

## 532nmヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの不確かさとその校正法

洪 鋒雷\*

(平成18年6月6日受理)

## Uncertainties and calibration method of 532-nm iodine-stabilized Nd:YAG lasers

Feng-Lei HONG

## 1. はじめに

レーザー光は音叉が出す音のように単一周波数の波である。このレーザー光の単色性は、高精度の長さ標準や周波数標準に用いられ、また超大容量光通信実現の基礎ともなる重要なものである。波長標準あるいは光周波数標準は、そのレーザーの周波数を分子あるいは原子の吸収線に安定化することにより得られる。現在、もっとも普及している波長標準はヨウ素安定化He-Neレーザーである。より高性能な波長・光周波数標準を実現するために、産業技術総合研究所（産総研）では、ヨウ素安定化Nd:YAGレーザーを開発してきた。

このレーザーは、以下のような優れた特性をもっている。

- (1) 出力に周波数変調がのっていないので、高度な干渉計測などに直接使用できる。
- (2) 光パワーが大きいので、He-Neレーザーと比べてより応用の範囲が広い。
- (3) 全固体のNd:YAGレーザーは小型・堅牢なので、可搬型の光源に向いている。

発振波長1064 nmのNd:YAGレーザーを結晶を用いて2倍の周波数に変換すると、532 nmの波長が得られる。その波長域にはヨウ素分子の強い遷移があるので、大きい吸収信号が得られる。さらに、飽和吸収分光法を使えば、線幅の狭い吸収線が観測できる。これらの手法により、吸収線の観測及びレーザー周波数の制御が比較的容易に実現できるので、ヨウ素安定化Nd:YAGレーザーを標準器として導入する動きが世界各国で広がっている。

## 2. レーザ装置の可搬化による国際比較

ヨウ素安定化Nd:YAGレーザーを標準器とするためには、世界各国標準研の標準器の同等性を確認する必要がある。その確認方法の1つが、レーザーの持ち回りによる国際比較である。図1に、産総研の可搬型ヨウ素安定化Nd:YAGレーザー装置の写真を示す<sup>1)~3)</sup>。

すべての光学部品が30cm×45cmの定盤の上へのせられ、アタッシュケースにも入るレーザー装置は航空機の中へ持ち込むことが可能で、国際比較に適している。性能を低下させずにシステムを小型化することは容易なことではない。可搬型レーザーは、産総研でしか開発されていないので、各国のレーザーの同等性を確認する上で参照用レーザーとして実際に各国をまわり大きな役割を果たしている。図2は産総研の可搬型レーザーによって行われた国際比較を示す<sup>4)~6)</sup>。この結果、各国標準器の周波数値が極めて高い精度で一致していることがわかった。

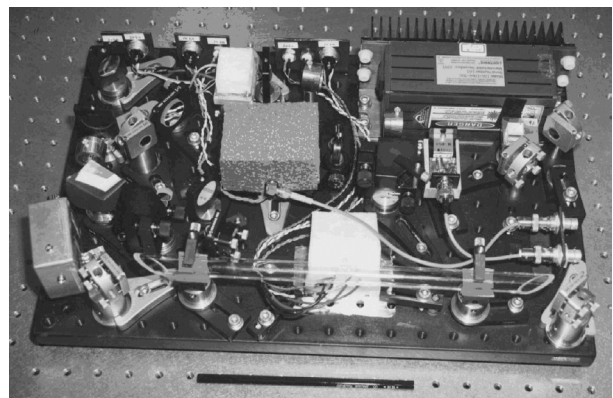


図1 産総研の可搬型ヨウ素安定化Nd:YAGレーザー装置

\* 計測標準研究部門 時間周波数科

本論文は当所における校正証明書等の不確かさ算出における一般的な考え方を記述したものであり、個別の校正証明書等に記載される不確かさ評価とは必ずしも一致しているわけではありません。

