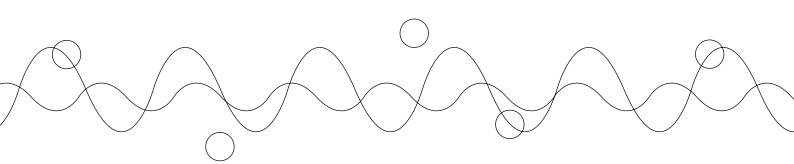
# 「物質・材料分野」俯瞰ワークショップ 一ナノテクの成果・融合の効果・今後の課題― 報告書

平成20年7月25日金-26日 出開催





## **Executive Summary**

本報告書は、平成20年7月25日、26日の2日間にわたり、(独)科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センター(CRDS)の主催で行われた「物質・材料分野俯瞰ワークショップ―ナノテクの成果・融合の効果・今後の課題―」に関する報告書である。

平成20年度(2008年度)は、第3期科学技術基本計画(2006-2010)で定める5年計画の3年目、第2期科学技術基本計画(2001-2005)から数えれば「ナノテクノロジー・材料」分野への重点戦略投資が開始されてから8年目にあたり、ほぼ同時期にスタートした米国のナノテク国家計画(National Nanotechnology Initiative: NNI)とともに10年という大きな区切りに近づきつつある。2011年以降の「次の10年」に向けて国の施策をどう組み立てていくのか、これまでの公的資金投入の効果をグローバルな視点で、かつ、エビデンスベースで評価し、今後の展望を切り開いていく時期に来ている。今回のワークショップは、以上のような背景の中で企画された。

本ワークショップの特徴は、「ナノテク・材料」分野全般を「物質・材料」という視点で俯瞰することを試みた点である。全体会議および4分科会(金属材料、半導体材料、無機・セラミックス材料、有機・高分子材料)構成で運営し、以下の3点をワークショップの目的とした。

- (1) 今後の研究開発戦略構築のための「物質・材料分野の俯瞰図」の作成
- (2) 社会ニーズに対応した中長期の重要研究領域と研究課題の抽出
- (3) 研究推進システム改善策の提案。

「物質・材料分野の俯瞰図」はワークショップ前後のアンケートも含めた議論を経て原型が完成した(本サマリーの最後に掲載)。俯瞰図中に、「物質・材料」軸として金属、半導体、無機・セラミックス、有機・高分子、生体物質から 30 項目の材料群を抽出、一方、社会ニーズ側に 31 項目の応用キーワードを対峙させて、その間を結ぶ「ナノテク・融合の場」として 60 項目近いキーテクノロジーを明示した。この俯瞰図を用いれば重要研究領域や研究課題を抽出することが可能であり、また個々の研究課題を多面的に位置づけられるように設計されている。

ワークショップ各分科会で抽出された今後の重要研究領域と研究課題は多岐にわたる(第4章、表4.2-1~4.2-4、図4.2-1を参照)。それらは、社会ニーズの視点からは、それぞれ以下のような項目に整理される。

エネルギー・環境(エネルギー変換・貯蔵・輸送材料、省エネルギー用構造材

料、資源対応型元素戦略・機能触媒化学など)

ナノエレクトロニクス(カーボンベースエレクトロニクス、スピン流デバイス、 ポスト CMOS デバイス、パワーエレクトロニクスなど)

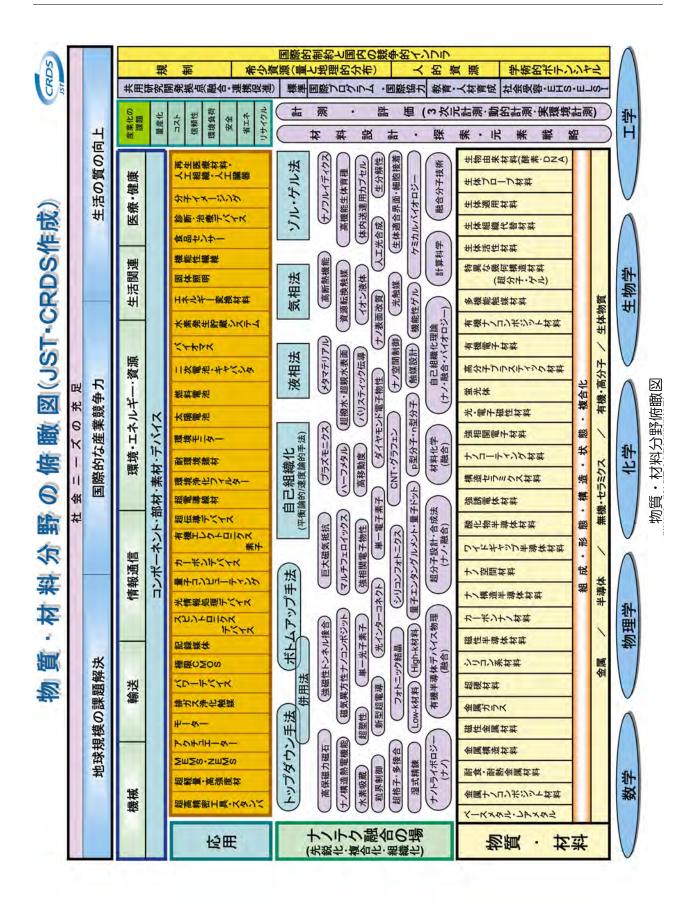
ナノバイオ(生体との理想界面/再生医療バイオ材料、生体機能医療材料など) 材料技術(高機能分子、融合分子、有機・無機複合材料、新型超電導、材料機 能設計、マテリアルインフォマティクスなど)。

研究推進システムとして、ナノテク・材料分野に特に必要と考えられている異分野融合及び産学連携を促進するため、以下が実施されるべきである。

- (1) 異分野融合重視の研究領域の設定、あるいは異分野融合提案の優先的採択などによる誘導ファンディングシステムの導入、
- (2) 異分野研究者や産学の技術者・研究者が物理的空間を共有できる共用施設や拠点構築の強化。

特に後者に関する日本のインフラ構築の遅れについては今後への影響が強く懸念される。

ナノテクノロジーは、1980年前後に始まった「ナノの先鋭化」(同一分野の極限技術化)を経て、現在は異分野融合を主とする「ナノの複合化」が進行中であり、今後2010年以降にかけては諸ナノ要素技術を構成的に組み上げていく「ナノの組織化」に向かうものと考えられる。「ナノテク・材料分野」は、学術的な基盤である材料科学・物理学・化学において、また、出口の部素材産業において、日本が国際的に優位を保っている分野である。その強さを維持する「ナノテク・材料分野」への継続的投資の重要性があらためて確認された。



## 目 次

## **Executive Summary**

1. 本ワ	ークショップの趣旨および事前アンケート結果概要
	フークショップの趣旨‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥
	言説明/オーガナイザー:田中一宜(JST-CRDS)························ 2
	前アンケート結果概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.4 外部	部状況と議論の進め方/総括コーディネータ:馬越佑吉(NIMS)・・・・・・・・・10
2. 分科	
2.1 金原	属材料分科会/コーディネータ:馬越佑吉(NIMS)
2.1.1	資源、材料加工・創成(循環プロセス):前田正史(東大)・・・・・・・・・20
2.1.2	磁性材料・ナノ組織制御:宝野和博(NIMS)・・・・・・・・・・・・・・・ 24
2.1.3	機能性材料、水素貯蔵:岡田益男(東北大)・・・・・・・・・・・・・・・・・29
2.1.4	耐熱構造材料、機能材料(熱電材料、電池材料):乾晴行(京大)36
2.1.5	生体材料、金属系医用デバイス:塙隆夫(医科歯科大)・・・・・・・・・・・・・40
	理論、計算科学:森永正彦(名大)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・46
2.2 半導	- - - - - - - - - - - - - - - - - - -
2.2.1	ナノエレクトロニクスにおける今後の材料研究:知京豊裕(NIMS)・・・・・・52
2.2.2	スピントロニクス関連半導体材料:田中雅明(東大)・・・・・・・・・・・・ 57
	化合物半導体:吉田貞史(埼大)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62
2.2.4	太陽電池新材料:野々村修一(岐大)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・67
2.2.5	ナノカーボン半導体材料:畠賢治(産総研)・・・・・・・・・・・・・ 70
2.2.6	ITRS ロードマップからみた課題:粟野祐二(富士通研)・・・・・・・・・・・ 75
2.2.7	情報処理デバイスの超微細化・高性能化の課題:金山敏彦(産総研)・・・・・・80
2.3 無机	幾材料分科会/コーディネータ:木村茂行(未踏協)・・・・・・・・・・・・・・・ 84
2.3.1	強相関無機物の機能開拓ー基礎研究が発信する革新的デバイス:
	高木英典(東大)・・・・・・87
2.3.2	外場誘起による物性及び形状制御による無機系材料の多様性発現:
	平尾一之(京大)90
2.3.3	薄膜及び微細構造形成による無機系材料の多様性発現:河本邦仁(名大)94
2.3.4	微粒子プロセスの高度化によるイノベイティブセラミックスの開発:
	目 義雄 (NIMS)······97
2.3.5	生体無機材料の展望と開発戦略:立石哲也(NIMS)・・・・・・・・・ 102

2.3.6	ナノエレクトロニクス、エネルギー応用で重要となる材料技術:
	曽根純一(NEC)······ 106
2.4 有村	幾·高分子材料分科会/コーディネータ:澤本光男(京大)··········· 110
2.4.1	概念融合による協奏機能触媒化学の創成
	一協奏機能触媒化学を機軸とする物質・材料開発:碇屋隆雄(東工大)・・・・・ 113
2.4.2	超分子ケミストリー:相田卓三(東大)・・・・・・・・・・・・・・・・118
2.4.3	有機エレクトロニクス:笠原二郎(ソニー)・・・・・・・・・・・・・・・・120
2.4.4	Biomimetics あるいは Bio-related Molecule による先端材料開発:
	木村俊作(京大)123
2.4.5	医療分野における材料研究への期待:大和雅之(女子医大)・・・・・・・・127
3. 全体	
,	分科会からの報告
3.1.1	金属材料分科会/コーディネータ:馬越佑吉(NIMS)・・・・・・・・・・ 130
	半導体材料分科会/コーディネータ:金山敏彦(産総研)·····145
	無機材料分科会/コーディネータ:木村茂行(未踏協)
	有機·高分子材料分科会/コーディネータ:澤本光男(京大)·····168
3.2 全位	本討議/総括コーディネータ:馬越佑吉(NIMS)・・・・・・・・・・・・・ 180
4. まと	· <b>th</b>
	<b>.w)</b> 質·材料分野俯瞰図··········186
	要研究領域と課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・188
4.3 研	究システム提案・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・193
Append	dix
A.1 本	ワークショップの開催日時・場所 ‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 195
A.2 本	ワークショップのプログラム、参加者の構成について ······ 195

## 1. 本ワークショップの趣旨および事前アンケート結果概要

### 1.1 本ワークショップの趣旨

独立行政法人科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センター(CRDS)では、科学技術に求められる社会的・経済的ニーズを踏まえて国として重点的に推進すべき研究領域や課題を選び、そのファンディング戦略を明確にするための活動を行っている。このような活動の一環として、専門家により重点研究領域を俯瞰するワークショップ(WS)を開催している。

当センターでは、物質・材料ユニットの前身であるナノテクノロジー・材料グループが平成 18 年 12 月に 2 日間にわたり「ナノテクノロジー・材料分野」俯瞰 WS を開催し、30 名を超える専門家が第 3 期科学技術基本計画を含む中長期研究開発の俯瞰と戦略の議論を行い、「元素戦略」をはじめとする幾つかの研究開発戦略提言へと繋げている。

今年度は第3期科学技術基本計画で定める5年間の3年目、第2期計画から数えれば『ナノテク・材料』への重点戦略投資が開始されてから8年目にあたり、ほぼ同時期に国家計画(NNI)をスタートさせた米国とともに10年という大台に近づいている。当然、2011年以降の第4期に向けてこれまでの成果を包括的に評価し、エビデンスベースの新たな戦略構築が必要である。米国では数回の政府レベルでの評価を終え中長期の議論が始まっているが、日本は出遅れているといわざるを得ない。そのような状況を踏まえて、当センターでは、見えにくいといわれるナノテクの成果を可視化し定量化する努力を続けている。

今回のWSでは、ナノテク・材料分野の高い知見を有する専門家にお集まりいただき、ナノテクの研究成果や異分野融合の効果を『物質・材料』という視点で俯瞰的かつ具体的に整理し、今後のグローバルな社会ニーズに対応した中長期の重要研究領域と課題を抽出するために議論を行う。

8

### 1.2 趣旨説明/オーガナイザー:田中一宜(JST-CRDS)

今回の物質・材料俯瞰ワークショップの位置付けは、将来の研究課題を抽出する ための物質・材料分野の技術の俯瞰をし、俯瞰図を完成させることである。俯瞰図 は、純粋な分類学に基づくものではなく、重要と思われているもののほとんどが網 羅されていることが重要である。

1996年に始まった科学技術基本計画において、平成13年度~平成17年度の第2期と平成18年度~平成22年度までの第3期にかけては、ナノテクノロジーと物質・材料は『ナノテクノロジー・材料』という表現により一緒に重点4分野の1つに定められ、これまで重点投資がされている。これに伴い、当研究開発戦略センター(CRDS)では、これまで平成15年、平成17年、平成18年の3回にわたりナノテクノロジー・材料分野の俯瞰図を作成している。平成23年度から始まるであろう科学技術基本計画の第4期を見据えて、ナノテクノロジー・材料全般がどう変わるのかを常にウォッチして、俯瞰図に対するそれなりの評価が必要である。

CRDSでは、これまで第4期科学技術基本政策を目指してナノテクノロジーと材料を一緒に検討していたが、今年度は『物質・材料』と『ナノテクノロジー』を分離し、今回のワークショップでは『物質・材料』という視点により俯瞰を行うこととした。今回のワークショップでは物質・材料が視点だが、物質・材料の先端的な部分はナノテクノロジーと完全に分離することはできないので、副題にナノテクノロジーの今後や融合を挙げている。

ナノテクノロジーとは、1nm~100nm 領域における物質の構造、成長、加工、表面・界面、諸物性現象を原子・分子レベルで観測/理解/制御し、それらを応用、あるいは他の技術と組み合わせることによって、新しい機能を創出しようとする学術的・技術的領域である。

重要な点は、ナノテクノロジーやナノサイエンスの技術階層性や世代推移をよく 見ておく必要がある。ここで、私はナノテクノロジーを、『先鋭化』・『複合化』・『組 織化』の3つに分けてみることができると考えている。

## ナノサイエンス/ナノテクノロジー

1nm—100nm 領域における物質の構造、成長、加工、表・界面、 諸物性現象を原子・分子レベルで観測し、理解し、制御し、それ らを応用することによりあるいは他技術と組み合わせることに よって、新しい機能を創出しようとする学術的・技術的領域

## 技術の階層性と世代推移

ナノの先鋭化/個別分野の要素技術の極限機能追求 ナノの複合化/異分野要素技術の融合による新機能発現 ナノの組織化/ナノからマクロへの(自律的)構成と設計

ナノの先鋭化 ナノの複合化 ナノの組織化 (1980's~ ) (2000's~ ) (2010's~ )

図 1.2-1 ナノテクノロジーの階層性と世代推移

まず、『ナノの先鋭化』とは、個別分野の要素技術を極限的に追求していくことで、 サイエンスを巻き込んだ先鋭技術が生まれ、これをメインにして同じ分野の中でナ ノの極限化と応用が進んでいく。

次に、『ナノの複合化』とは、『ナノの先鋭化』が極限に行き着いたときに、異分野のもの同士が少しずつ融合して新しいフロンティアが姿を現す。異分野要素技術の融合による新機能発現という展開である。

さらにその先になる『ナノの組織化』は、原子分子レベルから複雑な系を構成的 に組み上げていく技術である。ナノからマクロへの自律的構成と設計、自己組織化 はその代表的なものである。

このような意味で世代推移として、『ナノの先鋭化』は 1980 年代前後から始まっている。例えば、MBE は 1970 年代から始まっており、こういうものが先鋭化したのが 1980 年代だった。『ナノの複合化』は全世界が投資を始めた時代を中心にしていた。『ナノの組織化』が大きな技術として出てくるのはもう少し先になるであろう。

#### 基本認識(1)

日本の国際競争力は、ものづくり産業、特に部素材産業の圧倒的な国際優位性と付加価値の高さ、他産業への影響力の大きさにある。ナノテクノロジー・材料分野はそれらと直結した科学技術分野であり、また、関連学術分野(材料科学/物理学/化学)も国際的に優位のポテンシャルを有している。今後のものづくり産業に求められる高い精度や多様性に応えうる科学技術分野も本質的にはナノテクノロジーである。

#### 基本認識(2)

第2期と第3期の科学技術基本計画において、以下のような成果が上がっている。 これらは重点4分野の中では目立った成果ではないかと感じている。

- (1) JST 事業などの基礎技術開発での着実な成果が上がっている
- (2) 論文、特許は米国に次いで2位 実用化の気配
- (3) 世界最大のナノテク総合展示会の開催
- (4) 連携施策群や府省連携活動の先導
- (5) ISO ナノテクノロジー国際計測標準における幹事国を獲得
- (6) 社会受容プロジェクトの発進

#### 基本認識(3)

- (1) 新技術が世に出るまでには、20~30 年前後の年月がかかる。→ 20 世紀末から『ナノの先鋭化』が進み商品化へ
- (2) 異分野融合の中から新技術領域を拓いていくというナノテク分野の特殊性→『ナノの複合化』は始まったばかり
- (3) 異分野融合を加速するための共同利用施設や人材育成・教育システムがインフラとして重要→日本の課題
- (4) 応用を促進するための新しい win-win の産官学連携を構築することが肝要 →日本の課題

『ナノの先鋭化』から『ナノの複合化』への新しい流れを我々は注意して見る必要がある。海外に比して融合・連携を促進するシステム構築に遅れが見られるということが重要だ。

この中でナノテク製品数の商品化、その他が結構進んでいることが見られるが、 日本として問題になるのは共同利用施設が少し遅れていることだ。横方向の融合を 刺激するということでは、なかなか上手くいっていないことがある。国家計画全体 の予算の中で共同施設のインフラにどれだけ予算を配分するかという点で、米国、 韓国、台湾は計画的に一定比率を投資するが、日本はインフラ整備の重要性を認め るがその枠までは決めていない。 運営については、日本にはナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンターがあり、スタートしたのはどこよりも早いが予算が少ない。また、最初のうちは運営費の 100%は政府からの資金で、後はほとんどないという状況だったが、文科省が平成 19 年度から課金制度の導入を始め、今後、少しずつ変わっていくのではと期待している。

もう一つ大きな問題は人材で、今回のワークショップの事前アンケートで多くの 先生から指摘されている。平成19年8月の新聞に、国内の大学工学部の志望者総 数が激減していることが報じられているが、これは大学にとって大きな問題である。

日本の課題は、R&D 施策の戦略構造では中長期スコープがなく、インフラへの 投資計画については、戦略的構想がないことではないか。技術移転・基礎と応用の 垂直連携は効率的な win-win の産学官連携システムが必要で、法人同士が努力を しなければならないと考えている。人材育成・教育システムはいろいろな問題があ り、これについてもいろいろな議論をしなければいけない。国際協力プログラムは、 ほとんどが国としては名前だけがあり、具体的には何もないのではないか。

図 1.2-2 に物質・材料分野の俯瞰図案を示す。俯瞰図は、今後の研究戦略として重要と思われる領域を意識した項目で、技術全般を網羅的に俯瞰するということを目的としている。純粋な分類学に基づくものではなく、研究領域や研究課題などを階層的に整理している。このような俯瞰図から戦略プロポーザルを切り出し、社会ニーズや政策ニーズとの接点で優先度をつけて決定する。その時に深堀ワークショップを行う。

本日のワークショップの目的は、ナノテクノロジー・材料分野の研究成果や異分野融合の効果を『物質・材料』からの視点で俯瞰的かつ具体的に整理し、今後のグローバルな社会ニーズに対応した中長期の重要研究領域と課題を抽出することである。期待するアウトプットとしては、事前アンケートをベースとした議論をさらに深めていただき、重要な研究開発領域・課題の抽出をして融合促進のための研究システム提案をしていただきたい。

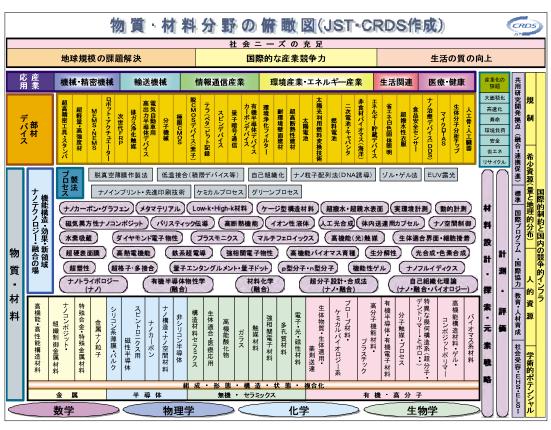


図 1.2-2 物質・材料分野の俯瞰図案

## 1.3 事前アンケート結果概要

本ワークショップ開催前に、ワークショップへの出席依頼者に対して、事前アンケートを行った。表 1.3-1 に事前アンケートの設問を示す。

事前アンケートに対する回答を当センターで集計・分析した結果の概略を図 1.3-1 ~図 1.3-3 に示す。5 年先、10 年先、20 年先と全体を見て、それぞれの分科会あるいは全体の席で色々な議論の一助としていただきたい。

#### 表 1.3-1 事前アンケートの設問

- ①今までのご自身の研究内容・分野をご説明下さい。また研究に対して、どうい うスタンスやアプローチで取り組まれてきたかについてご記述下さい。
- ②日本は、2001 年度から「ナノテク・材料」を重点 4 分野の一つとして戦略投資してきました。先生の研究領域で過去 5~10 年間で最も大きな成果(基礎、応用)は何でしょうか。海外、国内それぞれについて記してください。また、それらは異分野融合の結果生まれたものでしょうか。
- ③日本の国際競争力を維持し、かつ、地球規模のサスティナブル社会を実現する ためには、革新的な物質・材料の研究開発が不可欠です。今後、日本において 公的資金投入が重要になると思われる研究領域を特定し、研究課題を上げてく ださい(複数可)。

研究領域:「」

- 5年先に成果(開発段階への入り口)を求める研究課題
- 10年先に成果(開発段階への入り口)を求める研究課題
- 20年先に成果(開発段階への入り口)を求める研究課題

上記で取り上げた研究領域と研究課題について、諸外国の取組みや日本のポテンシャルを簡単に述べてください。

- ④ CRDS が作成した俯瞰図案について、修正すべき点、またはご意見を御願いいたします。
- ⑤米国の国家ナノテクノロジー・イニシアチブ(NNI)では連携・融合を推進するための共同センター、人材育成プログラムなど、研究運営システムの充実に力を入れています。将来を見据えたわが国の中長期戦略としての国家プロジェクトに、今何が必要でしょうか。ご自身に経験にもとづいて重要と思われるものを簡単に述べてください。
- ⑥仮説:以下の仮説(1)~(4)について、Yes/No でお答えください。また Yes/No とお考えになられた理由も簡単に記述いただけますようお願いします。
  - 仮説(1) 我が国の「物質・材料」分野の現在のポテンシャルは、学術的にも 技術的にも世界のトップである。
  - 仮説(2) 我が国の「物質・材料」分野の 10 年後のポテンシャルは、学術的 にも技術的にも世界のトップの地位を維持している。
  - 仮説(3)「物質・材料」あるいは「ナノサイエンス」、「ナノテクノロジー」 への我が国の戦略的国家投資は今後も強化されるべきである。
  - 仮説(4)「ナノテクノロジー」は一つの技術分野として国際的に認知されるに至ったので、今後は、「エネルギー」、「環境」、「素材」などナノテクノロジーの産業応用を加速するための施策に注力すべきである。



図 1.3-1 各分科会から提示された重要課題(抜粋)

## わが国の国家プロジェクトに、今、何が必要か

### 人材育成、教育 大学の機能

ナノテク研究を数分野に分類し、連携・融合を推進するための共同センター、人材育成プログラムなどの運営システムを作る。 トップリーダーの育成

プログラムなどの運営システムを作る。 トッフリーターの育成 各地域ブロック毎の拠点大学を核とした、ナノテク関連連携大学院を組織(教育プログラム、ナノテ

ク共用センターでの研究実習、企業群インターンシップのためのコンソーシアム整備など) 人材育成プログラムにおいて、任期付きポジションを渡り歩く人材の円滑な継承システム作りが重要

デマケにこだわる日本の科学技術政策運営の抜本的見直し中堅の大学が地盤沈下回避策(GCOE、世界トップ拠点の功罪)研究者のインセンティブ(待遇、給与)

