

令和元年6月26日現在

機関番号：82727

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06254

研究課題名(和文) 直流試験に基づく可変速電動機の標準試験法の検討

研究課題名(英文) A Study on Standardized Testing Method for Variable Speed Motors based on DC Test

研究代表者

荒 隆裕 (ARA, takahiro)

独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・名誉教授

研究者番号：40648896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：(1)小容量の直流電源を用いた静止試験(直流試験)は、特に大形機に対して商用周波数域の計測精度が劣化する課題があった。本研究では、この問題に対する複数の有効な対応策を明らかにした。(2)直流試験が運転時の低周波二次インピーダンスを精度よく測定できる特長を活かし、一般的な無負荷試験によって空間高調波による負のトルクに起因した損失を分離して測定する手段を示した。(3)半閉および全閉スロット、さらには普通および二重かご形の何れの誘導電動機に対しても共通に利用できる二次2回路等価回路モデルを示し、任意の2つの周波数の入力インピーダンスから、精度よく等価回路パラメータを決定する計算公式を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小容量かつ実施が容易な直流試験による可変速交流電動機の特性格算精度を向上させる手段を電気磁気理論に立脚して導出し、その効果性を明らかにすることができた。これによって、現状の商取引において採用されている特性格算試験法における課題(各メーカーの技術の粋を集めた高性能大形可変速電動機の特性格算に用いられる標準試験においてその性能を正しく評価されない課題)の改善を図る一手段として、直流試験を援用した特性格算法が有効な代替となる得ることを示した。

研究成果の概要(英文)：1) A new standstill testing method using a small-capacity DC power supply unit (DC test) had a big problem; it was difficult to measure motor impedance for commercial frequency range. To solve this problem, we showed effective countermeasures and clarified the validity of this method. 2) Utilizing a merit such that the DC test is capable of measuring secondary impedance in all slip frequency ranges under on-load operation, we showed a new no-load test method to measure a loss caused by space-harmonic-flux-based negative torque. 3) We derived a simple equivalent circuit model having two branches of secondary winding, and clarified a novel formula for calculating the parameters of the circuit model, applicable to not only both semi-closed and closed slot machines but also both single and double cage machines.

研究分野：電気機器学

キーワード：電気機器 回転機 誘導電動機 可変速 直流試験 等価回路 特性格算試験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 電動機技術の現状として、エネルギー有効利用の観点から高効率誘導電動機の使用を義務付ける規制や、電動機ドライブの可変速化が国際的に広まりつつある。ここで問題となるのが、効率をはじめとする電動機の諸特性をどのように測定評価するかである。中・大容量機の実負荷運転は実施が困難であるため、IEC(国際電気標準会議)や国内の商取引に使われる JEC(電気学会:電気規格調査会)の規格では、実負荷試験に依らない標準試験法(無負荷試験と拘束試験による試験法)が規格化されている。

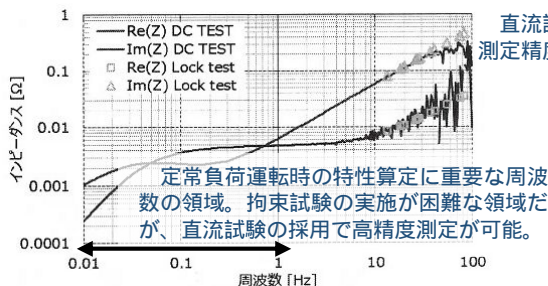
しかしながら、高効率化を指向した最近の大容量可変速電動機に対しては、運転特性の算定に必要な電動機のインピーダンスを正確に測定することが困難であることが最近の研究(竹内他「大容量可変速誘導電動機における各種特性算定法の比較」電気学会回轉機研究会, RM-15-157, 2015年)で指摘されている。各メーカーの技術の粋を集めた高性能電動機の特性が商取引に用いられる標準試験においてその性能を正しく評価されない事態は、今後需要が高まる海外ビジネスの好機を逃す事にも繋がりがねず、解決すべき重要な課題である。

