

フルトロイダル型無段変速機(I V T)バリエータの伝達効率・伝達容量の解析

Transmission Efficiency and Power Capacity Analysis of Infinitely Variable Transmission Variator

美佐田泰治 Y. MISADA 大野誉洋 Y. OONO

In accordance with recent movement of increased concern to environmental problems, both reduction of exhaust gas emission and fuel efficiency improvement in automobiles have become subjects of pressing needs. So, infinitely variable transmission (IVT) that can efficiently control an engine have been accepted to the market. In order to cope with recent needs for higher torque and higher efficiency, it is necessary to estimate the efficiency and the maximum power capacity of the full troidal variator. Transmission efficiency and maximum transmission capacity can be generally represented by dimensionless parameters in the traction analysis using an elastic plasticity fluid model. In this report, an analysis method for IVT traction using an elastic plasticity fluid model is introduced.

Key Words: *infinitely variable transmission, full troidal variator, efficiency, power capacity*

1. はじめに

近年の環境問題に対する意識の向上とともに、自動車分野でも排ガス低減および、燃費向上が急務となっている。そこで、従来の有段変速機に比べてエンジンを効率良く制御可能な無段変速機(ベルト式、トラクションドライブ式)が実用化され市場に受け入れられてきている¹⁾。

こうした状況の中、当社ではトラクションドライブ式無段変速機の1つであるフルトロイダル型無段変速機(Infinitely Variable Transmission, 以下IVTと称す)のバリエータ部(ディスクとローラ)の開発を行っている²⁾。近年の更なる変速機の高トルク化、高効率化の要求に対応してIVTの最も重要な性能の1つである伝達効率と最大伝達容量を精度良く予測する必要がある。

これまで当社では、バリエータ部に非ニュートン流体モデルを用いたEHL解析を行い³⁾成果を上げているが、数値計算の安定化と高速化などの課題がある。その為バリエータの設計においては弾塑性流体モデルを用いたトラクション解析⁴⁾を適用した伝達効率および最大伝達容量の計算が行われている。本報ではトラクション解析の手法を紹介し、IVTバリエータでの計算例を報告する。

2. IVTバリエータ

IVTバリエータとは、図1に示すような入力ディスク、出力ディスクおよびディスクにはさまれた6個のローラによって構成されている。ディ

スクとローラの接触部にはトラクションオイルによる油膜が介在する。オイルは高面圧(1 GPa以上)で固化すると共に、ディスクとローラ間に微小すべりを与えることでせん断力を発生させる。これに接触半径をかけたものがトルクとなってディスクに伝達される。バリエータ部の変速機構は、ディスクにはさまれたローラが連続的に傾くことにより滑らかな変速を可能にしている。当社では、図2に示すバリエータ部のディスクとローラの開発を行っている。



図1 IVTバリエータ
IVT variator

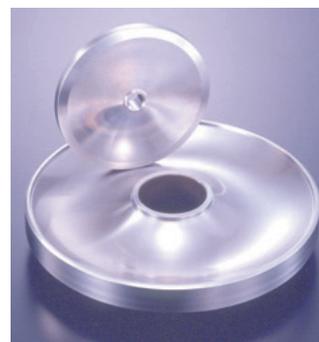


図2 ディスクとローラ
Disc and roller

3. 解析方法

3.1 解析モデル

トラクションドライブでのEHL解析において、トラクション油は1GPa程度の圧力で固化しニュートン流体として扱うことができないため、非ニュートン流体として解析される。さらに、トラクションオイルはせん断応力とひずみの関係が、低ひずみ側で弾性的、高ひずみ側で塑性的挙動を示すことから、弾塑性モデルとして扱われる。そこで本解析では、以下(1)の仮定(5)を採用した。

油膜せん断応力は接触楕円内のみに作用する(図3)。

接触楕円内の油膜厚さは一定。

接触部の油膜厚さとして、以下の中央油膜厚さ(Harmrock-Dowson式)を採用する(6)。

$$h_c = 2.69U^{0.67}G^{0.53}W^{-0.067}\{1 - 0.61e^{-0.73k}\}R_x$$

接触楕円内のせん断応力は弾塑性モデルを採用する。

接触楕円内のせん断応力を弾性域($\sqrt{s_x^2 + s_y^2} < s_c$)と塑性域($\sqrt{s_x^2 + s_y^2} = s_c$)に分けて表す。

