

第1章

フレキシブル・伸縮性エレクトロニクスを支える
要素技術の開発動向

サイエンス&テクノロジー

第1節 フレキシブル・伸縮性デバイスのための半導体・センサ材料技術

(1) π 共役高分子の精密合成による伸縮性 n 型半導体材料の開発

山形大学 東原 知哉

はじめに

人・モノ・サービスを含めたすべての事象が国境を越えて繋がる Internet of Everything (IoE) 社会の到来に向け、ウェアラブル電子デバイスの開発が急がれている。中でも半導体の果たす役割は益々重要になり、それらのフレキシビリティや伸縮性の付与に注目が集まっている(図1)。しかし、半導体特性と伸縮性にはトレードオフの関係があり、これを解消するための分子設計指針の確立が必要である。近年、半導体高分子材料の高効率化が進んでおり、例えば p 型半導体高分子材料²⁾では $>20 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、 n 型半導体高分子材料³⁾では $14.9 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ の高い電荷移動度が達成されている。半導体高分子材料は、絡み合い構造に由来する応力緩和特性の発現が期待されるものの不十分であり、多くの場合20~30%の伸長歪みに耐えられない。そこで、 π 共役高分子の主鎖または側鎖に特別に設計した応力緩和ユニットを導入することで、本質的に伸縮可能な p 型半導体材料が開発されてきた⁴⁾。しかし、 n 型半導体高分子材料については、一般に主鎖の剛直性が p 型のそれよりも高いためか、ほとんど報告されていない。

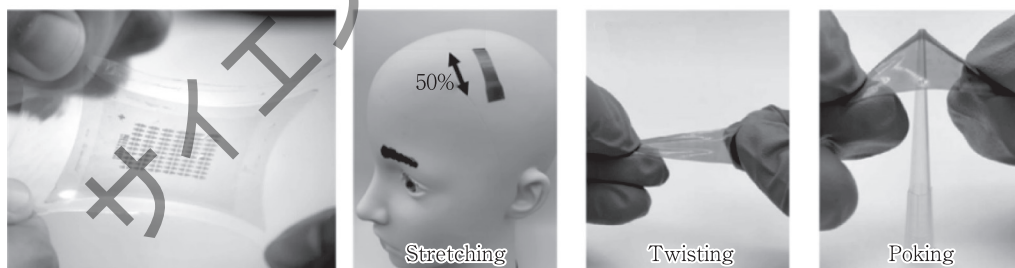


図1 ストレッチャブル有機薄膜トランジスタ素子の外観写真¹⁾

本研究では、 n 型半導体高分子に焦点を当て、それらの本質的な伸縮性付与のため、 π 共役高分子の精密設計・合成を戦略アプローチとする分子性有機材料の創成を行った。具体的には、ドナー・アクセプター型ナフタレンジイミド(NDI)系 n 型半導体高分子への延性/伸縮性付与のため、(a) 共役切断スペーサー(CBS)、(b) ブロック共重合体、及び(c) レジオランダム重合体を開発した(図2)。

[2] 皮膚貼付型のウェアラブルヘルスケアモニタ実現に向けた機能性酸化物材料のエピタキシャル薄膜を柔軟化する技術

近畿大学 西川 博昭

はじめに

強誘電体・圧電体や強磁性体などの優れた物性を示す機能性酸化物材料は、生体情報を含む多様な信号の高感度な取得に有効であり、皮膚貼付型のウェアラブルヘルスケアモニタに応用することが期待される。機能性酸化物材料は本質的に脆性材料であることから、皮膚に貼付可能な柔軟性(フレキシブル性)を持たせるために、我々はポリマーシートをはじめとするフレキシブルな基板に機能性酸化物材料の薄膜を複合させる技術に注目している。しかし、機能性酸化物材料が優れた物性を発揮するためには高温プロセスが必要な結晶化が要求される。一般にポリマーの耐熱性が乏しいことから、この要求は極めて困難である。本稿ではフレキシブルな基板に機能性酸化物材料の薄膜を複合させるプロセスとして、我々が研究を進めている、機能性酸化物材料の高品質なエピタキシャル薄膜を一旦耐熱性に優れる基板上に作製したのち、これを剥がしてフレキシブルなポリマーシートに転写する、「作った薄膜を剥がして使う」技術を紹介する。

