

「HB オシロスコープ解析並びにトランジエント解析」を適用した

100MHz 水晶発振回路の発振動作と基本特性の精細解析

May3, 2006

Mr. Endo

Copyright© MEL

1. 序文

100MHz 帯水晶発振回路の動作・安定性を、Harmonic Balance 法を用いた HB オシロスコープ解析、また信号時間波形をフーリエ解析して信号の周波数スペクトラムを高精度に分析するトランジエント解析を活用して、定量的な評価に基づく詳細解析を行った。元来 Q が高い水晶発振回路は、Q の高さに伴いその収束に時間が掛かるため、回路 Simulator を利用した定量的な解析が難しいと言われてきたが、SNAP の高度な機能を駆使して水晶発振回路の詳細解析を実現することが出来た。

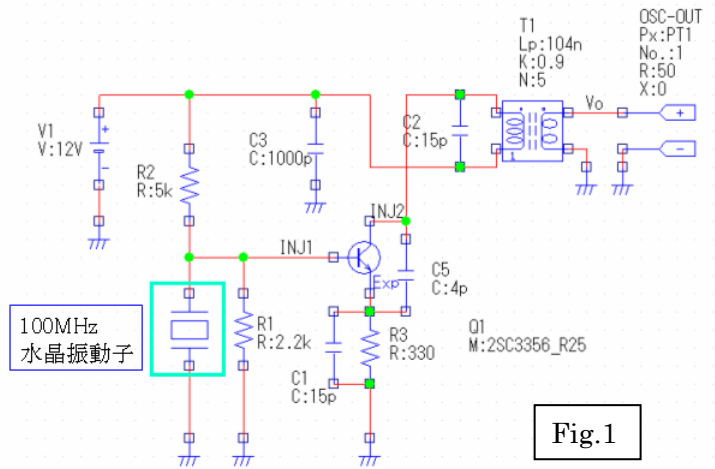


Fig.1

2. 水晶発振回路の動作概要と水晶振動子の等価パラメータ

(1) 図 1 の発振回路はトランジスタ Q1 のベースと GND 間に水晶振動子を、コレクタに High Q の共振回路を接続して、100MHz の高周波信号を選択的に発生させる。発生した 100MHz の信号を、コレクタ・エミタ間の帰還容量  $C_f = [\text{トランジスタの出力容量}] C_{oe} + C5$  と、エミタ回路の接地容量 C1 からなる帰還回路で正帰還させ、帰還された信号をトランジスタ出力およびコレクタ共振回路で増幅して発振を行う。この発振回路は発振周波数  $f_0$  における水晶振動子の等価インダクタンスと、コレクタ共振回路の等価インダクタンスによってハートレー型発振回路を形成する。

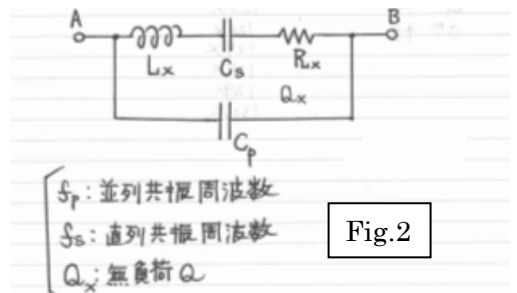


Fig.2

(1) 関係式

$$L_x = \frac{Q_x R_x}{\omega_p} \dots (1)$$

$$C_s = \frac{1}{\omega_s^2 L_x} \dots (2)$$

$$\frac{C_p}{C_s} = \frac{1}{\left(\frac{f_p}{f_s}\right)^2 - 1} \dots (3)$$

$C_p$  を設定すれば  $\Delta f$  が求まる,

$$\Delta f = \frac{1}{4\pi Q_x R_x C_p} \dots (4)$$

(2) 水晶振動子は、SNAP のエレメント説明書の水晶振動子(マクロ)の項に記載されているように、直列共振周波数:  $f_s$ 、内部抵抗:  $R_x$ 、無付加 Q:  $Q_x$ 、並列等価容量:  $C_p$  とすれば、夫々の等価パラメータを図 2 の関係式[1]で表すことができる。ここで重要なことは、等価並列容量  $C_p$  を設定することで、図 3 に示すように  $\Delta f$  即ち並列共振周波数  $f_p$  が定まり、水晶発振回路の発振安定度 [発振周波数  $f_0$  は  $f_s$  と  $f_p$  の間に存在 ( $f_s \leq f_0 \leq f_p$ ) し、発振周波数  $f_0$  の近傍における実質的な Q が等価的に定まる] を決める要因の一つになることである。ここで、並列共振周波数  $f_p$  を任意に定めると、並列容量  $C_p$  が

