高精度三次元レーザ切断加工システムの開発（第３報）

丸山　英彰*　　長谷川 雅人*　　斉藤　博*　　三村　和弘*　　田村　信*

Development of Precision 3-D Laser Cutting System

MARUYAMA Hideaki*, HASEGAWA Masato*, SAITO Hiroshi*, MIMURA Kazuhiro* and TAMURA Makoto*

抄　　録

高精度三次元レーザ切断加工システムを実用化するため、切断線補正データ作成システムの開発を行った。一方、制御システムの変更及び加工機の改造を行い、加工機の運動精度と切断精度の関連を調べると共に切断円間ピッチの収縮量を調べ、切断速度と材質による違いを明らかにした。またワーク固定治具を石膏の注型により迅速に作る方法を開発した。さらに、レーザ変位計を用いた加工機上でのワーク形状計測システムを開発した。これらの開発により、高精度三次元レーザ加工システムの実用化に目途がついた。

１．緒言

本研究は平成１２年度より、精密プレス成形品のトリミングを、従来のプレス切断からレーザ切断に置き換えるシステムを開発することを目的に実施してきた。昨年度までは主に高精度三次元レーザ加工機の開発を行った。今年度は実用化に近づけるため以下の項目について開発、改造、試験を行った。

１）切断線補正データ作成システムの開発
２）制御システムの変更及び加工機の改造
３）加工機の運動精度と加工精度の測定
４）切断円間ピッチ精度の測定
５）ワーク固定方法の開発
６）機上計測方法の開発

以下項目毎に詳細を記す。

２．切断線補正データ作成システム

プレス製品はスプリングバックや金型クリアランス等により、必ずしも設計どおりにはできていない。従って高精度三次元レーザ切断加工は単に設計面の上に描かれた切断線に正確に沿ってレーザ加工するだけでは実現できない。設計面と実際の製品面にはズレやギャップがあるからである。そこで、実際の成形品の形状に合わせて精度良くレーザ切断するため、切断線補正データ作成システムを開発した。

詳細は研究報告書第４報に掲載。

３．制御システム及び加工機

昨年度までに開発した制御システムでは切断線補正データ作成システムにうまく対応できないため、制御システムをファナック（株）のＮＣ及びモーターを使った制御方式に変更した。それに伴い、加工機回転アームのＣ軸とα軸のオフセット角もファナックＮＣが対応できる４５°に改造した。また、発振器に標準で装備されているシャッターでは反応が遅すぎて切断加工には不向きなため、ガルバノミラーを用いた高速シャッターを新たに設けた。このシャッターは信号入力から 10 msec 以内での開閉が可能である。

図１のような一点指向方式のレーザ加工機の回転軸角度とノズル方向の関係式を示す。

ノズル方向の X,Y,Z 方向余弦を各々n1,n2,n3 とすると n1,n2,n3 は以下の式で求められる。

＊　研究開発センター

$$n1 = -\sin\theta\cos\theta\cos\alpha\cos C + \sin\theta\sin\alpha\sin C + \sin\theta\cos\theta\cos C$$

$$n2 = -\sin\theta\cos\theta\cos\alpha\sin C - \sin\theta\sin\alpha\cos C + \sin\theta\cos\theta\sin C$$

