

## 第二高調波発生特性による非線形光学結晶体の解析（第2報）\*

前田貴信\*\* 川下智幸\*\* 杉原富紀\*\*\*

### Analyze of Non-Linear-Crystal by Second Harmonic Generation Characteristics(2nd Report)

Takanobu MAEDA Tomoyuki KAWASHITA Fuminori SUGIHARA

#### 1. はじめに

前報（佐世保工業高等専門学校研究報告 第42号）において、サーボ制御を応用した精密なモーションコントロール技術と、検査や加工などさまざまな分野に幅広く利用されているレーザ工学を融合した新しい計測技術について報告した。その中では、サーボ制御により、非線形結晶体である KTP 結晶に対して Nd:YAG レーザ発振器から発生させた近赤外レーザ光（波長 1064nm）の照射位置を高精度（数～数十 $\mu\text{m}$ 単位）で移動させ、非線形結晶体内の各位置で発生する第二高調波（近赤外線波長の半分、532nm になった、緑色のレーザ光）のパワー（Second Harmonic Generation Power, 以下 SHG パワー）を測定し、結晶体内部の特性を二次元解析できるシステムを開発した。また、この計測システムを用いて実際に測定を行った結果から、その有用性を示した。本報では、その測定結果についての精度・信頼性の検証を行うために表計算ソフトによるシミュレーション検証法を提案し、実測値との比較検討を行ったので、以下に報告する。

#### 2. 測定システムと KTP 結晶の内部特性解析結果

計測システムの詳しい説明は前報を参照して頂き、ここでは概要と実験結果について簡単に説明する。図1に、前報で製作した計測システムの概要図、図2にそのシステムを用いて測定した結果を示す。

図2は、KTP 結晶の2mm 四方を測定したもので、レーザの照射位置を送り 20 $\mu\text{m}$  ずつ移動させ、その場所ごとでの SHG パワーの大きいところを白く、小さいところを黒く 255 段階に画像化（画像の1ドットが送りの 20 $\mu\text{m}$  に相当）したものである。測

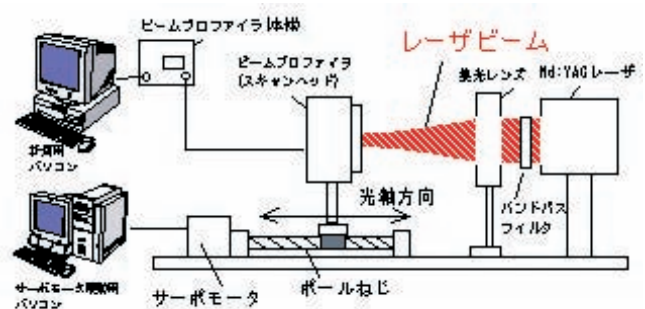


図1 開発した計測装置の概要

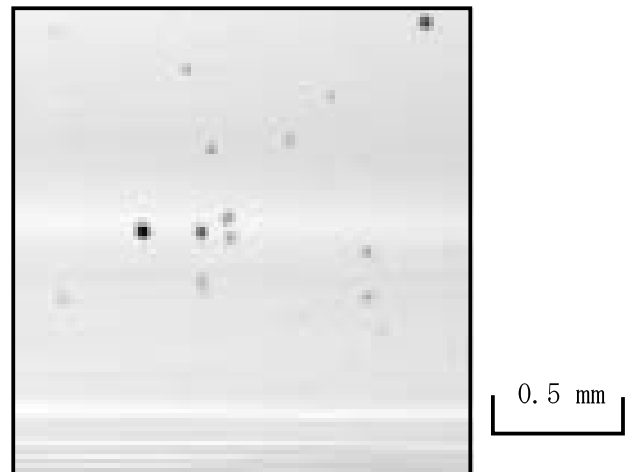


図2 非線形結晶体の断層解析測定結果

定に用いた Nd:YAG レーザ装置より発生させたが、KTP 結晶に照射されたレーザの直径（以下レーザ径）は 178.4 $\mu\text{m}$  であった（測定法は後述）。

