

# 水晶振動子の設計精度向上

## プロジェクト責任者

廣田 和博 日本電波工業株式会社

## 著者

利川 興司<sup>\*1</sup>、山口 貴士<sup>\*1</sup>、手島 芳朗<sup>\*1</sup>、加賀 重隆<sup>\*1</sup>、廣田 和博<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 日本電波工業株式会社

利用施設：国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間：平成 27 年 8 月 12 日～平成 28 年 3 月 31 日

## アブストラクト

水晶振動子は周波数の制御、選択を担う部品として、通信など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つ為、安定な周波数を発生することが出来るが、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を生じて出力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パターンを設計する必要があるが、製品の小型化、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、設計条件を見出すことが困難な為、大きな負担となっている。

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たが、解析精度を上げるためには膨大な計算コストが必要であり、大きな障害となっていた。平成 26 年度においては、実デバイスの出来栄えを出来るだけ詳細に計算モデルに反映した上で、大規模共有メモリを持つ UV 2000 を用いて十分な規模での解析をはじめて行い、実測したメインモード及びスプリアスモードの周波数がシミュレーションで正確に再現出来ることを確認した。但し、計算時間の制約により温度 1 点のみでの検証に留まった。平成 27 年度は引き続き、温度パラメータを振った計算を行ない、温度特性全体の解析を行ったところ、スプリアスモードの結合温度が 5℃の精度で再現された。本取組みにより水晶振動子のシミュレーションにおいて精度の良い結果が得られることを実証し、設計活用へ前進することができた。

キーワード：大規模シミュレーション、有限要素法、水晶振動子、周波数、結合温度

## 1. 本プロジェクトの背景と目的

水晶振動子および発振器は、光通信やマイクロ波通信などの基幹通信だけでなく LTE などのモバイル通信の端末および基地局で使用される。また、自動車に搭載される多くのセンサーやコントローラマイコンのクロック源としても必ず必要とされ、便利で安心・安全な社会を実現、創出していくために必要なデバイスである。「産業の米」である半導体に対し、水晶が「産業の塩」と呼ばれる所以

である。モバイル端末では非常に多数の搭載により小型化要求がすすみ、車載でも多数搭載に伴いコントローラユニットが室内から環境の厳しいエンジンルームへ変更となるなど変化が進んでいる。振動子自体の小型化が進むとメインモードである厚みすべりモードに影響を与えるスプリアスモードが多数存在するようになり、且つ使用温度範囲が広がると、その影響を避ける設計が難しくなる為、従来のような試作の繰り返しのみでは短時間で設計を確立することが困難になっている。

設計リードタイム短縮の為にはスプリアスモード周波数の正確な予測が必要であるが、解決手段としてシミュレーションの活用が期待されており、過去にも有限要素法による振動解析の事例が複数報告されている。最近では、文献 1)～7) 等がある。1)、4) はメインモードに関して解析しているが、スプリアスモードは対象としていない。また、7) は、スプリアスを含むモードチャートを計算しているが、実測との比較はなされていない。2)、5)、6)、7) では、周波数温度特性を計算して、スプリアスモードの結合温度を実測と比較している。例えば、2) で今井らは、ある温度範囲内で唯一観測されたスプリアスモードの結合温度を、実測と解析結果で比較しているが、約 40℃の差があった。また、実測でメインモードと結合したスプリアスの振動モードが特定されていないため、実測と解析結果で同じスプリアスモードを比較しているか判断できない。これはその他の事例も同様であった。

解析精度を上げるためには膨大な計算コストがかかる為、上記の過去事例では工夫して解析規模を抑えた手法が主流である。近年では計算機の性能が向上し、100GB 程度のメモリを積んだワークステーションが一般的になっているが、依然として水晶中を伝搬する波動を十分に表現できる規模ではなく、必要な精度を得るのに十分な解析環境の確保には至っていない。

本プロジェクトにおいては、AT カット水晶振動子についてスプリアスモードの周波数を正確に予測する為、大規模共有メモリシステムを持つ UV2000 により十分な計算規模を確保した。また、レーザースペックル法による変位計<sup>8)</sup>を用いてスプリアスの振動モードを特定し、大規模でのシミュレーション結果と比較することで、どこまで実測された周波数を再現できるかを検証した。

