

表面 SH 波を用いた金属疲労非破壊評価技術の開発

加工技術課 山岸英樹 土肥義治* 森本英樹 氷見清和*** 藤城敏史***

1. 緒言

機械構造物の破損不具合において、その原因の大半は金属疲労破壊と言っても過言ではない。設計段階での十分な寿命計算、試作耐久試験による寿命確認を実施しても、部品・組立不良、アブユースなどに起因する不測の破壊を免れることは難しい。このため、実機そのものの金属疲労を評価するべく、これまで X 線回折をはじめ様々な手法が試みられているが、現実的にフィールドで精度良く評価可能な手法は、まだ開発されていない現状にある。

そこで本研究では、簡便な金属疲労非破壊評価を可能とする技術の開発をねらい、原子もしくは分子レベルの材質変化に対し敏感に影響を受けることが知られている横波超音波¹⁾を用いて、金属疲労が横波超音波に与える影響について検討した。

なお、測定に用いた超音波は SH 波 (Horizontally polarized shear wave) と呼ばれるもので、境界面に傾いて入射した場合、偏向方向が境界面に平行な横波である。つまり、振動面が固体の表面下を伝播しやすい特徴を持つ。またこの波は反射によりモード変換 (横波→縦波) を起こさないため、純粋モードとして取り扱えることから受信波の判定が比較的容易となる利点を持つものである²⁾。

2. 実験方法

2. 1 疲労試験片

疲労試験片の寸法を Fig. 1 に示す。(板厚 3mm, 6mm) 試験片材質は、強度が高く構造用材などとして使用される Al-Cu-Mg 系アルミニウム合金 2024 (T3 処理) を用いた。

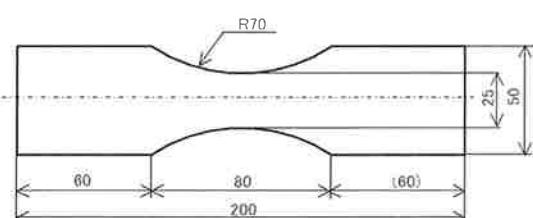


Fig.1 Specimen for test

2. 2 試験および測定方法

金属疲労付加に用いた試験機は、鷺宮製作所社製の油圧サーボ式疲労試験機である。負荷は単軸片振り張荷重 ($R=0$) とし、最大負荷は板厚 3mm の試験片で 63% σ_B , 6mm の試験片で 50% σ_B とした。なお、繰り返し負荷はともに正弦波状、周波数は 30Hz として実施した。それぞれの試験において、その都度途中で疲労試験機から取り外し、応力集中部における荷重方向の超音波透過波を取得した後、続けて疲労試験機にて疲労を付加する作業を試験片が破断するまで繰り返した。

超音波透過波の測定装置構成を Fig. 2 に示す。超音波探触子としてジャパンプローブ社製の対向型斜角 SH 波探触子を用いた。本センサは送受信センサを対向させた門型の一体式センサである (中心周波数 5MHz, 送受信角 21°, 入射点間距離 16mm, 振動子寸法 5×5mm)。センサの押付け荷重は治具により 220N に管理し、サンプリング周波数は 100MHz, アベレージング処理は 16 回として波形を取得した。なお、センサ接触媒体には東芝タンガロイ社製の横波専用オイルを用いた。

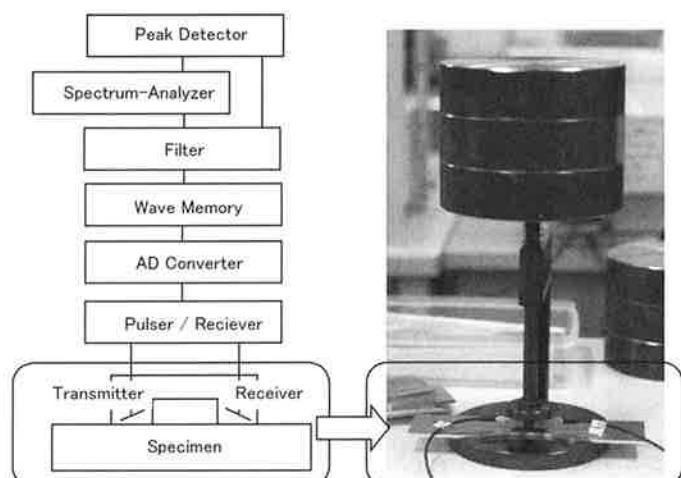


Fig.2 Diagram for measurement

3. 実験結果および考察

3. 1 SH センサ送受信角度による受信波形特性

本実験として金属疲労を評価する前に、SH センサの薄板試験片に対する基礎的伝播挙動を確認するため、センサ送受信角度および試験片板厚を変え、それぞれ波形

*現 企画情報課、**現 プロジェクト推進担当、***現 機械電子研究所

を取得した。その結果を Fig. 3 に示す(縦軸は受信音圧、横軸は伝播時間)。なお、送受信角 19° , 21° は、それぞれ試料が鉄およびアルミニウムの場合に、屈折角が 90° (表面 SH 波)となる様、Snell の法則(1)に基づき各横波音速から計算した臨界角である。

