

ERATO「横山液晶微界面プロジェクト」追跡評価報告書

総合所見

本プロジェクト最大の意義は、液晶分野で極めて高いポテンシャルをもつ研究者である総括責任者が、実験物理、理論物理、合成化学などの分野から実力のある研究者を集めることができた点である。

プロジェクト主要メンバーの個性を反映した理論解析面での成果は、世界トップレベルであった。この視点での代表的な成果に関連するキーワードは「ナノパターンニング」「液晶コロイド」「2次元液晶のダイナミクス」「キュービック液晶相」などがあげられる。それらはプロジェクト終了後も理論解析を中心とする独創的な基礎研究が元グループメンバーによって精力的に展開されており、対象の拡大と理解の深耕がみられる。

また、各分野での世界的な研究の活性化への貢献も高く評価される。それはトポロジーから複雑系の科学までを含む現代の物理数学・計算シミュレーション、理論物理の流れのなかでの液晶の高次秩序化構造の統一的理解をも予兆させるものであり、本プロジェクトの基礎研究面での大きな意義を物語っている。

一方、提案された応用コンセプトに基づく実用化開発については未だ萌芽的なフェーズにあるものが多い。基礎研究が応用につながり、さらに実用化されるには通常長い時間がかかるので、現時点で社会的、経済的な効果について評価することは難しい。ただし、個々のプロジェクト成果の実用化とは別に、その波及効果としていくつかの分野での世界的な開発活動の活性化に及ぼした貢献は重要である。また、いくつかのテーマの実験的研究を可能にした新規液晶材料の合成という成果もあった。各種新規液晶材料の相転移挙動や物性を観察する研究がプロジェクト後も継続して発展されており、新しいディスプレイデバイスの提案などもなされている。しかし残念ながら、プロジェクト終了後5年以上が経過したが、実用化に向けての展開が十分には見えずらい。

科学論文成果については質と量ともに優れており、プロジェクトへ参画した多くの研究者はその後これらの成果をベースに一流のアカデミックポジションを得て研究を継続している。我が国の基礎科学技術の向上への寄与は極めて大きく、更に現在のポジションを通じた人材育成への活躍が期待できる。これから産業界とどのように連携し、また産業界側はそのような人材をどのように活用して行くかを考える必要に迫られている。

液晶は世界で10兆円を超えた基幹産業となっており、液晶の微界面制御技術が今後の液晶デバイスの飛躍を支える基盤要素技術であり、基本的方向性として妥当であったことは、液晶ディスプレイ市場においてその傍証を見いだすことができる。たとえば、本プロジェクトとは独立に、シャープ株式会社が世界で初めて光で液晶配向を制御する技術を開発し、世界トップの省エネテレビを実現している。

今後この分野で一定のポジションを確保するにはサイエンスに裏付けられた真似のできない高度な技術を構築して、それにより革新的な応用製品を創生していく必要がある。

1. 研究成果の発展状況や活用状況について

以下に項目別に記述する。

◇液晶コロイド

プロジェクトでは液晶 - コロイド系を光学的に操作する方法を提示、コロイド粒子間の力の測定に成功する等の成果を挙げた。その後の発展研究では気泡をベースにした新しい液晶コロイドの提案、テラヘルツ分光や THG スペクトロスコーピー等による物性測定を推進するなどの展開をみせ、スメクティック液晶に気泡を注入することで格子構造の実現を可能にするなどの成果を挙げている。

一方、液晶コロイドにおける粒子間相互作用の解析などに成果を挙げた液晶分子の配向場解析の仕事は、プロジェクトメンバーであった福田順一氏（産総研・研究員）によって、コレステリックブルー（ChBP）相の理論研究へと展開をみせた。

◇2次元液晶ラングミュア膜のダイナミクス

アゾベンゼン誘導体のラングミュア液晶膜における光誘起波の発生と伝播の理論解析、さらにはキラル液晶分子によるコヒーレントな歳差運動の実験解析などがプロジェクトの成果であった。この研究はその後、プロジェクト研究推進委員であった多辺由佳・早大教授のグループによって対象がキラルスメクティック液晶の自立膜および生体膜類似の水中膜などにも拡大され、膜透過分子による輸送現象の解析と分子回転メカニズムの解明に成果をおさめた。

◇キュービック液晶相

プロジェクトでは、分子動力学に基づく解析とシミュレーションによって液晶分子がキュービック相を形成する様子を再現するとともに、実験的には等方性スメクティックブルー（SmBP_{iso}）相と名付けた新規な秩序構造の出現を確認した。この研究はプロジェクトメンバーであった山本潤・京大教授の研究グループに引き継がれて発展をみせている。SmBP_{iso}相は、その空間配置の立方対称性が破れて自発的に形成された巨視的球対称性をもつ構造であるというモデルを、スペクトロスコーピー、X線散乱、巨視的物性測定などに基づいて提唱している。また、分子動力学に基づくシミュレーション手法は、米谷慎氏の産総研グループによって有機半導体材料を溶質とする液晶溶液構造の解析に展開されている。溶質分子が溶媒の液晶分子と同程度に配向して安定に存在する構造を実現することで、溶媒蒸発による薄膜形成プロセスへの適用が可能となる。この技術によって、分子配向構造による有機半導体の高性能化が期待できる。

