

転がり接触下における内部欠陥の応力場への影響

The Influence of Subsurface Defect on Stress Distributions under Rolling Contact Fatigue Conditions

山川耕志郎 K. YAMAKAWA 木澤克彦 K. KIZAWA 小熊規泰 N. OGUMA 木田勝之 K. KIDA

Subsurface defects, such as inclusions or pores in bearing steel are known to have detrimental effects on flaking-type failures of rolling contact fatigue. The influence of subsurface inclusions or pores on stress distributions must be investigated to examine dynamically the relationship between subsurface defects and rolling contact fatigue life. In this study, 3D finite element analysis was performed on stress distributions around inclusions and pores. Stress distributions become most concentrated and show the largest effect when a pore exists in the matrix. However, there is practically no difference between the matrix without defects and that with a pore at a distance of $2.3a$ (a : pore radius) from the pore center.

Key Words: rolling contact fatigue, inclusion, subsurface defect, finite element method

1. はじめに

転がり疲れ寿命の主要な破損形態である内部起点型はく離は、製鋼の過程で混入する介在物の影響が大きいことがよく知られている¹⁾。しかし、介在物・空孔などの内部欠陥と転がり疲れ寿命との関係は、多くの研究が行われているにもかかわらず、十分に解明されているとはいえないのが現状である。

著者らはこれまでに、各種介在物の大きさ、量の情報をパラメータとする寿命推定式を導出し、従来から寿命に最も悪影響を及ぼすと考えられてきた酸化物系介在物だけでなく、硫化物系介在物も寿命に悪影響を及ぼすことを定量的に明らかにした²⁾。しかし、その理論的根拠は明らかではないため、本研究では、内部き裂や介在物・空孔に対して応力拡大係数を計算し、破壊力学的な見地から寿命推定式や疲労限度の理論的根拠を示すことを目的としている。

転がり接触下における介在物・空孔などの内部欠陥について力学的にアプローチした例としては、内部欠陥から発生したき裂の駆動力をエネルギー開放率で整理した例³⁾や、介在物周りの塑性ひずみからき裂発生までの繰り返し数を予測した例⁴⁾などが見られる。しかし、これらは接触面積が小さかつ3次元的な考察が必要となる玉軸受の内部介在物・空孔に対して一般化平面ひずみ状態を仮定するなどの粗い近似をしており、介在物・空孔の有害度を定性的に比較するにとどまっている。

一方、著者らは球-平板接触下の内部き裂進展

モデルを提案⁵⁾し、介在物を等価な円形き裂とみなして応力拡大係数を解析した。その結果、はく離源となる可能性が高い介在物の深さや、き裂がはく離の成長方向にモードⅡ型(面内せん断型)で進展することなどを明らかにした⁶⁾⁷⁾⁸⁾。ただし、基材中に介在物・空孔が存在したときに、基材との剛性の違いなどによる応力場の変化については特に考慮しなかった。

この影響の大きさと範囲を明らかにすることは、介在物・空孔の転がり疲れ寿命への影響を力学的に考察するために重要かつ必要不可欠であるが、これまでに、接触面積が小さかつ3次元的な考察が必要となる玉軸受の内部介在物・空孔が応力場に及ぼす影響を考察し、図1のようなき裂を力学的に検討した例は見当たらない。

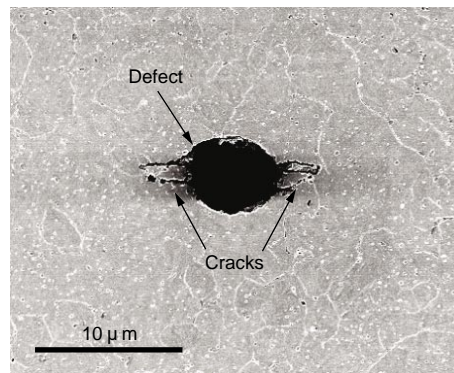


図1 内部欠陥から発生したき裂
Crack caused by subsurface defect

そこで本報では、転がり接触下で、介在物・空孔が応力場に及ぼす影響を詳細に検討し、き裂の発生問題を考察した結果について報告する。

2. 解析方法

計算モデルの概略を図2に示す。計算モデルは平板と玉の接触とした。平板試験片内部に介在物・空孔の存在を仮定し、その上方をヘルツ接触面圧が移動するときの介在物・空孔周りの応力分布を逐次解析した。

