

# 車輪及びレール鋼における混合モード負荷による疲労き裂成長

赤間 誠\*・薄 一平\*<sup>2</sup>

Fatigue Crack Growth under Mixed Mode Loading in Wheel and Rail Steel

Makoto AKAMA and Ippei SUSUKI

**Synopsis :** Fatigue crack growth under mixed mode loading is an important problem in railway fields. Therefore, a method was developed and prepared to observe the fatigue crack propagation under mixed loading of tensile and in-plane shear modes by an in-plane biaxial fatigue machine. In the experiments, sequential and overlapping mode I and mode II cycles were applied to the crack in the cruciform specimen made of wheel or rail steel. Growth rate laws for wheel and rail steel were obtained by means of least square regression analysis in terms of both the effective stress intensity factor ranges. The fracture surfaces near the crack tip region of tested specimens were observed by SEM and discussed to relate the superiority of pearlite structure over tempered martensite structure in detail.

**Key words:** mixed mode loading; fractography; effective stress intensity factor; rail steel; wheel steel.

## 1. 緒言

疲労き裂の進展特性に関する研究は、モードI負荷の場合について数多くなされているが、実際の構造部材に含まれるき裂は、モードIIや混合負荷を受ける場合もある。鉄道分野においても、レール頭頂面や車輪踏面に発生するき裂は、車輪とレールの接触によって、モードIとモードIIの混合負荷を受けることが知られている<sup>1)</sup>。よってき裂がこのような繰り返し負荷を受けた場合の進展特性を明らかにしておくことは実用上重要である。

Otsukaら<sup>2)</sup>は、低炭素鋼については、き裂面に垂直に小さな引張り応力を負荷し、完全反転繰り返しモードII負荷を与えることによって、初期のき裂面(共平面)方向への継続的な進展を得ることができたが、高炭素鋼については、同条件下では分岐が起り、共平面き裂進展は得られなかった。Gaoら<sup>3)</sup>及びSmithら<sup>4)</sup>も構造用鋼でできた切欠きまたは予き裂試験片に同様な負荷を与えて疲労試験を行ったが、継続的な共平面き裂進展は得られなかった。このように長い間、モードIとモードIIの混合負荷では、構造用鋼において継続的な共平面き裂進展を得ることはできなかったが、Boldら<sup>5)</sup>及びWongら<sup>6)</sup>は、レール鋼でできた十字型試験片に、完全反転繰り返しモードII負荷の直前にモードI負荷を与えるか、両者が重畳した負荷を与えることによって、継続的な共平面き裂進展を得ることに成功した。最近では同様な形式の混合負荷を円筒試験片に与えた

研究<sup>7)</sup>や、異なる形式の混合負荷を構造用鋼に与えた共平面き裂進展試験<sup>8)</sup>も行われている。

鉄道分野においては、これまでレール鋼を用いた混合モード負荷における疲労試験が集中的に行われているが、車輪鋼を用いた試験はいまだ行われていない。また破面から破壊の進行過程に関する情報を得るフラクトグラフィはBoldら<sup>5)</sup>及びWongら<sup>6)</sup>は行っていない。そこで本研究では、二軸引張り圧縮疲労試験装置を用いて、モードIとモードIIの混合負荷を、車輪鋼及びレール鋼でできた予き裂を含む十字型試験片に与え、それぞれのき裂成長速度を有効応力拡大係数範囲に対して整理した。さらに実験後の試験片におけるき裂先端付近の破面を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し、パーライト組織の焼戻しマルテンサイト組織に対するき裂成長抵抗の優位性について考察を行った。

## 2. 実験手法

### 2.1 二軸引張り圧縮疲労試験装置

モードIとモードIIの混合負荷条件下における疲労き裂の挙動を研究するため、二軸引張り圧縮疲労試験装置を用いた。この装置は、Fig. 1に示すような最大負荷が±200 kNである四つの油圧アクチュエータを二組とし、水平に設置された鋼鉄製の八角形フレームの対角線上に配置したものである。二組のアクチュエータは、荷重及び位置決定のためのフィードバック信号によって制御される。X

平成19年3月29日受付 平成19年5月11日受理 (Received on Mar. 29, 2007; Accepted on May 11, 2007)

\* (財) 鉄道総合技術研究所車両構造技術研究部 (Vehicle Structure Technology Division, Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho Kokubunji 185-8540)

\* 2 (独) 宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部 (Institute of Aerospace Technology, Japan Aerospace Exploration Agency)

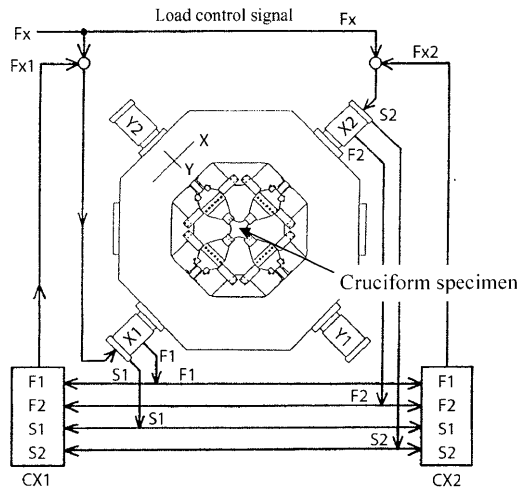


Fig. 1. Schematic view of biaxial testing machine.

