

転動面下の非金属介在物周囲の応力解析

藤松 威史*1, 長尾 実佐樹*2, 中崎 盛彦*3, 平岡 和彦*4

Analysis of Stress around Nonmetallic Inclusions under Rolling Contact Surface
Takeshi Fujimatsu, Misaki Nagao, Morihiko Nakasaki and Kazuhiko Hiraoka

Synopsis: The effects of nonmetallic inclusion types and sizes on rolling contact fatigue life have not been clearly understood because of the difficulty in identification of the inclusion which is an internal origin of fatigue fracture.

In this study, stresses around circular inclusions and a pore were calculated under relatively high or low contact pressure to clarify the effects of nonmetallic inclusion types and sizes on the fatigue life. The results are as follow:

- (1) It was found that the influence of inclusion type on the maximum equivalent stress around inclusion varied with changes in contact pressure.
- (2) Under high contact pressure, e.g. 3.95GPa, it was suggested that any types and sizes of inclusions, as well as pores, behave as cracks; therefore, under such a condition, rolling contact fatigue life was likely to be determined simply by inclusion sizes.
- (3) While in the case of low contact pressure, e.g. 2.45GPa, it was implied that rolling contact fatigue life was influenced by not only the inclusion size but their type.

key word: rolling contact fatigue life; nonmetallic inclusion; pore; stress; crack;

1. 緒言

正常な潤滑環境のもとで使用される軸受部品の主要な破損形態は、内部起点のはく離である。この場合、鋼の製造過程で混入する非金属介在物（以下、介在物と略）がはく離の起点として作用し、介在物の性状が転がり疲れや、それによるはく離寿命に影響を及ぼしていることは明らかである。長尾ら¹⁾は、極値統計法により予測される鋼中の酸化物、硫化物、窒化物の最大径をさまざまに変化させたJIS高炭素クロム軸受鋼SUJ2を用いて、代表的な転がり疲れ試験であるスラスト型寿命試験を実施した。その結果、極値統計法により予測される鋼中の酸化物、硫化物、窒化物の最大径 ($\sqrt{area_{max}}$) のなかで最大の値が大きくなるほど L_{10} 寿命が低下することを見出した (Fig.1)。この結果から、介在物の大きさは転がり疲れによるはく離寿命の有力な指標の一つであると言える。しかしながら、内部起点となる転がり疲れの場合には、はく離起点として作用した介在物を特定することは困難であり、介在物の種類や大きさが転がり疲れにどのような影響を及ぼすのか、定量的に明らかにされていない。

本研究では、 Al_2O_3 、TiN、 $CaO-Al_2O_3$ 、およびMnSを模した円形介在物ならびに円形の空洞を鋼中に位置させた解

析モデルを用いて、2種類の最大接触面圧（3.95GPa、2.45GPa）を加えた場合に介在物・空洞周囲に働く応力の計算を試みた。それによって、介在物の種類ではなく、大きさのみが転がり疲れによるはく離寿命の指標になるという見方が正しいのか、力学的に検証した。

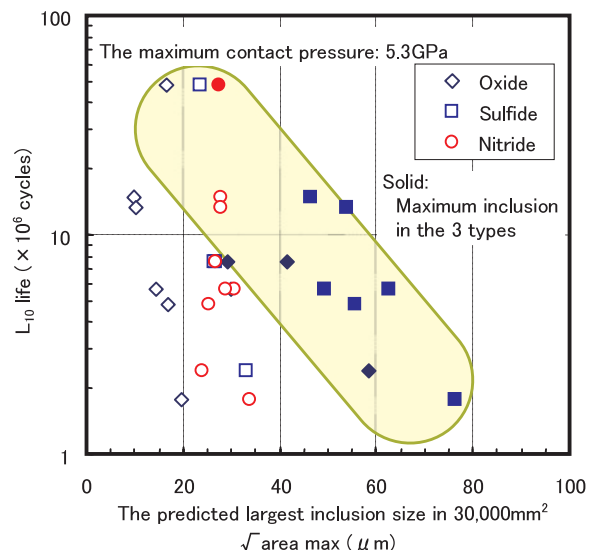


Fig.1 Relationship between the predicted largest inclusion size and L_{10} Life¹⁾.

