

特集 硬質被膜内の応力解析による被膜損傷メカニズムの推定*

Prediction of Coating Damage Mechanisms by Stress Analysis of Hard Coating

河 齋 実 昌

Sanemasa KAWABATA

By using BEM analysis of internal stress distribution, damage mechanisms of hard coatings were discussed. The developed BEM program is based on the DC-FFT scheme. The effects of film thickness on adhesion toughness and rolling fatigue life were experimentally evaluated. Thin film tends to adhere at low contact pressure but shows longer rolling contact fatigue life. The first result was explained as the effect of plastic deformation of the substrate due to the high compressive stress. Interfacial shear stress plays an important role in rolling contact fatigue and an effect due to surface roughness was suggested.

Key words: Coating stress, Hard coating, Adhesion, Surface roughness

1. はじめに

硬質被膜は、自動車部品用途としても広く使われるようになり、その信頼性保障と最適設計技術が求められている。本報告では、最適設計の一指針として被膜とその周辺材料に作用する応力分布の解析を用いた、被膜の損傷メカニズムに関する基本的な解析手法と解析事例を紹介する。

硬質被膜の基本機能は基材表面をしゅう動負荷から保護することであり、被膜硬度や相手材との耐凝着性を生かして耐摩耗性や耐焼き付き性を向上させている。硬質被膜の損傷形態には、亀裂、剥離、凝着、摩耗、など様々な損傷形態が考えられるが、そのメカニズムには被膜特性だけではなく、界面や基材の特性がかかわっている場合も少なくない。従って損傷メカニズムを推定するには、被膜処理した構造物としての特性を考えた方がよく、各部位に作用しているしゅう動負荷を判断する指標のひとつとして接触応力分布を用いることができる。

硬質被膜に対応した接触応力解析法には、ヘルツ解を応用した近似解析から有限要素法 (FEM)、境界要素法 (BEM) まで各種の手法が検討されており、特に BEM では、表面粗さなどかなり詳細な表面形状を考慮した解析ができるようになってきている。

薄膜を扱う場合には、膜厚オーダーの表面形状が損傷過程に影響を与えるので、表面粗さを無視することができない。バルク材においても疲労摩耗や転動疲労などの表層の機械的損傷に対して、粗さ突起を考慮した接触応力解析を用いることにより、表面粗さの影響を考慮した寿命推定法が検討されはじめています。

寿命推定を行う場合には、何らかの統計処理が必要である。こうした議論は今後の研究を待つところが大きいと考えるが、まずは数値実験的な意味合いで現象解析を行ってみることは可能であり、そこから統計モデルを考える上での手がかりが得られると考えている。本稿では単一突起の解析と直接シミュレーションおよび損傷解析への適用の概要について紹介する。

2. 硬質皮膜の損傷形態と作用応力

2.1 接触応力解析技術

Fig. 1 に境界要素法 (BEM) による接触応力解析法の概要を模式的に示す。基本になっているのは半無限体近似であり、表面の変位を平面表面の変位で近似する。この近似により接触面に対して垂直方向の変位成分を分離できるために解析精度が向上する。半無限体表面に単位集中荷重が作用したときの変位分布と応力分布は解析的に解くことができ、この解を基本解とする。面圧を集中荷重に分解 (Fig. 1 (a)) し、基本解 (Fig. 1 (b)) と掛け合わせて積分することにより、全体の変位分布と応力分布 (Fig. 1 (c)) を求めることができる。面圧を決定するには、接触面の密着条件を境界条件とした反復解法を用いる。表面変位を式で表せば、

