

高出力レーザーによる熱レンズ効果を考慮した光学解析

岩井 広成*, 西村 知晃*, 二野井 晃嗣**
 伊藤 杏奈**, 松浦 孝泰**, 古田 裕正**

*サイバネットシステム株式会社 (〒101-0022 東京都千代田区神田練堀町3番地 富士ソフトビル)

**パナソニック デバイス SUNX 株式会社 (〒486-0901 愛知県春日井市牛山町 2431-1)
 optsales@cybernet.co.jp

Optical Analysis Considering Thermal Lens Effect by High Power Laser

IWAI Hironari, NISHIMURA Tomoaki, NINOI Koji
 ITO Anna, MATSUURA Norihiro and FURUTA Hiromasa

(Received May 11, 2018)

It is needed to use both Finite Element Analysis (FEM) tool and optical simulation tool to calculate thermal lens effect for optical performance. FEM tool calculates lens internal temperature distribution and surface deformation delivered from laser power absorption and optical simulation tool use these data to calculate optical performance. Since FEM tool handles the data by grid form, on the other hand optical simulation tool handles the data by function form, it is difficult to do co-simulation between two tools. We studied and developed the method to do co-work between two tools easily and accurately and compared the simulation result with measured result and we got good correlation.

Key words : Thermal lens effect, Finite Element Analysis, Optical simulation

1. 緒 言

加工用レーザーの高出力化に伴い、熱レンズ効果の影響が無視できなくなってきた。熱による影響の少ない材質を利用すれば、熱レンズ効果の影響を小さくすることはできるが、その分コストが高くなってしまふ。コストの観点からは、安価な材料を利用できることが望ましいが、熱レンズ効果の影響が大きくなってしまふ。特に焦点位置の変化によって製品性能に悪影響を及ぼし、性能を保証できないといった問題が生じる。そのため、安価な材質を利用する場合には、熱レンズの影響を考慮したレンズ設計が不可欠になる。現状、熱レンズ効果の確認には、実測による評価を行う方法が一般的である。この方法では、都度実験系を組む必要があり、時間と手間がかかる。シミュレーションによって事前に解析を行うことができれば、実験の時間と時間を省くことができ、評価時間の短縮が可能になる。また、シミュレーションによって得られた熱レンズ効果の影響を設計に反映させれば、安価な材質を利用しつつ性能を保持できるため低コスト化が可能になる。今回、熱レンズ効果を考慮した光学特性解析のシミュレーションに関する検討を行い、実測をよく再現する結果が得られた。その具体的な手法について報告を行う。

2. CODE V-ANSYS 連携による熱レンズ解析の概要

熱レンズ効果による光学特性への影響解析には、入熱による温度上昇および熱変形を求めるための有限要素法のツールと、光学解析を行う光学設計ツールとを連携させる

必要がある。光学設計ツールは、レンズ内の吸収熱量分布の計算と熱変化後の光学特性解析の二つの段階、すなわち有限要素法解析の前後で使用される。今回は有限要素法の計算ツールとして ANSYS、光学設計ツールとして CODE V を用い両者を連携させて解析を行った。シミュレーション全体の枠組みを、Fig. 1 に示す。有限要素法は離散的なグリッドデータ、光学設計ツールは連続的な関数で形状や屈折率分布を表現するため、両者のデータのやり取りは簡単ではない。そこで、両者のやり取りを簡単かつ精度よく行う方法の検討・開発を行った。検討の結果得られた具体的な手法を以下説明する。

2.1 CODE V の初回光学解析

熱解析を実行するには、レンズ内部の吸収量を求める必要がある。光学系中でレーザービームは集光したり発散したりを繰り返して最終的な加工面に集光する。ビーム収束状況によってレンズの中央近傍のみをビームが通過する

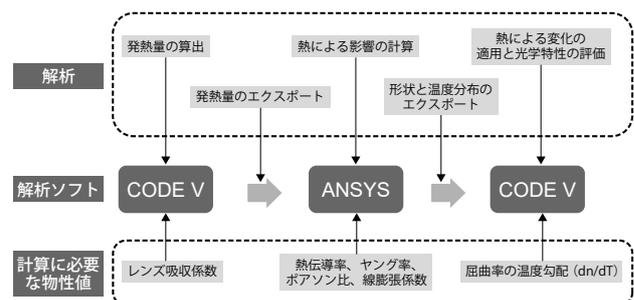


Fig. 1 Simulation framework.

