

電磁超音波共鳴法による鋼材疲労評価の研究

吉井 徳治＊、島田 道男＊、成瀬 健＊＊

Investigation on Fatigue Process
using Electro-Magnetic Acoustic Resonance(EMAR) system
by
Tokuharu YOSHII, Michio SHIMADA, Takeshi NARUSE

Abstract

Recently, an EMAR(electro-magnetic acoustical resonance) measuring system has come to be in use for precision ultrasonic velocity measurement, which enables stress evaluation of a metallic material based on an acousto-elastic effect. It also serves as an ultrasonic attenuation measuring system with high accuracy owing to the couplantless nature of the EMAR system. In order to collect fundamental technical data for development of a fatigue damage evaluation technique before crack initiation, we carried out ultrasonic measurements with the EMAR system on SM400B and S35C steel specimens, that were fatigued under stress ratio $R=-1$. SM400B specimens were used for velocity and attenuation measurement, and S35C specimens were for acoustical anisotropy measurement. We examined the ultrasonic characteristics value changes during fatigue test in relation with fatigue deterioration index such as fatigue cycle number and plastic strain width of stress-strain curves. The results are as follows: (1)sound velocity decreases as fatigue proceeds, (2)attenuation fluctuates for high stress fatigued specimens, because EMAR signal reduced its amplitude and attenuation measurement becomes tough work, (3)acoustical anisotropy shows similar behavior as plastic strain width. We conducted additional experiments concerning peculiar properties of the EMAR system such as stress effect, specimen size effect, etc.

＊ 輸送高度化研究領域 新材料利用研究グループ

＊＊ 輸送高度化研究領域 インテリジェント加工法研究グループ

原稿受付 平成 年 月 日

審査済 平成 年 月 日

目 次

1. 緒言
2. 実験方法
 - 2.1 試験片
 - 2.2 電磁超音波計測
 - 2.2.1 電磁超音波計測装置
 - 2.2.2 計測条件の設定
 - 2.3 疲労試験方法
3. 実験結果
 - 3.1 電磁超音波計測に影響を与える要因の検討
 - 3.1.1 音響異方性効果
 - 3.1.2 寸法効果
 - 3.1.3 温度効果
 - 3.1.4 応力効果
 - 3.2 疲労計測実験
 - 3.2.1 塑性ひずみ幅挙動
 - 3.2.2 超音波音速
 - 3.2.3 超音波減衰
 - 3.2.4 音響異方性
4. 考察
5. 結言
- 参考文献

1. 緒言

船舶や海洋構造物の大規模な事故は、人命の喪失のみならず海洋環境に与える影響も大きく、その復旧には莫大な費用が発生する。そのため、これらの大型構造物の健全性確保に対する強い要求がある。また、経済活動の一環に組み込まれたこれらの構造物の運用にはコストの視点も欠くことができない。減速経済情勢の下で、コストを考慮した健全性確保への取り組みが求められている。

これらの構造物の経年劣化による事故を考えると、ほとんどが腐食衰耗による鋼板の厚さ減少と波浪荷重による疲労き裂進展を原因としており、その結果、構造物の強度が低下し、通常ならば耐えられるはずの波浪荷重によって、構造物が崩壊している。

腐食衰耗については、超音波厚さ計による衰耗度のチェックが行われ、衰耗した鋼板の切り替え等の補修が行われる。き裂については、もっぱら目視による検出に頼っている。大型構造物のき裂をくまなく探すことは容易でなく、大きなき裂のみを検出補修しているのが実態である。き裂検出は確率的現象と考えられており、大きなき裂ほど検出する確率は大きい、すべて検出できたとする保証はどこにもない。船舶にあっては、近年、検査の強化が図られつつあるが、コスト面の制約から、き裂発生の確率が高い部位を集中的に

検査している。

一方、疲労き裂の発生進展挙動を実験室で観察すると、破断寿命の大半は疲労き裂発生に費やしており、疲労き裂進展が破断寿命に占める割合は高くない。鋼材の疲労劣化は、疲労き裂発生時に急に出現するものではなく、発生に至る期間に疲労による材質劣化がすすみ、疲労き裂発生に至ると考えられる。疲労き裂の検出と共に、疲労き裂発生以前の材質劣化状態を把握することも、構造物健全性評価に重要と思われる。

鋼材の疲労に伴う諸物性値の変化をとらえ、疲労による材質劣化を評価するための研究が、X線^{1)~2)}、超音波^{3)~9)}や電磁気的手法^{10)~14)}を用いて行われた。これらは疲労の進行に伴う特徴的な変化の検出に成功しているものの、疲労発生時期や疲労寿命評価にはまだ精度が不足している。なかでも超音波による鋼板の表裏面の間を往復する超音波多重反射波を利用した方法は、鋼材内部の劣化状態を反映する。疲労によって発生した転位やすべり線が超音波の減衰に与える影響が種々調べられている。しかしながら、高精度な測定を要求することから、実用化に至っていない。

近年、新しい超音波計測手段として、電磁超音波共鳴法（以下、電磁超音波法）が利用可能になった。電磁超音波法は高精度な音速測定が可能のため、音弾性効果を利用した応力測定に利用されている。さらに、電磁的作用を超音波発生受信に利用するため、従来法で不可欠であった接触媒質が不要となり、高精度減衰測

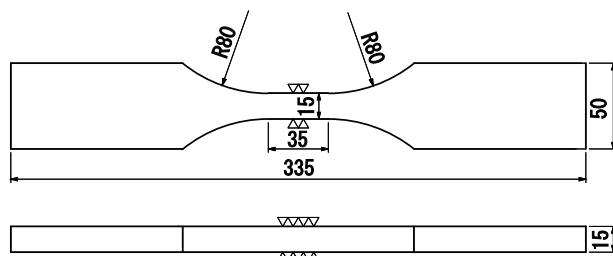


図-1 試験片形状

表-1 供試材の化学成分及び機械的性質

鋼 種	化学成分wt.%		機械的性質MPa	
SM400B	C	0.1	σ_{LY}	295
	Si	0.21	σ_{UY}	322
	Mn	1.13	T.S	441
	P	0.15		
	S	0.04		
S35C	C	0.36	σ_{LY}	383
	Si	0.24	σ_{UY}	401
	Mn	0.79	T.S	679
	P	0.003		
	S	0.006		
	Cu	0.16		
	Ni	0.02		
	Cr	0.05		

定も可能とされている。

本報告は、電磁超音波法による鋼材の疲労劣化評価の性質を明らかにするために行った試験について、取り纏めたデータの紹介と多少の考察を加えたものである。

試験は、(1)電磁超音波計測上の精度を確保するための電磁超音波計測の基本的性質(寸法効果、応力効果、温度効果等)、(2)疲労に伴う電磁超音波計測値変化について実施した。後者は、疲労に伴う弾塑性挙動の変化を疲労劣化の指標として計測し、疲労劣化との関係を調べた。

2. 実験方法

2.1 試験片

疲労試験片として、疲労に伴う音速変化と減衰変化を評価するため平行部幅15mmの試験片と、疲労に伴う音響異方性変化を評価するための平行部幅35mmの2種類を用意した。前者は、厚さ19mm制御圧延鋼板のSM400Bから図-1に示す形状に切り出し、平滑研磨盤による表面研磨を行ったものである。後者は、熱間圧延鋼板S35Cから平行部幅(35mm)以外は前者と同様に加工した試験片である。2つの鋼材の化学成分と機械的性質を表-1に示す。

2種の試験片は、どちらも圧延方向を試験片長手方向にして加工した。

また、電磁超音波の特性(寸法効果)を解明するため、幅(35mm)以外は図-1と同一形状のSM400B鋼試験片と300mm×300mmで厚さが図-1と同一のSM400B試験片を用意した。

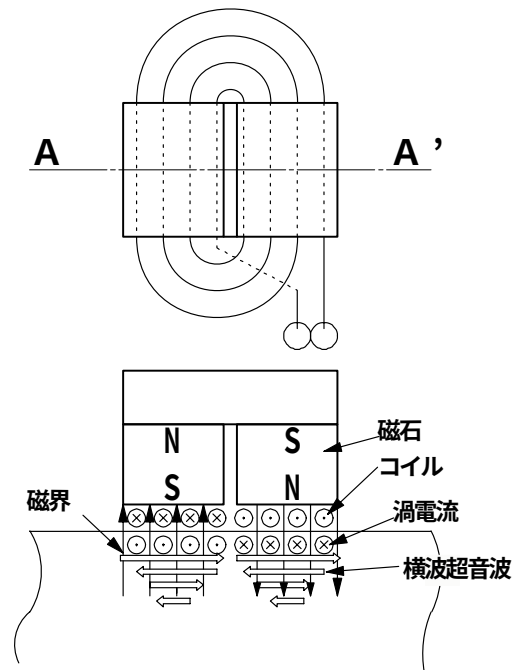


図-2 電磁超音波センサの構造と動作

2.2 電磁超音波計測

2.2.1 電磁超音波計測装置

超音波計測の多くは圧電振動子を内蔵した従来型センサを用いるが、超音波の入射・検出には接触媒質を探触子と被測定部の間に塗布し、超音波の伝搬を助けている。このため接触媒質のわずかな厚さの違いが測定に影響する。そこで接触媒質を用いない電磁超音波共鳴法が開発された^{15),16)}。

