

JAERI-Tech  
2005-043



JP0550485



難分析長寿命核種分析のための波長安定化レーザーの開発  
(3) コンピューターによる波長安定化システムの制御

2005年8月

宮部 昌文・大場 正規・加藤 政明・若井田 育夫・渡部 和男

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、  
お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡  
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,  
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-  
gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

## 難分析長寿命核種分析のための波長安定化レーザーの開発

### (3) コンピューターによる波長安定化システムの制御

日本原子力研究所東海研究所環境科学研究部

宮部 昌文・大場 正規・加藤 政明・若井田 育夫・渡部 和男

(2005年7月6日受理)

多段階共鳴電離法による難分析核種の分析では、発振波長を同位体の共鳴波長に素早く正確に同調でき、長時間一定に維持することのできるレーザー光源が不可欠である。本研究では、これまでに開発した周波数基準レーザーとエタロン干渉計によるレーザーの波長安定化システムを、デジタル回路とコンピューターを用いて制御する方式に改造し、発振波長を簡単に切り替えられるシステムを開発した。さらに、本システムの波長同調性能や波長安定度を、ヘテロダイン計測法や、カルシウム原子の多段階共鳴蛍光分光法を用いて測定し、同調誤差が 1GHz のスキャンで $\pm 0.5\text{MHz}$  以下、周波数ドリフトが約 9.5 時間の観測で $-0.8\text{MHz}$  程度であることを確かめた。これにより、開発したシステムが分析用光源として十分な波長同調性能や波長安定度を有することを確認した。

---

東海研究所： 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Development of Frequency Stabilized Laser System for Long-lived Isotope Analysis  
(3) Computer-based Laser Frequency Tuning System

Masabumi MIYABE, Masaki OBA, Masaaki KATO, Ikuo WAKAIDA  
and Kazuo WATANABE

Department of Environmental Sciences  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 6, 2005)

Multi-step resonance ionization spectrometry for long-lived nuclide in nuclear waste materials requires laser sources having high frequency stability and tunability. In this study we have developed a novel frequency control system consisting of a digital circuit and a computer to improve the frequency tunability of the developed laser stabilization system using dichroic atomic vapor laser lock (DAVLL) and fringe offset lock (FOL) techniques. Based on the heterodyne measurement and multi-step laser induced fluorescence spectroscopy of atomic Ca, frequency tuning error and long-term frequency fluctuation of the developed system were evaluated to be less than 0.5MHz per 1GHz scan and -0.8MHz per 9.5 hour observation period respectively. From these results, it was confirmed that the developed system is suitable for the laser sources for resonance ionization spectrometry.

Keywords : Diode Laser, ECDL, Stabilization, Fringe Offset Lock, RIMS, Heterodyne Measurement

## 目次

1. はじめに.....	1
2. デジタルFOLシステムの開発.....	3
2.1 デジタルFOLシステムの概要.....	3
2.2 フリンジ信号 TTL パルス生成回路.....	4
2.3 レーザー制御用プログラム.....	5
2.4 計測用プログラム.....	7
3. FOLシステムの性能評価試験.....	10
3.1 ヘテロダイン計測によるFOL レーザー発振特性の評価.....	10
3.2 2段階レーザー共鳴蛍光分光法による発振特性の評価.....	13
4. FOLシステムの性能に関する議論.....	14
4.1 エタロン干渉計のピエゾ素子の非線形応答.....	14
4.2 エタロン干渉計のフィネスの波長依存性.....	15
4.3 エタロン干渉計のFSR 絶対値の校正.....	15
5. 結論.....	17
謝辞.....	17
参考文献.....	18
付録1 レーザー制御プログラム.....	19
付録2 NI LabView ダイアグラム.....	24

## Contents

1. Introduction.....	1
2. Development of Digital FOL System.....	3
2.1 Principle of Digital FOL System.....	3
2.2 Digital Circuit for TTL Fringe Pulse Generation.....	4
2.3 C++ Program for Laser Control.....	5
2.4 LabView Program for Various Measurements.....	7
3. Performance of FOL System.....	10
3.1 Beat Signal Measurement with Heterodyne Technique.....	10
3.2 Frequency Tunability Evaluation with 2-step LIF Spectroscopy of Ca.....	13
4. Discussion on Various Factors Affecting FOL Performance.....	14
4.1 Non-linear Responce of Piezoelectric Transducer of FPI.....	14
4.2 Wavelength Variation of Finnese of FPI.....	15
4.3 FSR Calibration of FPI.....	15
5. Conclusions.....	17
Acknowledgement.....	17
References.....	18
Appendix 1. Visual C++ Source Code for Laser Control.....	19
Appendix 2. LabView VI Diagram and Front Panel for Various Measurements.....	24

This is a blank page.

## 1 はじめに

放射性廃棄物のクリアランス制度の法制化に向けて、廃棄物中に含まれる難分析核種の分析方法の開発が重要になりつつある。我々は、このような廃棄物の分析に多段階共鳴電離質量分析法を適用することを目指して開発を行っている。この方法ではレーザーの波長を同位体の共鳴波長に同調させ、発生するイオン量を比較することで同位体比を決定する。波長の異なる複数のレーザーの光を全て吸収した原子のみがイオン化されるため、同位体の選択性が飛躍的に高まり、存在比の極めて低い同位体の分析が可能になると期待される。

分析用光源には安価で操作の容易な半導体レーザーが適しているが、このレーザーは発振波長が変動しやすいという欠点を持っている。そこで我々は、ゼーマン効果を利用してルビジウム原子の強い吸収線に波長をロックした基準レーザーと、干渉縞(フリンジ)の現れる位置の変動から、基準レーザーとカルシウム原子励起用レーザーの相対波長を固定する機構を開発し<sup>1)2)</sup>、これを組み合わせて波長変動の少ない光源システムを開発してきた。しかし、同位体分析用光源では波長の変動を減らすだけではなく、別の同位体の共鳴波長に素早く、繰り返し切替えられることが重要となる。特に多段階共鳴電離では、複数のレーザーの波長をほぼ同時に別の波長に切替えなければならず、切替えの自動化は不可欠である。そこで本研究では、これまでに開発した波長安定化システムのうち、干渉縞から波長安定化のためのフィードバック制御信号を生成する処理を、デジタル回路とコンピューターを用いて行うDigital Fringe Offset Lock (FOL)方式に改造し、レーザーの波長を簡単に切替えられる制御システムを開発した。まず干渉縞の信号をピーク検出回路やTTL論理回路で処理して、縞の位置を示すTTLパルスを生成する回路を製作した。さらにこの信号をコンピューターのカウンタボードに入力し、パルス幅の変動を繰り返し測定するプログラムを作成した。さらにプログラムでは、基準レーザーとスレーブレーザーの縞の変動量を積算し、積算値に比例する電圧をD/Aコンバーターで発生させた。この信号でスレーブレーザーの共振器長を変化させることで、レーザーの波長変動を抑え、任意の波長に切替えられる光源システムを構築した。

このような、周波数基準レーザーとエタロン干渉計、デジタル回路、コンピューターを用いてレーザーの発振波長を制御する研究は、これまでにBushaw<sup>3)</sup>やLindsay<sup>4)</sup>、Jaffe<sup>5)</sup>、Zhao<sup>6)</sup>、Rossi<sup>7)</sup>らが報告している。Bushawらは広帯域コーティングエタロン(分解能10MHz, 400~800nm)の干渉縞をコンピューターで監視することにより、リング色素レーザーの周波数を誤差1MHz以下で制御した。またLindsayやJaffeらは干渉縞の信号をTTLロジックICで処理することにより、コンピューター無しでもリング色素レーザーの周波数を±1MHzの再現精度で繰り返しスキャンできることを示した。またZhaoやRossiらはコンピューター制御により、半導体レーザーやチタンサファイアレーザーなど複数のレーザーを同時に±1.2MHz~4MHzの精度で安定化し、原子トラップ実験のための光源を開発した。しかし、こ

これらの研究では、いずれも開発したレーザーの波長同調性能や安定度等の性能は簡易的な方法でしか評価されておらず、実際の周波数変動の様子や、性能に影響を与える因子等は明らかになっていなかった。そこで本研究では、開発したシステムを使って安定化したレーザーの光と、周波数基準レーザーの光を干渉させてビートを観測するヘテロダイン計測法や、カルシウム原子の多段階共鳴蛍光スペクトルを観測する分光計測法を用いて、開発したシステムの波長制御性能を定量的に評価した。

本報告では、まず第2章で波長制御の原理と開発した制御システムのハードウェア、ソフトウェアについてまとめ、第3章ではヘテロダイン計測とカルシウム原子の多段階共鳴電離分光による波長制御性能の評価結果についてまとめる。さらに第4章では、制御性能に影響する要因を明らかにし、残された課題について議論する。また開発した制御、計測プログラムの主要部分を付録1, 2にまとめる。



2 デジタル FOL システムの開発

2.1 デジタル FOL システムの概要

デジタル FOL システムの概念図を図 1 に示す。簡単のため 2 台のレーザーの例を示すが、3 台以上でも同様である。周波数基準レーザーとそれに波長をロックするスレーブレザーの光を 2 色性ミラーや偏光素子を用いて同軸上に結合し、走査型ファブリペロエタロン干渉計(CVI 社製 SA300-12F)に入射した。透過光は再び 2 色性ミラー等を用いて分離し、2 台のレーザーの干渉縞を別々のフォトダイオードで検出した。干渉縞は干渉計を透過する際の光路差が波長の整数倍になる位置に現れるので、その位置から波長の変動を検出できる。本システムでは、この情報をコンピューターに取り込むため、干渉計の基準位置（走査型干渉計では共振器ミラーの間隔をピエゾ素子で周期的に変化させ、干渉縞の時間波形を観測するので、1 周期の走査開始時に発生するトリガパルスが基準位置に相当する）から、最初に現れる干渉縞までの間の TTL 電位が Hi 状態となる TTL パルス（オフセットフリンジパルス）を、2.2 節のパルス生成回路を用いて発生させた。

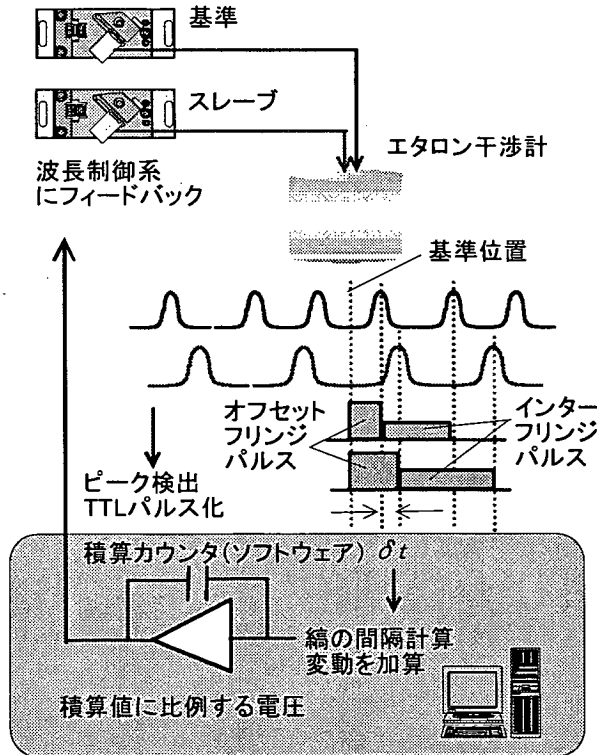


図1 デジタルFOLシステム概念図

2 つの光の TTL パルスは、コンピューターの PCI バスに接続した 8 チャンネル 32 ビットカウンタタイマボード(National Instruments 社製 PCI-6602)の 2 つのゲートにそれぞれ入力した。このカウンタボ

ードは、ゲートが Hi 状態の間だけ、20MHz の内部クロックパルスのカウントするモードを有するので、このカウント数からゲートに入力した TTL パルスの幅を測定できる。そこで Windows 上の高速プログラミング言語である Microsoft 社 Visual C++ を用いて、2 本のレーザー光に対するそれぞれのオフセットフリンジパルス幅の差  $\delta t$  を繰り返し測定し、制御開始時からの変動量を積算するプログラムを作成した (デジタル積分器)。レーザーの安定化制御は、この積算値に比例する電圧を 16 ビット 4 チャンネル D/A コンバーターボード (コンテック社製 DAI16-4C(PCI)) で発生させ、これによりスレーブレーザーの共振器長が変動と逆方向に変化するよう、ピエゾ素子の電圧を制御することで行った。またこのシステムで別の同位体の共鳴波長に切替える場合には、切替える周波数に相当する大きさのオフセット値をデジタル積分器に加算した。オフセット値の大きさと実際に変化するレーザーの周波数の関係は環境条件で変わるため、開発した制御プログラムでは、その関係を安定化操作のつど測定し、パラメータを校正するアルゴリズムを取り入れた。このパラメータ校正のため、オフセットフリンジパルスのほかに、第 1 フリンジから第 2 フリンジまでの TTL 電位が Hi 状態になる TTL パルス (インターフリンジパルス) をパルス生成回路で同様に発生させ、カウンタボードの別の 2 つのゲートに入力した。

