

レーザ加工技術の革新のメカニズムに関する研究

Study on the Mechanism of Innovation of Laser Material Processing

及川 昌志*¹
Masashi OIKAWA

河田 直樹*²
Naoki KAWADA

1. 背景

レーザ発振の基礎的な概念は、1916年にEinsteinが提唱し¹⁾、その42年後の1958年に米国の物理学者TownesとSchawlowは発振の原理と基本的な装置構成を示す論文を公表した²⁾。世界ではじめてのレーザ発振は1960年5月16日に米国Hughes Aircraft社に所属する理学者Maimanによって行われた。同年7月8日発行のThe New York Timesにレーザ発振と、レーザ加工のデモンストレーションの記事が掲載された³⁾。

現在、レーザの応用技術は科学、産業、医療の分野に広がり、このレーザ応用技術の革新は、多くの市場に受容され人々の生活を変えるイノベーションの典型例である。本研究ではレーザ応用技術の一つであるレーザ加工の概要とその実例を示し、次に技術革新のメカニズムを考察する。それによって、我々が全く新しい技術を手に入れた時、その技術をどのようにイノベーションへと結びつけるのか、という示唆を得る。

2. レーザ加工技術の革新

2.1 レーザとは

レーザ (LASER) とは、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (放射の誘導放出による光の増幅) のアクリニム (頭文字を

つなぎ合わせた造語) である。レーザという光の特長は、ほぼ単色で位相が揃っていること (コヒーレント) である。単色であることは光学媒質内での分散が生じないため、レンズでは収差の影響を受けず微小な点に集光することができ、光ファイバによる伝送では正確な信号のやり取りが可能となる。また、空間的、時間的に位相 (波面) がほぼ揃っているため、拡がり角が小さく、微小な点に集光することができる。レーザというエネルギーをレンズなどの光学系を使い微小な点に集光することがレーザのポテンシャルである。

2.2 レーザ加工の誕生

1958年のTownesとSchawlowのレーザ発振の論文以降、レーザ発振競争がはじまり、1960年5月16日に世界で初めてレーザが発振した。このニュースは米国物理学会で公表される予定であったが、レーザ発振を証明する手段がないと拒否されたため、新聞発表を先行させとされている。

Maimanは1960年7月7日に記者向けにレーザ発振とレーザ加工のデモンストレーションを行い、そこでは、宙に浮かぶ風船にレーザを照射して割り落とす、剃刀の刃に穴をあける、というレーザ加工も同時に披露された。その翌日8日にレーザ発振とその応用技術の一つであるレーザ加工が全世界に広がった。ここにレーザ加工技術の革新の起点がある。

*1 東京理科大学大学院イノベーション研究科博士課程後期単位取得満期退学

*2 埼玉工業大学工学部機械工学科

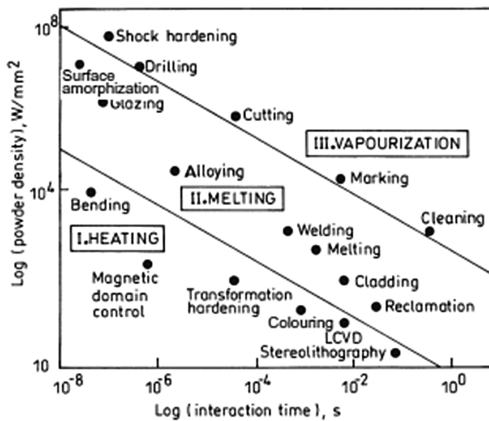
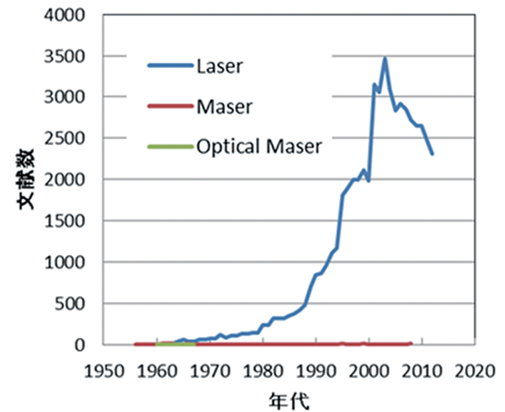

