

ERATO 中嶋ナノクラスター集積制御プロジェクト事後評価（最終）報告書

【研究総括】 中嶋 敦（慶應義塾大学 理工学部／教授）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

- 一柳 優子（横浜国立大学 大学院工学研究院／准教授）
- 小西 克明（北海道大学 大学院地球環境科学研究院 物質機能科学部門／教授）
- 寺西 利治（京都大学 化学研究所／教授）
- 西原 寛（委員長；東京大学 大学院理学系研究科化学専攻／教授）
- 日比野 浩樹（関西学院大学 理工学部先進エネルギーナノ工学科／教授）

評価の概要

原子や分子が数～数十個結合した 1～10 nm のサイズ領域の物質をクラスター物質という。ERATO 中嶋ナノクラスター集積制御プロジェクトでは、このようなナノサイズのクラスター物質の機能解明を行いながら、精密な構造制御と集合形態によって、クラスター物質を核とするナノ集積物質科学を確立し、ナノデバイス創成の新しい道筋を提示することを目的とした。

中嶋敦 慶應義塾大学理工学部 教授を研究総括とする本プロジェクトは 2009 年 10 月に発足し、機能ナノクラスターの精密大量合成と同一環境配列集積、その精密ナノクラスター集積物質の物性計測と機能解析、さらに機能ナノクラスター集積物質のナノデバイス創成アプローチをシステムティックに連動させる研究体制を構築した。

その結果として、企業との共同で独自に作製したマグネトロンスパッタリング法をもちいた装置により、プロジェクト発足当初の主要な目標であった、単一組成クラスター物質として金属内包シリコンケージクラスターなどのナノクラスターを単離、大量合成する手法を構築することで、汎用の湿式合成では達成できない新規物質の創出における本気相合成法の優位性を確固たるものとするとともに、基板表面固定化学種の解析として、自己組織化単分子膜（SAM）の表面電子物性や励起電子寿命などの電子状態を二光子光電子分光法により明らかにするなどの成果を次々と挙げている。これらの知見は、SAM が良好な電荷分離層としての機能性を示すなど、広範な領域に有用な情報が提供されるものである。新規なナノクラスター合成や分子動力学シミュレーションの理論と実験の連携によるナノクラスターの物性機能研究の進展などによって、今後、量子効果などのバルクとは異なるインパクトあるユニークな現象の発現への展開や、長期的視点において今後の応用展開への波及効果にも期待することができる。さらに、走査プローブ顕微鏡や光電子分光法による構造・物性解析の真空一貫装置の開発において成果を挙げている。形態観察や局所物性評価などのナノサイズ物質の構造評価は、今後、簡便な評価方法・技術の構築への展開が期待される。

これらの一連の成果は、学術論文や学会発表、プレス発表、特許出願、またアウトリーチ活動を通じて適切に外部発表され、国内外に成果を十分に発信した。

基礎研究は十分目標に到達したと評価され、応用面を指向したデバイス創成研究は研究発足当初の構想を字義どおりには満たしているとはいえないものの、限られた期間内でいくつかの可能性を示すに至っており、今後の研究活動を通じて、完成に至ることが見込まれる。これらから、今後の継続的な研究活動を通じて、中嶋研究総括ならびにナノクラスター集積制御が当該分野において国際的に中核的な役割を果たすことが期待される。

以上を総合し、ERATO 中嶋ナノクラスター集積制御プロジェクトは、卓越した研究水準を示し、戦略目標「異分野融合による自然光エネルギー変換材料及び利用基盤技術の創出」に資する成果が得られたと評価する。

1. 研究プロジェクトの設定および運営

1-1. プロジェクトの全体構想

本プロジェクトは、中嶋研究総括が先導的役割を果たしてきた気相系でのナノクラスター生成に関する、基礎科学に立脚し世界に先駆けたマテリアル応用に向けた新しい指導原理や基礎学理を統合的見地から確立することを目指した。また、既に世界に先駆けて具体的な実例を先導的に見出しつつある数多くの実績を基礎としながら、化学ならびに物理、さらには工学の叡智を結集することを通じて、ナノ領域の真髄としてのクラスター集積物質科学の創出を図るものである。単体であるフラーレンの研究で行われたような大量合成法への展開を化合物系に適用するのは単純ではないが、湿式合成では見いだせない新規物質の興味深い特性が見つかり、実際に応用展開できれば大きな成果となり、その研究手法を確立することが本プロジェクトの成功の大きな要因の一つとなっている。

