

技術紹介

1 超小型センシングデバイスの開発

The Development of Ultra-Compact Sensing Device

國方 亮太 Ryota Kunikata 商品開発センター 技術エキスパート

須田 篤史 Atsushi Suda 商品開発センター 技術シニアマネージャー 博士(材料科学)

キーワード: Trillion Sensors、AI、ビッグデータ、環境モニタリング

Keywords: Trillion Sensors, AI, Big data, Environmental monitoring

要 旨

人類が新たに直面する地球規模の課題は、ますます深刻化する上に先行きは不透明です。急速な AI の進歩により、多量に設置したセンシングデバイスより生み出されるビッグデータを解析し、地球規模の様々な課題が解決される社会の実現が現実味を増しております。

このような社会においてセンシングデバイスに要求される潜在的ニーズを探索することを目的として、我々は過去の国プロで培った技術を活用し、超小型に作製したセンシングデバイスを用いたニーズ探索を行っております。作製したデバイスは屋内外の気圧変化の測定と無線によるデータ伝送等の簡単な動作確認を行い、これを用いてユーザの重要な課題の解決や新たなサービス等に対する創造的発想に繋がるようなマーケティングを推進しております。

SUMMARY

The global challenges humanity now faces are becoming increasingly severe, with an uncertain outlook for the future. Rapid advances in AI are making it increasingly feasible to analyze big data generated by a vast number of deployed sensing devices, paving the way for a society where various global issues can be addressed.

To explore the latent needs for sensing devices in such a society, we are conducting needs exploration using ultra-compact sensing devices developed by leveraging technologies cultivated through past national research projects. We have performed basic functional verification on the fabricated devices, including measuring indoor/outdoor air pressure changes and wireless data transmission. Using these devices, we are promoting marketing initiatives aimed at fostering creative ideas for solving users' critical challenges and developing new services.

1. はじめに

2013 年に米国での産学連携により始まった Trillion Sensors Initiative が目指す “Trillion Sensors Universe” は、人類全体で毎年 1 兆個規模のセンサを使う社会です。これは Fairchild Semiconductor 社の Janusz Bryzek によって提唱されたコンセプトであり、一人当たり 100 個を超えるセンサを使う Trillion Sensors ネットワークより生み出されるビッグデータを活用し、様々な地球規模の課題が解決される “潤沢に満たされた” 社会の実現を目指しています。¹⁾

Trillion Sensors ネットワークが効率的に働くためには大容量のデータを同時に多点接続できる通信環境が不可欠となります。²⁾2000 年頃から、“いつでもどこでも誰とでも繋がる” ことができる “ユビキタスネットワーク” の実現が目指されました。2010 年代以降は IoT(Internet of Things)の急速な発展に伴い、様々な無線技術が開発されました。³⁾さらに、2020 年頃より整備が進んだ第 5 世代移動通信システム(5G)通信が一般化し、現在ではいつでもどこでも誰とでも繋がることは既に当たり前のこととして、ユビキタスネットワークについて特に言及されなくなるほど通信環境が大きく進歩しました。

通信環境の進歩に加えて、最も大きな変化ともいえるものが近年の急速な AI の進歩です。2000 年代に始まった第 3 次 AI ブームでは深層学習や強化学習といった機械学習の進歩により、少ない人手で大量のデータを解析し、特徴量を抽出することが可能となりました。さらに 2020 年以降は生成 AI や大規模言語モデル等による AI 革命とも呼べる急速な進歩により、人類の生活は大きく変わりつつあります。今やいたるところで AI データセンターが新規に整備され、半導体不足をも引き起こしていますが、今後は、解析対象となるデータさえも不足するものと考えられています。⁴⁾

以上のように周辺技術の状況は大きくプラスに作用しているにもかかわらず、Trillion Sensors の概念が提唱されてから 10 年以上が経過した現在においても、センサの個数だけに着目すると当初のコンセプトである年間 1 兆個に対して、その 10 分の 1 も達成されておりません。理由の一つとして、近年の環境問題の深刻化が考えられます。大量生産・大量消費といった環境への負荷が大きい経済活動は見直され、環境負荷を低減するための技術についての議論が活発化しています。このような状況では人類の生活を “潤沢に満たされた” ものとするために 1 兆個ものセンサを毎年消費するようなやり方は見直されて当然とも考えられます。

