

液滴型摩擦発電機における  
液滴の挙動と出力特性の関係に関する研究

2023 年 12 月

永沼 良太

## 要旨

世界の電力消費量は 1971 年以降増加している一方、未電化人口は 7 億 5,660 万人存在する。この課題に対して、全ての人々に電力を供給できる可能性のある技術としてエネルギーハーベスティングが注目されている。近年、エネルギーハーベスティングの一つとして液滴型摩擦発電機 (Droplet-based electric generator: DEG) の出力特性に関する研究が活発に行われている。DEG は誘電体膜の上下に導電性電極を配置した簡単な構造で、数百マイクロワットの瞬時電力を発生する。DEG では、液滴と誘電体の摩擦と静電誘導を介して誘電体と導電性電極に電荷が蓄積される。液滴が導電性電極に接触すると、蓄積された電荷が外部回路へ流れることで電気出力が発生する。DEG の電気出力は液滴の挙動に強く影響を受けるが、詳細な電気出力発生メカニズム、回路モデルと液滴パラメータの関係が解明されていない。本研究では液滴パラメータ、電気出力、回路パラメータの関係を検証した。

第 1 章ではエネルギーハーベスティングのニーズとターゲット、力学的エネルギー-電気エネルギー変換方式、摩擦帯電、傾斜 3 層型 DEG の特長と本研究の目的を述べた。エネルギーハーベスティングは人々の周囲環境に存在する未利用エネルギーを電気エネルギーに変換する技術である。ターゲットは数百マイクロワット以下の低消費電力電子機器である。摩擦帯電と静電誘導を組み合わせた力学的エネルギー-電気エネルギー変換方式は、耐久性、小型化、汎用性において他の方式より有利である。本研究は、摩擦帯電と静電誘導を組み合わせた傾斜 3 層型 DEG について、詳細な電気出力発生メカニズムを明らかにし、エネルギーハーベスティング素子としての利用可能性を提示することを目的とする。

第 2 章では、傾斜 3 層型 DEG の動作原理、等価回路モデル、基礎特性を述べた。傾斜 3 層型 DEG の電気出力の起源は、液滴とポリテトラフルオロエチレン (Polytetrafluoroethylene: PTFE) の界面、液滴と上部電極の界面で電気二重層が形成される過程で発生する下部電極からの正電荷の移動である。液滴の上部電極通過時間が約 50 ms であるのに対して、電荷の移動は約 1 ms で完了する。傾斜 3 層型 DEG の等価回路は、電荷移動中の水滴と PTFE の接触面積の時間変化が無視できる場合、簡略化した RC 回路で表せる。基礎特性については、本研究で作製した傾斜 3 層型 DEG の構造、基本的な電気出力波形を示した。電気出力波形は、先行研究報告と同様の波形が得られていることを述べた。

第 3 章では水滴の力学的エネルギーと傾斜 3 層型 DEG の電気出力の関係を詳細に調査した。導電率 3.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  の水滴と 110  $\mu\text{S}/\text{cm}$  の水滴について、水滴の力学的エネルギーが増加するほど、水滴が PTFE に衝突した後の、PTFE 表面上での水滴の最大直径が増加することを確認した。電気出力は水滴と PTFE の接触面積  $S$  に比例することを見出した。ただし、導電率 3.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  の水滴においては  $S$  がある値を超えると電気出力は一定値を示した。これは水滴と PTFE の界面で電気二重層形成に寄与する水滴内陽イオン数に上限があることが原因であると考察した。高導電率の水滴と低導電率の水滴の出力電圧の比は、第 4 章で導

出した内部抵抗値と開放電圧から算出した出力電圧の比とおおよそ一致していた。

第4章では、傾斜3層型 DEG が簡単な RC 回路でモデル化が可能であるかを検討し、液滴パラメータと回路パラメータの関係を検証した。傾斜3層型 DEG の出力電圧波形の減衰時定数から求めた静電容量と PTFE シートの静電容量の計算値はおおよそ一致した。また、傾斜3層型 DEG の電圧-電流特性と PTFE シートの静電容量から見積もった PTFE 帯電電荷密度と PTFE 帯電電荷密度の文献値は同程度であった。以上より傾斜3層型 DEG の回路モデルは、水滴の電気抵抗と PTFE の静電容量から構成される RC 回路であることが明らかになった。水滴の電気抵抗は、水滴の導電率の増加とともに増加し、水滴の形状に依存した。水滴は PTFE 上を薄く広く伸び広がるほど、水滴内の陰イオンの移動経路が長く、断面積が狭い。したがって水滴の電気抵抗が高くなる。PTFE の静電容量は水滴と PTFE 接触面積で決まる。開放電圧は、水滴の落下高さが一定の場合、水滴導電率に依存しないことがわかった。水滴の形状と開放電圧の関係については、水滴の力学的エネルギーが高いほど水滴と PTFE の衝突時の衝撃が強く、PTFE の摩擦帯電量すなわち帯電電荷密度が高いため、開放電圧が上昇する。本章で得られた回路パラメータを適用して、雨滴 1 滴から出力される最大瞬時電力を算出した。落下高さ 30 mm、落下点から上部電極までの距離 10 mm、負荷抵抗値 3 M $\Omega$ とした場合、雨滴 1 滴から出力される最大瞬時電力はおおよそ 833  $\mu$ W であった。

第5章では、本研究によって得られた知見を述べた。傾斜3層型 DEG は、エネルギーハーベスティングのターゲットとして考えられている温度・光センサー等、各種電子機器に利用できる可能性があることが明らかになった。本研究によって得られた電力供給技術に関する新しい知見が、未電化人口ゼロなど、社会的課題の解決に貢献できると期待する。

# 目次

## 第1章 序論

|   |    |
|---|----|
| 1.1 エネルギーハーベスティング .....                                       | 1  |
| 1.2 力学的エネルギー-電気エネルギー変換方式 .....                                | 3  |
| 1.3 摩擦帯電 .....  | 6  |
| 1.4 摩擦帯電+静電誘導方式における PTFE の有用性 .....                           | 10 |
| 1.5 液滴型摩擦発電機 (Droplet-based electricity generator: DEG) ..... | 11 |
| 1.6 本研究の目的 .....  | 12 |
| 1.7 本論文の構成 .....  | 13 |
| 参考文献 .....  | 14 |

## 第2章 傾斜3層型 DEG の動作原理

|                   |    |
|-------------------|----|
| 2.1 緒言 .....      | 18 |
| 2.2 動作原理 .....    | 18 |
| 2.3 等価回路モデル ..... | 21 |
| 2.4 基礎特性 .....    | 23 |
| 2.5 結言 .....      | 26 |
| 参考文献 .....        | 26 |

## 第3章 力学的エネルギーと電気出力

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 3.1 緒言 .....                        | 28 |
| 3.2 電気出力測定方法 .....                  | 28 |
| 3.3 力学的エネルギーと PTFE 表面衝突後の水滴直径 ..... | 30 |
| 3.4 水滴落下点から電極までの距離と電気出力 .....       | 33 |
| 3.5 水滴落下高さと電気出力 .....               | 37 |
| 3.6 水滴/PTFE 接触面積と電気出力 .....         | 38 |
| 3.7 結言 .....                        | 43 |
| 参考文献 .....                          | 44 |

## 第4章 回路モデルと液滴パラメータ

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 4.1 緒言 .....            | 45 |
| 4.2 RC 回路モデル .....      | 45 |
| 4.3 水滴導電率と回路パラメータ ..... | 48 |
| 4.4 水滴形状と回路パラメータ .....  | 53 |
| 4.5 出力電力 .....          | 57 |

|              |    |
|--------------|----|
| 4.6 結言 ..... | 58 |
| 参考文献.....    | 59 |

## 第5章 結論

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 5.1 緒言 .....            | 60 |
| 5.2 本研究によって得られた知見 ..... | 60 |
| 5.3 結言 .....            | 62 |
| 参考文献.....               | 63 |

|            |    |
|------------|----|
| 業績一覧 ..... | 64 |
|------------|----|

|         |    |
|---------|----|
| 謝辞..... | 65 |
|---------|----|

# 第1章 序論

## 1.1 エネルギーハーベスティング

世界のエネルギー消費量（一次エネルギー）が経済成長とともに増加を続ける中、電力消費量においても1971年以降、年平均5.0%の増加率でほぼ一貫して増加が続いている。その一方で、電力供給を受けていない人々がサブサハラアフリカや東南アジア、太平洋諸国など開発途上の国と地域を中心に7億5,660万人存在する[1]。特にアフリカの未電化人口は全世界の未電化人口の77%を占め、大きな政策課題の1つとなっている。図1.1に世界の電力消費量の推移と未電化人口を示す。

2015年にニューヨーク国連本部において開催された国連サミットで採択された持続可能な開発目標（SDGs：Sustainable Development Goals）では、2030年までに持続可能でよりよい世界を目指すために達成すべき17の目標・169のターゲットが掲げられている。SDGsでは世界全体の経済、社会及び環境の三側面を不可分のものとして調和させ、誰地球上の「誰一人取り残さない（leave no one behind）」の理念のもと、目標7において『すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的なエネルギーへのアクセスを確保する』ことが表明されている。この目標を達成するため、エネルギー関連インフラの拡大、クリーンエネルギー技術への投資など、様々な施策が、我が国を初め先進国だけでなく途上国においても積極的に取り組まれている。世界の未電化人口ゼロを達成するためには、発電、送配電、再生可能エネルギーによる分散型電源など、電力供給インフラへの大規模な投資が必要とされる。しかしながら、内陸開発途上国、島嶼開発途上国を含むあらゆる国と地域に電力供給インフラを導入、維持することは容易なことではない。

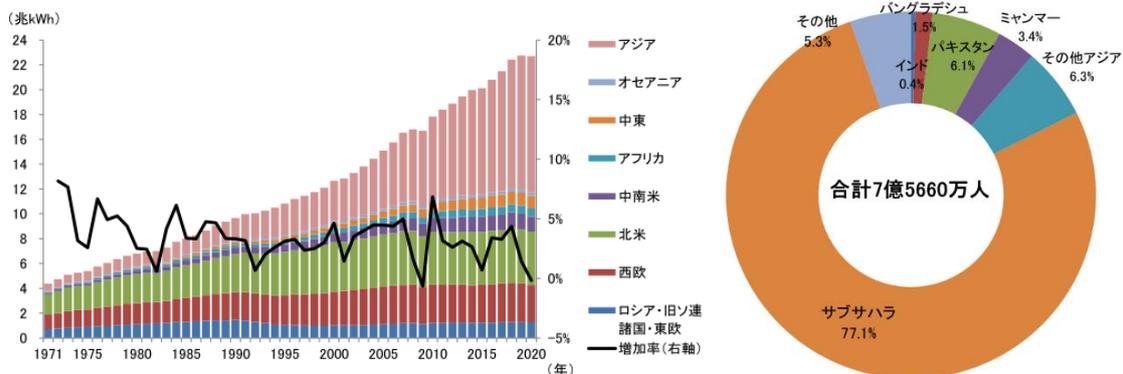


図 1.1 世界の電力消費量の推移と未電化人口[1]

そこで人々の身近な周囲環境に存在する未利用で微小な自然または人工的エネルギーを何らかの方法で収穫し、電気エネルギーに変換して利用することができれば、大規模な電力供給インフラの整備が困難な地域においても人々に電力を供給することができる。また、環境に存在するエネルギーを電気エネルギーに変換することができれば、二酸化炭素やメタンガスなど温室効果ガスを排出しない良質な電気エネルギーを人々に提供することができる。我々の身の回りには、人の歩行や運動時の身体の振動、蛇口の水の流れ、照明の光、人や動物の体温など、微小ではあるが利用されていないエネルギー源が存在する。

近年、人々の身近に存在する未利用エネルギーを収穫し、電気エネルギーに変換する技術であるエネルギーハーベスティングが、各種電子機器に電源を供給し得る新しい技術として注目されている[2,3,4]。現在、エネルギーハーベスティングのターゲットとして考えられている温度・光センサー、RFID Tag (Passive)、ペースメーカー、補聴器など、消費電力が数百マイクロワット以下の電子機器である。エネルギーハーベスティングの対象とされる供給電力の範囲、各種電子機器とその消費電力を図 1.2 に示した[5,6]。エネルギーハーベスティングによる電力供給が実現されれば、環境から持続的にエネルギーを収穫するため、電池不要の自立型電源として電子機器へ電力を供給することが期待される。

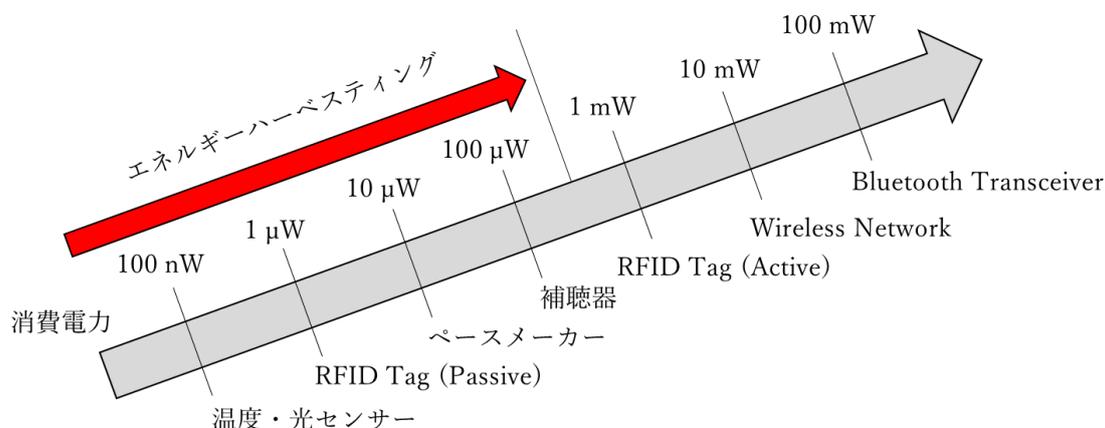


図 1.2 各種電子機器の消費電力とエネルギーハーベスティングのターゲット [5,6]

環境に存在するエネルギーには、力学的エネルギー、電磁波エネルギー、熱エネルギーがある。これらのエネルギーの内、力学的エネルギーは人間や機械の動作、水や風の流れなど最も身近に存在するエネルギーであることから、比較的アクセスが容易なエネルギーである。次節では力学的エネルギーを電気エネルギーに変換する方法を述べる。

## 1.2 力学的エネルギー—電気エネルギー変換方式

力学的エネルギーを電気エネルギーに変換する方法として、静電誘導、電磁誘導、圧電効果、逆磁歪効果を利用する 4 つのエネルギー変換方式がある[2,3,4]。各エネルギー変換方式の概略図を図 1.3 に示す。

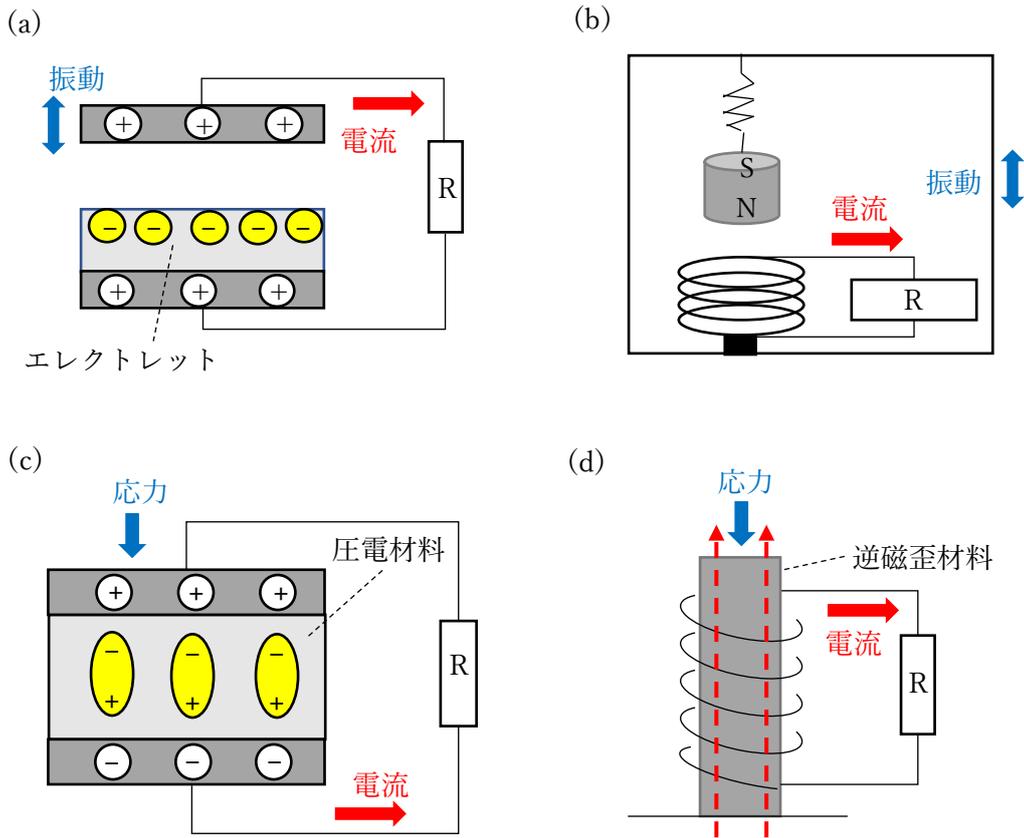


図 1.3 力学的エネルギー—電気エネルギー変換方式  
(a)静電誘導方式、(b)電磁誘導方式、(c)圧電方式、(d)逆磁歪方式

静電誘導方式では、イオン注入やコロナ放電によって帯電させたポリテトラフルオロエチレン (Polytetrafluoroethylene: PTFE) や四フッ化エチレン・六フッ化プロピレン重合体 (Fluorinated Ethylene Propylene: FEP) などエレクトレット材料をコンデンサ電極間に挿入することで、エレクトレット材料の帯電電荷が誘発する静電誘導によりコンデンサ電極に誘導電荷を発生させる。人間の歩行や自動車の走行、建物の揺れなど外部環境の振動に連動してコンデンサ電極が振動すると、コンデンサの電極間距離が変化する。コンデンサの電極間距離が変化的ることにより、電極の誘導電荷量が増減し、コンデンサに接続した負荷回

路に電流が流れる。

電磁誘導方式では、ネオジムなど永久磁石の下方にコイルを設置し、コイルに負荷回路が接続される。永久磁石が外部環境の振動に連動して振動することでコイルを貫く磁束が変化し、電磁誘導によりコイルと負荷回路に電流が流れる。

圧電効果方式では、圧電材料として強誘電体をコンデンサ電極間に挿入する。コンデンサ電極に応力が加わると圧電材料に電気分極が発生する。電気分極により発生する分極電荷がコンデンサの電極に自由電荷を誘導、コンデンサに接続された負荷回路に電流が流れる。

逆磁歪効果方式では、負荷回路を接続したコイルに逆磁歪材料を挿入する。逆磁歪材料に外部から応力が加わると、逆磁歪材料から発生する磁束が変化する。この磁束の変化によりコイルに誘導起電力が発生し、外部回路に電流が流れる。

圧電効果方式、逆磁歪効果方式では材料に機械的なストレスが断続的に加わる。このため材料の耐久性の強化が課題となる。また、強誘電体としてフッ化ビニリデンと三フッ化エチレンの共重合体、逆磁歪材料として鉄とガリウムの合金、テルビウムとジスプロジウムと鉄の合金など、特殊な材料が必要とされる。電磁誘導方式、逆磁歪効果方式では材料の他にコイルを設置する必要があるため、素子の小型化の点においては不利になる。静電誘導方式ではイオン注入やコロナ放電など特殊な方法により、エレクトレット材料を事前に帯電させる必要がある。一方、摩擦帯電と静電誘導を組み合わせた方式では、素子を使用環境に設置した後、環境に存在する力学的エネルギーを利用して材料を自立的に帯電させることが可能である。

摩擦帯電と静電誘導を組み合わせた力学的エネルギー—電気エネルギー変換方式として、図 1.4(a)に固体・固体摩擦帯電+静電誘導方式、図 1.4(b)に液体・固体摩擦帯電+静電誘導方式を示す。

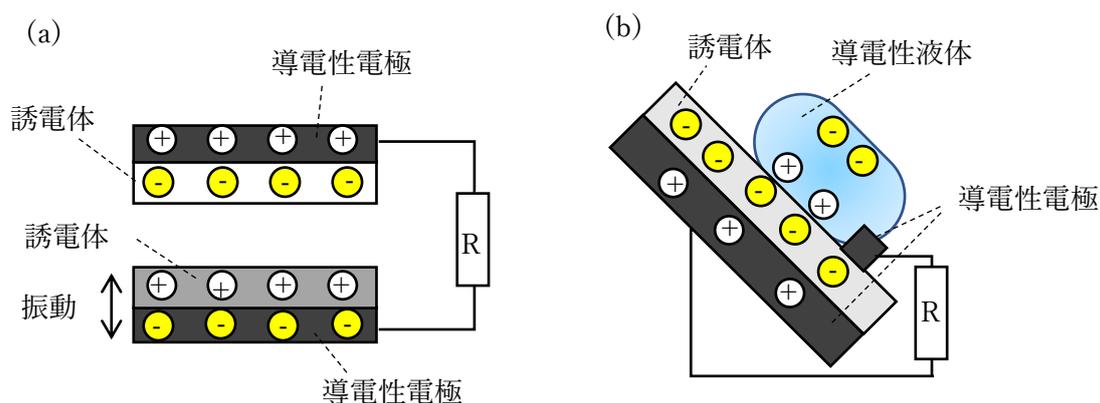


図 1.4 摩擦帯電と静電誘導を組み合わせた力学的エネルギー—電気エネルギー変換方式  
(a) 固体・固体摩擦帯電+静電誘導方式、(b) 液体・固体摩擦帯電+静電誘導方式

固体・固体摩擦帯電+静電誘導方式では、コンデンサを構成する導電性電極間に PTFE とポリイミドなど異なる誘電体材料を挿入する。外部環境の振動に連動して一方の電極と誘電体を上下または水平に振動させる。異なる誘電体同士が摩擦と分離を繰り返すことで各誘電体が正負に帯電する。この結果、帯電電荷が誘起する静電誘導によって導電性電極に自由電荷が誘導され、電極に接続した負荷回路に電流が流れる。

液体・固体摩擦帯電+静電誘導方式では、導電性液体と誘電体の摩擦により誘電体が帯電する。誘電体の帯電電荷が誘起する静電誘導により導電性電極に自由電荷が誘導され、負荷回路に電流が流れる。

摩擦帯電と組み合わせた方式を含め、静電誘導方式はコイルを使用しないことから他の方式と比較して小型化が可能である。特に液体・固体摩擦帯電+静電誘導方式では導電性液体として水など身近に存在する材料から電気出力を得ることが可能である。このことから液体・固体摩擦帯電+静電誘導方式は、自然環境に豊富に存在するエネルギー源を利用してエネルギーハーベスティングを実現できる大きな可能性がある。

表 1.1 に各力学的エネルギー—電気エネルギー変換方式の性質について、他方式と比較して有利な項目を○、不利な項目を△で示した。圧電効果方式、逆磁歪効果方式は材料に機械的ストレスが加わるため、固体・固体摩擦帯電+静電誘導方式は固体同士の摩擦が繰り返されるため耐久性で不利になる。電磁誘導方式、逆磁歪効果方式では材料に加えコイルを使用することから小型化の点で不利である。また圧電効果方式、逆磁歪効果方式はそれぞれ強誘電体、逆磁歪材料など特殊な材料を使用することから汎用性を△とした。静電誘導方式、液体・固体摩擦帯電+静電誘導方式では材料に機械的ストレスが加わらず、コイルや特殊な材料も使用しないことから、各性質に関して他方式と比較して有利である。

表 1.1 各力学的エネルギー—電気エネルギー変換方式の性質に対する比較

| エネルギー変換方式      | 耐久性 | 小型化 | 汎用性 |
|----------------|-----|-----|-----|
| 静電誘導           | ○   | ○   | ○   |
| 電磁誘導           | ○   | △   | ○   |
| 圧電効果           | △   | ○   | △   |
| 逆磁歪効果          | △   | △   | △   |
| 固体・固体摩擦帯電+静電誘導 | △   | ○   | ○   |
| 液体・固体摩擦帯電+静電誘導 | ○   | ○   | ○   |

静電誘導方式と液体・固体摩擦帯電+静電誘導方式比較すると、前者は前述のとおりイオン注入やコロナ放電による誘電体の事前帯電が必要であるのに対し、後者は使用環境に存在する液体との摩擦帯電を利用するため事前帯電が不要である。この点において静電誘導

方式よりも液体・固体摩擦帯電+静電誘導方式は利便性が高い。

### 1.3 摩擦帯電

本節では物質間の電荷移動に起因する帯電現象である接触帯電、摩擦帯電+静電誘導方式の重要な基礎となる現象である摩擦帯電について記述する。

異なる物質同士が、互いの最外殻電子の波動関数が重なる程度にまで近づくと、仕事関数の小さい物質から最外殻電子が界面ポテンシャルを超えて他方の物質へ移動する。界面を移動した電子はその物質の表面準位を占有し、物質同士が分離した後も表面ポテンシャルに束縛される[7]。その結果、一方の物質は正極性に、他方は負極性に帯電する。これが接触帯電であるが、接触する物質が固体の場合、表面に微視的な凹凸が存在するため、電荷が移動できるほどの表面間隔になっている部分の面積（有効接触面積）は見かけの接触面積よりも小さい。そのため、単に物質同士を巨視的に接触させただけでは発生する電荷は少ない。しかし、接触面が擦り合わされると微視的な両物質間距離が近づき、有効接触面積が増加することにより帯電量が増加する。この帯電様式を摩擦帯電という[8]。電子の波動関数の重なりに基づいて摩擦帯電を説明する電子雲-ポテンシャル井戸モデル[7]を図 1.5 に示す。本モデルでは、原子または分子内の特定の軌道を占有する電子によって電子雲が形成される。原子はポテンシャル井戸を形成し、核外電子はポテンシャル井戸に緩く束縛され、電子雲を形成している。図 1.5 中の  $d$  は物質 A と物質 B の電子雲間距離、 $E_A$  と  $E_B$  は物質 A と物質 B の占有された電子エネルギー準位、 $E_1$  と  $E_2$  は物質 A と物質 B のポテンシャル井戸の深さを表している。物質 A と物質 B の仕事関数はそれぞれ  $(E_1 - E_A)$ 、 $(E_2 - E_B)$  と表され、図 1.5 では  $(E_1 - E_A) < (E_2 - E_B)$  である。物質 A と物質 B が巨視的に接触した状態(a)では、両物質の電子はポテンシャル井戸の中に局在しているため両物質の界面を移動できない。両物質の電子雲が重なる程度にまで近づくと(b)、ポテンシャル井戸は非対称な二重井戸構造になり、電子は物質 A から物質 B へ移動することができる。両物質が分離した後(c)では、物質 B に移動した電子はエネルギー障壁  $E_2$  によって物質 B に束縛される。この結果、物質 A が正に、物質 B が負に帯電する。