ナノ材料研究は基礎から境界領域、複合領域まで広い分野で重要であり、さらなる発展のポテンシャルを有しており、世界的にナノテクノロジーが盛んに研究されている中での分野の先導は極めて望ましい。本分野において我が国が世界をリードする立場を確保するためにも重要である。その科学は、原子・分子レベルで組織・構造を制御して、このナノ物質の新奇な機能を活用したナノシステムを創成することにつながる上、情報通信分野、環境・エネルギー分野、ライフサイエンス分野で極めて重要な要素学問、技術となる。

このことから、「ナノクラスター集積制御」は、純粋な基礎科学的興味から基板上への担持・集積化を通じてデバイス・マテリアルへと応用する従来にない独創的かつ挑戦的なアプローチであり、次世代の材料科学のイノベーションに繋がるという、学術面のみならず応用面からも大きなインパクトをもたらすことが期待されるプロジェクトとして、戦略目標「異分野融合による自然光エネルギー変換材料及び利用基盤技術の創出」のもとで発足した¹。

1-2. プロジェクトの目標・計画

本研究課題では、ナノクラスターの示す新奇で多様な機能性を背景として、クラスター構造単位を物質における機能発現の原点として位置づける。その上で、クラスター物質の機能解明を行いながら、精密な構造制御と集合形態によって、クラスター物質を核とするナノ集積物質科学を確立し、ナノデバイス創成の新しい道筋を提示することを目的とした。

この目的の実現のために、(1)機能ナノクラスターの精密大量合成と同一環境配列集積、(2)精密ナノクラスター集積物質の物性計測と機能解析、(3)機能ナノクラスター集積物質のナノデバイス創成の3つのグループが連携する体制で以下の目標にて研究を推進した。(1)を実施する精密大量合成グループ（以下第1グループ）では、単一構造のクラスターを大量合成することによって物質化する。特に対象物質として、これまでの一連の研究の中から、クラスターを用いたデバイスへの発展を期待でき極めて特徴的な構造を有する、(A) 金属内包シリコンケージクラスターと (B) 有機金属サンドイッチクラスター、の2つを選択し、重点的に取り組む。(2)を実施する物性機能計測グループ（以下第2グループ）では、単一組成のクラスター物質を精密集積体として結晶化あるいは固体表面に担持し、原子配列と物性の相関を評価・分析することにより原子レベルで正確に測定し、クラスター物質に現れる特徴的な現象を解析し、多様な物質系が示す固有の機能的特性を電子物性の点から明らかにする。(3)を実施するナノデバイスグループ（以下第3グループ）では、高精度に作られたナノクラスター物質を精密に集積化し、特性を飛躍的に高めたデバイスの構築を展開する。

¹ <http://www.jst.go.jp/pr/info/info676/shiryo5.html>

本プロジェクトにおける、上記の構成グループ間の連携による「クラスター物質を核とするナノ集積物質科学の確立とナノデバイス開発」への展開という目標設定・計画は概ね適切であった。クラスター科学は物質材料研究に欠かせない領域であり、シリコンナノテクノロジーと有機金属ナノデバイスの創出までも掲げている。さらにまた、オリジナルの装置、手法開発を基盤として、新規機能物質創成を目指す点は、一般の合成化学とは一線を画すものである。しかしながら、気相反応で生じた安定な物質でも、反応性の高い酸素や水蒸気が含まれる空气中で扱えるとは限らず、応用に関しては、実用的な製品に展開するのは、元来容易ではないと推定される。従って、気相反応でしか見いだせなかった物質の特徴的な性質を根幹から詳らかにした上で、集積化に基づいた素子設計につなげる。さらに、クラスター個々の機能を活かせる単分散状態での集積化を実現するために、表面とナノクラスターの相互作用解析に基づいた適切な表面の選択を行い、それを基に表面構造の解明、FET 特性やメモリー機能の実証を目指すことが期待された。

科学の視点で特に注目すべき課題は、ナノサイズのクラスターに特徴的な、量子サイズ効果などの物理的な現象の発現である。少ない原子数で構成されているクラスターは、バルク物質では現れない新奇な現象を見出すことが期待される。こうした観点からの検討を基軸としつつ、高精度に作られたナノクラスターの精密集積の技術を早急に確立し、デバイス創成研究へと展開することがプロジェクトの目標・計画として期待された。

