

ステアリング用ラックの歯面誤差測定手法^{*1}

Measurement Method for Tooth Profile Error of Steering Rack

安原伸二 S. YASUHARA 山中亨介 K. YAMANAKA

Automotive steering systems are designated as critical safety parts, and mechanical parts used in them require high precision. The rack and pinion mechanism is widely used in steering systems, but the special support structure of the rack makes it difficult to fully evaluate gear meshing performance with conventional measurement methods for tooth profile error based on a datum in the workpiece, as is done with normal gears. Therefore, we proposed a unique measurement method that takes the rack support structure into account. Furthermore, we applied the measurement method to variable rack, which is increasingly used with the aim of achieving better driving stability.

Key Words: steering systems, rack and pinion, rack, variable rack, stoke, stoke ratio, tooth profile error

1. はじめに

自動車用ステアリングは重要保安部品に指定されており、構成部品には厳格な精度管理が要求される。ステアリング機構にはラック&ピニオンが広く用いられているが¹⁾、ラックの支持構造は一般的な歯車機構とは異なる。そのため、通常の歯車のように被測定歯車のデータムを基準として歯面誤差を評価する測定手法では、実際のかみあい性能を適切に評価できないという課題がある。

そこで本研究では、新規手法として従来手法では対応できていないラックの支持構造に起因する挙動を考慮した独自の歯面誤差測定手法を構築する。さらに、操縦安定性向上を目的として適用が拡大しているバリエابلラックを対象に比ストローク特性と歯面誤差を分離することで本手法を適用する。

2. ステアリングの構造とラックの支持構造

自動車用ステアリングは、操舵入力として与えられるホイールの回転運動をラック&ピニオン機構によって直線運動へ変換し、タイヤの向きを変化させる。図1にステアリングの構造の概要を示し、図2にはラック&ピニオンの外観と支持構造を示す。ラックはラックガイドとラックブッシュの2箇所支持される。ピニオンが回転す

るとラックはこれらの支持部に倣って左右方向へ往復移動（以下、ストローク）する。



図1 ステアリングの構造
Structure of steering system

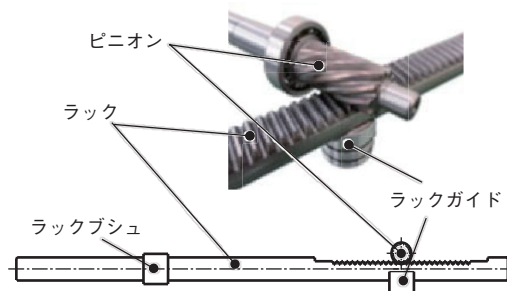


図2 ラック&ピニオンの外観と支持構造
Rack and pinion, rack support structure

*1 本報は、日本機械学会 2025 年度年次大会講演論文集 (No.25-1, S112-04) を基に作成した。

3. ステアリング用ラックの歯面誤差測定手法

3.1 ラック支持構造の影響

ステアリング用ラックには歯切り加工や熱処理に起因して軸方向の曲がりが生じる。曲がりが生じたラックは、**図3**に示すようにラックガイドとラックブッシュに倣うようにストロークする。通常の歯車と同様に支持位置をデータムとしてラックに固定された座標系を設定し、設計歯面との差を評価する手法では、曲がりの量が歯面誤差に含まれて評価される。しかし、前述のとおりラックは支持部に倣ってストロークするため、曲がりによるかみあい性能への影響は小さいと考えられる。

そこで、ラックの曲がりがかみあい性能に与える影響を定量的に評価するため、数値計算を実施した。計算対象としたステアリングを模擬したラック&ピニオンの諸元を**表1**に示す。まず、設計どおりの誤差を含まないラック歯面上に点群を生成する。つぎに、ラックに一定の曲率を与え、ラック中心軸に最大0.2 mmの曲がりを与与する。曲がりによるラック歯面変位の模式図を**図4**