一方、“Trillion Sensors Universe” の本来の目的である地球規模の課題に関しては、2015 年に国連で採択された SDGs (Sustainable Development Goals) 等により多くの人々の間で目標が共有化されました。⁵⁾さらに近年では経済安全保障や地政学的リスク等への関心の高まり、また、一般の人々の間では well-being への希求等、刻々と変化するニーズの多様化を受けて、医療、環境、エネルギー、農業、防災等の様々な分野における社会的課題が次々に浮き彫りとなっております。そして、これらの新たに顕在化した社会的課題を科学技術により解決しようとする取り組みに対して、大きな期待が高まっています。一方、ビジネスの世界では 2010 年代より VUCA (volatility (変動性)、uncertainty (不確実性)、complexity (複雑性)、ambiguity (曖昧性) の頭文字) 時代といわれるような予測不可能な状況への対応についての議論が活発化してきました。このような状況の現代において、新たなセンシングデバイスと高速のネットワークを用いて集積されたビッグデータを AI により解析し、潜在的な課題抽出とその解決を行う手法にさらなる期待が高まっております。このように近年の社会情勢の変化に伴って、Trillion Sensors Universe というコンセプトが目指した世界がますます現実味を帯びて議論されるに至

っているともいえます。

我々は 2010 年代後半に、社外協創プロジェクトを活用し、屋内居住空間の温度、照度、音、振動といった情報を取得し、サーバへ保管できる「屋内環境モニタリングデバイス」(図 1)を開発いたしました。⁶⁾開発したデバイスは居住者によるエアコン等の温度調整や照明器具の使用状況、さらには居住者が発する生活音、歩行振動といった、日常生活に起因する様々な情報を取得することが可能であり、社外共創プロジェクトに参加する様々な異業種の方々とデータ活用サービスについて討議いたしました。また、2020 年代には国立研究法人日本医療研究開発機構(AMED)の支援の下、過去の開発で培ったデバイス作製あるいは制御のノウハウを活用して、新興国インドを対象とした新しい新型コロナウイルス検出用デバイスを開発いたしました。⁷⁾そこでは、デザインアプローチの手法を用いて、ニーズの探索、そのニーズを満たすデバイスコンセプトの創出、および試作機開発を通じたコンセプトの妥当性評価等を行いました。

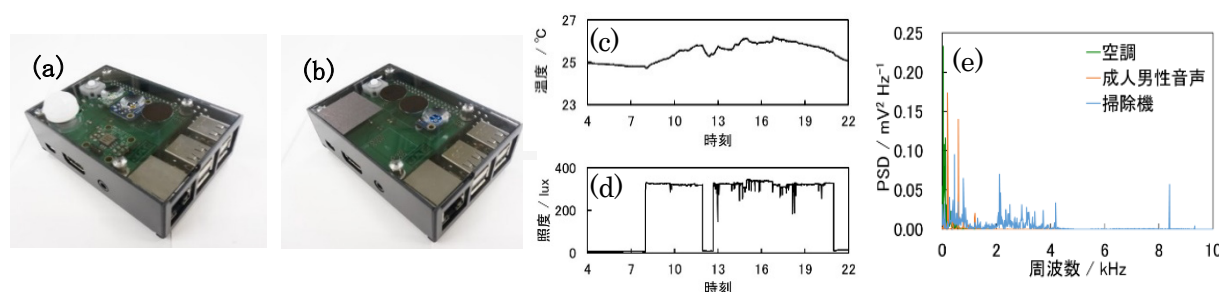


図 1. 屋内環境モニタリングデバイス

(a)92×61×28 mm の筐体内に温湿度、気圧、人感、振動センサを備えたデバイス。(b)同サイズの筐体内にマイクを備えたデバイス。両デバイスとも、これらセンサより取得したデータを無線にてウェブサーバに送付します。(c)温度データの例。(d)照度データの例。(e)典型的な生活音の周波数分布データの比較。

人類が新たに直面する地球規模の課題は、ますます深刻化する上に先行きは不透明ですが、近年急速に進化した AI を活用して、多量のセンシングデバイスから得られるビッグデータを解析することで、これら課題の解決が期待できます。本開発では、“当社の開発する技術が、お客様の独創的な商品開発に新しい扉を拓きます” との考え方に立ち、お客様の独創的な発想を喚起できるレベルの超小型センシングデバイスを、過去の国プロ等で培った技術を活用して試作いたしました。そして、この試作品をマーケティングツールとして活用することで、新たなセンシングデバイス開発に繋がる、地球規模の重要な課題の解決や新たなサービス等についての潜在的ニーズを探索することを目指しています。

