

超音波疲労試験を利用した介在物検査手法

古谷 佳之*・松岡 三郎*・阿部 孝行*

Inclusion Inspection Method in Ultra-sonic Fatigue Test

Yoshiyuki FURUYA, Saburo MATSUOKA and Takayuki ABE

Synopsis : This report proposes a new inclusion inspection method using ultra-sonic fatigue tests at 20 kHz. Fish-eye fractures occur in high-strength steels and the most harmful defect for fatigue in the risk volume of a specimen appears at the fracture site. In the other word, fatigue tests certainly specify the defect causing fatigue failure.

The method was validated on the basis of fatigue test results for two low-alloy steels and a spring steel. Fatigue tests had a larger inspection volume and detected a larger inclusion than a conventional direct observation method on mirror surfaces. In case of a low-alloy steel in which about 10 μm Al_2O_3 inclusions existed together with smaller TiN inclusions, the TiN inclusion and matrix cracks also caused fish-eye fracture. Even in a such case, fatigue tests certainly specify the most harmful defect for fatigue. In case of Al_2O_3 inclusions, the inclusion size could be measured on the fracture surface. For TiN inclusions, however, the sizes were difficult to measure. For matrix cracks, the size could be measured in the spring steel but was difficult to measure in a low-alloy steel. Although distinction of inclusions based on ASTM standard and measurement of TiN inclusion sizes were basically possible in fatigue test, the procedures took time and were costly.

Key words: inclusion inspection; ultrasonic fatigue test; fish-eye fracture; fracture surface; fracture site.

1. 緒言

高強度鋼では、介在物を起点とした疲労破壊（内部破壊）が生じ、疲労強度が低下する¹⁻⁴。内部破壊の場合、疲労強度は主に介在物寸法に支配され¹⁻³、介在物の種類によっても違いが見られる⁴。そのため、鋼中の介在物寸法と種類を把握することは必要不可欠である。また、最近の研究では、介在物ではなく、組織割れを起点として内部破壊する報告例もあり⁵、介在物以外の欠陥についても検査が必要である。

従来行われてきた介在物検査のうち最も一般的なものは、JIS法やASTM法に基づいて試料を鏡面に磨き、光学顕微鏡で介在物分布を調べる手法⁶で、画像処理技術を利用して自動的に分布を測定する装置も開発されている。また、最近では試料を電気分解し、溶液をろ過することにより介在物を採取して検査する手法⁷も用いられている。これらの手法には長所と短所がある。前者の鏡面を観察する手法では、介在物が非常に小さくかつ少ない最近の鋼において、介在物検査が困難になってきている。後者の電気分解する手法では、検査体積が大きくなるため、介在物が少ない鋼でも検査可能だが、ASTM法での分類が困難であるうえ、MnSのような介在物は解けて検出できない可能性がある。また、これらの手法では、組織割れに対する検査ができないことは言うまでもない。さらに、最近の介在

物制御した鋼⁸や介在物が非常に小さい鋼⁸では、必ずしも最大寸法の介在物が内部破壊の起点とはならない場合もあるので、従来の最大寸法の介在物を探す検査法では疲労破壊で問題となる介在物を特定できないこともある。

以上のことから、内部破壊の原因となる介在物や不均一組織などの欠陥を確実に検査するためには、実際に疲労試験を行うことが最良の手段である。疲労試験で内部破壊を生じさせれば、危険体積中に存在する最も疲労被害を与える欠陥が自動的に起点として出現する。疲労試験で介在物検査を行う方法は以前から指摘⁹されていたが、疲労試験は時間がかかることから、実用的ではないと思われてきた。ところが、20 kHzで運転可能な超音波試験機⁹による内部破壊の研究が進み¹²⁻¹⁴、疲労試験による介在物検査も現実味を帯びてきた。疲労試験で確実に内部破壊を生じさせるためには 10^7 回程度の試験が必要であるが、従来の100 Hz程度の試験では1本あたり1日程度時間を要したのに対し、20 kHzの試験では1本あたり10分程度で完了する。

本報では、超音波疲労試験機を使った介在物検査の手法を提案するとともに、SNM439鋼、SUP12鋼、SCM440鋼の3鋼種の疲労試験結果を検討し、疲労試験による介在物検査の有効性を実証する。

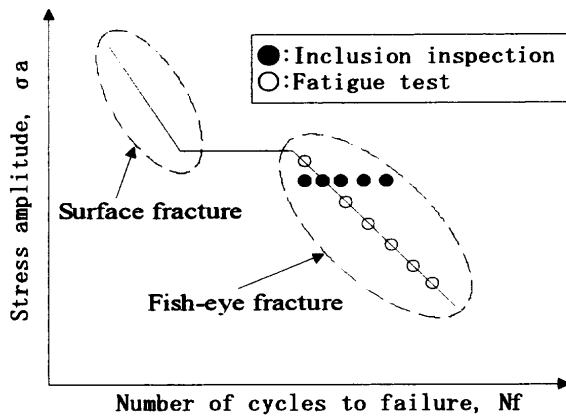


Fig. 1. Schematic S-N curve for a high-strength steel and concept of fatigue tests for an inclusion inspection.

