K-0609 加熱転がり接触を受ける被覆半無限体の界面屈折き裂進展特性

Kinked Interface Crack Growth in a Surface Layered Material due to Rolling Contact with Heat Input

○正 五嶋 孝仁（富山大工） 正 石原 外美 正 清水 理能 学 武藤 裕介（富山大院）

Takahito GOSHIMA, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama-city
Sotomi ISIHARA, Masayoshi SHIMIZU, Yuusuke Muto

The surface hard coating layered composite materials are more and more used in industries for the tribological and mechanical improvement. In this paper, the stress intensity factors are analyzed at the kinked interface crack tip due to the rolling-sliding contact with heat input. For the case of Al_2O_3, SiC, Stellite layered material bonded to the carbon steel substrate, the numerical calculations of the stress intensity factors are carried out, and the effects of the kinked angle, the layered thickness and the heat input strength on the results are considered.

Key Words: Thermal Stresses, Stress Intensity Factors, layered Composite Materials, Interface Crack, Kinked Crack, Rolling-sliding Contact

1．緒 言

近年、耐熱耐摩耗性のため被覆材が積極的に利用されている。これら被覆材の剥離等の損傷を破壊力学的に評価するための基礎として、加熱を伴う転がりすべり接触を受ける被覆半無限体界面主き裂から被覆材側または基材側に屈折した分岐き裂先端の応力拡大係数を熱弾性論と破壊力学により解析した。実際例として炭素鋼基材にアルミナ，炭化ケイ素，ステライトが被覆された場合について、屈折角度、摩擦係数並びに熱流入などが応力拡大係数に及ぼす影響を数値的に調べ、分岐屈折進展特性を評価した。

2．解析モデルと境界条件

解析モデルと座標系を図 1 に示す。転がりすべり接触を接触圧力 $P_1(\tilde{x}_1)$ と摩擦力 $fP_1(\tilde{x}_1)$ で表す。ただし f は摩擦係数である。外部からの流入熱を $Q_0(\tilde{x}_1)$ とすると発生する熱は、

$$Q_1(\tilde{x}_1) = fV_sP_1(\tilde{x}_1) + Q_0(\tilde{x}_1) \tag{1}$$

である。 ここで V_s は転がり接触中のすべり速度である。また以下の解析では、次に示す無次元パラメータを採用する。

$$(x, y) = (\tilde{x}/c, \tilde{y}/c),\ (x_1, y_1) = (\tilde{x}_1/c, \tilde{y}_1/c),\ (\xi, \zeta) = (\tilde{\xi}/c, \tilde{\zeta}/c)$$
$$h = \tilde{h}/c,\ l = \tilde{l}/c,\ a = \tilde{a}/c,\ e = \tilde{e}/c,\ K = K_2/K_1,\ G = G_2/G_1$$
$$R_g = cV/K_g,\ S_r = V_s/V,\ P(x) = P_1(\tilde{x})/P_0,\ \lambda = q_0/P_0V$$
$$C = 2G_1(1+\alpha)/(\kappa_1+1)(1-\beta^2),\ b_i = [U_{ii}]/c,\ (i = x, y, \xi, \zeta) \tag{2}$$

ここで、K_g は熱伝導率、G_g は横弾性係数、α_g は線膨張係数、R_g はペクレ数、S_r はすべり率、P_0 は最大接触圧力、λ は無次元熱流入強さ、q_0 は最大熱流入である。α,β は Dundurs' parameters で、添字 $g = 1,2$ はそれぞれ被覆材と基材の領域を示す。また $[U_{ii}]$ は i 軸方向の変位の不連続量である。

$Q_0(\tilde{x}) = q_0P(\tilde{x})$ とし、き裂による温度場のかく乱とき裂面摩擦を無視すれば、熱的並びに力学的境界条件は次式となる。