スプリアスモードとメインモードとの結合温度の正確な予測を達成することで、シミュレーションの水晶振動子設計への活用を可能にし、設計や開発の負担低減とスピードアップに貢献することが本プロジェクトの目標である。

## 2. 解析手法

有限要素法解析ソフトウェアの発達により、商用のツールにはプリポスト処理が非常に優れ、モデルの作成から結果の分析まで容易に実行できるものがある。本報告の解析では全ての手順を COMSOL Multiphysics を用いて実施した。

COMSOL Multiphysics は OpenMP による並列化のみに対応している実行コード化済みのアプリケーションであり、並列化に関わるチューニングは、実行時に指定できる要素のみである。但し、固有値求解時の CPU 負荷が占有コアの最大負荷に対して 30% 以下に留まることが分かっており、ユーザーの手の加えられない部分で最適化の余地があるとみられる。

様々な方向に伝搬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. 本プロジェクトの取組み内容

#### 3.1 必要な解析規模の把握

メインモードとそれぞれのスプリアスは互いに異なる伝搬モード、異なる振動姿態を持つため、十分な要素数での Full-3D 解析が必要である。典型的なスプリアスの周波数温度傾斜は凡そ  $-70 \sim -40\text{ppm}/^\circ\text{C}$  程度であり、より安定なメインモードとの結合温度を数 $^\circ\text{C}$ の範囲で予測するためには、周波数予測精度を数百 ppm 以内にする必要がある。

始めに、単純な 1 次元解析にて、AT カット水晶振動子の厚み滑りモードの分割数依存性を確認した。図 1 は厚み滑りモードの位相速

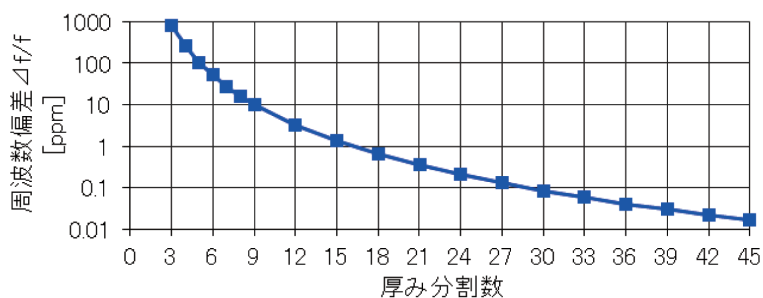


図1 AT カット厚み滑りモードの周波数偏差 (1D)

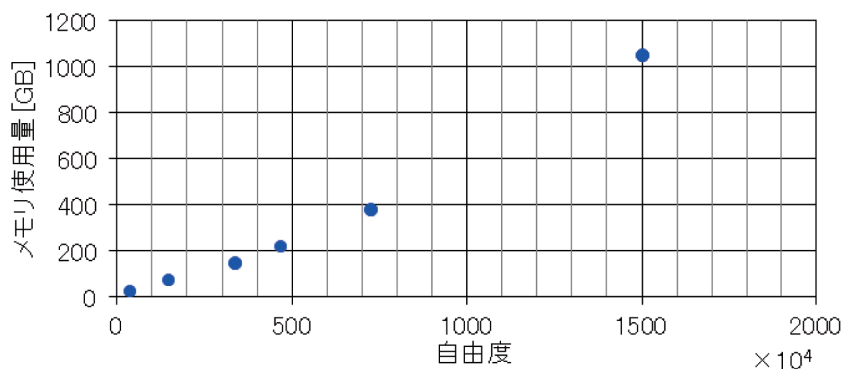


図2 自由度とメモリ使用量の関係

度で決まる周波数 ( $f = V/2H$ ) と、無限板モデルでの FEM 固有値解との差を、厚み分割数を変えて調べたものである。厚み分割数を増すと、本来の周波数に漸近する。逆に分割数が少ないほど、波動の位相変化を正確に表現できなくなり、実効的に硬くなるため本来の周波数よりも高くなる。

