研 究

ファイバーレーザーを用いた金属粉末のレーザー結合に関する研究
—レーザー照射部の温度測定—古本 達明^{☆1}, 上田 隆司^{☆1}, 塚本 卓^{☆2}, 小林 直人^{☆1}, 細川 晃^{☆1}, 阿部 諭^{☆3}^{☆1} 金沢大学大学院, 〒 920-1192 金沢市角間町.^{☆2} コマツ, 〒 107-8414 港区赤坂 2-3-6.^{☆3} 松下電工(株), 〒 571-8686 門真市大字門真 1048.Study on Laser Consolidation of Metal Powder with Yb Fiber Laser
—Temperature Measurement of the Laser Irradiation Spot—Tatsuaki Furumoto^{☆1}, Takashi Ueda^{☆1}, Takashi Tsukamoto^{☆2}, Naoto Kobayashi^{☆1},
Akira Hosokawa^{☆1} and Satoshi Abe^{☆3}^{☆1} Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa 920-1192, Japan.^{☆2} Komatsu Ltd., 2-3-6 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-8414, Japan.^{☆3} Matsushita Electric Works, Ltd., 1048 Kadoma, Kadoma 571-8686, Japan.

Received April 17, 2007

SYNOPSIS

The layered manufacturing technique is one of the most effective processes for the manufacture of prototypes, tools and functional end products. A variety of components, such as polymer, ceramic, paper and metal powder, has been applied to date for the achievement of manufacturing objectives. Selective Laser Sintering (SLS) and Melting (SLM), in particular, are two of the most versatile techniques, able to cover a wide range of materials. In this study, in-process monitoring of the processing temperature at laser irradiation spot is proposed by using two-color pyrometer, which has been developed by the authors. In order to investigate the consolidation characteristics of chromium molybdenum steel (SCM) based powders with a Yb fiber laser, the maximum temperature at the irradiation spot of a laser beam was measured under various experimental conditions. The influence of the laser power and diameter of laser beam on the temperature were evaluated. As a result, it was revealed that the maximum temperature during laser irradiation changed under the influence of laser power and particle size of powders. The temperature increased with the increase of laser power, and was greatly influenced by the particle size of the powders. The temperature after laser irradiation decreased rapidly to room temperature.

KEY WORDS

Yb fiber laser, laser consolidation, chromium molybdenum steel powder, two-color pyrometer, temperature

1 緒 言

近年, 消費者ニーズの多様化と共に製品ライフサイクルはますます短くなり, 製造メーカは製品の開発から市場投入に至るまでのプロセスを短縮化する様々な試みを行っている。中でも, PC の普及と共に進化した 3 次元 CAD システムは, CAM, CAE とのデータ共有を可能にし, 設計・開発期間の大幅な工程短縮を実現するコンカレントエンジニアリングの実現へと発展していった¹⁾。一方, 工程短縮の実現に寄与する要因として, RP に代表される積層造形技術の進歩が挙げられる。積層造形法とは, 3 次元 CAD データを薄い層状のスライスデータに変換し, 同様に層状に堆積した樹脂や粉末に対してレーザー照射を行って照射部を選択固化し, 得られた硬化層を幾層にも積み上げながら 3 次元形状を作成する手法である²⁾。

代表的な積層造形法としては, 紫外線を照射すると固化する性質を有する感光性樹脂を用いた光造形法, インクジェットノズルから加熱・溶融したワックスのような液滴を連続的に滴下して堆積・固化されるインクジェット法, 金属やセラミックスの粉末にレーザー照射して加熱し, 加熱粉末を相互に結合して積層造形する粉末焼結法などに分類することができる³⁾。これらは, 3 次元 CAD で作成したモデルを迅速に立体表現できるため, モデル形状や意匠の検討に有効であり, 応力が付加されない状況においては部品の機能確認モデルとしても利用されている。しかしながら, 各造形法において使用可能な材料に制限があり, 造形モデルの精度が機械加工と比べて劣るため, 強度や耐久性の評価やモデルそのものを実部品として製作することが困難である等の課題を有していた。

