

レーザ超音波による非破壊材質計測

鈴木 紀生*・高松 弘行*・新井 明男*・柳井 敏志*・小川 岳夫*・赤松 勝*

Nondestructive Material Characterization with Laser Ultrasound

Norio SUZUKI, Hiroyuki TAKAMATSU, Akio ARAI, Satoshi YANAI, Takeo OGAWA and Masaru AKAMATSU

Synopsis : Laser ultrasonic techniques are attractive for in line characterization of material, because they can transmit and receive ultrasound with fully non-contact condition to the target. Especially, the system, using Fabry-Perot interferometer, is widely studied because of its applicability to the evaluation of the rough surface material and its wide-band detectability.

In this paper, the detectability of the vibration and the characteristics of laser generated ultrasound are investigated with constructed laser ultrasonic system, using Fabry-Perot interferometer. And grain size of thin steel plates are evaluated from the frequency spectra of the attenuation constant of laser ultrasound.

It is proved that the vibration on the rough surface can be detected with this system, and the grain size of thin steel plates can be measured with fairly good accuracy, but pre-processing of the signal is needed, such as the selection of the orders of the deformation free multiple echos and low-cut filtering.

Key words : material evaluation ; non-destructive testing ; ultrasonic ; laser ultrasonic, interferometer ; grain size ; steel plate ; attenuation coefficient.

1. 緒言

鋼材の短納期化等の要請から、オンラインで鋼板特性を評価する装置が望まれている。それに応えるために、電磁超音波(EMAT)を用い、連続焼鈍ラインの出側で、冷延鋼板のランクフォード値(r値)を測定する装置の開発が報告されている¹⁾。しかし、同装置では、電磁気力を用いて測定するため、センサを鋼板に近接して配置する必要があり、適用に制約が生じる。

レーザ超音波法は非接触で超音波の送受ができるため、高速で搬送される鋼板や、高温の鋼板の品質特性等を評価できる可能性があり、注目を集め、研究開発が活発に進められている。同方法では大出力のパルスレーザを鋼板表面に照射し、表面の熱膨張による歪(熱弾性領域)、または、レーザと表面の蒸発原子との共鳴相互作用による爆発の反力による歪(アブレーション領域)により超音波を励起する²⁾。そして、材料中を伝播し、表面に到達した超音波の変位を、検出用の連続波レーザで検出する方法であり、完全に非接触であることに特徴がある。また、超音波の発生の機構から、入射する超音波はパルス状で、広い周波数帯域をもっていることも大きな特徴である。この特徴を利用し、減衰定数の周波数依存性の解析結果から材料の結晶粒径を計測する試み³⁾がされている。

超音波の検出には干渉計を用いるのが一般的である^{4)~6)}。なかでも、観測面の粗さが使用するレーザの波長に比較し

て粗い、粗面への適用が可能となる点から、ファブリペロ法と時間差干渉法の適用例が多い。前者は検出特性が広帯域であることから、前記の発生超音波の特徴を引き出せる点でも注目されている⁷⁾。

筆者らは、レーザによる超音波の発生⁷⁾、ファブリペロ干渉計を用いた鏡面に研磨した試験片での超音波の検出における周波数特性等⁸⁾について、実験および理論的に検討してきた。本報告では、粗面での超音波の検出、および、薄鋼板の結晶粒径の測定に適用した時の問題点について検討した結果を報告する。

2. 実験装置

2・1 超音波の発生

実験に使用した超音波発生系の装置構成をFig.1に示す。パルスYAGレーザで鋼板の表面を励起する。レーザパルス幅としては10nsecで、パルス当たりのエネルギーは0.6J以下の条件で実施した。レーザが鋼板の表面に照射されたタイミングはレーザの直後にあるビームサンプラの出力をモニタすることにより認識している。

熱弾性域で発生する超音波は横波で、その伝播方向はレーザ照射点を頂点とする円錐面方向で、複雑な伝播をする。本実験では、挙動が単純で結果の理解が容易なアブレーション領域での実験を主に実施している。この場合、横波も発生しているが、検出を照射中心軸上で測定することによ

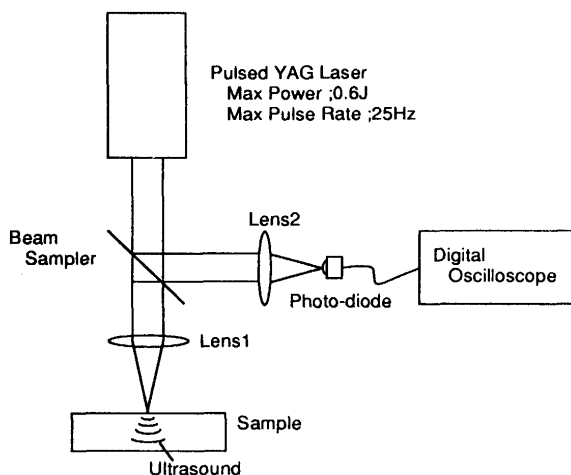


Fig. 1. Excitation system of laser ultrasound.

