

# ナノカーボン電極による 人間親和型高分子アクチュエータの開発

— 人工筋肉の実現を目指して —

安積 欣志

人体に装着して用いる機器である人間親和型機器は、今後、ますます必要とされると予測されており、それに必要なソフトアクチュエータとして、我々は、イオン導電性高分子をベースとした電気駆動ソフトアクチュエータの開発を進めてきた。この論文では、その中で特にナノカーボンを電極とした、低電圧駆動高分子アクチュエータの開発の経緯、設計指針と現状の技術、および今後の展開について詳細に述べる。

**キーワード:** 高分子アクチュエータ、ソフトアクチュエータ、ナノカーボン、イオン液体、ゲル

## Development of human-friendly polymeric actuators based on nano-carbon electrodes

– Toward the practical realization of artificial muscles –

Kinji ASAKA

Human-friendly machines are expected to increase in demand. To meet this demand, we have developed electrically driven soft actuators based on ionic polymers. This paper describes the development process, design guidelines, current state of R&D, and future prospects for low-voltage, polymeric actuators based on nano-carbon electrodes.

**Keywords:** Polymeric actuator, soft actuator, nano-carbon, ionic liquid, gel

### 1 背景—筋肉とソフトアクチュエータ研究

日本は人口の22.5%が65歳以上という、かつて経験したことのない高齢者社会になっており、高齢者、身障者のQOL(生活の質)を高め、社会参画を支える、医療福祉機器およびそのサービスの利用増加が予測される。それらの機器には、これまでにない使用環境に適応した安全確保、操作性の向上、小型化、軽量化、低コスト化等が求められる。そのような機器開発におけるキーテクノロジーとして世界的にソフトアクチュエータの開発が進められ、在宅でのリハビリ、介護予防を目的とした、人間に直接装着可能なリハビリ装置等の医療用デバイス、また、体に装着して触覚や音声で情報を伝えるような障害者用の情報伝達装置等、さまざまな人間親和型デバイスの開発が進められている。

これらのソフトアクチュエータの開発の目標として、世界の研究者が指針としているものが生体の筋肉である。生体

の動きの原動力は筋肉であり、よく知られているように筋肉はアクチュエータとして、極めて優れた特徴を持っている。個々のスペックで優れたアクチュエータは開発されているが、筋肉のように総合的に軽量・ソフトでパワーのあるアクチュエータは開発されていない。

このような筋肉の模倣を一つの指針として、最近、高分子を基盤材料とするソフトアクチュエータの研究が世界的に進められている<sup>[1]</sup>。特に、さまざまな電気活性のある高分子を用い、電気駆動の伸縮型のアクチュエータを開発する研究が実用化に近く、期待されている。我々、産総研では工業技術院大阪工業技術研究所の時代より、イオン導電性高分子ベースの低電圧駆動ソフトアクチュエータの研究を進めてきた。このような高分子アクチュエータは、軽量で柔軟性、成形性に優れ、しかも1Vオーダーの低電圧で大変形が得られる。したがって、前述の人間親和型機器の技術開発を推進する上で欠かせないデバイスとなる。

産業技術総合研究所 無機機能材料研究部門 〒563-8577 池田市緑丘1-8-31  
Inorganic Functional Material Research Institute, AIST 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda 563-8577, Japan E-mail: asaka-kinji@aist.go.jp

Original manuscript received June 6, 2015, Revisions received July 19, 2015, Accepted July 21, 2015

この論文では、以上のような人間親和型機器の開発に不可欠なソフトアクチュエータ技術として、我々が進めてきたナノカーボン電極を用いた電圧駆動高分子アクチュエータの開発について、どのようなシナリオで開発を進めたかを述べ、技術の現状と将来への展望について述べる。