また走査型エタロン干渉計では、1 回の走査で観測できる範囲がフリンジ 4 ~ 6 個程度、1GHz ~ 1.5GHz の周波数範囲に限られるので、1 つのフリンジにのみ着目して安定化制御を続けると、そのフリンジが観測範囲から外れた時点で制御が続けられなくなる。そこで、開発したプログラムでは、このような観測範囲による制御の制限を無くすため、干渉計の基準位置から新たなフリンジが現れた時や、注目しているフリンジが基準位置から消えた時点で、注目するフリンジを 1 つ隣のフリンジにずらし、ずらした回数を記憶させることで、制御開始時点からの周波数の総変化量を保持するアルゴリズムとした。このように着目するフリンジをずらす制御では、2 つのフリンジの周波数間隔が正確に分かっていないと、その前後でデジタル積分器に大きな変動量が加算され、強い不連続的なフィードバックによってロックが外れる恐れがある。そこでこのプログラムでは、オフセット量と周波数変化の関係を決めるパラメータの校正精度を高めることで、このような安定化制御の誤動作を防止した。

以下、TTL パルス回路と制御ソフトウェアの詳細な内容をまとめる。

## 2.2 フリンジ信号 TTL パルス生成回路

走査型エタロン干渉計のフリンジ信号からオフセットフリンジパルスとインターフリンジパルスを生成する回路を図 2 に示す。まず、図 2 (a) の回路でエタロンのスタートトリガパルスからエタロン干渉計の基準位置を表す TTL パルスを作った。このパルスはエタロンの走査開始直後の線形応答性が良くないフリンジ信号を制御に用いないようにするため、スタートトリガパルスよりも遅らせる必要がある。そこで、図 2 (a) では単安定マルチバイブレータ IC (74LS123) を 2 個使用し、1 番目の IC で、まずトリガパルスからある幅の TTL パルスを作り、それを

トリガーとして、2番目のICで遅れたTTLパルスを作った。74LS123のパルス幅 $T$ はR,C端子の抵抗と容量によって、 $T(\text{ns})=0.33 \times R(\text{k}\Omega) \times C(\text{pF})$ の関係で変化するので、最終的な出力パルスの遅延時間とパルス幅が約1.2msと7.3 $\mu\text{s}$ になるよう、1番目と2番目のICのR,C端子の可変抵抗値を調整した。この遅延パルス信号はオフセットフリッジパルスを作るためのRSフリップフロップ(図2(c)のRS-FF(1)、2つのNORゲートIC(74LS02)で構成)をセットする信号として用いた。

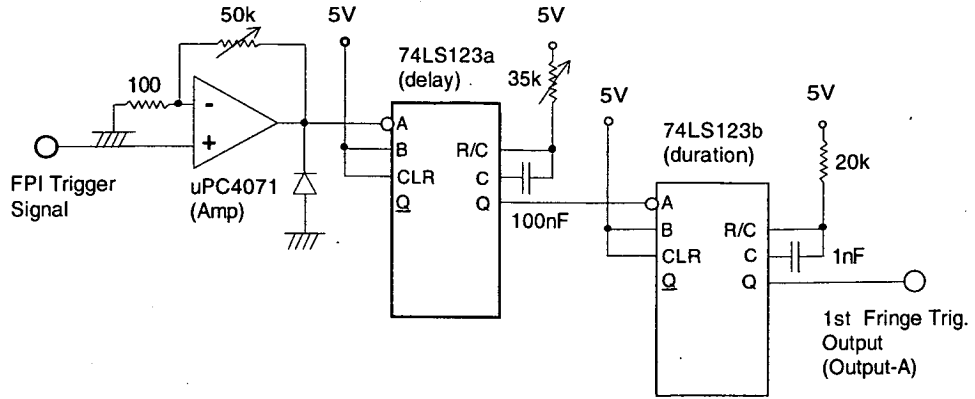
一方、フォトダイオードで検出したフリッジ信号はまず市販のプリアンプ(Hamamatsu C2719)で電流電圧変換し、図2(b)の微分回路(uPC4071)とコンパレータ回路(AD790:フリッジ信号のノイズによるチャタリング防止のためヒステリシス用1M $\Omega$ 抵抗付)からなるピーク検出回路で処理した。フリッジの微分信号を基に、ピークを中心(ゼロクロスポイント)で、論理レベルがLowからHi(5V)に変化するデジタル信号をコンパレータで作り出した。図2(c)の初段の74LS123ではこれをトリガとして、パルス幅を調整したTTLパルス列を発生させ、RS-FF(1)をリセットした。リセット信号はこのようにパルス列となるが、フリップフロップはエタロン干渉計からトリガが入った時にしかセットされないので、第1フリッジパルス以外は無視される。こうしてRS-FF(1)の正論理出力Qから、エタロンの基準位置から第1フリッジまでの間だけがHi状態となるオフセットフリッジパルスを生成した。

一方、RS-FF(1)の負論理出力 $\bar{Q}$ は次段の74LS123のトリガとして用い、第1フリッジ直後だけがHi状態となるパルスを作って、2番目フリップフロップ(RS-FF(2))をセットした。またこの74LS123の負論理出力パルスとフリッジTTLパルスでANDをとり(このANDゲートはチャタリング防止のためNAND(74LS00)とシュミットトリガ付インバータ(74LS14)で構成)、第1フリッジのパルスだけが欠けたフリッジパルス列を作って、RS-FF(2)をリセットした。これによりRS-FF(2)の正論理出力Qから、第1フリッジから第2フリッジまでの間だけがHi状態となるインターフリッジパルスを生成した。

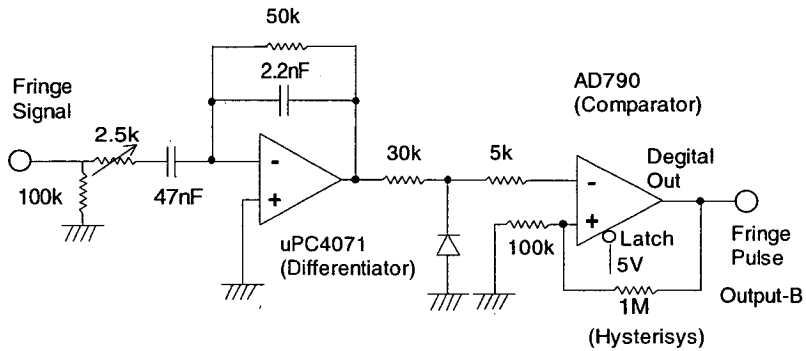
### 2.3 レーザー制御用プログラム

開発したレーザー制御プログラムのフローチャートを図3に示す。また対応するC++コードの主要部を付録1にまとめる。プログラムは各変数、定数の初期化に続き、アプリケーションのメイン関数部、コールバック関数部の順でコード化した。ここではメイン関数を便宜的にA~Eの5つの部分に分けて解説する。重要な変数はプログラム中の配列名を付記し、対応するコードの部分を丸数字で示す。

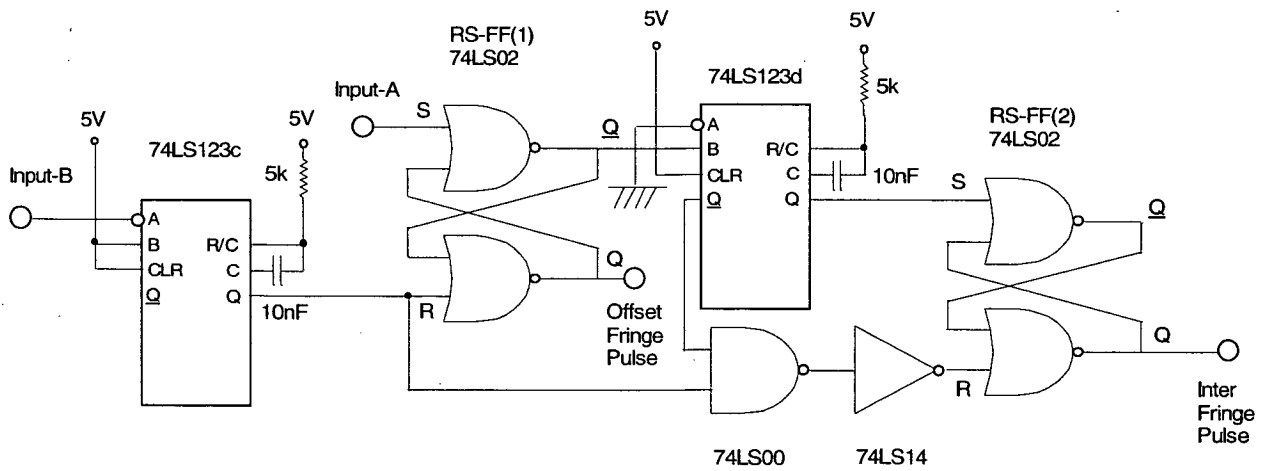
まずA部ではカウンタタイマボードやD/Aコンバータボードの動作環境を設定した。続いてE部でイベントを待機し、ボタンのON/OFFや割り込み等のイベントに応じて、制御状態を表示したり(図4)、



(a) エタロントリガパルス生成回路



(b) フリンジピーク検出回路



(c) フリンジパルス生成回路

図2 デジタルフリンジオフセットロック回路図

コールバック関数で子ウィンドウ (図 5) を開き、各レーザーの制御条件を設定するなどの処理を行った。このうち、PC の内部タイマ(100Hz)割り込みでコールされる安定化制御の核心部分が B~D 部である。B 部ではまず、全てのレーザーのオフセットフリンジパルス(CounterXValue[i])とインターフリンジパルス(CounterYValue[i])の時間幅をカウンタボードから取得した (B-①)。続いて、詳細な校正の前に、レーザーの制御に最低限必要なインターフリンジ間隔の平均値を求めて変数 InterFringe[i]に格納した(B-②)。さらに図5の校正ボタン(右)を押すことで起動される詳細校正モードでは、この値を基に、レーザーの周波数を 5MHz の刻みで 400MHz 変化させ、インターフリンジとオフセットフリンジの関係(Offset[i][j], Inter[i][j])を測定した(B-③)。そしてこのデータから、(1)式の 2 次関数で干渉計のピエゾ素子の非線形応答性を近似し、時間幅から周波数に換算するのに必要な 3 個のパラメータ(InterFringe[i], Coefficienta[i], Coefficientb[i])を決定した(B-④)。

$$\text{Inter}[i][j] = (\text{係数 } a[i])(\text{Offset}[i][j])^2 + (\text{係数 } b[i])(\text{Offset}[i][j]) + (\text{InterFringe}[i]) \quad (1)$$

C 部では校正したパラメータで補正(C-①)したオフセットフリンジの変動を求め(Drift[i], C-②)、基準レーザーの変動との差を逐次 TimeShift[i]に積算した (デジタル積分器) (C-③)。また波長を切替えるため、スキャン開始ボタン (図 5) が押された場合(hScan[i]=1)には、変化させる周波数の大きさ(TargetFreq[i])と周波数刻み幅 (FreqSeparation[i]) の設定値から、レーザーの設定周波数 SetTime[i]を連続的に変化させ(C-④)、これをデジタル積分器に加算した。スキャンの終了は SetTime[i]>TargetTime[i]で判定した(C-⑤)。刻み幅が大きいと終了時の実際の周波数と設定値のずれが大きくなるので、刻み幅が 50 以上(5MHz 以上)の場合は、終了直前で刻み幅を 0.1 倍に変更し、最終的に刻み幅が 1 になるまで、繰り返し減速させて(C-⑥)、設定値とのずれを 0.1MHz 以内に抑えた。またカルシウムの遷移では配列変数に同位体シフトデータを記憶させ、図5の質量数ボタンを押すだけでスキャンが行えるようにした。さらに、あるレーザーの制御に同期スキャンモード (Sync2 ボタン) が指定された場合は、別のレーザーの波長をスキャンする際に、同じ刻み幅で逆向きに周波数を変化させ、多段階励起で生じやすい波長のデチューニングを修正できるようにした。

D 部では、図5の安定化制御がチェックされた場合(hstabilize[i]=1)に、デジタル積分器の積算値に比例する電圧(Aout[i])を D/A コンバータから出力させた(D-①)。また異常動作時にレーザーを保護するため、出力電圧に上限値 (MaxLimit[i]) を設けたり、終了時に制御電圧がゆっくり減少するようにした(D-②)。

## 2.4 計測用プログラム

レーザーの計測プログラムは、レーザーの制御を高速化するため、制御プログラムから独立させ、Windows 上で並列処理させた。分光測定では様々な信号が必要になるので、汎用性や拡張性から

