

材料清浄度評価による転がり疲れ寿命の推定

Estimation of Rolling Contact Fatigue Life through Evaluation of Cleanliness in Bearing Steel

木澤克彦 K. KIZAWA 後藤将夫 M. GOTOH

A study in determining the quantitative relationship between cleanliness of bearing steel and rolling contact fatigue life is significant for material development to achieve weight reduction and improve reliability of rolling bearings.

This Paper presents an estimation formula of rolling contact fatigue life which has been established by multiple regression analysis with evaluated value of non-metallic inclusions, impurities and rolling contact fatigue life. By this evaluation method, it is found quantitatively that sulphide and titanium inclusions are harmful in addition to oxide inclusions which have been recognized to be harmful for rolling contact fatigue life.

Key Words: cleanliness, non-metallic inclusion, extreme value statistics, impurities, rolling contact fatigue life, multiple regression analysis

1. はじめに

軸受の転がり疲労損傷の一つに鋼中の非金属介在物を起点とした内部起点はく離がある。この種のはく離対策として、軸受鋼メーカーおよび軸受メーカーでは非金属介在物(特に酸化物系介在物)の低減に取り組み、その結果軸受寿命を飛躍的に向上させることができた¹⁾。しかし、これらの対策はあくまで『非金属介在物を低減すれば転がり疲れ寿命(以下寿命と称す)が向上する』といった定性的な傾向をもとに成し得たものであり、非金属介在物と寿命との定量的な関係に基づいたものでない。今日でもなお、一般的に酸化物系介在物の数を少なく、かつ小さくすることが寿命向上に有効であるという定性的な共通認識が存在するだけである。

このため、寿命ばらつきが小さい高信頼性軸受鋼の開発やその品質管理の手段として、また、さらなる長寿命軸受鋼の開発に向け、寿命に対する非金属介在物の影響度合いを定量的に把握する必要性が増している²⁾。しかしながら、これらの関係を定量化した研究例は少なく、わずかに外山ら³⁾や村上⁴⁾の研究があるのみである。また、寿命と非金属介在物との関係把握には、大きさ、個数といった非金属介在物そのものの評価値だけでなく、それらを構成する不純物量等についても合わせて検討する必要がある。

そこで、本報では、非金属介在物と寿命の関係の考察の第1ステップとして、鋼中非金属介在物および不純物の定量値と寿命に関して重回帰分析を行い回帰式導出を試みた。以下、その結果につ

いて報告する。

2. 現状の寿命推定精度と課題

軸受鋼における鋼中酸素量(O量)と寿命の関係を図1に示す。なお、本報での寿命値は、すべて図2に示すスラスト型転がり疲れ寿命試験機を用い、表1に示す条件で実施した結果である。図1より、酸素量の低減による寿命向上が読み取れるが、現状の10ppm以下まで高 cleanliness 化した酸素量領域では、同じ酸素量でも寿命のばらつきが大きく相関が得られているとはいえない。また、同様にJIS, ASTM法による清浄度評価値と寿命の相関も得られなかった。このように酸素量や清浄度評価値と寿命値に相関が得られなくなった要因は、以下の点にあると考えられる。

寿命に大きく関わると考えられている酸化物系介在物の疲労寿命現象を酸化物系介在物の総量の指標である鋼中酸素量で捉えようとしている。

清浄度の向上により、酸素含有量や非金属介在物の評価自体が既存の手法では正確に把握できなくなった^{5), 6)}。

酸化物系介在物の低減によって、他の非金属介在物および不純物が寿命支配因子として顕在化してきた⁷⁾。

そこで、本報では、非金属介在物と寿命の関係を考察する第1段階として、上述 ~ の要因を考慮して下記2項目について検証した。

- (i) 効率良く正確な非金属介在物情報(量, 大きさ)が得られる評価手法の検証

(ii) (i) で決定した非金属介在物評価法によって得られる各種非金属介在物評価値および不純物の定量値と寿命との相関を得る手法を考察することによって、高精度の寿命推定式の導出