$$w(x) = \int_{\Gamma} w^*(x-\xi)p(\xi)d\xi \quad (1)$$

と表せる。式(1)の計算は畳み込みと呼ばれる計算であり、Fig. 2 のように表面を基盤目状に均等要素分割すると、フーリエ変換を用いて

* (社)日本トライボロジー学会の了解を得て、「トライボロジスト」第48巻第10号(2003)より、一部加筆して転載

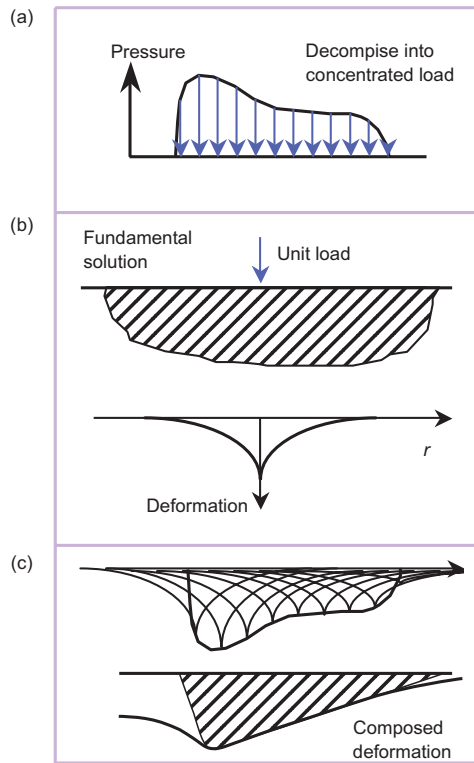


Fig. 1 Contact stress analysis scheme of BEM

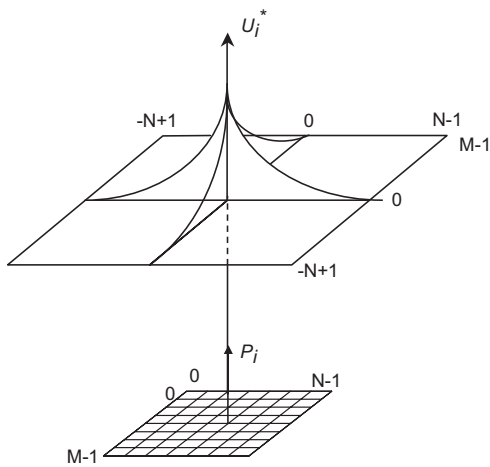


Fig. 2 Discrete model

$$w = IFFT[FFT(w^*)FFT(p)] \quad (2)$$

として計算できる。ここで、FFTは高速フーリエ変換、IFFTは高速フーリエ逆変換である。式(1)のまま計算すると、要素数 N に対して N^2 回の演算が必要なのに対して、式(2)では $\log N$ 回の演算で計算ができるために高速演算が可能である。

バルク材に対しては、Bousinesque解を基本解とし

て用いることができ、表面被膜を考慮する場合はフーリエ解析を用いて基本解を求めることができる。被膜を考慮した解析を行う際にはフーリエ変換を経由した解析法がよく用いられる。面圧分布の決定方法については、局所的な接触判定を行う方法、変分原理を応用した方法など多数の文献が報告されている¹⁾⁻⁹⁾

式(1)の積分計算を解析的に行う方法もいくつかあり、代表的なものがヘルツ解である。ヘルツの解析では、楕円型の面圧分布により接触面内が放物型となる変位分布が得られることを用いて解を導いている。梅井¹⁰⁾は三角形一次要素を用いて式(1)の積分値を解析的に求め、この解を用いた接触解析プログラムを実用化している。ただし、これらの解析法が適用できるのは基本的にバルク材に限定される。

尾田らによる一連の報告¹¹⁾⁻¹³⁾においてヘルツ解を用いた近似解析法も提案されている。この近似式では、ヘルツの解を二つ重ね合わせて被膜の接触応力を近似しており、 z 軸上での垂直応力成分と垂直方向変位をパラメータに用いて近似解を導いている。本解析手法により、Fig. 3に示す被膜表面と基材界面の応力状態を簡易的に求めることができる。近似式の導出過程からも、この近似式が適用できるのは z 軸上の垂直応力成分に限られるが、単一突起の接触問題などで傾向を把握するためには十分実用になるとと思われる。

