

高輝度光ビーム加工技術に関する研究

レ - ザアブレーション機構と最適加工条件の解明

高感度・高速アブレーション分光計測技術の開発

福井大学教育地域科学部 香川 喜一郎

[研究の概要]

リアルタイムで短パルスレーザー加工をモニタリングする方法を、光学的方法と電磁気学的方法を用いて検討した。光学的方法では半導体レーザー(650nm, 200mW)と干渉フィルターを組み合わせることによって加工表面をリアルタイムで観察する方法を提案した。また、広帯域 OMA を用いたスペクトル測定、および小型分光器と高速応答光電子増倍管を用いたプラズマ発光の時間変化測定を行い、これらがレーザー加工のモニタリングとして有効であることを示した。電磁気学的方法として、レーザープラズマに電界を作用させ、高密度プラズマの外に染み出た電子を誘導電流として計測する新しい方法を提案した。電磁気学的方法は、室内光やレーザー光の妨害を受けることがなく、モニタリング方法として優れていることを確認した。これら光学的方法と電磁気学的方法を組み合わせ、実際にレーザー加工モニタリングシステムのプロトタイプを試作し、その有効性を実証した。

1 . はじめに

現在、短パルスのレーザーを用いたマイクロ加工技術は急速に発展している。高精度の加工を行うには、レーザーの波長、パルス幅、レーザーのパワー密度、繰り返し周波数、雰囲気ガスなどを最適条件に設定する必要がある。これまでのレーザー加工では、レーザー出力や、レーザー集光度など、いろいろな条件を変えて照射し、その後、表面の顕微鏡観察などを行って加工状態を評価し、照射の最適条件を決定するといった方法が主流であった。一方、他の研究者によって行われたレーザー加工のリアルタイムモニタリング法として、マイクロフォンを用いて加工時のアブレーション量を検知する方法等があるが¹⁾、これらの方法は短パルスのレーザー加工においては有効とは思われない。本研究は、レーザー加工における材料表面の加工状態が、同時に発生するレーザープラズマの特性と密接に関係していることに注目し、レーザープラズマの特性を検出することによって、レーザー加工の状態を認識しようとするものである。表1はレーザー加工に影響を及ぼすパラメーターと、検出可能なレーザープラズマの特性、および検知が期待されるレーザー加工要素を表に示したものである。この表が示すように、本研究では、プラズマ発光のスペクトル、スペクトルの時間変化、さらにプラズマの電子を反映した誘導電流波形などを計測することで、リアルタイムで加工状態のモニタリングを行う。今後、超短パルスレーザーを用いるレーザー加工を、高性能かつ高効率に行うためには、この種の研究が必要不可欠であると考えられる。

2 . フェーズ の研究目的と内容

フェーズ では、「レーザーアブレーション機構の解明」と、「レーザーアブレーションの高感度・高速計測システムの開発」に関して行った。加工状態を、光学的方法を用いてモニタリングするためには、レーザーアブレーションに伴う原子の発光過程が十分解明され

ていなければならない。この立場から、本研究ではレーザープラズマの発光過程に関する基礎的研究も行った。また、本研究では、独創的な方法として、電磁気学的方法を用いて加工状態をモニタリングする方法も開発した。さらに、加工表面のリアルタイム観察法に関しても基本原理を確認した。

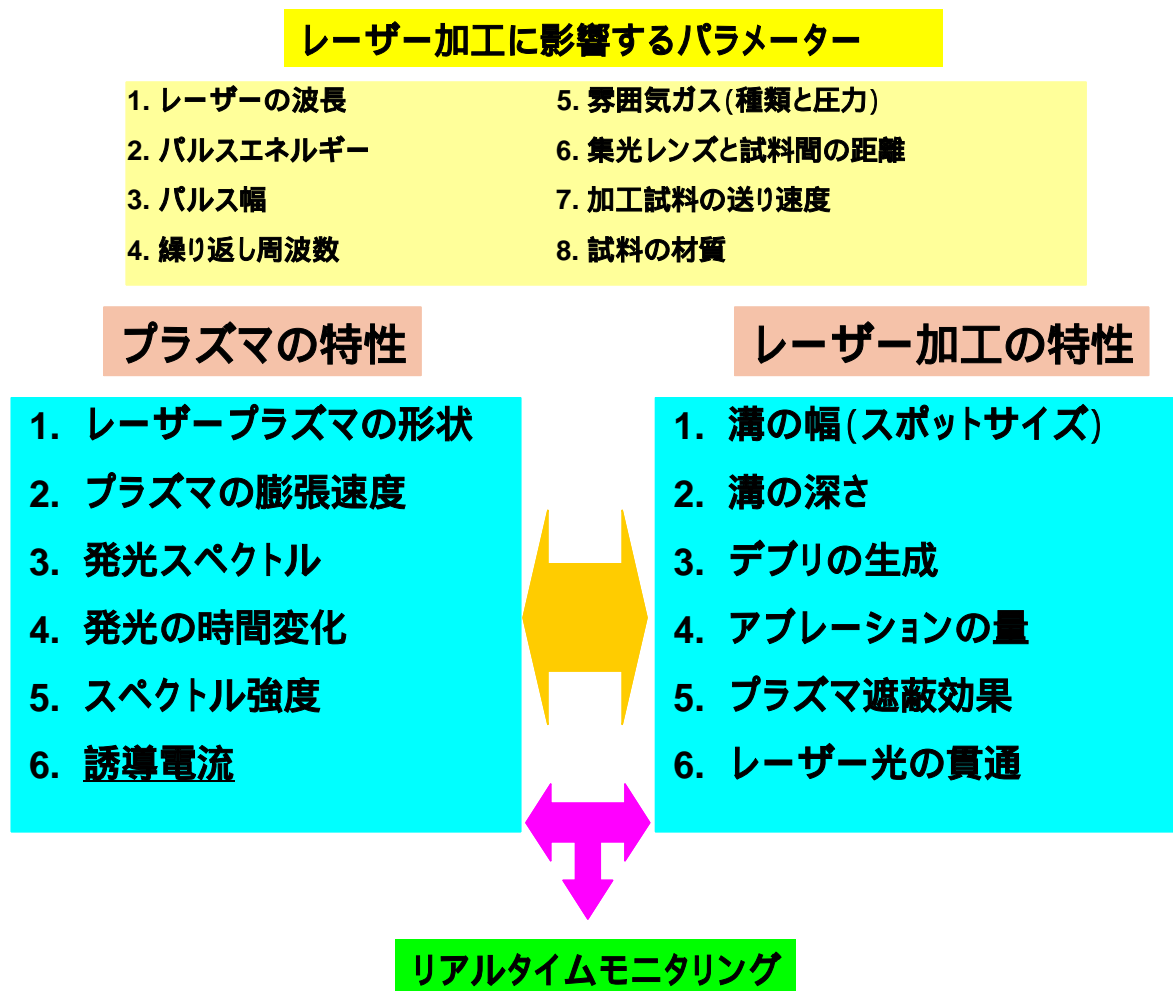


表 1. レーザプラズマ特性要素とレーザー加工特性要素

3. フェーズ の研究成果

3.1 プラズマ発光機構

レーザー照射により、試料から原子が高速で噴出し、強いプラズマ発光が生じる。この発光過程のメカニズムに関しては、いまだ十分に理解されていない。本研究では、この発光は、衝撃波と強く関係しているとの仮説に基づき、それを証明するための実験を行った²⁻⁴⁾。図1に示すような装置を用いて、プラズマ発光を検出するとともに、発生する衝撃波によるガス密度変化を、干渉法を用いて同時計測した。干渉計として我々が開発した虹干渉計を用いた⁵⁾。すなわちプローブ光としての He-Ne レーザ光を円柱ガラスに最小振れ角の条件で入射させ干渉縞を作る。この干渉縞の明暗の中間点にモノクロメータのスリットがくるように調整する。この方法によれば複雑な光学系を組まなくても簡単に干渉縞を作ることができる。衝撃波がプローブ光の場所に差し掛かると干渉縞は乱れるのでその瞬間

