊脚期時間

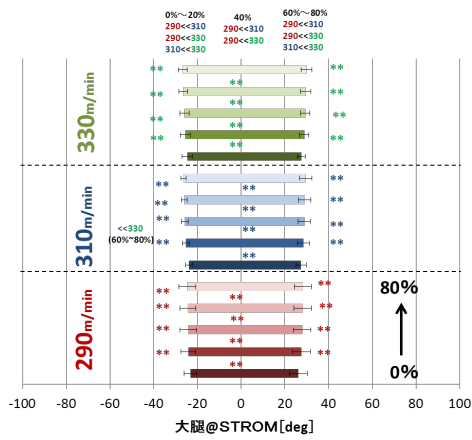


図 5 支持期大腿角度

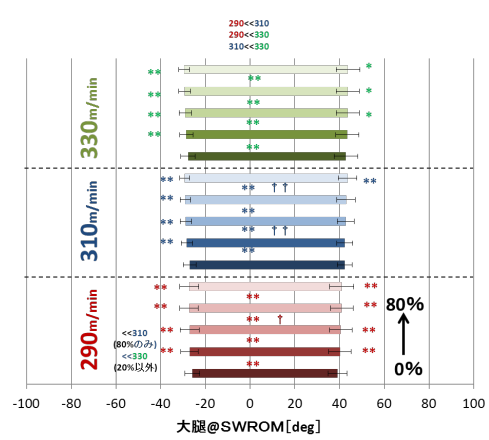


図 8 遊脚期大腿角度

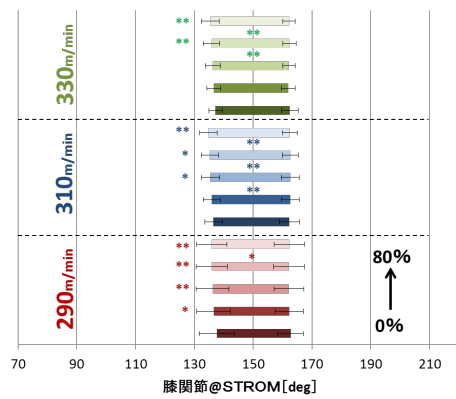


図 6 支持期膝関節角度

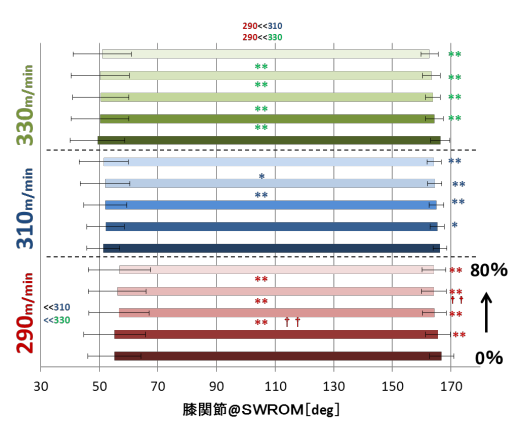


図 9 遊脚期膝関節角度

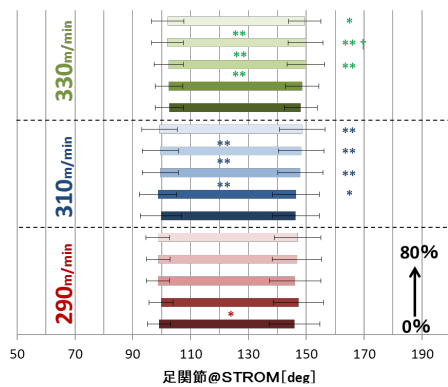


図 7 支持期足関節角度

変化することを意味している。

#### 支持期の下肢動作

図 5～図 7 は支持期の下肢角度の最大値，最小値，動作範囲を示したものである。大腿の動作範囲（図 5）は速度，ランニングの経過時間に伴い有意に増大し，膝関節最大屈曲（図 6）および足関節最大底屈（図 7）はランニングの経過時間に伴い有意に増加していた。以上のことから，長時間走行に伴う疲労により，大腿動作範囲が増大し，支持期中盤での膝関節屈曲が大きくなり，足関節底屈が増加すると考えられる。