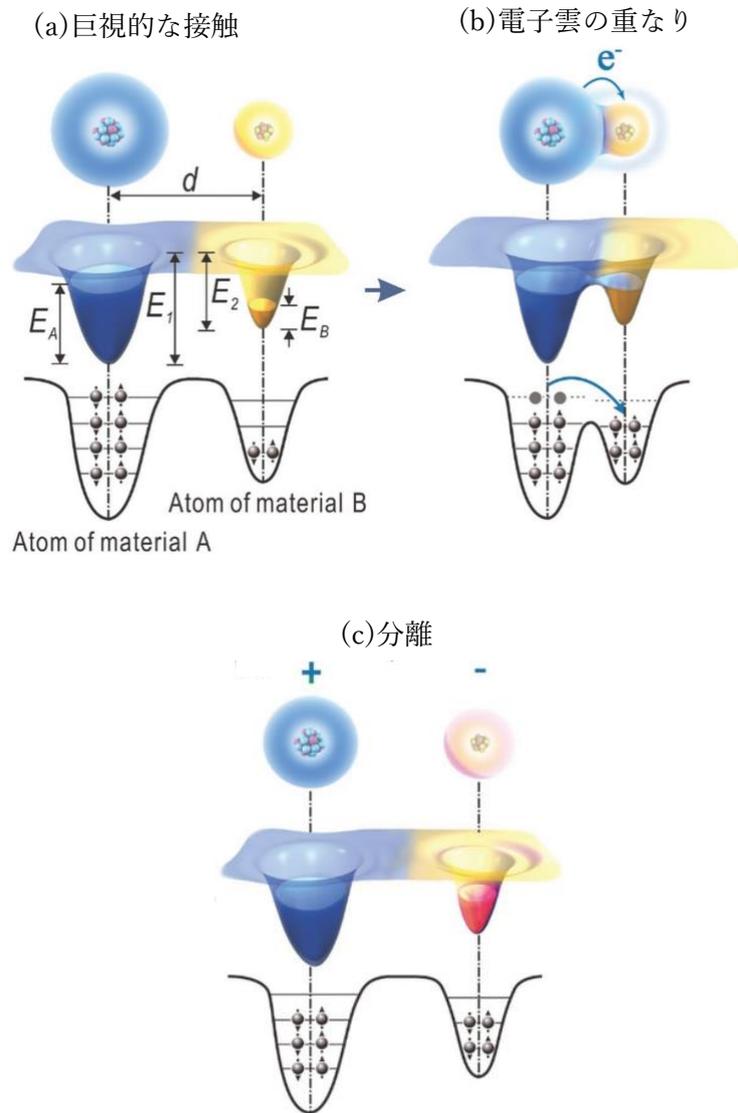


図 1.5 電子雲－ポテンシャル井戸モデルに基づく摩擦帯電[7]

液体と固体摩擦帯電の場合、例えば水・PTFE[9,10,11]、水・二酸化ケイ素[10]、硫化銅水溶液／塩化ナトリウム水溶液／水酸化ナトリウム水溶液・PTFE[11]、水・FEP[12]の摩擦の結果、液体から電子またはイオンが固体表面へ移動することによって液体と固体が帯電することが確認されている。水が PTFE 表面上を移動する場合、水中で電離している一部の水素イオンと水酸化物イオンが PTFE 表面に吸着し[13]、水分子中の酸素原子の価電子を PTFE 表面のフッ素原子が受容する帯電モデルが報告されている[11,14]。図 1.6 に水と PTFE の電子雲－ポテンシャル井戸モデル[11]、図 1.7 に水と PTFE の摩擦帯電の概略図を示した。水分子中の酸素原子の核外電子が電子雲を形成、酸素原子がポテンシャル井戸

を形成する。水と PTFE が巨視的に接触した状態 (図 1.6(a)) では、両物質の電子はポテンシャル井戸に束縛されているため、電子は水と PTFE の界面を移動できない。PTFE 分子と酸素原子の電子雲が重なると (図 1.6(b))、電子は酸素原子から移動し、PTFE 分子の最低空分子軌道 (Lowest Unoccupied Molecular Orbital: LUMO) を占有する。水と PTFE が分離した後 (図 1.6(c)) も、PTFE へ移動した電子はポテンシャル井戸に束縛される。この結果、PTFE が負に帯電し、水が正に帯電する。

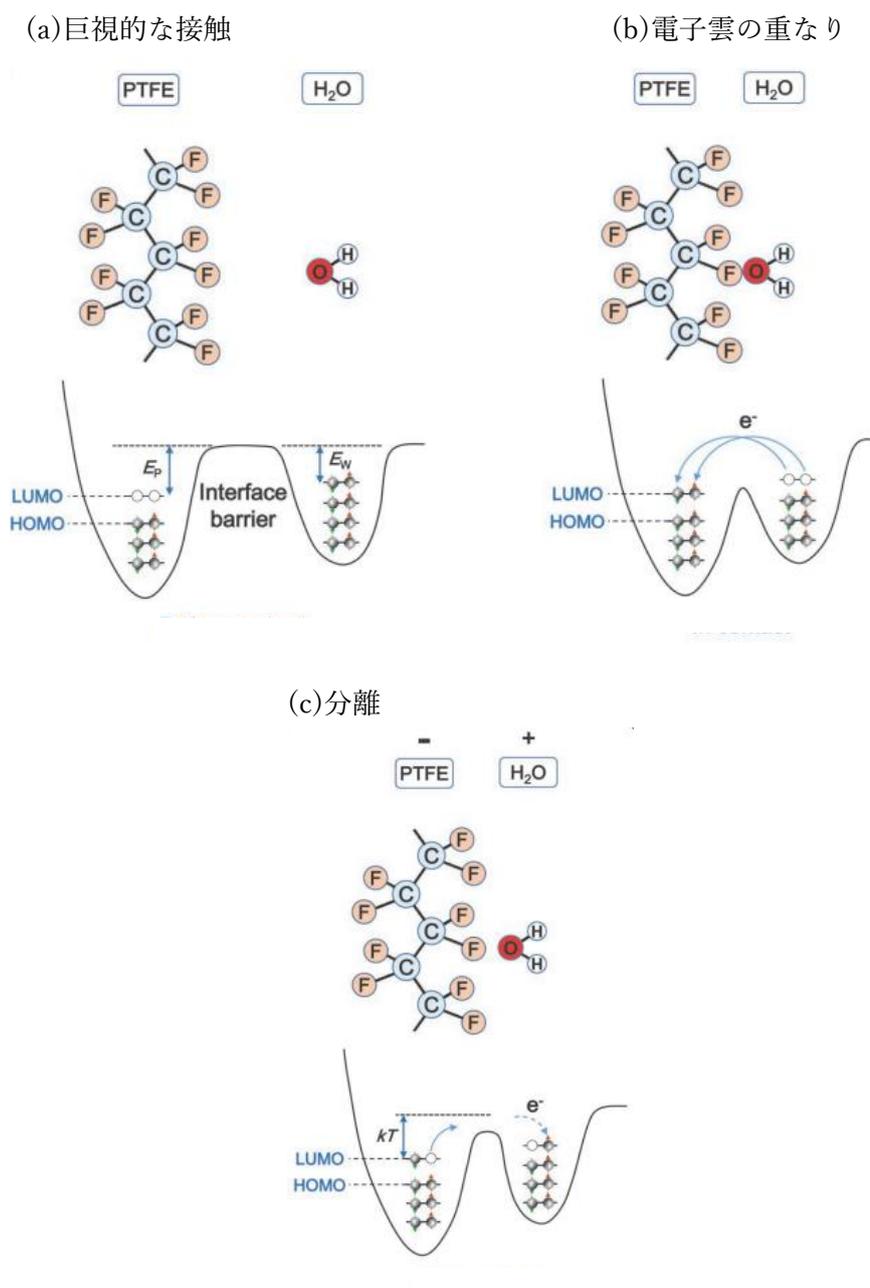


図 1.6 水と PTFE の電子雲-ポテンシャル井戸モデルに基づく摩擦帯電[11]

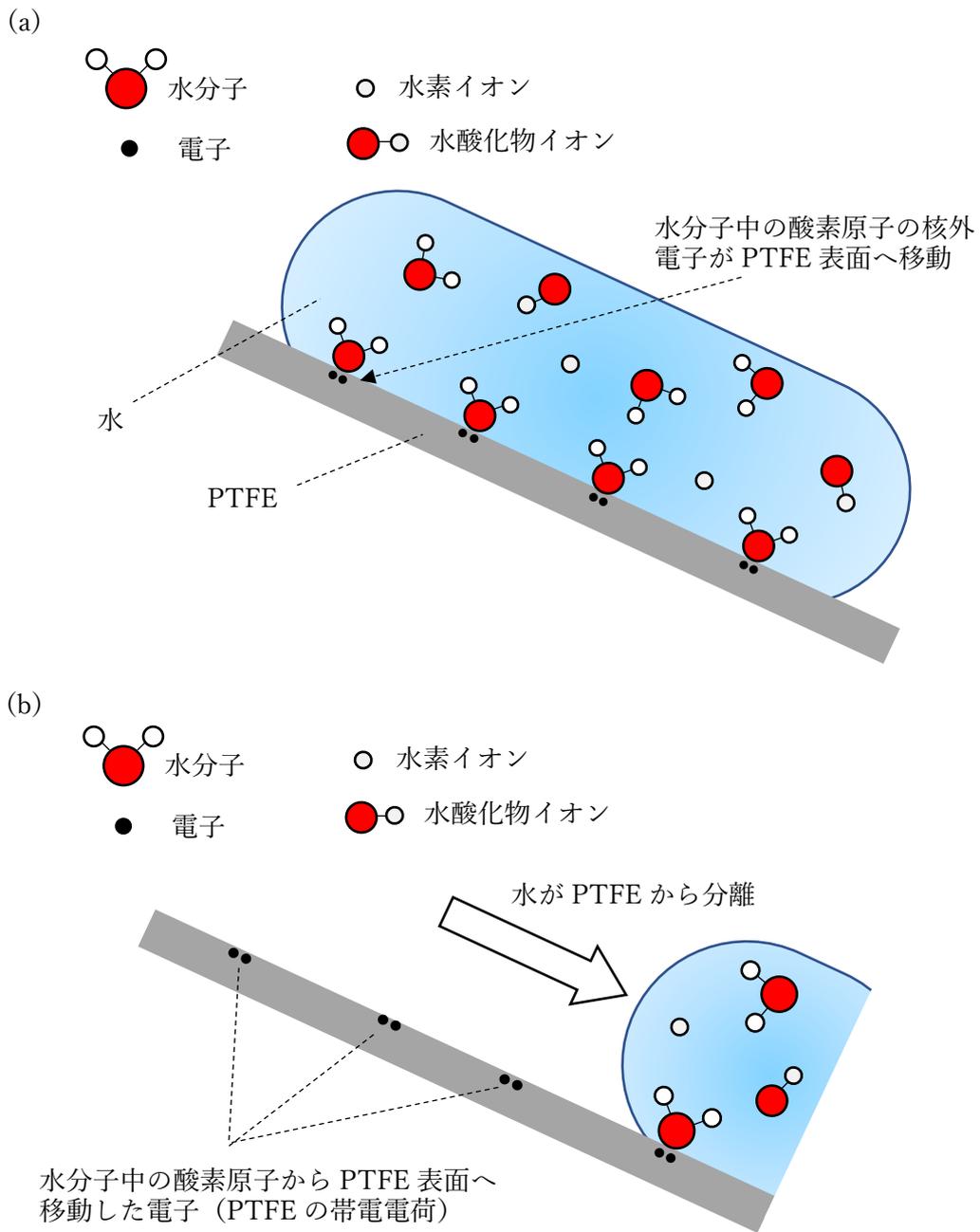


図 1.7 水と PTFE の摩擦帯電  
 (a) 水分子中の酸素原子から PTFE 表面への電子の移動、(b)水が PTFE から分離後の PTFE の帯電

#### 1.4 摩擦帯電+静電誘導方式における PTFE の有用性

PTFE はポリエチレンのすべての水素原子がフッ素原子に置換された、代表的なフッ素樹脂ポリマーである。比誘電率が 2.1、誘電正接が 0.0003 未満と低く、抵抗率が  $10^{18} \Omega\text{cm}$  以上と高いため[15,16]、高性能の絶縁材料として電線をはじめ電気電子工業の分野に広く使用されている。またフッ素原子の強い電子吸引性のため、PTFE は帯電しやすい材料である。図 1.8 は、各種誘電体ポリマーと、イオン交換水で生成された水滴を摩擦させた後の水滴の帯電電荷量である[17]。水滴の帯電電荷量が多いほど、水滴はポリマーとの摩擦によって多数の電子が奪われ、ポリマーの負の帯電量が多いと考えてよい。各種誘電体ポリマーとして主鎖は類似しているが側鎖の置換基が異なる材料が比較されている。各誘電体側鎖の置換基は、ポリプロピレン (PP) がメチル基 (-CH<sub>3</sub>)、ポリビニルアルコール (PVC) がヒドロキシ基 (-OH)、ポリエチレン (PE) が水素 (-H)、ポリフッ化ビニリデン (PVDF) がジフルオロメチレン基 (-CF<sub>2</sub>-)、PTFE がテトラフルオロエチレン基 (-C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>-)、FEP がテトラフルオロエチレン基 (-C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>-) とトリフルオロメチル基 (-CF<sub>3</sub>) である。PVDF、PTFE、FEP がフッ素原子を含む材料であり、この順に側鎖のフッ素原子数が多い。フッ素は全元素のうち最大の電気陰性度を有し、強い電子求引性の置換基効果を発揮することから、側鎖のフッ素原子数が多いほど誘電体ポリマーの帯電量は増加していると考えられる。PTFE は FEP と比較して帯電量が低い、安価で入手性が高いことから、摩擦帯電+静電誘導方式の力学的エネルギーハーベスティングの研究に最も使用されている材料である。

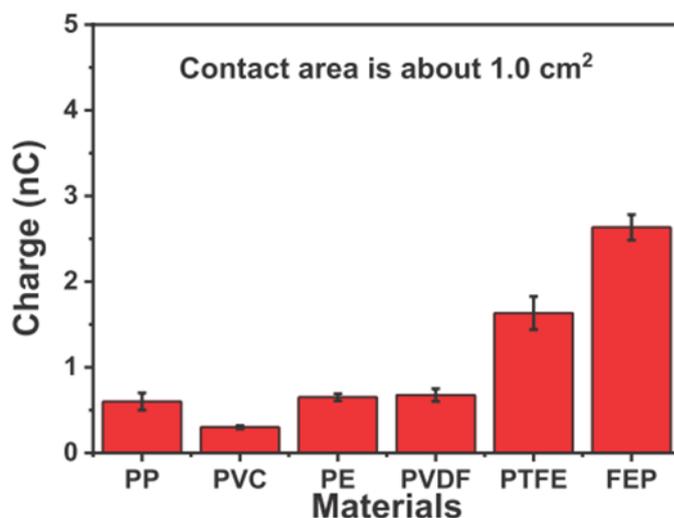


図 1.8 イオン交換水と各種誘電体の摩擦帯電電荷量[17]

## 1.5 液滴型摩擦発電機 (Droplet-based electricity generator: DEG)

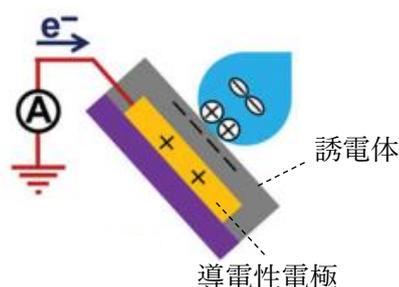
液滴型摩擦発電機 (Droplet-based electricity generator: DEG) は液滴と誘電体の摩擦帯電と静電誘導を利用し、マイクロワットからミリワットオーダーの瞬時電力を得ることができる小型発電機である。構造は誘電体膜の上部または下部に導電性電極を配置した簡単な構造である。DEG では、誘電体膜上に落下する液滴と誘電体の摩擦により誘電体が帯電、静電エネルギーが蓄積される。誘電体が帯電した状態で、液滴と誘電体または導電性電極の接触がスイッチとなり、外部に接続した負荷回路に電流が流れることで電気出力が発生する。DEG のエネルギー源は液滴と誘電体の摩擦過程で誘電体に蓄積される帯電電荷である。ただし、液滴の力学的エネルギーが、液滴と誘電体の摩擦帯電が発生する接触面積の拡大のために使用される。このことから DEG は力学的エネルギーハーベスティング素子と位置づけられる。

2014 年、最初の DEG として、水道水から生成した液滴と PTFE の摩擦及び静電誘導を利用して、最大瞬時電力密度  $20 \text{ mW/cm}^2$  を出力したことが報告された[18]。これ以降、多数の研究グループが身近な環境に存在する液体を利用した新しい小型発電機の実用化を目指し、DEG の電気出力特性、DEG の出力端子に全波整流回路とコンデンサを接続した蓄電の可能性などが研究されている[18-36]。

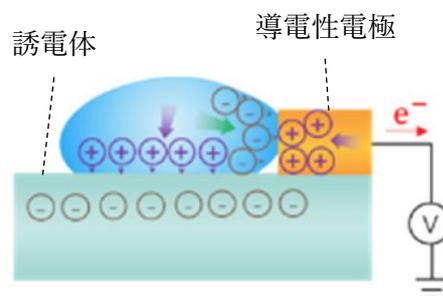
DEG は構造の違いにより図 1.9 に示した 4 つのタイプ(a)~(d)に分類される。(a) 傾斜 2 層下部電極接地型は、誘電体の下側に導電性電極が設置される。液滴との摩擦によって帯電した誘電体上に液滴が落下すると、液滴内に存在するイオンが誘電体の帯電電荷との間のクーロン力に引き付けられ、誘電体の帯電電荷が中和される。帯電電荷の中和により、導電性電極に電荷を誘起していた静電誘導が減弱する。これによって接地端子から導電性電極に電荷が供給される。この電荷の流れが電気出力となる。液滴は落下の都度誘電体上から滑り落ちるため、間欠的に液滴を落下させることで連続動作が可能である。しかし、落下する液滴が帯電した誘電体に接触する瞬間の接触部は  $20 \text{ mm}^2 \sim 30 \text{ mm}^2$  であることから、電気出力に寄与する帯電電荷量が少ない。したがって他のタイプより得られる瞬時電力は低い。(b) 2 層上部電極接地型は、誘電体の上側に導電性電極が設置される。液滴が帯電した誘電体上を濡れ広がる過程で導電性電極に接触すると、液滴内で分離したイオンの電荷が引き起こす静電誘導によって、上部電極から接地端子へ電荷が流れる。この電荷の流れが電気出力となる。液滴は数百  $\text{mm}^2$  程度濡れ広がった状態で電極に接触することから、(a)と比較して多量の帯電電荷が出力に寄与するため高瞬時電力である。しかし、誘電体が非接地の構造は現実的には設置困難である。(c) 3 層型は、誘電体の上下に導電性電極が設置される。帯電した誘電体上を液滴が濡れ広がる過程で上部電極に接触すると、誘電体の帯電電荷によって下部電極に誘導されていた電荷が、上部電極に流れることで電気出力が発生する。(b)と同様に高瞬時電力であるが、回路モデルに基づいて動作検証された結果が報告されていない。(d) 傾斜 3 層型は、(a) の特長である連続動作が可能であり、(b) 及び (c) の特長

である高瞬時電力でもある。それに加え、上部電極を複数設置することで1滴の液滴から電荷を複数回負荷回路に流すことが可能である。したがって他のタイプと比較して高出力かつ高効率であることから実用に最適である。しかし、液滴の力学的エネルギーと電気出力の関係、回路モデルと液滴パラメータの関係が解明されていない。エネルギーハーベスティングを実現する発電機として傾斜3層型DEGの実用化を達成するためには、これらの関係を明らかにすることが不可欠である。

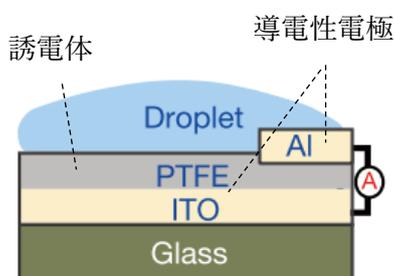
(a) 傾斜2層下部電極接地型



(b) 2層上部電極接地型



(c) 3層型



(d) 傾斜3層型

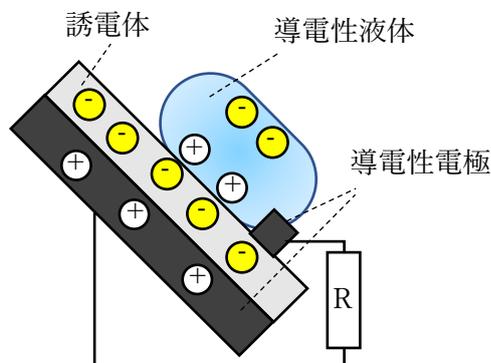


図 1.9 各種 DEG

## 1.6 本研究の目的

本研究では傾斜3層型DEGの電気出力発生メカニズムを明らかにし、エネルギーハーベスティング素子としての利用可能性を提示することを目的とする。具体的には液滴の力学的エネルギーと電気出力の関係、回路モデルと液滴パラメータの関係を明らかにする。また

傾斜 3 層型 DEG の応用例として落下する雨滴の力学的エネルギーから電気出力を得ることを想定し、雨滴 1 滴から得られる傾斜 3 層型 DEG の最大瞬時電力を推定する。エネルギーハーベスティングのターゲットである電子機器の消費電力値に対して、雨滴 1 滴から得られる傾斜 3 層型 DEG の最大瞬時電力がどの程度か検証する。本研究により、周囲環境に存在する液滴の力学的エネルギーを利用することによって、あらゆる国や地域の人々に電力を提供でき、安価かつ信頼できる近代的なエネルギーへのアクセスを確保するための知見を提供することを目指す。

## 1.7 本論文の構成

本論文は全 5 章で構成される。図 1.10 に本論文の構成をツリー形式で示す。本章では本研究の背景であるエネルギーハーベスティングのニーズ、力学的エネルギー変換方式、DEG のベースとなる物理現象である摩擦帯電、PTFE の有用性、各種 DEG の特長と本研究の目的を述べた。第 2 章では現在提唱されている DEG の動作原理、等価回路モデルについて述べ、本研究で作製した傾斜 3 層型 DEG の構造、電気出力測定装置、観測した基本的な電気出力波形を示す。第 3 章では水滴の力学的エネルギーと傾斜 3 層型 DEG の電気出力の関係について詳細に調査した結果を述べる。第 4 章では液滴パラメータ（液体の導電率、液滴の形状）と回路パラメータの関係性を示す。第 5 章では本論文の結論として第 2 章から第 4 章までに得られた知見、傾斜 3 層型 DEG のエネルギーハーベスティング素子としての利用可能性と今後の展望を述べる。

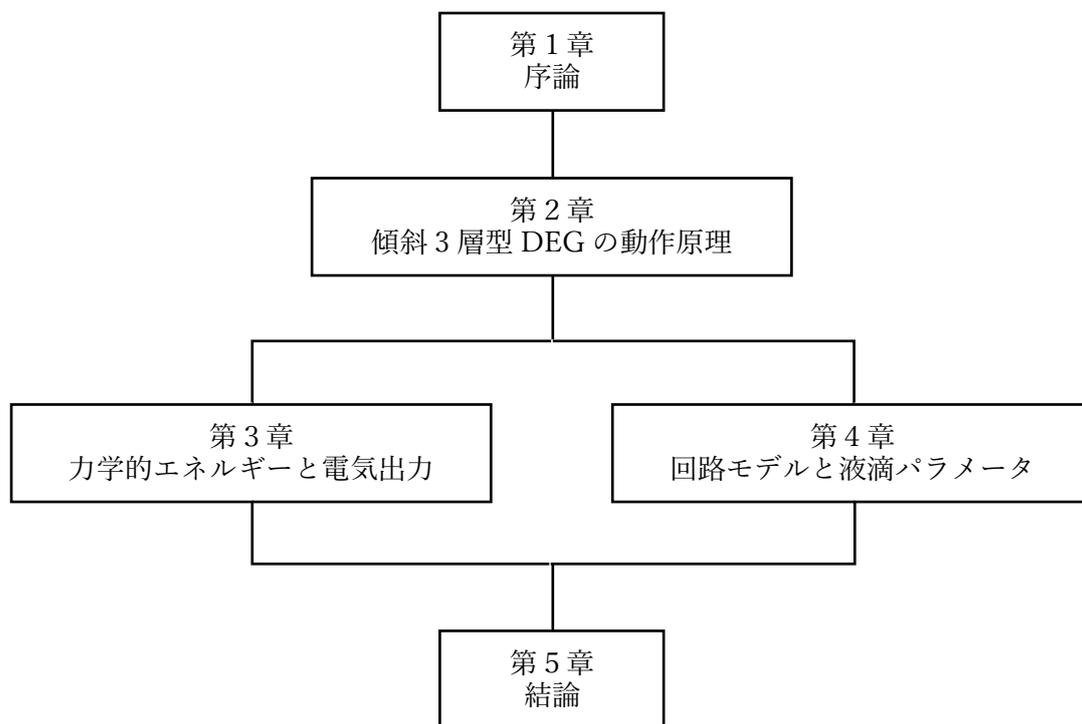


図 1.10 本論文の構成

## 参考文献

- [1] 資源エネルギー庁, 「令和4年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2023)」, 経済産業省, 最終更新日 2023年6月6日, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/2\\_2.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/2_2.pdf), (参照 2023-06-16).
- [2] 秋永広幸, 神野伊策, 篠原真毅, 竹内敬治, 八馬弘邦, 舟橋良次, 宮崎康次, 鈴木雄二, 「環境発電ハンドブック 第2版: 機能性材料・デバイス・標準化:IoT時代で加速する社会実装」, エヌ・ティー・エス, 2021.
- [3] 竹内敬治, 篠原真毅著, 堀越智編, 「エネルギーハーベスティングー身の回りの微小エネルギーから電気を創る“環境発電”」, 日刊工業出版社, 2014.
- [4] L Liu, X Guo and C Lee, "Promoting smart cities into the 5G era with multi-field Internet of Things (IoT) applications powered with advanced mechanical energy harvesters", Nano Energy 88 (2021), 106304.

