

# 戦略的創造研究推進事業

－CRESTタイプ－

研究領域「高度情報処理・通信の実現に向けた  
ナノ構造体材料の制御と利用」

研究領域事後評価用資料

平成20年 2月14日

## 1. 戦略目標

「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」

## 2. 研究領域

「高度情報処理・通信の実現に向けたナノ構造体材料の制御と利用」  
(平成14年度発足)

### 2-1. 研究領域の概要

この研究領域は、バルクとは異なるナノ構造体において、微細な構造・組織等を制御することにより、高度情報処理・通信の実現に向けたこれまでにない特徴的な物性・高機能・新機能を有する材料等の創製や、その利用を図る研究を対象とするものです。具体的には、既にバルクとして存在している物質の「ナノ化」、すなわち薄膜・微粒子等の極微細構造はもちろん、ナノ粒子やクラスター原子・分子、分子性物質等、無機物質・有機物質さらにそのハイブリッド系を制御し、これまでにない機能・物性等を有する革新的新材料の創製を目指す研究、フラーレン・カーボンナノチューブ等の新機能性材料の創製やナノデバイス・システムへの利用を目指す研究等が対象となります。なお、本研究領域は戦略目標「非侵襲性医療システムの実現のためのナノバイオテクノロジーを活用した機能性材料・システムの創製」および「環境負荷を最大限に低減する環境保全・エネルギー高度利用の実現のためのナノ材料・システムの創製」にも資するものとなります。

## 3. 研究総括

福山 秀敏 (東京理科大学理学部 教授)

#### 4. 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	事後評価時 所属・役職	研究課題	研究費
平成 14 年度	石田 武和	大阪府立大学・ 教授	超伝導ナノファブリケーションによる新奇物性と応用	395.6
	小林 速男	日本大学・ 客員教授	新規な電子機能を持つ分子ナノ構造体の構築	414.8
	篠原 久典	名古屋大学・ 教授	新世代カーボンナノチューブの創製、評価と応用	680.4
	田中 一義	京都大学・ 教授	精密分子設計に基づくナノ電子デバイス構築	416.8
	中嶋 敦	慶應義塾大学・ 教授	次世代光磁気材料を指向したナノデザイン制御	474.1
	永長 直人	東京大学・ 教授	関連電子コヒーレンス制御	438.2
	山下 正廣	東北大学・ 教授	量子スピン系ナノ分子磁石の創製	365.6
平成 16 年度	浅井 美博	産業技術総合研究所・ グループリーダー	単一分子伝導・接合シミュレーション	239.8
	前川 禎通	東北大学・ 教授	電子内部自由度制御型ナノデバイス創製原理の構築	162.9
			<b>総研究費</b>	3588.2

## 5. 研究総括のねらい

「物質科学」には実に多様な側面があり、その対象分野は基礎から応用ときわめて幅広い。しかし、現在「応用」上重要な役割を果たしている材料が実現された過程は、シリコンを代表とする半導体デバイス、ポリアセチレンのような有機導電性薄膜の例を見るまでもなく、多く（ほとんど）の場合地味な基礎的な研究が発端となっている。つまり「材料」はまず「物質」として発見され、その性質、物性が究明されて、それに工夫を重ねて初めて社会に有用な材料となる。材料にとって、基礎科学と工学は車の両輪である。実際科学（サイエンス）の裏付けのない技術（テクノロジー）は社会的な信頼を得ることができない。

本領域「ナノ構造体材料」においては、基礎科学を基軸に「ナノ物質」の可能性を追求し、同時に絶えず「材料」としての可能性に注意を払うことを基本的な方針とした。「ナノ物質」に関しては、従来 2 つの視点が強調されてきた；バルクの物質を小さくしてゆくとする「トップダウン的」、もう一方は、原子・分子を基に微小物質を合成するという「ボトムアップ的」。前者は物理的、後者は化学的な側面が強い。本領域にはこの両者が混在する。しかし、この両者を区別することなく「物質科学」の対象として総合的に意見交換する機会を多く設け、本領域での目標実現はもとより、「物質科学」の将来に向けたより大きな発展を目指した。

