

転がり疲労寿命研究の動向と最近の成果

Trends of Studies and Recent Results on Rolling Contact Fatigue Life

柴田正道 M. SHIBATA

This paper presents the trends of recent studies (since 1993) of rolling contact fatigue and Koyo's achievements, covering surface initiated flaking, caused by dents due to debris, and subsurface initiated flaking.

Recent improvement by computer with capabilities of high speed and large capacity, and advancement in computing technology led to the approach to the non-Hertzian contact issues and three-dimensional analysis of stress. Furthermore, unknown issues for some years are making steady progress for solution by using fracture mechanics. However, it is found that there exists another new type of rolling contact fatigue, which requires further studies in future.

Key Words: rolling contact fatigue life, non-Hertzian contact, three-dimensional analysis

1. はじめに

一般に、転がり疲労寿命といえば表面下最大せん断応力発生深さでの内部起点はく離をさす。しかし、近年汚染された潤滑状態での異物による表面圧痕を起点とした表面起点はく離が別に存在することが認められてきた。また、内部起点はく離については、これまで知られてきた転がり疲れによる組織変化とは異なる新しい形態をもった組織変化を伴ったはく離が顕在化してきた。

転がり疲れの研究動向に関して、最近では1993年にトライボロジー学会主催の「転がり疲れシンポジウム」で総合的に討議された¹⁾。その後10年を経た現在、転がり疲れ研究はどこまですすんだのであろうか。以下では、Koyoでの最近の研究成果をまじえてその後の転がり疲労研究の動向を概説する。

なお、対象は技術課題として重要度の高い異物混入油中での圧痕を起点とした表面起点はく離および内部起点はく離に関するものだけに限り、潤滑剤の性状による表面起点はく離などは別の機会に報告する予定である。

2. 圧痕を起点とした表面起点はく離

異物混入油中における転がり疲れによる寿命に至る過程は、2つの段階からなる。

1つは異物のかみ込みによって転走面に圧痕が形成される段階、もう1つは転がり接触の繰り返しにより圧痕を起点としてはく離が生じる段階である²⁾。

異物に起因する寿命低下を定量的に予測するた

めには、2つの段階それぞれにおける現象を実験的に把握するとともに、物理モデルを確立し、各因子の影響を定式化する必要がある。

前述した「転がり疲れシンポジウム」で著者は異物のかみ込みで発生した圧痕を起点とした寿命研究に対して、研究課題として以下の3項目を挙げた。

- 1) 潤滑油存在下での圧痕形成機構の解明
- 2) 圧痕部での繰返し転がりによる性状変化の解明
- 3) 圧痕からのはく離発生機構の解明

以下ではこれらの課題を切り口として、最近の研究動向を概説する。

まず、課題1)の圧痕形成については、異物の寸法や量、運転条件などの影響に着目した佐田、Dwyen-Joyce、Villeらの実験的研究^{2)~4)}の他、Xu、NikasらのEHL接触部周辺の異物挙動や形成される圧痕の形状を計算で予測する試みがなされており^{5)~8)}、シミュレーション技術の確立が期待されるがいまだ実験結果を十分に説明できるまでには至っていないようである。実験面では実験条件を制御して関係因子の影響を基本から見直す試みがVilleら⁴⁾によってなされた。大きさ32~40 μm で球状の高硬度粉を異物として混入させた潤滑油を用い、常に新しい異物が接触面に供給されるようにした転がり試験では、通常の内円形状圧痕と微小であるが深い圧痕が共存し、純転がりではこの微小圧痕は通常の内円形状圧痕の中央位置に存在したが、すべりが入ると圧痕形状は摩擦力の作用する方向に伸び、微小圧痕はその先端近くに存在するようになることがわかった。この結果は圧痕形成メカニズム解析に新しい知見をもたらし、圧痕形成に

