

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：50104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630043

研究課題名(和文)非円形歯車・無段変速機構を用いた高出力垂直軸風力発電機の開発

研究課題名(英文)Development of the high output vertical axis wind power generator which incorporated the noncircular gear and continuously variable transmission mechanism

研究代表者

岡田 昌樹 (OKADA, MASAKI)

旭川工業高等専門学校・機械システム工学科・教授

研究者番号：40455100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、垂直軸小型風力発電機の出力向上機構の開発に取り組んでいる。この中で、次に示す2つの機構の有効性を明らかにした。

1つ目は、発電機用モーターのコギングトルクを低減するために、非円形歯車を組み込んだ機構である。結果として、25%以上のトルク低減を図れるケースがあった。

2つ目は、風車の回転数に応じて位置制御ができる遠心调速機を操作方式とする無電力メカニカルな無段変速機構である。結果として、従来の固定速増速機に比べ、15%以上の出力向上を得られた。また、この改善研究から、新たな方式の無段変速機構を考案できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, I develop the output improvement mechanism of the vertical axis small wind power generator. In this study, I clarified the effectiveness of two mechanism to show next. The first is the mechanism that incorporated a noncircular gear to reduce cogging torque of the motor for generators. Some noncircular gear reduced more than 25 % of torque as a result. The second is the continuously variable transmission mechanism that is mechanical to control in a centrifugal governor. As a result, the output improved this continuously variable transmission mechanism more than 15% in comparison with step-up gear of the gear ratio uniformity. In addition, from this improvement study, I was able to devise the continuously variable transmission of a new method.

研究分野：設計工学・機械機能要素

キーワード：風力発電機 非円形歯車 無段変速機 遠心调速機

1. 研究開始当初の背景

エネルギーの地産地消や分散電源の普及にともない小型風力発電機の需要が増えてきた。このような背景の中、本研究では電源整備がされていない山間部道路脇に設置されるデリニエータ(視線誘導標)用の電源として、垂直軸小型風力発電機に関する取り組みを始めた。この風力発電機は、抗力を利用するためにブレード(羽根)の周速が小さく、出力係数(風エネルギーから取り出せる電気エネルギーの割合)が低い。また、出力係数を高めるために増速器の比率を上げると回転始動しにくくなる課題があった。これらについて、国内外の研究ではブレード形状や発電機に関する調査が多いが、本研究では新たな変速機構の研究開発から出力向上を目指すこととした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、抗力型風車を用いた風力発電機において、エネルギー変換効率の高いメカニカル機構を開発することである。そのために、次に示す2つの機構の有効性を明らかにする。

(1) 非円形歯車機構

非円形歯車はピッチ曲線の増減に応じて、駆動歯車のトルクを自由に増減させて被動歯車へ伝達させることができる。この基本的特性に着目し、発電機用モーターのコギングトルクの低減を図る。

(2) 無段変速機構

風車の回転数に応じて位置制御ができる遠心调速機を操作方式とする無電力メカニカルな無段変速機構を開発し、固定速増速機より高いエネルギー変換効率を目指す。

3. 研究の方法

(1) コギングトルク測定装置の製作

発電機のコギングトルクを測定するために製作した実験装置を図1に示す。

構成は、対象となる発電機①の軸をトルク検出器②に接続し、トルク検出器のもう一方には駆動モーター③の軸を接続している。

トルク検出器は、駆動モーターの回転速度とそれに発生する発電機の回転トルクを検出し、それらデータを演算表示器④に表示するとともにロガーに蓄積する。演算表示器から出力されるトルク値は、トルク検出器の定格トルク 2.0 [Nm]で 10 [V]となる。また、回転速度は 100 [rpm]で 10 [V]に設定した。

(2) 非円形歯車機構の開発

今回対象とした発電機は、市場にて容易に入手できるもので、磁極数が2極、スロット数が12のものである。従って、コギング数はその最小公倍数から12回となる。

コギングトルクの通常値と非円形歯車を組み込み時の効果を比較するため、図2に示す自作の歯車設計ソフトで、円形歯車と非円形歯車を作成した。円形歯車は、ピッチ円直径 24mm, 歯数 48, モジュール 0.5, 歯幅 10mm である。一方、非円形歯車はこの円形歯車をベースにピッチ曲線半径を 11.5~13.5mm の振幅 2mm で、コギング数(12回)分、変化させたものである。なお、この振幅値が歯車間のかみ合い設計上の限界値である。

