高精度三次元レーザ切断加工システムの開発（第２報）

丸山 英彰* 長谷川 雅人* 斉藤 博* 三村 和弘* 田村 信*

Developement of 3-D Precision CuttingSystemofLaser

MARUYAMAHideaki, HASEGAWA Masato, SAITOHiroshi, MIMURAKazuhiro and TAMURA Makoto

抄 録

平成１２年度より開発中の三次元レーザ加工機の精度を確かめるため、加工点の運動精度、環境温度による加工点の変位、繰り返し運動時の加工点の変位、２次元及び３次元加工精度について試験を行い、既存のレーザ加工機と比較しながら評価した。その結果、開発した加工機は、ほぼいずれの試験においても既存の加工機よりも精度がよいことがわかった。

１．緒言

開発中の高精度三次元レーザ加工機の精度に関し、前報では直動軸の真直度、２つの回転軸の交差精度及びレーザ光軸精度について報告した。本報では、実際の加工精度に直接影響を与える加工点の位置精度について、運動精度、環境温度変化の影響、繰り返し運動の影響を報告すると共に、２次元及び３次元加工精度についても報告する。

２．加工点の運動精度

2.1 ＮＣ制御

加工機の運動制御の基本となるＮＣ制御システムについて述べておく。レーザ加工機の制御はオープンＮＣ制御とし、パソコン上で Cimetrix 社製 CODE システムによりＭＥＩ社製 NC ボードを介してＸ、Ｙ、Ｚ、Ｃ、αの各軸を制御するシステムとした。図１に開発機の制御システム概要を示す。

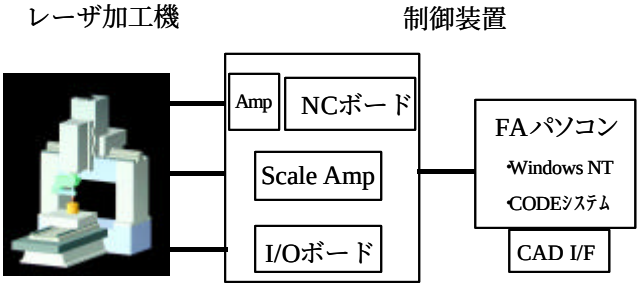

図１ 開発機の制御システム概要

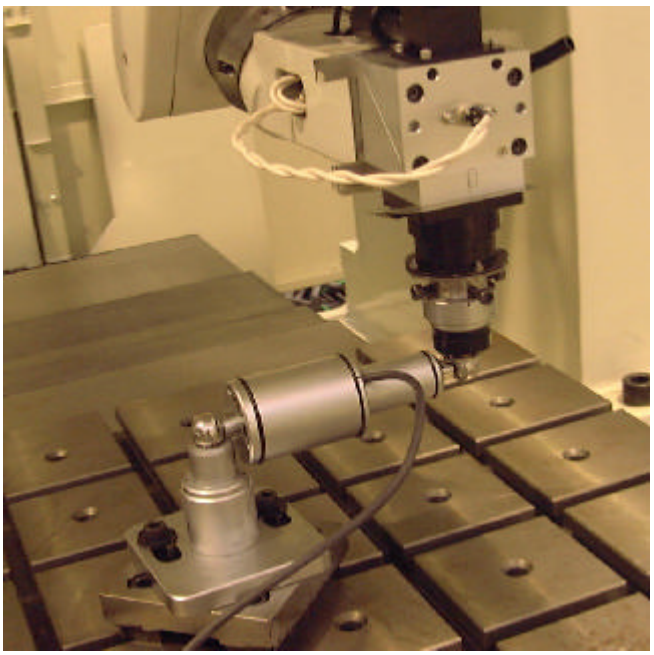

図２ DBB による運動精度測定

2.2 DBB による円運動の精度測定

2.2.1 実験方法

レーザ切断加工はレーザビームの移動軌跡そのものが切断精度となる。本開発では、ＹＡＧレーザを用い、光ファイバーにより加工ヘッドまで伝送することで、加工ヘッドの動き如何に関わらず、加工ヘッドに対するレーザ光軸ずれの心配を無くしている。従って加工ヘッドの運動精度を調べれば実際の加工点の動きの精度がわかることになる。

