レーザー超音波法による炭素鋼中の内部欠陥の非接触検出

田中 崇雄, 井澤 靖和*

(財)レーザー技術総合研究所 (〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目8番4号)

*大阪大学 レーザー核融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2番6号)

Noncontact Detection of Internal Defects in Carbon Steel by Laser Ultrasonics

Takao TANAKA and Yasukazu IZAWA*

Institute for Laser Technology, 1-8-4 Utsubohommachi, Nishi-ku, Osaka 550-0004

**Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871*

(Received October 15, 2001)

Cylindrical internal defects in carbon steel specimens were detected noncontactly and nondestructively from the measurements of ultrasonic diffraction signals using the laser ultrasonic technique. Laser beams used for both ultrasonic generation and detection have a 0.7-mm diameter. Spatial profiles of the diffracted ultrasonic amplitude were measured for the internal defects of 0.5 to 5.0 mm in diameter, which were in good agreement with the profiles calculated by using Cornu's spiral. This method can be useful for the noncontact detection of internal defects in metal, and is considered to be applicable to the noncontact sizing of the internal defects such as those in power plant components.

Key Words: Laser ultrasonics, Internal defect, Noncontact detection, Fresnel diffraction, Cornu's spiral

1. はじめに

電力プラントの安全運転のためには、構造材料中に発生した欠陥をできるだけ早期に検出し、必要に応じて修繕、部材取替え等を実施することが必要不可欠である。また、欠陥の検出のみならず、プラント部材の経年劣化の評価や余寿命の予測を行うことは、プラント設備管理の効率化につながり、定期点検期間の短縮、部材調達の効率化などコスト低減効果が大きく、産業界から強く切望されている技術である。

現在行われているプラント部材の材料検査の中でも非破壊検査は、材料表面あるいは材料内部に存在する欠陥や不連続部を、部材を傷つけることなく外部から調べることができる有益な検査手法である。非破壊検査のうち、超音波探傷試験は、比較的簡便に材料内部の欠陥を検出することが可能なため、例えば、原子力発電所における原子炉容器の溶接部、火力発電所におけるボイラー、蒸気タービン等、プラント部材の重要部分の検査に広く用いられている。

金属材料に超音波の送受信を行う装置としては、圧電素子が最も一般的に用いられており、圧電素子による超音波探傷試験は、一つの確立した検査技術となっている。しかしながら、圧電素子を用いる場合、測定者が試験対象部材に接近しなければならないため、放射線区域、高温区域等の悪環境条件下での測定が困難であり、また、狭隘部等の測定も困難である。

一方、最近のレーザー技術は著しく進歩しており、その応用技術であるレーザー超音波探傷法は、非破壊検査の分野における検査技術として盛んに研究・開発が行われている^{1,2)}。このレーザー超音波探傷法は、パルスレーザー光を材料表面に照射して、材料表面あるいは材料内部に超音波を発生・伝播させ、伝播した超音波による材料表面の微小振動をレーザー干渉計により受信する、非破壊検査技術である。この技術は、レーザーを用いて非接触で超音波の送受信を行うことができるため、遠隔操作による悪環境条件下での検査が可能になるという利点を有している。また、狭隘部の測定においては、これまで超音波顕微鏡等による超音波ビーム集束技術³⁾があるが、レーザー超音波法は、レーザー光の集光等により、ある程度離れた場所から狭隘部の測定を行うことが可能になるものと考えられる。

パルスレーザー光を金属材料に照射すると、縦波、横波、表面波等、多様な超音波が発生するが、表面波は伝播に伴う減衰が少ないため⁴⁾、これまでのレーザー超音波探傷技術では、表面波を用いた表面欠陥の検出が中心であった。しかしながら、プラント部材において、欠陥は材料表面だけでなく材料内部にも存在するため、表面波だけでは全ての欠陥を検出することができない。一方、縦波と横波は不透明な金属材料の内部を伝播し、内部欠陥を検出するのに非常に有効であることから、このレーザー超音波探傷技術を内部欠陥の検出に応用することが必要とされているが、材料の内部方向へ伝播する縦波と横波は、伝播に伴う減衰が大きいため、レーザー超音波探傷技術を利用した材料内