EHL下でのすべりの影響が非常に大きいことを示した。

課題2)については研究例は少ない。圧痕縁の性状としてX線回折による半価幅の変化を調べた戸田ら⁹⁾の研究例があるにすぎない。課題2)は課題3)とも関連し、はく離発生メカニズム解明の一手段でもある。以下、Koyoでの最近の研究成果をまじえて述べる。

圧痕形成後の転がり疲れについては、圧痕の存在による応力の変化から寿命を予測する試みがなされてきた¹⁰⁾。表面に圧痕が存在する場合、相手面の通過に伴う応力変化が位置によって異なるため、平滑面の場合とは異なり、応力の計算が非常に大規模になる。そのため、従来は二次元モデルによる応力計算が主流であったが^{10), 11)}、計算機の高速、大容量化と効率的な数値計算技術の導入により、最近では、Aiら¹²⁾によりEHLをも考慮した三次元の応力計算が実現されている。

実験的には、佐田ら¹³⁾により圧痕寸法と寿命の関係把握を目的として、種々の寸法の圧痕を人為的に付与した軸受の寿命試験が行われている。圧痕による寿命低下は主として圧痕の平均勾配(圧痕の深さと直径の比)によって決定され、勾配の増加とともに寿命が低下することがわかった。

圧痕を起点としたはく離は、従来、表面起点型に分類されていたが、佐田ら¹⁴⁾は人為的に圧痕を付与した軸受の実験結果から、圧痕近傍の材料内部を起点としたはく離の存在を明らかにした。また、圧痕周辺の三次元応力計算結果から、応力成分によって最大応力作用位置が異なることが明らかにされた¹⁴⁾。図1に示した座標系で相当応力 σ_e 、主せん断応力 τ_1 、直交せん断応力 τ_{xy} について、玉の通過に伴う変動過程における各応力の最大値(直交せん断応力 τ_{xy} については全振幅 τ_{xy} と絶対値の最大値を求めた結果を図2に示す。