に示す。曲がる前のラック歯面上の点を A' 、ラック中心軸と点 A' から下した垂線との交点を B' とする。曲がりにより、点 B' はラック中心軸曲線の点 B へ変位する。さらに、点 A' は点 B におけるラック中心軸曲線に対し垂直かつ $AB = A'B'$ を満たす点 A へ変位する。

通常の測定手法と同様に設計歯面との差を計算した結果を**図5**(a)に示す。歯番号の増加に伴って曲がり量が増加し、歯面差が過大に評価されることが確認された。

一方、**図3**に示すようにラック歯面上の点群をストローク方向に変位させたうえでインボリュート形状のピニオン歯面との差を計算した結果を**図5**(b)に示す。**図6**にはストローク補正量を示す。ストローク補正量は各歯面の歯面差が最小となる値として求めた。ストローク補正を適用することによって歯面差は0.003 mm以下まで低減された。

以上より、ラックの曲がりがかみあい性能に及ぼす影響は小さいことが確認され、曲がり成分を歯面誤差から分離して評価する必要がある。

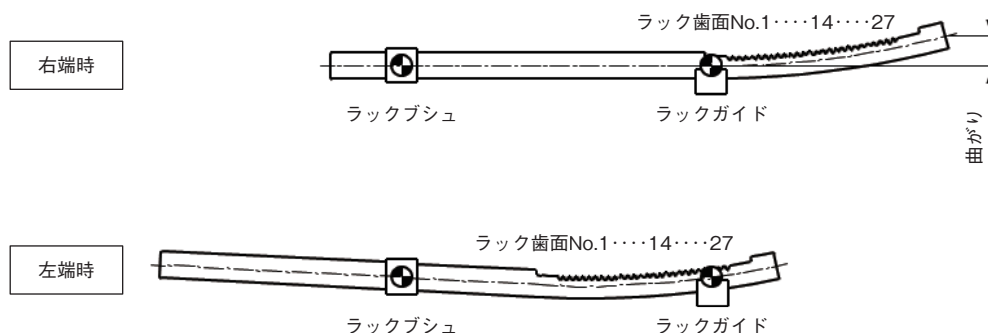


図3 ラック支持構造によるラックストローク
Stroke of rack supported by rack guide and rack bush

表1 ラック&ピニオン諸元
Rack and pinion specifications

項目	単位	ピニオン	ラック
モジュール	mm	2.000	
圧力角	deg	20.000	
ねじれ方向	—	左	右
ねじれ角	deg	25.000	5.000
歯数	—	9	27
転位係数	mm	0.300	—
ピッチ円直径	mm	19.861	—
ラック外径	mm	—	26.000
軸間距離	mm	17.530	
公差角	deg	20.000	
比ストローク	mm/rev	56.765	

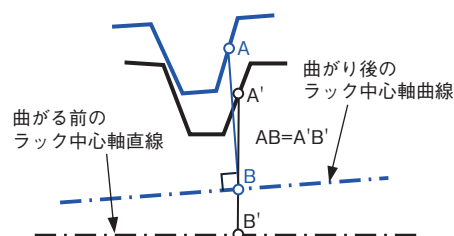


図4 ラック曲がり
Geometric displacement of rack tooth profile

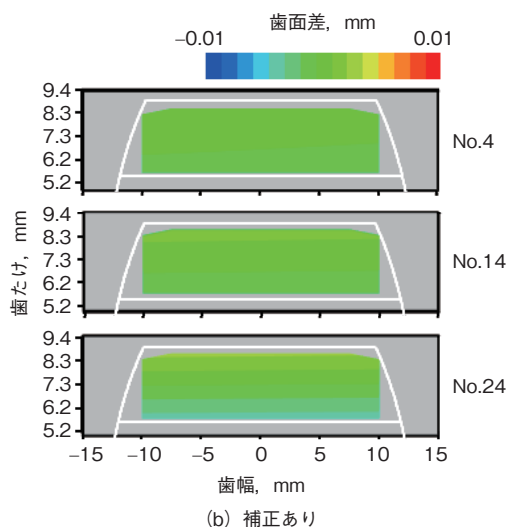
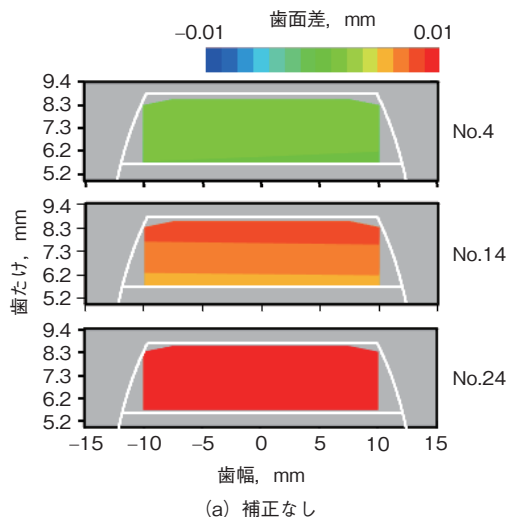


