

ERATO「高原ソフト界面」プロジェクト 追跡評価報告書

総合所見

高分子をはじめとしたソフトマテリアルは、その高い機能性から近年特に注目され、その材料開発や複合材料の創製とともにそれらの材料の特性解析が強く求められている。特に材料の表面や異種材料との界面の解析は、材料としての性能に大きく影響するため、詳細な研究が必要となる。しかしながら、実際にそのような微小な界面の分析は、装置的にも手法的にも困難を伴い、とりわけ時間経過とともに変化する動的な特性解析は、その理解が難しいものであった。それが、本プロジェクトの遂行により、高性能ソフト界面構築のための普遍的原理が確立され、超高性能のソフト界面の構築が可能となった。すなわち、物理的・化学的な観点から自然界の特徴的なソフト界面を観察・解析・理解することが可能になったことが、本プロジェクトの最大の研究成果であり、その波及効果はプロジェクト終了後も引き続いて他の分野に影響を与え続けている。

例えば、高分子ナノ構造体の分子鎖凝集構造と物性の相関の解明や、ポリマーブラシの水和構造解析と表面特性の評価、新規ナノ複合材料の創製と構造評価、放射光 X 線構造解析の展開など、その研究成果はプロジェクト終了後も多くの研究分野の発展に大きく寄与している。また、プロジェクト中から着手し始めた微小視斜角入射 X 線光子相関分光法のダイナミクス分析の確立は特筆すべき研究成果である。これまで不可能であったソフトマテリアル界面の *in situ* 測定を可能にしており、従来観察できなかった界面の動的挙動を解明できるようになったことは大きな研究成果である。さらに、これらの大型装置だけではなく、既存装置では測定不可能な特性を測定するために、実験室レベルのオリジナルな測定装置も開発し、界面測定のための最適化に成功した。これらの研究成果は界面科学研究の基盤を底上げし、日本の産業界の発展にも貢献し、今後も社会的・経済的観点からも発展し続けるものと期待できる。

本プロジェクトに参画した研究者はその後、別の大型プロジェクトを主宰、参画するなど、当該分野において重要な働きを継続しており、プロジェクト進行時は若手研究者として参画していた研究者が次々と重要なポストに就任している。したがって、人材育成の面でも成功していると評価できる。

以上より、本プロジェクトは、研究終了後も学術的および応用面で大きな研究成果を挙げていると高く評価できる。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本プロジェクト終了後、その研究成果は多くの研究分野に波及し、さらに発展している。その具体的な例を以下に列挙する。

①高分子ナノ構造体の分子鎖凝集構造と物性との相関の解明

分子構造を緻密に制御したブロック共重合体、電界紡糸ナノファイバー、ナノインプリント凹凸構造、熱可塑性エラストマー、有機半導体などの多様な高分子材料における分子鎖凝集構造、変形過程における凝集構造変化が、放射光 X 線回折・散乱測定や電子顕微鏡、原子間力顕微鏡などの構造解析手法により明らかになり、分子レベルでの構造形成に基づく物性発現機構の解明や新規の高機能高分子材料が創製されるようになった。

②ポリマーブラシの水和構造解析と表面特性の評価

ガラスや金属基板表面に厚さ 100nm 程度のポリマーブラシを生やすことにより、材料表面の濡れ性や撥水性が改質され、摩擦特性、接着性や防汚性などが劇的に向上することが分かった。この技術は、新たな表面改質法として注目され、高機能ソフトインターフェースとして期待できる。

③新規(有機/無機)複合材料の創製と構造評価

天然無機粘土鉱物の中空アルミノシリケートナノファイバーであるイモゴライトやハロサイトをを用いて、界面の選択的表面修飾による相互作用制御に基づく新規(有機/無機)ナノ複合材料を構築し、その構造解析、物性評価が行われた。

④放射光 X 線構造解析の展開

実空間観察の重要性の観点から、最先端の三次元ナノイメージング法である放射光 X 線トモグラフィにより、液体ビー玉の埋もれた界面の可視化に成功した。さらに、放射光赤外分光によるポリマーブラシ表面の水の構造評価、X 線光子相関分光法によるポリマーブラシ修飾シリカ微粒子のダイナミクス評価、微小視斜角入射 X 線光子相関分光法によるフィルム表面ダイナミクス評価や、柔 X 線による微小視斜角 X 線回折法の進展は特筆される。

