

# 内輪クリープの発生機構

## Generation Mechanism of Inner Ring Creep

村田順司 J. MURATA 鬼塚高晃 T. ONIZUKA

Generation of inner ring creep is a serious problem in roller bearings. When fitting has a shortage of interference or excessive load is imposed on it, inner ring rotates in reverse to the direction of shaft rotation. This movement is called the creep.

To clarify the precise generating mechanism of creep, examinations were made under relevant experimental conditions of "loose fit" and "tight fit."

This paper describes how these conditions affect the creeping phenomenon.

**Key Words:** creep, tight fit, loose fit, FEM

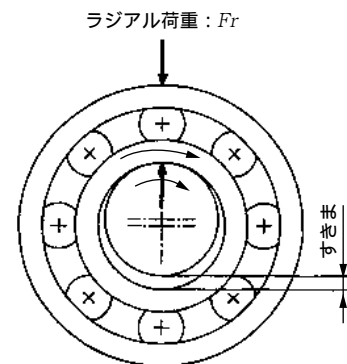
### 1. はじめに

転がり軸受は、はめあいしめしろの不足や過大な荷重が負荷されると、軸に対して内輪が回転方向とは逆方向に回転する問題(クリープ)が発生する。

一般的に、“しめしろ”を有する軸受にクリープが発生する機構として、2つの機構が知られている。1つめは“ゆるいはめあい”の場合で、軸受にラジアル荷重が負荷された時にシャフトと内輪の変形によりすきまが発生し、その状態で内輪が回転すると幾何学的に内輪とシャフトがずれてクリープが発生する機構である(図1)。この機構のクリープを防止するのに少なくとも式(1)に示す“しめしろ”が必要である<sup>1)</sup>。

2つめは“かたいはめあい”の場合で、今井<sup>2)</sup>によると荷重が負荷された時にシャフトのはめあい面に発生するせん断力(  $\tau$  )が、面圧による接線方向の摩擦力(  $\mu \sigma$  )に打ち勝ってクリープが発生する機構である(図2)。この機構のクリープを防止するのに少なくとも式(2)に示すしめしろが必要である<sup>3)</sup>。

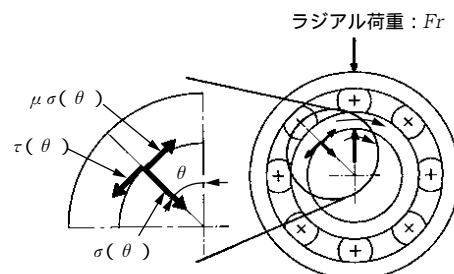
本報では、クリープの基礎的な試験に加え、3次元での有限要素法解析(FEM解析)の結果をもとに、上記機構のさらに詳細な内容を検討した。特に転動体の転がりとともに内輪が滑る機構について新たに明らかにした。将来的にはこれらのことをもとに正確なクリープの推定が可能になると考える。



$$\Delta d = \frac{d + 3}{d} \left[ 0.25 \sqrt{\frac{d}{b}} Fr + 0.0015 \Delta T \right] \quad (1)$$

$\Delta d$  : クリープ防止必要しめしろ  
 $d$  : 軸径  
 $b$  : 軸受幅  
 $Fr$  : ラジアル荷重  
 $\Delta T$  : 軸受温度上昇

図1 “ゆるいはめあい”のクリープ機構  
 Creep mechanism under "loose fit"



$\tau(\theta) > \mu \sigma(\theta)$  の時クリープ

$$\Delta d = 0.2 \times \frac{Fr}{b} \quad (2)$$

図2 “かたいはめあい”のクリープ機構  
 Creep mechanism under "tight fit"

## 2. クリープ荷重の測定

### 2.1 試験方法

図3に試験装置の概略を示す。

試験軸受をシャフトに圧入後、シャフトを試験機の回転軸に固定して回転をあたえる。荷重は軸受外輪に取り付けた負荷治具を介して、純ラジアル荷重をあたえた。なお、軸受がクリープ中に軸方向にずれるのを防止するため、スペーサを組み込んだ。ただし、スペーサはクリープの妨げにならないように軸方向にすきまを設け、シャフトとのはめあいもルーズに設定している。

