

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04526

研究課題名（和文）未踏周波数帯における電気インピーダンス量の計測基準の開発

研究課題名（英文）Development of measurement standards for electrical impedance in unexplored frequency bands

研究代表者

堂前 篤志（DOMAE, Atsushi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：20357552

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）：研究代表者は測定基準が存在しない周波数帯（未踏周波数帯）における電気インピーダンス量の計測技術の確立を目指して研究を進めている。本研究ではそのキーデバイスとなる、MHzからSub-6周波数帯に対応した電気インピーダンス量の基準を与える高周波インピーダンス基準器（RF Impedance Standard: RFIS）を設計・製作した。製作したRFISの電気特性を精密に評価し、その結果から40 MHzから18 GHzの周波数帯におけるインダクタンス基準値、および不確かさを推定した。また、本課題独自の手法により、推定したインダクタンス値の妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キャパシタ、インダクタ、抵抗器といったチップ部品（表面実装用デバイス）を使用する周波数が近年著しく高周波化しているが、5G無線通信でのSub-6周波数帯において「測定の基準」がないため正確な測定ができないことが大きな問題になっている。応募者は、測定基準が存在しない周波数帯における電気インピーダンス量（インダクタンスなど）計測技術の研究を進めており、本研究ではその核となる、「MHzからSub-6周波数帯に対応した電気インピーダンス量の基準を与える基準器の開発」を行った。本研究の成果はSub-6周波数帯における表面実装用デバイスの正確な評価を可能にし、5G無線通信の研究開発に大きく貢献する。

研究成果の概要（英文）：The project leader is conducting research to establish a measurement technique for electrical impedance in frequency range for which no measurement standards exist (unexplored frequency bands). In this study, The project leader designed and fabricated a radio frequency impedance standard (RF Impedance Standard: RFIS), which is a key device to provide a reference values for electrical impedance in the MHz to Sub-6 frequency range. The electrical characteristics of the fabricated RFIS were precisely evaluated, and the inductance reference values and uncertainties in the frequency range of 40 MHz to 18 GHz were estimated from the results. The validity of the estimated inductance values was confirmed using our original method.