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} \quad (1)$$

$\sin \theta_1$:境界面法線に対するセンサの入射角

$\sin \theta_2$:境界面法線に対する音波の屈折角

V_1 :センサ H 材横波音速, V_2 :試料横波音速

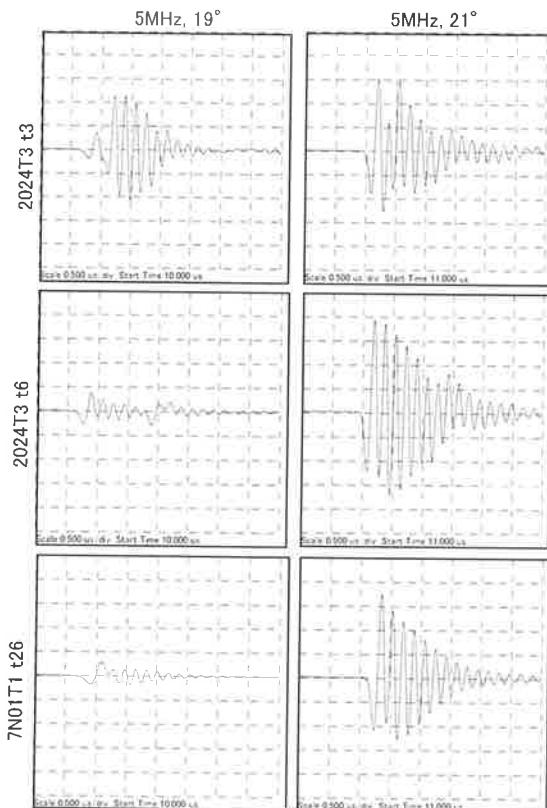


Fig.3 Characteristics of received waveform concerning probe angle and specimen thickness

鉄の音速に適合させた送受信角 19° のセンサでは、アルミニウム合金において音波が内部深くに入り込んでしまい、表層付近を伝播する有効な波形をほとんど得ることができなかつた。一方で、アルミニウムの音速に適合させた送受信角 21° のセンサでは、表層付近をしっかり伝播していることが十分に厚い板厚である 26mm のものから確認できる。しかしながら、この 21° のセンサでも板厚 6mm では底面からの反射波の影響を第 8 波で確認でき、また板厚 3mm のものに至っては第 1 波から底面反射波の影響を受けていると考えられる波形となつた。

以上の基礎的伝播挙動に注意して、5MHz, 21° のセンサを用い、薄板 (3mm, 6mm) における金属疲労評価の本実験を行つた。

3. 2 表面 SH 波による金属疲労評価

(a) 板厚 6mm

Fig. 4 に t6 試験片における取得波形例を示す。解析評価用のパラメータとして、第 1 波伝播時間 T1 のほか、第 1 波および第 2 波音圧の最大値 P1, P2, 積分値 S1, S2 を取得波形データから抽出した。

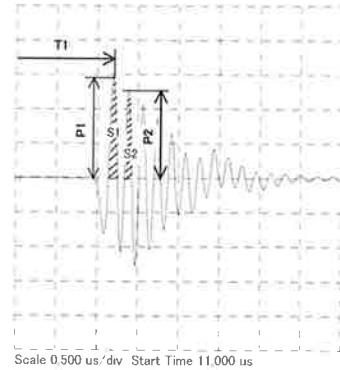


Fig.4 Example of the received wave

Fig.5 に金属疲労度 N/N_f と伝播時間 T1 および横内耗 ΔQ^{-1} の関係を示す(N :繰り返し数、 N_f :破断繰り返し数)。伝播時間は金属疲労に対し $N/N_f=0.8$ 付近を最小値とするようなオーバーシュート特性を示した。また横内耗は $N/N_f=0.5$ 付近まで漸減し、その後破断に向け急増する傾向を示した。両プロットデータから $N/N_f=0.5$ 付近を境に横波超音波が材料内部の変化に大きく影響を受けていることが分かる。つまり急激な転位成長など、疲労挙動的に内部で大きな変化が始まったと推察できる。なお横内耗測定には SH センサではなく垂直型の横波探触子(径 8mm)を用い、試験片くびれ部中央で行った。

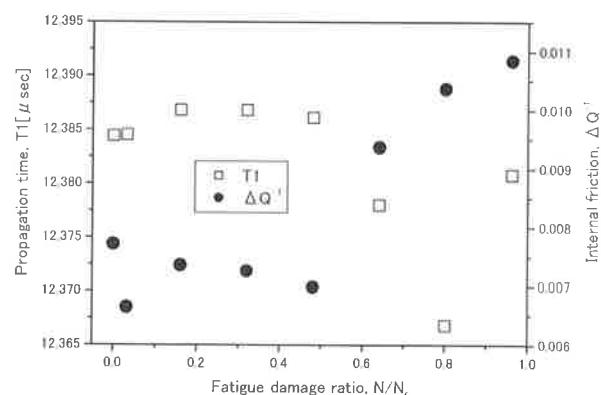


Fig.5 Relationship between fatigue damage ratio and propagation time, internal friction

