転がり疲労とき裂進展機構[†]

木 田 勝 之^{*}

Rolling Contact Fatigue and Crack Growth Mechanisms

by

Katsuyuki KIDA^{*}

Key words : Rolling contact fatigue, Tribology, Fracture mechanics, Crack initiation, Crack growth, Wear

1 はじめに

Tribology の定義は、「相対運動を行ないながら相互作用を及ぼしあう表面およびそれに関連する実際問題の科学技術」の総称である。¹⁾ 広義の「潤滑」が研究対象であり、具体的には、摩擦、摩耗、潤滑、軸受設計等が含まれる。Tribology では、これらの分野の研究が、物理学、化学、材料科学、力学的見地から行われる。²⁾ これは、Tribology が広い分野にわたった研究であることを意味するだけではなく、たとえ研究対象や目的が同じでもアプローチの仕方が様々であることも意味する。Tribology の中でも、損傷に関する問題は、潤滑分野や材料分野の研究が先行しており、力学分野の研究が近年に取り組み始められことは否定できない。本報では、Tribology の研究対象の中でも、力学的研究の貢献が期待される転がり疲労に焦点をあてる。特に、転がり接触条件下のき裂に対し、どのように力学的見地から研究を行えばよいかを念頭に、これまでに行われてきた研究状況をまとめる。

き裂とはく離の成長機構は様々な観点から研究されているが、統一的な観点からまとめることは難しい。そこで、図1のように、研究対象を分類する。この分類は、少々大胆だが、力学的観点から転がり疲労とき裂の関係

を理解するのに便利と考えた。図1にしたがい、表面近傍の摩耗機構とき裂の関係、静止領域に注目した表面き裂の考え方を中心に説明し、内部のき裂発生と進展の問題についても言及する。また、これまでに研究されてきたき裂進展機構と軸受損傷との関連についても述べる。

2 摩耗とき裂進展（浅い内部き裂の進展機構）

トライボロジーにおける最もよく知られた表面損傷は摩耗である。摩耗は、すべり摩耗、転がり摩耗等に大別される。すべり摩耗損傷は、接触面凝着部のせん断による凝着摩耗、凹凸や硬質粒子の切削作用によるアブレシブ摩耗等に分類される。²⁾ 摩耗の機構は、様々な方面から研究されているが、十分には明らかにされていない。しかし、表面上で薄片がはがれることによって表面が磨り減っていく現象を摩耗とみなすと、摩耗は薄片のはく離問題となる。この場合、力学的な観点からは、極めて浅い表面近傍でき裂が進展し、進展した部分がはがれることが、「はく離」とみなされる。

このように、摩耗を浅いはく離形成とみなすき裂進展の機構は、Fleming & Suh³⁾によって提案された。この機構では、図2のように、2次元的に表面近傍に表面と平行に位置するき裂を想定し、接触荷重である1点集中荷重が加わると、き裂が進展する場合が取扱かわれた。1点集中荷重によって発生する応力分布は、圧縮応力域と引張り応力域に分割され、き裂は引張り応力域でのみ進展すると仮定されている。き裂の全体もしくはき裂の一部が、圧縮応力域内に位置する場合、たとえき裂が存在していても、その領域はき裂とはみなされない。このモデルはトライボロジーの損傷を破壊力学的に研究した初

図1 転がり疲労き裂の分類

図2 1点集中荷重下の浅いき裂に対する進展機構

[†] 原稿受理 平成13年11月2日 Received Nov. 2, 2001

^{*} 正 会 員 大阪大学大学院基礎工学研究科 〒560-8531 豊中市待兼山町, Sch. of Mech. Eng. Sci., Osaka Univ., Machikanayama-cho, Toyonaka, 560-8531

期のものであるが、示唆すべき内容を多く含んでいる。有効領域の考え方の他に、接触による複雑な応力場にき裂が存在する場合、どのようにして近似的に応力拡大係数 (K_{II}) をもとめればよいかが示された。すなわち、lower bound solution (き裂を想定せずに応力分布をもとめた後、この応力下でき裂の応力拡大係数を解析する方法) は良い近似 (10% 程度の誤差) を示すことが指摘された。