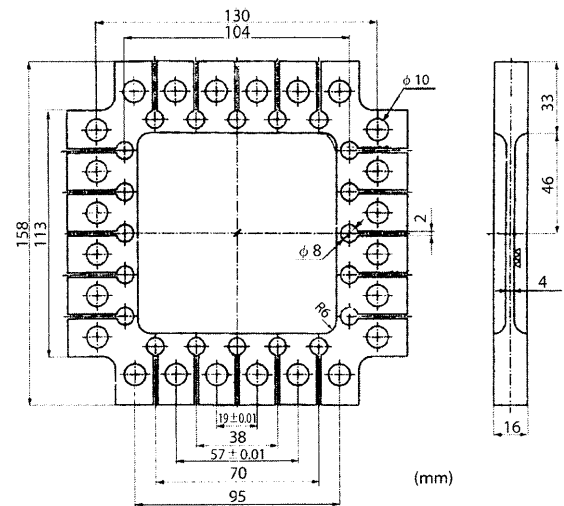


Fig. 2. Shape of cruciform specimen.

軸用アクチュエータのための荷重信号X1及びX2の制御法をFig. 1に示す。荷重命令信号FXは、荷重フィードバック信号FX1及びFX2、そして位置フィードバック信号S1及びS2から計算して決定する。これらフィードバック信号は、F1、F2、S1及びS2信号から計算回路CX1及びCX2によって計算される。ここでF1及びS1は、それぞれX1アクチュエータのロードセル及び差動トランス出力であり、F2及びS2は、X2アクチュエータのそれらである。混合モード疲労試験を制御するため、荷重及び位置フィードバック信号についての最適な時間刻みを選択した。またY軸用アクチュエータについても同様な制御である。

2.2 試験片及び負荷

試験片は、Boldら<sup>5)</sup>及びWongら<sup>6)</sup>が用いた十字型試験片で、中央に45°傾斜したスリットを挿入してある。試験片の寸法形状を、Fig. 2に示す。この試験片の場合、中央の72mm×72mm、厚さ4mmのワーキングセクションにおいて一様な応力場が得られる。スリットの半長は3mm、先端の半径は0.15mmである。引張り荷重はピンによって、また圧縮荷重は試験片端部にくさび型治具を通して負荷する。試験片周辺の治具の配置をFig. 3に示す。試験片の材質としては、車輪鋼（以下WTとする）及びレール鋼（RP及びRF）相当のものを用いた。化学成分をTable 1に、機械的性質をTable 2にそれぞれ示す。微細組織は、WTが焼戻マルテンサイト、RPが平均パーライト層間隔( $D_{avg}$ )が約0.5µmの普通パーライト、RFは微細パーライトで、 $D_{avg}$ が約0.1µmである。熱処理は加工前にWT試験片のみ行い、860°Cで2時間保持した後油焼入れを行い、焼戻しは490°Cで7時間保持した。

負荷履歴は、Fig. 4に示すようなWongら<sup>6)</sup>が用いたもので、車輪とレールの接触によってき裂が受ける負荷である。同図にはモードI及びモードII応力拡大係数( $K_I$ 及び $K_{II}$ )の重なり角度も示している。このような履歴を45°傾斜したき裂が受けるように、疲労試験装置の各軸の負荷を求め

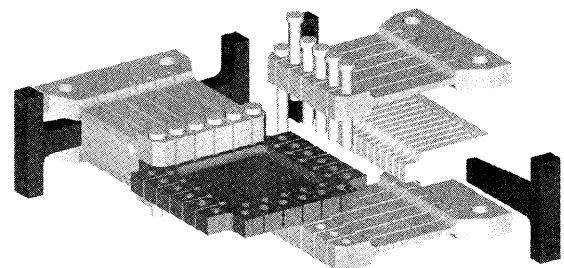


Fig. 3. Arrangement of specimen, tensile and compressive grips, pin and wedges.

Table 1. Chemical composition (wt%).

Material	C	Si	Mn	P	S
Wheel steel, WT	0.65	0.26	0.73	0.016	0.01
Rail steel, RP	0.68	0.26	0.93	0.016	0.01
Rail steel, RF	0.79	0.17	0.82	0.019	0.01

Table 2. Mechanical properties.

Material	Ultimate tensile strength (MPa)	Proof stress (MPa)
Wheel steel, WT	from 981 to 1030	from 618 to 657
Rail steel, RP	934	511
Rail steel, RF	998	599

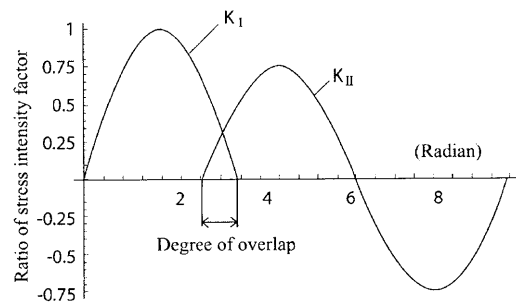


Fig. 4. Applied loading cycles.