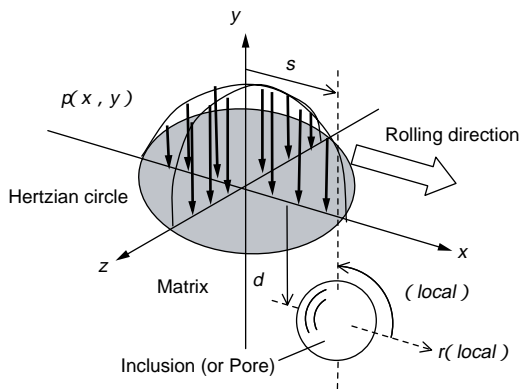


図2 計算モデルの概略
Outline of calculation model

介在物・空孔は、酸化物系介在物を想定し、 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ の球状とした。介在物の物性値は表1に示す値を用いた。以下の図で、マトリックスとは介在物・空孔が無い状態、つまり基材のままであることを意味する。介在物・空孔の表面からの深さ d は、最大せん断応力が最も大きくなる深さとした。

表1 材料定数
Material coefficient

Inclusion	Al_2O_3	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Matrix
Modulus of elasticity, GPa	390.0	100.0	207.9
Poisson's ratio	0.25	0.25	0.30

任意の三次元形状を有する連続体内部の応力分布を求める数値計算手法としては、有限要素法(以下FEMと称す)、境界要素法など多くの手法が存在するが、本研究では汎用コードが充実しているFEMを用いた。FEMでは、一般に、要素サイズを小さくするほど応力値は理論値に近づくことが知られている。本研究では、予備解析で要素サイズと発生応力の関係を調べ、介在物・空孔周囲の応力値が十分収束するように要素サイズを決定した。 $20\mu\text{m}$ 空孔の周辺に要素分割した例を図3に示す。

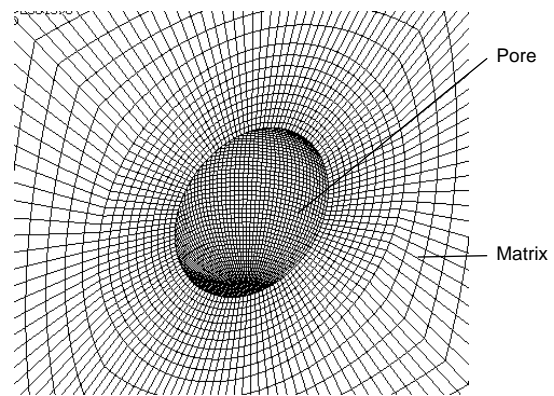


図3 空孔周りの要素分割
Mesh distributions around the pore

平板の大きさは、拘束条件の影響が小さくなるように、ヘルツ接触面圧の移動範囲に対して十分大きくとり、端面を完全拘束した。また、対称性を考慮し、 $z < 0$ の領域のみをモデル化した。荷重はヘルツ接触面圧を節点荷重に変換して入力し、平板の上を逐次移動させた。ただし、本研究では、玉と平板の摩擦、介在物とマトリックスの境界面の接触・摩擦などは考慮していない。

3. 解析結果および考察

3.1 き裂発生位置・角度⁹⁾

転がり接触下でのき裂は、主として、モード型(面内せん断型)で進展すると考えられる⁶⁾⁷⁾⁸⁾ため、以下ではモード型き裂進展の駆動力であるせん断応力に着目した。

介在物・空孔周囲の最大せん断応力分布図の一例として、介在物が Al_2O_3 の場合を図4に、空孔の場合を図5に示す。図4と図5は、介在物・空孔の真上に転動体(玉)が位置している場合の結果である。これらの分布図から、基材とのヤング率の大小関係によって、応力分布が大きく変わることがわかる。

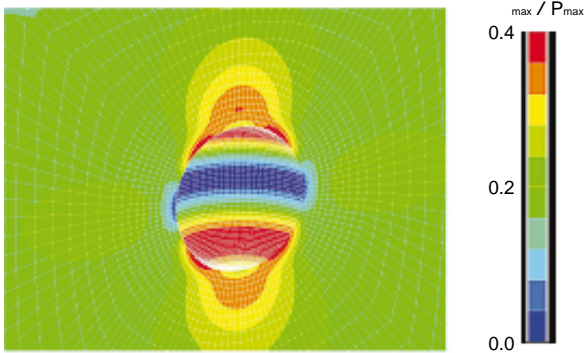


図4 最大せん断応力分布図(Al₂O₃)
Maximum shear stress distributions (Al₂O₃)