- [5] M Hayes, IEEE PELS webinar, 20 Oct. 2016.
- [6] B Zahnstecher and M Hayes, IEEE PELS webinar, 10 Nov. 2021.
- [7] C Xu, Y Zi, AC Wang, H Zou, Y Dai, X He, P Wang, YC Wang, P Feng, D Li, and ZL Wang, "On the electron - transfer mechanism in the contact - electrification effect", *Advanced materials* 30, 15 (2018), 1706790.
- [8] 村田雄司, 「帯電現象と材料表面」, *表面技術* 56, 8 (2005), 436.
- [9] K Yatsuzuka, Y Mizuno, and K Asano, "Electrification phenomena of pure water droplets dripping and sliding on a polymer surface", *Journal of electrostatics* 32, 2 (1994), 157.
- [10] L Zhang, X Li, Y Zhang, Y Feng, F Zhou, and D Wang, "Regulation and influence factors of triboelectricity at the solid-liquid interface", *Nano Energy* 78 (2020), 105370.
- [11] J Nie, Z Ren, L Xu, S Lin, F Zhan, X Chen, and ZL Wang, "Probing contact - electrification - induced electron and ion transfers at a liquid–solid interface", *Advanced Materials* 32, 2 (2020), 1905696.
- [12] LE Helseth, "Electrical energy harvesting from water droplets passing a hydrophobic polymer with a metal film on its back side", *Journal of Electrostatics* 81 (2016), 64.
- [13] S Lin, L Xu, AC Wang, and ZL Wang, "Quantifying electron-transfer in liquid-solid contact electrification and the formation of electric double-layer", *Nature communications* 11, 1 (2020), 399.
- [14] Y Nan, J Shao, M Willatzen, and ZL Wang, "Understanding contact electrification at water/polymer interface", *Research* (2022).
- [15] 黒川孝臣, 「機能性含ふつ素高分子」, 日刊工業新聞社, 1982.
- [16] 和田八三久, 「高分子の電気物性」, 裳華房, 1987.
- [17] S Li, J Nie, Y Shi, X Tao, F Wang, J Tian, S Lin, X Chen and Z L Wang, "Contributions of different functional groups to contact electrification of polymers", *Advanced Materials* 32, 25 (2020), 2001307.
- [18] ZH Lin, G Cheng, S Lee, KC Pradel, and ZL Wang, "Harvesting water drop energy by a sequential contact - electrification and electrostatic - induction process", *Advanced Materials* 26, 27 (2014), 4690.
- [19] R Naganuma, D Tajima, and Y Aoki, "Relationship between water droplet motion and output characteristics in droplet-based electricity generator", *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 762, 1 (2023), 71.
- [20] Y Aoki, and R Naganuma, "Effect of the wetting behavior of water droplets on the output of a water-droplet-based electricity generator", *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 763, 1 (2023), 47.
- [21] W Xu, H Zheng, Y Liu, X Zhou, C Zhang, Y Song, X Deng, M Leung, Z Yang, RX Xu, and ZL Wang, "A droplet-based electricity generator with high instantaneous power

- density", *Nature* 578, 7795 (2020), 392.
- [22] N Zhang, H Gu, K Lu, S Ye, W Xu, H Zheng, Y Song, C Liu, J Jiao, Z Wang, and X Zhou, "A universal single electrode droplet-based electricity generator (SE-DEG) for water kinetic energy harvesting", *Nano Energy* 82 (2021), 105735.
- [23] N Zhang, H Zhang, W Xu, H Gu, S Ye, H Zheng, Y Song, Z Wang, and X Zhou, "A droplet - based electricity generator with ultrahigh instantaneous output and short charging time", *Droplet* 1, 1 (2022), 56.
- [24] L Yang, Y Wang, Y Guo, W Zhang, and Z Zhao, "Robust working mechanism of water droplet - driven triboelectric nanogenerator: triboelectric output versus dynamic motion of water droplet", *Advanced Materials Interfaces* 6, 24 (2019), 1901547.
- [25] X Wang, S Fang, J Tan, T Hu, W Chu, J Yin, J Zhou, and W Guo, "Dynamics for droplet-based electricity generators", *Nano Energy* 80 (2021), 105558.
- [26] JH Lee, SM Kim, TY Kim, U Khan, and SW Kim, "Water droplet-driven triboelectric nanogenerator with superhydrophobic surfaces", *Nano Energy* 58 (2019), 579.
- [27] H Wu, N Mendel, D Ende, G Zhou, and F Mugele, "Energy harvesting from drops impacting onto charged surfaces", *Physical review letters* 125, 7 (2020), 078301.
- [28] A Riaud, C Wang, J Zhou, W Xu, and Z Wang, "Hydrodynamic constraints on the energy efficiency of droplet electricity generators", *Microsystems & Nanoengineering* 7, 1 (2021), 49.
- [29] J Xiong, MFang Lin, J Wang, SL Gaw, K Parida, and P See Lee, "Wearable all - fabric - based triboelectric generator for water energy harvesting", *Advanced Energy Materials* 7, 21 (2017), 1701243.
- [30] J Chung, D Heo, G Shin, SH Chung, J Hong, and S Lee, "Water behavior based electric generation via charge separation", *Nano Energy* 82 (2021), 105687.
- [31] D Yoo, SJ Kim, Y Joung, S Jang, D Choi, and DS Kim, "Lotus leaf-inspired droplet-based electricity generator with low-adhesive superhydrophobicity for a wide operational droplet volume range and boosted electricity output", *Nano Energy* 99 (2022), 107361.
- [32] X Li, X Ning, L Li, X Wang, B Li, J Li, J Yin, and W Guo, "Performance and power management of droplets-based electricity generators", *Nano Energy* 92 (2022), 106705.
- [33] N Zhang, H Zhang, Z Liu, W Xu, H Zheng, Y Song, Z Wang, and X Zhou, "Performance transition in droplet-based electricity generator with optimized top electrode arrangements", *Nano Energy* 106 (2023), 108111.
- [34] Z Li, D Yang, Z Zhang, S Lin, B Cao, L Wang, ZL Wang, and F Yin, "A droplet-based electricity generator for large-scale raindrop energy harvesting", *Nano Energy* 100 (2022), 107443.
- [35] Z Zhao, H Li, A Li, L Liu, L Xue, Z Cai, R Yuan, X Yu, and Y Song, "Two-orders of

magnitude enhanced droplet energy harvesting via asymmetrical droplet-electrodes coupling", *Nano Energy* (2023), 108213.

- [36] L Yang, J Yu, Y Guo, S Chen, K Tan, and S Li, "An Electrode - Grounded Droplet - Based Electricity Generator (EG - DEG) for Liquid Motion Monitoring", *Advanced Functional Materials* (2023), 2302147.

## 第2章 傾斜3層型 DEG の動作原理

### 2.1 緒言

本章では、前章で述べた傾斜3層型 DEG の動作原理、回路モデル、基礎特性を示す。動作原理では負に帯電した PTFE への水滴の落下から水滴と上部電極の接触、水滴が上部電極を通過するまでの水滴の挙動と電荷の移動を説明する。回路モデルでは、傾斜3層型 DEG に適用される回路方程式とその解として負荷抵抗の両端に発生する電圧を示す。これにより傾斜3層型 DEG の電気出力へ影響を与える回路パラメータを述べる。最後に本研究で作製した傾斜3層型 DEG の構造、電気出力測定装置の概略を図示し、観測した基本的な電気出力波形を示す。

### 2.2 動作原理

水と PTFE の摩擦帯電を利用する傾斜3層型 DEG の動作原理を以下に述べる [1,2,3,4]。図 2.1(a)は水滴と PTFE の摩擦により PTFE 表面が負に帯電し、PTFE の帯電負電荷と等量の正電荷が静電誘導により導電性電極に誘導された状態を示している。このとき、PTFE 表面、PTFE と下部電極の界面を平面電極とするコンデンサ  $C_p$  が充電されている。この状態において PTFE 上に水滴が落下する。水滴内には  $H^+$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  など様々なイオンが存在する [5,6]。落下する水滴が PTFE に衝突すると、水滴内に存在する陽イオンが PTFE 帯電負電荷のクーロン引力により PTFE 表面に引きつけられ、水滴と PTFE の界面で電気二重層が形成される。この結果、水滴内で陽イオンは PTFE との界面に、陰イオンは水滴表面に分離する。図 2.1(b)に水滴と PTFE 界面で電気二重層が形成され、水滴内で正負イオンが分離した状態を示す。

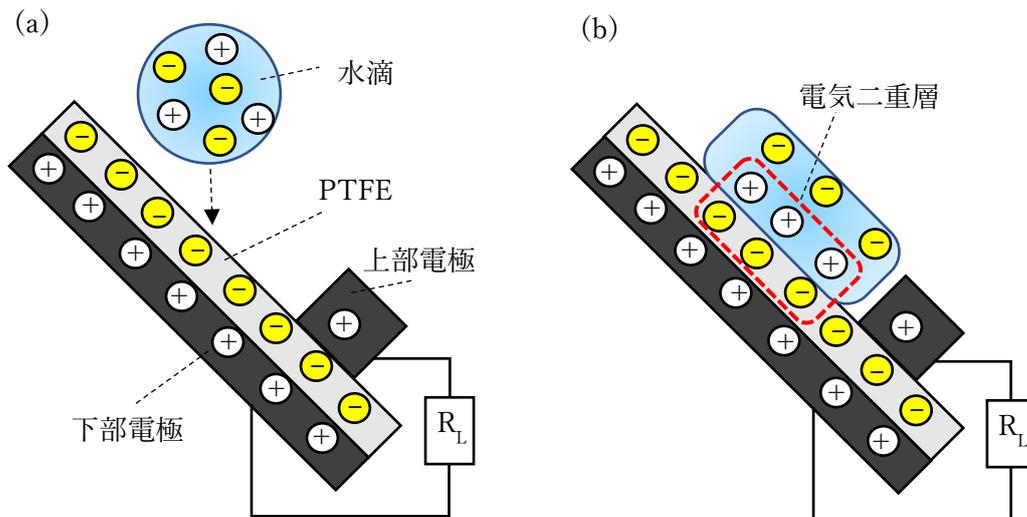


図 2.1 傾斜 3 層型 DEG の動作原理 (水滴落下から水滴/PTFE 界面における電気二重層形成)  
 (a)PTFE 帯電と静電誘導による電極電荷誘導、(b)電気二重層形成と水滴内イオン分離

図 2.1(b)に示したように水滴と PTFE の界面では電気二重層が形成される。この結果、一部の PTFE 帯電負電荷が水滴内陽イオンの正電荷によって中和され、PTFE 帯電負電荷に起因する電界が減弱する。そのため、PTFE 帯電負電荷が下部電極に正電荷を誘起していた静電誘導が減弱する。この状態で水滴が上部電極に接触すると、水滴内の陰イオンは水滴と上部電極の界面に移動する。一方、下部電極に誘起されていた正電荷は静電誘導が弱められたことによって解放され、負荷回路へ流れる。下部電極から負荷回路を介して上部電極へ移動した正電荷は、水滴内に陰イオンと上部電極の界面で電気二重層を形成する。図 2.2(a)に PTFE 帯電負電荷の中和、図 2.2(b)に静電誘導の減弱により下部電極正電荷が負荷回路へ流れる様子、図 2.2(c)に水滴と上部電極の界面で電気二重層が形成される様子を示した。

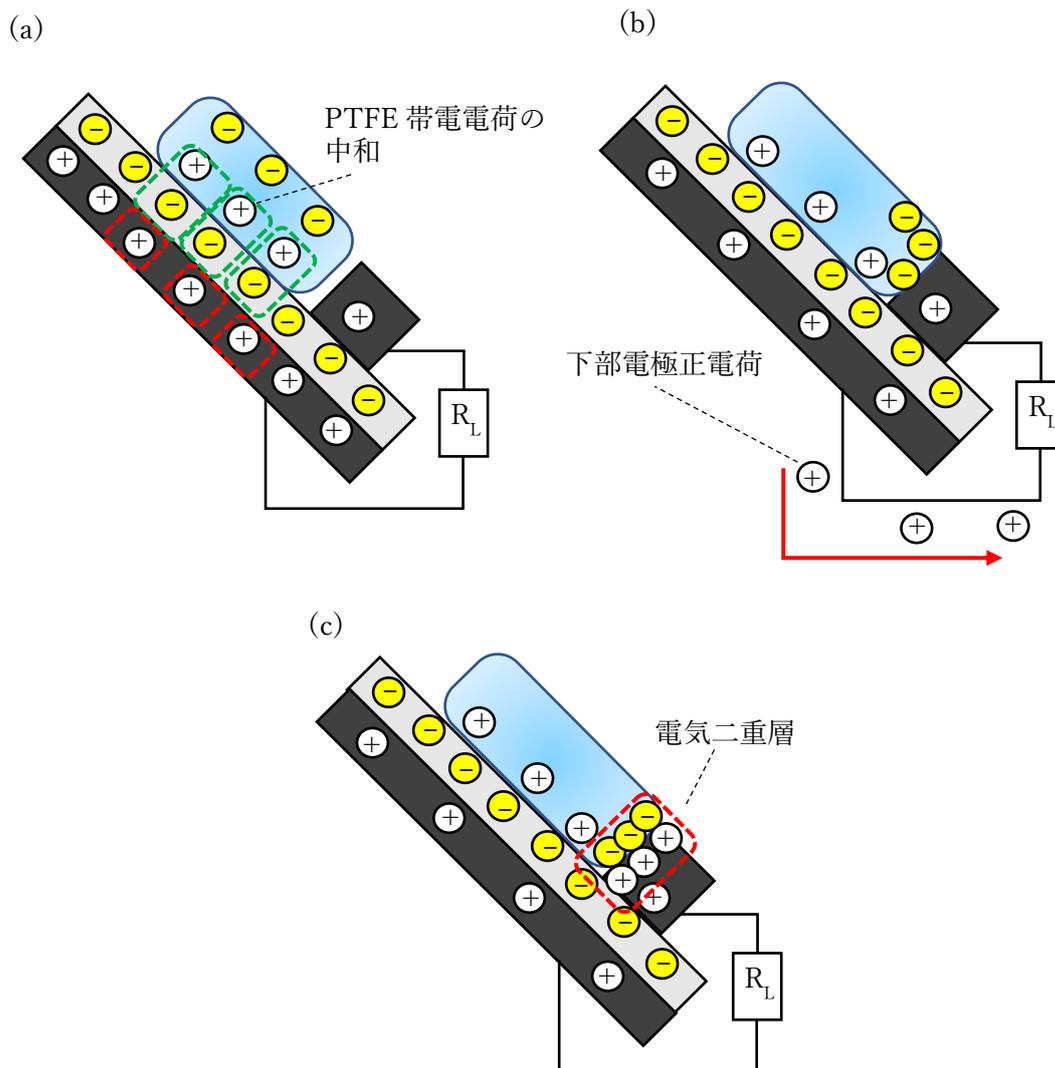


図 2.2 傾斜 3 層型 DEG の動作原理 (帯電電荷の中和から電極正電荷電流発生)  
 (a)PTFE 帯電電荷の中和、(b)下部電極正電荷電流発生、(c)水滴と上部電極界面における電気二重層形成

上述した水滴と PTFE の界面、水滴と上部電極の界面で電気二重層が形成される過程で発生する、下部電極正電荷の上部電極への移動が傾斜 3 層型 DEG の電気出力の起源である。電気出力の大きさは、水滴と上部電極の接触時に、水滴が PTFE と接触している領域において水滴内の陽イオンによって中和される PTFE の帯電負電荷量に依存する。したがって電気出力の大きさは、水滴と上部電極の接触時の水滴と PTFE の接触面積によって決まることが予想される。電気出力と水滴と PTFE の接触面積の関係については第 3 章で述べる。

その後、水滴が上部電極上を通過する過程において、水滴が PTFE と接触している面積が減少し得る。このとき水滴が除去された PTFE 表面において、中和されていた PTFE 帯電負電荷が再発生する。再発生した PTFE 帯電負電荷が誘起する静電誘導が下部電極に正電荷を再誘導する。これにより上部電極から下部電極へ、上述と逆方向に流れる正電荷電流が発生する。図 2.3 に水滴と PTFE の接触面積の減少に起因する逆方向電流の発生原理を示した。

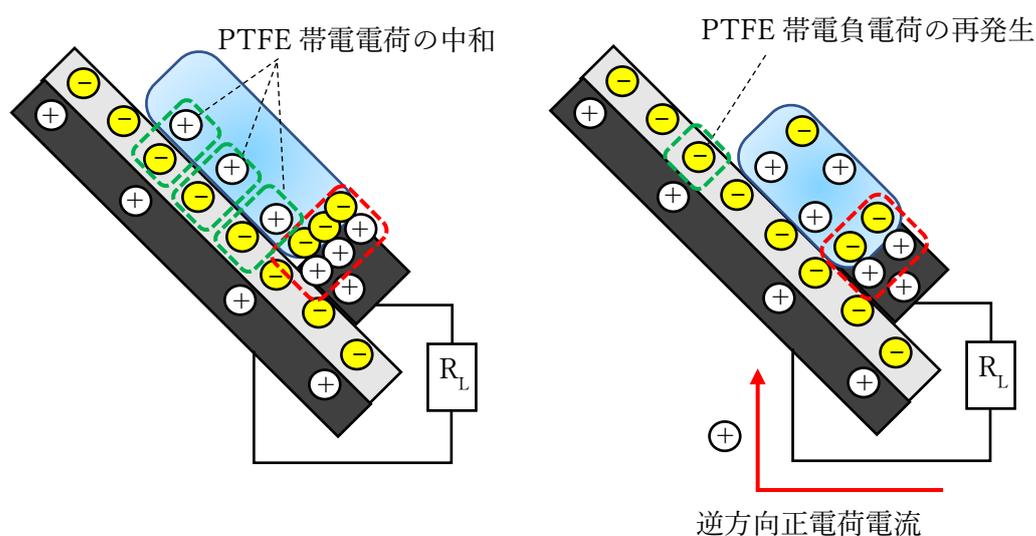


図 2.3 傾斜 3 層型 DEG の動作原理 (逆方向電流発生)

### 2.3 等価回路モデル

エネルギーハーベスティング素子として傾斜 3 層型 DEG を利用するためには、傾斜 3 層型 DEG を電気回路としてモデル化することが要求される。図 2.1 及び図 2.2 に示した動作原理で電気出力が発生する場合、すなわち逆方向電流が発生していない場合において、傾斜 3 層型 DEG は RC 回路でモデル化が可能である。水滴と PTFE の界面、水滴と上部電極の界面に形成される電気二重層をそれぞれコンデンサ  $C_1$ ,  $C_2$ 、上部電極と下部電極の間に形成されるコンデンサを  $C_3$  とする。PTFE はその表面に負電荷が帯電し、下部電極との界面に正電荷が帯電したコンデンサ  $C_P$  と考える。水滴を抵抗  $R'$  とすると、水滴が上部電極に接触した直後には  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_P$ ,  $R'$ 、負荷抵抗  $R_L$  が接続された閉回路が形成される [1,4,7,8]。コンデンサ  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_P$  の静電容量をそれぞれ  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_P$ 、抵抗  $R'$ ,  $R_L$  の抵抗値をそれぞれ  $R'$ ,  $R_L$  とし、この閉回路を図 2.4 に示した。傾斜 3 層型 DEG の等価回路は 3 層型 DEG と同様であるため、便宜的に回路を水平に描いている。この閉回路の回路方程式は式

(2.1)、(2.2)のように表せることができる[1,7]。

$$\frac{Q_P(t) - q(t)}{C_P(t)} = R_L \frac{dq_L(t)}{dt} + R'(t) \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{C_1(t)} + \frac{q(t)}{C_2(t)} \quad (2.1)$$

$$R_L \frac{dq_L(t)}{dt} = \frac{q(t) - q_L(t)}{C_3(t)} \quad (2.2)$$

$Q_P$ はPTFEの帯電電荷、 $q$ はコンデンサ  $C_P$  から流出する電荷、 $q_L$ は負荷抵抗  $R_L$  を流れる電荷である。式(2.1)の左辺は  $C_P$  にかかる電圧、右辺は  $R_L$ 、 $R'$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  における電圧降下を表している。なお、コンデンサ  $C_P$  の電極面積は、水滴が上部電極と接触しているときの、水滴とPTFEが接触している面積である。ここで、 $C_1$  及び  $C_2$  は電気二重層の深さがナノメートルオーダーであることから数十  $\mu\text{F}$ 、 $C_P$  はPTFEの静電容量で水滴との接触面積を考慮すると数十  $\text{pF}$  である。 $C_1$  及び  $C_2$  と  $C_P$  は数桁の違いがあることから、式(2.1)右辺第2項と第3項は無視してよい。また、上部電極がワイヤ状であることから、 $C_3$  に蓄えられる電荷は十分少なく無視してよい。したがって  $C_P$  から流出する電荷はすべて負荷抵抗  $R_L$  へ流れると考えられることから  $q_L(t) \approx q(t)$  である。さらに、下部電極から上部電極へ電荷が移動している間の、水滴とPTFEの接触面積の時間変化が無視できると仮定すると、コンデンサ  $C_P$  の電極面積は時間変化せず一定となる。そのため式(2.1)における静電容量  $C_P$ 、帯電電荷量  $Q_P$ 、水滴抵抗  $R'$  は時間に依らず一定とみなせる。この場合、回路方程式は次式のように簡略化された形式で表現できる。

$$(R_L + R') \frac{dq(t)}{dt} \approx \frac{Q_P(t) - q(t)}{C(t)} \quad (2.3)$$

この方程式の解を負荷抵抗  $R_L$  の両端電圧  $v(t)$  として表すと次式のようになる。

$$v(t) = \frac{R_L}{R' + R_L} \frac{Q_P}{C} e^{-\frac{t}{(R' + R_L)C}} \quad (2.4)$$

式(2.4)より傾斜3層型DEGの出力電圧に影響を与える回路パラメータは、負荷抵抗以外では水滴抵抗  $R'$ 、帯電電荷量  $Q_P$ 、静電容量  $C$ 、開放電圧  $Q_P/C$  である。液滴パラメータ（水滴の導電率、落下高さ）と回路パラメータの関係を第4章で述べる。式(2.3)で表される簡略化された等価回路を図2.5に示す。

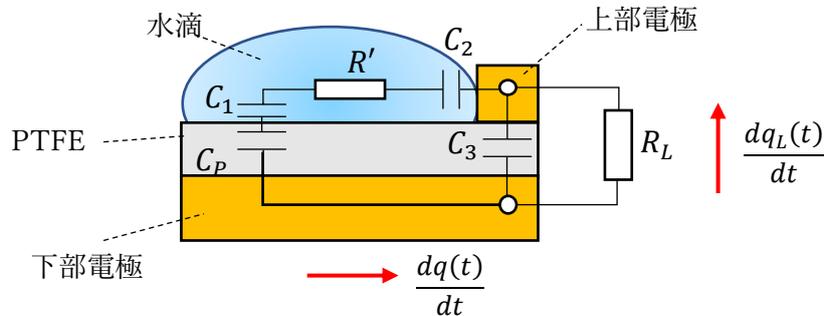


図 2.4 (傾斜) 3層型 DEG 等価回路

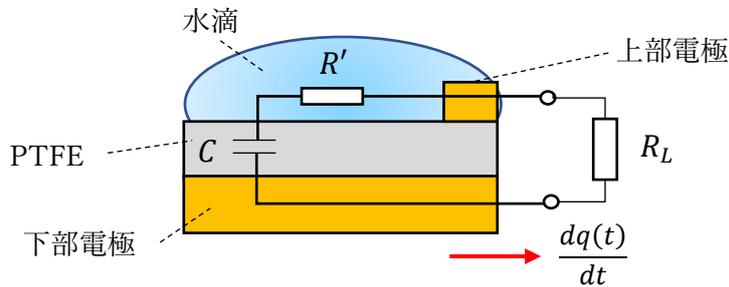


図 2.5 簡略化された（傾斜）3層型 DEG 等価回路

## 2.4 基礎特性

傾斜3層型 DEG の基本的な電気出力波形を観察するため、3層型 DEG を作製、水平面から45度傾斜させて固定し、基礎実験を行った。3層型 DEG は幅50 mm、長さ100 mm、厚さ0.03 mmのアルミニウム基板（下部電極）に幅50 mm、長さ100 mm、厚さ0.09 mmのPTFEシート（3M、5490）を貼り付け、PTFEシート上に上部電極として直径0.5 mmの錫（Sn）ワイヤを設置した。作製した3層型 DEG の模式図を図2.6に示す。

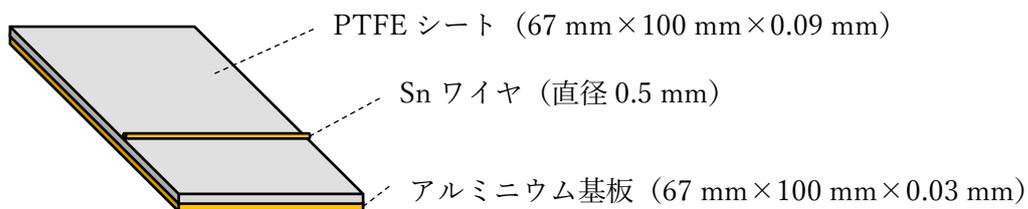


図 2.6 3層型 DEG

図 2.7 に電気出力測定装置の概略図を示す。作製した3層型 DEG を水平面から45度傾斜させて固定し、60 mmの高さからPTFEシート上に水滴を落下させた。水滴は水道水をオートビュレット（TOA DKK、ABT-511）へ投入し、オートビュレットから一定速度で水を排出することにより生成した。オートビュレットの液体排出口にプラスチックチューブを接続、プラスチックチューブの他端に金属製の筒を挿入し、金属筒を接地した。水は金属筒から排出される過程で一定の重さに達したときに滴となって落下する。落下する水滴の体積は、金属筒の内径により決定されるため一定値と考えてよい。本研究における水滴の体

積は 65  $\mu\text{L}$  であった。プラスチックチューブ内を移動した水は、落下する直前に接地した金属筒に触れる。これにより、水がプラスチックチューブ内を移動する間に帯電した場合においても、水の帯電電荷は接地端子へ流れ、水滴は電氣的に中性の状態で落下する [9,10,11]。PTFE 上に落下した水滴が PTFE 表面上を濡れ広がり、上部電極に接触した際に上下電極間に発生する電圧を電気出力として測定した。電圧測定にはオシロスコープ (Tektronix、MSO44) を使用した。PTFE 上を濡れ広がる水滴の動作は、PTFE の上方、法線方向から高速カメラ (DITECT、HAS-D71) で撮影した。高速カメラとオシロスコープを同軸ケーブルで接続し、高速カメラが発生する撮影トリガ信号をオシロスコープの測定トリガ信号として入力することで、高速カメラとオシロスコープの同期をとった。高速カメラのフレームレートは 8,000 コマ/秒、露光時間は 1/10,000 秒、画素数は 640 $\times$ 480 ドットとした。

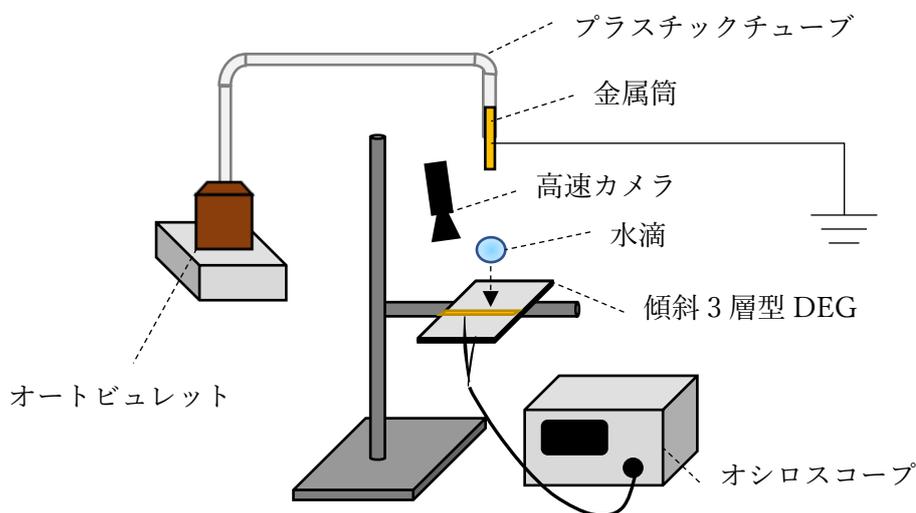


図 2.7 電気出力測定装置の概略図

基礎実験により観測した傾斜 3 層型 DEG の電気出力波形を図 2.8 に示す。高速カメラで撮影した水滴画像から、水滴と上部電極の接触が確認できた時刻を  $t = 0$  とした。挿入画像は  $t = 0$ 、 $t = 2.2$  ms、 $t = 5.0$  ms、 $t = 10$  ms における水滴の画像である。挿入画像から、水滴が上部電極に接触した後、上部電極上を通過していくことが確認できる。 $t = 0$  のとき 63.6 V の鋭いピーク電圧を観測した。その後出力電圧は急速に減少し、 $t = 2.2$  ms のとき 0 V まで減衰した。その後、電気出力は極性が反転して負電圧が観測され、水滴が上部電極から分離した  $t = 20$  ms まで負電圧が持続した。負電圧の最大値は -5.2 V であった。過去に報告された傾斜 3 層型 DEG の出力電圧波形を図 2.9 に示す [12]。この報告では誘電体として厚み 0.3 mm の PTFE フィルム、上部電極として銅箔、下部電極としてアルミニウム基板が使用