(2) 代表者らは小容量の直流電源を用いた静止試験による新しい特性算定試験法(直流試験法)を開発した(科研費 研究課題番号:25420278、2013~2015年度)。この方法は、静止した電動機の巻線端子間にステップ電圧を印加した時に計測される減衰電流から、低周波域の電動機インピーダンスを1回の静止試験によって精度よく算出できるため、検証試験に要するコスト、時間、人手、設備、電源容量を大幅に軽減できる。しかしながら、その特徴を活かして拘束試験に代替できる方法として確立するためには、運転時の特性算定に重要な低周波時の電動機のインピーダンスのみならず、起動時の特性やインバータ駆動時の特性算定に必要な高い運転周波数領域における電動機のインピーダンスを精度よく測定する必要がある。

また、現在の規格で採用されている等価回路では、二次回路の構成が回轉子抵抗と漏れリアクタンスの1本の直列回路で表されているのみである。このため、始動時の高周波域から運転時の低周波域まで一つの等価回路で精度よく特性を計算することが困難である。滑り全域の特性を精度よく計算でき、かつ、その回路パラメータを簡単に計算できる等価回路の規格への採用が望まれる。しかしながら、このような回路で一般に認められたものは見当たらない。さらに、もう一つの標準試験である無負荷試験では、高効率化に対する要求から空間高調波磁束に起因した負のトルクによる損失(以下、空間高調波トルク損失)を測定できることが望まれる。

2. 研究の目的

(1) 大形機に対する直流試験では、低周波のインピーダンス計測精度は劣化しないが、高周波のインピーダンス計測精度が劣化する(図1参照、10Hzを超えると大きな振動が見られる)。この現象は5.5kW程度の小形機では100Hz以上の領域からでしか現れないが、回轉機の容量増加に伴って低周波で現れるようになる。この現象の要因を解明し、大形機に対しても高周波時に計測精度が劣化しない手法を明確にすることとする。



直流試験は高周波時の測定精度改善が課題

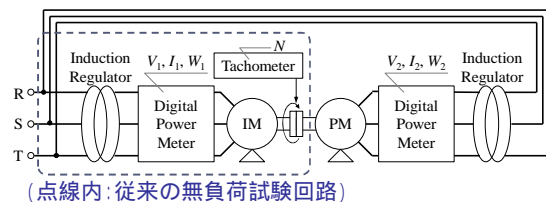


図1 直流試験(DC TEST)と拘束試験(Lock test)による4900kW機のインピーダンス計測例 (出典:竹内他、RM-15-157, 2015年)

図2 同一電源で同期速度駆動される原動機(PM)を含む誘導機(IM)の無負荷試験回路

(2) 従来の無負荷試験回路による測定(図2の点線内参照)では、誘導機の入力電力の測定値から銅損と機械損の測定値を差し引いた全てを鉄損として測定している。この方法は回路が単純で簡明であるため、標準試験としての採用に極めて適している。しかし、昨今の電動機システムの高効率化に対する強い要求から、空間高調波トルク損失を分離して測定できる新たな手段を明確にする必要がある。図2に示す完全同期駆動による無負荷試験は空間高調波トルク損失を分離して測定できる手段であるが、インバータ駆動時における妥当性の検証が必要である。また、試験回路の増強を必要としない試験法の開発が望まれることから、(1)の直流試験を援用し、従来の無負荷試験に基づいて空間高調波トルク損失を分離して測定できる手法を開発することを目的とする。

(3) 商取引の規格で採用されている等価回路は簡明で回路パラメータの決定が容易であるが、始動時から通常運転時までの商用周波から低周波までの電動機インピーダンス特性を正確に表

することが困難である。二次回路の周波数依存性と、回転子鉄心表面部の磁気飽和に起因した漏れリアクタンスの非線形性の双方を考慮でき、かつ、簡明で滑り全域の特性算定に適用可能な等価回路構成を明らかにするとともに、その回路パラメータを容易に決定する方法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 直流試験による高周波インピーダンスの計測精度改善に関する研究の方法を述べる。

図3の直流試験回路を構成する。図3の点線枠で囲った部分は負荷である。ここでは、電動機を模擬する線形負荷として2台の空心リアクトル(小形電動機を模擬するためのリアクトルA(電気時定数2.1ms)、大形機を模擬するためのリアクトルB(電気時定数7.9ms))を用いる。

