

## 摩擦熱を伴う転がり接触による三次元内部傾斜き裂の進展挙動\*

清水理能<sup>\*1</sup>, 五嶋孝仁<sup>\*1</sup>  
内山隆嗣<sup>\*2</sup>, 石原外美<sup>\*1</sup>Three Dimensional Internal Inclined Crack Growth Behavior  
due to Repeated Rolling Thermoelastic ContactMasayoshi SHIMIZU<sup>\*3</sup>, Takahito GOSHIMA,  
Ryuji UCHIYAMA and Sotomi ISHIHARA<sup>\*3</sup> Faculty of Engineering, Toyama University,  
3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555 Japan

This paper considered three dimensional internal inclined crack growth behaviors due to repeated rolling thermoelastic contact. In this analysis, crack is modeled as an internal inclined planar crack in a three dimensional half-space. Rolling contact is simulated as a long and narrow distributed load with both normal and shear components moving with constant velocity. At first, stress intensity factors along the crack contour are analyzed using high carbon chromium bearing steels. Next, numerical results of crack growth contours are given based on a modified Paris power law. And fatigue life is estimated by maximum crack growth. The shapes of crack contour and fatigue life are calculated under various conditions, which change sliding ratio, frictional coefficient, depth and angle of inclined crack. And influences of conditions, which affect the shapes and fatigue life, are considered from viewpoint of stress distributions in the state where there is no crack.

**Key Words:** Crack Propagation, Elasticity, Thermal Stress, Stress Intensity Factor, Fracture Mechanics, Contact Problem, Fatigue, Rolling Contact

## 1. 緒 論

歯車, 転がり軸受けの疲労き裂や圧延ローラーのスポーリング, 鉄道レールにおけるシェリングなど, 繰り返し転がりすべり接触疲労によるトライボロジー損傷は数多く見られる。このような転がり接触により, き裂が発生, 進展して疲労損傷に至る事故例が多い。特に構造材料内部に介在物, 空孔等の欠陥がある場合, これら内部欠陥からき裂が生ずる可能性が大きい。

内部き裂の解析については, Suh<sup>(1)</sup>の摩耗に関するデラミネーション理論の基礎解析以来, 多くの破壊力学的研究が報告されるようになった。例えば Fleming<sup>(2)</sup>はすべり接触荷重を受ける半無限体の表面に平行な内部き裂に関し, 応力拡大係数を解析し, き裂進展について報告している。さらに, Hearle<sup>(3)</sup>は表面で集中荷重と摩擦力が移動する場合の半無限体の内部水平き裂について, き裂のすべりを考慮した解析を行っ

ている。また, Miller<sup>(4)</sup>は表面が圧縮集中荷重を受ける半無限体中の分岐した内部き裂について, Yu<sup>(5)</sup>は表面が剛体ローラーによって転がり変位を受ける半無限体中の水平および垂直の内部き裂についてそれぞれ応力拡大係数を解析している。以上の報告はすべて温度分布を考慮しない問題として取り扱っているが, 実際の転がり接触では, すべり摩擦を伴ういわゆる転がりすべり接触となっていると考えられる。このような場合では摩擦熱が発生し, 厳密には熱弾性接触問題として取り扱う必要がある。このため五嶋<sup>(6)</sup>は, 内部き裂を有する半無限体表面が, 摩擦熱を伴う転がりすべり接触を受けたときの応力拡大係数を解析している。また三次元表面き裂についても検討を行い, き裂進展挙動について検討を行っている<sup>(7,8,9)</sup>。また Fujii<sup>(10)</sup>のように内部き裂を有限要素法により解析した例も見られる<sup>(10)</sup>。

このようにき裂をもつ物体に繰り返し転がり接触を受けた場合の解析は数多く行われている。しかしながら内部欠陥に関して三次元問題として取り扱い, また実際の疲労き裂進展挙動まで取り扱っているものはほとんど見当たらないのが現状である。

\* 原稿受付 2004年3月26日。

<sup>\*1</sup> 正員, 富山大学工学部(☎930-8555 富山市五福3190)。<sup>\*2</sup> 学生員, 富山大学大学院理工学研究科。

E-mail: shim@eng.toyama-u.ac.jp

そこで本研究では、三次元内部き裂を有する半無限体がローラーによって繰り返し転がりすべり荷重を受け、接触領域で摩擦熱を生ずる場合について解析を行った。数値計算には高炭素クロム軸受け鋼を用いて、疲労き裂進展挙動の数値シミュレーションを行い、さらに転がり疲労寿命を数値的に推定し、き裂深さ、き裂傾斜角度、摩擦係数、すべり率などが疲労き裂進展形状、疲労寿命に及ぼす影響について応力状態より検討した。