されている。液滴として水道水から生成した水滴を PTFE フイルム上に落下させ、PTFE フイルムは水平面から 35° 傾斜している。鋭いピーク電圧発生後、負電圧が発生し、ピーク電圧発生後およそ 25 ms で出力電圧は 0 V に戻っている。図 2.8 に示した本研究の基礎実験にて観測した傾斜 3 層型 DEG の電気出力波形は、先行研究報告と同様の波形が得られていることが確認できる。

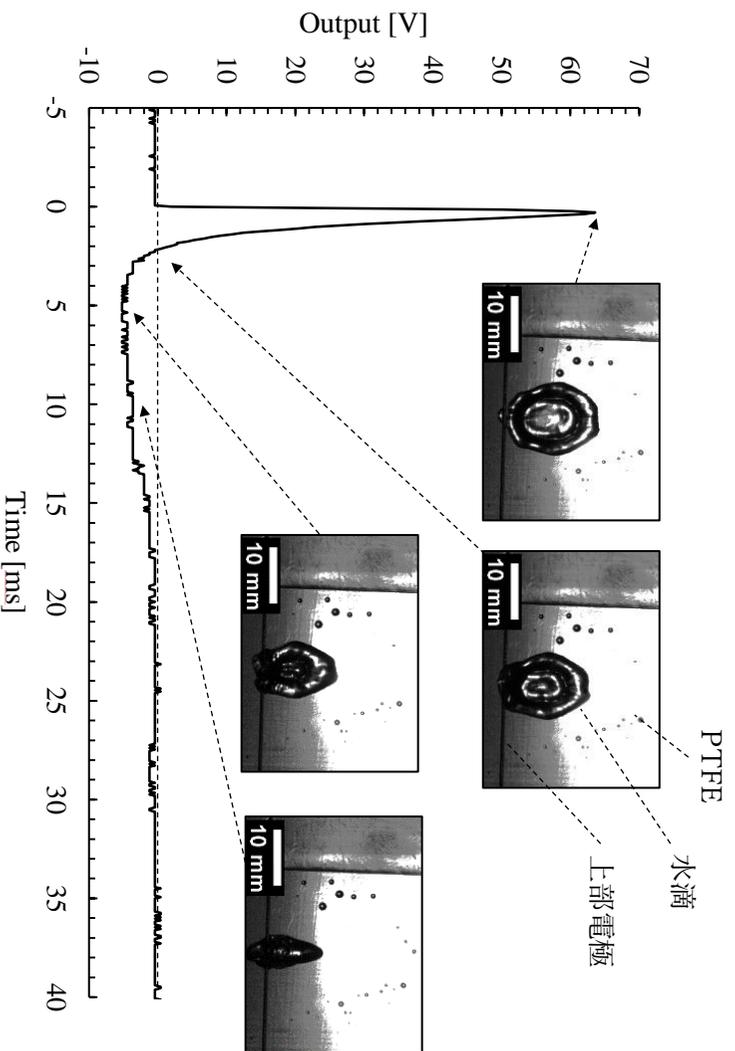


図 2.8 基礎実験により観測した傾斜 3 層型 DEG の電気出力波形と水滴画像

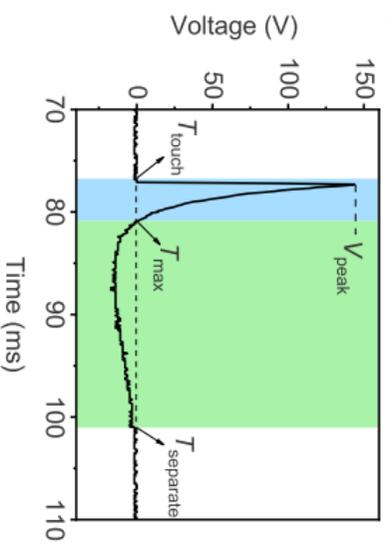


図 2.9 先行研究報告における傾斜 3 層型 DEG 出力電圧波形[12]

## 2.5 結言

本章では傾斜 3 層型 DEG の動作原理、等価回路モデル、基礎特性を示した。傾斜 3 層型 DEG の動作原理によると、水滴と PTFE の界面、水滴と上部電極の界面で電気二重層が形成される過程で、下部電極から上部電極へ流れる電流が傾斜 3 層型 DEG の電気出力である。電気出力の大きさは、水滴が PTFE と接触している領域において、水滴内陽イオンによって電荷が中和される PTFE の帯電負電荷量に依存する。傾斜 3 層型 DEG の等価回路は、下部電極から上部電極へ電荷が移動している間の水滴と PTFE の接触面積の時間変化が無視できる場合、簡略化された RC 回路で表せることを述べた。最後に、本研究で作製した傾斜 3 層型 DEG の構造と基本的な電気出力波形を示した。水滴と上部電極の接触と同時に鋭いピーク電圧が観測され、先行研究報告と同様の電気出力波形が得られていることを述べた。次章以降、電気出力の大きさに関しては、第 3 章にて水滴の力学的エネルギーとの関係、水滴と PTFE の接触面積との関係を明らかにする。回路モデルに関しては第 4 章にて、電気出力が発生している間の水滴と PTFE の接触面積の時間変化を評価し、RC 回路でモデル化が可能かを検証する。そして液滴パラメータ（導電率、落下高さ）と回路パラメータとの関係性を明らかにする。

## 参考文献

- [1] W Xu, H Zheng, Y Liu, X Zhou, C Zhang, Y Song, X Deng, M Leung, Z Yang, RX Xu, and ZL Wang, "A droplet-based electricity generator with high instantaneous power density", *Nature* 578, 7795 (2020), 392.
- [2] N Zhang, H Gu, K Lu, S Ye, W Xu, H Zheng, Y Song, C Liu, J Jiao, Z Wang, and X Zhou, "A universal single electrode droplet-based electricity generator (SE-DEG) for water kinetic energy harvesting", *Nano Energy* 82 (2021), 105735.
- [3] L Yang, Y Wang, Y Guo, W Zhang, and Z Zhao, "Robust working mechanism of water droplet - driven triboelectric nanogenerator: triboelectric output versus dynamic motion of water droplet", *Advanced Materials Interfaces* 6, 24 (2019), 1901547.
- [4] X Li, X Ning, X Wang, B Li, J Li, J Yin and W Guo, "Performance and power management of droplets-based electricity generators", *Nano Energy* 92 (2022), 106705.
- [5] 松本光弘, 板野龍光, 「雨水成分の統計的解析」, *大気汚染学会誌* 20, 1 (1985), 12.
- [6] 上脇雅代, 寺澤真実, 増田豊, 鶴澤昌好, 「市販ミネラルウォーター製品, 水道水, 井戸水の無機成分組成」, *日本食品工業学会誌* 39, 5 (1992), 432.
- [7] J K Moon, J Jeong, D Lee, and H K Pak, "Electrical power generation by mechanically

- modulating electrical double layers", *Nature communications* 4, 1 (2013), 1487.
- [8] N Zhang, H Zhang, W Xu, H Gu, S Ye, H Zheng, Y Song, Z Wang, and X Zhou, "A droplet - based electricity generator with ultrahigh instantaneous output and short charging time", *Droplet* 1, 1 (2022), 56.
- [9] A Z Stetten, D S Golovko, Stefan A L Weber and H J Butt, "Slide electrification: charging of surfaces by moving water drops", *Soft Matter* 15, 43 (2019), 8667.
- [10] L E Helseth, "The influence of microscale surface roughness on water-droplet contact electrification", *Langmuir* 35, 25 (2019), 8268.
- [11] K Yatsuzuka, Y Mizuno, and K Asano, "Electrification phenomena of pure water droplets dripping and sliding on a polymer surface", *Journal of electrostatics* 32, 2 (1994), 157.
- [12] X Wang, S Fang, J Tan, T Hu, W Chu, J Yin, J Zhou, and W Guo, "Dynamics for droplet-based electricity generators", *Nano Energy* 80 (2021), 105558.

## 第3章 力学的エネルギーと電気出力

### 3.1 緒言

前章では傾斜3層型 DEG 電気出力の起源は、水滴と PTFE の界面、水滴と上部電極の界面で電気二重層が形成される過程で発生する下部電極から上部電極への電荷の移動であることを述べた。また、水滴が PTFE と接触している領域において、水滴と PTFE の界面で中和される PTFE の帯電負電荷が電気出力の大きさに寄与することを述べた。電気出力の大きさは水滴と PTFE の接触面積に依存すると予想される。水滴は PTFE 上に落下後、傾斜した PTFE 表面上を濡れ広がりながら滑り落ちる。水滴と PTFE の接触面積は、水滴の落下速度すなわち力学的エネルギーと、水滴の落下点から上部電極までの距離に依存して変化すると推測される。また、水滴と PTFE の界面で電気二重層が形成されることによって、PTFE 帯電負電荷は中和される。したがって、水滴と PTFE の界面で中和される PTFE 帯電負電荷は、電気二重層を形成する水滴内の陽イオン量、すなわち水滴の導電率の影響を受けると考えられる。本章では、はじめに電気出力測定方法、水滴の力学的エネルギーと水滴が PTFE 表面に衝突した後の水滴の直径の関係を示す。次に、水滴と PTFE の接触面積と電気出力の関係を検証する。パラメータは水滴の落下高さや落下点から上部電極までの距離である。最後に、異なる導電率の水滴に対し、水滴と PTFE の接触面積と電気出力の関係を明らかにする。

### 3.2 電気出力測定方法

傾斜3層型 DEG と電気出力測定装置は前章で示した基礎実験に使用したものと同一のものを使用した。3層型 DEG の構造を図 3.1 に、電気出力測定装置の概略図を図 3.2 に示す。水滴はオートビュレット (TOA DKK、ABT-511) を使用して生成、電気出力はワイヤ電極と下部電極の間に発生する電圧をオシロスコープ (Tektronix、MSO44) を使用して測定した。ワイヤ電極に減衰比 10:1 のパッシブプローブを接続し、出力電圧をオシロスコープに入力した。オシロスコープの負荷抵抗は 10 M $\Omega$  である。本章では、水滴はイオン交換水 (導電率  $\sigma_w=3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) と水道水 ( $\sigma_w=110 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) を使用して生成した。水の導電率は導電率メータ (アズワン、AS710) で測定した。表 3.1 にイオン交換水と水道水の導電率を示す。オートビュレットの液体排出口にプラスチックチューブを接続、水滴はプラスチックチューブの他端に挿入した金属筒の先端から自重により落下する。水滴の体積は 65  $\mu\text{L}$  である。金属筒は接地した。水滴の帯電電荷は金属筒に触れることで接地端子へ流れるため、落下する水滴は電氣的に中性と考えてよい。PTFE 上を濡れ広がる水滴の動作は高速カメラ

(DITECT、HAS-D71) で撮影した。高速カメラとオシロスコープを同軸ケーブルで接続した。高速カメラが発生する撮影トリガ信号をオシロスコープの測定トリガ信号として入力することにより、高速カメラとオシロスコープは同期をとった。高速カメラのフレームレートは8,000 コマ/秒、露光時間は1/10,000 秒、画素数は640×480 ドットである。高速カメラで撮影した PTFE 上を濡れ広がる水滴画像を図 3.3 に示す。

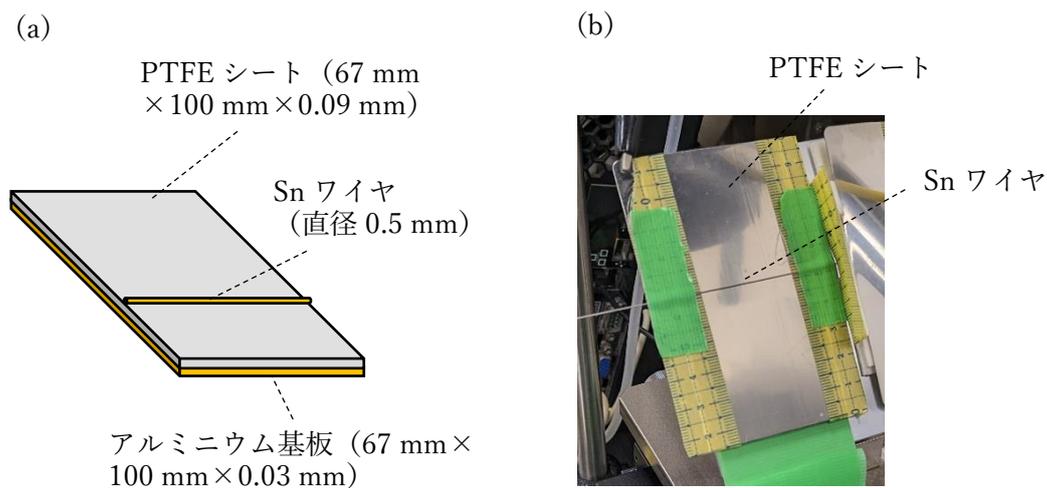


図 3.1 3層型 DEG (a)概略図、(b)写真

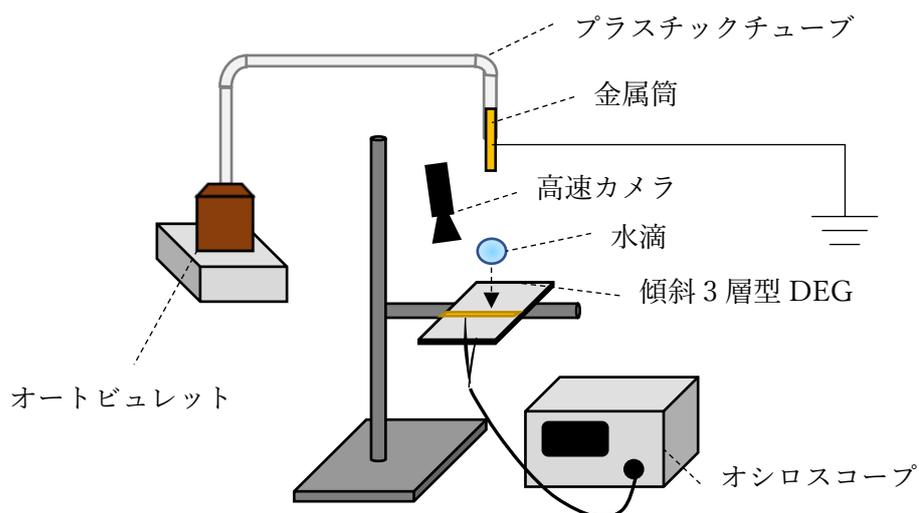


図 3.2 電気出力測定装置の概略図

表 3.1 使用した水滴の導電率

| 水滴     | 導電率 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] |
|--------|---------------------------------|
| イオン交換水 | 3.3                             |
| 水道水    | 110                             |

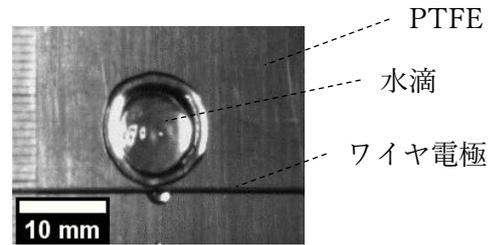


図 3.3 PTFE 上を濡れ広がる水滴画像

水滴の落下高さ $H$ 、PTFE 上の水滴の落下点から上部電極までの距離 $L$ をパラメータとして、傾斜 3 層型 DEG の電気出力を測定した。 $H$ は、図 3.4 に示したように傾斜 3 層型 DEG を固定し、プラスチックチューブと金属筒を上下させることによって変化させた。 $L$ はワイヤ電極を PTFE 上で傾斜方向に平行移動させることによって変化させた。

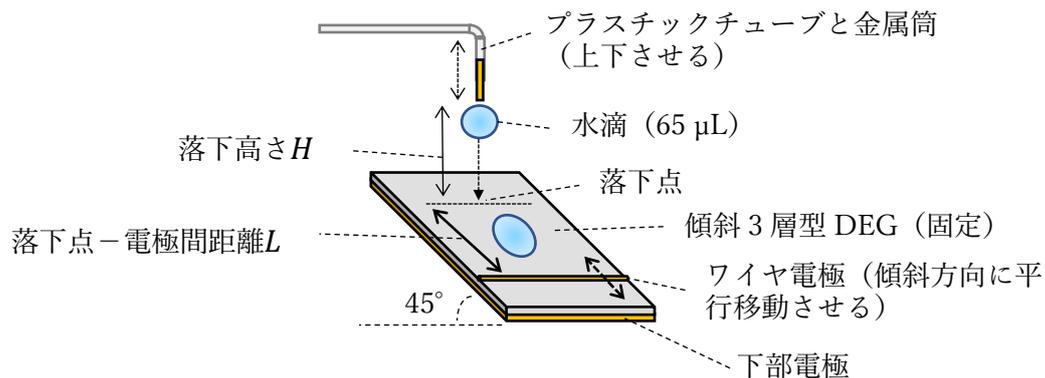


図 3.4 落下高さ $H$ と落下点－電極間距離 $L$ の変更方法

### 3.3 力学的エネルギーと PTFE 表面衝突後の水滴直径

水滴が固体と衝突する際、液滴がどのように変形するかは主に液滴の衝突速度に依存する [1,2]。液滴の運動エネルギーと表面張力の比であるウェーバー数  $We = \rho D_0 V_0^2 / \gamma$  の値が大きいほど衝突時の変形が大きくなる。 $\rho$ は液体の密度、 $D_0$ は液滴の直径、 $V_0$ は液滴の速度、 $\gamma$ は液体の表面張力である。

図 3.4 に示した方法により水滴の落下高さ $H$  を 15 mm から 180 mm まで変化させ、各 $H$ における水滴の PTFE への衝突直前のウェーバー数を算出した。水滴の位置エネルギーがすべて運動エネルギーに変換されるとして PTFE 衝突直前の落下速度を算出し、水の密度

$\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ 、水の表面張力 $\gamma = 72.8 \text{ mN/m}$ を使用した。水滴の PTFE 表面衝突後、最大に濡れ広がったときの水滴の直径を $D_m$ とする。高速カメラで撮影した水滴画像から、落下する水滴の直径 $D_0$ と各 $H$ における $D_m$ を評価した。落下する水滴の画像、 $H = 60 \text{ mm}$ 、 $H = 120 \text{ mm}$ における PTFE 表面衝突後最大に濡れ広がったときの水滴の画像、 $D_0$ と $H = 60 \text{ mm}$ 、 $H = 120 \text{ mm}$ における $D_m$ の値を図 3.5 に示す。 $H = 15 \text{ mm} \sim 180 \text{ mm}$ におけるウェーバー数と $D_m/D_0$ の関係を図 3.6 に示す。水の密度 $\rho$ 、水の表面張力 $\gamma$ 、水滴の直径 $D_0$ は各 $H$ において定数であることから、ウェーバー数は水滴の落下速度 $V_0$ の自乗すなわち運動エネルギーに比例すると考えて差し支えない。図 3.6 に示した結果から、PTFE に落下する水滴の運動エネルギーの増加とともに PTFE 上で濡れ広がる水滴の最大直径が増加することが確認できる。水滴の力学的エネルギーは、PTFE に衝突した後、PTFE 表面で濡れ広がる面積の拡大に使用されると考えられる。

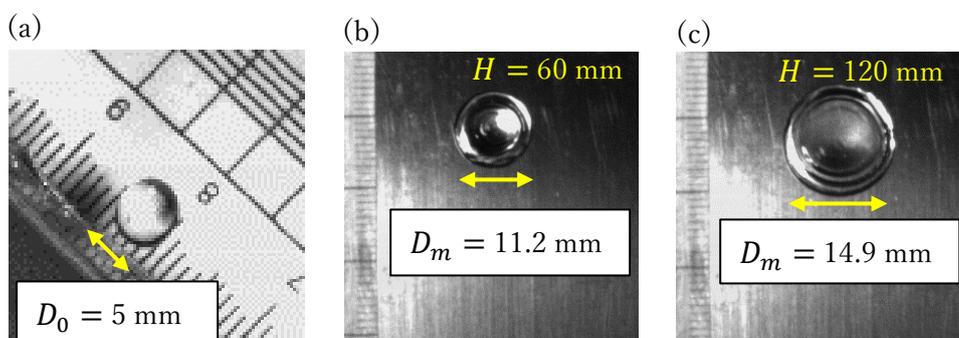


図 3.5 (a)落下する水滴の画像と $D_0$ 、(b) $H = 60 \text{ mm}$ における PTFE 表面衝突後最大に濡れ広がったときの水滴の画像と $D_m$ 、(c) $H = 120 \text{ mm}$ における PTFE 表面衝突後最大に濡れ広がったときの水滴の画像と $D_m$

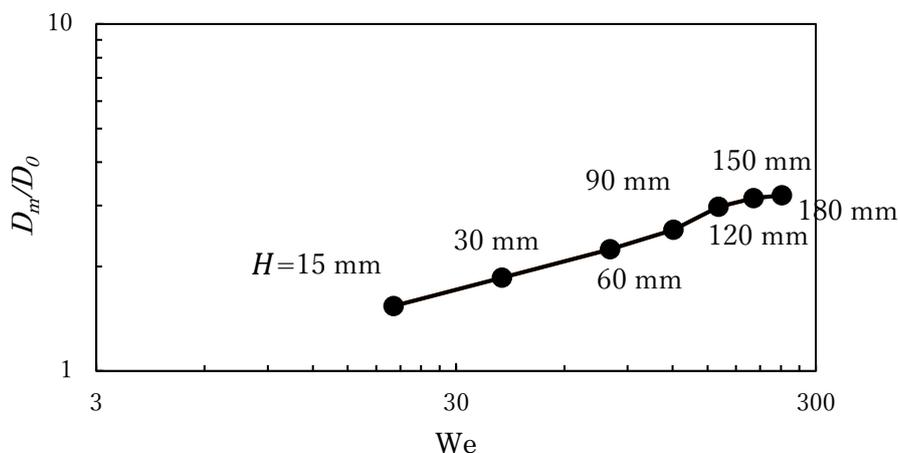


図 3.6  $H = 15 \text{ mm} \sim 180 \text{ mm}$ におけるウェーバー数と $D_m/D_0$ の関係

ここで、直径 $D_0$ の液滴を固体表面上に落下させたときの、固体表面上で液滴が最大の濡れ広がったときの直径 $D_m$ と $D_0$ の比 $D_m/D_0$ とウェーバー数の関係を調査した研究報告を図 3.7 に示す[3]。図中の破線で示された曲線は理論曲線であり次式で表される[3]。

$$\frac{3(1 - \cos \theta)}{We} \tilde{D}_m^2 + \frac{\alpha}{\sqrt{Re}} \tilde{D}_m^2 \sqrt{\tilde{D}_m - 1} = \frac{12}{We} + \frac{1}{2} \quad (3.1)$$

$\tilde{D}_m = D_m/D_0$ 、 $Re$  はレイノルズ数、 $\theta$ は液滴と固体の接触角、 $\alpha$ は定数である。 $D_m/D_0$ はウェーバー数の増加に対して下に凸な関数として増加、変曲点以降は比例関係に漸近している。図 3.6 に示した本研究の水滴と PTFE における $D_m/D_0$ とウェーバー数の関係(●)を図 3.7 に重ねた結果を図 3.8 に示した。 $H = 15 \text{ mm} \sim 180 \text{ mm}$ における水滴のウェーバー数と $D_m/D_0$ の関係は概ね文献[3]に示された理論曲線に沿って変化していることが確認できる。

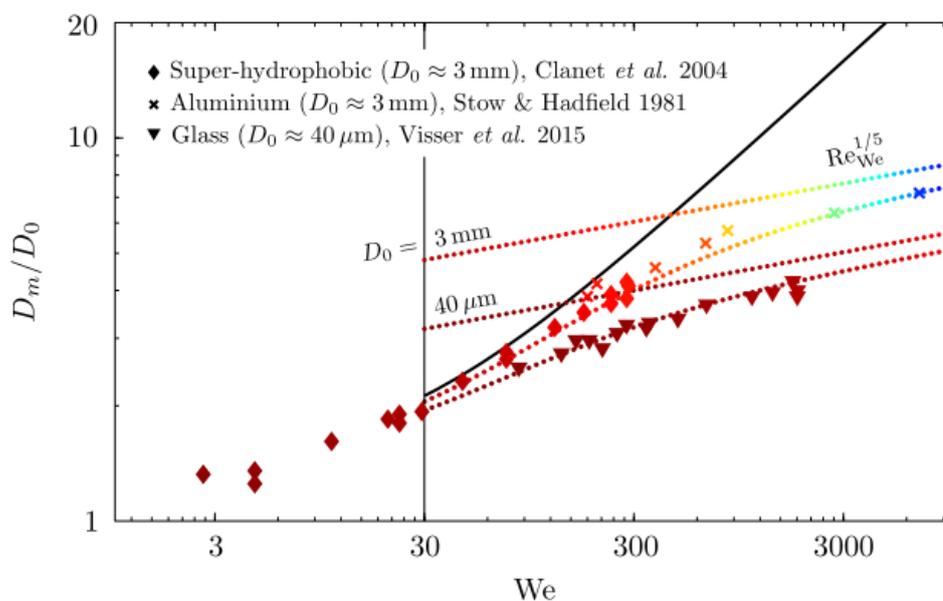


図 3.7 固体表面上で液滴の最大直径 $D_m$ と $D_0$ の比とウェーバー数の関係[3]

