

## 再生型および超再生型NQRスペクトロメータのための周波数マーカ-

(NQR / 周波数マーカ-)

三島満雄

## Frequency Marker for Regenerative and Superregenerative NQR Spectrometers

(NQR / Frequency marker)

Mitsuo MISHIMA

The frequency marker for regenerative and externally-quenched superregenerative NQR spectrometers was constructed for the purpose of determining resonance frequencies from absorption spectra drawn on the chart of the recorder. The performance of the frequency marker was examined by scaling on an absorption spectrum at intervals of 5kHz or 10kHz. It was confirmed that the resonance frequency could be determined at least with an accuracy of  $\pm 1$ kHz in either the regenerative or superregenerative spectrometer.

記録計の記録紙に描かれた吸収スペクトルから共鳴周波数を決定することを目的として、再生および他励式超再生型NQRスペクトロメータのための周波数マーカ-を製作した。吸収スペクトルに5kHzまたは10kHzの間隔の目盛を入れることによりマーカ-の性能を調べた。再生および超再生スペクトロメータのどちらにおいても、共鳴周波数を少なくとも $\pm 1$ kHzの精度で決定できることが確かめられた。

### 緒言

核四極共鳴 (NQR) を観測する際に、吸収が弱くオシロスコープ上で観測できないときには、ロックインアンプで位相検波し共鳴吸収を記録計で記録する。周波数を決定する際に、最大吸収の部分で掃引を止めて、その周波数を決定する方法もあるが、線幅が広い場合や吸収が弱く雑音が多い場合は、共鳴曲線の中心が分かり難い。このとき、共鳴スペクトル上に周波数目盛が書き込まれていると非常に都合がよい。

周波数の掃引はバリコンを回転させるかまたは可変容量ダイオードのバイアス電圧を変化させて行う。いずれにしても周波数変化はバリコンの回転角またはダイオードのバイアス電圧に対して直線的でない。このため、市販の超再生型スペクトロメータ (Wilks-1A および DECCA NQR スペクトロメータ) では記録計のマーカ-ペンで周波数目盛を書き込ませている。これらを利用して観測された共鳴周波数には精度が $\pm 10$  kHz のものが少なくない。これでは精度が不十分で、試料の温度がわずかに変化しても共鳴周波数は変化するので、少なくとも $\pm 1$  kHz で読み取る必要がある。

このためにはより細かい周波数目盛をスペクトルに重ね合わせて記録計で記録すれば、より高い精度で共鳴周波数を読み取ることができる。再生型スペクトロメータで観測したスペクトルに周波数カウンターを利用して周波数目盛を書き込んだ例はあるが、<sup>1)</sup> ブロッキング発振をする超再生型スペクトロメータでは周波数カウンターで周波数を直接読み取ることができないので、この方法は利用できない。多くの場合、超再生型スペクトロメータで観測することが多いので、再生型および他励式超再生型スペクトロメータの両方に使用でき、 $\pm 1$  kHz の精度で読み取れる周波数マーカ-を製作した。基本的な回路の構成はSmithらのマーカ-ペンのための回路<sup>2)</sup>を参考にしたが、スペクトルに直接目盛を入れることとクエンチの周波数を制御することが異なる。

### 回路の構成

回路の構成を図1に示す。スペクトロメータのRF信号と適当な周波数のクロックを混合し、その唸りの成分を濾波した後、直流電圧に変換して、周波数目盛の信号とする。周波数目盛はロックインアンプの出力に目盛信号を重ね合わせて記録計に出力する。この図

は記録計のペンに周波数目盛を刻ませる部分のみで、記録計のマーカーで目盛を入れる部分は含まれていない。クエンチ周波数の信号は超再生型スペクトロメータを使用する場合のみ使用する。フェーズロックドループ (PLL) 回路の出力パルスにはジッターがあるため、クエンチ周波数の信号源として直接は使用せず、外部同期端子をもった低周波発振器の同期信号として用いて、低周波発振器のジッターのない正弦波または矩形波を利用する。

