

# 321 加熱転がり接触を受ける被覆材の複数表面き裂進展特性

## Growth Behavior of Multiple Surface Cracks in Layered Media due to Hot Rolling Contact

○正 五嶋 孝仁(富山大工) 正 石原 外美 正 清水 理能 学 塚田 安喜(富山大院)

Takahito GOSHIMA, Sotomi ISHIHARA, Masayoshi SHIMIZU, Yasuki TSUKADA  
Faculty of Engineering, Toyama University, 3190, Gofuku, Toyama, 930-8555

Key Words : Elasticity, Thermal Stress, Contact Problem, Coating Layered Material, Multiple cracks

### 1. 緒言

近年,トライボロジ特性向上のため,被覆材が積極的に利用されている. このような被覆材が加熱などの種々の要因により多数の表面き裂を生ずることが多い. そこで本研究では加熱を伴う転がり接触を受ける複数の被覆材表面き裂の応力拡大係数を解析し,実際に一对の表面き裂の場合について,き裂接近に伴う応力拡大係数の干渉効果に及ぼす摩擦係数,熱流入強さおよびき裂長さなどの影響について検討した. さらに実際に繰り返し転がり接触を受ける場合の疲労き裂進展シミュレーションを行い,進展特性の定量的評価を行った.

### 2. 解析モデルと境界条件

解析モデルと座標系を Fig.1 に示す. 以下の解析では,次に示す様に接触半幅を基準長さとした無次元変数を採用する.  
 $(x, y) = (\tilde{x}/c, \tilde{y}/c)$ ,  $h = \tilde{h}/c$ ,  $l_k = \tilde{l}_k/c$ ,  $e_k = \tilde{e}_k/c$ ,  
 $R_j = cV/\kappa_j$ ,  $S_r = V_s/V$ ,  $K = K_2/K_1$ ,  $G_{12} = G_2/G_1$ ,  $\alpha = \alpha_1/\alpha_2$   
 ここで,  $G_j$  は横弾性係数,  $\alpha_j$  は線膨張係数,  $K_j$  は熱伝導率,  $\kappa_j$  は温度伝導率,  $R_j$  はベクレ数,  $S_r$  はすべり率,  $P_0$  はヘルツの最大接触圧力,  $V_s$  は転がり接触中に生じるすべり速度を示す.

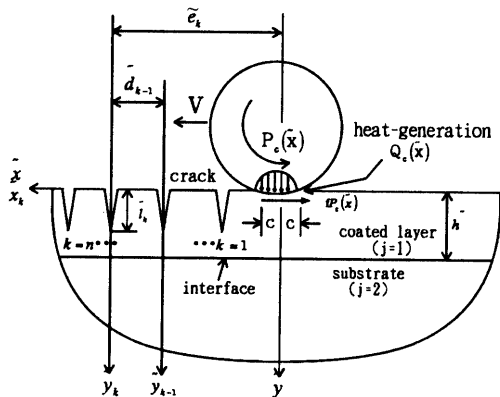


Fig.1. Geometry and coordinate system

ここで  $f$  を摩擦係数とすれば,摩擦熱は次式で与えられる.

$$Q_c(\tilde{x}_1) = fV, P_1(\tilde{x}_1) = fV, P_0 P(x_1) = fVS, P_0 P(x_1) \quad (1)$$

このとき, 熱的及び力学的境界条件は以下ようになる.