り、その存在を大きくは考慮しなくてもよいと考えられる。

2・2 超音波の受信

超音波の受信には連続発振のレーザ光を観測面に照射し、観測面が超音波振動をすることによる反射光の周波数の変化をファブリペロ干渉計で観測する方法を使用している。超音波の受信装置をFig. 2に示す。

ファブリペロ干渉計では、Fig. 2に示されるように、反射率95%程度の球面ミラーをその中心が相互に他のミラーの中心にくるように配置している。干渉計の光軸に平行に入射した光はミラー間で4回反射したのち同じ行路に戻る。

このため、平面波ではない、粗面からの反射光を入射しても多光束干渉が生じ、粗面の振動の検出が可能となる特徴をもっている。

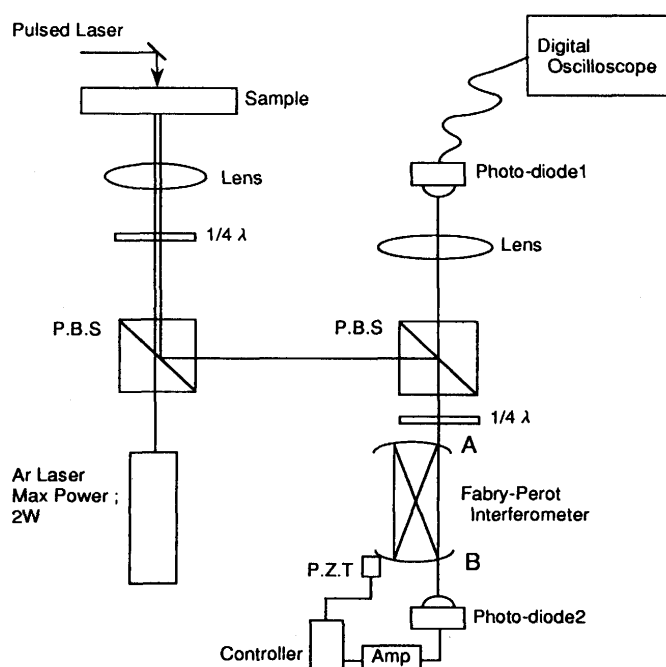


Fig. 2. Detection system of laser ultrasound using Fabry-Perot interferometer.

一般的にはFig. 2のB点の光量を観測する。その場合には、4回の反射に伴う位相の遅れが $2n\pi$ の条件では、多重反射波が相互に強度を強め合う、建設的な干渉を生じる。2枚の鏡の間の距離を、使用するレーザの波長分散の半値の波長で建設的に干渉する距離に調整しておく。反射面が振動することで、波長(周波数)のドップラーシフトが生じると振動変位の方向により、出射光の強度が増減し、振動の検出ができる。振幅が一定の場合、振動の周波数が高くなると、ドップラーシフト量が大きくなり、出力が大きくなる。しかし、更に振動の周波数が高い場合には、干渉計の中で十分な干渉が生じる前に振動が変化するために検出感度が低下し、結果として、振動検出に対して、バンドパス的な周波数特性を示す。本実験で使用した干渉計では実測結果で約2 MHzに中心周波数を持つ特性であり、これより高い周波数の検出には向かない。

反射法では、Fig. 2のA点の光量を観測する。高周波の振動に対しては、厳密にはドップラーシフト量を検出しているのではなく、その場合、ファブリペロ干渉計内から出射する光の位相が、一定になり、その出射光と入射面での反射光との干渉で光量が規定されるため、高周波ではホモダインの干渉計と同等の光量変化をしめすことになり、結果としてローカットの周波数特性を示す。以下の同干渉計を用いた実験では、すべてこの反射法を用いている。

B点の後ろに光検出器を配置しているのは、干渉計の両ミラーの距離を一定に保持し、安定した干渉光を得るため、光検出器の出力のDC成分が一定値になるように、圧電素子に印加する電圧を制御している。また、2組の偏光ビームスプリッタと1/4波長板は、効率よく光を分岐させるために使用している。

試料面が粗面の場合、反射光が散乱され、検出器側に戻ってくる光量が低下する。十分な光量を得るために、100mW程度の光量を投入する必要がある、従来使用していたHe-Neレーザに変えてArレーザを使用している。