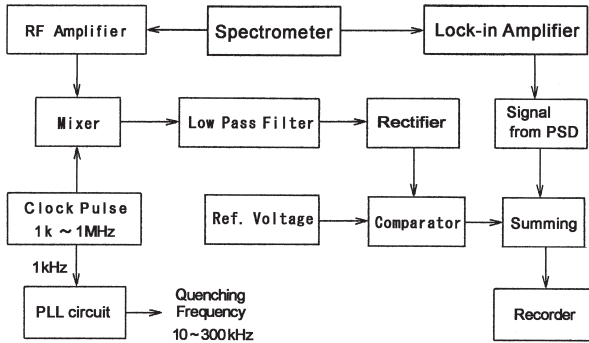


図1 周波数マーカーの構成

### 1. 高周波の増幅

RF信号の増幅部を図2に示す。スペクトロメータからRF信号を取り出すのに、容量の小さいコンデンサーをタンク回路に接続するか、数回巻きのコイルをタンク回路付近に配置するかまたはバッファアンプを利用しているので、特にインピーダンスの整合を考慮していない。高周波は $\mu$ PC1664(NEC)により10倍程度増幅している。200MHzまでは全く問題はなかった。図3(a)の回路のミキサからのスペクトロメータへのクロックパルスの通り抜けを避けるために、 $\mu$ PC1664の

OUT1, OUT2のそれぞれに2段のエミッターフォロワを接続している。Q3, Q5の2つのエミッターフォロワの出力は、それぞれ図3(a)~(e)の記録計の記録ペンのための回路(Aユニット)と大まかな周波数目盛を刻むマーカーペンのための回路(Bユニット)に入力する。

### 2. ミキサ、フィルタと増幅

図3(a)の回路はRF信号とクロックパルスのミキサおよびローパスフィルタからなり、AユニットとBユニットでは共通の回路である。Aユニットで使用したクロックパルスの周波数は1k, 5k, 10k, 20k, 40k, 50k, 60k, 80k, 100k, 120k, 150k および160kHz, Bユニットでは10k, 100k, 200k, 300k, 500kおよび1MHzである。クロックパルスを抵抗R1とコンデンサーC1からなる微分回路を通し、次のトランジスタQ1の回路により微分パルスの負電圧部分をカットしてミキサに加える。(トランジスタの代わりにダイオードを使用した場合は負パルスが0.6V程度残るので偶数次の高調波が弱くなる。) R3の抵抗値の部品の配置等の影響がかなりあり、1k 付近の抵抗の最適値を選びフィルタ出力が最大となるように調整する必要がある。ミキサの部分は周囲の配線等の影響が大きくシールドすることが重要である。ローパスフィルタは遮断周波数が約28Hzの6次のバターワース型(減衰特性 - 36dB/oct)を採用し、OPアンプOp4で交流分を増幅している。(フィルタは遮断周波数が50Hz以下で、急峻なロールオフ特性が得られればよく、厳密である必要はない。) このフィルタはRF周波数とクロックパルスの高調波の差が約 $\pm 30$ Hz以下になったとき周波数が一致したとみなし