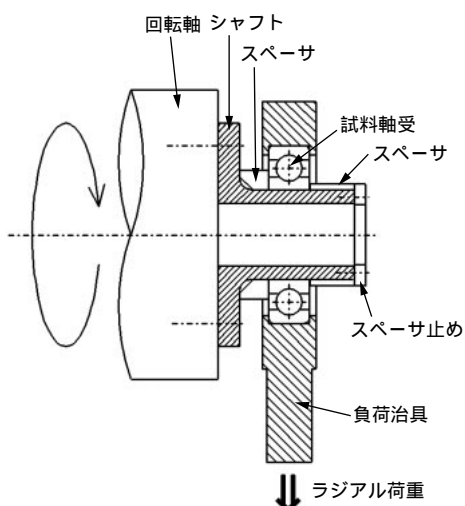


図3 試験装置概略

Schematic of testing device

試験軸受の諸元を表1に、シャフトの諸元を表2に示す。試験条件を表3に示す。

表1 試験軸受諸元  
Test bearing specifications

項目	内容
呼び番号	6208C3(樹脂保持器)
内径×外径×幅	40×80×18
基本動定格荷重, kN	29.1
基本静定格荷重, kN	17.8
玉数, 個	9
材質	S U J 2
内径仕上げ	研削(Ra=0.4~0.5)
内径真円度(半径法)	1~2 μm

表2 シャフト諸元

Shaft specifications

項目	内容
形状	中空シャフト(中空径 28) 中実シャフト
外径	40
材質	S45C
外径仕上げ	研削(Ra=0.3~0.4)
外径真円度(半径法)	1 μm
熱処理	無し

表3 試験条件

Test conditions

項目	内容
内輪 - シャフト間 しめしろ	中空シャフト : 10 μm狙い, 30 μm狙い, 50 μm狙い 中実シャフト : 30 μm狙い
ラジアル荷重	0 kNから 2 kNずつステップアップする
回転速度, min <sup>-1</sup>	200
時間, min	1

### 2.2 クリープ荷重

図4にクリープ試験の結果を示す。横軸にしめしろ、縦軸にラジアル荷重をとり、最初に内輪とシャフトが相対移動をする荷重(以下クリープ荷重と称す)をプロットしている

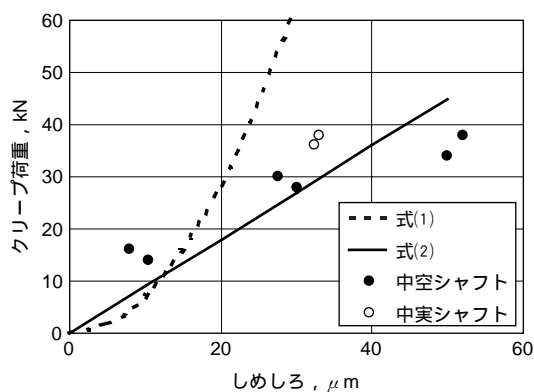


図4 クリープ試験結果

Creep test result

図4より、

- 1) しめしろ 10 μm 近辺では、式(1)・式(2)による推定値より若干実測が大きく、中空シャフトのしめしろ 30 μm 近辺では式(2)とよく一致する。
- 2) 中空シャフトのしめしろ 50 μm では式(2)よりも若干小さいが、これはシャフトのたわ

みなどが影響していると考えられる。

- 3) 中空シャフトの場合は中空シャフトに比較してクリープ荷重が大きい。これは、はめあい面の面圧が高いことが影響していると考えられる。

次に図5に図4の結果に対し、横軸を面圧で整理しなおした結果を示す。これより、クリープ荷重がほぼ面圧に比例していることがわかる(50  $\mu\text{m}$  は除く)。よって、面圧で整理すれば比例に近い関係であることがわかる。