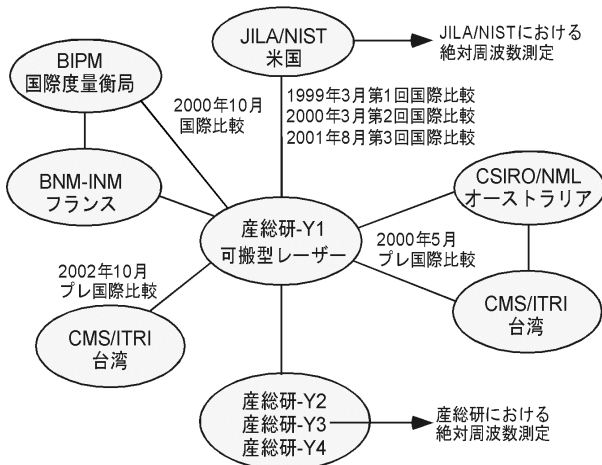


図2 産総研の可搬型レーザーによって行われた国際比較

### 3. レーザ周波数の絶対測定

周波数標準である原子時計を用いレーザーの周波数を測る方法があり、これはレーザー間の相対的な周波数比較に対して、絶対測定と呼ばれる。1999年頃ドイツのグループによって、モード同期超短パルスレーザーを用いた光周波数絶対測定の提案がなされ、この分野において極めて大きな技術革新が起こっている<sup>7,8)</sup>。産総研は、いち早くこの技術革新に着目をし、2000年にはレーザー周波数の絶対測定に成功した<sup>4,9)</sup>。現在は、原子時計を用いて日常的にヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの周波数を測定している<sup>10)</sup>。図3に、測定されたヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの周波数を示す。産総研のヨウ素安定化Nd:YAGレーザー(Y3)の周波数は、563260223507897(58) Hzである。測定の不確かさ(58 Hz)は主にNd:YAGレーザーの繰り返し再現性によるものである。産総研のヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの周波数測定値は、2001年国際度量衡委員会の長さ諮

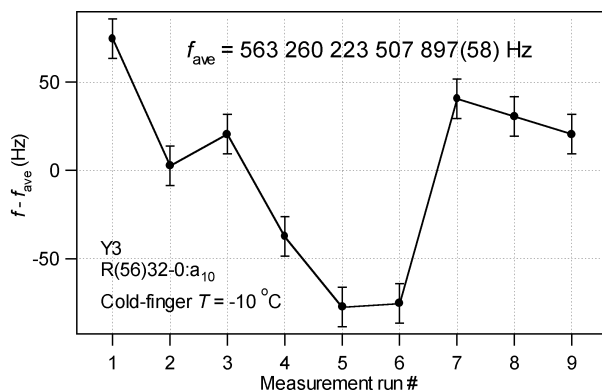


図3 光コムで測定されたヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの周波数値

問委員会において、米国とドイツの周波数値とともにNd:YAGレーザーの絶対周波数値を決定する値として採用された。メートル条約の枠組みの中で、産総研が果たした貢献として高く評価されている。

## 4. ヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの校正方法

### 4.1 校正原理

光周波数563 THzのヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの校正は、基本的には図4に示したように、周波数差を測定することにより実施する(ビート周波数測定法)。まず、Nd:YAGレーザー周波数標準器と校正器物のビームを、光軸調整反射鏡とビームスプリッタを調整することにより同軸平行になるように調整し、高速光検出器受光部に入射させる。それから、高速光検出器からのビート信号をカウンタで測定し、記録する。

### 4.2 校正手順

- 校正は、原則として、連続する3日間にわたり実施する。第1日目は、受入と、校正依頼者立ち会いのもとに行う受入検査及び1回目の校正を行う。第2日目は校正、第3日目は、校正依頼者立ち会いのもとに行う引渡検査と引渡を行う。
- Nd:YAGレーザー周波数標準器を含む校正システム装置全体の電源は、校正器物受入検査の1時間以上前に投入する。
- 校正器物を校正用光学テーブル上の校正実施位置に設置し、受入検査を行う。受入検査の結果は、受入検査票に記録する。
- 校正器物の電源を投入し、校正器物が周波数安定化可能になった時点で以下の調整を開始する。まず、校正器物とNd:YAGレーザー周波数標準器のビームを、光軸調整反射鏡とビームスプリッタを調整することにより