図2から、測定した KTP 結晶には結晶格子の欠損と思われる SHG パワーの著しく低下する箇所が存在することが確認され、その大きさは画像のドットの個数から 80～160 $\mu\text{m}$  であった。このことから、欠損（SHG パワーが低下する部分）の大きさは照射したレーザ径よりも小さなものが多数あることが

\* 原稿受付 平成 18 年 10 月 31 日

\*\* 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

\*\*\* 九州工業大学大学院 生命体工学専攻

わかった。さらに、測定時のサーボ制御によるレーザー照射位置の送りは  $20\mu\text{m}$  であることから、それに対しても照射したレーザー径が大きいことが明らかである。このことから、KTP 結晶の同じ箇所に対して何度もレーザーを照射し、測定してしまっていることがわかる。また、結晶の欠損は目視により確認することは不可能であるので、本システムで測定を行った結果が真値であると断定することができない。そこで、前報の結果の信頼性を確認する必要があると考え、シミュレーション解析を行うこととした。

### 3. SHG パワーシミュレーションの解析

#### 3. 1 シミュレーションの概要

前章のように、先の測定ではレーザー径 ( $178.4\mu\text{m}$ ) に対してレーザー照射位置の移動距離が  $20\mu\text{m}$  と小さいことから、KTP 結晶の同じ位置を何度も重ね合わせて測定していた。この測定法が問題ないか検討したところ、結果的にこれは画像処理におけるフィルタリングと酷似していると考えられる。画像処理では平均値フィルタをかけると原画像はぼやけてしまう。今回の実験では KTP 結晶が原画像、かけたフィルタがレーザー光と考えることができる。ただし、平均値フィルタはフィルタ全体が均等な重み付けがされているが、レーザー光は中心付近の重みが大きいフィルタとなる。このフィルタ処理を行っている結果、KTP 結晶の内部特性を測定できたことを証明するた

めに、次のような表計算ソフトを用いたシミュレーション解析方法を提案し、解析した結果を実際の値 (図2) と比較した。

シミュレーションでは、まず図3にシミュレーションのように、表計算ソフトの1つを1辺  $20\mu\text{m}$  の正方形領域 (レーザー光の送り距離に相当) と想定し、実際に KTP 結晶中に存在する欠損の分布を格納する KTP 結晶セル群と、レーザー径測定システムの実験結果から求めたレーザー光の結晶に対する照射位置における強度分布を格納するレーザー光セル群の二つの二次元セル群を用意する。KTP 結晶セルはレーザー光セルに比べて広くとってある。このセル群を重ね合わせて演算すると、近赤外レーザーを照射したときの近赤外レーザー光の強度と KTP 結晶内の欠損分布から、その位置 (セル) で発生する SHG パワーを擬似的に求めることができると考えられる。また、レーザー光セル群を1セルずつずらして演算を繰り返すことで、レーザー光の照射位置をずらしながら測定するのと同じように SHG パワーの分布を求めることが出来る。

具体的には、各セルを用意した後、画像処理のフィルタリングの要領で、レーザー照射位置の送りと同様にレーザー光セルを動かし、ラスタ走査していく。そして、重なり合ったレーザー光セルと KTP 結晶セルの値から SHG パワーを演算し、SHG パワーセルに格納する。以下、各セルについて説明する。

