

軸受鋼の転動疲労寿命における非金属介在物の大きさの影響

長尾 実佐樹*1, 平岡 和彦*2, 雲丹亀 泰和*3

Influence of nonmetallic inclusion size on rolling contact fatigue life in bearing steel
Misaki Nagao Kazuhiko Hiraoka and Yasukazu Unigame

Synopsis: As oxygen content and the size of oxide nonmetallic inclusions in steel have decreased, bearing life has been made more than ten times as long as those in 1960's. Since a sulfide inclusion could be larger than oxide or nitride inclusions in such clean steel, it is desirable to clarify the effect of sulfide size on the rolling contact fatigue life.

The relationship between the largest inclusion size predicted by statistics of extreme value and the thrust-type rolling contact fatigue life was studied in this paper. As the result, the fatigue life was well correlated with the predicted largest inclusion size without regard to inclusion types. Since sulfide has the adverse effect, it is important to minimize the size of sulfide inclusions as well as oxides for further improvement in the fatigue life.

Key words: bearing steel; oxide; sulfide; rolling contact fatigue life; statistics of extreme value; $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$

1. 緒言

自動車に代表される各種産業機械のエンジン、減速機、モーター等の回転体を支える転がり軸受において最も重要な特性は転動疲労寿命であり、そのはく離の起点となり得る鋼中の非金属介在物の低減に対して、今なお継続的な取り組みがなされている¹⁾。

転動疲労寿命に対して介在物は有害であるとの見解はどれも認めるところであるが、どの種類の、またどれくらい大きさのものが影響するのかなど介在物の影響度については諸説が存在し、未だ明確な結論が得られていないと思われる。このうち酸化物系介在物（以下酸化物）については従来から影響度が大きいとの見方で一致し、鋼中の酸素量の低減すなわち酸化物総量の低減、更には最大酸化物の大きさの抑制により転動疲労寿命が向上することが確認されている^{2),3)}。しかしながら、硫化物系介在物（硫化物）は、転動疲労寿命に有益であるとの報告と酸化物と同等の有害度を持つといった報告が存在し⁴⁾⁻⁶⁾、またTiNに代表される窒化物系介在物（窒化物）については、大きさが同じであれば最も有害度が大きいとの報告やチタン含有量（Ti量）が多くなると寿命が低下するといった報告がなされている^{7),8)}。

前述のように転動疲労寿命に対しては、従来から酸化物の有害度が大きく取り沙汰されてきたが、これは酸化物が他の介在物に比べ大きなものが頻度多く存在したため、はく離の起点となる確率が極めて高かったことによるものと考えられる。しかし近年の製鋼技術の向上により酸化物の

小径が進んだ結果、相対的に他の介在物の影響度が無視できなくなってきたと考えられ、そのような鋼において硫化物、窒化物の有害度を明確化することが求められている。特に硫化物は比較的大きなものが数多く存在するため、硫化物の影響度を明確化することが今後の更なる軸受の長寿命化を考える上で重要であると考えられる。

本研究では、転動疲労寿命の評価方法として比較的簡便に転動疲労寿命を評価できるスラスト型転動疲労試験（以下本試験をスラスト試験と称す）を用い評価を行った。また鋼材の介在物の評価は極値統計法を用いて行い、最大介在物の大きさの予測値を清浄度の評価指標とした。得られた介在物の評価結果と転動疲労寿命結果から、介在物の種類並びに大きさが転動疲労寿命に及ぼす影響、特に硫化物が寿命に与える影響の明確化を行った。更に起点観察を行い、スラスト試験におけるはく離の形態の観察と起点となった介在物の調査を行った。これらの調査結果から、最終的に軸受の転動疲労における各介在物の影響度について検討した。

2. 実験方法

2・1 供試材

供試材はJIS高炭素クロム軸受鋼SUJ2鋼で、その主な製造条件をTable1に、供試材の化学成分をTable2に示す。

供試材は大きく2種類に分類され、試料A~Eについては硫黄含有量（S量）が低い材料である。このうち試料A~Cは、酸素含有量（O量）が比較的高いチャージの材料を用

*1 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ

*2 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ長

*3 研究・開発センター長

Table1. Detail of SUJ2 materials

Specimen	Grade	Size	Manufacturing Process
A	LowS-①	φ 167	Billet
B		φ 65	Billet-Forging (at 1273K)
C			Billet-Forging (at 1423K)
D	LowS-②	φ 65	Billet-Rolling
E	LowS-③	φ 65	Billet-Rolling
F	HighS-①	φ 167	Billet
G		φ 65	Billet-Forging (at 1423K)
H	HighS-②	φ 167	Billet
I		φ 65	Billet-Forging (at 1273K)
J			Billet-Forging (at 1423K)

Table2. Chemical composition of SUJ2 (mass% Ti,N,O:ppm)

