

戦略的創造研究推進事業
－CREST タイプ－

研究領域
「ナノ界面技術の基盤構築」

研究領域事後評価用資料

平成 26 年 2 月 10 日

目次

1. 研究領域の概要	1
(1)戦略目標	1
(2)研究領域	3
(3)研究総括	4
(4)採択課題・研究費.....	4
2. 研究領域および研究総括の選定について.....	5
3. 研究総括のねらい.....	6
4. 研究課題の選考について.....	7
5. 領域アドバイザーについて.....	9
6. 研究領域の運営について.....	10
7. 研究を実施した結果と所見.....	15
8. 総合所見	25

1. 研究領域の概要

(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」

1) 具体的な達成目標

本戦略目標は、様々な材料・デバイス分野の発展に不可欠な異種材料・異種物質状態間の機能接合界面に着目する。ナノ界面に関する研究分野の融合によりナノ界面機能に関する横断的な知識を獲得し、これを基盤に異種接合界面におけるナノ構造制御による飛躍的な高機能化を達成する革新的なナノ界面技術を創出すること、及び次の応用例などを通して実証することを目的とする。

- ① ナノバイオ医療技術、エレクトロニクス技術、発電・蓄電エネルギー技術などに関連した異種材料・異種物質状態間の接合界面として、生体材料と人工物との接合界面、ソフト材料とハード材料との接合界面(有機物と金属・絶縁体など)、異なる機能材料の接合界面(半導体と金属・絶縁体など)、エネルギー変換と物質移動を伴う固液界面などの高機能化を実現すること。
- ② 界面や表面の機能を積極的に利用し、新規反応場や新規プロセスなどの新機能の創製を行うこと。さらに、異種材料の接合の結果生じる分子反応場としての界面の機能を探索すること。
- ③ ナノ粒子の生体材料(細胞膜など)の界面上の挙動に関する知見を蓄積すること。

2) 目標設定の背景及び社会経済上の要請

本戦略目標においては、ナノバイオ医療分野における生体材料と人工物との界面、エレクトロニクス分野における様々なデバイスに用いる異種材料間の界面、発電・蓄電エネルギー分野におけるエネルギー変換と物質移動を伴う固液界面など、多くの産業分野に共通の課題であると同時に新たな発展に不可欠である異種材料・異種物質状態間の機能接合界面に関して研究を行い、社会経済の持続的発展を支え競争力強化につながる材料・デバイスを実現する。

生体分子群は、省エネルギー型反応・物質変換、ソフトな認識・情報処理、高感度センシング、生体にやさしい物質構成などの優れた機能を持つ。一方、人工物質は、ナノ・分子レベルで精密に制御された機能材料およびその多様な物質群(ライブラリー)の創製が可能である。これら生体物質と人工物の融合は、長寿命社会における人に優しい新物質や新材料・デバイス創製の開発(病気の低コスト診断、代替組織・機能材料の提供、食品の安全性管理、環境モニタリングなど)につながり、高い価値を生み出すことが期待される。

エレクトロニクス分野では、例えば、有機デバイスの課題である動作安定性や寿命の克

服には、ソフト材料(有機材料)とハード材料(金属電極など)の界面における、電子素過程の理解に基づき精密に制御されたナノ界面の実現が必要である。また、ワイドギャップ半導体のショットキー接合やpn接合、また、シリコン系における半導体・絶縁体・金属間界面の詳細な解明と制御も、高い競争力を持つ製品に必要な素子寿命、消費電力などの革新に重要である。

エネルギーや環境の分野でも、ナノ機能界面は重要である。例えば、エネルギー変換材料(燃料電池、リチウム電池、キャパシタ用材料等)では、ナノ領域からマイクロ領域に及ぶ材料の構造、形状に関する制御により、エネルギー変換効率、耐久性、安全性、エネルギー密度、出力密度、設計の自由度などを向上した新規エネルギー変換デバイスの構築が期待され、持続的発展を可能とする経済社会の実現に資する。また、電気化学反応に必要な不可欠な液体と接合した固液界面を用いる触媒電極・電解質機能界面、および環境浄化用触媒や機能制御膜等においても界面とそのナノ構造制御は重要であり、革新的な性能実現による高い競争力と低環境負荷が期待される。

ナノ粒子の細胞膜などの界面上での挙動に関する研究は、その特性、特徴を明らかにすることにより、ナノ粒子の安全性の基礎となる知見の蓄積はもとより、DDSや再生医療等にも幅広く応用できる成果が期待される。

これらの接合界面の革新的な制御・応用は、最新の分子工学、界面工学、精密材料創製化学、ナノメカニクス、精密分子操作、微細加工等の各分野を動員し、ナノスケールレベルの各種接合界面の観測・分析による横断的な知識の蓄積と界面のナノ構造制御技術の統合集約が不可欠であるため、本質的に分野融合が不可欠な基盤技術分野である。

3) 目標設定の科学的裏付け

接合界面における革新的な機能創出には、ナノスケールレベルの蓄積された知識と実験技術を動員・統合して、新しいナノ構造制御を図ることが必要である。ナノテクノロジーの進展により、人工物質やナノ構造の形成など、個別技術は進展したが、その応用には横断的な知識と技術による基盤構築が必要である。このようなナノ構造制御により高機能化が実現できる具体例を示す。

遺伝子やタンパク質を生体類似環境に固定化可能なナノ界面の設計・創出・評価技術の研究開発により、食品安全保証やテーラーメイド医療のためのバイオチップの高集積化・高機能化が可能と期待される。さらに、細胞界面を分子レベルで精密に制御できる新手法や新材料の研究により、再生医療に必要な高効率な細胞増殖を支える基盤技術の構築が可能となる。特定の細胞表層を選択的に見分けて結合する界面認識の制御技術は、標的指向性の遺伝子・ドラッグデリバリーの精度を格段に向上させ、ナノメディシンの実現を加速する。

ソフト材料とハード材料のナノ機能界面に関しては、これまでも有機・高分子と金属・絶縁体など異種材料間の界面は重要な研究課題であったが、異種材料同士の界面における

マクロ構造、機械的特性などに関わる研究に限られていた。ソフト材料とハード材料の界面をナノレベルで制御し、異種の電子構造を持った物質同士を電子素過程の面から精緻に解析、設計することが、革新的機能(高寿命素子、低消費電力、高速動作など)に必要である。接合技術や機能制御手法およびこれらの精密評価手法の確立は、有機デバイスだけではなく、シリコン系などの半導体デバイスの大幅な特性向上や新しいナノデバイス創製にもつながるものである。

エネルギー変換と物質移動を伴う固液界面に関しては、燃料電池、二次電池、湿式太陽電池などにおいて、従来、現象論的な取り扱いが中心であった。これらのエネルギーデバイスの飛躍的性能向上には、電極と電解液などのナノレベル固液界面を科学的に解明し、得られた知見に基づく構造をナノレベルで設計し制御する技術を構築することが必要である。例えば、自己集積化・自己組織化によるナノサイズの電極触媒構造の創製とその界面制御は、高機能エネルギーデバイスを実現する手法として期待される。

無機系および有機系の物質、あるいはそのハイブリッド材料の生成プロセスを利用して、精密に設計・制御されたナノ構造体を生成する技術もナノ機能界面制御技術として重要である。また、ソフトな構造体を鋳型とした化学反応により、金属・無機系物質のナノ構造の設計・制御とプログラミングを行う技術は、ナノ機能界面形成の重要な研究領域であると考えられる。

以上のように、ナノ機能界面構築では、設計、制御、形成それぞれの段階で十分な技術が確立されておらず、多面的な原理的ブレークスルーが必要である。例示した各分野における個別の課題の研究開発として取り組むだけでは、目標の達成は困難と考えられ、異なる専門領域間での高度な共同作業による独創的な着想に基づく融合研究が必要である。

