

# 圧延ワークロールの 表層亀裂における応力拡大係数の数値解析

山本 普康\*・内田 秀\*・橋本 光生\*<sup>2</sup>

Numerical Analysis of Stress Intensity Factors of Crack in Subsurface Layer of Work Roll for Rolling  
Hiroyasu YAMAMOTO, Shigeru UCHIDA and Mitsuo HASHIMOTO

**Synopsis :** A simplified model for stress intensity factors of mixed modes was derived in consideration of non-dimensional stress intensity factors obtained by Murakami et al. A numerical analysis model for stress intensity factors of mixed modes in the subsurface layer of work roll of rolling was also obtained by applying this simplified model to the deformation analysis model for the thermal elastic-plastic stress and strain in the subsurface layer of work roll with stress and thermal loads. Then, the stress intensity factors in the subsurface layer of work roll in hot rolling were calculated with this numerical analysis model. It has been found that the stress intensity factors of tensile and shear modes on the side of intermediate roll is larger than those on the side of rolling material and that the crack propagation is estimated to occur on the side of intermediate roll, etc.

**Key words :** crack ; crack propagation ; stress intensity factor ; rolling ; work roll ; subsurface layer ; hot rolling ; numerical analysis.

## 1. 緒言

熱間圧延では、WR(ワークロール)は応力負荷と熱負荷を繰り返し受け、WR表層部に熱亀裂等の欠陥が発生する。このような初期亀裂が存在する状態で過大な応力が繰り返し負荷されると、初期亀裂を起点にして剪断型モードの亀裂が伝播する<sup>1)</sup>。亀裂の伝播に関する数値解析は、一般に単純モードの応力拡大係数<sup>2)</sup>を用いて行われている<sup>3-5)</sup>。しかし、WR表層部では3軸方向の応力が存在するため、複合モードの応力拡大係数<sup>6)</sup>を用いる必要がある。このような複合モードの応力拡大係数を用いた2円筒接触の数値解析例は少なく<sup>7)</sup>、特に熱間圧延のように、熱負荷が作用する条件での数値解析例は見あたらない。

本報告では、村上ら<sup>8)</sup>が求めた無次元応力拡大係数の簡易式を考慮して、複合モードの応力拡大係数の簡易モデルを導出する。そして、既に報告している圧延ロール表層の応力・熱負荷連成の熱弾塑性応力・歪数値解析モデル<sup>9)</sup>にこの簡易モデルを適用して、冷間・熱間圧延WRの表層亀裂における応力拡大係数の簡易数値解析モデルを作成する。また、冷間2円筒接触の計算において、今回導いた簡易数値解析モデルによる計算結果と、村上ら<sup>7)</sup>が体積法を用いて作成した複合モードの応力拡大係数の数値解析モデルによる計算結果とを比較する。さらに、熱間圧延におけるWRの表層亀裂の応力拡大係数に及ぼす荷重負荷の位置や亀裂

角度等の影響を解明し、表層亀裂の伝播機構を考察する。

## 2. 複合モードの応力拡大係数の簡易モデル

モードIとモードIIが混在する複合モードの場合には、Fig.1に示す亀裂の先端Pにおける引張型応力拡大係数 $K_{\sigma}$ と剪断型応力拡大係数 $K_{\tau}$ は、以下のように表される<sup>6)</sup>。

$$K_{\sigma} = \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \dots \dots \dots (1)$$

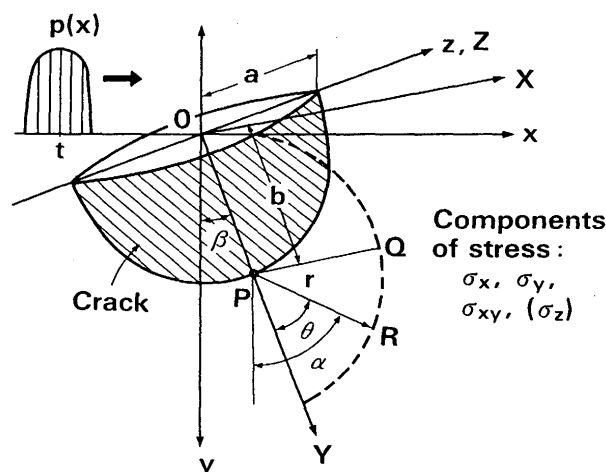


Fig. 1. Crack model in subsurface layer of work roll ( $Z, z$ : axis of work roll.  $\beta, \theta$  and  $\alpha$  show negative values in the figure).

