

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760213

研究課題名（和文） 三相モジュラー・マルチレベル変換器の実験的検証

研究課題名（英文） Experimental verification of a three-phase modular multilevel converter

研究代表者

萩原 誠 (HAGIWARA MAKOTO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：20436710

研究成果の概要（和文）：

本課題では、次世代型電力変換器である三相モジュラー・マルチレベル変換器(MMC: Modular Multilevel Converter) に関して検討を行った。初めに、MMC を用いたモータドライブに関して実験的検証を行い、ファン・ブロー等二乗低減トルク負荷への適用可能性について検討した。次に、MMC を用いた無効電力補償装置(STATCOM) の実験的検証を行い、定格逆相無効電力を制御できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This research has dealt with a three-phase modular multilevel converter that is considered as one of the next-generation multilevel converter. This research has focused on its application to a medium-voltage motor drive with fans or blowers, in which the load torque is proportional to the square of the rotating speed. Also, this research has attempted to control negative-sequence reactive power by using a STATCOM based on the MMC. The validity of the motor drive and the STATCOM has been confirmed by experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：パワーエレクトロニクス、モジュラー・マルチレベル変換器、高圧モータドライブ、無効電力補償装置(STATCOM)

1. 研究開始当初の背景

(1) 現代社会の発展と高度情報化社会の進展に伴い、電力の利用分野は急速な広がりを見せている。その中で効率的な電力利用を可能にする半導体電力変換技術(パワーエレクトロニクス)は、地球資源の有効利用や地球温暖化防止の観点から今後益々重要になると思われる。半導体電力変換技術は、数mW(ミリワット)の小型電源から、数百MW(メ

ガワット)の大容量電力変換器まで幅広く適用できる。従来、数MW以上の大容量電力変換を行う場合、変換器に変圧器を使用することで大容量化を実現してきた。例えば、2004年に関西電力(株)神崎変電所にて運開された自励器無効電力補償装置(STATCOM)は、3台の変圧器を用いることで80MVAの電力変換を達成している。その一方で、変圧器の使用は変換器重量・体積の増加を引き起こし、

系統擾乱時に直流偏磁現象を引き起こすという問題がある。

(2) このため、変圧器を用いずに大容量電力変換を実現するマルチレベル変換器に関する研究が、現在国内外問わず活発に行われている。代表的マルチレベル変換器として、ダイオードクランプ形マルチレベル変換器(DCMC: Diode-Clamped Multilevel Converter)がある。DCMCは変換器のレベル数を増加することで変換器容量の増大が可能であり、特に3レベルDCMCは、鉄鋼圧延や新幹線のぞみ(700系, N700系)のモータ駆動用電力変換器として既に実用化されている。しかし、4レベル以上のDCMCでは、直流分圧コンデンサの電圧不均一が問題となり、その抑制には直流リンクに均一化回路を接続する必要がある。また、レベル数の増加に伴いクランプダイオード数は急増し、実装が厄介となる。これらの問題のためDCMCは大容量電力変換には不向きであり、変換器容量の実質的上限は数MW程度と言われている。以上より、パワーエレクトロニクスの研究分野では、変圧器を用いずに大容量電力変換が実現可能な新しいマルチレベル変換器の出現が望まれていた。

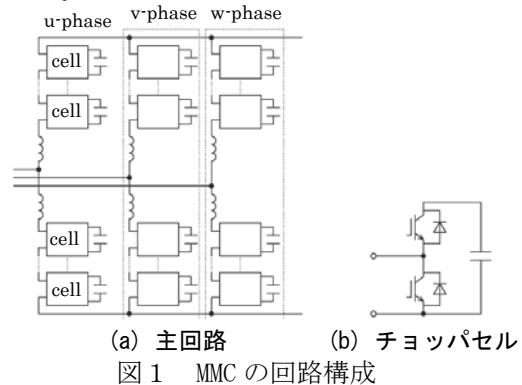
(3) 上記の問題点を解決する手法として、モジュラー・マルチレベル変換器(MMC: Modular Multilevel Converter)が下記論文にて提案された。

