

IVTバリエータの動的モデルの開発

蓮田康彦 ロバート・フックス

Development of IVT Variator Dynamic Modeling

Y. HASUDA R. FUCHS

IVT (Infinitely Variable Transmission) continuously performs a vehicle forward, backward and geared neutral without any starting device by the torque split method. A torque controlled full-toroidal variator, transmitting power by traction drive, is the key component of the IVT that promises quick response and stable behavior of the entire driveline.

Koyo, variator parts supplier, presents in this paper its own variator dynamic model, simulation, an example of parametric study and the description of the contact point trajectory.

Key words : *infinitely variable transmission, geared neutral, torque control, full-toroidal*

1. はじめに

近年、環境保護や省エネルギーのため、自動車には低燃費化が求められている。ベルト方式やトラクションドライブ方式が実現されているCVT (Continuously Variable Transmission) は、無段変速によりATに比べ燃費を向上させるが、ロスの大いトルクコンバータなどの発進デバイスが不可欠であるため改善に限界があるとされている。

これに対して、遊星ギヤを利用したトルクスプリット方式と、フルトロイダル型無段変速機(以下バリエータと称す)を組み合わせることで、この発進デバイスの問題を克服したIVT (Infinitely Variable Transmission) の実用化が、英国トロトラック社を中心に進められている。IVT搭載車両では、CAFE(The US. Corporate Averaged Fuel Economy)に基づいた5速マニュアル車との比較において、平均13%(都市10%、高速道路18%)の燃費改善が可能であることが確認されている¹⁾。

バリエータは、無段変速の動力伝達機能を有し、IVTの要とも言える重要なユニットである。動力の伝達は、ディスクとローラ接触部における最大面圧1~3.5GPaに達する油膜のせん断抵抗が生むトラクション力によって行われる。したがって、バリエータの開発においては、この接触部に関する軸受技術の応用が不可欠であるため、当社でも材料開発および油膜のEHL解析などを実施してすでに成果を挙げている²⁾。

一方、IVTはトルク制御であり、バリエータの変速はトラクション力を利用した自律的な機構による。したがって、さまざまな走行状態における接触部の状態(応力、油膜など)の変化については、過渡応答の厳密なシミュレーションによる調査が必要とされる。

本報では、以上のような背景に基づいて当社にて独自に実施してきたバリエータの動的モデルの開発とシミュレーションの結果について紹介する。

2. IVTの概要

2.1 IVTの基本構成

IVTは、非常に広範囲な変速レンジで無段変速が可能な自動変速機である。IVTのドライブラインは図1の構成例に示されるように、トルクスプリットギヤ(G)、バリエータ(V)、L/Hクラッチ(L、H)、遊星歯車(E)から成る。

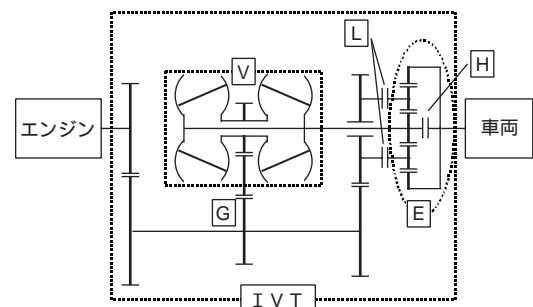


図1 IVTの構成例

Example of IVT configuration

2.2 フルトロイダルバリエータ

IVTのバリエータは、図2に示されるようにダブルキャピティのフルトロイダル型である。トルクスプリットギヤより入力されたトルクは、入力ディスクから6個のローラを介して1対の出力ディスクへと伝達される。

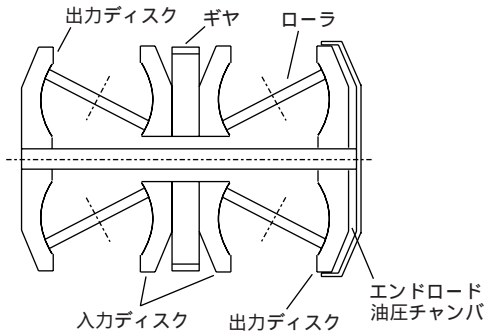


図2 フルトロイダルバリエータ
Full-toroidal variator

ディスクには、内蔵された油圧シリンダにより、ローラをクランプするためのエンドロードが与えられ、ディスクとローラの接触部を高面圧とし、EHL(弾性流体潤滑)状態でのトラクション油のせん断力による高効率の動力伝達が可能となっている。