平成8年12月13日受付 平成9年4月11日受理 (Received on Dec. 13, 1996; Accepted on Apr. 11, 1997)

\* 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293)

\* 2 新日本製鐵(株)機械プラント事業部 (Plant and Machinery Division, Nippon Steel Corp.)

$$K_{\tau} = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta}{2} [K_{I1} \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $K_{I1}$ と $K_{II}$ はモード I とモード II の応力拡大係数であり、 $\theta$ は亀裂先端Pを中心としたX、Y座標上のY軸からの角度である。

今、Fig.1に示したように、亀裂を半楕円とし、その軸長をaおよびbとすると、亀裂先端Pにおけるモード I とモード II の応力拡大係数 $K_{I1}$ および $K_{II}$ は、村上ら<sup>7)</sup>が求めた無次元応力拡大係数の簡易式 $f_{I1}$ と $f_{II}$ を用いることによって、以下のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K_{I1} &= f_{I1} \sigma_x \sqrt{\pi b} \\ f_{I1} &= 0.660 + 0.23 \beta^2 + (0.462 + 0.17 \beta^2) \left(1 - \frac{b}{a}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{II} &= -f_{II} \sigma_{xy} \sqrt{\pi b} \\ f_{II} &= 0.71 - 0.13 \frac{b}{a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、Fig.2に示すように、 $\sigma_x$ と $\sigma_{xy}$ は亀裂先端近傍のX、Y座標系における応力成分であり、 $\beta$ はx、y座標上における亀裂面(Y軸が亀裂面上に存在)のy軸からの角度である。今、x、y座標系における応力成分を $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_{xy}$ とすると、X、Y座標系における応成分 $\sigma_x$ と $\sigma_{xy}$ は、Fig.2から以下の式で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\beta + \sigma_{xy} \sin 2\beta \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_{xy} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\beta + \sigma_{xy} \cos 2\beta \dots\dots\dots (6)$$

したがって、式(3)~式(6)を式(1)と式(2)に代入すると、Fig.1に示した亀裂先端Pにおける引張型応力拡大係数 $K_{\sigma}$ と剪断型応力拡大係数 $K_{\tau}$ が求められる。なお、応力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_{xy}$ は、既に報告している圧延ロール表層の応力・熱負荷連成の熱弾塑性応力・歪数値解析モデル<sup>8)</sup>によって求められる。今回、応力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_{xy}$ としては、亀裂先端P

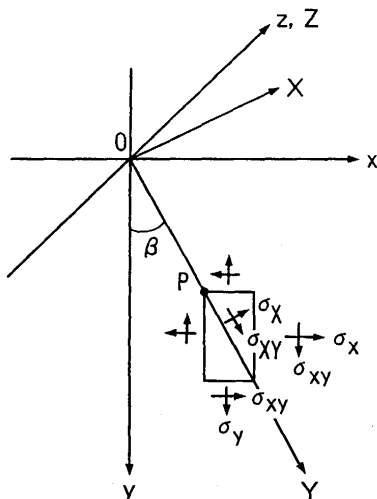


Fig. 2. x, y and X, Y coordinate systems( $\beta$  is a negative value in the figure).

を中心にして幅(x方向)が接触長(Fig.1に示した荷重分布 $p(x)$ のx軸上の幅)の0.3倍、深さ(y方向)が接触長の1.5倍の範囲における表層内の応力の平均値で与えた。なお、圧延ロールのようなころがり・すべり問題においては、荷重分布位置が円周上を移動するため、応力拡大係数の極大と極小の位置は重要ではなく、極大と極小の大きさが重要となる。

そこで、この考え方に従って、これらの数値解析モデルによって求められる複合モードの応力拡大係数が、村上ら<sup>7)</sup>の作成した複合モードの応力拡大係数の数値解析モデルによって計算される値とできるだけ等しくなるように、式(3)と式(4)の中の無次元応力拡大係数 $f_{I1}$ と $f_{II}$ を以下のように修正した。

$$f_{I1} = 0.660 + 0.23 \beta^2 + (0.462 + 0.17 \beta^2) \times \left[1 - \frac{b}{0.667(b-a) + a}\right] \dots\dots\dots (7)$$

$$f_{II} = 0.71 - 0.13 \frac{b}{0.667(b-a) + a} \dots\dots\dots (8)$$

### 3. 数値解析モデルの比較

今回導いた応力拡大係数の簡易数値解析モデルによる計算結果と村上ら<sup>7)</sup>の数値解析モデルによる計算結果とを比較するため、Fig.3に示すような6 HiミルのWRとIMR(中間ロール)との間(B側)の接触荷重によって、WR表層に存在する亀裂の先端の応力拡大係数を計算する。Fig.3の中で、tは荷重分布の中心位置であり、 $l_A$ および $l_B$ はWRの接触弧長の1/2である。Table 1に計算条件を示す。村上ら<sup>7)</sup>の数値解析モデルは温度の計算が含まれていないため、冷間の条件で計算を行う。ロール径はWRが $\phi 600$ mm、IMRが $\phi 800$ mmである。線荷重は9.8 KN/mm、WRとIMRとの間の摩擦係数 $\mu_B$ は0と0.2である。ロールのヤング率E