R. Marquardt, and A. Lesnicar, "A new modular voltage source inverter topology," in Conf. Rec. EPE 2003, CD-ROM."

図1にMMCの回路構成を示す。MMCは変換器各アームをモジュールで構成する点に特長があり、各モジュールは図1(b)の双方向チョップセルをカスケード接続している。MMCは実装が容易であることから高压用途に適しており、チョップセル数を増加することで数10~数100MWクラスの電力変換器にも適用できる。MMCは、次世代型電力変換器として今最も注目を集めている変換器の一つである。

次に、国内外におけるMMCの研究状況について言及する。上記の優れた利点を有するにも関わらず、現在MMCを研究しているグループは少ない。国外では上記論文を発表したドイツの研究グループとSiemens社のみであり、国内では申請者の所属する研究グループのみである。これは、MMCが提案されて間もない回路という他に、制御の難しさが理由として挙げられる。MMCが正常に動作するためには、図1における複数の直流コンデンサの電圧均一化(電圧バランス)が必要不可欠である。しかし、数十個に及ぶ直流コンデンサ

の電圧バランスを制御により実現することは至難であり、当研究分野の関係者の間では実現不可能と考えられていた。実際に、上記論文を発表したドイツの研究グループも、今まで発表された論文を見る限り、電圧均一化の実験的検証に成功していないよう思われる。



このような状況の下、申請者はMMCの有効性・将来性にいち早く着目し、平均値制御とバランス制御を併用した電圧バランス法を下記論文において提案した。

萩原, 赤木: 「モジュラー・マルチレベル変換器のPWM制御法と動作検証」, 電気学会産業応用部門誌, 128巻7号, pp. 1363-1373, 2008

提案した電圧バランス法の有効性は、単相ハーフブリッジ回路を用いた実験的検証より確認している。このような斬新な着想に至った理由は、申請者が長年にわたりマルチレベル変換器の研究に従事しており、マルチレベル変換器の問題点や課題点を熟知していたためである。上記の結果は、当研究分野で最も権威のある国際学会であるIEEE 39th Power Electronics Specialists Conference (PESC 2008, 査読有り, 論文採択率50%)にて発表し、関係者を驚嘆させた。

2. 研究の目的

申請者は世界に先駆けてMMCの電圧バランス法を考案し、その有効性・妥当性は単相ハーフブリッジ回路を用いた実験的検証により確認した。しかし、実用化の際は三相回路での動作が想定される。そこで本研究では、三相MMCの実験的検証を行うことを主目的とする。なお、実験は当研究室で設計・製作したミニモデルを用いて行う。ミニモデルを用いて以下の動作検証を行う。

(1) モータ駆動用電力変換器としての動作検証

ファン・ブロー(送風機)やポンプ(揚水機)

の風量・水量制御は、従来のダンパ・制御弁による定速度運転から、半導体電力変換器を使用した可変速運転に変更することで、大幅な省エネルギー効果を実現できる。本研究では、MMC を用いた高圧可変速モータ駆動システムについて検討を行う。ファン・ブローアに代表される二乗低減トルク特性負荷(トルクが回転数の二乗に比例する負荷)の特性を検討する。半導体電力変換器をモータ駆動システムに適用する場合、変換器が発生するコモンモード電圧や電圧高調波が、モータに伝導性・放射電磁ノイズ(EMI)、軸電圧、トルク脈動といった悪影響を及ぼすことが知られている。本研究では、制御性、電磁ノイズ抑制、トルク脈動低減の観点から MMC が優れた特性を示すことを実験とシミュレーションの両面から確認する。

(2) 無効電力補償装置(STATCOM)としての動作検証

電力会社で作られた電力は、三相三線方式で負荷に供給される。負荷が三相不平衡の場合、不平衡に起因する逆相無効電力が発生し、各相の電圧変動を引き起こすという問題がある。このとき無効電力補償装置(STATCOM)を使用し逆相無効電力を補償することで、不平衡負荷時も電圧変動を抑制できる。しかし、従来の変圧器を用いた STATCOM の場合、変圧器の直流偏磁現象を防止する観点から、逆相無効電力の補償量が制限されるという問題があった。上記の問題点を踏まえ、本研究では MMC を用いた STATCOM に関する検討を行う。MMC は変圧器を用いていないため、定格の逆相無効電力が補償できる。本研究では、MMC を用いた STATCOM が制御性・電流高調波低減の観点から良好な特性を示すことを実験より確認する。

