

**(独) 科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
チーム型 (CREST)**

研究領域中間評価用資料

**「ナノ界面技術の基盤構築」
(2006-2013)**

研究総括 新海征治

2011. 3. 14

1. 戦略目標

「異種材料・異種物質状態間の高機能接合界面を実現する革新的ナノ界面技術の創出とその応用」

人と環境に優しく安全で快適な持続的発展社会を実現するための一つの有力な技術として、近年、ナノテクノロジーの研究に力が注がれてきた。その結果、人工物質やナノ構造の形成など個別の分野で各種の有望な技術・材料が提案されてきた。今後、これら技術・材料を組み合わせる産業上有用な材料・デバイスを開発するには異種材料、異種物質状態間の接合が不可欠である。しかしながら、接合界面の原子分子レベルでの解析、および、接合により新たに発現する界面機能とその制御に関しては、その科学的・技術的基盤が未だ十分には構築されておらず、多面的な原理的ブレークスルーが必要とされている。言い換えると、「ナノレベルでの界面の理解」を通して、新しい材料設計へのパラダイムシフトを誘発することが可能となるものと期待される。

本戦略目標は、以上の状況を踏まえ、異種接合界面におけるナノ構造の理解と制御による飛躍的な高機能化を達成する革新的ナノ機能界面技術の創出を期待して提示されたものと考えている。

異種材料、異種物質状態が接合された材料・デバイスの開発の現状と課題、その解決により期待される展開は以下のとおりである。

- ・ エレクトロニクス分野では、LED とトランジスタを代表例として無機半導体デバイスの有機化が進められている。今後、有機材料と金属との界面における電子素過程の理解に基づくナノ制御により、長寿命、低消費電力、高速動作などを併せ持つ革新的有機デバイスの創出が期待できる。
- ・ エネルギーや環境の分野では、燃料電池のエネルギー変換効率や耐久性などの向上が課題となっているが、これも、電極と電解質との界面のナノ構造制御が鍵となっている。また、環境浄化用触媒や機能制御膜においてもその表面のナノ構造制御により革新的な機能向上が期待できる。
- ・ バイオ医療分野では、食品の安全保障やテーラーメイド医療、再生医療などを目指して、DNA・タンパクチップ、DDS、バイオセンサーなどが開発・実用化され、さらに、生きた細胞や組織を一部に組み込んだナノバイオデバイスも研究が始まっている。生体材料同士または人工材料との界面の制御も重要な課題の一つである。
- ・ 近年、STM や AFM に代表されるナノスケールで物質を直接観察、識別・同定する計測・分析手法は著しく進展し、ナノレベルでの現象の理解、機能の制御を側面から支えることが期待される。

これらの実現のためには、ナノスケールレベルの各種接合界面の分析・計測および理論解析による横断的な知識の蓄積と分子工学、界面工学、薄膜工学、精密材料創製化学、ナノメカニクス、精密分子操作、表面反応ダイナミクス、精密加工等幅広い分野の知見を総動員したナノ構造制御が不可欠である。特に、革新的な実用材料、デバイスへの応用による実証レベルまで到達するには、ナノスケール界面の分析・計測や理論解析とそれを基盤と

した工学的応用展開との密接な連携体制が必須である。

2. 研究領域

「ナノ界面技術の基盤構築」(平成18年度発足)

本研究領域は、異種材料・異種物質状態間の界面をナノスケールの視点で扱う研究分野が集結することによりナノ界面機能に関する横断的な知識を獲得するとともに、これを基盤としたナノレベルでの理論解析や構造制御により飛躍的な高機能を有する革新的材料、デバイス、技術の創出を目指すものである。

具体的な研究対象としては、エレクトロニクス、エネルギー変換用デバイスにおける有機材料と金属・半導体などとの界面、環境浄化触媒や機能制御膜などにおける表面・界面、ナノバイオ医療用の生体材料と人工物との界面などが対象となる。さらには、物質・材料の生成プロセスを利用した、または、ソフト構造体を鋳型とした無機系物質のナノ構造体の創製なども機能界面の利用という視点で研究対象に含まれる。このような目的を達成する方策として、異分野の研究代表者を分野横断的に採用し、彼らの研究融合を通して基盤構築の目的を達成するとともに、新規なナノ研究分野の創出をも目指したい。

3. 研究総括

氏名： 新海征治 (所属：崇城大学工学部 役職：教授)

4. 採択課題・研究費

* 研究費:平成22年度下期までの落付見込額に平成23年度以降の計画額を加算した金額

(百万円)

採択年度	研究代表者	中間評価時の所属・役職	研究課題	研究費*
平成 18年度	稲垣伸二	(株) 豊田中研シニアフェ ロー	有機シリカハイブリッド材料のナノ構造制御と機能創出	4 0 0
	尾嶋正治	東京大学 教授	超高輝度放射光機能界面解析・制御ステーション	3 4 9
	川崎雅司	東京大学 1) 教授	酸化物・有機分子の界面科学とデバイス学理の構築	4 5 4
	北川 宏	京都大学 2) 教授	錯体プロトニクスの創成と集積機能ナノ界面システムの開発	5 3 6
	春田正毅	首都大学東京 教授	異種物質との接合を利用した金クラスター触媒の機能設計	4 8 2
平成 19年度	有賀哲也	京都大学 教授	巨大 Rashba 効果によるスピン偏極電流	1 7 6
	君塚信夫	九州大学 教授	自己組織化に基づくナノインターフェースの統合構築技術	4 0 3
	平川一彦	東京大学 教授	ナノギャップ電極／ナノ量子系接合による新機能の創出	3 8 0
	藤田 誠	東京大学 教授	自己組織化有限ナノ界面の化学	3 9 2
	由井伸彦	東京医科歯科大学 3) 教授	分子運動操作を基盤とした多次元的バイオ界面	2 9 4
平成 20年度	一ノ瀬泉	(独) 物質・材料研究機構	界面ナノ細孔での液体の巨視的物性の解明	2 4 0
	小江誠司	九州大学 教授	水素活性化アクア触媒界面による常温・常圧エネルギー変換	2 6 9
	栗原和枝	東北大学 教授	表面力測定によるナノ界面技術の基盤構築	3 0 9
	櫻井和朗	北九州市立大学 教授	DDS 粒子のナノ界面と鳥インフルエンザワクチン等への応用	4 3 8
	松本和彦	大阪大学 教授	量子界面制御による量子ナノデバイスの実現	2 4 0
総研究費				5, 3 6 2