Rosenfield⁴⁾ は、Fleming & Suh が研究したモデルにき裂面間の摩擦の影響を取り入れた。

Hills & Ashelby⁵⁾ は、Fleming & Suh の解析を分布荷重下の問題に適用し、発展させた。この研究では、引張り応力域でのき裂長さを有効長さとしみなすだけではなく、せん断応力の有効領域も含めたき裂長さが有効と考えられている (図3)。せん断応力と垂直応力により発生する摩擦力を比較し、有効なせん断応力と有効なき裂長さが求められ、応力拡大係数が解析された。この解析の結果、先に述べた Fleming & Suh の考え方を分布荷重に適用した場合と大きな差は生じないことが明らかにされた。このことは、表面近傍のはく離には、き裂面間の摩擦力の影響がそれほど大きくないことを意味しており、ある程度簡単化された解析でも十分に力学的な考察を行なえる可能性を示している。ただし、垂直応力分布は、荷重や接触対の形状等に依存するので、全ての内部に存在する平行き裂にこの可能性が適用できるわけではない。

せん断応力から導かれた応力拡大係数とき裂有効領域の考え方は、この研究で対象とされたき裂の進展には大きな影響を及ぼさなかった。しかし、表面下き裂の進展機構を研究する上では大変重要な考え方を示している。

ところで、表面き裂を起点とするはく離を扱う場合には、き裂の進展量と摩耗量とを比較することが重要である。つまり、摩耗量の方が大きく、き裂が進展しない場

合には、き裂によるはく離が起こり得ないことに注意する必要がある。Fan ら⁶⁾ は、先に述べたき裂進展による摩耗ではなく、き裂進展と摩耗を完全に分けて考え、硬さと荷重によって、摩耗量よりもき裂の進展量の方が大きくなる場合 (き裂の進展が観察される場合) と摩耗量の方が大きい場合 (き裂の進展が観察されない場合) があることを示した。このことから、表面き裂によってはく離が発生する場合には、表面き裂の成長と摩耗の成長のどちらが大きいかを把握してから損傷の主要因を考えなければならないことが指摘される。

3 表面き裂

3・1 実験に基づいた表面き裂進展と静止領域のモデル

表面き裂の進展について、実験的に観察された研究は次のようにまとめることができる。

(1) Way の実験

Way⁷⁾ は、潤滑条件下で表面き裂を発生させた試験片を、無潤滑下で転がり疲労させると、き裂は進展しないことを発見した。また、粘度の高い潤滑油では、寿命が延びることも指摘した。この結果をもとに、Dawson⁸⁾ は潤滑油の膜厚と表面の硬度と粗さが寿命に及ぼす影響を調べた。また、Martin & Cameron⁹⁾ と Foord ら¹⁰⁾ は、潤滑油の粘度と寿命の関係を詳細に研究し、(表面き裂内の) 潤滑油がき裂進展に影響を及ぼしていることを指摘した。

(2) 表面での摩擦力の方向とき裂進展

Dawson¹¹⁾ は接触面での摩擦の方向と荷重の移動方向の関係から、接触対を従動・駆動と区別し、これらとき裂の発生・進展の関係を示した。Yamamoto¹²⁾ は、荷重の移動方向と摩擦の方向が異なる場合 (従動条件) に寿命が短くなり、同じ場合 (駆動条件) に寿命が長くなることを発見した。さらに、Nakajima ら¹³⁾ は、いったん従動条件下でき裂が発生した後に、駆動条件にする (摩擦の方向を逆転させる) とき裂が進展しなくなることを発見した。

(3) 静止領域

表面き裂は、表面近傍で進展する場合と、しない場合がある。Tallian¹⁴⁾ は、本来進展しない領域 (quiescent zone) に外乱が作用することにより、き裂が進展しうる条件が発生すると仮定した。

3・2 潤滑油の浸入とくさび効果

まず、3・1 節の (1) と (2) の実験結果に基づいたき裂進展機構を述べる。これらの研究では、接触対間の摩擦力の存在 (その方向) とき裂内への潤滑油の浸入が力学的に重要な役割を果たしていることが注目される。

Kaneta ら¹⁵⁾、¹⁶⁾ Murakami ら¹⁷⁾ は、き裂内に浸入した潤滑油がき裂進展に及ぼす力学的影響として、くさび効果を進展モデルに取り入れた。くさび効果とは、接触体の接触圧が潤滑油を介してき裂面に作用することにより、き裂が引張り応力を受けたようになって開口することである。この場合、き裂はモード I で進展する。図4のように、円柱接触における荷重移動の力学条件を考え、駆動と従動をそれぞれ分けた場合、(1) と (2) の実験結果は、

