

千葉工業大学

博士学位論文

屈折型非軸対称光学素子を用いた
レーザの強度分布変換に関する研究

平成 29 年 3 月

森田 翔

論文の要旨

本研究では、レーザによって一定領域へ熱加工するための屈折型強度分布変換素子を設計し製作するためのシステムの開発を行う。これは主としてレーザ加熱による材料表面の調質や改質に用いるための素子であり、現在行われている単純な焦点はずしによる加工の代替となるものである。ビームの強度分布を制御することにより、加工の均質性が向上すると期待される。また光線の制御によってパターンを照射することも可能である。本論文は7章から構成されており、以下のことが明らかとなった：

第1章では、屈折型強度分布変換素子の必要性について論じた。光利用効率が高く、小ロットあるいは単品生産でも製造しやすく、大パワーのマルチモードファイバレーザであっても変換可能な点が屈折型素子の利点であり、熱加工するにあたって治具や工具のように取り扱えるような簡便さを持ち合わせており、これからのレーザ加工の発展において必要な技術であることが分かった。軸対称な素子の設計手法について説明し、これが非軸対称素子には適用できないことを示した。

第2章では、非軸対称形状の分布変換素子設計手法について、分布変換と形状生成の点から解決策を述べた。分布変換プログラムでは光線要素に対し電荷を持った粒子とみなすことで要素間に発生する引力と斥力の合力によって要素の移動方向と量を決め、初期配置の隣接要素との間の線分を利用して光線の交差を防ぎながら繰り返し計算することで光線の照射位置を求めた。分布変換素子の形状は最長光路を基準としその他の要素の光路長を素子の厚みにより合わせるという手法を用いて求めることができた。

第3章では、第2章で開発したプログラムが実際に成り立つ場合があるかどうかを凸レンズと比較し検証した。その結果、100 mm先の一点に集光する屈折率1.49の素子を計算した場合、中心部の曲率が49.1 mmで放物面の非球面レンズをこのプログラムは出力することがわかり、実用可能であることが判明した。

第4章では、加工装置と加工法について述べた。設計した非軸対称形状を実現するため、2台の加工装置を用いて、アクリルは切削により、またガラスや石英は電着ダイヤモンドボール砥石で形状を加工し、それに研磨を施すことでRa 18 nm、研磨せずシリコンオイルを塗布することでRa 38 nmまで表面粗さが向上し、この時の光透過率はバルク材料と同等となった。これらのことから、複数の加工を組み合わせることで実用可能な光学素子が簡便に製作できることが明らかになった。

第5章では、分布変換を行い投影するための素子を製作し検証した。軸対称分布変換素子ではなし得ない非対称形状の目標分布を実現するための非軸対称素子の例として、均一な強度分布を3つのビームに分け変形し文字列“CIT”へと変換する素子を設計製作し強度分布の変化を観察した。また、単純な入力ビーム形状ではない実際のパルスレーザの形状や強度分布を計算に用いて星形にビームを変換する素子では、ビームプロファイルが設計距離の100 mmに対して100~110 mmで星形の強度分布に変化していることがわかり、ステンレス薄板に4.5 kW、10 msの変換したパルスを照射することで幅約4 mmの星形の加工痕ができることを確認した。

第6章では、ビーム走査加工のための素子を設計製作した。入力ビームの強度分布が大きく異なっているビームでも計算可能なことを示すため、また既存のレンズの組み合わせでは困難なパターンとするため、ガウスビームから線状の均一強度ビームに変換する素子を設計し製作した。12 mm角の石英製分布変換素子を通じたビームは100 mmの設計距離において4.0 × 0.7 mmの線状のビームとなり、プ

ラスチックへのバーンパターンは平坦部分ができ通常の焦点はずしでの加工形状とは異なるパターンが形成された。また、この線状ビームを用いて純鉄粉が溶融でき凝固物は平坦な板状になることから、粉末積層造形の工程用途に利用できることが分かった。

第 7 章では本研究を総括した。本研究の目的である屈折型レーザー強度分布変換素子が自動設計でき、簡便に製作でき、マーキングやビーム走査に対し機能することを確認し具体的な適用例を示した。

Summary

This study is on the development of design and fabrication method for refractive-type asymmetric beam distribution converter for laser heat treatments and pattern markings, as a result the following things became clear:

Chapter 1 is on reasons of refractive-type laser beam distribution converters with an asymmetric shape. Refractive-type optical elements are superior in higher light usage efficiency, easier fabrication even small lot sizes or customization. And they can convert from high power multi mode fiber laser beam. They have ease in handling for laser heat treatment like jigs for machining, so this technique is needed in the next age laser processing. However, the existing design method for axial symmetry optical elements cannot be applied for asymmetric elements as shown.

Chapter 2 is on the design method of asymmetric optical elements for converting beam distribution. Asymmetric distribution converting and geometry generation methods were shown. In distribution conversion program, for a desired beam pattern, the shaper form is designed automatically using iterative calculations by applying the behavior of electrically charged particles. The beam elements are assumed to possess the same polarity of charge, which generates a repulsive force depending on the intensity of electric charge and distance between elements. Furthermore, the desired pattern elements are assumed to possess contrary polarities, so that every beam element is effected of attractive force from all desired pattern elements. For no optical path crossing, the adjacent relations of elements are maintained throughout iterations. In form generation program, the longest optical path of beam elements are based, other optical paths of beam elements are regulated to match a standard by changing the thickness of the optical element.

Chapter 3 is on a verification of this design method via testing in order to redistribute uniform collimated radiation into a single focused point. As a result, a paraboloidal surface was obtained, which performs the same function as a convex lens.

Chapter 4 is on processing and machining methods for fabricating optical elements. To make element's form by cutting for acrylic resin, or grinding for quartz or glass are applied. To improve its surface roughness, polishing and coating by silicone oil are applied.

Chapter 5 is on examples of asymmetrical beam distribution convert elements for laser marking. Pulse laser beam was converted to characters of "CIT" and mark of a star, and they were confirmed by shot beam profiles and burn marks on thin stainless steel sheets.

Chapter 6 is on an example of gauss-to-line beam converter. Beam distribution converter made of quartz converted 12 mm diameter gauss beam to 4.0×0.7 mm line beam in 100 mm of work distance. In beam scan test to colored plastic, the element was marked flat section in the burn pattern. And this beam can use in one process of works of metal powder melting type additive manufacturing.

Chapter 7 describes conclusion of this thesis.

As mentioned above, a new design method for a refractive-type laser beam distribution converter with an asymmetric shape was proposed. Elements were designed automatically, fabricated easily, and have functions for laser marking and beam scan process.

目 次

第1章 緒 言	1
1.1. 本研究の目的	1
1.2. レーザ加工と分布変換素子の必要性	2
1.2.1. レーザ加工法の特徴と他工法の比較	2
1.2.2. レーザ利用の形態と分布変換素子の必要性	4
1.3. ビームの強度分布変換に関するこれまでの研究	6
1.4. 屈折型分布変換の概念	11
1.5. 軸対称素子の設計	12
1.6. 旋盤による素子の製作とその問題点	13
1.7. 軸対称の設計手法が非軸対称素子に適用できない理由	14
1.8. 本研究の目的と論文の構成	15
第2章 強度分布変換素子の設計	16
2.1. はじめに	16
2.2. 非軸対称素子の設計概念	16
2.3. 分布変換プログラムの流れの解説	17
2.4. 移動方向決定プロセス	19
2.5. 移動量制限プロセス	22
2.6. 実行速度について	24
2.6.1. 理論上かかる時間	24
2.6.2. Ruby から C 言語への書き換え	24
2.6.3. 並列計算への対応	25
2.7. 点群生成プログラム	26
2.8. STL 化	28
2.9. CAM による工具経路生成	29
2.10. まとめ	30
第3章 設計手法の検証	31
3.1. はじめに	31
3.2. 設計条件	31
3.3. 計算結果	31
3.4. 形状生成と平凸レンズとの比較	37
3.5. まとめ	40
第4章 分布変換素子の加工法と加工装置	41
4.1. はじめに	41
4.2. 切削と研削	41

4.3. 研 磨.....	42
4.4. 研磨の代替手段	45
4.5. 加工装置と CNC 制御.....	50
4.5.1. 加工装置.....	50
4.5.2. 制御系.....	52
4.6. 3D プリント.....	54
4.7. ビームプロファイル測定装置	55
4.8. まとめ	56
第 5 章 分布変換の例 1 文字や図形パターンへの変換.....	57
5.1. はじめに	57
5.2. 計算条件	57
5.3. 計算結果	58
5.4. 加工と製作された素子	63
5.5. ビームプロファイル	64
5.6. 金属へのパターンニング	67
5.7. 3D プリントによる光学素子製作	72
5.8. まとめ	73
第 6 章 分布変換の例 2 線状ビーム.....	74
6.1. はじめに	74
6.2. 設計と計算.....	74
6.3. 計算結果	75
6.4. 石英を用いた素子の製作	80
6.5. 線状ビームのプロファイル	81
6.6. ビーム走査実験	83
6.7. 実験結果	83
6.8. 金属粉末積層造形への適用.....	85
6.9. まとめ	88
第 7 章 結 言	89
参考文献.....	91
関連論文および発表.....	94
その他の論文および発表等.....	95
謝 辞	97

第1章 緒言

1.1. 本研究の目的

本研究はレーザー熱加工のうちある大きさを持った領域に照射する加工を対象としており、ビームを部分的に拡大縮小して照射対象に適した強度分布に変換する、屈折型強度分布変換素子の設計ならびに製作するためのシステム構築を目的とする。

これまでレーザー熱処理などある面積を有する熱加工には一旦レーザービームをレンズやミラーにより集光し、集光点より遠方のビームが拡大する領域を利用して対象物に照射することで加工している。このときレンズの焦点距離に対する焦点から対象物までの距離(以降焦点はずし量と称する)や、レーザーパワー、走査速度といった加工条件は経験値や試行錯誤により適正化されている。

一方、照射対象は単純な平面の一部領域のみという容易な事例はもとより、たとえばレシプロエンジンのピストンリング部のような溝内面やころがり軸受の転動面などの曲面のように様々な形状の熱処理が求められ、斜め方向からしか照射できないケースや照射位置によってレンズからの距離が異なるケースなどでも照射形状と強度分布の両方を適正化することが必要になっている。レーザー発振器から出射されるビームの強度分布も発振器に固有でありこれを変化させることは難しいため、現在では発振器から出るビームをそのまま利用しているが、これを変化させることも需要がある。

そしてこのような分布を変化させても加工が小ロット生産対象であると、適切な強度分布を実現するための光学系を設計するだけではなく、安価で簡便に作る方法まで確立する必要がある。本研究はこのような実情に対し、屈折型の非軸対称非球面光学素子による解決法を提案する。

設計手法、素子の加工装置について説明し、実際に製作した素子を用いた事例を提示することで解決策のひとつを明らかにする。この章においては、レーザー加工の変遷と素子の必要性、既存の軸対称変換の手法とその限界について説明する。

1.2. レーザ加工と分布変換素子の必要性

1.2.1. レーザ加工法の特徴と他工法の比較

レーザーは非接触の熱源としてその利便性を最大限に活かして材料加工に供されている。レーザーの特徴であるコヒーレンシの良好さから集光性に優れ、単位面積当たりの熱量投入率(パワー密度)が大きいいため非接触材料加工に広く用いられている。具体的には造船などの重工業から自動車産業など大小様々な部品を扱う分野で切断や溶接などの材料加工、微細な対象ではコンピュータの補助記憶媒体として用いられているハードディスクドライブのヘッド調整に用いられる変形加工など、マクロサイズからマイクロサイズの加工まで幅広い分野で応用されている。一般的な機械加工では不可欠な工具の管理が不要であることや、レーザー発振器をワークから離れた箇所に設置し光をファイバやミラー光学系での伝送が可能であることが利点である。また、大出力レーザーは主として可視から赤外域の発振波長であるので、大気圧下での加工が可能である点が特徴である。これに対し電子ビームやイオンビームによる加工は大気圧下では窒素分子などに衝突して減衰してしまうため真空中でなければ運用できない。

レーザー熱加工を焦点距離とワークの配置の観点から 2 種類に大別し説明する。図 1-1¹⁰¹⁾にレーザーによる熱加工の種類とそれらを実現するためのレーザー照射条件の目安を示す。まず、焦点距離近傍のビームウエストにおける加工は最もパワー密度が大きく取れることから、投入したエネルギーによって溶融、蒸発させる加工に用いられている。加工の目安となるパワー密度は 10^6 W/cm^2 以上で従来はレーザーを集光することでこの値を得ていた。主な加工として穴あけ、切断、溶接、アブレーションによる除去加工等が挙げられる。もうひとつの加工法は、焦点からワークをオフセットして照射し加熱する手法である。1974 年には、General Motors 社によってパワーステアリングハウジングを対象に量産用技術として実用化されている¹⁰²⁾。焦点はずし位置における加工は、照射面積が広がる分パワー密度が低下するが、昨今の発振技術の向上により 100 kW クラスのファイバレーザーが市販されており、1 kW のときの 10 倍もの直径、図 1-1 の表面加熱加工に必要なパワー密度から計算するとおおむね 10 cm^2 に一度に入熱を与えることが可能になり、広い応用分野が期待できる。特にバーナ、アーク、電磁誘導(IH)加熱等といった他の熱加工法と比べ、入熱の時間および空間的な範囲をより限定することが可能で、必要なところのみ加熱するような高度にコントロールされた加工が可能となる。これにより、従来工法であれば変形したり割れが発生しやすい鋳鉄などの部品にも熱処理が可能になっている¹⁰³⁾。

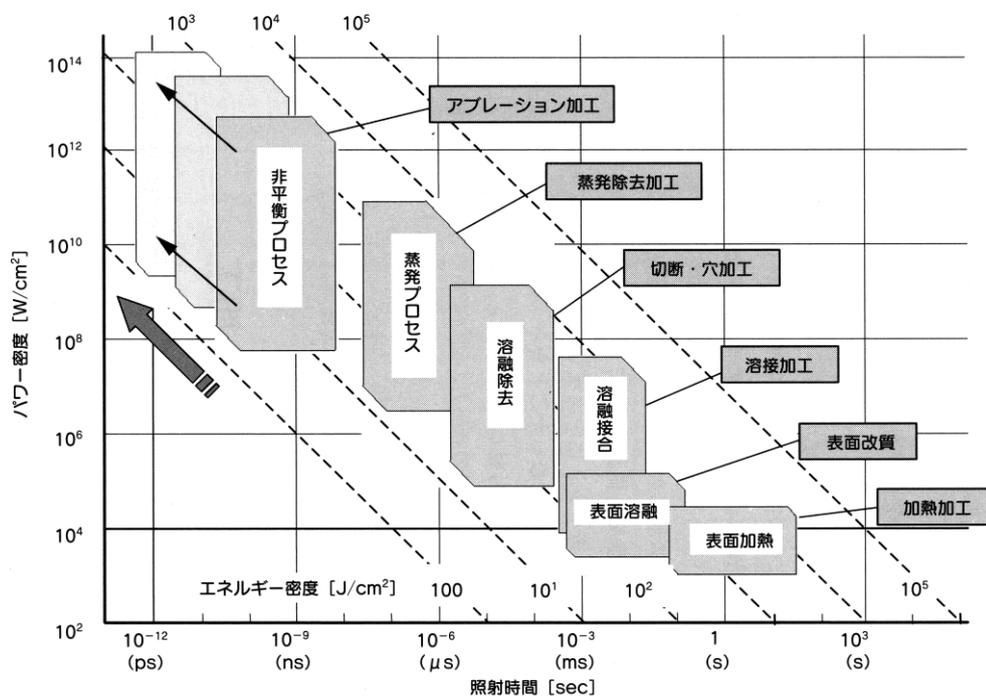


図 1-1 様々なレーザー加工に対するレーザーの照射時間とパワー密度の関係 ¹⁰⁾

1.2.2. レーザ利用の形態と分布変換素子の必要性

レンズはコリメート光(平面波)を球面波に変換する一種の波面変換素子である。一般にレーザを集光するためにはレンズを使うが、ビームが焦点付近の最小錯乱円内に収束するとき最大のパワー密度を得られる。そしてこの最小錯乱円の直径を小さくするために、球面収差を補正したレンズ(非球面レンズ、凸と凹のダブルレットレンズ等)が必要となる。良質の球面波にするためには波面が平面であることが必要で、光学素子の形状精度や表面粗さは波長以下より十分小さな起伏に整えることが要求される。これを実現するためにレンズは2面擦り合わせの原理により、不揃いの曲面が球面に近づくことを利用した研磨加工などによって精密に製作されている。加工点ではビームは微小な円に収束している領域(焦点)を使うため、発振器や光路、回折限界に伴うレーザスポット径の影響は受けるが、レーザの縦横のモードは加工にあまり関与しないため、発振器からの光をそのまま利用することが多い。

一方、焦点はずし位置での加工は熱処理などある程度の領域を対象とした加工で使われるが、加工深さや到達温度を所望の状態にすることは難しい。図 1-2 にレーザ走査による熱処理のイメージを示す。1 方向に走査するとき、円形ビーム図 1-2(a)ではビーム強度分布が均一であっても、ビームの中央部分と側面部分で入熱量に違いがあるので到達温度や熱影響層の厚さが異なってしまう。投入エネルギーを均一にするためには幅が一定の矩形状ビーム 図 1-2(b)が望ましい。また、一般的にレーザのパワー分布(ビームプロファイル)はガウス分布やマルチモードなど特有の分布があり、レンズでは焦点から離れるに従いレーザの発振モードに起因した強度分布が顕著になる。現在実施されている焦点はずし加工においては、所望の照射領域の形状と到達温度を実現するために数多くの試行錯誤を繰り返し妥当な状態を実現しているものと推測される。照射パターンを 図 1-2(b)のような発振光に依存しない形状としたり、加工面が曲面となっている等、加工領域が照射方向に直交した平面でない場合や必要パワーが局所的に異なるような入熱の需要も考えられる。こういったニーズを満たすには従来の球面レンズでは不可能で、レーザ強度分布を整形、変換する素子が必要である。

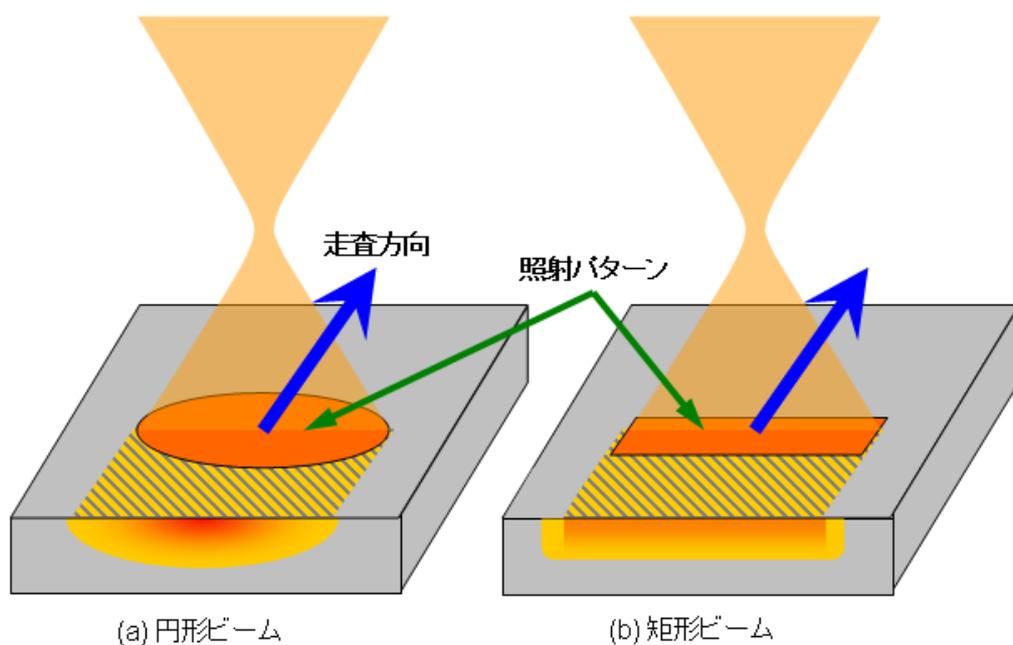


図 1-2 レーザ走査による熱処理のイメージ

1.3. ビームの強度分布変換に関するこれまでの研究

YAG ロッドのような固体のレーザ媒質で発振器を構成しているレーザはマルチモードと呼ばれる不規則な強度分布の機種が多い。これらのレーザ強度分布を他の分布にする方法には、発振器内にシングルモードを選択するためのアパーチャを挿入する方法があるが、出力が大幅に減少するデメリットがあり¹⁰⁴⁾、またシングルモード以外のパターンを選択するのは困難である。

シングルモード以外の強度分布を得る手法としては、光線の均質化、マスクによってビームの一部を取り出す、時間的配分、回折による分布変換、そして屈折による分布変換がある¹⁰⁵⁾。表 1-1 にレーザ加工の発展と強度分布変換技術の年表^{106)~109)}を、図 1-3 に各種のビーム整形技術を示す。均質化技術にはフライアイレンズ図 1-3 (a) とカライドスコープ図 1-3 (b)などがある。フライアイレンズ¹¹⁰⁾は多数の複眼状レンズによりビームを一旦分散させることで均質化する素子であり、1986年に Deng らによりレーザ加工に用途を意図して入力ビームの強度分布によらずに均一な強度分布を得る方法として提案された¹¹¹⁾。カライドスコープは名前の通り万華鏡状の筒の内面を鏡面とし多数の内部反射をさせることでビームをミキシングし均一化し、また出射光の開口形状により多角形状の照射形状制御ができる素子である。カライドスコープはもともと太陽炉やアークイメージ炉用として1963年に Chen らにより提案されており¹¹²⁾、高出力レーザには1980年には Grojean らにより応用されている¹¹³⁾。現在ではこのようなビーム整形デバイスは、JENOPTIK 社や Edmund Optics 社などから製造販売されている。いずれも光路の中途に挿入する素子であるため、光路が長くなり、また素子からの出射光は拡散光となるため、出射光手前に設置し、照射対象に密着させて使用する、素子の直後に結像レンズをおく、リレーレンズでもう一度コリメートさせる、といった配置が必要となる。密着させて使用する際は、カライドスコープをテーパ状にすることで集光作用を得ることも可能である¹¹⁴⁾。

マスクによる開口制御図 1-3(c)では、半導体レーザの楕円状の光強度分布を円形開口により円形に整形するための研究¹¹⁵⁾や、マスクとシリンドリカルレンズを用いた整形線状ビームによるセラミックスへの加工についての研究¹¹⁶⁾などがある。照射形状の制御は容易だが、パワー密度分布は元のビームの影響を受ける。また、ビームの不要部分を遮光しているため、光の利用効率が小さくなる問題や、マスクからの距離が遠くなると所望の分布から変化してしまう問題がある。

時間的配分法としては、ガルバノメータ 図 1-3(d)やポリゴンミラー図 1-3(e)で機械的に高速走査することで、必要とする熱分布にあわせて強度変調し照射形状を変化させる方法がある。ガルバノメータによってレーザ照射を制御する試みは、1979年には Oehrle らによって熔融石英のファイバを線引きする際の実非接触熱源として、軸外しレンズ回転法よりも加熱範囲を広げるために使われた¹¹⁷⁾。ポリゴンミラーは1990年に城戸らによって CO₂ レーザでの鋼の焼入れに用いられている¹¹⁸⁾。コンピュータ制御による分布の制御は比較的容易だが、ミラー駆動部品は機械的に動作するため消耗が早い点、また部品の慣性モーメントから発生する共振領域を避けた運用を求められる¹¹⁹⁾ことや慣性モーメントを小さくしなければならない可動部分にビームを反射さ

せるため、大出力化するとミラーの冷却で制限を受けることが問題となっている。

表 1-1 レーザ加工の発展と強度分布変換技術の年表 ^{106)~109)}

西暦	出来事
1917	アインシュタインによる誘導放出の予言
1954	アンモニア分子線レーザーの発振
1960	ルビーレーザーの発振
1964	CO ₂ レーザの発振 CW YAG レーザの室温発振
1970	TEA CO ₂ レーザの発振 CW 半導体レーザーの室温での発振 Xe エキシマレーザーの発振
1974	レーザーによる焼入れ加工の量産化 回折光学素子のレーザー加工への適用
1979	ガルバノメータによる均質化
1980	カライドスコープによる均質化
1986	フライアイレンズによる均質化
1987	Er 添加ファイバレーザーの開発
1990	ポリゴンミラーによる鋼の焼入れ
2002	ファイバレーザー出力が 1 kW 達成
2009	マルチモードファイバレーザーが 50 kW 達成
2013	マルチモードファイバレーザーが 100kW 達成

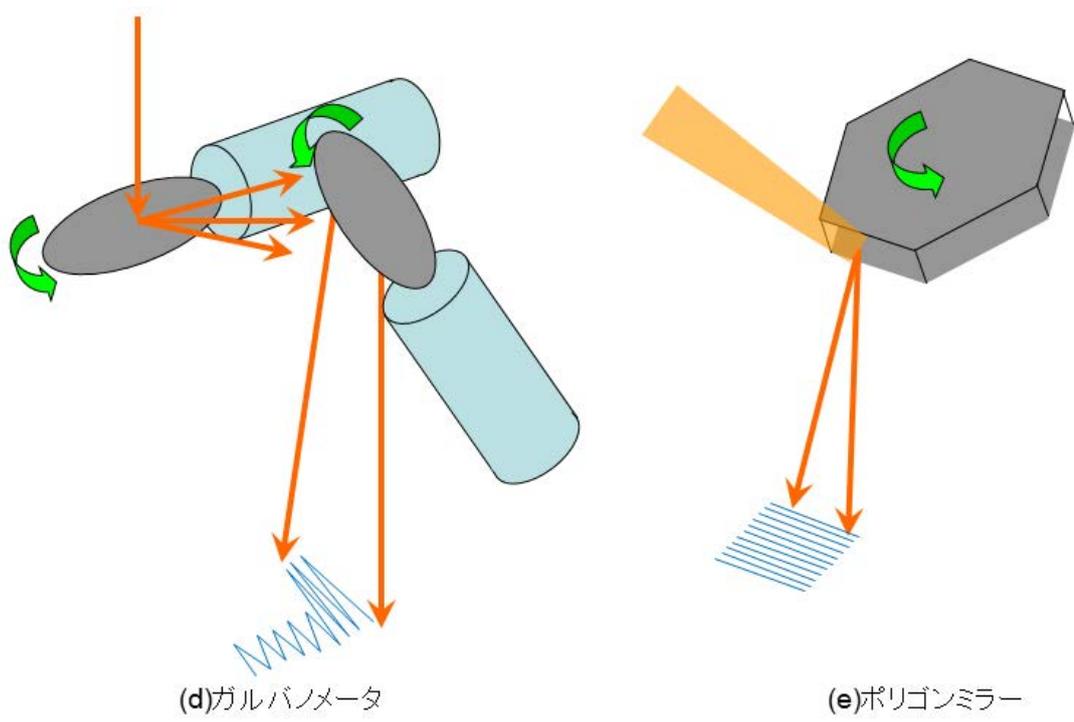
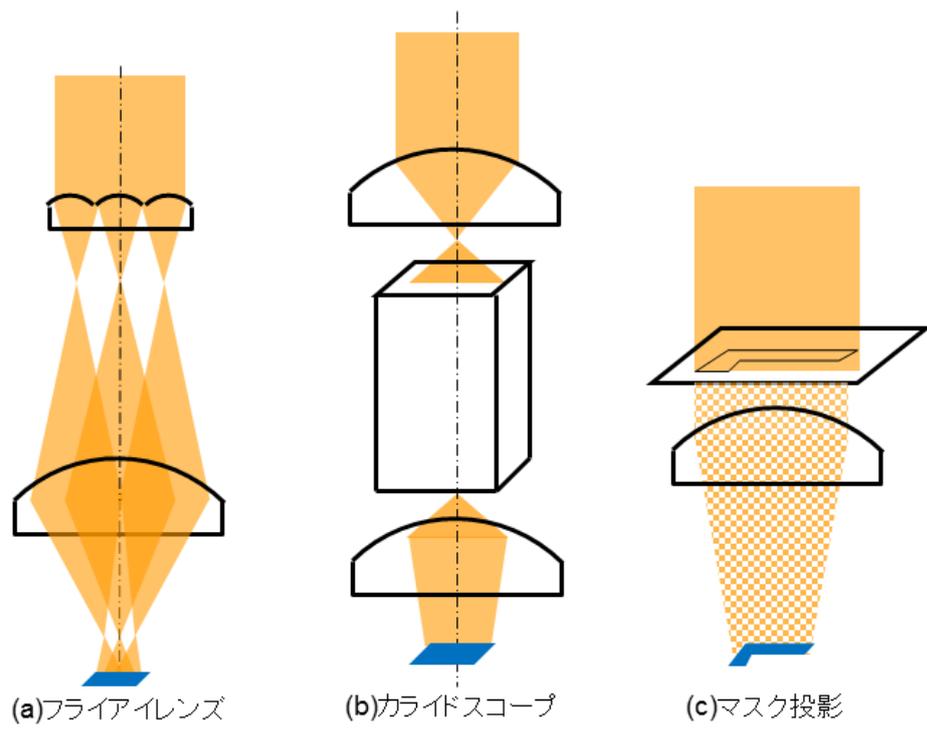


図 1-3 各種のビーム整形技術

回折光学素子は、光の干渉性によってビームを偏向する素子である。レーザ加工には 1974 年に Engel らにより適用された¹²⁰⁾。回折光学素子のパターン¹²¹⁾を図 1-4¹²²⁾に示す。図形の濃淡は高さ情報を輝度で表したものである。これらはフレネルゾーンプレートと原理としては同じである。干渉によって強め合う部分を、遮光と透過部分のパターンや、反射鏡または透過型素子表面に彫り込んだ凹凸形状から発生する位相の遅れによってコントロールする。2 値化や多値化による量子化も行えるため、コンピュータによる計算を行いやすい。CGH(Computer Generated Holography)では、ある程度計算機プログラムの計算手法が確立されており、繰り返し計算により高精度に集光パターンが求められるため、半導体産業などの微細加工用途での応用が期待されている。Gibson らはワークの領域ごとの冷却速度の違いなどから発生する到達温度の不均一を改善するために、ホログラム等のビーム整形技術を試みている¹²³⁾¹²⁴⁾。

CGH をはじめとする回折光学系では波長の数分の 1 のオーダーでのパターン製作精度によってはじめて計算した通りの分布となるため、マスクの形状はフォトリソとレーザや電子ビーム等を使ったリソグラフィなどで作成されるが、パターンの厚みに製作誤差が発生すると回折しない成分として 0 次光が現れ、これが光の損失となる。炭酸ガスレーザのような波長の長い光源の時と、Nd:YAG レーザなどのより短い波長では要求される精度や形状が異なり、基本的には設計波長専用の素子となる。高精度に製作するには半導体を製造する際と同様の設備が必要となり、小ロット利用では高価な素子となると考えられる。さらに、入力するビームの品質を要求するため、大出力ビームでありがちなマルチモードビームに対応しづらい。

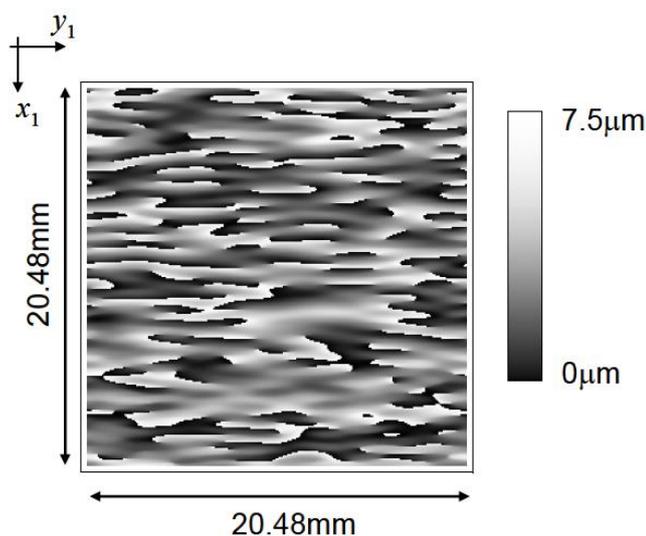


図 1-4 回折光学素子のパターンの例¹²²⁾

屈折による分布変換では、所望の強度分布や照射形状、照射面までの距離に応じて素子の斜面の角度を変化させることが可能で、任意の入熱を与えるという要求は十分に達せられると考えられる。また、波長の違いによる屈折率の変化が小さいため、同一光軸上に可視ガイド光を通すことで照射パターンの目視による概形確認が可能である。製品例としては、ガリレオ光学系によってコリメートビームをトップハット形状等に変換する軸対称型の素子がデルフトハイテック社からパイシェーパー等として紫外から赤外までの波長を対象として販売されている。

屈折型の光学素子として代表的なレンズでは、素子表面は nm のオーダーの表面粗さで傷のない品質が要求されるが、これは特に高ピークパワーのパルスレーザがレンズ表面の微細な欠陥を拡大させいずれ素子を破壊するためであり、レンズの耐久性を要求される利用法では面の粗さはより滑らかな方が望まれる。その反面、形状と表面はトレードオフの関係となることが多く、形状精度を維持したまま表面性状を良好にする加工は高価になりがちであり、その価格がレンズの耐久性要求を押し上げる循環を生んでいる。

焦点はずしでの熱加工に用いる光学素子では、最終的に熱伝導された温度分布が意味を持つため、非球面形状を正しく得ること、すなわち形状精度が重要である。しかし光吸収が熱として周囲に伝熱しながら到達温度に達するという工程を考えると、局所的な強度の過不足は全体に大きな影響を与えるとは考えにくい。すなわち分布変換という意味では、表面の粗さの程度は一般的なレンズよりあまり重要にならないと考えられる。この点は光学素子製作にかかる時間を短くでき、安価になるなど工業的な利用を意識すると有利な要因につながる。また、簡易に作製できる素子であれば、汎用性を持たせず都度専用に製作した素子を利用する方が合理的であり、素子の耐久性要求を低くすることができることも表面粗さを重要視しないで済む要因となる。

このようなことを考慮すると、本研究で想定している光学素子は金型成形法ではなく直接樹脂や光学ガラスなどから除去加工によって作製する手法が実現しやすいと考えられる。この結果、小ロット生産や壊れた場合の交換などにも対応することができ、光学素子を治具や工具と同等に加工対象ごとに最適な素子を選択し取り扱うことが見込める。

1.4. 屈折型分布変換の概念

図 1-5 に入射ビームが素子によって目的強度になるイメージを示す。軸対称素子における分布変換では、光軸を通る断面をとり半径方向の強度分布をみる。照射面の強度分布を比較すると、入射ビームより小さな需要しかなかったり、入射ビームのほうが低強度な個所が出てくる。これを是正するには、光軸から外周に向かって、あるいは光軸から最も離れた位置から順に強度配分素子につけたプリズムによって光線を曲げ、必要な光量となるまで配分すればよい。

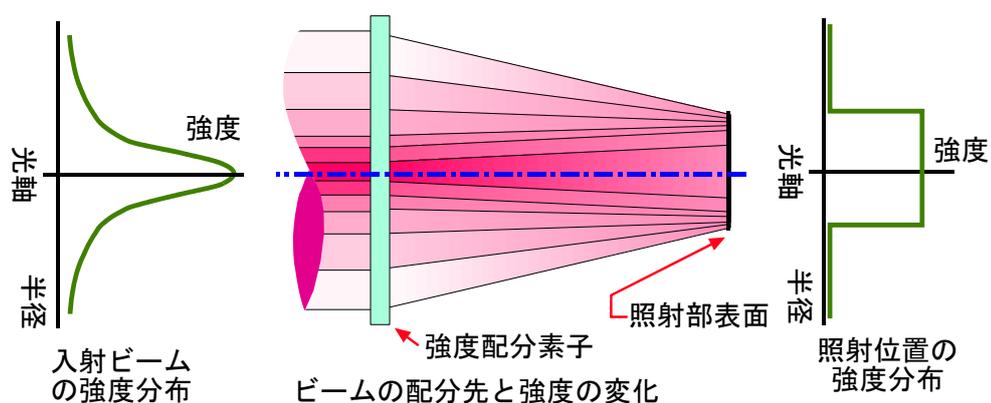


図 1-5 強度分布変換のイメージ

1.5. 軸対称素子の設計

図 1-6 に軸対称素子の形状決定手法を示す. あるひとつのプリズムの角度は光線の入射位置および配分先と作動距離によって求まる. ひとつ前のプリズムの端点から次のプリズムが始まるが, これはレンズの作動距離からの変位量や到達先のシフト量を加味して角度を決めることができる. そして各プリズムの端面がつながるように重ねていくと, 素子の断面が計算できる. 結果として光強度のない箇所へは凸レンズのように周囲から光を集め, 光強度を周囲に与えた箇所は凹レンズのような形状となる. 機械加工の精度より計算精度のほうが細かければ, 十分になめらかな素子表面が実現できる.

