

文部科学大臣賞

環境調和型イオン電解質を電源とした  
サステナブル無線センサネットワークの実現

—水をトリガとして分解する電源をつくる—

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻  
博士課程3年

山田 駿介

# 1. 緒 言

最先端エレクトロニクスの将来像として、モノに無線センサ端末を設置して、そこから得られる情報をビッグデータ解析することで、より豊かな社会を目指すモノのインターネット (IoT) が注目を集めている。日本では IoT を基礎として AI 技術による高精度な予測を行い、生産性や Quality of Life (QOL) の向上を目指した次世代の人間中心の社会 Society 5.0 を推進している。

本取り組みによるセンシング対象は、インフラモニタリング、ヘルスマニタリング、ロジスティクス、薬品・食料管理と多岐にわたる。このため、消費されるセンサの数、種類も増大することが予測されており、2020年には年間10兆個(トリリオン)のセンサが消費されると試算されている。その膨大な数のセンサのメンテナンスは物理的に不可能であり、電池交換が困難であることは明らかである。その電源として注目を集めているのが、振動[1]–[4]、光[5]–[7]、熱[8]といった余剰エネルギーを回収して、電力として使用する環境発電である。しかしながら、設置後のセンサは回収できず、無線センサ端末は環境中に廃棄されるものと想定される。このため、端末の経年劣化により、図1に示すように有害物質が漏洩して深刻な環境汚染を引き起こす恐れがある。本研究では、環境中に分解・吸収される無線センサ端末の実現に挑戦しようと考えた。

先行研究から、Si デバイスは、酸・アルカリ水溶液に触れると、無害な  $\text{Si}(\text{OH})_4$  に分解されることが分かっている [9]。一方、センサの電源として期待されている電池、スーパーキャパシタは、電解液の漏洩による環境汚染など数多くの課題が残されている。これらの課題を解決するため、環境調和性をもつ電解質を作製して、使用後に分解する蓄電素子の開発を行った。さらに、振動発電を電源とした無線センサ端末と本技術を融合して、環境調和型無線センサ端末を開発した。

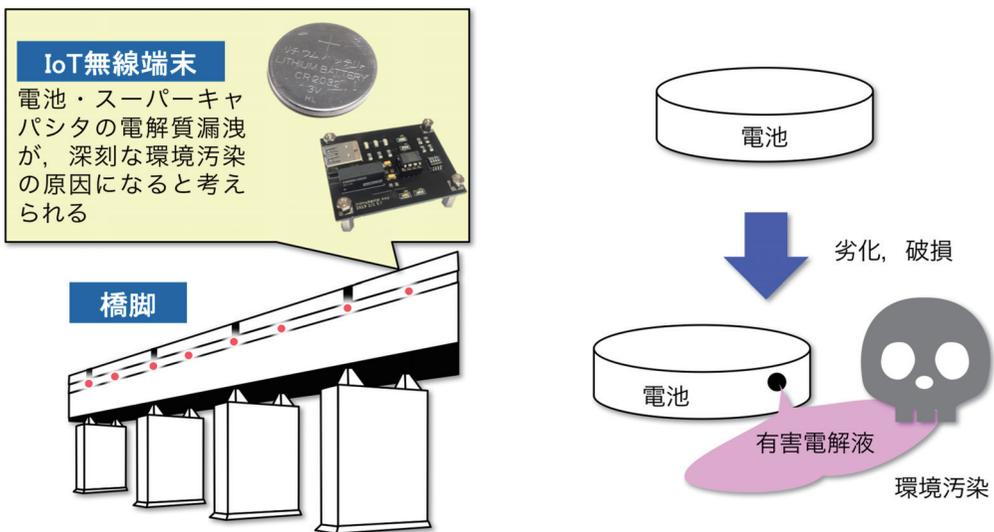


図1 IoT の例：インフラモニタリングと、電解質漏洩による環境汚染

## 2. 着想に至った経緯

### 2.1 先行研究との比較

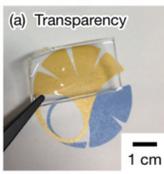
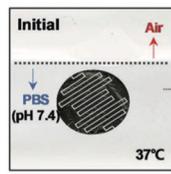
現状のスーパーキャパシタの電解質は溶媒として水を使用している[10]。このため、水が時間の経過とともに蒸発して、デバイスが劣化する欠点がある。また、表1に示すように、水の電気分解電圧(電位窓)は1V程度で生じるため、実用化には複数個を直列接続する必要がある。さらに、キャパシタCに充電できるエネルギーEは、 $E = (CV^2)/2$ より、電圧の2乗に比例するため、水系スーパーキャパシタのエネルギー密度は小さい。本論文は、これらの課題を解決するものである。

### 2.2 本研究の電解質：イオン液体

近年、常温常圧で液体として存在するイオン液体が、電解質として優れた特性を示すことからスーパーキャパシタ、電池の電解液として利用する研究が行われている[11]。イオン液体も塩と同様にイオン結合からなる物質であり、カチオン、アニオンの分子量が大きく、格子エネルギーが小さくなる。その結果、融点が室温を下回り、液体として存在するため、溶媒を使わずに電解質として使用できる。イオン液体のイオン対間の相互作用エネルギーは $340 \text{ kJ mol}^{-1}$ となり、共有結合とほぼ同じ大きさを示す。このため、イオン液体は揮発しないため常温常圧で安定して存在する。