また、ローラはトルクを伝達するトラクションによる反力を受けるため、それぞれのローラキャリアッジ端には油圧シリンダが設置され、ローラを支持する。

2.3 IVTの原理

IVTは搭載された2つのクラッチ(L, H)の切り替えにより、ローレージム、ハイレージムと呼ばれる2通りのモードを有する。ローレージムでは、LクラッチがON, HクラッチはOFFで、図3に示すようなドライブラインとなる。

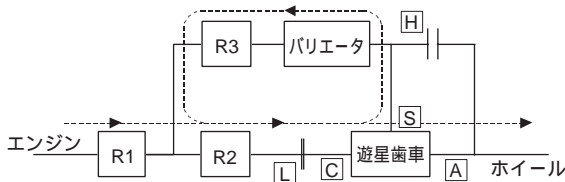


図3 ローレージム
Low regime

エンジンの動力はトルクスプリットギヤにより2経路に分けられ、一方はバリエータを介して遊星歯車のサンギヤ(S)に、他方はLクラッチからプラネタリギヤ(C)に伝達される。これらの動力は、遊星歯車のギヤ比に従って加算されてアニュラスギヤ(A)より出力される。(ただし実際

には、動力伝達方向は走行状態に依存し、例えば前進加速時には図3の矢印が示す通りであり、動力循環が存在する。)

ここで、ローレージムにおける遊星歯車の各歯車回転速度の関係は、

$$\omega_a = -\omega_s + (1 + \lambda)\omega_c \tag{1}$$

と表される。ここで、

- ω_a : アニュラスギヤ角速度
- ω_s : サンギヤ角速度
- ω_c : プラネタリギヤ角速度

式(1)の関係から、エンジン回転速度一定のまま、バリエータの変速比を適当に変えることで、前進 $\omega_a > 0$ から、ギヤードニュートラルとして知られる $\omega_a = 0$ の状態、さらに後退を示す $\omega_a < 0$ の状態までを連続的に実現できる。この機能がその名“Infinitely Variable Transmission”の由来であり、発進デバイスを必要としない理由である。

一方、ハイレージムでは、LクラッチがOFF, HクラッチはONで、図4のように遊星歯車はバイパスされる。これは高速前進用モードである。図5にはIVTの変速比 R_{IVT} (ファイナルギヤ、ディファレンシャルは含まない)とバリエータの変速比 R_v の関係を示す。レージムチェンジは、サン、プラネタリ、アニュラスの歯車がすべて同期する動作点Sで行われるため、クラッチ切り替え時のショックが回避されている。

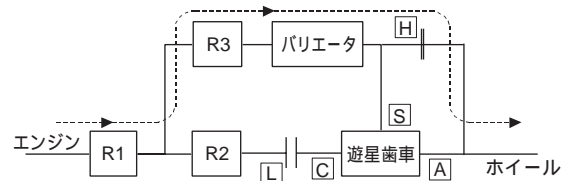


図4 ハイレージム
High regime

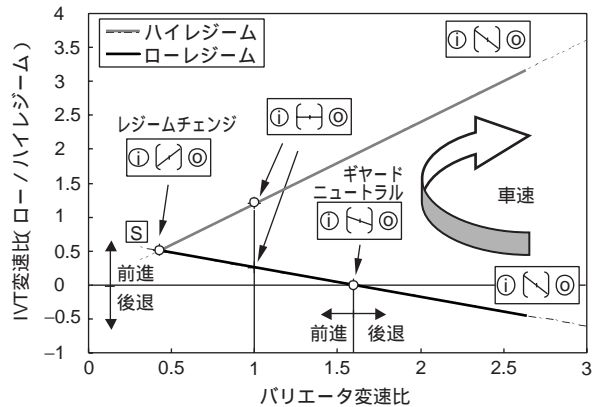


図5 IVT変速比
IVT speed ratio

なお、車両が完全に停止するニュートラルまたはパーキングでは、両クラッチはともに切り離される。この状態では、バリエータは回転を続けるが動力は伝達していない。

3. バリエータモデル

本項では、当社で実施のバリエータのモデリング方法について述べる。

3.1 トラクションドライブ

バリエータにおけるトルク伝達は、ディスクとローラに挟まれた薄い油膜のせん断力によって行われる。いわゆるトラクションドライブである。図6のような理想的な接触部におけるトラクション係数 μ は、押し付け力 F_n とトラクション力 F_t により、