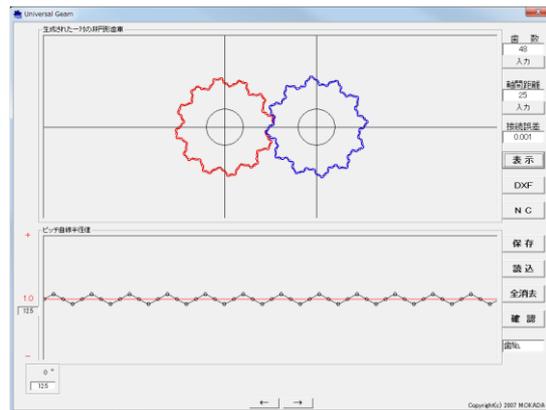
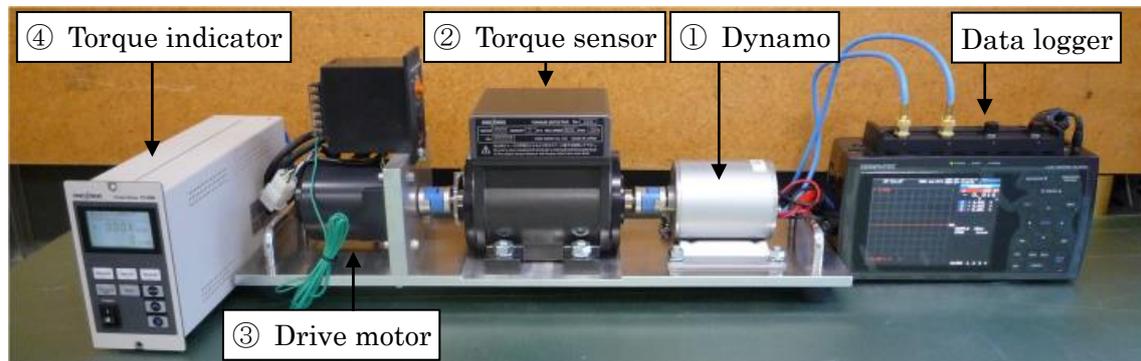


Fig.2 CAD/CAM of the noncircular gear



No	Device	Name of Product	Specification
①	Dynamo	Tsugawa KMB77-0712	DC12[V], 70[W], 2500[rpm]
②	Torque sensor	ONOSOKKI TH1204	Rated torque : 2.0[N·m]
③	Drive motor	Oriental motor M540-401	100[V], 40[W], Speed : 1500[rpm]
④	Torque indicator	ONOSOKKI TS-2800	Phase difference type, Magnetism type

Fig.1 The experiment system which measures cogging torque

製作した円形歯車と非円形歯車を図3に示す。歯車製作は当初マシニングセンタで行っていたが、実験結果のばらつきが大きかったため、高精細に出力できる光造形方式の3Dプリンタ **Projet1200** で製作した。

製作した歯車は、図4に示すようにトルク検出器と発電機の軸にはめ込み、実験した。



Fig.3 Circular gear & Noncircular gear

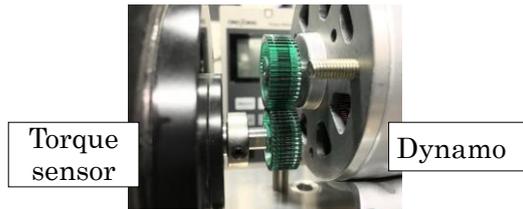


Fig.4 Engagement of the gear

(3) 無段変速機構の開発

本工程で製作した実験装置を図5に示す。上からローターの代用とした駆動モーター、速度制御機構となる遠心调速機構、無段変速機となるリングコーン型CVTの構成である。

駆動モーターにはオリエンタルモーター社製 M540-401/5GN3 を用い、0~500rpm の回転速度をコントローラで手動操作できる。

遠心调速機は、上部の固定スリーブと下部の移動スリーブ間で質量 300g のおもりが振り子となるように連結腕 2 本でピン止めし、回転軸の速度上昇により下部スリーブが上方に移動するよう調整している。