(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

新海征治（崇城大学工学部 教授）

(4) 採択課題・研究費

（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	400
	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	352
	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	474
	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	545
	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	484
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	176
	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	421
	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	382
	藤田誠	東京大学 教授	自己組織化有限ナノ界面の化学	437
	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	309
平成 20 年度	一ノ瀬泉	(独)物質・材料研究機構 ナノ有機センター長	界面ナノ細孔での液体の巨視的物性の解明	248
	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	275
	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	305
	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	500
	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	244
			総研究費	5,554

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

* 研究費：各研究課題とも全研究期間の執行総額

当初予算に対して追加で配布した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	442
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	537
計	1, 051

「総括裁量経費」は、各課題の当初予算から一律に 10%(計 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 1 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た。「その他追加配賦」は、年度ごとの JST 予算の有効活用のために発生する予算に基づくもので、「総括裁量経費」に準じた予算として活用した。平成 21 年度、インフルエンザ対策緊急支援として櫻井チームへの追加配賦、平成 25 年度には当初の研究期間を終了した君塚チーム、藤田チームの成果に対し、実用化へ向けた基礎固めとして 1 年延長による支援を行った。

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に対して、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に対して、それぞれ支援をおこなった。

2. 研究領域および研究総括の選定について

本領域は、異種材料・異種物質状態間のナノ界面の構造、機能に関する横断的な知識を獲得すること、および、これを基盤としたナノレベルでの界面構造制御を目指した研究を対象とした。ここでの「ナノ界面」としては、各種デバイスや触媒、機能膜等における有機、無機、金属、生体材料間の界面、表面にとどまらず、その界面、表面を利用した反応や鋳型とした新規ナノ構造体の創製、および、ナノ粒子の細胞膜上の挙動などナノ界面制御が鍵となる広い分野を対象として設定された。

実施体制として、分野融合によるナノ界面機能の横断的知識獲得と実証展開をチーム型研究(本 CREST 研究領域)によって行い、同時に界面・表面のナノレベルの構造解析・制御による新規なナノ界面機能の探索を個人型研究(さきがけ研究領域「界面の構造と制御」)によって行い、2 研究領域をあわせてナノレベルでの界面構造制御が鍵となる飛躍的に高機能を有する安全で革新的な材料、デバイス、技術の創出を目指した。

研究総括である新海征治は、光学活性化合物の分子集合体を鋳型としたキラルなシリカ

ナノチューブの創製や DNA／シゾフィランの三重ラセン形成の発見とその解析、ゲスト分子を鋳型としたホスト分子の組織化・固定による汎用的なホスト分子の構築法など超分子化学、分子認識化学を軸として学際分野に新しい可能性を開く卓越した研究成果をあげ、平成 16 年度にはこれらの成果に対し紫綬褒章を受章した。また、論文被引用数の化学部門で世界トップ 10 にもランキングされている(領域発足当時)など、本研究領域について先見性・洞察力を有していると評価された。

領域発足当時、九州大学大学院の教授であるとともに文部科学省・21 世紀 COE「分子情報科学の機能イノベーション」研究拠点リーダー、九州大学未来化学創造センター長を兼務しており、複数の技術分野にまたがる研究を総合的に推進する本研究領域において、適切なマネジメントを行うに当たって十分な経験・能力を有していると評価された。さらに、日本化学会・九州支部長や日本学会協議会員、イギリス化学会(Perkin Division)の編集委員など内外の学会等においても要職を歴任している。これらを総合すると、関連分野の研究者から信頼され、公平な評価を行いうると判断された。

3. 研究総括のねらい

研究総括の「研究に対する姿勢」について以下に記す。

「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」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。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となるためには、「ナノ界面」というキーワードを狭義に定義しないで、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、それぞれの採択課題について、ヘテロな専門分野で構成されたチーム内の共同研究をよりダイナミックに推進する、さらには、チー

ム外の異分野の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」を創出できると考えられる。

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よ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は高くなる。二つめは、用いる材料として、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が期待される。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研究成果となり得る。

さらに、研究総括自身が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。

4. 研究課題の選考について

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。

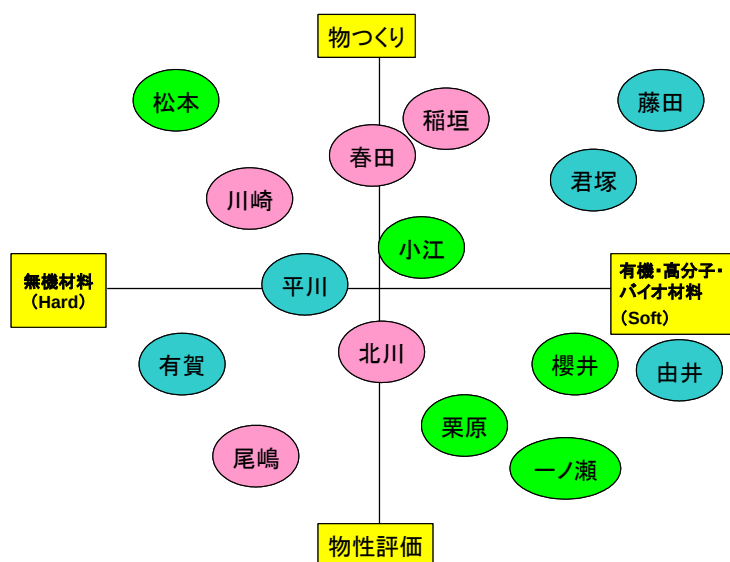
また、革新的なナノ界面材料やデバイスの創製に直接関わる研究だけではなく、これに資する理論計算やシミュレーション解析、分析・計測についても募集対象とした。

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。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するよう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则认为、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、図 1 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。



5. 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 -H26. 3. 31
かわい まき 川合眞紀	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	運営統括室長	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	H18. 6. 1 -H22. 9. 30
ますもとやすあき 舛本泰章	筑波大学大学院数理物質系物理学域	教授	H18. 6. 1 -H26. 3. 31
まつただけひさ 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	(独)物質・材料研究機構 若手国際研究センター	センター長	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

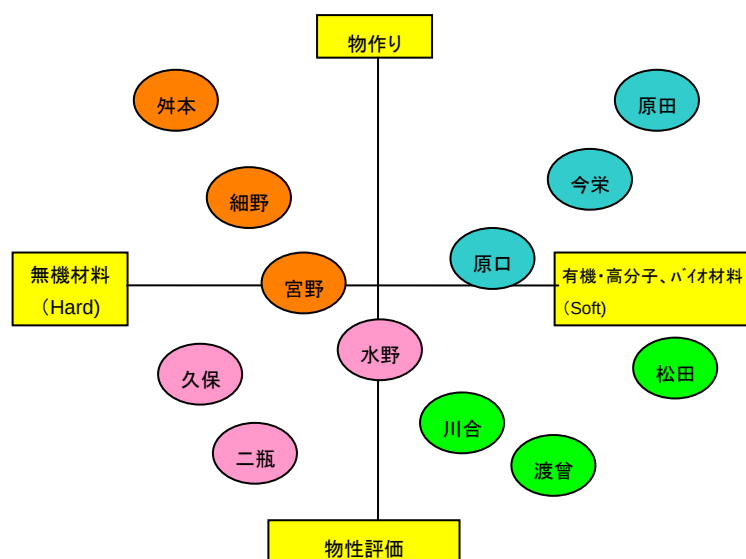


図2 領域アドバイザーのポートフォリオ

研究課題として広い範囲の学問分野から採択できるように、領域アドバイザーについては、広い専門分野から採択することが必然的に不可欠となった。特に、研究総括の専門外である物理、無機材料、計測関係を補完するために、これらの専門家の充実に努めた。また、出口を意識した応用研究にも的確なアドバイスが可能となるように、民間企業からも2名の領域アドバイザーの参加を得た(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領域アドバイザーを集めることができた(図2)。