## 6. 選考方針

### 6-1. 研究総括の募集・選考に当たっての考え方

情報処理・通信の基盤は物質の持つ機能によって支えられている。そのような物質のナノ化は情報処理・通信の高度化にとって必然である。この「ナノ化」には、2つの方向がある。一つは、既にバルクとして存在が知られている物質を微小化・微細化する方向であり、一方はナノ構造体としてしか存在しない物質系の発見あるいは安定化である。このようなナノ構造体が示す機能は電子状態によって規定されており、従って、ナノ物質に対する真のねらいは新しい電子状態の探索にある。このような観点から、本研究領域には、半導体・金属（半金属）・酸化物・分子性結晶等バルクにも存在する物質の制御されたナノ化を行い、それに伴う新しい物性（たとえば、バルク金属・半金属の絶縁体化、超伝導と磁性等タイプの異なる酸化物の接合）の探求をはじめ、フラーレン・カーボンナノチューブ・ゼオライト・鎖状分子等、それ自身ナノ構造をもつ物質およびその結晶が持つ新しい物性の可能性探索が含まれる。無機物質・有機物質のいずれも対象とし、バイオ物質にはしばしばみられる金属を含む有機分子の結晶等の無機・有機ハイブリッド系も積極的に対象とする。ただし、「電子」の振る舞いに注目し、新しい機能発現を目指すことを基本とする。

### 6-2. 研究総括総評

フラーレン、分子システム、膜・界面・超薄膜、ナノ超伝導体・磁性体、液晶、反応制

御、局所プローブの開発、等の新物質状態を探求する多様な且つレベルの高い様々な計画に加えて材料・プロセスに関する提案が計54件寄せられた。

8人のアドバイザーの先生を交えての率直で積極的な意見交換により15課題が面接対象となり、その中から7件が採択された（平成14年度）。

ナノ構造体材料の物性面への取り組みが研究領域の軸足であったためか、結果として採択されたのはすべて大学ないしは大学共同利用機関から申請されたものとなった。優れた提案でありながら、採択された課題と基本におなじ方向を目指すとの理由で採択に至らなかったケースもあり、心残りがある。一方で従来の研究の単なる延長としか思えない提案もあった。

平成16年度にはナノテクノロジー分野別バーチャルラボ全体でシミュレーションの課題募集が行われ、その応募の中から当領域として2件が採択された。

採択課題は当然それぞれが特徴をもっており、そこから、個性ある成果がうまれることが第一であるが、同時に、根幹では、原子の凝縮体としての物質が持つ限りない可能性を「ナノ構造体」という観点から「新物性探求」を目指した研究であるという点では共通である。従って、相互の研究連絡・意見交換を通じて個々の研究の先鋭化ばかりでなく予想外の新しい可能性がうまれることを期待したい。

## 7. 領域アドバイザーについて

### 7-1. 領域アドバイザー

領域アドバイザー	所属	役職	任期
秋光 純	青山学院大学 理工学部	教授	平成14年9月～平成20年3月
川合 知二	大阪大学 産業科学研究所	教授・所長	平成14年9月～平成20年3月
黒田 一幸	早稲田大学 理工学部	教授	平成14年9月～平成20年3月
小林 昭子	日本大学 文理学部	教授	平成14年9月～平成20年3月
高尾 正敏	松下電器産業（株） 中尾研究所	統括担当 参事	平成14年9月～平成20年3月
玉尾 皓平	理化学研究所 フロン ティア研究システム	システム長	平成14年9月～平成20年3月
寺倉 清之	北陸先端科学技術大学 院大学	特別招聘教授	平成14年9月～平成20年3月
十倉 好紀	東京大学 大学院工学系研究科	教授	平成14年9月～平成20年3月
北岡 良雄	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授	平成16年10月～平成20年3月
藤原 毅夫	東京大学 大学総合教 育研究センター	特任教授	平成16年12月～平成20年3月

