

# ツェッパ形等速ジョイント (CVJ) のボール挙動解析

## Analysis of Ball Rotation Behavior of Rzeppa Type Constant Velocity Joint (CVJ)

中村武史 T. NAKAMURA 市川和之 K. ICHIKAWA 小林英樹 H. KOBAYASHI 鈴木 聡 S. SUZUKI  
篠田佳享 Y. SHINODA 森 純 A. MORI 木村佳郎 Y. KIMURA 杉山雄一郎 Y. SUGIYAMA

The Rzeppa type constant velocity joint is widely used in the tire side of driveshafts. Analyzing joint ball rotational behavior could contribute to durability and functional improvement. To analyze ball behavior, we applied a multibody dynamics approach including a stick slip friction force model. This model allows the calculation of ball angular velocity. We have established an experiment method which quantifies ball angular velocity through multipoint measuring and graphical analysis, enabling the accurate prediction of ball behavior.

**Key Words:** rzeppa constant velocity joint, ball behavior, multibody dynamics, graphical analysis

### 1. はじめに

ドライブシャフトは、自動車の進行方向の変更や路面の凹凸による変動に対応しつつ、エンジンなどからタイヤに動力を伝達する部品である(図1)。ツェッパ形等速ジョイント(CVJ)はドライブシャフトのタイヤ側に配置され、入力軸と出力軸に軸交差角(ジョイント角)をとり、等速に回転運動を伝達する動力伝達系の機械要素である。近年の車両燃費向上と軽量化に対応してCVJにも軽量、コンパクト化が要求されている。CVJのボール挙動を予測することは、さらなる軽量化と高機能化につながる可能性がある。

軽量化のためには高面圧下での長寿命化という課題解決が必要であるが、多部品にわたる動的な接触や摩擦などのトライボロジー問題を扱う難しさがああり、また、CVJのボール挙動はCVJ全体が回転しているため数値化して解析し、結果を実験検証することが困難であった。実験例として、「BJ ボール自転運動の長時間計測と理論的検討、日本機械学会論文集」の著者である長谷らは磁化させたボールを用いて自転運動を計測している<sup>1)</sup>。

本研究では実験において、高速度カメラを用いた多点同時計測により得られる回転行列にオイラーパラメータの概念を用いた演算処理によって、ボールの挙動を数値化する方法を確立した。

また、解析においては静摩擦力と動摩擦力を高度に再現可能なモデルを用いて、部品間で発生する接触力と摩擦力を模擬した解析モデルを構築した。

それにより、解析結果を実験で検証することが可能になり、ボール挙動を精度良く予測することが可能となった。以下にその内容を報告する。

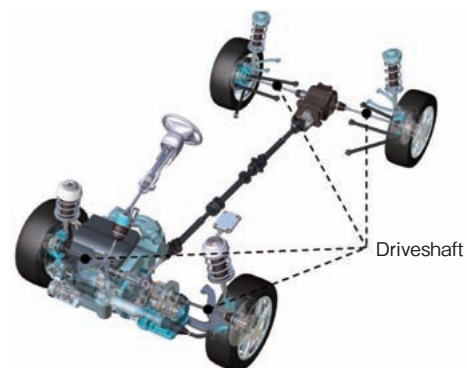


図1 ドライブシャフトの車両搭載位置  
Location of driveshaft on vehicle

### 2. 解析モデル

#### 2.1 CVJの構造

図2にCVJの構造を示す。一般にCVJは外輪、内輪、保持器および6個のボールで構成されている。内輪は保持器の内球面に保持され、保持器は外輪の内球面に保持されている。外輪、内輪は等間隔に6本のトラス状の溝を有し、6個のボールはそれぞれの溝内に保持され、ジョイント角や軸の回転運動に伴い、内輪、外輪と相対的に変位する。溝の断面はゴシックアーチ形状をしており、トルク伝達方向によりボールと接触する面が異なる。