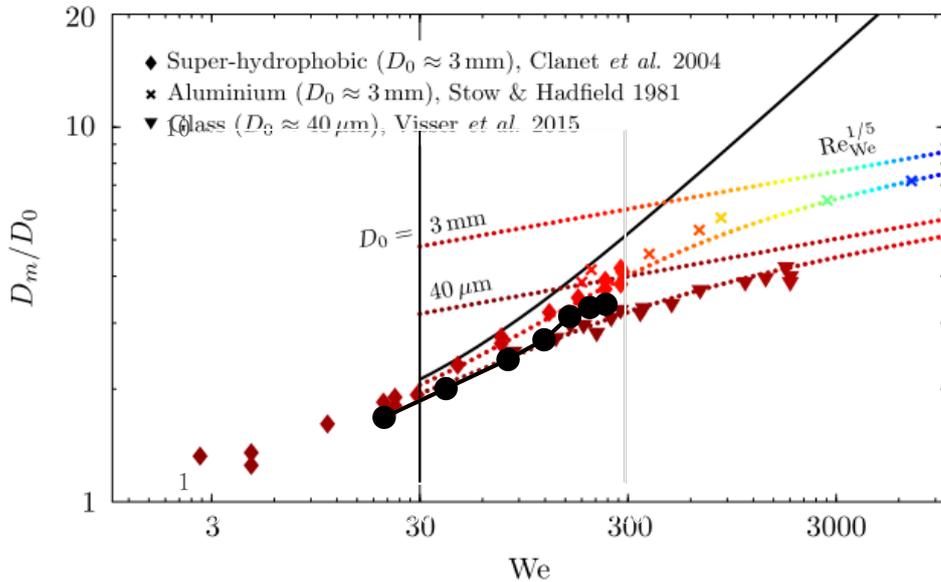


図 3.8 図 3.6 に示した  $H = 15 \text{ mm} \sim 180 \text{ mm}$  の水滴と PTFE における  $D_m/D_0$  とウェーバー数の関係 (●) を図 3.7 に重ねた結果

### 3.4 水滴落下点から電極までの距離と電気出力

前節にて水滴の力学的エネルギーは水滴と PTFE の接触面積の拡大に使用されることがわかったことから、力学的エネルギーと電気出力の関係は、水滴と PTFE の接触面積と電気出力の関数に置き換えてよい。ただし、水滴の落下高さ  $H$  を固定して力学的エネルギーを一定としたとき、PTFE 上の水滴の落下点から上部電極までの距離  $L$  に依存して、電気出力の大きさが変化する可能性がある。そこで  $H$  を固定し、 $L$  と電気出力の関係を調査した。図 3.9 に  $H = 90 \text{ mm}$  における、PTFE 表面上に落下した水滴が PTFE 表面を滑り落ちるときの水滴の画像を示す。水滴落下点からの距離に応じて水滴の形状が変化していることが確認できる。水滴の先端が落下点から PTFE 表面上を  $11 \text{ mm}$  進んだとき、水滴は PTFE 表面上を長く伸び広がり、 $24 \text{ mm}$  進んだとき水滴のバウンド運動のため水滴は収縮、 $38 \text{ mm}$  進んだとき水滴は再び PTFE 上を伸び広がっている。水滴は落下点からの距離  $L$  に応じて様々な形状で上部電極と接触する。図 3.10 に  $H = 90 \text{ mm}$  における、各  $L$  において水滴と上部電極が接触した時の水滴画像を示す。 $L$  に応じて水滴の形状、すなわち PTFE との接触面積が変化していることが確認できる。なお、4.2 節において電気出力が発生している間の水滴と PTFE の接触面積変化は無視できることを述べているが、第 4 章においては出力ピーク電圧の発生から  $0 \text{ V}$  に戻るまでの、約  $1 \text{ ms}$  間における面積変化が無視できることを前提としている。その間の水滴の移動距離は  $0.1 \text{ mm}$  以下である。本章における水滴と PTFE の接触

面積変化は、水滴が数ミリメートル移動する間の面積変化を扱っている。

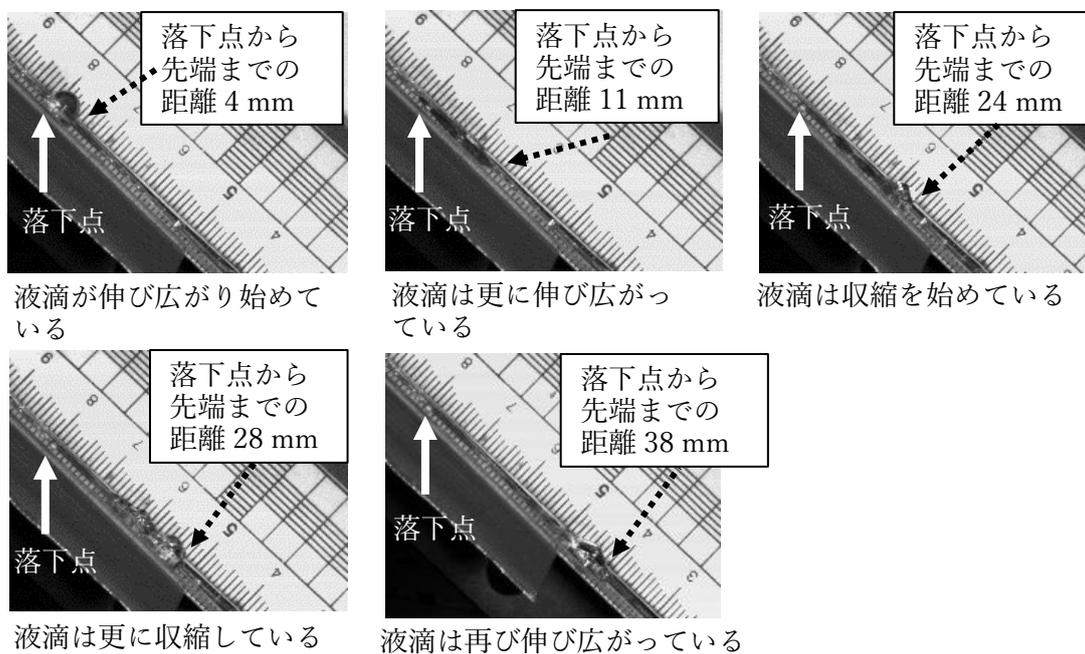


図 3.9 落下高さ  $H = 90$  mm における PTFE 表面上を滑走する水滴画像

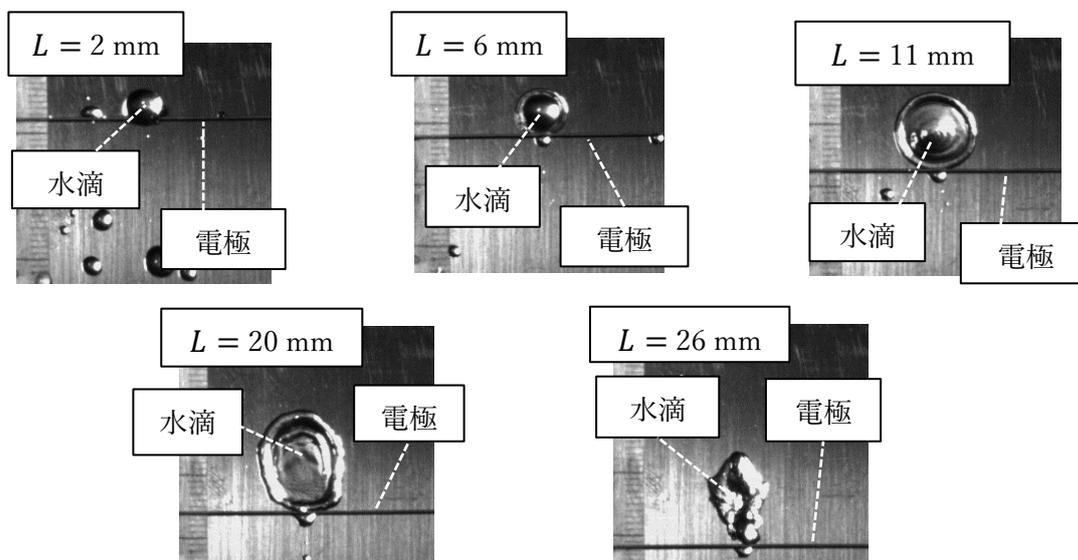


図 3.10  $L = 2$  mm、 $L = 6$  mm、 $L = 11$  mm、 $L = 20$  mm、 $L = 26$  mm における水滴 - 上部電極接触時の水滴画像

次に、 $L = 2 \text{ mm}$ 、 $L = 6 \text{ mm}$ 、 $L = 11 \text{ mm}$ 、 $L = 20 \text{ mm}$ 、 $L = 26 \text{ mm}$  における傾斜 3 層型 DEG 電気出力波形を図 3.11 に示す。水滴導電率 $\sigma_w = 3.3 \text{ }\mu\text{S/cm}$ 、負荷抵抗 $R_L = 10 \text{ M}\Omega$ である。 $L$ の変化に応じて出力ピーク電圧が増減することが確認できる。

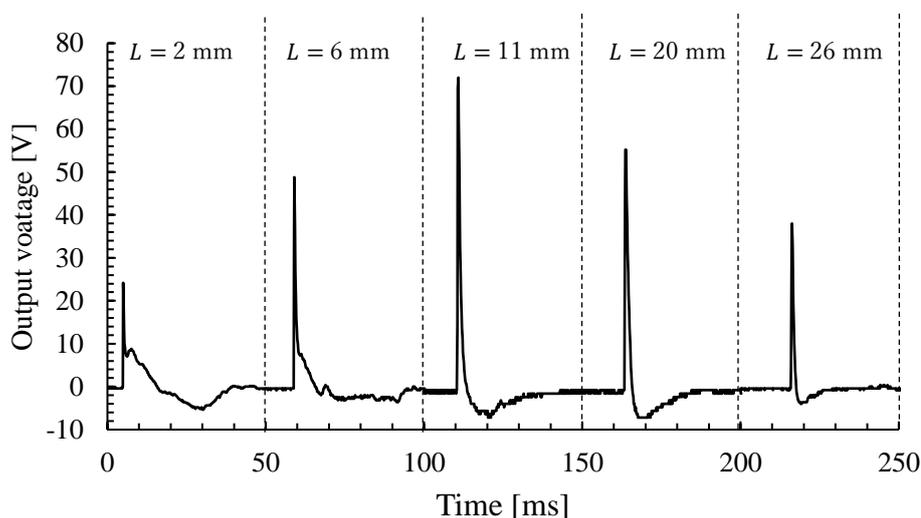


図 3.11  $L = 2 \text{ mm}$ 、 $L = 6 \text{ mm}$ 、 $L = 11 \text{ mm}$ 、 $L = 20 \text{ mm}$ 、 $L = 26 \text{ mm}$  における出力電圧波形（水滴導電率 $\sigma_w = 3.3 \text{ }\mu\text{S/cm}$ 、負荷抵抗 $R_L = 10 \text{ M}\Omega$ ）

水滴の落下点から上部電極までの距離 $L$ と出力ピーク電圧 $V_p$ の関係を詳細に調査した。 $H = 90 \text{ mm}$  における $L$  と $V_p$ の関係を図 3.12 に示す。エラーバーは測定値 10 個の標準偏差を表している。 $V_p$ は $L$ の増加とともに増加し、 $L = 11 \text{ mm}$  のときに最大となった。 $L = 11 \text{ mm}$  を超えると $V_p$ は減少し、 $L = 28 \text{ mm}$  のときに最小となった。更に $L$ が増加すると $V_p$ は再び増加した。ここで、同じ $L$ の値に対して $V_p$ の測定値がゆらぎを持っているのは、水滴の体積、PTFE 上での水滴の落下位置、PTFE 表面の濡れ状態の不確かさが合成された結果であると考えられる。図 3.10 に示した水滴と PTFE の接触面積の変化を考慮すると、出力ピーク電圧は、水滴と PTFE の接触面積と強く関連していると予想される。図 3.12 で示した $L$  と $V_p$  の関係に、水滴が上部電極に接触したときの水滴と PTFE の接触面積 $S$ を重ねた結果を図 3.13 に示す。出力ピーク電圧 $V_p$ は $S$ の変化に追従して変化している。しかし、 $S$ は $L = 16 \text{ mm}$  のとき最大値をとり、 $V_p$ が最大値をとった $L = 11 \text{ mm}$  と一致していなかった。この原因は 3.6 節の最後に述べる。

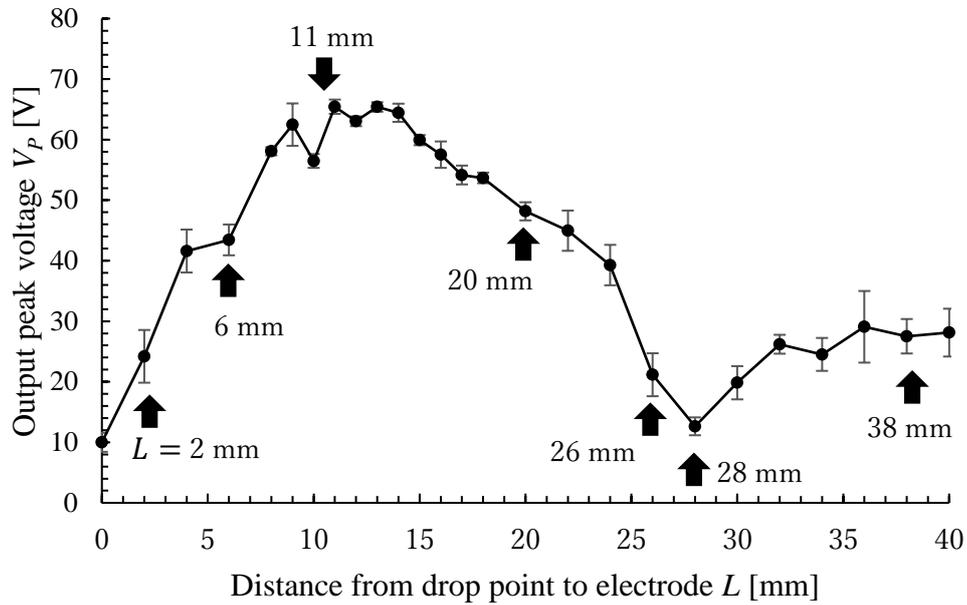


図 3.12 落下高さ $H=90$  mm における水滴の落下点から上部電極までの距離 $L$ と出力ピーク電圧 $V_p$ の関係。エラーバーは測定値 10 個の標準偏差を示している。  
(水滴導電率 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、負荷抵抗 $R_L = 10 \text{ M}\Omega$ )

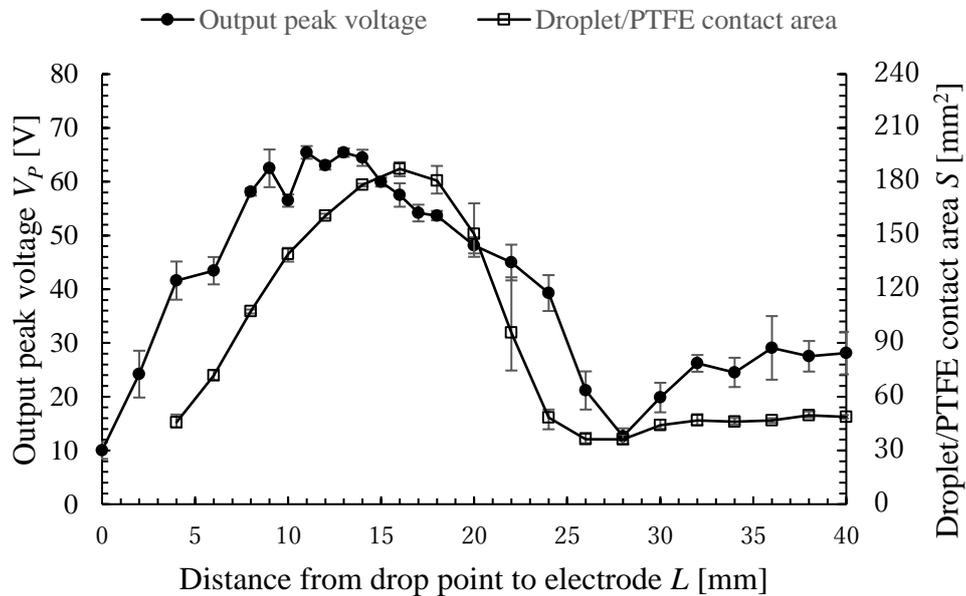


図 3.13 落下高さ $H = 90$  mm における水滴の落下点から上部電極までの距離 $L$ と出力ピーク電圧 $V_p$  (●)、 $L$ と水滴と PTFE の接触面積 $S$  (□) の関係  
(水滴導電率 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、負荷抵抗 $R_L = 10 \text{ M}\Omega$ )

### 3.5 水滴落下高さと電気出力

本節では水滴の落下高さ $H$ をパラメータとして、水滴の落下点から上部電極までの距離 $L$ と出力ピーク電圧 $V_p$ の関係を詳細に調査した。図 3.14 に、 $H = 15 \text{ mm} \sim 60 \text{ mm}$  における $L$ と $V_p$ の関係を示す。水滴導電率は $\sigma_w = 3.3 \text{ }\mu\text{S/cm}$ 、負荷抵抗は $R_L = 10 \text{ M}\Omega$ である。 $H = 15 \text{ mm}$  における $V_p$ の最大値は $L = 8 \text{ mm}$  のとき  $29.2 \text{ V}$ 、 $H = 30 \text{ mm}$  における $V_p$ の最大値は $L = 9 \text{ mm}$  のとき  $38.2 \text{ V}$ 、 $H = 45 \text{ mm}$  における $V_p$ の最大値は $L = 9 \text{ mm}$  のとき  $45.0 \text{ V}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$  における $V_p$ の最大値は $L = 16 \text{ mm}$  のとき  $63.8 \text{ V}$  であった。 $H$ が増加すると $V_p$ の最大値は増加、 $V_p$ が最大値をとるときの $L$ も増加した。また $H = 45 \text{ mm}$  と $H = 60 \text{ mm}$  においては、 $V_p$ がピークをとるときの $L$ が  $3 \text{ mm}$  から  $4 \text{ mm}$  程度の幅をもつ傾向が観察された。この結果の考えられる原因については 3.6 節の最後に述べる。2.2 節で述べた傾斜 3 層型 DEG の動作原理によると、電気出力の大きさは水滴と PTFE の接触領域における PTFE の帯電電荷量に依存する。出力ピーク電圧 $V_p$ と水滴と PTFE の接触面積 $S$ の間には相関があると予想される。次節では高速カメラで撮影した水滴画像から、水滴と PTFE の接触面積を評価し、出力ピーク電圧との関係を検証した。

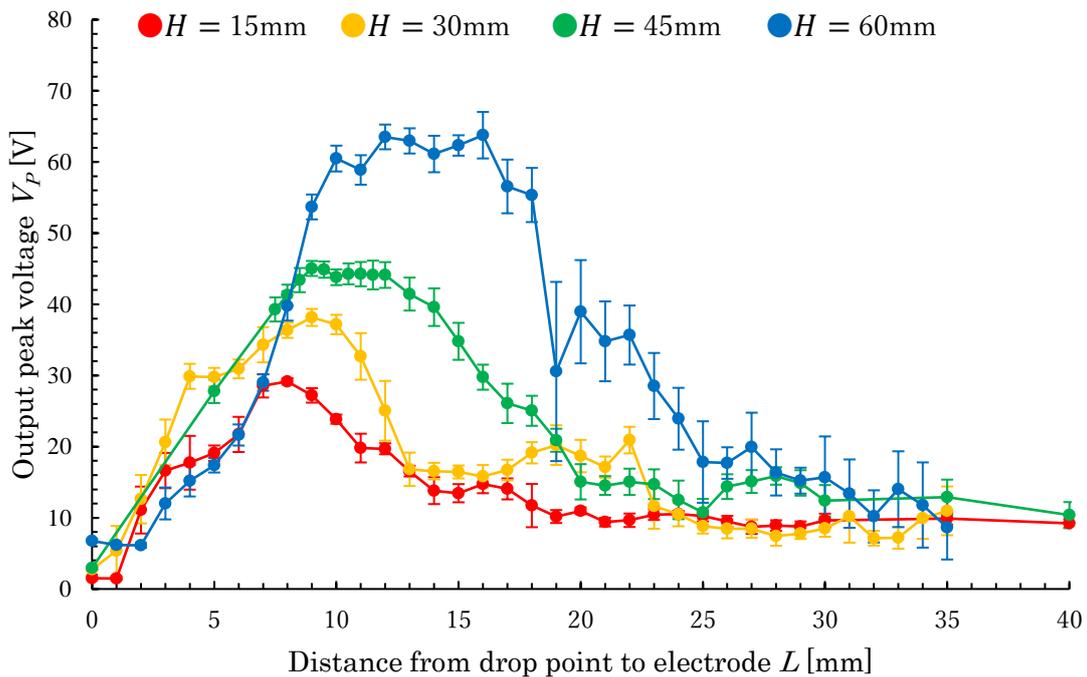
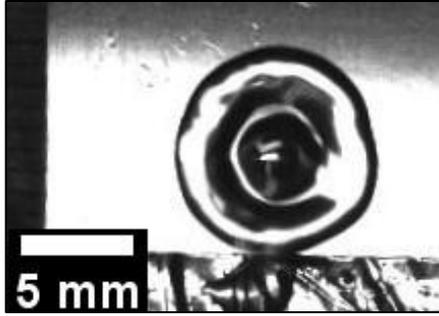


図 3.14 落下高さ $H = 15 \text{ mm}$ 、 $H = 30 \text{ mm}$ 、 $H = 45 \text{ mm}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$  における水滴落下点から上部電極までの距離 $L$ と出力ピーク電圧 $V_p$ の関係。エラーバーは測定値 10 個の標準偏差を示している。(水滴導電率 $\sigma_w = 3.3 \text{ }\mu\text{S/cm}$ 、負荷抵抗 $R_L = 10 \text{ M}\Omega$ )

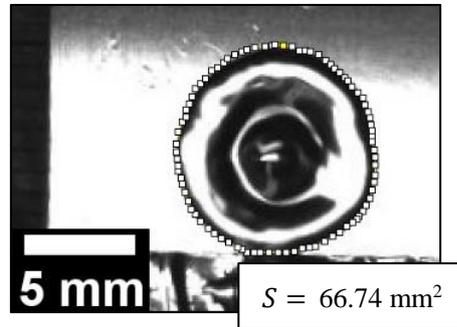
### 3.6 水滴・PTFE 接触面積と電気出力

図 3.15 に導電率 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  の水滴が上部電極に接触した時の水滴の画像、水滴と PTFE の接触面積 $S$ の評価結果を示す。(a)、(c)、(e)がそれぞれ $H = 30 \text{ mm}$ 、 $H = 45 \text{ mm}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$ における水滴の画像、(b)、(d)、(f)がそれぞれ $H = 30 \text{ mm}$ 、 $H = 45 \text{ mm}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$ における $S$ の評価結果である。 $S$ は画像解析ソフトを使用して PTFE 上を濡れ広がる水滴の輪郭を抽出し、抽出した輪郭内部の面積を同ソフトウェアにて計算して求めた。(b)、(d)、(f)の中の多数の白いドットは抽出した水滴の輪郭を表している。水滴導電率 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  (イオン交換水)、 $\sigma_w = 110 \mu\text{S}/\text{cm}$  (水道水) に対する、 $S$ と各 $H$ における最大出力ピーク電圧 $V_{Pmax}$ の関係を図 3.16 に示す。負荷抵抗は $R_L = 10 \text{ M}\Omega$ である。 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  (●) における $V_{Pmax}$ は、 $H = 30 \text{ mm}$  のとき約 48 V、 $H = 60 \text{ mm}$  のとき約 58 V、 $H = 90 \text{ mm}$  のとき約 63 V、 $H = 120 \text{ mm}$  のとき約 65 V であった。 $\sigma_w = 110 \mu\text{S}/\text{cm}$  (△) の $V_{Pmax}$ は、 $H = 30 \text{ mm}$  のとき約 74 V、 $H = 60 \text{ mm}$  のとき約 97 V、 $H = 90 \text{ mm}$  のとき約 111 V、 $H = 120 \text{ mm}$  のとき約 121 V、 $H = 150 \text{ mm}$  のとき約 155 V、 $H = 180 \text{ mm}$  のとき約 185 V であった。

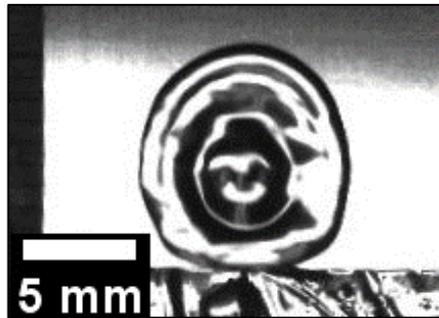
(a)  $H = 30$  mm 水滴画像



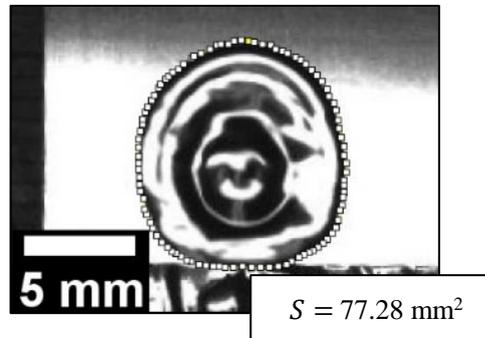
(b)  $H = 30$  mm 水滴・PTFE 接触面積



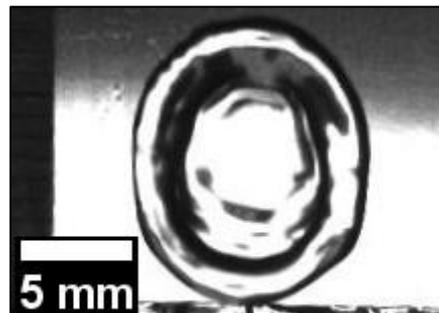
(c)  $H = 45$  mm 水滴画



(d)  $H = 45$  mm 水滴・PTFE 接触面積



(e)  $H = 60$  mm 水滴画像



(f)  $H = 60$  mm 水滴・PTFE 接触面積

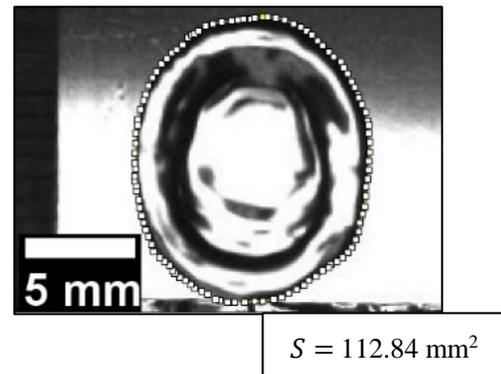


図 3.15 水滴と上部電極接触時の水滴画像と水滴と PTFE の接触面積 $S$  ( $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ )  
(a)(c)(e)は $H = 30$  mm、 $H = 45$  mm、 $H = 60$  mm における水滴画像。(b)(d)(f)は $H = 30$  mm、 $H = 45$  mm、 $H = 60$  mm における $S$ の評価結果。多数の白いドットは面積評価のため抽出した水滴の輪郭を表している。