図3 有効応力と有効面積の考えを取り入れたき裂進展機構 (有効面積は、有効応力の分布から求められる)

図4 有摩擦接触で発生するくさび効果
(き裂内への潤滑油浸入効果)

従動の場合にき裂進展の条件が最も整うことを表している。つまり、駆動条件(図4中、上側のき裂)では、荷重の移動方向(①→②)と摩擦力の方向(白矢印)が同じため、垂直荷重がき裂開口部に到達したときに、き裂は摩擦力により閉口する。この場合、き裂内に潤滑油が浸入できないため、くさび効果は作用しない。従動条件では、き裂の傾きが摩擦力の方向と同じ場合、荷重の移動にともなって、内部のき裂先端からき裂が閉じはじめ、荷重がき裂に到達したときには、き裂内の潤滑油は、排出されてしまっているため、これもくさび効果は働かない。しかし、き裂の傾斜角度が摩擦力の方向と逆の場合(図4中、下側のき裂)、荷重がき裂に到達したときに、き裂は開口しており、き裂内に潤滑油が浸入する。潤滑油を介して、垂直荷重がき裂面間に作用し、き裂をモードIで進展させる(図5(a))。

Keer & Bryant¹⁸⁾は、くさび効果とき裂面間の摩擦を考慮に入れて、近似的な手法で応力拡大係数を解析し、寿命評価の可能性を検討した。解析の結果、 K_I 値は極めて大きくなることを指摘した。さらに、混合モードのパリス則にこのモデルが従う場合、進展寿命がきわめて短くなることを予想した。実際に観察される寿命は、解析結果よりも長くなるため、寿命評価には、せん断応力を主たる進展駆動力とみなせばよいと指摘している(図5(b))。

Bower¹⁹⁾は、潤滑油の浸入効果を駆動条件下のき裂進展にまで拡張した。潤滑油がき裂内部に浸入した後に表面が閉口すると、潤滑油はそのまま内部に閉じ込められる。この状態で圧力が表面に作用すると、き裂先端が開く、つまり口の閉じた風船の一端を絞ると他端が膨らむのと同様な状態となり、き裂がモードIで進展する。Bowerは、この効果とモードIIのき裂進展機構を組合せて混合モード下のき裂進展モデルを提案した(図5(c))。しかし、近年Bordiら²⁰⁾は、Bowerのモデルは、実験的に検証困難と述べている。

(a) くさび効果
(モードI型き裂進展機構)

(b) モードII型き裂進展機構

(c) 閉込め効果型き裂進展機構

図5 表面き裂の進展機構

上記の3つは、最も代表的な表面き裂の進展モデルであり、⁶⁾図5は各モデルの特徴を示したものである。各進展モデルは、各々の特徴のみを研究して得られたものではなく、様々な力学的影響を考慮した上で各進展モデルの特徴が強調される結果となったことを付記しておく。

3・3 静止領域における突起間接触と介在物の影響

3・1節の(3)の原因については、統一された見解は得られていないが、介在物・欠陥や突起間接触がき裂進展に影響を及ぼす可能性があることが示されている。

Clarkeら²¹⁾は、寿命の5%で表面き裂の発生を確認した。これを詳細に調べたところ、短いまま停留するき裂(10から20 μm の長さ)や、進展するき裂があることが発見された。Clarkeらは、本来伸びない領域に位置するき裂に、介在物・欠陥による応力の増加効果が作用し、き裂が進展すると考え、解析的にこの可能性を示した。Millerら²²⁾は、Clarkeらの実験結果にもとづき、表面き裂に突起間接触(図6(a))による応力の変化が影響していると考えた。突起間接触によって、表面近傍の応力は増加する。この突起間接触による応力の深さ分布は、基材の応力分布に比べ、浅い位置で最大値を示す(図6では、応力ではなく、 ΔK_{II} で示す²²⁾)。このため、き裂は、突起間接触の影響があれば、基材のみの接触では進展しない深さでも進展しようと結論づけた。