場合もあれば、レンズ全体を覆うように太いビームがレンズを通過する場合もある。このためレンズごとの総吸収量を求めるだけでは、このようなビーム状態の影響を正確に表現することができない。正確な解析にはレンズ内部のビーム吸収量の3次元分布が必要になる。通常のCODE Vの解析では吸収量の3次元分布が得られないため、本解析用にCODE Vのマクロプログラムを作成した。このマクロでは、レンズ内部にデータを取得するダミー面を追加してレーザービームの伝播解析を行い、光の吸収量の3次元分布を求める。一例としてこのマクロで得られたレンズの吸収量分布の例をFig. 2に示す。入力ビームのガウシアン分布が吸収量の分布にも反映されている様子が確認できる。

2.2 ANSYS へのデータの受け渡し

レンズ形状および、CODE Vにて算出した各レンズのダミー面におけるビーム吸収量をANSYSに渡す。具体的なデータ形式はレンズ形状としてsat形式、ビーム吸収量は3次元の座標値とその座標における体積あたりの吸熱量を記述したテキストデータである。

2.3 ANSYS によるメッシュ生成

ANSYSではFEMによる解析を行うため、解析精度はモデル形状、材料物性値、境界条件の現象再現度に加え、メッシュ(要素)のサイズにも依存する。本例では、レーザーがレンズ中央に集光されているため、その部分における吸熱量のインポート精度、温度上昇や熱変形の計算精度が重要になることが予想される。よって、メッシュ生成においてもこれらの精度が確保できるようにレンズ厚み方向分割、レンズ中央(集光部分)の面内方向分割を十

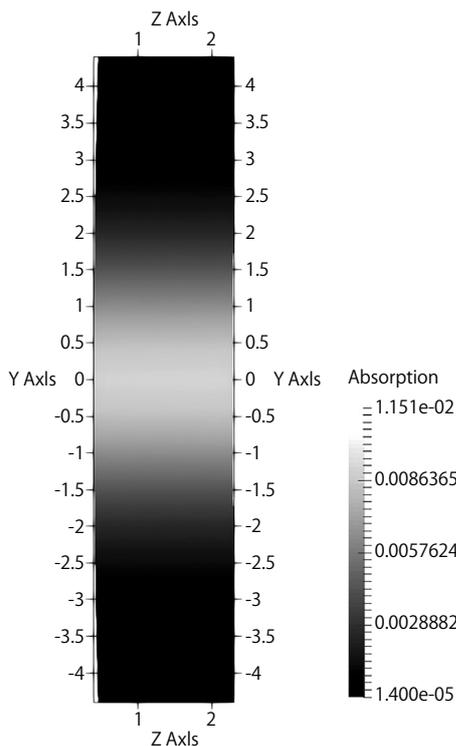


Fig. 2 Absorption Distribution.

分に細かくする必要がある。Fig. 3に生成したメッシュ分割を示す。

2.4 ANSYS による熱構造解析

2.2節で出力されたレンズ形状と吸熱データをANSYS Workbenchにインポートし、伝熱-構造の連成解析を実施する。下記に伝熱-構造解析に必要な情報と解析結果として得られる出力情報をまとめる。

- ・伝熱解析
 - 入力: レンズ形状, 吸熱データ, レンズの伝熱物性, レンズ表面からの放熱条件
 - 出力: レンズ各部における温度, レンズ表面からの放熱量
- ・構造解析
 - 入力: レンズ形状, レンズの構造物性, 伝熱解析で得られた各部の温度, レンズの保持条件
 - 出力: レンズ各部のXYZ方向の変形量

必要な入力情報としてレンズの物性値、境界条件(レンズ表面からの放熱条件、レンズの保持条件)が不足している。これらの情報はレンズの材料試験や実機の試験状態から推測して見積もる必要がある。レンズの物性値については事前の材料試験にて得られた値を示す。

境界条件についてはFig. 4のように実測の状態が確認できているため、境界条件として設定した値の推定方法を記載する。

実測用のレンズ保持状態から、レンズは外気に触れた状態にあり、自然対流による放熱が考えられる。よって自然対流相当の熱伝達条件として、熱伝達係数:3 [W/(m²・℃)], 雰囲気温度: 22 [℃]とする。