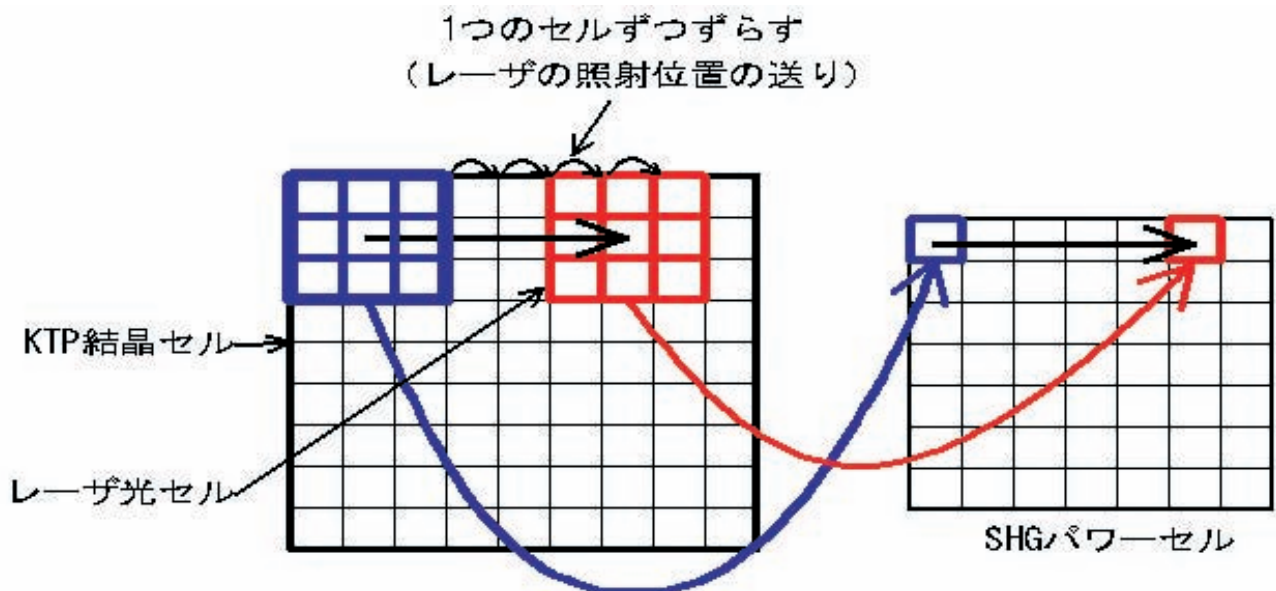


図3 シミュレーションの概要

### 3. 2 レーザ光セル

レーザ光セルとは前報の測定結果 (レーザ光の径・強度分布) からレーザ光の形状を 2 次元セルで表したものである。レーザ光は中心を最大値としたガウス分布となることが知られているので、ここでは最大値を 1 として計算し、値をセルに格納した。図 4 に結果より作成したレーザ光形状を示す。

### 3. 3 KTP 結晶セル

KTP 結晶セルには欠損によるパワーの減衰率すなわち SHG 効率の値を格納するのだが、この値は測定不可能である。そこで、次のように推測して値を適宜あたえる。SHG 効率の値の重み付けは、“1”または“0”のようなデジタル的な場合と、“1”また

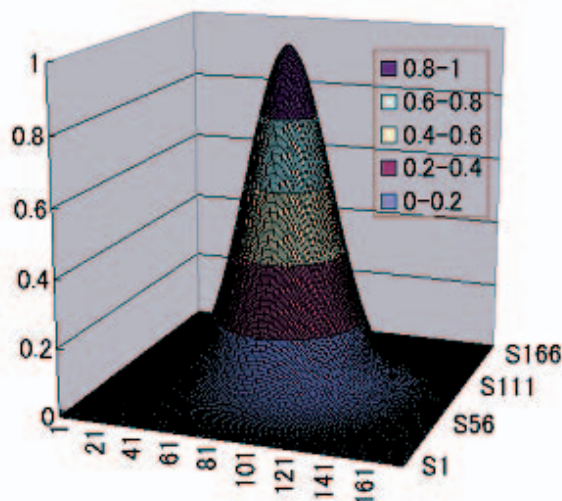


図4 レーザ光セルに格納した強度分布

は“0.01”のような SHG 効率が場所によって完全にゼロになるのではなく、何分の一かになるようなアナログ的な場合が考えられる。いずれかを用いるか検証してみたが、いずれの場合も大差ない結果となった。そこで、物理現象がデジタル的に起こることとは考えにくいので、本稿ではアナログ的な重みの付け方を採用した。