以上の領域アドバイザーは、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領域アドバイザーの意見に他の分野の領域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った。

6. 研究領域の運営について

(1) 概要

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図り、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 7 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図るよりも、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。

まず、「総括班・サイトビジット」であるが、採択翌年に実施した。これはチームの立ち上げ状況を現場で見る上では有用であったが、当領域の研究対象が広いが故に、研究内容の詳細までは領域総括の専門のみでは充分対応できないチームがあることに気付いた。そこで「当領域独自の取り組み」として、3 年次の初めにチームと専門性が合致する領域アドバイザー（基本的には 2 名）を選抜し、全チームに対して「アドバイザー・サイトビジット」を敢行した。ここに至って、領域アドバイザーの専門分野も広く取って選出したことが有効に働き、全てのチームに適切な領域アドバイザーを送り出すことができた。研究代表者には、この時のアドバイスを基にして、「課題中間評価会」に臨むように指導した。

採択された研究チームは、領域の広さを反映して質の異なる組織、方法論を掲げていた。このため一貫した指導法というものは、本領域に関する限り有り得ない。それで、15 チームを①研究が自己加速的に進行している、②研究が停滞して壁に当たっている、③研究は進行しているが、本来の目的から離反している、の 3 種に大まかに分類した。①のチーム（尾嶋、川崎、春田、君塚、藤田など）は、大枠の方向性についてのみ“bird eyes view”で研究チームと議論し、基本的には「放し飼い」状態にした。例えば、「光電子測定技術」を武器とする尾嶋チームは、本領域の「研究ハブ」となることを期待し、「物づくり」チームとの共同研究を積極的に進めることを推奨した。川崎チームは申請時から金属（川崎）－有機（岩佐）という“hetero big two”から構成されていて、本領域の目的とする特色が最も出やすいチームなので、そこから革新的ハイブリッド材料が生まれることを期待した。藤田チームは「有限ナノ界面」が申請テーマであったが、本 CREST が選考対象とする課題に含まれるか否か、きわどい内容であった。研究スタート時は従前的なカプセル分子の拡張、巨大化が研究対象であったが、「界面化学者を名乗る以上は、カプセル内部のみならず、カプセル外壁の機能や内外のコミュニケーションなども研究対象として取り上げるべき」と言い続けた。この議論が終盤に「結晶スポンジ」（2013 年 2 月に Nature で発表）という化学史に残る大ホームランを放つことの一助になった。

一方、②の研究が一時期停滞していたチーム（由井、平川、小江など）には総括班や専門が合致する領域アドバイザーによる「再サイトビジット」を実施した。小江チームは水素の分解活性を示す金属錯体触媒の開発で素晴らしい成果をあげていたが、これを燃料電池

に展開する段階で暗礁に乗り上げてしまった。このため久保、水野両領域アドバイザーが再サイトビジットを実施し、その後もメールで助言を繰り返し、また適切な共同研究者を紹介するなどした結果、研究は再度前に進み始めた。③については松本チーム、一ノ瀬チームが該当する。松本チームは初期目標が波動性やカーボンキラリティであったが途中からグラフェンを活用するバイオセンサーへ舵を切った。一ノ瀬チームはナノレベル細孔における流体の異常性を目標に掲げていたが、途中から実用化に向けたナノ細孔の作成に興味に移った。このため「再サイトビジット」でその変更の妥当性を議論した。特に、一ノ瀬チームには方向転換の妥当性について「再ヒアリング」を課した。また、これら以外に北川チームは国内外の特許申請に極めて熱心であり、領域運営アドバイザーの岡崎と領域担当の上田とが特許申請打合せに、九州大学や京都大学に何度も足を運んだ。これが国内特許 13 件、海外特許 3 件という特許件数の成果に現れている。

次項で実例を交えて詳細に説明する。

(2) 運営の具体的な実施例および成果について

上記の狙いおよび指導方針に即して第 4 章の図 1, 2 に示したように、課題のメインテーマで見て十分に広がりのある領域体制が整えられたが、各課題のグループ構成においても、狙いどおり異分野の研究者からなるヘテロなチームを多く採択することができた。図 3 に平成 18 年度採択課題の例を示す。分析機器ステーションの構築を主題とした尾嶋チーム以外はポートフォリオが広がりを見せ、研究代表者がその専門分野を補うダイナミックな編成を組んだことが伺える。

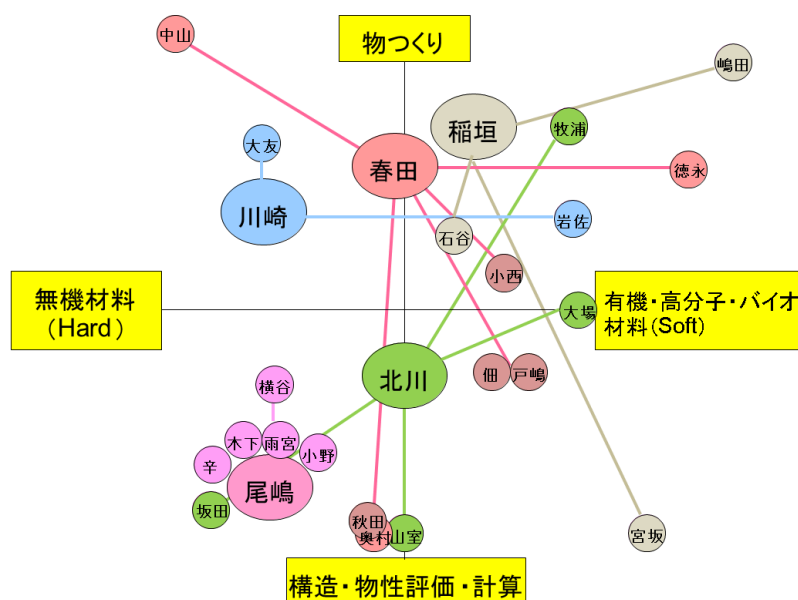


図 3 平成 18 年度採択課題のポートフォリオ

この効果を検証する方法として、下表に示すように、研究代表者が著者として含まれる原著論文について、共同研究の相手による分類を試みた。その結果、研究代表者以外のグループとの共同研究による論文が全体の 6 割以上を占めた。また、共同研究の内訳では領域外の研究者とのもの(C)が、チーム内の他グループとの共同研究(A)を上回った。これは、研究の進展にともなって、共同研究先の対象が広がったものと思われる。尾嶋チームは領域外との共同研究によるもの(C)が 3/4 を占めたが、ステーションの利用者との共同研究が広く行われたことによるものである。

研究代表者が著者に含まれる論文数	A チーム内の他のグループとの共著		B 領域内の他のチームの研究者との共著		C 領域外の研究者との共著		D 研究代表者グループ単独の論文	
	数	%	数	%	数	%	数	%
762	172	23	20	3	280	37	290	38

一方、共同研究がいかに効果的な研究につながったかであるが、研究代表者に各チーム最大 5 件として、代表的な成果に関する論文を提示してもらった。それら 66 件を共同研究の分類で見ると、次の表に示したようにチーム内の他グループとの共同研究(A)が最も多く、半分近くを占めた。これは採択時に組まれたヘテロな研究の融合の効果を示しているものとする。

分類	比率(%)
A:チーム内の他のグループとの共著	47
B:領域内の他のチームの研究者との共著	0
C:領域外の研究者との共著	26
D:研究代表者グループ単独の論文	26
計	100

なお、領域内の他チームとの共同研究(B)については、課題が採択されるごとにキックオフミーティングを兼ねた領域会議で、「私が出せる技術」「私が欲しい技術」を研究代表者に提示してもらい、技術の相互融通を推奨するなど、機会を見ては推奨したが強制はしなかった。結果として、共同研究にまで至るものは少なかったものの、この際の技術や知見の交流をきっかけとして、当初予想されなかった方向に研究が展開した例も見られた。

