二次元的最大介在物寸法推定法の問題点の
数値シミュレーションによる評価*上 村 裕二郎^{*1}, 村 上 敬 宜^{*2}A Numerical Simulation of Evaluating the Maximum Size of Inclusions to
Examine the Validity of the Metallographic Determination
of the Maximum Size of Inclusions

Yujiro UEMURA and Yukitaka MURAKAMI

Nonmetallic inclusions are the cause of a marked reduction and a large scatter of fatigue strength of high-strength steels. The sizes and positions of inclusions influence the fatigue strength. Murakami et al.'s equation has successfully shown the correlation between the fatigue strength and the size of the inclusion at the fracture origin, and has enabled us to predict the fatigue strength considering the inclusion size. The maximum size of inclusions contained in a specimen or a machine component must be determined in order to predict the reduction of the fatigue strength. The statistics of the extreme values for the determination of the maximum size have been applied to the experimental microscopic inspection data, though those data give essentially two-dimensional information, because the metallographic inspections were conducted only on a section of a specimen. In order to examine the validity of two-dimensional metallographic inspection data of inclusions, the numerical simulations considering the spatial and size distributions of inclusions are carried out. The prediction errors resulting from conventional metallographic inspections are estimated.

Key Words: Fatigue, Nonmetallic Inclusion, Quantitative Microscopy, Statistics of Extreme Value, High Strength Steels, Numerical Simulation

1. 結 言

高強度鋼または高硬さ鋼は低中強度鋼に比べ静的強度が高い割には疲労強度が高くなく、またばらつきが大きいことはよく知られている。その原因としては、表面粗さや材料中に含まれる非金属介在物の寸法、形状、位置の多種多様さの影響などが考えられている。微小欠陥や非金属介在物が疲労強度に及ぼす影響を定量的に明らかにするための基礎的諸現象が最近ようやく明らかになりつつある^{(1)~(10)}。

製鋼の面からみれば、介在物の寸法を小さく制御すればするほど疲労強度はその材料の本来の強さに近づき、またばらつきも小さくなるが^{(1)~(3)(6)~(11)}、費用がかかり実用的ではなくなる。現時点では介在物の寸法をどの程度まで小さく制御すれば最も経済的かを判断する評価方法は確立されていない。

設計の面からみれば疲労強度のばらつきを警戒して安全率を大きくとるよりは疲労強度の下限値を正確に推定して安全率を小さくとる方向に向かうべきである

う⁽⁸⁾⁽¹²⁾。硬い材料の疲労強度は含まれる介在物寸法が大きいほど低下する傾向があるから、疲労限度の下限値を推定するにはまず材料中の最大介在物寸法を推定する必要がある。このような意味で最大介在物寸法の推定は製鋼および設計の両面で重要な意味を持っている。

介在物の評価方法としては種々のものが提案されており材質の評価や識別に利用されている。例えば JIS 点算法、ASTM 法などがある⁽¹³⁾。しかし、これらの方法による介在物指数と疲労強度との間には必ずしも明確な一対一の対応関係がないことが指摘されている。

これに対して、村上らは^{(14)~(19)}最近の一連の研究で欠陥や介在物を最大主応力方向に投影した面積の平方根 $\sqrt{\text{area}}$ が疲労強度を左右する最も重要な幾何学的因子であることを明らかにした。試験片や部材の疲労強度は材質の硬さと最大の介在物の寸法によってほぼ決まるので $\sqrt{\text{area}}$ の最大値 $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ を決定する必要がある。 $\sqrt{\text{area}}$ の測定は通常組織の顕微鏡写真によってなされるが、組織観察によって得られる情報は二次元的な情報であり厳密な意味での $\sqrt{\text{area}}$ ではない。この問題については著者らはさきに若干の実験的考察を行っている⁽²⁰⁾。

* 平成元年 10 月 15 日 第 67 期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年 3 月 15 日。

