

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：84431

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05177

研究課題名(和文) 環境負荷軽減に寄与するプラスチック容器内で実現可能な超高速浸炭技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of ultra-high-speed carburizing technology using plastic containers to reduce environmental impact

研究代表者

平田 智丈 (Hirata, Tomotake)

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主幹研究員

研究者番号：20359433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：浸炭処理は、鋼の強度を高めるために、工業的に多く利用されている。本研究では、レーザーに注目し、従来より超高速で、浸炭できる技術の開発に成功した。プラスチック容器内に試料を置き、それに炭化水素系ガスを密封した後、容器越しにレーザーを試料に照射する。レーザーを照射して、試料を加熱すると、同時にガスも分解し、極短時間で浸炭ができる。本浸炭処理は、ガスの種類や圧力に依存するため、それらを制御し、さらにレーザーの出力も制御すれば、所望の浸炭状態を得ることが可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的な浸炭処理は数時間を要するため、多量のエネルギーやガスの消費が、産業界では深刻な問題となっている。しかしながら、本研究で開発した浸炭処理は、従来よりも大幅に処理時間を短縮することができ、環境負荷軽減に大きく貢献できる。本浸炭処理は、制御方法の確立が実用化に向けた課題の一つであったが、本研究により、学術的な見地から浸炭に影響するファクターを明確にすることに成功し、本技術の制御性の高度化にも大きく貢献できた。

研究成果の概要(英文)：Carburization is widely used industrially to increase the strength of steel.

In this study, we focused on lasers and succeeded in developing a technology that can perform carburizing at an ultra-high speed compared to conventional methods. After a sample is placed in a plastic container and sealed with a hydrocarbon-based gas, the sample is irradiated with a laser from outside of the container. When the sample is heated by laser irradiation, the gas is also decomposed at the same time, and carburization can be performed in an extremely short time. Since this process depends on the type and pressure of the gas, it is possible to obtain a desired carburizing state by controlling these and also the output of the laser.

研究分野：加工熱処理、破壊、金属破断面解析、接合、摩擦攪拌接合(FSW)、高温変形

キーワード：浸炭 熱処理 レーザ 鋼

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼の浸炭処理は、靱性を損なうことなく疲労強度等の機械的性質を改善できるため、鋼製動力伝達部材等の表面硬化処理には不可欠である。浸炭処理は、工業的にはガス浸炭と真空浸炭と呼ばれる二つの手法が多用されているが、それらは処理に数時間を要するため、多量のエネルギーと浸炭ガスの消費が問題となっている。特にガス浸炭では、温室効果ガスの多量排出も不可避のため、地球環境問題が差し迫る中で、熱処理業界では深刻な問題となっている。

ところで、上記の既存浸炭処理は、量産性においては優れるが少量生産には不向きで、昨今の潮流である多品種少量生産への対応が難しい。また、微細駆動部品や医療器具等においては、微細領域への部分浸炭も必要とされるが、既存の技術では困難である。

近年、レーザを利用した金属材料の熱処理や表面改質が注目されているが、レーザは瞬間的かつ局所的な加熱が可能のため、使用エネルギーを抑制でき、少量の処理にも適する。しかしながら、レーザを利用した既存の表面硬化処理は、レーザメタルデポジションのように金属の溶融をとともなうものが多い。鋼を溶融すると本来の特性が損なわれ、浸炭処理の魅力が半減するため、固相状態で実現可能な、レーザを利用した革新的浸炭処理法の確立が期待されている。

2. 研究の目的

本研究の予備実験において、プロパンガス雰囲気下にサンプルを置き、それにレーザを照射したところ、照射時間はわずか10秒足らずであるが、サンプルを溶融することなく、内部に浸炭できることがわかった。これにより、レーザを利用した浸炭処理は、処理時間を大幅に短縮でき、かつ使用ガスやエネルギーも著しく低減できる、新たな浸炭技術となり得ることを確認できた。しかしながら、今後はこれを実用的な技術に高める必要があり、浸炭処理の高度化には、その反応過程や影響因子を学術的に解析し、その理論を応用展開することが必要となる。そこで本研究では、「超高速浸炭は何に律速され、迅速な浸炭を目指すにはどのように制御すべきか」という問いを明らかにし、環境負荷軽減に大きく貢献できる制御性の高い浸炭技術を確立して、新たな展開・普及を図る。

