

レーザ穴あけ加工の品質を向上させるミラーの発明

小林信高* 石塚智彦***
滝川靖弘*
竹野祥瑞**

Invention of Mirror for Improving Laser Via Drilling Quality

Nobutaka Kobayashi, Yasuhiro Takigawa, Shozui Takeno, Tomohiko Ishizuka

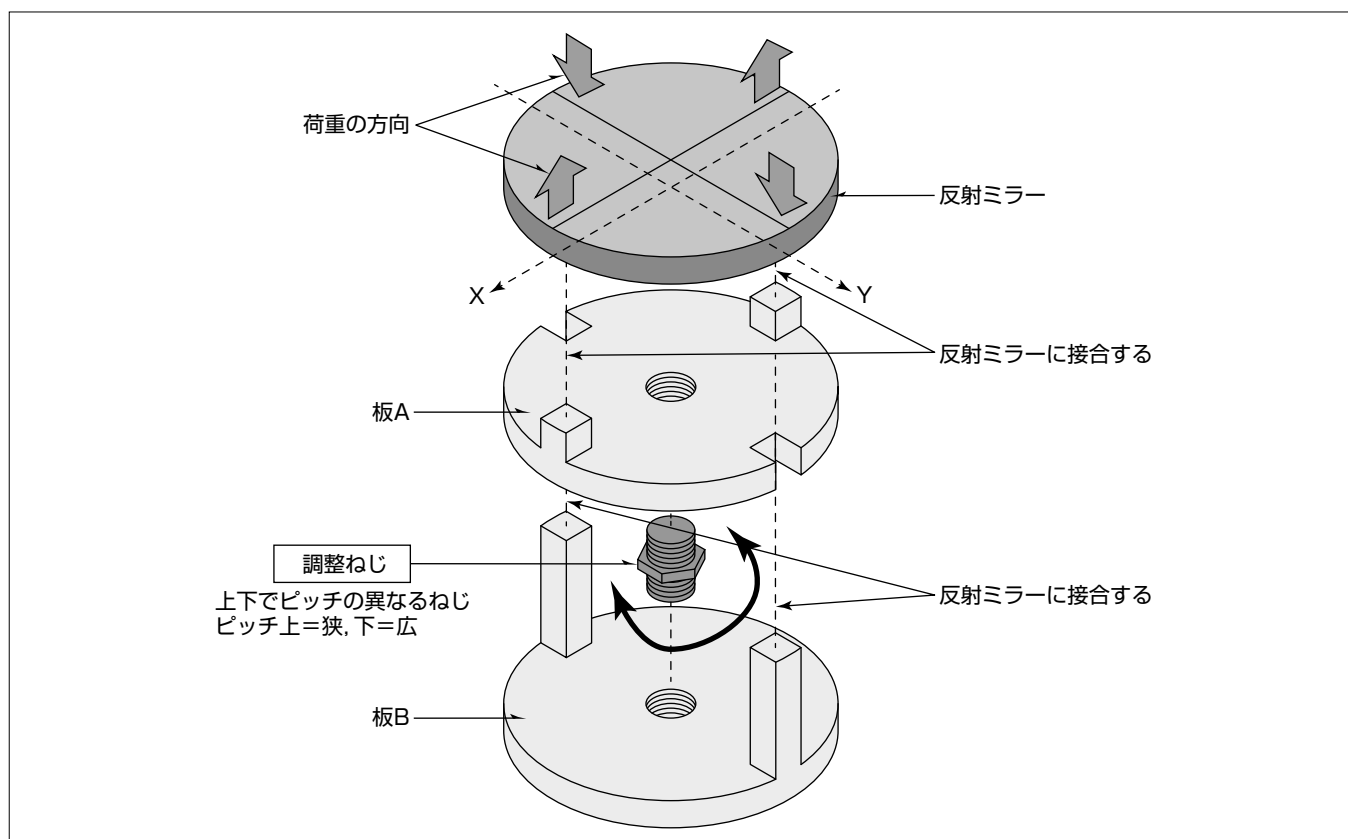
要旨

スマートフォン等に内蔵されるプリント基板は多層構造をしており、各層はレーザで加工された微細な穴で電気的につながっている。近年のIT機器の小型高機能化に伴う高密度実装によって、爆発的な穴数の増加と加工穴の小径化が進んできた。穴数の増加は穴あけの高速化のニーズにつながる。そこで、一つのレンズに2本のレーザビームを通して2か所同時に加工するマルチビーム方式を発案したが、光路を構成するミラーなどの枚数増が不可避であった。レーザ加工機では、光路中のレンズやミラーの形状誤差によってレーザビームに歪(ゆが)み(収差)が生じ、収差が大きいと加工穴の品質が低下する。マルチビーム方式はミラーなどの枚数増によって形状誤差が多く累積し、品質確保が困難な状況であった。また加工穴の小径化にはプリン

ト基板上に細く集光したレーザビームが必要であり、細いビームほど収差が顕著に加工穴の品質に現れる。

そこで、光路中のミラーを変形させ、収差を補正することにした。穴形状が楕円(だえん)になりやすいことに着目し、鞍(くら)形の変形によって補正可能なことを見いだした。さらに、誰にでも簡単に補正できるよう、ミラー裏面の中央に両端でピッチの異なるねじを一つ設けただけの構造とし、ねじを回すことでミラー形状をX方向に凹、Y方向に凸の鞍形に変形させ、穴形状を円形に修正する収差補正ミラーを発明した。

収差補正ミラーの適用によって、加工穴の品質低下のため高速化が困難であったφ50μmの小径穴で、不足していた光軸方向の加工裕度の確保に成功して1.6倍の高速化を実現した。



