

ヘテロダイン広帯域波長可変レーザシステム

大塚智昭^{*1} 西宮信夫^{*2} 鈴木正夫^{*3} 山口陽子^{*4} 大類祥宣^{*5}

Wide Range Wavelength Tunable Laser System Using a Heterodyne Method

Tomoaki Ohtsuka^{*1}, Nobuo Nishimiya^{*2}, Masao Suzuki^{*3},
Yoko Yamaguchi^{*4}, and Yoshinobu Ohroi^{*5}

A wide range wavelength tunable laser system has been developed using a heterodyne method. A beat signal of a microwave range from 0.2 to 12 GHz is obtained by mixing the frequency of the master laser stabilized by the reference cavity and that of the tunable slave laser and further it is measured with the microwave heterodyne system. The frequency accuracy has been evaluated by measuring the Doppler-limited absorption spectra of IBr molecule and Rb atom and the saturation absorption lines of Cs *D* 2 lines. The absolute frequency accuracy is ± 10 MHz and the relative value is ± 2 MHz.

1.はじめに

分光学の分野はレーザの出現により、回折格子分光装置やフーリエ変換赤外分光装置では観測できなかった超微細構造や広い帯スペクトルとして検出される重分子の電子遷移の微細構造の観測が可能となった。近年では、レーザの性能の向上により、広い帯域において高分解能特性を生かした研究も行われるようになった。

レーザ周波数計測は、標準周波数として確立している原子や分子の遷移周波数を参照し、ファブリペロー共振器より生じるフリンジ信号を補間マーカとして求める方法が一般的である。絶対周波数を確定するに当たり必要となる原子や分子の標準スペクトルの周波数領域は限定されたものでその数も少ない。

ミラー間隔を変化させることのできる共振器に He-Ne レーザと未知周波数のレーザ光を同時に入射し、それぞれのレーザ光より生じるフリンジ信号の数の比により波長を計測する光波長計¹⁾が市販されている。これは ± 0.5 ppm(± 500 MHz)の周波数精度

を有し、0.6~1.6 μ m という可視から近赤外線領域における広い範囲での周波数計測が可能である。本研究室では、このタイプの光波長計と 300 MHz の周波数マーカを用いて分光計測を行ってきた^{2,3,4)}が、1 MHz の水準にあるレーザの分解能に匹敵する精度で周波数を測定しようとした場合、この手法では限界がある。

周波数標準として用いられる物質の吸収スペクトルにレーザ周波数を安定化し、このレーザ光との周波数差をとり、ヘテロダイン周波数計測を行うことにより ± 0.5 ppm 以上の周波数精度が得られる⁵⁾が、近赤外線領域ではアルカリ金属原子の *D* 線に限定される。局部発振光に対しオフセットロック掃引法を用いた場合でもマイクロ波装置の帯域に限界がある。広帯域特性を備えた局部発振光を得るために外部共振器型半導体レーザの共振特性を利用したコム発振器⁶⁾やモードロックチタンサファイアレーザの側帯波を用いる方法⁷⁾が報告されている。局部発振光として用いるレーザの広帯域特性をどのように達成できるかが問題となる。

^{*1} 東京工芸大学大学院工学研究科電子工学専攻^{*2} 東京工芸大学工学部電子情報工学科講師^{*3} 東京工芸大学工学部電子情報工学科教授^{*4} 株式会社東京理工舎^{*5} 日本電算機株式会社