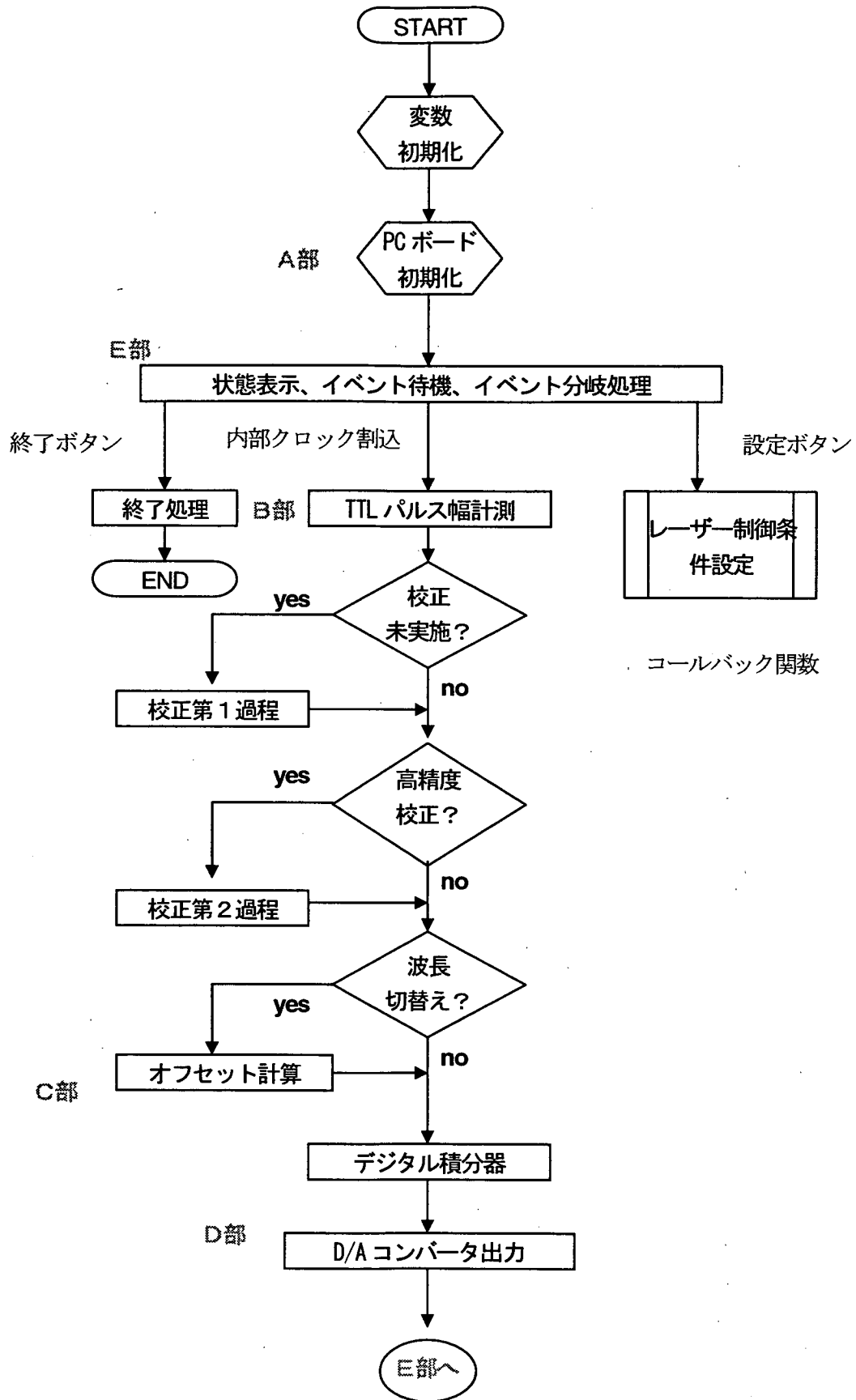


図3 制御プログラムのフローチャート

National Instruments 社の LabView をプログラム言語として用いた。開発したプログラム(Virtual Instruments)の一例として、(a)PCI バス接続のコンテック社製 AD 変換ボードによる計測と、(b)GP-IB を介した Lecroy 社製オシロスコープの計測、(c)Burleigh 社製波長計の計測、(d) PCI バス接続の NI 社製カウンタボードによる計測のブロックダイアグラムとフロントパネルを付録2に示す。これらの VI は同じハードウェアにアクセスするもの以外は同時に動作させることができる。また、制御コンピューターとは別のコンピューター上で動作させることもできる。

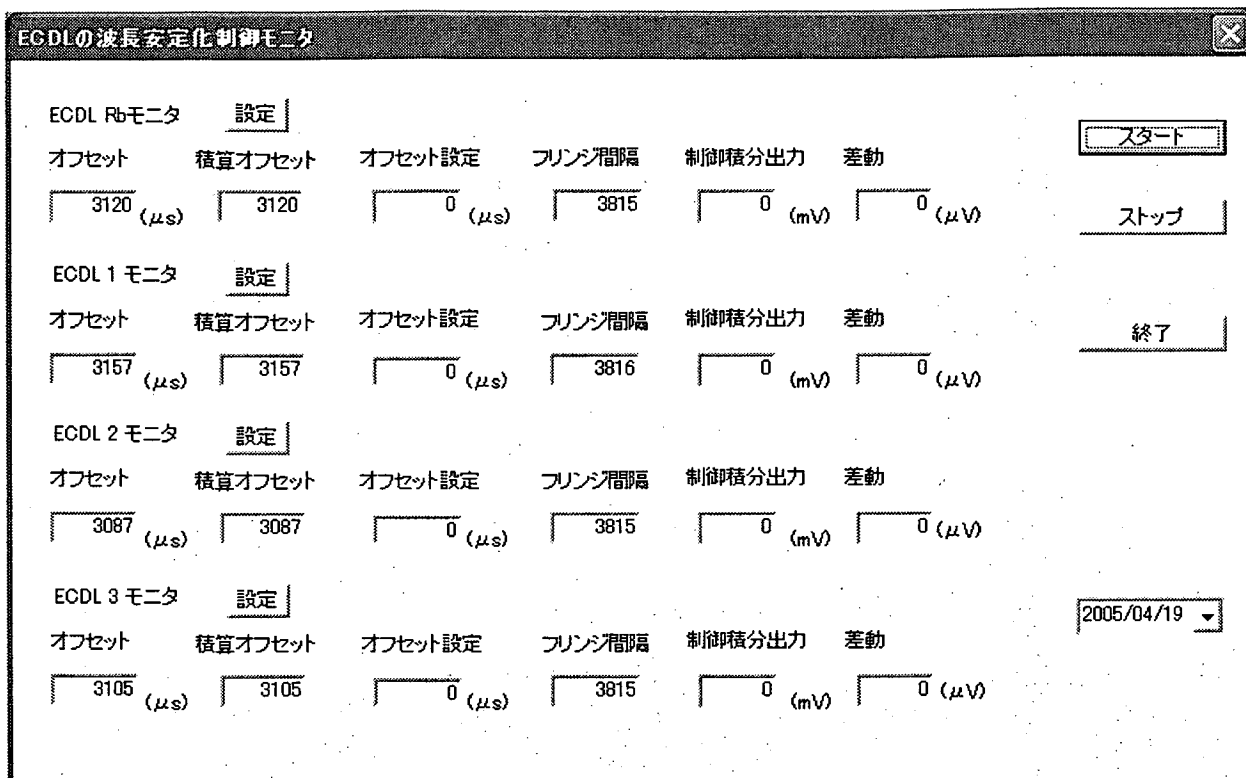


図4 制御プログラムの制御値表示ウィンドウ

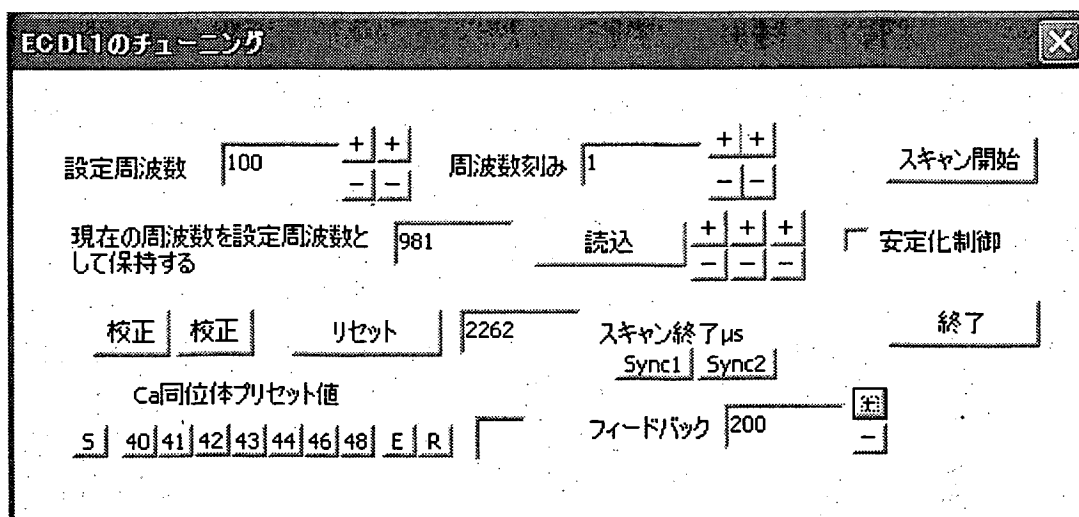


図5 制御プログラムのレーザー動作条件入力ウィンドウ

## 3 FOL システムの性能評価試験

## 3.1 ヘテロダイン計測によるFOL レーザー発振特性の評価

開発したFOL制御システムの波長同調性能や安定度を、2台のレーザーのビート信号を観測するヘテロダイン計測法で評価した。測定装置の配置を図6に示す。DAVLL法で安定化された基準レーザー(780nm)と発振波長のほぼ等しい半導体レーザーを、開発したFOLシステムで安定化し、2つの光を同軸上に結合して、高速応答性に優れたアバランシェフォトダイオード(松定プレジジョン社製APM-R263VF、帯域: 1MHz~1.2GHz)上に集光した。2つのレーザーの発振周波数を接近させると、音波で“うなり”が生じるのと同じ原理で、発振周波数の差周波数の周期で光強度が変動した。バビネ補償板で両方のレーザーの直線偏光方向を一致させることで、より強いビート信号を観測した。

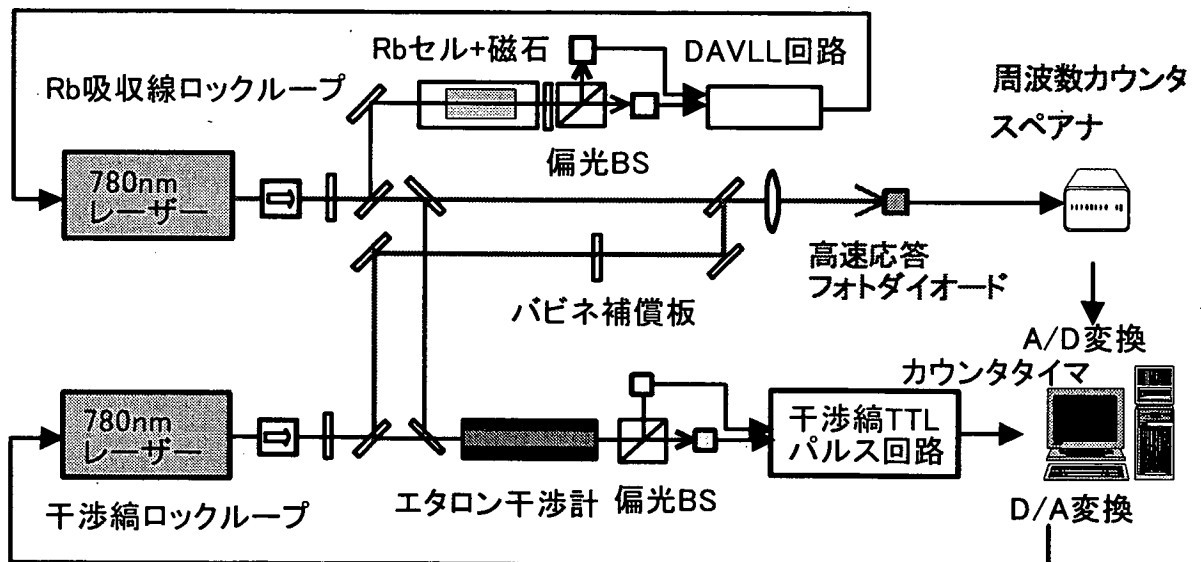


図6 ヘテロダイン計測装置の概要

オシロスコープで観測したビート信号の波形の一例を図7に示す。波形は左から3周期目で一致しているが、位相揺らぎのために右端ではぼやけていることがわかる。そこでこの波形をフーリエ分解し、周波数成分毎の信号強度分布(パワースペクトル)に変換した。その結果の一例を図8に示す。変換は高速デジタルオシロスコープ(LeCroy9374M、帯域1GHz)の波形データを、GP-IBでPCに取り込み、付録2(b)のLabViewプログラムでパワースペクトルにリアルタイムで変換する方法で行った。ピークの半値幅は、2台のレーザーの発振幅の和を表しており、その大きさは約3MHzであることがわかった。同様の方法で測定した、DAVLL法による2台の安定化