さらに、イオン液体の電位窓は3~5Vを示すため、水の電気分解電圧1Vを印加しても酸化還元反応が生じず、電気化学的に安定である[12]。キャパシタCに蓄積する静電エネルギーEは、電圧の2乗に比例するため、イオン液体系スーパーキャパシタは、水系スーパーキャパシタと比較して、保持できるエネルギーは大きくなる。イオン液体[MTEOA]<sup>+</sup>[MeOSO<sub>3</sub>]<sup>-</sup>は、生体適合性に加えて、さらに環境中で分解する環境調和性をもつ。以上よりイオン液体を使

表1 先行研究との比較

先行研究	本研究	先行研究
		
溶媒	イオン液体	水
環境調和性	○	○
電位窓 印加できる電圧範囲	○ -3.0 ~ 3.0 V	× -1.0 ~ 1.0 V
安定性	○ 不揮発	× 蒸発

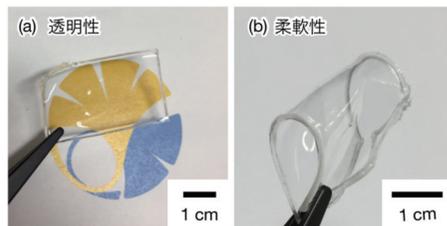
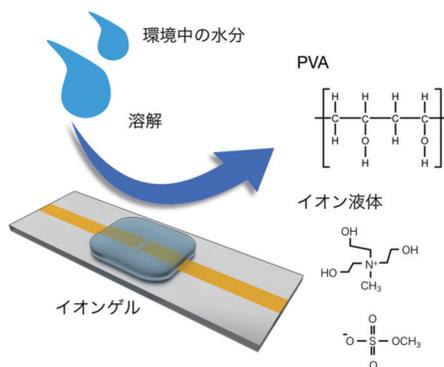


図2 上図：環境調和性イオンゲルのイメージ、水分に触れると溶解する  
下図：作製したイオンゲルは (a) 透明性、(b) 柔軟性を示す

用することで、使用後に環境中に分解する新しい蓄電素子を実現可能となる。

### 2.3 本研究の意義

本申請内容は、環境調和性をもつスーパーキャパシタという実用的な意義を持つだけでなく、イオンをセンシング原理としたイオニクスや、電子とそのハイブリッドによるイオントロンクスに基づく新規のフレキシブルデバイス実現の観点から独創的であり、学術的に意義深い[13]、[14]。さらに、イオンを使用したデバイスは、発電素子から、クロミック素子まで応用展開は幅広い。このため、本研究により、イオントロンクスに立脚したデバイスの新たな展開が実現できる。環境調和性蓄電素子はIoTモジュールだけでなく、フレキシブルなゲルにより自由曲面に貼り付ける用途にも応用可能であるため、ウェアブルデバイス分野にも産業的な波及効果は大きい。例えば、血糖値測定用貼り付けデバイスや、曲面に貼り付けるフレキシブル太陽電池の蓄電素子への応用が考えられる。

## 3. 環境調和型電解質の作製と評価

### 3.1 イオン液体のゲル化

本研究では、イオン液体をポリマー中に分散させてイオンゲルにすることでハンドリング性を向上させ、実用性を考慮したデバイス作製を行った[15]。ポリマー Poly(vinyl alcohol) (PVA) は、親水性が非常に強く、水に可溶であるため、雨や地中の水分と反応して分解する電解質を実現可能である。分子量89,000~98,000のPVAに、 $[\text{MTEOA}]^+[\text{MeOSO}_3]^-$ を、異なる重量比0wt%、20wt%、40wt%、60wt%、80wt%で分散した。図2(a)と(b)に作製したイオンゲル(60wt%)を示す。イオン液体とPVAが透明であることから、イオンゲルも良好な透明性を示しており、さらに柔軟性もつことがわかる。

### 3.2 サンプル準備

作製したイオンゲルの電気特性を測定して、電解質としての特性を評価した。ガラス基板にCr/Au(20nm/50nm)を蒸着して電極とした。また、シリコーンゴムシート(厚み1.5mm)の内部をくり抜いたモールドを、作製したガラス電極に設置した。その中にイオンゲルの前駆体を流し込み、ゲル化することで、厚み1.5mm、面積5mm<sup>2</sup>のイオンゲルを作製した。また、完全にゲル化する前に、金フィルムを被せることで上部電極とした。電気特性は、電気化学アナライザー(HIOKI, IM3590)を用いて、窒素充填されたグローブボックス内部で実施した。

### 3.3 電気特性の評価 インピーダンス

図3(a)に、異なるイオン液体の重量比で構成されるイオンゲルと、PVA、水、NaClで作製したゲル電解質の入力信号の周波数に対するインピーダンスの絶対値 $|Z|$ を示す。 $|Z|$ は、 $Z$ の実数部 $Z_{re}$ 、虚部 $Z_{im}$ を用いて下記の式で定義した。

$$|Z| = \sqrt{Z_{re}^2 + Z_{im}^2}, \quad (1)$$

イオン液体は良好な電気伝導度をもつため、イオン液体単独で100kHzにおいて抵抗値2.8kΩを示した。同様にNaClを用いて作製したハイドロジェルも、100kHzにおいて小さな抵抗値125Ωを示した。一方PVAは非常に大きな抵抗値15MΩを示した。このため、イオン液体とPVAを混合してゲル化した場合、イオン液体の重量比が低いと、PVAが電気特性を決定づけると考えられる。図3(a)から、イオン液体の重量比が低いと、100kHzにおける抵抗値が大きくなることがわかる。

