



K. Manabe

レーザーを用いた金属細管のフレキシブルな ダイレス引抜き加工システムの開発

真鍋 健一*

1. まえがき

金属マイクロチューブの製造法¹⁾としては、物理・化学的方法による電気鋳造法やスパッタリング法と、塑性加工法による引抜き法、曲げ加工法、スピニング法がある。後者のなかで生産性を目指す場合には、引抜き法が有利である。

ところで、これまで金属管の引抜き加工は、ダイスやプラグ、マンドレルなどの金型・工具を用いたダイス引抜き加工が主流である。それをマイクロチューブへ本加工法を適用する場合、高精度なマイクロ工具の製作や、プラグやマンドレルを微細なチューブの中に通すなどの作業は極めて困難となり、解決すべき課題が山積している。このように、従来のダイス引抜き加工法をマイクロサイズへスケールダウンすることは難しい。したがって、ダイスやプラグ、マンドレルなどの工具を必要とせずにマイクロチューブを創製する新しいダイレス引抜き技術を開発する必要があると考えられる。

ダイレス引抜き加工法は、1969年にWeissら²⁾により超塑性材料に適用したのが始まりであり、種々の丸棒や角棒の金属材料に対して行われている。我が国では1973年以降に関口・小島らが種々の金属材料に対して棒材から管材も含めて適用できることを明らかにした^{3)~6)}。ここでは管材は直径8mmのステンレス鋼管および炭素鋼管を用いて、ダイレス引抜きが管材にも適用できることを実験的に明らかにしている⁴⁾。

この年代では加熱装置は高周波誘導加熱方式が主流であった。この方式では装置出力、周波数、素材特性（比透磁率、抵抗率）、加熱コイル寸法などの制約から、ダイレス引抜きに適用できる最小素材寸法にはおのずから限界があり、それは素材ごとに異なる。

近年、マイクロ/ナノテクノロジーの進展により、その代表的な微小電気機械システム（Micro Electro Mechanical Systems, MEMS）などが注目され、半導体製造技術やレーザー加工技術等、各種の微細加工技術を応用し、微小な電気要素と機械要素を一つの基板上に組み込んだ医療機器やセンサ、アクチュエータ等のデバイス/システムが発展している。この分野においては製品機器の一層の小型化が要求されている。最近の動きとしては適用素材として金属材料の優れた力学的特性、機能特性が見直され、金属材料を用いた大量生産に適したマイクロフォーミングが注目を浴びようになっている。この

マイクロフォーミングは多くの製品で構成している小さな金属微細部品を生産するのに今後重要となる塑性加工技術である。なかでも金属マイクロチューブはその中でも注目されている部品の一つであり、マイクロノズル、無痛注射針、マイクロリアクターなどのマイクロ部品に用いられている。

このような背景から、既報^{7)~9)}においてマイクロチューブを作るため、高周波誘導加熱装置を用いたダイレス引抜き加工法に着手し、実験ならびに有限要素シミュレーションの両面から詳細な変形挙動の調査解明を行った。その結果、Zn-22Al超塑性材料を用いて外径200 μm のマイクロチューブのダイレス引抜きに成功した。近年ではSUS304を用いて外径290 μm のマイクロチューブの創製に成功している¹⁰⁾。

しかし、そのダイレス引抜き実験の加熱源は誘導加熱コイルを使用しており、マイクロスケール用の小型で微細な誘導加熱コイルを作製するには困難さが伴い、また個々の要求されるマイクロチューブにあった加熱コイルの設計と製造が必要となり製造プロセスの柔軟性が乏しいこと、が実用化を妨げていた。さらにこれらの問題点が金属マイクロチューブのさらなる縮小化を妨げていた。

そこで注目されるのが加熱源としてのレーザーであり、そのレーザー加熱は加熱領域としても高周波誘導加熱よりも素材を選ぶことなくさらに局所化が可能であり、光学系の制御により適材適所の柔軟な加熱が期待できる。

以上の背景から、本研究では、ダイレス引抜き加工での加熱法として、誘導加熱コイルを用いずに、局所加熱可能なレーザー加熱に着目し、新たに半導体レーザー加熱装置を用いたレーザーダイレス引抜き加工機を設計試作した。本報告では、それを用いて外径0.5mmのSUS304ステンレス鋼管のダイレス引抜きを行い、引抜き限界や変形特性に及ぼすレーザー出力および引抜き速度の影響を実験的に調査し、1方向からのレーザー照射においてもマイクロチューブのダイレス引抜き加工の有効性を実験的に明らかにした。

