

氏名	やまもと せつ 山本 摂
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 材料システム工学専攻
学位論文題目	レーザ超音波法による溶接施工インプロセスでの厚板検査技術
論文審査委員	主査 東北大学教授 山中 一司 東北大学教授 粉川 博之 東北大学教授 梅村 晋一郎

論文内容要約

今後競争のグローバル化が益々加速していく製造業分野では、生産性向上のために調達や製造におけるコスト低減および工期短縮が求められている。溶接技術の進歩により、技術的に困難とされてきた溶接部の厚さが 100 mm を超えるような大型構造物も溶接構造化対象とする動きが広がっている。しかし、溶接後検査で構造上クリティカルな欠陥が検出された場合、その補修や再加工のため莫大な追加コストや工期が発生することになる。このリスクが低減されない限り厚板構造の溶接技術は安定した製造技術として成立しえない。そこで、本研究では、溶接施工中に平行して検査を行い欠陥発生から早い段階での欠陥検出を行う“溶接施工インプロセス検査”を提案した。本論文は全 6 章から成り、第 1 章では溶接施工インプロセス検査と適用対象、第 2 章ではレーザ超音波の厚板溶接部適用に向けた信号処理方法の最適化、第 3 章ではハードウェアの選択とシステム構築、第 4 章では模擬欠陥や実溶接欠陥における性能検証、第 5 章では実機溶接構造への適用、第 6 章では結論として本論文の総括と今後の展望を、それぞれ述べる。

第 1 章では、溶接施工インプロセス検査を適用する対象を溶接構造蒸気タービンロータ（以下、溶接ロータ）とし、検査に要求される条件を以下のとおり明確化した。溶接部厚さ: 150 mm、検出可能最小欠陥寸法: $\phi 1.6$ mm、検査対象温度: 200 °C 以上、作動距離: 200 mm、溶接ロータ材料: CrMoV 鋼と 12%Cr 鋼の異材溶接。ここで、接触式超音波、空気超音波、電磁超音波、レーザ超音波の性能を比較し、作動距離の観点からレーザ超音波が唯一適用可能な超音波探傷技術であることを示した。また、レーザ超音波を用いた厚板における溶接施工中欠陥検査技術がこれまで報告されていないことを示し、本研究の工学的意義と新規性を明らかにした。

第 2 章では、溶接施工インプロセス検査システム（検査システム）が必要な感度を得るために用いる開口合成法の条件最適化および検出性能について、時間領域有限差分（finite-difference time-domain: FDTD）法を用いたシミュレーションで得た結果をベースに検討した。FDTD 法を用いて溶接施工インプロセスの幾何条件を模擬し、超音波伝搬をシミュレートした。ここでは、板厚 150 mm に対し、溶接が残り 70 mm まで進んだ状態で、開先直下 25 mm に $\phi 1.6$ mm のボイドが発生した条件を想定した。その条件で解析した結果、開先で励起された縦波がボイドで散乱され、その散乱波が受信レーザを照射している母材表面に到達する様子が再現できた。超音波送信時の音場を解析すると、半値幅をもつ縦波強度は入射角 $\pm 58^{\circ}$ まで分布しており、開口合成法の適用に必

要な指向性の低い入射波であることがわかった。受信された波形に実際のレーザ超音波試験体系にて得られた電気ノイズを重畳させ、信号ノイズ比（SN 比）をベースとした開口合成条件最適化の検討に用いた。

開口合成処理に関わるパラメータを定義し、処理を定式化した。ここでフェーズドアレイ超音波探傷による受信側の位相整合と、本システムで用いる開口合成法が数式的に等価であることを証明した。電気ノイズが存在する場合、開口合成においては強度抽出時間範囲（積分時間 ΔT ）に依存して SN 比が大きく変化することがわかっているが、 ΔT のまま検討した場合、入射波周期 T_i に応じて結果が変化してしまう可能性があった。そこで、本研究では ΔT を T_i で除した積分時間比 γ の概念を提案した。 γ をパラメータとし、電気ノイズおよびボイドからのモード変換で得られた横波を音響ノイズとしてそれぞれの SN 比を評価したところ、 $\gamma=0.35$ のとき最大の SN 比をもつことがわかった。一方で、溶接施工インプロセス検査においては、結果の表示にリアルタイム性を持たせる必要があるため、計算負荷に影響する γ は可能な限り低減させる必要がある。そこで、最大値に対して 95% の SN 比を持つ γ の最小値を選択し、それに相当する 0.25 が、検査システムに最適な γ であることを見出した。