(接触楕円内の速度分布を図4に示す。)

$$\begin{aligned} \text{弾性域: } s_x &= \frac{G}{2} \left[\frac{-X_s}{h_c} \right] \left[\frac{1}{Y} \right] \left[y^2 - b^2 \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right) \right] \\ s_y &= G \left[\frac{Y + X_s x}{h_c} \right] \left[\frac{1}{Y} \right] \left[y + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{塑性域: } s_x = \left(\frac{dc_x}{dt} \right) s_c \quad s_y = \left(\frac{dc_y}{dt} \right) s_c \quad (2)$$

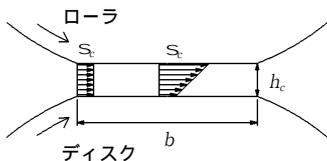


図3 IVT接触部
IVT contact area

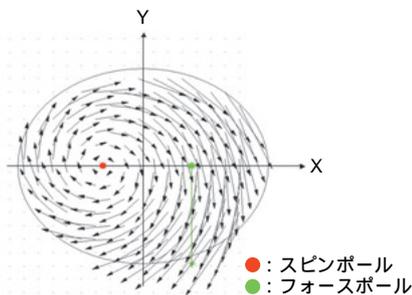


図4 接触楕円内の速度分布、スピンプール/フォースポールの関係

Velocity distribution at contact ellipse; relationship between spin pole and force pole

3.2 トラクション力とスピントルク

接触部のトラクション力とスピントルクは、せん断応力を弾性域と塑性域とに分割し接触楕円内で積分し算出する。しかし、塑性域では動力損失に伴う発熱により限界せん断応力 s_c の低下を考慮する必要があるため、塑性域での限界せん断応力には温度補正した値 s_{ct} を採用する(7)。また、IVTの定常状態では、転がり方向に直角方向にはトラクション力が発生しない為、 $F_x = 0$ となる。したがって、接触部のトラクション力とスピントルクを式(3)で表すことが出来る。

$$\begin{aligned} F_x &= \left[A s_x dA \right]_e + \left[\frac{S_{ct}}{S_c} \right] \left[A s_x dA \right]_p \\ F_y &= \left[A s_y dA \right]_e + \left[\frac{S_{ct}}{S_c} \right] \left[A s_y dA \right]_p \\ T &= \left[A (s_y x - s_x y) dA \right]_e + \left[\frac{S_{ct}}{S_c} \right] \left[A (s_y x - s_x y) dA \right]_p \end{aligned} \quad (3)$$

(e: 弾性域 p: 塑性域)

3.3 バリエータ伝達効率

接触部の伝達効率の算出には、平均縦弾性係数(\bar{G})と平均限界せん断応力(\bar{s})を用いた以下の無次元パラメータ(4)を用いる。

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{\bar{G}\sqrt{ab}}{sh_c} \frac{V}{V} & J_2 &= \frac{\bar{G}\sqrt{ab}}{sh_c} \frac{U}{U} & J_3 &= \frac{\bar{G}\sqrt{ab}}{sh_c} \frac{X_s \sqrt{ab}}{V} \\ J_4 &= \frac{F_y}{pab\bar{s}} & J_5 &= \frac{F_x}{pab\bar{s}} & J_6 &= \frac{T}{pab\bar{s}\sqrt{ab}} \\ J_7 &= J_1 J_4 + J_2 J_5 + J_3 J_6 \end{aligned} \quad (4)$$

バリエータには入力側と出力側の2つの接触部があり、一接触部の伝達効率は上記のパラメータを用いて以下のように表すことができる。(定常状態では横滑りが無い為、 $J_2, J_5 = 0$ である。)

$$\begin{aligned} g &= 1 - \frac{h_c \bar{s}}{G\sqrt{ab}} \left[\frac{J_1 J_4 + J_3 J_6}{J_4} \right] = 1 - \frac{X_s}{V} \left[\frac{V}{X_s} + \frac{T}{F_y} \right] \\ &= 1 - \frac{X_s}{V} (f_s + f_F) \end{aligned} \quad (5)$$

上式のように、接触部伝達効率は、スピンプール(f_s)、フォースポール(f_F) (図4)、スピン角速度、および表面速度で表すことができる。接触伝達効率を表す第2項は無次元スピンパラメータ $\frac{X_s \sqrt{ab}}{V}$ に比例していることが知られていることより、伝達効率は $\frac{X_s}{V} (f_s + f_F) = \frac{X_s \sqrt{ab}}{V} \times j$ と表すことができる。つまり、 $j = \frac{(f_s + f_F)}{\sqrt{ab}}$ は接触楕円内のスピンプール位置とフォースポール位置の和の割合を示している為、 j は一定値となる。また、