これらの課題を解決する手法としてRM (Rapid Manufacturing) やRT (Rapid Tooling)と呼ばれる積層技術が注目されている^{4,5)}。これは、実製品と同一品質の材料粉末を用いて製品を直接造形するもので、近年ではエンドミル加工と組み合わせた複合加工機も開発され、射出成形用金型の造形に適用されている⁶⁾。金型製作への本手法の適用は、深リブ構造を有する形状の一体造形が可能となり、放電加工による後加工を必要としないことから製作期間の短縮が期待される。しかしながら、金属粉末を高密度で結合し、造形モデルの表面硬度も十分に持たせる必要があるなど課題も有している。これまでの研究で、過大なエネルギー投入ではポーリング現象が生じ、過小なエネルギー投入では十分な結合物が得られないため、良好な金属粉末の結合物を得るには適切な投入エネルギーの選択が必要であることを示してきた⁷⁾。そこで本研究では、Ybファイバーレーザを用いて金属粉末を結合するときの粉末表面温度について、ファイバー導光型赤外線輻射温度計で測定し、表面温度と金属粉末の結合特性との関係について調べたので、以下に報告する。

2 ファイバー導光型2色温度計

2.1 温度計の測定原理

本実験で用いるファイバー導光型赤外線輻射温度計の概要をFig.1に示す。本温度計は、赤外線導光ファイバー、赤外線検出素子および増幅回路から構成されている。測定対象物表面から輻射された赤外線は、コア径が380 μm のカルコゲナイド光ファイバーで受光し、集光レンズを介して赤外線検出素子に伝送される。カルコゲナイド光ファイバー(NSG)は、波長が1~7 μm の赤外線を伝送することが可能である。赤外線検出素子は、InSb素子の上にInAs素子を積層した2色素子を用いる。前面のInAs素子によって波長が3 μm 以下の赤外線を受光し、InAs素子を透過した3 μm を超える波長の赤外線は、後面に配置したInSb素子で受光する。各素子いずれも、赤外線を照射すると起電力が生じる光起電力型素子であり、共に応答速度が1 μs と速い⁸⁾。なお、InAs素子は本実験に用いるファイバーレーザの波長に対しても感度を有しており、素子

Fig.1 Fundamental structure of two-color pyrometer.

がレーザ光を検出すると正確な温度測定が行えない。そこで、InAs素子の前面にGeフィルターを配置し、波長が1.6 μm 以下の赤外線を全て遮光した。したがって、InAs素子は1.6~3 μm の波長を検出することとなる。検出された赤外線は、回路を介して電気信号を増幅した後、オシロスコープで表示させて出力を記録した。得られた出力の温度への換算は、両素子からの出力比を取り別途測定した校正曲線を用いて行う。両素子からの出力比を取ることで、測定対象物表面からの赤外線輻射率の影響を抑えることができる⁹⁾。

2.2 温度計の校正実験

温度計は、測定する温度に応じて熱電対を用いる方法と試料融点を用いる方法の2種類で校正実験を行った。熱電対を用いる校正方法の概略をFig.2に示す。校正にはアルミナを試料として用いた。まず、アルミナ裏面にクロメル-アルメル熱電対を貼付し、周辺にニクロム線を配置して全体を絶縁体で覆う。そして、試料全体の温度が均一となるようにニクロム線を加熱し、試料表面から輻射される赤外線をカルコゲナイド光ファイバーで受光する。このとき、試料裏面の温度を熱電対で同時に測定することで、熱電対から求まる絶対温度と2色素子からの出力比との関係を知ることができる。なお、輻射赤外線は、2色素子の検出前にチョッパーを用いてパルス出力に変換している。