2. 超小型センシングデバイスの試作

誰もがより安価にビッグデータを構築・活用できるシステムの実現を目指し、将来の単価と設置コストの低減が期待できるよう可能な限り小型、かつ電池寿命の長いセンシングデバイスを開発しました。デバイスの外観を図2、仕様を表1に示します。センシングモジュールには小型かつ入手性がよいMEMS静電容量式の気圧計、および非接触式温度計を採用しました。無線モジュールには、消費電力の低減に特化したNordic Semiconductor ASA 製 BLE(Bluetooth® Low Energy)無線チップと PCB アンテナが極小にパッケージングされた加賀 FEI(株)製モジュールを採用しました。また、電池には公称容量 1 mAh、公称電圧 3 V のコイン型リチウム二次電池を採用しております。これらの構成により、デバイスのサイズは $13.4 \times 4.8 \times 2.6$ mm と無線センサとして世界最小(2025 年 12 月時点、web 情報より当社調べ)となっております。なお、無線通信規格は、Bluetooth® Core 5.0(LE 2M PHY)となっており、20 m 程度の距離にて極めて低い消費電力でのデータ送信を達成しております。センシングしたデータの送信 1 回に必要な消費電力量は通信間隔 0.1 s の場合に 45 μ J であり、本試作のような超小型電池を用いた場合でも計算上は 24 万回もの測定が可能です。制御プログラムのさらなる改良により、待機電力等を最適化することで、10 min 間隔の測定においても数年程度の使用が期待できます。本試作では、デバイスより送信されたデータは BLE 受信機を接続した PC により受信・ストレージされる構成としておりますが、BLE/Wi-Fi ゲートウェイ等を介することでインターネット上のクラウドサーバにストレージする構成も可能です。

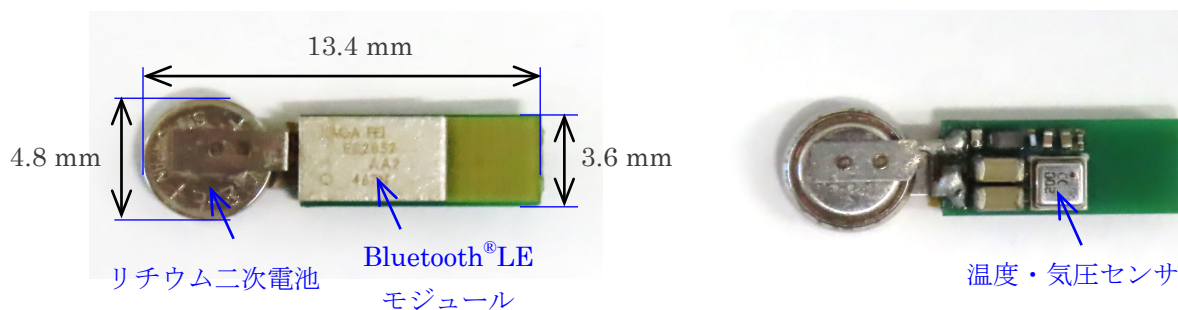


図 2. 超小型センシングデバイスの外観

我々はこのような超小型で長寿命なセンシングデバイスをオフィス、工場、圃場から都市全体あるいは人の立ち入りが少ない河川、山林まで、あらゆる環境に大規模かつ高密度に設置し、得られるビッグデータを AI により解析することで、新しいサービスの創出が可能であると考えています。今回作製した超小型センシングデバイスは量産時に数百円以下の価格になると考えており、例えば日本国民一人当たり一個のセンシングデバイスを負担すれば、国内全ての道路に 10 m 間隔で設置することができ、気象や人流、物流データ等を従来にないレベルの高い密度で収集し続けることも、コスト面からは十分に実現可能です。また、たとえ電池切れや故障により一部データが欠損あるいは異常値を示したとしても、センシングデバイスが高密度に設置されているために、隣接するデバイスのデータにより補完・補正することも可能です。気象庁が数～十数 km ごとに設置する気象測器等、厳しい検定基準と有効期限の設定により測定値の精度を保証する従来のデバイスとは異なり、我々のデバイスは密度と設置数によりこれを補うコンセプトであり、これによりデバイスの校正あるいは検定等にかかるイニシャル費に加え、設