図6 突起間接触が表面き裂におよぼす影響

3・4 摩耗とき裂進展

上記の研究は、それぞれが取り上げたき裂の特徴を非常にうまく説明している。しかし、それぞれの進展モデルが、他の進展モデルで考察の対象としたき裂の特徴を説明できているわけではない。このことに加え、Fan らが指摘した、摩耗による表面き裂の摩滅は十分に考えられていないことには、注意を払わなくてはならない。

3・5 3次元問題

これまでに述べた研究の接触状態は2次元である場合、つまり、円柱と円柱が接触する場合（線接触）であり、き裂も2次元き裂が想定されていることが多い。これらの進展モデルを圧延ローラーや歯車、レールの接触問題に適用する場合、接触体の幅が大きくなると接触状態の2次元性は保たれるが、き裂は3次元で考えなくてはならない。Kaneta らやMurakami らの研究は、いち早くこの問題に取り組み、2次元接触のみならず、3次元接触（点接触）問題¹⁶⁾に取り組んでいる意義は大きい。なお、Murakami らの研究では、実験で観察された3次元形状を有するき裂（矢じり型き裂）の傾斜角度を解析的に説明することに成功している。²³⁾

3・6 寿命評価の試み

き裂進展から寿命評価を行なう試みは、Keer & Bryant¹⁸⁾とHanson & Keer²⁴⁾の研究に見られる。Hanson & Keer は、Murakami と Kaneta の進展機構を3次元き裂に拡張するとともに、混合モードパリス則への適用性も研究した。表面き裂がはく離にいたる過程は不明ながら、応力拡大係数が急に増加する繰返し数が寿命として評価されている。Keer & Bryant のモデルでは、進展速度は、応力の2から3乗に比例するとされていたが、このHanson & Keer のモデルでは、8乗に比例すると仮定されている。この

点に矛盾があるとの指摘もあるが、²⁵⁾このモデルを用いて計算した寿命が実際の軸受寿命に近くなるとの指摘もされている。²⁶⁾

3・7 転がり接触問題と表面き裂

次に、転がり接触問題の例として、玉軸受にみられる玉と平板の転がり接触を取り上げる。

軸受の主たる研究対象は、内部き裂の発生であった。しかし、表面近傍の介在物・欠陥や、異物の噛み込みによってできる表面の窪みからき裂が発生・進展し、はく離発生の原因となる場合が多いことも指摘されている。²⁷⁾この損傷過程を明らかにするためには、表面き裂進展の力学的考察が必要となる。くさび効果の進展モデルは、接触表面の摩擦力がき裂を開口させなければ、潤滑油の浸入効果を力学的な進展モデルに反映させることができない。これは、軸受の表面き裂を取扱う時に特に注意が必要な点である。

軸受の接触は球（円筒）と平板の接触に代表される。図7のように、荷重の負荷側の平板を円柱どうしの接触と同様に駆動側とし、球をはさんだ反対側の平板を従動側とする。球と平板の間に摩擦の発生を仮定した場合でも、従動側・駆動側ともに、平板に作用する摩擦と荷重の移動方向は常に同じとなる。このため、摩擦力によるき裂の開口はおこらない。また、軸受では、摩擦係数が小さいことに着目すると、き裂を開口させるほど十分な摩擦力を想定しえない。このことから、軸受の表面き裂を取扱うには、どのき裂進展機構が軸受に有効なものであるかを、まずはじめに研究する必要がある（これは、円柱接触の駆動条件にしたがうような他の接触モデルで

図7 くさび効果と摩擦力の関係

も同様である)。ここで示した従動側と駆動側という区別は、実際の軸受でも行なわせているが、転がり状態が保たれている限り、従動条件下のき裂進展モデルが適用できるわけではないことに注意しなければならない。

4 内部き裂の進展と発生

内部き裂については、進展に関しては、圧延ロールの研究を紹介し、発生に関しては、軸受の問題を述べる。

4・1 圧延ロールのき裂進展問題

圧延用補強ロールでは、内部き裂が接触表面とほぼ平行に3周も回転するように進展した後にはく離した事例が知られている。栄ら²⁸⁾は、このき裂の安定成長過程を破壊力学的に研究した。き裂の進展が圧縮応力下で起こるため、き裂面間の摩擦、これによるき裂面間の固着と相対変位を考慮に入れた詳細な解析が行なわれた。栄らは、この解析結果を、村上らが行なったモードⅡき裂進展の研究結果²⁹⁾で評価することにより、き裂の進展期間を推測することに成功している。