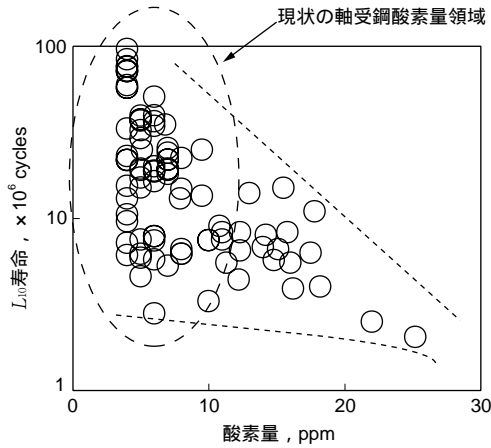


図1 鋼中酸素量と寿命の関係

Relationship between oxygen content and rolling contact fatigue life

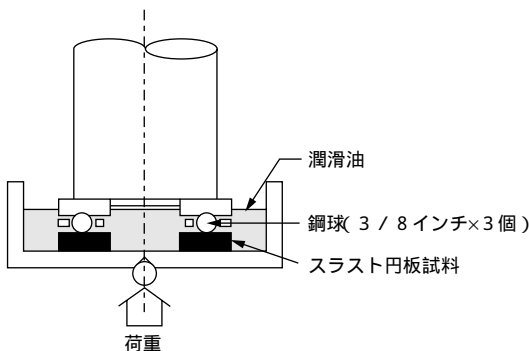


図2 スラスト型転がり疲れ寿命試験機

Thrust type rolling contact fatigue tester

表1 スラスト型転がり疲れ寿命試験の条件

Test conditions of thrust type rolling contact fatigue tester

試験機	スラスト型転がり疲れ寿命試験機
荷重, N	3 920
最大接触応力, MPa	5 230
応力繰返し速度, Hz	30
潤滑	マシン油 (ISO VG7相当) 油浴
試料数, 枚	10
試験時間, サイクル	はく離もしくは応力繰返し数 100 × 10 ⁶ まで

3. 非金属介在物の定量化

3.1 極値統計法による評価条件決定の考え方

非金属介在物評価値と寿命の相関を検討する前に、高効率で正確に材料の清浄度を評価できる測定条件を確立しなければならない。現状、鋼中非金属介在物分布をより精度よく把握するため評価法として、例えば極値統計法⁶⁾、発光分光分析法⁸⁾、超音波法⁹⁾が提案されている。本報ではこれらの評価法の中から、実用性を重視し、現状評価法がほぼ確立され、かつ評価が簡易な極値統計法を使用する。

極値統計法とは、ある基本分布関数に従うデータの集合から一定の数のデータ集合を取り出した時、各集合の極値(最大値, 最小値)が従う分布(極値分布)について解析する手法である。基本分布関数が正規分布や指数分布であってもその極値分布は異なった分布となる。

基本分布関数のすそ野が指数的に減少すると見なせる基本分布関数(例えば正規分布, 指数分布)を極値分布では2重指数分布と呼ぶ。この2重指数分布は極値分布上では直線となるため任意の予測領域内での最大値を推定できる。材料中の非金属介在物分布も指数分布となるため、極値統計法を用いて任意の予測面積(体積)中で予測される最大介在物の面積の平方根 $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ を算出することが可能となる。なお、本考察では $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ ではなく最大介在物の直径を表す予測最大径を評価値として用いる。表2に村上らの方法⁶⁾によって定義された予測最大径を求める時に必要なパラメータを示す。

表2 極値統計処理に必要なパラメータ

Parameters for extreme value statistics

基準面積 S_0	ある基本分布関数に従うデータの集合から一定数のデータの集合を取り出す際のデータ集合の領域
被検査面積 S_s	ある基本分布関数に従うデータの集合から一定数のデータの集合を取り出す際の一定数 × データ集合の領域
予測面積 S	予測最大径を算出するための面積
再帰期間 T	$(S + S_0) / S_0$

上述の極値統計法で信頼度の高い評価値(予測最大径)を得るためには、表2に示す基準面積 S_0 、被検査面積 S_s 、予測面積 S を最適化しなければならない。そこで、これら3種類のパラメータを以下の考え方にに基づき決定した。

基準面積 S_0 : 少なくとも1つの S_0 内に1つ介在物が存在する面積を決定する。

被検査面積 S_a : 図3に示す被検査面積 S_a と酸化物系介在物の予測最大径の関係により S_a を決定する。なお、図3は2種類の軸受鋼(軸受鋼, 軸受鋼)を各被検査面積でそれぞれ $n = 5$ 評価した時の予測最大径のバラツキを表したものである。図より、被検査面積 S_a が 400mm^2 以上で予測最大径のバラツキが小さくなる傾向が得られた。本関係より、高効率で正確な予測最大径が得られる最適な被検査面積 S_a を決定する。