3. 研究の方法

図1に、本研究で使用する実験装置の模式図を示す。レーザは透明な物体を透過するため、ガラス越しに物体を加熱することができる。そこで、透明密閉容器の中に処理対象物を置き、容器外からレーザを照射し、浸炭を試みた。なお、予備実験においても、本実験装置を使用しており、問題なく浸炭できることを確認している。容器の一部には、石英ガラス製の小窓を設けており、レーザを外部から照射すると同時に、二色放射温度計により容器内の材料の温度を測定した。レーザの照射面積は、5mm四方である。さらに、容器には複数のバルブを設け、所定の浸炭雰囲気に制御した。また、本研究で目指す浸炭処理は、瞬間的かつ局所的に著しく高温に加熱するだけであるため、密閉容器には耐熱性に優れた素材ではなく、プラスチック材料を採用した。なお、本研究で用いた材料はSCM415で、厚さが

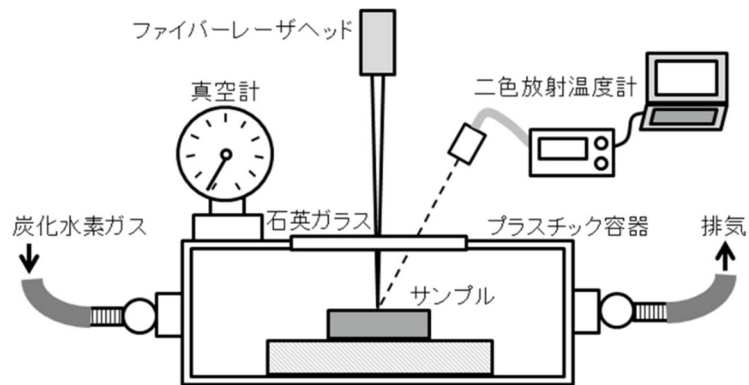


図1 本研究で使用した実験装置の模式図。

3mmの小判型の形状をした試験片を準備した。

本研究では、上記の装置を使用し、以下の調査項目に着目して、レーザを利用した超高速浸炭技術の高度化を目指す。

・ガス種の影響調査

通常、浸炭には炭化水素系ガスが使用されるが、浸炭前に起こるガスの分解反応は、ガス種によって異なることが知られている。そこで本研究では、予備実験で使用したプロパンガスの他に、メタンガスを用いて実験を進め、超高速浸炭に最適なガス種を検討する。

・ガス圧(濃度)の影響調査

一般的な真空浸炭時の炭素流入速度(浸炭速度)は、処理温度だけでなく、ガス圧(濃度)にも依存することが知られている。そこで本研究においても、容器内のガス圧を変化させ、その影響を調査する。なお、本研究では5種類のガス圧下で実験を行い、ガス圧はA < B < C < D < Eの大小関係にある。

【1 研究目的，研究方法など(つづき)】

・レーザ照射回数の影響調査

ガス種やガス圧の影響を調査する際，一度のレーザ照射だけでなく，複数回のレーザ照射も実施し，マルチパス浸炭の効果に関しても調査する．

以上の研究方法により，超高速浸炭のメカニズムを明確にし，迅速に浸炭させるための最適条件を確立する．

4. 研究成果

(1)プロパンガスによる浸炭

プロパンガスを用いて，種々の圧力(濃度)に密閉容器内を制御し，外部からレーザを照射して浸炭を試みた．図2に，各圧力下で浸炭を試みたサンプルの外観を示す．なお，ここでのレーザの出力は700W，走査速度は0.5mm/sで，ガス圧はA<B<Cの関係にある．圧力が低い条件では，レーザ照射部の後半域でやや白っぽく変色しているのに対し，圧力が高くなるに伴い，明瞭な白色への変化が全体的に認められた．また，それぞれの条件下で試験したサンプルにおいて，レーザ照射部を追跡して温度を連続測定した結果を図3に示す．レーザによる加熱状態は，ガス圧依存性が認められ，ガス圧が低下するに伴い，高い温度に加熱される時間が長くなる傾向が認められた．

次に，これらの条件下でレーザ照射したサンプルにおいて，断面の炭素濃度分布を調査した結果を図4に示す．なお，断面分析を行った箇所は，レーザ照射部の長手方向の中央付近である．低い圧力条件のサンプルは，ほとんど浸炭していないが，高い圧力条件のサンプルは，表面から高濃度に浸炭していることがわかった．また，表面の白色が明瞭であるほど，浸炭がより進んでいることがわかった．