収差補正ミラーの構造

収差補正ミラーは、プリント基板穴あけ用レーザ加工機に搭載され、加工穴の真円率を改善するミラーである。反射ミラーに接合された板Aと板Bの間にある、上下でピッチの異なる調整ねじを回すと、反射ミラーが鞍形に変形する。この鞍形によって、レーザビームの非点収差が補正される。加工穴の真円率を改善したことで、小径穴(φ50μm)の光軸方向の加工裕度確保に成功した。

1. ま え が き

近年、電子機器に搭載されるプリント基板には、無数の微細な穴がレーザーによって加工されている。例えば、現在のスマートフォンでは1台当たり数10万個もの穴が存在する。このような高密度化に伴って、 $\phi 50\mu\text{m}$ 以下の小径穴の割合も増えている。小径穴の品質確保は困難であったため、今回レーザービームの歪み(収差)を補正して加工穴の品質を向上させる収差補正ミラーを発明した。このミラーが活用される機会は広がっており、2017年度の全国発明表彰では特許庁長官賞を受賞した。

本稿では、このミラーが搭載されるプリント基板穴あけ用レーザー加工機と、このミラーの動きやその効果について述べる。

2. プリント基板の穴あけ加工

2.1 レーザビアとその動向

現在、スマートフォンなどの電子機器に内蔵されるプリント基板は、**図1**のような多層構造をしている。立体的に配線することで、基板表面のマイコンやコンデンサ等の電子部品をより密に実装できる。各層を電気的につなぐ層間接続穴はレーザーで加工され、レーザービアと呼ばれる。絶縁層である樹脂にレーザーを照射して除去した後、加工された穴をめっきすることで、電気を通すようになる。

近年のIT機器の小型高機能化に伴い、配線密度の向上、つまり基板1枚当たりのレーザービアの爆発的な穴数の増加と加工穴の小径化が進んできた。**図2**に、この20年間のレーザービアの穴数と穴径の推移を示す。穴数は基板1層当