1) 採択時：東北大学 2) 採択時：九州大学 3) 採択時：北陸先端科学技術大学院大学

H22年12月までの、追加配賦の執行額を下表に示した。

(単位：百万円)

費目	執行額
総括裁量経費	324
国際強化支援策	15
社会還元策	41
JST-RA 制度	57
その他追加配賦	325
計	762

総括裁量経費は、各課題の当初予算から一律に10%（479百万円）を徴収して留保し、8年間の予算を策定した。原則、第I四半期末頃に全チームに希望を募り、毎年度予算の枠内で、重要度・緊急度による査定を行い配賦した。使途の大半は設備・機器、残りは予期せぬ人事異動などに伴う人件費であった。各チームの急な計画の変更や思わぬ展開に対する柔軟な対応をサポートできている。

国際強化支援策は、応募のあった案件が審査の結果、すべて採択された。北川チーム、春田チームの、海外の大学との共同研究、藤田チーム、由井チーム、櫻井チームの、国際シンポジウム開催を支援した（国際シンポジウムについては、添付資料「5. シンポジウム等」参照）。社会還元策（平成21年度のための支援制度）は、春田チームに民間企業のグループが加わっての共同研究を支援し、企業には基礎的な研究に立ち戻っての知見が蓄積されるとともに、製品開発につながった。

5. 研究総括のねらい

物事を把握するときに、自分は真正面から真正直に把えるようなやり方にはどうしても馴染めなくて、斜めから、下から、そして後ろから眺めて、真正面からは見えない“もの”の本質を探り出すのが好きである。イタリアなどで絵画や彫刻を観賞するときも、正面から観てそこに教科書に載っていた写真と同じ“もの”があるのを確認して満足するようなことはどうしてもできない。それこそ、あらゆる角度から観察して製作者の意図を自分なりに理解しようと努めてしまう。ある意味では、これは「研究者としての性」なのかもしれない。

物質が形成する「相」は、大きく分類すると気相、液相、固相、さらにはこれらの中間相ということになるが、材料設計に適した相ということになると、固相および中間相が圧倒的に有利である。すなわち、最近の戦略的研究目標のひとつである「イノベーション」

化を達成するためには、気体および液体を「固体化」、あるいは「ソフトマテリアル化」することがどうしても必要になってくる。このプロセスで重要な役割を演ずるのが界面であると考えることができる。本研究領域は、異種材料・異種物質状態間の界面をナノスケールの視点で扱う研究分野が集結することにより、ナノ界面機能に関する横断的な知識を獲得するとともに、これを基盤としたナノレベルでの理論解析や構造制御により飛躍的な高機能を有する革新的材料、デバイス、技術の創出を目指すものである。しかし、「ナノ界面」というキーワードを狭義に定義してしまうと、本研究領域がテーマを発展的に拡大再生産するような基地になるとは思えない。寧ろ、広義に定義して境界領域を積極的に取り込んだ方がより生産的な結果に繋がるものと考えられる。すなわち、採択研究者の専門分野を巧みに組織化すれば、研究活動においても新しい「中間相」を創出できるのではないかと考えた。

一つめは、「界面」が持つイメージを マクロの見方で 「2次元的なもの」のみに限定しない方が良いということである。すなわち、本領域で対象とする界面は、一般的な材料間、物質状態間の2次元界面に限定せず、0次元（ナノ粒子、ベシクル、細胞表面など）、1次元（ナノチューブ、分子集合型ナノファイバーなど）、ならびに3次元（多孔質結晶の空孔など）の超構造体が提供する界面あるいは表面も含めて考えた方が、予想外の展開につながる確率が高いと思われる。二つめは、用いる材料。金属、粒子などのハードマテリアルは勿論のこと、高分子、分子集合体、ゲル、バイオ由来物質などのソフトマテリアルが新規界面の構築に利用されることを期待した。無機－有機ハイブリッド材料にも大きなポテンシャルがあるし、また「“ゆらぎ”を持つソフト界面」なども設計できたら面白いかもしれないと考えた。

さらに、研究総括自身がまだ発展途上の現役の研究者なので、CREST 研究者と同じ目線で物事を観察・討論して本領域をリードして行きたいと考えている。

6. 選考について

本領域で実施する研究における界面（表面）の定義としては、一般的な材料間、物質状態間の2次元界面（表面）のみには限定せず、0次元（ナノ粒子、ベシクル、細胞表面など）、1次元（ナノチューブ、分子集合型ナノファイバーなど）、3次元（多孔質結晶の空孔など）などの超構造体が提供する界面（表面）も対象とした。

また、革新的なナノ界面材料やデバイスの創製に直接関わる研究だけではなく、これに資する理論計算やシミュレーション解析、分析・計測についても募集対象とした。

ただし、界面におけるナノレベルの原子・分子の精密操作・微細加工など装置開発を主目的とする研究は原則として募集対象とはしなかった。これは同時期に設定されている他の類似プログラム（先端計測分析技術・機器開発事業）との重複を避けることを考慮した