2002年9月17日受理

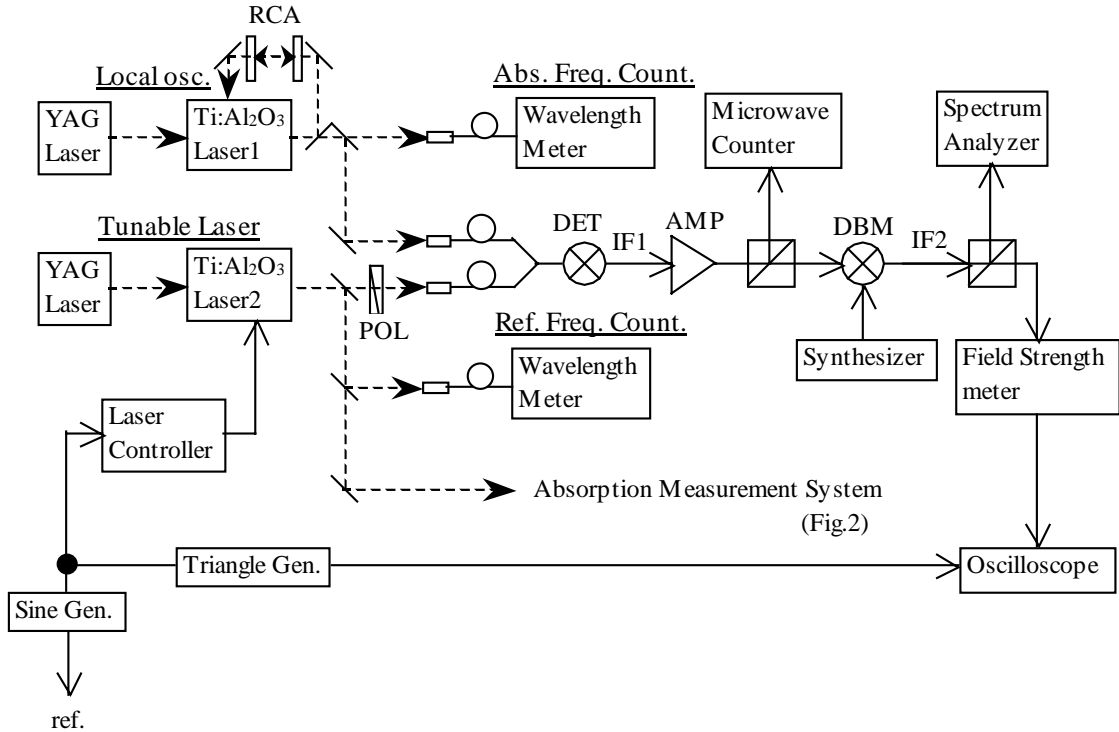


Fig.1 ヘテロダイン計測システム

広帯域波長可変特性を備えたリング型チタンサファイアレーザと絶対周波数の確定したフリンジ信号発生装置を併用したシステムを構築すれば周波数精度が高く、広い帯域で使用可能な局部発振器としてこれを機能させることができる。

システム構築の第1段階としてチタンサファイアレーザ 1 (899-29: Coherent)に取り付けられた周波数参照外部共振器 (Reference Cavity : RCA)に帰還をかけ周波数安定化させ、もう 1 台のチタンサファイアレーザ 2 (MBR-110: Coherent)との周波数差をヘテロダイン検出し、マイクロ波技術を用いて相対周波数を $\pm 2\text{MHz}$ の精度で計測できるシステムを構築した。このシステムを用い、IBr 分子と Rb 原子の吸収スペクトル、Cs 原子の飽和吸収スペクトルを観測し、このシステムによる周波数測定精度を評価した。

2.計測システム

構築したヘテロダイン計測システムを Fig.1 に示す。このシステムを用い、外部共振器に安定化され

たレーザ光を Fig.2 に示す分光計測システムに導く。分光計測では、この 2つのシステムを統合して使用するが、本節ではヘテロダイン周波数計測部と分光計測部に分けてそれぞれの構成を述べる。

2.1 ヘテロダイン計測システム

チタンサファイアレーザ 1 は局部発振に用いるレーザ光源であって、チタンサファイアレーザ 2 は周波数掃引に用いた。励起レーザには、それぞれ YAG レーザ (Verdi-8W, Verdi-5W: Coherent)を用いた。局部発振光として用いるレーザ 1 は RCA に安定化することにより $\pm 1\text{MHz}$ の周波数安定度が得られる。周波数精度は光波長計 (MF9630A: Anritsu)の読み取り精度で制限され、 $\pm 10\text{MHz}$ である。レーザ 2 はレーザ 1 に比べてモードホップが起りにくく、メンテナンスフリーなどの利点があるため周波数掃引用光源として使用した。外部接続した信号発生器 (LG1301: Leader 電子)の出力信号を本体内部に置かれたブリュスタ板に加えることにより最大 $\pm 20\text{GHz}$ の範囲が掃引できる。レーザ 1 とのビート信号を得るために光波長計 (TQ8325 : Advantest)の