2. 理論解析

**2.1 解析モデルと境界条件** 本研究では内部に円形状の三次元平面き裂を有する半無限体がローラーによって転がりすべり接触を受ける場合を考える。図1に示す様に、ローラーによる転がりすべり接触は接触圧力  $P(x)$  と摩擦力  $fP(x)$  でモデル化し、すべり速度  $V_s$  を持つ転がり接触中のすべりによって接触領域で摩擦熱  $q(x)$  が生じるものとする。ここで  $f$  は摩擦係数を表す。また解析にあたっては図1に示す座標系をとるものとする。このとき、き裂面では摩擦がなく、非接触状態で圧力がないものとするれば力学的および熱的境界条件は次式で与えられる。

$$\sigma_{22}(x_1, 0, x_3) = \begin{cases} -P(x) & |x| < c \\ 0 & |x| > c \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_{23}(x_1, 0, x_3) = \begin{cases} -fP(x) & |x| < c \\ 0 & |x| > c \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_{21}(x_1, 0, x_3) = 0 \quad -\infty < x_1, x_3 < +\infty \quad (3)$$

$$\sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3) = 0 \quad x_2 \rightarrow \infty \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$\left[ K_t \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right]_{y=0} = \begin{cases} -q(x) & |x| < c \\ 0 & |x| > c \end{cases} \quad (5)$$

$$T(x, y) = 0 \quad y \rightarrow \infty \quad (6)$$

$$\sigma'_{33}(x'_1, x'_2, 0) = 0 \quad x'_1, x'_2 \in D_{op} \quad (7)$$

$$\sigma'_{3i}(x'_1, x'_2, 0) = 0 \quad x'_1, x'_2 \in D \quad i = 1, 2$$

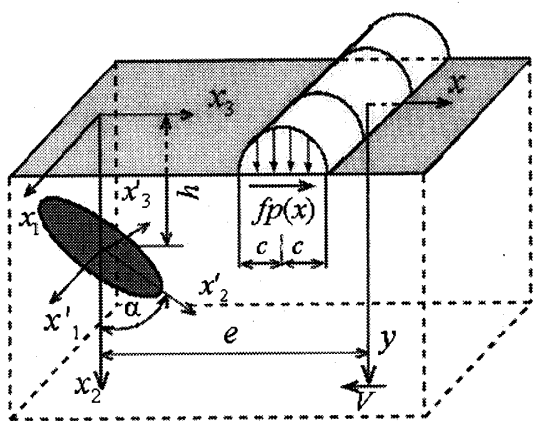


Fig. 1 Geometry and Coordinate System

ここで  $K_t$  は熱伝導率、 $D$  は平面き裂領域、 $D_{op}$  はき裂開口領域を示し、 $\sigma'_{3i}$  のプライム “'” は座標系  $(x'_1, x'_2, x'_3)$  での表示を意味する。

ここでは接触圧力  $P(x)$  を次式によって表される Hertz 分布と仮定する。

$$P(x) = P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{c}\right)^2} \quad (8)$$

また摩擦による仕事すべて熱に変換されるものとするれば接触領域において生じる摩擦熱は次式で表される。

$$q(x) = fV_s P(x) = fVS_r P(x) \quad (9)$$

ここで  $S_r = V_s/V$  はすべり率を示す。

**2.2 応力拡大係数の理論解析** 求める応力場  $\sigma_{ij}$  は次式のように、き裂のない半無限体の応力  $\sigma_{ij}^0$  にき裂による応力場のかく乱  $\sigma_{ij}^1$  を重ね合わせて求めることができる。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}^1 \quad (10)$$

さらにき裂のない半無限体の応力  $\sigma_{ij}^0$  は接触荷重  $P(x)$  と摩擦力  $fP(x)$  による応力場  $\sigma_{ij}^p$  と表面応力自由の境界条件のもとで、温度分布による準定常熱応力  $\sigma_{ij}^T$  を重ね合わせるにより求めることができる。境界条件を満たす半無限体の応力解  $\sigma_{ij}^p$  はよく知られており、次のように得られる<sup>(11)</sup>。

$$\sigma_{33}^p = -\frac{2\bar{y}}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{P(t)(\bar{x}-t)^2 dt}{\{(\bar{x}-t)^2 + \bar{y}^2\}^2} \quad (11)$$

$$\sigma_{22}^p = -\frac{2\bar{y}^3}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{P(t) dt}{\{(\bar{x}-t)^2 + \bar{y}^2\}^2} - \frac{2\bar{y}^2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{fP(t)(\bar{x}-t) dt}{\{(\bar{x}-t)^2 + \bar{y}^2\}^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{23}^p = -\frac{2\bar{y}^2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{P(t)(\bar{x}-t) dt}{\{(\bar{x}-t)^2 + \bar{y}^2\}^2} - \frac{2\bar{y}^2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{fP(t)(\bar{x}-t)^2 dt}{\{(\bar{x}-t)^2 + \bar{y}^2\}^2} \quad (13)$$

ここで  $\bar{x} = x/c$ ,  $\bar{y} = y/c$  とする。

また 応力自由の境界条件で、温度分布  $T(x, y)$  による熱応力  $\sigma_{ij}^T$  は Mow と Cheng<sup>(12)</sup> の解析に基づいて計算される。このとき熱応力は次のように得られる。

$$\frac{\sigma_{ij}^T}{H} = \int_1^{\bar{x}} F_{ij}^C(\bar{x}, \bar{y}, t) dt \quad \bar{x} \leq -1 \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_{ij}^T}{H} = \int_1^{\bar{x}} F_{ij}^P(\bar{x}, \bar{y}, t) dt + \int_1^{\bar{x}} F_{ij}^C(\bar{x}, \bar{y}, t) dt \quad (15)$$

$$-1 < \bar{x} \leq -1$$

$$\frac{\sigma_{ij}^T}{H} = \int_1^{\bar{x}} F_{ij}^P(\bar{x}, \bar{y}, t) dt + \int_1^{\bar{x}} F_{ij}^C(\bar{x}, \bar{y}, t) dt \quad (16)$$