置後の電池切れ・故障監視、交換等にかかるメンテナンス費をも大幅に低減できるものと考えています。

表 1. 超小型センシングデバイスの仕様

サイズ・重量	サイズ	13.4×4.8×2.6 mm
	重量	0.184 g
無線	規格	Bluetooth® Core 5.0 (LE 2M PHY)
	周波数	2.4 GHz
	送信出力	4 dBm
CPU・メモリ	CPU	ARM Cortex M4F 32bit processor
	メモリ	512 KB flash, 64 KB RAM
センサ	温度レンジ	−40〜85°C
	温度絶対確度	±0.5 K
	気圧レンジ	300〜1250 hPa
	気圧RMSノイズ	0.08 Pa@10 Hz〜0.78 Pa@240 Hz
	気圧絶対確度	±30 Pa
二次電池	公称容量	1.0 mAh
	公称電圧	3 V
	サイクル寿命	100 回

3. 気圧多点計測による原理実証

3.1 気圧多点計測による風の観測

現在、作製したセンシングデバイスを用いた新たなサービスについて、社内外の様々な業種の方々とともに討議を進めております。そのようなマーケティング活動におけるデバイスコンセプトの共有、潜在的ニーズの喚起を目的に、開発したデバイスを用いた実証実験を行いました。以下に実証実験の結果について報告いたします。

単価及び運用コストが低い超小型・低価格なセンシングデバイスは、従来に比べて多数設置することが可能であるため、これまで注目されてこなかったような極めて局所的な環境変化の観測および予測が可能と考えています。例として、デバイスを屋外の複数地点に数十 m 間隔で設置し、各地点の局所的な気圧変化を計測した結果を図 3 に示します。デバイス間の時刻同期により、デバイスごとの時間のズレを 0.1 s 以下としたうえで測定データを比較したところ、デバイス A→B→C の順序にて、5～10 s 程度の遅れを伴った気圧上昇（例えば図中 90 s および 290 s 付近の矢印）が複数回にわたり出現する様子が観測されました。この気圧変化の空間的な伝播は、実験時の秒速数 m 程度の風を捉えた結果と考えられます。一方で 130 s 付近ではデバイス B→C の順序にて気圧ピークが出現しているものの、デバイス A に気圧変化が観測されなかったことから、上空から吹き降ろす風や渦巻く風を捉えたものと推測されます。今回の実験ではデバイスをほぼ直線上に配置することで、その直線方向に吹く風の発生を観測しましたが、さらに多くのデバイスを二次元、あるいは 3 次元メッシュ状に配置すれば、あらゆる地点のあらゆる方向に発生する風を観測すること、さらには各地点の数秒先の発生を予測することが可能になると考えられます。このようなシステムにより、地形や建物、自動車走行等の影響を受けて複雑に変化する都市部の気流を観測・予測できれば、ドローンの自律飛行の安全性を大幅に向上させることも可能と考えられます。