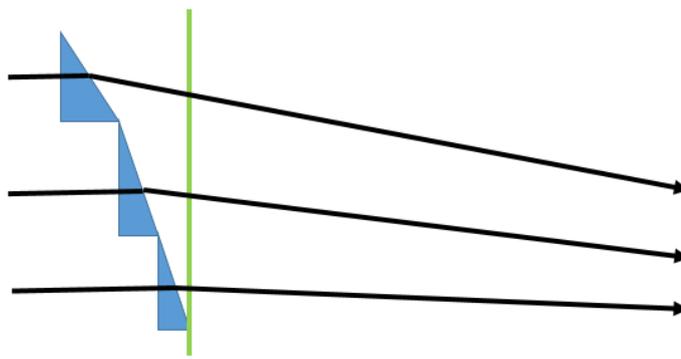


図 1-6 軸対称素子の形状決定手法

1.6. 旋盤による素子の製作とその問題点

プラスチック非球面レンズの試作では、これまでも NC 旋盤によって直接レンズ形状が削り出されてきた¹²⁶⁾。これは、製作に要する期間が短いためであり、さらに非球面金型の製作コストが非常に高いことも一因であった。この非球面レンズ試作技術の延長線上に、CNC 旋盤による変換素子の製作がある。金型を用いず、試作レンズの工法を製品として利用することで、簡便に少量の非球面形状素子が製作できる。

旋盤を用いた分布変換素子の研究は、バイトで削り出した後、回転する軸付フェルトバフで研磨することで製作した素子を用いてガウスビームをトップハット形状に変換した事例¹²⁷⁾、リングビームに変換する素子を NC 超精密旋盤と単結晶ダイヤモンドバイトを用いて研磨行程無しに加工した事例¹²⁸⁾がある。また、分布変換素子と位相補償素子の2枚を用いて異なる強度分布の平行光を生成するビームホモジナイザが布施らによって開発されている¹²⁹⁾が、こちらも回転対称の素子である。旋盤の構造上、軸対称の分布変換は可能だが、照射形状を変化させる素子の製作は困難である。

1.7. 軸対称の設計手法が非軸対称素子に適用できない理由

入力分布が軸対称でない場合、半径方向の強度分布を配分して目標分布とする計算をして全周に適用するという手法は適用できない。出力分布がたとえば矩形のビームを得ようとする場合、図 1-7 に示すように矩形の隅の部分に対応する方向では照射面積が他の場所より大きくなる分だけ必要なエネルギーの量が増え、回転対称性は失われ、このような分布は方向によってエネルギーの過不足を調整せねばならないため軸対称の計算の考え方があてはめられない。

また、端から順に必要なエネルギーの分だけを必要なビームをプリズムで配分し、プリズムの集積から素子形状を決定するという計算手法そのものが非軸対称の場合適用できない。たとえば、2次元の格子状の形状を考えたとき、左上から計算していくとして、上の行を先に計算するのか、それとも左列から順に計算するのかによって結果が異なる可能性が高く、一意に最適解が決まらない。さらに、素子の表面形状の決定においても、行または列ごとに計算する方式では行ごとあるいは列ごとを連続性をもった斜面として計算することも困難であり、プリズムの端面から次のプリズムを計算する手法では素子の形状が不連続な個所が発生することも容易に想像できる。

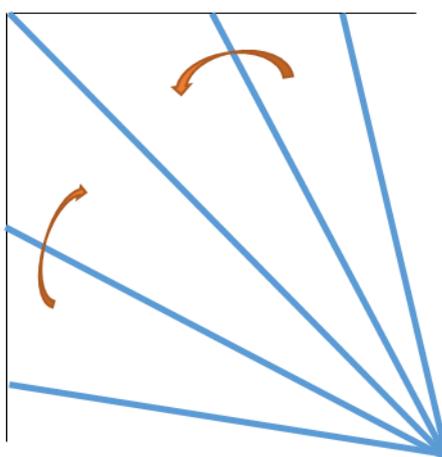


図 1-7 非軸対称素子を既存手法で計算しようとした場合

第2章 強度分布変換素子の設計

2.1. はじめに

この章では、入射してきたレーザビームを目標形状にし照射するための光学素子の設計概念やその具体的なプロセスについて述べる。まず強度分布を変換するプログラムについて説明する。計算手法の概念を説明する。プログラムの概要を示し、中でも重要な概念である光線要素の移動方向決定プロセスと光線の交差を防ぐための措置について解説する。また理論上の計算に要する時間と実際の実行速度の変化、プログラムの高速化について取り扱う。以上で任意の強度分布にするためビーム各要素の光路の方向が定まる。また、強度分布変換プログラムで得られた照射分布を実現するために、光学素子の形状を生成するためのプログラムの動作について明らかにする。

2.2. 非軸対称素子の設計概念

軸対称分布変換素子のように最適解を求めるような手法が有効ではないと考えられるため、非軸対称の分布変換の計算では、たとえば、非常に高い粘性を持つ流体が型枠の形に自然に変化していくような、自然現象にのっとった分布の変換手法が利用できると考えた。

計算の開始時点における状態としては、ビームプロファイラなどの面にセンサが並んだ装置や、単センサを走査しながら取得した入力強度分布をもとにするため、格子状に要素があり、各要素に光強度データが入力されている状態とした。次に、要素は強度を保持したまま要素の位置の移動によって分布の変化を表現するようにした。これはたとえば有限要素法による熱伝導計算のように、要素の持つ値が変化していくような方式であると、ある光線がどこに行っただかが混然となってしまっただけで光の配分を求める際に不適だからである。計算の過程で要素の位置が移動していく場合の問題点は、光線が混雑しないようにする点である。光線が交差する状態は、照射面において急激な位相の変化によって干渉が発生する原因になりうるし、素子の表面形状にも悪影響を与える。そこで、要素が移動する際には、他の要素を追い越したりしないよう制限を加える必要がある。この制限するための条件として、開始時に他の要素との間によく伸び縮みするひもを相互に結ぶことによって、ひもが交差することのない範囲で移動させることで解決できる。

どんなモチベーションによって要素が移動するかについて考える。目標の分布パターンが光の需要となるので、そこに向かって近くの入力要素が移動していくのが考えられる。需要に対し入力要素が引き込まれるような力を設定してやればこれは実現できる。しかし、ただ向かっていくだけであると目標要素についた時点で移動しなくなってしまい、他の需要点に行かず偏りが発生してしまうことになる。すべての需要にまんべんなく入力要素がいきわたるようになるためには、ある目標点にはもう十分に要素が来ているので他に行くようにという指示が必要となる。この過剰集中の信号と

して、入力要素間に互いに反発する力を考えてやると、目標分布に近づいた要素が増えてくると、目標へ引き込む力と、入力要素が反発し押しのける力とを合わせて受けることによって、より需要を満たせていない目標に対して入力要素が移動していくことになる。

最後に、形状生成について考える。ここまでの考えによって入力された光線の照射先は求まっているが、このままでは形状にならない。プリズムの角度を決めたのち、端から順番に並べることでZ座標を決めてゆく手法では1方向のプリズムの連続性は確保できるが、もう一方の連続性は維持できない。そのため、何らかの手法を用いて、すべての要素のZ座標の位置が一度に決定されるか、すべての要素が同じ基準に対しての計算によって求まるようにする必要がある。これは後述する最長光路を用いた手法によって解決する。

実際の計算においては、 10×10 の要素数でも手計算はほぼ不可能なため、プログラムによる計算が可能な状態で、上記の制限や規則を満たすようにしなければならない。多体の相互作用をシミュレーションする技法としては分子動力学²⁰¹⁾²⁰²⁾で行われているような手法もあるが、粒子の大きさや重さ、粒子同士の衝突など、今回取り扱わなくてよい事項が多数含まれ、また粒子の飛び越しをさける方法がないため、独自にプログラムを組むこととした。

2.3. 分布変換プログラムの流れの解説

プログラムは分布変換と形状生成の2つに分かれている。そのうち分布変換プログラムの基本的な動作としては、「光の要求のないところからは光線をそらし、より需要のある個所に光を集める」ためにはどのように光線を移動すればよいかを決定する機能を持つ。計算では、光線は点状の強度を持った光線要素の集合として扱うとし、これら要素が寄り集まれば投影面での光の強度が強くなると考える。ただし、急激な光線の混雑によって光線間で位相が急激に変化することによる干渉を防ぐために「光線要素は初期の隣接関係を維持する」「光線要素は交差しない」を満たすように光線要素の位置を変えていく必要がある。

図 2-1 に分布変換プログラムのフローチャートを示す。初期設定とデータの読み込みを行った後、繰り返し計算に入る。計算の繰り返し箇所は、移動量と向きを算出するために入力要素間に働く斥力と目標強度分布に働く引力を計算する部分と、その後要素が交差しないように移動先座標を確定させる部分からなる。また、繰り返し計算の周回ごとに計算結果を初期座標と計算後の座標からなるXY2軸の座標データとして出力する。この出力データをExcelに入れて散布図を描くことで計算の進行を把握し、また形状生成ソフトウェアへの入力データとする。次節からはさらに詳しくプログラムを説明する。

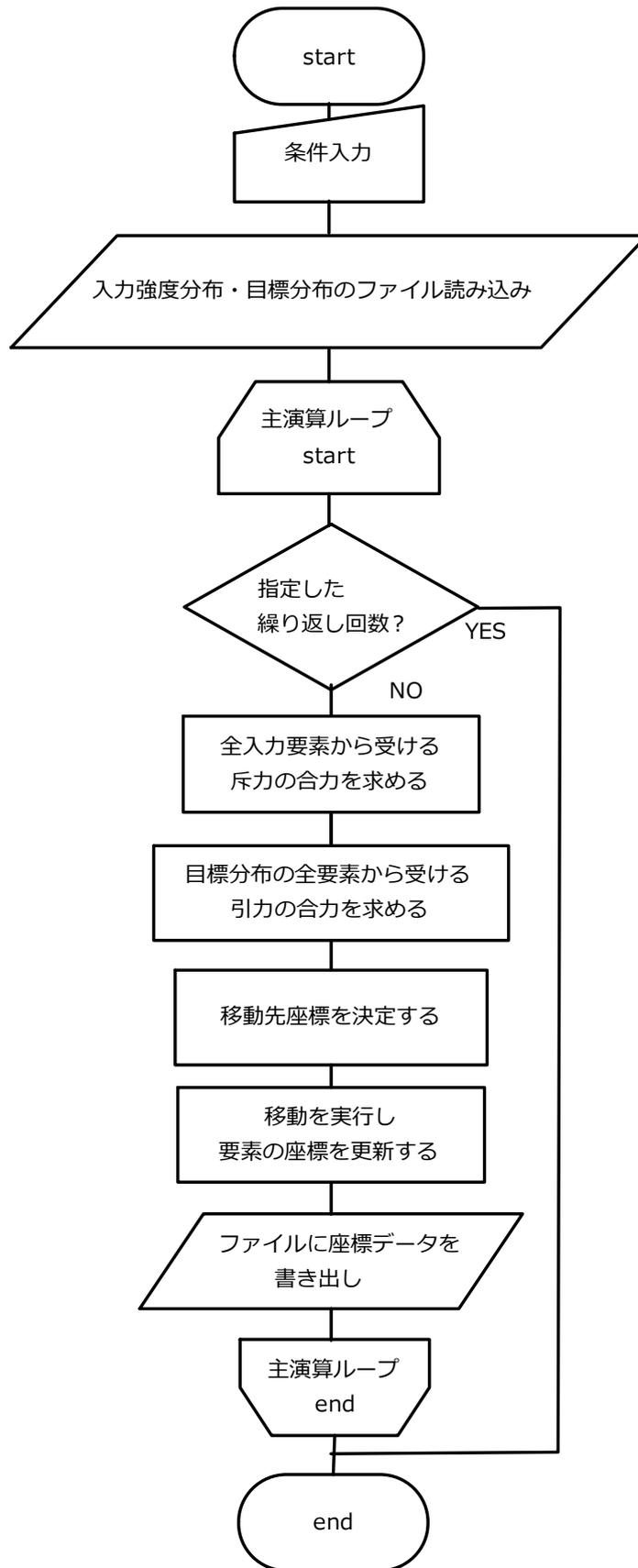


図 2-1 分布変換プログラムのフローチャート

2.4. 移動方向決定プロセス

ビームの到達先は以下の項目を考慮しながら行う；

- 1)入射面から照射面間でエネルギーの総和が等しくなること
- 2)照射面で需要に対して過不足ないようビームを偏向すること

前提として、デジタルカメラやビームプロファイラからのマップ状の強度データを入力データとするので、入射光を光強度を持つ要素(粒子)が格子状に並んだ集合とみて計算を行う。入射するビームの素子の位置における強度を $P_{in}(x,y)$ 、照射面における強度を $P_{out}(x,y)$ 、目標の強度分布を $P_t(x,y)$ とする。このとき強度分布は格子点に強度があるとして扱う。

1)について、入射ビームの全パワーと照射面の全パワーが等しいとする。すなわち、

$$\iint P_{in}(x,y)dxdy = \iint P_{out}(x,y)dxdy = \iint P_t(x,y)dxdy$$

となる。図 2-2 に入射ビームと照射されるビームのイメージを示す。図のように入射ビームがガウス分布で目標分布が均一な星形とすると、それぞれの強度分布が持つ強度の和(強度分布が描く図形の体積に相当する)が変換前後で変わらないとする。

2)について、光線の偏向を決める際には荷電粒子同士が押し引きする力を援用して計算する。入射ビームには正の極性、目標分布には負の極性の、強度分布に応じた電荷を各要素に与えると、同種電荷を持つ入力要素間には離れようとする斥力が、異種の極性を持つ入力要素と目標要素間には引き付けあう引力が発生する。そしてこれら引力と斥力の作用のバランスによって入射強度分布を変形させ目標に合わせる。

まず斥力について説明する。入力強度分布のある要素ともう一つの要素について考えたとき、要素間の相対的な距離と、要素それぞれが持っている光強度が情報として利用できる。ここで、それぞれの入力要素に強度のぶんだだけ同極性の電荷がかかっているとみなすと、入力要素の間には距離の二乗に反比例し強度の積に比例する反発力、斥力が発生する。照射面に到達したある光線要素の強度 $P_{out}(x_i,y_j)$ とこれ以外の光線要素のうちのある一点 $P_{out}(x_m,y_n)$ との間にはたらく斥力 $f_{xij}(x_m,y_n)$ は要素間距離を d とすると、

$$f_{xij}(x_m,y_n) = \frac{p_{out}(x_i,y_j) \cdot p_{out}(x_m,y_n)}{d^2}$$

となる。これをある要素自身を除く他の全光線要素との間で計算しその合力を求めるとすると、その要素が受ける斥力が決まる。図 2-3 に斥力のイメージを示す。これは入力ビームのうちの 1 要素が他の要素のうちの一部(3 要素)から個別に受ける斥力を模式的に説明している。この斥力のみで計算すると、分布は最終的に与えられた範囲の中で均一な強度となるように変化していく。

つぎに、入力強度分布と目標強度分布にはたらく引力について計算する。ある要素 $P_{out}(x_i,y_j)$ に目標強度分布のうちのある一要素 $P_t(x_m,y_n)$ によってはたらく引力を $g_{xij}(x_m,y_n)$ とすると、

$$g_{xij}(x_m, y_n) = \frac{p_{out}(x_i, y_j) \cdot p_t(x_m, y_n)}{d^2}$$

のように距離の 2 乗に反比例し強度の積に比例する引力が発生する。これを全目標要素間で計算しその合力をとると、ある要素に対しての引力による移動量と方向が出る。図 2-4 に引力のイメージを示す。これはある要素が目標要素から個別に受ける引力を模式的に示している。

これらのある要素にはたらく斥力と引力それぞれの移動量の合力が、その周回でその要素が移動すべき方向と量になる。これを全入力要素に対して計算することで各要素がどこに向かって移動すればよいかを指定する。

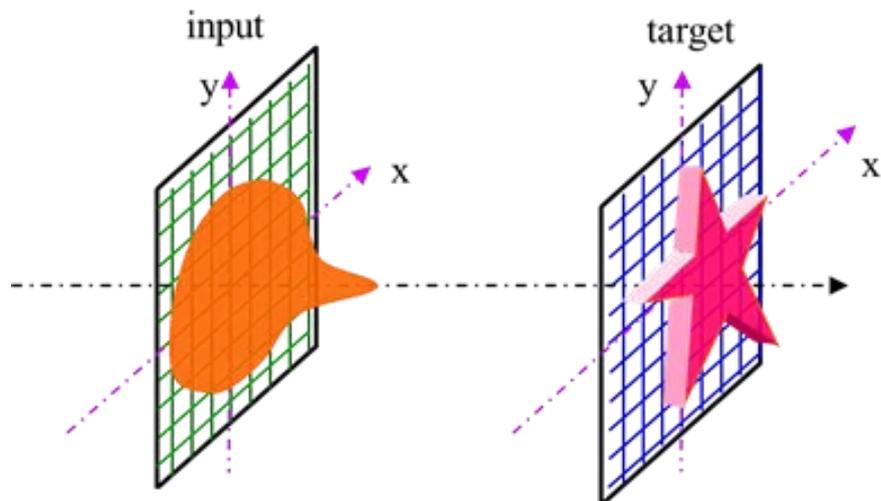


図 2-2 入射ビームと照射されるビームのイメージ

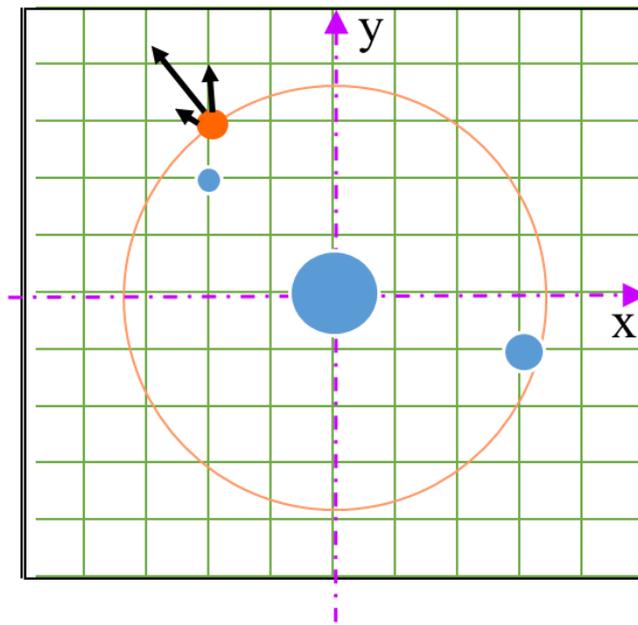


図 2-3 斥力のイメージ

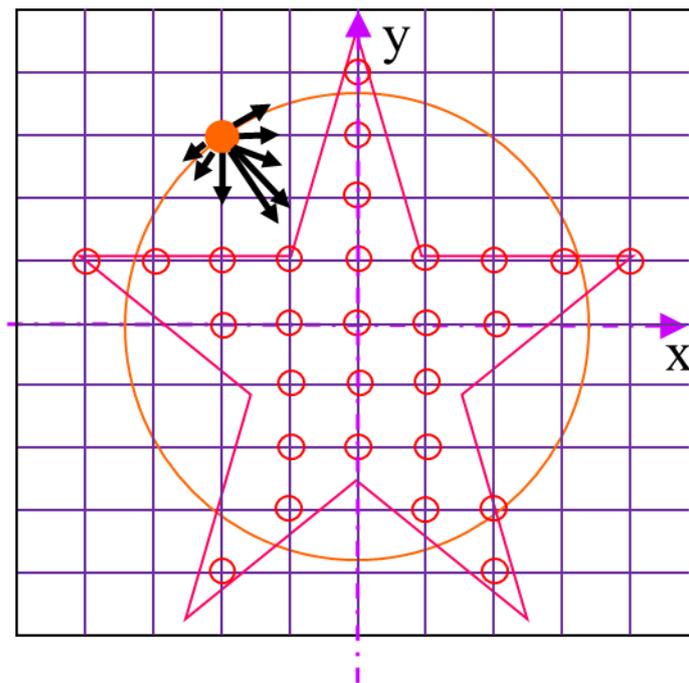


図 2-4 引力のイメージ

2.5. 移動量制限プロセス

前節の操作により、各計算繰り返しにおいて要素が移動する方向と量が求めたが、このままのベクトルに移動を実行してしまうと、それぞれの要素ごとに異なる移動方向や移動量によって光線の交差が発生してしまう可能性が高い。これを避けるために、ボロノイ(Voronoi)図やドロネー(Delaunay)三角形分割の考え方を利用することで移動方向や量を制限する。

ボロノイ図とドロネーグラフの例を図 2-5 に示す。青点が要素、緑の点線がボロノイ領域の境界、赤の実線がドロネーグラフの線分である。ボロノイ図とは、平面内に配置された要素に対して、要素への距離が最小となるように領域を分割した図であり、各要素はこの点線の領域の範囲で移動することにすれば、光線の交差が発生することはない。ただし、要素を一度移動すると位置関係が変わるため、繰り返しごとにボロノイ図を再計算する必要がある。ドロネー三角形分割とは、ボロノイ図と対になるもので、隣接するボロノイ領域の要素同士を線分でつなぐことによってすべての構成された面が三角形となるまで平面を分割することであり、その定義から生成した線分には交差している箇所がない。そのため、ある要素の移動方向をドロネー三角形分割の線分上としている限り、一度の移動で交差が発生する余地はない。同時に複数の要素を移動させる場合、ボロノイ図の境界を越えないようにすればよい。

より現実的な対応としては、初期配置では正方格子状の要素の集合から開始しているため、要素の周辺6要素、左上、上、左、右、下、右下の隣接要素との間に線分を結ぶと、ドロネー図と同様に初期状態で交差していない線分が生成できる。図 2-6(a)のようになる。この状態から開始するほうが、計算幾何学的な処理をせずに済むため簡便である。

移動を線分上に沿うような向きにするためには、移動ベクトルと隣接要素との接続線分の向きの単位ベクトルの内積を用いて、もっとも移動したい方向に近い線分を探し出す。また、もっとも内積の値が高かった線分と基準の値を比較し、その値よりも小さかった場合は向き不一致としてその繰り返しでの移動を中止する。

また、移動量は線分長いっぱいを移動可能とすると、逐次的に要素を移動する場合は良いが、同時にすべての要素の位置を更新する場合には、ひとつの線分を対向する2要素がともに移動した場合交差が発生してしまう恐れがある。要素の一斉移動は後述する計算の並列化のためには重要であるため、これを実現するために、移動量は線分長の半分未満とすることで移動実行時の交差を防ぐ手法を採用している。図 2-6(b)に模式を示すが、橙色の点から黄色の矢印のように隣接要素のさらに先へ移動しようとしている要素が、線分上を線分長の半分未満だけ移動するように2の乗数を適当にとった値で除すことで赤矢印のように制限される。

最後に、決定した移動方向、距離にすべての要素を同時に移動実行し、繰り返し計算1周の計算が完了する。計算のある周回だけに注目すると移動ベクトルの方向に接続線がない場合があるが、周囲の要素の移動に伴って移動ベクトルの方向も要素を結ぶ線分の向きも動的に変化し、次第に目標分布に近づく。

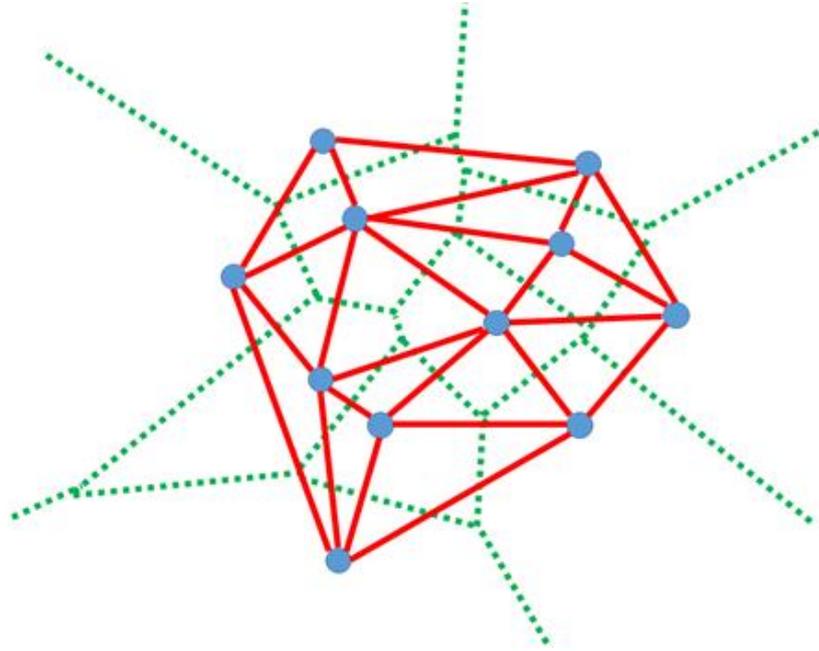
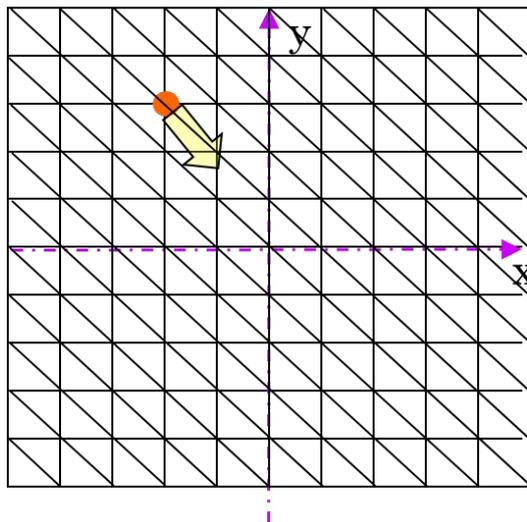
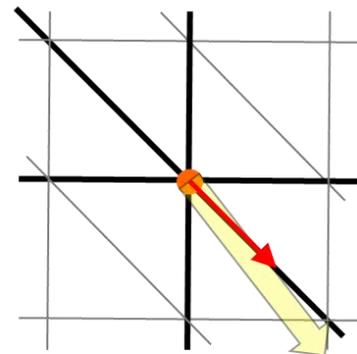


図 2-5 ポロノイ図, ドロネー図の例



(a) 初期配置における接続線



(b) 移動量の制限

図 2-6 初期配置の隣接関係を利用した移動方法決定の例

2.6. 実行速度について

2.6.1. 理論上かかる時間

ここまでの説明のような手法で、主要な計算ループが実行される。このとき、斥力を計算する箇所では要素ごとに他のすべての入力要素との間に働く力を計算する。また、引力を計算する箇所では、要素ごとにすべての目標要素との間に働く力を計算する。これにより、要素数を E とおくと、 E^2 だけ計算が発生することになる。移動方向を決定する箇所では、ベクトルの内積を計算するなど処理が移動量を計算する箇所より多くなっているが、繰り返しは高々要素数だけでよいため、計算時間としてはそれほど多くない。そのため、実行時間は E^2 に比例すると予測できる。

Ruby でシングルスレッドプログラムを作成し実際に intel Core i7-4770K CPU で計算した結果、 50×50 (2500)要素のとき、計算1周にかかる時間が約33秒だったのに対して、 100×100 (10000)要素のときは約523秒と約15.8倍かかり、これは予測していた実行時間の伸び 4^2 とほぼ一致する。

2.6.2. Ruby から C 言語への書き換え

先に見た通り、本プログラムは計算の空間解像度を上げるほどに計算時間が要求されるため、プログラムそのものが高速である必要がある。そこで、分布変換ソフトウェアを試作時に用いていたインタプリタ言語である Ruby 2.x から、コンパイル言語である C 言語に置き換えた。書き換え時には原則として計算フローが変更されないように移植した。実際に計算を行うと、コンパイル時の最適化にもよるが、Ruby プログラムの15~16倍の計算速度となった。これによってより多くのケースを計算したり、あるいはより多い要素数で計算することが可能となった。

2.6.3. 並列計算への対応

Microsoft VisualStudio 上の C 言語では OpenMP 2.0 規格による共有メモリ型並列計算が可能である。並列化対応は元々のプログラムが並列化可能なようにアルゴリズムが組まれていれば比較的容易であり(たとえば、繰り返し計算内で前後の計算が独立していて、あるスレッドで実行している計算に他のスレッドの計算結果が参照されない状態になっている、などの条件を満たす場合。今回は引力及び斥力の計算が並列化の対象であり、繰り返しの終了後に要素を一括して移動させることで並列化可能な構造にしてある)、`omp` プラグマを用いてコンパイラに並列化箇所を指定しコンパイルすることで、実行先環境の CPU コア数に合わせて並列数を自動で変化させたり、あるいは実行スレッド数を制限することもできる。100×100 要素での計算結果は4コア時で約54倍(Rubyプログラム比)の実行速度となり、シングルスレッドでC言語のときと比較すると3.4倍となった。なぜ4コアで計算速度の増加率が単純にCPUコア数の積とならないのかということ、非並列領域の存在や並列化のオーバーヘッドによる効率低下もあるが、それよりも利用した intel core i7-4790K CPU の turbo boost 機能によって利用率の高いコアが少数の場合のみ規定周波数よりクロックを上げて実行されている(このCPUでは標準4GHzのところ4.52GHzまでクロックアップすること、また大多数のコアの利用率が高いとCPUの過熱防止のため自動的にクロック周波数を下げて運用される(Throttling)仕様であることが大きな影響として考えられる。実際に4つすべてのCPUコアに計算させると、コンピュータを設置した部屋の温度にもよるが、数百MHzほどクロック周波数が下がることを確認している。このようにすべてのCPUを使い切るとコアあたり効率は下がるがPCあたりで見れば高速化できているため、すべての物理CPUを使う設定とした。ただし、Hyper Threading という論理コア数を物理コア数の倍としCPUの空きを減らし効率化する機能は、計算時に期待するような空気がなくむしろ計算速度が落ちるため利用しない。

