

論文の内容の要旨

論文題目 レーザーピーニングの衝撃力のAE法による評価

氏 名 高田 知樹

金属材料の表面に残留応力を付与する表面改質を行うことを目的としてレーザーピーニングがタービンブレードなどの製品に用いられている。レーザーピーニングはレーザー照射を行うことで金属表面にレーザーアブレーションを起こし、その衝撃力を用いて表面加工を行うものである。レーザーピーニングにおける残留応力の付与には衝撃力の値が重要である。レーザーアブレーションの衝撃力を上昇させるためには、レーザー出力を上げる方法が考えられる。しかしレーザーピーニングはプラズマを閉じ込めるために周囲を水層などで覆っている。このためレーザー出力を上げることで、レーザーのパワー密度の高くなりすぎると、水層がレーザーを透過させずに反応するレーザー誘起絶縁破壊という現象が起こる。絶縁破壊によってレーザーのエネルギーの一部が消費されるため、金属表面に到達するレーザーエネルギーは結果として出力時のエネルギーほどには高くない。したがってレーザーエネルギーを上昇させるだけではレーザーアブレーションの衝撃力は飽和してしまうと言える。本論文ではこの問題を解決するためにレーザーピーニング時の現象について注目した。

第1章ではレーザーピーニング及び本論文で対象とした現象について述べた。レーザーピーニングにおいてはレーザーアブレーションだけでなくキャビテーションバブルの崩壊によっても衝撃波が発生し、絶縁破壊自体も衝撃波を発生させる。キャビテーションバブルは水中の圧力差が生じた個所に発生する微小なバブルのことを指す。このバブルは崩壊時に強い衝撃を伴い、このため船舶のプロペラなどの壊食の原因となることがある。水中にレーザー照射するなど場合にもキャビテーションバブルは発生する。このようにレーザーピーニングにおける課題について述べた。

第2章では研究に用いた装置類について詳しく述べた。レーザーピーニングを行うことができる実験装置を作製し、実験条件ごとにレーザー照射を行った。レーザーのエネルギー、水層の温度、粘度、水層の厚さがレーザーピーニングに与える影響を評価した。レーザー誘起絶縁破壊の実験を行う際には、試料の位置とレンズの焦点位置を調節して水中にレーザーを収束させることで再現した。試料にはA7075(35×35×20mm)の試験片を用い、最大出力200mJのパルスレーザーを使用した。さらにレーザーピーニング時

の現象を明確にとらえるためにレーザー照射を行う金属試料の裏面だけでなく、水中にもAEセンサを設置しAE計測を行った。レーザーピーニング時の現象を観察するために高速度カメラによる撮影をシャドウグラフ法によって行った。

さらに実際にレーザーアブレーション以外の衝撃力源が材料表面の残留応力に対して影響を与えているのかどうかを調べるために、有限要素シミュレーションによる衝撃力と残留応力の評価を行った。レーザーアブレーションとキャビテーションバブルのシミュレーションは個別に行うことでそれぞれの残留応力への影響を計算によって求めた。作成した金属試料のモデルに直接衝撃圧力を荷重することでレーザーアブレーションのシミュレーションを行った。キャビテーションバブルのシミュレーションでは、金属試料とそれを覆う水層のモデルを用いた。金属表面の水層中に半球状のバブルを水の存在しない空孔として設定し、大気圧および重力中で時間経過とともに収縮していく様子をシミュレートした。

第3章では、得られた実験結果について述べた。レーザーピーニング時の現象としてレーザーアブレーション、キャビテーションバブルの崩壊、レーザー誘起絶縁破壊についてAE計測と高速度カメラによる観察によって捉えることができた。衝撃力の評価にはAE計測から得られたAE波形を逆解析することで衝撃力を求めた。レーザーアブレーションとバブル崩壊の衝撃力は条件にもよるが同程度の衝撃力を発生させており、水層の厚さを変えた実験条件ではキャビテーションバブルの崩壊時の衝撃の方が大きくなった。AE計測と同時に高速度カメラによるレーザーピーニングの観察について報告した。レーザー照射後のバブルの発生と崩壊を詳しく観察することができた。AEイベントが検出されるレーザーアブレーション、バブル崩壊、絶縁破壊の発生時を高速な撮影条件で観察すると衝撃波の発生と伝播を映像でとらえることができた。

