高精度三次元レーザ切断加工システムの開発（第４報）

（高精度三次元レーザ切断加工システムの切断精度）

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を開発した。当補正システムに具備する修正切断線作成機能、三次元座標変換機能、自動干渉回避機能、三次元オフセット機能、ピアスライン作成機能、ＮＣデータ作成機能、等の機能を使うことにより、複雑なプレス成形品の実形状に合わせた切断プログラムを作成できた。この切断プログラムを用いて、本研究で開発した高精度三次元レーザ加工機により切断試験を行い、切断精度を測定した結果、既存のレーザ加工機に比べて大幅に加工精度が良いことがわかったが、主に外周部で熱変形が原因と思われる精度不良が見られた。

1.　緒言

従来、多くの金型を必要とするプレス成形品に対するトリミング加工を、短納期、多品種小ロット生産に適した、金型を必要としないレーザ切断加工に置き換えることを目的として、高精度三次元レーザ加工切断システムの開発を行っている。今回、高精度切断を実現するソフト面の方策として、切断線補正データ作成システムを開発した。本システムはレーザ加工機のオフラインティーチングシステム（ＣＡＭ）で、プレス成形品の実形状に合わせた切断ができる点に大きな特徴がある。

本報では切断線補正データ作成システムの開発概要と、高精度３次元レーザ切断加工システムを用いたプレス成形品の切断精度について報告する。

2.　切断線補正データ作成システム

2.1　概要

切断線補正データ作成システム（以下、補正システム）は高精度を目的とした三次元レーザ加工機用のオフラインティーチングシステムである。

プレス成形品はスプリングバックや金型クリアランス等の影響で設計形状とは異なっている。そのため設計切断線からＮＣプログラムを作成する従来のオフラインティーチングシステムでは、ワークと加工ノズルの干渉が生じたり、狙い位置のズレにより加工精度の劣化が起こるなどの問題があった。

補正システムでは設計形状と実際のワーク形状の位置合わせの後、設計切断線を実際のワーク形状に投影することにより修正切断線を作成し、この修正切断線によってＮＣプログラムを作成するため、ワーク形状に合った高精度な切断を行うことができる。

また、自動干渉回避や三次元オフセット機能を開発すると共にオフラインティーチングでは必須のピアスライン付与機能なども備えた。

補正システムの概要を図１に示す。

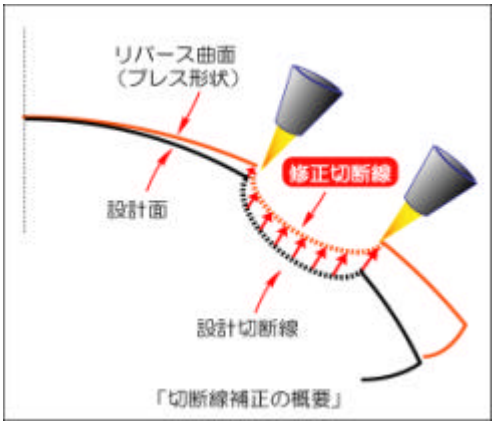


図１　切断線補正の概要

＊研究開発センター

2.2　データ入力形式

設計曲面、設計切断線はIGESのサブセットJAMA－IS形式とした。この形式は使用する要素を三次元形状の要素に限定してあるため、データ入出力時の問題が少ないことが特徴である。

三次元測定器で測定した点群をポリゴン化（STL形式）し、コンピュータ上で実際ワーク曲面を再現したものをリバース曲面とした（図2）。リバース曲面は非接触三次元測定機 OPTON 社製 surfタイザー500 で取得した。

2.3　システムの流れ

以下に補正システムの流れを説明する。

2.3.1　設計曲面とリバース面の位置合わせ

設計切断線を投影するため、設計曲面と、実際のワークを再現したリバース曲面を重ね合わせ、位置合わせを行う。位置合わせは全体の誤差を最小とするベストフィット法などを用いることにより行うことができる。また、設計曲面とリバース曲面の誤差量をカラーマップで表示することも可能である（図3）。