2. レーザーダイレス引抜き加工機の開発

図1に加熱源であるレーザー光を固定する連続型のダイレス引抜きの概要図を、図2に開発した連続型のレーザー加熱方式ダイレス引抜き装置の外観を示す。局所加熱用の使用したレーザー加熱装置として最大出力が35Wの連続発振方式の半導体レーザーを用いた。その照射スポットは長径2a、短径2bからなる楕円形であり、

* 首都大学東京大学院理工学研究科 教授

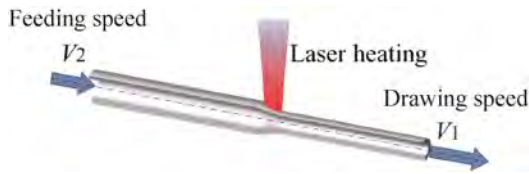


図1 レーザーダイレス引抜き原理

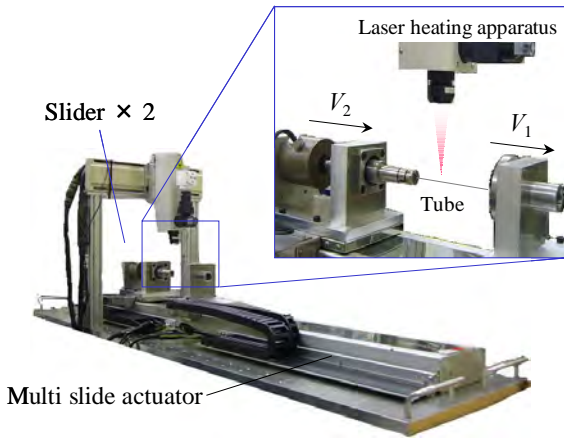


図2 開発したレーザーダイレス引抜き装置

レンズにより，照射スポットは $2a=0.8\text{mm}$ ， $2b=0.4\text{mm}$ となっている．また金属チューブの供給・引抜き装置がダイレス引抜きには必要不可欠であるため，同軸上に二つのスライダを有するマルチスライドアクチュエータを利用し，供給速度，引抜き速度は独立して制御できる方式とした．

3. 実験および方法

本研究では，開発したレーザーダイレス引抜き装置の性能確認とレーザーによるダイレス引抜きの可能性と有効性を検証するため実験を行った．供試材としては外径 $D=0.52\text{mm}$ ，肉厚 $t=0.1\text{mm}$ の SUS304 ステンレスチューブを用いた．

連続型ダイレス引抜きでの断面減少率 R は次式に示すよう引抜き速度 V_1 に対する供給速度 V_2 の比により決定される．

$$R=1-V_2/V_1 \quad (1)$$

レーザー照射は1方向からの単純な照射の場合におけるレーザーダイレス引抜きの基本的な特性を調査し，また，レーザーダイレス引抜きにおける変形特性に及ぼす断面減少率，供給速度，レーザー出力の影響を調査した．具体的には今回の実験では，供給速度 $V_2=0.5, 5, 10\text{mm/s}$ の3条件に対して，式(1)に従い断面減少率 $R=10, 20, 30, 40, 50\%$ ，レーザー出力を $0\sim 10\text{W}$ の範囲で検討した．

4. 実験結果及び考察

4.1 レーザー出力と温度の関係

レーザーダイレス引抜き加工におけるマイクロチュー

ブの変形特性は，加熱温度により変化する変形抵抗に関係している．また，加熱温度はレーザー出力や引抜き速度に依存するため，レーザー出力と引抜き速度によりチューブ表面の温度分布が変化する．マイクロチューブ表面の上部と底部の加熱温度は実験前にサーモグラフィを用いて測定を行った．供給速度 $V_2=0.5, 5, 10\text{mm/s}$ ，断面減少率 $R=0\%$ として実験を行い，チューブ表面の上部と底部（下部）の温度を比較を行った．図3にチューブ表面の上部と底部の最大温度を示す．加熱領域でのチューブの加熱温度はレーザー出力に比例しており，供給速度を速くして高速で供給する場合には，レーザー出力を上げても加熱温度は高くなりにくく，一方向加熱であるため，どうしても上部と底部の温度差は大きくなることわかる．つまり，均一に加熱するためには供給速度はできるだけ遅くすることが大切であることがわかる．もしレーザー出力を高くして加熱温度を上げるには，供給速度を速くした場合には上部と底部の温度差は避けられない．特に，供給速度 $V_2=10\text{mm/s}$ で 1000 度近く加熱する場合には，チューブの上部・底部の温度差は 400°C 近くあることを認識しておく必要がある．