をオシロスコープのチャンネル2で検知する。一方、プローブする場所から発するプラズマ発光を同時に検出しオシロスコープのチャンネル1で観測する。試料は Zn で、雰囲気ガス圧は空気 10 Torr, レーザはパルス YAG レーザ (8 ns 幅、10-60mJ) を用いた。図2は 37mJ のレーザ光を照射したときの衝撃波による信号 (上の信号) と、発光の信号 (下の信号) である。(a) は試料表面から 2mm の位置でとらえた場合であり、発光と密度変化は同時に起っていることがわかる。即ちレーザアブレーションによって噴出する原子が周囲のガスを圧縮して衝撃波を駆動し、その高速断熱圧縮によって作られる高温によって原子は励起・発光しているとするモデルを支持している。(b) は試料表面から 6mm の場合であり、発光の立ち上がりが密度変化の信号に比べて遅れているのがわかる。これは時間が経過すると衝撃波と発光の先端が離れることを意味する。この種の実験を大気圧の基でも行い、大気圧下生成プラズマにおいても、減圧下と同様、衝撃波が重要な役割をしていることを明らかにした。

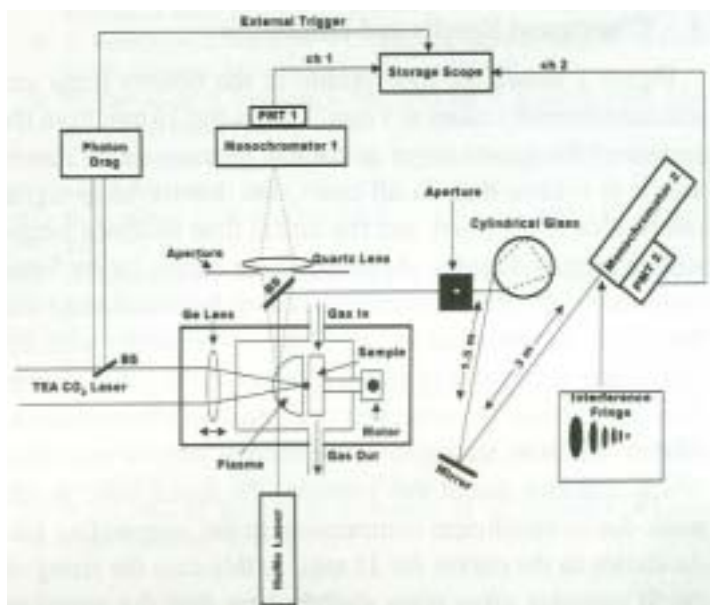


図 1. 衝撃波とプラズマ発光を同時計測する実験装置

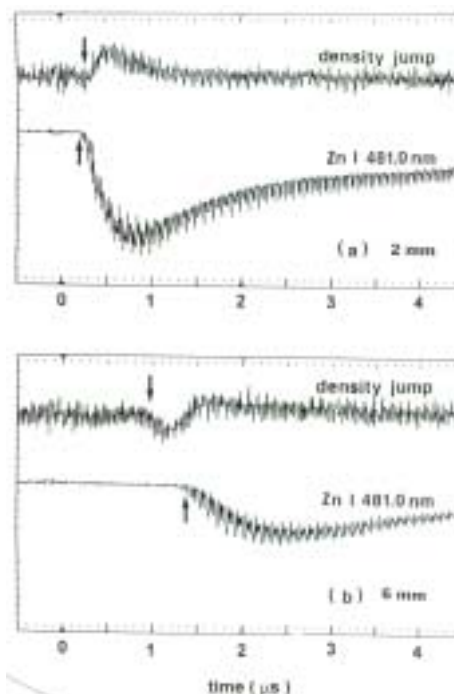


図2. ガス密度変化とプラズマ発光の立ち上がり。(a)は試料表面から2mm, (b)は試料表面から6mm

また、別の研究によっても衝撃波と発光の関係を明らかにした。即ち、レーザ照射する試料の前に細い針やワイヤーなどの障害物を置くと、プラズマの発光は通常の半球状から大きく変形されるが、その発光の形状は、一点から発生した衝撃波が、障害物によって変形されてできると予想される衝撃波の形状にほぼ一致している^{6,7)}。プラズマ中の原子の発光にかかわる励起機構のモデルとして、電子衝突モデルや電子・イオン再結合モデルなどが多くの研究者から提案されていたが⁸⁾、今回の我々の研究結果は衝撃波モデルを強く支持している。

3. 2 誘導電流信号

光現象と誘導電流現象を用いてレーザプラズマをモニタリングする技術を開発するために、まず、ガス中に短パルスレーザを照射してレーザプラズマを生成し、発光の時間変化および誘導電流波形を観測し、基礎的なデータを収集した⁹⁾。図3はその装置の概念図である。レーザはYAGレーザの3倍波(355nm、7ns)を10Hzで作動し使用した。レーザのエネルギーは2mJから50mJの間で必要に応じて変化させた。レーザ光はレンズでチャンパー内に集光し、レーザプラズマを発生させる。そのプラズマを挟んで、二つの電極(電極間隔15mm)が配置され、その電極に50Vから700Vの間で直流電圧が印加される。レーザプラズマが発生するとこの電極間には誘導電流が観測される。レーザプラズマの大きさは1mm程度と小さく、プラズマ中の電子は正電極まで到達することはできないが、印加された電界中で電子が移動することにより、それが誘導電流として計測できることを明らかにした。誘導電流の信号はデジタルオシロスコープのチャンネル1で観測した。同時にプラズマが発生する光信号をモノクロメーターと高速応答電子増倍管を用いて受けデジタルオシロスコープのチャンネル2で観測した。

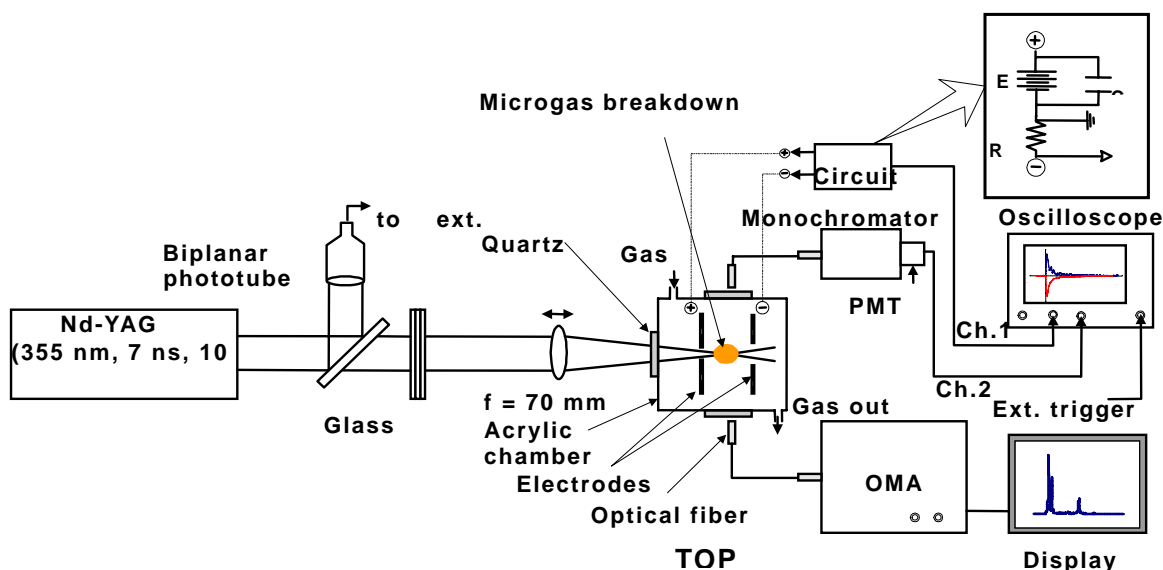


図3. レーザ誘起ガスプラズマによる誘導電流、および発光の時間変化を測定する装置

図4は空気中にレーザ光を集光した場合の誘導電流の時間変化、および連続スペクトル光の時間変化を示す。レーザのエネルギーは10mJで電極間の電圧は700Vである。両信号共に、レーザパルス波形に一致して立ち上がり、7ns付近でピークとなった後、急速に減衰し60ns付近で終わっている。同様の実験をヘリウムガス中で行いその結果を図5で示す。この場合は誘導電流の立ち上がりは空気の場合と同様に速いが、信号の減衰は緩やかで、6 μ s付近まで続く。ヘリウムガスの場合、レーザプラズマ発生とともに寿命の長いヘリウムガス原子の準安定状態が生成され、それからプラズマの熱エネルギーを得てイオン化がおり電子が徐々に供給され、その結果このように長い時間にわたって誘導電流が観測されると考えられる。さらに電極に印加する電圧と誘導電流信号の関係を調べた