4・2 転がり軸受のき裂発生問題

軸受の寿命研究は、Lundberg & Palmgren の研究^{30), 31)}に始まる。この研究結果は、修正が加えられながら発展し、軸受の転がり寿命を計算する上で基礎となっている (ISO R 281 (1990), JIS B 1518 (1992))。Lundberg & Palmgren は、Hertz の接触理論をもとに、せん断応力が表面から少し離れた内部で最大になること³²⁾に注目し、この深さ (最大せん断応力深さ) に位置する不均質部 (介在物、塑性変形、転位の蓄積等) でき裂が発生して、損傷が進行すると考えた。Ioannides & Harris³³⁾は、このモデルの不足していた内容と省略されていた全てのことを付け加えて、完全と見なされるものとした。Ioannides & Harris の研究により、疲労限度の考え方が軸受問題に取り入れられたことは、特に重要なことである。内部き裂の発生応力は、上記の Lundberg & Palmgren の Maximum orthogonal shear stress から、von Mises equivalent stress (Popinceanu ら³⁴⁾および Ioannides & Harris), octahedral shear stress (Zhou³⁵⁾)まで修正が行われている。また、表面近傍の残留応力がき裂を進展させると提案する研究 (Voskamp³⁶⁾)もあるが、その影響と値の大きさには、再確認の必要があるとの意見もみられる (Hanson & Keer²⁴⁾)。

一連の軸受の疲労寿命に対する研究では、発生寿命がその大半を占める^{30), 31)}と考えられてきたため、き裂進展よりもむしろき裂発生に重点がおかれてきた。Lamagnère ら³⁷⁾は、マイクロメカニクス³⁸⁾の観点から、介在物等の不均質部からのき裂発生モデルについて研究し、軸受の疲労寿命に解釈を与えた。Maymaud ら³⁹⁾は、介在物の位置 (深さ) 形を想定し、マイクロメカニクスモデルを使ってこれらと疲労寿命との関係を求めた。しかし、実験的観点からの検証は、十分とは言えないようである。Nélias ら⁴⁰⁾は、介在物からのき裂発生挙動に対し、詳細な実験と観察を行ない、き裂がせん断応力が最大値を示す深さよりも浅い位置で発生しやすいことを示した。しかし、なぜそのそのような特徴を示すのかにつ

いては、力学的観点からの説明は十分に行われていない。

軸受の内部き裂はバタフライと呼ばれる特徴的なき裂として、介在物から発生することが知られている。このことから、介在物に注目したき裂の研究が必要と思われるが、これまでに行なわれてきたような発生応力にのみ注目した研究では、介在物起点の微小き裂には十分に対処できない。⁴¹⁾

著者らは、き裂が内部介在物により発生したはく離⁴²⁾について力学的な解釈を試みた。図8は、介在物をき裂とみなした場合の応力拡大係数の解析結果である (解析には、Hills & Ashelby が示した有効領域・有効応力の考え方が取り入れられている)。この解析方法をもとに、どの深さに位置する介在物がはく離源となる可能性が高いかを検討した結果、き裂面間の摩擦係数の増加にともない、発生位置が浅くなる傾向が得られた。⁴³⁾

5 今後の展望

5・1 転がり疲労と破壊力学

圧延ローラーや軸受では、き裂の進展寿命が全寿命に占める割合が異なるため、発生問題と進展問題という研究対象が同列には扱われてこなかった。このことが、力

図8 応力拡大係数の深さ分布

(介在物の直径は、 $10\mu m$ 。図中の●は、 K_{II} の絶対値の最大値と深さを表す。実験では、バーで示した深さ $94.5\mu m$ でき裂が発生した。●の深さと実験結果がよく一致している)。

学分野においても、内部発生説と表面発生説を分けた一因であり、き裂の取り扱いを複雑にしている。

トライボロジーで扱われる材料には、高負荷下での耐変形性、耐摩耗性の性能が求められる。このため、歯車、ローラー、軸受等の接触機械要素の材料には、いわゆる高硬度鋼が選択される。使用寿命も長寿命域であるため、介在物からのき裂発生に破壊力学的な観点からの研究が必要不可欠である。

