

# 誰でも作れて携行できる長さの国家標準器

## — ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ共振器の機構設計 —

石川 純

長さの国家標準として用いられるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの発振波長は、レーザ共振器の機械的長さで決まる。従来、機械的安定度の高い共振器を実現するためには特殊な材料や素子を使ったり、周囲環境を厳重に管理したりすることは当然と考えられてきた。しかし、レーザの動作や共振器に要求される性能を詳しく調べた結果、レーザ共振器の機構に要求される機械的特性の多くは、市販の汎用部品で十分実現可能であることが明らかとなった。汎用部品を多用して大幅な価格低下を実現しつつ、発振波長の安定度や周囲環境の変動に対する耐性を大幅に向上させることが可能となり、国家標準器として十分な精度で、かつ保守や移送が容易なものを実現した。この設計にもとづくヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザは、日本の長さの国家標準として長年用いられただけでなく、民間の校正事業者が持つ標準器として、また発展途上国の国家標準器としても用いられている。

キーワード: 機構設計、精密機構、防振機構、長さ標準、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ

### Portable national length standards designed and constructed using commercially available parts

– An advanced mechanical design for the iodine stabilized He-Ne laser –

Jun Ishikawa

The iodine stabilized He-Ne laser at 633 nm is widely used as the national length (wavelength) standards in many countries. Since the wavelength emitted by the laser is directly proportional to the cavity length of the laser, extremely high mechanical stability is necessary for the cavity of the iodine stabilized He-Ne laser. Many special parts as well as special materials are adopted to achieve a sufficiently high stability in the conventional iodine stabilized He-Ne lasers while the adoption of such special parts and materials brings difficulty in the maintenance of the lasers. I developed and constructed a new iodine stabilized He-Ne laser with a special mechanical design. The assembly and adjustment of the laser is quite easy. Although most parts and materials of the laser are commercially available, it showed better stability especially against the ambient temperature variation. The new iodine stabilized He-Ne lasers were used for a long time as the national length standards of Japan.

Keywords: Mechanical design, fine mechanism, anti-vibration mechanism, length standard, iodine stabilized He-Ne laser

#### 1 はじめに

長さは物理量のうちでも最も基本的なもので、長さの計測技術は科学や産業の場で高度に発達している。長さの国際単位はメートルであり、その標準としては19世紀の後半からメートル原器が使われてきたが、20世紀に入り1960年にクリプトンの放電ランプが発する橙色の光の波長に変更された。現在の長さの標準は1983年から用いられているもので、真空中を進む光の速度(光速)をもとにして実現するものである<sup>注1</sup>。具体的には、特定の条件下で発振するレーザの波長を標準とする方法であり、最も広く用いられているものはヨウ素分子の吸収線に発振波長を安定化させたヘリウムネオンレーザである<sup>注2</sup>。現在我が国を初めてして世界の多くの国が、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ

を国家標準として使っている。このレーザを国家標準とした場合の長さ計測のトレーサビリティ体系を図1に示す。

一般に国家標準には、産業界や学术界で必要とされる計測の精度を十分に上回る最高の精度が求められる。したがって、国家標準の開発過程においては最高の精度を達成するために最新・高度・特殊な技術が投入される。しかし、いったん研究開発が終了し国家標準器が完成すると、次のフェーズで求められるのは、それをもとにしていかに効率的に産業界や学术界に標準を供給して活用するか、またその国家標準器をいかに安定して維持し続けていくかということである。このフェーズに移行するとはしばしば最新・高度・特殊な技術は、高コストや入手の困難性から供給・維持業務において無視できない障害となる。

産業技術総合研究所 デジタルものづくり研究センター 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東  
Digital Manufacturing Research Center, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan E-mail: j.ishikawa@aist.go.jp

Original manuscript received May 22, 2009, Revisions received September 24, 2009, Accepted September 25, 2009

筆者が1980年代に旧工業技術院計量研究所（現産業技術総合研究所計測標準研究部門）で精密干渉測定に関する研究を開始した際に、波長標準として使用したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ（これは2009年まで日本の長さの国家標準であった）は、ちょうどこの状態であった。当初は操作性の悪さや特殊部品の供給に問題を感じつつも、最高精度の国家標準器であればやむを得ないことと考えていた。そのようなときに、ニュージーランドの国立標準研究所の研究者がヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの国際比較を行うために、自らが開発したレーザをハンドキャリアで航空機の客室に持ち込み、各国の標準研究所を訪問し、計量研究所にも立ち寄るといった機会があった<sup>1)</sup>。ラック1台分の制御装置と鋳鉄製のチャンネルベンチ上に設置されたレーザ本体で構成された日本のレーザと比較して、そのコンパクトさと操作性はまさに衝撃的であった。

この出会いをきっかけに、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの汎用化の研究を開始した。ここでいう汎用化とは、まずヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの各部分に要求される性能・特性を詳しく調べて明確にすること、次にその性能・特性を可能な限り一般的な部品を用いて実現することである。本稿では、研究を開始したときの状況、その状況の下で決定した要素技術開発の方針、どのような要素技術を開発したか、要素技術を統合してどのような国家標準を実現したかを述べる。

## 2 研究の目標

### 2.1 国家標準器の汎用化

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに限らず、標準器やその構成部品に要求される仕様・性能は一般の製品と比べると特殊なものである。基礎開発過程では必要とされる性能を実現することが最優先課題であるから、特殊かつ高価な材料・部品・加工法が採用されることはやむを得ない。

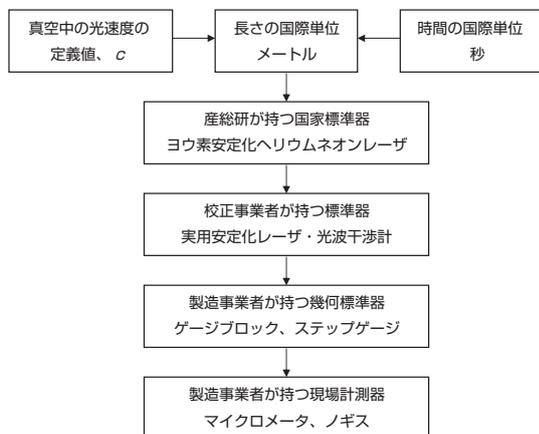


図1 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを国家標準とする長さ計測のトレーサビリティ体系

筆者は当初、標準器を開発する研究者の立場ではなく、1ユーザーとしてヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに関わり、その段階でニュージーランドのレーザと接する機会を得た。その経験から、基礎開発過程は標準器開発の全過程の半分にすぎず、本当の意味で開発を完了するためには引き続き汎用化を進めることが不可欠であると確信した。汎用化とは、先に述べたように必要とされる性能・特性を詳しく調査して明確化して、それを汎用部品を用いて実現する設計手法・技術を確立することである。すなわち、汎用化とは特殊部品（ハードウェア）から設計手法・技術（ソフトウェア）へと転換を図ることであると考えられるようになった。

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの動作原理は、ヨウ素分子の量子力学的性質を基準とするものである。ヨウ素分子の量子力学的性質は不変であるから、人工物のメートル原器とは異なり、用いるヨウ素の間で原理的な差は存在しない。しかし、ヨウ素分子の量子力学的性質から安定な発振波長を抽出する機構には、人工物であるが故の不完全性が存在し、発振波長の器物による差や不確かさとなって現れる。筆者は、標準の保有・維持とは単にヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ（ハードウェア）を所有することではなく、ヨウ素分子からレーザ波長を実現する技術の保有であると考えている。汎用化には、レーザ波長を実現する技術の精査と深い理解が不可欠である。すなわち、汎用化により得られた技術の保有が、標準の保有・維持に他ならない。