## 2 基本となるソフトアクチュエータ技術と新しいソフトアクチュエータ開発の材料指針

産総研関西センターでは、工業技術院大阪工業技術研究所時代よりイオン導電性高分子アクチュエータの開発を進めてきた。それは、固体高分子型燃料電池等に用いられるフッ素系イオン交換樹脂に白金や金等の貴金属を無電解メッキした接合体であり、電極間に1 V程度の低電圧を加えると、カウンターイオンのプラスイオンがマイナス極側に移動することで変形するものである(図1)<sup>[2]</sup>。この技術は、1991年に高分子アクチュエータとしては、世界に先駆けて開発されたもので、この技術をもとに能動カテーテル、触覚ディスプレイ、水中マイクロロボット等、さまざまな応用研究を進めた<sup>[3]</sup>。このアクチュエータは、優れたデバイスではあったが、ソフトアクチュエータとしてさまざまなデバイスに実用化するには問題があった。主な問題は、1. 電極に金、白金等の貴金属を用いる必要があるという材料コストの問題、2. 作製法が無電解メッキであり時間がかかるという製造コストの問題、3. 電極性能の面で高性能化するには表面積が小さい(キャパシタンス(イオンを貯める能力)が小さい)こと、4. フッ素系イオン交換樹脂がイオン伝導のためには水を含んでいる必要があり、空中駆動が難しく、実用における用途が限られることであった。これらを解決するために、a) 安価な材料で、b) 簡単なプロセスで作製

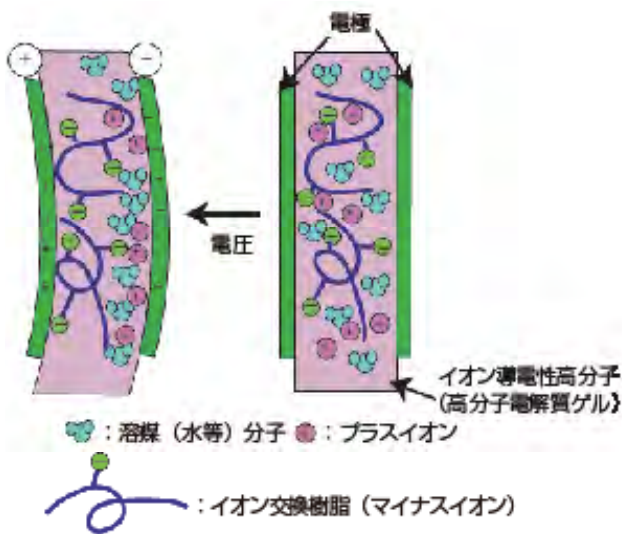


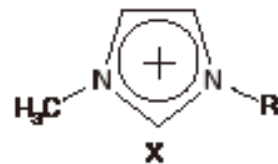
図1 イオン導電性高分子アクチュエータの構造、及び屈曲応答原理の模式図

可能であり、c) キャパシタンスの大きな電極材料を用い、d) 空中駆動可能なイオン導電性高分子を用いた、低電圧駆動ソフトアクチュエータの開発の検討を2000年頃に開始した。

## 3 ナノカーボンとイオン液体を用いた高分子アクチュエータの研究シナリオ

1999年にカーボンナノチューブ(CNT)アクチュエータに関する有名な論文がScienceに掲載されている<sup>[4]</sup>。その論文は、単層カーボンナノチューブで紙状の電極を作り、食塩水等の電解質水溶液中で対極に対して電圧を加えると、CNT電極が伸縮するというものである。これは、電圧を加えると電極を構成するCNTの表面に極性の異なるイオンが吸着し、電気二重層を構成してCNTに電荷が注入され、量子効果によりCNTを構成するグラフェンの結合状態が変化してCNTが伸縮するものと論文では説明されている。CNTの大きなヤング率と電気伝導性から、非常に優れたエネルギー密度とパワー密度のアクチュエータができることが、その論文で計算上予測された。さらに、他の論文からCNTは電気伝導性が高く<sup>[5]</sup>、機械的強度も強く<sup>[6]</sup>、また、比表面積も大きい、すなわち、キャパシタンスの大きい<sup>[7]</sup>、アクチュエータ電極として理想的なものであることが分かった。そこで、電極材料としてCNT等のナノカーボンをもとにした電極を用いることとした。

もう一つの課題である空中駆動について、含水素子表面のコーティング、あるいは、イオン交換樹脂に水の代わりに高沸点溶媒を含浸することを試みたが、種々の問題があり、実用的な素子を得ることはできなかった。一方、イオン液体と呼ばれる常温で液体状態を呈する塩(図2)の研究が、2000年頃より非常に盛んになり、デバイス研究にも用いることが可能となった。これは図2に示す有機物であ



