

進化する人工筋肉

—ロボット、人工臓器、医療まで—

平井利博
信州大学繊維学部 教授／繊維学部長

国際科学技術財団講演 2008/7/22
泉ガーデン7F コンファレンスセンター 「ROOM1」東京都港区六本木1-6-1

はじめに

- 「人工筋肉」と聴くと何を連想しますか？おそらく、スターウォーズにも出てくる筋肉代替機能を持つパワーアシスト的なものでしょう。サイボーグとしての機械的な駆動機構を連想する方が多いと思います。もちろん、この分野は実用化が始まっていると言って良いでしょう。そして、日本のロボット技術は世界を先導するレベルにあり、工業用ロボットで世界をリードしていると言えるでしょう。私たちの身近にもアシモやアイボなどのようにこれらの技術が実用レベルにあることを実感させる状況が生まれています。
- 人工筋肉という言葉は、幹細胞を利用した再生医療工学による“本物の筋肉”を人工的に作るという意味と捉えられることがあります。今日ここで紹介するのは実用化も遠くないと期待しているロボットにも使える柔軟な人工筋肉素材開発への取り組みです。

人工筋肉とは

- 産業ロボットから, ヒューマノイドへ
 - 油圧シリンダー型、ニューモニック型、ステップモータ型
- 駆動素子の様々
 - モーター、形状記憶合金、電歪素子、分子素子
- 金属機械から、分子機械へ
 - マイクロ化、極微細化に対応、究極的には分子機械へ
- 人工物機械から、生物機械へ
 - 機構の集積で機械を構築することが困難となる場合、化学的機能を含む場合、生体模倣の究極的な到達点は生物機械

今までとこれから

- 今までの科学技術者による取組みの中で、SFを含めると人工筋肉の研究は長い歴史を持っています。
- 現実味のある具体的な取組みが始まったのは比較的新しいと言えます。
- 構想が実現されるには複合的な周辺の各種技術が集積することが必要
- 一つの発見がデバイスとなって私たちの日常に入り込むには数多くの技術の進歩とそれらを必要とする状況が必要

今日の話

- どういったものが人工筋肉を目指して開発されつつあるかを紹介
- 人工筋肉と駆動素子
 - 機械工学的な駆動システムが最も現実味のある大きなパワーを出すことのできるもの
 - 今日の中心的な課題である柔軟な有機材料を用いる駆動デバイスへの試み
 - 最後に、この話題の延長線上で目指すものとして生体中で駆動することできる本物の“人工筋肉”へのロードマップ

柔軟な有機材料から人工筋肉への 最近の取組み

- 特に、従来有効と考えられてこなかった汎用の素材も省エネルギー駆動材料として利用可能であることが明らかとなり、新たな駆動素子としての領域を拓きつつあります。
 - 駆動を引き起こす引金として、あるいは駆動エネルギーの形態も様々なものが検討されています。
- 1) 化学的なエネルギー、
濃度差(pH差を含む)や溶媒の種類を変えること(貧溶媒と良溶媒の交換など)を利用する方法です。
 - 2) 電氣的なエネルギー、
直流電圧の印加や、交流電場の印加や周波数の変化などを含んでいます。
 - 3) 磁氣的なエネルギー、
磁場の印加による駆動制御を指しています。
 - 4) 熱的なエネルギーなどです。
直接温度を与えることや、電氣的手法などで温度変化を誘起して駆動することを指しています。
 - 5) 生物の筋肉を分子レベルで再構築して駆動素子を作ろうとする試み
原理的に可能であることが確認されていますが、具体的な素子の作製はこれからです。この場合耐久性が最大の課題です。

自律応答材料(人工筋肉材料としての)が 期待されている分野とその可能性

1. マイクロマシン分野

新規医用工学分野

マイクロマニピュレータ

マイクロセンサー

可変焦点マイクロレンズ

2. マイクロ・ラボラトリー

マイクロフローポンプ・バルブ

コンビナトリアル化学

超高効率ドラッグ開発

3. 医用工学機材

床ずれ防止ベッド、筋肉代替機能

4. インテリジェント機能衣料

ゲルの駆動に関する従来の成果とその概要

- Kachalsky: 溶媒置換
- 長田: 高分子電解質・電場(水中)
- 田中: 溶媒置換、温度(体積相転移)
- 鈴木: 膨潤・脱膨潤を利用するゲルの駆動
- 滋賀: 高分子電解質・電場(水中)
- 入江: 機能性色素・光(水中)
- Ottero: 導電性ポリマー・電場(水中)
- 小黒: 高分子電解質・電場(水分含有)
- 金籐: 導電性ポリマー・電場(水中)
- 平井: 非イオン性ゲル／エラストマー・電場(空気中)、磁性流体ゲル・磁場(空気中)
- 奥崎: 導電性高分子を用いる駆動
- 渡辺: イオン液体含有高分子を用いる駆動
- Yoshi, Kornbluh, Zhang, De Rossi, Shahinpoor, Wallace, Zrinyi, . . .

ゲルの膨潤収縮タイプー伸縮を利用

- 溶媒含有率の大きな高弾性ゲルによって、人工筋肉への応用が可能となった
 - 高弾性PVAヒドロゲル
 - PVA-PAA(ポリアクリル酸)ゲル
 - 部分加水分解PAN繊維
- 溶媒中での膨潤・脱膨潤など大きな体積変化を伴う変形を利用した駆動法
 - 拡散過程が律速となるため、多孔化、繊維化して表面積を大きくするなどの制御
 - 架橋点間距離の制御などにより溶媒の拡散(あるいはポリマー鎖の拡散)制御する必要あり。

ゲルの膨潤収縮タイプー屈曲を利用

- 水和水の移動による圧力の非対称分布
 - 水とイオンの移動と非対称分布を誘起するための電場印加（低電場駆動）
 - 水和水の非対称分布は定電場下では緩和するため、歪みの長時間保持は困難
 - 水と状態の非対称性を誘起するための非対称環境
 - 非対称環境を一定に保持することはユニモルフでは困難
 - 対象となる材料
 - PVA-PAAヒドロゲル
 - PAMPSヒドロゲル
 - PAM-PAAヒドロゲル

溶媒の吸脱着タイプ

伸縮・屈曲を利用

- ポリピロール、ポリアニリンなどでは薄膜や繊維にすることで効果的に気体の吸脱着を制御できる
 - －吸脱着による伸縮を活用するもの
 - －気体などの非対称な吸着による屈曲を活用

磁場を利用したゲルの変形

- 磁性体を含有するゲルの磁場による変形を活用
- 超常磁性を示す磁性流体を固定したゲルは磁場の印加を止めると歪みを解消する
 - 磁場の印加で、常磁性体から強磁性体に変化して応答。磁場を除くと、瞬時に常磁性体に戻る。
- 超常磁性体が持つ外部磁場への特徴的な応答を活用する
 - 磁歪特性など
 - 転移現象も

光を利用した変形

- 光応答性分子(アゾ色素など)の構造変化を利用した駆動
 - ポリマー鎖にこれらを固定したことで変形を増加
 - マイクロ繊維化などが有効
- 光誘起イオン化等との連携により、変形をより顕著にするなどの工夫