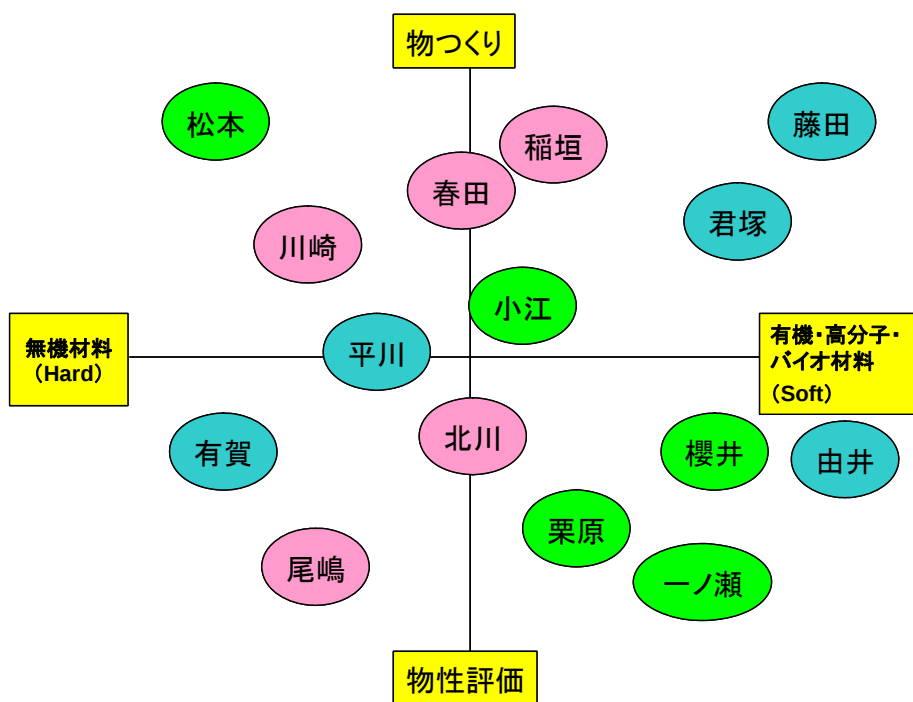
ためである。

これまで、機能設計するための材料は、有機・高分子化合物、無機・金属化合物、天然由来化合物などに分類されてきたが、革新的な機能を持つナノ界面を創製するという目的からはこのような旧式の分類はあまり意味がないと考えた。さらに、各化合物間のハイブリッド化が材料開発における0→1型の研究進展をもたらす例も多く、このような観点より、本領域では異分野間での共同研究を積極的に進めるべく、募集段階で既にそのアイデアがあれば提案書に記載して欲しい旨、募集要項に明記した。そのアイデアに関する記載がなくても審査段階でマイナスポイントとはしないが、採択された場合は、実施する際に“半強制的に”異分野間での共同研究を要請することとした。これにより、研究代表者が否応なしに知恵を絞る環境を作り、「革新的なアイデア」に辿り着く機会を増やすのが目的である。

平成18年度は5件を採択したが、そのほとんどが無機系、無機／有機ハイブリッド系に偏った結果となった。これは、現在「ナノ界面」を標榜する研究の最前線に位置しているのは、この分野の研究であることを反映した結果であると理解した。既存の研究分野を一層発展させるのもCRESTの使命ではあるが、研究総括としては異分野の研究を「ナノ界面」というキーワードで横に繋ぐことにより、新しい研究分野が開拓されと考えていたので、平成19年度は有機／高分子系、天然／バイオ系にやや軸足を移した選考を行い、新たに5件を採択した。その結果、無機材料界面、有機／高分子材料界面、さらにはバイオ材料界面までをカバーする課題が出揃ったので、本領域の初期の目的のひとつである異分野間共同研究を活発に遂進する状況がほぼ整った。このような経緯から、平成20年度は専門分野に関する偏りを排して選考を行ったが、結果として、無機系、評価系、錯体系、有機／高分子系ないしはバイオ系の課題が採択でき、下図に示すように、ポートフォリオをさらに拡充することができた。

なお、研究代表者として、女性1名、民間企業1名、独法1名、旧帝大以外の大学3名を採択し、研究機関の多様性についても一定のバランスをとることができた。

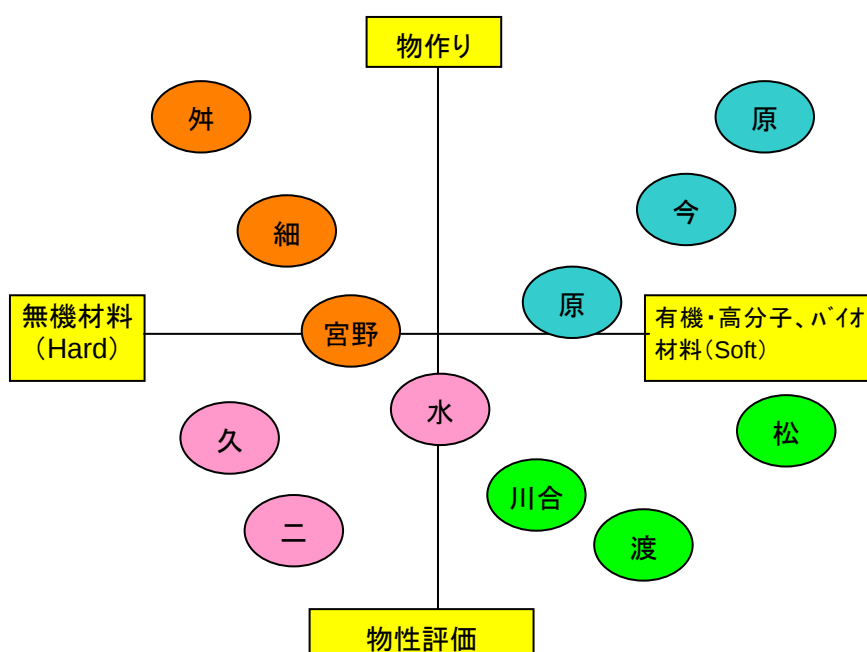
本研究領域の採択は平成20年度を以って終了したが、採択に至らなかった提案にも優れたものが多数あった。特に、各々の専門領域で審査すれば世界水準を凌駕するような提案もいくつかあった。しかし、「ナノ界面」という本領域の命題にややそぐわないために、不採択という残念な結果となった面もあった。これらの申請課題については、研究テーマがより合致するプログラムに応募して、研究の展開が計られることを期待した。