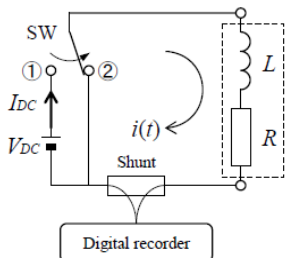


図3 直流試験回路

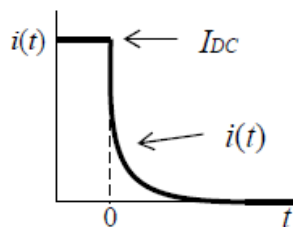


図4 減衰電流波形(模式図)

図4は、減衰電流の測定波形(模式図)である。直流試験では次式によるフーリエ変換によって、各滑り周波数における電動機インピーダンス  $Z(\omega)$  を一回の静止試験によって測定する。

$$Z(\omega) = \frac{1}{\frac{\omega}{jV_{DC}} \int_0^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt + \frac{I_{DC}}{V_{DC}}} \dots \dots \dots (1)$$

まず、2台のリアクトルに対して直流試験を実施する。このとき、試験電流  $I_{DC}$  は一定値(5A)に固定し、減衰電流計測のA/D変換器の分解能(縦の分解能)を12ビットと16ビットの2通りで実施する。さらに、減衰電流のサンプリング間隔(横の分解能)についても5kS/s、10kS/s、100kS/s、1MS/sの4通りで実施する。次に、Fortran言語を用いて実験と同一条件の直流試験を数値シミュレーションによって実施する。減衰電流の量子化とサンプリング間隔の相違を考慮して対象システムをモデル化してシミュレーションすることがポイントである。実験と数値解析の対比から、高周波インピーダンスの計測劣化の原因を探求し、対応策を検討する。

(2) 空間高調波トルク損失を分離して測定する研究の方法を述べる。

インバータ駆動時における完全同期無負荷試験の回路構成と試験方法を考案する。考案した方法の実施例として、0.4kWの供試機に対する空間高調波トルク損失(以下、 $\Delta W_2'$ )を測定し、既存の図2の試験回路による結果(真値)と比較してその妥当性を検証する。

直流試験を援用することで、一般的な無負荷試験によって空間高調波トルク損失を分離して測定する方法を考案する。上記の場合と同様、考案した方法の実施例として、0.4kWの供試機に対する空間高調波トルク損失(以下、 $W_{shl}$ )を測定し、既存の図2の試験回路による結果(真値)と比較してその妥当性を検証する。

(3) 滑り全域の特性算定に適用可能な誘導電動機等価回路とその回路パラメータ決定法に関する研究の方法を述べる。

手計算による回路パラメータの算定が可能な等価回路モデルを探索・考案する。考案した等価回路モデルに基づく滑り全域の特性計算の実施例として、始動特性(トルク-滑り特性、電流-滑り特性)の特性計算値と実測値を比較して、提案法の妥当性を検証する。

### 4. 研究成果

(1) 直流試験による高周波インピーダンスの計測精度改善に関する研究成果を述べる。

図5および図6は直流試験によるインダクタンス測定(実機試験)の結果である。シミュレーションの結果も実験と同様の傾向を有していた。これらの結果から以下の成果が確認される。

- ・減衰電流計測の分解能を上げると高周波域の計測精度が改善される。
- ・サンプリング間隔を狭めると高周波域の計測精度が改善される。
- ・減衰電流の分解能とサンプリング間隔の条件が同一であれば、電気時定数が小さいリアクトルAの方が高周波インピーダンスの計測誤差が少ない。このことは、一般に電気時定数が大きい大形機に対しては、電機子巻線に外部抵抗を直列に接続して直流試験を実施することにより、高周波域の計測精度を改善できることを示唆していると考えられる。

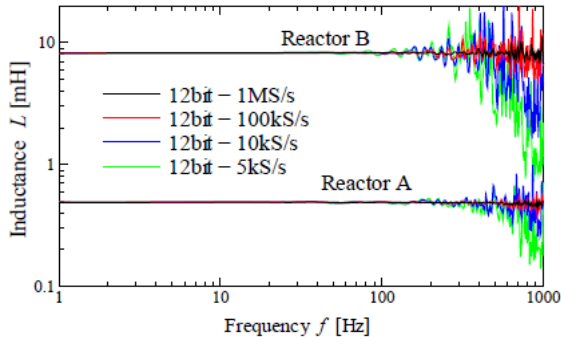


図5 インダクタンス算定結果 (12ビット)

