

# 重力波研究における超狭線幅レーザーと 超高品質光学素子

植田 憲一

## Ultra-Stabilized Quality Optics for Gravitation Wave Detection

Ken-ichi UEDA

Development of an ultra-stabilized solid state laser and ultra-high quality optics have been developed for the gravitational wave detector. We developed a stabilized laser with a linewidth of less than 193 mHz. The ultra-stabilized laser was a powerful tool to measure the optical parameters of a high finesse cavity and mirrors. We measured reflectance, transmission, scattering and absorption of optical mirrors coated by ion beam sputtering method. Optical test facility developed in our laboratory produced a lot of useful data for optical engineers. We developed ultra-low loss mirror with 1.5 ppm loss and high reflectance of 99.9816%. The transmission efficiency of reference cavity was measured to be 97.69%. The radius of curvature of the concave mirror is determined by measuring the free spectral range and the transverse-mode range with the frequency response functions.

**Key words:** stabilized laser, ultra-high quality optics, high finesse cavity, radius of curvature, free spectral range, transverse mode range

Maiman によるルビーレーザーの発振から 50 年、レーザーは科学研究や産業にとってなくてはならぬものになった。レーザーの出現以前は、狭帯域の光を作ろうとすれば、水銀灯などの原子スペクトル線を狭いスリットをもった分光器で分けるしかなかった。レーザーは誘導放出効果により、狭帯域にエネルギーを集中させるすぐれた単色光源である。本稿が話題とする超狭線幅レーザーとは、スペクトル線幅がヘルツ以下にまで狭窄化されたレーザーを指し、重力波天文学などのために開発されてきたものである。本稿では、単一モード、単一周波数を追求した超狭線幅レーザーの原理と、その歴史などを紹介する。最初にレーザーの線幅について考察し、その後、その基準となる参照共振器と超高品質ミラーについて述べ、最後にわが国での超高品質ミラーの開発経緯について報告する。

### 1. レーザー線幅

単色光とは 1 つの周波数成分しかもたない光であり、レーザー光はデルタ関数のように無限に狭い線幅をもって

いると考えられるかもしれない。しかし、単色光の代表のようにみられる He-Ne レーザーでも、その線幅は数 MHz もある。そもそもレーザー光の線幅はどこから発生するのか考察してみよう。

光を発生するのは原子である。原子は 1 回の光学遷移で 1 個の光子を放出する。エネルギー準位にはある程度の幅があるとしても、実際に原子が放出した光そのものは、エネルギーや波長が定まった光でなければならない。実際、極微弱光を分光していけば、分光器の検出装置、乾版、フィルム、CCD のような二次元検出器上には、図 1 のように点状の検出点が観測され、遷移確率に対応したスペクトルが直接観測されることはない。実際に放出された光のスペクトルを個別の光子ごとにみれば、完全な単色のはずである。ただし、自然放出過程で次々と放出される光子群は、全体として量子力学的な確率に支配されているので、集合としての光子集団のスペクトルには一定の幅が観測される。

レーザーによる光発生は、単純な自然放出光とは異なる

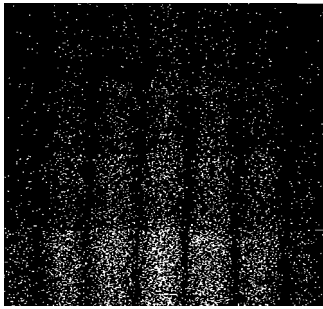


図1 ダブルスリット実験における光子干渉データ。光子数の増加にしたがい、徐々に干渉縞が見えてくる。

り、レーザー共振器がモード選択を行っていることを忘れてはならない。レーザー共振器は、レーザー共振器内に定在波が形成できるモードを選択し、共振器外を光伝播できるモードとしてレーザー光を出力する。超短光共振器やフォトニック結晶による自然放出光制御にみられるように、光の発生と伝播は不可分で、伝播できない光は発生できない。すなわち、光のモード制御というのは、光の発生にも深く関係している。

## 2. レーザー周波数安定化の歴史

レーザーが発明された直後から、レーザーの特長である狭線幅レーザーの研究は活発に行われた。1962年にはすでに He-Ne レーザーによってスペクトルのホールバーニング効果が観測され、ドップラー広がりを除く狭帯域レーザー光の発生が可能なが示された<sup>1)</sup>。しかし、自然放出光の周波数雑音 (FM 雑音) の量子限界は Schawlow-Townes Limit で決められている<sup>2)</sup>。短時間安定度を得るためには、図2のように光共振器を周波数弁別器として周波数雑音を強度信号に変換し、レーザー発振器にフィードバックして安定化させる必要がある。高フィネス共振器の狭帯域透過光を使って、Helmcke らは色素レーザーを

