

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製」  
研究課題「空間局在・分子超潤滑に基づく時空間空隙設計と高機能表示材料創生」

## 研究終了報告書

研究期間 2014年10月～2020年3月

研究代表者：山本 潤  
(京都大学大学院理学研究科、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本チームは、山本 G の基礎物理学的視点と多様な物性計測技術、荒木 G の理論・シミュレーション解析、菊池 G の分子設計・化学合成、さらに表示デバイス生産・販売企業としてシャープ社、表示材料や配向膜を提供する専門企業として DIC 社が一体となった相補的な研究チームを構成し、2019 年 10 月現在、14 回の研究会と 33 回の開発会議を開催して強力な研究協力体制の元研究を継続してきた。

研究期間前半において、Slippery 界面生成の基本原則として考えた Disorder 効果を、不純物の混合により誘導し、Slippery 界面を実現することに成功した。この Slippery 界面は、液体ぬれ層が作る界面であり、物質内に内在するナノ界面にも自己組織的に、Slippery 界面を展開することができる。しかしながら、温度範囲が限定されることや安定性などに問題があったため、研究の中間点から高分子ゲル界面、フラクタル界面、光励起 Azo 界面など、他の材料の探求を行ってきた。

一方、強誘電性液晶 SmC\* に Slippery 界面を適用した表示材料では、現行の Nematic 液晶の応答速度を 2-3 桁上回る 100 $\mu$ sec 以下の応答速度を維持しながら、駆動電圧を 1 桁以上低下させることに成功した。SmC\* はカイラル液晶相であり、自発的な復元力を必要としないため、Slippery 界面との相性はとても良い。今後、光変調器などへの応用が期待される。

研究の中間点で、ゲル状態の PEG 高分子材料により、10 $^{\circ}$ C~液晶-液体相転移温度に及ぶ非常に広い温度範囲で、Slippery 界面の実現に成功した。そこで、この界面を用いた新しい Nematic 液晶表示モードを考案し、実用を目指した研究を進めることにした。また、同時に PEG ゲル高分子の分子量や架橋密度、塗布条件、アニール条件などをパラメータとして、Slippery 界面の機構解明や、表示素子の性能評価を定量的に行ってきた。このため、3 基の固定角・回転磁場測定と、3 基の電気光学応答測定装置を早急に整備した。この結果、Slippery 界面の基本物性となる、アンカリングエネルギー  $W$  と表面粘性  $\gamma_s$  を正確に評価できると同時に、デバイス特性としてのモード効率や応答速度を決定できる。この定量的測定法は、他の材料系の機構解明や性能改良に大きな役割を担ってきた。

これらの研究の結果、有効な Slippery 界面の発現には、高分子のガラス転移やゾル-ゲル転移が大きく関係していることが示唆されるとともに、新しい液晶表示モードとしての実用性の期待が大きくなった。現在では、テストパネルの作成、パネル製作のプロセス技術の改良、市販の液晶パネルを製作しているラインでの生産テストなどを進め、実際の製品化に向けたステップを確実に上っている。

他方、高分子と液晶分子の相溶性をパラメータとした分子シミュレーションや、流体力学的理論に基づいた新液晶表示モードの応答特性の解析、らせん構造を持つ SmC\* の電場応答ダイナミクスなど、理論を用いた予測も並行して実施して、研究の推進に大きな原動力となっている。また、ナノスケールの界面を持つ物質である PDLC や、高速表示材料として期待されている PSChBP にも、自己組織的な slippery 界面を埋め込むことで大幅な性能向上に成功した。これらの研究成果は表示材料に止まらない、界面・物質設計の新しい普遍的概念の提唱と実証につながっている。

### (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 概要: 液晶表示材料研究の歴史の中で、基板界面のアンカリング原理や技術の研究が数多く行われてきたが、本研究構想が目指す、アンカリング力 0 の極限である「Slippery 界面」は、その概念自体が、全く新しい真逆の発想に基づいている。我々は、1990 年代に世界で注目されながら、実用されなかった強誘電性液晶 (SmC\* 相) に、この Slippery 界面を適用し、分子の運動性を潤滑することで、Nematic 液晶と比べて 2 桁以上高速な応答 (<100 $\mu$ sec) を維持しつつ、駆動電圧を 1 桁以上低減することに成功した。

2. 概要: 界面での液晶分子の運動を潤滑する **Slippery** 界面を発現させる普遍的な原理として、**Disorder** 効果を提唱した。また、現実の界面に **Disorder** 効果を誘導する様々な方法を開発した。さらに界面での分子の運動性を定量的に測定し、アンカリング力が極めて弱いにも関わらず、初期位置に確実に復帰する“**Weak**”アンカリング状態を **PEG** ゲル界面で、またアンカリング力が **0** となって完全に復元力を失った“**Slide**”アンカリング状態を **PMMA** 界面に親和性の強いドデシルアクリレートの不純物効果により具現化した。さらにこの 2 つの極限状態を定量的に観測し、他のアンカリング状態と明確な区別を与えた。この発見により後に述べる、新しいタイプの液晶表示素子を実現することが可能となった。