*1 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ
*2 軸受営業部軸受CS室
*3 研究・開発センター プロセス開発グループ
*4 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ長

2. 解析方法

2.1 解析モデル

スラスト型寿命試験を模擬して、平板上をボールが接触しながら移動する2次元平面歪みモデル (Fig.2左) を用い、汎用FEM解析コードMSC Marcによる弾塑性解析を行った。

本解析モデルでは、移動しているボールの中心が球形の介在物・空洞の中心の真上を通過する場合を想定して、介在物・空洞を球形と同一の直径を有する円形として近似的に取り扱った。ボールが平板上を移動する際に転動面に加わる最大接触面圧については、本解析における高面圧の条件として3.95GPa、低面圧の条件として2.45GPaの2種類を選定した。なお、介在物・空洞の位置は、上記の最大接触面圧を加えた際の最大せん断応力深さとした (Fig.2右)。また、介在物・空洞の大きさは直径5 μ mと20 μ mとした。

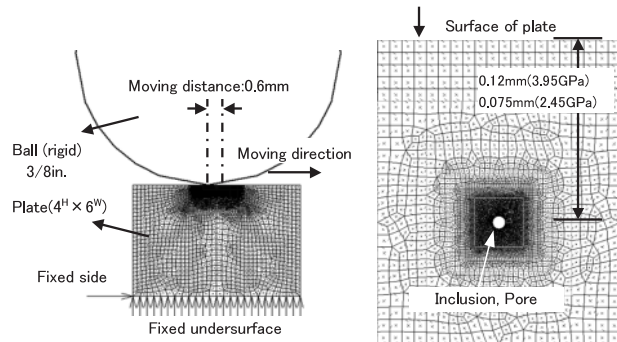


Fig.2 Plain strain model for stress distribution analysis. (Left side: whole model, Right side: around the inclusion)

2.2 母相, 介在物の物性値

Fig.3にJIS高炭素クロム軸受鋼SUJ2の焼入焼戻しを想定した母相の応力-歪み線図を示す。また、解析に使用した母相ならびに円形介在物・空洞のヤング率, 硬さ, および降伏強度をTable 1 に示す。なお, Table 1 における介在物の降伏強度は, 介在物の概略硬さから判断しており, 硬質のAl₂O₃, TiN, CaO-Al₂O₃の場合は母相の3倍, 軟質のMnSは母相の1/5と仮定した。また, 本解析モデルでは, 母相と介在物の界面を完全に密着させており, 境界面の摩擦は考慮していない。

2.3 解析結果の取り扱い

本解析では, 転がり疲れに及ぼす介在物の種類や大きさの影響を比較する指標として, ボールが介在物あるいは空洞上を一回通過する際に, 介在物あるいは空洞周囲に発生する相当応力の最大値 ($\sigma_{eq \max}$) を用いた。

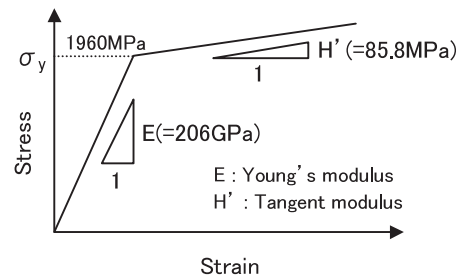


Fig.3 Stress-strain curve of matrix (SUJ2).

Table1 Physical properties of matrix ,inclusions and a pore.

