

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 7 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560149

研究課題名(和文) 四節リンク，ワンウェイクラッチ，立体カムによる複合伝達機構型無段変速機の開発

研究課題名(英文) Development of combined-type continuous variable transmission with quadric crank chains, one-way clutches and solid-cams

研究代表者

湯川 俊浩 (Yukawa, Toshihiro)

岩手大学・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) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：複数の四節リンク(てこクランク)機構で構成される無段変速機を開発した。この無段変速機は、入力側の回転クランクから、クランクとてこを結ぶ連結リンクを介し、入力側からの力がこへ伝動し、揺動するてこの往復角運動が、ワンウェイクラッチを介し、出力側の回転体に伝わることで、各リンク長さを連続的に変化させて、変速比を無段階に変更できる。

成果として、入力側から加わる力の一部を用い、カムを介し、リンク長さを機械的に変換する機構を開発した。数値計算により、てこの揺動の角度制御に必要なリンク長さの幾何学条件を見出した。入出力の回転数比を電氣的、機械的に制御できることを実験で確認し、無段変速機の原理を立証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a new type of continuously variable transmission (L-CVT). The proposed L-CVT consists of a couple of quadric crank chains, one-way clutches and solid-cams.

Two identical quadric crank chains are placed symmetrically in the mechanism. Since the proposed mechanism is not based on friction conduction, it provides a mechanism that creates no noise, is durable, and offers high transmission efficiency.

We have designed a plate cam which corresponds to the response of the length of a connecting rod to realize the function of CVT. Then, we installed the plate cam to the L-CVT prototype model. Thus, we have designed a L-CVT with a plate cam in which the synchronization between the rotation of the plate cam and the one of the crank can be taken mechanically. Finally, the behavior of the L-CVT has been confirmed by numerical simulations.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機構学・機構設計 無段変速機 リンク カム トライボロジー

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 自動車等の動力伝達機構であるトランスミッションは、原動機の発生動力による回転力に対して、車輪等の出力軸に伝える力やトルク、及び回転速度を調整するための機構である。トランスミッションは、多段変速機と無段変速機(CVT)に大別される。CVTは、変速比を連続的に変化させることができるため、多段変速機よりも、エネルギー伝達効率が理論的に優れているといわれている。従来のCVTの機構には、ベルト式CVTやトロイダルCVTがあり、これらの機構はいずれも摩擦伝動により動力が伝達されるため、エネルギー伝達効率には限界があり、滑りや騒音が生じる可能性があった。従来のCVTの機構は、伝達部品の長寿命化を図るために、構造設計や材料選定の際、トライボロジー分野における検討が必要であった。

(2) 従来のCVTの一つである(a)ベルト式CVTは、入出力軸にベルト用プーリーが取り付けられており、プーリーの両側二枚の円錐板の対向幅が変更できるようになっている。これらのプーリーの間にベルトがはめられた状態で、プーリーの両側のテーパ形状の円錐版が軸方向にスライドし、対向距離が変化する。これによって、ベルトとプーリーの接触位置が変化するため、入力側と出力側の双方で、プーリーの実行径が変化して、入出力軸の回転数比が決められる。従来のもう一つのCVTである(b)トロイダルCVTは、入力ディスクと出力ディスクの間にパワーローラーが強い圧縮力で挟み込まれており、パワーローラーの回転軸を傾斜させることによって、パワーローラーと入出力ディスクの接触位置が変更されて、パワーローラーと接する入出力双方の実行径の比が変化し、これが変速比となる。

(3) 従来のCVTと多段変速機(多段オートマチック(AT))に対して、同程度の伝達力とトルクをもつ変速機で比較した場合、従来型のCVTは従来型の多段ATと比べて、トルクコンバータと遊星歯車変速機を使わない分、軽量化を図ることができ、変速比を連続的に変えられることで、走行中のあらゆる状況において、エンジン効率のよい回転域のみを変速比で設定でき、燃費が改善される。また、CVTは変速時に衝撃が少なく、エンジンや駆動系の負荷変動が少ないため、車の乗り心地が良い。これらの特長から、CVTは効率のよい変速機とされている。逆に、従来のCVTの短所は、ベルト式CVTやトロイダルCVTにおいて、摩擦力によって動力が伝達されるため、その摩擦力を発生させるために必要な外からの圧力によって、回転に負荷がかかり、動力損失が大きくなることである。金属ベルト式CVTの場合、走行時に金属が擦れる音が生じることがある。トロイダルCVTは、圧縮力を発生させるための油圧制御が複雑