### 分野連携と融合

多様な専門領域の人間が日常的に交流できる研究開発の場づくり 競争原理による研究拠点間の連携と融合の有意義化

#### 研究施設•設備

最先端の施設・設備を、最新機器へと継続的に更新・充実 Spring-8のような機能する共同利用センターに(人員配置, 予算執行)

NIMSのナノテク支援センターのような共同利用センターの増設 人材流動策を講じた上での共同研究センター運営策の導入

大型ファンダリーの設置と利用支援、自由な研究成果発表、入り交じる産官学の研究者、海外研究に魅力ある拠点

#### 政策機能(立案、推進、評価)

首相直属の科学政策顧問 設置(各省統合機能) 予算の流れと逆向きの評価システムの導入 研究への投資効率の見直し(改良研究の良さ)

#### 国家プロジェクト ファンデング

科学研究費の特定領域研究の長期化(人材育成の効果も)

大学教育、研究課題の奨励、産業化までを一貫させた長期的視野に立つプロジェクト

個人が責任を持つ長期的ファンド方式、別組織による評価システム

研究予算10倍(的確な調査、審査が原則、研究期間10年、人件費枠増、研究設備、研

究スペース確保)

ファンディング・エージェンシーの部局の壁をとりはらうこと 研究現場を信頼した性善説に基づく運営が必要

図 1.3-2 わが国の国家プロジェクトに何が必要か

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

## 4つの仮説に対する回答のまとめ

1. 我が国の「物質・材料」分野のポテンシャルについて:

(現 在) 一部の分野でトップの位置にあるが、全体的にはトップ集団にいるという見方がほとんど。

(10年後) 漸減、沈下、低落を予想し、危機感を持つ有識者がほとんど。 その最大の理由として若手研究者の人材育成の遅れを指摘。

2. 「物質・材料」あるいは「ナノサイエンス」、「ナノテクノロジー」へ の戦略的国家投資の強化について:

ほぼ全回答者が「継続的投資が必要」としている。その理由は産業の基礎であるからというもの。投資対象として「ナノサイエンス」に裏打ちされた材料科学、「ナノテク」に裏打ちされた材料技術開発、というように、"科学"と"技術"の投資バランスへの配慮を求めている。

3. 今後、「エネルギー」、「環境」、「素材」など、ナノテクノロジーの 産業応用加速を支援する施策に注力することについて:

約2/3の回答者が産業応用への加速を支持。しかし1/3改良・改善型の研究開発への安易な移行を危惧している。新たな研究の流れ、大きく方向を変える技術革新を期待して、基礎研究への注力を求めている。

図 1.3-3 4 つの仮説に対する回答のまとめ

## 1.4 外部状況と議論の進め方/ 総括コーディネータ:馬越佑吉(NIMS)

「総合科学技術会議」の「ナノテクノロジー・材料 PT」ではナノテクノロジーに 関して、この3年間の世界、および日本の動向についてフォローアップしており、 その結果を図 1.4-1 と図 1.4-2 にまとめた。アメリカ、および欧州アジア諸国と日 本との違いで留意すべき点は、日本には研究拠点や共同研究のためファシリティー あるいはインフラ整備に対する長期的な視野での戦略に乏しく、また長期的な視野 からのナノテクノロジーへの教育・人材育成体制に遅れが見られる。台湾ではナノ テク財団を作り、組織的に教育カリキュラムや教員養成など小中高一貫の科学技術 教育体制を作っている。また、フラーレンの発見でノーベル化学賞を受賞したハロ ルド・クロトーは産経新聞の取材で、日本の科学技術の将来に対して危惧の念を持っ ていると語っている。この理由はクロトーの研究所との共同研究や訪問の申し出が 中国、韓国、台湾、シンガポールから来るが、日本からはほとんどない。これは日 本の若い人たちが科学技術に対する意欲に欠ける点である。このような指摘を踏ま え、今後の我が国の施策面において真剣に検討すべきであろう。

ナノテクノロジーに対する日本政府の事業は図 1.4-2 の通りで、基礎研究の成果 のみならず実用化に極めて近い展開もなされている。たとえば、基礎的分野では鉄 系の超伝導材料の発見。また連携分野横断型の事例としては文部科学省の「元素戦 略」と経済産業省の「希少金属代替材料開発プロジェクト」が連携し、両省が共同 で審査するなど連携が強化されつつある。

## 総合科学技術会議 ナノテクノロジー・材料PT委員会フォローアップ(1)

#### (米国)

国家ナノテクノロジー計画 (National Nanotechnology Initiative,2001, NNI)を継続。Environment, health and safety (EHS)予算が大幅増。American Competitive Initiative(2006)により10年で基礎研究費を倍増。研究拠点、共同研究ファシリティへの投資。全国ナノテクノロジー・インフラ・ネットワーク (NNIN)形成。

#### (欧州)

第7次欧州研究開発フレームワーク(2007~2013, FP7)の策定。基礎研究から市場技術まで。ナノテクノロジー関連予算はFP6の1.7倍。研究拠点や共同研究ファシリティーへの投資増。ナノテク拠点NINATECH)(Poled' innovation en Micro et Nanotechnologiest)設置。

#### (アジア諸国、韓国、中国、台湾、シンガポール)

韓国は、第2次科学技術基本計画(2008~2012)策定。基礎研究の重視、5年間で約5.3兆円の政府資金を投入。2012年には2006年比で約2倍の2600億円をナノテクに投入。ナノテク中核技術のロードマップを策定、ナノテク技術の先進トップ3を目指す。

台湾は、ナノサイエンス、ナノテクノロジーを国家基幹技術と位置づけ、小中高一貫科学技術教育(教科書、カリキュラム構築、教員養成)、共用施設ネットワーク、社会受容対応などトータルプランを実施。

中国、韓国、台湾、シンガポールのナノテクノロジー関連論文発表が急増、国家戦略によるインフラ整備

#### (日本)

研究拠点、共同研究ファシリティ、教育や人材育成、国家戦略、ナノテク産業振興などの長期的な 視野や戦略投資、ポートフォリオ形成で遅れをとっている。ナノテクの実用化、製品化が本格化し つつある。ベンチャー振興。

図 1.4-1 総合科学技術会議 ナノテクノロジー・材料 PT 委員会フォローアップ(1)

### 総合科学技術会議 ナノテクノロジー・材料PT委員会ファオローアップ(2)

#### (特記事項)

- (1)「超高密度HDDのためのナノオーダー制御高性能トンネル磁気抵抗素子の開発で従来の5倍以上の記録密度を達成可能とする次世代ヘッドの基本構造と製造プロセスを確立。 JST/NEDO連携の成功例
- (2) 青緑色に発光するサイアロン蛍光体を開発し、白色LED用のランプの試作に成功(クリーンなエネルギーのコスト削減、文科省)

#### (注目される研究成果とその応用)

- (1)銅酸化物、金属系超伝導体に続く第3の新型超伝導物質系の発見
- (2)室温で14%水素貯蔵可能な新材料の開発
- (3)大面積シキコン太陽電池として22.3%、色素増感型は実用サブモジュール型で約7%の効率を達成
- (4)自己組織化を利用した半導体チップ製造技術(配線間の絶縁物に直径20nm程度の真空の微小な穴を数兆個形成)
- (5)国内企業がカーボンナノチューブとグラフェンの自己組織化に世界で初めて成功
- (6) 単層CNTによる高性能電気二重キャパシタの試作(活性炭利用に比べ2~3倍の出力密度)
- (7) 光触媒による可視光照射下での水分解による水素製造と有害物質分解

#### (連携、分野横断、融合事例)

- (1)「ナノエレクトロニクス合同戦略会議」の設置(文科省/JSTと経済産業省連携施策)
- (2)「ナノバイオテクノロジー」(厚生労働省、経済産業省のマッチングファンド)
- (3)「水素利用/燃料電池」科学技術連携施策群
- (4)「元素戦略」(文科省)と「希少金属代替材料開発プロジェクト」(経産省)
- (5)「ナノメディシン研究」(厚生労働省)と「分子イメージング機器研究開発プロジェクト(経済産業省)

図 1.4-2 総合科学技術会議 ナノテクノロジー・材料 PT 委員会フォローアップ(2)

8

#### 2030年のナノテク国内市場は26.3兆円

エレクトロにクス:18兆円(69%)、エネルギー分野:4.4兆円(17%)、材料分野;1.5兆円(6%) バイオ分野:1.1兆円(4%)、精密製造加工分野:0.7兆円(3%)、計測分野:0.2兆円(1%)

2005年 2兆8085億円 ナノテク市場に先行商品が登場する

黎明期(第一世代)携帯電話、フラッシュメモリ、

2010年 4兆2138億円 リチウムイオン電池、化粧品等



2020年 13兆4369億円 2000~2005年の研究成果が市場を形成 普及期(第二世代)

FED/SED、ナノガラス、燃料電池等



2030年 26兆2645億円 ナノテク掲載製品が広範囲に普及

拡大期(第三世代)

次世代LSI、フレキシブルエレクトロニクス デバイス等

経済産業省「ナノテク関連市場規模動向調査」

#### 図 1.4-3 ナノテク国内市場

経済産業省が作ったロードマップ「ナノテク関連市場規模動向調査」によれば出口としての材料分野の市場は 1.5 兆円と 2030 年の我が国におけるナノテク市場 26.3 兆円の 6%しかなく、日本政府の投資効果がないのでないか」という議論が出てくるが、エレクトロニクスやエネルギー分野にもナノテクの材料は関連しており、ナノテク・材料としての分類のみではその成果が非常に見えにくいことを自覚する必要がある。

最近、JST は「戦略的創造研究推進事業の成功事例」を出口成果としてまとめた。 CREST や ERATO、さきがけのプロジェクトで売り上げが 100 億円以上見込め、基 礎研究が産業のイノベーションに繋がった、あるいは企業が実用化に向けて開発中 という案件を選定した事例を見ると、材料関係が多いことがわかる。

- (1)「真に臨床応用できる多能性肝細胞の樹立」 山中伸弥
- \*細胞移植療法の実現への期待
- (2)「電子波の位相と振幅の微細空間解像」 北澤宏一、高野幹夫
- \* サハラの太陽光発電からの電力輸送も可能に
- (3)「超Gbit-MRAMのための単結晶TMR素子の開発」 湯浅新冶
- \* HDD、MRAMの高密度化
- (4)「高密度励起子状態を利用したダイヤモンド紫外線ナノデバイスの開発』川崎雅司
  - \* 紫外線発光ダイオード実現へ
- (5)「超高速ヘタパイト情報ストレージ」 井上光輝
  - \* 国際標準規格に採択
- (6)「小池ファオトニクスポリマープロジェクト」 小池康博
- \* プラスチック光ファイバーでギガビットネットワーク
- (7)「細野透明電子活性プロジェクト」 細野秀雄
  - \*ITO(酸化インジュウムスズ(に代わる透明酸化物
- (8)「透明酸化物のナノ構造を活用した機能開拓と応用展開プロジェクト」 細野秀雄
- \* 新タイプの高温超伝導物質
- (9)「ナノシートの創製」 佐々木高義
- \* 高機能光触媒、省エネルギー薄膜電子デバイス等の創出
- (10)「ナノ微細制御表面による細胞からの組織再生技術の開発」 岡野光夫
- \* 角膜、重症心不全などで画期的な治療効果
- (11)「インフルエンザウイルス感染過程の解明とその応用」 河岡善裕
- \* 新規インフルエンザワクチン開発
- (12)「審良自然免疫プロジェクト」 審良静男
- \* 免疫療法や治療薬開発への応用
- (13)「小林高機能性反応場プロジェクト」 小林修
  - \* 水中合成。環境負荷の低減

図 1.4-4 戦略的創研究推進事業の成功事例

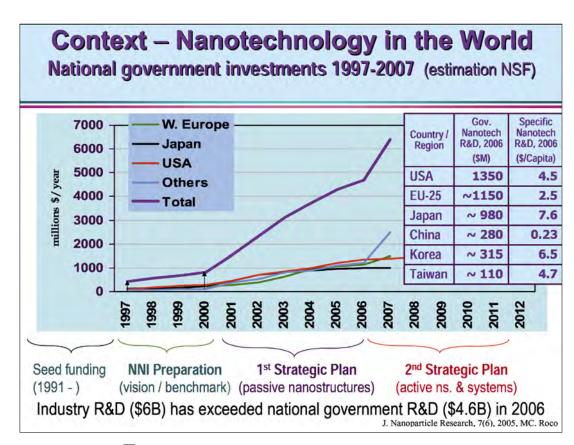


図 1.4-5 Context-Nanotechnology in the World

め

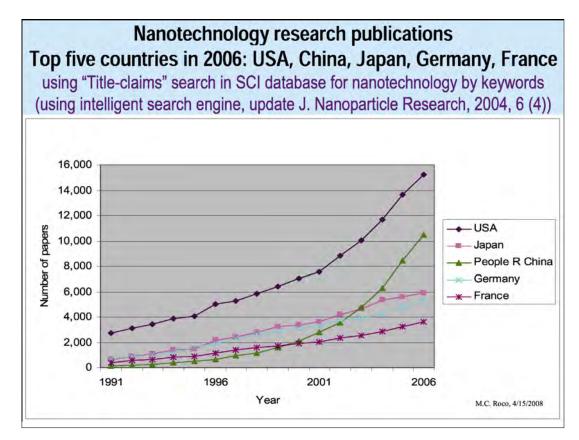


図 1.4-6 Nanotechnology research publications

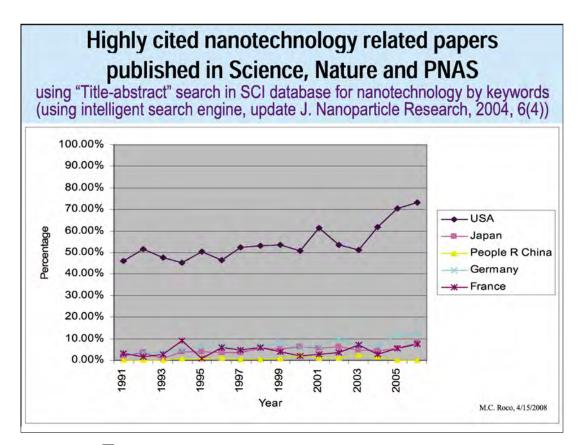


図 1.4-7 Highly cited nanotechnology related papers

学術的な国際比較として論文発表数を見てみる。ナノテクノロジーに対するアメリカの投資額は日本の1.4 倍でそれほど大きくはないわけだが、ナノテクノロジーに関する論文数は2倍と圧倒的に多く、最近では論文数では日本は中国に追い抜かれているが、サイエンスとして評価の高い雑誌への掲載数は低い。掲載数からみるとアメリカが非常に多く、これらの雑誌は基礎研究の成果が発表されているわけで、日本の掲載数が少ないのは日本の競争力が必ずしも強くない、ことを示しているとも言える。

また、産業界からのナノテク・材料分野に対する要望・批判として、我が国の産業競走力強化にいかに寄与したのかといった点がある。

このような背景を基にこの分科会で議論すべき点を挙げる。物質・材料をナノテクノロジーといった面から見て、従来のトップダウン型と原子 1 個 1 個を操作するボトムアップ型ではその研究展開の時間軸が異なるはずである。それぞれのナノテク手法においてどこまで展開が可能なのか。また、10 年後、30 年後、50 年後の展開を考えて戴きたい。また、ナノテクノロジーという手法により従来の研究とは異なった物質・材料の属性改善、あるいは新機能の発現がどのように期待されるのかと言った観点から議論する。ここでは材料別に分けているが、横断的な環境エネルギー、医療生命科学、情報通信といった分野のそれぞれとの関連性についても考えても議論していただく。本分科会のそれぞれの発表が終了した時点で、先にJSTで用意された俯瞰図に対しての追加や削除を議論する。また、環境・エネルギー、医療・生体材料、エレクトロニクス、物質基盤技術以外に重要となる研究領域を、分科会が中心の事項と分科会横断的な事項で挙げたい。最終的にはそれぞれの研究分野での提案を、可能な範囲でプライオリティーをつけて挙げる。これを実施するに当たっての研究施設の備わった拠点形成が必要ならば具体的な提案をする。

## 分科会での論点-1

- 〇ボトムアップ型、トップダウン型ナノテクの研究成果と方向。
- \* サイエンス?、物質・機能創製、実用・デバイス展開まで可能か?、時間軸は?
- \* ナノテク手法、概念の利用による特性改善、新機能発現?
- ○金属、半導体、無機・セラミックス、有機・高分子材料 資源、材料加工・創製、ナノコンポジット、磁性材料等の物 質・材料による切り口と環境・エネルギー、医療・生命科学、 情報・通信といった横串との関係
- 〇俯瞰図の議論
- \*追加のテーマ
- \*削除すべき項目

図 1.4-8 分科会での論点 - 1

## 分科会での論点-2

- ○環境・エネルギー、医療・生体材料、エレクトロニクス、物質 基盤技術以外に重要となる研究領域
- \* 分科会が中心的なもの
- \* 分科会横断的、新概念的なもの
- \*優先順位をつける
- 〇上記研究領域の具体的な説明
- 〇拠点形成(装置群)の必要性の有無、具体的な提案
- 〇人材育成策

CRDS-FY2008-WR-05

〇研究(ファンディング)システム

図 1.4-9 分科会での論点 - 2

## ナノテクに関する施設の共用施策

#### 2002年4月~2007年3月

文部科学省委託事業「ナノテクノロジー総合支援プロジェクト」

- ■「超高圧透過型電子顕微鏡を活用した解析支援」 (その場・高分解能・分析電子顕微鏡による解析支援)
- 「放射光を活用した解析支援」 (広エネルギー帯域ビームラインを活用した放射光利用研究支援)
- プロジェクト全体を総括するセンターの運営を行う

#### 2007年4月~2012年3月

文部科学省委託事業「ナノテクノロジー・ネットワーク」

- NIMSナノテクノロジー拠点を設置し、支援業務を中心に実施する「ナノテクノロジー融合支援センター」を設立
- 超微細加工、ナノ計測・分析、極限環境領域での支援を実施中

図 1.4-10 ナノテクに関する施設の共用施策

## 分科会の論点-3

- ○国際化、協調?、競争?
- ○異分野融合、連携施策
- \*必要な分野とその方策
- 〇ナノテク・材料、物質・材料の到達すべきゴール
- \*物質・材料ごとに議論
- ○物質、材料、デバイス、製品への展開と産業化
- \* サイエンスに留まるのか、産業化まで展開可能か、 出口は?

図 1.4-11 分科会での論点 - 3

8

## ナノテクノロジ融合支援センターの設置

分野毎の共用設備(技術支援者を含む)の整備の必要性

「創る」「観る」「測る」のツール(ナノファウンドリー)を集積。 物質・材料の創製とその評価、さらに材料や機能を集積した機能性素子の試作を、 一貫して行える体制を整備し、ナノテクを活用したイノベーションの創出を加速。





図 1.4-12 ナノテクノロジー融合支援センターの設置

## 人材育成プログラム

- O21世紀COEプログラム
- OグローバルCOEプログラム
- 〇大学院教育改革支援プログラム
- ○魅力ある大学院教育イニシアティブ
- ○質の高い大学院教育推進プログラム
- 〇新興分野人材養成ユニット(一部ナノテク)
- 〇科学技術に関する学習の支援 (理科わくわくネットワーク)

いずれも時限的で長期戦略、研究分野別育成策が欠如ナノテクを対象とした組織的な人材育成策が必要

図 1.4-13 人材育成プログラム

ナノテクの研究開発費:2006年の米国(1350M\$)は日本

(980M\$)の1.4倍

発表論文数:米国は日本の約2.5倍、アジアが急伸。日本は

中国に抜かれ3位。近年減少傾向

被論文引用数:米国は約2倍、Science, Natureでは約9倍

原因は?:ファンディングシステム、拠点形成に問題がある

のか?諸外国は装置より人に投資

図 1.4-14 投資対象

人材育成策についてはファンディングシステムも含めて議論する。国際化といっ た観点からは協調で進めるのか競争で進めるのか、他省庁を巻き込むのか単独で進 めるのか、を議論したい。到達すべきゴールを物質・材料ごとに議論して戴きたい。 また、応用展開、産業化まで要求することか、それとも基礎研究でとどまるのかに ついても議論したい。

め

#### 分科会討論 2.

#### 金属材料分科会/コーディネータ:馬越佑吉(NIMS) 2.1

#### 2.1.1 資源、材料加工・創成(循環プロセス):前田正史(東大)

日本がめざすのは日本の便益であるが、地球環境論議への対応はより重要な視点 である。日本はエネルギー、資源、水を含む食料について対応を考えなければなら ない。

鉱物資源からスタートし、素材になり、材料になり、製品となる。製品は重層構 造をしており、製品に仕上げて日本の便益を担保する。製品性能を制限しているも のが材料だとしたら材料開発が必要である。材料の機能がナノによらなければ得ら れないとすれば、結果的にナノテクノロジーになっていくだろう。例えば亜鉛メッ キ鋼板というのは日本が誇るべき成果の1つで、精緻な金属間化合物であり結果 としてナノ構造になっている。珪素鋼板、ネオジウム磁石もその例だ。これはナノ で積み上げていったのではなく、結果的にナノ構造になるというプロセスだ。また、 高性能2次電池の電解質や触媒なども多くの工夫を積み上げ、結果的にナノ構造 になっている。作製時はナノだが使用時は大きなものになっている場合が多い。細 野先生らが進めている構造制御や構造の構築で機能を出していくという考え方もあ る。

天然資源を濃縮して素材を取り出すが、高価な素材はそれだけ原料の濃縮にエネ

世界の資源消費量

	— <i>-</i> .		71527		
Resources	Totalamount		Weight / billion tons	Year	
Energy resources	8.97 billion tons				1.5 ton/man/y
		Coal	3.711	1998	
		Petroleum	3.115	2000	
		Natural gas	2.148	1998	
Foods	2.73 billion tons				
		Grains	1.912	2000	319 kg/man/y

Meats

Milk

Marine products 0.095 Wood 3.73 billion tons Specific gravity 0.9 Firewood 1.962 2000 1.766 2000 Timber Minerals ca. 2 billion tons 330 kg/man/y

Limestone

Iron ore

0.233

0.490

1.191

0.622

日本国勢図会 2002/03、世界国勢図会 1999/2000 を基に作成

図 2.1.1-1 世界の資源消費量

2000

2000

1996

1983

1998

39 kg/man/y

82 kg/man/y

ルギーを要している。しかし、車を例に取ると車のボディになる鋼板になるまでの エネルギーよりも車を動かす燃料がより大きなエネルギーである。

よって製品を作るためのエネルギーよりも製品の消費電力を抑えた製品を作るのが大事だ。だから製造技術は省エネルギー低炭素型というメジャーでは計れない。製品を廃棄する時は白金などの希少金属も一緒に廃棄すると回収が天然資源のときと同じエネルギーを要してしまう。よって、白金を使わない技術もあるし、わざと白金を10g 使って回収しやすい車を作るという発想もありえる。

材料設計はその素材のリサイクルや廃棄物処理、車なら燃費も含めたトータルコストを考えた設計で、結果としてナノが必要ならばナノでやっていくという考え方がよい。

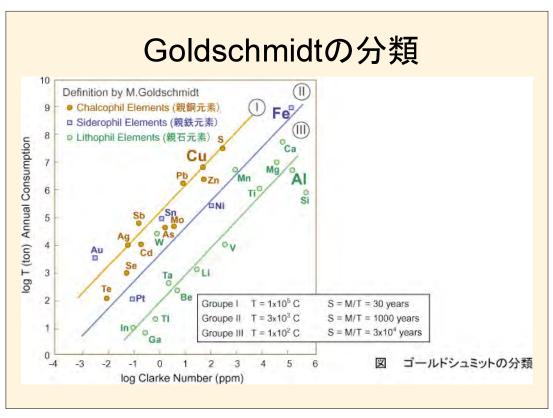


図 2.1.1-2 Goldschmidt の分類

Goldschmidt の分類図。縦軸は年間消費量、横軸はクラーク数。Cu系、Fe系、Al系の3種類に分けてプロットすると直線に乗る。この直線は上のほうが存在量は少ないが多く使われていることを意味する。すなわち枯渇性が高い。Fe や Alは存在量に心配は無いが、Cu や Zn の枯渇性が高い。レアメタルよりベースメタルが不足している。バイプロダクトとして付随してくる色々なものの処理も合わせて考えなくてはならない。

また、採掘するにはどれくらいのエネルギーが必要かを考えなければならない。 例えば海水から採取するのはかなりのエネルギー(コスト)がかかり不可だ。

め

## 地球科学的資源の考え方

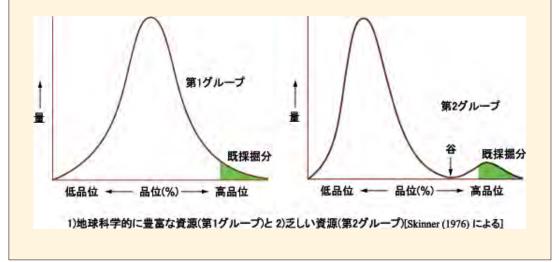


図 2.1.1-3 地球科学的資源の考え方

## 将来の世代にどこまで地下資源を 残しておくか?

- ・ 閉鎖系の状態の変化はエントロピーが増大する方向でのみ起こる。
- ・ 人間の生産活動は、資源とエネルギーを用いて、有用な、多くの場合エントロピーを減少させた製品を作り出す。
- その結果として同時に、有用性の低い高エントロピーの廃物を必然的に生み出す。全体として見れば、エントロピーを増大させる。これは避けることができない。
- 何のエネルギーも投入せずに、全ての廃棄物を人為的に元に戻すことは不可能である。
- ・ 永遠に資源を残しておくことははできない。
- ・ 人口が年々増加している現実を考えれば、それは不可能である。
- ・ 資源残量は時間の関数である。

図 2.1.1-4 将来の世代にどこまで地下資源を残しておくか?

