

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560313

研究課題名(和文)ハイブリッド回転電界場の微小液滴の回転混合システムの研究

研究課題名(英文)Research on Rotational Mixing System of Small Droplet in Hybrid Rotational Electric Field

研究代表者

東山 禎夫 (Higashiyama, Yoshio)

山形大学・理工学研究科・教授

研究者番号：50144209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：特定の周波数の交流電界下に置いた水滴の共振振動現象を利用して、数十 μ Lの2種類の水滴を混合するために、超撥水性材料上の粘性水滴の挙動を明らかにした。100 μ Lの水滴に加える交流電界の周波数を変化させて、水滴が伸びるときと縮む時の変形量を調査して、共振周波数を決定した。粘度を高めた水滴をとイオン交換水の水滴の攪拌の様子を明らかにするために、水滴に蛍光体を混入して水滴内の液体の動きと攪拌する速さを調べた。また、三次元電界により、水滴の変形量を大きくすることにより、攪拌性能が向上することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To mix two kind of water droplet with a few tens micro L by resonant vibration of a water droplet under AC electric field, behavior of a viscous water droplets placed on a super-hydrophobic material was investigated. Extension ratio of the water droplet under AC electric field for relation of frequency were investigated from observation of the variation of the droplet shape for ac voltage from 5 to 20 Hz applied to a pair of parallel electrodes where a water droplets of 100 micro L was placed. A 50-micro-L viscous water droplet containing fluorescent material and water droplet made to be coalesced to confirm liquid flow inside of the droplet. The mixing performance of viscous droplets was increased by using three dimensional electric field.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：微小水滴 攪拌 混合 共振振動 交流電界

1. 研究開始当初の背景

微量の液体の混合・反応を起こさせ微細加工により流路を形成するマイクロ・リアクターは種類の異なる少量の液体を一本の細い流路内部で合流させて混合させ、反応させるものである。液滴の混合は液体同士の拡散によるので、反応溶液の混合には時間を要する。反応時間を確保するために流路を長くとることが必要になるだけでなく、液体に粉体を混合することや粘性の高い液体の混合を行うことは困難である。液体に粉体を混合することや粘性の高い液体の混合を行うことができれば、溶液混合の適用範囲を広くし、新たな応用の拡大の可能性がある。

細孔から噴出した液体ジェットや振動ノズル先端に置かれた水滴などのように、液滴が外部から機械的な力を受けたとき、液滴の大きさに固有の周波数で起きる共振振動現象が現れる。共振振動時の水滴は大きな変形を伴うので、この機械的な共振振動と同様な挙動を起こさせるために、固有振動周波数に相当する交流電界水滴に加えることにより、非接触で変形させることができる。

絶縁板上に置かれた水滴に交流電界を加えたときの変形の程度は絶縁板表面の特性に大きく依存し、表面の粘りがあるシリコンゴムでは、特に大きく変形する。撥水性が良く水滴が滑りやすいPTFEの場合には、水滴の変形は小さいことが明らかになっている。接触かくが大きい、超撥水性材料上では水滴の側面に電界が集中するので、共振振動による変形を起こさせやすく、異なる種類の水滴を混合するには適している。

2. 研究の目的

本研究は液滴の共振振動だけでなく、回転電界により液滴を回転させた状態で、別の擾乱電界を加えたハイブリッド電界場により、電気流体力学的作用により非接触で効率的な攪拌・混合を行う方法を確立することを目的とする。本研究では、100nL～数100 μ l、液滴の直径では数10 μ m～3mmの微小液滴を直接合体させて混合するために、液体の交流電界による共振振動周波数を用いた回転電界と擾乱電界を利用する方法を確立する。これまでシリコンゴムの上に置いた水滴の振動を行ってきておりテフロンのような撥水性材料の上に置いた液滴はほぼ半球状になる。この半球状の液滴に回転電界を加えて共振振動と回転運動を起こさせ、液滴内部の流

体の激しい動きを促すとともに、回転電界とは異なる方向に擾乱電界を重畳させることにより、液滴内部の攪拌運動を促進する可能性を探る。二種類の液体の混合速度を明らかにするとともに、本手法で混合可能な液体の大きさ、粘性液体の粘度範囲を明らかにする。