$$\frac{\partial T^{(1)}}{\partial y} = \begin{cases} -f c V P_0 P(x) / K_1, & |x| \leq 1, y = 0 \\ 0, & |x| > 1, y = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T^{(1)}}{\partial y} = K \frac{\partial T^{(2)}}{\partial y}, \quad y = h \quad (3)$$

$$T^{(1)} = T^{(2)}, \quad y = h \quad (4)$$

$$T^{(j)} = 0, \quad (j=1,2), \quad x^2 + y^2 \rightarrow \infty \quad (5)$$

$$\sigma_{xx}^{(1)} = \begin{cases} -P_0 P(x), & |x| \leq 1, y = 0 \\ 0, & |x| > 1, y = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma_{yy}^{(1)} = \begin{cases} f P_0 P(x), & |x| \leq 1, y = 0 \\ 0, & |x| > 1, y = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma_{yy}^{(1)} = \sigma_{yy}^{(2)}, \quad \sigma_{xy}^{(1)} = \sigma_{xy}^{(2)}, \quad y = h \quad (8),(9)$$

$$U_{xx}^{(1)} = U_{xx}^{(2)}, U_{yy}^{(1)} = U_{yy}^{(2)}, \quad y = h \quad (10),(11)$$

$$\sigma_{pq}^{(j)} = 0, \quad (p, q = x, y), (j=1,2), \quad x^2 + y^2 \rightarrow \infty \quad (12)$$

$$\sigma_{x_k y_k}^{(j)} = 0, \quad x_k = 0, \quad 0 \leq y_k \leq l_k \quad (k \text{ 番目のき裂面全領域}) \quad (13)$$

$$\sigma_{x_k y_k}^{(j)} = 0, \quad x_k = 0, \quad y_k \in y_{k \text{ top}} \quad (k \text{ 番目のき裂開口領域}) \quad (14)$$

### 3. 応力拡大係数の解析

求める応力  $\sigma_{pq}^{(j)}$  は, き裂のない被覆半無限体の熱応力  ${}^0\sigma_{pq}^{(j)}$  に, き裂による応力場  ${}^k\sigma_{pq}^{(j)}$  を  $n$  個重ね合わせて求められる.

$$\sigma_{pq}^{(j)} = {}^0\sigma_{pq}^{(j)} + \sum_{k=1}^n {}^k\sigma_{pq}^{(j)}, \quad (p, q = x, y; j=1,2; k=1,2,\dots,n) \quad (15)$$

き裂のない被覆半無限体の熱応力  ${}^0\sigma_{pq}^{(j)}$  は境界条件式(2)~(12)を満足するように熱弾性基礎式を解くことによって得られる. また,  $k$  番目のき裂による応力場  ${}^k\sigma_{pq}^{(j)}$  は任意の転位をき裂に沿って連続分布させて求めた特解に, (6)~(12)式を満足するように応力の一般解を加えて求めることができる.

このようにして求めた  ${}^0\sigma_{pq}^{(j)}$  と  ${}^k\sigma_{pq}^{(j)}$  を(15)式のように重ね合わせた  $\sigma_{pq}^{(j)}$  をき裂面での境界条件式(13),(14)式に代入すれば, 次のような転位密度に関する連立特異積分方程式を得る.

$$\int_0^{l_k} \frac{\alpha_{xx}^{(j)}(\eta_k)}{y_k - \eta_k} d\eta_k + \sum_{j=1}^n \int_0^{l_j} \left\{ \alpha_{yy}^{(j)}(\eta_j) \Gamma_{yy}^{(j)}(y_k, \eta_j) + \alpha_{xy}^{(j)}(\eta_j) \Lambda_{yy}^{(j)}(y_k, \eta_j) \right\} d\eta_j = -\frac{{}^0\sigma_{xx}^{(j)}(y_k)}{P_0} \quad (x_k = 0, y_k \in y_{k \text{ top}}, k=1,2,\dots,n) \quad (16)$$

$$\int_0^{l_k} \frac{\alpha_{xx}^{(j)}(\eta_k)}{y_k - \eta_k} d\eta_k + \sum_{j=1}^n \int_0^{l_j} \left\{ \alpha_{yy}^{(j)}(\eta_j) \Gamma_{yy}^{(j)}(y_k, \eta_j) + \alpha_{xy}^{(j)}(\eta_j) \Lambda_{yy}^{(j)}(y_k, \eta_j) \right\} d\eta_j = -\frac{{}^0\sigma_{yy}^{(j)}(y_k)}{P_0} \quad (x_k = 0, 0 \leq y_k \leq l_k, k=1,2,\dots,n) \quad (17)$$