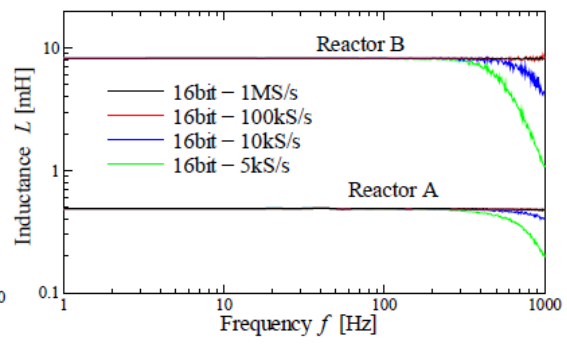


図6 インダクタンス算定結果 (16ビット)

上述した検討とは別途に、測定ノイズの低減策と知られているアベージング処理を減衰電流の測定に適用することにより、商用周波数を越える周波数域のインピーダンス計測精度が改善されることを実証試験によって確認している。ただし、一般に大形機は電気時定数が大きいので、減衰電流が零に減衰するまでに30秒以上を要することがしばしばである。このため、アベージング処理の実施には減衰電流を計測するレコーダのメモリ増強が必要となる他、試験に要する時間がアベージングの処理回数に比例して増加する。試験時間が増大する際には、電機子巻線の温度上昇に対しても注意を払う必要がある。

(2)空間高調波トルク損失を分離して測定する方法の研究成果を述べる。

図7は考案したインバータ駆動時の同期無負荷試験回路構成である。考案の際に障壁となったのは、図2で採用している誘導電圧調整器を用いる事ができないことである。しかし、一般にインバータの周波数精度は極めて高い事を勘案し、異なる2台のインバータでIMとPMを各々駆動して完全同期状態を作る回路構成を考案した。空間高調波トルク損失 ( $\Delta W_2'$ ) の測定手順は、図2の商用電源駆動時と同一のプロセスを採用できる。

図8は、その実施例である。この結果より、次の成果が確認される。

・  $\Delta W_2'$  は、真値と同様の結果であった。したがって、本研究で考案した図7の試験回路は、インバータ駆動による時間高調波の影響下にあっても、その悪影響を受けず、正しく空間高調波トルク損失を測定できることが確認された。

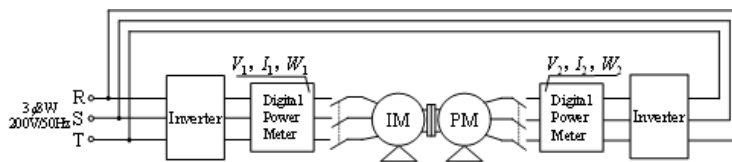


図7 インバータ駆動時の完全同期無負荷試験回路

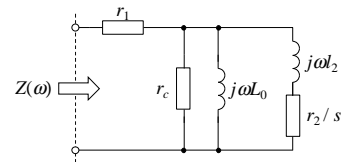


図9 誘導機の等価回路

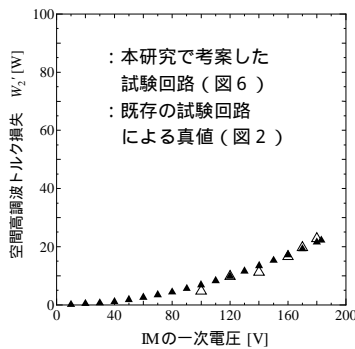


図8 インバータ駆動時の空間高調波トルク損失  $\Delta W_2'$  の測定結果

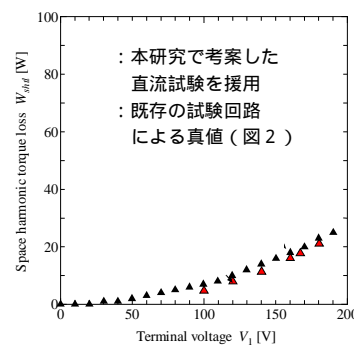


図10 直流試験を援用した空間高調波トルク損失  $W_{shl}$  の測定結果

直流試験と一般的な無負荷試験の組み合わせによる空間高調波トルク損失分離測定法を考案した。この方法は次のとおりである。

直流試験による図9の二次回路定数算出値 ( $r_2$  および  $l_2$ ) を用いて、励磁リアクタンス  $L_0$  および鉄損抵抗  $r_c$  を決定する。 $L_0$  については直流試験からも算出できるが、主磁束による鉄心の磁気飽和を考慮するため、無負荷試験時の電圧  $V_1$ 、電流  $I_0$ 、入力  $W_0$ 、機械損  $W_m$  から無負荷時のリアクタンス  $X_0$  を求め、角速度  $\omega$  で除したもので代用する。次に、 $r_c$  については最初に適当な初期値を与え、図9の等価回路定数と無負荷試験時の滑り  $s$  から再計算した入力  $W_0'$  と測定した入力  $W_0$  との誤差が最小となるように  $r_c$  の値を収れんさせて決定する。次に、これらの結