2.2 損傷形態の分類

硬質被膜の最終的な損傷形態は、摩滅、剥離など被膜としての機能を失った状態と考えられるが、損傷起点を考えると、被膜自体に起点がある場合、基材ある

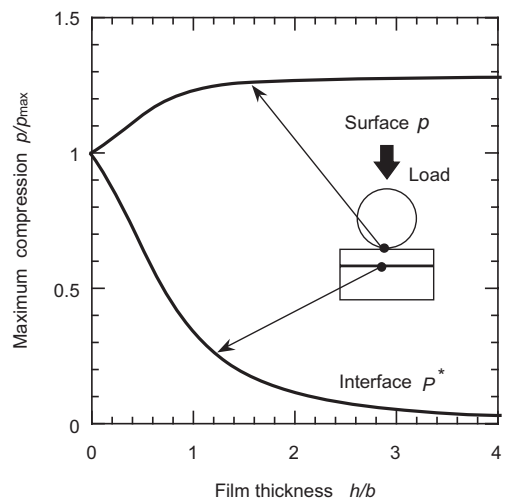


Fig. 3 Approximate solution of spherical contact

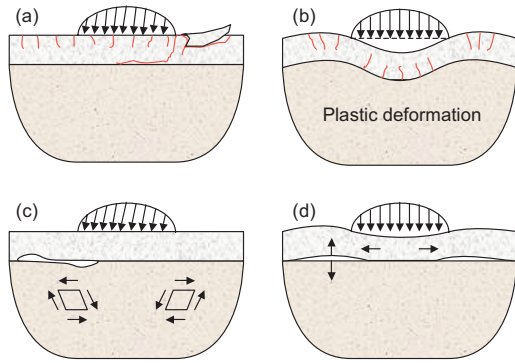


Fig. 4 Damage mechanisms of hard film

いは界面に起点がある場合が考えられる。Fig. 4に損傷メカニズムを模式的に示す。被膜自体に起点がある場合 (Fig. 4(a)) としては、被膜内部にマイクロクラックを生じるなどして層内剥離を生じる場合、表面で発生したクラックが成長して剥離に至る場合などがある。基材が塑性変形を起こせば被膜が基材変形に追従できなくなった時点で被膜のクラックや界面剥離につながる (Fig. 4(b))。界面の密着強度やしゅう動形態によっては界面クラックが先行しこれらが連結して大きな剥離につながるケースも報告されている¹⁴⁾

界面剥離を界面の破壊現象であると捉え、界面を表面と平行なフラット面として扱ったとき、界面が延性的であればせん断応力による破壊 (Fig. 4(c)) が主であり、脆性的であれば垂直応力成分による破壊 (Fig. 4(d)) も考えられる。垂直応力に対する強度は引張りに対しては界面凝集力、圧縮側に対しては周辺の基材ないし被膜の圧縮強度を考えればよいと思われる。基材に対して弾性率の高い被膜の場合、接触に伴う垂直応力成分は、通常の見取りでは圧縮側にしか現れないことから、界面のモデルとしてせん断強度が弱い強度異方性をもった領域を考えている。ただし、基材表面粗さに相当する界面形状を統計的に考慮して界面に厚みを持たせたモデリングを用いれば、界面の圧縮強度低下も考えられる。以上の考え方は、界面クラックの発生を疲労として捉えたときの、垂直応力によるモードⅠのクラックとせん断応力によるモードⅡのクラックとも対応する。

2.3 応力解析と損傷解析の関係

応力解析を用いて損傷メカニズムを考察する代表的な方法として、塑性変形に着目した解析、繰り返し応力を考える疲労寿命の推定、応力集中や亀裂進展を扱う破壊力学、の三つの考え方が挙げられる。破壊力学

による取り扱いについては、文献¹⁵⁾に詳細な記述があるためここでは取り上げない。

塑性変形を考慮した解析では、被膜ないし基材が塑性域に入るかどうかを負荷の判定基準としており、Misesの降伏条件を用いて塑性判定を行うのが一般的である。基材と弾性率の異なる硬質被膜を考えた場合、応力成分 $\sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ の3成分は界面の力の釣り合い条件から基材側と被膜側で同一の値をとるが、残りの $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ の3成分は弾性率差を反映して不連続となる。残留応力の影響なども、界面の曲率を無視すれば後者にのみ現れる。その結果、von Mises応力も界面で不連続となるが、塑性判定を行う場合には、材料が塑性変形するかどうかを判定基準とするため、材料別に応力値を求めて、その最大値を判定基準とする。統計的な塑性判定には塑性指数が用いられ、Greenwood-Williamsonのモデル¹⁶⁾ や、硬質被膜に拡張した野木らによる修正GWモデル¹⁷⁾ が提案されている。これらの統計モデルは、各突起接触部を球の接触として扱っており、材料物性として必要なのは被膜と基材の押し込み硬さである。