であり、油圧機構を動かすためのエネルギー損失があり、耐久性に欠け、開発コストがかかる傾向にある。

(4) 他の研究者らによる、CVTに関する従来の研究例として、ベルト式CVTにおける力とトルクの解析をおこない、車両に搭載する実験を行った例、従来型の車両用動力伝達機構CVTの安定性を考慮した非線形制御法を構築した例、クラッチ付ハーフトロイダルCVTの制御機構の開発例、従来型のトロイダルCVTにおいて、アクチュエータを用いて、入出力ディスクをシフトさせ、入出力ボールジョイントと入出力ディスクの接触位置で変速比が決まる方式の球状CVTを提案した例、別の新しいしくみのCVTとして、単一リンク形CVTを開発した例、出力ギヤを中心に、ガイドローラーを回転移動させることにより、歯車ローラーが出力ギヤと噛み合う位置が連続的に変わることによって変速比が変化する機構の開発例、そして、五節リンクの中に、一本のフレキシブルリンクを連結リンクとする構造をもった従動的CVTを開発した例等がある。

## 2. 研究の目的

(1) 前述のCVTに関する従来技術や研究背景を踏まえ、諸特性を改善し、従来技術を凌駕する新しい機構を有するCVTを開発する。

(2) 具体的には、四節リンク機構を用いたリンク(Link)方式CVT(L-CVT)を新たな方式の機構として提案し、この機構の有効性を立証する。このL-CVTは、二つの四節リンク機構(てこクランク機構)を対称に配置し、てこの往復角運動を出力側の回転部材に伝えることにより、クランクを入力、回転部材を出力とする無段変速機である。クランク及び連結リンクの長さを連続的に変化させることにより、クランクの回転数に対し、てこの往復運動の動きが変わるので、無段階に変速比を変えることができる。てこの運動を回転部材に伝えるために、ラチェット機構やワンウェイクラッチ機構が用いられる。二つのが交互に一方向にのみ回転部材に動力を伝えることにより、回転部材が出力軸まわりに回転する。固定リンク部はベース本体と一体になっている。この機構は、従来のように摩擦伝動によらないので、騒音が少なく、耐久性があり、伝達効率が高くなると考えられる。

## 3. 研究の方法

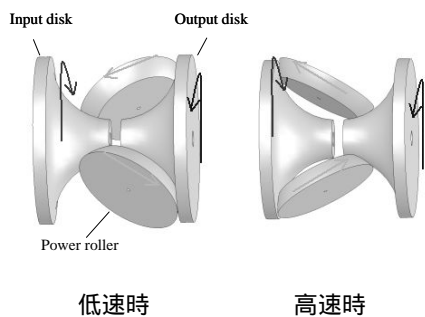
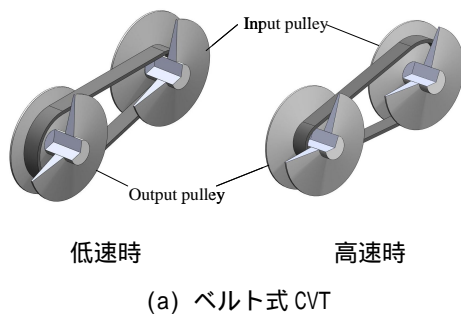
(1) 本プロジェクト(23年度~25年度)の研究方法の内容は、大きく分けて次の三項目~である。

従来のCVTは前述のように、(a)ベルト

式 CVTと(b) トロイダル CVT に分けられる。従来のベルト式 CVT とトロイダル CVT の簡略図をそれぞれ図1(a), (b) に示す。本研究で提案するCVT(L-CVT)は、図2 に示すように、二つの四節リンク機構(てこクランク機構)を対称に配置し、てこ  $c$  の往復角運動を出力側の回転部材  $Q$  に伝えることにより、クランク  $a$  を入力、回転部材  $Q$  を出力とする無段変速機である。本研究では、この機構とは全く異なり、申請時に製作中のL-CVT2(2号機)(図3)を改良して、評価する。ラチェット部の強度、バックラッシュ、耐久性を評価した後、ラチェットをワンウェイクラッチ  $S_c$  に変更する。そして、L-CVT2(2号機)のリンクの回転速度むら、伝達力、速度比を調査する。