熱を利用した変形

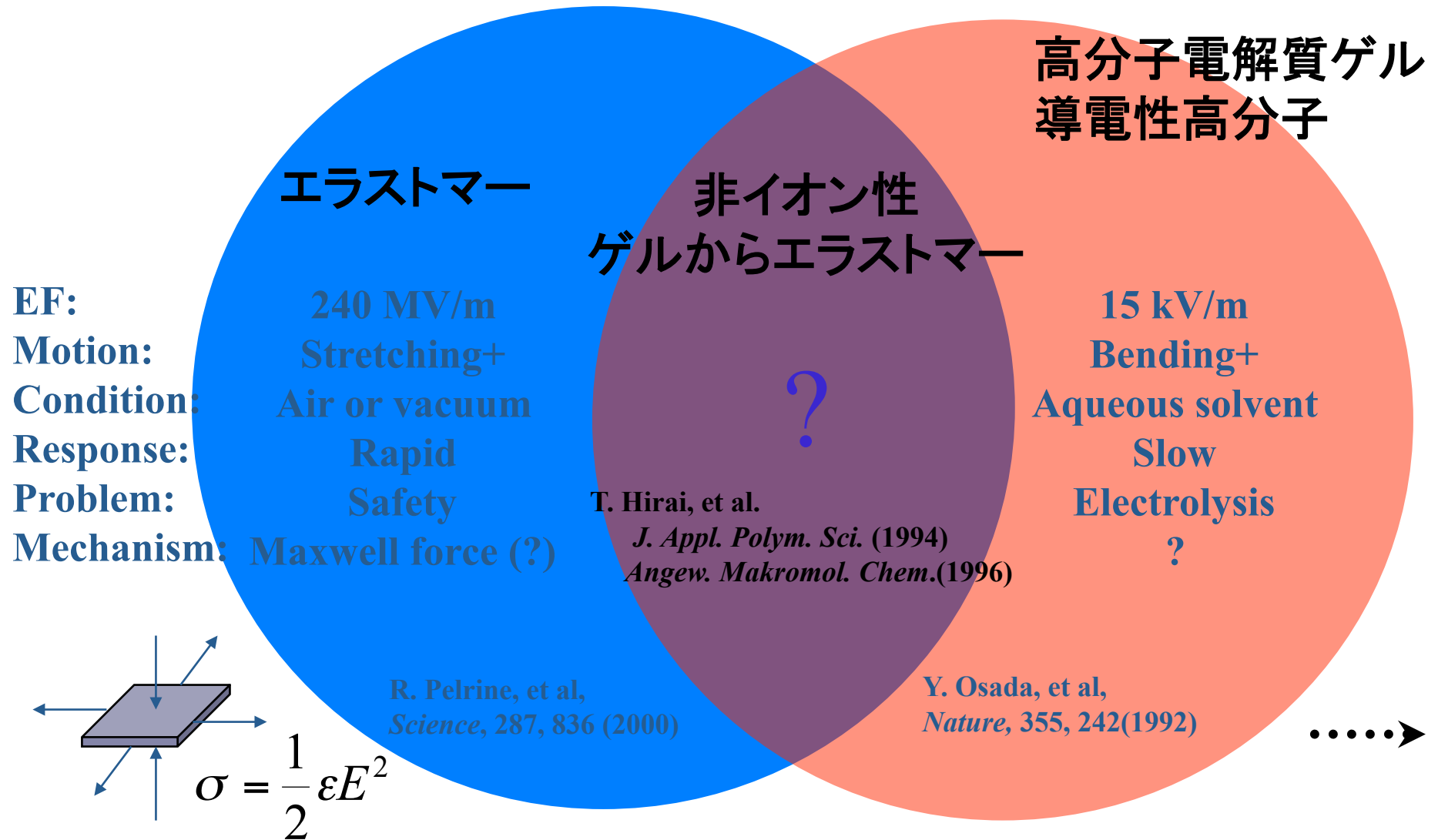
- イオン性のゲルに電場を印加した際に発生する熱による膨張・収縮を利用する駆動法
 - 薄膜、繊維などの形状に加工することで応答速度を確保できる
 - 一般に媒質の共存下で駆動するため媒質の拡散が律速となる
 - 熱の拡散は、エネルギー効率の面からは損失となる

電場駆動の利点と展望

工学的にもっとも利用しやすい駆動法

- イオン性の高分子などでは定電場での駆動が可能となるため微細化によるマイクロデバイスとして期待できる。
 - イオン液体との組合せは難点を克服するためのその一例
- 誘電性高分子は、電場駆動しないと考えられていたために、詳細な検討が行なわれていない。
 - 実際には、巨大な歪みを高速で、高エネルギー効率で発生するため、新たな電場駆動素材として期待できる
 - 駆動の機構はいくつかに分類できる
 - 分子設計により新たな分野に展開する可能性を持つ

電場駆動の現状に関するまとめ



誘電性柔軟高分子材料の電場による駆動

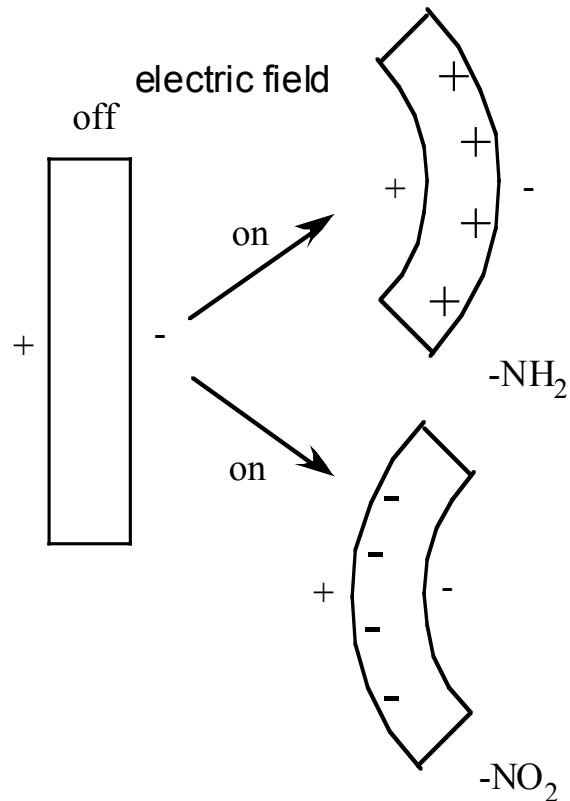
	高度に膨潤したゲル (Solvent Flow is allowed)	可塑化高分子 (Plasticizer flow is restricted)	エラストマー (Solvent is Not contained)	結晶性高分子フィルム (Solid polymer film with low dielectricity)
変形	伸縮 8% at 250V/mm	(伸縮)	伸縮	
	屈曲	折曲り	屈曲	屈曲
	クローリング	クリーピング(アメーバの偽足様変形)		振動
特性	応答: 90°/60 ms 歪み $\propto \varepsilon E^2$ 電流: 10 μ A 電場: 500 V/mm	応答: 100°/30 ms 歪み $\propto \varepsilon E^2$ 電流: 10nA 電場: 1000 V/mm	応答: 100°/60ms 歪み $\propto \varepsilon E^2$ 電流: 10 μ A 電場: 1000 V/mm	応答: 10ms 歪み $\propto \varepsilon E^2$ 電流: 10nA 電場: 1000 V/mm
駆動機構	電荷注入, 溶媒牽引, 電極への吸着	電荷注入, 高分子鎖を伴うエレクトロレオロジカル変形、電極への吸着,	空間電荷の非対称分布	電荷の表面帯電
応用分野	スイッチデバイス, バルブ, ポンプ, 人工瞳, 曲率可変鏡	スイッチデバイス、焦点可変レンズ(人工瞳)、フィンガーマニピュレーター、駆動素子	スイッチデバイス、駆動素子、伸縮型人工筋	振動子、スイッチ

エラストマーの電場変形

- 伸縮 : Maxwell forceによる変形 (SRIが中心)
- 屈曲 : 空間電荷の非対称分布 (Hiraiら)
 - 屈曲の制御
 - カチオン化する置換基を持つ場合
 - アニオン化する置換基を持つ場合
 - 架橋点間距離が及ぼす効果
 - その他の重要な因子

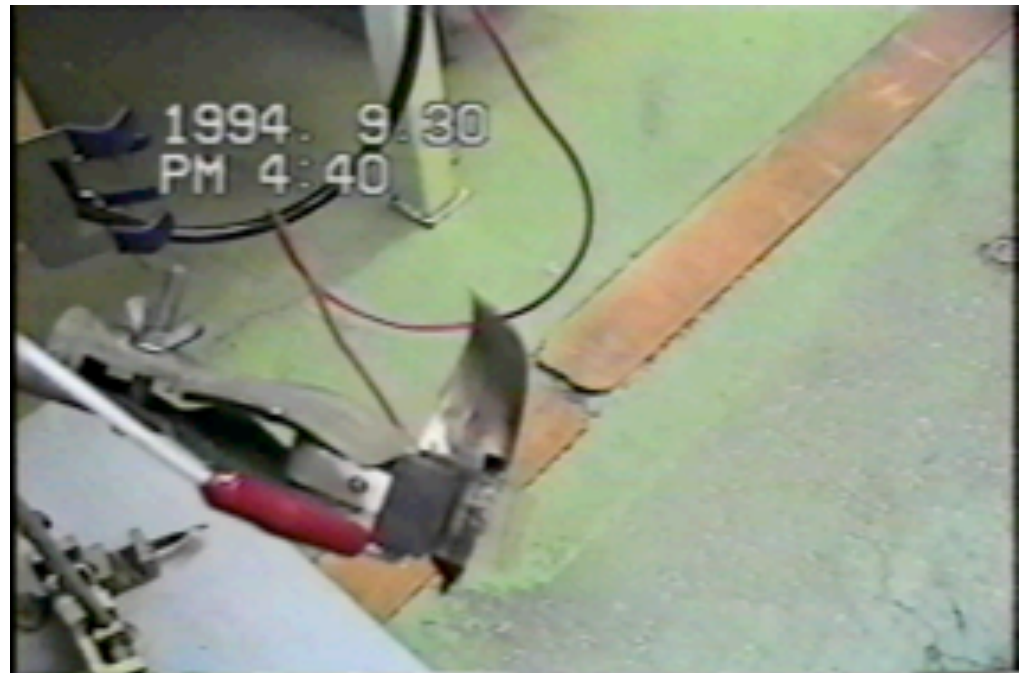
エラストマーの屈曲

空間電荷分布の制御による変形



Space charge distribution can be controlled by varying the additives and/or chemical structure of the elastomer itself.