次に 3D 解析において、目標の周波数精度が得られる解析規模について確認した。解析要素モデルとしては、中間節点のある 2 次のソリッド要素を用いた。1 節点あたりの自由度は、X,Y,Z 方向の変位と電位の 4 自由度である。解析規模は自由度の総数で決まるため、自由度数とメモリ使用量の関係について調べた。図 2 は、解析モデルの自由度とメモリ使用量を示している。自由度数が増すにつれてメモリ使用量は増加し、1500 万自由度では 1TB を超える。

次に、3D 解析において出現する多数のスプリアスモードの周波数偏差が、自由度を増すことでどのように収束するかを確認した。X 寸法 / 板厚が 29.5、Z 寸法 / 板厚が 20.9 の AT カット振動子を、異なるサイズの立方体でメッシュ分割し、固有値解析した。図 3 に、厚み滑り基本波周波数付近の各 30 個の固有周波数を示す。縦軸の周波数偏差は、各モード毎に最大規模 1500 万自由度での結果を基準にとった値である。スプリアスモードには様々な振動姿態のモードが含まれており、それらの波長も異なる為、モード毎に周波数の収束度合いが大きく異なっている。150 万自由度では、振動姿態を十分表現できず、最大の偏差が 1000ppm を超える。また、すべてのモードについて計算規模が有限であることによる誤差を 100ppm 以下に抑えるには、1000 万自由度以上の解析規模が必要であると見込まれる。

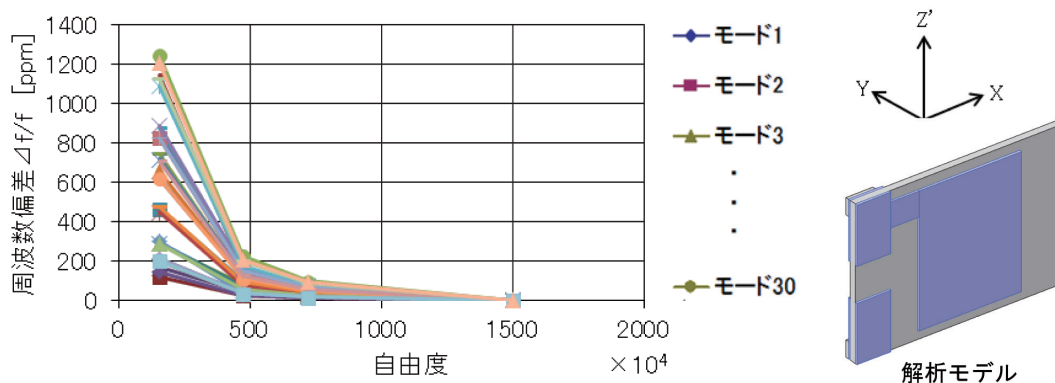


図3 複数のスプリアスモードの周波数偏差 (3D)

### 3.2 水晶振動子の測定

今回は小型振動子のうち、寸法の測定精度を比較的確保し易い 2520 サイズ 26MHz AT カット水晶振動子（水晶片 1.797mm × 1.274mm）をとりあげた（図4）。シミュレーションに用いる水晶片の寸法は、接触式測定器及び無接触電極型周波数測定機を用いて、厚み方向では± 0.04μm、面内方向には± 0.7μm 以下の精度で決定した。

図5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の温度特性を示す。左側縦軸は、メインモード 25℃の周波数を基準をとした。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等価直列抵抗 R1 が変動しており、特性が安定していない。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。

シミュレーションによるスプリアスモードの予測精度を検証する為には、それらのモードを特定する必要がある。スプリアスの振動姿態を把握する為、レーザースペックル法による変位計を使用して測定を行った。図6に、常温において各スプリアスの周波数で駆動した時の測定結果をそれぞれ示す。