Fig. 1の超音波発生用光学系とFig. 2の検出用の光学系を試験片に対して同じ側におくこと(反射配置)や反対側におくこと(透過配置)が可能であり、目的に応じて使い分けられている。本報告の中では、透過配置の結果のみについて報告する。反射配置では、鋼板の高速搬送ライン等への適用性が増す利点がある一方、検出光学系にプラズマ発光の一部が入射することによる光量変動、および、YAGレーザの照射跡の表面変化による反射率の変動に伴う光量変動が外乱として信号に乗ってくる欠点がある。実用化を図る上で、今後、反射配置の開発を進める必要がある。

振動検出用の光検出素子としてはアバランシェフォトダイオードを用い、その出力を増幅した後にデジタルオシロ(Nicolet社製: 450)に入力し、記録する方式を採用している。なお、実験結果の章で示す振動検出波形は全て1回のYAGレーザの照射で得られた振動波形であり、平均化処理

はしていない。レーザ超音波に関する文献に見られる振動波形は、平均化によりS/Nを向上させた結果を表示した例が多いが、この点でもレーザ超音波技術が実用に近づいたと言える。

3. 実験方法

試作した装置の性能を確認するために、鋼材の結晶粒径を測定する実験を行なった。結晶粒径は、鋼板の多重反射エコーを利用し、レーザ領域の減衰定数の周波数依存性が以下の式で表現できることを仮定し、4次の項の係数から結晶粒径を求める方法¹⁰⁾について検討した。同方法では、帯域が広い測定系の使用が、結晶粒径の測定範囲の拡大および高精度化の決め手であり、レーザ超音波とファブリペロの反射法による広帯域測定特性の有効性を確認するのに適した対象であると考えられる。

$$\alpha(f) = a_1 f + S d^3 f^4 \dots\dots\dots (1)$$

f : 周波数

d : 結晶粒径

S : 散乱係数

a_1 : 吸収係数

測定では、鋼板の表裏面での多重反射エコーを周波数解析し、減衰定数を求めている。この方法では、超音波が材料に注入する効率が測定結果に影響しないことが特徴である。

結晶粒径の測定に対する、励起レーザ光の直径(波源の大きさ)の影響を評価するために、励起レーザの照射面の直前に配置した集光レンズと試料間の距離を変化させた実験も実施した。その結果を参考にして、結晶粒径を測定する場合の誤差を検討した。実験に使用した直径の範囲は1~5mmである。励起レーザの直径の下限は0.5mm程度である。これより小さくすると、試験片にレーザが到達する前に、空气中でプラズマが発生し、試験片に十分な超音波が発生しなくなるため、励起の安定性の確保の観点から、実験範囲を決定している。

4. 試験片

熱処理により結晶粒径を変化させた試験片を製作した。使用した試験片をTable 1に示す。板厚は2種について検討している。結晶粒径は17.5~112 μ mの範囲である。炭素量は0~0.15%の範囲で、フェライト-パーライト組織の材料である。また、測定系の周波数特性を調査するために、減衰の少ないマルテンサイト系ステンレスの板も使用した。

試験片の表面は、振動検出性能の表面粗さ依存性を評価するために、Rmaxが3 μ mの研削面とバフ研磨鏡面について実験した。

Table 1. Samples.

TP. No	Grain size (μ m)	Thickness (mm)	Remarks
T1	17.5	6	Carbon Steel
T2	55.5	6	Carbon Steel
T3	74.8	6	Carbon Steel
T4	91.0	6	Carbon Steel
T5	112.8	6	Carbon Steel
U1	20.0	2	Carbon Steel
U2	50.0	2	Carbon Steel
U3	53.0	2	Carbon Steel
S1	—	3	Martensitic SUS

5. 実験結果

5・1 超音波検出波形の特徴

Fig. 3には、試験片U1を計測した波形を示している。鋼板の多重反射エコー(Bi)が観測されること、および、それらの多重反射エコーの間にブロードで顕著なエコーが存在することが示される。添え字のiは多重反射の次数を表し、鋼板の表裏面間をi回往復したことを意味する。

Fig. 4には6mm厚の鋼板で結晶粒径が17.5 μ m(T1)と91

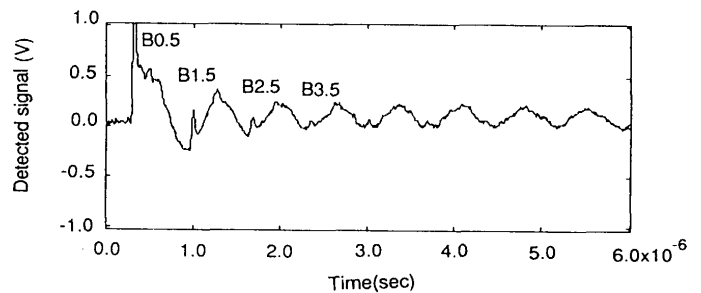


Fig. 3. Detected vibration signal for thin sample.
Sample: U1 YAG-laser beam diameter: 2mm

