解 説

レーザー加工の物理 1 

# 塚 本 雅 裕

## Physics of Laser Materials Processing 1: Light Power Dependence

Masahiro TSUKAMOTO

Laser materials processing utilizing physical phenomena caused by high power laser irradiation are described. Those physical phenomena depend on laser power density at the laser focusing spot. Historic background of high power laser developments for materials processing is also presented. In the about 10 kW/cm<sup>2</sup> to 100 MW/cm<sup>2</sup> range of laser power density, thermal conduction welding, key hole welding and local heating for controlling microstructures of metal are performed with continuous wave lasers. In the 100 GW/cm<sup>2</sup> to 100 TW/cm<sup>2</sup> range, fine tuning for microstructures' shape treatment, periodic nanostructures and microstructures formation and phase transition are caused by femtosecond laser ablation.

**Key words:** laser materials processing, laser power density, thermal conduction welding, key hole welding, local heating, laser ablation, periodic microstructures, phase transition

太陽光を虫眼鏡(レンズ)で集光する、マジックで黒く 塗った紙が焦げる。小学生のころ,ほとんどの人が経験し ているのではないだろうか.人生はじめての光加工体験の 瞬間である。レンズによって光を微小領域に収束、単位面 積当たりの光パワー(パワー密度:W/cm<sup>2</sup>)を増加させ た結果、生じた現象である、レーザーが発明される以前、 たくさんの光を集めることができれば、金属をも溶かすこ とが可能になると考えた人は、少なくなかったのではない だろうか。20世紀後半、ついに人類は高出力レーザーを 手にすることになり、光加工分野は切り開かれた。図1 (a) および (b) に、ランプ光源とレーザー光の集光につい てそれぞれ示した. ランプから出射される光は, さまざま な方向に伝搬するので、図1(a)のような光跡をたどる。 レーザーの場合,光がコリメートされているため,図1 (b)のように集光され集光スポット径をランプ光源の場合 より小さくすることができる. つまり, ランプ光源とレー ザーが同じ出力の場合, レーザーのほうが集光によってパ ワー密度を増大させることになる。

本稿では、加工用高出力レーザー開発における光パワー

増大の歴史的な流れおよび方法,さらにパワー密度の増大 によって引き起こされる物理現象を利用したレーザー加工 について紹介する.

#### 1. 加工用高出力レーザー開発

約50年前にレーザー(メーザー)が発明された.出力 の増大とともに、レーザーを加工に使おうとする試みが約 40年前に始まった。そこで問題となったのが熱伝導であ る.加工対象物が金属の場合、レーザー光の電界により自 由電子が振動し、それが格子振動を引き起こす。次の段階 では図2(a)に示したレーザー照射領域(レーザー光侵入 領域)において溶融・蒸発が生じ、加工が成立するはずで あった。しかしながら、溶融・蒸発は起こらなかった。図 2(b)に示したように、レーザー照射領域外へと格子振動 (熱)が伝わってしまったからである。つまり、熱が周囲 に逃げてしまい、加工部が融点に達しなかったのである。 ここで2つの考え方が登場した。熱は逃げてもよい。逃げ る熱よりも大量のエネルギーを投入し、溶融・蒸発現象を もたらす。このためには、図3(a)に示したように、レー

大阪大学接合科学研究所(〒567-0047 茨木市美穂ケ丘 11-1) E-mail: tukamoto@jwri.osaka-u.ac.jp



ザーの出力(光パワー)を増加(増幅)させる方法が考え られた。もうひとつの考え方は、熱が逃げる前、つまり、 非常に短い時間内に大量のエネルギーを投入する。熱が逃 げる前に瞬間的に溶融・蒸発現象を引き起こす。このため には、図3(b)に示したようにレーザー光のエネルギーを 短い時間内に注入(圧縮)し、光ピークパワーを増加させ る方法が提案された。前者はCW(連続波)レーザー加工 分野の誕生であり,後者がパルスレーザー加工分野の誕生 である. (ここでいうパルスは, ナノ秒オーダー以下のパ ルス幅を示す。)図4に、2つのレーザー加工分野の流れ について示した。別のいい方をすれば、前者が高エネルギ -密度熱源加工(熱加工)分野であり、後者がアブレーシ ョン加工分野である。CW レーザー加工分野は溶接・切断 という目的がはっきりとしていたので, 産業界がレーザー の大システム化を推進した。いち早く登場したのが、大出 力 CO<sub>2</sub> レーザーであった.次に YAG レーザーが登場し た. YAG レーザーの波長が 1.06 µm であることからファ イバー伝送ができるようになり, レーザーシステム室と加 工室を分けることができ、さらにレーザーヘッド (集光光 学系)のロボットアームへの装着が容易になった。半導体 レーザーはエミッターからの出力が増大するとともにスタ ッキング技術が向上し、大出力化へと進んだ。これにとも



図3 出力の増大.(a) CW レーザー,(b) パルスレーザー.