^{*1} 学生員、九州大学大学院〔現在 九州松下電器(株)〕。

^{*2} 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

本論文ではこのような二次元情報から三次元情報を推定する際に生じる介在物の最大寸法の推定法の問題点について数値シミュレーションを用いて考察を行い、顕微鏡による組織観察から得られる介在物寸法の取扱い方を明らかにする。

2. 最大介在物寸法の推定法とその問題点

著者らはこれまでの一連の研究で微小表面き裂や、微小表面欠陥が疲労強度に及ぼす影響を定量的に評価するため、多くの材料について詳細に調べ以下の予測式を作った⁽¹⁹⁾⁽²¹⁾。

$$\sigma_w \cong 1.43(H_v + 120)/(\sqrt{\text{area}_s})^{1/6} \dots\dots\dots (1)$$

ここで各量の定義および単位は以下のとおりである。

σ_w : 疲労限度 MPa

H_v : ビッカース硬さ kgf/mm²

area_s : 表面欠陥、表面き裂を最大主応力方向に投影した面積 μm^2

また、内部に存在する介在物が起点となる疲労破壊の場合の疲労限度は式(1)を発展させ、次式で推定できることが示されている^{(8),(12)}。

$$\sigma_w \cong 1.56(H_v + 120)/(\sqrt{\text{area}_i})^{1/6} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、各量の定義および単位は式(1)と同じである。

この式(1)または式(2)を用いることにより、ビッカース硬さ H_v が既知の材料の場合、破断の起点となる介在物の $\sqrt{\text{area}}$ がわかれば疲労限度を予測することができる。

材料中の最大介在物寸法の推定法の一つとして極値統計⁽²²⁾⁽²³⁾を用いる方法が考えられる。以下にこの方法について説明する。

対象とする材料の最大主応力方向に垂直で、面積 S_0 の断面の組織観察を行い、 S_0 中の介在物の $\sqrt{\text{area}}$ の最大値 $\sqrt{\text{area}_{\max,j}} (j=1 \sim J)$ を決定する。測定数 J をある程度大きくするとこの分布は極値分布に従うと期待される。以下では実際の測定結果を例にとって説明する。

図1は高速度工具鋼SKH 51材の組織写真である。この1視野を基準面積とし、この中に含まれる最も大きい介在物を決定しその面積の平方根 $\sqrt{\text{area}_{\max,j}}$ を測定する。図1(b)にこの視野中の最大介在物を示す。この場合 $\sqrt{\text{area}_{\max,j}}$ は $11.1 \mu\text{m}$ である。このような測定を十分な数の視野について行い、得られた $\sqrt{\text{area}_{\max,j}} (j=1 \sim \text{測定数})$ を小さい順に並べ変え極値確率紙にプロットする。図2はこのようにして得られ

た極値分布である⁽²⁴⁾。

ここで最大介在物寸法を推定する要求は2種類あると考えられる。一つは回転曲げのように表面の応力が最も高くなる場合、その危険にさらされる表面積中にどの程度の大きさの介在物が存在するかを知りたいという要求である。もう一つは、引張り・圧縮のように、ある体積について一様応力が作用し、その体積中にどの程度の大きさの介在物が存在するか知りたいという

(a) 検査面中の介在物 ($S_0=0.482 \text{ mm}^2$) 円で囲まれた介在物が最大介在物

(b) 最大介在物の拡大写真

図1 介在物寸法測定例 (SKH 51)

図2 SKH 51 横断面の最大寸法の累積頻度分布 ($S_0=0.482 \text{ mm}^2$, データ数: 42)

