

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420880

研究課題名(和文) 超軽起動・大トルク伝達・高変速比型変速機の開発と低始動風波力発電蓄電系への搭載

研究課題名(英文) Development of a mechanical CVT with closed loop chains, one-way clutches and solid-cams, and its installation into wind or wave power generation system

研究代表者

湯川 俊浩 (YUKAWA, TOSHIHIRO)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：10347205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：自然エネルギーを利用した発電の中で、特に風力・波力発電を普及させる目的で、超軽起動特性をもつ大トルク伝達・高変速比型変速機を設計し、発電できる最小の流速、すなわちカットイン流速が小さくても発電が可能な低始動型風波力発電系を開発した。本研究で開発した大動力伝達型の機械式無段変速機は、四節リンク、ワンウェイクラッチ、カムを搭載した複合伝達機構型無段変速機(LCVT)である。この変速機は、従来方式と異なり、非摩擦伝動機構である。今回、発電システム搭載用の立体カム搭載型LCVTの設計、製作、評価をし、トルク伝達効率を算出した。LCVTとダイナモ発電機を搭載した発電系モデルを設計し、有効性を確かめた。

研究成果の概要(英文)：Among the power generation using natural energy, especially for the purpose of spreading wind or wave power generation, we have designed a new type of CVT which can transmit large power or torque, and realize a high transmission ratio. The CVT (LCVT) consists of closed loop links, non-invertible elements and solid cams can maintain high transmission efficiency. That is, the LCVT can transmit the power from input axis to output axis with light-starting characteristics, and the minimum flow speed that can generate electric power. Actually, we installed the LCVT into wind power generation system in order to realize generating electricity even if the in-flow velocity is small. Next, we designed a power generation model equipped with LCVT and dynamo generator, and we calculated torque transmission efficiency. Furthermore, we installed a flywheel into power generation system, and we confirmed the effectiveness of stability of the electricity storage system.

研究分野：ロボット工学，機械設計，制御工学

キーワード：機械要素 設計工学 再生可能エネルギー トライボロジー 無段変速機 リンク カム 摩擦力

## 1. 研究開始当初の背景

自然エネルギーを利用した発電方法の一つに風力発電があるが、従来の風力発電の問題点として、季節や天候によって、風向きや風速の時間変動があり、また、国内では比較的、風が弱い地域が多いため、設置場所が限定され、さらには建設コストがかかるという理由が挙げられる。風力発電の基本原則として、風のエネルギーは風速の三乗に比例し、風車のエネルギーに対する風車の回転エネルギーのエネルギー比(効率)は、Betz 限界理論では 59% が上限値であり、一般に 40~45% といわれている。文献調査からも、この効率を極端に上げることは容易ではないことがわかる。風車の出力は、ローターの直径の二乗に 0.3 を掛けた値となる。例として、直径が 60 メートルの風車では 1,000 キロワットとなり、直径 6 メートルの風車では 10 キロワットとなる。風車の種類には、ブレード(羽)の形状で比較して、揚力型と抗力型があり、用途として、発電式(誘導式)と機械駆動式(同期式)があり、軸の方向(設置の姿勢)で、水平軸型と垂直軸型がある。さらに、回転速度に対して、定速式と変速式がある。風力発電機の本体(ナセル)の中には、ブレードの回転数を増速するギヤが発電機との間に組み込まれているが、このギヤが負荷となり、発電効率が上がらない原因であった。最近になって、発電効率を高めるため、発電機の構造(永久磁石)や制御(同期法)の改良により、電気式変速の風力発電機が企業で開発されてきた。しかしながら、この方式は電気的なロスを伴う。

本研究では、カットイン風速(ブレードが回転し始め、発電を始める風速)を小さくできれば、発電効率が上がると予想し、発電効率を高める工夫の一つとして、ブレードと発電機の間に「無段変速機(CVT, Continuously Variable Transmission)」を搭載し、カットイン風速を下げることを試みた。この CVT は、機械式の大動力伝達型変速機であり、風力発電機に搭載可能である。

従来型の CVT は、現在、軽量の自動車に用いられており、これは、原動機(エンジン)で発生する回転力やトルクを車軸等の出力側に伝える動力伝達機構であり、回転数を無段階に調整し、力やトルクの大きさを変化させて出力できる。基本構造として、二枚の円錐板を直角に組み合わせた摩擦車からなり、プーリの左右の距離を変化させ、ベルトとの接点を変えて変速比を変えるベルト式 CVT や、パワーローラーを入出力ディスク間に高圧縮力で挟み込み、パワーローラーの傾き角を変えることにより、ローラーとディスクの接点の位置が移動して変速比を変えるトロイダル CVT がある。これらの CVT は力やトルクを伝達部品間の摩擦力で伝える摩擦伝動式の機構であるため、伝達部品間の滑りや磨耗を防ぐ必要があった。伝達部品に圧力をかけて摩擦力を発生させることにより、CVT