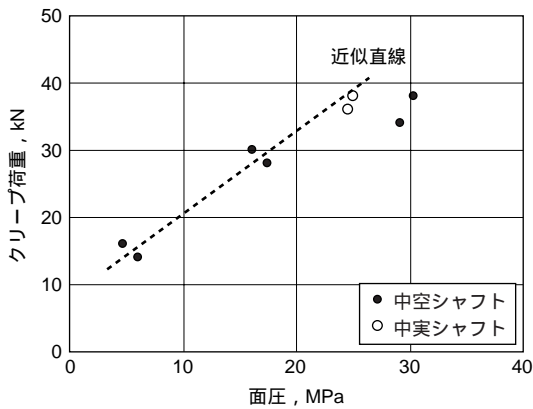


図5 面圧とクリープ荷重の関係

Relation between surface pressure and creep load

### 2.3 クリープ量

図6にクリープが発生した後もさらに荷重を増加させたときのクリープ量(内輪 - シャフトの相対移動角度)を示す。

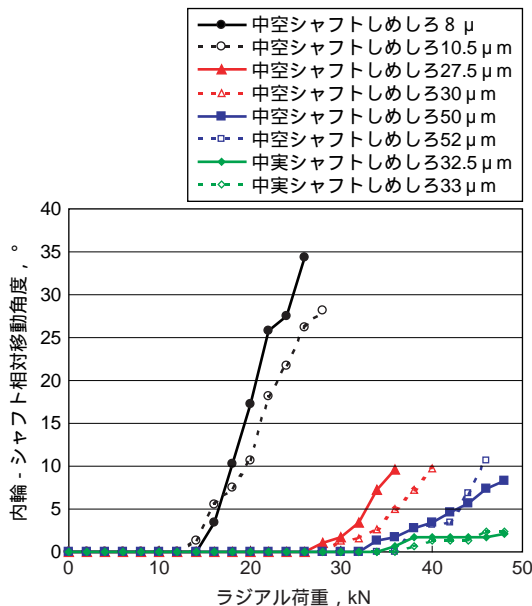


図6 クリープ量

Degree of creep

- 1) 全体的な傾向としては、荷重を増加させるとクリープ量も増加している。
- 2) しめしろ10  $\mu\text{m}$  近辺の試料では、クリープ量が急激に増加する。しめしろ30  $\mu\text{m}$  以上ではクリープ量は緩やかに増加している。

### 3. 内輪滑り量測定

クリープ発生機構を考察するために、ここでは内輪とシャフトの滑る位置を測定した。

#### 3.1 試験方法

軸受内輪をゆっくりと1回転させたときに、内輪とシャフトの滑りが、円周上でどの位置で発生しているか確認した。

図7に測定方法概略を示す。

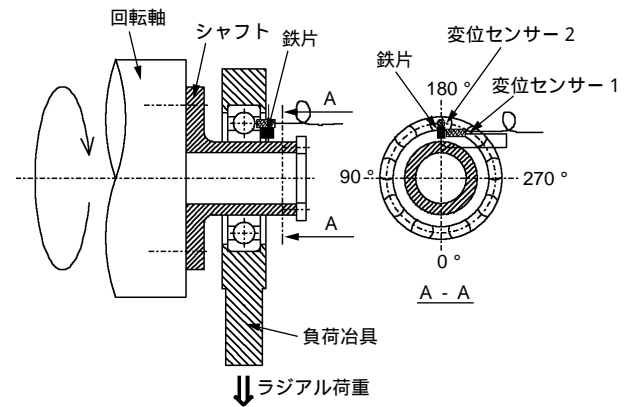


図7 測定方法概略

Outline of measurement method

内輪に鉄片を貼り付け、シャフトに固定した変位センサー1でその鉄片の移動量を測定する。この移動量がシャフトと内輪の相対移動量となる。また同時に鉄片に変位センサー2を取り付けて、回転体の位置関係も同時に測定した。

表4に試験条件を示す。

表4 試験条件

Test conditions

項目	内容
内輪 - シャフト間 しめしろ	中空シャフト : 10 $\mu\text{m}$ 狙い, 30 $\mu\text{m}$ 狙い
ラジアル荷重	20kN, 30kN, 40kN
回転	手動回転