Space charge dependent bending deformation of polyurethane elastomer.



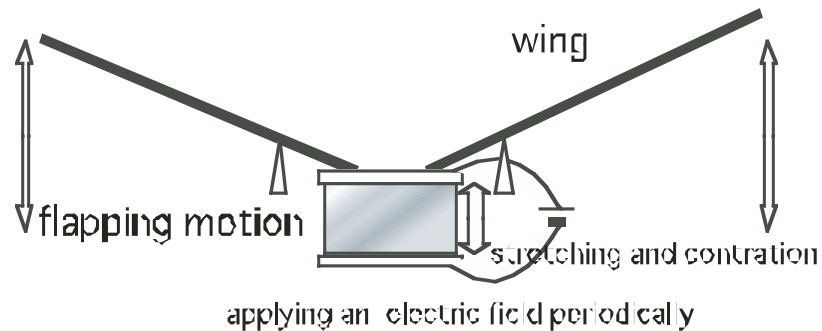
誘電性溶媒で膨潤した 誘電性高分子ゲル

- 誘電体であるので高分子電解質に較べて高電場が必要
- 溶媒含有量が大きいので、高分子の果たす役割はどの程度
- 溶媒のリークは避けられるか
- そもそも変形する理由は何か
- 応力はどの程度とれるか

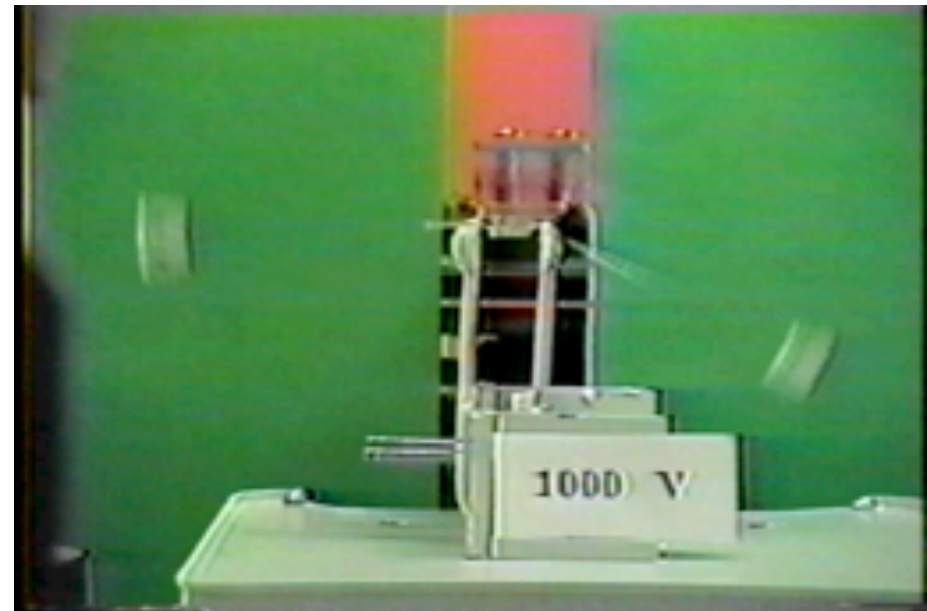
羽ばたく高分子ゲル

非イオン性ゲルの電場による伸縮

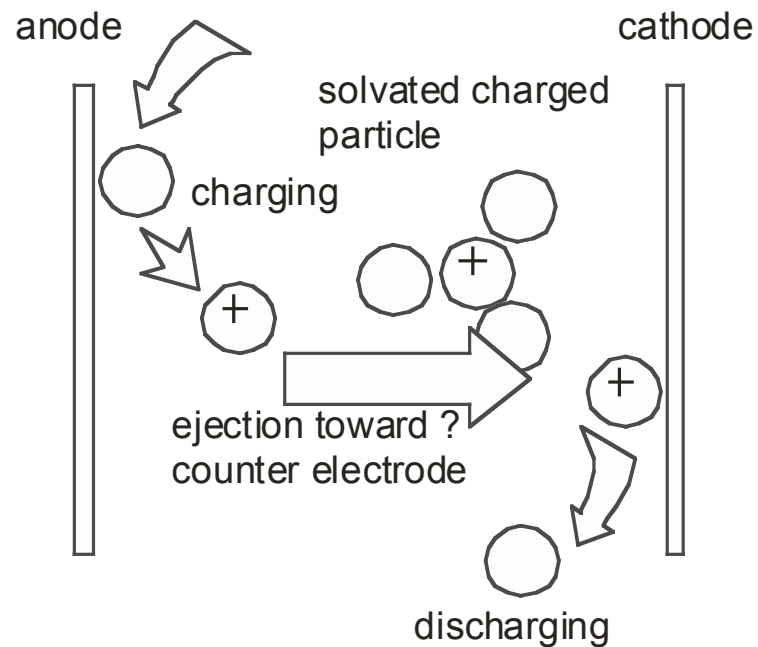
**Maxwell応力による伸縮以外の過程が
大きな貢献をしている。**



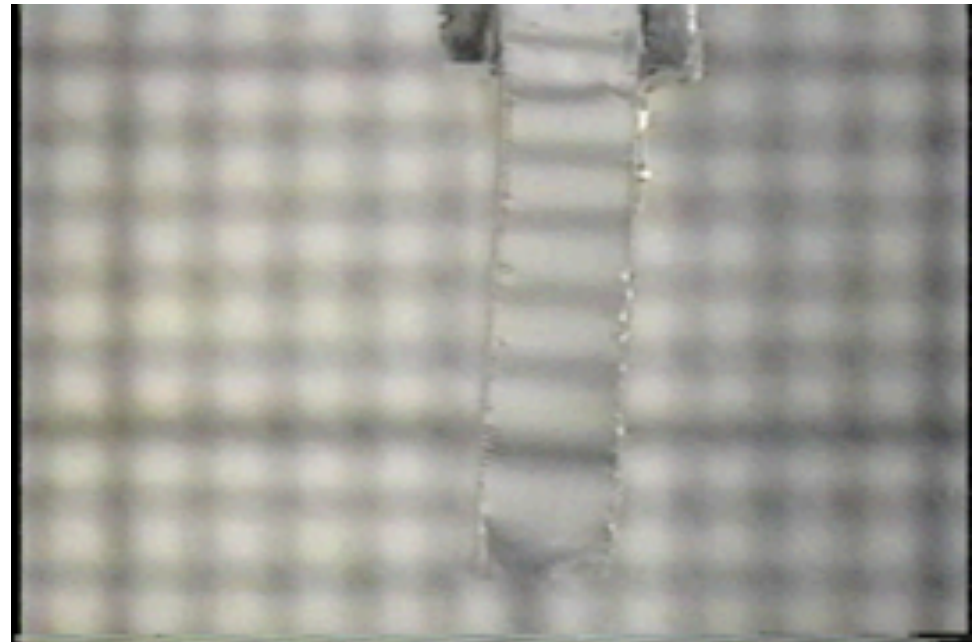
Flapping motion in air induced by stretching and contraction of polymer gel.
For instance, polyvinyl alcohol gel swollen with DMSO shows the motion by applying an electric field.
Presence of water should be avoided.



非イオン性膨潤ゲルでの イオンドラッグによる屈曲

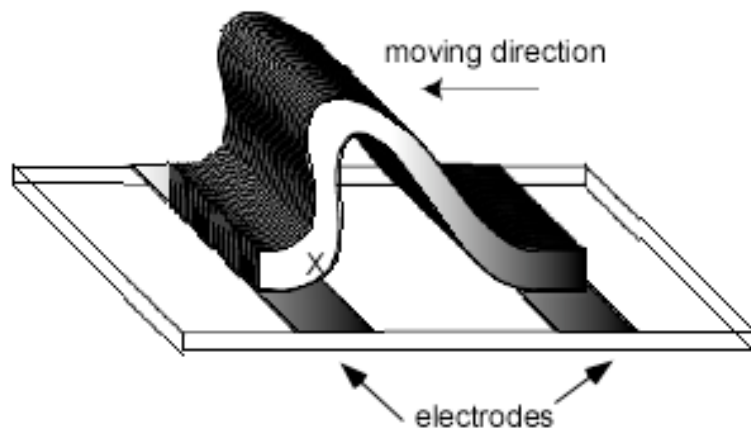


An Illustrative explanation of "Ion Drag".
Solent is charged on an electrode, and is ejected toward a counter electrode. Charged solvent is solvated. On the counter electrode, charged solvent is discharged. ?
Image shows the case of dimethyl sulphoxide. In the case of phthalates, the situation is opposite.