### 3. 4 シミュレーションの演算方法

レーザ光セルおよび KTP 結晶セルをそれぞれ準備できたら、セルの位置が重なり合ったセル同士で演算を行うと、その位置での SHG の強度を計算することができる。

レーザ光セルの値を  $L_1$  から  $L_n$  とし、レーザ光セルと重なり合った部分の KTP 結晶セルの値を  $K_1$  から  $K_n$  とする。SHG パワーの大きさは照射されたレ

ーザ光の強度の 2 乗に比例することから、重なり合った部分におけるレーザ光セルの値の 2 乗と KTP 結晶セルの積を計算し、それらの総和を SHG パワーセルの値とした。図 5 に演算の概要と数式を示す。実際のシミュレーションで用いたレーザ光セルは  $360 \times 360$  であったが、図 5 ではわかりやすくするために  $3 \times 3$  で表現している。

$L_1$	$L_2$	$L_3$
$L_4$	$L_5$	$L_6$
$L_7$	$L_8$	$L_9$

$K_1$	$K_2$	$K_3$
$K_4$	$K_5$	$K_6$
$K_7$	$K_8$	$K_9$

レーザ光セル                      KTP 結晶セル

$$S = \sum_{i=1}^9 K_i \cdot L_i^2$$

SHG パワー

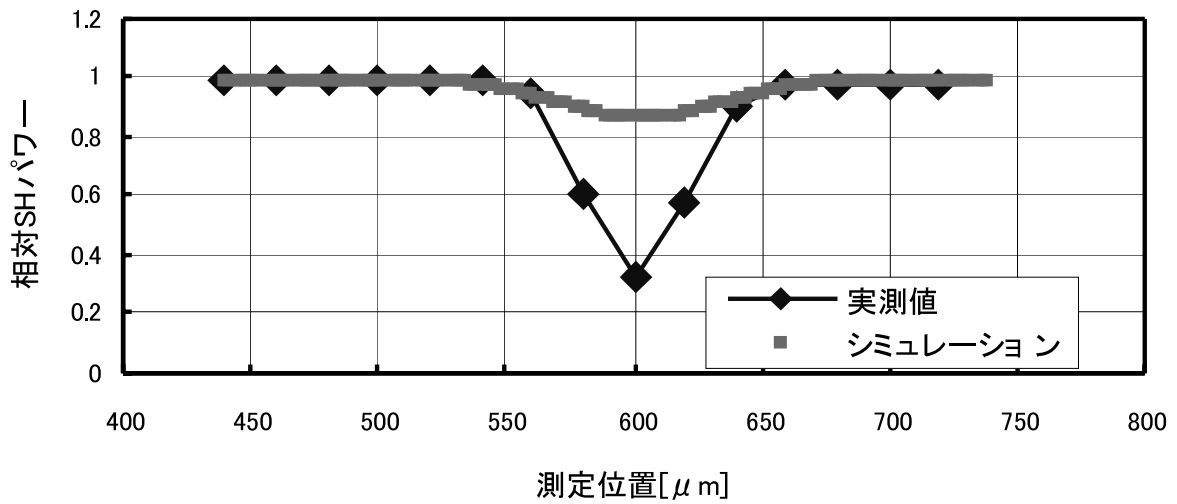
図5 重なり合ったレーザ光セルと KTP 結晶セル

## 4. シミュレーション結果と実測値との比較

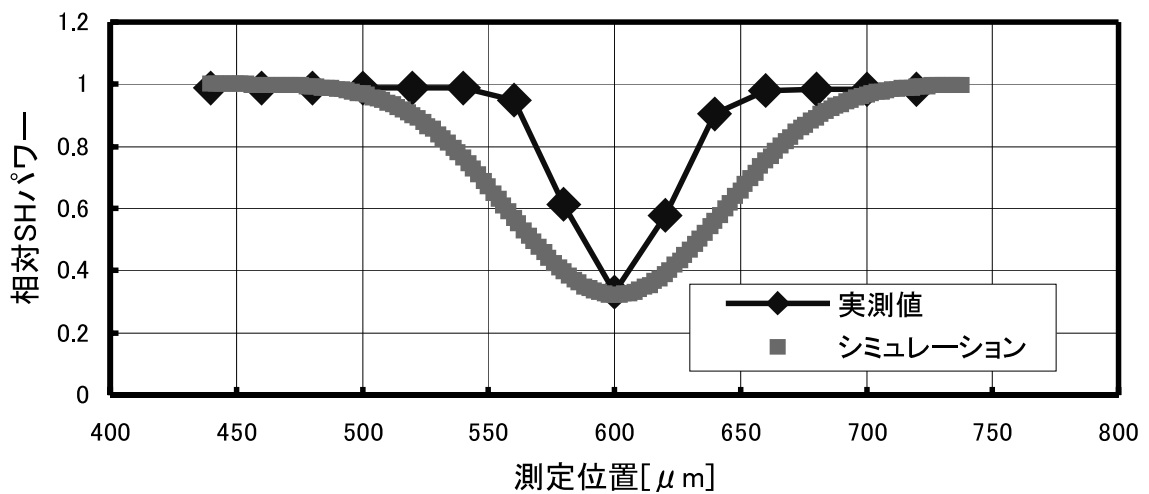
図 6 は、図 2 の実測値と、前章の要領でシミュレーションを行った結果を比較したものであり、検討を行いやすいよう、実測値とシミュレーション値の欠損部分から一列を取り出して比較している。