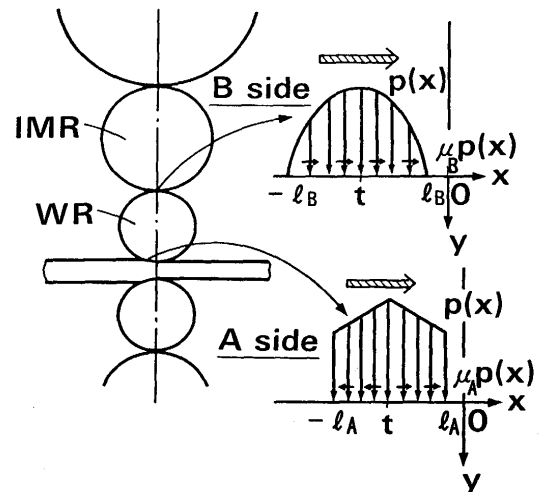


Fig. 3. Rolling model of 6 Hi mill(A side: between WR and strip, B side: between WR and IMR).

は 206GPa, 降伏応力は 1765MPa, 応力歪曲線の勾配は  $E/10$  である。WR 表層の半楕円亀裂の寸法は、幅  $2a$  が 2 mm, 深さ  $b$  が 1 mm であり、亀裂角度  $\beta$  は  $0^\circ$  である。

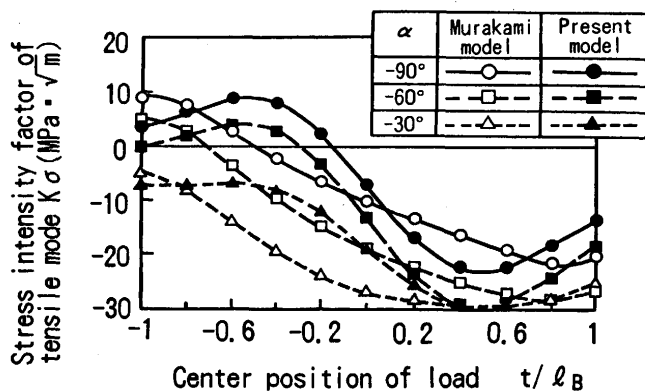
Fig. 4 と Fig. 5 は、摩擦係数  $\mu_B$  が 0 と 0.2 の場合の今回の数値解析モデルによる計算結果と村上ら<sup>7)</sup>の数値解析モデルによる計算結果との比較である。ここで、横軸は Fig. 3 の

モデルの x 軸上における荷重分布の中心  $t$  の位置を示し、縦軸の応力拡大係数の値は Fig. 3 のモデルの荷重分布の中心が  $t$  の位置にある時の  $x=0$  における計算値を示す。摩擦係数  $\mu_B$  が 0 および 0.2 のいずれにおいても、引張型および剪断型の応力拡大係数  $K_\sigma$  および  $K_\tau$  の極大と極小を示す位置は、今回のモデルと村上ら<sup>7)</sup>のモデルで若干異なっているが、極大値および極小値に関しては、両モデルはほぼ同程度の大きさを示す。

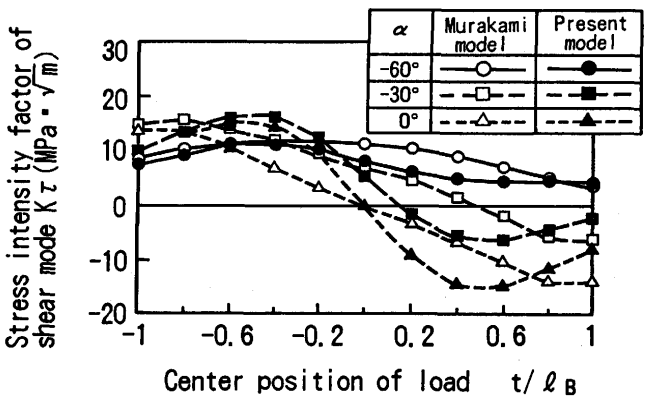
村上ら<sup>7)</sup>のモデルは、ロール表層の応力の計算に弾塑性有限要素法を用い、応力拡大係数の計算に体積法を使用した厳密な計算である。一方、今回のモデルは、ロール表層の応力の計算に Merwin ら<sup>9)</sup>の弾塑性変形数値解析法を適用し、応力拡大係数の計算に村上ら<sup>9)</sup>の簡易式を使用した簡易計算法である。Fig. 4 と Fig. 5 に示した両モデルの差異は、このような計算方法の違いによって生じたものである。しかし、圧延ロールのようなころがり・すべり問題では、荷重分布位置が円周上を移動するため、応力拡大係数の極大と極小の位置は重要ではなく、極大と極小の大きさが重要となる。このことを考慮すると、今回導いた応力拡大係数の簡易数値解析モデルは、圧延ロールの表層亀裂の解析に十分適用できると考えられる。

Table 1. Calculation conditions for comparison of present and Murakami's models.