転がり軸受や歯車では、転がり接触の繰り返しによる転動疲労寿命が問題となる。フレットングの場合も繰り返し応力による損傷と考えれば類似の寿命予測ができる可能性がある。バルク材においてもピーリングやピittingなど表面が微小剥離する現象に対しては疲労の考え方が適用される。Fig. 5に円筒接触における応力分布をヘルツ面圧 p_{max} と接触半幅 b で規格化して示す。転がり接触において接触点が材料表面を通過したときには、片振りに近いせん断応力 τ_{45} と両振りに近いせん断応力 τ_{yz} が作用し、応力振幅の大きい τ_{yz} や von Mises 応力 σ_y を内部起点クラックの主要因として解析される。被膜の亀裂などを考察するには、バルク材と同様の考え方が適用できるが、界面起点の

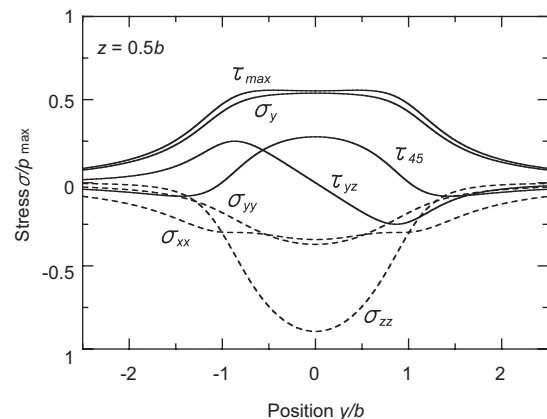


Fig. 5 Stress distribution of line contact

剥離や界面亀裂の進展を考慮するには界面強度に関する知見が必要になる。硬質被膜の密着性評価法として、圧痕試験やスクラッチ試験が行われるが、これらの評価は塑性変形を伴い、剥離形態も複雑なため、界面強度の定量化に難点がある。

疲労評価は、比較的塑性変形が少ない点では応力解析を用いた強度評価に向いている。界面破壊のメカニズムの考察により界面モデルを改良していく必要があると思われるが、最も簡単には、界面に作用するせん断応力成分 τ_{yz} を主要因と考えることができる。

3. 皮膜破損の膜厚依存性

3.1 塑性変形と耐凝着性

塑性変形を考慮した解析事例¹⁸⁾として、アルミダイカスト合金ADC10に処理したNiPめっきの凝着性評価について述べる。基材が軟質なため、NiPめっきは硬質被膜として機能している。Fig. 6に実験方法を示す。パーベル形状の試験片を用いた線接触一方向しゅう動の試験であり、一定レートで荷重を上げ摩擦係数上昇より凝着を検出している。膜厚が厚い場合の凝着荷重の下限値は膜厚に依存しないが、膜厚が3 μm 以下では耐凝着性が劣る結果が得られた。しゅう動により相手材ADC10は摩耗し、摩耗粉がしゅう動部前方に堆積した状態で凝着に至っており、凝着部断面組織を観察すると、Fig. 7に示すように、膜厚5 μm 以上では被膜表面に凝着粒が生成するのに対し、膜厚3 μm 以下

では、被膜が大きく変形している。このことから、しゅう動面で摩耗粉に高圧が作用し凝着粒が成長していく過程において、被膜の変形により凝着粒が押し込まれると低面圧でも凝着が発生すると考えられる。この結果を材料の塑性変形挙動との関係により解析した。