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2)$$

また、すべり率は2物体の表面速度 V_i 、 V_o を用いて

$$\frac{\Delta V}{V_e} = \frac{\lambda(V_i - V_o)}{V_i + V_o} \quad (3)$$

と定義される。

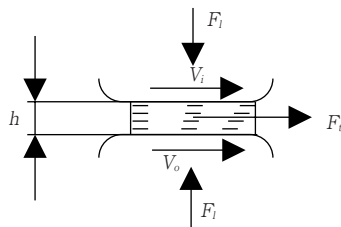


図6 トラクション・ドライブ
Traction drive

このときの、典型的なトラクションカーブは図7のようになる。

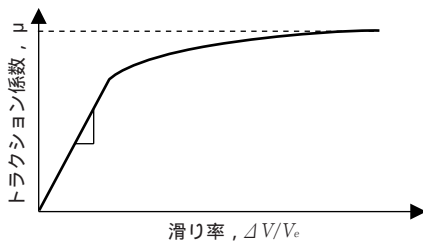


図7 トラクションカーブ
Traction curve

本モデルでは、Tevaarwerk-Johnsonモデル³⁾を基本とし、単純化のためにスピンの影響を無視してトラクションの計算を行った。このとき、せ

ん断応力の方向は、弾性領域、塑性領域に関わらずせん断ひずみベクトルと同一方向となる。したがって、接触部におけるディスクとローラ間の滑りの方向はトラクション力の方向と一致する。

3.2 ローラの自由度

ローラは図8のように、ローラキャリッジにより支持され、両利きの油圧シリンダにより駆動される。ローラの挙動は厳密には、シャフト周りの自転運動、回転軸のチルト、油圧シリンダによる並進運動、球面軸受によるローラキャリッジの倒れ、キャスト角の変化を含む。しかし本モデルでは単純化のため、以下の仮定に基づいた3自由度モデルを採用した。

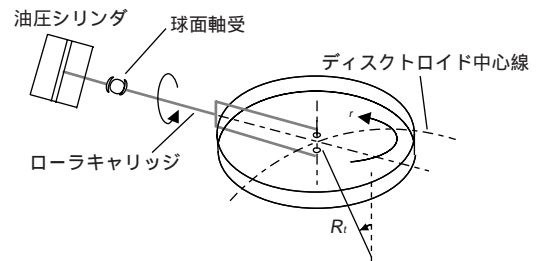


図8 ローラの自由度
Degree of freedom of roller

- 1) ディスクは軸方向に移動しない。したがって、ローラ中心は常にディスクのトロイド中心線上を移動する。
- 2) ローラ・キャリッジ端の球面軸受は、ローラ中心から十分離れており、これを基点としたキャリッジの倒れ、キャスト角の変化は無視できる。

このとき3つの自由度は、ローラの自転角速度 ω_r 、ローラ・キャリッジ周りのチルト角 θ 、ローラ中心の移動角 ϕ の3変数に対応する。

3.3 トルク制御変速原理

図9は、定常状態においてローラに作用する力の釣り合いを示す単純化された模式図である。この時、トラクション力 F_{tr} と油圧シリンダのピストンの押し付け力(リアクション力) F_p の関係は、キャスト角 α を用いて

$$F_{tr} = \frac{F_p \cdot \cos \alpha}{2} \quad (4)$$

と表される。ディスクとローラの接触部に発生するトラクション力に対して、油圧シリンダの押し付け力がこれと釣り合っている。バリエータの入出力ディスクトルクは、トラクション力と変速比(接触半径)によって定まるので、式(4)から、リア