2. 疲労試験による検査方法

2.1 試験片作成

Fig. 1にS-N曲線の模式図を示すが、一般的に高強度鋼の場合にはS-N曲線が二段折曲がりの様相になり、折曲り点を境に高応力側は表面を起点として破壊し、低応力側では介在物等の欠陥を起点として内部から破壊する⁴⁾。この折曲り点は内部破壊しない場合（表面破壊）の疲労限 $\sigma_w = 0.5\sigma_B$ に対応するという考え方が一般的で、強度が高くなるほど高応力側に移動するが、内部破壊する領域はそれほど変化しない⁵⁾。そのため、高強度になるほど内部破壊する応力域が拡大し、高応力・低寿命でも内部破壊が生じるようになる。

疲労試験による介在物検査を行うためには、内部破壊域を狙って試験する必要がある。そのため、できるだけ高強度の試験片を作成した方が介在物検査には有利になる。その際、次の2つの材料に分けて考える必要がある。

- 1) バルクの状態ですら十分に高強度で使用され、内部破壊の危険性が高い材料。
- 2) バルクの状態ではそれほど高強度ではなく、内部破壊の危険性は少ないが、浸炭・窒化や高周波焼入れなどの表面処理が行われ、表面の硬化層での内部破壊が懸念される材料。

1) の材料としては、ばね鋼や軸受け鋼などの調質鋼が考えられるが、この場合は実用と同じ条件で熱処理を行い、バルクの状態を再現して検査する方が望ましい。とくに、焼入れ条件は組織割れ起点内部破壊の有無に関係する¹⁰⁾ので注意が必要である。焼戻しに関しては、できるだけ低温にして高強度にした方が有利だが、内部破壊と焼戻し温度や強度との関係は不明な部分もあるので、実用状態と条件を合わせた方が好ましい。

2) の材料としては低合金鋼等の調質鋼と非調質鋼の場合も考えられるが、この場合は実用状態を模擬して表面処理をしてしまうと、試験片内に強度の分布が生じるため、

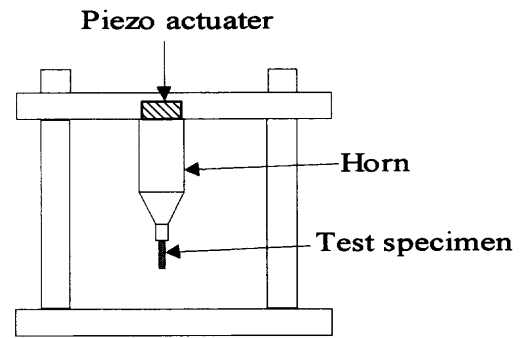


Fig. 2. Ultra-sonic fatigue test machine.

検査体積の定義が難しくなる。そこで、焼入れ+低温焼戻しの熱処理を行い、均一に高強度な状態にした方がよい。この場合、組織割れが起点となる可能性があるが、組織割れを除外したい場合には、改良オースフォームにより焼入れをすることで組織割れを無くすることができる¹⁰⁾。

以上の議論から、試験片の作成方法として次の3つが考えられる。

- 1) 実用と同じ条件で熱処理を行い、疲労試験片に加工する。
- 2) 焼入れ+低温焼戻しの熱処理を行い、疲労試験片に加工する。
- 3) 改良オースフォーム+低温焼戻しの熱処理を行い、疲労試験片に加工する。

2.2 疲労試験

疲労試験には超音波試験機 (20kHz) が最も適している。Fig. 2に超音波試験機の構造を示すが、ホーン先端に試験片をネジで固定するだけの簡単な構造である。したがって、実働の試験時間を短縮できるだけでなく、試験片の交換作業も短時間で完了できる。ただし、高応力域では発熱する可能性があるため注意が必要である。疲労特性を取得する場合には、Fig. 1の○印で示すように応力レベルを変えながら試験を行うが、介在物検査のみを行う際には、●印で示すように、適当な1応力レベルのみで行えばよい。無論、応力レベルを変えて、S-N曲線を取得しながら試験しても、介在物検査は可能である。

2.3 介在物検査

介在物検査は、疲労試験の後、破面をSEMで観察し、起点をEDAXで分析することにより行う。この場合、観察される起点は試験片の危険体積中で最も大きな疲労被害を与える欠陥であり、同一種の欠陥に対しては危険体積中で寸法が最大のものである。したがって、村上らの手法⁶⁾によって極値統計解析が可能で、検査結果の定量的な評価ができる。その際の検査体積は、危険体積と呼ばれる試験片の中で高応力に曝される部分の体積と等しくなる。試験片の危険体積の考え方として、平行部付の試験片の場合には平行部の体積となるが、平行部のない砂時計型の試験片 (Fig. 3参照) の場合には、最大応力の90%以上の応力が作

用する部分の体積と考えるのが一般的である⁸⁾。

疲労破面は軸方向に垂直な横断面に沿って形成される。そのため、疲労破面を観察しただけでは軸方向に平行な縦断面での介在物形状は特定できないことに注意が必要である。つまり、ピレット材のようにあらゆる方向に沿って試験片採取可能な場合は問題ないが、棒材のように軸方向にしか試験片を採取できない場合には、圧延の際に伸びる介在物か否かは区別できない。したがって、棒材の場合にはASTM法¹¹⁾に基づく分類は困難である。

3. 介在物検査の実施結果

以下では、今までに発表した疲労試験結果^{5,13-15)}を用い、ここで提案した介在物検査の有効性を検証する。

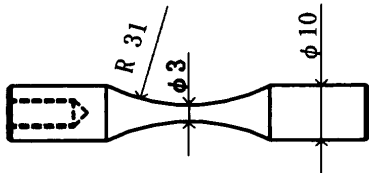


Fig. 3. Fatigue test specimen for ultra-sonic fatigue test machine.