試料融点による温度校正には、融点が2200 $^{\circ}\text{C}$ である炭化ケイ素と¹⁰⁾、融点が1510 $^{\circ}\text{C}$ である冷間圧延鋼板を用いた¹¹⁾。それぞれ、条件を変えながら試料表面にレーザ光(日本電気(株)製: SL117C)を照射し、試料表面が溶融する最小のエネルギー条件のときの輻射赤外線を2色素子で測定して、それらの出力比から融点との関係を求めた。Fig.3は、溶融前後における炭化ケイ素の表面をSEM(日本電子(株)製: JSM-6390LVU)で観察した結果である。溶融前における炭化ケイ素の表面は、Fig.3(a)に示すように照射痕のみが観察できるのに対して、溶融後の表面は、Fig.3(b)に示すように炭化ケイ素表面に再凝固層が存在している。本実験では、このときの各素子からの出力を測定して、その出力比を融点とした。

Fig.4は、各校正実験の結果と計算によって求めた理論曲線との関係を示す。理論曲線は、検出素子、伝送用ファイバー、

Fig.2 Schematic illustration for calibration of pyrometer.

Fig.3 SEM image of SiC surface.
(a) Before irradiated, (b) After irradiated

Fig.4 Calibration curve.

Fig.5 Schematic illustration of experimental arrangement.

Geフィルターなどの各波長における相対感度を用いて計算したものである。グラフから、熱電対を用いて得られた結果、試料融点から得られた結果が、いずれも理論値と良く一致していることがわかる。したがって、本温度計を用いた測定結果はグラフ中の理論曲線を用いて行うこととした。

3 実験方法

3.1 実験装置

金属粉末のレーザー結合装置の概要をFig.5に、実験に用いる

Table 1 Specification of Yb fiber laser.

Laser type	Yb fiber (CW)
Beam diameter	ϕ 45 μ m
Wavelength	λ 1070 nm
Maximum power	P 40 W
Scanning speed	F 1–3000 mm/s

Fig.6 Profile of laser beam at focus spot.

レーザーの仕様をTable 1に示す。装置は、波長が1070 nmの連続発振Ybファイバーレーザー(SUNX(株)製: LP-F10)と金属粉末の結合ユニットで構成されている。結合ユニットには、粉末の堆積厚さを調節するためのブレードが取り付けられ、X-Yステージに固定した結合用プレートの表面に、任意の高さで粉末を堆積させることができる。照射するレーザーパワーは $P=10\sim40$ Wで変化させ、ガルバノメータミラーを介して伝送されたレーザー光が、堆積粉末表面に焦点を結ぶように調整した。なお、レーザー照射時は粉末表面の酸化を防ぐため、ユニット内部を窒素ガスで充填した。

Fig.6は、ビームプロファイラ(OPHIR製: BeamStarFX-50)を用いて、 $P=40$ Wのときにおける焦点位置のビームプロファイルを測定した結果である。ガルバノメータミラーを介して集光しているため、集光レンズを用いたビーム径より大きくなっているが、ビーム形状がTEM₀₀のガウシアン形状を呈していることがわかる。1/e²におけるビーム径は $\phi=45\mu\text{m}$ となった。

3.2 実験用粉末

使用する金属粉末は、粉末焼結型積層造形で一般的に用いられる鉄系粉末、銅系粉末、ニッケル系粉末などから構成される混合粉末であり、その平均粒径は17 μ m, 25 μ mの2種類を用いた。また、プレート表面に粉末を堆積させるとき上面からの加圧は行わず、粉末の自重のみで堆積させた状態を標準状態とした。このときのかさ密度を測定したところ、平均粒径が25 μ mのときは4290 kg/m³, 17 μ mのときは4180 kg/m³と、それぞれ真密度と比較して50%程度となった¹²⁾。

3.3 実験方法

レーザー照射時の温度測定部拡大図をFig.7に、実験条件をTable 2に示す。ステージ上に取り付けた冷間圧延鋼($t_p=3.2$

Fig.7 Enlargement of laser irradiation spot.

Table 2 Experimental conditions.