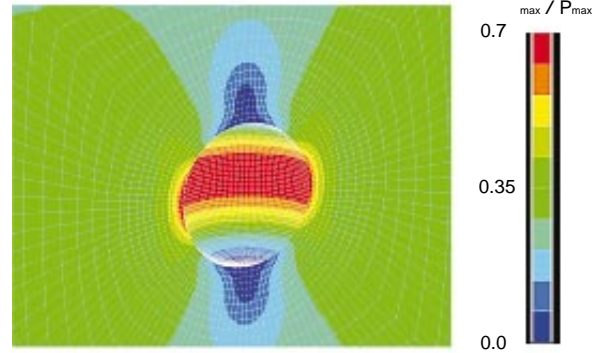


図5 最大せん断応力分布図(空孔)
Maximum shear stress distributions (Pore)

介在物・空孔とマトリックスの境界(以下介在物境界と称す)上の最大せん断応力 τ_{max} と玉位置の関係を図6に、せん断応力 τ_r と玉位置の関係を図7に示す。このせん断応力 τ_r は、図6右上に示した球座標に対して定義されたものであり、図6と図7には、 $\theta = 0^\circ$ の位置に発生するせん断応力を例として示した。これらの図から介在物・空孔の種類によって、最大応力値とその発生位置に違いがあることがわかる。

さらに、介在物全周つまり、 $\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$ の各位置で同様の計算を行い、せん断応力の働く方向とその値の関係を調べた。これらの関係からき裂の発生位置や方向を考察する。

図8に介在物境界上の位置 θ と τ_{max} の関係を示す。縦軸は、ヘルツ接触面圧が一回通過する際に最大となるせん断応力を最大接触面圧 P_{max} で無次元化した。図8より τ_{max} は、空孔 > CaO・Al₂O₃ > Al₂O₃ > マトリックス(基材)の順で大きくなることがわかった。また、介在物境界において τ_{max} が最大となる位置は、介在物・空孔とマトリックスのヤング率の大小関係によって違いが見られた。すなわち、介在物としてAl₂O₃が存在する場合には $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ で、また、空孔が存在する場合は、 $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ でそれぞれ τ_{max} が最大となることがわかった。また、 τ_{max} が最大となる位置におけるその方向はほぼ45°方向であり、これは介在物・空孔の有無に関らず同じ傾向であった。

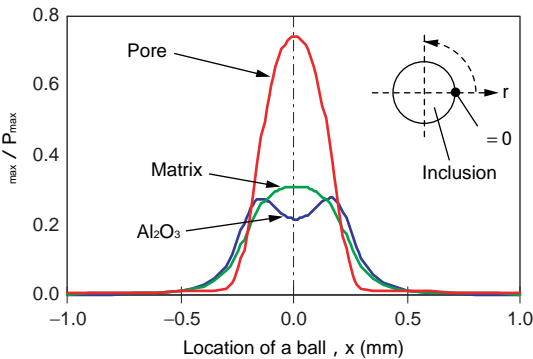


図6 玉位置と τ_{max} / P_{max} の関係
Relations between ball position and τ_{max} / P_{max}

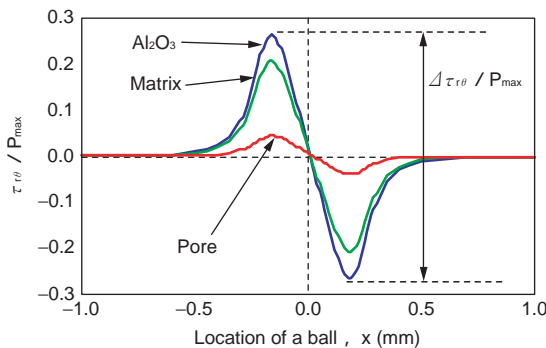


図7 玉位置と $\tau_{r\theta} / P_{max}$ の関係
Relations between ball position and $\tau_{r\theta} / P_{max}$

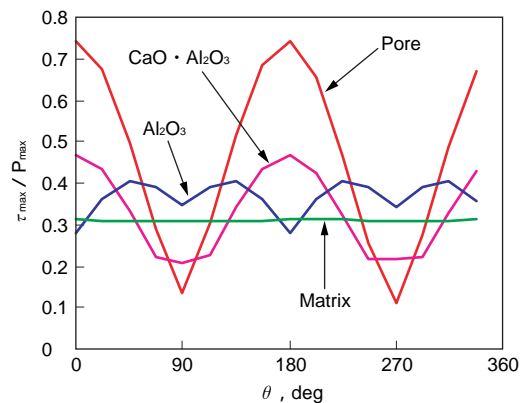


図8 介在物境界上の位置 θ と τ_{max} / P_{max} の関係
Relations between position of inclusions' boundary, θ and τ_{max} / P_{max}