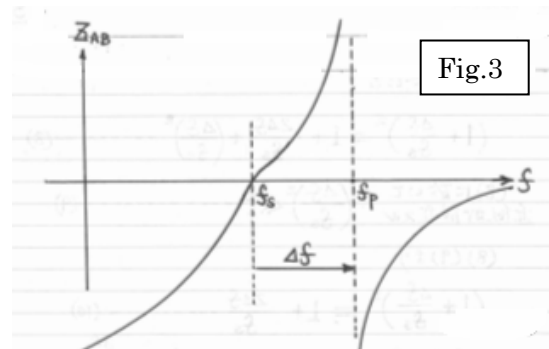


Fig.3

不適切な値になってしまい、[水晶振動子の等価インダクタンスが不適切な値となって] 水晶発振回路の発振条件を成立できない場合が生じることに留意したい。

- (3) 100MHz 帯の水晶発振回路では、基本波振動子の代わりに高次オバートの振動子が適用される。[基本波振動子を使用した場合には、通常では 100MHz の発振は難しい----- 後述] 今回の simulation では 5 次のオバートン水晶振動子を使用した、20MHz の基本波振動子の等価パラメータを  $f_s$ 、 $R_x$ 、 $Q_x$ 、 $C_p$ 、 $C_s$ 、 $L_x$ 、 $\Delta f$  とすると、理論解析計算の結果では、 $n$  次のオバートン振動子の等価パラメータ  $f_{sn}$ 、 $R_{xn}$ 、 $Q_{xn}$ 、 $C_{pn}$ 、 $L_{xn}$ 、 $\Delta f_n$  は、 $R_{xn} \doteq R_x$  ----- (21)、 $Q_{xn} \doteq Q_x$  ----- (22)の仮定の下に、それぞれ  $f_{sn} = n f_s$  ---- (23)、 $C_{pn} \doteq C_p / n$  ---- (24)、 $C_{sn} \doteq C_s / n$  ---- (25)、 $L_{xn} \doteq L_x / n$  ---- (26)、 $\Delta f_n \doteq n \Delta f$  ---- (27)の関係を有する。この結果を後述の個別水晶振動子のマクロ作成に適用する。

①基本波 100MHz水晶振動子の等価パラメータ

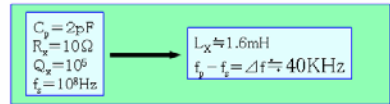
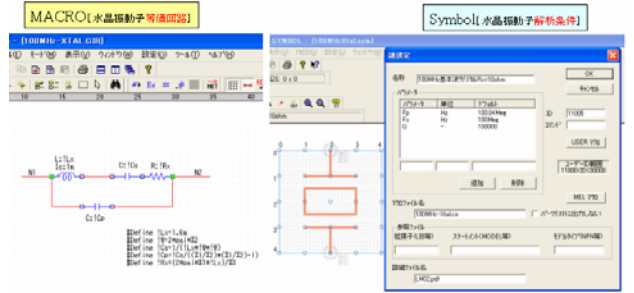


Fig.4



②5次オバートン100MHz水晶振動子[内部抵抗10Ω]の等価パラメータ

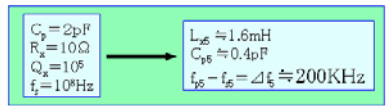
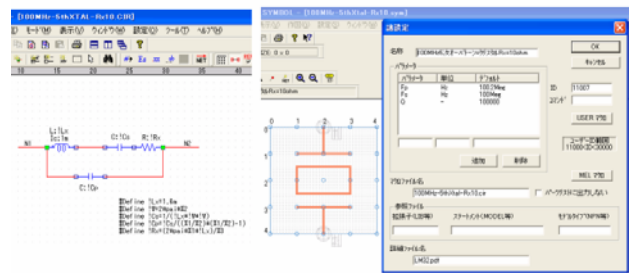


Fig.5



3. 100MHz 水晶発振回路用の個別水晶振動子の作成

回路 Simulation に先立って、前述の(1)式から(14)式を利用して 100MHz 基本波振動子と、(21)式から(27)式において  $n=5$  として 100MHz-5 次オバートン振動子 [内部抵抗  $R_x=10\Omega$ ]、100MHz-5 次オバートン振動子 [内部抵抗  $R_x=10\Omega$ ] の 3 つの水晶振動子の等価パラメータを導出した。次いで SNAP の Library を活用して、これらの等価パラメータを適用した図 4-図 6 の 3 つの水晶振動子 [本解析用 Macro/Symbol] を用意した。

③5次オバートン100MHz水晶振動子[内部抵抗50Ω]の等価パラメータ

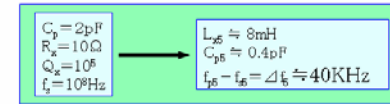
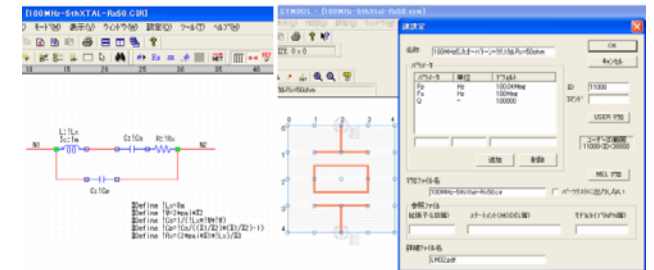