また、本プロジェクト終了後もその研究成果を基盤として、科学研究費基盤研究(A)(2014年度～2017年度、2017年度～2020年度)や内閣府革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)(2014年度～2018年度)などで引き継がれ、基礎と応用の両面から研究が広がっている。グループメンバーも科学研究費基盤研究(A)(陣内、2016年度～2018年度、2019年度～2021年度)、CREST(中嶋、2017年度～2022年度;陣内、2019年度～2024年度;出口、2019年度～2024年度)などで関連の研究を展開している。プロジェクト終了後の大型プロジェクトによる発展的な継続は、本プロジェクトの研究成果の波及効果が大きいことを物語っている。また、プロジェクト終了後に継続された研究は、各テーマが多彩な分野へと広がっている。特許出願に関してはプロジェクト期間中と比べてプロジェクト終了後はかなり減少しているが、産業界との共同研究はプロジェクト終了後も進められており、実用化に向けた取り組みがなされていると考えられる。

2. 研究成果から生み出された科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果

(1) 研究成果の科学的・技術的観点からの貢献

本プロジェクトではソフト界面の特性解析の分野で多大な研究成果が得られたが、それらを活かして、ナノ構造体の分子鎖凝集構造の解明や、ポリマーブラシの水和構造解析、表面特性評価、新規(有機/無機)ナノ複合材料の創製と評価、放射光構造解析の展開、などの分野において、科学的・技術的な貢献が多くなされた。特に、界面現象を動的状態で観察できる手法の開発は特筆すべき研究成果である。例えば、高分子電解質ブラシの界面分析により、双性イオン高分子材料の優れた細胞接着回避能力が証明され、さらにブラシ内に閉じ込められた水がバルク水と同様な水素結合状態で超親水性発現する方向に働くことが見出されるなど、その研究成果は大きく発展している。

また、基礎研究のための大型装置が整備されたことも、本プロジェクトの科学的な波及効果として重要である。例えば、SPring-8の高輝度でコヒーレンスの高い放射光の特徴を利用したX線光子相関分光装置の開発により、表面修飾されたシリカ微粒子のダイナミクスの測定が可能となった。さらに、微小視斜角入射広角X線回折と微小視斜角入射小角X線散乱を同時測定することにより、分子オーダーの階層構造の解析が可能になった。

一方、本プロジェクトの研究成果により、新規ナノ材料の精密合成の研究分野が進展したことも重要である。例えば、立体規則性や多重らせん構造のポリマーブラシの精密合成が可能となり、今後の材料分野での利用が期待される。このポリマーブラシは、その濡れ性にユニークな特性を示すことが明らかとなったが、材料表面の水潤滑性の評価、防汚性の解明など、産業的にも応用範囲が広がると期待できる。また、ポリマーブラシの濡れ特性の研究結果から明らかになったことの将来像として、高分子膜や金属の表面特性の改質技術の進展が今後も望まれる。いずれも、新規表面修飾された複合材料として、様々な応用が考えられ、産業的にも注目されている波及効果であると言えよう。さらに、本プロジェクトで創製された新規ナノ複合材料は、高い機械的強度を示し分解速度も遅いことが確認されており、生物医学分野での新規材料としての利用が強く期待される。特に、広範囲のpH域において水中で安定に存在するセルロースの積層フィルムや、超両親媒性コーティングが可能なカテコール含有フルオロポリマーとのハイブリッド材料は興味深く様々な分野での応用が考えられる。本プロジェクトの研究成果は、“動的界面科学”という新たな潮流の形成につながっていると見える。これらの材料の表面改質や摩擦・防汚性能、有機半導体への応用などは今後の実用化が期待でき、産業界への影響も大きい。

本プロジェクト終了後の研究成果の発展状況を定量的にみると、論文数はプロジェクト終了後の約5年間で107報(プロジェクト期間中は193報)であり、引き続き優れた研究成果を継続的に出し続けていることがわかる。プロジェクト中およびプロジェクト終了後の論文の累積被引用数も増加しており、本プロジェクトに関連する研究成果が科学的・技術的観点から大きな波及効果があることが理解できる。