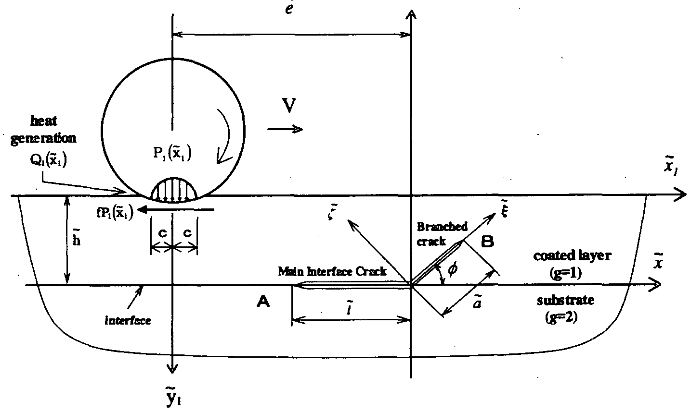

Fig.1. Problem configuration and coordinate system

$$\left(\frac{\partial T^{(1)}}{\partial y_1}\right) = \begin{cases} -(fS_r + \lambda)P_0cVP(x_1)/K_1, & |x_1| \le 1, y_1 = 0 \\ 0 & , |x_1| > 1, y_1 = 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$\left(\frac{\partial T^{(1)}}{\partial y_1}\right) = K\frac{\partial T^{(2)}}{\partial y_1},\ y_1 = h \ (4); \qquad T^{(1)} = T^{(2)},\ y_1 = h \tag{5}$$

$$T^{(g)} = 0,\quad x_1^2 + y_1^2 \to \infty \tag{6}$$

$$\sigma^{(1)}_{y_1y_1} = \begin{cases} -P_0P(x_1), & |x_1| \le 1,\ y_1 = 0 \\ 0 & , |x_1| > 1,\ y_1 = 0 \end{cases} \tag{7}$$

$$\sigma^{(1)}_{x_1y_1} = \begin{cases} fP_0P(x_1), & |x_1| \le 1,\ y_1 = 0 \\ 0 & , |x_1| > 1,\ y_1 = 0 \end{cases} \tag{8}$$

$$\sigma^{(1)}_{y_1y_1} = \sigma^{(2)}_{y_1y_1},\ y_1 = h \ (9) \ ; \qquad \sigma^{(1)}_{xy} = \sigma^{(2)}_{x_1y_1},\ y_1 = h \tag{10}$$

$$U^{(1)}_{y_1y_1} = U^{(2)}_{y_1y_1},\ y_1 = h \ (11) \ ; \ U^{(1)}_{x_1x_1} = U^{(2)}_{x_1x_1},\ y_1 = h \tag{12}$$

$$\sigma^{(g)}_{pq} = 0,\ (p, q = x_1, y_1),\ x_1^2 + y_1^2 \to \infty \tag{13}$$

$$\sigma^{(g)}_{xy} = 0,\ -l \le x \le 0, y = 0 \ (14); \quad \sigma^{(g)}_{yy} = 0, x \in x_{op}, y = 0 \tag{15}$$

$$\sigma^{(1)}_{\xi\zeta} = 0,\ 0 \le \xi \le a,\ \zeta = 0 \ (16); \quad \sigma^{(1)}_{\zeta\zeta} = 0, \xi \in \xi_{op}, \zeta = 0 \tag{17}$$

$$U^{(1)}_{yy} = U^{(2)}_{yy},\ x \in x_{cl}, y = 0 \ (18); \ U^{(1)}_{\zeta\zeta} = U^{(2)}_{\zeta\zeta},\ \xi \in \xi_{cl}, \zeta = 0 \tag{19}$$

ここで x_{op}，ξ_{op} および x_{cl}，ξ_{cl} はき裂の開口および閉口領域を表す。また、き裂面における変位の一価性の条件より、

$$\int_{\Gamma_l}\left(U^{(1)}_{xx} + i\,U^{(1)}_{yy}\right)dx + \int_{\Gamma_a}\left(U^{(1)}_{\xi\xi} + i\,U^{(1)}_{\zeta\zeta}\right)e^{i\phi}\,dz = 0 \tag{20}$$