ここまでで得られた知見に基づき、ボイド映像化を行った。その結果、明瞭なボイド映像化結果が得られた。また、本研究はあくまでボイドの検出を最終目的としているが、本技術のさらなる適用範囲拡大のために、溶接で発生する割れ検出への適用性を検討した。FDTD 法のシミュレーションにおいて、溶接部と母材の境界に減衰 2 重節点による閉じたき裂（閉口応力 10 MPa）を導入し、その検出性を検討した。入射波振幅が 50 nm の時はき裂の応答が得られなかったが、振幅 100 nm の入射波においてはき裂からの応答が得られた。そこで得られた波形を、開口合成法を用いて映像化し、基本波成分を用いた振幅差分法を用いたところき裂からの応答のみを抽出することに成功した。これにより、シミュレーションベースではあるが、閉じたき裂が映像化およびボイドとの識別が可能であることがわかった。

第 3 章では、検査システムに用いるハードウェアを選定し、開口合成法と組合せて結果をアウトプットする、システム化を行った。送信レーザには高出力と高繰り返しを両立する Q スイッチジャイアントパルス Nd:YAG レーザの Continuum 社製 PowerLite9060（繰り返し周波数：60 Hz、パルス幅：8 ns、パワー：700 mJ/pulse）を選択した。受信レーザにはロングパルスレーザを励起できる Nd:YAG レーザの TECNAR 社製 PDL（繰り返し周波数：60 Hz、パルス幅：100 μ s、パワー：2.5 mJ/pulse）を用いた。レーザ干渉計には粗面計測に適用可能なコンフォーカルファブリペローレーザ干渉計を選択した。また、作動距離 200 mm 以上で受信レーザを伝送可能な受信プローブを製作した。ここまでで構成したハードウェアに、第 2 章までに検討した開口合成アルゴリズムを適用し、溶接装置と組合せて検査システムを構築した。受信レーザを溶接部と直交方向に 1 回走査して得られる映像化結果を B-Scan 像、B-Scan 像を溶接方向に積み重ねて溶接部を 3 次的に映像化し、溶接方向を横軸に取った映像化結果を D-Scan 像とした。150 mm の厚さをもつ溶接部の底面を計測した結果、底面が明瞭に映像化された。これにより、溶接施工インプロセス検査システムの構築と、基礎的な動作検証を完了した。

第 4 章では、目標としている \square 1.6 mm 欠陥が検査システムによって検出できるか否か、室温および溶接施工

中の試験体において検証した。ここで、通常行っている溶接ロータの溶接後検査技術である **time of flight diffraction (TOFD)** 法の位置付けを明確化した。TOFD 法では校正試験体に導入した平底穴を基準とし、実際に得られた溶接欠陥を、平底穴に換算して ϕ 何 mm に相当するかという等価直径を用いて評価している。本研究でも、断面観察が困難な対象にあつては、等価直径を基準としてその感度を検証することとした。

まず、室温下で検査システムを用いた実溶接欠陥の測定を行った。等価直径約 ϕ 0.5 ～2.0 mm の溶接欠陥が存在することが予め TOFD 法でわかっていた試験体を持ち、検査システムで探傷したところ大部分の欠陥が映像化できた。ここで、映像化できなかった欠陥は検出目標としている ϕ 1.6 mm よりも小さい、 ϕ 0.5 mm であった。次に、溶接施工条件下で検査システムを用いた検証を行った。ここで、試験体には厚さ 150 mm の厚肉配管を用い、開先側面にドリルで既知サイズの模擬欠陥を加工した。ドリル穴は ϕ 1.5 mm、 ϕ 2.0 mm および ϕ 3.0 mm のものを用い、配管断面を円周方向に 10° 刻み、深さ方向に 10 mm 刻みで導入した。その試験体を溶接施工インプロセスで測定したところ、ほぼ全ての模擬欠陥検出に成功した。ここで検出できない欠陥が一部存在した理由としては、開先側面に導入したドリル穴だったため、溶接金属が流れ込んで埋まってしまったことが挙げられる。最も検出困難といえる、深さ 140 mm に存在する ϕ 1.5 mm 単体欠陥が検出できたため、本システムが十分な感度を有することがわかった。さらに、同形状のドリル穴を導入していない厚肉配管を用い、溶接施工インプロセスで実溶接欠陥を測定した。その結果 7 点の欠陥が検出でき、溶接後の TOFD 法では 12 点の溶接欠陥が検出された。検出された欠陥の等価直径に着目したところ、溶接施工インプロセスでは等価直径 ϕ 1 mm 以上の欠陥を全て検出できていることがわかった。これにより、本検査システムが溶接欠陥においても十分な感度をもつことが裏付けられた。