Specimen	Grade	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti	N	O
A,B,C	LowS-①	0.99	0.17	0.35	0.015	0.002	1.41	0.010	12	85	8
D	LowS-②	0.98	0.30	0.27	0.009	0.002	1.38	0.028	7	99	4
E	LowS-③	1.01	0.23	0.36	0.013	0.002	1.40	0.012	18	46	4
F,G	HighS-①	1.00	0.20	0.39	0.019	0.010	1.40	0.012	23	112	5
H,I,J	HighS-②	1.00	0.20	0.40	0.017	0.010	1.40	0.010	15	96	6

い、試料Aは外径167mm、試料B、Cについては同一チャージの材料を更に鍛伸加工し外径65mmとした。このとき鍛伸加工の加熱温度を変化させ、介在物の分布状態を変化させることを試みた。試料Dは凝固速度の遅い鋳塊から製造された外径65mmの圧延材、試料EはO量が低いチャージの外径65mmの圧延材である。

一方、試料F～JについてはS量が比較的高めの材料である。使用した鋼材は2チャージ共にO量が中間レベルの材料であり、試料F、Hは外径167mm、試料G、I、Jについては同一チャージの材料を更に外径65mmに鍛伸加工した材料である。なお、試料D以外については全て連続鋳造工程で製造された鋼材を用いている。

これら10種類の供試材を極値統計法による介在物評価並びにスラスト型転動疲労試験に供した。

2・2 極値統計法を用いた介在物評価

金属中に含まれる介在物の大きさの度数分布が指数関数に近いと仮定した場合、極値統計処理によりある面積（体積）中に存在する最大介在物の大きさの予測が可能であり、清浄度の高い鋼材の介在物評価方法としてこの極値統計法による介在物評価が提案されている⁹⁾。本研究ではこの極値統計法による評価法を用い、酸化物、硫化物、窒化物の各介在物についてある面積中に存在する最大介在物の大きさの予測を行った。検鏡試料採取方法、測定条件の概略をFig.1に示す。なお、各測定条件については酸化物の予測介在物径と転動疲労寿命とに良好な相関が認められた坪田

らの用いた条件¹⁰⁾と同一とした。

以下に介在物評価手順を示す。各供試材の中周部より試料を採取し、鏡面研磨後、光学顕微鏡による試料観察を行い、10mm×10mmの範囲を1視野（基準検鏡面積 $S_0=100\text{mm}^2$ ）としその視野内の最大の介在物を選択し、選択された介在物の大きさを測定し、介在物径を $\sqrt{\text{長径:a} \times \text{短径:b}}$ で表し、1つの基準面積中の最大介在物径 $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ を決定した。

ここで長径:aと短径:bの取り方について記述する。介在物の長径は単体又は複数からなる群にて存在する介在物の端と端を結んだ最大の辺とし、その長径の辺と平行な線で挟んだ介在物の最大幅を短径とした。また群にて存在する介在物では、介在物間の距離と小さい方の介在物の大きさ($\sqrt{\text{area}}$)とを比較し、小さい方の介在物の $\sqrt{\text{area}}$ の値が介在物間の距離より大きな場合には両者は一体と判断、また小さい方の介在物の $\sqrt{\text{area}}$ の値が介在物間の距離より小さな場合には両者は別々の介在物と判断した。

この作業を30視野にて実施し、小さい介在物から順に極値統計グラフにプロットし、最小二乗法を用いて最大介在物分布曲線を求め、予測面積 $S=30,000\text{mm}^2$ 中に存在する最大の介在物径を求めた。

2・3 スラスト型転動疲労試験

転動疲労寿命は森式スラスト型転動疲労試験機を用いて評価を行った。試験片の作製は以下の方法によった。

まず各々の供試材を865℃の焼ならしを行い、800℃－

15hrの球状化焼なましを行った後、機械加工により外径60mm、内径20mm、厚み5.8mmに粗加工を行った。外径65mmの鋼材からはそのまま削り出しにより試験片を採取したが、外径167mmの鋼材では転動部が鋼材の中心に極めて近い部位となるため、中周部より試験片を採取した。その後試験片を硬化させるため、835℃-20min加熱し50℃の油に投入する焼入れを実施した後、170℃-90minの焼戻しを行い、試験片の硬さを62HRCに調整した。その後、表面から0.1mmの削り代で平面研磨を行い、最終鏡面仕上げを実施しスラスト試験に供試した。

スラスト試験はFig.2に示す条件にて実施した。試験面圧は5.3GPaで一定とし、はく離までの応力繰返し数を測定し、ワイブル統計処理により10%破損確率：L₁₀寿命

を求めた。

2・4 はく離起点観察

試料A~C並びにH~Jの合計6供試材について、スラスト試験後のはく離部の起点観察を実施した。まず、はく離部の破損形態を観察するため、はく離部を静的に破断することを試みた。手順をFig.3に示す。