た。Fig. 5は、X軸及びY軸の負荷履歴の例である。 $K_I$ 及び $K_{II}$ の有効値範囲 $\Delta K_{I,eff}$ 及び $\Delta K_{II,eff}$ は、公称値範囲 $\Delta K_{I,nom}$ 及び $\Delta K_{II,nom}$ を用いて、次式で計算した。

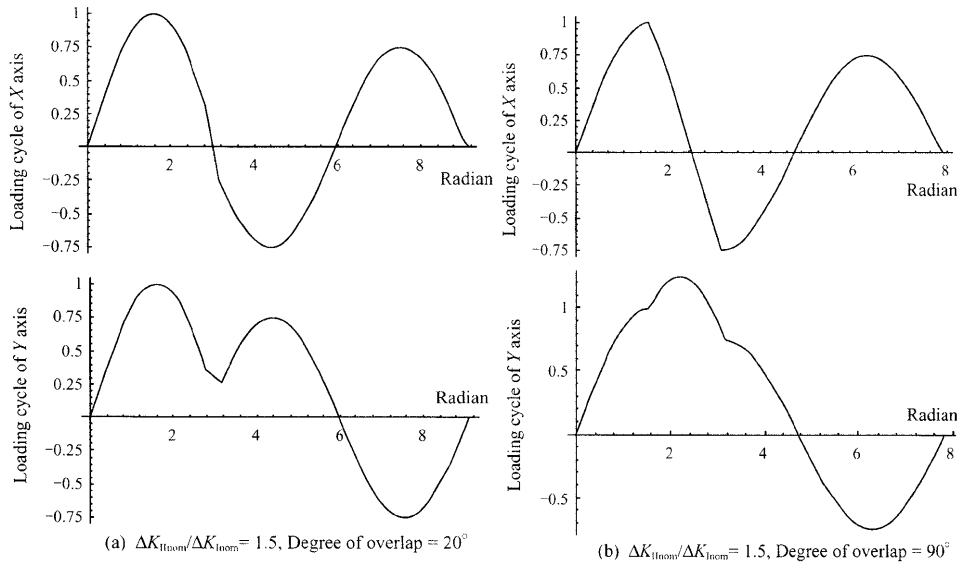


Fig. 5. Applied sequential loading cycle of X and Y axes. (The vertical axis represents the relative value of X and Y axis load with the maximum X axis load taken as unity.)

$$\Delta K_{I,eff} = U_I \Delta K_{I,nom} = U_I F \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta K_{II,eff} = U_{II} \Delta K_{II,nom} = U_{II} F \Delta \tau \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (2)$$

ここで  $\Delta \sigma$  及び  $\Delta \tau$  は、き裂面における垂直及びせん断応力範囲である。また  $F = \sqrt{\sec(\pi a/2W)}$  で、 $a$  はき裂の半長、 $W$  は対角線に沿った試験片の等価半幅である。 $U_I$  及び  $U_{II}$  は、それぞれき裂開口率及びき裂固着率で、次式で表される。

$$U_I = \frac{v_{a,max} - v_{a,min}}{v_{th,max} - v_{th,min}} \dots \dots \dots (3)$$

$$U_{II} = \frac{u_{a,max} - u_{a,min}}{u_{th,max} - u_{th,min}} \dots \dots \dots (4)$$

$v_{a,max}$ ,  $v_{a,min}$ ,  $v_{th,max}$ ,  $v_{th,min}$  はそれぞれ開口変位の実測最大値、実測最小値、理論的最大値及び理論的最小値で、 $u_{a,max}$ ,  $u_{a,min}$ ,  $u_{th,max}$ ,  $u_{th,min}$  はそれぞれ滑り変位のそれらである。これら実測値の判定には、表面レプリカ法を用いた。また、き裂長さの測定には、移動式顕微鏡を用いた。実験は乾燥状態で行い、負荷の急激な変化に試験装置が十分正確に応答するように、周波数は1.0 Hz以下とした。

### 3. 実験結果

実験は WT 試験片 4 個、RP 試験片 7 個、RF 試験片 1 個を用いて行った。WT 試験片を用いた実験を、それぞれ WT1, ..., WT4, また RP 及び RF 試験片を用いた実験を、それぞれ RP1, ..., RP7 及び RF1 とする。WT1 から WT4 まで、RP1 から RP4 まで及び RF1 は、共平面成長速度を求めるための実験、RP5 及び RP6 は分岐き裂の成長速度を求めるた

Table 3. Testing conditions.