課題の研究進捗状況の把握と助言、指導に関しては、領域会議とシンポジウムを毎年開催した。期間の前半は領域内情報共有と研究総括、領域アドバイザーによる進捗状況把握と助言の目的を重視して非公開の領域会議とした。3 回目の領域会議は、領域内での水平連携に加えて垂直(階層、年代)連携も図るべく、同じ戦略目標下に設定された、さきがけ「界

面の構造と制御」領域(川合領域)と合同で開催、2日間に亘る交流を行った。

期間の後半は、成果に基づく交流・融合の場を領域の外にも広げるべく、公開シンポジウムの形をとった。計3回のシンポジウムでは産官学からバランスよく参加者を得たが、企業関係からの参加者が半分近くに達する時もあった。事後にコンタクトがあったという話も聞いており、交流のきっかけを作るという目的は、ある程度果たせたと考えている。

いずれの会でも領域アドバイザーの出席率はほぼ8割を超えていた。前向き、積極的なアドバイスがなされたが、これに加えて書面で「コメント」を提出してもらい、有用なものについては研究代表者にフィードバックした。

本領域の課題の専門分野は広範にまたがっているため、領域アドバイザーにも広い範囲からお願いしたことは5.領域アドバイザーについてでも述べたが、これを積極的に活用した例として、課題中間評価の半年ばかり前に、課題の専門分野に近い領域運営アドバイザー(研究総括を含む)2~3名によるサイトビジットを、15課題すべてについて実施した。領域アドバイザーには、現地で研究代表者から進捗状況を聞いて、適切なアドバイスを行うとともに、研究総括に対して簡単なレポートの提出を依頼した。また、中間評価会では主導的に発言するように依頼した。この試みは、中間評価会を効果的なものとするための大変有効な方法であったと考える。

領域としての中間地点を迎えた平成23年夏には、カンフル注射を試みた。その時点での研究総括の各課題に対する評価と今後の研究推進のための要望事項をまとめ、レターとして各研究代表者に送付し、それぞれ回答を得た。レターの内容は、領域中間評価で指摘された主要な指摘事項の一つであった、「界面とのつながりが薄い課題がある」との指摘も踏まえたものである。

また、レターでのやりとりに加えて、中間地点での進捗が思わしくないと認識された5チームに対しては、研究総括によるサイトビジットを実施した。これは、全チームに対してそれぞれの採択半年後に行った総括サイトビジットとは別に行ったものである。進捗遅れについての相互確認と促進に向けての助言を行った。平川チームや松本チームにおける後半の進展はこうした取り組みが功を奏したものと考えている。また、有賀チームではチーム唯一の特許出願につながった。

問題を認識したチームに対するマネジメントの他の例として、一ノ瀬チームの例について説明する。採択時の構想に比べて、「物づくり」への偏重傾向に懸念を感じ、研究期間の第3コーナーにあたる平成24年の4月に、領域アドバイザー2名の協力を得て研究方針の確認と軌道修正に対する助言を行った。流体のナノ細孔ならではの異常性を確認するには、データの再精査やサブナノ領域への挑戦の必要性などが確認された。

領域中間評価では、主な問題点として以下の二点が指摘された。一つは領域内のチーム間の交流、一つは界面とのつながりである。

前者に対しては、「合宿を行ってでも推進すべき」との指摘もいただいたが、元々、研究総括自身の考え方として、「CRESTに集う研究代表者はすでに確立された研究者」であり、

さきがけとは違って「合宿」の効果はそれほどには期待できないだろうと思ったこと、さらに領域アドバイザーや主だった研究代表者にヒアリングしても同意見であったことから、「合宿」は実施しないことにした。これに替わるチーム間の交流促進策として、領域の課題を横串として貫く共通のテーマにフォーカスした情報交換の場を考えた。さらに、交流の場を広く求めるため公開形式のワークショップを開催した。1 回目は、ソフトマテリアルを扱う課題に共通する「水と界面」、2 回目は主にハードマテリアルが対象になる「界面とデバイス」と題して、それぞれ関連する課題の研究者が発表し、情報交換と議論を展開した。「水と界面」では、さきがけ研究領域「界面の構造と制御」で水に関して顕著な成果を挙げている研究者も 3 名発表した。公開シンポジウムとは異なり、共通のテーマを軸としているため、チームを超えた議論はより深く行えたものと感じられた。

「界面とのつながりが薄い課題」への対処についてはやや悩まされたが、藤田課題、小江課題、櫻井課題などで、採択当初から頭にひっかかっており、領域会議、サイトビジット、中間評価会など機会を捉えて、「界面」に対する意識を喚起した。藤田チームの結晶スポンジの出現に結実したことは上にも述べたが、櫻井チームについても、高分子ミセル界面での薬剤の染み出しや、界面水和層の構造解析など界面に関わる重要な知見が後半になって得られた。

各課題の研究運営に予算面でのフレキシビリティを持たせるため、各課題の採択時の予算から 1 割を徴収して総括裁量経費としてストックし、毎年各チームから出される要望を査定する形で再配分した。川崎チームの酸化物絶縁膜原子層堆積(ALD)装置や藤田チームの超高分解能質量分析計の導入、櫻井チームのワクチンのサルでのテストなど重要な成果につながるものに有効に活用された。さらに、短期間の研究者の雇用や研究室移転に伴う費用など突発的な事態にも、当初予算への影響を最小限に食い止めつつ時宜を得た対応を可能ならしめた。また、4 グループ編成でありながら、採択時に小型予算であった由井チームには、予算基盤を底上げするべく重点配賦した結果、他の要因もあるものの後半の研究の進展を支えることができたと考える。

7. 研究を実施した結果と所見

(1) トピックス

本 CREST の実施は、①世界的に通用する“super star”の誕生、②インフラの整備、③有望な若手人材育成、などで大きな成果をあげた。言い換えると、本研究領域は「優秀な人」が集まり、「有望な研究課題」を展開できる時期にタイムリーに設定されたと考えて良い。以下にその具体例をあげていく。

- 川崎チーム：2000 年前後、米国ベル研究所の研究者であった Jan Hendric Schoen は、Science や Nature 誌上に、分数量子ホール効果や電界誘起超電導の論文を立て続けに発表していたが、その後、これらのデータは全て捏造であることが発覚した。川崎チーム

は努力を傾注して酸化亜鉛を精製し、実際にこれらのデータを計測することに成功し、世界に大きなインパクトを与えた。

- 春田チーム：本研究領域発足時には、金触媒に関する研究は隆盛を向える直前であった。しかし、世界中でいくつかの強力な研究チームが群雄割拠している状況であった。春田チームは24名からなる“All Japan”組織をCRESTのチーム型研究のスキームで構築し、多数の研究成果を発表した。その結果、金触媒の本流が日本にあることを世界に認めさせた(これらの成果から、春田教授は2012年のトムソン・ロイター引用栄誉賞を受賞)。さらに本研究課題の終了時点でベンチャー・Haruta Gold Inc. を立ち上げた。
- 尾嶋チーム：機能界面を解析するとともに、界面制御・新構造提案を行うためには、ナノレベルで高輝度放射光ビームを利用することが渴望される時代が到来していた。東京大学にはアウトステーション計画が持ち上っていたが、実施に踏み切れない状況であった。尾嶋チームの採択が呼び水となって状況は一変し、東京大学による追加資金投入が決定し、2009年にSpring-8にアウトステーションが完成することとなった。その結果、世界最高精度の超高輝度コヒーレント軟X線による計測が可能となった。多くのチームとの連携を通して研究は爆発的に発展し、研究期間内だけで原著論文285報を発表するに至った。
- 藤田チーム：従来、自己集積型カプセルの研究で高質の研究成果を積み重ねていたが、本研究領域で採択されたことから「ナノ界面」との課題擦り合せを意識してきた。その結果、本研究課題の最終盤において、カプセルの外壁を修飾し、金属によってカプセル間を架橋した「結晶スポンジ」を開発した(2013年2月Natureで発表)。これは結晶化が困難な化合物や試料が μg 以下の量でもX線結晶解析で構造が決定できる優れた方法で、多方面に衝撃的かつ革新的なインパクトをもたらしている。この成果は紛れもなく化学史にマイストーンとして残る大研究成果となることを確信している。
- 君塚チーム：分子集合化学、超分子化学の分野に、初めて「非平衡」の考えを持ち込み、従来は形成不可能であった準安定な集合体を作成するコンセプトを例示した。