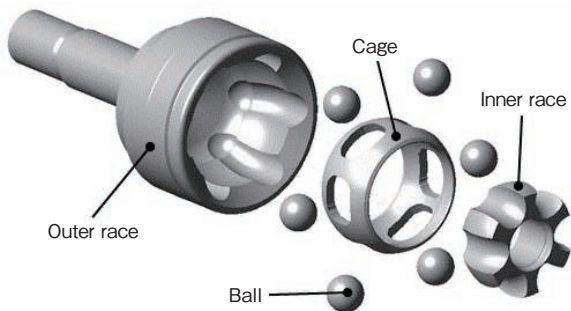


図2 CVJの構造  
Configuration of CVJ

2.2 解析手法の概要

ジョイント角をとったときのCVJの部品配置を図3に示す。

解析には汎用機構解析ソフトを用い、中間シャフト、CVJの各部品、角度をとっても等速回転を伝達できる対偶と、しゅう動の対偶でモデリングしたデファレンシャル側等速ジョイントおよび、試験機部分を剛体として、3次元の全体座標に配置する。

中間シャフトの一部には梁要素を用いる。次に、外輪ボール溝、内輪ボール溝、保持器窓とボール、外輪の内球面と保持器の外球面、保持器の内球面と内輪の外球面を接触要素のみで関連づける。外輪と外輪の軸、内輪と中間シャフトを連結し、外輪の軸、中間シャフトを試験機と連結する。試験機から回転、トルク、ジョイント角を与え、CVJの挙動を解析する。

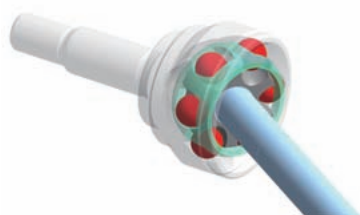


図3 ジョイント角を取ったときのCVJ部品の配置  
Arrangement of CVJ parts at a joint angle

2.3 接触のモデル

各々の面形状が重なりあった場合に、貫入量から導かれる接触力を双方の接触部に作用させる。以下で定義式を示す。接触力  $f_n$  を次式に示す貫入量  $\delta$  のべき乗指数とし、接触形状に合わせた指数  $m$ 、係数  $C$  を設定する。

$$f_n = C\delta^m \tag{1}$$

2.4 摩擦のモデル

2.4.1 摩擦の分類

CVJ内に発生する摩擦には、2物体の接触面の相対滑りのみを考慮し、ボール接触だ円の中心と端部におけるボール回転半径の差によって生じる差動滑り、スピン滑りなどは考慮しない。また、接触面に介在するグリースのせん断による摩擦も考慮しないものとする。

2.4.2 接触部の摩擦係数と摩擦力

すべり摩擦力  $f_t$  は、すべり摩擦係数に接触力を乗じた次式となる。

$$f_t = \mu f_n \tag{2}$$

従来の機構解析での接触部の摩擦力は図4の下側の線に示すように、速度ゼロの状態から相対速度がある場合に滑らかに摩擦力を作用させていたが、実際には、図5に示すように静摩擦と動摩擦が存在し、特に、すべり速度の遅いところで解析の前提条件との誤差が大きい。また摩擦係数は、面圧、すべり速度の影響も受ける。図5中のSNは基準面圧である。

したがって、静摩擦係数と動摩擦係数からなる前提を導入する。各摩擦パラメータは、ボールオンプレート試験での摩擦係数測定から数値を決定した。

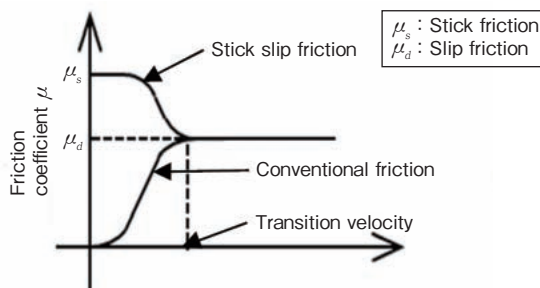


図4 摩擦係数  
Function of friction coefficient

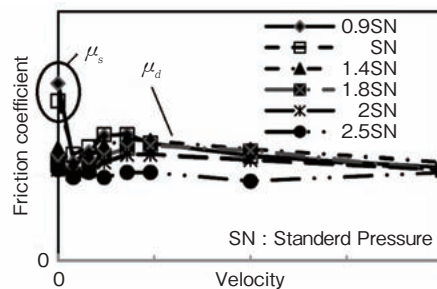


図5 実験による摩擦係数の測定結果  
Measurement results of friction coefficient from the experiment

### 2.4.3 静摩擦と動摩擦のシミュレーション例

ボールオンプレート簡易モデル (図6参照) に、静摩擦と動摩擦を織り込み摩擦力をシミュレーションした例を図7に示す。従来では再現できなかった、すべり速度の遅いところでの摩擦力の発生を確認した。