結果、印加する電圧とともに誘導電流信号が直線的に増大するのが確認された。

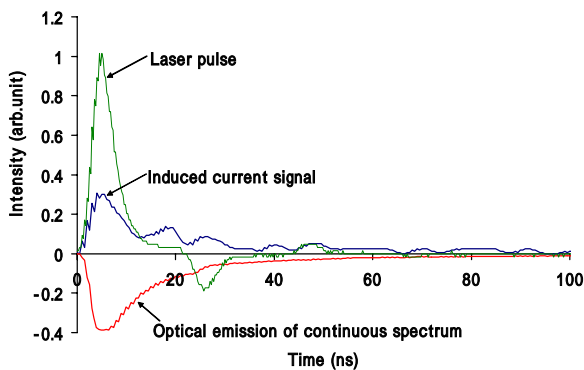


図 4. 空气中に図 4： レーザ光を集光した場合の誘導電流と連続スペクトル光の時間変化

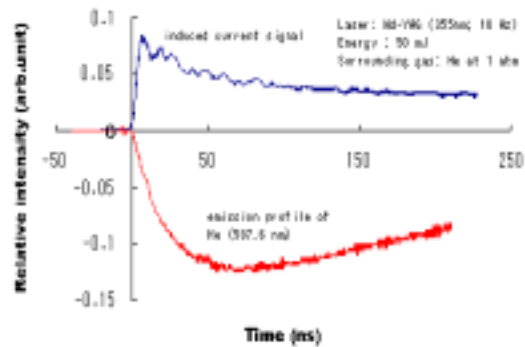


図5. Heガス中にレーザ光を集光した場合の誘導電流と連続スペクトル光の時間変化

3.3 動的加工表面観察法

レーザ加工中に顕微鏡を用いて加工表面を観察すると、強い連続スペクトルを持つプラズマ発光に妨害され、表面を観察することはできない。この表面観察を実現することも、リアルタイムモニタリングシステムとして重要な課題である。本研究では、図 6 で示すような、比較的簡単な方法でこれを実現した¹⁰⁾。すなわち、試料表面を半導体レーザ(650 nm, 200mW)レーザで照明しつつ、顕微鏡に取り付けたアナログ CCD カメラの前に干渉フィ

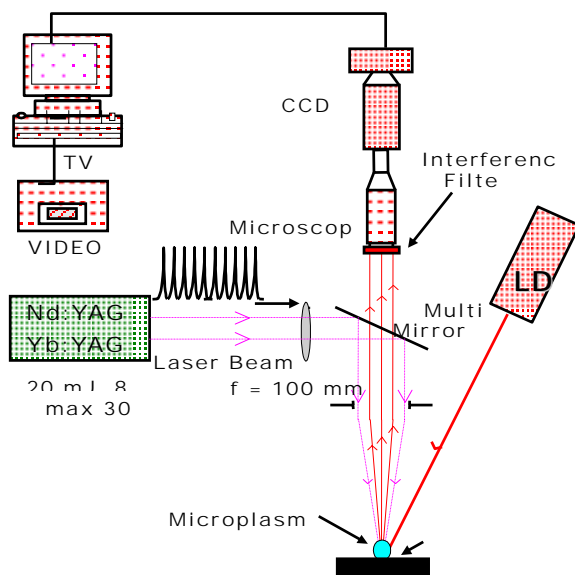
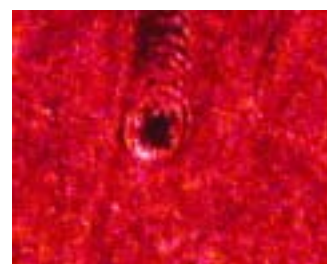


図 6. リアルタイムでレーザ加工表面の状態を観察する装置



(a)



(b)

図 7. (a) 半導体レーザ(650nm, 200mW) と干渉フィルターを用いた場合 (b) 干渉フィルター - を使用しない場合

ルター(650 nm)をセットする。これによって、プラズマが発する強い連続スペクトル光をカットでき、半導体レーザで照明する加工表面が明瞭に観察できる。図には表していないが、表面照射用のレーザ光はスリガラスなどを用いて散乱させレーザ光としての干渉性を

消去した方がよい。

図7(a)は半導体レーザーと干渉フィルターを用い表面観察を可能にした場合である。表面状態をリアルタイムで観察しながらレーザー照射条件を調整できるので、加工制御は非常にやり易くなる。干渉フィルターを使用しない場合を図7(b)に示す。この場合、強いプラズマ光に妨害されてクレーターは観察できない。興味深い事は、数 mJ のナノ秒幅の YAG レーザー(基本波) パルスを、試料の同じ場所に 10Hz 程度で繰り返し照射し続けると、金属表面が溶け、沸騰する状態が観察される。また、デブリの成長状態も観察できる。ガラス基板上に作られた ITO 薄膜に照射すると、レーザー照射によって薄膜が除去されていく様子が、リアルタイムで観察できる。この場合、レーザー光はガラス基板の側面のエッジから入射させるとよい。ガラス基板の内部の全反射によってレーザー光が広がり、薄膜の下方から加工部を照射することが可能となり、そのため薄膜の除去が比較的鮮明に観察される。

4. フェーズの研究目的と内容

フェーズ I の基礎実験で明らかになった電磁気学的方法(誘導電流)と光学的方法(プラズマ発光)によるプラズマ計測技術を用いて、リアルタイム加工モニタリングのための装置を設計・製作した。図8はこの装置の概念図を示す。以下このシステムが持つ五つの機能と、それを実現するための必要機器を括弧内に示す。

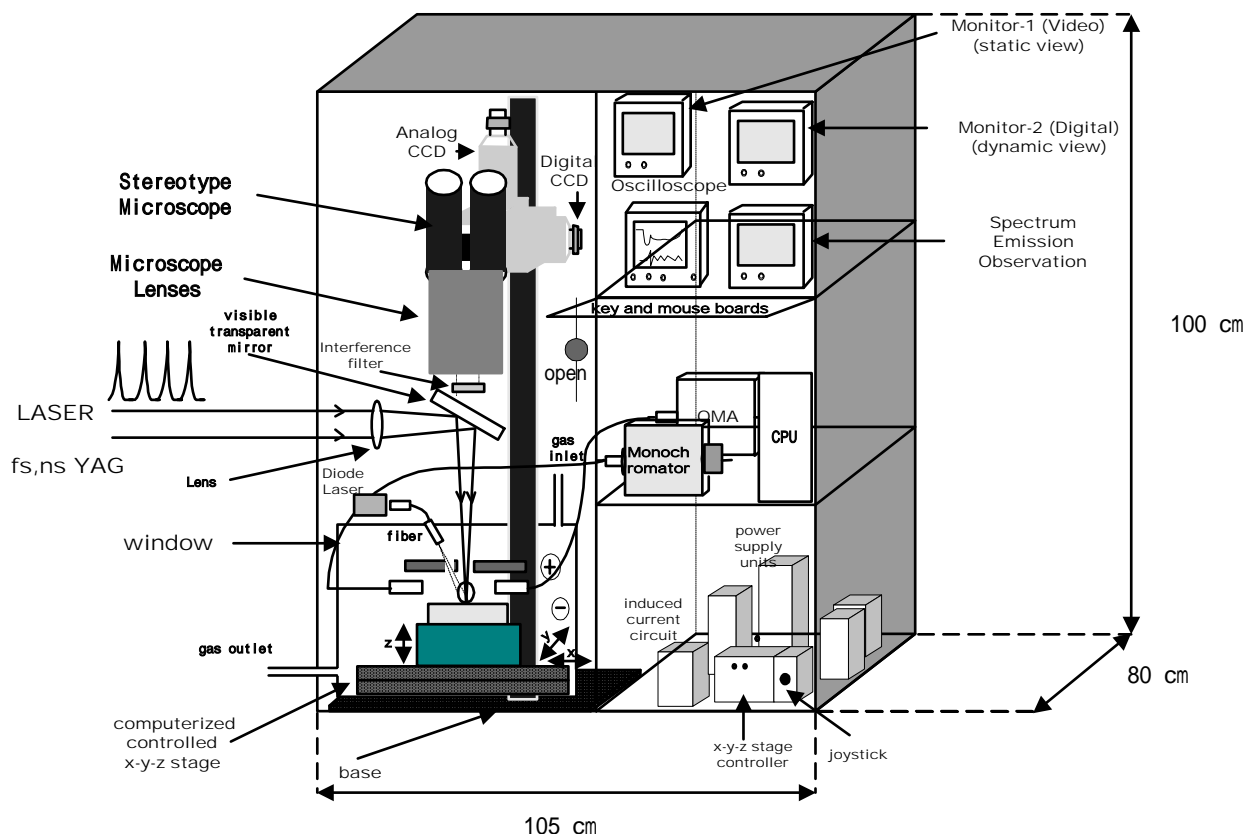


図8： レーザ加工モニタリングシステムの概念図

- 1) 静的表面観察 (実体顕微鏡 + デジタル CCD カメラ (専用モニター付))
- 2) 動的表面観察 (実体顕微鏡 + アナログ CCD カメラ + TV モニター + 高出力半導体レーザー + 干渉フィルター)