7. 領域アドバイザーについて

氏名	現在の所属	役職	任期
いまゑ とよこ 今栄 東洋子	国立台湾科技大学 精誠榮譽学院 行程技術研究所	講座教授	H18. 6. 1 -H24. 3. 31
かわい まき 川合 真紀	東京大学大学院新領域創成科学研究科 (独)理化学研究所	教授 理事	同上
くぼ よしみ 久保 佳実	物質/材料研究機構 ナノ材料科学環境拠点	主席研究員	同上
にへい よしまさ 二瓶 好正	東京理科大学	特別顧問	同上
はらぐち かずとし 原口 和敏	(財) 川村理化学研究所	所長	同上
はらだ あきら 原田 明	大阪大学大学院理学研究科	教授	同上
ほその ひでお 細野 秀雄	東京工業大学フロンティア創造共同研究センター	教授	同上

ますもと やすあき 舛本 泰章	筑波大学大学院数理物質科学研究科	教授	同上
まつだ たけひさ 松田 武久	金沢工業大学ゲノム生物工学研究所	教授	同上
みずの のりたか 水野 哲孝	東京大学大学院工学系研究科	教授	同上
みやの けんじろう 宮野 健次郎	東京大学先端科学技術研究センター	教授	同上
わたらい ひとし 渡會 仁	大阪大学ナノサイエンスデザイン教育 研究センター	招聘教授	同上



研究課題として広い範囲の学問分野から採択したいと考えていたので、アドバイザーについても、広い専門分野の方に参加して頂くことが必然的に必要となった。特に、自分自身の専門外である物理、無機材料、計測関係を補完して頂くために、これらの専門の方の充実に努めた。また、出口を意識した応用研究にも的確なアドバイスを頂けるように、民間企業の方からも2名のアドバイザーに参加をお願いした（久保佳実氏は、当初、NEC トーキン(株)所属）。結果的に、採択された研究代表者の専門分野の広がりをはばカバーできる専門を持つアドバイザーを集めることができた（上図）。

以上のアドバイザーは、選考過程の議論などから判断して、JST が提示した「公平無私な人」という要件を満たしていると確信している。ただ、専門がかなり広いので、選考の最終局面では専門分野が近いアドバイザーの意見に他の分野のアドバイザーが引きずられているように見えるケースもあるように感じた。

8. 研究領域の運営について

研究・領域運営については、CRESTで採択されるレベルにある研究代表者は、既に“能力が確立した一人前の研究者”であるという考えを基本方針にした。この考え方に基づくと、研究代表者が更なる高レベルの研究成果を出し、更なる研究能力を身に付けるには、“個人では出来ない”研究環境をCREST領域が提供することが重要である。更に、本研究領域は「ナノ界面」をキーワードとして、その横断的な知識を獲得することが目的なので、多様な視点からのアプローチが不可欠である。このような二つの理由から、極力異分野の研究者、または、異分野が融合した課題を採択し、異なる材料・異なる技術がCREST領域内外の“研究場”で交叉することにより、研究者がレベルアップを計り、かつ新規な融合領域、境界領域が誕生することを期待した。この目論見はかなりの成功を納め、第9章にまとめたように、共同研究に由来する幾つかの新規な研究分野、研究成果が生まれつつある。一方、この方法論にはテーマや人の性質、性格によっては限界があることも注意すべきことが明らかとなりつつある。すなわち、異分野の研究者間では“言語”が通じにくく、また各研究者間の“価値観のずれ”があることが障壁となるケースも見受けられる。このような場合には自分の研究の“殻”に閉じこもる保守性が一部の研究者に見え隠れする。

結局、効果的な共同研究を実施する上での成功のポイントは、各々の研究者が同じ基盤上に乗って融合を計るよりも、異なる基盤上にあることを認め合って、相補的にお互いが足りないものを補完し合う方が、 $1+1>2$ の式が成り立つようである。例えば、「光電子測定技術」を持つ尾嶋チームと「物づくり技術」を持つ幾つかのチームとの共同研究はこの好例で、「ナノ界面」の研究にはこのような組み合わせが効率良く機能することを証明している。

9. 研究の経過と所見

各チーム研究の経過

(1) 稲垣チーム「有機シリカハイブリッド材料のナノ構造制御と機能創出」

本研究は、有機シリカ材料の構造と機能の拡張・最適化を図り、高効率で安定な光エネルギー変換、分子認識、吸着・触媒システム等を構築するための基盤技術の確立を狙ったものである。

これまでに、材料の拡張という点で多くの有機シラン原料を設計し多孔体化に成功している。得られた各種メソポーラス有機シリカ材料(PMO)を用いた物性・機能の研究では、光捕集アンテナ機能を用いた水素生成、フタロシアニン系色素組み込み等による蛍光増幅、Re錯体導入によるCO₂還元光触媒機能、太陽電池への期待のホール輸送能の発現等に成功

している。これには、有機合成を専門とする嶋田グループによる多様なシラン前駆体の合成、無機化学を専門とする石谷グループによる触媒開発など、チーム内の有機的な連携が効を奏している。