1.8 kHz まで安定化した<sup>3)</sup>。1983年に Drever らは、マイクロ波領域で Pound が開発した方式を光周波数に拡張して Pound-Drever-Hall 法とよばれる方式を開発し、今日のレーザー周波数技術が完成した<sup>4)</sup>。この方式では、高周波変調したレーザー光の高フィネス共振器からの反射光を電子回路で復調し、共振器の共鳴周波数からのずれを検出する。強い反射信号を基準信号として使うために、ショット雑音限界が低下し、従来法に比べて高いレベルの周波数安定化が可能となった。高フィネス共振器による光の長時間積分と超高速エレクトロニクス、機械、音響、電気光学効果を応用した結果、能動的にレーザー光の周波数制御が可能になったのである。Pound-Drever-Hall 法における FM 雑音限界は

$$\delta\nu(f) = \frac{\pi c R \sqrt{e} \sqrt{[\eta_R J_0^2(m) 2 J_1^2(m)] M + (1-M)}}{8 L \mathcal{F}^2 T M J_0(m) J_1(m) \sqrt{I_0}} \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{\Delta\nu_c}\right)^2}$$

と表現される<sup>5,6)</sup>。ここで  $\delta\nu(f)$  は FM 雑音、 $c$  は光速、 $L$  は参照共振器の長さ、 $\mathcal{F}$  はフィネス、 $R$  と  $T$  はミラーの反射率と透過率、 $M$  は TEM<sub>00</sub> モードに対するモード整合比、 $m$  は変調度、 $J_0, J_1$  はベッセル関数、 $f$  はフーリエ周波数、 $\eta_R$  は共鳴周波数と反射効率、 $I_0$  は検知器の光電流である。狭帯域レーザーの限界はショット雑音で決まるので、狭帯域化のためには高出力化が必要となる。

重力波検出に用いられる LD 励起 Nd:YAG レーザーの安定化は、1990 年代にさかんに研究がなされた。Shoemaker らはフィネス 800 のファブリー・ペロー (FP) 共振器を使って安定化を行い、 $3 \text{ mHz}/\sqrt{\text{Hz}}$  というショット雑音限界の相対的 FM 雑音を達成した<sup>5)</sup>。その後、われわれ (Uehara & Ueda) は日本の重力波検出研究の中で、高フィネス共振器 ( $\mathcal{F}=103,000$ ) を開発し、 $0.37 \text{ mHz}/\sqrt{\text{Hz}}$  にまで安定化した<sup>7)</sup>。