予測面積 S : スラスト型転がり疲れ寿命試験条件から転走直下の負荷応力体積を見積り、それを村上ら⁶⁾の手法を用いて面積換算することにより決定する。

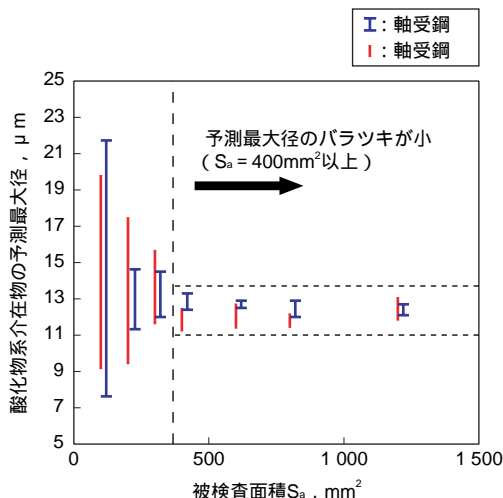


図3 被検査面積 S_a と酸化物系介在物の予測最大径
Evaluation area and estimated maximum oxide inclusion diameter

3.2 評価材料および評価条件

評価材料は、高炭素クロム軸受鋼SUJ2を用い、前述した評価装置、条件で転がり疲れ寿命試験を実施した試料を対象に調査した。被検査面は圧延方向に切断後鏡面仕上げを施した。その後、介在物自動測定装置(東芝ITSソリューション社製 METALSPECTOR II - C)により、酸化物系介在

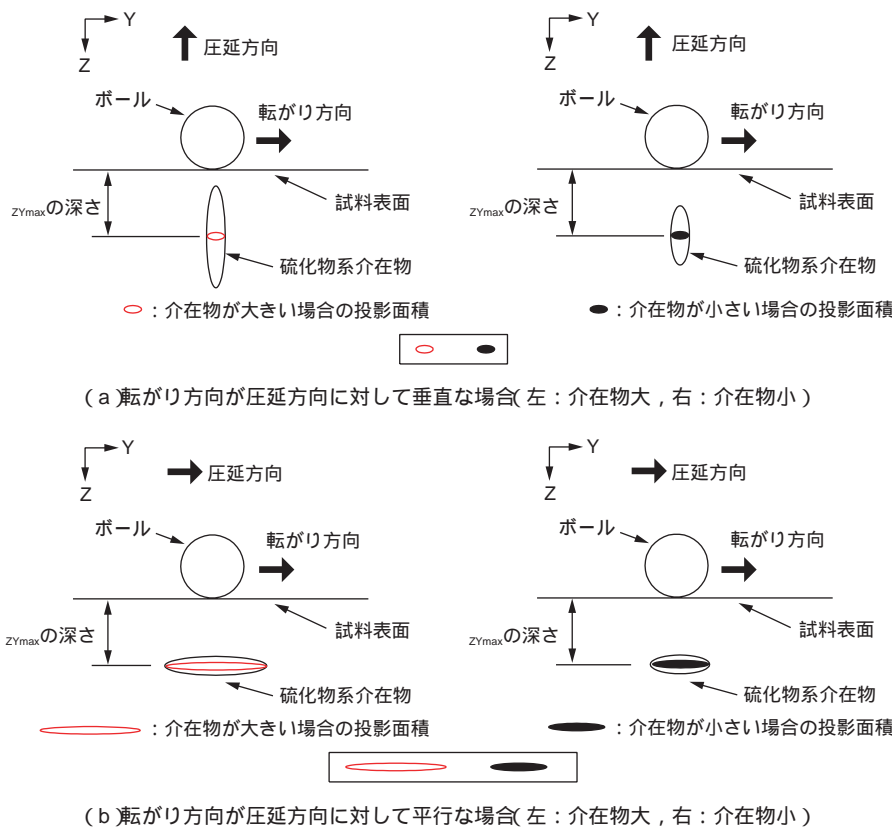


図4 硫化物系介在物の応力作用投影面積の変化
Projection area by stress in sulphide inclusions

物，チタン系介在物，硫化物系介在物の大きさと個数分布を測定し，それぞれの予測最大径を算出した．なお，硫化物系介在物の評価については，以下の理由により半径方向最大断面の予測最大径を算出した．