Laser power	P	10–40 W
Scanning speed	F	88–180 mm/s
Layer thickness	t	50 μm
Particle size	d	17, 25 μm

mm)に、リコーティングブレードを用いて金属粉末の厚みが $t=50\mu\text{m}$ で均一となるように堆積させ、レーザ光をライン状に走査したときの温度を測定する。測定に用いるカルコゲナイドファイバーは、走査するレーザ光がファイバーの受光エリアに対して中心を通るように設置し、受光エリア内部をレーザ光が通過するとき、加熱された粉末表面から輻射される赤外線を受光する。このとき、ファイバーは堆積した粉末表面との角度が45度で、ファイバー先端とレーザ照射位置との直線距離が4.2mmの位置に固定した。使用するファイバーの開口数は $NA=0.4$ であり、輻射赤外線の最大受光角は 23.6° となることから¹³⁾、受光エリアの幅は4.1mmとなる。したがって、レーザ照射部とファイバー先端との距離が4.2mmの場合、レーザ光がファイバー先端を通過する長さ4.1mmにおける温度変化を測定することとなる。

まず、レーザ照射条件が照射部温度に与える影響を調べるため、Table 2に示すようにレーザ光の照射パワーを変えたときの温度変化について調べた。そして、各条件で得られた結合金属をSEM(日本電子(株)製: JSM-6390LVU)で観察して比較した。また、粉末粒径が照射部温度に与える影響を調べるため、粒径の異なる粉末で同様の実験を行った。さらに、レーザビーム形状の違いによる粉末の結合特性を調べるため、焦点位置とデフォーカス量が $D_f=8\text{ mm}$ の位置でレーザ照射して、それぞれの照射部温度や結合状態を調べた。

4 実験結果および考察

4.1 温度計出力波形例

Fig.8は、レーザ光の走査速度が $F=180\text{ mm/s}$ のときにおける各検出素子からの出力波形および、各素子における時間毎の出力から比を求めて温度に換算した結果である。ファイ

Fig.8 Recorded output waves of pyrometer.

バー先端を通過するレーザ光の速度 180 mm/s とファイバーの受光エリアの幅4.1mmとの関係から、受光エリア内をレーザ光が通過する時間は 22.8 ms となる。

Fig.8に示すように、両素子からの出力はいずれもレーザ光がファイバーの受光エリアに進入した直後から確認でき、それから11.5ms後に出力が最大となり、その後急速に出力が低下している。受光エリア内部のレーザ走査時間との関係から、走査レーザ光が受光エリアの中心付近に到達したとき、各素子からの出力が最大となることがわかる。このとき、Geフィルターを用いて $1.6\mu\text{m}$ 以下の波長を遮光しているため、走査したレーザ光の反射成分は検出されていない。

温度に換算した結果においても、各素子からの出力が最大となるまで次第に温度が上昇し、中心を通過した直後から急速に減少している。この波形例の場合、レーザ光が中心付近に到達したとき約 1600°C であるが、わずか20ms経過すると 400°C 近くまで減少している。これは、実験に用いる粉末の熱容量が小さく、レーザ光の走査直後から急速に温度が低下したためと考えられる。得られた結果から、レーザ光照射に対して本温度計を用いて十分測定できることがわかる。本実験では、温度計の各素子の出力においてその最大値の比を取り、温度に換算して評価することとする。

4.2 レーザ照射条件と照射部温度との関係

Fig.9は、レーザ光の走査速度が $F=88\text{ mm/s}$ 、粉末粒径が $d=25, 17\mu\text{m}$ のときにおけるレーザパワーと照射部温度との関係を示している。いずれもサンドブラスト処理した冷間圧延鋼上に堆積した粉末にレーザ照射実験を行った結果である。図に示すように、いずれの粒径においてもレーザパワーが大きくなるにつれて照射部温度が高くなっている。粉末粒径が $d=17\mu\text{m}$ の場合、レーザパワーが $P=10\text{ W}$ のとき約 1500°C で

Fig.9 Influence of particle size on temperature.