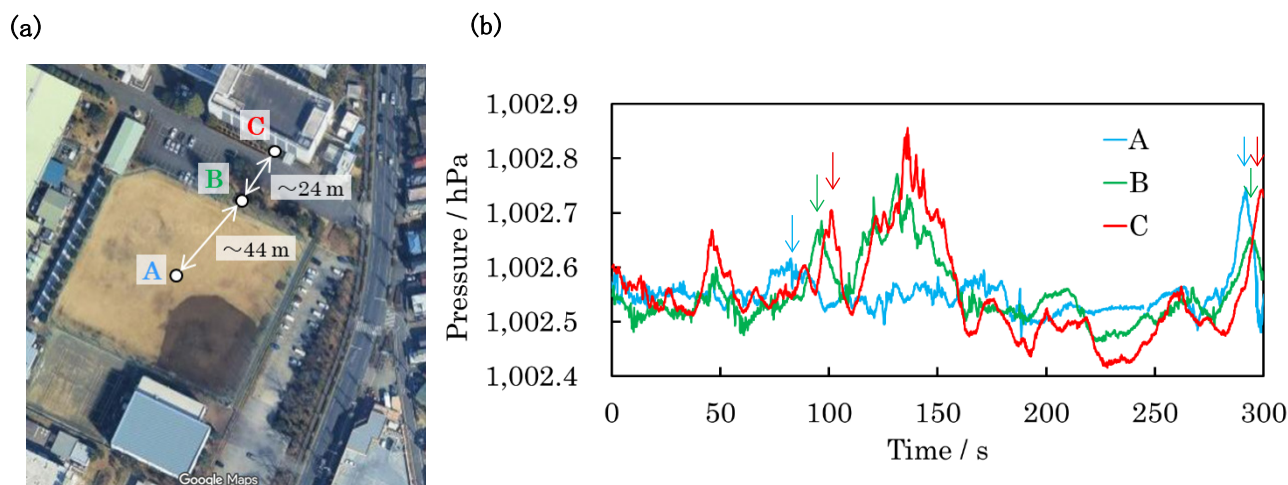


図 3. 気圧の多点計測による風の観測結果

(a) 当社昭島事業所の航空写真にセンシングデバイスによる気圧測定位置を A、B、C で示します。

(b) A、B、C 各測定位置の気圧測定結果。データは 0.1 s 間隔で取得しています。

近年では、都市部の環境に関する情報を数～数十 m 間隔の極めて高い解像度で得ようとする試みが多数報告されております。例えば、気象庁が提供している解析データと構造物の 3D 情報を用い、コンピュータシミュレーションと機械学習による超解像計算によって、都市部地表付近の 5m 間隔の温度分布が得られています。⁸⁾また局所的な気流を直接的に測定する手段としては、ドップラーライダーの活用も考えられますが、現在の装置価格は 1 台あたり数百万円以上と高額であり都市部への多数設置は難しいため、小型低価格化に向けたさらなる技術開発が推進されています。⁹⁾

3.2 微小な気圧変化の観測によるドア開閉の検知

本デバイスに搭載している気圧センサは、小型($2 \times 2 \times 0.8$ mm)かつ安価(数百円/個)ながらも高い精度(相対精度 ± 0.4 Pa、絶対精度 ± 60 Pa)を有することから、室内のドア開閉等に由来する微小な気圧変化も再現良く捉えることが可能です。例として、隣接する 2 部屋の間のドアを開閉したときの、それぞれの部屋の気圧測定結果を図 4 に示します。換気扇により陰圧となっている部屋 A にデバイス a を設置し、さらにドアを介して隣接する部屋 B にデバイス b を設置して気圧を測定したところ、ドアを閉じた状態では換気扇由来の約 0.4 hPa の気圧差が観測されたのに対し、ドアを開けた状態ではこの気圧差が直ちに解消され同気圧となることが示されています。また、デバイス a と b の測定値の差分をプロットすることにより、ドアを閉じた状態と、完全には閉まりきっておらず、わずかに隙間がある状態の差を明確に区別できることがわかります。