国家標準器を汎用化することによって多くのメリットが得られることが予想されたが、その中で中心的なものは各国の長さ標準の相互信頼性が向上すること、そして我が国の中で長さの精密計測の精度が飛躍的に向上することであった。これらを次の2つの節で述べる。

### 2.2 国際的な相互信頼性の向上

先進国の一部を除き、ほとんどの国立標準機関では、国家標準器として製品化された市販のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを購入している。この場合、簡単な調整以外の修理等はそのレーザの製造業者に依存している。つまり、国立標準機関は単なるハードウェアの所有にとどまっていて、標準の維持はその製造業者に全面的に依存している。製品としての完成度が高く、供給・維持サービスが滞ることがなければ大きな問題が生じることはない。しかしヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザのような国家標準レベルの機器は、高度な技術を必要とすること、需要が極めて限定的であることから、開発・製造・維持を営利事業として継続することは容易ではなく、事業化は実際多くの困難を伴っている。

筆者が考えたヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの汎用

化とは、標準器としての性能・操作性・経済性・維持管理の容易さに優れたレーザーの実現を目標としつつ、同時にレーザーについての詳細な技術情報をユーザーに開示するというものである。波長標準の本質は、ヨウ素分子の普遍的な量子力学的性質から安定なレーザー波長を実現する技術にある。汎用化によりもたらされるこのような技術を国際間で共有できるならば、それは国家間でそれぞれの国家標準が同等であることを認め合うための相互信頼を確立する基礎となる。

### 2.3 国内トレーサビリティの中流域の高度化

日本国内のトレーサビリティの中流域で波長標準の校正をビジネスとする事業者は現在何社か存在するが、その技術レベルは一部先進国以外の国立標準機関と類似している。したがって汎用化したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを構成事業者の標準器として採用することは、前節で述べたように標準を技術として保有するということを意味する。

ゲージブロックや分銅といった人工物の基準器は、校正を行って値付けすることによりトレーサビリティが確保できる。しかし、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、ヨウ素分子の量子力学的性質から波長を取り出す標準器であり、器差（不確かさ）は波長を取り出す過程の技術に依存する。このような標準においては、波長の値付けに加え、波長を取り出す過程の技術の保有とその評価、いふならば「技術のトレーサビリティ」が本質的に重要である。技術の汎用化は、校正事業者などのトレーサビリティの中流域においても、ハードウェアの所有から技術の保有への転換を推進し、その信頼性の向上を実現するものである。

### 3 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの動作原理

ここでヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの動作原理を紹介しておく。図2はヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの構造の概略図である。普通のヘリウムネオンレーザーは、2枚の平面鏡（正確には僅かな凹面）で構成される光共振器の間にヘリウムとネオンの混合ガスが入ったレーザーチューブが置かれる。一方ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーでは、高純度のヨウ素ガスを封入した「ヨウ素セル」が光共振器の中に挿入される。2枚の平面鏡の光学的間隔（光共振器

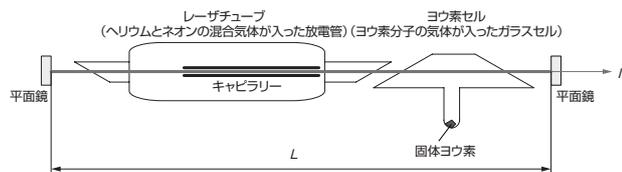


図2 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの概略図

長)  $L$  と波長  $\lambda$  の関係は式 (1) で表すことができる。

$$\lambda = 2L / N \quad (1)$$

ここで  $N$  は整数である。 $\lambda$  は  $L$  に比例するが、ヘリウムネオンレーザーチューブの光増幅効果が有効である波長範囲は極めて狭いので、発振波長  $\lambda$  は限定されたある範囲に留まる。 $L$  を有効波長範囲を超えて変化させると整数  $N$  が一つずつ増加あるいは減少（モードホップ）し、 $\lambda$  は光増幅効果の有効な一定の範囲内に留まる。今、モードホップが発生しない範囲で  $L$  を変化させると、レーザーの出力  $I$  は図3の変化（破線）を示す。 $I$  は  $\lambda$  がモードホップに近い両端では低下し、中央で最大となる。レーザーチューブに加えヨウ素セルが光共振器内に存在すると、ヨウ素分子による光の吸収が  $I$  に影響し、出力曲線は図3（実線）のように変化する。レーザー共振器内には高強度（10 mW）の光の定在波が存在するので、ヨウ素分子による光の吸収が飽和する。吸収の飽和により吸収波長中心では吸収が弱まるので、 $I$  が僅かに増加し出力曲線上に小突起が出現する。この現象を利用すると、ヨウ素分子の運動によるドップラー効果の影響を受けない極めて分解能の高い分光（飽和吸収分光：saturated absorption spectroscopy）が実現できる。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、出力曲線に出現する飽和吸収による小突起をマーカーとし、その中心に発振波長を制御・安定化することにより高精度の波長基準を実現する。

出力曲線のピーク位置を検出する方法としては、通常位相敏感検出による微分法が利用される。図4に位相敏感検出による微分の原理を示す。微分を実現するために、 $\lambda$  に僅かな変調をかける。 $\lambda$  の変調により  $I$  も変動するが、その振幅と位相は出力曲線  $I(\lambda)$  の傾斜で決まる。図に示したように、出力信号と復調信号を掛け合わせて得られた信号から直流成分を取り出すと  $I(\lambda)$  の1次微分  $I'(\lambda)$  が得られる。この微分がゼロになるように  $\lambda$  を制御すれば

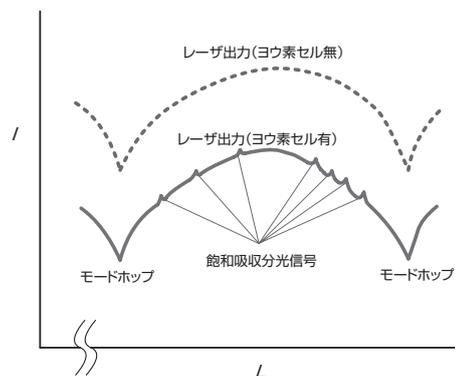


図3 レーザ共振器長  $L$  とレーザー出力  $I$  の関係 (1 縦モード内)

発振波長は  $I(\lambda)$  のピークの位置に留まる。しかし、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、ヨウ素分子の飽和吸収による小突起はレーザ出力曲線  $I(\lambda)$  の上に重畳して存在するので、ベースラインの傾斜の影響が避けられない。この影響を除去し純粋にヨウ素分子の飽和吸収の中心を検出するために、実際には3次微分検出が行われる。3次微分の信号  $I'''(\lambda)$  は、位相敏感検出の復調参照信号に変調信号（周波数  $f$ ）の3倍波（周波数  $3f$ ）を用いることで得られる。レーザ出力曲線は飽和吸収による小突起と比較して遙かになだらかなので、3次微分によりその影響は十分除去される。図5はオシロスコープで観察したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの出力の、ヨウ素分子吸収成分付近の3次微分信号  $I'''(\lambda)$  である。この3次微分信号がゼロになるように発振波長が制御され、安定化される。

レーザの波長  $\lambda$  は、先に述べたようにモードホップが発生しない範囲では光共振器長  $L$  に比例する。したがって発振波長  $\lambda$  を制御や変調のために変化させるためには、 $L$  を変化させればよい。例えば3次微分信号検出のための変調として、発振波長  $\lambda$  には光の周波数に換算して6 MHz p-pの変調が掛けられる。 $L$  が0.3 mの場合、6 MHzの変調に対応する  $L$  の変化は3.8 nmである。つまり平面鏡の片方を光軸方向に振幅3.8 nmで振動させれば、3次微分検出に必要な  $\lambda$  の変調が実現できることになる。また、発振波長の制御に用いる3次微分信号（図5）の幅は、光の周波数に換算して5 MHz程度である。振動や衝撃など