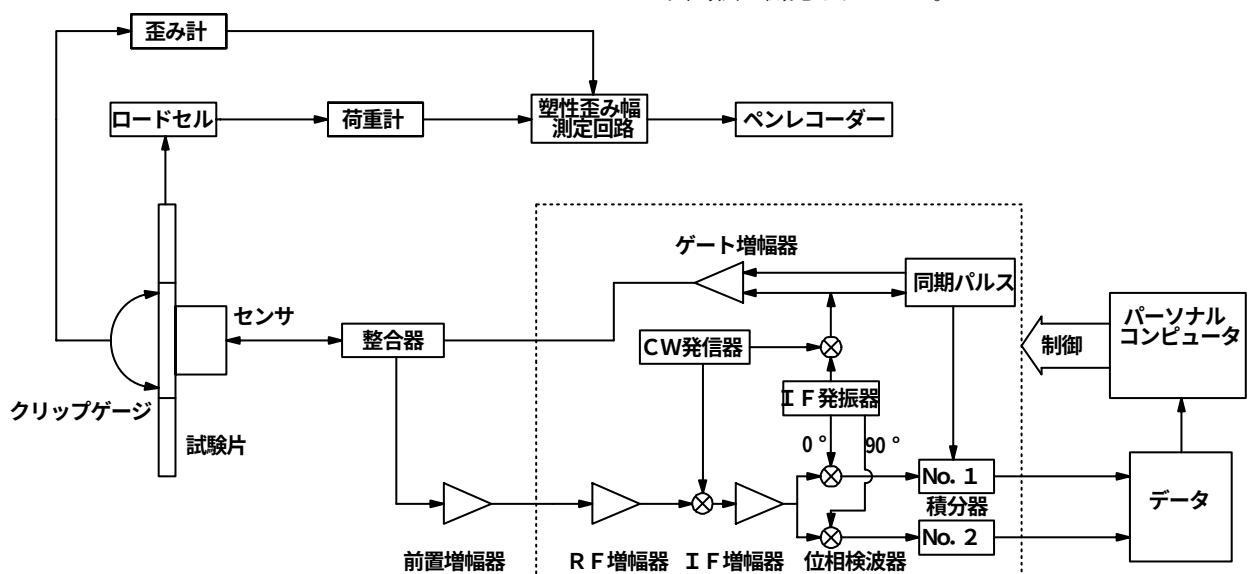


図-3 電磁超音波共鳴法を用いた実験装置

電磁超音波センサは、図－２に示すとおり、コイルと永久磁石から構成されている。コイルに高周波電流を流すと導体表面に逆向きの渦電流が発生し、その渦電流と磁石による磁界との相互作用によって、表面に平行方向の振動が鋼板表層部に生じる。この振動が横波となって鋼板板厚方向に伝搬する。検出は発生と逆の現象によりコイルに生じた高周波電圧を利用する。

永久磁石が鋼板から離れると電磁超音波の送受信感度が低下するので、コイルの厚さは薄いことが望ましい。そのため、厚さ 0.7mm のプリント基板で製作したコイルを実験に用いた。プリント基板上に形成したコイルの形状は、平行部 15 × 25mm、ピッチ 0.22mm、巻き数 28T であり、素線断面は幅 0.22mm、厚さ 55 μm である。磁石は 16mm 角のコバルトサマリウム磁石を使用した。

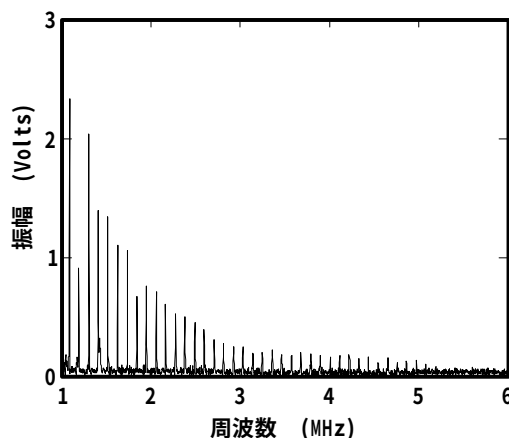
電磁超音波共鳴計測システムのブロック図を疲労試験のシステムと共に図－３に示す。電磁超音波センサはデジタルシンセサイザ(CW 発振器)が発生する周波数を中間周波数(IF 発信器)と混合して得られる周波数によって駆動される。駆動周波数と同一の横波超音波が発生し、平板試験片では表裏面で反射を繰り返す。駆動周波数は、デジタルシンセサイザによって掃引され、周波数が式(1)を満たすときに反射波は重なり合い、検出信号が極大化する。

$$F = \frac{nc}{2d} \quad \dots\dots\dots(1)$$

F : 共鳴周波数 n : 次数 c : 音速 d : 板厚

検出信号はデジタルシンセサイザの発振信号と混合され、中間周波数に変換される。その後互いに 90 度の位相差を持つ中間周波数による位相検波と時間積分により、振幅の実数成分と虚数成分が計算され、その絶対値振幅が 2 乗和の平方根から求められる。このような複雑な処理を行う理由は、電磁超音波センサの感度を補い、実用的な感度を得るためである。

以上の、電磁超音波共鳴システムにより、



図－４ 電磁超音波共鳴スペクトル

①共鳴状態における信号強度の極大化

②位相検波による信号成分のみの抽出

③積分による高周波雑音成分の低減

の３者の効果を得て、S/N比を向上させている。

電磁超音波共鳴システムでは、共鳴周波数の高精度測定ができるので、従来の超音波計測装置では得られない高精度な音速測定が可能となった。これを用いて、材料の音弾性効果を利用した応力測定^{17),18)}が行われている。

また、電磁超音波共鳴システムでは、超音波の送受信に従来型センサでは不可欠であった接触媒質を必要としないため、超音波エネルギーのセンサへの漏洩がなく、超音波減衰の測定にも有利と考えられている。

図－１の試験片上に電磁超音波センサをセットし、1 ～ 6MHz の範囲で測定した周波数スペクトルの例を図－４に示す。共鳴数波数の間隔 ΔF は、式(1)から次の通り求められる。

$$\Delta F = \frac{c}{2d} \quad \dots\dots\dots(2)$$

試験片厚さ(15mm)と鋼の横波音速(3230m/sec)を式(2)に代入すると 0.1077MHz が得られ、図－４から得られる周波数間隔と正確に一致した。1 ～ 6MHz における周波数間隔の標準偏差は 0.00214MHz であり、共鳴周波数の測定精度が高いことが分かる。振幅値は、周波数の増加とともに低下しているが、周波数増加と共に電磁超音波センサコイルのインピーダンスが増加するためと考えられた。

従来型の圧電素子を利用した超音波センサでは、圧電素子の共振を利用しているため、図－４に示ような広範囲の周波数範囲での周波数スペクトル取得は不可能である。

電磁超音波センサの駆動周波数を共鳴周波数に設定すると、平板中の超音波は共鳴状態となる。この時、電磁超音波センサの駆動を止めると、電磁超音波センサが検出する超音波振幅は指数関数的に低下する。数式で表現すれば、次式の通りである。

$$A(t) = A_0 \exp(-\alpha t) \quad \dots\dots\dots(3)$$

α は減衰定数である。接触媒質が無いので、表裏面反射において鋼板外へ漏れる超音波エネルギーは無いと考えて良く、表裏面における反射損失を考慮する必要がない。

以上のことから、音速(共鳴周波数)の高精度決定機能を用いて音弾性効果に基づく加工状態評価や応力測定、減衰測定機能を利用した材料劣化に伴う材質変化の検出に有効な手段となると考えられる。

2.2.2 計測条件の設定

電磁超音波法により疲労劣化に伴う計測値変化を検出するに際し、計測値に影響すると思われる温度の影響、応力の影響、材料異方性の影響、試験片寸法の影響

響についてあらかじめ実験的に検討した。これらの検討内容及び以下に記した計測条件の設定理由は、実験結果の章で説明する。

超音波減衰測定用試験片（平行部幅15mm）については、疲労試験片を恒温槽に入れ試験片温度を20℃の状態に計測した。また、試験片寸法効果の影響を避けるため、平行部幅を15mmとし、かつ超音波振動方向を試験片長手方向（疲労荷重方向）に一致させた。

音響異方性測定用試験片は、超音波振動方向を試験片長手方向と幅方向の2種で測定するので、平行部幅は35mmとした。ただし、試験片幅の影響があるので、減衰の測定は行っていない。また、この場合、計測容易な共鳴周波数のみの測定であり、疲労試験機に取り付けた状態で測定した。

2.3 疲労試験方法

疲労試験は20トン油圧サーボ疲労試験機を用い、応力振幅一定の正弦波荷重による応力比 $R=-1$ の条件で実施した。繰返し速度は応力振幅により適宜変えた(0.3～1.2Hz)。

疲労の進行過程を監視するため、試験片中央部に標点間隔35mmのクリップゲージを取り付け、試験片中央部におけるひずみを常時計測した。疲労初期では、ひずみと公称応力の関係は1本の直線であるが、疲労が進行すると、載荷時と除荷時のひずみに差異を生じる。両者の線図の間隔を塑性ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ と定義し、疲労による劣化の進行の目安として、これを監視しつつ疲労試験を実施した。

電磁超音波計測は、破断に至るまでの塑性ひずみ幅挙動の要所要所で疲労試験を停止して行った。

3. 実験結果

3.1 電磁超音波計測に影響を与える要因の検討

3.1.1 音響異方性効果

電磁超音波センサは横波を発生させるが、その振動方向は鋼板表面に平行で、かつコイル電流の方向に直角である。従って、電磁超音波センサの方向を変えることにより鋼板中を伝搬する横波超音波の振動方向制御が可能である。

図-5はS35C(平行部35mm幅)で得られた横波超音波の振動方向による共鳴スペクトルの一例である。きれいな共鳴スペクトルの得られる周波数帯で実験し、3.1.2の寸法効果の影響を避けた。振動方向は、上が圧延方向（長手方向）に平行、中央が圧延方向に45度、下が圧延方向に直角である。中央には、上下のスペクトルのピークが2つとも出現しており、そのピーク周波数は、それぞれ上下のピーク周波数に正確に一致している。振動方向を圧延方向に45度に設定した中央の場合には、横波超音波は、振動方向が圧延方向と圧延方