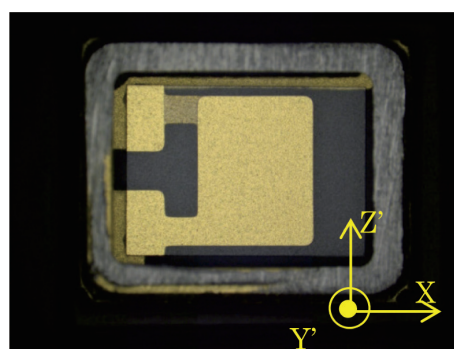


図4 水晶振動子の開封写真

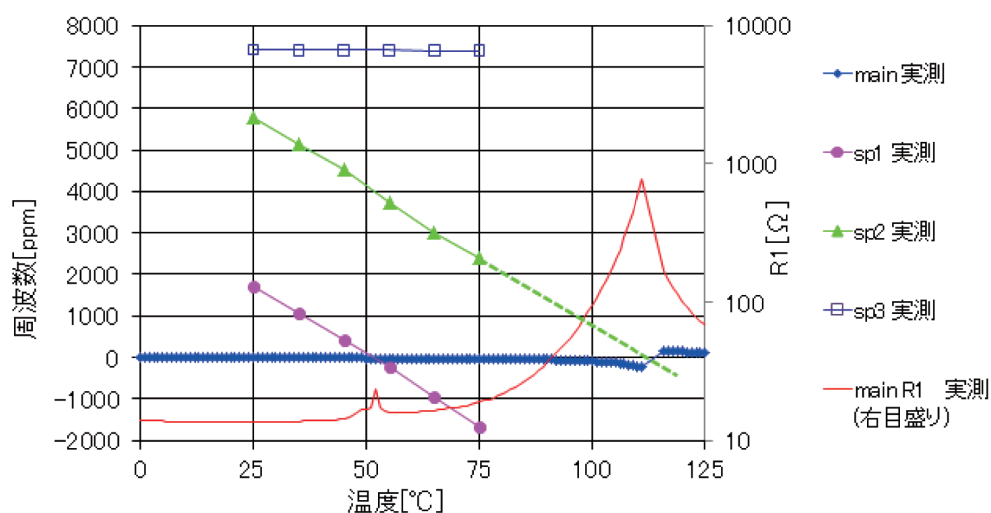


図5 実測した水晶振動子の周波数温度特性



図5で示した各スプリアスモードの温度係数はモード毎に異なり、図6の振動姿態と合わせて考察することで、sp1 sp2はZ'方向に伝搬する屈曲振動、sp3は厚み滑り振動のインハーモニックモードであると推定される。次にこれらのスプリアスモードをシミュレーションでも再現し、その周波数精度を見ていく。