本研究で取り扱うのは、交流電界下の水滴の振動現象であり、水平方向の電界、水平直交電界による回転電界である。この電界により回転運動を与えると同時に、形成された電界に擾乱を与えることによる液滴内の攪拌効果、粘性の高い液体に対する適用性について検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 絶縁板上の水滴挙動の調査

共振周波数

絶縁材料としてSiR板、PTFE板、超撥水性材料HIRECを塗布したアクリル板を用いた。SiR板は撥水性に優れており、水滴を接触角90°以上で静置することができる。SiR板の表面はゴム特有の粘着性を持つため、用いる水滴の大きさを変化させても絶縁板と水滴との接触角は変化しにくい。

PTFE板上に半球状の水滴を静置することができるが、滑水性に優れているため電界を印加すると水滴が移動しやすく、PTFE板上で電界下の水滴の挙動を制御するためには、特定の位置で運動を行わせるための工夫が必要である。

水滴との接触角が150°以上の撥水性を持つ超撥水性材料(図1)も使用した。特殊フッ素樹脂微粒子とフッ素系ワニスを主成分と



図1 HIREC板上の水滴

したHIREC(NTTAT, HIREC1450NF)であり、アクリル板の表面に塗布した。

水滴に交流電界を印加するときの実験回路を図2に示す。発振器(エヌエフ回路設計ブロック, WF1974)からの正弦波交流電圧を高電圧アンプ(Trek, MODEL20/20C)で2000倍に増幅し、棒電極に印加する。電極に印加する電圧は1/1000に分圧し、オシロスコープ(Tektronix, Inc, TDS724C)により読み取った。電極間に絶縁板を設置し、その中央部に水滴を静置した。

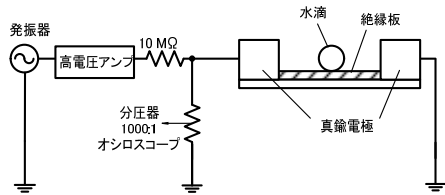
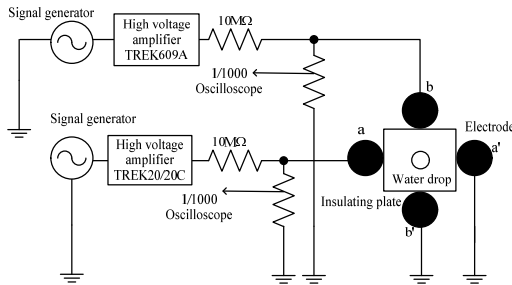


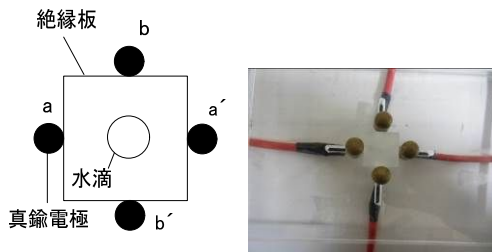
図2 水平電界による共振振動を調べるための平行棒電極系

回転電界による水滴の挙動

水滴に回転電界および交互直交電界を印加するときの実験回路図を図3に示す。撥水性の高い PTFE、HIREC 板上にマイクロピペットで水滴を置き、水滴の大きさに対応した共振周波数の回転電界を図3に示すように絶縁板表面に沿って加え、液滴に振動力と回転力を付加した。



(a) 回転電界を形成する直交電極系



(b) 直交電極 (c) 直交電極の外観

図3 水滴に回転運動を起すための高電圧二相直交電界形成装置

任意波形発生器で駆動する2台の高電圧増幅器を使用し、1対の電極に正弦波、他方の電極に位相が $1/2$ ずれた正弦波を加えることにより、回転電界を形成した。発振器(エヌエフ回路設計ブロック WF1974 ,CH1)からの交流電圧を高電圧アンプ (Trek , MODEL20/20C)により2000倍に増幅して a-a' 電極に印加した。同様に発振器(エヌエフ回路設計ブロック WF1974 ,CH2)からの交流電圧を高電圧アンプ(Trek , MODEL10/40A)により1000倍に増幅して b-b' 電極に印加した。1/1000 に分圧した電圧波形をオシロスコー