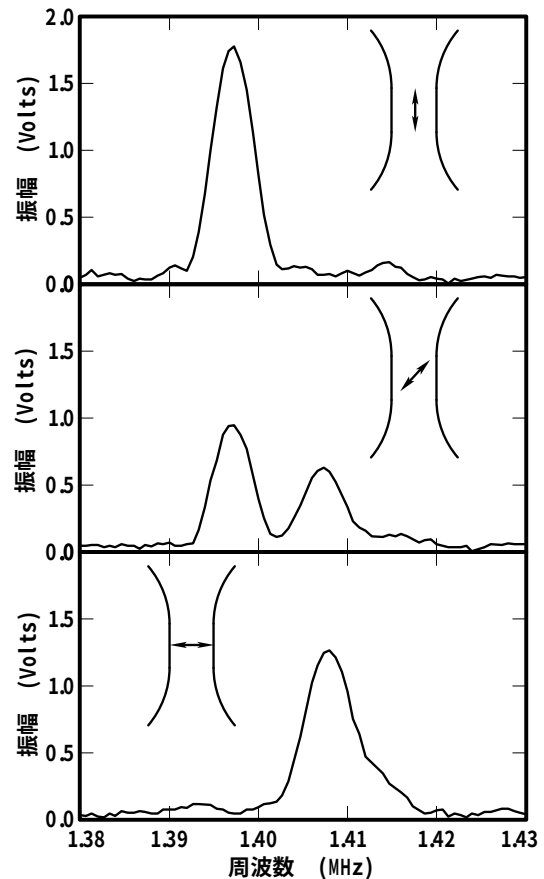


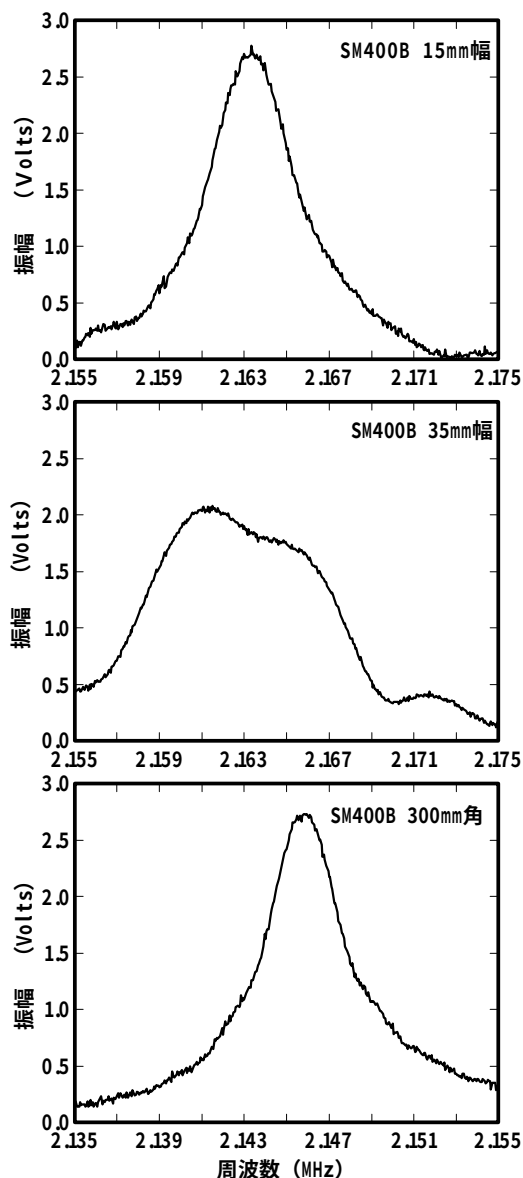
図-5 振動方向による共鳴スペクトル変化

向に直角方向の横波成分に分離して伝搬していると考えられている。

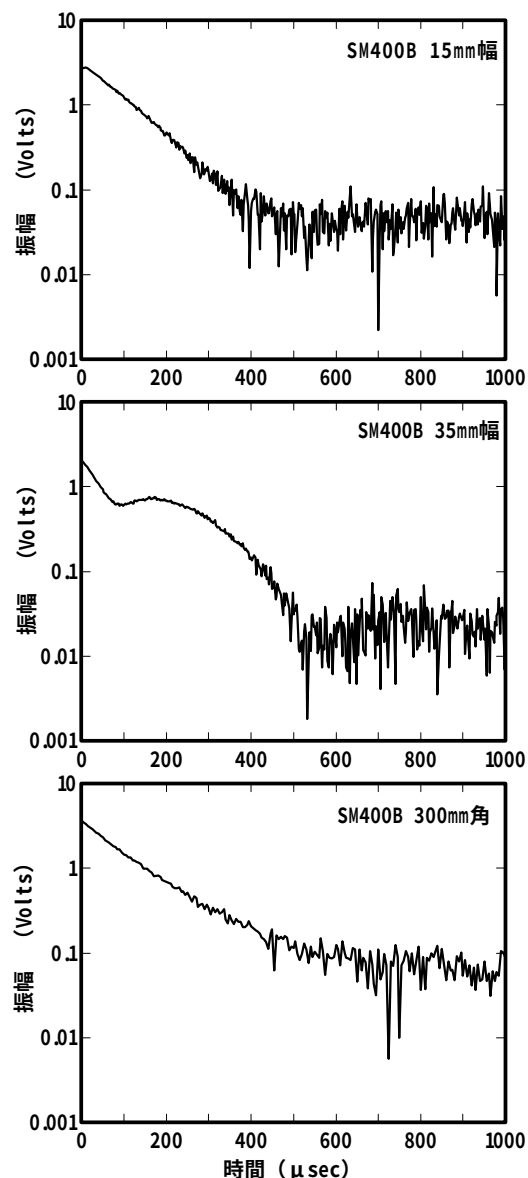
このような異方性は鋼板の圧延に起因しているが、電磁超音波による疲労評価においては、この異方性を考慮して、圧延方向と圧延方向に直角方向での測定が望まれる。減衰測定においては次に述べる試験片の寸法効果の影響があり、振動方向が試験片長手方向（圧延方向）のみの測定を行った。

3.1.2 寸法効果

当初、平行部35mm幅のSM400B試験片を用いて、超音波振動方向を2種(試験片長手方向と試験片幅方向)で電磁超音波計測を試みた。しかしながら、幾つかの共鳴周波数の減衰測定において、減衰曲線がきれいな指数関数とならず減衰測定が困難であった。特に、超音波の振動方向が試験片幅方向の場合、乱れが大きかった。その原因を検討するため、同じ鋼材同じ厚さの300mm×300mm試料の中央で計測すると、2つの振動方向の両方できれいな減衰波形が得られた。このことから、電磁超音波センサが板厚方向伝搬の超音波を発生させるだけでなく、他の方向(例えば、表面に沿う)に伝搬する超音波を発生させると考えられた。300mm×300mm試験片では、試料寸法が大きいため表



図－6 共鳴スペクトル



図－7 減衰曲線

面伝搬超音波の共鳴周波数が十分低くなり、或いは長い距離伝搬するため減衰が大きい等の理由で、板厚方向の共鳴状態に影響を与えないと考えられる。

また、振動方向の試料幅が小さい場合に乱れが大きいことは、電磁的に発生させた振動が試料の端で強制的に遮られることになり、本来板厚方向に伝搬する超音波となるエネルギーが、他の方向に伝搬する超音波に振り向けられるためと考えられる。

従って、正確な減衰測定を行うためには、幅の大きな試験片が必要であるが（試験片の長さは大きい）、疲労試験荷重が大きくなり小型疲労試験による試験が困難となる。そこで、減衰測定は小さい試験片幅で計測可能な振動方向が試験片長手方向の超音波に限ることとした。

この場合の減衰測定に与える試料の幅効果を検証した。そのため、平行部の幅を 300mm、35mm、15mm と変えた SM400B 試験片で実験した結果を図－6 に示した。300mm 角試験片では綺麗な共振スペクトルで寄生ピークがないことが分かった。これに対し、35mm 幅試験片では、寄生ピークが生じ、共鳴周波数（最大ピークの周波数）にも影響していると考えられた。15mm 幅の試験片では、寄生ピークが無く、共鳴周波数の測定にも問題がないと考えた。ただし、300mm 角試験片と比べると、裾がやや広く共鳴の鋭さがやや低い。

図－6 の共鳴周波数で測定した減衰曲線を図－7 に示す。減衰曲線は、縦軸を対数表示としているので、減衰曲線の始まり部分（左側）が直線的に低下し、この部分の傾斜から減衰定数を求めることができる。減衰曲

線の中央から右側部分はSN比が低い領域で線のふれが大きく、減衰定数の計算に使用しない。300mm角、15mm幅試験片では、左部分が直線に近く減衰測定が容易であるが、35mm幅試験片では減衰曲線に波があり、減衰測定に適していない。これは、寄生ピークの影響で正確な共鳴周波数に設定できなかったことが原因と考えられた。

以上から、減衰測定には小型疲労試験機が使用できる15mm幅の試験片を用いた。電磁超音波測定は、振動方向を試験片長手方向とした横波で行い、測定上の問題をさけた。

なお、図-5上段の測定に用いたS35C試験片と図-6中段の測定に用いた試験片は共に、平行部幅35mmの同一形状試験片であるが、共鳴スペクトルの形状が異なる。差異は、両者の測定周波数範囲の違いに起因している。図-5は、スペクトルのきれいな周波数範囲での測定結果であり、図-6は、スペクトルの乱れが大きい周波数範囲の測定結果である。減衰測定においては、周波数依存性に重要な情報が含まれると考え、多数の共鳴周波数での測定を行う。従って、その計測法を検討するために、スペクトルの乱れが大きい周波数範囲での測定結果を例として示したものである。

3.1.3 温度効果

電磁超音波共鳴計測法は、共鳴周波数を高精度に測定するとともに、得られた共鳴周波数を減衰測定に利用している。従って、試験中に鋼材の温度が変動して共鳴周波数に変化を生じた場合には、誤差を生じる可能性がある。あらかじめ、電磁超音波共鳴測定に与える温度の効果を明らかにしておくことが重要である。