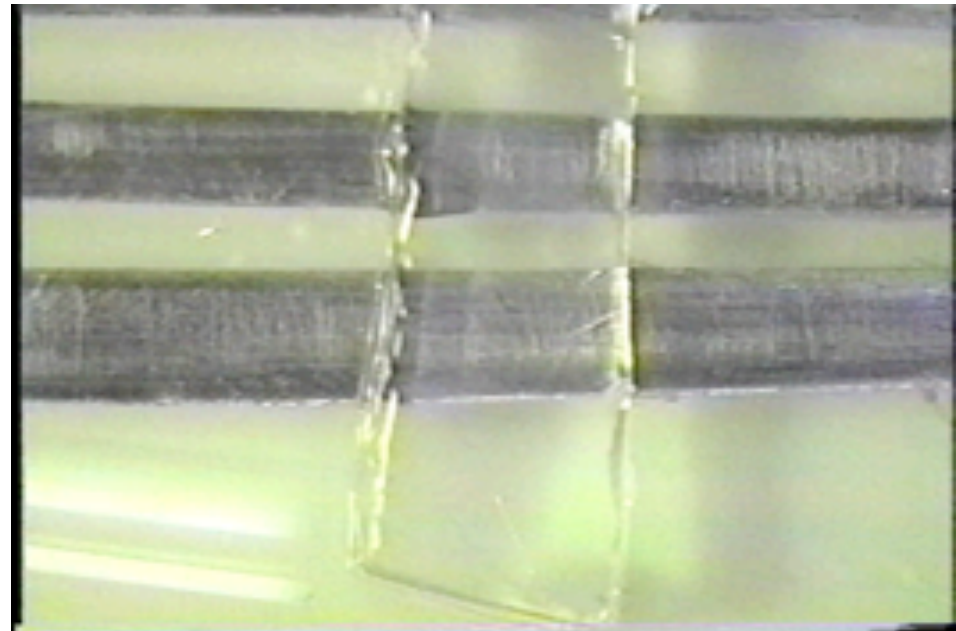


非イオン性膨潤ゲルでのイオンドラッグによるクローリング変形

電極接触面からの電荷注入と対極面ゲル内部(図中X印)での圧力増加による変形がクローリングを誘起



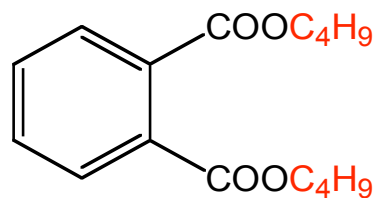
Crawling motion of a gel that was placed on a glass plate on which electrodes are arrayed. The solvent was charged on a right electrode migrate toward the another electrode and accumulated at the position marked by "x".



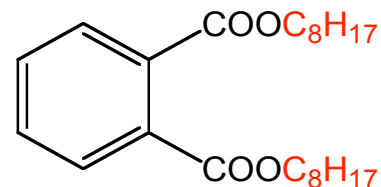
可塑化された結晶性高分子

- 可塑剤と溶媒の違い
 - 膨潤に用いられた溶媒の挙動
 - 可塑剤の挙動
- 可塑化に適する高分子
 - 物理架橋を形成しやすいこと
 - 分子鎖間の長周期構造を保持しやすいこと
 - 大量の可塑剤でも流動化しにくいこと
- イオン液体への期待
 - 不揮発性であること、新たな可塑剤としての期待
 - イオン対の寸法上の非対称性が顕著であること

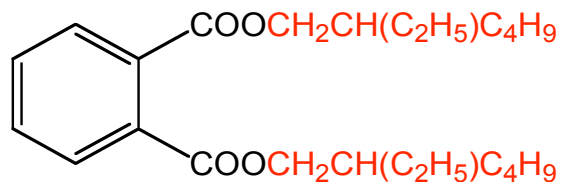
Plasticizers investigated



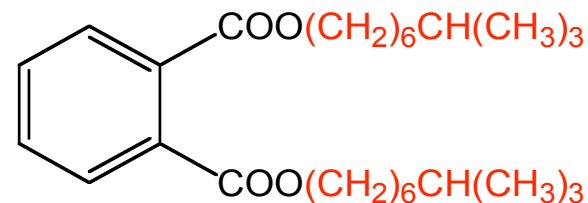
Di-n-butyl-Phthalate (DBP)



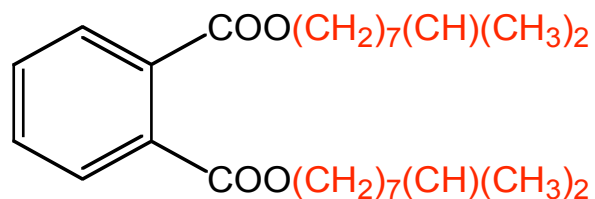
Di-n-octyl Phthalate (DnOP)



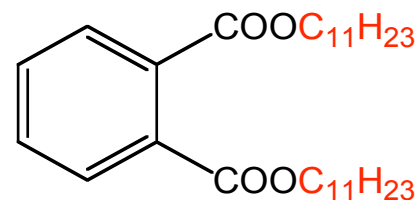
Dioctyl Phthalate (DOP)



Diisononyl Phthalate (DINP)



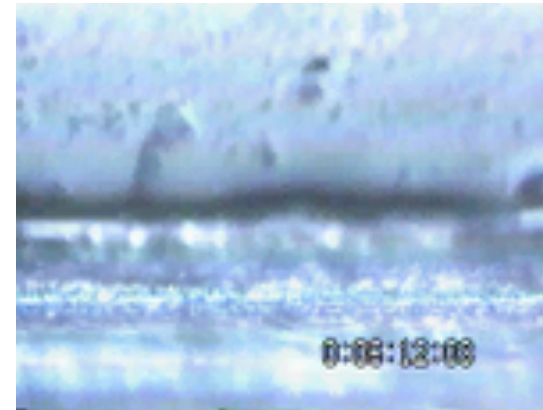
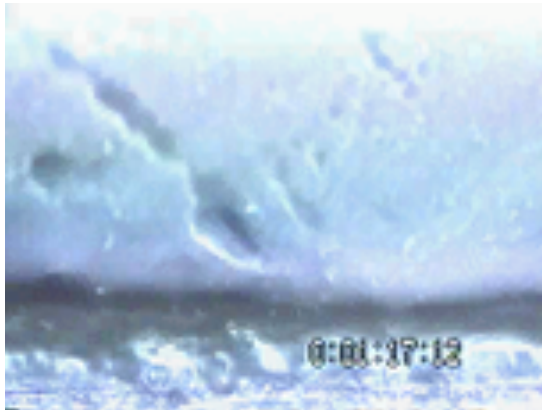
Diisodecyl phthalate (DIDP)



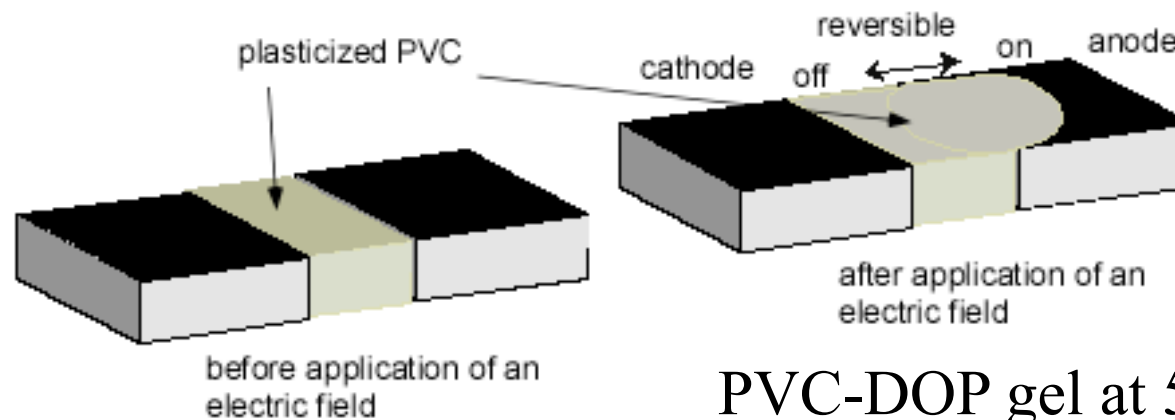
Diundecyl phthalate (DUP)