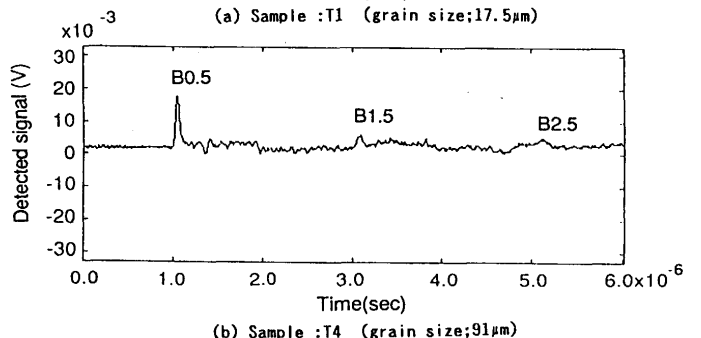
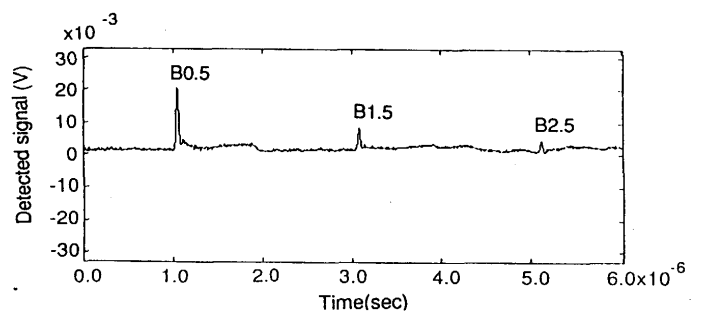


Fig. 4. Detected vibration signals for thick samples.
YAG-laser beam diameter: 2mm

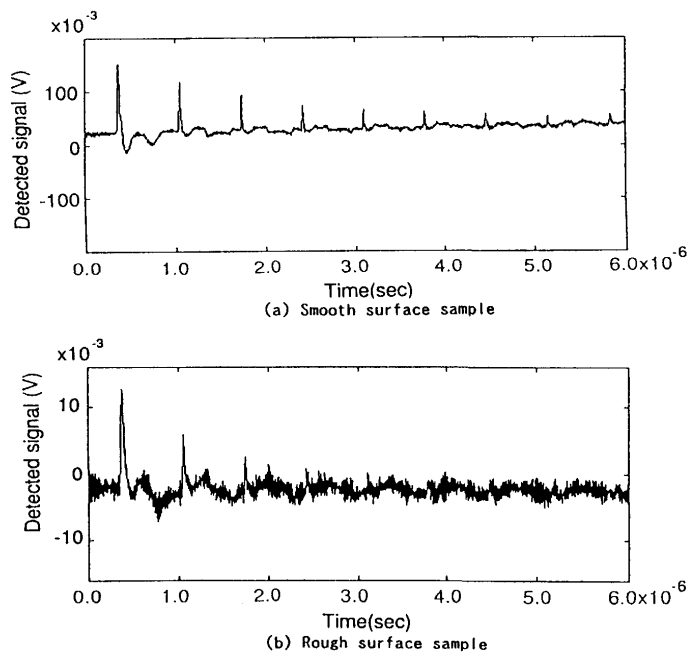


Fig. 5. Detected vibration signals for smooth and rough surface samples.
Sample: S1 YAG-laser beam diameter: 2 mm

μm (T4)の鋼板を測定した波形を示す。Fig. 3の2 mmの鋼板の場合に比較して、前述の低周波成分が小さく、また多重反射エコーとの重なりが顕著でないことが分かる。また、Fig. 4のB0.5, B1.5等の多重反射エコーの大きさおよび形状を2種の試料について比較すると、結晶粒径が大きい試料ではB1.5エコーの低下が顕著で、また、形状がブロードなことが分かる。これらの信号変化を解析して結晶粒径を次節で示す方法で測定する。