の機能を有するが、力の伝達効率は低下した。そのため、風力発電機への利用を考えると、カットイン風速を下げるのが困難であった。

従来の摩擦伝動方式の CVT に対し、本研究の先行研究でおこなってきた新方式の大動力伝達型の機械式 CVT は、四節リンク、ワンウェイクラッチ、カムを搭載した複合伝達機構型 CVT (LCVT) である。この変速機は、従来方式と異なり、非摩擦伝動機構である。LCVT は、直動機構を含むリンクを伸縮させて、入力軸の回転角速度と出力軸の回転角速度の比、または入出力軸のトルク比を無段階に調整して変速する機構であり、伝達部品間のすべりによる伝達ロスがないため、伝達効率が高い。

LCVT の主要要素である四節リンク機構単体について、四節リンク機構は四本の長さの異なるリンクが四カ所の回転関節で接続されており、四角形を形成している。四本のリンクの中で最短リンクがクランクであり、このクランクと回転軸を介して隣り合ったリンクを土台に固定する。クランクは入力軸の周りを回転する。固定リンクの他端にあるもう一方の出力軸(厳密には、出力軸は別の箇所にも設定できる)を中心に往復角運動するリンクがてこである。クランクの回転力をてこに伝えるのが連結リンクである。本研究の LCVT に搭載する四節リンク機構はてこクランク機構であるが、LCVT に搭載可能な回り対偶をもった閉リンク機構には他にも種類がある。てこクランク機構の運動が成立する条件は、最短リンクと他のある一つのリンクの長さの和が、さらに残りの二つのリンク長さの和より常に小さいことである。

主要要素である四節リンク機構を搭載した LCVT の基本原理について、二組の四節リンク機構が対称にベースに配置されており、双方の固定リンクはベースと一体になっている。二つの入力軸どうしは機械的に連動している。クランクが入力軸まわりに等速回転すると、てこは揺動するが、その往復運動は等速度ではない。そこで、クランクと連結リンクを直動機構を使って伸縮させる。この伸縮によって、てこの揺動の角速度を調整することで、クランクの回転運動と完全に連動したてこの揺動運動が実現できる。つまり、双方のてこに対し、揺動の半周期ずつが等速度運動になるようにする。てこの揺動による伝達力を一方向だけに伝達させるため、ワンウェイクラッチやラチェット等の不可逆機構を用いる。そして、不可逆機構を介して、てこ出力軸を接続する。以上が LCVT の原理である。

さらに、クランクと連結リンクの双方の長さを同時に機械的に可変できるのが、立体カム搭載型機械式 LCVT である。

## 2. 研究の目的

前記の LCVT は開発済であり、この技術の

見直しと、風力・波力発電蓄電系へ搭載することが、本研究の目的となる。とくに、新エネルギー発電の中でも、風力・波力発電を普及させるために、新たに、超軽起動特性をもつ大トルク伝達・高変速比型変速機を開発し、発電できる最小の流速(カットイン流速)が小さくても発電が可能な低始動型風波力発電系を開発するのが目的である。必要となるキー技術は、「リンク式 CVT」(LCVT)であり、この変速機は時々刻々と変化する自然エネルギーを電気に変換するのに適していると考えられる。

### 3. 研究の方法

三年間に亘り、研究室で単独でおこなう基礎研究である。初年度(平成26年度)は、立体カムを搭載したLCVT(6号機)を3DCADを用いて設計し、製作した。二年目(平成27年度)は、LCVT(6号機)を搭載した発電系1/100モデルLCVT-GENを設計した。最終年度(平成28年度)は、1/100モデルLCVT-GENにフライホイールを取り付けたLCVT-GEN+FLYWを設計し、製作した。また、LCVT(6号機)の改良型の7号機を開発した。