- EMBF<sub>4</sub>: R=C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, X=BF<sub>4</sub>
- EMTFSI: R=C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, X=(CF<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>N
- EMTFS: R=C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, X=CF<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>
- BMBF<sub>4</sub>: R=C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>, X=BF<sub>4</sub>
- BMPF<sub>6</sub>: R=C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>, X=PF<sub>6</sub>
- BMTFSI: R=C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>, X=(CF<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>N

図2 高分子ゲルアクチュエータに用いられるイオン液体の構造式

り、室温において液体で、難揮発性、高導電性、安定性という特徴がある。すなわち、室温で水溶液のように揮発を気にすることなく用いることが可能となる。

上記の知見をもとに、イオン導電性高分子アクチュエータの電極にCNTを用い、電解質にイオン液体の系を用いることの検討を開始した。単層CNTは当時、入手できるものは極めて高価であったが、将来、量産化されれば、安価になることが期待された。そこで、上記の1と3の問題に対してはCNT等のナノカーボン電極を用い、2の問題に対してはCNTの分散電極の印刷につながるプロセスで成形し、4の問題に対してはイオン液体ゲルを用いることを検討した。

#### 4 バッキーゲルを用いた高分子アクチュエータ研究

当初は、それまでのイオン導電性高分子アクチュエータの改良から始め、前述のCNTの紙状の電極をフッ素系イオン交換樹脂膜に貼り付け、イオン液体を染み込ませて、アクチュエータ素子を作製する方法で研究を進めたが、あまりよい成果は得られなかった。その中で、JST ERATO 相田プロジェクト、福島孝典研究員（現、東京工業大学教授）から、2003年にバッキーゲル研究の紹介をいただき、アクチュエータへの応用の共同研究を開始した。バッキーゲルとは、福島らがCNTとイオン液体を乳鉢でねるとゲル化する現象を発見し、そのゲルをバッキーゲルと名付けたものである<sup>[8]</sup>。この現象はイオン液体のイミダゾリウムカチオンがCNTの $\pi$ 電子と結合して、CNTを架橋してゲル化する現象であることが、福島らによって見出されている<sup>[8]</sup>。我々はそのゲルをアクチュエータの電極として用いる共同研究を開始した。

CNTはすでに述べたようにアクチュエータ電極として種々の優れた性質を持っているが、問題はそれをいかにして電極として成形するかにある。CNTの材料から電極として成形する際に、CNTの個々の分子をいったん分散し、電解質と接することができる状態にした電極を作製しないと、せっかくの大きな比表面積が生かせず、イオンを貯める電極とならない。前述の紙状の電極でうまくいかなかったのも、そこに一因があると考えられた。

イオン液体を用いたCNTのバッキーゲルの技術は、このCNTの分散を解決し、しかもイオン液体自体が電解質となり、さらに電極の成形法として、印刷やキャスト等の安価で量産化につながる手法を適用することが可能であり、アクチュエータ電極の作製法として理想的と考えられた。ただしCNTとイオン液体のみのバッキーゲルでは、アクチュエータ電極としては柔らかすぎたので、これに機械的なサポートポリマーとして、イオン液体と相溶性のよいポ

リフ化ビニリデンヘキサフルオロプロピレン共重合体 (PVdF (HFP)) を加え電極とした。また、イオン導電性高分子として同様のPVdF (HFP) とイオン液体のイオンゲルを用い、図3に示すような3層構造を持つアクチュエータ素子の開発に成功した<sup>[9][10]</sup>。この素子は、当初のシナリオ通り、1. 安価になりうる材料で、2. 簡単なプロセスで作製でき、3. キャパシタンスの大きな電極材料を用い、4. 空中駆動可能なイオン導電性高分子を用いた、低電圧駆動ソフトアクチュエータとなっている。

#### 5 バッキーゲルアクチュエータの特徴と応用のシナリオ

開発したバッキーゲルアクチュエータの特徴をまとめる。作製法は極めて簡単である。CNT電極層とイオンゲル層の組成の各々を溶媒によく分散させた液を用意し、キャストして溶媒を蒸発させ、電極フィルムとイオンゲルフィルムを各々作製し、イオンゲルフィルムを電極フィルムでサンドイッチしてホットプレスすることで作製する。この手法を印刷法等の量産化手法へ応用することも可能である。