プ(Tektronix Inc., TDS724C)により読み取った。

(2) ハイブリッド電界下での液滴の挙動

共振周波数の規則的な回転電界だけでは一方に回転するだけであるので、回転電界に擾乱を与えて、水滴内の液体の流れを乱すことを試みた。図3は直交電界に加える信号を半波正弦波として水滴を交互に伸張させることを試みた。

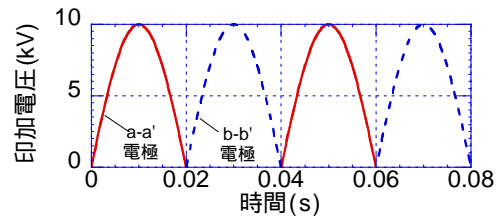


図4 直交電極に加える半波正弦波

(3) 二種類の微小液体の混合速度の把握

図5に示すように、水滴の位置を安定させるために中央部に窪みを設けた HIREC 板を用いて、二種類の液滴を合体させたときの混合性能を調べた。水滴内の液流を観察するために、蛍光体(テルナビ, UVV-3C)を用いた。使用した蛍光体は粉体粒子で、紫外線を照射することにより紫色に発色する。蛍光体は粒径 $2\sim 8 \mu\text{m}$ 程度であり、丸みのある形状である。この蛍光体を水滴に混合させ紫外線を照射し、電界を印加することで水滴内の各部の液流の状態を観察した。紫外線光源(日亜化学工業, UV-LED375-01RS)を水滴上方から照射して蛍光体を発光させた。

イオン交換水に蛍光体を1%および10%混合させたときの粘度はそれぞれ $1.1\text{mPa}\cdot\text{s}$, $1.17\text{mPa}\cdot\text{s}$ である。蛍光体の濃度を大きくするにつれて、導電率が上昇する。蛍光体水溶液を用いるときは、濃度10%として実験を行った。

水滴を静置した場合、共振振動だけを起こした場合の混合速度との比較を行う。液滴内部の液体の動きを把握するために、片方の液滴には予め蛍光物質を導入し、蛍光物質を

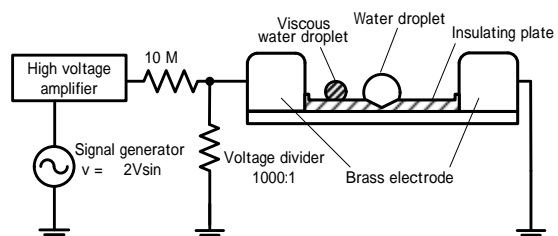


図5 二種類の液滴を混合する電極系

加えた液滴内の紫外線照射による発光分布状態の時間変化を捉えた。

イオン交換水にエチレングリコールを混ぜて粘度を高めた液滴を絶縁板上に置き、粘度および液滴の導電性と電界による変形の大きさの関係を明らかにする。さらに、粘度を高めた液滴と水滴との攪拌混合を行い、混合可能な液滴の粘度の上限を実験的に明らかにする。

(4) 空气中に保持した孤立液滴の挙動

液滴の反応を絶縁板上ではなく、クモの糸上に直径 1 mm 以下の水滴を保持して電界を印加し、水滴の大きさに対応した共振振動周波数を見出し、微小水滴の混合のために適した周波数を確認する。

4. 研究成果

(1) 共振周波数

絶縁板上に置かれた水滴に共振周波数付近の電界を加えたとき、水滴が振動している時の伸びたときの長さとの縮んだときの長さの比を図 6 に示す。特定の周波数で水滴が大きく変形していることが分かる。