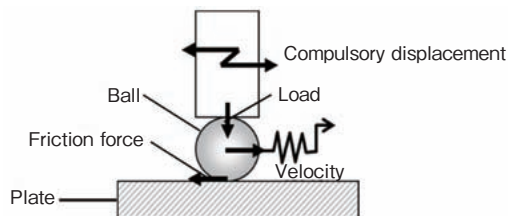


図6 ボールオンプレート簡易モデル  
Simple ball and plate model

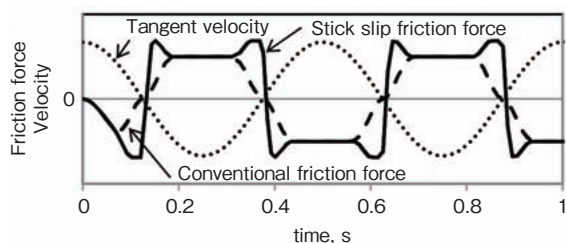


図7 ボールオンプレートモデルの計算結果  
Calculation results of ball and plate model

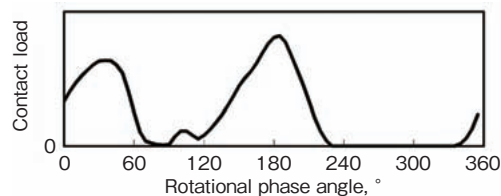


図9 ボール溝接触力の計算結果  
Calculation results of ball contact load

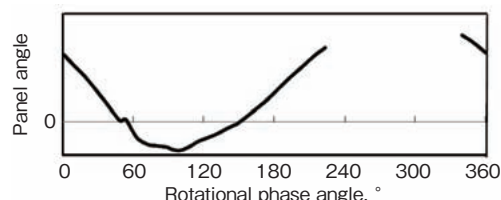


図10 はさみ角の計算結果  
Calculation results of panel angle

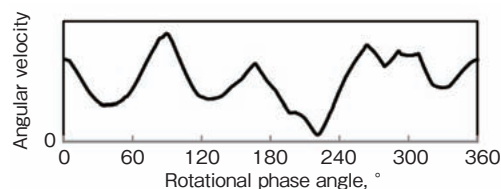


図11 角速度の計算結果  
Calculation results of angular velocity

## 3. 解析結果

### 3.1 解析条件

解析条件は、後述する実験での検証条件と同一のジョイント角、回転速度、トルクで実施した。

### 3.2 ボール挙動の解析結果

図8にCVJの内部力状態を示す。また図9、10、11にはそれぞれCVJの回転位相を横軸として、ボール溝の接触力、内輪溝とボール、外輪溝とボールの共通接触平面で定義されるはさみ角、自転成分のみを分離したボール基準での角速度 $\omega$ の大きさの解析結果を示す。

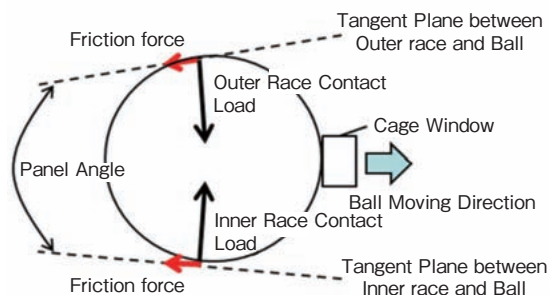


図8 CVJ内部に作用する力  
CVJ internal force

## 4. 実験による解析結果の検証

### 4.1 ボール回転角速度の計測と解析方法

ボールの回転運動の計測には、本来回転しているボールを静止した座標系で観測できるように工夫を施した。また、これまでジョイント奥側の挙動の観察は不可能であったが、外輪に穴をあけ、観測できるようにした。

ボール表面上にランダムで打刻した3点を外輪に固定された高速度カメラで同時計測し、画像解析により外輪基準でのボール表面上の3点の座標を算出する。

### 4.2 ボール角速度の算出方法

外輪を基準としたボール表面上の任意の3点の座標を、ボール中心を始点とした位置ベクトル $\vec{r}_1$ 、 $\vec{r}_2$ 、 $\vec{r}_3$ で表すと図12のようになり、これらの位置ベクトルと角速度ベクトルには次の関係が成り立つ。

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{r}_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