$$n3 = \sin^2\theta\cos\alpha + \cos^2\theta$$

この関係から C、αの角度を逆変換で求め、任意方向にノズルを向けることができる。

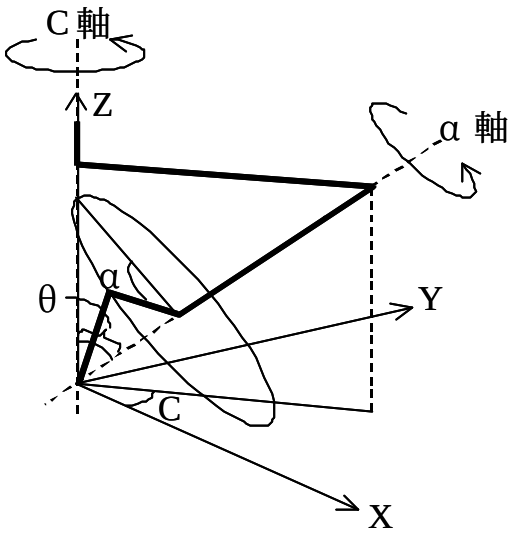


図１　一点指向方式の加工機の模式図

４．加工機の運動精度と切断精度

加工機の運動精度については前報で既に報告しているが、制御方式及び加工機回転アームの改造を行ったため、改めて運動精度を調べた。

ハイデンハイン社製ＫＧＭによりＸＹ平面上で円運動をさせたときの精度を調べると 500㎜/min で運動したとき半径0.5㎜ 以上では真円偏差が10μm以内であった。

また、ＤＢＢ試験により JIS-B-6336-6 に基づいて５軸同時運動の精度を調べたところ、トレランス 10μmの直線補間経路で運動させた場合、真球からの偏差は19μmであった。（図２参照）

以上により、加工機の運動精度は５軸制御においても目標の±10μmを達成できたと認められる。

しかし、運動精度と実際の切断精度とが一致するとは限らない。そこでその関連を調べるため、同じ直径 25㎜ の平面円運動試験、平面丸穴切断試験、球面丸穴切断試験を行った。図３に切断精度測定のための加工サンプルを示す。平面丸穴切断試験はＸＹ平面上の２軸同時運動での、球面丸穴切断試験はノズルを球面に垂直に向けながらの５軸同時運動での切断である。運動経路はトレランス１μmの直線補間で作った。切断精度の評価は切り取った切断面の真円度により行った。図４に運動精度及び切断精度の比較を示す。平面円運動時（真円度 9.0μm）に比べ、平面丸穴切断（真円度 24.3μm）では約15μm真円度が悪くなった。

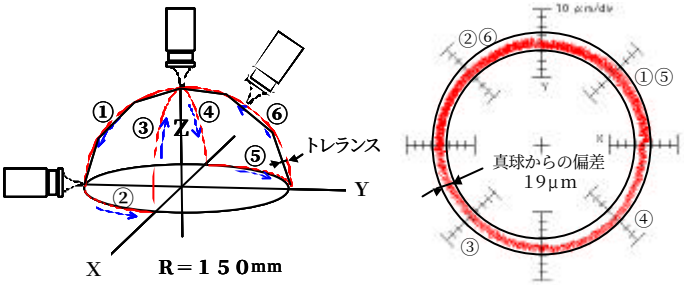
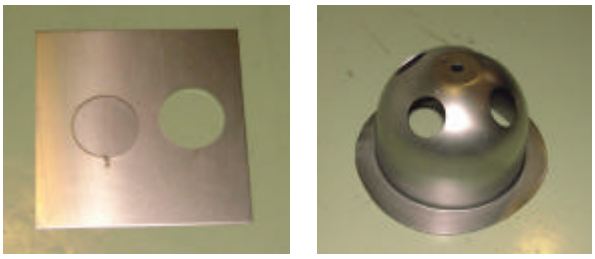


図２　５軸同時運動精度測定方法とその結果



平面の穴あけ加工サンプル　　球面の穴あけ加工サンプル

図３　切断精度測定用サンプル

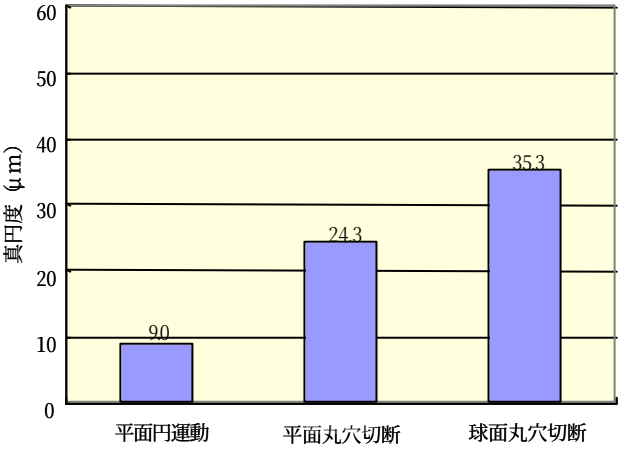


図４　運動精度と切断精度の比較（φ25㎜）

切断面の粗さや切断幅のばらつき、熱変形などがその原因と考えられる。また、球面切断での真円度は 35.3μmであった。５軸制御での運動精度（真球からの偏差 19μm）より約 16μmの精度劣化が認められるものの、目標の切断精度±50μmは十分に達成できたと判断される。