Exp. No.	$\Delta K_{II,nom} / \Delta K_{I,nom}$	Degree of overlap (Degree)
WT1	1.0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 120
WT2	1.0	30, 60, 90, 120
WT3	1.25	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 120
WT4	1.0, 1.375, 1.5, 1.9, 2.0	10, 30, 60
RP1	1.0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
RP2	1.5	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
RP3	1.0	30, 60, 90, 120, 150
RP4	1.5	30, 60, 90, 120
RP5	2.0	0
RP6	2.5	0
RP7	1.6, 1.7, 1.8, 2.0	10, 30, 60
RF1	1.0, 1.375, 1.5	30

めの実験である。実験前に応力比0の等二軸モードI負荷を用いて、荷重漸減法でスリット先端に予き裂を挿入した最終的な  $\Delta K_{I,nom}$  は、例えば RP 試験片の場合、ほぼ  $6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  であった。Table 3 に、それぞれの実験における  $\Delta K_{II,nom}$  と  $\Delta K_{I,nom}$  の比及び  $K_{I,nom}$  と  $K_{II,nom}$  の波形の重なり角度の条件を示す。き裂開口については、負荷した最大及び最小の  $K_{I,nom}$  におけるき裂先端からの距離とその位置における開口量を測定し、き裂固着については、負荷した最大及び最小の  $K_{II,nom}$  におけるき裂先端からの距離とその位置のき裂面のずれ量を測定した。

実験 WT1, WT2, WT3, RP1, RP2, RP3 及び RF1 では、全ての波形の重なり角度で、共平面き裂成長がほぼ直線状に起こった。き裂の両端における成長速度はほぼ一定で、重なり角度が  $120^\circ$  以上の場合においてもほぼ共平面成長のままであった。き裂はいずれの重なり角度の場合ともほぼ  $3 \text{ mm}$  ずつ進展させた。また、き裂成長とともに  $K$  値が大きくなりすぎるのを避けるため、波形の重なり角度を変更するごとに負荷荷重を減少させ、初期の  $K$  値をほぼ一定に保った。き裂開口及びき裂固着については、いずれも実験

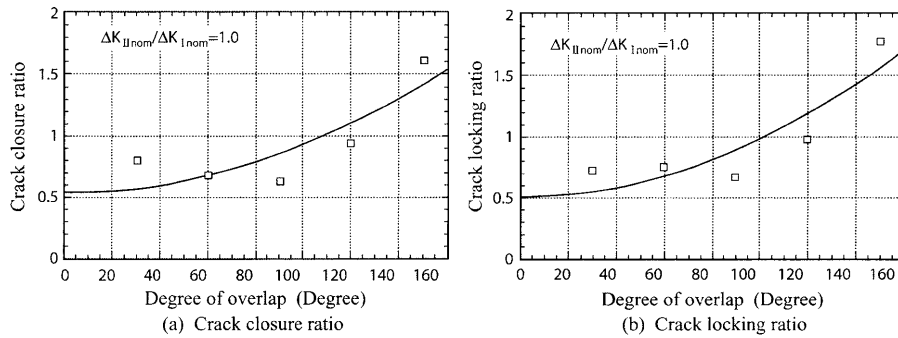


Fig. 6. Crack closure ratio and crack locking ratio at different degrees of overlap.

中に負荷した最大及び最小の  $K_{II,nom}$  及び  $K_{I,nom}$  を、負荷履歴を与えてその瞬間に停止して測定した。実験 WT4 では  $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom}=1.375$ 、重なり角度が  $10^\circ$  で分岐し、実験 RP4 では重なり角度が  $120^\circ$  で分岐した。本実験では、き裂面に沿った摩擦力は一定と考え、 $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom}$  及び重なり角度が同一の場合には、固着率は一定と考えて有効値を求めた。これらの結果より、式(3)及び(4)を用いて、種々の重なり角度に対する閉口率及び固着率が得られる。例として、 $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom}=1.0$  の場合のそれらを Fig. 6 に示す。

3.1 共平面き裂成長速度

得られた全ての共平面き裂成長速度について、 $\Delta K_{I,nom}$  と  $\Delta K_{II,nom}$  及び  $\Delta K_{I,eff}$  と  $\Delta K_{II,eff}$  に対して整理したが、どのグラフも  $K$  値範囲の単一パラメータでは、良い相関は得られなかった。よって、き裂成長速度は、負荷した両方の有効  $K$  値範囲及び重なり角度に依存するものと考えられる。そこでき裂成長速度はモード I 及びモード II の両方の機構に基づくと考え、き裂成長速度を整理した。まず最初は、き裂成長速度はモード I 及びモード II の両方の機構に基づくが、そのどちらかが支配的であると考えた。混合モード負荷の下では、 $\Delta K_{I,eff}$  は  $\Delta K_{II,eff}$  から影響を受け、逆に  $\Delta K_{II,eff}$  は  $\Delta K_{I,eff}$  から影響を受けると考えられる。Fig. 7 及び Fig. 8 に、それぞれ WT 及び RP について、このような考えに基づく成長速度のグラフを示した。二つのき裂成長モデルは、次式で示される。

$$\Delta K_{II,eff} \times \left(1 + \frac{\Delta K_{I,eff}}{\Delta K_{II,eff}}\right)^{m1} \text{ or } \Delta K_{I,eff} \times \left(1 + \frac{\Delta K_{II,eff}}{\Delta K_{I,eff}}\right)^{m2}$$

指数  $m1$  及び  $m2$  は、結果がよい相関となるように試行錯誤によって決定し、他の係数は、最小二乗回帰によって求めた。これらを WT 及び RP について Paris 型の進展則で表すと、以下ようになる。