レーザーのパワースペクトルは、幅が約1.5MHzであるので<sup>8)</sup>、FOL法によるレーザーの発振幅は2MHz程度であると考えられる。

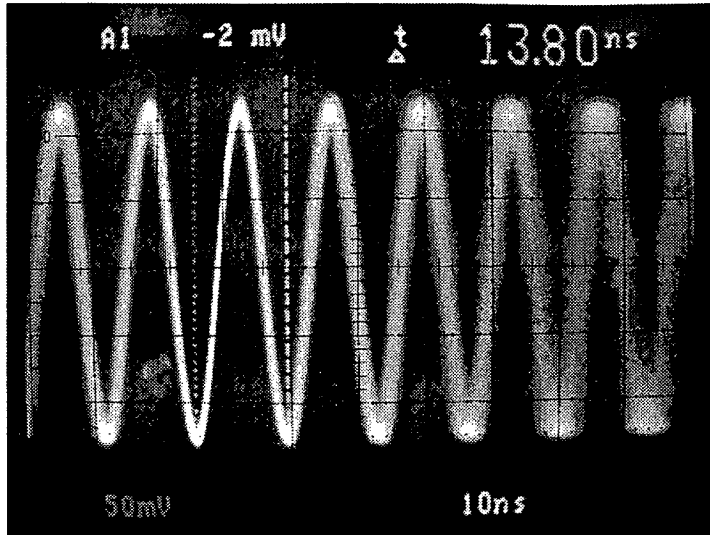


図7 観測したビート信号波形の一例

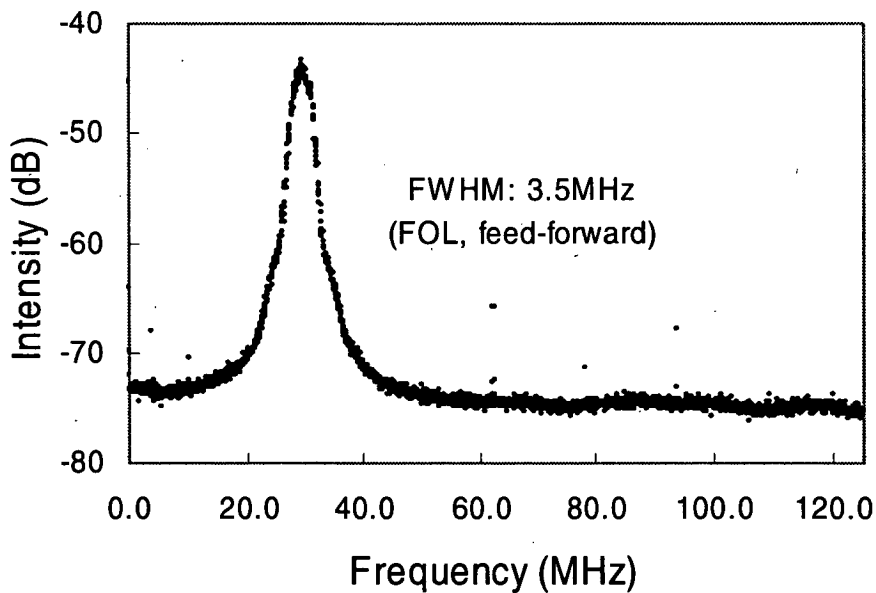


図8 ビート信号のパワースペクトルの一例

図8のピークの中心周波数は2台のレーザーの差周波数を表し、差周波数は開発したFOLシステムで安定化されているので、周波数の変動を長時間観測することで、FOLシステムの波長安定度を評価することができる。その結果の一例を図9に示す。周波数の測定にはRF周波数カウンタ(Advantest製 R5372)を用いた。約9.5時間の観測で周波数は-0.8MHzドリフトした。また、このほかに約1.5時間おきに約1MHz程度の不連続な周波数変動が観測された。この周波数変動は4章で議論するエタロン干渉計のピエゾ素子の伸縮長と引加電圧の非線形応答性によるものと考え

られる。いずれにしても、カルシウム原子吸収線の自然幅や残留ドップラー幅が数10MHz程度であることを考えれば、これらは十分無視できる大きさである。

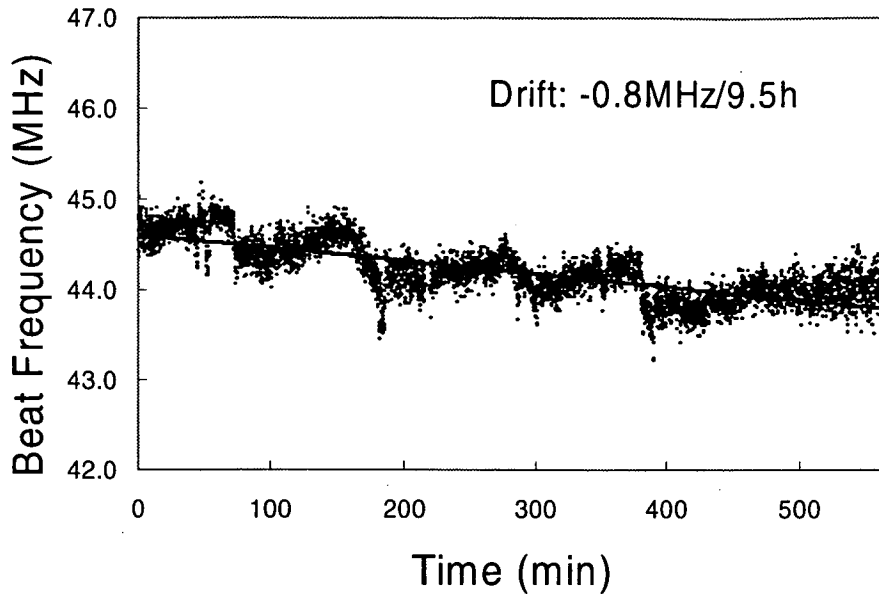


図9 ビート信号による波長安定度の測定結果の一例

また同じ装置を用いて、FOLシステムの波長同調性能の試験も行った。図10にその結果の一例を示す。横軸はPCで指定した周波数の設定値、縦軸はビート信号の中心周波数から測定した実際のレーザーの周波数変化である。また下の白丸は観測値から設定値を差し引いた波長同調誤差を表している。図から1GHzのスキャン範囲での同調誤差は±0.5MHz以内であり、無視できる大きさであることが確かめられた。

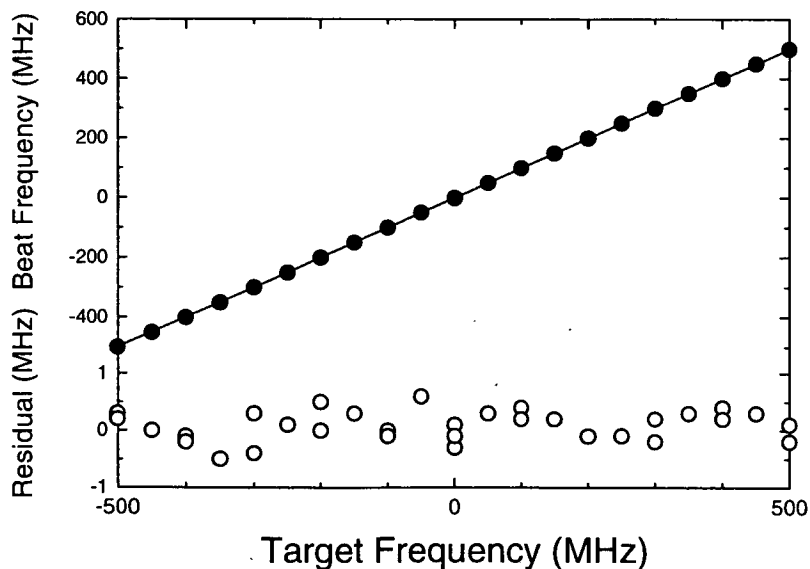


図10 ビート信号による波長同調性能の測定結果の一例

### 3.2 2段階レーザー共鳴蛍光分光法による発振特性の評価

開発したFOLシステムでカルシウム原子の励起用レーザーを制御し、カルシウム原子の共鳴蛍光を観測する方法で、本システムの波長同調性能を評価した。金属カルシウムを500°Cに加熱して生成した原子ビームに2つのレーザービームを直交させ、基底状態の原子を2段階共鳴励起した。図11に示すように、1段目のレーザーの波長は連続的に変化させ、2段目の波長は同位体毎の共鳴波長に切り替えながら同調させ、1段目の波長がその同位体の共鳴波長を通過するのを待って、第1励起準位からの脱励起に伴う蛍光信号を観測した。観測した共鳴蛍光スペクトルの一例を図12に示す。各ピークの小さな窪みは、第1励起準位の原子の一部が、2段目のレーザー光によって蛍光を発しない第2励起準位に移り、蛍光が減少して現れた構造(Lamb Dip)であり、これが各ピークの中に現れていることから、2段目のレーザーが同位体の共鳴波長に正しく同調されていることを確認した。

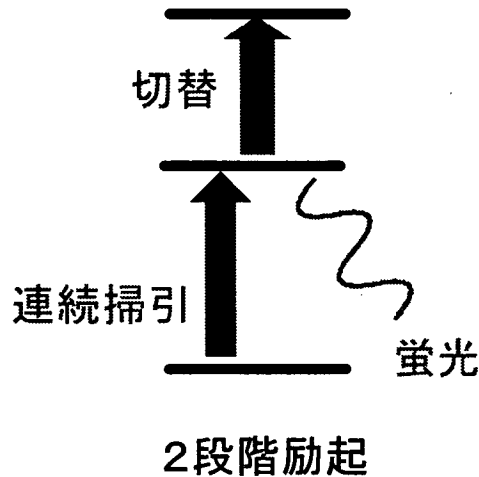


図11 2段階共鳴蛍光法による波長同調性評価の原理

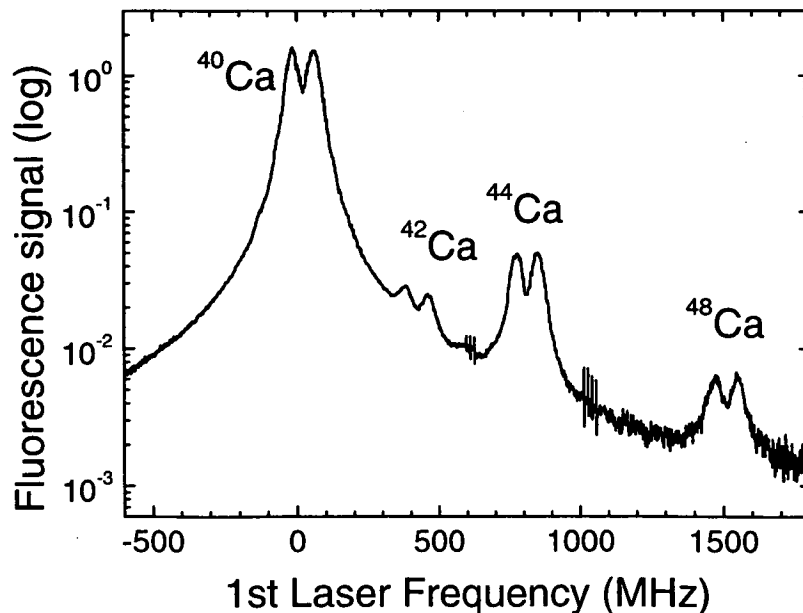


図12 カルシウムの共鳴蛍光スペクトルによる波長同調性能の評価結果

## 4 FOL システムの性能に関する議論

## 4.1 エタロン干渉計のピエゾ素子の非線形応答

開発したFOL制御システムの性能は、第3章で述べた通りであるが、その性能に大きく影響する要因の1つに、エタロン干渉計のピエゾ素子の伸縮長と電圧が完全には比例していないことが挙げられる。一般に走査型エタロン干渉計のフリンジ間隔は、走査開始直後に広く、ピエゾ電圧が高くなるほど狭くなる。このため、プログラムでは2.3節で述べたように、オフセットフリンジ幅( $X$ )とインターフリンジ幅( $Y$ )の関係を測定し、それを(1)'式の2次関数で近似して3つの近似パラメータ( $a, b, FSR$ )を決定し、これを用いて補正を行っている。

$$Y = aX^2 + bX + FSR \quad (1)'$$

実際に測定した $X$ と $Y$ の関係の一例を図13に示す。1フリンジ( $0 \sim 3200 \mu \text{sec}$ )の間でインターフリンジ幅は約3.8%減少している。

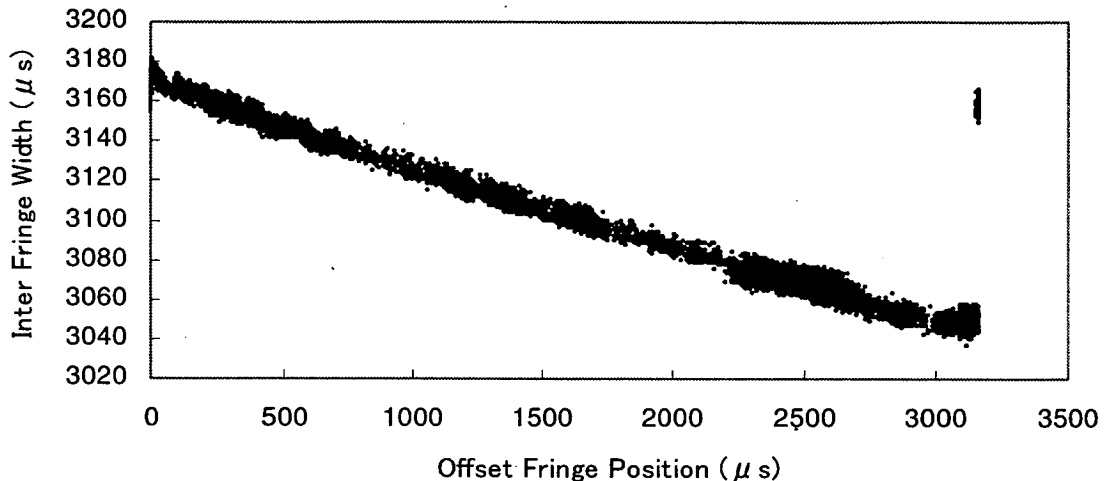


図13 エタロン干渉計のピエゾ素子ののびの非線形効果

開発したプログラムでは、注目するフリンジを1つずらす際に、フリンジ間隔に相当するパルス幅を積算カウンタに加算または減算するが、その値に(1)'式で求めた切片 $FSR$ を用いている。また基準位置から1フリンジ以内でもピエゾ素子の伸縮長は変化するので、観測されたオフセットフリンジの位置 $X$ を次式で補正している。

$$X_{correct} = \frac{FSR(1+b+aFSR)}{FSR+bX+aX^2} X \quad (2)$$

しかし、実際に観測される図13のような非線形性を2次関数で近似すると、エタロンの走査開始直後にずれが最も大きくなっている。このため図9の場合、注目するフリンジを1個ずらす