図4に一定供給速度 V_2 におけるレーザー照射時のチュ

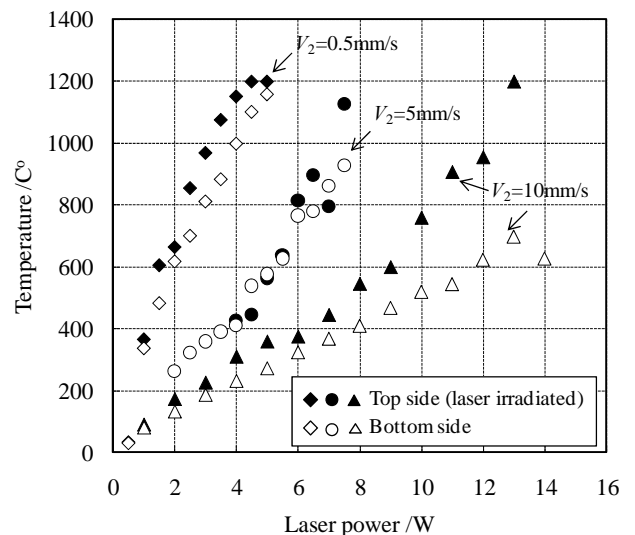


図3 チューブ表面温度とレーザー出力との関係に及ぼす供給速度 V_2 の影響

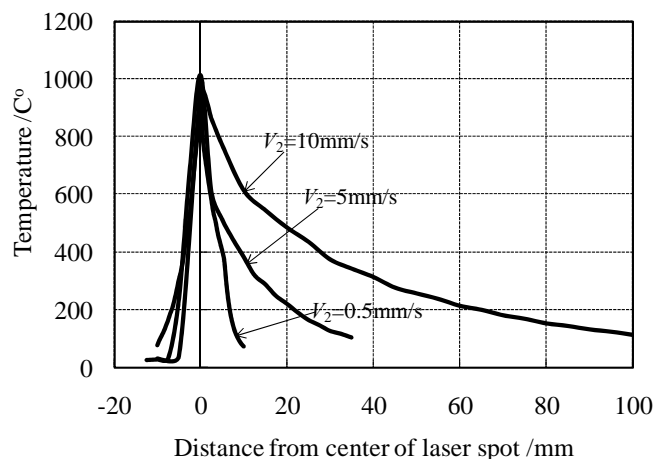


図4 レーザー照射時のチューブ上部での軸方向温度分布に及ぼすチューブ供給速度 V_2 の影響

ープ上部の温度分布を示す。供給速度 V_2 の増加に伴い、加熱領域が拡大している。一般的に、ダイレス引抜き加工においては局所加熱が有効である。したがって、供給速度 $V_2=0.5, 5\text{mm/s}$ と設定しレーザーダイレス引抜き実験を行った。

4.2 断面の変形特性

従来のダイレス引抜き加工における理論的断面減少率は、速度比 V_2/V_1 を用いて式(1)により表される。1方向レーザー照射ダイレス引抜き時の断面における変形特性を調査した。引抜き後の断面積はマイクロ스코プを用いて計測し算出した。

図5にはレーザーダイレス引抜きにおける断面減少率の実験値と理論値の関係を示す。図より、実験値の断面減少率は理論値のそれと良く一致していることが確認できる。これより、引抜き後の断面減少率は、1方向レーザー照射での引抜きにおいても温度分布は周方向に多少の温度分布の乱れがあるものの、式(1)を用いて十分に予測することが可能であるといえる。

4.3 引抜き限界

図6はチューブ供給速度 $V_2=0.5\text{mm/s}$ の条件でレーザーダイレス引抜きを行ったあとの縮管したチューブの外観である。断面減少率 R が大きいほど引抜き後の外径が減少していることが確認できる。