$$\bar{x} > 1$$

ここで  $F_{ij}^P, F_{ij}^C$  は  $x, y$  の無次元変数を用いて以下のよう表される。

$$F_{ij}^P(\bar{x}, \bar{y}, t) = \frac{4\sqrt{1-t^2}}{Pe\sqrt{\pi Pe}} \Gamma_{ij}^P(\bar{x}, \bar{y}, t) \quad (17)$$

$$\times \exp\left[-\frac{Pe\bar{y}^2}{4(\bar{x}-t)}\right]$$

$$F_{ij}^C(\bar{x}, \bar{y}, t) = \frac{\sqrt{2}\sqrt{1-t^2}\bar{y}^{-3/2}}{Pe\sqrt{\pi Pe}} \Gamma_{ij}^C(\bar{x}, \bar{y}, t) \quad (18)$$

$$+ \frac{8\sqrt{1-t^2}\gamma'(t)}{\pi Pe\bar{y}[\gamma^2(t)+1]^2}$$

ここで  $\gamma(t) = (\bar{x}-t)/\bar{y}$  であり、 $\Gamma_{ij}^P$  および  $\Gamma_{ij}^C$  は五嶋ら<sup>(9)</sup>によって求められている。また式(14)～(16)中の熱応力の大きさを決めるパラメータ  $H$  は次式で与えられる。

$$H = \frac{\alpha_0 \mu \kappa (1+\nu) Pe f S_r}{K_I (1-\nu)} \quad (19)$$

ここで  $\nu$  はポアソン比、 $\mu$  は横弾性係数、 $\alpha_0$  は線膨張係数、 $\kappa$  は温度伝導率、 $Pe$  はペクレ数である。

一方、き裂による応力場のかく乱  $\sigma_{ij}^1$  は、半無限体中のき裂の体積を  $\Omega$  とし、表面で応力自由の境界条件を満足するような eigen ひずみ  $\varepsilon_j^*$  を分布させると、グリーン関数  $G_i$  を用いて次式で与えられる。

$$\sigma_{ij}^1(\mathbf{x}) = C_{ijkl} \int_{\Omega} C_{pqmn} \varepsilon_{mn} \cdot \frac{\partial G_s^{(q)}(\mathbf{x}, \xi)}{\partial x_i \partial \xi_p} \cdot d\xi \quad (20)$$

ここで  $C_{ijkl}, C_{pqmn}$  は弾性定数である。また、 $\mathbf{x}, \xi$  はベクトル  $(x_1, x_2, x_3), (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  を示す。グリーン関数  $G_i^{(q)}(\mathbf{x}, \xi)$  は Mindlin<sup>(13)</sup> によって得られていて、半無限体等方性体中の点  $\xi$  に働く  $x_j$  方向の単位体積力によって点  $\mathbf{x}$  で生ずる  $x_i$  方向の変位を示す。平面き裂領域  $D$  を三次元領域  $\Omega$  の極限の形と考え、 $\pm \xi_3$  方向における  $\Omega$  の

表面までの距離を  $\pm q(\xi_1', \xi_2')$  と定義する。このとき  $\Omega \rightarrow D$  の極限におけるき裂開口変位  $b_m'(\xi_1', \xi_2')$  は次のように得られる

$$b_m'(\xi_1', \xi_2') = 2 \int_q^q \varepsilon_{3m}^*(\xi_1', \xi_2', \xi_3') d\xi_3' \quad (21)$$

以上の式を用いて式(10)のように重ね合わせを行い、き裂面における応力境界条件式(7)に代入すれば、つぎのような連立特異積分方程式が与えられる。

$$\sum_{m=1}^3 \int_D b_m'(\xi_{12}') K_{im}(x_{12}', \xi_{12}') d\xi_{12}' \quad (22)$$

$$= -\sigma_{3i}^0(x_1', x_2', 0) \quad x_{12}' \in D$$

ここで  $x_{12}', \xi_{12}'$  はベクトル  $(x_1', x_2'), (\xi_1', \xi_2')$  を示し、核  $K_{im}(x_{12}', \xi_{12}')$  は五嶋ら<sup>(9)</sup>によって与えられている。

この連立特異積分方程式を Murakami<sup>(14)</sup> らや Lee ら<sup>(15)</sup> によって用いられたものと同様な方法で数値的に解く。このとき、き裂開口変位は積分点からの最短距離  $\varepsilon$  を用いると次式で与えられる。

$$b_i'(\xi_1', \xi_2') = \sqrt{2a\varepsilon - \varepsilon^2} f_i(\xi_1', \xi_2') \quad i=1,2,3 \quad (23)$$

ここで  $a$  はき裂の代表長さを示す。さらにき裂の領域  $D$  を  $N$  個の三角形要素  $D_k (k=1,2,\dots,N)$  に分割し、各要素  $D_k$  内では未知関数  $f_i(\xi_1', \xi_2')$  は一定であるとする。すると、式(22)の積分方程式は離散化されて次の代数方程式に変換される。

$$\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^N K_{ij}^{\beta k} f_j^{\beta} = -\sigma_{3i}^0(x_1^{\beta}, x_2^{\beta}, 0) \quad i=1,2,3 \quad (24)$$

ここで、 $(x_1^{\beta}, x_2^{\beta})$  は各三角形領域における選点である。また、係数  $K_{ij}^{\beta k}$  は次式で与えられる。

$$K_{ij}^{\beta k} = \int_{D_k} \sqrt{2a\varepsilon - \varepsilon^2} K_{ij}(x_{12}^{\beta}, \xi_{12}^{\beta}, 0) d\xi_1' \xi_2' \quad i=1,2,3 \quad (25)$$