操作が約1.5時間おきに起り、その前後で約1MHzの不連続な周波数変動が起ったと考えられる。

従って、このような変動を抑えて、波長安定度をさらに向上させるためには、(1)エタロン干渉計を真空槽に入れて、圧力や温度による干渉計のドリフトを減らすことや、(2)エタロンのピエゾ素子に印加している高電圧の鋸波信号を、フリンジ波形がリニアになるようプログラマブル関数発生器で合成した波形信号に代えて、フリンジ信号自体を補正することが必要と考えられる。

#### 4.2 エタロン干渉計のフィネスの波長依存性

エタロン干渉計の性能は、2枚の共振器ミラーの間隔で決まる自由スペクトル領域(Free Spectral Range: FSR)と、ミラーの反射率で決まるフィネスの2つの数値で特徴付けられる。このうち、ミラーの反射率を可視～近赤外の全域で98.5%(フィネス200)以上にするのは難しいため、大きく波長の異なる複数台のレーザーを安定化するシステムでは、フィネスの波長依存性が性能に影響する。本研究で用いたCVI社のエタロンは、700-860nmでフィネス200となる多層膜コーティングが施されているが、カルシウムの第1励起遷移である423nmの波長でも85%以上の反射率があり、フィネス30程度のフリンジが観測できた。フィネスが小さいと観測されるフリンジのピーク幅が広がり、オフセットフリンジやインターフリンジの測定誤差が大きくなる。そこでフィネスの波長依存性によって、423nmの光に対するFOLシステムの安定性能が780nmに比べてどの程度低下するかを評価した。評価は780nmと423nmのECDLで図13のような曲線を測定し、そのデータのばらつき幅を比較することで行った。その結果、423nmの光の方が、ばらつきが約2倍大きいことがわかった。このようなフィネスによる誤差を減らすためには、近赤外域と420nm域の両方で反射率の高いマルチコーティングミラーの干渉計が必要である。

#### 4.3 エタロン干渉計のFSR 絶対値の校正

本研究で波長安定化に用いたエタロン干渉計のFSRの仕様値は300MHzであるが、この値には数%の誤差が含まれる可能性がある。仮に誤差を2%としてカルシウムの第2励起遷移の波長を $^{40}\text{Ca}$ から $^{48}\text{Ca}$ の共鳴波長まで変化させると、約3.3GHzのスキャン幅に対して66MHzのずれが生じる。これはカルシウム原子の吸収線幅に比べて無視できない大きさである。このずれを数MHz以内に抑えるためには、誤差を0.1%以内、即ちFSRを誤差0.3MHz以内で校正することが必要となる。

そこで本研究ではこの校正のために、3.1節のヘテロダイン計測による同調誤差測定法を利用した。FOL制御プログラムのFSRの値を299MHzから297MHzまで0.5MHz刻みで変化させ、波長を1GHzの範囲でスキャンさせることで、ビート周波数のカウンタ表示値と設定値の差を求めた。その結果を図14に示す。実線は最小二乗近似直線である。この結果から、傾きを0とするためのFSRの平均値は、 $298.28 \pm 0.07\text{MHz}$ となった。なお使用したマイクロ波周波数カウンタの表示誤差はこの測定誤差に比べて十分に小さい。図10の同調性能試験結果はこうして得られた値

FSR=298.28MHzを基にして測定したものである。

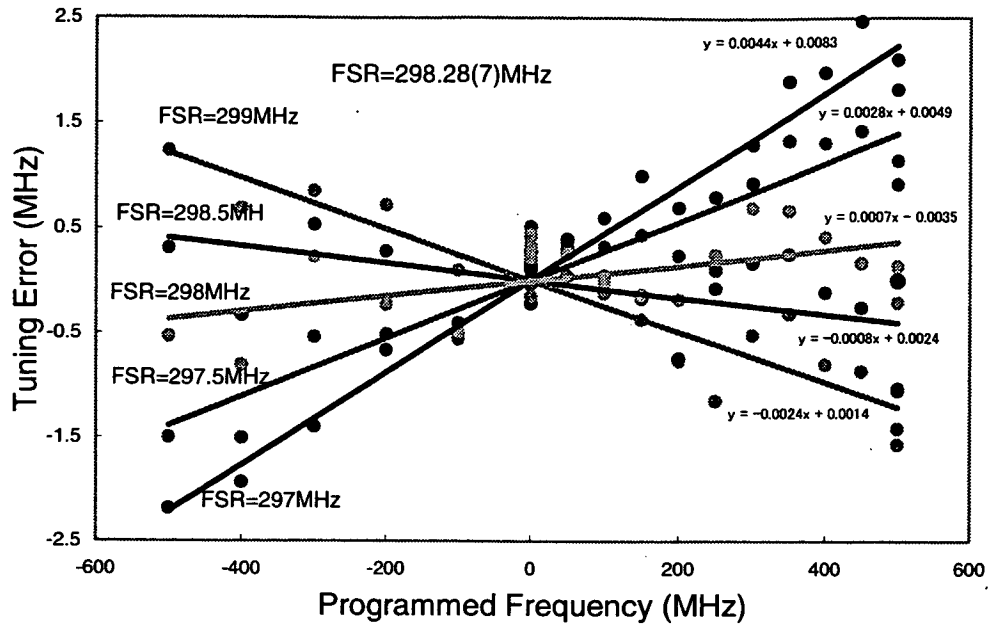


図14 エタロン干渉計のFSR校正結果

## 5 結論

本研究では、デジタル回路とコンピューターを用いて複数の半導体レーザーの発振波長を、素早く、簡単に切り替えられる制御システムを開発した。このシステムで制御されたレーザーの波長同調性能や波長安定度を、基準レーザーとのビート信号を調べるヘテロダイン計測法によって定量的に評価した。波長同調性能についてはさらに、本システムでカルシウム原子の多段階共鳴励起用レーザーを安定化し、2段階共鳴蛍光スペクトルに現れるLamb Dipを観測することでも評価した。その結果、スキャン幅1GHz以内の同調誤差は±0.5MHz以下、約9.5時間の周波数ドリフトは-0.8MHz程度となり、本システムで制御されたレーザーが分析用光源として十分な性能を有することが確かめられた。また、FOLロック時の周波数変動の様子から、エタロン干渉計のピエゾ素子の非線形応答性が本システムの性能に大きく影響することが明らかになった。

今後は、多段階共鳴電離分光分析に利用できるアトマイザーを開発し、波長安定化光源と組み合わせて分析実験を行う予定である。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたって多くの助言を頂きましたドイツマインツ大学K. Wendt博士、C. Geppert氏、P. Schuman氏に深く感謝します。また、本原稿を読んでいただき、貴重なコメントを頂きました物質科学研究部副主任研究員、大場弘則氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) M Miyabe, K Oda, M Oba, M Kato, I Wakaida and K. Watanabe : JAERI-Tech 2004-0064 (2004).
- 2) M Miyabe, M Kato, M Oba, I Wakaida and K. Watanabe : JAERI-Tech 2004-0065 (2004) .
- 3) B A Bushaw, B D Cannon, G K Gerke and T J Whitaker : Opt. Let. 11 422 (1986).
- 4) B.G.Lindsay, K.A.Smith and F.B.Dunning : Rev. Sci. Instrum. 62 1656 (1991).
- 5) S. M. Jaffe, M. Rochon and W. M. Yen : Rev. Sci. Instrum. 64 2475 (1993).
- 6) W. Z. Zhao, J. E. Simsarian, L. A. Orozco and G. D. Sprouse : Rev. Sci. Instrum. 69 3737 (1998).
- 7) A. Rossi, V. Biancalana, B. Mai and L. Tomassetti : Rev. Sci. Instrum. 73 2544 (2002).
- 8) M Kato, M Miyabe, M Oba, I Wakaida and K. Watanabe : JAERI-Tech to be published (2005) .



付録1 レーザー制御プログラム(1)初期化

```

e:\Documents and Settings\高橋昌文\My Documents\Visual Studio Projects\Win32\Visual Studio 2005\ECOL_stabilize2d3_2005.cpp
// ECOL_stabilize2d3_2005.cpp
// 4台のレーザーの周波数を安定化してスキャンする制御プログラム (C) Copyright M. Miyabe
//
// 改定履歴
// 2004年 6月30日 同期スキャン、高精度校正、最小スキャン間隔0.1kHz、減速スキャン、四倍体プリセットによる相互切替
// 2004年 7月 7日 波長調整時のエネルギー一定同期調整機能を追加、スキャンやり直し機能追加
// 2004年 9月 1日 校正の読み込み、平均回数を各2倍に変更
// 2004年 9月27日 制御電圧上段の変更
// 2004年12月17日 エタロンピエゾ素子の伸縮率の電圧依存性修正
// 2005年 3月 9日 レーザー番号の配列変数化
// 2005年 3月17日 非線形補正の改良、エタロンFSR値更新
#include <windows.h>
#include <math.h>
#include <resource.h>
#include <nidsocx.h>
#include <calc.h>
// グローバル変数の宣言
HWND hWnd;
static int ND_Counter[] = {ND_COUNTER_0, ND_COUNTER_1, ND_COUNTER_2, ND_COUNTER_3, ND_COUNTER_4, ND_COUNTER_5, ND_COUNTER_6, ND_COUNTER_7}; // カウンタ番号配列
static u32 CounterValues[] = {0, 0, 0, 0}; // カウンタ読取値 オフセットフリンジ
static u32 CounterYValues[] = {0, 0, 0, 0}; // カウンタ読取値 インターフリンジ
static u32 InterFringe[] = {0, 0, 0, 0}; // FSRバルス長平均値
static u32 InterFringeSum[] = {0, 0, 0, 0}; // FSRバルス長総和
static u32 OffsetFringeSum[] = {0, 0, 0, 0}; // オフセットバルス長総和
static u32 OffsetFringe[] = {0, 0, 0, 0}; // オフセットバルス長設定値 (読み込みのみ)
static int hatazibiki[] = {0, 0, 0, 0}; // ロック動作フラグ
static int hCallb[] = {1, 1, 1, 1}; // 校正モードフラグ
static int hFree[] = {0, 0, 0, 0}; // リセットフラグ
static int hScan[] = {0, 0, 0, 0}; // 高速スキャンフラグ
static int hScanSum[] = {0, 0, 0, 0}; // 高速スキャンフラグ
static float SetTime[] = {0, 0, 0, 0}; // オフセットバルス長設定値
static int HusePos[] = {0, 0, 0, 0}; // 新サイクルのFSRバルス長
static int OffsetPos[] = {0, 0, 0, 0}; // 新サイクルのFSRバルス長
static int DriftY[] = {0, 0, 0, 0}; // 新サイクルのFSRバルス長補正
static int HusePos2[] = {0, 0, 0, 0}; // 新サイクルのオフセットバルス長
static int OffsetPos2[] = {0, 0, 0, 0}; // 新サイクルのオフセットバルス長補正
static int AktTime[] = {0, 0, 0, 0}; // 新サイクルの減速オフセット
static int TargetTime[] = {0, 0, 0, 0}; // スキャン終了目標オフセット
static int OldSetTime[] = {0, 0, 0, 0}; // スキャン前目標オフセット
static long int TimeShift[4]; // オフセットバルス長設定値からのずれ
static float TargetFreq[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0}; // 現在値からスキャンする周波数値 (MHz)
static float FreqSeparation[] = {0, 0, 0, 0}; // スキャン間隔 (MHz)
static int FreqSum[] = {0, 0, 0, 0}; // 現在値からスキャンする周波数値 (MHz)
static int TargetIsotope[] = {0, 0, 0, 0}; // 四倍体シフトの選択スイッチ 基線レーザー用は未使用(0番)
static float AFactor[] = {0, 0.00000100, 0.00000100, 0.00000300, -0.00000300}; // 変換係数、フィードバックゲイン (リング色数は3倍、SDLは逆符号)
double Denominator[] = {0, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000}; // エタロンピエゾ素子伸縮率補正パラメータ 追加(2004.12)
double Coefficienta[] = {0, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000};
double Coefficientb[] = {0, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000};
double Numerator[] = {0, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000};
int iStatusTop[] = {0, 0, 0, 0}; // フリンジ番号異常サイクルフラグ
int CallbRun[] = {0, 0, 0, 0}; // 校正サイクルのカウンタ、高精度、異なるオフセットの識別子
int ScanRun[] = {0, 0, 0, 0}; // 次のオフセットに移るまでのサイクルカウンタ
int MaxScanRun[] = {10, 10, 10, 10}; // 校正モードで停止するサイクル数
f64 Inter[4][8]; // 高精度校正用FSRデータ
f64 Offset[4][8]; // 高精度校正用オフセットデータ
int DataPoint[4]; // 高精度校正用データの点数
int OffsetDiv[4]; // Offset[0]値 ノーマライズに使用
int InterDiv[4]; // Inter[0][0]値 ノーマライズに使用
// 共通変数および定数
int iStatus = 0; // カウンタ割り振
int iDevice = 1; // カウンタデバイスID
u32 uArmed = ND_YES; // カウンタ動作
int hAtizumi = 0; // 校正モードで読み取りを無視するサイクル数
float Softstop; // リセット時のDAA出力減衰量
float CVI_FSR = 298.28; // CVIエタロンのFSR 298.28 (MHz) 050317確定
f64 X4=0; // 最小二乗近似計算公式に当てはめる各変数 (非線形補正計算)
f64 X3=0;
f64 X2=0;
f64 X1=0;
f64 XY=0;
f64 XZY=0;
f64 Y=0;
float IS1_38 = -600.0; // 四倍体シフトプリセットデータ
float IS1_40 = 0; // (質量数38, 50にスタート、ストップ点)
float IS1_41 = 393.5; // 注意: 3段目のRydbergデータはすべてダミー
float IS1_44 = 773.8;
float IS1_46 = 1159.8;
float IS1_48 = 1513.0;
float IS1_50 = 1800.0;
float IS1_41_0 = 150; // 校正データ
float IS1_41_1 = 250; // 校正データ
float IS1_41_5 = 300; // 校正データ
float IS1_43_0 = 555.5;
float IS1_43_1 = 630;
float IS1_43_5 = 685;
float IS2_38 = -1296.5;
float IS2_42 = 875.2;
float IS2_44 = 1672.0;
float IS2_46 = 2401.2;
float IS2_48 = 3069.3;
float IS2_50 = 3889.4;
float IS2_41_11 = 1280.2; // 校正データ
float IS2_41_5 = 1280.2; // 校正データ
float IS2_41_3 = 1280.2;
float IS2_43_11 = 1362.3;
float IS2_43_9 = 1280.2;
float IS2_43_7 = 1362.3;
float IS2_43_5 = 1280.2;
float IS2_43_3 = 1362.3;
float IS3_38 = -1296.5;
float IS3_42 = 875.2;
float IS3_44 = 1672.0;
float IS3_46 = 2401.2;
float IS3_48 = 3069.3;
float IS3_50 = 3889.4;
float IS3_41_11 = 1280.2;
float IS3_41_7 = 1362.3;
float IS3_43_11 = 1280.2;
float IS3_43_7 = 1362.3;
// 関数のプロトタイプ宣言
BOOL WINAPI DigProcApplication( HWND hWnd, UINT message, WPARAM wParam, LPARAM lParam );
BOOL CALLBACK ModalDlgProc0( HWND, UINT, WPARAM, LPARAM );
BOOL CALLBACK ModalDlgProc1( HWND, UINT, WPARAM, LPARAM );
BOOL CALLBACK ModalDlgProc2( HWND, UINT, WPARAM, LPARAM );
BOOL CALLBACK ModalDlgProc3( HWND, UINT, WPARAM, LPARAM );
// アプリケーションのメイン関数
BOOL WINAPI DigProcApplication( HWND hWnd, UINT message, WPARAM wParam, LPARAM lParam ) {
static HINSTANCE hInstance;
u32 uTReached = ND_NO; // NI-DAQカウンタボード用
int iIgnoreWarning = 0;
int iValidDN = 1;
int iMaxRepeat = 10;
int iRepeat = 1;
int i32 Rat; // Controlボード用 読取の戻り値
int i8 DeviceName[256] = "A10001"; // デバイス名