### 3.4 電気特性の評価 位相

抵抗  $R$  と静電容量  $C$  が直列に接続された場合を考えると、そのインピーダンスは、

$$Z = |Z|e^{j\theta} = Z_{re} + jZ_{im} = R + \frac{1}{j\omega C}, \quad (2)$$

で表される。ここで、 $e$ 、 $j$ 、 $\theta$  はネイピア数、虚数単位、位相である。理想的なキャパシタは静電容量のみを持つため、位相は $-90^\circ$ を示す。しかしながら、実際の素子は内部に抵抗値を持ち、イオン拡散を無視できないため、位相が $-90^\circ$ を下回ることが想定される。入力信号の周波数に対する位相 $\theta$ の変化を図3(b)に示す。イオン液体とハイドロゲルは、周波数1Hzにおいて $-71^\circ$ 、 $-60^\circ$ の位相を示した。これは低周波領域においては、電気二重層キャパシタ成分が電気特性の大部分を占めることを示唆している。イオンの移動度は、電子と比較すると小さいため、高周波領域ではキャパシタ成分は減少する。また、イオン液体のイオン伝導性により、位相は0になる。この特徴は、イオンゲル60wt%と80wt%で見られており、

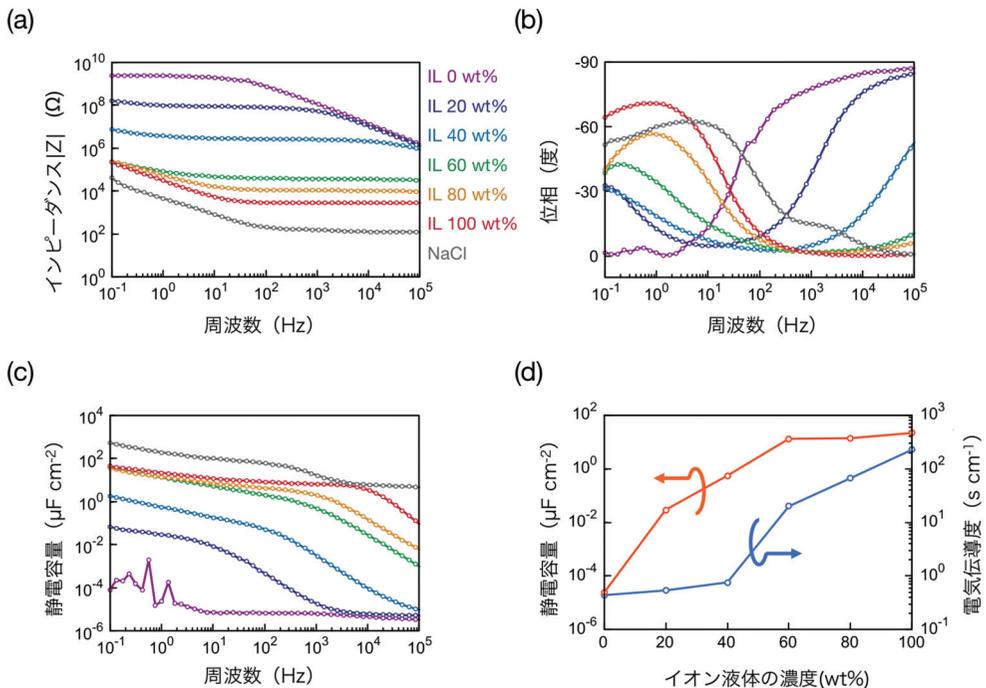


図3 作製したイオンゲルの電気特性 (a) インピーダンス  $|Z|$ 、(b) 位相 $\theta$ 、(c) 静電容量  $C$ 、(d) イオン液体の重量比が変化したときの静電容量  $C$  と電気伝導度  $\sigma$  を示す。

この重量比で固体電解質として使用可能であることが判明した。一方、PVA は低周波において位相遅れが $0^\circ$ になり、容量成分を持たないことがわかる。同様に、イオンゲル40wt%、20wt%の位相遅れは、 $-30^\circ$ 以下であり、固体電解質としては不十分である。

### 3.5 電気特性の評価 キャパシタンス

イオン液体の静電容量を評価したところ、1Hzで $22\mu\text{F}/\text{cm}^2$ を示して、10kHzまで静電容量を保つことが判明した。図3(c)にイオン液体の重量比を変えたときの静電容量の変化を示す。重量比が60wt%以上であれば、1Hzにおける静電容量が $10\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 以上の値を示した。40wt%以下になると、静電容量は $560\text{nF}/\text{cm}^2$ を下回り、2桁以上小さくなった。電気二重層が電極-イオン液体界面で生じる現象であり、イオン液体の量の低下とともに、電気二重層が減少したと想定される。

### 3.6 電気特性の評価 イオン伝導度

イオンゲルの電気伝導度 $\sigma$ は式(3)を用いて計算できる。

$$\sigma = \frac{t}{AR}, \quad (3)$$

ここで $t$ 、 $A$ 、 $R$ は、それぞれイオンゲルの厚み、面積、100kHzにおける抵抗値である。図3(d)にイオン液体の重量比に対するイオンゲルの電気伝導度と静電容量の変化を示す。イオン液体は、電気伝導度 $285\mu\text{S}/\text{cm}$ を示して、イオン液体の減少とともに電気伝導度も減少することが判明した。特に、重量比60wt%と40wt%では、電気伝導度が $20\mu\text{S}/\text{cm}$ から $760\text{nS}/\text{cm}$ に降下しており、PVAポリマーネットワークがイオンの移動の妨げになることが顕著になることがわかった。また、静電容量も、重量比60wt%と40wt%において1桁減少することから、イオン液体の重量比は60wt%以上必要である。

### 3.7 乾燥環境下での耐久試験

本研究で作製したイオンゲル電解質が乾燥に対してロバストであることを示すため、イオンゲルとハイドロジェルを温度 $80^\circ\text{C}$ に保った炉の中に入れて、電気伝導度と静電容量の変化を調査した。図4(a)に電気伝導度の開始前 $\sigma_0$ と開始後