各年度の研究の方法について、26年度は、LCVTの動力学モデルを導出し、クランクの回転数や各リンクの加速度や慣性モーメントが大きい場合を想定して解析した。LCVTのブレーキ機能の理論を導出し、変速比の幅が0～であることを確認した。動作実験では、LCVTが構造的に非バックドライブ機能を有することを理解した。発電系(LCVT-GEN)の制御系を設計し、3DCADの解析ツールで調査した。27年度は、非摩擦伝動式であるLCVTの各機構要素の配置可能パターンを解析した。LCVT内部で、四節リンク、ワンウェイクラッチ、立体カム、および入出力軸の配置方法を検討した。28年度は、蓄電系(機械式フライホイール、電気式二次電池)を搭載した発電系(LCVT-GEN-FLYW)を設計した。また、LCVT7号機(発電機搭載機)の変速幅、伝達トルク、変速比変動を調査した。つぎに、フライホイールを設計し、LCVT-GEN-FLYWの発電量を調査した。

### 4. 研究成果

平成26年度は、LCVTの動力学モデルを導出した。このモデルは、入出力回転数、加速度、および慣性モーメントが大きい場合の動特性を考慮した。過去に導出したLCVTの運動学理論を基にして、LCVTが直動機構をもつ連結リンクの伸縮により、入出力軸の回転角速度の関係を調整できる変速機構であることが今回、実験で実証された。変速比の幅が広いという特長を活用し、変速比が無限大になったときに、ブレーキ(エンジンブレーキ)としての機能を果たすかどうかを解析するため、3DCADの解析ツールを使い、変速比0～のシミュレーションをおこなった。つぎに、発電系搭載用の立体カム搭載型LCVT6

の設計、製作、評価をおこなった(図1)。LCVT6は、原動機から入力軸に加わる回転力やトルクが各リンクと立体カムを回転させながら、立体カムを介して、連結リンクを伸縮させるので、付加的なリンク伸縮用モータや電源が不要である。LCVT6が変速伝達機構として機能しているかを確認した後、トルク伝達効率を算出した。理論解析には、数値計算ソフトウェアと3DCADの解析ツールを用いた。開発したLCVT6は、軸受で生じる摩擦を除き、伝達部品間の摩擦力による駆動力のロスや潤滑等のトライボロジー領域の問題を取り扱う必要がないことは大きな利点である。

平成27年度は、LCVTにダイナモ発電機を搭載した発電システムモデルLCVT-GENを設計した(図2)。立体カム搭載型LCVT(LCVT6)を改良し、発電システムLCVT-GEN搭載用の立体カム搭載型LCVT7を再設計したLCVTにダイナモを取り付け、発電システム搭載用の電力供給型CVT(LCVT7号機)に改良した後、減速比とトルク効率を測定する回路を開発した。

平成28年度は、LCVTに発電機を搭載した発電システム(LCVT-GEN)の検証実験をおこなった。LCVTの変速幅/伝達トルク/変速比変動を測定し、つぎに、LCVT-GENの発電量を計算した。入出力軸の双方のDCモータが発生するトルクを比較することで、伝達効率を測定した。双方のモータの電圧値からトルク伝達効率を求めるために、モータとダイナモの電流値をI-V変換回路で電圧値に変換し、AD変換器を介し、コンピュータ内でトルク伝達効率を算出するためのC言語プログラ

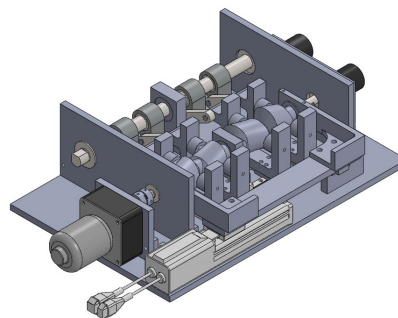


図1 立体カムを有する完全機械式LCVTの実験装置

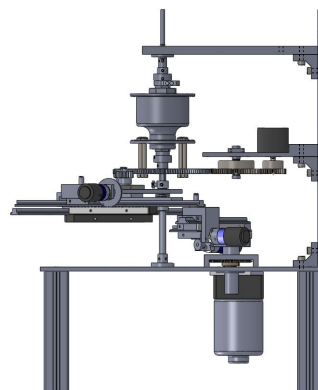


図2 LCVT-発電系の実験装置

ムを開発した。ダイナモの発電量やトルク伝達効率を測定するにあたり、ダイナモ、出力側 DC モータ、およびエンコーダの取付位置を容易に交換可能にするためのコンパチブル設計をした。

以上、平成 26 年度から平成 28 年度の 3 年間で、装置の技術レベルを評価した結果は次のとおりである。伝達効率が 95%以上を達成した。入力回転数に対する出力回転数の速度変動（脈動）が 1% 以内であることを確認した。許容トルク 150 Nm は未確認であり、今後、装置の改良後に実施する計画である。LCVT-GEN の発電効率とリンク型ブレーキの機能のさらなる詳細な調査に関しても、今後の課題である。四節リンクの最適組数としてはコスト面から 8 組が妥当という結論に至った。