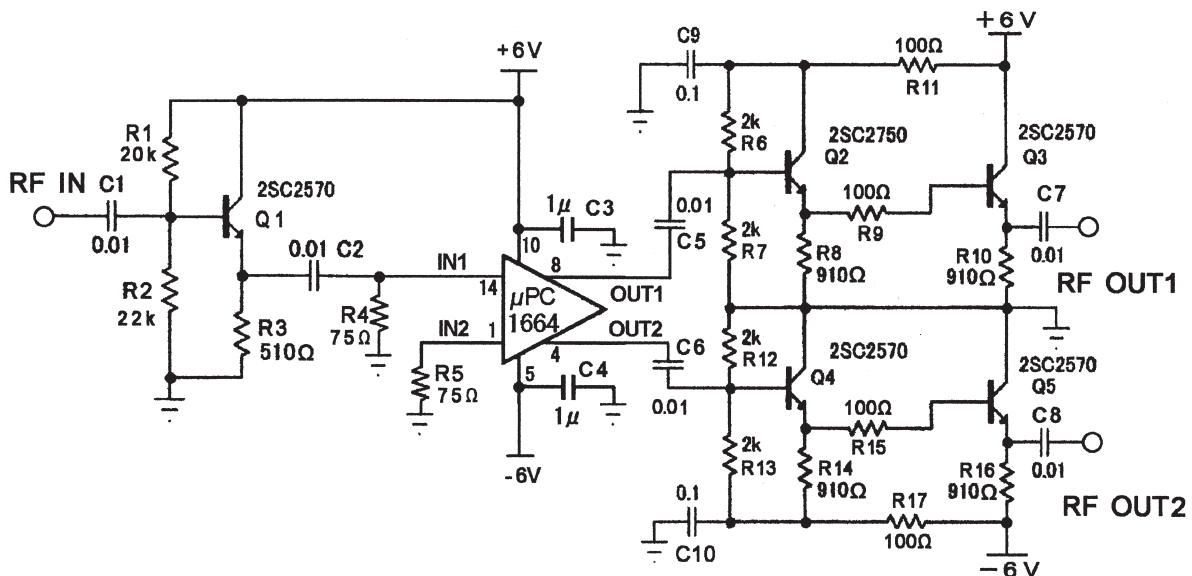


図2 高周波の増幅回路

て、その唸り成分を利用して記録計に目盛を書き込ませるためのものである。

ローパスフィルタからの交流成分は図3(c)の回路により増幅、整流し、次段の図3(d)または(e)のOp8またはOp11で構成するコンパレータに接続する。この回路まではAおよびBユニットの共通の回路である。図3(d)、(e)のコンパレータは電圧比較型のものより電流比較型の方が良い結果が得られた。図3(d)と(e)はそれぞれAとBユニットの終段回路で、この部分

のみが2つのユニットで異なる。AユニットではダイオードD1、D2を挿入して、コンパレータの出力が正電圧のみとなるようにし、Op9で構成するアンプのスイッチSW1は記録計で描かれた吸収曲線上に、上向きまたは下向きに周波数目盛を入れるために使用する。最終段の非対称な差動増幅器を用いたのはロックインアンプからの入力が増幅度は1で、Op9からの出力電圧のみを1/6程度に減少させるためである。