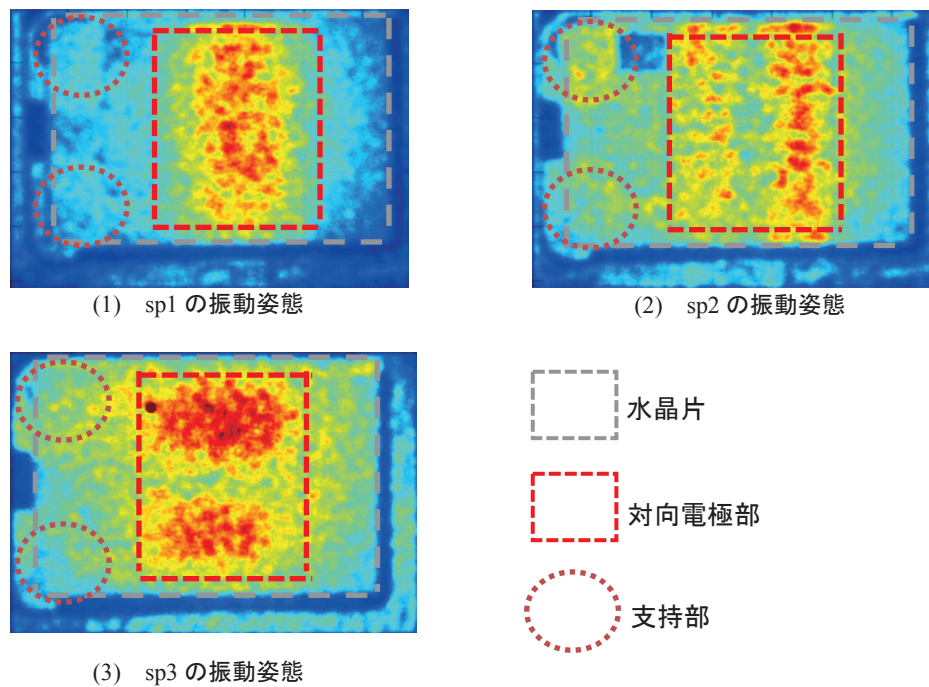


図6 レーザースペckル法による振動姿態の観測

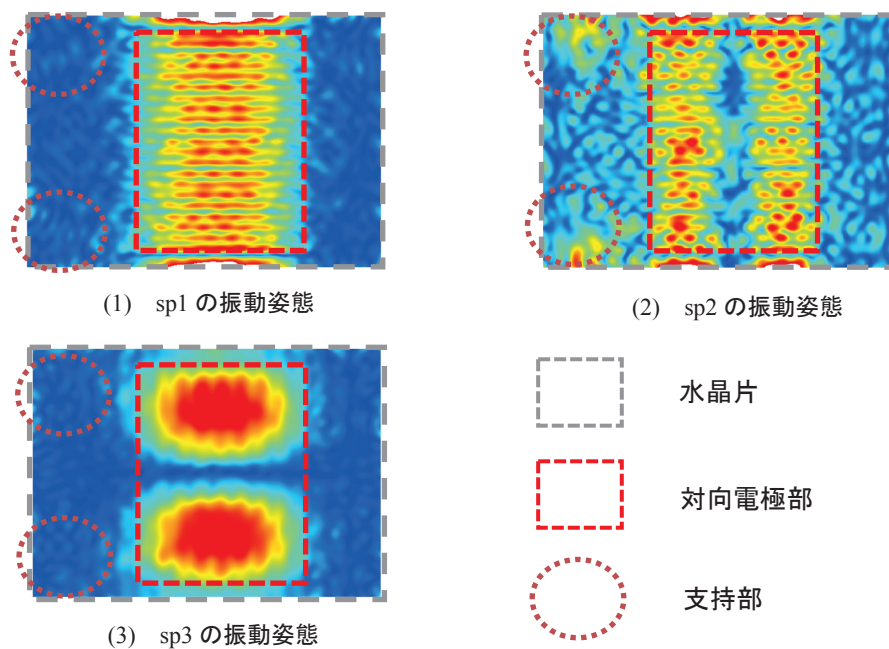


図7 シミュレーションによる変位図

### 3.3 実測値とシミュレーション結果の比較

#### 3.3.1 中規模解析によるシミュレーション結果

始めに社内 WS（ワークステーション）上で中規模（40 万自由度）の固有値解析を行い、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。水晶の弾性定数は 9) を用い、温度係数には 10) を用いた。図 7 に常温（25℃）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。sp2 では、レーザースペックル法による測定結果（図 6(2)）でもシミュレーション結果（図 7(2)）でも、電極内だけでなく支持部の変位が大きくなっていることが確認される。

これらのモードについて中規模（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 8）。この規模であれば、1 温度あたり数十分で計算できるため、温度範囲全体を 1 日程度で求められる。温度係数は、例えば sp1 では実測値 -67.3ppm/℃ に対し、解析値 -68.1ppm/℃ と -2ppm 程度の差である。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℃ 付近であるのに対して 250℃ 付近になってしまう。