解析モデルと結果をFig. 8に示す。凝着粒を球が稠密に並んでいるとしてモデル化し、各点の占有面積をFig. 8のハッチング領域とすると、平均面圧と占有面積の積から各接触点に作用する荷重が求められる。各膜厚における凝着発生時の相手材実測摩擦幅から平均面圧をもとめ、前述の近似解析手法¹³⁾により基材表面(界面)と被膜表面に作用する圧縮応力を解析した。Fig. 8には、先端曲率2,20,40 μm に対する表面および界面の圧縮応力を示している。Fig. 7から凝着粒子の先端曲率半径は数十 μm あり、この先端曲率を想定すると、膜厚3 μm 以下の界面応力がほぼ一定値をとり、その値はビッカース硬さから求めた基材の塑性流動圧力を超えている。3 μm 以上ではめっき表面の応力が一定となる。このことから、めっき膜厚保が厚ければめっきの凝着限界荷重で凝着が発生するのに対し、膜厚が薄いと基材に塑性流動圧力を超える圧縮応力が作用するために、基材が塑性変形を起こして沈み込むことが説明できる。

粗さの突起のみならず、凝着粒や異物などによる応力集中に対しても接触応力解析により塑性変形防止のための下限膜厚を求めることができる。

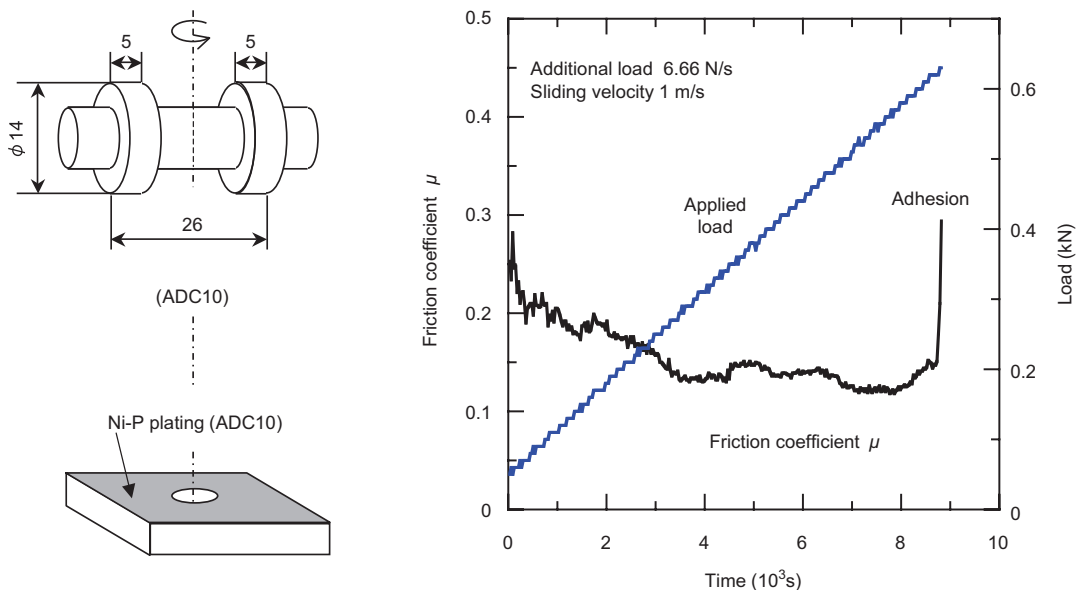


Fig. 6 Adhesion experiment

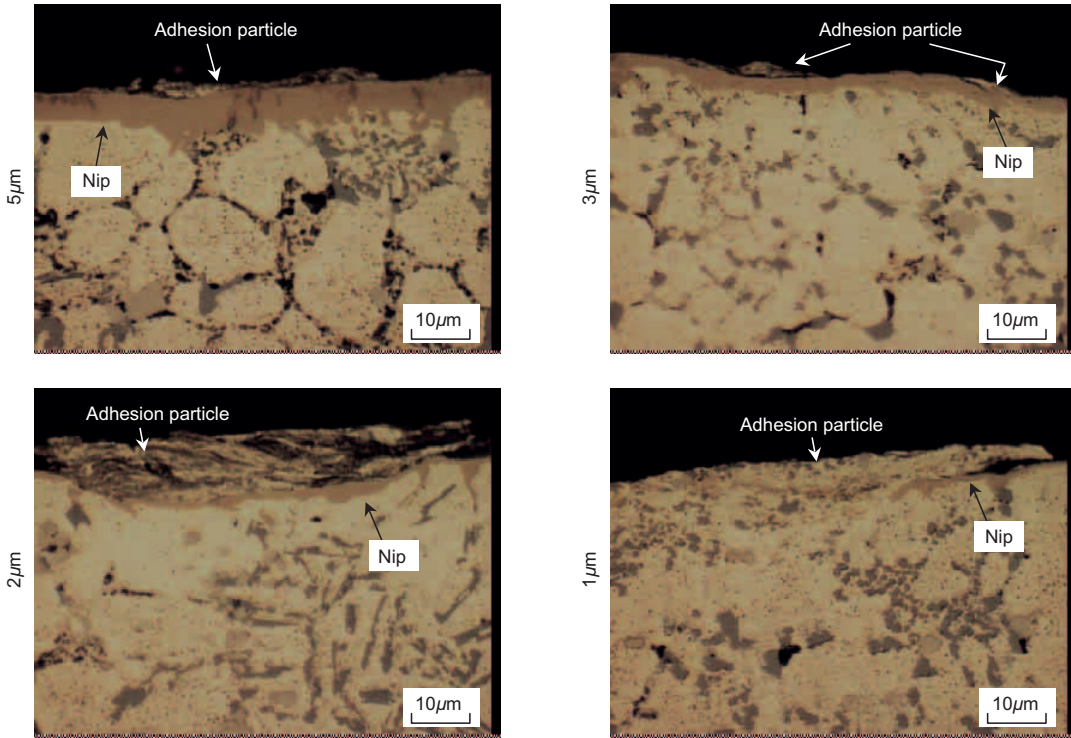


Fig. 7 Crosscut of adhesion area

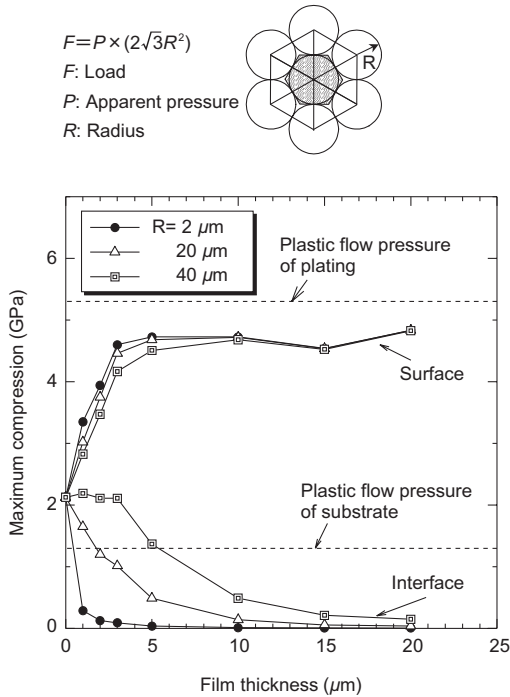