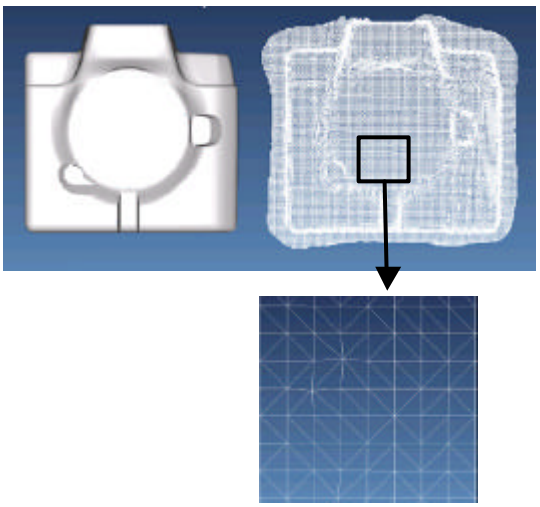


図２　設計曲面（左）とリバース曲面（右）

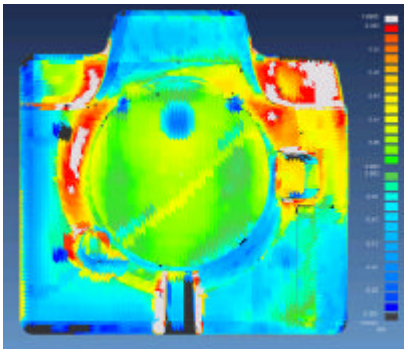


図３　位置合わせ後の形状誤差カラーマップ

2.3.2　修正切断線の作成

設計切断線を実際のワークを再現したリバース曲面上に投影し修正切断線を作成する。投影方法は設計曲面の法線方向、ＸＹＺ軸方向、任意方向を選択できる。目的とする精度を持った修正切断線を作成するためには、部位により適切な投影方法を選択する必要がある。カメラボディ（3.三次元形状の切断精度参照）では、場所により適宜投影方法を使い分けて設計切断線を投影することで、設計どおりの精度で修正切断線を作成することができた。

2.3.3　通過点の作成

本システムで作成されるＮＣプログラムは直線補完命令の連続で構成される。そのため誤差トレランスを指定して目標精度を維持するように修正切断線を直線近似し通過点を作成する（図４）。この通過点には、ＸＹＺの座標情報の他、設計面法線方向を示すベクトル情報も含まれている（図５）。