これまで我々は、QスイッチNd:YAGレーザー照射により炭素鋼内部に発生させた超音波縦波を、CWレーザーとファブリーペロー干渉計を用いたレーザー干渉計により受信する、レーザー超音波送受信装置を作製し、非接触で炭素鋼内部の微小欠陥の検出を試み、最小で直径100 μm の長円柱形内部欠陥の非接触検出を行った⁶⁾。これは内部欠陥により反射した超音波信号を受信したものであるが、内部欠陥の形状によっては、反射波の進行方向が大きく変わるため、反射波の存在を見落としてしまう可能性がある。一方、内部欠陥を回折した超音波信号を用いると、超音波受信点が超音波発生点から見て内部欠陥のかげとなる領域では、受信される超音波信号が弱くなることから、この超音波信号の測定によっても、非接触で材料内部の欠陥検出が可能となるものと考えられる。この手法では、受信される超音波信号が内部欠陥の形状にあまり依存せず、内部欠陥検出の信頼性が向上するものと考えられるため、本論文では、レーザー超音波送受信装置を用いて、内部欠陥を回折した超音波信号の測定を行うことにより、炭素鋼試験片中の模擬内部欠陥の非接触検出を行ったので報告する。

になるときに、PD1出力電圧の変化率が最大となり、レーザー干渉計の感度が最大となるため、このタイミングで、超音波を発生させるよう、Fig. 1に示すコンパレータ回路のしきい値電圧を調整した。コンパレータ回路からの信号により、QスイッチNd:YAGレーザーのフラッシュランプへの放電を開始し、放電開始から約250 μ s後に、Qスイッチが動作し、パルスレーザー光が試験片に照射される。これをFig. 2(c)およびFig. 2(d)に示す。Qスイッチレーザー光照射により発生・伝播した超音波により受信側の試験片表面が微小振動するため、CW Nd:YAGレーザー光はドップラーシフトを受け、このシフト量に応じてレーザー光周波数が変化する。このレーザー光周波数の変化に比例してファブリーペロー干渉計の反射光強度が変化するため、最終的に超音波信号がファブリーペロー干渉計の反射光強度で表されることになり、これをPD2によりFig. 2(e)のような信号として受信した。この手法により、CW Nd:YAGレーザーの周波数変動や、環境温度の変化に対して、常に測定装置の超音波受信感度が最大になるように保たれ、測定誤差を非常に小さくすることが可能となった。

また、計測信号としてファブリーペロー透過光ではなくファブリーペロー反射光を使用する理由は、透過光は超音波の周波数が高い領域において、周波数が高くなるにつれて超音波受信感度が低下するのに対して、反射光は超音波の周波数が高い領域においても、超音波受信感度が一定に保たれるためである⁷⁾。超音波計測信号は、低周波フィルタおよび増幅器を通過した後、デジタルオシロスコープでAD変換され、30ショットを平均した波形を記録した。

2.2 模擬内部欠陥試験片の仕様

厚さ20 mmの炭素鋼試験片に、長円柱形の穴を空けて模擬内部欠陥を作製した。Fig. 1に示すように試験片のx,y,z軸を定めると、模擬内部欠陥の長円柱の軸はz軸方向であり、長円柱の直径としては、0.5 mm, 1.0 mm, 3.0 mmおよび5.0 mmを用いた。長円柱形の横穴は、QスイッチNd:YAGレーザー照射面、およびCW Nd:YAGレーザー照射面からは、目視により確認できないものであるため、模擬的な内部欠陥であるとみなすことが可能である。ここで、超音波受信面と模擬内部欠陥中心との距離を7.5 mmに設定した。また、Qスイッチレーザー光を試験片に照射したときに発生する超音波縦波の指向性は、試験片表面に対して垂直方向が最大となるため、受信用CW YAGレーザー光の照射点は、常にQスイッチレーザー光の照射点からy軸方向に伸ばした線上になるように固定した。この状態で、模擬内部欠陥の長円柱の軸が超音波伝播経路を横切るよう、x軸方向に試験片を精密ステージで移動させることにより、レーザー光を走査して非接触で内部欠陥の位置を検出しているとみなすことが可能となる。