ない、半導体レーザー励起 YAG レーザーと直接加工を目 的とした半導体レーザーシステムが登場した。そして、そ の半導体レーザーを基幹技術としたディスクレーザーおよ びファイバーレーザーの誕生を迎えることとなる.ファイ バーレーザーは、従来のレーザーより小さいレーザースポ ット径を実現することができるので、光パワーをさらに増 大させることができる. これらの流れは、前述したように 産業界において溶接・切断という明確な目的のもと、進め られてきた。一方のパルスレーザー加工分野では、アブレ ーション現象を利用した応用研究が、大学・研究機関を中 心に進められた。パルス幅についていうと、Qスイッチ 技術の開発からナノ秒がい,モードロックおよびチャープ ドパルス増幅(CPA)技術の開発から<sup>2,3)</sup>20世紀末には, パルス幅100fs, 繰り返し1kHz, 平均出力1Wクラス のフェムト秒レーザーが市販されるまでになった。1パル ス当たりのエネルギーは1mJ,パルス幅は100fsである ので、ピークパワーは10GWになる。当パルスをCWレ ーザーで取り出すことを考えてみる。図5に示したよう に,連続で出力されているレーザーの光路途中に回転式の シャッターを挿入して切り出す。シャッターの性能が100 fs 間開く性能を有しているとすると,原理的には可能で ある.しかしながら,100fsの間に1mJのエネルギーが シャッターを通過するために必要な CW レーザーの出力



図4 CW レーザー加工とパルスレーザー加工。



(パワー) は,10 GW である. ピークパワーとは,そのパ ルスを切り出すのに必要な CW レーザーのパワーのこと である.例えば,市販されている出力10 kW の CW ファ イバーレーザー(価格約1億円)を100万台,損失なく結 合させることが必要となる.単純計算ではあるが,価格は 100兆円となる.CPA 技術のおかげで,このような大規 模かつ高額なシステムを用いなくても,数千万円のフェム ト秒レーザーで10 GW のピークパワーを得ることができ る.近年,発振器部および増幅器部のほとんどがファイバ ーから構成されるフェムト秒ファイバーレーザーも開発さ

ファイバーレーザーについて少し触れておく.ファイバ ーレーザーは、その特徴である高出力かつ高集光性から従 来のレーザーよりも光パワーの増大を可能にする.同時に 高安定性および高操作性を満たす.ファイバーレーザーが 登場する以前のレーザーは、さまざまな局面で加工を制限 してきたといえる.レーザー主導型(先導型),このレー ザーで何ができるかというアプローチが主であった.本来 の加工は,加工があって道具(ツール)がある.高品質な ツールは,加工側からの要求に答えることができる.レー ザーもツールのひとつである.「本来の加工」からの要求 に答えることのできるレーザー,つまり,加工用として高 品質化したレーザーの第一弾として登場したのが,ファイ バーレーザーである.

### 2. レーザー加工

#### 2.1 パワー密度と加工

現在、市販されている加工用レーザーで実現できるパワ -密度は、CW レーザーで100 MW/cm<sup>2</sup>、パルスレーザ - では 100 TW/cm<sup>2</sup> 程度である。図6に,波長が可視光 から近赤外線領域にあるレーザーのパワー密度と各種加工 の関係を示した。10 kW/cm<sup>2</sup>~100 MW/cm<sup>2</sup> の領域を熱 加工, 100 MW/cm<sup>2</sup>~100 TW/cm<sup>2</sup>の領域をアブレーシ ョン加工としている。熱加工領域においては、通常、ステ ンレス鋼などの金属に 10 kW/cm<sup>2</sup>~数百 kW/cm<sup>2</sup> のパワ ー密度でレーザーを照射する場合,図7(a)に示したよう に熱伝導型溶融現象が起こる。数百 kW/cm<sup>2</sup>~100 MW/ cm<sup>2</sup>の範囲では、図7(b)に示したように、キーホールと よばれる空洞がレーザー光軸に沿って形成される。以下で は、熱伝導型溶融を利用した熱伝導型溶接、キーホール形 成を利用したキーホール溶接について紹介する.熱加工領 域のトピックとして,局所加熱による金属結晶粒制御につ いても紹介する。アブレーション加工については、300 GW/cm<sup>2</sup>~100 TW/cm<sup>2</sup> 領域におけるアブレーションを 利用した加工例について紹介する.