上記の力学的な問題、材料の特性を考えると、今後、き裂進展はもちろん、発生に関しても破壊力学的アプローチが重要になるものと思われる。

5・2 表面き裂

表面き裂の進展機構に関する研究は、そのほとんどが、摩擦がある接触対間の問題を研究対象としている。くさび効果モデルも、介在物・突起間接触に起因する応力増加機構も、摩擦力がある接触対間で実験・解析が行われている。また、これらの研究で取扱われている材料のほとんどは、鋼（高硬度鋼）である。近年、セラミックスでは、表面き裂が駆動条件でも進展するとの研究結果も報告されており、^{44), 45)}従来説と相反する結果も示されはじめている。

これらを総合的に考えると、摩耗量が少なく、摩擦力が発生するような接触対間の表面き裂進展挙動は、従動条件から導かれる進展モデルで説明可能なことがわかる。しかし、「転がり接触下、および駆動条件下の表面き裂は進展しない」という概念も、材料の耐摩耗性とじん性値に大きく影響される可能性がある。したがって、転がり接触下、および駆動条件下の表面き裂進展機構を明らかにするためには、材料特性、接触条件を考慮に入れて、各進展モデルの適用性を検討することが必要である。

5・3 内部き裂

軸受等の転がり疲労下のはく離損傷では、内部き裂の進展寿命が短い。このため、破壊力学的観点からは、まず、き裂の発生条件と疲労強度を明らかにすることが第一の目的とされる。しかし、進展機構を力学的に評価する手法が確立されないと、微小介在物からのき裂停留条件を破壊力学的に求めることができない。このため、圧延ローラーでみられるような安定成長するき裂の観察と挙動解析を通し、き裂進展モデルを構築することが求められる。

5・4 寿命および疲労強度

進展したき裂が、どのようにはく離、つまり、表層の分離を引き起こすのかに加え、より基礎的なき裂の発生・進展を考察するには、モードⅡ型き裂進展挙動の解明が必要・不可欠である。近年、高硬度材料のモードⅡ疲労特性を調べる方法が開発され、^{29), 46)}き裂進展挙動が明らかになりつつある。下限界値については各研究結果によってばらつきがあるが、転がり疲労の研究に適用できる環境が整いつつある。

最後に、本報では転がり疲労とき裂進展に焦点をあてた。はく離の発生起点は、表面型と内部型に分けられる⁴⁷⁾が、様々な因子が影響していることに加え、進展機構が

異なるため、どちらが支配的かは、あえて論じなかった。

なお、広い視点からのトライボロジーと破壊力学の関係については、文献^{25), 48)}に詳しく述べられている。

参 考 文 献

- 1) 木村好次, 岡部平八郎, “トライボロジー概論”, p.1 (1992) 養賢堂.
- 2) 日本潤滑学会編, “潤滑用語集”, p.65 (1992) 養賢堂.
- 3) J. R. Fleming and N. P. Suh, *Wear*, **44**, 39 (1977).
- 4) A. R. Rosenfield, *Wear*, **61**, 125 (1980).
- 5) D. A. Hills and D. W. Ashelby, *Wear*, **54**, 321 (1979).
- 6) H. Fan, L. M. Keer, W. Cheng and H. S. Cheng, *Trans. ASME, J. Trib.*, **115**, 141 (1993).
- 7) S. Way, *Trans. ASME, J. Applied Mechanics*, **2**, A49 (1935).
- 8) P. H. Dawson, *J. Mech. Eng. Sci.*, **4**, 16 (1962).
- 9) J. B. Martin and A. Cameron, *J. Mech. Eng. Sci.*, **3**, 148 (1961).
- 10) C. A. Foord, C. G. Hingley and A. Cameron, *Trans. ASME, J. Lubr. Tech.*, **91**, 282 (1969).
- 11) P. H. Dawson, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, **183I**, 75 (1968).
- 12) T. Yamamoto, *Solid Contact and Lubrication*, ASME/ AMD 39, ASME, New York, 223 (1980).
- 13) A. Nakajima, K. Ichimaru, F. Hirano and M. Nishimura, *JSLE Int.*, **4**, 94 (1983).
- 14) T. E. Tallian, Y. P. Chiu and E. V. Amerongen, *Trans. ASME, J. Lubr. Tech.*, **100**, 156 (1978).
- 15) M. Kaneta, H. Yatsuzuka and Y. Murakami, *ASLE Trans.*, **28**, 407 (1985).
- 16) M. Kaneta, M. Suetsugu and Y. Murakami, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **53**, 354 (1986).
- 17) Y. Murakami, M. Kaneta and H. Yatsuzuka, *ASLE Trans.*, **28**, 60 (1985).
- 18) L. M. Keer and M. D. Bryant, *Trans. ASME, J. Lubr. Tech.*, **105**, 198 (1983).
- 19) A. F. Bower, *Trans. ASME, J. Trib.*, **110**, 704 (1988).
- 20) V. Bordi, Ch. Dorier and B. Villechaise, *Trans. ASME, J. Tribology*, **120**, 436 (1998).
- 21) T. M. Clarke, G. R. Miller, L. M. Keer and H. S. Cheng, *ASLE Trans.*, **28**, 111 (1985).
- 22) G. R. Miller, L. M. Keer and H. S. Cheng, *Proc. R. Soc. Lond.*, **A397**, 197 (1985).
- 23) Y. Murakami, C. Sakae and K. Ichimaru, *STLE, Trib. Trans.*, **37**, 445 (1994).
- 24) M. T. Hanson and L. M. Keer, *STLE, Trib. Trans.*, **35**, 451 (1992).
- 25) 栄 中, 村上敬宜, *材料*, **49**, 356 (2000).
- 26) T. E. Tallian, *Trans. ASME, J. Trib.*, **114**, 207 (1992).
- 27) 山本隆司, *トライボロジスト*, **42**, 912 (1997).
- 28) 栄 中, 大小森義洋, 村上敬宜, *日本材料学会第10回破壊力学シンポジウム講演論文集*, 162 (1999).
- 29) 村上敬宜, 濱田 繁, 杉野和男, 高尾健一, *材料*, **43**, 1264 (1994).