変形応答の原理は図4に示したように、電圧を加えることでイオンがそれぞれの電極に移動して、電極層が伸縮することで変形が生じる。3V以下の電圧で、図5に示すように大きな変形を示す薄膜のアクチュエータフィルムを得ることができる。すなわち、バッキーゲルアクチュエータの特徴として、1. 薄膜、2. 大変形、3. 低電圧駆動、4. 加工性がある。これらの特徴を生かし、JST相田プロとの共同研究、産総研での単独の研究で、基礎的な材料開発を進めた後、2006年～2007年より、企業との共同開発を通じて、人間親和型機器応用へ向けたアクチュエータ高性能化開発を進めることとなった。

高分子アクチュエータが必要とされる人間親和型機器

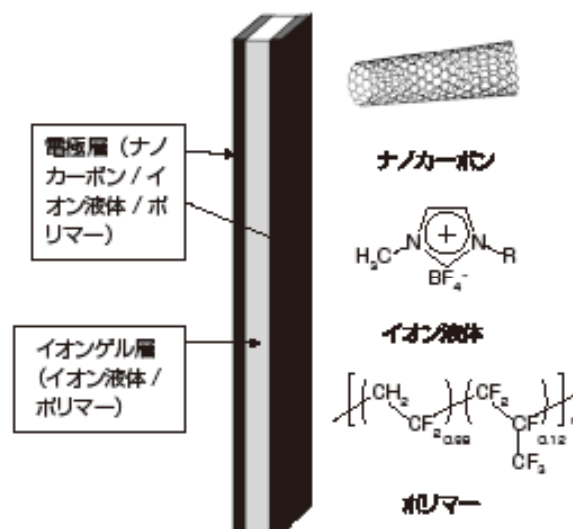


図3 バッキーゲルアクチュエータ構造模式図

は、体に装着する機械として、ソフト、軽量で低電圧駆動の高分子アクチュエータが必要とされるが、機器の大きさとして、パワーアシスト等の人並の大型機器と装着型マイクロポンプや携帯用情報提示装置等の薄型軽量機器に分けることができる。前者については、高分子アクチュエータの積層等による大型化技術が必要となるため将来の課題として位置づけ、まず、後者の高分子アクチュエータの薄型軽量機器デバイスへの応用を実現するために、アクチュエータの曲げ力、曲げ応答性を曲げ変位量とともに向上させるべく、材料開発を進めた。

## 6 バッキーゲルアクチュエータの性能向上

ここでバッキーゲルアクチュエータの性能向上のポイントについて、材料開発の視点からまとめる。すなわち、本アクチュエータの駆動原理が電極へのイオンの分極によることから、発生力と変位量の向上のためには分極を大きくする材料の開発が、また、応答速度の向上のためには分極速度を大きくする材料の開発が鍵となるためである。この基本的な考え方を踏まえて、下記の材料開発を2007年以降、企業と共同で、薄型軽量人間親和型デバイスへの応用を目指して進めた。材料開発についての詳細は文献 [11] を参照されたい。