1-3. プロジェクトの運営

研究実施場所は、物性機能計測グループとナノデバイスグループが「かながわサイエンスパークイノベーションセンタービル東棟」、精密大量合成グループと物性機能計測グループの一部は「慶應義塾大学先端科学技術研究センター」であり、いずれもプロジェクトのためのスペースを確保した。各グループはグループリーダーの下で主体的・能動的に研究を遂行し、月2回の全体ミーティング（セミナー形式）を開催し、研究進捗を相互に評価し、共有することを通して、グループ間相互の連携の促進が行われた。また、グループ内のミーティングが、研究総括、GL 以下グループメンバーにより月2回開催され、個別の課題抽出、成果報告が綿密に行われていた。さらに、外国人を含む外部講師を招いた「中嶋ナノクラスター集積制御セミナー」を年4回程度開催し、最新情報の収集と国内外交流の促進が図られた。

上記のように、研究総括のもとで気相合成技術を核に、グループでの分担や、効率的できめ細かな研究推進がなされており、プロジェクト研究体制は適切に構築・運営されていた。実施場所は一部を除いては近くに実験室が配置されており、連携や密なコンタクトを取れる良好な環境にあった。全体ミーティングは相互の進捗をチェックし共有するために効果的であった。また、化学合成、計測評価、機器装置設計、理論など多様なバックグラウンドをもつ研究者が、バランス良く配置されており、大学で見いだされた基礎科学をベースにナノクラスター集積物質のサイエンスを開拓し、マテリアル、デバイスへの応用へと展開する上で効果的な研究体制がとられていた。

また、若手研究員はコンスタントに論文を発表しており、若手研究者育成を行う適切なリーダーシップも発揮されている。初期に研究装置の納入と立ち上げに時間が取られたが、これにより強固な装置群が構成され、加速度的に成果が創出されている。機器開発については民間企業と共同で行われて製品化に届く成果も得られており、効率的な連携が図られ、研究費の執行状況も効率的であった。このような産業界との連携、知的財産プロデューサー派遣事業を活用した企業との戦略的な共同特許出願、装置名の登録商標出願など、高強度ナノクラスターイオン源の産業化に向けた取り組みは評価できる。

〔研究プロジェクト（領域）の設定および運営〕 a+（十分に的確かつ効果的である）

2. 研究の達成状況および得られた研究成果

2-1. 精密大量合成グループ

既に気相合成法でその生成が見出され、本プロジェクトの主たる合成対象物質であるシリコンケージナノクラスターとランタノイド有機金属マルチデッカー錯体を中心に述べる。

シリコンケージナノクラスターについては、気相反応による精密大量合成法の開発が必要であり、その装置開発にプロジェクト期間前半の多くの時間が費やされた。銀クラスターのようなモデル物質を用いて、高強度クラスター源の開発、HiPIMS 法による合成の反応追跡などが行われ、一次的なクラスターサイズ制御ができることが実証されている。そして、主たる対象物質であるシリコンケージナノクラスター系に応用し、 TiSi_n 系と TaSi_n 系の研究が大きく進んだ。さらに、独自に開発した低損失捕集法による分散液からの単離・精製を確立し、質量分布の狭いサンプルを加工性の高い形態で提供することにも成功している。これらのように一定組成のクラスターの大量合成・選別を達成し、安定性の高い金属内包シリコンケージクラスターの単結晶の創成を確立し、確固たる成果を示したことは評価される。さらに、ナノクラスターの単離技術が進歩したことにより、構造解析に着手され、X 線構造解析用の単結晶試料の作製にも進捗が見られた。今後の研究により XAFS 法の検討なども含めた決定的なナノクラスターの精密構造決定へとつながることが期待され、さらにインパクトのある論文として発表されると期待される。

また、構造を評価する手法の開発もナノ科学のひとつの課題であると考え。ナノクラスターの生成過程のより深い理解に、分子動力学シミュレーションの理論研究者との連携や検討も有効である。これらが達せられれば、従来の気相合成法の限界を打ち破る画期的なものとなると考えられる。さらに安定化メカニズムが明らかとなれば、他の気相クラスターにも適用範囲が広がるであろうと予想され、国内外に多大な波及効果をもたらすことが期待される。