レンズホルダについてはレンズ側面の数箇所を保持してはいるが、レンズからの熱伝導は小さく、変形挙動に関しても抑制するほどの拘束は掛かっていないと考えられる。よって、レンズホルダからの熱伝達による放熱は無視し、拘束条件についてもレンズの全体的な変位(剛体移動)のみ拘束し、変形挙動には影響しない弱いバネを張ることと

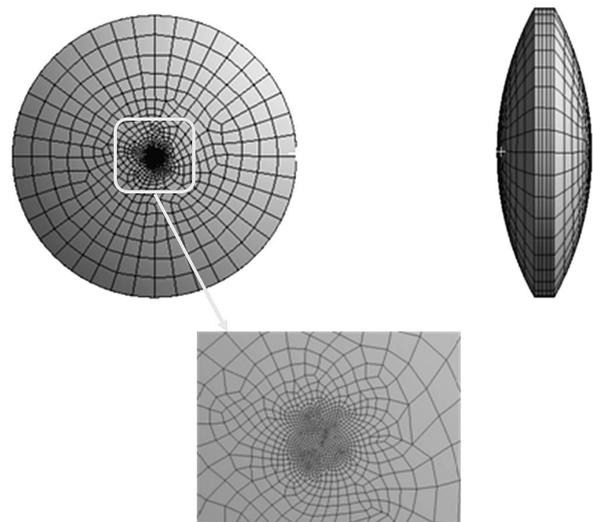


Fig. 3 Mesh.

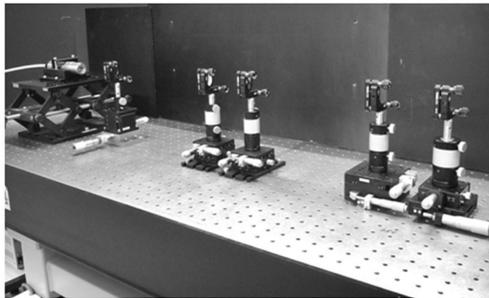
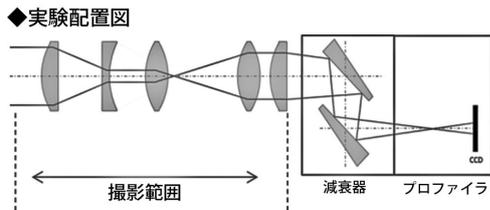


Fig. 4 Measurement Condition.

する。

すべての入力情報を設定し、伝熱 - 構造の連成解析を実施する。得られた温度、および変位結果を Fig. 5、および Fig. 6 に示す。

2.5 ANSYS 結果の出力

伝熱 - 構造解析の結果として得られた温度、変位結果を CODE V で読み込み可能なテキスト形式で出力する。出力する情報は以下の二つである。

- ① レンズ内部節点の XYZ 座標と温度データ
- ② レンズ表面節点の変位量データ

については解析結果をそのまま出力するが、②については 2.6 節におけるレンズ形状再生成の精度を上げるための工夫を行っている。②において、レンズ表面の変形後の節点位置を出力した場合、Fig. 7 に示すように初期のレンズ形状に対し波打つような変形が生じるという問題が確認できた。

原因は形状データ取り込みおよびメッシュ生成時の誤差が累積したことによるものであり、通常の解析においては結果に影響が出ない程度に小さな誤差であり無視できるものである。ところが、本件のようなマイクロオーダーの変形において変形後形状を出力しようとした場合、発生した誤差が熱ひずみにより発生する変形量よりも大きな値となってしまう、無視できない問題となる。特にレンズ厚み方向の誤差が大きいことが確認できている。

この問題の対策として、出力する結果情報をレンズの変形後座標ではなくレンズ表面節点の面内方向座標 (x, y)⁺ レンズ厚み方向の変位量 (dz) を出力することとした。変

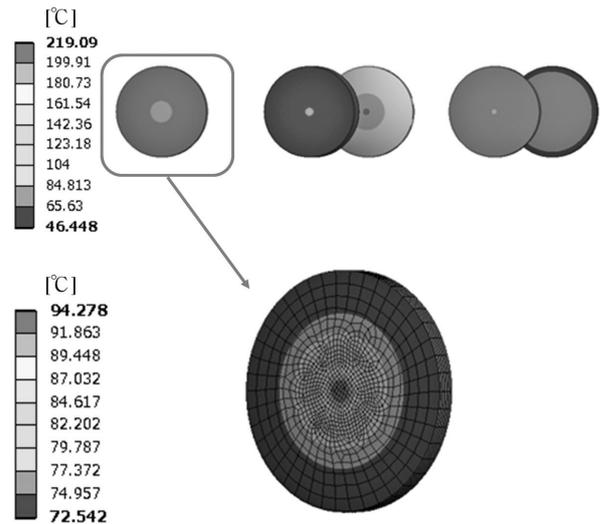


Fig. 5 Temperature Result.