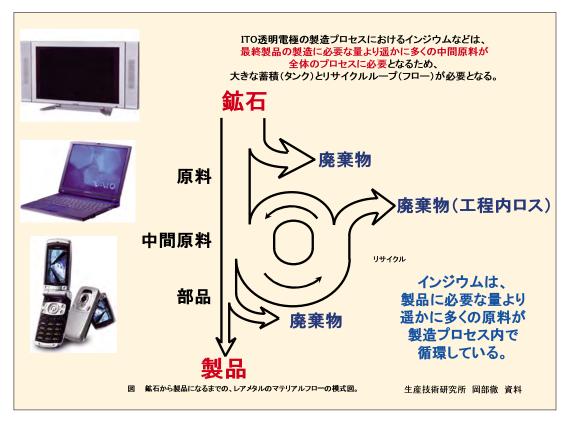


図 2.1.1-5 鉱石から製品になるまでのマテリアルフロー模式図

インジウムを例にとると、その工程で製品として使われないインジウムが大量に発生する。これはインジウムが高騰すれば改良されるだろう。また、ベースメタルの枯渇は心配しなくていいだろう。宇宙空間には白金がかなりあるが、地球上では大きく分けて3箇所しかない。南アフリカのブッシュウェルトという大きい岩帯、ロシアの二タの岩帯、そして北米にもある。この3箇所は隕石が落ちたという。

資源的な性格とエネルギー的な性格の両者をもって材料設計をしないと、本当の 競争力のある製品開発にはならない、というのが結論である。

#### 2.1.2 磁性材料・ナノ組織制御:宝野和博(NIMS)

金属材料分野において「ナノテク・材料」によって何が起きたか。ナノ組織を制 御することにより従来材料の特性を凌駕するような材料がいくつか開発されたが、 一方でナノ組織を構成すること自体が目的である課題設定が可能となり、ナノの大 きさであればその特性から実用材料としてポテンシャルがなくても研究対象として 受け入れられる傾向が顕著になった。そのため目的が明確な実用材料の研究が華や かさに欠けることから採択されにくくなった。ただ「ナノテク・材料」には大きな プラス面もある。それは、微細加工技術と解析技術が飛躍的に向上したことである。 これによってデバイス開発に非常に大きく貢献し、こうしたインフラを得られたこ とは注目に値する。



図 2.1.2-1 磁性材料分野におけるナノテク・材料の大きな成果

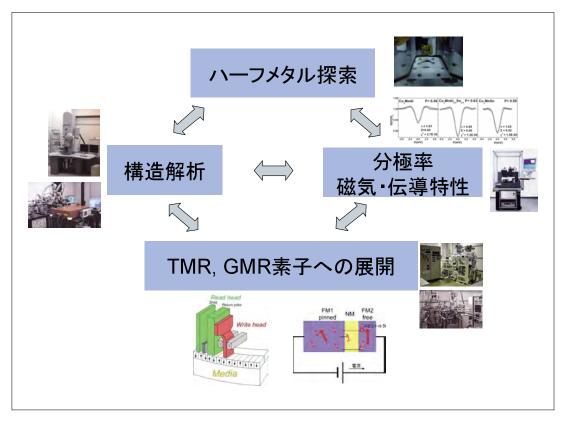


図 2.1.2-2 ハーフメタルの探索

磁性材料分野での大きな成果は磁気記録密度の増加に貢献した磁性材料と磁気デバイスの開発が挙げられる。図 2.1.2-1 に示されるように磁気記録密度は、MR ヘッドの登場で飛躍的に上がり、続いて GMR ヘッド、そして「垂直磁気記録方式」の採用により飛躍的に向上した。書き込み用ヘッドとしては磁束密度の高い軟磁性材料が必要で、再生ヘッドはスピントロニクスの大きな成果である GMR ヘッドが使われてきた。記録密度 ITbpsi を実現するにはビットサイズが 20x20nm² となるので、このようなナノ構造が必要であり、磁気記録媒体のナノ組織制御が鍵になっている。 GMR ヘッドの素子は単に金属層を多層に積層するだけでなく最近東芝から提案されている CCP-CPP GMR 素子にみられるように、合金超薄膜内での自己組織化によりナノ構造を制御してデバイスが作製されている。まさに、ナノテクノロジーの大きな成果と言える。また近年では GMR 素子がより磁気感度の高いトンネル磁気抵抗素子 (TMR) に置き換えられているが、将来さらに記録密度が増加すると、素子抵抗の低い GMR が再度使われるようになるのではないかと予測されている。そのために GMR の磁気抵抗変化率を現状の 10 倍以上に高める必要があり、そのための研究が進められている。

近年、スピントロニクスの発展が著しいが、スピンが偏極した電流を発生させる ために伝導電子がすべて一方のスピンだけを持つハーフメタルの重要性が増してき ている。ハーフメタルは TMR や GMR 素子における磁気抵抗変化を大きくさせる のに有効な材料と考えられているが、半導体と組み合わせた素子を作る時にも偏極

電流を半導体に効率良く注入させることができると期待されている。そのほかにも 磁壁を動かしてメモリーを開発するなどの試みもあり、そのためにはより高い分極 率を持つ強磁性材料探索が重要で、これは金属材料分野で新しい機能材料研究の一 つの大きなテーマになる可能性がある。ただしハーフメタルの材料を見つけ出した だけでは何の役にも立たず、これをデバイスにし、その特性を評価し、素子にして その構造を見て最適化する、というような研究が必要で、材料だけで問題が解決で きる時代はすでに終わっている。デバイスへの展開を図るためには、高価な成膜装 置や高度な微細加工技術が必要で、このような研究を推進できる大学の研究グルー プは世界的にも限られてきている。より、多くの大学研究者が第一線の研究に従事 することができるような環境構築(共用で使えるナノファウンドリーやナノ解析設 備など) の整備が望まれる。

記録媒体については 1Tbpsi を実現できる媒体の開発が進められている。現在の 磁気記録媒体は軟磁性体の上にルテニウムの膜を形成する。ルテニウムはレアメタ ルで資源的に問題となっているため他の元素に置き換えなければならず、大きな テーマである。記録媒体を ITbpsi にするには強磁性の粒子を小さくしなければい けないが、小さくなると熱揺らぎによって不安定になる。そこで鉄白金やコバルト 白金のような結晶磁気異方性を持つ材料が必要になってくる。それをナノスケール で非磁性層に分散させることが必要になる。それらのナノ粒子の異方性をそろえる ことも必要で、材料分野のチャレンジングなナノテク課題である。また、先ほどの 例と同様に媒体構造を作るだけでは目的に到達できない。記録再生の評価なども必

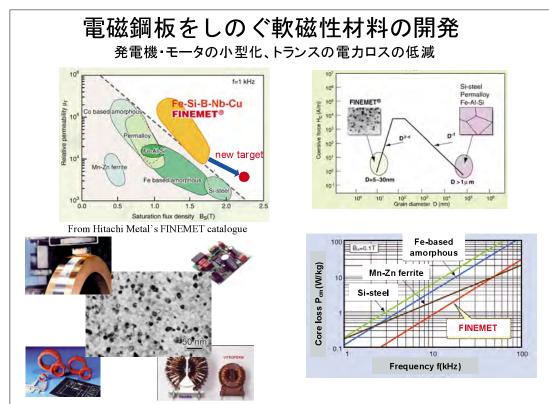


図 2.1.2-3 電磁鋼板をしのぐ軟磁性材料の開発

要で、物理・電子工学・材料工学・機械工学を融合したような研究体制が必要である。

省エネの一環として、電磁鋼板をしのぐ安い軟磁性材料の開発への要望は大きい。 今のシリコンスチールより高い飽和磁束密度を持つ材料が必要になる。組織を制御 して、軟磁性特性を持ち、かつコアロスが小さく磁束密度が高いという夢の材料が 出来れば、自動車のモータも小さくなり、柱上トランスの電力ロスも小さくなるだ ろう。

ネオジム磁石は最高性能の永久磁石として様々な用途に使い続けられている。ハイブリッド自動車や電気自動車の駆動モータ用の磁石としてネオジウム磁石の使用量が増え続けているが、動作温度が 200℃となるために、耐熱性のあるネオジム磁石が必要とされている。ネオジム・鉄・ボロンを主成分とするネオジム磁石は高温で磁石としての保磁力がなくなるが、ジスプロシウム(Dy)を加えると 200℃での使用が可能になる。Dy のネオジウム(Nd)に対する自然存在比は 10% であり、現在の自動車用磁石の Dy/Nd 比 40% の磁石を使い続けると近い将来に確実に資源問題が浮上する。そのため、自動車メーカーでは Dy の代替材料の研究の重要性が増している。このためには Dy を使わずに焼結磁石の界面構造をナノスケールで制御して保磁力を向上させるのが有効と考えられている。

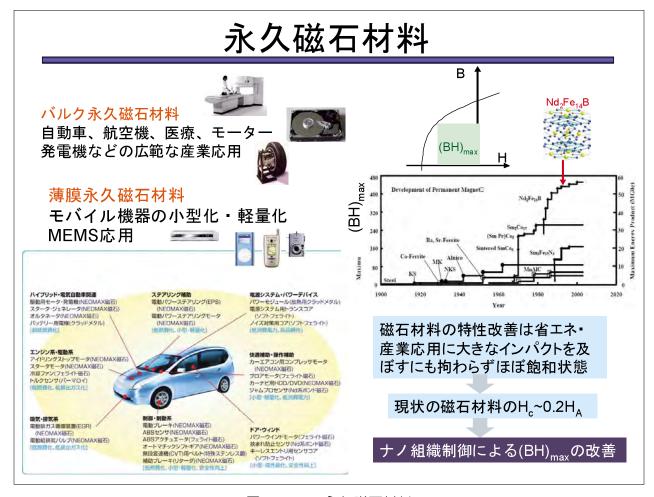


図 2.1.2-4 永久磁石材料

また次次世代の磁石として現状のネオジウム焼結磁石の性能を凌駕する可能性の ある異方性ナノコンポジット磁石の開発研究も盛んになり始めている。

軟磁性材料や磁束密度が高いものと組み合わせて、さらに高特性を持つナノコンポ ジット磁石が出来ないかという可能性が検討されている。 焼結磁石の Dy 削減は磁 石メーカーにとって死活問題だが、その技術的重要性からこれは様々なプロセス改 良によっていずれ解決されると期待さる。次は、異方性ナノコンポジットを使って より高い特性の磁石を作っていくということを長期的に考えていかねばならない。

このように、今後の高特性の材料開発では組織制御が重要なキーワードとなって おり、そのスケールもナノレベルになってきている。そのため、工業材料さらに高 特性化するためにそれらの組織・構造を徹底的に解析し、その特性と構造の因果関 係を解明して進んでいかなければならない。そのためには高度なナノ組織解析ツー ルが必要となってきている。これらの装置は非常に高価になってきているので、今 後のナノ組織制御材料の発展のためには、大学・企業・国研などのさまざまな研究 者が必要に応じて高度な解析手法を使用できる環境の整備が待たれる。

#### まとめとして、

- 情報通信、環境エネルギーに貢献できるより高性能な磁性材料が求められてい る。
- データストレージ、スピントロニクス分野では、材料の開発だけでなく、デバ イス化までが必要で、そのためには界面原子レベル制御や、微細加工、原子レ ベル解析などナノテクノロジーの応用が必要。
- 高保磁力永久磁石開発は、二次電池開発とともに自動車産業にとって必須。
- 難しい課題だが、電磁鋼板を超える高磁束密度の軟磁性材料の開発が必要。 これらを開発するには高度なナノ解析手法が使われ、そのためにも解析装置の 共用センターの設置が必要。

#### 2.1.3 機能性材料、水素貯蔵:岡田益男(東北大)

物質・材料分野全体を考えると、

- 我が国の材料とそのプロセス技術は、自動車、電子・電気機器、製造機械など 広範な分野で、世界のトップレベルを堅持してその基盤を確かなものにし、豊 かな社会の形成に大きく貢献してきた。
- わが国の社会基盤の形成は、金属やセラミックスや高分子などの材料技術の存在なくして不可能であった。
- 鉄鋼、自動車、造船、半導体、電子機器、精密機械などの分野において、激しい国際競争の中で「ものづくり大国」の地位を勝ち取ることができたのは、易加工性高張力鋼板、極低欠陥 Si 単結晶及び半導体材料、高密度実装用電子部品、小型高性能磁石、ポリオレフィンとその複合材、エンジニアリングプラスチック、炭素繊維、ゴム材料、繊維材料などの世界に誇る材料とそれを具現化する技術によるものであった。
- バブル崩壊の時代を経て「ものづくり大国」の地位は確実に揺らいでいる。
- 多様なニーズに応えるための問題を解決するためには、製品やシステムの改良 ではもはや不十分であり、製品を構成する基本部品や材料技術の革新的創造力 が必要とされている。

以上により、

○ 「ものづくり」の基盤である金属、セラミックス、ソフトマテリアル(高分子) などの個別材料を深化させると共に、革新的新材料・新プロセス開発が不可欠。

#### 「機能性材料・水素貯蔵」について

- 1. 燃料電池関連材料と水素製造技術 固体高分子型燃料電池ロードマップ等(NEDO 2008 年 6 月)
- 2. 水素貯蔵技術

NEDO により水素貯蔵材料先端基盤研究事業(平成 19~23 年度)実施中。 Back to the Basic を掲げ、基礎研究を実施中であるが、開発研究は後退

3. 超伝導材料技術

超伝導新物質の探索研究への継続的ファンディング重要

- 4. ナノ粒子科学と応用の新しい展開 ナノ粒子触媒、ナノ粒子と水素のつくる新しい科学
- 5. 機能元素のナノ材料科学 微量元素が界面、転位、表面に局在化して材料機能発現

8

#### 「水素製造技術の中長期的テーマ」について

#### <改質>

・水蒸気改質:都市ガス・灯油を使用した実証システム稼働中

100m³/h 水素製造システム 反応温度 700~800℃

長期的目標:非Pd 系水素分離膜を用いた水素透過型メンブレンリアクタ

分子ふるい膜 / 選択輸送膜による CO2 分離技術

・部分酸化

#### <水分解>

- ・アルカリ水電解装置 水素ステーション用として実証段階 コスト低減、高電流密度化技術の開発
- ・固体高分子水分解 低コストセパレータ MEA が開発中 長期的目標: 非フッ素系膜および非貴金属触媒の研究
- ・高温水蒸気電解装置:高温廃熱を利用した酸化物イオン伝導体電解技術

#### <再生可能エネルギー> 中長期的技術

- ・バイオマス・生物利用(水素発酵、超臨界バイオマスガス化技術、光合成水素 生産)
- ・太陽・風力エネルギー利用(太陽光、光触媒、風力発電水電解システム)

PEFC に対する材料の貢献は、セルスタック、電極触媒、担持セパレーターが挙げられる。セパレーターは金属セパレーターとカーボン樹脂モールドセパレーターに絞られてきた。金属セパレーターは金属の耐食性、カーボン樹脂は樹脂モールドによる成形が問題点。金属セパレーターが有利と予測している。

電極触媒の白金はナノ構造を使って白金の使用量を減らさないといけない。白金は両電極の触媒に使われるが、特にアノードでは燃料に含まれる微量の CO (一酸化炭素)が白金表面に吸着して反応を妨げる(被毒現象)。これを防ぐためにナノファイバーを使うか、新しいタイプの触媒担持体の開発が必要である。

水素製造は日本では水蒸気改質で得るが、米国は部分酸化改質法で得ている。水 蒸気改質法は吸熱反応であるが部分酸化は発熱反応で、自動的に反応が進む部分酸 化法に将来は移行していくだろう。

#### 「水素貯蔵材料容器と水素貯蔵材料」について

#### <現状>

・TiCrV 系 BCC 合金で 3mass%達成に目処

使用例:2.6~3mass%(<100℃)

材料コスト 30,000~40,000 円 /kg、反応熱 △ H 30~40kJ/molH<sub>2</sub>

#### <長期的テーマ>

- ・6mass%以上級貯蔵合金材料 Mg 系、超高圧合成や超積層複合化等の新規水素化物の探索
- ・無機系貯蔵材料

アラネート系(Na-Al-H)、アミド(N-H)・イミド(N-H<sub>2</sub>)系(Li-N-H)、ボロハイドライド系(Na-B-H)、複合系材料で  $3\sim13$ mass% 作動温度高い

・水素貯蔵材料容器(ハイブリッド容器)

水素高圧タンク中に水素吸蔵合金をハイブリッドする 水素量 / 容器 / 容器重量(充填圧力): 5kg/200L/567kg(3MPa)

・ハイブリッド容器

水素量 / 内容量 / 外体積 / 容器重量(充填圧力): 7.3kg/150L/200L/420kg(3.5MPa)

# 水素貯蔵について

燃料電池自動車は 1kg の水素で約 100km 走ることができ、5kg で 500km の走行が目標。水素貯蔵材料は BCC 合金で 3mass%が現状。材料コストは 3 万円 /kg でかなり高い。長期テーマとして 6mass%以上の貯蔵合金を作りたい。これは DOE もヨーロッパも同じ目標値。材料としてはアラネート系、ポロハイドライト系などが挙げられるが作動温度が高いため実現は難しい。他の方法として、高圧タンクの中に水素吸蔵合金を入れるというハイブリッド型が考えられる。

日本は革新的材料を作らないといけない。これはハイリスク・ハイインパクトな研究分野への投資になるが、産業界からもよく意見を聞いて分野を絞り込む。そしてできるだけ多くの研究者に参加させ、そして研究意欲の旺盛な研究員を厳選する。このようなことは日本の風土に合わないところがあるが、このような厳しさも必要。日本に欠けているのは非常にリスキーでインパクトの高い研究に対しては、ある程度の結果がでないと、なかなか投資してくれない。長期的な支援が必要で萌芽的研究投資であり、研究資金は必ずしも多い必要はないけれども、革新的な材料のための投資があっても良いのではないか。

め

# 高容量新規水素吸蔵材料の開発

·超高圧による新規化合物合成一

#### 研究開発のターゲット:

コンパクトで安全な水素輸送媒体としての水素貯蔵材料(150°C以下、5.5mass%)の開発

経済・社会での活用に関する具体的ビジョン: 燃料電池自動車の水素貯蔵タンクとして、350気圧の高圧水 素ガスタンクが試用されているが、安全性が高く、コンパクトな水素貯蔵材料タンクが待望されている。本プロジェ クトでは、1回の充填で500km走行可能なように150ºC以下で5.5mass%の水素容量を有する高容量新規水素 吸蔵材料を開発する。

#### 開発法の特徴:

超高圧(GPa(1万気圧))による合成法の特徴 融点の上昇(Mgは4GPaで900℃まで上昇)で 融点以上の高い温度で固相反応が進行。 原子半径の減少(Mgは5GPaで10%減少)

### 研究の概要:

1~6GPaの超高圧により、高容量の新規水素化物 を合成する。本合成法が新規水素化物探索に適用例 が少ないことから2元系合金から着手する。

- ① Mg-X系合金(X:遷移金属など)
- ② Mg-Re(希土類元素)-X系合金 ③ Mg-Li-X系合金
- ④ Li-X系合金

これまでにMg-X2元系合金において20以上の新 規化合物の合成に成功している。

# 高圧合成によりMgーY系の新規水素合成に成功 高圧合成アン (Mg0.33Y0.67)4H12の結晶構造 ビル模式図

安心安全な燃料電池自動車の実用化



#### 図 2.1.3-1 高容量新規水素吸蔵材料の開発

### ナノ複合材料による水素貯蔵特性の高性能化

環境問題。エネルギー問題から二酸化炭素を発生しない燃料電池自動車が開発され、35MPaの高圧 水素タンクが使用されている。この高圧水素タンクを利用した燃料電池自動車の走行距離は300km程度(内容積: 136Lのタンク)であり、既存の自動車(500~600km)に比べ短く、航続距離の向上が望まれている。これを改良する ために、圧縮水素に比べコンパクトに水素を貯蔵できる水素吸蔵合金が開発されてきたが、質量水素密度が3質 量%以下と低く、質量水素密度の大きな水素貯蔵材料が必要不可欠である。

<u>目標 水素吸蔵合金に代表される水素貯蔵材料は日本の学界・産業界が世界に誇れる強い基盤技術の1つであ</u> る。その技術を更に発展させ、それを活用して質量水素密度が水素吸蔵合金より大きい軽元素から構成される、高 性能なナノ複合水素貯蔵材料の開発を図るとともに、異分野融合による新しい学術体系を開拓することにより、世 界の水素貯蔵材料のトップランナーとなる。

#### 特徴と課題: 軽元素で構成される水素化物(LiH, NH<sub>3</sub>, NaH, MgH<sub>2</sub>, AlH<sub>3</sub>, LiBH<sub>4</sub>, NaBH<sub>4</sub>, LiAlH<sub>4</sub>, NaAlH<sub>4</sub>, LiNH。等)を用い、ナノ複合化技術の導入により、反応 速度や構造安定性を制御した高性能ナノ複合水素貯 蔵材料を開発する。また、物理、化学、工学など、異分 野との融合により、新しい学術体系を開拓する。

- ①無機系ナノ物質と単結晶の作製(作製技術確立)
- ②構造解析による水素貯蔵メカニズム解明(ナノ・原子 レベルでの観察・分析技術確立)
- ③第一原理計算による解析と予測(動的挙動と構造安 定性の評価と予測)
- ④動力学(反応速度)と熱力学 (構造安定性)を制御した 高性能ナノ複合水素貯蔵材料の開発(設計技術開 発)

学協会名:日本セラミックス協会

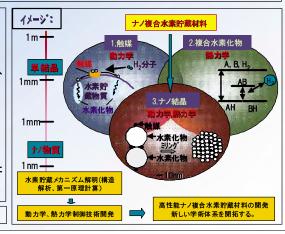


図 2.1.3-2 ナノ複合材料による水素貯蔵特性の高性能化

図 2.1.3-3 ナノ粒子科学と応用の新しい展開ー 1

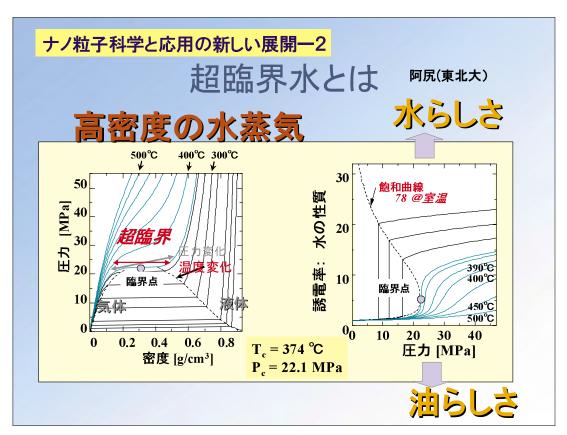


図 2.1.3-4 ナノ粒子科学と応用の新しい展開ー 2

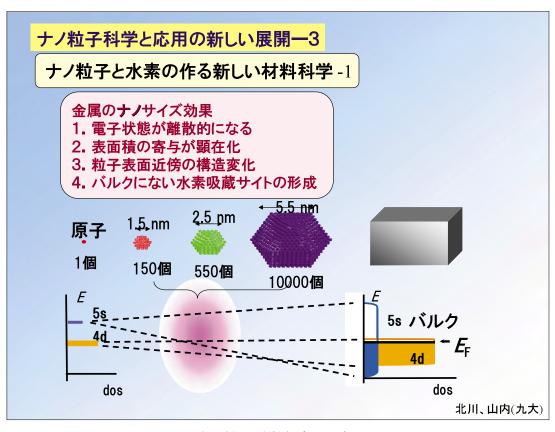


図 2.1.3-5 ナノ粒子科学と応用の新しい展開ー3

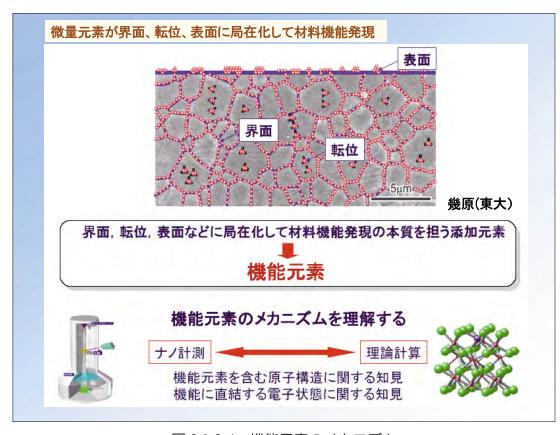


図 2.1.3-6 機能元素のメカニズム

図 2.3.1-7 ナノ計測一理論計算一プロセス技術の連携

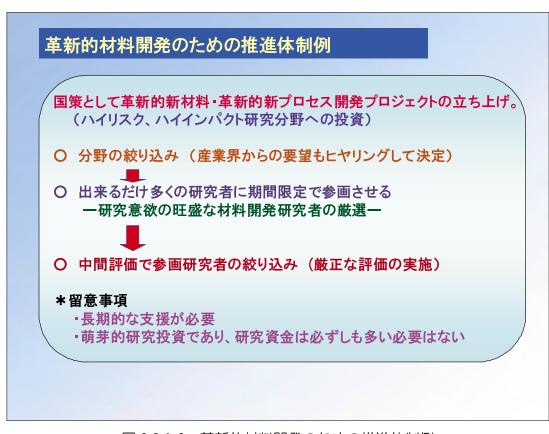


図 2.3.1-8 革新的材料開発のための推進体制例

# 2.1.4 耐熱構造材料、機能材料(熱電材料、電池材料):乾晴行(京大)

耐熱構造材料、熱電材料、電池材料について

京都議定書で定められたように日本は炭酸ガスの排出量を削減しなければならな い。これに資する材料の特性を上げる研究には重点的に投資されるべき。日本では 年間に約12億トンの炭酸ガスが排出されている。その中の30%はエネルギー転換 部門の発電関係で、産業部門、それから運輸部門の自動車で、それぞれ30%、 20%が排出されている。このようなところに使われている材料対策を世界規模で やることが非常に効果的であろう。

例えば、発電効率を上げるには燃焼温度を上げれば良いので、より耐熱性のある 構造材料を作れば上手く達成できる。しかも排出量が30%も占めるので、たとえ1% の削減でも大きな効果だ。また、例えば自動車エンジンからの熱を熱電変換材料で 電気に変えることが出来れば、消費する燃料も少なく出来て非常に有効な手である。

# CO。排出削減と新規エネルギー関連材料

- 京都議定書に定められているように、地球温暖化の防止のためには、その原 因となる二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)等の温室効果ガスの排出削減が求められている.
- 国内のCO<sub>2</sub>総排出量のうちの約30%は発電プラント等のエネルギー転換部 門からのもので、さらにその99%は火力発電から.
- 火力発電をはじめとして、 化石燃料利用分野での効率向上は最も現実的な CO。削減策
- 同時に, 廃熱利用, 電力貯蔵, 高効率送電, 非火力発電システムの利用など による総合エネルギー効率の向上が必要.