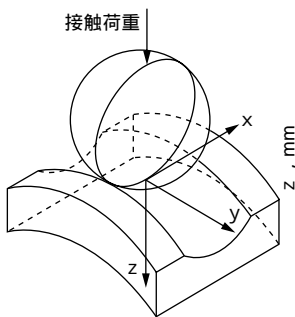


図1 座標系
Coordinate system

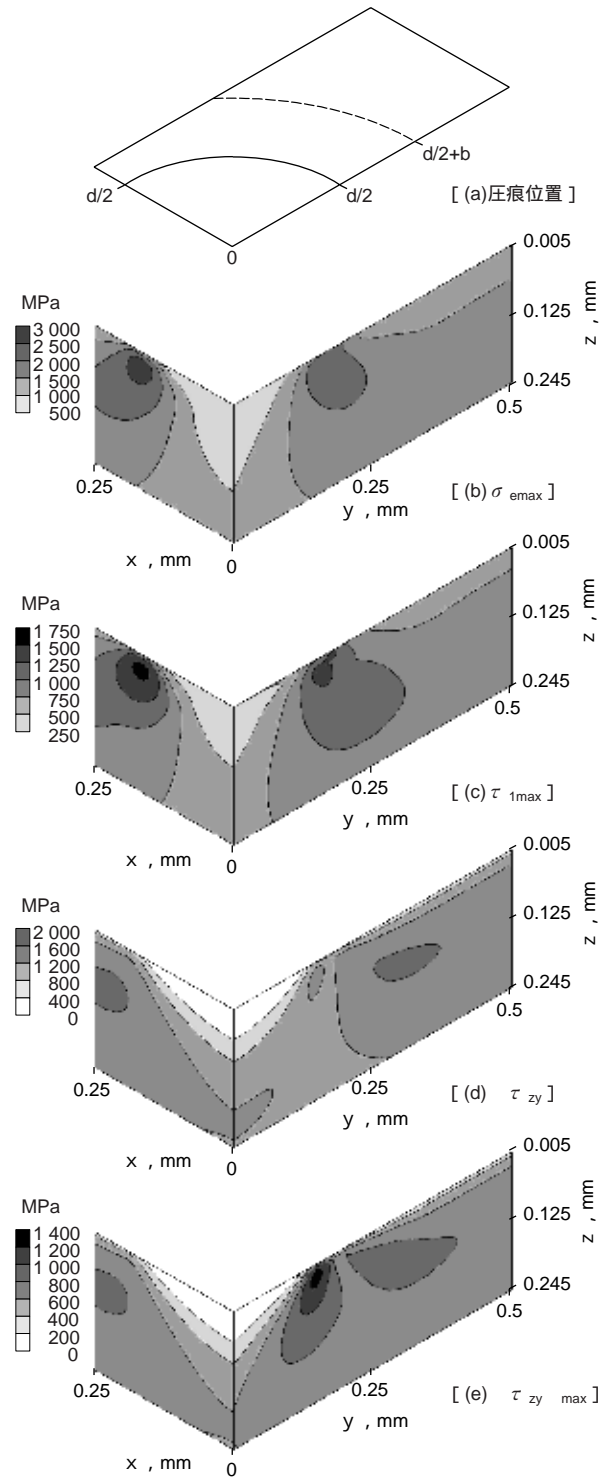


図2 玉の通過にともなう応力変動の最大値分布
Maximum value distribution of stress change caused by the ball passing

σ_{emax} と τ_{1max} は $y = 0$ 面の $(0.17, 0, 0.035)$ 位置で最大である。また、Lundberg - Palmgrenが基準応力として採用した直交せん断応力の全振幅 τ_{xy} は同じく $y = 0$ 面の $(0.23, 0, 0.095)$ 位置で最大となっている。一方、直交せん断応力絶対値の最大 $|\tau_{zy}|_{max}$ は、 $X = 0$ 面で最大となり、そ

の位置は(0, 0.15, 0.025)である。はく離が発生していなかった圧痕周辺の断面観察をおこなった結果を図3に示す。観察は応力計算で各応力の最大値が出現した位置、すなわち $X = 0 \text{ mm}$, 0.17 mm , 0.23 mm の転がり方向断面である。 σ_{max} と σ_{1max} の最大位置の断面($X = 0.17 \text{ mm}$)および σ_{xy} の最大位置($X = 0.23 \text{ mm}$)の断面においては、き裂は存在しなかったが、 $|\sigma_{\text{zy}}|_{\text{max}}$ の最大位置($X = 0 \text{ mm}$)の断面で図3に示す内部き裂が観察された。き裂は圧痕下のDEA(dark etching areas)境界でWB(white band)に沿った形で発生し、表面に向かって進展している。このき裂がさらに進むと圧痕の一部を含む形のはく離を引き起こすものと考えられる。すなわち、図3に示したようなき裂により、圧痕に起因する内部起点型はく離の存在が確認された。この種の研究は、従来表面起点型はく離に分類されていた圧痕を起点としたはく離の発生メカニズムを見直す必要があることを示唆している。