Fig.6



4. シミュレーション適用水晶発振回路および発振解析の解析条件と操作方法

- (1)100MHz 基本波振動子を使用した基礎発振回路  
高周波技術の教科書でよく見かける、図 7 の発振回路 [図 4 の基本波水晶振動子を使用] に対して HB オルタ解析を

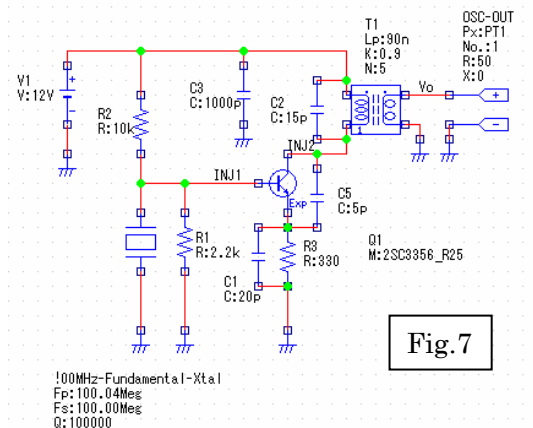
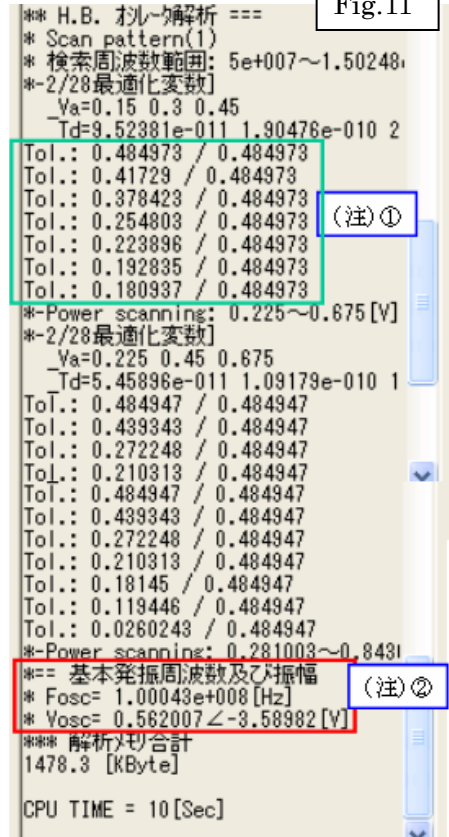


Fig.7



Fig.11



手際よく見つけ出すことができる。

⑤解析が収束した場合には、グラフメニューの表示式を開いて、図 9 のようにプロット欄から所要の解析結果を選定し、それに合わせてフォーマットの表示条件を適切に選択すると、発振出力の時間波形や、スペクトラム分布を表示 (図 10) 出来る。時間波形に表示される発振波形の周期  $T_0$  は、スペクトラム分布に表示される発振スペクトラムのピーク値  $f_0$  に対応し、具体的には  $f_0 = 1 / T_0$  ----- (30) の関係を有する。

(A) 改良100MHz水晶発振回路[基本波振動子]

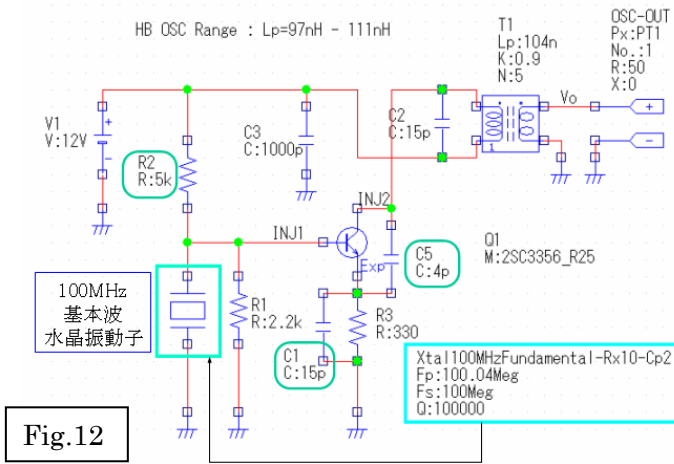


Fig.12

なおポートタイプアロケの欄には、(注)②のように発振周波数  $f_0 = F_{osc}$  と発振出力のレベルも表示される。HB 発振解析の解析

条件等の制約に伴って、発振スペクトラムはスペクトラムアナライザで観測されるようなシャープなスペクトラム分布波形にはならないが、後述のト

ランジェント解析では観測時間を発振周期  $T_0$  の 1000 倍程度に選べば、スペアナで測定されるようなシャープなスペクトラム波形が得られる。

⑥前述の基礎発振回路を HB オシレータ解析を適用して、100MHz で発振する条件を調査・検証した結果として、図 12 の改良水晶発振回路 [R2、C1、C5 を最適値に変更] を導き出すことができた。発振回路出力の共振回路のインダクタンス  $L_p$  を変化させると、 $L_p = 97\text{nH} - 111\text{nH}$  の範囲で発振 [HB オシレータ解析が収束] することを確認した。なおトランジェント解析を適用した場合には、共振回路トランスのインダクタンス  $L_p$  や結合系数  $K$ 、巻線比  $N$  を変化させても発振が得られなかったため、実際上はこのように基本波振動子を使用した水晶発振回路では 100MHz の発振は生じないと考えられる。

