長さ標準と周波数安定化レーザ

秋元義明，盛永篤郎，桜井慧雄

（計量研究所）

目　次

１．はじめに……1
２．長さ標準の発展の推移……4
　2.1　メートル原器時代《メートル条約の締結から終戦まで》1875～1945 年…5
　2.2　原器から波長標準へ《クリプトン波長標準》　1945～1960 年……5
　2.3　新しい光、レーザの登場　　1960～1980 年頃……6
　2.4　クリプトンから真空中の光の速さへ　1972～1983 年……6
３．メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザ……7
　3.1　計量標準における周波数安定化レーザの役割……7
　3.2　周波数安定化技術の開発……9
　　3.2.1　歴史的背景……9
　　3.2.2　3.39 μm メタン安定化 He-Ne レーザ……10
　　1）線形吸収スペクトルへの周波数安定化……11
　　2）飽和吸収スペクトルへの周波数安定化……13
　3.3　国家標準の開発……15
　3.4　評価技術の開発……26
　3.5　国際認証への道……28
　3.6　日本製装置の国際舞台での活用……31
４．ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザ……32
　4.1 ヨウ素安定化 He-Ne レーザの概要……32
　4.2　田中敬一先生を巡るヨウ素安定化レーザ開発の思い出……35
　4.3　633 nm のヨウ素分子吸収線の超微細構造の解明……41
　4.4　ヨウ素分子の FM サイドバンド分光……43
　4.5　カルシウム光ラムゼー波長標準の開発……45
５．考察・まとめ……46
６．謝辞……50
　参照文献……51
　著者略歴……53

要旨

計量研究所では、レーザの発明直後の 1960 年代から長さ標準のためのレーザ研究を開始した。本稿では 1970 年代に着手した、長さ標準のためのメタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザ、及びヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザについて、技術開発の状況について述べる。1983 年に至りメートルの定義の改定によって、これら 2 つのレーザは新定義実現のための具体的手段として位置づけられたため、メートル条約の枠組みの中での国際相互比較を介して、これらレーザの周波数の国際整合性を確保した。さらにヨウ素安定化レーザに関しては、トレーサビリティのための質の高い長さ標準を産業界へ供給すること、或いは途上国へ周波数安定化レーザを使った長さ標準を技術移転すること、のために必要な技術開発ならびに普及活動を行ったが、この状況について簡単に触れる。これらレーザを用いた長さ標準の開発で培った技術基盤のコンセプトは、産総研時代に至っては、光周波数コム技術の実用化と相まって、中性原子による次世代長さ標準の新しい可能性を引き出し、また次世代時間標準を目指した光格子時計の実用化研究へと展開している。

１．はじめに

計量標準は大別して人工物によって決められる標準と、物理定数や物性定数に基盤を置いて決められる標準がある。前者の代表はメートル原器やキログラム原器などであり、後者の代表は温度定点などである。最近ではキログラムの定義を基礎物理定数で表そうとする大きな動きがあるが [1.1-2)]、従来はメートル（1960 年以前）とキログラムの定義は、それぞれ国際メートル原器、国際キログラム原器による定義だったから、各国は自国の原器をパリの国際度量衡局(BIPM)に里帰りさせ、そこに保管されているそれぞれの国際原器で校正された自国の原器を持ち帰ることをしていた。これによって正しい計量標準の値が国際的に分配されていた。物理定数や物性定数によって規定される標準であって巡回標準器が用意できる場合は、それを巡回させて測定値の国際比較（持ち回り測定などと呼ぶこともある）を行う。グローバル化した現代では世界各国が普遍的な標準を持つことが必須であり、各国標準研究所では国際的に共通な原理に基づく計量標準を確立・維持して供給体制を構築する努力が常に払われる。これは自国の科学技術振興や経済成長にとって極めて大切なことであり、計量研究所の使命でもある。共通な原理で各国が計量標準を実現する理由は、標準の値に偏りがないことを確認するためである。もし他国の平均値から自国の値がずれていれば、例え原理は同じでも、各国で異なる標準実現装置・測定装置・測定法・データの処理法等に何からの誤りが潜んでいる可能性があり、それを見つけて修正することになる。この行為が国際社会に対する自国標準の信頼性を向上させることであり、計量標準の研究者に求められる最も大切な任務である。

さて計量標準を長さ標準に絞る。ただし計量研究所の長さ標準には、重要な分野として標準尺、ブロックゲージ、大寸法測定などをはじめとする精密工業計測の研究もあるが、ここではメートルの定義、波長標準の流れに沿って周波数安定化レーザの研究に重点を置いて述べる。

歴史的に見れば、物差しの存在はエジプトやメソポタミヤ文明の遺跡に遡るが、長い紆余曲折を経て、近代の長さ標準は 1875 年にパリで締結されたメートル条約から始まるといってよかろう。1889 年の第 1 回国際度量衡総会（CGMP）では長さの単位メートルが国際メートル原器によって定義された。

この時点で非常に興味ある出来事が起こった。それは、長さが国際メートル原器によって決められてからわずか 3 年後の 1892 年に、光の波長は高い精度で一定な値を示すことが実験的に示されたことである [1.3)]。長さ標準の立場からこの実験を最初に行ったのは BIPM がアメリカから招聘した分光学の第一人者 Michelson(表 2.1)である。彼はカドミウムを封じた放電管から放出される赤色スペクトルの波長を測定し、質の高い長さ標準として使える可能性を示した。この実験はいわば遙か 70 年も後に出現する周波数安定化レーザへ繋がる長いレールの出発点であったと言えるだろう。

長い時間が経過した 1960 年にメートルの定義が国際メートル原器からクリプトン 86 が

放出する原子スペクトルの波長（0.6057μm、橙色）に基づく定義に改訂された。19 世紀末の Michelson の頃から波長を用いた長さ標準が精度と信頼性の点で最も優れた技術だったからである。しかしながら波長を使うメートルの定義は、専門家にとってはカドミウム赤色光などの波長がメートル原器より高精度・高信頼性と見なせるのにもかかわらず、また 1927 年にカドミウムが波長標準としては認められたものの､70 年もの間メートル原器より低次の長さ標準に甘んじてきた。1960 年を境に光波干渉測長技術はメートルを実現する技術そのものに昇格したことになる。

この定義改訂は人工物による標準が物理現象による標準に置き換わった点で画期的なことであった。今後は天変地異や戦争などによる標準の損傷や破壊を心配することなく、世界中どこでも標準の実現ができるようになったからである。しかしながらこの頃使われていた光源は元素ランプからの放射スペクトルであったため、一度に測定できる長さが、当時最も優れているといわれたカドミウムの赤色スペクトルでも高々20 数 cm だった。一方、この頃には精密機械工業が発展し大きな長さを高精度でしかも効率よく測定するニーズが強まってきた。それにあたかも同期したように 1960 年には Maiman によってルビーレーザが、翌年には長さ標準でよく使われるヘリウム・ネオン(He-Ne)レーザが Javan によってそれぞれ発明された。レーザ光による長さ標準の恩恵は産業技術振興や高度な学術的要求を十分に満たすと期待できたため、計量研究所はレーザの研究にいち早く着手した。おりしも 1961 年は中央計量検定所が計量研究所と改名した年であり、工業技術院を支える新しい計量標準･計測技術の研究を強化しようとする時期でもあった。

レーザを長さ標準に使うために行わなくてはならない一番大きな課題は、レーザ光の周波数を安定化することである[脚注 1.1)]。この状況は次のように喩えられる。ストラディバリウスはバイオリンの名器であるが、この楽器の構造からして弦の張力によって音程が自在に動く。美しい音色の原点が正しい音程設定（調律）にあるとすれば、それを決めるのは演奏者の耳にある絶対音感であるとは言えないか。この絶対音感はレーザの周波数安定化のための正確でシャープな周波数基準に相当する。レーザ光もバイオリンのように周波数が変動するので、演奏者の絶対音感に相当するいろいろな周波数基準を研究することが大切なのである。なお、その周波数変動は He-Ne レーザでは中心周波数の 100 万分の 1 程度であるから、非常に小さいと思うかも知れない。しかし 10 億分の 1 よりさらに細かな周波数変動が問題になる長さ標準では､これより変動をいかに小さくできるかが命となる。

1983 年の第 17 回 CGPM において、メートルの定義が真空中の光の速さをもとにして再び改訂された。このコンセプトの原点はレーザ光の単色性であり、周波数安定化技術であり、光周波数計測技術であるといえよう。新たな定義に付帯してメートルの実現法として「波長のリスト、1983」が勧告されたが、その中に以下に述べるメタン分子飽和吸収安定化 3.39μm He-Ne レーザおよびヨウ素分子飽和吸収安定化 633 nm He-Ne レーザが含ま

脚注 1.1)　c を光の速さ、光の周波数と光の波長をそれぞれ f と λ とすれば、　$c = f \times \lambda$　の関係があるから、周波数の安定化は波長を安定化することと同義である。本稿では周波数で記述する。

れている。

以下、第 2 章には、本研究の位置づけ、必要性、技術の推移等を年表に基づき解説する。

第 3 章では磁歪同調方式 1.15 μm He-Ne レーザ周波数安定化について触れ、メタン分子飽和吸収線を使った 3.39 μm He-Ne レーザの周波数安定化（以下、メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザまたはメタン安定化レーザ）について述べる。レーザが発明された直後から出発した研究だったため、新たな光学部品の開発や光検出器の吟味、注意深い防振に対する配慮などから始まったといってよい。開発したメタン安定化レーザは BIPM との周波数比較を行い [1.4]、そのとき使われた計量研究所のメタン安定 He-Ne レーザの周波数制御装置とオフセットロック装置は、その優秀さが認められて BIPM に寄贈された。また、これらの実験のノウハウや知見は、第 4 章で述べるヨウ素分子飽和吸収線を使った 633 nm He-Ne レーザ（以下、ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザまたはヨウ素安定化レーザ）の研究に少なからぬ影響を与えた。

第 4 章ではヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの周波数安定化の研究について述べる。またその研究の延長線の上で行われた 633 nm ヨウ素分子吸収線の超微細構造の解明の研究、さらにはその構想を高度化したカルシウム（Ca）光ラムゼー波長標準の開発の研究について触れる。このヨウ素安定化レーザの特徴は 1.15 μm や 3.39 μm He-Ne レーザが赤外線であるのに対し、可視域 633 nm の光ということである。小型化した装置を携えて先方に出向いて国際比較も何度か行われた [1.5-7]。また可視光ゆえの使い勝手の良さから、高精度な波長標準を民間に供給するための最も有用なツールとなり、平成 5（1993）年に施行された計量法トレーサビリティ制度(JCSS: Japan Calibration Service System)では特定標準器として長さトレーサビリティの国家標準の役を担った。

第 3 章、第 4 章で述べるメタン安定化レーザ及びヨウ素安定化レーザの研究、633 nm ヨウ素分子吸収線の超微細構造の解明の研究、カルシウム光ラムゼー波長標準の開発の研究等によって積み上げられた周波数安定化レーザを用いた長さ標準の基盤は、産総研時代の初期に開発された光周波数コムを使った精密レーザ周波数超精密測定技術を伴って、単に次世代長さ標準の確立にとどまらず、光格子時計の開発など次世代周波数・時間標準の確立へと展開している。

第 5 章では産総研時代に至り長さ標準がどう展開したかについて略記し、この書き物をまとめる。

２．長さ標準の発展の推移

表 2.１は長さの単位「メートル」の定義の変遷ならびに関連事項を示した年表である。定義を実現するための決めごとや付帯する技術の総称は計量標準と呼ばれる。計量単位の定義改訂においては、もちろん長さ標準もそうだが、従来技術を基盤にした現定義と新技術による新定義との連続性が大切であり、その上で新定義によって精度、信頼性、作業効率等の向上に努力が傾注される。したがって表 2.１にはメートル条約の締結から工業技術院時代までの主な関連事項を列挙した。

表 2.1　メートルの定義、長さ標準、周波数安定化レーザの変遷

文献欄に記載がない事項は文献 2.1-2.5)を参照。

西 暦	事　　項	文献番号 or 記述した章
1875	メートル条約成立	
1885	メートル条約へ日本が加盟	
1889	国際度量衡総会(CGPM)がメートルを国際メートル原器により定義	
1892	Michelson がカドミウム赤色光の波長 λ(red)を測定。１メートルは λ(red)の　1 553 163.6 倍とした。その後、BIPM は λ(red) = 0.643 846 96 μm と報告	
1920-22	国際度量衡局(BIPM)による各国メートル原器の校正。各国原器群のばらつきは 0.1～0.2 μm	
1927	CGPM が λ(red)を 0.643 846 96μm とし、波長標準に採用。	
1948	CGPM で各種の同位元素ランプ(独の ^{86}Kr, 米の ^{198}Hg など)が波長標準として名乗りを上げた。	
1949	商工省の廃止、通商産業省設置。	
1951-61	1951 年、サンフランシスコ講和条約に調印。 この頃を契機に産業界が息を吹き返し、長さ標準、標準尺やブロックゲージなど長さ精密測定の分野にも新技術の開発研究が活性化。	2.6
1952	工業技術庁が工業技術院に、中央度量衡検定所が中央計量検定所(中検)に改称。 CIPM が「メートルの定義のための」諮問委員会(CCDM)の設置を決める。	
1957	CCDM が新定義の候補となる原子スペクトルやその他の光源について検討。 中検は ^{86}Kr、^{198}Hg の波長測定値を報告。新定義に ^{86}Kr、0.605 μm 線を満場一致で採択。	
1960	CGPM が ^{86}Kr によるメートルの新定義を決定。	
1960	Maiman(米)が 0.694 μm ルビーレーザの発振に成功。	第 3 章
1961	中検が計量研究所(計量研)に改名される。	
1962	田幸(計量研)らが国内初の 1.15 μm He-Ne レーザの発振に成功。	2.7, 第 3 章
この頃	レーザの周波数安定化の研究が開始された。ラムディップ安定化などからスタート。	2.7, 第 3 章
この頃	霜田(東大)、田幸ら(計量研)がメタン分子 3.39 μm 吸収線が波長標準としてきわめて優れた特性を持つことを理論的に明らかにした。田幸らが 3.39 μm He-Ne レーザの周波数安定化の実験を開始。	2.7, 2.8, 第 3 章
1969	Hanes(加)らが 633 nm He-Ne レーザの周波数安定化基準にヨウ素分子吸収線を提案。田中(計量研)らがヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの研究を開始。	第 4 章
1973-74	米国 NBS、英国 NPL が周波数チェーンにより真空中の光の速さの測定に成功。	2.9
1976	計量研のヨウ素安定化 633 nm He-Neレーザと緯度観測所の BIPM 製同レーザとの周波数比較。	第 4 章
1978	ヨウ素分子スペクトルの超微細構造の解析。	第 4 章
1979	CCDM がメートルの新定義の根拠について議論し、光の速さを用いることに意見が傾いた。その論点は将来の拡張性。	2.9
1983	CGPM が真空中の光の速さに基づくメートルの定義を決定。	2.9
1984	Hurst(ﾆｭｰｼﾞｰﾗﾝﾄﾞ)によるヨウ素安定化 633nm He-Ne レーザの国際比較へ参加。	第 4 章
1988	BIPM の Chartier、Felder を招聘しメタン安定化、ヨウ素安定化レーザの国際比較。	第 3, 4 章
1989	メタン安定化 3.39μmHe-Ne レーザの制御系を BIPM に寄贈。	第 4 章
1991	カルシウム光ラムゼー波長標準の研究で超高分解能 10 kHz を達成。	第 4 章
1993	計量法ﾄﾚｻﾋﾞﾘﾃｨ制度を施行。ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザが長さの特定標準器。	
2000	フォトニック結晶構造持った光ファイバー(PCF)で発生させた光周波数コムにて Nd:YAG レーザ周波数の絶対測定に成功。この業績で J.L.Hall と T.W.Hänsch は 2005 年にノーベル賞を受賞	2.10
2001	香取(東大)らがストロンチウム光格子時計を実現した。	2.11-13

以下、エポック毎に概要をのべる。

2.1　メートル原器時代《メートル条約の締結から終戦まで》　1875～1945 年

メートル条約の下、国際メートル原器が 1889 年にメートルの定義として採用された。一方、1892 年の Michelson による測定の後、BIPM では再測定を行い、カドミウムの赤色波長が 6 438.469 6×10^{-10} メートルであるとしたが、メートル条約の下でそれが採用されたのは 20 年後の 1927 年、第 7 回 CGPM であった。カドミウム赤色波長によるメートル原器の測定は、1892 年の Michelson から 1940 年までに、中検[脚注 2.1)]を含む各国計量標準研究所で 9 回繰り返され、測定値の信頼性が検証された。「石橋をたたいて渡る」という計量標準の理念がそこに見える。

1927(昭和 2)年頃から少しずつ、時代激動の波は第二次世界大戦から太平洋戦争に突き進んで行った。19 世紀末の Michelson からこの時代にかけての波長標準の研究は元素ランプから放射される光であって、細くて対称性の良いスペクトルの探求であった。しかしながらその研究も大戦のために約 10 年間の渋滞を余儀なくせざるを得なかった。

2.2　原器から波長標準へ《クリプトン波長標準》　1945～1960 年

大戦が終わった後、光波を用いたメートルの定義を実現させるための研究が一気に加速を始めた。単一の同位元素を封じたランプが放射するスペクトルの研究が進み、熱拡散装置で同位体を分離して作ったドイツのクリプトン（^{84}Kr、^{86}Kr）ランプ、加速器による核反応を使った米国の水銀（^{198}Hg）ランプ、ソ連のカドミウム（^{112}Cd、^{114}Cd、^{116}Cd）ランプ等が出現した。このような新しい光源は厳しく精査され、1960 年に ^{86}Kr の 0.605 μm を使った定義が採用された。定義の根拠になった値は新定義より 70 年前に Michelson と BIPM とで行った測定値であり、1927 年の第 7 回 CGPM によって採用されたカドミウムの赤色波長 6 438.469 6×10^{-10} m である。

サンフランシスコ講和条約（1952 年）が結ばれた頃になると、精密な長さ測定の要求は次第に高精度で大きな寸法へ広がり、測定の効率化も要求されるようになっていった。従来、標準尺の校正は縦動比較器もしくは横動比較器を使い、メートル原器で校正された正標準尺と校正を受ける標準尺とを比較することによって行われていたが、この方法は多くの時間を費やすだけでなく精度的にも不十分であった。光波によるメートルの定義の改正が視程に入った頃、従来方式の標準尺校正方法に変えて光波干渉を使った標準尺計測技術の研究が世界各国で開始された。このような目的の装置は中検、IM、NPL、NRC [脚注 2.1)] などで 1960 年頃までには 0.1 μm 程度の精度で標準尺を干渉測定することに成功した。計量研の標準尺測長装置は 1 m まで測定できるもので、干渉縞を計数する方式である [2.14)]。当時は光源の可干渉距離を十分大きくすることができず、自動的に継ぎ足し測定ができる干渉測長装置も研究された [2.15)]。この観点からも可干渉距離が長い光源が望まれていた。

脚注 2.1)各国の計量標準研究所の略称。中検（中央計量検定所のこと。計量研究所の前身）、IM（ソ連）、NPL（英国）、NRC（カナダ）。

2.3　新しい光、レーザの登場　　1960～1980 年頃

国際メートル原器がメートルの定義として採用された 3 年後に Michelson が光波標準の優秀さを発表した時のように、メートルの定義が 70 年の時を経てようやくクリプトン 86 による波長標準になった 1960 年に、米国の Maiman がルビーレーザを、翌年同じく Javan が 1.15μmHe-Ne レーザをそれぞれ発振させた。全くの偶然である。元素ランプの光は熱運動をしている原子集団から放射される光であり、振幅も位相も不規則に変化する。これに対してレーザ光は特定な方向にビームとして放射される光、波面の位相が揃った光であって、電子的発振器と同様に正弦波を発生させる光発振器とみなせる全く新しい光であった。

レーザの長さ標準への応用で最も重視される特徴は、単色性がよいこと、即ち可干渉性がよいことである。初期の周波数安定化はラムくぼみ（3.2.1 参照）を使った方式が研究されたが、さらに高い周波数再現性を目指し、メタン分子の吸収線を使って 3.39　μm He-Ne レーザの周波数安定化の構想が 1965 年頃から東京大学の霜田光一教授と計量研究所の田幸グループとの間で議論されはじめた。メタン分子吸収線は元素ランプの放射スペクトルなどに比べてはるかに細いが、その細い吸収線を検出できることは、3.39　μm He-Ne レーザ光の単色性ゆえである。この研究の詳細については第 3 章で述べる。この研究の成果は、元素ランプの光とは全く性質が異なるレーザ光が長さ標準に応用できることを実証し、わが国の長さ標準汎用技術として確立したことにある。

時期は少し遅れて 1970 年前後になるが、計量研究所の田中グループによりヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの開発が開始された。このレーザはメタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザより安定度や再現性が最終的には一桁低いものの、目に見える光であり、トレーサビリティの観点から、民間で普及されはじめた実用周波数安定化 633 nm レーザを校正できるという狙いがあった。この研究の詳細については第 4 章で述べる。

2.4　クリプトンから真空中の光の速さへ　1972～1983 年

1983 年の第 17 回 CGPM においてメートルの定義が「メートルは、1 秒の 299 792 458 分の 1 の時間に、光が真空中を伝わる行程の長さ」と改訂された[2.9]。その根拠は、特定の周波数安定化レーザの周波数と波長がそれぞれ絶対測定によって測定され、両者の積から真空中の光の速さを導出できたことにある。周波数を測る手法は周波数チェーンと呼ばれ、NBS(米), NPL(英), NRC(加)の 3 研究所のみが期限までに測定を完了できた。なお、絶対測定とは、周波数と波長を、それぞれセシウム原子周波数標準、及びクリプトン波長標準を基準にして、測定する方式である。