Fig. 5には試験片S1の鏡面と粗面に対して、測定した結果を示す。鏡面の場合に比較して粗面ではS/Nが低下しているが、低次の多重反射エコーを十分検出できることが分かる。粗面に適用することによるS/Nの低下の主因は、表面での散乱による入射光量の低下であり、それにともない検出器および増幅器のノイズが顕著になっている。50MHzのハイカットフィルタを入れることにより、ノイズはかなり改善される。しかし、ファブリペロ干渉計のフィネス(ドップラシフトによる周波数変化を検出する感度に相当する値)が、干渉計への入射光の波面の乱れにより低下する分、S/Nが多少低下する。

以下の結晶粒径の計測データは全て、鏡面にした試験片で採取しており、レーザ超音波での結晶粒径の測定における信号処理と精度の追求を重視している。

5・2 結晶粒径の測定

板厚が薄い場合、多重反射エコーの直後にはFig. 3に示されるように、ブロードな波動が観測される。従って、通常利用されている、生波形の多重反射エコーにゲートをかけ、複数の多重反射エコーのFFT結果を用いて減衰定数の周波数依存性を求め、結晶粒径を演算することは困難である。

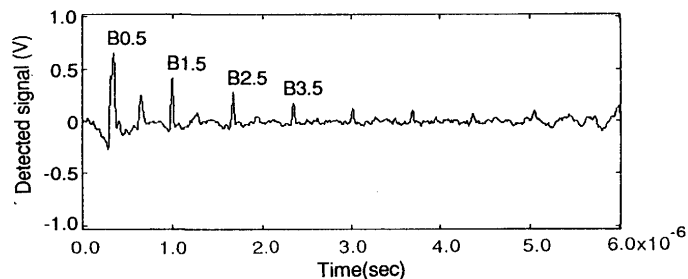


Fig. 6. Filtered signal for thin sample.
Sample: U1 Filter: low-cut (cut-off; 2 MHz)

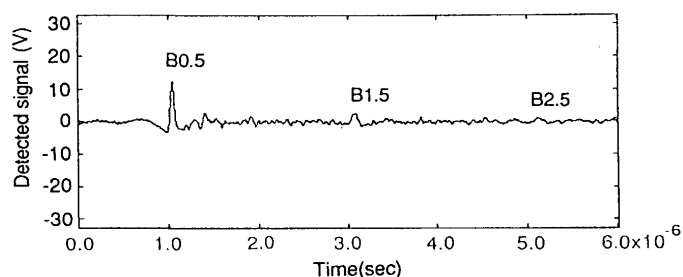


Fig. 7. Filtered signal for thick sample.
Sample: T4 Filter: low-cut (cut-off; 2 MHz)

そこで、得られたデータを周波数解析し、低周波成分のみをカットした後に逆FFTして再生した波形の、多重反射エコー部のみにゲートをかける方法で減衰定数の周波数依存性を求める方法について検討した。試験片U1とT4の測定結果に対して、2 MHzのローカットフィルタを適用した結果をFig. 6およびFig. 7にそれぞれ示す。ローカットフィルタは具体的には周波数解析(FFT)し、2 MHz以下の成分を除去し、その結果を逆FFTすることによって計算機上で達成している。波形の多少の歪みが発生するが、低周波成分がほぼ除去され通常の超音波探触子を用いた時に得られる波形にちかい。Fig. 6では多重反射エコーの間に比較的顕著な信号が観察されるが、この信号は横波成分が検出されたもので、検出用のレーザの大きさが試験片上で100 μm 程度の広がりをもっているために、中心軸上では観測されないはずの横波が観測されたものと考えられる。実際の測定時には鋼板の厚さと音速は既知であり、多重反射が生じる時間は予測できるため、その横波のエコーが測定の障害になることはない。

Fig. 6およびFig. 7の多重反射エコー部の信号のみを抽出し、それぞれをFFTにより周波数解析し、音波の拡散による減衰はその周波数成分ごとに拡散減衰量を関の方法¹¹⁾で算出し、補正している。

また、板厚2 mmの鋼板では、低次の多重反射エコーの幅が高次のエコーに比較して広がっていることが、Fig. 3から観測される。これは、励起用レーザの直径が板厚に比較して、無視できない大きさであることに起因している。そこで、結晶粒径を計測するために使用する多重反射としては、板厚6 mmの場合はB0.5とB1.5を、板厚2 mmの鋼板では透

