

# 小型・高精度・非侵襲型誘電率測定技術 および血糖値センサへの応用

法政大学 理工学部 電気電子工学科  
教授 安田 彰

令和6年7月4日

# 背景

糖尿病の患者は年々増加 全世界で約5億人以上に達する  
糖尿病の患者は、毎日複数回の血糖値測定が必要



採血型の血糖値測定器は採血時の苦痛や、また感染症の恐れも生じる



採血不要の非侵襲型血糖値センサー実現が急務



小型・高精度・非侵襲型誘電率測定技術



高周波信号を用いた小型の高感度血糖値センサを提案  
スマートウォッチなどに内蔵可能

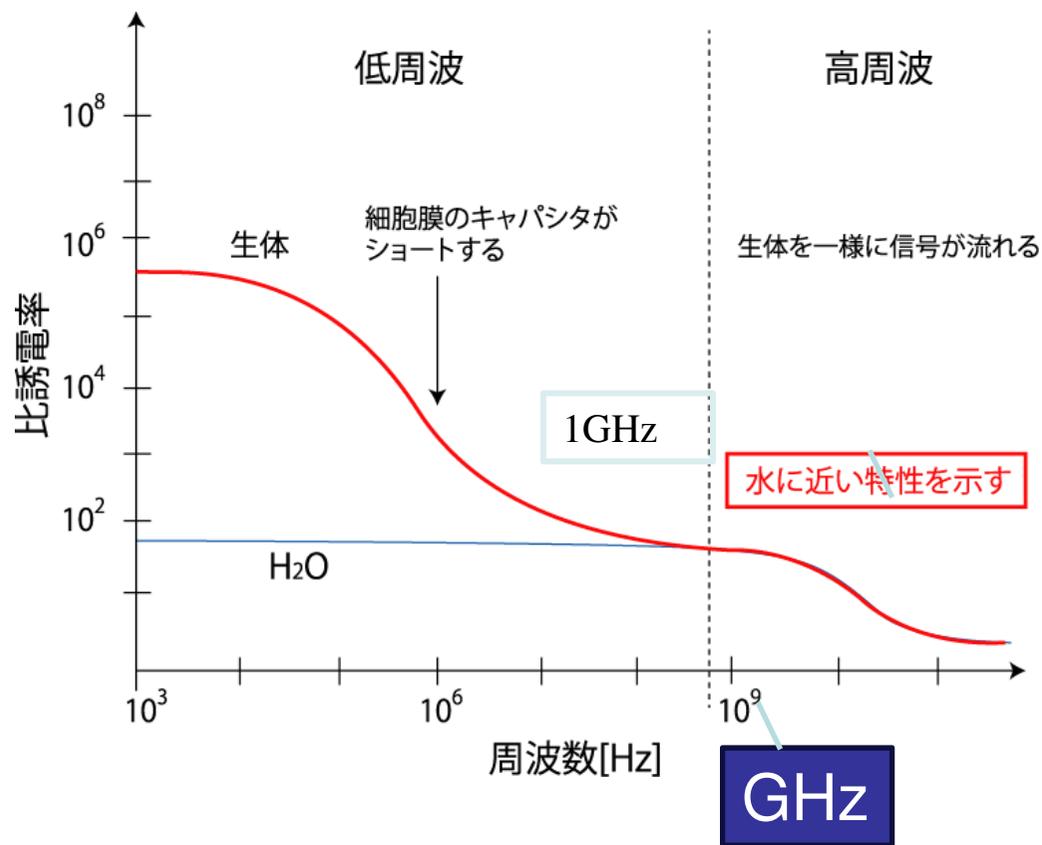


## 従来の非侵襲血糖値センサと問題点

- 赤外光の吸収スペクトルを測定する方法
- 唾液を用いる方法
- 誘電率測定を行う方法
  - ⇒いずれも血糖値濃度測定之感度が低く、不純物の影響を受ける等の問題があった。
- 近赤外光(0.78 $\mu$ ~3 $\mu$ m)を用いた方法
- 高輝度中赤外光レーザーを用いる方法
- 光音響を使う方法
  - ⇒測定感度は従来法に比べれば改善されたが、いまだ実用化されていない。