第 3、4 章で述べるメタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザ、ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザは 1983 年のメートルの再定義以降、わが国の計量標準を所掌する計量研究所にとっては、なくてはならないレーザとして位置づけられることとなった。

3. メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザ

3.1 計量標準における周波数安定化レーザの役割

1960 年 6 月に T. H. Maiman がルビーレーザの発振に成功し、同年 10 月には 2 章で述べたようにメートルの定義が「メートル原器から ^{86}Kr のスペクトル線の波長」に改訂された。このような状況を鑑みて計量研究所（NRLM）の先輩である田幸敏治先生[脚注 3.1)]は 1962 年の日本物理学会学術講演会で「波長標準としての光メーザー」と題して講演を行い、光メーザー光源の単色性と強度は直ちに干渉光学への利用が考えられるが、波長標準としてはなお問題が残ると述べられ、波長標準としては、

1) スペクトル線のプロファイルの幅が狭いこと
2) スペクトル線のプロファイルの幅が対称であること、
3) 波長の再現性が少なくとも 10^{-8} 以下で保証されることを要し、
4) なるべく可視部の線が望ましい、

と指摘し[3.1)]、レーザを光源とする光波の物差しを作ることによりさらに優れた長さ標準の到来を期待したのである。

そして、1962 年 9 月に田幸敏治先生らによって日本で初めて 1.15 μm He-Ne 光メーザーの発振に成功[3.2)]した。図 3.1 は初期の 1.15 μm He-Ne 光メーザー装置の写真である[3.3)]。このようにレーザは、長さ標準や長さ計測の光源として発明当初から着目され、1960 年初頭は計量標準の分野において大きな変革の時代であったと言っても過言ではないであろう。

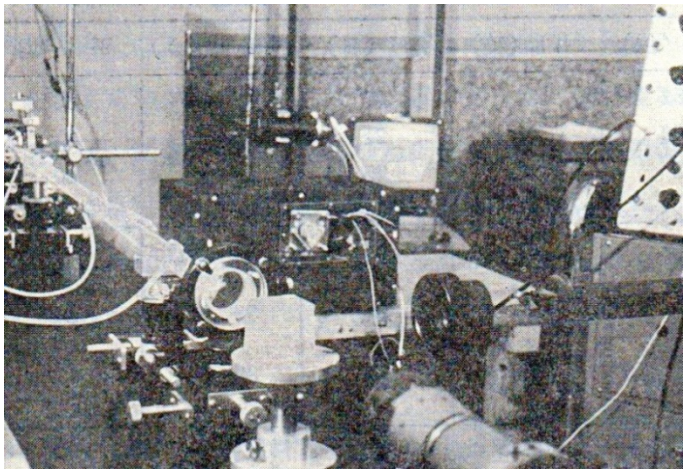

図 3.1 初期の 1.15 μm He-Ne 光メーザー装置

最近は光メーザー[脚注 3.2)]との用語は殆ど使用されることはないので本稿では文献等で使用されている用語を除きレーザに統一して使用する。また、3 章では、特に断りがない限り「周波数安定化」を「安定化」と表現する。

脚注 3.1）1972 年東京工業大学の精密工学研究所教授に転出
脚注 3.2）レーザーと同義語。特許権の絡みもあり 1970 年中頃まで使用されていた。日本語標記として理学系では「レーザー」を、また工学系では「レーザ」は現在でも使用している傾向にある。

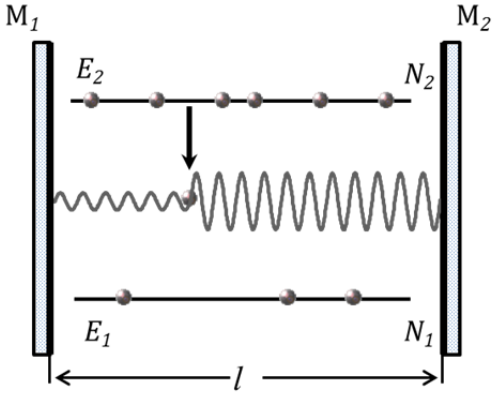

図 3.2 レーザ発振のメカニズム

ところで読者の中には、レーザと言えばビーム状の強い光とのイメージを持つ方も少なくないと思われる。レーザは、図 3.2 に示すように強い光を発生させる光の増幅作用と、指向性を整える光共振器を備えているので、読者のイメージ通りと言えるであろう。光増幅現象は、図に示すように上準位(E_2)の原子数(N_2)が下準位(E_1)の原子数(N_1)よりも多い状態が存在するとき、$E_2 - E_1 = h\nu$（h:プランク定数、ν:周波数）の条件を満たす光子が共振器内に在ると、上準位の励起原子からエネルギーをもらい誘導放出が起こり図 3.2 に示すように振幅が増幅されることである。一方、光共振器を備えていることにより指向性が整えられるとともに、誘導放出光を共振器内に閉じ込めて発振効率の改善を図り、さらに定在波を形成するために単色性や可干渉性（コヒーレンシー）の優れた光源になるのである。光計測分野では、レーザはビーム状の強い光であるとともに単色性や可干渉性が従来の光源に比較し格段と優れていることに期待していた。

レーザの単色性は、レーザの周波数のゆらぎ幅にほぼ逆比例する。レーザ周波数は、レーザ反射鏡（M_1 と M_2）の間隔を l、空気の屈折率を n、そして光の速度を c、で表すと

$$\nu = q\frac{c}{2nl} \tag{3.1}$$

で与えられる。ただし q は整数値である。

l の変化に伴う周波数変化（周波数ゆらぎ）$\Delta\nu$は、近似的に次式で示される。

$$\Delta\nu = -q\frac{c}{2nl^2}\Delta l \tag{3.2}$$

したがって、Δlを小さくするように制御することができれば周波数ゆらぎ幅を狭くすることができ、単色性が改善されることになる。これがレーザの周波数安定化の基本的な考えである。

レーザの安定化を達成するために、1940 年代の中頃から普及し始めた自動制御の技術が必然的に採り入れられた。図 3.3 は、安定化レーザの負帰還制御モデルであり、制御装置の伝達関数を G_1、レーザの伝達関数を G_2 で示している。このシステムは、G_2 の出力信号の位相を反転して G_1 の入力信号として帰還するため負帰還制御と呼ばれている。安定化レーザには周波数基準（基準要素 R）が不可欠である。その中心周波数をν_r、また種々の要因による周波数オフセットを$\Delta\nu_r$、安定化レーザの周波数をν_o、環境等による周波数ゆらぎをν_dと仮定すると、周波数ゆらぎ成分は図 3.3 の左側に示す接続部分⊖で周波数基準と比較され$\left((\nu_r + \Delta\nu_r) - \nu_d\right)$で表される。その成分を G_1 で増幅し、G_2 に帰還して補正され

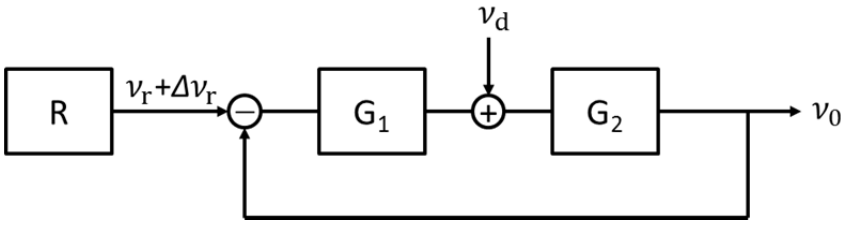

図 3.3 安定化レーザの負帰還制御モデル

る。そしてレーザの周波数は、近似的に

$$\nu_o \cong \nu_r + \Delta\nu_r + \frac{1}{G_1}\nu_d \qquad (3.3)$$

で表すことができる。第 3 項の周波数ゆらぎ成分は制御装置の利得分の 1 に低減される。このように、負帰還制御ループを採り入れることにより、レーザの周波数安定性は、制御装置の利得(G_1)に比例して向上する。

これに対し第 1 項と第 2 項は、制御装置の利得と独立であり周波数オフセット$\Delta\nu_r$を制御することはできない。よって、正確な発振周波数を得るには、環境等の影響を受け難い原子や分子の吸収スペクトル等を基準要素に活用することが期待されるのである。

以上のことを整理すると、計量標準として活用される安定化レーザは、

i. 周波数ゆらぎを制御し安定性を向上させること
ii. 周波数オフセット$\Delta\nu_r$の低減を図り安定化レーザの周波数ν_oを基準要素の周波数ν_rに限りなく近づけること

の課題をかかえており、それらを克服しなければならない。

この二つの課題を光波の物差しで考えてみよう。まず、普通の物差しを思い浮かべていただきたい。物差しには目盛が刻まれている。物差しの目盛の間隔を一定に保つことは、課題 i のレーザ周波数の安定性につながる。そして、物差しの目盛の間隔に正確な値をつけること、すなわち計量標準で言われる「目幅」をつけることは、課題 ii のレーザ周波数ν_oを基準周波数ν_rに合わせることに相当する。この二つの課題を克服することにより安定化レーザで、長さの標準を実現することができる。

3.2 周波数安定化技術の開発

3.2.1 歴史的背景

英国の W.R.C. Rowley と D.C. Wilson は、1963 年に 633nmHe-Ne レーザの出力特性（半値全幅が約 1.4G Hz)の最大値を基準要素として、世界で最初に安定化レーザの研究を開始した。そして、メートルの定義として勧告された ^{86}Kr の波長（相対的な不確かさ 1×10^{-8}）を基準に再現性を測定し 5×10^{-7} と報告した [3.4)]。

翌年、霜田光一先生らは 1.15 μm He-Ne レーザの中央部で観測される「ラムくぼみ」の中心周波数を基準要素として安定化を図り、10^{-10} 台の安定性を報告した [3.5)]。NRLM はこの論文に着目し、周波数安定性、再現性測定の参照光源として、また安定化レーザなしで

はなし得なかった各種物理量の測定への活用[3.6]を考慮し試作に踏み切った。その背景には、1.15 μm He-Ne レーザのノウハウを所有していたこともあったと推測される。

「ラムくぼみ」への安定化は、Rowley らの安定化に比較して基準要素の半値全幅が狭いことがメリットとして掲げられる。すなわち、「ラムくぼみ」の半値全幅は、レーザの出力特性の半値全幅（約 750 MHz）の約 1/20 以下である。よって、周波数弁別感度の改善が期待でき、式（3.3）に示す利得 G_1 の大きさの改善につながるためである。

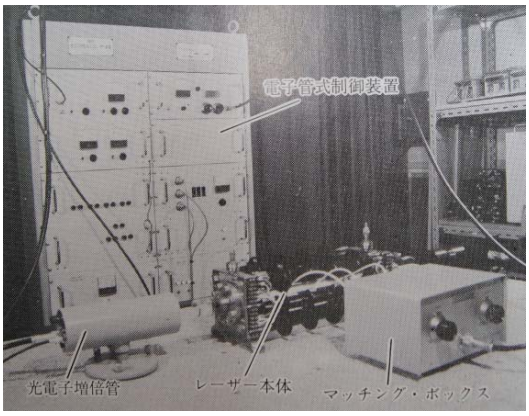

図 3.4 磁歪同調形安定化光メーザー装置

磁歪同調形安定化光メーザー装置は、図 3.4 の写真に示すようにレーザ本体部と制御装置部で構成されており、日本電子株式会社でアッセンブルされ、1967 年 NRLM に搬入された。レーザ本体部（レーザヘッド部）は、レーザ管とレーザ共振器で構成されている。レーザ反射鏡の間隔は、周波数制御のためにインバーロッドにコイルを巻き磁歪効果で制御した。このため、この安定化レーザ装置は磁歪同調形安定化光メーザー装置と呼ばれた。

制御装置部は、電子回路が全て真空管式でかなり大きい装置であった。周波数ゆらぎ成分が含まれているレーザ光を光電子増倍管で検出し、その信号を位相敏感検波して制御信号とした。位相敏感検波された一次微分信号はレーザ反射鏡の傾き補正に、二次微分信号は最適な大きさの「ラムくぼみ」を維持するためにレーザ出力の安定化に、そして三次微分信号はレーザ周波数の安定化にと、かなり複雑な制御システムである。

レーザ出力は、フリーランニング時に 100 μW 以上得られたが、周波数を安定化した際にはラムくぼみの半値全幅を狭く抑えるために 10 μW 程度の小出力で使用することになった。

3.2.2　3.39 μm メタン安定化 He-Ne レーザ

レーザの安定化の研究が進展するにしたがい、正確な周波数と優れた再現性の安定化レーザが求められるようになり、基準要素として重い原子や分子の吸収スペクトルが提案された。霜田光一先生らは、純粋メタン分子の吸収スペクトルは中心周波数が環境の影響を受け難い優れた基準要素であることを提案した。これは、メタン分子は重心に炭素原子を配置し各頂点に水素原子を結合している球対象コマ型で正四面体の構造をしており、さらに永久双極子モーメントを持たない特長を有しているためである[3.7]。

1) 線形吸収スペクトルへの周波数安定化

メタン分子を用いて 3.39 μm He-Ne レーザを高精度に安定化することが霜田光一先生より提案されて以来 NRLM では先生と密接な連携のもとにすぐれた波長（光周波数）標準を実現すべく 1968 年頃から安定化の研究の準備を開始した。

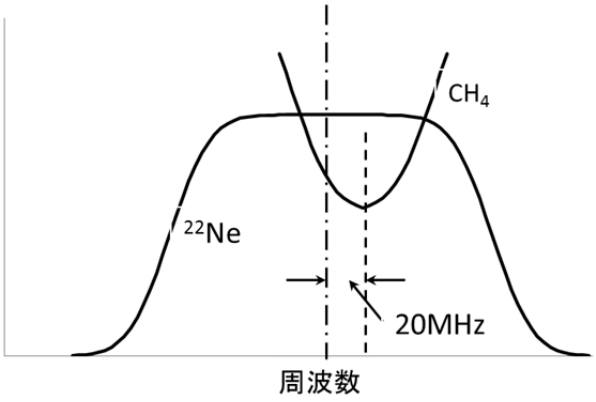

図 3.5 レーザの出力特性とメタンの吸収線

メタンの ν_3 帯 P(7)枝 $F_2^{(2)}$成分の吸収スペクトルは、一般に 3.39 μm He-Ne レーザの中心周波数よりも 90 MHz ほど高い周波数領域で観測される。しかし、レーザ媒質に ^{22}Ne を使用しアイソトープシフトを利用すると、図 3.5 に示すようにレーザの出力特性の中心より 20 MHz 程度高周波側で観測できるようになる。

通常、3.39 μm He-Ne レーザの出力特性の形状は、レーザ媒質が熱運動しているために Gauss 分布を呈しており、その半値全幅が 250 MHz 程度である。図 3.5 に示すように、レーザの出力特性の中心周波数と吸収スペクトルの中心周波数が接近していると、レーザの出力特性の影響を受けメタンの吸収スペクトルが歪み、中心周波数がオフセットするので安定化レーザの基準要素として好ましくない。このためレーザに縦磁場を印加し、ゼーマン効果を利用してレーザの出力特性を図 3.5 に示すようにフラットトップ状に変形し、メタンの吸収スペクトルの歪みを抑え、中心周波数のオフセットの低減を図った。

図 3.6 は、メタン分子の線形吸収スペクトルを基準にした安定化レーザ装置の構成図である。NRLM では 3.39 μm He-Ne レーザの研究に着手するのは初めてであり、レーザの開発から開始することになった。レーザ管は、ブリュースター窓に溶融石英板を用い、メタンの線形吸収スペクトルへの安定化に必要なレーザ出力を確保するために長さを約 30cm とし、放電の電子密度を考慮して内径 3mm の毛細管をレーザ管の中心部に配置する二重構造を採用した。そして、陽極にはタングステンを、また陰極にはアルミ合金（長さ 70mm で直径 18mm の円筒形）を採用し作製された。レーザ媒質は ^{3}He と ^{22}Ne の混合気体であり、全圧力として 270 Pa 封入して使用した。開発した冷陰極形直流励起方式の He-Ne レーザは、動作が安定しており、磁歪同調形安定化光メーザー装置に使用された高周波励起方式のレーザに比較し温度上昇を抑えることができ、安定化レーザの分野で活用できることが確認できた。

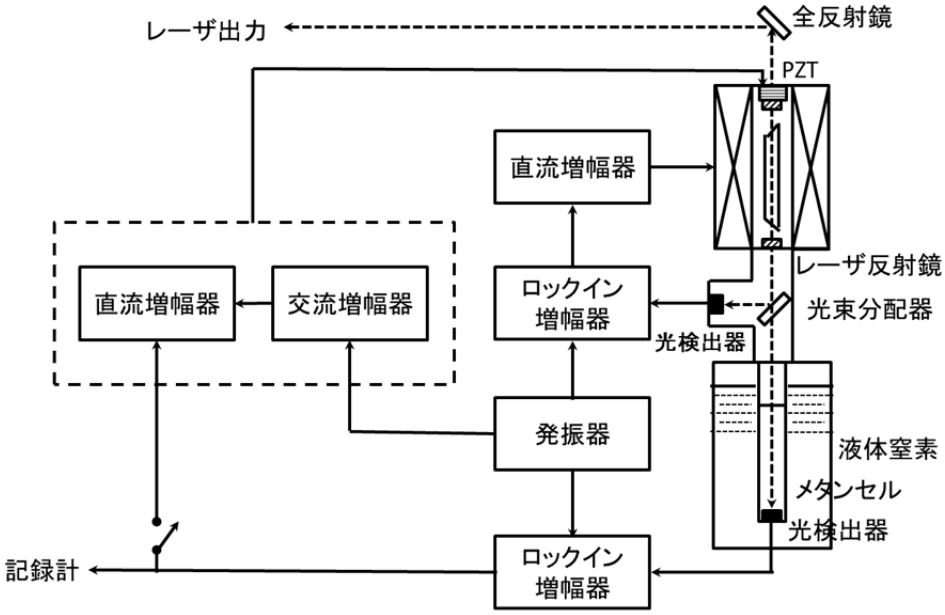

図 3.6 線形吸収形メタン安定化レーザ装置の構成図

レーザ共振器は、3 本の溶融石英製のロッド（直径 15 mm）の両端にインバー製の取付具を接着して端板を固定する構造を採用した。これは、石英ロッドとインバー製の取付具の長さの比を 10:1 にすることにより、熱膨張による共振器間隔の変化を打ち消し、レーザ周波数のドリフト状の変化を抑制するためである。一方に多層膜を、他方に Al 膜を蒸着したレーザ反射鏡は、33 cm の間隔に配置した。レーザ共振器の間隔は、電歪素子（PZT）の電気機械変換効果を採用して制御した。

レーザの出力特性をフラットトップにするための縦磁場発生用の多層ソレノイドは、レーザ管の有効放電部分にわたって一様な磁場(100±1 Oe)を発生させることを目標に製作した。

ソレノイド上部には安定化されたレーザ出力を水平方向に取り出すための全反射鏡とビームを取り出す窓を取り付けた蓋を準備し、ソレノイド内に流れ込む空気と音響振動を遮断することによりレーザの周波数ゆらぎを抑えることを目的に、ソレノイド内の空気を減圧できる構造にした。

長さ 20cm のメタンセルは溶融石英で作製し、窓部分への結露防止を目的にレーザ共振器側に真空部分を設けた。メタンセルの底の部分に銅ブロックを取り付け、制御信号を検出する光検出器（Ge-Au；3×3×10 mm^3）を窒素温度で冷却して使用した。

メタンの吸収スペクトルの半値全幅は、窒素の三重点（-210℃）では 62.9 MHz であり、レーザの出力特性の半値全幅（約 250 MHz）の 1/4 程度に相当する。また、メタンの線形吸収スペクトルの中心周波数の圧力シフトは、メタンセルの冷却温度変化に依存し、窒素の三重点での温度変化を±0.05 K 以内に制御することにより 4×10^{-12} に抑えことができた。また、冷却槽内部をロータリーポンプで減圧することにより 15 分程度で窒素の三重点に到達できた。

制御装置として、レーザ出力のフラットトップ特性の制御と、レーザの周波数ゆらぎの安定化の２系統を準備した。フラットトップ特性は、光束分配器で反射されたレーザ光を室温動作の光検出器（InAs）で検出し、ロックインアンプの二次微分信号で制御した。また周波数ゆらぎ成分は、メタンに吸収されたレーザ光を光検出器（Ge-Au）で検出し、ロックインアンプの一次微分信号を、直流増幅器を介し電歪素子に帰還して制御した。これらの研究成果は1970年に開催されたメートルの定義のための諮問委員会に報告された[3.8)]。

周波数安定性は、ロックインアンプの時定数を30秒に設定し出力信号をペンレコーダに記録した結果から推定した。ソレノイド内の温度変化を±0.01℃にした時のレーザのフリーランニングの安定性は$\pm 8\times10^{-11}$/hであった。比例制御の際にはロックインアンプの出力信号を直接直流増幅し電歪素子に帰還して周波数ゆらぎを制御した。ペンレコーダに記録された信号から推定した周波数安定性は*S/N*の影響を強く受け$\pm 5\times10^{-10}$/hであった。

積分制御の際には、開ループ利得75dB、時定数33秒の積分器を介して直流増幅し電歪素子に帰還した。積分制御時は、積分器のフィルター効果により*S/N*の改善に伴い周波数安定性は$\pm 6\times10^{-12}$/hに改善された[3.9)]。

メタンの線形吸収スペクトルへの安定化の研究では、制御信号を下に周波数安定性を評価した。基準要素のスペクトルの半値全幅は1.15 μm He-Neレーザのラムくぼみの幅に比較して２倍程度広い。しかし、スペクトルの*S/N*は２桁程度改善されており、磁歪同調形安定化光メーザー装置より優れた結果を得ることができた。液体窒素の補給などの課題があり、長時間にわたる安定性の測定が難しい状況であった。