図9に介在物境界上の位置 θ と $\Delta\tau_{r\theta}$ との関係を示す。無次元化の方法は、図8と同様である。 $\Delta\tau_{r\theta}$ は、 τ_{max} とは異なり、介在物、空孔の有無に関らず、 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の位置で最大となった。また、その大きさは $Al_2O_3 > マトリックス > CaO \cdot Al_2O_3 > 空孔$ の順、つまりヤング率の大きさの順に大きくなり、 τ_{max} とは逆の傾向を示した。また、介在物境界上の τ_{max} の最大値と $\Delta\tau_{r\theta}$ の最大値は、空孔が存在する場合は $\Delta\tau_{r\theta}$ よりも τ_{max} が、 Al_2O_3 が存在する場合は τ_{max} よりも $\Delta\tau_{r\theta}$ が大きくなること明らかとなった。

介在物境界上でせん断応力が最大となる位置とその方向を図10にまとめる。図10には、ヘルツ接触面圧が一回通過する際のピーク値 τ_{max} と、その際の $\tau_{r\theta}$ の振幅 $\Delta\tau_{r\theta}$ が最大となる位置() と方向() を示した。

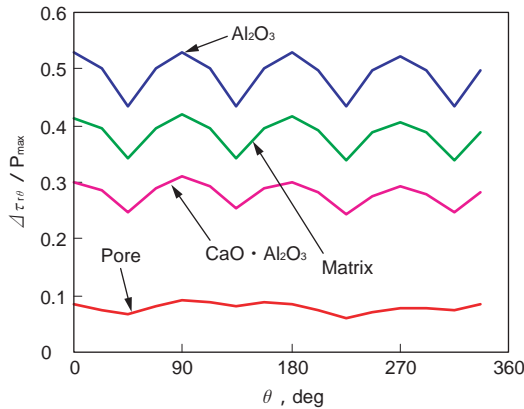


図9 介在物境界上の位置 θ と $\Delta\tau_{r\theta} / P_{max}$ の関係
Relations between position of inclusion's boundary, θ and $\Delta\tau_{r\theta} / P_{max}$

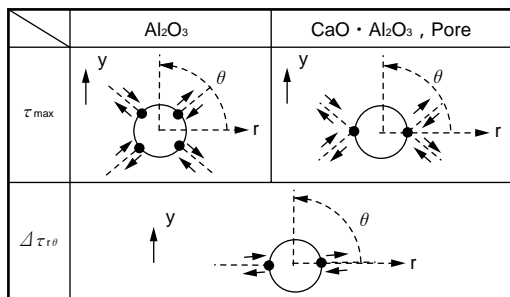


図10 せん断応力が最大となる位置・方向

Position and direction where shear stress becomes maximal

以上の結果をまとめると、基材中に空孔が存在する場合には $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ に発生する τ_{max} が最大となり、 Al_2O_3 が介在物として存在する場合には $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ に発生する $\Delta\tau_{r\theta}$ が最大となること明らかとなった。特に空孔に発生する τ_{max} の値が大きく、その位置が、 $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ であることが明らかになったことは重要である。

3.2 介在物・空孔が及ぼす応力場への影響

以下3.1項で示した結果を基に、介在物・空孔が変化させる応力分布とその範囲を考察する。

図11に介在物境界からの距離と最大せん断応力 τ_{max} の関係を示す。横軸は、介在物境界からの距離を介在物・空孔の半径 a で無次元化した。縦軸は、ヘルツ接触面圧が一回通過する際に最大となるせん断応力を最大接触面圧 P_{max} で無次元化した。

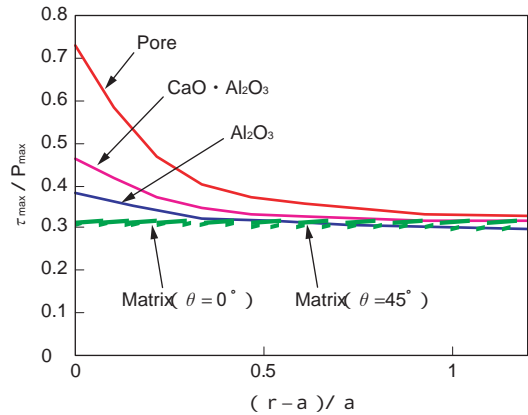


図11 最大せん断応力 τ_{max} の径方向分布

Radial distributions of maximum shear stress τ_{max}

介在物・空孔の種類によって、応力が変化する範囲が大きく異なることがわかる。その範囲は、大きい順に、空孔、 $CaO \cdot Al_2O_3$ 、 Al_2O_3 となった。最も影響が大きい空孔の場合でも、空孔から $(r - a) / a = 1.3$ (a : 介在物・空孔半径) 以上離れると、介在物・空孔が無い場合との差が5%以下になった。