はトラクション係数によって異なることから、各トラクション係数(滑り率)における j を算出し、 j を算出しておけば容易に接触部伝達効率を得られる。また、

バリエータ伝達効率は入力側と出力側の伝達効率の積で容易に算出することができる。

3.4 最大伝達容量

トラクションドライブでは、トラクション油のせん断を介して動力を伝達している為、トラクション油の最大せん断力を超える力を伝達することが出来ない。つまり、使用するトラクション油のせん断力が最大の時 ($J_4 = 1$)、最大伝達容量 ($F_y V$) が得られる。また、バリエータの場合接触部が6箇所ある為、バリエータ最大伝達容量は得られた最大伝達容量の6倍となる。

4. 計算結果

上記の計算方法を用いてバリエータ入力側、バリエータ出力側、およびバリエータの伝達効率 (η) と伝達容量 (J_4) を数値計算した結果を図5に

示す。表1に計算条件を示す。

4.1 バリエータ伝達効率

図5からバリエータの伝達効率は無次元スピンパラメータに反比例していることがわかる。伝達効率の比例係数 (η_0) はトラクション係数によって変化するため、各トラクション係数での比例係数 (η_0) を把握することでバリエータ伝達効率は容易に計算することが出来る。更に、無次元スピンパラメータは接触楕円半径、表面速度とスピンパラメータで表すことができるため、バリエータ伝達効率はバリエータ形状、表面速度と変速比にも依存していることがわかる。

4.2 バリエータ最大伝達容量

バリエータの最大伝達容量は、図5(c)で $J_4 = 1$ の時のバリエータ入力動力であるため、バリエータの最大伝達容量は図から容易に求まる。ただし、最大伝達容量はトラクション係数によって変化するため、トラクション係数とバリエータ形状が決まると最大伝達容量は算出できることがわかる。

バリエータの伝達容量は、バリエータ形状と言うとトロイド径、ローラ径などによって変化するが、概ねローラ径により決まる(図6)。ローラ径が120mmのバリエータでは、350kWのエンジン入力に対応可能である。このバリエータが大型SUV(表2)に搭載され、十分な実車走行+性能を有することが確認されている⁸⁾。

表1 計算条件
Calculation conditions

トラクション係数	0.045
変速比	0.4, 1, 2.6
バリエータ入力動力, kW	10~42
入力回転速度, min^{-1}	2000
トラクションオイル	サントラック50
油温, °C	80