# 提案手法の技術背景 (気づき)

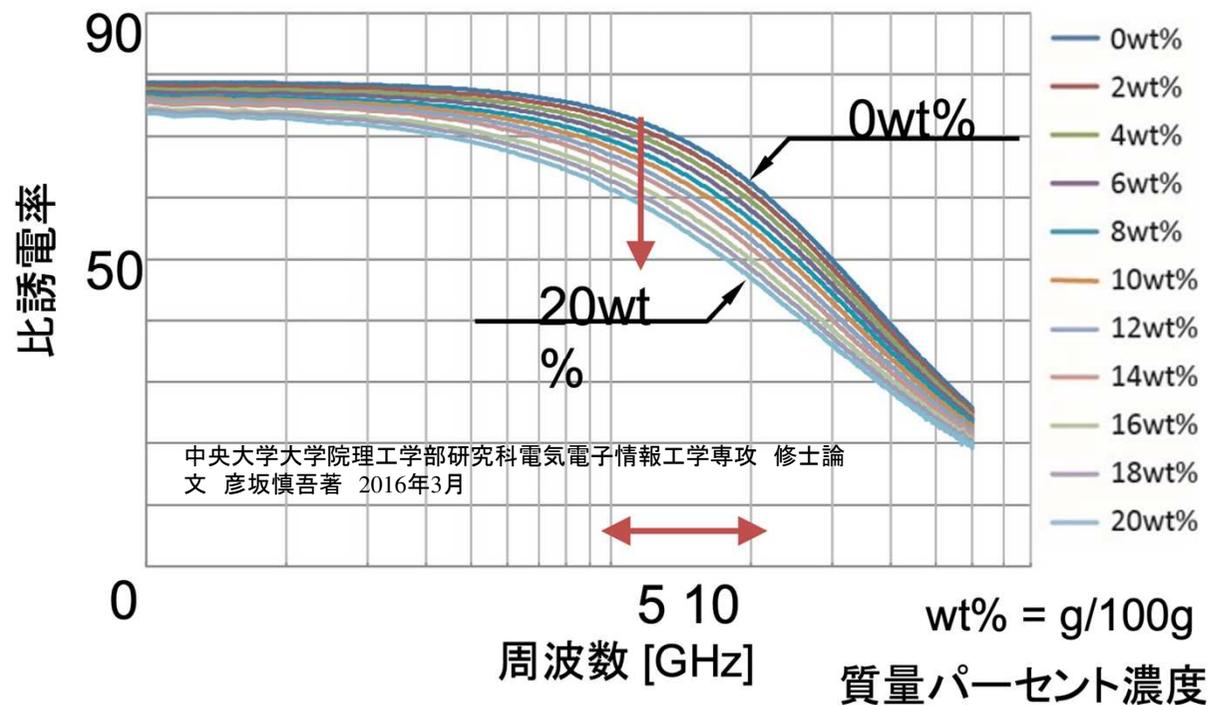
- 人体の比誘電率の周波数特性



人体(血液など)の比誘電率はGHz帯で、ほぼ水と等しくなる

高周波では誘電率が下がり、グルコース濃度の変化が見えやすい

## 提案手法の技術背景（気づき）



グルコース水溶液の濃度が高いほど、誘電率が減少

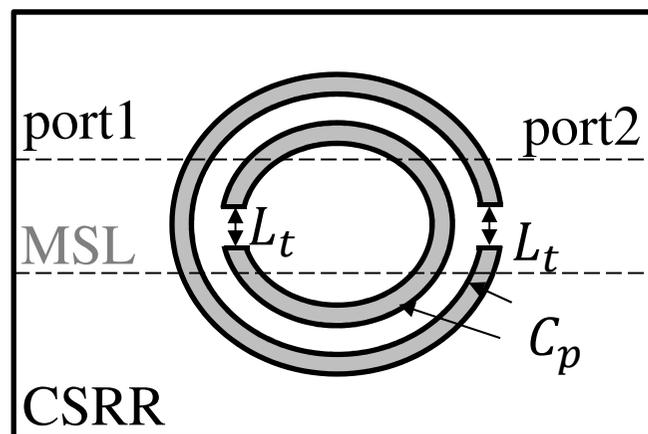
5～10GHz前後が、最もグルコース水溶液の濃度による誘電率の変化が大きい

GHz帯で測定による高精度測定の可能性大

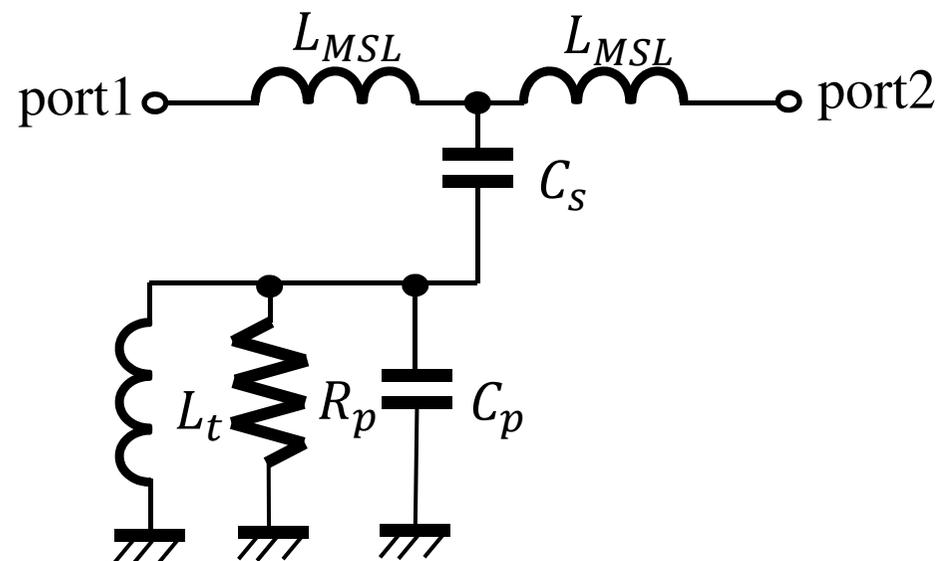
# GHz帯での誘電率測定 先行研究

## 相補型スプリットリング共振器 (CSRR)

誘電率の変化を共振周波数の変化で検出



等価  
回路



MSL: マイクロストリップライン

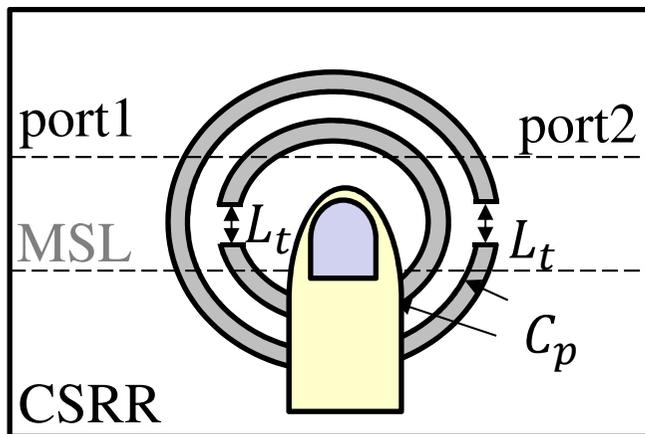
$C_s$ : キャパシタ(センサー-MSL間)

$R_p$ : センサ内の抵抗

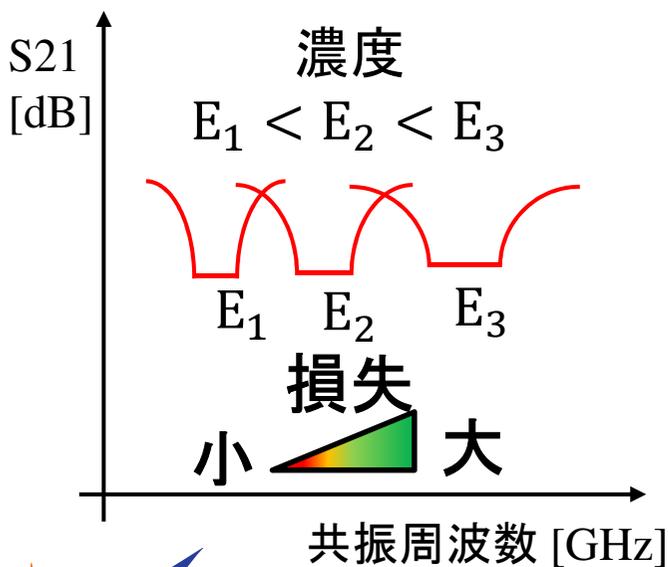
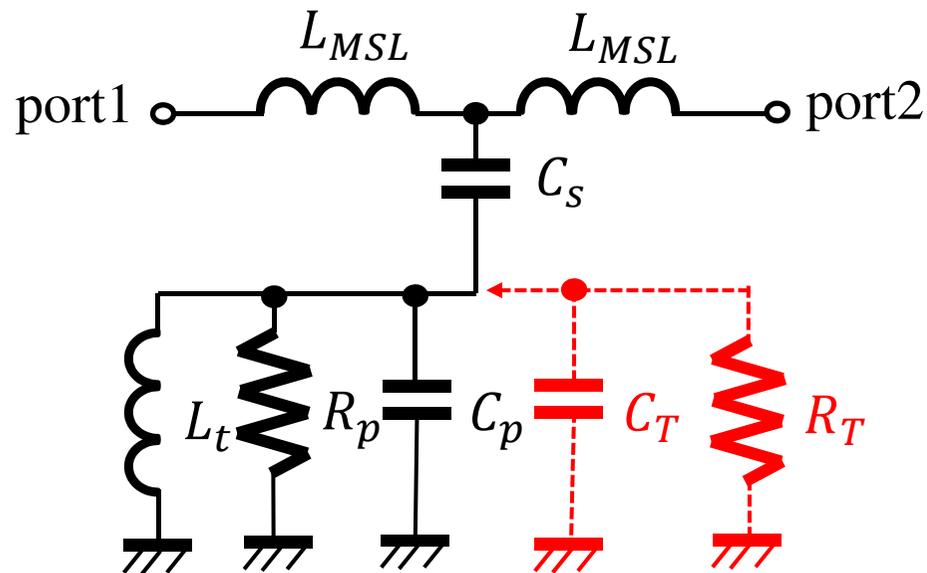
$f_{dip}$ : 共振周波数