式(25)の積分はガウスの二重積分を各三角形要素に適用的に用いることで解くことができる。

このとき、き裂前縁の応力拡大係数  $K_I$  はき裂前縁に位置する領域での解  $f_i(\xi_1', \xi_2')$  を用いて次のように関係づけられる。

$$\{K_I, K_{II}, K_{III}\} = P_0 \sqrt{\pi a} \{f_3, f_2, f_1\} \quad (26)$$

**2.3 疲労き裂進展形状シミュレーション** 実際の転がり接触疲労によるき裂の進展を解析する場合には、図1での  $e=+\infty$  からき裂を通り過ぎるまでを1サイクルとし、このときの応力拡大係数の変動幅

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$  が重要なパラメータとなる。また、き裂が進展する際には単一のモードではなく混合モードで進展する。そのため Paris 則を修正した次式を用いる。このときエネルギー解放率  $\Delta G$  は次式のようになる。

$$\Delta G = ((1-\nu)K_{I_{\max}}^2 + (1-\nu)\Delta K_{II}^2 + \Delta K_{III}^2)/2\mu \quad (27)$$

き裂前縁におけるエネルギー解放率  $\Delta G$  が下限界値  $\Delta G_{th}$  を超えるとき、き裂が進展すると考える。このとき、き裂前縁における点の垂直伝播速度は次式で与えられる。

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C_0 \left( \frac{\sqrt{\Delta G}}{\sqrt{\Delta G_{th}}} \right)^\gamma & \text{if } \Delta G \geq \Delta G_{th} \\ 0 & \text{if } \Delta G < \Delta G_{th} \end{cases} \quad (28)$$

ここで、 $C_0$  と  $\gamma$  は材料定数、 $N$  はサイクル数、 $\Delta G_{th}$  はき裂進展に対するエネルギー解放率下限界値を示し、 $\Delta G_{th} = (1-\nu^2)\Delta K_{th}/E_0$  で与えられる。ここで  $E_0$  は縦弾性係数である。実際の疲労き裂進展のシミュレーションは以下の手順で行う。

- (1) 1 サイクル中の応力拡大係数の数値計算をもとに式(27)より  $\Delta G$  を決定する。
- (2) 次に式(28)によりき裂前縁の各選点での  $da/dN$  を計算する。
- (3) そして進展速度が最大となった  $(da/dN)_{\max}$  の点において、き裂進展のきざみ量  $(\Delta a)_{\max}$  を決めて、 $(\Delta a)_{\max} = (da/dN)_{\max} \Delta N$  より  $\Delta N$  を決定する。そして、 $(\Delta a) = (da/dN) \Delta N$  よりき裂の他の選点での  $\Delta a$  を決定する。
- (4) き裂前縁の各選点での  $\Delta a$  が求まるので、新しいき裂形状が決定される。

以上の(1)~(4)のステップを繰り返して、き裂進展の数値シミュレーションを行う。

### 3. 数値計算

**3.1 数値計算例** 数値計算は高炭素クロム軸受け鋼 (SUJ2) を例にとり、傾斜角度  $\alpha = 0^\circ \sim -180^\circ$  で半径  $r = 40 \mu\text{m}$  の円形の初期平面き裂がある場合について計算を行った。必要な SUJ2 の材料定数を表 1 に示す<sup>9)</sup>。接触荷重は Hertz 分布接触圧力で、Hertz 最大接触圧力  $P_0 = 2.0 \text{ GPa}$ 、接触半幅  $c = 400 \mu\text{m}$ 、ペクレ数  $Pe = 100$  の場合について、種々のすべり率、摩擦係数における進展形状を求めた。また最大進展量  $(\Delta a)_{\max} = 10 \mu\text{m}$  で一定値とし計算を行った。

**3.2 き裂進展形状** 図 2 ~ 図 4 にはそれぞれ初期き裂角度が  $\alpha = 0^\circ, -45^\circ, -90^\circ$  での最大き裂長さが  $80 \mu\text{m}$  になるまでのき裂形状の変化を示す。き裂深さはいずれも  $h = 100 \mu\text{m}$  とする。なお摩擦係数および熱的効果の小さい ( $f=0.1, S_r=0.1$ ) 場合と大きい ( $f=0.7, S_r=0.7$ ) 場合をそれぞれ (a), (b) に示す。

Table 1 Material Properties of SUJ2

$E_0$ [GPa]	207
$\nu$	0.3
$\alpha_r$ [ $\text{K}^{-1}$ ]	$11.0 \times 10^{-6}$
$K$ [w/mK]	43
$\kappa_r$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$1.17 \times 10^{-5}$
$C_0$	$2.0 \times 10^{-11}$
$\gamma$	4
$\Delta K_{th}$ [ $\text{MPa}^{1/2}$ ]	3.4