果と無負荷試験時の滑り  $s$  を用いた回路計算により二次出力を計算する。ここから  $W_m$  を差し引くことで空間高調波トルク損失  $W_{shll}$  を得る。

図 10 は、その実施例である。この結果より、次の成果が確認される。

・  $W_{shll}$  は、真値と同様の結果であった。すなわち、図 2 の同期駆動試験に見られる試験回路の増強をしなくても空間高調波トルク損失を測定できる新手法を示し、妥当性を確認した。

(3) 滑り全域の特性算定に適用可能な誘導電動機等価回路とその回路パラメータ決定法に関する研究成果を述べる。

図 11 は採用した等価回路モデルであり、二重かご形誘導電動機の等価回路において上部導体漏れリアクタンスが零となるよう等価的に変数変換したものと既に知られている。

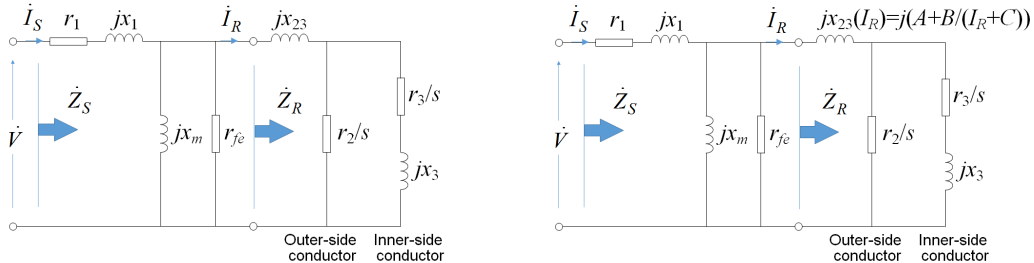


図 11 誘導機の標準等価回路

図 12 全閉スロット機にも共通に適用できる標準等価回路

本研究の成果は、拘束試験や直流試験で計測できる任意の 2 つの周波数 ( $f_1$  および  $f_2$ ) における回転子回路インピーダンスの値 ( $f=f_1$  における  $Z_{R1} (=r_{R1}+jx_{R1})$  と  $f=f_2$  における  $Z_{R2} (=r_{R2}+jx_{R2})$ ) から、簡単な計算で図 11 の回転子回路パラメータを求めるための計算式を次のように明らかにしたことである。

$$\begin{aligned}
 r_2 &= \frac{1}{k^2-1} \left( k^2 r_{R1} - r_{R2} + \frac{k^2 (r_{R1} - r_{R2})^3}{(k x_{R2} - x_{R1})^2} \right) & r_3 &= \frac{r_2 (k^2 r_2 r_{R2} - (k^2 - 1) r_{R1} r_{R2} - r_2 r_{R1})}{(k^2 - 1) (r_2 - r_{R1}) (r_2 - r_{R2})} \\
 x_3 &= \frac{k}{k^2-1} \sqrt{\frac{r_2^4 (r_{R1} - r_{R2}) (r_{R2} - k^2 r_{R1} + (k^2 - 1) r_2)}{(r_2 - r_{R1})^2 (r_2 - r_{R2})^2}} & x_{23} &= x_{R1} - \frac{r_2^2 x_3}{(r_2 + r_3)^2 + x_3^2}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

上式は、 $(x_{23}, r_2, r_3, x_3)$  と  $(r_{R1}, x_{R1}, r_{R2}, x_{R2})$  との間に成立する 4 つの関係式から導出したものである。この 4 つの式を連立方程式として単純に解くと解の式が長大になり、上式のように簡明な形にはならない。本研究では、周波数比  $k (=f_1/f_2)$  を導入することで、 $r_2$  のみについては  $(r_{R1}, x_{R1}, r_{R2}, x_{R2})$  を用いた短い式で求解されることに着眼し、計算式の導出に成功している。言い加えると、無数ある変数変換後の等価回路の中から、図 11 の等価回路については上記の求解が可能な回路構造であることを発見し、本研究ではこれを採用するに至っている。