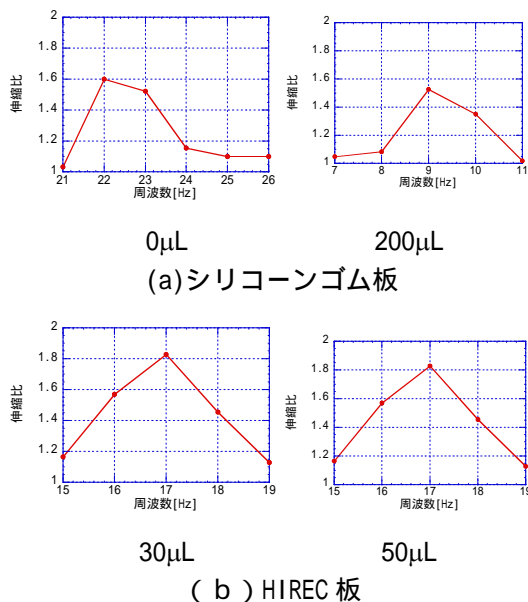


図 6 絶縁板上に置いた水滴の変形と印加周波数の関係

図 7 に示すように、SiR 板と HIREC 板では、共振周波数および伸長比は同程度となった。PTFE 板では共振周波数は大きくなり、伸長比は共振振動時でもかなり小さかった。

HIREC 板上の水滴は 11.5~12.5Hz で、振動運動を行った後、回転運動を行う現象が見られた。これは撥水性が非常に高いため、水滴

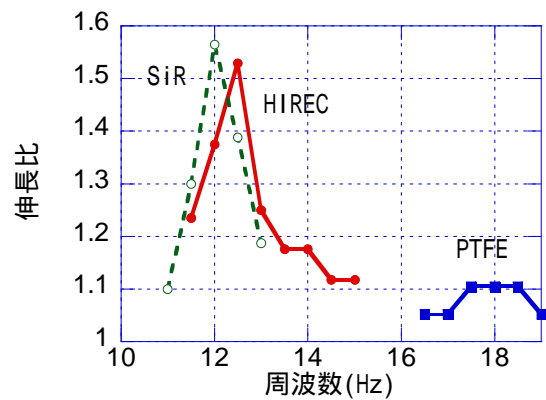


図 7 絶縁板上に置かれた 100μL の水滴の変形と周波数の関係

の振動運動が大きくなっていくと徐々に運動の方向がずれていくために起こる。

(2) 直交电界による水滴の変形

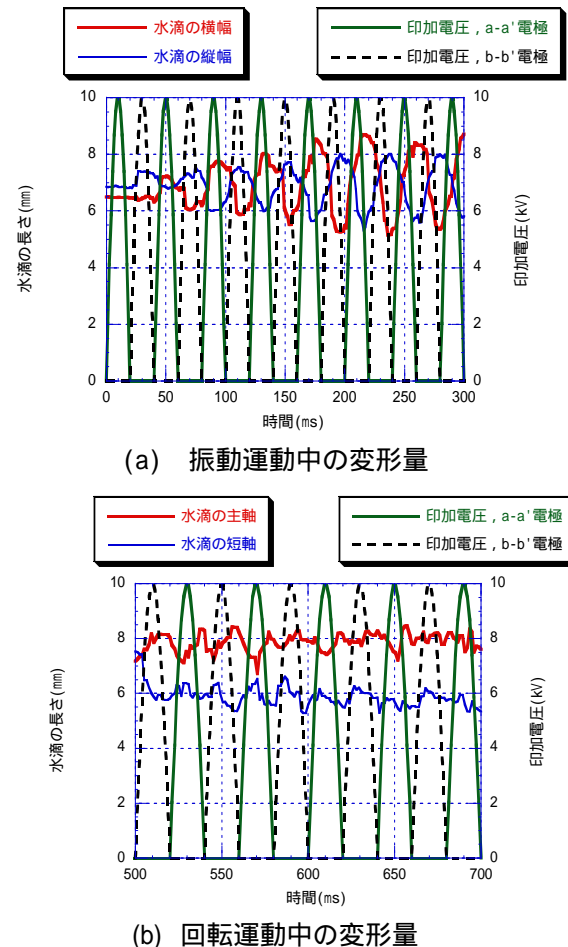


図 8 半波正弦波による交互電界による水滴の変形量と回転運動への移行

(3) 水滴の攪拌

2 つの水滴を接触させ合体させた 100μL の

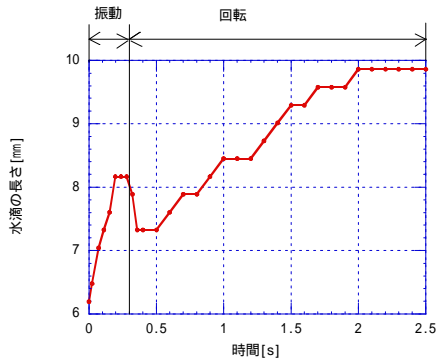


図9 HIREC 板上の水滴の回転運動への移行

水滴は、両者の体積が同じ 50 μ L で接触させたときに最も大きく変形した。また、接触させる体積が大きく異なる場合には一回の接触で水滴が合体できない現象も見られた。