2.7. 点群生成プログラム

前節までの分布変換プログラムからは、カンマ区切りの「初期 X 座標, 初期 Y 座標, 計算後の X 座標, 計算後の Y 座標」というフォーマットでのデータが得られる。これをもとに、素子表面の Z 座標を算出し、3次元座標の点群とする。

分布変換プログラム時には距離の概念がなかったので、ここで入力分布と照射面の寸法および作動距離を指定する。

ビームの到達先が計算によって決定すると、そのビームの偏向方向になるような斜면을ビーム断面の各場所に与えることでビームは所望の強度分布になる。ただし、各場所でのプリズムの角度を個々に生成すると領域の外周ごとにフレネルレンズ状の無数の段差になり加工が難しくなる。そこで、各領域の斜面をつなぐことで連続した面にしなければならない。なお素子の入射面は平面で光学的機能はなく、射出面のみを屈折面としている。屈折面を1面のみにすることで偏向可能な角度の最大値は2面の場合より小さくなるが、形状計算も実際の素子の加工も大幅に簡略化できる点で有利である。

凸レンズの集光作用を波動光学的に解釈すると、レンズに入射する光線の波面が焦点の位置で同時に到達することであり、これは入射位置から焦点までの光路長がレンズのすべての個所で等しいことを意味している²⁰³⁾。つまり空間を伝播する距離の違いが屈折率の高いレンズを伝播する距離(厚さ)である。形状生成プログラムでは照射面に同位相でビームが到達するとして素子形状を求める。すなわち素子の入射面から各要素の到達位置までの光路長が等しくなるように、空間を伝播する光路長の違いを、屈折率が高い素子内部の光路長に反映することで素子の厚み、つまり形状を算出する。図 2-7 に光路長を用いた素子形状の決定を示す。まず、全要素の初期座標から目標座標までの光路長を求め、最も長かったものを基準長 L_{ref} とする。この部分の素子厚さは最低の厚さ d_{min} とする。それ以外の要素は空間を伝播する光路長 L_{xy} を基準長から減じた長さが素子の屈折率 n とその部分の厚さ d_{xy} からなる光路長になっていればよい。すなわち、

$$L_{ref} = L_{xy} + nd_{xy}$$

のように最長光路と光路長が一致するようにし、最低厚さ d_{min} を加えた寸法をその場所の素子の高さとする。この方式だとビームの出射する向きと素子の高さ方向が大きく異なっている場合には誤差要因となるが、今回は角度が小さいので無視できるものとした。

なお、点群生成プログラムは計算の繰り返しが高々要素数しかないため、Ruby で書いても実用的な速度になる。

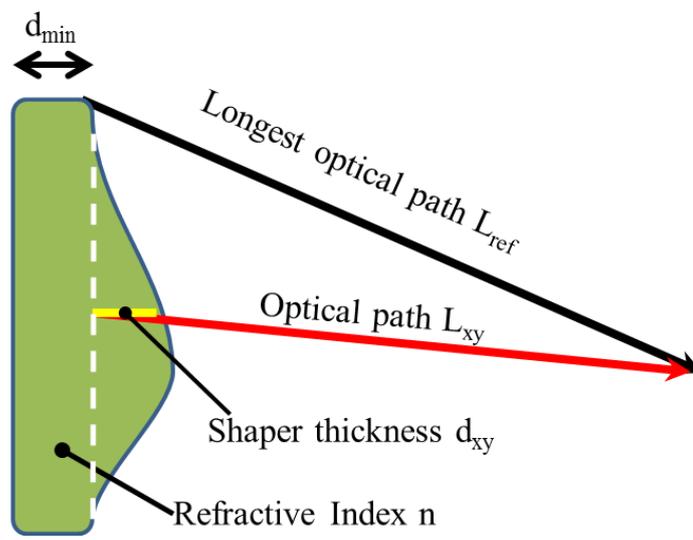


図 2-7 光路長を用いた素子形状の決定の模式

2.8. STL 化

生成した点群のサーフェス化には、既存のソフトウェア Meshlab を用いる。図 2-8 に MeshLab の実行画面を示す。このソフトが認識できる点群形式のうち、「.asc」形式(カンマ区切りで XYZ の座標の数値が入っているフォーマット)に合わせて点群による形状生成ソフトウェアから出力したファイルを Meshlab にインポートし、点群形式から三角形パッチのサーフェスモデルに変換する。変換したデータは CAM ソフトウェアが認識できる STL 形式で保存する。

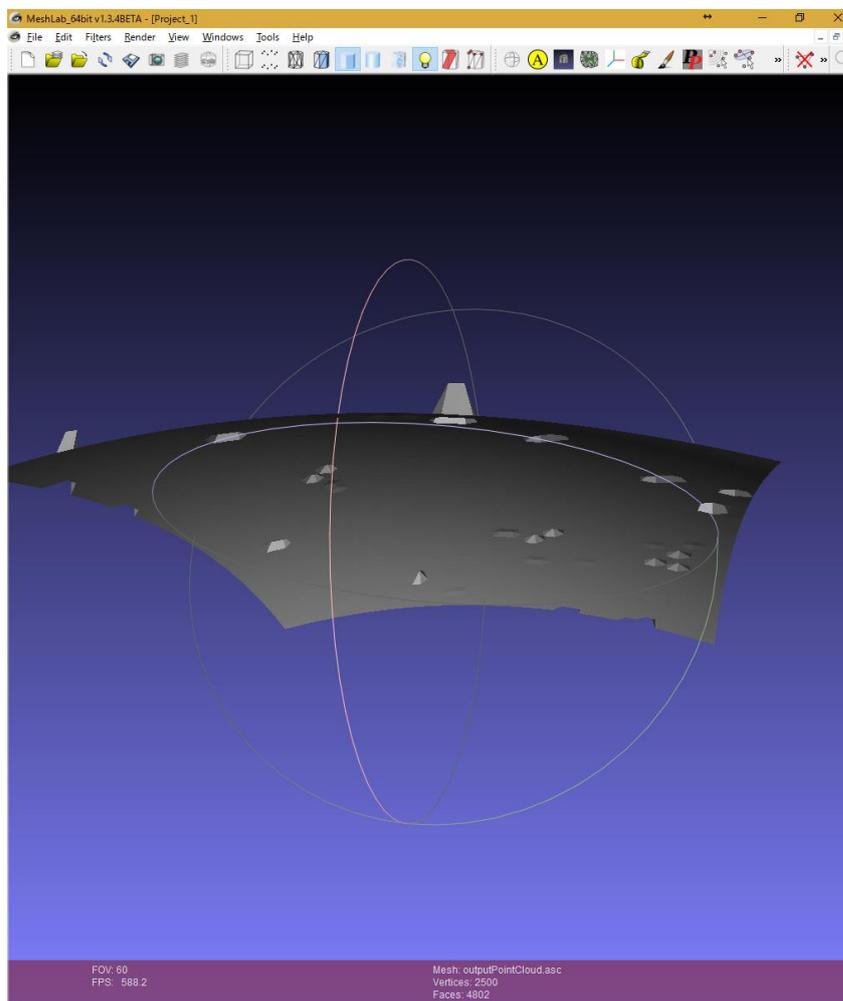


図 2-8 MeshLab の実行画面

2.9. CAMによる工具経路生成

工具経路計算にはCAMソフトウェア Vectric社のCut3Dを使用する。図2-9にCut3Dの実行画面を示す。入力したSTLファイル形式の3Dデータを投影した立体図形として表示し、工具の直径を加味した経路を生成する機能を持つ。STLデータがシェル状に閉じていない形状であっても適した寸法のワークを割り当て彫刻する機能を持つので簡便である。使用する際には表示された図形の表裏を確認することが重要である。

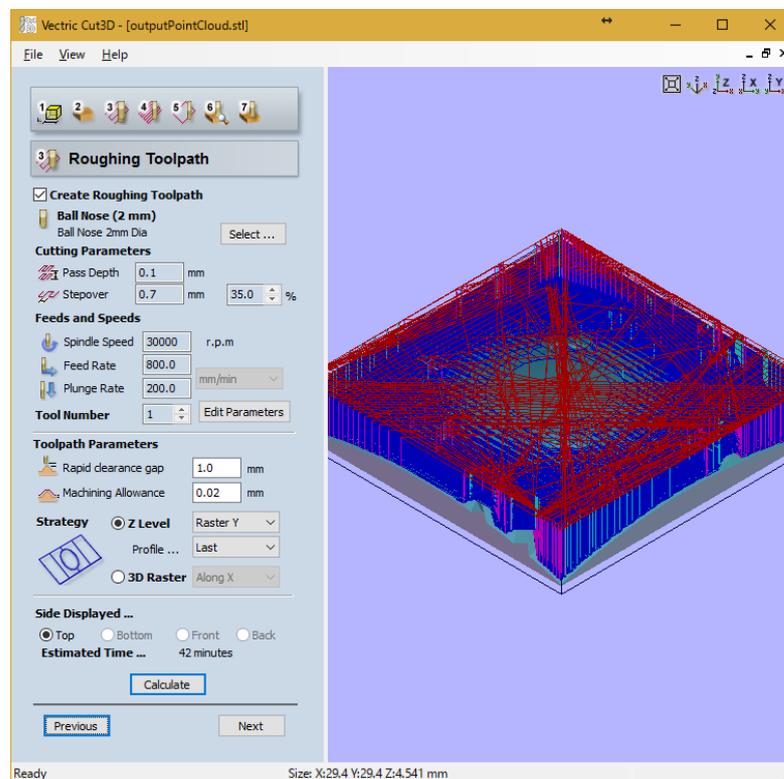


図 2-9 Cut3D の実行画面

2.10. まとめ

この章では、非軸対称形状の分布変換素子設計手法について、分布変換と形状生成の点から解決策を述べた。分布変換プログラムでは光線要素に対し電荷を持った粒子とみなすことで要素間に発生する引力と斥力の合力によって要素の移動方向と量を決め、初期配置の隣接要素との間の線分を利用して光線の交差を防ぎながら繰り返し計算することで光線の照射位置を求めた。分布変換素子の形状は最長光路を利用する手法を用いて求めることができた。実用的な速度になるようプログラムを改修し、また得られた点群の処理方法について述べた。

第3章 設計手法の検証

3.1. はじめに

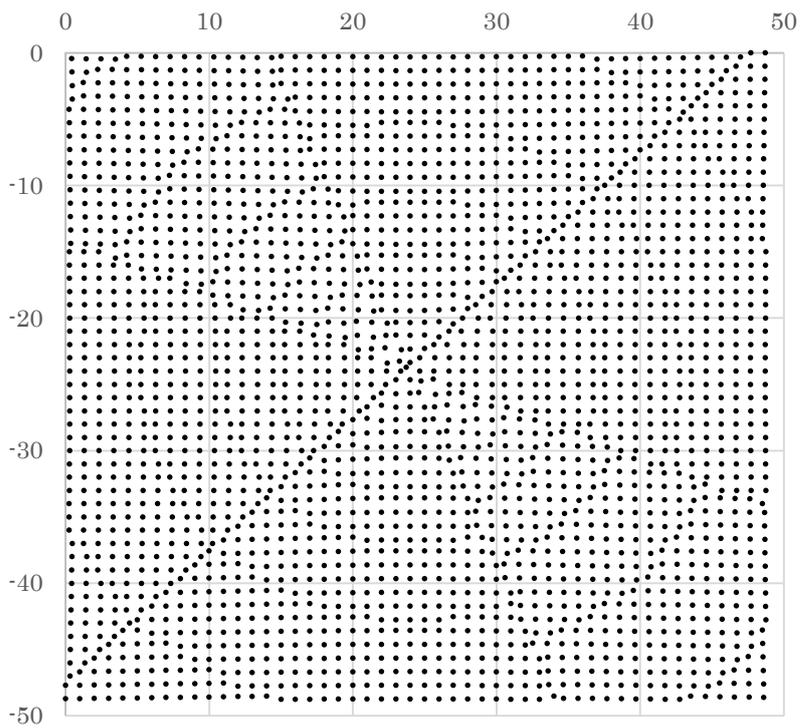
第2章で強度分布変換プログラムと形状生成プログラムを開発した。これら設計が正しく行われうる場合があるのかについて、ほかの方法で設計でき比較しやすい凸レンズを題材に検証する。製作したソフトウェアにビーム強度分布変換の能力があるかを確認するために、1点に集光する機能を有する素子を設計し凸レンズ形状と比較する。

3.2. 設計条件

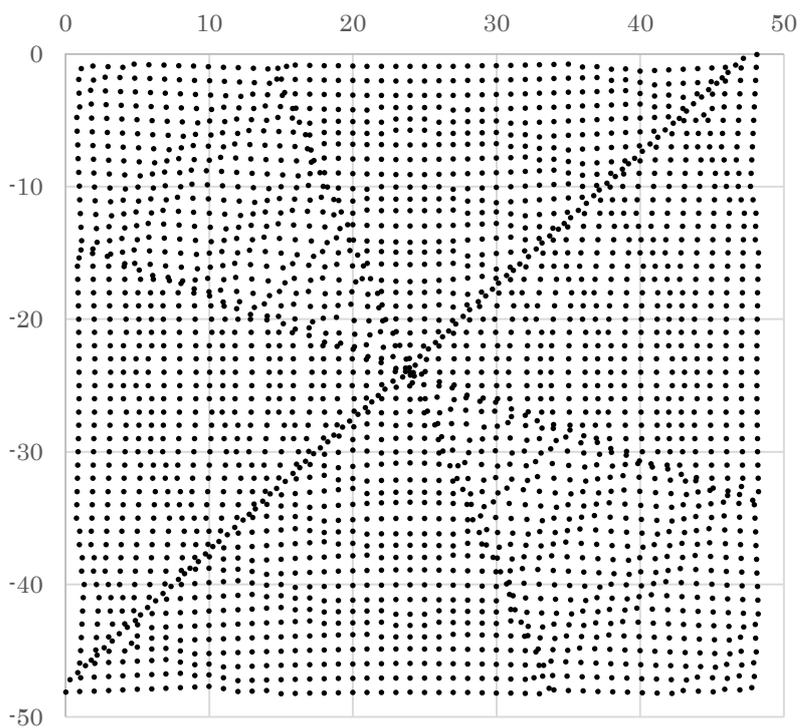
入力分布は、すべての要素が等しい強度を持っている(すべての入力要素に100の強度を与える)分布とし、目標分布は中央の1点に全強度(250000)が集まっている分布とした。要素数は 50×50 の2500要素とする。計算はRuby版のプログラムで行い、1000回繰り返し計算する。

3.3. 計算結果

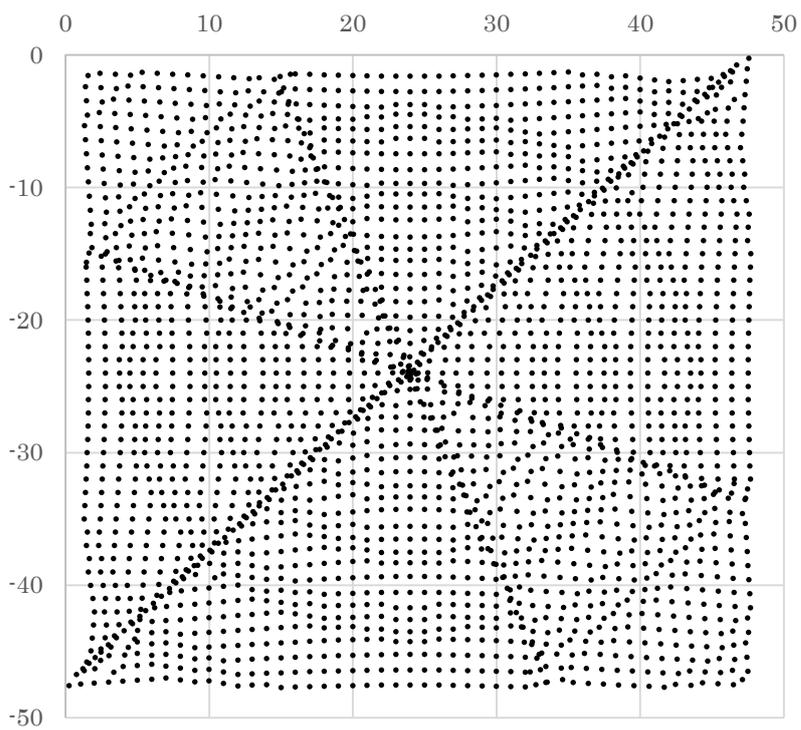
図3-1に要素の位置が計算の繰り返しにより変化する様子を示す。移動初期に45度のライン状に見える並びが発生するのは、要素の斜め方向の線分が左上および右下方向にあることで移動しやすい方向に差がつくためと考えられる。繰り返しが進むにしたがって全体が中央の点に向かって収束していくが、45度のラインには遅れがみられる。100回の時点では45度のライン状の要素群と、いくつかの取り残された要素が中央以外に存在している。300回から先の繰り返しでは、ほぼすべての要素が中央に集まり、残りの要素は大きく動いているようには見えない。なお、実行時間は約14時間だった。



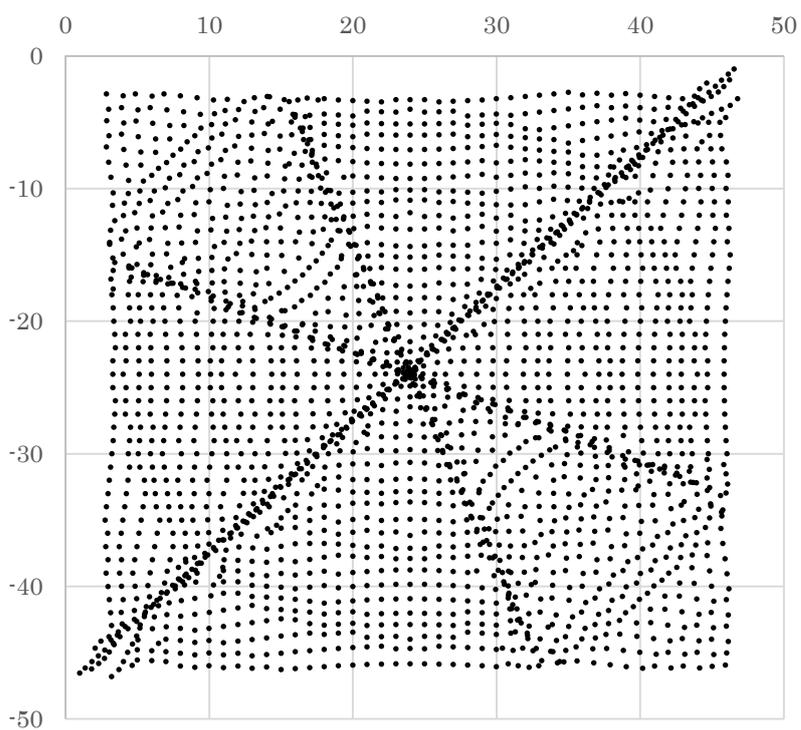
1回目



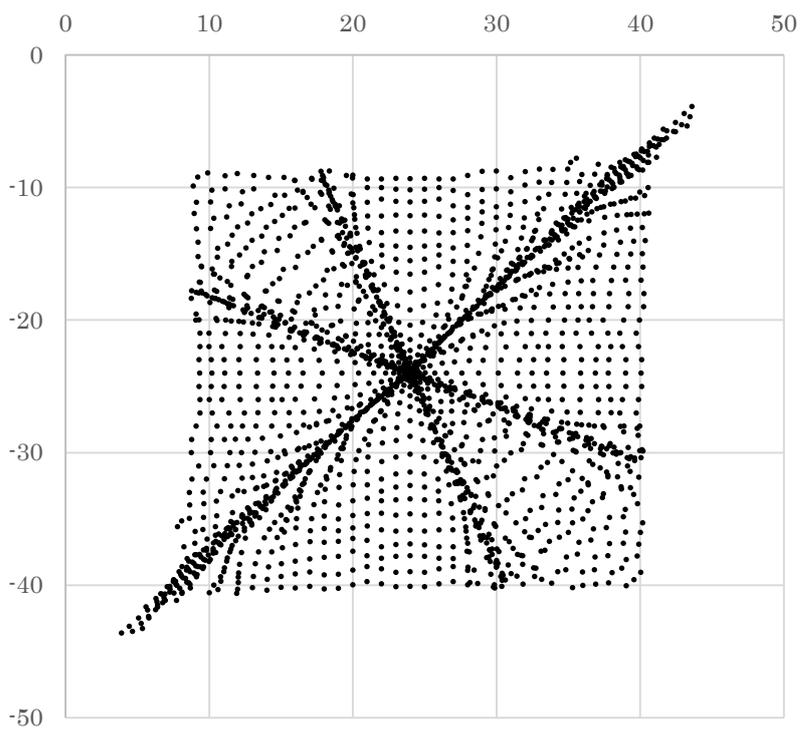
3回目



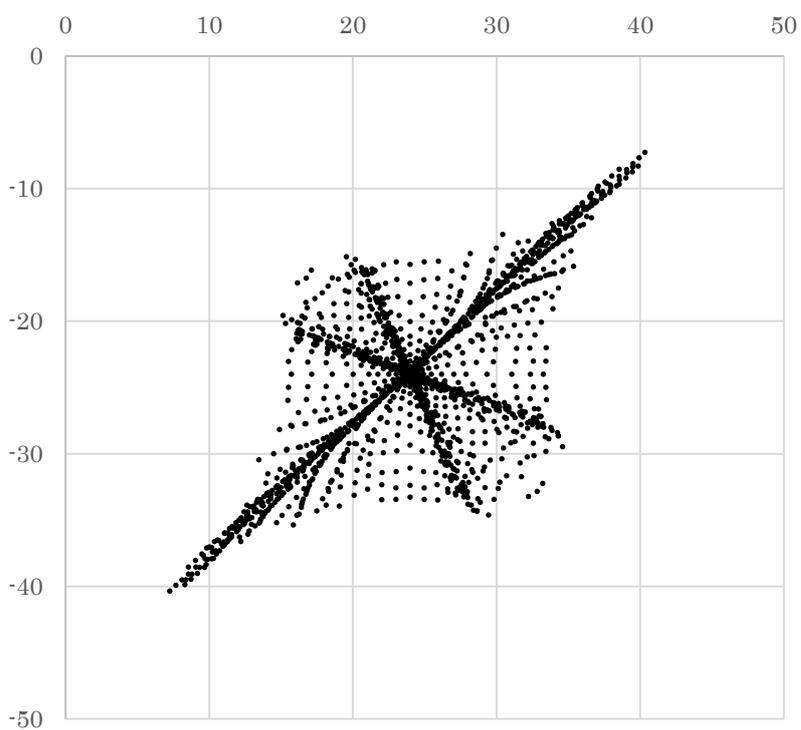
5回目



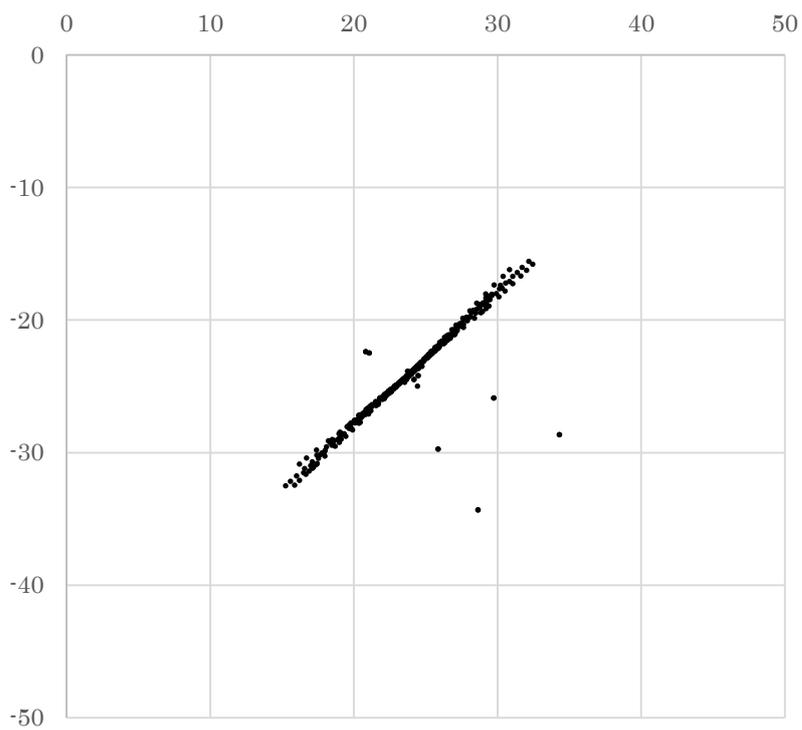
10回目



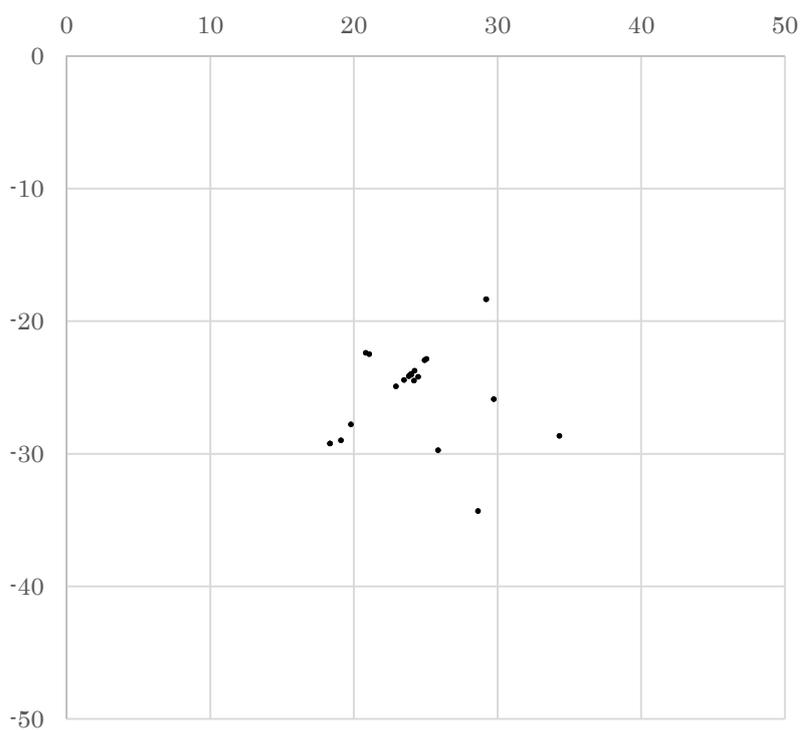
30回目



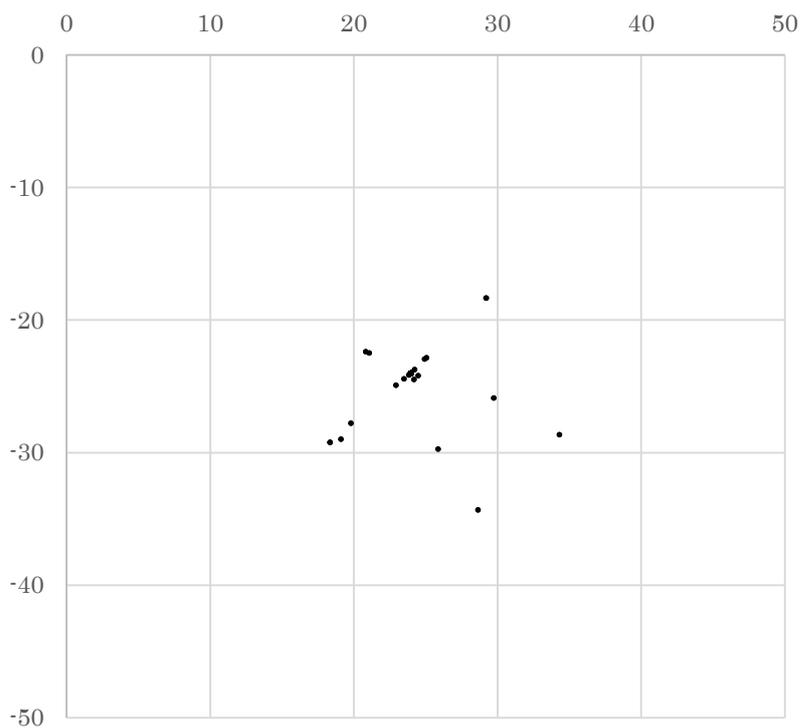
50回目



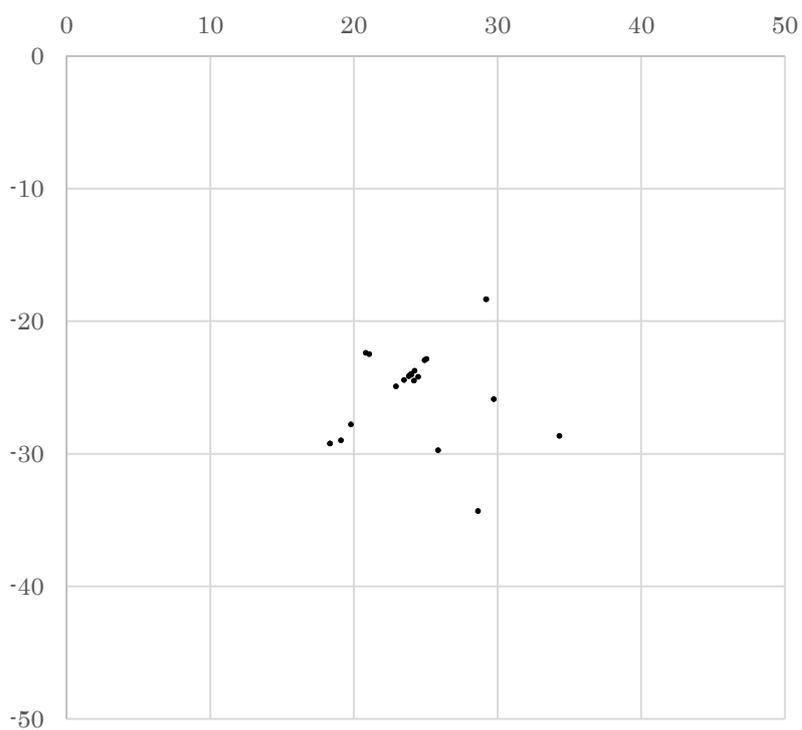
100回目



300回目



500回目



1000回目

図 3-1 要素の位置が計算の繰り返しにより変化する様子

また、各光線の光路を画像化したものを図 3-2 に示す。図中の色の相違は光路の長さを表しており、赤いほど移動距離が長いことを示している。光線要素の行き先はほぼすべて1点に集中している。四隅から中心に向かう要素の光路が長いことがわかる。いくつかある中央に到達していない例外の原因として考えられることは、力のつり合いで要素に作用する力が発生しなくなることで、算出された移動方向に対応する線分がないため移動できない状態で固定されること、目標分布要素などと距離があり移動力が小さくなるため移動しないこと、などが挙げられる。

3.4. 形状生成と平凸レンズとの比較

1000 回の繰り返し計算を終了したデータをもとに、形状を生成する。作動距離は 100 mm とし、素子及び投影寸法は 30 mm 角とした。生成した形状を図 3-3 に示す。いくつかの突起のあるものの全体としてはなめらかな曲面形状が生成された。突起部は収束しなかった要素によるものと考えられる。これらの突起は対角線に対して対称に発生していることから、計算時に移動可能とした 6 方向の線分のうち、斜め方向への要素の移動しやすさが向きによって異なることによって起こる現象であると推測できる。斜め方向への移動をできないよう上下左右とすることもできるが、その場合も何らかの移動しない要素は発生しうると考えられる。

生成した 30 mm 角の素子曲面の中心を xy 平面の原点としたときの x 軸上での断面曲線を図 3-4 に示す。赤線は 2 次の近似式であり、素子断面は放物線を描くことがわかる。またこの放物線の頂点と左右 3 mm の点を結ぶ 3 点から円弧を取り半径を算出したところ 49.1 mm となり、一般的な平凸レンズの式から算出される焦点距離 100 mm での半径 49.0 mm とほぼ一致した。この結果から、本研究で提案する設計法は目標強度分布に近い状態にするための素子形状を自動的に生成できる事例があることが明らかになった。これら計算手法は少なくとも 1 点に集光する非球面レンズの設計が可能であると考えられ、その他の形状の素子を製作する際にも期待が持てる。