Fig. 8 Analysis model and results of adhesion

3.2 疲労による剥離寿命

次に、転動疲労試験機¹⁹⁾により、被膜の剥離寿命を評価した結果について述べる。実験に用いた評価装

置をFig. 9に示す。SUS440C円筒試験片のNiPめっき膜厚を10~50 μmまで振り、剥離寿命を評価した。Fig. 10(a)に示すように、同一面圧を負荷したとき、膜厚が厚いほど剥離寿命が低下する傾向が認められる。

この結果を、応力解析を用いて考察する。転動疲労寿命を考えるときは、界面に作用するせん断応力成分 τ_{yz} を考える。本試験機の接触状態をヘルツ接触で考えたときにせん断応力振幅が最大となるのは100 μm オーダの深さであり、それより膜厚の薄い本試験条件では、薄膜ほどせん断力が小さくなり寿命が伸びることが考えられる。この考え方に従って、縦軸を界面せん断応力で整理したのがFig. 10(b)である。

硬質被膜の剥離寿命もS-N線図を用いて整理でき、疲労限近傍の応力は比較的安定して評価できるが、試料形状から計算したせん断応力を用いて整理しただけでは剥離寿命の膜厚依存を説明しきれない。

次に、表面粗さの影響を解析した。評価試料の自乗平均粗さは0.2 μmであり膜厚と比較すれば1/10以下であるが、実測粗さ形状を解析モデルに取り入れたBEMを用いて解析を行うと、Fig. 11に示すようにせん断応力分布に顕著な影響がでる。これは、ヘルツ接触によるせん断応力の小さい部位に界面が位置するか