Bユニットは記録計のマーカーをオン、オフするた

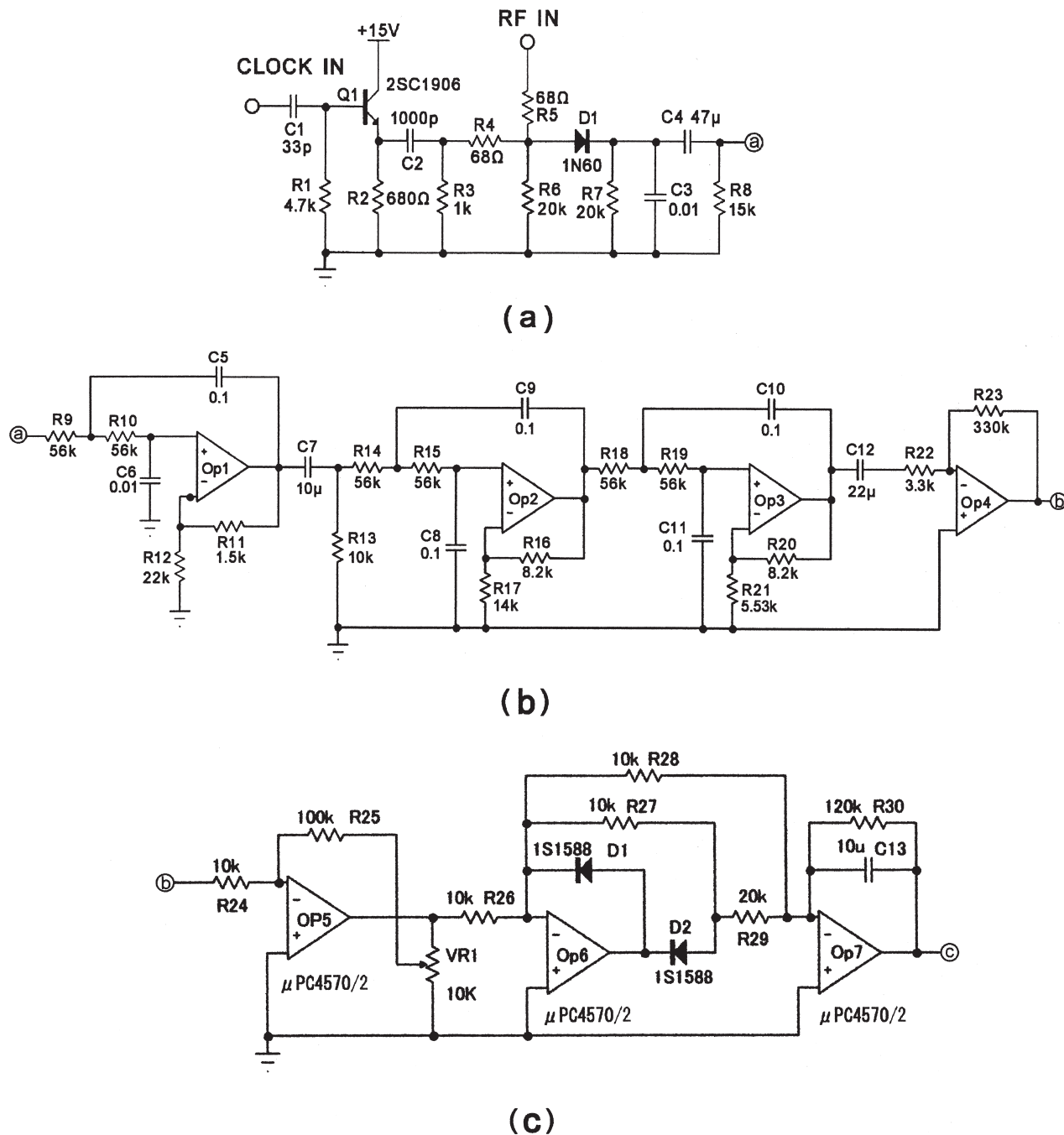
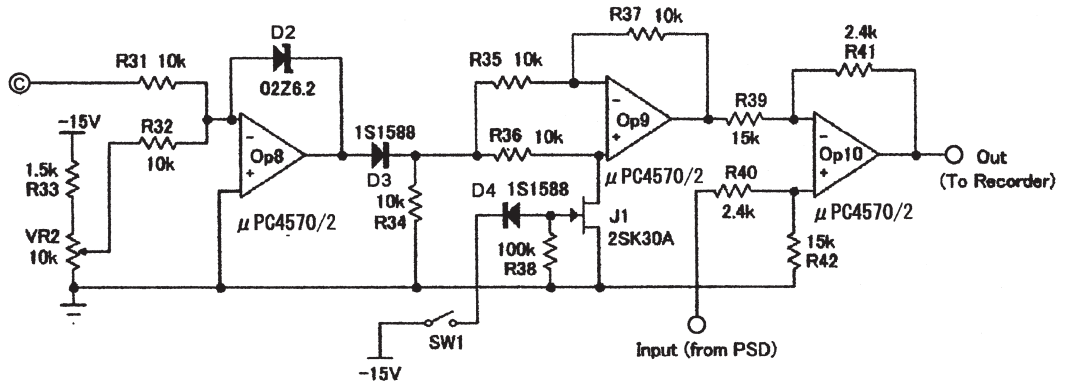
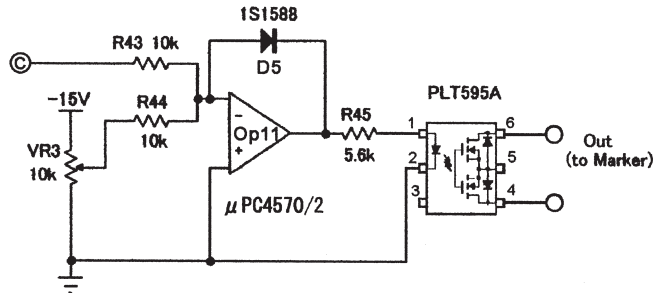


図3 周波数目盛の生成回路

(a)ミキサ回路 (b)ローパスフィルタ回路 (c)フィルタ出力の増幅と整流回路



(d)



(e)

図3 周波数目盛の生成回路

(d)周波数目盛電圧と検波出力の混合回路 (e)マーカーペンのスイッチング回路

めの回路で、低電流で駆動するフォトリレーTLP595A (東芝、4、6端子間のオン抵抗の実測：1Ω，許容電流：300mA) を使用して、このリレーを2mA程度の電流で駆動している。

3. クロックパルス

発信周波数12.8MHzの水晶モジュール (京セラKTXO-18S、温度特性±pm/-20~60℃、エージング特性±1ppm/year) を基準周波数源として、12.8MHzを適

当に分周することにより、周波数が1k、5k、10k、20k、40k、50k、80k、100k、160kHzおよび200kHzのクロックパルスを得た。60k、120k、150k、300k、500kおよび1MHzのクロックパルスは12.8MHzの周波数のものを分周しても得られないので、図4のようなPLL回路を利用して、内蔵のVCO回路により3MHzで発振させ、これをさらにIC3で3分周して1MHzのパルスを得た。これらの適当な分周により60k、120k、150k、300kと500kHzのクロックパルスを得た。この回路では発振周波