3. 研究の方法

(1) モータ駆動用電力変換器としての動作検証

基礎実験を通じて、三相 MMC の電圧バランスを実現する。設計・製作したミニモデルは、合計 24 個(各相当たり 8 個)のチョップセルを使用する。したがって、24 個の直流コンデンサ電圧を制御する必要がある。全ての直流電圧を制御することは困難なため、初めはチョップセル単体(昇圧チョップ動作)の直流電圧制御を達成する。電圧が一定値(140 V)に制御できることを確認し、制御ゲインの最適化も同時に行う。さらに、過電圧・過電流検出回路の正常動作を確認する。他のチョップセルについても同様の検討を行う。

次に 24 個の直流電圧を制御する。直流電

圧制御には、前述論文にて提案した平均値制御とバランス制御を使用する。初めに無負荷で出力電圧が零の状態を実験する。この場合、平均値制御のみで電圧バランスが実現できる。申請者は、前述論文で二種類の平均値制御法を提案した。一つは各アームの直流電圧平均値を個別に制御する方法で、もう一つは各レグ(上下アーム)の直流電圧平均値を制御する方法である。本研究では、両制御法の性能を定常偏差量・安定性の観点から評価する。

次に、有負荷で出力電圧を最大にした場合の電圧バランスを実現する。負荷はモータ負荷ではなく、単純な抵抗負荷を使用する。申請者は、前述論文において三種類のバランス制御法を提案した。各バランス制御法をミニモデルに適用し定常偏差量、過渡特性、定常安定度の三項目から評価する。同時に制御ゲインの最適化を行う。

(2) ファン・ブローア負荷への応用

モータ駆動用電力変換器動作時の特性について検討する。モータ負荷の 7 割以上がファン・ブローアという事実を踏まえて、ファン・ブローア・ポンプ等のトルクが回転数の二乗に比例する「二乗低減トルク特性負荷」に関して検討を行う。モータ負荷に関しては、当研究室が所有する誘導電動機・誘導発電機セット(MGセット、電力回生用変換器付き)を用いることで実現する。ファン・ブローアを駆動する場合、モータには「電圧・周波数比一定制御(V/f 制御)」が一般的に適用される。V/f 制御を適用し MMC の出力電圧と周波数を定格値(320 V, 50 Hz)まで上昇させる。このときモータは定格回転数 1500 rpm で動作する。この状態でモータ負荷の出力電力を定格の 15 kW まで上昇させる。次に、MMC の出力電圧と周波数をそれぞれ 190 V, 30 Hz とし、出力電力を 1.1 kW(15 kW / 14)まで減少させる。このとき回転数は 900 rpm となり、二乗低減トルク特性負荷が模擬できる。回転数が 1500 rpm と 900 rpm の両場合において、良好な運転特性を実現できることを確認する。さらに、MMC に適した始動法を検討する。

(3) 無効電力補償装置(STATCOM)としての動作検証

無効電力補償装置(STATCOM)動作時の特性について検討する。MMC の出力は三相電源に接続し、電源と無効電力を授受する。STATCOM の主用途は力率改善を目的とした正相無効電力補償と、不平衡電圧抑制を目的とした逆相無効電力補償に大別できる。本研究では、両者に関して検討を行う。初めに正相無効電力補償時の動作検証を行い、正相補償時に求められる特性、すなわち電流高調波の低減、無効電力の高速制御が実現で

