

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05283

研究課題名(和文)集積化のための微小試料のマイクロ波吸収の測定装置および計測法

研究課題名(英文)Microwave cavity and absorption measurement of minute specimen for system integration

研究代表者

加藤 初弘 (Kato, Hatsuhiro)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：00270174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の課題は、微小な試料でも測定できるマイクロ波吸収の測定装置とその試料の下限量を探ることであった。試料の周辺に形成される局在波を利用することが独自の発想で、これに適したマイクロ波吸収の解析方法も探る。

平面型および同軸導波路の共鳴装置により、比誘電率2程度で20マイクロリットル程度まで試料を抑えても安定した測定が可能なが分かった。さらに、弱形式理論を応用して、共鳴装置の金属壁における影響を取り込んだ基礎方程式およびこれを利用した材料特性の検出手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

平面回路によるマイクロ波の共鳴装置は集積回路の実装技術との親和性が高く、マイクロ波集積回路に材料測定技術を融合させ得る可能性がある。集積回路の加工技術やその実装技術を統合する必要があるものの、マイクロ波化学やバイオ分析などをコンパクトな装置で効率的に実施できる技術の進展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The subject of this study was to find a microwave absorption measuring device that can measure even a minute specimen and the lower limit of the specimen. Our original idea is to use the localised waves formed around the specimen, and to apply the weak-form theory for developing a suitable microwave absorption analysis method.

It was found that a reliable measurement is possible even if the amount of specimen is suppressed to about 20 microliters provided that a material with a specific permittivity of about 2 is filled in the cavity of the planar type and the coaxial type waveguides. Furthermore, by applying the weak form theory, we have developed a basic equation that reflects the influence of the resonance device on the metal wall and a method for detecting material properties using this equation.

研究分野：デバイス設計

キーワード：マイクロ波 物性測定 集積化 平面回路

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

半導体によるマイクロ波技術の集積化が進み単一チップで多くの機能が実現できるようになった。一方、化学分析やバイオ分析を基板上の流体回路を用いて制御する分野も実用化されている。これらの技術を応用すると材料のマイクロ波吸収特性などをカード状の装置すなわちマイクロ TAS で測定できる可能性があり、測定の効率化やコストの削減を行うことができる。

### 2. 研究の目的

本研究の課題は、マイクロ波の吸収測定を例として微量な試料でも測定できる装置とその試料の下限量を探ることにある。このとき、試料の周辺に形成される局在波を利用することが独自の発想で、これにより微量な試料でも効率的にマイクロ波を吸収させる。

同軸導波路や立体回路で形成された共鳴装置を平面回路化することで小型化を進めるとともに流体回路などとの統合も探る。また、微量な試料からのデータに含まれる弱いマイクロ波吸収の影響を解析し材料定数を決定できるデータ処理の方法も探る。

### 3. 研究の方法

研究グループでも動作確認の実績がある円筒型共振器と同軸導波路を用いた測定装置をそれぞれ再設計して、微量な試料に対応できしかも集積化にも適した形式を探る。

使用するマイクロ波の周波数は現有するネットワークアナライザで測定可能な 1~8GHz とする。このとき、試料室の形状や設置場所などを工夫することで、波長と比較して小さな局在波あるいは高調波を発生させ必要な試料の下限量をなるべく少なくする。

対象とする試料は、狭小な空間への充填が比較的容易である液体あるいは粉体とし、癌治療への応用が期待されているポリフィリン(粉末)の特性測定も目指す。

実験装置の加工は、化学処理の負担が少なく多様な形状を数値的に制御できることから、平板材料の切削により行う。検討する装置は実績がある 2 種類の装置を発展させたものである。一つは円筒型共振器でありこれを集積化に適した形式である平面型に再設計し、測定可能な試料の下限量を探る。さらに実績があるもう一つの同軸型導波路による装置も、狭窄部を利用して狭小な試料室を実現する。いずれも、資料室周辺に局在波あるいは高調波を発生することに特徴がある。

検討を予定しているいずれの装置も試料が微量なことから得られる信号が弱くなる傾向がある。このような弱い信号でも有効にデータを解析できる方法を探る。具体的には、局在波の数値解析法の研究で実績がある弱形式離散化の手法を応用して、共鳴装置内のエネルギー散逸を考慮できるデータの処理方法を開発する。

### 4. 研究成果

平面型および同軸型の共鳴装置により、比誘電率 2 程度なら 20 マイクロリットル程度まで試料を抑えても安定な測定が可能であることが分かった。さらに、共鳴装置の微量な試料によるマイクロ波散乱波で材料特性を検出するために、弱形式理論による定式化が有効であることが分かった。これらの概要は次のとおりである。

#### (平面型の共振器による検討)

円形平板をグランド面に対向させた共鳴装置で(図1)、資料室の大きさを変えて共鳴周波数の変化を調べた。試料の比誘電率が 2 以下なら共鳴周波数の変化量の安定した測定の限界が 0.02GHz 程度であり、その 1/10 の周波数まで許すなら 1 マイクロリットルの試料まで測定できることを確かめた(図2)。このほか、水-エチルアルコール混合液や TPP(ポリフィリン)粉末の特性も測定した。TPP は医療応用が期待される物質で、安定した測定ができた量は 39 マイクロ