図12に介在物境界からの距離と $\Delta\tau_{r\theta}$ との関係を示す。無次元化の方法は、図11と同様である。介在物による応力範囲への影響は、それが最も大

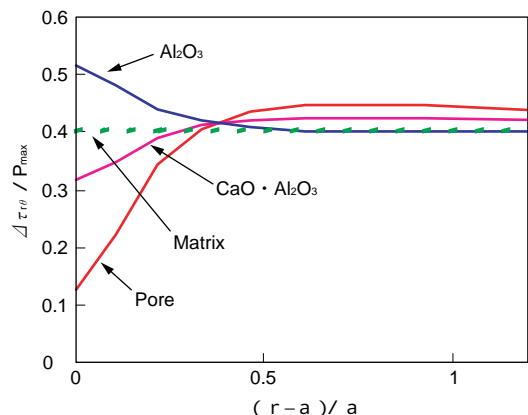


図12 $\Delta\tau_{r\theta}$ の径方向分布

Radial distributions of $\Delta\tau_{r\theta}$

きい Al_2O_3 の場合で、 $(r - a) / a = 0.3$ 以上で、介在物・空孔が無い場合との差が5%以下になった。また、空孔の場合では、 $(r - a) / a = 0.6 \sim 0.9$ の範囲において、介在物・空孔が無い場合との差が12%程度になっているが、介在物境界周辺の応力が小さいことから、応力集中影響範囲として考慮する必要が無いと判断した。

以上の結果をまとめると、基材中に空孔がある場合に、応力集中の影響が最も大きくなり、その範囲も大きい。空孔中心から $2.3a$ 離れると、その影響はほとんど無くなると見なしてよいことが明らかになった。

したがって、この範囲を越えてき裂が進展した場合、介在物・空孔による応力集中の影響は小さくなると考えられる。特に、転がり疲労でも内部から発生したき裂に停留が認められているため¹⁰⁾、疲労限度に対しては、空孔や介在物の種類にかかわらず力学的な扱いが容易になる可能性がある。ただし、介在物・空孔近傍では、その影響が及んでいるため、初期におけるき裂発生・進展と寿命の関係にはさらなる検討が必要である。

4. おわりに

転がり接触下における介在物・空孔周囲の3次元の応力分布を解析した結果、以下の事項が明らかになった。

- 1) 介在物・空孔の種類によって、周囲の応力場に及ぼす影響の大きさと範囲が大きく異なる。
- 2) 介在物・空孔と基材との境界上に発生するせん断応力は、空孔が存在する場合の最大せん断応力のピーク値が最も大きい。また、そのときの位置は、空孔の中心を通り、転がり方向と並行な直線と空孔 - 基材境界面が交わる2点である。
- 3) 基材中に空孔が存在する場合に、応力集中の影響とその範囲が最も大きくなるが、空孔中心から空孔半径の2.3倍まで離れるとその影響はほとんど無くなる。

参考文献

- 1) 村上敬宜：微小欠陥と介在物の影響，養賢堂，(1993)131。
- 2) 後藤将夫，木澤克彦：材料とプロセス，vol. 14，(2001)1399。
- 3) A. Melander, Int. J. Fatigue, vol. 19, no. 1 (1997) 13.
- 4) M. Freitas, D. Francois : H511A ASTM Spec

Tech Publ (USA), 803 vol. 2, (1983) .796.

- 5) 木田勝之，小倉敬二：日本機械学会論文集 A，vol. 66，no. 644 (2000) 783。
- 6) 木田勝之，麻生博行，柴田正道，山川耕志郎：日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集，(2002)113。
- 7) 木田勝之：材料，vol. 51，no. 8 (2002) 867。
- 8) 木田勝之・麻生博行・斉藤誠・小熊規泰・山川耕志郎・原田久：浸炭したSCM415鋼の長寿命転がり疲労特性とき裂発生深さ，材料，53-5，(2004)187。
- 9) 山川耕志郎，木澤克彦，小熊規泰，木田勝之：第47回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集，(2003)411。
- 10) D. Nelias, M. L. Dumont, F. Champiot, A. Vincent, D. Girodin, R. Fougères and L. Flamand : Trans. ASME, J. Trib., vol. 121 (1999) 240.

筆者



山川耕志郎*
K. YAMAKAWA



木澤克彦**
K. KIZAWA



小熊規泰***
N. OGUMA

木田勝之****
K. KIDA

* 軸受事業本部 解析技術部

** 総合技術研究所 基礎技術研究部

*** 総合技術研究所 基礎技術研究部 工学博士

**** 大阪大学 基礎工学部