計測値を参照し、レーザ2の発振周波数を設定した。2つのレーザ光を光カプラ (Model FOBS-12P-111: OZ optics)でミキシングするに当たり偏波面を一致させる必要があるため偏光補償器 (Model 5540: New Focus)を挿入した。0.2~12GHzの周波数範囲を持つ検出器 (Model 1554 : New Focus)で検波したビート信号 *IF1* を増幅器 (Model A3H2121: Anritsu)で約 100 倍に増幅した後、方向性結合器 (Model C118-6: sage)によって分配し、各計測機器に入力した。ビート周波数はマイクロ波周波数カウンタ (R5373: Advantest)で計測した。マイクロ波シンセサイザ (83751B: Agilent Technologies)とのビート信号 *IF2* を周波数範囲 3~11GHz を持つダブルバランスミキサ (Model R&K M-121: R&K)で検出し、信号成分をスペクトラムアナライザ (R3273: Advantest)により観測した。周波数範囲 25~230MHz の VHF 受信機 (M-321C: Anritsu)は 1MHz の帯域幅を持ち、計測したレーザ周波数は RCA に安定化されているので±1MHz の精度で与えられる。

2.2 分光計測システム

ヘテロダイン検波システムを用いて気相原子や分子の吸収スペクトルを測定する多目的なシステムを Fig.2 に示す。チタンサファイアレーザ2の出射光をビームスプリッタ (BS)で光路 I、II、III、IVに分割する。光路 I ではセル 1 の両方向からレーザ光を入射し、飽和吸収スペクトルが計測できる光学系を構築した。光路 II では遷移確率の低い物質に対して吸収強度を向上させるためにホワイトセルなどを用い、光路長が長くとれるスペースを確保した。光路 III では遷移確率の高い物質の線形吸収スペクトルの計測や周波数ダブラー装置を用いた2重共鳴や2光子吸収計測ができる光学系を構築した。光路 IV ではレーザ光を共焦点型ファブリペロー共振器に入射し、これによって発生するフリンジ信号をレーザ周波数計測の補間マーカとして用いる。本実験ではセル 1 に Cs 原子(飽和蒸気圧、光路長 5cm)を封入し、飽和吸収スペクトルのビデオ信号をロックイン検出し、2次微分信号として観測した。セル 2 には IBr 分子(飽和蒸気圧、光路長 2m)を、セル 3 には Rb 原子(飽和蒸気圧、光路長 5cm)を封入して、線形吸収スペクトルを観測した。