## 7-2. 人選・依頼するに当たっての考え方

個々の「物質」に特有な性質に深い理解を持ち、かつ「物性」の多面的な性質の総合的な判断に基づいて、「激励的なアドバイス」を期待できる方々をお願いした。

## **8. 研究領域の運営について**

### 8-1. 研究総括の方針や研究領域のマネージメント

チーム内におけるメンバー間の協力・連携関係の構築のため、チームリーダーとしばしば意見交換を行った。加えて、チームの活動が自閉的にならないよう、チーム間の情報交換・意識の共有化に努めた。それは、各個別のテーマ究明の中から生まれる「物質科学」における重要な成果は必ず普遍性をもち、他のテーマにも手がかりを与える可能性があるという認識に基づく。とりわけ、本領域では「物理」と「化学」が混在しており、このような「異文化」間の情報交換は極めて有益と考えた。「異文化」間の情報交換の場として、領域関係者が集う領域ミーティングを9回開催した。この領域ミーティングには、研究総括、アドバイザー、研究代表者、共同研究者（80～130名/回）の参加に加えて、関連する分野の専門家を招聘した。多くの場合、春期は1日で、夏期は2日間に亘って、①研究代表者による研究活動状況報告と主要成果の発表・討議、②主要研究テーマのポスター発表（研究担当者）と討議、および③招聘外部有識者による関連テーマの講演を設けた。その結果、10件以上の領域内チーム間での共同研究が派生的に生まれた（主要な研究活動は「添付資料、p.17 6-1 領域内チーム間で実施された主要な研究活動」を参照）。

一方、研究の進捗は上述の領域ミーティングの他、研究代表者との意見交換を通じて把握に努め、時宜を得た研究予算の追加配算によって必要設備の購入を促進した。その結果、スピン液体の世界最初の実現や金属・分子合成系での特異な磁性状態の発見などが達成された。

### 8-2. 研究テーマの導き方について

チーム内での研究テーマの絞込み・力点の修正等については研究代表者と個別に意見交換を行った。例えば、石田チームでの理論的研究の補強、山下チームにおける分子性磁石の物性物理の面からの理論的な解析などに反映された。

並行して、機能分子と電極との伝導などのように、より広範囲にわたる課題については、チーム間のみならず領域外の専門家を交えた会合（国際シンポジウムを含む）を開催して理解を深めた。これは大変有効であった。この課題は後に、あたらしい研究課題（浅井チーム）へと展開させた。

## 9. 研究を実施した結果と所見

### 9-1. 研究総括のねらいに対する研究成果の達成度

本領域の目標は、「物理」「化学」を区別することなく徹底して「物性」、とくに「電子物性」、に注目し、「物質科学」の将来に向けたより大きな発展の基礎構築、であった。(その際、応用の可能性については絶えず留意した。) その結果、各チームは5年間(2チームは3年間)にそれぞれ世界的な視点からも注目すべき特徴ある具体的な成果に到達した。研究領域全体として、学術論文1052件(邦文誌13件、内外欧文誌1039件)、学会発表3125件、特許出願70件(国内出願59件、外国出願11件)の成果が生まれ、当初の研究領域としての狙いを概ね達成できたと考えている。

このような成果は、研究テーマの広がりやを反映して、物質科学の基本にかかわる新物性の実現、提案・実証から既に具体的な応用に向けた活動が高程度に進んだ事例まで実にさまざまである。前者の例として

- 1) 単一分子種金属の世界で初めての実現、
- 2) スピン液体の世界最初の実現、
- 3) スピンホール効果の提案・実証、
- 4) 金属・分子合成系での特異な磁性状態の発見、
- 5) 埋没界面の低波数振動分光による測定技術の開発
- 6) 新熱電変換材料の提案

等がある。また後者の例としては

- 1) 2層カーボンナノチューブ(DWCNT)の特性に基づいた透明導電性ポリマーフィルムの実現、
- 2) わが国オリジナルな高温超電導材料 $MgB_2$ の高品質細線を用いた中性子検出器の提案、
- 3) ゼロ熱膨張材料の開発
- 4) DWCNTのデバイス応用として、DWCNTの成長方向制御およびFETの新構造の提案

等がある。

このような明示的な成果に加え、そのような成果に到達していなくとも、大きな「夢のある」課題について、当初世界的に認識がなかった根本問題を明確に抉り出し、その基本から堅実な取り組みを進め今では目標達成直前まで推進された「分子デバイス」に関する研究という例もある。その途次で「物質が材料へと進化する」際に避けて通れない普遍的な問題「界面・表面の局所構造とそこでの電子状態」(象徴的に「電極問題」と呼んだ)を認識し系統的な意見交換の機会(2回の領域内および外部有識者による非公開会合および1回の公開国際シンポジウム)を持ったことの意義は極めて大きいと考えている。やはり研究は「人間」でありそれを取り巻く環境によって当初単純に予想された以上の飛躍が展開されることが実感された。「電極問題」認識のきっかけはアドバイザーからの「アドバイス」は重要であった。感謝に耐えない。

