

# 高周波を用いた誘電率センサと 非侵襲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

2024年11月28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



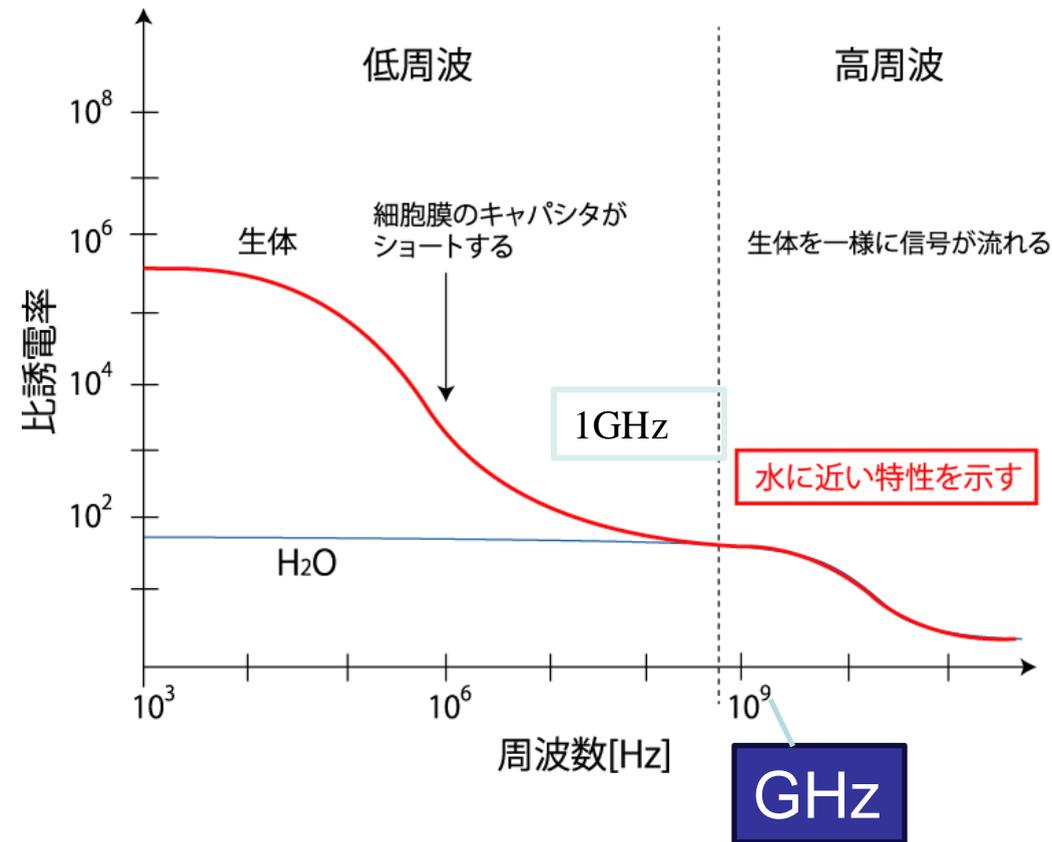
高周波信号を用いた小型の高感度血糖値センサを提案  
スマートウォッチなどに内蔵可能