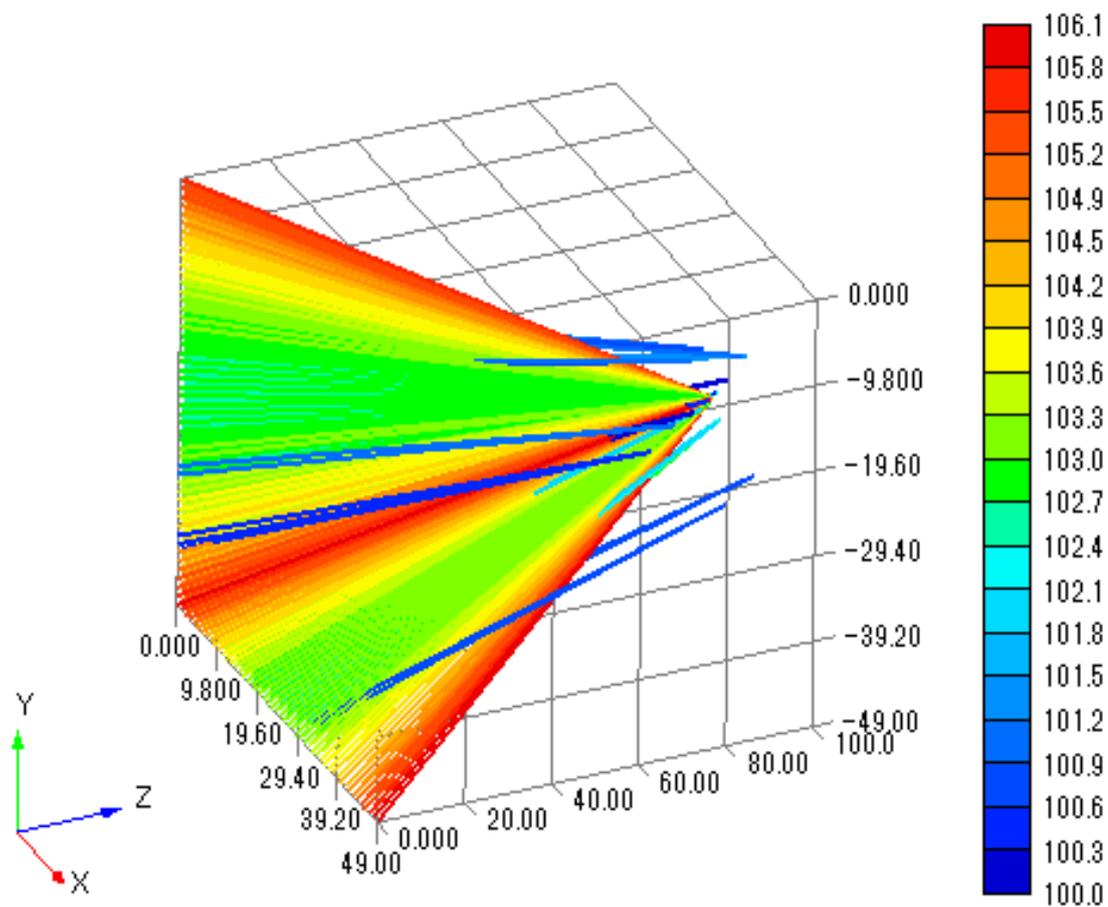


図 3-2 光路の様子

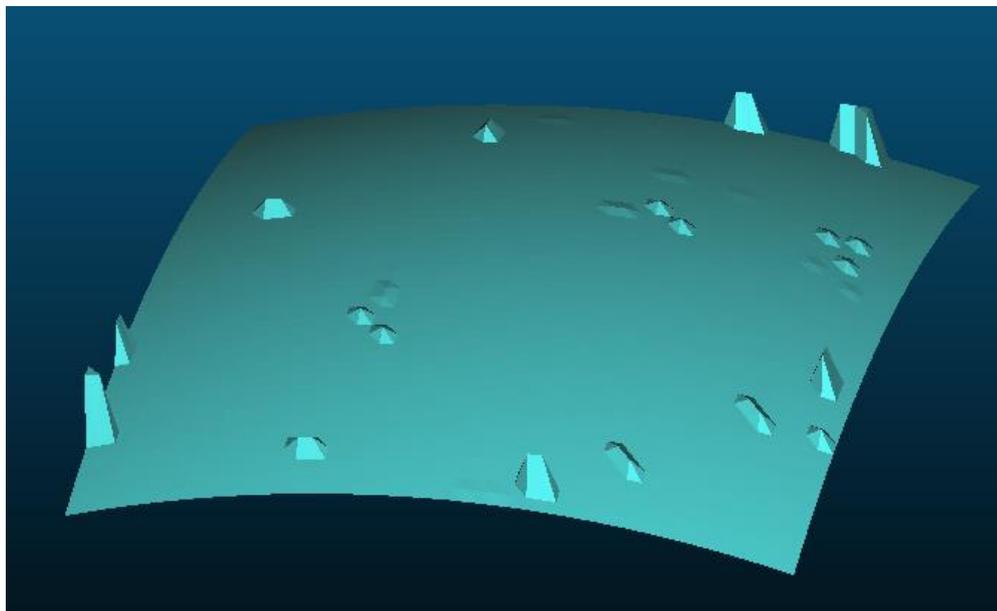


図 3-3 生成した形状

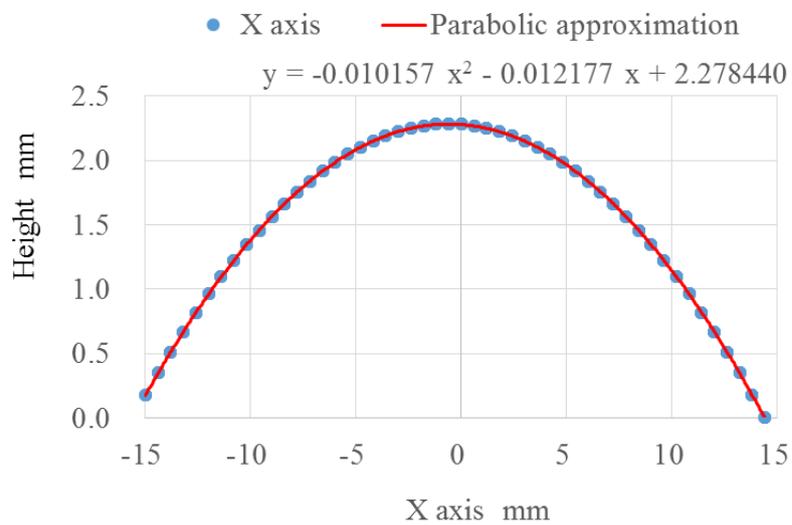


図 3-4 素子断面の高さの変化

3.5. まとめ

第2章において強度分布変換と素子形状生成プログラムを製作したが、第3章では実際にこれらのプログラムが成り立つかどうかを凸レンズと同様の機能を持つ素子について平凸レンズと比較し検証した。その結果、100 mm先の一点に集光する素子を計算した場合、中心部の曲率が49.1 mmで放物面の非球面レンズをこのプログラムは出力することがわかり、実用可能であることが判明した。

第4章 分布変換素子の加工法と加工装置

4.1. はじめに

この章では加工法, 加工装置について取り扱う. 計算により自動設計された3次元データは材料に刻み付けることではじめて光学素子としての機能を持つが, 光学素子として機能するためには一定水準の形状精度や表面粗さを満足する必要がある. ひとつの加工法では同時に形状と粗度の2要求を満足できないため, たとえば切削と研磨のように組み合わせて所定の性能を発揮させる. 使用する材料によっても好適な加工法が変わるため, 樹脂加工用に切削, 硬脆材料用には研削加工を行う. 研磨によって表面粗さが向上することを示し, 時間のかかる研磨の代替となる工法についても述べる.

4.2. 切削と研削

アクリルの切削には2刃の超硬ボールエンドミル(直径2 mm)を用いる. 加工条件は装置の送りが確実に実行できる最大の速度として800 mm/minとした. 実際の加工ではこれ以上の速度になることはないが, 経路によっては装置の加減速加速度の制限でこれより遅くなることはありうる. 先に等高線加工によって仕上げ負荷を減らしてから, 切り込み幅40 μm でスキャン加工して仕上げる. 工具回転数は1刃当たり送りがスキャン幅よりも小さくなるよう, 30000 rpmとした.

研削加工では被加工物がガラスや石英であり樹脂と比べて硬いため, 加工速度は樹脂加工の1/40の送り速度とし, 電着ダイヤモンドボール砥石の不得手とする深さ方向への送りはさらに1/4の速度とした. 工具回転数は工具の制限から20000 rpmとした.

図4-1に工具先端を示す. 工具のボール部直径は2 mmである.

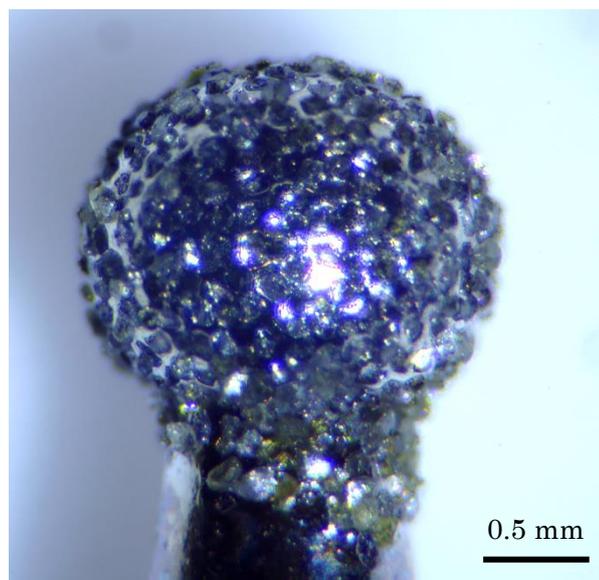


図 4-1 使用する電着ダイヤモンドボール砥石

4.3. 研 磨

NC 研磨では軟質材でできている工具の消耗による先端部の消滅が問題となる。そこで、工具の消耗を補償する機構が必要となる。図 4-2 に摩耗補償機構付き研磨工具の外観を示す。アルミニウムのディスクから3本のプラスチック柱が立っており、この柱に沿ってもう一つのディスクが柱に沿って前後方向に滑りながら回転することで、回転力を伝え、また前後のディスクに挟まれたばねによって摩耗と押しつけ力の補償をしている。工具は砲弾型のゴム砥石の先端を直径 2 mm のボールエンドミルと同様の形となるように成形したもので、こうすることによって CAM によって生成された工具経路を使用できる。工具回転数は摩耗補償機構が確実に動作する回転数として 5000 rpm とし、送り速度は 3.33 mm/s、工具押しつけ力は 0.1 N である。

図 4-3 に白色干渉計による表面測定結果を示す。1 行目が光学顕微鏡像で、2 行目が白色干渉法による高さの変化、3 行目が断面曲線であり、いずれも左列が切削後、右列が研磨後のものである。光学顕微鏡像では、切削後の試料には無数の円弧状の傷が見えるが、研磨後の試料にはいくつかのピットが見えるがなめらかになっている。干渉計による高さ情報では、切削後の試料では、光学像で見えていた円弧状の傷はくぼみであることがわかる。研磨後のものはピットの箇所がわずかにくぼんでいるが、全体としては平坦になっていることがわかる。白色干渉像上に引いた青黄の線分で切断したときの断面曲線では、切削後の試料では Ra 254 nm で周期的に高さ 1 μm 程度の凹凸が見られ測定範囲のピーク-バレーだと 2 μm 程度になるが、研磨後では Ra 18 nm まで改善している。

研磨による光学機能の変化を比較するために、光透過率を測定した。表 4-1 に透過率測定条件を示す。いずれも焦点距離 100 mm のレンズで、測定は光パワーメータを損傷しないよう 30 mm はずして行った。図 4-4 に透過率測定結果を示す。切削のみのレンズは試料のないコリメート光の 87 % まで透過率が落ちているが、研磨を行うと、94 % とバルクのアクリル板や市販ガラス製レンズと同等まで回復した。

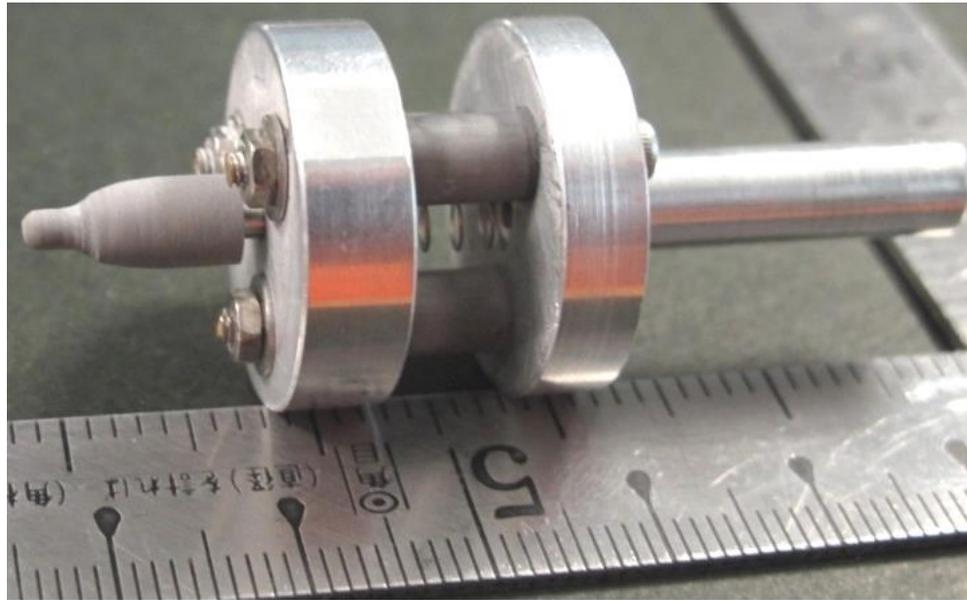


図 4-2 摩耗補償機構付き研磨工具の外観

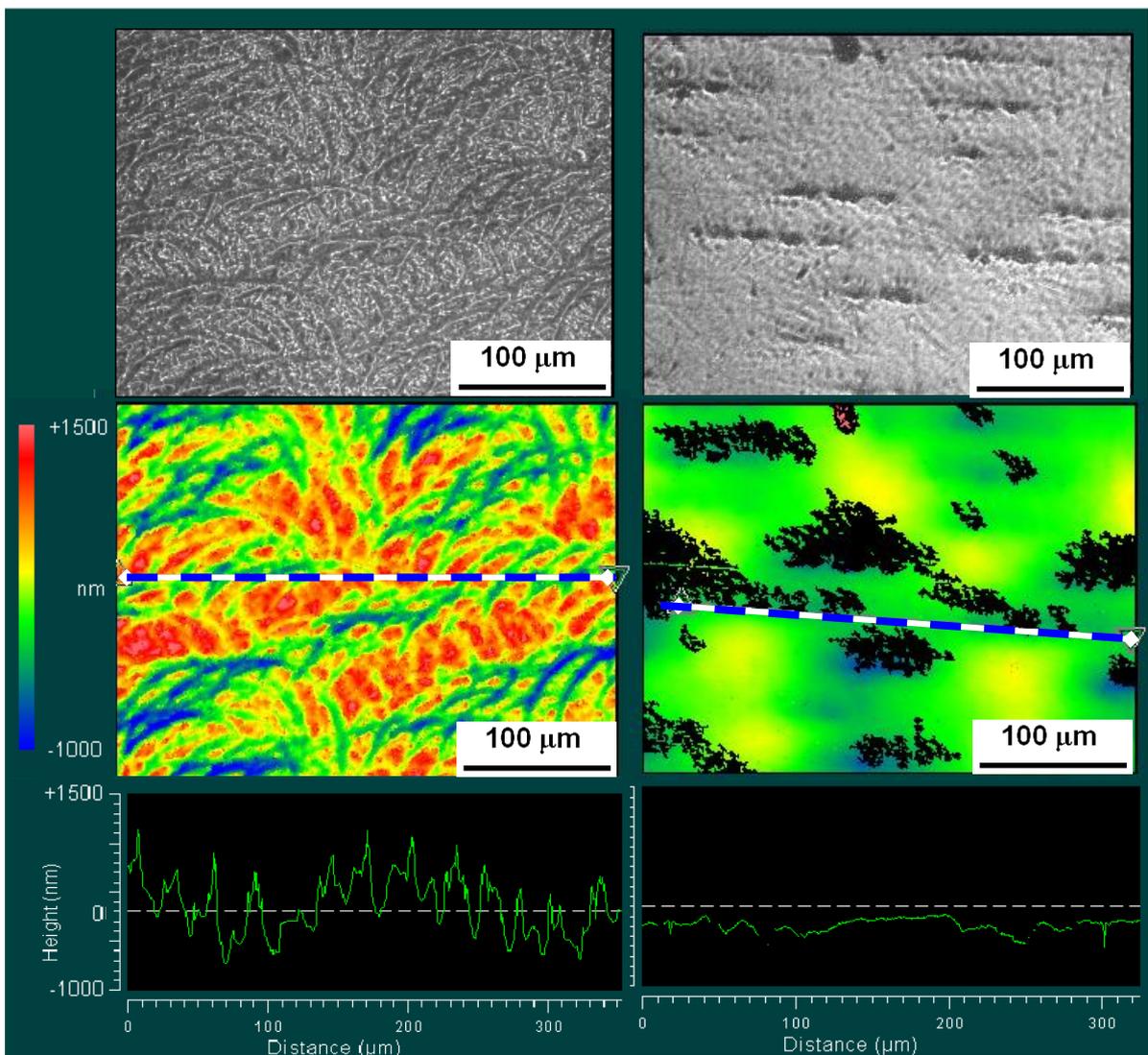


図 4-3 白色干渉計による表面測定結果

表 4-1 透過率測定条件

laser type	YAG(CW). 1064 nm
laser power	15 W (at oscillator end)
measuring instrument (laser power meter)	COHERENT FieldMaster GS
measuring distance	130 mm from sample
samples	lens (milling only) lens (milling and polishing) bulk PMMA plate (t = 5 mm) commercial glass lens (BK-7) *all lens focal length are 100 mm

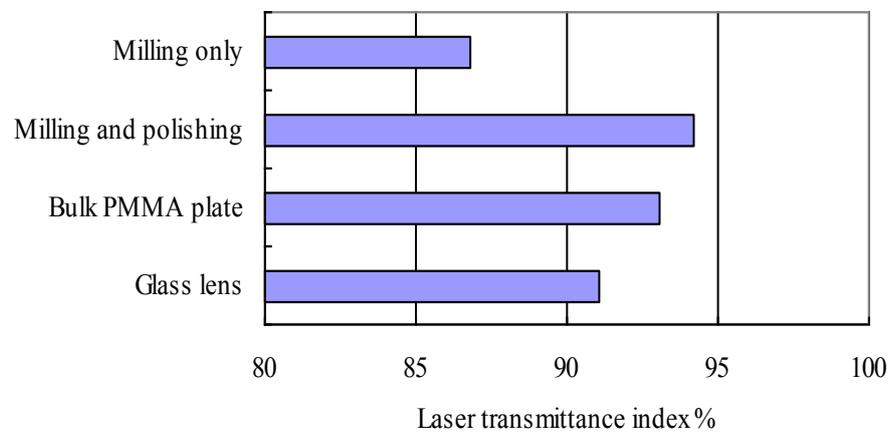


図 4-4 透過率測定結果

4.4. 研磨の代替手段

前節のように研磨によって素子を製作することもできる。しかし、研磨工具の機構上軸ぶれが発生するため回転数を上げられず能率が低かったり、磨くことによって切削してときの形状とは異なるゆがみが新たに発生する場合があるなど、形状誤差と表面性状の関係にはトレードオフの関係がある。また一般的な2面ずりの原理に基づくレンズの作成方法は非軸対称の光学素子には応用できない。

図4-5に切削と研磨、液体塗布の表面イメージを示す。研磨というのは、材料表面の凹凸のうち、山側の材料から順番に取り去っていき、最終的に谷底まで磨ききる加工である。逆に、谷間を適切な材料で埋めることで、ちょうどすりガラスに水がかかったときのように光透過性がよくなることが考えられる。たとえば、難燃性で屈折率1.4とアクリルその他の素子材料に近いシリコンオイルを切削後の素子に塗布することで光学素子としての機能が果たせないかを調査した。

加工条件は、横フライス型加工装置に取付けたアクリル樹脂材料をボールエンドミルによって切削し、工具をフェルトバフに交換後、研磨する。なお研磨に用いるバフは押しつけ圧力をばねにより安定化する機構を介して取付けている。加工条件を表4-2に示す。

波長1064 nmに対して焦点距離100 mmとなる直径27 mmの凸レンズを作製する。切削加工は、等高線切削で外形を出した後30000 rpm、幅方向切り込み20 μm 、送り840 mm/sでX-Z走査線加工を行った。表面に塗布する液体には、アクリル樹脂の使用温度範囲において安定で屈折率も近い(約1.4)シリコンオイル(信越化学製KF412SP)を用いる。

図4-6に切削のみ、切削後研磨、切削後塗布の試料の外観を示す。切削のみのものは後ろにおいた紙が不鮮明だが、研磨したもの、オイルを塗布したものは透明になり数字も読み取れる。液体の塗布された表面性状は非接触方式でしか測定できないため、非接触三次元測定装置(三鷹光器社 NH-3)を用いて断面形状と表面粗さを測定した。図4-7に断面曲線を示す。表面粗さは切削後はRa0.420 μm であったものが、シリコンオイルを塗布すると約1/10の値のRa0.038 μm となり、研磨工程を経た試料の値Ra0.037 μm と同等となった。断面曲線からは研磨したものでは山部分が研磨工程により除去され谷部分が残存しているが、塗布では山部分が多く残っていることから、表面の谷部分を埋めるように液体が作用していると考えられる。

また、表面の状態が透過率に与える影響を調べるため、加工に用いるのと同じ波長帯であるファイバレーザのコリメート光を照射し、透過する光を300 mmの距離においた光パワーメータで比較した。図4-8に透過率を示す。透過率は切削後落ち込むが、その後研磨してもオイル塗布でも回復した。塗布後はYAGレーザ波長での透過率がバルク材の94.5%の値まで回復した。

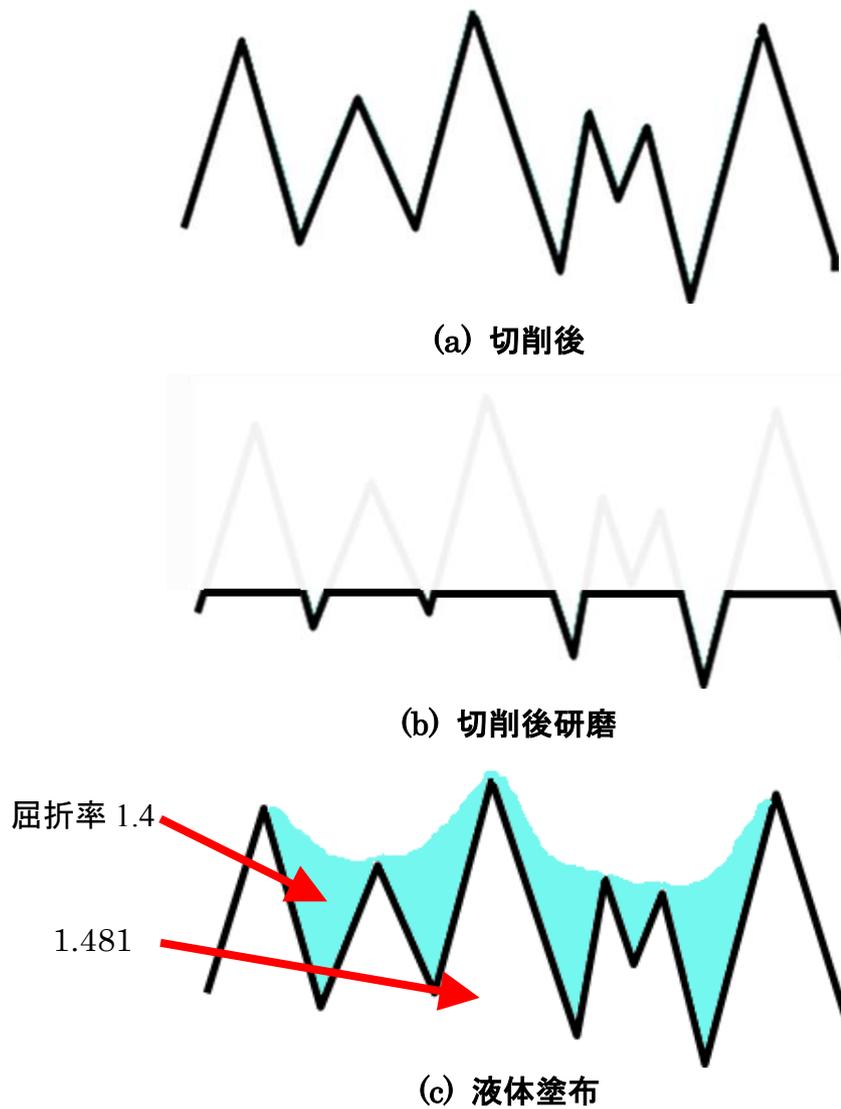
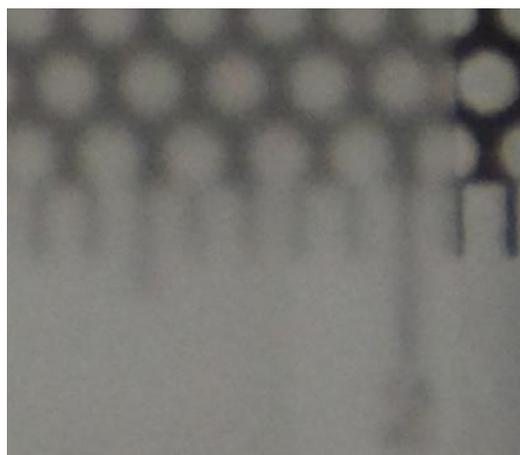


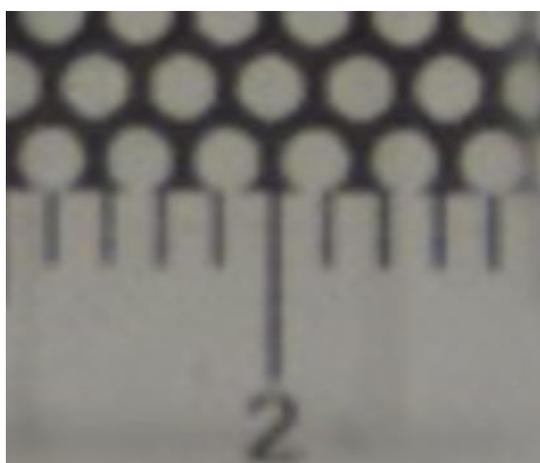
図 4-5 切削と研磨，液体塗布の表面イメージ

表 4-2 加工条件

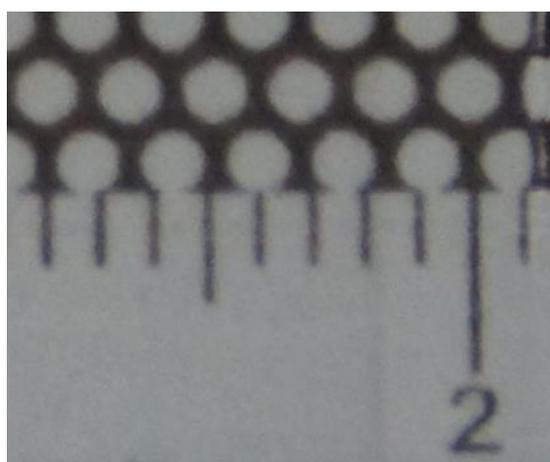
切削工具	三菱マテリアル MSTAR 超硬ボールエンドミル r1
切削条件	480mm/min 送り幅 0.075 mm 15000 rpm
研磨工具	モニター 砲弾型軸付きフェルトバフ GA2253
研磨条件	150mm/min 送り幅 0.05 mm 5000 rpm 押しつけ圧 0.51 N
使用コンパウンド	BAIKOWSKI Baikalox 1.0 μm アルミナ粒子



(a) 切削のみ

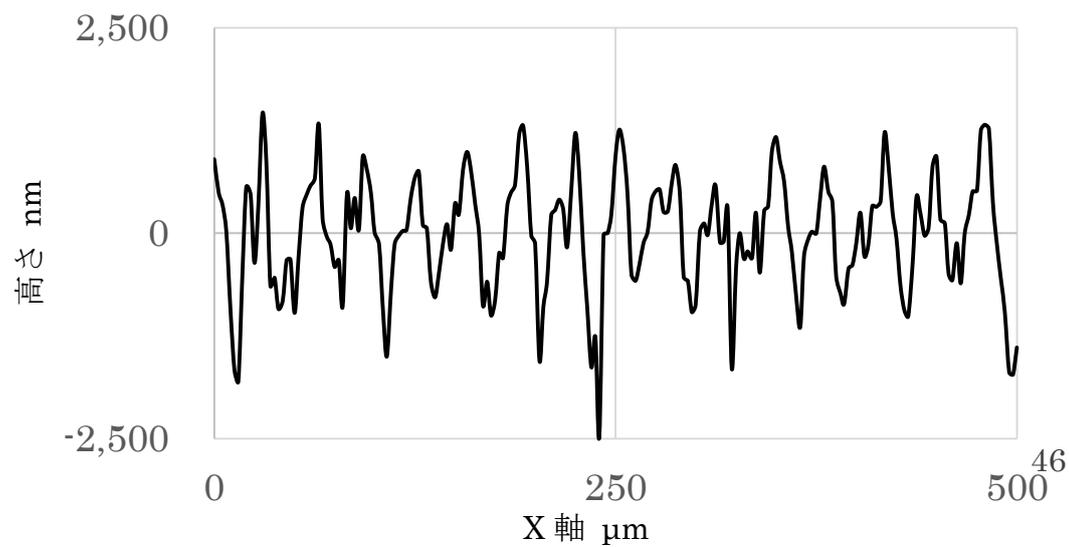


(b) 切削後研磨

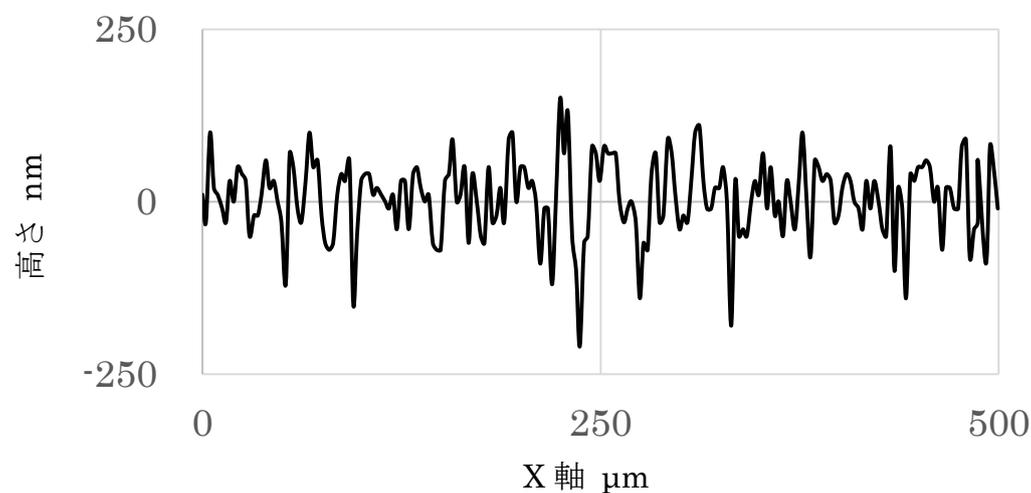


(c) 切削後塗布

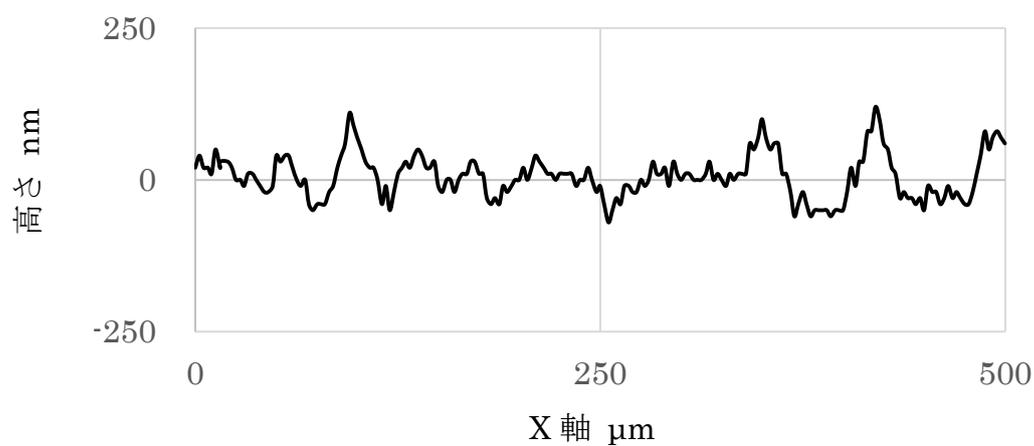
図 4-6 加工法の違う外観の比較



(a) 切削のみ



(b) 切削後研磨



(c) 切削後塗布

図 4-7 工程ごとの断面曲線

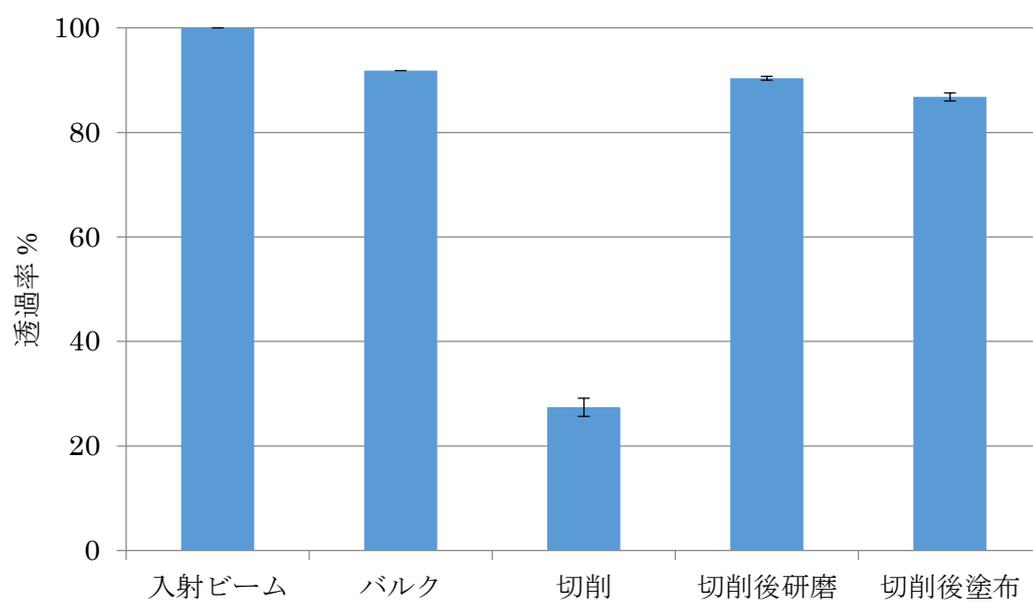


図 4-8 光透過率の比較

4.5. 加工装置とCNC制御

4.5.1. 加工装置

図4-9に横フライス型加工装置の外観を示す。この装置は直動ガイドなどから構成されている。ワークに水をかけることで温度上昇を防ぎ、切りくずを除去できる。水はフィルタで切りくずを除いたのち下の1.5 Lのタンクを兼ねた水受けにたまり、ポンプによって循環利用される。