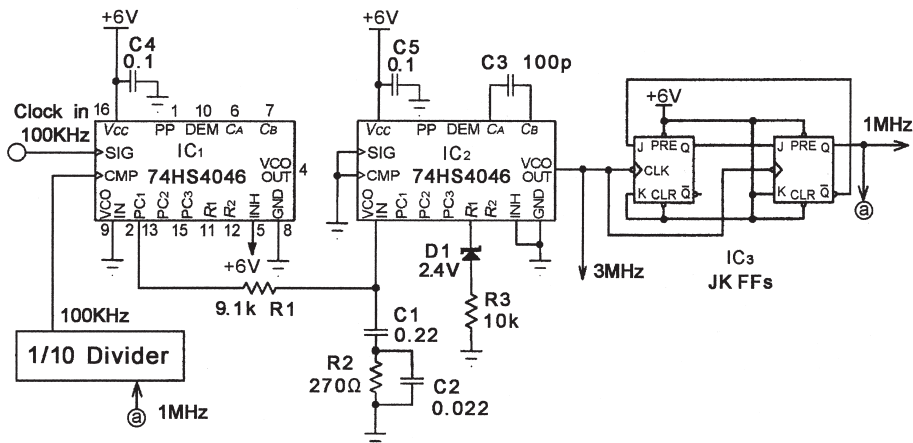


図4 PLL回路による1MHzと3MHzのクロックパルスの生成回路

数を固定していることと、スプリアスをできるだけ減少させるため、74HC4046のExORによる位相比较器のPC1を使用し、さらに干渉をさけるため位相比较器とVCOは別のICを使用した。<sup>3)</sup>

#### 4. クエンチ周波数

図4に他励式超再生スペクトロメータのためのクエンチ周波数の生成回路を示す。スペクトロメータの周波数範囲やスペクトロメータに使用する発振器の型により、広範囲のクエンチ周波数が要求されることから、PLL用ICとしてロック範囲の広いC-MOSの4046Bを採用し、図のR1, R2, C2, C3の抵抗とコンデンサーから成るループフィルタを用いて10k~300kHzの範囲の周波数で発振させることができた。分周回路はカスケード接続した3個のMC14522とデジタルスイッチで構成し、1kHz単位で設定できるようにした。

出力は形が矩形波であることから高調波を減少させるため、信号をOp4, Op5で構成する遮断周波数可変のローパスフィルタを通してている。遮断周波数の変化はフォトカプラーMCD5221 (モリリカ) のR13, R14の抵抗をフォトカプラー中のフォトダイオードの電流を変化させて行う。電流の制御はIC1のVCOの制御電圧を利用して、Op1, Op2を通してOp3で電圧 電流変換しフォトカプラーの電流を制御している。可変抵抗VR1を調整して適当な遮断周波数とする。10kHz付近ではかなり歪みのある正弦波となるが、充分目的に耐えている。フォトカプラーには相当の個性があるので、Op2の周りの抵抗値は目安に過ぎない。このようにして得られた出力(QF)をKENWOOD製(AG-253)またはNF回路ブロック製(SY-107A, 廃止品種)の低周波発振器の同期信号として入力し、低周波発振器をジッターのない正確なクエンチ周波数の信号源としている。

(低周波発振器の機種によってはフィルタ回路は必ずしも必要ではない。)

超再生スペクトロメータの発振器は、上述のように、クエンチ周波数でブロッキング発振をする。このため、図3(a)のミキサに入力したクロックパルスの高調波が、スペクトロメータの発振周波数と一致したときとクエンチ周波数と一致したときの両方で唸り成分を生じる。したがって、読み取りやすい周波数目盛を入れるには、スペクトルの周波数範囲にもよるが、クエンチ周波数を5kHzまたは10kHz単位で正確な周波数で設定することが必要である。また、クエンチ周波数が50kHzのとき、40kHzまたは60kHzクロックパルスを用いるとサイドバンドの周波数にも応答するため50kHzとの差の10kHz単位の目盛を入れこともできる。勿論、10kHzのクロックを用いてもよいが、クロックパルスとクエンチの周波数の差を利用して周波数目盛を入れる方法はクロックの高調波が弱くなる100MHz領域では特に有効である。