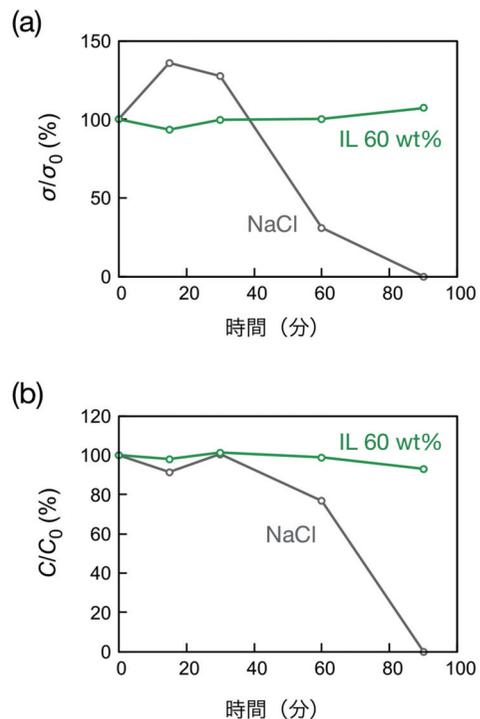


図4 イオンゲルとハイドロジェルの乾燥環境下 ( $80^\circ\text{C}$ ) おける (a) 電気伝導度 $\sigma$ と (b) 静電容量 $C$ の時間変化

$\sigma$ の相対変化を示す。イオンゲルの場合は、イオン液体の極めて小さい蒸気圧のため、ゲルは揮発せず安定しており、電気伝導度に大きな変化はみられなかった。一方、ハイドロジェルの場合は、開始後30分で電気伝導度が上昇して、その後は減少していき、90分で電気伝導度は測定できなかった。電気伝導度は、イオン濃度に依存するため、水の蒸発とともに電気伝導度は上昇したと考えられる。その後は、水の蒸発により、イオンが塩として析出したため、導電性が消失したと想定される。

同様に静電容量の変化を計測した。図4 (b) にイオンゲルとハイドロジェルの静電容量の開始前  $C_0$  と開始後  $C$  の相対変化を示す。イオンゲルは静電容量に関しても安定した特性を示した。ハイドロジェルの場合は、開始30分後に静電容量が減少を開始して、90分後には、静電容量は測定不可能となった。電気伝導度同様に、水の蒸発により、イオンが塩として析出したため、電気二重層が消失したと想定される。

### 3.8 イオンゲルの水への溶解性

イオンゲルの水への溶解性を試験しつつ、溶解が電気特性に与える影響を測定した。図5 (a) に実験の概念図を示す。ガラス基板上にPVAを成膜して、その上に5 mm幅の電極(Cr/Au = 20 nm/50 nm)を、ギャップ1 mmを設けて蒸着した。次に、モールドを設置して、電極を覆うようにイオンゲルを図5 (b) に示すように作製した。作製したイオンゲルを60°CのDeionized Water (DIW) に浸して、恒温槽60°Cに保管した(本実験では加速度試験を行ったため、60°Cに加熱している)。図5 (c) にDIWに浸して25分経過後のイオンゲルを示す。PVAが溶解してゲルの形が崩れており、一部電極が破損していることがわかる。さらに16時間経過すると、図5 (d) に示すように、イオンゲルは完全に溶解した。イオンゲルの電気特性を溶解試験開始から25分後と開始前で測定して、その変化を比較した。図6 (a) に実験系の概念図を示す。図6 (b) に示すように、イオンゲルのインピーダンスは溶解試験開始前において、100 kHzで58 k $\Omega$ だったが、溶解後は1 M $\Omega$ に増加した。ガラス基板との密着性

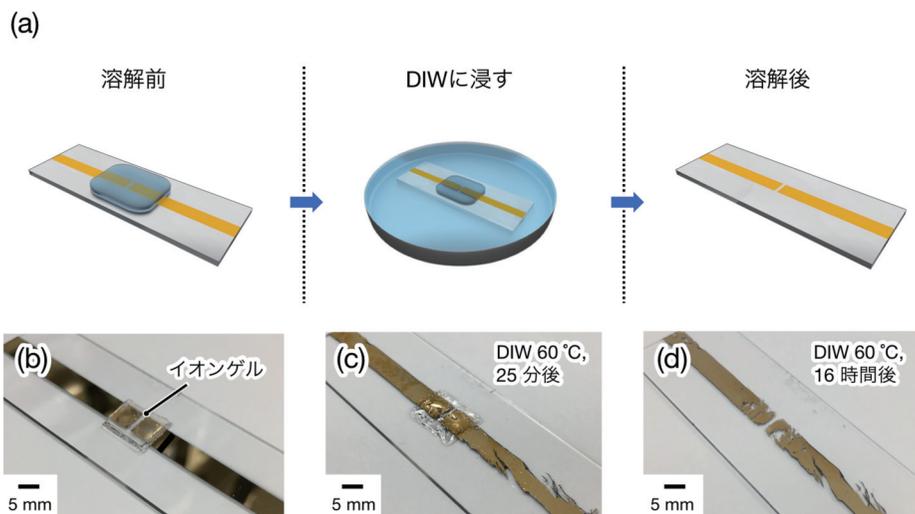


図5 (a) イオンゲルの溶解の概念図、(b) 溶解試験前のイオンゲル、(c) DIW 60°Cに25分浸したあとのイオンゲル、(d) DIW 60°Cに16時間浸したあとのイオンゲル、DIWに完全に溶解した。