# 材料分野からのアプローチ

新規エネルギー関連材料の開発が不可欠

耐熱構造材料(発電用, 航空機用)

熱電変換材料(廃熱利用)

電池用材料(水素吸蔵材料,リチウム二次電池材料) 原子力用材料

超伝導材料 (高効率電力輸送用)



図 2.1.4-1 CO。排出削減と新規エネルギー関連材料

まず耐熱材料で、航空機のジェットエンジンについて。日本は国産のジェット機 を作ろうとしており、エンジンが1つの産業のターゲットになる。燃費が良く、 耐熱性の高いエンジンを作ることは非常に重要。ニッケル超合金が今使われている が、耐用温度である融点ぎりぎりまできており、さらに新しい材料が必要となって いる。そこで日本はコバルトの超合金、金属間化合物材料、アルミナイド、シリサ イドという材料を使っていきたい。耐熱を上げるためにナノテクノロジー、あるい はナノサイエンスが入っている。強度の話をする場合は、折出強化、固溶強化、転 移強化が全てナノの観点からなされている。

より高い温度で、軽量にするにはどうしても金属間化合物、遷移金属のアルミナイトライドやシリサイドにいかなければならない。コバルトベースですら 1500℃程度でしか耐熱性がない。まだ実用化段階には全く至っていないが、より融点の高いものでは遷移金属のシリサイドというのがある。融点は 3000℃級でかなり高い耐用温度が達成できる。まだ学術的な研究段階だが、例えばある種のシリサイドの転位のところに、ある元素が偏析して高温の強度を高めるということがわかっている。

# 航空ジェットエンジン用耐熱構造材料

<背景> 民間航空機の需要ニーズは年率約5%レベルの成長見込まれており、2026年には約30,000 ~35,000機必要(2006年の約2倍)とされている. 化石燃料消費量およびCO2削減の観点から、エンジンの燃料消費効率(SFC)の向上が必要不可欠である. 国内においては、次世代型リージョナルジェット(MRJ)の開発が始まり、また環境適応型小型航空機用エンジン研究開発も行われている. これらの新しい技術開発の実現のためには、それを支える新しい耐熱構造材料の開発が必要である.

<目標>現在の民間航空機用エンジンのタービン入口ガス温度は1600°C以上(離陸時)にも到達する. 新型エンジンでは燃料消費効率向上のためには、さらなる高温化、高効率化が有効策である. そこで、 燃焼ガス温度上昇を可能にする優れた高温タービン部材の開発を行う.

<研究課題> Ni基超合金の性能向上に関する研究を行うとともに、新規耐熱構造材料として、Co基超合金、金属間化合物材料(遷移金属アルミナイド、遷移金属シリサイド)をターゲットとし、高温タービン部材としての実用化を目指した研究を行い、新しいナノサイエンスの構築を目指す。

- 1. 高耐熱性をもつ新材料探索
- 2. 基本材料のナノ・ミクロ構造制御による高機能化
- 3. 高温曝露下での組織の安定化と異相界面の 構造・組織学の構築
- 4. 耐熱構造体創製のためのプロセス構築
- 5. 結晶塑性学, 材料組織学(金属系材料の変形と物質移動)の基礎



図 2.1.4-2 航空ジェットエンジン用耐熱構造材料

#### 電池について

ニッケル水素電池・リチウム電池等は、産業的にも国際競争力が非常に強い。リチウム2次電池の場合サンヨー、ソニー、松下の3社で7割のシェアを持っている。しかし中国が追い上げてきている。ここでもナノテクノロジーというのは非常に重要だ。例えば、LaNi5というものが電池材料としてずっと使われていた。ここへマグネシウムを入れてやると、LaNi5のところにマグネシウムが濃化して違う原子配列を持つようになる。こういったマグネシウムの濃化を自己組織的に起こすと自己放電率が非常に少なくなる。これがいわゆる三洋電機のエネループとして実用化されている技術だ。リチウムの2次電池の方も発火するという問題点があるが、全

め

固体化が有効である。全固体化するとリチウムの電位によって電極が膨れたり縮ん だりする。その時に固体の電解質を使うと、その範囲で割れが出来てサイクルとと もにどんどん特性が悪くなってくるということがある。この界面をナノ、縞状のア モルファスをナノ領域として作ることによって割れもしない安定性のあるサイクル が出来るようになる。

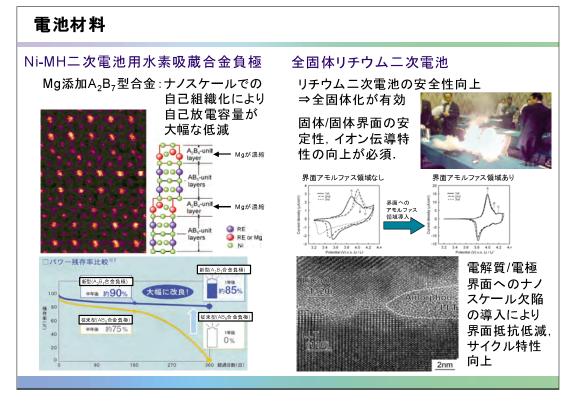


図 2.1.4-3 雷池材料

#### 熱電変換材料について

熱電変換に対応可能な未利用熱エネルギー量は、日本では原油換算で1年間に 7,600 万 kl ある。日本の総エネルギー消費量の 18%になる。そのうちほとんど半 分が自動車の廃熱で、あと半分が工場とかの廃熱。たとえばラジエーターに熱電変 換のスタックを張り付けてそれを発電させるだけで市場として非常に大きい。同様 に工場の廃熱に対しても熱電変換で発電をすると、 $71 \times 10^{12} \text{ kJ/}$ 年くらいの省工 ネ効果がある。この場合も非常にナノテクノロジーが重要である。熱変換の効率が 重要だが、個々の材料では出ないような良い数字が、ナノのコンポジットにするこ とによってできることがわかっている。

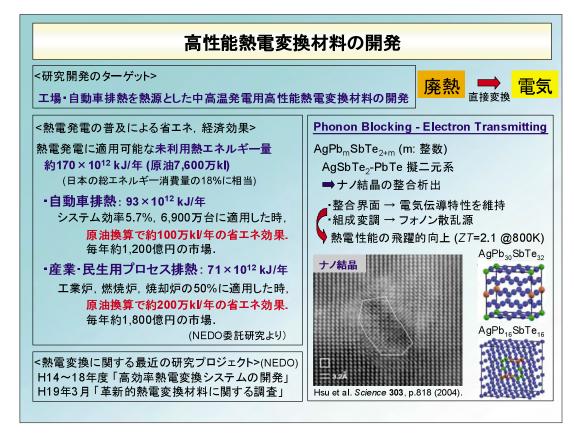


図 2.1.4-4 高性能熱電変換材料の開発

耐熱材料、熱電材料、電池材料は、全て炭酸ガス排出量削減に有効な材料だ。何をするにしてもナノサイエンスの視点というのが必須である。ナノ構造の制御と元素機能の特性ということにおいて機能発現を図るべきで、20年前にはできなかったナノ計測、第一原理計算があるので、新しいサイエンスを作っていくとよい。それから日本独自のスタンスでの支援の重要性が必要。あまりアメリカに追従するというのは良くないのではないか。また、非常に長い支援が必要な分野もある。さらに、確立された学問体系同士の異分野融合を図っていく必要がある。

# 2.1.5 生体材料、金属系医用デバイス: 塙隆夫(医科歯科大)

金属に限らず生体材料の分野全体を俯瞰する。第1の問題は外国製品が優勢であること。研究レベルでは日米欧が世界の3極を形成し、かなりの勢力を持っているが、許認可制度、産業構造の改革という実用の面では明確に遅れている。また、研究レベルでの人材の問題は深刻で、生体材料においても材料科学をきちんと学んだ若手が担っていかなくてはならないが、このような人材が将来不足すると予測される。中国、韓国、シンガポールはキャッチアップの研究が主流であったが、近年は独創的な研究が出てきている。人材の面から言うと追いつかれる日も近いのではないか。

# 金属バイオマテリアル研究の国際比較

内容	状況
新Ti合金	実用化では米欧がリード。研究数では日本、一部で 実用化。中韓はキャッチアップ程度。
Niフリーステンレス鋼	実用化では米欧がリード。Mnフリーでは日本がリードするも実用化はまだ。
NiフリーCo-Cr合金	日本のみで研究。韓でキャッチアップ。
Niフリー超弾性合金	日本が圧倒的リード。
生分解性Mg合金	欧で既成合金を実用化するも不完全。日本は萌芽的 研究段階。
骨形成表面処理	米欧は停滞気味。日本で活発。中韓はキャッチアップ。 程度だが、数で圧倒。
機能分子固定化	欧がリード。日本では始まったばかり。中国が独自に 始めつつある。
低磁性合金	世界的に始まったばかり。

図 2.1.5-1 金属バイオマテリアル研究の国際比較

この分野の問題は、基礎と応用、実用研究の区別がほとんど出来ていないこと。例えば、iPS 細胞の研究は、現在は理学のレベル。工学のレベルまで行くには産業化するための相当な障壁があるが、報道ではすぐに実現可能だと騒がれ、話が一人歩きする。以前の ES 細胞の時も全く同じ現象が起きた。実現時期と長期的な投資方策を検討する必要がある。最近は、再生医療、ナノバイオ、ナノメディスン、ナノ医療と呼ばれる分野に集中的に研究資金が投入されてきた。その理由は出口を示しやすく、明快であること。しかしこれを実現できるかどうかは全く別問題で、実際にメーカーのレベルで実現したものはほとんどないというのが現状である。

実際に使用されていて性能向上が必要なものへの投資が必要であり、細胞の研究 も重要ではあるが、人工材料のさらなる性能向上を考える必要があるというのが、 今回の結論になる。

生体材料の研究は医療用の材料の開発・評価が中心だったが、再生医療が出てきてからはかなり再生医療にシフトしてきている。再生医療の中でも材料の重要さがだんだん薄れてきていて、細胞の研究にシフトしてきている。ただ、再生医療を最初に提唱した研究者は材料の成功なくして再生医療の完結はあり得ないとはっきり言っている。つまり細胞だけの研究では勿論駄目で、細胞が育って組織を作る足場となる材料がなくてはならず、ある程度以上の大きさのものになると細胞の研究だけでは再生医療の完成はありえない。これはすでに関係者は皆が認識していることでもある。

それからもう1つ、ナノテクが出てきてからナノテクとバイオの結合ということでそれを診療とか治療に応用しようという分野に投資が始まった。この辺になるとだんだん材料の研究なのかよくわからなくなってきており、システムとかデバイスの研究になってきている。出口の華やかさに惑わされてどんどん投資しているが、実際にはそれほど多くの製品は出てきていない。

金属系のバイオマテリアルの研究は注目されおり、実用化では欧米がリードしている。研究数では日本が多く研究しており一部では実用化されているが、外国製品が優勢であり、一番典型的な人工関節の日本での適用数をみると高齢化でどんどん伸びて来ているが、世界市場では日本のメーカーのシェアは非常に少なく、まだ欧

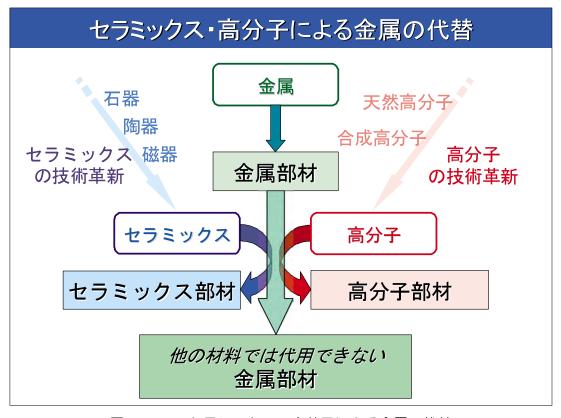


図 2.1.5-2 セラミックス・高分子による金属の代替

8

米には追い付けない。

最近注目されている材料はニッケルフリー合金で、ヨーロッパではニッケルアレ ルギーが深刻な問題になっているため、注目を集めている。アレルギーの発生は装 飾品によるものが一番多いが、この対策としてもニッケルフリー合金はかなり伸び るであろう。ニッケルフリーコバルトクロム合金というのは日本以外にどこもやっ ていない。ニッケルフリー超弾性、形状記憶というのは日本でかなり研究が進んで いる。それから生分解性のマグネシウム合金がヨーロッパで実用化しているが不完 全で、日本では萌芽的な段階にありいつ実用化出来るかわからない状況。その他で は、金属への機能分子の固定化とか、低磁性合金の開発等は世界的に始まったばか りであり、今後の動向に注意する必要がある。以上が、金属バイオマテリアルの国 際間の現状である。

金属材料を生体材料として使ってはいけないのではないかというイメージは大き い。セラミックスや高分子で色々な革新的な材料が出てきているが、どうしても金 属が必要な部材が残る。現在使われているもので、最近特に整形で注目されている のは脊椎固定器具。骨折固定においても金属使用というのは絶対に必要だ。それか ら人工関節。また、ステントとか塞栓コイルといったものは金属でなければいけな い。体内埋入部材、すなわちインプラントは80%近くが金属製だ。金属は機械的 な強度と靭性も大きいことから、他の部材では代用できないので、結局幅広い範囲 で金属が使われている。

# 金属の主な特性、種類、用途

# 耐食金属



ステンレス鋼、Co-Cr合金、 Ti, Ti-6Al-4V, Ni-Ti, Ta, Pt、Au合金、Ag合金など

> ネジ止め部位 大荷重付加部位 締め付け・結紮部位 構造維持機能 電極・リード線





脊柱固定器具、骨折固定材 人工関節-骨頭 埋め込み型人工心臓 心臓ペースメーカー、人工弁 ステント、ガイドワイヤー 血管栓塞用ワイヤー、クリップ 人工内耳•外耳 歯科修復物、矯正用具 歯科インプラント 磁性アタッチメント リーマ、ファイル 注射針、メス、カテーテル



図 2.1.5-3 金属の主な特性、種類、用途

# 金属バイオマテリアル目標・現状・達成予想

- 低毒性合金・Ti合金、Niフリー合金など
  - 一部達成実用化、5~10年以内に達成可能
- 低弾性率材料・β型Ti合金、多孔体など
  - 一部達成、5~10年以内に達成可能
- 硬組織適合化(骨形成・非形成)技術・HA被覆、表面改質など
  - 一部達成実用化、生体分子機能分子固定化に移行
- 軟組織適合化(細胞接着)技術・コラーゲン固定化など
  - ・技術的見通しなし、達成時期不明
- 血液適合化(細胞非接着)技術・機能分子固定化など
  - 5~10年以内に達成可能
- 抗感染(バイオフィルム非形成)技術・Ag含有合金、機能 分子固定化など・達成時期不明
- 非磁性・低磁性(NMR対応合金)・Co-Cr合金、Zr合金
  - 達成時期不明
- 生分解金属・Mg合金・達成時期不明

図 2.1.5.-4 金属バイオマテリアル目標・現状・達成予想

目標、達成状況、あるいは予想をまとめた。金属の毒性を示すかどうかは金属イ オンが溶出するかしないかで決まる。低毒性の合金開発が必要であり、ニッケルフ リー合金や新しいチタン合金によって解決されるかもしれない。骨折固定材では弾 性率があまり大きくてはいけない。これに関しては見通しがある程度出来ていて 10年位で達成できるであろう、と言われている。それから硬組織の適合化はセラ ミックスの複合化によって徐々に達成されているが、むしろ今の動きは生体機能を 持つ分子を固定化する方法の開発で、簡単にできる方法が必要。そしてこれは一番 重要なことだが、軟組織との接着は金属に限らずあらゆる材料で達成されたことが ない技術であり。コラーゲン固定なども試みられているが技術的な見通しは立って いない。セラミックスや高分子でも現在のところ達成の見込みなく、金属でももち ろんまだわからない、というのが現状。それから血液適合化というのはだんだん進 んできて、機能分子の固定化などで達成できるのではないか。最後の3つが重要 な課題で、1つは感染症の問題。これは金属に限ったことではなくて、体に人工物 が入るために感染症を起こしやすい。これは表面にバイオフィルムが形成するため で、バイオフィルムができない表面を作らなければならない。ポリマーなどではヨー ロッパでかなり研究例が報告されているが、金属では、ほとんど研究例がない状況 で、最近少しずつ研究が始まって来ている。ただ、実際にインプラントを摘出する 症例の殆どは感染症によるもので、これを防止することは骨を形成させることなど

CRDS-FY2008-WR-05

よりもっと重要な問題だ。MRI というのは画像診断に使用するが、強磁場で使用しなければならないため、非磁性、または低磁性の合金が必要であるが、これもなかなか達成時期がわからない。それからマグネシウム合金だが、色々なグループが生体に応用しようとしているが、出口が華やかで、マスコミ等にも取り上げられているが、実際には分解速度の調整というのは非常に難しく、達成時期は不明というのが現実。

生体材料の中で金属が何故地味に見えるかというと、セラミックスや高分子というのは生体機能性というものを非常に強調するために、凄い材料だと思われる。金属の場合は生体機能を発揮するということはあり得ず地味にみえてしまうというのが現状。但し、金属の方が実用化には明らかに近い。

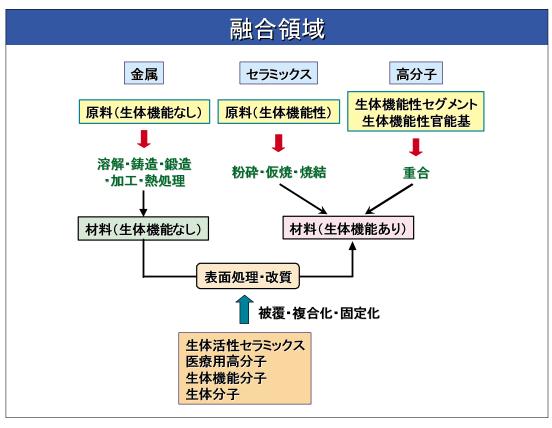


図 2.1.5-5 融合領域

融合的研究というのは絶対に必要で、高分子とセラミックスとの複合化、それから金属材料自身の構造を研究することで色々な力学的な機能、低磁性の問題を出すことが必要になる。実際臨床に使う時にこの様な造影性とか抗菌性も必要になる。

バイオマテリアル、生体材料ではどうしても最後の段階で許認可というものが必要なため、この点が他の材料とは違う。しかも臨床の現場での問題点をきちんと拾い上げ、しかも企業がそれに乗ってこなくてはならない。しかし、これが構造的になかなかできない。よって臨床の現場と材料の研究室、企業の3極からの提案で相互に動けるシステムが生体材料には必要である。それから人材のところで重要な

のは臨床と材料研究の橋渡しを出来る人がいること。また、長期的な問題に対応できる材料開発も必要だ。

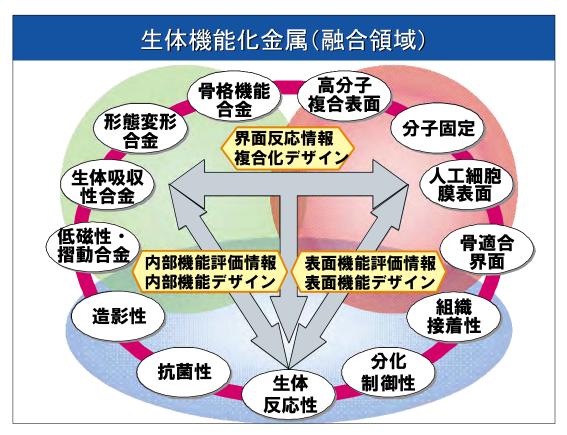


図 2.1.5-6 生体機能化金属

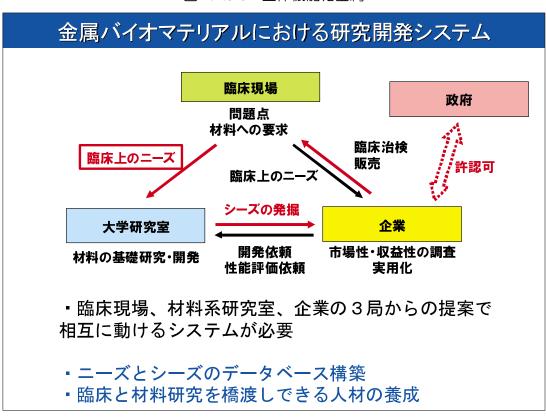


図 2.1.5-7 金属バイオマテリアルにおける研究開発システム

# 2.1.6 理論、計算科学:森永正彦(名大)

計算といえばやはり主流は電子論の計算にならざるを得ない。電子論の計算は近似計算であり、図 2.1.6-1 に示すように、それは 1 電子近似であり、また原子を振動させない断熱近似を使っている。非相対論の計算からスタートして、多体効果を入れた計算、そして非断熱近似、相対論計算へというのが世の中の計算の流れになっている。最近、相対論 DVME 法が開発されている。これには多体効果も入っており、相対論効果も入っている。このような計算をすることによって、結晶中の遷移金属イオンや希土類イオンの多重項エネルギー準位や吸収スペクトルの第一原理計算が出来るようになり、光学材料、固体レーザー材料への応用が図られている。一方、非断熱近似、すなわち有限の温度での近似計算も少しは試みられてはいるが、未だ発展途上である。それに替わり、統計熱力学と電子状態計算を組み合わせて問題を解決しようとするアプローチが通常取られている。例えば、その方法で自由エネルギーを求めて、状態図の計算などが行われている。

# 理論、計算科学と材料

# 電子状態計算

一電子近似、断熱近似、非相対論計算から

多体効果、非断熱近似、相対論計算へ

例: 相対論DVME (Discrete Variational Multielectron) 法の開発

Ogasawara et al., Phys.Rev. B64, 115413 (2001)