なお、上に挙げた成果以外にも印象に残る下記のような成果がある。

MgB<sub>2</sub> 良質ジョセフソン接合の実現

高解像度超電導量子干渉素子(SQUID)顕微鏡画像のための数値処理方法開発

多くの金属内包フラレン・ピーポッド合成

カーボンナノチューブの構造と電子物性の系統的研究

有機サイリスターの実現

単一分子性金属の開発と物性評価

ポーラス系におけるフェリ磁性(強磁性)強誘電体の開発

オリゴチオフェンの大量合成法の開発と世界最長 192 量体 (75 nm) 分子ワイヤー達成

ナノギャップ電極の実現

界面計測用マルチプレックス和周波分光法と四次ラマン分光法の開発

複合分子クラスターの合成とソフトランディング技術の確立

強磁性金属における異常ホール効果の理論

スピントロニクスによる電気磁気効果(ヘリカル磁性体での誘電性)の発見

多くの鎖状分子磁石の合成と物性解析

振動的な非弾性散乱のシミュレーション基礎理論構築

Si 表面での有機分子の吸着特性の解明

巨大熱起電力を持つ低次元遷移金属酸化物の理論構築と物質探索

強磁性体/超伝導体ナノ構造の量子効果提案

低次元モット絶縁体における巨大非線形光学効果の発見

## 9-2. 領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果

### 1) 科学技術の進歩に資する成果

#### (1) 科学技術のブレークスルー、フロンティア開拓等

##### a) 有機三角格子系におけるスピン液体の世界最初の実現 [永長チーム]

ほぼ等方的な三角格子構造を持つモット絶縁体  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> において量子スピン液体状態が実現していることを <sup>1</sup>H NMR 実験と静磁化率の測定によって発見した。これは、磁性秩序を持たない量子スピン系の開拓という強相関物理学の約 30 年間の懸案を世界で初めて達成したものである。また、この物質の加圧研究により、スピン液体からフェルミ液体へのモット転移を実証し、転移直前で電荷ギャップが激減する新しい電子状態が現れている証拠を得た。さらに、スピン液体に隣接する超伝導が特異であることも発見した。

##### b) 3次元スピン液体 Na<sub>4</sub>Ir<sub>3</sub>O<sub>8</sub> の発見 [永長チーム]

一般には磁性秩序が安定化すると考えられていた 3次元系でもフラストレーションが十分に強いとやはりスピン液体状態が実現することを、ハイパーカゴメ格子を持つ Na<sub>4</sub>Ir<sub>3</sub>O<sub>8</sub> において発見した。磁化率や比熱、中性子回折の結果はこの物質の

基底状態が初めての3次元  $S=1/2$  スピン液体状態であることを示している。さらに、磁気比熱が低温で2次元系に期待される  $T^2$  の依存性を持つ、ハイパーカゴメ構造は異なったカイラリティを有する二つの等価な構造が存在する、などのユニークな特徴を次々と明らかにした。また鹿野田グループにより NMR の測定が行われ、スピンのフェルミ面を示唆する結果も得られた。

c) スピンホール効果の理論構築 [永長チーム]

ベリー位相に伴う散逸を伴わないトポロジカルカレントが固体中に存在することを理論的に示し、強磁性金属における異常ホール効果と半導体におけるスピンホール効果が、まさにその実現であることを、実際の物質に対する詳細な第一原理計算と種々のモデル計算を組み合わせて実験との比較検討を通じて確立した。具体的には、スピン軌道相互作用の存在下でバンド構造に現れるベリー位相の運動量空間での構造を明らかにし、純粋な系の内因性ホール効果、スピンホール効果を計算した。スピンホール効果についても、p-型 GaAs において本研究で予言した内因性スピンホール効果が実験的に確認された。さらに進んで、量子ホール状態のスピンカレント対応状態—量子スピンホール状態—の理論的提案を行った。この提案はその後、アメリカの Kane 教授らのトポロジカル数の発見により現実的なものとなり、最近 HgTe/(Hg,Cd)Te の量子井戸系においてその存在が実験的にも確認されるに至った。

d) 巨大なスピンホール効果の発見 [前川チーム]