有機金属マルチデッカー錯体は、単核錯体（すなわちダブルデッカー型錯体）について、合成と単離、構造解析を達成しており、マルチデッカー型錯体の合成の端緒が得られている段階である。単核錯体に関しては発光特性や単分子磁石の特性が得られているが、他のランタノイド（特に Eu(II) ）錯体も数多く知られていることを考えると、それらに対する本系の優位性、ポリマー構造とダイマー構造との物性の違いの構造的、光物理的観点からの議論等を含めた、クラスター系での興味深い物性の発見を今後期待したい。

その他に、金属・合金ナノクラスターの湿式合成研究も行われ、基板上への集積化が検討されている。この研究テーマは、世界中で競争が激しく、いかにオリジナルな系を見出せるかが重要であり、プロジェクトとしては、主たる合成対象物質を基板固定するための予備的な研究と位置づけられるであろう。本プロジェクトの主旨と照らして、一般的なバッチ式液相合成と比較した優位点として、微小反応場を利用した合金クラスターの精密合成、バッチ式では取得困難なサイズ分布の狭い 3d 遷移元素クラスターが達成されている。さらなる究極的な分布の狭窄化、規則集積体の新奇特性の発見への展開を期待したい。

本研究課題の目標に対する達成度としては、まだ十分とは言えないが、合成装置の開発や合成手法の確立が大きく進んでおり、ナノクラスター源に関する特許が企業と共同で出願され、装置開発がほぼ完成していることも評価される。今後、材料として利用可能な収量のナノクラスターの汎用的な合成を成し遂げることが期待できる状況にある。一度、純度の高い錯体が得られれば、物性測定から応用へと研究成果のさらなる発展が期待できる。様々な新規クラスター物質の合成や、究極的な分布狭窄なクラスター合成への展開を図ることも期待される。本プロジェクトの終了後も基板上の集積と評価にむけて、戦略的に研究を推進することが望まれる。

2-2. 物性機能計測グループ

本研究グループは、新規ナノクラスターの探索と関連した孤立状態での物性の評価から、固体基板表面上に集積配列したときの物性評価へ展開することを目指した。主幹となる研究対象は、精密大量合成グループから供給されるナノクラスター試料を基板上に配列し、その構造、物性を

解析することである。ナノクラスターの生成から基板上への担持、走査プローブ顕微鏡や光電子分光法による構造・物性解析を真空環境下で一貫して行うことのできる装置を開発している。各種ナノクラスターの形態観察ならびに局所物性評価を直ちに行える観点から評価される。ナノサイズの物質の構造評価は、ナノテクノロジーが発展しつつある現在においても未だ課題であり、これらは非常に重要な技術である。普遍的かつ簡便な評価方法・技術構築も重要な共通課題である。

二光子光電子分光法を用いた基板表面固定化学種の解析では、SAM の表面電子物性と励起電子寿命など電子状態を明らかにするなどの成果が得られており、表面の電子状態を明らかにできる注目すべき技術である。また、走査トンネル顕微鏡により I-V 特性と z-V 特性を併用して、フェルミ準位近傍の広い領域でピークを観察し、電子状態を測定できたことは高く評価される。

また予備研究として、ビス（ベンゼン）クロム誘導体やフェロセンなどのシンプルな金属錯体を SAM と組み合わせた系や、銀クラスターをフラーレン薄膜と組み合わせた系などの測定や理論計算が行われ、その結果の一部は論文としても報告されている。これらの知見は、SAM が良好な電荷分離層として機能することを示しており、本プロジェクトの枠を超えて広範な領域に有用な情報を提供するものと評価される。また、二光子光電子分光法による SAM に吸着したフェロセンの光励起状態の検討により、絶縁性基板上に孤立して固定化されることで独特な励起状態が形成されることを明らかにした結果は、SAM のユニークな一面を示したものであり、クラスターの機能化に寄与すると期待される。また、本来の目的である気相合成で独自に開発したナノクラスターを用いた研究成果として、C₆₀ 薄膜上にシリコンケージナノクラスターを凝集させることなく単分散で担持することに成功し、化学的、熱的安定性を光電子分光法により実証した。金属内包シリコンケージナノクラスターの化学的、熱的安定性が証明されたことは、物性解明にもデバイス応用にも重要な成果である。さらに、超原子ナノクラスター連結体が、実験的に確認されたことも独創的で重要な成果であり、ユニークな物性発現につながることを期待される。