3.1 SNCM439鋼の場合^{13,14)}

3.1.1 疲労試験結果

供試材は金属材料技術研究所（現、物質・材料研究機構）疲労データシート¹⁶⁾で使用した比較的古いSNCM439鋼0.41C-0.29Si-0.74Mn-1.84Ni-0.74Cr-0.22Mo mass%である。熱処理はソルトバスを使用して870°C×30分、空冷で焼準を行い、845°C×30分、油冷で焼入れた後、電気炉を使用して160°C×60分、水冷の低温焼戻しを行った。その結果、ビッカース硬さでHV600程度の高強度材となった。疲労試験には超音波試験機（20kHz）、高速油圧サーボ試験機（600Hz）、電磁共振式試験機の3種類を使用した。代表例として超音波試験機で使用した試験片形状をFig. 3に示すが、試験片は平行部のない砂時計型で最小断面部の直径はφ3mmに統一してある。

疲労試験結果をFig. 4に示し、破面の代表例をFig. 5に示す。ほとんどの試験片は内部破壊し、内部破壊の起点はすべてAl₂O₃介在物だった。ちなみに、この材料は、JISで示されている550~650°C程度の温度で焼戻すと、ビッカース硬さでHV320程度の硬さになり、疲労試験では内部破壊を生じない¹⁶⁾。したがって、バルクの状態では内部破壊の危険性はないが、表面硬化処理により内部破壊が懸念される材料に該当し、介在物検査を行うためには低温焼

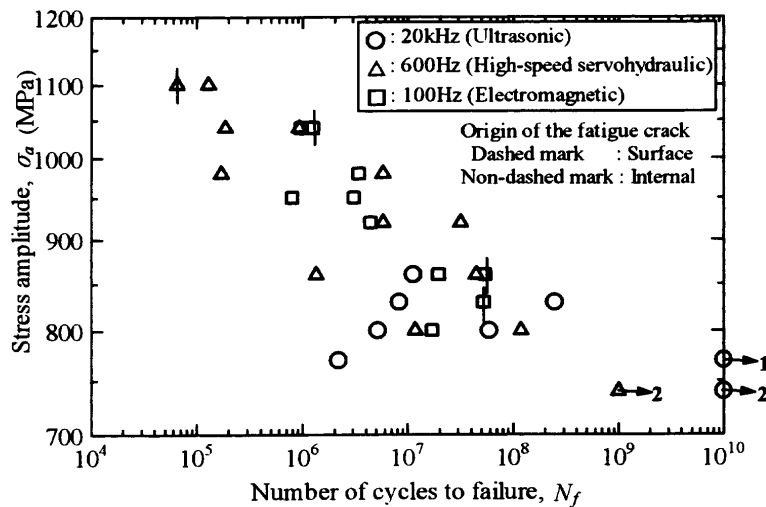


Fig. 4. Fatigue test result for a low-temperature-tempered SNCM439 steel.

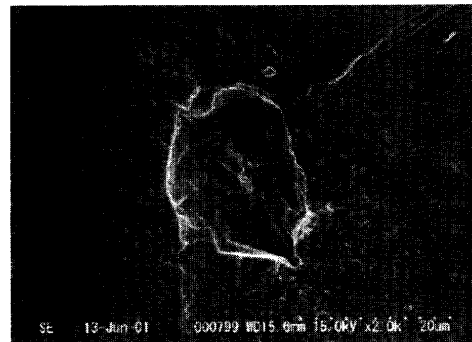
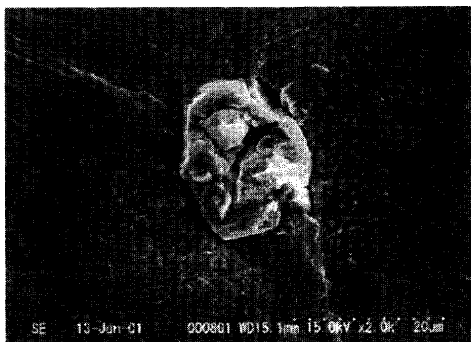


Fig. 5. Fractographs for the low-temperature-tempered SNCM439 steel. An Al₂O₃ inclusion is the fracture site.