*研究開発センター

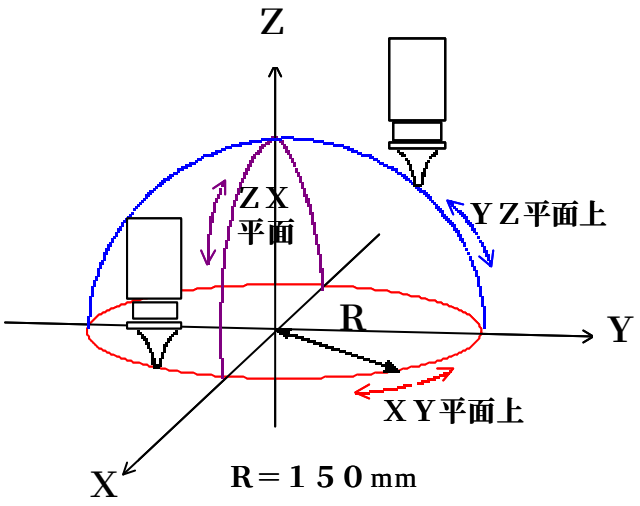

図３　各基準平面上での円運動

これに対し炭酸ガスレーザでは、レーザ光路の調整誤差を加味したものが加工点の運動精度になる。

運動精度の測定ははハイデンハイン社製の DBB を用いた。DBB 変位センサは両端がボール状になっており２つのボールの距離の変化を測定できる。図２に示すようにセンサの一端の球を加工ヘッド先端の加工点に凹形マグネットで取り付け、他端の球をテーブルに固定した凹形マグネットに取り付ける。センサ両端の球は各凹形マグネットとユニバーサルジョイントを形成する。テーブル上のジョイントを中心とした円運動のプログラムを組んで動かし、２つのボールの距離の変化を調べることにより、真円からのずれを計測することができる。今回は円運動の回転半径を150mm に設定し、開発機とともに、レーザー応用研究室で保有する炭酸ガス三次元レーザ加工機 ML2012HT も既存機として比較試験を行った。開発機の目標運動精度は機械単体で±10μｍである。