図-1のSM400B試験片を恒温槽に入れ試験片温度が十分安定した後、共鳴周波数と減衰定数を測定した。恒温槽の設定温度を-50～60℃の範囲で変え、温度の関数としての共鳴周波数、減衰定数を得た。

図-8に3つの共鳴周波数(1.5、2.5、5MHz付近)と

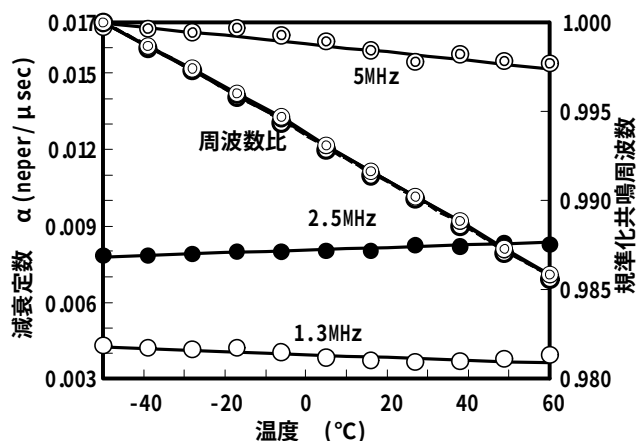


図-8 温度と規準化共鳴周波数、減衰定数

その周波数における減衰定数の測定例を示す。共鳴周波数は-50℃の値で規準化して示した。共鳴周波数は、規準化することにより1本の直線上に測定値が並んだ。共鳴周波数の温度依存性を計算すると、 $1.43 \times 10^{-4}/K$ が得られた。式(1)から分かるとおり、共鳴周波数には板厚変化が影響する可能性があるが、鋼の線膨張係数は $1.2 \times 10^{-5}/K$ であるので温度による厚さ変化は微小であり、共鳴周波数の変化はほぼ音速の変化と考えて良い。3つの周波数で規準化した共鳴周波数変化が同一であることは、音速が周波数によらないことを表している。

減衰測定中に温度変化によって共鳴周波数がずれると誤差を生じるので、温度変化の影響を評価する。2MHz付近の共鳴周波数は温度が1℃変わると前述の温度依存性から0.0003MHz変化することが分かる。これは、図-6の共鳴ピークの半値幅の8.4%であるが、振幅値では僅か1.3%の低下である。従って、減衰測定中に温度が安定していれば、減衰に与える影響はないと考えられる。

3.1.4 応力効果

電磁超音波を用いた応力測定では、材料に応力がかかったときの音速変化を検出、利用している。疲労試験を行う前に、電磁超音波の基礎データを得るため、応力が存在するときの共鳴周波数と超音波減衰の挙動を調べた。応力をかける都合上、試験機に試験片を設置した状態で電磁超音波測定を実施した。

図-1の試験片平行部中央に電磁超音波センサをセットし、荷重を0、80、160、260MPaに順次設定し、電磁超音波計測を実施した。次に、荷重をゆっくりゼロに戻し、-100、-180、-260MPaの圧縮荷重を保持し、電磁超音波計測を行った。

3種の共鳴周波数の変化を図-9に、減衰定数変化を図-10に示した。共鳴周波数は応力ゼロの値で規準化した。引張側では共鳴周波数は低下し、圧縮側では増加する。引張圧縮ともに260MPaで0.2%の共鳴周波数の変化を検出した。260MPaにおける弾性的な厚さ変化量を弾性定数208GPaポアソン比0.3で推定すると、応力ゼロの状態に対し0.04%である。従って、共鳴周波数変化の主要原因は、応力がかかったことによる音速変化と考えることができる。

減衰定数は、共鳴周波数と異なり周波数が高いと減衰が増大する傾向である。また、引張側で減衰定数がやや大きくなる傾向があった。高い周波数では測定値のばらつきが大きくなった。図-4に示したとおり、高い周波数では信号強度が低下することが原因であると考えられた。ただし、恒温槽測定の結果である図-8と比較すると、図-10の5.5MHzにおける減衰定数のばらつきが大きい。これは、疲労試験機が動作中など周辺環境の違いによるものと考えられる。従って、疲労による材質変化を検出する電磁超音波計測(音響異方

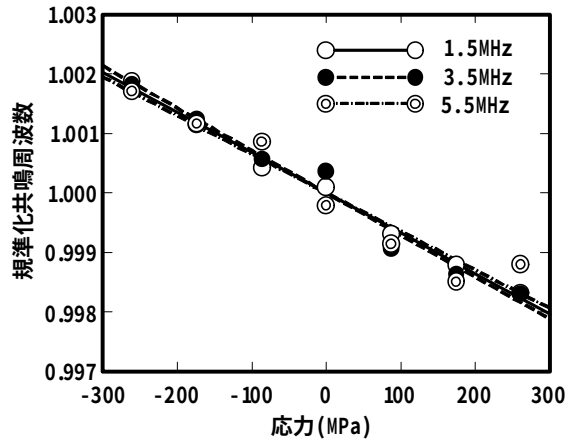


図-9 応力と共鳴周波数の関係

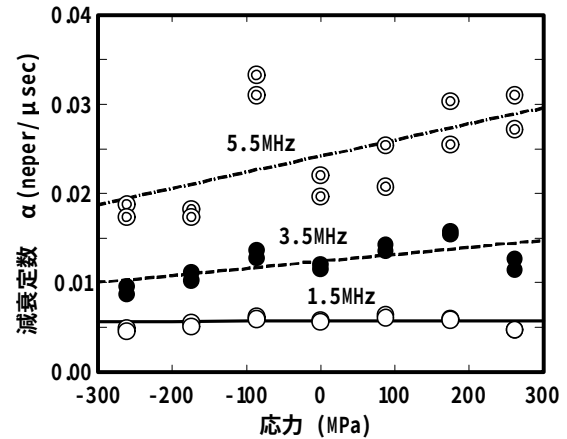


図-10 応力と減衰定数の関係

性を除く)においては、試験片を疲労試験機から外し、恒温槽中で温度が安定したのち行った。

3.2 疲労計測実験

3.2.1 塑性ひずみ幅挙動

疲労き裂発生以前の疲労の進行度合いをモニタするため、以下の方法で塑性ひずみ幅を監視しつつ疲労試験を実施した。応力比 $R=-1$ の疲労試験の実施において、図-3に示すとおり、試験片平行部をまたいで取り付けたクリップゲージによる標点間距離と荷重を疲労試験中に測定した。縦軸を荷重、横軸を標点間距離として表示すると、疲労初期には両者の関係は弾性的挙動に基づき、1サイクル毎に同じ直線を描く。疲労が進んでくると荷重増加時と荷重減少時に描く直線に間隔が生じ、いわゆるヒステリシスを描くようになる。そこで、この間隔を標点間距離で規準化し塑性ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ とした。

超音波減衰測定に用いた図-1の試験片の塑性ひずみ幅と繰返し数の関係を図-11に示す。どの応力振幅においても塑性ひずみ幅が増加した後、しばらく塑

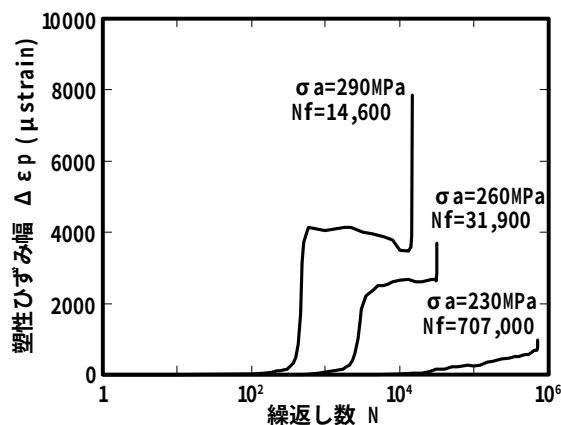


図-11 疲労過程の塑性ひずみ幅挙動

性ひずみの変動がやや少ない疲労繰返しを経て、最終的には塑性ひずみ幅が急増し試験片が破断する。塑性ひずみ幅立ち上がりの初期部分は、試験片の一部に塑性変形を生じた時期に対応しており、その後塑性変形が平行部全体に広がっていく過程が塑性ひずみ幅の急増に対応している。塑性ひずみ急増以後、塑性ひずみ幅の変動がやや小さい領域は、平行部全体が繰返し塑性変形（ヒステリシス）を受け、急速に疲労が進行し、き裂発生に至る過程と考えられる。最後の塑性ひずみ幅急増は、試験片に生じたき裂が標点間距離を増大させたと考えることができる。

塑性ひずみ幅の急増は疲労荷重が大きいほど、少ない疲労回数で現れ、また、急増時の塑性ひずみ幅も大きい。疲労荷重が小さい場合には、僅かな塑性ひずみ幅の増大で破断に至る。

3.2.2 超音波音速

疲労の進行に伴う超音波音速変化を調べるため、疲労試験を適宜中断して共鳴スペクトルの測定を行った。図-12、13は、応力振幅230MPa及び290MPaで測定した共鳴スペクトル(3.5MHz付近)の形状、位置が疲労の進行と共に変化していく様子を示した例である。図-12は疲労回数が $0 \sim 6.5 \times 10^5$ (破断直前)、図-13は、 $0 \sim 1.4 \times 10^4$ (破断直前)の範囲をプロットした。共鳴スペクトルの振幅は最大値で規準化した。

低応力振幅疲労においては、図-12に示すとおり、疲労開始時から破断直前まで、きれいな共鳴スペクトルを示した。共鳴周波数は疲労の進行に伴い低下する傾向を示した。これに対し、高応力振幅疲労では図-13に示すとおり、疲労以前はきれいな共鳴スペクトルであるが($N=0$)、塑性ひずみ幅が急増すると($N=1,200$ 以降)、共鳴スペクトルの形に乱れが生じ、乱れの様子を変えながら破断に至った。同時に電磁超音波の振幅も、共鳴スペクトルの乱れと共に低下した。共鳴スペクトル形状の乱れと振幅の低下は疲労荷重が高