要求である。

前者の場合、図2と同様の線図を用いて比較的容易に近似的最大寸法を求めることができる^{**1}。その方法は、危険にさらされる表面積が S のとき、再帰期間 T を $T=S/S_0$ と見積もり図2の矢印の手順に示すように、 T と分布直線との交点から最大寸法を求めるのである。しかしながら、このような手順に従って求めた最大寸法は必ずしも介在物の真の最大寸法とは一致しない⁽⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²⁵⁾。なぜならば、図3に示すように検鏡面は必ずしも最大介在物の最大断面積部分を切っていないからである。この真の最大寸法を極値確率紙にプロットすると図4の破線のように見掛けの最大値の右側に位置し、しかも平行になると思われる。なぜなら真の最大値は見掛けの最大値より常に大きく $j=\infty$ で事実上一致すると考えられるからである。しかしながら実際に測定するのは図4の実線であって破線ではない。したがって、この見掛けの最大寸法と真の最大寸法との差をなんらかの方法で見積もっておく必要がある。著者らは先の報告⁽²⁰⁾で、この差を一次元と二次元の関係から二次元と三次元の関係推定する方法で見

積もることを行っている。本論文では、数値シミュレーションによって直接この関係を検討する。本論文の説明では図4に示すように見掛けの最大値を $\sqrt{\text{area}_{\text{max1},j}}$ 、真の最大値を $\sqrt{\text{area}_{\text{max2},j}}$ と名付け、それぞれの分布から求まる最大値を $\sqrt{\text{area}_{\text{max1}}}$ 、 $\sqrt{\text{area}_{\text{max2}}}$ と呼ぶことにする。

後者の場合、図1と図2を用いて体積中の最大寸法を予測するのは困難である。なぜならば図2の分布は二次元の情報から得られたものであるが、求めるものは三次元中の最大値であるからである。そこで、図5に示すようにこの基準面積 S_0 内の最大寸法を十分薄い一定厚さ h_0 を持った直方体中の最大介在物寸法と仮定する。したがって、この手順によって、危険体積 V に含まれる最大介在物寸法は再帰期間 T を $T=V/(S_0 \cdot h_0)$ と見積もり、分布直線と T との交点から予測することができる⁽²⁴⁾。本論文では、この最大介在物寸法の推定方法の妥当性と板要素の厚さ h_0 の設定値について数値シミュレーションを用いて検討を行う。

3. 数値シミュレーションの方法

本研究の数値シミュレーションでは、簡単のため、介在物の形状は球とし、介在物寸法 $\sqrt{\text{area}}$ の代わりに直径 D を用いた。ただし手法そのものは介在物形状が球以外でも本質的な違いはない。介在物の個数の分布は確率密度関数 $\phi(D)$ が次式のような指数分布に従うと仮定した。

$$\phi(D) = \frac{1}{m} \cdot \exp\left(-\frac{1}{m}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

分布を上式のように仮定すると平均および標準偏差も m となる。この指数分布に従う介在物 n 個をある体積 V の立方体の中に乱数を用いて分布させた。図6はこのようにして介在物を分布させた後、この立方体をある断面を切って、その面に出てくる介在物の様子を示した例である。このような断面の一つ一つに対して先に述べたように見掛けの最大寸法 $D_{\text{max1},j}$ 、真の最大寸法 $D_{\text{max2},j}$ を求めれば、その寸法の分布は極値分布に従うものと期待される。このようにして得られる極値

図3 検鏡面によって切られた介在物

図4 見掛けの最大寸法と真の最大寸法の累積頻度分布

^{**1} 厳密には、回転曲げの場合も表面積でなく表面の薄い層の体積について議論すべきであるが、そのような考察を行っても表面だけを危険面積と考えたものと大差ないことが検討されている⁽¹²⁾。

図5 厚さ h_0 を持った検鏡面

(a) $m=1\mu\text{m}$ の介在物分布の断面 (面積: 1mm^2)

(a) $m=1\mu\text{m}$ の介在物分布における見掛けの最大寸法と真の最大寸法の累積頻度分布 ($S_0=0.25\text{mm}^2$, データ数 (検査面数) 40)

(b) $m=2\mu\text{m}$ の介在物分布の断面 (面積: 1mm^2)

(b) $m=2\mu\text{m}$ の介在物分布における見掛けの最大寸法と最大寸法の累積頻度分布 ($S_0=0.25\text{mm}^2$, データ数 (検査面数) 40)