 図1 レーザ照射エネルギーと加工形態の関係⁴⁾


図2 レーザに関わる文献数の推移 (著者作成)

2.3 レーザ加工とは

加工とは、材料に対しエネルギーを与え所望の形状や機能を得ることである。レーザ加工とは、そのエネルギーにレーザを使う加工方法の一つである。レーザ加工では照射するエネルギー状態と材料によって加工形態が決まる。

図1に示すように鉄鋼材料に対する熱加工では、低エネルギーであれば焼入れとなり、照射するエネルギーの増加にしたがい、表面溶融、溶接、切断、穴あけとなる。その一方で、非熱加工の例は、高ピークエネルギーのレーザをセラミクスなどの脆性材料に照射すれば、大気中で瞬時に穴をあけることができる。この穴あけ加工の起源は石器まで遡るが、脆性材料の大気中での短時間の穴あけ加工はレーザが登場するまで実現することはなかった。

脆性材料の穴あけ加工は多くの時間を要し、加工が進むにしたがい道具が変化するので加工品質にも問題があった。大気中で脆性材料に瞬時に穴をあけるといいうレーザ加工は、レーザが人類の最大の発明と言われる所以のひとつである。

2.4 レーザ加工技術の革新

レーザ加工技術の革新の程度を測定することは難しい。そこで、その尺度を学術論文、およびその口述発表の予稿集の数とした(図2)。なお、

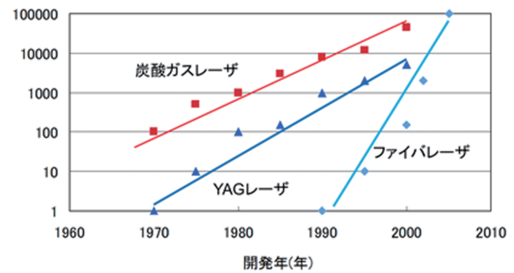


図3 レーザ発振器の出力の推移 (著者作成)

技術革新の程度をこのような尺度で示すことの妥当性は、正確性は欠くが一定の目安にはなるとされている⁵⁾。

図2はレーザ、オプティカルメーザ、およびメーザの論文数の推移である。なお、メーザ(MASER)とはMicrowave Amplification by Stimulated Emission of Radiationのアクロニムであり、オプティカルメーザとはレーザを示している。図に示すように、論文と口述発表の数は1970年から増え始め、概ね1980年から指数関数的に増加している。また、図3に示すようにレーザ発振器の出力も1980年以降に急速に増加し始めている。ここでは図示していないが、レーザの時間的空間的な出力分布の安定性も向上している。ファイバレーザの時間的出力の安定性は、出力4kWに対し、ばらつきは0.1%以下である。また、出力0kWか

ら6kWまでの立ち上がり時間は、17nsecである。出力の空間的分布の安定性は、シングルモードのファイバレーザでは、 M^2 は1.2、BBPは0.4mm mradである。出力密度は 1.3×10^9 W/cm²であり、同じ出力のロッド型のYAGレーザに比べるとおよそ3桁の高出力密度化を得られる。レーザの高出力化と時間的空間的な出力分布の安定化は、レーザ加工の生産現場への導入を促進した。安定的に発振させることも難しかった初期のレーザでは、共振器の調整もできるような専任の技術者が必要であったが、現在は特別な知識を必要とせずレーザを発振できるよう技術革新が行われてきている。

レーザ加工技術の発展には、レーザの時間的空間的出力の分布の安定化と、高出力化が不可欠であった。同時にレーザ加工システムに含まれるレーザ伝送集光装置の低損失化と加工物移動装置の精密化も求められた。レーザ加工の実用化後も、しばらくはレーザ加工システムには不安定なサブシステムが含まれていた。不安定なシステムを使いレーザ加工品質を確保するには、加工品質を加工後に評価するよりも、レーザ発振器や集光レンズの健全性を常時監視するという技術も進化している。