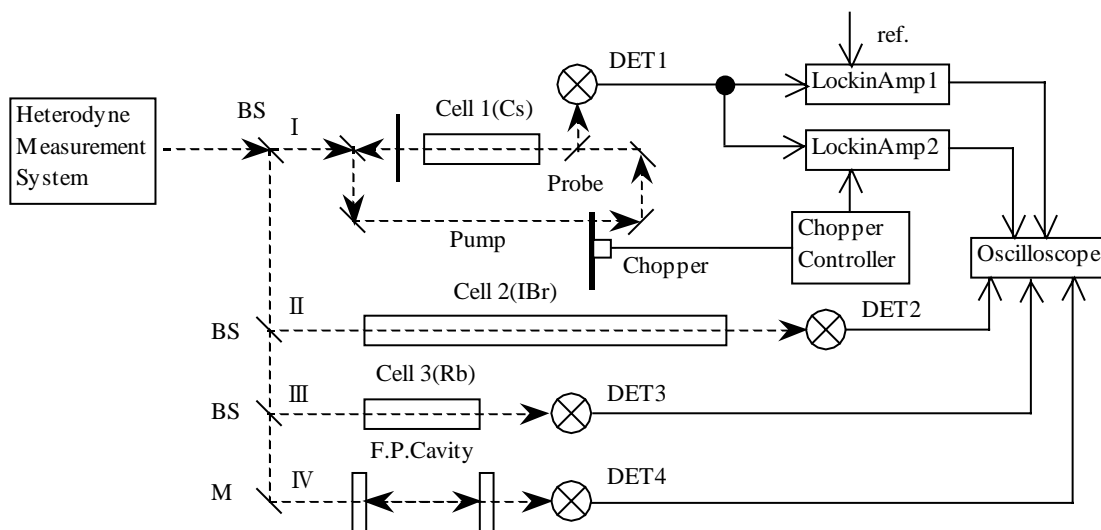


Fig.2 分光計測システム

3. 結果と考察

3.1 ビート信号 $IF1$ と最小入力感度の関係

2つのレーザ光をミキシングしたときのビート信号 $IF1$ の出力 I_{beat} は2つのレーザ入力に比例し、次の関係式が成り立つ。

$$I_{beat} = K \cdot I_{MBR}^m \cdot I_{899}^n \quad (1)$$

マイクロ波周波数カウンタの最小入力感度を得る上で必要な最小入力を見積もるためのパラメータ m 、 n を求める。レーザ2の光出力 I_{MBR} とレーザ1の光出力 I_{899} の入力レベルをそれぞれ 0.1mW ～ 2mW で変化させた。光カプラへの入力には光パワーメータ (TQ8210: Advantest) で、ビート出力については $+20\text{dBm}$ のマイクロ波増幅器の出力をスペクトラムアナライザで測定した。 $\log(I_{beat})$ と $(\log(I_{MBR}), \log(I_{899}))$ の関係より指数 m 、 n を求めると $m = 0.978$ 、 $n = 0.964$ であったので、 $m = n \approx 1$ とした。比例定数 K を求めると $K = 0.078 \text{ mW}^{-1}$ であった。マイクロ波周波数カウンタの最小入力感度は $10 \mu\text{W}$ であり、光ファイバーへの入射効率を含むシステム全体の特性は(2)式となり、この関係を満たす必要がある。

$$I_{beat} \approx 0.078 \cdot I_{MBR} \cdot I_{899} \geq 10 \mu\text{W} \quad (2)$$

3.2 ダブルバランスミキサの出力

スペクトラムアナライザにより測定したダブルバランスミキサの出力結果を Fig.3 に示す。掃引発振レーザの周波数 ν_{Sweep} と局部発振レーザの周波数 ν_{Local} のビート信号 $IF1$ はマイクロ波周波数カウンタの表示より 3.17GHz であった。この成分を Fig.3 中央にある(c)ラベルで示す。マイクロ波シンセサイザの出力は $\nu_{MW} = 2\text{GHz}$ 、 $+10\text{dBm}$ に設定した。ビート信号 $IF2$ の信号成分 $\Delta \nu_{beat}$ を Table1 に示す。これらビート信号は(3)式で与えられる。

$$\Delta \nu_{beat} = |A \nu_{MW} \pm B (\nu_{Sweep} - \nu_{Local})| \quad (3)$$

通倍指数 A 、 B は Table1 の第4列に示した。ノイズレベル -70dBm に対し和周波(e)と差周波(d)は -40dBm 以上の出力を得た。

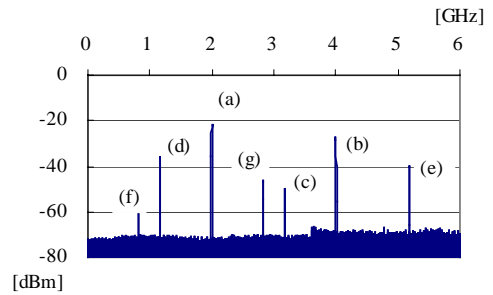


Fig.3 ビート信号 $IF2$

Table1 ビート信号 $IF2$ の信号成分

記号	名称	入力[dBm]	(A, B)
(a)	マイクロ波シンセサイザ: ν_{MW}	-22	1, 0
(b)	マイクロ波シンセサイザ: $2 \nu_{MW}$	-26	2, 0
(c)	ビート信号 $IF1$	-49	0, 1
(d)	ν_{MW} と $IF1$ の差周波	-35	1, 1
(e)	ν_{MW} と $IF1$ の和周波	-39	1, 1
(f)	$2 \nu_{MW}$ と $IF1$ の差周波	-61	2, 1
(g)	$3 \nu_{MW}$ と $IF1$ の差周波	-35	3, 1