	Matrix	Al ₂ O ₃	TiN	CaO-Al ₂ O ₃	MnS	Pore
Young's modulus, E (GPa)	206	387	316	113	137	0
Tangent modulus, H' (MPa)	85.8	-	-	-	-	-
Poisson ratio	0.30	0.25	0.192	0.25	0.25	0
Hardness (HV)	700	~ 1900	~ 2400	~ 2200	150	0
Yield strength (MPa)	1960 (=σ _y)	3·σ _y	3·σ _y	3·σ _y	σ _y /5	0

3. 解析結果

Fig.4に一例として最大接触面圧が3.95GPaの条件のもとで直径20 μ mの各種介在物, 空洞の直上にボールが位置した場合の介在物, 空洞周囲の相当応力分布を示す。このように介在物あるいは空洞と母相の物性値の違いによって, 相当応力分布はさまざまに変化することが分かる。

次にFig.5に2種類の最大接触面圧のもとでの各種介在物および空洞の周囲に発生する $\sigma_{eq, max}$ と母相の降伏強度の関係を示す。以下に得られた知見を示す。

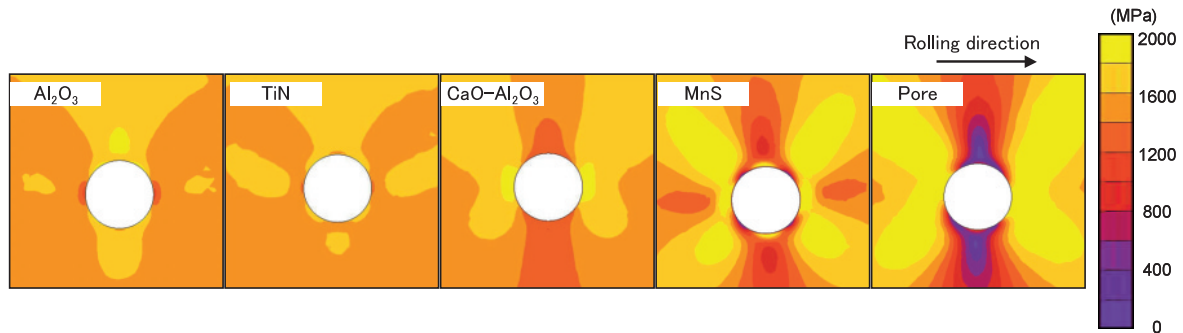


Fig.4 Equivalent stress distribution around 20 μ m in diameter inclusions and a pore at 3.95GPa.

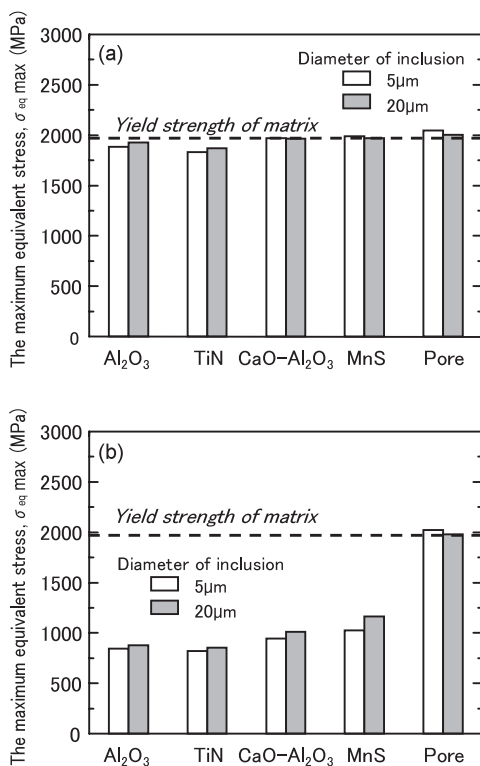


Fig.5 Relationship between inclusion type, size and the maximum equivalent stress around inclusions and a pore at (a) 3.95GPa, (b) 2.45GPa.