### 6.1 ナノカーボンの分散性の改良

すでに述べたように、電極層におけるナノカーボンの分散性は、電極層の導電性、キャパシタンス、およびヤング率等の機械的特性に密接に関係し、分散性よくナノカーボ

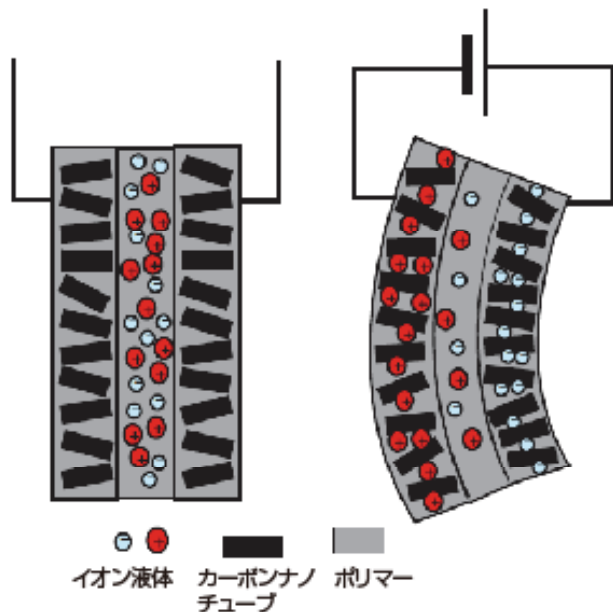


図4 バッキーゲルアクチュエータの変形応答原理

ンを多く含ませることにより、導電性、キャパシタンスの大きな電極が作製でき、アクチュエータ性能も優れたものができると考えられる。

単層カーボンナノチューブは優れた性能を持つが、分散性が悪く、電極等への成形加工をする際、単体の性能を引き出すのが難しいものと従来は考えられてきた。我々はイオン液体を分散剤として用い、各種超音波、ボールミル、ジェットミル等のさまざまな分散法を適用して、単層カーボンナノチューブを溶媒へ分散するプロセスを開発し、CNTが高濃度で分散した電極を作製することに成功した。さらに、CNTからなる電極層にカーボンブラック (CB) やカーボンナノホーン (CNH) を添加すると、アクチュエータ性能は飛躍的に向上することが分かり、これらの混合電極の最適分散条件を見出すことで優れたアクチュエータ電極を作製することに成功した。

以上のことから、電極のナノカーボンに求められる性質は、単体としての導電性、発生応力、伸縮率、比表面積、さらにヤング率等の機械的な特性だけでなく、前述した分散性、アスペクト比等の幾何学的因子も、集合体としての性質として現れる場合に重要となることが推察される。前述のCBやCNHの添加によるアクチュエータ性能の向上も、CB、CNH自身の導電性やキャパシタンスの寄与だけでなく、それらによるCNTの分散性向上や電極構造の密度増加等の幾何学因子の要因が大きく寄与しているものと推察される。

我々はこれまであくまで経験的に最適な電極組成とその分散条件を見出してきたが、今後は分散性の定量的な評価とアクチュエータ性能を関連づける研究を進め、より高性能なナノカーボン高分子アクチュエータの開発を進めたい。

### 6.2 イオン液体

ナノカーボン電極とともに本アクチュエータの性能を決定するのは、用いるイオン液体である。図4の変形モデルに

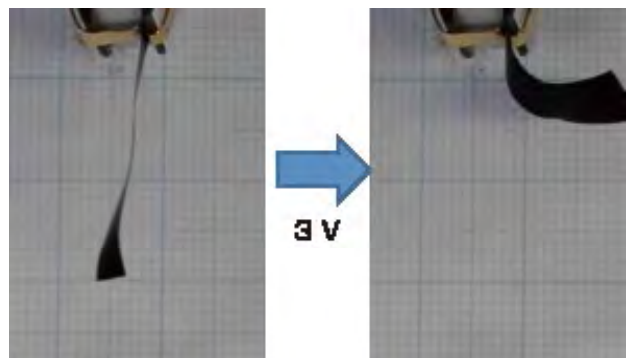


図5 バッキーゲルアクチュエータの3V印加時における変形の様子

表1 バッキーゲルおよび圧電セラミックスアクチュエータ性能比較表

アクチュエータ	加工性	駆動電圧	伸縮量	応答性	発生力
圧電セラミックス	×	100 V以上	2 μm	1 m秒	100 gf
バッキーゲル	○	3 V以下	1 mm	1 秒	3 gf

注：性能比較サイズが6 mm×6 mmのアクチュエータのデータが中心。圧電セラミックアクチュエータはバイモルフ型の文献値

に基づき、変位量についてカチオンとアニオンの大きさの差に着目、また変位速度についてはイオン導電率について着目し、電気化学デバイスによく用いられる、イミダゾリウム系のイオン液体5種類、4級アンモニウム系のイオン液体2種類を用いてアクチュエータフィルムを作製し、性能を比較することにより、最適なイオン液体について探索した。その結果、①アクチュエータの応答の速さは、イオン導電性、および電極の導電性で決まる。②変位応答の大きさが、カチオン、アニオンの大きさの差に依存する、という図4の変形モデルに基づくイオン液体選択の指針が得られた。

### 6.3 バッキーゲルアクチュエータの圧電セラミックスアクチュエータとの性能比較

市販されている電圧駆動で屈曲変形するアクチュエータとしては、圧電セラミックスのバイモルフタイプアクチュエータがよく知られている。ここでは、その圧電セラミックスアクチュエータとバッキーゲルアクチュエータの現状値を比較してみる(表1)。