無段変速機は、日本電産シンゴ社製 RXL-90 である。変速操作がレバー式のため、図6に示すとおり、遠心调速機の上下移動するスリーブに平行リンク機構を連結し、制御させた。

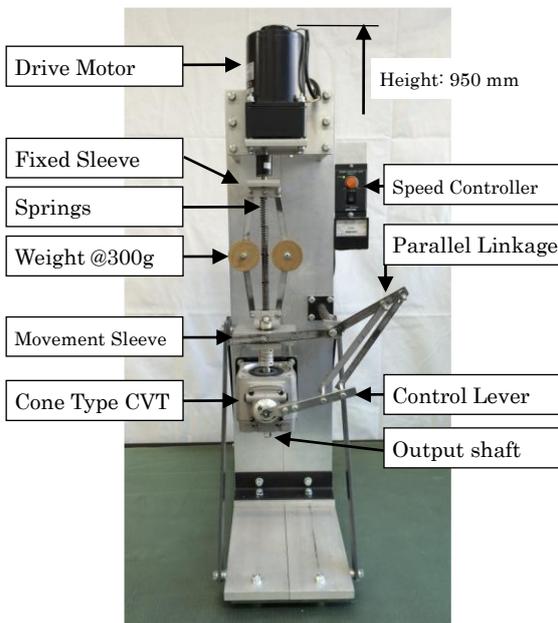


Fig.5 Experimental Equipment of CVT

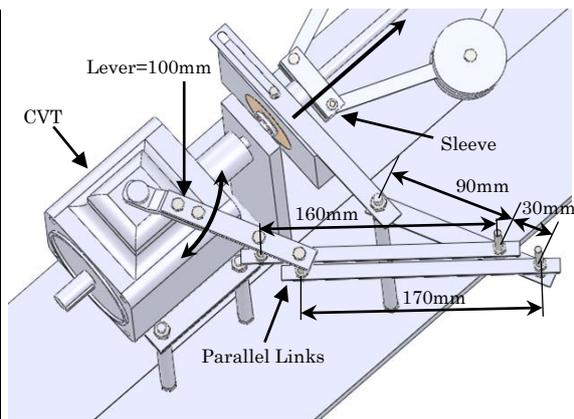


Fig.6 CVT Control Mechanism

(4) 垂直軸小型風力発電機への組み込み実験

非円形歯車機構と無段変速機構を組み込んだ実験装置を図7に示す。風車には当初、高回転を得られる直線翼垂直軸風車を用いたが、一般的なカットイン風速である 5m/s 以下で、リングコーン型 CVT の始動トルクを得られず、直径 600mm、高さ 400mm のサボニウス風車に変更した。

実験は、従来と本研究成果を比較するため、CVT の出力軸トルクが 10 倍違うことを利用し、最高値を従来の固定速増速機、最小値を本無段変速機の始動トルクとして実験した。なお、入力となる送風機には山善製 YDF-602 を用い、速度 0m/s~5m/s の風を送り、出力となる CVT 出力軸の回転速度は小野測器製のタコメーター HT-4200 で測定した。