クッション油圧で入出力ディスクトルクを制御できる。

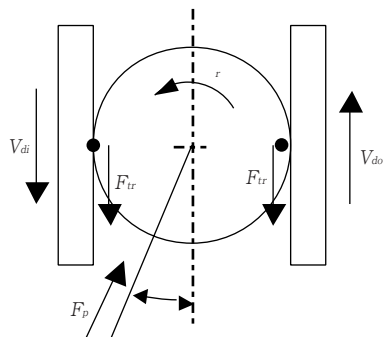


図9 バリエータ定常状態における力の釣り合い
Balance of forces in steady state

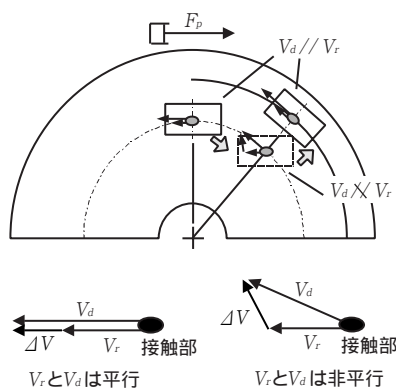


図10 接触部におけるディスクとローラの表面速度
Disk and roller surface speeds on the contact point

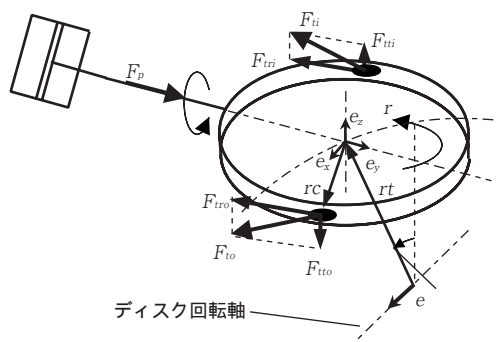


図11 ローラに作用する力
Loading on roller

一方、リアクション油圧の変化、あるいは入出力ディスク回転速度の変化に伴うトラクション F_{tr} の変化によって、式(4)の均衡が破れると図10のように接触部におけるディスク、ローラの表面速度ベクトル V_d, V_r は非平行となる。トラクション力 F_{ti}, F_{to} の方向は表面速度ベクトルの差 $\Delta V = V_d - V_r$ と一致するので、図11のように、ローラ表面速度ベクトル V_r に平行なトラクション力成分 F_{tri}, F_{tro} だけでなく、これに垂直なトラクション力成分 F_{tti}, F_{tto} が発生する。このためローラ

自転軸はチルトするが、キャスト角の効果により、ローラ自転軸がディスク回転軸と交差する点で、ディスク、ローラの表面速度ベクトル V_d, V_r は再び平行となり、ローラは安定する。

このように、IVTバリエータでは式(4)の関係によって入出力ディスクトルクが制御され、変速はディスクローラ間の速度差によって生じるトラクション力成分 F_{tti}, F_{tto} により自率的に行われるのである。

過渡応答におけるローラの挙動を支配する運動方程式は、

$$\left. \begin{aligned} I \frac{d^2}{dt^2} &= r_t \times (F_{ti} + F_{to} + F_p) \cdot e \\ I_y \frac{d^2}{dt^2} &= r_c \times (F_{ti} - F_{to}) \cdot e_y \\ I_z \frac{d^2}{dt^2} &= r_c \times (F_{ti} - F_{to}) \cdot e_z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

と表される。ここで e, e_y, e_z は回転軸方向の単位ベクトル、 I, I_y, I_z はローラのイナーシャ、また、 r_t, r_c はローラ中心と接触部の位置ベクトルである。第1式はローラ中心の移動、第2式はローラ自転軸のチルト、第3式はローラの自転を表している。

3.4 Simulinkによるバリエータモデル

バリエータモデルは図12に示されるように、

- 1) ディスクとローラの接触部における速度解析
- 2) トラクション力の計算
- 3) ローラの運動方程式の解法

の3つのパートにより成る。初期条件を与え、1) ~ 3) を繰り返すことで、ローラの挙動が計算される。シミュレーションにおいては、MathWorks社のMatlab / Simulinkで計算を行った。Simulinkは、モデルをブロック線図により作成できるが、ここではモデルの記述の煩雑さを避けるために、カスタムブロックをプログラム形式で作成できるS-Functionブロックを用いてバリエータモデルを作成した。

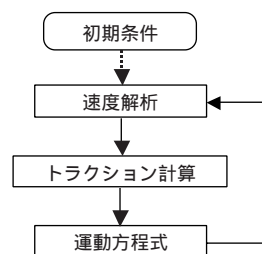


図12 バリエータモデルのフロー
Flow of variator model

図13にバリエータS-Functionモデルのフローを示す。モデルの入力は、バリエータ変速の直接要因であるエンドロード、リアクション圧力、および入出力ディスク回転速度であり、これにより計算される結果は、入出力トルク、およびローラ中心の移動である。(ローラのチルトや自転、および変速比は、バリエータモデルの内部変数として扱われる。)