れている.



図6 レーザー加工におけるパワー密度と照射時間の関係.



# 2.2 熱加工

#### 2.2.1 熱伝導型溶接

電子分野や精密機械分野において, 電子銃や圧力センサ ー,金属ベルト,溶接ベローズ等のように厚さ数百 µm の超薄板を溶接して作られる製品や部品が多い。近年、機 能向上や省力化への対応から、これらに適用できるマイク ロ溶接技術の開発が期待されている。薄板溶接では、部材 が薄くなるほど溶け落ちなどの不良を生じやすくなるた め,溶接における入熱量を高精度に制御する必要がある。 図7(a)に示したレーザーによる熱伝導型溶融現象を利用 した、厚さ50 µmのステンレス鋼の溶接結果を図8(a) に示した.図8(b)は、溶接ビードの断面写真である。レ ーザーとして半導体レーザーを用いている。集光スポット 形状は楕円である。楕円形状にしたことで、従来の円形状 の場合よりも材料への入熱制御性が向上し、図8(b)のよ うな良好な溶接ビードを得ることができている。図9(a) は、ステンレス鋼 (SUS316L) の重ね溶接のためのレー ザー照射配置図および溶接ビードの断面写真を示し、図9 (b) には、厚さ100 µmの INCONEL のエッジ溶接のレ ーザー照射配置図および接合面の断面写真を示した. 両断



図8 レーザー熱伝導型溶接による超薄板の接合。

面写真が示すように,楕円形状の集光スポットを用いた入 熱制御によって,良好な溶接ビードが得られていることが わかる<sup>4</sup>.

2.2.2 キーホール溶接

前述したように、ハイパワーレーザーを金属に集光照射 すると、ある閾値以上のパワー密度になると図7(b)に示 したキーホールが形成される5, レーザービーム先端のパ ワー密度が高いために、急激な加熱・溶融・蒸発現象が生 じ、前述したキーホールが形成される。キーホールは、蒸 気圧や壁面の溶融金属の表面張力および重力などのバラン スで維持される。溶接を行う場合は、図10に示すように レーザービームあるいは溶接物を移動させることによっ て,キーホール前壁が順次溶融され,溶融金属は,孔壁に 沿って後方に流れ、さらに後方で冷却凝固が進み溶接ビー ドが形成される。これらの機構が、当溶接方法がキーホー ル溶接とよばれる所以である. 深溶け込み溶接とよばれる こともある。レーザー溶接が最初に脚光を浴びたのは熱伝 導型溶接ではなくキーホール溶接のほうであり、それは、 従来の溶接法では困難であった厚板の溶接が高速で行える ようになったからである.

2.2.3 局所加熱--金属結晶粒制御---

新加工領域として,局所加熱による金属結晶粒制御技術 を紹介する.金属における高機能材料創製手段のひとつと して,集合組織の制御がある.集合組織の制御は,結晶方 位が設計者のニーズに最適な状態になるように力学的エネ ルギー,熱エネルギーを最適化して投入することで行われ る.しかしながら,熱エネルギーを用いて組織を変化させ ようとする場合,均一加熱では材料全体に組織変化が進行 してしまう.選択した結晶粒に対し加熱することができれ



図9 レーザーによる熱伝導型重ね溶接(SUS316L 超薄板)(a)およびエッジ溶接(INCONEL 超薄板)(b).

ば、選択的粒成長を引き起こすことができる<sup>6)</sup> 図 11 (a) に、局所加熱シミュレーション(モンテカルロシミュレー ション)結果を示す。材料は純アルミニウム、中心部の温 度を900K,周囲温度を300Kに設定した。(a-1),(a-2), (a-3) および (a-4) はそれぞれ, 50, 100, 200, 500 mcs (mcs:モンテカルロステップ)における結果である.mcs は,処理時間に相当する量である。中心部の結晶粒が周囲 よりも大きくなっていることがわかる.図11(b)は、図 11 (a)の(a-4),500 mcsの試料に対し900 K で均一加熱 した場合のシミュレーション結果である。(b-1), (b-2), (b-3) および (b-4) はそれぞれ、0、50、500、1000 mcsの 結果を示した。初期の粒サイズの大きい部分が、どの時間 帯においても周囲よりも大きいことがわかる。実際にシン グルモードのファイバーレーザーを用い,局所加熱実験を 行った。通常, 10 MW/cm<sup>2</sup>~100 MW/cm<sup>2</sup>の領域では, 瞬時にキーホールが発生する。しかしながら,結晶粒を観 測するために表面を研磨しているため,当パワー密度でも 照射時間が数十秒以内であれば溶融は生じない。局所加熱 実験の結果、特定の結晶粒だけに優先的な組織変化が起こ ることがわかった".