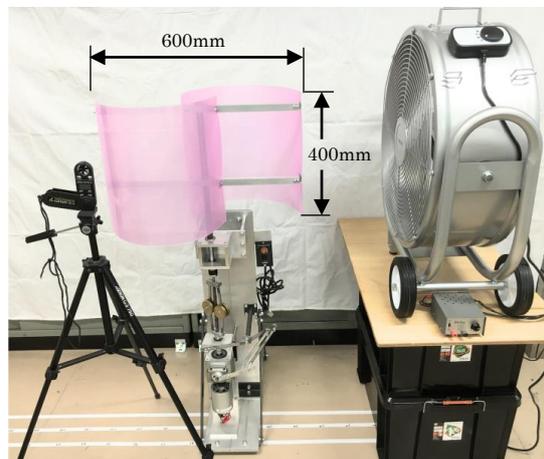


Fig.7 Vertical axis wind power generators

4. 研究成果

(1) 非円形歯車機構

図1の実験装置を用いて、発電機の起動時のコギングトルクを測定するため、駆動モーターの回転速度を 1rpm~3rpm に設定した。

円形歯車、回転速度 3rpm 時の測定結果を図8に示す。なお、回転速度 1rpm と 2rpm の結果は 3rpm と同様であったため省略する。

図8より、円形歯車時のトルクは、一回転1周期でうねりを生じているが、振幅の平均値は約 0.1N・m である。

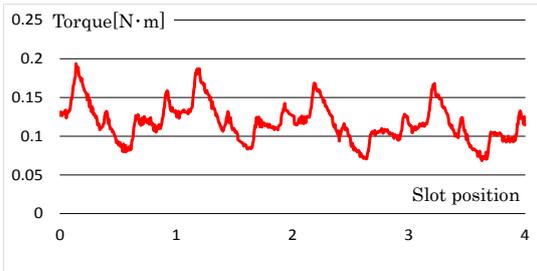


Fig.8 Circular gear connection

また、非円形歯車の測定結果を図9と図10に示す。図9と図10の違いはバックラッシュ量である。図9はバックラッシュを少し設けた場合で、図10はバックラッシュを無くし、少量の予圧をかけたものである。なお、予圧をかけるため、歯形は円形としている。

結果として、図9の振幅平均値は約0.15N·m、図10の振幅平均値は約0.07N·mである。図9の結果が予想に反して大きくなった原因は、コギングトルクにおける磁気離脱時の反動が歯車間の遊びにより大きくなったことが考えられる。一方、図10の結果は予想どおり円形歯車に比べ25%以上の減少である。

この結果から、非円形歯車を組み込む場合は、バックラッシュを除き、歯形を円形として予圧をかけることで効果を発揮することが分かった。ただし、予圧量の適切値は、コギングトルクの最大値上昇やモーターの性能低下などを考慮して設定する必要がある。

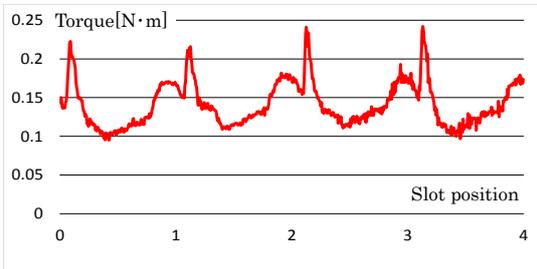


Fig.9 Noncircular gear connection - A

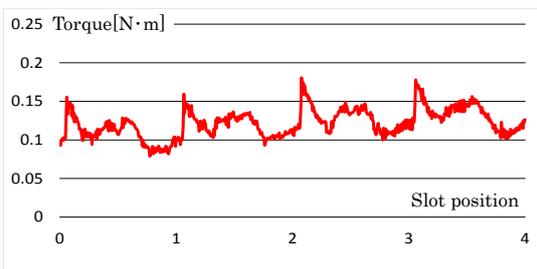


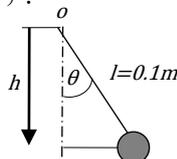
Fig.10 Noncircular gear connection - B

(2) 無段変速機構

遠心调速機の回転数とおもりの理論的な位置関係を次式と図11①に示す。

$$h = l \times \cos \theta = l \times \frac{g}{l\omega^2}$$

$$= l \times \frac{g}{l \times (N \frac{2\pi}{60})^2} = \frac{900 \times g}{(N\pi)^2}$$



なお、 N は入力回転速度(rpm)、 g は重力加速度9.8 (m/s²)

また、図5の実験装置で無段変速機を接続しない状態で、スリーブ間にバネがない場合の実験結果を図11②、バネ(バネ定数0.61 N/mm)を挿入した場合を図11③に示す。実験は、モーターの回転速度100rpm~350rpmを10rpm刻みで変化させた場合のスリーブの高さ位置(=l·h)を測定した。

この結果から曲線②は曲線①と比較し、スリーブの始動回転速度が約30rpm遅れているが変化の傾向は同じであり、曲線③はバネの抵抗でスリーブの移動量を減少させているが、回転速度にほぼ比例して増加していることが分かる。