3.3 IBr 分子及び Rb 原子の吸収スペクトル

光路ⅡとⅢにより測定した IBr 分子の A-X 電子遷移、および Rb 原子の D_1 線の線形吸収を Fig.4 に示す。掃引領域は、384. 2234~384. 2334 THz、掃引速度は 200 MHz/s である。トレース(A)には、 $I^{79}\text{Br}$ の $v'=9 \leftarrow v''=2$ の Q (25) と $I^{81}\text{Br}$ の $v'=12 \leftarrow v''=3$ の Q (38)、トレース(B)には、 ^{87}Rb の $F=(2,1) \leftarrow 2$ 、 ^{85}Rb の $F=(3,2) \leftarrow 3$ および $(3,2) \leftarrow 2$ が検出されている。いずれもドップラー効果による影響で、数百 MHz のライン幅を示している。ヘテロダイン周波数計測マークはトレース(C)に、トレース(D)は参照用に記録した 300MHz のフリッジ信号である。

2つの周波数マークを比較すると、ヘテロダイン信号の分解能は、VHF 受信機の帯域幅である 1 MHz の水準を達成しているに比べ、フリッジ信号の幅は 100MHz である。

吸収信号の周波数を測定するに当たっては、局部発振レーザ光の周波数 $\nu_{\text{Laser}}^{\text{Local}}$ は固定しておき、マイクロ波シンセサイザの周波数 $\nu_{\text{MW}}^{\text{Local}}$ を変化させ、トレース(C)のヘテロダイン周波数計測マーク ν_{Rec} を吸収のピークに一致させ、

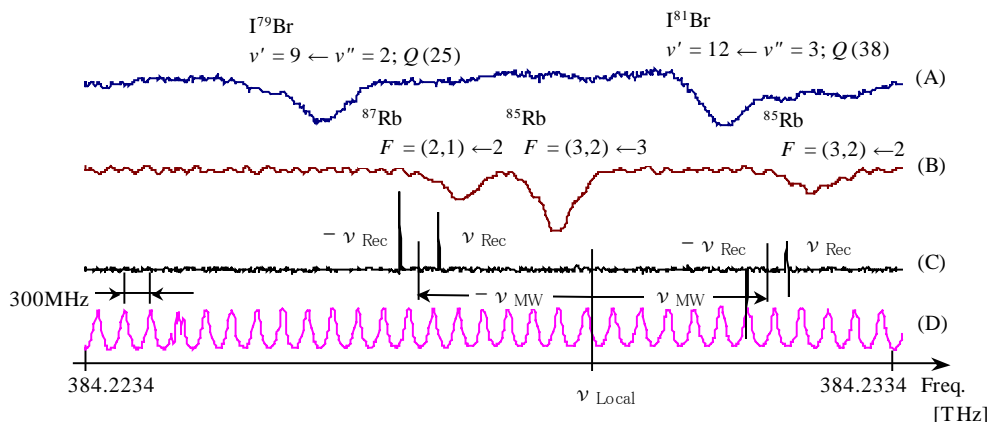
$$\nu_{\text{Abs}} = \nu_{\text{Laser}}^{\text{Local}} \pm \nu_{\text{MW}}^{\text{Local}} \pm \nu_{\text{Rec}} \quad (4)$$

の関係式より決定する。

相対周波数はマイクロ波シンセサイザの周波数精度 $\pm 0.001\text{MHz}$ と VHF 受信機の精度 $\pm 0.1\text{MHz}$ に依存する。2つのスペクトルの間隔については相対値となるので、局部発振レーザの周波数短期安定度から $\pm 1\text{MHz}$ と見積もることができる。