クリープ変形

Over view



Electrode (anode) side

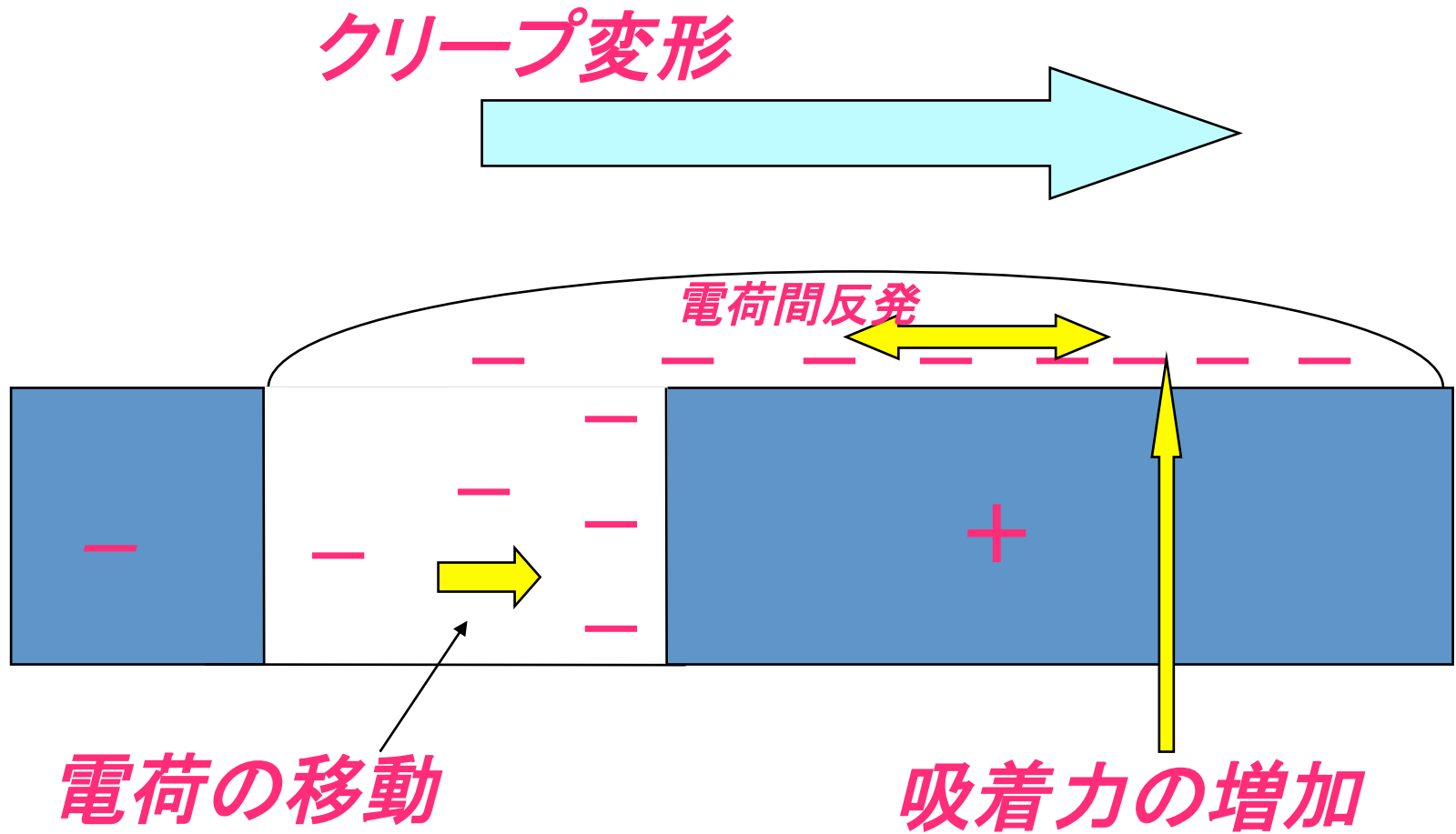


PVC-DOP gel at 500 V/mm

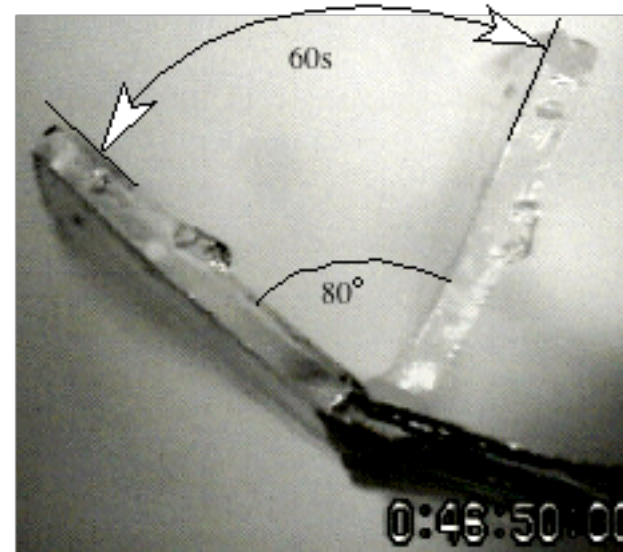
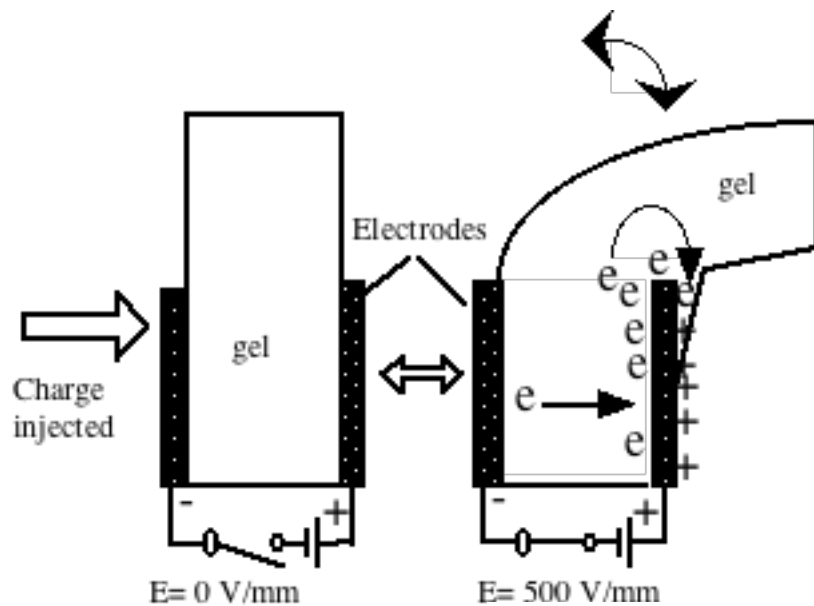
Amoeba-like pseudopodial creep deformation induced in plasticized PVC by applying an electric field.

電場によるアメーバの偽足様変形”エレクトロタクシス”