2）飽和吸収スペクトルへの周波数安定化

波長（光周波数）標準を実現するには、短期安定性を中心に安定性をさらに改善することが不可欠となり、周波数弁別感度を顕著に改善することができる飽和吸収スペクトルを基準要素とする安定化レーザの検討を開始した。

最初に飽和吸収スペクトルの発生メカニズムを紹介しよう。飽和吸収スペクトルは、レーザ共振器内にメタンセルを配置することにより観測することができる。飽和吸収スペクトルの発生メカニズムの説明図を図3.7にモデル化して示す。図3.8に示すとおり共振器内ではレーザ反射鏡M_1とM_2でレーザ光が反射されるために、左と右に進む２種類の光が存在することが分かる。また、セル内で熱運動しているメタン分子は、共振器内でレーザ光と相互作用するので一様に吸収されることは理解できよう。メタン分子の熱運動の速度分布を思い浮かべていただきたい。速度分布の中心部には静止しているメタン分子が存在している。それらのメタン分子は左と右に進むレーザ光と２回相互作用するために図3.7 Aに示すように吸収係数の中央部に凹みが発生する。総合利得（Gnet）は、レーザ媒質の利得特性（G）と吸収係数（A）を重ね合わせた形状として観測されるので、Gnetの中央部に突起状の信号として観測される。これを、飽和吸収スペクトルと呼んでいるが、「ラムく

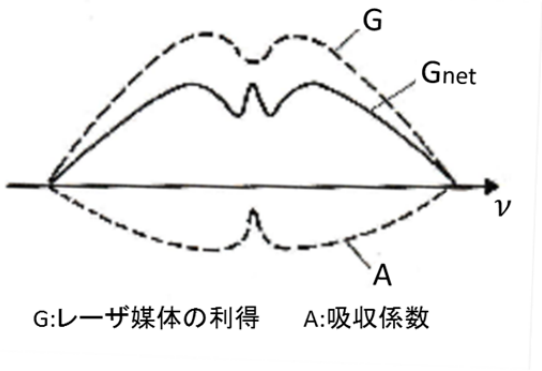

図 3.7 飽和吸収スペクトルのメカニズム

ぼみ」と比較し「逆ラムくぼみ、あるいは、反転ラムくぼみ」とも呼ばれることもある。

飽和吸収スペクトルの半値全幅は、共振器内の電場が弱い理想的な状態では自然幅でありとても狭い。しかし、飽和吸収スペクトルはレーザ光とメタン分子の相互作用の状態やメタンの封入圧力等により 160 kHz から 170 kHz に広がった状態で観測される。このスペクトルの半値全幅は、線形吸収スペクトルの半値全幅に比較し 1/370 程度狭いことになる。このため、周波数弁別感度が高く G_1 の利得を高く確保することができるので、式(3.3)より判るように安定性の改善が期待できる。

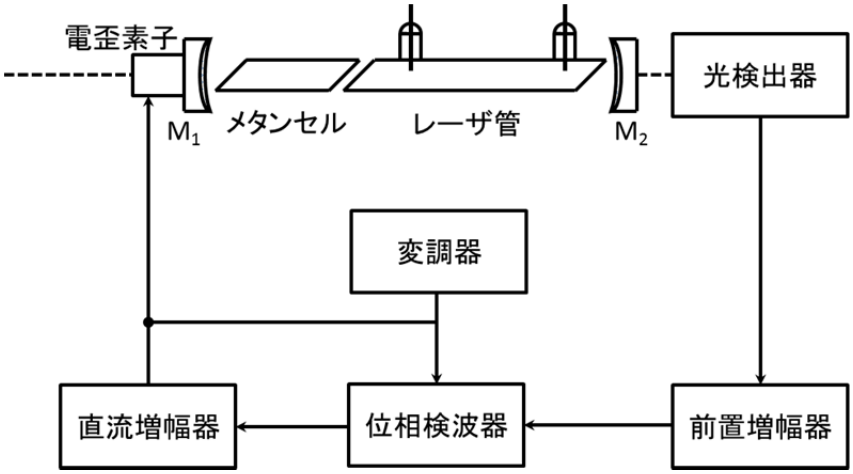

図 3.8 飽和吸収形メタン安定化レーザ装置の構成図

図 3.8 は、飽和吸収形メタン安定化レーザ装置の構成図である。安定化装置の構成は、図 3.6 の線形吸収形メタン安定化レーザ装置の構成図に比較してシンプルである。制御装置の全ての電子回路は、大電力で高耐圧の電子デバイスが入手できるようになり、全て固体素子で製作することができるようになった。

レーザ管は、線形吸収形メタン安定化レーザ装置に使用した 1 本の毛細管で製作したタイプと、図 3.9 に示すように新たに開発した毛細管を 3 分割した低雑音形との 2 種類を用意した。

レーザ管の陰極部分で発生した放電雑音は、陽極側に進む際に移動縞として毛細管内で増幅されレーザ出力の振幅雑音になることはよく知られている。レーザ共振器内で発生す

るこの種の放電雑音は、共振器内の屈折率に変化を及ぼすことになり式(3.2)からも明らかなように周波数ゆらぎの原因になる。このため、１本の毛細管を３本に分割し、毛細管と毛細管の間に 2.3cm の間隔をもうけることにより移動縞を消滅させ、移動縞の増幅を抑える方法を採用した。予備実験の結果、陰極部分で発生した放電雑音は完全に消滅し安定な放電が得られるようになった [3.10]。

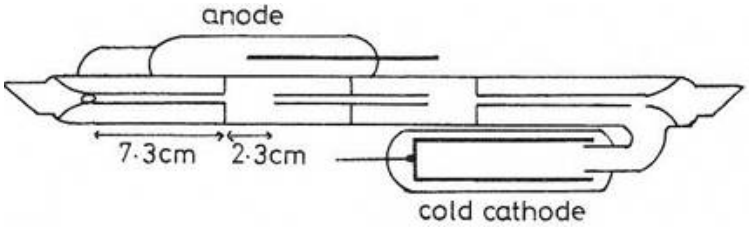

図 3.9 低雑音形のレーザ管

レーザ共振器の長さは、長さ 33cm のレーザ管と、長さ 20cm のメタンセルを配置するために 55 ㎝に設計した。低雑音形のレーザ管には He-^{20}Ne の混合気体を 307 Pa 封入し、メタンセルには 3 Pa の純粋メタンを封入して使用した。

短期安定性は、２台の安定化レーザから得られたビート周波数ゆらぎを F-V 変換してデータレコーダにアナログ信号として収集して、オフラインで電子計算機を利用し AD 変換し、後に周波数領域で統計処理して評価した。長期安定性は、２台の安定化レーザから得られたビート周波数を周波数カウンターで計数し、紙テープに収集したデータを、オフラインでアラン分散法[脚注3.3)]によって評価した。3.39 μm He-Ne レーザのフリーランニング状態での安定性は 10^{-9}～10^{-10} であり、制御時の長期安定性は、従来形のレーザ管の場合には $\sigma(2,\tau)=1.4\times10^{-11}\,\tau^{-1/2}$ と推定された [3.11]。また、低雑音管を使用した際には、放電雑音の低減により $\sigma(2,\tau)=5\times10^{-12}\,\tau^{-1/2}$ に改善することができた [3.12]。

3.3　国家標準の開発 [3.13]

国家標準や計測標準としての周波数安定化技術の開発のために、メタンの吸収スペクトルを基準要素にした線形吸収形と飽和吸収形の安定化の研究を行った。線形吸収線の安定化レーザは、レーザの強い電場などの影響を受け難いので基準要素として優れているがスペクトルの半値全幅が 70 MHz 程度あり高安定化が困難である。他方飽和吸収形メタン安定化レーザは、スペクトルの半値全幅が内部セル方式でも 200 kHz 以下であり高安定化が期待でき、メタンの分子構造上環境の影響を受け難い基準要素のために多くの研究成果が報告されている。また、これまで実施した研究を通し、安定なレーザ共振器の設計、冷陰極直流励起方式の低雑音レーザ管の開発、制御装置の固体デバイス化と周波数オフセット要因の解決方法、不規則信号の解析技術、防振対策など多くの周辺技術の知見を得ている。

脚注 3.3) アラン分散：周波数標準分野で採用されている周波数安定性の評価方法。平均時間 τ で計測した k 番目と k+1 番目の周波数値を y(k)と y(k+1)で表すとアラン分散は $\sigma^2(2,\tau)=\left\langle\frac{(y(k+1)-y(k))^2}{2}\right\rangle$ で与えられる。一般に周波数安定性は、アラン分散値の平方根で示す。

海外の計量標準機関では、レーザビームを拡大し飽和吸収スペクトル内で観測される磁気的超微細構造(MHPF)のスペクトルに安定化が試みられていたが、安定化装置が複雑になることは否めない。NRLM では、これらの研究成果を総合的に見直し得られた新しい情報を基に国家標準として、安定性の向上に限らず、周波数の絶対値を保証することができる、内部セル方式の飽和吸収形メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザ装置の開発に着手した。

1)　国家標準開発の基本的姿勢

国家標準としての安定化レーザを設計するに際し、国際ルールに従うことは基本である。1983 年 10 月に開催の第 17 回国際度量衡総会（CGPM）ではメートルの定義を「メートルは、1 秒の 299 792 458 分の 1 の時間に光が真空中を伝わる行程の長さとする」と決議すると共に、メートルを具現できる 5 種類の安定化レーザを使用基準付きで勧告した。

勧告されたメタン安定化 He-Ne レーザの使用基準は次の通りである。

1)　メタンセルは、レーザ共振器の中あるいは外に取り付ける。
2)　メタンの封入圧力は 3 Pa 以下にする。
3)　波面の曲率半径は 1 m 以上とする。
4)　左右両方向に伝播する光波の強度比は 5%以下とする。
5)　共振器内の一方向に進む光波の平均放射束密度は 10^4 W/m^2 以下とする。

以上の勧告に示されている使用条件の他に、国家標準として重要な安定化レーザの発振周波数を定める物理現象や種々の要因は図 3.10 のように整理できる。

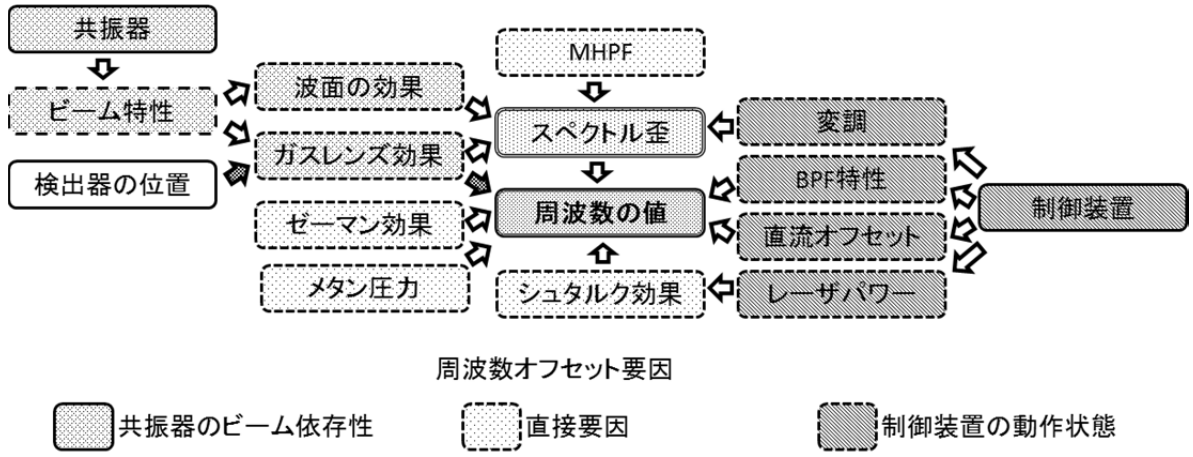

図 3.10 メタン安定化 He-Ne レーザ装置の発振周波数を定める要因

図 3.10 から明らかなようにスペクトル歪によって周波数の値が変化する要因には、波面の効果、ガスレンズ効果、および、変調条件、磁気的超微細構造（MHPF）などが含まれる。この中で、波面の効果とガスレンズ効果は、レーザ共振器のビーム特性に依存する。このため、CGPM 勧告にも波面の曲率半径を定める要因としてレーザ反射鏡の曲率半径を 1 m 以上にすること、また波面の効果が顕著に現れるのを避けるために光波の強度比を 5%以下にすることが定められている。この他にもスペクトル歪は吸収スペクトルを微分信号

に変換する際の変調振幅に依存するので、安定化レーザの操作マニュアルの作成には配慮が必要である。メタン分子の MHPF の存在による飽和吸収スペクトルの歪みは避けることができない要因であるが、大きな周波数オフセット要因でないことは幸である。

また、直接周波数オフセットに影響を及ぼす要因は、圧力シフト、ゼーマン効果の他に制御装置の帯域フィルター（BPF）の特性や位相敏感検波器の直流電圧のオフセット、さらにはレーザパワーの変化に伴い発生するシュタルク効果による周波数オフセットなどが掲げられる。圧力シフトは、メタンの封入圧力に依存する周波数シフトであり、CGPM 勧告でもメタンの封入圧力を 3 Pa 以下に制限している。レーザの平均放射束密度は、本来シュタルク効果に基づく周波数オフセットになるが、レーザパワーは波面の効果やガスレンズ効果にも影響を及ぼすために非線形光学効果による周波数シフトとして取り扱われることが多く、10^4 W/m^2 以下の条件の下で使用するよう求めている。

これらの発振周波数を定める要因の他に、光検出器の位置変化に基づく周波数オフセットが考えられる。このように安定化レーザの発振周波数は多くの物理現象が介在して変化するが、それぞれの周波数要因を系統的に分類し、対策を講じながらレーザ共振器や制御装置の設計・製作に取り組まなければならない。さらに装置完成の暁にはマニュアル作成にも取り組むことになる。

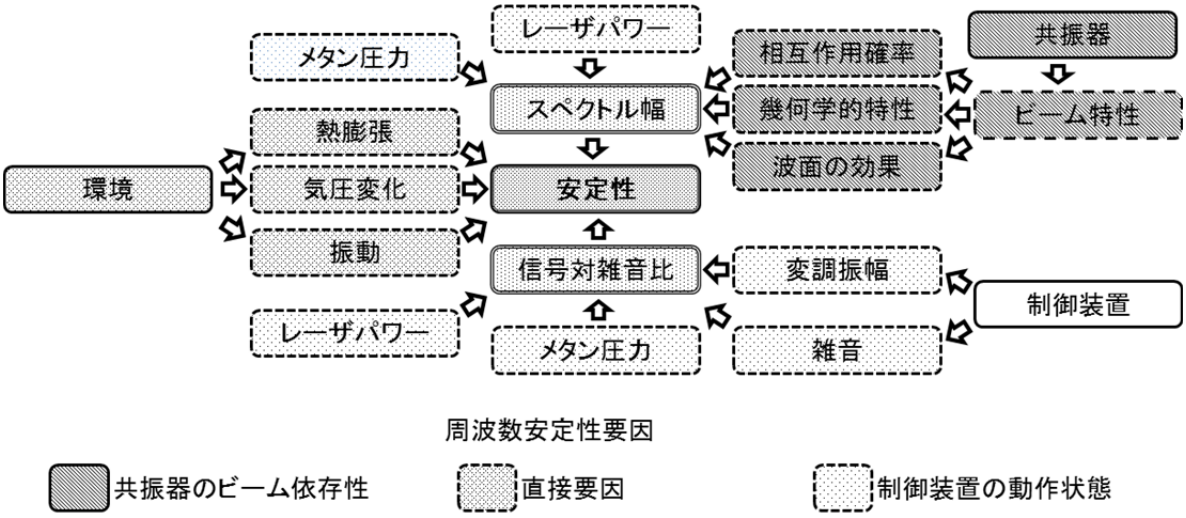

図 3.11 安定性に寄与する要因

安定化レーザが最適制御されている状態で、基準要素としてのスペクトルの quality factor（スペクトルの中心周波数と半値全幅の比）を Q、信号の信号対雑音比を S/N、制御帯域幅を W で表すと安定性は、

$$\sigma(\tau) = \frac{2}{Q\frac{S}{N}\sqrt{W}}\tau^{-1/2} \qquad (3.4)$$

で与えられる。したがって周波数安定性に主に影響を及ぼす要因として、スペクトル幅、制御信号の S/N、および、図 3.11 に示すように安定化レーザの設置環境などが掲げられる。スペクトル幅を直接広げる要因としてメタンの封入圧力とレーザパワーが考えられ、間接

的にはビーム特性に依存する希薄なメタン分子と光との相互作用の確率、ビームサイズに依存する幾何学的特性、波面の効果などが掲げられる。メタンの封入圧力とレーザパワーは、CGPM 勧告の使用条件内で考えなければならないし、その他の要因については共振器の設計に際しビーム特性に配慮が必要になる。

制御信号の *S/N* を定める要因として、スペクトルの信号強度に依存するレーザパワーやメタンの封入圧力、周波数弁別特性の感度に依存する変調振幅、それに制御装置の電子回路から発生する雑音などがリストアップされる。

安定化レーザの設置環境に依存する要因は、共振器の熱膨張に限らず、レーザ管およびメタンセルの窓材や空気の屈折率の温度依存性まで広げて精査が必要である。さらに、共振器内の光路に含まれる空気の屈折率の温度依存性は周波数ゆらぎになる。気圧の変化に依存する要因は、大気圧の変化や空気の流れ及び音響振動に至まで実験を下に調べることも重要である。また、振動につては、地面振動、機械的振動、防振台等の振動振幅と振動加速度について分析すべきである。

2) レーザヘッドの考察

飽和吸収形メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザの性能を左右する要因として、1)で述べたように共振器のビーム特性に依存する波面の効果が最も大きいことが判った。よって、CGPM 勧告を忠実に守りつつ、共振器内のビーム特性に配慮しながらレーザヘッドの設計を開始した。共振器長は、内部にレーザ管（365 mm）とメタンセル(200 mm)を配置するために 600 mm とした。波面の効果によるレーザ周波数のシフトとスペクトルの広がりを最小限に抑えるには、共振器内の波面が平面波であることが望ましい。しかしながら、平面鏡でレーザ共振器を構成すると、レーザ発振を安定に維持することが比較的難しくなり実用的でない。さらに、ガスレンズ効果による周波数シフトは、レーザ管の細管部における回折や Truncation 損失に依存する。このため、これまでに得られた研究成果等を検討し設計条件として

ⅰ） メタンセルの中央部でビームウエストの波面を平面波にすること

ⅱ） レーザビームの毛細管への接触を最小限にすること

を掲げ反射鏡 M_1 と M_2 の曲率半径を解析的に求めた。設計条件ⅰ)を満たすことにより、波面の効果による周波数シフトの相殺が期待できる。この反射鏡の構成によるスポットサイズとビームウエストサイズは 0.96 mm と推定され、メタンセルの両端での波面の曲率半径は 7.48 m 以上であることが理論的に求められている。設計したレーザ共振器の

共振器の長さ		60cm	
反射鏡構成	反射鏡	M1	M2
	曲率半径 スポットサイズ 反射率	7m 0.97mm 98%	2m 1.11mm 94%
レーザ管の長さ		36cm	
レーザ管細管部の内径		3mm	
メタンセルの長さ		20cm[3.14]	

表 3.1 レーザヘッドの仕様

主な仕様を表 3.1 に示す。これらの共振器のパラメータを下にビーム特性に基づくスペクトルの幾何学的広がりは、レーザ波長をλ、ドップラー幅をΓ、ビームウエストサイズ w_0 で示すと次式で与えられる。

$$\Delta\nu_g = \frac{2\lambda\Gamma}{\pi^2 w_0} = 90.9\ \text{kHz} \tag{3.5}$$

一方、相互作用の確率に依存する Transit time broadening は、同様に

$$\Delta\nu_t = \frac{1}{8w_0}\sqrt{\frac{2kT}{M}} = 41.9\ \text{kHz} \tag{3.6}$$

と推定される。このように、内部セル方式を選択すると、レーザ管の毛細管の太さによりビーム径が制限されるために、レーザ共振器の仕様に基づくスペクトル広がりが大きくなる。

レーザ反射鏡の傾きの微動調整機構には運動の再現性が要求されると同時に、微動調整後のためにクランプ機構を備えることが不可欠である。これらの機構は、一時的な温度変化や機械的雑音の影響を小さくすると共に、環境の復元に伴い光学的調整機構も復元することが望ましい。これらの条件を考慮し、角度調整機構に 3 点支持法[3.15]を採用した。この方式の採用により、反射鏡の中央部でのレーザ発振が容易になり、レーザ管の細管部で発生する Truncation 損失を抑えることが容易になった。

大気圧変化や音響振動に伴うゆらぎは、式(3-1)の屈折率 n を介して周波数ゆらぎになるので、レーザ管のブリュースター窓とレーザ反射鏡の間、さらに、レーザ管とメタンセルの間をスリーブで被い空気の流れを防止することが好ましい。使用環境の振動で特に配慮が要求されるのは、振動加速度成分であり特に高い周波数成分には要注意である。レーザ共振器、レーザ管、メタンセル等が幾何学的に非対称な形状をしていると振動加速度の影響を受け易く周波数ゆらぎの原因になる。このため、図 3.12 に示すように軸対称のレーザ管を設計し製作した。

安定化レーザの周波数は、制御信号を検出する光検出器の位置変化によりオフセットする。これは、ガスレンズ効果に基づく現象であり、ビームの中央部分でオフセット量が小さく、光検出器を同軸方向に移動するとオフセット量は大きくなる。したがって、室温動