- 3) 発光スペクトル測定 (小型 OMA+ パソコン)
- 4) 発光時間変化測定 (小型モノクロメーター+ デジタルオシロ+ 高速 PMT)
- 5) 誘導電流測定 (デジタルオシロスコープ + 高圧電源 + 電子回路)

本装置は、通常の加工機と同様、レーザ加工観察部として、レーザ照射後に表面を精度良く観察する装置を備えている。これは、高性能の CCD カメラと画像解析機能を持つ専用ディスプレイからなる。これに加えて、フェーズ I で述べたレーザ照射中でもリアルタイムで表面観察ができる動的表面観察機能を備えている。加工試料の上部に電極やビームスプリッター等を配置する必要から、顕微鏡は作動距離の長いステレオタイプ実体顕微鏡を用いた。

フェーズ I でのガスプラズマ を用いて行った誘導電流測定法を、ターゲットプラズマ



図9 .試作したレーザ加工モニタリングシステム

の場合に適用できるように、加工試料の上部に正と負の電極を配置した。誘導電流の信号はデジタルオシロスコープのチャンネル1に送る。このほか、発生するターゲットプラズマの発光を2本の光ファイバーで受け、1本は小型 Optical Multichannel Analyzer (OMA) に送りプラズマ発光のスペクトルをリアルタイムでパソコン上に表示している。もう1本は小型の分光器に送り、選択した波長でプラズマ発光の時間変化を高速応答光電子増倍管で計測し、デジタルオシロスコープのチャンネル2に入力させる。このほか加工試料を高精度で移動させるための、X-Y-Z 軸移動装置、および4軸移動制御装置がある。図9は試作した装置の写真である。

5 . フェーズ の研究成果

上記5つの機能の内、発光スペクトル測定、発光時間変化測定、誘導電流測定に関して、以下測定例を挙げ説明する。

5 . 1 発光スペクトル測定

本モニタリングシステムに使用した OMA は 200nm から 1000nm までの広い波長範囲のスペクトルを時間積分法で計測する。検出感度も高く、1mJ 程度の比較的低いパルスエネルギーのレーザ光を照射する場合でも十分な強度でプラズマの発光スペクトルを計測できる。図 10(a)は真鍮に YAG レーザを照射した場合のスペクトルである。連続スペクトルと共に Cu、Zn による強いスペクトル線が観測される。このようにプラズマ発光スペクトルより、加工試料の組成分析がリアルタイムで可能となる。また、図のイラストで示すように、層状構造からなる試料の場合、発光スペクトルからどの層まで加工が進んでいるか

判定できる。レーザー光を用いる基板上薄膜の選択除去にもこの発光スペクトルは効果的に利用できる。即ち、薄膜による発光スペクトルと、基板の材質からの発光スペクトルは異なることを利用して、基板自体からの原子の噴出（アブレーション）が起らないようレーザー照射条件を制御することができる。図 10(b)は ITO 薄膜と、基板からのスペクトルを比較して示した。

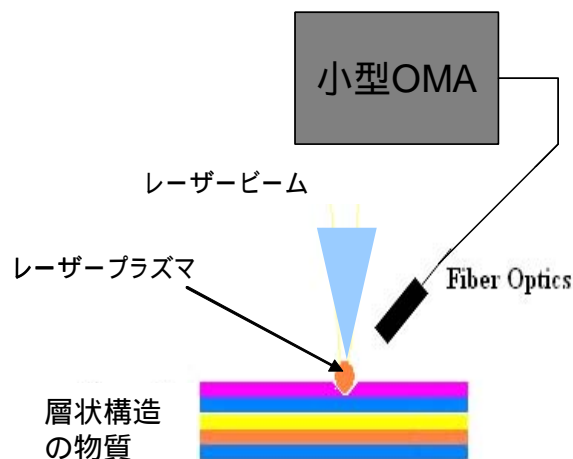
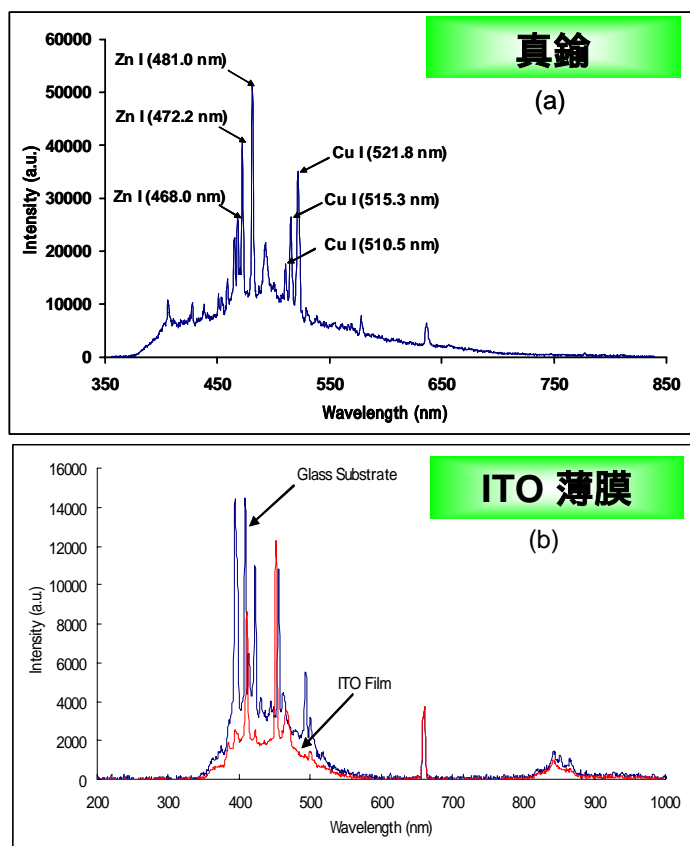


図. 10 広帯域小型 OMA で測定したプラズマ発光スペクトル (a) 試料が真鍮の場合のスペクトル (b) 試料が ITO 薄膜の場合のスペクトル

5.2 発光時間変化測定

よく知られているようにプラズマ遮蔽効果が起こるとレーザー加工は熱的效果が顕著となり、加工の性能は劣化する。したがってプラズマ遮蔽効果の程度を検知することもモニタリングとして重要な課題である。プラズマ遮蔽が起こらない場合は、短時間の間にアブレーションは完了する。しかし、プラズマ遮蔽が起こると、アブレーションの急峻さは低下し、アブレーションがパルス幅に比べ比較的長い時間続く。したがってプラズマ発光の時間変化を観察することでプラズマ遮蔽に関するある程度の情報を得ることができる。

図 11 の(a)は YAG レーザの 3 倍波(355nm)を Cu 板に集光した場合の Cu, 324.7nm の発光の時間変化であり、(b)は YAG レーザの基本波(1064nm)を集光した場合である。プラズ