硫化物系介在物の形状は酸化物系，チタン系介在物と異なり圧延方向に対し細長い形状をしている．図4(a),(b)は，圧延方向に対して転がり方向が垂直，および平行な場合における硫化物系介在物の大きさが異なる場合の応力作用投影面積の変化を模式的に示したものである．図4(a)より，スラスト型転がり疲れ寿命試験のような転がり方向が圧延方向に対して垂直な場合，転がり接触による両振りの最大せん断応力(ZY_{max})の作用する深さでの硫化物系介在物のXY平面の投影面積は，介在物の半径方向の断面積で決定されることが分かる．なお，この場合介在物の大きさの変化に対して応力作用投影面積の変化が小さいという特徴を持つ．一方，図(b)の転がり方向に対して平行な場合は，その投影面積は介在物の軸方向断面(長手方向断面)で決定されることが分かり，この場合，図4(a)とは異なり応力作用投影面積の変化は大きくなる．

以上のことから，スラスト型寿命試験の場合における硫化物系介在物の大きさ評価は，圧延方向に対して転がり方向が垂直となる場合(図4(a))に対応するため，半径方向最大断面の予測最大径を評価することとした．表3に3.1節の考え方により決定した極値統計処理条件を示す．

表3 極値統計法処理条件
Conditions of extreme value statistics

基準面積 S_0, mm^2	20
被検査面積 S_a, mm^2	400
予測面積 S, mm^2	8 600
再帰期間 T	430

3.3 評価結果

図5に酸化物系介在物の予測最大径と寿命の関係を示す．図より，両者の間にはほとんど相関がないことが分かる．すなわち，本結果から酸化物系介在物の予測最大径のパラメータのみでは高精度な寿命推定ができないものと考えられる．酸化物系介在物の予測最大径と酸素量の関係を図6に示す．図より，両者の間にも相関がないことが分かり，これまで良い相関を示すと言われる酸化物系介在物個数と酸素量の関係⁹⁾と異なる傾向を示した．この結果の意味するところは，10ppm以下と高浄度化した今日の軸受鋼の酸素量は，酸化

物系介在物の個数(総量)を表す尺度には成り得るが，大きさを表す尺度には成り得ないということである．

したがって，酸化物系介在物に関する含有量と個数は，類似の情報を持つパラメータであるが，それらと予測最大径は何ら相関性のないパラメータであるといえる．そのため，大きさか量情報のいずれか一方の情報しかないパラメータで寿命との相関性を検証した図1，5は良い結果が得られなかったものと考えられる．なお，チタン系介在物，硫化物系介在物の含有量(チタン系介在物：チタン量，硫化物系介在物：硫黄量)と個数と予測最大径の関係も本報での介在物評価により酸化物系介在物と同様の関係であることが分かった．参考として図7，8にチタン系介在物の予測最大径と寿命およびチタン系介在物の予測最大径とチタン量の関係を示す．

以上の結果より，次項以降で寿命との相関性を考察していくにあたり，図1，5，7に示した非金属介在物の大きさや量の情報に関する評価値を寿命と個々に対応させて考察していくのではなく，寿命に影響を与えると考えられる因子全てを考慮し，それらと寿命との相関性を考察していくこととした．

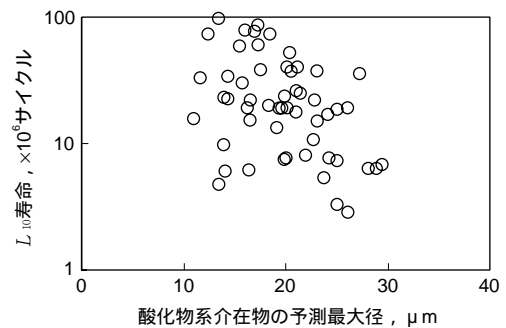


図5 酸化物系介在物の予測最大径と寿命
Estimated maximum oxide inclusion diameter and rolling contact fatigue life

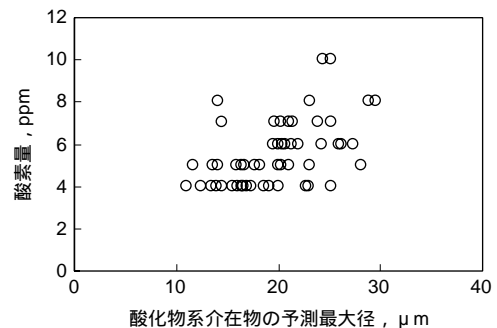


図6 酸化物系介在物の予測最大径と酸素量
Estimated maximum oxide inclusion diameter and oxygen content