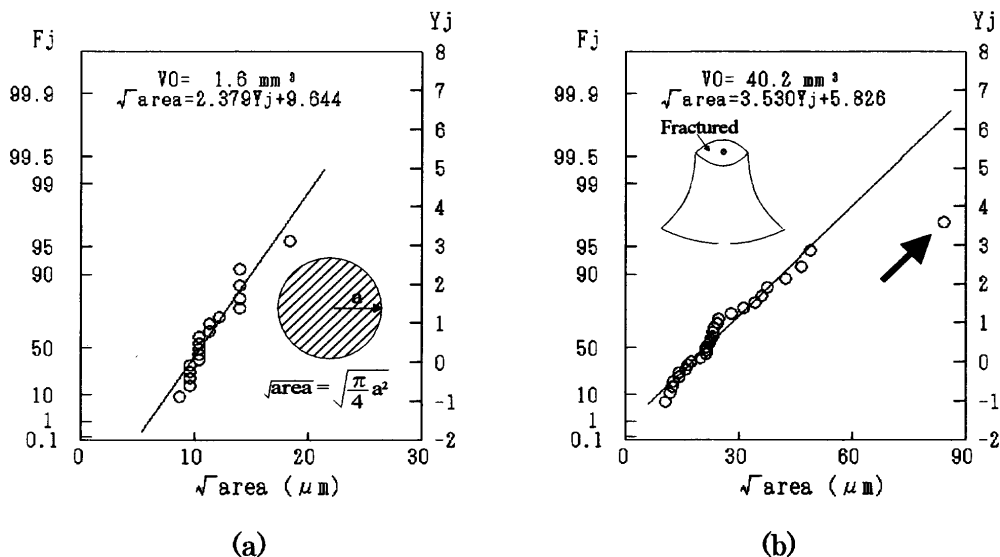


Fig. 6. Inclusion inspection results. (a) is for mirror surfaces. (b) is measured on fracture surfaces after fatigue tests.

戻しによる高強度化が必要である。

3.1.2 介在物検査結果

Fig. 6に、検鏡面に対して行った介在物検査結果と疲労試験による介在物検査結果を示す。検鏡面に対する検査は、150mm²を1視野とし、20視野について最大の介在物寸法を測定した。その結果、2視野について介在物が検出されず、18点が有効データとなった。疲労試験による検査は総数36本の試験片について行い、表面破壊した4点を除く32点が有効データとなった。検鏡面に対する検査では検査体積を定義しにくい、1視野の面積に平均介在物寸法を乗じて検査体積を見積もる考え方⁶⁾が一般的で、今回の検査の場合では1.6mm³となる。一方、疲労試験による検査では、最大応力の90%以上の応力が作用する領域を危険体積(=検査体積)とすると、40.2mm³である。したがって、疲労試験の場合の検査体積は検鏡面に対する場合の約25倍となる。これは、疲労試験での試験片1本の検査が検鏡面の場合の25視野分に匹敵することを意味する。

この検査体積の差は、Fig. 6の結果に如実に現れていて、疲労試験による検査の方が明らかに大きな介在物を検出している。また、疲労試験による検査ではFig. 6(b)中に矢印で示しているように、極値分布の回帰線からはずれた極端に大きな介在物が検出された。これは極値統計解析では予測しえない大きな介在物である。このようなことは疲労試験ではまれに経験することであるが、極端に大きな介在物を検出する可能性が高くなることも、検査体積が大きくなったことのメリットであるといえる。

統計学的には、検鏡面に対する検査結果から極値統計に基づいて疲労試験片の危険体積中に存在する最大介在物寸法を予測した場合、その予測値は実際に疲労試験を行った場合の平均値と一致しなくてはならない。本検査の場合、前者が17μm、後者が22μmとなり、比較的よい一致と

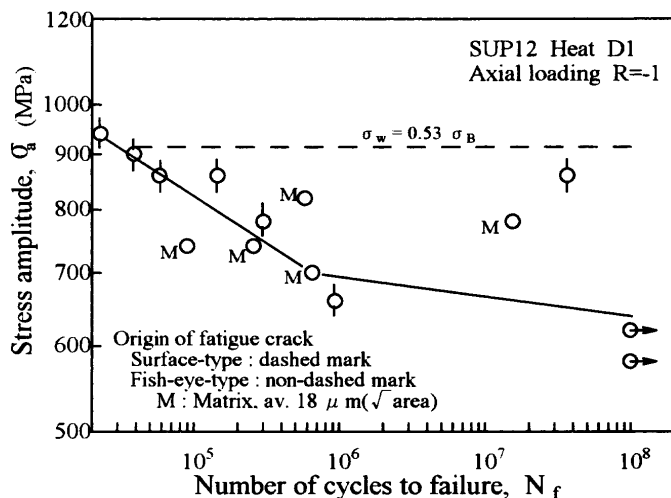


Fig. 7. Fatigue test result for SUP12 steel.

なった。このことから、双方とも妥当な検査結果を与えている。

3.2 SUP12鋼の場合⁵⁾

3.2.1 疲労試験結果

供試材は実験室で溶製されたSUP12鋼0.57C-1.48Si-0.72Mn-0.73Cr mass%で、介在物軟質化がなされている。熱処理はソルトバスを使用して845°C×30分、空冷で焼準を行い、845°C×30分、油冷で焼入れた後、430°C×60分、水冷の焼戻しを行った。ビッカース硬さはHV520程度である。疲労試験には電磁共振式試験機を使用し、R=-1で試験した。試験片は砂時計型で最小断面部の直径はφ6mmである。

Fig. 7に疲労試験結果を示すが、介在物起点内部破壊は生じず、組織割れが内部破壊の起点となった。破面の代表例をFig. 8に示すが、組織割れ寸法の平均値は18μmであった。