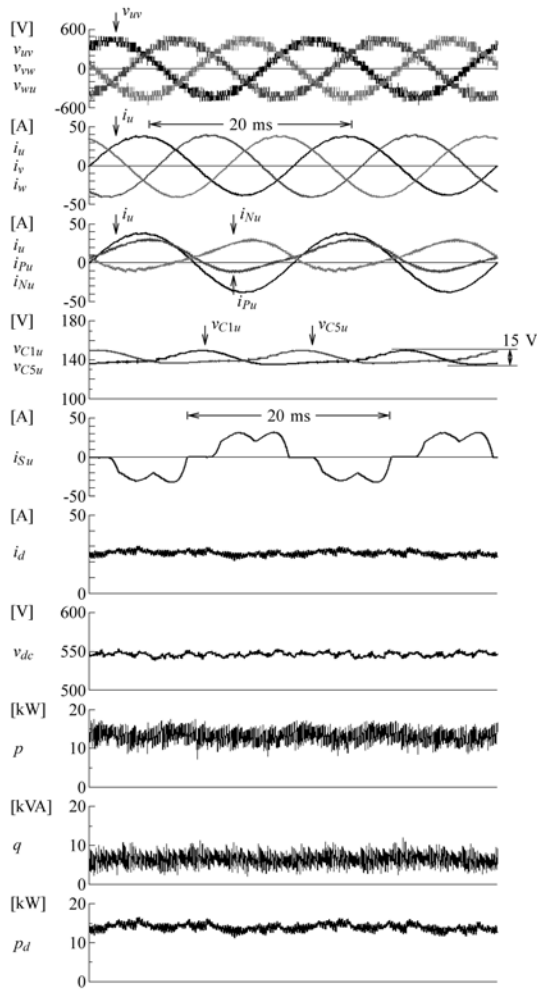


図2 50 Hz 定格負荷時の実験波形

きることを確認する。次に、逆相無効電力補償時の動作検証を行う。逆相補償時には、直流コンデンサの偏差量が增大するという問題がある。電圧偏差は半導体デバイスの電圧定格に影響するため、できる限り小さいことが望ましい。そこで申請者が提案した各種バランス制御法を適用することで、逆相補償時も電圧偏差を零に抑制することを試みる。

各相に流れる循環電流量に関する検討を行う。MMC-STATCOMは、逆相補償時に各相に循環電流を流すことで電圧バランスを実現する。しかし、循環電流の増加は半導体素デバイスの電流定格に影響するため、循環電流と逆相電力の関係をあらかじめ把握する必要がある。そこで、両者の定量的な検討を行い、逆相電力と循環電流の関係を明らかにする。

4. 研究成果

(1) モータ駆動用電力変換器としての動作検証

図2に、50 Hz 定格負荷時の実験波形を示す。モータ電圧は線間15レベルのマルチレ

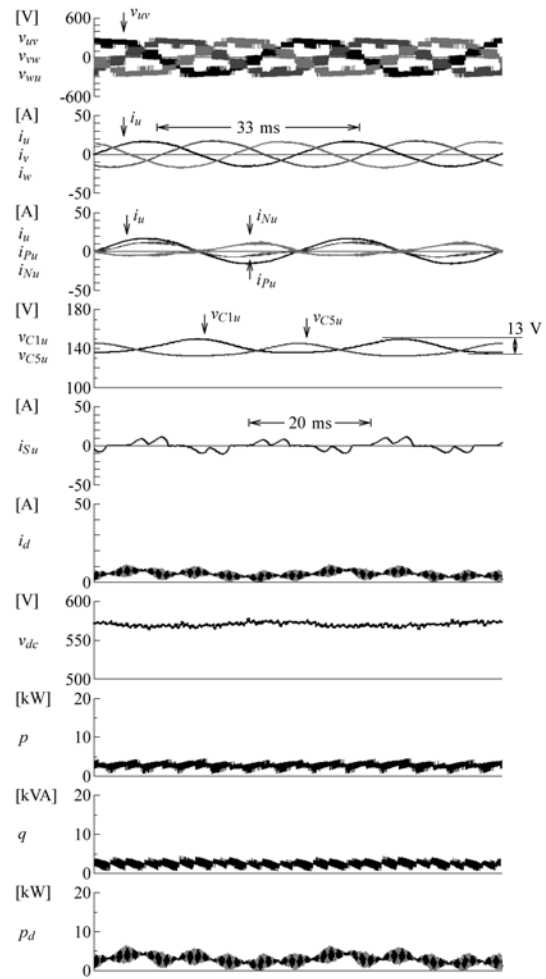


図3 30 Hz ファンブローア負荷時の実験波形

ベル波形となる。その結果、高調波電圧やコモンモード電圧を十分低減でき、これらに起因する電磁ノイズ、高周波漏れ電流、ベアリング電流も抑制できる。

高調波電圧成分が少ないため、モータ電流は正弦波状と見なせる。その結果、トルク脈動は無視できる。一方、アーム電流には4 kHzのスイッチングリップル成分が存在するが、結合リアクトルのインダクタンス値を適切に選ぶことで抑制できる。