$$f_{dip} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_t (C_p + C_s)}}$$

# 先行研究の問題点



等価回路  
→



問題点  
センサの抵抗 $R_p$ , 測定対象の抵抗 $R_T$

共振特性のQが低下

共振周波数の検出精度低下

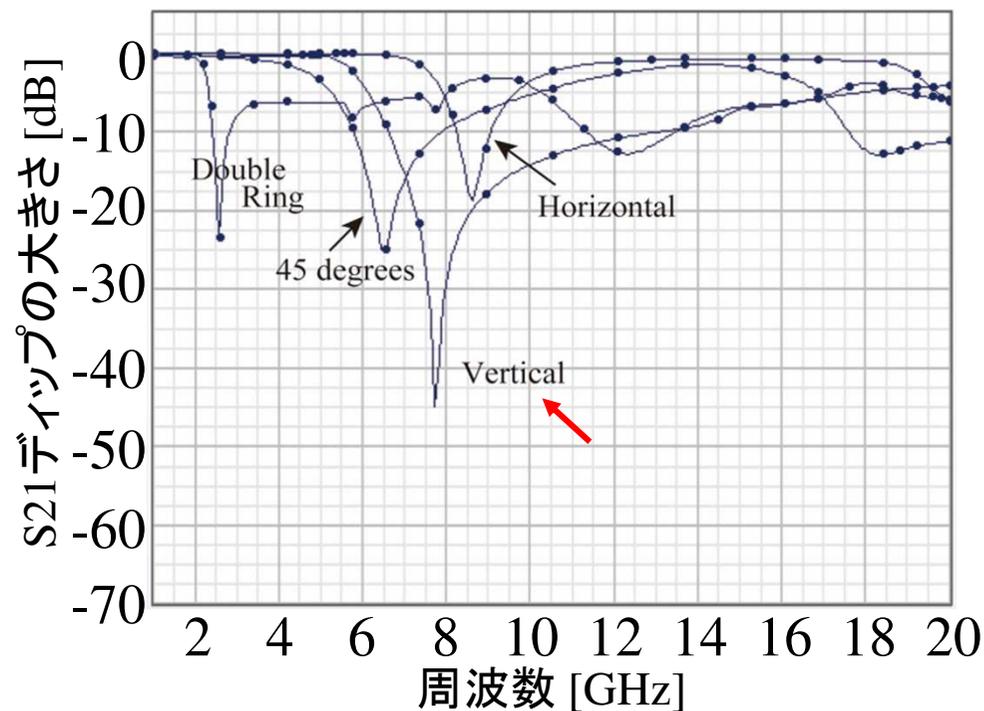
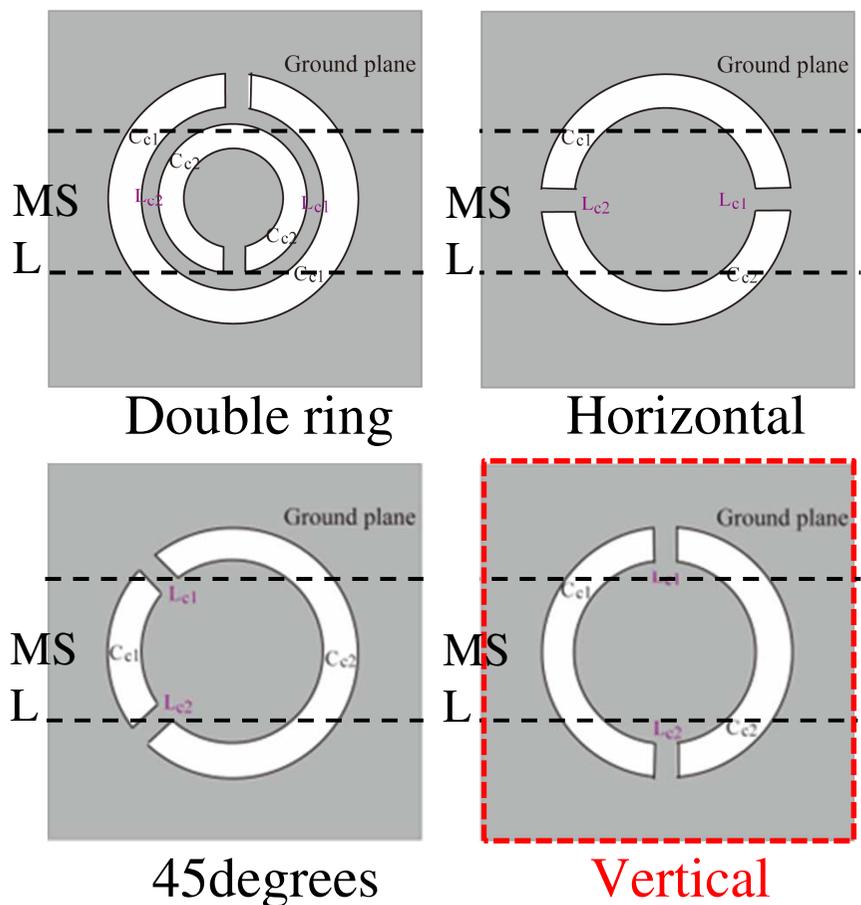
自由を生き抜く実践知

## 提案手法

- 新センサ構造の提案
  - センサ感度の向上
  - センサ部損失の低減
- トランジスタを用いた動的補償回路
  - 測定物およびセンサ部の損失を補償
- 共振特性を改善し，測定を容易化
  - 高精度化，小型化，低コスト化
- 非侵襲，高感度(10 ppm)，小型薄型，低コスト

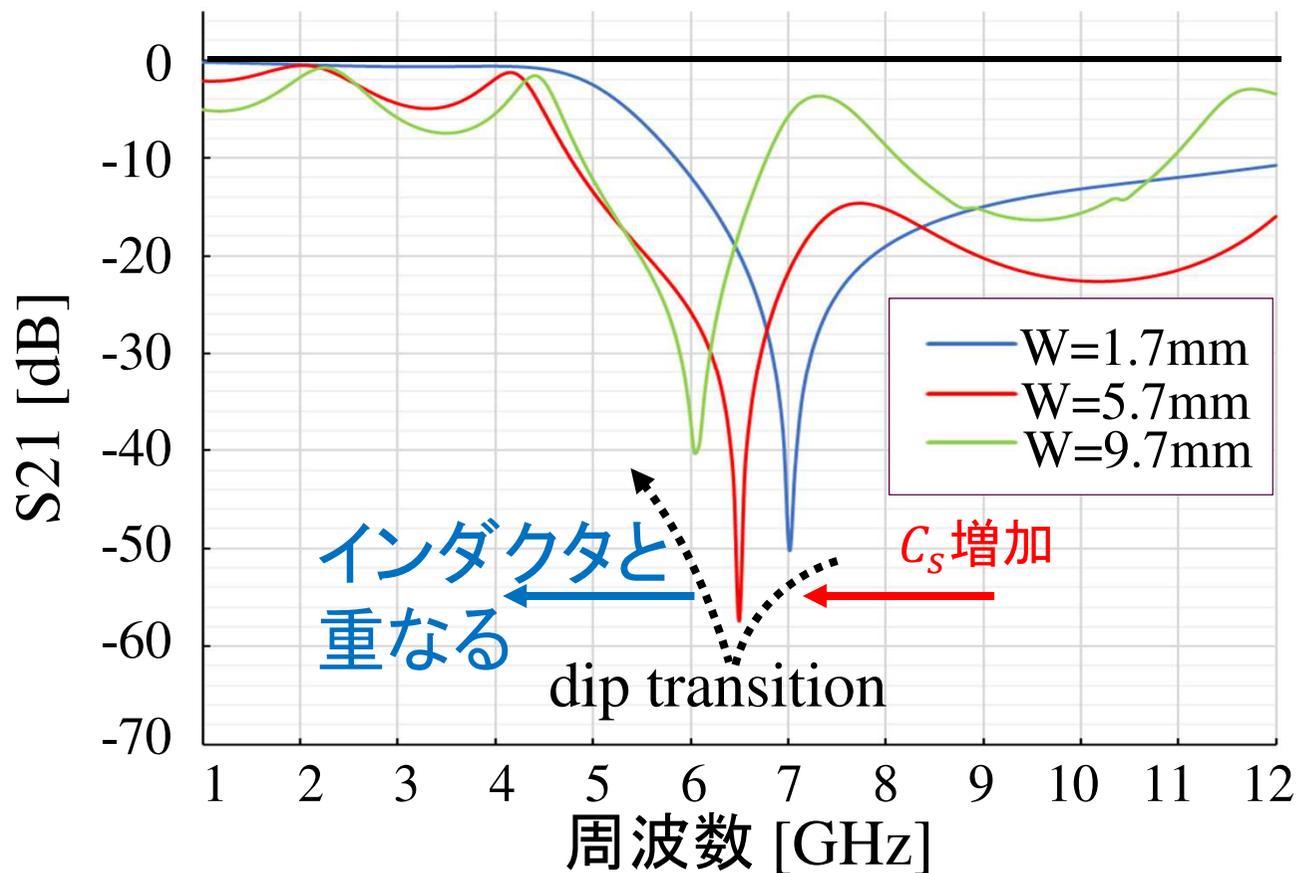
# 新センサ構造1

## インダクタの位置の検討



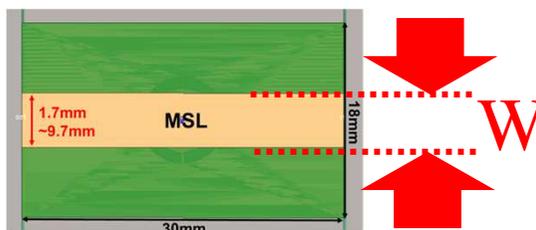
- ・インダクタとMSLの重畳：  
損失増大 Q値減少
- ・Verticalパターン：深いディップ Q値大

# 新センサ構造2

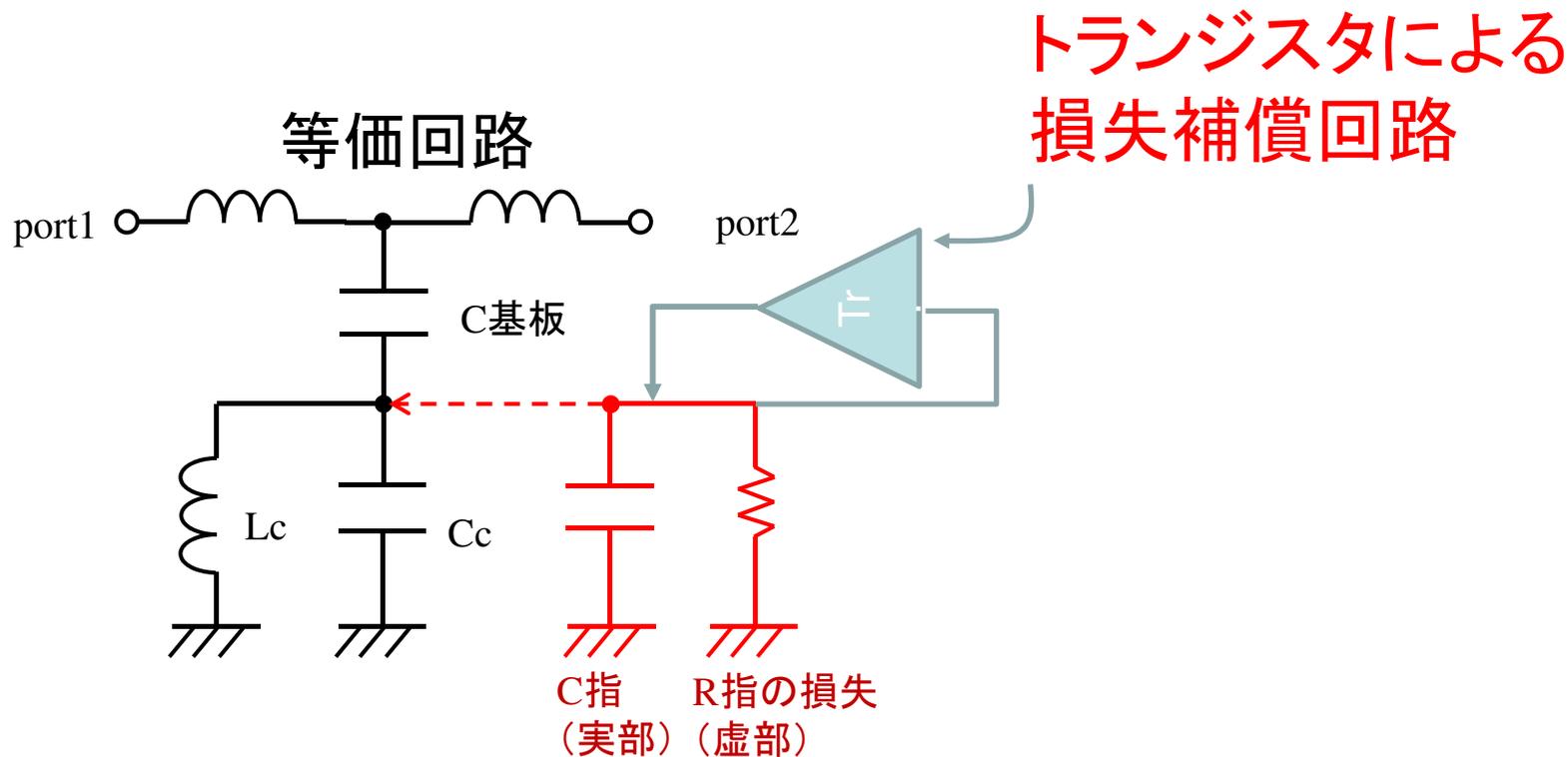


$$Q = R_c \sqrt{\frac{C_s + C_c}{L_c}} \times \left( \frac{C_s}{C_s + C_c} \right)$$

$C_s$  増加でQ増大  
インダクタとMSL重畳  
→損失増大 Q値減少

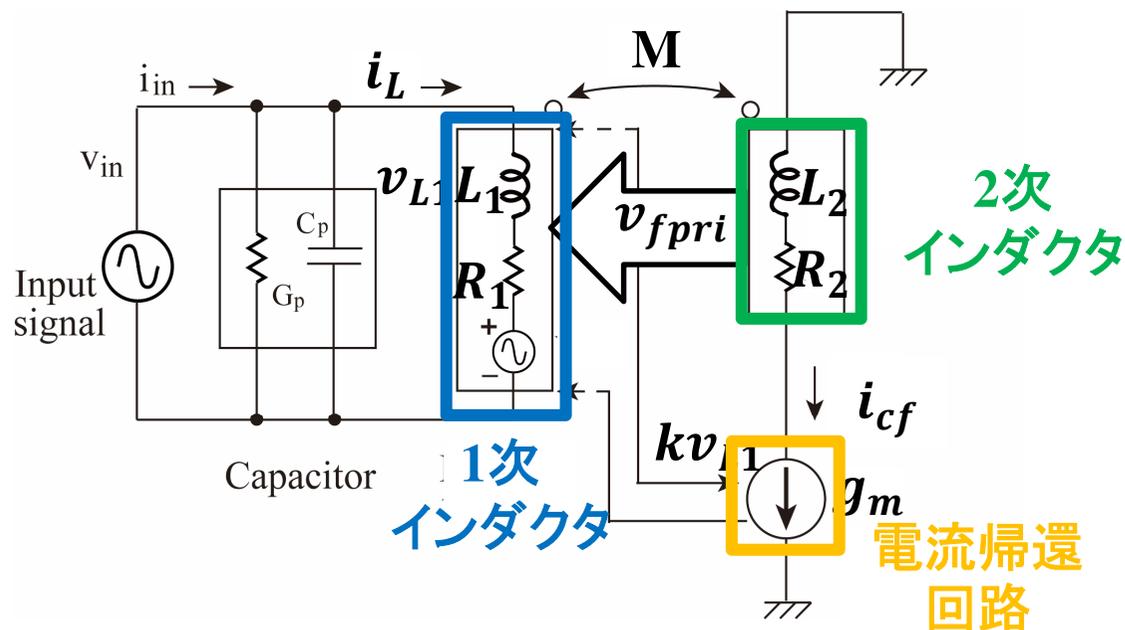


# トランジスタを用いた動的補償回路



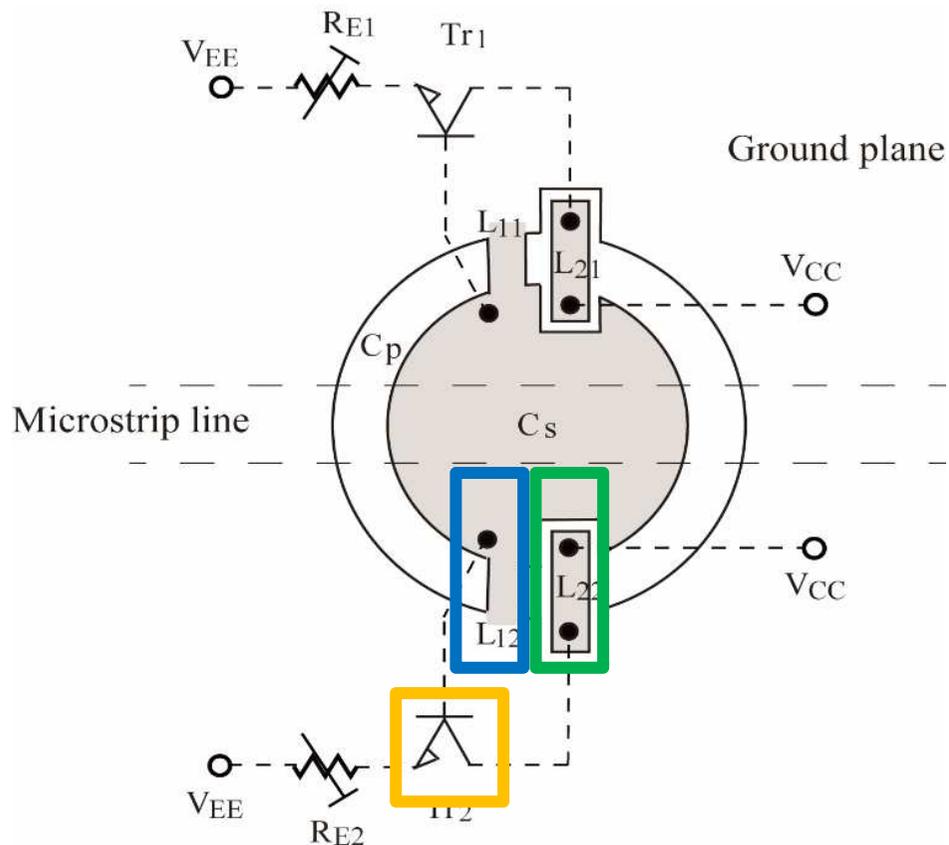
- ・損失電力をトランジスタから供給
- ・Q値増大 共振特性改善

# 補償回路詳細



$$R = k g_m \omega^2 M L_1$$

無損失を  $g_m$  で調整可能



