

水晶振動子の設計精度向上

利川 興司*1、山口 貴士*1、手島 芳朗*1、加賀 重隆*1、廣田 和博*1

*1 日本電波工業株式会社

1. まえがき

水晶振動子を用いた発振回路は周波数の制御、選択を担う部品として、通信等の用途に幅広く利用されている。水晶は温度による周波数変化が極めて小さいという特徴を持ち、安定した周波数発生源となる。しかしメインモード（3次温度特性）がある温度でスプリアスモードと結合すると、その温度では周波数の急激な変動(Dip)を生じ、発振周波数が安定しなくなる。その為、スプリアスモードとの結合を避けるように外形寸法や電極形状を設計する必要があるが、製品の小型化や高精度化のニーズが強くなるにつれて問題となるスプリアスモードが数多く存在するようになり、設計条件を見出す難易度が増し、負担が大きくなってきた。

そこで、我々は有限要素法によるシミュレーションの水晶振動子設計への活用を目指しているが、解析規模の不足が大きな障害となり、実用に堪える解析精度が得られていなかった。今回、大規模共有メモリを持つUV 2000を用い解析規模の問題を解消できたことにより、モデル形状精密化の必要性も見いだせた。結果として、スプリアスモードの結合温度予測に必要な解析精度を得ることができた。

2. 解析手法

モデル作成から計算、結果出力まで全ての手順を商用の有限要素法解析ソフト COMSOL Multiphysics を用いて行った。様々な方向に伝播する振動モードが出現し、全方向の正確な表現が必要となる為、メッシュの形状は一様な立方体とした。要素は全て、六面体の二次要素である。

3. 取組み内容

3.1 必要計算規模の確認

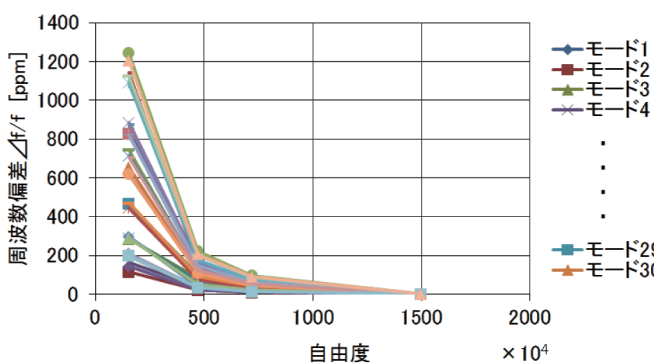


図 1. 計算規模と周波数計算結果

解析結果には多数のスプリアスモード解が出現するが、自由度を増すことでそれらの周波数がどう収束するかを UV2000 を用いた計算で確認した(図 1)。各モードの収束割合は大きく異なり、Dip の発生温度を 2~3°Cの精度で予測するには、全てのモードに対して計算規模による誤差を 100ppm 以内に抑える必要がある。

その為には 1000 万自由度以上、メモリ使用量にすると 1TB 超の計算規模が必要であることが明らかになった。

3-2. 水晶振動子の測定

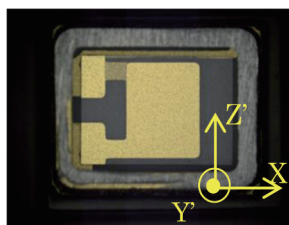


図 2. 水晶振動子の開封写真

今回、2520 サイズ 26MHz AT カット水晶振動子(BK 寸法 1.797mm×1.274mm) をとりあげた(図 2)。シミュレーションに用いる水晶片や電極の寸法は、実物の出来栄を精密に測定して決定した。

図 3 に、実測したメインモードと 3 つのスプリアスモード (sp1, sp2, sp3) の周波数温度特性及び等価直列抵抗 R1 の温度特性を示す。左側縦軸は、メインモード 25°C の周波数を基準とした。sp1, sp2 は、メインモードに比べて温度に対する周波数の変化量が大きく、メインモードと周波数が一致し結合する温度において、メインモードの周波数及び R1 が変動しており、特性が安定しない。sp3 は温度に対する周波数の変化量がメインモードと同程度であった。