## 結果と性能

NQRスペクトロメータとしてRobinson型の再生発振検波器<sup>4)</sup>とDean型他励式超再生発振検波器<sup>5)</sup>を用い、試料としてp-ジクロロベンゼンを用い、NQRを共に磁場のゼーマン変調<sup>6)</sup>を使って観測し、周波数マーカーの性能を検討した。図6にその結果を示す。図6(a)は再生発振器で得られたスペクトルで、このときの試料温度が292Kであった。AおよびBユニットのクロックパルスとしてそれぞれ5kHz, 50kHzを用いた。記録計のペンは5kHz毎に周波数目盛を刻んでおり、マーカーの目盛の間隔もクロックパルスの周波数と一致している。図が縮小されているため34.29MHzの目盛は明確

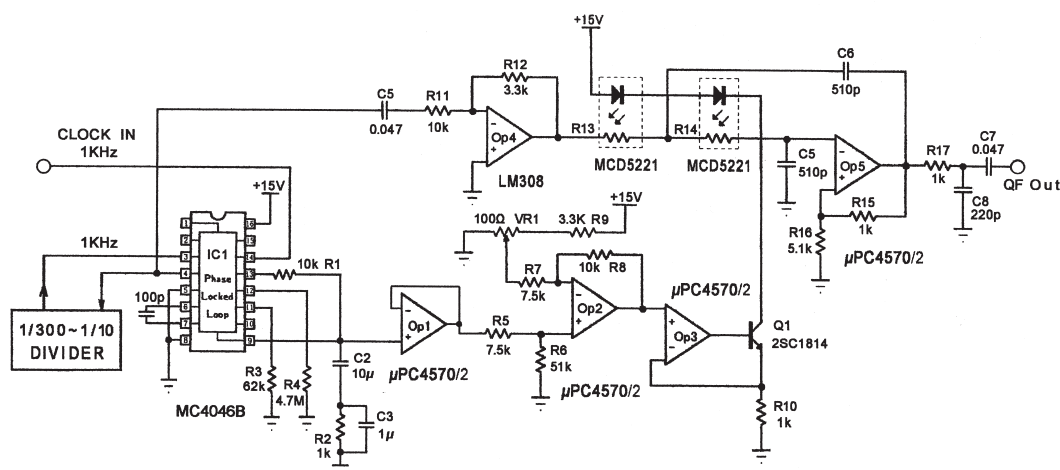
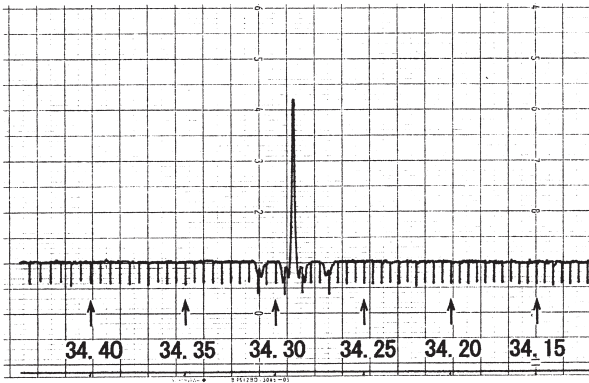
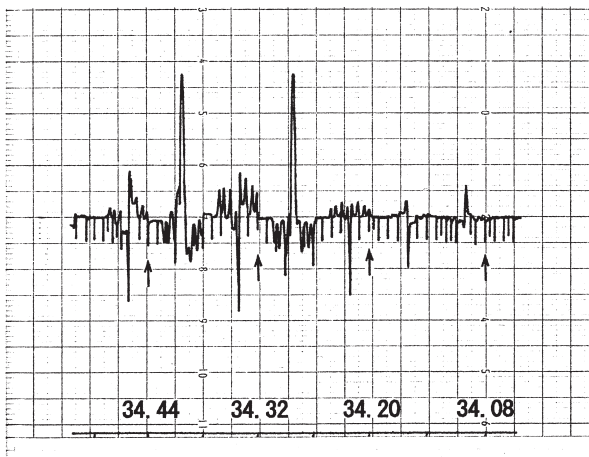


図5 クエンチパルスの生成とフィルタ回路





(a)



(b)

図6 NQR スペクトル

- (a) 再生型スペクトロメータによるスペクトル  
 (b) 超再生型スペクトロメータによるスペクトル

ではないが吸収曲線の最大の部分にあり、共鳴周波数は34.290MHzと、半値幅は周囲の目盛の間隔から1.7kHzと読み取ることができる。5kHzの目盛があれば、共鳴周波数を目分量で十分に $\pm 1$ kHzの精度で読み取ることができる。