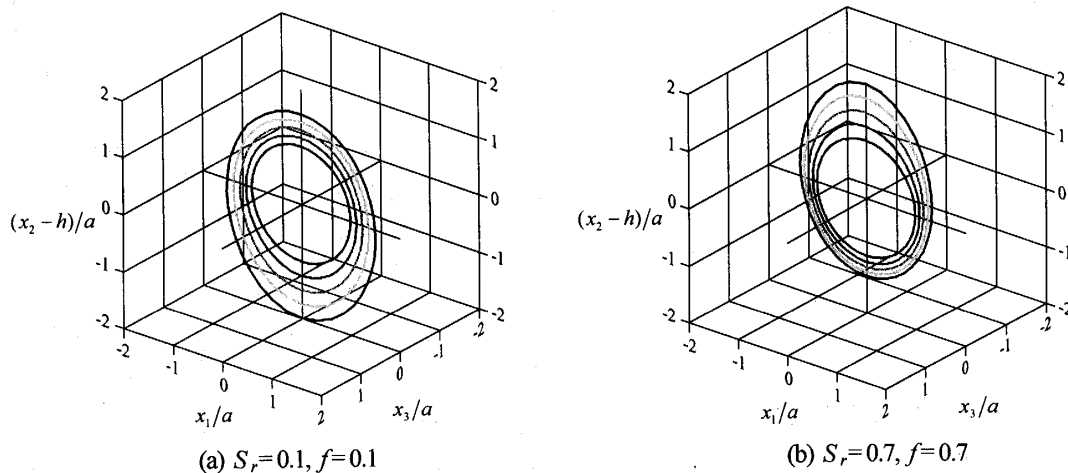
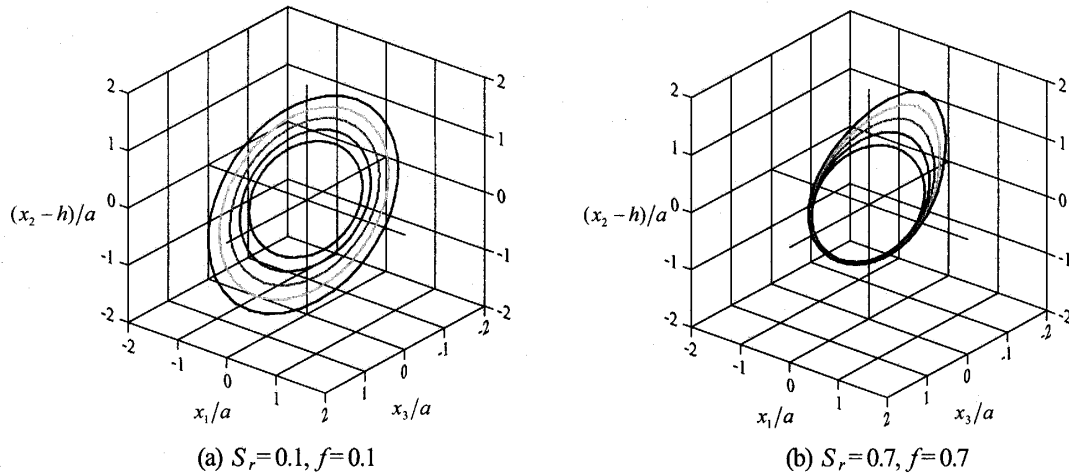
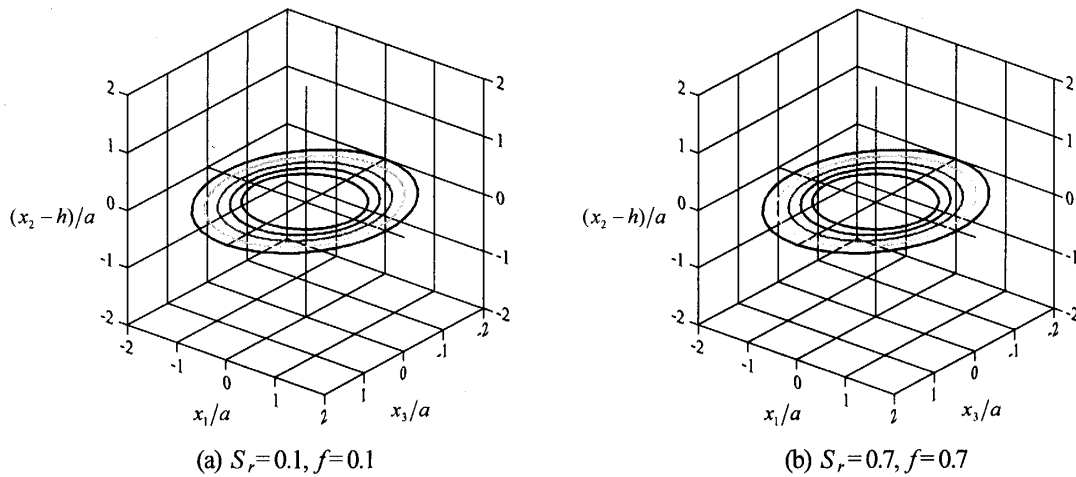
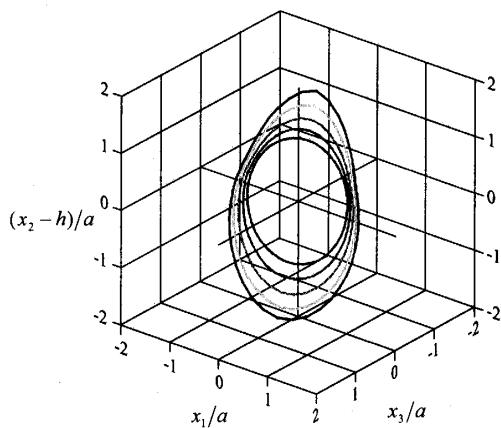


Fig. 2 Crack Growth Contours ( $\alpha = 0^\circ, h = 100 \mu\text{m}$ )