1. 皮膚貼付型のウェアラブルヘルスケアモニタ

現在、我が国は人類史上でも類を見ない超高齢社会に突入している。高齢者が発症しやすい病気を予防することで社会が負担する医療費や介護費を削減することが期待される。そのためには、定期的に医療機関に通うことで早期に病気を発見・治療することが重要である。しかし頻繁に医療機関に通うことは、医療費や時間の面からも難しい。そこで、健康かつ安全で安心な社会を築くために、皮膚や衣服の表面に装着するだけで生体情報をリアルタイムで測定することができるウェアラブル(身につけられる)ヘルスケアモニタが、医療やヘルスケア分野で注目されている。しかし現状のウェアラブルヘルスケアモニタは腕時計型や指輪型が主であり、硬い材料で構成されていることから装着感や違和感が大きいうえに装着部位が制限されており、部位を選ばず連続的に生体情報を取得することは困難である。そこで注目されているのが、皮膚貼付型のウェアラブルヘルスケアモニタ¹⁾である。皮膚貼付型のウェアラブルヘルスケアモニタを実現するには、平らでなく、かつ軟らかい皮膚や衣服の表面に違和感なく密着さ

[2] フレキシブル熱電発電デバイス

東海大学 高尻 雅之

はじめに

科学技術の進歩と共に社会は急速に発展し、人々の生活環境は大きく向上した。今後、さらなる社会発展を遂げていく上で期待されるのがInternet of Things(IoT)技術である。この技術はインターネットに多数のセンサおよび機器を繋げることで、情報交換および相互制御が可能になり、モノ同士が繋がることで、これまでにはなかった新たな価値が生み出される。近年、IoT技術の応用のひとつとしてウェアブルデバイスが注目されている¹⁻³⁾。スマートウォッチなどのウェアブルデバイスを身に付けることで、心拍数や人の行動を測定し、データや個人の行動データを収集し、そのデータを生活に活かすことができる。このウェアブルデバイスのセンサを駆動させるには独立電源が欠かせない。独立電源としては、取り換えや充電が不要であることが望ましい。

その有力な候補が熱エネルギーを電気エネルギーに変換できる熱電発電デバイスである⁴⁻⁸⁾。図1に一般的な熱電発電デバイスの概要を示す⁹⁾。このデバイスでは、P型とN型熱電材料の2つの材料を介し、熱電材料内に温度差を付けることで電位差(熱起電力)が発生する。

ウェアブルデバイスのセンサの独立電源として、熱電発電デバイスに求められる特性として、

- ① 毒性がない
- ② 小型化が可能
- ③ 柔軟性を持つ
- ④ 低コスト材料で大量生産可能
- ⑤ 室温域で高性能

が挙げられる。これらの特性を満たす最も有力候補が単層カーボンナノチューブ(CNT)である¹⁰⁻¹⁵⁾。しかし、単層CNT

を使用した熱電発電デバイスをセンサの電源として利用するためにはいくつか課題がある。第一の課題はいかに空気中で長期間安定したN型材料を作製するかである¹⁶⁻¹⁸⁾。単層CNTは空気中の酸素分子が吸着することでP型熱電性能を示すことが知られており¹⁹⁾、空気中で半永久

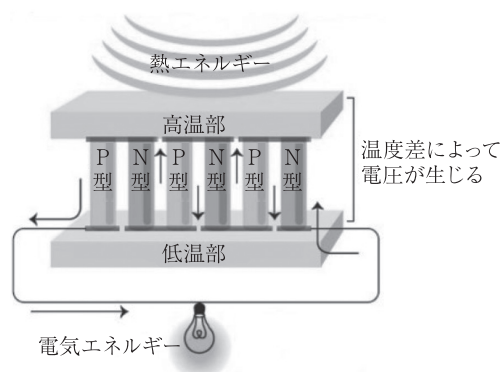


図1 一般的な熱電発電デバイス概要図⁹⁾

[4] 二次元通信技術による無線給電・データ伝送とウェアラブル生体計測システム

高知工科大学 野田 聡人

はじめに

フレキシブル・伸縮性エレクトロニクス技術に焦点を当てた本書における「次世代ウェアラブルデバイス」とは、現在「ウェアラブルデバイス」と称されている腕時計型や眼鏡型のアイテムとは異なったものを指しているはずである。絆創膏のように皮膚に直接貼付するデバイスや、衣服のような文字通り「ウェアラブル」なデバイスが想定される。こうした次世代ウェアラブルデバイスを実現する鍵となるフレキシブル・伸縮性エレクトロニクスに関して、本書中に多数の解説がなされているように、様々な技術開発・研究が進展している。