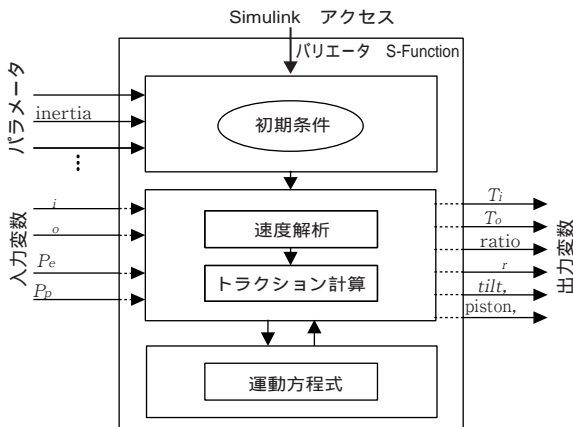


図13 バリエータ S-Function
Variator S-Function

4. シミュレーション結果

前節のバリエータモデルを用いたシミュレーションの結果について、以下に述べる。

4.1 入出力ディスク回転速度の変化に対する応答

図14に入出力ディスク回転速度を100~200rad/s(変速比1:1~2:1)にステップ状に変化させた時の、入出力ディスクトルク T_i , T_o 、ローラ中心移動角、チルト角の応答を示す。いずれの応答も2次遅れ系の特徴を示し、立ち上がり時間は0.02sと高速で、これはローラの約1/2回転に相当する。また、整定時間は約0.2sである。この結果から、入力ディスク回転速度の急激な変化に対しても、バリエータは高速な応答性と安定性を有するといえる。また、この結果はトヨタトラック社によるシミュレーション結果とよく一致することを確認している。

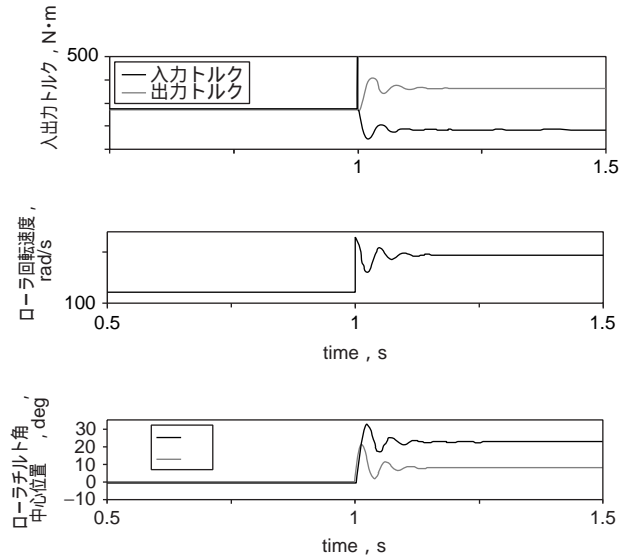


図14 ステップ応答(入力ディスク回転速度100~200rad/s)

Step response (input disk speed 100-200rad/s)

4.2 リアクション圧力の変化に対する応答

図15に、ディスク回転速度を一定(変速比1:1)にして、リアクション圧力を2.5~3MPaにステップ状に変化させた時の応答を示す。ここでも、ローラ中心位置とチルト角の応答は、振幅は微小だが4.1の結果と同様である。

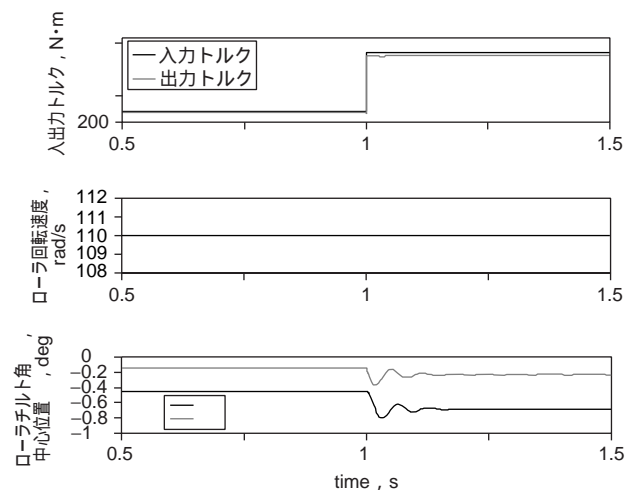


図15 ステップ応答(リアクション圧力2.5~3.0MPa)

Step response (reaction pressure 2.5-3MPa)