絶対周波数は局部発振レーザの周波数安定度に依存し、本実験では波長計の確度により規定され、 $\pm 10\text{MHz}$ と見積もっている。線形吸収においては測定対象となるスペクトル線の幅がドップラー幅となり、ピーク検出に伴い誤差が生じる。この精度やフリッジ信号のピーク検出精度より $\pm 30\text{MHz}$ の測定誤差が伴うので、ドップラー幅の分解能で行なう分光研究には十分な精度と言える。

第2の利点は、200 MHz/s という高速掃引特性が達成できることである。光波長計のデータとフリッジ信号をデジタル計測する方法では、光波長計の計測レートが 1 time/s であるから 10GHz の領域を掃引するに当たり、600~1000s の時間を必要とするが、本システムでは検出系の時定数に規定される[分解能/時定数]の掃引速度を達成することができる。通常の線形吸収の測定条件として用いられる分解能 20MHz、時定数 100ms の条件のもとでは、10GHz を 50s の掃引速度で記録できるので、ほぼ 1/10 に観測時間を短縮できることが分かった。



$$\nu_{\text{Local}} = 384. 2299 \text{ [THz]}, \quad \nu_{\text{MW}} = 2000 \text{ [MHz]}, \quad \nu_{\text{Rec}} = 230 \text{ [MHz]}$$