途中で「テコ入れ」で成果を出したチームとしては以下のような例があげられる。

- 平川チーム：ナノギャップ電極の作成を論理的に解析し、その“歩止まり率”を画期的に向上させた。しかし、その基礎研究に手間取り、研究期間中には華々しい成果は乏しかった。しかし、総括再サイトビジットで評価された基礎研究の積み上げが有効に働き、本研究課題終了間際より、イオンゲート、分子機能スイッチ、金属内包フラーレンのダイナミクスなど、次々と優れた成果が出始めた。
- 小江チーム：ヒドロゲナーゼ活性中心のモデル化により、水素の分解活性を持つ金属錯体を合成し、世界中で話題となっていた。本研究課題ではこれを卑金属の二核錯体に発展させた。しかし、その出口研究では評価方法や再現性の取り方で苦しんでいた。しか

し、界面や電池の専門家である領域アドバイザー(久保、水野ら)の助けで、研究が前に進むようになった。錯体化学が専門の小江チームをどこまで出口研究に引きずるかという問題については総括班で何度か議論したが、研究は間もなく実用化チームに手渡しできるところまで来ている。

一方、研究期間中には結実しなかったが、今後の深耕に期待をつなぐ以下のような例もあった。

- 由井チーム：研究目的は「分子運動」を基盤として新しいバイオ界面を設計することであった。しかし、チームを構成した4グループともバイオ、分子集合、医療などの「ナマモノ」が専門の研究者ばかりであり、共通項である「動き」を測定、あるいは可視化する物性研究者が不在であった。総括班はこの点を繰り返し助言し、終盤になって、有力な可視化の専門家との共同研究が開始された。今後のコワークの結実に期待したい。

また人材育成については、数多くの代表研究者や共同研究者が研究課題スタート後に、新しいポジションに移動した。内訳としては、ポスドクなどのテンポラリーな身分から助教などのパーマネント職への異動が40件、助教から准教授などへの昇進が56件である。これはCREST事業が活発な「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、研究代表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や主たる共同研究者の多くが旧帝大や東京の大学へ“career up”してしまう傾向がある。「人材の流動性」という観点からは有意義であるが、「人材の偏在」というネガティブな一面もあることは留意すべきであろう。

次の項で、全課題についての研究実施の結果と所見について述べる。

(2) 課題別研究実施の結果と所見

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、研究代表者が世界に先駆けて合成に成功した有機-無機ハイブリッド材料であるメソポーラス有機シリカ(PMO)を活用し、これまで均一溶液系を中心に発展してきた有機化学をより実用的な固体系に大きく発展させる、すなわち、PMOの骨格と細孔の機能連動を図ることによる新しい光エネルギー変換材料(光触媒、光電変換)を作製するための基盤技術の構築を主目的とした。

原料である有機シラン化合物の合成法を研究する嶋田グループ、CO₂の固定につながる錯体光触媒を開発する石谷グループ、PMOの合成と壁面による集光の最適化、壁面への光触媒の効果的な固定などを担った稲垣グループの有機的な連携により、採択時に既に完成していたPMOの種類を大幅に拡げる新規PMOを開発するとともに、骨格中の125個のビフェニル基が捕集した光エネルギーが細孔内の1個のクマリン分子に集まる優れた光捕集アンテナ

ナ効果、捕集光の可視部への波長変換、ホール輸送性の付与(ホール移動度は $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$)、蛍光特性(量子収率 = 59-70%)の発現、光触媒機能、細孔中への n 型半導体材料(修飾フラーレンなど)の組込など、細孔内に導入した種々の機能物質との効果的な連動により、光触媒や太陽電池としての機能発現を確認し、光エネルギー変換材料における新たな分野を切り開いた。

一方、実用性の観点では、未だ社会的なインパクトを与えるレベルに達していないが、有機基や細孔内導入化合物の組合せにより、多様な展開が可能なことは疑いのないところであり、今後の発展が期待される。とくに人工光合成の可能性が開ければその社会的インパクトは極めて大きい。

研究代表者グループが企業の研究組織ということもあり、成果は着実に特許出願された。

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」

本研究課題では、SPring-8 の超高輝度コヒーレント軟 X 線放射光を用いて、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 3 次元的に解明すること、さらにその結果に基づいてデバイスの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た。

ステーションの陣容として、3 次元ナノ ESCA、マイクロ発光分光、コヒーレント分光の 3 装置を東京大学の新設ビームラインに設置し、この分野のトップクラスの共同研究者をチーム内に配し、研究代表者の強いリーダーシップの下に開発が進められた結果、3 次元ナノ ESCA で 70nm という理論値に近い空間分解能を、マイクロ発光分光においても、エネルギー分解能 $E/\Delta E \sim 10,000$ という、いずれも世界最高レベルの分解能を達成し、測定精度の向上と得られる情報量の飛躍的増加を実現した。

ついで、このステーションの装置群における有効性が検証され、各種電子デバイスのナノ界面における元素組成、電子状態、化学結合状態、磁気的環境などにおいて、従来ブラックボックス的な状況にあったナノ領域の現象がいくつも明らかにされ、“問題の解決”とともに、“観測に基づく新規な界面電子構造の制御・設計”にも展開されている。とくに、界面のナノ深さ方向の精密な情報が手に取るようにわかるようになった意義は大きく、論文の 9 割近くが国内外の利用者との共同研究であることもそのことを表している。また、実際にいくつかの半導体・デバイス、その他のメーカーでも活用が進んでおり、本研究課題の有効性が実証されつつある。

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、金属酸化物と有機物を用いた様々な 2 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することを目的としたものである。

研究代表者が展開してきた金属酸化物ヘテロ構造の高品質化と、有機電解質との接合により形成される電界効果トランジスタ構造の駆使を研究の二本柱といえる。

前者においては、最も典型的な酸化物半導体である ZnO について、MBE(分子線エピタキシー)法で構築した極めて清浄な (MgZn)O/ZnO ヘテロ接合界面に蓄積される 2DEG(2 次元電子

ガス)の $770,000 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ という高い移動度の実現に成功した。また、金属酸化物においては最初の例となる量子ホール効果の観測、さらにはより難度の高い分数量子ホール効果の観測にも成功した。

後者においては、トランジスタ構造の絶縁体上に有機電解質を貼り付け、そこに形成される電気二重層 (EDLT) を利用した機能化が試みられた。その最も重要な成果が、絶縁体中の界面に EDLT で誘起されるチャンネルが超伝導になるという従来の方法とは全く異なる電界効果型トランジスタ構造による超伝導現象の発見である。まだ臨界温度は 15 K と低いものの、材料を幅広くスクリーニングできる手法であるため、今後の高温化が期待できる。この成果は、異分野でそれぞれ力量のある研究者の相補的組合せ (川崎グループ+岩佐グループ) が相乗効果を生み出した好例であり、時機を得た研究連携が大きな成果に繋がることを証明するものである。

以上の成果は、いずれも高度でオリジナルな技術を背景にしたものであるが、レベルの高い論文誌に継続的に掲載されており (原著論文数 84 報)、Essential Science Indicators データベースのトップ 0.1% の論文に 5 件がリストされる (2012 年 3 月当時) など世界をリードする程の高いレベルにあり、内外の類似研究と比べても先頭を走っていることは明白である。