- 30) G. Lundberg and A. Palmgren, *Acta poly., Mech. Eng. Ser.* **1**, 3 (1947).
- 31) G. Lundberg and A. Palmgren, *Acta poly., Mech. Eng. Ser.* **1**, 4 (1952).
- 32) K. L. Johnson, "Contact Mechanics", p.90 (1985) Cambridge University Press.
- 33) E. Ioannides and T. A. Harris, *Trans. ASME, J. Trib.*, **107**, 367 (1985).
- 34) N. G. Popinceanu, E. Diaconescu and S. Cretu, *Wear*, **71**, 265 (1981).
- 35) R. S. Zhou, *STLE, Trib. Trans.*, **36**, 329 (1993).
- 36) A. P. Voskamp, *Trans. ASME, J. Trib.*, **107**, 359 (1985).
- 37) P. Lamagnere, R. Fougères, G. Lormond, D. Girodin, G. Dudragne, F. Vergne and A. Vincent, *Trans. ASME, J. Trib.*, **120**, 421 (1998).
- 38) T. Mura and K. Tanaka, *Mechanics of Fatigue* (T. Mura ed.), *ASME/AMD*, **47**, 111 (1981).
- 39) P. Meynaud, G. Lormand, A. Vincent, R. Fougères, G. Baudry, J. Saleil, D. Girodin and G. Dudragne, *Proc. 2nd Int. Symp. on Bearing Steels* (1995).
- 40) D. Nélías, M. L. Dumont, F. Champiot, A. Vincent, D. Girodin, R. Fougères and L. Flamand, *Trans. ASME, J. Trib.*, **121**, 240 (1999).
- 41) 村上敬宜, "金属疲労微小欠陥と介在物の影響", p.54 (1993) 養賢堂.
- 42) 木田勝之, 小倉敬二, 柴田正道, 麻生博行, 斉藤 誠, 日本材料学会第 25 回疲労シンポジウム講演論文集, 300 (2000).
- 43) 木田勝之, 麻生博行, 斉藤 誠, 小倉敬二, 柴田正道, 第 45 回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集, 241 (2001).
- 44) 木田勝之, 小倉敬二, 日本機械学会論文集, **A-65**, 846 (1999).
- 45) 木田勝之, 小倉敬二, 日本機械学会論文集, **A-65**, 2113 (1999).
- 46) 藤井幸生, 前田喜久男, 大塚昭夫, *材料*, **50**, 1108 (2001).
- 47) 山本雄二, 兼田楨宏, "トライボロジー", p.207 (1999) 理工学社.
- 48) 村上敬宜, 日本機械学会論文集, **A-59**, 283 (1993).