比較の方法として、未知数である KTP 結晶セルの値を 2 パターン想定し、それぞれの場合でシミュレーションを行った。(a)ではシミュレーション値のレーザ径が実測値 ( $178.4 \mu\text{m}$ ) と一致するように、(b)ではシミュレーション値のピークが実測値と一致するようにそれぞれ KTP 結晶セルの値を調節した結果である。実測値・シミュレーション値は比較が可能となるように最大値が 1 として相対化している。

比較した結果、図 6 で明白なように、どちらのシミュレーションでも実測値と同等な結果を導出することができていない。よって、調整するパラメータが KTP 結晶セルの値だけであった場合、図 6 (a),



(a) レーザ径を一致させた場合



(b) ピークを一致させた場合

図6 シミュレーション結果と実測値の比較

(b)のように、実測値を再現することができないことがわかった。

そこで、シミュレーション結果を実測値の近づけるために、KTP 結晶セルの値だけでなくレーザー光セルも調整した。実測したレーザー径をそのまま用いて計算によりレーザー光セルの値を決定していたが、測定したレーザー径が何らかの影響で変化した、あるいは正確なレーザー径を測定することが出来なかったと仮定し、レーザー径の値を変化させてシミュレーションを行った。その結果、レーザー径を実測した値の半

分 ( $89.2\mu\text{m}$ ) にしてシミュレーションを行った時の結果が実測値とほぼ一致した。そのグラフを図7に示す。

このシミュレーション結果が正しいとすると、測定したレーザー径 ( $178.4\mu\text{m}$ ) が実際はその半分程度しかない、または、KTP 結晶の表面にレーザー光が減衰または反射・屈折いづれかによりレーザー径が小さくなった、などの原因が考えられる。