加工性は、焼結・ポーリング等、複雑な工程が必要な圧電セラミックスに対して、バッキーゲルは印刷等で量産可能であり、加工性が優れていることは明らかである。アクチュエータ特性を見ると、バッキーゲルは低電圧駆動、大変形である点が、圧電セラミックスは高応答速度、大発生力の点が優れている。バッキーゲルアクチュエータは、これまで圧電セラミックスアクチュエータが対応できなかった、低電圧駆動で大変形を必要とする用途に用いることができる。また、その加工性を生かし、積層技術等を開発することで、小さな発生力をカバーすることも将来可能となると考えている。

## 7 バッキーゲルアクチュエータの軽量・薄型点字ディスプレイへの応用

薄型軽量デバイスとしていくつかの応用の検討を進めた。その中でプロトタイプを開発し、ユーザー評価までいった点字ディスプレイ開発について紹介する。

6個の点で文字を表す点字は、視覚障害者にとって利用できる唯一の文字である。現在、日本には視覚障害者が約30万人おり、その中で点字利用者は3万人といわれている。近年のデジタル情報技術の発達で、視覚障害者用

の情報伝達端末である点字ディスプレイが商品化されているが、それらはピエゾ式、あるいはソレノイド式アクチュエータが用いられており、原理的に素子サイズが大きくなってしまふ。したがって、情報端末として携帯することは難しく、また、1行表示しかできず、携帯できて、より読みやすい多行表示のデバイスの必要性を、利用者から指摘されている。

我々は、以上の背景に立ち、2009年度厚生労働省障害者保健福祉推進事業(障害者自立支援機器等研究開発プロジェクト)<sup>[12]</sup>、および2010年度同障害者自立支援機器等研究開発促進事業<sup>[13]</sup>において、アルプス電気株式会社(仙台開発センター)、慶應義塾大学自然科学研究教育センター、東京大学工学系研究科と共同で、バッキーゲル高分子アクチュエータの軽量・薄型点字ディスプレイへの応用開発を進めた。すなわち、短冊状のアクチュエータフィルムを平面状に多数構成し、各々の素子を独立に電気信号でコントロールすることにより点字を表現すれば、軽量・薄型の多行点字ディスプレイを作製することが可能となると考え、点字ディスプレイのプロトタイプ開発を進め、6文字を提示できる超薄型軽量点字ディスプレイ(図6)デモ評価機を作製した。

このデモ評価機のユーザーによる評価実験を通じて、このような薄型、軽量で多行表示可能な点字ディスプレイに対するさまざまな用途への期待が寄せられた。例えば、さまざまな家電製品や銀行等のATMでの液晶表示操作の代替、あるいは、複数行表示によるページディスプレイ、さらに点字のみならず、図や表等の表示への期待も寄せられた。また、日本国内のみならず、ヨーロッパやカナダ等海外からも問い合わせがあった。



図6 バッキーゲルアクチュエータを用いた点字ディスプレイ

評価実験では、デバイスの耐久性や信頼性、また特性のばらつき等、いくつかの問題が明らかになり、その後アクチュエータの改良と点字表現のメカニカル機構の改良を進め、薄型・軽量点字ディスプレイの実用化への目処を付けた。

## 8 ナノカーボンを用いた高分子アクチュエータ技術の現状と今後の展開

その後、点字ディスプレイのプロジェクトを通じて明らかとなったアクチュエータの耐久性、信頼性等の実用的課題は、厚労省プロジェクト終了後のNEDO助成事業による企業との共同研究により、多くの問題を解決した。その結果、さまざまな応用に対応できるスペックのナノカーボンを用いた高分子アクチュエータを開発することに成功した<sup>[4]</sup>。

今後、このアクチュエータ素子を用いた薄型軽量デバイスへの応用による実用化開発と、さらに積層技術等の大型化開発によるパワーアシスト等のロボットアクチュエータ開発を進めていきたいと考えている。

## 謝辞

この論文で紹介した内容は、以下の方々との共同研究の成果です。ここに感謝の意を表します。

福島孝典教授（東京工業大学）、相田卓三教授（東京大学）、小阪敦子氏（東京工業大学）、清原健司博士、杉野卓司博士、寺澤直弘博士、向健博士、竹内一郎氏、畠賢治博士、Don Futaba博士（以上産総研）、アルプス電気株式会社仙台研究センター、染谷隆夫教授（東京大学）、関谷毅教授（大阪大学）、中野泰志教授（慶應義塾大学）、新井哲也氏（慶應義塾大学）