クリープ変形の機構



折曲り変形



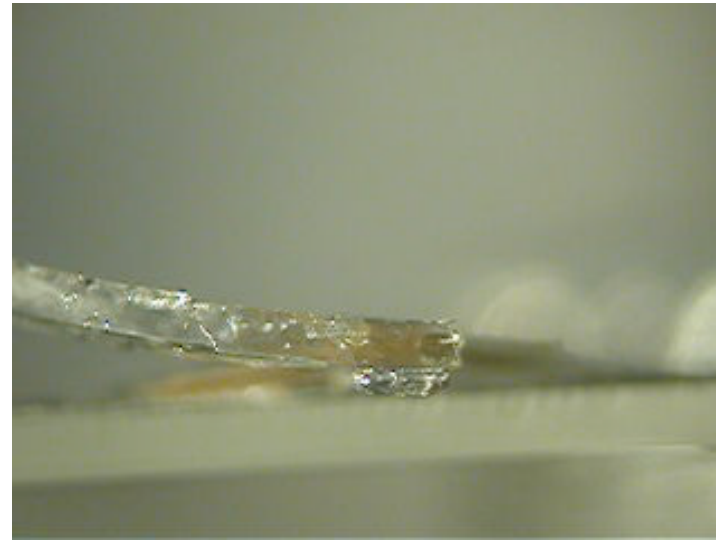
電流 < 0.1mA

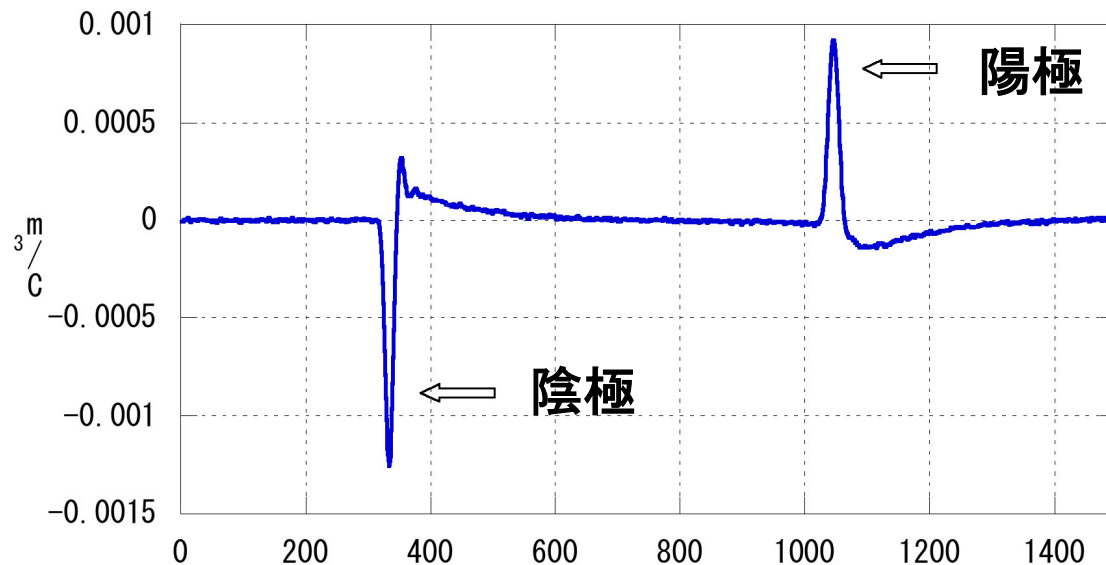
The bending motion of PVC-DOP gel induced by an electric field of 500 V/mm. The overlapped image was composed of the very beginning picture and another one taken after 60s.