Fig.4 線形吸収スペクトル

3.4 Cs 原子の飽和吸収スペクトル

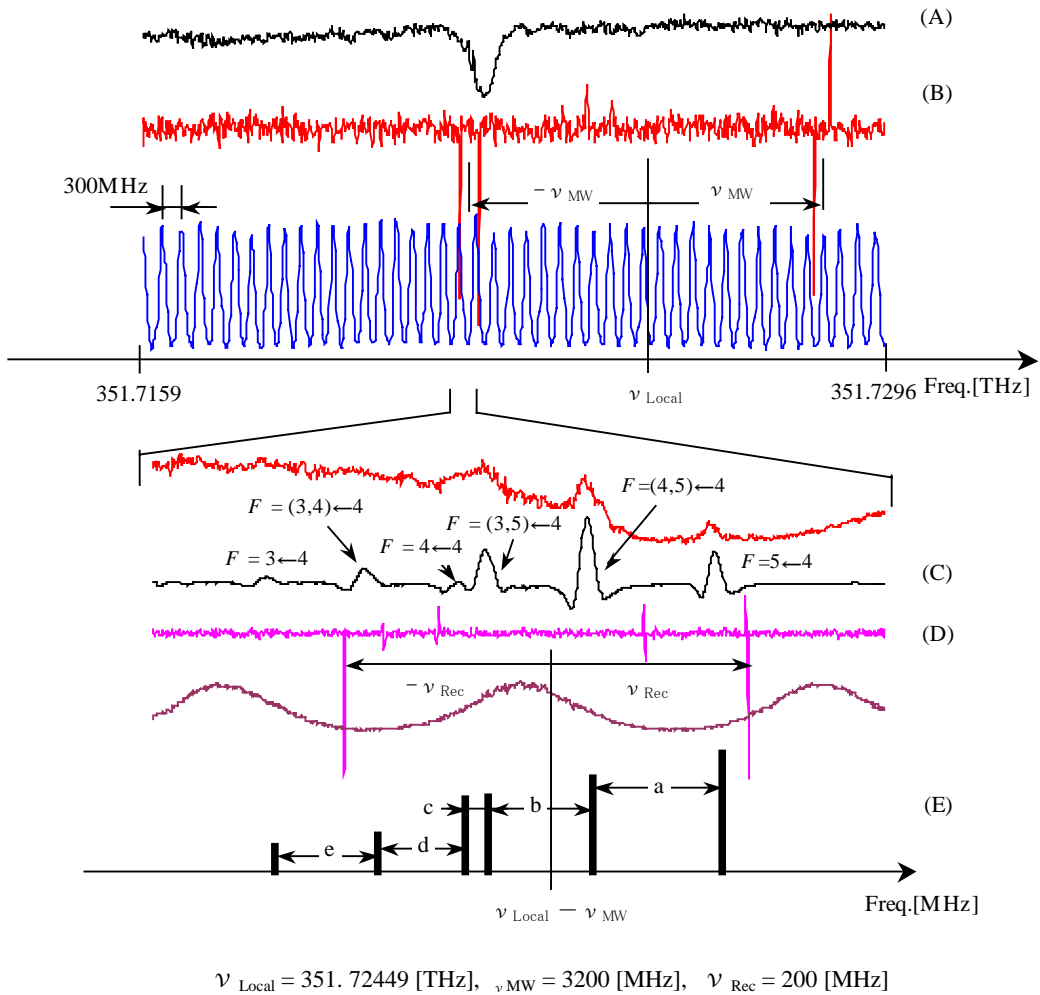


Fig.5 飽和吸収スペクトル

線形吸収に伴うドップラー幅を狭窄化し、サブドップラー幅によるスペクトルを用いて周波数測定精度を評価するため、Cs 原子の D_2 線の飽和吸収を測定した。このスペクトルは、Udem 等⁷⁾により、モードロックレーザーの側帯波を局部発振光としたヘテロダイン周波数計測法により、周波数精度 ± 8 kHz、スペクトル線幅 5 MHz で測定されている。

Fig.2 に示す光路 I により測定した $F = (3,4,5) \leftarrow 4$ の超微細構造の飽和吸収スペクトルと周波数マーカーを Fig.5 に示す。

検出に当たっては、変調周波数 20Hz、変調幅 30MHz の FM 変調を施した。トレース(A)は掃引幅 14GHz のビデオ吸収信号、トレース(C)、(D)、(E)は吸収線の近傍 700MHz を拡大して掃引したものである。飽和効果による反転ラムクぼみが現れている。この飽和吸収信号のロックイン検出した結果がトレース(C)である。両側にある吸収は、 $F = 3 \leftarrow 4$ と $5 \leftarrow 4$ である。クロスレゾナンスによる吸収が現れている。

Table2 The Line Splitting width of Cs D_2 line $F = (3,4,5) \leftarrow 4$

	$\nu_{(F' \leftarrow F'')} - \nu_{(F' \leftarrow F'')}$	This work	Ref. (8) ^{*1}	$\Delta \nu_{\text{obs}} - \Delta \nu_{\text{ref}}$
(a)	$\nu_{(4,5 \leftarrow 4)} - \nu_{(5 \leftarrow 4)}$	128.6 (2.9)	125.294	3.3
(b)	$\nu_{(3,5 \leftarrow 4)} - \nu_{(4,5 \leftarrow 4)}$	100.0 (4.5)	100.620	-0.6
(c)	$\nu_{(4 \leftarrow 4)} - \nu_{(3,5 \leftarrow 4)}$	24.2 (1.3)	24.904	-0.7
(d)	$\nu_{(3,4 \leftarrow 4)} - \nu_{(4 \leftarrow 4)}$	93.8 (3.5)	100.736	-7.0
(e)	$\nu_{(3 \leftarrow 4)} - \nu_{(3,4 \leftarrow 4)}$	96.7 (3.5)	100.583	-3.9

*1 分裂幅は絶対周波数の差より求めた

in MHz

Table3 The Line Frequency of Cs D_2 line $F = (3,4,5) \leftarrow 4$

$F' \leftarrow F''$	This work	Ref. (8)	$\nu_{\text{obs}} - \nu_{\text{ref}}$
5 \leftarrow 4	351 721 981.6 (7.3)	351 721 960.362	21.2
(4,5) \leftarrow 4	351 721 851.4 (6.7)	351 721 835.068	16.3
(3,5) \leftarrow 4	351 721 751.4 (5.8)	351 721 734.448	17.0
4 \leftarrow 4	351 721 727.2 (6.3)	351 721 709.544	17.7
(3,4) \leftarrow 4	351 721 632.5 (4.5)	351 721 608.808	23.7
3 \leftarrow 4	351 721 532.0(11.2)	351 721 508.225	23.8

in MHz

中心の $F=4 \leftarrow 4$ と $F=3 \leftarrow 4$ と $5 \leftarrow 4$ のクロスレゾナンスは重なっている。

図に示すように、 $F = 3 \leftarrow 4$ 、 $(3,4) \leftarrow 4$ 、 $(4,5) \leftarrow 4$ 、 $5 \leftarrow 4$ の4本のスペクトル線を用いて解析すると(E)に示す超微細構造を示すことが分かる。非線形吸収の強度は、線形吸収の相対強度と異なっているので、相対強度は実測値に合うよう補正した。