構造に強度がそれほどないことから樹脂加工専用であり、非接触式のセンサでワークの厚みを測定できる機能を持つため主に研磨の実験で利用される。

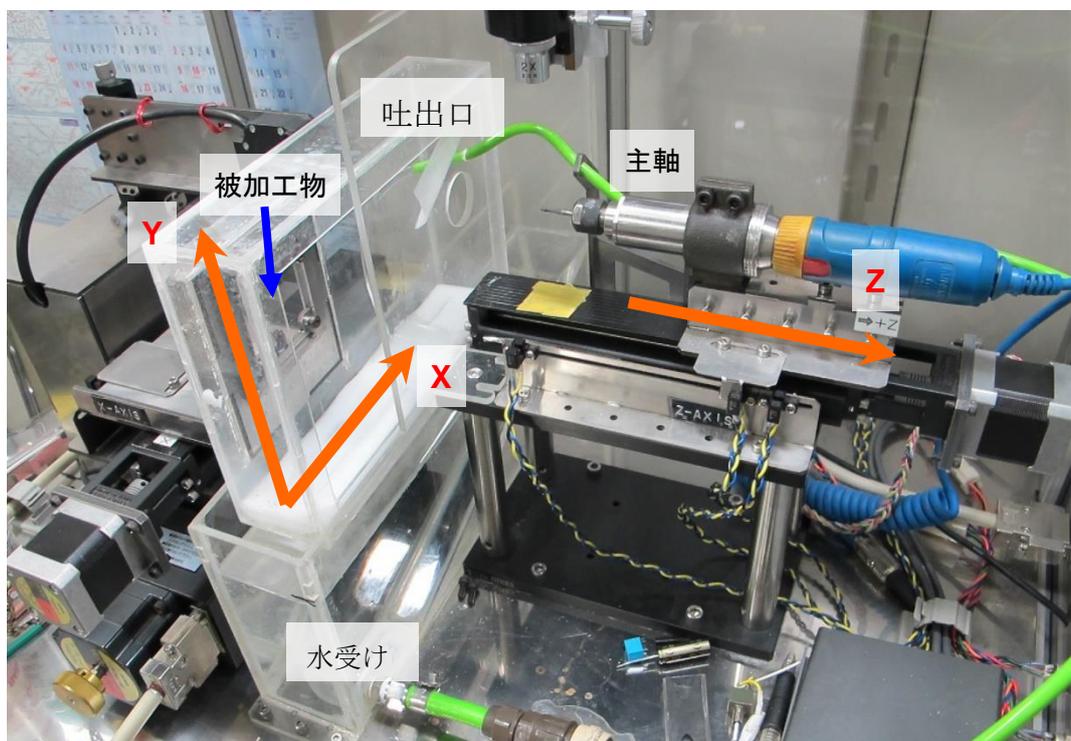


図 4-9 横フライス型加工装置の外観

図 4-10 に卓上 CNC フライスの外観を示す。この装置はオリジナルマインド社の mini-CNC COBRA 2520 である。横フライス型加工装置よりも剛性が高いため、樹脂のほかガラスや熔融石英の加工にも使用する。Y 軸がステージ側にあるという構造上加工液を扱うのが難しいが、薄く水を張ることのできるエリアを設けている。主軸はミニター社のハンドグラインダーに交換されており、最大で 50000 rpm までの回転数に対応する。駆動に使用している台形ねじのバックラッシュはソフトウェア補正している。制御分解能は $0.625\ \mu\text{m}$ であるが、2 相ステッピングモータのマイクロステップ機能を使っており実用上の分解能は $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 程度となる。

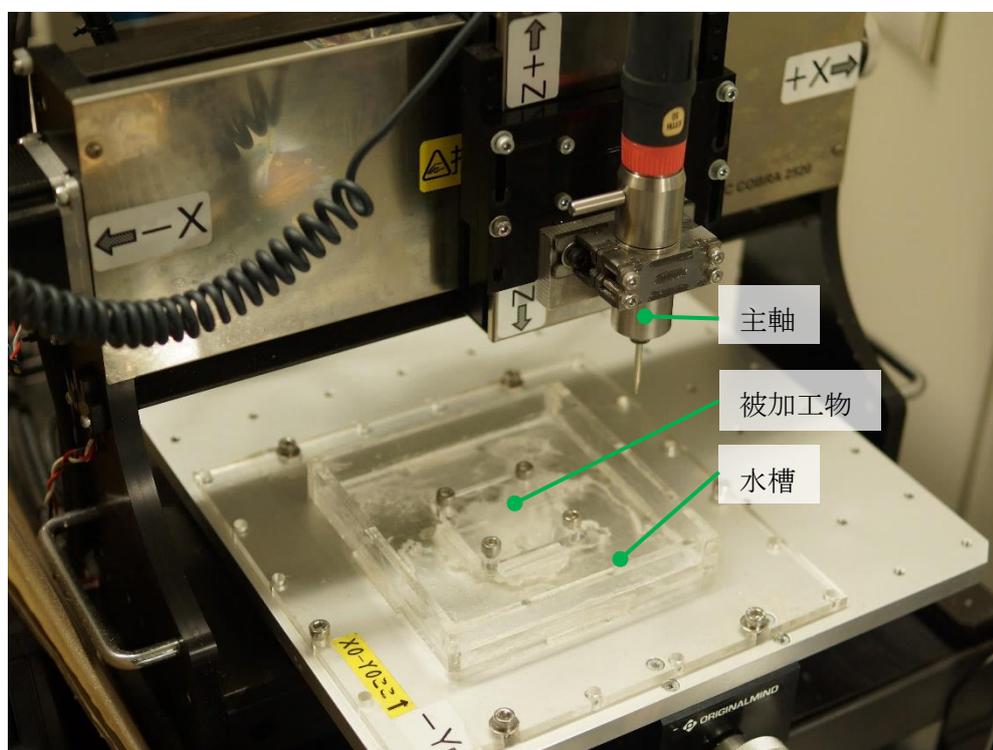


図 4-10 卓上 CNC フライスの外観

4.5.2. 制御系

装置1は、これまで Interface 社のモーションコントロールボードを用いたハードウェア制御であり、ボードの制御が独自の命令形式であるために制御プログラムの開発が必要であったが、開発されてきたプログラムには2点間直線補間(PTP動作)しか実装されていなかった。そのような状況でも、平面を研削して加工条件を調査するには十分な制御が可能であったが、研究の進展と共に、レンズなどの設計した曲面形状を製作するために自由曲面形状のスキャン加工などを制御する必要が出てきたとき、工具径補正を含む工具経路算出も独自に開発する必要がある点が問題となった。工具経路算出の計算方法は複数あるが、既に十分なCAMプログラムがパッケージ化されて販売されており、独自にソフトウェアに実装することで機能が向上することが見込めなかった。

このことから、制御系を更新した。Linux ディストリビューションである「Ubuntu Linux 12.04 LTS」のリアルタイムシステム改造版で動作するパブリックドメインのソフトウェアCNC「LinuxCNC」と、モータパルス出力やリミットセンサ入力等のデジタル入出力にパラレルポート(IEEE1284インタフェース)を使用した。これにより、加工装置制御にNC言語が利用でき、既存のコンピュータグラフィクス資産が利用できるようになった。工具経路の算出はCADデータをCAMソフトウェアで開いて加工条件を設定することで、工具形状を補正した経路が出力される。また、図4-11にLinuxCNCの実行画面を示すが、ソフトウェアCNCならではのGUIを備えており、画面とマウスだけでも操作が完結するため操作性に優れている。

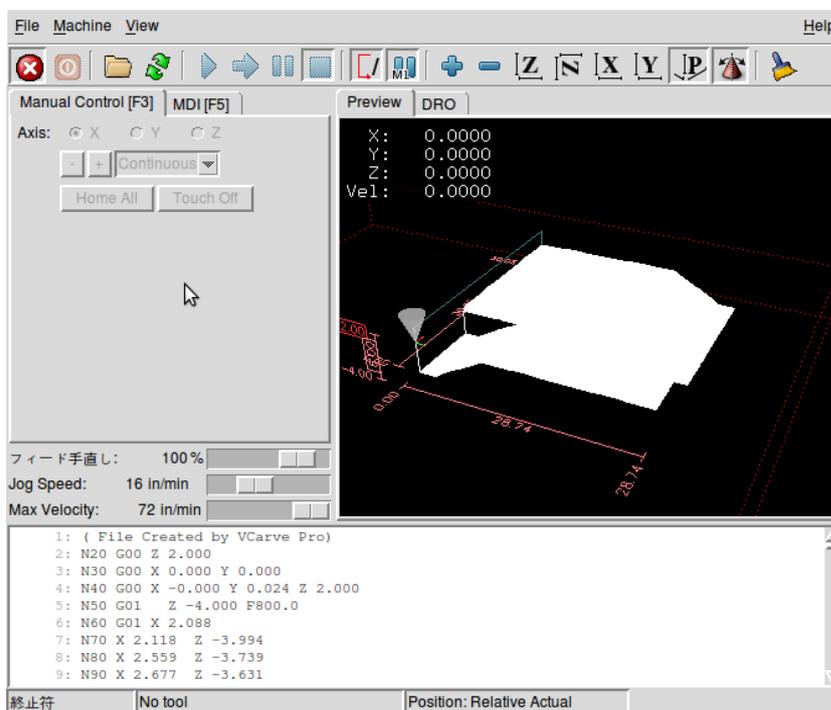


図 4-11 LinuxCNC の実行画面

過去に装置の制御で利用していたモーションコントロールボードでは、ボード上でパルス発生するため最高制御周波数はボードの特性のみに依存し、約 70 kHz であったが、ソフトウェア制御では OS がリアルタイム処理に対応しているかどうかと、パーソナルコンピュータの応答速度に依存する。この応答速度は必ずしも一般的なコンピュータの処理スペック(演算ベンチマークソフトのスコアの多寡や、CPU クロック周波数の速さ、CPU の数等)と必ずしも一致せず、安定して時間内に応答する能力を求めるとリアルタイム OS に追従できるコンピュータのほうが処理に向いている。ハードウェア制御と比べるとパルスレートが若干劣るが、汎用のパラレルポート増設ボードが利用でき入出力の拡張が容易である点は優位である。なお、コンピュータの利用時は、省電力機能を止めておく必要がある。これは、CPU 周波数変更等のステート変更時に数〜数十クロックの時間がかかり、これが応答速度に対してジッタとなり応答が追いつかなくなるためである。

パーソナルコンピュータ上に全てのシステムがあるため、LinuxCNC では、組み込み機器とは比べものにならない広大なメモリ空間が利用でき、大量の G コードをハンドリング、シミュレートでき、途中で装置の可動範囲を超える時は警告が出される。通常の NC 装置では、シリアル通信で逐次コードが送信され、その後の制御はハードウェア NC ユニットが担当するが、ソフトウェア CNC では、全てコンピュータ側で管理しているため現在位置の表示も容易に行える。加工時間や工具走行距離の算出も行われる。

パーソナルコンピュータであるため、これに接続できる周辺機器も加工制御に供することが可能である。たとえば、リモートコントローラとして市販のゲーム用 USB 接続のアナログジョイパッド等も設定でき、フィードオーバーライドの変更、スピンドルやクーラントのスイッチ、オプションストップ M1 の動作、工具の折損などの事故発生時に可動軸動作や補機類を一括して停止する命令の実行、各軸の手動位置制御等が可能である。

4.6. 3D プリント

レーザ加工における治具としての光学素子の利用のためには、光学素子加工の専門家でもなくても簡便に製作できることが必要である。製作において回折光学素子ほどの高い工作精度を要求しないのが屈折型分布変換素子の利点のひとつであり、そのため様々な手法を用いて素子を製作することが可能である。近年 Additive Manufacturing 技術の開発が盛んであり、また 3D プリントサービスが提供されており出力装置を保有していなくてもプリントされた製品を手に入れることができるようになってきている。DMM 社の行っているプリントサービスで透明度の高いアクリル樹脂を用いて素子の出力依頼が可能であるが、この素材では一般に知られているような熔融樹脂をノズルから押し出し造形する(FDM 方式)手法ではなく、PolyJet 方式で出力される。図 4-12 に PolyJet 方式の概要を示す⁴⁰⁾。これはインクジェット印刷技術に近いが、紙にインクを印刷する代わりに光硬化性樹脂をモデル形状に応じて造形台に噴射し、次いで紫外線を照射し硬化させる工程を繰り返し行うことでモデルと同じ形状に積層される手法である。プリントサービスに依頼する際は、計算によって出力される一枚板状の 3D データでは不可でシェル状になっていなければならないので、体積を持つ図形となるよう計算で得られた点群の座標に追加し、それから STL フォーマットデータなどに変換する必要がある。

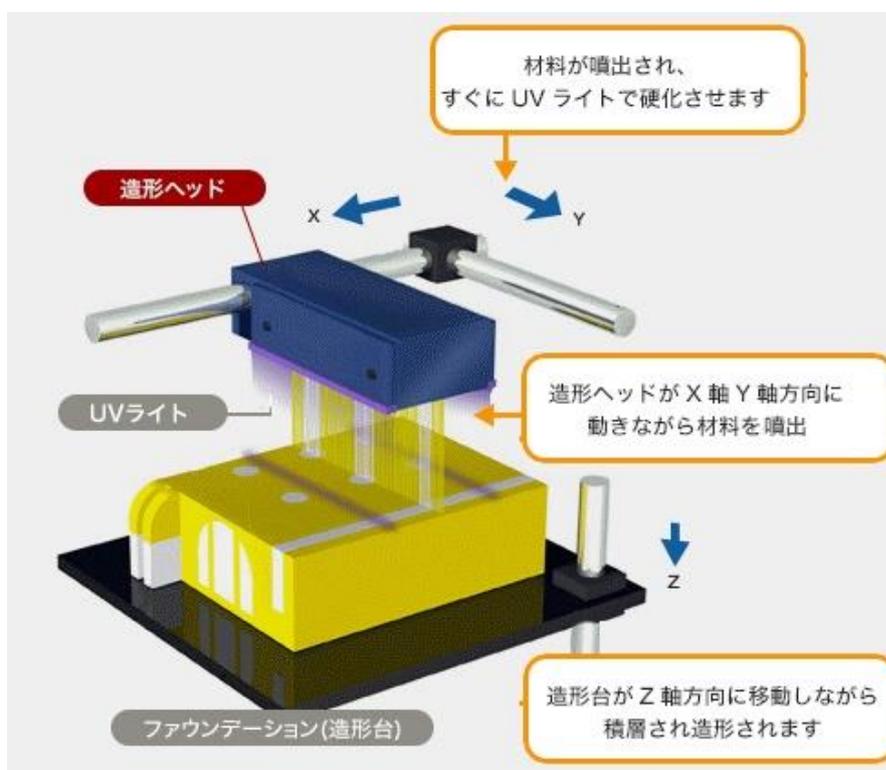


図 4-12 PolyJet 方式の概要⁴⁰⁾

4.7. ビームプロファイル測定装置

できた素子はビームプロファイルを測定し検証する必要があるが、一般的にビームプロファイラはセンササイズが小さく、ビーム直径の大きいコリメートビームのデータが取得できないため、独自に簡易プロファイラを製作した。図 4-13 にビームプロファイル測定装置の外観を示す。センサとして、APS-C サイズフォーマットのレンズ交換式デジタルカメラ(ソニー NEX-5R, センササイズ 23.5×15.6 mm, 画素数 4912×3296)を使用し、そこに可視光を遮るための 850 nm ハイパスフィルタ、入射レーザー強度に応じ ND フィルタなどを装着し、作製した素子をフィルタ枠に取り付けることで 23.5 × 15.6 mm までのビームプロファイルを測定できるようにした。素子とセンサまでの距離は中間リングを着脱することで変化できる。なお、直接測定するとフィルタやセンサが損傷するので、測定ビームは直角プリズムの表面反射光をサンプルすることで減光された入射光を得るようにする。



図 4-13 ビームプロファイル測定装置の外観

4.8. まとめ

4章では、加工装置と加工法について述べた。設計したデータを実現するため、2台の加工装置を用いて、アクリルは切削により、またガラスや石英は電着ダイヤモンドボール砥石で形状を加工し、それに研磨を施すことで Ra 18 nm、研磨せずシリコンオイルを塗布することで Ra 38 nm まで表面粗さが向上し、この時の光透過率はバルク材料と同等となった。これらのことから、複数の加工を組み合わせることで実用できる光学素子が簡便に製作できることが明らかになった。

第5章 分布変換の例1 文字や図形パターンへの変換

5.1. はじめに

この章では、非対称形状の分布変換素子の例として、均一な強度分布を文字列“CIT”や星形へと変換する素子を設計製作し強度分布の変化を観察する。軸対称の変換素子では不可能な目標分布の一例として、一体となっている入射ビームが3つに分割され、ビームの変形も要し、それぞれの文字間に強度が無い空間が存在するケースについて検討する。このような変換素子は1回の照射でたとえばロゴマークなどをマーキングするような、決められたパターンの加工で応用可能性がある。設計計算を行い、アクリルで素子を製作し、ビームプロファイルを取得し考察する。また、入力されるビームの側も単純な均一矩形分布でないことが実用上求められるため、実際の装置のビーム強度分布を計算に入れて星形へと変形する素子も製作し、金属に照射してマーキング可能か確認する。

5.2. 計算条件

設計条件は、パターンの空間周波数が高いことから 100×100 要素とし、Ruby 版の分布変換ソフトウェアで 500 回繰り返し計算した。入力分布はすべての要素に 100 の強度を持たせた。目標とするパターンを図 5-1 に示す。パターンの黒部分に 529 の強度を持たせ、入力強度の総和と目標強度の総和がほぼ一致するようにした。



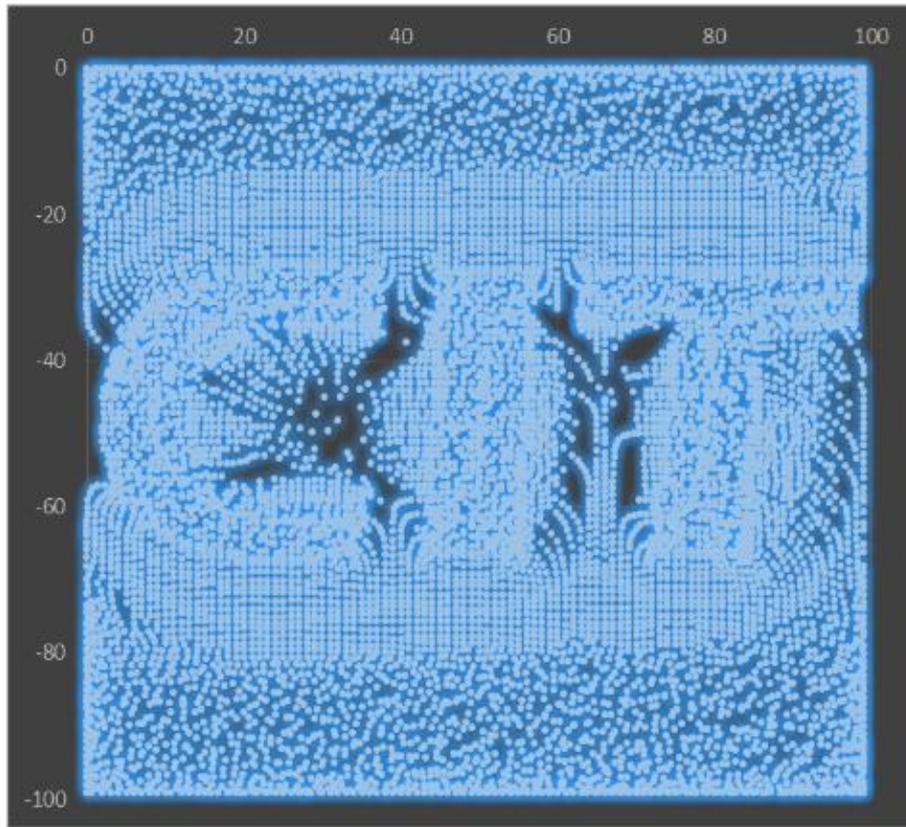
図 5-1 目標とするパターン

5.3. 計算結果

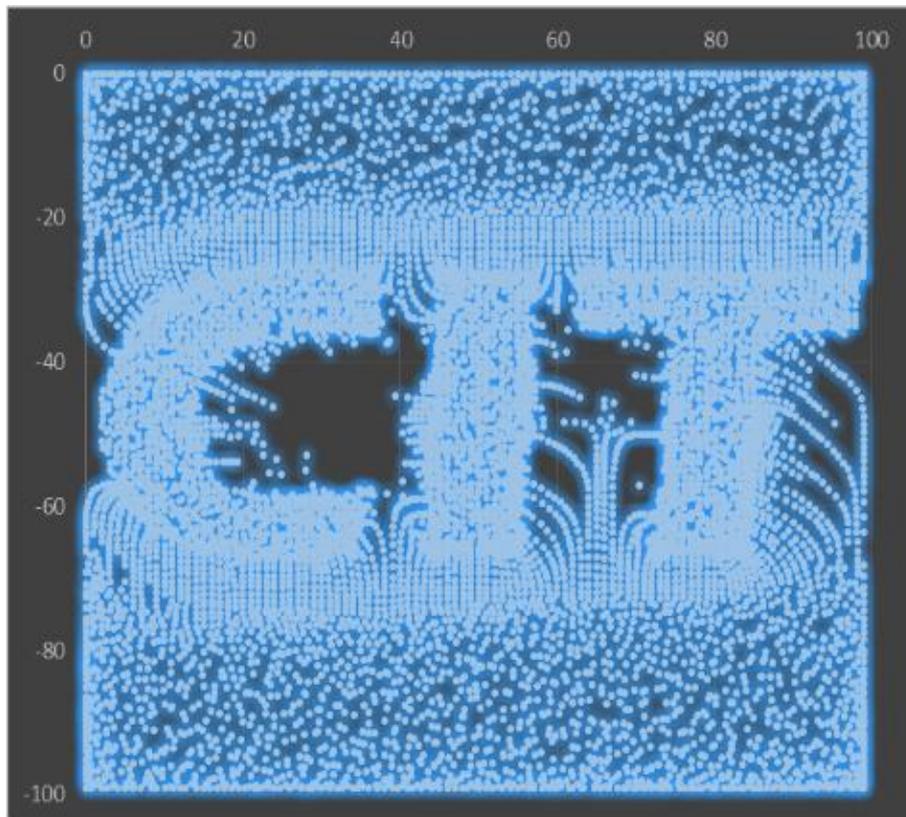
計算結果の繰り返し回数による要素座標の変化を図 5-2 に示す。繰り返し計算の初期で文字間に隙間ができ始め、50 回程度でおおよその形になる。同時に上下から中央へも要素の移動が始まる、これは 100 回程度でだいたいの輪郭が形成される。目標に到達しない要素も主に下部に一部残るが、今回は 500 回繰り返して計算を終了した。

要素の移動の様子を数値化するため繰り返しごとの要素ひとつ当たりの移動量を求めた。図 5-3 に計算の繰り返しによる要素ひとつ当たりの移動量の変化を示す。計算の初期は移動量が増大しその後減少する傾向は図と一致していることがわかる。このケースでは最大移動量の 7 割ほどに漸近しており 500 回よりさらに繰り返しても 0 にはならないと予想される。これは振動するように移動する要素があるためと考えられる。しかし繰り返し計算の収束判断の 1 つの要因に利用が期待できる。

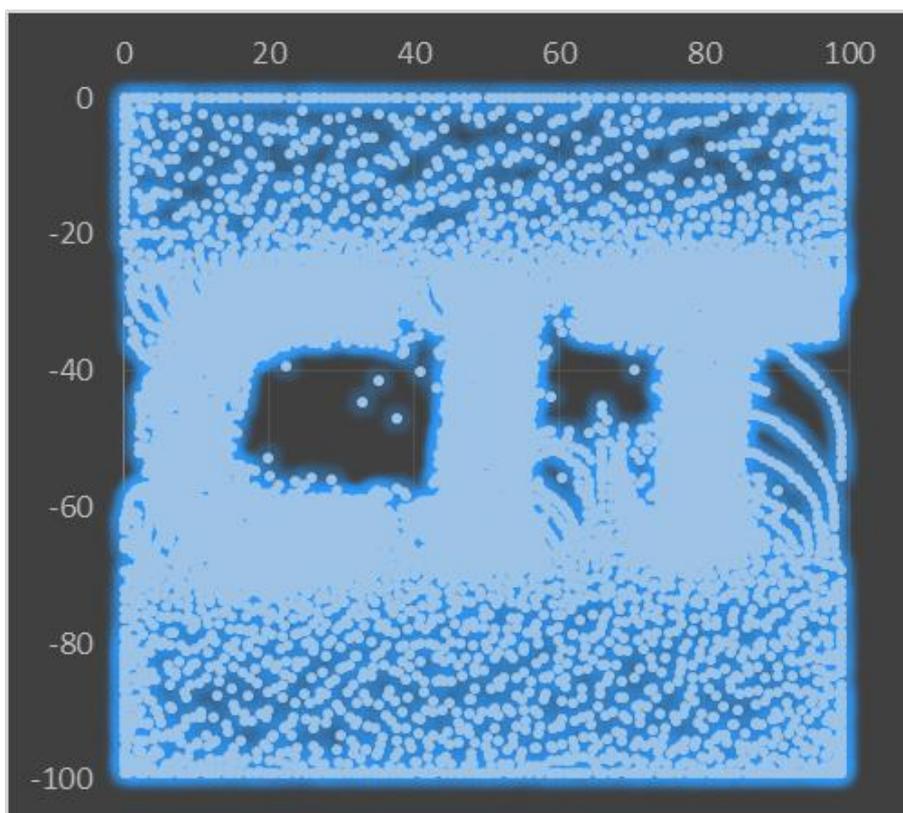
次に素子の形状を計算する。素子寸法と作動距離を指定して素子の各位置での厚みを計算し XYZ の座標からなる点群データとする。今回はワーキングディスタンスを 158.5 mm、素子の寸法を 12 × 12 mm、屈折率 1.49 として計算した。そして計算で得られた点群に微小な面を張り付けてできた素子のサーフェスモデルを図 5-4 に示す。なお、図では素子高さの変化を見やすくするため Z 方向を 20 倍に強調している。縦方向に 2 筋の切り込みのあるような形状になると計算されていることがわかる。素子の設計上の最大深さは 115 μm である。作成したサーフェスデータを CAM ソフトウェアに入力することで素子形状の加工経路データが生成できる。