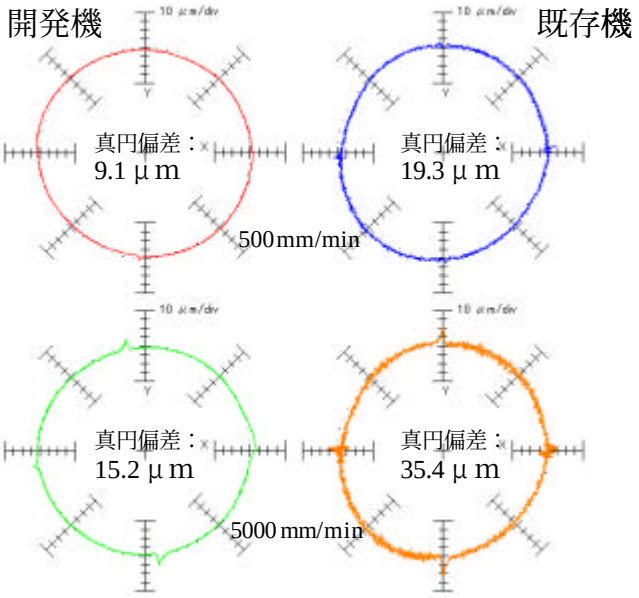

図４　ＸＹ平面上での円運動精度（R150mm）

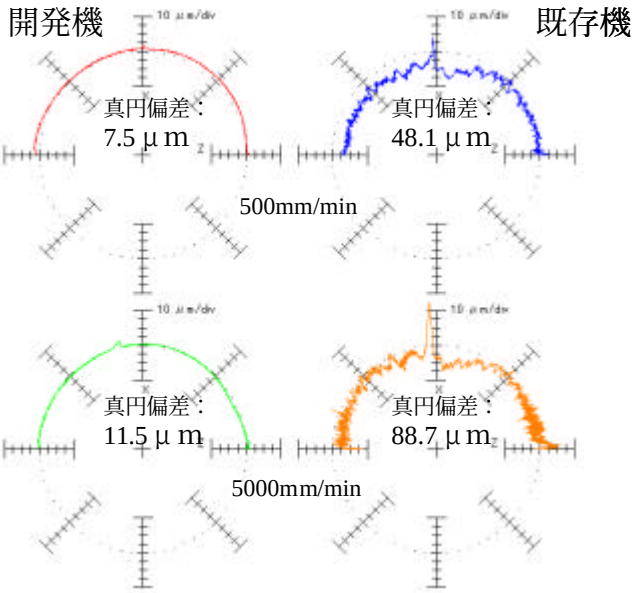

図５　ＺＸ平面上での円運動精度（R150mm）

2.2.2　直動軸のみによる運動精度

Ｃ、α軸を原点位置（下向き）に固定し、Ｘ、Ｙ、Ｚの直動軸のみを動かし、ＸＹ平面、ＺＸ平面上で円運動を行った場合の精度を、運動速度を変えて調べた（図３）。

試験結果を図４及び図５に示す。ＸＹ平面上では、遅い速度（500mm/min）、速い速度（5000mm/min）での既存機の真円偏差は各々 19μｍ、35μｍであった。それに対し、開発機では各々の速度に対し、9μｍ、15μｍと約半分の偏差であった。またＺＸ平面上では、500mm/min 及び5000mm/min での既存機の真円偏差は各々48μｍ、89μｍであるのに対し、開発機では各々8μｍ、12μｍと圧倒的に精度が良く、この条件の中では目標の±10μｍという目標を達成していると言える。既存機ではＺ軸駆動にラックを使用しているのに対し、開発機ではボールネジを使用していることが、両機のＺＸ平面上での運動精度差の主な原因と思われる。

2.2.3　回転軸も含めた運動精度

３次元レーザ加工を行うには、加工面の向きに応じて回転軸を回し、ノズルの向きを変える必要があるため、回転軸も含めた運動精度が重要である。既存機では回転軸がオフセット方式のため、回転軸を回すと加工点位置が変位し、それに応じてＸ、Ｙ、Ｚの直動軸での位置補正が必要となる。開発機は一点指向（ゼロオフセット）方式としたため、回転に対する直動軸での補正は必要ない。

試験方法は図６に示すような ISO 規格に準拠した方法をとった。半径150mm の半球上を、①から⑥の順路で、ノズル方向を球の中心に向けながら運動し、直動軸の運動精度と同様に DBB により測定評価した。既存機では、加工点運動速度が速い場合、回転軸に対する直動軸の補正速度が追いつかないため、2000mm/min までしか速度を上げることができなかった。

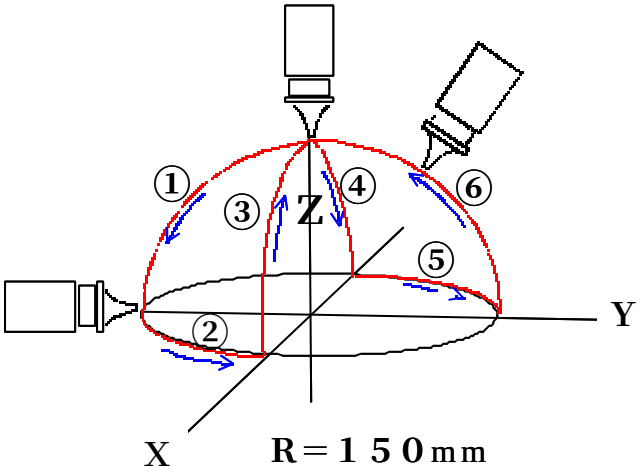

図６　回転軸も含めた運動精度試験（ISO 準拠）

試験結果を図７に示す。既存機では500mm/min でも150μm超の偏差を生じているのに対し、開発機では20μm弱であった。低速領域だけを見ると、開発機は既存機に対して大幅に精度が向上していると共に開発目標の精度をほぼ達成していると言える。しかし、2000mm/min では、開発機でも50μm近い偏差となっており、目標の±10μmを達成できていない。ただ、グラフをよく見ると、方向が変わる各円弧のつなぎ部分での振れが大きいだけなので、加減速を調整して円弧つなぎでの振動を和らげることにより、偏差はかなり改善されるものと思われる。