(B) 5次オーバートーン水晶振動子[Rx=10Ω]-100MHz発振回路

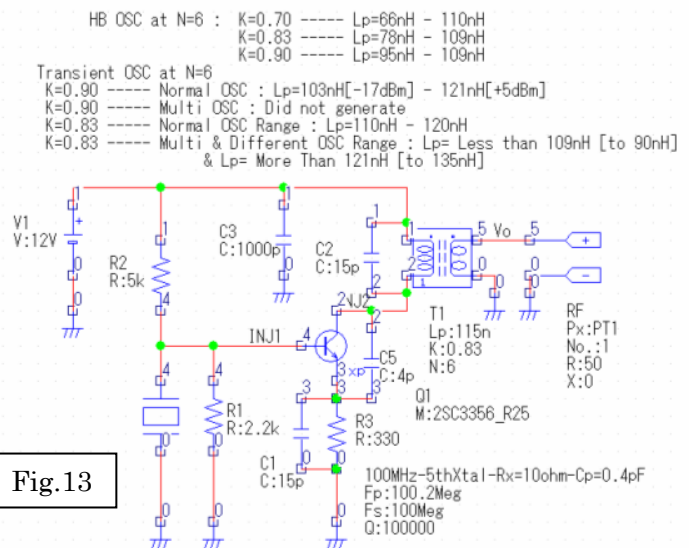


Fig.13



5. 5次オーバートン水晶振動子を使用した100MHz水晶発振回路とトランジエント解析を適用した発振解析

5.1 HBオシロスコピー解析およびトランジエント解析の両解析法で発振する高次オーバートン水晶発振回路

(1) 図5、図6の5次オーバートン水晶振動子[MACRO]を使用し、両解析法での発振を検証し、その発振条件[共振回路トランスの最適パラメータ]を明記した発振回路を、図13[内部抵抗Rx=10Ω]と図14[内部抵抗Rx=50Ω]に示す。

(2) 何れの発振回路においても、トランスの1次コイルLpと2次コイルLsの結合係数Kの変化、即ち共振回路に対する負荷重さに[共振回路のQ]によって、発振の条件が大きく変化することが分かる。