あった照射部温度は、 $P=40\text{ W}$ になると約 2000°C まで上昇している。これは、粉末に投入される単位面積あたりのエネルギー量に依存していると考えられ、レーザーパワーが大きくなるにつれて投入エネルギーが増加したためである。一方、粒径の違いについて比較すると、粒径が $d=25\mu\text{m}$ の照射部温度が $d=17\mu\text{m}$ の場合より低く、レーザーパワーが $P=40\text{ W}$ のとき約 100°C の違いがある。これは、粉末の熱伝導率や熱容量の違いによるものと考えられる。これまでの研究で、粉末粒径が小さくなるにつれて熱伝導率や熱容量が小さくなることがわかっており¹²⁾、粒径が小さい方がレーザー照射で生じた熱が拡散されにくく、照射部温度が上昇したためと考えられる。

Fig.10は、Fig.9で得られた結合物をSEM観察した結果である。いずれも、レーザー光を図中に示す方向に $F=88\text{ mm/s}$ で走査し、サンドブラスト処理したプレート上に結合したときの結果である。粉末粒径が $d=17\mu\text{m}$ のとき、レーザーパワーが $P=10\text{ W}$ では結合物がボール状となってプレート表面に接合しているのに対して、 $P=20\text{ W}$ を超えると結合物がライン状に連なっている様子がわかる。一方、粉末粒径が $d=25\mu\text{m}$ のとき、レーザーパワーが $P=20\text{ W}$ までは結合物がボール状となっているが、 $P=30\text{ W}$ を超えるとライン状に連なっている。

このように結合の様子が異なるのは、レーザー照射に起因した粉末およびプレート表面の熔融状態の違いが生じたためと考えられる。プレートに粉末を熔融・結合するとき、レーザー照射による熱でプレート表面も熔融され、凝固の過程でそれらが合金化されながら接合する機序となる。Fig.9で示したように、照射部温度は粉末の熱伝導率や熱容量の違いに起因して、粉末粒径が小さい方が高くなった。すなわち、粉末粒径が $d=17\mu\text{m}$ の方が、低いレーザーパワーでライン状の構造物を得る十分なエネルギー供給がなされたといえる。一方、粉末粒径が $d=25\mu\text{m}$ の場合には、レーザーパワーが $P=20\text{ W}$ の条件では十分に加熱・熔融されず、ライン状の結合物を得るには、より多くのレーザーパワーが必要になったものと考えられる。

これらの結果より、レーザー照射時の粉末表面の温度によって、粉末の熔融・結合形態に違いが見られることが明らかとなった。粉末の主成分である鉄系材料の融点は 1490°C である¹¹⁾。したがって、レーザー照射部が融点近傍の温度に到達すると粉

 Fig.10 SEM images of the consolidation metal.
(a) $d=17\mu\text{m}$, (b) $d=25\mu\text{m}$

末の熔融がはじまり、このとき熔融物はプレート上にボール状で結合する状態となる。そして、さらに加熱されると熔融物は次第にライン状に結合する状態となることから、この範囲において熔融粉末をライン状に結合させるための最適な温度が存在することとなる。本実験の範囲において、レーザー照射による投入エネルギーが不十分で結合物がボール状となったのは、いずれも照射部温度が 1700°C 以下であることから、照射部温度を 1700°C 以上にすることによって熔融粉末をライン状に結合できることとなる。また、熔融粉末の結合状態と照射部温度に相関が認められることから、照射部温度を監視することによって各粉末の結合状態を把握できる可能性があるといえる。

