

構造用鋼の疲労損傷の非破壊評価技術

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***

Non-Destructive Evaluation Technique for Fatigue Damages of Structural Steels

By

Tokuharu YOSHII, Kenichi KATSUMATA, Michiyoshi NOMAKUCHI
Masahide SAKAKI, Michio SHIMADA and Chikako TAKIZAWA

Abstract

The magnetostriction technique, the technique by ultrasonic attenuations in a magnetic field and the ultrasonic transition temperature technique were experimentally found to be applicable to the monitoring of fatigue states of structural steels. Their monitoring parameters are the magnetostriction sensitivity, the magnetic ultrasonic sensitivity and the ultrasonic transition temperature respectively. The present paper describes their measuring procedures, monitoring examples and limitations of their applications to real structures.

1. 緒 言

近年、船舶、海洋構造物、橋梁などに見られるように、公共の構造物の高性能化、大型化が進んでいる。これらの大型で高性能な構造物に破壊事故が生じた場合、社会的、経済的な影響は極めて大きなものとなると予想される。このため、それらの構造材料の寿命および余寿命の予測技術の確立が安全の確保と信頼性および経済性の向上をはかるという立場から強く望まれている。この様な観点から船舶技術研究所では、旧組織の共通工学部、溶接工作部、および原子力船部の共同で、構造用鋼の疲労損傷の非破壊的評価技術の開発研究を行った。この開発研究のなかで、磁気ひずみ効果法、磁界中超音波減衰法、および超音波遷移温度法が構造用鋼の疲労損傷評価に有効であることが明らかになってきたので、これら3種の非破壊評価技術の測

定方法、試験例、適用限界などについて報告する。

本研究は科学技術振興調整費によって昭和58年度から3年計画（第I期）で実施したものである。

2. 磁気ひずみ効果による疲労度測定

鉄鋼材料は重要な構造材料であり、磁気による材質検査、欠陥検査が広く行われている。磁気的手法による疲労度の検出法の研究は、1930年代より一部の研究者によって取り上げられ¹⁾、近年になって、当所における吉永、吉井²⁾によって磁気ひずみ効果を利用した振り疲労の検出法の研究が行われた。その実績の上に立って、構造物への適用を目的とした疲労度測定の研究を行った。

磁気ひずみ効果は磁性体の磁气的性質の一つで、鉄鋼などの磁性体を磁化するとひずみが生じ、また、逆にひずみが増えられるとその磁气的性質が変化する現象である。鉄鋼材料に応力が加わったときの磁気ひずみ感度が疲労損傷による材質劣化（疲労度）によって変化する現象を利用し、疲労度を推定する。

はじめに、①疲労の進行にしたがい磁気ひずみ効果による磁気ひずみ出力の変化を調べた。つぎに、鋼疲

* 材料加工部

** 装備部

*** 元共通工学部

原稿受付：昭和61年4月28日

疲労測定に際し、磁気的手法の有効性を調べるため、②疲労による鋼材の基本的な磁気特性の変化を測定した。さらにこれらの成果を踏まえ、当所の安福、滝沢³⁾によって開発された応力測定用磁気異方性センサと測定回路を疲労度測定用に改造試作した。これを用いて、③磁気異方性センサによる疲労度測定を行った。

2.1 疲労度による磁気ひずみ出力変化と検定用応力および磁界周波数の関係

磁気ひずみ効果を利用した鋼疲労度測定の有効性の確認を行うため、疲労の進行にしたがって磁気ひずみ出力がどう変化するかを、シェンク式疲労試験機を用いた曲げ疲労試験によって調べた。

2.1.1 試験方法および測定装置

用いた試験片の材料は軟鋼 SS41 で、その化学成分を表 2-1 に、形状を図 2-1 に示す。試験片は 650℃、2 時間の真空焼鈍による応力除去を行った。

表2-1 試験片の化学成分

化学 成 分 (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.077	0.002	0.30	0.009	0.01

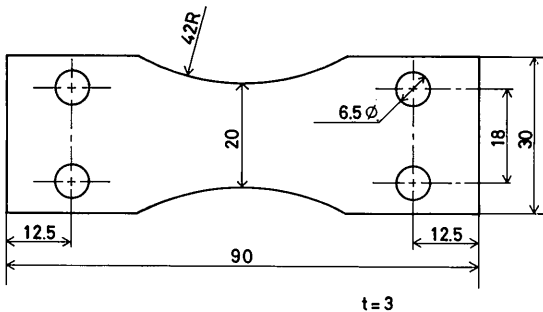


図2-1 試験片形状

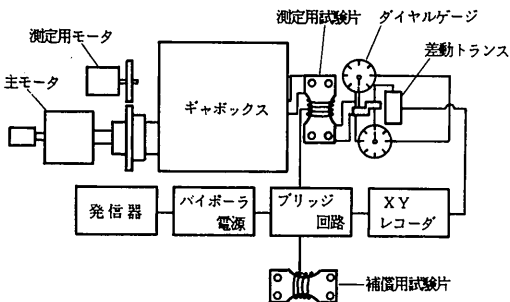


図2-2 試験装置概要

用いた試験機は容量 4 kg・m のシェンク式疲労試験機で、試験は応力振幅一定、応力比を -1、繰返し速度 3000cpm として行った。

試験装置の概要を、図 2-2 に示す。ポピンに、直径 0.29mm のホルマル線を幅 20mm にわたって、800 回巻いてピックアップコイルとし、試験片 2 個に図 2-3 に示すようにそれぞれセットする。ピックアップコイルは、図 2-4 のブリッジ回路の二辺を構成している。このブ

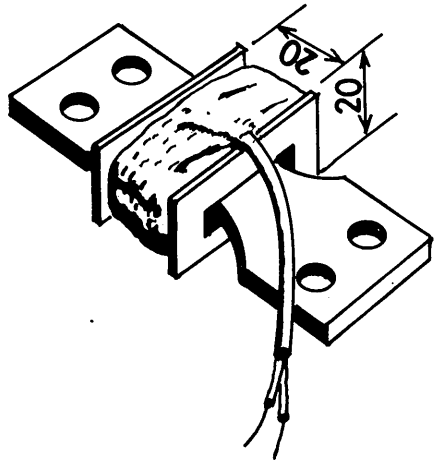


図2-3 測定用ピックアップコイルを装着した試験片

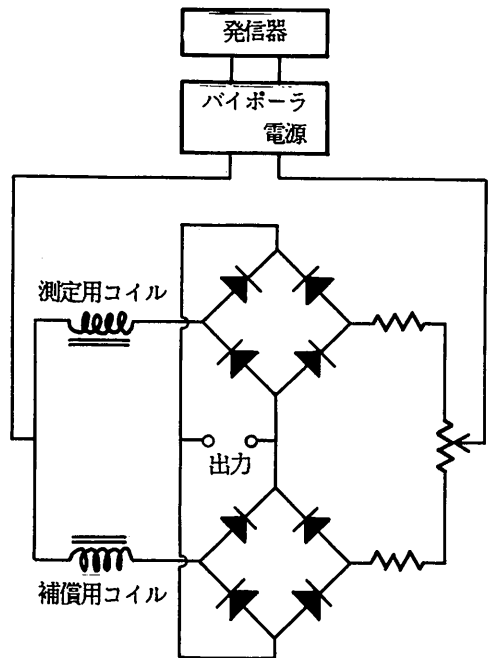


図2-4 ブリッジ回路

ブリッジ回路は磁気ひずみ効果を利用して残留応力を非破壊で測定するストレススタ⁴⁾に使用された方式と同じである。ブリッジ回路はピックアップコイルと試験片の一组を試験機に装着し、平衡をとる。磁気ひずみ効果を得るための検定用応力として、疲労試験機の主機モータにかわり、測定用モータで試験機をゆっくり駆動させ、試験機にとりつけた試験片に曲げ応力±15kg/mm²を与える。測定試験片に検定用応力を与えることにより測定用のピックアップコイルのインピーダンスが変化し、ブリッジの平衡が破れて不平衡電流が生じる。これを磁気ひずみ出力としてXYレコーダのY軸に入力する。一方、試験片に加えられた曲げモーメントはダイヤルゲージの読みから求められる。ダイヤルゲージのスピンドルの変化は差動トランスで検出してXYレコーダのX軸に入力する。XYレコーダには図2-5のような図形を描くことができ、これを磁気ひずみ出力曲線とする。この操作を疲労前から疲労過程の任意の繰返し数の段階で疲労試験を停止して行い、磁気ひずみ出力曲線の高さh、履歴幅aを測定した。

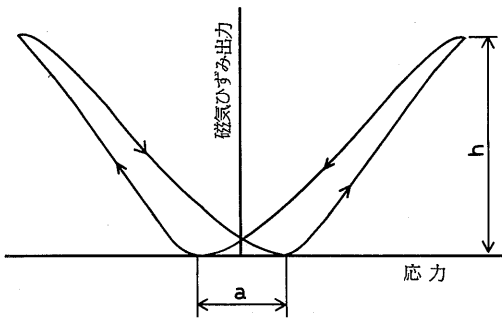


図2-5 振り応力による磁気ひずみ出力曲線

2.1.2 結果および考察

磁気ひずみ出力曲線のなかで疲労過程に変化する量は磁気ひずみ出力曲線の高さhと履歴幅aであった。このh、aの値と疲労前の磁気ひずみ出力曲線の高さh₀、履歴幅a₀との比h/h₀、a/a₀が応力繰返し数Nにより変化する様子を図2-6、7に示す。繰返し疲労応力振幅σ_aが高くなる程、hはNの増加につれ急激に低下し、aは急激に上昇した。このことは磁気ひずみ出力と検定用応力との比である磁気ひずみ感度が、疲労の進行にともない低下することを示すものである。

磁気ひずみ出力曲線を描くための検定用応力としては、±15kg/mm²を用いているが、実機稼働中の微振動などの利用を考慮すれば、検定用応力を低くすることが、

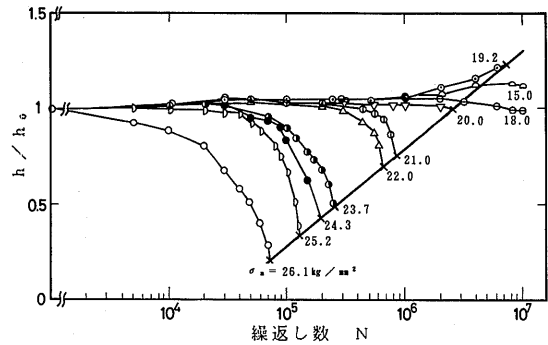


図2-6 h/h₀と繰返し数との関係

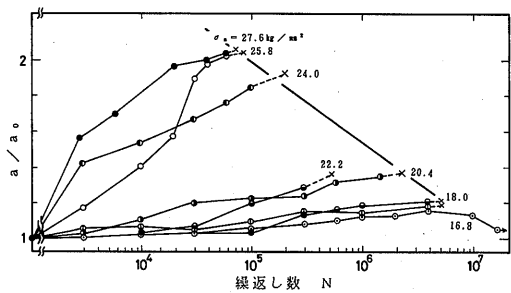


図2-7 a/a₀と繰返し数との関係

実機に应用する際には利点となる。この検定用応力を低くした場合においても、hは検定用応力にほぼ比例して減少した。

ブリッジ回路にあたる電源周波数、すなわちピックアップコイルにより試験片を磁化する磁界周波数は、従来より50Hzを使用していたが、磁界周波数を変化させた場合のhの変化の例を図2-8に示す。20~400Hzの磁界周波数で測定した時のh/h₀はNに