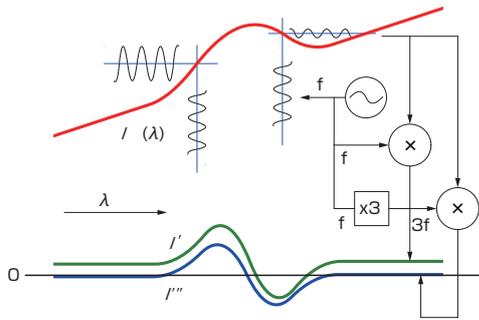


図4 飽和吸収によるレーザ出力  $I(\lambda)$  上の小突起とその1次微分  $I'$  および3次微分  $I'''$  の信号

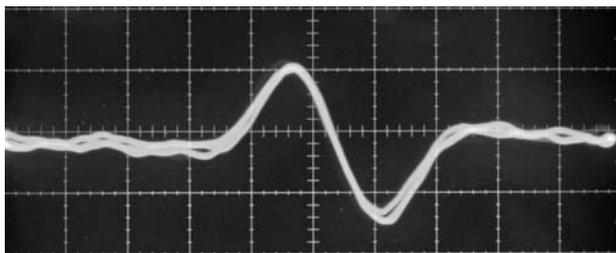


図5 オシロスコープで観察した実際の3次微分信号

により発振波長の変調範囲がこの幅を超えると制御は不能となる（これを周波数ロックが外れるという）。レーザの波長安定化をうまく行うためには、 $L$  の変動をこの幅の1/10程度、すなわち500 kHz程度に抑えることが必要である。500 kHzのレーザ周波数変動に相当する共振器長  $L$  の変動は0.32 nmである。これは原子の直径に相当する長さである。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを安定に動作させるためには、振動による平面鏡の間隔の変動を原子の直径程度に抑えるという難しい技術が必要になる。

図6は筆者が最初に使用したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの共振器の機構である。平面鏡の1枚はそのままの状態、もう片方はリング状の積層ピエゾアクチュエータに取り付けた状態で、それぞれ精密な角度調整機構付の端板で保持される。2枚の端板は熱膨張がゼロに近い4本のスーパーインバー製のスペーサロッドで向かい合わせに固定される。共振器の中にはレーザチューブとヨウ素セルをセットし、実際のオペレーションに際しては、防音ケースをかぶせ空気バネで支えた防振定盤上に設置することにより、振動の影響を上記の500 kHzの条件内に抑えた。図6において積層リングピエゾアクチュエータは1個であるが、変調信号と制御信号の両方をこのピエゾアクチュエータに印加し、変調と制御を同時に行った。

#### 4 目標達成のための道筋

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの各機構に要求される性能・特性には、前章で述べたようにかなり特殊なものが多い。特殊な要求に対しては、汎用部品を普通に使ったのでは対応できない。特殊な性能・特性を、汎用部品を用いて実現するためには新しい特殊な使用法を考案・採用することが必要となる。特殊な使用法といっても、危険を伴うもの、寿命の著しい短縮を伴うものなど無理のあるものは採用できない。つまり、今まで使われたことのない利用法で理にかなったもの、さらに必要とされる性能・特性を実現できるものを考案・実現することにより、汎用部品の採用範囲を広げることができる。

一例として、制御装置の新しいバイアス調整回路について

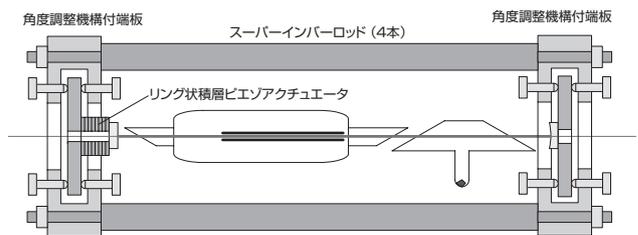


図6 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの共振器機構（従来型）

て述べる。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、吸収線を探索・選択するためにピエゾアクチュエータへの印加電圧を滑らかに変動させる必要がある。従来はこの変動をポテンシオメータを使って行っていたが、全行程にわたって十分な電圧分解能を有するポテンシオメータの製品は存在しない。したがって、変動範囲は一部の狭い電圧範囲に限定せざるを得ず操作性が悪くなっていた。図7は、ポテンシオメータを用いる代わりにDCギアモータと積分回路を用いて、極めて高い電圧分解能を実現した電圧調整回路である。DCギアモータは、本来、入力電圧に比例した回転数で回転するアクチュエータであるが、外力で回転させた場合には発電機として動作し角速度 ( $2\pi \times$  回転数) に比例した電圧を発生する。この発生電圧を積分回路に入力させると、その出力はギアモータの回転角に比例した電圧となる。回転角と積分回路出力電圧の比例定数は、積分回路の入力抵抗とコンデンサを選択することにより任意に設定できる。さらにギアモータは、ポテンシオメータと異なり制限なく回転させることができるので、全行程にわたる電圧調整を、例えば100回以上の回転で行うような設定も可能である。

しかし、このような汎用部品を用いて特殊機能を実現させることは、計画的・系統的に進めたわけではない。レーザの性能に直結する部分、安定した供給・維持の障害となる部分の開発が優先されることはいうまでもないが、実際にアイデアが浮かび問題が解決される順序は、必ずしも重要度とは一致しなかった。したがって、本開発を進めるに際して、当初計画的・系統的なシナリオというものも存在しなかった。一方、このような汎用化がいくつか成功するとボトルネックを正確に把握できるようになり、問題の重要度を認識して頭の片隅に置いておくことで、他の業務を遂行するかたわらでふと解決策が浮かんだときに改良・開発を進められるようになった。このような状況で、およそ10年で一通りの汎用化が完成した。

上述の電圧調整回路の例は、操作性向上に関するものであるが、汎用品を利用した新機構により基本性能（不確かさ・安定度）の向上を実現することもできた。以下の章では、レーザの基本性能を決定する光共振器長の制御機

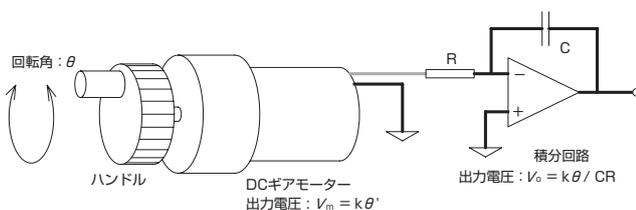


図7 DCギアモータと積分回路による広範囲の電圧微調整回路

表1 国家標準としてのヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの動作条件（国際度量衡委員会の勧告）

・ヨウ素セルの壁面の温度	(25±5)	℃
・ヨウ素セルコールドフィンガーの温度	(15±0.2)	℃
・周波数変調幅 (P-P)	(6±0.3)	MHz
・一方向共振器内光強度	(10±5)	mW
*ただし光周波数の共振器内光強度シフト係数は1.4 kHz/mW 以下であること		

構に関して述べる。

## 5 光共振器長制御機構の汎用化

レーザの共振器長制御機構は、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの基本性能を決定する最も重要な部分である。従来は超低膨張材料やピエゾアクチュエータといった特殊部品が多用されていた。共振器長制御機構は、波長を制御するための直進移動機構と、3次微分信号を得るための変調機構があるが、以下に両機構の汎用化について述べる。また、安定した共振器長制御を実現する上で重要な防振機構についても述べる。