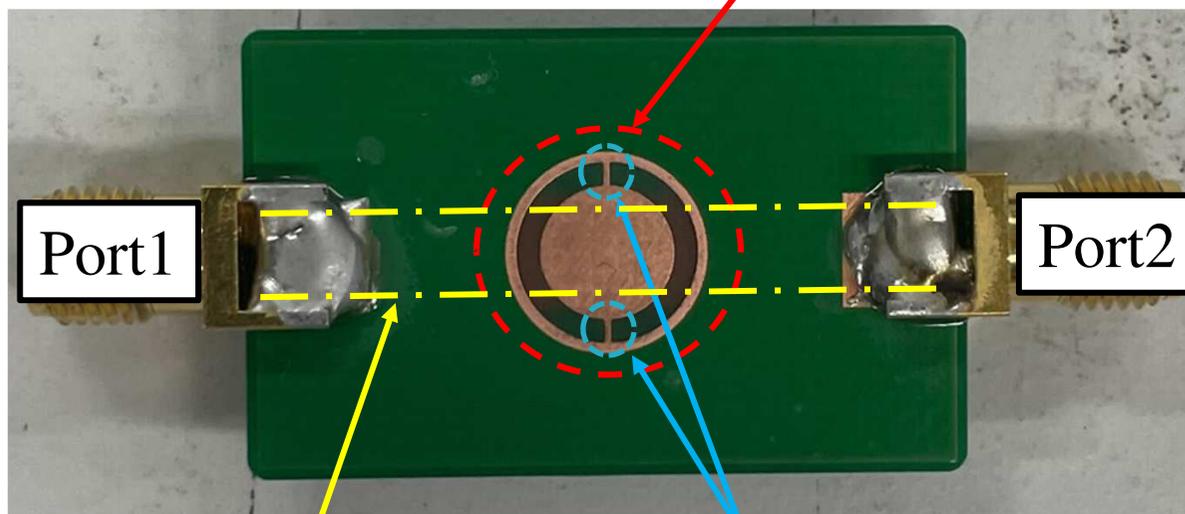
レイアウト

# 実験結果

## 新センサ部実験基板

CSRRの基板

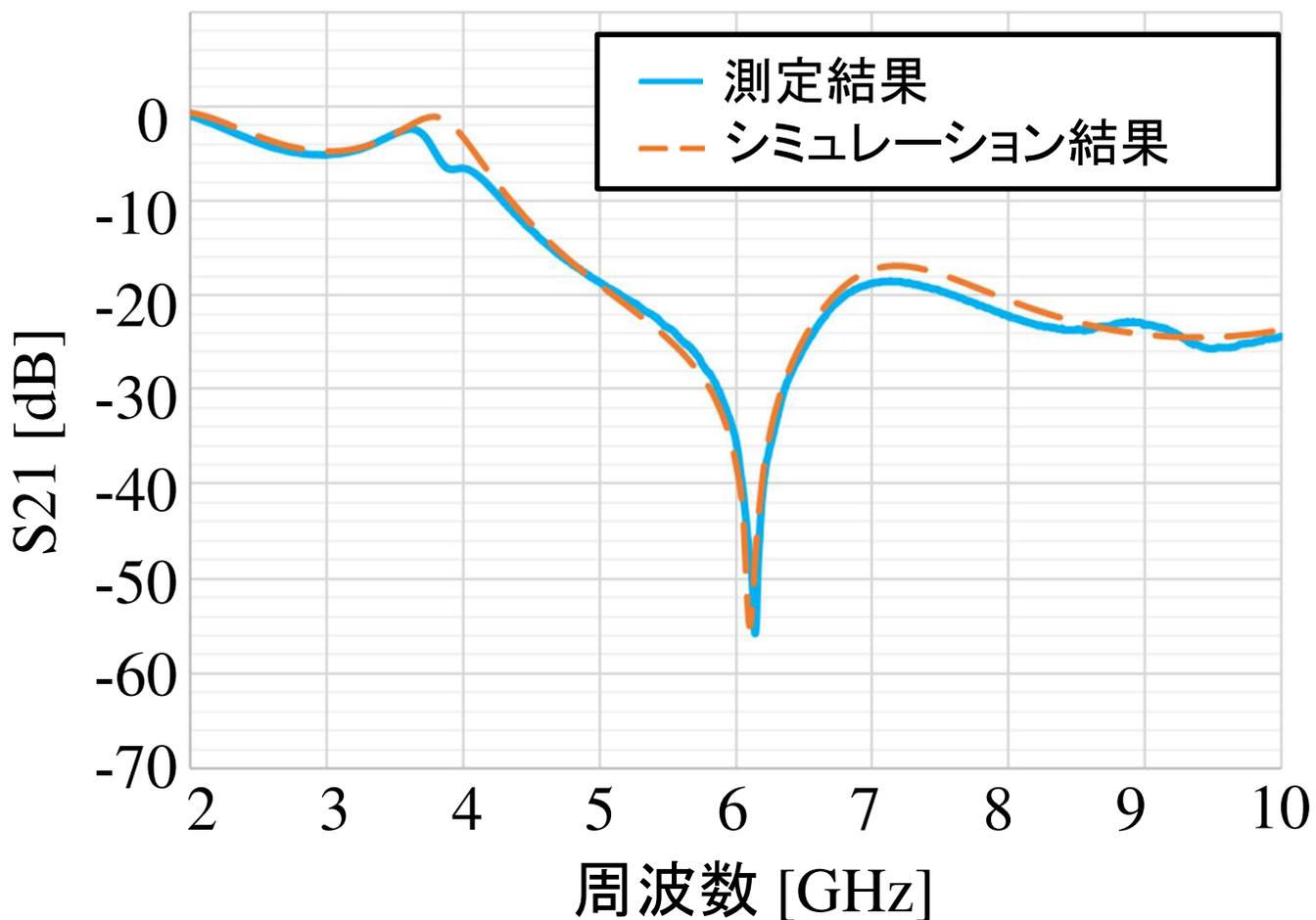
サイズ縮小



MSLの線幅拡大5 mm

Vertical インダクタ

# 実験結果

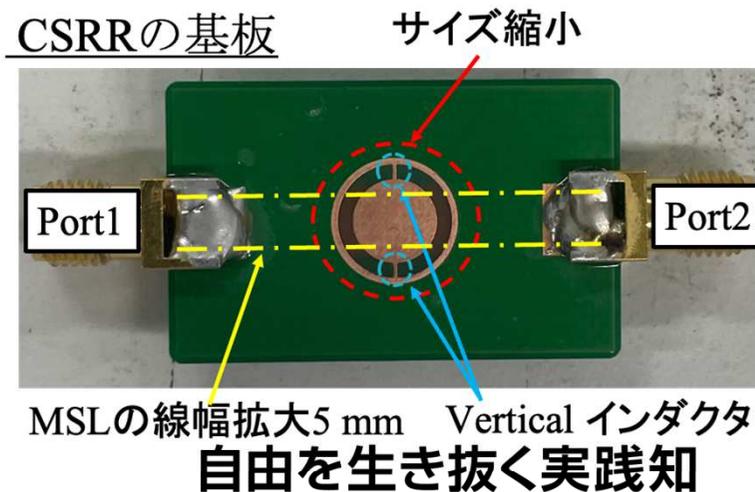


## シミュレーション結果

共振周波数: 6.1 [GHz]  
S21 ディップ: -54.9 [dB]

## 測定結果

共振周波数: 6.14 [GHz]  
S21 ディップ: -55.8 [dB]  
Q値: 256



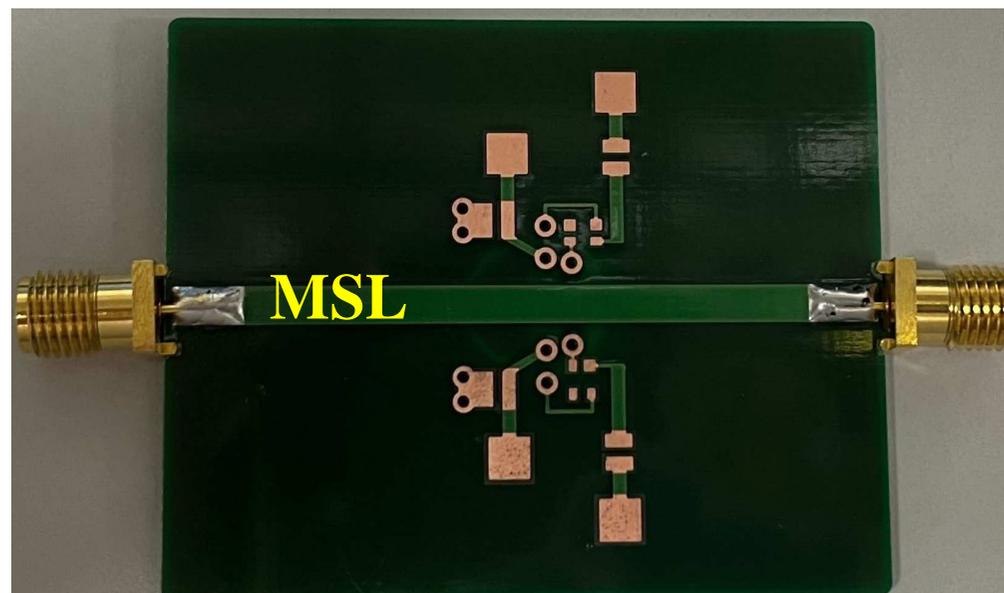
# 実験結果

## 動的補償回路部

## 試作基板



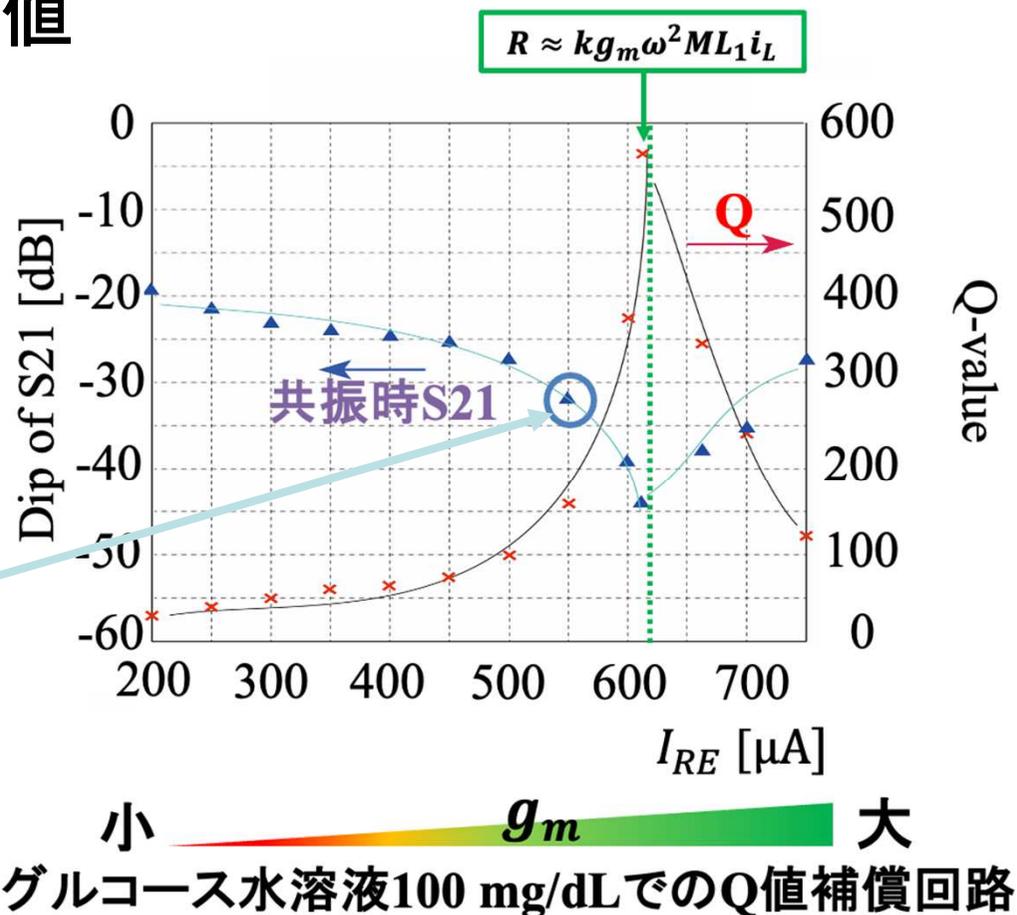
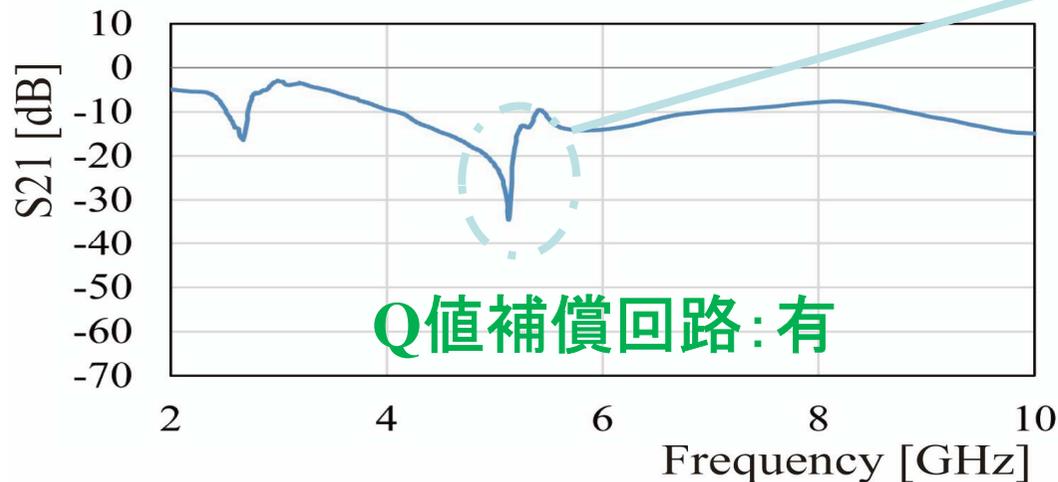
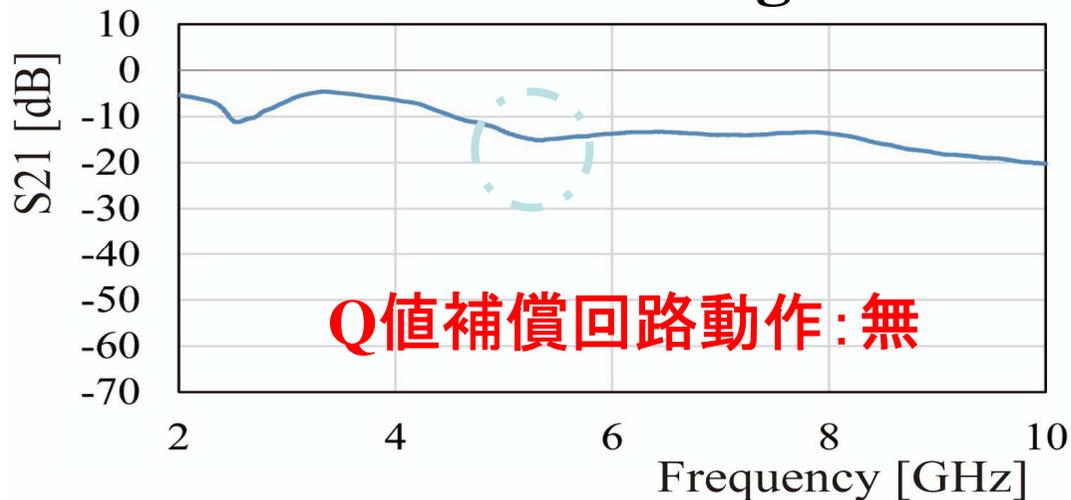
センサ面



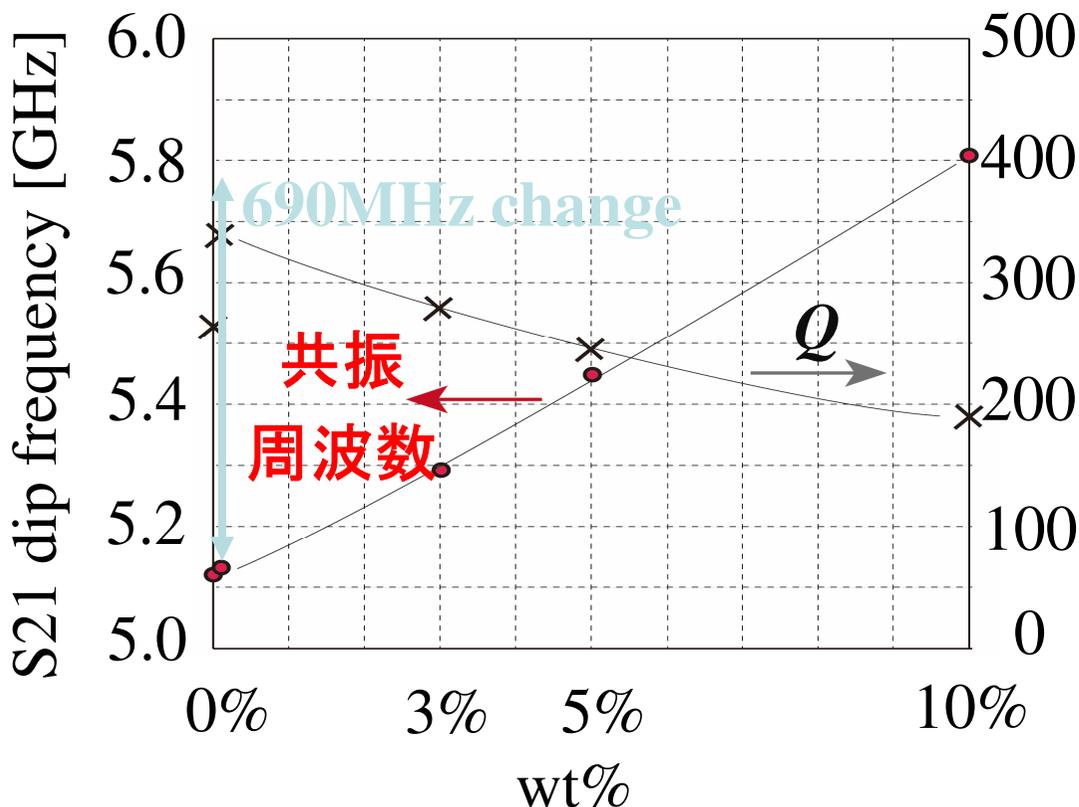
MSL面

# 実験結果

## グルコース水溶液 100mg/dLでのQ値

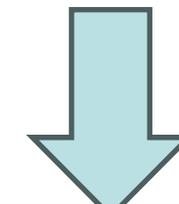


# 実験結果



濃度に対する共振周波数の  
変化量

**69 kHz / 1 mg/dL (10ppm)**



**高精度**  
濃度測定可能

濃度に対する  
共振周波数とQ値

# 従来技術との比較

## 新共振器構造による効果

パラメータ	[1]	[2]	本研究
共振器構造	2重リング CSRR	2重リングCSRR MSL(50Ω)	1重リングCSRR MSL(24Ω)
直径 [mm]	11.3	12	8
共振周波数 [GHz]	≈0.6	1.16	6.14
S21 [dB]	-50	-16	-55.8
Q値	51	≈38.8	256

# 従来技術との比較

## 動的補償回路の効果

S21 Q値	従来研究 [3] 100 mg/dL	従来研究 [4] 100 mg/dL	提案手法 100 mg/dL
S21	-16.8 dB	-41 dB	<b>-43.9 dB</b>
Q値	20.4	116	<b>565</b>

検出感度	従来研究 [5]	従来研究[6]	提案手法
共振周波数変化量 (0~10000 mg/dL)	10 kHz	1.5 kHz	<b>69 kHz</b>

## 想定される用途

- 本技術の特徴
  - 非侵襲, 高感度(10 ppm), 小型薄型, 低コスト
- 非侵襲型血糖値センサ
  - スマートウォッチなどウェアブル端末に内蔵可
  - 24時間測定可能
- パッケージ等に入った食品等の濃度センサ
  - 非侵襲 糖度, アルコールセンサ

# 実用化に向けた今後の開発予定

- 感度のさらなる向上
  - センサ部の最適化
  - 動的損失補償回路の改良
- 超小型共振周波数測定回路
  - LSI化を検討中
    - 小型化, 低コスト化
- 自動キャリブレーション

# 企業様への貢献, PRポイント

- 本技術は非侵襲で物質の濃度測定が可能
  - さまざまな物質での検討, 試験により多方面での応用へ期待
- 非侵襲血糖値センサへの応用
  - 超小型, 低コスト化
- 本格導入にあたっての共同研究

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：誘電率測定装置
- 公開番号：出願済
- 出願人：学校法人法政大学
- 発明者：安田 彰, 杉本 泰博, 山下 喜市

# 産学連携の経歴

- ・ 2008年-2010年 STARC社と共同研究実施
- ・ 2009年-2010年 JST A-STEP JST A-step【本格研究開発】事業に採択
- ・ 2009年-2010年 JST A-STEP JST A-stepシーズ発掘試験に採択
- ・ 2011年-2012年 JST A-STEP(フュージビリティスタディ(探索タイプ))事業に採択
- ・ 2013年-2014年 JST A-STEPフュージビリティスタディステージ シーズ顕在化タイプ事業に採択
- ・ 2012年-2014年 JST A-STEP事業に採択
- ・ 2018年-2019年 NEDO事業に採択
- ・ 2022年-2024年 JST A-STEP事業に採択
- ・ 共同研究, 東芝, zenmotor, 東芝TEC, ASO,他多数

# 参考文献

- [1] J. Bonache, M. Gil, I. Gil, J. Garcia-Garcia, and F. Martin, "On the Electrical Characteristics of Complementary Metamaterial Resonators," IEEE Microwave and Wirel. Compon. Lett., vol.16, no.10, pp.543-545, October 2006.
- [2] M. S. Boybay, and O. M. Ramahi, "Material Characterization Using Complementary Split-Ring Resonators," IEEE Trans.Instrumentation and Measurement, vol.61, no.11, pp.3039-3046, November 2012.
- [3] A. E. Omer et. al., "Non-Invasive Real-Time Monitoring of Glucose Level Using Novel Microwave Biosensor Based on Triple-Pole CSRR," IEEE Trans. Biomedical Circuits and Systems, vol.14, no.6, pp.1407-1420, December 2020
- [4] G. R. Pecorella et. al., "High-sensitivity narrow-band CSRR-based Microwave Sensor for Monitoring Glucose Level" IEEE. 2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 30 June 2022
- [5] A.Ibnath et. al., "Dual Ring Complementary Split Ring Resonator (DC-CSRR) Sensor For Non-invasive Glucose Sensing Application" IEEE.2020 11th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), 05 April 2021.
- [6] T.Pechrkool et. al., "High-Sensitivity Contactless Microwave Sensor Based on Rectangular Complementary Split Ring Resonator for Glucose Concentration Characterization" IEEE.2022 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications(ITC-CSCC), 03 oct 2022.

# お問い合わせ先

**法政大学 研究開発センター  
リエゾンオフィス**

**TEL 042-387-6501**

**FAX 042-387-6335**

**e-mail:liaison@ml.hosei.ac.jp**