(C) 5次オーバートン水晶振動子[Rx=50Ω]-100MHz発振回路

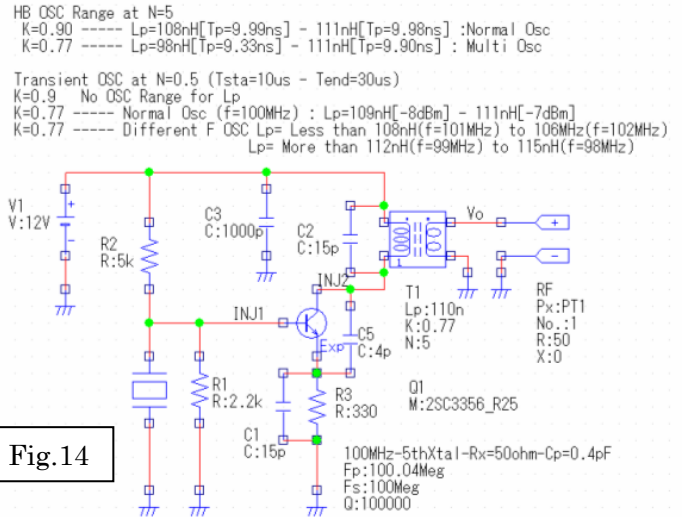


Fig.14

5.2 トランジエント解析における発振解析の詳細設定と具体的方法

5.2.1 解析条件の設定

(1) 解析条件について重要な設定は①スイープ設定のスタート時間とストップ時間、②FFT開始周波数/FFT終了周波数、③最大周波数の3つである。

(2) まずスイープ設定については、発振波形の周期Toと対比してどの程度の観測時間Tmを選定するかが重要である。

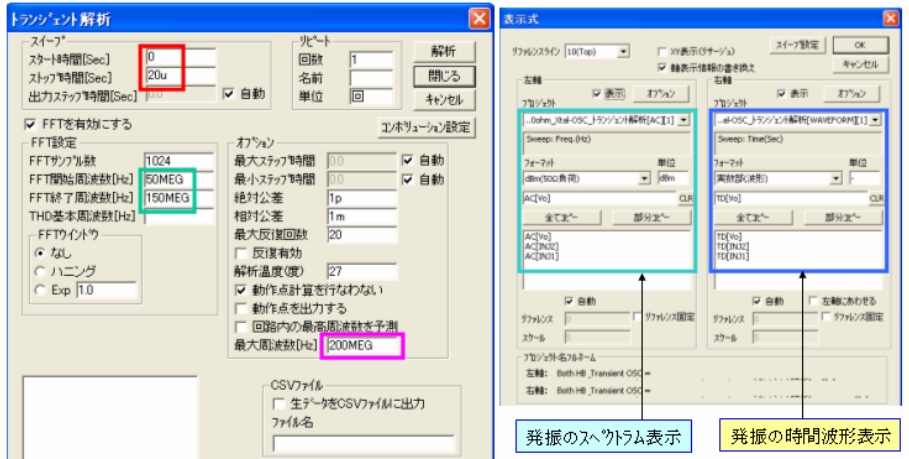
発振スペクトラムの分解能ならびに発振回路の立ち上り時間[ $Tr \approx Q(\text{水晶振動子の } Q) \times To$ ]を考慮して、概ね  $Tm \approx 2000To$  ----- (31)を目安とすればよい。この観測時間Tmを必要以上に大きくすると、解析所要時間[PCの演算能力等による]が飛躍的に増大し、計算に必要なメモリも急速に増加してメモリ容量が不足して解析が停止したり、或いは解析結果を表示する際に多大なグラフ作成時間が必要になって、解析効率が低下するので、その選定に際して十分な事前検討・吟味が必要である。

(3)FFTの開始周波数と終了周波数はスペクトラムの観測スイープ周波数レンジのスタート周波数とストップ周

Transient 解析の条件

Fig.15

解析結果の表示



発振のスペクトラム表示

発振の時間波形表示

波数と同じである。最大発振周波数は、発振周波数  $f_0$  の 1.5 倍 - 2 倍の範囲に選定するとよい。

### 5.2.2 解析結果の表示方法

(1) HB 解析と同様に、プロジェクトの欄から「AC 解析」(発振のスペクトル波形表示)と、「Waveform 解析」(発振の時間波形表示)を選択する。なお前記の観測時間  $T_m$  が発振周期  $T_0$  の 2000 倍と大きい場合には、解析結果からスペクトル波形のグラフを作成表示するのに、数十秒から 1 分程度の所要時間 [PC の演算能力等による] を要することを注記したい。

(2) 発振を生じた (比較的にデータ容量の大きな) 時間波形を表示した後、回路データの操作を行うと、SNAP の時間波形表示 [準備時間] 等の影響で、次の PC 操作がスタートするのを待つ必要が生じる。この待ち時間を解消するため、「Waveform 解析」をグラフィックの表示式で「AC 解析」に一度切替えてから、次の PC 操作を行うと、この待ち時間を必要とせず、解析を効率的に進められる。

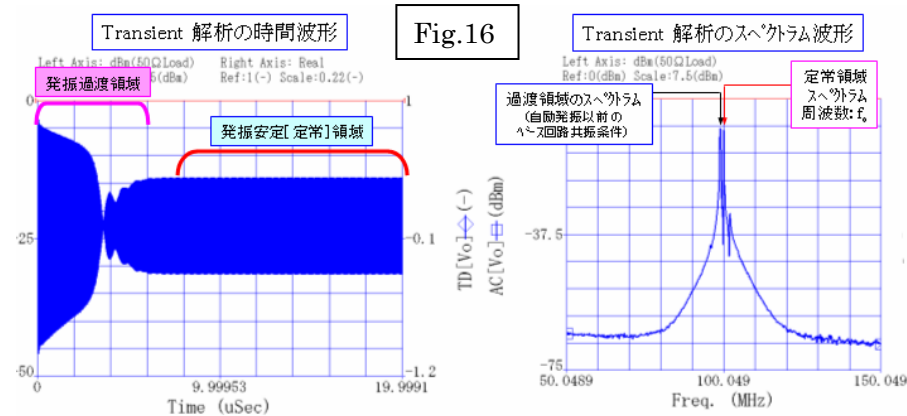


Fig.16

(1) HB 解析と同様に、プロジェクトの欄から「AC 解析」(発振のスペクトル波形表示)と、「Waveform 解析」(発振の時間波形表示)を選択する。なお前記の観測時間  $T_m$  が発振周期  $T_0$  の 2000 倍と大きい場合には、解析結果からスペクトル波形のグラフを作成表示するのに、数十秒から 1 分程度の所要時間 [PC の演算能力等による] を要することを注記したい。

(2) 発振を生じた (比較的にデータ容量の大きな) 時間波形を表示した後、回路データの操作を行うと、SNAP の時間波形表示 [準備時間] 等の影響で、次の PC 操作がスタートするのを待つ必要が生じる。この待ち時間を解消するため、「Waveform 解析」をグラフィックの表示式で「AC 解析」に一度切替えてから、次の PC 操作を行うと、この待ち時間を必要とせず、解析を効率的に進められる。