### 5.1 平面鏡の直進移動機構

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの動作条件は、国際度量衡委員会 (CIPM) による勧告としてすでにまとめられている<sup>[2]</sup>。表1に国際度量衡委員会が勧告したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの動作条件を示す。この勧告で規定されている4つの動作条件のうち共振器機構に直接関係するのは、先に述べた変調の深さ（光の周波数換算で  $6 \pm 0.3$  MHz）であるが、共振器内の一方向光強度 ( $10 \pm 5$  mW) は平面鏡角度の影響を受けるので、共振器機構の問題ともいえる。従来型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、共振器長をリング状の積層ピエゾアクチュエータで制御していた。ところがピエゾ素子は必ずしも均一な材質でできているわけではないので、一定の電圧を印加しても伸縮量が場所ごとに異なるという不均一性が生じ、これが原因となって平面鏡の傾き角がわずかに変化するという現象が起きた。平面鏡の傾き角が変わると、光共振器の損失が変化するのでレーザの出力も変化する。レーザ出力は、共振器内の一方向光強度とレーザミラー透過率の積で決まる。表1からその変動の許容範囲は、規定出力（共振器内一方向光強度 10 mW）の  $\pm 50\%$  と大きいため、ピエゾアクチュエータの傾き角の変動による出力変化は、通常はほとんどの範囲に収まる。

しかし、実際の実験から、発振波長の再現性と安定性に優れたヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを実現するためには、制御に伴う平面鏡の傾き角の変動を可能な限り小さくすることが極めて重要であることが分かってきた。この点で、国際度量衡委員会の勧告は発振波長に影響する重

要な条件が欠落しているといえる。筆者は以前に、発振波長 $\lambda$ の平面鏡の傾き角に対する依存性を評価するために、レーザパワー $I$ をほぼ一定に保ちながら平面鏡の角度を変えた測定を行った<sup>[3]</sup>。その結果、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの全ての動作パラメータを国際度量衡委員会の勧告の範囲内に設定しても、発振波長 $\lambda$ は共振器の調整（平面鏡の傾き）によっては勧告する不確かさ（周波数換算で 10 kHz）上変動することを実験的に確認した。このようにヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの発振波長の安定化のためには、平面鏡の移動機構には極めて高い直進性が要求されることが分かった。共振器長の制御に使用した piezoアクチュエータは、剛性が高く微小変位が可能という優れた特徴をもつが、上記のように直進性に問題があり従来型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの精度のボトルネックとなっていた。汎用化を進めるためには、直進性の優れた移動機構の開発が不可欠であることが分かり、新型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは高剛性で微小変位に優れた piezoアクチュエータと直進性に優れたガイド機構を組み合わせるという手法を採用した。

一般に機械的な直進ガイド機構は、平行バネ機構、摺動機構、転がり機構の三つに分類できる。piezoアクチュエータと組み合わせる直進ガイド機構として実績が多いのは、平行バネ機構である。平行バネ機構は、可動範囲は限られるが、遊び・摩擦・バックラッシュが存在しないので特に精密な位置制御に適していると考えられる。しかしながら、高度な直進性を実現するためには平行バネの構造をある程度大きくしなければならないこと、また系の剛性を高めると重量も増大すること、さらに高価であるという問題がある。摺動機構は原理的に遊びがあるので、本用途には適用できない。開発に際して、piezoアクチュエータ用のガイドとしての実績はほとんどないが、安価で軽量の転がり機構の採用を試みた。

### 5.1.1 ボールスプラインによる直進移動機構

転がり機構は、有限移動距離のもの、無限移動距離のものが存在する。有限移動距離転がり機構は、図 8a に示したように、対向する直線ガイドの間にボールやローラ等の回転体を挟んだものである。下のガイドを固定して上の

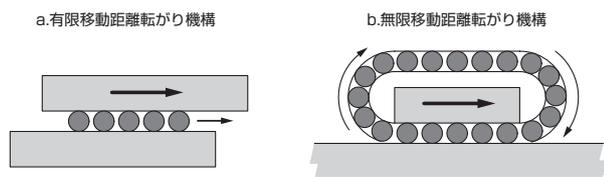


図 8 有限移動距離転がり機構 (a) と無限移動距離転がり機構 (b)

ガイドを移動させると、挟まれた回転体は上ガイドの半分だけ移動する。ガイドの移動量を確保するために、回転体はガイド全長の 50 ~ 70 % の範囲に配置される。有限移動距離転がり機構には、移動に伴い支点（回転体の位置）も移動していくという問題がある。転がり機構の剛性や荷重にも依存するが、支点位置の移動は避けられない姿勢変化の原因となる。

無限移動距離転がり機構は図 8b に示したように、上のガイドの移動に伴い後部から排出された回転体を、前部に戻し上下のガイド間に挿入するという機構を有するものである。長い移動量を容易に実現できるのに加え、支点の移動が小さい（回転体の間隔以下となる）ので、姿勢変化の少ない優れた機構とされている。

直進移動転がり機構として最初に試用したのは、円形中空軸構造をもつボールスプライン（THK 株式会社：LF13）<sup>[4]</sup>である。ボールスプラインは無限移動距離転がり機構の一種で、高度な直進性が期待できることと、形状がリング状積層 piezoアクチュエータに近いのでレーザ共振器へ組み込みやすいことから採用を決定した。採用したボールスプラインのスプライン軸直径は 13 mm、中心には直径 5 mm の穴があり、レーザ出力光はここを通る。図 9 はボールスプラインを組み込んだ平面鏡直進移動機構である。平面鏡はスプライン軸端部にセットされ、スプライン軸は制御アーム内のプリロードスプリングにより前方に引っ張り出された状態である。平面鏡の調整機構をレーザ本体にセットすると、本体内のリニア piezoアクチュエータの先端がスプライン軸制御アームに接触し、スプライン軸は半分程度押し込まれた状態となる。リニア piezoアクチュエータに制御電圧を印加し、その伸縮によりミラー位置の制御を行った。

転がり機構は摺動機構と異なり、予圧をかけて遊びを取り除くことができる。試用したボールスプラインも本体・ボール・スプライン軸の隙間は -6 ~ -2  $\mu\text{m}$  に調整され、ガタはない。しかし、レーザの発振中にスプライン軸を横方向に押しミラーの傾きが原因と考えられるレーザパワーの変動が観測された。ボールスプライン機構の回転モーメントに

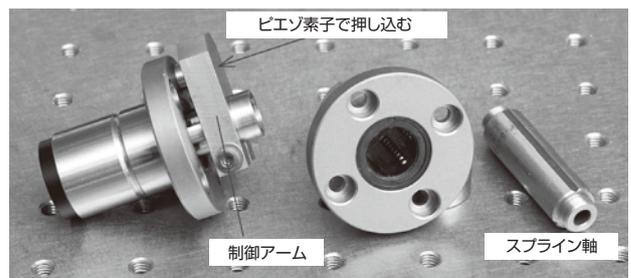


図 9 ボールスプラインを組み込んだ平面鏡直進移動機構

対する剛性は、明らかに不足していることが分かった。無限ストロークの転がり機構では、ボールは循環する。本体スプライン軸の間隔は仕様によればボール径より小さい（ $-6 \sim -2 \mu\text{m}$ ）ので、ボールがこの隙間に進入すると大きな抵抗力が発生し、スムーズな動きを妨げることが考えられた。しかしボールスプラインではボールの出入に伴う抵抗力変化はほとんど検知されない。つまり、両端付近ではボール進入時の抵抗力発生を防ぐために間隔が広がってあって、実際に予圧がかかっているのは中央部に限定されるものと推測される。その結果シフトに対する剛性は確保できててもティルトに対する剛性は不十分となる。メーカーの説明でも、モーメントのかかる場所では、2個直列に使用することが推奨されている。