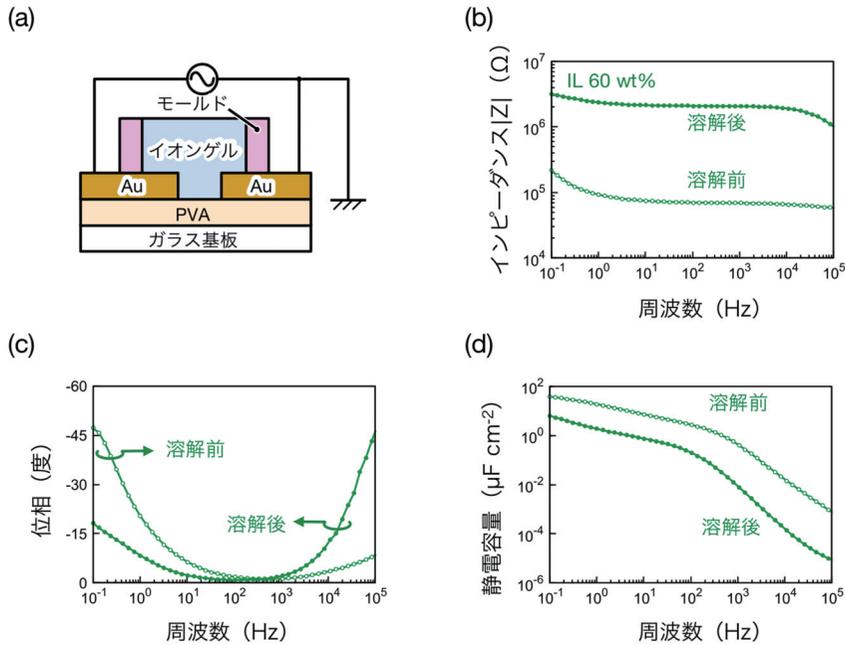


図6 (a) 実験系の概念図。電気特性 (b) インピーダンス、(c) 位相、(d) 1 Hz における静電容量のイオンゲル60wt%の溶解前後における変化

を向上するために挿入したPVA層が、図5(c)のように溶けたため、電極が損傷してインピーダンスが増加したと考えられる。入力信号の周波数に対する位相遅れは、図6(c)に示すように、位相 $-20^\circ$ から、位相 $-8^\circ$ にまで減少した。図6(d)に静電容量の変化を示す。溶解試験の前は、イオンゲルは静電容量 $19\mu\text{F}/\text{cm}^2$ を示したが、溶解試験の後には、 $1.9\mu\text{F}/\text{cm}^2$ に減少した。ゲルのイオン液体が水に溶けだして、電気二重層に寄与するイオンが減少したためだと考えられる。

## 4. デモンストレーション 無線センサ端末

### 4.1 無線センサモジュール作製

イオンゲルが無線センサ端末の電源として使用できることを実証するため、無線センサ端末を作製した。無線センサ端末は、電源、センサ、マイクロコンピュータ、無線回路から構成される。しかしながら、発電素子の出力は非常に小さく(数百  $\mu\text{W}$ )、消費電力が大きい無線センサ端末(数  $\text{mW}$ )を連続駆動することは不可能である。応力印加、温度変化、照度変化などイベントが生じたとき端末に電力供給を行う間歇駆動方式であるイベントドリブン駆動を無線センサ端末に搭載した。図7に示すように、電池レス無線センサモジュールを、イベントドリブン回路、発電素子、整流回路(LTC3588-1, Linear Technology)、キャパシタ、温度センサ(SENSIRION, SH21)、RF回路ZigBee(MONO WIELESS, TWELITE DIP)を用いて作製した[16]、[17]。本モジュールは、市販の圧電体PZTを電源として使用することで、電池レス化を実現している。作製したイオンゲルを電源とした無線センサ端末の作製を行っ