応用例: 結晶中の遷移金属イオンや希土類イオンの多重項 エネルギー準位や吸収スペクトルの第一原理計算

光学材料、固体レーザー材料への応用

# 非断熱近似 (T=0Kではない有限温度)での計算方法は未開発

→ 統計熱力学と電子状態計算の組み合わせ 自由エネルギーの表現、状態図の計算

図 2.1.6-1 理論、計算科学と材料

格子振動の第一原理計算は昔から行われている。例えば図 2.1.6-2 に示すように、 ソフトモードが観測され、相変態が説明されている。また、原子移動の第一原理計 算もされている。情報科学手法と第一原理計算との統合が重要であるが、先に述べ たように、有限の温度では統計熱力学的な取扱いをせざるを得ないのが現状である。 この外、マルチスケール・シミュレーションがあり、ナノレベルからマクロレベル までの計算が統一的に行われている

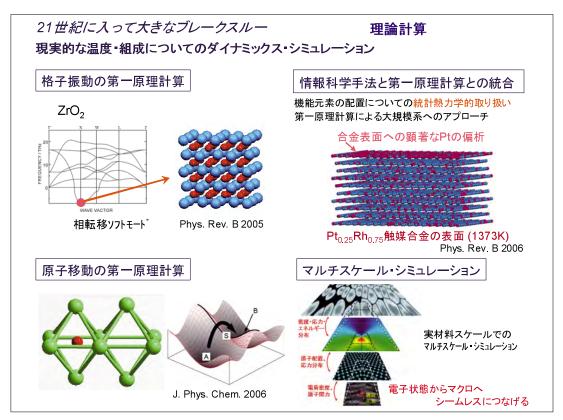


図 2.1.6-2 現実的な温度・組成についてのダイナミックス・シミュレーション

さらに、各種材料を同じ土俵の上で比較したいという要望があり、それに応えうる化学結合のエネルギースケールの新解析法として、エネルギー密度解析法(Energy Density Analysis)がある。これを用いれば、全エネルギーを構成原子のエネルギーに分配することができる。例えば、最近の水素貯蔵材料の計算結果によれば、化学結合様式の異なる全ての水素化物(金属系、無機系、有機系)が、同じ「エネルギー」の土俵の上で比較できることが分かっている。この解析を基に、「構成原子の顔」が見えてくるので、この方法は材料設計にも使える。この計算は物質を選ばないので、例えば酸化物の計算も可能である。

電子論から離れると、最近は色々な計算法がある。その中でも最近大きな進歩が見られるのは、Phase-field method という組織形成シミュレーション法である。これを使えば、組織が時々刻々とどう変化していくかということを自由エネルギーベースで解析できる。最近、計算が実験と一致するようになってきている。Phase-field シミュレーションは、ポリマー、セラミックス、金属のどれにも使える方法になっている点を、ここでは特に協調しておきたい。

材料新機能戦略についていえば、図 2.1.6-3 に示すように、従来のものづくりでは、物質の優れた機能があり、それを具現する材料を探索してきた。例えば、超伝導材料であれば、超伝導現象が出来るだけ高い温度で出現する優れた機能を持つ材料の探索を行ってきた。一方、新しいものづくりでは、新機能を新しい視点から作り込むことを目指している。機能を作りこむためには、当然その物質の性質を変える何

CRDS-FY2008-WR-05

らかの外部操作を加えなければならない。その 1 つの方法がプロセスである。も う1つは機能元素を添加することであり、これは元素戦略にも繋がる。如何に上 手に物質の潜在的な機能を引き出して、新材料に結び付けるかということがこれか らの新しいものづくりに必要である。プロセスと機能元素だけでなく、そこには当 然、計測・評価が入ってくる。この物質はこの機能であるという単純な割り切り方 ではなく、外部操作を加えて、潜在的な機能を掘り下げて、新機能を発現させるこ とを目指した材料機能工学を創成する必要がある。結論を言えば、プロセス(機能 元素)による新機能の創出は、新しいものづくりとして面白いテーマであると思う。

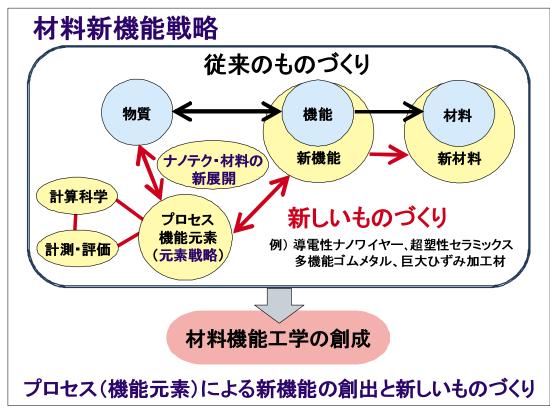


図 2.1.6-3 材料新機能戦略

加工プロセスに例をとれば、図 2.1.6-4 に示すように、物質の変形はマルチスケー ルな現象なので、マルチスケールなシミュレーションが必要となる。ナノレベルか らマクロレベルにいたる色々な計算法を使って変形機構を理解し、新しい材料の機 能を引き出す努力が必要である。最近報告されているゴムメタルは、冷間加工によ り多機能(インバー、エリンバー特性)を見事に引き出している。

図 2.1.6-4 加工プロセスのマルチスケール・シミュレーション

# 研究領域:「材料新機能」

# 一プロセスー計測・評価ー計算科学の異分野連携ー

- 1. 新機能発現のための要素技術の研究
- ・冷間加工による多機能の発現

(例:ゴムメタルのインバー機能及びエリンバー機能)

- ・機能発現元素の界面、表面、転位への局在化 (例:導電性ナノワイヤー、超塑性セラミックス)
- ・巨大ひずみ加工(形状不変加工)による大量格子欠陥の導入と 特異構造、特異現象の出現(例:高強度と高延性の両立)
- -機能制御のためのナノ計測および3次元可視化技術の開発
- ・機能制御のためのマルチスケール・シミュレーション技術の開発
- 2. 要素技術統合による環境・エネルギー材料の開発研究
- ・水素エネルギーシステムの触媒機能の評価と触媒設計
- 3. 「材料機能工学」の創成と多機能材料の開発研究
- ■新規多機能材料の設計と開発

図 2.1.6-5 研究領域『材料新機能』

図 2.1.6-5 に示すように、計測・評価、計算科学の異分野連携も重要である。 最近、 ナノ計測や3次元可視化技術等の研究が盛んに行われており、それらを組み入れ た新機能発現のための要素技術の研究も必要である。さらにそれらの要素技術を統 合させて、時代の要請である「環境・エネルギー材料」の開発研究に結びつけるこ とが重要である。それら一連の研究を基に、「材料機能工学」の創成を行う。併せて、 多機能材料の開発研究も将来性のある面白いテーマである。

#### 質疑:

- 一有限要素法のシミュレーション・計算では、個々の機能元素の効果については言 及できない。マルチスケールの計算を行い、機能元素も扱える計算が必要である。
- ーナノ部材の新展開のための計算科学には、物質のある限られた機能しか扱ってい ない。多くの機能を作りこむ方法についての議論が抜けている。
- 一新しいものづくりには計算科学の役割が非常に重要である。結果を説明するだけ の計算ではなく、性質の予測のための計算をしなくてはいけない。
- 一計算科学の弱いところは非断熱近似の計算をしていないことにあるかもしれな い。温度を上げた場合に熱統計力学を使うことは有用であるが、今後はできれば、 非断熱近似へのアプローチが望まれる。もう1つ電子構造計算の問題点は、全 エネルギー計算のみで終わっていることであり、全エネルギーのさらなる解析が 望まれる。その意味で、エネルギー密度解析法は面白い方法である。
- 一計算対象について言えば、触媒研究への応用が面白い。触媒は化学では大変難し い領域で色々な仮説があるが、計算が有効であることが最近分かってきている。 触媒研究は進んでいるが、まだ分かっていないことがたくさんあるので、この分 野での計算の役割は特に重要である。
- -機能がどうして出現するのかについては、まだ十分には分かっていない。すなわ ち、どの構造ユニットがどの機能に結び付くかということが分かっていない。こ れを解明し、新機能を作り出さなくてはいけない。機能を見つけるという従来の 物質探索ではなく、今後は機能を積極的に作りこむことが重要である。

# 2.2 半導体材料分科会/コーディネータ:金山敏彦(産総研)

この分科会では半導体という材料を議論することになっているが、半導体が使われるのは半導体デバイスであり、そこでは半導体以外の幅広い材料が組み合わされて初めてデバイスができている。したがって、半導体"材料"の議論ではあるが、デバイス的な視点も加味して頂いて両方のバランスをとった提言としたい。

半導体デバイスは種々の材料・プロセスの組合せであることから、以下が議論のポイントとなる。すなわち、①単独の材料の物性では特性は決まらない、②ナノレベルの材料集積が重要であり、界面特性が重要、③異種材料の本質的な融合が重要、④特性 modification 技術(プロセスひずみなど)が重要。

定量的にあまり細かな議論は出来ないが、俯瞰図に挙げる技術をどのくらいの重要性と実現性で考えるかということをチャート」の上でまとめてみたい。事前アンケートで、5年先、10年先、20年先という時間軸での重要テーマの設問があったが、時間軸で先のものは、実現される時間が先だというだけではなく、色々な不確定性が高いという意味も含まれると思う。またもう1つの尺度として、技術の重要性はどの程度のものか、例えば、不確定性は高いが、実現すればインパクトが大きい要素技術なのか、あるいはその技術が使われる可能性は高く、是非やらなければいけない技術なのか、という点も議論する。

本ワークショップでは、それぞれの分野での重要技術だけでなく、研究開発システム、あるいはそれをサポートするインフラについても必要な提言をまとめるという課題を頂いている。例としてシリコン LSI のナノレベルの集積化を考えると、今後ナノテクノロジーの基盤的な技術を使っていくことが当然必要だが、それは、そのままの形で技術実証ができるような問題ではない。非常に素晴しいナノテクの技術があっても、それが技術実証を経てある程度のデバイスの可能性を見極められるためには、微細化の可能性、スケーラビリティ、集積化、信頼性というような原理的な実証が必要で、これがある程度できないと、容易には次のステップに移れない。このためには技術に見合った試作設備が必要になってくる。単に加工サービスだけではなく、シミュレーションやモデリング、計測技術を結びつけた知識の統合が必要ではないか。この辺りはある程度戦略的に研究を誘導しなければならない。このようなことが、それぞれの技術についても当てはまるのかどうか、当てはまるとすれば、どのような形のものが望ましいのかということも検討したい。

<sup>「</sup>時間軸と技術インパクト軸チャートについては 3.1.2 半導体分科会の報告 の項を参照。

# 2.2.1 ナノエレクトロニクスにおける今後の材料研究: 知京豊裕 (NIMS)

シリコンの世界で使われている言葉で言うと、現在我々は CMOS 世代にいる(図2.2.1-1 参照)。そこでの研究課題はメタルゲート、high-k 材料、low-k 材料といった材料が目標になっており、その後は、II-V族半導体チャネルとか、ナノワイヤといった技術を導入していく。その先に Beyond CMOS 世代があると想定されている。現在多くの業界紙等を見ると、CMOS 技術の基軸はあまり変わらないだろうと考えられており、その基軸の上で Beyond CMOS 的な発想を取り入れていくという認識になってきている。

もう1つ我々が認識しなければいけないのは、例えば Beyond CMOS 技術が2030年からスタートすると仮定すると、それから10年前の2020年位までに、このデバイスを製品化するためのプロセス技術、製造方法がある程度確立していなければいけない。そのためには、その10年前に、どういう方法でこのBeyond CMOS デバイスを動かすか、どうやって集積化できるかということの基本的なコンセプトが固まっていなければいけない。そうすると、実は Beyond CMOS といっても、実はあまり時間がなく、2010年度位までに、少なくとも基本的な集積化ができる、あるいはロジックデバイスができるというようなコンセプトが実証されていなければいけないということになる。アメリカがグラフェン等色々なものに注力をして、むこう3年間のうちに答えを出すといっているのは、そういった事情がある。

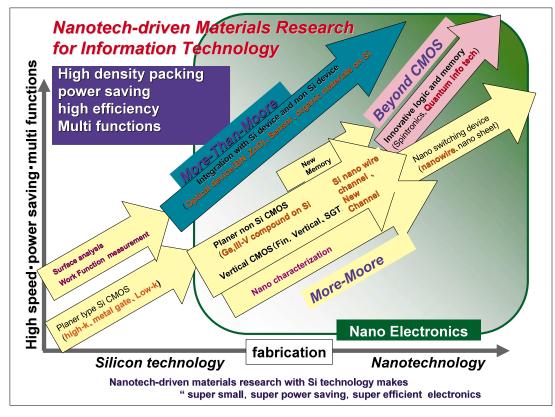


図 2.2.1-1 Nanotech-driven Materials Research for Information Technology

このような状況の中で我々がこれから注目していくべき切り口として、高密度化 と、もう1つは省電力について話をしたい。

今、ハイエンドサーバの消費電力が大きな問題になっている。マルチコアの導入 等で各PCは、消費電力が下がっているが、残念ながらサーバとルータの消費電力 に関しては増加傾向にある。

今年の4月に International Nanotechnology Conference(INC4)が東京で 開催され、その中で将来のナノエレと材料のトレンドが議論された。かつて高速デ バイスはバイポーラと言われていたが、バイポーラトランジスタの消費電力が年々 高まったために、低消費電力化の観点で、CMOSが 1990年代に登場した。それ により劇的に消費電力が下がったが、スピードの遅さを集積度でカバーするという ことでどんどん集積化が進んだ。それによりモジュール当たりの消費電力は大きく なり、今現在は CMOS といえども、消費電力はかつてのバイポーラなみになって しまった。これを桁で落としたいというのが多くの電機メーカーの期待である。そ れを実現するための1つの方向の最優先課題は、high-kメタルゲートであり、将 来の技術としての Beyond CMOS 技術である、というのが共通の認識となってい る。



図 2.2.1-2 Beyond CMOS 5 つの挑戦課題

例えば Beyond CMOS テクノロジーでは 13 の項目があったが、特に重要な点は、 電子やホールを使わない情報伝達、具体的にはスピントロニクスへの期待が非常に 高まっている。そういったもので情報伝達ができるか、つまり電子やホールが動く

ことによって熱が発生して、それが消費電力につながるので、こういうものを動か さずに情報伝達や利得がとれるか、ということが大きな課題になっている。またこ れはアメリカがスピントロニクスや、いろんなものに対して、非常に注力をしてい る大きな理由になっている。

電子デバイスの将来技術への流れという観点から、もう一度材料の原点に帰って 考察してみたい。例えば high-k 材料に関して多くの研究がなされているが、本当 に今までこの研究でベストの選択をしてきたのだろうか、という疑問がある。例え ば、ゲートリークは集積化による SiO<sub>2</sub> の薄膜化に伴うトンネル電流によるものと いう前提から、誘電率の高い HfO2 が選ばれ、さらに結晶化防止および相分離防止 の対策を行った結果、今の HfSiON( $HfO_2+SiO_2+SiN$ )という材料ができあがった。 これはあくまでも誘電率という観点から見た結果で、本当にこの材料でリーク電流 が収まったかというと、決してそうではなかった。というのは、実際の high-k のリー ク電流の原因は、トンネル電流ではなく、欠陥を介したリーク電流だったことが、 最近明らかになった。そこで今度は、材料の設計を欠陥制御の観点からもう1回 再構築した。すなわち、欠陥の少ない材料としてイオン性の高い材料、例えば Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を出発材料として、それをアモルファスにするために Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を加え、誘電率 を上げるために Hf を加える、このような発想が出てきても良いのではないか。こ れが今の候補となっている。したがって次の high-k を設計する際には、誘電率か らの発想ということを変えなければいけない。

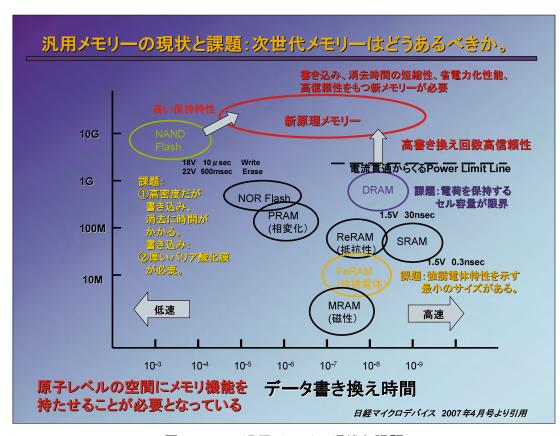


図 2.2.1-3 汎用メモリの現状と課題

次世代メモリがどうあるべきかということも重要な点である。消費電力、スピー ドという観点からは、どうしても電流貫通型のメモリは厳しい。電流が流れてしま うと、発熱に対しては弱いという問題があるので、例えばフローティングゲートの ように、電流がデバイスを貫かないタイプが望ましい。チャージの移動を電子でお こなうか、光をつかった原理でやるか、そのような新しい原理のメモリが必要で、 このようなところに材料の開発要素がある。

材料に関しては、理論計算を含め、早く合成をして、それを早くデータベース化 し、その新しい材料を早く回すという"ディスカバリーループ"が必要になってく る。

ナノエレを担う人材開発について少し言及する。今、電子工学を希望する若い人 達がいないということが問題になっているが、人材開発もこのようなデジタル世代 に受けるようなやり方もある程度必要である。アメリカの教育現場の試みとして、 シミュレーションをベースとしたラーニングシステムというのがメリーランドで行 われている。例えば装置に関して、制御を全部コンピュータ上でシミュレーション できるようにする。このシミュレータを使った実験をやり、装置の使い方をマスター し、いろいろなハザードに対して対応できる、ということが分かった後に始めて実 際の装置を使用させる(装置とのインターフェイスがつながる)。こうやって得ら れたデータを系統的にまとめ、その次の人がその装置を使うときには、このソフト ウェアに含まれた様々なパラメータをみれば、自己学習が出来るような形にする。 いわゆるデジタル世代が親しんだコンピュータというものを介して、材料研究をや らせるのがアメリカで今進んでいる試みである。こういうものを日本の現場も取り 入れていく必要があるのではないか。

ナノテク分野の特許に関しては、日本は「材料」まわりの基礎構造・製法特許を 重んじ、欧米ではアプリケーション特許を重んじる傾向がある。過去 10 年間の特 許累積数をみてもその傾向は明らかだ。なお米国のナノテク関連特許は急増してお り、1976-2002 年の関連特許のうち約80%の56,828 件を米国が取得している。

2005年の MRS での展示を見てきたが、非常に特徴的だったのは、ナノ研究を加 速するための非常に多くの評価装置が出現していたということである。例えばどこ にでも持っていける小型の AFM、あるいは TEM/SEM/STEM が一体になった、プロ セスモニタリングで使えるような装置が出てきていた。そういう観点からすると、 日本で最近注目されているテラヘルツ顕微鏡というのは非常に有効で、ギガヘルツ 帯の誘電率と誘電損失をそのまま評価出来るから、こういったものをうまく利用し、 新しいタイプの評価装置を立ち上げていくということが必要ではないか。こういっ た部分に対して資金投入するべきではないかと考える。

研究がスタートしてある程度研究が習熟していくと、そこで多く方向性が変わっ てくるが、その変わり方が日米で異なる。日本は、更に材料の研究に進み、材料研 究道のような、その道を極める方向に行くが、アメリカの場合はある時点までいく

と、標準化が起こり、ベンチャーが起こり、いわゆる実用化に移っていく。その結 果、実際にファンドリーの中で実現され、実用化を目指したプロトタイプに移る。 日本の場合、誰がどこで実用化の舵取りをするのかということを考えると、やはり 拠点は必要であると思う。

次世代電子デバイスのキーワード、これは今の事情を考えていくと"省電力化" および"高速化"が大きな話題になるであろう。現在のCMOS世代では、 high-k、メタルゲート、それから高周波応答性をいかに迅速に評価するかという評 価手法の開発も必要である。Beyond CMOS 世代では、特にスピントロニクスの 研究者に期待したいのは、原理ができるような現実的なスピントロニクスの話をし ていただきたい。それから人材育成、また拠点の必要性も同時に手を打たないとい けない。

最後にまとめると、やはり時間軸で考えると、材料開発を加速するための基幹技 術としての技術は当然必要である。これは例えば、ウェーハのサイズを揃える。非 常にプリミティブだが、やはり基幹技術として、共通の認識を持つ必要がある。そ して、近々のなかで技術インパクトが高いのは、新発想に基づくメタルゲートやメ モリ等、それから low-k 材料。こういったところは、現在の CMOS 延長線上にあり、 早くやる必要がある。それから次に来るチャネル材料、ロジック、それから利得を もつスピントランジスタ。また、大化けするかもしれない分子デバイスを、もう少 し先物として考えていければと思う。

#### 質疑:

- ーグラフェンは Beyond CMOS か。
- ーチャネル材料の1つとみるとCMOS世代に入るが、研究フェーズは相当探索的。 アメリカはグラフェンが本当に使えるかどうかを集中的に議論している。ただし、 上述のように Beyond CMOS 世代が来るとしても時間的余裕はそれ程ないため、 グラフェンに関する研究は向こう3年間で打ち切るといっている。
- 一俯瞰図で入れておくべき重要なキーワードは。
- ーテラヘルツ技術は重要。非接触で高周波特性を測ることが出来るのでいいプロー ブになるだろう。フェムト秒レーザを使うことでキャリアのダイナミックスを見 ることが出来る。例えば、チャネルの中を移動していく電子の様子を時間分解で 見ることができる。今まではシミュレーションのみで実際に見た人はいない。そ れが見えると素晴らしい。

# 2.2.2 スピントロニクス関連半導体材料:田中雅明(東大)

半導体デバイスは基本的にはキャリアの電荷輸送を使っており、一方、強磁性体を用いたデバイスでは巨視的な磁化、あるいはスピンが使われている。これらを融合させるとスピンの自由度を使った新しいエレクトロニクスができるのでないかという期待があり、国際半導体技術ロードマップ(ITRS)でも More Than Moore あるいは Beyond CMOS の候補にも挙げられている。

	磁性半導体と関連物質研究の進展				
年代	磁性半導体 希薄磁性半導体(DMS)	強磁性金属/半導体 ヘテロ構造	グラニュラー構造 強磁性微粒子/半導体		
60 ∼ 70	Eu-X (X=S, Se) 強磁性 CdCr <sub>2</sub> Se <sub>4</sub>				
<b>'80</b>	CdMnTe等 <b>II-VI DMS</b> MBE成長、量子井戸 巨大ファラデー効果	MBE成長 Co/GaAs, Fe/GaAs			
<b>'90</b>	PbSnMnTe (IV-VI) InMnAs, GaMnAs等 III-V 強磁性半導体 強磁性、ヘテロ接合 巨大磁気伝導, TMR	MnAl/AlAs, MnGa/GaAs MnAs/GaAs, MnAs/Si MnSb/GaAs 磁気異方性制御 異常ホール効果	GaAs:MnAs GaAs:MnSb 巨大磁気光学効果 巨大磁気抵抗効果		
'00~	(GaCr)N, GeMn, GeFe / 高T <sub>C</sub> 強磁性半導体(ワイ		(MRS効果) S 巨大MR CB、スピン起電力		

図 2.2.2-1 磁性半導体と関連物質研究の進展

図 2.2.2-1 に磁性半導体と関連物質研究の進展を示す。ここでは、1) 磁性半導体 (希薄磁性半導体)、2) 強磁性金属/半導体へテロ構造、3) グラニュラー構造、の3 種類に分類し、以下にその概略を述べる。

スピンに関連する半導体材料として、最もよく知られているのは磁性半導体であり、古くは 60 年代頃から、磁性半導体 EU-X(X=S, Se)や CdCr $_2$ Se $_4$  が研究されていた。80 年代頃から分子線エピタキシー(MBE)が使えるようになり、II-VI族化合物半導体に Mn、Fe、Co などの遷移金属元素を添加して混晶にした希薄磁性半導体(あるいは半磁性半導体ともいう)が作製された。これらの物質は半導体でありながら磁性を持ち、大きな磁気光学効果を示すことが知られている。CdMnHgTe はその大きな磁気光学効果を利用し、0.98  $\mu$ m 帯の光アイソレータの材料になっている。その後、80 年代後半にキャリア誘起の強磁性がIV- VI磁性半導体(PbSnMnTe)で発見され、さらに 90 年代に入ってIII-V族でも発見された

(InMnAs、GaMnAs)。以後、Ⅲ-Ⅴ族強磁性半導体 GaMnAs、InMnAs は材料科学、 物性物理、スピントロニクスデバイス応用などさまざまな観点から非常にさかんに 研究されるようになった。2000年以降になり、GaN、ZnO などのワイドギャップ 半導体に遷移金属をドープすると、室温以上の強磁性転移温度(Tc)をもつ強磁性 半導体ができるという予測から、ワイドギャップや酸化物の強磁性半導体が作られ、 材料研究の幅が大きく広がった。一方、Ⅳ族は研究が遅れていたが、2002年以降、 主にゲルマニウムを母体とした IV 族磁性半導体の研究が始まり、GeMn や GeFe が作製された。GeMn は強磁性を示す Mn 濃度が高いクラスターが磁性の起源で あるが、GeFe は真性の強磁性混晶半導体であるということが分ってきた。

磁性半導体以外の複合構造も興味深い研究がなされている。80年代から、強磁 性を示す半導体ベースの複合材料として、強磁性金属と半導体のヘテロ構造が作ら れるようになった。これらの金属間化合物は半導体とは全く違う結晶構造で、異種 物質間のヘテロ接合になる。一方、半導体と同じ閃亜鉛鉱型結晶構造を持つ CrAs や MnAs 等が数 nm の厚さの超薄膜やナノ構造で作製できるようになった。これ らはハーフメタル(後述)として期待されている。

もう1つの複合構造はグラニュラー構造というもので、これは半導体の結晶の 中に強磁性の微粒子を埋めこむ。例えば GaAs 結晶の中に、MnAs 微粒子を単結 晶性を保ったまま埋め込むことができる。このような材料では非常に大きな磁気光 学効果や磁気抵抗効果、磁気抵抗スイッチ(MRS)効果が発見された。最近では、 スピンに依存するクーロンブロッケードやスピン起電力といった興味深い現象も観 測されている。

上述のように、さまざまな半導体材料をベースとして、スピンや磁性の機能を示 す材料の研究が進んでいる。その中で、シリコンと整合性が良い™族ベース材料の 研究はあまり進んでいなかったが、今後は非常に重要になるだろう。シリコンデバ イス技術とスピンの機能や自由度を融合させると、
V族ベースの GMR、TMR デバ イスができ、スピントランジスタにも応用できる。特に MOS 型のスピントランジ スタができれば、トランジスタの動作とスピン依存出力を併せ持つデバイスができ、 不揮発性メモリ、あるいは再構成可能なロジックに応用できる。こうしたスピント ランジスタの作製と原理実証のための研究がなされている。

材料を中心とした課題を図 2.2.2-2 に示す。室温以上の Tc をもつ筋のいい強磁性 半導体が望まれる。ワイドギャップ材料ではいくつか報告されているが、なかなか エレクトロニクスに使う材料となると難しい。Ⅳ族ベース磁性半導体は、未開拓の 部分が非常に多い。特にⅣ族半導体(Si)に高効率でスピン注入出来るようなハー フメタル材料(図 2.2.2-3 参照: アップスピンのみフェルミ準位がバンド内にあり、 ダウンスピンとの状態密度の差で決まるスピン偏極率Pが100 %の材料)の形成は、 今後の大きな課題である。

# 課題(材料を中心に)

- ・室温以上のTcをもつ強磁性半導体
- ・SiまたはIII-V族半導体と整合性の良い材料
- 透明かつ磁気光学効果の大きい磁性半導体
- ・ 光る磁性半導体
- ・IV族磁性半導体は未開拓な部分が多い
- ・半導体(Si)にスピン注入できるハーフメタル(高スピン偏極)材料
- ・界面、デバイス構造との整合性

基礎物性 強磁性発現機構 高 $T_{\rm C}$ 化 磁性制御 キャリア制御

ヘテロ構造 スピン依存伝導 (GMR, TMR ...) 磁気光学効果 受動デバイス 二端子デバイス

能動デバイス 三端子デバイス 集積回路、システム ... Beyond CMOS

結晶成長、欠陥制御が重要!