3. 測定結果

3.1 円柱形内部欠陥を走査させたときの超音波信号の変化

Fig. 1の装置を用いて、模擬内部欠陥のない試験片にレー

ザー超音波の送受信を行った超音波波形例をFig. 3に示す。Fig. 3において、3.4 μ s付近に現れる信号は超音波縦波第1波であり、引き続き、試験片表面での縦波反射による多重反射エコーが観測された。また、Fig. 3において、6.3 μ s付近に現れる信号は超音波横波第1波である。これらの超音波信号は、炭素鋼中における縦波および横波の音速と試験片の厚さから計算される超音波伝播時間と一致することからも確認される。超音波の伝播経路に内部欠陥が存在すると、超音波は反射、散乱、および回折を受けて、波形が変化するため、これらを観測することにより試験片中の内部欠陥が検出される。

まず、超音波の伝播経路を横切るよう、直径5.0 mmの長円柱形欠陥をFig. 1のx軸方向に走査させ、各欠陥位置における縦波第1波の受信電圧をプロットしたものをFig. 4に示す。横軸は、QスイッチNd:YAGレーザー照射面の中心からFig. 1のy軸方向に伸ばした線上に、模擬内部欠陥の中心が存在する場合の欠陥位置を0.0 mmに定めた。また、試験片表面の荒れにより、レーザー干渉計の感度は試験片を走査するたびに変動し、PD2から出力される電圧に影響を与えるが、レーザー干渉計の感度も同時に測定し、試験片に欠陥がない場合に1になるよう、PD2出力電圧の規格化を行った。

Fig. 4のプロットより、欠陥の位置が0.0 mm付近の場合に、PD2出力電圧が大きく減少することが観測された。また、その最小値は、欠陥が十分離れている場合のPD2出力電圧の0.16倍程度であった。これは、超音波の送受信を行うレーザービーム径よりも、模擬内部欠陥の直径の方が数倍大きく、発生した超音波の大部分は欠陥で反射、散乱されたためであると考えられる。また、欠陥の位置が ± 4.5 mm付近の場合、すなわち、レーザー光照射点が内部欠陥の幾何学的なかげの縁(± 2.5 mm)から約2 mm程度離れている場合において、PD2出力電圧は最大値を示した。

Fig. 3 An example of ultrasonic waveform measured without internal defect.

Fig. 4 Spatial profile of the ultrasonic amplitude. Diameter of internal defect is 5.0 mm.

次に、直径3.0 mmの長円柱形欠陥を走査させ、規格化したPD2出力電圧をプロットしたものをFig. 5に示す。横軸はFig. 4と同様に定めた。Fig. 5のプロットにおいても、模擬内部欠陥の直径の方がレーザービーム径よりも大きいため、Fig. 4と同様に、欠陥の位置が0.0 mm付近の場合に、PD2出力電圧が大きく減少することが観測され、その最小値は欠陥が十分離れている場合の0.19倍程度であった。また、欠陥の位置が ± 3.5 mm付近の場合、すなわちFig. 4と同様に、レーザー光照射点が内部欠陥の幾何学的なかげの縁(± 1.5 mm)から約2 mm程度離れている場合において、PD2出力電圧は最大となった。

次に、直径1.0 mmの長円柱形欠陥を走査させ、規格化したPD2出力電圧をプロットしたものをFig. 6に示す。Fig. 6

Fig. 5 Spatial profile of the ultrasonic amplitude. Diameter of internal defect is 3.0 mm.

Fig. 6 Spatial profile of the ultrasonic amplitude. Diameter of internal defect is 1.0 mm.

のプロットにおいては、PD2出力電圧は欠陥の位置が ± 1.0 mmの場合に最小となり、0.0 mmの場合に極大となることが観測された。0.0 mm付近に模擬内部欠陥が存在する場合のPD2出力電圧は、Fig. 4およびFig. 5ほど著しくは減少しておらず、PD2出力電圧の最小値は、欠陥が十分離れている場合の0.65倍程度であった。これは、内部欠陥の直径がレーザービーム径と同程度であり、内部欠陥で反射、散乱され、損失を受ける超音波成分が減少したためであると考えられる。また、欠陥の位置が0.0 mmの場合は、欠陥の左右から回折した、それぞれの超音波の位相が一致するため、PD2出力電圧が極大値となって観測されたものと考えられる。一方、PD2出力電圧の最大値は、欠陥の位置が ± 2.5 mm付近の場合、すなわち、レーザー光照射点が内部欠陥の幾何学的なかげの縁(± 0.5 mm)から約2 mm程度離れている位置において観測された。