#### 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 7 件)

- (1)湯川俊浩, 村上彰勸, 武田洋一, 大島修三, てこクランク機構と包絡線形溝カムを用いた複合型無段変速機の開発, 日本設計工学会学会誌「設計工学」, Vol. 51, No. 7, (2016.7), pp. 519-534, J-STAGE, jsde 設計工学, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsde/51/7/51\\_2015.2638/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsde/51/7/51_2015.2638/_article/-char/ja/) (査読有)
- (2)Toshihiro YUKAWA, Youichi TAKEDA, Toru KAGA, and Shuzo OHSHIMA, Development of Mechanical Combined-Type CVT consisting of Closed Links, Grooved Cam and Non-Invertible Elements, The 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE), P19-8154, Nov. 14-16 2016, Hamamatsu, Shizuoka, Japan. (査読有)
- (3)Toshihiro YUKAWA, Youichi TAKEDA, Toru KAGA, Jun SASAKI, Operability Evaluation of Six-D.o.F Surgical Assist Arm with Sphere Joints and Inner-Outer Cables, The 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE), P14-8153, Nov. 14-16 2016, Hamamatsu, Shizuoka, Japan. (査読有)
- (4)Toshihiro Yukawa, Kohsuke Takahashi, Yusuke Fujiya, Mobile Robot with Portable Toilet as an Element of Nursing System, Proc. of the 6th Int. Conf. on Advanced Mechatronics (ICAM2015), 2A2-15, pp. 325-326, Tokyo, Japan, December 5-8, 2015. (査読有)

- (5)Toshihiro Yukawa, Takuya Takahashi, Shuzo Ohshima, Combined Type Continuous Variable Transmission with Four-Bar Linkages and Non-Invertible Components, Proc. of the 6th Int. Conf. on Advanced Mechatronics (ICAM2015), 2A1-14, pp. 263-264, Tokyo, Japan, December 5-8, 2015. (査読有)
  - (6)Toshihiro YUKAWA, Akinori MURAKAMI, Analysis of the Relationship between Force and Torque Generated in CVT with Link Mechanism, Proc. of Int. Conf. on Positioning Tech, (ICPT2014), pp. 418-423, P2-24DN, Fukuoka, Japan, Nov. 18-21, 2014. (査読有)
  - (7)Toshihiro YUKAWA, Kohsuke TAKAHASHI, Position Control of Mobile Robot with Portable Toilet using Optical Sensors, Proc. of Int. Conf. on Positioning Tech, (ICPT2014), pp. 212-215, P1-06AP, Fukuoka, Japan, Nov. 18-21, 2014. (査読有)
- 〔学会発表〕(計 20 件)
- (1)宇佐美勝喜, 湯川俊浩, 富士谷裕介, 武田洋一, 加賀亨, 佐々木純, 高操作性六自由度型リトラクタの開発, 1A1-01b5, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama, パシフィコ横浜(神奈川・横浜)
  - (2)高橋洸介, 富士谷裕介, 佐野恭介, 畠山彩花, 湯川俊浩, 屋内用デッドレコニングセンサシステムの開発, 1A1-07b1, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama, パシフィコ横浜(神奈川・横浜)
  - (3)富士谷裕介, 高橋洸介, 佐野恭介, 畠山彩花, 湯川俊浩, 介護用移動マニピュレータの自律移動制御, 1P1-02b5, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama, パシフィコ横浜(神奈川・横浜)
  - (4)三浦研人, 湯川俊浩, サイクロ減速機を応用した連続変速機, 2A1-05a3, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama, パシフィコ横浜(神奈川・横浜)
  - (5)三浦研人, 湯川俊浩, エピトロコイド遊星ギヤを用いたノークラッチ式変速機のシミュレーション, 2A1-05a4, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama, パシフィコ横浜(神奈川・横浜)
  - (6)高橋拓也, 湯川俊浩, 武田洋一, 加賀亨, 大島修三, 電力供給型無段変速機構と測定システムの開発, 2P1-09b1, ロボティク

ス・メカトロニクス講演会 2016 in  
Yokohama, パシフィコ横浜( 神奈川・横浜)