図5 支持構造有無による歯面差

Tooth profile errors calculated using conventional and proposed methods

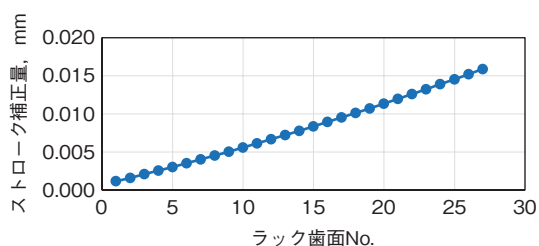


図6 ストローク補正量

Stroke correction

3.2 歯面誤差測定手法の提案と検証

表1の仕様に基づいてラックを試作し、提案手法を検証した。測定には図7に示す三次元測定機 ZEISS PRISMO® ultra を使用した。ラック歯面は各歯について約1200点を取得し、三次元的に形状を把握した。また、ラックの曲がりを推定するため、円筒部14箇所を測定した結果を図8に示す。これらの測定値に多項式近似を適用し、図4と逆の手順で測定した歯面形状から曲がり成分を除去した。そのうえで、設計歯面との差を計算した。曲がり補正の有無による比較を図9に示す。補正を適用した場合、歯面誤差は小さく評価されており、本手法によって歯面誤差から曲がり成分の影響を分離できることが確認された。