3.2.2 介在物検査結果

SNM439鋼と同様の条件で行った検鏡面に対する介在物検査では、酸化物系複合介在物が検出され、極値統計処理により介在物寸法は $8\mu\text{m}$ と推定された。一方、疲労試験ではこの介在物は問題とならず、組織割れが疲労破壊の起点となった。この材料の組織解析を行った結果¹⁷⁾、組織割れとほぼ同程度の寸法の下部ベイナイト組織が存在することがわかった。したがって、この場合の組織割れの原因は下部ベイナイト組織であると考えられている。

以上のSUP12鋼の例は、バルクの状態で内部破壊の危険性が高い場合に該当する。そのため、実用条件で熱処理を行う必要があるが、その結果、介在物よりも組織割れの方が問題であることが判明した。このように、組織割れが疲労破壊の原因となる場合には、疲労試験を行う以外に欠陥を検出する方法はない。

3.3 SCM440鋼の場合¹⁵⁾

3.3.1 疲労試験

供試材は比較的最近に製造された新しいSCM440鋼0.42C-0.19Si-0.80Mn-1.16Cr-0.16Mo mass%である。熱処理はソルトバスを使用して $880^{\circ}\text{C}\times 30$ 分、空冷で焼準を行

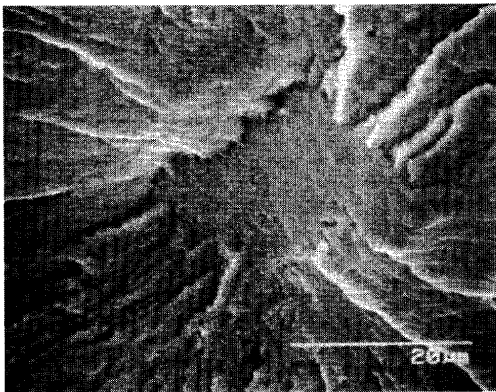


Fig. 8. Fractograph for SUP12 steel. Matrix cracks are the fracture sites.

い、 $880^{\circ}\text{C}\times 30$ 分、油冷で焼入れた後、 $200^{\circ}\text{C}\times 60$ 分、水冷の低温焼戻しを行った。ビッカース硬さはHV560程度である。疲労試験には超音波試験機と電磁共振式試験機を使用し、 $R=-1$ で試験した。試験片は砂時計型で、最小断面部の直径はそれぞれ $\phi 3\text{mm}$ と $\phi 3.5\text{mm}$ である。

疲労試験の結果をFig. 9に示す。応力振幅 $860\sim 1100\text{MPa}$ の範囲で内部破壊が生じ、内部破壊の起点として Al_2O_3 介在物、TiN介在物、組織割れの3種類が出現した。

3.3.2 介在物検査結果

検鏡面に対する検査は前節と同様の条件で行った。その結果、20視野すべてで Al_2O_3 介在物が検出され、極値統計による整理では $\phi 3.5\text{mm}$ の試験片1本に対して $12\mu\text{m}$ と推定された。それに対し、疲労試験では内部破壊した12点の有効データとなり、内部破壊起点として6点が Al_2O_3 介在物、3点がTiN介在物、3点が組織割れだった。検鏡面に対する検査でもTiN介在物は検出されていたが、 Al_2O_3 介在物の方が寸法が大きかったため、極値統計処理において Al_2O_3 介在物のみが残った。この結果は必ずしも寸法が最大の介在物が疲労破壊の原因となるとはかぎらないこと示している。

疲労試験で複数種の欠陥が内部破壊起点として出現した場合には、欠陥の種類ごとに分けて解析する必要がある。今回の場合はデータ数が少ないので、極値統計による解析は行わず、欠陥寸法の平均値で議論する。 Al_2O_3 介在物に関しては、6点の平均寸法は $13\mu\text{m}$ で検鏡面に対する検査結果とよく一致している。したがって、 Al_2O_3 介在物に関しては妥当な検査結果が得られている。TiN介在物に関しては、3点の平均寸法は $2\mu\text{m}$ となり、非常に小さい。 $2\mu\text{m}$ という小さな介在物が疲労破壊の原因となるとは考えにくいので、この場合はTiN介在物が破面の中に埋まっている⁸⁾、破面上に真の寸法が現れていない可能性が高い。組織割れに関しては、破面の代表例をFig.10に示すが、Fig.10(a)のように比較的是っきりと組織割れの領域を定義

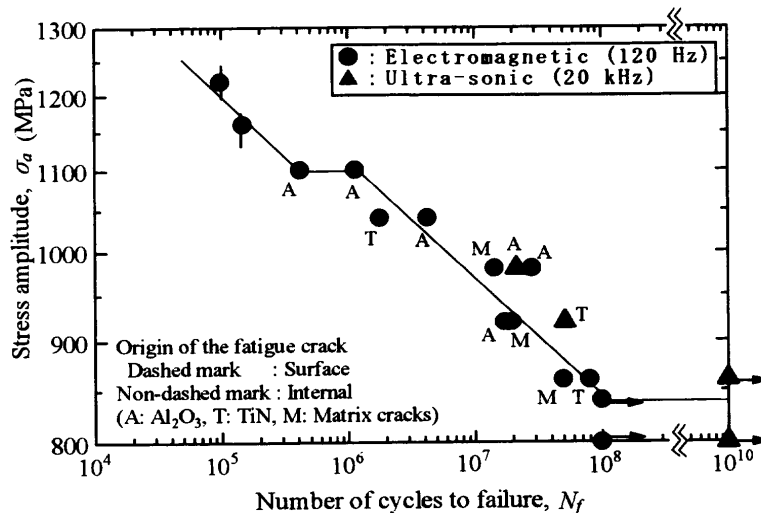


Fig. 9. Fatigue test result for SCM440 steel.