#### 遊脚期の下肢動作

図 8 および図 9 は遊脚期の下肢角度の最大値，最小値，動作範囲を示したものである。大腿の動作範囲（図 8）は速度，ランニング

の経過時間に伴い有意に増大した。一方，膝関節動作範囲（図 9）は速度の増加に伴い増大したが，ランニングの経過時間に伴い減少した。このことから，疲労にともない遊脚期の股関節屈曲が増大し，接地距離の増加を招き，ブレーキが増大すると考えられる。

#### 筋活動量

図 10 は支持期における半腱様筋の筋電図平均振幅を示したものである。また，図 11 は遊脚期における大殿筋の筋電図平均振幅を示したものである。図中の\*印は 0%区間との差が危険率 5%水準で，\*\*印は危険率 1%水準で，\*\*\*印 は危険率 0.1%水準で有意であったことを示し，各速度によって凡例と同色の色分けをしている。支持期では半腱様筋，前脛骨筋，腓腹筋，ヒラメ筋は全ての速度でランニングの時間経過にともない平均振幅が有意に減少していた。このことから，これら 4 筋は長時間走行による疲労の影響を受けやすい筋であると考えられる。これらの筋は離地時の蹴り出しや着地時の体重受け止めの際に筋発揮を行い，主に下腿と足部の動作に関わる。これらの筋の筋活動がランニングの時間経過とともに小さくなることにより，足関節の出力および下腿と足部の運動域が小さくなり，ステップ長の減少を引き起こしている可能性が考えられる。また，いずれの筋も高速走行時よりも低速走行時の方が平均振幅の低下が大きかったことから，支持期の

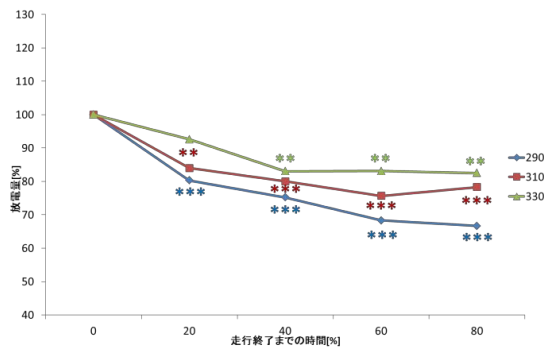


図 10 支持期における半腱様筋の平均振幅

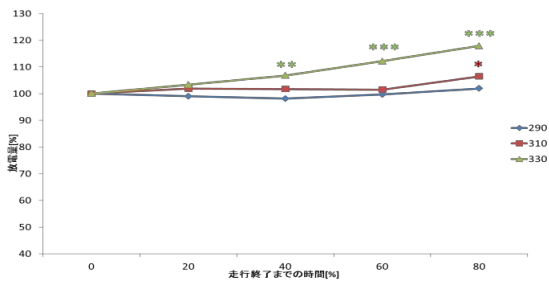


図 11 遊脚期における大殿筋の平均振幅

筋疲労は高強度短時間の負荷よりも低強度長時間の負荷に対してより大きく影響を受けると考えられる。

遊脚期では大腿直筋，外側広筋，大殿筋，大腿二頭筋は，ランニングの時間経過とともに平均振幅が維持もしくは増加する傾向にあった。この内，大殿筋の 310m/min, 330m/min では有意に増加していた。これらの筋では平均振幅の低下がみられなかったことから，走動作を維持させるために不可欠な動作に関与していると考えられる。一方，腓腹筋は全ての速度で有意に減少していた。このことから，腓腹筋は速度に拘らず疲労の影響を受けやすい筋であることが推測できる。遊脚期では支持期と比較して，ランニングの時間経過に伴う各筋の平均振幅の低下が小さいか，もしくは低下がみられなかった。遊脚期は地面反力を受ける支持期に比べると筋の出力が小さいため，長時間走行に伴う疲労の影響も小さいと考えられる。