◇新規液晶材料

プロジェクトにおいてはいくつかのテーマの実験的研究を可能にした新規液晶材料の合成という成果も重要である。ジキラル構造の強誘電性液晶材料を発展させた強誘電・反強

誘電性液晶材料や、その他合成された新規液晶材料の相転移挙動や物性を観察する研究がプロジェクト後も継続して発展している。

相転移に関しては独創的な実験手法を用いて、新しい過渡状態を経由する第 1 種相転移が生じるなどの新しい知見が得られている。またネマティック配向秩序領域と層秩序を有するラメラ構造領域とがミクロに相分離を起こして共存する、新規な穴あきラメラネマティック相の観察などの成果は、液晶秩序構造に関する理解に貢献するものと期待される。さらに、反強誘電性液晶を用いた新しいディスプレイデバイスの提案などもあり、プロジェクトが目指したボトムアップアプローチに関しても興味深い展開を見せている。

◇ナノパターンニング技術

プロジェクトにおいては、AFM 探針を用いて形成したマイクロサイズの微界面によってネマティック液晶の多重安定性配向を実現し、液晶システムにメモリー効果を付与する可能性を実証した。プロジェクト終了後には実用性に有利な光配向技術を活用して、液晶システムの多重安定状態を実現する開発が同グループによって推進された。光配向とナノインプリントの技術を用いてマイクロパターンを形成する技術を双安定/多安定配向制御に適用して、双安定動作の実証デバイスの実現に成功している。プロジェクトメンバーの米谷慎氏（産総研・グループ長）は他の研究機関との協力の下に、新規な双安定状態間のスイッチングモデルに基づいて動作特性や表面配向のアンカリング特性に関する解析を行い、特性改善に向けた活動を展開している。

2. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な効果・効用及び波及効果について

2.1 研究成果は科学技術の進歩にどのように貢献しているか

◇液晶コロイド

プロジェクトから生み出された大きく異なるスケールでの秩序を解析する計算手法は、この研究分野でのシミュレーション技法としても今後とも世界最先端レベルでの活用が期待される。この研究では、光ピンセットを用いた液晶中での微粒子間の引力の測定、微粒子周辺の液晶場の数値解析などが行われ、液晶中の微粒子の操作に関する先駆け研究になった。微粒子の代わりに気体を用い、規則正しい構造を形成し、新しいフォトニックデバイスへ応用しようとする試みも行われている。

◇2次元液晶ラングミュア膜のダイナミクス

本プロジェクトにおいて、ラングミュア膜での配向場の歪が起こす配向波や気体透過による分子の集団的な歳差運動（分子モーター）などが発見され、理論的な解析も行われた。多辺由佳氏のグループによるこの分野の研究は、山本潤氏のグループの臨界ゆらぎの実験的研究とあわせて、カオスの縁とよばれる領域での現象および自己組織化臨界現象の理解に貢献するものと期待される。

◇キュービック液晶相

合成化学グループにより、新規な液晶相（特に光学的等方相）が発見され、物性グループとの協力によりその構造が明らかにされた。さらにシミュレーションチームの協力で、分子動力的に分子配位の決定が行われたばかりでなく、実験で得られる物理的現象の解釈にもつながった。このように、合成、物性、シミュレーションの研究者の協力が大きな成果を生み出した。具体的には、本テーマの成果が上述のようにSmBP相の臨界現象の実験的研究へと発展をみせ、液晶のキュービック相を支配する臨界現象、さらには高温超伝導の研究開発への波及が期待できる。山本潤氏のグループによる臨界現象の研究は、スメクティック液晶のキュービック相であるTGB相の理解の深耕にもつながり、新理論の構築をも期待させ得るものである。またChBP相の位相欠陥の性質を解明しようとする福田順一氏の研究は、トポロジーの視点から液晶の秩序構造を解明しようとする最先端の液晶研究の一翼を担うものである。

◇ナノパターニング技術

AFM探針により基板表面にパターンを形成して液晶分子配向を制御し液晶システムにメモリー性を与えるという研究は、先駆的・独創的であり、かつNature誌への掲載も実現している。一方、この分野では光配向法、ナノインプリント法などを用いて実用的な技術への展開を図っているが、実用化にはまだ距離がある。ただし、この研究とは別に、光配向技術は企業によって一部実用化され始めているので、今後、本研究で得られた知見が活かされていく可能性はある。

2.2 研究成果はどのような形で応用に向けて発展しているか

◇液晶コロイド

液晶 - コロイド系の光学的操作技術、コロイド粒子間力測定技術を基盤として、気泡をベースにした新しい液晶コロイドの開発への取り組みがなされている。スメクティック液晶に気泡を注入した規則正しい格子構造の応用などが検討されているが、新素材としての可能性は未知である。世界的には分子状コロイドの集合体やフォトニック結晶などのコロイド配列は注目を集めている。一方、液晶中にナノ粒子を分散させたコンポジット材料の研究開発が高性能液晶ディスプレイへの応用を視野に活発化しており、一部で実用化のフェーズにある。さらには上述のChBP相を用いた高速応答液晶ディスプレイのプロトタイプが実現され、新材料・新技術の実用化開発にプロジェクトの成果が繋がることが期待される。