直流コンデンサ電圧に着目すると、平均値制御とバランス制御を併用することで、その直流分は指令値140 Vに良好に追従する。一方交流分は、主成分である基本波成分(50 Hz)と2次成分(100 Hz)から構成される。

図3に、30 Hz ファンブローア負荷時の実験波形を示す。基本的に、図2と同様な波形となる。ファンブローア負荷であるため、図2と比較し負荷トルクは0.36倍となっている。負荷トルクが少ない場合も、直流コンデンサ電圧は指令値の140 Vに良好に追従している。

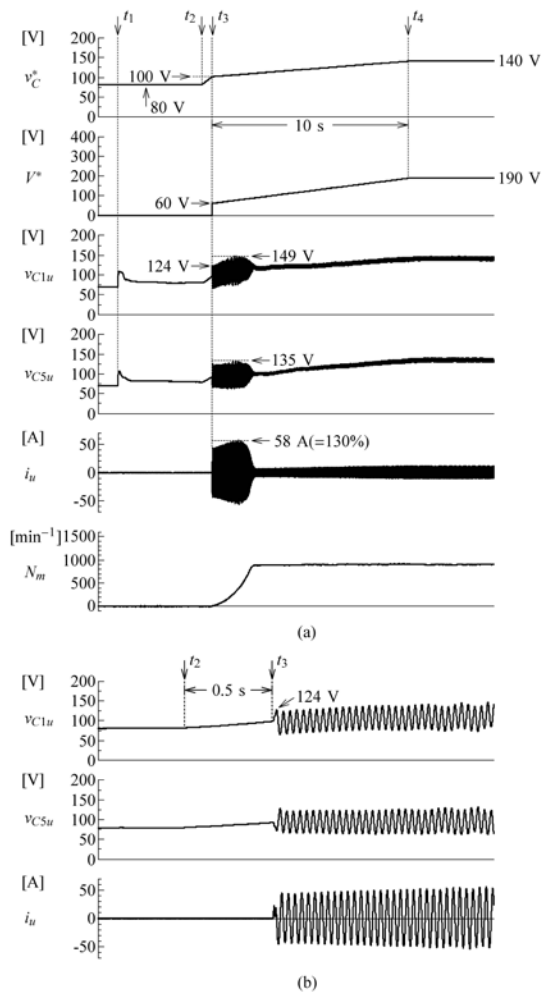


図4 モータの始動特性

図4に、モータの始動特性を示す。これは、モータの始動周波数を固定し(図4では30 Hz)、初期振幅を与えることで始動トルクを発生させる点に特長がある。提案した始動法を用いることで、良好な始動特性を実現できることを確認した。なお、本始動法は産業財産権を出願済みである。