図7 三次元測定機

Coordinate measuring machine

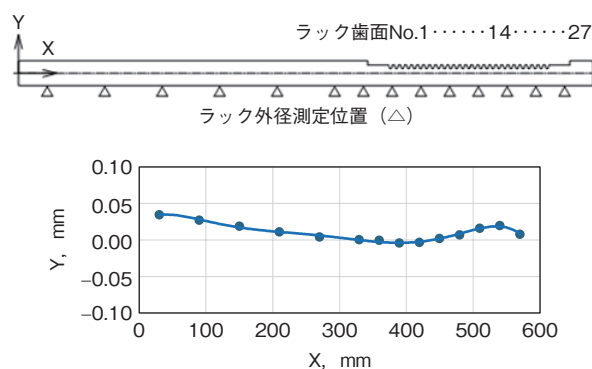


図8 試作ラックの曲がり

Bending of prototype rack

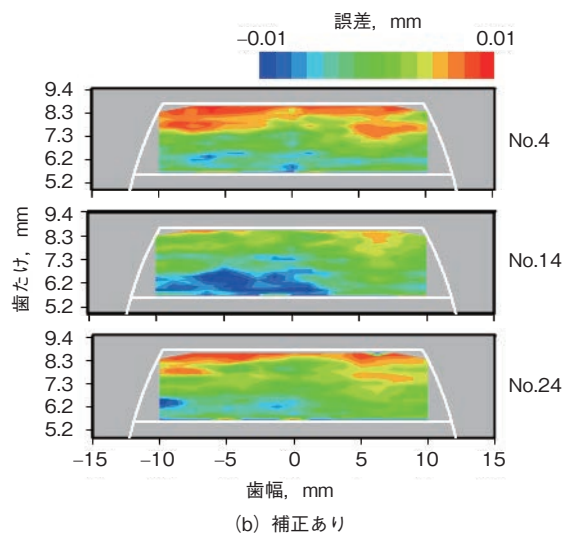
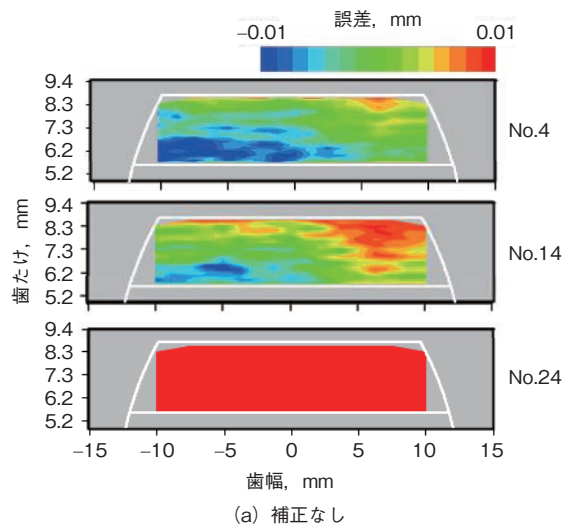


図9 試作ラックの歯面誤差

Tooth profile errors of prototype rack evaluated using conventional and proposed methods

4. バリアブルラックの歯面誤差測定

車両の操縦安定性向上のため、中立付近では比ストロークを小さく、端部では大きく設定したバリアブルラック²⁾の採用が拡大している。バリアブルラックの歯面誤差を測定するには、前節で述べた手法にくわえて比ストローク特性と歯面誤差の分離が必要である。

4.1 バリアブルラック

ステアリング用ラックを模擬した比ストローク線図および線図を構成するパラメータを図10に示す。比ストロークは、ピニオン回転角がゼロ近傍の中央（中立付近）で小さく、エンド（端部）で大きく設定されており、中央からエンドにかけて連続的に変化する。図11に

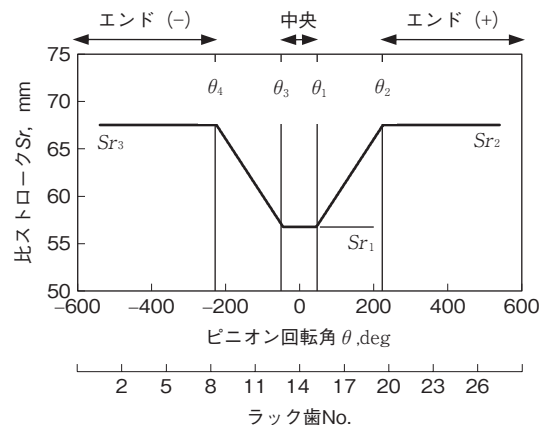
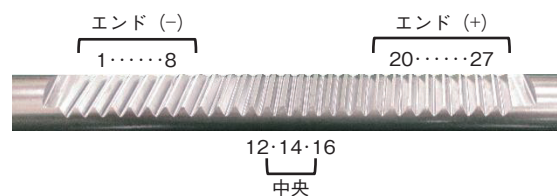
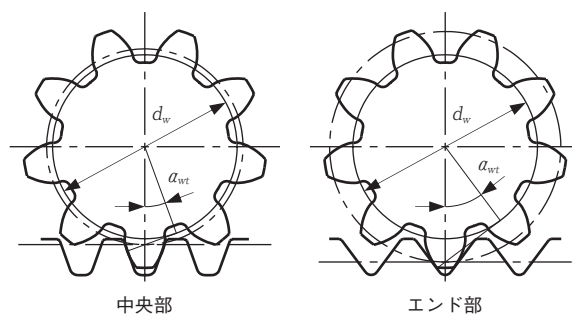
図10 比ストローク線図
Variable Stroke ratio図11 試作バリアブルラック
Prototype variable rack図12 ピニオンとバリアブルラックのかみあい
Meshing diagram of variable rack