この様に、本プロジェクトで独自に開発したシリコンケージクラスターの基板への担持の研究が進んでおり、今後、その構造解析や物性評価などが進展することが期待される。具体的に、取り組みが望まれ期待される成果例として、(1) C₆₀ 上に担持した単一物性シリコンケージクラスターの構造の同定に基づいた構造と物性の相関に関する議論の深化、(2) 理論的に解明された超原子ナノクラスター多量体や M@Si₁₆ 超原子クラスターのヘテロ構造体の物性予測の実験的な実証への発展、(3) SAM にソフトランディングし孤立固定化されたクラスターの構造・配向の特定を IRAS スペクトルとモデル計算との組み合わせから明らかにし、その結果を様々なクラスター類へ展開させること、および(4) その配向構造と機能の相関の解明、(5) 秩序集積構造の構築と機能探索、機能発現への戦略的な展開、などが挙げられる。これらの一部はすでに研究成果が達せられつつあり、本研究成果をさらに多くの成果や展開に結びつけることが期待される。さらに将来的には、ナノクラスターの物性機能研究の進展によって、量子効果などのバルクとは異なる物理現象が見出されるなどのインパクトあるユニークな現象が見出されることが期待される。

2-3. ナノデバイスグループ

本研究グループでは、ナノクラスターを集積してデバイスを開発することを目標としている。有機金属ナノクラスターに関しては、ナノクラスターのデバイス化、電子を用いた物性評価を目的として、XAFS 測定用試料の測定フィルム、SiN_x セルをガスバリア材として用いる封止技術を検討し、嫌気条件下にサンプル封入するための技術開発に成功している。ガスバリアポリマー樹脂によるサンドイッチクラスターの耐酸化性向上にはさらなる性能向上が求められるものの、ガスバリア封止技術を達成したという成果は評価される。この手法はクラスターに限らず他の嫌気な化合物の材料応用に適用が期待され、一般的な指導原理を確立できると期待されるなど、広い意味で科学技術の貢献に繋がるものと評価される。

応用としては、発光材料、太陽電池用色素としての利用が検討されており、明快な目標設定が

なされた。より具体的には、ナノクラスター薄膜の電気的特性評価やナノクラスターフローティングメモリーの試作などの明確な目標に焦点を絞っており効果的である。一方、嫌気デバイスを目標としている場合、顕著な高性能、新機能が必要となる。有機金属マルチデッカー錯体など二次元クラスターの特長について新機能発現の検討をさらに深めることも求められる。

シリコンケージナノクラスターについては、集積体の電子素子化を検討し、興味深い電気的挙動が見出されており、気相系で合成されるクラスターの電子デバイスとしてのポテンシャルが示されている。金属内包シリコンケージクラスターを用いた急峻界面の形成は、本物質に特有である。また、FET 特性を評価し、アンバイポーラ動作を示すことを明らかとした。この FET 応用は、本プロジェクトオリジナルの大量合成技術に基づく、画期的な取り組みであるが、現時点では本材料を用いる意義が必ずしも明確になっていない。今後、分子レベルでの機構の解明を進め、シリコンナノクラスター特有の機能に由来する特性の理解が望まれる。また有機配位子保護金ナノクラスターの単分子膜を用いて、サイズ依存性を有する電荷蓄積機能を実証し、メモリー素子としての可能性を示している。これらの結果は電子素子としてのナノクラスター化合物の可能性を提示している。

本グループでは、いずれの研究も初期段階にあるが、他グループが実践したような関連研究が進むことにより、本 ERATO プロジェクトならではの物質によるユニークな特性を示すデバイス機能が見出されることが期待される。なお、成果をシーズとして企業との共同開発へ導く等の方法も考えられるが、本プロジェクトの得意な項目に焦点を絞ったことは有効であったと思われる。グループリーダーが研究期間途中で異動したが、研究総括がリーダーを兼務されて、プロジェクトを恙なく終了した。今後は、より積極的に外部のデバイス専門家と連携を図るなどの取り組みも期待したい。