過配置のB1.5とB2.5を使用している。この励起光の直径に起因する結晶粒径の計測誤差に関しては考察で評価する。

Fig. 8 にはU1とT4の試験片に対して、それぞれのエコー

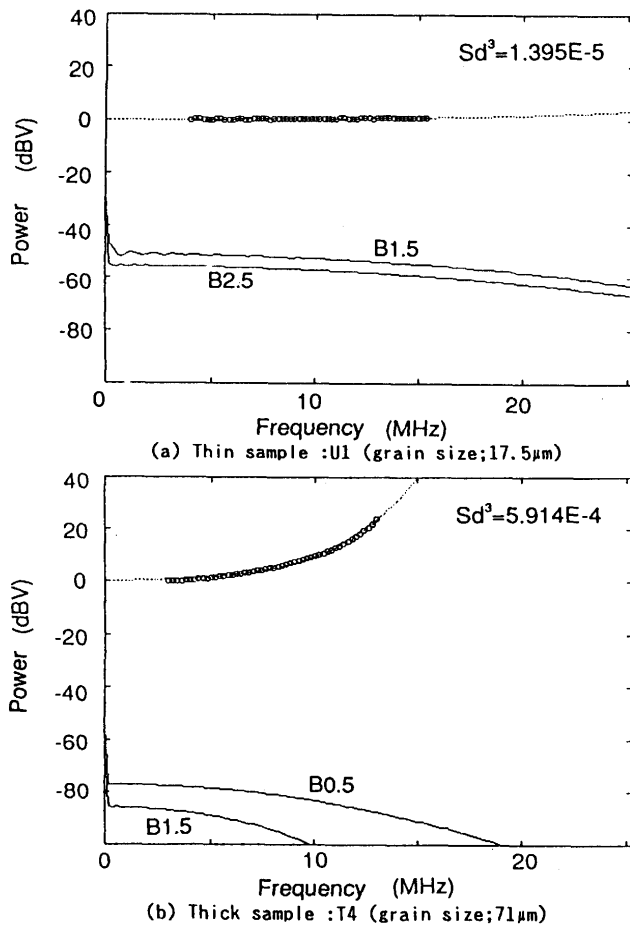


Fig. 8. Frequency spectra of two successive echos and deduced spectrum of attenuation.
upper trace: attenuation
lower traces: spectrum for each echo

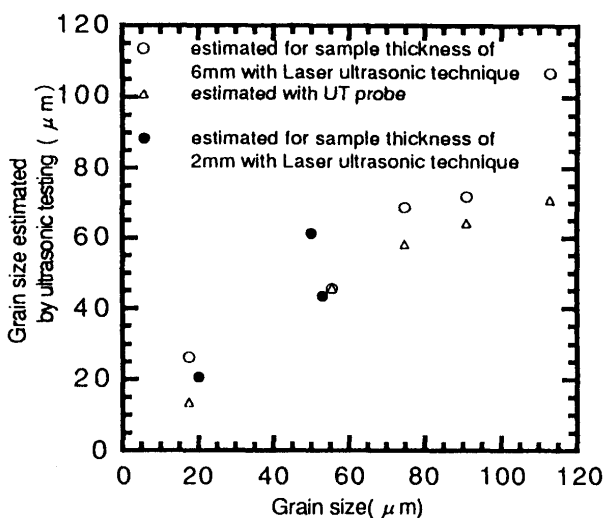


Fig. 9. Relationship between grain size estimated by ultrasonic testing and grain size determined microscopically.

の周波数スペクトルの計算結果、および、拡散補正のあと、両者の比を求め、減衰の周波数依存性を求めた結果、および、式(1)にフィッティングした曲線を示す。図中に単位板厚当たりの4次の項の係数を示すが、その大きさから結晶粒径を算出している。

この手順で結晶粒径を求めた結果をFig. 9に示す。なお、結晶粒径の算出に使用した散乱係数は、別の標準試験片について、通常の超音波探触子を用い、水浸法で同様に測定し、測定された周波数の4次の項の係数と、破壊測定で求められた結晶粒径とから決定した。すべての試験片で同じ散乱係数を使用している。

板厚が6 mmの鋼板では、通常の超音波探触子を用いた評価を行っており、T1～T5の鋼板を水浸法で測定し、4次の項の係数から結晶粒径を求めた結果もFig. 9にはあわせて示している。両者の測定値はほぼ一致している。このように、レーザ超音波を用いた場合でも、低周波成分を除去することにより、板厚によらず、通常の超音波探触子を用いた場合と同等な手法で結晶粒径が評価できることがわかる。

6. 考察

5章で述べたように、薄板の低次の多重反射エコーでは、励起レーザの照射径の影響でその幅が広がる。この広がりのおよび結晶粒径の測定におよぼす誤差に関して考察する。

レーザ超音波の測定に於いて、励起レーザのビーム径を変化させた時の測定波形をFig.10に示す。ビーム径を大きくすると、低次の多重反射エコーがブロードになることが図から分かる。なお、同図は実際の表面変位を正確に求めるために、ファブリペロ干渉計ではなく、振動検出の周波数依存性がないホモダインの干渉計を使用した結果⁷⁾を示している。等方体中での超音波の伝播は、波源からの超音波の重畳で波面が決定される。レーザ超音波では、波源で圧縮パルスのみが発生し、通常の超音波探触子の場合の正負の繰り返しのないことが特徴である。したがって、レーザ超音波では破壊的な干渉が生じることがなく、波源が有限の大きさを持ち、波源上の各点から観測点までの距離の差分、パルス幅が広く観測される。したがって、観測点までの距離によって、パルス幅が変化する。