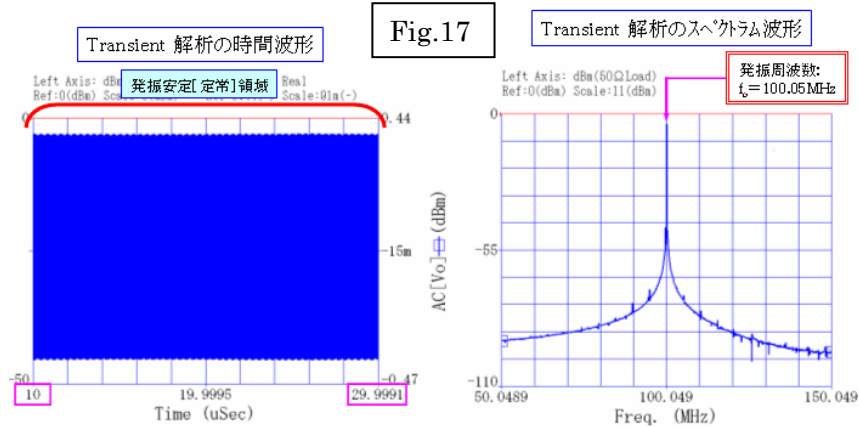


Fig.17

### 5.2.3 時間波形の解析・観測方法のポイント

(1) 図 16 に示すように、観測時間  $T_m$  に、発振回路の立ち上り、すなわち過渡領域を含んでいる場合には、その発振スペクトルには、定常領域の発振周波数  $f_0$  以外に、過渡領域の共振条件のスペクトルを含んでいる、ことに留意する必要がある。このため、今回のトランジェント解析で発振出力のスペクトル波形を解析・表示する場合には、図 17 のように、スイープのスタート時間を 10us に遅らせ、ストップ時間を 30us に選んで、解析の観測時間  $T_m$  が発振の定常領域に入るようにして、正確な発振スペクトルを解析表示できるようにした。

(2) 水晶発振回路のように、予め発振周波数が予測されている場合には、図 18 のように、スイープのスタート時間を例えば、20.002us - 20.012us に設定し観測時間  $T_m$  を 10ns に選ん

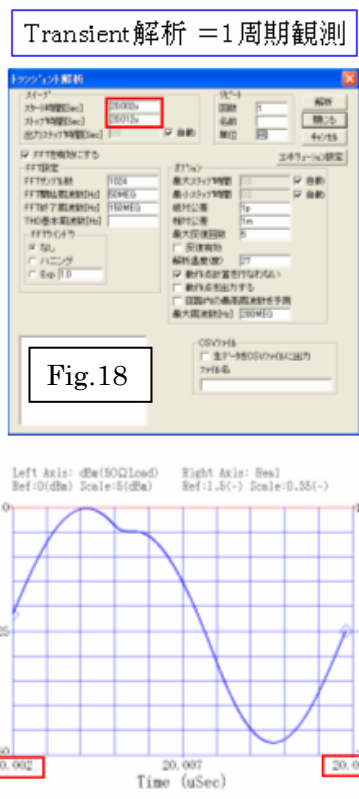


Fig.18

で、発振時間波形の1周期 [To] にとり、発振時間波形を精細に解析・観測することが出来る。

(3) トランジエント解析では、デジタル高速ミクロスコープのように、発振波形を自由に拡大・縮小して、波形の微細部から全体部まで過渡現象を含めて連続的に観測することができる便利な機能を備えている。すなわち、トランジエント解析は、スペクトラムアナライザの周波数特性分析と、高速ミクロスコープの時間特性分析の両機能を融合一体化した優れた解析能力を有する。