## 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の感度が低く、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）

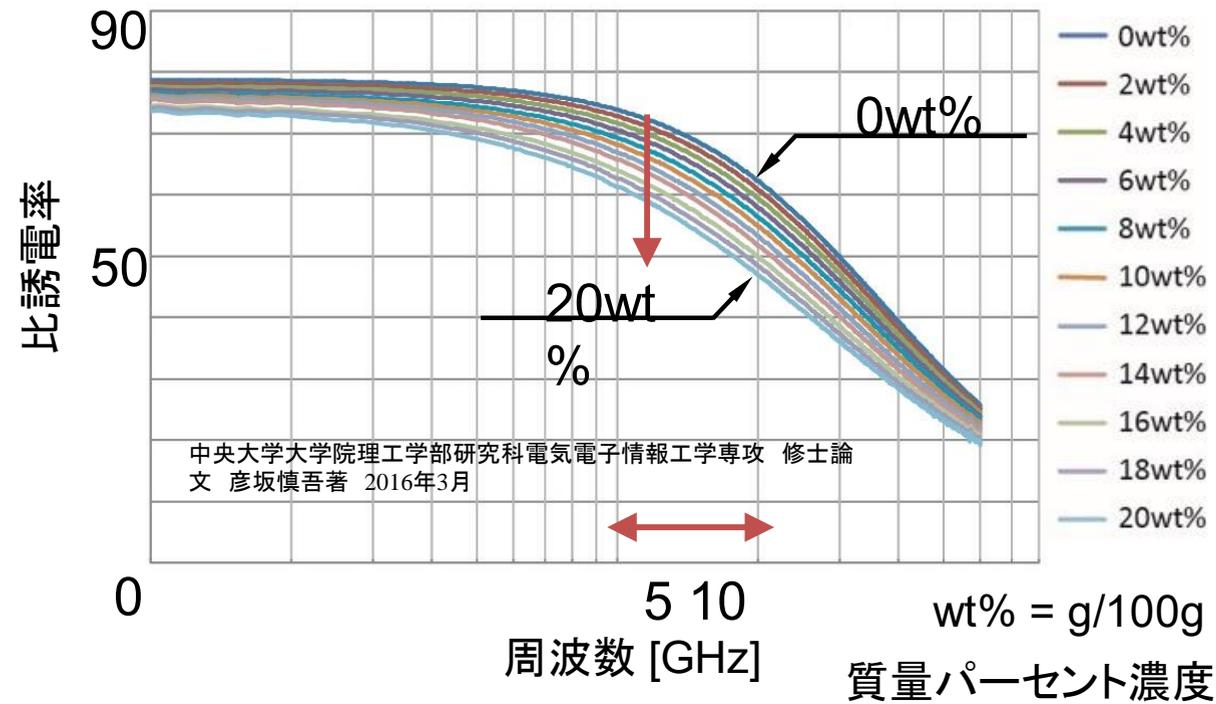
- 人体の比誘電率の周波数特性



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

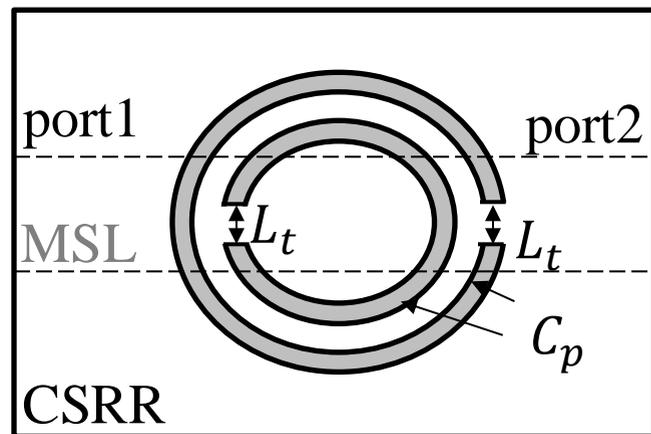
5～10GHz前後が、最もグルコース水溶液の濃度による誘電率の変化が大きい

GHz帯で測定による高精度測定の可能性大

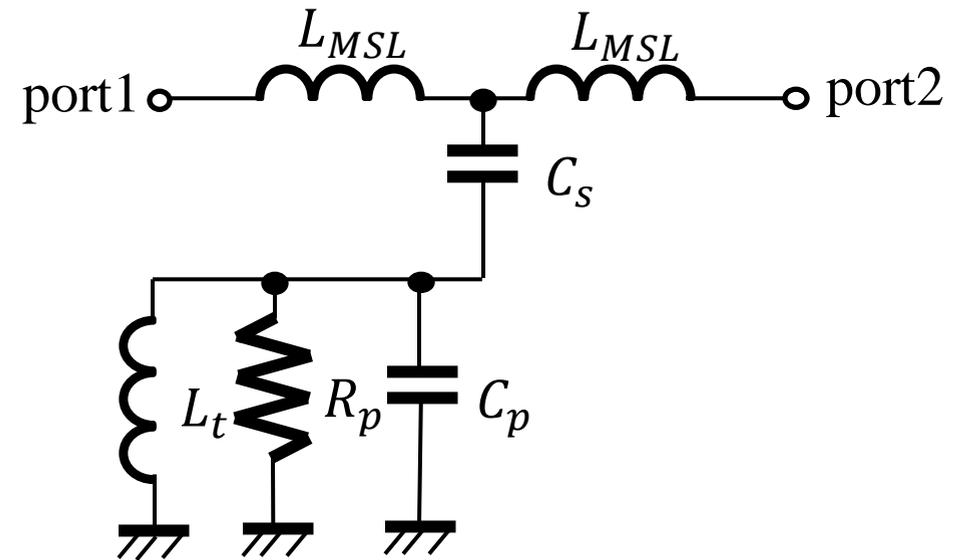
# GHz帯での誘電率測定 先行研究

## 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

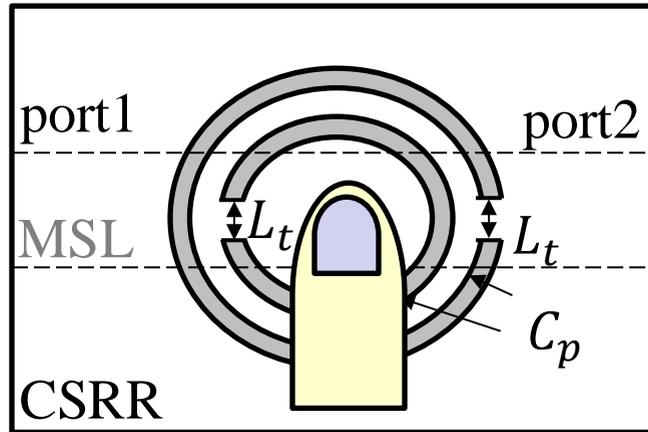
$C_s$ : キャパシタ(センサー-MSL間)

$R_p$ : センサ内の抵抗

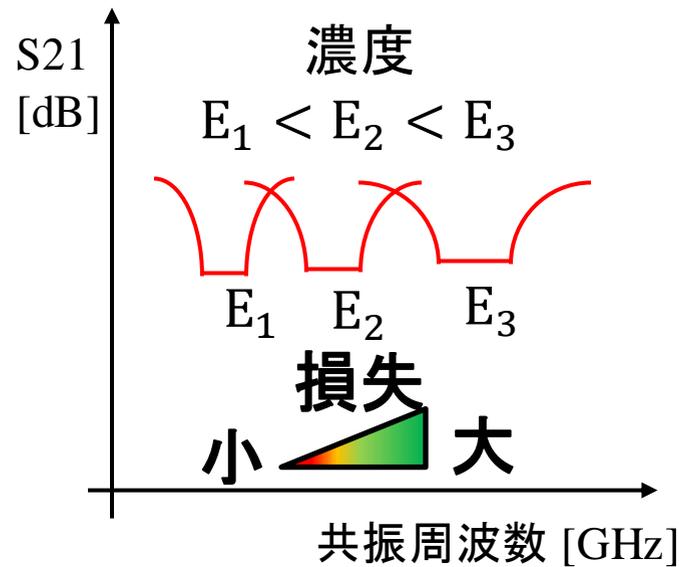
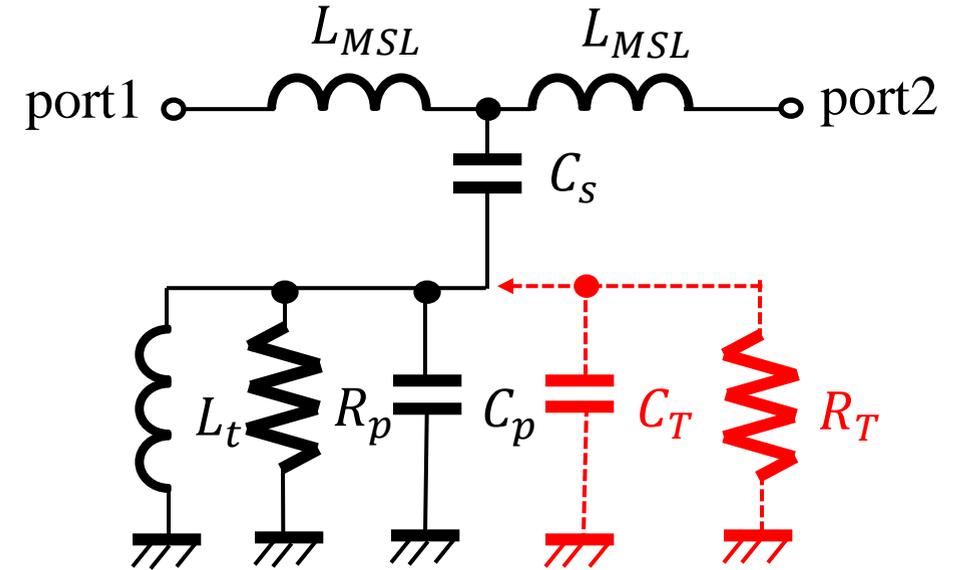
$f_{dip}$ : 共振周波数

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

# 先行研究の問題点



等価回路  
→



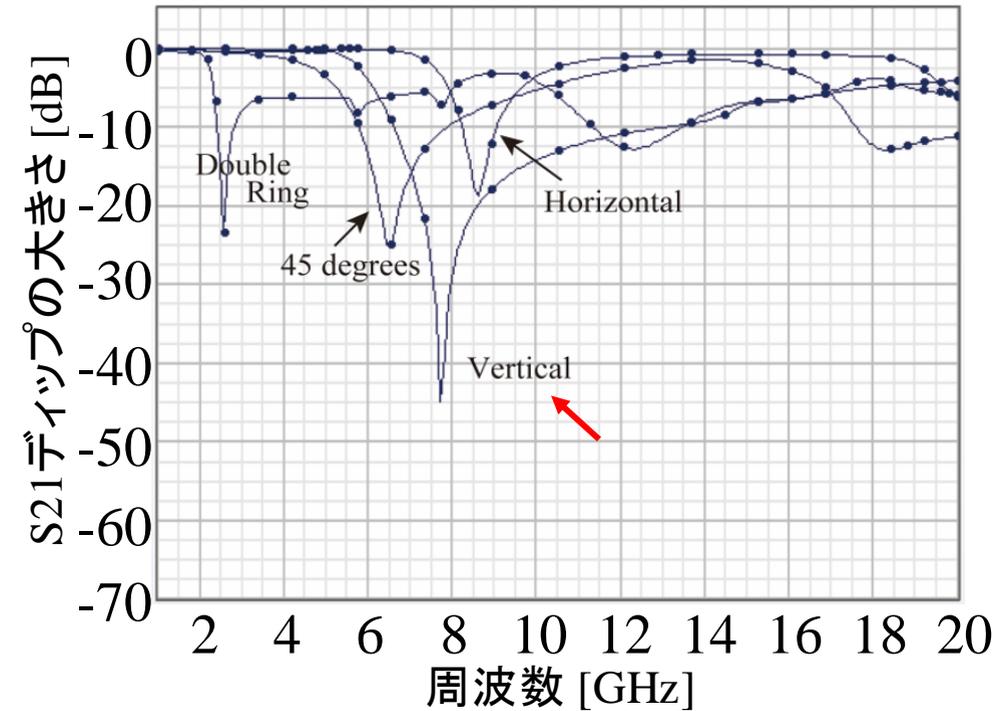
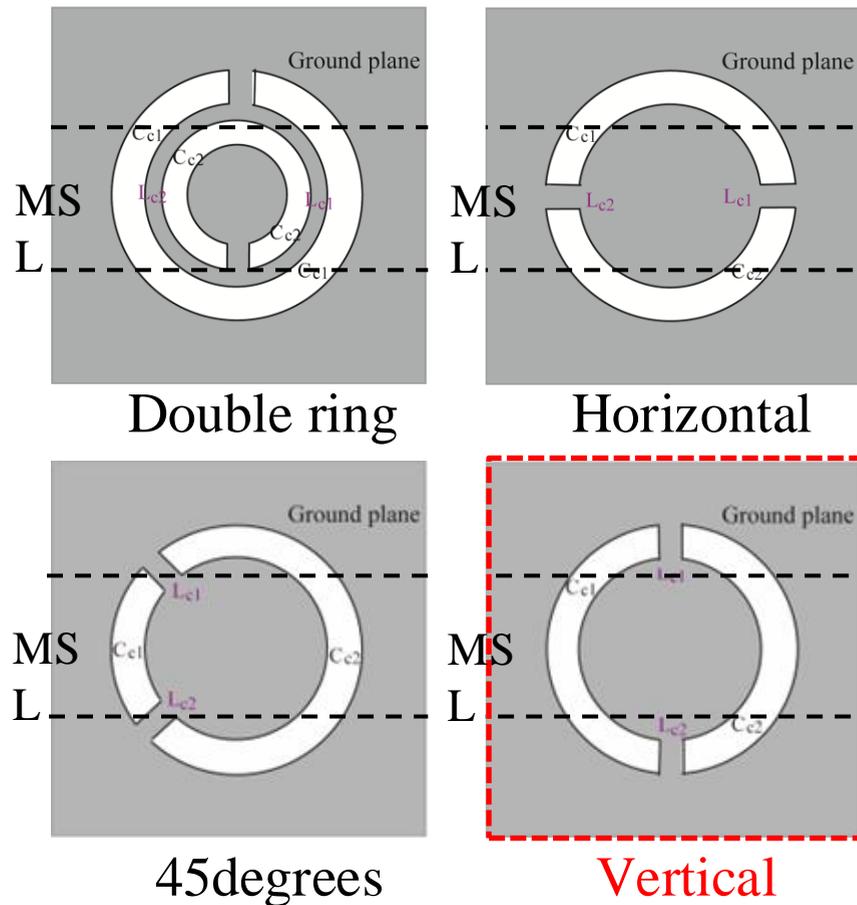
問題点  
 センサの抵抗  $R_p$ , 測定対象の抵抗  $R_T$   
 ↓  
 共振特性のQが低下  
 ↓  
 共振周波数の検出精度低下

# 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

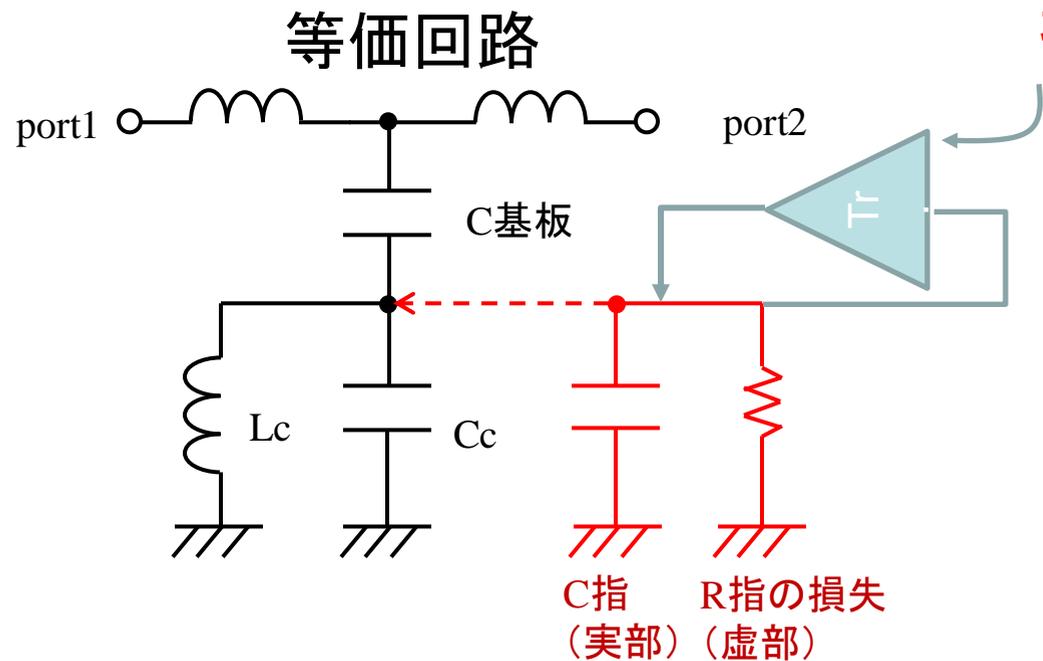
## インダクタの位置の検討



- ・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

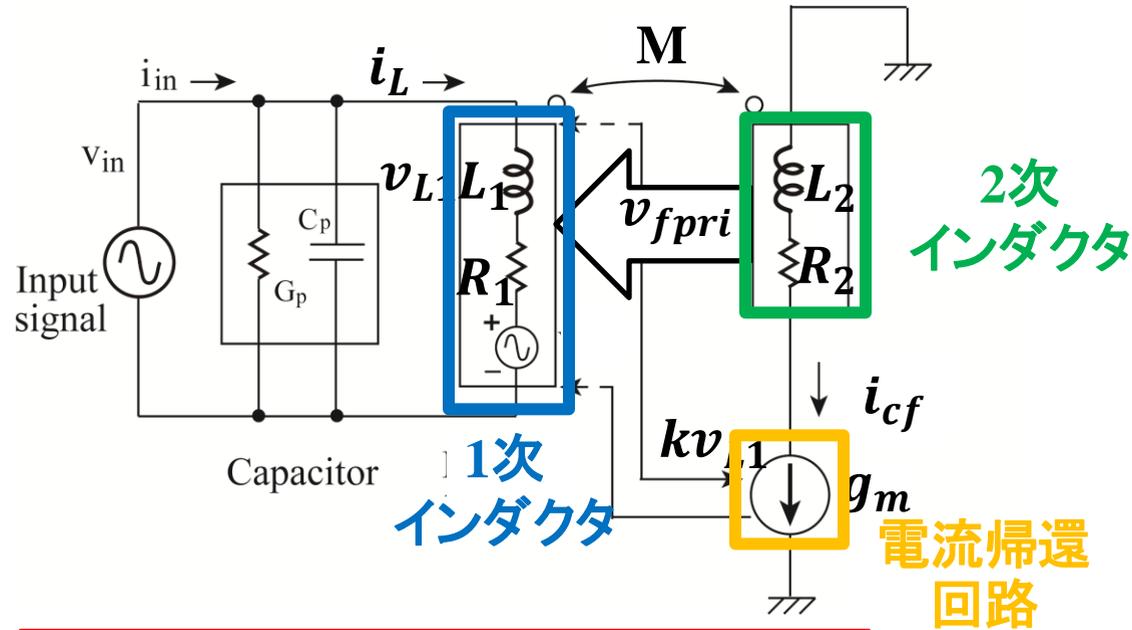
# トランジスタを用いた動的補償回路

トランジスタによる  