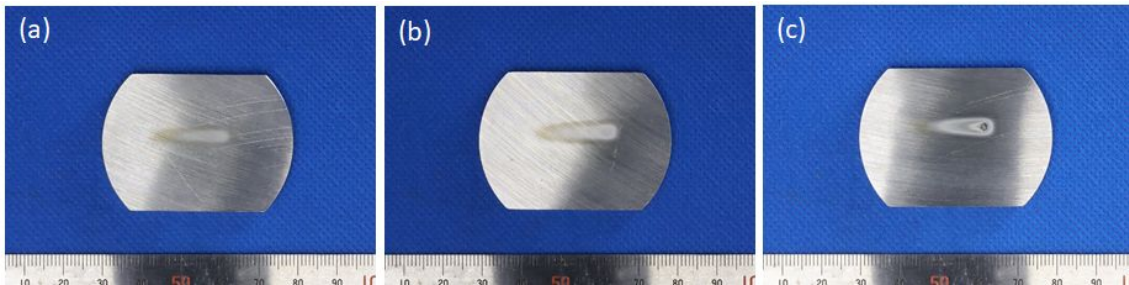


図2 プロパンガス雰囲気中でレーザ照射したサンプルの外観，ガス圧は(a)A，(b)B，(c)C．

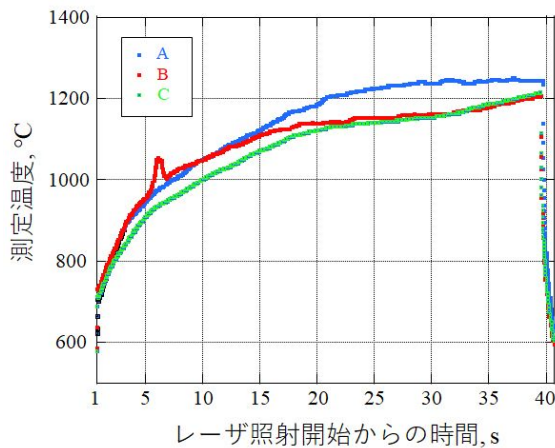


図3 種々のプロパンガス雰囲気中でレーザ照射したときの温度プロファイル．

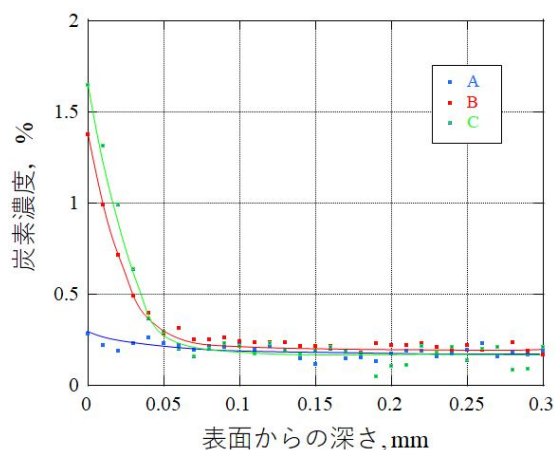


図4 種々のプロパンガス雰囲気中でレーザ照射したサンプルの炭素濃度分布．

(2)メタンガスによる浸炭

次に，メタンガスを使用して，浸炭を試みた．メタンガスは，プロパンガスと同様に，ガス浸炭によく用いられるガスであるが，一般的にプロパンガスと比べ，浸炭する際のガス圧(濃度)が高いことが多い．そこで，本研究においても，プロパンガスと比べて高めの圧力も選択し，浸炭実験を行った．図5に，メタンガスを使用し，種々のガス圧雰囲気下で浸炭を試みたサンプルの外観を示す．なお，ここでのレーザ走査速度は0.5mm/s一定で，ガス圧はB<D<Eの大小

【1 研究目的, 研究方法など(つづき)】

関係にある。低いガス圧条件下では、表面が全体的に褐色か黒色を呈しており、プロパンガスと同様のレーザー照射条件のときと比べて、その様相が大きく異なる。一方、ガス圧が高くなるに伴い、レーザー照射域に白色を呈した領域が認められた。また、各ガス圧条件下において、レーザー照射領域の中間地点で計測した温度プロファイルの結果を図6に示す。プロパンガスのときと比べると、レーザーの出力が高いこともあり、最高到達温度は高い傾向にあるが、プロパンガスのときと同様に、ガス圧が低い方が、最高温度が高い傾向が認められる。