これらの成果に基づき、第 7 回山崎貞一賞や第 42 回市村学術賞功績賞、第 8 回本多フロンティア賞、平成 19 年度日本化学会学術賞など数多くの受賞につながっている。

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」

本研究では、燃料電池やプロトン電池などのエネルギーデバイスへの応用を念頭に、金属錯体を 2 次元から 3 次元に組み上げた MOF (Metal Organic Framework) を基盤材料として、水素分離、水素吸着・解離、酸化 (プロトン化)、プロトン伝導などが関わる新しい学術分野である「錯体プロトニクス」の創成を目指した。

その結果、ナノ細孔を有する結晶性の高い薄膜やチューブなど多彩な MOF の合成に成功し、層毎に機能を分担する積層構造体の開発への基盤が整った。また、その過程で、得られた構造体のキャラクタライズで共同研究者の協力を得て SPring-8 の高輝度放射光による X 線回折法や中性子散乱を用いた解析で世界トップレベルの測定技術の開発も行われ、材料研究者にとって極めて重要な解析技術の進展にも貢献した。

また、燃料電池などのエネルギーデバイスへの応用を念頭においた機能付与および物性評価では、結晶水や導入アンモニアによる高いプロトン伝導性やガスの選択吸着性、電極触媒としての可能性、MOF に担持される触媒としてのナノ合金粒子の開発など要素技術につながる多様な展開が見られた。これらの成果は、レベルの高い雑誌で数多く引用され、世界的にも注目を集めている。さらに、積極的に特許出願が行われ、直接に、あるいは、NEDO でのプロジェクトを通じて数多くの企業との共同研究に展開した。バルクにはないユニークな特性を示すナノ合金粒子の研究は CREST「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」領域での研究に引き継がれている。

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」

化学的に不活性であるとされた金の触媒作用は、1982 年の本研究代表者の発見(金微粒子による CO の低温酸化)に端を発するものである。本 CREST 研究では、我が国における広い分野にわたる金触媒に関係する研究者を集結し、クラスターや担持触媒の調製、有用反応の開拓、粒径効果、担体効果などを実験および計算科学から探求することにより、金触媒の性能把握と触媒メカニズムの解明を目指した。

その結果、金クラスター材料の調製と触媒としての絞り込み、構造解析、触媒評価とメカニズム推定のすべての目標を当初の研究構想にほぼ近い形で実施し、新しい材料および触媒としての金の化学分野を世界に先駆けて推進し創出できたものと評価できる。2nm 以下のサイズで金粒子の触媒特性が劇的に変化することや、 $\text{TiO}_2(110)$ を担体とするモデル触媒による CO 酸化反応で TiO_2 との接合界面が活性点であること、さらには異種元素に囲まれたクラスター頂点原子が特異的に高活性であることなど、ナノ領域における接合界面の重要性を定量的に明らかにした意義は大きい。

これらの成果は、基礎、応用にわたり着実に発表されたが、2009 年の Nature 誌掲載の論文の被引用回数が 500 回近いことをはじめ研究代表者の論文の引用回数総計が 2 万件を超し、2012 年トムソン・ロイターの引用栄誉賞を受賞している。また、Royal Society での講演を初めとする国際会議での招待講演が 83 件(2012 年当時)であることなどはこのチームの研究が世界をリードする立場にあることを物語っている。なお、2012 年には、アジアで初めてとなる金に関する国際会議 Gold 2012 を主催し、多くの第一線の研究者を集めてこの分野の国際的な交流にも貢献した。

反応への応用では、複雑な工程を要する反応の単純化やバイオマス関連の反応にターゲットが絞られ、金触媒が多く反応に有効であることが示されたが、社会的に絶大なインパクトを及ぼすような触媒反応の開発には至っていない。現在、春田触媒を有償で提供する会社を設立し、広く世の中の評価を仰ぐ体制をとっている他、着実な特許出願に基づいて、数多くの企業と共同研究などの連携が図られている。

6) 有賀チーム「巨大 Rashba 効果によるスピン偏極電流」

本研究では、半導体表面で巨大 Rashba 効果を実現し、これを利用して表面でのスピン偏極電流を実現することを目的とし、研究代表者グループによる、構造解析、電子状態測定などによる物質探索と、共同研究者の理論グループによる、Rashba 系の特徴を再現するモデルの構築を目指した。

物質探索は角度分解光電子分光法、スピン分解光電子分光法を駆使して行われ、 $\beta\text{-Pb/Ge}(111)$ 表面において、巨大 Rashba 効果によりスピン分裂した金属的電子バンドを発見したのをはじめ、 $\text{Tl/Ge}(111)-(1\times 1)$ 表面など半導体表面での数多くの金属的スピンバンドや軽元素金属表面でのスピン偏極状態の例を発見し、表面・界面のスピン偏極がかなり普遍的に生じ得る信頼すべき現象であることを示した。一方、当初の大目的であるスピン偏極電流を取り出すことについては、独自に開発した高精度表面電気伝導度測定において感度以下の結果となり、達成できなかったのは残念である。

補償関係、あるいは競合関係にある研究者、さらには川下に位置する研究者との交流を

積極的に推進していれば、オリジナリティのある本研究課題の成果を質、量とも膨らますチャンスがあったのではないかと思われる点が残念である。

なお、理論グループとの連携は後半に実を結び、Rashba 効果が解析可能な minimal モデルの計算法を確立し、光電子分光の結果とよい一致を示した。

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、金属イオン、金属錯体、生命分子あるいは有機分子をナノ界面の構築素子(ライブラリ)とし、それらの溶液や表面における自己組織化プロセスによって、新しいナノ界面構造を構築すること、また、そこでの分子間相互作用を制御して、特有の電子構造や発光特性等を開拓し、ナノインターフェイス材料の創製を計ることを目的とした。

結果として、1次元金属錯体を主たる素材とし、液-液、固-液界面での自己組織化を利用した多様なナノ構造体の生成法を開発するとともに、優れた誘電特性、光学特性およびセンシング機能を示す多くのナノ材料を創出し、成果はレベルの高い国際誌に継続的に掲載された。これまでの超分子化学の積み上げの上に、ナノ界面が持つ特徴を見事に組み合わせて、“界面超分子”とでも呼称すべき新境地を開拓したことは高く評価できる。

一方、得られた多彩な成果(各論)を統合し、研究タイトルにある“統合構築技術”の本質を明確に表現できる概念の確立に至れば、これらの質的価値は更に高まると思われる。

研究期間の終盤(平成 24 年)に、アゾベンゼン基を有するイオン結晶-イオン液体の光誘起相転移現象を見いだした。この現象は、ヒートポンプなど光を利用したエネルギー変換への応用が広く期待できたため、実用化へ向けた基礎を固めるべく研究期間を 1 年延長して実施した結果、フォトンアップコンバージョン液体の開発の成果が得られた。

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」

本研究では、精密に構造制御したナノギャップ電極により、単一分子や InAs 量子ドットへの接合を作製し、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を目指した。

その結果、通電断線法という新規なメカニズムに基づく歩留まりの高いナノギャップ電極作製法を見出し、この確かな技術をベースに、バリスティック領域の原子移動のメカニズムの提唱や単一分子・量子ドットのランジスタ構造の実現、スピン-軌道相互作用・ g 因子のゲート電圧による制御、THz 波照射下での光支援トンネル効果の観測など多くの新規な物理現象を見出した。ナノギャップ電極は、量子ランジスタの必須技術として、また、究極の分子物性を精査する目的で化学、物理の両方より多くの研究アプローチがなされている基盤的な技術である。成果はまだ萌芽的な段階であるが、今後の発展により大きなインパクトが期待される課題である。