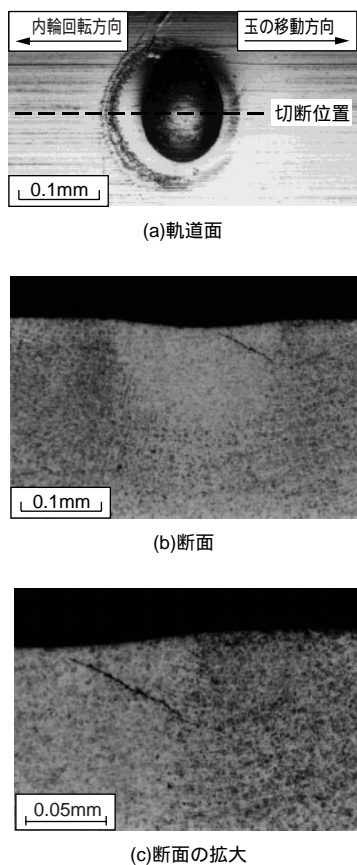


図3 観察された内部き裂
Internal crack

3. 内部起点はく離

3.1 破壊力学的アプローチ

一連の軸受の転がり疲れ寿命に関する研究では、き裂の発生寿命がその大半を占めると考えら

れてきたため、き裂進展よりもむしろき裂の発生に研究の重点がおかれてきた。Lamagnereら¹⁵⁾はマイクロメカニックス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検討した。また、Maymaudら¹⁶⁾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性を求めた。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。Neliasら¹⁷⁾は介在物からのき裂発生挙動に対して詳細な実験と観察を行い、き裂は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。

軸受の転がり疲れで発生する内部き裂は、バタフライと呼ばれる特徴的組織変化を伴う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研究が必要と思われるが、これまでに行われてきたような発生応力のみ注目した研究では介在物起点の微小き裂には十分対処できない。

き裂の進展挙動やはく離発生に対して、破壊力学的手法を用いて軸受鋼での転がり疲労の研究が進められ、近年2つの重要な発見があった。1つはNeliasら¹⁷⁾によるものであり、き裂の発生が従来より極めて速く($\times 10^5$ サイクルオーダー)またその多くは微小き裂として発生した後、進展せずに停留していることが超音波検査法によって明らかにされたことである。もう1つは、村上ら¹⁹⁾および藤井ら²⁰⁾によるものであり、軸受鋼のモードIIき裂が下限値をもつことが明らかにされた。すなわち、モードIIき裂の応力拡大係数幅が存在すること、およびその値が求めつつあることである。これら2つの重要な発見は、従来の研究手法の枠を超えて、転がり疲労現象を新たな視点からより詳細に研究できることを意味している。

木田ら²¹⁾は転動面下の介在物の存在を仮定することで、どの深さに位置する介在物や発生した微小き裂がはく離源となるかを解析した。図4はき裂面間の摩擦係数 μ_{cf} が0.0から0.5へと増加した場合の K_{II} の変化を示す。図の K_{II} は最大値・最小値とその時の深さを表している。摩擦係数の増加に伴い、 K_{II} の最大深さが浅くなることが明らかとなった。このことは、せん断応力の最大深さよりも浅い位置ではく離が発生しやすいという前述のNeliasらの実験傾向を解析的に支持している。

このように、き裂の進展挙動に着目した研究が少しずつではあるが着実な成果をあげ、転がり疲労のメカニズム解明に新しい知見を与えつつあるのが最近の特徴的な動向である。

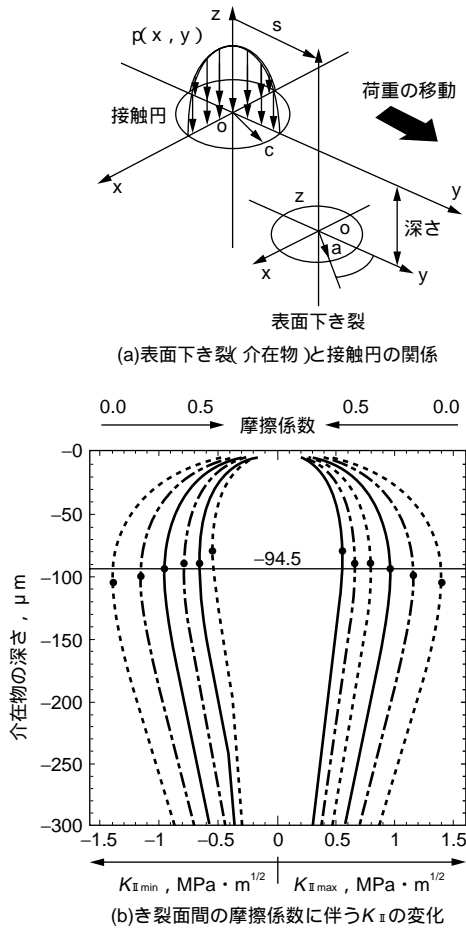


図4 応力拡大係数の深さ方向分布 (介在物直径: 10 μ m)

