

氏名	三原毅
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和63年1月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和57年3月 東北大学大学院工学研究科金属加工学専攻 前期2年の課程修了
学位論文題目	超音波周波数解析法を用いた金属材料の非破壊評価
論文審査委員	東北大学教授 井川 克也 東北大学教授 渡辺 龍三 東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 小幡 充男

論文内容要旨

第1章 序 論

非破壊材質評価法の確立は、構造物の健全性、経済性を向上させるうえで、急務の課題となってきた。従来提案されてきている非破壊材質評価法のうち、超音波法は、実用材への適用が比較的容易であることなどから、実用材質評価法として期待されている。超音波法には、音速法・減衰法・後方散乱法などの方法が提案されているが、このうち減衰法は周波数解析を行うことで広範な組織情報が得られることから、比較的複雑な材質の変化をも評価できる可能性がある。超音波減衰により材質を定量評価するためには、まず評価の対象となる材質因子と超音波因子の関係を正確に把握する必要がある。しかし、従来超音波減衰への影響が定量的に検討されてきた材質因子は、結晶粒径についてだけであり、実用材料にみられる多様な組織変化を、超音波減衰により評価する試みはほとんど行われてこなかった。

そこで本研究では、これらの未検討の材質因子のうち、実用金属材料において評価すべき重要な組織と考えられる、母相中に異物（散乱源）を含有する組織（気孔・介在物・析出物などの組織変化に対応する）に対象を限定した。そして、これらの組織の超音波減衰関係式を実験的に近似評価し、これを基に超音波減衰法による散乱源組織の実用的評価法を確立することを目的とした。

第2章 超音波散乱の観察と固体中の超音波減衰関係式の提案

本章では、超音波減衰関係式を検討するにあたって、実用金属材料の超音波減衰が、主に含有する異物（散乱源）による散乱によって起こると考えられる。そこで、まずこの超音波散乱の様子を、光弾性およびシャドウグラフ法を用いた超音波可視化法により定性的に観察した。可視化法による観察の結果、超音波減衰は散乱源の投影総面積に依存すること、さらにこの投影総面積は、幾何的投影面積を、散乱源の重なりの影響、用いる超音波の波長の影響、散乱源の分布の影響の3つの因子を考慮して補正する必要があることが推定された。これらの因子を定量的に評価するために、各々の因子ごとに準備したモデル試料の超音波減衰を実測し、各々の因子が減衰に与える影響を、近似式により定量的に評価した。そして、3つの因子の影響を表す近似式を組み合わせることで、実用材料において超音波減衰を表す実験的な近似式として、次に示す超音波減衰関係式を提案した。

$$\alpha = S(m) = (1-a) \{1 - (1-F')^{L/D}\} + aLF'/D \quad (1)$$

ただし $F' = ((D'/D)^3) \cdot F$, $D' = D \cdot \exp(-C(\lambda - K \cdot D))$

α : 超音波減衰係数 $S(m)$: 散乱源実効投影面積 F : 容積比

L : 試料高さ D : 散乱源直径 C, K, a : 定数

また、この近似式の実用材における有効性を確認するために、樹脂中にガラスビーズを含有させた実用材料模擬材の実測減衰値と提案した超音波減衰関係近似式 ((1)式) から推定される減衰値を比較した結果を図1に示す。両者は良い一致を示し、不連続な散乱源を含有する組織に対しては、(1)式に示す超音波減衰関係式が有効であることが明らかになった。

つぎに、この関係式をもとに、本研究の目的である、超音波減衰法による実用材の組織評価を試みた。提案した(1)式では、超音波減衰は材質因子の複雑な関数で表されるため、この式をそのまま実用材質評価