1. Roll diameter WR: $\phi 600$ mm, IMR: $\phi 800$ mm
2. Rolling load per unit width $p=9.8$ kN/mm (1 tf/mm)
3. Friction coefficient between WR and IMR $\mu_B=0, 0.2$
4. Young's modulus of roll $E=206$ GPa (21000 kgf/mm <sup>2</sup> )
5. Compression yield stress and hardening modulus of roll $\sigma_y=1765$ MPa (180 kgf/mm <sup>2</sup> ) $H=E/10$
6. Initial residual stress : 0
7. Crack size (half ellipse) Width : $2a=2$ mm, Depth : $b=1$ mm
8. Crack angle : $\beta=0^\circ$

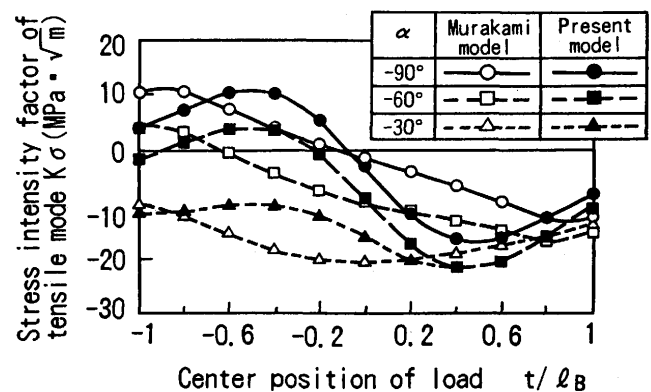


(a) Stress intensity factor of tensile mode  $K_\sigma$

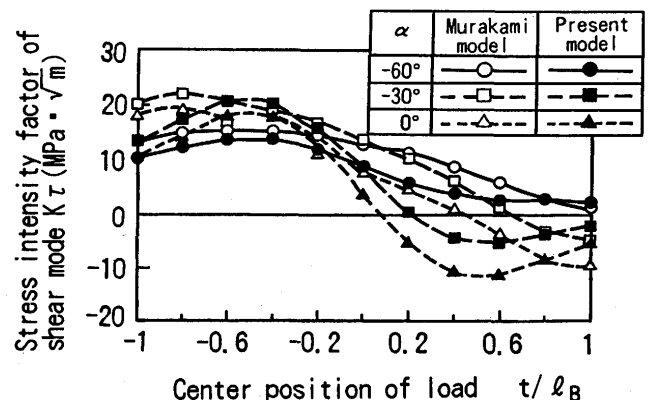


(b) Stress intensity factor of shear mode  $K_\tau$

Fig. 4. Comparison of present and Murakami's models with regard to stress intensity factors of tensile and shear modes ( $\mu_B=0, \beta=0^\circ, \ell_B=2.18$  mm).



(a) Stress intensity factor of tensile mode  $K_\sigma$



(b) Stress intensity factor of shear mode  $K_\tau$

Fig. 5. Comparison of present and Murakami's models with regard to stress intensity factors of tensile and shear modes ( $\mu_B=0.2, \beta=0^\circ, \ell_B=2.18$  mm).

### 4. 熱延WR表層亀裂の応力拡大係数の数値解析と考察

熱間圧延のWR表層の亀裂の伝播特性を明らかにするため、熱間圧延によって加熱冷却を受ける6HiミルのWR表層に存在する亀裂の先端の応力拡大係数を計算する。計算条件には、Table 1 に示した条件の内、WRの圧縮降伏応力と応力歪曲線の勾配とを除いた条件を使用し、それ以外の条件としてはTable 2 に示すものを用いる。Fig. 6 は、WR材料の常温(25°C)における圧縮応力と歪の関係である。高温におけるこの材料の圧縮応力と歪の関係式は、Fig. 6 と

Table 2. Calculation conditions for stress intensity factors in subsurface layer of work roll.