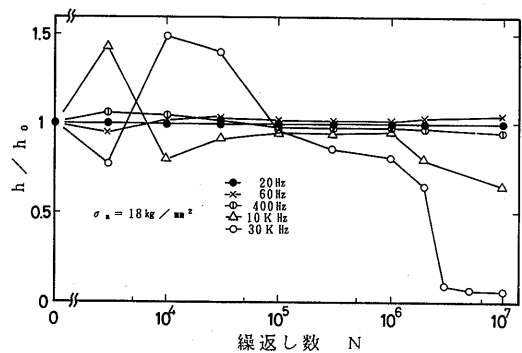


図2-8 各磁界周波数におけるh/h₀と繰返し数との関係

対し殆ど変化がみられない。しかし、10k、30kHz₂で測定すると h/h₀は、両者とも N=3000付近で大きく変化を示しており、30kHz₂では N=1×10⁶以降、10kHz₂では N=1×10⁶以降、減少しはじめ、さらに大きいNに対しては急激な減少を示した。

理論的には磁界周波数60Hz₂では磁束が試験片の中心まで通り、10~30kHz₂では表皮効果により90~50μm程度の深さまでしか磁束が侵入しないことが知られている。このことから、60Hz₂ではhの測定値から試験片全体に関する情報が得られ、試験片全体として疲労被害がないようにみえる。10~30kHz₂では、試験片表面に関する情報が得られ、曲げ疲労による試験片表面の塑性変形をとらえて、h/h₀が早い時期に減少を示すものとする。このことは磁界周波数を変化させることにより試験片深さ方向の疲労情報や材質劣化情報が非破壊的手法で得られる可能性を示すものである。

ピックアップコイルに測定試験片を挿入して磁気ひずみ効果を調べることによる疲労検出の方法は、大型構造物のような実機には不向きである。しかし、供用機器の機構部品で特定の形状試料についての工業的な計測法には有効である。

2.2 鋼の疲労度による磁気特性の変化

鋼の疲労度測定に際し、磁気的手法の有効性を調べるため、疲労による鋼材の基本的な磁気特性の変化を測定した。

2.2.1 試験方法および測定装置

用いた試験片の材料は厚さ55mmのSM41Bで、図2-9に示す形状に製作した。材料の化学成分と試験片の機械的性質は表2-2に示す。なお、試験片の長手方向は圧延方向にとった。また、熱処理は施していない。

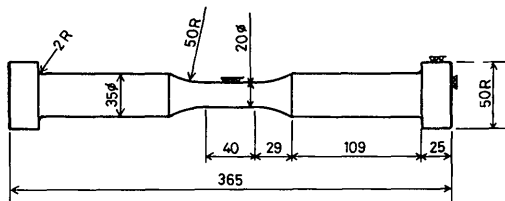


図2-9 試験片形状

用いた試験機は容量20トンの油圧サーボ疲労試験機で、試験は応力振幅一定、応力比-1、波形は正弦波、繰返し速度は応力振幅により0.3Hz₂又は1 Hz₂とした。測定装置の概要を図2-10に示す。

試験片を磁化する磁化コイルには2分割のソレイド(24)

表2-2 試験片の化学成分と機械的性質

化学 成分 (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.16	0.20	1.06	0.018	0.003
機 械 的 性 質				
σ _{LY} (kg/mm ²)	σ _{UL} (kg/mm ²)	σ _B (kg/mm ²)	El. (%)	
24.5	33.0	40.3	41	

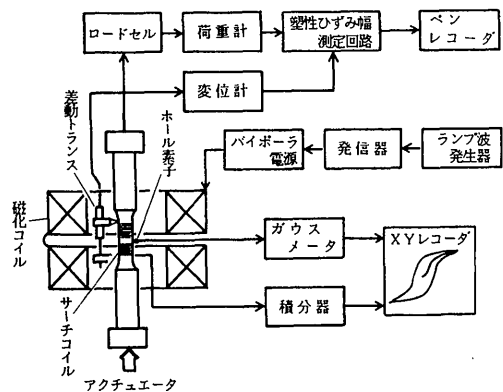


図2-10 試験装置概要

コイルで直径1mmのホルマル線を3928回巻いたものを用いた。このコイルは空心の場合

$$H=265 I, (Oe)$$

の磁界を与える。Iは磁化電流(A)である。図2-11に試験片を磁化した場合の試験片表面よりの外部磁界分布の測定結果を示す。

試験片を試験機に装着した状態で0.01Hz₂の正弦波信号を直流増幅器により電力増幅して、磁化コイルに磁化電流を供給し、試験片を磁化した。試験片内部の磁界を評価する場合、従来の磁気特性測定に際し用いた環状試料や寸法比の大きな棒状試料の場合は反磁界が0か、無視できる値である。しかし、疲労試験片のような中央部がくびれた磁氣的に複雑な形状では、試験片のフィレット部と肩のあたりおよび試験片両端に発生する磁極による反磁界を無視できない。そこで磁界の接線成分は連続であるという電磁気学の境界条件を試験片表面に適用し、磁化コイル中央部の仕切板の穴に極小のホール素子(2×1mm)を挿入、試験片表面の磁界を測定することにより試験片内部磁界を近似

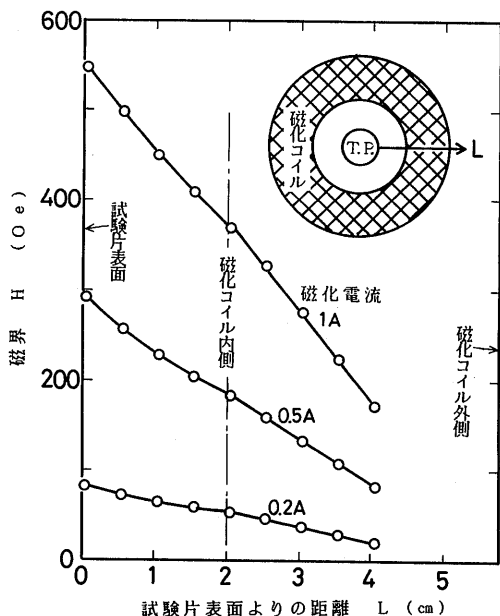


図2-11 試験片の外部磁界分布

した。試験片平滑部には直径0.05mmのホルマル線を420回直巻し、磁束の変化による誘起電圧を積分定数1秒の積分器により積分して内部磁束とした。内部磁界と磁束の出力はXYレコーダに入力し、磁気ヒステリシス曲線を描いた。この操作を疲労前から疲労過程の任意の繰返し数の段階で疲労試験を停止して行い、磁気ヒステリシス曲線より磁気特性値をしらべた。なお、残留磁気による影響をはぶくため、磁気特性測定終了のたびに消磁を行った。

一般に強磁性体の磁界による磁化強さの変化は四つの部分に分けることができる。第一は磁界のごく弱い範囲で磁界に比例して増加する初透磁率範囲、第二は磁化が急激かつ不可逆的に増加する不連続磁化範囲または不可逆磁壁移動範囲、第三はゆるやかに磁化の増加する回転磁化範囲である。第四はさらに磁界を増すと磁化は飽和に達する。この様子を図2-12に示す。また、磁化の特性を現す特性値は種々あり、それらと強磁性体の磁界Hと磁束密度Bとの関係を示す磁気ヒステリシス曲線を図2-13に示す。

試験片の変位測定は渦電流方式の差動トランスをエッジを用いた治具によって試験片平滑部（標点距離40mm）の位置に取り付け、疲労試験の間、常時測定した。なお、変位計と取付治具は強磁性体を一切使用せず、磁気測定に際し磁界を乱さぬように考慮した。検出し

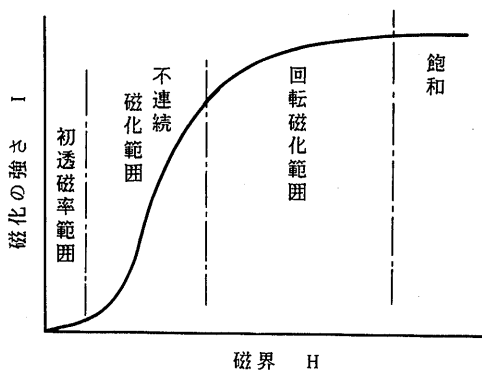


図2-12 磁化特性

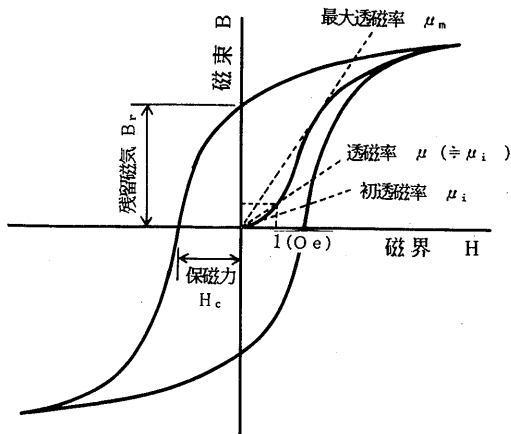


図2-13 磁気ヒステリシス曲線

た変位出力はサンプルホールド回路を応用した塑性ひずみ幅測定装置により演算した。塑性ひずみ幅の挙動はペンレコーダでモニタした。塑性ひずみ幅測定装置のブロックダイアグラムを図2-14に示す。



図2-14 塑性ひずみ幅測定装置

2.2.2 結果および考察

引張圧縮疲労過程において、上降伏応力 σ_{UY} と下降伏応力 σ_{LY} を持つ軟鋼材は、繰返し応力振幅 σ_a が

$\sigma_{LY} > \sigma_a$, $\sigma_{UY} > \sigma_a > \sigma_{LY}$, $\sigma_a > \sigma_{UY}$ のそれぞれの領域では、疲労過程で塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p$ の変化に特徴的な挙動を示すことが知られている。応力・ひずみの関係は初めに弾性変形を示す。その後、塑性変形が発生し、ヒステリシスが現れる。そのヒステリシス曲線が疲労繰返しとともに引張り側に移動していく、このときのヒステリシス幅である塑性ひずみ幅を $\Delta \epsilon_p$ とした。また、疲労試験の停止は引張りから圧縮の応力を加えたのち、応力 0 の位置で行っているが、この疲労試験停止時の停止永久ひずみを ϵ_p 、さらに疲労試験中の最大ひずみ振幅の中央の値である平均ひずみを ϵ_M とした。これらの関係を図 2-15 にしめす。

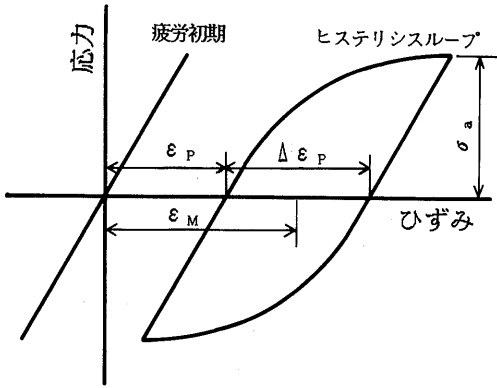


図2-15 応力-ひずみ線図

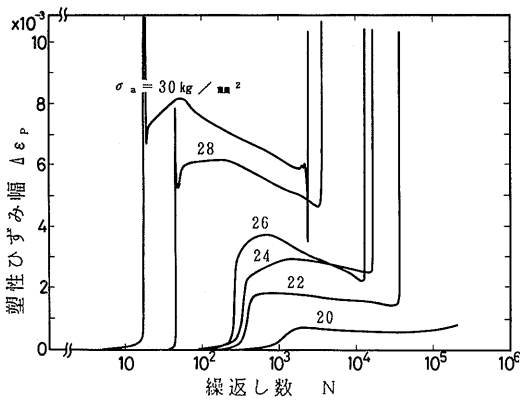


図2-16 疲労過程の塑性ひずみ幅

σ_a をパラメータにした場合の疲労過程における $\Delta \epsilon_p$ の挙動の一例を図 2-16 に示す。なお、 $\sigma_a = 20 \text{ kg/mm}^2$ の場合 (26)

