レーザレオロジープロセッシング に関する研究 (第1報)*

—熱的加工現象の基礎研究—

中 沢 弘** 始 関 雄 三***

Study on Laser Rheology Processing (1st Report)
—Fundamental Research of Thermal Phenomena in Process—

Hiromu NAKAZAWA and Yuzoh SHISEKI

Laser Rheology Processing is the process which can produce near net shape parts by irradiating laser onto string shape material which is composed of powder and liquid binder and extruded onto the table or part processed before. Liquid binder is evaporated instantly after laser is irradiated. This report deals with the fundamental research on thermal phenomena in process. It is found that in case of Fe powder the surface layer of the processed part is oxidized under the atmosphere and most heat is hindered to flow through it. So it is recommended that the process is done without the existence of O_2 . It is also found that the process is better done in a little lower range of temperature from the melting point of the powder material.

Key words: laser rheology processing, powder, binder, thermal phenomena, iron, oxidization

1. は じ め に

現在、生産加工分野では、エネルギー問題、NICS諸国の追上げ、消費者のニーズの多様化等の問題を抱え、生産システムの合理化、高付加価値製品の生産などが強く望まれている。レーザレオロジープロセッシング(略LRP)はこのような要望にこたえるべく考案された、素材から一貫して加工できるフレキシブルな加工法である。LRPの概念を簡単に図1に示す。この図より、テーブルがXYZ方向に、シリンダがC軸に制御されることにより、シリンダより押し出された金属粉末と粘結剤を混合したクリーム状の線状素材が目的の形状に創成されてゆく。素材は射出されると同時にレーザにより加熱固化され、かつ、すでに創成されているものに積層付着されて、三次元のnear net shapeな製品が出来る。この場合、レーザを照射すると粘結剤は瞬時に蒸発してしまう。このLRP加工によれば、任意の形状が自由に創成でき、素材を自由に選択できるので、非常にフレキシブルで幅広い加工が

行える¹⁾。

本論文では、LRPにおける加工現象を素材の温度分布と金属粉末の結合の発達の観察を通して、基礎的に解明したことについて述べる。

2. 実験装置および方法

実験は図2に示すような出力分布を持つCO₂レーザ(最大出力100W)を用いて行った。斜線部分が直接素材に照射された部分である。

図3は、LRP加工中の素材内の温度分布を測定したときの実験装置図である。素材は、入手のしやすさ、鉄の焼結に関するデータが多いことなどから粒径約5 μ mの鉄粉と、その鉄粉との濡れ性が良いことや、低酸素濃度での焼結の際に蒸発して素材内に残ら

Fig. 1 Principle of LRP

* 原稿受付 昭和63年6月30日。昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和63年3月17日)にて発表

** 正会員 早稲田大学理工学部(東京都新宿区大久保3-4-1)

*** 学生会員 早稲田大学理工学部(現、(株)ブリヂストン; 小平市小川東町3-1-1)

Fig. 2 Beam profile

Fig. 3 Temperature measuring system

Fig. 4 Temperature measuring points

ないことなどから、粘結剤に流動パラフィンを用い、重量比7:1で混合したものをジグで3mm角の試料片に成形した。レーザは、スポット径9mmにセットし、雰囲気は大気アルゴンガスで置換して酸素濃度を変えた。この試料片をレーザ照射しながら一定速度で送り加工を行い、このときの試料片の温度測定を行った。測定は図4に示す7点で行った。a点は、放射温度計で測定し、b~g点は、径0.32mmの白金-白金ロジウム熱電対を埋め込んで測定した。3mm角の小さな試料片であるので、熱電対での測定は、2点ずつ3回に分けて行い合成した。パラメータとしては、送り速度、雰囲気中に含まれる酸素濃度を採った。

Fig. 5 Observing system

Table 1 Absorptivity of specimen surface

O ₂ Concentration in Atmosphere %	Absorptivity
1	0.50
21	0.58

図5は、レーザ照射による鉄の粒子と粒子の結合の発達を観察した場合の装置図である。この観察は、光学顕微鏡とCCDカメラを用いた装置で、この場合は、粒径約44μmの鉄粉を用いて、アルゴンガス雰囲気中でレーザ出力をパラメータとして行った。なお、光学顕微鏡やモニターテレビで直接観察すると同時にビデオレコーダで記録も行った。

以上の2つの実験結果より、LRP加工における現象の解明を行った。

3. 温度測定

温度測定は、試料片の概略的な温度分布を求めることにより、LRP加工現象の要因をより明確にし、あわせてLRP加工における熱的データを得るために行った。図3に示したような測定方法では、試料片表面のレーザ光の吸収率の変化や熱電対を通しての伝熱や放熱などの誤差要因は多いが、概略的な温度分布を求めるためには、これらはいした支障にはなっていないと考えられる。吸収率は、式(1)より温度を測定することにより求めた。吸収率の実測値を表1に示す。

$$Q = \frac{C_D \cdot m \cdot \Delta T}{\Delta t} \quad (1)$$

ただし、 Q : 吸収率、 C_D : 定圧比熱、 m : 質量、 ΔT : 温度、 Δt : 時間である。

3.1 酸化と熱伝導率

送りをかけなかったときの定常状態の試料内の温度分布を図6に示す。この図より、同じ出力で加工した

(a) O₂ Concentration: 1 % (b) 21 %

Fig. 6 Temperature distribution of specimen
Laser intensity; 0.36 W/mm²

Fig. 7 Thermal conductivity calculation

Table 2 Thermal conductivity of specimen λ_m
W/m°C

O ₂ concentration in atmosphere %	Upper	Lower	Average
1	7.2	8.2	7.6
21	4.7	8.7	6.8