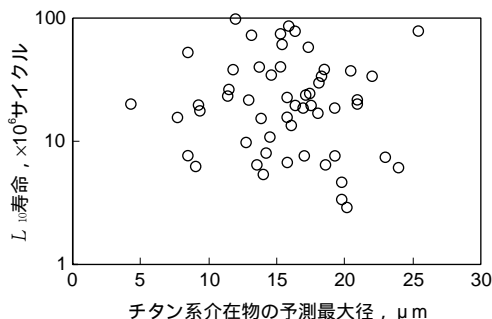


図7 チタン系介在物の予測最大径と寿命
Estimated maximum titanium inclusion diameter by extreme value statistics and rolling contact fatigue life

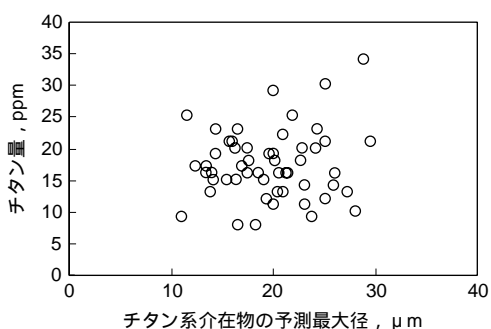


図8 チタン系介在物の予測最大径と酸素量
Estimated maximum titanium inclusion diameter and titanium content

4. 寿命推定式の導出

4.1 寿命に影響を与える因子の明確化

本解析では寿命に影響を与える可能性があると考えられる表4に示す因子13種類を説明変数とし、寿命を目的変数として(1)式を仮定し、重回帰分析を実施した。

一般に説明変数の数が増えるほど重回帰式の重相関係数Rは増加する。すなわち、(1)式の場合、13種類の因子すべてを説明変数とした時の重相関係数が最も高くなる。そのため、重相関係数をより良い重回帰式の判断基準とすると、目的変数(寿命)に影響を及ぼしていない説明変数も含んでしまう可能性がある。そこで、本解析では、説明変数を過大に取り込むことを防ぐために、重回帰式の良さを判断する基準となる自由度2重調整済み寄与率^{**2}を用い、この値が極大化する時の説明変数の組合せが目的変数に最も影響を与えている因子と判断することにした。なお、(1)式は非金

属介在物評価値以外に不純物量も寿命に影響を与える可能性がある因子として考慮し、また寿命値が負の値とならないよう指数関数のモデルとした。

$$L_{10} = \exp\{\beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_i \cdot x_i\} \quad (i = 1 \sim 13) \dots (1)$$

L_{10} : L_{10} 寿命

$\beta_0 \sim \beta_i$: 偏回帰係数

$x_1 \sim x_{13}$: P, S, O, solAl, Ti, N, Sb, 酸化物系, チタン系, 硫化物系介在物の予測最大径および個数

このような考え方にに基づき、残差平方和の減少に最も寄与する順に表4の説明変数を選択し加えていった結果を図9に示す。なお、図9の横軸における説明変数の組合せは、表4に示す各説明変数番号に対応している。図より、N量+O量+S量(説明変数番号組合せ12+9+8)の組合せで自由度2重調整済み寄与率は大きく増加し、N量+O量+S量+酸化物系介在物の予測最大径(説明変数番号組合せ12+9+8+1)の組合せで最大値を示していることが分かる。また、最大値以降は説明変数を加えても重相関係数は増加するが自由度2重調整済み寄与率が減少する結果となった。以上のことより、寿命に影響を与える因子はN量, O量, S量, 酸化物系介在物の予測最大径であると判断した。

表4 説明変数

Explanatory variables

番号 i	説明変数
1	酸化物系介在物の予測最大径
2	酸化物系介在物の個数
3	チタン系介在物の予測最大径
4	チタン系介在物の個数
5	硫化物系介在物の予測最大径
6	硫化物系介在物の個数
7	P量(リン)
8	S量(硫黄)
9	O量(酸素)
10	solAl量(固溶アルミ)
11	Ti量(チタン)
12	N量(窒素)
13	Sk(アンチモン)量