上記の連立方程式を解くことで、角速度ベクトルを求めることができる。

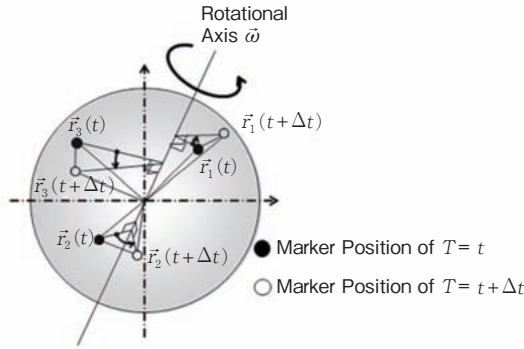


図12 ボール角速度の定義  
Definition of ball angular velocity

具体的には、 $T = T_A$  および  $T = T_B$  での3点のボール中心を基準とした3次元座標を、 $3 \times 3$  行列で表したAおよびBと、 $T_A \sim T_B$  間の回転行列Gには式(5)の関係が成り立つ。

$$B = GA \tag{4}$$

ここで、 $A = \begin{bmatrix} x_{1A} & x_{2A} & x_{3A} \\ y_{1A} & y_{2A} & y_{3A} \\ z_{1A} & z_{2A} & z_{3A} \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} x_{1B} & x_{2B} & x_{3B} \\ y_{1B} & y_{2B} & y_{3B} \\ z_{1B} & z_{2B} & z_{3B} \end{bmatrix}$ ,

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \text{である。}$$

一方で、 $\phi$  を回転角、 $\lambda = [l \ m \ n]^T$  を回転軸の方向ベクトルとして、式(5)のように定義されるオイラーパラメータ  $E_{AB} = [\epsilon_0 \ \epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \epsilon_3]^T$  を用いて回転行列Gを表現すると、式(6)のようになる<sup>2)</sup>。

$$E_{AB} = \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \\ l \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \\ m \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \\ n \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \\ \lambda \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$G = \begin{bmatrix} \epsilon_1^2 - \epsilon_2^2 - \epsilon_3^2 + \epsilon_0^2 & 2(\epsilon_1\epsilon_2 - \epsilon_3\epsilon_0) & 2(\epsilon_3\epsilon_1 + \epsilon_2\epsilon_0) \\ 2(\epsilon_1\epsilon_2 + \epsilon_3\epsilon_0) & \epsilon_2^2 - \epsilon_3^2 - \epsilon_1^2 + \epsilon_0^2 & 2(\epsilon_2\epsilon_3 - \epsilon_1\epsilon_0) \\ 2(\epsilon_3\epsilon_1 - \epsilon_2\epsilon_0) & 2(\epsilon_2\epsilon_3 + \epsilon_1\epsilon_0) & \epsilon_3^2 - \epsilon_1^2 - \epsilon_2^2 + \epsilon_0^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

式(4)の実験により、求めた回転行列Gを式(6)の回転行列Gと対比させることで求めた回転角 $\phi$ と、回転軸の方向ベクトル $\lambda$ 、および  $T_A \sim T_B$  間の時間  $\Delta t$  から角速度ベクトル  $\vec{\omega}$  を求めた。

### 4.3 実験と解析の精度検証結果

解析結果と実験結果の比較を図13、14に示す。比較する位相は、観測可能であった回転位相 120 ~ 270 度とした。図15に示すように、実測できた回転位相の範囲内で 240 度以降を除くと目標の解析精度の範囲内であり、さらに方向に着目すると、方向が急激に変化する位相も一致しており、整合性があると判断した。

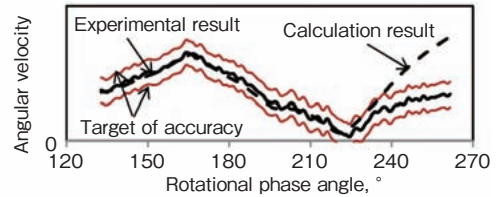


図13 ボール角速度の計算結果と実験結果の比較  
Ball angular velocity comparison between calculation and actual behavior