残り研究期間にて、理論計算によるサポート等を含め、実用化レベルを視野に入れた量子収率向上等の機能効率化と絞り込みに期待している。

(2) 尾嶋チーム「超高輝度放射光機能界面解析・制御ステーション」

本研究は、新しいナノ領域界面構造を利用したナノデバイスの開発を可能にするため、SPring-8 の長尺アンジュレータ超高輝度放射光ビームラインにおいて、高分解能コヒーレント軟 X 線放射光を用い、半導体ナノデバイス、磁性ナノデバイス、有機薄膜デバイスにおける界面構造を三次元的に解明すること、そして得られた結果に基づいて界面電子構造の制御・設計を行うこと、を目的として研究を実施している。

本研究の目玉である 3 次元ナノ ESCA 装置の設計・試作、ナノビーム開発など、ハードとソフトの開発は計画通り進捗し、実用材料に適用した結果から目標分解能 50 nm を十分達成できる見通しが得られ、すでに半導体表面近傍の深さ方向のプロファイルに関して、デバイスとして重要な解析結果が出始めており (MEM 深さ分析、PEEM 解析、発光分光など)、本格的運用での成果が大いに期待できる。

すでに、川崎チームや春田チームなどとの共同研究が行われているが、今後は、チーム内外の多くの研究者との共同研究を通じて、各種高機能デバイスの開発に貢献する世界の最先端のハブ的な役割を果たしていくことを期待したい。

(3) 川崎チーム「酸化物・有機分子の界面科学とデバイス学理の構築」

本研究は、酸化物と有機物を用いた様々な二次元界面構造を形成し、その電気特性や光応答を調べて界面電子状態を明らかにするとともに、その機能化を雛形デバイスで実証し、エレクトロニクス材料としての基礎を構築するものである。

世界第一級の成果である電界誘起超伝導および分数量子ホール効果の観察に成功した。前者では、絶縁体に電解質ポリマーを貼付することにより、超伝導現象としては第三世代といえる電界効果超伝導を達成した。これは、酸化物エレクトロニクスの研究部隊である川崎グループと有機エレクトロニクスの研究部隊である岩佐グループとの強力な共同研究の所産である。後者では、酸化物 (ZnO) 薄膜を高純度で作製することにより、分数量子ホール効果を初めて確認、電子移動度も従来 ZnO の 10 倍を観測した。

これらの成果をもとに残り期間の研究を、新規量子現象や新規超伝導体の発見などのインパクトの大きい量子効果を狙うとともに、界面電子状態の解析とデバイス実証への研究を進めつつ、「ナノ界面」の構造と学理について掘り下げを期待している。

(4) 北川チーム「錯体プロトニクスの創成と集積機能ナノ界面システムの開発」

本研究は、金属、イオンを有機配位子で架橋した金属錯体 (MOF) を基盤材料として、水素分離、水素吸着・解離、プロトン伝導等に関わる新しい学術分野「錯体プロトニクス」の創成により、水素ガス輸送、超高速電子・プロトン輸送、超効率物質変換等の各素機能を薄層集積化した界面システムの開発を進めるものである。

多くの新規な MOF 関連物質が合成され、超高輝度放射光による精密な X 線結晶構造解析 (坂田グループとの共同研究) と物性測定により、世界に先駆けて創製したルーズな格子構造を有する超薄膜結晶性錯体が世界に先駆けて創製された。この他にも、AgI ナノ粒子での超イオン伝導、原子レベルで融合した Rh/Ag 合金の水素吸蔵機能など多彩な成果が得られており、学術的なインパクトも高い。

残り期間では、それらの新規な MOF 構造材料の有する選択的吸着や触媒能等の物性・機能評価を進めるとともに、大強度中性子源による金属錯体中の動的水素構造の解析による錯体プロトニクスの創成および水素エネルギー操作への貢献を通して「新たな学理の創成」も目指すことを期待する。

(5) 春田チーム「異種物質との接合を利用した金クラスター触媒の機能設計」

化学的に不活性な金属金は、直径約 2 nm、原子数 300 個以内のクラスターになると、その化学的性質が劇的に変化する。本研究は、そのような金クラスターを種々の卑金属酸化物、炭素 (豊富なナノ構造を有する)、高分子 (ソフトマテリアル) と接合することにより、その物性をさらに広範、かつ飛躍的に変化させ、環境に優しい化学プロセスを生み出す新規触媒の探求を行うものである。

本チームは、金クラスター・触媒合成、触媒反応探索、速度論、理論・計算、エマルションなど多様な専門家を擁し、本領域で最も多数のグループから成る。

これまでの研究で、金クラスターの調製技術がほぼ確立され、酸化物、炭化物、高分子等担体の種類も増加し、異種物質との接合状態が多様になりつつある。触媒活性と金粒子サイズ効果の関係は、数多くのデータから明確となってきた。一方、遅れがちであった接合界面の性質やモルフォロジーとの関係についても、理論・計算グループの寄与により、この 1～2 年ほどで、その助触媒的な効果との関連から、理解が進んだ。応用面においては、金触媒の触媒活性を包括的に探索し、オレフィンやアルコールのヒドロホルミル化や分子状酸素による直接酸化が比較的マイルドな反応条件で進む可能性があることを明らかにした。また、バルクケミカルのプロピレンオキサイドをプロピレンの直接酸化で得るプロセスに関しては、選択率が約 50% まで向上した。なお、空気清浄器向け実用触媒として繊維状担体へ固定化する技術の開発が企業と共同で行われ、フィルター製品の開発にまで至った。

今後は、金の触媒作用機構の解明を深化するとともに、実用化レベルの観点から、適用反応の絞込み、触媒の基本性能向上 (反応速度と選択率)、システム化 (多元触媒化、反応