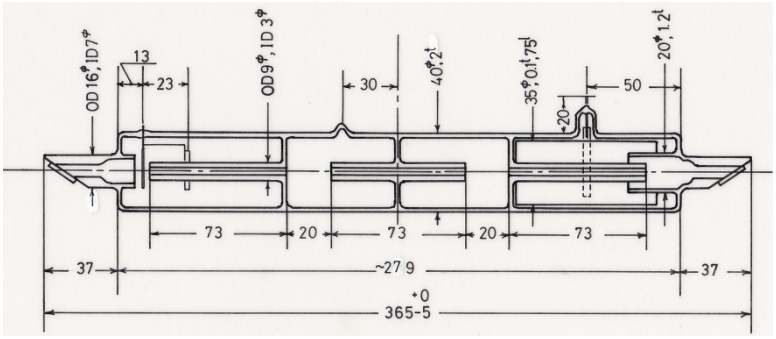

図 3.12 軸対称低雑音レーザ管の概要

作の赤外検出器のように受光素子の面積が狭いデバイスを使用する際には特に取り付け誤差への配慮が必要である。よって、光検出器と溶融石英製の集光レンズを一体構造に設計し、アッセンブリとしてレーザ共振器の端板に取り付ける構造にした。

従来から安定化に使用されていた電歪素子アッセンブリは、ドーナツ状の薄い電歪素子をスタック状に接着し、それをミラーホルダーと共にハウジングに比較的柔らかい接着剤で取り付けられている。このためにレーザ反射鏡は傾くことなく光軸方向に伸縮させることができ周波数制御には適しているが、高い周波数領域では伸縮変化が吸収されることが判った。電歪素子アッセンブリをモデル化し応答特性の理論的解析を行い、接着剤の硬度と伸縮変化の関係を求めた。その結果、従来から使用した電歪素子の応答特性は、接着剤がダンパーとなり 200 Hz 程度までほぼ平坦であるが、約 200 Hz を越えると共振現象が徐々に現れ 980 Hz 付近で共鳴しその後減衰することが分かった。

安定化レーザの短期安定性の改善に際し、式(3.4)から明らかなように制御帯域を広く確保することが要求されるので高い変調周波数が求められる。よって、伸び縮のダイナミックレンジを犠牲にしても応答特性の広い電歪素子を選択し、変調素子として使用することが望まれる。これらの条件を考慮し、共振周波数が約 4 kHz の電歪素子を入手し、変調周波数を 2.5 kHz に設定し広い制御帯域を確保した[3.16]。

3) 制御システムの設計

メタンの飽和吸収スペクトルはレーザの出力特性上で観測されるが、安定化時のコントラストは必ずしも大きいとは言えない。このため、背景光（レーザの出力特性）の影響を最小限に抑えることが課題になる。

そこで、信号強度と周波数シフト量を比較するために、レーザの出力特性を Gauss 形とし、飽和吸収スペクトルを Lorentz 形と仮定し、飽和吸収スペクトルの一次微分信号と、三次微分信号の理論的解析を行った。変調振幅が小さい範囲では図 3.13 に示すように、信号レベルは一次微分信号（実線）の方が三次微分信号（点線）に比較し大きい。傾きに着目すると、一次微分信号は変調振幅に強く依存し変化するのに対し、三次微分信号は変調

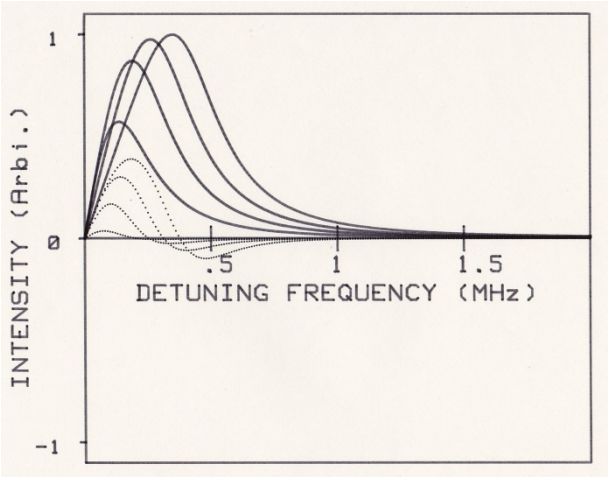

図 3.13 微分信号の比較

振幅に殆ど依存していない。他の理論的解析によれば、一次微分信号は、飽和吸収スペクトルの中心周波数とレーザの出力特性の中心周波数が一致している際には周波数シフトは小さいが、飽和吸収スペクトルの中心周波数がレーザの出力特性の中心周波数から 2 MHz 以上オフセットしている場合には周波数シフトが大きくなる。メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザの圧力シフト（24.3 MHz±0.3 MHz/Torr）や電流シフト（1.4 MHz/mA）は比較的大きいので、メタンの封入圧力誤差および励起電流の設定誤差等を考慮すると、一次微分信号を採用することは好ましくない。

変調振幅に対する三次微分信号の傾きの理論的解析の結果、変調振幅の最適値は飽和吸収スペクトル幅の 1.6 倍であることが分かる。これらの理論的解析結果を下に、国家標準としてのメタン安定化 He-Ne レーザは、三次微分信号を採用して制御装置を設計し製作することにした。

制御装置は、前置増幅器、交流信号増幅器、変調器、位相敏感検波器、積分器、電歪素子制御用電力増幅器、および、レーザ励起電源で構成した。トランス結合の前置増幅器は、励起電源や電歪素子駆動装置の電源に使用している直流高電圧と、制御信号のような微小信号を処理する電子回路とのグランドレベルを分離するために設けた。交流信号増幅器は、最大 60 dBV の電圧利得が得られ、第 3 高調波用の 8 極特性の帯域通過フィルター（±400 Hz（±3 dB））を通して制御信号を増幅した。

AGC 回路付き変調器は、高周波歪みを抑制する帯域通過フィルターを備えた LC 発振器である。さらに、信号強度監視のための第 2 高調波および第 3 高調波の逓倍回路および位相器等で構成した。発信器は、CR 発振回路を基本として振幅変化の制御を行い、さらに Q=30 の帯域通過フィルターを用いて高周波歪みを除去している。

位相敏感検波器のオフセット電圧は、メタン安定化レーザの周波数オフセットとして現れる。たとえば、位相敏感検波器に積算回路を使用すると温度変化に伴い零点がオフセットし、1×10^{-13} より周波数安定性を改善することができなかったことがある。しかし、温度特性の優れた積算回路に交換することにより安定化レーザの周波数オフセットを改善し

たことがある。このように、最先端の安定化レーザを開発する際には電子デバイスの選択も重要である。

レーザの周波数ゆらぎにはドリフト成分が多く含まれるので、ミラー積分回路を２台直列に接続し効率的に周波数ゆらぎの制御を行った。前段の積分器にラグリード形式のフィルター回路を採用し、制御ループのダンピング調整を可能にし、２段目には時定数 0.5s のミラー積分器を接続した。また、アナログスイッチを用いて積分コンデンサーにリセット回路を設け制御ループの開閉を容易にした。

電歪素子制御用電力増幅器には、同相雑音の除去を目指し平衡形電力増幅を採用した。アクチュエータに採用した電歪素子アッセンブリの仕様は、電気機械変換効率が 12 μm/ 1,600 V で、静電容量が約 50 nF である。一般に電歪素子の電気機械変換には非線形性が含まれるのでダイナミックレンジを限定して周波数制御を行うことが求められる。安定化レーザ装置を設置する環境の温度を±5℃に維持すれば、線膨張係数 1×10^{-6} 程度のスペーサーでレーザ共振器を製作すると、共振器長の変化を±3 μm 以内に抑えることができる。したがって、電歪素子アッセンブリの制御電圧は、±400 V 程度確保すれば制御レンジは十分確保できることになる。

一方、制御帯域の遮断周波数における電歪素子アッセンブリのリアクタンスは約 8 kΩ になるので、その消費電力は約 80 W に相当する。よって、電歪素子制御用電力増幅器は、増幅部の発熱を抑えることも考慮に入れ 100 W に設計すればよい。

レーザ励起電源には、小型化のためにスイッチングレギュレータが用いられることが多い。しかし、スイッチング電源を使用して励起するとレーザの周波数ゆらぎにスイッチング周波数で変調された雑音が含まれる。このため、励起電源として、直列制御形で出力電圧 1,800 V、供給電流 10 mA で 1×10^{-4} の安定性を保証することができ、約 4,500 V のトリガー電圧を重畳した定電流電源を準備した。

4)　メタン安定化装置の性能と精度評価

国家標準のように最高精度の装置は、基準にすべく装置が他にないために同じ仕様の装置を複数台製作し相互比較によって評価するのが一般的である。このため、メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザ装置を２台製作し、それぞれのレーザビームを光混合することにより得られるビート周波数のゆらぎを周波数カウンターなどで計数し、統計処理することによって性能評価を行った。

周波数安定性　周波数安定性の評価には種々の手法が採られてきたが、周波数標準の評価に活用されているアラン分散法で評価するのが一般的になっている。図 3.14 は、データ個数 20 個で推定したアラン分散の平方根であり、フリーランニングの安定性を●で、また、周波数安定化時の安定性を○で示している。

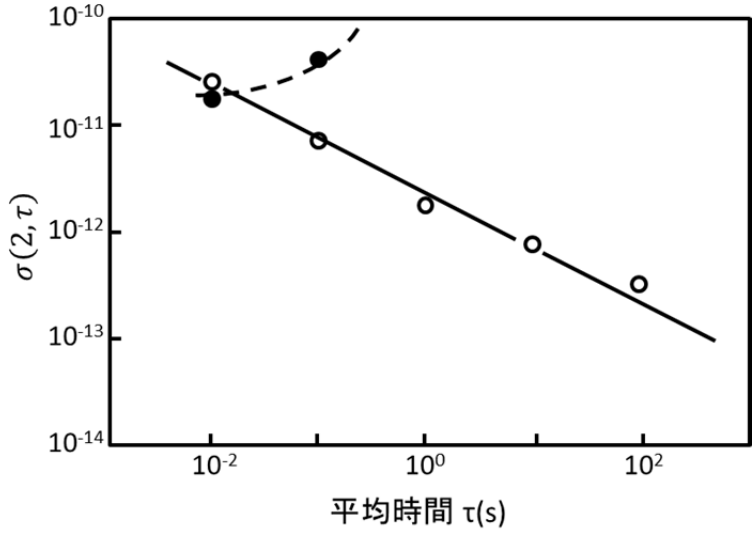

図 3.14 周波数安定性

フリーランニング時の短期安定性は、平均時間が 1 ms＜ τ ＜10 ms の範囲で 2×10^{-11} と推定され、10 ms より長い積分時間領域ではレーザ共振器の熱膨張によりドリフト状に周波数が変化していることが分かる。一方、安定化時の周波数安定性は、$\sigma(\tau)=2.5\times10^{-12}\,\tau^{-1/2}$ と推定され、平均時間 τ =1,000s で 8×10^{-14} に達することが判った。また、一週間の連続運転で測定した発振周波数の残留ドリフト成分（長期安定性）は 750 Hz/日であった。そして、フィードバック制御を繰り返した際に測定した繰返し性[脚注 3.4)]は±220 Hz であり発振周波数の$\pm2.5\times10^{-12}$ に相当している。

<u>スペクトルの広がり</u>　飽和吸収スペクトルは、メタンの封入圧力 p(mTorr)、共振器内の電場 P(μW)に依存し広がることは先に述べた通りである。メタンの圧力広がりは、レーザパワーを 28.2 μW に、また変調振幅を 600 kHz (peak-peak)に保ち、封入圧力を 45 Pa から 1.46 Pa の範囲で測定した結果を最小二乗法でカーブフィッティングし推定した結果、

$$\Gamma(p) = \gamma_0 + 15.6 \cdot p \ \text{kHz} \qquad (3.7)$$

である。ここに第 1 項のγ_0は、不確定性できまるスペクトル幅を示す。

レーザ出力によるスペクトル広がりは、メタンの圧力を 0.53 Pa、変調振幅を 600 kHz (peak-peak)に保ち、レーザパワー28.2 μW から 67.1 μW の範囲で測定した結果を最小二乗法でカーブフィッティングした結果を次式で示すことができる。

$$\Gamma(P) = 2.088\times10^{-5} + 1.625\times10^{3} \cdot P \ \text{Hz} \qquad (3.8)$$

これらの測定結果を下に推定されたメタンの飽和吸収スペクトルの広がりは、レーザパワーを 28.2 μW、メタン圧力を 0.53 Pa (4 mTorr)と設定した際には次式で表される。

$$\Gamma = 150.36\ \text{kHz} + 15.60\ \text{kHz/mTorr} \cdot p + 1.625\ \text{kHz/μW} \cdot P \qquad (3.9)$$

第 1 項の残留ドップラー幅は、式(3.5)と式(3.6)で触れた幾何学的広がりと Transit Time broadening などが含まれており、これらの割合は残留ドップラー広がりの約 88%を占め

脚注 3.4) 繰返し性　メタン安定化 He-Ne レーザ装置をマニュアルにしたがって動作させた際に観測される周波数値。

ている。この測定結果より明らかなように、スペクトルの広がりはレーザ共振器の性能に強く依存していることが分かる。

安定化レーザの動作条件が、メタンの封入圧力 1.3 Pa、レーザパワー50 μW の場合には残留ドップラー幅は 388 kHz と推定される。したがって、Q 値は 1.13×10^{8} と推定される。また、測定された制御信号の S/N 値は約 70 dBV であるので、式(3.4)から推定される周波数安定性は、$1.76\times10^{-12}\,\tau^{-1/2}$ になる。この推定値は、図 3.14 に示した実測値から推定した結果とよく一致している。

繰り返し性　メタン安定化 He-Ne レーザの繰返し性は、メタンの封入圧力、励起電流、変調振幅に基づく周波数シフトに依存する。これらのパラメータ依存性と周波数シフト、および、繰り返し性を表 3.2 にまとめて示す。

パラメータ	パラメータ依存性	周波数シフト
メタンの封入圧力	-825Hz/mTorr	-9.5×10^{-14}
励起電流	-448Hz/mA	-1.1×10^{-13}
変調振幅	29.1kHz/MHz	1.2×10^{-12}
繰り返し性		$\pm1.2\times10^{-12}$

表 3.2 繰り返し性

メタンの圧力シフトの測定結果を下に 0.4 mTorr から 10 mTorr の範囲で最小二乗法にしたがってカーブフィッティングを行った結果、

$$\delta\nu = 1.18\times10^{4} - 7.47\times10^{3}\sqrt{p} + 8.76\times10^{2}p \qquad (3.10)$$

で表される。また、1 mTorr から 10 mTorr の範囲での直線近似では、-825 kHz/mTorr（-6.2　kHz/Pa）である。レーザ共振器内の温度変化に伴うメタンセル内の圧力変化は 1/100 mTorr 程度と推測されるので、安定化レーザの周波数オフセットは-9.5×10^{-14} と推定される。

励起電流を 2.5 mA から 5 mA の範囲で測定した電流シフトは、カーブフィッティングで求められ-448 Hz/mA であった。励起電源の電流値は、分解能 1/100 mA のデジタルマルチメータで設定するように設計されている。また、その電流安定性は 1×10^{-4} である。したがって、±1 デジットの設定誤差による電流変化は 2/100 mA に相当するので、周波数オフセットは-1.1×10^{-13} と推定される。

変調振幅の周波数依存性は、変調振幅を 692 kHz から 1.93 MHz の範囲で測定した。カーブフィッティングの結果は 29.1 kHz/MHz と推定された。変調シフトは、飽和吸収スペクトルの非対称性に依存するために、諸外国の性能評価結果がそれぞれ異なっている。変調用電歪素子の電気機械変化率を下に推定される変調振幅の変化率は 346 kHz/V である。変調電圧の設定精度は 10 mV であるので、設定誤差は 3.5 kHz 程度になる。したがって、変調振幅の設定誤差に伴う周波数オフセットは 1.2×10^{-12} 程度となる。

これらの周波数オフセットが全て独立に発生すると仮定すると、総合設定誤差すなわち

メタン安定化レーザの繰り返し性は±1.21×10^{-12}と推定される。すなわち、マニュアル通りメタン安定化 He-Ne レーザ装置を操作することにより 1.21×10^{-12}の正確さの発振周波数源として使用できること示している。この推定値は、安定性を測定した際に同時に測定した繰り返し性の結果（±2.5×10^{-12}）によく一致している。

再現性　表 3.3 は、周波数オフセットと設定精度をまとめ、再現性[脚注 3.5)]を推定した結果である。表に示すように再現性は、メタンの封入圧力の測定精度、制御システムに組み込まれた赤外検出器アッセブリーの設定位置誤差、位相敏感検波器の零点のオフセット、および、共振器内ビームの波面の曲率半径やビーム径に依存する光学的非線形効果に基づく周波数オフセットに依存する。メタンの封入圧力の精度は、計測器の種類によって多少異なるが 10 mTorr 前後の圧力の範囲では±1/3 mTorr の精度で測定することは難しいことではない。この封入圧力の精度に基づく周波数オフセットは、メタンの圧力シフトから容易に推定可能であり-3.1×10^{-12}である。

パラメータ	オフセット周波数	設定精度
メタンの封入圧力	-3.1×10^{-12}	封入精度　±1/3mTorr
光検出器の位置変化	6.0×10^{-12}	設定精度　±50μm
PSDの零点変化	5.7×10^{-12}	零点変動　±1mV
光学的非線形効果	1.3×10^{-11}	スペクトル幅　約70kHz
再現性	±1.56×10^{-11}	

表 3.3 再現性

赤外検出器アッセンブリは、取り付け方法を吟味することにより±50 μm 以内の取り付け誤差で位置合わせが可能である。この取付誤差に対する周波数変化は 532 Hz と推定されるので相対変化は 6.0×10^{-12}と推定される。

一方、位相敏感検波器の零点のオフセットは、乗算器を厳選することにより±1 mV に抑えることは可能である。したがって、直流電圧オフセットに伴う周波数オフセットは約 500Hz であると推定できるので、5.7×10^{-12}に相当する。

メタンと光電場の相互作用時の不確定性に基づく周波数オフセットは、Gauss ビーム中での飽和吸収スペクトルの理論と波面による周波数シフトを基に推定すると次のようになる。メタンの飽和吸収スペクトル線幅のうち均一幅成分は、主にメタンの圧力拡がりと考えられ約 70 kHz と推定されている。均一幅から推定される光学的非線形効果に基づく周波数オフセットは 1.3×10^{-11}になる。

これらの結果から推定される周波数の再現性は、±1.56×10^{-11}となる。したがって、ここで述べた設計思想に基づいてメタン安定化 He-Ne レーザを独立に製作した場合には、

脚注 3.5) 再現性　周波数安定化レーザシステムをマニュアルにしたがって同じ仕様で製作したり部品交換を行った場合に観測される周波数値。

$\pm 1.56\times10^{-11}$ で発振周波数が保証できることを示している。

3.4　評価技術の開発

1) 赤外線の可視化

赤外領域のレーザの開発や安定化の研究で掲げられていた課題は、出力が大きい炭酸ガスレーザ等は別としても、出力がそれ程大きくないレーザの場合にはビームの可視化が最も期待された。当時、近赤外領域で使用できる可視化装置は、赤外ビディコンや暗視管等であった。磁歪同調形安定化 1.15 μm He-Ne 光メーザーの実験の際には暗視管を可視化の手段として利用していたが、感度がよくなく、受光面等にも課題があった。この種の可視化装置は 2μm より長波長側では利用できないために、メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザの研究に際しては、633 nm He-Ne レーザのビームを参照光としての実験が続いたことを記憶している。一時 3.39 μm He-Ne レーザの反射鏡に、ゲルマニュウムが使用されていたために可視光が透過せず手探りの状態での実験が続いた。出力が大きい炭酸ガスレーザなどでは、ビーム観測に感熱紙を使用していた研究者の方も多かったが、3.39 μm 帯ではレーザ出力が弱く使用することはできなかった。

そのころ、液晶の研究が広く行われるようになり、3.39 μm He-Ne レーザのモニターにコレステリック液晶を利用することが試みられた。最高感度は 20 μW であったが、70 μW 以上のレーザ出力が得られる場合には、モードパターンの観測までできるようになり当時としては画期的な可視化の手段となった [3.17)]。

2) スペクトル解析技術

レーザの周波数は、3.3 で述べてきたように種々の物理現象の他に設置環境の影響を強く受け易い。このため、レーザの安定化の研究では、安定化レーザの設置環境状態や周波数変動の要因等を定量的に把握することと、安定化レーザ装置の動作状態を的確に判断することも求められる。これらの課題を克服するために、不規則信号の解析手段としてスペクトル分析技術を導入した。当時は最近のようにパーソナルコンピュータが普及しておらず、リアルタイムでの解析は困難であり、磁気テープにデータを収集し、オフラインで計算機処理する方法が最善の手段であったように記憶している。このため、実験室にある利用できそうな装置等はなんでも活用していた。

あるとき、安定性の評価に必要なデータ収集を行いながら、隣室で実験の打合せを行っていたことがある。データ収集が終了した後に、収録データをモニターで確認の際に、それまでに観測したことのない現象が記録されていることに気がついた。原因追求を行ったが容易に判明しなかったために、収録データをイヤホンで再生したところ隣室での打合せの声がかすかに聞こえるではないか。話し声がレーザ共振器内の光路に音響振動として伝搬しレーザ周波数が FM 変調された状態で記録されたことが判った。このように、実験に携帯ラジオのイヤホンまで持ち出したこともあったのである。