図8に、今回使用した Nd:YAG レーザ発振器と、レーザー径測定措置 (ビームプロファイラ) を示す。

## 第二高調波発生特性による非線形光学結晶体の解析（第2報）

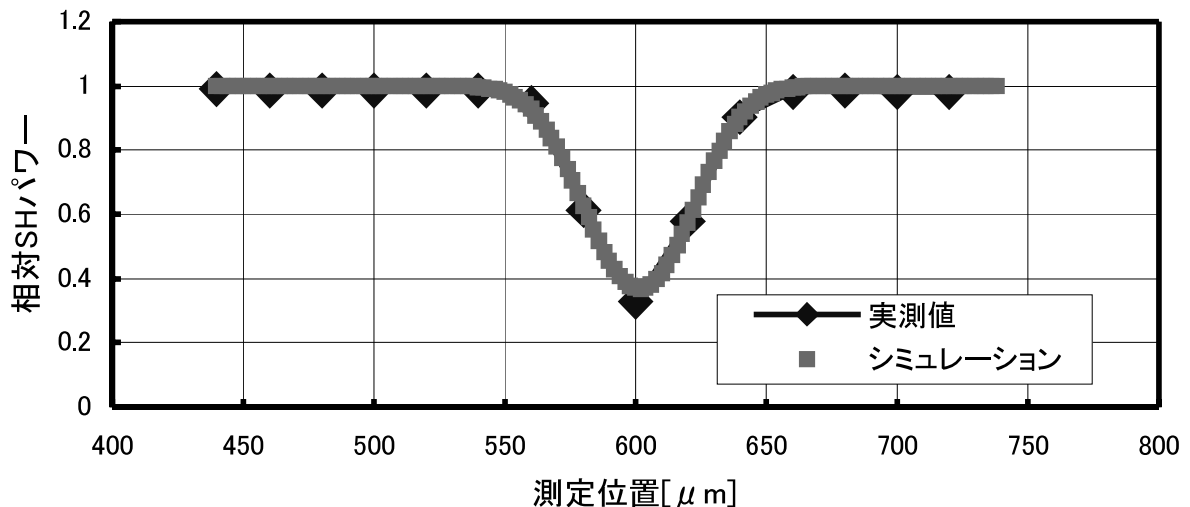


図7 レーザ径を実測値の半分にした場合

この測定では、レーザの射出口から KTP 結晶表面までの距離にビームプロファイラを設置してレーザ径を測定しているが、このような測定では KTP 結晶表面上でのレーザ径を正確に測定できたか問題がある。よって、今後測定装置の見直しも行う必要がある。

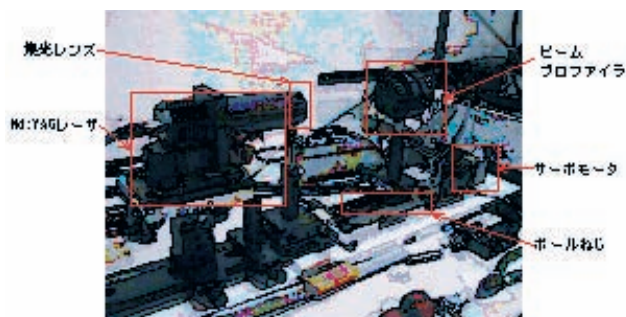


図9 レーザ径測定装置

## 5. まとめ

前報で報告した、精密なサーボ制御技術とレーザ工学を融合した新しい計測システムについて、そのシステムで測定した実験結果の精度を検証するために、表計算ソフトによるシミュレーション検証法を提案し、計算結果と実測値を比較したところ、シミュレーションにて実測値を完全に再現することはできず、測定対象である非線形結晶体 (KTP 結晶) 中に存在すると思われる欠損の真の大きさを知り得るまでは至らなかった。しかし、図7のようにレーザ光の径を SHG に影響を及ぼすパラメータとして

考えた場合、実測値にシミュレーション値を合わせることができた。このことから、レーザ光を照射する際に何らかの非線形な現象が生じていることも考えられた。今後の課題として次のようなことが考えられる。

- (1) レーザ径をさらに絞った上での精密な測定を再度行う
- (2) 焦点距離の違うレンズを用いるなどして実験条件を変え、それを踏まえた上でシミュレーションを行う
- (3) シミュレーションに影響を及ぼすその他のパラメータがないかどうか検証する

また、今後このシミュレーション解析を進めていくと同時に KTP 結晶の欠損が実際の製品（たとえば緑色レーザ発生装置など）に用いられる場合にどのような影響を与えるのかどうか、ということに関しても検証を行い、（商品化に向けて）この計測システムの有用性をさらに高める必要があると考えられる。

## 6. 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。

#### 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：第二高調波発生の位相整合，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