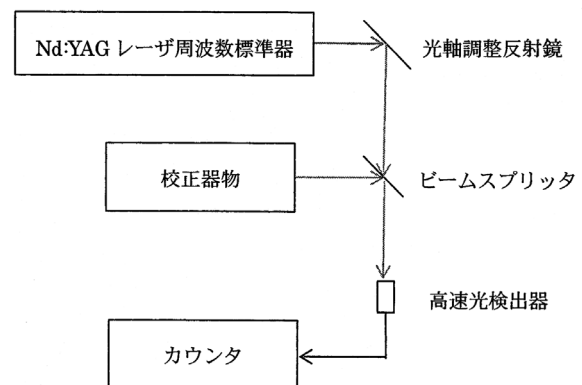


図4 ヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの校正原理

同軸平行になるように調整し、高速光検出器受光部に入射させる。このとき戻光が校正器物に戻らないように注意する。

- e) 高速光検出器からのビート信号をオシロスコープで観測し、振幅が200 mV P-P以上であることを確認する。このとき、オシロスコープの入力インピーダンスを50Ωにする。振幅が200 mV P-P以下の場合には、光軸調整反射鏡とビームスプリッタの再調整を行うとともに、NDフィルタを用いてNd:YAGレーザ周波数標準器の光量調整を行い、信号レベルの最適化を行う。また校正器物の偏光方向が異なる場合にはNd:YAGレーザ周波数標準器の光軸に1/2波長板を挿入し、偏光方向の最適化を行う。さらに、ビート信号のノイズレベルが2 mV P-P以下であることを確認する。
- f) カウンタの外部参照信号のサインがついていることを確認する。
- g) ここで、1回目の測定を行う。Nd:YAGレーザ周波数校正記録に日付、開始時刻及び室温を記入する。Nd:YAGレーザ周波数標準器と校正器物のビート周波数を10秒のゲート時間で50回測定し、その平均値と標準偏差を、Nd:YAGレーザ周波数校正記録に記入する。
- h) 第1日目の作業はここで終了である。校正器物を含むすべての機器は、電源を入れたままとする。
- i) 第2日目に2回目以降の校正作業を行う。Nd:YAGレーザ周波数校正記録に日付、開始時刻及び室温を記入する。Nd:YAGレーザ周波数標準器と校正器物のビート周波数を10秒のゲート時間で50回測定し、その平均値と標準偏差を、Nd:YAGレーザ周波数校正記録に記入する。
- j) 上記i)項の測定を30分以上の間隔をあけて、さらに4回繰り返す。
- k) 第2日目の作業はここで終了である。校正器物を含むすべての機器は、電源を入れたままとする。
- l) 第3日目に引渡検査及び引渡を実施する。引渡検査として、受入検査と同様の測定を、依頼者立会のもとに実施する。引渡検査終了後、校正器物を依頼者に引渡、校正を終了する。

## 5. ヨウ素安定化Nd:YAGレーザの不確かさ

### 5.1 不確かさの要因

Nd:YAGレーザ周波数校正における不確かさの要因は表1に示した3種類に分類される。

#### (1) Nd:YAGレーザ周波数標準器自体の不確かさ $u_1$

563 THzヨウ素安定化Nd:YAGレーザの周波数は、ヨウ素分子の量子力学的性質により決定されるので、原理的

表1 不確かさの要因

| 要因分類                   | タイプ (註) |
|------------------------|---------|
| Nd:YAGレーザ周波数標準器自体の不確かさ | B       |
| 周波数カウンタの不確かさ           | B       |
| ビート周波数測定結果の不確かさ        | A       |

(註) Aタイプの不確かさ：一連の測定値の統計的解析による不確かさ。

Bタイプの不確かさ：一連の測定値の統計的解析以外の手段による不確かさ。

な差は存在しない。しかしヨウ素分子の光吸収を検出し、それをもとにレーザ周波数の安定化を行う過程において、その機構の不完全さに起因するレーザ周波数の差が発生する。ヨウ素安定化Nd:YAGレーザの周波数不確かさ ( $k=1$ ) は、5 kHzであることが国際的に合意されている。

産総研のヨウ素安定化Nd:YAGレーザの周波数測定値は、2001年国際度量衡委員会 (CIPM) 長さ諮問委員会 (CCL) において、米国のJILA研究所及びドイツのPTB研究所の周波数値とともにNd:YAGレーザの絶対周波数値を決定する値として採用されている。Nd:YAGレーザの絶対周波数値 (CIPM勧告値) を決めるに当たって、上記3研究所で得られているレーザ周波数値の差を考慮に入れて、勧告値の不確かさを5 kHzと定めた。

Nd:YAGレーザ周波数標準器は、563 THzヨウ素安定化Nd:YAGレーザの国際比較及びフェムト秒光コムを用いた周波数絶対測定により、国際度量衡委員会による563 THzヨウ素安定化Nd:YAGレーザ周波数の勧告値を満たしていることが確認されている。

したがって、レーザ周波数標準器自体の持つ不確かさを、 $u_1=5$  kHzとする。

#### (2) 周波数カウンタの不確かさ

周波数カウンタの基準周波数外部入力端子に、産総研所管の原子時計にトレーサブルな信号を接続する。

校正室内に供給されている原子時計の信号の不確かさは0.01 ppm以下なので、カウンタの不確かさはビート周波数の最大値 (100 MHz) に対して1 Hz以下である。従って、カウンタの不確かさが、ヨウ素安定化Nd:YAGレーザの周波数不確かさ (5 kHz) の0.02 %以下となり、その影響は無視できる。