接触した後の水滴は振動運動か回転運動を行い攪拌に寄与する挙動を示した。蛍光体を用いた水滴の攪拌では、蛍光体水溶液 20 μ L を接触させたときには攪拌できず、それ以外の体積ではすべて攪拌を行うことができた。

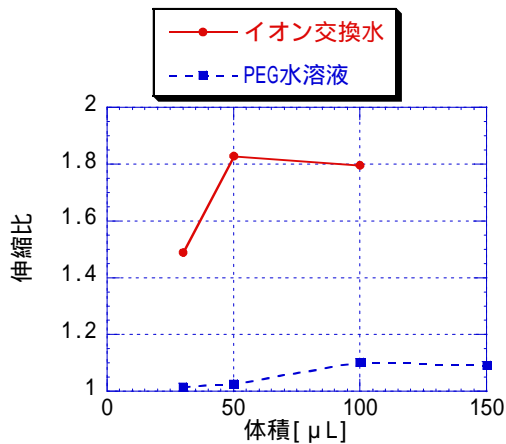


図10 粘性液滴の体積と共振周波数

また、粘度を上昇させた濃度 15% の PEG 水溶液を用いたとき、水滴の変形量は小さくなった。攪拌可能な水滴の粘度は 15% の PEG すなわち 30mP \cdot s の粘性液体をイオン交換水で混合することは可能であることが明らかになった。

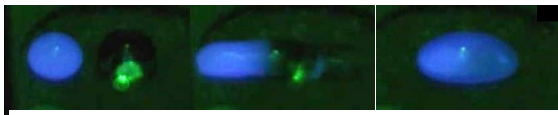


図11 100 μ L水滴の粘度と共振周波数の関係

(4) 孤立水滴の共振周波数

図12に示すように、絶縁板上の水滴と、クモの糸で孤立させた球状の水滴では同じ体

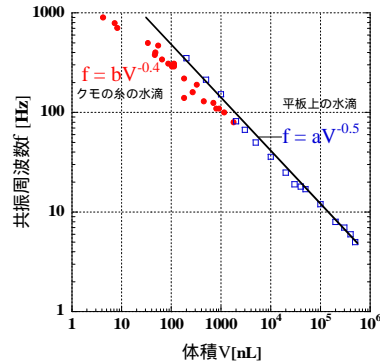


図12 孤立した小微水滴の共振周波数

積でも共振周波数は大きく異なる。水滴の形状によるのか、水滴にクモの糸の粘性成分が混入した効果であるかは不明である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 7 件)

1. 大内孝記、東山禎夫: 3次元交流電界下の水滴の変形を利用した粘生液滴の混合、平成 26 年度静電気学会全国大会 (2014.9) 広島国際大学 (発表予定)
2. 大内孝記、東山禎夫: 3次元交流電界下における水滴の共振振動、平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会 (2014.8) 山形大学 (発表予定)
3. 東山禎夫、渡辺宗: 交流電界下に置かれた微小水滴の共振周波数、平成 25 年静電気学会全国大会 (2013.9) 千葉大学
4. 大内孝記、東山禎夫: 撥水性材料上に置かれた粘性水滴の交流電界下における共振振動による変形、平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会 (2013.8) 会津大学
5. Y. Higashiyama, T. Shiori: Negative corona discharge from a water droplet with or without resonant vibration, ISEHD 2012, Budapest (2012.9)
6. 天摩洋、東山禎夫: 半波正弦波を用いた交互直交電界下での水滴の挙動、平成 24 年静電気学会全国大会 (2012.9) 八戸工業大学
7. 天摩洋、東山禎夫: 超撥水性材粒状に置いた水滴の平行電界下での振動: 平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会 (2012.8) 秋田県立大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東山 禎夫 (HIGSHIYAMA, Yoshio)
山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 50144209

(2) 研究分担者

南谷 靖史 (MINAMITANI, Yasushi)
山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 10323172