トレース(D)に示すヘテロダイン周波数マーカを用いて、各スペクトルの分裂幅を測定した結果をTable2に示す。測定値の標準偏差は $\pm 2\text{MHz}$ であり、Udem等⁸⁾の結果と比較すると $\pm 5\text{MHz}$ の範囲で一致しているが、周波数掃引に用いたレーザ2のS/Nが悪いことやブリュースタ板の応答特性にヒステリシスがあるため、データ値に差異が出たと考えられる。

局部発振レーザ光の周波数とTable2より算出した分裂幅を式(4)に代入して求めたスペクトル線の絶対周波数をTable3に示す。Udem等の結果と比較すると系統的に約20MHz高い値を示している。これは波長計の周波数精度が、 $\pm 0.5\text{ppm}$ であることを考えると妥当な範囲にあると言えるが、波長計の

表示値の最小桁10MHzを超えているので、波長計を20MHz補正すべきものとする。

4.まとめ

光周波数ヘテロダイン法を用いて分解能1MHzの周波数マーカを得るシステムを構築し、特性を評価した。絶対周波数の測定精度は周波数安定化するレーザの周波数安定度に依存する。本計測システムの主要な誤差要因は、局部発振レーザ周波数を計測する波長計の精度にある。

広い周波数帯域にわたり周波数安定度の高い局部発振光を得るため、本システムで用いている外部周波数参照フェブリペロー共振器の共振器長を標準スペクトルに安定化したレーザにより安定化し、絶対周波数精度についてもレーザ分解能の精度で計測するシステムの製作に着手している。

このシステムは、レーザの周波数掃引にあたり波長計のデジタルデータを記録する必要がないので、

従来の方法に比較し、数十倍速い 200 MHz/s 以上の周波数掃引特性を有している。また、周波数マーカの高分解能特性により、相対的な分裂幅であればレーザーの分解能と周波数短期安定度に相当する±1MHz以上の測定確度を達成できる。

このレーザー分光システムは 0.7~1.1 μm 領域にわたる広い周波数掃引特性をそなえ、その出力光は周波数分解能においても出力特性においても優れている。高出力特性を利用し、近赤外光の第 2 高調波を発生させ可視・紫外線領域への拡張も可能である。また、このレーザーシステムは全て固体化されており、耐久性や出力効率の点でも優れている。汎用分光計測システムとして活用する上で障害となっている絶対周波数計測システムの精度と周波数掃引機能を向上させ、この優れた特性を生かした近赤外・可視レーザー分光計測装置として一層その機能を発揮させたいと考えている。

参考文献

- 1) H.Goto, Y.Tamura, Y.tsuda, H.Miyano, K.Ikeuchi and T.Tsukamoto, *Anritsu Technical*. **62**, 38–43 (1992).
- 2) N.Nishimiya, T.Yukiya and M.Suzuki, *J. Mol. Spectrosc.* **163**, 43–57 (1994).
- 3) T.Yukiya, N.Nishimiya and M.Suzuki, *J. Mol. Spectrosc.* **182**, 271–279 (1997).
- 4) T.Yukiya, N.Nishimiya and M.Suzuki, *J. Mol. Spectrosc.* **214**, 132–143 (2002).
- 5) H.Sasada, S.Takeuchi, M. Iritani and K.Nakatani, *J. Opt. Soc. Am. B* **8**, 713–718 (1991)
- 6) M.Kouroggi, K.Nakagawa and M.Ohtsu, *IEEE J. Quantum Electron.* **29**, 2693–2701 (1993)
- 7) Th.Udem, J.Reichert, R.Holzwarth and T.W.Hansch. *Phys. Rev. Lett.* **82**, 3568–3571 (1999).
- 8) Th.Udem, J.Reichert, T.W.Hansch and M.Kouroggi, *Phys.Rev. A* **62**, 031801-1 – 031801-4 (2000).