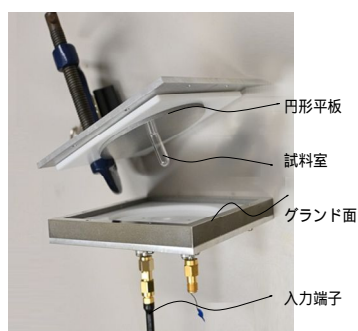


図1. 共鳴装置の内部構造  
測定時は 2 つの部分を接合。

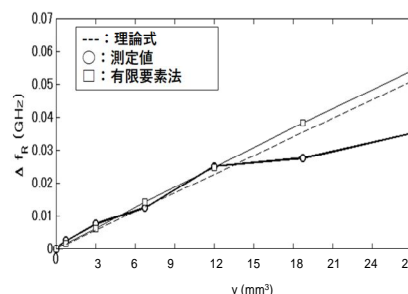


図2 試料体積と共鳴周波数の変移量  
試料室に空気が充填された場合。

リットルであった．得られた材料特性（分子分極率）の値は，既存の円筒型の装置に 1100 マイクロリットルの試料を充填して得た測定値と 7%の差異で一致した．

（同軸導波路共振器による検討）

SMA 規格の同軸導波路と同等な導波路に狭窄部分を設け，試料室および共鳴装置へのパワー供給端子として使用した（図 3）．試料室の体積は 21 マイクロリットルで，比誘電率が 2 程度の試料（シリコングリース）なら，試料の有無による共鳴周波数の変化量が約 0.3GHz と安定した測定が可能なことが確かめられた（図 4）．

（弱形式離散化を用いたデータ解析法の開発）

平面型および同軸型のそれぞれに対して，共鳴装置を囲む金属壁でのエネルギー散逸に由来した項を含む基礎方程式を導出した．この定式化の特徴は，弱形式理論で使用するテスト関数の任意性とシステム内の微小な領域における体積積分を利用することで，マクスウェル方程式の弱形式表現に境界条件を取り込んだことにある．従来型の手順では共鳴曲線から共鳴周波数と Q 値を抽出する摂動論的な公式を用いてデータ処理を行っていた．しかし，共鳴装置を小型化して試料の絶対量も少なくしたことから，従来の手法の適用が困難なことが問題であった．本研究の解析法はこの問題を解決するもので，局在波を含む波動現象を数値計算するための境界条件の研究にも発展した．

エネルギー散逸があることから試料の絶対量が少なくなると共鳴曲線の幅が相対的に広がる傾向がある．この場合でも，共鳴曲線全体で測定値と理論値が一致するように材料定数を決定する最急降下法の手順を開発した．

さらに，散乱行列の理論表現に非可換代数を応用することで，散乱行列を導波路の空間変化に関する相関関数で表現した．これにより，有限要素法など従来の手段では得られない知見が可能となり新しい設計手法を切り開く端緒が得られた．

ここ 2 年に及び大学内外でコロナ対策を優先する必要性があったことなどをはじめいくつかの不可抗力が重なり，上述の成果のすべてを学術誌で公開できてはいない．しかし，現在 3 篇の論文を作成中であるので，査読などの出版手順を整えてこれらを順次出版する．

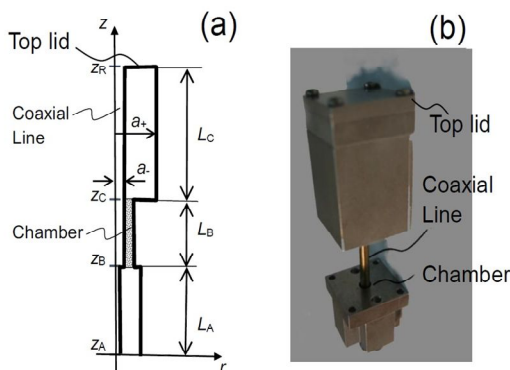


図 3．共鳴装置の内部構造  
(a) 円筒座標での形状，(b) 分離した外観．測定時は 2 つの部分を接合．

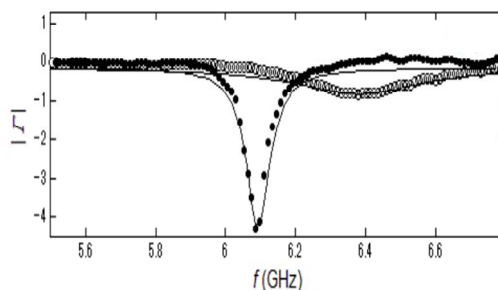


図 4．共鳴曲線．○は試料室が空，●は試料（シリコングリース）を充填．実線は理弱形式理論による理論曲線．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kato Hatsuhiro, Kato Hatsuyoshi	4. 巻 89
2. 論文標題 Proposal of Effective Near-Field Wrap Boundary Condition under Coexistence of Radiation and Damping Components	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124004 ~ 124004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.124004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kato Hatsuhiro, Kato Hatsuyoshi	4. 巻 89
2. 論文標題 Fano Resonance of an Elastic Waveguide with an Island Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024402 ~ 024402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.024402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 加藤初弘, 石田健太, 小川和也
2. 発表標題 平面キャビティによる微小試料の物性計測
3. 学会等名 電子情報通信学会 2020年エレクトロニクスソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤初弘
2. 発表標題 重調和波動方程式の散乱問題における円形孔 “ の隠れ衰 ” 効果
3. 学会等名 第48回数値解析シンポジウムプロシーディングス
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 境界条件設定プログラム及び境界条件設定方法、並びに、これらを用いた 物理量分布解析プログラム、物理量分布解析方法及び物理量分布解析装置	発明者 加藤 初弘	権利者 国立大学法人山梨大学
産業財産権の種類、番号 特許、2020-012718	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Reserch Subject and Published Articles <a href="http://www.szr.yamanashi.ac.jp/lab/kato/Okura/index.htm">http://www.szr.yamanashi.ac.jp/lab/kato/Okura/index.htm</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小川 和也  (Ogawa Kazuya)  (50335486)	山梨大学・大学院総合研究部・准教授   (13501)	
研究分担者	加藤 初儀  (Kato Hatsuyoshi)  (80224525)	苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・教授   (50102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------