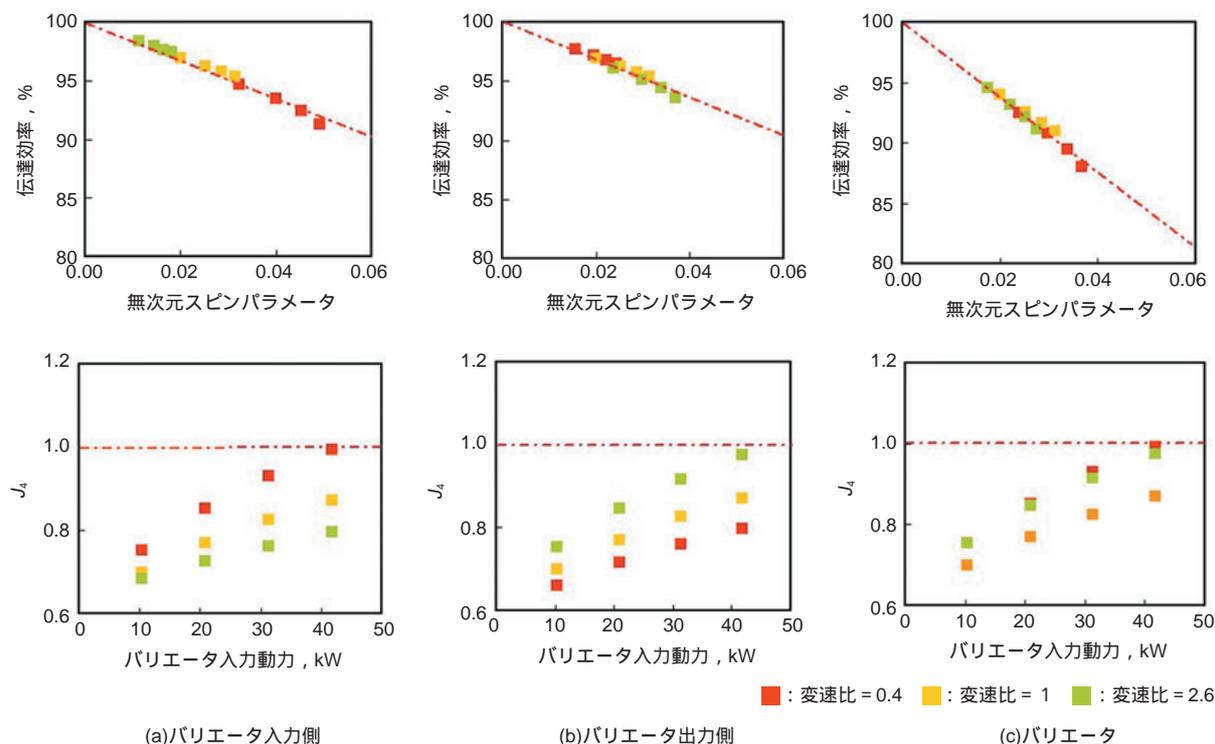


図5 各接触部の伝達効率・ J_4 の計算結果

Calculation results of transmission efficiency and J_4 at each contact area

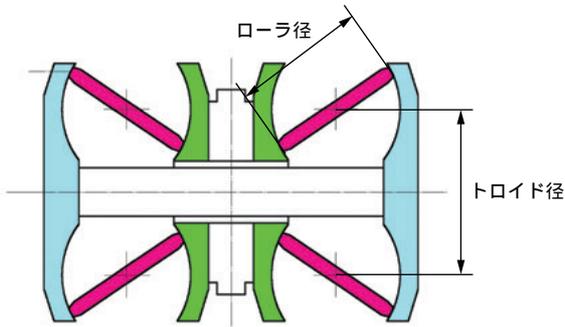


図6 バリエータ形状
Shape of variator

表2 IVT搭載SUV車仕様
Specification of IVT equipped SUV

車両	排気量, L	5.4
	エンジンタイプ	V 8 ガソリンエンジン
	エンジン最大出力/ トルク, kW/N・m	236 / 560
IVT	入力/出力トルク, N・m	560 / 2000
	レシオ幅	- 0.426 ~ - 2.236
	重量, kg	110

5. おわりに

弾塑性モデルを用いたIVTトラクション解析を行った場合のバリエータ伝達効率と最大伝達容量の計算方法について紹介した。今後、更に小型で高トルク、高効率なバリエータが求められており、これらの検討のために解析手法の高精度・高速化を計っていきたい。

記号の説明

- h_c : 中央油膜厚さ
- σ_x, σ_y : 接触部単位面積あたりに作用するX/Y方向のせん断応力
- $\sigma_c, \sigma_{ct}, \bar{\sigma}$: トラクション油の等温限界せん断応力/フラッシュ温度を考慮した限界せん断応力/フラッシュ温度を考慮した平均限界せん断応力
- a, b : 接触楕円半径
- G, \bar{G} : 油の縦弾性応力/平均縦弾性係数
- ω_s, ω_d : 接触部のスピン角速度/ディスク角速度
- \bar{V} : 接触部平均速度
- v_x, v_y, v_t : X方向/Y方向/合成ひずみ速度
- F_x, F_y, T : X方向トラクション力/Y方向トラクション力/横方向トラク

- シオン力/スピントルク
- U, U : 接触部X方向表面速度/接触部X方向滑り率
- V, V : 接触部Y方向表面速度/接触部Y方向滑り率
- J_1, J_2, J_3 : 無次元Y方向滑り/無次元X方向滑り/無次元スピン
- J_4, J_5, J_6 : 無次元Y方向トラクション/無次元X方向トラクション/無次元トルク
- J_7 : 無次元損失/接触部伝達効率
- s, F : スピンポール/フォースポール距離
- $\frac{x\sqrt{ab}}{V}$: 無次元スピンパラメータ

参考文献

- 1) 土屋勉男, 大鹿隆: 次世代自動車, 東洋経済新報社(2001)44.
- 2) 浅野憲治: Koyo Engineering Journal, no. 164 (2003) 14.
- 3) 山下龍城: Koyo Engineering Journal, no. 164 (2003) 30.
- 4) J. L. Tevaarwerk, K. L. Johnson: "The Influence of the fluid rheology on the performance of traction drive", Tractions of the ASME vol. 101 July (1979).
- 5) 村木正芳, 木村好次: 潤滑, vol. 28, no. 10 (1983), 753.
- 6) B. J. Hamrock, D. Dowson: "Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts", Tractions of the ASME April (1977).
- 7) 田中裕久: トロイダルCVT (2000) 18.
- 8) Matthew Burke, Graham Briffet他: SAE Technical Papers 2003-01-0971(2003).

筆者



美佐田泰治*
Y. MISADA



大野誉洋*
Y. OONO

* 総合技術研究所 機械システム研究部