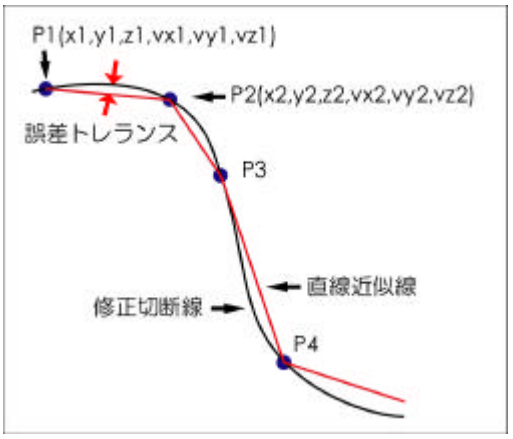


図４　修正切断線の直線近似

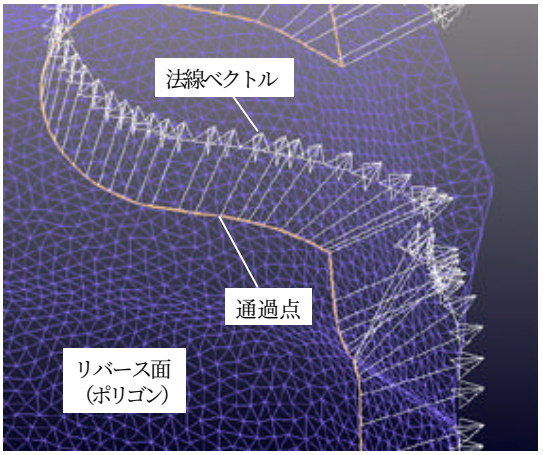


図５　修正切断線上の通過点と法線ベクトル

2.3.4　オフセットとピアスライン

レーザ加工では加工切断幅分を補正して切断経路を決める必要がある。修正切断線は３次元形状をしたリバース面上に描かれているため、３次元的なオフセットを行わなければならない。補正システムでは、連続する通過点の位置情報とベクトル情報を基に３次元オフセット補正を行えるようにした（図６）。

また、レーザ加工に必要なピアスラインを、位置、長さ、形状を指定して設けることができる。

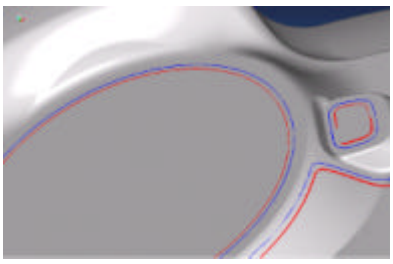


図６　切断線のオフセット

2.3.5　座標変換処理

従来のオフラインティーチングシステムでは、加工機上のワーク位置とＮＣプログラムは関連がないため、ワーク位置にＮＣプログラムを合わせる必要があった。位置合わせは目測で行うため、位置合わせ誤差が加工精度劣化の一因となっていた。

本補正システムでは、ワーク固定治具上の３個の基準球をワーク形状と同時に測定してリバース面を作成する（図７）とともに、加工機テーブル上に設置した際にも基準球をタッチプローブで測定し（図８）、この基準球位置を基に自動的に座標変換処理を行っている。これによりワーク位置に合致したＮＣプログラムを作成することができる。

2.3.6　自動干渉回避

加工時にはノズルは基本的に加工面に対し垂直に向けられるが、そのままでは加工ノズル等とワークの間に干渉が起こることがあるため、干渉を事前にチェックし、回避しておく必要がある（図９）。市販のオフラインティーチングシステムでは、干渉のあるポイント毎に手動で干渉回避操作を行うのが一般的で、ワークが複雑形状の場合、多大な労力を伴う。本補正システムでは、手動での干渉回避機能に加え、自動的にノズル姿勢を変更し高速に干渉回避操作を行うことができる自動干渉回避機能を備えている。