にもかかわらず、雰囲気中の酸素濃度により表面温度が違うことがわかる。これは表1に示した吸収率の違いによるものと考えられる。

次に温度分布とレーザ出力より、図7に示すようにレーザ光軸上の熱伝導を一次元定常状態と考え、試料内を上部と下部に分けて、熱伝導率 λ_m (W/m°C)を式(2)によって求めた。その結果を表2に示す。

$$\lambda_m = \varepsilon \cdot \frac{P}{A} \cdot \frac{\delta}{\theta_{in} - \theta_{out}} \quad (2)$$

ただし、 ε :レーザ光の吸収率、 P :レーザ出力(W)、 A :伝熱面積(m²)、 δ :伝熱距離(m)、 θ_{in} , θ_{out} :測定部の上面、底面の温度(°C)である。

この表より、雰囲気中の酸素濃度21%におけるレーザ照射面に近い上部の熱伝導率が非常に低いことがわかる。これは、鉄の酸化により表面付近に酸化膜が形成され、熱がほとんど表面の酸化膜内を通して流れてしまい、内部に伝わらないためと考えられる。このことは、図8に示した試料片の断面写真からも推定できる。酸素濃度21%の雰囲気中で加工を行ったも

O₂ Concentration : 1 % ×50

O₂ Concentration : 21 % ×50

Fig. 8 Microstructure of fractured specimen profile

のは、表面に溶融した層が形成され、内部の層は粒子の結合があまり進行していない。この2層による構造は、酸素濃度1%の場合には見られないので、表面は酸化膜の層であると考えられる。そしてこの表面と内部の層の境界面が熱伝導率を低下させている原因と考えられる。さらに、2つの断面写真を比べてみると、酸素濃度1%の方が21%のものより小さい空洞の数が減り比較的大きな空洞が残る、かなり収縮が起きていることがわかる。これも酸化膜の存在の有無による影響で、酸化膜の形成が収縮を起さずらくしていると思われる。この影響は、同じ素材を用い、新たに作成した1mm角の試料片の破断荷重と酸素濃度の関係を示した図9からもわかる。すなわち、酸素濃度が減少すると破断荷重が上がるという傾向に表れている。

次に、LRP加工で雰囲気中の酸素がどのように影響を与えるのかをまとめると図10のようになる。この図に示したように、鉄の酸化は雰囲気中の酸素と直接結合するほか、流動パラフィンが蒸発、燃焼することにより発生する水蒸気(H₂O)、二酸化炭素などにより、反応が促進されたりもする。また吸収率や熱伝導率などの物性値を変化させ加工に影響を与える⁴⁾。

3.2 加工中の温度分布

図11に、送り速度5mm/minで加工を行った場合の測定結果を示す。ただし、a~gは図4に示した測

Fig. 9 Relation between O_2 concentration of atmosphere and fracturing load
Laser intensity; 3.0 W/mm^2 , Feed speed; 20 mm/min , Specimen size; 1 mm square

Fig. 10 The process of oxidation and its effect

Fig. 11 Results of temperature measurement
Laser intensity; 0.50 W/mm^2 , Feed speed; 5 mm/min , O_2 concentration; 1%

定点である。

この測定結果より、図12に示す試料内の温度分布図を得た。まず、送り方向に垂直な断面における温度分布図を見ると、試料片の中心部よりも回りの表面に近い部分の方が、温度変化が急であることがわかる。

Front View (X-Z Plane)

Fig. 12 Temperature distribution in specimen
Laser intensity; 0.50 W/mm^2 , Feed speed; 5 mm/min , O_2 concentration; 1%

次に、送り方向に平行な断面の温度分布を見ると、レーザ光に近づく場合の方が遠くの場合よりも等温線が密になっており、加熱速度の方が冷却速度よりも早いことがわかる。また、温度差が試料片内で 1 mm あたり 100°C 以上あることがわかる。これは、表2に示した熱伝導率が $10 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 以下で純鉄のそれが約 $50 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ であることを考慮すると非常に低く、さらにレーザによる熱供給部分が微小であるために放熱の影響が大きいことが原因と考えられる。

Fig. 13 Heating process

Fig. 14 Cooling process

3.3 温度分布の影響

図12に示した温度分布はLRPの問題点である試料片内の組織のむらや熱応力による試料片の変形の原因になっていると考えられる。

まず、試料片内の組織のむらについて考察してみる。レーザ光軸上の温度分布をみてわかるように、上部と下部では加工温度が 500°C も違ってしまふ。このため、粒子の結合の度合もかなり異なってしまう。よって、試料片内に組織のむらができてしまう。