表1の諸元と図10の比ストローク線図中のパラメータに基づいて試作した検証用バリアブルラック歯部の外観を示す。比ストロークが異なる中央とエンドでは歯形が異なることが確認できる。ラック中央およびエンドにおけるピニオンとバリアブルラックのかみあい状態を図12に示す。比ストロークの異なるかみあいは、かみあいピッチ円径 d_w がピニオン回転角に応じて変化することで実現される。この幾何学的関係に基づくことで設定したパラメータからバリアブルラックの歯面形状を計算できる。

4.2 最小二乗法

バリアブルラックの測定では、まず最小二乗法³⁾を

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \sigma(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial \alpha_n} \sigma(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \sigma(A_1, A_2, \dots, A_n) + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_1} (\alpha_1 - A_1) + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} (\alpha_2 - A_2) + \dots + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_n} (\alpha_n - A_n) = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial \alpha_n} \sigma(A_1, A_2, \dots, A_n) + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_n \partial \alpha_1} (\alpha_1 - A_1) + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_n \partial \alpha_2} (\alpha_2 - A_2) + \dots + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_n \partial \alpha_n} (\alpha_n - A_n) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_n \partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \alpha_n \partial \alpha_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 - A_1 \\ \vdots \\ \alpha_n - A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial}{\partial \alpha_1} \sigma(A_1, A_2, \dots, A_n) \\ \vdots \\ -\frac{\partial}{\partial \alpha_n} \sigma(A_1, A_2, \dots, A_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

表2 パラメーターの設計値と測定値
Variable stroke ratio parameters

変数	記号	単位	値	
			設計	測定
中央比ストローク	Sr_1	mm/rev	56.765	56.775
エンド比ストローク (+)	Sr_2	mm/rev	67.526	67.531
エンド比ストローク (-)	Sr_3	mm/rev	67.526	67.555
変化開始点 (+)	θ_1	deg	45.000	44.751
変化終了点 (+)	θ_2	deg	225.000	224.735
変化開始点 (-)	θ_3	deg	-45.000	-44.276
変化終了点 (-)	θ_4	deg	-225.000	-227.139

用いて比ストローク線図を構成するパラメーターを同定する。最小二乗法の手順を以下に示す。

求めるパラメーターを $\alpha_1 \sim \alpha_n$ とし、これらにより定義される目的関数を σ とする。式(1)に示すように σ を $\alpha_1 \sim \alpha_n$ で微分した値がすべてゼロになるとき、 σ は最小になる。式(1)を初期値 $A_1 \sim A_n$ で1次のテーラー展開をすると式(2)が得られる。さらに、これを行列式で示すと式(3)となる。

$A_1 \sim A_n$ を求めるパラメーターの初期値とし、ガウスの消去法を用いて式(3)の $\alpha_1 \sim \alpha_n$ を求める。得られた解を再び $A_1 \sim A_n$ として同様の計算を繰り返すことで、 $\alpha_1 \sim \alpha_n$ は σ を最小とする数値に収束する。

4.3 バリアブルラックの歯面誤差測定

前節と同様に検証用バリアブルラックを三次元測定機で歯面形状を測定した。比ストロークの推定においては、図10に示したパラメーター $\alpha_1 \sim \alpha_n$ を未知数とし、こ

れらによって決まる歯面形状と測定点の誤差の二乗和を σ とした。前節で示した最小二乗法を用いて、 σ が最小となるパラメーターを計算した。なお、初期値には設計値を用いた。