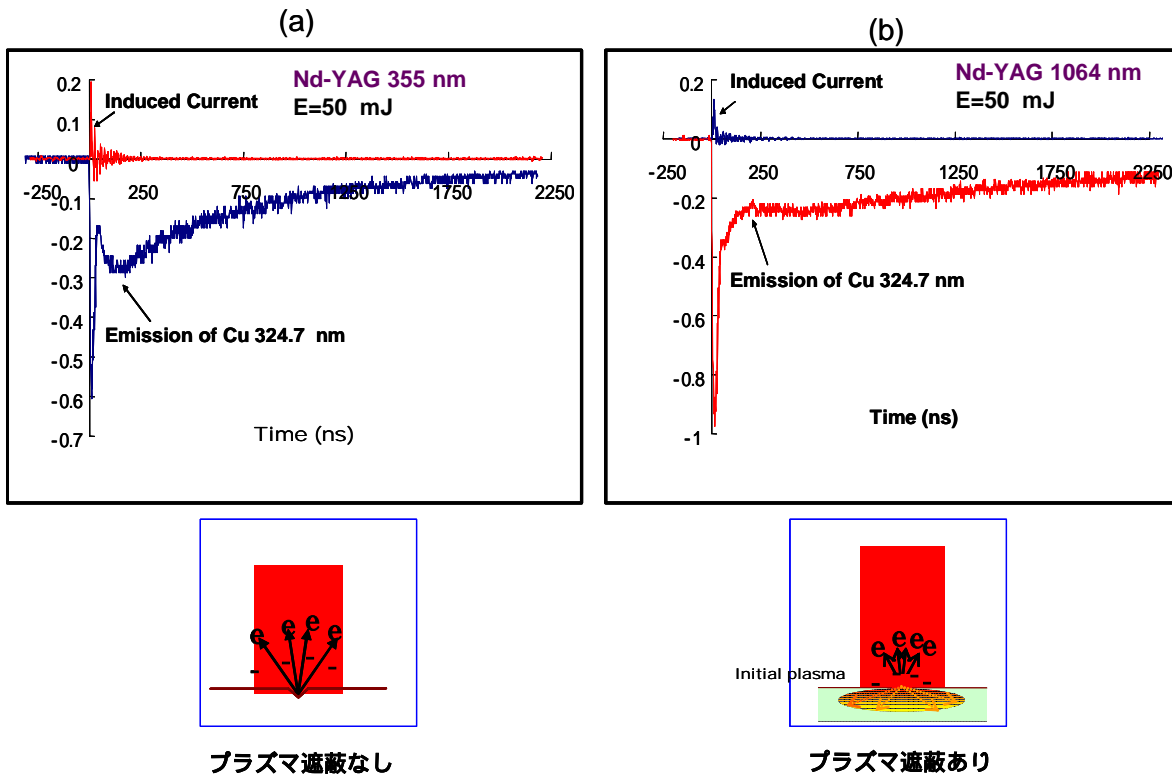


図11. プラズマ発光の時間変化、試料は銅 (a)YAG レーザ 3 倍波 (355nm)照射の場合 (b) YAG レーザ基本波(1064nm)照射の場合

マ遮蔽はレーザーの波長が長い程起こりやすいことが分かっているが、実際に(b)の発光の立ち上がりは(a)に比べて緩やかであり、かつ発光はより長い時間続いている。ここで、プラズマ発光の初期にスパイク状に立ち上がっている信号は primary plasma によるものである⁴⁾。

5.3. 誘導電流測定

レーザー加工モニタリングに使用する誘導電流計測の概念図を図12に示す。図8に示した装置では、試料を正・負の電極でサンドイッチしていたが、その場合は形状の大きな試料を加工することができない。そこで、試料の大きさに拘わらずモニタリングができるように電極配置を検討した。すなわち、試料表面から数 mm 上方に正・負の電極（電極間隔 3 mm）を配置し、両電極に数百 V を印加する方法である。

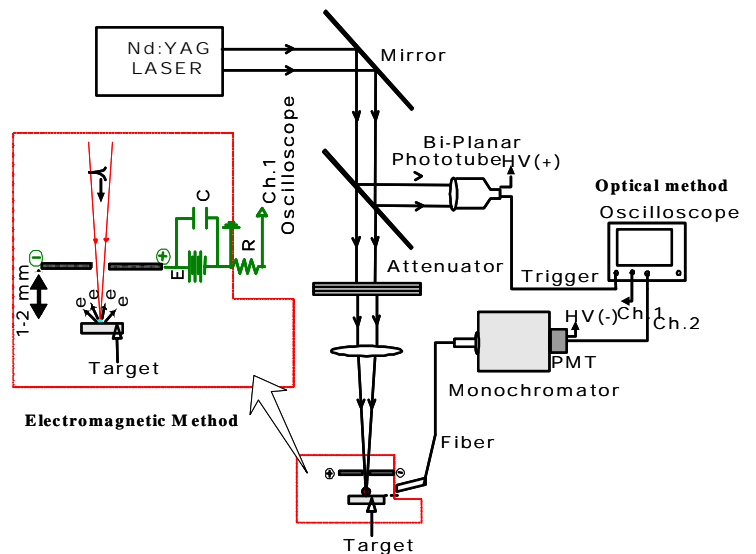
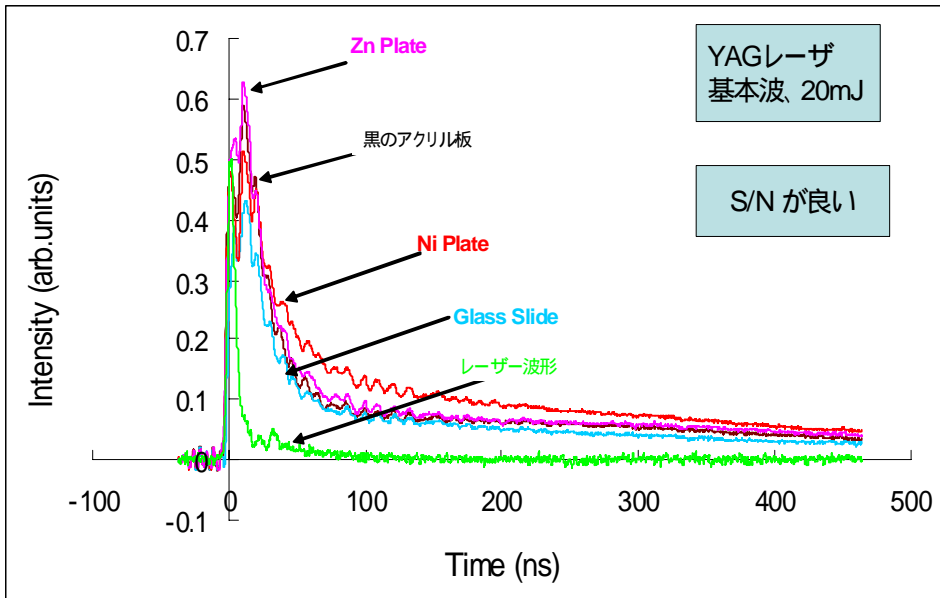


図12. レーザプラズマによる誘導電流を測定する装置

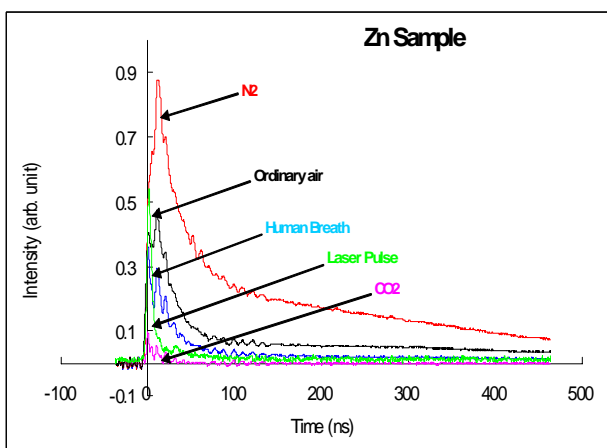
図 13 はこの方法でレーザーをいろいろの試料に照射した場合の誘導電流信号である。い