### 5.1.2 クロスローラガイドによる直進移動機構

有限移動距離転がり機構では、支点位置の移動に伴う姿勢変化が避けられないことは先に述べた。この姿勢変化は、原理的にストローク全域にわたり徐々に進行していくものと考えられる。一方でレーザーの波長安定化に必要な移動量は、熱膨張によるレーザー共振器長の伸縮を補正することが目的なので、高々  $0.05 \text{ mm}$  程度である。これは代表的な有限移動距離転がり機構であるクロスローラガイド<sup>15)</sup>、その小型のものに対しても、最大ストロークの  $1/100$  以下である。クロスローラガイドのストローク全域での姿勢変化は、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー用直進機構に要求される性能を満足しないとしても、 $1/100$  ストロークの移動量に対する姿勢変化は十分に小さいのではないかと、ということが期待できる。さらに、有限移動距離転がり機構では、回転体のガイド間への出入りがないので、無限移動距離転がり機構のようにガイド両端で間隔を広げる必要はない。したがって、ティルトに対する高剛性を有することも期待できる。共振器長制御の直進移動機構の使用条件・必要とされる性能と、その条件で使用したときの直進移動機構の

性能を熟慮した結果、クロスローラガイドが最適なメカニズムとして浮上してきた。

クロスローラガイドの形状は移動ステージに適しており、円筒形状メカニズムへの対応は難しい。クロスローラガイドの採用に伴い、レーザー共振器構造を端板とロッドといった従来の構造から図 10 に示したような板状の部材を組み合わせた箱状筐体へと大幅に変更した。さらに、平面鏡の移動量制御と直進性保持を別機構に分離したという特徴を活かし、図 11 に示したようにリニアピエゾアクチュエータをスーパーインバーロッドに固定し、さらにスーパーインバーロッドの反対側を、他方の平面鏡面の位置で箱形筐体に固定するという構造を考案した。この構造により、共振器長はピエゾアクチュエータとスーパーインバーロッドで決定されるので、箱形筐体板材の熱膨張を考慮する必要はなくなり、アルミニウムの採用が可能となった。アルミニウムは熱膨張率が大きいので、従来レーザー共振器筐体に用いられることはなかった。しかし熱伝導率も高いので、温度勾配に起因する熱歪みは発生しにくいという優れた特徴を持つ。スーパーインバーロッドと比較するとアルミニウムの熱膨張係数は 50 倍にもなるが、熱伝導係数も 20 倍近くあるので熱歪みの影響は 3 倍以内に収まると考えた。

クロスローラガイド、アルミニウム箱形筐体、リニアピエゾアクチュエータ+スーパーインバーロッドによる共振器長の制御機構を有する新型レーザーは、平面鏡の角度変化が極めて少なく、経時変化・環境依存性の小さい安定動作を実現した。現在、日本の国家標準器として保有している 5 台のレーザー（本新型レーザー）では適切な調整を行うことにより、それぞれの間での発振波長の差が光の周波数換算で  $\pm 3 \text{ kHz}$  と、国際度量衡委員会の勧告の不確かさ  $\pm 10 \text{ kHz}$  の  $1/3$  に収まっている。また周囲温度の変化に対しても安定性が高く、 $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  という大幅な温度変動に対して

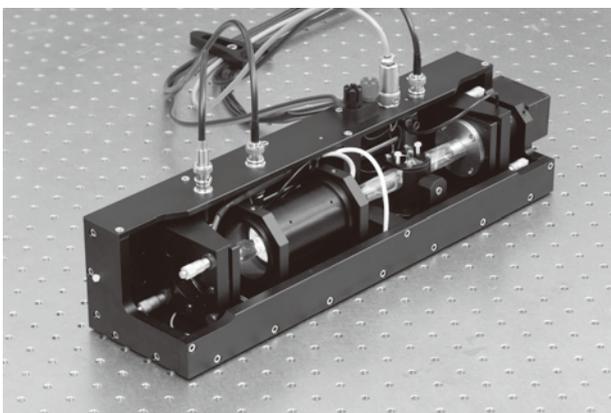


図 10 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの箱形共振器機構（新型）

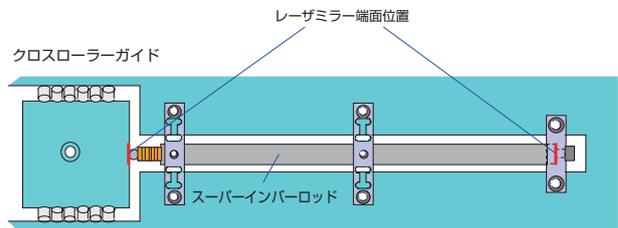


図 11 共振器長の制御機構

も、発振波長の変動は光の周波数換算で $\pm 5$  kHz（相対的には $1 \times 10^{-11}$ ）の偏差に収まるという優れた性能を有している。

## 5.2 レーザ共振器の変調機構

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、ヨウ素分子による飽和吸収信号を検出するために、発振波長に光の周波数換算で $6 \pm 0.3$  MHzの変調をかけている。この変調は、片方の平面鏡を光軸方向に正弦波で振動させることで実現する。共振器長が30 cmの場合、その振幅は $(3.81 \pm 0.19)$  nmとなる。また、先に述べたように、3次微分による制御信号を得るために第3高調波検出を行っている。もし平面鏡の振動に第3高調波が含まれると、3次微分信号に1次微分信号成分が混入し、結果として発振波長がシフトする。したがって、この平面鏡の振動は、高調波歪の極めて少ない純粋な基本波であることが求められる。さらに、位相敏感検出の感度を一定に保つため、駆動正弦波信号と振動の位相関係は変化しないことが求められる。このように、波長変調用のアクチュエータには、極めて高レベルの振幅安定性・超低歪・位相安定性が要求される。

従来型のレーザを含む多くのヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、変調にも共振器長の制御用と同じ構造を持つリング状積層ピエゾアクチュエータを用いる。従来型レーザでは、1個のリング状積層ピエゾアクチュエータを、変調・制御の両目的に兼用した。

積層構造のピエゾアクチュエータは、本来制御用（DC動作）であり、振動（AC動作）は想定されていない。特に問題となるのは、振動させたときの耐久性である。従来型レーザでは、変調のための振動が原因と考えられるピエゾ素子の接着面剥離が頻発した。ひとたび剥離が起ると修理不能で交換しなければならないが、当時使用していた米国製リング状積層ピエゾアクチュエータは、高価な上に供給が不安定であり（軍用に優先的に供給されていたため）、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを使用する上で大きな障害となっていた。

### 5.2.1 単層ピエゾ素子を用いた変調機構

剥離故障したリング状積層ピエゾアクチュエータは廃棄するしかない。あるとき、故障の状況を把握するために廃棄の前に分解を試みた。リング状積層ピエゾアクチュエータをアセトンに浸しておくと、剥離面以外の接着面も全て剥がれ容易に分解することができた。このリング状積層ピエゾアクチュエータは、両面に電極として金属が蒸着されたリング状のピエゾ素子を10枚重ねたものであることが判明した。アクチュエータのストロークは1000 Vの印加電圧に対して $10 \mu\text{m}$ であるので、素子1枚はその $1/10$ 、すなわち $1 \mu\text{m}$ である。

この分解されたアクチュエータを前にして、素子1枚を用いた単層の変調用アクチュエータの開発を思いついた。単層であれば剥離故障はない。変調に必要な振幅は先に述べたようにおよそ4 nmであり、単層素子のこの変位に相当する印加電圧は4 Vと、通常のおペンプを使用した回路で扱いやすい電圧となる。さらに剛性も大幅に増加するので動作の安定性向上が期待できる。