ここで転位密度  $\alpha_{xx}^{(j)}(\xi_k)$ ,  $\alpha_{xy}^{(j)}(\xi_k)$  を特異性を分離して

$$\alpha_{xx}^{(j)}(\xi_k) = \frac{g_{xx}^{(j)}(\xi_k)}{[1-\xi_k]^\gamma [1-\xi_k]^\delta}, \quad \alpha_{xy}^{(j)}(\xi_k) = \frac{g_{xy}^{(j)}(\xi_k)}{[1-\xi_k]^\gamma [1-\xi_k]^\delta}, \quad \xi = \frac{2\eta_k - l_k}{l_k} \quad (18)$$

と置く. ただし,  $\eta_k < h$  のときは  $\gamma = \delta = 0.5$  である. また  $\eta_k = h$  のときは  $\gamma < 0.5, \delta < 0.5, \gamma \neq \delta$  となり,  $\gamma, \delta$  の値は被覆材と基材の材料定数を含む特性方程式の根で与えられる.

(18)式を(16),(17)式に代入し,  $\xi$  を等分割し Lagrange の補間を用いて離散化すれば, 積分方程式は  $g_{xx}^{(j)}(\xi_k), g_{xy}^{(j)}(\xi_k)$  に関する連立方程式に帰着され, これを数値的に解けば,  $k$  番目のき裂先端における応力拡大係数は次式で与えられる.

$$[K_I, K_{II}] = \frac{\pi P_0 (2lc)^\gamma}{2 \sin(\pi \gamma)} [g_{xx}^{(j)}(1), g_{xy}^{(j)}(1)], \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (19)$$

$$K_I^* = K_I / P_0 \sqrt{c}, \quad K_{II}^* = K_{II} / P_0 \sqrt{c} \quad (20)$$

4. 応力拡大係数の数値計算例

簡単な場合として一対のき裂を例にとり、基材を炭素鋼とし、アルミナ( $Al_2O_3$ )、超鋼合金(WC-Co)、窒化珪素( $Si_3N_4$ )を被覆材とした場合を比較検討する。材料定数を下表に示す。

Table 1 Material constants

	$Al_2O_3$	WC-Co	$Si_3N_4$	Carbon Steel
$E_f$ (GPa)	390.0	522.7	318.0	207.0
$\nu_f$	0.23	0.222	0.27	0.3
$\alpha_f$ ( $K^{-1}$ )	$7.19 \times 10^{-6}$	$5.34 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$11.0 \times 10^{-6}$
$K_f$ (W/mK)	20.73	33.5	21.0	43.0
$\kappa_f$ ( $m^2/s$ )	$4.99 \times 10^{-6}$	$1.14 \times 10^{-5}$	$9.8 \times 10^{-7}$	$1.17 \times 10^{-5}$

一例として無次元被覆厚さ  $h=0.5$ , すべり率  $Sr=0.1$ , 摩擦係数  $f=0.1$ , 熱流入がない( $\lambda=0$ )の場合について、応力拡大係数のローラの移動に伴う変動の一例を Fig.2,3 に示す。

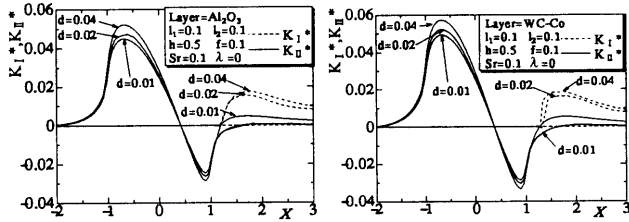


Fig.2 Stress intensity factors vs. crack-1 location ( $Al_2O_3$ )

Fig.3 Stress intensity factors vs. crack-1 location (WC-Co)

以下に  $l_1=l_2=0.1$  の場合について、摩擦係数  $f$  または熱流強さ  $\lambda$  が変化するときのモード I, II の応力拡大係数の最大値  $K_{I \max}$   $K_{II \max}$  と無次元き裂間距離  $d$  の関係を示す。