次に、熱応力による試料片の曲がりについて考察する。温度分布図より、急峻な温度勾配が試料片内にできていることがわかる。この温度勾配により熱応力が発生し、試料片が曲がってしまうと考えられる。そのときの様子を図13, 14に示す。レーザ照射による温度上昇とともに試料は図13のように熱膨張し、高温になれば降伏応力が低下して加熱した領域が塑性変形を起こして試料全体は凸に変形する。さらにレーザ照射後、放熱により冷却され加熱部分は収縮を起こす。このとき再び熱影響部に熱応力が作用して、図14に示すように塑性変形する。このような過程で試料片は塑性変形を起こすが、粒子の結合は上部のレーザ照射部分の方が下部より進んでいるので密度が高くなり収縮度合も大きくなるので、試料片は一般にレーザ照射後凹に変形する²⁾。

4. 鉄粉の結合の観察

レーザ照射による粒子と粒子の結合の発達を視覚的にとらえることによってその現象を解明するために、図5に示す装置で観察を行った。この観察は鉄粉を対象としたが、アルゴンガス雰囲気中で行ったので酸化は起こらないものと仮定できる。

図15に示すように、粒子が形状を残したままレー

Irradiation Start

2 s

4 s

6 s

8 s

10 s

×2000

Fig. 15 Neck growth of Fe grain (1490°C)

Irradiation Start

1 s

2 s

3 s

×800

Fig. 16 Neck growth of Fe grain (1890°C)

ザ照射後2s, 4sと進むにつれてネックが成長していく場合と、図16に示すように、レーザ照射直後に粒

Fig. 17 Bonding process of Fe grain

Fig. 18 Polished profile of laser irradiated grain
(1490°C) ×300

子が融解し、相接する粒子が瞬時に結合する場合の2通りが観察できた。前者の場合は粒子の温度約1490°C、後者の場合は約1890°Cであった。ただし、鉄粉の融解温度は約1535°Cである。粒子の白く見えている部分は、レーザー光が反射しているためである。

ここで、図15に示すような結合過程について考察してみる。まず粒子内の温度について考えてみると、レーザー光のエネルギーは、金属表面の十数nmでほとんど吸収されてしまい、それ以後は熱伝導という形でエネルギー伝達されることがわかっており、粒子内において表面付近の方が内部より温度が高いと考えられる³⁾。そのため粒子は、図17(a)に示すように表面は融解し、内部は融解していない状態だと考えられる。この際、粒子表面の形状を詳しく観察すると、表面の形状が変動していることがわかる。そして、(b)に示すように相接する2粒子は、融解した部分が表面張力によりネックとして結合したと考えられる。さらにこの融解される部分は、レーザー出力を上げるにつれて増加し温度が粒子の融点を越えると粒子全体が融解し図16に示すような結合が行われると考えられる。以上

の結合過程は、図18に示した粒子の断面写真からも確認できる。この写真は約1490°Cでレーザー照射した粒子を樹脂で固めて研磨した断面写真である。表面と内部で2層に分かれていることが観察できる。これは、表面は一度融解して緻密化が起きたが、内部は融解しなかったことを表していると考えられる。

5. おわりに

LRPにおける加工現象を解明するために行った研究により以下のことが明らかとなった。

- (1) 鉄粉を用いた場合、加工雰囲気中の酸素により酸化膜が形成され、この酸化膜が熱の流入を妨げ試料片の内部や下部の粒子の結合を不完全にし、試料片の破断荷重を減少させる。
- (2) 鉄粉と流動パラフィンを用いた試料片の熱伝導率は10 W/m°C以下で、加工中試料片内に1 mm当たり100°C以上もの温度差が出来てしまう。また酸化によりこの値はさらに悪化するので、鉄粉を用いる場合酸素のない雰囲気加工するのがよい。
- (3) 鉄粉は粒子間に圧力が加わっていない場合、レーザー照射により融点より少し低い温度である約1490°C以上で表面だけが融解して結合する。LRPにおいては、粉末材料の融点より若干低い温度での加工が適している。

そこでLRPを実用的なものに近づけるためには、成形時に粉末粒子同士が圧縮されている状態を実現し、温度を制御し素材内の温度を均一に近づけ、融点より少し低い温度で加工を行う必要があると考えられる。

最後に、本研究の遂行に当たり先端機械技術振興会及び、本大学昭和62年度卒業生 桶谷和信、中川純一、中西英一、中村武の4氏の協力を頂いた。また、本研究は昭和62年度文部省科学研究費補助金（一般研究(C)）によって行われたことを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) H. Nakazawa: Laser Rheology Processing, Int. Conf. on the Manufacturing Science and Technology of the Future, 9-12 Oct. 1984, pp. 105-109.
- 2) 難波善治, 川口憲治, 大峯 恩: レーザ・フォーミング, 昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1986) 677.
- 3) 難波 進, 豊田浩一, 杉山征司: レーザと加工, 共立出版(1983).
- 4) 飯泉新吾: 金属材料の高温酸化と高温腐食, 丸善(1982).