- (7) 櫻田陽一, 湯川俊浩, 高精度低侵襲手術用鉗子マニピュレータの多自由度構造システム化, GS1-12, pp. 36-37, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 (SSI 2015), 函館アリーナ( 北海道・函館 ), 2015.11.18-20
- (8) 宇佐美勝喜, 湯川俊浩, 高橋拓也, 佐々木純, 手術者との協調支援を目的としたインターフェース機器 - 球状関節ブレーキをもつ手術支援補助アーム -, GS6-2, pp. 214-215, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 (SSI 2015), 函館アリーナ, ( 北海道・函館 ), 2015.11.18-20
- (9) 高橋拓也, 湯川俊浩, 電力供給型無段変速機構の運動解析および測定システムの開発, A601, pp. 194-197, 2015.9.24-25, 東北大学( 宮城・仙台 ), 第 25 回 インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN 2015)
- (10) 高橋洸介, 富士谷裕介, 湯川俊浩, 光学方位センサを用いた屋内デッドレコニング用センサシステムの開発と介護ロボットへの搭載, A602, pp. 198-201, 2015.9.24-25, 東北大学( 宮城・仙台 ), 第 25 回 インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN 2015)
- (11) 富士谷裕介, 三浦研人, 高橋洸介, 湯川俊浩, ポータブルトイレを搭載した移動マニピュレータの自律移動制御, 計測自動制御学会東北支部 第 294 回研究集会, No. 294-9, 頁数: 6 頁, 岩手大学工学部( 岩手・盛岡 ), 2015.5.29.
- (12) 湯川俊浩, 加賀亨, 武田洋一, 江刺家哲朗, 金子昌晴, 大島修三, 閉リンク機構を用いた変速機構の機械式制御, 計測自動制御学会 東北支部 第 293 回 研究集会 / 特別講演会( 東北大学工学部, 宮城・仙台 ), 293-6, 2015.2.19, 頁数: 6 頁
- (13) 佐藤晴希, 湯川俊浩, 減速機の伝達効率評価システムの開発, 日本設計工学会秋季研究発表講演会( 山形大学工学部, 山形・米沢 ), pp. 27-28, A10, 2014.10.4
- (14) 村上彰勲, 湯川俊浩, リンクと立体カムを用いた無段変速機の検討, 日本設計工学会秋季研究発表講演会( 山形大学工学部, 山形・米沢 ), pp. 29-32, A11, 2014.10.4
- (15) 湯川俊浩, 高橋拓也, 村上彰勲, 大島修三, リンク機構を用いた無段変速機の力と

トルクの関係, 2014.9.5, "日本機械学会東北支部第 50 期秋季講演会", pp. 155-156, 631, 東北学院大学( 宮城・多賀城)

- (16) 宇佐美勝喜, 湯川俊浩, 佐藤晴希, 高橋拓也, 佐々木純, 姿勢保持機構を有する手術支援補助アームの球状関節構造の最適化, 2014.9.5, "日本機械学会東北支部第 50 期秋季講演会", pp. 55-56, 234, 東北学院大学( 宮城・多賀城)
- (17) 櫻田陽一, 大森達登, 佐藤晴希, 湯川俊浩, 江刺家哲朗, 金子昌晴, 定荷重バネと遊星歯車を有するシリアルアームの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '14, 1A1-C08, 2014, 富山市総合体育館, 富山国際会議場( 富山・富山 ), 2014.5.26
- (18) 高橋洸介, 佐藤晴希, 湯川俊浩, 牧野平, 排泄介護用ロボットの光学センサを用いた移動制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '14, 1A1-E01, 2014, 富山市総合体育館, 富山国際会議場( 富山・富山 ), 2014.5.26
- (19) 高橋拓也, 湯川俊浩, 佐々木純, ボールジョイントとインナーアウターケーブルを用いた手術支援用補助アーム, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '14, 3A1-D04, 2014, 富山市総合体育館, 富山国際会議場( 富山・富山 ), 2014.5.28
- (20) 湯川俊浩, 佐藤晴希, 高橋拓也, 江刺家哲朗, 金子昌晴, 減速機の伝達効率の評価, 計測自動制御学会東北支部 第 288 回研究集会, No. 288-8, 頁数: 5 頁, 岩手大学工学部( 岩手・盛岡 ), 2014.5.19.

〔その他〕

ホームページ等

- 1) <http://univdb.iwate-u.ac.jp/index.php>
- 2) [http://www.eng.iwate-u.ac.jp/jp/profile/yukawa\\_toshihiro.html](http://www.eng.iwate-u.ac.jp/jp/profile/yukawa_toshihiro.html)
- 3) <http://www.mech.iwate-u.ac.jp/~yukawa>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯川 俊浩 (YUKAWA TOSHIHIRO)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号: 10347205

(4) 研究協力者

大島 修三 (OHSHIMA SHUZO)

(元) 岩手大学・地域連携推進センター・客員教授