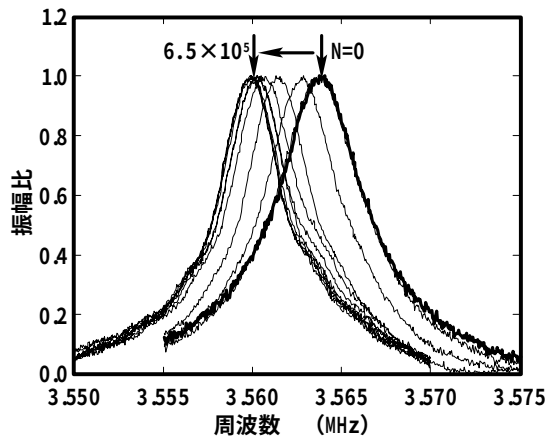


図-12 応力振幅230MPaにおける共鳴スペクトル例

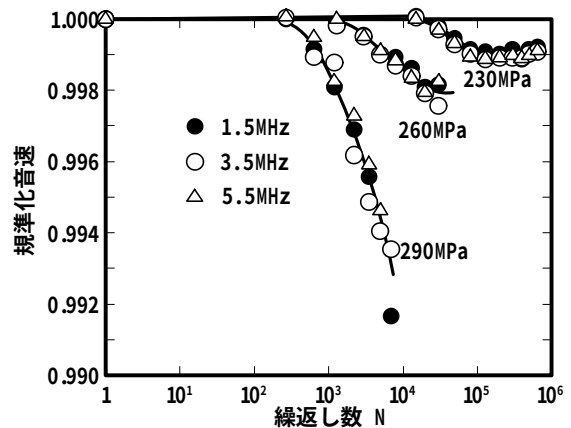


図-14 疲労過程の音速変化

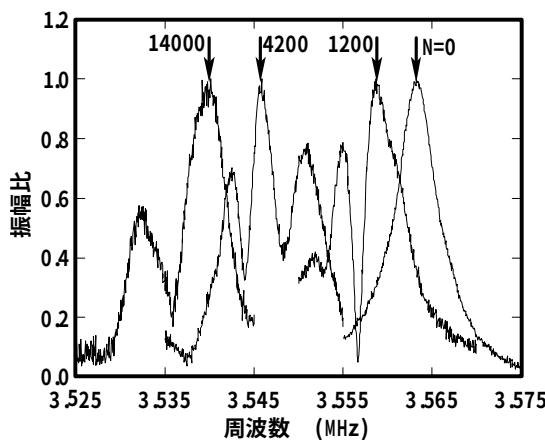


図-13 応力振幅290MPaにおける共鳴スペクトル例

く、また共鳴周波数が高いほど顕著であった。

板厚が一定であれば、疲労前の値を基準とすることにより、規格化音速は規格化共鳴周波数に一致する。図-14は、共鳴周波数から求めた規格化音速と繰返し数の関係をプロットしたものである。共鳴周波数としては、1.5、3.5、5.5MHzの3周波数を用いた。音速変化は最大で0.8%の低下であり、平滑部厚さの変化は最大0.01mm（マイクロメータ測定値）、0.06%の減少であるので、厚さを一定とした仮定による誤差は小さい。

規格化音速の低下が始まる繰返し数は塑性ひずみ幅の急増点にほぼ対応している。また、高振幅疲労では規格化音速の低下が急であり、また低下の程度が大きい。低振幅疲労では、逆に、規格化音速の低下は緩やかで、また低下の程度も小さい。

3.2.3 超音波減衰

任意の繰返し回数で疲労試験を停止し、電磁超音波によって減衰定数を測定した。疲労試験の進行に伴い共鳴周波数が変化するため、毎回の減衰定数測定の直前に共鳴周波数を求め、電磁超音波センサ駆動周波数を正確な共鳴周波数に設定して減衰定数を測定した。

また、超音波減衰定数は周波数の関数であるため、1～6MHzの範囲の30個程度の周波数で減衰測定を行った。以下は図-11を作成した疲労試験で得た結果である。

図-15は応力振幅が230MPaの疲労試験における試験前と破断直前の減衰定数測定結果を示す。横軸は周波数である。また、応力振幅260MPa、290MPaの結果を図-16及び図-17に示す。周波数に対し減衰定数が単調に増加する傾向があった。また、疲労振幅が大きいと減衰定数のバラツキが大きい傾向にある。3.2.1の超音波音速の項でも述べたように、高振幅疲労では、共鳴スペクトル形状の乱れが大きくなり、共鳴周波数の正確な決定が次第に困難になる。そのため、減衰曲線が乱れて減衰定数が求められない場合があった。図-16及び図-17における減衰定数がゼロの点は実際に減衰定数が求められなかった点である。また、これらの図における減衰定数のバラツキが大きい原因も共鳴周波数の決定が困難になったためである。

このような減衰定数のバラツキに対処するため、減衰定数を周波数の関数で表す回帰式を導入して、より誤差の少ない減衰定数を求めることを考えた。超音波周波数 f における減衰定数 α は、一般に次式で表現できる^{19),20)}。

$$\alpha = a_0 + a_1 f + a_4 f^4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 f は周波数であり、 a_0 、 a_1 、 a_4 はそれぞれ、定数項、内部摩擦による減衰に関わる係数、結晶粒界による超音波散乱減衰に関わる係数である。減衰定数に式(4)の回帰式を当てはめ、その結果を図中に細線で示した。ただし、減衰定数がゼロの点は回帰計算に用いなかった。

疲労前から破断直前の減衰定数を回帰式から求めた結果を図-18に示した。5つの周波数で減衰定数を求めた。また、塑性ひずみ幅も図中にプロットした。疲労振幅260MPa、290MPaにおける結果を図-19及び図-20に示した。

応力振幅230MPaの場合、どの共鳴周波数でも塑性ひ

ずみ幅急増後は減衰定数は低下しほぼ一定で推移し破断直前でやや増加する傾向がある。疲労振幅が高い290MPaの場合には、低い周波数(1.5MHz、2.5MHz)における減衰定数は塑性ひずみ幅急増後、230MPaと同様低下する傾向があるが、高い周波数領域(3.5MHz、4.5MHz、5.5MHz)における減衰定数は塑性ひずみの立上がり部ではあまり低下しないか、逆に増加する傾向を示した。

3.2.4 音響異方性

音響異方性については、3.1.1で簡単に触れたが、ここでは疲労に伴う音響異方性変化について行った実験の結果を紹介する。平行部幅が35mmのS35C製の試験片を用い、電磁超音波の振動方向を試験片長手方向とその直角方向に取付け、共鳴スペクトルより得られる共鳴周波数を測定した。試験片長手方向の共鳴周波数を F_y 、直角方向を F_x とした。試験片に電磁超音波センサを装着した状態で、試験片に引張と圧縮の荷重をか