1. Friction coefficients
Between WR and strip $\mu_A$ : 0.2
Between WR and IMR $\mu_B$ : 0, 0.2
2. Compression yield stress and hardening modulus of WR
$\sigma_y = 1765[-6.5 \times 10^{-7}(T-25)^2 - 1.5 \times 10^{-4}(T-25)+1]$ MPa
$H=E/2$
3. Material properties of WR
Thermal conductivity : 50.2 W/(m·K)
Specific heat : 0.48 J/(kg·K)
Density : $7.85 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>
Coefficient of linear expansion : $1.1 \times 10^{-5}$ 1/°C
4. Thickness of strip
Entry : 3.7mm, Exit : 2.6mm
5. Reduction in thickness : 29.7%
6. Temperature of entry strip : 940°C
7. Initial temperature of subsurface layer of WR : 25°C
8. Temperature of cooling water : 25°C
9. Properties of black scale
Thermal conductivity : 12.6 W/(m·K)
Specific heat : 0.48 J/(kg·K)
Density : $5.20 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>
10. Thickness of black scale : 10 $\mu$ m

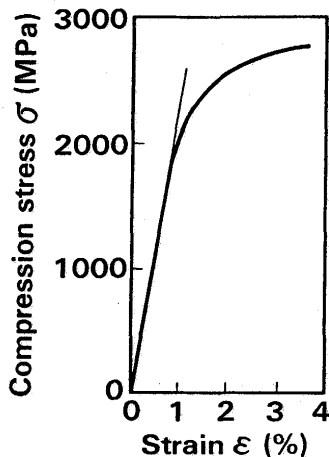


Fig. 6. Relation between compression stress and strain for rolling material.

高速度鋼の高温硬度特性<sup>10)</sup>とを参考にして作成し、Table 2 の中に示す。また、この数値解析は熱間条件であるため、圧延ロールと圧延材料の熱物性値等もTable 2 の中に示している。なお、WRと材料との間の摩擦係数 $\mu_A$ は通常熱延を想定して0.2の値を用いるが、WRとIMRとの間の摩擦係数 $\mu_B$ は、通常熱延の場合とWR表面上に激しい焼付きが発生した場合とを想定して、0と0.2の値を用いる。

Fig. 7 は、今回の圧延条件を用い、応力・熱負荷連成の熱

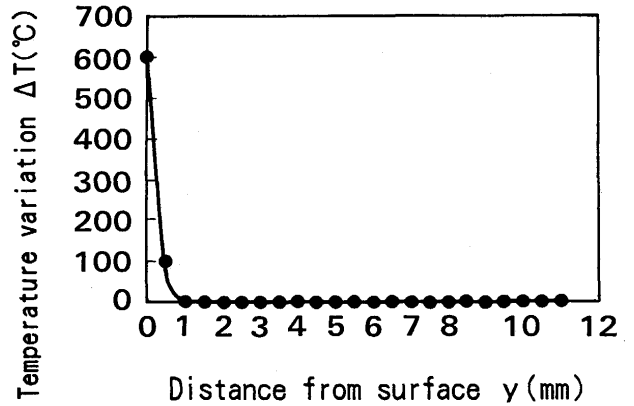
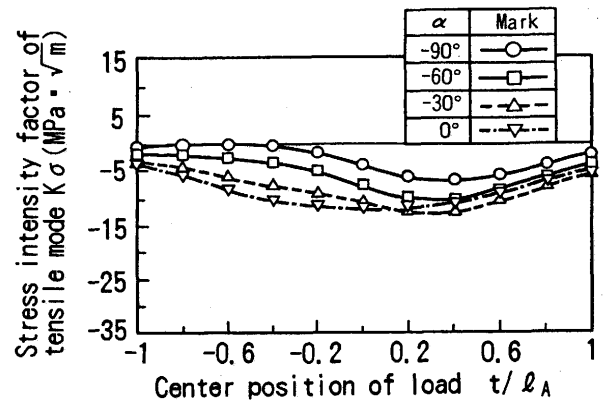
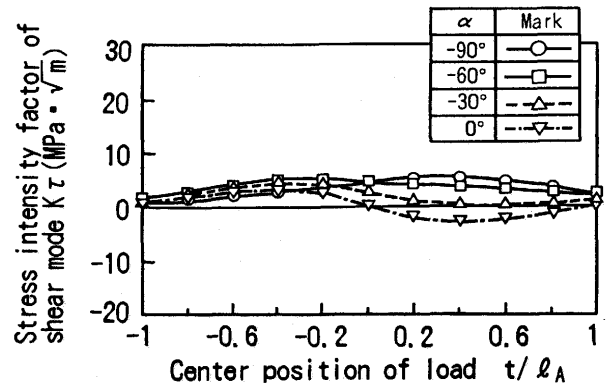


Fig. 7. Relation between temperature variation  $\Delta T$  and distance from surface of work roll  $y$ .