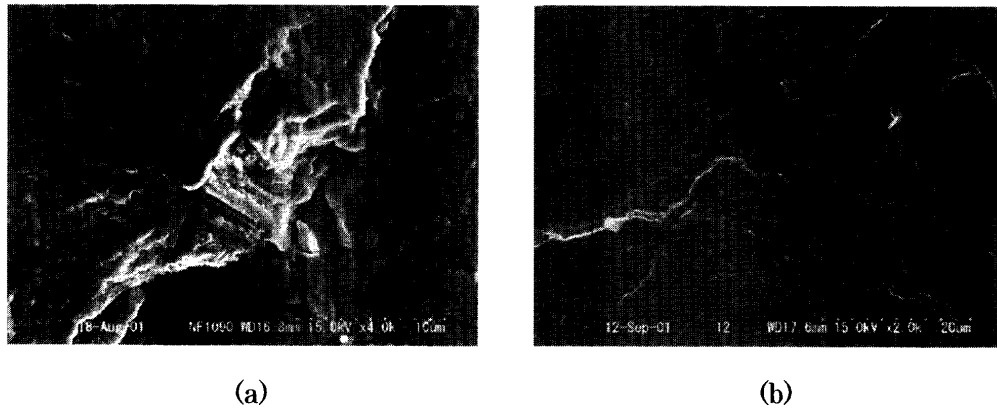


Fig. 10. Fractographs for the SCM440 steel. Matrix cracks are the fracture sites. (a) is the case that the fracture site is clearly defined and (b) is not the case.

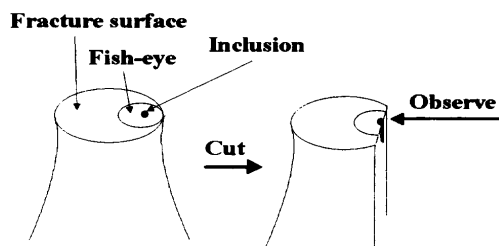


Fig. 11. Procedure for observation of an inclusion shape along an axial direction.

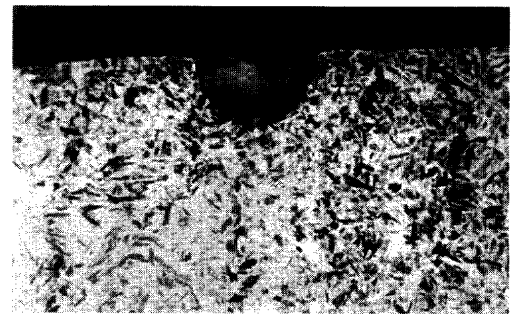


Fig. 12. Observation of an inclusion shape along axial direction. The inclusion was found un-deformable D type inclusion in ASTM standard.

できる場合と、Fig.10(b)のように組織割れの領域をはっきりと定義できない場合がある。この2例は、起点付近をEDAXで分析してもFeしか検出されなかったため、組織割れと分類したが、SUP12鋼の場合 (Fig. 8) のような典型的なものと同か否かについては、現時点では結論できない。これらの点から、SCM440鋼の場合には組織割れの寸法を解析することはできなかった。

以上の結果をまとめると、疲労破壊の原因となるか否かについては、どの欠陥についても検査可能であった。しかし、寸法の測定は Al_2O_3 介在物については可能であったが、TiN介在物と組織割れの場合には困難である場合が多かった。

4. 考察

4.1 ASTM法に準じた介在物の分類法

2.3節で述べたように、棒材の場合、疲労破面を観察しただけでは、圧延の際に変形する介在物か否かを判断できず、ASTM法による分類はできない。しかし、原理的には試験後の破面を、Fig.11に示すように、起点を横切るように縦断面に沿って切断し、切断面を観察することにより、圧延の際に伸びる介在物か否かを判断することができ、ASTM法による分類が可能となる。最近では、精密切断機と光学顕微鏡を組合わせて $1\mu m$ 程度の位置決め精度で切

断できる装置が市販されているので、破面の切断作業も比較的容易になってきた。

SCM440鋼の破面について、実際に切断・観察を行った結果をFig.12に示す。Fig.12の例では、切断後に研磨とエッチングを行い、組織を出現させているが、介在物みに着目する場合は切断するだけでよい。この結果から、圧延の際に伸びない球状の介在物で、ASTM法の分類によるD系介在物 (Globular Oxide) であると確認できた。