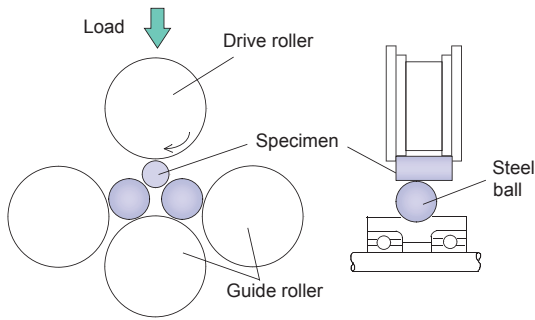


Fig. 9 Rolling contact fatigue experiments

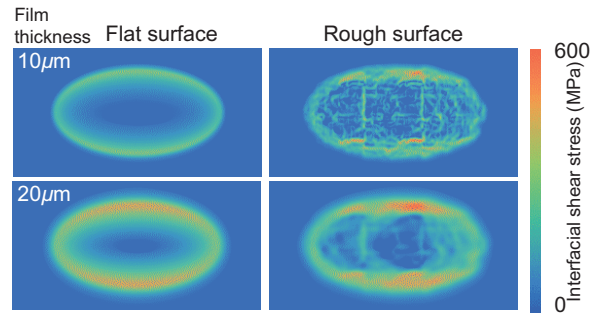


Fig. 11 Interfacial stress distribution

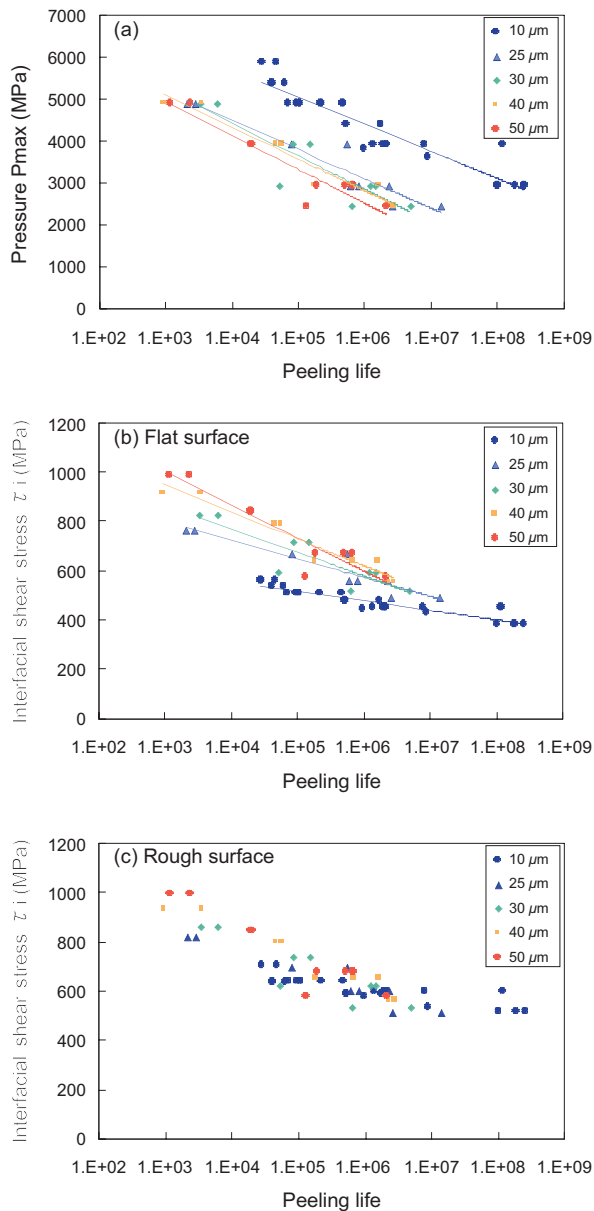


Fig. 10 Results of rolling contact fatigue test

らであり、相対的に粗さの影響が無視できなくなることを示している。

Fig. 10(c)は粗さを考慮した解析による界面せん断応力を用いて整理したS-N線図である。剥離寿命は膜厚によらず、ほぼ一つのバンドに納まってきている。

表面粗さの表記は粗さ曲線の高さだけを表すファクターが大半であるが、解析上は横方向の広がりも重要であり長振幅のうねり成分ほど深部にまで影響が及ぶ。粗さパラメータの効果についてさらに解析が必要だが、本結果は粗さや膜厚に依存しない寿命推定式が求められる可能性を示している。