スペクトル解析のプログラムの準備が済み、振動センサーの借用の約束が得られ、最初に実験室の環境測定として振動のパワースペクトル密度解析を行った。板橋庁舎の実験室の環境は優れておらず、防振台の上ででも地面振動のほかに空調設備の機械的振動らしき信号が観測された。また、2台の安定化レーザから得られたビート信号の周波数ゆらぎのパワースペクトル密度には、振動成分のほかに音響振動成分や電気的雑音成分さらに空調の温度変化のスペクトルが観測された。

パワースペクトル密度は、物理量の分散値を周波数領域に変換したものである。したがって、観測されたそれぞれのスペクトルについて三角近似でスペクトル密度を求めることにより、分散値からスペクトル発生要因の物理量を近似的に定量化することができる。さらに正確な定量値を推定する手段として、寄与率の推定方法がる。寄与率βは、スペクトルの発生要因のパワースペクトル密度を$S_{xx}(f)$、ビート周波数ゆらぎのパワースペクトル密度を$S_{yy}(f)$、発生要因とビート周波数ゆらぎのクロススペクトル密度$S_{xy}(f)$で表すと次式から推定できる。

$$\beta = \frac{\int_0^{\infty} \frac{|S_{xy}(f)|^2 \mathrm{d}f}{S_{xx}(f)}}{\int_0^{\infty} S_{yy}(f) \mathrm{d}f} \tag{3.10}$$

たとえば、安定化レーザの環境温度依存性は、サーミスター温度計で測定した室温変化とビート周波数ゆらぎのデータから推定したパワースペクトル密度とクロススペクトル密度を式(3.10)に代入することにより、室温変化 70s 後に 4.26 kHz/℃の割合で安定化レーザの周波数に変化を与えることが定量的に推定できた [3.18]。

ビート周波数は 2 台の安定化レーザの周波数差であるので、双方の安定化レーザの動作状態がビート周波数ゆらぎに含まれていることは理解できるであろう。しかし、ビート周波数ゆらぎに変化が観測された時、どちらの安定化レーザの動作状態がビート周波数に変化を与えたのかを識別することはできない。そこで2台の安定化レーザの制御信号とビート周波数ゆらぎのパワースペクトル密度とクロススペクトル密度を式(3.10)に代入し寄与率を推定し、ナイキスト周波数領域で分析することにより、それぞれの安定化レーザ装置の動作状態を独立に解析できるようになる [3.19]。

スペクトル解析技術は、周期性をもつ不規則信号に限らず、広い周波数領域わたりパワー密度を持つようなホワイト雑音の信号解析にも有効であり、安定化レーザの性能評価や性能改善の貴重なツールとなった。これらのスペクトル解析技術を適用することにより、安定化レーザの制御技術の高度化に貢献することができた。

3) オフセットロック装置

メタンの飽和吸収スペクトルは、3.39 μm He-Ne レーザの発振領域で一本のみ観測される。このため、2台の安定化レーザの周波数が接近しているためにビート信号の観測が比較的困難である。さらに、ビート周波数からは、どちらの安定化レーザの周波数が高いの

か、あるいは、低いのかを判別することは困難である。このため、1台のメタン安定化 He-Ne レーザ（マスターレーザ装置）の周波数ν_0に既知の周波数f_0（オフセット周波数）を加算した周波数ν_0+f_0で動作する3台目のレーザ(オフセットロックレーザ装置）を準備した。すなわち、オフセットロックレーザ装置は、ν_0+f_0の周波数を維持するようにマスターレーザの周波数を忠実に追従する装置である。したがって、オフセットロックレーザとメタン安定化 He-Ne レーザのビート周波数を観測することにより、オフセット周波数を基準にしてメタン安定化 He-Ne レーザの発振周波数の状態を正確に観測できるようになる。

オフセットロックの手法として、レーザの短期安定性があまり優れていない場合には周波数ロック方式[3.20)]を、短期安定性が優れている場合には位相同期方式[3.21)]を採用するのが一般的である。周波数ロック方式のオフセットロックレーザ装置は、周波数ゆらぎが 1.2×10^{-13}でフリッカー雑音レベルに達する結果を得ている。これに対し、位相同期方式のオフセットロックレーザ装置は、積分時間が 4 ms< τ <1,000 s の範囲でのビート周波数ゆらぎは $35\,\tau^{-1}$Hz と推定され、オフセット周波数 5 MHz で測定したトラッキング誤差はマスターレーザが周波数変調されている状態で 4 Hz であった。

メタンの吸収スペクトルは 3.39 μm He-Ne レーザの発振領域に一本のみ存在し、安定化レーザの基準要素としては相互干渉の影響が無く優れているが、反面、メタン安定化レーザの評価に際してはオフセットロックレーザ装置を準備することが不可欠となる。

3.5　国際認証への道

安定化レーザの研究に携わり、国家標準の位置づけの重要性を念頭に仕事を進めた。ポータブルタイプのメタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザ装置の評価がほぼ終了し、その結果[3.22)]を持って 1986 年に精密電気磁気精密測定国際会議（CPEM）ワシントン会議に出席した。

会議には大勢の著名な研究者が参加していたが、中でも 2005 年にノーベル物理学賞を受賞した J.L. Hall 先生や可搬形 633 nm ヨウ素安定化 He-Ne レーザを開発した H.P. Layer さんが発表内容に関心を示してくれた。J.L. Hall 先生は、飽和吸収形のメタン安定化 He-Ne レーザを提案し数々の成果を発表し、安定化レーザの研究分野の牽引者でもある。主な質問はメタン安定化 He-Ne レーザの周波数シフトを低減させるためにどのような設計思想の下で研究を進めたか？であったように記憶している。筆者は、CPEM 後 J. L. Hall 先生の研究室をお尋ねする約束をしており、初めてのボルダー訪問であったので、デンバー空港からのアクセスについて親切な説明を受けた。

H.P. Layer さんからは、制御装置の詳細について質問を受けたと記憶している。そして NIST のゲイザバーグ庁舎の研究室に招待を受け、H.P. Layer さんの研究室で開発したヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの性能とその後の活用方法について話を伺った。開発の目的・用途についての質問には、国際比較や比較測定の際の仲介器として、また実用的な長さ標準としての普及を挙げていた。

デンバー空港のバスターミナルで多少戸惑ったものの、無事ボルダーに到着。コロラド大学の J.L. Hall 先生の研究室を訪問すると、部屋の真ん中に大きなテーブルが数台置かれ、山のように積み上げられた論文等の別刷りが、またテーブルの下にはトランスや電気部品それに実験に使用する機材がところせましと置いてあるのが目に入った。

部屋の片隅に置かれていた先生の机の側で、メタンのレーザ分光の研究成果について、別刷りの山の中から資料を探し出し説明を受けた。論文については、既に目を通したものが殆どであったが、詳細に説明を受けたことと質問等を通し理解を深めることができた。その後、実験室に案内され、研究室で説明を受けたレーザ分光装置を始め、安定化レーザの紹介を受けた。

(1) BIPM との国際比較 [3.23)]

J.L. Hall 先生に案内され安定化レーザの研究グループを訪問した際に、コロラド大学に留学していた国際度量衡局（BIPM）の J-M Chartier さんと R. Felder 氏さんに会うことができた。NRLM で開発したメタン安定化 He-Ne レーザについて意見交換した後、BIPM との国際比較を打診した。先方は、二つ返事で OK。帰国後、NRLM で報告し 1988 年の CPEM 筑波会議に合わせ、日本で初めての BIPM との安定化レーザの直接比較の実現に向け準備を開始した。

国際比較に向け準備の段階で先方から、渡航費の補助とヨウ素安定化 633nmHe-Ne レーザの比較も同時に行うべく打診がなされ、NRLM としては、渡航費補助については「招へい研究制度」に申請すること、ヨウ素安定化レーザについても国際比較を受け入れることを了承した旨連絡した。招へい制度による予算も確保された段階で、1988 年 6 月 6 日から 2 週間にわたりメタン安定化 He-Ne レーザとヨウ素安定化 He-Ne レーザの BIPM との直接比較を NRLM で実施することを決定した。

BIPM のレーザ装置の通関手続の補助のために成田空港に出向いた際に、J-M Chartier、R. Felder さん達と同行の BIPM の P. Giacomo 局長と対面し挨拶を交わし、通関手続も特に問題はなく終了した。後日、日本通運が、約 1.5 m 立方の 2 個の木箱に収納された BIPM の安定化レーザを搬入。それぞれの木箱にはメタン安定化レーザとヨウ素安定化レーザ本体と、国際比較に使用される工具や消耗品等が収められていた。J-M Chartier さん曰く、国際比較の際には「この木箱」を持って出かけているとのこと。ヨーロッパの国家計量標準機関との国際比較の際には、「木箱」を自動車に積み込み自ら運転し比較測定を行っているとのことであった。

R. Felder さんは BIPM4.3 と識別されたメタン安定化 He-Ne レーザ装置を持参した。これに対し日本側は、NRLM#1 と NRLM#2 と識別した 2 台のメタン安定化レーザ装置を準備した。これら 3 台の安定化レーザは、全て 1983 年の CGPM 勧告の使用基準を満たしていたが、NRLM#1 および NRLM#2 と BIPM4.3 とはメタンの封入圧力が異なった仕様の下で製作されている。その結果、BIPM4.3 と NRLM#1 の周波数差は、

$$(\mathrm{BIPM4.3}) - (\mathrm{NRLM\#1}) = 4.209 \pm 0.233\ \mathrm{kHz} \qquad (3.11)$$

であった。この測定値は発振周波数に対し 4.78×10^{-11} であり、それまでの比較結果のチャンピオンデータにはならなかったが、1983 年の CGPM 勧告値（$\pm1.3\times10^{-10}$）を十分満たしていることが分かった。測定結果の標準偏差が 233 Hz であったことは、安定化レーザ装置とオフセットロックレーザ装置が常に安定に動作していることの証であり評価された。

633 nm ヨウ素安定化レーザの比較測定は、BIPM が BIPM4 および BIPM10 と識別した２台の安定化レーザと、NRLM が NRLM#1、NRLM#2、NRLM#3 と識別した３台の安定化レーザとの間で行われた。比較測定は、主に NRLM#1 と BIPM4 の間で実施され、ヨウ素の 4 本のスペクトル線にそれぞれ安定化しながら進められた。その結果、NRLM#1 の周波数差は、

$$(\mathrm{NRLM\#1}) - (\mathrm{BIPM4}) = 0.9 \pm 2.6\ \mathrm{kHz} \qquad (3.12)$$

であり、この値は 633 nm ヨウ素安定化レーザの発振周波数に対し $+7.4\times10^{-12}$ に相当する。この比較測定結果は、当時 BIPM との間で実施されていた 12 カ国との比較測定結果の中で最も小さい値と評価された。

(2) ソビエト連邦(VNIIFTRI)との比較測定 [3.24)]

日ソの研究・技術交流の一環として、ソビエト連邦国立物理工学研究所・電波工学研究所(VNIIFTRI)からの要請を受け、1990 年 12 月 14 日から 27 日にわたりメタン安定化レーザの国際比較を実施した。比較測定を前に Domnin さん（担当研究者）と Tatatenkov さん（担当部長）それに Bukharov さん（コーディネーター・通訳）との事前打合せで、VNIIFTRI の安定化レーザ装置(M101)は、1986 年に BIPM の安定化レーザ(BIPM.3)との比較測定を行ったことを知らされた。さらに、NRLM との比較測定を実施する前(1990 年 11 月)に発振周波数の絶対値の測定を行い 88 376 181 601.3±0.3 kHz の結果を得ていることも同時に知らされた。

VNIIFTRI の安定化レーザ装置(M101)は、NRLM で開発した安定化レーザの 1.5 倍程度長く設計されていた。1983 年の CIPM 勧告の使用基準を満たしているが、飽和吸収スペクトルの検出方法として、光検出器の代わりに誘導オプトガルバニック効果[脚注 3.6)]を採用していた。よって、光検出器を必要としないために光検出器の位置変化に伴う周波数オフセットを避けることができる利点を備えている。

安定化レーザの周波数差は、M101 の発振周波数を基準とし NRLM#1 の動作パラメータを変えながら測定され、

$$(\mathrm{M101}) - (\mathrm{NRLM\#1}) = -4.933 \pm 0.137\ \mathrm{kHz} \qquad (3.13)$$

であることが分かった。

BIPM と VNIIFTRI との２回の比較測定の結果、NRLM の安定化レーザの周波数は、メ

脚注 3.6) オプトガルバニック効果　中性原子が励起原子によってイオン化される場合に電子が放出され効果。ペニング電子をレーザの励起電流から検出する方法である。

タンの封入圧力の違いにより 4.2 kHz 低いことが分かった。昨今、計量標準の同等性が重要視されグローバル MRA（Mutual Recognition Arrangement ） への参加の下、各国の計量標準機関との間で基幹・補完比較結果などが実施され、それらの結果は BIPM のホームページに掲載されているようになっている [3.25]。1990 年以前に BIPM と VNIIFTRI との間で実施した国際比較が我が国にとっても国際認証のさきがけだったのかも知れない。

3.6　日本製装置の国際舞台での活用

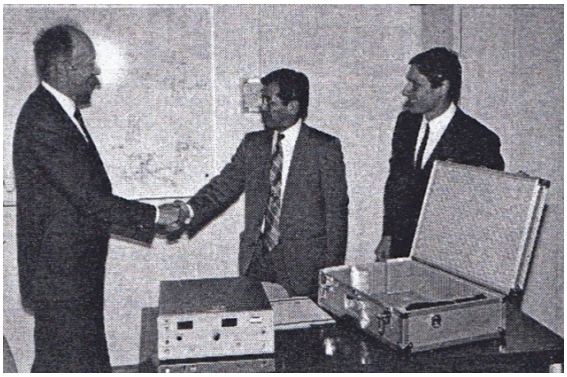

図 3.14 装置の引き渡し

BIPM との国際比較で活用したメタン安定化 He-Ne レーザの制御装置とオフセットロック装置は、国際比較の際に BIPM の担当者にその性能が認められ、BIPM から同型器の発注申請がなされた。装置をアッセンブルした製造メーカと調整し、NRLM を通し製造メーカから寄贈すべく提案が出され、1988 年に開催された第 77 回国際度量衡委員会に度量衡委員として出席された飯塚幸三元工業技術院長から BIPM で引き渡しが行われた。

写真（図 3.14）は飯塚幸三工業技術院院長より Quinn 国際度量衡局長へのオフセットロック装置の引き渡しの様子である。この日本からの貢献に対し Quinn 局長より感謝の意が伝えられている [3.26]。

４．ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザ

4.1 ヨウ素安定化 He-Ne レーザの概要

He-Ne レーザで、最初に発振が報告されたのは近赤外の波長 1.15 μm 線であったが、すぐに、可視から遠赤外にわたり多数の発振線を持つことが確認された。そのうち、出力の大きい赤外の 3.39 μm 線と、出力は比較的小さいが目に見える赤色の 633 nm 発振線が注目された。この 2 つの発振線の上準位は共通で、通常利得の大きい赤外の方が発振する。そのため、赤外を通さないパイレックスなどで窓材を作ると 633 nm 線のみを選択して発振できる。レーザ管長 10 cm 程度の小型のものは単一周波数で連続発振(CW)し出力は 1 mW 弱、長いものでは 2 m のものもあり、縦多モード発振で 50 mW が得られる。CW 発振を得るためには、直流放電による励起方式が用いられる。この放電の熱は共振器長を伸ばし、レーザの発振周波数がそれにつれて変化するので、このままでは、発振線の周波数安定度は利得の幅か、縦モード間隔（30 cm の共振器長で 500 MHz）に限られる。しかし、各発振線そのものの幅は Schawlow-Townes リミットからは mHz のオーダーと推定され [4.1]、発振周波数の安定化を行えば、かなり高い精度の周波数(波長)光源になることが期待できる。その頃の長さ標準であったクリプトンランプの波長に近いこともあり、波長標準として期待された。

633 nm レーザの波長安定化では、最初出力曲線の形状を使う方法が開発され、ついで、出力曲線に現れる約 100 MHz の幅の Ne 原子吸収線のラム凹みの中心に安定化する方法が行われた。しかしそれでは正確さは 10^{-8} 程度に限られ、クリプトンランプの波長精度に及ばない。赤外 3.39 μm 線は、3 章で述べられたように、狭い線幅のメタン分子の特定の吸収線を使って高精度に波長安定化がなされた。1969 年に Hanes らはこれと同じことがヨウ素分子吸収線を用いて可能であることを示した。彼らは、ヨウ素分子スペクトルの超微細構造線がこの波長域にあることを見出し、レーザ共振器内にヨウ素分子を封入した内部吸収セルを入れ、数 MHz 程度の幅をもつ反転ラムくぼみを検出し波長安定化を行った [4.2]。この結果、1970 年の国際度量衡委員会（CIPM）は、この方式を将来の 1 次波長標準候補としてその性能を調べることを勧告し、計量研究所(NRLM)では、田中、櫻井、黒澤によるヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの開発が行われることになった。この研究・開発の詳細は次節で述べられる。用いられた原理の多くは 3.39 μm メタン安定化レーザとほぼ同じであるが、この節では、ヨウ素安定化 He-Ne レーザの原理と研究要素をまとめておく。

ヨウ素分子は波長 500-650 nm の範囲に多数の吸収線を持っていて、可視域の良い波長マーカーとして知られていた [4.3]。レーザ分光学が発展すると、1 つの吸収線には多数の超微細構造線があり、それらが 1 GHz の範囲に広がっていることがわかった。丁度 He-Ne レーザの発振する 633 nm の付近には、吸収係数は小さいが、$B^3\Pi_{0u}^+ \leftarrow X^1\Sigma_g^+$, 11-5 バンド R(127) という電子遷移の超微細構造成分がある。この遷移は 21 本の超微細構造成分を持ち、そのうち、図 4.1 に示すように、周波数の高い側から名付けて、d～ j の 7 成分が 633 nm の発

振線と一致している[4.4]。d～g と i～j の成分はそれぞれ約 40 MHz の範囲に分布しており、

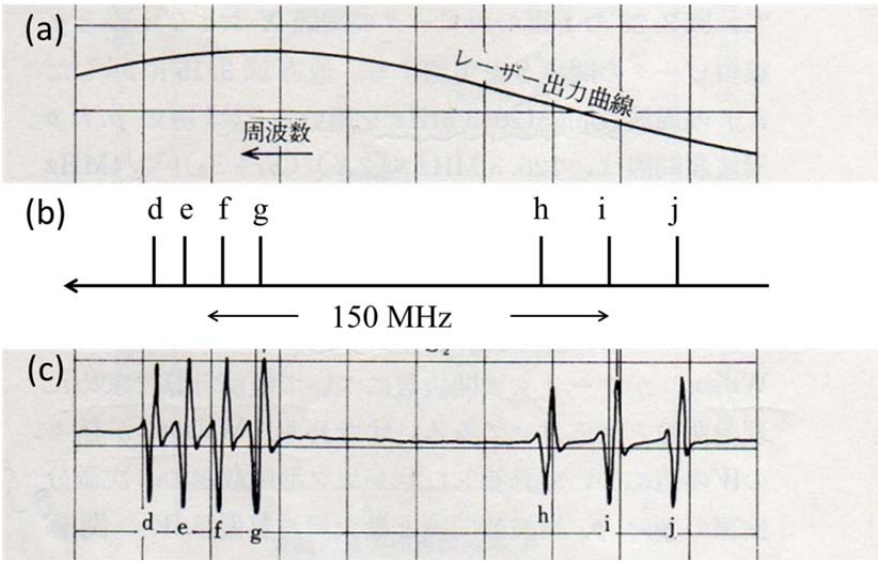

図 4.1　ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザ[4.5]
(a)　出力曲線　(b)　ヨウ素の超微細構造成分の吸収位置　(c)　吸収線の 3 次微分信号

それらは約 150 MHz 離れて存在している。それらの各超微細構造線の線幅は圧力や飽和による広がりを持ち、通常数 MHz であるが、常温では、分子のドップラー効果のため数百 MHz に広がっている。これが重なりあう結果、全体約 1 GHz の幅をもつ 1 本の吸収線に見られる。

広い吸収線広がりの中から 1 つの超微細構造成分を検出する手法が反転ラムくぼみ法である。これは吸収が光の強度に対して飽和して比例しないことを利用する現象である。ある構造成分の共鳴周波数からずれた周波数で発振している場合、ずれの周波数をドップラー効果により補正する速度の分子が光と共鳴する。共振器の光軸方向の分子の運動を考えた場合、光は両方の鏡から分子に向かって来るので、+v と−v の速度を持つ分子が光と共鳴する(図 3.7 参照)。これらの分子は、それぞれ同じ数だけ存在するので、片方から来る光の 2 倍の吸収が起こることになる。しかし、発振線が丁度共鳴周波数に一致するとき、速度 0 の原子が一度に 2 倍の光と共鳴するので、飽和のために吸収が 2 倍より減ることになる。その結果、共鳴周波数で吸収が減る分だけ出力が増加し、吸収線の幅を持つ突起となって現れる。これが反転ラムくぼみと呼ばれ、ドップラー広がりの中から吸収線の狭い幅の信号が検出できる原理である。

しかしながら、R(127)遷移の場合吸収係数が小さく、出力曲線上では反転ラムくぼみは確認できない。そこで、Hanes らは、周波数を数百 Hz の正弦波で周波数変調し、この変調周波数に同期検出することを考えた。このとき、変調周波数で同期検出すると、出力曲線の 1 次微分信号に比例した信号が、変調の 3 倍周波数で同期検出すると 3 次微分信号に比例した信号が得られる[4.6]。これらの微分信号の大きさは変調の振幅と曲線の幅の比に比例