(すなわち測定した超音波減衰から散乱源の容積比や寸法を個別に抽出すること)に適用することは困難であった。そこでここ

では、数式からの評価の代わりに、(1)式を用いた図式的評価方法の可能性について考察し、実用材料に適用し得る簡便な組織評価方法を検討した。その結果、特に散乱源の寸法が変化する試料においては、各々の減衰周波数特性曲線は、それぞれ高周波数側に平行移動することで一本のマスターカーブ上に整理できるように変化すること、またこのときの各特性曲線のマスターカーブへの周波数の移動量(Δf)は、散乱源の寸法に強く依存することがわかった。以上により、 Δf を測定することで組織評価を行う方法(以下「周波数シフト法」と呼ぶ)を、実用組織寸法の簡易評価法として提案した。

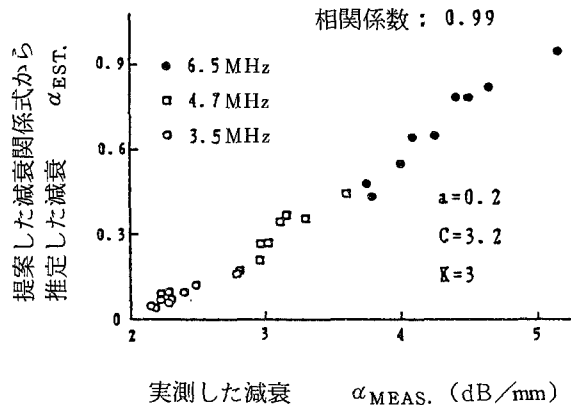


図1 (1)式の有効性の検討

第3章 銅焼結材料の残留気孔寸法の評価

本章では、第2章で提案した「周波数シフト法」を銅焼結材料に適用し、残留気孔組織評価の可能性について検討した。その結果、得られた超音波減衰特性は、第2章で提案した超音波減衰関係式(1式)と、定性的に一致した。さらに、それぞれの減衰周波数特性曲線は、高周波数側に平行移動することで、いずれも一本のマスターカーブ上に整理でき、各々の特性曲線のマスターカーブへの周波数移動量(Δf)は、図2に示す様に、気孔寸法Dに強く関係することが分かった。また、これらの関係を予め求めておけば、超音波減衰の定量化法として「周波数シフト法」を用いることで、銅焼結材料の平均気孔径が評価できることを示した。

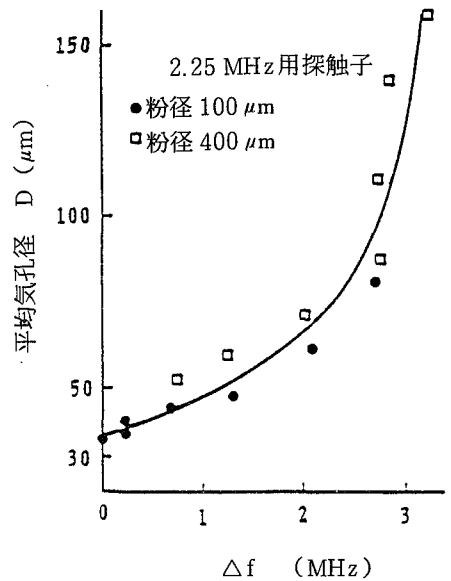


図2 Δf とDの関係

第4章 オーステナイト系ステンレス (SUS 304) 鋼の結晶粒径の評価

本章では3章と同様に、結晶粒径を母相中に含有する単一種の散乱源と見なして、2章で提案した「周波数シフト法」を用いて結晶粒径の評価を試みた。その結果、図3に示すように、 Δf と平均結晶粒径Dは強い相関を持つことが分かった。こ