条件の影響：温度、圧力、相、分離プロセスなど）にも留意が必要である。

（６）有賀チーム「巨大 Rashba 効果によるスピン偏極電流」

本研究は、結晶表面における巨大 Rashba 効果を利用してスピン偏極電流を実現し、新たなナノスピントロニクス技術の基盤構築を目的としている。

ここ 1～2 年の進展は目覚しく、半導体（Ge）上に Pb 薄膜を配することにより、半導体で初めて Rashba スピン分裂した金属的表面状態バンドを発見した。Bi/Ge (111) 表面においては、内表面に局在したショックレー型表面状態を同定し、その複雑なスピン偏極構造を明らかにした。さらに、その表面に正孔をドーピングすることにより、このショックレー型表面状態バンドを金属化できることを見出した。これらは、スピン偏極電流の実現に向けて大きな意義を有するものであり、研究が一気に広がる可能性が出てきた。デバイス化の実現に必要なスピン偏極電流の取り出し・測定という勝負所にさしかかっているところである。

ほとんど注目されない時期より Rashba 効果に取り組み、それを世に出した業績は高く評価される。まずは、理論面からの高度な解析も含め、サイエンスベースで確固とした基礎を築き“Rashba 効果”の創始者と認められるような研究の展開と推進が望まれる。

課題中間評価では、理論面での強力な研究者との共同研究を勧めた。

（７）君塚チーム「自己組織化に基づくナノインターフェースの統合構築技術」

本研究は、溶液や表面における自己組織化プロセスによって新しいナノ界面の階層ナノ構造を構築し、その構造的特徴を最大限に活かした新機能の創成に結びつけるための「ナノ界面の統合分子システム化学」を開拓しようとするものである。その応用分野として、分子メモリ、ナノ誘電体薄膜やセンサー、医療ナノ材料などを含む革新的な自己組織性ナノマテリアルの創製を目指している。

金属錯体の性質を巧みに利用する自己組織化を多面的に研究し、各種の新しいナノマテリアルの創製、興味ある現象・機能の発見など、質量共に顕著な成果を挙げている。医療ナノ材料の例を挙げれば、核酸と Rn イオンで、アダプティブな（適応型の）配位高分子ネットワークが自己組織化した物質は、機能性分子やナノ粒子を包接可能で、細胞プローブや造影剤としての応用が期待されるバイオマテリアルである。さらに、金ナノ結晶をベースにして、酸化還元反応を伴う金属イオンの自己組織化により、ナノ花びらを作製するなど、ナノレベルの形態制御でも成果をあげている。

類似のアプローチは世界的に見ても希少であり、トップジャーナルへの多数の論文発表や特許出願などで、注目を集めている。今後は、得られた種々のナノマテリアルについて、応用の可能性を視野に入れた物性・機能の評価を進めるとともに、自己組織化の原理・メカニズムに関する考察を深め、一般的・普遍的な統合コンセプトの提案にまで進行することを期待する。

(8) 平川チーム「ナノギャップ電極／ナノ量子系接合による新機能の創出」

本研究は、精密に構造制御したナノギャップ電極により単一分子、InAs 量子ドット、グラフェン接合体などを作製し、金属接合を介した 1 電子の注入と金属/ナノ量子系接合が発現する新規な物理現象の解明とその高機能デバイスへの展開について研究するもの、研究の狙いは、単一分子や量子ドットなどナノ量子系の状態を金属電極により電氣的に制御・読み出すことにより、演算や記憶を司る情報処理デバイスに革新をもたらすことである。

まず、原子レベルの金属 (Au)ナノ接合におけるエレクトロマイグレーション (EM) の素過程を解明し (JST 特許出願)、ナノ量子系接合の基礎となるナノギャップ電極の精密制御・精密作成技術を確認し、位置と形状が制御された InAs 系量子ドットの作製技術に著しい進歩が見られた。また、これを用いた量子接合系においても、量子トランジスタ に向けた一定のデータが出始めている。一方、単一分子系とグラフェン接合系の研究も、やや停滞気味ではあるが、C₆₀ や藤田“中空球状錯体”などの超分子も対象物質に加えるチーム内外の強力なグループとの共同研究も進めており、実用化が期待できる系への絞り込みを行ってほしい。

(9) 藤田チーム「自己組織化有限ナノ界面の化学」

本研究では、自己組織化により定量的に生成するナノスケール中空球状錯体の表面および内面を「一義構造の有限ナノ界面」と捉え、明瞭な構造を持った巨大分子上で有限系の表面化学と内面化学を展開する。具体的には、① 有限界面を分子設計に基づいて精密構築する。② 界面の特性に基づく新機能や新反応を溶液状態で発現させる。③ 有限界面での現象を溶液・結晶化学手法で解析し、界面現象の本質の解明や有用物質の創製を達成しようとするものである。

金属錯体の自己組織化による球面構造の構築により、例えば、72 成分 (M₂₄L₄₈, M: 金属, L: 配位子) もの定量的自己集合による巨大球状錯体の合成に成功するなど世界的に類を見ないユニークな有限界面を多数実現し、その界面 (特に内面) を巧みに利用することによって、多くの有用な知見を得ている。例としては、“錯体容器”の中で分布の極めて狭いシリカナノ 1 分子粒子を合成したり、結晶性“分子フラスコ”(3 次元錯体結晶中の空隙)の中で、ヘミアミナールといった不安定な反応中間体を含め、全て X 線結晶構造解析によって構造決定することに成功など。極めて独創性に富んだ成果は、トップレベルの国際雑誌に数多く報告され、他の研究者の追随を許さない。国際会議などにおける情報発信でもインパクトの高い活動を続けている。

今後、さらに外界面や内-外界面間のコミュニケーションなどへも展開し、特異性のある「有限界面」としての特徴の色づけが成されることを期待する。

(10) 由井チーム「分子運動操作を基盤とした多次元的バイオ界面」

生体内埋込型医療デバイスと生体との理想的な界面の創製を目指して、材料を構成する分子の運動をナノメートルレベルの分子間力をもとにして操作し、それを基盤とした多次元的バイオ界面構築によって生体の階層的応答を支配する。これにより最終的には、材料－細胞界面における機能を永続的に発現して生体と共存可能なバイオ界面を創製することを目指すのが本研究である。