研究分野：計測工学

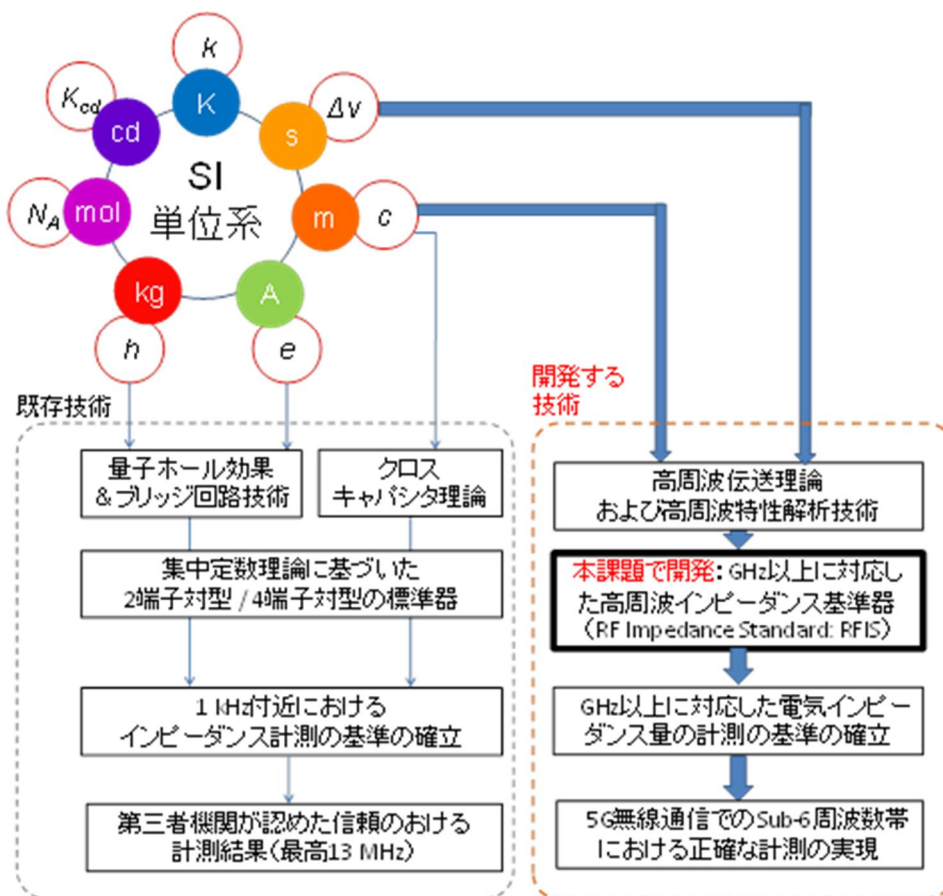
キーワード：電気インピーダンス インダクタンス 高周波 不確かさ

## 1. 研究開始当初の背景

正確な計測は「SI 単位系を基準に物理量を導出する」ことで実現されており(図1)、基本的な物理量は SI 単位系を基準に導出されている。しかしながら、本研究で着目する電気インピーダンス量のうちキャパシタンスでは、「クロスキャパシタ理論」および「量子ホール効果を基準とした手法」の2つの手法により SI 単位に基づいた導出がなされているが、SI 単位系を基準に導出されるキャパシタンスの周波数は kHz 付近の低周波に限定されている(図1の既存技術)。この制限は「標準器が集中定数理論に基づいた構造であること」「ブリッジ回路で使用する高透磁率磁性材料の特性が高周波数帯で著しく低下すること」等に起因している。抵抗とインダクタンスの導出も、キャパシタと同様の要因で kHz 付近の低周波に限定されている。

電気インピーダンス量の基準が kHz 付近に制限されているため、GHz 以上の測定へ基準を拡張して利用するのは極めて困難である。「GHz 帯まで測定可能」と標榜している市販計測器が存在するが、国際規格 ISO/IEC17025 に基づき公的認定機関が認めた信頼のおける精度評価は 13 MHz までである。

このような背景から、応募者は未踏周波数帯、特に 5G 無線通信での Sub-6 周波数帯における電気インピーダンス量の計測技術の確立を目標に研究を進めている。



【図1】 Sub-6周波数帯に対応したインピーダンス計測の実現

## 2. 研究の目的

本研究では、Sub-6 周波数帯における電気インピーダンス量の計測技術確立のキーデバイスとなる、「MHz から Sub-6 周波数帯に対応した電気インピーダンス量の基準を与える高周波インピーダンス基準器 (RF Impedance Standard: RFIS) の開発」を行う。

RFIS は MHz から Sub-6 周波数帯に対応した電気インピーダンス値の基準値導出に特化した同軸線路である。本研究では、まず RFIS の設計・製作を行う。そして、製作した RFIS の特性評価を行い、その結果から電気インピーダンス量の基準値を推定する。また、推定した基準値の精度(不確かさ)を国際標準化機構 (ISO) のガイドに基づいて詳細に評価する。ISO ガイドに基づいた不確かさ評価を行うことにより、RFIS を基準とした電気インピーダンス量の計測結果が国内の公的認定機関や国際的にも受け入れられるようにする。

### 3. 研究の方法

研究代表者はこれまで、高周波伝送理論に基づいて製作された同軸線路に着目し、同軸線路を Sub-6 周波数帯に対応した GHz 以上の電気インピーダンス量の新たな基準として利用できないか検討を重ねてきた。同軸線路は、その単位長さ当たりのインダクタンス、キャパシタンスの推定値を高周波伝送理論から求めることが可能である。しかしながら、実際は推定値と実測値にズレが生じてしまい、このズレが同軸線路を測定の基準として用いる最大の障害となる。研究代表者はこのズレの原因および補正手法の検討を行い、その検討の結果および市販の同軸線路を利用したインダクタンス推定の予備実験から、同軸線路を測定の基準として用いるためには以下の課題を解決する必要があることを洗い出した。

- ・課題 1. 市販同軸線路ではインダクタンスの公称値が基準として適切な値でない(基準として利用するには 10 nH など 10 のべき乗の値が適切)。
- ・課題 2. 市販同軸線路では 50 MHz から 10 GHz にてインダクタンスの理論値からのズレが周波数によって変化する(周波数依存あり)。
- ・課題 3. 上記 2 の周波数依存に起因し基準値推定の精度が悪くなる(不確かさが大きい)。