3. 概要: **PEG** ゲルの **Slippery** 界面としての物性を、アンカリングエネルギー  $W$  と表面粘性  $\gamma_s$  を、磁場印加に対する応答測定で定量的に評価し、その架橋剤依存性を議論した。これから、新しいアンカリング状態である“**Weak**”界面が発現するためには、微視的には分子鎖が融解しながら、巨視的には弾性体としてふるまう“ゲル”状態が重要な役割を担っていることを見いだした。また、**Glide** アンカリングなど、古くから知られるアンカリング特性も、高分子のガラス転移やゾルゲル転移に深い関係があることを確かめた。また、分子モデルを用いたシミュレーションによって、**PEG** 分子と液晶分子の親和性をパラメータとして、アンカリング状態の変化を議論した。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 概要: 1990 年代に全世界が研究開発にとん挫した強誘電性液晶 **SmC\*** について 1 桁以上の低電圧駆動を実現し、さらなる低電圧化の可能性も追求可能な包括的な研究構想を提唱した。現在のネマチック液晶材料に対して、本質的に 2~3 桁高速な材料系である **SmC\*** を実用駆動電圧に近づけることに成功し、今後の **AR/VR** などインフォメーションテクノロジーの発展に必要とされている、現存の表示材料とは異なる液晶表示素子の発展に可能性を開いた。

2. 概要: 科学技術の項で紹介した、新しい“**Weak**”アンカリング界面は、界面での液晶分子拘束力が極めて小さいため、微小な電場で分子が大きく回転して、大きな透過光強度が得られる。この性質を利用して、駆動電圧が約半分でバックライトの光をほぼ 100% 透過させることができる **Slippery-Nematic FFS** 液晶パネルの原理を実証した。この優れたデバイス特性を利用して、共同研究先のシャープ(株)では、昨年来、商品化を目標として液晶パネルの試作、生産プロセスの改良、デバイス特性の評価・改良を精力的に行っている。今年、実際に市販のパネルを生産している工場で、複数回のライン生産試験も行き、問題点克服に向けて研究を続けている。さらに、理論・シミュレーションにより、デバイススイッチング特性なども最適化してきた。

3. 概要: 現存の液晶表示材料の改良型として、高分子分散型液晶 (**PDLC**) に自己組織的な **Slippery** 界面を導入し、その低電圧・高速駆動に成功した。ガラス基板など巨視的な界面だけでなく、物質内に内包されるナノ界面にも自己組織的 **Slippery** 界面生成の原理が有効に働き、機能が発揮されることが実際に証明された。これにより、類似の表示材料である高分子安定化ブルー相 (**PSChBP**) への適用に止まらず、様々な機能性物質の内部にあるナノ界面設計に **Slippery** 界面応用の可能性を広げた。

< 代表的な論文 >

1. Kanako Hata, Yoichi Takanishi, Isa Nishiyama and Jun Yamamoto, “Softening of twist elasticity in the swollen smectic C liquid crystal”, Euro. Phys. Lett. Vol.120, 56001(2017).
2. Takeaki Araki and Junpei Nagura, “Bistable director alignments of nematic liquid crystals confined in frustrated substrates”, Phys. Rev. E Vol. 95, 012706 (2017).

### § 3 研究実施体制

#### (1) 研究チームの体制について

##### ①山本グループ

研究代表者: 山本 潤(京都大学大学院理学研究科 教授)

研究項目

#### A 空間局在・分子超潤滑による表示材料の時空間空隙設計と実験物理

- ①低電圧超高速 Slippery SmC\*液晶
- ②「競合効果」&「溶媒効果」ソフトニングによる低電圧駆動の達成
- ③Slippery 界面の設計原理と物性計測・評価および機構解明・改良
  - ③.1 基本設計原理としての Disorder 効果
  - ③.2 Slippery 界面発現原理と物質探索
  - ③.3 Slippery 界面評価 磁場印加/回転磁場法と Slippery 界面の物性定数計測
  - ③.4 界面状態定義・分類
    - ③.4a PMMA-12A 混合液晶不純物効果による Slide 状態の発現
    - ③.4b PEG 高分子ゲルにおける Weak 状態の発現
  - ③.5 Slippery 界面の発現メカニズムとガラス転移/ゾル-ゲル転移
  - ③.6 高分子粘弾性と Slippery 界面
- ④Slippery 界面の Nematic ディ스플레이応用と電気光学応答特性
- ⑤デバイス応用
- ⑥Slippery 界面の改良

#### B 空間局在・分子超潤滑による表示材料の時空間空隙設計と理論物理

※荒木サブグループ

- ①Disorder 効果理論 不均一アンカリング界面
- ②Disorder 効果理論 不純物効果
- ③Disorder 効果理論 高分子添加
- ④並進回転結合
- ⑤層状流体力学

#### C 空間局在・分子超潤滑による表示材料の時空間空隙設計と応用

- ①デバイス化設計 (シャープサブグループ)
- ②表示材料設計(DIC サブグループ)

##### ②菊池グループ

主たる共同研究者: 菊池 裕嗣(九州大学先導物質化学研究所 教授)

研究項目

- ・超潤滑と低電圧化 百日紅 Slippery 界面
  - ①不純物効果
  - ②グラフト鎖
  - ③フラクタル界面
  - ④等方性ソフト界面
  - ⑤百日紅 PSChBP
  - ⑥高速局在モードと高速化 PSChBP 微細化閉じ込め
  - ⑦デバイス応用