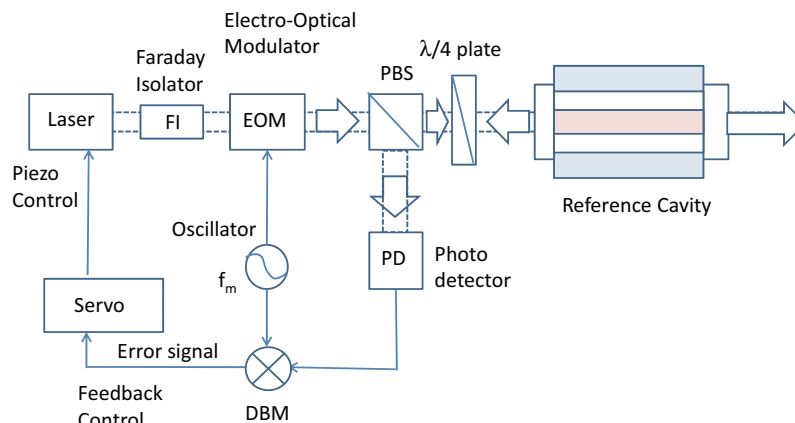


図2 高安定光共振器を使った周波数安定化レーザー。

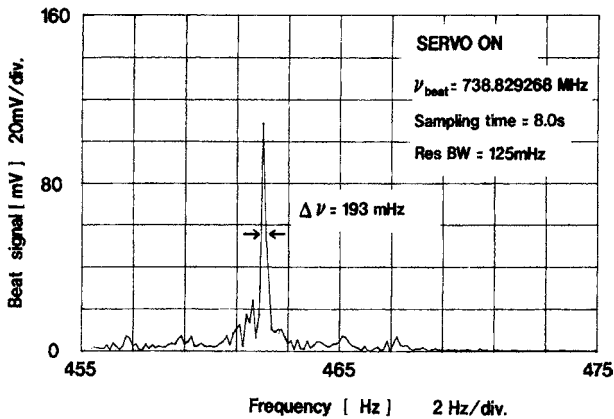


図3 測定された193 mHz ビート線幅。

同一の光共振器に安定化した2台の安定化レーザーをビート計測して、実際の周波数安定度を計測する研究では、He-NeレーザーについてSalomonらが計測した50 mHzという報告がある<sup>8)</sup>。重力波検出研究の中で急速な進歩が果たされて、スタンフォード大学のDayらが330 mHzを報告するようになり<sup>9)</sup>、その後、われわれは193 mHzまでの安定化を達成した(図3)<sup>6)</sup>。この結果は、Shawlow-Townes Limit 243 mHzを超える狭帯域レーザー発振を実現した最初の例となった。その後、巨大重力波アンテナが開発された結果、周波数安定化は巨大レーザー干渉計で限界が決まる技術となり、さらなる発展を遂げている。

### 3. 超高品質ミラーの導入と計測法の確立

上記のように、狭帯域レーザー光の発生の決め手となっているのは、安定なレーザー発振器と基準となる参照共振器である。安定なレーザー発振器であるNPROレーザーは、Kaneによって開発されたnon planar ring oscillator型YAGレーザーである<sup>10)</sup>。超高品質ミラーの開発はわが国の光学技術にとっても重要な課題であったので、本稿を通じて紹介しよう。重力波アンテナに必要なミラーは、損失がppmクラスでなければならない。このような超高品質ミラーは米国ではジャイロ品質ミラーとよばれ、ミサイル誘導装置の中核技術である。門外不出の機密技術で、それらを製作可能な企業は国防省に登録され、言及することすら禁止されていた。

1991年、わが国の重力波研究がスタートした。重点領域研究の開始である。筆者は高安定レーザーと光学素子の計画研究代表者として、超高品質ミラーの重要性をよく認識していた。わが国の光学メーカーは優れた技術を持っているが、この水準のミラーの製作経験がないことから、当初は米国企業に試作を依頼することにした。もちろん、国防省に登録されている企業に委託することはできない。米

国の研究者の協力を得て、全米の優れた光学技術をもっている企業をチェックした結果、当時はPMS、現在はREOとして知られる光学メーカーに目をつけ、共同研究を実行した。PMS社(Particle Measurement Systems)はクリーンルーム内の粒子計測器の感度を高めるために、He-Neレーザーの短波長化を進めていた。黄色(594 nm)や緑色(543.5 nm)のHe-Neレーザーを発振させるには、高反射率、低損失ミラーの開発が不可欠で、われわれが目指す重力波天文学用ミラーと多くの共通点をもっていた。そして、何よりもPMS社には超平滑研磨のD. Willis、IBSコーティングのR. Larezariというすぐれた専門家がいることがわかったからである。1年半かけて、Nd:YAGレーザー用の超高品質ミラーの開発に成功した。それらを使って、前述の周波数安定化実験に成功し、フィネス10万以上の参照共振器を作りあげた。表面粗さは0.7 Årms、IBS(ion beam sputtering)コーティングによるすばらしいミラーであった。わが国の重力波アンテナの建設には、直径10 cmの大型ミラーの開発が必要であった。それらを日本の光学メーカーに公開し、日本でもこのような高品質ミラーを製作できるようにすることを了承してもらい、高性能光学薄膜研究会を組織した。PMS社がこのような契約を許可してくれたのは、純粋科学研究である重力波天文学の価値観に共鳴してくれたからで、わが国の重力波研究と光学会にとって、非常に幸運であった。

もちろん、ミラーを破壊、分析するようなことは禁止である。電通大に設置した図4のOTF(optical test facility)(<1 Hz安定化レーザー)で計測したデータを公開し、ミラーの特性を明示した試料を提供して、わが国の光学メーカーの開発を促した。極端に厳しい要求に、できるかどうか半信半疑だったメーカーも、実際にすぐれた特性のミラーを目の当たりにし、その測定方法とデータを見せられた状況となって、本気の開発に取り組んでくれるようになった。技術開発はできると信じた時点から、新しい質をもたらした。