次に、各サンプルにおける断面炭素濃度分布を図7に示す。なお、断面分析を行った箇所は、レーザー照射部の長手方向の中央付近である。プロパンガスであれば、浸炭していたガス圧条件においても、プロパンガスよりも加熱温度は高いにもかかわらず、メタンガスではほとんど浸炭しておらず、むしろ脱炭していることがわかる。しかしながら、ガス圧が高い条件では、プロパンガスと同様に浸炭している。ただし、表面の炭素濃度や浸炭深さについては違いが認められ、メタンガスのほうが、表面炭素濃度が低く、また浸炭深さは深い傾向が認められた。

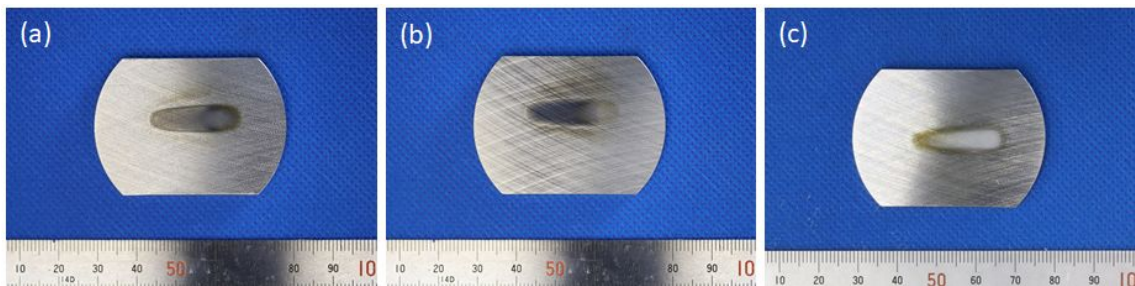


図5 メタンガス雰囲気中でレーザー照射したサンプルの外観, (a)760W, ガス圧 B, (b)760W, ガス圧 D, (c)800W, ガス圧 E.