５．切断円間ピッチ精度

切断した円間ピッチ精度については機械運動精度がそのまま保てるかどうかを確認するため、図５に示すような平板に開発したレーザ加工機で丸穴をあけ、円間ピッチ精度を調べた。ピッチ精度の測定は、オリンパス光学工業㈱製測定顕微鏡 STM5-322 を用いた。加工順序は図５に示した番号順とし、１－２間をX、２－３間をYとして測定した。１から３までの３穴を加工した段階のものと、１２穴全部を加工したものを測定した。

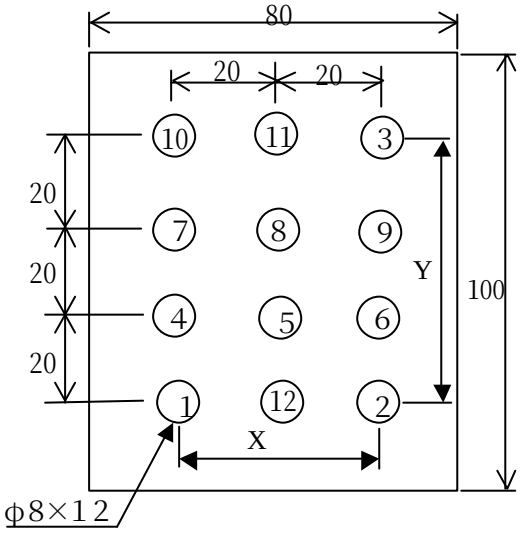


図５　切断ピッチ測定用テストピース

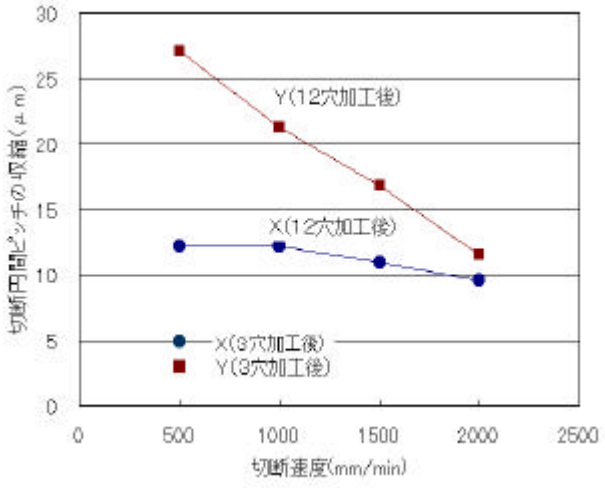


図６　Ti 板(t0.8mm)切断時の円間ピッチ誤差

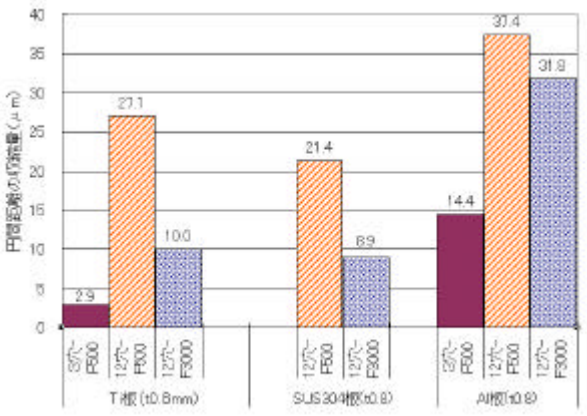


図７　各種板材切断時の円間ピッチ誤差

Ti 板を加工した例について図６に示す。この場合、レーザ光波形は全て矩形波を用いた。３穴だけを加工した時点では数μm程度しか収縮は無かったが、１２穴全てを加工してから測定すると、500mm/min ではX12μm、Y27μmの収縮があった。１，２の間に１個、２，３の間に２個の穴を加工していることが収縮を大きくしている原因と考えられる。また、加工速度を上げるに従って収縮量はX、Y共に小さくなった。