はく離後のスラスト試験片をはく離部を中心に軌道の接線方向に約5mmの幅に切断し、はく離部の裏側を作用点として3点曲げの要領で静的に強制破断した。破断後の外観を観察し、はく離と破断位置との関係から、はく離の種類を2種類に分類した。また強制破断面及びはく離部上面から走査型電子顕微鏡（SEM）にて観察を行い、起点の介在物の有無、組成について調査した。

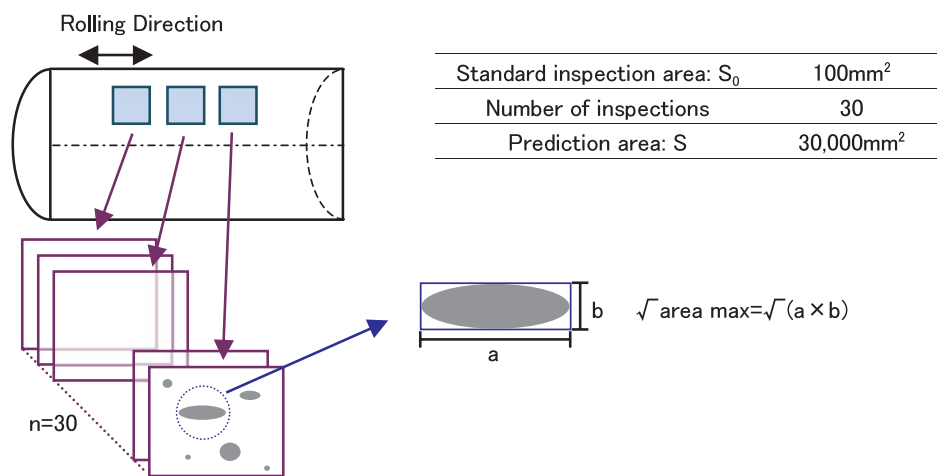


Fig.1 Inclusion rating method by statistics of extreme value

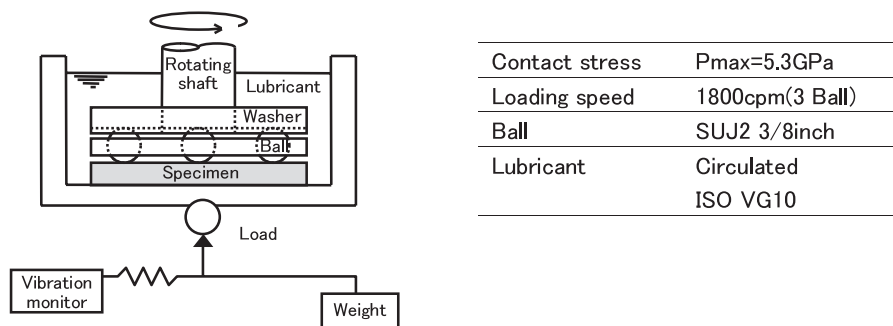


Fig.2 Schematic view of thrust type Rolling Contact Fatigue tester

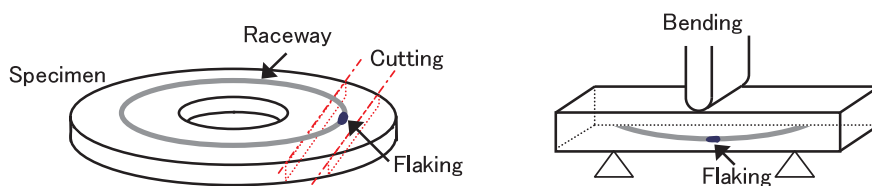


Fig.3 Observation method of the initiation site of flaking

3. 実験結果

3.1 寿命試験片の確性評価

極値統計法による30,000mm²中に存在する最大介在物の大きさの予測結果をTable3に示す。表中のハッチングは同一供試材において酸化物、硫化物、窒化物の各予測値の中で最大の値であることを示す。

S量の低い試料A~Eの中のうちO量の高い試料A~Cではいずれも酸化物の予測値が最も大きな値を示した。凝固時の凝固速度が遅いC材である試料Dでは硫化物の予測値が最も大きくなり、O量の低い試料Eでは窒化物の予測値が最も大きな値を示した。一方、S量の比較的高い試料F~Jでは何れも硫化物の予測値が最も大きな値を示した。