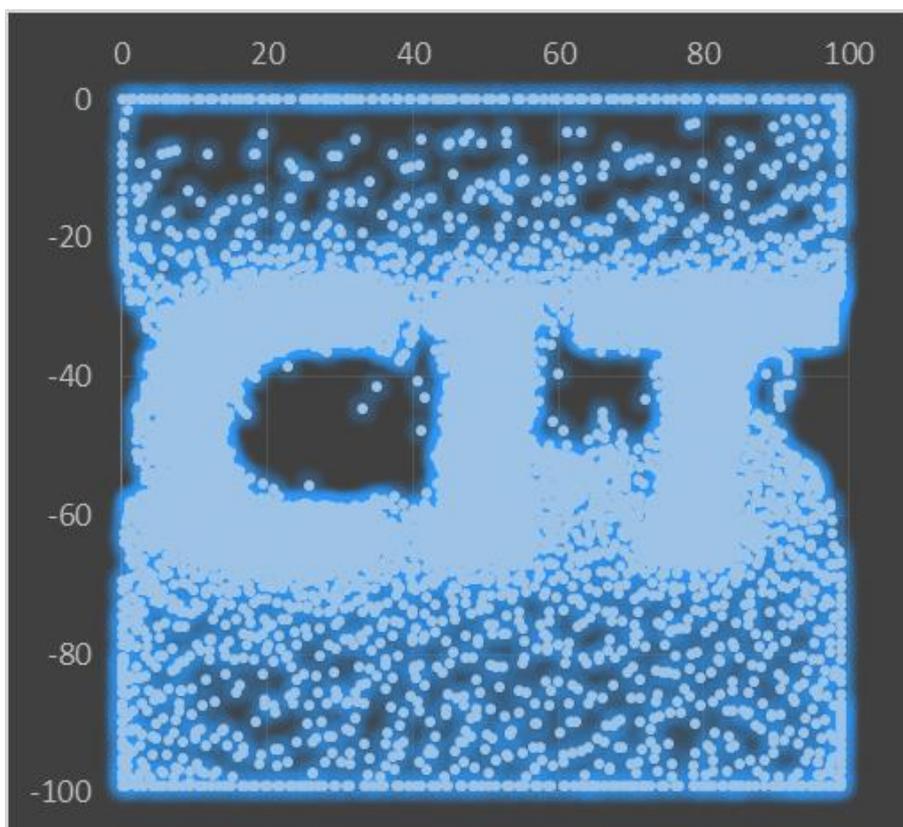
10 回目



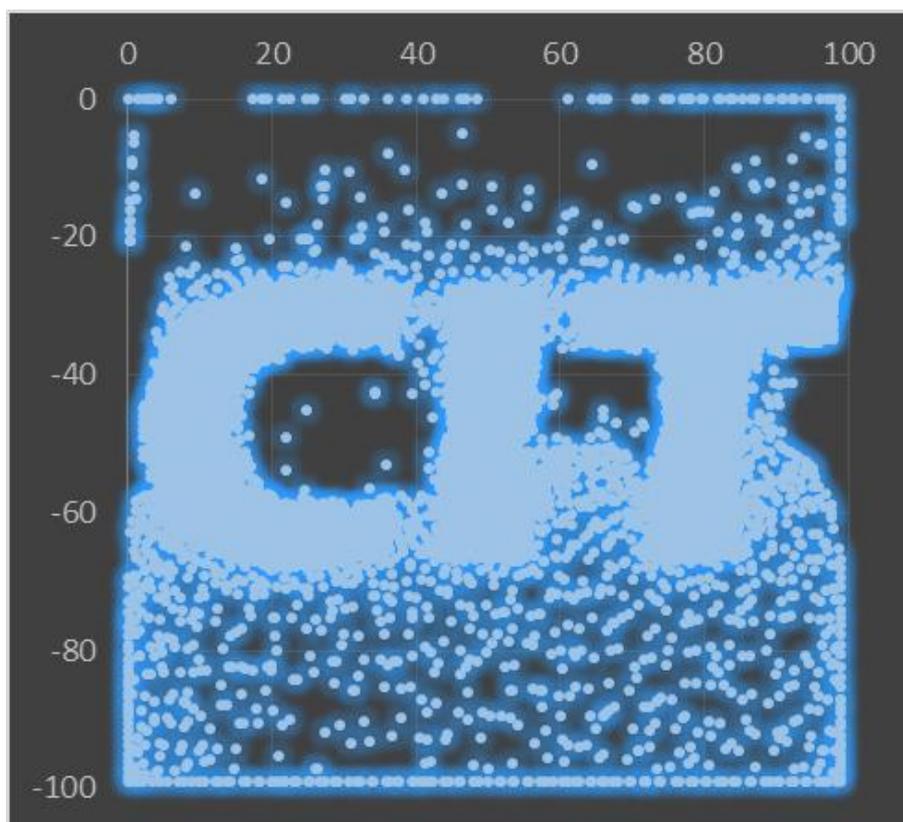
25 回目



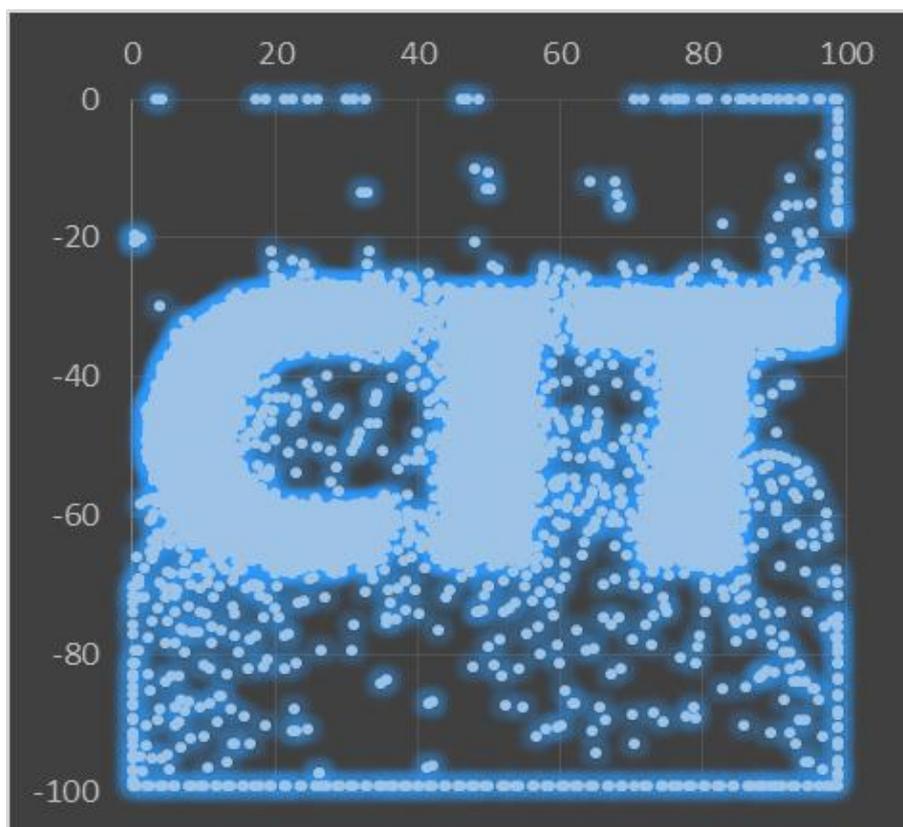
50回目



100回目



200 回目



500 回目

図 5-2 計算結果の繰り返し回数による要素座標の変化

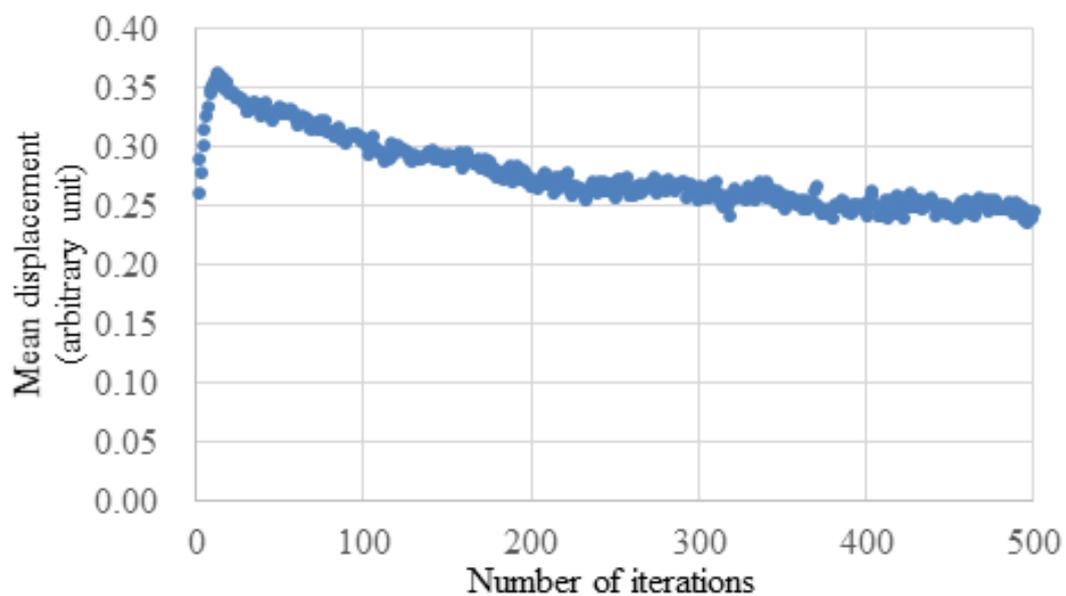


図 5-3 計算の繰り返しによる要素ひとつ当たりの移動量の変化

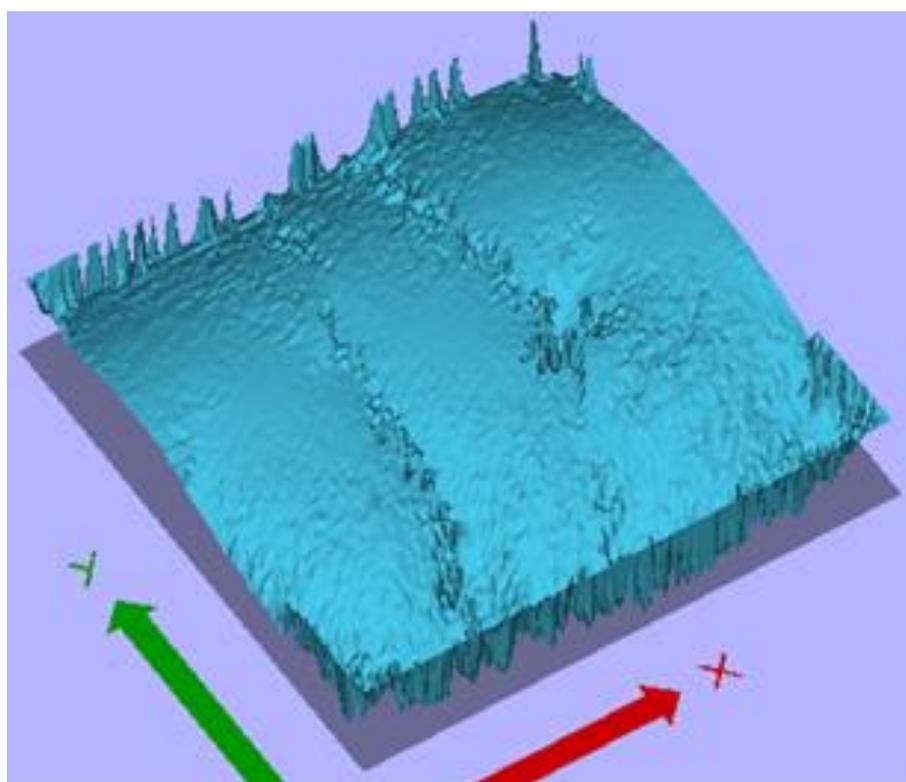


図 5-4 素子のサーフェスモデル

5.4. 加工と製作された素子

図 5-5 に製作した素子の外観を示す。この素子は卓上型 3 軸 CNC フライス盤を用いて、直径 2 mm の超硬ボールエンドミルを使用し、厚さ 5 mm のアクリル樹脂板に等高線加工による粗加工と走査線加工による仕上げ加工にて製作し研磨した。

製作された素子にテレセントリックバックライトイルミネータからの可視並行光を照射し壁面に投影した。図 5-6 に投影の様子を示す。図左側の素子を透過した光が図右側の壁面に照射され文字「CIT」状のパターンになっていることがわかる。また、パターンの投影部分は周辺の素子を通らなかった光よりも明るく、パターン以外の部分は周辺よりも暗くなっていることから、素子によって光が必要な個所に集められていることがわかる。

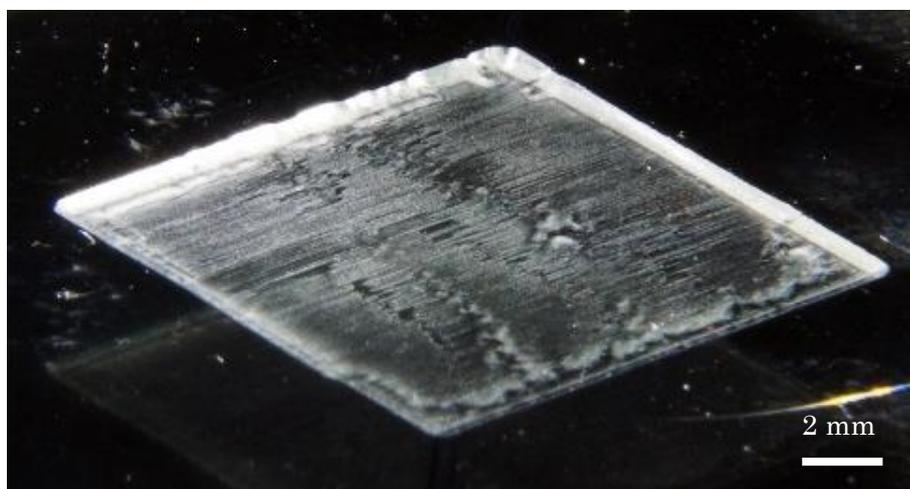


図 5-5 製作した素子の外観

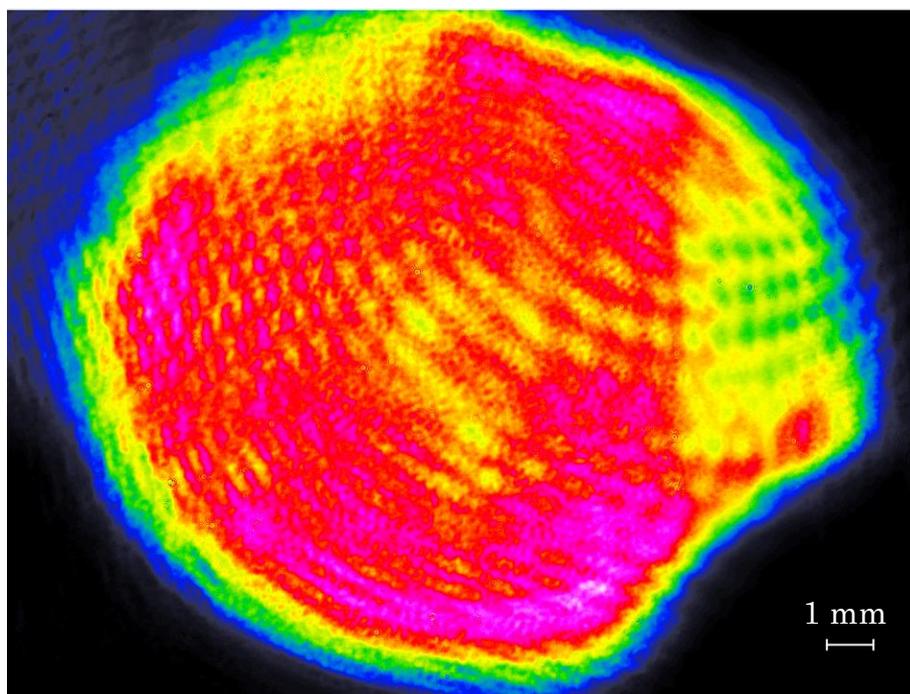


図 5-6 平行な可視光での投影の様子

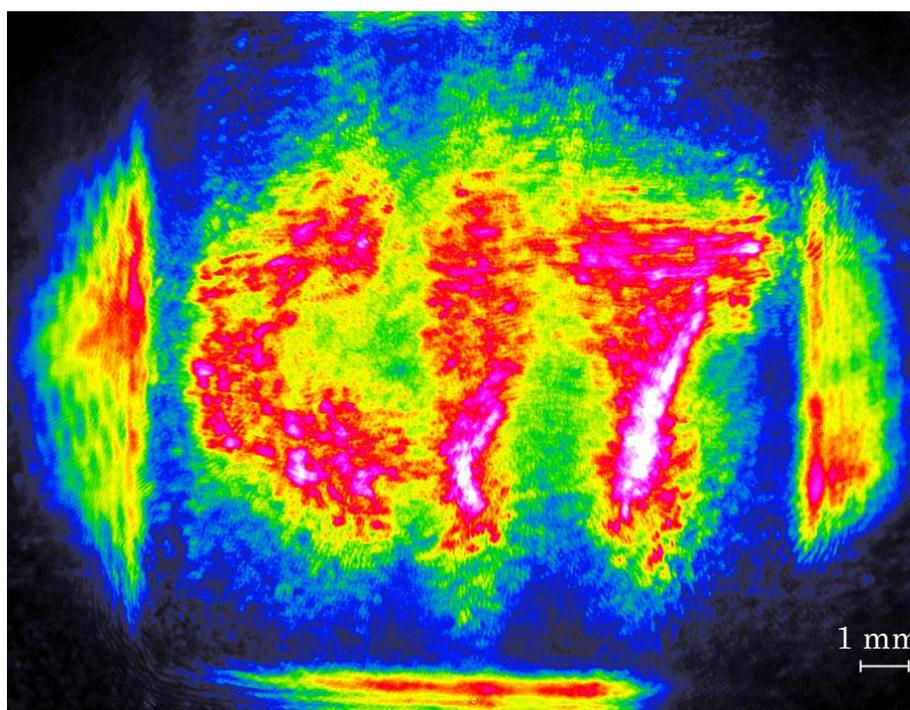
5.5. ビームプロファイル

素子に入る前のコリメートビームと素子通過後のビームのプロファイルをデジタルカメラで取得した。図 5-7 にビームプロファイルの変化を示す。入力分布(コリメートビーム)で、規則的にみられる縦横の干渉縞は、カメラのセンサ部分の干渉によるものである。素子の寸法より入射ビームのほうが大きいため、図 5-7(b)に示す強度分布変換後のプロファイルには、左右および下部分に素子で変換されずに直進したビーム成分がみられる。出力分布では、赤色～白色で示されている強度の高い部分が設計計算時の到達位置に照射されており文字列状の分布をなしていることがわかる。

また、目標のパターンと実際の強度の比較を図 5-8 に示す。(a)は設計パターンおよび照射されたパターンで、プロファイル中央を横断する箇所強度を(b)に記す。赤実線が計算値で、青点を実測値である。実際の強度は計算時の解像度に合わせている。明部は30～100%で、暗部は13～80%となっている。この結果からは光利用効率という点では改善の余地がある。原因の中で影響の大きいものとしては、設計計算時点では光線が要求箇所に到達していない要素があることや、計算解像度の不足に加え、各光線要素は計算上点として扱っているが実際にはそれぞれの光はガウス分布状の広がりを持つため、設計上要素間に強度がない領域は要素間を広げ強度が低下している状態になっており、エッジのシャープさには限界があることが考えられる。また、素子の加工に関して、工具径の影響による特に谷形状の箇所での形状誤差の発生や、素子の表面性状が光学素子レベルから比べると粗いことによる散乱の発生が挙げられる。なお実際のレーザ加工においては材料が加工に至る閾値があることから、材料表面上のパワー密度を調整することにより分布変換素子として利用することが可能である。

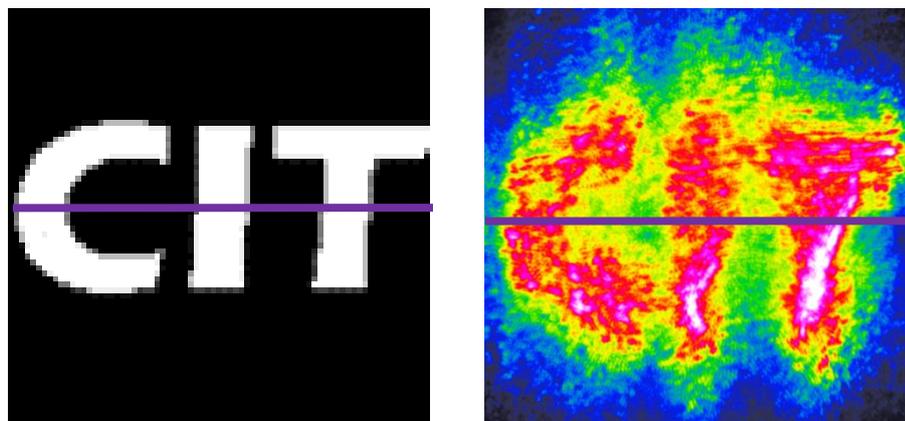


(a) コリメートビームのプロファイル

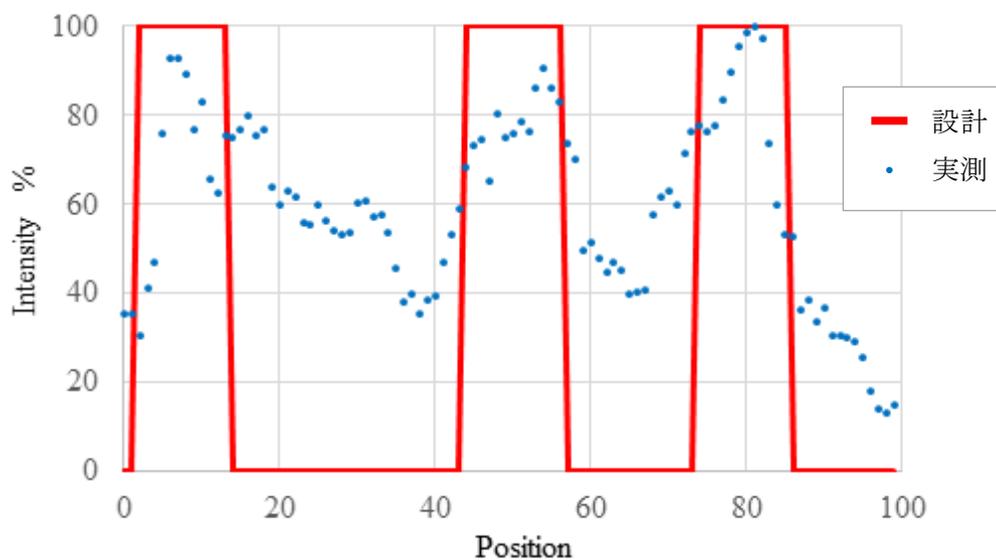


(b) 変換素子通過後のプロファイル

図 5-7 ビームプロファイルの変化



(a) 設計パターンおよび照射されたパターン



(b) プロファイル中央を横断する箇所強度

図 5-8 目標のパターンと実際の強度の比較

5.6. 金属へのパターンニング

前節までの変換例では、ビームの一部分を矩形で均一な分布とみなして利用していた。そのため、素子より入射ビームのほうが大きいため効率が落ち、また実際に利用する際に直進する未利用ビームを排除する必要があるなどの問題がある。ここからは、パルスレーザービームすべてを利用するために、入射ビームプロファイルを実際のビームに合わせて設定し、星形形状を出力する素子を設計し、金属薄板に照射する。

入力する分布はデジタルカメラで取得したパルスレーザーのもので図 5-9(a)に示すような形状で 200×200 要素とする。目標とする分布は図 5-9(b)に示すような 200×200 要素で表現した星形である。素子の寸法は 16×16 mm, 設計距離は 100 mm, 照射サイズは 3×3 mm とする。計算は 1000 回繰り返し行い、計算完了時の要素の座標は図 5-10 に示すようなものであった。

製作した素子の外観を図 5-11 に示す。集光機能があるため凸レンズに近い形状になっている。ビームプロファイルの変化を図 5-12 に示す。プロファイルからは、設計距離近傍(102.5 mm)のときに赤で表示された強い強度の箇所が設計した寸法 3mm に近くなっている。設計距離より短いと星はより大きく、長いとより小さくかつ中央の強度が高い強度分布となる。実際にステンレスの薄板に 4.5 kW, 10 ms で照射したときの加工痕を図 5-13 に示す。角のひとつの入熱が小さく照射痕にむらがあるのは、照射時に素子の中心とパルスレーザーの光軸が若干ずれたために発生したものと考えられる。寸法としては設計距離より離れた 110 mm のときが幅約 3 mm となっており、設計距離では中央から 5 つの角が離れて別々の図形として存在しているように見える。こうしたことが起こるのは、主な原因としては使用したパルスレーザーが広がって進んでいるためではないかと考えられる。ビームがコリメート光でなく広がっている場合、集光機能を持つ素子(レンズ)を挿入した際、ビームは並行光だとして設計された照射点より遠くに集まるためであると考えられる。

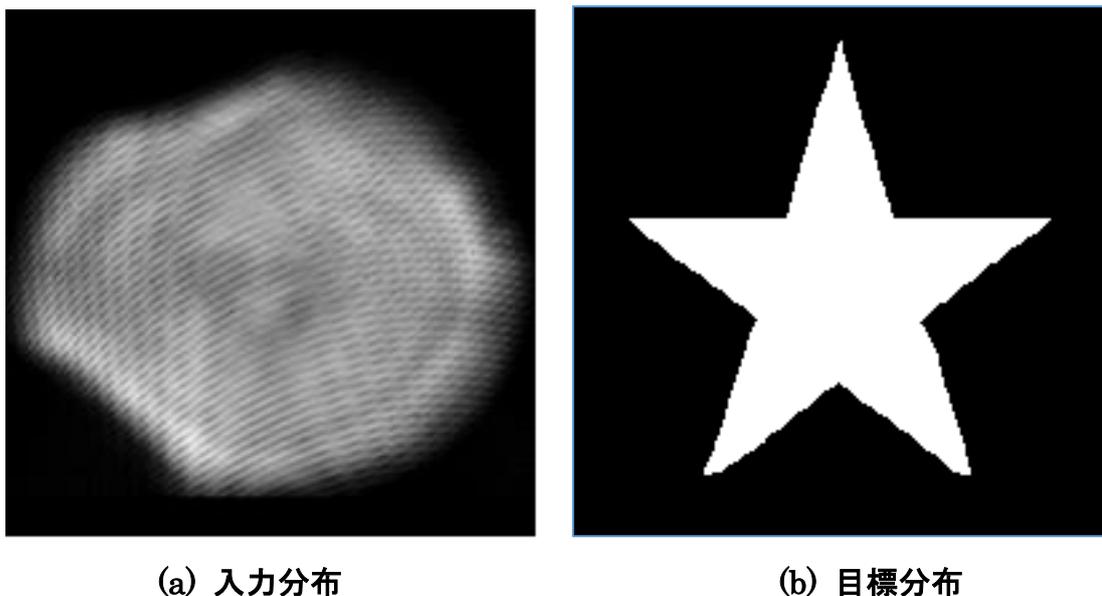


図 5-9 入力分布と目標分布

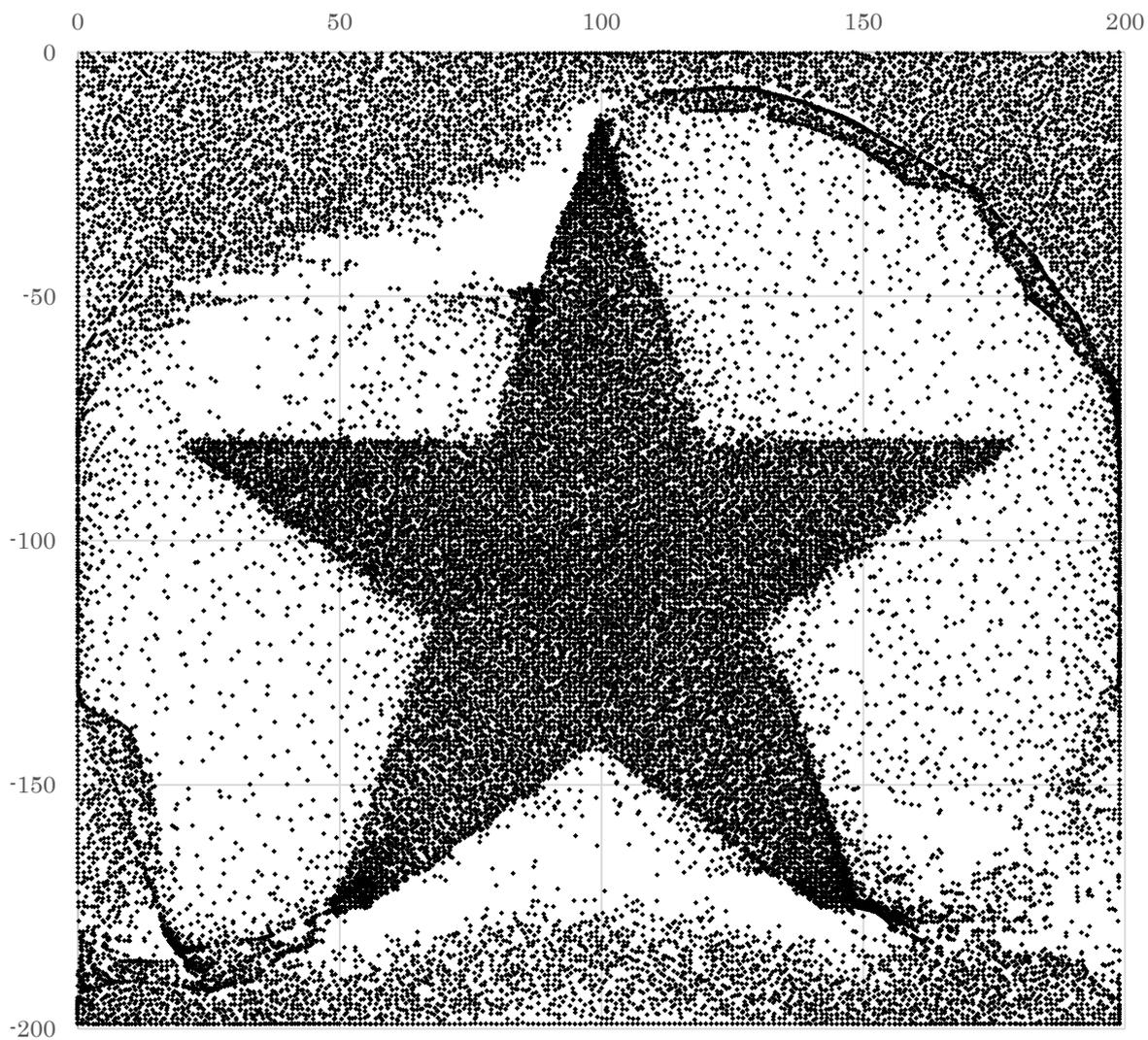


図 5-10 1000 回繰り返し計算後の要素の座標

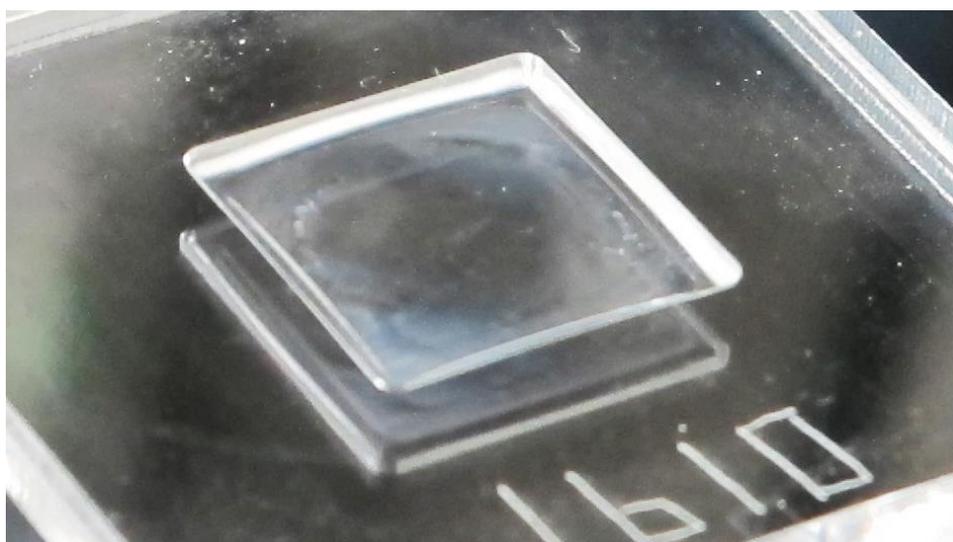
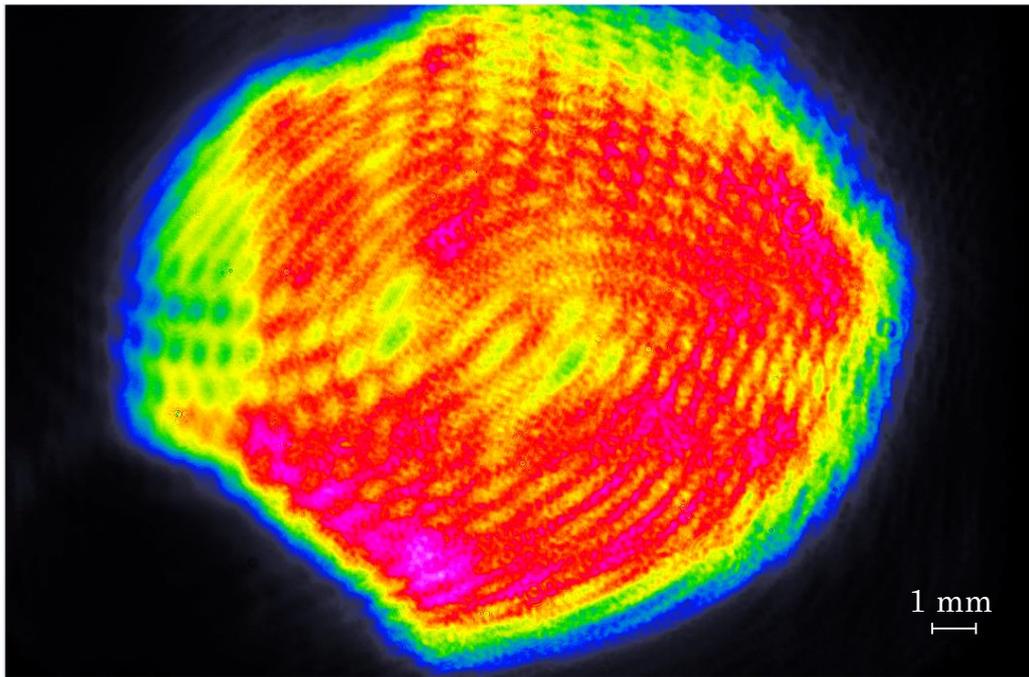
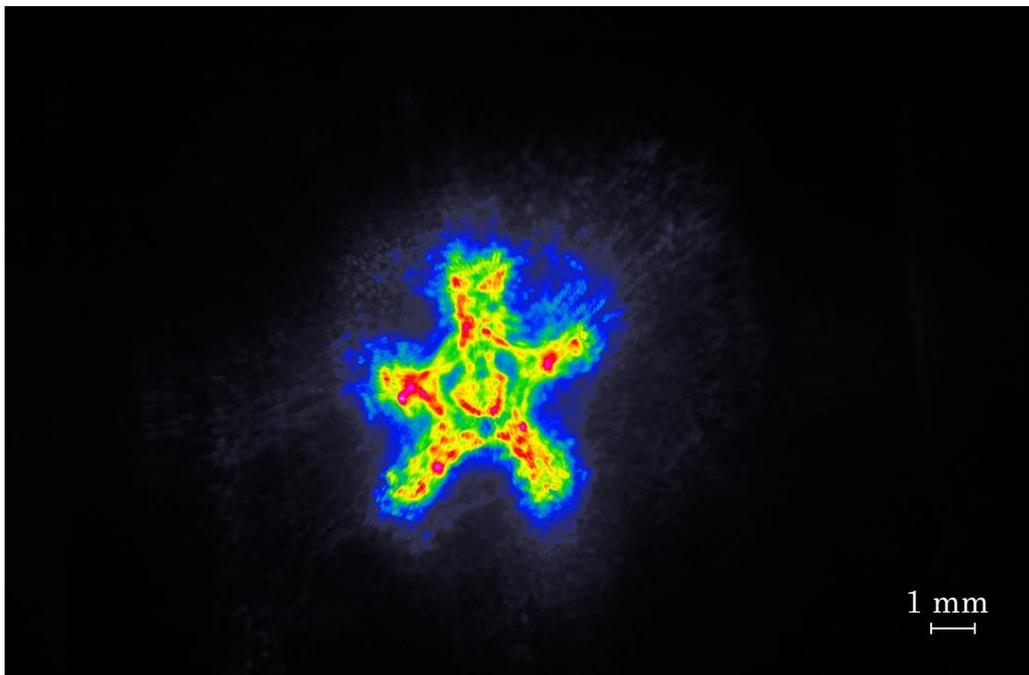