改めて、超高品質ミラーの開発におけるパラメーターの測定と進歩を紹介しよう。通常、ミラーのパラメーターとして、反射率 $R$ 、透過率 $T$ 、損失 $A$ の測定が必要となる。損失 $A$ には吸収、散乱の両方が含まれている。FP共振器では $\mathcal{F} = \pi\sqrt{R}/(1-R) = FSR/\Delta\nu$ の関係があるので、共振器のFSR(free spectral range)と共振線幅 $\Delta\nu$ の計測からフィネス $\mathcal{F}$ を計測することが普通である。重力波計測では参照共振器の透過率を100%に近づける必要がある。共振器透過率は $\eta_T = \frac{P_T}{P_i} = \left(\frac{T}{T+A}\right)^2 = \left(\frac{1}{1+A/T}\right)^2$ であるので、

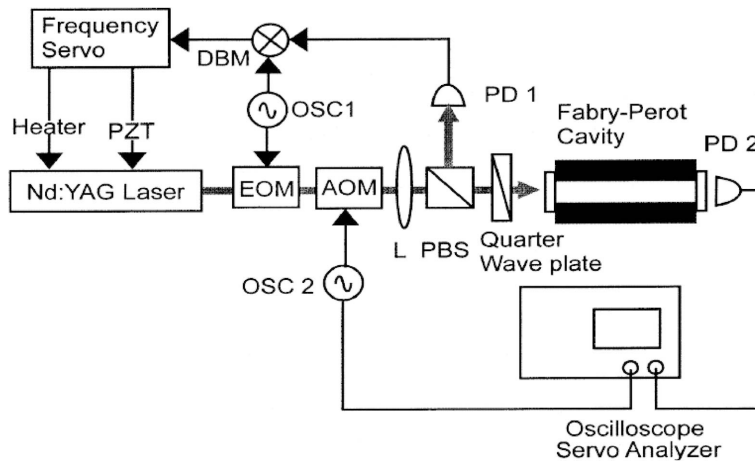


図4 光学ミラーの特性測定装置.

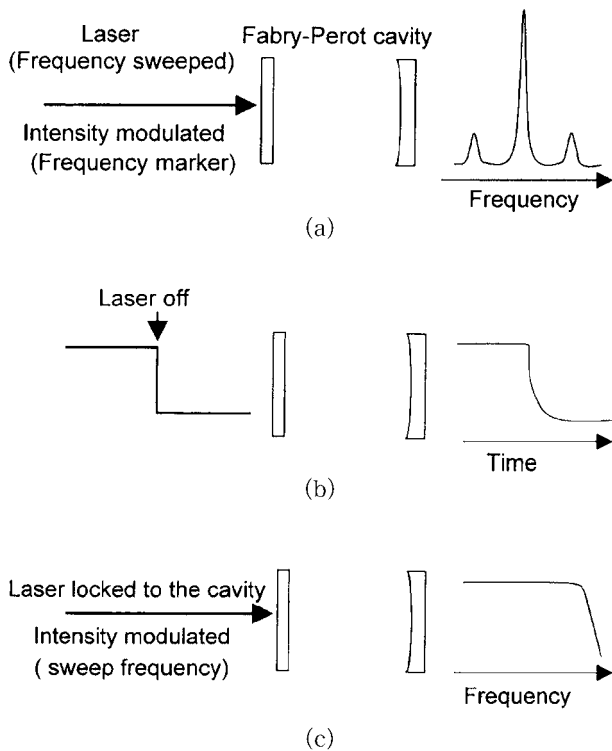


図5 光共振器の特性測定法. (a) AM サイドバンド法, (b) リングダウン計測法, (c) 伝達関数測定法.

損失  $A$  を極限まで減少させ、透過・損失比  $T/A$  を大きくすることが重要になる。

フィネス計測には、図5に示す AM サイドバンド測定法、リングダウン計測法と伝達関数測定法の3種類を用いた。AM サイドバンド法では、レーザー光に強度変調をかけ、同時にレーザー光周波数を掃引して共振線幅を測定する。リングダウン計測では、共振器内光子寿命  $\tau_c$  を測定して、 $\Delta\nu = \frac{1}{2\pi\tau_c}$  から共振線幅を求める。一方、レーザー光を光共振器に安定化した状態で、レーザー光に強度変調

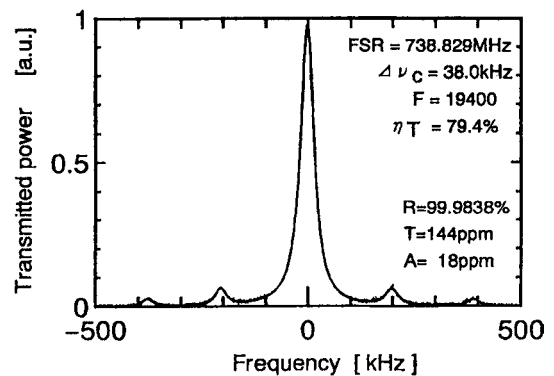


図6 最初に計測された PMS 社製高反射率ミラー.