合は 20 万回で実験を打ち切った。疲労過程初期の $\Delta \epsilon_p$ は 0 から $10^{-5} \sim 10^{-4}$ のオーダーで微増し、当該試験片の場合、破断繰返し数 N_f の 0.5 ~ 2% の付近で急激に上昇した。 σ_a が $\sigma_{LY} < \sigma_a < \sigma_{UY}$ のときは $\Delta \epsilon_p$ の挙動にするどい頂点をともなう。その後 $\Delta \epsilon_p$ は疲労過程の大半をゆっくり減少し、反転上昇して破断に至った。この反転時は微視き裂が巨視き裂へと発展していく段階である。

図 2-17 に疲労試験により、得られた S-N 曲線を N_f によって示す。また、疲労過程初期に発生する $\Delta \epsilon_p$ の急増点 ($\Delta \epsilon_p$ が最高値の 1/2 に達したときの繰返し数とする) を N_p によって示す。また、試験片形状および材質は異なるが、試験片平滑部にゲージ長 1 mm の応力集中ゲージ 12 枚をはりつけて疲労試験を行った。各ひずみ測定点における $\Delta \epsilon_p$ の挙動を図 2-18 に示す。図より過大なひずみ発生によるひずみゲージの剝離が一部に起こっているが、試験片平滑部の 1 ~ 4 番の測定点に発

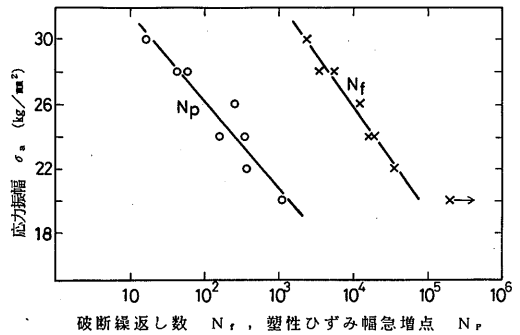


図2-17 各応力振幅における破断繰返し数と塑性ひずみ幅急増点

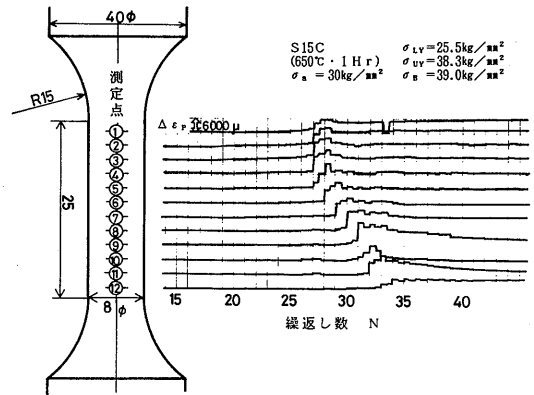


図2-18 試験片各点における塑性ひずみ幅挙動

生した塑性ひずみ領域が、繰返し数とともに順次12番の方へ移っていく様子をはっきりわかる。さらに、 $\Delta\epsilon_p$ の急増とビッカース硬度の急増や疲労すべり帯の発生時期とが一致⁵⁾することから、図2-18の N_p の曲線は微視き裂発生や、き裂発生を示すと同様な一種の損傷曲線であるといえるし、引張試験におけるリューダース帯伝播過程と同様な局部的または微視的な塑性領域が試験片全体に拡大していく段階であると考えられる。

図2-16に示した疲労過程の塑性ひずみ幅挙動と対比した磁気特性の測定例を図2-19~23に示す。図2-19は σ_a が $\sigma_{LY} > \sigma_a$ の場合で疲労初期の $\Delta\epsilon_p$ の急増に頂点を持たない(図2-16参照)。最大透磁率 μ_m 、残留磁気 B_r 、保磁力 H_c は $\Delta\epsilon_p$ の急増し始めるまでの変化は少なく、 $\Delta\epsilon_p$ 急増後に大きく変化し始め μ_m 、 B_r は減少、 H_c は増加を示す。その後、 $\Delta\epsilon_p$ が最大値を示すN値近傍で、 μ_m 、 B_r は増加、 H_c は減少する。疲労過程の大半をしめる $\Delta\epsilon_p$ 減少の段階では、磁気特性値の変化は少なく、破断直前で $\Delta\epsilon_p$ が急増するところで μ_m 、 B_r は減少、 H_c は増加する。これらは $\Delta\epsilon_p$ の挙動とも対応ある変化を示した。

図2-20は σ_a が $\sigma_{UY} > \sigma_a > \sigma_{LY}$ のときのもので(図2-16参照)、疲労過程初期の $\Delta\epsilon_p$ 急増の前で磁気特性の測定ができなかったが、図中に示すように $\Delta\epsilon_p$ 急増までは、値の変化はなく、 $\Delta\epsilon_p$ が急増するN値でそれぞれの特性値は増加、減少を示している。N=300のところで μ_m が異常に高い値を示しているが、この点については後述する応力履歴または、ひずみ履歴などが影響していると考えられる。 μ_m の測定点の変動が大きいのは、測定精度が低かったためと考えられる。

図2-21は外部磁化電流振幅が1 Aの場合の磁界と磁束の最大値 H_m' 、 B_m' を示したものである。この場合の磁化の範囲は飽和に近い回転磁化範囲である。磁界、磁束の最大値には塑性ひずみ幅の挙動に対応した変化はなく、Nの増加につれてごくゆるい減少を示した。磁界、磁束の最大値が塑性ひずみ幅の挙動に対応した変化を示さないということは、飽和に近い回転磁化範囲では、材料の疲労による組織変化が磁気特性の変化として現れにくいことを示すものである。岩柳⁶⁾は加工材や焼なまし材による組織変化が高磁界での磁気ひずみ感度に与える影響が少ないことを報告していることから類推できる。なお、 $N = 1 \times 10^4$ 以後の H_m' 、 B_m' のわずかな回復は疲労試験休止(約10時間)によるもので、この原因については時効現象によるものと考えられる。

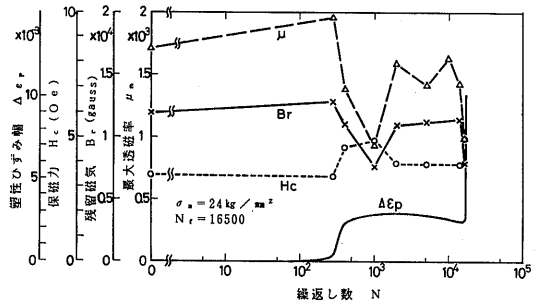


図2-19 疲労過程における磁気特性と塑性ひずみ幅

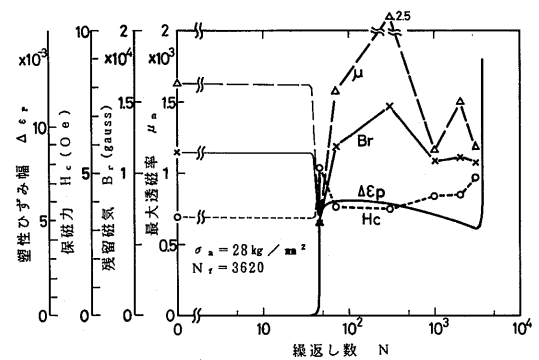


図2-20 疲労過程における磁気特性と塑性ひずみ幅

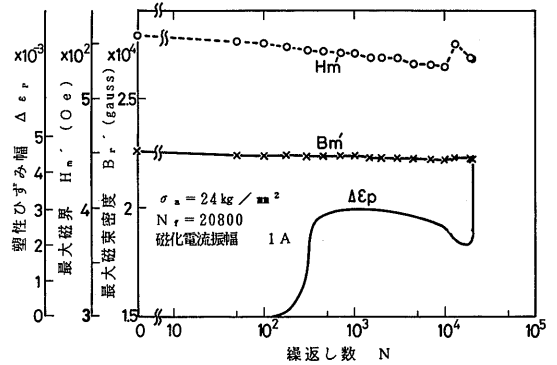


図2-21 疲労過程における磁気特性と塑性ひずみ幅

大型構造物のような実機について、磁気的手法による被測定物の非破壊的な疲労度測定を考えた場合、被測定物に対して相対的に小型の磁石で磁化を飽和または飽和に近い回転磁化範囲まで磁化することは困難である。そこで、より低磁界の不連続磁化範囲について磁気特性を調べた。

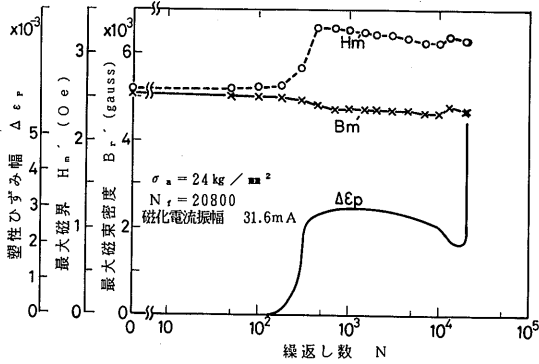


図2-22 疲労過程における磁気特性と塑性ひずみ幅

図2-22は外部磁化電流振幅を31.6mAとしたときの H_m' , B_m' と $\Delta\epsilon_p$ の変化を示したものである。この場合の磁化の範囲としては、不連続磁化範囲である。疲労過程初期の $\Delta\epsilon_p$ の立ち上がりにより、 H_m' は大きく増加し、 B_m' は減少を示した。このことは試験片に磁束が通りにくくなり、透磁率が低くなったことを示すものである。その後の $\Delta\epsilon_p$ のゆっくりした減少過程では、図2-21と同様に H_m' , B_m' も減少の傾向を示した。さらに、外部磁化電流振幅を10mAとした場合も同様な結果を得た。磁気特性測定時の磁界が回転磁化範囲以下にあるときは(図2-19, 20, 22), 疲労による転位や折出物などの組織変化のため磁壁の移動が妨げられる。このため、最大透磁率、保磁力、および、残留磁気などの磁気特性値が大きな変化を示しているものである。

図2-23は最大透磁率 μ_m , みかけの初透磁率 μ_i' と $\Delta\epsilon_p$ の変化の対応を示したものである。ただし、この場合の μ_i' は図2-13に示す磁界1 (Oe) の範囲の磁界と

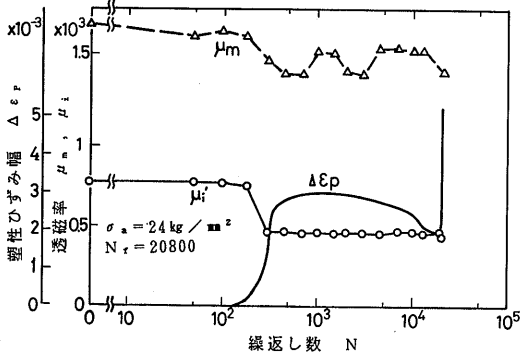


図2-23 疲労過程における磁気特性と塑性ひずみ幅

磁束の比より求めたものである。これは真の初透磁率 μ_1 と異なるものの、1 (Oe) の範囲がレーリー範囲*にあるとすれば、 μ_i' の変化は μ_1 の変化を定性的に現しているのとみてよい。図2-23の μ_i' は疲労過程初期の $\Delta\epsilon_p$ の立ち上がりではっきりした変化を示し、 $\Delta\epsilon_p$ の急増後は約6割に減少、その前後では一定の値であり、破断直前の塑性ひずみ幅の反転急増したところで、わずかな減少を示す。 μ_m は図2-19と一部の細かい変化を除き、ほぼ同様な結果を示した。測定値のばらつきが大きいのは、測定精度、応力履歴、永久ひずみによると考えられ、今後考察を加える必要がある。