この次世代技術を実用なものとするためには、本節が主題とする電源・通信技術についても相応の進歩が必要となる。計測のためのトランスデューサ(対象とする物理量から電気信号への変換器)がフレキシブルな素材で構成できたとして、それだけでは計測システムは完成しない。増幅やアナログ→デジタル変換を経て信号を伝送する必要があり、これらの機能は電源なしには成立しない。この電源・通信技術の必要性は従来のセンシングシステムと何ら変わるところはないが、「フレキシブル・伸縮性」を損なうものであってはならないという点が、この次世代技術に特有の課題となる。

本稿では、次世代ウェアラブルデバイスを実装するための基盤技術の一つとして筆者らが研究している、導電テキスタイルを介してバッテリーレスのセンサやアクチュエータなどの素子に給電し通信する手法について解説する。

1. 導電テキスタイル二次元通信の基本原則

筆者らの提案する導電テキスタイル二次元通信では、布地の両面に導電性を付与して伝送路として用いる。この表と裏の2枚の導電面による2導体系で電圧・電流を伝送する。具体的な構成の方法としては、絶縁性の基布を挟み込むように導電布を両面に重ね合わせたり、絶縁基布の両面に導電インクを印刷したりしても良いし、布の織り編みの工程で絶縁性の糸と導電糸を組み合わせる両面に導電糸が露出するように構成しても良い。

図1には、導電布と絶縁布を重ね合わせる場合の例を示している。これらの互いに絶縁さ

第2章

フレキシブル・伸縮性センサ・デバイス・システムの
開発動向

サイエンス&テクノロジー

第2節 形状記憶高分子イオンゲルを用いた ウェアラブル多機能無電源センサ

山梨大学 後藤 大徹 梁田 奥崎 秀典

はじめに

インターネットを通じてヒトとモノ、モノとモノが繋がる「モノのインターネット (IoT)」の実現には、安価で軽量、フレキシブルな有機エレクトロニクスが不可欠であり、そのキーデバイスはフレキシブルセンサである¹⁻⁵⁾。一般に、フレキシブルセンサはピエゾ抵抗型と静電容量型に大別され、心拍センサを用いたヘルスマonitoringやウェアラブルデバイスによる家電のリモートコントロール、靴底センサを用いた歩行センシングなどへの応用が検討されている。ピエゾ抵抗型センサはグラフェン⁶⁾やカーボンナノチューブ⁷⁾、導電性高分子⁸⁾、金属ナノワイヤー⁹⁾などの導体を変形させた際の抵抗変化に基づくため、常に電流を流す必要があることから消費電力が大きくなる等の課題がある¹⁰⁾。一方、静電容量型センサはシリコンやポリウレタンなどの誘電体を変形させた際の静電容量変化を検出するが¹¹⁾、変形方向の識別が難しくモーションセンサには不向きである。さらに、センサの年間出荷数が一兆を超えるトリリオンセンサ時代を迎え、電力供給は深刻な問題となっている。ポリフッ化ビニリデン (PVDF) のような強誘電性高分子は分子内に大きな双極子モーメントを有することから圧電性を示し、センサやアクチュエータとして研究されてきた^{12,13)}。また、摩擦帯電現象を利用した自己発電型センサは、エネルギーハーベスタの観点からも注目を集めている^{14,15)}。しかしながら、これらはスパイク状の電圧を発生することから、ヒューマンマシンインターフェイスとして人間の遅い動きや定常状態の検出は困難である。これに対し、安積らはナフィオン膜に金電極をめっきしたイオン性高分子金属複合体 (IPMC) を屈曲させると約0.3 mVの電圧が発生することを報告しており、無電源センサへの応用を検討している^{16,17)}。また、釜道らはカーボンナノチューブとイオン液体からなるバッキーゲルを用いたカンチレバーを作製している¹⁸⁾。IPMCやバッキーゲルを用いたセンサの発電メカニズムは、変形によるイオンの分極に基づ