図 2.2.2-2 材料を中心とした課題

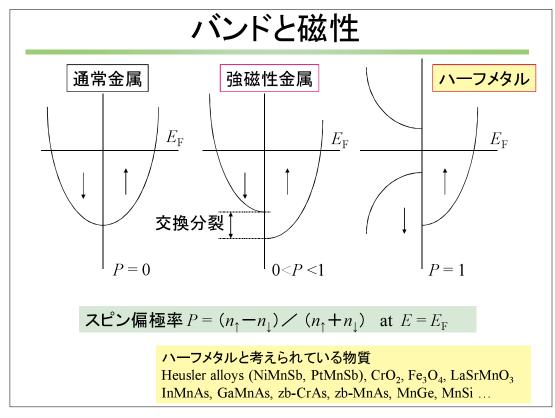


図 2.2.2-3 バンドと磁性

# スピントロニクスの研究課題

# さまざまな物質中における

スピン生成 ← 強磁性物質、磁性イオン添加、円偏光、

強磁場、核スピン

スピン注入 ← 強磁性コンタクト(スピン偏極電流)、円偏光

スピン蓄積 ← スピン緩和(長)

スピン輸送 ← 電場、拡散

スピン流

スピンホール効果

スピン操作 ← 磁場、ゲート電界、光

スピン検出 ← 磁気抵抗(GMR,TMR)、磁気光学効果、発光

スピン自由度の活用 キャリアスピン、磁性イオンスピン、磁壁、核スピン スピントロニクスデバイス

(不揮発性、低消費電力、非相反性、再構成可能ロジック、量子性...)

# 図 2.2.2-4 スピントロニクスの研究課題

スピントロニクス全体での研究課題を図 2.2.2-4 に示す。これらが現在研究対象になっているが、どれも満足に出来ているとは言えない。最近ではスピン流という概念が新たに出てきて、こういうものを積極的に使う研究も始まっている。また、キャリアのスピンだけではなく、固体中には磁性イオンのスピン、磁壁、核スピンもあるわけで、それらの物理とダイナミクスを理解し、積極的に使ってデバイスに応用する、という研究が重要になる。スピントロニクスは Beyond CMOS の候補といわれているが、応用に至る前に、まださまざまな材料技術を確立し、スピンに係わる物理を理解し、現象を制御できなければならない。従って短期的な研究で実用化される、というものではない。しかしながら、この分野は非常に研究の進展が早く、研究者層も厚い(日本には世界トップクラスの優れた研究者が多い)ので、不揮発性、低消費電力、非相反性、再構成可能、量子性... といったスピンの特長を生かした有用なデバイスができる可能性は高い。

デバイスに関する課題を図 2.2.2-5 に示した。なお、視野を半導体だけに限る必要はない。金属、絶縁体、強相関系、そのようなものを一緒に考えることが必要である。また現象そのものも、電気伝導、光物性、磁性、スピン物性と色々あるが、どれか 1 つにこだわる必要もない。材料、デバイス、回路、システムについても同様である。異分野との融合、横断的思考と広い視野、長期的な思考が非常に重要である。

# 今後の研究課題

# スピン機能 材料

- ・ 室温以上のTcをもつ強磁性半導体
- ・ 透明かつ磁気光学効果の大きい磁性半導体
- · SiまたはIII-V族半導体と整合性の良い材料
- ・ 集積化型(モノリシック)磁気光学デバイス

# 光-スピン デバイス

- ・ 波長可変発光素子・レーザ
- ・ スピン緩和時間の制御
- ・ 全光超高速光スイッチ、光論理ゲート

# 電子-スピン

- ・ 電界、光などによる磁化の反転・制御
- (伝導)デバイス・ 半導体と整合性のよい強磁性トンネル接合
  - スイッチ機能付き不揮発性メモリ素子半導体へのスピン注入、ゲート電界によるスピン制御
  - ・ 電力増幅機能とMR効果を併せもつスピントランジスタ

# 量子-スピン デバイス

- ・ スピンコヒーレンス長/時間の増大
- ・ 単一スピンの計測、制御
- ・ スピンを用いたqubit/量子計算素子

図 2.2.2-5 デバイスに関する課題

### 質疑:

- (図 2.2.2-4 で) 低消費電力というのは?
- 一これは非常に単純で、不揮発性メモリの機能があれば、使わない間は止めていられる。たとえばスピントランジスタで不揮発性のロジックができれば、消費電力を大幅に削減できるはずである。
- 一電流が流れなくてもスピンは流れるので、スピン流をうまく使えればかなり省エネ効果があるのでは?
- 一低消費電力あるいは dissipationless という効果を発揮するためには、トータルで消費電力が少なくなければならない。電流を伴わない純粋なスピン流が仮に dissipationless だとしても、電流を 1000 流したら 1 しかスピン流は生じない。そこが 1 つの問題で、スピン流自体は散逸がないと言われているが、それを作り出すために必ず電流が必要だ。短期的には、まずスピン RAM をきちんと作って市場で使われることが重要と思う。その後でそれをトランジスタにしてロジック素子にする。そうするといろいろ面白いことができる。例えば、再構成可能な論理回路ができたり、トランジスタだけで MRAM ができる。そこまで到達するには 5~20 年程度かかるであろうが、そのためにはやはり界面やナノ構造も含めた材料研究がきわめて重要である。

め

# 2.2.3 化合物半導体:吉田貞史(埼大)

代表的な化合物半導体材料・構造とデバイス・応用例を図 2.2.3-1 に示す。ここに示されているように、エレクトロニクス、フォトニクスなど非常に広い範囲で、 化合物半導体は使われている。

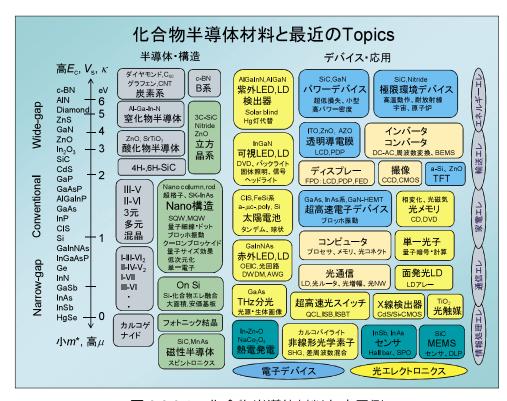


図 2.2.3-1 化合物半導体材料と応用例

# 化合物半導体材料研究開発の流れ

- (1)新半導体を加えて半導体デバイスの仕様・適用限界を超える
  - 軽元素系半導体(SiC、窒化物、酸化物、ダイヤモンド、B系) against Si, GaAs系 →軽元素系半導体の拡大
    - ex. InN(高In組成InGaN), B系、ZnMgO混晶系、強相関電子系 etc 立方晶系(c-GaN,3C-SiC) against h-SiC, h-GaN 無極性面成長

研究課題:完全結晶成長と半導体材料化基礎技術開発

- (2)新構造・組み合わせによって半導体デバイスの仕様・適用限界を超える
  - ・化合物半導体 on Si, on SOI
  - ・ヘテロ接合: DH-LD, HEMT,HBT
  - ・モノリシック: OEIC, PIP、タンデム、ハイブリッド、カスケード 研究課題:新構造・組み合わせの提案と構造形成技術開発
- (3) 微細化・ナノ構造により半導体デバイスの仕様・適用限界を超える
  - 量子効果デバイス:超薄膜、超格子、量子井戸
    - ・量子細線、量子ドット: 低次元化、クーロンブロッケイド、ブロッホ振動、単一電子
    - ・疑似混晶(規則混晶)、歪超格子、人工格子、フォトニック結晶

研究課題:ナノ構造制御技術と効果の具現化技術開発

- (4)他の物理系との融合により半導体デバイスの仕様・適用限界を超える
  - 電子系と格子系:ポーラロン
  - ・電子系とスピン系:スピントロニクス

研究課題:融合系の物理と新効果の具現化技術開発

図 2.2.3-2 化合物半導体研究開発の流れ

化合物半導体材料の研究開発の流れをみると、大きく4つの視点がある。1つは新しい半導体材料をデバイス利用可能な候補リストに加えるということで、例えば窒化物やSiC、ダイヤモンドのような軽元素系半導体の研究開発である。2番目は今ある半導体の組み合わせで、Si 基板上の化合物半導体やヘテロ構造など。3番目は微細化あるいはナノ構造化で低次元構造やフォトニック結晶など。4番目は他の物理系との融合で、ポーラロン(電子系ー格子系の相互作用)やスピントロニクス(電子系ースピン系)。いずれも従来の半導体デバイスの仕様と適応限界を超えようという流れである。

横断的・融合的な領域という視点から、今後重要となる研究領域として2つをとり上げる。1つは、ニーズからの研究領域で、エネルギーエレクトロニクスという領域。これはエネルギーのネットワークを半導体エレクトロニクスで制御しようという領域である。融合という意味は、情報処理を中心に発展してきたエレクトロニクス分野と、発生と貯蔵が中心のエネルギー分野との融合という意味と、もう1つ、エレクトロニクス分野でも、エネルギーを上手く使わないと、将来、情報処理の膨大な増加に対応できなくなるという状況から、両者を取り結ぶ融合領域という意味がある。

そこで、図 2.2.3-3 に示したようなエネルギーエレクトロニクス領域の構築を提案したい。研究開発課題は、革新的パワー半導体デバイスの開発であり、また大電流を流すので、周辺機器の開発も一緒に進めなければならない。そして、それらをシステムとして組み合わせるような、研究開発が必要である。

# 「エネルギー(半導体)エレクトロニクス領域の構築」

#### 目的•目標

エネルギー(電力)の発生、貯蔵、伝送を制御する回路の電気回路(真空遮断機、トランス等)から電子回路(半導体エレクトロニクス)へのシフトを、ワイドギャップ半導体等を用いた革新的パワー半導体デバイスを用いることによって可能にし、エネルギー(電力)ネットワークの革新をもたらす。

#### 研究開発課題

- (1) 革新的パワー半導体デバイスの開発: ワイドギャップ半導体デバイス開発
  - Si → SiC.Nitrides, Oxides, Diamond素子化技術
- (2) 革新的パワーエレの開発:周辺素子技術開発

回路技術、モジュール化技術、熱マネッジメント 構成要素のビルディングブロック化

(整流回路、コンバータ、スイッチユニット)

(3)各種電力ネットワークシステムの開発:スーパーノッド

分散電源-系統接続:太陽電池パネル制御 UPS,CPU電源、DC給電、200V給電、EV、HEV、FCEV 給電システム(BEMS, HEMS, マイクログリッド)

図 2.2.3-3 エネルギーエレクトロニクス

米国では CPES (Center for Power Electronics Systems) という組織があり、 NSF から全体の 50 %位の予算が出されている。5 大学がメインになって、教育と 先端的な研究を行い、それに多くの会社が協力して新しいパワーエレクトロニクス の世界を進めている。その中のキーワードとして Electro-Magneto-Thermo-Mechanical Integration という言葉があり、全ての材料技術の集結が必要である ことが謳われている。

欧州では ECPE (European Center for Power Electronics) という組織がある。 こちらは企業中心で、その回りに大学が参加しているが、やはり一番最初に "Advanced Education"が挙げられている。このような CPES や ECPE に相当す る組織、システムが日本にはない。

シーズの視点から重要な研究領域は「ハードエレクトロニクス」である。これは SiC、窒化物、酸化物、ダイヤモンド、ボライドという新しい軽元素系半導体材料(図 2.2.3-5) を加えることによって、デバイスの領域を広げていく。軽元素系材料は、 もちろん個々には少しずつ違う物性や応用分野を持つ材料であるが、共通のニーズ や課題を持っており、それらをきちんと統括して研究するようなマネジメントが必 要ではないかという提案である。応用の1つは上述のエネルギーエレクトロニク スであるが、それだけではなく、情報通信や過酷環境下動作デバイスへの応用にも 広がっていく。

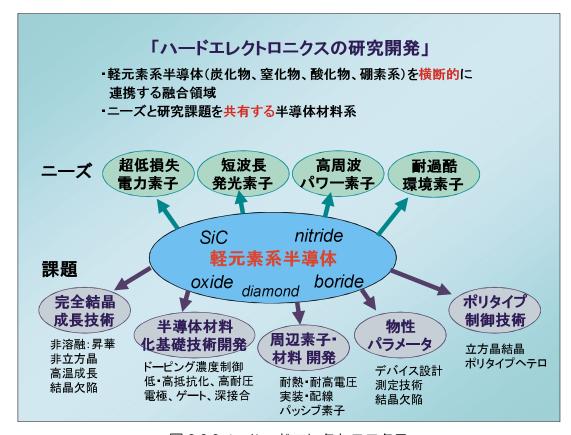


図 2.2.3-4 ハードエレクトロニクス

ハードエレクトロニクスの研究開発における課題として以下が挙げられる。すなわち、1)軽元素系半導体物性値データベース構築、2)完全結晶育成:欠陥制御技術確立、3)素子の高エネルギー密度化・小型化のための周辺材料技術、4)軽元素系半導体 on Si、on SOI、5)立方晶系結晶育成、6)ポリタイプ制御、7)新ワイドギャップ半導体材料探索(ボライド系等)。

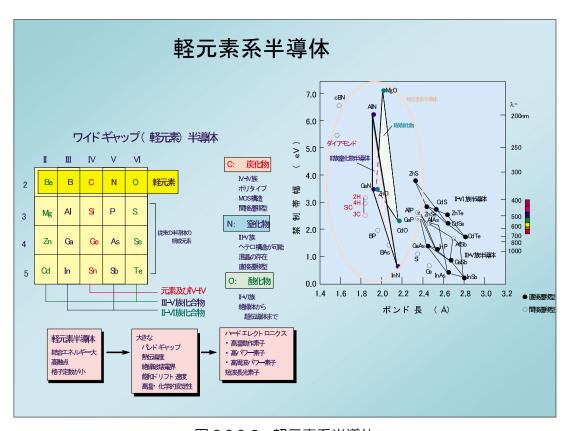


図 2.2.3-5 軽元素系半導体

研究開発を進める上では、常に材料に立ち返る必要があるが、現状では材料研究が終わると、次はデバイス、デバイスの次はシステムとなり、研究の上流に戻れないのが問題だ。応用指向のプロジェクトでは、成果(実用化や起業)を問いすぎるあまり、基礎研究がおろそかになっているきらいがある。応用を追いながら、その基礎となっている研究が十分に行え、「ノウハウ」ではなく、理屈が分かった「材料科学」として残せるような研究システムが必要だ。

# 質疑:

- -化合物半導体 CMOS、あるいは Si-CMOS チャネルに高移動度Ⅲ V族半導体を使おうという研究が盛んであるが、うまくいく可能性は?
- CMOS として使うのか、化合物半導体は化合物半導体らしく使うのか(例えば HEMT)で、やり方が違うと思う。勿論両方あってよいが。On Si というのはシ リコンテクノロジーとの融合というのが大きい。化合物半導体からの視点では

基板としても使いたい。

- 一完全結晶という話が出たが、例えば CMOS チャネルだけの成長でも必要か?
- 一完全結晶はハードエレクトロニクスの研究課題として挙げた。新しい半導体材料 をデバイスにするためにはこれがキーになる。この技術が確立されないと、デバ イスの性能限界が物性限界ではなく欠陥限界になってしまうからだ。

# 2.2.4 太陽電池新材料:野々村修一(岐大)

太陽電池における新材料という観点からの開発課題を述べる。これまでいろいろな太陽電池材料の開発が行われているが、2030-2050年に向けた新材料がないというのが現状であり、したがって、そのための材料探索は非常に重要な課題である。メーカーでも、次世代の太陽電池開発のための人材と新しい材料の基礎研究が不足しているという危機感がある。

2007年の太陽電池生産量は全世界で3.7 GW であるが、日本の生産量を見るとここ数年伸び悩んでいる(図2.2.4-1)。それに対してヨーロッパが伸びている。これはドイツから始まって、スペイン、その他のヨーロッパの国々に波及していった Feed-in Tariff(電力の固定価格買い取り制度)の政策の成功例である。それにも増して一番の伸びを示しているのは、ここではその他と書いてある中国、台湾勢である。

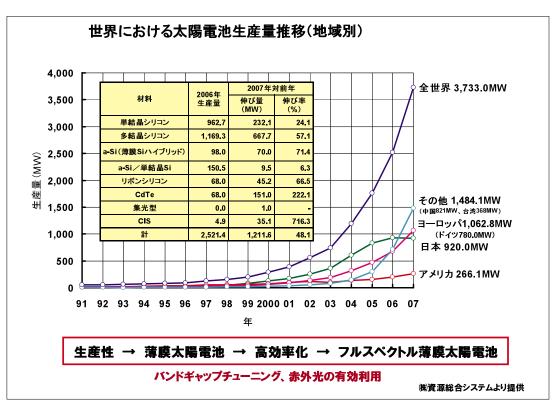


図 2.2.4-1 世界の太陽電池生産量推移

次に太陽電池用材料の研究開発課題について述べる<sup>2</sup>。高効率化の観点から、太陽光のスペクトルを有効に利用するための、いろいろなバンドギャップの材料が必要となる。例えばアモルファス Si(a-Si)だと可視光しか吸収しないので、もっと長波長の赤外で吸収があるバンドギャップの小さい薄膜半導体材料が必要となってくる。これをずっと突き詰めると、太陽光スペクトル全体にわたって色々なバンド

<sup>2</sup>研究開発課題を整理した図については、3.1.2 半導体分科会の報告の項参照。

ギャップを持つ材料の開発が必要になってくる。

バルク結晶 Si 太陽電池は、単結晶とポリ Si があるが、価格と生産性の点ではポ リ Si が主流。この場合重要となるのは粒界の不活性化技術である。このようなバ ルクの Si だけでなく、薄膜やナノ結晶の場合にも欠陥の不活性化技術は非常に重 要である。

色素増感太陽電池では、色素の特徴をいかして可視光は通過し赤外光だけを吸収 するという太陽電池の試みがなされている。

バンドギャップを変える技術としては、組成制御のできる化合物半導体が有力候 補であるが、環境低負荷の観点からは Si が良いというニーズがある。Si でバンド ギャップを制御するには量子ドットという方法があり、研究開発が進められている。 また、いろいろな材料、例えば CIS (CulnSe<sub>2</sub>)、a-Si、微結晶 Si、SiGe 等の数種 類のバンドギャップを用いた多接合型の太陽電池により効率を上げるという研究が 始まっている。究極的には広い範囲に渡ってバンドギャップを調整できる材料が必 要で、多接合フルスペクトル薄膜太陽電池が、次の段階としてある。

高効率太陽電池実現のためには、連続的にバンドギャップを変えられる技術が重 要で、候補として例えば金属内包 Si クラスレートから金属を脱離したゲストフリー Si クラスレートがある(図 2.2.4-2)。この新材料はバンドギャップが 1.8~2.0 eV であり、理論計算では間接遷移から直接遷移に変わっている。そうすると薄くても 吸収係数が大きい可能性がある。これと同様の Ge クラスレートとの混晶を用いれ

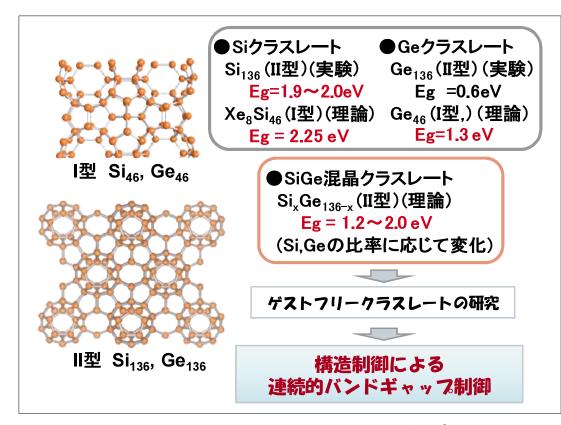


図 2.2.4-2 クラスレートによる連続的バンドギャプ制御

ば、広い範囲で連続的にバンドギャップを調整することが可能となる。現在行われ ているクラスレートの研究は、超伝導や熱電変換素子がメインで、太陽電池に応用 するところまでいっていない。クラスレートというのは一例であるが、このように バンドギャップチューニングが可能な新材料開発のための基礎研究をプログラムと して組んでもらえると太陽電池の裾野が広がる。

もう1つの提案は、無機と有機を融合して新しい材料ができないかというもの である。赤外光はなかなか発電に寄与しないが、赤外光を2つ使って(2光子吸収) バンド間遷移を起こさせることができれば、非常に効率のよい太陽光発電が実現で きる。色素増感太陽電池を作る時に、色素と ZnO を電解析出すると、ZnO が結晶 化してその中間に色素が入ったという経験がある。アルコール系でこの色素を溶か してしまうと、奇麗なポーラスの電極が出来ている。これを利用した超格子形成と いう可能性がある。

2 光子吸収によるバンド間遷移では中間バンドが必要である。光合成ではそのよ うなプロセスがあり、それからの類推で、構造制御による複合分子で同様のプロセ スが実現できないか。不確実性は大きいが、無機の枠から出てもっと広い範囲の材 料が利用できる。基本的には無機と有機の複合材料によるバンドギャップ制御の可 能性という提案である。