強磁性体と常磁性の金属または半導体でナノハイブリット構造を作ることにより、強磁性体から金属または半導体にスピン流が注入される。このスピン流は、ホール電圧を導く。このスピンホール効果と呼ぶ現象は、スピンエレクトロニクスの新しい現象として、応用上も注目されている。当研究では強磁性体の FePt と Au のハイブリッドが巨大なスピンホール効果を示すことを見出した。

e) 磁壁駆動についての理論及び実証 [前川チーム]

磁性半導体、(Ga, Mn)As における磁壁の駆動を磁界及び電流の場合について理論及び実験で調べ、2つの駆動が全く違う原理に基づくことを明らかにした。磁性半導体はスピンエレクトロニクスにおける中心的な材料であり、磁壁の駆動は磁気記録のための基本作動である。その為この研究は物理学上及び応用上、新しい知見を与えたものである。

f) 単一分子性金属の開発 [小林チーム]

単一分子性金属は、一種類の分子が独立性を保ちながら自己集積し、なおかつ金属結晶になるという、非常に新しい側面を持った金属である。初めての単一分子性金属、[Ni(tmdt)<sub>2</sub>] は、拡張 TTF 型ジチオレン配位子を持つ平面金属錯体分子 Ni(tmdt)<sub>2</sub> の結晶で、その結晶構造や金属性は小林らによって初めて報告された。

本研究で、新しい実験技術（低温・強磁場下でのマイクロカンチレバーによる磁化測定）によって、微小な $[\text{Ni}(\text{tmdt})_2]$ 単結晶の磁気トルク実験（世界初）を行い、金属特有のドハース-ファンアルフェン効果（磁気量子振動）の観測に成功した。この研究成果は、自己集積しただけで金属となる分子が存在することを厳密に証明した。一種類の分子だけで金属結晶を形成することができるという発見は、伝統的な分子や分子物質の概念を超えるもので、意義は大きい。単一分子性金属の開発により、物質分子科学の新しいフロンティアが開かれた。

g) 単一次元分子磁石の発見 [山下チーム]

「単分子磁石を架橋基で連結した1次元、2次元および3次元ナノドット・ネットワーク磁石」（「単一次元鎖磁石」に関して世界中で15例の報告がある中で山下グループは10例を報告）、「伝導性単分子磁石」および「光スイッチング機能を有する単分子磁石」（「ナノドット・ネットワーク磁石」や「伝導性単分子磁石」や「光スイッチング単分子磁石」は世界で初めて報告）などの化合物の開発を行った。“単分子磁石をナノドットとする連結系は、従来のネットワーク化合物には見られない斬新な興味がある”という新しい物質群の創製に向けた独自の概念を提案した。

2) 社会的及び経済的効果・効用に資する成果

a) 2層カーボンナノチューブの創製と応用 [篠原チーム]

独自に開発したゼオライト基盤を用いた化学気相蒸着（CCVD）法によって、新規ナノチューブ物質、特に、内径が約0.7 nmで、 $\text{C}_{60}$ と同程度の極めて細い（2007年現在、世界で最小）内径を持つ高品質で、バンドルを作る高純度な2層カーボンナノチューブ（DWNT）の合成法を開発した。このように極細内径をもち、かつ、高品質のDWNTは電界効果型トランジスタ（FET）のチャネルとして、あるいは原子間力顕微鏡（AFM）の探針として実証されている。

ガドリニウムなどの金属ナノワイヤーを内包した単層および2層カーボンナノチューブの創製というブレイクスルーは、本プロジェクト最終年度に行われた。今後、金属ナノワイヤー内包カーボンナノチューブの研究は、世界のカーボンナノチューブ研究をさらにまい進させると期待される。

b) ゼロ熱膨張材料の開発 ―企業との共同研究に展開― [永長チーム]

マンガン窒化物 $\text{Mn}_3\text{XN}$ （X: Zn, Gaなど）が低温の反強磁性相から高温の常磁性相への転移に際して顕著な不連続的体積収縮を示すことは、1960年代後半には知られていた。この磁気転移が室温付近にあることに着目し、組成の調整および生成条件の制御によって単一物質の熱膨張特性を、室温を含む広い温度範囲で体積膨張（収縮）「ゼロ（前密には測定限界以下）」を連続的に生じさせることに成功した。この材料は、負熱膨張が均一（等方的）なため、使い勝手が良く、動作が安定してい