また、特にレーザ溶接ではアーク溶接のように訓練された技能者が品質を担保するという技術的思想がなく、自動化を前提として開発された経緯がある^{6),7)}。レーザ加工システムの常時監視によって正常でない状態を見つけ出すという技術開発の方向性が規定され、技術革新が進んだ。

2.5 レーザ加工技術の実例

(1) 脆性材料の加工

脆性材料のレーザ加工は、前述したように1960年7月7日に剃刀の刃の穴あけのデモンストレーションからはじまるが、近年は海苔や昆布にレーザで文字や絵を切り抜いた商品が市販されるに



図4 海苔のレーザ切断の例⁸⁾

至っている(図4)。乾燥した海苔を所望の複雑な形状に割れも折れもせず精密に切り出すことは相当に困難であることは容易に想像できる。大気中での脆性材料の加工はレーザでなければ実現しないという例が多い。

(2) アブレーション加工

アブレーション加工は、樹脂材へのマーキングなどに多く使われている。高ピーク出力密度のレーザを加工物に照射することで、固相から気相まで一挙に相変態させる加工である。レーザ照射部の周囲に熱を殆ど拡散しないため、非熱加工となる(極めて少ないが熱拡散は生じる)。その一例は、自動車の運転席周辺に取り付くスイッチである。スイッチは、乳白色で光を透過する樹脂の上に非透過性の塗料を被覆している。この表面にレーザを照射し、下地の樹脂に損傷を与えずに塗料のみを蒸発させている。文字や記号などにあわせてレーザを照射すれば、乳白色の素地が現れ、スイッチ裏面に配置した光源から光が透過するので、夜間の視認性、操作性が格段に向上する。

(3) 溶接加工

レーザ溶接は自動車の車体の組み立てにも使われている。車体には部位ごとに強度や板厚が異なる複数の鉄鋼材料を用いているが、従来は部位に

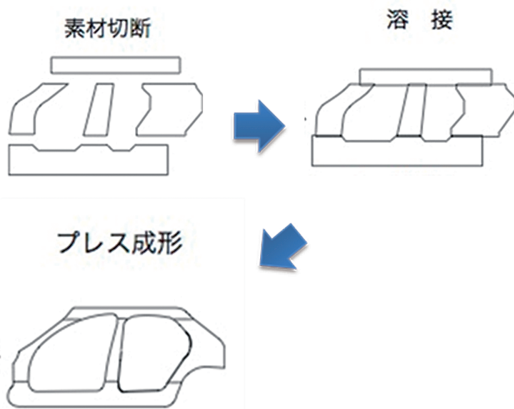


図5 テーラードブランク溶接の概要

応じてプレス加工で整形した後、抵抗スポット溶接で接合し車体を組み立てていた。抵抗スポット溶接は点状の離散的な接合で、その間隔を狭めるには原理的な制約によって限界があるため、点状の接合部に力が集中してしまい、車体の剛性や強度の確保に制限があることが知られていた。連続的な接合な接合が望ましいが、アーク溶接で接合を行うと、入熱量が多くなりハイテン材と呼ぶ高強度な材料の強度が熱影響層で低下してしまう。そこで、高出力密度のレーザー溶接の適用が検討され、実用化されている（図5）。

3. 技術革新のメカニズムの解明

3.1 本論文での技術の定義

レーザ加工の技術革新の生成メカニズムの解明にあたり、技術の定義をここで記す。Arthurは、技術を「人間の目的を達成する技術」「実践方法とコンポーネント（装置）の組み立て」「文化に役立てることができる装置と工学の集合体」と定義したが⁹⁾、本研究でも技術とは目的を果たすためのシステムであり、複数のサブシステムで階層的構造を持って構成し、そのサブシステムは単独でもその機能を果たす最小単位である部品で構成すると定義する。