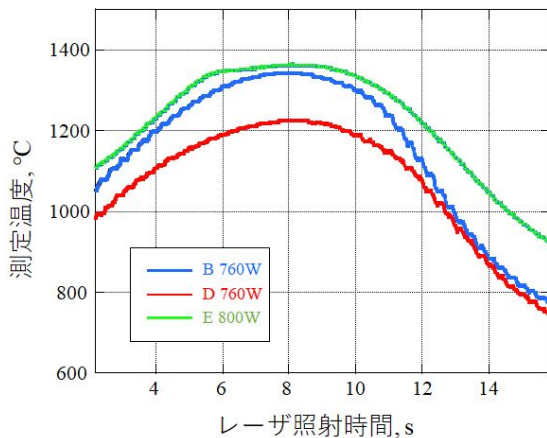


図6 種々のメタンガス雰囲気中でレーザー照射したときの温度プロファイル。

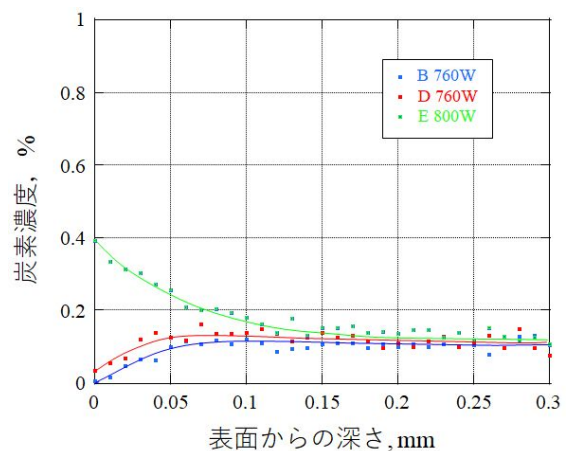


図7 種々のメタンガス雰囲気中でレーザー照射したサンプルの炭素濃度分布。

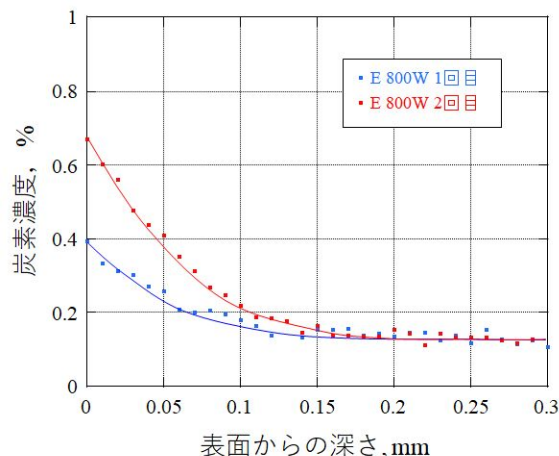


図8 メタンガス雰囲気中で複数回レーザー照射したサンプルの炭素濃度分布。

【1 研究目的，研究方法など(つづき)】

さらに，複数回レーザを照射すれば，より浸炭が促進すると考えられるため，メタンガスを用いて，その効果を検証した．図 8 に，メタンガス雰囲気中，一回および二回レーザを照射したときの断面炭素濃度分布を示す．明らかに，二回照射したときのほうが炭素濃度は高く，より深く浸炭しており，レーザによる浸炭においては，複数回実施することが有効であることがわかった．なお，以前の調査では，プロパンガスを用いても，今回と同様に二回照射したときのほうが炭素濃度は高くなったが，メタンガスほど深くは浸炭できなかった．

(3)レーザによる浸炭のメカニズム

一般的な浸炭は，加熱により炭化水素ガスが分解し，炭素が材料表面に吸着したあとに，内部への浸炭が始まる．このガスの分解反応は，吸熱反応であることが知られており，すなわちガスの分解が進むと，周囲の熱は奪われる．ところで，プロパンガスは，メタンガスと比べ，ガスの分解速度が速いため，浸炭に不可欠な材料表面への炭素の吸着が起こりやすい．それは裏返せば，レーザ照射によりサンプルは加熱されるが，それと同時に周囲のガスの分解により熱が奪われるため，プロパンガスでは温度が上昇しにくいと考えられる．この傾向は，ガス圧が高い場合も同様と考えられる．一方，メタンガスでは，ガスの分解が緩慢なため，炭素の吸着は起こりにくいですが，レーザ照射による昇温は顕著に進むと考えられる．これらの考察は，両ガスでの温度プロファイルを見ても，その妥当性が証明されている．したがって，プロパンガスでは表面の炭素濃度は高くなるが，芯部への拡散は進まず，一方，メタンガスでは，表面の炭素濃度は低いが，より高温に加熱されるため，芯部への拡散は，より起こりやすくなっていると考えられる．

以上の結果を踏まえると，プロパンガスでは表面の炭素濃度が高くなり過ぎ，脆くなる可能性があるため，より深く浸炭を目指すのであれば，メタンガスのほうが好ましいと考えられる．今回は同一条件で浸炭したが，必ずしもこの限りではなく，異なる条件でレーザ照射すれば，浸炭状態を様々な形態で制御可能と考えられる．

5. まとめ

本研究では，レーザを利用した超高速浸炭は何に律速され，迅速な浸炭を目指すにはどのように制御すべきか，という問いに対して，それらを明らかにし得る多くの成果を得ることができた．浸炭用のガスの選択，あるいはレーザの照射条件の制御により，様々な浸炭状態を実現できることもわかった．これらの成果をもとに，熱処理業界が抱える問題の解消に少しでも貢献できるよう，今後も本技術をより実用的な技術へと高めていく予定である．

参考文献

- 1) T. Hirata, T. Yamaguchi, Y. Yokoyama, H. Hoshino, Surface modification by high-speed laser gas carburization in low-alloy steel, *Materials Letters* 280 (2020) 128586.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Hirata, T. Yamaguchi, Y. Yokoyama and H. Hoshino	4. 巻 280
2. 論文標題 Surface modification by high-speed laser gas carburization in low-alloy steel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 128586
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.matlet.2020.128586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平田智丈、山口拓人、横山雄二郎、星野英光
2. 発表標題 レーザを利用したプラスチック容器内で実現可能な超高速浸炭技術
3. 学会等名 西部金属熱処理工業協同組合 令和3年度 第1回技術講習会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平田智丈、山口拓人、横山雄二郎、星野英光
2. 発表標題 プラスチック容器で超高速浸炭を実現
3. 学会等名 MOBIO産学連携オフィス テーマ別合同シーズ発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平田智丈、山口拓人、横山雄二郎、星野英光
2. 発表標題 プラスチック容器で超高速浸炭を実現
3. 学会等名 ORIST 技術シーズ・成果発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山口 拓人 (Yamaguchi Takuto) (20530041)	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主任 研究員 (84431)	
研究分担者	横山 雄二郎 (Yokoyama Yujiro) (30359418)	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主任 研究員 (84431)	
研究分担者	星野 英光 (Hoshino Hideaki) (60359396)	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・総括 研究員 (84431)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------