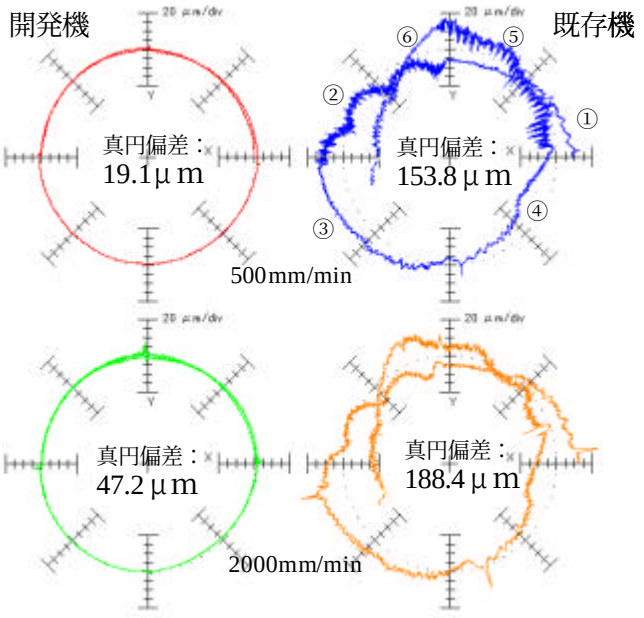

図７　回転軸も含めた運動精度

３．環境温度による加工点の変位

レーザ加工機は加工時にヒュームやスパッタを発生することから、解放された、温度変化の大きな環境で使用されることが多いと想定される。環境温度が変化した場合に加工点位置がどの程度変位するかを調べておくことは、高精度加工を目指す上で重要である。

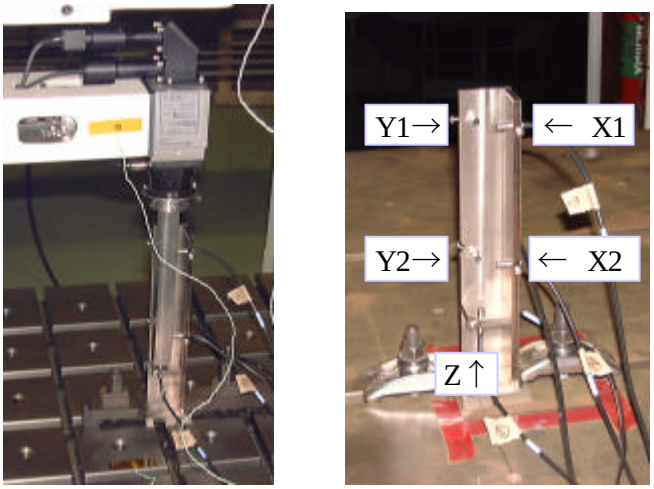

図８　加工点位置の測定方法

3.1　測定方法

加工機の加工ヘッドにインバー角材（□18mm）を取り付けて加工ヘッドの延長とし、その変位を図８のように５個の渦電流式変位センサー（キーエンス製 AH-305、AS-440-01）によりＸ、Ｙ、Ｚ

方向の変位及びＸ、Ｙ方向の角変位を調べた。変位センサーはインバー材で作った治具により固定し、センサー自体の変位を極力排除するよう配慮した。センサー感度保持のため角材の被センシング部分には□18mm の鉄板を貼り付けた。測定はテーブル中央付近で行い、サーボ ON の状態で、気温、加工機各部の温度、及び加工ヘッドに取り付けたインバー角材の変位を数日間記録した。変位センサーＸ１、Ｙ１は加工点部分を測定しているものであり、加工点のＸ方向、Ｙ方向の変位を与える。変位センサーＺも加工点のＺ方向の変位を与えるものとした。