最後に、レーザービーム径よりも小さな、直径0.5 mmの長円柱形欠陥を走査させ、規格化したPD2出力電圧をプロットしたものをFig. 7に示す。Fig. 7のプロットにおいても、Fig. 6と同様に、0.0 mmの欠陥位置において、PD2出力電圧の極大値が観測された。PD2出力電圧の最小値は、欠陥が十分離れている場合の0.84倍程度であった。また、Fig. 4, Fig. 5, およびFig. 6と同様に、レーザー光照射点が内部欠陥の幾何学的なかげの縁(± 0.25 mm)から約2 mm程度離れている位置において、PD2出力電圧の最大値が観測された。

Fig. 4およびFig. 5より、超音波の送受信径、すなわちレーザービーム径より、数倍以上大きな模擬内部欠陥が超音波伝播経路に存在する場合、発生した超音波の大部分は、欠陥で反射、散乱されるために、PD2出力電圧が著しく減少することが観測された。また、Fig. 6およびFig. 7より、模擬内部欠陥が、超音波の送受信径と同程度か、それより小さい場合においても、PD2出力電圧が減少することが示された。これらの測定により、レーザー超音波法を用いてレー

Fig. 7 Spatial profile of the ultrasonic amplitude. Diameter of internal defect is 0.5 mm.

レーザー光を走査し、PD2出力電圧の変化を調べることで、非接触で金属材料の内部欠陥の探傷が可能となることが示された。また、本測定により、レーザー超音波探傷法は、ある程度離れた場所から狭隘部の測定を行う手法として有効である可能性が示された。

3.2 内部欠陥による超音波回折の理論計算

試験片中を伝播する超音波は、内部欠陥により回折する。そこで、長円柱形欠陥による超音波の回折を理論的に計算し、本測定結果との比較を行った。回折現象はFraunhofer回折とFresnel回折に分類されるが、本測定は、障害物である模擬内部欠陥と超音波受信面が近距離にあるため、Fresnelの回折理論が当てはまるものと考えられる。

Fresnel回折の条件において、波が長円柱形の障害物により回折する場合、受信面における波の振幅を求めるには、コルヌの螺旋 (Cornu's spiral)⁸⁾を用いた手法が簡便であり、この手法を用いて、本測定条件のように内部欠陥を走査した場合の、超音波振幅分布の計算を行った。この計算に必要なパラメータは、超音波の波長、音源と障害物との距離、障害物と受信点との距離、障害物の大きさおよび位置であり、超音波の波長以外は既知である。そこで、試験片を伝播している超音波の波長を見積もるために、超音波の周波数特性の測定を行った。これは受信超音波信号に高速フーリエ変換 (FFT)を行うことにより求められる。

まず、内部欠陥のない試験片を伝播する超音波縦波第1波についてFFTを行った波形をFig. 8に示す。Fig. 8より、本測定装置により炭素鋼中に発生した超音波は、広い周波数帯域を有しており、また5.0 MHz付近に周波数ピークを有していることが分かる。炭素鋼中の超音波縦波の音速は約5,900 m/sであるため⁹⁾、これより超音波の波長は約1.2 mmの成分が最も多いものと見積もられる。

測定結果との比較を行うため、直径5.0 mm, 3.0 mm, 1.0 mm, および0.5 mmの長円柱形欠陥を走査した場合の幾何

Fig. 8 Frequency spectrum of the first longitudinal wave measured without internal defect.

学的パラメータと、この超音波の波長から、コルヌの螺旋を用いて、長円柱形欠陥によるFresnel回折後の超音波振幅分布の計算を行った。なお、発生した超音波はFig. 8に示されるような広い周波数帯域を有しているため、各周波数ごとに超音波振幅を繰り返し計算して重ね合わせを行い、また、超音波の送受信面においても、レーザービーム径0.7 mmの中の各点ごとに、繰り返し計算して重ね合わせを行うことにより、超音波周波数の広がりおよび送受信点の広がりを考慮した。