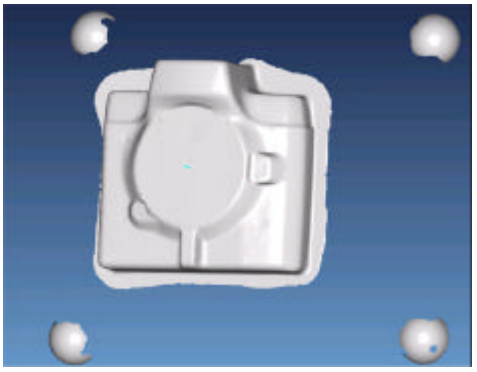


図７　基準球も含めたリバース面データ

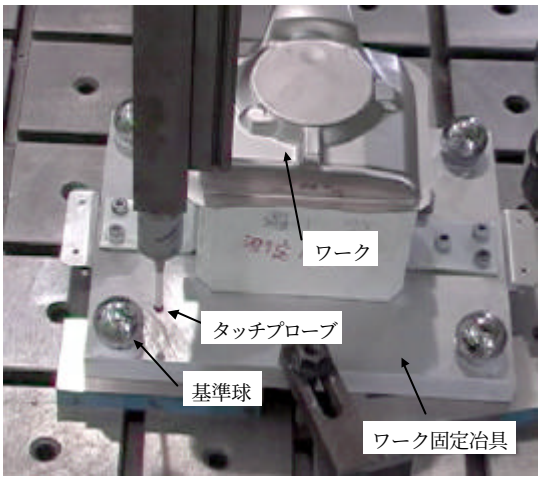


図８　タッチプローブによる基準球の測定

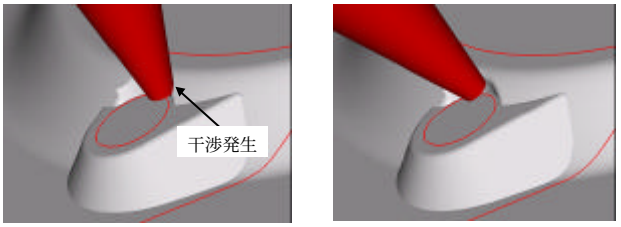


図９　干渉回避前（左）後（右）

2.3.7　ＮＣプログラム作成

加工順序を指定することによりＮＣプログラムが作成される。作成されたプログラムにはレーザ発振器の起動、停止、加工ガスのオン、オフ、シャッターの開閉などのコードも自動で挿入される。

3.　三次元形状の切断精度

3.1　概要

高精度３次元切断加工システムを用いてプレス成形品に対する３次元レーザ切断を行い、切断精度を評価した（図１０）。

3.2　ワーク

評価に用いたワークは純チタン製のカメラ筐体で、板厚は0.7㎜である（図１１）。プレス成形品は、塑性変形により生じた残留応力が切断により解放され、形状が変わる恐れがあった。それを防ぐため、あらかじめ熱処理を行って残留応力を除去したワークを用いた。熱処理条件と熱処理前後の残留応力測定の結果を図１２に示す。残留応力は約1/4に低減した。

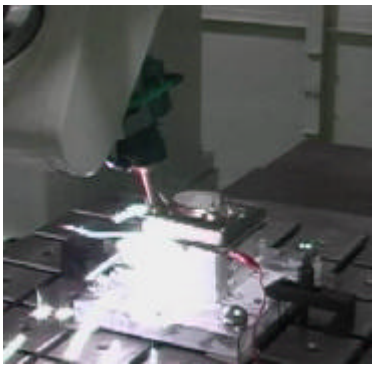
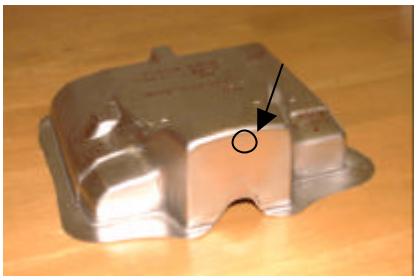


図１０　加工の様子

図１１　評価に用いたワーク

●条件　５１０℃　３００ｍｉｎ

●残留応力測定箇所



●結果

左右方向　　残留応力２６%に減少

上下方向　　残留応力２４%に減少

図１２　ワークの熱処理と残留応力

3.3　評価方法

同一条件で切断したワーク１０個について寸法測定を行った。測定は製品図面に示された４０カ所を対象とした。寸法公差はほとんどが0.025㎜、0.050㎜である。

評価パラメーターは工程能力指数Cp値、及びCpk値を用いた。Cp値はサンプルのばらつきに対する余裕を示し、Cpk値は設計値からのかたよりに対する余裕を示す。いずれも数値が大きいほど余裕がある状態を示し、１以上を良と判定した。それぞれ下式で計算される。