(1) HB 解析=波形 Rx=10Ω

Fig.19

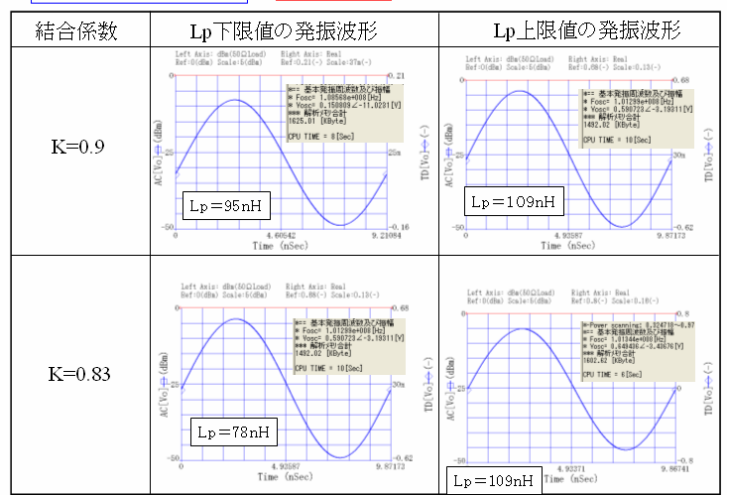


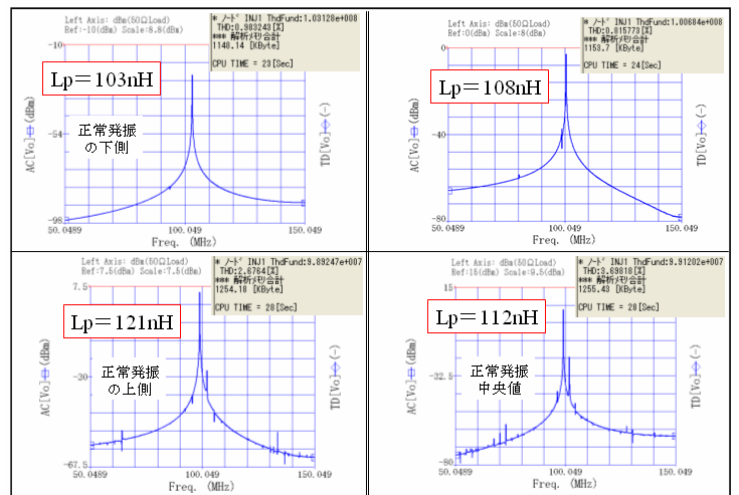
Fig.20

5.3 5次オバートン水晶振動子を使用した100MHz水晶発振回路の解析結果の要点

5.3.1 内部抵抗  $R_x = 10\Omega$  の水晶振動子を使用した100MHz水晶発振回路の特性

(2) Transient 解析①[正常発振のスペクトラム分布:K=0.9] Rx=10Ω

(1)HBポリア解析では、トランスの結合係数  $K=0.9, 0.83$  の両条件に対して、図19に示すように、1次コイルインダクタンス  $L_p$  の広い範囲 [ $K=0.9$  のときに、 $L_p=95nH-109nH$ ] で発振していることが判る。



(2)トランジエント解析では、結合係数  $K=0.9$  において、1次コイルインダクタンス  $L_p$  の  $L_p=103nH-112nH$  の範囲で正常に発振して、図20のように水晶発振回路本来のシャープな線状スペクトラム波形が得られている。ここで注意したい点は、HB解析とトランジエント解析のインダクタンス  $L_p$  に対する発振範囲が異なっていることである。

(3) Transient 解析②[寄生発振のスペクトラム分布:K=0.83] Rx=10Ω

寄生発振

(3)水晶発振回路の寄生発振について触れたい。トランジエント解析を、例えば正常発振[発振周波数  $f_0$  が水晶振動子の周波数範囲内 ( $f_0 = f_s \sim f_p$  の間)]のインダクタンス  $L_p$  の範囲外で行ってみると、その発振スペク

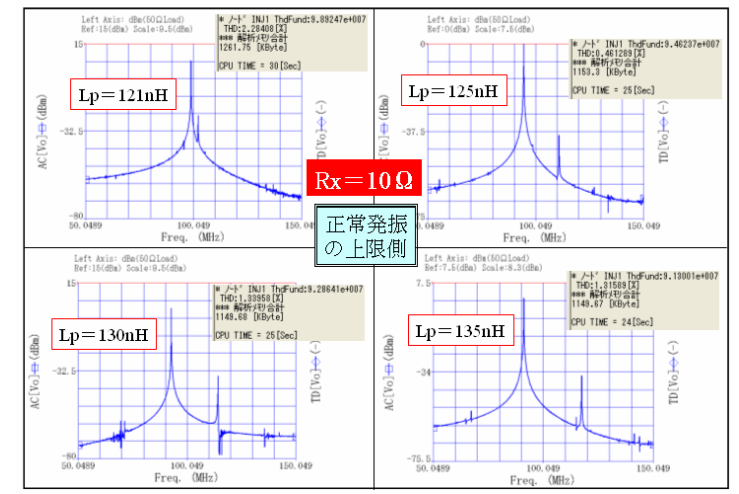


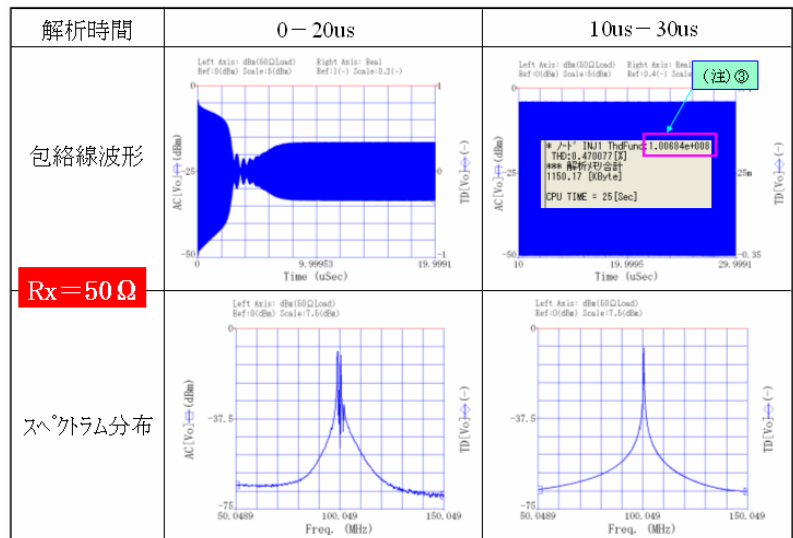
Fig.21

Fig.22

(4) Transient 解析③[正常発振:Lp下限値=109nH:K=0.77]