Fig. 3 Crack Growth Contours ( $\alpha = -45^\circ, h = 100 \mu\text{m}$ )Fig. 4 Crack Growth Contours ( $\alpha = -90^\circ, h = 100 \mu\text{m}$ )Fig. 5 Crack Growth Contours  
( $\alpha = -15^\circ, h = 100 \mu\text{m}, S_r = 0.5, f = 0.5$ )

き裂進展過程における最大き裂進展を示す位置に着目すると $\alpha = 0^\circ, -45^\circ$ では摩擦係数および熱的効果の少ない場合はき裂下部が大きく進展する。しかしながら摩擦係数および熱的効果が大きい場合には

き裂上部が進展し、特に $\alpha = -45^\circ$ では深い方向にはほとんど進展が見られないことがわかる。これに対し $\alpha = -90^\circ$ では条件によらず水平方向にほぼ同程度進展していることがわかる。

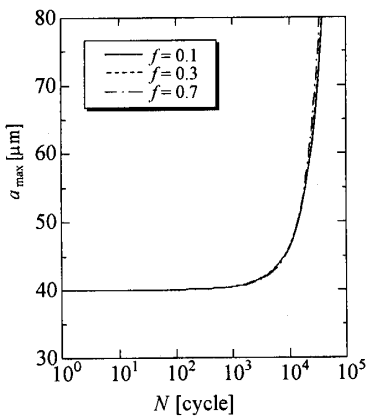
このように、ほとんどの条件における解析結果では最大き裂進展を示す位置が明確であり、進展過程途中においてその位置が変化することはなかった。しかしながら、 $\alpha = -15^\circ$ ですべり率 $S_r = 0.5$ 、摩擦係数 $f = 0.5$ とした場合については、特殊な進展を示した。図5に示すようにき裂進展初期は表面から遠いき裂下部が大きく進展し、進展が進むにつれ最大の進展量を示す方向が逆になり、表面に近いき裂上部が大きく進展する。また、き裂中心よりやや浅い位置では進展量が著しく小さくなる部分があり、全体的にいびつな形状に進展していることがわかる。

**3.3 き裂進展寿命** 図6(a), (b)には深さ $h = 100 \mu\text{m}$ 、 $\alpha = 0^\circ$ の垂直き裂についてそれぞれ $S_r = 0.1$ および

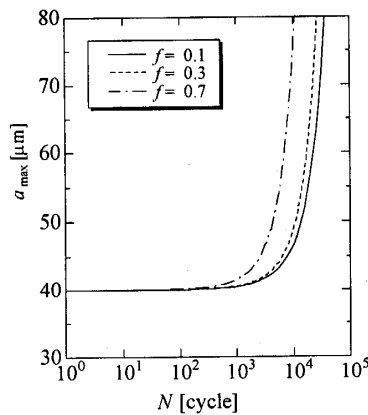
0.7とし $f$ を3通り(0.1, 0.3, 0.7)に変化させた場合について最大き裂長さとサイクル数の関係を示す。いずれの場合もき裂長さは初め緩やかに増加しているが、サイクル数の増加とともに、急激に増加している。すべり率が小さい場合、摩擦係数を変化させてもほとんど変化が見られないが、すべり率が大きいときは摩擦係数が大きくなると少ないサイクル数でき裂が進展していることがわかる。

このようにして求めた全き裂長さ $a$ とサイクル数 $N$ の関係より $a_{max} = 80\mu\text{m}$ のときの $N$ を転がり疲労寿命 $N_f$ と定義する。そこで、き裂傾斜角度が寿命 $N_f$ にどのように影響を及ぼすかを検討するため、図7(a), (b), (c)にそれぞれ、深さ $h = 100\mu\text{m}$ ,  $170\mu\text{m}$ ,  $200\mu\text{m}$ のときの、き裂傾斜角度 $\alpha$ による転がり疲労寿命 $N_f$ の変化を示す。深さ $h = 100\mu\text{m}$ の場合、摩擦係数が大きくなると、き裂傾斜角度に対し寿命の増減の幅が大きくなっていることがわかる。この傾向は深さが深くなると見られなくなる。また、いずれ

の場合も、摩擦係数が小さいときは、 $\alpha = 0^\circ$ ,  $-90^\circ$ 付近で寿命は最小となり、摩擦係数が大きくなるとそれぞれ、 $\alpha = -135^\circ$ ,  $-45^\circ$ に近づいていくことがわかる。しかし、深さが深くなるにつれ、その移動