一方、入出力ディスクトルクは、ほぼステップ状の立ち上がりを示している。このことは、リアクション圧力の変化により式(4)の均衡が崩れ、ローラ中心の移動により接触部の滑りおよびトラクション力が変化して、入出力ディスクトルクが立ち上がるという一連の過程が、瞬時に行われることを意味する。これはトラクションドライブの高速応答性によるもので、リアクション圧力の調整

によって、入出力ディスクトルクを高速に制御できることがわかる。

4.3 接触部の軌跡

4.1のシミュレーションにおける、 θ の変化を図16のようにプロットした。ただし、最終値が0となるようにオフセットしてある。 θ と ϕ の軌跡が時間とともに一点に収束していく様子が確認できる。このことは、 θ と ϕ によって定まるディスクとローラの接触部の軌跡が、同様に螺旋を描いて安定点に収束することを示唆している。

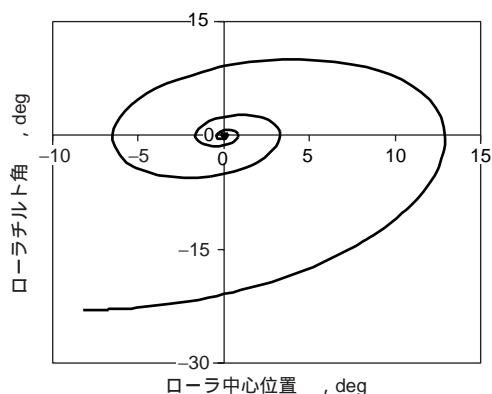


図16 接触部の軌跡
Trajectory of the contact point

4.4 キャスタ角の過渡応答への影響

本モデルを用いて、キャスタ角 についてのパラメトリックスタディを行った結果を図17に示す。45°までは、キャスタ角が大きいほど整定時間は短くなることがわかる。現在のバリエータデザインでは、構造の制約からキャスタ角は約20°となっている。

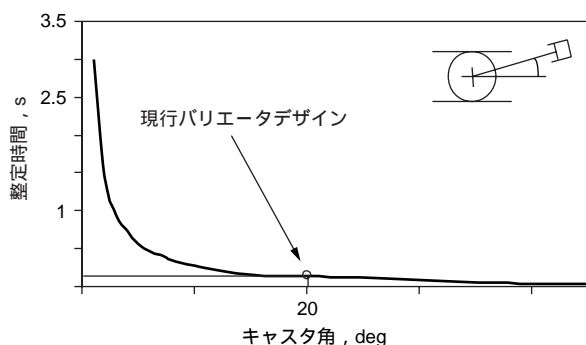


図17 パラメトリックスタディ
Parametric study

5. おわりに

トヨタトラック社を中心に開発を進めているIVTフルトロイダルバリエータに関して、当社で行ったモデリングとシミュレーションについて論じ

た。以下に要旨をまとめる。

- 1) トラクションドライブを含んだダイナミックなバリエータモデルを、SimulinkのS-Functionブロックとして作成した。
- 2) 本モデルを用いたシミュレーションの結果、入出力ディスク回転速度のステップ状変化(100~200rad/s)に対するバリエータの応答性について、立ち上がり時間0.02s、整定時間0.2sが示され、バリエータの高速応答性と安定性が確認された。
- 3) リアクション圧力のステップ状変化(2.5~3.0MPa)に対しては、入出力ディスクは遅れの無視できる立ち上がりを示し、トルク制御における高速応答性が示唆された。
- 4) ディスクとローラ接触部の軌跡が、螺旋状に一点に収束する様子が示された。
- 5) バリエータの応答性がキャスト角に依存することが示された。

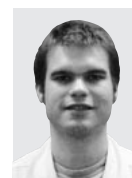
参考文献

- 1) Smith, M.J., Hawley, M.D.: Start Again! Engine and Vehicle Designers Set Free by a Quiet Revolution in Transmissions, AUTOTECH '93 (1993).
- 2) Ono, Y., Goto, M., Yamashita, R., Hasuda, Y., Yasuhara, S.: The Durability and Reliability of Variator for a Dual-cavity Full-toroidal CVT, SAE paper No. 00PC-2 (1998).
- 3) Johnson, K.L., Tevaarwerk, J.L.: The Influence of Fluid Rheology on the Performance of Traction Drives, Transactions of the A.S.M.E., J. Lub. Tech., vol. 101 (1979) 266.

筆者



蓮田康彦*
Y. HASUDA



ロバート・フックス*
R. FUCHS

* 総合技術研究所 システム技術研究所
機械システム研究部