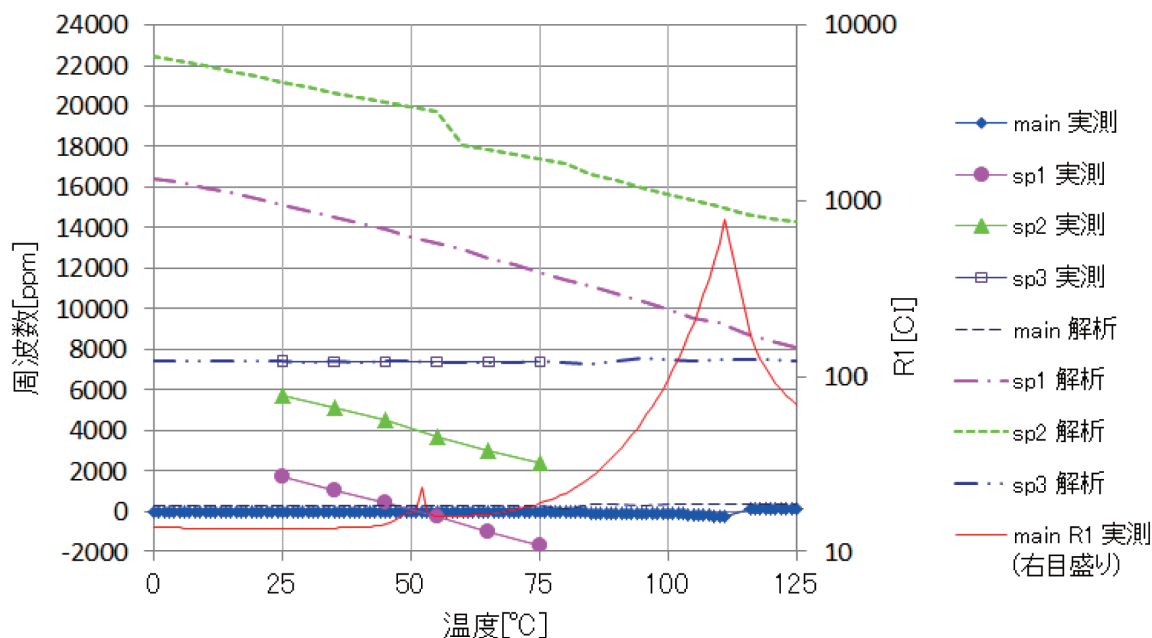


図 8 周波数温度特性の実測と FEM 解析結果

#### 3.3.2 大規模解析によるシミュレーション結果：常温での周波数

前節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。

- ・ 社内 WS による最大規模での解析（170 万自由度）
- ・ 大規模共有メモリ型計算サーバー UV2000 による解析（1500 万自由度）

但し、解析規模が大きくなると温度 1 点の計算時間でさえ超大になる為、常温（25℃）のみの解析とした。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、電極形状や支持部などのモデル細部表現の正確さによる結果の違いが顕在化し、その重要性を認識した。