3.2　試験結果

開発機の測定結果を図９に示す。気温の変化に応じて加工機各部の温度も変化し、それに伴って加工点も変位している。１日間の温度変化は約３℃で、その間Ｘ方向10μｍ、Ｙ方向３μｍ、Ｚ方向11μｍの加工点変位があった。Ｙ方向に比してＸ方向及びＺ方向の変位が大きいことがわかる。

Ｘ方向及びＹ方向各２カ所の変位値から加工ヘッドの角度変化を計算して描いたものを図10に示す。気温の変化と加工ヘッドのＸ方向角度変化とは極めてよく符合し、１日間３℃の温度変化に対し0.0035°の角度変化を生じていることがわかる。加工ヘッドが傾くときの回転中心が、加工点からＸ250mm、Ｚ250mm だけ離れている回転アーム上にあると仮定すれば、0.0035°の角度変化によってＸ15μｍ、Ｚ－15μｍの変位を生ずることになる。この値は実測の加工点変位量であるＸ10μｍ、Ｚ－11μｍにかなり近い値である。

これらのことから、温度変化に伴って生ずる加工点の変位は、回転アーム付近の変形に起因する角度変化に主原因があるものと思われる。

比較のために、既存機についても環境温度と加工点変位の関係を調べた。その結果を図11に示す。既存機に比べ、開発機の方が全般的に環境温度変化に対する加工点変位が少なく、安定していることが確認された。

４．繰り返し運動時の加工点の変位

加工点の変位は環境温度の変化だけではなく、

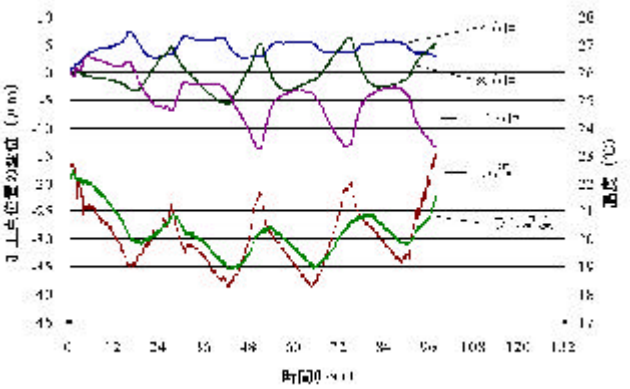

図９　環境温度変化に対する加工点変位（開発機）

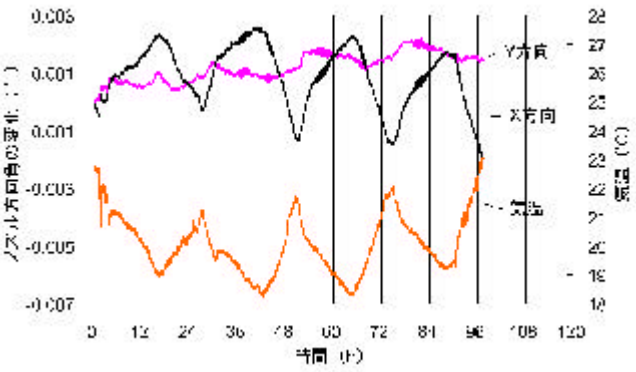

図10 気温変化に対する加工ヘッドの傾き（開発機）

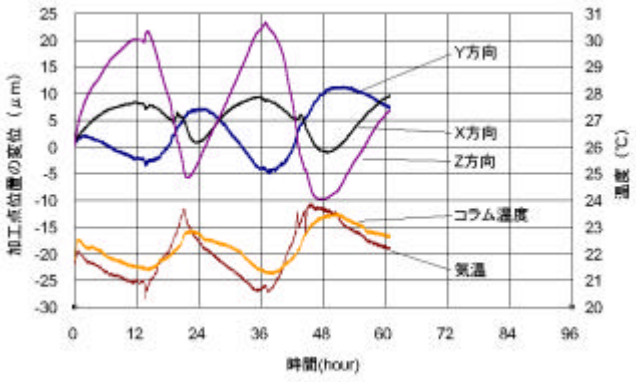

図11　環境温度変化に対する加工点変位（既存機）

加工時のモーター発熱等による加工機の熱変形によっても引き起こされる可能性がある。もし加工中に加工点が大きく変位してしまえば目標の加工精度は達成できなくなる恐れがあるため、加工機が繰り返し運動をする間にどれだけ加工点が変位するかを調べた。