以上にに基づき研究成果を俯瞰すると、本プロジェクトでは、生成量を大幅に向上させたクラスター合成手法の確立、物性評価法の確立、基板へのクラスターの担持と界面評価を中心に成果を得ており、当初の計画におおむね沿ったものと評価される。

これまでに報告された成果は、気相反応で発見された新規クラスター物質を大量合成して、その性質を明らかにし様々な応用を探索する、という研究目標において、その基礎となるものが多い。研究期間の初期に研究装置の納入と立ち上げに時間が取られ、成果創出が遅れた面が否めないがプロジェクト終了時に向けて研究が加速された。その中で、基礎研究を極めることに集中し、ナノ物質を精密にデザインする目標により、新しい発展を見出していることは評価できる。金属内包クラスター、有機金属ナノクラスターのソフトランディングの成果は発展性も望まれ、世界に向けた発信も期待される。気相合成や二光子光電子分光、走査トンネル顕微鏡などの強みを活かした特徴的な装置群が構成され、これにより加速度的に成果が創出されている。とくに研究総括が先導してきた気相系で合成されるシリコンケージクラスターなど独自の系では、本プロジェクトの成果として興味深い現象・物性が得られており、今後は新現象・物性の探索を継続し、新しい原理やコンセプト、ナノデバイス応用に繋がることが期待される。また、引き続いて積極的な外部との連携を通じた、製品化という最終的な出口を見据えた推進や、クラスターあるいはクラスター集積体に独自の特長を活かした、特出した物性・機能の発現、一定組成のクラスターの大量合成・選別の加速、クラスター構造決定、全体を統合した構造と物性などの議論の深化、ナノクラスターの現象における一層の創造的な成果が期待される。

基幹となるナノクラスターに関する外部発表において、招待講演や学会発表は標準的であるが、論文発表等については研究期間後半に加速され、専門家へのアピールは十分であると感じる。また、シンポジウム開催や報道発表などによる一般社会へのアピールも行われている。今後はデバイス分野など他分野との共同シンポジウム開催等を推進し共同研究を積極的に進めることなども期待される。

知的財産権においては、特許に関しては、5 件が出願されている。気相クラスターの大量合成法については、企業との共同出願を含め一定の業績を挙げており、外国特許も出願されている。

特に、知的財産プロデューサー派遣事業を活用し、戦略的に国内および国外特許出願を行ったことは高く評価される。

〔研究の達成状況および得られた研究成果〕 a（高い水準にある）

3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

3-1. 科学技術への貢献

気相反応で発見された新規クラスター物質の大量合成、物性解析、デバイス応用を探索するという全体構想は、かつてフラーレンの研究がその道筋で大きく発展したように、潜在的に科学技術へ貢献できる可能性を秘めている。本プロジェクトでは、単体のフラーレンと異なり、化合物系に主眼を置いているため、ナノクラスターを合成するための装置の開発から取り組んでおり、この独自の製法により、独創的な生成物を得られると期待できるものの、全体の道程にはクリアすべき課題が多く存在していると考えられる。本プロジェクトでは、その状況を認識しつつも、果敢にチャレンジし、いくつかの科学技術に貢献する新規な成果を得た。特に、シリコンケージクラスターの大量合成やサンドイッチクラスターの有機分子膜へのソフトランディングの成功は、科学技術上のインパクトおよび独創性があり、ナノ集積物質科学という新しい分野に発展できると期待される。多数の招待講演からも、国際的に高く評価される先導的かつ独創的な成果が得られていると判断される。また、気相系合成における生成収量の向上と独自の低損失捕捉技術の開発、SAM 上での光ダイナミクス、フラーレン／クラスター界面特性、多角的な構造解析の着手などは、世界的にみても革新的、先導的なものであり、関連分野に多大な波及効果が期待できる。最近、欧米においても類似のプロジェクトが動いているが物理系主導であり、「精密化学」の観点からのアプローチは本プロジェクト独自のものであり、独創的なものであると評価される。また、基礎研究の分野から応用へつなげる展開へと発展させた点も科学技術の貢献に寄与しており大きく評価される。今後さらに、気相混合法によるナノクラスターの生成を基盤に、湿式混合法やその他の製法によるナノサイズの物質合成法等において、国内外における先行研究、競合研究に勝る成果により、本プロジェクトが、気相合成に基づく、炭素系ではないナノクラスター科学という、新たな科学技術領域を切り拓くと期待される。