# 2.3 フェムト秒レーザーによるアブレーション加工2.3.1 ファインチューニング

フェムト秒レーザーは、ナノ秒レーザーを用いた穴あけ と比較した場合、注目すべき優位性が示される<sup>8)</sup>.その優 位性は、フェムト秒レーザー照射による気相とプラズマ相 の非常に急速な形成、わずかな熱伝導および液相がほとん ど存在しない点にある.これにより熱影響部が少なく、照



射部(加工部)周辺に形態変化を引き起こさない微細加 工,いわゆる加工部エッジのシャープな加工が可能とな る.図12に、ステンレス鋼基板にフェムト秒レーザーを 照射した場合のパワー密度に対するアブレーション深さの 関係を示す.300 GW/cm<sup>2</sup>では、1パルス当たりのアブレ ーション深さが約0.03 nm/pulse、10 TW/cm<sup>2</sup>付近にお いても約400 nm/pulseと極薄(微小量)である.このパ ワー密度領域においてフェムト秒レーザー照射による当微 小量除去技術を用いれば、材料の形状あるいは質量のファ インチューニング(微調整)が可能となる.現在、当ファ インチューニング技術を適用し、電子部品用トリミング金 型の長寿命化を実現するために、経済産業省地域新生コン ソーシアム研究開発事業「超短パルスレーザーを用いた電 子部品用微細トリミング金型の開発(平成18年度-19年 度)」が進行中である.



図 11 (a) 局所加熱シミュレーション (モンテカルロシミュ レーション) 結果: (a-1), (a-2), (a-3) および (a-4) はそれ ぞれ 50, 100, 200, 500 mcs における結果, (b) (a-4) の試 料に対し 900 K で均一加熱した場合のシミュレーション結 果: (b-1), (b-2), (b-3) および (b-4) はそれぞれ 0, 50, 500, 1000 mcs における結果.

#### 2.3.2 自己組織的微細構造形成

フェムト秒レーザーを金属材料表面に照射すると、レー ザーの偏光方向に依存した微細構造が形成される現象があ る.アブレーション閾値近傍においてフェムト秒レーザー を金属材料表面に照射すると、レーザーの偏光方向に直交 する方向に溝を有する周期数 100 nm の周期構造(ナノ周 期構造)が形成される<sup>9</sup>.アブレーション閾値より高いフ ルーエンス領域では、偏光方向と同じ方向に溝を有する周 期数 µm の周期構造(マイクロ周期構造)が形成される<sup>10</sup>. 照射パルス数をさらに増加させれば、偏光方向に依存した 形状を有する突起構造体(マイクロ突起構造)が形成され る<sup>11)</sup>.チタン基板にフェムト秒レーザーを照射した際に形 成されたナノ周期構造,マイクロ周期構造およびマイクロ 突起構造を、図 13 (a),(b) および(c) にそれぞれ示し





図 13 自己組織的に形成された微細構造.(a)ナノ周期構造,(b)マイクロ周期構造,(c)マイクロ突起構造.

た. これらの構造を利用することができれば,元来材料が もつ特性にさらなる機能を付与することが可能であると考 えられる. 例えば,経済産業省地域新生コンソーシアム研 究開発事業「フェムト秒レーザーを使った省エネルギー・ 長寿命部品加工機の開発(平成17年度-平成18年度)」で は,ピストンなど摺動する材料表面に,フェムト秒レーザ 一照射により誘起された微細構造によって滑らかな潤滑膜 を形成し,摩擦が軽減されることが示されている.

#### 2.3.3 相 転 移

パワー密度 20 TW/cm<sup>2</sup> で照射すると、純チタンにおい ては自然界に存在しないとされていた  $\beta$  チタンが形成さ れることがわかった<sup>12)</sup>. 透過型電子顕微鏡 (TEM) によ り観察された,照射後のチタン基板の断面像を図 14 (a) に示す.図 14 (a) 中の A, B, C および D においてそれ ぞれ分析した.図 14 (a) 中の A の領域において得られた TEM 像と電子線回折パターンを図 14 (b),電子線回折パ



図 14 (a) 断面 TEM 像, (b) A 点における分析結果: TEM 像および電子線回折パターン, (c) β チタンの電子線回折パ ターン.