Distribution of stress intensity factor (inclusion dia. : 10 μ m)

3.2 WE Aを伴うはく離

最近、自動車用エンジンの補機に使用される軸受やCVT(Continuously Variable Transmission)に使用される転動部品は、振動、衝撃、高接触圧などの厳しい条件下で使用されており新しい形態の組織変化(WE A: White Etching Area)を伴うはく離が顕在化してきた。WE A起因のはく離現象については種々のメカニズムが提案されており、振動、衝撃、曲げなどの複雑な応力状態で発生するとする説^{22,23)}や軸受中に浸入した水素の影響で発生するとする説²⁴⁾に大別される。しかしながら、いずれの説も発生初期のメカニズムには不明な部分が多く、いまだ全容は明確になっていない。

原田ら²⁵⁾はWE Aの発生メカニズムを明らかにする目的で、特にWE A発生初期での組織変化過程に着目した研究を進めている。図5は急加減速試験機でWE Aを発生させた例で、試験時間の経過による組織変化を示したものである。試験時間144ksの場合は、表面から深さが一定の領域に黒

い針状組織(矢印)が認められる。一方、255.6ksの試験時間の場合は広い範囲にWE Aが認められている。このことから、黒色の針状組織への変化がWE Aの初期過程であると考えられる。

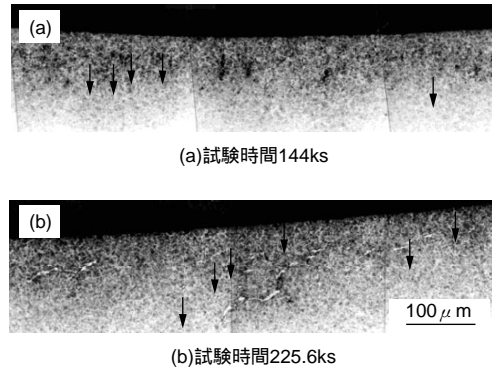


図5 光学顕微鏡観察結果
Optical micrograph

この針状組織は、SIM(走査イオン顕微鏡)観察した結果、き裂ではなく筋状の窪みであり、組織的にはマルテンサイトが局部的に変化したものであることがわかった。その微細構造は、図6に示すTEM(透過型電子顕微鏡)観察結果から、マルテンサイトのラスが局部的に崩れて微細な粒状の組織に変化していることが分かった。また、微細に組織変化した周囲には図6の矢印で示すような多数の微細なボイドも認められた。

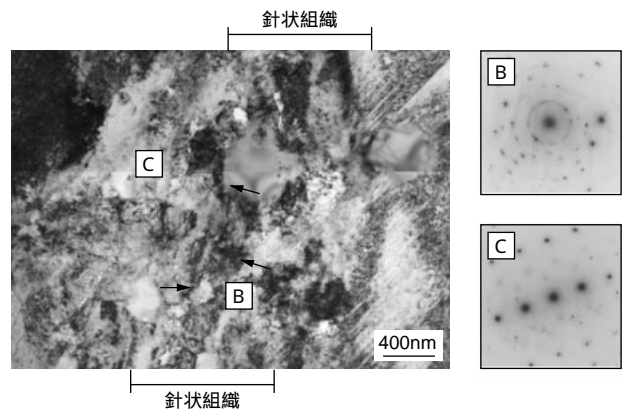


図6 針状組織のTEM観察と制限視野回折図形
TEM image of acicular structure and SADP

このような観察結果より、原田らはWE Aの発生初期を組織変化過程を次のように推定している。すなわち、第1段階として、転がり接触による繰返し荷重による応力の局在化でマルテンサイト組織に局部的なせん断が発生する。転がり疲労の進行とともに局部ひずみが生じた領域の転位密度が増大し、ある転位密度まで達するとひずみエネルギーを解放するために、転位セル状の組織が