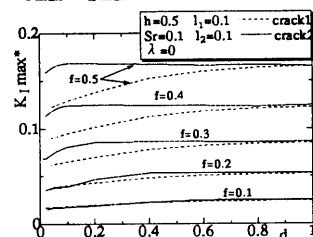


Fig.4  $K_{I \max}$  as a function of the  $d$  showing the effect of  $f$  ( $Al_2O_3$ )

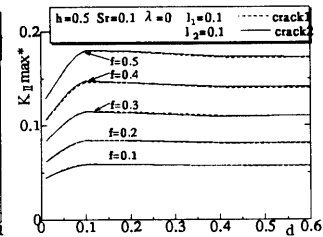


Fig.5  $K_{II \max}$  as a function of  $d$  showing the effect of  $f$  ( $Al_2O_3$ )

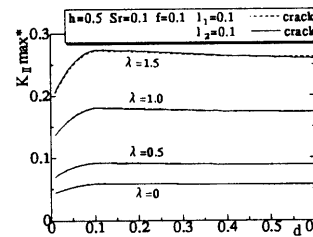


Fig.6  $K_{I \max}$  as a function of the  $d$  showing the effect of  $\lambda$  ( $Al_2O_3$ )

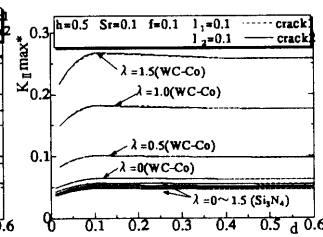


Fig.7  $K_{I \max}$  as a function of  $d$  showing the effect of  $\lambda$  (WC-Co,  $Si_3N_4$ )

また  $\lambda=0, f=0.1$  の場合、 $K_{II \max}$  と  $d$  の関係に及ぼすき裂長さの影響を、等長き裂( $l_1=l_2$ )の場合と、 $l_1=0.4$  で  $l_2$  のみ変化する場合について、それぞれ Fig8 と Fig9 に示す。

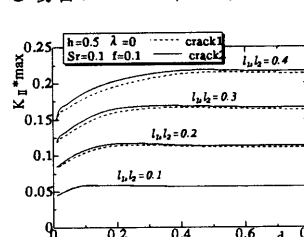


Fig.8  $K_{II \max}$  as a function of  $d$  showing the effect of  $l_1=l_2$  ( $Al_2O_3$ )

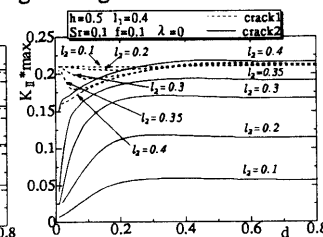


Fig.9  $K_{II \max}$  as a function of  $d$  showing the effect of  $l_2$  ( $l_1=0.4, Al_2O_3$ )

以上より、き裂が接近するにしたがい相互干渉により、応力拡大係数の値は小さくなっている。さらに本数値計算の範囲で最も接近した場合( $d=0.04$ )と十分離れている場合( $d=1.0$ )の応力拡大係数の比を干渉効果と呼ぶことにすれば、干渉効果に及ぼす摩擦係数  $f$ , 熱流入  $\lambda$  およびき裂長さ  $l_1, l_2$  の影響をそれぞれ Fig.10~13 に示す。

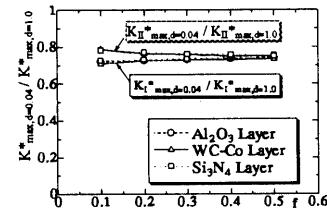


Fig.10 Interferential effects of  $K_{I \max}$  and  $K_{II \max}$  as a function of  $f$