図７にTi、ステンレス、Al 合金板材を 500mm/min 及び 3000mm/min で切断加工した場合のYの収縮量を示す。いずれも加工速度が大きい方が収縮量は小さかった。材質別では Al 材が最も収縮量が大きかった。Ti やステンレスでは切断速度が遅いほど切断部の熱による変色幅が大きかったことから、レーザ切断時の収縮は切断隣接部分への熱の伝導が主な原因と考えられる。熱伝導率は Al 合金（116W/m/K）が Ti（18W/m/K）やステンレス（15W/m/K）に比べて１桁大きく、レーザ加工熱が切断隣接部分に伝わりやすいため、熱による収縮が大きくなるものと推察される。

これらのことから、ワークの切断ピッチ誤差を小さくするためには、ワーク中心付近から順番に加工を開始し外側の加工を最後に行うこと、加工速度をなるべく大きくすることが必要と考えられる。また、本開発機はCWが基本のYAGレーザ発振器を用いているが、熱の加工部周辺への伝導を防ぐという観点から、短時間に高密度エネルギーを与えることのできるパルスレーザやQスイッチレーザの可能性も検討する必要があると考えられる。

６．ワーク固定方法

高精度な切断をするためには、ワークを確実に再現性良く固定できる方法を開発することが必要である。本開発では高精度な固定治具を迅速に製作するため、石膏の流し込みによる方法を開発した。用いた石膏は、吉野石膏㈱製ハイストーンＢＬ型で、硬化時の膨張が0.02%以下の精密型取りが可能である。

図８に示すようにプレス成形品の裏面が上になるようにセットし、その上に４枚の板で囲いを作った上、油粘土を用いて石膏が漏れないように目張りをした。また、固まってから脱型しにくそうなところに油粘土で肉盛りをした。規定の比率で水に石膏を溶かし、６～７分間掻き回した後、型枠の中に流し込んだ。１～２時間で固まってから脱型し、フライス盤などを用いて切断部位にアシストガス逃げの溝加工を施した後、鋼プレートに固定した。こうして作った石膏型固定治具にワークをかぶせて良く押しつけるだけで左右 10μm、上下30μm以下の再現精度で固定できた。ワークの種類によってうまく設置できなかったり切断時に浮いてきたりしたので、主要箇所をネジ止めする必要もあった。

また石膏型は熱に弱く、レーザ光が当たる箇所は徐々に掘れたり脆くなって崩れたりするため、１個の石膏型固定治具では２０個程度のレーザ加工が限界であった。

石膏型を用いる方法は納期、コスト、精度に優れた方法であるが、５０個程度以上の数量が必要な場合には金属型を用いるのが適当と考えられる。

７．機上計測

切断線補正データを作成するためには、実ワーク形状を三次元計測する必要がある。そこでレーザ加工機上でデータ作成に必要な部分だけを効率よく測定できるシステムを開発した。