(c) $m=3\mu\text{m}$ の介在物分布の断面 (面積: 1mm^2)

(c) $m=3\mu\text{m}$ の介在物分布における見掛けの最大寸法と真の最大寸法の累積頻度分布 ($S_0=0.25\text{mm}^2$, データ数 (検査面数) 40)

図 6

図 7

分布に対して前述の問題点の検討を行っていく。

今回のシミュレーションでは、一辺が1mmの立方体に介在物を分布させた。式(3)の m の値(平均および標準偏差)および介在物の個数 n の値としては、介在物の体積率が図1に示したSKH 51材の介在物の面積率(0.4%)と等しく、また極値分布の傾きが同程度になるような組合せを検討した。その結果 $m=1, 2, 3\mu\text{m}$ の分布を用いることにした。

4. 結果および考察

図6にそれぞれの分布における断面の例を示す。また図7には、前述の測定によって得られる見掛けの最大寸法 $D_{\text{max}1,J}$ と真の最大寸法 $D_{\text{max}2,J}$ を極値確率紙にプロットした結果を示す。この図7について前述の二つの問題について検討を行う。

まず、危険面積中に存在する介在物の最大寸法の予測について考察する。図7(a)~(c)はすべて $D_{\text{max}1,J}$ 、 $D_{\text{max}2,J}$ が互いに平行になっていることがわかる。通常回転曲げ疲労試験で使用される試験片の危険にさらされる表面積は100~500mm²程度と考えてよい。そのときの再帰期間 T は $T=S/S_0$ より400~2000と見積もられる。そこで図7(a)~(c)においてそれぞれ $T=400$ と $T=2000$ において見掛けの最大寸法 $D_{\text{max}1,J}$ および真の最大寸法 $D_{\text{max}2,J}$ の両方の分布直線から最大寸法を予測した。表1にその結果を示す。いずれの場合も $D_{\text{max}1,J}$ の $D_{\text{max}2,J}$ に対する誤差は少なく、見掛けの最大寸法から予測しても実用的には十分精度よく予測できることがわかる。

次に体積中に存在する介在物の最大寸法を予測する場合について検討を行う。著者らは先の報告で前述の図5の板要素厚さ h_0 として介在物寸法程度が妥当であると考察している⁽²⁴⁾。そこで今回はこの h_0 として見掛けの最大寸法(図7の白丸のデータ)の平均値をとり、1mm³中の最大介在物寸法を予測した。表2にその結果を示す。数値シミュレーションでは1mm³中の真の最大寸法は既知であるので予測値の誤差を計算したところすべての場合について±10%未満であった。このことから h_0 のオーダーは妥当であり、またこの手法で実用的に十分な精度で体積中の最大寸法が予測できると考えてよいであろう。すなわち、組織観察に基づく具体的手順としては図2の測定値の平均値程度を h_0 としてとればよいことになる。

5. 結 言

ピッカース硬さ H_V が400以上の高強度鋼の疲労強度はその静的強度から期待されるほど高くなく、また

表1 見掛けの最大寸法の真の最大寸法に対する誤差

$m = 1\mu\text{m}$			
	$D_{\text{max}1}(\mu\text{m})$	$D_{\text{max}2}(\mu\text{m})$	Error(%)
$T=400$	13.60	14.14	3.82
$T=2000$	15.38	15.85	2.97

$m = 2\mu\text{m}$			
	$D_{\text{max}1}(\mu\text{m})$	$D_{\text{max}2}(\mu\text{m})$	Error(%)
$T=400$	27.11	28.59	5.18
$T=2000$	31.45	32.77	4.03

$m = 3\mu\text{m}$			
	$D_{\text{max}1}(\mu\text{m})$	$D_{\text{max}2}(\mu\text{m})$	Error(%)
$T=400$	32.72	35.11	6.81
$T=2000$	37.73	40.26	6.28