し、振幅が幅程度になるとき最も大きくなる。したがって、変調の振幅をちょうどヨウ素の線幅程度にすると、出力曲線の微分信号は小さくなり、反転ラムくぼみの微分信号が大きく検出できる。1 次微分信号では、まだ、出力曲線の微分が大きいが、図 4.1(c)のように、3 次微分信号では、ほぼ出力曲線に影響されずにヨウ素の反転ラムくぼみの 3 次微分信号が検出できる。こうして、3 次分信号を検出し、これを周波数弁別曲線として使い、発振周波数が常に中心に戻るように比例積分制御を行うことで、レーザ周波数をヨウ素の超微細構造吸収線の中心に制御することが可能になる。

安定化のためには、検出信号が、1)共鳴線の中心の周波数で 0（ゼロ）を横切ること、2)横切る信号の傾きの大きさが雑音に比べて出来るだけ大きいことが重要である。1)に関しては、0 からのずれをオフセットというが、これか原因で周波数シフトを生じ、正確さに影響する。オフセットの原因としては、バックグラウンド曲線の影響、吸収線の形の非対称性、吸収線のシフトなど吸収線の質によるものと、検出方法や検出装置から生じるものがある。正確さを良くするためにはこれらをできるだけ取り除く必要がある。2)に関しては、制御したとき得られる周波数(波長)安定度に影響する。雑音が同じなら、信号が大きく、線幅が狭いほどこの比は大きくなる。ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの場合、メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザと比較して、線幅が数 MHz と広いこと、飽和吸収信号が小さく 3 次微分信号でなければ安定化信号として使えないこと、そのために変調振幅も大きいことが欠点になる。このため、最適なヨウ素の蒸気圧(圧力広がり)、最適な共振器構成および最適な共振器内発振出力（飽和広がり)、また、信号検出のための最適な変調振幅(変調広がり)と変調周波数が模索されなければならない。雑音を小さくするには、低雑音レーザ管の開発、検出器雑音の低減化、共振器の堅牢化、振動・音響雑音の除去などがある。そして、これらの信号による最適な制御条件が求められなければならない。

正確さや安定度の評価には 2 台の独立に安定化したレーザのビート周波数を一定の積算時間で測定して処理したアラン分散が使われる。ヨウ素の場合、発振領域内に通常 7 本程度の成分があるので、別々の成分に安定化することで、2 台のビート信号が検出でき安定度を評価できる利点がある。同じ積算時間で最も小さな分散を得る方法、積算時間を長くしたとき到達できる最小の分散値が問題になる。また、7 本の成分にわたって比較し、行列の表を作り、レーザの正確さが評価できる。また、どの線が基準として最も良いかを総合的に評価できる。このようにして、安定度、正確さともに、精度 10^{-11} を求めて、ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの開発研究が行われた。

4.2　田中敬一先生を巡るヨウ素安定化レーザ開発の思い出

田中敬一先生は日本ではじめてヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザを開発した人物で、大正 13 年のお生まれである。板橋の計量研究所に入所して筑波移転の 2 年後、北海道大学応用物理学科教授として転出された。研究室員達は田中先生よりおよそ 20 才以上は年が離れていたが、足かけ 15 年ほどご一緒のグループで仕事をさせて頂いた。昼食はいつも皆が一緒、学会も研究会もほとんど一緒だった。この節では田中先生のヨウ素安定化レーザ研究の技術的側面とそれをサポートした職人達の思い出を綴る。

メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザの研究がスタートした時期より少し後の 1970 年メートルの定義のための諮問委員会（CCDM）の話題として、「633 nm He-Ne レーザがヨウ素分子の吸収線を基準にして周波数安定化できる」との情報がグループに届いた。当時オーストラリア国立標準研究所（NSL）の留学から帰国した田中先生は、干渉測長の光源に使える小型 633 nm He-Ne レーザの開発をはじめていたが、早速、ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの開発に着手した。

最初の 633 nm He-Ne レーザは図 4.2 に示すような内部鏡レーザで、外管は太さ 35～40 mmφの溶融石英製の二重管で、長さは 100～250 mm の範囲でいろいろと製作した。中心には内径はφ1～1.5 mm 程度の毛細管が入れてあり、両端は平面鏡と球面鏡である。レーザ共振器の良さ（損失の少なさ）を見る実際的な指標は、如何に小さなレーザを作れるかによって評価できよう。その様な観点から試行錯誤を繰り返した結果、完成したレーザが図 4.2 で、鏡面間隔 105 mm、レーザ出力は約 170 μW であった。このかわいいレーザを田中先生は当時 Baby-Laser と呼んでいた。このような実験を行うことによって、ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザ用に使うレーザ管のツボをつかむことができた。

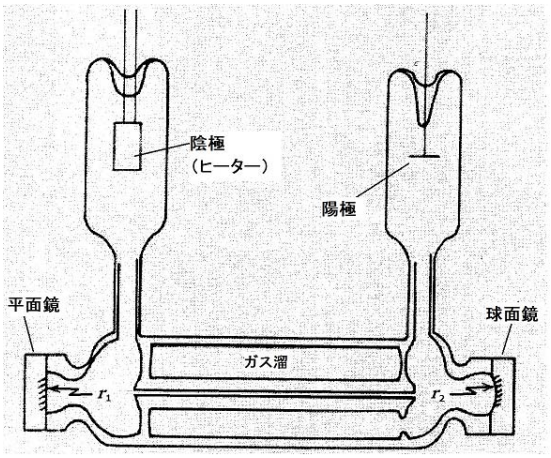

図 4.2　内部鏡型レーザ

鏡面間隔は 105 cm、二枚の鏡の接着は、分子間引力を使った光学接着。球面鏡の曲率半径は $r_1=\infty$、 $r_2=162$ mm、反射率はそれぞれ 99 %、放電電流が 4mA の時にレーザ出力で約 170 μW が得られた [4.7]。

石英細工は当時水銀灯を作っていた金門製作所の石英部門、石英製の鏡の研磨と多層膜蒸着は溝尻光学にお願いし、He と Ne ガスはアイソトープ協会、レーザ管に He、Ne を封じ込める真空排気装置は工業振興会（後の安藤ガラス）にお願いした。

石英レーザ管に関しては、毛細管の真直度や真円度の良さが性能を左右する。石英細工は 2000 ℃を超える酸水素炎で加工するので、田中先生は中心部の毛細管の穴（φ1～2 mm）

がなるべく円に近くてまっすぐになる加工法について現場で議論し、できるだけ良い物を作ってもらうことに徹していた。石英部門の責任者は職人肌の庄司さんだった。レーザを作るのは田中先生も庄司さんもはじめての経験だったから、田中先生は金門製作所の郡山工場にまで何度か足を運んで議論していたようだ。レーザ鏡なども素材は石英だから金門にお願いしていたと思う。既成のレーザ鏡などはなかった頃だから、田中先生はレーザ管の長さとレーザヘッド内での配置からレーザ鏡の曲率を計算して溝尻光学に研磨をお願いしていた。平面レーザ鏡は初めのうちは研磨した素材を計量研のブロックゲージ用干渉計にて検査して平面度を確かめた後、多層膜蒸着を施してもらっていた。

真空排気装置はガラス製で大方の仕様は決まっていたが、細部は全て一品料理のため、工業振興会（後の安藤ガラス）の安藤さん、沼田さん、中田さんに付きっきりで注文を出した。3 人とも個性は違うが根っからの職人だから、無理な注文にも決して出来ないとは言わなかった。職人というのは失礼かも知れないが、装置が完成した時、まるでわが子の姿を見つめるような眼差しがそんなことを連想させた。われわれ研究者は、注文を出すと同時に看取り稽古で彼らからガラス細工技術を教わった。ガラス細工はレーザ管を排気装置に脱着するときに研究者側に求められる技術だからである。

職人のガラス細工は見ていると簡単そうでとても楽しそうに見えるが、やってみるとあんなに難しい技術はない。肉厚を均一にし、ピンホールを作らないように、冷えたときにクラックが入らないように、その上で欲しい機能をちゃんと出さねばならない。ガラス管を酸素バーナーであぶった後、赤みが取れてもしばらくは触れば瞬間的にやけどするのだが、夢中になりすぎ、それをついつい忘れてやけどだらけの手になるのが常だった。

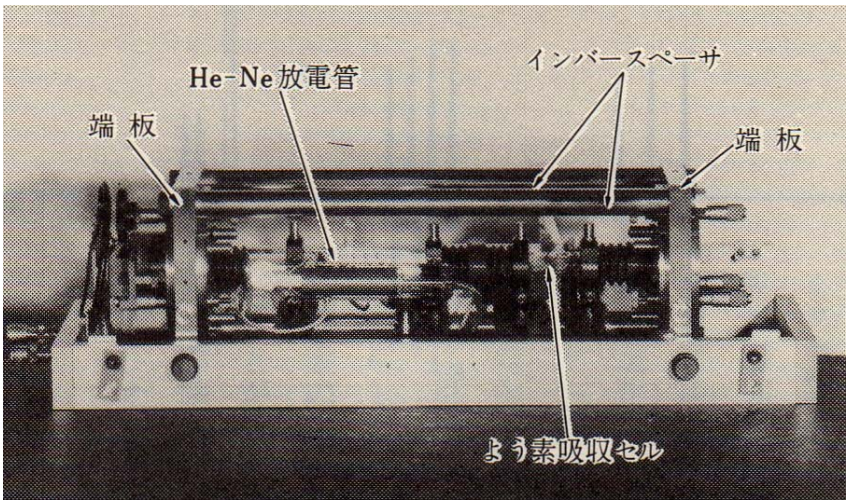

図 4.3　田中が試作したヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザ [4.8)]

さて話をもとにもどそう。図 4.3 に田中先生設計によるヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザを示す。細部は別として、動作の基本原理はメタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザと同じなので詳細は省略する。しかし両者は発振する波長が 5 倍ほど異なるので、構成部品ひとつ一つの寸法や性能は全く異なる。

このレーザは 4 本のインバー棒で左右の端板の四隅を保持してレーザヘッドとし、端板

の中心には鏡ホルダーが取り付けられて､その中心にレーザ鏡が左右一枚ずつ格納された。鏡の向きは 120 度毎に配置したマイクロメーターヘッド 3 本により微細調整される。3 点支持は通常使うジンバル機構（X 軸、Y 軸の周りに独立に回転できる機構）に比べて機械的に安定だというのが田中先生の哲学で、この思想は機械設計全般に及んでいた。天国の田中先生にその詳細を聞いてみたい思いにかられるがそれは無理なことだ。このレーザヘッドを作った神津精機の神津さんは田中先生と同じサナトリュウムで終戦後の若い時代を過ごした仲間だった。だから上記の溶融石英加工と同じように工場に乗り込み、田中先生の機械設計哲学を旋盤工やフライス工の職人にもぶつけて大いに議論していたことだろう。

レーサ管やヨウ素セルの端面は斜めに切られているがこれはブリュースター窓といって表面反射による損失を低く抑える工夫である（寸法は異なるが、形状や部品配置は図 3.9 を参照)。金門で作ったレーザでは、この窓は研磨して平行平面にした薄い溶融石英板を熔着してある。2000 ℃を超える酸水素炎で中央部にひずみを作らず熔着するのだが、アイデアは田中先生と金門の庄司さんの議論から生まれたのではないかと想像している。この方法以外に高真空接着剤や光学接着も使ったが、前者は接着剤からのアウトガス、セルに関してはヨウ素による接着剤の腐蝕が問題になるし、後者はコストに問題が残った。

ヨウ素セルを長寿命化するのはなかなか難問だった。実験を続けると吸収線信号が出なくなることがよくあった。仕方なく空のセルと小瓶から取り出したゴマ粒ほどのヨウ素を真空排気装置に載せ、新しいヨウ素セルを作り実験を続けるが、なかなか吸収線信号が消失する原因が分からなかった。そんな頃、1973 年 4 月に化学を修めた小崎が研究室に入ってきた。彼はヨウ素の話を聞くと直ぐに､「小瓶のフタをあけるとヨウ素はすぐ水分を吸着する。化学の常識では、精製して使用するんですよ」と教えてくれた。田中先生も他の研究スタッフも化学のことには土地勘がなかったから、精製という作業がもともと念頭になかったのである。直ぐに工業振興会にお願いして 3 段精製ができるガラス製の精製装置を製作し成果を上げた。黒澤は「これが計量研のヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザが国際比較などで良い成果を得ることができた大きなブレークスルーではないか」と当時を振り返る。ちなみに 1970 年代にはセルに封じたヨウ素の純度の国際比較も行われた。

ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの周波数安定度の評価の実験は、地下恒温・恒湿室室の防振台上行われた。防振台は断面が T 字状で目方が 5 トン程のコンクリートブロックを 4 個の太く丸いゴムブロックで支えたもので、その上に 1 畳半のほどの定盤を載せて周波数安定度評価のための光学系を組み立てた。2 台のレーザ光を同軸上に導き両者の光を混合してビートを発生させ、その周波数を周波数カウンターで読み取り、アラン分散を計算する。口で言えばそれだけだが、レーザ 2 台のほか、軸合わせ望遠遠 2 台、光検出器、多数の鏡や微動台がところ狭しと並ぶ｡そのために使う多数の鏡ホルダー､多数の微動台、多数の部品保持具類は真鍮製で、多くが計量研の工場製だった。これらにも田中先生の機械設計哲学がふんだんに盛り込まれていた。

これらの機械加工を担当する職員は板橋時代から筑波まで働いて下さった非常勤職員の

谷村浩義さんだった。彼は光学工業が地場産業である東京板橋区に家があり、カメラの部品を数でこなす旋盤職人であった。一刻を争って綺麗な仕上げをする加工技術を磨き上げた人だから、実験に使う部品や装置の加工もその線上にあった。とても悪い勤務条件のもと、移転後 10 年ほど筑波で働いて下さったお陰で、われわれ研究者が如何に多くの恩恵を受けたか測り知れない。若い頃、彼は働きすぎで体をこわしたことから生き方をすっかり変え、衣食住は質素を旨とし、人に喜ばれる生き方を貫いた。将棋を通して友との交わりを楽しんだ得がたい人物であった。

ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザがほぼ完成した 1976 年、外国の同レーザと比較するチャンスが巡ってきた。海外でもヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザを開発途上であったが､それまではどこの国の計量標準研究所がどんな開発状況にあるかほとんど分からず、仮に分かっても外国出張旅費の欠乏ゆえに国際比較の実施が不可能な時代だった。そんな時、BIPM から輸入した佐久間式絶対重力加速度測定装置にヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザが付属しているというニュースが入ってきた。この装置は計量研究所から 1960 年代の前半に BIPM に移籍した佐久間晃彦さんが設計したもので、輸入した研究所は岩手県水沢市（現、奥州市水沢区）にある緯度観測所（通称：緯度観、現国立天文台水沢 VLBI 観測所）である。絶対重力加速度装置の動作原理は、空気抵抗の影響を避けるために真空筒（太い排水用ヒューム管を垂直に立てたもの想像してほしい）の中で物体を投げ上げ、落ちてくるまでの時間を測って地球の重力加速度 g を測定するものである。原理は比較的簡単だが､ものすごく精密な装置で､有効数字 8 桁より良いデータが取れると聞いていた。

田中先生は早速に緯度観と交渉してヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザを拝借することになり、水沢までそのレーザを取りに行くことになった。研究所側が道中の事故を心配して公用車の使用を渋る中でそれを説き伏せ、田中先生と桜井がトヨペットクラウンで水沢を目指した。高速道路は仙台の泉インターまでしか開通していなかったため、その先は下の道を走り夕方に緯度観着、早速、佐久間式絶対重力加速度測定装置を見学した。一言でいえば、とにかくすごい装置だった。地下にピットを掘った実験室に背丈の 2 倍はあろうかという装置がデンと設置してあった。緯度観の初代所長は地球自転のゆらぎに z 項を導入したことで有名な木村栄（ひさし）､その木村は東京帝大教授で初代国際度量衡委員である田中館愛橘（あいきつ）の愛弟子であるから、地震予知や地球物理の関係で地磁気や重力加速度 g を精密測定する伝統が今でも引き継がれているのだろう。安全にレーザを板橋まで運べるか否かはすごく心配だったが、緯度観のスタッフも同様であり、帰り道には g 測定グループの佐藤さんが仙台と福島の中間にある白石まで車中で議論しながら同行した。

無事に板橋に戻り、前述の防振台に BIPM レーザをセットして計量研レーザとの比較実験を田中先生と黒澤、桜井で一週間ぐらい行ったように思う。その結果を表 4.1 に行列の形で示す [4.9]。前節の図 4.1(b)に示したように、比較に用いた 2 台のレーザとも発振周波数を掃引すると高い周波数から低い周波数にかけてそれぞれ成分 d～j に到る 7 本の吸収線を観測できたので、周波数比較は 7×7 通りの組み合わせで周波数安定化が可能である。し

かしながら 2 台が同じ成分に安定化され、光ビート検出器上で重ね合わされた場合、レーザ間には光学的な結合が起こり、周波数安定化の動作が不安定になるので実測できない。各行列要素の上段は実測値、下段は計算値の下 4 桁である。対角要素は計算値である。計算値は、ひとつの行列要素をそれ以外の行列要素から導くもので、測定の不確かさは最小化される。表 1 の解析からこれら 2 台のレーザの周波数の再現性は$\pm 6\times 10^{-11}$であることを結論づけた。この結果から田中先生は自分のレーザに大きな自信を持ったようだった。

表 4.1　$^{127}I_2$の 7 本の吸収線に安定化した計量研レーザと BIPM レーザとの周波数差（MHz）[4.9]。各行列要素の上段の数字は測定値、下段には計算値の小数点以下 4 桁を示す。対角要素は計算値である。

計量研レーザ (No.1)	BIPMレーザ (No.2)						
	d	e	f	g	h	i	j
d	−0.0064	−12.8852 8680	−26.2420 2293	−39.4571 4300	−143.1641 1743	−165.1304 1344	−186.6613 7038
e	12.8543 8654	0.0038	−13.3607 3474	−26.5496 5581	−130.2914 3024	−152.2606 2625	−173.8391 8319
f	26.2310 2152	13.3487 3536	−0.0076	−13.1593 2083	−116.9405 9526	−138.9344 9127	−160.5326 4821
g	39.3948 4149	26.5574 5578	13.1850 1965	−0.0041	−103.7368 7484	−125.6836 7085	−147.2778 2779
h	143.1586 1842	130.3269 3226	116.9653 9613	103.7544 7606	0.0163	−21.9382 9437	−43.4948 5131
i	165.1743 1342	152.2746 2726	138.9081 9113	125.7021 7165	21.9397 9663	0.0063	−21.5665 5631
j	186.6858 6800	173.8347 8183	160.4840 4571	147.2405 2563	43.4937 5120	21.5373 5520	−0.0174

筑波移転が終わり研究所の体制が落ち着いた 1984 年 4 月、ニュージーランド物理工学研究所（PEL）の R. B. Hurst がポータブル仕様のヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザを携えて来日した。世界各国 10 研究所を廻ってヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの国際比較を行う計画の途中で計量研に 10 日ほど滞在することとなった。10 研究所とはいずれもその国の計量標準研究所であって、それぞれニュージーランド:PEL 、オーストラリア:NML、 インド:NPLI、カナダ:NRC、ドイツ:PTB、米国:NBS、中国:NIM、英国: NPL、日本: NRLM、韓国:KSRI である。田中先生はもう北海道大学に転出した後だったので、かつての部下達、岩崎、石川、桜井がこの国際比較に対応した。Hurst のレーザ一式は中くらいの旅行用スーツケースに一切がすっぽり収まっていた。彼が到着して型どおりの挨拶を済ませた後、直ぐに実験室で荷ほどきをしてレーザを組み立ててみた。何とそれに要した時間は 30 分足らずだった。余りの可搬性の良さにびっくりしたのを今でも思い出す。

スイッチを入れると、ヨウ素の吸収線を探すのはいとも簡単、そこにサーボをかけるのもいとも簡単、スーツケースから出して 1 時間後にはもう周波数比較の予備測定が始まっていた。田中先生のヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザは機械的にはすごく洗練されてはいたが、可搬性や操作性の点ではまだまだ改良の余地があることを教えられた。

この周波数比較結果の詳細は BIMP 発行の論文誌に掲載されているが [4.10]、10 研究所の周波数の標準偏差は 23 kHz（5×10^{-11}）という結果であり、1983 年 CGPM で決議されたメートルの定義（真空中の光の速さに立脚した定義）の実現法に示されたヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザ周波数の不確かさの約 7 分の 1 であった。この国際比較によって計量研のヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザ周波数は参加した 10 研究所との間に相対関係が明らかにされた最初の仕事であった。また、それぞれの研究所は今回の国際比較とは別のグループで同様の比較を行っているから、計量研のヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの周波数値ははじめて国際的なネットワークの中に位置づけられることになった。

精密電気磁気計測会議（CPEM）が 1988 年に筑波で開催されたことがある。この機会を利用して BIPM の Chartier さんと Felder さんが周波数安定化レーザの国際比較を兼ねて来日したが、このことは既に第 3 章にて触れた。計量研とのヨウ素安定化レーザの国際比較結果は BIMP の論文誌に掲載されている [4.11]。また、BIPM のホームページにある校正と測定能力のページ（Calibration and Measurement Capabilities - CMCs）には、これらの国際比較を通して評価された計量研の CMC を見ることができる [4.12]。Chartier さんはヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザが専門家で、機会を見つけては世界各国に出向いて精力的に国際比較を実施していた。その結果、各国計量標準研究所のレーザ周波数の相互関係が比較回数を重ねるたびに明確になり、メートルの定義の実現法として位置づけられたヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの国際的信頼性が大きく向上した。

ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザはもっとも実際的な長さの国際標準といえるだろう。メートル原器のように国の計量標準を所掌する研究機関だけが所有するものではなく、それ以外の機関も所有し、十分に活用できる標準器である。特に、社会的インフラとしてのトレーサビリティの確立を目指すときには標準器としての重要性が増大する。以下に、この観点からの研究・普及活動をご紹介する。