3-2. 社会・経済への貢献

本プロジェクトはデバイス応用を研究の出口としているが、実際には、社会・経済に貢献する産業化につながるような成果を直接的に創出することは研究分野として難しく、基礎研究への貢献が大きな役割であると思われる。ただちに産業への応用に向けるというより、本プロジェクトにおいては、ナノサイエンスの研究を極めることが重要であり、ナノクラスターに特徴的な物理現象を見出すことを目標にすることが望ましいと考えられる。

一方、具体的なメモリー素子の実験結果は今後の可能性の点から評価できる。また、XAFS 測定用試料の測定フィルムの提案は、XAFS 実験者への実用が期待され、このような研究開発者のための技術提供も重要な貢献である。超原子クラスターの合成に関しては、クラスター装置の開発から着手しており、その開発に企業と共同で特許の出願も行っており、実用に向けた活動も行われ一定の業績を挙げている。知的財産プロデューサー派遣事業を活用し、国内のみならず米国・欧州への戦略的な特許出願や、装置名の登録商標出願など、高強度ナノクラスターイオン源の産業化への取り組みは評価される。nano tech 2015、2016、米国での Material Research Society 会議等への出展も、成果普及および成果展開への重要な活動として評価される。ナノクラスター物質の多様化や規則集積手法の確立により、ナノクラスターを機能単位とする新規デバイス創成など科学技術イノベーションに寄与することが期待できる。また、ケイ素を初めとする汎用軽元素を主体とした機能ナノクラスターやデバイスの開発を通じて、レアメタルを極力軽減した未来材料の

設計への道を拓くと期待され、これは元素戦略等の観点からも科学技術イノベーションに大きく寄与すると予想される。さらにまた、光エネルギー変換素子における界面制御は重要な課題であり、ナノクラスターを用いた界面構造や界面電子状態の制御は、エネルギー変換効率の高い光電素子開発において大いに貢献するものと期待される。気相法に基づくナノクラスターの精密大量合成技術は、今後、太陽電池、センシング、触媒など、幅広い応用領域への展開が期待される。

さらには、本プロジェクトにおける成果の発信などを通し、ナノサイエンスへの理解と素晴らしさを社会に伝え発信する役割を担うことも期待されよう。

〔研究成果の科学技術への貢献、社会・経済への貢献〕 a（貢献が期待できる）

4. その他特記すべき事項

4-1. 若手研究者支援

若手研究者が、それぞれの強みを活かし、周囲と連携しながら、コンスタントに成果を創出していることは、中嶋研究総括のリーダーシップの賜物であろう。若手研究者支援に関しては、全体ミーティングに加え、グループ内のミーティングを研究総括、GL 以下グループメンバーの参加を得て、月 2 回開催し、個別の課題抽出、成果報告が綿密に行われることを通してなされていた。さらに、外国人を含む外部講師を招いた「中嶋ナノクラスター集積制御セミナー」の年 4 回程度の開催、最新情報の収集と国内外交流の促進等により、研究者の育成が行われた。

研究員への慶應義塾大学からの特任職位の付与など、大学での研究実績と職位の明示による外部機関への配慮もなされた。また、ERATO 特別設置科目「メゾスコピック物質科学特論」の授業を実施し、大学院生に最新の研究を紹介し啓発することにより、大学院教育への貢献を行い、学術成果の社会還元がなされており、その上、講師を本プロジェクト内の若手研究者が務めたことで、メンバーの教育経験の充実も図られていた。サイトビジットで研究室を見学した際にも、研究補助者らが誇りを持って研究に取り組んでいる様子がうかがえた。これらから若手研究者の大学、公的機関、企業への転職につながり、それぞれが活躍している。今後プロジェクトの研究成果をアピールしていくことで、さらなるキャリアへ発展する可能性も期待される。