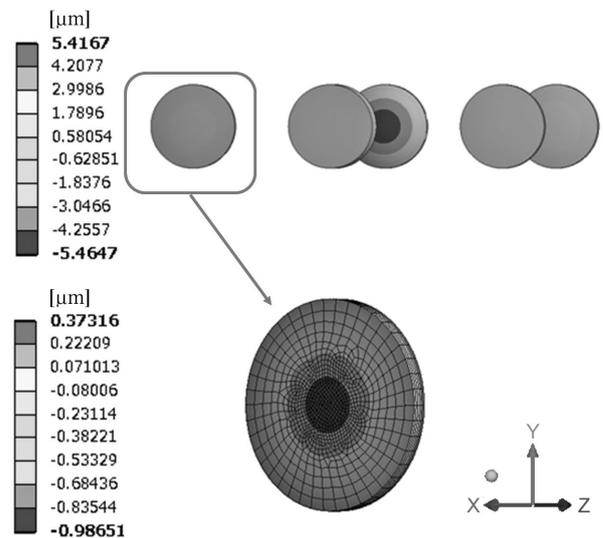


Fig. 6 Z-axis Displacement Result.

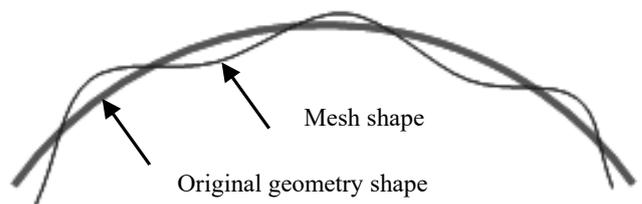


Fig. 7 Geometry and Mesh shape.

形後座標ではなく、変位量のみを出力することで、Fig. 8 に示すように上記の誤差を含めずに結果出力が可能となる。出力した変位結果を CODE V 側で所有している初期レンズ形状に追加することで、変形後のレンズ形状を見ることが可能となる。

2.6 CODE V で情報取り込み⇒形状再生成

ANSYS で計算された情報のうち、光学解析のため CODE V に渡される情報は、①レンズの面形状の変形量

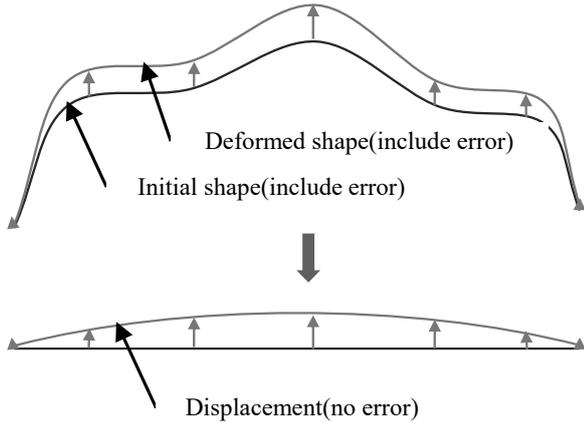


Fig. 8 Error removal method.

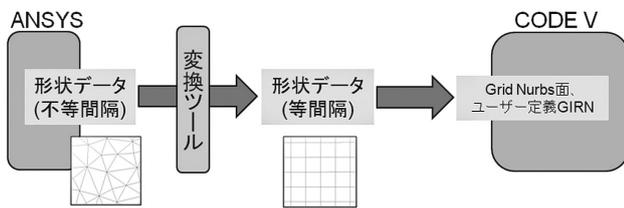


Fig. 9 Data Conversion.