図12は最初に試作した変調用アクチュエータの構造である。2枚の真鍮固定リングネジの間に、リング状ピエゾ素子、アルミニウム製の平面鏡保持具、O-リングをケース内で挟んで締め付けるという単純な構造で、電圧は平面鏡保持具と固定リングの間に印加する。しかしながら、この機構をヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに組み込み、波長安定化を試みたところ、勧告された不確かさの10倍を超える大幅な波長シフトが観測された。3次微分信号のベースラインが目視でも判別できるほど傾いており、1次微分信号の混入、すなわち変調機構における3次高調波歪の著しい発生を伴うことが判明した。この構造は、静的な動作においては柔らかいO-リングが変形し、期待どおりの動作をする。しかし、振動動作では作用・反作用により、ピエゾを支えている真鍮固定リングも振動する。真鍮固定リングはネジ山で本体と接触している。通常のネジ同士の接触点は部分的であり、小さい変位に対する剛性が低く、非線形性も強いものと考えられる。ネジが直接物体を支えるような構造が歪発生の原因であると推測した。

### 5.2.2 変調機構の動的特性の改善

変調機構の動的特性を改善し高調波歪を低減するためには、機械的接触は丁寧な仕上げの平面同士として、剛性が高く安定した接触を確保することが必須である。さらに振動する平面鏡を支える保持具は、できるだけ動かないような構造とすることも重要である。図13はこの2点を考慮

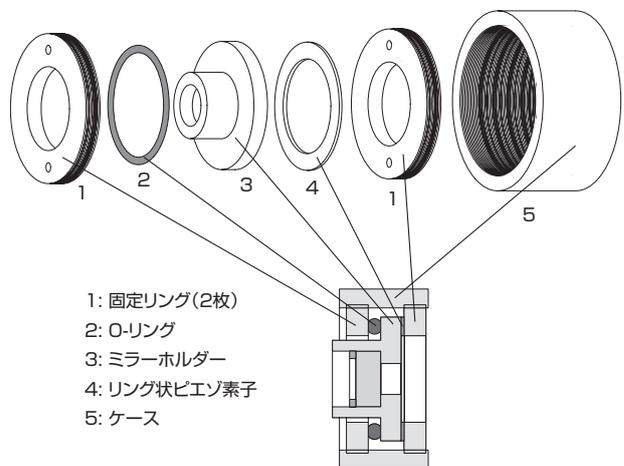


図12 変調用アクチュエータ（改良前、高調波歪が大きい）

し、高調波歪の低減と動作安定性の向上を図った変調用アクチュエータである。図12の変調用アクチュエータと大きく異なる点は、真鍮の固定台の質量である。この真鍮の固定台の質量はおよそ200gであり、平面鏡とその保持具をあわせた振動部質量4gのおよそ50倍である。この大きな質量比により、リング状ピエゾ素子が高速で伸縮しても平面鏡/平面鏡保持具のみが動き、真鍮の固定台はほとんど動かない。真鍮固定台・リング状ピエゾ素子・平面鏡保持具・平面鏡の間の接触面の仕上げには特に留意し、仕上げはとも擦り研磨を行って接触面積を増大させ、高調波歪を低減させた。さらに、組立前に真鍮固定台にリング状ピエゾ素子・平面鏡保持具を乗せる。接触面にアルコールを垂らしてから真鍮固定台を逆さにして、リング状ピエゾ素子・平面鏡保持具が貼り付いて落下しないことで、良好な平面接触を確認した。

平面鏡保持具は、リン青銅の薄肉円筒バネと真鍮丸ナットにより予圧が与えられ、リング状ピエゾ素子、真鍮固定台に密着させた。真鍮固定台とリン青銅薄肉円筒バネ・真鍮丸ナットはナイロンインシュレータにより電氣的に絶縁した。ピエゾアクチュエータの駆動電圧は、真鍮丸ナット(+)と真鍮固定台(G)間に印加した。

ナイロンインシュレータは、設計時には電氣的絶縁を目的としていたが、それ以外にも重要な働きのあることが明らかとなった。ナイロンインシュレータに替わる絶縁部品として、絶縁アルマイトコーティングしたアルミインシュレータを試用したときに、絶縁機能には問題はないが変調機構の動作が不安定になった(著しい振幅の経時変化が起きた)。原因は、平面鏡保持具の振動がリン青銅薄肉円筒バネ、非線形性の強いねじ接触を経て真鍮丸ナットに伝わり、複雑に共振したことにある。柔らかいナイロンインシュ

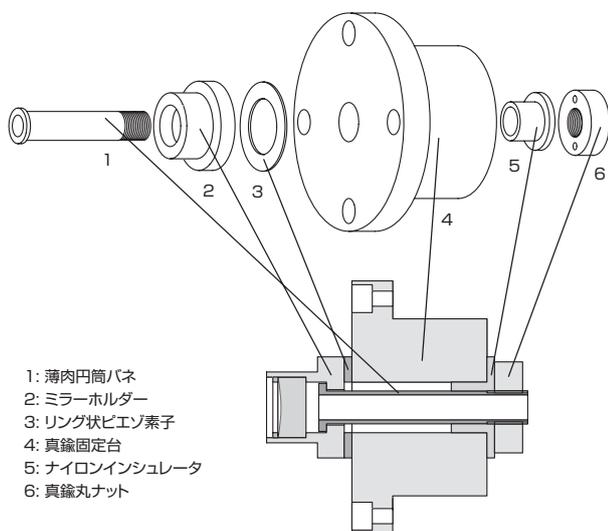


図13 変調用アクチュエータ(改良後、低高調波歪構造)

レータはダンパーとして働き、この共振を大幅に低減する重要な機能を担っていることが判明した。

### 5.3 防振機構

先に述べたように、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの安定動作を実現するためには、外部環境の振動・音響によるレーザ共振器長変動を、原子の直径(0.3 nm)以下に抑えなければならない。また、防振機構の開発の前提として、このような共振器長の微小な変動を検知・評価する手法の確立も必要である。以下に、共振器長の微小変動、および防振機構について簡潔に紹介する。

発振波長の安定化のためにレーザ出力光の強度変動を検出しているが、これを増幅してスピーカーに接続する。すると周波数 $f$ (3 kHz)の波長変調(光の周波数換算で6 MHz)がもたらす強度変化が音として聞こえる。これは波長変調による波長の変化を、レーザ波長-出力曲線 $I(\lambda)$ で強度変化に変換して音として聞いているのであるが、同様に、外部振動による共振器長変動も波長変動をもたらす、それを音として聞くことができる。音の振幅は波長変化、すなわち共振器長の変化に比例するので、外部振動による音を波長変調による音の振幅の1/10(強度では1/100、-20 dB)に抑制できれば、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの安定動作が実現できる。ハニカム構造の光学定盤上(表面は厚さ5 mmのステンレス板)にヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの金属筐体を直に置き、定盤を貨幣等で引っかく・軽くたたくなどしたときにスピーカーから聞こえる音は、ちょうど人間が耳を定盤に押し当てたときに聞こえる音と類似している。

防振ゴム等の性能評価を行うために、厚さ1 cmのアルミニウム板(レーザ筐体の底板と同等)を用意した。この板を定盤上に置き、耳を押し当てながら定盤を引っかく・軽くたたくなどしたときの音の聞こえを確認した。次に、評価対象の防振ゴムを金属板の下に置き、音がどの程度低減したかを確認した。

新型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの箱形筐体の底面には、この簡単な試験で音の遮蔽に優れた効果を示した直径14 mmの半球型ポリウレタン製のゴム足を3個配置した(図14)。筐体に直置にすると定盤上で光軸調整等の操作を行うと振動の影響で波長安定化のロックが外れ

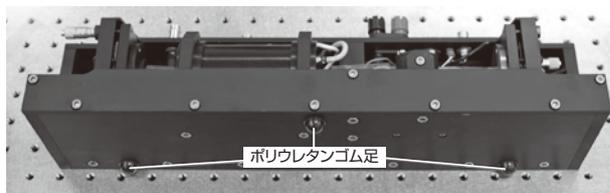


図14 サブナノメートル防振機構(ゴム足)