- (1) 最大接触面圧の違いによって、 $\sigma_{eq, max}$ に及ぼす介在物種類の影響度合いが異なることが分かった。
- (2) 高面圧条件（最大接触面圧3.95GPa）での知見
 - ①全ての介在物および空洞周囲の $\sigma_{eq, max}$ はほぼ同等であり、介在物の種類、および介在物・空洞の大きさの違いが $\sigma_{eq, max}$ に及ぼす影響は小さかった (Fig.5(a))。
 - ②介在物周囲の $\sigma_{eq, max}$ は2000MPa程度であり、母相の降伏強度と拮抗している。したがって、介在物の種

類、大きさを問わず、介在物周囲には繰り返し応力の負荷により容易に亀裂が生じると見られる。

- (3) 低面圧条件（最大接触面圧2.45GPa）での知見

- ①空洞は介在物に比べて $\sigma_{eq, max}$ が際立って高く、2000MPa程度の値を示した (Fig.5(b))。
- ②低面圧下での介在物周囲の $\sigma_{eq, max}$ は、高面圧下での $\sigma_{eq, max}$ のおよそ1/2の1000MPa前後であった。ただし、CaO-Al₂O₃、MnSはAl₂O₃、TiNに比べて $\sigma_{eq, max}$ が高くなる傾向が見られた。
- ③ $\sigma_{eq, max}$ に及ぼす介在物や空洞の大きさの影響は、高面圧の場合と同様に小さいことが分かった。

4. 考察

高面圧での解析結果 (Fig.5(a)) は、長尾らの実験結果 (Fig.1) を裏付けるものとなった。この条件下では、転がり疲れの初期段階において、いずれの種類、大きさの介在物の周囲にも亀裂が発生し、亀裂発生後は、介在物は空洞と等価な欠陥^{2) 3)}になるとみられる。その場合、介在物の種類には無関係に、介在物が大きくなるほど初期の亀裂長さは長くなり、それに伴って亀裂はより伝播しやすくなるものと考えられる。したがって、転がり疲れによる離寿命は介在物の種類ではなく、介在物の大きさに支配されると解釈することができる。

一方、低面圧での解析結果では、介在物の種類によって $\sigma_{eq, max}$ に差を生じた (Fig.5(b))。このことは、介在物が転がり疲れの初期段階で亀裂になり、その後亀裂の伝播を経て転動面にはく離を引き起こすか、あるいは亀裂にならず、はく離に関与しないかどうかに対して、介在物種類の影響があることを示唆している。また、介在物から亀裂が発生する場合でも、介在物の種類によって亀裂発生までの繰り返し数が異なり、はく離寿命に差を生じる可能性がある。さらに、本解析では介在物は母相に密着しているも

のとして取り扱ったが、素材の段階で母相と介在物の界面がはく離しているか、あるいははく離しやすい介在物の場合、低面圧の条件下では転がり疲れに対して極めて有害であることが示唆される。したがって、転がり疲れに及ぼす介在物の影響を解明していく上で、転がり疲れに伴う介在物からの初期亀裂の発生状況の観察を行うことが重要と考えられる。

5. 結言

2種類の最大接触面圧のもとで、モデル化した代表的な介在物、および空洞周囲に作用する応力を計算した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 最大接触面圧の違いによって、介在物周囲に作用する相当応力の最大値に及ぼす介在物種類の影響度合いが異なる。
- (2) 本解析における高面圧条件 (3.95GPa) での解析結果から、介在物はその種類、大きさを問わず空洞と同様に亀裂としての作用を持つと見られる。この場合、介在物の大きさが転がり疲れによるはく離寿命の指標になると考えられる。
- (3) 本解析における低面圧条件 (2.45GPa) での解析結果から、ある面圧以下においては、介在物の大きさのみならず、介在物の種類が転がり疲れに影響を及ぼすと考えられる。

[参考文献]

- 1) 長尾実佐樹, 平岡和彦, 雲丹亀泰和 : Sanyo Technical Report, **12** (2005) 38
- 2) 村上敬宣 : 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂 (1993)
- 3) K. Tanaka and T. Mura : Metal. Trans. A, **13A** (1982) 117