ここで、Γ_l，Γ_a は界面主き裂及び分岐き裂周積分路を表す。

3．応 力 解 析

応力場 $\sigma^{(g)}_{pq}$ はき裂のない被覆半無限体の熱応力 ${}^0\sigma^{(g)}_{pq}$ に、界面主き裂、分岐き裂の応力場 ${}^1\sigma^{(g)}_{pq}$，${}^2\sigma^{(g)}_{pq}$ を重ね合せて求まる。

$$\sigma^{(g)}_{pq} = {}^0\sigma^{(g)}_{pq} + {}^1\sigma^{(g)}_{pq} + {}^2\sigma^{(g)}_{pq},\ (p, q = x, y)(g = 1,2) \tag{21}$$

準定常熱伝導方程式と(3)～(6)式より得られる温度場Tに基づき、熱応力 ${}^0\sigma^{(g)}_{pq}$ は境界条件(7)～(13)式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。一方、き裂による応力場に関しては、異種材料接合無限体の界面(x 軸)上および ξ 軸上に刃状転位 (b_x, b_y)，(b_ξ, b_ζ) を考え、それらによる応力の特解を求め、表面自由および境界条件(9)～(13)式を満足させるに必要な応力補解を追加して各座標系で応力解を求めた後、各転位をき裂に沿って連続分布させて ${}^1\sigma^{(g)}_{pq}$，${}^2\sigma^{(g)}_{pq}$ が求められる。このようにして求めた応力解を重ね合わせ、き裂面境界条件(15)-(20)式に代入すれば、被覆材側に屈折した場合(g=1)には、$X^{(g)}_{pq}$，$Y^{(g)}_{pq}$ を(x,x0)，$E^{(g)}_{pq}$，$F^{(g)}_{pq}$ を(x,η)，$H^{(g)}_{pq}$，$L^{(g)}_{pq}$ を(ξ,x0)，$\Gamma^{(g)}_{pq}$，$\Lambda^{(g)}_{pq}$ を(ξ,η)の関数として、$B_m(x) = c\,b_m/\pi P_0$ (m= x,y, ξ, ζ) に関する次の特異積分方程式を得る。

〔No.01-1〕日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集（Ⅰ）〔2001-8.27～30,福井市〕

$$\beta B_x(x) - \int_{-l}^{0} \frac{B_y(x_0)}{x - x_0} dx_0 + \int_{-l}^{0} \left\{ B_x(x_0) X_{yy}^{(g)} + B_y(x_0) Y_{yy}^{(g)} \right\} dx_0$$

$$+ \int_0^a \left\{ B_\xi(\eta) E_{yy}^{(g)} + B_\zeta(\eta) F_{yy}^{(g)} \right\} d\eta = - \frac{{}^0\sigma_{yy}^{(g)}(x,0)}{P_0}, \quad x \in x_{op} \tag{22}$$

$$\beta B_y(x) + \int_{-l}^{0} \frac{B_x(x_0)}{x - x_0} dx_0 + \int_{-l}^{0} \left\{ B_x(x_0) X_{xy}^{(g)} + B_y(x_0) Y_{xy}^{(g)} \right\} dx_0$$

$$+ \int_0^a \left\{ B_\xi(\eta) E_{xy}^{(g)} + B_\zeta(\eta) F_{xy}^{(g)} \right\} d\eta = - \frac{{}^0\sigma_{xy}^{(g)}(x,0)}{P_0}, \quad -l \le x \le 0 \tag{23}$$

$$\left(\frac{\beta^2 - 1}{\alpha + 1} \right) \int_0^a \frac{B_\zeta(\eta)}{\xi - \eta} d\eta + \int_{-l}^{0} \left\{ B_x(x_0) H_{\zeta\zeta}^{(g)} + B_y(x_0) L_{\zeta\zeta}^{(g)} \right\} dx_0$$

$$+ \int_0^a \left\{ B_\xi(\eta) \Gamma_{\zeta\zeta}^{(g)} + B_\zeta(\eta) \Lambda_{\zeta\zeta}^{(g)} \right\} d\eta = - \frac{{}^0\sigma_{\zeta\zeta}^{(g)}(\xi,0)}{P_0}, \quad \xi \in \xi_{op} \tag{24}$$