また、この論文の内容は、NEDO ナノテク・先端部材実用化研究開発（2006～2008）、2009年度厚労省障害者自立支援機器等研究開発プロジェクト、2010年度厚労省障害者自立支援機器等研究開発促進事業、NEDO「低炭素社会を実現する革新的カーボンナノチューブ複合材料開発プロジェクト」（2012～2014）で支援を受けた成果の一部を含んでいます。

## 参考文献

- [1] K. Asaka and H. Okuzaki (eds.): *Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications and Future Perspectives*, Springer, Tokyo (2014).
- [2] K. Asaka and K. Oguro: Chap.5 IPMC actuator: fundamentals, *Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators* (F. Carpi and E. Smela (eds.)), Wiley, (2009).
- [3] K. Asaka and K. Oguro: Chap.6 Active microcatheter and biomedical soft devices based on IPMC actuators, *Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators*

- (F. Carpi and E. Smela (eds.)), Wiley, (2009).
- [4] R. H. Baughman, C. Cui, A. A. Zakhidov, Z. Iqbal, J. N. Barisci, G. M. Spinks, G. G. Wallace, A. Mazzoldi, D. De Rossi, A. G. Rinzler, O. Jaschinski, S. Roth and M. Kertesz: Carbon nanotube actuators, *Science*, 284 (5418), 1340–1344 (1999).
- [5] T.W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. Hiura, J. W. Bennett, H. F. Ghaemi and T. Thio: Electrical conductivity of individual carbon nanotubes, *Nature*, 382, 54–56 (1996).
- [6] M. R. Falvo, G. J. Clary, R. M. Taylor II, V. Chi, F. P. Brooks Jr, S. Washburn and R. Superfine: Bending and buckling of carbon nanotubes under large strain, *Nature*, 389, 582–584 (1997).
- [7] S. Shiraishi, H. Kurihara, K. Okabe, D. Hulicova and A. Oya: Electric double layer capacitance of highly pure single-walled carbon nanotubes (HiPco™ Buckytubes™) in propylene carbonate electrolytes, *Electrochem. Commun.*, 4 (7), 593–598 (2002).
- [8] T. Fukushima, A. Kosaka, Y. Ishimura, T. Yamamoto, T. Takigawa, N. Ishii and T. Aida: Molecular ordering of organic molten salts triggered by single-walled carbon nanotubes, *Science*, 300 (5628), 2072–2074 (2003).
- [9] 安積欣志, 福島孝典, 相田卓三, 小川敦子: 特許4038685号, 「アクチュエータ素子」(2003年12月8日出願, 2007年11月16日登録).
- [10] T. Fukushima, K. Asaka, A. Kosaka and T. Aida: Fully plastic actuator through layer-by-layer casting with ionic-liquid-based bucky gel, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 44 (16), 2410–2413 (2005).
- [11] K. Asaka, K. Mukai, T. Sugino and K. Kiyohara: Ionic electroactive polymer actuators based on nano-carbon electrodes, *Polym. Int.*, 62 (9), 1263–1270 (2013).
- [12] 厚生労働省: 平成21年度障害者自立支援機器等研究開発プロジェクト 携帯電話の両面にも装着可能な軽量で薄い(薄さ1 mm)点字デバイスの開発報告書 (2010), [http://www.mhlw.go.jp/bunya/shougaihoken/cyousajigyou/jiritsushien\\_project/seika/S04Report/Report\\_Mokuji04.htm](http://www.mhlw.go.jp/bunya/shougaihoken/cyousajigyou/jiritsushien_project/seika/S04Report/Report_Mokuji04.htm), 閲覧日 2010-04-01.
- [13] 厚生労働省: 平成22年度障害者自立支援機器等開発促進事業 “電子点字図書薄状(B5程度)の点字ディスプレイ”に関する開発 (2011), [http://www.mhlw.go.jp/bunya/shougaihoken/cyousajigyou/jiritsushienkiki/H22/S03/H22\\_seika-03.htm](http://www.mhlw.go.jp/bunya/shougaihoken/cyousajigyou/jiritsushienkiki/H22/S03/H22_seika-03.htm), 閲覧日 2011-06-01.
- [14] 産総研 (2013-08-23): 軽量で消費電力の少ないナノカーボン高分子アクチュエータを開発—カーボンナノチューブを用いて高耐久性・高保持性を実現—, [https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2013/pr20130823/pr20130823.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130823/pr20130823.html), 閲覧日 2013-08-23.