WT については

$$\frac{da}{dN} = 4.44 \times 10^{-11} \left[ \Delta K_{II,eff} \times \left(1 + \frac{\Delta K_{I,eff}}{\Delta K_{II,eff}}\right)^{1.8} \right]^{2.32} \dots (5)$$

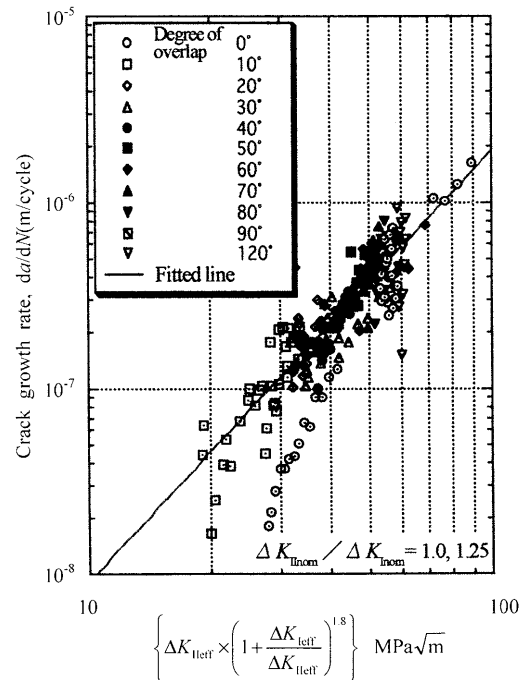


Fig. 7. Co-planar crack growth rate data for WT.

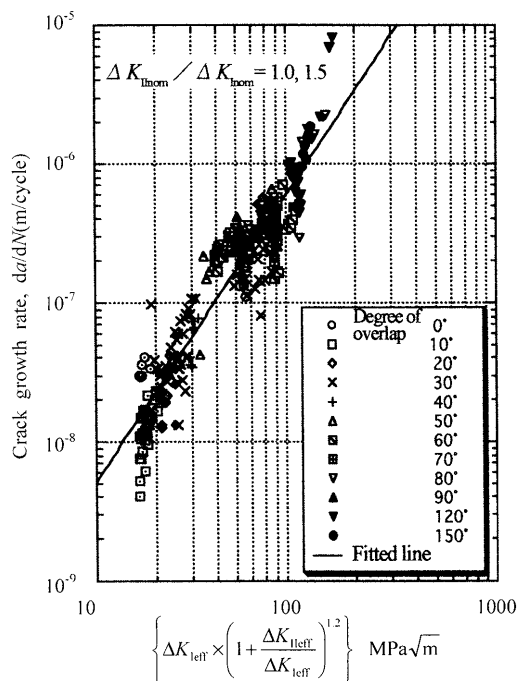


Fig. 8. Co-planar crack growth rate data for RP.

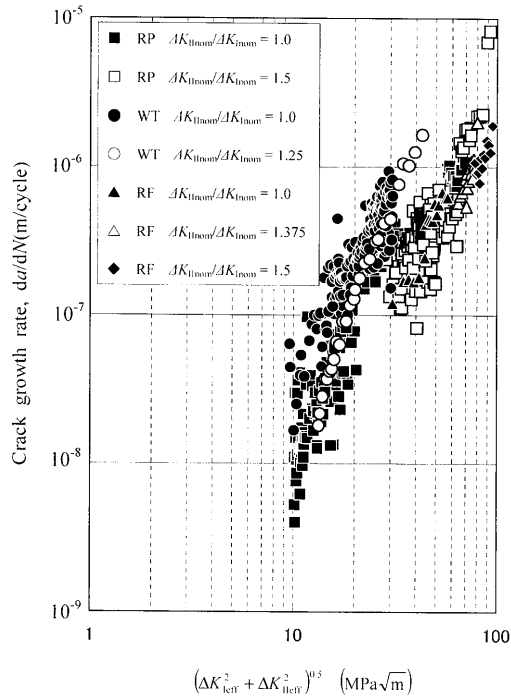


Fig. 9. Co-planar crack growth rate data for WT, RP and RF.

RPについては

$$\frac{da}{dN} = 3.47 \times 10^{-11} \left[ \Delta K_{I,eff} \times \left( 1 + \frac{\Delta K_{II,eff}}{\Delta K_{I,eff}} \right)^{1.2} \right]^{2.17} \dots\dots\dots (6)$$

次にき裂成長速度はモード I 及びモード II の両方の機構に同程度に依存すると考え、き裂成長速度を等価有効応力拡大係数範囲  $\sqrt{\Delta K_{I,eff}^2 + \Delta K_{II,eff}^2}$  で整理し、全ての鋼について Fig. 9 に示した。この場合は次式のような Paris 型の進展則とした。

$$\frac{da}{dN} = C \left( \sqrt{\Delta K_{I,eff}^2 + \Delta K_{II,eff}^2} \right)^m \dots\dots\dots (7)$$

ここで WT については

$$C = 9.48 \times 10^{-11}, \quad m = 2.57$$

RP については

$$C = 8.78 \times 10^{-11}, \quad m = 2.22$$

RF については

$$C = 1.05 \times 10^{-10}, \quad m = 2.11$$

となる。この図から、 $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom}$  が同じ場合には、パーライト組織である RP 及び RF の方が焼戻しマルテンサイト組織である WT よりもき裂成長速度は小さいことが分かる。また一般には、 $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom}$  が増大すれば同じ材質においては、き裂成長速度は小さくなることも分かる。