*)レーリー範囲は磁界の一次式

$$\mu = \mu_1 + \alpha H \quad \alpha: \text{レーリー一定数}$$

が成立する低磁界の範囲で、透磁率が一定の初透磁率範囲より上で、不連続磁化範囲にいたる中間領域である。

2.3 磁気異方性センサによる疲労度測定

大型構造物のような実機の疲労度測定に際し、より実用的な使用を考慮した磁気異方性センサによる疲労度測定を行った。

2.3.1 試験方法および測定装置

用いた試験片の材料は厚さ20mmのSM41Bで、図2-24に示す形状に製作した。材料の化学成分と機械的性質は表2-3に示す。なお、試験片の長手方向は圧延方向にとった。また、熱処理は施していない。

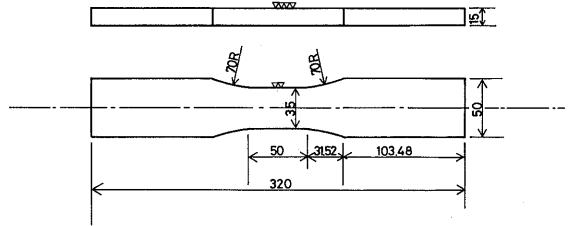


図2-24 試験片形状

表2-3 試験片の化学成分と機械的性質

化学成分 (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.10	0.21	1.13	0.15	0.041
機械的性質				
σ_{LY} (kg/mm ²)	σ_{UL} (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	El. (%)	
31.4	41.0	46.2	56	

用いた試験機は容量20トンの油圧サーボ疲労試験機で、試験は応力振幅一定、応力比を-1、波形は正弦波とした。

使用した磁気異方性センサの測定装置のブロック図を図2-25に示す。

磁気異方性センサは直径8mm、4本の足を有する形状で図2-26に示す。対向する2本の足には磁化コイル、他の2本には検出コイルを巻いてあり、巻数はそれぞれ640回である。センサは試験片に対して0.1mmのギャップをもうけて取り付け、試験片長手向に対し45度方向に磁化した。磁界周波数は1kHz、磁化電流は0.1Aである。試験片に応力が加わると、検出コイルに誘起電圧が発生し、その電圧を同期検波して出力(磁気ひずみ出力)が得られる。測定方法は疲労前から破断直前までの任意の繰返し数で疲労試験を停止し、試験片に磁気ひずみ効果を得るための応力±1kg/mm²を与える。得られた磁気ひずみ出力と応力の比をとり、磁気ひずみ感度 Λ (V/kg/mm²)とした。

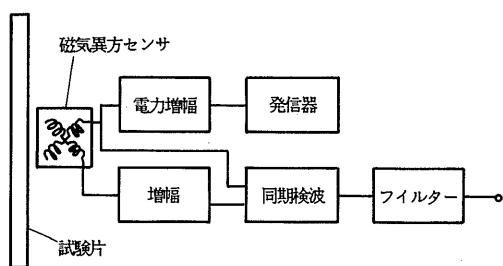


図2-25 磁気異方性センサ測定装置

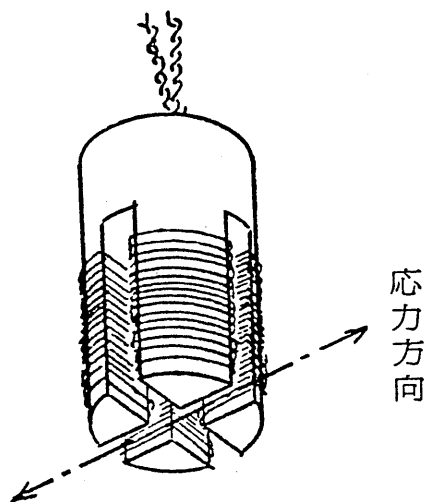


図2-26 磁気異方性センサ

試験片の変位測定はU字型変位計で試験片平滑部(標点距離50mm)の位置に取り付け、前項と同様の方法で塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ を測定した。

2.3.2 結果および考察

図2-27は同一ロットの試験片6本について、応力振幅を変えた場合の疲労過程の $\Delta\epsilon_p$ の挙動を示す。この平板試験片の場合は2.2項の丸棒試験片の場合と異なり、 $\Delta\epsilon_p$ の急増点 N_p は破断繰返し数 N_f にたいして10~24%を示した。この違いは試験片形状によるものと考えられる。図2-28に得られたS-N曲線を示す。

Λ と $\Delta\epsilon_p$ を縦軸に、磁気ひずみ感度測定時の繰返し数 N と破断繰返し数 N_f の比を横軸にして、疲労過程における Λ と $\Delta\epsilon_p$ の挙動を、図2-29に示す。引張圧縮疲労による Λ は、疲労過程初期の $\Delta\epsilon_p$ の急増時に急激に減少を示し、その後は、ほぼ一定または徐々に減少する。このように Λ と $\Delta\epsilon_p$ の挙動とはよく対応し、応力振幅に応じ10~60%減少した。

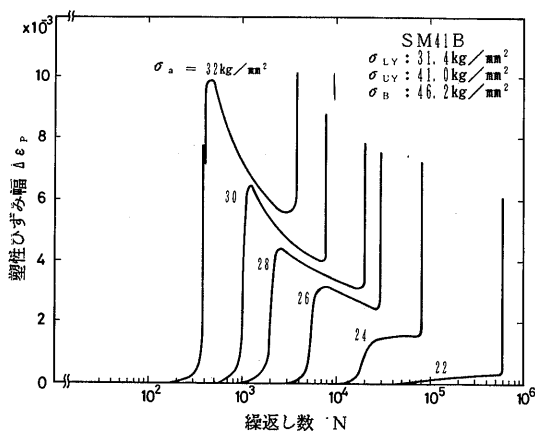


図2-27 疲労過程の塑性ひずみ幅

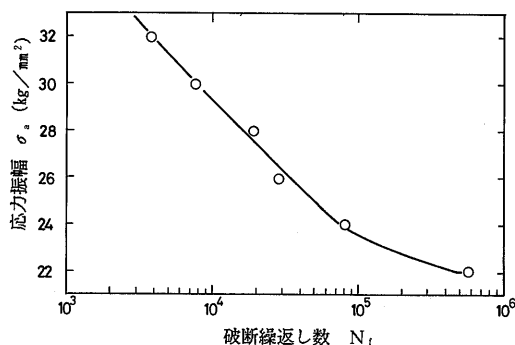


図2-28 S-N線図

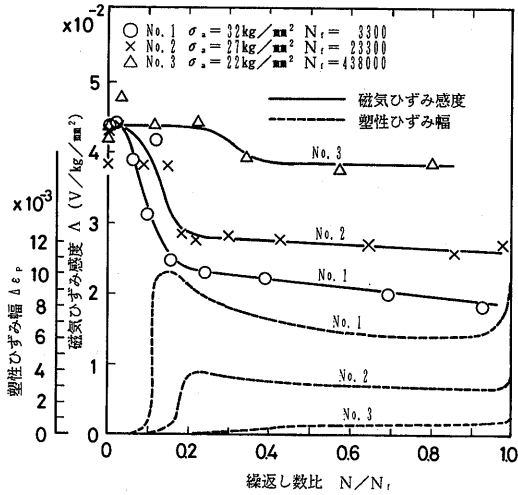


図2-29 疲労過程における磁気ひずみ感度と塑性ひずみ幅

なお、応力振幅 $32kg/mm^2$, $N/N_f=0.117$ の Δ が異常値を示している。これは疲労試験停止時の応力履歴によるものである。このときは図2-15で示すように圧縮側から応力0で停止せずに、引張応力が約 $15kg/mm^2$ 加わったため、試験停止時に ϵ_p が直前の測定点と大きくずれたためと考えられる。

図2-29における試験片No.1~No.3の結果より求めた疲労過程の Δ と $\Delta \epsilon_p$ の関係を図2-30に示す。図中の回帰曲線は図2-29における異常値と $\Delta \epsilon_p=0$ における値を除いて求めた。両者の間には強い相関がみられる。また、停止永久ひずみの絶対値 $|\epsilon_p|$ 及び平均ひずみの絶対値 $|\epsilon_M|$ との間についてもある程度の相関がみられた。その結果を図2-31, 32に示す。図2-33には静的引張試験により静的永久ひずみ ϵ_s を与えた

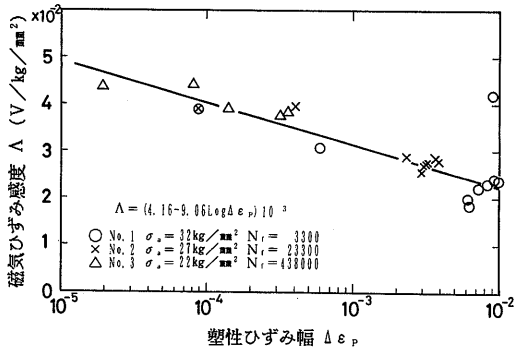


図2-30 磁気ひずみ感度と塑性ひずみ幅の関係

(30)

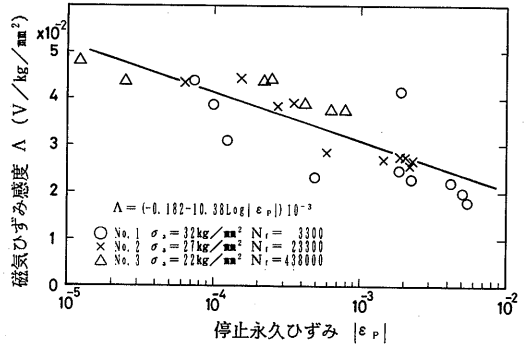


図2-31 磁気ひずみ感度と停止永久ひずみの関係

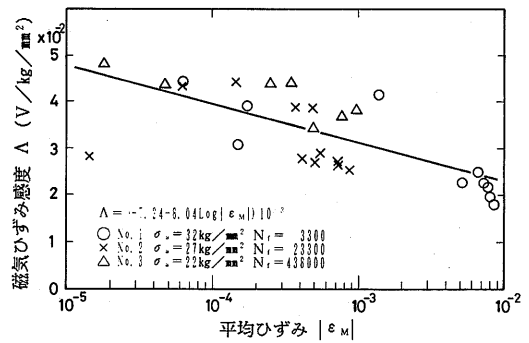


図2-32 磁気ひずみ感度と平均ひずみの関係

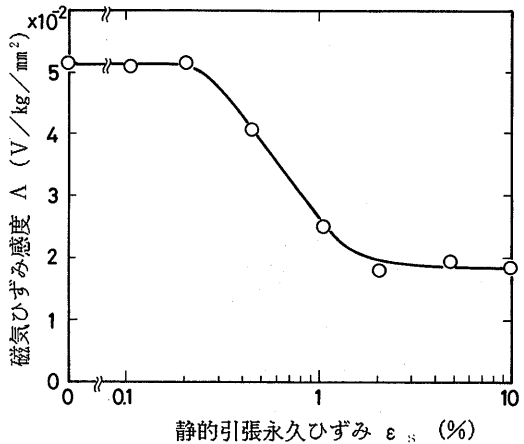


図2-33 静的引張試験による磁気ひずみ感度と静的引張永久ひずみの関係

後に除荷し、さらに検定用応力 $\pm 1 \text{ kg/mm}^2$ を加えたときの Δ を ε_s との関係を示す。 ε_s が約0.2%までは Δ は ε_s によらず一定となった。これは試験片の応力集中部に発生した塑性域が、センサの測定領域まで達しないためである。 ε_s の増大に伴い塑性域が拡大し Δ は減少しはじめている。さらに、 ε_s が1%をこえると、 Δ は ε_s によらず一定になった。この場合の Δ の減少量は疲労試験における Δ の減少量(図2-29)とほぼ等しい。このことはきわめて興味ある結果である。図2-29における Δ の異常値などから、 Δ に大きく寄与するものとして、 $\Delta\varepsilon_p$ のみでなく、 ε_F も考慮する必要があると考える。