L-CVTの原理として使われる四節リンク機構(図2)の幾何学、力学の理論を導出する。この理論に基づいて、平板カムのカム線図を設計する。この平板カムを搭載するためのL-CVT3(3号機)(図4)を検討する。(一組の対称的な平板カムはハートの様な形状で示される(図4(a), (b)))。3DCAD上で機構シミュレーションをおこない、このシミュレーション結果と理論値(カム線図)と実験データ(エンコーダ値)を比較する。

L-CVTが無段変速機能をもつための幾何学、力学の理論を導出する。入出力軸の回転速度関係から、無段変速機能をもつための立体カム(図5(a))を設計し、立体カムを搭載した一組の四節リンク機構の基礎試験機 L-CVT4(4号機)を検討する(図5(b))。将来的に、複数の四節リンク機構を搭載したL-CVTを検討する。



(a) ベルト式 CVT  
(b) トロイダル CVT  
図 1 従来型 CVT

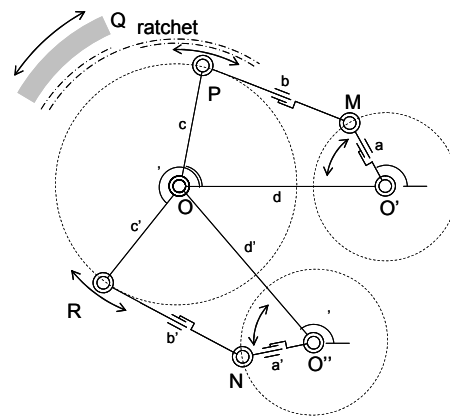


図 2 リンク式 CVT (L-CVT) の原理

(2) 具体的な実施項目は、次の ~ である。L-CVT2(2号機)の改良と評価、L-CVT3(3号機)の仕様検討と設計製作と評価、L-CVT4(4号機)の仕様検討と基礎試験機の設計。各項目 ~ における各機構について、報告書を作成し論文を執筆する。

申請前に開発したL-CVT1(1号機)もL-CVT2(2号機)(図3)と同様に、本申請の基本原則(図2)に基づいており、直動機構をもつクランク  $a$ ,  $a'$  と連結リンク  $b$ ,  $b'$  の伸縮によって、クランクの回転角速度と、てこ  $c$ ,  $c'$  の角速度関係を調整できる無段変速機である。連結リンクの先端部にはラチェットのみが取り付けられていて、出力となる大径内歯車とかみ合っている構造であった。本申請では、ラチェットはバックラッシュが大きいので、ゼロ・バックラッシュのワンウェイクラッチに変更する(図3, L-CVT2(2号機)参照)。クランクと連結リンクは、スライドラールにラックギアとモータが取り付けられた構造であり、モータ駆動で伸縮される。モータの電力供給には回転電極を使用する。これは、クランクが回転しても、リード線がねじれることなく、連結リンク上のモータに電力を外部から供給することができるからである。L-CVT2(2号機)の動作を確認し、リンク、関節等の機能部品の強度、及び耐久性等の基礎

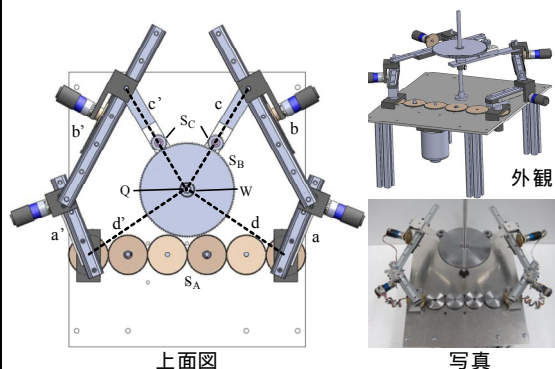
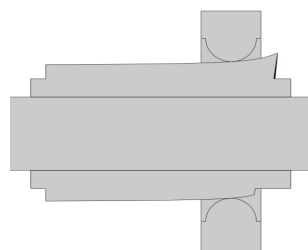


図 3 L-CVT2(2号機)(図中  $S_c$ :ワンウェイクラッチ)