## 質疑:

- ーアモルファスシリコン太陽電池はどのような状況か。
- ーアモルファスに関しては限界がある。また劣化の問題は解明されていない。
- ーアモルファス半導体の出番がもっとあってよいように思うが、何かアイデアは?
- 一そのアイデアを出す研究者が減っているのが一番問題だ。太陽電池が活性化して きて企業は基礎研究をもうやっておらず、基礎研究の人材は減ってきている。た だし、若手の学生にとって太陽電池への関心は高く、優秀な人が入ってくる。
- 色素増感太陽電池の課題は?
- 一やはり全固体化ができないと長時間の駆動が難しい。色素自体は色々なものが作 られているので、見込みはあると思う。有機と無機が合体できたらいろいろなバ ラエティが生まれるのではないかというのが夢だ。

# 2.2.5 ナノカーボン半導体材料: 畠賢治(産総研)

ナノカーボンに対して従来のクラシックカーボンがあり、これは活性炭、カーボンファイバ、グラファイト等である。一方ナノカーボンには、フラーレン、カーボンナノチューブ、グラフェンがあり、これらは見事に0次元、1次元、2次元に、新旧で対応している。違いは、構造が原子レベルで定義できるかということである。

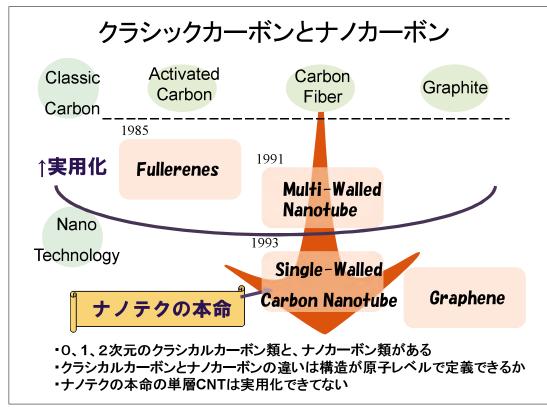


図 2.2.5-1 クラシックカーボンとナノカーボン

カーボンナノチューブ (CNT) とグラフェンの電子状態というのは非常に面白く、 逆格子空間の六角形の頂点おいてのみ、πバンドとπ\*バンドが接している。この ような材料は他にはない。CNT はグラフェンを丸めた構造で、1 次元のためさらに 許容状態が制限され、巻き方(カイラルティ)によって金属にも半導体にもなる。

CNIの面白さは、定義可能な限界までの複雑性といえる。この複雑性を解消していくという材料のプロセスが進化するたびに新しい研究領域が生まれている。 CNI は全研究分野を代表する研究領域になっている。CNI の研究は現在でも拡大しているものの、サイエンスとしては最盛期を過ぎ、成熟期に入っている。一方、グラフェンの研究は急速に立ち上がりつつある。残念ながらグラフェンでは日本は存在感を示せていない。



図 2.2.5-2 CNT の特性と用途

電子デバイスへの応用では、CNT-FET は Si-FET を凌駕するポテンシャルを持っている。課題は金属 CNT の存在で、このために、トランジスタを 100 個作っても100 個全部を動作させることはできない。もう1 つ集積化技術がないことも課題である。

弾性的性質を利用したナノメカニクス(MEMS)では、AFM 探針、ナノピンセット、不揮発性メモリなどへの応用に関する論文が Nature、Science に掲載されている。課題は、単一デバイスでの実証のみで、研究室レベルの研究で終わっていることである。

構造制御(カイラルティ制御)については、CNTのフォトルミネッセンス測定で構造同定が可能になったことが、CNTサイエンスの発展に大きく貢献した。しかし分離できるのは特定のカイラルティのみであること、および低収量であることが課題である。

CNT の成長は非常に難しく、初期のころは材料がなかなか手に入らなかったが、水分を添加すると、大量に CNT が出来るという発見があった(スーパーグロース法)。この方法で、不純物がなく配向した CNT ができるようになった。これにより、工業的量産の道が開け、CNT を構造が決まった形で集積化することができるようになってきた。

グラフェンは、2004年に単離に初めて成功して以来、非常に高い電子移動度を持っていることや、様々な2次元の自由電子系に近いということで今非常に注目されている。新しい発見が毎年出ている状況である。

今後重要となる研究領域の課題で、どのように予算を投入したらよいかという基 本的な考え方を提案する<sup>3</sup>。サイエンス、プロセス、アプリケーションという順番 で実用化に向かうとした場合、CNTはプロセス、アプリケーション、グラフェン は現在サイエンスの段階にある。日本は大きく遅れているグラフェンの基礎科学に 予算を全力投入すべきである。まだ研究の端緒なので、実用化については言及せず、 サイエンスとして取り扱う。特に若い人に携わって欲しい。一方 CNI は、今まで お金を使った分をきちんと社会に還元することを目指すべきではないか。そのため にプロセス、アプリケーションに予算を投入することが大事である。その場合、人、 物、技術、分野の融合が非常に大事になってくる。

# グラフェン

# 物性・機能

- 1層の炭素シート
- 半金属
- 半導体としても利用可能
- 移動度: 15,000cm<sup>2</sup>/Vs以上。理論 的には100.000cm<sup>2</sup>/Vs以上。
- 熱伝導率:約3.000W/K/m
- 機械強度: 1,060GPa
- 二次元電子系
- スピントロニクスへの応用
- 超伝導

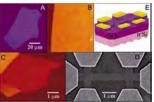
# 経緯

- ・ 2004年 初の単離(英マンチェスター大)
- 2005年 二次元電子系としての性質
- 2006年 バンドギャップの調整法
- 2008年 化学的分離法開発

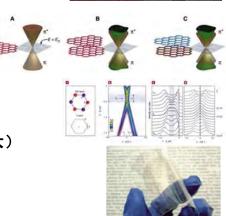
# 新しい発見が相次ぐ熱いサイエンスの場



単一 CNT デバイスから集積化 CNT デバイスへの移行として、インテグレート CNI デバイスを提案する。この集積カーボンナノデバイスを実現するためには信 頼性、制御性がある CNT のデバイス製造プロセスが必要になってくる。また CNT は CMOS には全くできない領域に踏み入ることができる。例えば印刷技術ででき るデバイスが将来おそらく実現するだろう。そうするとプリンタブル大面積でフレ キシブルなデバイスが実現し、アクティブデバイスとして様々な未来の能動デバイ スを駆動する素材として使える可能性がある。



Science 2004



一方 CNT が主役のデバイスだけでなく、CNT が脇役という使い方もたくさんある。他のナノ材料と組み合わせて、新しい革新的なデバイスができるだろう。その時には化学・物理・ナノテク・材料・プロセスの融合が行われなければならない。

複合化の例として、イオン液体と組み合わせて長い CNT を使うと、CNT のゲルが出来る。これをキャスティングして、フィルムを作る。それを用いてアクチュエーターが出来る。こういうものは実際に今企業が実用化研究をやっている。それは素材屋と、化学屋、そしてプロセス屋が手を結んで連携、垂直連携することによって進められている。さらにこの先に、例えば CNT とイオン液体と相溶性のあるゴムを溶かし合わせて、伸び縮みしても非常に高い導電性を持つゴム材料が開発されている。このゴム材料を配線として有機トランジスタアレイを接続して、全方位にストレッチしても大丈夫なようなストレッチャブルなデバイスが実現されている(東大)。これは材料と化学とプロセスが融合して初めて生まれる新しい研究だ。

以上述べたことは構造制御という切り口でまとめることができる。複雑な CNT の構造をどうやって制御するかが重要で、CNT のポテンシャルを引き出す技術、金属半導体分離技術、究極的にはカイラルティを完全に制御する技術がある。 More Than Moore として既存の CMOS との融合、Beyond CMOS で、プリンタブル大面積・フレキシブルデバイスがある。ユキビタスデバイスの中の 1 つのコンポーネントとして CNT が使われ、部屋中のあちこちにこのようなデバイスがある、そのような最終イメージを考えている。グラフェンに関しては、全然だめかもしれないし、物凄く化けるかもしれない、そういう大きな不確実性を持っている。

融合促進のための研究システム提案に関しては、CNTでは異分野融合を促進するための必然性をもった垂直連携が必要ではないかと思う。事例を図 2.2.5-4 に示す。強力な者同士が連携して WIN-WIN の関係を構築し世界との競争に勝つための戦略施策である。

# WIN-WINの垂直連携事例 スーパーグロースの実用化とスーパーキャパシターへの応用

産総研 超高効率成長 (スーパーグロース) シーズ技術



日本ゼオン(化学・材料メーカーNEDOーRJ 安定したゴム事業をベース(基幹) ハイテク素材で高収益(短期) ゴム材料に変わる基幹事業として CNTIC注目 日本ケミコン(電気化学・デバイスメーカー) 電界コンデンサーの世界トップメーカー 次世代の技術として スーパーキャパシターを開発 従来の活性炭電極を凌駕する CNTに着目

# 必然性がある強者による連携によるWIN-WINの関係

- 素材メーカーとデバイスメーカー
- ・シーズとニーズ
- ・国と企業
- →実用化へ向けて工場設計・投資段階に

図 2.2.5-4 WIN-WIN の垂直連携事例

# 2.2.6 ITRS ロードマップからみた課題: 粟野祐二(富士通研)

米国の SRC の下にある NRI (Nanoelectronics Research Initiative) では、今後研究すべき Beyond CMOS の 13 項目のリサーチベクトルを挙げている。これはかなり良く練られている。図 2.2.6-1 は、そのうち特に重要と位置づけられている最初の 5 項目を示す。

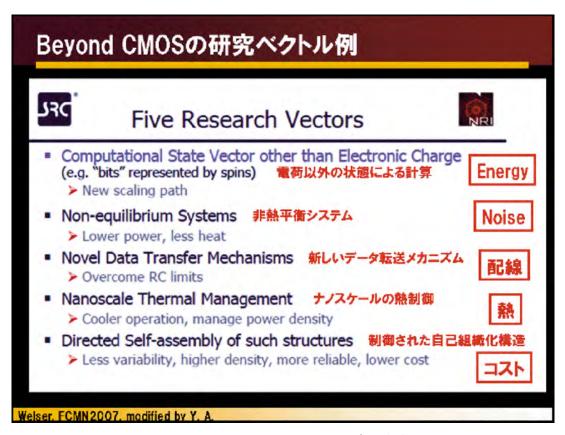


図 2.2.6-1 Beyond CMOS の研究ベクトル

最初の、電荷以外の状態変数を使う計算という中にはスピン等が入っている。それから非熱平衡システム、新しいデータ転送メカニズム、ナノスケールの熱制御、自己組織化などがある。それぞれは、上からエネルギー、ノイズ、配線、熱、プロセスコストに関係する内容で、我々から見てもやはり重要だと思われるポイントであり、それぞれにブレークスルーが必要というのが Beyond CMOS の研究ベクトルになっている。

上述の NRI では研究拠点を合計 4 拠点(WIN、INDEX、SWAN、MIND)作っている。それぞれ大学中心だがメーカーもテーマ選定や運用面でかなりバックアップするという構造が既にできている。

め

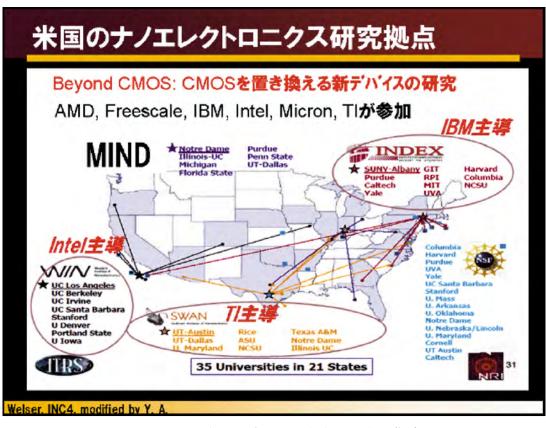


図 2.2.6-2 米国のナノエレクトロニクス拠点

それぞれの拠点が取り組んでいるテーマは Beyond CMOS のリサーチベクトルをブレイクダウンしたものになっている。たとえば WIN では状態変数にスピンを使うデバイスのテーマなどがかなり多い。

それぞれ上述のリサーチベクトルを分担しているように見えるが、リサーチニーズの中のどれをやっているかという分布を取ると、実は偏っている。重要と認識してはいても、それに対応する手当がまだ十分なされている訳ではない。ヨーロッパも、例えば熱非平衡や熱マネジメント、データ転送等の新しい技術はあまりやられていない。この辺は日本も同様である。

ITRS ロードマップの活動組織として、日本では JEITA(電子情報技術産業協会)の中に STRJ(半導体技術ロードマップ専門委員会)が設置されており、その中の ERD (Emerging Research Devices)と ERM (Emerging Research Materials)ワーキンググループがナノエレクトロニクス関係のロードマップを担当している。日本の ERD では図 2.2.6-3 のような図を描いている。ナノマテリアルがどのように使われるかというと、More Moore の領域も先々はナノマテリアルになり、またボトムアップのテクノロジーの部分はナノマテリアルを使っている。More Than Moore の中でも NEMS などはナノマテリアルを使っているので、そういう意味では先のところはほとんどナノマテリアルが入ってくる。

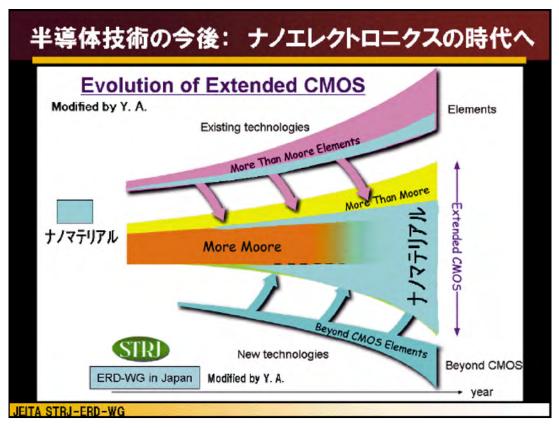


図 2.2.6-3 半導体技術の今後:ナノエレクトロニクスの時代へ

ERM (Emerging Research Materials) とはどんなものかというと、代表的なものを図 2.2.6-4 に示した。

ITRS が ERM ワーキンググループを新しく作った背景には、LSI が抱えている困難な技術課題の解決には、もはや材料まで踏み込んだブレークスルーが必要であることがあり、そうした新材料に関する技術的あるいは時間的要請を明らかにすることが、ERM のゴールとも言える。ITRS はリソグラフィ、パッケージング、トランジスタ等、色々なワーキンググループに分かれており、今それぞれのグループのニーズを ERM として纏めようとしている。それから世界中にある潜在的能力のある研究の芽を調査し、ニーズとのギャップを明らかにする。今後重要となる材料技術は何かという情報を発信するのが ERM の役割と言える。材料系は主に低次元材料(1次元、2次元、グラフェン等)、巨大分子、自己組織化材料、強相関材料、スピントロニクス材料、などが ERM としてすでに入ってきている。

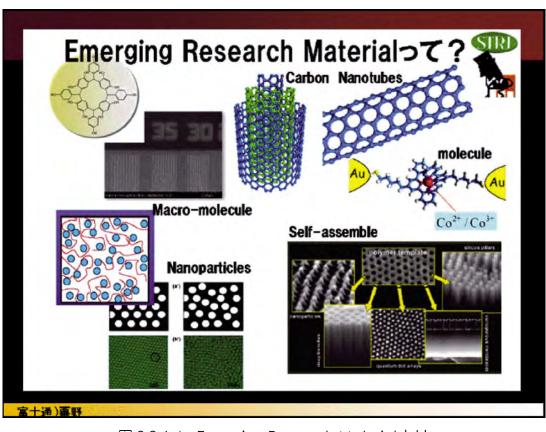


図 2.2.6-4 Emerging Research Material とは

カーボン系ナノ材料としては、1次元の状態を使うナノチューブやナノワイヤと、 2次元の状態を使うグラフェンがある。グラフェンに関しては、IBM でグラフェン のトランジスタを作っているが、製法、エッジ制御、ドーピング等、技術課題が多 く残されている。

分子エレクトロニクスに関しては、配線の部分まで分子で作る等の新しい動きが あり、以前と違う新しい切り口がいくつか出てきた。CMOS LSI 上にナノワイヤク ロスバーで配線を作り、各ナノワイヤに例えば分子デバイスで機能を入れるという ような CMOL というアイデアが提案されている。

スピンを使ったデバイスでは、スピン MOSFET や、TMR/CMOS を融合したタイ プがあり、これらの2つはスピントルク転送デバイスというカテゴリーに入る。 さらに電荷は移動せず、スピン流やスピン波が伝播するスピンデバイスの提案もあ る。スピン材料に関しては色々な材料系が考えられているが、室温以上のプ等、 課題が多い。

複合金属酸化物に関しては、酸素空孔の問題等が残っている。強相関系を使うこ とで、所望のロジックが全部組めるか、動作速度や動作電圧、等の課題も今後重要 になる。

配線のための ERM では金属 CNT のナノワイヤが挙げられている。 リソグラフィ のための ERM では、レジスト材料として、解像度、速度、エッジラフネス等の観 点でナノマテリアルへの期待が大きい。またインプリント材料、自己組織的な効果を用いるブロック共重合体などの技術開発が出てきている。

FET を作るためのプロセス(フロントエンドプロセス)のための ERM としては、例えばドーピングのばらつきをなくすようにドーパント位置を 1 原子ずつ制御する、決定論的ドーピング技術が提案されている。また自己組織的エッチングやクリーニングのアプローチも ERM で考えられている。

最近のトピックスとして、先週サンフランシスコであった ITRS のロードマップ 委員会では、いくつも提案されている Beyond CMOS デバイス候補の中で、今後 リソースを投入すべきもの、さらに詳細なロードマップを作るべきものは何かというテーマが、ERD と ERM のグループで討議され、順位付けが行われた。事前の電話会議で 7 候補まで絞り込みを行った。 7 候補とは NEMS、コレクティブスピンデバイス、スピントルク輸送デバイス、原子スイッチ、カーボンナノ、単電子、ナノワイヤクロスバーである。最終的には 75 %以上の同意が得られた結論として、カーボンベースのナノエレクトロニクスを推薦することに決定した。カーボンベース材料に含まれているのはナノチューブとグラフェンである。 ITRS に非常に関わりの深い、NRI や SRC 等では、今後の研究リソースの配分等にも、この結果を反映させていくものと考えられる。グラフェンやナノチューブが何故選ばれたかというと、実はこれらの材料は非常に高い移動度を持つことから、コンベンショナルな FET のチャネルという切り口で有望であるだけでなく、スピンのリラクゼーションタイムが長いという特徴から、Beyond CMOS デバイス材料という切り口でも発展性があるということで、今回選ばれた。

これらの ERM がいつ頃出てくるのかということは 2007 年版の ITRS では扱っておらず、2009 年版にはこのような情報を入れようと取り組んでいる。また ERM では、並行して地球環境、安全性等の ESH についてもメッセージを出そうと考えている。

# 2.2.7 情報処理デバイスの超微細化・高性能化の課題:金山敏彦(産総研)

これまでの議論の再整理にもなるが、CMOSの超微細化と高性能化は、現在のスケーリングを推し進め、さらに色々な材料を入れていくという流れと、もう少し alternative なことを考える場合の2つに分かれる。その場合、かなり幅広い知見を入れないといけないので、研究体制も必要である。喫緊の課題では、材料、(配線)手法、界面制御がある。バリスティックあるいは高移動度材料、薄膜トランジスタ材料の後、どこかで低次元系が要る。低次元系を使いこなすためには必ずコンタクト問題が非常に大きくなるので、ナノレベル半導体/金属コンタクトの課題は挙げておく必要がある。また、ばらつき問題も含めた課題を解決するためには、なるべくばらつきの少ない自己組織的な構造形成を使いたいので、最終的には原子レベルで自己形成してくれるようなプロセスが欲しい。

Beyond CMOS と言ってしまうと非常に幅が広くなってしまうが、そこに行く前に、CMOS そのものの原理限界をあげる材料があると思う。例えば強相関系のように、1 電子のキャリアを外部電界で制御するのではない動作原理があり得る。

CMOS の技術的な問題の 1 つにパワー限界があるが、Beyond CMOS を探索してそれで解決する問題かどうかというのは良く考えておく必要がある。例えばMPU の消費電力はどんどん増えているが、携帯用のものは実は増えていない。デスクトップも同様で、100 W で頭打ちになっている。これは冷却能力がリミットされているので、それ以上の仕様を使わないようにしているだけである。すなわち、それは使い方の問題である。確かに CMOS 回路の消費電力はずっと上がっているが、CMOS 単体のパワーは劇的に下がっている。その下がった分を低消費電力化に使わないで、むしろ機能向上に使ってしまっているので CMOS 回路全体としては上がっているという訳である。このようなことから考えると、CMOS を越えるデバイス動作原理の開発というのは、非常に探索的な研究は別として、それ以外のテーマは可能性があるのはまだ見えていないのが現状である。この論理素子の熱限界、物理的な限界に照らした時に CMOS はどういう位置づけにあるかということは良く見ておく必要がある。

基本的には動作原理の限界は動作温度の熱エネルギーkTであるが、現状のCMOS は 2 つの点で、はるかに大きなエネルギー損失で動作している。1 つはオフ状態の漏れ電流を避けるために、しきい値電圧がkT (25 meV)の約 40 倍になっている。現実問題として、これは 1 V から下がらなくなってくる。もう 1 つは、CMOS の論理演算では、論理演算に必要なパワーの 4 倍のパワーを 1 演算で使っている。あとは電荷の数で、(電圧×電荷数)の分だけエネルギーが増えている。この意味で、現状では、まだ kT に比べるとかなり大きい。逆に、ここに迫ろうと思えば、実は比較的近くまで迫り得るということを意味している。すなわちCMOS でもかなり原理的な限界に近いところまで行き得るものだということである。

ITRS ロードマップの延長線上を見ても、ハイパフォーマンスの動作電子数は、1 演算あたり 10 を切るくらいだと書いてある。これが単電子になるのが本当に良い かどうかは別問題として、数電子で動く。そうすると電源電圧を下げられればかな り kT に近いところまで近づく。他のどんな手段を持ってきても、先程のサーマル バスの中で埋もれて論理演算をやっている限りは、kT 限界を超えることはできな い。それを考えると、CMOS と本当に対抗できるようなものは、今のところない のではないかと思う。

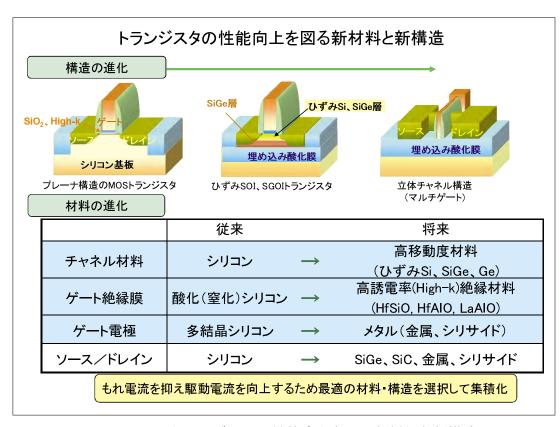


図 2.2.7-1 トランジスタの性能向上を図る新材料と新構造

という訳で、CMOS の高性能化のために色々な材料を入れる、CMOS の延命を図るという意味での新材料の導入が続いている訳で、メタル high-k ゲートスタックが今量産に入りつつある。さらに、マルチゲート、バリスティック、それをさらに延命しようとすると、低次元化。同時にシリコンフォトニクス等で、インタコネクションの方のパワーロスをさげる、あるいはどうしても SiGe 系ではだめならばもうすこしエキゾチック材料に出て行く、さらに、エキゾチック材料で、かつ、低次元化して延命を図る。

次にはもう少し分子レベルの材料が延長線上にくる。今のところグラフェンは可能性が非常に見えているという事では特記すべき材料であるが、まだグラフェンと言い切る必要はない。

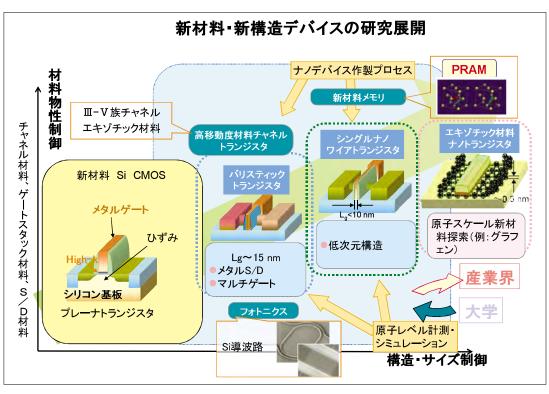


図 2.2.7-2 新材料・新構造デバイスの研究展開

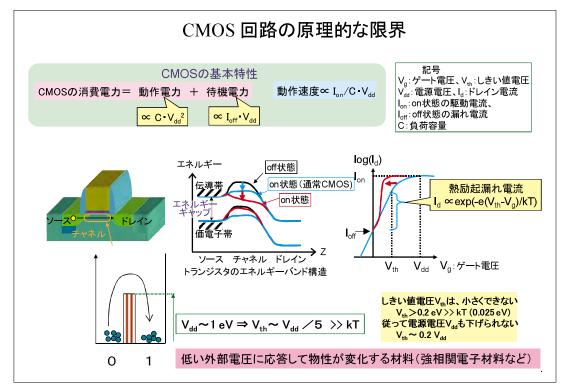


図 2.2.7-3 CMOS 回路の原理的な限界

さらにその先で、おそらく普通の CMOS の限界がくると思われる。オン/オフの漏れ電流の比がボルツマンファクターで決まるので、上述のように kT の数 10 倍の動作電圧を使わざるを得ない。1つのチャージ(1電子、1ホール)に対して外部ポテンシャルにきくという動作原理を取っている限り、この限界は避けることはできない。これを打ち破って、より電源電圧を下げて、kT 限界に近づこうとすると、このような 1 粒子モデルは避けなければいけない。可能性の 1 つは強相関系である。スピンもあり得る。また分子を動かすのも 1 つ。今のところどれかが非常に本命だというのはないように思われる。むしろそのようなお互いの情報を知りながら、研究が進む。ニーズ側からいくとこういう状況にあるということを知りながら色々な研究を組織的にやるという方が良い。

# ナノレベルトランジスタに最適の材料は?

	影響する トランジスタ特性	Si	SiGe	III-V	CNT	グラフェン
バンドギャップ	$I_{ m off}$	0	Δ	⊚~×	Δ	×
キャリア濃度・速度	$I_{ m on}$	Δ	0	0	0	0
ドーピング	$I_{ m on}, I_{ m off}, V_{ m th}$	0	Δ	Δ	×	×
表面・界面安定化	$I_{ m on},V_{ m th}$	0	Δ	Δ	0	0
コンタクト	$I_{ m on}$	0	Δ	Δ	Δ	Δ

総合的な特性が必要。自己形成的な界面構造・電子状態。

図 2.2.7-4 ナノレベルトランジスタに最適の材料は?