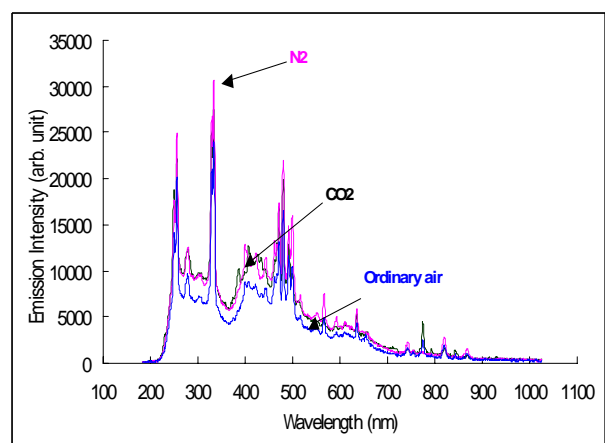
ずれの試料の場合も誘導電流はレーザーパルス照射とともに急激に立ち上がり数百 ns の間信号が続くのがわかる。大気中でレーザー照射してできるレーザープラズマの径は小さく、電子が直接電極に到達することはあり得ない。この誘導電流信号はレーザープラズマで発生する電子が電界の

図13. レーザ波形と各種試料にレーザー照射したときの誘導電流波形

影響を受け加速されるために起こる現象である。誘導電流信号に寄与する電子はプラズマの外側に染み出た電子であることが次の実験より明らかとなった。即ち、雰囲気ガスを変えて誘導電流測定をおこなった。図 14(a)に示すように空気から窒素ガスに変えると誘導電流信号は増大するが、炭酸ガスを吹き付けると信号は殆どゼロ近くまで激減することが分かった。しかし、プラズマの発光スペクトルは図 14(b)に示すようにガスの種類を変えても殆ど変化しない。外側に染み出た電子は炭酸ガスに捕獲されるため電子数が減少し、その結果誘導電流信号が小さくなると考えられる。高密度プラズマ中にも電子は多量に存



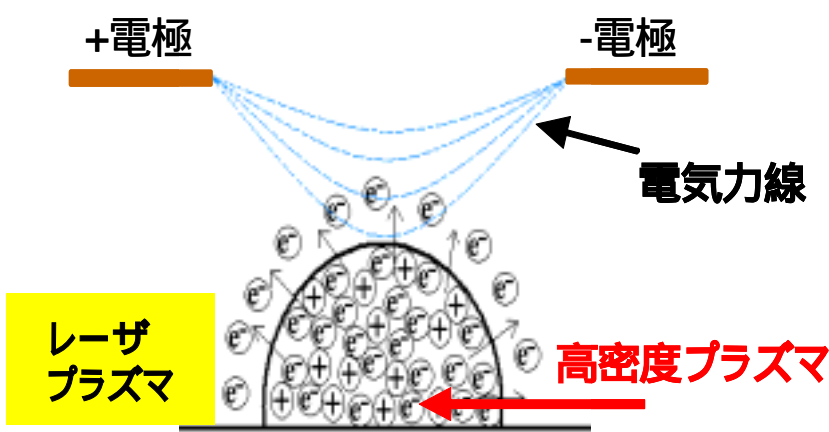
(a)



(b)

図 14 : . (a) 雰囲気ガスを換えた場合の誘導電流の変化

(b) 雰囲気ガスを換えた場合のプラズマ発光スペクトル



在するが、そのような高密度プラズマには外部電界は侵入することができないので誘導電流信号に寄与しない。図 15 のイラストはそのことを表している。

図 15. 誘導電流に起因する電子は高密度プラズマから染み出た電子であることを示す

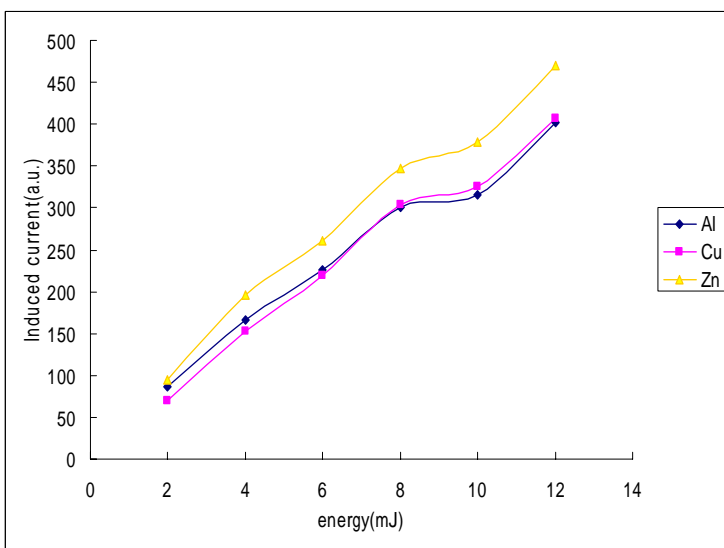


図 16 : レーザのパルスエネルギーと誘導電流の関係

レーザー加工モニタリングとして、最も重要な事は、試料からアブレーションする原子量を測定可能にすることである。光学的方法によってもある程度それは可能である。実際これまでの基礎的研究から、時間的に積分した試料の広領域スペクトルの積分値(200nm-1000 nm 領域の積分値、全発光強度と呼ぶ)は、試料から噴出する原子量とほぼ比例関係を持っていることが分かった。従って、小型OMA装置を用いてスペクトル強度を計測すれば、アブレーション加工する量を知ることができる。

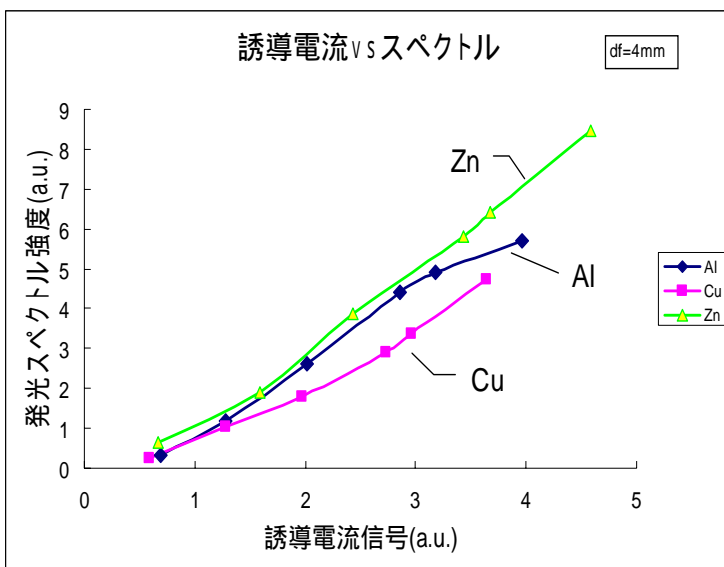


図 17 : プラズマ全発光強度と誘導電流信号強度の関係

しかし、この光学的方法は加工のモニタリング法としてはいろいろの問題がある。室内の光がスペクトル測定を妨害することや、レーザーの波長が紫外域から可視域にある場合、レーザーの強い散乱光によってスペクトル測定が困難となる。これに対して、誘導電流信号の場合、全くこのような妨害を受けない。図 16 は種類の異なる3種の金属で得られた、レーザーのパルスエネルギーと発生する誘導電流信号強度の関係を示す。ここで誘導電流信号を時間的に積分したものを強度としている。

この曲線が示すように誘導電流信号強度はエネルギーと共にほぼ直線的に増加している。図 17 はこれら 3 種の金属に対して測定した、プラズマの全発光強度と誘導電流信号強度の相関を示す。両者は良い直線関係を持っていることがわかる。これらの事実から、誘導電流信号強度はほぼアブレーションする原子量に比例していると考えられる。このことを利用すれば、動的表面観察法でレーザ加工中の溝幅をリアルタイムで計測し、同時に誘導電流信号を計測することによって、1ショットのレーザ照射でアブレーションする厚みを推定することも可能となる。

< 誘導電流信号の応用 >

5.3.1 タイトフォーカスの判定

レーザ加工の場合、レーザ集光レンズと試料表面の間隔調整は極めて重要である。特に、鋭利でかつ微細な加工を行う場合、タイトフォーカスの状態を維持しなければならない場合がある。図 18 は集光レンズと試料の間隔を変化させながら、誘導電流信号のピーク強度の変化を測定したものである。この場合の電極