$$Cp\ 値 = T/6\sigma$$

$$Cpk\ 値 = (Su - \mu)/3\sigma$$

または

$$Cpk\ 値 = (\mu - Sl)/3\sigma$$

Ｔ：規格幅

σ：標準偏差

Su：規格の上限値

Sl：規格の下限値

μ：サンプルの平均値

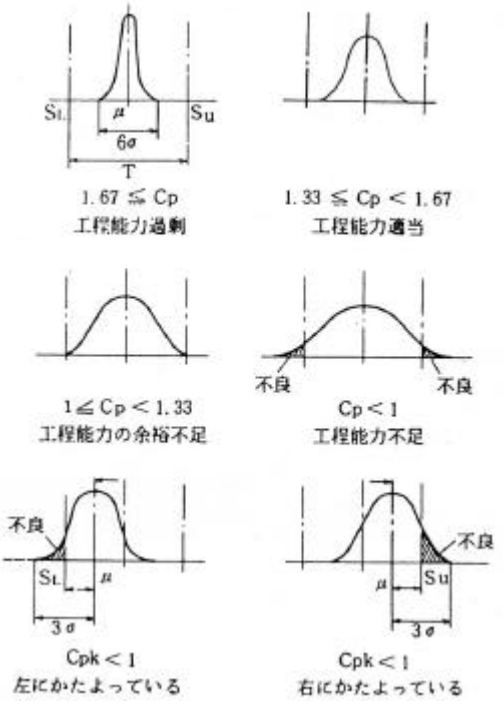


図１３　Cp値及びCpk値

3.4　切断精度

測定結果の一例として図１４に直径1.8㎜の切断穴径測定のヒストグラムを示す。標準偏差σは0.0045㎜、Cp値は3.68、Cpk値は2.62である。高精度で安定した切断ができていることがわかる。

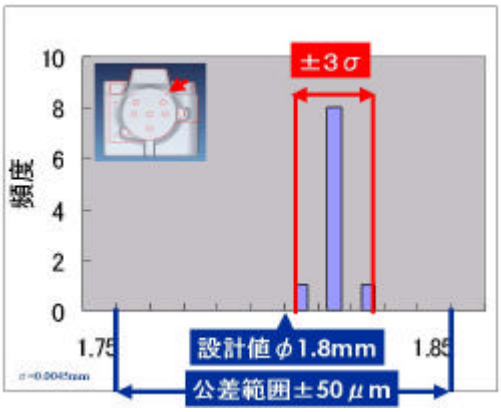


図１４　直径1.8㎜の穴直径のヒストグラム

表１に測定結果をCp値で分類した結果を示す。開発システムを用いて切断した場合、４０箇所のうち３１箇所がCp値１以上で、そのうち２２箇所がCp値1.67以上と非常にばらつきの少ない加工ができた。既存の三次元レーザ加工機で切断を行ったものと比較すると開発システムの加工精度が優れていることがわかった。

表１　切断精度の評価　Cp

範囲	開発システム	既存機（Φ8導入 CO_2 レーザ）
	40カ所	34カ所
1.67≦Cp	22	1
1.33≦Cp＜1.66	6	0
1.00≦Cp＜1.33	3	2
Cp＜1	9	31

表２に測定結果をCpk値で分類した結果を示す。既存機で加工した場合に比べると精度の向上が見られるが、測定値の平均が設計値に対してかたよりのあることを示すCpk値１以下の部分が１５カ所あり改善が必要である。

Cp値が１以上であれば（測定の平均値－設計値）分だけずらせばいいので、ＮＣプログラムを変更することで容易にCpk値の改善が可能である。今回の切断実験において問題となるのは、表３に示したCp値１以下の９箇所である。

表２　切断精度の評価　Cpk

範囲	開発システム	既存機（Φ8導入CO2 レーザ）
	40カ所	34カ所
1≦Cpk	25	2
Cpk＜1	15	32

表３に測定部位による詳細Cpを示す。円直径、円中心位置に関しては全く問題が無かった。問題となる箇所は図１５に示した窓位置寸法及び外周Z方向である。窓位置寸法は中心側に移動する傾向が強く、外周は7箇所すべて同じ方向へ変形する傾向があった。また、Cp値１以上の箇所でも同様の傾向があった。残留応力は熱処理により除去されているため、原因は切断時のレーザ加熱によるワークの熱変形によるものと思われる。

表３　測定部位による詳細 Cp

範囲	円直径	円中心位置	窓位置寸法	外周XY方向	外周Z方向
	7箇所	16箇所	6箇所	4箇所	7箇所
1.67≦Cp	7	11	2	2	0
1.33≦Cp＜1.66	0	5	1	0	0
1.00≦Cp＜1.33	0	0	0	2	1
Cp＜1	0	0	3	0	6