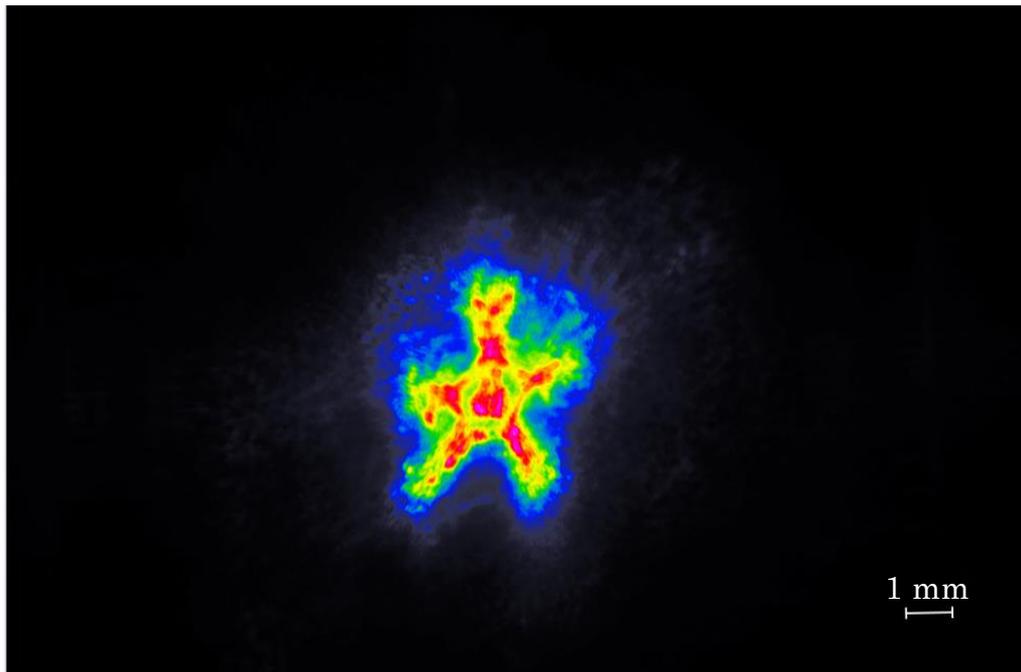
図 5-11 製作した素子の外観



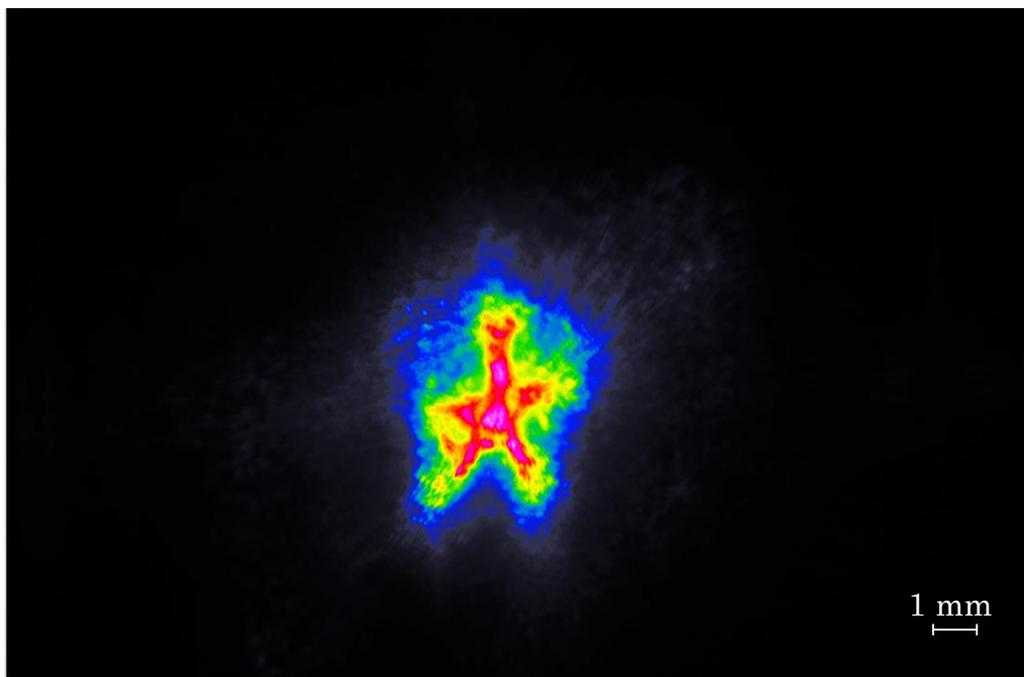
(a) 変換前のコリメートビーム



(b) 素子通過後のビームプロファイル(作動距離 90.5 mm)

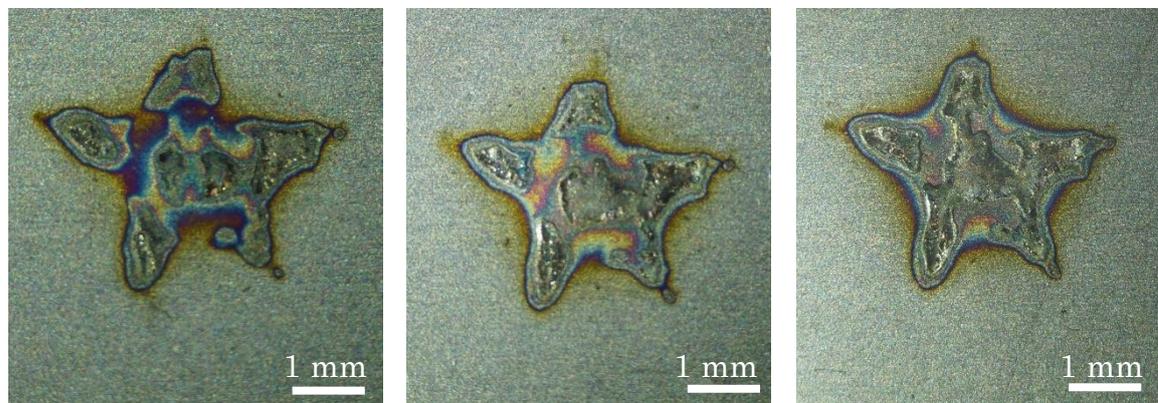


(c) 素子通過後のビームプロファイル(作動距離 102.5 mm)



(d) 素子通過後のビームプロファイル(作動距離 110.5 mm)

図 5-12 ビームプロファイルの変化



(a) 100 mm

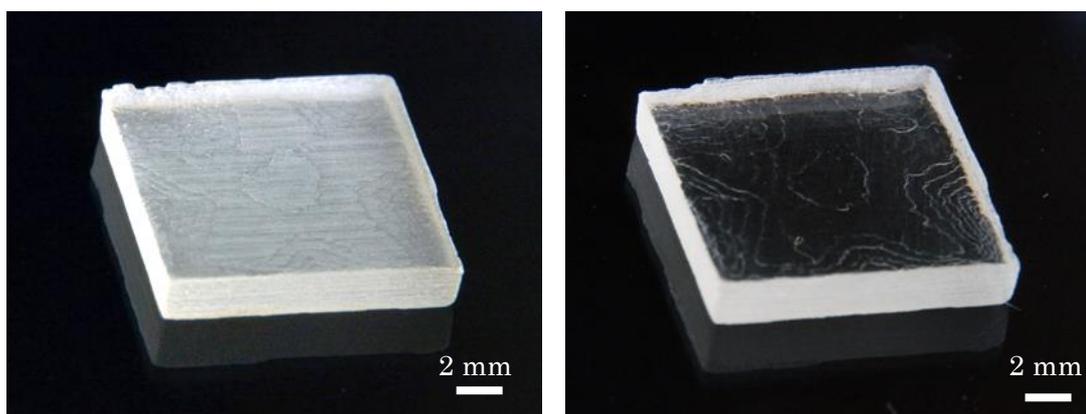
(b) 105 mm

(c) 110 mm

図 5-13 星形ビームの照射痕

5.7. 3D プリントによる光学素子製作

光学的な性能は造形精度次第ではあるが、出力サービスを用いることによりファブレス、自前の製造装置や加工技術を持ち合わせていなくても、設計のためのコンピュータのみで目的の光学機能を持つ素子を手に入れることも技術的には可能である。これを示すため、図 5-14 に外部の出力サービスに依頼して出力されたアクリル製素子を示す。(a)の出力直後の素子は表面が白く曇って見える。表面を研磨したものを(b)に示す。わずかに青みがかった透明で、表面にモデルと同様の積層に伴う凹凸がある。これを可視並行光で投影した様子を図 5-15 に示す。並行光が約 100 mm の作動距離で図形に変換されて投影されているのがわかる。



(a) 出力直後の素子

(b) 研磨処理後の素子

図 5-14 出力された素子の外観

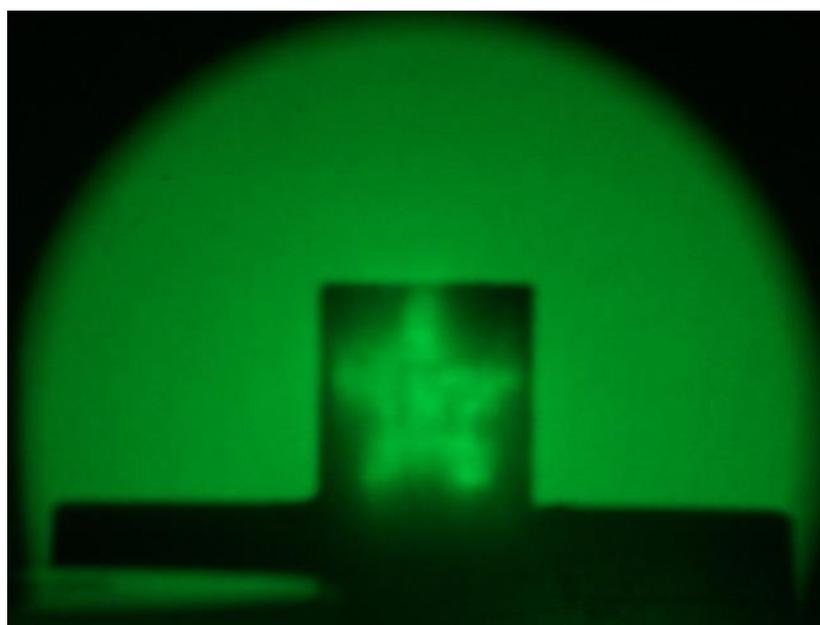


図 5-15 可視並行光による投影の様子

5.8. まとめ

この章では、軸対称分布変換素子ではなし得ない非対称形状の目標分布を実現するための非軸対称素子の例として、均一な強度分布を3つのビームに分け変形し文字列“CIT”へと変換する素子を設計製作し強度分布の変化を観察した。また、単純な入力ビーム形状ではない実際のパルスレーザの形状や強度分布を計算に用いて星形にビームを変換する素子では、ビームプロファイルが設計距離の100 mmに対して100～110 mmで星形の強度分布に変化していることがわかり、薄板に4.5 kW、10 msの変換したパルス照射することで幅約4 mmの星形の加工痕ができることを確認した。

第6章 分布変換の例2 線状ビーム

6.1. はじめに

この章では、ビームの強度が場所によって大きく異なるガウスビーム(シングルモードビーム)の連続発振レーザを線状の均一なビームとすることで、熱処理などのビームを走査して熱源とする加工に役に立つ素子を製作する。これは既存の素子を使ったシリンドリカルレンズなどで線状にするようなやり方では中央部強度が強くなってしまったために単素子では困難な分布である。素子を設計し計算し、その結果をもとに高い耐熱性を持つ石英で素子を製作し、バーンパターンによって確認する。また粉末金属積層造形の1工程として線状ビームが適用できないか検討する。

6.2. 設計と計算

図 6-1 に入力分布と目標分布を示す。入力とする分布は 200×200 要素で表現されたガウスビームに近いファイバレーザのプロファイルであり、目標とする分布は中央の 1×60 ドットに均等に配分するような形状とした。計算はC言語版の分布変換ソフトウェアで行い、計算時間は繰り返し1周当たり約160秒、全体では約44時間を要した。

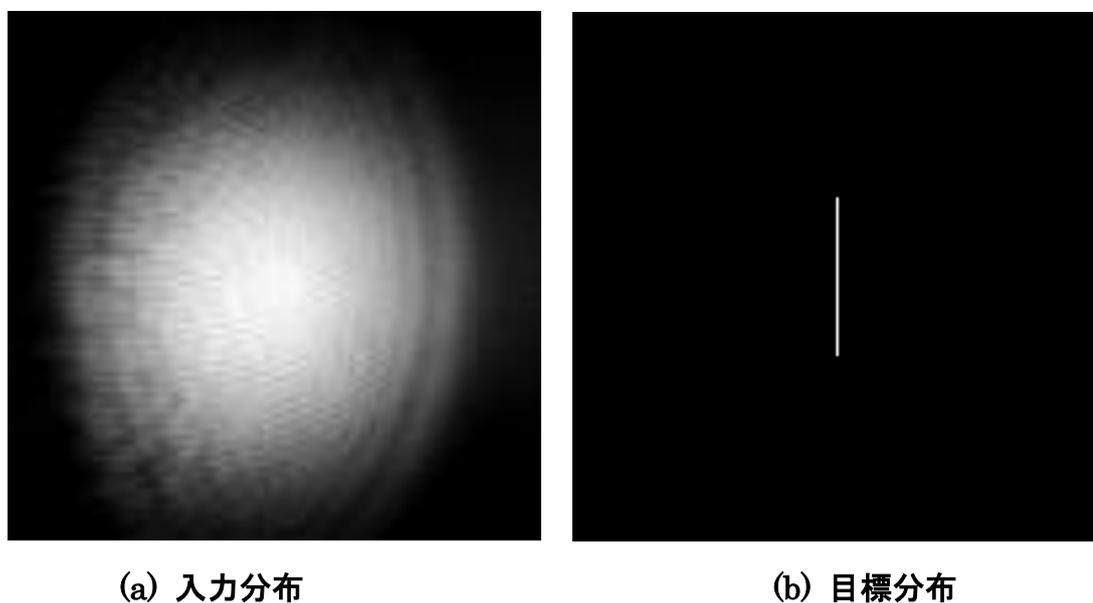
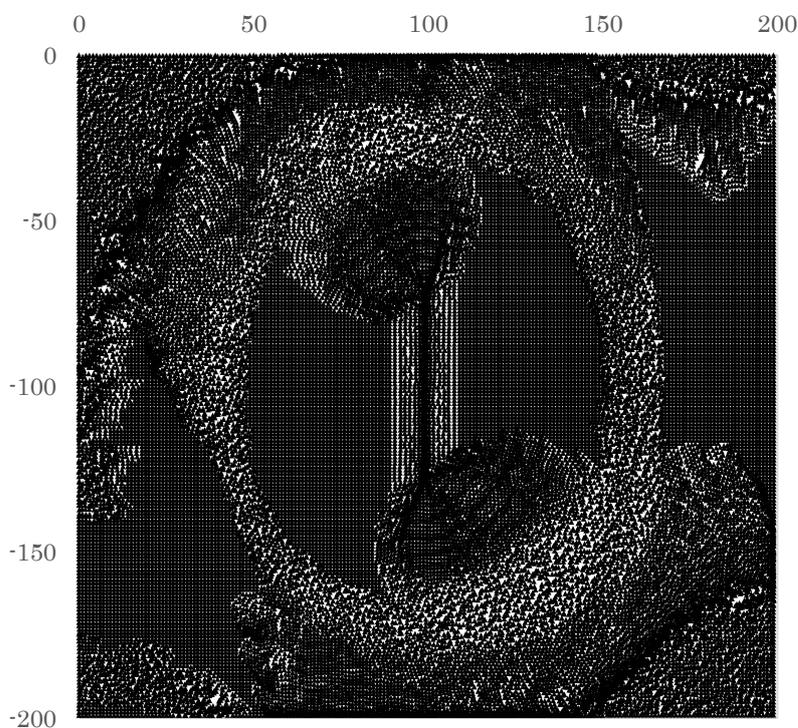


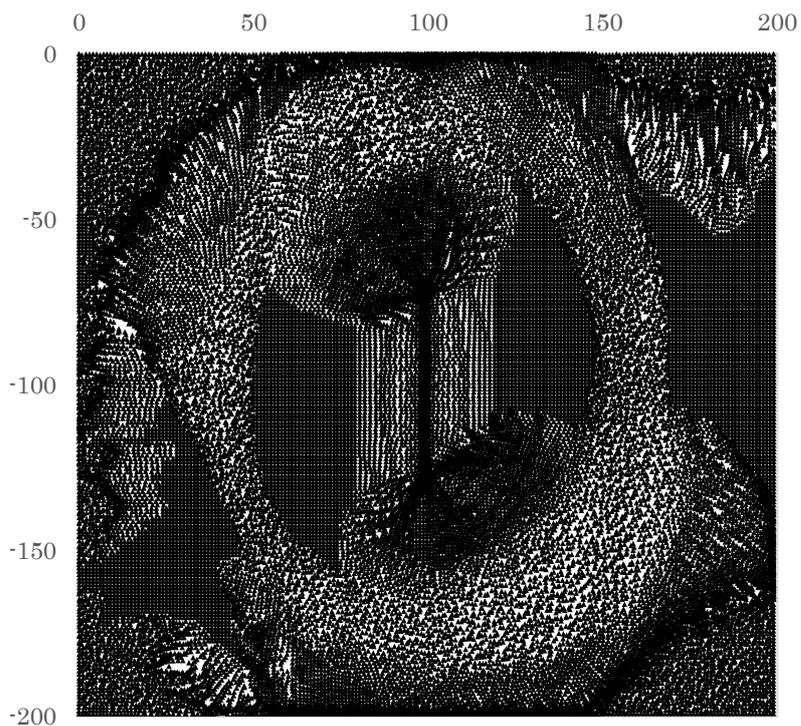
図 6-1 入力分布と目標分布

6.3. 計算結果

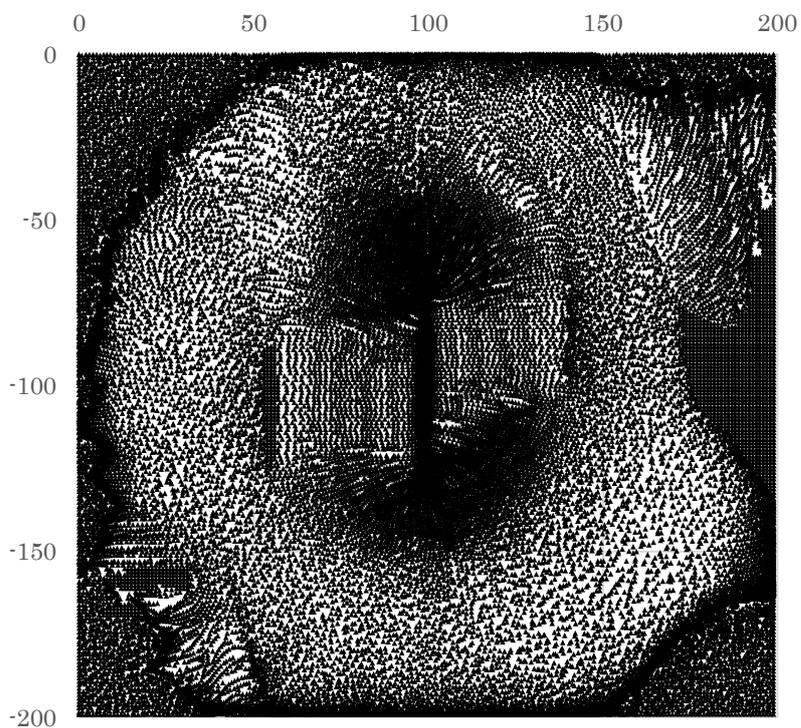
繰り返し計算による計算結果の変化の様子を図 6-2 に示す。初期段階では目標分布に近い個所では左右への移動が起きている。回数が進むと進む向きに斜め方向が加わりながら中央に集まる。50 回の時点で強度を持った入力要素は移動を開始している。強度のない要素はプログラムに与えられた追加のわずかの強度によって微小ながら動いている。200 回の時点で空間に要素のない部分ができ始めている。中央の目標要素のある部分付近には集まった要素が太くなってきている。500 回では上方及び右方に空き空間ができている。1000 回を要しても初期座標近くから動いていない要素もあるが、これらは強度 0 の入力要素のため、計算上問題はない。また、左方及び下方に中央まで移動しきれず残った要素があるが、これらは全要素数 40000 に対して十分に少なく、また持っている強度も小さいため影響はごく小さい。1000 回繰り返し計算後のグラフの中央部を拡大したものを図 6-3 に示す。ほとんどの要素が(90,-130)から(105,-70)の範囲に集まっていることがわかる。また強度の大きい要素が集合したとみられる中心部よりも、低強度の要素が多く集まる端部のほうが要素の密度が大きくなっていることがわかる。計算結果からはこの素子は入力されたビームを 3.6×0.6 mm のビームに変換すると予測できる。



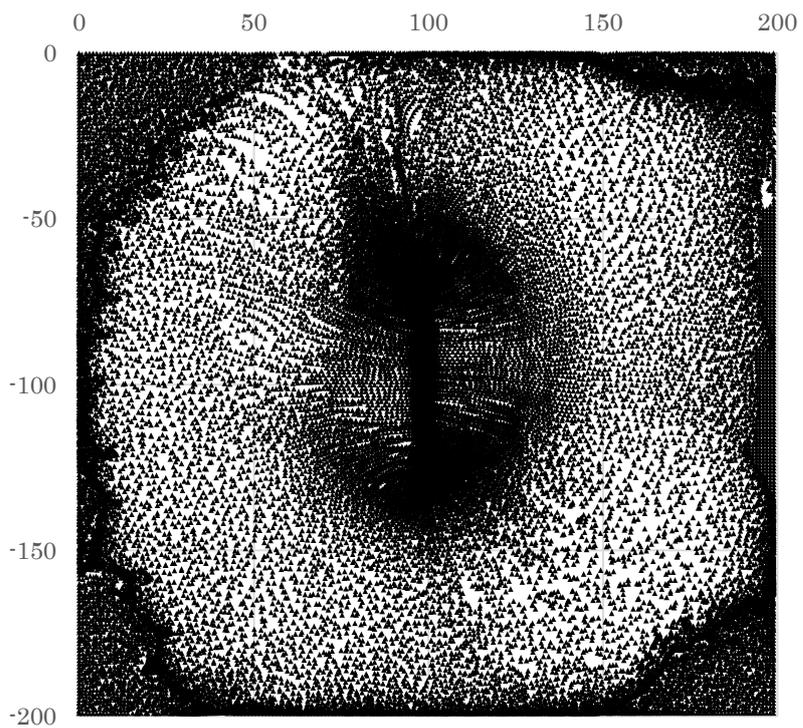
10 回目



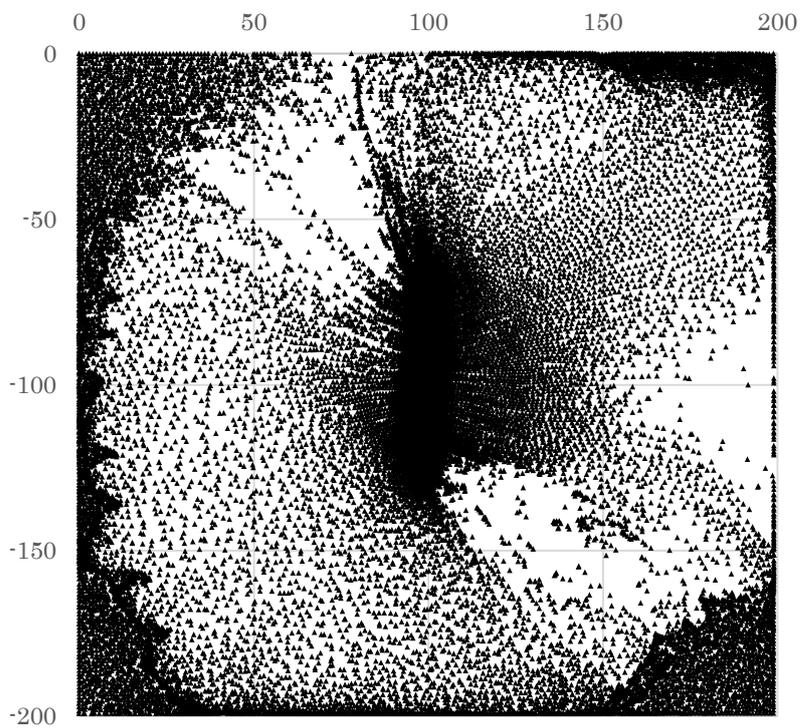
20回目



50回目



100回目



200回目

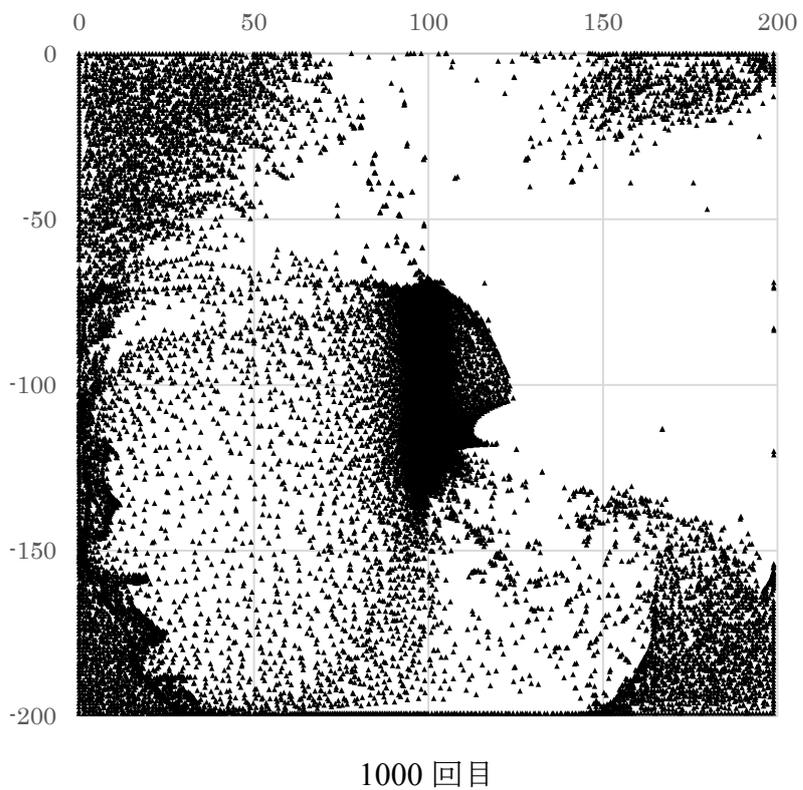
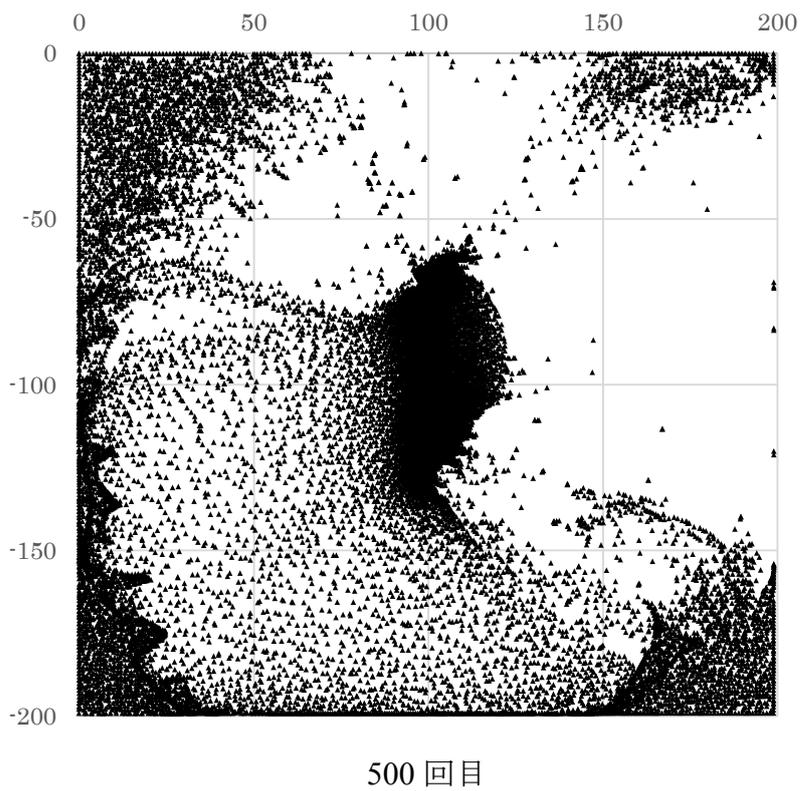


図 6-2 計算結果の変化の様子

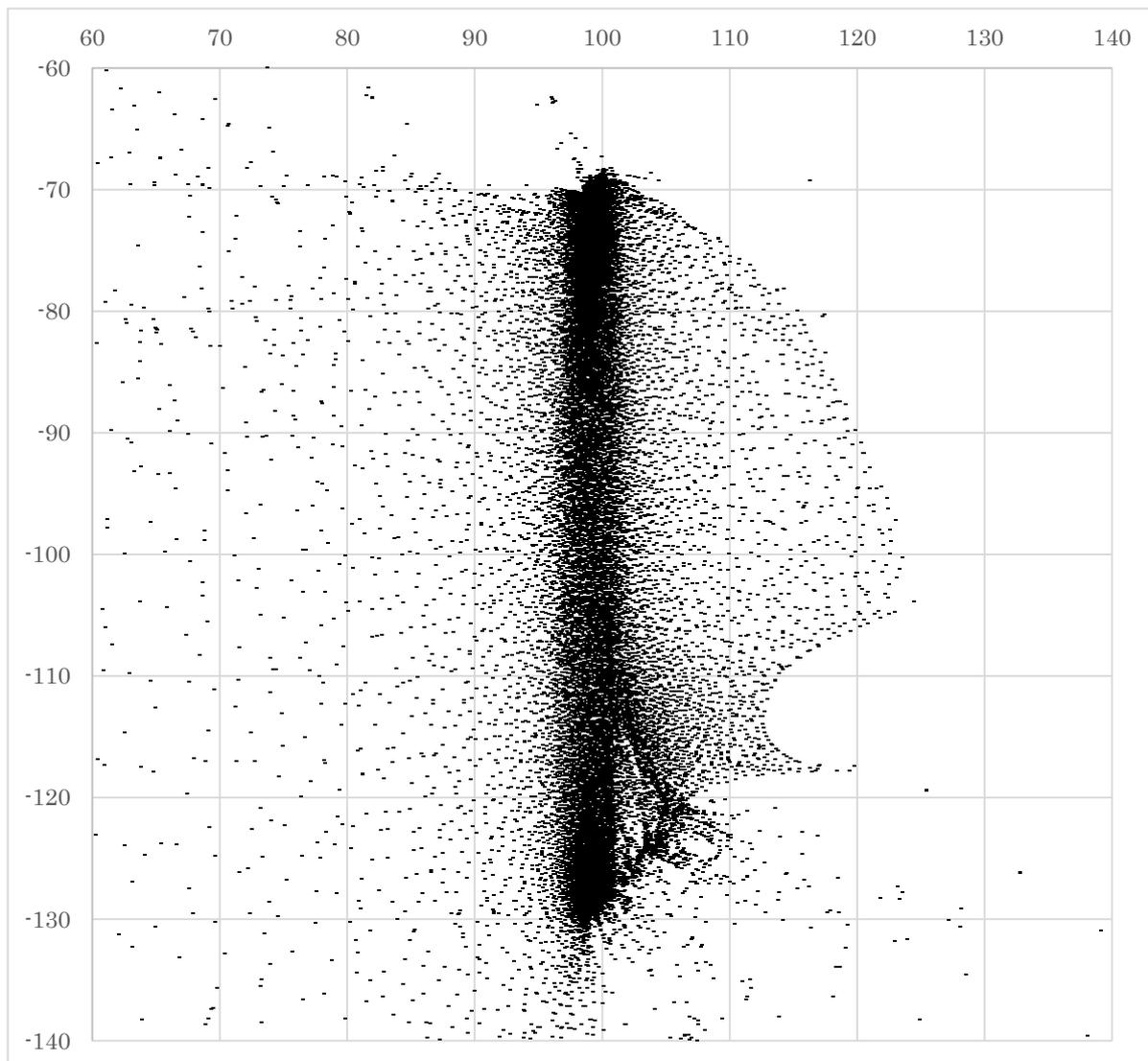


図 6-3 1000 回目の計算結果拡大

6.4. 石英を用いた素子の製作

パワー密度の高い入射ビームに対応するため、熔融石英のディスク(直径 20 mm, 厚さ 2 mm, 杉藤)に彫り込むことで分布変換素子を製作する。

加工は卓上 CNC フライス盤で、水中で電着ダイヤモンドボール工具(ボール直径 2 mm)を用いて行う。50 μm ごとの等高線加工で概形を加工したのち、走査線加工によって仕上げる。切り込み幅は 40 μm である。加工時間は約 4 時間であった。加工した素子の外観を図 6-4 に示す。加工した素子は表面を研磨し、オイルを塗ったうえで C マウントレンズホルダに入れ、加工実験に供する。