図 9 に 3 つの異なる規模の解析で得られた周波数を実測周波数と共に示す。ただし、実測のメイン

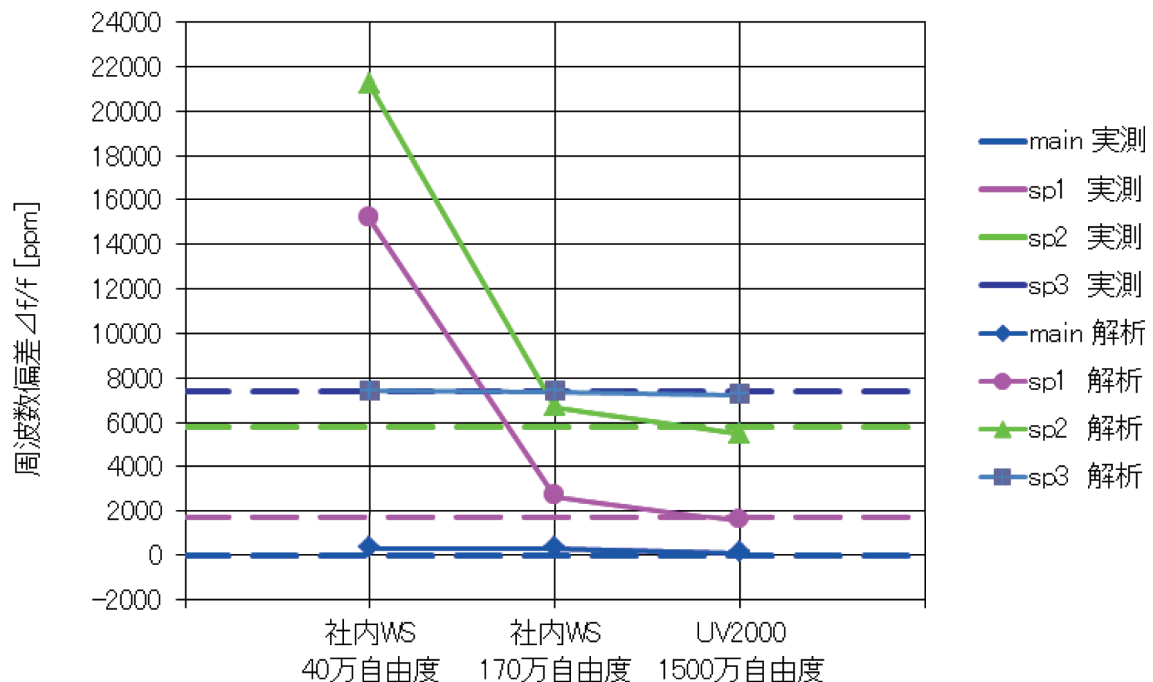


図9 異なる解析規模での周波数と実測周波数

表1 異なる規模での解析結果

| 条件             | 自由度<br>( $\times 10^4$ ) | メモリ<br>使用量<br>[GB] | 1℃あたりの<br>解析時間<br>[min] | 実測値との差 [ppm] |         |         |        |
|----------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|--------------|---------|---------|--------|
|                |                          |                    |                         | main         | sp1     | sp2     | sp3    |
| 社内WS(中規模)      | 40                       | 20                 | 12                      | 307.7        | 13426.4 | 15417.9 | -11.0  |
| 社内WS(最大規模)     | 170                      | 90                 | 75                      | 279.2        | 929.8   | 895.3   | -65.9  |
| 社外サーバー(UV2000) | 1500                     | 1000               | 3240                    | 103.7        | -181.0  | -306.1  | -180.9 |

モード周波数を基準としている。表1には、各規模の計算条件と、実測値と解析結果との差を示した。1500万自由度では、すべてのモードについて300ppm程度の差まで再現することができた。これは結合温度にすると4.5℃の精度にあたり、目標とする精度と同程度である。

### 3.3.3 大規模解析によるシミュレーション結果：温度特性

続いて、周波数及び等価直列抵抗R1の温度特性の再現を試みた。1500万自由度の解析規模であれば全てのモードにおいて十分な精度を得られることが分かったが、これを900万自由度まで規模を落とした場合、図3の結果を参考にすると、メインモードとスプリアスモードの相対周波数精度低下は100ppm以下であり、結合温度の精度低下にして1℃程度で済むことが予想される。実用的な計算時間において必要な計算精度を得ることを目的とし、やや規模を落とした900万自由度において温度をパラメータとして振った計算を実行した。結果を実測値と比較したものを図10に示す。周波数は25℃での値を基準としたときの各温度における偏差をプロットした。スプリアスの結合によって起こっている50℃付近に見られる急峻な変動、110℃付近に見られる巨大な変動の両者を5℃の精度で再現することができた。