### 3.2 滑り位置

図8にしめしろ10.5 $\mu\text{m}$ ，図9にしめしろ27.5 $\mu\text{m}$ の時の試験結果を示す．横軸に回転角度，縦軸に内輪とシャフトの相対移動角度(内輪回転方向と逆向きを正の値としている)をとっている．

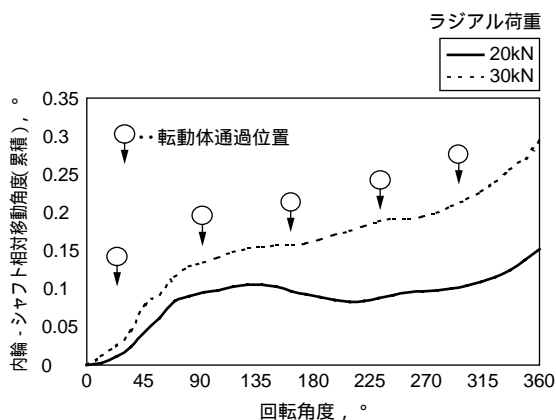


図8 滑り量(しめしろ10.5 $\mu\text{m}$ )  
Sliding degree (interference: 10.5 $\mu\text{m}$ )

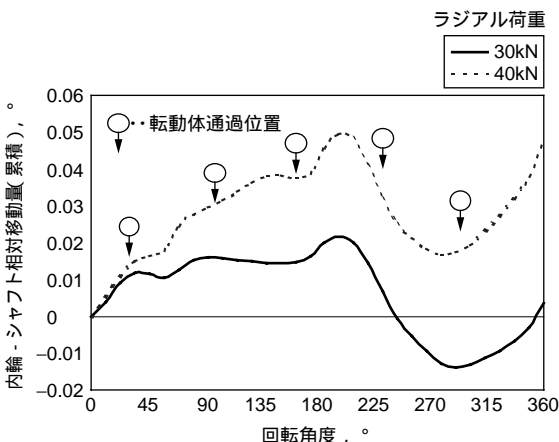


図9 滑り量(しめしろ27.5 $\mu\text{m}$ )  
Sliding degree (interference: 27.5 $\mu\text{m}$ )

- 1) 図8より，しめしろ10.5 $\mu\text{m}$ の30kNを負荷した場合は，転動体荷重を受ける負荷圏(90°~270°)では緩やかにクリープが進み反負荷圏(0°~90°，270°~360°)で大きくクリープが進んでいる．荷重が20kNの場合は，負荷圏では相対移動角度が最大負荷位置(180°)を中心に，波打った形になっており，この範囲ではほとんどクリープが進んでいない．
- 2) 図9より，しめしろ27.5 $\mu\text{m}$ では10.5 $\mu\text{m}$ の場合と比較して，大きく傾向が異なることが分かる．また，相対移動角度の絶対値は小さいことが分かる．これは図6の結果とよく一致する．

- 3) 図9より，0°から最大荷重位置を少し越えた200°の範囲と280°~360°までの範囲でクリープが進行している．逆に200°~280°では内輪が逆方向に進んでいる．
- 4) また，最大負荷位置(180°)より少し手前の，転動体が通過する近辺で相対移動が止まっていることが認められる．

## 4. 有限要素法(FEM)による検証

### 4.1 モデル

図10にFEMモデルを示す．これは図7の試験装置のシャフトと内輪をモデル化したものである．荷重は転動体荷重を面圧分布で入力している．

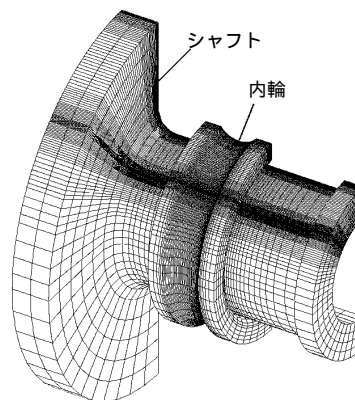


図10 FEMモデル図  
FEM model

### 4.2 FEM解析結果

しめしろについては2水準(10 $\mu\text{m}$ ，30 $\mu\text{m}$ )で実施している．図11に代表で，しめしろ30 $\mu\text{m}$ ・ラジアル荷重30kN時の内輪とシャフトのはめあい面の面圧( )分布を，図12に同条件でののはめあい面の円周方向せん断力( )分布を示す．さらに3次元表示では分かりにくいので，図13にはめあい面中央部の円周方向の面圧分布を，図14に同様にせん断力分布を示す．