形成される。さらに転がり疲労が進行するとともに、動的再結晶により転位セル組織が微細粒組織に変化する。この際、微細粒組織の粒界部分に転位や空孔が排出され微細なボイドが形成される。そして、最終的に転位セル状組織が完全に微細粒組織に変化した時点でWEAが形成される。

なお、このような微細粒組織は高硬度鋼の回転曲げ疲労破面に見られるFish-eye中心部の細粒状領域でも観察されており²⁶⁾、転がり疲労で認められたWEA発生との関係解明が今後必要である。

4. 超長寿命軸受の開発

前項までは、転がり疲労についての基礎研究の動向を述べてきた。最後に応用研究としての軸受寿命向上策の具体例²⁷⁾について簡単に触れる。

戸田ら²⁸⁾は炭化物状態と寿命との関係を調べ、炭化物平均粒径、炭化物間距離が小さいほど異物混入油中で長寿命となることを明らかにした。この研究を基本として、従来の耐異物長寿命軸受(K E軸受)を上回る長寿命軸受を開発した。この軸受は高濃度浸炭技術を軸受軌道輪に適用し、析出炭化物量の適正化を図るとともに、生地組織の微細化を図ったものである。異物混入油中では軸受寿命は標準品比15倍になり、軸受、ユニットの大幅な小型・軽量化を図ることが可能である。(図7・8)

型番	TRA0607R
荷重	Fr = 20.6kN, Fa = 13.7kN
回転速度	2000min ⁻¹
潤滑	ギヤオイル85W90
異物	ハイス鋼粉0.06wt%(860HV平均粒径27μm)+ SUJ2焼入粉0.06wt%(700HV平均粒径125μm)

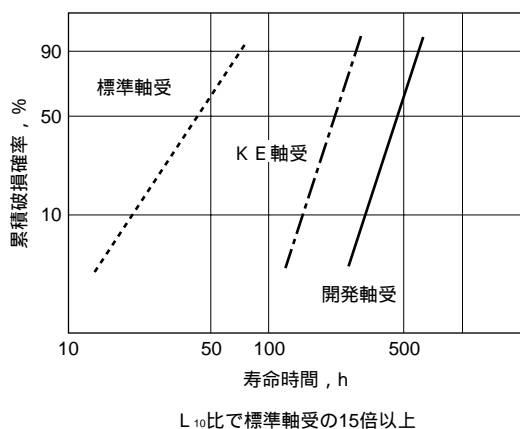


図7 超長寿命円すいころ軸受の異物混入油中での軸受寿命

Life of super-long life TRB lubricated with the oil containing foreign materials

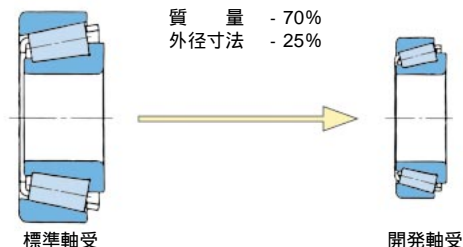


図8 超長寿命円すいころ軸受
Super-long life TRB

5. おわりに

以上、転がり疲労研究の最近の動向をKoyoでの研究成果をまじえて概説してきた。転がり疲労の基礎研究は、疲労限問題やそれらを考慮した寿命予測モデル、寿命計算式や表面粗さ、潤滑剤の影響を扱ったものと広範囲に及んでいる。なかでも近年の計算機自体の高速、大容量化と数値計算技術の発達により、非ヘルツ接触、3次元での応力解析が可能になるなど、これまでは解析が難しかった問題への定量的な取り組みが可能となってきた。また、研究動向の大きな特徴として、破壊力学的手法を用いて多くの成果が出てきたことも特筆される。メーカーとしては、今後これらの基礎研究の推進を図るとともに、さらなる長寿命方策の開発、残存寿命の推定等の研究を進め、軸受を始めとする転動部品・ユニットの小型・軽量化を通じて社会に貢献してゆく所存である。