また、領域内他グループとの共同研究は 3 件について試みられ、うち、1 件は成果に結実した(イオン液体ゲートを用いた量子ドットの高効率な電子状態制御: 川崎チーム、岩佐グループとの共同)。原著論文発表は RPL や Nano Letters など物理系の有力誌を含め 82 件の

発表がなされ、妥当な成果である。また、研究期間中に、ナノ量子構造に関する国際会議を2回開催し、成果発信にも努めた。

9) 藤田チーム「自己組織化有限ナノ界面の化学」

研究代表者は世界に先駆けて、配位結合を活用した自己組織化により、さまざまな構造の巨大中空構造体の自在構築を達成してきた。この独自技術に立脚して、本研究では、このナノメートルスケール中空錯体の表面および内面を利用した有限系の表面化学と内面化学の展開を目的として実施した。

その結果、特有の界面・空間に規定される極めて多面的な現象とその特徴を利用した様々な応用を明らかにし、化学反応への理解や構造解析に大きく資する貢献成果を上げた。その成果を挙げればきりが無いが、特に、巨大球状錯体にタンパク質を閉じ込めての X 線構造解析や、錯体ユニットのつながった 3 次元結晶に生まれるナノ界面・空間を利用した“ナノグラム結晶構造解析”は、この錯体超分子の最大の特徴である一義構造の賜物であり、これまで結晶化が困難であった難結晶性低分子やタンパク質などの巨大分子の構造決定に大きな進歩をもたらす可能性が大である。この成果を実用化へ進める基礎固めとして研究期間を1年延長して、結晶スポンジの合成法確立、種類の拡充、解析法の確立、特許の拡充などに取り組んだ。現在、分析機器メーカーや製薬企業などとの本格的な共同研究に向け準備中である。タンパク質の包接は、バイオを専門とする共同研究グループである加藤晃一グループや、領域外の分析研究者との共同によるもので、異分野協同の代表的な成功例といえる。

成果は、Nature、Science といった著名な雑誌に数多く掲載されており、その引用回数の多さからも、この分野で世界をリードする地位にいたることが自明である。また、これらの成果に基づき、トムソン・ロイター第3回リサーチフロントアワードの他、海外の学会、大学からの受賞、国内では文科大臣表彰、日本化学会賞、江崎玲於奈賞など数々の賞の受賞につながっている。

10) 由井チーム「分子運動操作を基盤とした多次元のバイオ界面」

本研究は、生体内で安定に存在し続けるバイオマテリアル開発の基礎として、その表面に構築した分子・分子鎖の運動の機作を通して、初期から中長期に亘る生体防御反応を制御しうるナノバイオ界面を創製することを目的として実施した。

材料の生体適合性を動的バイオ界面という切り口で捉えて、表面分子の動きに QCM-D を用いた M_f という新規なパラメータを導入し、生体防御反応への効果について整理した結果、血小板の粘着で、関与するタンパク質フィブリノーゲンの構造変化(γ 鎖の露出)が M_f の大きい表面上ほど小さく、それにともなって血小板の粘着が低減する傾向が見られたなど、一定の傾向を見出すことに成功した。定性的な研究が多い分野にあって定量化を目指したことは評価できる。科学的な理由付けは必ずしも明確とはなっていないが、医工学の分野

に一石を投じたと言える。一方、「ナノ界面」をキーワードにした本領域の趣旨に照らして、ナノの領域を観る・測るといった視点が未だ不足しており、その点で科学技術へのインパクトを減じている。本チームは化学とバイオからなるヘテロな体制で推進されたが、今後、「観る・測る」の専門家との共同研究の展開に期待するところである。

11) 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」

本研究課題は、ナノ細孔を有する多孔性薄膜の活用により、環境やエネルギーに関する諸問題の解決に貢献する革新的なナノ分離膜の開発を目指すとともに、その優れた性能を発揮する要因を解明することで、“ナノ界面”に特有な“異常現象”の有無を検証する基礎科学的なイノベーションをも目指して行った。

その結果、孔径数 nm、厚み数 10 nm の、力学的に強靱で、有機溶剤にも十分に耐え得るダイヤモンド状カーボン(DLC)の自立ナノ薄膜を開発し、その製法をパイロットレベルで確立した。当該分離膜を透過する溶液の流束は従来品の 1000 倍を超える優れた性能を示し、別途開発した多孔性の吸着剤と併せて、石油発掘の随伴水の浄化などの用途で、種々の企業への技術移転が進められている。

開発された一連の分離膜や吸着剤とその性能の解析については、Nature 姉妹誌、Science といった著名な雑誌に複数掲載されており、世界第一線の成果であることが伺える。

しかしながら、“ナノ界面”に特有な“異常現象”については、大野グループとの共同研究になる分子シミュレーションにおいてその兆候が示されたものの、孔径が 1 nm オーダーになっても、通常のニュートン流体の連続流で観測される“ハーゲン・ポアズイユの式”に従い、期待されたような“異常現象”といえるものは今のところ観測されていず、今後のサブナノ領域での検討を待ちたい。

12) 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、天然に存在する酵素を範としたエネルギー問題解決に資する人工の錯体触媒を開発するにあたり、高機能酵素の探索と、その精製法開発と構造解析、さらに、それを範とした錯体触媒の開発と、それを利用した常温・常圧燃料電池、および、常温・常圧での CO₂還元や他の化学反応への応用という形で進められた。

まず、酵素の探索では、研究代表者が自ら阿蘇山に採取に出かけ、水素活性化能が極めて高く、世界で初めての発見である酸素耐性も有するという高機能のヒドロゲナーゼ(S-77)を見出した。アミノ酸配列などこの酵素の構造が樋口グループとともに徹底的に調べられ、活性部位を取り巻く、いわば界面に相当するタンパク質の構造も明らかとなった。これに並行して行われた錯体触媒の開発では、主として配位子の電子的効果を最適化する手法で、鉄-ニッケル系で、水素だけではなく酸素をも活性化する画期的な錯体触媒を世界に先駆けて開発し、その活性化メカニズムの全容も明らかにした。また、水素をヘテロに開裂するというこれまでの有機分子触媒にはなかった特徴も S-77 を引き継いでいる。こ

これらの成果はそれぞれ Nature と Science 誌に掲載された。

燃料電池での実用化に供するには、まだ課題は山積みであるが、類似の錯体で、CO₂ の還元や H₂O₂ の直接合成がチーム内企業との共同研究で進められている。これらが実現すれば、エネルギー問題解決の一策として世の中に与えるインパクトは絶大である。酵素における活性部位周辺の“界面”構造の意義解明が大きな鍵となると思われる。

13) 栗原チーム「表面力測定によるナノ界面技術の基盤構築」

本研究課題は、研究代表者が独自に開発した表面力測定装置を基に、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・制御し、新規ナノ界面技術の基盤形成に活用することを目的とした。

その結果、基本的なナノ共振ずり測定装置とツインパス型表面力装置の測定から、液体をナノ空間に閉じ込めた状態で温度、圧力、電場勾配等を制御しつつ、ナノ界面の状態を力学的観測と種々の光学的観察(紫外可視～赤外分光、蛍光分光、SFG 分光、X 線回折等)による詳細な評価・解析を可能とし、電極反応やトライボロジーなど周辺領域との共働を容易にすることで機能材料界面評価への応用・展開を促進する基盤が構築された。

研究成果として、当該分野の代表的論文誌である *Phys. Rev. Lett.* を含む論文誌での原著論文発表(56 報)、学会における口頭発表(115 件)等により、国内外の物理系学会における認知度も上がっており、オーストラリアの学会や IUPAC からの受賞にもつながった。

装置の改良・普及という点からも、試料の高精度高温保持装置の改良や、解析ソフト、国際標準化等による実用化促進にも努力が払われており、企業との連携で商品化した装置の販売実績も出始めており、徐々にではあるが、今後普及が進んでいくと考えられる。