同一チャージの鋼材にて鍛錬比を変化させた場合、一部を除き鍛錬比が大きい方が、酸化物、硫化物の最大介在物の予測値が小さくなる傾向が認められた。これは熱間加工

により介在物が引き伸ばされ、分断されたためと考えられる。但し、試料Jの酸化物では、極値統計の分布直線から外れるクラスター状の酸化物が存在したため、鍛錬比の小さい試料Hに比べ酸化物の予測値が大きくなった。また試料Iの硫化物では、1000℃での鍛伸加工において硫化物は長く伸展したものの、幾つかの視野にて平行に並んだ2つの硫化物を一体と判定したものがあり、そのような硫化物では短径の値が大きく取られ√areaの値が大きくなったため、鍛錬比の小さい試料Hに比べ硫化物の予測値が大きくなった。また鍛伸加工時の温度を変化させることで介在物の大きさを変化させるを試みたが、鍛伸温度による介在物の大きさの変化は小さかった。

なお窒化物については、供試材のTi量を7~23ppmと変化したものの最大介在物の予測値に大きな差は認められず、試料E以外は3種類の介在物の中で最大となるものはなかった。

3.2 スラスト型転動疲労試験結果

スラスト試験の結果をFig.4に示す。

L₁₀寿命の比較ではS量が低くO量も低い試料Eが最も長寿命を示し、O量は中間レベルであるがS量の高い試料Fが最も短寿命となった。同一チャージで比較した場合、試料A、F、Hのように鍛錬比の小さい材料が短寿命となった。鍛伸加工時の温度を変化させた試料BとC及び試料IとJについては同等の寿命を示し、鍛伸温度による寿命の変化は認められなかった。

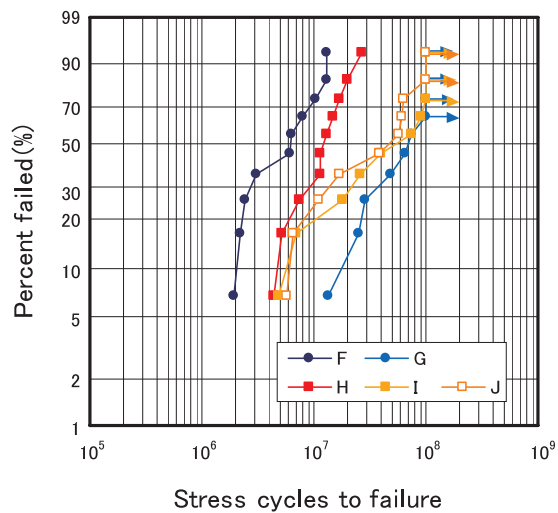
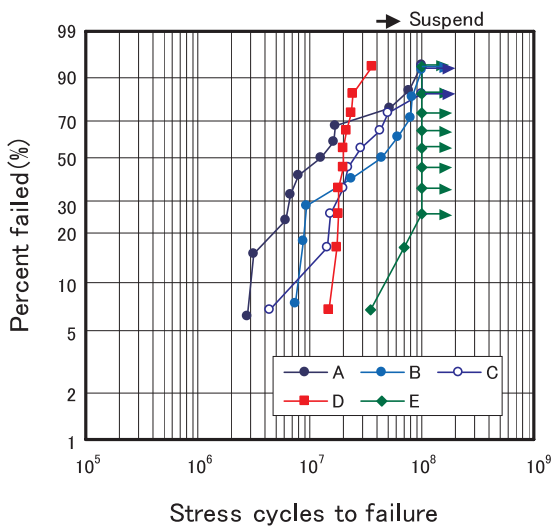
3.3 はく離起点観察結果

強制破断後の破断形態による分類結果をTable4に示し、その破断例をFig.5に示す。また破断面に観察された疲労破面に見られた介在物をFig.6に示す。

試料A~C並びにH~Jの合計6供試材にてはく離した試

Table3. Predicted maximum inclusion size in 30,000mm²(μm)

Specimen	Oxide	Sulfide	Nitride
A	58.6	33.2	24.1
B	29.1	26.9	26.6
C	41.5	26.5	26.9
D	9.9	46.6	27.7
E	16.6	23.7	27.4
F	19.7	76.2	33.7
G	10.2	53.8	27.9
H	16.9	55.6	25.5
I	14.4	62.6	30.6
J	30.1	49.2	28.8



Specimen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
L ₁₀ Life (× 10 ⁶)	2.4	7.5	7.5	14.7	47.8	1.8	13.4	4.8	5.7	5.7

Fig.4 Result of thrust-type Rolling Contact Fatigue test

Table4. Observation result of test pieces after static breaking

Specimen	Number of flaking	Breaking point		
		Rear of flaking	Front of flaking (Initiation site)	Apart from flaking
A	11	9	1 (not clarified)	1
B	8	7	1 (not clarified)	0
C	8	7	1 (oxide)	0
H	10	6	4 (Sulfide: 3 Not clarified: 1)	0
I	8	7	0	1
J	8	7	0	1