4.1　試験方法

繰り返し加工中の精度変化を調べる目的で、図１２に示すような経路を設定し、試験を行った。図中①-②-③-④-⑤-①の経路を、ノズル方向を半球の中心に向けながら１往復運動したあと、測定位置まで移動し、10秒間停止する間に変位の測定と環境温度、加工機各部の温度測定を行った。このサイクルを400回繰り返した。測定用センサー及び治具は前項の環境温度による加工点の変位を測定したときと同じものを用いた。

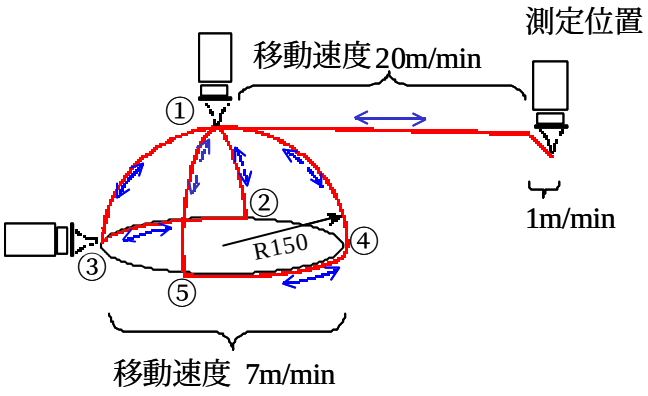

図12　繰り返し運動試験の経路

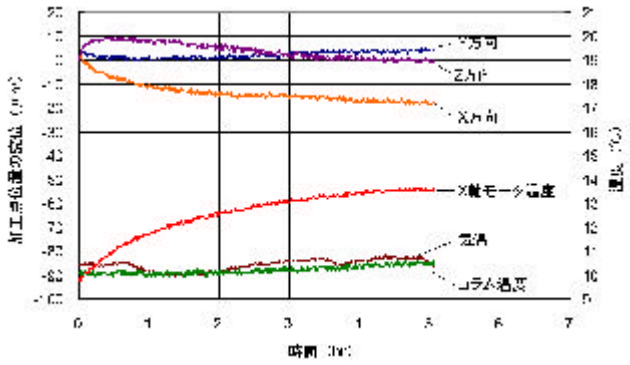

図13　繰り返し運動中の加工点変位（開発機）

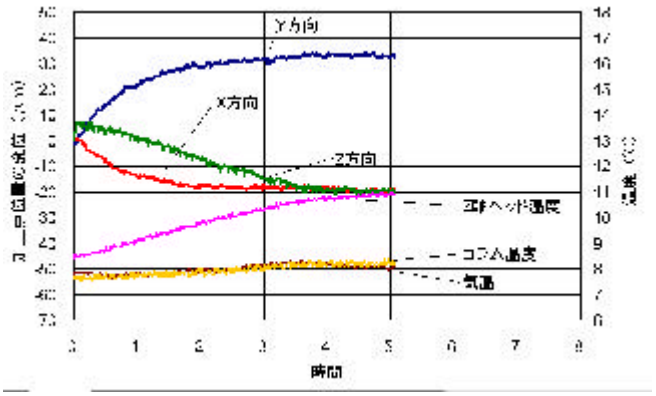

図14　繰り返し運動中の加工点変位（既存機）

4.2　試験結果

図13に試験結果を示す。400回の繰り返し試験には約５時間を要したが、その間気温はほとんど変化しなかった。しかしモータ温度は上昇し、加工点位置は変位している。400回の繰り返し運動の間に、加工点位置はＸ軸方向に18μｍ、Ｙ方向に10μｍ、Ｚ軸方向に10μｍの幅で変位があった。

既存機について測定した結果を図14に示す。既存機では400回の繰り返し運動の間に、加工点位置はＸ方向に24μｍ、Ｙ方向に32μｍ、Ｚ方向に38μｍの幅で変位した。この結果から、長時間加工を行っている間の加工点の変位は開発機の方が少なく、安定した精度で加工ができることがわかった。直動軸の制御は、既存機ではエンコーダフィードバック制御であるのに対し、開発機ではスケールフィードバック制御として、ボールネジの熱膨張誤差をキャンセルしているためと思われる。