レーザーアブレーションのシミュレーション結果から衝撃圧力による残留応力を評価できた。キャビテーションバブルの崩壊のシミュレーションにおいては時間経過とともにバブルの中心部に向かって収縮していたバブルは最終的に崩壊した。崩壊時に衝撃波を発生させ、バブルの中心部近傍の材料表面に残留応力を発生させた。発生した残留応力はバブルの初期最大半径を大きくするとともに増加した。

第4章では第3章で得られた実験結果について考察を行った。レーザー照射時の条件によって衝撃力が受けた影響を評価した。実験結果からレーザーアブレーション時の衝撃力は水層の衝撃インピーダンスが上昇する条件で上昇した。キャビテーションバブルの衝撃力はレーザーアブレーションと同程度の衝撃を発生させており、水層の厚さを変えることでレーザーアブレーション以上の衝撃を発生させる条件も存在した。実験条件の違いによってバブル崩壊時の衝撃力が大きな影響を受けた。バブル崩壊の衝撃も材料の残留応力に十分に影響を与えることができると言える。絶縁破壊の衝撃も検出することができ、こちらもレーザーエネルギーの上昇とともに絶縁破壊の衝撃力も上昇した。さらにレンズの焦点距離が短い場合に絶縁破壊に消費されるエネルギーが増加し、衝撃力

も増加する結果が得られた。

材料に取り付けたセンサでは材料表面及び材料内部のAE波を主にとらえることになるが、水中のセンサでは材料表面以外で起こった現象をとらえることができた。また逆解析による衝撃力の評価も材料伝播AEと水中伝播AEの解析結果を比較した結果、水中伝播AEによるレーザーピーニングのモニタリング及び評価も十分に可能だという結果が得られた。

レーザーアブレーションのシミュレーションでは、2GPa以上の衝撃圧力を加えると、一部の残留応力値が低下した。この傾向はユゴニオ弾性限界（HEL）によって説明できた。2GPa以上の衝撃圧力を繰り返し加えると残留応力の値は上昇していくものの、表面近傍に大きな変形が発生してしまうことから、残留応力を求める場合でも大きな衝撃圧力を加えるだけではいけないといえることができる。さらにキャビテーションバブルの衝撃がレーザーアブレーションによる衝撃をすでに受けている材料に対して有効であるかを調べた。バブルの中心部の金属試料モデルにレーザーアブレーションのシミュレーションを直接行ったのちに、バブルが崩壊したシミュレーションを行った。このシミュレーションにおいても、最初のレーザーアブレーションの衝撃によって発生した残留応力がバブル崩壊の衝撃によってさらに増加する結果が得られた。このことからキャビテーションバブルの衝撃もレーザーピーニングにおいて有効であると考えられる。またシミュレーションの計算結果が実際のレーザーピーニングに合致しているかどうかを調べるために、実験結果との比較を行った。キャビテーションバブルの崩壊のシミュレーションにおいてバブルの崩壊時間が実験結果とほぼ一致し、バブル崩壊の理論式から求めた値とも合致した。レーザーアブレーションのシミュレーションにおいても残留応力の深さ方向の分布と実際に計測した実験試料の残留応力分布の最大残留応力の値や深さなどにおいて実験値と一致する結果が得られた。

第5章においてはこれまでの内容を総括した。AE計測と高速度カメラの観察からレーザーアブレーションだけではなく、バブルの崩壊やレーザー誘起絶縁破壊の衝撃力を評価することができた。シミュレーションにおいてもキャビテーションバブルによる残留応力への影響が確認できたことから、バブル崩壊の衝撃を有効に活用することで表面改質の効果を向上させることができると言える。AE計測において水中伝播AEを活用することで、従来の材料伝播AEではとらえることが難しい現象のAE波も計測することができ、レーザーピーニングのモニタリング及び評価も十分に行える結果が得られた。シミュレーション結果は実際の実験結果と一致することが分かった。

このように本研究においてレーザーアブレーション以外にもレーザーピーニング時の衝撃力源となりうる現象が存在し、バブル崩壊の衝撃力を考慮することで表面改質の効果を高めることが期待できるといえる。絶縁破壊に関しても、レーザーピーニング時の避けるべき課題としてのみ捉えるのではなく表面改質のための衝撃力源と考えれば直接レーザーを行えない部分の表面改質に利用できる可能性がある。