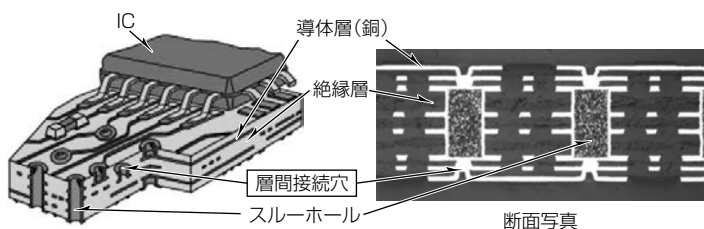


図1. プリント基板の構造

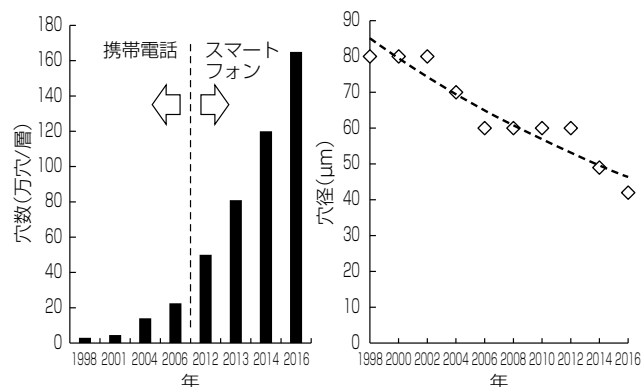


図2. レーザビアの穴数と穴径の推移

たり100万穴を超え、穴径は $50\mu\text{m}$ を下回るところまできている。

2.2 レーザ加工機

図3に示すプリント基板穴あけ用レーザー加工機は、複数のキーパーツから構成される。発振器から射出されたレーザービームは、2本のガルバノスキャナの先端に取り付けられた2枚のガルバノミラーによってX方向とY方向の二次元にスキャンされ、 $f\theta$ レンズによってプリント基板上に集光される。ガルバノスキャナは1秒間に2,500か所もの位置決め(加速・減速・停止)をし、高速加工を可能にしているが、更なる高速化は容易でなかった。そこで穴数の増加の市場要求に応えるため、一つの $f\theta$ レンズに2本のレーザービームを通し、2か所同時に穴あけをする**図4**のマルチビーム方式を考案した⁽¹⁾。

2.3 新たな課題

マルチビーム方式では、レーザービームを光路途中で2本に分岐するため、ミラー等の光学部品の増加が不可避であった。レーザー加工機では、発振器から基板までの光路中に配置されるレンズやミラーの透過面や反射面の形状誤差によってレーザービームに歪み(収差)が生じ、この歪みが大きいと加工穴の品質(真円率)が低下する。マルチビーム方式では、光学部品の増加に伴い、形状誤差が多く累積することで、収差が増大していった。

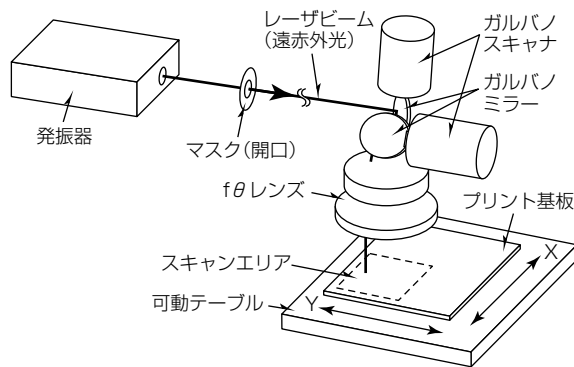


図3. プリント基板穴あけ用レーザー加工機の構成

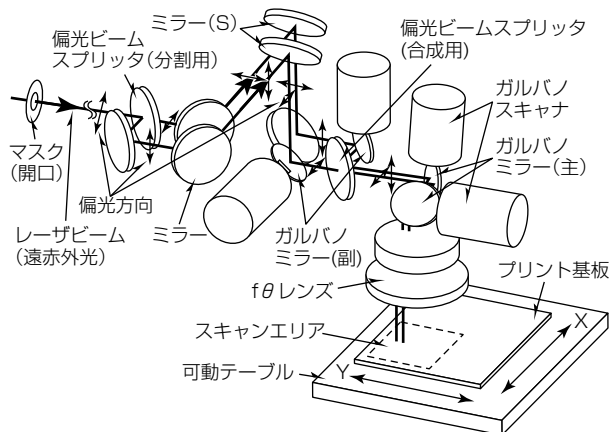


図4. マルチビーム方式の光路構成

また加工穴の小径化では、基板上にレーザービームをより細く集光するため、大きな収束角度でレーザービームを絞り込む。このため、焦点(ジャストフォーカス)から光軸方向に少しずれるだけでレーザービームが広がり、光軸方向の加工裕度が狭くなる。