をかけて共振器出力信号を FFT サーボアナライザーで計測すると、共振器の伝達関数を計測できる。変調周波数  $f_m$  に対する伝達係数  $|H(\nu)| = \eta_T \frac{1}{\sqrt{1+(f_m/\Delta f_c)^2}}$  から共振器線幅  $\Delta\nu_c = \Delta f_c/2$  が計測できる。伝達関数測定法は実際に安定化している条件で共振器特性が取れる点で優れている。

リングダウン計測法が有効なのは、反射率が 99.99% 以上、共振器内光子寿命がマイクロ秒以上になった場合である。AOM 素子で高速スイッチングを行いながら、繰り返し計測を行い、測定精度を高めることができる。

実際の測定例を示しながら、開発経過を説明する。図6は最初に計測された PMS 社製高反射率ミラーである<sup>6)</sup>。ほぼ 99.99% の反射率をもち、フィネス 19400 を達成した。

何よりも注目すべき点は、透過・損失比が、 $\frac{T}{A} = \frac{144 \text{ ppm}}{18 \text{ ppm}} = 8$ 、透過率 79.4% という高透過特性である。1992 年当時、反射率だけでいえば、国産の電子ビーム蒸着による誘電体多層膜ミラーでも 99.97% が計測された。しかし、FP 共振器としての透過率はわずか 0.14% という結果で、散乱、吸収の少ないミラーを作るのがいかに難しいかを実感

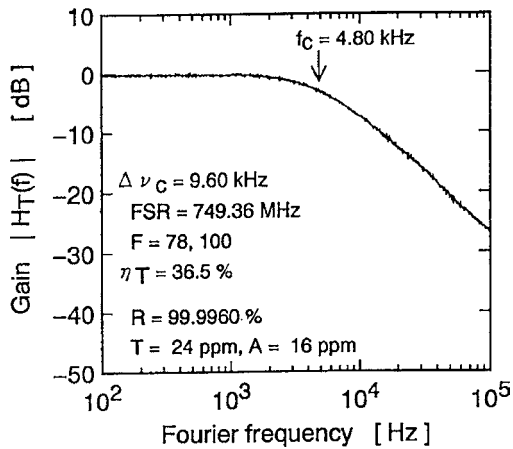


図7 PMS社製99.996%反射ミラーの伝達関数計測.

したのであった。

伝達関数測定法で測定した例を図7に示した。このミラーでは、ミラー損失は16 ppmとさらに少ないにもかかわらず、反射率が99.996%と高いために、FP共振器の透過率は36.5%と低下した<sup>11)</sup>。高い反射率をもったミラーは高いフィネスの共振器を実現するが、共振器の透過率は透過・損失比  $T/A$  のみで決まる。散乱、吸収損失は基板の表面粗さ、誘電体多層膜の材料、成膜技術で決まっているので、反射率に依存せず一定であり、設計上で制御することができない。

これらの計測と並行して、高性能光学薄膜研究会を中核に、わが国における超高品質ミラーの開発が始められた。超高品質ミラーの開発には、超平滑面の研磨技術と超高品質誘電体多層膜の成膜技術の両面における技術革新が必要であった。国立天文台やわが国の光学メーカーが導入、開発したIBSコーティング装置を用いて、実際に高品質ミラーを作成、評価することを繰り返し、研究は進められた。具体的な目標が与えられ、OTFによる定量的技術評価が可能となったことで、わが国の技術は急速に進歩し、数年後には後述するような世界最高水準のミラー開発に成功したのである。

#### 4. 散乱、吸収損失の分離と面分布の計測

わが国の光学メーカーが作成した超高品質ミラーを分析し、その技術改良の方向を示すには、損失原因の特定が必要となる。性能を上げるには、基板の表面粗さ、光学薄膜内の欠陥、吸収、散乱要素、または膜内結晶化の影響の有無を特定しなければならない。解析のためには、これまで損失として一体化していた散乱損失と吸収損失を分離計測することが必要となる。図8のように光共振器内に2つの積分球を挿入し、両方のミラーの散乱光を測定した<sup>12)</sup>。

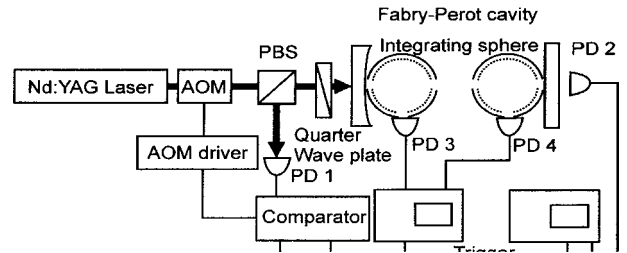


図8 積分球による散乱損失測定と二次元反射、透過、散乱計測.