3.2 分岐き裂成長速度

分岐き裂の K 値計算には、Gao ら<sup>3)</sup>が提案した、き裂面に垂直に作用する応力を考慮する手法を用いた。RP 試験

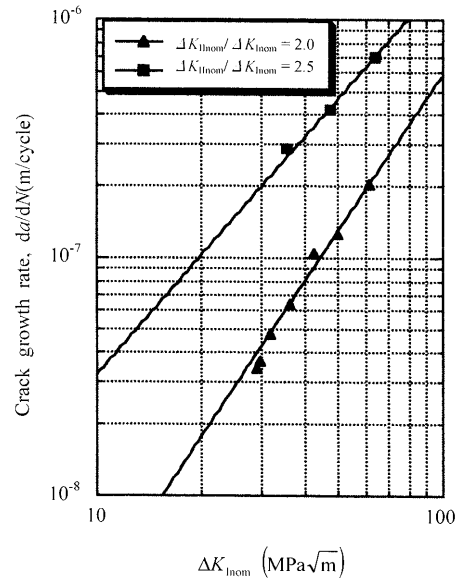


Fig. 10. Branch crack growth rate data.

片では、 $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom}$  が 2.0 以上では、分岐き裂となった。実験 RP5 は  $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom} = 2.0$  の場合、実験 RP6 は  $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom} = 2.5$  の場合で、いずれも分岐き裂が発生し、進展した。これらは負荷軸の一つにほぼ垂直に進展するモード I 疲労き裂である。いずれの実験においても、最初の負荷で直ちに分岐き裂となった。このような分岐き裂は、今回の二軸負荷試験では、モード II 負荷部分からの大きなモード I サイクルと、モード I 負荷部分からの小さなモード I サイクルを受けることになる。後者による成長速度は小さく、かつ残留塑性域によっても減少する。Fig.10 に、これら分岐き裂の成長速度と  $\Delta K_{I,nom}$  の関係をまとめて示す。

3.3 破面観察

実験後の試験片の破面から、き裂成長機構についての情報が得られる可能性がある。よって試験片のき裂先端付近の破面を SEM で観察した。 $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom} = 1.25$  における WT3 試験片、 $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom} = 1.5$  における RP2 及び RF1 試験片のき裂先端付近の破面を、それぞれ Fig.11 から 13 に示す。破面は多くの酸化摩耗粉が含まれており、特に比較的大きな  $\Delta K_{II,nom}/\Delta K_{I,nom}$  で実験を行った RP2 及び RF1 試験片で顕著であったため、観察はそれら摩耗粉を取り除いてから行った。全ての試験片で滑り方向に擦り取られたような大きく変形した ridge や valley が観察されたが、WT3 及び RP2 試験片でのみ不明瞭な striation が散見された。それゆえ、き裂先端付近の損傷は、主にモード II 負荷によって引き起こされていると考えられる。RP2 及び RF1 試験片におけるパーライト層の破面は複雑で、破面の傾きに依存して粒子によって変動している。層状構造のため、破面は比較的粗く、高倍率においては micro-cleavage が観察される。き裂成長は、進展方向に垂直な層構造によって阻止されたり、進展方向に傾斜した層構造によって偏向される可能性

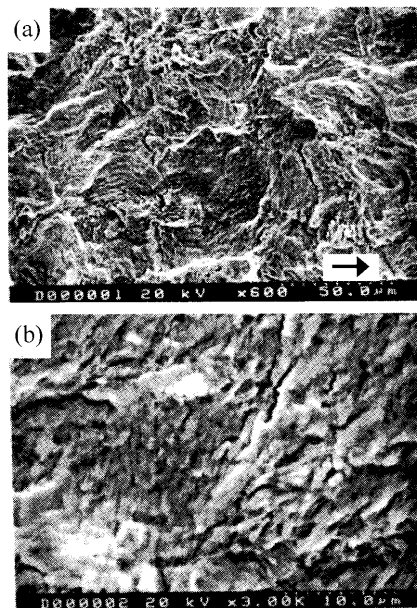


Fig. 11. Fracture surface near the crack tip of WT3 specimen. (a) Low magnification. (Arrow indicates the direction of crack propagation.) (b) High magnification.

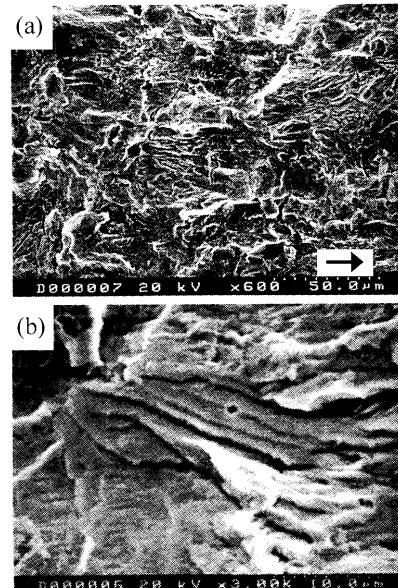


Fig. 13. Fracture surface near the crack tip of RF1 specimen. (a) Low magnification. (Arrow indicates the direction of crack propagation.) (b) High magnification.