上述した Hurst レーザのすばらしさに強く共感した研究者がいた。若手の石川だった。田中先生のレーザは熟慮のうえ製作した機械部分とレーザ管以外は、ほとんど内外最高級の計測器や電源（いずれもカタログ製品）で組み立てられていた。これに対して機械学を修めた彼は Hurst の設計哲学をヒントにして、石川独自のアイデアを詰め込んだヨウ素安定化レーザを開発した。その機械部分には、既成の精密機械コンポーネントや素材をうまく組み合わせ、高性能で重量を大幅に軽減したレーザヘッドを作った。また、周波数安定化のための電子制御系には、既成のオペアンプをふんだんに活用し、小型・廉価・高性能なレーザを完成させた。その結果、田中レーザになかった可搬性や操作性を大幅に向上できた。この石川レーザはネオアアーク(株)との共同開発によって完成されたが、そこに到

る最初の段階は田中先生の下地作りがあったとネオアークの技術者・李さんから聞いた。2016 年現在、同社ではこのような技術の連携に基づいたヨウ素安定化レーザを継続的に販売している [4.13]。その後、石川は当初のデザインから本当に必要な機能だけを抽出して彼らが“Open Laser”と呼んでいるモデルを開発し、少しの電気・機械的素養があれば誰でも作れる製作マニュアルとともにそれを発表した [4.14,15]。石川レーザは認証された校正ラボの標準器として使われることはもちろんのこと、計量法トレーサビリティ制度における技能試験にも活用され、さらにアジア太平洋計量計画（APMP）の枠組等の中で、途上国への技術移転に大いに活躍したと聞いている。ヨウ素安定化レーザの製作、波長測定、長さ標準の国際同等性、試験所認定のための技能評価などに関する一連の石川の仕事は、別の機会に紹介されることを期待する。

一方、ヨウ素安定化レーザの普及に関して、秋元、岩崎によるもうひとつの技術指導があった。日本光学工業が計画した工業計測や分光計測の光源として使用可能な可搬形ヨウ素安定化レーザの共同開発である。レーザヘッドの構造は、スペーサーには低線膨張係数の 3 本のスーパーインバーを使い、レーザ管の発熱による熱の影響を最小限に抑えるべく、レーザ管の真上にスペーサーを配置することを避け L 字形に配置した。レーザ管は、アルミニウム合金の筒に入れ、外筒の軸と光軸を一致させるように調整後、隙間にシリコン樹脂を注入しレーザ管の回転、交換した場合でも光学調整が大きくズレにくい構造を採用した。共振器端板とベース、及び、カバーにアルミ合金を採用し、レーザヘッド部の重量を 8.5kg と軽量化した。また、制御装置についてはメタン安定化 He-Ne レーザで開発された制御帯域の拡幅技術などが採用された。

開発された安定化レーザは、1983 年 CIPM に勧告されたヨウ素安定化 633 nm　He-Ne レーザの使用条件を満たしており、計測用実用光源として、また簡易安定化レーザの校正用光源の基準光源として活用された。こうして、小型、軽量で運搬がし易く、レーザの専門家でなくても容易に操作ができて性能が発揮できるレーザが完成した。その成果は、計量研会議室にてプレス発表された。

ヨウ素安定化レーザに関するもう一つの技術移転として、(株)ミツトヨへの技術指導があり、ミツトヨからもヨウ素安定化 He-Ne レーザが発売された。

4.3　633 nm のヨウ素分子吸収線の超微細構造の解明

633 nm He-Ne レーザの発振領域にある吸収線は、質量数 127 のヨウ素原子による 2 原子分子の吸収線で、分子構造を表す記号で $B^3P_{0u}^+ \leftarrow X^1S_g^+$ 電子準位間の 11-5 バンド R(127) の振動回転遷移の超微細構造であることは 4.1 節で述べた。この吸収線は約 1 GHz の範囲に 21 本の超微細構造線に分裂している。通常の共振器長 30 cm の He-Ne レーザでは、本来 21 本ある超微細構造線のうち発振領域にある 7 本が検出された。発振域は共振器長で決まる縦モード間隔 500 MHz 以下に限定されてしまうためである。その当時、Ne 同位体組成を変えたり、レーザ管に磁場を印加しゼーマン効果で発振域を広げたりして、どうに

か a~n までの 14 本を観測した例があるにすぎなかった。これらの分裂構造は超微細構造定数により正確に決まっており、したがって、これらの分裂の間隔を測定することはヨウ素分子の超微細構造定数を実験的に精密に決める手段になる。ヨウ素安定化 He-Ne レーザは、これらの間隔を精密に決定できる最高の装置なので、21 本の成分について周波数間隔を測定することが望まれていた。

21 本の成分を検出するには発振域が 1 GHz 以上ある He-Ne レーザを開発することが必要である。共振器の考え方からは、共振器長が 15 cm 以下の短いものを作れば良いのであるが、これらのものはレーザ媒質の長さを制限するので利得が小さく、逆に、発振領域が狭くなってしまう。計量研では、1975 年当時、光速度測定のプロジェクトの一つで、単一周波数発振高出力 He-Ne レーザの開発を行っており、既に、共振器長 2 m、単一周波数発振領域 1.5 GHz の複合共振器 He-Ne レーザを開発していた。したがって、この複合共振器 He-Ne レーザ内にヨウ素吸収セルを挿入すれば、R(127)遷移の超微細構造の全容を知ることが出来ると考えた。

作成された複合共振器の構造と写真を図 4.4 に示す。主共振器長は 193 cm、副共振器長は 10 cm である。主共振器内に、規格値で多モード 50 mW 出力の管長 177 cm の市販の He-Ne レーザ管を配置した。複共振器は Fox-Smith 型で、ビームスプリッターの反射率は 35 %、副共振器間隔をピエゾ素子で変調し縦単一モードを選択するように主共振器長に追従させたところ、1.5 GHz の周波数範囲を単一モードで約 10 mW の出力で発振できた [4.16]。この共振器内にセル長 10 cm のヨウ素吸収セルを配置し、セルのヨウ素溜の温度を制御して、セル圧力をコントロールした。ヨウ素圧力 80 mTorr(ヨウ素溜温度 10 ℃)で 3.5 mW の出力を得た。

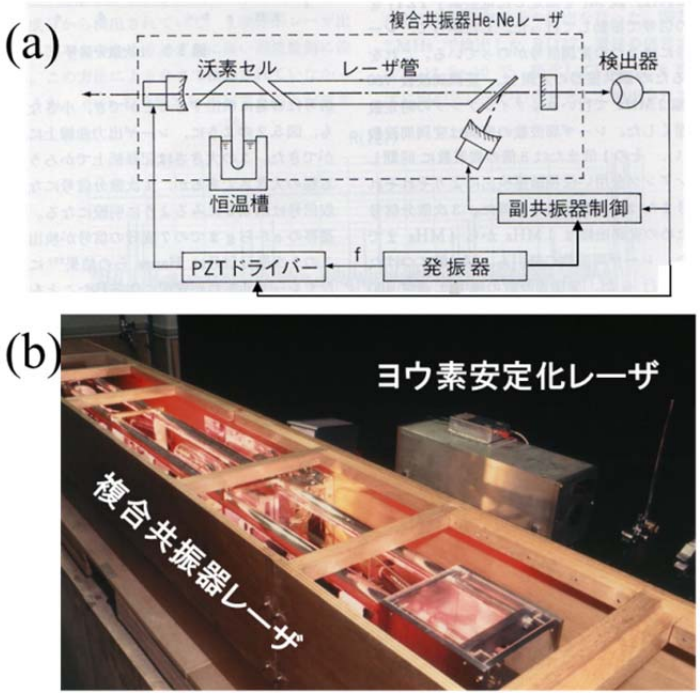

図 4.4　複合共振器ヨウ素安定化 He-Ne レーザ(a) 構成図 (b)複合共振器 He-Ne レーザとヨウ素安定化 He-Ne レーザ

図 4.5 は、その時の出力曲線と 3 MHz の変調振幅で得られたヨウ素吸収線の 3 次微分信号である。a 成分から r 成分までと、大きな 3 次微分信号の中に s、t 成分が観測されている。p、q 成分が重なっていることと、u 成分が他の大きな吸収線信号に埋もれて検出されなかった [4.17]。

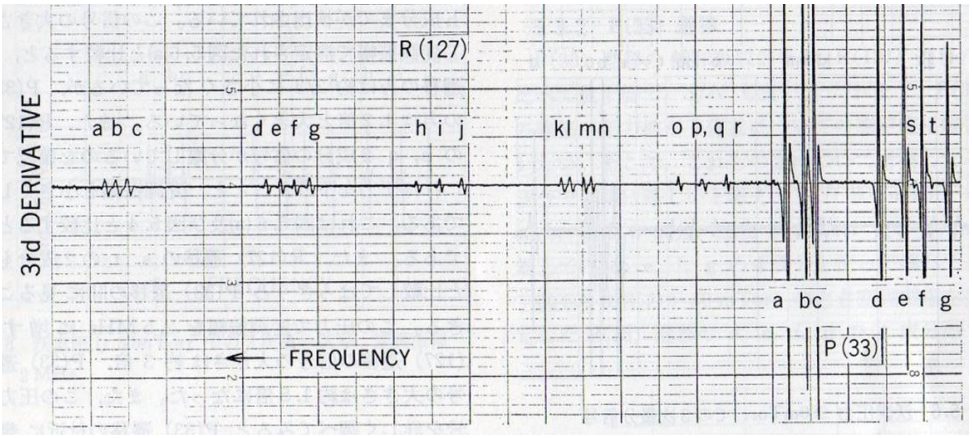

図 4.5 ヨウ素分子 R(127)と P(133)吸収線の超微細構造成分の 3 次微分信号 [4.17)]

これらの吸収線の周波数間隔は、ヨウ素安定化 He-Ne レーザの i 成分を基準にして不確かさ 0.1 MHz で測定された。当時のヨウ素安定化 He-Ne レーザの測定精度に比べれば 1 桁低いが、d～i の 7 成分の値は不確かさの範囲内で一致した。一方、これまで 14 本を測定していた不確かさ 1 MHz の測定値は、a~c 成分がかなりずれていたことが分かった。これらの結果をもとに、測定データに、電気四重極相互作用、磁気双極子相互作用を考慮した理論式をフィットするプログラムを開発し、微細構造定数を決定した。その結果は多くの成分で 0.1 MHz 以下の差で今回の値に一致することができた。この結果はこれまで報告されていた構造定数をより精度よく決定することに導いた。今回の測定で、発振の端の方に現れた大きな信号は 6-3 バンド P(33)遷移の超微細構造成分であった。この遷移の a~j までの 10 成分も精度よく測定することがきたので、その間隔を使って、同様の解析を行い、構造定数の決定を行うことができた。ヨウ素の周波数間隔測定の結果は 1983 年の長さの実用的実現法のテーブルの中の採択値として採用され、R(127)の s, t の成分の値は今でも使われている [4.18)]。

4.4　ヨウ素分子の FM サイドバンド分光

ヨウ素分子の吸収線は波長 500 nm から近赤外域にわたり、数 GHz 毎に 1 本程度の頻度で 4 万本ほど存在している。そのうち、吸収線の振動バンドにより、吸収の強い線と弱い線があるが、総じて、波長 500 nm 近傍に強い吸収線があり、650 nm 以上では弱くなる。これらも吸収セルを温めることで信号を大きくすることができる。したがって、ヨウ素分子の吸収線は波長 500～700 nm で発振する多数のレーザ光の良い周波数基準になる。そのため、分光用に振動回転吸収線の位置を示すアトラスが作成されていた。1970 年代に入ると、レーザを用いた外部セルでの飽和吸収分光法が確立し、ヨウ素の超微細構造の検出が行われるようになった。レーザの周波数安定化としては 633 nm He-Ne レーザの他に、514 nm のアルゴンイオンレーザ(現在では 1.06 μm の YAG レーザの 2 倍波 532 nm)の周波数基準として研究がなされていた。

これらの吸収線へのレーザ周波数の安定化は、制御信号を作成するため低周波数でレーザ共振器長を変調するソース周波数変調法が使われてきた。この場合、最大の吸収信号を

得るためには、吸収線の幅程度の最大周波数偏移を必要とする。ヨウ素安定化 He-Ne レーザの場合 peak-to-peak で約 6 MHz の幅で周波数変調されている。したがって、中心周波数が 10^{-11} で安定でも出力周波数は 6 MHz(10^{-8})の幅を持っていることになる。これが、ヨウ素安定化レーザを実用的に応用することを制限していた。これを解決する方法として、1 つはヨウ素安定化レーザと一定周波数離れた吸収セルを持たない無変調のレーザとのビート信号を取り、ビート周波数が一定になるように無変調レーザの周波数を安定化する周波数オフセットロック法が開発された。他の 1 つはレーザ共振器内に吸収セルを置かず、ソース変調はしないで、外部に取出した光を低周波数で変調する外部変調方式が検討された。この場合、吸収セルも外部に置かれる。1975 年当時の研究室では、先の複合共振器 He-Ne レーザを周波数オフセットロックレーザとして使用する方法や、外部に置いた磁歪素子を用いて大きな変調を行う外部変調方式が研究されていた。

ところが、1980 年代にはいると、Bjorklund と Levenson らは、レーザ出力光を rf 波を印加した電気光学結晶に入れ、キャリア周波数から±rf 波分だけ離れた側帯波を発生させる側帯波分光法を開発した [4.19]。このキャリア波と発生した側帯波を外部に置いた吸収セルに入射させ、キャリア波と 2 つの側帯波のビート信号の大きさを検出すると、吸収の付近でビート信号の振幅が変化して 3 次微分信号と同様の制御信号が検出できることを示した。この方法は、変調周波数をショットノイズ領域の rf 周波数に持ち込むことで、これまでの低周波変調信号がレーザ振幅雑音で制限されていたのに反し、信号をショットノイズ限界で検出できる革新的方法であった。こうして無変調で 10^6 分の 1 程度の小さな飽和吸収信号を検出できる方法が確立した。

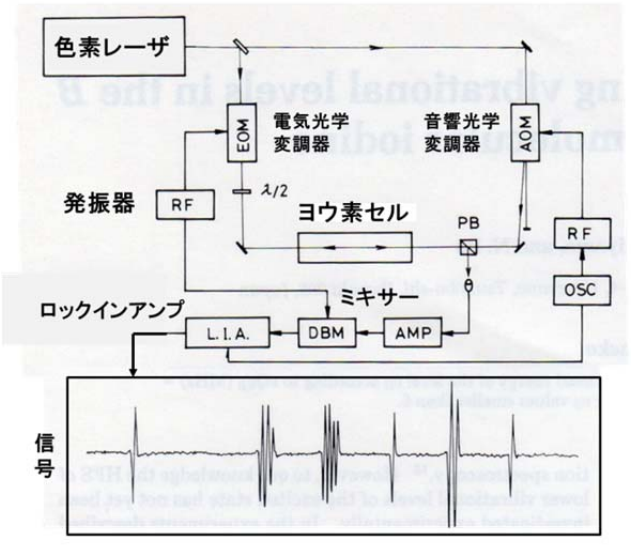

図 4.6　FM 側帯波分光法とヨウ素超微細構造のスペクトルの例 [4.20]

この側帯波分光法と、可視域から赤外域にわたり単一周波数で発振する可変波長の色素レーザを用いて、ヨウ素分子の超微細構造の研究が精力的に行われるようになった。計量研でもいち早くこの方法を取り入れた研究が行われた。図 4.6 に波長 657 nm の測定系と測定された信号を示す [4.20]。このようにして、種々の振動回転準位に対する超微細構造定数が決定され、超微細構造定数の振動準位に対する規則性が議論できるようになった。そして、これらの超微細構造定数を用いて、超微細構造成分の推定が可能になった。このような研究が世界中で行われ、超微細構造までを含んだ詳細なヨウ素分子吸収線のアトラスが作られた。

4.5　カルシウム光ラムゼー波長標準の開発

Drever と Hall らは、側帯波分光法による分散信号を共振器内に挿入した電気光学変調器に印加し周波数制御を行うことで、無変調で高速制御が可能であることを示した [4.21]。この Pound-Drever-Hall（PDH）法は、ショット雑音レベルでレーザ線幅狭窄化が可能になる方法として注目された。計量研でも、西ドイツ物理工学研究所（PTB）と国際共同研究を開始し、1986 年からこの制御法の開発に取り組んだ。色素レーザの線幅は、高フィネスの外部受動共振器を基準に狭窄化した。基準共振器は、温度を一定に安定化し、地面振動、音響雑音から隔離された線幅 700 kHz のものを作成した。単一周波数で発振する電気光学結晶を挿入した色素レーザを作成し、外部で 15 MHz の側帯波を発生させ、PDH 法を用いて基準共振器の制御信号を検出、色素レーザの線幅を、共振器への追従線幅として 10 Hz 以下に狭窄化することに成功した [4.22]。

ヨウ素の吸収線の幅は数 MHz 程度で、レーザ周波数のさらなる高安定化にはより狭い線幅の吸収線が望まれる。これを実現する方法の 1 つとして、カルシウム原子の異重項間遷移の 657 nm 吸収線がある。この吸収線幅は、光ラムゼー分光法を行うと、約 300 kHz の飽和吸収信号の中に相互作用時間により決まる狭い幅のフリンジを発生できる [4.23]。そこで、PDH 法で安定化した色素レーザ光を、2 台のキャッツアイを用いて間隔の等しい 2 本の進行波のペアを作成し、相対する方向から原子ビームに垂直に相互作用させることで、図 4.7 のような光ラムゼー共鳴信号を発生させた [4.24]。この線幅は 2 本のレーザビーム間隔を 20 mm にすることで、10 kHz のフリンジを発生させることができ、吸収線の 20 kHz の反跳分裂構造を解くことが出来た。これからも、色素レーザの線幅が 10 kHz 以下に狭窄できたことが確認できた。また、フリンジ幅 50 kHz の光ラムゼー共鳴信号を用いて色素レーザの周波数安定化を行った [4.25]。その結果、色素レーザの周波数安定度は $2\times10^{-12}\tau^{-1/2}$ で、高精度波長計を利用し 10 桁の精度で波長が測定できた [4.26]。1992 年国際的に認められたメートルの定義の実際的な実現法である“*mise en pratique* of the definition of the metre”（安定化レーザのリスト）に、カルシウム原子が初めて登録されたとき、波長の測定値により貢献した。こうして 21 世紀の中性原子を用いた光周波数標準の研究のスタート点が作られた。

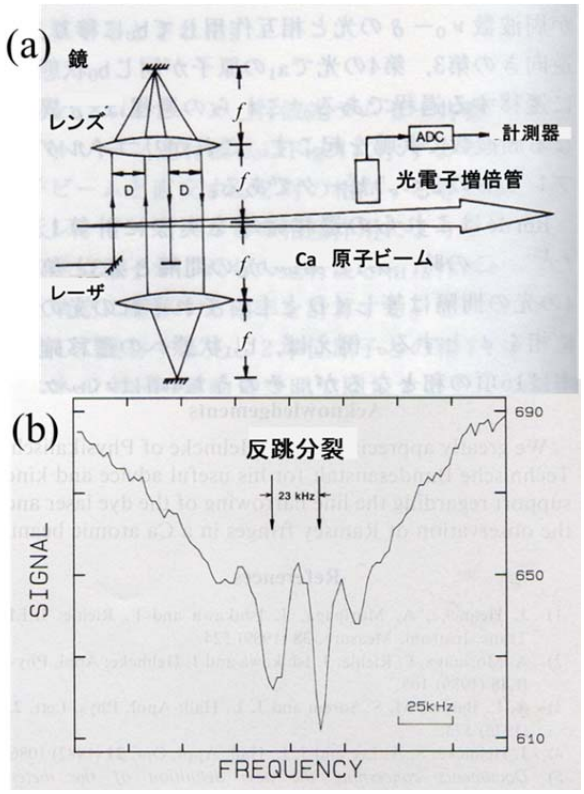

図 4.7 (a) 光ラムゼー分光光学系 (b) 光ラムゼーによる Ca の反跳構造 [4.24]

５．考察・まとめ

この Archives を依頼されたとき、長さ標準分野における周波数安定化レーザの研究成果をどのようにまとめるべきかについて考えた。そのときまず頭に浮かんだ事柄は中学の地理で習った火山の分類法だった。ドイツ人火山学者のシュナイダーによる分類、コニーデ（成層火山)、トロイデ（鐘状火山)、アスピーテ（盾状火山)・・・である。この分類は火山をその形によって分類したもので今では使われなくなったそうであるが、それはともかくとして、私がイメージしていたいわゆる革新的な成果は、コニーデの代表格である富士山であった。しかしながら、それに相当する研究成果は計量研が行った周波数安定化レーザの研究の中では、少なくとも私には見つけられなかった。そこで視点を変えてアスピーテ型で考察してみると、計量標準分野の研究成果は大方そのイメージに当てはまることに気がついた。どの量の計量標準でも測定装置あるいは実現装置を開発し、精度の維持や信頼性の確保を実行し、その標準を民間に供給する、３つのカテゴリーがある。どのカテゴリーにも分厚い実績が必要であり、それら３層が重なった姿をアスピーテと捉えた。富士山はコニーデの代表で標高は 3776 m であるが、アスピーテ型でよく知られるハワイのマウナケアは､盾を伏したような形ながら標高 4205 m もあり､富士山より 400 m も高い。このような類推から革新的とは標高の高さでも評価できるのではないかと解釈し、山の形状についてのこだわりを捨てた。その様なコンセプトにより執筆した原稿がこの Archives である。