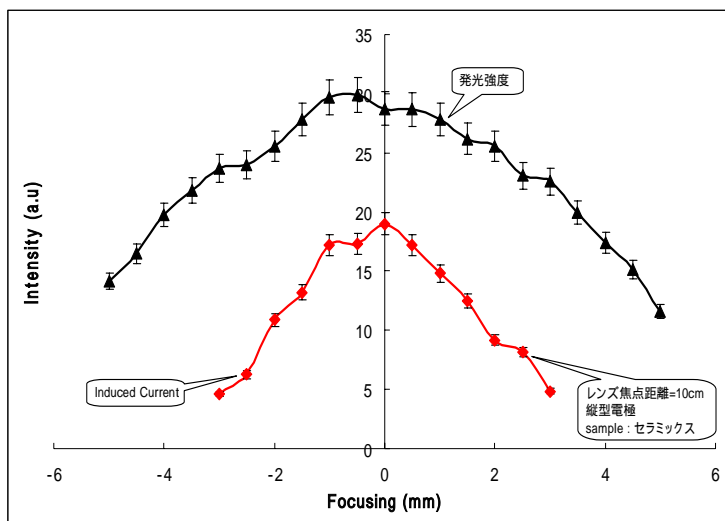


図 18 : レーザ光のタイトフォーカスからのズレと誘導電流の関係

は図 8 の方式、即ち、電界が試料に垂直に及ぼす条件で行った。レーザは YAG の基本波 (2 mJ) を用い集光レンズは焦点距離 100mm のものを用いた。試料は銅板を用いた。タイトフォーカスのところで誘導電流の信号が最高値をとり、ディフォーカスに移行すると急激に信号が低下するのがわかる。一方、プラズマ発光強度はレーザ光の集光状態がディフォーカスに移行しても緩やかに減少するのが分かる。即ち、プラズマ発光強度を用いるより、誘導電流信号を用いる方がより敏感にタイトフォーカス状態を検知できると言える。レーザ光としてより短波長のレーザを用いると、さらに誘導電流はタイトフォーカスに敏感になることが認められた。

5.3.2 レーザ光が試料を貫通する瞬間を捕らえる

レーザパルス照射による穴あけ加工をモニターすることも重要な課題である。レーザ光が試料を貫通するとプラズマが発生しなくなるので、発光強度の変化を検知することで貫通を判定することもできる。しかし、光による判定は室内光が妨害する他、レーザ光が紫外・可視領域にある

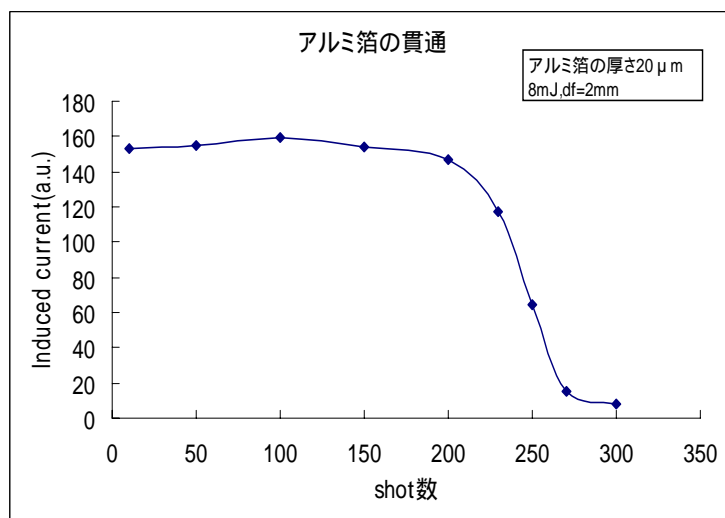


図 19 : レーザ光の貫通による誘導電流の変化、試料はアルミ箔

場合はレーザーの散乱光が圧倒的に強く測定は困難となる。しかし誘導電流方式を用いれば光による妨害は全くなく、また、高感度で貫通の判定が可能である。

図 19 は、アルミ箔（厚さ 20 ミクロン）に YAG レーザ（8 mJ，基本波）を照射し続け、貫通するまでの誘導電流信号の変化をプロットしたものである。貫通することによって信号は急激に減少することが分かる。この実験では図 15 に示す水平電極を使用した。電極が試料をサンドイッチする方式(図 8)の場合の結果を図 20 で示す。この実験では、厚み 1 mm の真鍮試料に 10mJ のレーザー (YAG 355nm) を約 500 ショット照射し続け、穴が貫通した瞬間スパイク状の誘導電流信号が強く発生することが認められた。(a) は貫通前を、(b) は貫通直後の信号を示す。この方式の方がより敏感に貫通を検知できるが、大きな試料に対しては適用が難しい。

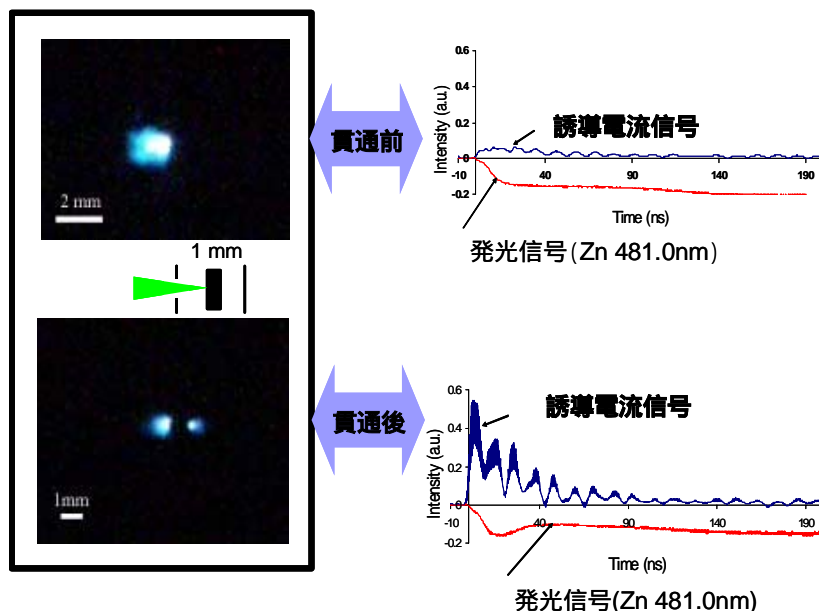


図 20： 試料を電極でサンドイッチした場合のレーザー光の貫通による誘導電流の変化、試料は真鍮(1mm)でレーザーは YAG 3 倍波使用

5.3.3 薄膜除去と試料の送り速度

本研究で開発した誘導電流計測を ITO 薄膜加工のモニタリングに応用することを試みた。一般に基板上に作られた薄膜のアブレーションに対するフルエンスの閾値は、基板のそれよりも低い。したがって薄膜が除去されても基板には損傷を与えない程度の照射条件を利用して薄膜除去が可能となる。ITO 薄膜に固定した場所にレーザー照射を繰り返すと図 21 に示すように数ショットの間誘導電流信号が観測されるが、その後信号はなくなる。この実験に使用したレーザーは YAG 基本波でパルスエネルギーは 6mJ、これを焦点距離 100mm のレンズを用いタイトフォーカスから 4mm シフトさせ、薄膜に 1 ショットずつレーザー照射した。除去される薄膜の径は 0.3mm である。この固定照射で得た誘導電流信号のデータとレーザーの発振繰り返し周波数を考慮して、適正な試料の送り速度を推定することが可能となる。