課題 2 と 3 に関係する周波数依存の主要因は、応募者が構築した市販同軸線路の解析モデルから「同軸線路の損失成分」および「表面処理(メッキとその下処理の状態)」であることを明らかにしている。そして、上記 3 つの課題は、電気インピーダンス値の基準値導出に特化した同軸線路(RFIS)を製作することで、以下のように解決へ導くことができる。

- ・解決法 1. RSIF の寸法の最適化により基準値を 10 のべき乗の値に合わせ込み可能。
- ・解決法 2. 厳選された材料で RSIF を製作することにより、損失成分を小さく抑え、メッキ処理を不要にし、基準値の周波数依存を抑制。
- ・解決法 3. 上記 2 で周波数依存を抑えることに伴い、精度も改善可能。

上記の解決法 1~3 を実現するため、本研究では、まず、これまでに行ってきた予備実験で得られたデータを基に、インダクタンス基準値設定に最適な RFIS の設計を行い、製作を行う。寸法の最適化によりインダクタンス基準値を 10 nF に合わせ込む。そして、完成した RFIS の寸法を、非接触式レーザーマイクロメーターなどの高精度測定器群を用いて評価し、この寸法評価結果を用いて「寸法から決まるインダクタンス値」を推定する。この際、寸法計測の不確かさの値を基にして「寸法から決まるインダクタンス値」の不確かさを推定する。また、RFIS の電気特性評価の結果と解析モデルと組み合わせ「インダクタンス値の周波数特性」の推定を行い、周波数特性推定の不確かさ評価も行う。「寸法から決まるインダクタンス値」と「インダクタンス値の周波数特性」の結果を組み合わせ、インダクタンス基準値および不確かさを推定する。上述の不確かさ推定は、すべて ISO ガイドに基づいて行う。

### 4. 研究成果

#### (1) RFIS の設計・製作

図 2(i)に本研究で製作する RFIS の構造を示す。図 2(i)において、RFIS の各部のサイズを、内部導体の外径:  $a$ 、外部導体の内径:  $b$ 、長さ:  $l$ 、で表す。RFIS は同軸構造の伝送線路であり、内部導体を外部導体の中心軸上に配置した構造をとる。RFIS の両端には計測器などへ接続するためのコネクタを設置する。内部導体と外部導体の間は空気で絶縁する。

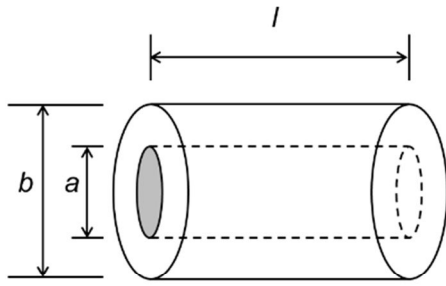
RFIS の特性インピーダンス( $Z_0$ )は式(4-1)で与えられ、 $\mu$  は透磁率、 $\epsilon$  は誘電率を表す。高周波において RFIS の電気特性評価を行うには、 $Z_0$  を評価装置の特性インピーダンス(50  $\Omega$ )に合わせる必要がある。

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4-1)$$

また、RFIS の寸法から決まるインダクタンスは式(4-2)で与えられる。

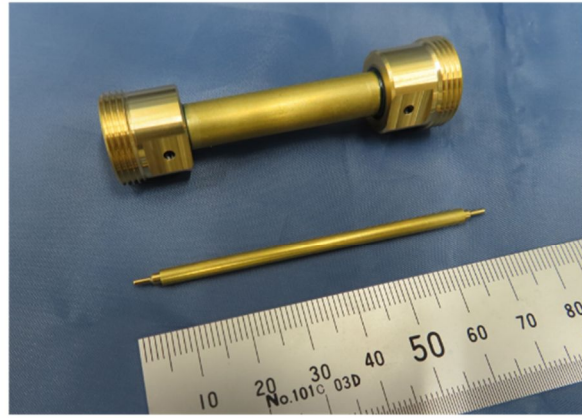
$$L_D = \left\{ \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right\} \times l \quad (4-2)$$

本研究では特性インピーダンス: 50  $\Omega$ 、寸法から決まるインダクタンス: 10 nH、の条件で RFIS を設計した。RFIS の製作に際しては、加工性、電気特性、温度特性などの幅広い観点から材料選定を進めた。選定の結果、非磁性であり、切削加工がしやすく、電気伝導性および熱伝導性に優れる利点を有する黄銅を金属材料として選定した。図 2(ii)に黄銅を用いて製作した RFIS の写真を示す。RFIS の両端に設置したコネクタは、高周波計測で広く用いられている PC-7 である。



各部のサイズ

- ・内部導体の外径:  $a$
- ・外部導体の内径:  $b$
- ・長さ:  $l$



(i) RFISの構造

(ii) 製作したRFIS

図2 高周波インピーダンス基準器: RFIS

(2) RFIS の寸法評価

製作した RFIS の内部導体の外径  $a$ 、外部導体の内径  $b$ 、長さ  $l$  を、長さの国家計量標準を基準に測定した。寸法測定のトレーサビリティは図3に示す通りである。

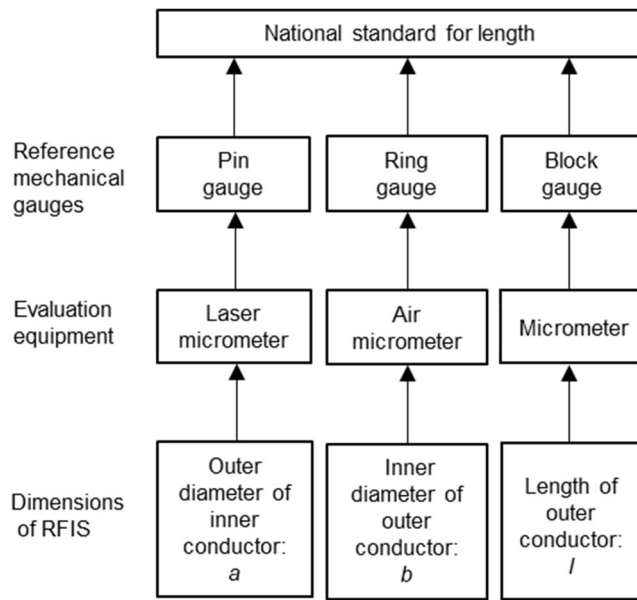


図3 寸法測定のトレーサビリティ

RFIS の内部導体の外径  $a$  は、レーザー光で部品上を走査する際にできる影を利用して、部品の寸法を非接触で測定可能なレーザーマイクロメーターを用いて測定した。レーザーマイクロメーターの長さの国家計量標準へのトレーサビリティは、ピンゲージを用いて確認した。

RFIS の外部導体の内径  $b$  は、プローブ先端のノズルから放出される空気の流量を測定して内径の寸法へ換算するエアマイクロメーターを用いて測定した。エアマイクロメーターの長さの国家計量標準へのトレーサビリティは、リングゲージを用いて確認した。

RFIS の外部導体の長さ  $l$  は、マイクロメーターで測定した。マイクロメーターの長さの国家計量標準へのトレーサビリティは、ブロックゲージで確認した。マイクロメーターを用いた長さ測定は10回繰り返して行い、結果はその平均値とした。

上述の寸法測定の結果を用いて式(4-2)から求めた「寸法によって決まるインダクタンス」は10.000 nHとなった。また、この値の不確かさ評価をISOガイドに従って実施した。その結果、「寸法によって決まるインダクタンス」の信頼区間95%の不確かさ(拡張不確かさ)は、0.028 nHと推定された。

### (3) インダクタンス基準値の推定

ベクトルネットワークアナライザを用いた伝送線路特性評価結果を解析モデルに組み入れ、RFISのインダクタンス値の周波数特性を推定した。周波数特性の推定範囲は、40 MHz から 18 GHz とした。40 MHz は伝送線路特性評価に使用したベクトルネットワークアナライザの下限周波数、18 GHz は RFIS で使用した PC-7 コネクタの上限周波数である。

(2)に記述した「寸法から決まるインダクタンス値」の結果と、上述の「インダクタンス値の周波数特性」の結果を組み合わせ求めて、「RFISのインダクタンス基準値の推定結果」を図4に示す。図4において、例えば周波数 1 GHz において、インダクタンス値は 10.032 nH、その拡張不確かさは 0.030 nH と推定された。