表2 予測最大寸法と実際の最大寸法

$m(\mu\text{m})$	1	2	3
Mean of 40 maximum sizes ($=h_0$)(μm)	7.58	12.43	15.77
Return period T	527.7	321.8	253.6
Predicted maximum size (μm)	13.91	26.52	31.30
Maximum size in 1mm ³ volume (μm)	15.24	27.83	30.40
Prediction error (%)	-8.73	-4.71	+2.96

ばらつきも大きいことはよく知られている。この原因は、材料中に含まれる介在物の影響と考えられる。従来の研究ではJIS点算法などによる清浄度と疲労強度の相関をつける研究が多くなされてきた。しかし、それらの方法では図6(a)~(c)に示したような、介在物の体積率は同じでも、含まれる最大介在物の大きさが異なるような材料の疲労強度を同程度と評価する恐れがあり、疲労強度を正確に推定することは困難と考えられる。

著者らはこれまでの一連の研究において介在物が疲労強度に及ぼす影響を定量的に評価することを試み、また極値統計を用いて最大介在物寸法を推定し、疲労限度の下限値を予測している。しかしこの極値統計を利用した最大介在物寸法の推定は二次元観察から三次元立体中の寸法を推定するため、近似的なものであるという問題点があった。本研究ではこの最大介在物寸法法の推定が妥当なものであるかを数値シミュレーションを用いて評価した。評価の結果は良好で、極値統計を用いた推定法が妥当であり、本論文で示したような再帰期間 T のとり方を採用すれば二次元測定でも実用的に十分な精度で最大介在物寸法を推定できるという結論を得た。

文 献

- (1) 村上・ほか2名, 機論, 45-400 (1979), 1479.
- (2) 山本・ほか4名, 機講論, No. 814-2 (1981), 12.
- (3) 斉藤・伊藤, ばね論文集, 30 (1985), 11.
- (4) Nishijima, S., ほか2名, *ICF*, 6-3 (1984), 1719.
- (5) 増田・ほか2名, 機論, 52-476, A (1986), 847.
- (6) 蘇・ほか2名, 機論, 54-506, A (1988), 1821.
- (7) 毎熊・ほか2名, 機論, 53-485, A (1987), 1.
- (8) 村上・ほか2名, 機論, 54-500, A (1988), 688.
- (9) 岩倉・ほか2名, 機論, 54-506, A (1988), 1826.
- (10) 村上・清水, 機論, 54-499, A (1988), 413.
- (11) 尹・ほか2名, 日本金属学会誌, 46-11 (1982), 1068.
- (12) 村上・宇宿, 機論, 55-510, A (1989), 213.
- (13) 日本鉄鋼協会編, 鉄鋼便覧, IV (1981), 432.
- (14) 村上・遠藤, 機論, 49-438, A (1983), 127.
- (15) 村上, 機講論, No. 840-2 (1984), 1.
- (16) 村上・ほか2名, 材料, 34-385 (1985), 1153.
- (17) 村上・ほか3名, 日本材料学会第34期学術講演会前刷集, (1985), 148.
- (18) 遠藤・村上, 機講論, No. 858-1 (1985), 63.
- (19) 村上・遠藤, 材料, 35-395 (1986), 911.
- (20) 村上・ほか2名, 機論, 55-509, A (1989), 58.
- (21) Murakami, Y. and Endo, M. (Miller K. J. and de los Rios, E. R., ed.), The Behavior of Short Fatigue Cracks, *EGF Pub. 1 Mech. Eng. Pub.*, (1986), 275.
- (22) Gumbel, E. J. (河田・ほか2名訳), 極値統計学, (1963), 1, 広川書店.
- (23) ばね技術研究会, 非金属介在物評価法委員会, ばね論文集, No 32 (1987), 52.
- (24) 夏目・ほか3名, 材料力学第19回疲労シンポジウム前刷集, (昭63-11), 76.
- (25) Dehoff, R. T. and Rhines, F. N., *Quantitative Microscopy*, (1968), McGraw-Hill, 牧島監訳, 計量形態学, (1972), 169, 内田老鶴園新社.