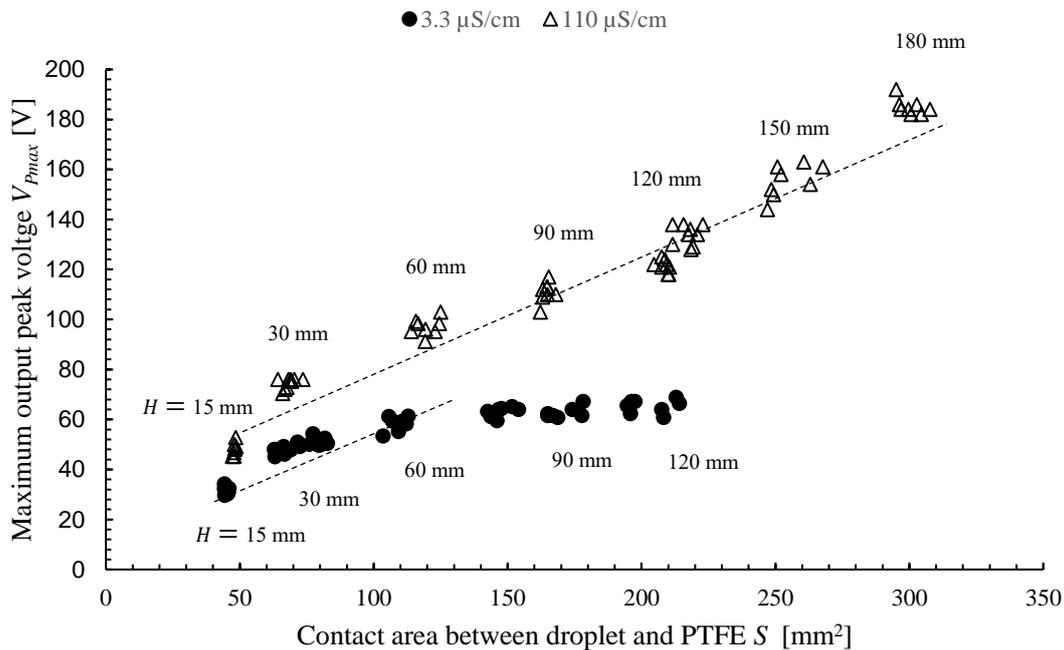


図 3.16 水滴導電率 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  (●)、 $\sigma_w = 110 \mu\text{S}/\text{cm}$  (△) における水滴と PTFE の接触面積 $S$ と各水滴の落下高さ $H$ における最大出力ピーク電圧 $V_{Pmax}$ の関係 (負荷抵抗 $R_L = 10 \text{ M}\Omega$ )

落下高さ $H$ が共通の場合、 $\sigma_w = 110 \mu\text{S}/\text{cm}$  の水滴の方が最大出力ピーク電圧 $V_{Pmax}$ は高い。 $V_{Pmax}$ は $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\sigma_w = 110 \mu\text{S}/\text{cm}$  共に水滴と PTFE の接触面積 $S$ に比例して増加したが、 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  では $S$ がおおよそ  $100 \text{ mm}^2$  以上になると $V_{Pmax}$ のは一定値を示すようになった。一方 $\sigma_w = 110 \mu\text{S}/\text{cm}$  では $S$ の増加に対して $V_{Pmax}$ の増加が継続して観察された。

$S$ と $V_{Pmax}$ が比例関係にある $H = 15 \text{ mm} \sim H = 60 \text{ mm}$  において、 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  のとき $V_{Pmax}$ が低く、 $\sigma_w = 110 \mu\text{S}/\text{cm}$  のときが高くなった結果は、水滴の電気抵抗の差に起因していると考えられる。水滴の電気抵抗 $R_w$ は水滴の導電率で決まる。 $R_w$ は傾斜 3 層型 DEG を電源として見た場合、内部抵抗 $R'$ として機能する。低導電率の水滴では $R_w$ が高いため、傾斜 3 層型 DEG からの出力電圧 (開放電圧) は内部抵抗 $R'$ で分圧されることにより、負荷抵抗の両端電圧である出力電圧は低導電率の水滴で低くなったと考えられる。 $H = 30 \text{ mm}$  における $V_{Pmax}$ は  $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合おおよそ  $48 \text{ V}$ 、 $\sigma_w = 110 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合おおよそ  $74 \text{ V}$  であり、その比は $74/48 \approx 1.54$ である。一方、傾斜 3 層型 DEG の等価回路は、図 3.17 のような RC 回路であることを 4.3 節で明らかにしている。したがって、開放電圧を $V_0$ とおくと、負荷抵抗における出力電圧 $V$ は、 $V = (R_L / (R' + R_L)) V_0$ と表せる。 $H = 30 \text{ mm}$  における水滴の抵抗 $R_w$ すなわち内部抵抗 $R'$ の値は、4.3 節にて $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合 $R' = 3.17 \text{ M}\Omega$ 、 $\sigma_w = 116 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合 $R' = 0.35 \text{ M}\Omega$ と導出している。また、 $H = 30 \text{ mm}$  における開放電圧 $R_w$

は水滴の導電率によらず、 $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S/cm}$  の場合と  $\sigma_w = 116 \mu\text{S/cm}$  の場合とでほぼ等しいことも 4.3 節で明らかになっている。今、負荷抵抗は  $R_L = 10 \text{ M}\Omega$  であることから、合成抵抗値 ( $R' + R_L$ ) は  $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S/cm}$  の場合  $13.17 \text{ M}\Omega$ 、 $\sigma_w = 116 \mu\text{S/cm}$  の場合  $10.35 \text{ M}\Omega$  である。したがって、負荷抵抗における  $\sigma_w = 116 \mu\text{S/cm}$  の出力電圧  $V_{\sigma_w=116 \mu\text{S/cm}}$  と  $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S/cm}$  の出力電圧  $V_{\sigma_w=2.4 \mu\text{S/cm}}$  の比  $V_{\sigma_w=116 \mu\text{S/cm}}/V_{\sigma_w=2.4 \mu\text{S/cm}}$  は、合成抵抗の逆比に等しく  $13.17/10.35 \approx 1.27$  である。 $H = 30 \text{ mm}$  における  $V_{Pmax}$  の測定値の比 1.54 と、開放電圧、負荷抵抗値、内部抵抗値から算出される出力電圧の比 1.27 はおよそ一致している。

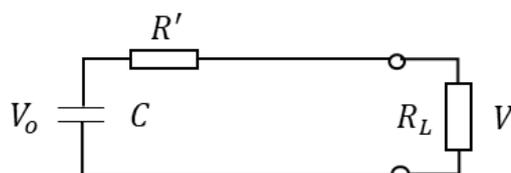
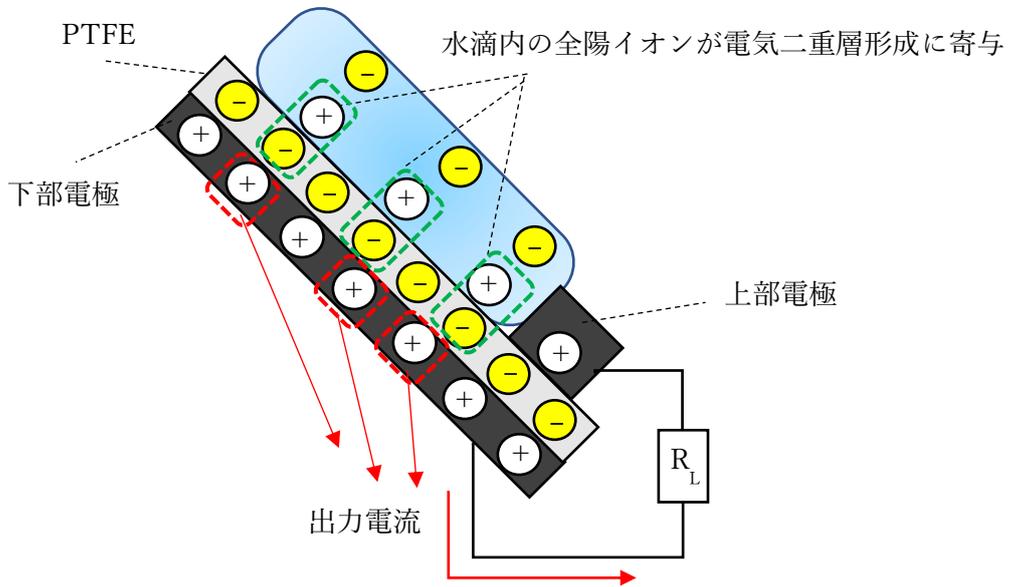


図 3.17 傾斜 3 層型 DEG の等価回路

$\sigma_w = 3.3 \mu\text{S/cm}$  において  $S \geq 100 \text{ mm}^2$  で観測された  $V_{Pmax}$  の飽和については、以下のような原因が可能性として考えられる。2.2 節で傾斜 3 層型 DEG 述べた動作原理によると、下部電極から負荷回路へ流れる電荷量は、水滴と PTFE の界面で中和される PTFE 帯電電荷量で決まる。水滴と PTFE の界面で中和される PTFE 帯電電荷量は、水滴と PTFE の界面で電気二重層の形成に寄与する水滴内陽イオン数に依存する。したがって負荷回路へ流れる電荷量、すなわち出力電流の大きさは、水滴と PTFE の界面で電気二重層を形成する水滴内陽イオン数によって制限されることになる。水滴内に存在するイオンの総量は、水滴のイオン濃度（導電率）と体積によって上限が決定される。水滴と PTFE の接触面積がある程度広くなると、水滴内のすべての陽イオンが電気二重層の形成に寄与するようになり、それ以上面積が増加しても電気二重層の形成に寄与する水滴内の陽イオン数は増加しない。したがって  $V_{Pmax}$  は飽和すると考えられる。すべての水滴内の陽イオンが電気二重層形成に寄与するときの水滴と PTFE の接触面積  $S$  は、水滴内イオン量が少ないほど、すなわち水滴の導電率が低いほど狭い。このことから  $S$  の増加に対して、 $V_{Pmax}$  の飽和は低導電率の水滴の方が早く現れる。 $S \approx 100 \text{ mm}^2$  において  $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S/cm}$  の水滴では全ての陽イオンが電気二重層形成に寄与したと考えられる。一方  $\sigma_w = 110 \mu\text{S/cm}$  の水滴では電気二重層の形成に寄与せず余剰となっている陽イオンが存在する。したがって  $S$  の増加によりこれら余剰となっている陽イオンが電気二重層の形成に寄与するようになることで更に  $V_{Pmax}$  が増加したと考えられる。図 3.18 に  $S \approx 100 \text{ mm}^2$  における (a)  $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S/cm}$  と (b)  $\sigma_w = 110 \mu\text{S/cm}$  の水滴内イオンの模式図を示した。

(a)  $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S/cm}$



(b)  $\sigma_w = 110 \mu\text{S/cm}$

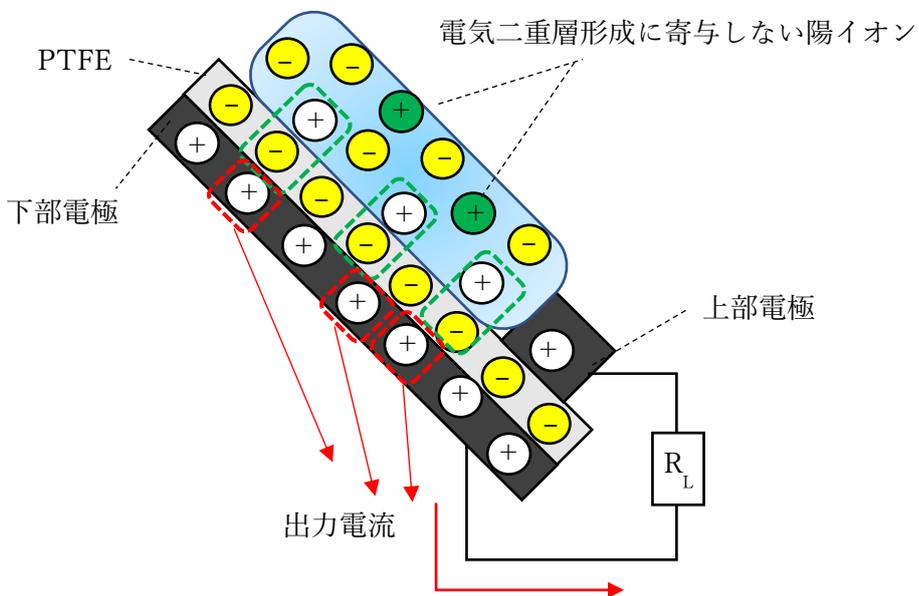


図 3.18  $S \approx 100 \text{ mm}^2$  における (a)  $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S/cm}$  と (b)  $\sigma_w = 110 \mu\text{S/cm}$  の水滴内イオン

最後に、3.4 節で述べたように、出力ピーク電圧 $V_p$ は水滴と PTFE の接触面積 $S$ の大きさに対応して変化するが、 $S$ が最大となる水滴落下点から電極までの距離 $L$ と、 $V_p$ の最大値が得られる $L$ の値が一致していなかった (図 3.13)。また 3.5 節では水滴の落下高さ $H$ が 45mm を超えると、 $V_p$ が最大となる $L$ が 3 mm から 4 mm 程度の幅をもつことを示した (図 3.14)。これらの結果についても、水滴内のイオン量の上限に起因する最大出力ピーク電圧 $V_{pmax}$ の飽和が原因であると考えられる。水滴内のイオン量が十分であれば、 $S$ に比例して $V_{pmax}$ は増加する。しかし低導電率の水滴では、水滴内イオン量が少量であるため、 $S$ が最大になる前にすべての水滴内陽イオンが PTFE との界面で電気二重層を形成する。したがって、 $S$ が増加しても $V_{pmax}$ は増加しないことから、 $V_p$ が最大になる $L$ と、 $S$ が最大になる $L$ が一致せず、 $V_p$ が最大となる $L$ が一定の幅をもったと考えられる。

### 3.7 結言

本章では、始めに体積 65  $\mu\text{L}$  の水滴の落下高さ $H$ が 15 mm から 180 mm までにおけるウェーバー数と PTFE 表面上における水滴の最大濡れ広がり直径 $D_m$ を評価し、PTFE に落下する水滴の運動エネルギーの増加とともに $D_m$ が増加することを示した。次に水滴の落下点から上部電極までの距離 $L$ 、水滴の落下高さ $H$ をパラメータとし、異なる水滴導電率 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S/cm}$  (イオン交換水) と  $\sigma_w = 110 \mu\text{S/cm}$  (水道水) に対して水滴と PTFE の接触面積 $S$ と電気出力の関係を詳細に調査した。その結果、(i) 電気出力は $S$ に比例して増加すること、(ii)  $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S/cm}$  の水滴においては $S$ がおよそ 100  $\text{mm}^2$  を超えると最大出力ピーク電圧 $V_{pmax}$ が飽和すること、(iii)  $S \leq 100 \text{mm}^2$  において $V_{pmax}$ は高導電率の水滴の方が高いことが明らかになった。(i) については $S$ が広いほど多数の水滴内イオンが水滴と PTFE 界面で電気二重層の形成に寄与するためである。(ii) については水滴内に存在するイオン量は水滴の導電率と体積によって決定されることにより、水滴と PTFE の界面で電気二重層の形成に寄与する水滴内陽イオン数に上限があることが原因であると考えた。(iii) については低導電率で水滴の電気抵抗すなわち内部抵抗が高いため、傾斜 3 層型 DEG からの出力電圧 (開放電圧) の内部抵抗における分圧が大きくなり、その結果、負荷抵抗の両端電圧は低くなったと考えられる。 $H = 30 \text{mm}$  における $V_{pmax}$ の測定値の比と、開放電圧、負荷抵抗値、内部抵抗値から算出される出力電圧の比はおおよそ一致していた。

直径 5 mm、体積 65  $\mu\text{L}$  の水滴を $H = 15 \text{mm}$  から 180 mm の高さから負荷抵抗 $R_L = 10 \text{M}\Omega$ を接続した傾斜 3 層型 DEG へ落下させたとき、水滴の落下に伴う運動エネルギーは PTFE 上で水滴の面積の拡大に使用され、水滴導電率 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S/cm}$  (イオン交換水) の場合、48 V から 65 V、 $\sigma_w = 110 \mu\text{S/cm}$  (水道水) の場合、74 V から 185 V の電気出力が負荷抵抗の両端電圧として得られた。

## 参考文献

- [1] R Denis, C Clanet, and D Quéré, "Contact time of a bouncing drop", *Nature* 417, 6891 (2002), 811.
- [2] Y Yonemoto, and K Tomoaki, "Analytical consideration of liquid droplet impingement on solid surfaces", *Scientific reports* 7, 1 (2017), 2362.
- [3] S Wildeman, CW Visser, C Sun, and D Lohse, "On the spreading of impacting drops", *Journal of fluid mechanics* 805 (2016), 636.

## 第4章 回路モデルと液滴パラメータ

### 4.1 緒言

傾斜3層型 DEG をエネルギーハーベスティング素子として利用するためには、出力電力値の予測や負荷回路とのインピーダンス整合を行うためにも回路モデルを構築することが不可欠である。2.3節で傾斜3層型 DEG は RC 回路でモデル化が可能であること、特に下部電極から正電荷が移動し、電気出力が発生している間の水滴と PTFE の接触面積の時間変化が無視できる場合は簡略化された RC 回路でモデル化が可能であることを述べた。本章ではまず電気出力が発生している間の水滴と PTFE の接触面積を評価し、簡略化された RC 回路モデルを適用可能であることを確認する。次に異なる水滴導電率に対して電気出力波形を観察し、その結果から回路パラメータである内部抵抗、開放電圧、静電容量、帯電電荷密度を導出、RC 回路モデルが妥当であることを検証する。また、水滴形状をパラメータとして内部抵抗、開放電圧、静電容量を評価し、液滴パラメータ（導電率と形状）が回路パラメータに与える影響を検証する。最後に傾斜3層型 DEG の出力電力を算出する。

### 4.2 RC 回路モデル

傾斜3層型 DEG の電気出力が発生している間の水滴と PTFE の接触面積の時間変化を評価するため、3.2節に記載した電気出力測定方法と同様の方法にて、出力電圧波形を観察した。傾斜3層型 DEG の写真と測定装置の概略図を図 4.1 に示す。

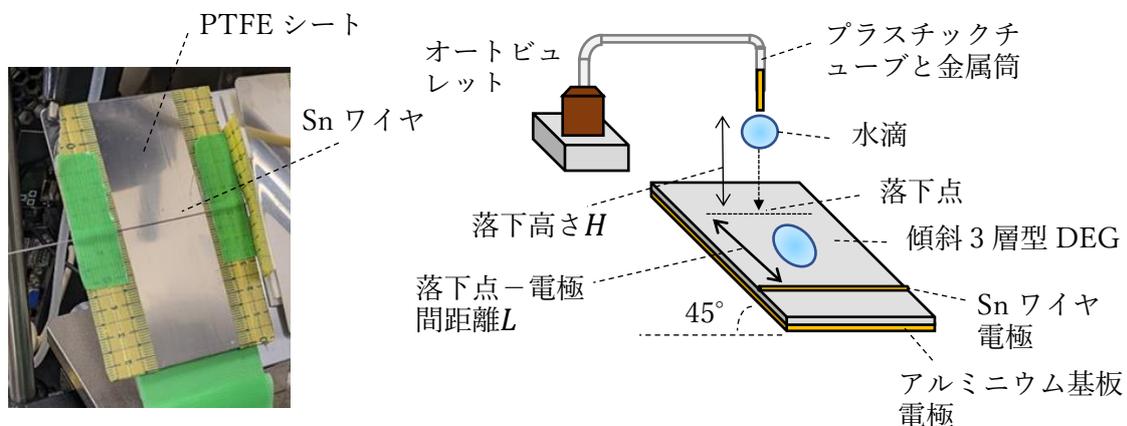


図 4.1 傾斜3層型 DEG 写真と測定装置の概略図

水滴導電率 $\sigma_w = 116 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、負荷抵抗 $R_L = 1 \text{ M}\Omega$ 、水滴の落下高さ $H = 30 \text{ mm}$ 、水滴の落下点から上部電極までの距離 $L = 10 \text{ mm}$ において観測した出力電圧波形、 $t = 0, 0.125 \text{ ms}$ 、 $0.375 \text{ ms}$ 、 $0.75 \text{ ms}$ における水滴画像を図 4.2 に示す。 $t = 0.75 \text{ ms}$ において出力電圧はゼロに減衰している。 $t = 0, 0.125 \text{ ms}$ 、 $0.375 \text{ ms}$ 、 $0.75 \text{ ms}$ における水滴と PTFE の接触面積 $S$ はそれぞれ  $85.74 \text{ mm}^2$ 、 $84.71 \text{ mm}^2$ 、 $83.69 \text{ mm}^2$ 、 $82.81 \text{ mm}^2$ であった。 $t = 0$ における $S$ を $S_0$ とし、各時刻における $S$ との比 $S/S_0$ の値を図 4.2 に赤丸で示した。 $S/S_0$ の値は $t = 0.125 \text{ ms}$ のとき $S/S_0 = 0.99$ 、 $t = 0.375 \text{ ms}$ のとき $S/S_0 = 0.98$ 、 $t = 0.75 \text{ ms}$ のとき $S/S_0 = 0.97$ であったことから、電気出力が発生している間の $S$ の時間変化は無視してよい。

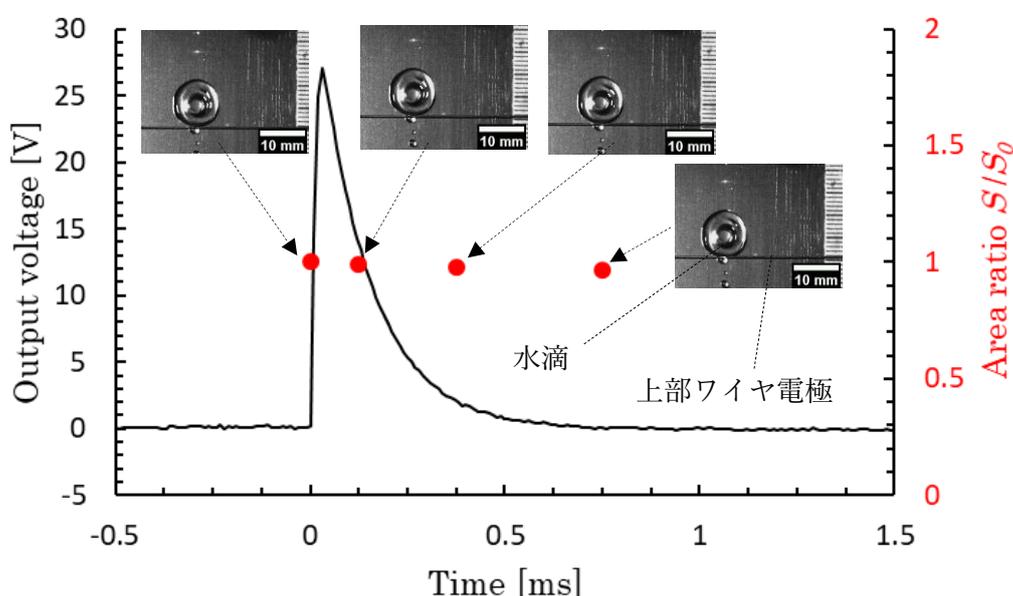


図 4.2 出力電圧波形と水滴と PTFE の接触面積比  
( $\sigma_w = 116 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $R_L = 1 \text{ M}\Omega$ 、 $H = 30 \text{ mm}$ )

図 4.2 の出力電圧を対数表示した波形を図 4.3 に示した。対数表示した出力電圧波形は直線的に減少していること、上述のように電気出力が発生している間の $S$ の時間変化は無視できることから、傾斜 3 層型 DEG の回路モデルは簡略化した RC 回路であると仮定する。簡略化した RC 回路を図 4.4 に示す。このとき負荷抵抗の両端にかかる電圧すなわち出力電圧 $v(t)$ は次式のように表せる。

$$v(t) = \frac{R_L}{R' + R_L} \frac{Q_P}{C} e^{-\frac{t}{(R' + R_L)C}} \quad (4.1)$$

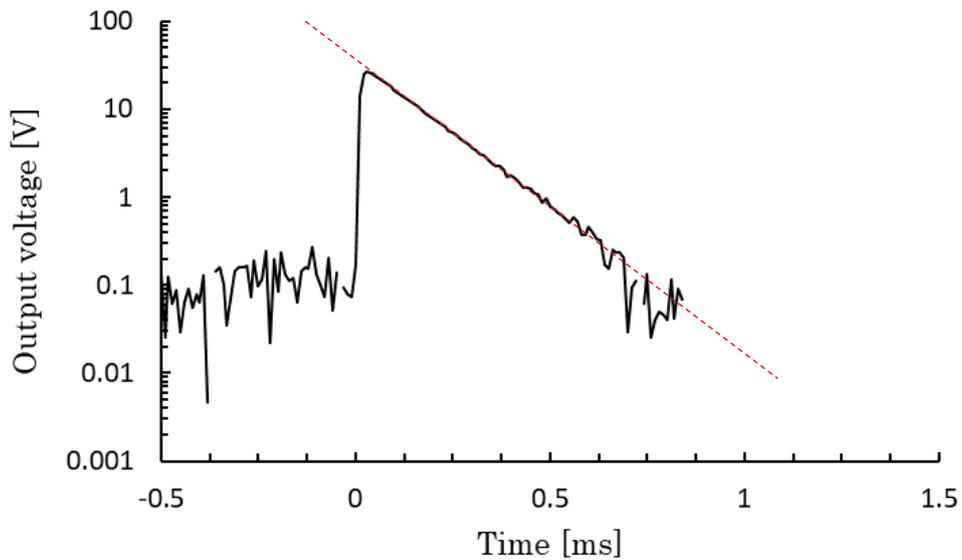


図 4.3 対数表示した出力電圧波形

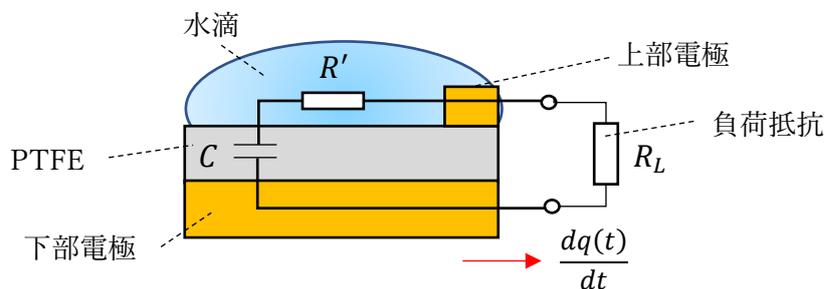


図 4.4 簡略化した RC 回路モデル

出力電圧 $v(t)$ が式(4.1)で表せる場合、最大出力電圧は水滴抵抗 $R'$ 、負荷抵抗 $R_L$ 、PTFE 帯電電荷量 $Q_p$ 、PTFE 静電容量 $C$ により決定される。液滴パラメータである導電率は水滴の電気抵抗 $R'$ に影響を及ぼし、液滴の形状は PTFE の帯電電荷量 $Q_p$ 、PTFE の静電容量 $C$ に影響を及ぼすと予想される。図 4.5 に液滴パラメータと回路パラメータの予想される関連を矢印で示した。次節以降、液滴パラメータと回路パラメータの関係を検証する。