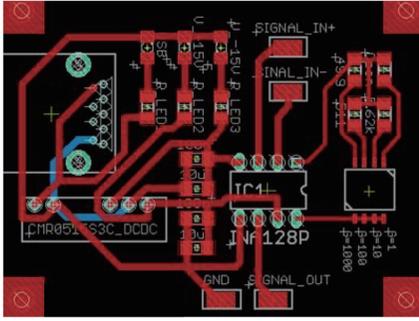


図7 電池レス無線センサモジュール。(左) CAD 画像、(右) 実際に作製した無線センサ端末

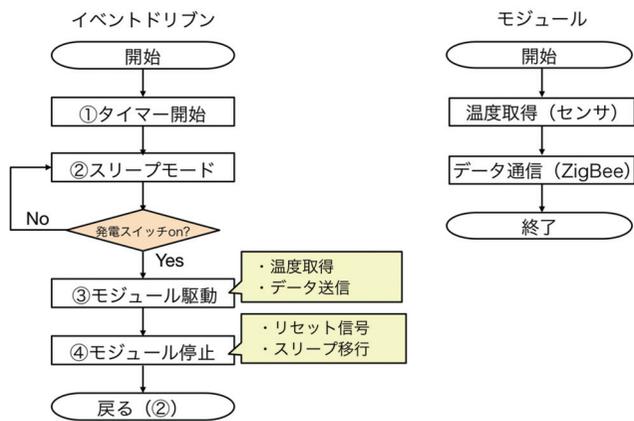


図8 電池レス無線センサモジュール：フローチャート

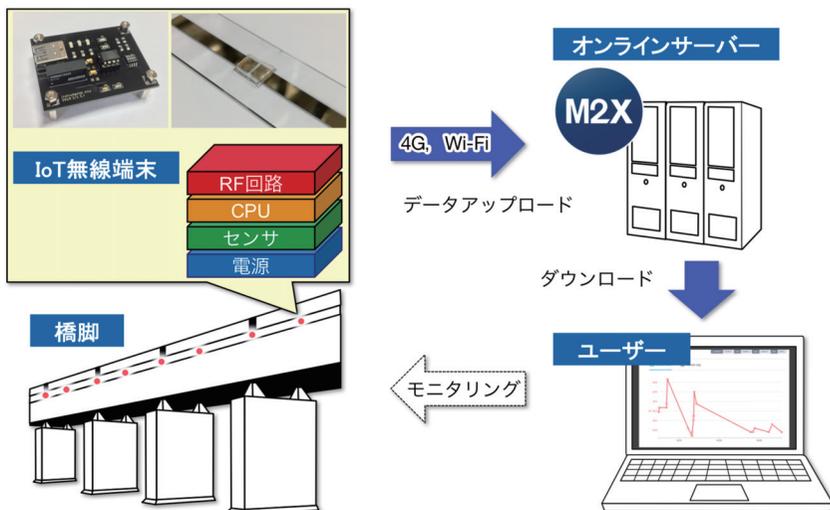


図9 無線センサネットワーク全体像

た。本無線センサ端末は図8に示すように、常時スリープモードで待機しており、この間に振動発電素子が発電した電力は整流回路を通してキャパシタに充電される。発電スイッチが発電してイベントドリブン回路がオンになると、キャパシタに充電されたエネルギーがセンサ、RF回路に供給される。ZigBee内部のマイコンが温度センサから温度データを取得し、RF回路によりデータが送信されて、パソコン(Raspberry pi 3)でデータを回収する。無線センサネットワークを実現するにあたり、本研究ではAT&Tが提供する無償のオンラインサーバー(M2X)を使用した。図9に示すように、無線センサモジュールが取得したデータはZigBeeで送信され、ゲートウェイ(Raspberry pi 3)が受信する。本ゲートウェイはインターネットに接続されており、無線LAN経由でデータをM2Xへアップロードしてデータを公開する。ここで、Raspberry pi 3が受信したデータをM2Xへアップロードするプログラムには、Python 3を使用してRaspberry pi 3-M2X間のAPIインターフェースを実装した。

## 4.2 実験：データ通信

図10に示すように、本無線センサモジュールを用いて、イベントドリブン駆動によるデータ送信を試験した。発電スイッチとしてポリマー圧電体(Polyvinylidene fluoride, PVDF, LDT0-028K, Measurement Specialties Inc.)を使用して、圧電体に応力が印加されて発電すると、データを送信できた。図11に無線センサモジュールが取得してM2Xにアップロードしたデータを示す。電池レス無線センサモジュールが取得した温度データをウェブサーバーにアップロードでき、無線センサネットワークへの応用を確認できた。