本プロジェクト実施期間中に行われた種々のソフト界面の材料開発は、そのバリエーシ

ョンの広がりと共にプロジェクト終了後もペースを落とすことなく継続されている。精密な合成技術と精緻なキャラクタリゼーション手法の応用から、国内のみならず世界のソフトマテリアルの開発研究を先導する立場を担っていると思われる。本プロジェクト以降、ソフトマテリアルを対象とした大型のプロジェクトが多数実施された(一部は現在も実施中)が、それらには本プロジェクトメンバーが直接的・間接的に貢献している。もちろん大型プロジェクト以外にもソフトマテリアル分野の材料科学研究は国内のみならず海外でも精力的に推進されているが、それらには合成法・試料調製法と物性制御、濡れや付着・摩擦などの界面科学的知見、またそのキャラクタリゼーション手法などの観点から、本プロジェクトの研究成果の応用等、何らかの影響が見られるものが多い。さらに、キャラクタリゼーションの手法として高原らが力を注いだ放射光を利用したソフト界面解析は、ソフトマテリアル分野のみならずハードマテリアルも含めた解析・評価、さらには放射光施設全体の利用活発化にも大きく貢献している。本プロジェクトの科学的・技術的観点からの貢献は、終了後も高いレベルが維持されており、当該研究領域の発展に大きく貢献していると考えられる。

(2) 研究成果の社会的・経済的観点からの貢献

本プロジェクトの研究成果は、社会的・経済的観点から多大な貢献が期待でき、将来の各分野への応用が見込まれている。まず挙げられるのは、資源・エネルギー分野への応用である。本研究成果により、自然の現象や生物の機能が理解され模倣されることとなった。その結果、例えば再生可能エネルギー、太陽光発電、風力発電、バイオマス燃料、スマートグリッド、浄水技術などの地球環境問題の解決策につながるグリーン技術の発展に寄与するものと期待される。例えば、新しい防汚技術の開発は、環境に優しい汚染・付着除去や船底防汚材料の開発へと発展させることができ、動力エネルギーの節約や海洋汚染対策に貢献すると思われる。さらに、新規摩擦制御技術の解明は、摩擦によるエネルギーロスの低下につながり、結果として地球温暖化対策にも貢献できると言えよう。

また、化学合成分野への貢献も重要な点である。ポリマーブラシの合成研究で確立された手法は、高分子の精密合成を可能とし、分子レベルで制御された新しい材料開発に貢献できると期待される。

さらに、医療分野への応用も特筆すべきである。新規ナノ複合材料である天然材料と無毒性架橋剤を組み合わせたヒドロゲルは、その遅い分解速度や優れた機械的特性があり、生医学分野での貢献が多大である。特に、制御された表面潤滑性、湿潤性を持った材料は、バイオデバイスの高性能化に貢献できると期待できる。

これらの産業分野のみでなく、エレクトロニクス分野への応用も考えられる。特定のポリマーブラシは高性能のn型単極性揮発性メモリの挙動を示すため、新しい有機半導体としての利用が期待される。ナノキャビティ内での酸化カップリング重合はp型半導体材料の効率化に応用可能である。さらに、ナノインプリント法は、半導体技術やディスプレイ部材、LED、太陽電池などへの応用が強く期待される。

本プロジェクトにより進められた界面分析技術の多大な研究成果は、新しい界面解析技術として貢献できると思われる。特に、プロジェクトの研究成果として特筆すべき表面構造解析手法は、放射光赤外吸収分光法、放射光 X 線トモグラフィ、中性子反射率測定、X 線反射率測定、微小角入射広角 X 線回折、微小角入射小角 X 線散乱、微小角入射 X 線光子相関分光、光ピンセット法による分子間力測定などであり、これらの装置、手法の利用により、表面や界面の状態や現象が、今後さらに明らかになっていくものと期待され、最も重要な社会的・経済的波及効果であると言える。

産業界で新材料が試される過程では、性能とコストのバランス、耐久性、他の必須性能とのトレードオフの解消等においてシビアな判断がなされる。その中で社会実装が実現されていくには、(少なくともそのきっかけを作るのは)材料に対する開発者の強いこだわりも要素の一つに思える。その点で、応用を念頭に置いたアプローチがもう少し広がっても良いように思う。その中には、船舶の防汚に代表される表面コーティングに求められる大面積への処理技術のように、基礎研究では出てこないような課題の解決も必要になる。これだけの研究成果が得られたプロジェクトから、実用化に向けた検討が確実に進捗するための取り組み強化を是非期待したい。