1960 年にレーザが発明されるとほぼ同時に、レーザの長さ標準への応用が注目され、1.15 μm He-Ne レーザの周波数安定化の研究がスタートした。この頃の周波数安定化はラムくぼみの中心に発振周波数を制御し安定化するものであった。しかしながら周波数安定度や再現性は元素ランプの放射スペクトルを超えることができなかった。そこで登場した方式がメタン分子の吸収線を周波数基準として用いた 3.39 μm He-Ne レーザの周波数安定化の研究であった。正四面体構造を持つメタン分子の理論的考察から、周波数基準として吸収線が外部の擾乱に対して安定であることが予測できたからである。第３章で述べたように BIPM との国際比較に使われた計量研のメタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザの周波数安定度や再現性は、元素ランプのスペクトルの波長再現性をはるかに超え、CIPM 勧告も十分にクリアーした。

メタン分子による 3.39 μm He-Ne レーザ安定化実験は、波長こそ違うものの 633 nm He-Ne レーザのヨウ素分子による周波数安定化実験に大きな技術的示唆を与えるものであった。ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの研究をスタートさせる最大の動機は、光が可視光ゆえ、赤外線の 3.39 μm よりは実用性が高いというものであったが、メタン安定化レーザが示した周波数安定度や再現性の実績が、新たに始まるヨウ素安定化レーザの研究を計量研として承認し、後押ししたと考えられる。当時は可干渉距離が高々25～30 cm の ^{198}Hg ランプを用いた１m までの標準尺光波干渉測長の研究が最盛期であったから、この

グループからの期待も大きかったと思われる。

ヨウ素安定化レーザは試作には設計から 4 年ほど、改良に 2 年ほどかかったと記憶している。むしろ時間がかかったフェーズは、国際比較を通しての信頼性の確保、民間や途上国への普及であった。前者にはおよそ 12 年かかったと見ている。また後者は、筆者達が定年等で部署を離れてしまった後でのことであるが、前者同様に多くの時間がかかったように聞いている。

このようなプロセスを経て、わが国のメタン安定化レーザ及びヨウ素安定化レーザの安定性・再現性は、長さ諮問委員会(CCL、CIPM への諮問委員会）[5.1)]によって承認された水準に到達できたと考えている。ヨウ素安定化レーザの普及に関しては、精密機械工業界、精密光学工業界のニーズに応えるべく進められてきたが、可搬性、操作性を備え、周波数再現性に関しては CIPM 勧告に準拠したモデルとして現在も販売されている。このステージに到るまで約 30 年を要したが、その時間をどう評価するかは読者に任せたい。

最後に、周波数安定化レーザの研究がその後どのように発展したかについて略記したい。1983 年、従来のメートルの定義が改訂されたが、真空中の光の速さ c_0 を用いた改訂を実現させた最大のポイントは、レーザ周波数がセシウム原子周波数標準によって絶対測定できるようになったことにある。これを契機に、レーザ周波数絶対測定の技術開発が国際的に加速され始めたといってよい。

鍵となる技術は周波数逓倍混合と呼ばれる技術で、局部発振周波数の N 倍（N は整数）と信号周波数を混合して周波数変換する技術である。当時は周波数逓倍混合を何段階か組み合わせ、信号周波数を下げ、最後には直接測定可能な周波数（1 GHz 程度以下）まで到達させる周波数変換技術が用いられていた。この方式はいわゆる周波数チェーンであるが、ひとつ前のステージで局部発振器として使った信号源は、そのステージでは信号として扱われ、それが何段階か繰り返されることになる。NBS の測定実験では、周波数を測るレーザには発振周波数 88 THz のメタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザが使われたが、そのレーザとセシウム原子周波数標準との間に使われた局部発振器は、レーザだけでも周波数の高い方から、炭酸ガスレーザ(30 THz、2 台)、水蒸気レーザ(10 THz)、シアンレーザ(900 GHz)、他に、マイクロ波からミリ波かけて複数のクライストロンを使った。これだけ沢山のレーザやクライストロンを総動員しなければならない理由は、逓倍混合において逓倍次数を一度に大きく取れないことにあった。周波数チェーンは装置が膨大となるだけではなく、局部発振器が原子分子の遷移周波数できまるレーザ周波数によって決められてしまうため、チェーンの組み方の自由度がとても小さい。幾つかの国立計量標準研究所で NBS と同様な測定実験が試みられたが、1983 年の定義改訂に資するデータを期限までに報告できた研究所は、世界の計量標準研究所の中で NBS(米)、NPL(英)、NRC(加)の 3 研究所だけであった。今思えば力不足が歴然としていたが、計量研は無念の涙を飲んだ。

レーザ周波数を測るということは、言い方を変えれば、既知の局部発振周波数を用意して両者の周波数混合を行い、汎用測定機で直接測定可能な IF 周波数を取り出すこととい

ってよい。この延長線上において、20 世紀の終わり頃、周波数標準のマイクロ波とレーザ光周波数をつなぐ画期的な技術が登場した。これは繰り返し周期を原子周波数標準で制御した、超短パルスレーザ光を非線形光ファイバーに導入することによって、可視域から近赤外域に亘って数百万もの高調波を発生させる技術であった。この光を周波数ドメインで見れば、モード同期された各ラインが等間隔で櫛の歯のように並ぶから、“光周波数コム”と呼ばれた。例えば、直接測定可能な周波数である 1 GHz で繰り返すパルスを使えば、1 GHz 間隔で可視域に光周波数コムができるので、未知の可視レーザ周波数は必ず隣り合う 2 本のコムの歯で挟み込まれるから、コムの次数と、コムと未知レーザとのビート周波数を観測すれば、高い精度でレーザ周波数を測定することが可能になった[5.2]。したがって測定する安定化レーザごとに組まれる周波数チェーンに比べて、光領域のどの周波数でも測れるという意味において、はるかに大きな自由度を持つ計測法である。

ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザの仕事が一段落した後、同じ目的に利用する YAG レーザの第 2 高調波（緑色、532 nm）をヨウ素分子の飽和吸収線で安定化したり、赤外半導体レーザ（1.54 μm）をアセチレン(C_2H_2)分子の飽和吸収線に安定化する研究が行われた。これらレーザの周波数再現性の評価には光周波数コムが使われ、これらレーザがヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザと同等か高い周波数安定度や再現性を持つことが実証できた。また計量法トレーサビリティの分野では、光周波数コムが特定標準器に指定され、特定二次標準器としての周波数安定化レーザの校正に活用されている。

第4章で述べた中性原子の超高分解能分光の分野は20世紀終わり頃から盛んに研究されるようになり、光周波数標準(光時計)と呼ばれる分野が台頭してきた。現在の周波数標準（時間標準）は、原子泉（atomic fountain）方式のセシウム（Cs）原子周波数標準にゆだねられているが、その再現性を超える“光時計”の実現が期待されるようになったためである。これを契機に、従来はレーザの周波数を絶対測定する手法だった光周波数コム技術には、光周波数標準を評価するという新しい役目が与えられた。周波数標準あるいは時間標準はもともと地球の自転や公転から出発した概念であったが故に、長さ標準とは独立した概念であった。しかしながら光周波数コム技術によって光周波数とマイクロ波が高い精度でリンクできるようになった現在、長さ標準の研究から展開した高分解能分光、超高分解能分光、周波数安定化技術等の延長線上に、光周波数標準の研究という新しいパラダイムが開花することになった。

2001年に東大の香取秀俊先生が提案し、研究・開発を進めてきている光格子時計は、光領域での周波数標準を目指したユニークな「日本発」のアイディアで、今や世界各国の標準研や先端研究機関で競って研究開発が行われている[5.3-5.5]。産総研・計量標準総合センターでは、香取グループとの緊密な研究協力関係を保ちながら、イッテリビウム原子(^{171}Yb)やストロンチウム原子（^{87}Sr）を利用した光格子時計の研究開発を進めている。このプロジェクトで、イッテリビウム光格子時計の評価を行う手法が光周波数コム技術である。現在 9 GHzのマイクロ波で規定されているセシウム原子周波数標準が、将来は500 THzの光

格子時計に置き代わる時代が来るかもしれない。BIPMのホームページに掲載されている^{171}Ybの周波数と再現性は、

$f(^{171}\mathrm{Yb}) = 518\ 295\ 836\ 590\ 865.0\ \mathrm{Hz}, \quad u_c/y = 2.7 \times 10^{-15}$

である[5.1)]。ここに u_c/y は相対不確かさを表し、u_c は合成標準不確かさ、y はレーザ周波数である。u_c/y は再現性と考えて良いだろう。

光周波数標準の精度追求はいったいどこまで続くのだろうか。オリンピック出場選手はマスコミのインタビューに対して「一番いい色のメタルを目指します」と宣言するが、はじめから 2 番でいい 3 番でいいと思っていたらメタルを取れる確立はガタンと落ちるだろう。一番を目指す路傍には、それまで気付かなかった宝物がたくさん転がっているに違いない。

６．謝辞

本稿に記述した研究の実施にあたり、東京大学理学部・霜田光一教授には研究のスタートから長年に亘り、長さ標準、周波数標準、レーザ、レーザの周波数安定化、基礎定数などの分野に関して、研究だけにとどまらず、計量研究所が行う成果普及活動、委員会活動等を含む幅広い領域にご興味を示して頂き、多岐にわたるご指導を賜りましたことを衷心より感謝申し上げます。

計量研究所においては 1962 年に故田幸敏治教授（1972 年東京工業大学へ転出）によってレーザの発振に成功してまもなく、長さ標準としての赤外レーザの安定化の研究が開始されました。1970 年頃から田幸教授は、計量研究所のこの分野の研究の方向として、レーザを使った新しい長さ標準に焦点を絞り、メタン安定化レーザの研究成果を CCDM に報告するとともに、その先に見えるレーザ周波数の絶対測定を介した次世代長さ標準の構想を示して下さいました。また、故田中敬一教授（1982 年北海道大学へ転出）は、可視レーザとしてヨウ素安定化レーザの研究を開始されるとともに、レーザ周波数の絶対測定の研究を実施に移されました。計量研究所は、両教授にご指導を賜りつつ、可視から赤外領域の広い領域に亘り、レーザの安定化、光周波数計測技術を構築することができました。両教授には、心より御礼申し上げます。

光周波数コムの発明で 2005 年度ノーベル物理学賞を受賞された、米国天体物理研究所（JILA）の J.L. Hall 教授におかれましては、40 年間に幾多のご来訪を頂き、レーザの開発、分光、応用計測などを担当する研究室員との間で、示唆に富む多くのご討論を賜りましたことを、心より御礼申し上げます。また、Hall 教授と同様な分野がご専門である、ドイツ物理工学研究所（PTB）の J. Helmcke 博士も多数回ご来訪頂き、レーザ研究員との間で、多くの有益なご討論を賜りました。また同博士は、レーザ研究で計量研究所から PTB へ長期留学する際に、実質的な受け皿としての役を長年に亘り勤めて下さいました。さらに、同博士が PTB のカウンターパートとなって、工業技術院・国際研究協力課所掌の国際特定共同研究を実施することができました。その結果、特に、カルシウム原子による波長標準の研究で得られた成果はメートルの定義の実現法の高精度化の 1 つとして貢献することができました。併せて心より御礼申し上げます。

日本学術会議第 5 部・標準研究連絡委員会ならびに基礎定数小委員会の委員各位におかれましては、高度な学術的見地から周波数安定化レーザ研究の推進に亘り多くのご意見を頂きました。また、国際計量研究連絡委員会ならびに長さ分科会の委員各位におかれましては、技術行政的見地を踏まえた周波数安定化レーザ研究の推進に亘り多くのご意見を頂きました。ここに心より御礼申し上げます。

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・上級主任研究員・大苗 敦博士には、本稿の構成について議論して頂き、また、最近の周波数安定化レーザに関する多くの情報を提供して頂きました。ここに心より御礼申し上げます。

参照文献

第 1 章

1.1) 藤井賢一：キログラムの定義改定に向けた質量標準の開発動向，日本物理学会誌，Vol. 69, No. 9, pp. 604-612 (2014).
1.2) 藤井賢一：シリコンの同位体濃縮によるアボガドロ定数の精密測定，計測標準と計量管理，Vol. 65, No. 4, pp. 24-33 (2016)
1.3) 増井敏郎，長さ標準， 精密機械 30 巻 7 号(1964)，583-588.
1.4) 秋元義明，周波数標準としてのメタン安定化 He-Ne レーザの研究，計量研究所報告，Vol.39 Suppl. (1990) 1-121.
1.5) R. B. Hurst, N. Brown, V. D. Dandawate, G. W. Hanes, J. Helmcke, H. P. Layer, Liu 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 (1987) 1, 39-44.
1.6) S. Iwasaki and J. –M. Chartier, Comparison of the $^{127}I_2$ Stabilized He-Ne Lasers at 633 nm Wavelength of the National Research Laboratory of Metrology of Japan and the Bureau International des Poids et Mesures, Metrologia, 26 (1989) 4, 257-261.
1.7) S. Shen et al., International comparisons of He-Ne lasers stabilized with $^{127}I_2$ at λ=633 nm (July 1997). Part Ⅷ: Comparison of NIM (China), NRLM (Japan), KRISS (Republic of Korea) and BIPM lasers at λ=633 nm, Metrologia Vol. 38 (2001) p.181.

第 2 章

2.1) 渡辺 襄， 長さの統一に就いて，精密機械 Vol.2 (1935) No.21, 191-200.
2.2) 増井敏郎，長さ標準， 精密機械 30 巻 7 号(1964)，583-588.
2.3) 増井敏郎， メートルの定義の改訂(1)，計測，Vol. 8 (1958) No. 7， 425-428.
2.4) 増井敏郎， メートルの定義の改訂(2)，計測，Vol. 8 (1958) No. 7， 496-501.
2.5) 増井敏郎， メートルの定義の改正(3)，計測， Vol. 11 (1961) No. 2，115-119.
2.6) 丸尾克子，戦後日本工作機械工業の展開：昭和 20-40 年代，北大・経済学研究 Vol.45, Issue 2，30-45.
2.7) 計量研 80 年史，精機通信社，昭和 59 年，124-129.
2.8) 霜田光一，レーザー周波数安定化と長さ標準，応用物理，Vol.38（1969）No.4， 306-317.
2.9) 清野昭一，メートルの新定義，清野昭一，精密機械，Vol.50(1984)No.7，1173-1179.
2.10) 洪 鋒雷，光コムー光科学のイノベーションー，応用物理 **79** (2010) 6, pp.546-549.
2.11) 洪 鋒雷，“リレー解説《第 5 回 時間(s)についての基礎解説と最新動向》”，計測と制御，第 53 号(2014) 第 5 号，pp.438-443.
2.12) M. Takamoto, F.L.Hong, R. Higashi, and H. Katori: “An optical lattice clock”, Nature **435**, 321 (2005).
2.13) 安田正美，“1 秒って誰が決めるの？－日時計から光格子時計までー”，ちくまプリマー新書 215, 筑摩書房，2014.
2.14) 桜井好正，光波干渉による標準尺の測定法の研究および測定装置の試作，精密機械，Vol.26 (1960) No.9， 505-511.
2.15) 土井康弘，標準尺の読み取り刻線及び較正，精密機械，Vol. 30 (1964) No.354, pp.556-563.

第 3 章.

3.1) 田幸敏治：日本物理学会学術講演会 4p-H-7(1962/04).
3.2) 田幸敏治，大井みさほ，浅見茂夫：日本物理学会学術講演会 4p-H-7(1963/04).
3.3) 計量研究所 80 年史：計量研究所発行 昭和 59 年.
3.4) W.R.C. Rowley and D.C. Wilson: Nature. 200 (1963) 745.
3.5) K. Shimoda and A. Javan：J. Appl. Phys. Vol.36, No.3 (1965) 718.
3.6) 計量研ニュース，Vol.15, No.6 (1988) 4.
3.7) K. Shimoda: IEEE Trans., IM-17 (1968) 343.
3.8) T. Tako, M. Ohi, Y. Akimoto, A. Sugiyama and K. Shimoda: Proces-Vervaux des

Séances 1970, M 77, CCDM 4e Session, ANNEXE M5 (1970).
3.9) 大井みさほ，秋元義明，田幸敏治：応用物理，第 41 巻，第 12 号，(1972)1300.
3.10) 大井みさほ，秋元義明，田幸敏治：応用物理，第 46 巻，第 8 号 (1977) 832.
3.11) M. Ohi and Y. Akimoto: JJAP, Vol.15,No.6 (1976) 1177.
3.12) M. Ohi and Y. Akimoto: JJAP, Vol.15,No.9 (1976) 1853.
3.13) 秋元義明：計量研究所報告 Supplement No. 154, (1990).
3.14) K. Shimoda : JJAP, **12**, (1973) 246.
3.15) 田中敬一：応用物理，**46,** (1977) 54.
3.16) 秋元義明：レーザー研究，第 16 巻，第 2 号，(1987) 58.
3.17) 大井みさほ，秋元義明，田幸敏治：応用物理，第 41 巻，第 4 号 (1970) 363.
3.18) Y. Akimoto, M. Ohi: JJAP, Vol.16, No.2 (1977) 385.
3.19) 秋元義明，大井みさほ：応用物理，第 47 巻，第 5 号（1978）425.
3.20) M. Ohi and Y. Akimoto: JJAP,18,8 (1979) 1425.
3.21) Y. Akimoto: JJAP, 27, 9 (1988) 1565.
3.22) Y. Akimoto: IEEE, Trans. Instrum. and Meas. Vol.IM-36, No.2 (1987) 633.
3.23) 計量研ニュース，Vol.36, No.8 (1988) 1.
3.24) 計量研ニュース，Vol.39, No.5 (1991) 2.
3.25) 秋元義明：計測と制御，Vol.40，No.7（2001）489.
3.26) 計量研ニュース，Vol.37, No.1 (1989) 5.

第 4 章

4.1) A. L. Schawlow and C. H. Towns: Phys. Rev. 112 (1958) 1940.
4.2) G. R. Hanes and K. M. Baird: Metrologia 5 (1969) 32.
4.3) S. Gerstenkorn and P. Luc: in Atlas du Spectre d'Absorption de la Molecule d'Iode, Editions du CNRS (CNRS, Paris, 1978).
4.4) G. R. Hanes and C. E. Dahlstrome: Appl. Phys. Letters 14 (1969) 362.
4.5) 田中敬一：計量研究所報告 24 (1975) 181.
4.6) G. V. H. Wilson: J. Appl. Phys. 34 (1963) 3276.
4.7) 田中敬一，小型 He-Ne レーザの製作,計量研究所報告 17 (1968) 3, 201.
4.8) 田中敬一，レーザと計測－極限への挑戦, 1983, 共立出版, p.61, 図 27 より転載.
4.9) K. Tanaka, T. Sakurai and T. Kurosawa, Frequency Stability and Reproducibility of an Iodine Stabilized He-Ne Laser, J. J. Appl. Phys. 16 (1977) 11, 2071-2072.
4.10) R. B. Hurst, et al., 文献 1.5)と同じ.
4.11) S. Iwasaki, et al., 文献 1.6)と同じ.
4.12) BIPM ホームページ，http://kcdb.bipm.org/appendixC/
4.13) ネオアーク(株)ホームページ　http://neoark.co.jp/?page_id=241
4.14) 石川 純,CIPM 勧告準拠 633 nm ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザの設計と製作, 計量標準モノグラフ, 2003 年 3 月.
4-15) 石川 純，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，シンセシオロジー 2 (2009) 4, 277-287.
4.16) BIPM ホームページ: http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html
4.17) A. Morinaga and K. Tanaka: Jpn. J. Appl. Phys. 17 (1978) 881.
4.18) A. Morinaga and K. Tanaka: Appl. Phys. Letters 32 (1978) 114.
4.19) G. C. Bjorklund and M. D. Levenson: Phys. Rev. A 24 (1981) 165.
4.20) A. Morinaga, K. Sugiyama, N. Ito, and J. Helmcke: J. Opt. Soc. Am. B 6 (1989) 1656.
4.21) R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Pord, A. J. Munley and H. Ward:). J. Appl. Phys. 30 (1991) L1811.
4.23) A. Morinaga, F. Riehle, J. Ishikawa and J. Helmcke: Appl. Phys. B 48 (1989) 165.
4.24) A. Morinaga, N. Ito and K. Sugiyama: Jpn. J. Appl. Phys. 29 (1990) L1727.
4.25) N. Ito, J. Ishikawa and A. Morinaga: J. Opt. Soc. Am. B 8 (1991) 1388.
4.26) J. Ishikawa, N. Ito and A. Morinaga: Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) 1652.

第５章

5.1) BIPM ホームページ：文献 4.16)と同じ.
5.2) 洪 鋒雷，文献 2.10)と同じ.
5.3) 洪 鋒雷，文献 2.11）と同じ.
5.4) M. Takamoto, et al.，文献 2.12)と同じ.
5.5) 安田正美，文献 2.13)と同じ.

著者略歴

秋元義明（あきもと　よしあき　1941 生）

1966　計量研究所入所
1989　工学博士
1989～　計測研究室長・計測要素研究室長歴任
1996　国際計量研究協力官
2001　産業技術総合研究所　国際部門　総括主幹
2002　産業技術総合研究所定年退職
2002～2014　産業技術総合研究所　研究参与
2002～2008　JICA タイ国家計量標準機関・プロジェクトリーダー
2015～　産業技術総合研究所　研究支援アドバイザー

盛永篤郎（もりなが　あつお　1948 年生）

1975　計量研究所入所
1982　理学博士
1992　計量研究所退職、東京理科大学理工学部助教授
1995　東京理科大学理工学部教授
2015　東京理科大学退職。嘱託教授
2016　東京理科大学名誉教授

桜井慧雄（さくらい　としお　1941 生）

1965　計量研究所入所
1985　理学博士
1988～　研究企画官／熱物性･量子･計測システム部長歴任
2000　計量教習所校長
2002　産業技術総合研究所定年退職
2002～現在　浄土真宗本願寺派 善光寺住職

受理日：２０１６年４月２９日