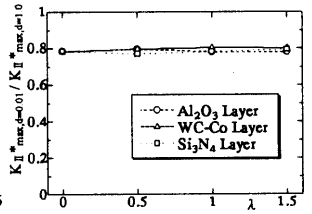


Fig.11 Interferential effects of  $K_{I \max}$  and  $K_{II \max}$  as a function of  $\lambda$

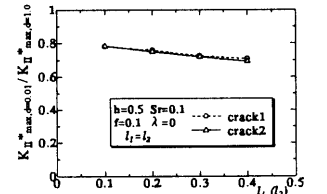


Fig.12 Interferential effects of  $K_{I \max}$  and  $K_{II \max}$  as a function of crack length  $l_1=l_2$

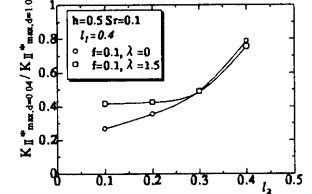


Fig.13 Interferential effects of  $K_{I \max}$  and  $K_{II \max}$  as a function of crack length  $l_2$  ( $l_1=0.4$ )

5. 疲労き裂進展特性

前節より、複数き裂の中でも1本のき裂のみが進展すると考えられるので、ここでは繰返し転がり接触による1本のき裂の進展特性を調べる。なお、ここではエネルギー解放率変動幅  $\Delta G$  を応力拡大係数の代わりに用いた次の進展則を仮定した。

$$\frac{d\tilde{l}}{dN} = \begin{cases} C(\Delta G / \Delta G_{th})^\gamma & \text{if } \Delta G \geq \Delta G_{th} \\ 0 & \text{if } \Delta G \leq \Delta G_{th} \end{cases} \quad (21)$$

$$\Delta G = [(1-\nu)K_{I \max}^2 + (1-\nu)\Delta K_{II}^2] / 2G_f \quad (22)$$

ここで、 $C$  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値を示し、次式で与えられる。

$$\Delta G_{th} = (1-\nu)\Delta K_{th}^2 / 2G_f \quad (23)$$

疲労き裂進展シミュレーション例として、被覆材が超鋼合金(WC-Co)または窒化珪素( $Si_3N_4$ )の場合を考え、それぞれ疲労試験<sup>(1)(2)</sup>を行って(21)式の実験定数  $C, \gamma, \Delta G_{th}$  を推定した。またここでは  $\Delta G \approx \Delta G_{th}$  となったときのき裂長さを初期き裂長さ  $l_0$  と仮定した。(21)式を用い繰返し計算によって求めたき裂長さとサイクル数の関係を Fig.14, 15 に示す。

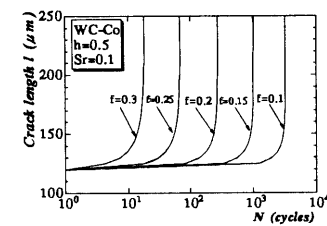


Fig.14 Predicted Crack length Vs. loading cycle (WC-Co)

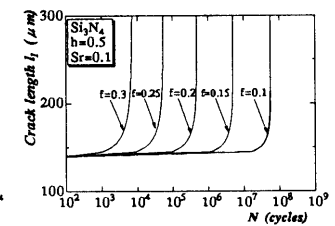


Fig.15 Predicted Crack length Vs. loading cycle ( $Si_3N_4$ )

6. 結言

いずれの被覆材の場合にもき裂接近に伴い  $K_{I \max}$ ,  $K_{II \max}$  の値は小さくなり近接き裂間で相互干渉が見られる。とくに被覆材材料の相違や摩擦係数、熱流入の変化によってあまり大きな干渉効果は見られないが、き裂長さの相違により、とくに短いき裂に著しい干渉効果が見られる。また、転がり疲労寿命に関しては、摩擦係数の増加とともに、いずれの材料の場合も進展疲労寿命は減少する。

文献

- (1) Ishihara, Goshima, et al, Proc. 1<sup>st</sup> Int. Sym. Thermal Stresses, (1995), p.147
- (2) 石原・五嶋ほか, 機論, A編 63巻 610号(1997), pp.1183-1190.