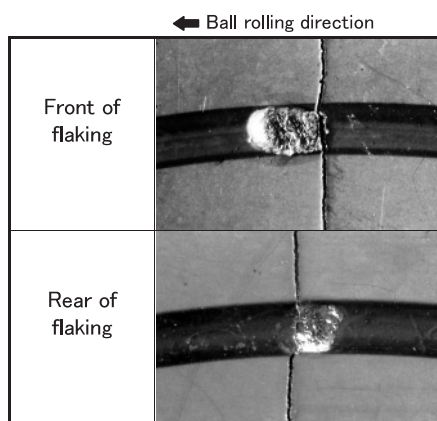


Fig.5 Examples of fractured position after static breaking (Specimen:H)

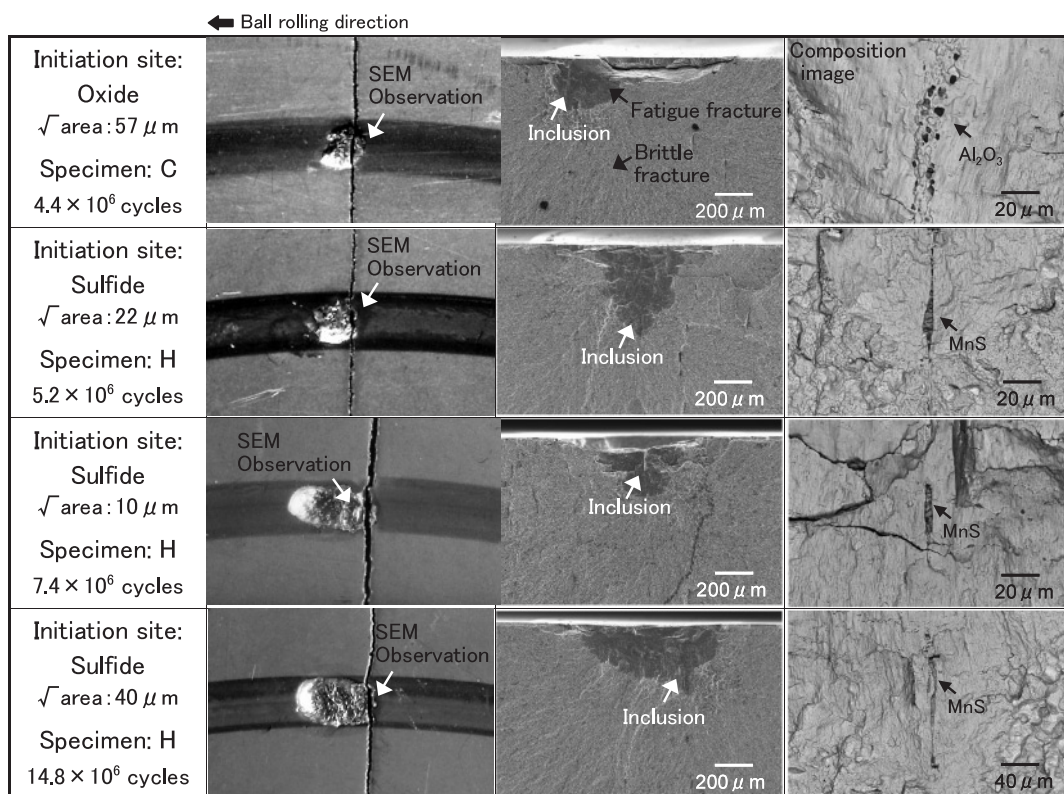


Fig.6 SEM images of fracture surface revealed by static breaking

試験片53枚をはく離部にて強制破断したところ、はく離の手前で破断するものとはく離の先で破断するものの2種類の破断形態が観察された。強制破断した試験片の破断面のSEM観察を実施したところ、はく離の手前で破断した試験片7枚には全て転動面直下の破断面に疲労破面が観察され、残りの部分が脆性破面（強制破断により生じた破面）となっていた。一方、はく離の先で破断した破断面には同様の疲労破面は認められず脆性破面のみであった。

また前者の破断面の疲労破面内に起点となったと思われる介在物が認められた試験片が4枚あり、介在物は1枚が $\sqrt{\text{area}}=50\mu\text{m}$ 程度の酸化物、3枚が $\sqrt{\text{area}}=10\sim 40\mu\text{m}$ 程度の硫化物であった。

なお、はく離部上面からのSEM観察では起点部の特定並びに起点の介在物の観察はできなかった。この理由として転動疲労によるき裂の伸展はせん断型の疲労（Mode II型）であり破面は擦れ合わされて明瞭な起点及び疲労き裂の伸展が確認できず、またははく離した部分の周りのはく離に至っていない箇所にも内部にき裂が存在しておりはく離部には起点が現れていない可能性もあるためと考えられる。