2.4 まとめ

磁気ひずみ効果による曲げ疲労の検出において、磁気ひずみ出力曲線の最大出力がほとんどの場合、疲労にともなって低下した。また、そのヒステリシス幅が大きくなった。磁気ひずみ出力曲線を得る検定用応力には、実機稼働中の応力などを利用することによって、本方法は疲労検出に有力な手段となりうる。さらに磁界周波数を高くすることにより試験片表面の疲労情報が早期に得られることがわかった。

鋼材の疲労過程における磁気特性の変化は、不連続磁化範囲以下の低磁界であれば磁気特性を測定することにより、材料の組織敏感性が顕著に現れ、塑性ひずみ幅の挙動とよく対応した変化を示した。これらの現象を利用することにより、鋼材の疲労度測定の可能性があり、さらに、疲労機構の考察にも役立つものと思われる。

大型構造物のような実機を想定し、磁気異方性センサを疲労試験に適用した。このセンサは被測定物の大きさ、厚さに影響されず小型軽量、非破壊的な接触または非接触の使用ができる。磁気ひずみ感度は疲労過程の塑性ひずみ幅の挙動とよく対応し、疲労度測定に有効な手段になると考える。

3. 磁界中超音波減衰測定による疲労度の測定

3.1 測定法および装置

鋼などの強磁性材料に磁界を加えて、超音波を入射させると、超音波の減衰が少なくなることは、すでに報告されている⁷⁾。これは磁区が磁界方向に揃うことによって、磁区の境界(磁壁)が少なくなり、磁壁の弾性振動による超音波の減衰が少なくなるためと考えられる。また、引張りによって永久ひずみを与えた場合は、永久ひずみのない場合に比べて、磁界中超音波の減衰は大きくなることが報告されている⁸⁾。したが

って、内部ひずみも磁界中の超音波減衰量と密接に関係していると推定される。

以上の現象から、疲労損傷によって生ずる内部ひずみの増加は磁界中超音波の減衰の増大をもたらすと思われるので、この現象を明らかにし、疲労度の推定に利用できることを確かめた。

構造用鋼の疲労損傷の検出に、疲労に伴う磁界中超音波減衰量の変化を利用する技術としては現在、次の方法がある。すなわち鋼に磁界を加えてない場合の超音波受信音圧 E_0 と磁界を加えた場合の受信音圧 E_n の比、 E_n/E_0 (以後、超音波磁気感度と呼ぶ)を求め、この比の変化から疲労損傷の程度(疲労度)を推定するというものである。

超音波磁気感度は相対値であって、鋼の表面状態の影響が相殺される相対値測定によるものであるため、腐食等による鋼材の表面状態に影響されず疲労に伴う磁界中超音波減衰量比の変化を正確に、かつ、再現性良く測定できるという利点を持つ。なお、磁界中超音波減衰量は磁束密度、超音波の波長等にも影響されるので、これらの条件を一定に保持して測定する必要がある。

使用装置は通常の超音波探傷器、可変定電流電源(0~8 A)および外部磁石である。外部磁石は試験体に応じて適当なものを用いた。超音波は周波数が高いほど超音波磁気感度が高くなるが、減衰との関係から5MHzの周波数を用いた。

3.2 実験結果および考察

3点曲げ疲労試験による確認

断面20mm角のSM50材について図3-1に示すように3点曲げ疲労試験を行った。超音波音圧は、荷重点を中心として斜角2探法および表面波2探法の2方法で測定し、磁界は荷重点を中心にして直流極間法により加えた(図3-2)。外部磁石は断面20×20mmの磁心を有する磁極間距離65mmのコの字形で、直径0.6mmのエナメル線を400回巻いてある。

図3-3の①から④に斜角探触子5MHz45°(5Z10×

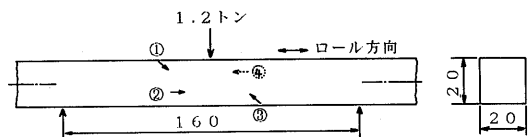


図3-1 3点曲げ疲労試験片, SM50材(圧延材から加工), ○内数字は超音波測定面

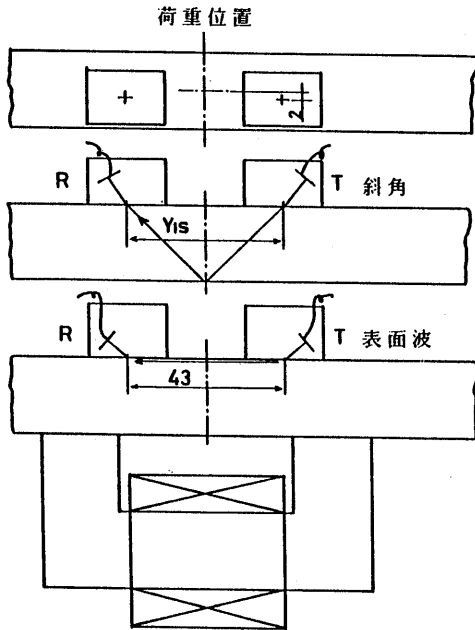


図3-2 超音波探触子および外部磁石の配置図

10A45) を用いた場合の各測定面における超音波磁気感度と磁化電流との関係を疲労繰返し数 N に関して示す。図において、測定面②が引張応力部、④が圧縮応力部、①が圧縮→引張→圧縮部および③が引張→圧縮→引張部をそれぞれ超音波が伝播する。 $N=0$ において測定面②および④の超音波磁気感度は①および③のそれらより大きくなった。両者の違いは圧延方向に対する超音波ビーム方向の違いである。①および③では圧延によって生じた層状の組織を超音波が突き抜けるが、②および④では超音波は層状組織に平行である。しかし、どの場合にも磁界が同一方向であるため磁束数には変化がない。変化をもたらす要因としては層状組織に束縛されている磁壁と超音波ビームとの関係、 E_0 の絶対値等が考えられる。

図3-3から N が大きくなるにつれて超音波磁気感度がどの測定面でも低下することが判る。図3-3の④では $N=3 \times 10^5$ において、超音波磁気感度が負側に転じている(反転現象と呼ぶ)。このような反転現象は塑性変形に特有である。同じ繰返し数でも超音波磁気感度は測定面によって異なる。これは片振3点曲げ疲労試験であるため、引張応力部と圧縮応力部とで疲労損

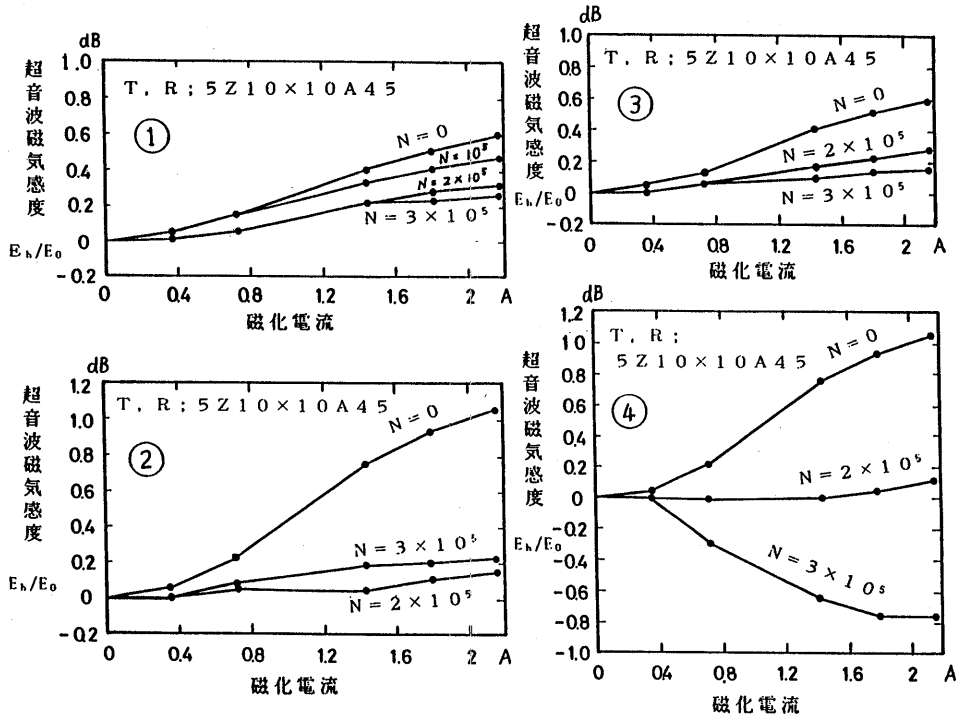


図3-3 3点曲げ疲労試験における超音波磁気感度と磁化電流の関係(測定面①~④)

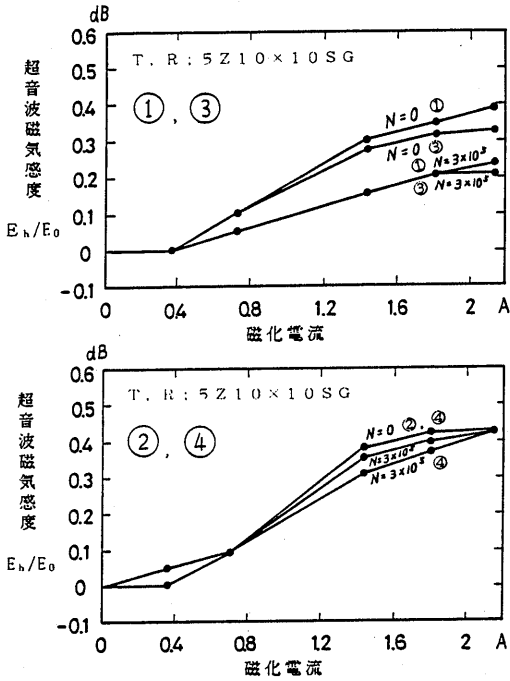


図3-4 表面波による超音波磁気感度と磁化電流の関係 (測定面①③および②④)

傷に違いが生じているためと思われる。以上から磁界中超音波減衰量は疲労の進行に伴って変化することが明らかとなった。

表面波による測定では、 $N = 0$ での超音波磁気感度が斜角による場合よりも小さく、 N が増加した場合でもその変化が少ない(図3-4)。また、測定面②および④では鋼材が疲労損傷しているにもかかわらず、その変化は微少である。したがって、表面波による方法では適切な測定面を選ぶ必要がある。

両振曲げ疲労(シェンク)試験

シェンク疲労試験による両振曲げ疲労損傷の検出実験を行った。供試材は船体用圧延鋼 KE36 である。その機械的性質および化学成分を表3-1に示す。試験片の形状および寸法は図2-1(ただし、板厚は2.6mm)示す。送信、受信探触子は5Z10×10A45、外部磁石は3点曲げ疲労試験に用いたものと同様である。表3-2に各試験片の番号と繰返し応力および破断回数 N_f を示す。図3-5、図3-6に超音波磁気感度と繰返し数との関係を示した。図3-5は試験片が圧延材の板厚中央部の場合で、超音波磁気感度は N が 1.5×10^5 強で僅かに低下し、 N が $3 \sim 4 \times 10^5$ では急激に低下する。以