ていたが、ゴム足の防振効果は大きく、定盤上での通常の操作が波長安定化に及ぼす影響はほとんど無くなった。

## 6 開発した国家標準器の性能とその活用

新型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、産総研で日本の国家標準として、また波長標準の供給を行う校正事業者でその標準器として用いられている。このレーザーは、今まで紹介したような独自の新しい機構を有するものであるが、その最大の特徴は製品としてではなく、組立キットとして供給される点にある。最初に述べたように、ヨウ素分子吸収線の量子力学的性質を利用した標準において重要なのは、その性質から標準（波長）を取り出す技術である。この考え方を実践するために、筆者は新しいヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの詳細な仕様・設計図をまとめ、計量標準モノグラフとして刊行した<sup>6)</sup>。このモノグラフに基づけば、国際度量衡委員会の勧告を満足するレーザーの製作が可能である。しかし、汎用品がほとんどとはいえ、レーザー製作に必要な部品類を洩れなく調達するのは大きな負担である。そこで、必要な部品類をとりまとめてレーザー組立キットとして希望する事業者に有償頒布した。キットであるから、各部品類に関して仕様を満足するかは保証の範囲となるが、最終的な標準器としての性能（絶対波長やその不確かさ）は、所有者の技術に依存する。必要に応じて、組立の技術指導は行うが、キットで頒布することにより、レーザーヘッド・制御系（制御系はほぼ完成したかたちで供給される）一式でおよそ200万円という、国家標準器としては破格の低価格を実現した。

このような、波長標準を技術として伝える試みは、海外に対しても進めている。産総研ではタイ王国の国立標準研究所（NIMT）設立援助のプロジェクトを進めてきた。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーキットの1号機はこのプロジェクトを通して、NIMTに収められたものである。現在、NIMTを拠点として、ASEAN諸国の国立標準研究所に対して同様の技術供与を行うことを計画している。

本レーザーは国際比較にも用いたが、国際度量衡委員会の勧告に従った標準器として今までのレーザーにない優れた特徴を有することも分かってきた。前章の国際度量衡委員会が勧告する条件に、ヨウ素セルの管壁の温度を $25 \pm 5$ ℃に保つという規定がある。この温度は周囲温度とほぼ同じとなるので、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーも $25 \pm 5$ ℃の温度範囲で動作できるはずである。新しいレーザーはこの条件を満たす。 $25 \pm 5$ ℃の範囲で波長安定化を継続可能であり、波長変動も国際度量衡委員会勧告の不確かさの半分以下（光の周波数換算で5 kHz以下）という良好な結果であった。一方、従来型レーザーを含めた多くのレー

ザーは、国際度量衡委員会が勧告する不確かさを満足するためには、周囲温度のより厳密な安定化を必要とする。多くのレーザーで用いられているように、リング状積層ピエゾアクチュエータの伸縮に伴う平面鏡の傾き角の変化は、発振波長の変動要因となる。傾き角の変化を防ぐためには、レーザー本体への超低膨張材料の採用に加え、厳密な周囲温度安定化を行い、アクチュエータの伸縮を最小限に留めることが必要となる。以前、各国の国家標準であるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを1箇所に集めて国際比較を行ったことがある。その最中にレーザーを設置した部屋の温度が、空調装置の不調からたまたま2℃程度変動したことがあった。そのとき多くのレーザーで安定化のロックが外れて動作不能に陥ったのに対し、新型レーザーでは安定化のロックが外れることなく動作し続け、その性能の高さの一端を証明することになった。

## 7 おわりに

筆者は最初に、ユーザーとしてヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーと関わるようになった。本来の研究テーマであった「精密干渉測定装置の開発」を円滑に進める上で、波長の基準光源であるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの使い勝手と信頼性を向上させることは潜在的な悲願であった。ニュージーランドの可搬型レーザーを見たことでその悲願が顕在化し、研究を開始したことは先に述べた。しかし、もしユーザーとしての立場ではなく、従来型レーザーの開発者としての立場であったならば、おそらく「国家標準器なのだからそこまで使い勝手にこだわる必要はない。それよりも、より精度の高い次世代標準の開発こそ重要だ」と判断していたと思う。

研究の初期に、汎用部品を従来にない特殊な使用方法で活用することにより、特殊な機能を実現するという研究の方向性を決定づけたのは、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの改良が正規のテーマではなかったことが最大の理由と考える。研究の初期段階において、極めて低予算であったこと、研究の期限と成果に対する義務が課せられていなかったことから、ある意味大胆な試みを行えたことが、研究の方向性を決定づけた。もし、最初から正規のテーマとして研究計画を作成し、予算を要求したのであれば、特殊部品や特殊材料を常識的に使用するという無難な選択を行っていたことは間違いない。

開発したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを、組立キットとして有償頒布することにより、破格の低価格を実現したことは前章で述べた。しかし、組立キットによる本当の意義は、ユーザーのモチベーションの向上にある。レーザーの組立は、研修という形で行っているが、多くの参加者は

時間を忘れて作業に没頭した。筆者は、研修を終えた参加者が、自ら組立調整を行ったヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを持ち帰る際に「このレーザは単なるモノであって標準ではありません。標準とは、あなたの身につけた技術と、標準を維持するという意志に他なりません」と伝えている。

**注1)** 現在の長さの国際単位はメートルであり、光が真空中を1/299 792 458秒間に進む距離を1メートルとしている。

**注2)** 現在の長さの一次標準としては、ヨウ素分子の特定の吸収線に発振周波数（波長）を安定化したヘリウムネオンレーザが多用されており、その周波数 $\nu=473\ 612\ 353\ 604\ \text{kHz}$ が勧告されている。波長 $\lambda$ は光速 $c$  (299 792 458 m/s) を $\nu$ で割ることにより算出される。 $\lambda = c/\nu$ 。

## 参考文献

- [1] R. B. Hurst, N. Brown, V. D. Dandawate, G. R. Hanes, J. Helmcke, H. P. Layer, L. Zhongyou, W. R. C. Rowley, T. Sakurai and M. S. Chung: International intercomparison of iodine-stabilized helium-neon lasers at 633 nm involving ten standards laboratories, *Metrologia*, 24 (1), 39-44 (1987).
- [2] T. J. Quinn: Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001), *Metrologia*, 40 (2), 103-133 (2003).
- [3] 石川 純: 633 nmレーザ波長校正と不確かさ, *産総研計量標準報告*, 4 (1), 71-77 (2005).
- [4] ボールスプラインシリーズ(カタログ), THK株式会社, 東京 (2008).  
[https://tech.thk.com/upload/catalog\\_claim/pdf/381\\_ball spline.pdf](https://tech.thk.com/upload/catalog_claim/pdf/381_ball spline.pdf)
- [5] *THK総合カタログ*, A8,B8, THK株式会社, 東京 (2008).
- [6] 石川 純: CIPM勧告準拠633nmヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの設計と製作, *産総研計量標準モノグラフ*, 2 (2003).