生体高分子の表面への吸着に新旧様々な手法を持ち込んで研究を展開しつつある。これまで、由井グループによる、本チームのキーマテリアルである各種ポリロタキサンの合成とその固定化基盤の提供がやや遅れ気味で、他のバイオグループとの連携がちぐはぐに成りがちな面もあったが、ようやくサンプルが出揃い、多価相互作用の亢進などの解析を進めつつある。今後は、本課題のキーコンセプトである「動き」を中心に据えた、より有機的なグループ連携で研究が加速されることを期待している。

物性測定データからの分子運動性の推論には、説得性がやや不十分と感じられ、分子運動をより定量的に評価する方法論の確立が要望される。

(1 1) 一ノ瀬チーム「界面ナノ細孔での液体の巨視的物性の解明」

本研究は、界面ナノ細孔における液体の状態あるいは流体力学的な特性を解明し、環境やエネルギー問題の解決に「真に」貢献する革新的な分離機能材料を提供することを目指している。このため、多孔性ナノ薄膜の作製と物質透過特性の評価、ナノ細孔中の液体の微細構造解析、ナノ細孔中の輸送現象の分子シミュレーションの項目を3グループで分担し、連携をとりながら研究を実施している。

その結果、従来の予想を覆し、常温・常圧で、ナノチューブ内の水が水素結合ネットワークを形成し、単一分域強誘電構造となる新発見が得られた。カーボンナノ薄膜の細孔構造が明らかとなり、流体力学的な評価も可能となった。さらに、無機ナノストランドの平滑な自立膜を利用してナノ粒子をシート状に固定化し、これを化学的に架橋することで、細孔サイズが制御された限外濾過膜を開発した。また、極薄のダイヤモンド様カーボン(DLC)膜を用いて様々な有機溶媒の透過実験を行い、DLC膜中の1 nm以下の細孔を有機溶媒が高速の粘性流体として透過することを見出している。

今後は、ナノ細孔における実験と分子シミュレーション結果との整合性に留意し、流動メカニズムについての合理的な説明が可能となることを期待する。また、食塩やエタノールの水溶液からの分離をナノ膜処理で実現する技術の確立までのロードマップを描いておきたい。

(1 2) 小江チーム「水素活性化アクア触媒界面による常温・常圧エネルギー変換」

本研究は、常温・常圧で水素をプロトンと電子に変換する酵素であるヒドロゲナーゼを範として合成した「水素活性化アクア触媒」の界面を利用し、ナノレベルでの水素駆動型常温・常圧エネルギー変換を目指し、また、白金単体や白金合金に代わる安価、かつ、触

媒能力の制御が容易にできる燃料電池用電極触媒を提供することにある。

その結果、特定の構造を有する分子性金属錯体（例 Ru-Ni 系錯体）を用いることにより、原理的に燃料電池の触媒電極の働きをすることを独自に見出した（JST より基本特許を国際出願）。

今後、燃料電池用電極触媒向けに関する改良では、実機レベルを目指した起電力の向上の可能性に対する判断が要求されよう。創製したレドックス型の分子錯体触媒の他の用途（有機合成用触媒など）の探索も重要と考えられる。

（1 3）栗原チーム「表面力測定によるナノ界面技術の基盤構築」

本研究は、研究代表者が開発したツインパス型表面力装置と共振ずり測定法を中心手段として、機能デバイス設計や反応場として重要な固-液界面の特性・機能を、分子レベルで解明・制御する新規ナノ界面技術の基盤形成を目的としている。特に、界面の液体をも機能分子として捉え、装置開発など新規アプローチを創製し、① 金属も含む機能界面の特性評価、② 束縛液体の特性、光反応機能の解明、③ 界面の高次階層機能構造制御などの研究を行うものである。

これまでの主な成果は、① 液晶-色素 2 成分系のナノレオロジー・ナノトライボロジー：ナノ薄膜中では色素(添加剤)が濃縮し、スティック(固着状態)からスリップ状態への転移現象が起こることを見出したこと、② 共振カーブの解析、物理解析モデルの高度化：装置と試料部を適切に反映した物理モデルを導入、その解析解を導出（定量解析には必須）したことで、それにより全ての条件で液体薄膜の粘性、弾性特性の定量評価、また同時に試料のせん断率の決定を可能とした。

測定装置の機能がかなり向上してきたので、今後は、測定対象を広げ、得られた結果と対象物質の構造・状態との関係をより深く考察されることにより、興味ある現象の発見も期待したい。

（1 4）櫻井チーム「DDS 粒子のナノ界面と鳥インフルエンザワクチン等への応用」

本研究は、次世代の DDS を代表する 3 種類のナノ粒子（カチオン性脂質、高分子ミセル、多糖・核酸複合体）に関して、粒子の内部構造、粒子のナノ界面、粒子内の疎水/親水界面における薬物の挙動と形態、生体膜との融合挙動を、放射光などを用いて正確に測定する技術を確立し、その結果を利用して、CpGDNA/インフルエンザ抗原タンパクのナノ DDS 粒子を分子設計指針し、パンデミックフルーの効果的で安全なワクチンを提案するとともに、遺伝子デリバリーの分野に新しい DDS 技術を提供するものである。

これまでの主な成果は、① インフルエンザウイルスに対する多糖核酸複合体のアジュバント効果を動物で証明（石井グループとの共同研究、米国特許出願）。② 遺伝子導入に用いる DNA と脂質の複合体の構造について、ASAXS（異状 X 線小角散乱）の可能性を、日本で初めてソフトマテリアルからの放射光を用いた高精度の構造解析で見出した（八木グ