4.3 レーザービーム形状が結合特性に与える影響

4.3.1 エネルギー分布

Fig.11は、焦点位置とデフォーカスが $D_f=8\text{ mm}$ のときのビームプロファイルと比較した結果、Fig.12は焦点位置におけるピーク出力を1とし、ピーク出力とレーザー光のスポット径との関係を示した結果である。Fig.11に示すように、レーザー光はともにガウシアン形状を呈している。また、デフォーカスが $D_f=8\text{ mm}$ のときビーム径は $\phi=278\mu\text{m}$ となり、焦点位置におけるスポット径と比較して約6倍大きくなった。一方、レーザー光のピーク出力は、Fig.12に見るようにスポット径が大きくなるにつれて急激に小さくなり、デフォーカスが $D_f=8\text{ mm}$ のときにおけるピーク出力は、焦点位置のそれと比較して約 $1/12$ となった。

Fig.11 Profile of irradiated laser beam.
(a) Focus ($\phi=45\mu\text{m}$), (b) Defocus ($\phi=278\mu\text{m}$)

Fig.12 Relation between diameter of laser beam and peak power.

4.3.2 照射部温度

Fig.13は、粉末粒径が $d=25\mu\text{m}$ のとき、ビーム形状の違いによる照射部温度を測定した結果である。比較のため、サンドブラスト処理した冷間圧延鋼表面にレーザ照射したときに得られた測定結果も併せて示す。図からわかるように、各条件においてレーザパワーが大きくなるにつれて照射部温度は高くなっている。粉末上にデフォーカスでレーザ照射した場合、 $P=10\text{ W}$ のとき約 1500°C であった照射部温度は、 $P=40\text{ W}$ になると 1850°C まで上昇している。また、スポット径の違いによる温度を比較すると、デフォーカス位置における照射部温度が全体的に低く、レーザパワーが $P=40\text{ W}$ のとき約 50°C の違いが見られる。一方、プレート上にレーザ照射したときの温度は、粉末上の温度と比較して全体的に低くなっている。また、ビーム形状の違いによる温度差が大きく、デフォーカスで照射したとき最大で 200°C 低くなった。

4.3.3 デフォーカスの影響

Fig.14は、レーザパワーが $P=40\text{ W}$ のとき、各条件で得られた結合物をSEM観察した結果である。図に見るように、焦点位置では結合物がライン状に凝固しているのに対して、デフォーカス位置では結合物がボール状に点在している。このときの照射部温度は、Fig.13で示したように焦点位置で 1900°C 、デフォーカス位置で 1850°C である。すなわち、焦点位置におけるレーザ照射ではライン状に結合した温度域でもボール状に結合していることとなる。このような結合状態の違いは、レーザ照射による投入エネルギーと粉末の溶融領域に

Fig.13 Influence of diameter of laser beam on temperature.

Fig.14 SEM image of the consolidation metal ($P=40\text{ W}$).
(a) $D_f=0\text{ mm}$ (focus), (b) $D_f=8\text{ mm}$

よって生じると考えられる。デフォーカスでレーザ照射することで粉末の溶融領域が大きくなり、より多くの溶融粉末が凝集・結合したため、照射部温度が高温になっても結合物がボール状に点在したものと考えられる。また、プレート上にレーザ照射したときの温度はスポット径の違いによって大きく異なっているが、粉末上にレーザ照射したときの温度はスポット径の違いほど変化が無く、スポット径が照射部温度に与える影響は小さいといえる。これは、レーザ光をデフォーカスで照射するとエネルギー密度が低くなるのに対して、照射するレーザ光がガウシアン形状を呈しており、また、粉末の熱伝導率が小さいため、レーザ照射部中心付近の温度が上昇したためと考えられる。

4.3.4 レーザパワーの影響

レーザパワーによる違いを比較すると、焦点位置におけるレーザ照射では、全条件においてプレート表面に溶融物が接合していたのに対して、デフォーカス位置によるレーザ照射では、 $P=20\text{ W}$ 以下のとき、溶融物がプレート上に接合しなかった。このようなレーザスポット径の違いによる接合状態の変化は、レーザ光のピーク出力に大きく寄与していると考えられる。レーザ光をデフォーカスで照射することでピーク出力が小さくなり、バルク材であるプレートの熱伝導率が粉末と比較して大きいため、プレート表面の温度が十分に上がらず溶融物が接合されなかったためと考えられる。