(3) その他の特記すべき波及効果

本プロジェクトの研究対象は、当初は表面科学、界面科学の分野に限定されてはいたが、多大な研究成果が得られたことにより、多くの他分野への波及効果があった。特に材料においては、その界面や表面の特性解析が、材料そのものの特性に直接影響することが分かってきており、今後は様々な分野での応用が強く期待できる。また、本プロジェクトから派生して、米国、カナダ、ドイツ、フランス、韓国、中国、タイ、台湾などとの数多くの国際共同研究が進められたことも特筆される。さらに、本プロジェクトに参画していた研究者が数多く昇任していることや、別の大型プロジェクトを主宰する立場になっていることも、人材のキャリアアップという観点から大きな成果であると言える。

研究総括は世界のソフト界面研究を先導してきており、この分野に関連する研究センターなどの発展にも尽力してきた。日本学術会議会員や高分子学会長、日本 MRS 会長を歴任するなど、関連分野の発展に大きく貢献してきた。また、アメリカ化学会の界面科学分野の権威ある学術誌「Langmuir」の Senior Editor も務め、最近弱体化している世界における日本の科学技術の地位の向上にも努めている。さらに、プロジェクトに参画したグループリーダーや研究者のほとんどが大学や公的研究機関などで研究を続けており、CREST 研究などの研究費を獲得してソフト界面の発展に寄与している。このようにソフト界面分野における優れた研究者を輩出したことも、本プロジェクトの大きな成果と言える。日本の科学技術の発展のためには、ソフト界面のような幅広い分野に関連する基礎研究をしっかりと支え、さらに広げることができる次世代の研究者を育てることは最も重要である。プロジェクトにおいて中心的な役割を果たしたメンバーはそれぞれ昇進し、独立した研究グループとして精

力的に活動している。アカデミアでの基礎研究を継続しているメンバーがほとんどのようであるが、本報告書には直接現れていない形での企業との共同研究など産業応用に向けた取り組みについても、プロジェクト終了以降、それぞれの新たな所属先において精力的に推進されていることを期待する。

3. その他

ソフト界面は接着や摩擦、塗料、洗剤などの身近な材料の物性や機能を支える基礎研究であり、さらにエネルギーや環境、医療などに関わる幅広い分野の材料開発に不可欠な基盤技術を取り扱っている。電池材料や再生医療などを直接的な目的とするハイインパクトな研究に対する支援はもちろん重要ではあるが、ソフト界面のような身近な材料から先端材料までを支える基盤研究に対する支援も国の科学技術の底上げには不可欠である。このような観点から、高原プロジェクトで基礎科学の世界的な拠点を築き、多くの次世代研究者を輩出したことは、本プロジェクトの大きな成功を意味している。また、ERATOのプロジェクトでソフト界面が取り上げられたことに対して、JSTの研究支援事業に対する考え方を伺い知ることができ、今後の基礎科学の発展を期待させるものであった。このソフト界面プロジェクトは、国内で基盤科学技術の研究に携わっている研究者には非常に励みになる ERATO プロジェクトであったと思われる。

加えて、本プロジェクト中および終了後の基礎研究から生まれた様々な成果を産業界に活かして迅速に実用化させるためには、産業界も巻き込んだ大きな変革を起こす仕組みが必要である。一方、基礎研究に関しても引き続き支援し、新しい学理を創出し、学術イノベーションにつなげる長期戦略に基づく予算措置も用意すべきである。本プロジェクトによって日本にソフト界面研究の一大拠点が確立されたので、これを基幹として全国的に波及させる仕組みの設計も JST には期待したい。

本プロジェクト実施中および終了後に創出された多くのソフト界面素材、ハイブリッド材料の実用化を加速するような取り組みが、もう少し力強い形で推進されることを期待する。産業応用が実現されるためには、素材のある狙った材料特性だけが優れているのではなく、コストや耐久性、安全性、両立すべき性能とのバランス(トレードオフの解消)、生産効率や品質の均一性など、多くの観点からの課題をクリアする必要がある、それは必ずしも自然発生的には広がらないことも多い。実現可能性の高い材料とその応用分野の企業のマッチングを強化し、プロジェクトに応用検討を推進するような取り組みが今後加速されることを望みたい。