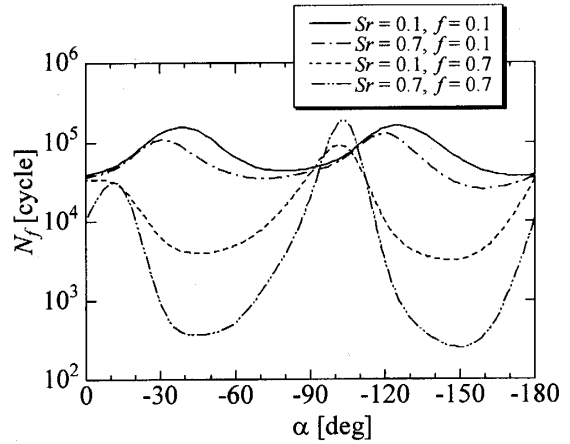


(a)  $S_r = 0.1, \alpha = 0^\circ, h = 100\mu\text{m}$

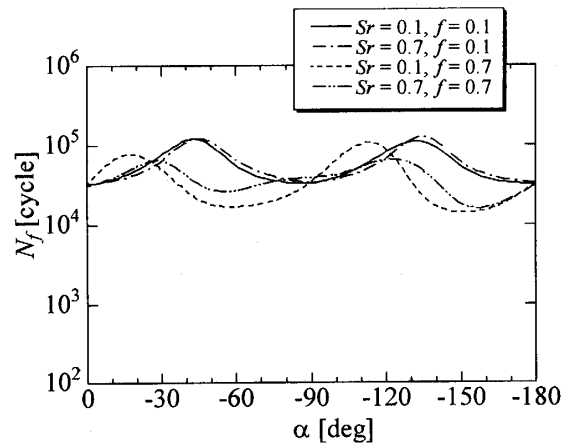


(b)  $S_r = 0.7, \alpha = 0^\circ, h = 100\mu\text{m}$

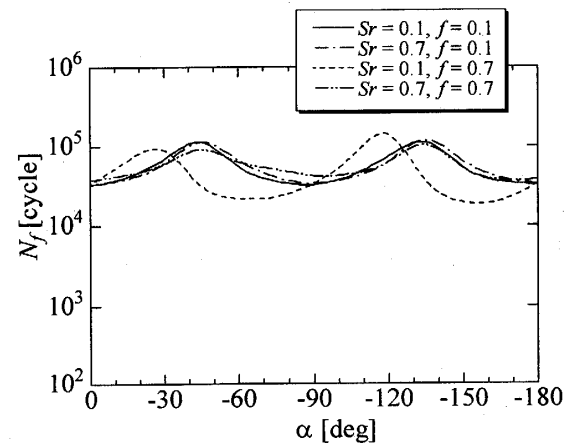
Fig. 6 Predicted Crack Size vs. Cycle  $N$



(a)  $h = 100\mu\text{m}$



(b)  $h = 170\mu\text{m}$



(c)  $h = 200\mu\text{m}$

Fig. 7 Fatigue Life vs. Angle of Inclined Crack

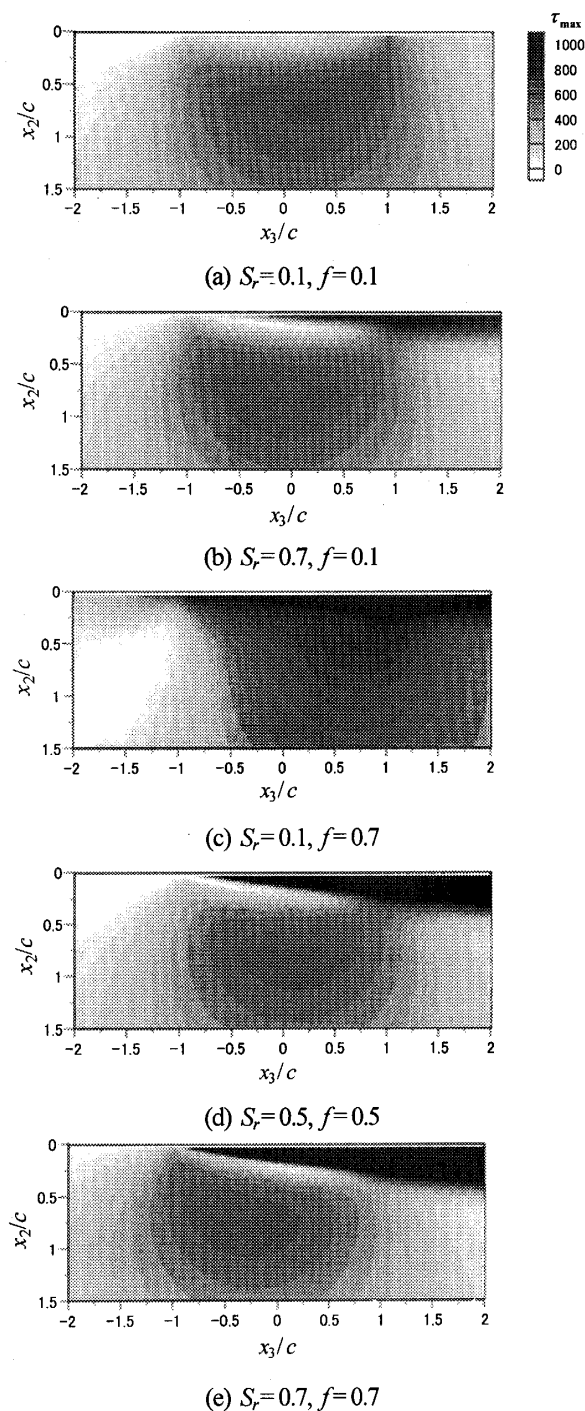


Fig. 8 Maximum Shear Stress Distribution due to Rolling Contact

量は減少していく。さらにすべり率が大きい場合の方がその傾向は顕著である。そのため深さ 200  $\mu\text{m}$  においてはすべり率  $S_r=0.7$ 、摩擦係数  $f=0.7$  の場合はき裂傾斜角度による変化が摩擦係数が小さい場合とほぼ一致していることがわかる。

また、深さ  $h=170 \mu\text{m}$  において、すべり率、摩擦係数がともに大きい場合、き裂傾斜角度  $\alpha$  が  $-90^\circ$