図6(b)は超再生型発振器を用い294kで測定した結果である。スペクトルはサイドバンドが多く現れ、吸収が強すぎるためゼーマン変調の影響も強く表れて、やや目盛が分かりにくい。この場合は、クエンチの周波数は60kHzに設定し、Aユニットの入力パルスは50kHzに、Bユニットへのパルスは300kHzに設定した。34.40MHz付近の吸収もサイドバンドである。マーカーの目盛はクエンチ周波数の倍数となっているため、目盛間隔は60kHzとなっている。他方、ペンが刻んだ目盛間隔は50kHzと60kHzの差の10kHzとなっている。この図から共鳴周波数は34.282MHz $\pm$ 1kHzと読み取れる。このスペクトルの測定の際に、図3(b)の回路の増幅

度を大きくしたため、所々に5kHzの目盛が入っているが、原因は解明していない。5kHzの目盛が入ることによって不都合は生じないので現段階では改良はしていない。再生型発振器の場合でも同様に、図3(b)の回路の増幅度を大きくすると、クロック周波数の1/2の目盛が入るようにすることができる。

## 考 察

周波数マーカーをスペクトロメータに接続した際に、スペクトロメータに何らの影響を与えないことが重要で、特にRF信号の入力回路に注意を払う必要がある。図2のRF増幅回路において $\mu$ PC1664のOUT1とOUT2のそれぞれにトランジスタQ2とQ3およびQ4とQ5で構成する2段階のエミッターフォロワを接続している。Q3とQ5によるエミッターフォロワを省略した場合は、図2(a)のミキサ回路からスペクトロメータへのクロックパルスの通り抜けが生じ、クロックパルスの高調波がスペクトルに重畳される現象が見られた。2段階のエミッターフォロワの採用はクロックパルスの通り抜け阻止に効果的で、図6(a)および(b)に見られるように、スペクトルにクロックパルスの影響は全く現れていない。

RF増幅回路以外で問題となるのは、回路内で発生するノイズである。周波数目盛の生成回路で問題となるのは、図3(d)と(e)におけるコンパレータとリレー回路の電圧および電流ノイズである。これらの回路ではコンパレータは電流比較型のものを採用している。コンパレータに電圧比較型を使用した場合は、微弱なノイズが発生し、このノイズが電源ラインを通過して交流および直流増幅回路に回り込み、コンパレータがリセットされず発振する現象が生じた。これに対し、電流比較型コンパレータではノイズによる不具合はなく、コンパレータは安定な作動をしている。

図3(e)の回路においてメカニカルリレーを使用した場合、数十mAの駆動電流が必要であり、リレーのセット・リセットによって生じる電流ノイズのために、ノイズの回り込みによりコンパレータとリレーのリセットが困難となった。これを解決するためには、リレーのための別電源を必要とし、さらに電源ラインをフェライトコアに通し、最も効果的な配線の位置を探る必要があった。フォトカプラーを使用した際には、駆動電流が小さいため、別電源は不要であり、図3(a)~(e)の回路を同一基板上に組み込んでもノイズによる不具合は生じていない。

図4と図5の回路および分周回路では、デジタル回

路とアナログ回路とは別電源を使用しているので、ノイズの問題は生じていない

### まとめ

再生型および超再生型スペクトロメータでは、今回報告した周波数マーカーの使用により30MHz台の共鳴周波数を $\pm 1\text{kHz}$ の精度で読み取りことができる。共鳴周波数の低い $^{14}\text{N}$ 核の場合はより容易に目盛を入れることができる。超再生スペクトロメータの場合が他励式の場合に、報告した周波数マーカーの使用が有効である。

### 参考文献

- 1) M.Suhara, Sci. Rep. Kanazawa Univ. 17, 7-15 (1972).
- 2) J.A.S.Smith and D.A.Tong, J. Sci. Instrum. 1, 8-14 (1968).
- 3) 遠坂俊昭, トランジスタ技術, 2001. 3月号, p 249.
- 4) F.N.H.Robinson, J. Phys. E: Sci. Instrum. 15, 814 - 823 (1982).
- 5) C.Dean and M.Pollak, Rev. Sci. Instrum. 29, 630-632 (1958).
- 6) F.N.H.Robinson, J. Phys. E: Sci. Instrum. 13, 961-963 (1980).