照射域の中心軸上の観測点から、照射域の中心までとエッジ部までの距離を計算し、遅延時間に換算し、照射域の径をパラメータにして計算した結果をFig.11に示す。2 mmの鋼板を照射径5mmの条件で励起すると、B0.5ではパルス幅が200nsec伸びることが図から分かり、Fig.10の低次エコーの幅の広がりが説明できる。

励起レーザのパルス波形をFig.1のトリガ決定用検出素子で測定した結果をFig.12に示す。直径2 mmの照射径で、2 mmの鋼板を励起した時のB1.5とB2.5の多重反射エコー形

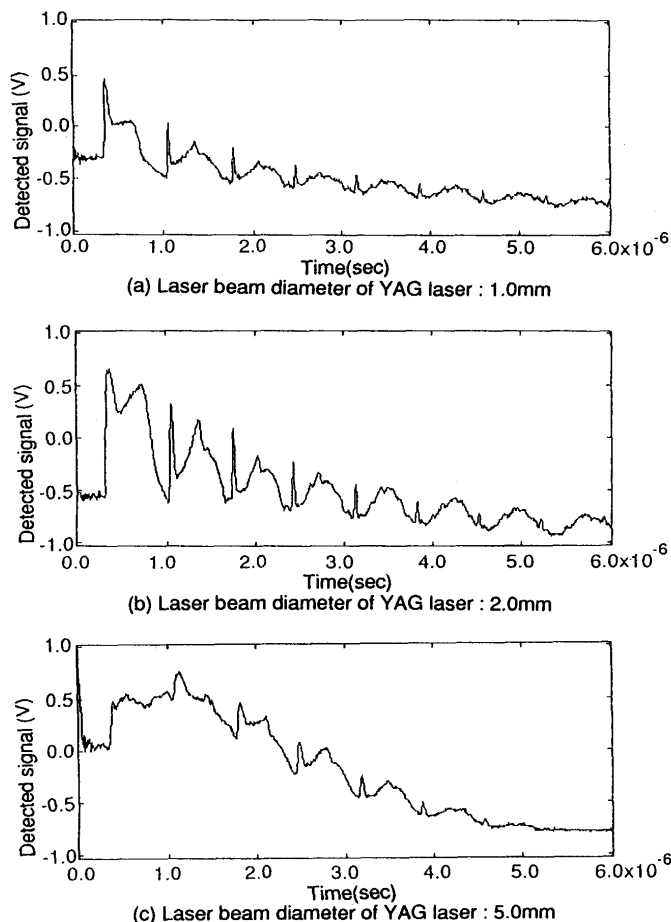


Fig. 10. Detected vibration signals, excited by YAG-laser with various diameter.
interferometer : homodyne

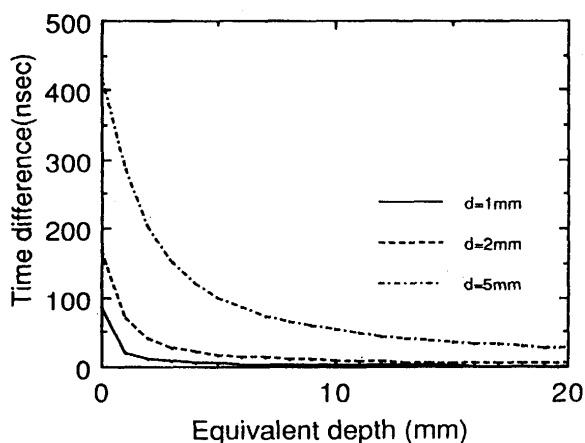


Fig. 11. Time difference between center ray and edge ray at different detection depth, with various YAG-laser beam diameter.

状をFig.11を参考にしてFig.12の波形を加算して求め、その結果をそれぞれ、周波数解析し、その比から、減衰定数の測定に及ぼす幅広がり効果を推定する。この方法により、結晶粒による減衰がなく、かつ拡散による減衰がない条件で、幅が変化した時の誤差が推定できる。上記の方法で求めた仮想の2種のエコーの周波数特性を解析した結果をFig.