マイクロメータを用いた RFIS の長さ測定結果（機械長）と信号の遅延特性から求めた長さ（電気長）を比較する本研究独自の妥当性確認手法により、推定したインダクタンス値の妥当性確認を行った。その結果、周波数 40 MHz から 18 GHz の範囲において、機械長と電気長は不確かさの範囲内で一致し、推定したインダクタンス値の妥当性が確認できた。

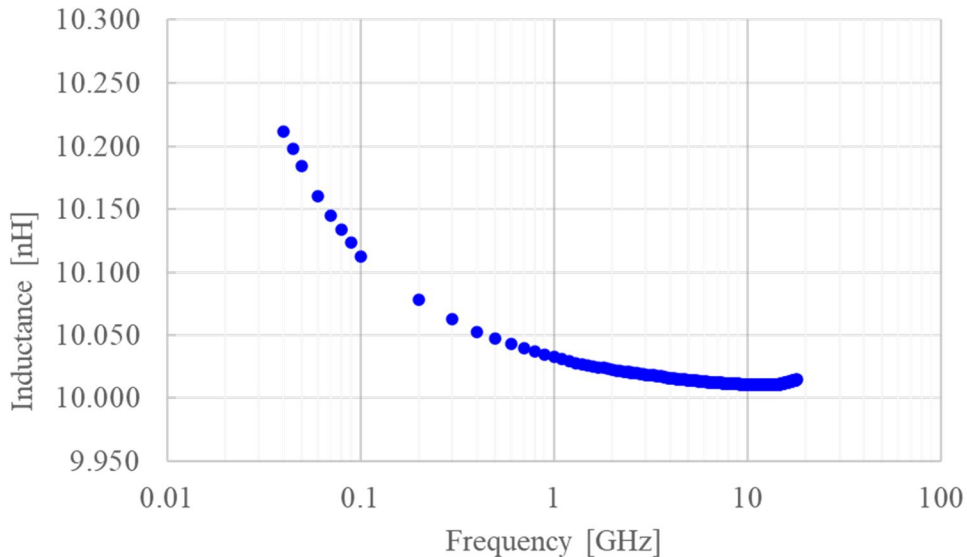


図4 RFISのインダクタンス基準値の推定結果

### (4) 研究成果のまとめ

研究の初年度から最終年度までで得られた一連の成果により、「RFISの設計・製作を行い、推定したRFISの基準値の精度（不確かさ）をISOガイドに基づいて詳細に評価する」という本研究の目標を達成した。

本研究の成果より、未踏周波数帯におけるインピーダンス計測の基準の確立が可能となり、例えば移動通信システムの研究開発および機器評価、表面実装用デバイス製品評価などにて正確な評価が可能となる。特に日本が大きなシェアを維持する表面実装用デバイスの分野では、Sub-6周波数帯での正確な製品評価の実現が喫緊の課題となっている。また、第5世代移動通信システム（5G）の展開や6Gの研究開発などにおいて、電気インピーダンス量の測定周波数は著しく高周波化している。GHz以上に対応した新たな基準や計測手法を開発できなければ電気インピーダンス量の正確な評価は不可能であり、5Gの展開や6Gの研究開発の進捗にも影響が大きい。このように、本研究の成果は電気インピーダンス量の計測の喫緊および将来に向けた課題を解決に導くものであり、科学・産業の基盤である精密電気インピーダンス量計測技術の高度化につながるものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Atsushi Domae	4. 巻 2022
2. 論文標題 Development of Coaxial-Type Inductance Standard for Megahertz-To-Gigahertz Frequency Range	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Microwave Conference proceedings	6. 最初と最後の頁 417-419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34385/proc.73.TH3-F4-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 堂前 篤志	4. 巻 2022
2. 論文標題 インピーダンス計測の高周波化に向けた計測基準の開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 令和4年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会 講演集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Atsushi Domae
2. 発表標題 Development of Coaxial-Type Inductance Standard for Megahertz-To-Gigahertz Frequency Range
3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堂前 篤志
2. 発表標題 インピーダンス計測の高周波化に向けた計測基準の開発
3. 学会等名 令和4年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堂前 篤志
2. 発表標題 情報通信技術の進化に対応した電気インピーダンス測定技術の開発
3. 学会等名 2021年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------