1220 VGRラック&ピニオンの性能評価と歯面解析

Evaluation of Motion and Tooth Surface Analysis of VGR Rack & Pinion

○ 遠藤 大輔 (山形大院) 正 大町 竜哉 (山形大)
川口 協一 (いすゞ自動車) 戸田 英幾 (ティエスティ)

Daisuke ENDO, Yamagata Univ., Jo-nan 4-3-16, Yonezawa

Tatsuya OHMACHI, Yamagata Univ.

Kyoichi KAWAGUCHI, Isuzu Motors Ltd.

Hideki TODA, TST Ltd.

VGR (Variable Gear Ratio) rack & pinion is a machine element that the rotation angle of the pinion changes the movement distance of the rack. It is used the power steering device for the car. As a result, the conflicting performance it is the stability when going straight and the steer when turning can be improved at the same time. When the motion of this mechanism was evaluated, the error was caused in the theory value and measurements in the movement distance of rack to rotation angle of pinion. Then, the cause of the error is examined by the measurement tooth surface is compared with the theory tooth surface. There, it is shown that this error is influenced by the lead error in right tooth surface from relation of lead error and contact line.

Key Words: Variable Gear Ratio, Rack & Pinion, Lead error, Contact line

1. 緒言

VGR(Variable Gear Ratio)ラック&ピニオンとはピニオンの回転角に対して、ラックの並進移動距離が変化するという特性がある機械要素である。この機械要素を自動車用パワーステアリング装置に組み込むことにより、直進時の安定性と旋回時の操舵性という、相反する性能を同時に向上させることができる。

しかし、現在用いられているVGRラック&ピニオンの性能を評価したところピニオンの回転角に対するラックの並進移動距離において、理論値と測定値に誤差が生じていることがわかった。本研究では歯面解析によってこの誤差の原因を検討する。

2. VGRラック&ピニオン

図1にVGRラックの概念図を示す。VGRラックはピニオンとのかみ合いピッチ円半径を変化させることにより、ラックの並進移動距離が変化するよう設計されている。ここで、ピニオン回転角に対するラックの並進移動距離が短い領域をローゲイン域、長い領域をハイゲイン域、その間で変化する領域をバリエブルゲイン域と呼ぶ。またVGRラックのバリエブルゲイン域では歯面形状が刻々と変化するため直線歯形にはならない。

実際にはピニオン歯形は、ローゲイン域でもハイゲイン域でも同じであるため、VGRラックの圧力角やねじれ角を変化させることで、結果的に噛み合いピッチ円半径を変化させている。

Fig.1 Concept of VGR rack & pinion

3. VGRラック理論歯面

VGRラック&ピニオンの理論歯面は、実際にラックとかみ合うピニオンを工具とみなして創成運動させた際の、ピニオン歯面の包絡面として求められる⁽¹⁾。図2に創成概念図を示す。

Fig.2 Generation concept of VGR rack

図3にラックに固定した並進座標系(0-XYZ)とピニオンに固定した回転座標系(0-xyz)を示す。このとき2つの座標系は式(1)の関係を持つ。ここでMは座標変換マトリックスである。

$$\begin{bmatrix} 1 & X & Y & Z \end{bmatrix}^T = M \begin{bmatrix} 1 & x & y & z \end{bmatrix}^T \dots \dots \dots (1)$$

Fig.3 Coordinate of VGR rack & pinion

図4にピニオンを示す。ピニオン歯面の式を求めるために、図のようにパラメータ u, v, θ を与える。ここで u はインボリュート曲線を創成するパラメータ、 v はピニオンの y 座標、 θ はピニオンの回転角である。ピニオン歯面は式 (2) のように表現できる。

Fig.4 Tooth surface of pinion

$$\left. \begin{aligned} x &= x_p(u, v, \theta) \\ y &= y_p(u, v, \theta) \\ z &= z_p(u, v, \theta) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