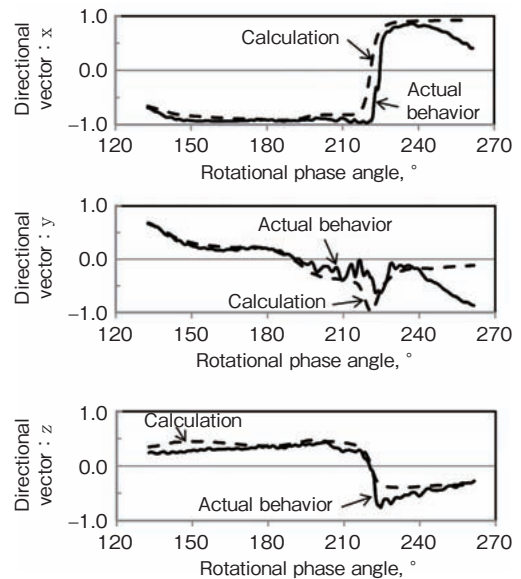


図14 方向ベクトルの計算結果と実験結果の比較  
Directional vector comparison between calculation and actual behavior

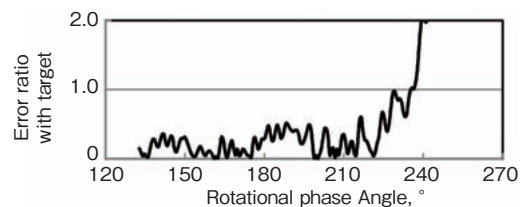


図15 計算結果と実験結果の誤差  
Error between calculation and actual behavior

#### 4.4 ボール挙動解析結果の考察

CVJの回転中、図9で示すような1回転につき2つの荷重ピークをもち、回転位相240度位相以降では荷重が抜ける位相が存在する。また、ボールはさみ角は図10に示すように回転1次の周期となり、ボールに与える接触力と摩擦力の方向を決める。

ボール挙動はボールに働く摩擦力モーメントの総和で決定されると考えられ、解析結果は精度よく接触力とその方向を再現していると予測される。

一方、誤差発生要因としては解析の前提条件で考慮していないすべり摩擦以外のグリースせん断摩擦、転がり摩擦による要因が考えられ、荷重の抜ける位相で大きな影響を与えていると考えられる。

#### 5. おわりに

CVJ (ツェッパ形等速ジョイント) について、静摩擦と動摩擦による前提でCVJ内のボール角速度ベクトルを数値化した。さらに、高速度カメラを用いた多点同時計測を行い、解析精度があると判断した。

本解析手法の構築によって、以下の事項が可能になった。

- 1) 従来の解析では、すべり速度が遅い部分では摩擦力を発生させられなかったが、ボールオンプレート試験での摩擦係数測定結果をベースに、静摩擦と動摩擦を考慮することで、すべり速度が遅い部分でも摩擦力を発生させることが可能となった。
- 2) 接触部の静摩擦と動摩擦モデルの前提で、CVJのボール挙動が角速度ベクトルで計算可能となった。
- 3) CVJは全体が回転しているため、ボールの挙動を観察、数値化することが困難であったが、撮影方法の工夫と多点同時計測により数値化を可能にし、解析結果と比較した結果、ボール荷重の抜ける位相範囲を除いて、目標の解析精度を達成し、解析による机上での予測が可能となった。

これにより、ジョイント耐久性の高精度な予測、グリース開発における最適摩擦係数の提案ができる可能性があり、今後の設計手法の向上が期待できる。

#### 参考文献

- 1) 長谷陽夫, 齋藤 剛, 井本正之, 石黒重好: BJ ボール自転運動の長時間計測と理論的検討, 日本機械学会論文集 (C編), 72巻, 716号(2006)1249.
- 2) 田島 洋: マルチボディダイナミクスの基礎 3次元運動方程式の立て方, 東京電機大学出版局(2006)77.

#### 筆者



中村武史\*

T. NAKAMURA



市川和之\*\*

K. ICHIKAWA



小林英樹\*

H. KOBAYASHI



鈴木 聡\*\*\*

S. SUZUKI



篠田佳享\*\*\*\*

Y. SHINODA



森 純\*\*\*\*

A. MORI



木村佳郎\*\*\*\*

Y. KIMURA



杉山雄一郎\*\*\*\*

Y. SUGIYAMA

\* 自動車部品事業本部 第3実験解析部

\*\* 自動車部品事業本部 第3実験解析部  
博士(工学)

\*\*\* 自動車部品事業本部 第1駆動技術部

\*\*\*\* トヨタ自動車株式会社  
ドライブトレーンシステム統括部

\*\*\*\*\* トヨタ自動車株式会社 材料技術開発部