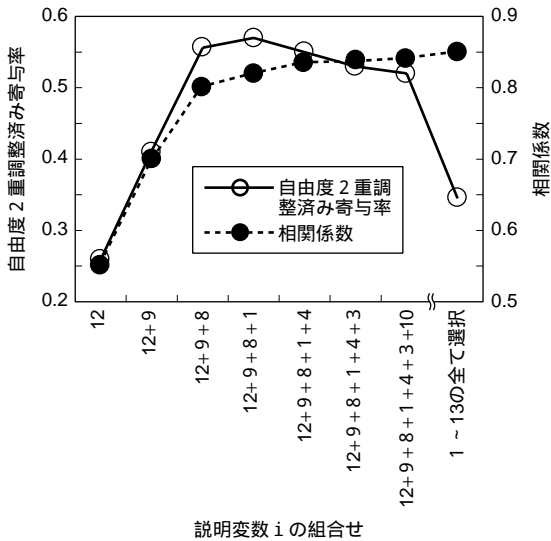


図9 自由度2重調整済み寄与率と重相関係数の変化
Change between R^{**2} and R

4.2 寿命推定式モデルの改良

前項で得られたN量，O量，S量，酸化物系介在物の予測最大径を説明変数として，(1)式をモデルとした寿命推定式は成立する．しかし，その寿命推定式の説明変数は，統計学上の尺度である自由度2重調整済み寄与率のみにより判断されたものであるため，普遍的な寿命推定式でない可能性がある．また，上述の4種類の説明変数では各種非金属介在物の寿命への影響度合いを十分に説明することが出来ないといった問題がある．

そこで，次に，選択したN量，O量，S量，酸化物系介在物の予測最大径の4種類の説明変数をもとにさらに寿命推定式を改良した．

改良結果を表5に示す．酸化物系介在物の予測最大径と酸素量は酸化物系介在物に関する情報であり，硫黄量は硫化物系介在物に関する情報であることが3.3項で明らかため，表5のようにまとめた．一方，窒素は鋼中でチタン系介在物，アルミナイトライド(AℓN)の析出物として存在する¹⁰⁾ため，チタン系情報パラメータとAℓN析出物パラメータの2種類に分けてモデル化した．なお，AℓNの大きさはナノオーダーであるため非金属介在物のように考慮する必要がないと判断した．以上の改良をもとに最終決定した寿命推定式モデルを(2)式に示す．本式は各非金属介在物の大きさと量の情報を考慮したモデル(ただし，AℓNは量のみ)である．

表5 寿命推定式モデル改良内容

Improved formula model of to estimate rolling contact fatigue life

寿命に影響を与える因子	寿命推定式モデル	
	整理方法	関数 ¹⁾
酸化物系介在物の予測最大径	酸化物系介在物情報パラメータ	$F_1(x_{11}, x_{12})$
O含有量		
S含有量	硫化物系介在物情報パラメータ	$F_2(x_{21}, x_{22})$
N含有量	チタン系(TiN)介在物情報パラメータ	$F_3(x_{31}, x_{32})$
	AℓN析出物情報パラメータ	$F_4(x_{41})$

1：関数に関する詳細は式(2)，(3)に記載

$$L_{10e} = \beta \cdot \exp \left\{ \begin{aligned} &\alpha_1 \cdot F_1(x_{11}, x_{12}) + \alpha_2 \cdot F_2(x_{21}, x_{22}) \\ &+ \alpha_3 \cdot F_3(x_{31}, x_{32}) + \alpha_4 \cdot F_4(x_{41}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

L_{10e} : 推定 L_{10} 寿命 (×10⁶ cycles)

β : 定数

$\alpha_1 \sim \alpha_4$: 偏回帰係数

$F_1(x_{11}, x_{12})$: 酸化物系介在情報パラメータ

$F_2(x_{21}, x_{22})$: 硫化物系介在情報パラメータ

$F_3(x_{31}, x_{32})$: チタン系介在情報パラメータ

$F_4(x_{41})$: AℓN析出物情報パラメータ

$$F_i(x_{i1}, x_{i2}) = x_{i1}^{\epsilon_i} \cdot x_{i2}^{\gamma_i} \quad (i = 1 \sim 4) \dots\dots\dots(3)$$

x_{i1} : 各介在物の含有量, mass%

x_{i2} : 各介在物の予測最大径, μm

ϵ, γ : 非金属介在物の種類により決定される定数

4.3 寿命推定式の導出

式(2)の寿命推定式モデルを用い，再度重回帰分析を実施した結果，重相関係数 $R = 0.84$ の式(4)を導出した．図10に式(4)による実寿命と推定寿命の関係を示す．ここで，硫化物系介在物の予測最大径に関しては，3.2項で述べたように介在物の大きさの変化に対して応力作用投影面積の変化が小さいという特徴を持ち寿命への影響が小さいと考えられるため，工業的観点から式(4)では考慮しなかった．しかし，転がり方向と圧延方向に関する硫化物系介在物の寿命への影響については，今後詳細に考察していく必要があると思われる．また，AℓN量は，それを説明変数とすると自由度2重調整済み寄与率が低下し寿命に影響を及ぼす因子でないことが分かったため，式(4)の説明変数から除外した．