## 執筆者略歴

石川 純 (いしかわ じゅん)

1982年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。1983年通商産業省工業技術院計量研究所入所。精密干渉計開発の研究に従事し、波長基準光源としてのヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに接する。2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門。2006年デジタルものづくり研究センターに異動、以後製造現場における熟練技能可視化の研究に携わる。現在、同センター計測分析技術研究チーム長。2006年市村学術賞（(財)新技術開発財団）。2007年文部科学大臣表彰。



## 査読者との議論

### 議論1 研究目標とシナリオの追記

コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

シンセシオロジー誌としては「研究の目標」と「目標の達成のためのシナリオ」を追加して書いていただきたく思います。

回答 (石川 純)

ご指摘のとおりと考え、「研究の目標」と「目標の達成のためのシ

ナリオ」について新しい章を追加・記載しました。ただ、本研究は当初シナリオ（計画）なしに開始したという経緯があり、これに関しては事実に沿って当時の状況を率直に記載しました。

### 議論2 文献の「産総研計量標準モノグラフ」の活用

質問・コメント (小野 晃)

文献6は本技術の普及という意味では大変重要なものと思います。とかくオリジナルな技術のさわりだけを研究論文に記載しておしましとする傾向が強い中で、機器を再現的に製作するための必要かつ十分な情報をすべて開示するということは、今までなかったように思います。文献6を書くことになった著者の動機と、その活用方法はどのようなものでしょうか。

回答 (石川 純)

人工物であるメートル原器とは異なり、ヨウ素分子の量子力学的性質を利用するレーザ波長標準において、その本質は、量子力学的性質から光波長を取り出すプロセスの技術に存在します。したがって、標準の維持・継承とは技術の維持・継承に他なりません。産総研計量標準モノグラフは、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザに関する技術の維持・継承を目的に執筆しました。本論文においても、上記の考え方を反映するように改訂しました。

### 議論3 標準器の質量と大きさ

質問 (小野 晃)

国家標準器を航空機内に持ち込んで移送できるということは、国際比較をスムーズに行うために極めて有効と思いますが、開発した新型レーザの質量、大きさはどの程度ですか。これは航空機の客室に持ち込める重さ、大きさとして十分なものでしょうか。

回答 (石川 純)

レーザ本体は、長さ:420 mm、幅:105 mm、高さ:95 mm、重量:5.3 kgです。制御装置は、奥行:400 mm、幅:420mm、高さ:100 mm、重量:7.5 kgです。

航空機に搭乗する場合は、レーザ本体は手荷物としてキャビンに持ち込み、制御装置は預け荷物としました。小型軽量化のみに注力すれば、より小さく軽いレーザは実現できますが、製造・組立・調整等の容易性に重点を置き、この大きさに留めました。

現時点における航空機内持ち込み最大の障害は、9.11以降大幅に強化された機内持ち込みの規制です。波長安定化レーザという一般になじみのない特殊機器のため、その説明には大変苦勞します。

### 議論4 発振波長の不確かさ

質問 (小野 晃)

新型レーザの発振波長の不確かさはどの程度と評価していますか。それは国際度量衡委員会が勧告した不確かさの値よりも小さいのではないかと想像しますが、どうでしょうか。可能であれば不確かさの要因とともに、バジェット表で示していただけませんか。

回答 (石川 純)

表 a に国際度量衡委員会が勧告したヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ不確かさのバジェット表を示します。筆者は、表に示された不確かさのうち、共振器内一方向光強度に起因する不確かさ見積は大きすぎると考えています。しかしこれは、制御機構の直進性に問題のある従来のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザでは、分離して評価することも難しかったガスレンズ効果・ガスプリズム効果の影響を含めたものであると筆者は考えています。国際度量衡局で長年ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの研究に携わってきた研究者も、そのことを認めていました。

新型レーザは制御機構の直進性が非常に優れているため、ガスレンズ効果・ガスプリズム効果の分離が可能であり、不確かさバジェットは表 b のようになります。ガスレンズ効果・ガスプリズム効果による

不確かさを軽減するためには、レーザチューブ放電管の幾何形状を厳密に製作する必要がある、そのようなレーザチューブは現実的には入手不可能です。ヨウ素純度の影響に関しては、ヨウ素セル充填プロセスの改良により、ビート周波数計測不確かさについても計測技術の改良により小さくすることができました。

表a 国際度量衡委員会が勧告するヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ不確かさ

パラメータ	推奨値	許容範囲	比例係数	不確かさ (kHz)
ヨウ素セル関連				
壁面温度	25 °C	5 °C	0.5 kHz/°C	2.5
コールドフィンガー温度	15 °C	0.2°C	-15 kHz/°C	3.0
ヨウ素純度の影響				5.0
周波数変調深さ	6 MHz	0.3 MHz	-10 kHz/MHz	3.0
共振器内一方向光強度	10 mW	5 mW	<1.0 kHz/mW	5.0
ビート周波数計測不確かさ				5.0
合成標準不確かさ				10.0

表b 新型ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ不確かさ

パラメータ	推奨値	許容範囲	比例係数	不確かさ (kHz)
ヨウ素セル関連				
壁面温度	23 °C	2 °C	0.5 kHz/°C	1.0
コールドフィンガー温度	15 °C	0.1°C	-15 kHz/°C	1.5
ヨウ素純度の影響				2.0
周波数変調深さ	6 MHz	0.2MHz	-10 kHz/MHz	2.0
共振器内一方向光強度	10 mW	2 mW	<1.0 kHz/mW	2.0
ビート周波数計測不確かさ				0.0
ガスレンズ効果・ガスプリズム効果				5.0
合成標準不確かさ				6.3

### 議論5 校正事業者が持っている標準器の精度

質問（小野 晃）

国内数社の校正事業者がそれぞれの標準器としてヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザを保有しているとのことですが、それらは定期的な校正のために産総研に持ち込まれると思います。そのときに産総研の国家標準器と波長（周波数）を比較して、差はどの程度ありましたか。それは新型レーザに対して評価した不確かさの範囲内に入っていましたか、あるいは中にはそれを超えるようなものもありましたか。

回答（石川 純）

新型レーザは全て産総研で、筆者の技術指導のもと組立調整を行いました。したがって、出荷時には特定標準器との周波数差は5 kHz 以下を確認しています。また、光学窓の汚れなどにより発振が止まった場合を除いて、ほぼ初期性能を維持していることを再校正時に確認しています。

### 議論6 海外の研究者のその後の展開

質問（小野 晃）

ニュージーランドの研究者は著者に対してアイデアを顕在化させる貴重なきっかけを与えてくれたと思います。その研究者はその後どのような研究の展開をたどったのでしょうか。差し支えない範囲でお答えいただければと思います。

回答（石川 純）

その後、ニュージーランドの行政改革により多くの研究所が縮小・統廃合され、その際に Dr. Hurst も民間企業に転出したと後任の方から聞きました。ニュージーランドのヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザも、現在はアメリカの製品を利用して Dr. Hurst が国際比較に用いたレーザは使われることなく、研究室の片隅に置かれているという少し寂しい話でした。

### 議論7 海外の国立標準研究所が行った製品化研究の事例

質問・コメント（小野 晃）

著者が今回行った国家標準器の汎用化の研究は製品化研究と解釈できることはすでに述べたところです。産総研の計量標準グループの中でも製品化を明確に意識して研究に取り組む例は従来あまり多くなかったように思いますが、校正事業者を巻き込んだトレーサビリティの中流域においては「遠隔校正」などですでにいくつか研究が行われており、製品化研究の重要性はより強く認識されているように見えます。

世界的に見て、著者の知る限りで結構ですので、ニュージーランド以外に今回のような製品化研究を国立標準研究所が行った事例はあるのでしょうか。

回答（石川 純）

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザ製品化の試みはごく初期の段階（1980 年頃）から行われていましたが、研究所の研究開発品を基にして、メーカーではそのままコピーし製品化するというものでした。その結果、価格、大きさ、操作性に問題があり、製品としての完成度は高くありませんでした。ニュージーランドのレーザは、研究者が国際比較に使用するという目的で、ユーザーの立場で開発したものであり、当時としては突出した携行性・操作性を有するものでした。実際にニュージーランドのレーザが製品化されることはありませんでしたが、ユーザーの立場で汎用化の研究を進めるというプロセスは、製品化を成功させるために不可欠であると思います。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザといったような特定目的の機器について、ユーザーの立場での汎用化研究を進めた例はあまり知りませんが、より一般的な機器類（ミラーホルダー等）では、国立標準研究所の開発品を基に製品化を実現し、従来のメーカー製品を超える優れた性能を有するものが存在します。