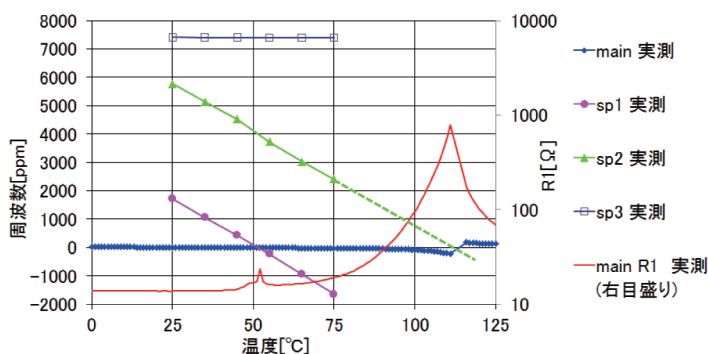


図 3. 実測した水晶振動子の周波数温度特性

予測精度検証の為には、各スプリアスモードを特定する必要がある。レーザースペックル法を用いて水晶表面の振動姿態を各モード毎に確認したものが図 4 左である。sp1 と sp2 は Z' 方向に伝播する屈曲振動、sp3 は厚み滑り振動のインハーモニクスモードであると推定された。

3.3 スプリアスモードの特定及び実測との比較

はじめにメモリ容量 96GB の WS (ワークステーション) を用いて固有値解析を行い、各固有モードの変位図を観察して、実測のスプリアスモードと同じ振動姿態のモードを特定した。図 4 に常温 (25°C) における各スプリアスモードの変位図を示す。それぞれのモードの特徴を良く表現できていることが分かる。

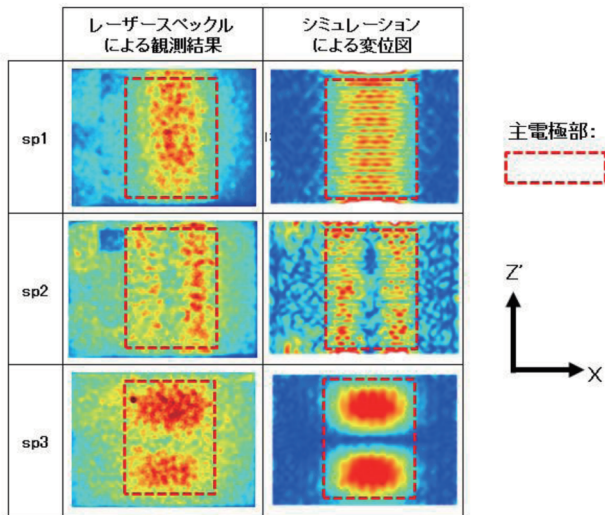


図 4. スプリアスモードの振動姿態

これらのモードについて、WS における中規模 (40 万自由度) で周波数温度特性を計算し、実測との比較をおこなった(図 5)。温度係数は、例えば sp1 では実測値 $-67.3\text{ppm}/^\circ\text{C}$ に対し、解析値 $-68.1\text{ppm}/^\circ\text{C}$ と比較的合っている。しかし、周波数そのものは実測に対して約 13000ppm 程度高く、メインモードとの結合の予測温度は、実測値が 50°C 付近であるのに対して 250°C 付近になってしまっている。

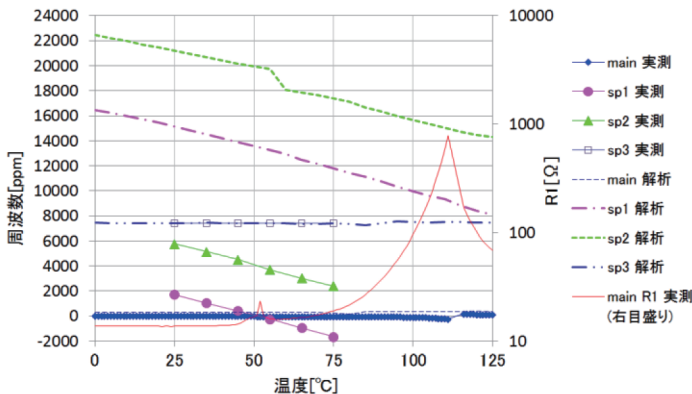


図 5. 周波数温度特性の実測と FEM 解析結果

3.4 周波数精度の追求

このように従来の解析規模では、スプリアスの位置を予測するには明らかに精度が不足している。そこで、次の計算規模での解析を行った。

- ・ WS における最大規模での解析 (170 万自由度)
- ・ UV2000 による大規模解析 (1500 万自由度)