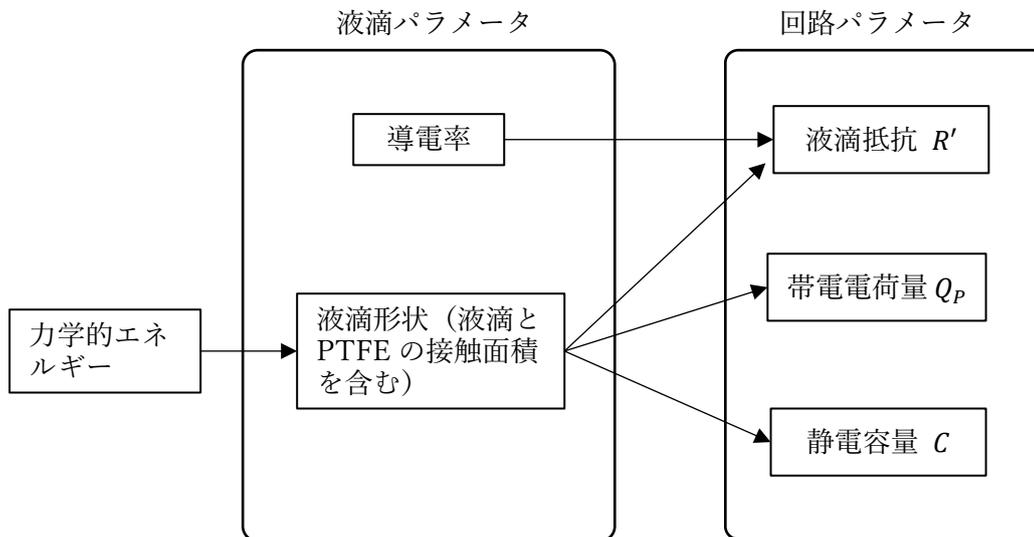


図 4.5 液滴パラメータと回路パラメータの関連性

### 4.3 水滴導電率と回路パラメータ

本節では異なる水滴導電率に対して、(i)出力電圧波形の減衰時定数から求められる静電容量と PTFE の静電容量値との比較、(ii)電圧-電流特性から求められる傾斜 3 層型 DEG の開放電圧、PTFE の静電容量から見積られる帯電電荷密度と PTFE の帯電電荷密度の文献値との比較により、前節の簡略化した RC 回路モデルが傾斜 3 層型 DEG の回路モデルとして妥当であるかを検証する。また、水滴導電率と回路パラメータの関係性について考察する。

傾斜 3 層型 DEG の電圧-電流特性を求めるため、負荷抵抗  $R_1$  と  $R_2$  を傾斜 3 層型 DEG に接続し、抵抗  $R_2$  の両端電圧をオシロスコープ (Tektronix、MSO44) で測定した。減衰比 1:1 のパッシブプローブを使用して電気信号をオシロスコープへ入力した。オシロスコープの入力抵抗は  $1\text{ M}\Omega$  である。出力電圧測定回路を図 4.6 に示す。 $R_1$  と  $R_2$  の組み合わせ、 $R_L = R_1 + R_2$  はそれぞれ  $(R_1, R_2) = (1\text{ M}\Omega, 10\text{ k}\Omega)$ 、 $(3\text{ M}\Omega, 10\text{ k}\Omega)$ 、 $(10\text{ M}\Omega, 100\text{ k}\Omega)$ 、 $(50\text{ M}\Omega, 100\text{ k}\Omega)$ 、 $R_L = 1.01\text{ M}\Omega$ 、 $3.01\text{ M}\Omega$ 、 $10.1\text{ M}\Omega$ 、 $50.1\text{ M}\Omega$  の 4 通りである。表 4.1 に  $R_1$  と  $R_2$  の組み合わせと  $R_L$  を示す。水滴導電率は  $\sigma_w = 116\text{ }\mu\text{S/cm}$ 、 $50.3\text{ }\mu\text{S/cm}$ 、 $2.4\text{ }\mu\text{S/cm}$ 、水滴の落下高さは  $H = 30\text{ mm}$ 、水滴の落下点から上部電極までの距離は  $L = 10\text{ mm}$  である。水滴導電率を表 4.2 に示す。

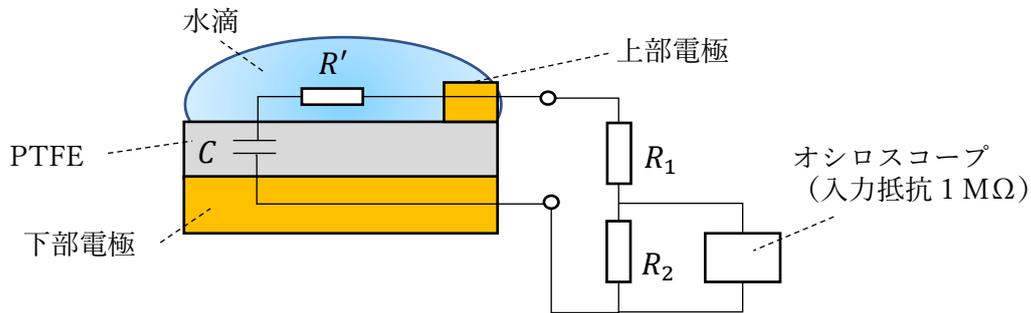


図 4.6 出力電圧測定回路

表 4.1  $R_1$ と $R_2$ の組み合わせと $R_L$

|   | $R_1$ [MΩ] | $R_2$ [kΩ] | $R_L = R_1 + R_2$ [MΩ] |
|---|------------|------------|------------------------|
| A | 1          | 10         | 1.01                   |
| B | 3          | 10         | 3.01                   |
| C | 10         | 100        | 10.1                   |
| D | 50         | 100        | 50.1                   |

表 4.2 水滴導電率

| 水滴導電率 $\sigma_w$ [ $\mu\text{S cm}$ ] |
|---------------------------------------|
| 2.4                                   |
| 50.3                                  |
| 116                                   |

図 4.7 に  $(R_1, R_2) = (1 \text{ M}\Omega, 10 \text{ k}\Omega)$  における、水滴導電率  $\sigma_w = 116 \mu\text{S/cm}$ 、 $50.3 \mu\text{S/cm}$ 、 $2.4 \mu\text{S/cm}$  の出力電圧波形を示す。青線は出力電圧をリニアスケールで、赤線は対数スケールで表示した波形である。出力電圧波形から読み取ったピーク電圧 $V_p$ と減衰時定数 $\tau$ を図中に記載した。 $V_p$ と $\tau$ は $\sigma_w = 116 \mu\text{S/cm}$  の場合 $V_p = 0.70 \text{ V}$ 、 $\tau = 0.047 \text{ ms}$ 、 $\sigma_w = 50.3 \mu\text{S/cm}$  の場合 $V_p = 0.57 \text{ V}$ 、 $\tau = 0.051 \text{ ms}$ 、 $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S/cm}$  の場合 $V_p = 0.25 \text{ V}$ 、 $\tau = 0.12 \text{ ms}$ であった。 $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S/cm}$  については他の 2 条件と比較して電圧発生及び減衰に遅れが発生していることが観察された。 $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S/cm}$  の場合、下述するように回路の合成抵抗値が他の条件よりも 2 倍から 3 倍高いため、出力電圧の緩和時間が長く、水滴が低イオン濃度であることから電気二重層形成が遅れると考えられる。

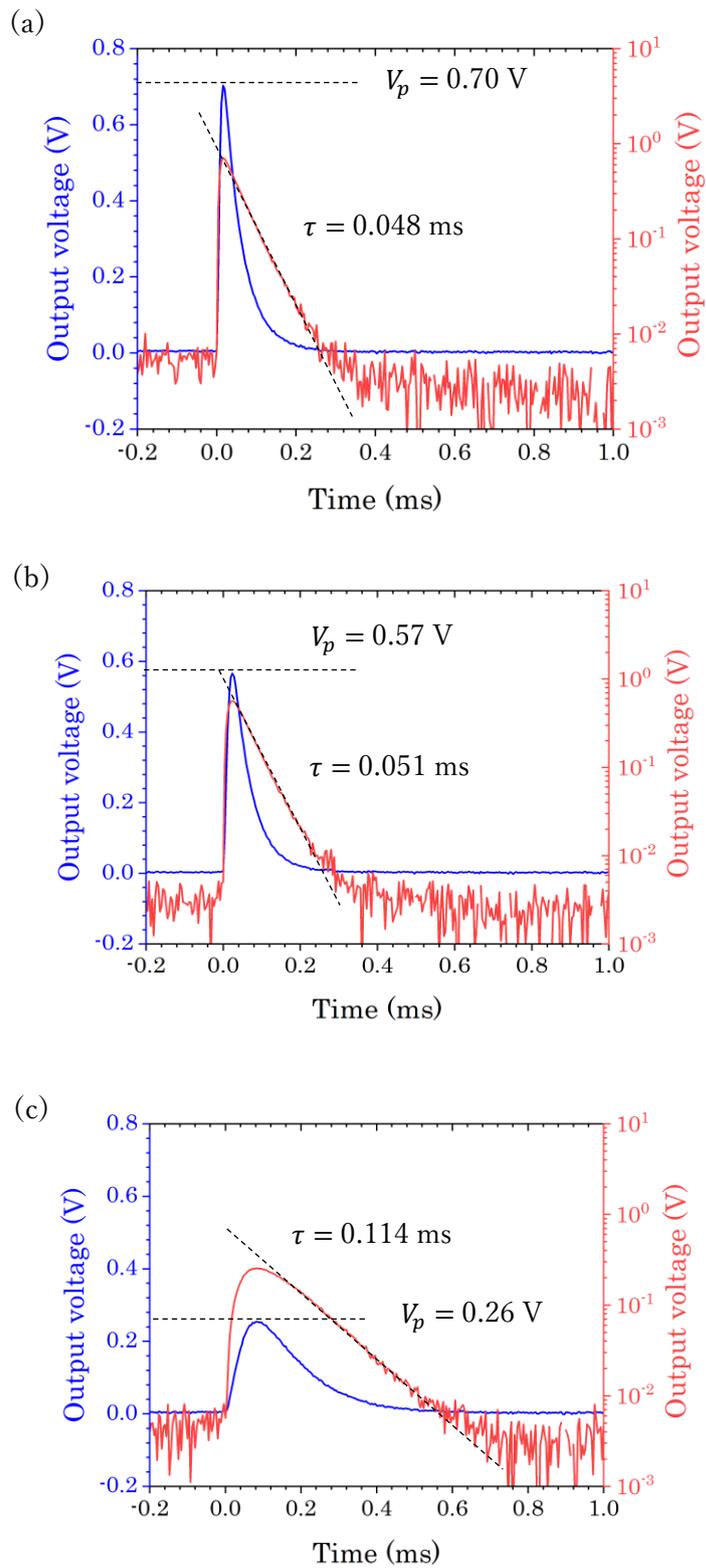


図 4.7  $H=30$  mm、 $L=10$  mm、 $(R_1, R_2) = (1 \text{ M}\Omega, 10 \text{ k}\Omega)$  における出力電圧波形  
 (a)  $\sigma_w=116 \text{ }\mu\text{S/cm}$ 、(b)  $\sigma_w=50.3 \text{ }\mu\text{S/cm}$ 、(c)  $\sigma_w=2.4 \text{ }\mu\text{S/cm}$

水滴導電率  $\sigma_w = 116 \mu\text{S/cm}$ 、 $50.3 \mu\text{S/cm}$ 、 $2.4 \mu\text{S/cm}$  に対し、 $(R_1, R_2) = (1 \text{ M}\Omega, 10 \text{ k}\Omega)$ 、 $(3 \text{ M}\Omega, 10 \text{ k}\Omega)$ 、 $(10 \text{ M}\Omega, 100 \text{ k}\Omega)$ 、 $(50 \text{ M}\Omega, 100 \text{ k}\Omega)$  の 4 通りの組み合わせに対して  $R_2$  の両端電圧を測定した。その結果から  $R_1$  と  $R_2$  に流れる電流  $I$ 、 $R_1$  と  $R_2$  の両端にかかる電圧  $V$  を算出し、電圧－電流特性を求めた。図 4.8 に電圧－電流特性を示す。図中の  $R_L$  は  $R_L = R_1 + R_2$  である。電圧－電流特性の傾きと電圧軸切片から各水滴導電率に対して内部抵抗  $R'$  と開放電圧  $V_0 = Q_p/C$  を求めると、 $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S/cm}$  の場合  $R' = 3.17 \pm 0.11 \text{ M}\Omega$ 、 $V_0 = 110 \pm 2 \text{ V}$ 、 $\sigma_w = 50.3 \mu\text{S/cm}$  の場合  $R' = 0.71 \pm 0.03 \text{ M}\Omega$ 、 $V_0 = 95.9 \pm 1.0 \text{ V}$ 、 $\sigma_w = 116 \mu\text{S/cm}$  の場合  $R' = 0.35 \pm 0.02 \text{ M}\Omega$ 、 $V_0 = 100 \pm 1 \text{ V}$  であった。この結果を表 4.3 に記載する。内部抵抗値は水滴導電率が高いほど小さい結果となった。水滴のイオン濃度が高いほど水滴の電気抵抗は低く、妥当な結果であるといえる。開放電圧は水滴導電率に依存しなかった。この理由は次のように考察する。 $H = 30 \text{ mm}$  は、3.6 節で示した水滴と PTFE の接触面積  $S$  と最大出力ピーク電圧  $V_{Pmax}$  の関係 (図 3.16) から、最大出力ピークが水滴と PTFE の接触面積に比例しているときの落下高さである。このとき、水滴導電率に依らず、図 3.17(b) に示したように、水滴内には電気二重層形成に寄与しない余剰の陽イオンが存在する。水滴内陽イオンによって中和される PTFE 帯電負電荷は、異なる水滴導電率に対して等量であり、下部電極から移動する正電荷量、すなわち電気出力は水滴導電率に依存しない。したがって開放電圧は水滴導電率に依存しないと考えられる。

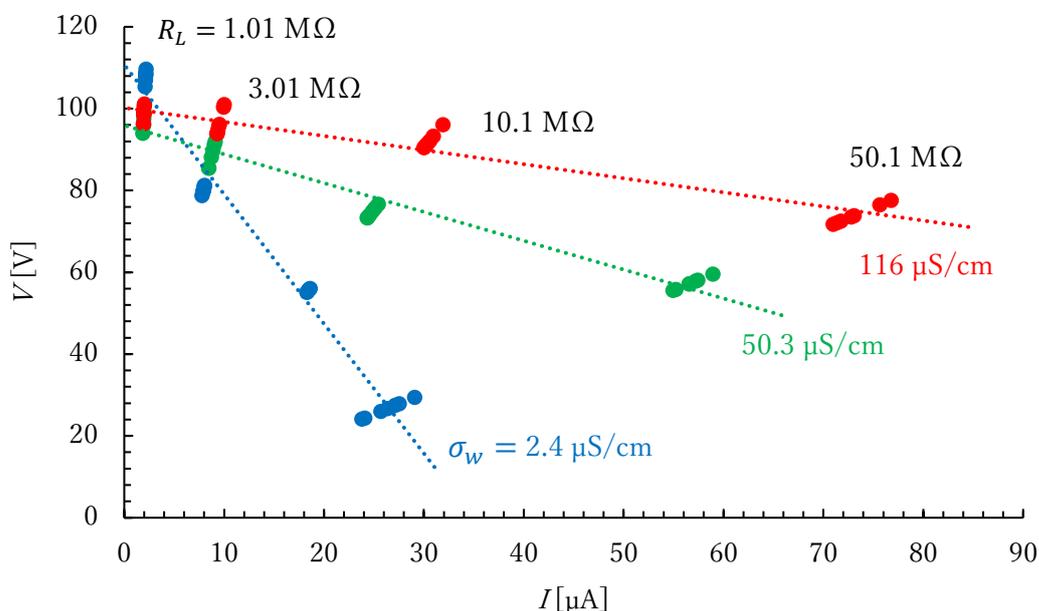


図 4.8  $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S/cm}$ 、 $\sigma_w = 50.3 \mu\text{S/cm}$ 、 $\sigma_w = 116 \mu\text{S/cm}$  における傾斜 3 層型 DEG の電圧－電流特性

表 4.3  $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\sigma_w = 50.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\sigma_w = 116 \mu\text{S}/\text{cm}$  における内部抵抗 $R'$ と開放電圧 $V_o = Q_p/C$  ( $H = 30 \text{ mm}$ 、 $L = 10 \text{ mm}$ )

| $\sigma_w$ [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] | $R'$ [ $\text{M}\Omega$ ] | $V_o = Q_p/C$ [V] |
|--|---------------------------|-------------------|
| 2.4                                    | $3.17 \pm 0.11$           | $110 \pm 2$       |
| 50.3                                   | $0.71 \pm 0.03$           | $95.9 \pm 1.0$    |
| 116                                    | $0.35 \pm 0.02$           | $100 \pm 1$       |

次に $\tau = RC = (R' + R_L)C$ の関係から静電容量 $C$ を導出する。負荷抵抗値 $R_L = 1.01 \text{ M}\Omega$ のとき、 $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合 $C = 27.1 \pm 0.1 \text{ pF}$ 、 $\sigma_w = 50 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合 $C = 29.6 \pm 0.1 \text{ pF}$ 、 $\sigma_w = 116 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合 $C = 35.9 \pm 0.0 \text{ pF}$ であった。各水滴導電率において出力電圧波形から求めた時定数 $\tau$ 、回路の合成抵抗 $R = R' + R_L$  ( $R_L = 1.01 \text{ M}\Omega$ )、 $\tau = RC$ から求めた静電容量 $C$ の値を表 4.4 に記載する。

表 4.4  $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\sigma_w = 50.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\sigma_w = 116 \mu\text{S}/\text{cm}$  における時定数 $\tau$ 、合成抵抗 $R$ 、静電容量 $C$  ( $H = 30 \text{ mm}$ 、 $R_L = 1.01 \text{ M}\Omega$ )

| $\sigma_w$ [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] | $\tau$ [ms]       | $R$ [ $\text{M}\Omega$ ] | $C$ [pF]       |
|--|-------------------|--------------------------|----------------|
| 2.4                                    | $0.113 \pm 0.003$ | $4.18 \pm 0.11$          | $27.1 \pm 0.1$ |
| 50.3                                   | $0.051 \pm 0.001$ | $1.72 \pm 0.03$          | $29.6 \pm 0.1$ |
| 116                                    | $0.049 \pm 0.001$ | $1.36 \pm 0.02$          | $35.9 \pm 0.0$ |

上記の静電容量 $C$ の導出値は、本研究に使用した PTFE シート (3M、5490) の静電容量の計算値  $20.4 \text{ pF}$  とおおよそ一致した。PTFE シートの静電容量の計算において、面積は水滴が上部電極に接触したとき (図 4.2 において $t = 0$  のとき) の水滴と PTFE の接触面積  $85.74 \text{ mm}^2$  を使用した。

次に、表 4.3 に示した開放電圧 $V_o = Q_p/C$ と PTFE シートの静電容量の計算値から帯電電荷量 $Q_p$ と電荷密度 $\sigma$ を求めると、 $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合 $Q_p = 2.31 \pm 0.04 \text{ nC}$ 、 $\sigma = 2.64 \pm 0.09 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 、 $\sigma_w = 50.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合 $Q_p = 1.91 \pm 0.02 \text{ nC}$ 、 $\sigma = 2.28 \pm 0.05 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 、 $\sigma_w = 116 \mu\text{S}/\text{cm}$  の場合 $Q_p = 1.86 \pm 0.01 \text{ nC}$ 、 $\sigma = 2.39 \pm 0.04 \text{ nC}/\text{cm}^2$ であった。この結果を表 4.5 に示す。表中の $S$ は高速カメラで撮影した水滴画像から評価した水滴と PTFE 接触面積である。電荷密度 $\sigma$ は約  $2.4 \text{ nC}/\text{cm}^2$  程度でほぼ一定となり、表 4.6 に示す PTFE 帯電電荷密度の文献値と同程度であった。

表 4.5  $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\sigma_w = 50.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\sigma_w = 116 \mu\text{S}/\text{cm}$  における帯電電荷量 $Q_p$ と電荷密度 $\sigma$  ( $H = 30 \text{ mm}$ )

| $\sigma_w$ [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] | $Q_p$ [nC]      | $S$ [ $\text{mm}^2$ ] | $\sigma$ [nC/ $\text{cm}^2$ ] |
|--|-----------------|-----------------------|-------------------------------|
| 2.4                                    | $2.31 \pm 0.04$ | $87.7 \pm 2.7$        | $2.64 \pm 0.09$               |
| 50.3                                   | $1.91 \pm 0.02$ | $83.7 \pm 1.7$        | $2.28 \pm 0.05$               |
| 116                                    | $1.86 \pm 0.01$ | $77.8 \pm 1.1$        | $2.39 \pm 0.04$               |

表 4.6 PTFE 帯電電荷密度 (文献値)

| 文献  | $\sigma$ [nC/ $\text{cm}^2$ ] |
|-----|-------------------------------|
| [1] | 2.41                          |
| [2] | 2.8                           |
| [3] | 0.8~2.4                       |

以上のことから、異なる水滴導電率に対して次の2点が明らかになった。一つは、出力電圧波形の減衰時定数から求めた静電容量と PTFE 静電容量の計算値がおおよそ一致した。もう一つは、電圧-電流特性から求めた開放電圧と PTFE 静電容量から見積もった PTFE の帯電電荷密度と、PTFE の帯電電荷密度の文献値が同程度であった。これらの結果から、4.2 節で提起した傾斜3層型 DEG の回路モデルは簡略化した RC 回路であるとの仮定は妥当なものであると考える。RC 回路の内部抵抗 $R'$ は水滴のイオン濃度によって決まる水滴の電気抵抗、静電容量 $C$ は PTFE の静電容量である。ただし、コンデンサとして機能する PTFE の面積は、水滴と PTFE の接触面積である。

また開放電圧 $V_0$ は、 $V_0 = Q_p/C = \sigma d/\epsilon$ であることから PTFE の帯電電荷密度 $\sigma$ と厚さ $d$ で決まると予想される。 $\sigma$ は水滴導電率には依存しないことを確認した。しかし PTFE の表面状態の違いによって摩擦帯電量が異なり、その結果 $\sigma$ が変化する可能性がある。本研究では厚み 0.09 mm の PTFE シートのみ使用し、表面状態の異なる PTFE で検証は未実施である。厚さと表面状態の異なる PTFE シートを使用したときの開放電圧の変化を明らかにすることが今後の課題といえる。

#### 4.4 水滴形状と回路パラメータ

傾斜3層型 DEG をエネルギーハーベスティング素子として利用するにあたり、その設置環境や用途に応じて液滴の落下高さは様々であると想定される。液滴の落下高さに応じて誘電体表面上での最大濡れ広がり時の液滴形状は異なることが予想される。本節では水滴

の異なる落下高さにおいて、上部電極接触時の水滴形状をパラメータとして簡略化した RC 回路モデルにおける内部抵抗と静電容量に与える影響を検証する。

水滴落下高さ  $H = 18 \text{ mm}$ 、 $H = 30 \text{ mm}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$  における導電率  $\sigma_w = 116 \text{ }\mu\text{S/cm}$  の水滴の PTFE 上での最大濡れ広がり時の水滴画像を図 4.9 に示す。 $H$  が高いほど水滴は長く薄く伸び広がっていることが確認できる。

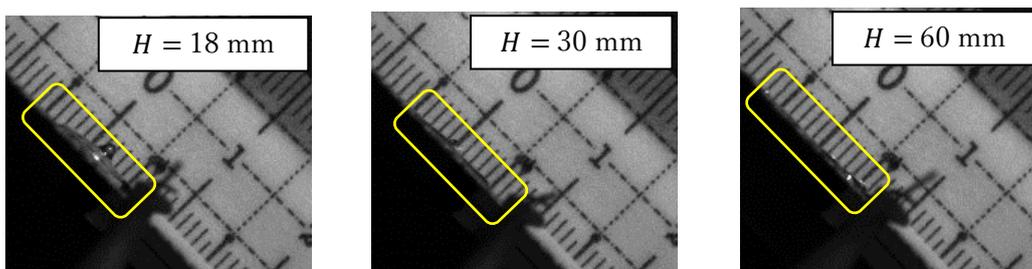


図 4.9 落下高さ  $H = 18 \text{ mm}$ 、 $H = 30 \text{ mm}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$  における PTFE 上での最大濡れ広がり時の水滴画像

図 4.10 に示した測定回路において  $(R_1, R_2) = (10 \text{ M}\Omega, 100 \text{ k}\Omega)$  における、水滴落下高さ (a)  $H = 18 \text{ mm}$ 、(b)  $H = 30 \text{ mm}$ 、(c)  $H = 60 \text{ mm}$  の出力電圧波形を図 4.11 に示す。水滴導電率は  $\sigma_w = 116 \text{ }\mu\text{S/cm}$  である。電圧波形から読み取ったピーク電圧  $V_p$  を図中に記載した。ピーク電圧は  $H = 18 \text{ mm}$  のとき  $V_p = 0.25 \text{ V}$ 、 $H = 30 \text{ mm}$  のとき  $V_p = 0.58 \text{ V}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$  のとき  $V_p = 0.99 \text{ V}$  であった。

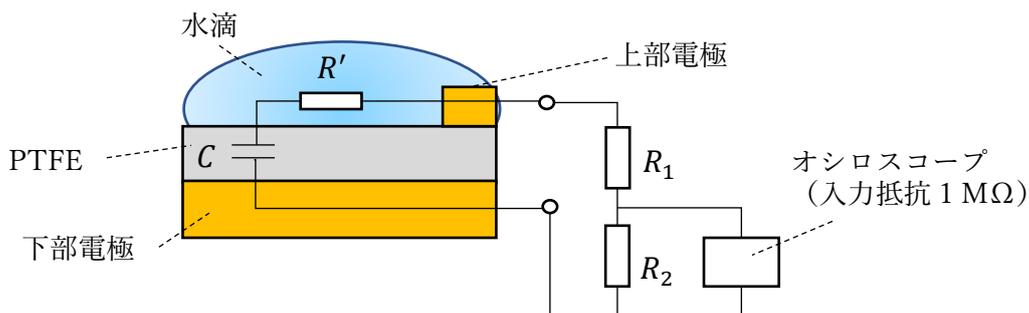


図 4.10 出力電圧測定回路

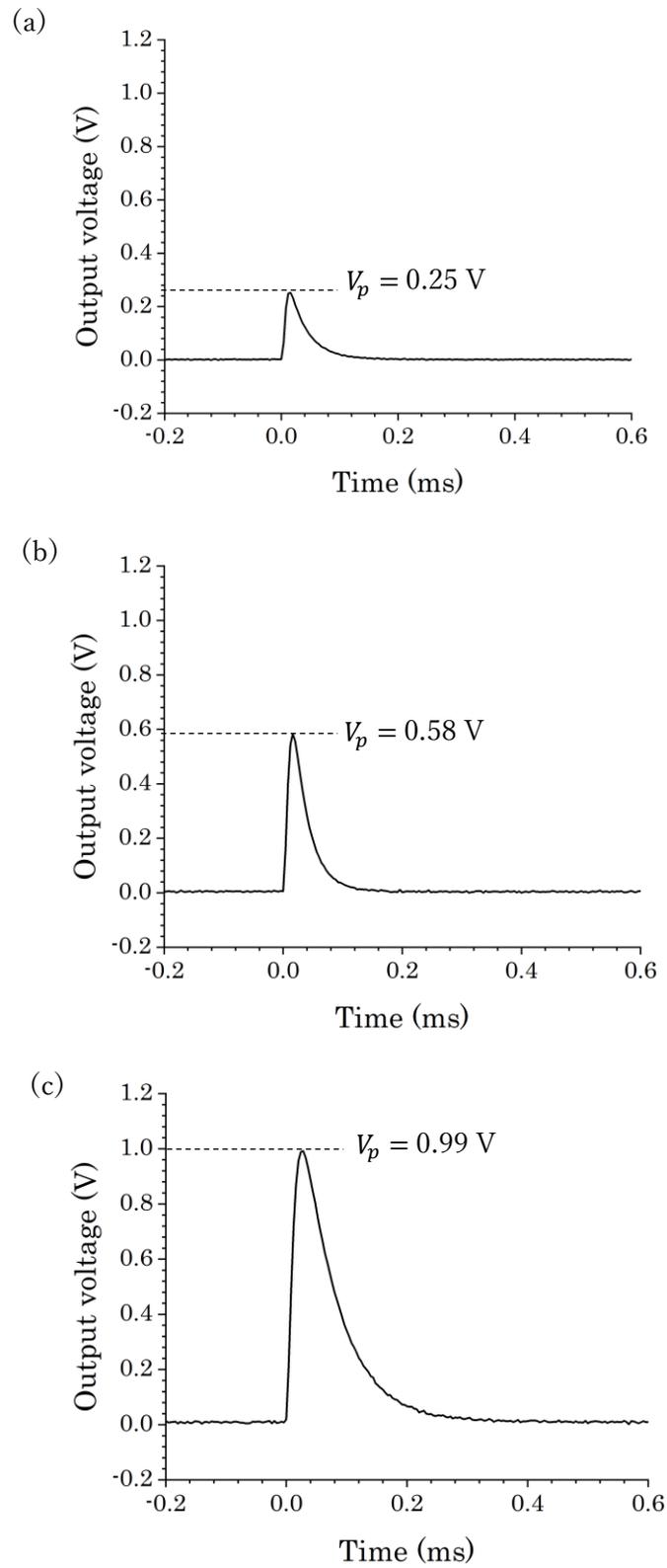


図 4.11  $\sigma_w = 116 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $(R_1, R_2) = (10 \text{ M}\Omega, 100 \text{ k}\Omega)$  における出力電圧波形  
 (a)  $H = 18 \text{ mm}$ 、(b)  $H = 30 \text{ mm}$ 、(c)  $H = 60 \text{ mm}$