このように、マルチビーム方式によって収差が増大した上に、さらに加工穴の小径化で加工裕度が狭くなり、加工穴の品質確保が困難な状況にあった。また、先に述べたとおり収差の増大は各光学部品の形状誤差の累積が原因だが、レンズやミラーの形状誤差は既に $0.3\mu\text{m}$ 以下と小さく、研磨等の製造の限界にあった。

このため、レーザービームの収差を補正する新たな光学部品が強く求められていた。

3. 収差補正ミラー

3.1 変形形状“鞍形”

2. 3節で述べた課題に対し、光路中の1枚のミラーに能動的に変形を与え、変形形状と変形量を制御することで、光路全体が持つ収差を相殺する方法がある。

このような収差補正ミラーを開発するに当たり、マルチビーム方式では、図5に示すように基板上で焦点を光軸方向に振ると、穴形状が楕円に崩れやすく、かつ、焦点の上下で楕円の長軸方向が直交することを見いだした。図5の横軸はスキャンエリア内の異なる位置の加工穴になっており、縦軸は光軸方向に焦点を変化させている。レーザー加工機に求められる光軸方向の加工裕度、 $60\mu\text{m}$ (= 6列分)に満たないことが分かる。

焦点の上下で直交する楕円となる収差を非点収差という。非点収差は光軸を含む異なる二つの断面で、焦点の絞れる位置が光軸方向にずれていることによって生じる。このため、光路中のミラーを平面から図6に示す馬の鞍形に変化させることで補正、つまり加工穴の真円率を改善できる。鞍形とは、ミラー形状がX方向は凹、Y方向は凸の直交する2方向で逆に反った形であり、ミラー裏面のX方向の両端に押す力を、Y方向の両端に引く力を加えることで実現できる。

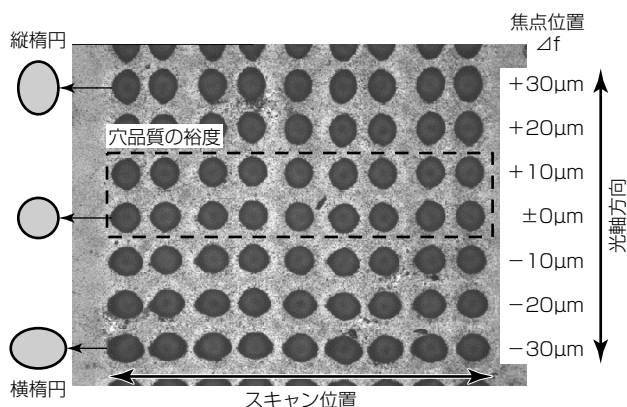


図5. マルチビーム方式で生じた加工穴の歪み

すなわち、この収差補正ミラーでは補正対象を非点収差に限定し、実現すべき変形形状を鞍形ただ一つに絞った。

3.2 構造と動作

次に、収差補正ミラーに必要とされる変形量を見積った。図4に示した各光学部品について、形状誤差(平面度)の仕様値からその部品によって発生する非点収差の量を算出する。そして、システム全体の非点収差の量が最大になるよう、光路に沿った全部品の非点収差を積み上げ、これを相殺するために必要な収差補正ミラーの最大変形量、 $5\mu\text{m}$ を算出した。

図7にこの収差補正ミラーの構造を示す。加工穴の楕円形状が時間変化をしないことに着目し、荷重の生成にはねじを用いることにした。さらに、現場や客先での調整を念頭に誰にでも簡単に操作できるように、ねじ1本だけで変形させるようにした。

反射ミラーは裏面側に板Aと板Bを備える。板AはX方向の両端で、板BはY方向の両端で、反射ミラーの裏面に接合される。板Aと板Bの間には、 $5\mu\text{m}$ という微小な変形を実現するために、差動式マイクロメータに用いられている上下でピッチの異なるねじ(調整ねじ)を設けた。