- 1) 図11・図13より，負荷圏(90°~180°)では面圧分布は転動体荷重の位置にピークが認められる．また，90°以下の反負荷圏ではほぼ一定の低い値を示しているが，これははめあいによる面圧と考えられる．特に，しめしろ10 $\mu\text{m}$ ではほぼ0に近い値を示している．
- 2) 図12・図14より，せん断力は転動体荷重の掛かっている位置より若干ずれた位置にピークが認められる．

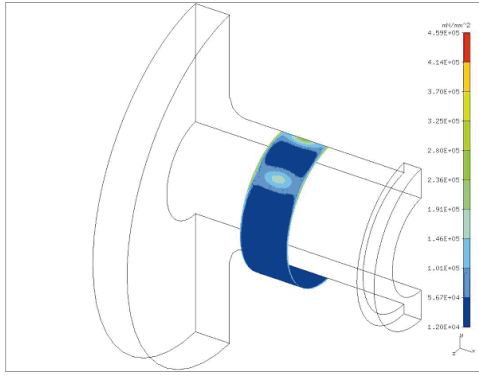


図11 面圧分布(しめしろ30 $\mu\text{m}$  ラジアル荷重30kN)  
Distribution of surface pressure  
(interference: 30  $\mu\text{m}$ , radial load: 30kN)

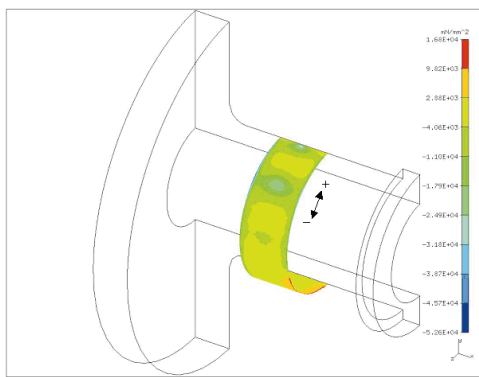


図12 せん断力分布  
(しめしろ30 $\mu\text{m}$  ラジアル荷重30kN)  
Distribution of shear stress  
(interference: 30  $\mu\text{m}$ , radial load: 30kN)

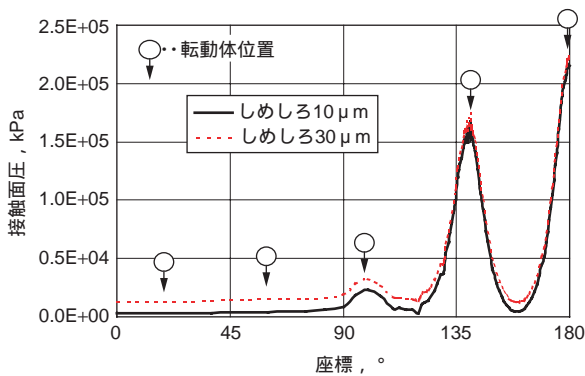


図13 面圧分布(はめあい中央)  
Distribution of surface pressure (center of the fitting surface)

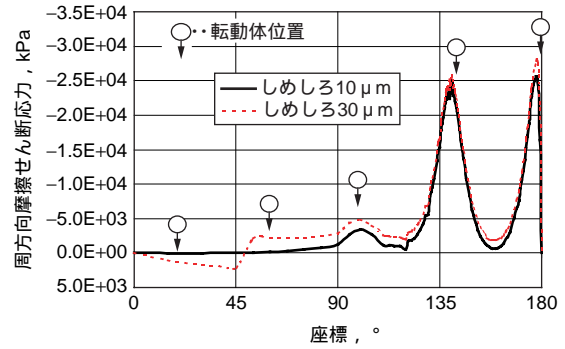


図14 せん断力分布(はめあい中央)  
Distribution of shear stress (center of the fitting surface)