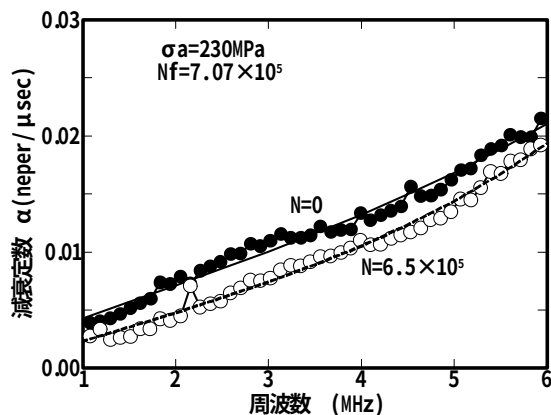


図-15 疲労前と破断直前の減衰定数変化

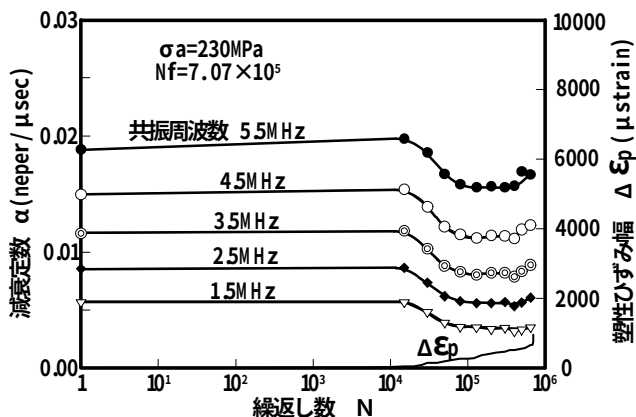


図-18 各繰返し数における減衰定数変化

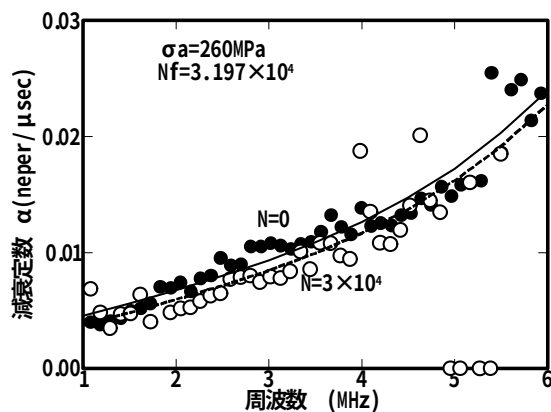


図-16 疲労前と破断直前の減衰定数変化

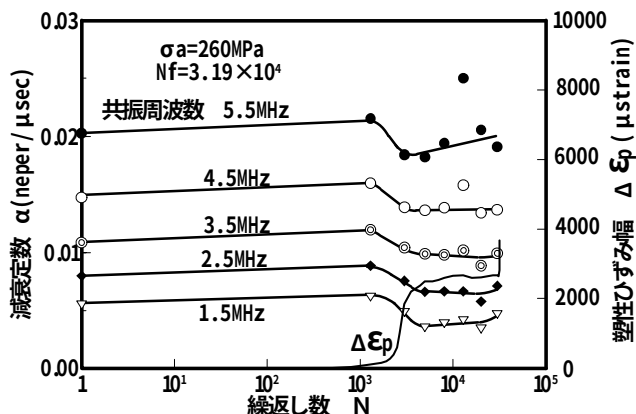


図-19 各繰返し数における減衰定数変化

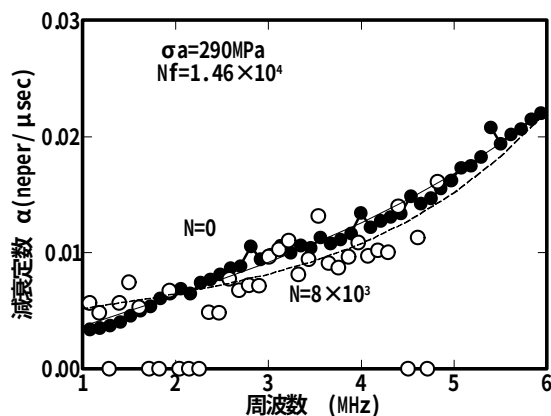


図-17 疲労前と破断直前の減衰定数変化

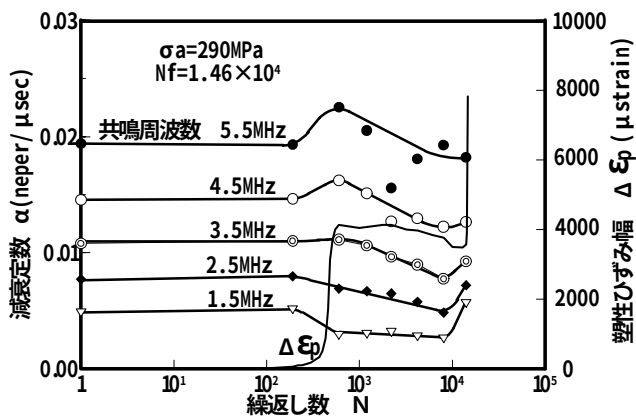


図-20 各繰返し数における減衰定数変化

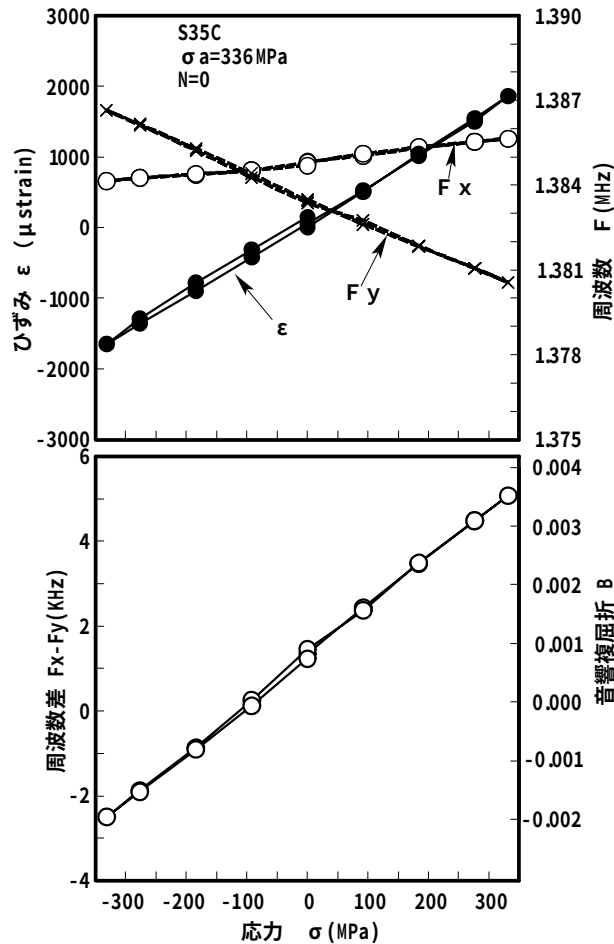


図-21 疲労前における音弾性関係パラメータの応力依存性

けたときの応力ひずみ線図と1.38MHz付近の共鳴周波数の変化を図-21の上図に示した。3.1.2の寸法効果の影響が小さい共鳴周波数として、1.38MHzを選んだ。降伏点以下の荷重であるので、3つの計測値にはヒステリシスはなく応力に対して直線的に変化し、1サイクルが終わるとほぼ最初の点に戻った。

図-21の下図は、共鳴周波数差（振動方向が試験片長手方向とそれに直角な方向の共鳴周波数 F_x 、 F_y の差）と付加した公称応力の関係を示す。共鳴周波数差を平均の周波数で規準化すると音響複屈折Bと呼ばれる値が得られる。式で表すと、以下の通りである。

$$B = \frac{2(F_x - F_y)}{(F_x + F_y)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

音響複屈折は、周波数に無関係であり、また、応力に比例するので、電磁超音波を用いた応力測定に用いられる。図-21下図の右縦軸には、周波数差を音響複屈折に変換して示した。

図-22の上図には、疲労が進み、塑性ひずみ幅が急増した後における応力ひずみ線図と2つの共鳴周波数の変化を示した。応力ひずみ線図にはヒステリシス

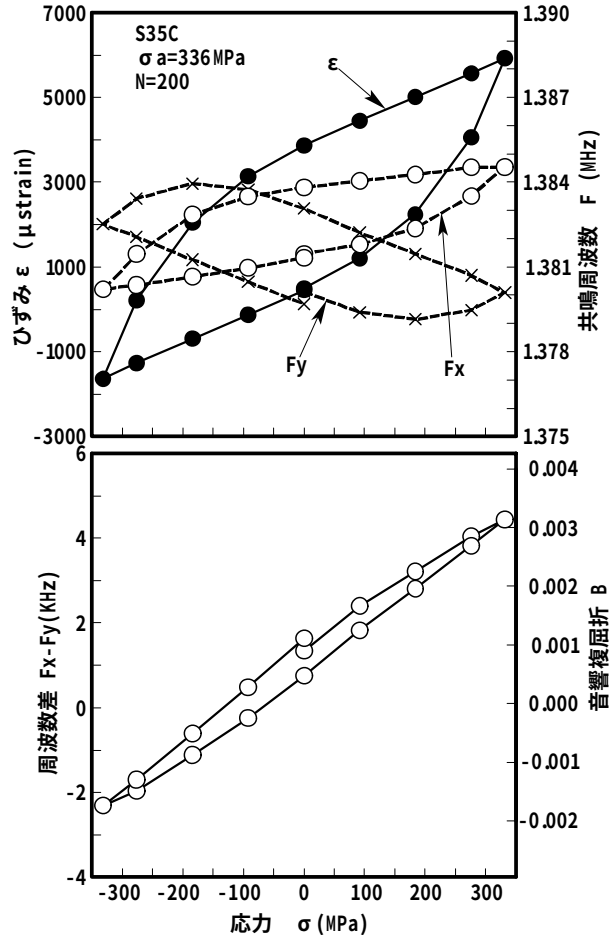


図-22 疲労後(N=200)における音弾性関係パラメータの応力依存性

を生じている。2つの共鳴周波数にもヒステリシスが認められた。この時の周波数差を図-22の下図に示した。共鳴周波数差に見られるヒステリシスは比較的小さく、荷重の作用が2つの共鳴周波数に対して同程度であることが分かった。

音響複屈折が疲労回数と共に変化する様子を図-23に示した。この時の塑性ひずみ幅と弾性率比（引張側除荷時と圧縮側除荷時の応力ひずみ線図の傾き平均値を疲労前の値で規準化）の変化を図-24に示した。応力振幅が大きいたときには、塑性ひずみ幅の急増よりやや遅れてゆっくり音響複屈折が増大した。また、応力振幅が小さくなると、音響複屈折の増大は次第になくなる傾向を示した。音速は弾性率の1/2乗に比例する常数であるので、図-24の弾性率比と図-23の音響複屈折との間には相関が認められるはずであり、初期値から逸脱する繰返し数は両者でほぼ対応している。ただし、336MPaと比較すると前者には塑性ひずみ急増後、頭打ちになる傾向があるが、後者にはそのような傾向は認められない。前者が純粋に弾性率に対応するのに対して、後者が互いに直角方向の振動成分による

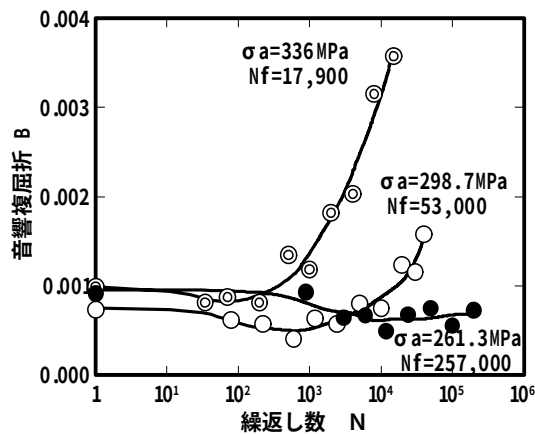


図-23 疲労過程における共鳴周波数変化

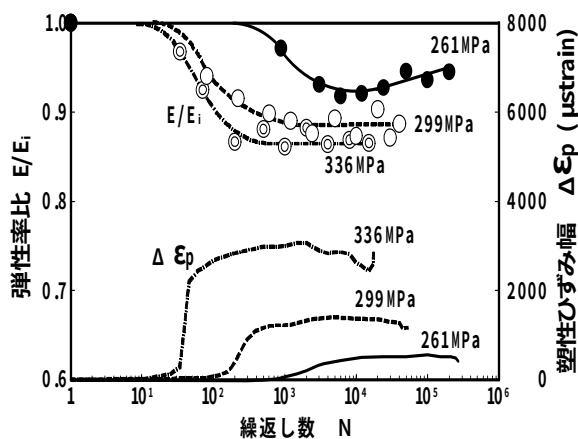


図-24 疲労過程における弾性率変化

音速差であるためと考えられた。

図-25には疲労に伴う音弾性定数の変化を示した。音弾性定数は、音響複屈折の応力に対する比例定数である。図-22に示すとおり、疲労が進んだ状態では音響複屈折と応力の関係に弱いヒステリシスが見られるので、音弾性定数は、全測定点に対する回帰直線の傾きから求めた。図-24と図-25を比較すると、音弾性定数は塑性ひずみ幅に対応して変化していることが分かる。応力振幅が大きい時には塑性ひずみ幅の急増に対応して急激に低下し、その後はバラツキはあるが急増や急低下せず破断に至った。また、低い応力振幅においても、塑性ひずみ幅の増加に対応し音弾性定数が立ち下がる傾向を示した。立ち下がり量も塑性ひずみ幅の増加が小さいことに対応して小さい。