パラメーターの設計値と σ が最小値となったときの測定値を表2に示す。これらの測定値を用いて計算した歯面と、測定歯面との差がかみあいに影響する歯面誤差

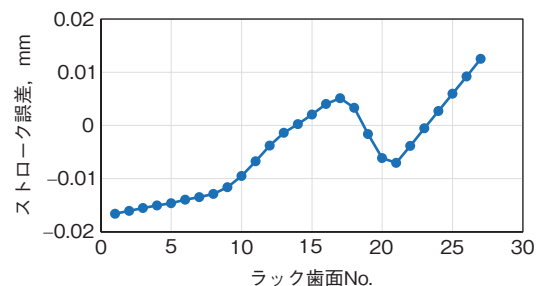


図13 試作バリアブルラックのストローク誤差
Stroke error of prototype variable rack

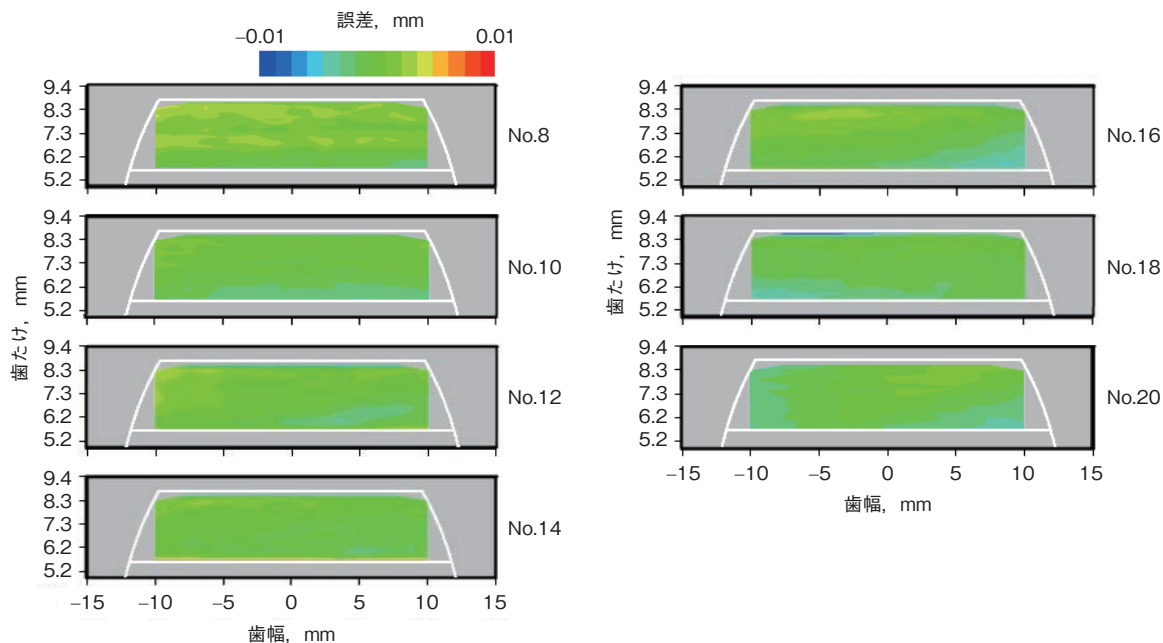


図14 試作バリエブルラックの歯面誤差
Tooth profile errors of prototype variable rack

であり、設計歯面との差がストローク誤差となる。図13にストローク誤差を示し、図14に歯面誤差を示す。評価の結果、歯面誤差は0.005 mm程度であり、本手法によって比ストローク特性と歯面誤差を分離して評価できることが確認された。

5. おわりに

本報では、ステアリング用ラックのかみあい性能を適切に評価するため、新規手法としてラックの支持構造に起因する挙動を考慮した歯面誤差測定手法を提案した。さらに、比ストローク特性と歯面誤差を分離することでバリエブルラックに本手法を適用して評価できることを示した。この手法で試作ラックを測定し、従来手法では0.02 mm程度の歯面誤差が実際には0.002 mm程度であることを確認した。

今後は本手法を活用し、実機で生じる強度や軸間距離変動などに対して、かみあい性能が及ぼす影響の評価などに役立てる。

参考文献

- 1) 山中亨介：ステアリング用ラック & ピニオンのかみあい解析，日本機械学会，2021年度年次大会講演論文集，No. 21-1 (2021) 754-758.
- 2) 光洋精工株式会社：バリエブルギヤレシオのラック&ピニオン式パワーステアリング，Koyo Engineering Journal, No. 157 (2000) 90.
- 3) 藪 忠司，伊藤 惇：数値計算法，機械系教科書シリーズ 12，コロナ社 (2002) 36-49.

筆者



安原伸二*

S. YASUHARA



山中亨介*

K. YAMANAKA

* イノベーション本部 機械要素技術研究部