る、硬い、安価で環境負荷の少ない元素だけで構成される、といった特長を有する。これまでに4件以上の特許を出願し、民間企業5社（太平洋セメント、日本ブレーキ、Du Pont、フルウチ化学、高純度化学研究所）と理化学研究所の間でそれぞれ共同研究契約を締結し、実用化に向けた技術供与と共同研究を開始しており、様々な新しい低膨張材料の開発や、その開発を支え促進するための研究用試薬開発を行っている。

c)  $MgB_2$ 薄膜技術を利用した超高速・高感度の中性子センサーの開発[石田チーム]

我が国で発見された高温超伝導物質  $MgB_2$  ( $T_c=39K$ )に含まれる同位体  $^{10}B$  と中性子が高い原子核反応の確率を有することを利用して、中性子を検出することを提唱し、試作センサーを製作して中性子炉においてその有効性を実証することに成功した。高品質の  $MgB_2$  薄膜作製技術とナノ微細加工技術（線幅  $1\ \mu m$  以下のメアンダーなど）の開発、測定システムの整備が成功の原動力である。試作した  $MgB_2$  中性子検出器は、小型・軽量で電池で作動することが可能で、優れた空間分解能（数  $\mu m$  程度）を有し、中性子信号のパルス幅が  $2ns$ （ナノ秒）と従来法に比べて3桁高速で作動するなどの特長を有する。この  $MgB_2$  中性子検出器の超高速性は、我が国の大強度陽子加速器 J-PARC での強いパルス中性子の計測に使える可能性があるなど、世界の最先端研究施設で、超高速・高感度の中性子検出器として利用されることが期待される。

### 9-3. 今後の研究発展への期待と展望

本領域での研究活動においては、「物理」「化学」の区別を徹底しなくす努力をして「物質科学」としての総合的な見方の涵養に務めた。その結果、化学的な興味から出発した研究テーマに対して物性物理的な視点が加わり研究の広がりが実現した例が数多くある。たとえば、上に述べた「電極問題」。このテーマは当領域の「分子デバイス」追求の過程で浮かび上がったテーマであり、意見交換を重ねた結果、「基礎物性物理」として興味あるかつ重要な課題が存在すること、また決して容易ではないがひとたびそれが解決された時には材料科学への大きな寄与が期待されることがわかり、その後はそれ以前とは異なりより着実な研究推進スタイルをとった。このテーマは、平成20年度第2期「さきがけ」募集テーマ「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」（「界面の構造と制御」と深いつながりがある。

また、単一分子種金属および磁性鎖状ベンゼン・金属クラスターの実現に触発された電子状態についての研究は、いずれも「分子」と「金属原子」の結合系における電子状態の理解が目標となり、将来、ヘム蛋白質で代表される「金属蛋白質」の物性研究へと発展する可能性を秘めている。実際、このような方向に向けての準備として物性物理および化学の研究者13名で2005年初めより「分子系の物性」というフォーラムを当領域の援助のもとにほぼ毎月開催し生体関連物質についての勉強会を持ってきている。（これについては、SP-ring8における研究会、および理研との共催の研究会を2回開催した。）これは物性

物理・化学・生物学全体を含むこれからの基礎科学「生物物質科学」に向けての研究活動である。このフォーラムには、今回採択となった研究課題にとどまらず、当該研究領域において高いアクティビティを持つ関連研究者の広い参加をもとめ、本領域の目指す研究の将来のより大きな発展を期待したい。（なお、このフォーラム運営については、領域事務所から格別の配慮を頂いた。心から感謝する。）

研究期間中に得られた成果を基に研究期間中および終了後に他事業へ展開される研究課題が多数あり、今後の一層の発展が期待されている。

- 1) 他の研究事業へ引き継がれる例、
  - NEDO・太陽光発電システム未来技術研究開発事業 2件、
  - JST 関係の事業 6件、
  - JSSP 関係の事業 2件、
  - 科学研究費補助金 37件（申請中を含む）、
  - その他事業 6件、
- 2) 企業との共同研究へと発展したテーマ
  - 巨大負熱膨張材料の開発、
  - SERS 活性基板を用いた振動分光、
  - ケルビンプローブ顕微鏡による局所仕事関数の計測
  - 和周波分光法の革新、
- 3) 市場開拓・製品化へ展開したテーマ
  - 高品質・高純度カーボンナノチューブ合成法、
  - 透明導電性コーティングフィルム（剤）を市場開拓中、
  - 巨大負熱膨張材料の開発、
  - 「リケンシュリンクファイブ」として販売。