4. 考察

4・1 転動疲労寿命： L_{10} 寿命と非金属介在物の大きさとの関係

Fig.7に極値統計法による30,000mm²中の最大介在物径の予測値とスラスト試験の L_{10} 寿命との関係を示す。

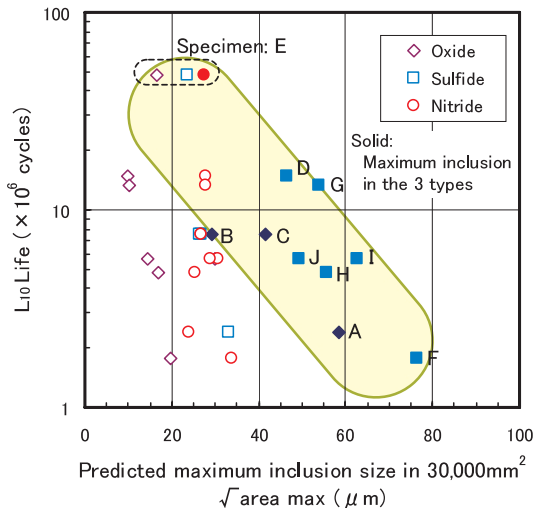


Fig.7 Relationship between predicted maximum size of inclusion and L_{10} Life

スラスト試験の L_{10} 寿命は図中塗潰しで示した各供試材の酸化物、硫化物、窒化物の最大介在物径の予測値のうち、最大の値と相関が認められた。また介在物の種類により転動疲労寿命の明瞭な層別はなされなかった。

ここで極値統計法により予測された最大介在物径の意味合いについて検討する。本研究では坪田らの用いた測定条

件により介在物評価を行っている。本条件では各供試材にて3,000mm²の面積を検鏡により評価し、そこから30,000mm²中に存在する最大介在物径を予測している。このときの2次元の評価面積を村上の提唱する方法⁹⁾により評価面積に仮想的な評価厚さを掛け合わせて3次元の評価体積に置き換えると、今回の調査では仮想的な評価厚さ h ($h = \sum \sqrt{\text{area}}_{\text{max}, j} / n$ すなわち測定した介在物径の平均値) が $h=0.003\sim 0.028\text{mm}$ となり、介在物径の平均値をおおよそ $h=0.01\text{mm}$ と仮定した場合には、予測面積30,000mm²は予測体積300mm³と言い換えることができる。すなわち今回の介在物評価では300mm³程度の体積中に存在する各介在物の最大の大きさを予測していることとなる。

一方、スラスト試験において転動面下に大きな介在物が存在した場合にはく離が生じる危険性のある部分の体積（以下危険体積と称す）を式(1)にて見積もった場合、

$$\text{危険体積} = (\text{接触楕円径}) \times (\text{転動軌道の円周}) \times (\text{最大せん断応力の90\%応力が掛かる深さ}) \cdots (1)$$

$P_{\text{max}}=5.3\text{GPa}$ 、ボール径：3/8 inchの条件では、ヘルツ接触における接触楕円径：約0.7mm、転動軌道の円周：38.5mm $\times \pi$ 、最大せん断応力の90%応力が掛かる深さ：約0.17mmとなり、そこをはく離起点になり得る可能性の高い危険体積とするとその値は約14.4mm³となる。スラスト試験では10枚程度の試験により1つの供試材の寿命評価を実施しているため、1つの供試材を試験した場合の危険体積は100数十mm³程度となる。

以上から極値統計法による介在物の評価体積とスラスト試験の全試験片の危険体積とは同じオーダーであり、したがってスラスト試験の全試験片の危険体積中には極値統計法により予測されるレベルの大きさの酸化物、硫化物、窒化物が存在していると考えられる。

本研究では極値統計法により予測される酸化物、硫化物、窒化物の最大介在物径のうち最大の値とスラスト試験の L_{10} 寿命とに相関が認められている。これは介在物の種類によらず、転動面下の危険体積中に存在する最大の介在物の大きさに寿命が支配されていることを示しているものと考えられる。また介在物の種類により寿命の明瞭な層別がなされていないことから、各介在物は転動疲労寿命に対して同程度の影響度を持っていると考えられる。但し、酸化物のプロットが介在物径と寿命の関係の短寿命側に寄っていることから、酸化物と硫化物の形状の違い（アスペクト比）が寿命に影響を与えている可能性もあり、形状の影響に関する更なる検討が必要と考える。