例えば、1958年にレーザー発振理論が構築され、1960年にレーザー発振器が完成し、同時にレーザー加工装置という新しい概念が形成された。レーザー加工技術は1970年代以降に急速な革新を遂げるが、それにはレーザー加工システムを構成するレーザー発振器、伝送集光光学装置、加工物移動装置というサブシステムの技術革新が必須で、いずれかが欠けてもレーザー加工システムは構成できず、レーザー加工技術は発展することはなかった。

3.2 従来の技術革新論

(1) 技術革新の契機

技術というシステムが既存で健全に機能している状態（均衡状態）に対し、一部のサブシステムが機能を果たさなくなると、システムが停止する、システムの出力が低下する、不安定になるという状態（不均衡状態）に陥ってしまう。システムが目的の機能を果たさなければ、当事者は問題のあるサブシステムや部品を探し、解決のために人や資金という資源を集中させ、課題を解決しようとする。この現象を焦点化装置と呼ぶ¹⁰⁾。例えば、図6は均衡状態にあるシステム概念図で、横軸はサブシステムを直列で表し、縦軸はその能力を示している。システム全体の安定可動範囲は、サブシステムの能力のばらつきを考慮し、特定のサブシステムの能力の最低値より低く設定したしきい値以下の領域で、システムは均衡状態となる。図7に示すように何らかの理由で、例えばサブシステム－2の能力がしきい値より小さくなれば（図中の下向きの矢印のように能力が低下する場合）、システムには不均衡な状態が生じてしまう。すると、当事者はシステムを安定稼働させようと、すなわち均衡状態に戻そうと、サブシステムに着目し課題解決を図る。

この焦点化装置では、技術というシステムは既存であることが前提に議論が行われているという指摘¹¹⁾があるが、レーザーの発振とともに概念が

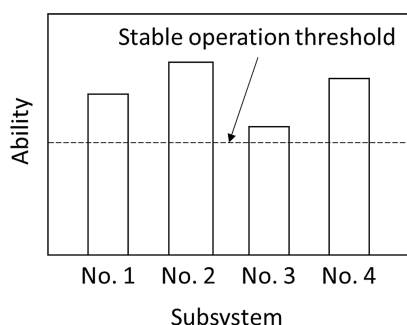


図6 均衡状態にあるシステムの概念図

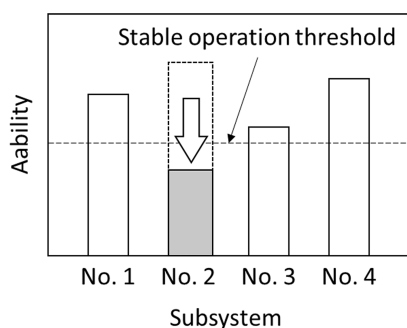


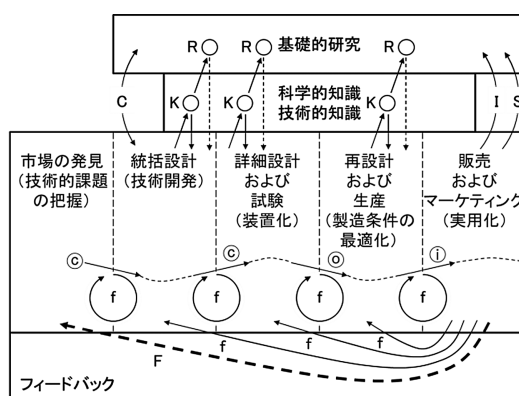
図7 不均衡状態にあるシステムの概念図

形成されたレーザ加工では、概念形成と同時に焦点化装置が機能したことを観察できることから、既存の技術システムに限らず焦点化装置は動作することがわかる。

レーザ加工のような新しい概念が形成されると、技術というシステムは具体化へと向かい、その度合いに応じシステムやそのサブシステムの仕様が詳細に決められるようになる。それを達成するように資源が投入されるので、焦点化装置が動作することになる。