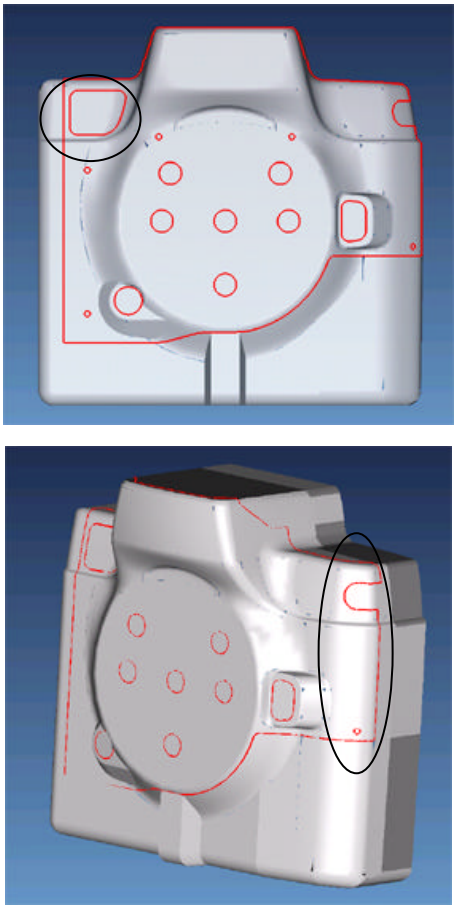


図１５　寸法精度を満たせない部分

熱変形の抑制法として①加工機の高速化②ハイピークパワーレーザによる加工③加工ジグによる熱の除去が考えられる。以下に具体策を述べる。

①高速切断を行うことで熱の拡散を防ぐことができるものと考えられる。高精度三次元レーザ加工機のX、Y、Z直動軸は高速動作が可能であるが、A、C回転軸は最大回転速度 180 °/ secの制約があるため、姿勢変化の大きな切断部分に対しては加工速度を上げることができない。回転軸の高速化を図るため、モータの高速化、及び加工機の軸構成の変更等により加工速度を向上させる必要がある。

②開発機に用いているＬD励起ＹＡＧレーザ発振器はＣW発振が主であり、ハイピークパワーのパルス発振には対応していない。パルスレーザは発振のＯN,ＯＦＦを繰り返すため、加工部での急速な冷却効果が得られ、熱影響を低減できるものと考えられる。パルスレーザの適用も検討する必要がある。

③実験で使用した加工冶具は石膏であるため、熱伝導率が低くワークの熱を逃がすことが困難である。金属性の加工冶具を用いることによりワークの熱を取り除くことが可能と考えられる。

4.　結言

（1）本開発により開発した高精度三次元レーザ切断加工システムを用いることで、より高精度にレーザ加工を行うことが可能になった。プレス成形品に対する加工では、ほとんどの部位で指定寸法に対して±0.05mm 以内での切断を実現することができ、従来のレーザ加工機に比べ飛躍的に切断精度を向上できた。

（2）開発した切断線補正データ作成システムは、高速自動干渉回避、位置合わせ、その他各種レーザ加工用の機能を有しており、高精度レーザ切断加工に有効である。また高精度を目的としない場合でも大きな時短効果がある。

（3）なお、本システムの開発をとおして、加工方法について特許出願を行った。

5.　今後の課題

レーザ切断は熱加工であるため、その入熱によりワークの変形を生じ一部で製品寸法を満たせない部分が生じた。本開発で得られた所見を元に熱変形の抑制方法について検討する必要がある。

謝辞

本開発を進めるにあたり、ご協力をいただいたプロジェクト委員各位、並びに委託研究に従事していただいた 株)アルモニコス、倉敷機械 株)、 財)機械振興協会技術研究所、新潟大学に深く感謝申し上げます。

参考文献

１）吉野ほか：「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）丸山ほか：「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）丸山ほか：「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)