4・2 はく離形態からみた初期き裂生成方向の推定

次にはく離起点の観察からスラスト試験における初期き裂の発生と介在物の影響について検討を行った。Fig.8に

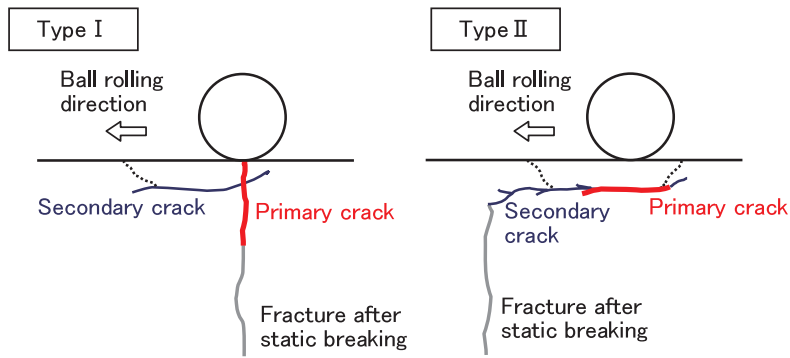


Fig.8 Process of flaking in rolling contact fatigue

破断形態別のはく離に至る過程と強制破断位置の模式図を示す。

はく離の手前で破断した試験片には転動面下に転動面と垂直方向の疲労破面が確認されており、強制破断時にはこの疲労破面（き裂）の存在によりそこから脆性破断したものと考えられる。この形態をType I と表す。一方、はく離の先で破断したものについてはこの転動面と垂直方向の疲労破面が見られないことから、元々転動面下の垂直方向のき裂が存在していなかったものと考えられ、強制破断時には転動面に平行な方向に伸展した内部き裂の一番深い位置から破断したものと考えられる。この形態をType II と表す。

Type I のはく離形態は松本らによるAEセンサを用いた転動疲労の起点解析¹¹⁾でも報告されている。Type I のはく離形態では転動面に垂直方向にき裂が発生しているが、このき裂は発生した方向から従来から一般的に言われている転動面に平行な動的せん断応力もしくは45°方向の最大せん断応力によるものではなく、転動面に対し垂直な面に作用する引張圧縮応力により生じたものと考えられ、その後、そのき裂を起点としてせん断応力により転動面に平行に主としてボールの転動方向にき裂が進んだものと考えられる。これは転動面に垂直方向の疲労破面は全てはく離の手前に存在していること、疲労破面には起点になったと思われる介在物が確認できることから推察される。介在物を起点として転動面に垂直方向のき裂が生じた例として、Fig.9に硫化物を起点として生成したき裂の観察事例を示す。この硫化物及びき裂は転動面から20μm研磨した位置に観察され、き裂の大きさは幅方向：50μm、深さ方向：70μm程度であり、この段階では転動方向へのき裂の伸展は確認できなかった。

一方、Type II のはく離形態では転動面に垂直方向のき裂は見られず、このはく離形態では従来から一般的に言われている転動面に平行な動的せん断応力もしくは45°方向の最大せん断応力にてき裂が発生・進展しはく離に至っていると考えられる。

このようなはく離形態の違いは各応力成分に対する介在物の投影面積が影響しているものと考えられる。本研究で

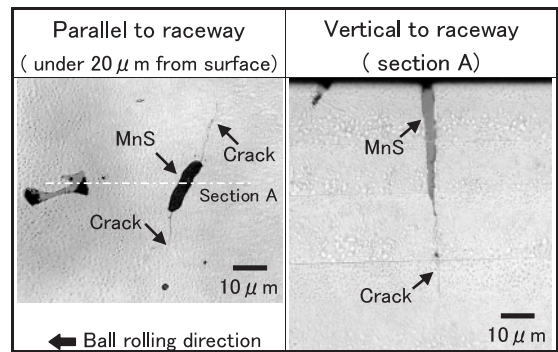


Fig.9 Crack occurred from sulfide under raceway (Specimen H, 11.6×10^6 cycles)

はスラスト試験の試験片を鋼材長手方向に対し垂直方向から採取している。この方向に試験片を採取した場合、介在物の形が塊状であれば転動面に平行な面でも垂直な面でも介在物の投影面積はほぼ同じとなるが、鋼材長手に伸びた硫化物やクラスター状の酸化物では、転動面に平行な面に投影される面積に対して垂直な面に投影される面積が大きくなる。塊状の介在物が小さくなると、動的せん断応力又は45°方向の最大せん断応力に対する介在物の投影面積が小さくなり、その結果、転動面に対し垂直な面に作用する引張圧縮応力に対する投影面積の大きい硫化物やクラスター状の酸化物を起点に転動面に垂直方向に疲労き裂が生成し、そのき裂を起点にせん断応力によりき裂が転動方向に平行に進展してはく離するモード（Type I のはく離形態）が現れるようになると思われる。

Fig.10に試料Hの試験結果をType I とType II のはく離形態毎にプロットした結果を示す。この試料ではType I、II 共に同じ位置にプロットされ、はく離の形態による寿命の差は見られなかった。S量が高く鍛錬比の小さな供試材Hでは、塊状の介在物に対し相対的に大きな硫化物が存在した結果、転動面下のせん断応力によるはく離（Type II のはく離形態）と引張圧縮応力によるはく離（Type I のはく離形態）が混在するようになったものと考えられる。これは転動面下に存在する介在物の存在状態により各応力