#### 筋電図周波数中央値

表面筋電図の周波数解析を行い，1 サイクルごとのパワースペクトルを求めた。また，パワースペクトルの中央値を 1 サイクルにおける周波数中央値とした。算出した周波数中央値を各解析区間の 30 サイクルについて平均し，その区間の周波数中央値とした。支持期，遊脚期においても同様の処理を行い，両局面ごとの周波数中央値を求めた。

1 サイクル全体では，大腿二頭筋，前脛骨筋，腓腹筋，ヒラメ筋は各速度で時間経過にともない周波数中央値が有意に減少する傾向を示した。

支持期では，大腿直筋，大殿筋，腓腹筋，ヒラメ筋は時間の主効果のみが有意であっ

た。腓腹筋，ヒラメ筋では各速度で時間経過にともない周波数中央値が有意に減少した。大腿直筋と大殿筋では，290m/min および 310m/min の周波数中央値が有意に増加していた。

遊脚期では，大殿筋，前脛骨筋，腓腹筋は時間の主効果のみが有意であった。前脛骨筋では全ての速度で時間経過に伴う有意な周波数中央値の減少を示した。大腿直筋，大殿筋，腓腹筋もある速度では周波数中央値がランニングの時間経過に伴い有意に減少した。

以上のことから，ランニングの時間経過に伴う前脛骨筋の周波数中央値の低下は遊脚期における周波数の低下に起因しているといえる。同様に，ヒラメ筋の周波数中央値の低下は支持期における周波数の低下に起因しており，腓腹筋の周波数中央値の低下は支持期，遊脚期のいずれもの周波数が低下することが原因であるといえる。これらの結果は，足関節まわりの筋がランニングの時間経過に伴い疲労していることを示しており，これらの疲労は前脛骨筋では遊脚期の，ヒラメ筋では支持期の，腓腹筋では支持期および遊脚期の筋活動との関わりが深いといえる。

#### 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 11 件)

Kikkawa, K., Okada, H., and Oishi, R., Age-Associated Changes of Walking Parameters in Japanese Adult Women, *Rejuvenation Res.*, 査読有, 17(2), 229-234, 2014. doi: 10.1089/rej.2013.1507.

岡田英孝, いかに正しく走るか-ランニングフォームを考える-, *ランニングの世界*, 査読無, 16, 72-81, 2013.

狩野豊, 榎本靖士, 忠鉢信一, 岡田英孝, 佐伯徹郎, [第 24 回ランニング学会大会 シンポジウム] マラソン 2 時間を考える, *ランニング学研究*, 査読無, 24(2), 19-42, 2013.

栗田崇平, 新井駿, 屋比久将吾, 岡田英孝, *トレッドミル上のランニングにおける接地および離地の検出方法の検討*, 第 35 回バイオメカニズム学術講演会 (SOBIM2014) 予稿集, 査読無, 157-158, 2014.

林健太郎, 長名シオン, 吉川和利, 岡田英孝, 長時間走行中の下肢筋活動変化に関する研究, 第 33 回バイオメカニズム学術講演会 (SOBIM2012) 予稿集, 査読無, 113-114, 2012.

〔学会発表〕(計 8 件)

Kurita, S., and Okada, H., Changes in lower limb muscle activity of distance runners with increase in running speed, 5th Conference of the Asian Society of Sports Biomechanics CD of Proceedings, 3B-3, 2014. Taipei(Taiwan)

横澤俊治, 平山大作, 高木斗希夫, 岡田英孝, 身体部分慣性特性が走効率に及ぼす影響, 第 26 回ランニング学会大会抄録集, 53, 2014. 大阪市

岡田英孝, 日本人トップアスリートの身体部分慣性特性: 性差および種目間の差, 第 159 回日本体力医学会関東地方会抄録集, 15, 2013. 調布市

岡田英孝, キネマティクスモデルを用いた加齢にともなう歩行速度変化の要因分析, 第 22 回日本バイオメカニクス学会大会論集, 131, 2012. 江別市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hb.mce.uec.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 英孝 (OKADA HIDETAKA)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・准教授

研究者番号: 20303018

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: