



負性容量デバイス

九州工業大学 大学院工学研究院

物質工学研究系

教授 孫 勇

2022年12月15日

発表内容

1. 本発明の概要
2. 負性容量デバイスの構成
3. 負性容量デバイスの抵抗
4. 負性容量デバイスの容量

1. 本発明の概要

(1) コンデンサの容量について

❖ 平行平板誘電体コンデンサの容量 $C = \frac{\Delta Q}{\Delta V}$

極板間の電圧増加 ΔV に対して、

極板電荷 ΔQ が増加すれば、容量 C は正の値である

反対に、電荷 ΔQ が減少すれば、容量 C は負の値になる

❖ 負性容量を持つ誘電体材料は極少数だが、確認されている

1. 本発明の概要

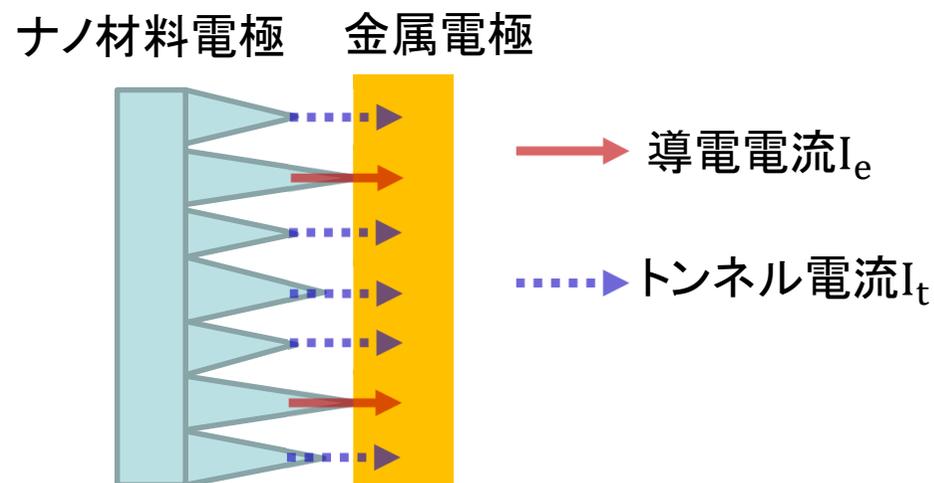
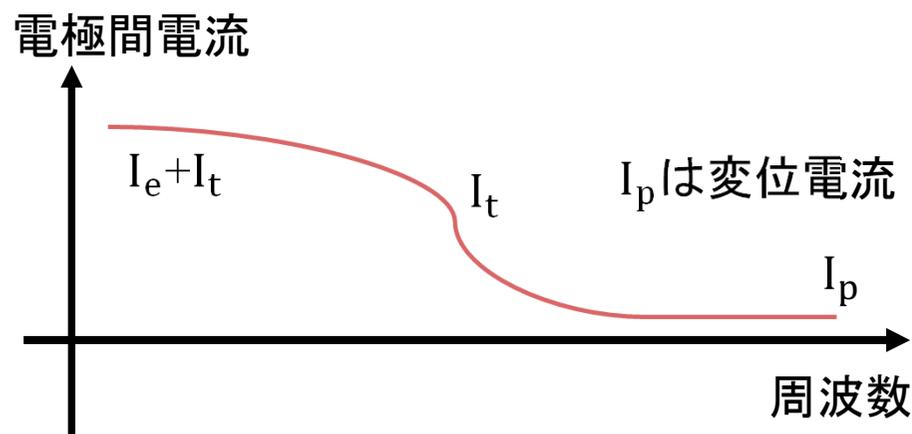
(1) コンデンサの容量について

- ❖ 通常の誘電体は絶縁体であり、コンデンサに流れるのは変位電流で容量は正の値のみである
- ❖ 強誘電体では、印加電界がなくても材料中に正味の電界が存在するため、その電界を打ち消すまで、印加電界の増加に対して、極板電荷が減少する可能性があり、負性容量となる
- ❖ 強誘電体 HfO_2 が負性容量をもつ少ない例の一つである
- ❖ 極板に電荷が溜まれば容量になるので、誘電体以外の導電性材料の両極に導電電流やトンネル電流などによる電荷が蓄積されることで、広い意味での負性容量の形成が可能となる

1. 本発明の概要

(2) コンデンサ容量の周波数依存性について

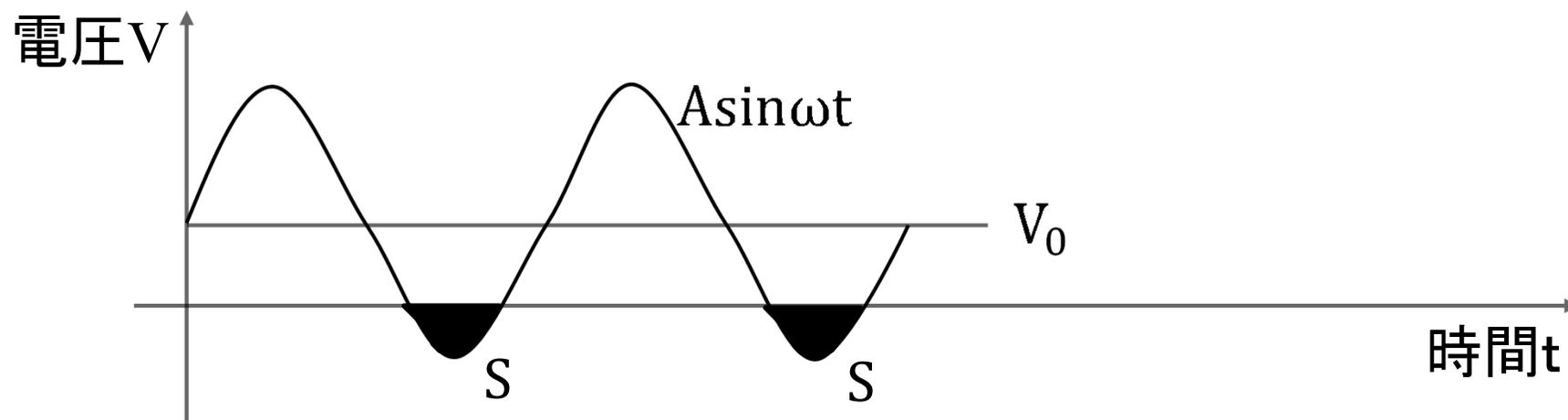
- ❖ ナノ材料電極/金属電極の構造について考える
- ❖ 導電電流はナノ材料の抵抗を受け、電極に到達する
- ❖ トンネル電流は抵抗を受けず真空を通過して、電極に到達する
- ❖ 導電電流 I_e の速度はトンネル電流 I_t の速度より遅い
- ❖ トンネル電流は、より高い周波数まで続く



1. 本発明の概要

(3) コンデンサ容量の印加直流バイアスと交流振幅の依存性について

- ❖ コンデンサ両極に直流バイアス V_0 と交流を印加すると $V = V_0 + A\sin\omega t$
 V の調整で、容量に寄与する最小面積 S 、つまり極板電荷量が制御できる
- ❖ よって、 $C = \Delta Q/\Delta V$ も制御できる
- ❖ 広い意味でのコンデンサ容量が正と負の間で変化できる



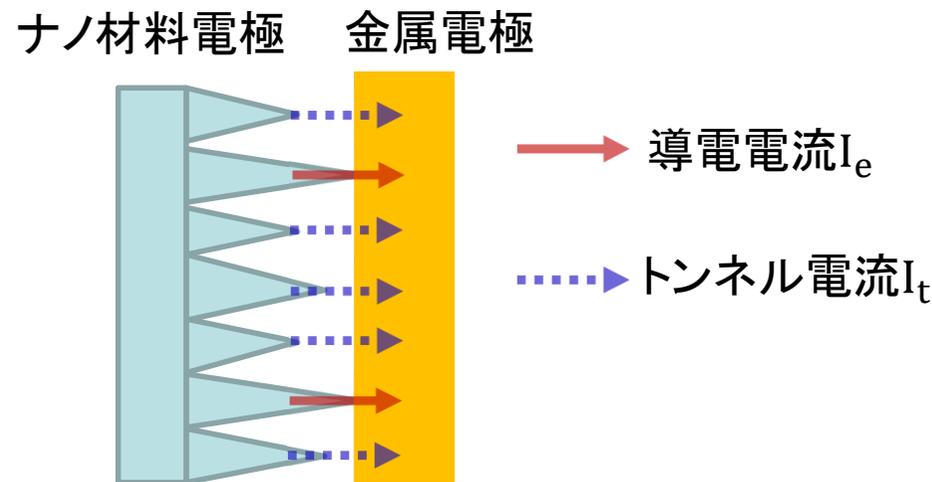
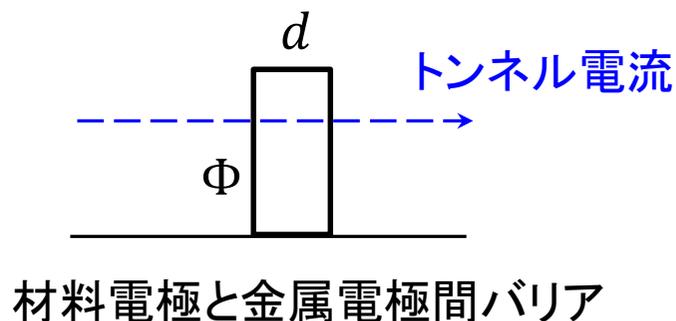
1. 本発明の概要

(4) コンデンサ容量のトンネル電流依存性について

❖ トンネル電流密度 $J = \left[\frac{q^2 V}{h^2 d} \right] \sqrt{2m\Phi} \exp \left\{ - \left[\frac{4\pi d}{h} \right] \sqrt{2m\Phi} \right\}$

ここで、 V は印加電圧、 d は障壁の幅、 Φ は障壁の高さである

- ❖ 材料電極と金属電極の両方向から見ると、 d と Φ は異なるので、方向によっては、トンネル電流の大きさに差異が生じる
- ❖ 両電極板に蓄積した電荷量は異なり、少ない電荷量が容量となる



1. 本発明の概要

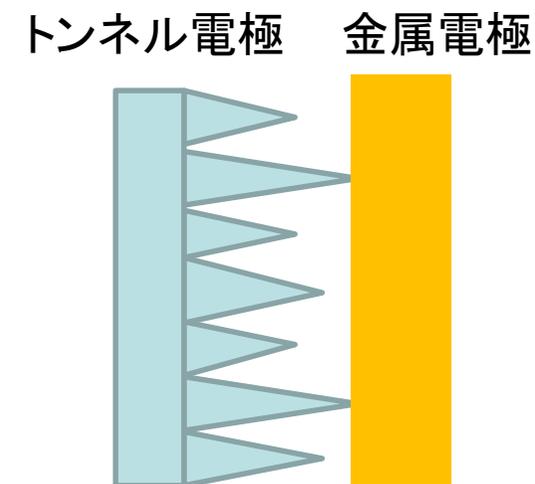
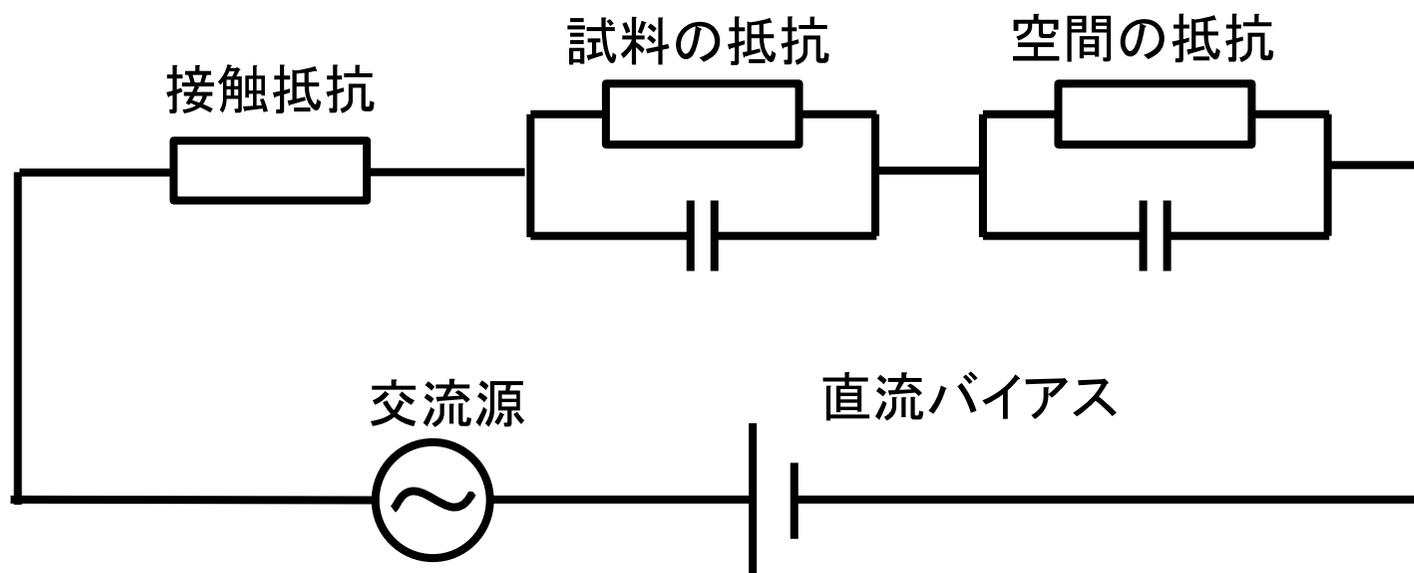
(5) トンネル電流支配コンデンサの特性について

- ❖ トンネル電流等が流れるコンデンサの容量は正負どちらにすることも可能
- ❖ 容量値は、周波数、DCバイアス、交流振幅および実体構造に依存
- ❖ 交流源やDCバイアスを撤去すれば電荷が失われる(揮発性)
- ❖ コンデンサの抵抗値が設定でき、各種回路の要求ごとに応用可能
- ❖ 回路の基本3素子(抵抗、容量、コイル)の機能を一つのデバイスに集約でき、次世代集積回路の開発に新しいチャンスが生まれる

2. 負性容量デバイスの構成

(1) 理想構造と等価回路

- ❖ トンネル電流が発生しやすい電極、例えばカーボンナノ材料
- ❖ トンネル電流が発生しにくい電極、例えば平坦な金属板
- ❖ 適切な距離を維持しながら両電極を設置

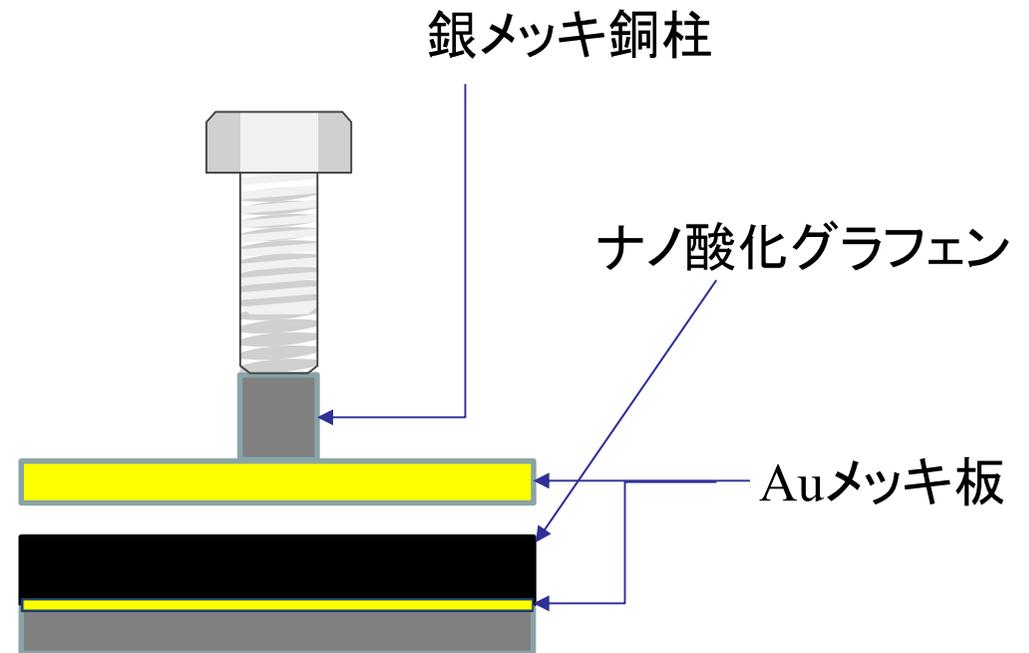
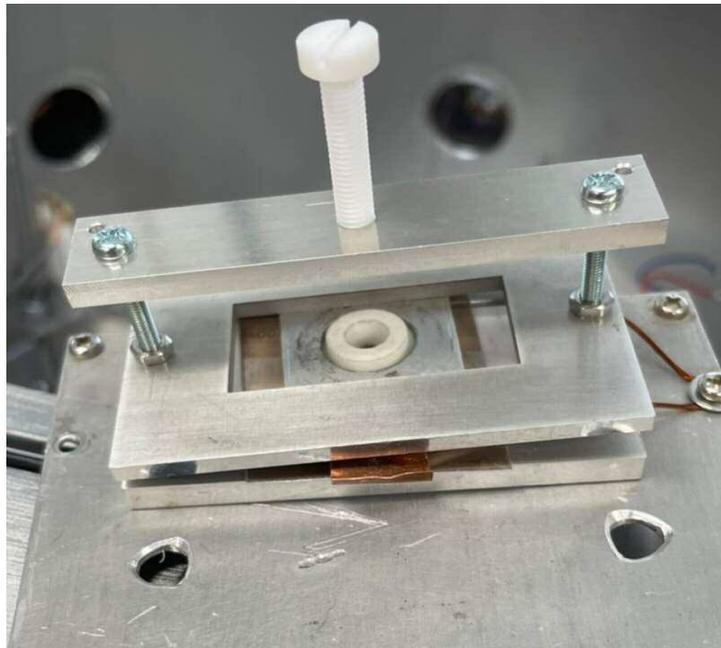


デバイスの等価回路

2. 負性容量デバイスの構成

(2) 作製例

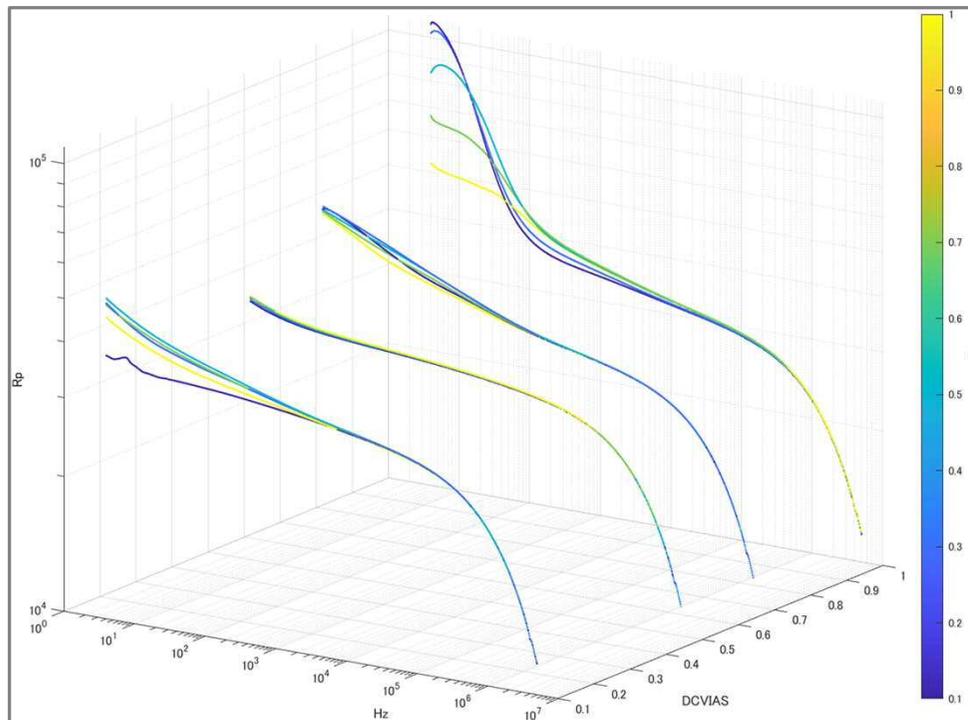
- ❖ トンネル電極：ナノ酸化グラフェン
- ❖ 金属電極：AuメッキCu板
- ❖ 距離はネジで調整する



3. 負性容量デバイスの抵抗

(1) デバイス抵抗(電極間距離が大の場合)

- ❖ 試料全体の並列抵抗 R_p の周波数、DCバイアス及び交流振幅に依存



電極と試料表面の接触度合を変えて条件設定

条件1: 接触弱の状態(電極間距離大)

条件2: 接触中の状態(電極間距離中)

条件3: 接触強の状態(電極間距離小)

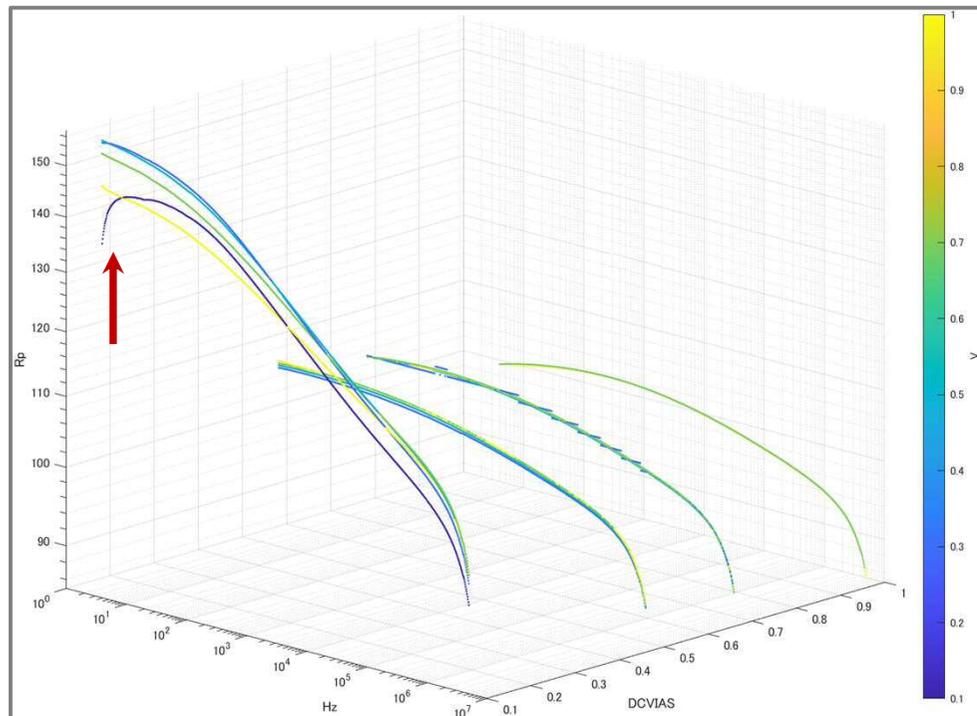
条件1では R_p の値は正の値

周波数、DCバイアスおよび交流振幅に依存

3. 負性容量デバイスの抵抗

(1) デバイス抵抗(電極間距離が中の場合)

- ❖ 試料全体の並列抵抗 R_p の周波数、DCバイアス及び交流振幅に依存



電極と試料表面の接触度合を変えて条件設定

条件1: 接触弱の状態(電極間距離大)

条件2: 接触中の状態(電極間距離中)

条件3: 接触強の状態(電極間距離小)

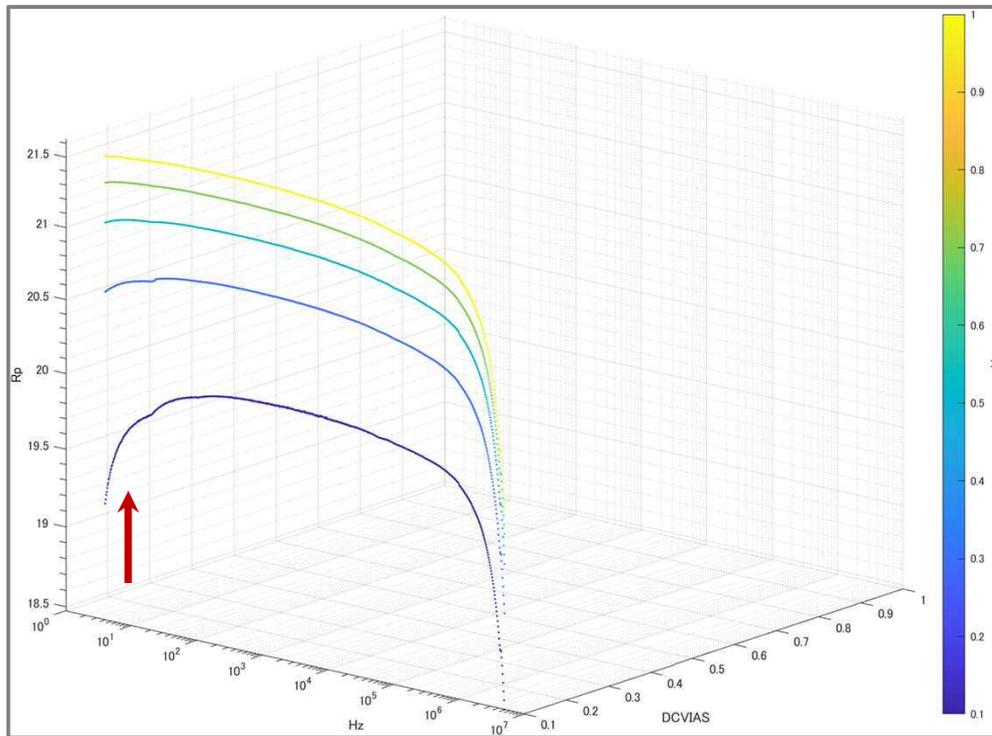
条件2では R_p の値は正の値

周波数、DCバイアス及び交流振幅に依存

3. 負性容量デバイスの抵抗

(1) デバイス抵抗(電極間距離が小の場合)

- ❖ 試料全体の並列抵抗 R_p の周波数、DCバイアス及び交流振幅に依存



電極と試料表面の接触度合を変えて条件設定

条件1: 接触弱の状態(電極間距離大)

条件2: 接触中の状態(電極間距離中)

条件3: 接触強の状態(電極間距離小)

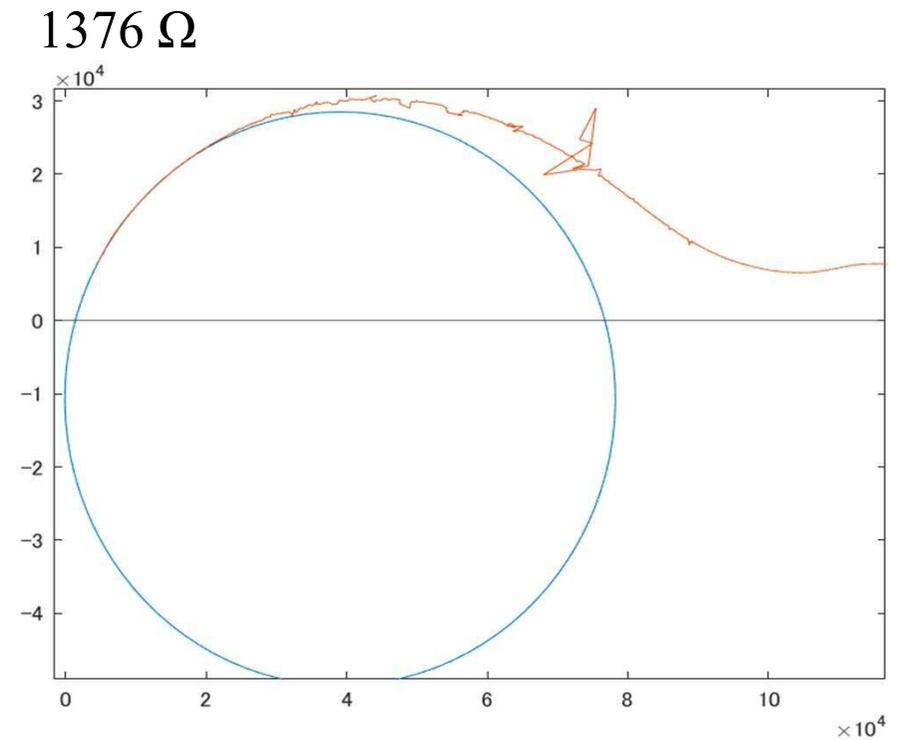
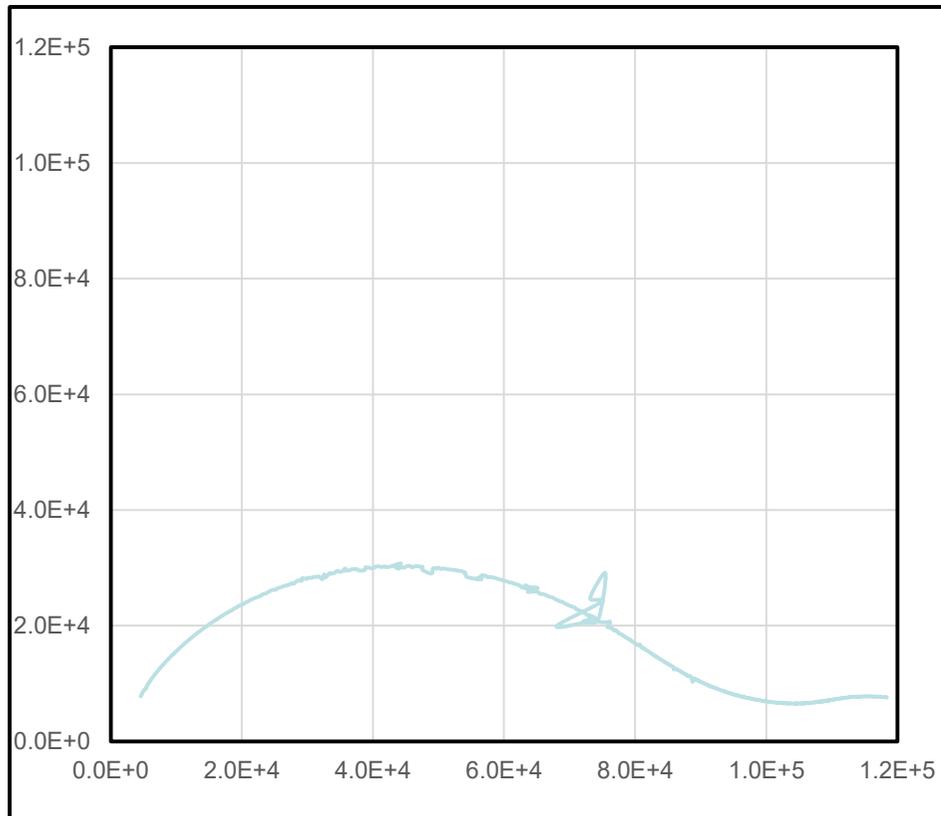
条件3では、高いDCバイアスにおいて R_p の値は測定器のレンジを超えデータが取得できなかった

低周波数では、 R_p の値は周波数の増加に従い顕著な増加がみられる

3. 負性容量デバイスの抵抗

(2) 接触抵抗

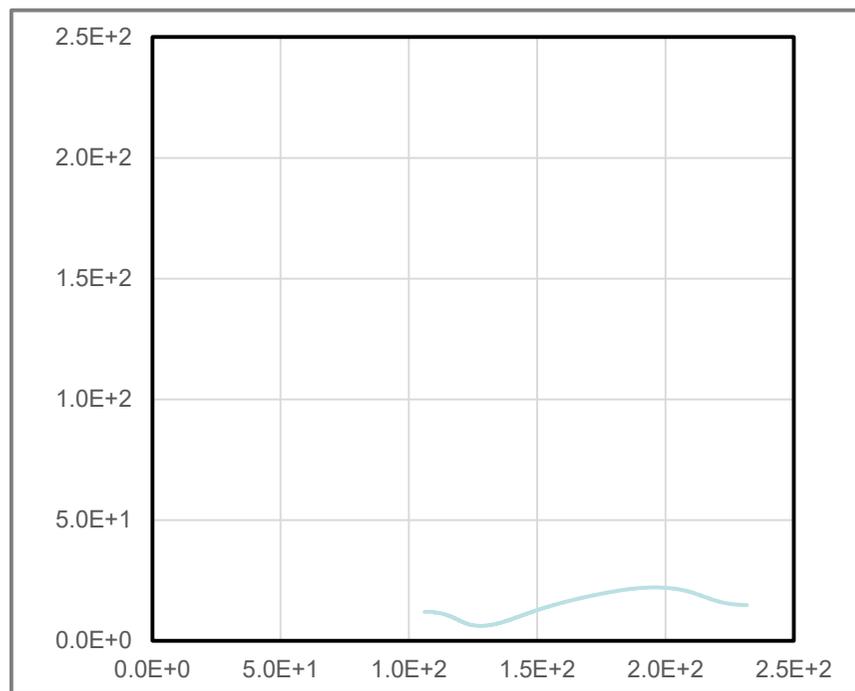
❖ 電極間距離が大の場合



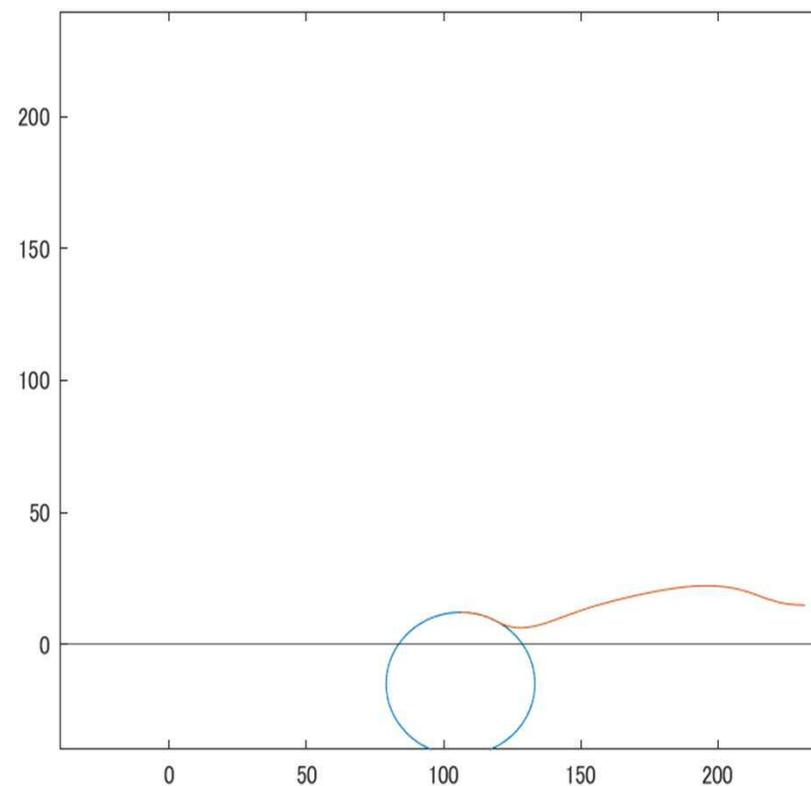
3. 負性容量デバイスの抵抗

(2) 接触抵抗

❖ 電極間距離が中の場合



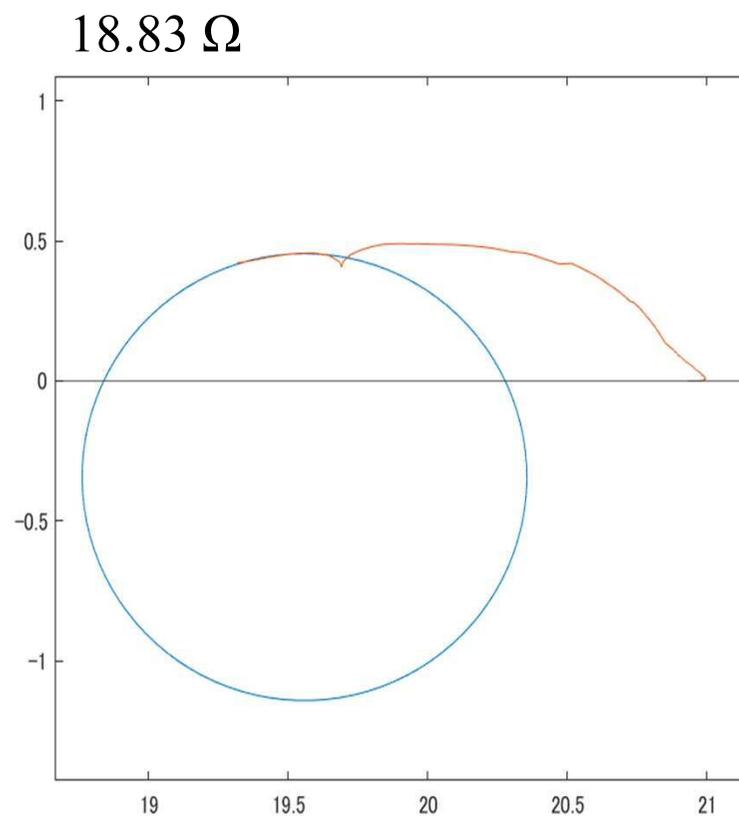
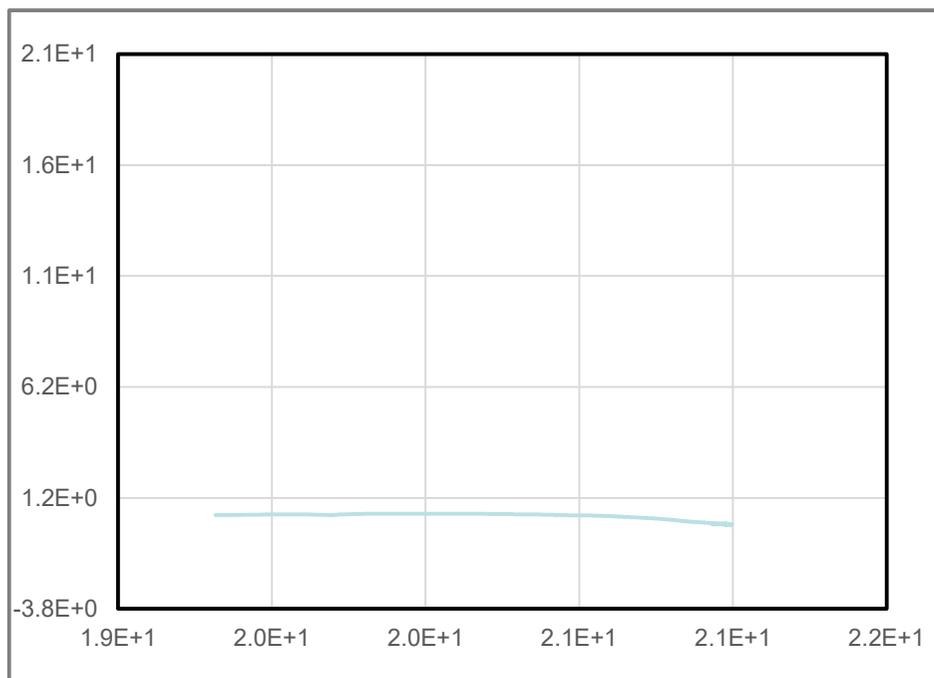
83.66 Ω



3. 負性容量デバイスの抵抗

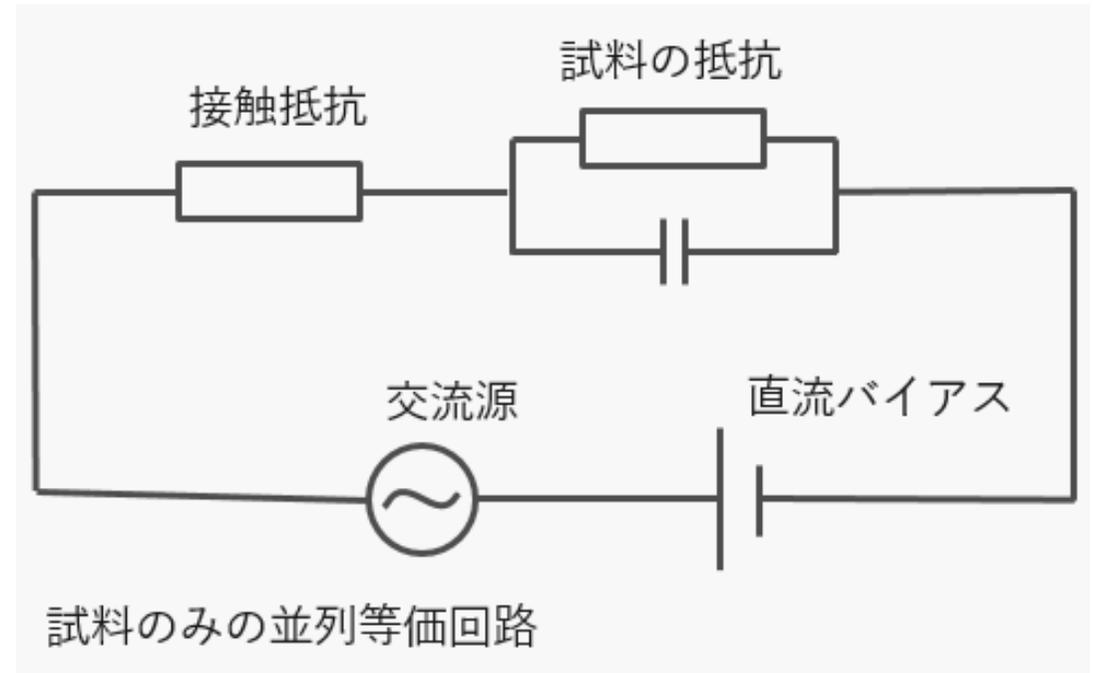
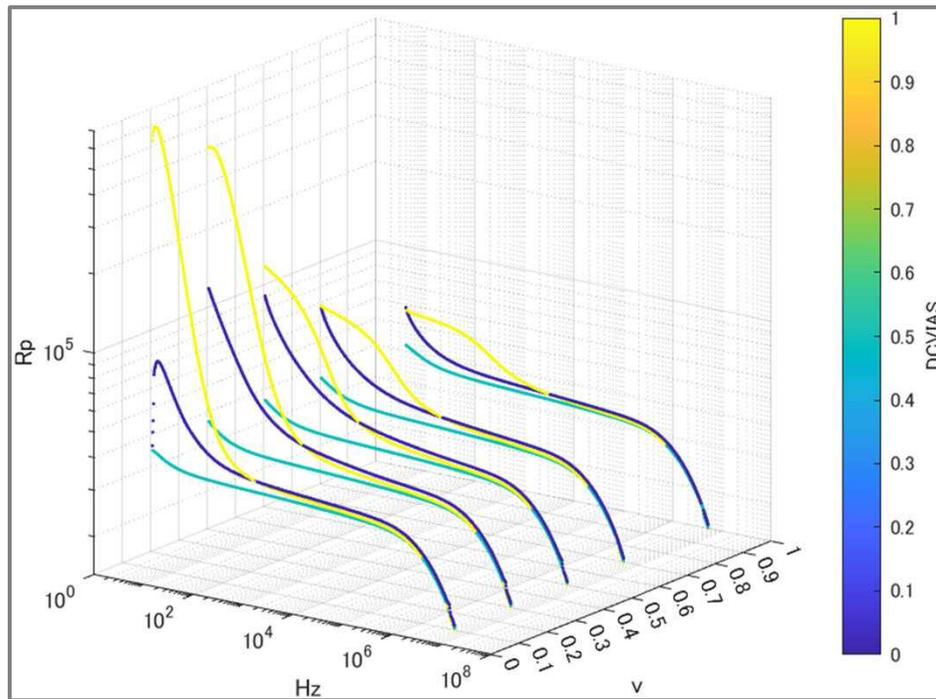
(2) 接触抵抗

❖ 電極間距離が小の場合



3. 負性容量デバイスの抵抗

(3) 試料の抵抗

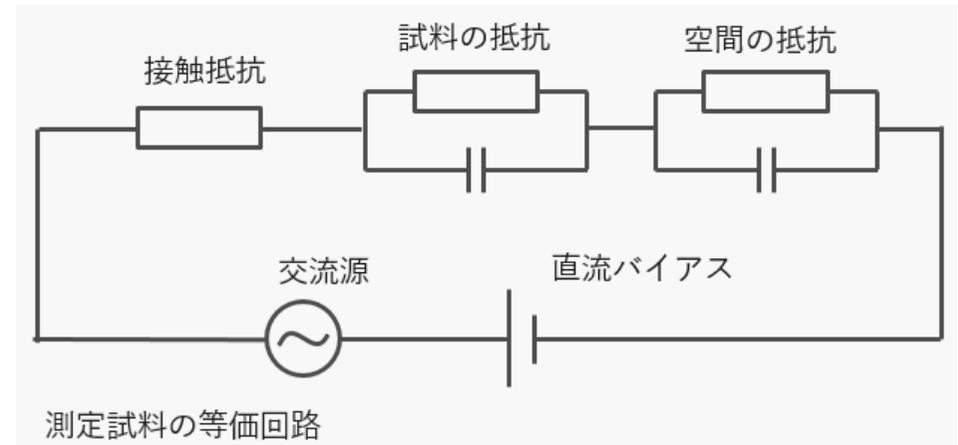
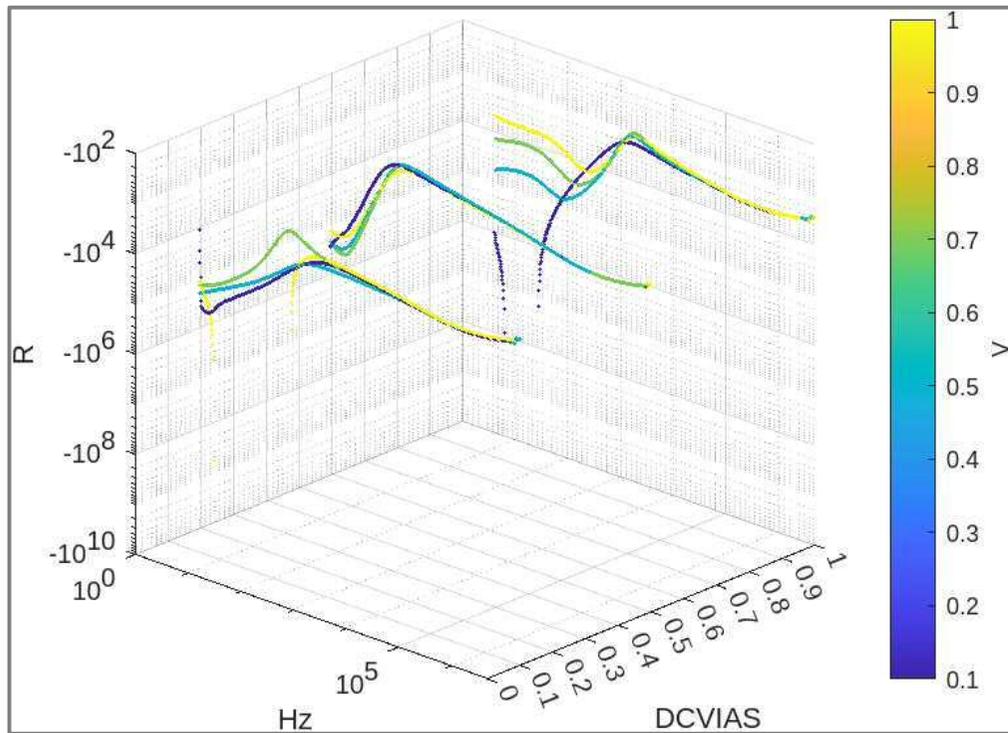


試料自身の抵抗は、通常の抵抗と同じような振る舞いを示し、周波数、DCバイアス及び交流振幅に依存する

3. 負性容量デバイスの抵抗

(4) 空間の抵抗

❖ 電極間距離が大の場合

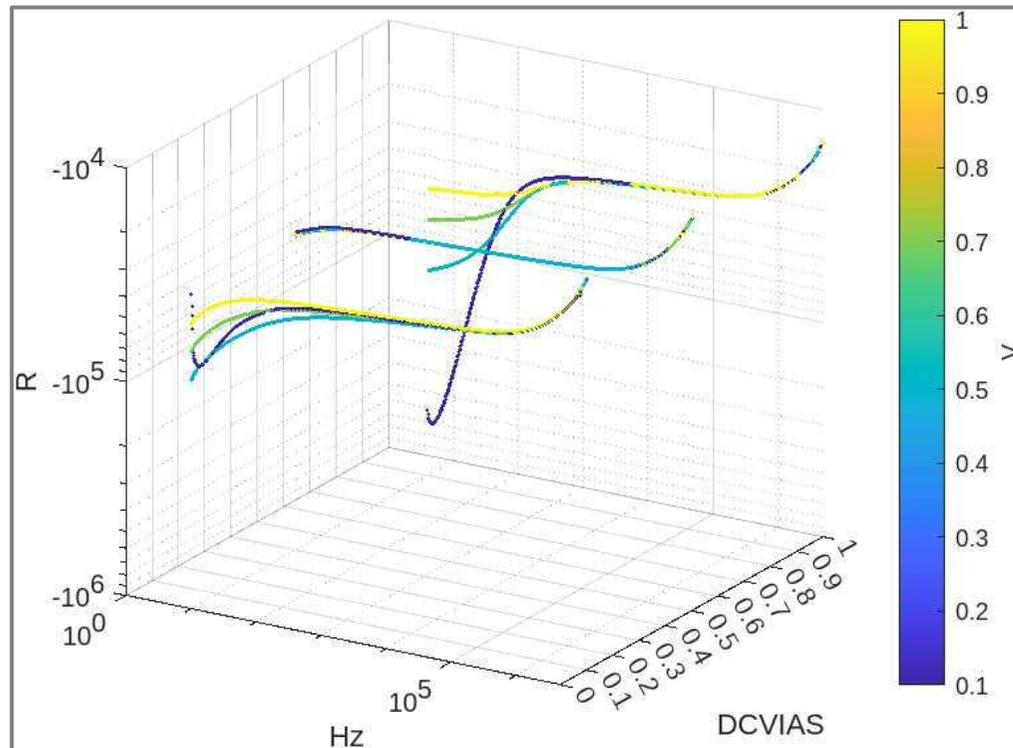


試料全体の抵抗と容量、接触抵抗及び試料の抵抗と容量の測定値から、空間の抵抗を計算

3. 負性容量デバイスの抵抗

(4) 空間の抵抗

❖ 電極間距離が中の場合

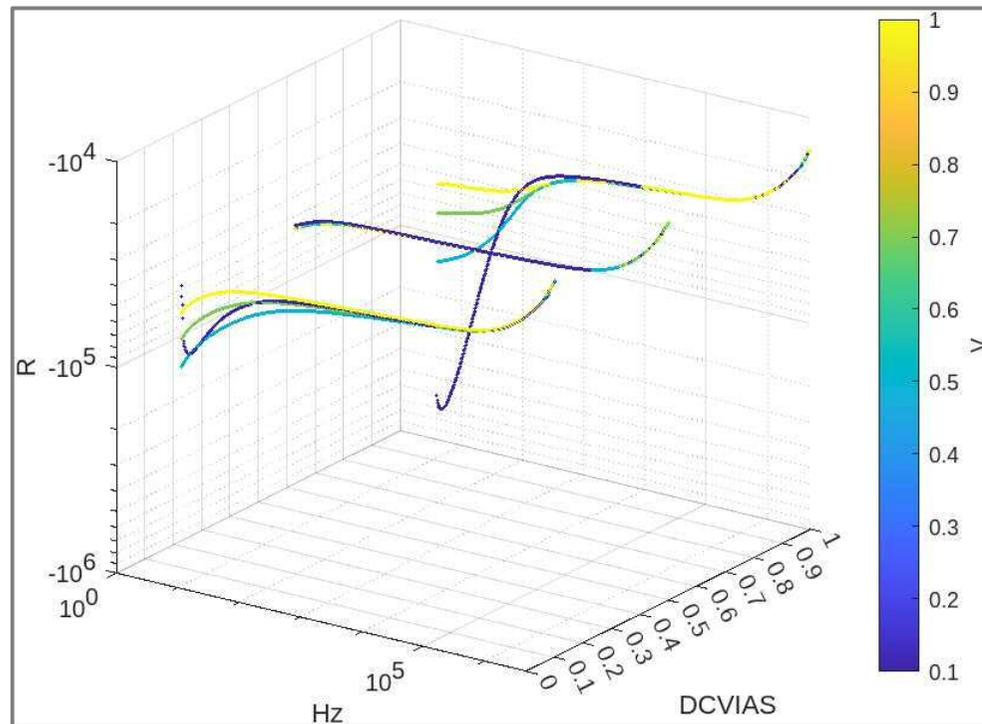


電極間距離が大の場合より、1桁大きくなるが空間の抵抗は負の値となる

3. 負性容量デバイスの抵抗

(4) 空間の抵抗

❖ 電極間距離が小の場合

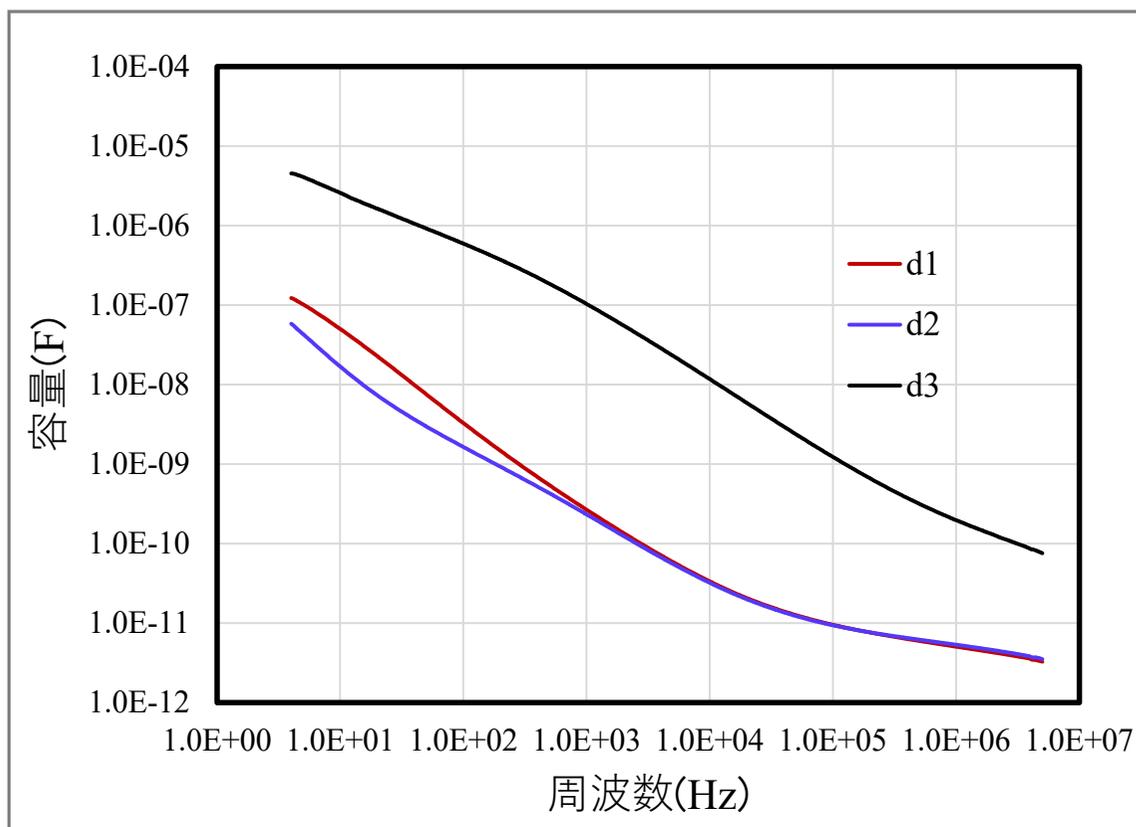


空間の抵抗は、空間距離の大きさと関係なく負の値となり、周波数、DCバイアス及び交流振幅に依存する

電極間距離が中の場合とほぼ同じである

4. 負性容量デバイスの容量

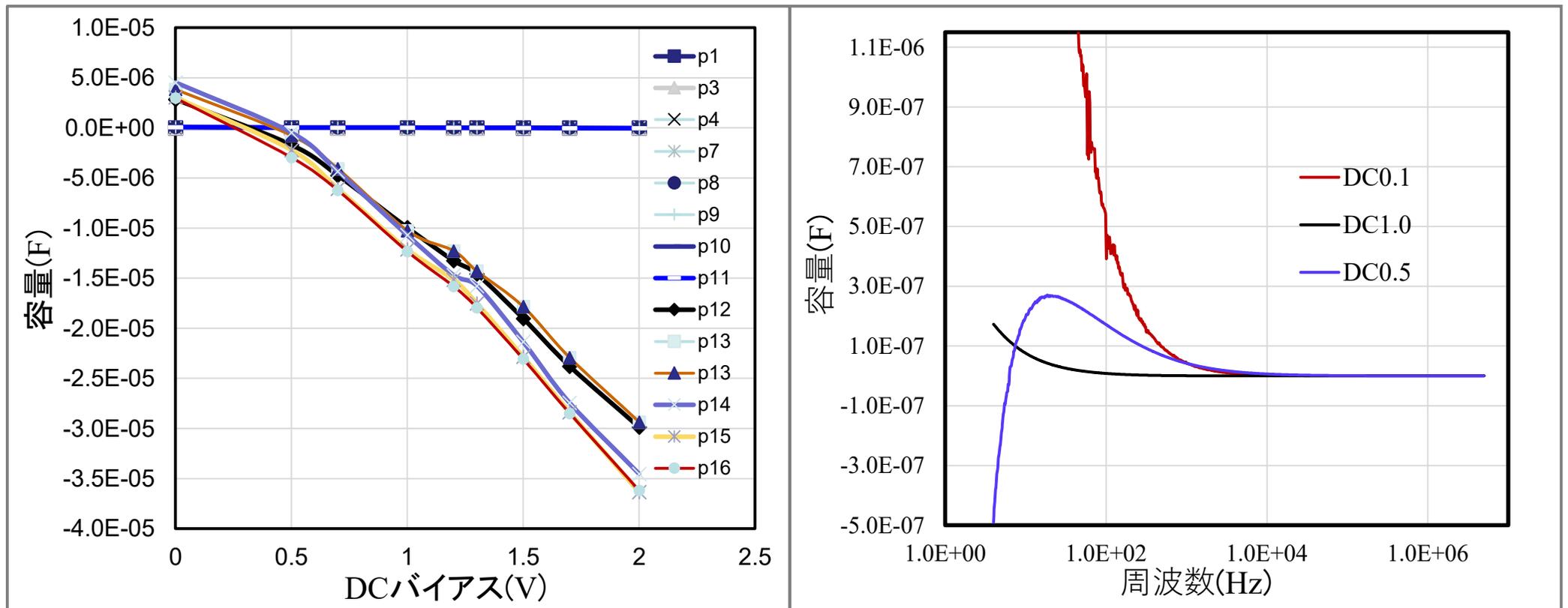
(1) 容量の空間距離依存性



電極・材料間距離 $d1 > d2 > d3$
距離の調整で容量を可変

4. 負性容量デバイスの容量

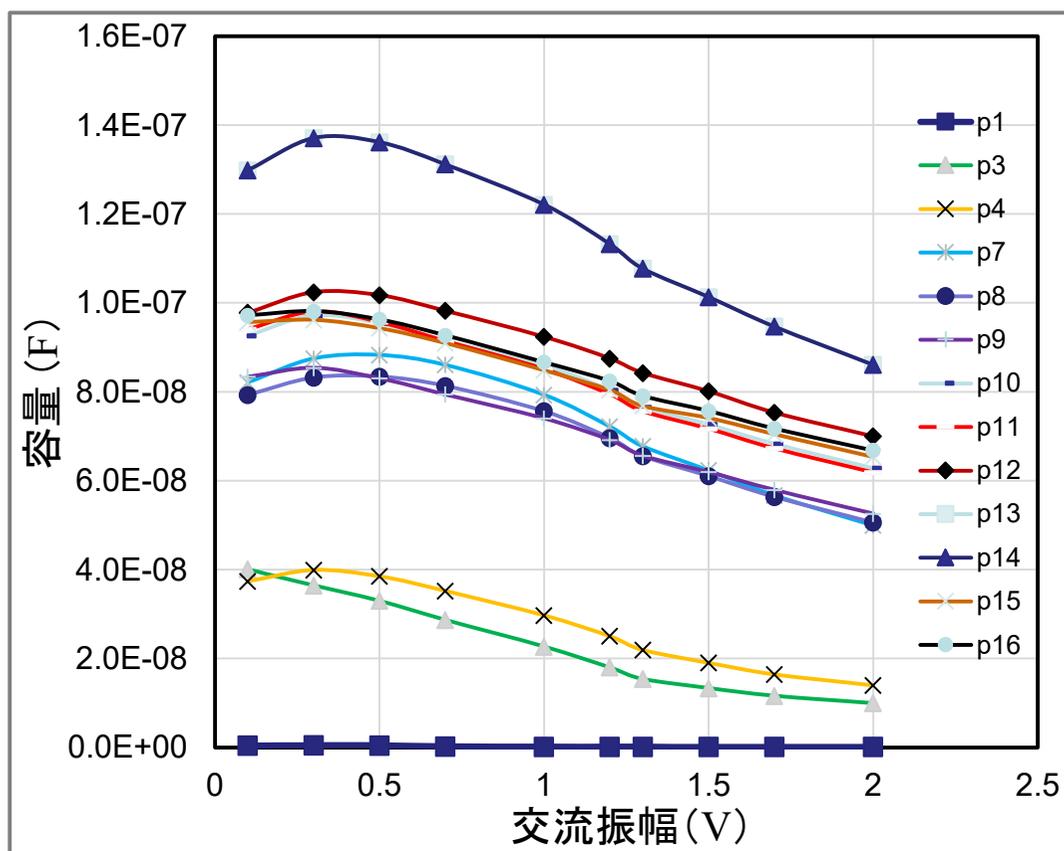
(2) 容量のDCバイアス依存性



空間距離やDCバイアスの調整で容量を正～負に可変

4. 負性容量デバイスの容量

(3) 容量の交流振幅依存性



交流振幅の増加で容量値は減少傾向にある

従来技術とその問題点

従来コンデンサの役割:

- ❖ 電荷の蓄積
- ❖ 位相調整機能 電流が電圧より $+90^\circ$ 進む

求められる役割:

- ❖ 電荷の蓄積
- ❖ 電荷の揮発性
- ❖ 位相調整機能 電流が電圧より $+90^\circ \sim -90^\circ$ 可能

新技術の特徴・従来技術との比較

- ❖ 電荷の蓄積
従来型: 大きくてもmF程度
本技術: 数F程度の実現
- ❖ 電荷の揮発性
従来型: なし
本技術: 揮発性の実現
- ❖ 位相調整機能
従来型: $0 \sim +90^\circ$
本技術: $+90^\circ \sim -90^\circ$

想定される用途

- ❖ 送配電ネットワークにおける位相調整
- ❖ 集積回路における寄生容量の除去

実用化に向けた課題

- ❖ トンネル電流発射効率の向上
- ❖ 大気中で安定するトンネル電極の開発
- ❖ トンネル電極と金属電極間の平行度と距離の精密制御

企業への期待

- ❖ 負性容量デバイスの設計と作製
- ❖ 負性容量デバイスの集積回路への実装
- ❖ 負性容量デバイスの送配電ネットワークへの応用

本技術に関する知的財産権

- ❖ 発明の名称: デバイス
- ❖ 出願番号: 特願2022-114620
- ❖ 出願人: 九州工業大学
- ❖ 発明者: 孫 勇

産学連携の経歴

- ❖ 2002年 研究助成 九州産業技術センター
- ❖ 2006年 JSTシーズ発掘試験に採択
- ❖ 2009年 JSTシーズ発掘試験Bに採択
- ❖ 2012年 助成研究 天野工業技術研究所
- ❖ 2012年 JST A-STEP事業に
- ❖ 2014年 FAIS研究開発プロジェクト創出・育成事業に採択
- ❖ 2022年 研究助成 高橋産業経済研究財団

お問い合わせ先

九州工業大学

産学イノベーションセンター

楯 純生

TEL 093-884-3498

FAX 093-884-3531

e-mail: chizai@jimu.kyutech.ac.jp