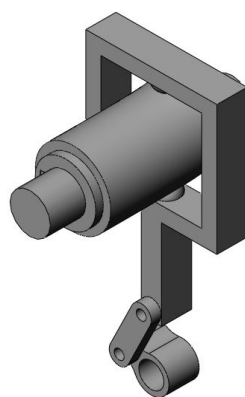
評価をする。

四節リンク機構（図2）内にて  $c$ ,  $c'$  に対し、一定速度の往復角運動のシミュレーションをおこなう。一定の変速比を得るためには、入出力軸の回転数比を一定にしなければならないので、連結リンク  $b$ ,  $b'$  の長さは時間毎に変化する必要がある。つまり、一つの変速比に対し、連結リンクは、ある範囲内で伸縮幅をもつ。動作試験では、入力軸を等速で回転させたとき、出力軸としてこの等速性を確認する。そして、シミュレーションと実験結果を比較する。3DCADの機構解析機能を用い、L-CVT2（図3）の構造と動作の様子を確認し、実験機の動作と比較する。つぎに、モータを使わずに、歯車を用いて連結リンク  $b$ ,  $b'$ （図3）を機械的に伸縮させるため、L-CVT3(3号機)に平板カムを搭載する(図4)。

L-CVT3(3号機)に搭載する平面カムによって、入出力比が一定になる機構が実現できる。今度は、変速比を可変にするため、カムの回転軸方向に沿ったカム断面におけるカム線図が変化するように立体カムを設計する(図5(a))。ただし、立体カムの形状は閉曲面で構成されなければならない。つぎに、立体カムを搭載した一組の四節リンク機構からなるL-CVT4(4号機)基礎試験機を設計する(図5(b))。連結リンクの伸縮が機械的におこなわれるかどうかを3DCADの機構解析機能で確かめる。クランクを回転させながら、立体カムの回転軸方向にカム



(a) 立体カムの断面図



(b) L-CVT4(4号機)基礎試験機

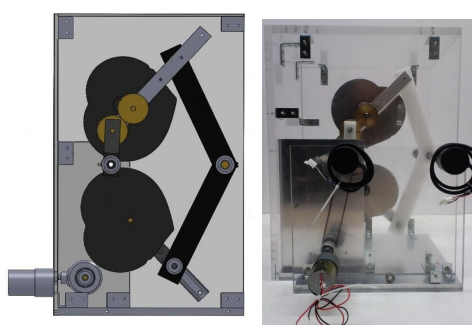
図5 立体カムを用いたL-CVT4(4号機)

スライド機構を動作させて、カムローラーと接触した四節リンク機構の連結リンクがスムーズに伸縮できれば、無段変速が実現できる。連結リンクを伸縮させる他の方法としては、新たに連結リンクに回転軸を設け、さらに一リンクを追加して五節リンク機構にする方法もあるので検討する。

#### 4. 研究成果

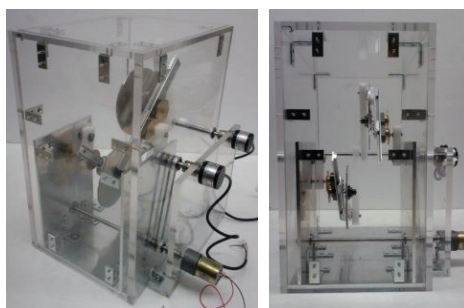
四節リンク、ワンウェイクラッチ、立体カムによる複合伝達機構型無段変速機（L-CVT）は、従来の手法とは異なり、摩擦伝達機構を用いないことを特徴とする無段変速機である。本研究で開発した L-CVT2~4 について、計三年間の研究開発における成果は、大きく分けて三つあり、次の (1)~(3) である。

(1) 23年度に開発したL-CVT2(2号機)は、四節リンク機構とワンウェイクラッチ機構を用いた無段変速機であり、二組の四節リンクを対称に配置しており、摩擦伝動を陽に用いない伝達機構であった。ソフトウェア Octave を用いたシミュレーションにより、四節リンク機構がてこクランク機構として各リンクの長さ関係が成立することがわかった。てこの揺動の角度制御をおこなうための各リンク長さとの幾何学的条件を導き、数式表現が可能となった。連結リンク  $b$ ,  $b'$  の伸縮制御には DC モータを用いた。PC に



(a) 正面図

(b) 正面写真



(c) 実験機全体

(d) 側面

図4 L-CVT3(3号機)