式 (2) を式 (1) に代入すると式 (3) が得られる。式 (3) はラックに固定した並進座標系でとらえたピニオン歯面を表している。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_p(u, v, \theta) \\ Y &= Y_p(u, v, \theta) \\ Z &= Z_p(u, v, \theta) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

式 (4) に式 (3) で表される歯面の包絡面の条件式を示す。

$$\left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial X}{\partial u} & \frac{\partial Y}{\partial u} & \frac{\partial Z}{\partial u} \\ \frac{\partial X}{\partial v} & \frac{\partial Y}{\partial v} & \frac{\partial Z}{\partial v} \\ \frac{\partial X}{\partial \theta} & \frac{\partial Y}{\partial \theta} & \frac{\partial Z}{\partial \theta} \end{array} \right| = 0 \dots \dots \dots (4)$$

式 (3) を式 (4) に代入し、1 つのパラメータについて解き、その値を式 (3) に代入することでラック理論歯面を求めることができる。

4. 性能評価

本研究ではVGRラック&ピニオンの性能を評価する際に、ラックゲインを用いている。ここでラックゲインとは、ピニオンギヤの回転入力に対するラックの出力変位の割合であり、本研究では、ピニオンギヤ 1 回転あたりのラック並進移動距離(mm/rev)としている。表1に本研究で用いたVGRラック&ピニオンのラックゲインとピニオン回転角の関係を示す。表2、3に示す諸元を持つVGRラック&ピニオンについてラックゲインを測定したところ、図5に示すようにVGRラック右歯面には理論値と測定値の間に誤差が生じている。また、図6はVGRラック左歯面のラックゲイン理論値と測定値である。

Table.1 Rack gain and pinion rotation angle

Pinion rotation angle (deg)	Gain (mm/rev)
~-158	38.4 (High)
-158 ~ -90	(Variable)
-90 ~ 90	32 (low)
90 ~ 158	(Variable)
158 ~	38.4 (High)

Table.2 Basic dimensions of pinion

Module (mm)	2
Number of teeth	5
Pressure angle (deg)	20
Helix angle (deg)	26
Addendum modification coefficient	0.9

Table.3 Basic dimensions of rack

		High gain
Module (mm)	2	
Pressure angle (deg)	21.840	38.283
Helix angle (deg)	6.346	11.653

Fig.5 Measured rack gain on right tooth surface

Fig.6 Measured rack gain on left tooth surface

右歯面のラックゲイン誤差はハイゲインとローゲインの理論値の差に対して、ハイゲイン域で最大 39%，ローゲイン域で最大 19% 生じている。また、同じ諸元で別のピニオンに交換し同じように評

価してもラックゲイン誤差は変わらなかったことから、この誤差はピニオンによるものではないと考えられ、ラックに原因があると考えられる。

5. 歯面解析

本研究では各ラック歯面を特定するため、ラックの中心を原点として、中心の歯面を $n=0$ 歯面とし、ラックを測定したときの進行方向を正として中心から $n=1$ 歯面, 2 歯面, 3 歯面..., $n=-1$ 歯面, -2 歯面, -3 歯面... と定義している。

5.1 ピッチ誤差 図7に $Y=0$ (mm) におけるラック理論歯面と測定歯面のピッチ誤差を示す。ここで、 Z 座標はラック有効歯丈の範囲内で任意の3点に固定している。ピッチ誤差はハイゲイン域で最大 $16(\mu\text{m})$ 、バリアブルゲイン域で最大 $61(\mu\text{m})$ 、ローゲイン域で最大 $15(\mu\text{m})$ であった。

Fig.7 Pitch error in $Y=0.0\text{mm}$

5.2 歯形方向における誤差 図8に $Y=0$ (mm), ラックハイゲイン域での歯形方向における理論歯面と測定歯面を重ね合わせたものを示す⁽²⁾。また、図9にそれぞれの歯面での理論歯面と測定歯面の誤差を示す⁽²⁾。ここで、歯形方向の理論歯面はラック有効歯丈の範囲内の値である。歯形誤差は最大で $30(\mu\text{m})$ であった。