(2) 技術革新の経路

技術とはArthurによれば、「文化に役立てることが出来る装置と工学の集合体」とも定義している。すなわち、技術革新によって生まれた新しいシステムや商品が上市され、市場に受け入れられることも必要である。ここでは、技術革新の経路


図8 連鎖モデル¹²⁾ (一部、筆者が加筆)

を述べる。

図8に示した連鎖モデルでは、技術革新の契機は、図中の基礎研究、市場の発見（技術的課題の把握）、統括設計（技術開発）、詳細設計および試験（装置化）、再設計および生産（製造条件の最適化）、販売およびマーケティング（実用化）のいずれでも技術革新の契機、すなわち新しい製品や製造システムの実用化のアイデアがあることを示している。例えば、詳細設計で生じた課題解決のためのアイデアは、実用化に向け再設計および生産へと移行し、最終的に販売およびマーケティング（実用化）に至る。課題に直面した場合には、科学的知識や技術的知識に解を求め（図中の経路K）、それでも解決しない場合には基礎的研究に解を求めるようになる（図中の経路R）。あるいはそれに要するコストを考慮し断念する場合もある。既存の知識や研究によって課題が解決すれば、課題が生じた場所に立ち回り、そこを起点に実用化に向かう。あるいは、詳細設計で課題が統括設計（技術開発）にフィードバック（図中の経路f）される場合もある。一方、基礎的研究で生まれた新しい技術が統括設計（技術開発）に移行することもある（図中の経路C）。レーザがこれに該当する。

4. レーザ加工技術の革新のメカニズム

レーザ加工は1960年を起点とした新しい技術であるが、レーザ加工の領域では何に使えるか、どのように使うかという用途の探索から技術革新が行われた。これは1981年、小林昭が精密機械に掲載した研究評論「レーザ加工」⁵⁾に見ることができる。国内のレーザ加工初期(1965年から1979年)の研究開発動向の調査結果(精機学会の口述発表の件数)から、レーザ加工の取り組みの多くは大学や研究機関で行われたことが示されている。概ね1980年代初頭までレーザ発振器を含むレーザ加工装置は発展途中であり入手が難しく、そのような中で微量の除去加工(スクライビング、トリミング、電子回路のパターン修正)、熔融再結晶(アモルファス化)、フォログラフィ加工、加熱切削、穴あけなどが試みられた。同時に理論解析も行われ、レーザ加工という新しい知識が蓄積されている。

換言すれば、特定の材料に対し特定のレーザ加工を行えば、従来にはない形状・形態や機能の付加、あるいは既存の加工方法を代替できるという仮説のもと、研究開発が行われた。先に述べた技術開発の契機を示す焦点化装置を視座にすれば、新しいレーザ加工が既に確立された技術に不均衡を与えることによって技術革新が行われたと考える。

2.5(3)節で示した溶接加工を例にすれば、既存の自動車のサイドパネルの製造システムの概要を図9に示す。従来は、プレス加工した部品を抵抗スポット溶接で組み立てサイドパネルを製造していた。抵抗スポットでは離散的な点接合となるため、サイドパネルの剛性と強度の向上には限度があることがわかっていた。そこで、抵抗スポット溶接を連続的な接合を得られるレーザ加工に代替することで、サイドパネルの剛性と強度の向上を見込んだ。しかしながら、プレス加工した部品

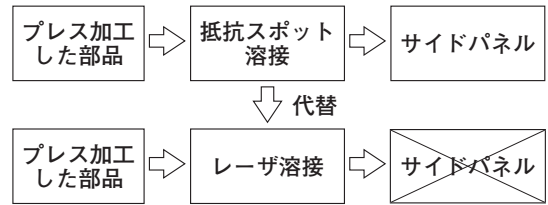


図9 サイドパネルの接合方法の代替を示す概要図

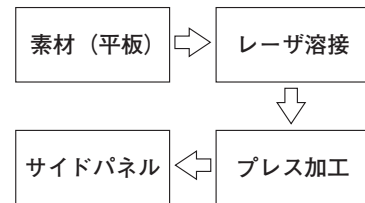


図10 レーザによるテーラードブランク溶接の概要

は素材の持つ機械的特性のばらつきのためレーザ溶接に必要な寸法精度の確保が難しく、レーザ溶接によって接合することは困難である。

そこで、焦点化の対象をレーザ溶接に適したプレス加工の寸法精度の確保から、サイドパネル製造システム全体とし、平板状態の素材を予めレーザ溶接で接合し、その後にプレス加工するという方法が開発された。