(a) Stress intensity factor of tensile mode  $K\sigma$



(b) Stress intensity factor of shear mode  $K\tau$

Fig. 8. Effect of center position of load  $t/l_A$  and angle  $\alpha$  on stress intensity factors of tensile and shear modes on material (A) side ( $\mu_A = 0.2, \beta = 0^\circ, l_A = 9.95$  mm).

弾塑性応力・歪数値解析モデル<sup>8)</sup>によって求めたWR表層の温度変化とWR表面からの距離との関係である。この温度変化は、Fig. 3 に示している圧延において、WRが圧延材料と接触している間に発生し、接触が終わると、水冷却によって温度変化は0に戻る。このようなWRの温度変化のもとで、WR表層に存在する亀裂先端の応力拡大係数が計算される。Fig. 8 は、材料側(A側)における引張型および剪断型応力拡大係数 $K\sigma$ および $K\tau$ に及ぼす荷重分布の中心位置と角度 $\alpha = \theta + \beta$  (Fig.1 参照)との影響である。引張型応力拡大係数 $K\sigma$ は負値であるため、引張型による亀裂伝播は生じないと推察される。また、IMR側(B側)における引張型および剪断型応力拡大係数 $K\sigma$ および $K\tau$ に及ぼす荷重分布の中心位置と角度 $\alpha$ の影響は、WRとIMRとの間の摩擦係数 $\mu_B$ が0の場合をFig. 9 に、 $\mu_B$ が0.2の場合をFig.10 に示す。摩擦係数 $\mu_B$ が大きくなると、引張型応力拡大係数 $K\sigma$ の最大値(正值)はわずかに増加し、剪断型応力拡大係数 $K\tau$ の正值側の最大値も増加するが、 $K\tau$ の負値側の最大値(最小値の絶対値)は減少する。また、応力拡大係数の引張型 $K\sigma$ の最大値(正值)と剪断型 $K\tau$ の最大値(絶対値の最大値)とを比較すると、剪断型 $K\tau$ の方が引張型 $K\sigma$ よりもはるかに大きいことが分かる。このことは、WR材料の亀裂伝播開始の特性値である応力拡大係数の敷居値が引張型と剪断型では

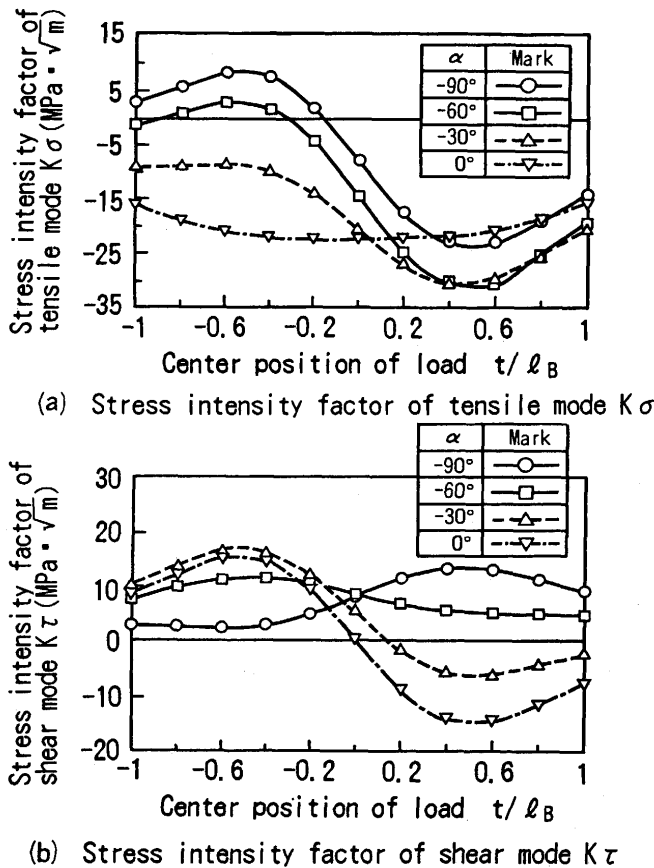


Fig. 9. Effect of center position of load  $t/l_B$  and angle  $\alpha$  on stress intensity factors of tensile and shear modes on IMR (B) side ( $\mu_B=0$ ,  $\beta=0^\circ$ ,  $l_B=2.18$  mm).