～ $-120^\circ$  のあたりで他の曲線にはみられない変化を示し、値の変化が緩やかになることがわかる。

**3.4 応力状態による考察** これまでに示したき裂進展形状および寿命におよぼす、すべり率、摩擦係数、き裂傾斜角度、深さの影響について、き裂のない状態での応力状態より検討を行うものとする。図 8 はすべり率および摩擦係数を変化させたときの最大せん断応力  $\tau_{\max}$  の分布を示す。Hertz 接触による内部応力は接触半幅の約 0.67 倍の深さで最大値をとることが知られており<sup>(6)</sup>、本解析では図 8(c)を除いてその近辺で大きなせん断応力を示している。また表面では摩擦力が働くため摩擦係数が大きい場合には表面に大きな値が生じており、さらに図 8(d), (e) のようにすべり率も大きいものでは  $x_2/c = 0.25$  近傍に非常に小さな値となる部分があることがわかる。

以上より、き裂進展形状に関して次の様に考察できる。図 2(a), 3(a)においてき裂下部が大きく進展しているのは表面に比べ内部の方が大きなせん断応力が生じているためであり、図 2(b), 3(b)においてき裂上部で大きく進展しているのは表面近傍で生じたせん断応力によるものである。また図 5 において、き裂進展形状が特殊なものとなった原因としては次のように考えることができる。き裂進展初期においては内部に生じた大きなせん断応力によりき裂下部における進展が大きくなる。しかし、き裂が進展するにつれて表面に生じた大きなせん断応力によりき裂上部の進展が大きくなる。またき裂がほとんど進展しない部分に関しては表面と内部の高い応力を示した位置の間にせん断応力が小さい部分が存在することによりほとんど進展しなかったものと考えられる。

次にき裂進展寿命とき裂傾斜角度について考察を行う。摩擦係数が小さい場合、すべり率によって変化が見られないのは図 8 (a), (b)からわかるように応力分布の差異が小さいためである。またき裂深さが浅い  $h=100 \mu\text{m}$  で摩擦係数が大きくなると寿命の増減の幅が大きくなり寿命が短くなるき裂傾斜角度が変化するのは、摩擦力により表面に生じた大きなせん断応力によるものと考えられる。さらに深くなるとその影響が小さくなり、 $h=200 \mu\text{m}$  では  $S_r=0.7$ 、 $f=0.7$  を除き、き裂傾斜角度による寿命が一致しているのは図 8 (a)～(c)では摩擦力による最大せん断応力が  $x_2/c=0.25$  である  $h=100 \mu\text{m}$  までしか生じず、それに対し  $S_r=0.7$ 、 $f=0.7$  である図 8 (e)では  $x_2/c=0.5$  である  $h=200 \mu\text{m}$  までこの最大せん断応力が生じているためと考えられる。

## 4. 結 言

本研究では内部に円形き裂を有する半無限体表面に摩擦熱を伴う繰り返し転がり接触を受けたときの応力拡大係数の三次元解析を行い、高炭素クロム軸受け鋼をモデルとして繰り返し接触中の応力拡大係数変動幅とエネルギー解放率を数値的に求め、これをもとにき裂進展挙動の数値シミュレーションを行った。また転がり疲労寿命を数値的に推定し内部き裂深さ、き裂傾斜角度、摩擦係数、すべり率が結果に及ぼす影響の考察を検討した。

- (1) 水平き裂を除き、き裂はすべり率および摩擦係数が小さい場合ではき裂は深い方向に進展していく。しかし、すべり率および摩擦係数が大きい場合では表面に大きく進展する。
- (2) 進展寿命はすべり率に比べ摩擦係数の影響を大きく受ける。
- (3) Hertz接触を受ける内部き裂の進展挙動と進展寿命はき裂のない熱応力場によってある程度定性的に評価できる。

## 参考文献

- (1) Suh, N. P., *Wear*, Vol. 44(1977),1-15
- (2) Fleming, J. R., Suh, N. P., *Wear*, Vol. 44(1987),39-56
- (3) Hearls, A. D., Jhonson, K. L., *Trans. ASME, J. Applied Mechanics*, Vol.54(1987)
- (4) Miller, G. R., *Trans. ASME, J. Tribol.*, Vol. 110 (1988), 292-296
- (5) Yu, M. M. H. Keer, L. M., *Trans. ASME, J. Tribol.*, Vol.111(1989), 648-654
- (6) 五嶋, 曾田, *機論(A)*, 62-600, (1996), 1854-1861
- (7) Goshima, T., Keer, L. M., *ASME, J. Tribol.*, 112(1990), 382
- (8) Goshima, T., Hanson, M. T., Keer, L. M., *J. Thermal Stresses*, 13(1990), 237
- (9) 五嶋, 石原, *機論*, 63-607(1997), 471-477
- (10) Fujii, Y., Maeda, K., *Wear*, 252(2002), 811-823
- (11) Johnson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, 19(1985), 204
- (12) Mow, V. C., Cheng, H. S., *Z. Angew. Math. Phys.*, 18(1967), 500
- (13) Mindlin, R. D., *Proc. First Midwestern Conf. Solid Mechanics*, (1953), 56
- (14) Murakami, Y., Nemat-nasser, S., *Eng. Fracture Mech.*, 17(1983), 193-210
- (15) Lee, J. C., Farris, T. N., Keer, L. M., *Eng. Fracture Mech.*, 27(1987), 27
- (16) Halling, J., *トライボロジ*, 近代科学社(1984), 48-51.