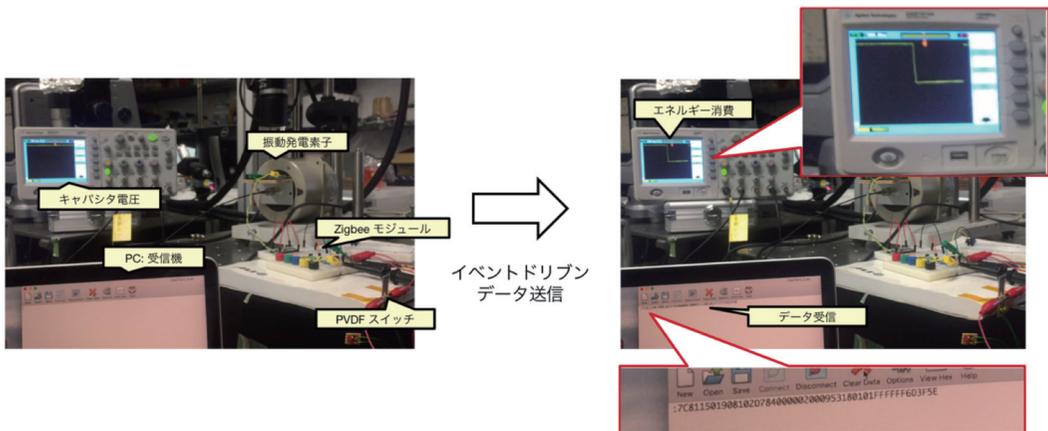


図10 イベントドリブンによるデータ送信

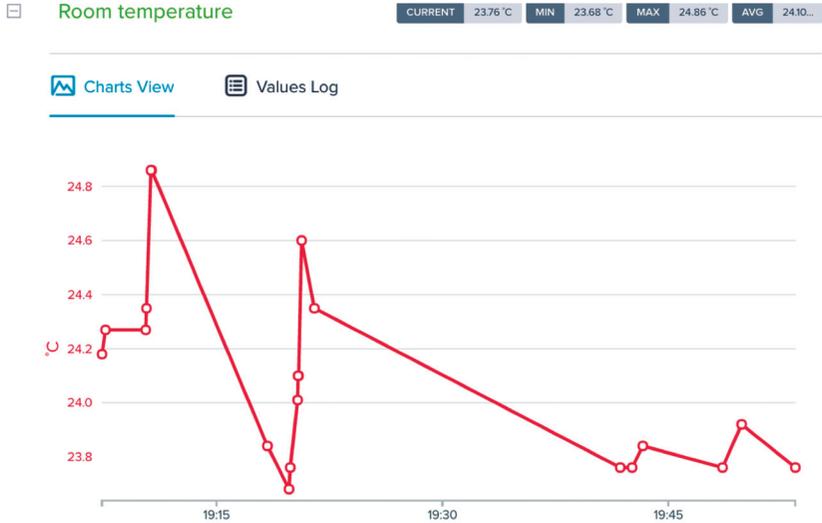


図11 無線センサモジュールが収集した温度データ

### 4.3 電気特性：消費電流

電池レス無線センサモジュールが駆動したときに消費する電流・エネルギーを測定し必要なキャパシタ、間歇駆動間隔を定量的に評価した。電源とイベントドリブン回路間に抵抗0.1Ωを挿入し、その両端に印加される電圧を、計装アンプ(Texas Instruments, INA128P)を用いて計測して、オームの法則から電流・電力値を算出した。定量的に消費電流を測定するために、振動発電素子と発電スイッチのかわりにそれぞれ直流電源と発電スイッチを使用した。図14に示すように、モジュールの駆動時間は30ms程度であり、最大電流は20mAであった。この波形を積分して消費した電荷を計算したところ、発電総量は $Q = 372 \mu\text{C}$ であり、消費エネルギーは $(1/2)QV$ より1.2mJと判明した。

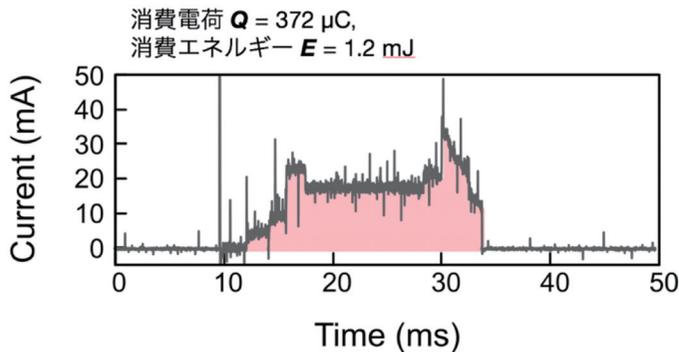


図12 無線センサモジュールが駆動したときに消費する電流

#### 4.4 電気特性：駆動間隔

モジュールが消費する電荷から、本モジュールの間歇駆動可能な時間間隔を計算した。図13に、無線センサモジュール駆動間隔と発電素子の出力電流の関係を示す。電荷  $Q$  と電流  $i$  との関係式  $dQ/dt = i$  から、電荷  $390 \mu\text{C}$  を再充電するために必要な時間を計算した。発電素子の短絡電流が  $10 \mu\text{A}$  であることから、現時点では、40秒に1回程度の時間間隔でモジュールを駆動することができる。将来的には振動発電素子の出力が増大して  $500 \mu\text{W}$  を実現できるため、本時間間隔はさらに短縮されて、2秒に1回の頻度で駆動可能となる。

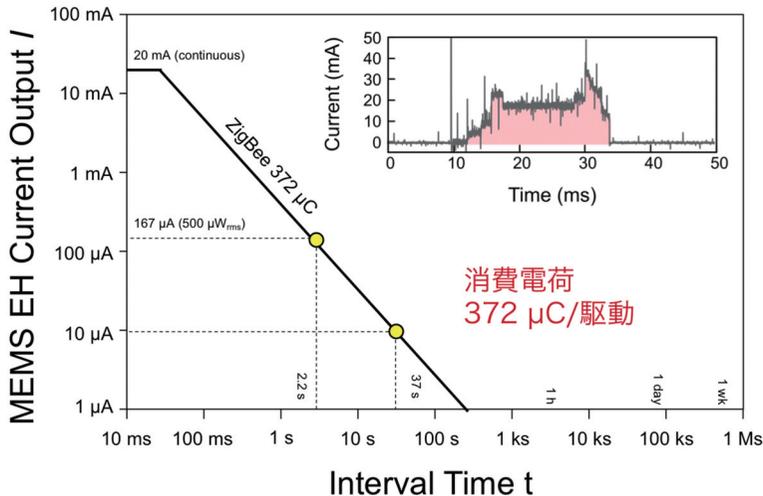


図13 無線センサモジュール駆動間隔と発電素子の出力電流の関係

## 5. 本研究の結論

本研究では、生分解性を有するイオン液体を電源とした、環境調和性を有する無線センサ端末の作製と評価を行った。PVA にイオン液体を分散したところ、電気二重層による非常に大きな静電容量  $13 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  を確認できた。また、PVA ポリマー中をイオンが動くことで、良好な電気伝導性  $20 \mu\text{S}/\text{cm}$  を示した。DIW に浸したところ、16時間後にイオンゲルは完全に溶解して、水をトリガとして分解するイオンゲルを初めて作製できた。

上記電解質の電源としての実用性を確認するため、イベントに反応して起動する間歇駆動型無線センサ端末を作製した。圧電体をスイッチとして使用することで、応力に対して温度データを送信した。駆動時に生じる電流から、消費エネルギーは  $1.2 \text{mJ}$  であると判明して、振動発電素子を使用した場合、40秒に1回無線通信できることを示した。

以上の研究成果により、環境調和性電解質を電源として駆動する電力自立マイクロエレクトロニクスを提案・実証するとともに、その有効性を実験により確認した。本研究はIoTモジュールを環境中から安全に撤去するために不可欠な要素であり、無線センサモジュールとそのネットワーク実現に大きく貢献できた。