4.2 破面観察で介在物寸法が測定可能な場合と不可能な場合

SCM440鋼の場合、 Al_2O_3 介在物に関しては介在物寸法の測定が可能だったが、TiN介在物の場合にはできなかった。この違いは、前報⁸⁾でも述べたように、介在物と母地が剥離するか否かと介在物の弾性定数に関係する。 Al_2O_3 介在物の場合には、Fig. 5に示すように破面の一方に介在物が残り、他方には介在物が抜落ちた穴が残る。したがって、この場合は介在物と母地は剥離している。ところが、TiN介在物の場合には、介在物が割れて疲労き裂が発生する場合と介在物の頂点の部分から疲労き裂が発生する場合がある。それぞれの破面の代表例をFig.13, 14に示すが、この場合には介在物と母地は剥離しない。これらの破壊形態を模式的にまとめると、Fig.15のようになる。

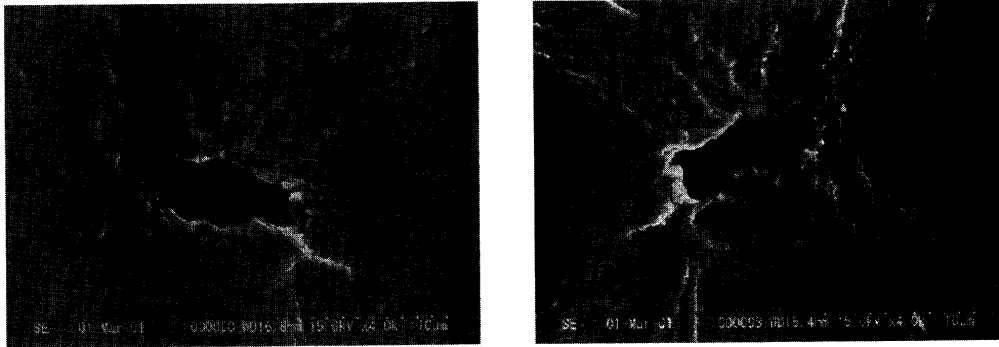


Fig. 13. Fractographs for the SCM440 steel. The TiN inclusion is crack in this case.

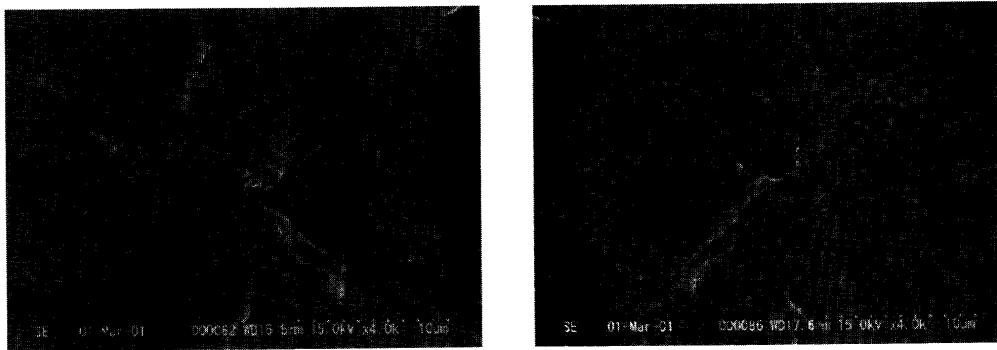


Fig. 14. Fractographs for the SCM440 steel. Only top of the TiN inclusion appears on the fracture surface in this case.

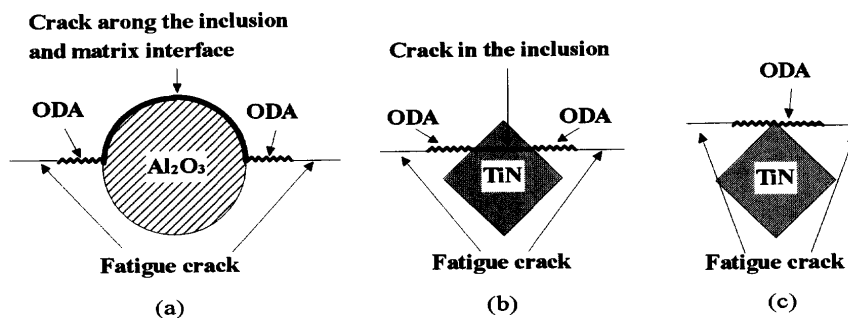


Fig. 15. Fatigue crack initiation sites. (a) is an interface crack between the inclusion and matrix, (b) is a crack in the inclusion and (c) is the top of the inclusion. (a) is the case of an Al_2O_3 inclusion and (b) and (c) are the cases of TiN inclusions.