高フィネス特性のため入力パワーと同水準の強い散乱光計測が可能となり、高精度の散乱損失が計測できる。重力波アンテナに必要な大型ミラーの場合、面内の光学特性の均一性を測定する必要がある。そのために、ミラーを0.5 mm間隔で移動させ、リングダウ計測法によって、各地点の反射率、透過率、散乱損失の面内分布を計測して二次元マップを作成した。残余の損失成分は光学薄膜の吸収損失と評価できる。測定した結果では、反射率分布と散乱分布が強い逆相関の関係をもち、反射率を低下させている原因が膜内および基板表面の散乱であると解析されるなど、品質改良に役立った。

#### 5. 高次モードを用いた曲率半径計測

先述のように、超高安定化レーザーと超高品質光共振器の組み合わせは全く新しい光学測定を必要とし、また、それから新しい知識を得ることになった。具体的な例を示そう。

光共振器には、縦モード間隔を示すFSRと同時に、横モード間隔TMRがある。

平面・球面共振器のFSRとTMRは、共振器長  $L$  と球面鏡の曲率半径で表現できる<sup>13)</sup>。

$$TMR = \gamma(r, L) FSR, \quad FSR = \frac{c}{2L}$$

$$\gamma(r, L) = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{L}{r} \right)^{1/2}$$

の関係から、FSR、TMRの測定から球面鏡の曲率半径  $r$  を求めることができる。

実際にTMRを測定した例を図9に示す<sup>14)</sup>。完全球面ミラーならば縮退している  $TEM_{11}$ ,  $TEM_{02}$ ,  $TEM_{20}$  モードの共振周波数が分裂している。これはミラーが完全軸対象ではなく、非対称な曲率半径を計測した結果となる。さらに計測の結果をまとめると表1となり、ミラーの曲率半径はモードごとに異なることが判明した。TMR測定はミラーの曲率半径を光のモードによって直接測定しており、光のモードがもっている波面と最も整合する曲率半径を示している。光のモードは各モードに固有のモード体積をもって

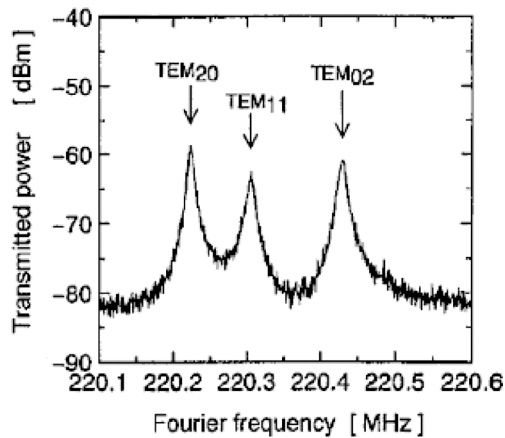


図9 TMR測定. モード縮退が解けている.

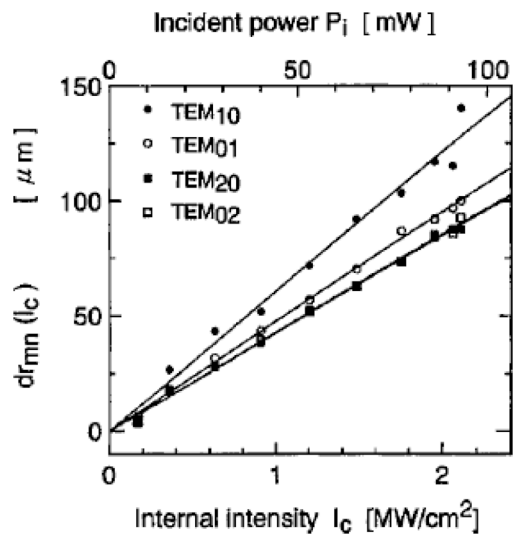


図10 曲率半径のレーザーパワー依存性.

表1 TMR計測によるモード別曲率半径.