```



付録1 レーザー制御プログラム (3)安定化、スキャン

```

o:\Documents and Settings\高橋昌文\Documents\Visual Studio Projects\ハードウェア制御\in板2\FE\CDL_etal\jze2d3_2005.cop
AktTime[1] = 0; // 補正実数前の積算値を0にする
}
}
// ----- DB -----
// ----- 安定化制御 (PI: 比例制御 (Aout[0]) + 積分制御 (Aout[0])) -----
for (int i=0; i<3; i++) {
    NumPos[i] = Numerator[i]*CounterXValues[i]/(InterFringe[i] + Coefficientb[i]*CounterXValues[i] + Coefficienta[i]*CounterXValues[i]); //0-㉔
    if (Numerator[i] == 0) // 校正第2過程未実施時の安定化
        NumPos[i] = CounterXValues[i];
    Drift[i] = NumPos[i] - OldPos[i]; //0-㉕
    if (CounterXValues[i] > 1.2*InterFringe[i]) iStatusHop[i]=1; // インターFRINGが20%以上違うサイクルを無視する
    if (CounterXValues[i] < 0.8*InterFringe[i]) iStatusHop[i]=1;
    if (iStatusHop[i] != 1) //1サイクルでFSRの85%以上変動したら隣のFRINGに落ちたと判断
        if (Drift[i] < -0.85*InterFringe[i] || Drift[i] > 0.85*InterFringe[i]) iStatusHop[i]=1;
    OldPos[i] = NumPos[i];
}
// ----- スキャン処理 -----
if (hScan[0] == 1) {
    ScanRuns[0]++;
    if (FreqSeparation[0] > TargetFreq[0] && FreqSeparation[0] < -FreqSeparation[0]) // 刻み幅の符号の自動判別対応
        if (ScanRuns[0] > MaxScanRuns[0]*1)
            SetTime[0] += FreqSeparation[0]/10*(int)InterFringe[0]/CVI_FSR;
    ScanRuns[0] = 0;
    if (FreqSeparation[0] > 0 && SetTime[0] > TargetTime[0] || FreqSeparation[0] < 0 && SetTime[0] < TargetTime[0]) {
        TargetFreq[0] = 0;
        TargetTime[0] = 0;
    }
}
for (int i=1; i<3; i++) {
    if (hScan[i] == 1) {
        if (FreqSeparation[i] > TargetFreq[i] && FreqSeparation[i] < -FreqSeparation[i]) {
            ScanRuns[i]++;
            if (ScanRuns[i] > MaxScanRuns[i]*1)
                if (FreqSeparation[i] > 0 && SetTime[i] > TargetTime[i]-2*FreqSeparation[i]/10*(int)InterFringe[i]/CVI_FSR && (FreqSeparation[i] > 50 || FlagScan[i]==1) && hCallb[i] != 2) {
                    FreqSeparation[i] = FreqSeparation[i]/10; //0-㉖
                    FlagScan[i] = 1;
                    if (FreqSeparation[i] < 1) FreqSeparation[i] = 1;
                }
                if (FreqSeparation[i] < 0 && SetTime[i] < TargetTime[i]-2*FreqSeparation[i]/10*(int)InterFringe[i]/CVI_FSR && (FreqSeparation[i] < -50 || FlagScan[i]==1) && hCallb[i] != 2) {
                    FreqSeparation[i] = FreqSeparation[i]/10; //0-㉗
                    FlagScan[i] = 1;
                    if (FreqSeparation[i] > -1) FreqSeparation[i] = -1;
                }
                if (FreqSeparation[i] > 0 && SetTime[i] > TargetTime[i] || (FreqSeparation[i] < 0 && SetTime[i] < TargetTime[i])) //0-㉘
                    hScan[i] = 0;
                TargetFreq[i] = 0;
                TargetTime[i] = 0;
                FlagScan[i] = 0;
            }
            else {
                SetTime[i] += FreqSeparation[i]/10*(int)InterFringe[i]/CVI_FSR; //0-㉙
            }
        }
    }
}
if (iStatusHop[0] != 1) {
    AktTime[0] = AktTime[0] + TimeShift[0]; // 基準レーザー用
    TimeShift[0] = SetTime[0] - AktTime[0];
}
for (int i=1; i<3; i++) {
    if (iStatusHop[i] != 1) {
        AktTime[i] = AktTime[i] + TimeShift[i]; // スレーブレーザー用
        TimeShift[i] = SetTime[i] - AktTime[i]; // 積算誤差用 //0-㉚
    }
}
// ----- 状態の表示 -----
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED11, CounterXValues[0]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED14, AktTime[0]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED13, SetTime[0]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED12, InterFringe[0]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED10, CounterXValues[1]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED19, AktTime[1]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED17, SetTime[1]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED111, InterFringe[1]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED115, CounterXValues[2]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED120, AktTime[2]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED117, SetTime[2]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED116, InterFringe[2]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED121, CounterXValues[3]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED128, AktTime[3]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED123, SetTime[3]/20, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED122, InterFringe[3]/20, TRUE);
// ----- DB -----
// ----- DAコンバータ出力(積分器の発散防止のためMaxLimit(通常1.2V)を上限とする) -----
for (int i=0; i<3; i++) {
    if (hStabilize[i] == 1 && iStatusHop[i] != 1) {
        Aout[i] = Aofactor[i] * TimeShift[i];
        Aout[i] = Aout[i] + Add[i];
        if (Aout[i] <= MaxLimit[i]) {
            Ret = AioSingleAoEx(id, AoChannel[i], Aout[i]); //0-㉛
        }
        if (Aout[i] > MaxLimit[i]) {
            Ret = AioSingleAoEx(id, AoChannel[i], MaxLimit[i]);
            hStabilize[i]=0;
        }
    }
}
// ----- フリッジ異常サイクルの終了処理 -----
for (int i=0; i<3; i++) {
    if (iStatusHop[i] == 1) { iStatusHop[i] = 0; }
}
// ----- DAコンバータ リセット時の減衰処理 ----- //0-㉜
for (int i=0; i<3; i++) {
    if (hStabilize[i] == 0 && hFree[i] == 1) {
        for (int j=0; j< 50000; j++) {
            Softstop=Aout[i]-Aout[i]*j/50000;
            Ret = AioSingleAoEx(id, AoChannel[i], Softstop);
        }
        hFree[i] = 0;
        hScan[i] = 0;
        Aout[i] = 0;
        AktTime[i] = CounterXValues[i];
    }
}
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED15, Aout[0]*1000, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED113, Aout[1]*1000, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED118, Aout[2]*1000, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED124, Aout[3]*1000, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED116, Add[0]*1000000, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED114, Add[1]*1000000, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED119, Add[2]*1000000, TRUE);
SetDigitInt(hWnd, IDC_ED125, Add[3]*1000000, TRUE);
break;
case WM_COMMAND:
    switch( LOWORD( wParam ) ) {
        case IDC_START:
    }
}

```



付録1 レーザー制御プログラム(5)設定値入力

c:\Documents and Settings\高島文博\Documents\Visual Studio Projects\Vt1ルネ補制御\in編ZVEQL\_ateb\lize2d3\_2005.cpp