成分に対する介在物の投影面積が変化し、その結果転動疲労寿命を支配する応力が変化することを示しており、転動疲労寿命における介在物の影響を評価するためには、せん断応力に投影される介在物の大きさのみを評価するのではなく、各応力成分に投影される介在物の最大の大きさ、すなわち鋼材の長手方向に平行な面に投影される介在物の大きさを評価する必要があるものとする。

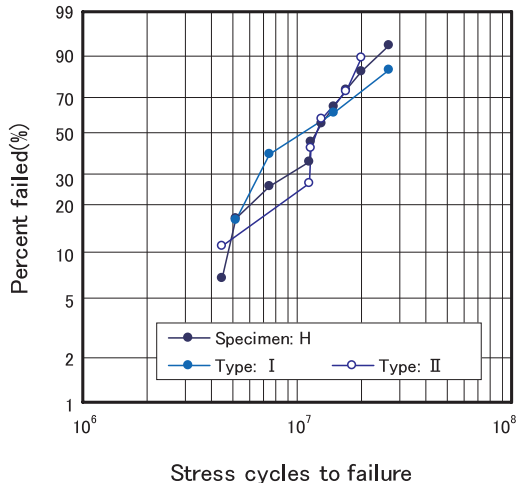


Fig.10 Rolling Contact Fatigue life resolved into two-type fracture mode

5. 結言

本研究により以下のことが明らかとなった。

- 1) 極値統計法により30,000mm²中に予測される酸化物、硫化物、窒化物の最大径のうち最大の値と、スラスト試験のL₁₀寿命とは相関し、同じ材質、硬さにおけるL₁₀寿命は、介在物の種類によらず転動面下の危険体積中に存在する最大の介在物の大きさに支配される。
- 2) 鋼材の長手方向に対し垂直な面から試験片を採取したスラスト試験では、転動面下のせん断応力によりはく離が発生するモードの他に、転動面下の引張圧縮応力によりはく離が発生するモードが混在した。これは介在物の存在状態により転動疲労寿命を支配する応力成分が変化することを示しており、転動疲労寿命向上のためには鋼材の長手方向にて評価される介在物の最大の大きさを小さくすることが重要である。

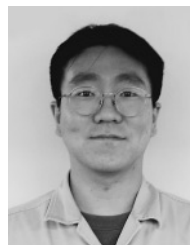
- 3) 窒化物の最大介在物径の予測値は酸化物、硫化物に比べ小さく、O量、S量共に低い1供試材以外、3種類の介在物の中で窒化物が最大となるものはなかった。数十ppm程度のTi量では窒化物が最大となることは少なく、Ti量が転動疲労寿命に与える影響は小さいと考えられる。

本研究では、スラスト試験により評価される転動疲労寿命と転動面下に存在する最大の介在物の大きさとの間に相関が認められ、寿命向上には鋼材の長手方向にて評価される介在物の最大の大きさを小さくすることが重要であることが分かった。転動疲労寿命に対する介在物の有害度は、介在物が同じ大きさの場合には介在物の種類によらず同程度であり、転動疲労寿命の向上のためには硫化物の小径化が酸化物と同様に重要であると結論付けられる。

参考文献

- 1) 例えば 川上潔：第182,183回 西山記念技術講座〔日本鉄鋼協会〕，(2004) 151
- 2) 上杉年一：鉄と鋼，74 (1988) 1889
- 3) 奈良井弘，阿部力，古村恭三郎，西森博，小林一博，坪田一一：材料とプロセス，5 (1992) 1959
- 4) A. G. Shalimov :Jpn USSR Jt Symp Phys Chem Metal Processes，6 (1977) 35
- 5) 山本三幸，外山和男，材料とプロセス，5 (1992) 1958
- 6) 木澤克彦，後藤将夫：Koyo Engineering Journal，163 (2003) 36
- 7) J. Y. Cogne, B. Heritier, J. Monnot : Clean Steel，3 (1987) 26
- 8) 小林一博，坪田一一，坂上高志：鉄と鋼，71 (1985) S1556
- 9) 村上敬宣：金属疲労 微小欠陥と介在物の影響，養賢堂 (1993)
- 10) 坪田一一，佐藤紀男，加藤恵之，平岡和彦，北野修平：日本材料学会 学術講演会講演論文集，46 (1997) 105
- 11) 松本洋一，村上保夫，古村恭三郎：NSK Technical Journal，654 (1992) 27

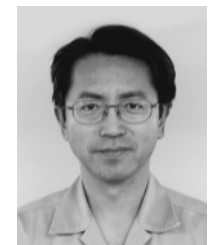
■ 著者



長尾 実佐樹



平岡 和彦



雲丹亀 泰和