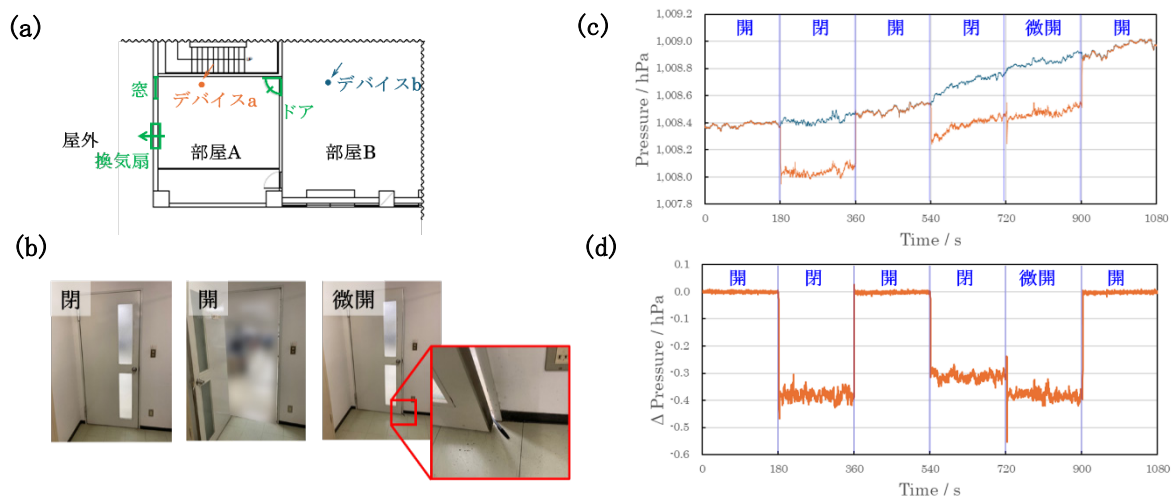


図 4. 微小な気圧変化の観測によるドア開閉の検知結果

(a)デバイスの設置場所の見取り図。部屋 A には換気扇が設置されており、隣接する部屋 B と比較し陰圧となっています。(b)部屋 A、B をつなぐドアの開閉時の写真。(c) 各部屋に設置したデバイス a、b の気圧測定結果。(d)デバイス a と b の気圧差分のプロット。差分プロットにより、ドアが閉の状態とわずかに隙間を有する微開の状態を明確に判別できます。

このようなデバイスを屋内に多数配置することにより、人の往来をカメラ無しでモニタリングできる

他、ドア・窓の閉め忘れや異物挟み込み等の発生に関して正確に位置を特定して検知することが可能と考えられます。すなわち半導体製造工場やバイオハザード実験設備等、厳密な気圧管理を行う施設では、部屋ごとの設置だけではなく、製造装置ごとあるいは配管ごとに設置してより密な監視網を構築することで、建材や筐体の劣化等による意図しない気密の破れをより早く、位置を特定して検知できるものと期待しております。

3.3 測定対象の増加による応用範囲の拡大

応用範囲のさらなる拡大のため、マイク、カメラ、振動センサあるいはガスセンサ等を集積したセンシングデバイスの試作にも取り組んでおります。これらのセンサモジュールはMEMS気圧センサと比較して消費電力が大きく、電池容量の増大が必要であるため、デバイスサイズは増大し、価格は上昇するものと予測されます。そのような消費電力の高いセンサであっても、デバイスコスト及びサイズの増大を抑えつつ長期間データを収集するため、太陽電池を搭載したデバイスも試作および動作確認を行いました。試作したセンシングデバイスの外観を図5に示します。本試作デバイスには、前述の超小型デバイスと同じ無線モジュール、温度・気圧センサに加えて、可聴域の音を収集可能なマイク、有感振動を検知可能な3軸加速度計を搭載し、さらにデバイス裏面全面にアモルファスシリコン太陽電池を設置いたしました。デバイスのサイズは入手可能な太陽電池モジュールのサイズでほぼ決まってしまう、温度および気圧のみを測定する超小型センシングデバイスよりかなり大きく $26.4 \times 8.0 \times 4.5$ mm となります。なお、現在はこのようなデバイスに搭載可能な超小型の太陽電池モジュールは入手性が悪く、選択の幅は非常に狭いものでした。過去にはソーラー腕時計用に超小型の太陽電池が多く製造されていたものと考えておりますが、最近はデザインの自由度向上等を目的として太陽電池モジュールが文字盤と一体化しておりほとんど製造されていないように思えます。したがって超小型太陽電池の製造には技術的課題はないため、太陽電池搭載型センシングデバイスのニーズが高まればさらなる小型化も可能と考えております。

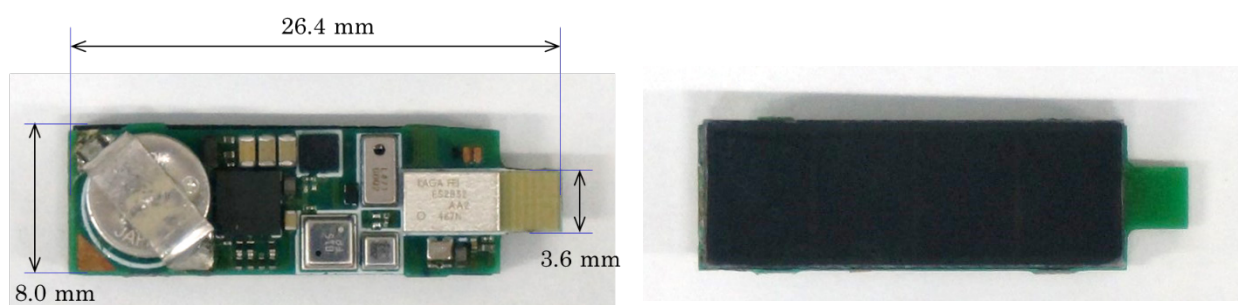


図 5. 太陽電池型デバイス試作の外観

現時点では、日中の太陽光下における音、振動の連続測定が可能であることを確認しております。今後は屋外での長期駆動を可能とする防水・防塵パッケージを開発することで、災害や事故に起因する異常音検知、地震や噴火の予兆となる微震動の検知等、将来のより広範囲なアプリケーション創出に活用できるものと考えております。