$$\left(\frac{1 - \beta^2}{\alpha + 1} \right) \int_0^a \frac{B_\xi(\eta)}{\xi - \eta} d\eta + \int_{-l}^{0} \left\{ B_x(x_0) H_{\xi\zeta}^{(g)} + B_y(x_0) L_{\xi\zeta}^{(g)} \right\} dx_0$$

$$+ \int_0^a \left\{ B_\xi(\eta) \Gamma_{\xi\zeta}^{(g)} + B_\zeta(\eta) \Lambda_{\xi\zeta}^{(g)} \right\} d\eta = - \frac{{}^0\sigma_{\xi\zeta}^{(g)}(\xi,0)}{P_0}, \quad 0 \le \xi \le a \tag{25}$$

$$\int_{-l}^{0} B_x(x_0) dx_0 + \cos\phi \int_0^a B_\xi(\eta) d\eta + \sin\phi \int_0^a B_\zeta(\eta) d\eta = 0 \tag{26}$$

$$\int_{-l}^{0} B_y(x_0) dx_0 - \sin\phi \int_0^a B_\xi(\eta) d\eta + \cos\phi \int_0^a B_\zeta(\eta) d\eta = 0 \tag{27}$$

基材側屈折き裂の場合は上式で g=2, $\alpha \to -\alpha$, $\beta \to -\beta$ と置く。

4. 応力拡大係数の解析

転位密度関数 B_m を特異性を分離して次のようにおく。

$$B_m(\varepsilon) = \frac{g_m(\varepsilon)}{(1-\varepsilon)^\gamma (1+\varepsilon)^\delta} \quad (m = x, y, \xi, \zeta) \tag{28}$$

界面転位(m=x,y)の場合は $\varepsilon = 1 + 2x_0/l$ で、特異性のオーダは

$$\gamma = 0.5 + i\varpi, \ \delta = 0.5 - i\varpi, \ \varpi = \ln\{(1+\beta)/(1-\beta)\}/2\pi \tag{29}$$

で表され、ξ軸上転位の場合には $\varepsilon = 1 + 2\eta/a$ で、特異性のオーダーは $\gamma = \delta = 0.5$ となる。積分方程式(22)-(27)に上式を代入し離散化すれば、$g_m(\varepsilon)$ に関する連立方程式となり、被覆材側屈折き裂先端Bの応力拡大係数は次式で表わされる。

$$K_{IB}^{*} + i K_{IIB}^{*} = \frac{K_{IB} + i K_{IIB}}{P_0 \sqrt{c}} = \sqrt{\frac{\pi a}{2}} \left(\frac{\beta^2 - 1}{\alpha + 1} \right) \{ g_\zeta(1) - i g_\xi(1) \} \tag{30}$$

また基材側分岐屈折き裂のときは $\alpha \to -\alpha$, $\beta \to -\beta$ と置く

5. 数値計算例

炭素鋼を基材として, l=0.1, a=0.02, S_r=0.1, V= 1 m/s, c=400μm の場合について、K_{IB}^{*}, K_{IIB}^{*} の数値例を以下に示す。

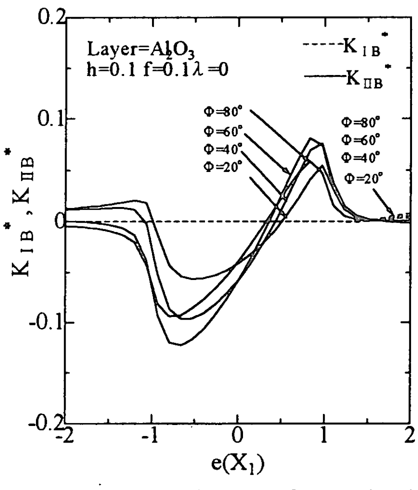

Fig.2 K_{IB} and K_{IIB} as a function of e (x_1) showing effects of ϕ for the case of h=0.1, f=0.1, λ=0