ループとの共同研究)。③ 遺伝子治療用ミセル構造の散乱データからの直接可視化も達成した。なお、インフルエンザのワクチンとして従来にない安全で高効率なアジュバントの効果に関しては、大型動物での試験を開始した。

有機化学、医学、機器分析等からなるヘテロな研究者構成が有効に働き、概ね計画通りに進行し、着実に成果が出ているようであるが、社会的にインパクトの大きいテーマであることから、なお一層の努力をお願いしたい。

(15) 松本チーム「量子界面制御による量子ナノデバイスの実現」

本研究では、量子細線を利用し、ナノ構造の真の特長を生かした基礎デバイスとして、カーボンナノチューブ／金属電極の量子界面を制御し、電子の粒子性と波動性を自在に制御する量子ナノデバイスの実現を狙っている。また実用化デバイスとして、量子細線の周辺に同心円状に2層絶縁膜を形成し、同心円構造による電界集中を利用して、従来の平面構造メモリの～1/10の低電圧で動作する量子細線ナノメモリの実現も目指している。

これまでの大きな成果としては、トンネルバリアの厚さをバイアスで制御することにより、電子の粒子性／波動性の近藤温度が制御可能になることを初めて示したことである。また、2層絶縁膜界面に電荷を保持するナノメモリにおいて、界面に金微粒子を担持することにより電荷のトラップサイトを大きくし、ヒステリシス窓を2～3倍大きく改善することにも成功した。

概ね順調に進行しているが、キラリティの制御に関しても、今後、独自の成果を期待している。

所見

(1) CREST からの”super star”の誕生

各研究チーム間で研究の進捗状況に差はあるが、研究の進展が著しいチームからは国際的な”super star”が誕生しつつある。例えば平成18年採択の川崎、北川、春田、平成19年採択の藤田、君塚である。また、数年後にこの序列にランクされるであろうと期待しているのが、平成19年採択の有賀、平成20年採択の小江である。これらの研究者に共通しているのは、“独創的な研究テーマを持ち、それを独創的な発想法で展開している”ことである。このような人材の選考・育成がCRESTの本来のミッションと考えている。

また、添付資料「7. チームメンバーの異動」にまとめられているように、数多くの代表研究者や共同研究者がCRESTスタート後に、新しいポジションに移動している。これはCRESTが活発な「人材育成の機関」としても機能していることを如実に示している。しかしながら、代表研究者に関しては選考時においてはその所属組織がヘテロになるように意識して採択したものの、成果が上った研究代表者の多くが旧帝大へ“career up”してしまう傾向がある。これはこれで良いのであろうか？

(2) “High risk / high return”か “Low risk / low return”か？

研究で一番「費用対効果」が高いのは“low risk/ high return”であるが、そのような研究テーマはそんなにいくつものではない。では、CREST 選考は、どのレベルの研究を重点対象として選考すべきなのであろうか？ これに対する確固とした解答はまだないが、尾嶋チーム、栗原チームなどの測定・解析系は装置さえできれば、成果はコンスタントに出て来ており、その意味では“low risk”である。一方、理論が絡む実験系は“high risk”なものが多く、本領域では有賀チームの研究がその例である。幸い、CREST 期間中にデータが開始したので良かったが、悪くすると「成果なし」で終る可能性もあった。CREST の総括の重要な役割のひとつは、“high risk”にチャレンジしている研究者に特に注意してサポートすべきだと考えている。

10. 総合所見

異種材料の界面をナノのスケールで理解、制御し新たな機能を発現せしめるという目標に対して、無機材料（ハード）から有機・高分子・バイオ材料（ソフト）という幅広い材料を対象に着実に成果をあげつつある。特に、領域設定から課題募集時に目論んだように、異なる専門分野の研究者からなるチームでの相乗効果が発揮されているチームでの進展が大きいと感じている。一方で、研究の意外な展開や行き詰まりに対しては、柔軟に共同研究体制を再編するのが望ましく、これを推奨して行きたい。これまで2回の課題中間評価でも多くのアドバイザーからも多数の有益な指摘があり、この運営方針が基本的には賛同を得ているものと信じている。また、チーム間の共同研究については、尾嶋チームの高輝度放射光を利用した分光をキーとする共同研究が幾つかのチームと始められている他、平川チームの量子接合への藤田チームの中空球状錯体の利用が開始されるなど、まだ著に著いたばかりのものもある。今後の相乗効果が期待される段階である。これらについても「中間相」から革新的なアイデアを引き出すべく、積極的に推奨して行きたい。

一方、本領域は終盤〜後半に差し掛かるので、研究成果を積極的に外部に発信することを強く勧めている。川崎、北川、藤田、君塚、小江、櫻井などのチームは外部からも良く見える「話題の研究者」となっている。春田チームは「金触媒」に対してオールジャパン体制の組織で研究に臨んでおり、我が国が「金触媒」研究のリーディングカントリーであるという評価を確立しつつある。また、尾嶋チームは CREST が呼び水となってスタートした東大における大型プロジェクトの中心的な存在として活躍している。このような本領域の「陽の当る部分」は一層強力に推進して行きたい。

また、既に研究目標を達成するレベルにあるチームには、頭書の研究戦略目標に捕われず、自由な発想で“次なる展開”を模索することを推奨している。一方、研究がやや遅れ

気味にあるチームは、チーム内のメンバー間の相補効果や相乗効果が出ていないケースが多い。また、他のチームとの共同研究にも消極的なことも関係している。この辺のポイントを研究総括としてサジェスチョンして行きたい。

結論として、本 **CREST** 領域終了時には、材料を問わず、ナノスケールで見た界面に共通の技術基盤の構築への貢献で締めくくれるよう後半戦に望みたい。

以上