TEM <sub>mn</sub> mode	$f_{mn} = (m+n)$ TMR (MHz)	$R_{mn}$ (mm)
10	$110.1017 \pm f_c$	$1008.46 \pm 0.08$
01	$110.1917 \pm f_c$	$1006.94 \pm 0.08$
20	$220.2250 \pm f_c$	$1008.28 \pm 0.08$
11	$220.3050 \pm f_c$	$1007.60 \pm 0.08$
02	$220.4300 \pm f_c$	$1006.54 \pm 0.08$

表2 国産ミラーの性能向上.

	1992	1993	1994	1995	1996
R	99.97%		99.9905%	99.8595%	99.9867%
T			37 ppm	1399 ppm	131.8 ppm
A			58 ppm	6 ppm	1.5 ppm
$\eta_T$	0.014%	1.4%	15.2%	99.1%	97.6%
$\mathcal{F}$			33,000	2,236	23,560

おり、ミラーの曲率半径は対応するモード体積の関数であることを意味している。このようなことが可能になるのも、超狭帯域レーザーによる光学計測の新しい可能性といえる。

超狭帯域レーザーによるミラー計測の高感度を裏付ける例として、上記の曲率半径測定に計測用レーザーのパワー依存性が観測された。図10に示すとおり、レーザー共振器に入れるパワーが変化すると、曲率半径は入力パワー密度が  $\text{mW}/\text{cm}^2$  レベルでも、 $>40 \mu\text{m}/\text{mW}$  のパワー依存性で曲率半径が変化することがわかった<sup>14)</sup>。レーザーの強度に依存する曲率半径の変化は大型レーザー干渉計のモード整合に影響し、結果的に強度雑音や周波数雑音を生み出すことになる。重力波天文学では、このようなわずかな

曲率半径の変化も無視できない。極限的な特性をもつ光学素子開発やその測定は、極微の雑音発生機構にもつながった。

## 6. 国産超高品質ミラーの開発結果

上記のような新しい計測法の開発と、光学メーカーの技術開発の努力の結果、わが国の超高品質ミラーの品質は急速に向上した。その結果をまとめて表2に示した<sup>15,16)</sup>。当初は高反射率を達成してもレーザー光はすべて共振器内の損失で消費され、利用できる透過光を発生しなかったが、IBSコーティングの技術を改善し、試作→測定・解析→技

表3 1.5 ppm 損失超高品質ミラーの特性<sup>16)</sup>.

	AM sideband	Ring-down (Single shot)	Ring-down (Avg.256)	Frequency resp.
$\eta_t$		97.69 ± 1.09 %		
$\tau_c$	/	4.81 ± 0.30 $\mu\text{s}$	9.71 ± 0.30 $\mu\text{s}$	/
$\Delta\nu_c$	30.7 kHz	33.1 ± 1.9 kHz	32.8 ± 1.9 kHz	30 ± 2 kHz
$\mathcal{F}$	$2.42 \times 10^4$	$(2.24 \pm 0.14) \times 10^4$	$(2.26 \pm 0.07) \times 10^4$	$(2.48 \pm 0.18) \times 10^4$
R	99.987 %	99.9860 ± 0.0008%	99.9861 ± 0.0005%	99.9873 ± 0.0009%
T	128 ppm	138.4 ± 7.5 ppm	137.1 ± 3.8 ppm	125.4 ± 8 ppm
A	1.5 ppm	1.6 ± 0.9 ppm	1.6 ± 0.8 ppm	1.5 ± 0.8 ppm

術改良を繰り返す中で、散乱・吸収損失の低減に努め、1995年には6 ppm<sup>15)</sup>、1996年には全損失1.5 ppm<sup>16)</sup>という超高品質ミラーの開発に成功した。表3にその結果を示したが、測定はAMサイドバンド法、リングダウン計測法(単一ショットおよび矩形変調繰り返し計測法)、伝達関数測定法で行われ、反射率99.9867%、全損失1.5 ppm、 $T/A=83$ 、透過率97.1%、フィネス23560という世界水準のミラーであることを確認した。まさに、重力波検出という純粋科学研究と光学メーカーの技術の融合研究の結果といえる。当初は、成膜速度の低いIBSコーティングは産業応用には不相当と考えられていたが、1990年代半ばに起こった波長多重通信技術に対応する超高精度狭帯域波長フィルターの製造技術に、その成果が応用されたことを書き加えておく。最も役に立たないといわれた重力波検出の研究が、一般社会や産業技術に影響した実例である。