但し、解析規模が大きくなると一温度でさえ計算時間が超大になる為、1500 万自由度での大規模解析は常温 (25°C) のみの解析にとどめた。規模の増大により精度が改善、解析結果が実測値に近付き、電極形状や支持部等、モデル細部表現の正確さによる結果の違いが顕在化し、その重要性を認識できた。モデル細部表現を改良した解析を、3つの異なる規模で行い得られた周波数を実測周波数と共に図 6 に示す。ただし、実測のメインモード周波数を基準としている。1500 万自由度では、全てのモードについて 300ppm 程度の差まで再現できた。これは結合温度約 4.5°C の精度に相当する。

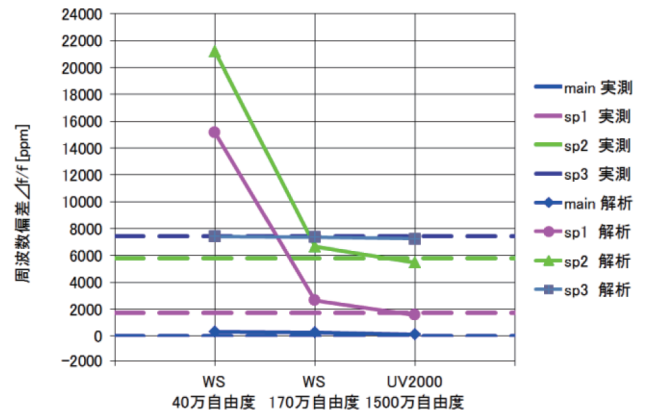


図 6. 異なる解析規模での周波数と実測周波数 (25°C)

3.5 温度特性の計算

解析規模を自由度 900 万程度に落とすことで計算時間を短縮でき、解析精度は落ちるものの、その程度は結合温度 $1\sim 2^\circ\text{C}$ 相当で済む。この解析規模で周波数及び等価直列抵抗 R1 の温度特性計算を行い、実測値と比較した結果を図 7 及び 8 に示す。実測においては 50°C 付近に急峻な、 110°C 付近に巨大な Dip が観測されているが、両者の出現を 5°C の精度で予測できた。

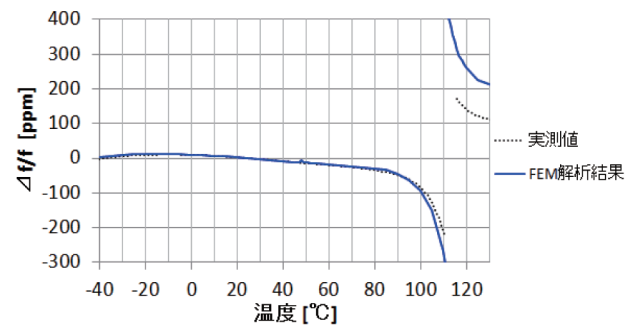


図 7. 温度特性の比較 (周波数)

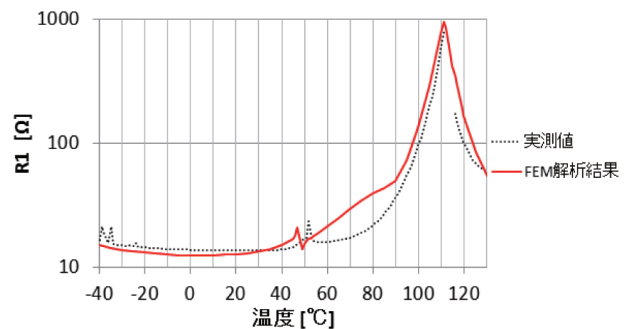


図 8. 温度特性の比較 (R1)

4.まとめ

水晶振動子の有限要素法解析において、解析規模とスプリアスモードの周波数精度の関係を確認し、解析に必要な計算規模の把握を行った。

26MHz AT カット振動子を対象とし、観測されたスプリアスの振動モードを特定し解析結果との比較を行った。解析規模を上げることで、スプリアスとの結合温度を実測に対し 5°C の精度で再現することができた。