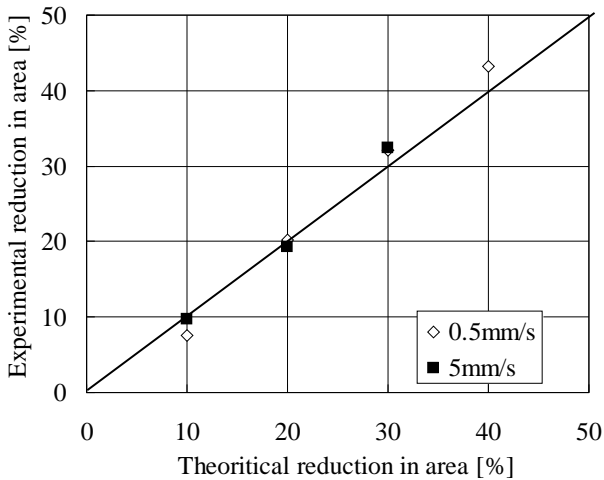


図5 レーザーダイレス引抜き時の実験値と理論値の断面減少率の比較

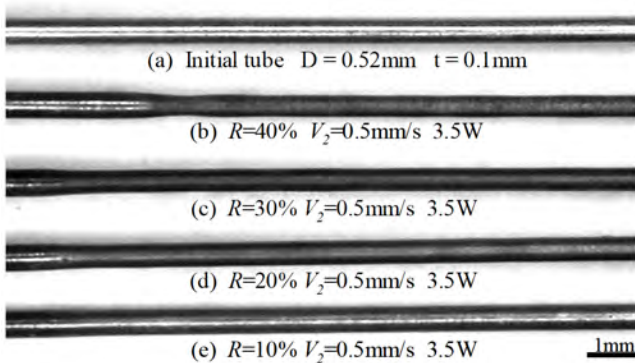


図6 レーザーダイレス引抜き後のチューブの外観 ($V_2=0.5\text{mm/s}$)

図7にレーザーダイレス引抜き加工におけるレーザー出力と引抜き速度 V_1 にプロセスウインドウを示す。ダイレス引抜きが成功する成功領域と破断領域に分けられる。

この成功領域はレーザー出力および引抜き速度 V_1 の影響を受ける。ダイレス引抜きには適切なレーザー出力が必要であり、レーザー出力を大きくすれば成功領域が得られ、出力の増加に伴い大きな加工度まで一度に加工できるようになる。その後、断面減少率の最大値に達したあとは逆に出力とともに減少するようになる。また、引抜き速度 V_1 が遅い場合にはレーザー出力を小さくすれば高い断面減少率まで一度に加工することができる。引抜き速度を高速にすれば必要なレーザー出力も大きくなることがわかる。しかし、その時は大きな断面減少率まで一度に引抜くことは難しい。

4.4 断面形状の幾何学的相似則

既報において⁶⁷⁾、高周波誘導加熱によるダイレス引抜きにおいて、加工前後における断面形状は幾何学的相似則を満たしており、つまり、それは変形前後において外径に対する内径の比、内径/外径比が一定であること示した。そこで、この幾何学的相似則について、1方向レーザー照射の場合にも成り立つかどうかについて検討を行った。

図8に引抜き後の横断面形状を示す。横断面形状は1方向レーザー加熱でありながら円形状のまま一様に縮管されていることが確認できる。そこで、ダイレス引抜き途中の断面の変形特性を調査するため、引抜き速度 V_1 を0.5と5mm/sの2条件、レーザー出力は3.5Wと7Wの2条件として、これらの引抜き加工条件から、ダイレス引抜き後の内径/外径比 d/D に及ぼす断面減少率 R と供給速度 V_2 の影響を調査した。なお、 R は式(1)より引抜き速度 V_1 を変化させることによって変えた。

図9にその結果を示す。本研究のように1方向レーザー照射の場合でもダイレス引抜き後のチューブの内径/外径比は常に断面減少率 R によらず一定値であることが確認できる。

次に、図10にレーザーダイレス引抜きにおける内径/外径比 d/D に及ぼすレーザー出力の影響を示す。この結果から、レーザー出力を変えてもダイレス引抜き後のチューブの内径/外径比は一定である。これは本実験範囲であれば加熱部が熔融する以下の温度に加熱されその変形抵抗が変化するが、そこでも内径/外径比は一定である。以上より、本実験範囲であれば図9と図10の結果から、1方向からのレーザー照射でのダイレス引抜きにおいても断面の幾何学的相似則が成り立つことがわかる。

5. まとめ

本研究では、新たにレーザーダイレス引抜き加工機を開発し、それを用いて1方向照射の場合におけるSUS304ステンレス鋼鋼管のマイクロ引抜き加工限界および引抜き変形特性に及ぼすレーザー出力や供給速度の影響を調査した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 1方向レーザー照射においてもSUS304鋼管のマイクロダイレス引抜き加工が可能であることを実証