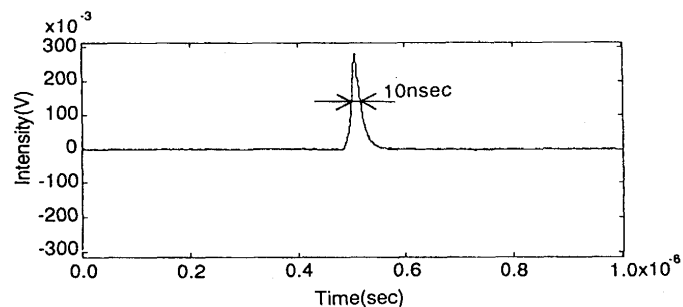


Fig. 12. Pulse shape of YAG-laser.

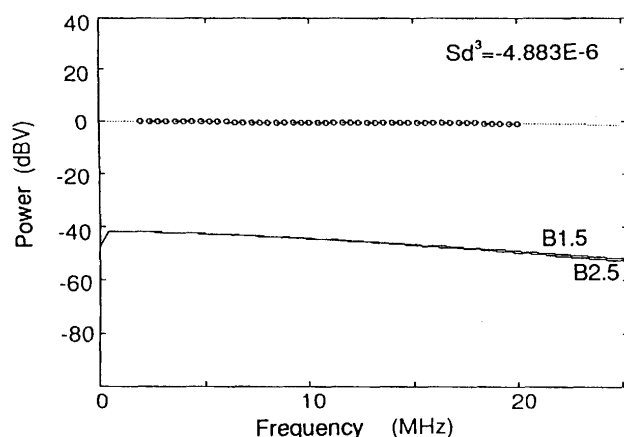


Fig. 13. Simulation of error on attenuation measurement, caused by YAG-laser beam diameter.
lower traces : spectrum of each virtual echos
upper trace : virtual attenuation caused by path difference
sample thickness : 2 mm
YAG-laser beam diameter : 2 mm

13に示す。

図および図中の4次の項の係数の値をFig. 8の場合と比較すると、広がりによる効果は結晶粒径 $17.5\mu\text{m}$ での減衰量より小さい。より小さい結晶粒径を評価する場合には広がりを考慮する必要があると思われる。

上記の照射域の大きさによる発生超音波のパルス長さの変化、および、多重反射エコーの間に観測される低周波エコーについては、差分法による発生超音波のシミュレーションでも確認されており、今後詳細を報告して行きたい。

7. 結言

レーザ超音波は非接触で超音波を送受し、対象物の材質や欠陥を評価できる特徴を有する。従って、高速で移動する対象物や高温の対象物の評価に適用することができる長所をもっている。本報告では、薄鋼板でのレーザ超音波の多重反射エコーを粗面での超音波の広帯域計測に適したファブリペロ干渉計を用いた実験を行ない、鋼板の結晶粒径の計測へ応用できることを明らかにした。また、結晶粒計測の評価にあたり、励起レーザの照射径によるエコー幅の

広がりによる誤差を考慮して使用する底面エコーを選択し、また、多重反射の間に生じる低周波成分をフィルタで除去する必要があることが分かった。

文 献

- 1) K.Kawasima: J Acoust. Soc. of America, **87**(1990), p.681
- 2) D.A.Hutchins, R.J.Dewhurst and S.B.Palmer: Ultrasonics, (1981), p.103
- 3) J.D.Aussei and J.P.Monchalin: J.Appl. Phys., **65**(1989), p.2918
- 4) 二宮英樹, 平田健二, 井上 浩, 水溪寿右衛, 佐藤住彦: 四国総合研究所・研究期報, **53**(1989), p.9
- 5) T.Sato, T.Suzuki, P.J.Bryanston-Cross, O.Ikeda and T.Hatuzawa: Appl. Optics, **22**(1983), p.815
- 6) J.P.Monchalin and R.Heon: Mater. Eval., **44**(1988), p.1612
- 7) 新井明男, 鈴木紀生, 小川岳夫, 高松弘行, 柳井敏志, 赤松 勝: 日本非破壊検査協会予稿集・平成3年秋季大会, (1991), p.13
- 8) 小川岳夫, 鈴木紀生, 新井明男, 高松弘行, 柳井敏志, 赤松 勝: 日本非破壊検査協会予稿集・平成3年秋季大会, (1991), p.15
- 9) 鈴木紀生, 小川岳夫, 高松弘行, 新井明男, 柳井敏志, 赤松 勝: 計測自動制御学会論文集, 投稿中
- 10) R.L.Smith: NDT International, **120**(1987), p.43
- 11) 超音波探傷法 (日本学術振興会・製鋼第19委員会編), (1964), p.284 [日刊工業新聞社]