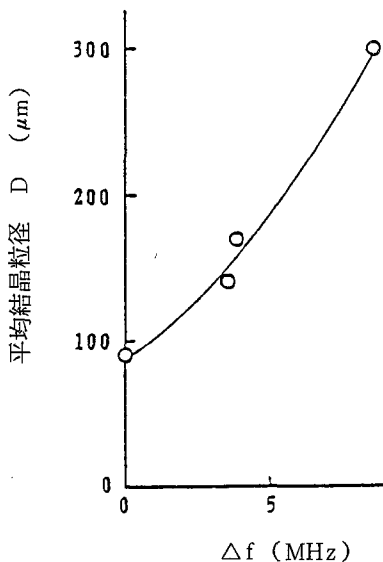


図3 Δf とDの関係

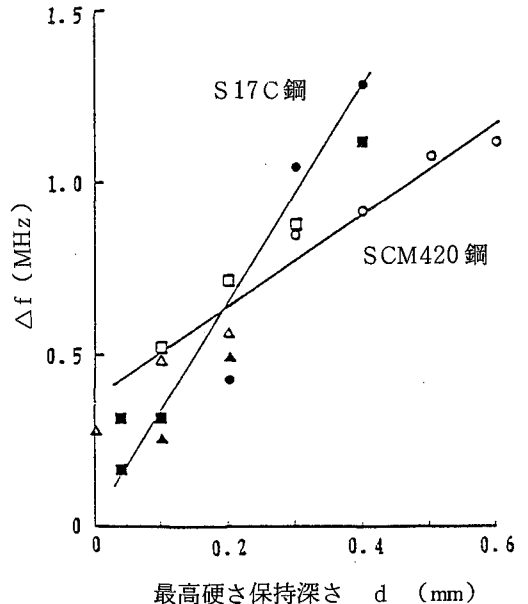


図4 Δf とdの関係

の関係を予め求めておけば、超音波減衰結果を「周波数シフト法」により整理することで、平均結晶粒径が評価できることが分かった。

第5章 低炭素鋼の浸炭深さの評価

本章では、3章、4章に続いて、表面硬化層の「周波数シフト法」による評価を試みた。ここでは伝播する超音波にとって、表面浸炭層が母相中の散乱源と見なせる（すなわち、浸炭層深さが散乱源寸法に当たる）よう、用いる超音波は縦波の代わりに表面波を用いた。その結果、図4に示すように用いた2種の鋼について、前章までと同様に、「周波数シフト法」により求めた Δf は浸炭深さ d と強い相関を示した。これより、超音波減衰測定結果を「周波数シフト法」で整理することで、浸炭深さが評価できることが分かった。

第6章 二相ステンレス(SUS 329 J1)鋼の σ 脆化の評価

本章では、3～5章で用いた母相中に含有する散乱源が単一種の組織に続いて、複数種の散乱源を含有する組織について、各々の散乱源組織の寸法と容積比が変化した場合の超音波減衰関係式、およびこれらの組織の評価方法について考察した。すなわち、母相中に単一の散乱源を含有する組織の結果を、母相中に複数種の散乱源を含有する組織にまでそのまま拡張することを試みた。複数種散乱源による減衰は、先に考えたように各々の散乱源の投影面積に加えて、各々の散乱源の超音波減衰特性を加味する必要があると考えられる。ここでは、 n 種の散乱源を含有する組織の減衰を、(2)式に示すように、(1)式で考慮した散乱源の実効投影面積： $S(m)$ （寸法因子）と、各散乱源組織における減衰特性： $f(m)$ （材質因子）の積の総和として表した。

$$\alpha = \sum_{m=1}^n f(m) \cdot S(m) \quad (2)$$

(2)式の超音波減衰関係式としての有効性を検討するため、このモデルに適合する実用材料として、6段階に σ 脆化させた2相ステンレス鋼を選び、各々の材料について超音波減衰特性を実測した。その結果、6種の試料の組織評価結果を用いて、(2)式から推定した減衰特性と、実測された減衰特性はよく一致し、(2)式は(1)式を含めた、母相中に散乱源を含有する組織に対する超音波減衰関係近似式として有効であることが分かった。また各試料の特性曲線は、単一種散乱源を含む材料で見られたものに比べて、狭い周波数範囲ではあるものの、やはり高周波数側への平行移動によって一本のマスターカーブに整理できた。さらに、周波数のずらし量(Δf)は、図5に示すように各々の散乱源組織の容積比と最も強い相関を示した。このことから、 σ 脆化した2相ステンレス鋼に「周波数シフト法」を適用するこ