## 執筆者略歴

安積 欣志 (あさか きんじ)

1986年3月京都大学大学院理学研究科修士課程修了(化学専攻)。1990年京都大学より理学博士取得。1986年より1993年まで京都大学化学研究所教務職員。1993年に工業技術院大阪工業技術試験所(現産業技術総合研究所)入所。現在、産業技術総合研究所無機機能材料研究部門ハイブリッドアクチュエータグループ研究グループ長。信州大学、和歌山大学客員教授。専門は界面電気化学、高分子アクチュエータの開発。



## 査読者との議論

### 議論1 全体評価

コメント (田尾 博明:産業技術総合研究所)

この論文は、人工筋肉ともいわれるソフトなアクチュエータを、先端材料であるカーボンナノチューブ、イオン液体等を用いて実現したものであり、開発の背景、駆動原理、材料開発のポイント等が適切に記述されています。また、実用化の例として、点字ディスプレイへの応用が検討され、企業共同研究による作製と、評価実験が実施され、今後の改良点等に関する考察がなされています。新技術の開発から製品化、今後の展望までの一連の研究開発の流れが記述されており、特に、材料開発分野の研究者にとって参考になると考えます。

### 議論2 「人間親和性」の意味

コメント (湯元 昇:産業技術総合研究所)

タイトルにある「人間親和型」は広い概念のように思います。しかし、アクチュエータに求められる性質は、用途に応じて異なり、体外で用いるか、体内で用いるかで材料等の制限が大きく異なります。したがって、この論文で開発したアクチュエータはどのような用途を想定して対応していったのかを明確にする必要があると思います。

回答 (安積 欣志)

この論文で記載しているナノカーボン高分子アクチュエータは、低電圧駆動で、空中で駆動できることが、他のアクチュエータと比較して特徴があり、「体内で用いること」は本来想定しておりませんでしたので、「人間親和型」の意味を「人間に装着する装置」に限定して記載するよう、修正しました。

### 議論3 開発したアクチュエータの優位性

コメント (田尾 博明)

この論文で開発したアクチュエータの性能等に関して定量的な記述、特に従来の材料、あるいは世界のベンチマークとなる材料との比較が記述されておらず、技術の優位性が読者に伝えられていないと考えられます。

回答 (安積 欣志)

表1に、市販され広く用いられている材料として圧電セラミックスのバイモルフアクチュエータとの比較表を加え、この論文にも本アクチュエータの優位性について記述しました。

### 議論4 性能向上のプロセス

質問 (田尾 博明)

バッキーゲルアクチュエータの性能向上において、さまざまな実験を行って、最終的に有用な材料開発やその指針の策定に成功していますが、これらは、実験を試行錯誤的に重ねるなかで、経験的に見出した結論なのか、それともイオン電導性や分子サイズが効くという仮説を立てて、それを実証するために物性の異なるイオン液体を選んで実験を行い、仮説通りの結果が得られたのでしょうか？

回答 (安積 欣志)

最適なイオン液体については、図4の変形モデルに基づいて仮説を立てて探索しました。具体的には、変位量についてカチオンとアニオンの大きさの差に着目し、また変位速度についてはイオン導電率について着目して検討しました。この検討過程をこの論文に追加しました。

### 議論5 性能向上の理由

質問 (田尾 博明)

カーボンブラックやカーボンナノホーンを添加すると性能が飛躍的に向上するのは何故でしょうか？

回答 (安積 欣志)

電極のナノカーボンに求められる性質は、単体としての導電性、発生応力、伸縮率、比表面積、さらにヤング率等の機械的な特性だけでなく、分散性、アスペクト比等の幾何学的因子も、集合体としての性質として現れる場合に重要となると推察しています。カーボンブラックやカーボンナノホーンの添加によるアクチュエータ性能の向上も、それら自身の導電性やキャパシタンスの寄与だけでなく、それらによるCNTの分散性向上や電極構造の密度増加等の幾何学因子の要因が大きく寄与しているものと推察しています。このような推論をこの論文に追加しました。