4. 考察

疲労に伴う音速変化と減衰率変化を評価したが、そのメカニズム理解を助けるため、疲労試験中の金属組織変化を観察した。SM400B材で平行部幅35mmの試験片中央部を3%硝酸アルコールで腐食させ、疲労試験を

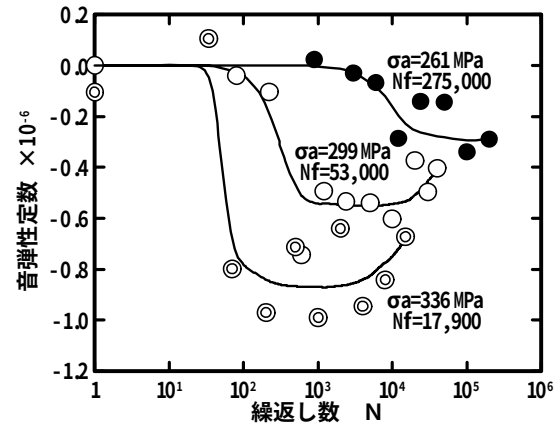


図-25 疲労過程の音弾性定数変化

実施した。適宜、同一の4ヶ所を光学顕微鏡を用いて、結晶組織の状態変化を観察した。結晶粒の大きさは圧延方向とその直角方向共に約12 μmであり、方向による差は認められなかった。本材料は制御圧延によって結晶粒を細かくした鋼材であり、一般の軟鋼材よりも結晶粒が細かく、強度が高い鋼である。

図-26は、応力振幅294MPaの疲労試験における塑性ひずみ幅挙動である。図中の矢印の回数で金属組織観察を行った。観察結果の例を写真-1に示した。N=280の組織は、試験前とほぼ同じである。繰返し数280、370ではすべり線が見られず、疲労前と同じ状態である。しかし、塑性ひずみ幅はすでに増加しているので、試験片平行部の他の場所ではすべり線が発生していると考えられる。塑性ひずみ幅急増後の繰返し数1000回以降は、応力方向(写真の上下方向)に対し、ほぼ±45度方向にすべり線が見られる。さらに繰返し数が増加すると、すべり線密度は増加せず、すべり線の幅が徐々に大きくなる傾向であった。結晶粒によってすべり線が見られる場合と見られない場合があった。これは結晶方位の違いによると考えられた。

疲労試験を受けたSM400B材においては、塑性ひず

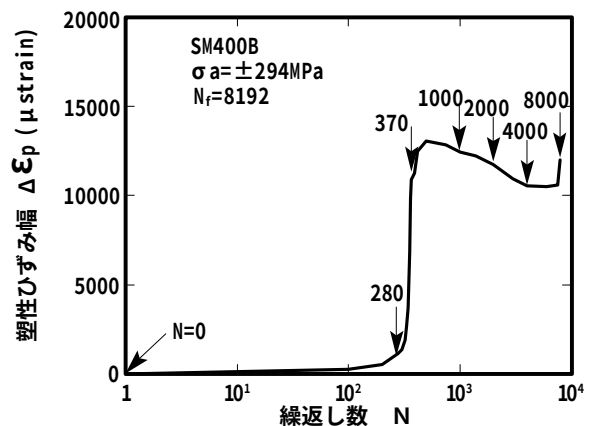
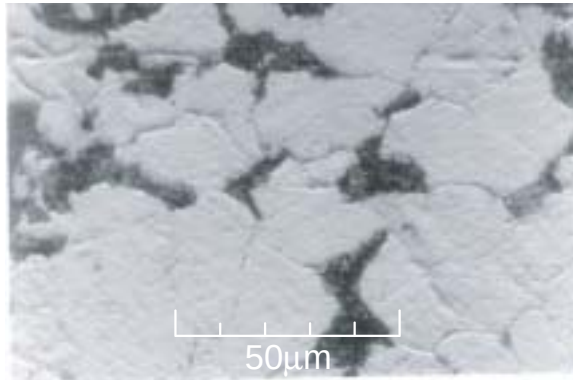
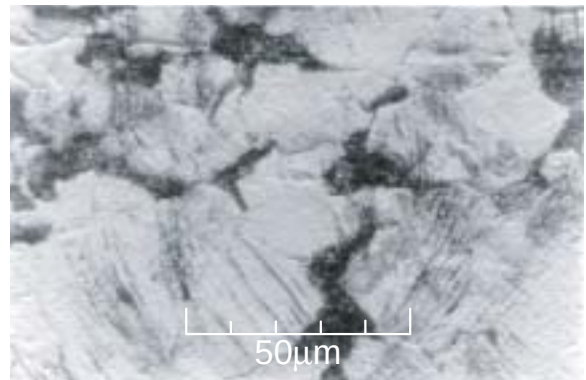


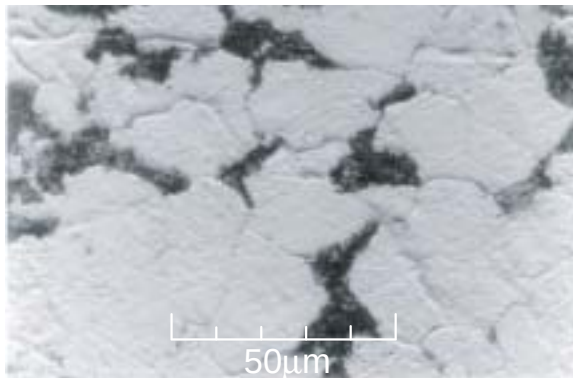
図-26 疲労過程のすべり線観察繰返し数



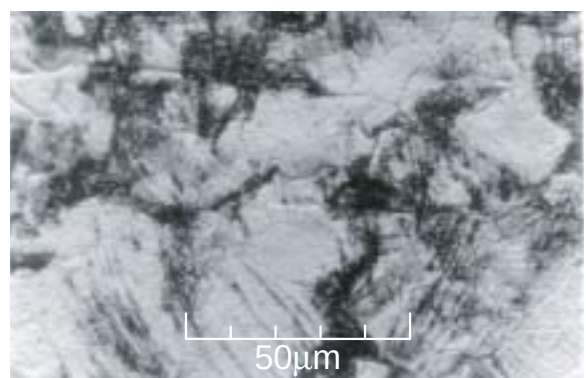
N=280



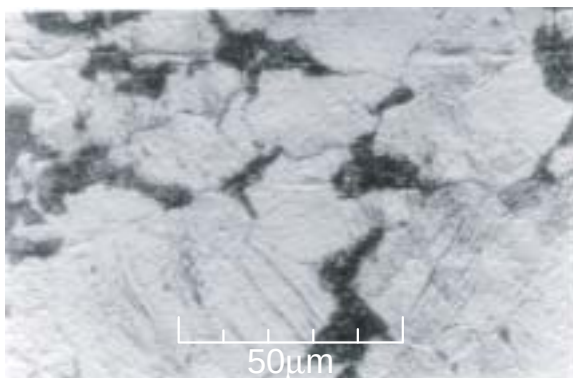
N=2,000



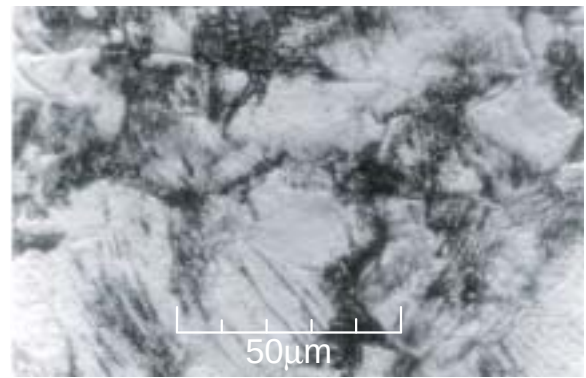
N=370



N=4,000



N=1,000



N=8,000

写真-1 疲労過程のすべり線挙動

み幅の急増に伴い音速（図-1 4 参照）は低下する傾向を示し、応力振幅が大きいほど少ない繰返し数で音速低下が始まり、その後の低下量も大きい。音速は弾性定数の平方根に比例するので、疲労に伴う弾性定数の低下が音速低下の原因と考えられた。実際、図-2 4 の弾性率比で弾性率が疲労に伴い低下する傾向が認められる。ただし、弾性率比は塑性ひずみ幅急増後、低下が頭打ちになる傾向であるが、音速（図-1 4）にはその様な傾向は認められない。

また、弾性率比では最大10%程度の低下が見られ、これから計算すると音速は5%程度の低下が予想される

が、実際は最大0.8%の低下にとどまっている。弾性率比は最大荷重或いは最小荷重からの除荷時の応力ひずみ線図からの求めた値で、準静的で大きな荷重による測定値である。これに対し、超音波音速はMHz領域の高速微小応力振動における測定値である。そのため、両者では測定時に試験片内部で活動する転位の種類や数が異なると考えられ、このような差異を生じたと考えられる。