損失補償回路



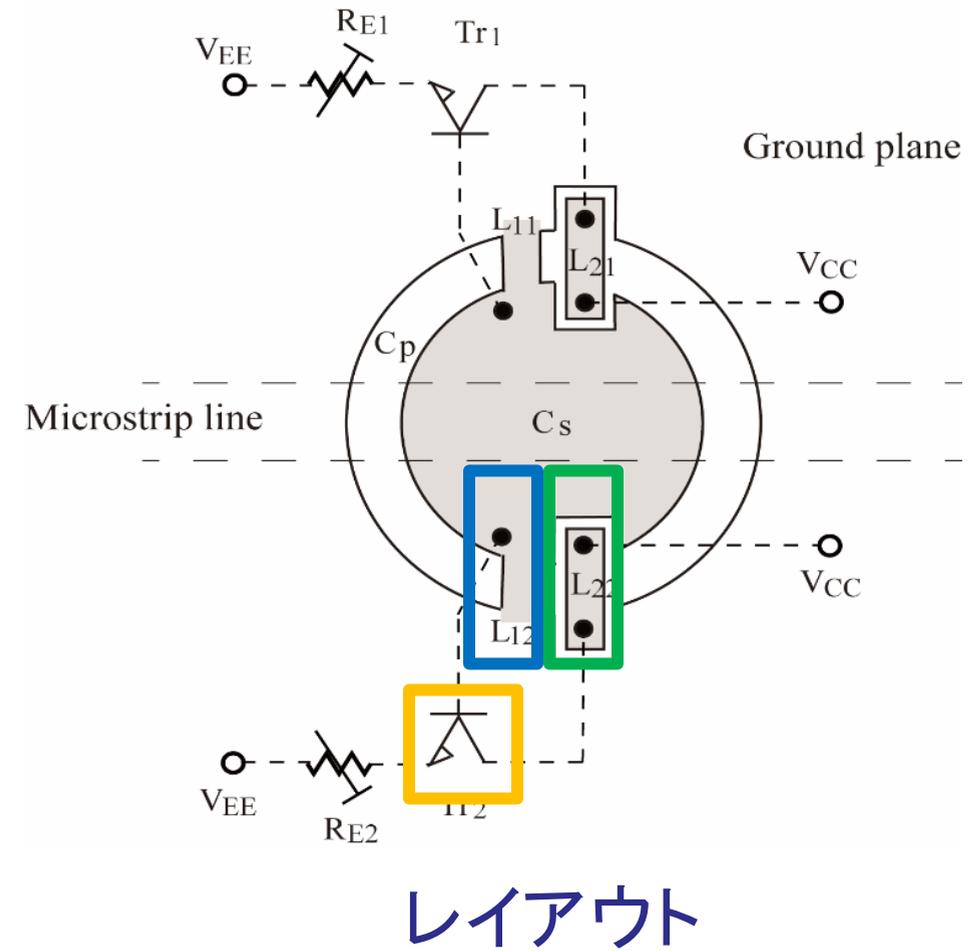
- ・損失電力をトランジスタから供給
- ・Q値増大 共振特性改善

# 補償回路詳細



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

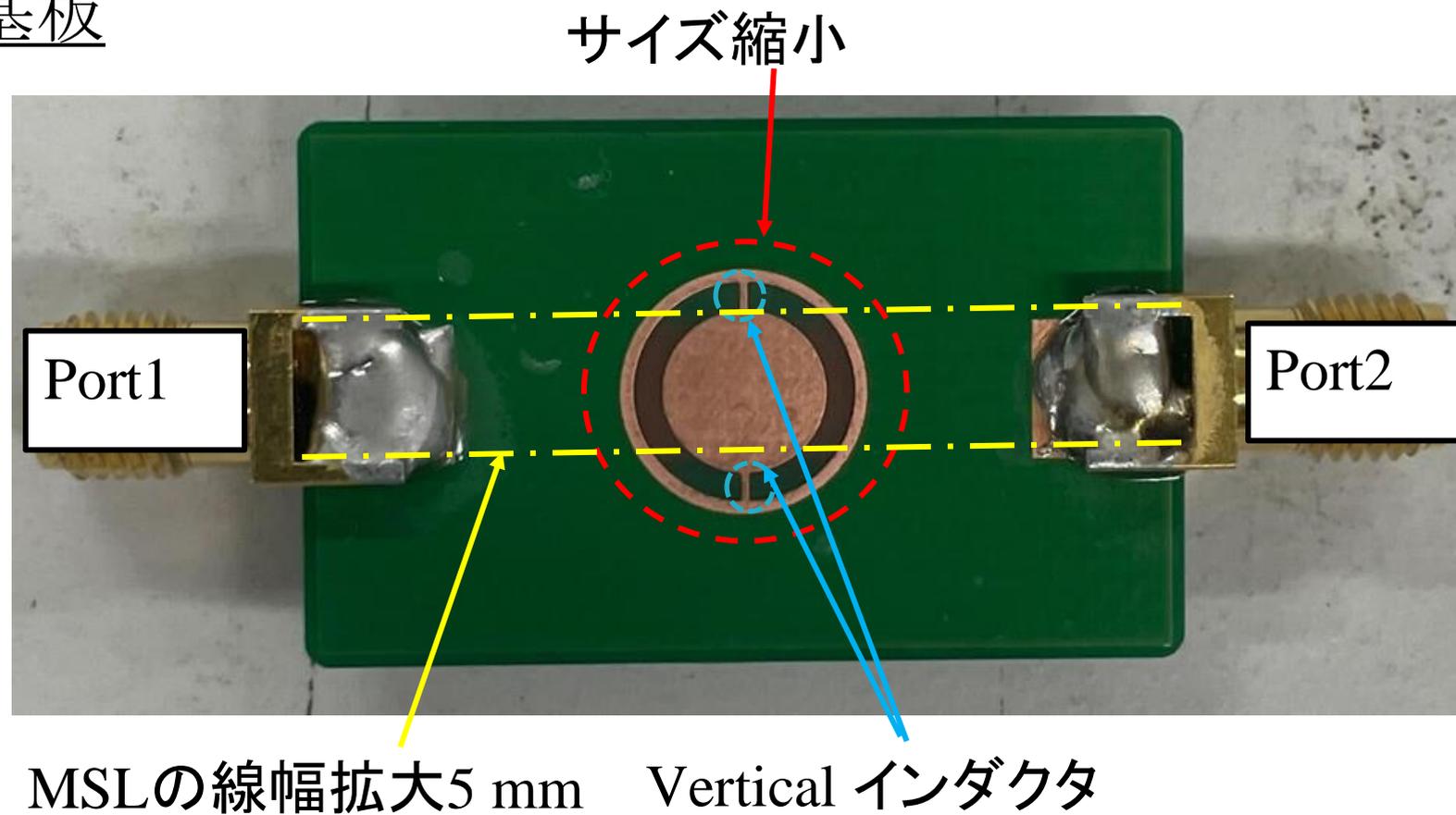
無損失を  $g_m$  で調整可能



# 実験結果

## 新センサ部実験基板

### CSRRの基板



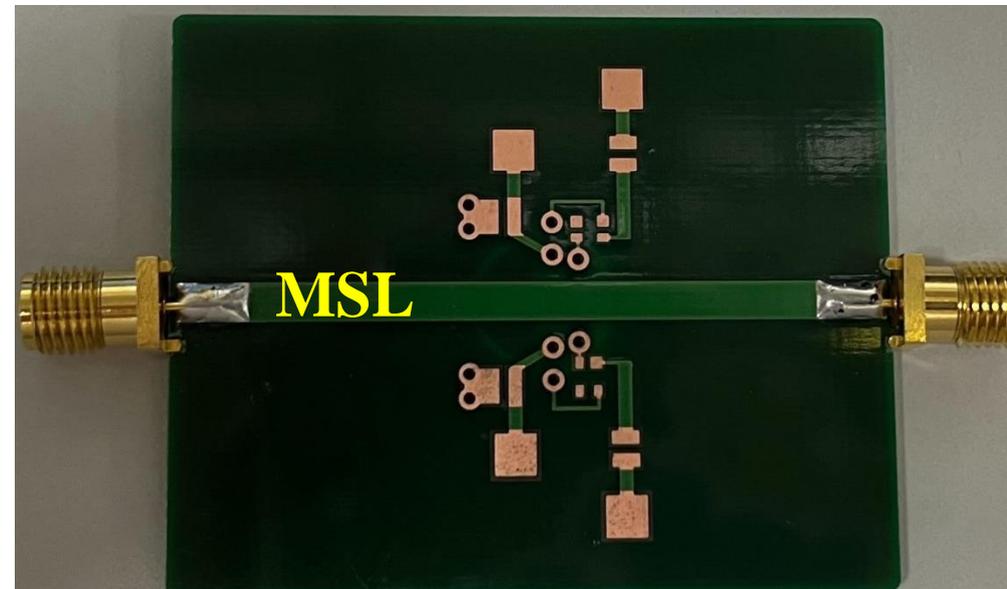
# 実験結果

動的補償回路部

試作基板



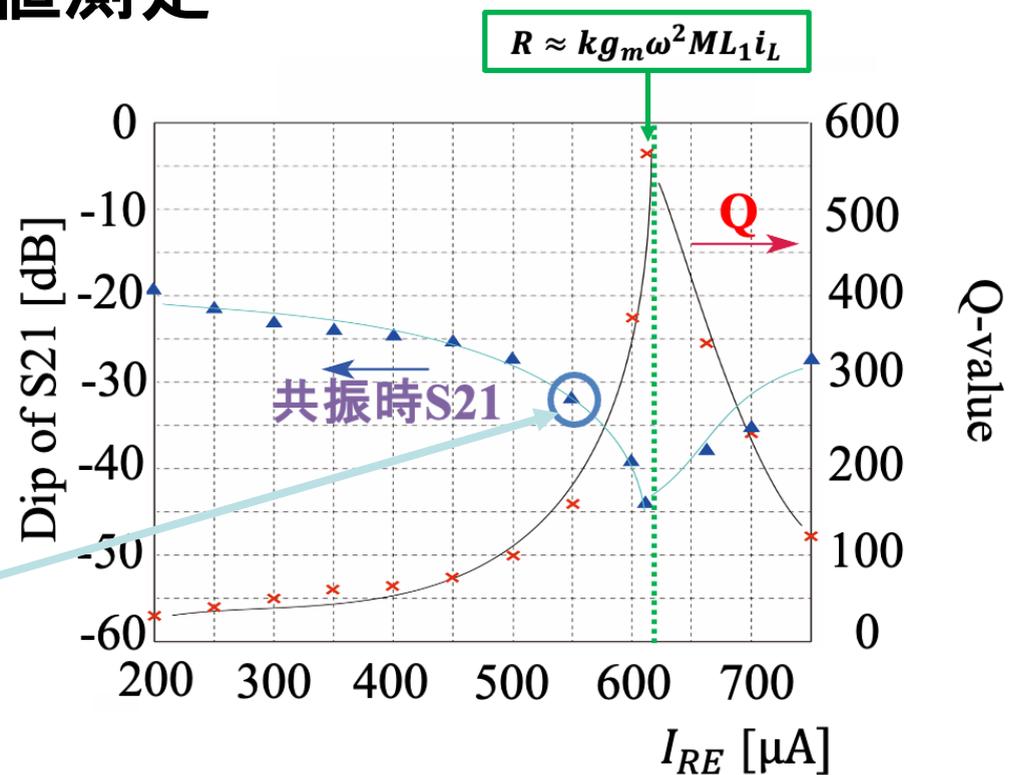
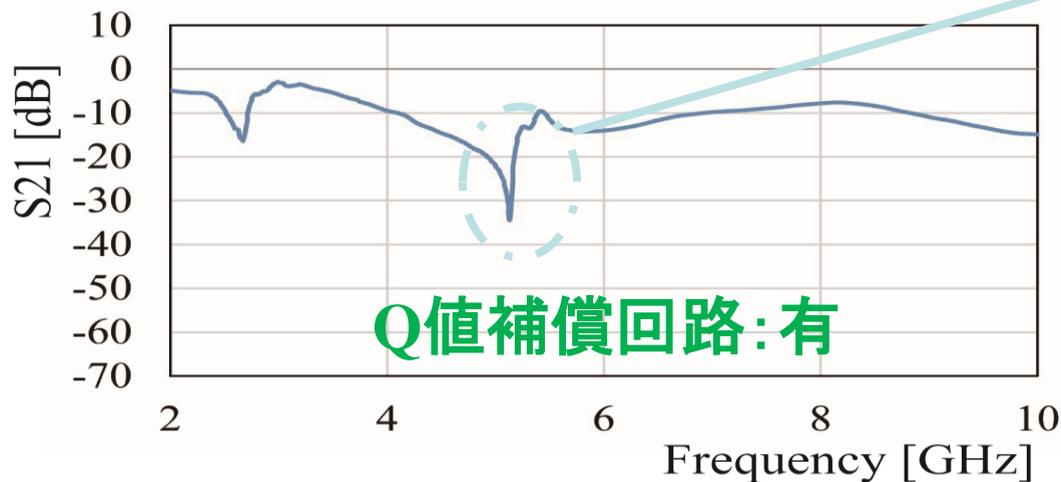
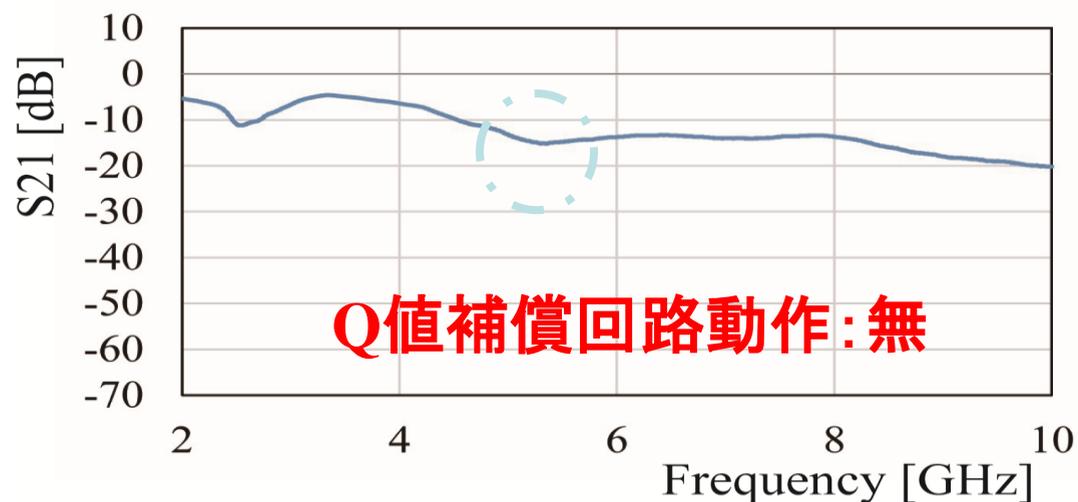
センサ面



MSL面

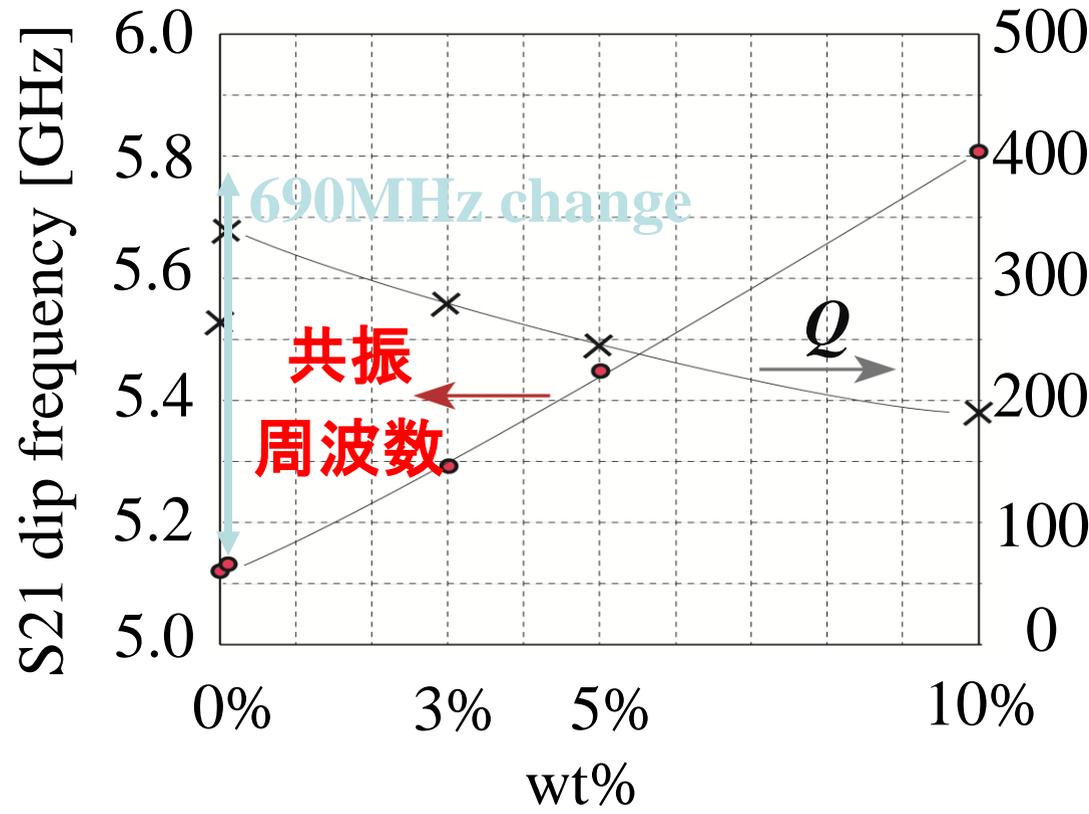
# 実験結果

## グルコース水溶液 100mg/dLでのQ値測定



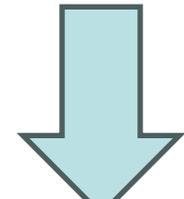
小  $g_m$  大  
 グルコース水溶液100 mg/dLでのQ値補償回路

# 実験結果



濃度に対する  
共振周波数とQ値

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

# 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/(1mg/dL)	1.5 kHz/(1mg/dL)	<b>69 kHz/(1mg/dL)</b>

**感度  
6倍以上**

# 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
- 対応可能物質の拡大, 人体での検証

# 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

# 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フィ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フィ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, TI, zenmotor, 東芝TEC, 横河電機, 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

ご静聴ありがとうございました。