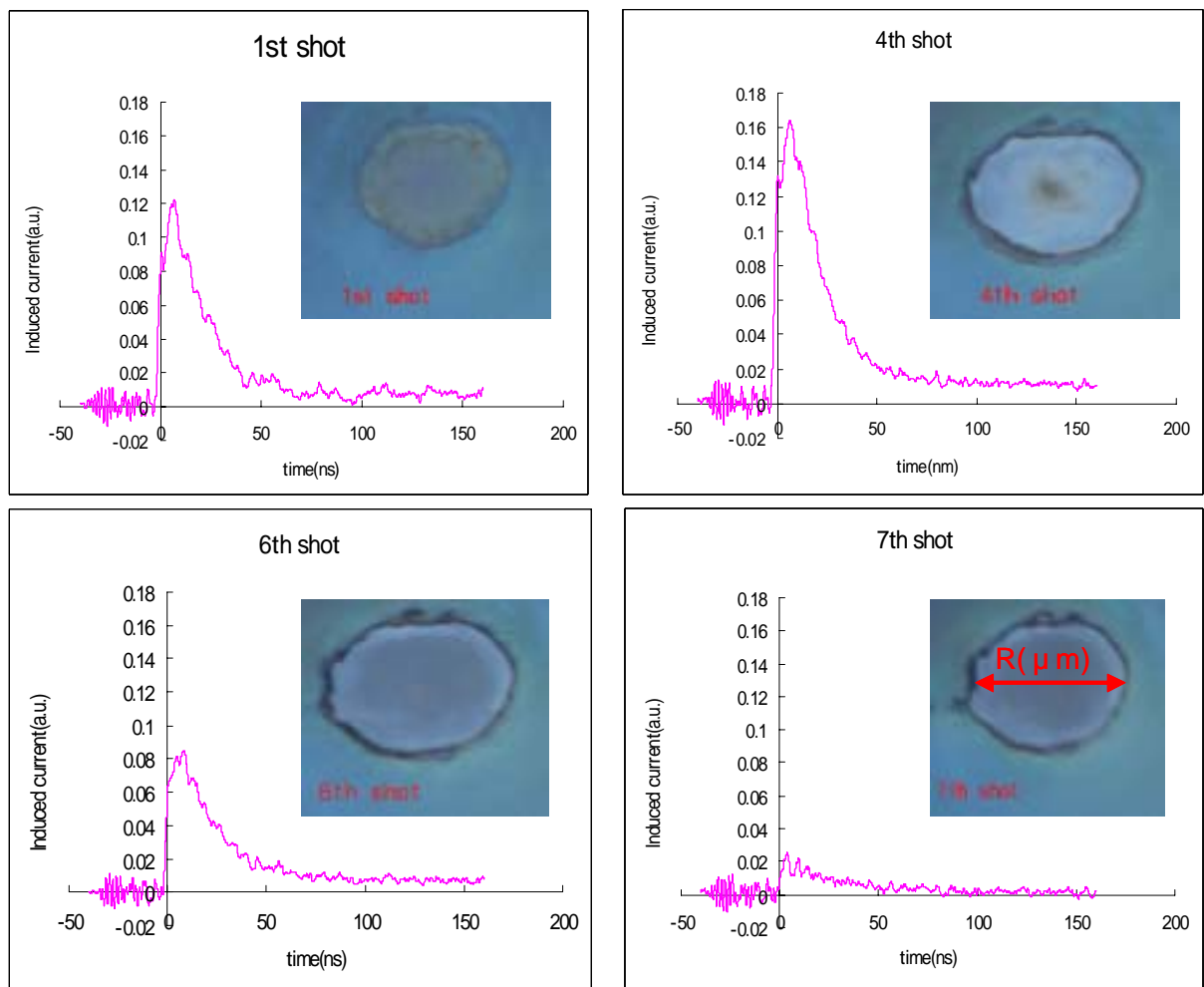


図 2 1 : ITO 薄膜に YAG レーザ基本波(6mJ,4mm デイフォーカス)を 1 ショットから 7 ショットまで照射したときの誘導電流波形と膜の顕微鏡観察

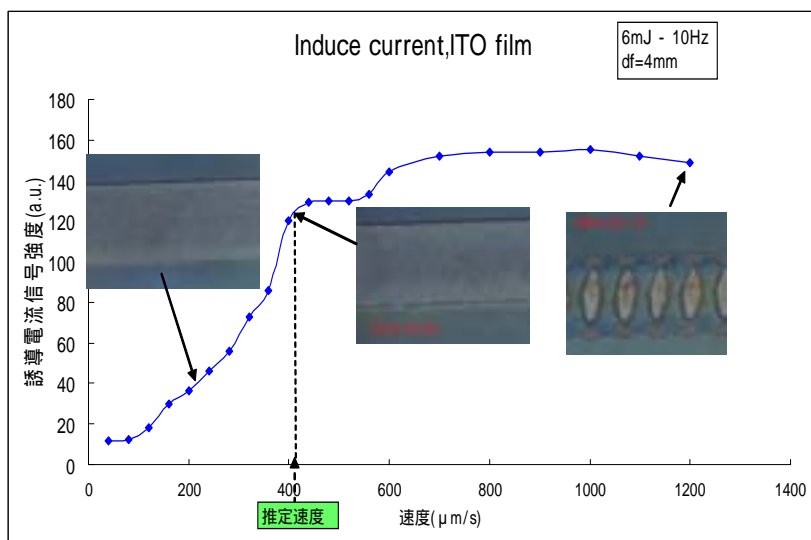


図 2 2 : ITO 薄膜試料の送り速度と誘導電流信号強度の関係

図 22 は ITO 薄膜試料の送り速度とその場合に観測される誘導電流信号との関係をプロットしたものである。レーザー照射条件は固定照射の場合と同じであるが、レーザー照射の繰り返し周波数を 10Hz で行った。送り速度が速い場合誘導電流信号は高いが、写真で示すように薄膜は完全には除去されていない。計算による適正な送り速度は約 400 μ m/s であるが、実際にこの付近ではスポットの中央付近の薄膜は十分除去されている。実際行われている ITO 薄膜加工では高速繰り返しのピコ秒パルスが用いられており¹¹⁾、そのようなケースでも誘導電流計測法が有効であるかどうか今後検討しなければならない。

6 . フェーズ 以降の計画

開発したリアルタイムレーザー加工モニタリング技術を各種材料に適用するとともに、プロトタイプ装置に改良を加え、市販可能な装置へと完成する。また、これまでのフェーズ、フェーズの実験においては、ナノ秒のYAG基本波、および3倍波のレーザーのみを用いた。本装置の最終目標は、高速繰り返しのピコ秒レーザー、フェムト秒レーザーを用いるレーザー加工への応用であり、今後その方向で研究を進める必要がある。

7 . 特記事項

特許取得：

本研究で開発した、モニタリングシステムは「レーザー加工モニタリングシステム」として特許出願している。

出願年度：平成16年

特許の名称：「レーザー加工モニタリングシステム」

出願年月日：平成16年11月11日

8 . 参考文献

- 1) T. Kurita, T. Ono and T. Nakai: A study of processed area monitoring using the strength of YAG laser processing sound, J. Mater. Process. Tech. Vol.112, pp.37-42 (2001).
- 2) H. Kurniawan, M. Ueda and K. Kagawa: Detection of the density jump in the laser-induced shock wave plasma using low energy Nd:YAG laser at low pressures of air, 分光研究, Vol. 50, pp.13-18 (2001).
- 3) N. Idris, T. Kobayashi, H. Kurniawan, K. Kagawa and Y. I. Lee: Confinement effect in TEA CO₂ laser-induced plasma on solid organic samples, J. Korean Physical Society, vol. 47, pp.256-262 (2005).
- 4) H. Suyanto, H. Kurniawan, M. O. Tjia and K. Kagawa: Hole-modulated plasma for suppressing background emission in laser-induced shock wave plasma spectroscopy, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.42, pp.5117-5122 (2003).
- 5) H. Hattori, H. Yamanaka, H. Kurniawan and K. Kagawa: Using minimum deviation of a secondary rainbow and its application to water analysis in a high-

- precision refractive-index comparator for liquids, *Applied Optics*, Vol.36, pp. 5552-5556 (1997).
- 6) S. N. Madjid, H. Kurniawan, I. Kitajima and K. Kagawa: Shock wave and emission with sheet-like structure induced by YAG laser ablation at reduced pressure, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.41, pp.3747-3751 (2001).
 - 7) S. N. Madjid, I. Kitajima, H. Kurniawan and K. Kagawa: TEA-CO₂ laser-induced shock wave plasma modulated by wires and needles placed in front of the target at low pressure, *Applied Spectroscopy*, Vol. 42, pp.874-877 (2003).
 - 8) J. M. Green, W. T. Silvast and O. R. Wood: Evolution of a CO₂ laser-produced cadmium plasma, *J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp.2753-2761 (1977).
 - 9) S. N. Madjid, I. Kitajima, T. Kobayashi and K. Kagawa: Characteristics of induced current due to laser plasma and its application to laser processing monitoring, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.43, pp.1018-1027 (2004).
 - 10) S. N. Madjid, I. Kitajima, T. Kobayashi and K. Kagawa: Low-cost monitoring system for laser processing, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.41, pp.6411-6412 (2002).
 - 11) 富田誠一、田中隆三、岩井善郎：透明導電薄膜の短パルスレーザーアブレーション選択除去装置の開発，福井県地域結集型共同研究事業研究成果集、pp.9-10 (2005).