さらに、高出力の送信レーザをビード上に照射したことによる溶接品質の変化が起こっているか否かについても検証した。レーザを照射した領域と照射していない領域で、TOFD 法による欠陥発生傾向および溶接部の断面観察を用いて評価したが、レーザ照射の有無による有意な差は得られなかった。これにより、本検査システムが溶接品質に対しても悪影響を及ぼさないことが検証できた。

第 5 章では実機溶接構造への溶接施工インプロセス検査を適用した。対象は、溶接ロータと完全同形状のモックアップとし、溶接施工インプロセスで検査を行った。その結果、周方向位置約 175°、深さ 105.5 mm にエコーが得られた。その結果を、溶接後の TOFD 法で得られた結果と比較したところ、角度、深さともによく一致した。周方向位置約 175° でロータを断面し、その断面を観察したところ深さ 106 mm に ϕ 1.5 mm のブローホールが存在することがわかった。これにより、溶接施工インプロセスで得られた検査結果が、溶接後の TOFD 法および断面観察結果とよく一致し、その確かさが検証できた。また、検査システムで得られた欠陥からの信号強度と、溶接後の TOFD 法で得られた等価直径を比較し、検査システムの定量評価性能について検討した。Fig.1 にその関係を示す。信号強度を縦軸、等価直径を横軸とする感度直線が得られ、白抜きの丸で示した上述の検出結果が等価直径約 ϕ 1 mm と評価できることがわかった。当該欠陥の等価直径は ϕ 1.1 mm であり、よく結果が一

致することがわかった。また、信号強度のノイズレベルを評価したところ、等価直径的には $\phi 0.5$ mmに相当することがわかった。そのことから、理論的な検出下限は $\phi 0.5$ mmであると考えられ、目標としていた $\phi 1.6$ mm欠陥を十分検出する性能を有することが理論的にも示された。

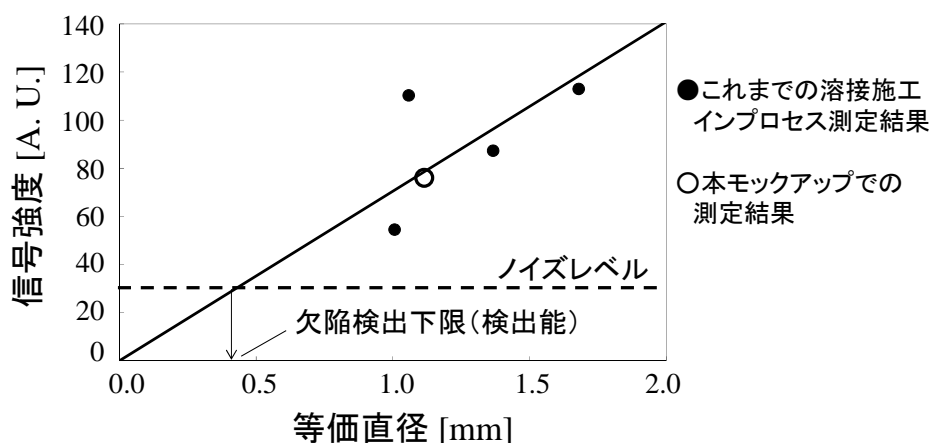


Fig. 1 溶接施工インプロセス検査システムにおける信号強度と等価直径の関係

最後に、溶接施工インプロセス検査が最も効果を発揮した例として、溶接初層に発生した欠陥の早期検出結果を報告した。検査システムを用い、溶接が約 10 mm 進んだ状態で初層に存在する欠陥の検出に成功した。溶接初層は接合だけでなく裏波の形成が求められることから溶接が困難であり、欠陥が発生した場合の再加工工程も最大となる非常に重要な領域である。溶接初期段階で初層欠陥を検出できたことは、本検査システムの有効性を改めて示しており、重要な結果である。以上の研究成果から、溶接施工インプロセスで $\phi 1.6$ mmの単体欠陥を検出する性能を有する、溶接施工インプロセス検査技術の開発に成功した。

将来的には、本技術の定量評価精度をより高めることで、本技術のみで品質保証まで達成できるシステムを構築することを目標としている。それが実現すれば、溶接後すぐに次の工程への展開が可能であり、さらなる製造コスト短縮が期待できる。また、本論文で述べた対象は全て低合金鋼であり超音波探傷の適用先としては比較的容易である。火力発電分野では超々臨界圧をはじめとして高温高压化が進んでおり、Ni 基合金等、高い耐クリープ性と引き換えに超音波探傷が困難となる材料の適用が試みられている。そのため、従来困難だった材料へ本技術を適用するための更なる感度向上を目指していく。