ここで、滑りが発生するのは

$$> \mu$$

$\mu$  : 静摩擦係数.....図15の方法により、実測にて求めた。

であるので、FEMに実測で求めた $\mu$ を入力して、滑り量の分布を算出した。図16に、しめしろ30 $\mu\text{m}$ ・ラジアル荷重30kN時の内輪とシャフトのはめあい面周方向滑り量分布を、図17にはめあい面中央部の2次元分布を示す。

- 1) 図16・図17から、負荷荷重の大きい180°近辺の転動体では0°側にずれた位置で、滑りのピークが認められる。

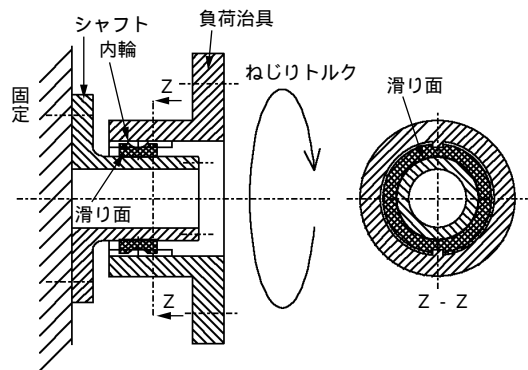


図15  $\mu$ 測定方法  
Measurement method of friction  $\mu$

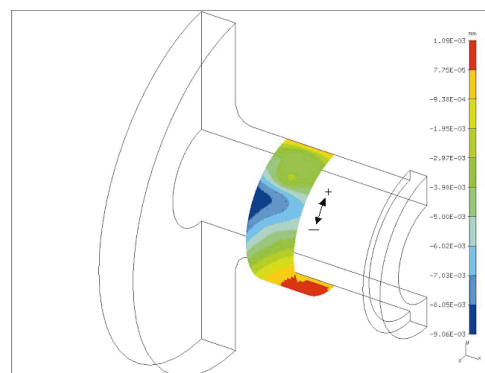


図16 滑り分布(しめしろ30 $\mu\text{m}$  ラジアル荷重30kN)  
Distribution of sliding (interference: 30  $\mu\text{m}$ , radial load: 30kN)



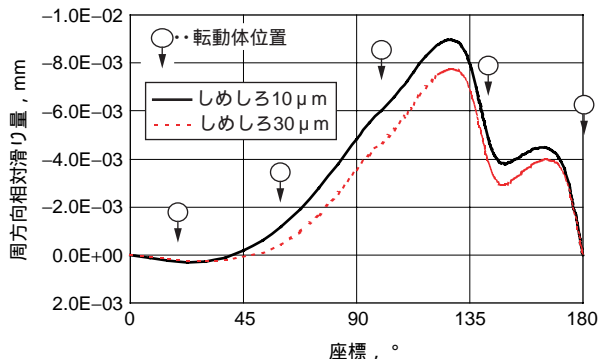


図17 滑り分布 (はめあい中央)

Distribution of sliding (center of the fitting)

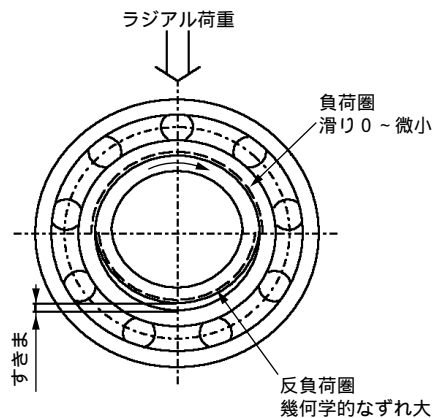


図18 “ゆるいはめあい”の機構

Mechanism of "loose fit"

## 5. 考察

FEMではある瞬間の静的なつり合い状態をシミュレートしている．よって4項で示したFEMのはめあい面の状態が，転動体の通過によって動的に変化することで，3項の結果(図8，図9)のとおり，内輪が滑ると考えられる．