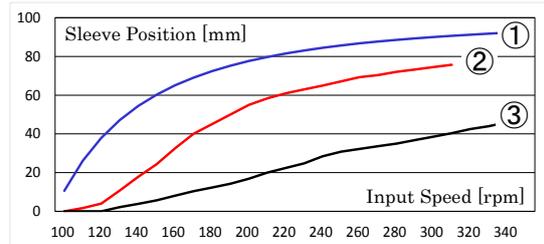


Fig.11 Results of the centrifugal governor

無段変速機を接続し、入力となるモーターの回転速度90rpm~450rpmを30rpm刻みで変化させた場合のCVT出力軸の回転速度と変速比を図12に示す。この測定結果から、モーターの回転速度が増加するにつれ、出力軸の変速比も増加していることが分かる。なお、変速比はモーター回転速度390rpmで最大値となった。

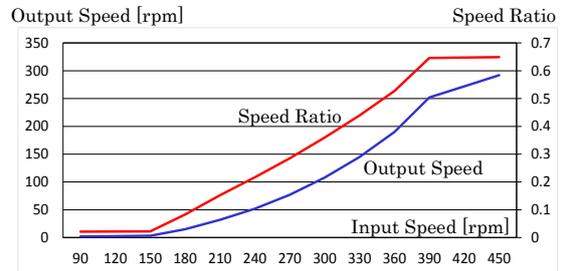


Fig.12 Output speed & Speed ratio

(3) 垂直軸小型風力発電機の出力結果

図7の垂直軸小型風力発電機における実験結果を図13に示す。従来方式の固定速増速機が風速3.8m/sから回転始動するのに対し、本無段変速機(遠心调速機有)は3.2m/sから回転始動し、約15%の出力向上を得られた。

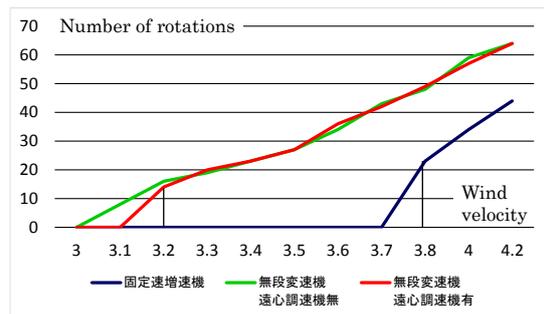


Fig.13 Experimental result

また、遠心调速機にかかる負荷が回転始動に与える影響を調査するため、本無段変速機から遠心调速機を外した場合の測定結果が、無段変速機（遠心调速機無）である。始動時の風速に 0.1m/s 程度の違いはあるが、ほぼ影響なしという結果であった。

ちなみに、リングコーン型 CVT を外した場合の風速と回転数の関係を示す実験結果が図 14 である。CVT の起動トルクが 0 であれば、風速 1.0m/s から回転始動する。

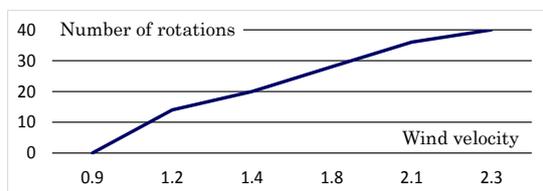


Fig.14 When a CVT was removed

(4) 新たな無段変速機の検討

本研究に用いたリングコーン型 CVT は起動トルクが大きく、回転式操作レバーに対応した複雑な平行リンク機構も必要である。

そこで、これらの問題点を解決する方式として、立体確動カムとラック&ピニオン、フリーホイール、歯車列による新たな変速機構を考案した。図 15 にその基本原理を示すが、回転するカムの偏心運動により、揺動リングに接続されたラックが左右に水平運動する。この動作に従い、ラックにかみ合うピニオンは回転運動を行うが、ピニオン軸にはフリーホイールが挿入されているため、一方にしか回転しない。ラック&ピニオンはカムの左右に独立して 2 セットあることから、ラックが右へ移動した時は、右側のピニオンだけが回転し、ラックが左へ移動した時は、左側のピニオンだけが回転する。つまり、右側と左側のピニオンの組み合わせで回転動作を連続することになる。しかし、左右のピニオンは回転方向が異なるため、図 16 に示すように歯車が片側に 1 つ多い歯車列で回転方向を統一する。なお、この歯車列を増速歯車列とすることで、増速比を 1 倍以上に設定できる。