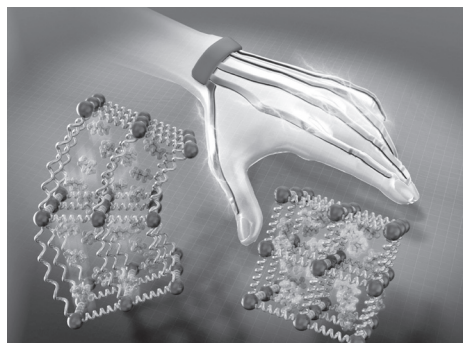


図1 形状記憶高分子イオンゲルを用いた
ウェアラブル多機能無電源センサのイメージ図

第4節 隠れ熱中症の検出に向けた 皮膚貼付型熱中症フレキシブルセンサ

東海大学 樋谷 和義

はじめに

2020年に70歳以上が人口の30%を占める超高齢化社会を迎えた日本では、2015年の熱中症による死亡者の約80%が65歳以上で、死亡する発生場所の約50%が自宅であることが、厚生労働省から報告された。ここで熱中症とは、熱射病や日射病の軽度の障害を指す。本人が気づかないところで症状が進行する、いわゆる隠れ熱中症で死に至るケースが、さらにこの問題を大きくしている。

日本では、その隠れ熱中症対策として企業だけでなく地方公共団体でも、多方面からの取り組みが行われている。例えば、温度計と湿度計を生活環境内や活動環境内に設置し、獲得した情報をLAN(Local Area Network)経由で送信して記録し、熱中症の予防につなげる取り組みが行われている。この手法は、ヒトが活動する環境を計測するので、センサの設置が容易であるという特長がある。しかし、環境変化への適応力は個人差が大きいため、環境のモニタリングでは個々人の体調への影響を知ることが困難である。また、作業員の熱中症予防として、着用型のセンサで心拍を随時計測し、解析する方法や、身に着けるセンサとしてリストバンド型センサが開発され、温度や、湿度、運動量、心拍数などをモニタリングして熱ストレスを推定するといった方法により、取り組み始められている。しかし、バイタル信号は、体表面に存在する脂肪や血液などの体組織を介して検出されるので、例えば、体表面温度では、深度温度(体温)とは異なることがよく知られており、体の外から熱中症の度合いを精度良く測定することは難しい。そのため、既存の熱中症予防によるバイタル信号の計測では、複数のセンサによる複数種類の信号センシングが要求されるので、熱中症の度合いの測定精度はほとんど議論されていないのが現状である。

隠れ熱中症の最も支配的な要因は、細胞外液の浸透圧とpHの関係からも明らかな、脱水症状である。したがって、固体電極とナノシートで構成された皮膚貼付型熱中症フレキシブルセンサの開発により、脱水症状について、より直接的かつ連続的にpHを測定できるようになれば、体表面でのpH変化と体温の連続測定により、今まで未知であったpHと温度との相関を深く理解することができ、隠れ熱中症を理解する上で学術的意義も大きい。さらに、体表面に「貼る」フレキシブル性を持ったセンサで、隠れ熱中症の進行具合を知ることができれば、高

第6節 酵素修飾特殊構造薄膜フィルムセンサによる 皮膚(アルコール) ガス計測

佐賀大学 富永 昌人

はじめに

血圧や血液の酸素濃度などを計測するバイメタルセンサは、既にスマートウォッチに導入されており、特に中高年者においては「時計」としての機能はもとより、健康管理をより主目的に装着されている方々が多い。筆者はアナログ時計を愛用しているが、最近では健康管理用ツールとしてスマートウォッチの装着を考えている。バイメタルセンサは格段の進歩を遂げたが、一方で生体から発せられる生体ガス(皮膚ガスや呼気ガス)等を計測するウェアブル「化学センサ」は実用化に至っていない。生体ガスは日々の健康状態によって変動する。皮膚ガスの場合は、図1に示すように血液由来のガスもあれば、皮膚やその表面由来のガスもある。