Fig.8 Theory and measurement tooth profile
($Y=0$ (mm), $n=4$ tooth surface)

Fig.9 Profile error ($Y=0$ (mm), $n=4$ tooth surface)

5.3 歯すじ方向における誤差 図10にラックハイゲイン域での歯すじ方向における理論歯面と測定歯面を重ね合わせたものを示す。また、図11, 12にそれぞれの歯面での理論歯面と測定歯面の誤差を示す。ここで、歯すじ方向の理論歯面はラック有効歯丈の範囲内の値である。歯すじ誤差は右歯面で最大 $28(\mu\text{m})$ 、左歯面で最大 $36(\mu\text{m})$ であった。

Fig.10 Theory and measurement flank line ($n=4$ tooth surface)

Fig.11 Lead error on right tooth surface ($n=4$ tooth surface)

Fig.12 Lead error on left tooth surface (n=4 tooth surface)

6. 考察

VGR ラックの歯面解析からピッチ、歯形方向、歯すじ方向のそれぞれに誤差が生じていることがわかった。これらの誤差がラックゲインの誤差に影響していると考えられるが、ここでは歯すじ方向における誤差がラックゲインの誤差にどのように影響しているかをラックとピニオンのかみ合い状態から考察する。

6.1 ラックゲインとかみ合い枚数 図13にラック右歯面におけるラックゲインとかみ合い枚数の関係を示す。右歯面のラックゲイン測定の場合、ピニオン回転角は負の値から正の値へ増やしていくため、ラックゲイン誤差が大きく生じている箇所は、かみ合い枚数が増加するときとほぼ一致していることがわかる。

Fig.13 Measured rack gain and number of engagement on right tooth surface

6.2 接触線とラック形状 図14にラック右歯面におけるピニオンの接触線の軌跡を示す⁽³⁾。また、図15にラック左歯面におけるピニオンの接触線の軌跡を示す⁽³⁾。

ラックの歯すじ方向における誤差をみると、右歯面の場合、歯すじ方向のラック歯面形状は理論歯面に比べ測定歯面は両端が膨らんでいる。かみ合い枚数が1歯かみ合いから2歯かみ合いへ増加するとき接触線はラックの端部にあり、ラック歯面は両端が膨らんでいるため、ラックの並進移動距離は増大する。それによりラックゲイン誤差が生じると考えられる。また、1歯かみ合いとなるラック中央部では、歯すじ方向における誤差は小さいためラックゲインも

理論値に近い値となる。

一方、左歯面の場合、歯すじ方向の歯面形状は理論歯面に比べ測定歯面はY軸方向において正の端部では膨らんでおり、負の端部ではへこんでいる。かみ合い枚数が増加するときの接触線は右歯面と同様に端部にあるが、2歯かみ合いのうちの一方の歯面が膨らんでおり、もう一方の歯面はへこんでいるため右歯面のように大きなラックゲイン誤差は生じないと考えられる。

Fig.14 Contact line on right tooth surface

Fig.15 Contact line on left tooth surface

7. 結言

ピニオンを創成工具とした包絡面から VGR ラック&ピニオンの理論歯面を求め、実際の VGR ラック&ピニオンの測定歯面と比較し、評価することでラックゲインの誤差について考察できることを示した。

ラック右歯面のゲイン誤差は、ラック右歯面の歯すじ方向によるものであることを、ピニオンのかみ合い状態から考察した。

参考文献

- (1) 塘口卓, VGR ラック&ピニオンのかみ合いに関する研究, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集, No.02-1, (2002), 31-32
- (2) 川口協一, VGR ラック&ピニオンの歯面解析, 日本機械学会東北支部第41期秋期講演会講演論文集, No.05-2, 265-266
- (3) 井上太郎, VGR ラック&ピニオンのかみ合い接触線に関する研究, 日本機械学会第3回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, No.03-03, (2003), 71-72