4. おわりに

塑性変形から膜厚下限が、剥離寿命から膜厚上限が規定されることを述べた。こうした限界値を定量化するために応力解析が有効である。課題は、静的強度も含め硬質被膜や界面の強度特性が把握しきれていない点にあり、応力解析技術の進歩と損傷メカニズムの解明により、より汎用的な強度推定が可能になると考えられる。

<参考文献>

- 1) T. C. O'Sullivan & R. B. King : Sliding Contact Stress Field Due to a Spherical Indenter on a Layered Elastic Half-Space, ASME J. Tribology, 110 (1988), p. 235.
- 2) H. M. Stanley & T. Kato : An FFT-Based Method for Rough Surface Contact, ASME J. Tribology., 119 (1997), p. 481.
- 3) 野木・加藤：弾性接触の限界に及ぼす硬質薄膜の影響（第1報）、トライボロジスト, 42 (1997), p. 158.
- 4) Y. Z. Hu, G. C. Barber, & D. Zhu : Numerical Analysis for the Elastic Contact of Real Rough

- Surfaces, STLE Tribology Trans., 42 (1999), p. 443.
- 5) X. Ai & K. Sawamiphakdi : Solving Elastic Contact Between Rough Surfaces as an Unconstrained Strain Energy Minimization by Using CGM and FFT Techniques, ASME J. Tribology, 121 (1999), p. 639.
 - 6) W. Peng & B. Bhushan : A Numerical Three-Dimensional Model for the Contact of Layered Elastic/Plastic Solids With Rough Surfaces by a Variational Principle, ASME J. Tribology, 123 (2001), p. 330.
 - 7) Z. Liu, A. Neville, & R. L. Reuben : A Numerical Calculation of the Contact Area and Pressure of Real Surfaces in Sliding Wear, ASME J. Tribology, 123 (2001), p. 27.
 - 8) S. Liu & Q. Wang : Studying Contact Stress Fields Caused by Surface Traction With a Discrete Convolution and Fast Fourier Transform Algorithm, ASME J. Tribology, 124 (2002), p. 36.
 - 9) I. A. Polonsky & L. M. Keer : A numerical method for solving rough contact problems based on the multi-level multi-summation and conjugate gradient techniques, Wear, 231 (1999), p. 206.
 - 10) 梶井：線形三角形要素による三次元弾性接触問題の数値解法，機論，53，492 (1987)，p. 1631.
 - 11) 尾田・久保田・山田：2層体の弾性接触問題に対する近似解法，機論，57 (1991)，p. 2008.
 - 12) 尾田・久保田・山田：2層弾性体の軸対称接触問題に対する近似解法，機論，57 (1991)，p. 2014.
 - 13) 尾田・久保田・阿部：薄膜を有する物体間の弾性接触問題に対する近似解法，機論，59 (1993)，p. 2581
 - 14) 榎本・三宅：薄膜トライボロジー，東京大学出版会 (1997)，p. 54.
 - 15) 破壊力学とトライボロジー，トライボロジスト，47 (2002)，p. 603.
 - 16) 山本・兼田：トライボロジー，理工学社，p. 33.
 - 17) 野木・加藤：弾性接触の限界に及ぼす硬質薄膜の影響 (第2報)，トライボロジスト，42 (1997)，p. 225.
 - 18) 河鱈・竹内・杉：NiPめっきの凝着性におよぼす膜厚の影響，トライボロジー会議予稿集 (名古屋1998-11)，p. 330.
 - 19) 河鱈・竹内・村上：硬質薄膜の剥離寿命評価，トライボロジー会議予稿集 (東京2001-5)。

< 著 者 >



河鱈 実昌
(かわばた さねまさ)
材料技術部
トライボロジー技術に関する研究
に従事