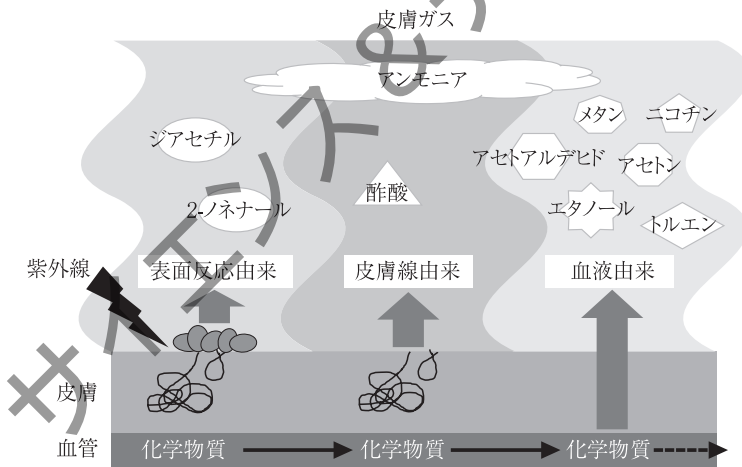


図1 皮膚ガスの発生由来

体調によってそれらのガス成分の比率が変わるであろうし、加齢によっても変わるであろう(表1)。既にご存じの方も多いと思うが、加齢臭の原因物質はノネナールである。また、アセトンガス濃度は糖尿病と、ノネナールは肺がんと関連あることが分かっている。格段の進歩を遂げたバイメタルセンサと、この生体ガスセンサを併せ持つウェアブルセンサを実用化できると、我々の日々の健康管理に十分に有用な製品となる。また、日本はもとより世界的な超高齢

第9節 高集積フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス(FHE) 技術

東北大学 福島 誉史

はじめに

リジッドな無機エレクトロニクスとフレキシブルな有機エレクトロニクスの単純比較を図1に示す。無機エレクトロニクスの主デバイス材料である単結晶半導体、特にシリコンは、50年以上前から、そして現在も半導体の主役であり、その傾向は今後も続くと思われる。この硬い半導体材料をフレキシブルエレクトロニクス用途に利用するためには、リジッドな単結晶半導体で構成されるチップをリジッドなプリント基板(PCB)に実装し、そのPCB間をフレキシブルなプリント基板(FPC)を介してインターコネクションしなければならない。このような形態はリジッド/フレックスPCBとも呼ばれ、FPC部では大きく曲げることができる。ただし、曲がる部分にチップを実装することはできない。こうしたリジッド/フレックスPCBは、現在のスマートフォンや AirPodsのような小型ウェアラブル機器など非常に多くのエレクトロニクスで採用されている¹⁾。

トランジスタの誕生から2022年で75年を迎え²⁾、トランジスタ密度は、1965年以来、ムーアの法則に従って劇的に増加している。現在では、メタル1(M1)層のハーフピッチなどが標準的な指標として使用されているが、技術ノードの微細化によって、ICの性能に多大な貢献をしてきた。フォトリソグラフィに基づくウエハレベルの微細加工戦略は、高集積なマイクロエレクトロニクスの製造を可能にしている。一方、単結晶半導体を用いたトランジスタの微細化は何年も前から停滞しているといわれているが、多結晶半導体、アモルファス半導体、有機半導体よりも、電荷キャリアの移動度に代表される電気特性は優れている。そのため、最先端のICは依然として単結晶半導体、主にシリコンが主流となっている。しかし、単結晶シリコンで構成されたトランジスタの柔軟性は、非単結晶半導体で形成された薄膜トランジスタ(TFT)よりも低い。フレキシブルな有機エレクトロニクスの低温成膜技術は、熱に弱いフレキシブル基板の利用を可能にする。例えば、FPCで広く利用されているポリイミド(PI)は350℃以上の高い耐熱性を示すが、最近では、ポリエチレンテレフタレート(PET)のような安価な材料で量産し、利用したいという要求もある。一般的にPETは120℃以上では熱的に不安定である。そのため、印刷技術に基づくシートレベルまたはロール・ツー・ロールのプロセスでは、熱履歴を慎重に管理しなければならない。したがって、高温成膜を必要とする技術を用いてフレキシブルエレクトロニクスの性能や機能を向上させることは難しい。最近、有機半導