ターンの解析結果を図 14 (c) に示す.図 14 (c) の結果から、図 14 (a) 中の A 領域において、 $\beta$  チタンが形成されていることがわかった。同様に、図 14 (a) 中の B の領域においても $\beta$  チタンが形成されていることがわかった。図 14 (a) 中の C および D の領域(輝度の高い部分)においては、 $\alpha$  チタン (レーザー照射前の結晶構造)であることが示された。暗視野像についても観察し、チタン基板の極表面近傍(表面から約 450 nm の深さ)領域内に $\beta$  チタンが形成されていることがわかっている。アブレーション圧力あるいはアブレーション時の加熱によってもたらされる高温状態が $\beta$  チタンへの相転移の原因であると考えられるが、レーザー照射後も $\beta$  チタンが保たれている理由については、現在解明中である。

 $10 \text{ kW/cm}^2 \sim 100 \text{ TW/cm}^2$  領域内において,パワー密 度に依存して引き起こされる物理現象を利用したレーザー 加工についてまとめた. CW レーザー加工の領域である  $10 \text{ kW/cm}^2 \sim 100 \text{ MW/cm}^2$ は,熱加工で,前述した金属 結晶粒制御を除くと,溶融をともなう.  $100 \text{ GW/cm}^2 \sim$  $100 \text{ TW/cm}^2 のアブレーション加工では,材料への熱的$ 影響が極小化される. 今後も,出力および集光性の向上によるパワー密度増大によって,新加工領域の開拓が期待さ れる.現在行われているレーザー加工については,出力お よび集光性向上とともに信頼性を高めることが重要であ り,そのためには光パワーの安定性および制御性を重視し たレーザー開発が必要不可欠である.

# 文 献

- F. J. McClung and R. W. Hellworth: "Giant optical pulsations from ruby," J. Appl. Phys., 33 (1962) 828-829.
- P. Maine, D. Strickland and G. Mourou: "Compression of amplified chirped optical pulses," Opt. Commun., 56 (1985) 219–221.
- C. Chalearb, V. Detalle, S. Kocon, J. L. Lacour, C. Nouvellon, P. Mauchien, B. Salle and A. F. Semerok: "Experimental investigation of laser ablation efficiency of metals," Proc. SPIE, 3404 (1998) 432–440.
- N. Abe, M. Tsukamoto and Y. Funada: "Micro edge welding of thin Ni based alloy foils with direct diode laser processing and its application," *ICALEO 2006 Congress Proceedings*, Arizona (2006) pp. 270–276.
- N. Abe, Y. Agano, M. Tsukamoto, T. Makino, M. Hayashi and T. Kurosawa: "High speed welding of thick plates using a laser-arc combination system," Trans. JWRI, 28, No. 1 (1999) 69-75.
- T. Shibayanagi, N. Matsuda, M. Tsukamoto, N. Abe and M. Naka: "Monte Carlo simulation for grain growth process during spot heating," Smart Process. Technol., 1 (2006) 143-146.
- 7) T. Shibayanagi, M. Tsukamoto, N. Abe, Y. Soga, N. Matsuda and T. Matsumoto: "Local recrystallization treatment in pure aluminum by means of laser spot heating," Trans. JWRI, 35, No. 2 (2006) 67-68.
- B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben and A. Tunnermann: "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process., 63 (1996) 109–115.
- 9) M. Hashida, K. Nagashima, M. Fujita, M. Tsukamoto, M. Katto and Y. Izawa: "Femtosecond laser ablation of metals: Characterization of new processing phenomenon and formation of nano-structures," *Proc. of Symp. on Microjoining and Assembly Tech. in Electronics (MATE2003)*, Kanagawa (2003) pp. 517-522 (in Japanese).
- 10) M. Tsukamoto, K. Asuka, H. Nakano, M. Hashida, M. Katto, N. Abe and M. Fujita: "Periodic microstructures produced by femtosecond laser irradiation on titanium plate," Vacuum, 80 (2006) 1346-1350.
- M. Tsukamoto, T. Kayahara, H. Nakano, M. Hashida, M. Katto, M. Fujita, M. Tanaka and N. Abe: "Microstructures formation on titanium plate by femtosecond laser ablation," J. Phys.: Conf. Ser., 59 (2007) 666–669.
- 12) T. Kayahara, M. Tsukamoto, Y. Komizo, N. Abe, K. Asuka, M. Tanaka, M. Fujita, M. Hashida and H. Nakano: "Microstructure on metal plate produce with femtosecond laser," *Reports on The 343rd Topical Meeting of The Laser Society of Japan Laser Technology for 21st Century*, Hiroshima (2005) pp. 13–17 (in Japanese).

(2007年5月14日受理)