## 6. 将来展望

本研究は、生分解性イオンゲルの電気特性と、デバイス作製という基礎特性の評価のみならず、無線センサ端末の電源としての実用化の観点からも重要な取り組みである。本研究結果は、論文2本、国際学会2本、受賞2本を達成しており、特許1本も申請済みである。本研究では、イオンゲルが水をトリガとした分解することを実証したが、無線センサ端末の電源実現には、イオンゲルの封止が必要である。この課題解決に向けて研究を着手しており、有機薄膜をイオンゲルに蒸着して大気雰囲気化で安定して駆動するデバイスを作製中である。また、無線センサ端末のシステム構築と低消費電力化に関する研究を実施している。将来的には、本研究で得られたイオンゲルの基礎特性、デバイス封止技術、無線センサ端末作製技術を融合して、Society 5.0実現に向けた無線センサネットワーク構築を目指す。

## 7. 謝 辞

本研究は、リーダー博士人材育成基金 東京大学、JST CREST プロジェクト番号 JPMJ CR15Q4、LIXIL 住生活財団 若手研究助成(学生)、立石科学技術振興財団 研究助成(C)の支援を受けて遂行されました。この場を借りて感謝申し上げます。

## 8. 参考文献

- [1] Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors," *ACS Nano*, vol. 7, no. 11, pp. 9533–9557, 2013.
- [2] S. Wang, L. Lin, and Z. L. Wang, "Nanoscale-triboelectric-effect enabled energy conversion for sustainable powering of portable electronics," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 6339–6, 2012.
- [3] B. Alavikia, T. S. Almoneef, and O. M. Ramahi, "Electromagnetic energy harvesting using complementary split-ring resonators," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 173903, no. 2012, pp. 163903–4, 2016.
- [4] G. Tang, B. Yang, J. Liu, B. Xu, H. Zhu, and C. Yang, "Development of high performance piezoelectric d33 mode MEMS vibration energy harvester based on PMN-PT single crystal thick film," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 205, pp. 150–155, 2014.
- [5] Y. Hung, M. Cai, and H. Su, "High-Voltage Generation in CMOS Photovoltaic Devices by Localized Substrate Removal," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 37, no. 6, pp. 754–757, 2016.
- [6] G. Yang, H. Lei, H. Tao, X. Zheng, J. Ma, Q. Liu, W. ke, Z. Chen, L. Xiong, P. Qin, Z. Chen, M. Qin, X. Lu, Y. Yan, and G. Fang, "Reducing Hysteresis and Enhancing Performance of Perovskite Solar Cells Using Low-Temperature Processed Y-Doped SnO<sub>2</sub> Nanosheets as Electron Selective Layers," *Small*, vol. 13, no. 2, p. 1601769–n/a, 2017.
- [7] A. Lennert, M. Sternberg, k. Meyer, R. D. Costa, and D. M. Guldi, "Iodine-Pseudohalogen Ionic Liquid-Based Electrolytes for Quasi-Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 39, pp. 33437–33445, Oct. 2017.
- [8] C. Wan, X. Gu, F. Dang, T. Itoh, Y. Wang, H. Sasaki, M. kondo, k. koga, k. Yabuki, G. J. Snyder,

- R. Yang, and k. koumoto, "Flexible n-type thermoelectric materials by organic intercalation of layered transition metal dichalcogenide TiS<sub>2</sub>," *Nat. Mater.*, vol. 14, p. 622, Apr. 2015.
- [9] S. Hwang and J. a. Rogers, "A Physically Transient Form of Silicon Electronics," *Science(80-.)*, vol. 337, no. 28, p. 1640, 2013.
- [10] G. Lee, S. kang, S. M. Won, P. Gutruf, Y. R. Jeong, J. koo, S. Lee, J. A. Rogers, and J. S. Ha, "Fully Biodegradable Microsupercapacitor for Power Storage in Transient Electronics," vol. 1700157, pp. 1–12, 2017.
- [11] K. Goossens, k. Lava, C. W. Bielawski, and k. Binnemans, "Ionic Liquid Crystals: Versatile Materials," *Chem. Rev.*, vol. 116, no. 8, pp. 4643–4807, Apr. 2016.
- [12] **S. Yamada**(申請者), H. Mitsuya, S. Ono, H. Toshiyoshi, and H. Fujita, "Enhancement of Electrostatic Induction Current of Energy Harvester by Using a Gelatinized Ionic Liquid," *IEEJ*, vol. 139, no. 1, pp. 7–14, 2019.
- [13] S. Z. Bisri, S. Shimizu, M. Nakano, and Y. Iwasa, "Endeavor of Iontronics: From Fundamentals to Applications of Ion-Controlled Electronics," *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 25, p. 1607054, Jul. 2017.
- [14] **S. Yamada**(申請者), T. Sato, and H. Toshiyoshi, "A pressure sensitive ionic gel FET for tactile sensing," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 253501, no. 110, pp. 1–4, 2017.
- [15] **S. Yamada**(申請者) and H. Toshiyoshi, "A Water Dissolvable Electrolyte with an Ionic Liquid for Eco-Friendly Electronics," *Small*, vol. 14, no. 32, p. 1800937, Jun. 2018.
- [16] **S. Yamada**(申請者) and H. Toshiyoshi, "Self-Powered Artificial Sensory Nervous System Using Ring Oscillator for Pulse Density Modulation," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 38, no. 10, pp. 1477–1480, 2017.
- [17] **S. Yamada**(申請者) and H. Toshiyoshi, "An Autonomous Power Management System with Event-driven Energy Harvester Switch," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1052, no. 1, p. 12070, 2018.
- [18] H. Honma, H. Mitsuya, G. Hashiguchi, H. Fujita, and H. Toshiyoshi, "Improvement of energy conversion effectiveness and maximum output power of electrostatic induction-type MEMS energy harvesters by using symmetric comb-electrode structures," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 28, no. 6, p. 64005, 2018.