本論をまとめるにあたり、大阪大学大学院基礎工学研究科 木田勝之助手に多大なるご支援をいただいた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本トライボロジー学会：転がり疲れシンポジウム予稿集(1993)明治大学。
- 2) 佐田 隆, 三上 剛：トライボロジー会議予稿集(名古屋1998-11)487。
- 3) R. S. Dwyer-Joyce and J. Heymer : Proc. 22nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology (1996) 135。
- 4) F. Ville and D.Nélias : STLE Tribology Transactions, 42 (1999) 231。
- 5) G. Xu, F. Sadeghi and J. D. Cogdell : ASME J. Tribology, 119 (1997) 579。
- 6) G. K. Nikas : ASME J. Tribology, 123 (2001) 83。
- 7) G. K. Nikas : ASME J. Tribology, 123 (2001) 828。
- 8) G. K. Nikas : ASME J. Tribology, 124 (2002)

- 461 .
- 9) 戸田一寿, 三上 剛, 星野照男: 日本金属学会誌, vol. 58, no12 (1994) 1473 .
- 10) 例えば, M. N. Webster, E. Ioannides and R. S. Sayles: Proc. 12th Leeds-Lyon Symposium on Tribology (1986) 207 .
- 11) 栗田伸一: NSK Technical Journal, no. 668 (1999) 29 .
- 12) X. Ai and S. C. Lee: STLE Tribology Transactions, 39 (1996) 881 .
- 13) 佐田 隆, 三上 剛, 原田昌寛: トライボロジー会議予稿集(東京 2002-5) 127 .
- 14) 佐田 隆, 三上 剛, 原田昌寛: トライボロジー会議予稿集(東京 2002-5) 129 .
- 15) P. Lamagnere, R. Fougères, G. Lormond, D. Girodin, G. Dudragne, F. Verne and A. Vincent: ASME J. Tribology, 120 (1998) 421 .
- 16) P. Meynaud, G. Lormond, A. Vincent, R. Fougères, G. Baudry, J. Saleil, D. Girodin and G. Dudragne: Proc. 2nd Int. Symp. on Bearing Steels (1995)
- 17) D. Nelias, M. L. Dumont, F. Champiot, A. Vincent, D. Girodin, R. Fougères and L. Flamand: ASME J. Tribology, 121 (1999) 240 .
- 18) 村上敬宜: 金属疲労の微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂(1993) 54 .
- 19) 村上敬宜, 濱田 繁, 杉野和男, 高尾健一: 材料, vol. 43, (1994) 13 .
- 20) 藤井幸生, 前田喜久男, 大塚昭夫: 材料, vol. 50 (2001) 1108 .
- 21) 木田勝之, 麻生博行, 斎藤 誠, 小倉敬三, 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(2001) 241 .
- 22) M. Shibata, M. Gotoh, N. Oguma, T. Mikami: Proc. International Tribology Conference Yokohama (1995) 1351 .
- 23) 沖田 滋, 武村浩道, 村上保夫: CAMP-ISIJ, 12 (1999) 51 .
- 24) K. Tamada and H. Tanaka: Wear, 199 (1996) 245 .
- 25) 原田 久, 小熊規泰, 山本厚之, 椿野晴繁: CAMP-ISIJ, 15 (2002) 1037 .
- 26) 小熊規泰, 原田 久, 酒井達雄: 日本材料学会第51期学術講演会講演論文集(2002) 275 .
- 27) 佐藤秀樹: Koyo Engineering Journal, no. 162 (2002) 10 .

筆 者



柴田正道*
M. SHIBATA

* 総合技術研究所 トライボロジー研究部