は同じレベルであるならば、亀裂の伝播は剪断型で発生することを示唆する。この示唆は、ハイス系熱延WRの伝播亀裂破面の観察結果<sup>1)</sup>と一致する。さらに、Fig. 8 と Fig. 9 および Fig.10 とを比較すると、引張型および剪断型応力拡大係数は、いずれも材料側(A側)よりもIMR側(B側)の方が大きい。このことは、亀裂の伝播は材料側(A側で発生するのではなく、IMR側(B側)で発生することを示唆する。

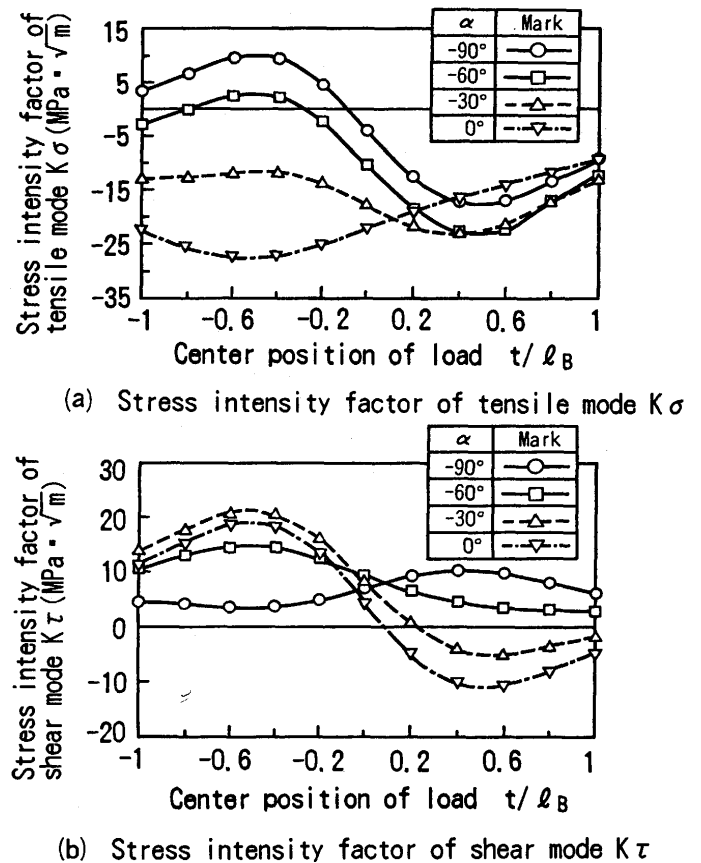


Fig. 10. Effect of center position of load  $t/l_B$  and angle  $\alpha$  on stress intensity factors of tensile and shear modes on IMR (B) side ( $\mu_B=0.2$ ,  $\beta=0^\circ$ ,  $l_B=2.18$  mm).

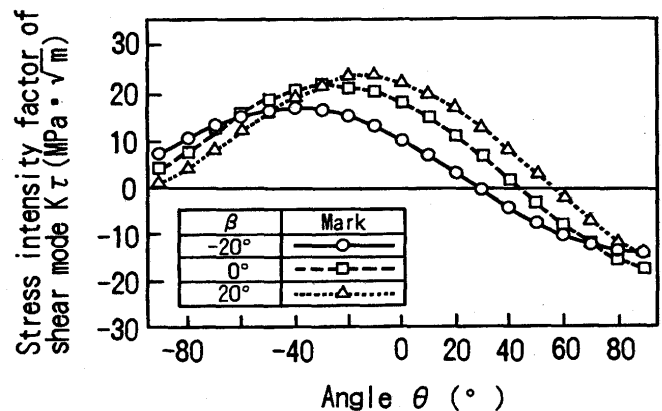


Fig. 11. Effect of angles  $\theta$  and  $\beta$  on stress intensity factors of shear mode on IMR (B) side ( $\mu_B=0.2$ ,  $t/l_B=-0.6$ ,  $l_B=2.18$  mm).

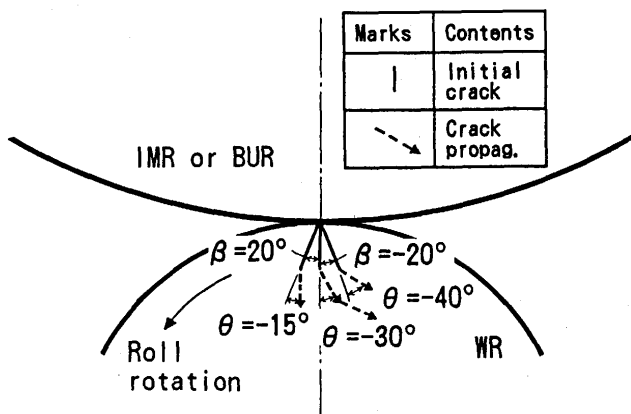


Fig. 12. Propagation direction of shear mode crack.