Al_2O_3 介在物のように母地と剥離する場合には、穴と同様になり、応力集中の最大点である介在物の赤道の付近から疲労き裂が発生する。そのため、確実に破面上に介在物全体が出現する。これに対して、TiN 介在物のように母地と剥離せず、介在物が割れるか、介在物の頂点から疲労き裂が発生する場合には、Fig.15からわかるように破面上に介在物全体が出現するとはかぎらない。Fig.15(c)のようになる理由は、弾性定数が母地より高い硬質介在物が母地と剥離しない場合には、介在物の頂点の部分が応力集中点となるからである。一方、軟質介在物の場合には、穴の場合と同様に赤道付近が応力集中点となるため、剥離しなくても介在物の最大径が破面上に出現する可能性が高い。

以上の議論から、母地と剥離する介在物か剥離しなくて

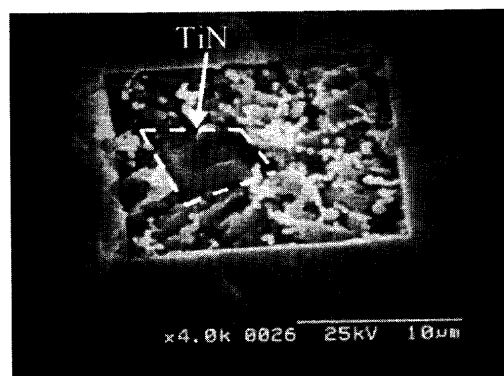


Fig. 16. Fracture surface after FIB milling around the fracture site of a TiN inclusion.

も軟質介在物であれば、破面を観察することで介在物寸法を測定できる。さらに、前節で述べたように、介在物を含めて破面を縦割りにすると、ASTM法による分類も可能である。一方、母地と剥離しない硬質介在物については、破面観察では介在物寸法を測定できない。母地と剥離しない硬質介在物に関しても、Fig.16に示すように、FIB (Focused Ion Beam) で破面を掘ることにより、原理的には真の介在物寸法を測定することができる。また、破面を縦割りにする方法でも原理的には可能である。ただし、精密切断機やFIBを使用する方法は手間とコストがかかるので、実用的な手段として考えるには工夫が必要である。

5. 結論

本報では、超音波疲労試験による介在物検査法を提案し、SNCM439鋼、SUP12鋼、SCM440鋼の3鋼種について疲労試験による介在物検査の有用性を実証した。SNCM439鋼は、比較的大きな Al_2O_3 介在物が存在する例で、SUP12鋼は組織割れが問題となる例、SCM440鋼は複数種の欠陥が起点として出現する例だった。その結果、以下のような結論を得た。

(1) SNCM439鋼では、 Al_2O_3 介在物が内部破壊の原因となった。疲労試験による介在物検査では、検鏡面に対する検査よりも検査体積が大きくなり、より大きな介在物を検出できた。また、極値統計では予測しえない極端に大きな介在物も検出できる可能性が高いことがわかった。

(2) SUP12鋼では、介在物は内部破壊の原因とならず、組織割れが問題となった。SUP12鋼の場合、組織割れの寸法の測定と原因となる組織の解析ができた。

(3) SCM440鋼では、 $10\mu m$ 前後の Al_2O_3 介在物、TiN介在物、組織割れの3種類が内部破壊の原因となった。この場合、必ずしも最大寸法の介在物が疲労破壊の原因とならなかった。 Al_2O_3 介在物については、寸法を測定することができ、検鏡面に対する検査結果と比較しても妥当な結果が得られたが、TiN介在物と組織割れに関しては寸法を

測定することが困難だった。

(4) Al_2O_3 介在物のように母地と剥離する介在物については、破面観察で介在物寸法を測定できるが、TiN介在物のように母地と剥離しない硬質介在物の場合や組織割れに関しては、破面観察で寸法の測定が困難であることがわかった。

(5) 疲労試験による介在物検査でも、破面の切断やFIBによるマイクロミリングにより、原理的にはASTM法に基づく介在物の分類やTiN介在物の寸法測定が可能なることを実証したが、手間がかかることから、コストの面で問題が残った。

文 献

- 1) S.Nishijima and K.Kanazawa: *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **22** (1999), 601.
- 2) K.J.Miller and W.J.O'Donnell: *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **22** (1999), 545.
- 3) Y.Murakami, T.Nomoto and T.Ueda: *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **22** (1999), 581.
- 4) T.Abe and S.Matsuoka: *Trans. JSSR*, **46** (2001), 19.
- 5) T.Abe, Y.Furuya and S.Matsuoka: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A*, **67** (2001), 1988.
- 6) 村上敬宜: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂, 東京, (1993), 94.
- 7) 塗 嘉夫, 北野修平: 特開2001-159627, (2001).
- 8) Y.Furuya, S.Matsuoka and S.Takagi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A*, **68** (2002), 41.
- 9) T.Wu and T.Bathias: *ASTM STP*, **1231** (1994), 598.
- 10) T.Sawai, Y.Kimura, K.Tsuzaki, E.Takeuchi and S.Matsuoka: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A*, **68** (2002), 49.
- 11) ASTM standard, E45, (1997).
- 12) H.Ishii, K.Yamanaka and K.Tohgo: *Mat. Sci. Res. Int. (JSMS) Special technical publication I, JSMS, Kyoto*, (2001), 59.
- 13) Y.Furuya, S.Matsuoka, T.Abe and K.Yamaguchi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A*, **68** (2002), 477.
- 14) Y.Furuya, S.Matsuoka, T.Abe and K.Yamaguchi: *Scr. Mater.*, **46** (2002), 157.
- 15) Y.Furuya and S.Matsuoka: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A*, in press.
- 16) NRI Fatigue Data Sheet No. 25, National Research Institute for Metals, Tokyo, (1981).
- 17) K.Miyahara, S.Matsuoka and K.Tsuzaki: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 1181.