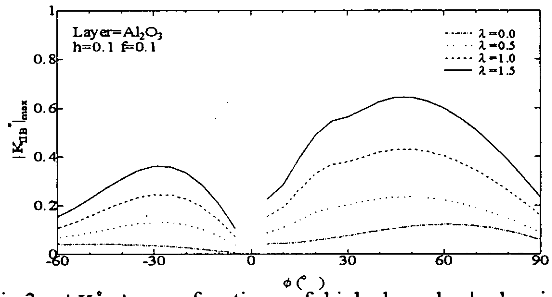

Fig.3 $|K_{IIB}^{*}|_{max}$ as functions of kinked angle ϕ showing the effect of heat input strength λ for the case of Al_2O_3 layer

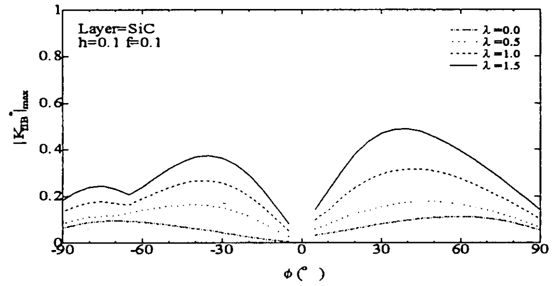

Fig.4 $|K_{IIB}^{*}|_{max}$ as functions of kinked angle ϕ showing the effect of heat input strength λ for the case of SiC layer

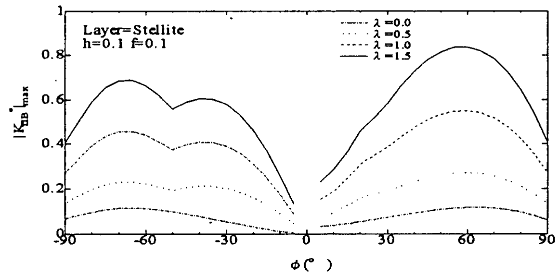

Fig.5 $|K_{IIB}^{*}|_{max}$ as functions of kinked angle ϕ showing the effect of heat input strength λ for the case of Stellite layer

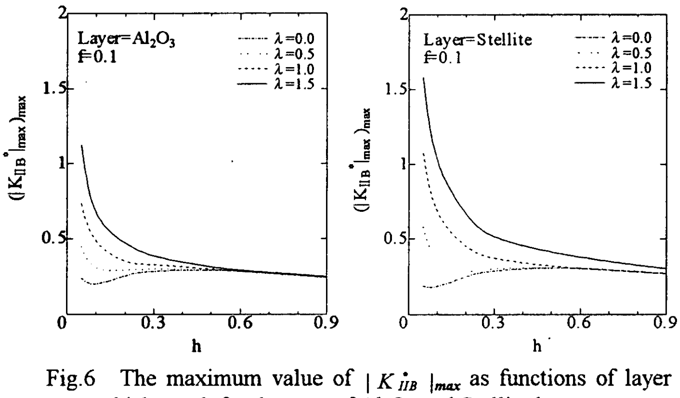

Fig.6 The maximum value of $|K_{IIB}^{*}|_{max}$ as functions of layer thickness h for the case of Al_2O_3 and Stellite layers

6. 結　言

1) 基材側よりも被覆材側にき裂が進展する可能性が大きく、熱的効果が小さく摩擦係数が大きいとき以外はモードⅡの進展が支配的となる。
2) モードⅠで評価した場合は、被覆材によらず ϕ≒90° の方向に、モードⅡで評価した場合は ϕ=40° ～65° の方向に進展する可能性が大きく、その進展方向は被覆材や摩擦係数及び熱的効果によって異なる。
3) $|K_{IIB}^{*}|_{max}$ の最大値は、摩擦係数並びに熱流入が小さい場合には被覆厚さ h ≒0.5 あたりで最大となるが、摩擦係数並びに熱流入が大きくなるにしたがい、被覆厚さがより薄くなるほど、$|K_{IIB}^{*}|_{max}$ の最大値は大きくなる。