5

```

TargetTime[0] = 0;
TargetFreq[0] = (TargetTime[0]-SetTime[0])*CVI_FSR/(int)InterFrings[0]; //-----
SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT1, TargetFreq[0], TRUE);
SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT2, TargetTime[0]/20, TRUE);
return TRUE;
case IDC_BUTTON7:
    FreqSeparation[0]=FreqSeparation[0]*1;
    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT7, FreqSeparation[0], TRUE);
    return TRUE;
case IDC_BUTTON8:
    FreqSeparation[0]=FreqSeparation[0]-1;
    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT7, FreqSeparation[0], TRUE);
    return TRUE;
case IDC_BUTTON9:
    Afactor[0] = Afactor[0]*2;
    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT9, Afactor[0]*100000000, TRUE);
    return TRUE;
case IDC_BUTTON10:
    Afactor[0] = Afactor[0]/2;
    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT9, Afactor[0]*100000000, TRUE);
    return TRUE;
case IDCOK:
    // 周波数スキャン開始スイッチ
    if (!hstabilize[0] == 1 && hScan[0] == 0) {
        if (!hScanSync[1]==1) {
            hScan[1]=1;
            FreqSeparation[1]=TargetFreq[1]*FreqSeparation[0]/TargetFreq[0];
            hScanSync[1]=0;
        }
        if (!hScanSync[2]==1) {
            hScan[2]=1;
            FreqSeparation[2]=TargetFreq[2]*FreqSeparation[0]/TargetFreq[0];
            hScanSync[2]=0;
        }
        if (!hScanSync[3]==1) {
            hScan[3]=1;
            FreqSeparation[3]=TargetFreq[3]*FreqSeparation[0]/TargetFreq[0];
            hScanSync[3]=0;
        }
        if (!hScanSync[1]==2) {
            hScan[1]=1;
            FreqSeparation[1]=FreqSeparation[0];
            TargetFreq[1]=TargetFreq[0];
            hScanSync[1]=0;
        }
        if (!hScanSync[2]==2) {
            hScan[2]=1;
            FreqSeparation[2]=FreqSeparation[0];
            TargetFreq[2]=TargetFreq[0];
            hScanSync[2]=0;
        }
        if (!hScanSync[3]==2) {
            hScan[3]=1;
            FreqSeparation[3]=FreqSeparation[0];
            TargetFreq[3]=TargetFreq[0];
            hScanSync[3]=0;
        }
        hScan[0] = 1;
        SetTime[0] = SetTime[0];
        break;
    }
    if (hScan[0] == 1) {
        hScan[0] = 0;
        break;
    }
}
return TRUE;
case IDCOK2:
    // 現在のカウンタ値の記憶
    iStatus = GPCTR_Control(iDevice, HD_COUNTER_0, HD_PROGRAM);
    do {
        iStatus = GPCTR_Watch(iDevice, HD_COUNTER_0, HD_ARMED, &iArmed);
    } while ((iArmed == HD_YES) && (iStatus == 0));
    iStatus = GPCTR_Watch(iDevice, HD_COUNTER_0, HD_COUNT, &iCount);
    SetTime[0] = (int)iCount;
    // 2004.12追加
    if (hArmed[0] != 0) {
        SetTime[0] = Numerator[0]*SetTime[0]/(InterFrings[0] + Coefficienta[0]*SetTime[0] + Coefficientb[0]*SetTime[0] + Coefficientc[0]*SetTime[0]*SetTime[0]);
        SetTime[0] = Numerator[0]*SetTime[0]/(InterFrings[0] + Coefficienta[0]*SetTime[0]/2 + Coefficienta[0]*SetTime[0]*SetTime[0]/2);
    }
    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT8, SetTime[0]/20, TRUE);
    return TRUE;
case IDCOK3:
    // インターフリンジ校正スイッチ
    hCalib[0] = 1;
    return TRUE;
case IDCOK5:
    // インターフリンジ高精度校正スイッチ
    hCalib[0] = 2;
    return TRUE;
case IDCOK4:
    // DA変換出力のリセット
    hRes[0] = 1;
    return TRUE;
case IDC_CHECK1:
    // 安定化のon/offスイッチ
    if (!hstabilize[0] == 0) {
        hstabilize[0] = 1;
        break;
    }
    if (!hstabilize[0] == 1) {
        hstabilize[0] = 0;
        break;
    }
    return TRUE;
case IDCANCEL:
    EndDialog(hDlg, 0);
    return TRUE;
}
break;
case WM_CLOSE:
    EndDialog(hDlg, 0);
    return TRUE;
}
return FALSE;
// EOL-1 専用第1励起用青紫レーザー(423nm)
BOOL CALLBACK ModeDiProc1(HWND hDlg, UINT iMsg, WPARAM wParam, LPARAM lParam)
{
    switch (iMsg) {
        case WM_INITDIALOG:
            SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT8, CounterYValue[1]/20, TRUE);
            return TRUE;
        case WM_COMMAND:
            switch (LOWORD(wParam)) {
                case IDC_BUTTON1:
                    SetTime[1] +=10000;
                    if (!hScanSync[2]==2) SetTime[2] += InterFrings[2]/InterFrings[1]*10000;
                    if (!hScanSync[3]==2) SetTime[3] += InterFrings[3]/InterFrings[1]*10000;
                    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT8, SetTime[1]/20, TRUE);
                    return TRUE;
                case IDC_BUTTON2:
                    SetTime[1] -=10000;
                    if (!hScanSync[2]==2) SetTime[2] += InterFrings[2]/InterFrings[1]*10000;
                    if (!hScanSync[3]==2) SetTime[3] += InterFrings[3]/InterFrings[1]*10000;
                    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT8, SetTime[1]/20, TRUE);
                    return TRUE;
                case IDC_BUTTON11:
                    SetTime[1] += 2000;
                    if (!hScanSync[2]==2) SetTime[2] += InterFrings[2]/InterFrings[1]*2000;
                    if (!hScanSync[3]==2) SetTime[3] += InterFrings[3]/InterFrings[1]*2000;
                    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT8, SetTime[1]/20, TRUE);
                    return TRUE;
                case IDC_BUTTON12:
                    SetTime[1] -= 2000;
                    if (!hScanSync[2]==2) SetTime[2] += InterFrings[2]/InterFrings[1]*2000;
                    if (!hScanSync[3]==2) SetTime[3] += InterFrings[3]/InterFrings[1]*2000;
                    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT8, SetTime[1]/20, TRUE);
                    return TRUE;
                case IDC_BUTTON13:
                    SetTime[1] += 2000;
                    if (!hScanSync[2]==2) SetTime[2] += InterFrings[2]/InterFrings[1]*2000;
                    if (!hScanSync[3]==2) SetTime[3] += InterFrings[3]/InterFrings[1]*2000;
                    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT8, SetTime[1]/20, TRUE);
                    return TRUE;
                case IDC_BUTTON14:
                    SetTime[1] -= 2000;
                    if (!hScanSync[2]==2) SetTime[2] += InterFrings[2]/InterFrings[1]*2000;
                    if (!hScanSync[3]==2) SetTime[3] += InterFrings[3]/InterFrings[1]*2000;
                    SetDigitLimit(hDlg, IDC_EDIT8, SetTime[1]/20, TRUE);
                    return TRUE;
            }
            case IDC_BUTTON15:
                return TRUE;
            }
    }
}