式(4)の各説明変数の標準偏回帰係数により，酸化物系介在物情報パラメータが0.5，硫化物系介在物情報パラメータが0.6，チタン系介在物情報パラメータが0.2の割合で寿命へ影響を及ぼしていることが分かる．すなわち，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，チタン系介在物も寿命に悪影響を及ぼすということが定量的に把握出来た．また，特に寿命への影響度合いが不明確と言われて来た^{11), 12)}硫化物系介在物が酸化物系介在物と同程度の影響力を有することが分かった．

$$L_{10e} = 18.8 \cdot \exp \left\{ \begin{array}{l} -0.5 \cdot F_1^*(x_{11}, x_{12}) - 0.6 \cdot F_2^*(x_{21}) \\ -0.2 \cdot F_3^*(x_{31}, x_{32}) \end{array} \right\} \dots(4)$$

$F_i^*(x_{i1}, x_{i2})$: $F(x_{i1}, x_{i2})$ 値を平均0，分散1に標準化した関数 ($i = 1 \sim 3$)

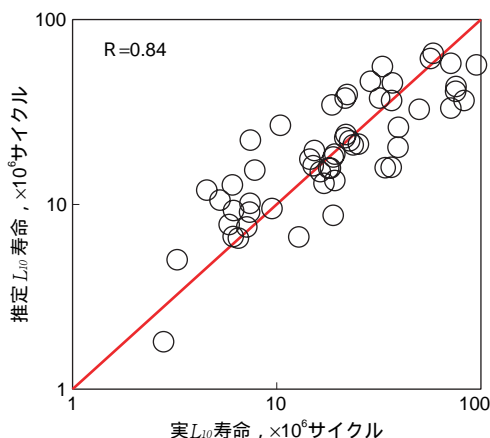


図10 実寿命と推定寿命

Actual and estimated rolling contact fatigue life

5. おわりに

非金属介在物と転がり疲れ寿命における関係の考察の第1ステップとして，鋼中非金属介在物および不純物の定量値とスラスト型転がり疲れ寿命試験による寿命値に関する回帰式導出を試みた結果，重相関係数 $R = 0.84$ の寿命推定式が得られた．本方法により，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，チタン系介在物も寿命に悪影響を及ぼすということが定量的に言え，特に寿命への影響度合いが不明確であった硫化物系介在物が酸化物系介在物と同程度の影響力を有することも分かった．

参考文献

- 1) 森原源治，藤田良樹，藤本芳樹：Koyo Engineering Journal no. 128(1985)20.
- 2) 岡本純三：トライボロジスト，vol. 46，no. 9 (2001)3.
- 3) 外山和男，山本三幸：CAMP-ISIJ，no. 2 (1989)1975.
- 4) 村上裕志：NTN TECHNICAL REVIEW no. 68(2000)58.
- 5) 山口智則，新貝元，狩野隆，岸幹根：電気製鋼，vol. 73，no. 1(2002)61.
- 6) 村上敬宜：金属疲労 微小欠陥と介在物の影響(1993)養賢堂.
- 7) 家口浩：トライボロジスト，vol. 46，no. 9 (2001)27.
- 8) 谷本 亘，山本 公：CAMP-ISIJ，no. 14 (2001)13.
- 9) 加藤恵之，佐藤海広，平岡和彦，塗嘉夫：Sanyo Technical Report vol. 8，no. 1 (2001)9.
- 10) L. S. Darken, R. P. Smith, and E. W. Filer: J. Metal, 3(1951)1174.
- 11) T. Lund・J. Akesson: Clean Steel, vol. 3, no. 20(1987)1.
- 12) 斎藤・関谷：電気製鋼，vol. 46，no. 3(1975)147.

筆者



木澤克彦*
K. KIZAWA



後藤将夫*
M. GOTOH

* 総合技術研究所 トライボロジー研究部