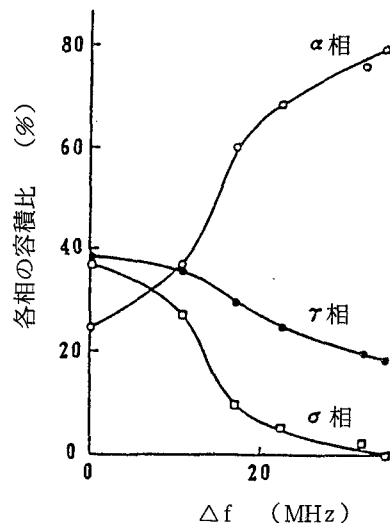


図5 散乱源の容積比と Δf の関係

とで、 σ 脆化の原因である σ 相の容積比あるいは機械的性質が求められることが分かった。

すなわち実用的には、母相中に単一種散乱源を含有する材料においては、減衰 α は散乱源の実効投影面積： $S(m)$ に依存し、「周波数シフト法」を用いることで散乱源の寸法（散乱源直径）が求まる。一方、複数種の散乱源を含有する場合には、減衰 α は散乱源の超音波減衰特性： $f(m)$ と $S(m)$ の両方に依存し、今回評価した組織のように、各散乱源の寸法が大きく変化せず、それぞれの減衰特性（ $f(m)$ ）が大きく異なる場合には、「周波数シフト法」から、特に散乱源の容積比が評価できる事が分かった。

第7章 結 論

本章は、結論であり本論文の結果をまとめたものである。

審査結果の要旨

超音波の減衰特性を用いて金属材料組織の評価を行うためには、両者の関係を正確に定量化する必要がある。しかし、組織が減衰に与える音響学的影響は複雑で多岐にわたるため、従来、研究対象となる金属組織は、音響的に最も単純な、結晶粒径の評価がほとんどであった。

本研究は、超音波散乱による超音波減衰とその周波数依存性を、超音波可視化法・モデル法により実験的に解析し、両者の関係を定式化すると共に、その図式解法である周波数シフト法を確立することで、金属材料評価のための新しい超音波周波数法を提示した経緯をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では超音波散乱の可視化法による観察と、母相中に音響的に異なる单相を含有するモデル材を用いた減衰の周波数解析から、超音波の周波数・減衰・組織についての関係を、実験的に近似定式化した。また、求めた式を基にした図式的解法により、組織簡易評価方法として、「周波数シフト法」を提案している。これは新しい知見である。

第3章では「周波数シフト法」を、銅焼結材の残留気孔組織評価に適用した結果、第2章で推定した通り、平均気孔寸法が評価できることを明らかにしている。

第4章では「周波数シフト法」を、オーステナイト系ステンレス鋼の結晶粒径の評価に適用した結果、平均結晶粒径が評価できることを述べている。

第5章では「周波数シフト法」を、低炭素鋼の浸炭深さの評価に適用した結果、浸炭深さの評価ができることを述べている。

第6章では σ 脆化した二相ステンレス鋼をモデル材として、母相中に音響的に異なる相を複数種含有する金属組織について、超音波周波数・減衰・金属組織の関係を考察し、第2章で提案した減衰関係式を含む、より広範な金属組織に適用できる減衰関係式を提案している。さらに、「周波数シフト法」を σ 脆化した二相ステンレス鋼に適用し、 σ 脆化に伴う三相組織の容積比の変化、及びそれに伴う機械的性質の変化が評価できることを明らかにした。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、モデル材料を用いて実験的に、超音波周波数・減衰・金属組織の関係を定式化し、これを基に新しい材料評価法として「周波数シフト法」を開発し、従来研究されてきた結晶粒径を含む、より広い金属材料組織の非破壊評価法として、極めて有効であることを示したもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。