## 10. 総合所見

チームごとの個別の成果が多く創出されたことは印象的である。「物質科学」の基盤を支える「物理学」と「化学」の研究者の意識の共有化と連繋構築に大きな影響を持ったといえる。加えて、「電極問題」のように基礎・応用両面で実に多岐に亘る問題についてチーム間で意見交換する状況が生まれたことも将来に向けての大きな資産となる。さらに、フォーラム「分子系の物性」が誕生し、そこで物理学と化学の研究者と一緒に「生体物質」の物性について理解を深めつつあることは「物質科学基礎研究」の将来に大きく寄与すると期待される。

一方「人材育成」という観点からは、領域主催の全体会議には多くの若い方々が参加し、研究領域の各チームでの先端的な研究活動に触れ、各学問分野の学識を徹底的に習得した上で「物質科学」を総合的に考える習慣を身につけるきっかけのひとつとなったと期待したい。

当領域を含む10領域は「ナノバーチャルラボ」を構成した。ナノサイエンス・ナノテクノロジーに関する研究対象は大変多岐に亘り、当然漠然としておりあいまいである。このことを反映して、所属する領域によって異なった視点から追求しているものの根本においては多くの共通点を持つテーマがいくつかあった。その典型例の一つがカーボンナノチューブであろう。このようなテーマについての領域横断的な意見交換を可能とした「バーチャルラボ」制度は極めて実効性が高かった。その成果は成果報告会のプログラムに明快に現れていた。各セッションでの講演者が所属する領域が違っていてもテーマについての取り組みに共通性があった。同時に、領域横断企画ワークショップとして、当領域の関係する会議10件（詳細は「添付資料 6-2. 領域横断活動」に記載）も開催した。願わくは、もっと実質的な意見交換・連携をとりたかった。

「ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ」は総合科学技術会議で重点4分野のひとつとして認識された「ナノテク・材料」についてJSTが対応した仕組みと理解する。「ナノテク」の対象は実に壮大である。壮大さゆえに狙いが多岐にわたり一見まとまりがつきにくい。しかし、それゆえに「戦略」策定が重要となる。この際、まず「ナノテク・材料」の前に「ナノサイエンス・物質」を明確に位置づけることが必要であろう。「技術革新」の前に「新しい物質観の確立」という“イノベーション”が必要であるからである。そのうえで、「物質科学」の基本にかかわるテーマから「(荒唐無稽ではない)実体のある材料・デバイス志向した出口に近いテーマ」までを俯瞰した研究体制を構築する必要がある。その際に、価値観を共有でき更には将来連携研究が展開できるような可能性に絶えず目を向ける。このことは言うはやさしいが実現することは決して容易ではない。しかし不可能ではない。(サイエンス・テクノロジー・産業の3相のつながり(「サイエンス・テクノロジー・インダストリー」(STI)サイクル)は重要であり常に留意する必要があるが、科学技術研究推進が任務であるJSTが企業の研究所ないしは事業所が行うような活動をすべきではなかろう。上記3相間のギャップは大変大きく、それらの間をつなぐためには高度の経

験・知識・見識を持った人材が必要であるが、JST の「トップダウン」制度を実効的にするためには、そのような人材を確保することが先決である。トップダウン的な研究推進体制の理想像では、まず（大づかみな）目標設定とそれをもとにした「戦略」策定がある。これは「トップダウン」組織としての JST の任務であろう。当然、決定されたこの方針の内容については100%JST の責任であり、そのことについては研究者には責任がない。この作業実現のための方策のひとつは、JST が各分野の専門家と（個別ではなく、開かれた場で）「サイエンス」現場についての意見交換する機会を頻繁に設けることであろう。サイエンスの現場と funding の現場が face-to-face でまじめに議論する場を通して相互理解が深まれば双方に益するところ極めて大きいと想像する。