4-2. アウトリーチ活動

プレス発表、慶應科学技術展（KEIO TECHNO-MALL 2013、2014、2015）への出展、ワークショップ開催等、アウトリーチ活動を行った。国際ワークショップならびにプロジェクト成果報告会の主催や、各種展示会への出展も重要な活動であった。特許も 2 社の企業と共同出願を行っている。大学と企業が共同で特許を申請することは、困難な点も多いと思われ努力がうかがわれる。また、大学院の授業で特設科目を開設し、プロジェクトメンバーがオムニバスで講義するというのはアウトリーチ活動の観点でも良いアイデアである。科学の基礎と最先端の研究を身近に聴ける機会は、学生にとって教育効果が高いといえる。シンポジウム開催や報道発表などによる一般社会へのアピールも行われた。中嶋研究総括が組織委員長を担い The 17th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC-17) 国際シンポジウムを開催され、日本から先導していく分野であることを発信したことは非常に意義がある。10 年以上研究が推進されてきたナノテクノロジーの分野、ナノサイエンスの重要性とポテンシャルの深さを今後も継続してアピールしてゆくことも期待される。

5. 総合評価

研究全体の道程にはクリアすべき課題が多く存在しているため、5 年間のプロジェクトの前半

は、それらの課題を解決することが行われ、基礎固めが行なわれた。ナノクラスターの生成と評価はわが国の得意とする分野でもあり、本プロジェクトで提案された技術のいくつかは、ERATOの目的の1つである「科学技術の源流をつくる」という項目に沿っている。独自装置の開発から取り組んでおり、それを有効に活用して超原子クラスターに代表されるような、独自の製法による独創的な試料の生成と、その評価方法を国内外へ向けて発信し、源流となる技術を駆使し世界を先導してゆくことが望まれる。オリジナルな装置を組み上げるためには、ある程度の時間が必要であり、インキュベーション期間とも考えられる。プロジェクトの後半は、構築したオリジナルな装置群をフル活用し、それぞれの段階での研究において加速度的に成果を創出しており、論文として発表されてきた。HiPIMSによるナノクラスターの選択的大量合成法の開発、HiPIMS装置の開発、大量合成としての目標値の達成、二光子分光法技術の提案、サンドイッチクラスターのソフトランディング、気相系合成における生成収量の向上と独自の低損失捕捉、SAM上での光ダイナミクス、フラーレン／クラスター界面特性など、クラスター以外の分野にも広く興味を持たれる現象、知見が見いだされており、注目すべき成果が得られている。また、インパクトファクターの高い一般化学誌にも掲載されている。これらの成果は、界面化学を中心に多大な波及効果をもたらすと期待される。また、ナノサイズの物性評価に関して、数種類の計測・評価方法を提案して研究を進め、普遍的なナノサイズ評価法の確立に向けた成果が得られている。

本プロジェクトでは、実験研究と理論研究の融合展開を通じて、独創的なナノクラスターを開発するとともに、ナノクラスター集積体の界面が関与する電子授受機能を見いだすことで、デバイス応用への展開に資する有用な知見を得ている。この研究の進展を踏まえて、オリジナルな物質の特異な物性を用いた素子作製という目標にかなり迫った成果を出したものと判断できる。最終年度に至り多くの結果が形になり論文数も急激に増えている。今後、本プロジェクトの成果をベースとして、ナノクラスター集積制御を通じた機能発現、デバイス応用への展開が期待される。次に目指す秩序集積構造の構築はそれ自体困難であることが予想されるが、緻密な戦略構築により達成可能であると期待される。そのためには、本プロジェクトで得られた個別に有意義な成果を戦略的に統合して困難を克服することが望まれる。またその一方で、クラスターならではの特徴を前面に出して、ナノクラスターあるいはクラスター集積体としての面白い現象、物性の探索に焦点を当て、将来のイノベーションや新しい科学の潮流につながる新しい原理、コンセプトを提示することにより、本ERATOプロジェクトの成果を大きく世界にアピールできると考える。

装置の開発などで企業と共同開発で特許を申請しており、産業界への貢献が有効に機能している。太陽光発電技術において、界面構造や界面電子状態の制御に基づく、効率的な電荷分離は重要である。本プロジェクトにおける、ナノクラスターを用いた急峻な界面の作製やナノクラスター/薄膜界面の電子状態の理解に関する成果は、戦略目標の達成に寄与するものである。

以上を総合し、ERATO 中嶋ナノクラスター集積制御プロジェクトは、卓越した研究水準を示し、戦略目標「異分野融合による自然光エネルギー変換材料及び利用基盤技術の創出」に資する十分な成果が得られたと判断する。

〔総合評価〕 A（成果が得られた）

以上