Fig.11 は、IMR側(B側)の剪断型応力拡大係数 $K_{\tau}$ に及ぼす亀裂角度 $\beta$ と角度 $\theta$ の影響である。Fig.11 から剪断型亀裂の伝播方向を求めると、Fig.12 が得られる。この結果から、熱延WR表層に生じる熱亀裂のようなほぼWR表面に垂直な初期亀裂を起点とする剪断型亀裂は、ロールの回転方向と逆の方向に伝播し、伝播とともに次第にWR表面に平行となるように進展することが推察される。このことは、ハイス系熱延WRの剪断型亀裂の伝播方向の調査結果<sup>1)</sup>と一致する。

以上のことを考慮すると、今回導いた圧延WRの表層亀裂における応力拡大係数の数値解析モデルは、ハイス系熱延WRの亀裂伝播の発生現象<sup>1)</sup>を比較的良く説明できると考えられる。

## 5. 結言

村上ら<sup>5)</sup>が求めた無次元応力拡大係数を考慮して、複合モードの応力拡大係数の簡易モデルを導出した。そして、既に報告している圧延ロール表層の応力・熱負荷連成の熱弾塑性応力・歪数値解析モデル<sup>6)</sup>にこの簡易モデルを適用して、圧延WRの表層亀裂における応力拡大係数の簡易数値解析モデルを作成した。この簡易数値解析モデルを用いて、熱間圧延におけるWRの表層亀裂の応力拡大係数を計算し、表層亀裂の伝播機構について検討した。以下に主要な結果を要約する。

(1)今回導いた簡易数値解析モデルと、村上ら<sup>7)</sup>が体積力法を用いて作成した複合モードの応力拡大係数の数値解析モデルとを冷間2円筒接触の計算結果と比較すると、両

モデルは応力拡大係数の極大と極小を示す位置が若干異なっているが、両モデルの応力拡大係数の極大値と極小値はほぼ一致する。圧延ロールのようなころがり・すべり問題においては、荷重分布位置が円周上を移動するため、応力拡大係数の極大と極小の位置は重要でなく、大きさが重要であるため、今回導いた応力拡大係数の簡易数値解析モデルは十分適用できると考えられる。

(2)今回の熱間圧延の計算条件では、材料側(A側)において、引張型応力拡大係数が負値であるため、引張型による亀裂伝播は生じないと推察される。

(3)材料側とIMR側(B側)の応力拡大係数を比較すると、引張型および剪断型応力拡大係数は、いずれも材料側よりもIMR側の方が大きい。このことは、亀裂の伝播は材料側で発生するのではなく、IMR側で発生することを示す。

(4)IMR側において、応力拡大係数の引張型 $K_{\sigma}$ の最大値(正值)と剪断型 $K_{\tau}$ の最大値(絶対値の最大値)とを比較すると、剪断型 $K_{\tau}$ の方が引張型 $K_{\sigma}$ よりもはるかに大きい。このことは、WR材料の亀裂伝播開始の特性値である応力拡大係数の数値値が引張型と剪断型でほぼ同じレベルであるならば、亀裂の伝播は剪断型で発生することを示唆する。

(5)今回の数値解析から、ほぼWR表面に垂直な初期亀裂を起点とする剪断型亀裂は、ロールの回転方向と逆の方向に伝播し、伝播とともに次第にWR表面に平行となるように進展することが推察される。

最後に、応力拡大係数の数値計算プログラムの使用と御指導で大変お世話になった九州大学・工学部・機械工学科村上敬宜教授および栄中講師に感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 松永栄八郎, 佐野義一, 野田 朗: 材料とプロセス, 8 (1995), 1266.
- 2) 例えば, 岡村弘之: 線形破壊力学入門, 培風館, (1976), 24.
- 3) J.C.Lee, T.N.Farris and L.M.Keer: Eng. Frac. Mech., 27 (1987), 27.
- 4) Y.Murakami: Eng. Frac. Mech., 22 (1985), 101.
- 5) 村上敬宜, 石田 誠: 日本機械学会論文集A, 50-455 (1984), 1359.
- 6) F.Erdogan and G.C.Sih: J. Basic Engng., Trans. ASME, 85 (1963), 519.
- 7) Y.Murakami, M.Kaneta and H.Yatsuzuka: ASLE Trans., 28 (1985), 60.
- 8) 山本善康, 内田 秀, 井上 剛, 荒谷省一, 中島浩衛: 鉄と鋼, 82 (1996), 599.
- 9) J.E.Merwin and K.L.Johnson: Proc. Inst. Mech. Eng., 177 (1963), 667.
- 10) 日本金属学会編: 金属便覧, 丸善 (1960), 511.