５．加工精度

加工精度はこれまで述べた加工機の動作精度に加え、レーザーの安定性、切断面粗度、位置決め精度等の要因が含まれる。開発機を用い二次元、三次元切断を行い総合的な加工精度評価を行った。

5.1　２次元加工精度

２次元の加工精度はステンレス平板（SUS304、厚さ0.8mm）にφ40mm の穴加工を行い、ランクテーラーホブソン㈱製タリロンド300真円度測定機で穴の真円度を測定し評価を行った。試験結果を図15に示す。真円度は100μｍ を目標にしている。

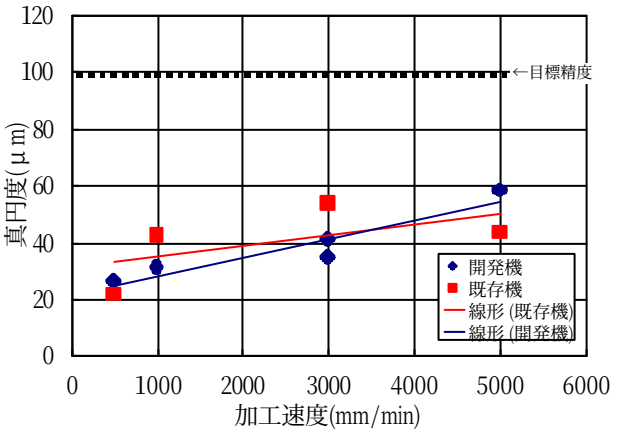

図15　２次元切断における真円度

速度が速くなるに従い真円度は大きくなるが、5000mm/min でも目標精度を達成できた。XY 平面上で２次元切断を行った場合、開発機と既存機は同等の加工精度であった。

5.2　３次元加工精度

３次元の加工精度は、ステンレス平板（SUS304、板厚0.8mm）を球面（半径180mm）にプレス成形したテストサンプルにφ40の穴加工を行い、穴の真円度で評価を行った。（図16参照）。穴加工時、加工機のノズルが加工面に対して垂直となるようにした。この実験で加工機は X、Y、Z 軸動作のほかに、切断点における法線方向にノズルを合わせるため回転軸動作を複合して行う。そのため、回転軸心の交差ずれやレーザ光軸のずれ、既存機ではさらに回転軸に対する直動軸補間精度などの様々な要因が総合的に加工精度に影響を及ぼす。

試験結果を図17,18に示す。開発機は既存機に比べればどの速度領域においても良好な精度が得られたが、２次元加工に比べるとかなり大きな値となっている。加工機単体での運動精度に比べてもかなり劣っており、加工面あらさだけでは説明できない。またレーザ光軸のずれも10μm以内の精度で合わせてある。　開発機の加工精度が意外と低い理由の１つとして、加工機の動作プログラムは設計切断線に沿って動くように作成されているが、テストサンプルはプレス成形時のスプリングバック等により設計寸法とは異なっていることが考えられる。そのため、想定された加工点と実際の加工点が合わず、ノズル－ワーク間の距離の誤差により切断幅が異なること等により、期待されたほどのの真円度が得られていないと推察される。

６．まとめ

三次元レーザ加工機の運動精度、環境温度変化による加工点の変位、繰り返し運動による加工点位置の変位、２次元、３次元の切断試験について開発機と既存機を比較しながら評価した結果、以下のことがわかった。