また，3項の実測結果から，クリープの発生機構はしめしろ10 μm近辺と30 μmでは分けて考える必要がある．つまり，しめしろ10 μm近辺は“ゆるいはめあい”によるクリープ機構が支配的であると考えられ，30 μm近辺では“かたいはめあい”のクリープ機構が支配的であると考える．

### 5.1 ゆるいはめあいの場合

図8の実測結果より，荷重の負荷されていない反負荷圏で大きくクリープが進んでいる事がわかる．このことから図18に示すとおり，反負荷圏ではしめしろが無くなり，すきまになっている範囲で内輪とシャフトが幾何学的にずれていると考える．FEMの結果からも，反負荷圏でははめあい中央部においてもほぼ面圧が0になっており，軸方向の一部ではすきまである結果が得られている．なお，負荷圏側は，20kNでは滑りは認められないが，30kNでは若干滑りが認められる．これは，次項の“かたいはめあい”の機構と同じ原理によるものとする．

### 5.2 かたいはめあいの場合

図17のFEMの結果から，転動体の位置から0°側にずれた位置に滑りのピークが認められる．また，図9の実測結果から転動体が通過するときに内輪の動きが止まっている．よって，このことから下記の機構で内輪が滑っていると考えられる．

図19の概念図に示すとおり，90°~180°の位置にある転動体では，転動体荷重により発生したせん断力 $\tau(\theta)$ が面圧による摩擦力 $\mu\sigma(\theta)$ より大きくなったとき $\tau(\theta) > \mu\sigma(\theta)$ に，内輪とシャフトに微小滑りが生じる．また，その滑りは玉の通過する面圧がピークとなる時に固着する．その繰り返しにより内輪とシャフトが少しずつずれてゆきクリープが発生するものとする．

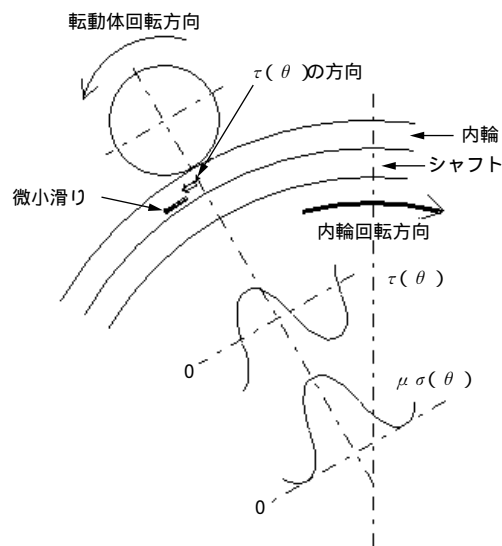


図19 “かたいはめあい”の機構

Mechanism of "tight fit"

なお，図9の実測値において， $200^{\circ} \sim 280^{\circ}$  近辺で，逆方向に内輪が滑っている．これは，この領域において転動体の回転方向とは逆方向に滑りのピークが出るので（FEMの結果は左右対称になるので），滑りが固着されることが無く，この領域だけの滑りになっていると考える．

## 6. おわりに

クリープの基礎的な試験に加え，3次元でのFEM解析の結果，以下の事項が明らかになった．

- 1) ゆるいはめあい” “かたいはめあい” の各場合に円周上のどの位置でクリープが発生しているか実測により確認することができた．
- 2) 内輪クリープの発生機構について，実測とFEMを組み合わせ，定性的ではあるが考察することができた．

## 参考文献

- 1) PALMGREN: 「Ball and Roller Bearing Engineering」 S. H. Burbank & Co., Inc. (1945) 115.
- 2) 今井正也：潤滑，vol. 4，no. 6 (1959) 15.
- 3) 曾田範宗：軸受，岩波全書，岩波書店(1964)，202.

## 筆 者



村田順司\*  
J. MURATA



鬼塚高晃\*  
T. ONIZUKA

\* 軸受事業本部 解析技術部