14) 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」

本課題は、研究代表者が既に見出していた多糖/核酸複合体をベースに、DDS としての、主として界面における構造と挙動を詳細に解析し、インフルエンザワクチン材料としての基盤を確立するとともに、他の応用展開へ向けての探索を図ることを目的とした。医・理・工からなる 6 グループ体制で実施した。

DDS の概念設計において受容体 Dectin-1 の利用、dA-タンパク質コンジュゲートなど drug carrier に新規なコンセプトを導入し、基礎から応用までの幅広い研究で多糖-核酸複合体による DDS 技術を飛躍的に進展させ、実用化が期待できるレベルの感染症ワクチンの新しい構成要素の提案に至った。多糖複合体による核酸製剤の機能、複合化効率の向上等に関するデータは独自性が高く、論理的な研究展開は際立ったものであった。また、バイオ、薬剤の分野のソフトマテリアルの形態分析において、Spring-8 の X 線小角散乱を適用・解析する技術を確認したことも基礎科学としてのオリジナリティの高さが評価され、多くの類似研究を生み出す波及効果の大きいものと評価される。

これらの成果は、一流の論文誌を含む論文に発表され、採択数 165 件は、公立大学を主

体とする研究チームとしては異例の多さである。基本特許の国内外での権利化がなされたことも企業化に有用である。その成果に対する企業の関心は高く、共同開発を行う企業が既に出ており、社会的に重要なパンデミックウィルス、がんなどの治療に有効な難病治療薬となる可能性が大きい。

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、粒子性／波動性制御デバイスの実証と、量子細線ナノメモリの開発を主として実施した。

粒子性／波動性制御デバイスに関しては、クーロンブロッケード領域と共鳴トンネル領域がシームレスに繋がること、そのクーロンブロッケード領域と共鳴トンネル領域の間に近藤共鳴が生じていること、トンネルバリア厚さを制御することにより近藤温度の制御が可能であることなどを初めて実験的に示し、本コンセプトを実証するに至った。量子細線ナノメモリに関しては、カーボンナノチューブの半周メモリを開発し、金微粒子を用いることによるメモリ窓の改善を行なって、書き込み電圧を従来の平坦なフラッシュメモリの1/10程度に低減することができた。また、カーボンナノチューブ全周にわたって2層の絶縁膜を形成した全周量子ナノメモリの開発にも成功した。

中間評価時点以降は、バイオ研究者を加えて、グラフェンのセンサーへの応用研究を重点的に行ったところ、高感度かつ選択的なバイオセンサーに利用できる可能性を見出し、国際会議でのインパクトある発表が注目され、国内外への特許出願(6+6件)も行って、当該分野の企業との連携による実用化研究へ道を拓いた。

一方、科学的インパクトの点では、ややオリジナリティに不足しており、基礎研究データを基に上記の成果をさらに深化させ真にオリジナリティの高い研究に磨き上げることが必要である。

8. 総合所見

(1) 研究総括所見

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ることができた。統計データとしては総論文数1550報、Nature系/Scienceの合計は32報、特許(国内)は122件であり、いずれもCRESTの他の領域と比べてもトップクラスの成果といえる。この成功の理由として、①タイムリーな時期に「ナノ界面」の課題がCRESTに設定されたために、やる気のある優秀な研究者が参集した、②幅広い領域アドバイザーと研究代表者を選出し、お互いのマッチングやディスカッションで研究の幅を広げさせた；その結果、研究(特に境界領域研究)が目立って活性化された、③領域の内外で積極的な共同研究を推奨し、単独グループでは達成できない目標にアプローチすることが可能となった；その結果、実施途中で方向転換がなされるようなケースも出た

が、その理由は明確であり、新方向に将来性があると見た場合は良しとした。更に、敢えて言えば、④研究総括として研究に有効と見たら徹底的に支援したが、研究に対する効果が小さいにも関わらず研究者に負荷をかける事は極力省いた。

とりわけ、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間、更には研究者と領域アドバイザー間での相乗効果が発揮されているチームでの研究進展に目覚ましいものがあつた。一方で、研究の意外な展開、行き詰まり、設定課題からの離脱などに対しては、柔軟に研究方向や研究体制を再編するのが望ましい結果をもたらした。

本研究領域は当初「無機からバイオまでの材料開発」の横糸と「物づくりから物性評価までの技術開発」の縦糸が交差する 4 象限の図面上で、ナノ界面の基盤構築を目論んだ。縦横ともに幅が広いので、全ての象限をカバーできたとは言えないが、各々の交差点における研究成果、研究の方法論は例示できたと考えている。これらはナノ界面の基盤知識、基盤技術として、将来にわたって重要な意味を持つ成果であると信じている。以前、北澤前 JST 理事長は「CREST を実施した課題のスポットには世界と対抗できるクラスター拠点ができる」と言われた。15 チームで 1550 報という総論文数からして、ナノ界面の研究領域で世界的なクラスター拠点を日本に構築できたものと考えている。事実、本報告書には、世界初(first one)、世界最良(best one)、そして世界唯一(only one)のキーワードがいくつも出てくる。これらは本研究領域の研究成果の質の高さ、量の多さを端的に示す証左であると言える。

(2) JST 所見

本領域設定の以前にナノテクノロジーに関する領域は数多く設定されたが、意外にも「界面」をテーマとする領域はなかった。本領域は満を持して登場したと言える。応募数の多さも時宜を得ていたことを物語っている。

領域設定後、新海研究総括のねらいにより、界面の対象を 2 次元だけに限定するのではなく、0 次元～3 次元へ拡張させるとともに、物質の対象はハードマテリアルにとどまらずソフトマテリアルの界面も含めたスコープを研究者に提示し、目的として物づくりから物性評価に亘る課題が採択されたため、極めて幅広い多様な陣容となった。

運営では、この多様性を生かすべく、チーム内外の異分野との交流が積極的に図られたため、「ナノ界面を知る」「ナノ界面から機能を生み出す」点において、専門分野を超えたスケールの大きい骨太の成果に数多く結実した。運営の適切さもさることながら、まずはこのような場が提供された意義は大きい。ナノ界面の主戦場をすべて網羅できた訳ではないのはもちろんだが、上記の幅広い分野のそれぞれに強力な橋頭堡を築くことができた。今後の材料、デバイス開発の基礎基盤構築という、戦略目標の意図を十分に実現できたと判断する。またこうした考え方、および取り組みが功を奏した結果として、平成 25 年度からは「選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製」という新たな戦略目標が文部科学省より提示され、CREST「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」(研究総括：瀬戸山亨)、
さきがけ「超空間制御と革新的機能創成」(研究総括：黒田一幸)が発足している。

新海研究総括は、自らの研究者としての経験も踏まえ、「過去の延長線上にないチャレンジングな研究を進めること」、「サイエンスとしての本質を大事にすること」を基本精神とし、そのために異分野交流を強く推奨して研究者を啓蒙し続けた。藤田誠・東京大学教授の研究課題における“結晶スポンジ”の成果は、過去の殻を破った好例である。領域会議や評価会では豊富な経験に基づく卓越した見識と柔軟な発想で、常に前向き・具体的、時々“研究者が考えもしなかった”助言を行い、研究者から尊敬を集めた。また、領域アドバイザーの信頼も厚く、総括の思いを押し付けることなく合意を醸成し、総括＋領域アドバイザーによる温かく、かつ、時には厳しい緊張感のあるサポート体制が構築されていた。さらに、JSTが毎年のように提示する各種施策に対しては、時には厳しいご意見で釘を刺しながらも、趣旨を理解して本領域に合う形で採り入れた。

最後に、このような幅広い領域をマネージして成果を生み出せるのは、見識と人柄を兼ね備えた新海総括しかいないとの領域アドバイザーの言葉があったことを付言する。

以上