データ (x, y, dz) と②レンズ内部の温度分布のデータ (x, y, z, t) である。面形状の変移量データは、設計値の面形状を加えることにより、熱変化後の実形状データ (x, y, z) に、温度分布は dn/dt という係数を積算することで屈折率分布 (x, y, z, n) に変換することができる。光学設計ツールには、面形状と屈折率分布の情報を入力して解析を行うが、どちらも位置に対する関数として入力する必要がある。一方、ANSYS から得られるデータは、節点の情報すなわち、離散的な点群データであり、そのまま光学設計ツールに入力することはできない。そのため、点群データから関数形式のデータに変換する必要がある。このデータ変換のプロセスが有限要素法のツールと光学設計用のツールとの連携させる際の最大の課題である。従来は、点群データ(面形状、屈折率分布)を関数にフィッティングする手法が取られていた。この手法には、フィッティングの変数指定を段階的に行う必要があるなど、試行錯誤が必要である。また熱変化後の面形状や屈折率分布が光学設計ツールで標準に用意されている関数でうまく表現できない場合には、分布を再現できるユーザー定義の関数を作る必要があるという課題もある。今回の検討では、新たに ANSYS の点群データから CODE V 用に直接読み込めるデータに変換するプログラムを作成した。この変換プログラムは Fig. 9 のように、ANSYS から得られた不規則グリッドを CODE V で読み込める規則グリッドに変換する。変換されたデータは CODE V に読み込まれて形状や屈折率分布の再現が行われる。その際、グリッドデータから補間によって任意の位置の情報が計算される。CODE V 側では、変換後のデータファイルを指定するとデータの再現ができる。この方法により従来

Table 1 RMS error.

面形状		屈折率分布	
第1レンズ_前面	4.33E-07	第1レンズ	9.68E-08
第1レンズ_後面	4.25E-07	第2レンズ	1.04E-07
第2レンズ_前面	6.54E-08	第3レンズ	5.74E-08
第2レンズ_後面	7.68E-08	第4レンズ	5.53E-08
第3レンズ_前面	2.02E-07	第5レンズ	6.11E-08
第3レンズ_後面	4.45E-05		
第4レンズ_前面	2.55E-07		
第4レンズ_後面	9.87E-06		
第5レンズ_前面	4.53E-07		
第5レンズ_後面	9.91E-08		

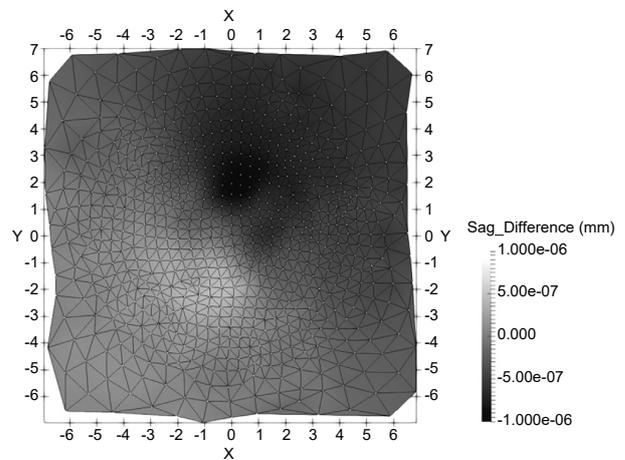


Fig. 10 Surface Error.

の問題点を回避してデータのやり取りを簡単に行うことができる。データの再現性については以下のように確認を行った。

Table 1 に光学面ごとの面形状とレンズごとの屈折率分布に関して、CODE V 上で再現したものと ANSYS 上のものとを比較した場合のズレ量の RMS 値を示す。一般に面形状誤差の公差は波長の 1/2 といわれる。可視から近赤外の場合、数百 nm (1.0e-4 mm) オーダに相当する。一方、光学ガラスの屈折率の公差は等級などにもよるが、SCHOTT 社の最も厳しい等級 (H5) の屈折率の最大変動は $\pm 5e-7$ である。表中の RMS 値はこれらの公差と比較して小さい値であることから、光学的には十分な再現精度が得られていることがわかる。統計的な解析結果に加えて、面形状誤差の分布例として、第1レンズ前面の面形状の再現誤差量の分布を Fig. 10 に示す。この図のスケールは ± 1 nm である。分布自体もよく再現されていることが確認できる。

3. 実測との比較

実測との比較に用いた光学系の特性と全体の構成図を Table 2, および Fig. 11 に示す。構成を把握しやすくするため、構成図は縦方向の縮尺を横方向の 1/4 に設定して

いる。レンズの材質は安価に入手可能なBK7を用いている。この光学系に対して、CW発振のレーザ光源（ビーム径 $(1/e^2)$ $\phi 5.0$ mm、波長 1070 nm）からのビームを入射させて、実測とシミュレーションの比較を行った。比較の指標には、ビーム径 $(1/e^2)$ のデフォーカス特性を用いた。光源の強度は 46.6 W (P30%)、および 174.4 W (P70%) の2通りで評価を行った。

シミュレーションと実測で得られたビーム径のデフォーカス特性を Fig. 12, および Fig. 13 に示す。図中の測定面位置は、第5レンズの最終面からの距離を表す。実験とシミュレーションとでよい一致が得られることがわかる。今回開発、検討した手法が有効であることが確認できた。

Table 2 Lens Data.

	第1レンズ	第2レンズ	第3レンズ	第4レンズ	第5レンズ
形状	平凸	平凹	両凸	両凸	平凸
材質	BK7	BK7	BK7	BK7	BK7
コーティング	なし	なし	なし	なし	なし
外形 (mm)	$\phi 25.4$				
中心厚さ (mm)	2.5	2	8.4	2.8	3
前面の曲率半径 (mm)	155.7	無限	25.95	207.6	77.85
後面の曲率半径 (mm)	無限	15.57	-25.95	-207.6	無限
次のレンズまでの距離 (mm)	276	105	232	105	150

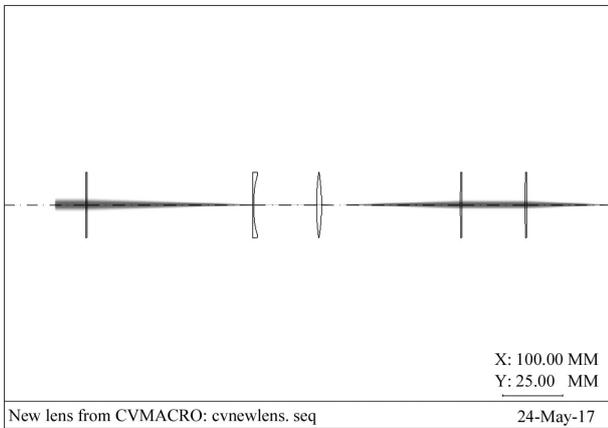


Fig. 11 Lens Drawing.

4. 結 論

光学設計ツール CODE V と有限要素法を用いた計算ツール ANSYS とを連携させることで、熱レンズ効果を考慮した光学特性の解析が可能である。今回の検討において開発、検討した手法を用いたシミュレーションでは、実測との相関も高い結果が得られることが確認できた。シミュレーションで得られた解析結果を設計に反映させることで、熱レンズの影響を事前に予測したレンズ設計を行うことができる。これにより、コストを抑えた硝材を使いつつ、性能のより高いレーザ光学系の実現が期待できる。

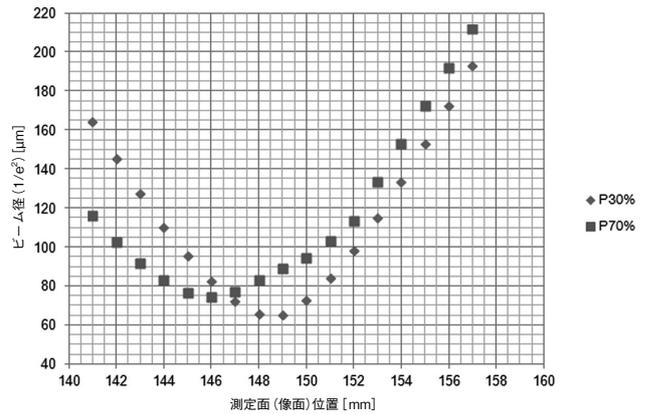


Fig. 12 Simulation Result.

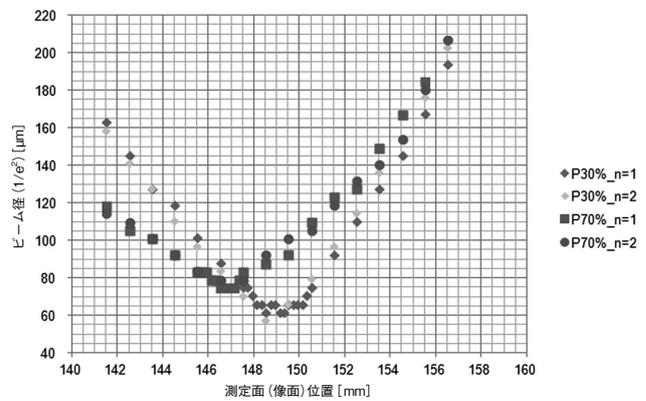


Fig. 13 Measurement Result.