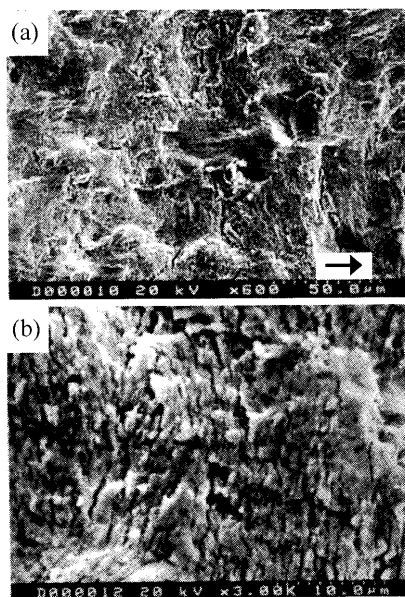


Fig. 12. Fracture surface near the crack tip of RP2 specimen. (a) Low magnification. (Arrow indicates the direction of crack propagation.) (b) High magnification.

がある。

#### 4. 考察

本研究では混合モード荷重における  $\Delta K_{I,eff}$  と  $\Delta K_{II,eff}$  の相互作用を調査した。Fig. 6 によって、モード I き裂閉口率と、モード II き裂固着率は重なり角度によって変化することがわかった。き裂閉口率とき裂固着率の変化に内在する詳細な機構は明らかではないが、重なり角度が増大するとき裂

の残留開口量が大きくなり、それら両方の比率が 1.0 に近づくと考えられる。これらの図から、同じ公称  $K$  値範囲に対するき裂先端の塑性流動は、重なり角度が大きい場合には発生しやすくなるものと考えられる。またき裂進展量が 1 mm 以下の場合に、成長の遅延が観察された。これは前の塑性域がその後の荷重条件に影響を与えているものと推察される。

き裂先端の塑性域、繰返し応力ひずみ挙動、応力及びひずみの負荷範囲など、幾つかのパラメータがき裂の進展挙動に影響を及ぼすものと考えられる。き裂の分岐は  $\Delta K_{II,eff}/\Delta K_{I,eff}$  だけでなく、重なり角度の影響も受けると考えられる。本研究で与えたような、非比例混合モード荷重サイクルの下では、疲労き裂は最大せん断応力方向または最大円周応力方向をたどり、そのいずれをたどるかはどちらの成長速度が高かに依存するといわれている<sup>9)</sup>。それを考慮すると、重なり角度が  $0^\circ$  のように小さい場合には、き裂面摩擦の影響で最大せん断応力方向へのき裂成長すなわち共平面き裂成長速度が小さくなるため、最大円周応力方向へのき裂成長即ちモード I 分岐き裂成長が形成されやすいものと考えられる。重なり角度が  $30^\circ$  程度では、モード I 荷重によってき裂先端が開いて、き裂面摩擦の影響を受けない間にモード II 荷重が与えられるため、最大せん断応力方向のき裂成長速度が高く、共平面き裂成長が起こるものと考えられる。しかし重なり角度がさらに大きくなると、 $Y$  軸の荷重が  $X$  軸の荷重に比較してかなり大きくなるので、 $Y$  軸に垂直な方向すなわちほぼ最大円周応力方向へのき裂成長速度が高くなり、再びモード I 分岐き裂成長が起こりやすくなるものと考えられる。

分岐き裂については、本研究に用いた $K$ 値の計算手法では、単一の式で成長速度を表すことができなかった。分岐き裂の成長速度を求めた負荷条件は、 $\Delta K_{II\text{nom}}/\Delta K_{I\text{nom}}=2.0$ 及び $2.5$ であるが、この場合はき裂先端の塑性域が比較的大きく、き裂成長速度に及ぼすき裂先端の塑性域寸法の影響が無視できなくなる。この塑性域寸法には $T$ 応力すなわちき裂先端からの距離に依存しない応力が影響を及ぼすことが指摘されている<sup>3)</sup>。この $T$ 応力は、き裂形状及び二軸引張り圧縮疲労試験装置における両軸の負荷の関数となる。本実験における共平面き裂成長の場合には $T$ 応力は $0$ となるが、分岐き裂成長のようなそれ以外の場合には $0$ とはならず、試験装置の $X$ 軸方向応力 $\sigma_x$ 及び $Y$ 軸方向応力 $\sigma_y$ 、両方の影響によって変化することになる。 $\Delta K_{II\text{nom}}/\Delta K_{I\text{nom}}$ が異なると $\sigma_x$ 及び $\sigma_y$ が異なるため、 $T$ 応力が異なる。よってき裂先端塑性域寸法が異なるため、 $\Delta K_{II\text{nom}}/\Delta K_{I\text{nom}}$ が $2.0$ と $2.5$ では、き裂成長速度に差が現れたものと考えられる。