これらの結果から、レーザ光のスポット径が照射部温度に与える影響は小さいが、溶融物の結合状態はスポット径に

よって大きく異なることがわかった。したがって、スポット径を変化させて溶融粉末を同様の状態で結合させるためには、レーザパワーやレーザスポット径などの条件選定を慎重に行う必要があるといえる。このとき、レーザ照射部の温度とともにレーザ光のビーム形状に注目することによって、溶融粉末の結合状態を把握できると考えられる。

5 結 言

本研究では、金属粉末を高精度にレーザ結合しながら金型構造物を造形するRT技術を確立するための基礎的研究として、Ybファイバーレーザを用いて金属粉末をレーザ結合するときの表面温度について、ファイバー導光型赤外線輻射温度計で測定する手法を提案するとともに、同手法を用いてレーザ照射条件と金属粉末の結合特性との関係について調べた。以下に、得られた結果を要約する。

- (1) 金属粉末表面にレーザ光を走査させると、レーザ光が近づくにつれて急激に温度が上昇し照射部中心付近が最高温度となる。また、レーザ光が通過して20ms経過すると、照射部温度が400℃以下に低下する。
- (2) レーザ照射によって得られた結合物は、レーザパワーや粉末粒径の違いによってプレート表面に対する結合状態が異なる。レーザ光の照射部温度が1700℃を超えると結合物がライン状に接合され、それ以下では結合物がボール状に点在する。
- (3) レーザスポット径の違いによる照射部温度の変化は小さく、プレートに対する溶融物の結合はレーザ光のピーク出力に大きく影響を受ける。
- (4) 粉末の結合状態とレーザ照射部温度に相関が認められ、レーザ照射部の温度を監視することで、粉末の結合状態が把握できる可能性がある。

謝 辞

本研究は、地域新生コンソーシアム研究開発事業「金属光造形と成形技術の高度化による企業連携グリッドモデル構築」(H18-19)で得られた成果である。

文 献

- 1) K. Hitomi: "Introduction to Manufacturing Systems Engineering, Second Edition", Kyoritsu Shuppan Co., Ltd., (2000)201.
- 2) T. Nakagawa and Y. Marutani: "Sekisou Zoukei System", Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd., (1996)4.
- 3) Y. Marutani, et al.: "Sekisou Zoukei Gijutu Siryosyu", The OPTRONICS Co., Ltd., (2002)11.
- 4) K. Maekawa: "Rapid Prototyping Using Laminated Manufacturing with Laser Sintering", J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 70(2004)167-170.
- 5) M. Imamura: "Recent Trend about the Metal Rapid Prototyping Using Powder", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 48(2001)415-421.
- 6) S. Abe, Y. Higashi, et al.: "Development of milling-combined laser metal sintering method", J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 73(2007)912-916.
- 7) T. Furumoto, T. Ueda, et al.: "Study on the Sintering Characteristics of the Metal Powder for Rapid Tooling with Yb fiber laser", Jpn. Soc. Prec. Eng. Autumn Meeting, (2007)495-496.
- 8) A. Hosokawa, et al.: "Temperature of Tool Frank in Intermittent Cutting (1st report)", J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 66(2000)1786-1791.
- 9) M. Sato, T. Ueda, et al.: "Measurement of Tool Face Temperature in Orthogonal Diamond Cutting", J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 64(1998)892-896.
- 10) S. Iida and K. Ohno: "Butsuri Teisuuhyo", Asakura Publishing Co., Ltd., (1969)199.
- 11) "Dennetsu Kougaku Siryou, the 3rd edition", Jpn. Soc. Mech. Eng., (1975)296.
- 12) T. Furumoto, Takashi Ueda, et al.: "Study on the Measurement of Physical Property in the Metal Powder for Rapid Prototyping", J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 73(2007)558-562.
- 13) Y. Suematsu, et al.: "Hikari Fiber Tsuushin Nyumon", Ohmsha, Ltd., (1989)20.