◇分子ダイナミカルシステム

本テーマのプロジェクト後の展開に関しては、シミュレーション技術に関して成果がみ

られる一方で、応用面からの進展はさほど明確ではない。分子モーターなどへの応用が考えられるものの、「分子ダイナミカルシステム」は全体としてはまだ萌芽的段階にあるといえる。しかし、選択性分子透過膜などとあわせて医学、治療技術開発への波及効果も考えられ、実用化面でも今後の進展に期待するところである。

◇キュービック液晶

キュービック液晶相はフォトニック結晶としての応用が考えられ、プロジェクトの発展としてアゾ色素を添加した SmBP_{iso} 相にレーザー光を照射したときの構造変化の応答性などが観察されている。波長可変光学素子やレーザー関連デバイスとしての応用が示唆されているが、いずれも他の素材に対する優位性は明確ではなく、アイデア段階にとどまっている。応用に関しては当面は探索のフェーズが続くであろうが、液晶コロイドの項でふれた ChBP 相は、キュービック液晶というくくりでは実用化の先端に位置するものである。

◇ナノパターニング技術

応用分野ではナノパターニングを用いたメモリー液晶デバイスへの応用が最も現実的なものである。プロジェクト期間中に、マイクロサイズの微界面形成によって液晶システムにメモリー効果を付与する可能性を AFM 探針法で原理的に実証し、この分野を進展させるきっかけになった。メモリー機能を有する液晶は、低消費電力で紙資源の保護に有効な電子ペーパーや携帯用情報端末デバイスの核となる部品として期待されている。その後、同グループによって実用性に有利な光配向技術やナノインプリント法を活用して、液晶システムの多重安定状態を実現するなどの技術開発が推進された。しかし、総括が 2009 年の夏に米国ケント州立大学液晶研究所 (Kent State University, Liquid Crystal Institute) へ異動したこともあり、その後の十分な展開はなく、実用化への道のりは遠い状況である。

以上をまとめると、基礎研究を軸としたプロジェクトの中で、実用化を意識した成果を得るには、最終ターゲットの時宜を得た設定や企業側からの的確な連携策の提案が不可欠である。また、実用化に向けた課題として、特許 40 件は、論文の数に比べて物足りない印象を受ける。特許の分類としては①研究用の物性評価技術、②光によるスイッチング技術、③メモリー液晶、④光配向用材料、⑤光配向を使った高透過率と広視野角を有する表示方式、⑥表示素子である。このように広い領域で散発的に特許を出願しているが、重要な特許を戦略的に出願したとは言い難い。産業的にみて有力な特許創出にはターゲットを絞ることもプロジェクト運営として必要であったかもしれない。

2.3 参加研究者はどのような形で活躍しているか

本プロジェクトの主要メンバーは、いずれもプロジェクト開始時からすでに注目を浴びていた人材である。プロジェクトを通じてさらなるキャリアアップを遂げて、研究員 2 名

が大学の教授の職を得たことは特筆に値する。研究室を作つて間もないため、華々しく活躍していると言うほどではないが、自身の経験と得意な技術を生かして順調に研究室を発展させていると言える。理論・シミュレーショングループのメンバーも AIST や大学に職を待て、良い研究を継続している。企業に移った中にもそれぞれの部署で中心的な役割を果たしている研究者も多い。特に、本プロジェクトに途中から参画した研究者の一人は、2009年よりシャープ株式会社研究開発本部先端材料・エネルギー技術研究所において、技術者として高い職位である技師長職（部長相当職）の地位を得て先端材料の開発に従事している。

3. その他

（1）ERATO 発足時点の理念として、「日本が豊かな未来を切り開くため、また国際社会での然るべき貢献を十分果たすためにも、科学技術の創造的な研究、特に基礎的な研究をより一層充実させ、しっかりとした工業立国を建設していくことは不可欠な課題の一つです。」とある。基礎的研究と工業立国の建設と 2 つの記載があるが、人により得意分野は様々である。一方、我が国が少子高齢化社会に突入して、将来に渡り質の高い国民生活が守れるのかという危機感が強まっている中、より効率の良い成果に結び付けるにはプロジェクトとしてどこにフォーカスして行くのが重要である。経済的ニーズに応えることも重要なミッションのプロジェクトであることを鑑みると、そのような観点でのリーダーシップをどうやって取るかが E R A T O 制度の課題である。

（2）本プロジェクトで取り上げられたような種々の独創的な研究テーマの成果の実用化を達成するためには、本プロジェクトの数倍のリソースを掛けた応用・実用化研究フェーズへの連続的・発展的な展開が必要である。もちろんそのようなフェーズへの移行はプロジェクト成果の応用面・実用面からは望ましいが、残念ながら本プロジェクト終了後にそのような形態での展開が図られたものは少なかった。しかしこのことがイノベーションの出発点と位置付けた基礎研究における本プロジェクトの評価を下げるものではない。

以上