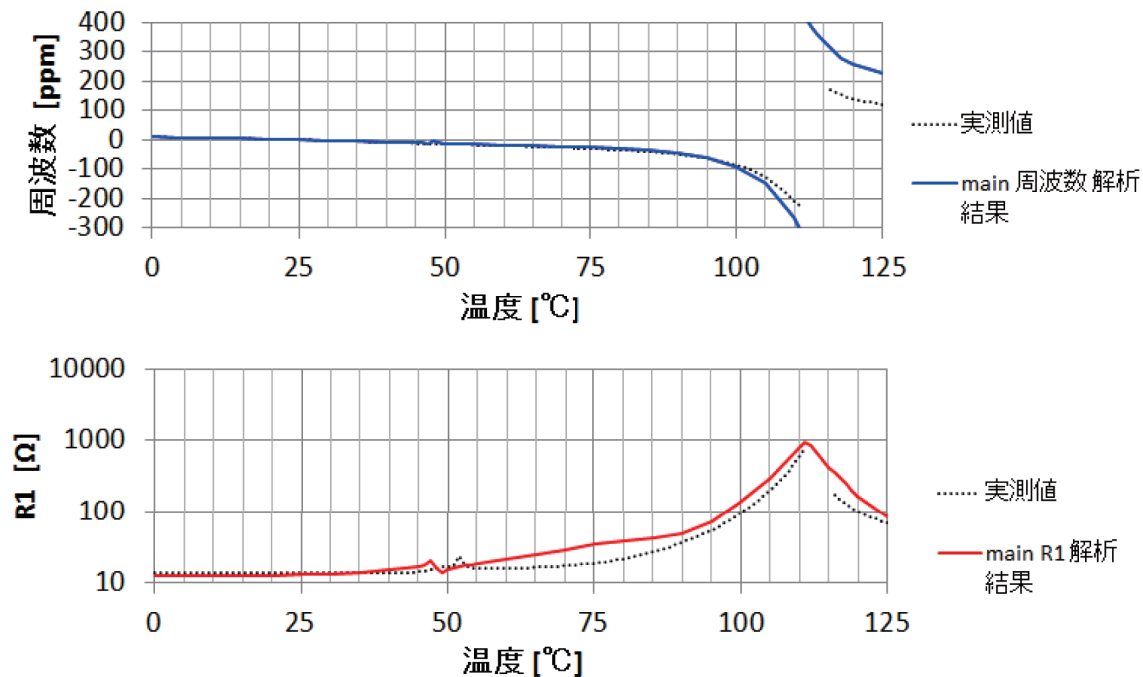


図 10 周波数及び等価直列抵抗 R1 の温度特性解析結果 (900 万自由度)

#### 4. まとめ

水晶振動子の有限要素法解析において、特定の AT カット振動子で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目標とする精度が得られることを常温 (25°C) のみで確認していたのに引き続き、温度をパラメータとして振り、温度特性全体の解析を行ったところ、実測で見られるスプリアスの結合する温度を 5°C の精度で再現することが出来た。このように、確度の高い水晶振動子のシミュレーションが可能であることを実証することで、試作による試行を大幅に減らした設計手法への道が開けた。

#### 謝辞

スプリアスモードの特定の為、レーザースペックル法による変位分布測定をしていただいた日本電波工業の小林 甫氏、測定設備の使用を快諾していただいた首都大学東京の渡部 泰明教授に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 青山 裕司, 大規模並列有限要素法による水晶振動子の解析, 第 30 回 EM シンポジウム予稿集, pp.9-12(2001 年)
- 2) 今井 勉, 田中 雅子, Yook-Kong Yong, 表面電荷を考慮した AT 振動子のスプリアス解析, 第 30 回 EM シンポジウム予稿集, pp.41-46(2001 年)
- 3) Yook-Kong Yong, Mihir S. Patel, Masako Tanaka Tutomu Imai, “The Impact of Finite Element Analysis on the Design of Quartz Resonators”, IEEE IFCS, pp.9-22, 2006.
- 4) 田中 雅子, 今井 勉, Mihir Patel, Yook-Kong Yong, 厚みすべり振動子の解析による Q 値算出, 第 36 回 EM シンポジウム予稿集, pp.37-42(2007 年)



- 5) Liu Yang, Zhiping Yu, “Modal Analysis of Practical Quartz Resonators Using Finite Element Method” , IEEE Trans. UFFC-57, No.2, pp.292-298 2010
- 6) Shin-Yung Pao, Qiao-Qiao Pan, “An Efficient AT-cut Quartz Crystal Resonator Design Tool for Activity Dip in Working Temperature Range” ,IEEE IFCS, 2011.
- 7) S.Y. Pao, M.K. Chao, C.H. Chiu, C.S. Lam, and P.Z. Chang, “Beveling AT-cut Quartz Resonator Design by an Efficient Numerical Method” ,IEEE IUS, 2005.
- 8) H. Kobayashi, K. Mochizuki, Y. Watanabe, “Measurement of vibration amplitude distribution of piezoelectric devices by speckle interferometry with pulsed laser” , IEEE IFCS, 2014.
- 9) J. Kushibiki, I. Takanaga, S. Nishiyama, “Accurate Measurements of the Acoustical Physical Constants of Synthetic  $\alpha$  -Quartz for SAW Devices” , IEEE Trans. UFFC-49, No.1, pp.125-135, 2002.
- 10) B. J. James, “A NEW MEASUREMENT OF THE BASIC ELATIC AND DIELECTRIC CONSTANTS OF QUARTZ” , Proc.1988 IEEE FCS, pp.146-154.