歪みは 400%を超える

Creep induced bending

- **Bending like a joint**
- **Swift bending is possible.**

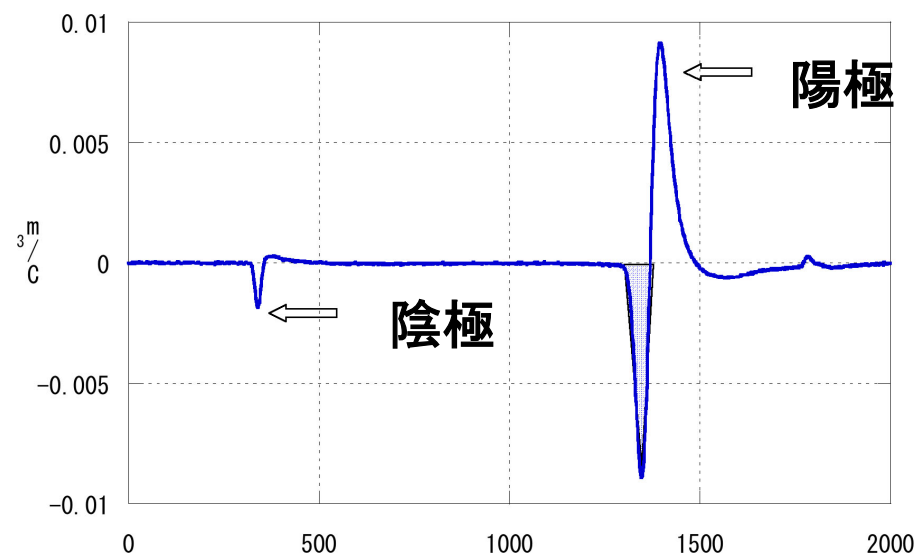




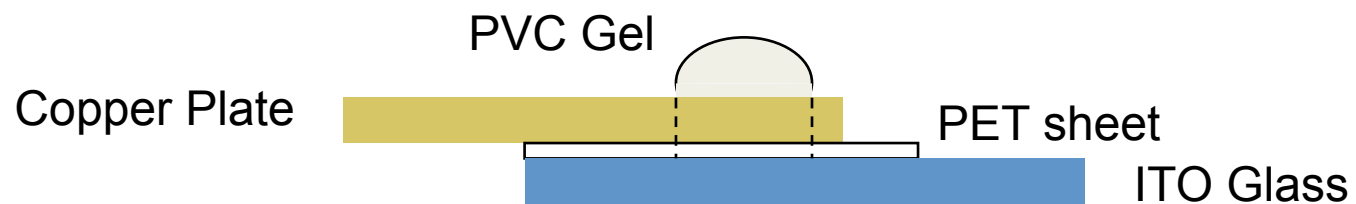
PMMAではポリマー内に空間電荷の蓄積がほとんど見られない

可塑化PVCでは、ポリマー内に空間電荷の蓄積と非対称な分布が現れる

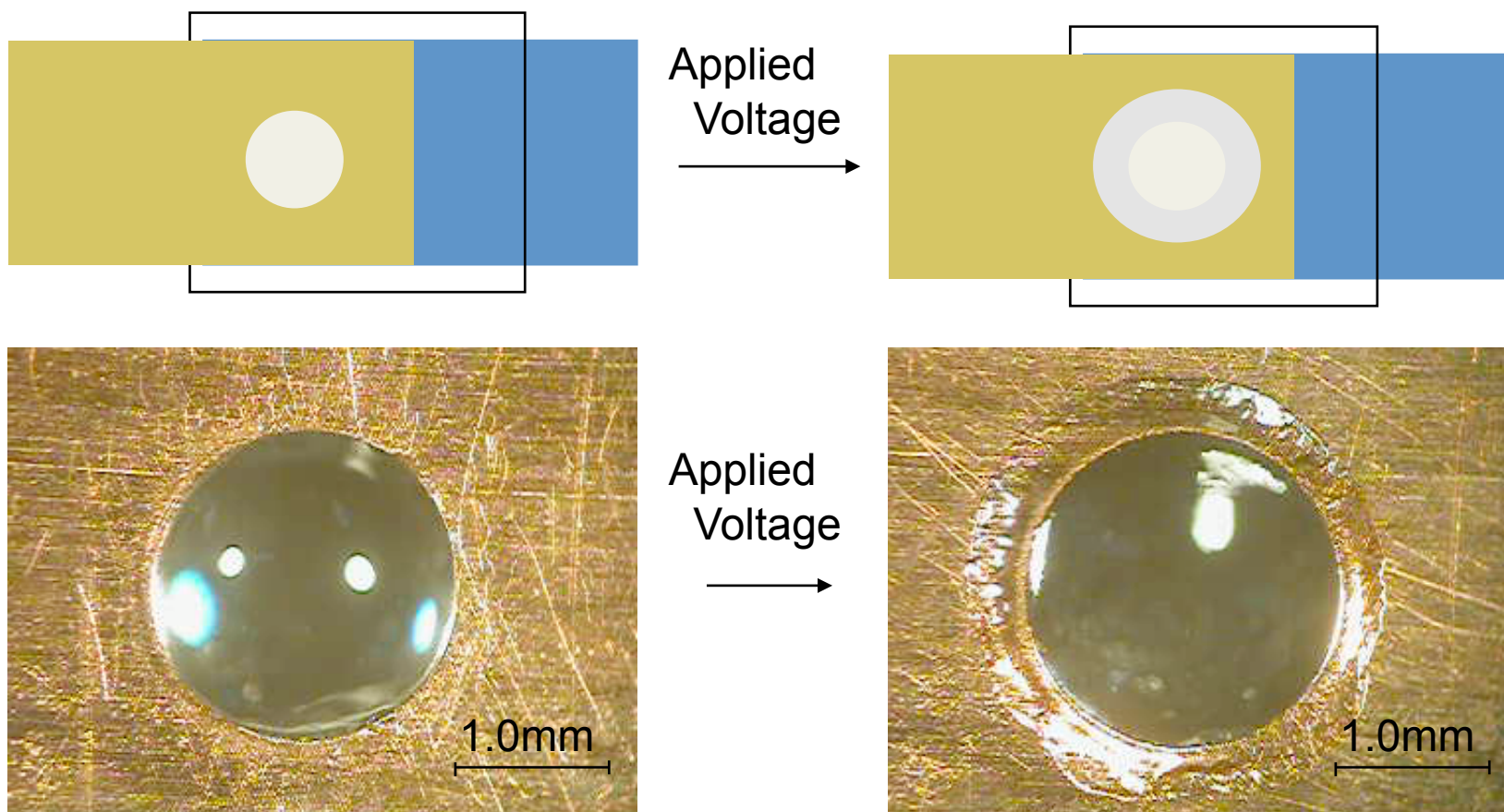
一般に、このような非対称な空間電荷分布が現れる



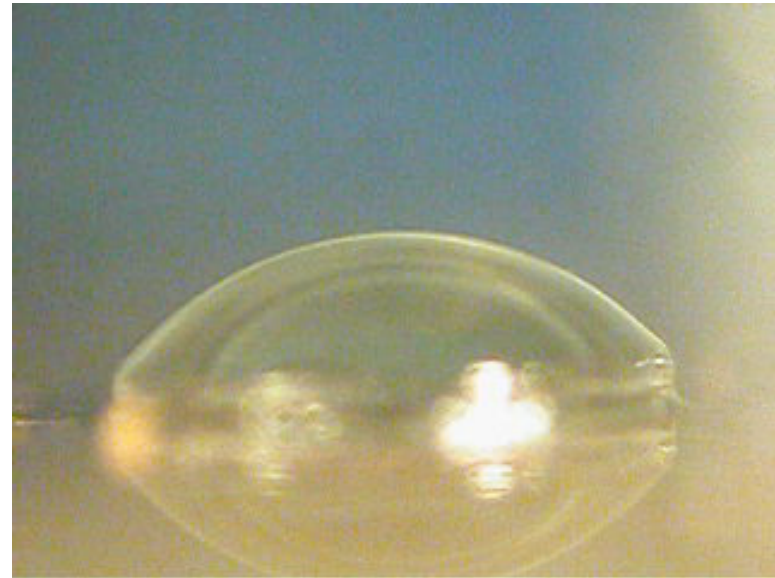
試料の側面



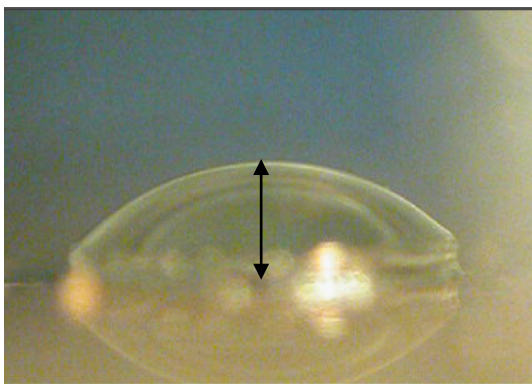
上から見た試料



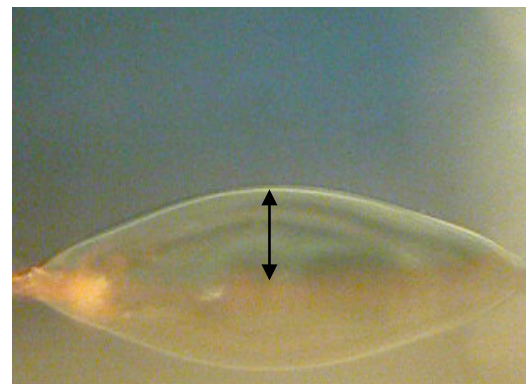
Electrically induced creep deformation



PVC plasticized with DBP



(a)



(b)

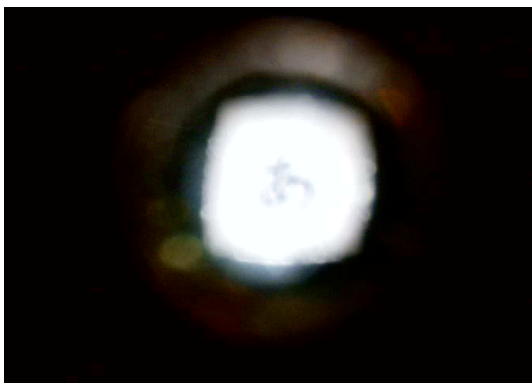


(c)

Voltage on
 $\xrightarrow{\hspace{1cm}}$
 $\xleftarrow{\hspace{1cm}}$
 off



(d)

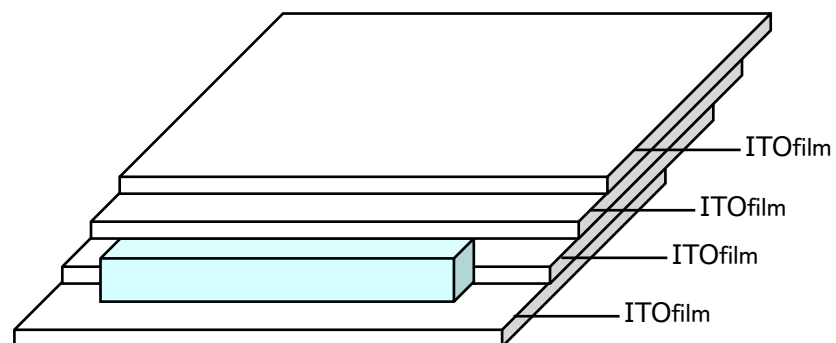


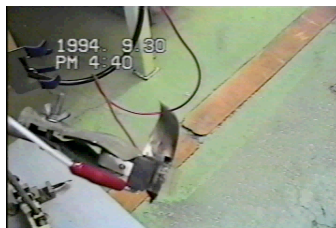
(e)



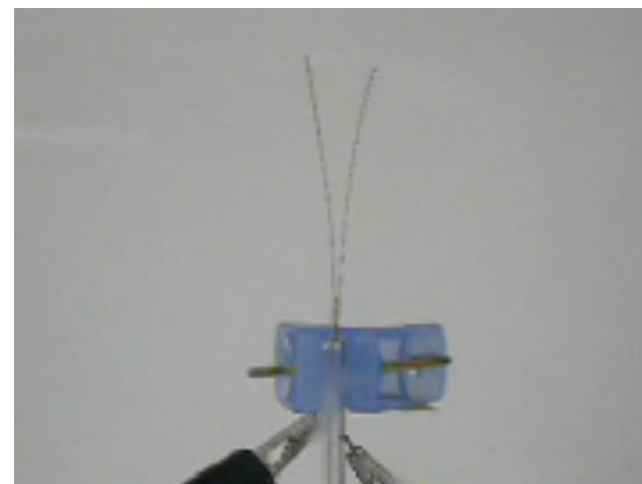
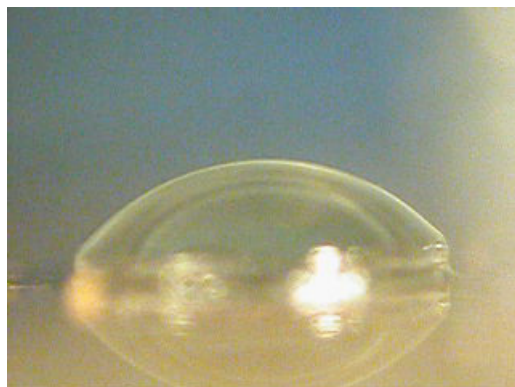
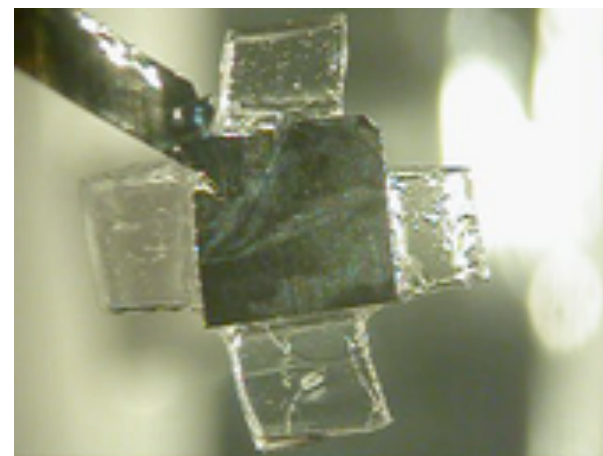
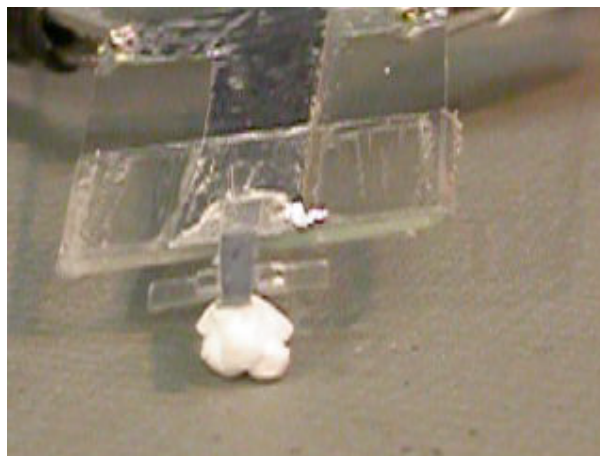
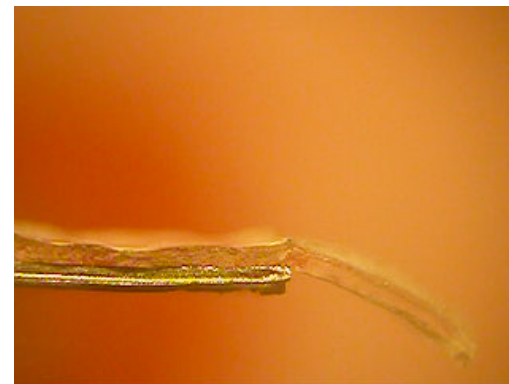
(f)