正常発振

トランジエント解析は図 21 に示すように、マルチ発振 [複数の線状スペクトラムを有する] や発振周波数が水晶振動子の範囲から飛び離れた異常発振などの、寄生発振を生じていることが分かる。このようにトランジエント解析を行うと、水晶発振の正常な発振スペクトラムに加えて、マルチ発振等の寄生発振を含めた、精確無比かつ実践的な解析を実現できることが明確になった。



### 5.3.2 内部抵抗 Rx=50Ω の水晶振動子を使用した 100MHz 水晶発振回路の特性

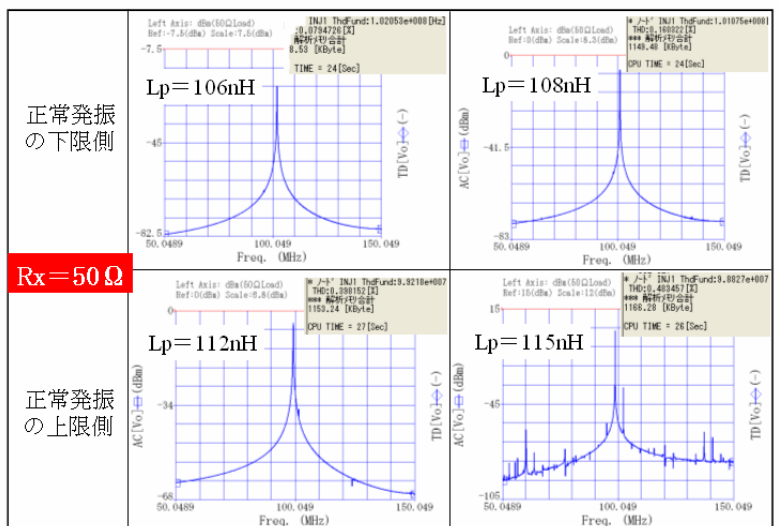
(1) スweep を変えて、トランジエント解析の観測時間 Tm [観測窓] を、図 22 のように変更してみると、前述の発振現象の過渡状態と定常状態におけるスペクトラム波形の違いがよく分かる。

(2) トランス 1 次側コイルのインダクタンス Lp に対する正常発振範囲を越えた領域では、トランジエント解析の結果から、図 23 に示すように、マルチ発振等の寄生発振が発生し易いことがよく分かる。

(5) Transient 解析④[寄生発振のスペクトラム分布:K=0.77]

寄生発振

Fig.23



## 6. 水晶発振回路に対する両解析結果の纏め

[1] 100MHz 基本波—水晶振動子を発振回路に使用すると、HB オシレータ解析では発振する回路条件を見出せるが、トランジエント解析では如何なる回路条件に対しても発振しないことが判った。

この解析結果から、100MHz 基本波—水晶振動子を使用した場合には、実際上は発振が困難であると推測される。

[2] 5 次モード—100MHz 水晶振動子を使用した発振回路では、[教科書に記述されている通り] 内部抵抗 Rx が小さいほど発振が容易であり、共振回路の共振が少し外れても発振が継



続することを、HB オルタ解析とトランジエント解析の両解析法で確認した。

[3] 内部抵抗  $R_x$  が小さい程発振は容易であるが、共振回路の共振条件が少しでも外れると、寄生発振や異なった周波数発振等の異常発振を生じ易いことが、トランジエント解析で明らかになった。

[4] 共振回路の 1 次コイル 2 次コイルの結合係数  $K$  を小さくして、負荷の影響を軽くして共振回路の  $Q$  [共振インピーダンス] を高くすると、共振の僅かなズレ等によって、異常発振が発生し易いことが判った。

[5] 所定の周波数で安定に発振させるためには、例えば共振回路の  $L$ 、 $C$  は、水晶振動子の内部抵抗  $R_x$  が  $10\Omega$  の場合には、その最適値に対して  $\pm 5\%$  の範囲内に、内部抵抗  $R_x$  が  $50\Omega$  の場合には  $\pm 1\%$  の範囲内に選定する必要がある。この範囲を外れると寄生発振等の異常発振を生じる恐れがある。

## 7. 所見

①  $Q$  の高い水晶発振回路の動作解析に、HB オルタ解析ならびにトランジエント解析の両解析方法が有効で、且つ効果的に機能することが分かった。

②最初に HB 解析で発振条件 [発振を生じる回路定数/等価パラメータの範囲等] を見出し、その結果をベースにしてトランジエント解析を進めると、発振回路の解析を効率よく行うことができると同時に、ピンポイントを押さえて発振回路の特性を精確に解析・観測することが出来る。

③トランジエント解析では、正常発振のシャープな発振スペクトラムを精細に解析すると同時に、マルチ発振等の寄生発振や異常発振の様子や、そのスペクトラム波形まで精確に解析できることが明確になった。将に実践に適した優れた Simulation 解析機能である。

—以上—