後の N においてはあまり変化がなく破断直前に急上昇する。図3-6の場合、試験片は鋼板の表面部から取った場合で、超音波磁気感度は疲労試験前には小さいことが前図と異なっており、これは圧延の影響と思われる。 N が増加すると超音波磁気感度は上昇し、そして、明白な低下を示す。図3-5および図3-6から、 N_f の10~25%の繰返し数で、超音波磁気感度の明瞭な低下を示すこと、それらの点は応力振幅が大きい程 N_f に対して早い時期にあることが判る。

表3-1 供試材 KE36 の機械的性質と化学成分

化学成分 (%)							
C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Al
.16	.36	1.42	.017	.005	.03	.05	.026
機械的性質							
σ_Y (kg/mm ²)		σ_B (kg/mm ²)		El. (%)		I. Test(kg·m)	
38		54		32		12.2	

表3-2 試験片番号、繰返し応力および破断回数

試験片番号	繰返し応力	破断回数
TM 9	± 30 kg/mm ²	1.345×10^6
T 8	± 30 kg/mm ²	1.453×10^6
TS 9	± 32 kg/mm ²	—
LS 9	± 37 kg/mm ²	8×10^4

L; ロール方向, T; ロールに垂直方向, S; 表面部
M; 板厚中央部, T 8); ロールと板厚に垂直方向

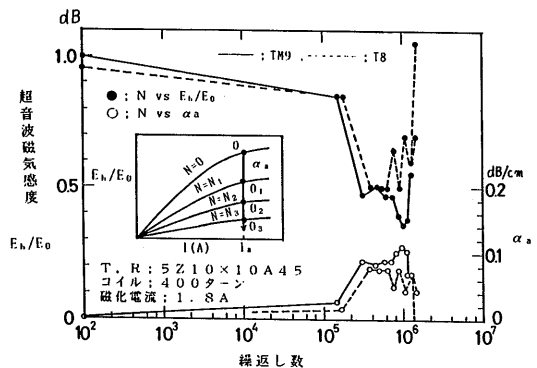


図3-5 シェンク疲労試験における繰返し数と超音波磁気感度の関係 (試験片 TM 9, T 8)

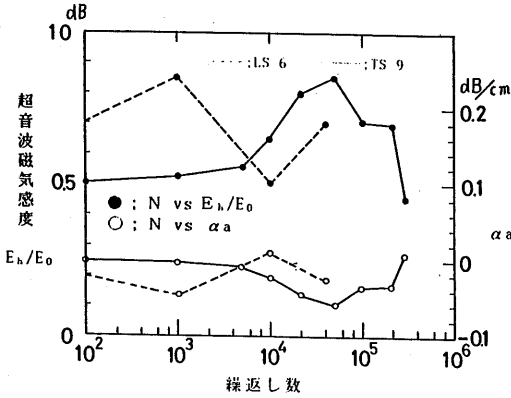


図3-6 シェンク疲労試験における繰返し数と超音波磁気感度の関係 (試験片 TS9, LS6)

片振引張疲労試験

西原式疲労試験機による片振引張疲労損傷の検出実験を行った。供試材は SM50A である。その機械的性質および化学成分を表 3-3 に示す。図 3-7 は試験片の形状、寸法および測定部 3 箇所 (斜線域) を表す。用いた外部磁石は磁心断面が $11 \times 35\text{mm}$ 、コイルは 250 回巻きである。図 3-8 は標点間 (50mm) の伸び (3 箇所) と繰返し数の関係である。図において、試験機ピストン側の応力集中部 (ネック部) は先に永久伸びが生じ、ついで反対側の応力集中部 (固定側ネック部)、試験片中央部の順となった。対応する超音波磁気感度の変化 (図 3-9) はピストン側の応力集中部の低下が

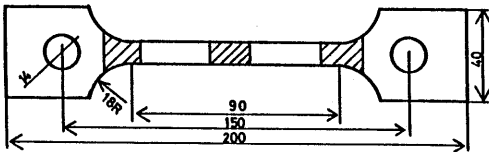


図3-7 引張疲労試験片の寸法および形状 (斜線域は測定部)

表3-3 供試材 SM50A の機械的性質と化学成分

化学成分 (%)				
C	Si	Mn	P	S
.16	.38	1.43	.02	.06
機械的性質				
σ_Y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	El. (%)		
37	54	27		

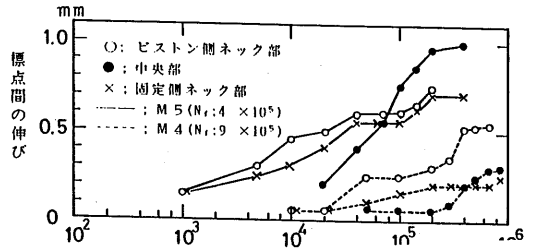


図3-8 標点間 (50mm) の伸びと繰返し数の関係

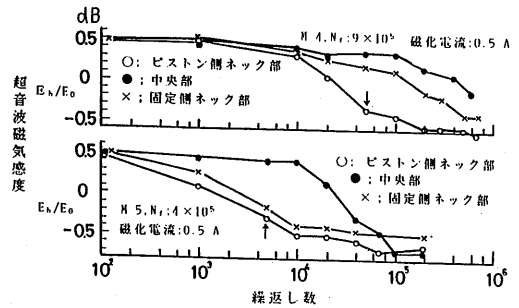


図3-9 引張疲労試験における超音波磁気感度と繰返し数の関係

最も早い。両図から超音波磁気感度は永久伸びと密接に関係することが判った。

ただし、繰返し応力が鋼の疲労限 (供試材では $0.83 \sigma_Y$) 以下の場合 (応力振幅 $0.7 \sigma_Y$ で実験), N が 10^6 に達しても超音波磁気感度は変化しなかった。

以上の結果から片振引張疲労損傷を検出する要点は超音波磁気感度が負側に転じる N (図 3-9 の矢印) で行うことである。この反転現象は塑性変形に特有の現象で、磁界を加えると超音波が通り難くなる。これは磁界を加えることにより磁壁の数が逆に増加し、超音波の振動損が大きくなるものとかがえられる。また、磁壁の増加については塑性変形時に磁区が揃う部分が生じ、そこに磁界を加えると磁区が乱れて磁壁が増加すると考えられる。

両振引張圧縮疲労試験

容量 20 トンの油圧サーボ疲労試験機を使用し、応力比 -1 の両振引張疲労試験を行い、その疲労損傷検出の実験をした。供試材は SM41B 鋼である。その機械的性質および化学成分は表 3-4 に、試験片の形状および寸法は図 3-10 に示した。応力振幅は試験片 No. 3 が $0.85 \sigma_Y$ 、No. 4 が $0.8 \sigma_Y$ 、No. 5 が $0.75 \sigma_Y$ であり、No. 6 は引張り永久ひずみ 3.3% を与えた後 $\pm 0.75 \sigma_Y$ 、No. 7 がひずみ 1% を与えた後 $\pm 0.75 \sigma_Y$ の計 5 本である。こ

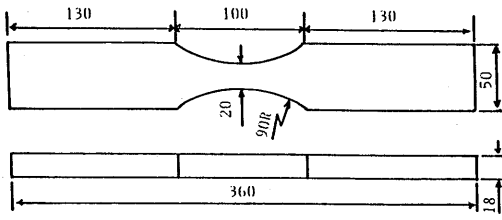


図3-10 試験片の形状および寸法

表3-4 供試材 SM41B の機械的性質と化学成分

化学成分 (%)				
C	Si	Mn	P	S
.14	.25	1.08	.014	.002
機械的性質				
σ_Y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	El.(%)	1.Test(kg·m)	
32	47	33	23	

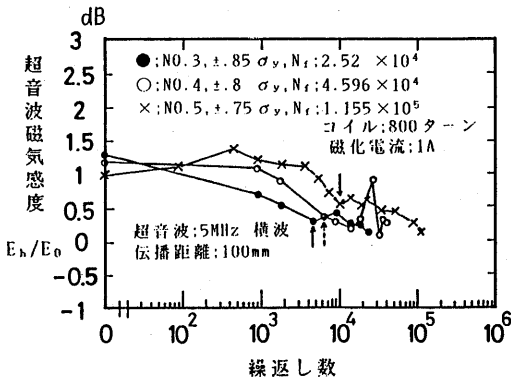


図3-11 超音波磁気感度と繰返し数の関係

ここではアクリル反射板を用いて超音波の路程を長くしている。疲労試験中は所定の繰返し数ごとに図2-11に示すような塑性ひずみ幅を求めた。

図3-11は予ひずみを与えない場合の繰返し数と超音波磁気感度との関係である。Nの増加に伴い超音波磁気感度が低下し、最初の谷(図3-11中の矢印)は応力振幅が高い程、そのN/N_fが小さい。これらはN_fに対して10~20%にあたる。図3-12は塑性ひずみ幅と繰返し数の関係である。試験片No.5において、塑性ひずみ幅はNが10⁴でほぼ飽和した。これに対し、図3-11のNo.5の超音波磁気感度の谷のN(矢印)と一致する。

よって、超音波磁気感度は塑性ひずみ幅とも関連していることがわかる。図3-13は予ひずみを与えた後の疲労試験結果であるが、超音波磁気感度の変化は明瞭なNの判断点を示していない。

以上の実験から疲労試験前に降伏を越えたひずみのない場合では余寿命の基準点となり得ると考えられる超音波磁気感度の明瞭な低下点が存在することがわかった。

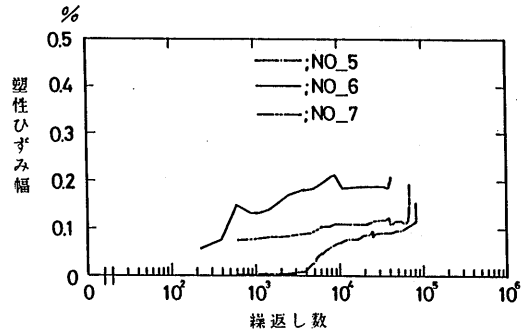


図3-12 塑性ひずみ幅と繰返し数の関係

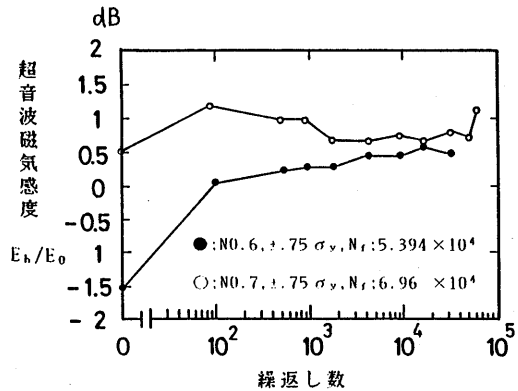


図3-13 永久ひずみを与えた場合の超音波磁気感度と繰返し数の関係

測定部材の大きさ、鋼種等の影響

図3-14は引張強度が40~80kg/mm²の鋼について超音波磁気感度を測定したものである。ここから本法の適用に妥当な鋼種はHT60あたりであることが分かる。試験体が、それに充分な磁界(不連続な磁壁移動が生じる程度)を加え得る大きさであることも本法適用の必須条件である。そこで、試験体の大きさだけを変えて超音波磁気感度を測定した。試験体は板厚12mmのSS41受入材をガス切断したものである。磁心