アメーバ様のク リープ変形がも たらすローリン グ移動





応用に向けて

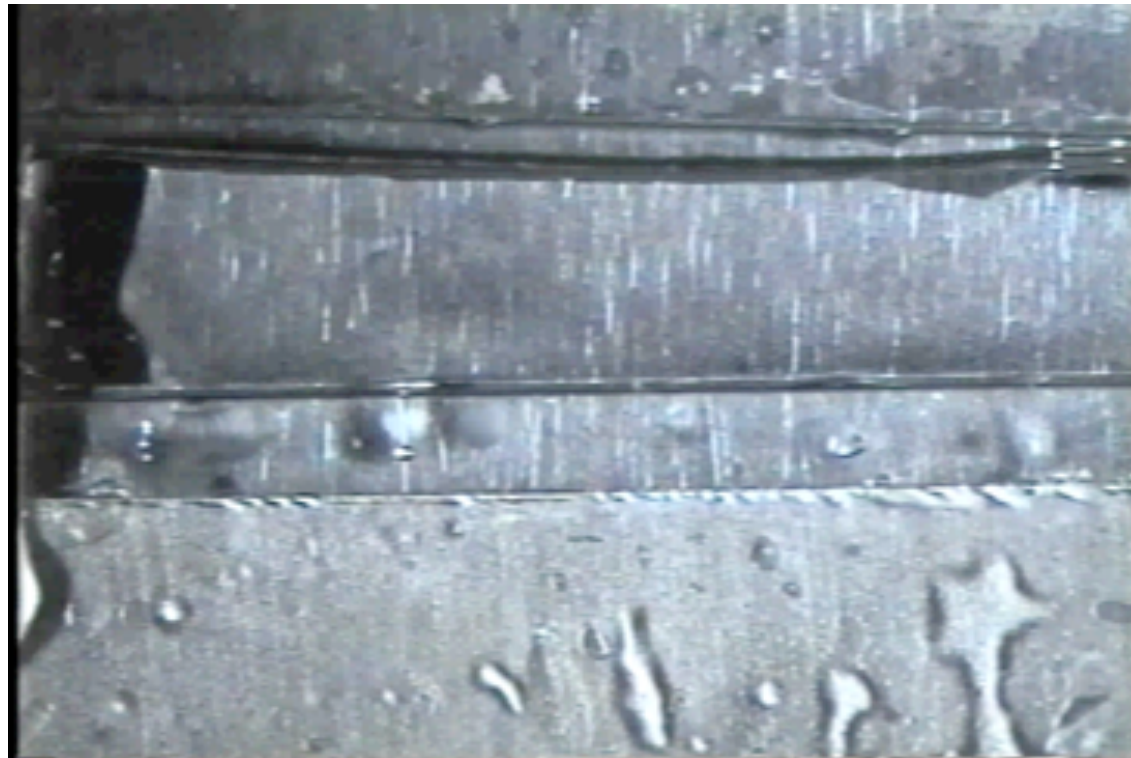


ナイロンの駆動



ナイロンの両面に金を蒸着し、電場を印加することで変形、
電場を除くと元に戻る

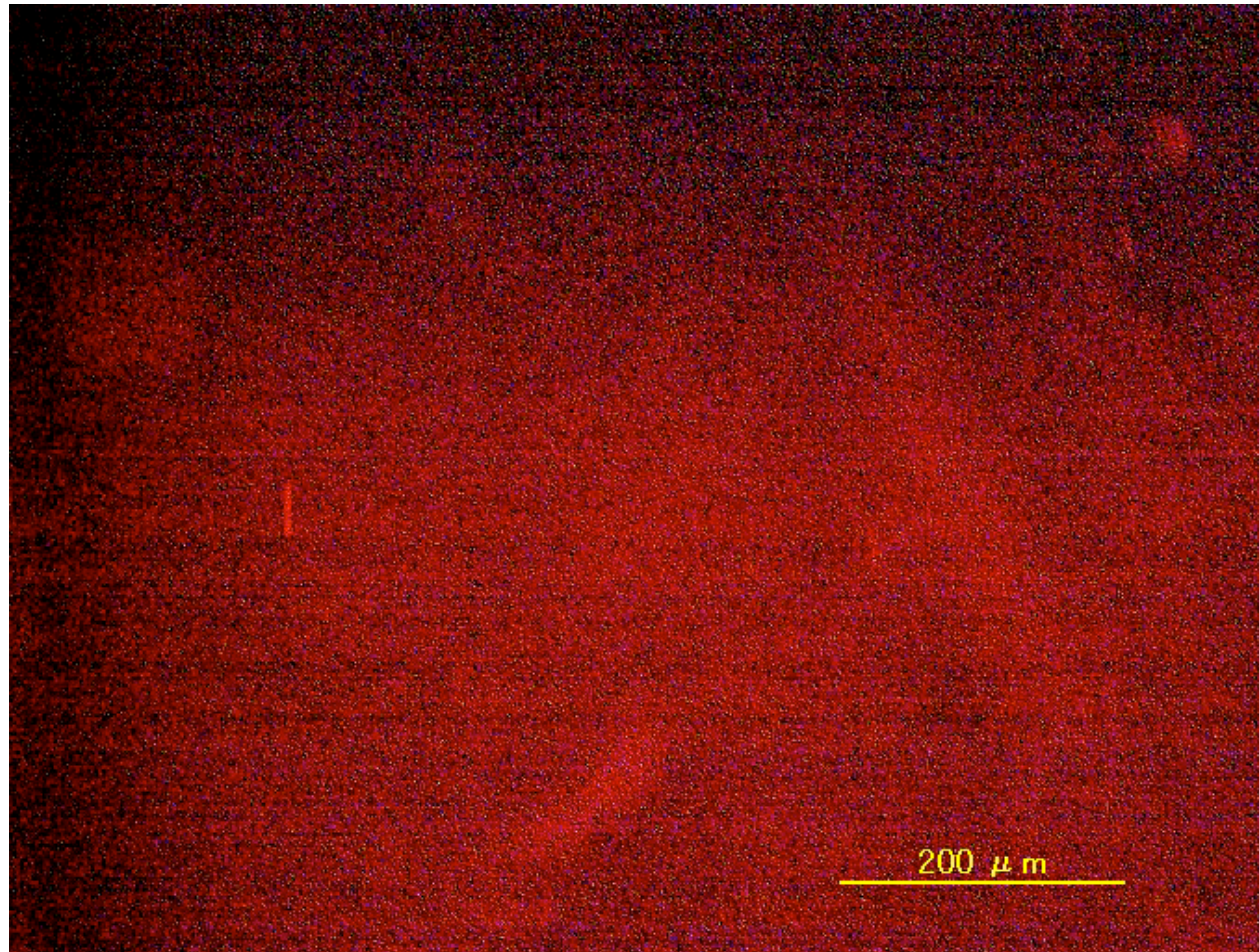
ゲルのマイクロポンプ



誘電ポリマー駆動素子のまとめ

- 誘電ポリマーの電場駆動では、電流値はnAから μ Aの範囲で、熱損失が殆どない
- 駆動電場は高いがエネルギー効率が高い
- 現在のところ、大変形を誘起するのに適する
- 大きな応力の発生は今後に期待
- 新たなコンセプトの出現も期待
- 人工筋肉自体は、近い将来実用化されるものと思われる、マイクロデバイス分野で
- そして、生物素材を活用した駆動法の実現へ

車軸藻のミオシンと鶏肉のアクチンのハイブリッド駆動素子



おわりに

- 柔軟材料を用いた低エネルギー消費型の駆動素子も開発をはじめて10年以上の歴史があり、基礎科学的な段階を脱しつつあるというところでしょうか。
- バイオ素材を用いた筋肉機能の再構築も注目されており、基本的な現象の再現には成功しています。
- 遠くない将来、人工筋肉素材は、多方面で多様な使われ方をするものと期待できます。
- それは省エネルギー、優しい環境負荷などを考えた際、こうしたスマート(賢い)材料の活用は不可欠だからです。

ご清聴をありがとうございました