4. まとめと今後の展望

以上、我々は世界最小レベルのサイズを実現した超小型センシングデバイスを作製し動作確認を行いました。現在、この超小型センシングデバイス試作と動作確認データ等を用いたマーケティング活動を推進しております。様々な業種の方々と、多量のセンシングデバイスから得られるビッグデータの活用法に関しても討議しており、想定した範囲を超えるような潜在的なニーズに到達しつつあるものと考えております。

デバイスやシステムの構成、あるいはセンシングデバイス設置方法等については、今後は特に環境問題に配慮する必要があるものと考えております。2013年当時の **Trillion Sensors** ネットワークにおけるセンシングデバイスについては、多くの方が低コストで使い捨てのデバイスを想定していたものと思われませんが、このようなデバイスは環境負荷が大きいものと容易に想像できます。開発初期の構想では、デバイスの小型化の推進や使用する材料選定等を考慮すれば、究極的には環境中に残して自然分解させる運用も可能であると考えておりました。しかしながら、企業活動に対する環境負荷低減への取り組みの要求は年々厳しくなっており、今後は環境に配慮しつつ、使い捨てではなく超小型でも **RF** タグ等を利用して位置を調べて回収できるよう、デバイス構造についてさらなる検討が必要となるものと考えております。今後、技術者は広い視野で環境破壊の小さな可能性までも配慮しつつ開発に臨む必要性がますます高まっていくものと考えております。また **Trillion sensors** の概念でも重要視されていたエネルギーハーベスティングに対する考え方もますます重要になると考えられます。応用範囲も市場規模も非常に大きい二次電池等周辺技術に関しては、研究開発が活発に推進されており、近い将来の技術革新には大いに期待しております。

ところで、現在の **AI** 技術の進歩は非常に速く、近い将来、多くの方の仕事のやり方やライフスタイルが大きく変化するものと予想されています。過去においても技術の進歩により潜在的なニーズが新たに発掘されるタイミングで、価値観の大きな変化を伴った産業構造の変化が起こり、多くの人々の生活が大きく変化いたしました。過去に産業構造が大きく変化した際には、関連企業が多く生まれ、やがてそれらは淘汰されて勝者が決まったのですが、このときに資本力が大きな要素となっていたように思えます。現在は **AI** が産業構造を大きく変えるのは確実視されており、過去と同様に数多くの **AI** 企業が誕生していますが、やがてこれらも新しい資本力、すなわちデータを持てる者が生き残っていくものと考えています。**SDGs** の次の目標も議論が始まっているようです。ここでは **well-being** や **ネイチャーポジティブ** についても議論されるものと思われます。これら指標の評価のためのデータあるいは取得するためのセンシングデバイスやシステムは、全く新しい次世代の産業の資本に相当するものと考え、今後も開発を推進してまいります。

[参考文献]

- 1) “Tsensors summit”, mediaX at Stanford University (<https://mediax.stanford.edu/news/tsensors-summit/>) (2013).
- 2) S. Kaminaga, “Trillion Sensors and MEMS”, *Sens. Mater.* **30**, 723 (2018).
- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, “製造現場における無線通信技術の導入ガイドライン”, (2024).
- 4) P. Villalobos *et al.* “Will we run out of data? Limits of LLM scaling based on human-generated data”, Preprint at <http://arxiv.org/abs/2211.04325> (2024).
- 5) 国連総会決議 “Transforming our world the 2030 Agenda for Sustainable Development”, A/RES/70/1 (2015).
- 6) 國方亮太, 須田篤史, “環境モニタリングデバイスの開発～共創プロジェクト事例紹介～”, *航空電子技報* **42**, 42 (2020).
- 7) 國方亮太, 須田篤史, “インドにおける新型コロナウイルス検査装置の実用化に向けた取り組み”, *航空電子技報* **45**, 1-1 (2023).
- 8) Y. Yasuda *et al.* “Super-resolution of near-surface temperature utilizing physical quantities for real-time prediction of urban micrometeorology”, *Build. Environ.* **209**, 108597 (2022).
- 9) 古本 淳一, “風計測用国産小型ドップラー・ライダー”, *光技術コンタクト* **64** (1), 18 (2026).