肝心の変速方法を図 17 に示す。カムの形状を立体確動タイプとし、揺動伝達位置を軸方向に移動することで、変速量を制御する。例えば、外径 60mm、長さ 100mm の円柱状の立体確動カム（偏心量 $e=0\sim 23.56\text{mm}$ ）に、モジュール 1 のラック&ピニオン（ピッチ円直径 $d=30\text{mm}$ ）を組み合わせた場合、増速比 1 の歯車列と組み合わせた変速比 n は下式より $0\sim 0.5$ となる。増速比 4 の歯車列と組み合わせると変速比 n は $0\sim 2.0$ となる。

$$n = 2 \times \frac{e}{\pi d}$$

また、本理論に基づき試作した無段変速機を図 18 に示す。揺動リングの位置を上下させることで、理論どおりに動作する。今後、死点に対応した機能を追加し、完成を目指す。

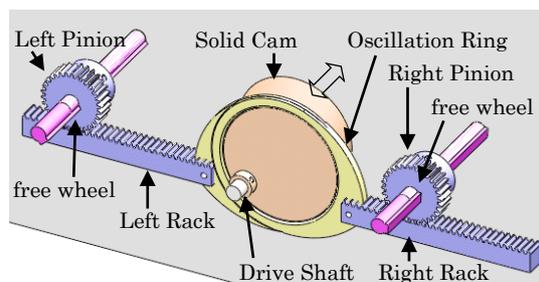


Fig.15 Mechanism of new CVT

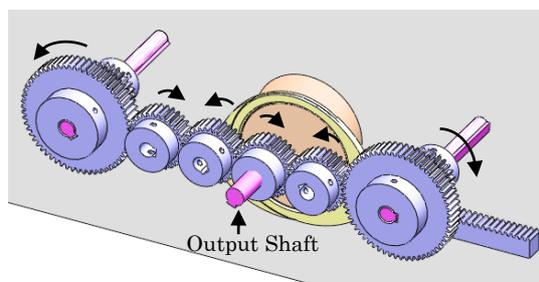


Fig.16 Speed increasing gear train

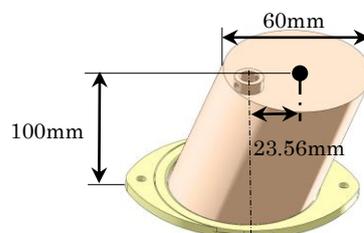


Fig.17 Solid cam

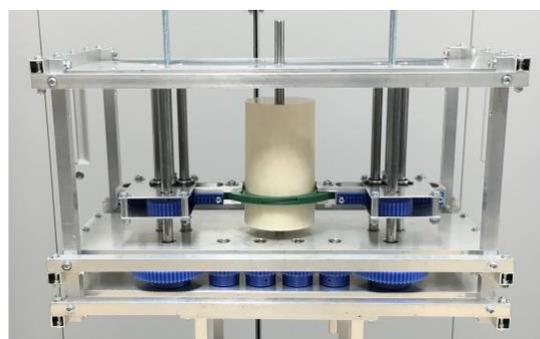


Fig.18 Trial product

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 4 件）

- (1) 岡田昌樹, 小型風力発電機用無段変速機の開発, 日本機械学会第 1 回イノベーション講演会, 2015 年 11 月 14 日, 広島県東広島市, 広島大学
- (2) 岡田昌樹, 垂直軸小型風力発電機用無段変速機構の制御方式の検討, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 14 日, 北海道札幌市, 北海道大学
- (3) 岡田昌樹, 風力発電機のコギングトルクを低減する非円形歯車機構の検討, 日本設

計工学会平成 26 年度秋季研究発表講演会，
2014 年 10 月 4 日，山形県米沢市，山形大
学

- (4) 岡田昌樹，コギングトルクを低減させる
非円形歯車機構の検討，日本機械学会 2014
年度年次大会，2014 年 9 月 10 日，東京都
足立区，東京電機大学

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 昌樹 (OKADA, Masaki)

旭川工業高等専門学校・機械システム工学
科・教授

研究者番号：40455100

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし