

第二高調波発生特性による

非線形光学結晶の解析（第1報）*

川下智幸**, 杉原富紀***, 前田貴信**, 浅海勝征****

Analyze of Non-Linear-Crystal by Second Harmonic Generation Characteristics(1st Report)

Tomoyuki Kawashita, Fuminori Sugihara, Takanobu Maeda, Katsuyuki Asaumi

1. はじめに

サーボ制御を用いた精密なモーションコントロール技術は産業用ロボット，NC工作機，半導体製造装置などに用いられ，現在の先端産業の基幹技術になっている^{1)～3)}。このサーボ制御の駆動部として用いられているサーボモータおよび制御装置は，近年，安価で取り扱いが簡素化されていることから汎用の計算機を用いても容易に μm 単位のモーションコントロールが可能になっており，その技術を精密な計測分野で活用することが期待されている。

一方，近年，工学・医療分野などでは様々な波長の安定した電磁波（光波を含む）を発生させることが求められ，その発振源として安定かつ大出力の固体レーザーが注目されている。固体レーザーはその出力波長が近赤外線領域であるために，これまで主に加工用として広く用いられてきた。しかしそれ以外にも，この固体レーザーを光放射に対し強い非線形の誘電的な応答機能を持つ非線形光学結晶（Non-Linear-Crystal）に照射すると，その波長の半分となる光（第二高調波発生（Second Harmonic Generation 以下，SHG））が発生する現象を利用して入射光の1/2の波長を得る利用法が注目されている⁴⁾。その代表的な非線形光学結晶である KTP 結晶を用いると固体レーザーの一種である YAG レーザ装置で発生させた波長 1064nm の近赤外線レーザー光は，SHG として波長 532nm の緑色可視光線レーザー光を得ることができる。この技術を用いることで，さまざまな

用途に利用できる高出力の緑色可視光線レーザー光が得られることになる。しかしながら，KTP 結晶をはじめとする非線形光学結晶は，結晶生成度にバラツキがあり，その照射位置により第二高調波発生特性に差異があることが予想されその詳細な解析が求められている。

このようなことから，本研究では非線形光学結晶（KTP 結晶）に対するレーザーの照射位置をサーボ制御を用いて μm 単位で管理することにより，任意の照射位置で発生した SHG を測定し，結晶内の照射位置による SHG の効率の差異を調べ検討したので以下に報告する。

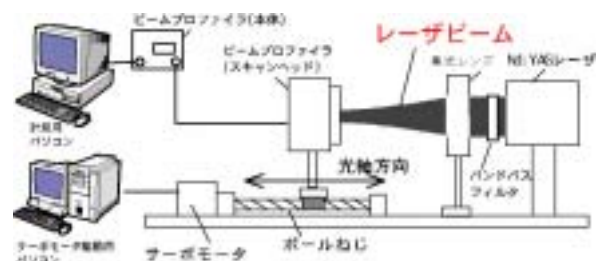


図1 レーザ径測定システムの概要

2. 実験方法及び条件

2.1 YAG レーザ径測定

KTP 結晶に照射する Nd:YAG レーザの焦点位置前後におけるレーザー径の形状測定を行った。図1，図2に測定用に製作した実験システムの概要およびレーザー径測定システムの外観を示す。表1はシステムの仕様である。本システムは，光源である Nd:YAG レーザ，レーザー光を集光させる集光レンズ（焦点距離 50mm），レーザー光の強度を減衰させるバンドパスフィ

* 原稿受付 平成17年9月30日

** 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

*** 佐世保工業高等専門学校 専攻科

**** 長崎総合科学大学



図2 レーザ径測定システムの外観



図4 測定角度の定義

表1 レーザ径測定システムの仕様

計測用計算機	PC/AT互換機(COMPAQ) OS:MS-DOS Version6.20
サーボ駆動用計算機	PC/AT互換機(フロンティア神代社製) OS:Microsoft Windows2000
ACサーボモータ	CM1-C1-7S30(マッスル社製)
ボールねじ	ピッチ:P=10mm (NSK社製)
ビームプロファイラ	PHOTON社製



図3 ビームプロファイラの外観

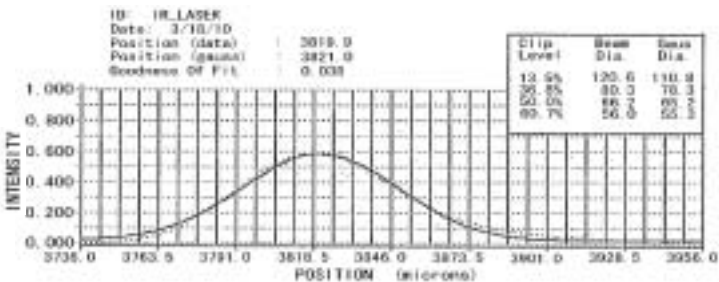


図5 レーザの強度分布測定例と半径の定義

ルタ、レーザ径を測定するビームプロファイラとレンズ間の距離を光軸方向に1 μ m単位で位置制御可能な精密テーブルから構成されている。図3にビームプロファイラの外観を示す。図1のように各機器を配置して、レーザ光が集光レンズ、バンドパスフィルタを透過してプロファイラに当たるようにする。なお、バンドパスフィルタは、ビームプロファイラの出力の飽和を防ぐために配置している。さらに、ビームプロファイラは光軸回りで測定方向をかえることが可能なことから、それぞれの測定角度でレーザ径を計測し、レーザの断面の形状も併せて計測した。図4にスキャンヘッドの測定角度の定義を示す。図5に、実際に計測したレーザ光の強度分布の測定例およびレーザ径の半径の定義を示す。図のように、その測定角度においてのレーザ光の強度分布が測定される。レーザ径は、ビームプロファイラによってガウスビーム半径(レーザ光の強度がビームの中心

の13.5%まで減衰する半径)の2倍で測定される⁵⁾。

2. 2 内部特性解析システム

図6、図7に内部特性解析システムの概要およびシステムの外観を、表2にはシステムの仕様を併せて示す。システムは、計算機、KTP結晶(一辺5mmの立方体)に対するレーザ照射位置を正確に位置制御するための2軸精密テーブル、それを駆動するサーボモータ、サーボ制御装置、光測定の光源部である固体レーザ装置、光を検出するための受光装置、受光装置で検出した光をパワーに応じた電圧(以下、SHGパワーと記す)に変換する光量電圧変換装置などから構成される。システムの中心となる計算機は、D/A変換ボード(分解能12bit)を介してサーボ制御装置に任意の速度指令を与える。SHGパワーの値は

第二高調波発生特性による非線形光学結晶の解析（第1報）

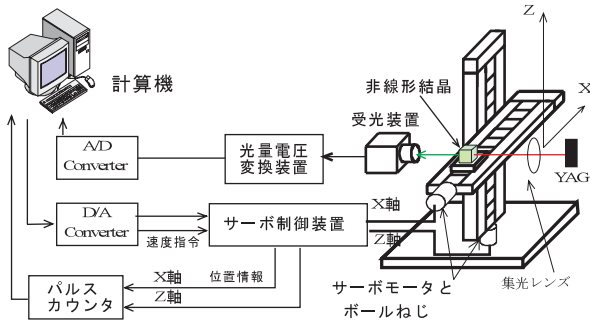


図6 内部特性計測システムの概要図

表2 内部特性計測システムの仕様

計算機	PC/AT互換機(DELL)
	OS:Microsoft WindowsMe
パルスカウンタボード	AZI-3503(インターフェース社)
A/D・D/A変換ボード	AZI-6201(インターフェース社)
ACサーボモータ(X軸)	SGM-A38(株安川電機)
	回転速度域: -200rpm~+200rpm
ACサーボモータ(Z軸)	SGM-01B(株安川電機) ブレーキ付き
	回転速度域: -200rpm~+200rpm
エンコーダ	インクリメンタル型エンコーダ (標準:2048pulse/rev 4通倍:8192)
ボールねじ	ピッチ:P=10mm
固体レーザー	YAGレーザー(波長:1064nm 出力:500mW) (Amoco Laser Company)

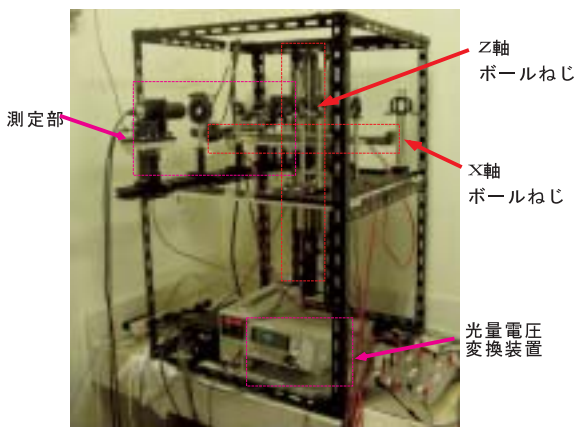


図7 内部特性解析システムの外観

アナログ電圧で得られることから A/D 変換ボード（分解能 12bit）を介して計算機に取り込む。また、KTP 結晶の位置を μm 単位で管理するために必要となるサーボモータのエンコーダの位置情報をカウンタボードを介して取得している。なお、サーボ制御や計測等のプログラムはC言語で作成している。

図8は計測の流れを示したものである。固体レーザー装置から照射されたレーザー光はKTP結晶に照射さ

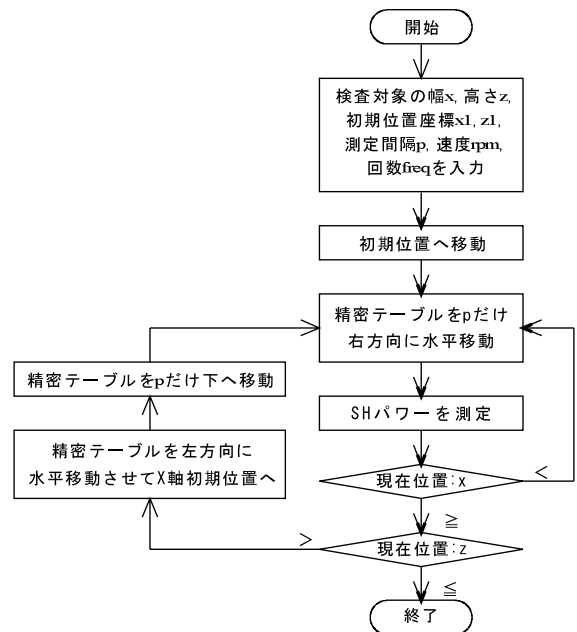


図8 内部特性計測システムの測定フローチャート

れるが、その照射位置を光軸方向に対して平面的に μm 単位で位置制御を行いながら、任意の位置でのSHGパワーを計測する。まず、測定初期位置から、あらかじめ指定した測定間隔、測定範囲に対応してX軸方向に移動させ計測する、X軸方向に測定が完了したらZ軸方向に測定間隔だけ移動させ、X軸方向に対して同じように計測を繰り返すことにより光軸方向に対して2次元平面での計測を行う。測定データは1カ所で100個取得しcsv形式のファイルとして保管される。なお、データのサンプリングは、計測装置のSHGパワーのデータは16.7msごとに更新されていることから17ms間隔で取り込んでいる。

図9に実際にレーザーを照射し、発生したSHGパワーを測定する光学系装置の詳細を示す。最初に、YAGレーザー装置より照射された1064nmの近赤外レーザー光を水晶波長板に通す。水晶波長板とは直交する偏光成分間に位相差を与える複屈折素子であり、今回は位相差 π (180°)を与える水晶波長板を用いた。直交する偏光成分間に位相差を与えることにより、直線偏光の偏光方向を変えることができる。この水晶波長板によって位相差を与え、非線形光学結晶に対し最も効果的にはたらくように偏光方向を調節する。このようにして偏光方向を調節した近赤外レーザー光

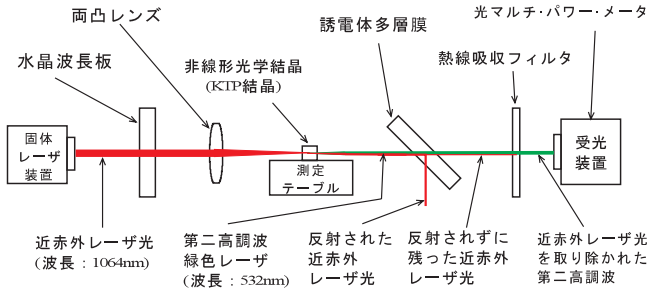


図9 光学系装置の概略図

を両凸レンズによって集光し、収束半径を小さくする。集光された近赤外レーザー光はKTP結晶に照射されSHGが発生する。SHGから得られた波長は、半分の532nmである緑色の可視光線となっている。しかし、非線形光学結晶を透過した光の中には発生したSHGだけでなく、もとのYAGレーザー装置より照射された近赤外レーザー光も含まれている。受光装置において測定する際、測定したい光はSHGによる波長だけなので近赤外レーザー光を除去するために誘電体多層膜プレートビームスプリッタ(ハーモニックセパレータ)と熱線吸収フィルタを図9のように設置する。誘電体多層膜プレートビームスプリッタとは、基本波とその高調波を分離するために用いるもので、今回用いたものは1064nmと532nmのレーザー光の両方を同時に照射したとき、532nmを透過させ1064nmを反射させるようにして、532nmのみ光量測定装置の受光部に照射されるように調整した。

計測したデータは、ノイズ等の影響を排除するため100回の測定値の上下10個を切り捨て、残りの80回の測定値を平均するという方式をとっている。また、実験データは、光軸方向に対して平面的に測定するので、測定値は2次元データとして得られる。これを視覚的にわかりやすくするため、本プログラムでは測定値の2次元データを画像表示する。測定結果画像を表示するのにフルカラー(24bit)のDIB(Device Independent Bitmap: デバイス独立ビットマップ)を用いることにした。24bitのDIBはRGBにそれぞれ8bitずつ用意されていて、約1670万色の表現が可能であるが、測定結果画像はグレースケールであるので量子化ビット数を8bitとする256階調画像へ変換した。変換の際は、測定値(csv

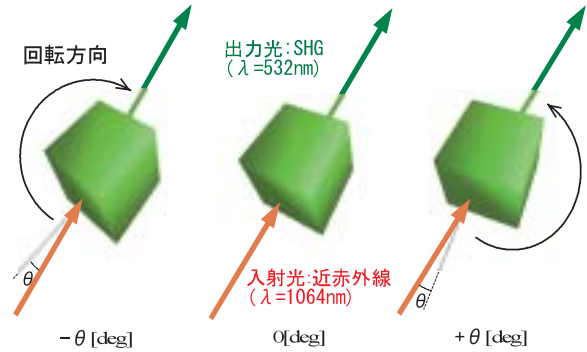


図10 光軸に対する角度の定義

形式)の中の最小値と最大値の間を256分割して量子化する方法のほか、任意に最小値、最大値を決めることができるようにもした。これによって、コントラストの良い画像を得ることができる一方で、複数の画像の絶対的な比較もディスプレイ上の輝度の比較をすることで可能になっている。また、もともとDIBを用いているので画像ファイル出力も容易である。

レーザー光をKTP結晶に照射する際、入射角度に対するSHGパワーの変化について検証するため入射角度について定義する必要がある。そのため正確に結晶の回転角度を設定できるように精密テーブル上に、0.1°の精度保証がある回転テーブルを設置しKTP結晶を固定した。角度については、図10に示すように切り出し面に垂直な方向を角度0°と定義して、その0°位置の確認方法は、回転テーブルを回しながら受光装置の出力デジタル表示を確認し、最も大きいSHGパワーを示す角度を0°とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 レーザ径の形状測定

図11にYAGレーザーの光軸方向に対するスポット径の測定結果を示す。最小のレーザー径は179.4μmとなっており、その位置はレンズからの距離が50mm付近でレンズの焦点と一致していることがわかる。

図12に最小レーザー径において測定方向を0°から180°まで15°刻みでずらしてスポット径を測定し、スポット径から半径を計算してグラフ化させたものである。図のように、レーザー径は、ほぼ真円であることがわかる。したがって、KTP結晶は1辺が5mm

第二高調波発生特性による非線形光学結晶体の解析（第1報）

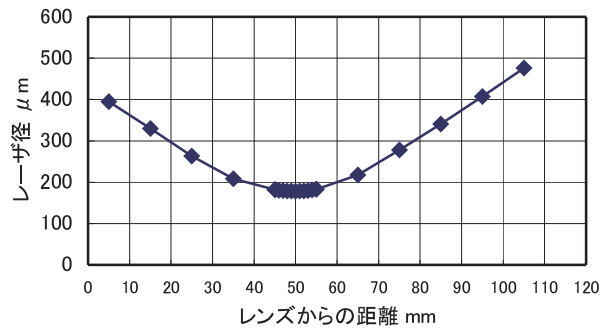


図 11 レンズからの距離とスポット径の関係

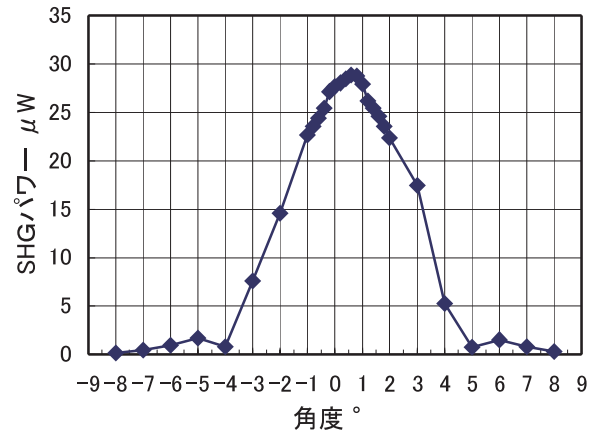


図 13 角度による SHG パワーの変化（0° 中心）

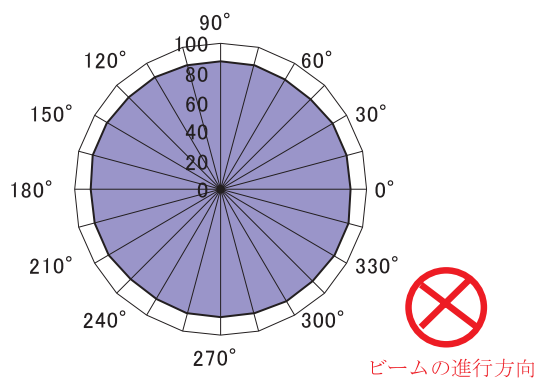


図 12 スポットの形状

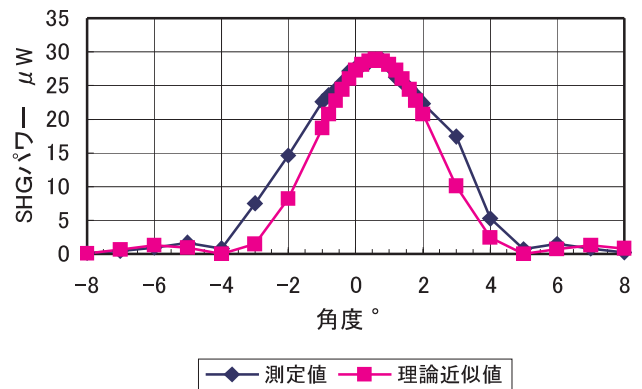


図 14 測定値と理論近似値の関係

の立方体であることから、その結晶内部では、180 μm 程度のビーム径で、ほぼ真円の円筒状のレーザー光が透過していることがわかる。

3. 2 内部特性解析

3. 2. 1 レーザ光の入射角度による SHG 特性

図 13 に入射角度と SHG パワーの関係を示す。実験では、予め入射角を 1° ごとに左右の方向に振り、ピークの SHG パワーが得られる角度を 0° と設定した。その後その角度を基準として、-8° ~ +8° の範囲を 1° 刻みで測定し、ピーク周辺では 0.1° 刻みで正確なピーク角度を調べた。図より、ピーク角度は約 +0.6° で極大値となっていることがわかる。また、それより左右の角度は、大きくなるにつれ低下し、+5° と -4° 以上になると、著しく SHG パワーが低下し ±8° 以上になるとほぼ 0 に収束していくことがわかる。測定上の基準角度を 1° ごとに変え初

期設定角度 0° を決め計測を行ったが、ピーク角度が約 +0.6° になっていることから、SHG パワーを最大に引き出す入射角度の範囲は極めて小さく重要であることがわかる。

0° 付近の角度特性を光学的理論面⁴⁾から検討した結果を図 14 に示す。SHG は位相整合条件が成立したときに最も波長変換効率が良くなるので位相整合条件は(1)式で表される。

$$\Delta k = k_{2\omega} - 2k_{\omega} = 0 \quad (1)$$

ここで、 k_{ω} および $k_{2\omega}$ はそれぞれ基本波、第二高調波の波数ベクトルである。 $\Delta k = 0$ のときに位相整合しているというので、 Δk を波数ベクトルのミスマッチ量といい、 θ を変化させるときは θ の関数 $\Delta k(\theta)$ となる。 Δk および結晶体の長さ l を用いれば角度による変換効率 $R(\theta)$ は、 sinc^2 関数となり、

(2)式で表される。

$$R(\theta) = \left(\frac{\sin\left(\frac{\Delta k(\theta)l}{2}\right)}{\frac{\Delta k(\theta)l}{2}} \right)^2 \quad (2)$$

測定結果を sinc^2 関数で近似すると、最大値をとる 0.6° や極小値をとる $+5.0^\circ$, -4.0° の値がほぼ一致することから $\text{sinc}^2(0.7 \times (\theta - 0.6))$ が最適であると判断した(図 13 参照)。よって、以下の式が成立し、 $\Delta k(\theta)$ が導出される。

$$0.7 \times (\theta - 0.6) = \frac{\Delta k(\theta) \times 0.005}{2} \quad (3)$$

$$\therefore \Delta k(\theta) = \frac{2 \times 0.7 \times (\theta - 0.6)}{0.005} = 280 \times (\theta - 0.6) \quad (4)$$

以上の結果から、平面内の 1 点における SHG パワーは、レーザの入射角度に依存することがわかった。このことを踏まえて SHG パワーが最大効率の照射角度 $+0.6^\circ$ (測定上設定した 0° 基準に対して) を維持して内部特性解析を行った。

3. 2. 2 内部特性解析

入射角度は、SHG パワーが最大の出力が得られる $+0.6^\circ$ として、図 15、図 16、図 17 に、それぞれ 4mm 四方を測定間隔 0.04mm, 2mm 四方を測定間隔 0.02mm, 1mm 四方を測定間隔 0.01mm で計測したものを示す。それぞれの図で、色が淡い画素はパワーが強い点、色が濃い画素(黒色)はパワーが弱い点を示している。なお、サンプル数は 1 平面につき 10000 点で統一した。図 15 の上部は結晶体に照射していない部分で、SHG が発生していないため黒い領域になっているが結晶体の端面の形状を的確に計測できている。また、それ以外の領域では結晶体の大部分を計測できており SHG パワーの小さい(黒い)部分の分布はわかる。しかし、個々の形状までは明確になっていない。図 17 では、かなり分解能が上がって、点の大きさや形状を忠実に計測できていると思われるが、狭い範囲を測定しているので局所的部分の計測しかできない。なお、この SHG パワーの小さい(黒い)部分の大きさは、最も大きいもので、直径 0.16mm

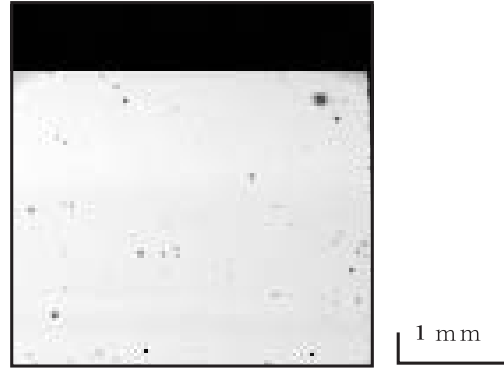


図 15 4mm 四方の平面解析結果

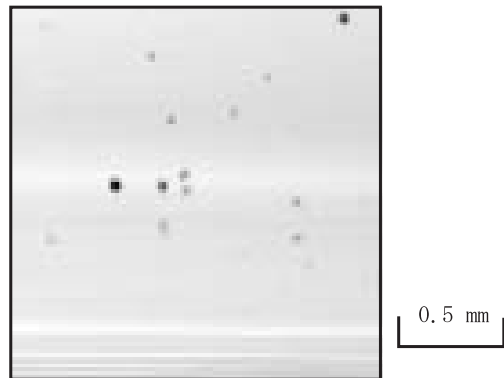


図 16 2mm 四方の平面解析結果

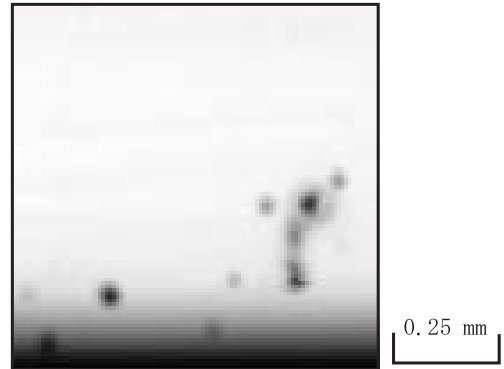


図 17 1mm 四方の平面解析結果

程度であったが、直径約 0.08mm のものが多く見られた。また、(黒い)部分での SHG パワーの値は、通常は $27 \sim 29 \mu\text{W}$ 程度であるが、ほぼ $6 \mu\text{W}$ 程度と、極端に低い値になっている。なお、このように計測できた(黒い)部分は、照射したレーザ径の大きさよりかなり小さくなっていて、レーザ径より小さな SHG パワーの低下部分の計測ができていることわかる。

第二高調波発生特性による非線形光学結晶体の解析（第1報）

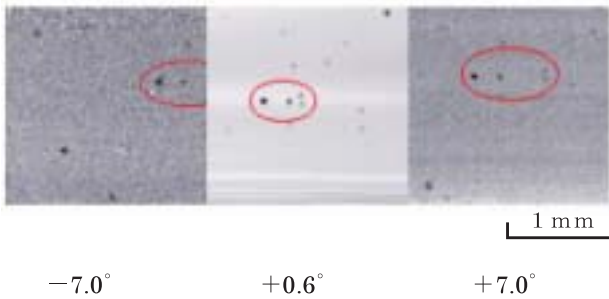


図18 角度変化における平面解析結果の比較

これらの計測結果が出力低下部分の正確な形状精度まで対応しているかは、今後さらに検討を行う必要があると考えている。

いずれにしても、本計測システムを用いることで、任意の測定範囲、計測間隔で非線形光学結晶（KTP 結晶）の内部特性解析が可能であり、目的に合わせてそれらの条件を設定することが肝要と言える。

3. 2. 3 SHG パワー低下要因の確認

前述した内部特性解析における SHG パワーの低下の原因が KTP 結晶の表面（レーザの入射面または通過面）の傷や付着物によるものかどうか確認するために故意に入射角を変えて内部特性解析を行った。

図 18 に入射角が $+0.6^\circ$ 、 $+7.0^\circ$ 、 -7.0° での内部特性解析結果を示す。なお、測定条件は、図 16 と同じで 2mm 四方、0.02mm 間隔で計測している。特に、SHG パワーが $\pm 7.0^\circ$ では極端に低くなるので、出力変化がよくわかるようにするため、測定値範囲内の最小値と最大値の間を 256 分割し SHG パワーの変化がよくわかるようにしてある。これら 3 枚の画像を比較するために、まるく囲んだ点の位置関係に注目してみた。なお、回転テーブルを用いて照射角度を変えているが KTP 結晶に対する計測中心位置も多少変化するため画像内において、その位置関係は少し上下している。 $+7.0^\circ$ の平面画像内の 4 個の SHG パワーの低下する（黒い）部分が、 $+0.6^\circ$ 、 -7.0° では、それぞれの距離が横方向に変化していることがわかる。このようなことから、これらの黒い部分は、KTP 結晶の表面傷や付着物ではなく、結晶内に立体的に点在する結晶格子の欠損である可

能性が高いと判断できる。

4. まとめ

非線形光学結晶（KTP 結晶）に対するレーザの照射位置を、光軸方向に対して平面的に μm 単位で管理し、任意位置において発生した第二高調波（SHG）を測定し、その SHG パワーの差異を見ることで、どのような内部の特徴を持っているか解析を行った。その研究過程で以下のことが明らかになった。

(1) Nd:YAG レーザの結晶体に対する照射部分での形状は、レーザ径 $180\mu\text{m}$ 程度のほぼ真円形状をした円筒状である。

(2) 結晶体に対するレーザ光の照射角度によって発生する SHG 特性は大きく変化する。

(3) 内部特性解析の結果、結晶格子の欠損と思われる SHG パワーが著しく低下する部分がある。

(4) (3) で確認した SHG パワーが著しく低下する部分の大きさは照射したレーザ径よりも小さいものが多数あり、本計測方法で結晶体の欠損の真の大きさを計測できているのか断定できない。これらについては、今後さらに検討をする必要があると言える。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり卒業研究を通し実験に協力頂いた、坂本篤氏（平成 15 年度）、佐々木裕一氏（平成 16 年度）に謝意を表する。

6. 参考文献

1. (株) 安川電機編：メカトロニクスのためのサーボ技術入門，1986 年，日刊工業新聞社
2. 杉本英彦，小山正人，玉井伸三：AC サーボシステムの理論と設計の実際，1990 年，総合電子出版社
3. 土谷武士，深谷健一：メカトロニクス入門，1994 年，森北出版（株）
4. 浅海勝征：第二高調波発生有位相整合，2001 年，青山社
5. 斉藤成分 監修：レーザー読本，1982 年，（株）オーム社