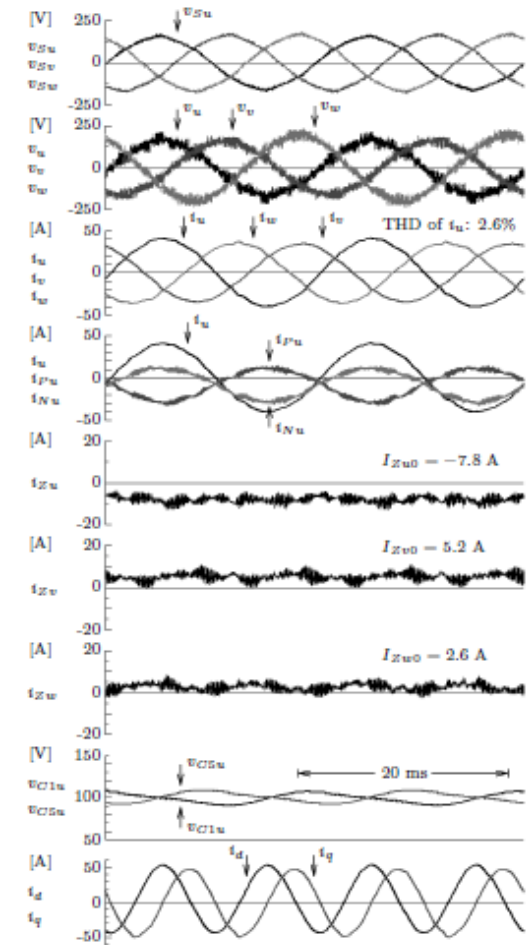
(2) 無効電力補償装置(STATCOM)としての動作検証

図5に、定格逆相無効電力制御時の実験波形を示す。実験は、研究室で設計・製作した200 V, 10 kVA ミニモデルにより行った。

逆相無効電力制御では、各相で動作モードが異なる。u相変換器は整流器動作を、v相変換器はインバータ動作を、w相変換器はインバータ動作を行う。

電源電流に着目すると i_u, i_w, i_v の順となり、逆相無効電力を制御できている。 i_u の THD 値は 2.6% となり、高調波電流を十分に抑制できている。

逆相無効電力制御時には、循環電流に直流分が重畳する。重畳する直流量は各相で異



な

図5 逆相無効電力制御時の実験波形

る。 i_{zu} は整流器動作のため負の電流が重畳し i_{zv}, i_{zw} はインバータ動作のため正の電流が重畳する。直流量は電源・変換器間の有効電力授受量に応じて異なるが、三相の総和は零となる。図5の場合、u相変換器を通じて電源から流入した電力が、v相w相を通じて電源に流出している。実験結果より、定格逆相無効電力(10 kVA)制御時に i_{zu} に含まれる直流電流は 7.8 A となる。これは i_u の基本波実効値 29 A の 27% であり、十分に小さい。

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 萩原誠, 前田亮, 赤木泰文, 二重スター・チョップセル方式のモジュラー・マルチレベル・カスケード変換器(MMCC-DSCC)の理論解析と制御, 電気学会産業応用部門誌,

131 卷, 84-92, 2011, 査読有

② 萩原誠, 西村和敏, 赤木泰文, A Medium-Voltage Motor Drive With a Modular Multilevel PWM Inverter, IEEE Transaction on Power Electronics, 25 卷, 1786-1799, 2010, 査読有

③ 萩原誠, 西村和敏, 赤木泰文, モジュラー・マルチレベル PWM インバータを用いた高圧モータドライブ 第 1 報: 400 V, 15 kW ミニモデルによる実験的検証, 電気学会産業応用部門誌, 130 卷, 544-551, 2010, 査読有

④ 萩原誠, 西村和敏, 赤木泰文, モジュラー・マルチレベル PWM インバータを用いた高圧モータドライブ 第 2 報: 始動法と始動特性, 電気学会産業応用部門誌, 130 卷, 552-559, 2010, 査読有

[学会発表] (計 2 件)

① 萩原誠, 前田亮, 赤木泰文, Negative-sequence reactive-power control by the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (MMCC-DSCC), IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010 年 9 月 16 日, Atlanta USA

② 萩原誠, 前田亮, 赤木泰文, Theoretical analysis and control of the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (MMCC-DSCC), International Power Electronics Conference, 2010 年 6 月 22 日, 札幌, 日本

③ 萩原誠, 西村和敏, 赤木泰文, A Modular Multilevel PWM Inverter for Medium-Voltage Motor Drives, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009 年 9 月 22 日, San Jose, USA

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: モータ始動方法
発明者: 赤木泰文, 萩原誠
権利者: 国立大学法人東京工業大学
種類: 特許権
番号: 特願 2009-227406
出願年月日: 2010 年 2 月 25 日
国内外の別: 国外

名称: 電力変換器
発明者: 赤木泰文, 萩原誠
権利者: 国立大学法人東京工業大学

種類: 特許権

番号: 特願 2010-042622

出願年月日: 2010 年 2 月 26 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩原 誠 (Hagiwara Makoto)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 20436710