#### (3) ビート周波数測定結果の不確かさ $u_2$

校正器物の数時間～数日の周波数ドリフトなどの影響で、ビート周波数測定結果に不確かさ $u_2$ が現れると予想される。通常 $u_2$ は、Nd:YAGレーザ周波数標準器自体の不確かさ $u_1$ に比べて無視できる程度である。

## 5.2 測定の不確かさの算出

要因別の不確かさから見積もられたNd:YAGレーザ周波数校正における標準不確かさは次の通りである。

$$\text{合成標準不確かさ} : u_c = [(5 \text{ kHz})^2 + u_2^2]^{1/2}$$

$$\text{拡張不確かさ} : U = k u_c \quad (k = 2)$$

(この不確かさ $U$ は、正規分布にもとづく包含係数 $k=2$ から決定された拡張不確かさであり、約95%の信頼の水準をもつと推定される。)

## 6. おわりに

産総研において、ヨウ素安定化Nd:YAGレーザが実際にブロックゲージ干渉計の光源として使用開始され、良好な測定結果が得られている<sup>11)</sup>。このために、研究棟の間に光ファイバー網を敷設し、ヨウ素安定化Nd:YAGレーザ光による光周波数標準の供給を実現している。この標準を確立することで、精密機械加工産業における高精度長さ計測の技術に大きく貢献できる。

## 参考文献

- 1) F.-L. Hong, J. Ishikawa, T. H. Yoon, L.-S. Ma, J. Ye and J. L. Hall : A portable  $I_2$ -stabilized Nd:YAG laser for wavelength standards at 532 nm and 1064 nm, in Recent Developments in Optical Gauge Block Metrology (SPIE Proc. Vol. 3477, 1998) 2-10.
- 2) F.-L. Hong, J. Ishikawa, J. Yoda, J. Ye, L.-S. Ma, and J. L. Hall : Frequency comparison of  $^{127}I_2$ -stabilized Nd:YAG lasers, IEEE Trans. Instrum. Meas., **48** (1999) 532-536.
- 3) F.-L. Hong, J. Ishikawa, Z.-Y. Bi, J. Zhang, A. Onae, and J. Yoda : A portable  $I_2$ -stabilized Nd:YAG laser for international comparisons, IEEE Trans. Instrum. Meas. **50** (2001) 486-489.
- 4) F.-L. Hong, J. Ishikawa, K. Sugiyama, A. Onae, H. Matsumoto, J. Ye and J.L. Hall : Comparison of independent optical frequency measurements using a portable iodine-stabilized Nd:YAG laser, IEEE Trans. Instrum. Meas., **52** (2003) 240-244.
- 5) L. Robertsson, S. Picard, F.-L. Hong, Y. Millerieux, P. Juncar and L.-S. Ma : International comparison of  $^{127}I_2$ -stabilized frequency-doubled Nd:YAG lasers between the BIPM, the NRLM and the BNM-INM, October 2000, Metrologia **38** (2001) 567-572.
- 6) 洪鋒雷, 石川純 : ヨウ素安定化Nd:YAGレーザの国際周波数リンク, 応用物理, **70** (2001) 838-841.
- 7) Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch : Absolute optical frequency measurement of the Cesium D1 line with a mode-locked laser, Phys. Rev. Lett., **82** (1999) 3568.
- 8) D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S. T. Cundiff : Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis, Science, **288** (2000) 635.
- 9) K. Sugiyama, A. Onae, F.-L. Hong, H. Inaba, S.N. Slyusarev, T. Ikegami, J. Ishikawa, K. Minoshima, H. Matsumoto, J.C. Knight, W.J. Wadsworth and P. St.J. Russell : Optical frequency measurement using an ultrafast mode-locked laser at NMIJ/AIST, Proc. 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology, (World Scientific, Singapore, 2002) 427-434.
- 10) F.-L. Hong, S. Diddams, R. Guo, Z.-Y. Bi, A. Onae, H. Inaba, J. Ishikawa, K. Okumura, D. Katsuragi, J. Hirata, T. Shimizu, T. Kurosu, Y. Koga, H. Matsumoto : Frequency measurement and hyperfine structure of the R(85)33-0 transition of molecular iodine with a femtosecond optical comb, J. Opt. Soc. Am. B, **21** (2004) 88.
- 11) 尾藤洋一 : ブロックゲージと国際比較, AIST Today, Vol.2, No.4 (2002) 30.