図8に示すように、中立状態から調整ねじを左に回転さ

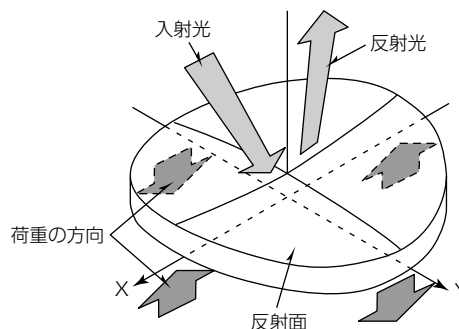


図6. 収差補正ミラーの変形形状

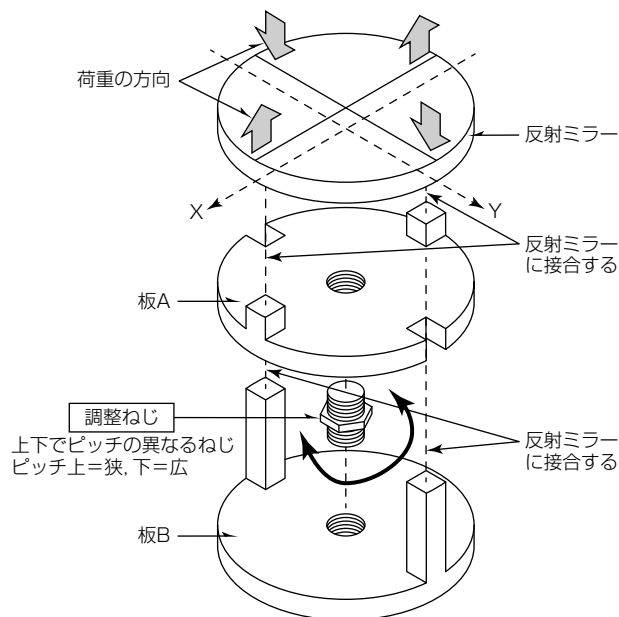


図7. 収差補正ミラーの構造

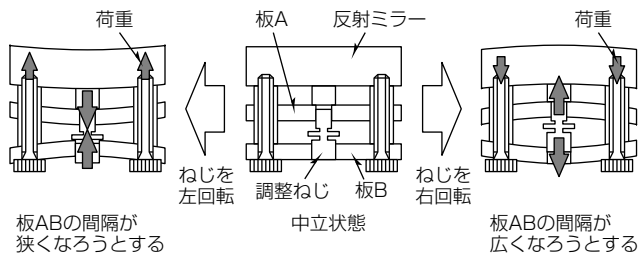


図8. 収差補正ミラーの動作

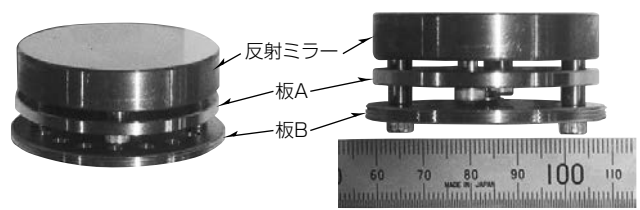
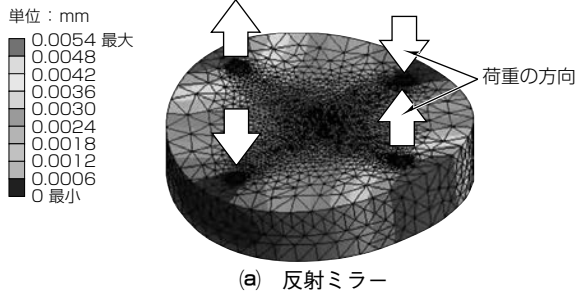
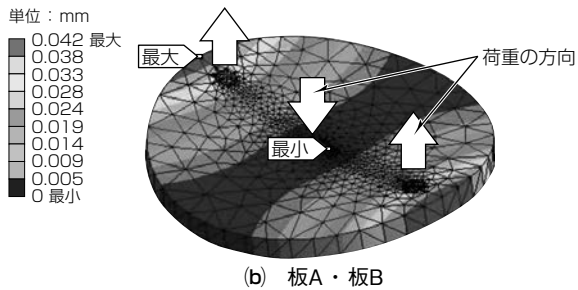