前節と同様に  $(R_1, R_2) = (1 \text{ M}\Omega, 10 \text{ k}\Omega)$ 、 $(3 \text{ M}\Omega, 10 \text{ k}\Omega)$ 、 $(10 \text{ M}\Omega, 100 \text{ k}\Omega)$ 、 $(50 \text{ M}\Omega, 100 \text{ k}\Omega)$  において  $R_2$  の両端電圧を測定し、電圧－電流特性を求めた結果を図 4.12 に示す。水滴導電率は  $\sigma_w = 116 \text{ }\mu\text{S/cm}$  である。電圧－電流特性の傾きと電圧軸切片から各落下高さに対して内部抵抗  $R'$  と開放電圧  $V_0 = Q_p/C$  を求めると、 $H = 18 \text{ mm}$  の場合それぞれ  $R' = 0.32 \pm 0.03 \text{ M}\Omega$ 、 $V_0 = 31.1 \pm 0.3 \text{ V}$ 、 $H = 30 \text{ mm}$  の場合それぞれ  $R' = 0.58 \pm 0.26 \text{ M}\Omega$ 、 $V_0 = 89.9 \pm 8.0 \text{ V}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$  の場合それぞれ  $R' = 0.64 \pm 0.04 \text{ M}\Omega$ 、 $V_0 = 171 \pm 2 \text{ V}$  であった。この結果を表 4.5 に示す。

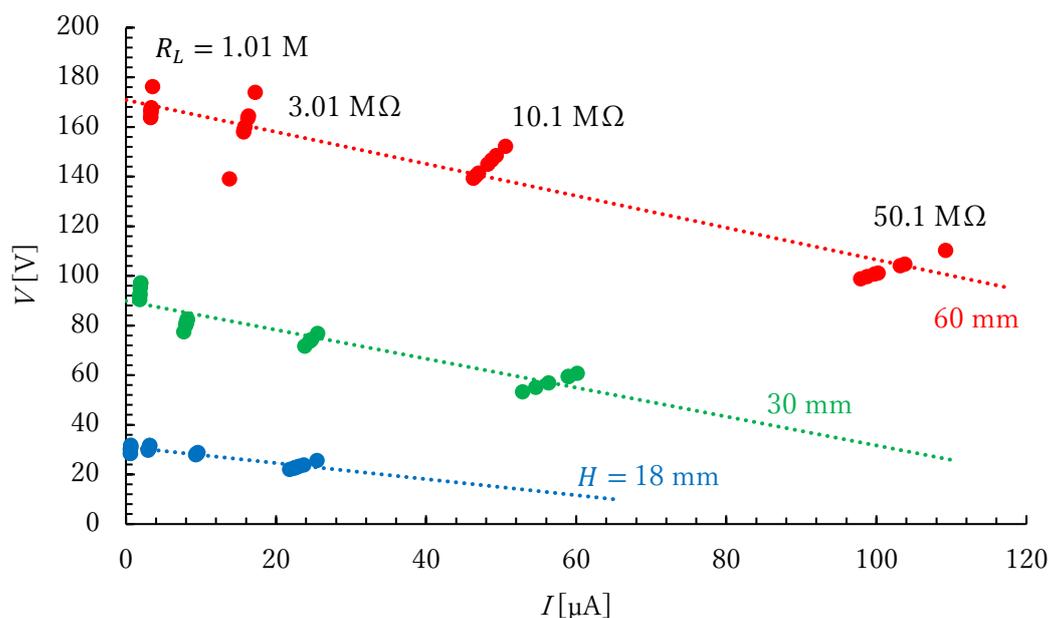


図 4.12 水滴落下高さ  $H = 18 \text{ mm}$ 、 $H = 30 \text{ mm}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$  における電圧－電流特性 ( $\sigma_w = 116 \text{ }\mu\text{S/cm}$ )

表 4.5  $H = 18 \text{ mm}$ 、 $H = 30 \text{ mm}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$  における内部抵抗  $R'$  と開放電圧  $V_0 = Q_p/C$  ( $\sigma_w = 116 \text{ }\mu\text{S/cm}$ )

| $H$ [mm] | $R'$ [ $\text{M}\Omega$ ] | $V_0 = Q_p/C$ [V] |
|----------|---------------------------|-------------------|
| 18       | $0.32 \pm 0.03$           | $31.1 \pm 0.3$    |
| 30       | $0.58 \pm 0.26$           | $89.9 \pm 8.0$    |
| 60       | $0.64 \pm 0.04$           | $171 \pm 2$       |

水滴落下高さ  $H$  が高いほど、すなわち水滴形状が長く薄く伸び広がるほど内部抵抗は高く、開放電圧が大きいたことが確認された。内部抵抗に関しては図 4.13 の赤矢印で示したように水滴内陰イオンの移動経路が長く、断面積が狭いために抵抗値が高い結果となったと考え

られる。開放電圧に関しては $H$ が高く力学的エネルギーが高いほど水滴と PTFE の衝突時の衝撃が強く、PTFE の摩擦帯電量すなわち帯電電荷密度が高いためと解釈できる。また、各 $H$ において水滴と PTFE の接触面積を評価し、PTFE の静電容量を計算すると、 $H = 18 \text{ mm}$  の場合  $14.4 \text{ pF}$ 、 $H = 30 \text{ mm}$  の場合  $21.0 \text{ pF}$ 、 $H = 60 \text{ mm}$  の場合  $34.4 \text{ pF}$  であった。前章で述べたように水滴落下高さ $H$ が高いほど水滴と PTFE の接触面積が広いと、静電容量が大きいと考えられる。

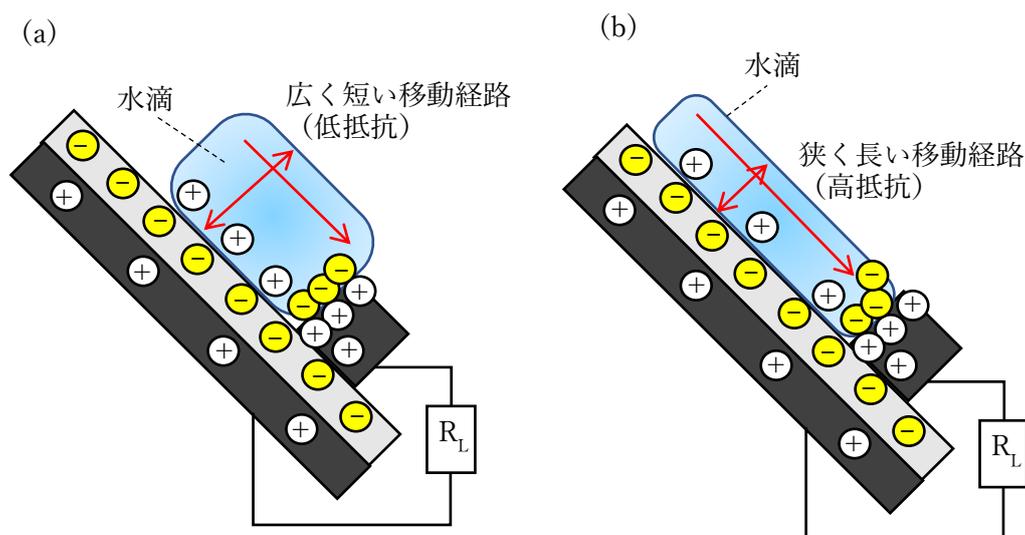


図 4.13 水滴形状の違いに由来する水滴内陰イオンの移動経路の違い  
(a)  $H = 18 \text{ mm}$ 、(b)  $H = 60 \text{ mm}$

## 4.5 出力電力

傾斜 3 層型 DEG は簡略化された RC 回路モデルで表せることを 4.3 節で述べた。したがって負荷抵抗から得られる出力電圧は

$$v(t) = \frac{R_L}{R' + R_L} \frac{Q_P}{C} e^{-\frac{t}{(R' + R_L)C}} \quad (4.3)$$

と表せるので、最大電圧発生時の出力電力は

$$P = \left( \frac{R_L}{R' + R_L} \frac{Q_P}{C} \right)^2 / R_L \quad (4.4)$$

となる。

傾斜 3 層型 DEG の応用例として落下する雨粒の力学的エネルギーから電気出力を得ることが考えられる。我々は 2023 年 6 月に三重県津市に降った雨滴を収集し、導電率メータ（アズワン、AS710）を使用して雨滴の導電率を測定したところ  $4.9 \mu\text{S/cm}$  であった。収集

した雨滴の導電率は表 4.3 に記載した  $2.4 \mu\text{S}/\text{cm}$  に近い。また、雨滴の直径は  $1 \text{ mm} \sim 6 \text{ mm}$  であり [4]、本研究で生成した水滴の直径  $5 \text{ mm}$  と同程度である。直径  $5 \text{ mm}$  の雨滴を  $H = 30 \text{ mm}$  の高さから傾斜 3 層型 DEG に落下させ、PTFE 上の雨滴の落下点から上部電極までの距離を  $L = 10 \text{ mm}$  に設定すると、表 4.3 に記載した結果から、傾斜 3 層型 DEG の内部抵抗  $R'$  はおよそ  $3 \text{ M}\Omega$ 、開放電圧  $V_0 = Q_p/C$  はおよそ  $100 \text{ V}$  と見積れる。 $R' = 3 \text{ M}\Omega$ 、 $V_0 = Q_p/C = 100 \text{ V}$ 、負荷抵抗を  $R_L = R' = 3 \text{ M}\Omega$  と選んだ場合、式(4.4)から、雨滴 1 滴から出力される傾斜 3 層型 DEG の最大瞬時電力は  $833 \mu\text{W}$  と算出できる。この電力値は第 1 章で述べたエネルギーハーベスティングのターゲットとして考えられている、消費電力が数百マイクロワット以下の電子機器に対して利用可能な数値である。

#### 4.6 結言

本章では始めに、下部電極から電荷が移動している間の水滴と PTFE の接触面積の時間変化が無視できることを確認し、傾斜 3 層型 DEG が簡略化された RC 回路でモデルされると仮定した。異なる水滴導電率 ( $\sigma_w = 2.4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $50.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $116 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) に対し、出力電圧波形の減衰時定数から求めた静電容量と PTFE シートの静電容量の計算値がおおよそ一致した。また電圧-電流特性と PTFE シートの静電容量から見積もった PTFE 帯電電荷密度は約  $2.4 \text{ nC}/\text{cm}^2$  であり、PTFE の帯電電荷密度の文献値と同程度であった。以上より、傾斜 3 層型 DEG の回路モデルは水滴電気抵抗と PTFE 静電容量から構成される簡単な RC 回路であることがわかった。

次に傾斜 3 層型 DEG の内部抵抗は水滴導電率の増加とともに増加すること、水滴の落下高さ  $H = 30 \text{ mm}$  において開放電圧は水滴導電率に依存しないことが明らかになった。 $H = 30 \text{ mm}$  は最大出力ピーク電圧が水滴と PTFE の接触面積に比例する水滴の落下高さである。したがって水滴内には電気二重層形成に寄与しない陽イオンが存在し、電気出力に寄与する下部電極正電荷量は水滴導電率に依らず等しいと考察した。傾斜 3 層型 DEG の静電容量は、PTFE シートの静電容量とおおよそ一致した。

また水滴落下高さ  $H = 18 \text{ mm}$ 、 $30 \text{ mm}$ 、 $60 \text{ mm}$  において、落下高さが高いほど傾斜 3 層型 DEG の内部抵抗、開放電圧、静電容量が大きいことが明らかになった。落下高さが高いほど水滴は PTFE 上を薄く広く伸び広がり、水滴と PTFE の接触面積は広い。内部抵抗に関しては、水滴内陰イオンの移動経路が長く、断面積が狭くなることから水滴の電気抵抗が高くなると考察した。開放電圧に関しては水滴の力学的エネルギーが高いほど水滴と PTFE の衝突時の衝撃が強く、PTFE の摩擦帯電量すなわち帯電電荷密度が高いため、開放電圧が上昇すると解釈した。

最後に雨滴の導電率を測定し、本章で得られた内部抵抗値と開放電圧値を適用すると、雨滴の落下高さ  $H = 30 \text{ mm}$ 、落下点から上部電極までの距離  $L = 10 \text{ mm}$  とした場合、雨滴 1

滴から出力される傾斜 3 層型 DEG の最大瞬時電力はおよそ 833  $\mu\text{W}$  であることがわかった。これはエネルギーハーベスティングのターゲットとして考えられている、消費電力が数百マイクロワット以下の電子機器に対して利用可能な数値である。

#### 参考文献

- [1] J Nie, Z Ren, L Xu, S Lin, F Zhan, X Chen, and ZL Wang, "Probing contact - electrification - induced electron and ion transfers at a liquid–solid interface", *Advanced Materials* 32, 2 (2020), 1905696.
- [2] S Liua, W Zhenga, B Yanga, and X Tao, "Triboelectric charge density of porous and deformable fabrics made from polymer fibers", *Nano energy* 53 (2018), 383.
- [3] S Li, J Nie, Y Shi, X Tao, F Wang, J Tian, S Lin, X Chen and Z L Wang, "Contributions of different functional groups to contact electrification of polymers", *Advanced Materials* 32, 25 (2020), 2001307.
- [4] 藤吉康志, 「雨滴の最大粒径について」, *細氷* 53 (2007), 2.

## 第5章 結論

### 5.1 緒言

本研究はこれまで未解明であった傾斜3層型 DEG の電気出力発生メカニズムを明らかにし、エネルギーハーベスティング素子としての利用可能性を提示することを目的とした。第1章では本研究の背景であるエネルギーハーベスティングのニーズ、力学的エネルギー-電気エネルギー変換方式、摩擦帯電、各種 DEG の特徴と本研究の目的、第2章では傾斜3層型 DEG の動作原理と基礎特性、第3章では力学的エネルギーと電気出力の関係、第4章では回路モデル、液滴パラメータと回路パラメータの関係を述べた。本章では本研究の結論として第2章から第4章までに得られた知見と今後の展望を述べる。

### 5.2 本研究によって得られた知見

第2章では傾斜3層型 DEG の動作原理、提唱されている回路モデル、基礎特性を示した。本研究において作製した傾斜3層型 DEG を使用して基礎実験を行った結果、水滴と上部電極の接触した瞬間に鋭い出力ピーク電圧を観測した。本研究で作製した傾斜3層型 DEG において他の研究報告と同様の電気出力波形が得られていることを述べた。

第3章では水滴の力学的エネルギーと傾斜3層型 DEG の電気出力の関係を詳細に調査した結果、次のことが明らかになった。PTFE に落下する水滴の力学的エネルギーの増加とともに、水滴が PTFE に衝突した後に PTFE 表面で水滴が最大に濡れ広がった時の直径  $D_m$  が増加することを確認した。水滴の力学的エネルギーは、PTFE 表面で水滴が濡れ広がる面積の拡大に使用される。傾斜3層型 DEG の最大出力電圧は水滴と PTFE の接触面積  $S$  に比例することがわかった。ただし、 $\sigma_w = 3.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  の水滴においては  $S$  がおよそ  $100 \text{ mm}^2$  を超えると最大出力電圧は  $S$  の増加に対して一定の値を示した。電気出力の大きさは、水滴と PTFE の界面で電気二重層形成に寄与する水滴内の陽イオン数に依存する。 $S$  の増加に対して最大出力電圧が一定値を示した原因は、水滴内に存在するイオンの総量が、水滴の導電率と体積によって決定されることにより、水滴と PTFE の界面で電気二重層の形成に寄与する陽イオン数に上限があるためであると考えられる。最大出力電圧が  $S$  に比例している間、低導電率の水滴よりも高導電率の水滴の方が電気出力値は大きいことを観測した。傾斜3層型 DEG の開放電圧は、水滴の電気抵抗、すなわち内部抵抗によって分圧される。低導電率の水滴を使用した場合、高い内部抵抗によって開放電圧より分圧がされ、負荷抵抗から得られる出力電圧が下がる。高導電率の水滴と低導電率の水滴の電気出力測定値の比は、第4章で導出した内部抵抗、開放電圧、負荷抵抗から算出した出力電圧の比とおおよそ一致してい

た。

第4章では、傾斜3層型DEGの回路モデルは水滴の電気抵抗とPTFEの静電容量から構成される簡単なRC回路であることがわかった。水滴の電気抵抗は、水滴の導電率の増加とともに増加し、水滴の形状に依存した。水滴の落下高さが高く、力学的エネルギーが高い場合、PTFE上で水滴が薄く広く濡れ広がる。したがって水滴内の陰イオンの移動経路が長く、断面積が狭いため、水滴の電気抵抗は上がると考えられる。PTFEの静電容量は、水滴とPTFEの接触面積で決まる。傾斜3層型DEGの開放電圧は、水滴の落下高さ $H = 30$  mm、すなわち最大出力電圧が水滴とPTFEの接触面積 $S$ に比例する条件では、水滴の導電率に依存しないことがわかった。これは、水滴内には電気二重層形成に寄与しない陽イオンが存在するため、電気出力に寄与する下部電極から流れる正電荷量が水滴導電率に依らず等しいためであると考察した。開放電圧はPTFEの帯電電荷密度 $\sigma$ と厚さ $d$ で決まると予想される。PTFEの表面状態の違いによって摩擦帯電量が異なり、その結果 $\sigma$ が変化する可能性がある。厚さと表面状態の異なるPTFEシートを使用したときの開放電圧の変化を明らかにすることが今後の課題といえる。一方、水滴の形状と開放電圧の関係については、水滴の力学的エネルギーが高いほど水滴とPTFEの衝突時の衝撃が強く、PTFEの摩擦帯電量すなわち帯電電荷密度が高いため、開放電圧が上昇すると考えられる。

雨滴1滴（導電率 $4.9 \mu\text{S}/\text{cm}$ ）から出力される傾斜3層型DEGの最大瞬時電力は、雨滴の落下高さ $H = 30$  mm、PTFE上の雨滴の落下点から上部電極までの距離 $L = 10$  mm、負荷抵抗 $R_L = 3 \text{ M}\Omega$ の場合、およそ $833 \mu\text{W}$ であった。図5.1にエネルギーハーベスティングのターゲット[1,2]と雨滴1滴から得られる傾斜3層型DEGの最大瞬時電力を示す。雨滴1滴から得られる傾斜3層型DEGの最大瞬時電力は、エネルギーハーベスティングのターゲットである温度・光センサー、RFID Tag (Passive)、ペースメーカー、補聴器の消費電力を超えている。したがって消費電力が数百マイクロワット以下である電子機器の電源として、傾斜3層型DEGを利用可能であることが明らかになった。

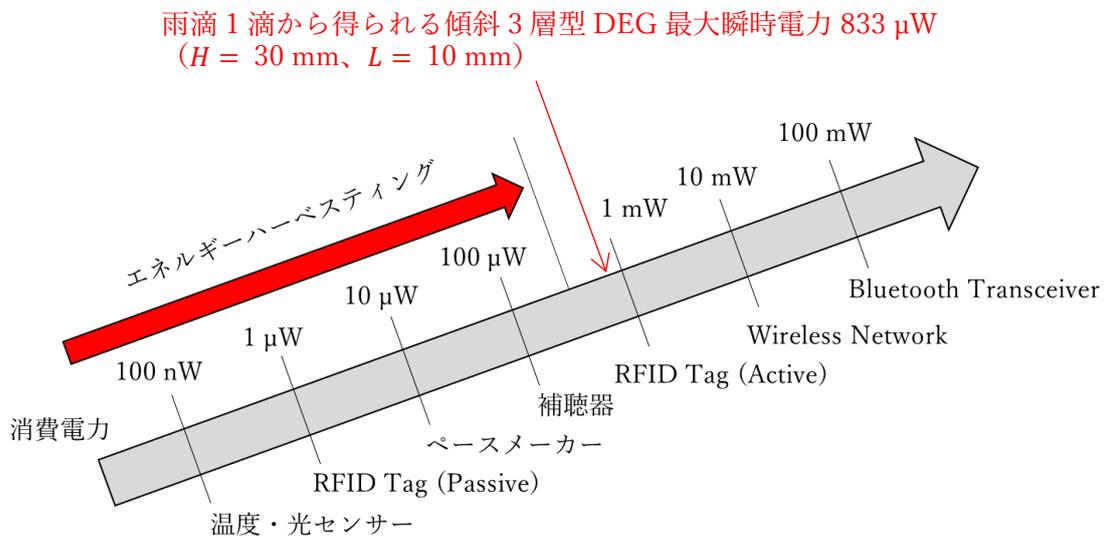


図 5.1 エネルギーハーベスティングのターゲット [1,2] と雨滴 1 滴から得られる傾斜 3 層型 DEG の最大瞬時電力

### 5.3 結言

本研究によって、これまで未解明であった傾斜 3 層型 DEG の水滴の力学的エネルギーと電気出力の関係、回路モデル、液滴パラメータと回路パラメータの関係について詳細に調査し、新たな知見を得た。傾斜 3 層型 DEG の最大瞬時電力は、エネルギーハーベスティングのターゲットとして考えられている電子機器の電源として利用可能であることを示すことができた。環境に存在する水滴の力学的エネルギーを取り込むことで、低消費電力の電子機器へ電力供給し駆動する可能性を見出した。ただし、出力される電気エネルギーの蓄電、電子機器の駆動回路との接続方法の確立など、傾斜 3 層型 DEG の発電機としての実用化に向けた課題は残っている。これらの課題が解決されることにより、SDGs のゴール 7 に掲げられている『すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的なエネルギーへのアクセスを確保する』に対し、電力が供給されていない国や地域に人々においても持続可能な電気エネルギーへのアクセスを可能とし、ゴール 7 の達成に近づくことができる。

貧困、医療不足、水不足、エネルギー不足が解消された世界を実現するには、年間 1 兆個のセンサーが無線ネットワークを構築する必要があるとの報告がある [3,4]。また 2015 年に内閣府によって我が国が目指す未来社会として提唱された「Society 5.0」は、IoT によって全てのヒトとモノがつながり、社会的課題の解決と経済発展の両立を目指す超スマート社会である [5]。傾斜 3 層型 DEG はセンサーなど小型電子機器の電源を代替する技術である。本研究によって得られた知見が、新たな電力供給技術の開発につながり、持続可能な社会の

構築、社会的課題の解決と経済発展に貢献できると期待する。

#### 参考文献

- [1] M Hayes, IEEE PELS webinar, 20 Oct. 2016.
- [2] B Zahnstecher and M Hayes, IEEE PELS webinar, 10 Nov. 2021.
- [3] J Bryzek, "Roadmap for the trillion sensor universe", Berkeley, CA, April 2 (2013).
- [4] S Kaminaga, "Trillion Sensors and MEMS", Sensors & Materials 30 (2018).
- [5] 内閣府 総合科学技術・イノベーション会議 第 14 回基本計画専門調査委員会 議事録 (2015) <https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/kihon5/14kai/giji.pdf>, (2023-06-16 参照).

## 業績一覧

### 1. 査読のある雑誌

- 1) R Naganuma, D Tajima, and Y Aoki, "Relationship between water droplet motion and output characteristics in droplet-based electricity generator", *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 762, 1 (2023), 71.
- 2) Y Aoki, R Naganuma, "Effect of the wetting behavior of water droplets on the output of a water-droplet-based electricity generator", *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 763, 1 (2023), 47.

### 2. 査読のある国際会議のプロシーディングス

- 1) R Naganuma, Y Aoki, "Effect of water droplet dynamics on the output of a droplet-based electricity generator", *Proceedings of the 12th International Symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME2022)* (2022), 46.

### 3. その他

- 1) 永沼 良太, 青木 裕介, 「液滴挙動が液滴型摩擦発電機の出力に与える影響」, 電子情報通信学会施術研究報告 121(367) (2022), 1.
- 2) R Naganuma, D Tajima, Y Aoki, "Relationship between Water Droplet Motion and Output Characteristics in droplet-based electricity generator", 2022 KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics
- 3) 永沼良太, 田島大輔, 青木裕介, 「液滴型摩擦発電機における液滴の挙動の違いが出力変化に及ぼす影響」, 2023年電子情報通信学会総合大会 エレクトロニクス講演論文集 2 (2023), 9.
- 4) 永沼良太, 青木裕介, 「液滴型摩擦発電機における液滴濡れの違いが出力に及ぼす影響」, 令和5年電気学会全国大会 (2023).
- 5) R Naganuma, Y Aoki, "Effect of the droplet conductivity on the output of a droplet-based electricity generator", *The 9<sup>th</sup> International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnology* (2023).

## 謝辞

本研究の実施と論文を執筆するにあたり、懇切なるご指導とご鞭撻を頂きました三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 村田博司教授、青木裕介准教授に厚く御礼申し上げます。

本論文の審査に際し、貴重な御助言、御議論を賜りました三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 三宅秀人教授、中村浩次教授に厚く御礼申し上げます。

御多忙の中、長期間にわたり懇切なるご講義を賜りました三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 飯田和生元教授に心より感謝申し上げます。

実験データ取得などにおいて多大なるご協力を頂きました田島大輔氏、宇井遥氏、浅井啓紀氏に深く感謝致します。また、研究生活を送るにあたり、折に触れ親切なサポートを頂きました有機エレクトロニクス研究室の皆様に深く感謝致します。

本研究に携わる貴重な機会を与えて頂き、多大なご支援を頂きました株式会社コスモス・コーポレーション 濱口慶一社長、業務及び研究の両立にご理解とサポートを頂きました同僚の皆様に心より感謝申し上げます。