音速と金属組織とを対応させると、金属組織のすべり線発生に伴い音速低下が生じている。また、さらに疲労が進むと、すべり線の幅増大に伴い、音速がさら

に低下する傾向があることが分かる。すべり線の発生とその幅の増大は、金属組織内に転位が増加し、格子間隔の大きなところが増えることを意味している。その結果、弾性定数が下がり音速が低下したと考えることが出来る。

一方、超音波減衰率はやや複雑な挙動を示した。応力振幅が低い図－18では、周波数が異なっても定性的には同じ挙動を示した。塑性ひずみ幅急増と時を同じくして、減衰定数が低下した。応力振幅が大きい図－20においては、周波数が低い1.5MHzと2.5MHzの挙動は、低い応力振幅の図－18と同様の傾向であるが、周波数の高い4.5MHzと5.5MHzでは、塑性ひずみ幅急増時に減衰定数が一旦増加する傾向があり、その後繰返しが進むと減少する傾向になった。

MHz領域の超音波減衰率は、内部摩擦と結晶粒界による散乱により決まってくる。図－18の塑性ひずみ幅急増にともなう減衰定数の低下量は、5.5MHzで0.004nper/ μ sec、1.5MHzで0.0024nper/ μ secであり、5.5MHzは1.5MHzの値の1.6倍である。粒界散乱による減衰定数は周波数の4乗に比例するので、5.5MHzと1.5MHzの減衰率の比1.6倍は、結晶粒による散乱減衰を当てはめるには、小さすぎると考えられる。

従って、ピン留めされた刃状転位の振動による減衰と鋼が強磁性体であることから来る磁壁の移動や回転による内部摩擦減衰が考えられる²¹⁾。前者については、鉄鋼材料での検討資料はほとんどなく、詳細は不明である。後者は、応力と磁界を作用させた時の減衰測定例がある。磁界を作用させると、磁壁が少なくなり、磁壁の振動に伴う超音波の減衰が低下すると考えられている^{9)・22)}。また負荷した応力も応力方向に磁化した磁区を減じる効果により磁壁を減少させる。そのため、引張応力が作用すると超音波減衰が低下する傾向を示す。今回減衰測定の対象としたSM400Bでは図－10に示すごとく、引張応力により逆にやや減衰が増加する傾向を示している。これは本材料が制御圧延鋼であるため、初期状態で内部に複雑なマイクロ残留応力が存在するためと考えられる。図－18においては、塑性ひずみ幅急増後の電磁超音波計測に、直前の圧縮荷重による塑性変形の影響を受け、内部に生じたマイクロな圧縮応力のため、減衰定数が低下したと考えられる。

図－20において周波数が高い5.5MHzと4.5MHzで減衰定数が一旦増加する傾向を示したが、これは、鋼材内に生じた複数の幅広のすべり線が、擬似的な結晶粒界として働き、超音波を散乱させたものと思われる。疲労がさらに進行すると、幅広のすべり線が増加し、擬似的な結晶粒界のサイズが小さくなり、超音波減衰に与える影響が少なくなるためと考えられる。

以上の超音波減衰のメカニズムは一つの推定である。高応力疲労における電磁超音波計測では、信号強度が弱くなると共に、共鳴スペクトル形状の乱れも大きい。

従って、減衰メカニズムの推定には、精度の高い測定による検討が必要と思われる。

見方を変えると、高応力疲労試験における電磁超音波信号強度の低下と共鳴スペクトル形状の乱れに解明すべきメカニズムがあると思われる。試験片の形状変化はほとんどないので、試験片内部に電磁超音波に反応する変化が生じていることは確かと思われる。電磁超音波振幅の低下は、鋼材の電気伝導度の低下（転位の増加により生じる）や透磁率低下などが生じれば、電磁超音波発生に必要な鋼表層部の渦電流や磁界強度が減少するので、これでも説明できると考えられる。しかしながら、共鳴スペクトルの形状の乱れは、鋼板中に超音波を乱す変化が生じた結果と考えられる。特に、塑性ひずみ幅急増後のすべり線の幅の拡大は、音響的不連続な領域を拡大させているとも考えられ、電磁超音波計測に影響を与えている可能性がある。この点については、さらなる実験的な検討が求められている。

音響異方性は振動方向が試験片長手方向（圧延方向）とその直角方向の超音波伝搬速度の差から生じる。応力の関数としての2つの共鳴周波数は、塑性ひずみ急増後大きなヒステリシスを描いた（図－22参照）。これに対し、共鳴周波数差のヒステリシスは小さく、2つの共鳴周波数に同じような影響を疲労が与えていることが分かった。すべり線の方向が引張方向に対し±45度方向であるため、2つの振動方向の超音波音速に同じ作用を及ぼしたためと考えられた。

高応力振幅疲労における共鳴周波数差は、塑性ひずみ幅急増と同時に増加したが、低応力振幅においては塑性ひずみが生じていても明瞭な変化がなかった。測定直前の高応力疲労サイクルによる圧縮塑性変形により大きなマイクロ残留応力を生じ、周波数差を大きくしたと考えられた。低応力振幅では、塑性変形も小さく、マイクロな残留応力が小さいと考えられた。

5. 結言

電磁超音波共鳴測定装置を用いて、制御圧延鋼SM400Bを対象に疲労試験に伴う超音波音速と減衰の挙動、熱間圧延鋼S35Cを対象に疲労試験に伴う音響異方性の挙動を明らかにした。測定精度が高いとされた電磁超音波共鳴測定装置であったが、高精度を達成するには寸法効果等の電磁超音波共鳴測定法特有の現象を考慮する必要があった。

電磁超音波共鳴法は音速測定には極めて精度の高い測定が可能であり、そのため、疲労に伴う音速変化や音響異方性の変化を明らかにすることができた。しかしながら、共鳴スペクトル形状が疲労の進行と共に大きく乱れる現象があり、高応力で疲労した試験片では音速測定も減衰測定も困難になった。共鳴スペクトル

形状の乱れにこそ疲労で生じる材料内部の劣化現象の本質である可能性があるが、今回の試験では明らかにできなかった。今後の課題と考える。

減衰測定では、制御圧延鋼では応力に対する挙動が従来の熱間圧延鋼とは異なる部分があった。従って、疲労に伴う減衰変化についても、熱間圧延鋼とは異なる可能性があり、今後の検討が待たれる。疲労した制御圧延鋼の超音波特性に関しては、文献データもほとんどないので、さらにデータの蓄積が必要と思われる。

参考文献

- 1)X線材料強度部門委員会第2分科会：「疲労のX線的研究（Ⅰ）」材料(1969) Vol.18 p679-684
- 2)X線材料強度部門委員会第2分科会：「疲労のX線的研究（Ⅱ）」材料(1969) Vol.18 p685-688
- 3)棋木義一、明石一、寺石稔、藤井太一：「疲労の進行に伴う炭素鋼の遷移点の変化と超音波減衰」材料(1969)、Vol.18 No.191,pp702-706
- 4)三浦節男、小林道明、村中一裕、山本泰代、阿部博充：「アルミニウムの疲労過程におけるAE特性について」機械学会論文集中編(1996.5) Vol.62 No.597 p1117
- 5)箕浦潔、萩博次、平尾雅彦：「軸対称SH波EMATによる回転曲げ疲労のモニタリング」機械学会論文集中編(1996.11) Vol.62 No.603 p2520
- 6)前田宣喜、杉林卓也、山口篤憲、和田宇生：「材料劣化に伴う弾性波の減衰係数及び音速の変化の解析」非破壊検査(1997) Vol.46 No.10 p752
- 7)松原重行、横野泰和、今中拓一：「超音波による材料劣化診断技術」非破壊検査(1997) Vol.46 No.3 p185
- 8)三浦節男、小林道明、追分祐司：「疲労損傷に伴う転位挙動の超音波スペクトロスコピーによる評価」機械学会論文集中編(2002.11)Vol.68 No.675
- 9)榊昌英、神尾昭、勝又健一、島田道男：「磁界中の超音波減衰測定法による材料劣化の推定について」構造用金属材料の劣化損傷の実態と非破壊検査技術シンポジウム論文集中(1984)pp.194-198
- 10)神尾昭、野間口道義、吉井徳治、勝又健一、島田道男、後藤英信、前中浩：「磁気技術による疲労損傷評価技術の確立」構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究成果報告書(1988) pp327-345
- 11)吉井徳治、勝又健一、野間口道義、榊昌英、島田道男、滝沢千嘉子：「構造用鋼の疲労損傷の非破壊評価技術」船舶技術研究所報告 第24巻第1号、pp.21-41
- 12)前田宣喜、山口篤憲、杉林卓也：「バルクハウゼンノイズとB-H曲線の測定による熱時効及び疲労の検出」非破壊検査(1996) Vol.45 No.11 p818
- 13)村山、他3名：「集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の非破壊評価」機械学会論文集中(1997) Vol.63 No.609
- 14)宅間正則、新家昇：「磁気特性と磁気AEによる疲労損傷度と疲労条件の評価(低サイクル疲労へのニューラルネットワークの適用)」機械学会論文集中(1998) Vol.64 No.627
- 15)川島捷宏：「電磁超音波探触子」非破壊検査(1981)、Vol.30 No.10,pp785-793
- 16)萩博次、平尾雅彦：「電磁超音波共鳴」非破壊検査(1994)、Vol.43 No.12,pp764-770
- 17)日本非破壊検査協会規格 NDIS 2417-1995：「音弾性法による応力測定通則」
- 18)吉井徳治、島田道男、成瀬健：「電磁超音波による疲労損傷評価(第1報)」船舶技術研究所研究発表会講演集(2000.6),p185-188
- 19)超音波技術便覧(1984)、日刊工業新聞社、p943-951
- 20)Nondestructive Testing Handbook Vol.7 第2版,ANST, p405-409
- 21)物性工学講座「音波物性とその応用」、オーム社(1969)
- 22)超音波試験技術—理論と実際一、(社)日本能率協会,p499