計算により求められる超音波振幅は、測定により得られるPD2出力電圧に比例するため、内部欠陥の直径が5.0 mm, 3.0 mm, 1.0 mm, および0.5 mmの場合における超音波振幅分布の計算結果を、それぞれFig. 4, Fig. 5, Fig. 6, およびFig. 7中の実線で示す。超音波振幅分布の計算結果は、欠陥の左右から回折した超音波が互いに干渉することにより、複雑な振幅振動を示すが、いずれの直径においても、音源から見て受信点が内部欠陥の幾何学的なかげとなる領域では、超音波振幅が減少した。しかしながら、幾何学的なかげの中心、すなわち0.0 mmの位置では、欠陥の左右から回折した超音波の位相が一致するため、内部欠陥直径が5.0 mmの場合を除き、超音波振幅は極大を示した。また、いずれの欠陥直径に対しても、内部欠陥の幾何学的なかげの縁から約2 mm離れた位置において、超音波振幅は最大値を示した。

これらの計算結果と測定プロットとの比較を行うと、測定結果は計算結果とよく似た傾向を示した。特に、Fig. 6およびFig. 7では、幾何学的なかげの中心で超音波振幅が極大を示す現象が、測定においても観測された。また、いずれの欠陥直径に対しても、超音波の送受信点が内部欠陥の幾何学的なかげの縁から約2 mm程度離れている場合に、Fresnel回折の効果により、PD2出力電圧が最大値を示した。よって、レーザー光を走査させたときの、PD2出力電圧の変化の情報から、金属材料中の内部欠陥の寸法を推測することも

可能であると考えられる。

本測定結果により、レーザー超音波法による金属材料の探傷において、内部欠陥により反射した超音波信号からだけでなく、内部欠陥により回折した超音波信号からも、非接触で内部欠陥の検出が可能であることが示された。本測定により検出された、直径0.5 mmから5.0 mmの内部欠陥は、従来の圧電素子を用いた探傷法でも十分検出可能なものであるが、レーザー超音波法の非接触という利点を生かすことにより、悪環境条件下での非破壊検査が可能になるものと考えられる。

4. まとめ

炭素鋼試験片に長円柱形の模擬内部欠陥を作製し、レーザー超音波送受信装置を用いて、レーザービーム径0.7 mmで超音波の送受信を行った。超音波の伝播経路を横切るよう、長円柱形内部欠陥を走査した場合の超音波信号を測定した結果、超音波振幅は、内部欠陥の幾何学的なかけの中に超音波受信点がある場合に減少し、内部欠陥の幾何学的なかけの縁から超音波受信点が2 mm程度離れた場合に最大になることが観測された。また、簡便な手法として、コルヌの螺旋を用いて内部欠陥を走査した場合の超音波振幅分布の理論計算を行った結果、計算結果は測定結果を裏

付けるものであることが示された。これらの測定結果より、レーザー超音波探傷法は、非接触で、炭素鋼中のmmオーダー以下の内部欠陥が検出可能であることが示された。さらに、内部欠陥により回折した超音波信号の測定と、内部欠陥により反射した超音波信号の測定を組み合わせることにより、レーザー超音波法による、プラント材料の内部欠陥検出の信頼性が向上できるものと考えられる。

参考文献

- 1) H. Sato, S. Nakano, H. Ogiso, and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **36** (1997) 3267.
- 2) 落合 誠, 仏円 隆, 三浦 崇広, 黒田 英彦, 空本 誠喜, 兼本 茂 : 日本原子力学会誌**43** (2001) 275.
- 3) 超音波便覧編集委員会編 : 超音波便覧(丸善, 東京, 平成11年) p.374.
- 4) C. B. Scruby and L. E. Drain: *Laser Ultrasonics Techniques and Applications* (Adam Hilger, Bristol, Philadelphia, and New York, 1990) p.261.
- 5) H. Nishino, Y. Tsukahara, H. Cho, and K. Yamanaka: *Proc. IEEE Ultrason. Symp.* 95, Seattle USA, (1995), p.673.
- 6) T. Tanaka and Y. Izawa: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) 1477.
- 7) R. J. Dewhurst and Q. Shan: Meas. Sci. Technol. **5** (1994) 655.
- 8) B. Rossi: *Optics* (Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, Palo Alto, and London, 1957) p.197.
- 9) J. Krautkramer and H. Krautkramer: *Ultrasonic Testing of Materials* (Springer-Verlag, Berlin, 1977) p.620.