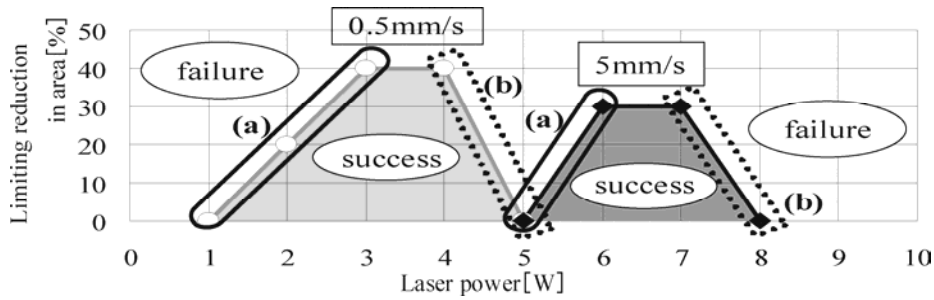


図7 レーザーダイレス引抜きにおけるプロセスウィンドウ

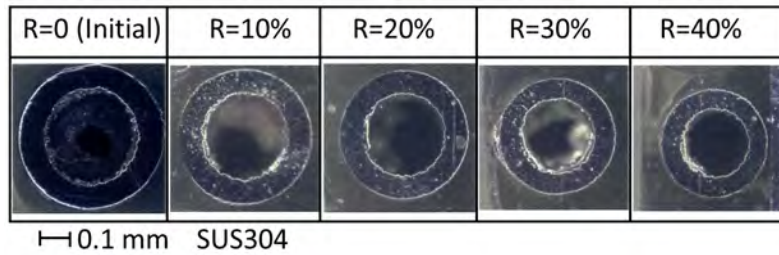


図8 引抜き後の横断面形状

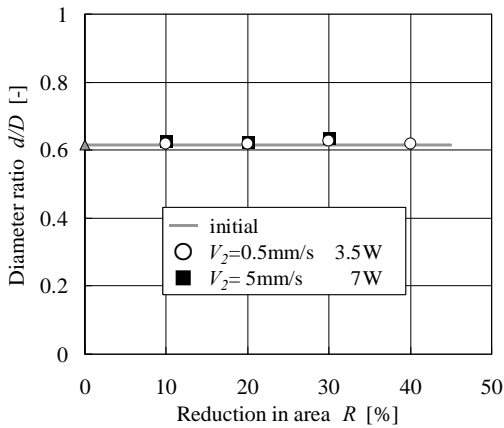


図9 内径・外径比 d/D に及ぼす断面減少率 R と引抜き速度の影響

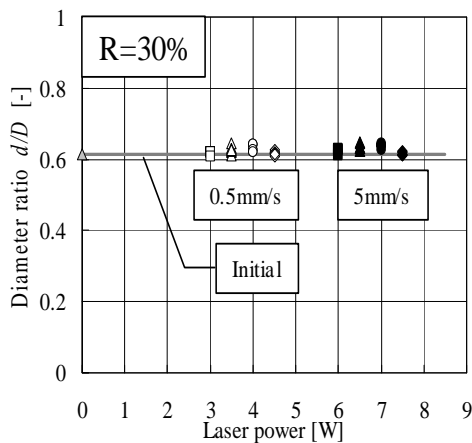


図10 内径/外径比 d/D に及ぼすレーザー出力の影響

し,40%の限界断面減少率を再現できた。

- 2) 引抜き限界は引抜き速度 V_1 とレーザー出力の影響を受け、適正なレーザー出力と引抜き速度が存在することが実験的に確認された。

- 3) 1方向照射レーザーダイレス引抜き加工においても、断面形状の幾何学的相似則は成立する。これは供試管が0.5mmのマイクロチューブであるため、1方向照射でも直ちに周方向に熱伝導して著しい温度分布が生じないためである。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団(当時 財団法人天田金属加工機械技術振興財団)の一般研究開発助成(平成20年度研究開発助成 AF-2008005)によって行われたものであり、同財団に対し深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 古島剛・真鍋健一：塑性と加工，50-586 (2009), 981-985.
- 2) Weiss, D. & Kot, R.A.: Wire J., 9(1969),182-189.
- 3) 関口秀夫・小島耕二・小坂田宏造：24回塑性加工連合講演会講演論文集，(1973),317.
- 4) 関口秀夫・小島耕二・小坂田宏造：塑性と加工，17-180(1976),67-71.
- 5) 小島耕二・関口秀夫・小坂田宏造・吉川勝幸：塑性と加工，20-224(1979),814-819.
- 6) 小島耕二・関口秀夫・小坂田宏造・吉川勝幸：塑性と加工，21-228(1980),52-58.
- 7) T. Furushima, K. Manabe: J. Mater. Process. Technol., Vol. 187-188 (2007), 236-240.
- 8) T. Furushima, K. Manabe: J. Mater. Process. Technol., Vol. 191 (2007), 59-63.
- 9) T. Furushima, K. Manabe: J. Mater. Process. Technol., Vol. 201 (2008), 123-127.
- 10) 古島剛・古澤周作・對馬 圭・今川 裕介・真鍋健一：日本機械学会関東支部第19期総会講演会 (2013)