(1) 各基準平面上で直動軸のみでの円運動精度試験を行った結果、開発機は5000mm/min でも目標の±10μmの精度を達成できることがわかった。

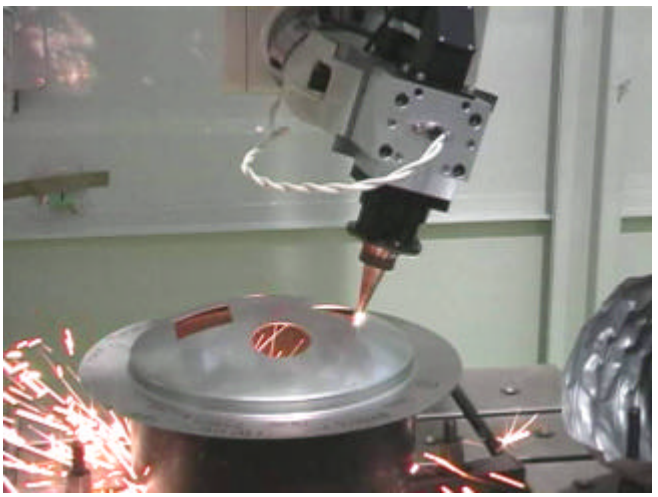

図16　３次元加工精度評価用サンプルの加工

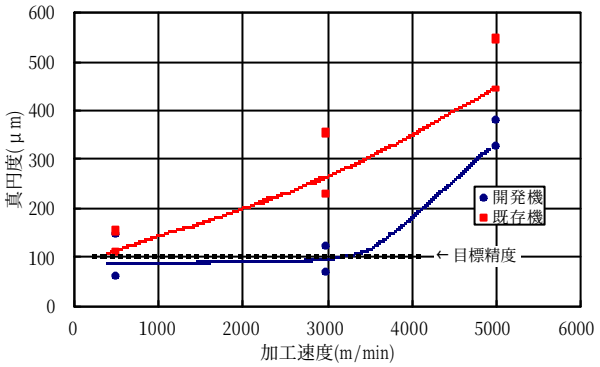

図17　３次元切断における真円度

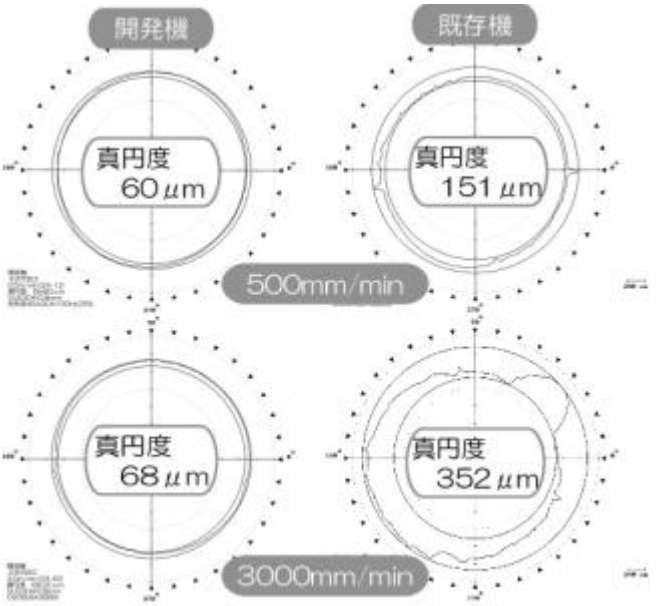

図18　３次元切断における真円度測定チャート

(2) Ｘ、Ｙ、Ｚ、Ｃ、αの５軸による球面上の運動の精度試験では、開発機は500mm/min の低速域では真円偏差19μｍで目標を達成できた。2000mm/min でも加減速の調整により改善できるものと思われる。

(3) 環境温度が３℃上昇することより、開発機加工点は、X+10μｍ、Z-11μｍの変位があった。これは回転アーム付近の変形に起因する角度変化に主な原因があるものと思われる。

(4) 400回の繰り返し運動の間に、開発機の加工点位置はＸ軸方向に18μｍ、Ｙ方向に10μｍ、Ｚ軸方向に10μｍの幅で変位があった。

(5) ＸＹ平面上における２次元切断試験では開発機及び既存機とも切断面の真円度にほとんど差がなく、目標値の真円度50μｍを達成できた。

(6) 球面形状の５軸同期加工では、開発機は3000 mm/min までは真円度100μｍ以下で切断加工することができた。

(7) ２次元加工でほとんど差がなかったことを除いて、いずれの試験でも開発機の方が既存機より精度がよいことがわかった。