I-O/A-D/D-A/カウンターの各種ボードを取り付け、モータドライバを用い、ソフトウェア C++でプログラミングをし、伸縮制御用モータの PWM 制御をおこなった。モータの回転検出にはエンコーダを用いた。そのエンコーダ値をフィードバックし、速度制御と PWM 制御を混合させた制御系を構成した。L-CVT2 の動作実験により、入力側のクランクと出力側にてこの等角速度運動が実現できており、変速比がほぼ一定になることが、取得したエンコーダ値のデータを解析してわかった。実機によって、一定の変速機として入出力の回転数比を制御できることを確認し、L-CVT の基本的な原理が成り立つことを理論と実験の双方により確認ができた。つぎに、入力軸側のクランクと出力軸側にてことを結ぶ連結リンクの長さを連続的に変化させるため、四節リンク機構の早戻り機構の運動を DC モータで等速度制御し、これによって、入力軸の回転数と出力軸の回転数の比を連続的に変化させることも可能となった。よって、無段変速が実現できることを証明した。

(2) 24 年度に開発した L-CVT3(3 号機)は、二つのでこクランク機構を「並列」に配置した機構をもつ。まず、前年度(23 年度)に開発した、二つのでこクランク機構を「対称」に配置した機構をもつ L-CVT2(2 号機)の連結リンクを伸縮するためのカム形状を解析した。この解析結果を基に、平板カムを設計し、この平板カムを搭載した平板カム搭載型 L-CVT3 を開発し検証をおこなった。L-CVT3 は、伝達効率が高く、なめらかなカムの形状により、磨耗や粉塵等による障害が発生しなかった。従来、カム線図の微分値が不連続になる点が存在していた。回転部材(出力歯車)への駆動の切替点(てこの往路と復路の切替点)の不連続性における解決策として、伝達機構であるワンウェイクラッチが、力が加わらない方向(空回りする方向)に、任意の速度に設定できるという特徴をもつ機構であることに気づき、この点に着目した。往路(もしくはワンウェイクラッチの駆動方向によっては「復路」になる)区間は、入力軸の等角速度に応じて、出力軸の等角速度制御が不要な区間となることを改めて理解した。前述の切替点(往路と復路の切替点、つまり、図 4(a)、ハート型カムの凸凹の部分の二か所)では、カム曲線の微分値が不連続になっていたが、それを回避するために、角速度指令値を任意に設定できるようになった。すなわち、切替のタイミングによっては、てこの角度応答の微分値(角速度)を連続に設定できる可能性が新たに判明した。

もう一つ、新たに理解したことがあった。それは、複数のでこクランク機構を並列に配置した機構を有する L-CVT に対し、多くの組数のでこクランク機構を組み合わせることで、准無段変速が可能であるということである。つまり、連結リンクの伸縮制御を

しなくても、速度むらが少しだけある状態で無段変速ができることである。さらに、クランクの代わりに、てこに対して伸縮制御をおこなう場合の方式において開発をおこなった結果、すべり等による伝達ロスがないため、伝達効率が高くなった。しかし、てこの伸縮のみの場合には、てこの角加速度が完全にゼロにはならず、多少角速度が変動し、脈動現象が若干生じた。

(3) 25 年度は、L-CVT3(3 号機)に変速比を変化させる機構を追加して、立体カム搭載型 L-CVT4(4 号機)を設計した。四節リンク機構の理論解析、数値シミュレーション、機構シミュレーション、及び無段変速の理論を再検討した。立体カムを搭載した L-CVT4 は、クランク(入力軸)に加わる回転力(トルク)の動力の一部が歯車の機械要素を介して伝わり、立体カムが回転する機構であった。カムのスライド機構によって、立体カムの回転軸方向へスライド動作をさせることで、入力軸となるクランクの回転力が立体カムを回転させ、立体カムと接触した連結リンクが伸縮し、本来の四節リンク機構の早戻り運動が速度制御されて、入力軸の回転数と出力軸の回転数の比を連続的に変化させることが 3DCAD の機構シミュレーションで確認できた。この結果から、連結リンクを伸縮させるための別のモータを設けなくても、無段変速が実現できることがソフトウェア上で実証された。この L-CVT4 は、入出力軸が高速回転のときのリンク伸縮制御に対しては不向きであると推測しているが、この場合、別途、多段ギヤを設けて、一旦減速させて、無段変速を低速域でおこない、変速の出力側で、再び増速させて回転数をもとに戻して無段変速する方法があることを見出した。

