



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Development of Photocured Liquid-Crystalline Electrolytes with Ion-Transport Pathways and their Application to Electroactive Actuators [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	呉, 哲豪
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第15634号
Issue Date	2023-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90781
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	WU_Che-Hao_review.pdf, 審査の要旨



学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理学） 氏名 呉 哲豪

	主査	教授	澤村 正也
	副査	教授	向井 紳
審査担当者	副査	客員教授	吉尾 正史
	副査	客員教授	増田 卓也
	副査	客員教授	白幡 直人

学 位 論 文 題 名

Development of Photocured Liquid-Crystalline Electrolytes with Ion-Transport Pathways
and their Application to Electroactive Actuators
(イオン輸送パスを有する光硬化液晶電解質の開発と電気活性アクチュエータへの応用)

デジタル化による便利さや効率性が進化した中で、人体・感覚情報を活用したコミュニケーションを可能にするデジタル技術へのニーズが加速してきている。中でも、人が簡単に装着して、よりリアルさを感じられる軽量かつ柔軟なバーチャル・リアリティ振動素子の開発が求められている。

イオン導電型高分子アクチュエータは、数ボルトの電圧印加によって、生き物のように柔らかく静かに高速で振動できることから、触覚素子材料として期待されている。イオン伝導性高分子を二枚の電極層で挟んだ素子に電圧を加えると、カチオンとアニオンが対向電極に向かって移動し、電気二重層を形成する。イオンサイズおよび輸率の差によって、電極界面での体積歪が生じ屈曲変形が起こる。高分子のイオン伝導性および機械的強度は、素子の変形量、速度、出力を決定する重要な要素である。従来、プロトン伝導性スルホン酸系ポリマーやイオンゲルを用いたアクチュエータが開発されてきたが、電解液リークに伴う素子劣化や軟材料での高出力化が困難などの問題点があった。

本論文は、超分子化学的手法から、イオン拡散を高めるナノ構造を導入した光架橋液晶性高分子膜を設計し、素子の高性能化を目指した研究に関するもので、以下の6章から構成される。

第1章では、高分子アクチュエータの研究背景が示されており、本研究の目的と課題解決に資する液晶高分子の設計指針が簡潔に述べられている。

第2章では、世界初のイオン伝導液晶アクチュエータに関する研究成果が示されている。光重合性基を有する扇形構造のイオン性カラムナー液晶が合成され、イオン液体との複合化および紫外線ラジカル重合によって、一次元イオンチャンネル構造を固定化した高分子フィルムが作製されている。ポリチオフェン系フレキシブル電極と液晶高分子膜の圧着により、大気下において安定駆動するアクチュエータ（室温イオン伝導度 10^{-6} S cm $^{-1}$, 2 V, 1 Hz で 0.20 % 歪, 直流 1V で 0.28 mN 出力）が開発されている。同組成のアモルファス高分子フィルムを用いた素子と比べて、液晶高分子素子が 3.5 倍の変形速度および 2 倍の出力を発揮することを明示したことは、当該分野の発展に資する重要成果である。

第3章では、生分解性を有する二次元イオン伝導パス構造を形成した液晶高分子膜の作製と素子特性に関する成果が示されている。生体由来の光重合性イタコン酸エステルを骨格とする室温で液晶性を示すイオン性分子が合成されている。この分子とイオン液体、架橋剤とを複合化し、センチメートルレベルの液晶分子配向、その場重合により、強靱なイオン伝導性高分子フィルム（室温イオン伝導度 10^{-5} S cm $^{-1}$ ）が作製できることが示されている。また、土中埋没試験によって生分解性が実証されている。この材料を用いた素子は、広い周波数応答性（0.01–20 Hz）と高い出力性（0.7 mN）を兼備し、大気下で安定駆動することが示されている。

第4章では、カラム構造の周りに三次元的に連結したイオン伝導パス構造を有する光架橋型液晶高分子フィルムの構築とそのアクチュエータ機能およびプロトタイプの触覚素子、微小鉗子、クラゲ模倣ロボットの開発に関する研究成果が示されている。光重合性のジエン基を有する楔型構造の逆カラムナー液晶分子が合成されている。イオン液体と複合化し、重合固定化することで、室温で 10^{-4} S cm $^{-1}$ の高イオン伝導性を示す高分子フィルムの作製に成功している。液晶配向によらない等方的イオン伝導性、X 線回折、電子線回折を解析し、三次元的に連結したイオン伝導パス構造の形成を証明

している。このフィルムを用いる素子では、印加電圧を変えることで出力を段階的に制御でき最大で 1.2 mN 出力が得られること、広い周波数応答性 (0.01–30 Hz) を示すことが明示され、素子性能に関して数式を用いて理論的に考察されている。

第 5 章では、触覚用途に必要な周波数応答性 (0–100 Hz) と出力性 (2.5 mN 以上) を兼備するアクチュエータの創出に向けて、三次元的に連結したイオン伝導パス構造を有し、高力学弾性を示すミセルキュービック液晶性高分子の開発とアクチュエータ素子評価についての研究成果が述べられている。70 Hz 高速応答性に加え、史上最高の 40 mN 出力を達成したことは、材料科学に革命をもたらす破格の成果と言える。

第 6 章では、研究成果のまとめと位置づけ、並びに触覚素子開発に向けた将来展望が述べられている。

これを要するに、著者は、光架橋液晶高分子アクチュエータの開発について、高効率な電気–力学変換実現の新知見を得たものであり、マテリアル革新に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。