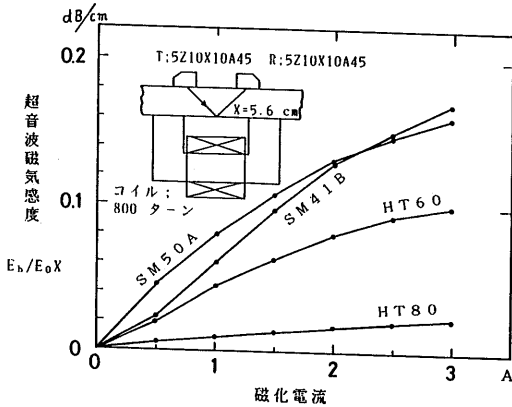


図3-14 構造用鋼における単位長さ当りの超音波磁気感度

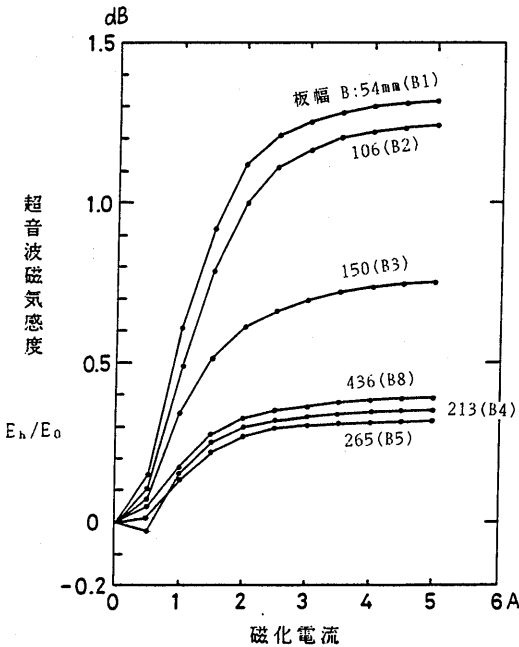


図3-15 試験材の幅を変えた場合の超音波磁気感度

断面20×54mm, 250回巻きコイルの外部磁石および2個の5MHz_{45°}探触子を用い, 圧延の影響を小さくするため, 超音波ビームの方向と磁界とを直交させた。図3-15に測定結果を示す。試験体の幅54mm (B1) は磁心と同幅で, 充分な超音波磁気感度を示した。幅が大きくなると感度は低下するが, B1の4倍以上では低下しない。この試験片断面は12×213mmの大きさとなる。したがって, 実機の試験箇所がこれより大きい場(36)

合でも, この試験体と同程度の超音波磁気感度が得られることになる。以上から本法は船体および橋梁の部材に適用可能と言える。

3.3 まとめ

鋼の疲労過程における超音波磁気感度の変化を, 曲げ疲労試験および引張圧縮疲労試験に対して調べた結果, 永久ひずみのない場合は明瞭な低下点が存在することが分かった。モニタリングによって検出された低下点は鋼疲労損傷における余寿命推定のために重要な情報を提供する。この低下点は応力振幅に関係し, 引張圧縮疲労試験では10~20% N_f , 引張疲労試験では2~6% N_f , シェンク疲労試験では20~25% N_f のところにある。

本法の適用可能な鋼としては, 第一に強磁性体であること, 第二にその鋼に磁界を加えたときに磁壁が移動し易いことを要する。磁壁が移動できない状態, 例えば転位密度が高い場合, 磁壁の移動を妨げる合金元素あるいは不純物元素を多く含む場合および塑性変形が加えられている鋼材では超音波磁気感度の測定は難しい。したがって, 適用鋼種としては一般的な構造用鋼が考えられる。

4. 超音波遷移温度法による疲労度の測定

4.1 技術的背景

構造用鋼の超音波減衰の遷移温度をその鋼材の材質劣化の評価に利用する非破壊評価技術の研究は昭和30年頃の榎木らの研究まで遡ることができる。そこでは, 0.15C, 0.4C, および0.55Cの3種の鋼において超音波遷移温度が存在し, これはまた脆性延性遷移温度の付近にあることが報告されている⁹⁾。また, ASTM A212B, A302B, A533B, およびA542の4種の鋼の場合, それらの超音波減衰定数は, 衝撃試験の破壊吸収エネルギーと同様に, それぞれ鋼材ごとに異なる温度領域において顕著な遷移を示し, かつこれらの遷移温度領域の上限は, どの鋼においても, DWTT試験のエネルギー遷移温度の近くにあることをすでに報告した¹⁰⁾。この方法では, 超音波減衰定数の遷移温度領域上限を以てフェライト系鋼の脆性亀裂伝播停止温度を推定した。また, 超音波遷移温度領域上限は, 暫定的に, sT_a と記し, 上限付近で最大曲率を与える温度とした。

本法においては, 試験片または被試験箇所の温度を変化させながら, 一定周波数の超音波をそれらに入射して伝播させ, 超音波減衰定数の温度依存特性を測定する。

疲労に関する榎木らの実験では、炭素鋼 S20C の片振引張疲労の場合、超音波遷移温度と繰返しの応力および回数との間には図 4-1 のような傾向の関係があることが知られている¹¹⁾。また、本研究において、

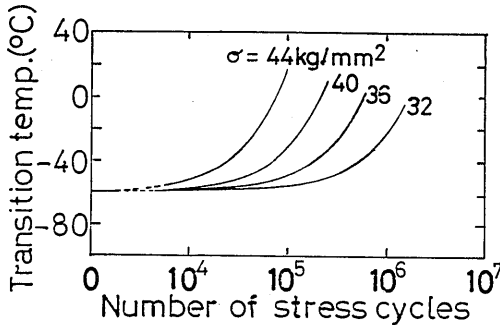


図4-1 S20C 鋼の片振引張疲労における繰返し応力，回数，および超音波遷移温度¹¹⁾

SM41B 鋼の両振引張圧縮疲労の場合に、非焼鈍で疲労試験にかけてない試験片を疲労亀裂の伝播が肉眼で認められる状態に達する破壊直前まで疲労させると、超音波遷移温度はおよそ50℃上昇し、疲労余寿命と超音波遷移温度とは直線的な相関があることが明らかになった。ここでは、特にことわらない限り、余寿命は現時点以前の疲労履歴と同じ疲労モードで、或る一定の繰返し応力および周波数によった場合の現時点から疲労破壊に至るまでの繰返し数によって測ることにする。この余寿命は実機の現時点までの疲労モードが判明しているときに有効であるが、現時点までの繰返しの応力、周波数、および回数が異なった疲労損傷状態であっても、余寿命が同じであればそれらの疲労損傷状態は等価であるということができ、厳密な意味での疲労度の尺度となるであろう。また、疲労による試験片の破断は、マクロ亀裂の発生後、急速に起こり、余寿命はマクロ亀裂発生までの期間とほぼ一致した。従って、この計測法へのマクロ亀裂発生による空隙等の影響は殆どないものとする。

4.2 測定法および装置

SM41B 鋼について、疲労モードとして両振引張圧縮疲労を取り上げ、疲労過程のある時点までの1次疲労試験では諸種の繰返し応力および周波数により、また、その時点以後の2次疲労試験では繰返し応力および周波数を $\pm 0.9\sigma_y$ 、 0.2Hz とし、その時点の余寿命と超音波遷移温度を測定する。実験に使用する疲労試験

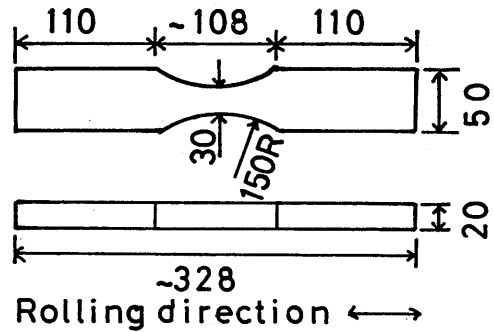


図4-2 両振引張圧縮疲労および超音波遷移温度の試験片

機は容量20トンの油圧サーボ疲労試験機である。試験片は SM41B 鋼の25mm 厚鋼板から図 4-2 のように切り出した。なお、試験片は焼鈍してない。超音波遷移温度の測定は測定周波数1~10MHz_zの超音波測定装置 UAC-77 および設定温度範囲-70~+180℃の小型超低温恒温槽 ULF-718-1 を使用し、多重反射法によった。超音波の入射には、縦波10MHz_z用の水晶圧電振動子素子を用いた。超音波測定装置において得られる多重反射の検波波形からマイクロ・コンピュータおよびトランジェント・メモリーを用いる計測制御によって試験片の超音波減衰定数の温度依存特性を測定した。

4.3 実験結果および考察

この実験において、非焼鈍で疲労試験にかけてない試験片を疲労亀裂の伝播が肉眼で認められる状態に達している破壊直前まで疲労させると、超音波遷移温度はおよそ50℃上昇し、超音波減衰定数は常温において30~40%低下することが観測された(図4-3)。また、同じ場合に疲労余寿命と超音波遷移温度とは直線的な相関があることが明らかになった(図4-4)。この疲労に伴う超音波遷移温度の上昇および超音波減衰定数の低下については、疲労の進行に伴って鋼材の内部に転位などが堆積して結晶構造は緊張し超音波は通り易くなる、一方、構成原子の熱振動は超音波を通り難くするが、超音波遷移温度が上昇することによって結晶構造の緊張の影響が相殺されるものと考えられる。

以上の実験結果から実機の局所の疲労度を超音波遷移温度単位で推定できる見通しが得られた。すなわち、①事前に実機の使用鋼材について図4-4のような疲労余寿命と超音波遷移温度との相関を実験によって調べておき、②局所の超音波遷移温度を定期的に測定す

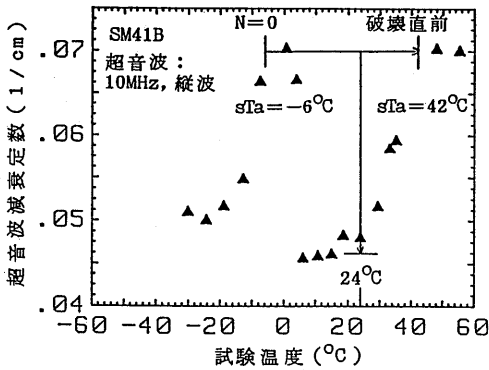


図4-3 疲労の進行に伴う超音波遷移温度 sTa の上昇

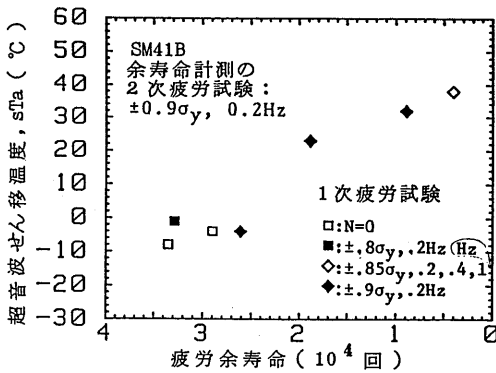


図4-4 疲労余寿命と超音波遷移温度 sTa との関係

ることによって実機の局所の疲労度を超音波遷移温度で推定する、③次に①において測定された疲労破壊直前の超音波遷移温度と②において測定された超音波遷移温度の上昇速度とに基づいて実機の疲労余寿命を後何年であると予測することが可能になるのではないかと考えられる。

5. 共通試験片による各計測法の比較

磁気ひずみ効果法、磁界中超音波減衰法、および超音波遷移温度法の各計測法の共通試験片による相互比較を行った。科学技術振興調整費により同じく材料の微視的損傷の計測技術の開発研究を行っている鉄道技術研究所のX線法についても共通試験片を用いて相互比較することが出来た。

共通試験片はSM41B鋼の厚さ20mm鋼板から図2-24のように切り出した。20トン油圧サーボ疲労試験機を使用して30 ($=0.96\sigma_Y$), 24 ($=0.76\sigma_Y$) kg/mm^2 の

2つの応力振幅で荷重制御の両振引張圧縮疲労試験を行い、各々の応力振幅の系列でそれぞれ疲労度の異なる試験片を数本作成し、各試験片とも塑性ひずみ幅と繰返し数を記録した。30 kg/mm^2 の応力振幅の系列では破断寿命 $N_f=7710$ 回であった試験片を、また24 kg/mm^2 では $N_f=81900$ 回であった試験片をそれぞれの系列の標準試験片とした。共通試験片の疲労特性を表5-1および5-2に示す。これらの表における塑性ひずみ幅はそれぞれの試験片の実測値であるが、繰返し数は塑性ひずみ幅に基づき標準試験片の繰返し数に引き直してある。