## 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, 佐藤悠貴, 村上彰勲, 大島修三, 四節リンクとワンウェイクラッチを用いた無段変速機の開発, 精密工学会誌, Vol. 79, No. 10, pp. 943-949, 2013, ISSN 0912-0289, (査読有)
- (2) Toshihiro Yukawa, Taisuke Takahashi, Yuki Satoh and Shuzo Ohshima, Combined-Type Continuous Variable Transmission with Quadric Crank Chains and One-Way Clutches, J. of Computer Technology and Application, Vol. 3, No. 10, pp. 649-656, 2012, ISSN 1934-7340, (査読有)
- (3) Toshihiro Yukawa, Continuously

variable transmission using quadric crank chains and Ratchets, Journal of Energy and Power Engineering (JEPE), Vol. 6, No. 4, pp. 645-655, 2012, ISSN 1934-8975, (査読有)

(4) Toshihiro Yukawa, Taisuke Takahashi, Yuki Satoh and Shuzo Ohshima, Development of Combined-Type Continuous Variable Transmission with Quadric Crank Chains and One-Way Clutches, The SICE Annual Conference 2012, ThB05-06, pp. 2151-2156, 2012, ISBN: 978-4-907764-40-1, (査読有)

(5) Toshihiro Yukawa, Continuously variable transmission using quadric crank chains and ratchets, Proc. of Int. Conf. on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11), 2011, 264, (査読有)

〔学会発表〕(計 18 件)

(1) 佐藤悠貴, 村上彰勸, 湯川俊浩, 江刺家哲朗, 金子昌晴, 大島修三, 四節リンク機構を用いた無段変速機の開発 (GA を用いたリンク長の最適化), 計測自動制御学会東北支部第 285 回研究集会, No. 285-6, 2013 年 12 月 07 日, 東北学院大学工学部 (宮城県), (査読無)

(2) Toshihiro Yukawa, Akinori MURAKAMI and Yuki SATOH, Motion Analysis of Lever-Crank Mechanism and Design of Grooved Cam using Envelope Curve in the Combined-Type CVT, Proc. Of the 2013 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, Tukuba, Japan, 2A1-P21, 2013 年 05 月 22 日 ~ 25 日, つくば国際会議場 (茨城県), (査読無)

(3) 高橋泰輔, 村上彰勸, 佐藤悠貴, 湯川俊浩, 並列四節リンク機構を用いた無段変速機の開発, 日本機械学会東北支部 第 48 期総会・講演会, 2013 年 03 月 15 日 ~ 2013 年 03 月 15 日, 東北大学工学部 (宮城県), (査読無)

(4) 佐藤悠貴, 高橋泰輔, 湯川俊浩, 四節リンク機構を用いた無段変速機の運動解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '12, 2012 年 05 月 26 日 ~ 2012 年 05 月 29 日, アクトシティ浜松 (静岡県), (査読無)

(5) 佐藤悠貴, 高橋泰輔, 湯川俊浩, 無段変速機用四節リンク機構の運動解析, 計測自動制御学会東北支部 第 271 回研究集会,

2012.3.9, 東北大学流体科学研究所 (宮城県), (査読無)

(6) 高橋泰輔, 湯川俊浩, アクティブ伸縮リンクを搭載した無段変速機のシミュレーションと制御実験, 日本機械学会東北支部第 47 期秋季講演会, 2011.9.22, 山形大学工学部 (山形県), (査読無)

(7) Toshihiro Yukawa, Taisuke Takahashi, Linkage-Type Continuously Variable Transmission Using a Plate Cam, 2011 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2011.5.27, Okayama Convention Center (Okayama), (査読無)

〔図書〕(計 1 件)

(1) Toshihiro Yukawa, Taisuke Takahashi and Shuzo Ohshima, Energy Book Series - Volume # 1: "Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments" A. Mendez-Vilas (Ed.), FORMATEX, "Combined-Type Continuous Variable Transmission with Quadric Crank Chains and One-Way Clutches for Wind Power Generation", chapter pp. 536-544, 2013, ISBN-13:978-84-939843-7-3, (査読有)

〔その他〕

ホームページ等

1) 岩手大学 研究者総覧,

<http://univdb.iwate-u.ac.jp/index.php>

2) 岩手大学工学部教員データブック,  
[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) Bio Robotics Lab,

<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・工学部・准教授

研究者番号: 10347205