つぎに、金属疲労度と減衰比 $P1/P2$ および $S1/S2$ の関係を Fig. 6 に示す。両減衰比とも疲労度が大きくなるにつれ減少する傾向を示したが、中でも各ウェブレット内で音圧を積分したものの比である $S1/S2$ は、ピーク音圧の比である $P1/P2$ に比べ良い相関を示す結果となった。

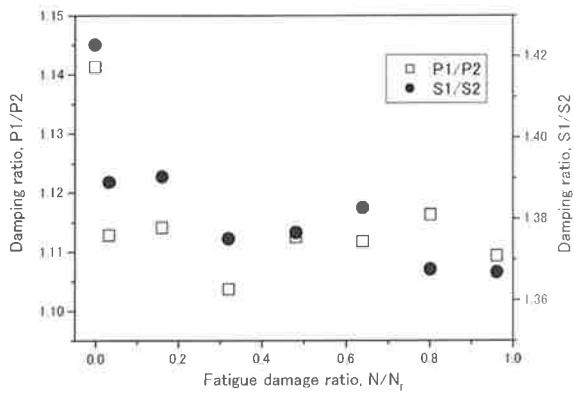


Fig.6 Relationship between fatigue damage ratio and damping ratios

エネルギーflux法に基づく応力負荷時のエネルギーによれば、引張の残留歪みによる負の応力場を伝播する SH 波は表層を伝播しやすくなると考えられる³⁾。つまり、表層のウェブレット減衰比は疲労の増大とともに理論的にも小さくなると考えられ、今回の実験結果に当てはまると言える。

(b) 板厚 3mm

Fig. 7 に t3 試験片における金属疲労度と第 1 波伝播時間 $T1$ の関係を示す。本試験片は 3.1 項で示したとおり、第 1 波から底面反射波の影響を受けるものである。その伝播時間変化は非常に特徴的であり、底面反射波の影響を受けない t6 のものとは全く異なる特性を示した。これには塑性変形に伴う伝播経路の変化が大きく

関係していると考えられる。つまり音速、肉厚、負荷など部材に合わせてセンサの仕様を最適化させ、適当な底面反射波の成分を取り入れることで、大局的なトレンド変換をもとに疲労度を評価できる可能性があることを示す。塑性変形量をはじめ各種パラメータとの相関を精査することは非常に興味深い課題である。

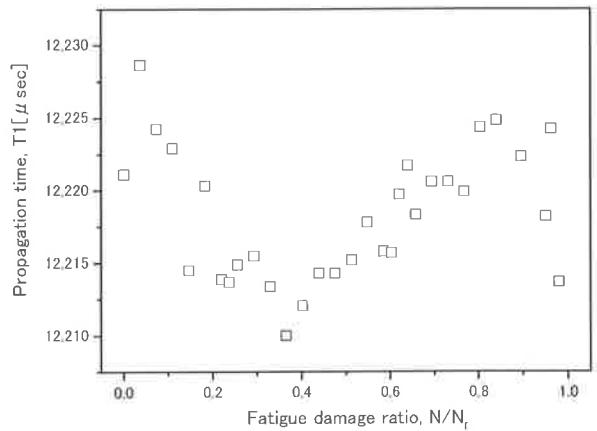


Fig.7 Relationship between fatigue damage ratio and propagation time

4. 結言

簡便な金属疲労非破壊評価技術の開発を念頭におき、アルミニウム合金を対象として表面 SH 波の適用を試みた。SH 波の薄板における基礎的伝播挙動を探るとともに、単軸引張の金属疲労に対する感受性を考察したところ、伝播時間、減衰比などに興味深い有意差を見いだした。

「参考文献」

- 1), 3) 福原幹夫: NEW CERAMICS, No. 11 (1997) p. 21-27
- 2) 福岡秀和: 音弹性の基礎と応用 (1993) p. 18-19

終わりに、本研究推進にあたり数多くご指導を頂いた東北大学 福原幹夫先生に深く感謝致します。

キーワード：表面 SH 波、横波、非破壊検査、金属疲労、アルミニウム合金

Acoustic characteristics of metal fatigue using ultrasonic transmission wave

Processing Technology Section; Hideki YAMAGISHI, Yoshiharu DOI*, Hideki MORIZOTO,
Kiyokazu HIRI*** and Satoshi FUJIKI****

The acoustic characteristics of metal fatigue, 2024T3, were investigated by using surface SH wave. As the result of experiments, we can perceive the following trends. Increasing the metal fatigue, the damping ratio decreases, the propagation time overshoots and the internal friction increases drastically. In conclusion, this method has enough possibility to be applied for easy non-destructive inspection.