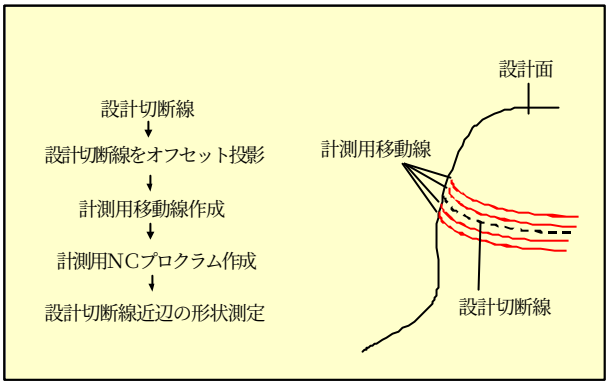


図９　計測移動線の作成と計測

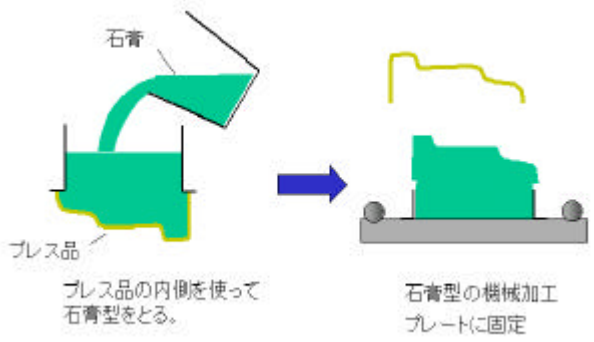


図８　石膏注型による固定治具の製作

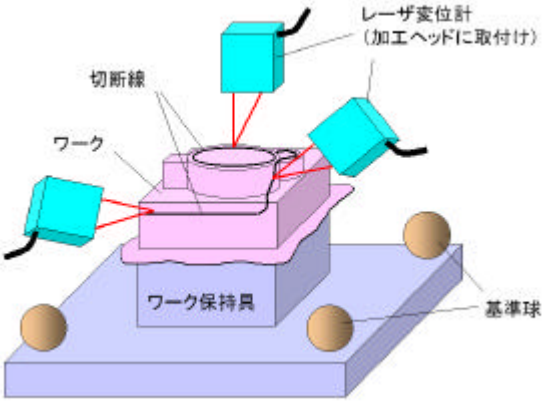


図１０　機上計測のイメージ図

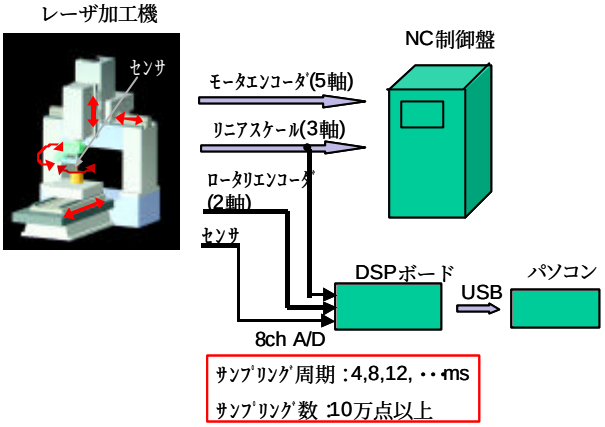


図１１　機上計測システムの概要

この計測方法はワーク全体の形状を測定しようというものではなく、設計切断線を投影するのに必要な切断線周辺だけを測定するものである。

図１２に示すように設計切断線を一定量ずつオフセットすることにより設計面上に数本の新たな線を引き、これらの線をつないで計測移動線とする。センサーを計測移動線に沿って移動させることにより、切断線周辺のワーク形状を測定することができる。設計面とプレス成形品の位置の誤差はせいぜい数 mm なのでセンサーの測定レンジは小さくすることができ、結果的に高精度な計測が可能と思われる。

今回は計測センサーとして㈱キーエンス製レーザ変位計 LK-080、LK-2100 を用いた。測定範囲は±15mm とやや大きいが、基準距離を大きく（80mm）取ってワークとの干渉を避けることを優先した。機上計測のイメージを図１０に示す。また機上計測システムの概要を図１１に示す。加工機焦点位置(X,Y,Z)情報はリニアスケールから、C, αの回転位置情報は専用のロータリーエンコーダから得て、センサーの変位情報と共にパソコンに取り入れた。

焦点位置座標を(X,Y,Z)、ワーク位置座標を(x,y,z)、ノズル方向の X,Y,Z 方向余弦を各々 n1,n2,n3、焦点位置からの変位を m とすると、x,y,z は以下の式から求めることができる。