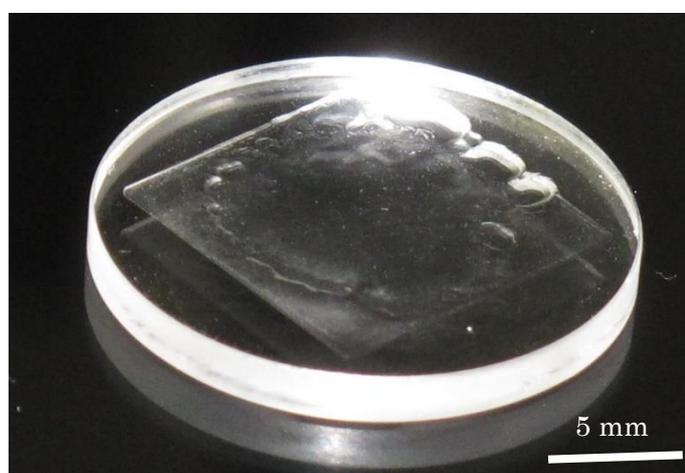
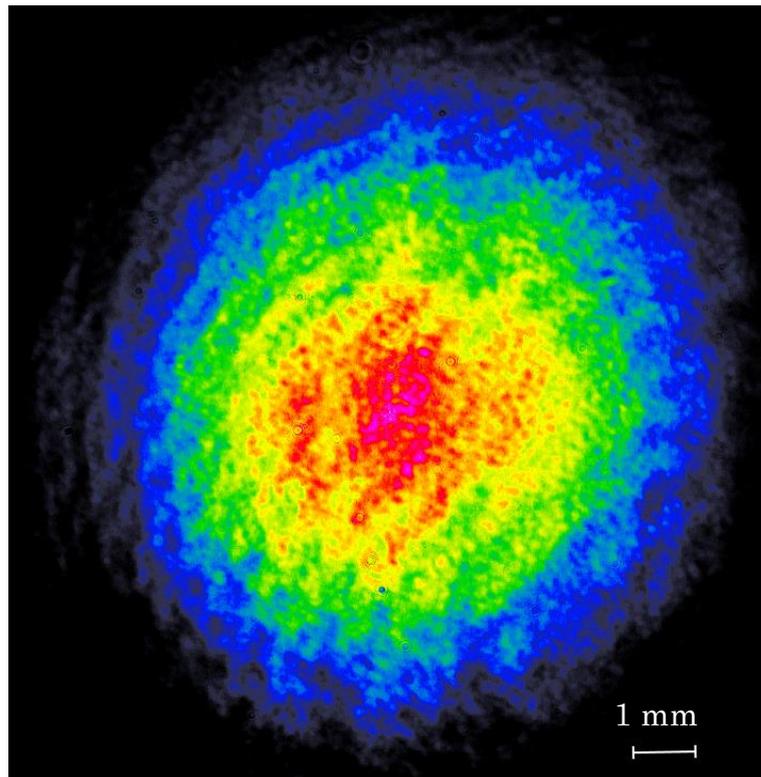


図 6-4 製作した素子の外観

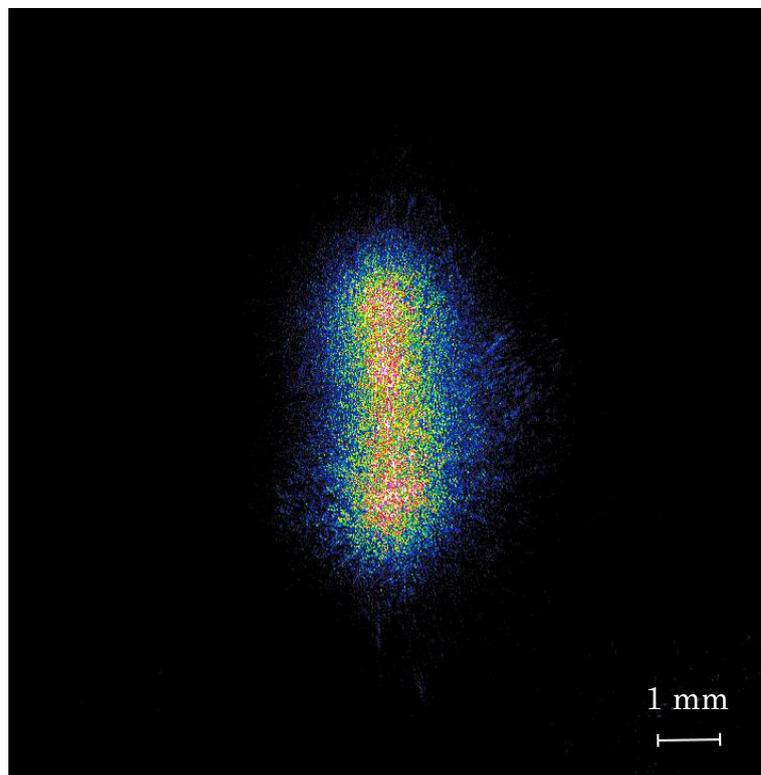
6.5. 線状ビームのプロファイル

デジタルカメラで取得したビームプロファイルの変化を図 6-5 に示す。素子とセンサの距離は機材の都合で設計長 100 mm より短い 98.5 mm となっている。ガウスビームの入射コリメート光が、分布変換素子を通すと縦 4.0 mm 横 0.7 mm ほどの縦長のビームとなっていることがわかる。アスペクト比は 5.7 である。

ビームが縦横に広がった理由としては、計算結果の時点で光線要素同士の反発力によって目標要素から離れた位置にある要素が一定の割合で発生したことが挙げられる。また、ビームのエッジが急峻なものとならないため、半値幅でとると設計値より大きい値になりうることも考えられる。さらに、どんな平行ビームもわずかに広がっていくので、設計焦点距離より遠くで設計寸法になる可能性がある。



(a) 入射ビームのプロファイル



(b) 素子通過後のプロファイル

図 6-5 ビームプロファイルの変化

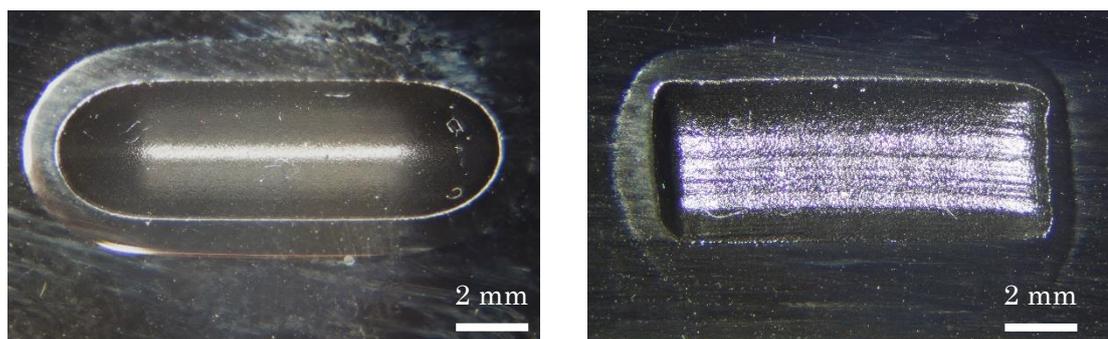
6.6. ビーム走査実験

製作した素子を用いて、ファイバレーザを着色プラスチックに照射した。レーザ出力 26.5 W, 5 mm/s で一方向に走査する工程を 5 回繰り返すことでパターンを深くした。比較対象として、焦点距離 100 mm の平凸レンズを 40 mm 焦点をはずすことで、加工された溝幅が同等となるようにして照射したものを用いる。

6.7. 実験結果

バーンパターンの比較を図 6-6 に示す。平凸レンズを用いたものでは長円状の溝となっており、溝の中央部が大きくえぐれているのに対して、分布変換素子を用いたものは角の丸い四角形の溝が形成されており、平坦な溝が加工されているように見える。

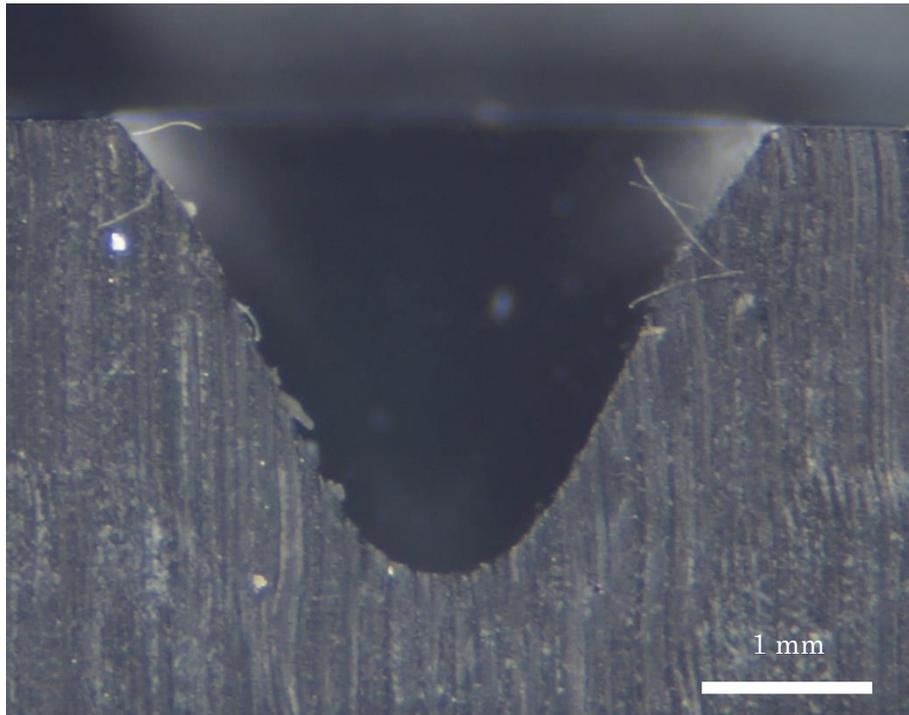
試料をビーム送り方向と直交に切断したものを図 6-7 に示す。平凸レンズでの走査痕(a)ではガウスビームのビームプロファイルを 1 軸方向に積分したときの曲線と似た中心ほど深い V 字状の溝が刻まれているのに対して、分布変換素子を用いた(b)では一部平坦部があり縦方向に均一にビームのエネルギーが分配されたことがわかる。



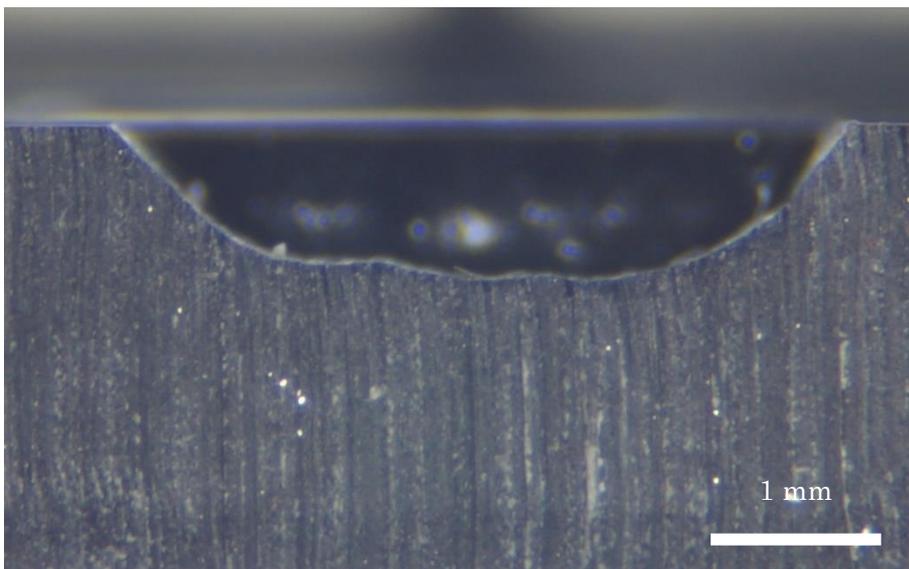
(a) 平凸レンズで焦点はずしをしたもの

(b) 変換素子を通して照射したもの

図 6-6 バーンパターンの比較



(a) 平凸レンズで焦点はずしをしたとき



(b) 変換素子を通して照射したとき

図 6-7 バーンパターンの断面の比較

6.8. 金属粉末積層造形への適用

線状ビームの応用範囲はレーザービーム焼き入れなどが考えられるが、ここでは粉末金属を用いた積層造形法への適用を考える。

金属粉末を用いた積層造形法では、薄く敷き詰めたパウダーの表面に焦点を合わせたビームを高速にスキャンすることによって瞬間的に熔融させる手法が主流である。この方法では現在求められている時間当たり造形体積の増大を求められた際、スキャン速度の向上やマルチビーム化が必要となる。これに対し本研究室で行われている方式では、ある程度の厚さにパウダーを敷き、そこに焦点を外したレーザーを照射することで凹メニスカス状の完全に熔融した金属薄板を造形し、これをスタックしていくことで造形しようとするもので、ビームパワーの増加に対しては熔融幅を増やすことで対応できる点は有利であるが、焦点はずしをする際にビームの強度分布の影響を受け、また円形ビームであると走査した際に円の直径位置の入熱が過剰になるなどの不具合がある。そこで線状のビームがあれば薄板の製作品質の向上が望めると考えた。

実験条件は5 mmの厚さに純鉄粉(アトメル)を敷き詰めることで、通常(1 mm)の条件よりも沈み込みを観察しやすくした。素子は前節と同じものを使用した。対照として、焦点距離100 mmの平凸レンズを用い、30 mm焦点を外して同様に走査した。レーザー出力は60 Wとした。

ビーム照射中の粉末の様子を図6-8に示す。線状のビームを横方向に走査することにより、矩形状の熔融池が発生していることがわかる。

実験結果として、図6-9に製作した薄板を樹脂に埋め込み湿式精密切断砥石で切断した断面を示す。焦点はずしで照射して製作した薄板はビームのパワー密度が高い中央部が大きく落ち込んでしまっているのに対して、素子を用いたものでは平坦部ができていて、写真右側の斜面上になっている部分は、素子とビームの光軸が合わなかったことが原因のパワー不足によって融ける深さが浅くなったと考えられる。

これらのことから、ビームパワーが増大しても安定した作動距離で高品質な造形が行えるようにするには、分布変換素子を用いて設計した強度分布で照射することが重要であることが分かった。一方、素子の利用の際には通常のレンズ以上に光軸と直交方向の2軸のアライメントが求められることもわかった。

造形速度について検討する。本方式では薄板造形後、板から輪郭を切り出したり、下層とレーザー溶接する工程が入るため一概に比較できない点もあるが、ここでは薄板造形速度を求める。薄板造形では、通常1 mmの厚さに粉末を敷き、これを溶かすと厚さ0.6 mmの板となる。100 Wの出力で2 mmの縦幅のビームが照射できる素子を用いて10 mmの長さを加工するには5秒かかり、これを開始位置を変えながら7回繰り返すことで10 × 10 × 0.6 mmの薄板を得た。ここから、

$$(10 \cdot 10 \cdot 0.6)/(100 \cdot 35) = 0.017 \text{ mm}^3/\text{J}$$

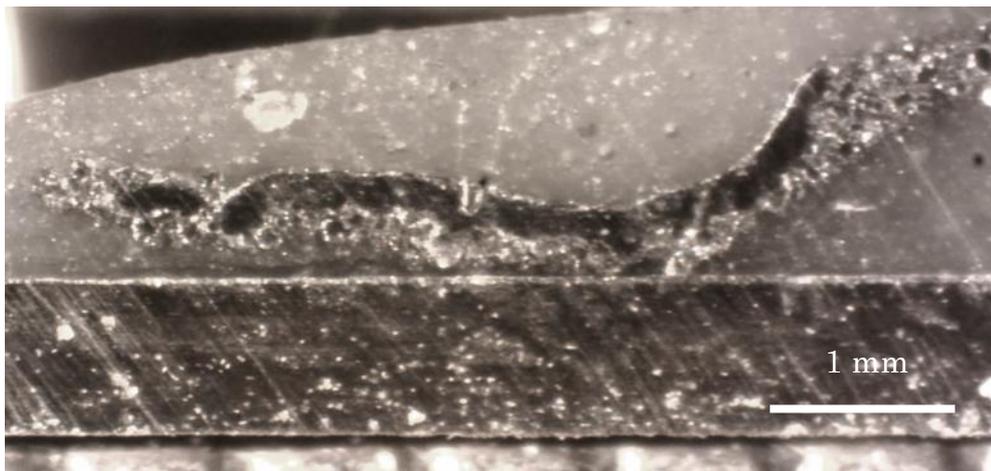
となる。この方式では利用する発振器の出力に応じてビームの幅を変えればよいので、高い出力においても相応の造形速度となる可能性が高い。



図 6-8 ビーム照射中の粉末の様子



(a) 焦点はずしをしたもの



(b) 線状ビームを用いたもの

図 6-9 薄板断面の比較

6.9. まとめ

入力ビームの強度分布が大きく異なっているビームでも計算可能なことを示すため、また既存のレンズでは困難なパターンとするため、ガウスビームから線状の均一強度ビームに変換する素子を設計し製作した。12 mm 角の石英製分布変換素子は 100 mm の設計距離において線状のビームとなり、プラスチックへのバーンパターンは平坦部分ができ通常の焦点はずしでの加工形状とは異なるパターンが加工された。また、この線状ビームを用いて純鉄粉が熔融でき凝固物は板状になることから、粉末積層造形工程として利用できることが分かった。

第7章 結 言

本研究では、レーザによって一定領域へ熱加工するための屈折型強度分布変換素子を設計し製作するためのシステムの開発を行い、その結果以下のことが明らかとなった：

第1章では、屈折型強度分布変換素子の必要性について論じた。光利用効率が高く、小ロットあるいは単品生産でも製造しやすく、大パワーのマルチモードファイバレーザであっても変換可能な点が屈折型素子の利点であり、熱加工するにあたって治具や工具のように取り扱えるような簡便さを持ち合わせており、これからのレーザ加工の発展において必要な技術であることが分かった。軸対称光学素子の設計手法について説明し、これが非軸対称素子には適用できないことを示した。

第2章では、非軸対称形状の分布変換素子設計手法について、分布変換と形状生成の点から解決策を述べた。分布変換プログラムでは光線要素に対し電荷を持った粒子とみなすことで要素間に発生する引力と斥力の合力によって要素の移動方向と量を決め、初期配置の隣接要素との間の線分を利用して光線の交差を防ぎながら繰り返し計算することで光線の照射位置を求めた。分布変換素子の形状は最長光路を基準としその他の要素の光路長を合わせるという手法を用いて求めることができた。

第3章では第2章で開発したプログラムが実際に成り立つ場合があるかどうか凸レンズと比較し検証した。その結果、100 mm先の一点に集光する屈折率1.49の素子を計算した場合、中心部の曲率半径が49.1 mmで放物面の非球面レンズをこのプログラムは出力することがわかり、実用可能であることが判明した。

第4章では、加工装置と加工法について述べた。設計したデータを実現するため、2台の加工装置を用いて、アクリルは切削により、またガラスや石英は電着ダイヤモンドボール砥石で形状を加工し、それに研磨を施すことでRa 18 nm、研磨せずシリコーンオイルを塗布することでRa 38 nmまで表面粗さが向上し、この時の光透過率はバルク材料と同等となった。これらのことから、複数の加工を組み合わせることで実用できる光学素子が簡便に製作できることが明らかになった。

第5章では、分布変換を行い投影するための素子を製作し検証した。軸対称分布変換素子ではなし得ない非対称形状の目標分布を実現するための非軸対称素子の例として、均一な強度分布を3つのビームに分け変形し文字列“CIT”へと変換する素子を設計製作し強度分布の変化を観察した。また、単純な入力ビーム形状ではない実際のパルスレーザの形状や強度分布を計算に用いて星形にビームを変換する素子では、ビームプロファイルが設計距離の100 mmに対して100~110 mmで星形の強度分布に変化していることがわかり、薄板に4.5 kW、10 msの変換したパルス照射することで幅約4 mmの星形の加工痕ができることを確認した。

第6章では、ビーム走査加工のための素子を設計製作した。入力ビームの強度分布が大きく異なっているビームでも計算可能なことを示すため、また既存のレンズの組

み合わせでは困難なパターンとするため、ガウスビームから線状の均一強度ビームに変換する素子を設計し製作した。12 mm 角の石英製分布変換素子を通過したビームは100 mm の設計距離において線状のビームとなり、プラスチックへのバーンパターンは平坦部分ができ通常の焦点はずしでの加工形状とは異なるパターンが形成された。また、この線状ビームを用いて純鉄粉が熔融でき凝固物は平坦な板状になることから、粉末積層造形の工程用途に利用できることが分かった。

以上より、本研究の目的である屈折型レーザー強度分布変換素子が自動設計でき、簡単に製作でき、マーキングやビーム走査に対し機能することを確認し具体的な適用例を示すことができた。

今後の課題としては、現在の延長線上として、変換可能なパターンの高分解能化、計算のさらなる高速化のための検討があげられる。また、より精密な分布変換のために現在計算上無視した事項による照射位置の誤差発生の影響度を調査し補正する必要がある。斜め方向からの入射では照射面に角度がつき箇所により照射距離が変化するが、それを考慮した形状生成手法が必要となる。実際の加工事例の拡充も必要であり、そのためには、被加熱物の形状の影響を伝熱的に最適化した入熱分布の設定手法の開発も求められる。これらの課題が解決されるとともに、適用できる事例が増え、より複雑な、たとえばベアリング転動面への焼き入れ加工など斜め方向や曲面への照射でも望むパターンのレーザー熱処理がごく簡易な素子の追加で可能となるだろう。そのほかの展開として、屈折型強度分布変換素子はインコヒーレント光、白色光にも適用できる手法であることから照明分野への適用が挙げられる。また、新しい解き方である本手法の他分野への転用可能性を検討する。

参考文献

- 101) 新井 武二：はじめてのレーザープロセス，工業調査会，p.95，2004.
- 102) 中井 貞雄：パワーレーザーの技術，オーム社，p.125，1999.
- 103) 川澄 博通，新井 武二，中村 幸夫：CO₂ レーザによる鋳鉄及び炭素鋼の焼入れ特性，昭和 55 年度精機学会春季大会学術講演会，p.385，1980.
- 104) 川澄 博通：レーザー加工技術，日刊工業新聞，p.14，1985.
- 105) 川澄 博通：最先端レーザー加工技術，シーエムシー，p.55，1989.
- 106) 矢島 達夫，霜田 光一，稲場 文男，難波 進 編：新版 レーザーハンドブック，朝倉書店，pp.2-5，1989.
- 107) レーザー学会 編：レーザーハンドブック(第 2 版)，オーム社，pp.5-7，2005.
- 108) 住村 和彦，西浦 匡則：解説 ファイバーレーザー —基礎編—，オプトロニクス社，p.50，2011.
- 109) E. A. Shcherbakov, V. V. Formin, A. A. Abramov, A. A. Ferin, D. V. Mochalov, V. P. Gapontsev: Industrial Grade 100 kW Power CW Fiber Laser, Advanced Solid-State Lasers Congress Technical Digest, ATh4A.2, 2013.
- 110) レーザー学会 編：レーザープロセッシング応用便覧，エヌジーティー，pp.129-130，2006.
- 111) Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen, Wenyan Yu, Renyong Ma: Uniform illumination of large targets using a lens array, Applied Optics, 25, 3, pp.377-381, 1986.
- 112) M. M. Chen, J. B. Berkowitz-Mattuck, P. E. Glaser: The Use of a Kaleidoscope to Obtain Uniform Flux Over a Large Area in a Solar or Arc Imaging Furnace, Applied Optics, 2, 3, pp.265-272, 1963.
- 113) R. E. Grojean, D. Feldman, J. F. Roach: Production of flat top beam profiles for high energy lasers, Review of scientific instruments, 51, 3, pp.375-376, 1980.
- 114) 岸本 正，山本 章裕，島津 忠司：レーザー照射処理におけるカライドスコープによるエネルギー分布の変換 —テーパ管のカライドスコープ—，精密工学会誌，58，2，pp.271-276，1992.
- 115) 高瀬 義明，徳永 剛，三須 直志，宮崎 俊行：円形開口による半導体レーザーの集光特性への効果，2010 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，p.827，2010.

- 116) 田中 義弘, 徳永 剛, 宮崎 俊行: 整形線状ビームによる三次元レーザ加工, 精密工学会誌, Vol.60, No.3, 1994.
- 117) R.C.Oehrle: Galvanometert beam scanning system for laser fiber drawing, Applied Optics, 18, 4, pp.496-500, 1979.
- 118) 城戸 基, 南田 勝宏, 市古 修身, 及川 昌志, 川澄 博通: ポリゴンミラー光学系を用いたレーザ熱処理—第1報 新手法による鋼の焼き入れの実験結果, 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.903-904, 1990.
- 119) 島田 敏夫: 最新レーザプロセッシングの基礎と産業応用, オーム社, p.98, 2007.
- 120) A. Engel, J. Steffen, G. Herziger: Laser Machining with Modulated Zone Plates, Applied Optics, 13, 2, pp.269-273, 1974.
- 121) 萩野 秀樹, 朴 忠植, 加藤 暢宏, 三俣 真理, 菊田 久雄, 岩田 耕一: 炭酸ガスレーザビーム整形のための曲面上 CGH の製作, 精密工学会誌, Vol.69, No.3, p.419, 2003.
- 122) 萩野 秀樹: 高出力レーザを用いた表面処理のための回折光学素子に関する研究, 大阪府立大学博士論文, 2009.
- 123) Matthew Gibson, John Tyrer, Rebecca Higginson: NOVEL COMPUTER GENERATED DIFFRACTIVE OPTICS MODIFYING BEAM CHARACTERISTICS TO IMPROVE THE MICROSTRUCTURES OF DIRECTLY DEPOSITED INCONEL 625, ICALEO 2008 Congress Proceeding Laser Materials Processing Conference Proceedings paper(102), 2008.
- 124) Matthew Gibson, Rebecca Higginson, John Tyrer, Matthew Blackmur: THE USE OF HOLOGRAPHICALLY CUSTOMISED BEAM PROFILES TO CONTROL THE OVERALL PHYSICAL CROSS SECTION OF DIRECT METAL DEPOSITIONS, ICALEO 2008 Congress Proceeding Laser Materials Processing Conference Proceedings paper(109), 2008.
- 125) Fred M. Dickey: Laser Beam Shaping Theory and Techniques (second edition), CRC Press, p.313, 2014.
- 126) 内尾 舜二; 実用プラスチックレンズ, 日刊工業新聞, p.17, 1989.
- 127) Ryoichi KUWANO, Tsuyoshi TOKUNAGA, Yukitoshi OTANI and Norihiro UMEDA: Beam Shaping Optics for YAG Laser Processing Fabricated by Computerized Numerical Control Lathe, Optical Review Vol.12 No.6, 2005.
- 128) 桑野亮一, 古賀俊彦, 徳永剛: 超精密切削加工によるリングビームシェイピング光学素子の作製, 2011年度精密工学会春季学術講演会講演論文集, p.167, 2011.3.
- 129) 平井 隆之, 布施 敬司, 塩崎 学, 岡田 健, 江畑 恵司: 非球面ビームホモジナイザの開発, SEI テクニカルレビュー, 第161号, p.92, 2002.
- 201) 佐藤 明: HOW TO 分子シミュレーション—分子動力学法, モンテカルロ法, ブラウン動力学法, 散逸粒子動力学法—, 共立出版, 2004.

- 202) 泉 聡志, 増田 浩寿: 機械・材料設計に生かす実践分子動力学シミュレーション, 森北出版, 2013.
- 203) 飯塚啓吾: 光工学 新訂増補版, 共立出版, pp.99-101, 1989.
- 401) 丸紅情報システムズウェブサイトより 2016年10月15日閲覧
http://www.marubeni-sys.com/3dprinter/what_3d/index.html

関連論文および発表

関連論文

1. TOKUNAGA Tsuyoshi, MORITA Sho, and KUWANO Ryoichi ; Fabrication of an aspheric poly (methyl methacrylate) laser beam shaper using computer numerical control machining and polishing for laser heat treatment, Proceedings of the Tenth International Conference on Progress of Machining Technology, pp.89-92, 2012.
2. 森田 翔, 徳永 剛, 桑野 亮一 ; 屈折型非軸対称ビームシェイパの設計手法の開発, 精密工学会誌, 82, 11, pp.983~988, 2016.
3. 森田 翔, 徳永 剛, 坂本 幸弘 : 非対称の屈折面を有するレーザ強度分布変換素子の設計と製作 —ガウス分布-線状均一分布—, 設計工学, 発行予定.

関連発表

- ・森田 翔, 徳永 剛, 桑野 亮一 ; レーザビームシェイピング素子の迅速製作に関する研究 切削と研磨による樹脂レンズの作製と評価, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.631-632, 2011.
- ・森田 翔, 渡辺 翔, 徳永 剛, 桑野 亮一 ; 切削と液体塗布によるレーザ熱加工用簡易アクリルレンズの作成と評価, 2015 年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.711-712, 2015.
- ・森田 翔, 渡辺 翔, 徳永 剛, 桑野 亮一 ; アクリル樹脂の直接切削によるレーザ加工用非軸対称ビームシェイパの設計と製作, 2015 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.189-190, 2015.

その他の論文および発表等

論文

・谷合 哲行, 森田 翔, 横山 起季, 西崎 泰; リサイクル自転車を活用した自転車レンタル事業による地域貢献と技術者教育について, 工学教育, 57 巻 4 号, pp.48-53, 2009.

発表

・村瀬 千春, 徳永 剛, 森田 翔, 横山 起季, 桑野 亮一; 金属粉末溶融型積層造形における薄板形状の成形特性, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.777-778, 2012.

・五十嵐 和樹, 徳永 剛, 森田 翔, 桑野 亮一; レーザ照射に伴うプルームの観察, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.801-802, 2012.

・熊谷 大輝, 徳永 剛, 森田 翔, 桑野 亮一, 横山 起季; レーザ 3 次元形状加工における斜面生成 第 2 報 励起ランプが斜面に及ぼす影響, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.803-804, 2012.

・村瀬 千春, 徳永 剛, 森田 翔, 横山 起季; 多段階レーザ照射法による金属粉末溶融型積層造形法, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, せせる 193-194, 2013.

・熊谷 大輝, 徳永 剛, 森田 翔, 桑野 亮一; レーザ 3 次元形状加工における斜面生成 第 3 報 - 数値計算による加工形状の予測 -, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.281-282, 2013.

・横山 起季, 徳永 剛, 森田 翔, 村瀬 千春; 純チタン粉末を用いた積層造形の試み - 断面要素の整形特性 -, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.301-302, 2014.

・岡根 祐太, 徳永 剛, 森田 翔, 桑野 亮一; 液体と弾性膜を用いた可変焦点レンズ機構によるレーザ溶接の試み, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.709-710, 2015.

・坂本 裕二, 徳永 剛, 森田 翔, 岡根 祐太, 桑野 亮一 ; 可変焦点レンズにおける焦点距離の圧力制御, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.201-202, 2015.

・ Ryoichi Kuwano, Tsuyoshi Tokunaga, Sho Morita, Yuta Okane, Yukitoshi Otani ; An Enclosed variable focusing lens for remote welding , International Symposium of Optomechatronics Technology (ISOT 2015), 2015.

・ 渡辺 翔, 徳永 剛, 森田 翔 ; 表面性状が強度分布に及ぼす影響について, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.841-842, 2016

・坂本 裕二, 徳永 剛, 森田 翔, 桑野 亮一 ; 可変焦点レンズを用いたビーム走査によるレーザー溶接の試み, 2016 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.645-646, 2016.

謝 辞

本研究遂行にあたり、千葉工業大学大学院の坂本幸弘教授には主査をお引き受けいただきましたこと、深く感謝いたします。

千葉工業大学大学院 徳永剛准教授には、学部卒研究生の頃から面倒を見ていただきました。博士後期課程においては、素子設計というチャレンジに対してお忙しい中ご指導ご鞭撻をいただきました。ここに心から感謝申し上げます。

本研究の共同実験者としてご助言いただきました、広島工業大学工学部 桑野亮一准教授に厚く感謝いたします。

本研究をまとめるにあたっては、千葉工業大学大学院 長瀬亮教授、松井伸介教授、高橋芳弘准教授に熱心なご討論やご助言をいただきました。ここに深くお礼申し上げます。

本研究は千葉工業大学徳永研究室にて遂行されました。楽しく有意義な研究生生活を送ることができたことを、歴代の先輩方、大学院の同僚、そして後輩の皆様に感謝申し上げます。

最後に、博士後期課程進学を許していただき、暖かく見守っていただいた両親に深く感謝いたします。