```

付録2 NI LabView ダイアグラム (1)4チャンネル電圧信号記録用A/D変換VI

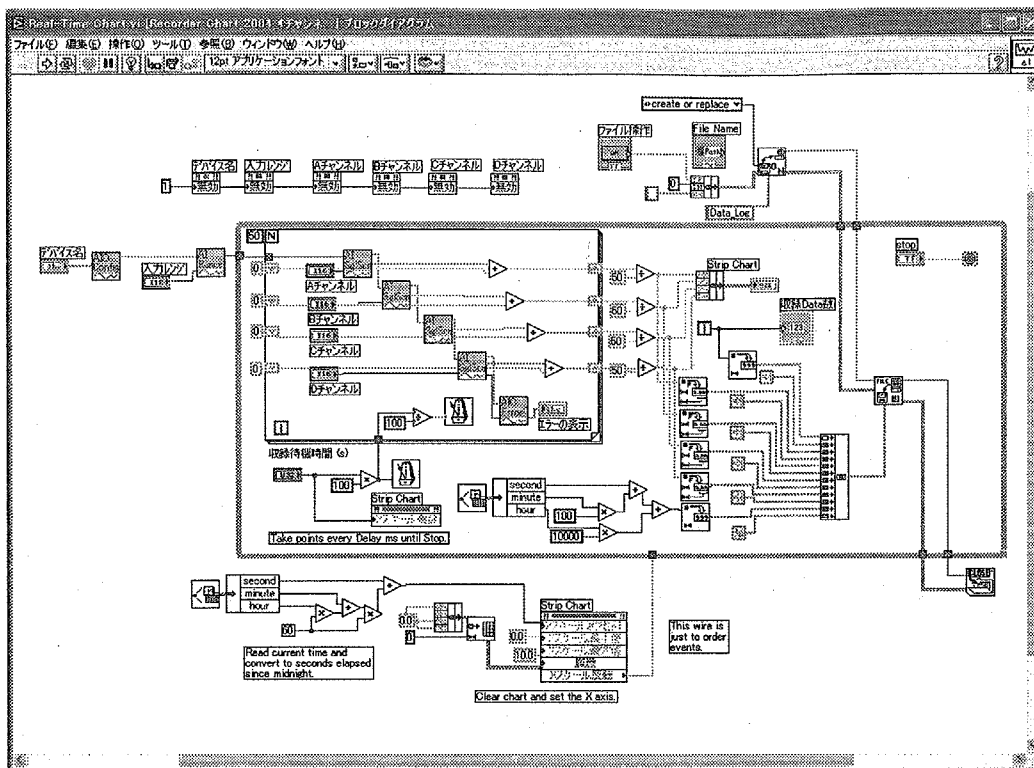


図 A-1 PCI-A/D 変換 VI ダイアグラム図

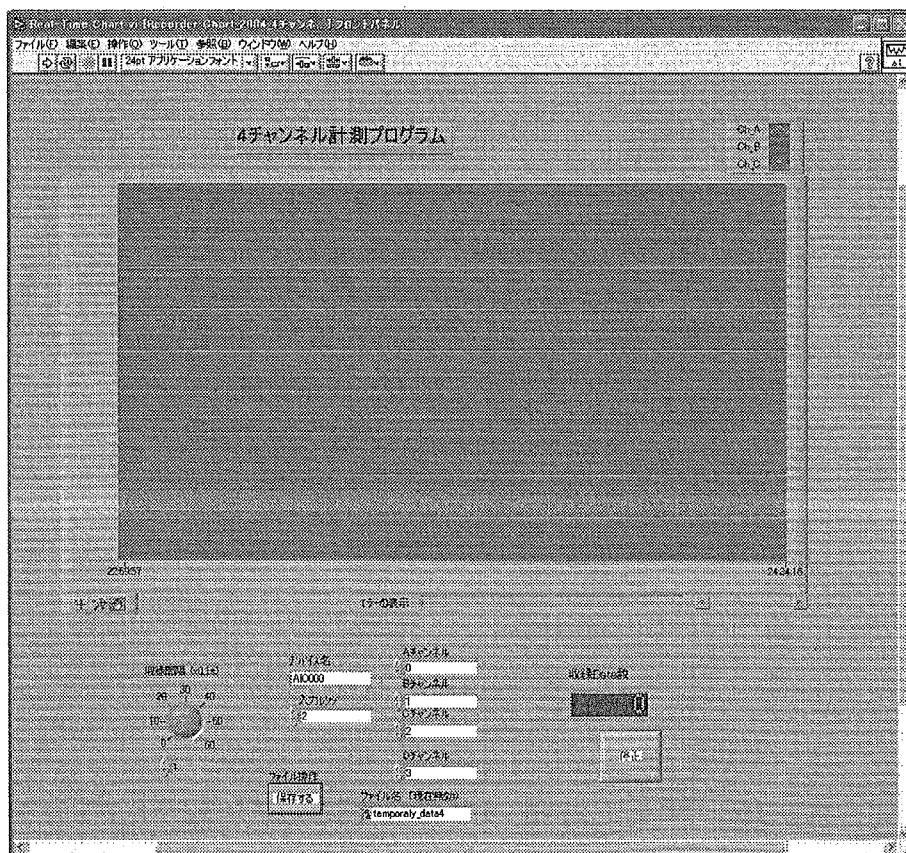


図 A-2 PCI-A/D 変換 VI フロントパネル図

付録2 NI LabView ダイアグラム (2)デジタルオシロスコープによるスペクトラムアナライザ VI

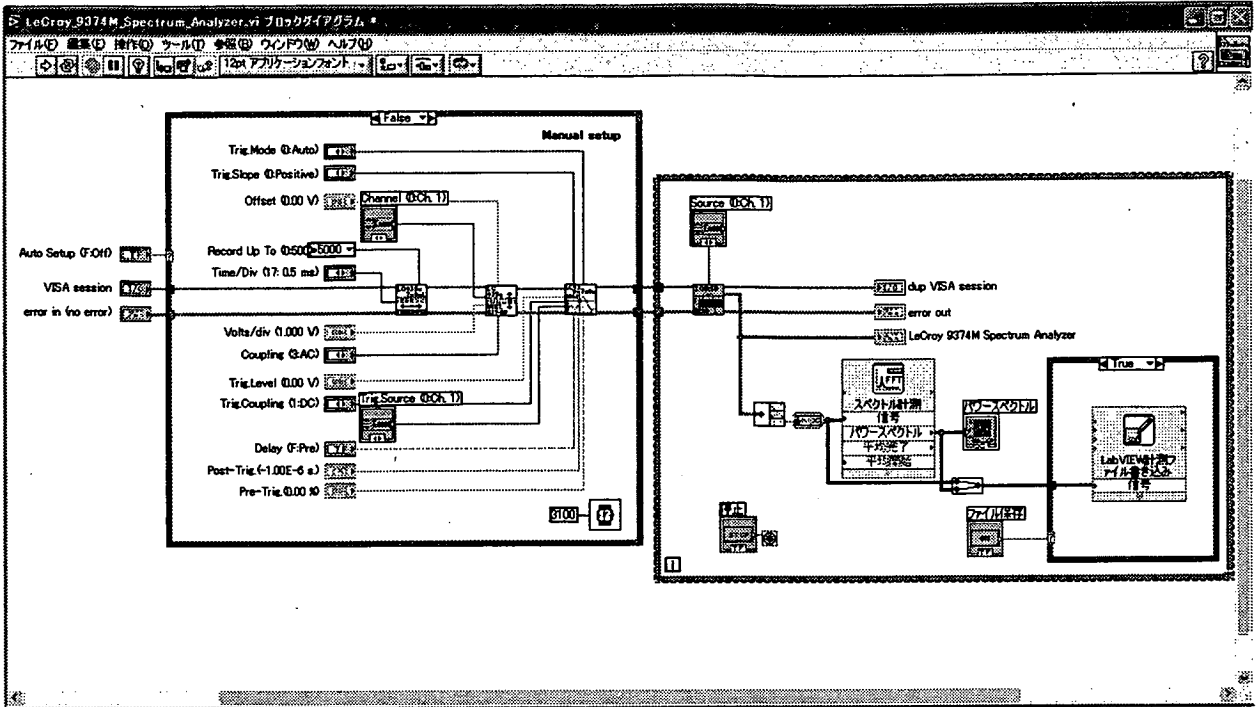


図 A-3 GP-IB スペアナ VI ブロック図

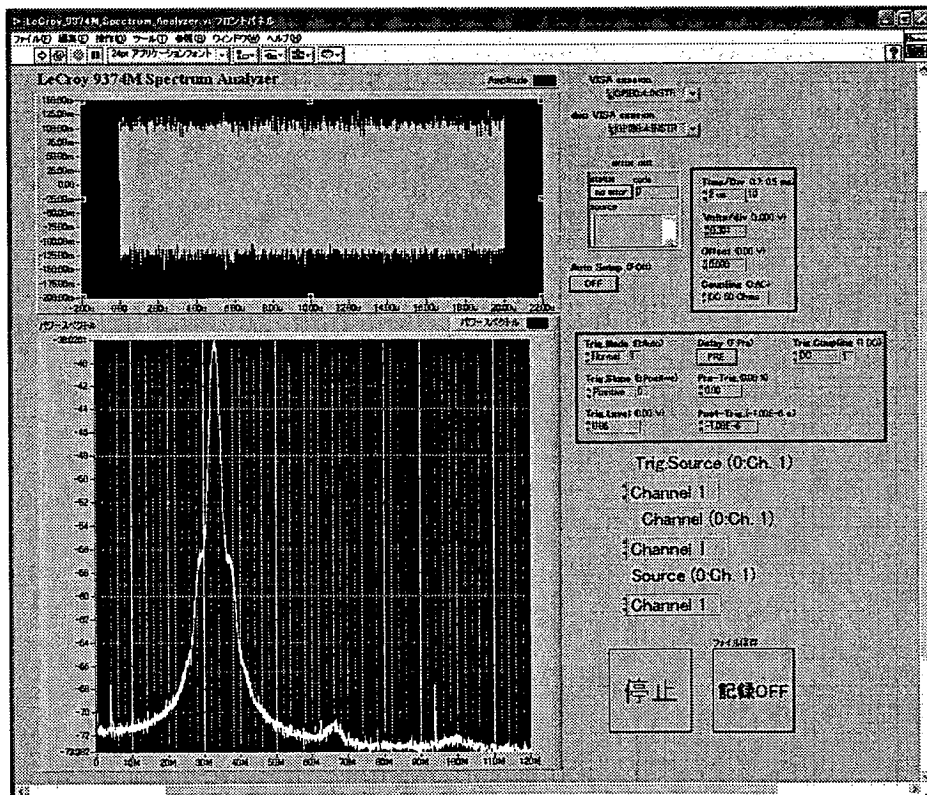


図 A-4 GP-IB スペアナ VI フロントパネル図

付録2 NI LabView ダイアグラム (3)GP-IB 接続 Burleigh 波長計 VI

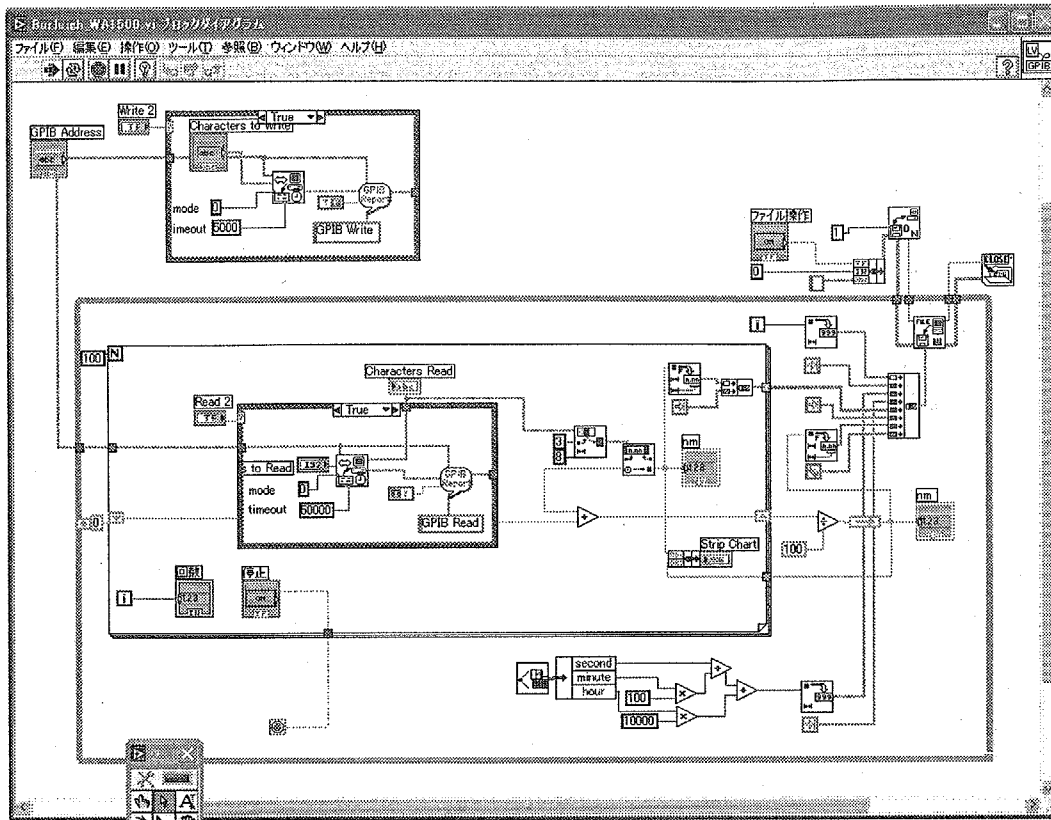


図 A-5 GP-IB 波長計 VI ブロック図

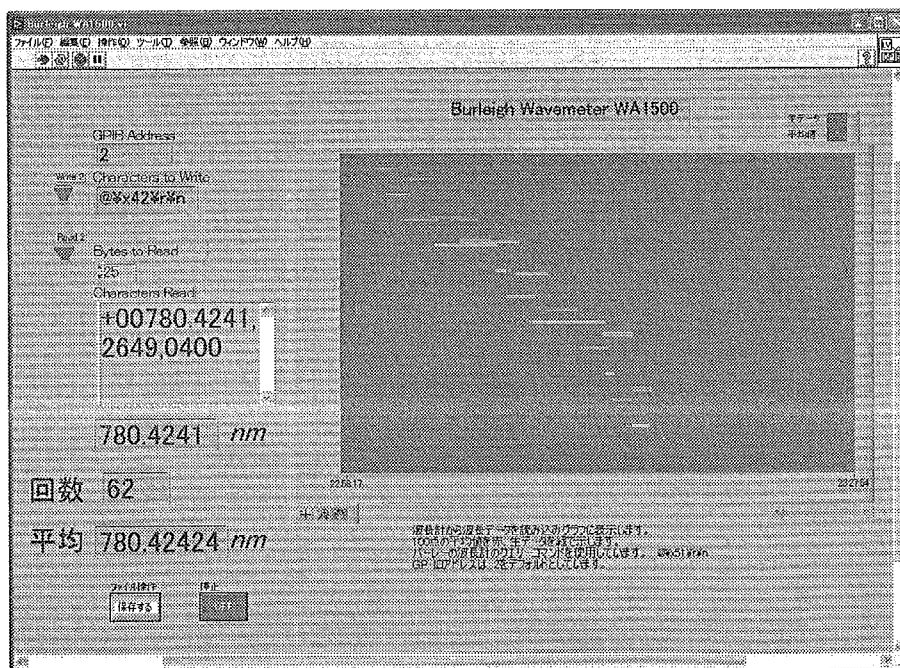


図 A-6 GP-IB 波長計 VI フロントパネル図



付録2 NI LabView ダイアグラム (4)2 チャンネルフリンジパルス幅監視 VI

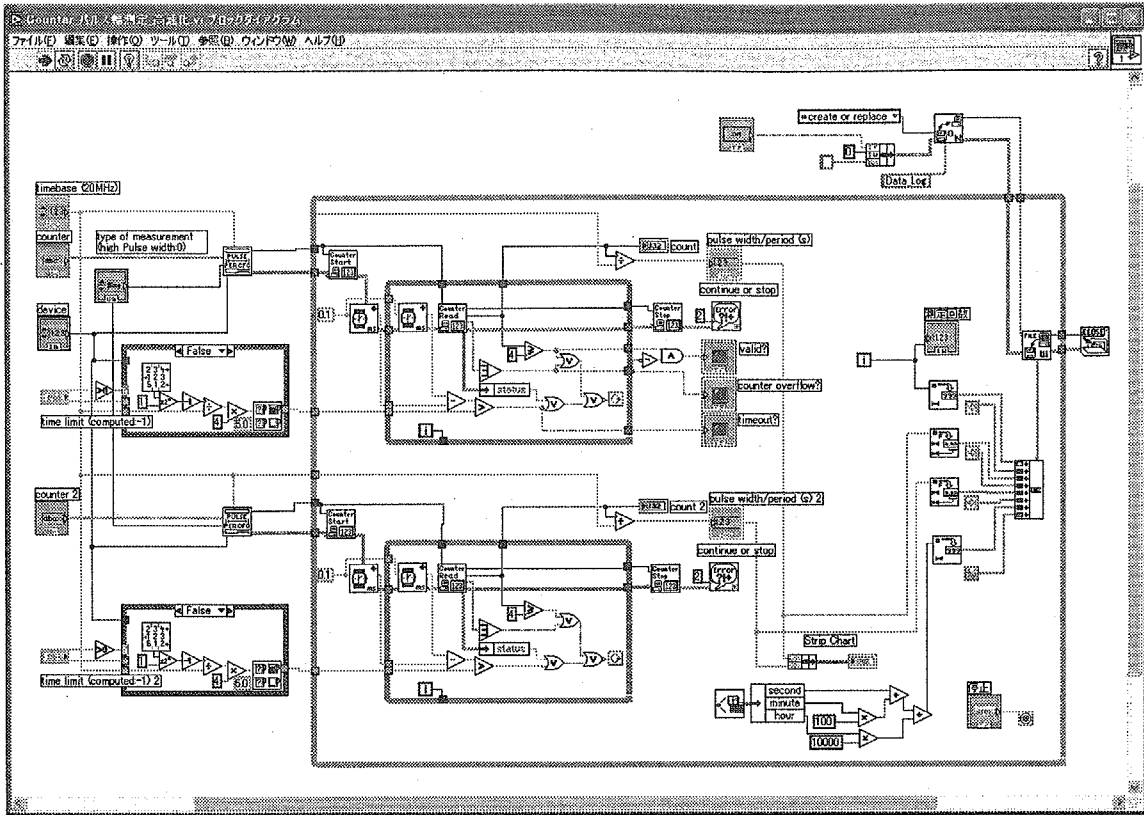


図 A-7 PCI カウンタ VI ブロック図

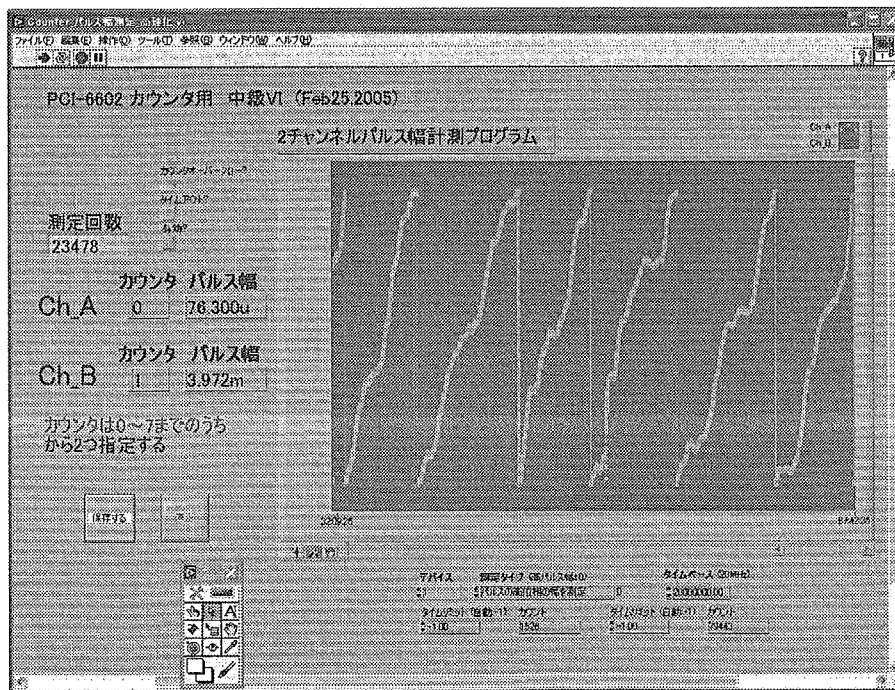


図 A-8 PCI カウンタ VI フロントパネル図

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の 1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」 mmHg を表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))  
動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-28</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

難分析長寿命核種分析のための波長安定化レーザーの開発 (3) コンピューターによる波長安定化システムの制御



古紙配合率100%  
白色度70%の再生紙を使用しています