（θ, α, C については図１参照）

$$x = X + m * n1$$
$$= X + m(- \sin\theta \cos\theta \cos\alpha \cos C + \sin\theta \sin\alpha \sin C + \sin\theta \cos\theta \cos C)$$
$$y = Y + m * n2$$
$$= Y + m(- \sin\theta \cos\theta \cos\alpha \sin C - \sin\theta \sin\alpha \cos C + \sin\theta \cos\theta \sin C)$$
$$z = Z + m * n3$$
$$= Z + m(\sin^2\theta \cos\alpha + \cos^2\theta)$$

変位センサーを使った場合、変位センサー光軸と C 軸を一致させることは困難なため、C, α軸を回転させると計測用レーザ光の狙い位置が不定となる。従って１回の測定の間は C, α の回転軸は固定しておく必要がある。また同時に３個の基準球もその角度で測定しておくことで、測定データの位置の確定が可能となる。

図１２にカメラ窓部の計測移動線を作成したものを、図１３にこの計測移動線に沿って計測し、データをポリゴン平面に変換したものを示す。

これらにより、機上計測の可能性が実証された。

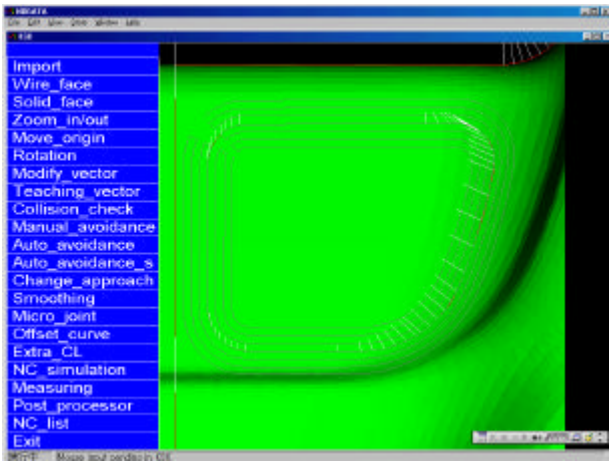


図１２　計測移動線の作成（カメラ窓部）

図１３　計測移動線に沿った計測結果(ﾎﾟﾘｺﾞﾝ)

当センターでは加工用レーザと同軸に照射されるガイド光を使って同軸計測することについても検討中である。これが実現すると回転軸を動かしながらの連続計測が可能となるため、常に計測光を設計面に垂直に当てながら計測することができ、測定精度がさらに向上すると共に計測時間の短縮にも寄与ものと期待される。

８．結言

(1) 切断線補正データ作成システムにより、実際の成形品に合わせた切断線を作成し、精度良く切断できるようになった。
(2) 開発した加工機は、５軸制御運動時においても±10μm以内という精度目標を達成することができた。
(3) 丸穴切断試験の結果、５軸同時運動での切断においても±50μmという切断精度目標は余裕を持って達成することができた。
(4) 切断円間ピッチの狂いは切断速度が遅いほど大きくなることがわかった。パルス発振レーザ等が有効な解決手段と思われる
(5) 石膏の流し込み成形により、高精度な固定冶具を短時間に作ることができたが、耐久性に問題があることがわかった。
(6) レーザ変位計を用いて加工機上で切断線周辺のワーク形状を計測する方法を開発した。
(7) これらの成果をふまえ、明らかになった問題点を解決することにより実用化が達成されるものと思われる。

参考文献

１）吉野、吉田、平石、板垣、佐々木、野村：「３次元レーザー加工機の高精度、短時間加工」新潟県工業技術総合研究所　工業技術研究報告書、NO.28、p.31(1999)
２）吉野、長谷川、斉藤：「高精度三次元レーザ切断加工システムの開発（第１報）」新潟県工業技術総合研究所　工業技術研究報告書、NO.30、p.16(2001)
３）丸山、長谷川、斉藤、三村、田村：「高精度三次元レーザ切断加工システムの開発（第２報）」新潟県工業技術総合研究所　工業技術研究報告書、NO.31、p.9(2002)