図10. 収差補正鏡の外観



(a) 反射ミラー



(b) 板A・板B

図9. 変形量の解析

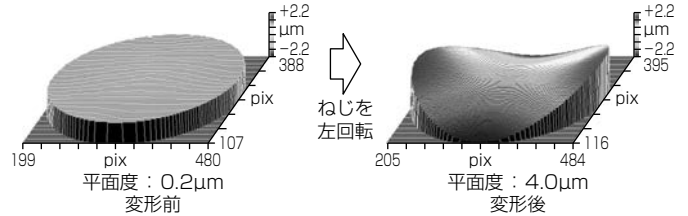


図11. 実測形状

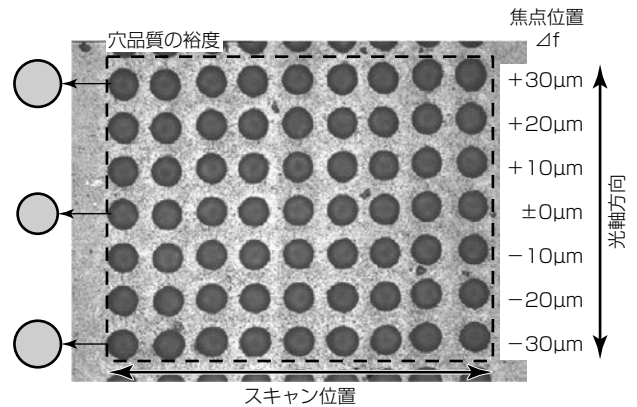


図12. 収差補正ミラーによる穴形状の改善

せると、上下でねじの進む量が異なるため、板Aと板Bの間隔は狭くなるとうとする。このため、反射ミラーの板Aに接合された部分と、板Bに接合された部分で逆方向の荷重が発生し、反射ミラーは鞍形に変形する。逆に、調整ねじを右に回転させると、X方向とY方向で凸と凹が入れ替わった逆の鞍形になる。

3.3 変形感度の適正化

変形量は最大で5 μmのため、実際には0.1 μmレベルで変形を制御する必要がある。調整ねじを少し回しただけで収差補正ミラーがμmレベル以上で大きく変形すると、穴の真円率の調整は困難になる。そこで、調整ねじの回転に対する変形量、つまり変形感度の調整を図った。

図9のように、構造解析を用いて、反射ミラーと板A・板Bの板厚バランスを調整し、反射ミラーよりも板A・板Bの変形の方が大きくなるようにした。すなわち、調整ねじのピッチ差の大半を板Aと板Bの変形で受け止め、反射ミラーの変形が緩やかになるようにした。その結果、調整ねじ0.5周でミラー変形量5 μmの制御を実現した。

4. 加工品質の改善

図10に収差補正ミラーの外観を、図11に干渉計によって測定した変形前後の反射ミラーの形状を示す。狙いどおり鞍形が生み出せていることが分かる。

図4に示したマルチビーム方式の光学部品のうち、ミラー(S)の部分にこの収差補正ミラーを適用し、その変形量を調整した後の加工穴を図12に示す。図5に比べ、光軸方向の裕度が大幅に拡大している。

不足していた加工裕度の必要量の確保に成功したことで、1.6倍の高速化とφ50 μmの小径化を両立させるレーザ加工機を実現した。

5. むすび

最近、配線自由度の高さから空間を節約でき、電子機器の小型軽量化に有効なフレキシブル基板が多用されるようになってきた。フレキシブル基板はポリイミド樹脂からなり、紫外光(UV)レーザで加工される。このため、UVレーザ加工機のニーズが高まっている。

またUVレーザの波長は従来の炭酸ガス(CO₂)レーザの1/30であり、更なる小径化の可能性も持っている。今後、UVレーザ加工機で用いられる、ミラー基材が石英の収差補正ミラーも開発していく必要がある。

参考文献

- (1) 竹野祥瑞, ほか: マルチビーム光学系によるプリント配線板穴あけ用レーザ加工機の高速化, 三菱電機技報, 84, No.12, 697~700 (2010)