測定結果を表5-3および5-4にしめす。図5-1および5-2は、それぞれ表5-3および5-4の測定結果を図示したものである。ここに、磁気ひずみ感度は磁気ひずみ効果法の、超音波磁気感度は磁界中超音波減

表5-1 24 kg/mm^2 応力振幅における疲労特性

試験片番号	停止繰返し数($\times 10^3$)	塑性ひずみ($\times 10^{-2}$)
0-0	0	0
24-1	7	0
24-2	17	0.033
24-3	20	0.079
24-4	22.5	0.181
24-5	50	0.166
24-6	81	0.221
24-7	81.8	0.253

表5-2 30 kg/mm^2 応力振幅における疲労特性

試験片番号	停止繰返し数($\times 10^3$)	塑性ひずみ($\times 10^{-2}$)
30-1	0.60	0.016
30-2	0.92	0.071
30-3	1.03	0.301
30-4	1.07	0.593
30-5	1.20	0.731
30-6	2.00	0.585
30-7	5.00	0.467
30-8	7.00	0.423

表5-3 応力振幅24kg/mm²における各測定法

試験片番号	磁気ひずみ感度 (V/kg/mm ² ×10 ⁻²)	超音波磁気感度 (Eh/Eo)dB, at1A	UT 遷移温度 (°C)	X線半価幅比 (B/Bo), Bo=1.88
0-0	5.306	0.30	-1	1.0
24-1	5.191	0.54	15	1.01
24-2	4.761	-0.05	5	0.97
24-3	4.024	-0.51	-5	0.98
24-4	3.764	-0.28	14	0.93
24-5	4.081	0.03	18	0.87
24-6	3.238	0.17	-	0.82
24-7	3.989	-0.17	-	0.83

注) Eo;磁化電流0のときの超音波振幅, Eh;磁化電流1Aのとき(磁界H)の超音波振幅

表5-4 応力振幅30kg/mm²における各測定法

試験片番号	磁気ひずみ感度 (V/kg/mm ² ×10 ⁻²)	超音波磁気感度 (Eh/Eo)dB, at1A	UT 遷移温度 (°C)	X線半価幅比 (B/Bo), Bo=1.88
30-1	4.388	0	-5	0.97
30-2	3.379	-0.20	1	0.98
30-3	2.955	-0.05	-2	0.97
30-4	2.755	-0.31	2	0.86
30-5	5.233	0.10	4	0.76
30-6	2.364	-0.38	12	0.77
30-7	5.095	0.02	27	0.71
30-8	2.317	-0.39	33	0.74

衰法の、および超音波遷移温度は超音波遷移温度法の指標である。また、半価幅比は鉄道技術研究所のX線法の指標である。磁気ひずみ効果法、磁界中超音波減衰法、およびX線法では、いずれの指標も共に塑性ひずみ幅が急激に増加する点において急激な低下を示す。また、超音波遷移温度法では、塑性ひずみが始まる点から繰返し数の増加にしたがって遷移温度が上昇している。図5-2において磁気ひずみ効果法および磁界中超音波減衰法では、特異な測定値を示す試験片がある。これは一本の試験片について一貫して測定していないことにもよると思われる。また、応力振幅が24 kg/mm²と低い場合(図5-1)、超音波遷移温度法では測定点が大きくばらついている。鋼材の超音波遷移温

度は脆性延性遷移温度と良く一致するのであるが、ここでは、試験片によって脆化が大きくばらついているのではないかと思われる。

以上の結果をまとめると、磁気ひずみ効果法、磁界中超音波減衰法、およびX線法では疲労寿命の10~20%の疲労度を各計測法とも明らかに検出できた。超音波遷移温度法では、それ以後において疲労度と超音波遷移温度が対応している。磁気ひずみ効果法、磁界中超音波減衰法、およびX線法でも、鋼構造物の継続的モニタリングが可能であれば、塑性変形の変化点から疲労度を推定できると思われる。各計測法のそれぞれの特質は構造部材の疲労寿命の推定に有効であると考えられる。

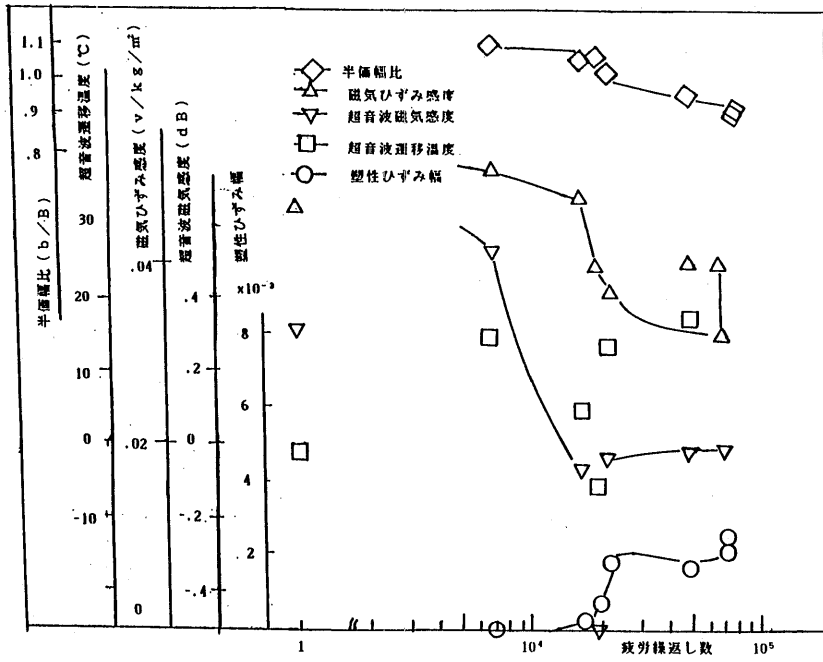


図5-1 応力振幅24kg/mm²における各計測法

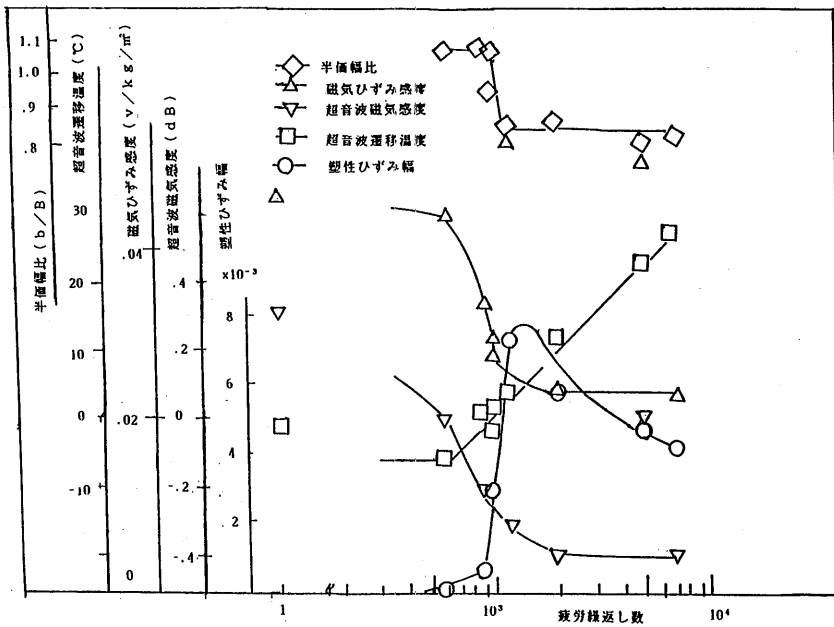


図5-2 応力振幅30kg/mm²における各計測法

6. 結 言

磁気ひずみ効果法および磁界中超音波減衰法では、磁気ひずみ感度および超音波磁気感度は共に疲労過程の塑性ひずみ幅が急激に増加する点において急激な低下を示す。従って、両計測法によって、鋼構造物の継続的モニタリングが可能であれば、塑性変形の変化点から疲労度を推定できると考える。超音波遷移温度法では、両振引張圧縮疲労の場合に余寿命と超音波遷移温度とは直線的な相関が観測された。従って、この計測法によって鋼構造物の疲労余寿命を推定できると考える。磁気ひずみ効果法では、磁気ひずみ感度測定の場合、磁気異方性センサは非接触型であり、かつ検定用応力が $\pm 1 \text{ kg/mm}^2$ とわずかで済むため、大型実用構造物への適用が容易であるという利点を持っている。磁界中超音波減衰法は、その超音波磁気感度が相対値測定によるものであるため、腐食等による鋼材の表面状態に影響されず疲労に伴う磁界中超音波減衰量比の変化を正確に、かつ再現性良く測定できるという利点を持つ。また、磁界中超音波減衰法は船体、橋梁等の部材に適用可能であることが確かめられた。超音波遷移温度法は実用構造物への適用においては試験箇所の試験温度設定が可能ならば、試験体の磁化および検定用応力を必要とせず、また試験体の大きさに制限が少ないという利点を持っている。従って、これからは3計測法のそれぞれの特徴を生かして、3計測法による総合的な疲労度評価を目指す必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、多大な御援助と御指導をいただきました科学技術庁研究調整局はじめ船舶技術研究所から出向された元船体構造部・松岡一祥、元機関性能部・高井元弘、元共通工学部・桜井昭夫の各氏および、元共通工学部長、現海洋科学技術セクターの岩柳順二博士をはじめ上村晃元共通工学部長、神尾昭材料加工部長に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 浅川：金属の疲労に関する研究，金属の研究，第8巻，4号，(1931)，pp.221~236
上田，田中：鋼の疲労に関する磁気的研究（第2報），日本金属学会誌，第16巻6号，(1952)，pp.325~328
財満：軟鋼の疲労と磁气的性質について，材料試験，第9巻，76号，(1952)，pp.19~21
- 2) 吉永，吉井：磁気ひずみ効果を用いた鋼材のねじり疲労検出法，日本機械学会論文集（第1部），第43巻，369号，(1977)，pp.1547~1556
- 3) 安福，滝沢：曲げ応力の磁气的測定，船舶技術研究所研究発表会講演集，第43回，(1977)，pp.46~49
- 4) S. Abuku：Magnetic Studies of Residual Stress in Iron and Steel Induced by Uniaxial Deformation, Jap. Jour. Appl. Phy, Vol.16, No.7, July, (1977), pp.1161~1170
- 5) 吉永，滝沢，吉井，他2名：磁気ひずみ効果を利用した残留応力の測定（せん断応力差積分法を用いた場合），日本機械学会論文集，第43巻，365号，(1977)，pp.65~75
- 6) 岩柳：炭素鋼の磁気ひずみ効果による残留応力測定に関する基礎的研究，船舶技術研究所報告，第2巻，2号，(1975)，pp.1~66
- 7) 干瀉：材料試験における超音波の応用（第2報），機械試験所報，第8巻，1号，(1954)，pp.45~52
- 8) 高沖：超音波による塑性変形の検出について，金属学会誌，第23巻，6号，(1959)，pp.325~329
- 9) 榎木義一，藤井太一，明石一，寺石稔：低温における鋼材内の超音波減衰，材料試験，第6巻，第47号，(1957) pp.534~537
- 10) 野間口道義：フェライト系鋼脆性—延性遷移温度の超音波試験法，船舶技術研究所研究報告，第16巻，第6号，研究報告，(1978)，pp.313~327
- 11) 榎木義一，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，第18巻，第191号，(1969)，pp.702~706