その後、重力波天文学の研究は大きく発展し、国立天文台に設置した300メートル干渉計TAMA300や神岡鉱山のトンネル内で低温干渉計として動作しているCLIOなどの研究を経て、基線長3kmの低温重力波アンテナLCGTの建設が始まった。最後の雑音源である熱雑音を低温で抑制し、地面振動の少ない神岡鉱山のトンネルを利用した本物の重力波観測用装置である。一方、重力波の研究対象はより低周波の重力波にも拡大しており、0.1 Hz帯の重力波を対象にして、DECIGO(基線長30 km、フィネス500)という宇宙重力波アンテナを打ち上げる計画も進んでいる。

究極の計測である重力波天文学は、レーザーと光学についても、狭帯域、安定化、低損失、超高反射率において究極の要求を突きつけている。それらに応えることで、周波数安定化レーザーや超高品質ミラーの開発は進んできた。超高安定化レーザーは光と電子を融合した高度なフィードバック制御という現代テクノロジーによって可能となった。超高品質ミラーの開発を可能にしたのは、サブオングストロームまで可能にした超平滑研磨技術、IBSコーティング技術という超精密光学技術である。その一方で、重力波天文学のために開発された安定化レーザーや光学パラメーターの精密測定技術が、超高品質ミラーの開発に大きな寄与をした。これらは、現代における基礎科学と最先端技術開発が互いに支え合って発展するよい例を示した。日常とはかけ離れたものと考えられている重力波天文学が、周波数安定化レーザーや超高品質ミラーの開発を通じて人

類社会に役立っていることを理解いただければ幸いである。

なお、本稿で言及した安定化レーザーの開発、超高品質ミラーの開発は、電通大レーザー研で博士論文研究を行った上原昇氏、上田暁俊氏、ならびに日本航空電子の渦岡泉氏らの研究成果の賜物であることを付言して、感謝に代えたい。

## 文 献

- 1) W. Bennett: Jr.: "Hole burning effects in a He-Ne optical maser," *Phys. Rev.*, **126** (1962) 580-593.
- 2) A. Schawlow and C. Townes: "Infrared and optical masers," *Phys. Rev.*, **112** (1958) 1940-1949.
- 3) J. Helmcke, S. Lee and J. Hall: "Dye laser spectrometer for ultrahigh spectral resolution: Design and performance," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 1686-1694.
- 4) R. Drever, J. Hall, F. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. Munley and H. Ward: "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," *Appl. Phys. B*, **31** (1983) 97-105.
- 5) D. Shoemaker, A. Brillet, C. Man, O. Cregut and G. Kerr: "Frequency-stabilized laser-diode-pumped Nd:YAG laser," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 609-611.
- 6) N. Uehara and K. Ueda: "193-mHz beat linewidth of frequency-stabilized laser-diode-pumped Nd:YAG ring lasers," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 505-507.
- 7) N. Uehara and K. Ueda: "Frequency stabilization of two diode-pumped Nd:YAG lasers locked to two Fabry-Perot cavities," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) 1628-0633.
- 8) Ch. Salomon, D. Hils and J. Hall: "Laser stabilization at the millihertz level," *J. Opt. Soc. Am. B*, **5** (1988) 1576-1587.
- 9) T. Day, E. Gustafson and R. Byer: "Sub-Hertz relative frequency stabilization of two-diode laser-pumped Nd:YAG lasers locked to a Fabry-Perot interferometer," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 1106-1117.
- 10) T. Kane and R. Byer: "Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 65-67.
- 11) N. Uehara and K. Ueda: "Accurate measurement of ultralow loss in a high-finesse Fabry-Perot interferometer using the frequency response functions," *Appl. Phys. B*, **61** (1995) 9-15.
- 12) 上田暁俊, 植田憲一, 佐藤修一, 三代木伸二, 大橋正健, 伊藤和彦, 御嶽隆義, 中村憲司, 北島直哉, 渦岡 泉: "重力波検出干渉計用大口径ミラーの評価," *レーザー研究*, **27** (1999) 116-120.
- 13) A. Siegman: *Lasers* (University Science Books, Mill Valley, 1986), Chap.19, pp.761-766.
- 14) N. Uehara and K. Ueda: "Accurate measurement of the radius of curvature of a concave mirror and the power dependence in a high-finesse Fabry-Perot interferometer," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 5611-5619.
- 15) N. Uehara, A. Ueda, K. Ueda, H. Sekiguchi, T. Mitake, K. Nakamura, N. Kitajima and I. Kataoka: "Ultralow-loss mirror of the parts-in-106 level at 1064 nm," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 530-532.
- 16) A. Ueda, N. Uehara and K. Ueda: "Ultra-high quality cavity with 1.5 ppm loss at 1064 nm," *Opt. Rev.*, **3** (1996) 369-372.

(2010年12月20日受理)