その技術革新の経路を連鎖モデルによって表すと、レーザ溶接技術の(技術開発)から(装置化)への移行が見られ、プレス部品の寸法精度の向上は(製造条件の最適化)から(技術的知識)へ解を求めるが、課題解決が困難であることから、(製造条件の最適化)へと戻り、レーザ溶接技術の(装置化)と(技術開発)へのフィードバックの経路であることがわかる。

焦点化したサブシステムの課題解決をシステム全体の課題と捉え直し行ったこと、焦点化したサブシステムの課題解決を新しい技術に求め、故意に技術的不均衡を生じさせて焦点化するという技術革新を見ることができる。

5. まとめ

レーザー加工の起点は1960年にあり、1970年代の初頭から実用化が始まった比較的新しい技術である。レーザー加工技術が発展する初期には、レーザーの物理的特性から用途の多さは理解されていたものの、レーザー加工特性の把握、レーザー加工メカニズムの解明、そして用途の探索が行われた。そこでは、新しい加工形態や新しい機能の付加、あるいは従来技術の代替が可能で実用化するであろうという仮説、あるいは仮想のもとでレーザー加工システムが焦点化され技術革新が行われた。さらに現在も継続するレーザー発振器の高出力化、波長の多様化、レーザー発振時間の高精度化によって新しい加工形態や新しい機能の付加が試みられ、技術革新が行われている。

このように、レーザー加工の技術革新のメカニズムを解明することは、特定の技術的課題の解決の際に、従来の技術や新しい技術をどのように、あるいは効率的に展開させ移転させるかという技術戦略の策定に有効な方法であると考えられる。今後も、特定の技術開発を事例に、技術革新の生成メカニズムの解明を続ける。

参考文献

- 1) A. Einstein: Zur Quantentheorie der Strahlung, Physik. Zeits, 18, 121-128 (1917)
- 2) A. L. Schawlow and C. H. Towns, Infrared and Optical Masers, Physical Review, Vol. 112, No.6, 1940-1949 (1958)
- 3) The New York Times, page7, column5 (1960,7,8)
- 4) W. M. Steen and Jyotirmoy Mazumder : Laser Material Processing, 4th Edition, Springer
- 5) 小林昭, レーザ加工, 精密機械, Vol.47, No.12, 96-100 (1981)
- 6) 通商産業省工業技術院: 工業技術院大型プロジェクト超高性能レーザー応用複合生産システム研究開発成果発表会論文集 (1985.3)
- 7) 経済産業省: 技術評価報告書, 大型工業技術研究開発精度「超高性能レーザー応用複合システム」追跡評価報告書 (2000.5)
- 8) <http://www.laserworks.jp/blog/laser-cutting/post-138.html>
- 9) William Brian Arthur : テクノロジーとイノベーション, 有賀祐二監修, 日暮雅通訳, みすず書房 (2011)
- 10) Nathan Rosenberg : The Direction of Technological Change: Inducement Mechanisms and Focusing Devices, Economic Development and Cultural Change, Vol.18, No.1, Part1 (Oct., 1969), pp. 1 -24
- 11) 加藤俊彦, 技術システムの構造と革新, 白桃書房 (2011)
- 12) Stephen Jay Kline & Nathan Rosenberg : An overview of innovation, In R. Landau & N. Rosenberg (eds.), The Positive Sum Strategy, Harnessing Technology for Economic Growth, National Academy Press, p275-305. (1986)