さらなる本研究の成果は、図 11 の等価回路構造において、全閉スロット機に見られる回転子回路の非線形性の影響が回転子回路電流  $I_R$  に依存する  $x_{23}$  の変動に集約されて表れる性質を有することを実験によって証明し、図 12 に示す誘導電動機の回転子構造によらない共通の標準等価回路を導出したことである。

図 12 の等価回路ならびに式(2)に基づく回路パラメータ決定法の妥当性は、回転子形状のみ異なる 4 台の誘導電動機（半閉普通かご形機、全閉普通かご形機、半閉二重かご形機、全閉二重かご形機）に対する始動特性の計算値と実測の比較から明らかにしている。

<引用文献>

竹内 活徳、松下 真琴、坪井 雄一、津田 敏宏、大容量可変速誘導電動機における各種特性算定法の比較、電気学会回転機研究会、電気学会回転機研究会、RM-15-157, 2015 年

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

山本 修、平原 英明、田中 晃、荒 隆裕、A Simple Method to Determine Double-Cage Rotor Equivalent Circuit Parameters of Induction Motors From No-Load and Locked-Rotor Tests、IEEE Transactions on Industry Applications、査読有、55 巻、2019、273-282  
DOI: 10.1109/TIA.2018.2864105

[学会発表](計 8 件)

田中 晃、吉水 健剛、平原 英明、山本 修、荒 隆裕、ダルトン - カメロン法を用いた各周波数における直軸および横軸インピーダンス算出法の検討、平成 31 年電気学会全国大会、2019 年  
平原 英明、森本 稔、山本 修、誘導電動機の無負荷損失分離法の検討、電気学会回転機

研究会、2018年

森本 稔、平原 英明、山本 修、誘導電動機のインバータ駆動時における無負荷損の評価、  
職業大フォーラム 2018 職業能力開発研究発表講演会、2018年

森本 稔、平原 英明、山本 修、インバータ駆動誘導電動機の無負荷試験法の検討、平成  
30年電気学会産業応用部門大会、2018年

山本 修、山崎 克巳、石川 裕記、米谷 晴之、松下 真琴、インバータ駆動誘導電動機  
の高調波損失の分析と実験検証、平成30年電気学会全国大会、2018年

山本 修、平原 英明、田中 晃、荒 隆裕、等価鉄損抵抗を考慮した一次磁束鎖交数ベク  
トル演算による誘導電動機のトルク推定の検討、電気学会回転機研究会、2017年

山本 修、平原 英明、田中 晃、荒 隆裕、A simple method for determining equivalent  
circuit parameters of double-cage induction motors from no-load and locked-rotor tests,  
IEEE ECCE (Energy Conversion Conference and Expo.) 2017、2017年

DOI: 10.1109/ECCE.2017.8095796

田中 晃、平原 英明、山本 修、荒 隆裕、直流試験における電流の測定条件が回転機の  
演算子インピーダンス算出結果に及ぼす影響、平成29年電気学会全国大会、2017年

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.uitec.jeed.or.jp/schoolguide/teacher/t00041/>

<http://www.uitec.jeed.or.jp/schoolguide/teacher/t00042/>

<http://www.uitec.jeed.or.jp/schoolguide/teacher/t00043/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：山本 修

ローマ字氏名：(YAMAMOTO, shu)

所属研究機関名：独立行政法人高齡・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発大学校

(能力開発院、基盤整備センター)

部局名：能力開発院

職名：教授

研究者番号(8桁)：00648925

### (2) 研究分担者

研究分担者氏名：田中 晃

ローマ字氏名：(TANAKA, akira)

所属研究機関名：独立行政法人高齡・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発大学校

(能力開発院、基盤整備センター)

部局名：能力開発院

職名：准教授

研究者番号(8桁)：30648952

### (3) 研究分担者

研究分担者氏名：平原 英明

ローマ字氏名：(HIRAHARA, hideaki)

所属研究機関名：独立行政法人高齡・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発大学校

(能力開発院、基盤整備センター)

部局名：能力開発院

職名：助教

研究者番号(8桁)：50649209

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。