モードI負荷の下で観察される破面の主要な特徴はstriationであることはよく知られている。本研究においては、破面には明確なstriationは観察されず、摩擦による著しい‘荒れ’が観察された。このような表面損傷はモードII負荷の下でのき裂面間の相互作用がある場合に観察されることが報告されている<sup>10)</sup>。それゆえ、本研究における主要なき裂成長機構はモードIIであるとされる。 $\Delta K_{II\text{nom}}/\Delta K_{I\text{nom}}$ が小さい場合には、モードI負荷の影響が大きく、き裂面間の相互作用はそれほど現れない。モードI負荷が大きくなると、き裂先端において大きな開口変位が残留し、固着状態が解放されるため、き裂成長速度が増大するものと考えられる。 $\Delta K_{II\text{nom}}/\Delta K_{I\text{nom}}$ が大きい場合には、 $\Delta K_{II\text{nom}}$ 及び $\Delta K_{I\text{nom}}$ の両方もき裂面の接触によって減衰し、き裂成長速度は減少するものと考えられる。

SEMによる破面観察から、パーライト組織が焼戻しマルテンサイト組織よりもき裂成長に対する抵抗を所持している理由は次のように推測される。これは本来の微細組織と関係があると考えられる。焼戻しマルテンサイト組織の場合は、焼戻しによってマルテンサイトラスに沿って析出したセメンタイトが球状化しており、周囲を軟質なフェライトが取り囲んでいる。球状セメンタイトの間隔は比較的広く、平均フェライト自由距離は本研究の場合、約 $3\sim 4\mu\text{m}$ にもなる。それゆえ、き裂は軟質のフェライト間を縫って進展しやすいものと考えられる。これに対してパーライト組織の場合は、フェライトとセメンタイトの層状組織であり、特に微細パーライトの場合は、先に記したように $D_{\text{avg}}$ が約 $0.1\mu\text{m}$ とかなり狭くなり、疲労き裂はこのパーライト層に阻まれ、進展しにくくなるものと考えられ

る。

## 5. 結言

車輪踏面及びレール頭頂面に発生し、車輪とレールの接触によってモードIとモードIIの混合負荷を受ける疲労き裂の進展機構を明らかにするため、二軸引張り圧縮疲労試験装置を用いて、そのような負荷を車輪鋼及びレール鋼試験片に与え、それぞれの共平面き裂成長速度、及び分岐き裂成長速度を求めた。得られた結果を以下に示す。

(1) 車輪鋼及びレール鋼試験片について、 $\Delta K_{II\text{nom}}/\Delta K_{I\text{nom}}$ 及び $K_{I\text{nom}}$ と $K_{II\text{nom}}$ の重なり角度を種々変化させて、共平面き裂成長速度を求めた。 $\Delta K_{II\text{nom}}/\Delta K_{I\text{nom}}$ 及び重なり角度が変化すると、き裂開口率及びき裂固着率は変化することがわかった。またき裂成長速度については、 $\Delta K_{I\text{eff}}$ 及び $\Delta K_{II\text{eff}}$ の両方を用いた式によって相関の高い成長速度式が得られた。レール鋼については、分岐き裂成長速度を求めたが、単一の式で成長速度を表すことはできなかった。

(2) 重なり角度が小さい場合には、き裂面摩擦の影響で分岐き裂成長が起こりやすくなる。重なり角度がある程度大きければ、き裂先端が開いている間にモードII負荷が与えられるため、共平面き裂成長が起こりやすくなる。しかし重なり角度をさらに大きくすると、最大円周応力方向へのき裂成長速度が増大し、き裂の分岐が起こる。

(3)  $\Delta K_{II\text{nom}}/\Delta K_{I\text{nom}}$ が同じ場合には、パーライト組織におけるき裂成長速度はマルテンサイト組織におけるものよりも小さいことが分かった。これはパーライトの微細組織である層状構造が、き裂成長に対する遮蔽物となるためと考えられる。

## 文 献

- 1) A.F.Bower: *Trans. ASME. J. Trib.*, **110** (1988), 704.
- 2) A.Otsuka, K.Mori, T.Ohshima and S.Tsuyama: *Proc. 5th Int. Conf. Frac.*, **4**, (1981), 1851.
- 3) H.Gao, N.Alagok, M.W.Brown and K.J.Miller: *ASTM Sympo. on Biaxial and Multiaxial Fatigue*, San Francisco, (1982).
- 4) M.C.Smith and R.A.Smith: *ASTM STP 924*, ed. by J.T.Fong and R.J.Fields, **1**, (1988), 260.
- 5) P.E.Bold, M.W.Brown and R.J.Allen: *Wear*, **144** (1991), 307.
- 6) S.L.Wong, P.E.Bold, M.W.Brown and R.J.Allen: *Wear*, **191** (1996), 45.
- 7) V.Doquet and S.Pommier: *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **27** (2004), 1051.
- 8) Y.Fujii, K.Maeda and A.Otsuka: *J. Soc. Mater. Sci. Jpn.*, **50** (2001), 1108.
- 9) F.Hourlier and A.Pinau: *Proc. 5th Int. Conf. Fract.*, **4**, (1981), 1841.
- 10) L.P.Pook and A.F.Greenan: *Proc. Fatigue Testing Design Conf.* (London), Soc. Environmental Eng., (1976), 30.1.