もとになるアイデア、基本コンセプトは材料側から出てくるので、そういう新しい種を探すための基盤的な研究は広くやる必要があるが、ある程度その種が出てきたら、次はもう少し、方向性を明確にした総合的な研究開発を行う必要がある。

もう 1 つ、このようにある程度の芽が出てきたものを育てるためには、何らかのシステムが要る。必要な要件を満たすような研究拠点、そこでは人材育成とともに、知識が集中されるようなものを日本に幾つか用意していく必要がある。

8

# 2.3 無機材料分科会/コーディネータ:木村茂行(未踏協)

無機材料科学の考え方の変遷

# 無機材料科学の考え方の変遷

- ◆ 熱力学と相平衡の時代
  - \* 新材料は安定相
  - 利用特性は化学組成と結晶構造に依存
  - \* セラミックス原料が天然から合成へ
- ◆ 組織・構造制御と粒界の時代
  - \* 相のみでなく組織(texture)も制御して材料特性を改善・向上
  - \* 粒内転位および粒界の挙動を理解し、新性能を引き出す
  - ⋄ 電子顕微鏡などの観測・分析技術の大展開
- ◆ メゾスコピックな現象の存在感拡大の時代
  - ※ 微細粒子の表面エネルギーと粒界相の相互作用
  - ⋄ ナノサイズのファイバー、シート、特殊形状物質の出現
  - \* 物質中の電子の挙動に関する理解の大きな進展
  - バッファー層を介したエピや時間依存化学反応による材料合成
- ◆ ナノテクノロジーの時代
  - ⋄ ナノメーターの空間と量子効果発現
  - ⋄ ナノサイズ物質の人為的操作技術の展開
  - トップダウンとボトムアップ
  - ⋄「ナノテクノロジー」の実用的成果への過剰な期待
- ◆ ポストナノテクノロジーの材料開発的発想はあるか

図 2.3-1 無機材料科学の考え方の変遷

まず、無機材料科学の考え方の変遷から述べたい。大体 1960 年代ぐらいまでは 熱力学と相平衡が無機材料研究の基盤であった。新しく出てくる材料は安定相で、 利用特性が化学組成と結晶構造にほぼ依存していた。天然原料から合成原料に変 わってきたのが 60 年代である。

70年代になると組織構造制御と粒界の時代になる。相だけでなくて、テクスチャー組織も制御すると材料特性も変わることが分かり、また同時に粒内の転移、そして粒界の挙動がセラミックスの世界でわかり、これを利用する範囲が広がった。この時代になって顕著になってきたのは、測定技術や電子顕微鏡による観察技術の普及である。

80年代に入ると、メゾスコピックな現象の存在感が大きくなり、微粒子の表面エネルギーと粒界相の相互作用という現象が出てきた。

80年代の終わりころから90年代にかけて、ナノサイズのファイバー、シート、コーンが出てき、物質中の電子の挙動に関する理解が大きく進んだ。これは80年代終わりの超伝導体、高温超伝導体が出てきて、そのメカニズムはいまだに明確ではないが、その電子の挙動に関して理解が進展した事が大きく寄与している。またこの時代、何の変哲もない材料の合成技術も大きく発展し、これは次の時代のナノ

テクノロジーにつながった。

ナノテクノロジーの時代で、メゾスコピックからナノメートルまで連続的に理解が進んだ。このあたりから量子効果が発現する。ナノサイズの物質は人為的な操作でいかようにでもなってきたというのが80年代終わりから90年代にかけてである。ナノテクにはトップダウンとボトムアップがある。トップダウンは今までの技術の継承だが、ボトムアップが出てきたのは2000年に入ってからである。このような時代にあって、ナノテクノロジーの実用成果への過剰とも言える期待が形成された。

# 研究開発を効率的に進める方法

# 研究開発の効率的手法

- ◆ 合成・特性評価・材料物性の三要素
  - 新物質・新複合素材の開発では必須
  - ※ 三要素のバランスの取れた活用
- ◆ シード主導型研究は研究開発のリニアモデル適応型(大学や国研)
  - システム改革が求められている
  - ⋄ 研究者から見た国の研究開発システムのあり方は?
  - ⋄ 自由に安価に使える高度な実験施設の共用化
  - ⋄ 「選択と集中」は適切に行われているか?
- 二一ズ主導型研究は高度なマネジメントが必要
  - \* 基礎研究は発散型だが、ニーズ主導型研究は収束型
  - \* 出口志向のマネジメントは経験が重視されている(まだ、暗黙知の世界?)
  - ※ 来年から「革新的技術推進費」による集中投資→目利きによるマネジメント
- ◆ 研究開発に異分野融合が求められている
  - ∗ 異なる発想の出会いが新規な成果(イノベーション)を生む、という経験に基づく
  - ⋄ 同時にスピード感への要請が時代の流れ
  - ⋄ ロードマップの重要性
- ◆ 研究開発にcost-effective化は可能か
- ◆ 材料の環境対応の考え方

図 2.3-2 研究開発の効率的手法

研究開発を効率的に進めるには、合成・評価・物性の3要素をバランスよく活用することが必要である。

シード主導型の研究展開というのは、リニアモデルの典型例だが、出口志向の研究開発にはマネジメントの経験が重要だ。さらに近年は、異分野融合が求められている。そして、研究開発にコストエフェクティブということがありうるのか、あるいはデジタイズすることは可能なのか、効率化が叫ばれているが評価は容易ではない。それから最近、特に問題になってきているのは環境対応で、これを材料開発にどういうふうな視点で取り込むかも極めて重要である。

# 国際競争力

今回のワークショップは国際競争力を高めることが最終ターゲットである。国際競争力の定義も曖昧だ。実験施設の共用化、特に高価な実験設備を整えたところをどのように展開していくか、課題が多い。研究者連携システムをどのように最適化するか。それから、共用施設の管理担当、この研究者のキャリアパスは未だに明快な答えが出ていない。それから国際連携、WPI やグローバル COE など現在進められているが、制度作りが明確でない。融合促進は国内に限定したものではないはずである。

# 今日のプレゼンテーション内容

皆さんからの今日のプレゼンテーションは専門の分野領域を俯瞰的に、大きな流れを展望されることを期待している。それから、融合領域や新領域も意識的に含めてお話しいただきたい。また、融合促進のための研究システム提案あるいは、研究推進のために重要と思われる点を指摘してほしい。ご自身の研究成果の話しではなく、公的資金を投入すべき研究領域や課題を特定する際に有効な情報を提供してほしい。また、重要となる研究領域を指定のフォーマットに列挙していただきたい。

# 俯瞰図の修正案作成について

- ・メンバーのそれぞれが一番詳しい分野の状況を直接的に出すことが重要である。 無機材料の分野を広くカバーして欲しい。
- ・バイオセラミックスの材料では、伝統的なバイオセラミックスは出尽くし、次にでてくるのはコンポジット化とか、ハイブリッド化という時代だろう。この方向でプレゼンしていただきたい。
- ・俯瞰図の一番下の無機セラミックスが8種類の材料になっているが、必ずしも これにこだわらず、プラスすべきものがあればその指摘を是非お願いしたい。多 孔質材料は独立させておいた。
- ・俯瞰図を作る目的はこの中からファンディングすべき重要な研究領域を引き出す ことである。図の上部に書かれているのは、そのデバイス・部材、それから下側 の物質材料、横に並んでいる項目と結びつけたときに途中の段階としてどういう ものが現れるだろうかということをこの図で示せるのではないかと思っている。

# 2.3.1 強相関無機物の機能開拓-基礎研究が発信する革新的デバイス: 高木英典(東大)

デバイス研究開発の世界では「革新的」という言葉や、「環境」、「持続成長可能」というキーワードが氾濫している。技術への要求も次第に高まっており、室温超伝導の実現や、ZT=1を上回る熱電変換材料、電池についてもかなりの高性能を要求されるようになってきている。産業界からは、5年後までの研究開発のロードマップは出来ているので、大学では10年後を考えて欲しいといわれる。今は真に革新的なキーワードを考えなくてはならない時であり「基礎からの骨太のアプローチ」という言葉を考えている。ここでは、強相関電子材料としての遷移金属、特に酸化物の機能開拓をアプローチの1つとして挙げる。(図 2.3.1-1)

# 「革新的」機能への要請 持続成長可能な社会の構築 環境への配慮

- ー省エネ/高集積度デバイス
- 一超伝導 「室温」
- 一高効率熱電変換材料 ZT>1
- 一蓄熱材料
- 一雷池

5年後:現在の材料の改質 ロードマップ描ける 10年後:真の革新 基礎からの骨太アプローチ

強相関電子材料 一遷移金属化合物特に酸化物 (有機物)

図 2.3.1-1 「革新的」機能への要請

東工大の細野教授の研究チームによって、鉄系の新超伝導物質が発見された。我々材料研究の立場としては、ショーウィンドーのようにさらに色々なタイプの物質を取り揃えておきたい。 転移温度をさらに上げたいという要求も高い。 現在最も高温である HgCaBaCuO の発見から既に 15 年余りが経過しており、この臨界温度を超える新物質の発見が今こそ期待される。(図 2.3.1-2)

強相関金属は、金属の様でもあり磁石の様でもあり、金属だが高エントロピーである。高エントロピーの状態を使う強相関熱電材料という視点も、高温超伝導の研究にはある。エントロピーが高いことから、電子蓄熱という発展もあり得る。また

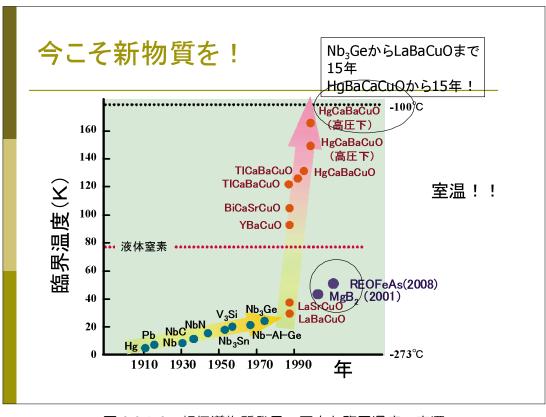


図 2.3.1-2 超伝導物質発見の歴史と臨界温度の変遷

デバイスとしてのスマートな機能を引き出すことも重要な展開である。この種の材料は少しの刺激で固まったり溶けたりするという、外的刺激敏感性が高いことも重要なキーだ。また、マルチフェロイックスでは、磁性と強誘電性が共存している。この2つの自由度が結合しているので磁場の向きによって強誘電モーメントも変わる。この相競合を使った新しい機能を引き出すことができるということも1つの特徴である。

メモリで今一番使われているのはフラッシュメモリであり、次の候補として FRAM や MRAM があるが、最近、強相関の酸化物を使った RRAM という概念が 出てきた。RRAM は集積度が高く、安く出来、消費パワーが他に比べて少ないと いう非常に高いポテンシャルを持っている。

半導体は電子の出し入れによりトランジスタが動作するが、微小にすることによって電子の数が少なすぎるという問題が起きてきた。しかし、相関電子デバイスではその影響を受けにくい。相間材料は外的刺激に敏感なため、今後新しいアプローチになるだろう。半導体界面のエネルギーギャップはバンドベンディングを描いて理解するが、相関材料におけるギャップは同じではない。半導体の物理に対応する学問を、相間デバイスでも構築していかなければならない。(図 2.3.1-3)

今、革新的な材料が求められているが、物質探しは思わぬところから新たなものが出てくる。取り組むべき研究としては「新型超伝導」の領域を提案したい、それによりさらなる新物質の発見や、思わぬ現象・特性の発見を期待したい。(図 2.3.1-4)

# 相関電子エレクトロニクスムーアの法則の呪縛を逃れる。



半導体デバイス

**1**0<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup> 程度の電子の 出入り

電流の担い手がもともといないので外的刺激に敏感

**10 nm**の程度になるとデバイスあたり平均一個の電子しかない

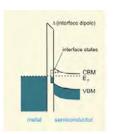


相関デバイス

**1**0<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup> 程度の電子 たくさんいる。

本来なら外的刺激に鈍感だ が絡み合い効果で極めて敏 感

**10 nm**の程度になっても電子はたくさんいる。



バンドベンディン グ? 相関半導体物理

図 2.3.1-3 相関電子エレクトロニクス

# 最後に

ー見あれもこれもにみえる。 しかし、強相関にキーワードでつながっている 物性基礎研究から飛び出してきた

革新的デバイス機能開拓:超伝導、熱電などと絞らずに、 ある概念のもとに生み出される多彩なポテンシャルを拾うアプローチが ある割合で必要。

特に物質探し。思わぬものがでてくる。

有機と無機 相関電子の概念は同じ 共通の舞台で物質・機能開拓 新物質の開発を大事に - 出口イメージを見せにくいのが難点

鉄系超伝導 日本 対 中国

JPARC SPring8 との連携。ただし新物質開発が置き去りにならないように。

図 2.3.1-4 最後に

# 2.3.2 外場誘起による物性及び形状制御による無機系材料の多様性発現: 平尾一之(京大)

# ガラスはナノテクの宝庫

ガラスの用途は建築、自動車、エレクトロニクスなど多岐にわたり、ナノガラスとして扱うディスプレイ、プリンターのセルフォックレンズ、情報用光学部品などが伸びてきている。ディスプレイ用のガラスは直接目に見えないがナノテクノロジーの宝庫である。1個の泡で不良品となるため、泡を消す技術として、酸化還元平衡技術の利用、イオンの添加、泡の大きさを減少させるための適正な粘性、クラック発生防止として外面に施すレーザー処理の方法、内部に高密度層を作るなど、技術的対策が検討されてきた。

情報通信用ガラスも非常に発達してきた。波長多重通信には熱膨張が課題であった。光ファイバーの温度が上がっても熱膨張がないようにガラスの中にナノの結晶を析出させ、そのバランスによって300°Cくらいまでなら熱膨張はない。今、光増幅用 Er ドープファイバーもこの透明結晶化ガラスで作っている。

また、光中継器として使うラマン増幅器は 1 個 1 個作るのではなく、ナノイン プリントといってナノスケールの細工をした鋳型に高温融体を流入し、ナノオー ダーの精密寸法をもつガラスを成形する。この技術もナノテクノロジーである。

次世代の液晶ディスプレイ用のガラスはサイズ 3m × 3m で泡は全くなく、(茨城県の面積にピンポン球の大きさ 1 個以下)、レーザーで熱処理をしているのでクラックも入らず、厚みは 3mm か 5mm になっている。ガラスのダイシングにフェムト秒レーザーを使うと、歩留まりが上がりコストも下がる。また、フェムト秒レーザーを当てることで、ガラスの中に屈折率分布を作ることができ、多様な用途が期待される。

# 無機セラミックス分野の研究開発現状と国際競争力について

ナノマテリアル関連セラミックス、エネルギー関連セラミックスについては日本の技術は世界をリードしている。今後も更に競争力を維持すべきである。環境関連の無機・セラミックス材料は耐環境性・耐熱性に優れ、しかも地球に豊富に存在する環境にやさしい材料であるため、脱 CO<sub>2</sub> という点からも研究開発が加速している。

研究開発の現状と国際競争力を図 2.3.2-1 のように整理した。

# 無機・セラミックス分野の研究開発の現状と内外の流れ

# 国際競争力について

# <u>ナノマテリアル関連セラミッ</u>クス

- 無機材料は周期律表のほとんどの元素をカバーし、ナノ構造、結晶、非晶質、形態なども多種多様であり、こ れらに由来する特性の発現も無限に近い。日本はナノマテリアル分野では世界をリードしているが、今後も、 さらに競争力を維持すべきである。
- 特に、ナノ多結晶材料・ナノガラス・ナノ金属・無機コンポジット材料、有機・無機ハイブリッド材料やさまざまな 形態のナノ粒子(たとえば(ナノチューブ、ナノワイヤー、ナノシート、ナノファイバー、ナノロッド)やナノコーテイ ングプロセスは、材料分野における揺籃期に当たるが多くの新機能が期待できる。
- これからのユビキタス社会でますます発展する電子情報通信産業への革新材料提供 機能性新材料・ 新商品開発が必要だが、それらは省エネルギーや環境負荷の少ない材料でもあるべき

#### エネルギー関連セラミックス

- エンジニアリングセラミックスの生産技術は我が国が圧倒的な国際競争力を持っている。
- 地球温暖化やエネルギーセキュリティへの対策が急務になっている。将来的には省エネ・脱炭素材料社会に 向けた新たなプロセスの開発とその産業への展開、さらにエネルギー消費の少ない材料への転換(SiからSi C)に今後の成長が期待され、そのための技術開発をさらに加速していく必要がある。
- 太陽電池なども第3世代電池としては大幅な変換効率向上と生産効率を両立した全く新規のセラミックス材料 が求められる。

## 環境関連セラミックス

- <u>・無機・セラミックス材料は耐(対)環境性にすぐれているし、地球に豊富に存在する環境にやさしい材料であり、</u> <u>研究開発を加速する分野である。</u>
- 環境戦略 一温室効果ガス削減に資する革新的プロセス技術
- エネルギー・資源戦略 ― 環境調和型断熱ガラス製造技術、高熱伝導・低抵抗電子材料開発
- 環境快適化および新規医用材料提供 ー 新規ウエラブル環境センサー材料、再生医療材料、新商品開発
- エコマテリアル(非鉛系圧電材料)開発においては、元素に頼らない、ナノ構造制御により物性の拡大を目指 す材料開発

図 2.3.2-1 無機・セラミックス分野の研究開発の現状と内外の流れ

# 無機・セラミックス分野に期待される成果等について

ナノ関連セラミックスの応用は光情報技術やディスプレイ、メモリ、携帯部品な ど多岐にわたっており、機能性新材料の開発が絶えず求められている。

エネルギー関係では、炭化ケイ素や窒化アルミ、フッ化物の単結晶はマスクや医 療材料、パワーデバイスへの応用などに潜在的な需要があるが、高性能化、大型化、 低コスト化などの壁があり開発は余り進んでいない。ドイツが先行している。環境 調和型ガラスやセラミック製造技術も重要である。

我々が持っているインターグラッドというガラス分野のデータベース(物性―組 成一構造一機能の関連)は、材料・プロセス開発の迅速・効率化に役に立つ。セラ ミックス全体でデータベース構築が必要である。

今、原料燃料の危機的状況にあり、出口製品だけではなく、加工、プロセス、特 にプラズマやレーザーを用いた斬新な技術開発が期待されている。

期待される成果について、(図 2.3.2-2) のように整理した。

# 無機・セラミックス分野に期待される成果等について

# ナノマテリアル関連セラミックス

- 機能性新材料・新商品開発 ··· 光情報技術革新、快適環境創造をもたらす(たとえばデイスプレー、高密度メモリー、ケータイ部品)
- 無機素材を左右する高純度・ナノ粉末製造は我が国が優れた技術を持つが、長期的経済的な 理由で、海外に生産が流れている傾向がある。当問題は国内でのさらなる技術革新により解 決できる。
- 無機材料は周期律表の大部分の元素をカバーし、構造、形態も多種多様であり、ナノレベルの配向制御により革新的新機能(たとえば高温磁石)の生まれる可能性が大いにあり、世界を先導している。

### エネルギー関連セラミックス

- 炭化ケイ素や窒化アルミ、フッ化物の単結晶は高性能化・大型化・低コストの壁があり、パワーデバイス等に潜在的マーケットは巨大であるが、開発が焦眉で、国家のサポートを強化すべきである。
- 環境対応材料は国家と企業戦略に依存し、開発研究が不安定になっている。セラミックスを用いた代替材料・希金属資源回収・使用不可材料を含め戦略を早急に決定すべきである。
- ナノ構造を利用し、エネルギー効率を上げるといったナノチューブやフォトニック結晶のようなセラミックス商品開発が、各国でも注目され、開発競争が激化している。
- サノカーボンは、白金触媒代替として燃料電池分野で注目され、将来が期待される分野である。 日本の最も強い分野の一つであり、第四期で更に発展させる必要がある。

#### 環境関連セラミックス

- 環境調和型ガラスヤセラミックス製造技術 …CO2排出削減、資源使用削減、環境負荷物質 削減
- データベース構築(ガラス分野ではIntergladがある) ・・・ 材料・プロセス開発の迅速・効率化
- 機能を優先した材料開発ではなく、安全・安心性、環境を優先した材料開発も重要である。

原料・燃料の危機的状況において、無機・セラミックス分野においても出口製品だけでなく、 加工やプロセス(たとえばプラズマやレーザーを用いた)の斬新な技術開発が期待されて いる。

図 2.3.2-2 無機・セラミックス分野に期待される成果などについて

## 今後重要となる研究領域と課題

(1) 大型・精密セラミックス部材化技術 (構造材料セラミックス)

セラミックスは靭性が低いためエンジンに使えなかったが、中空構造を持ってエンジンに使える特性を持たせ、構造材料セラミックスの応用を拡大した。液晶半導体部材用として高い定常熱変形感度と高比剛性、鋳造用部材として断熱・軽量性に優れ、高温溶融体に濡れやすい機能を有する大型精密部材化プロセスの確立が求められる。

(2) コーティング技術 (構造材料セラミックス)

金属、セラミックス(ガラス含む)、高分子などの基板材料の表面に新しい機能を与える先進的なコーティング技術を開発することを目標に、コーティングプロセス、コーティング及び表面ナノ構造解析・制御、コーティング材料設計技術、コーティング材料評価解析技術が求められる。

(3) セラミックス長繊維複合材料(構造材料セラミックス)

酸化物繊維では 1200℃を超える環境下で安定に特性を維持できるものが、現在、 見あたらない。より安定な相構造の創出と緻密な粒界制御により、優れた高温特性 の多結晶質酸化物繊維が求められる。

非酸化物繊維では航空・宇宙・原子力分野での応用が考えられ、結晶性炭化珪素の展開が活性化すると思われる。

# (4) ガラス

ガラス製造段階での大幅な省エネ、最終処分量・バージン資源量の大幅削減、通 常の環境汚染量の大幅削減が求められる。

非晶質のガラスの構造的無秩序性を人為的に制御する技術が求められる。また、 データベース構築が望まれる。

# ナノテクノロジーの融合をベースに進展が期待される研究領域

以下のような研究領域が重要と思われる。

- (1) 光触媒
- (2) 多機能発現型バイオマテリアル(生体適合界面)
- (3) セラミックス多孔体(ケージ型構造材料)
- (4) 炭素ナノファイバーコンポジット(ナノカーボン)
- (5) ナノカーボンによる炭素・酸化物複合耐火物の高機能化(ナノカーボン)
- (6) ナノ複合材料による水素貯蔵特性の高性能化(水素吸蔵)
- (7) 熱電材料による排熱回収と二酸化炭素排出制御(高熱電機能)
- (8) 酸化亜鉛エレクトロニクス (量子ドット)
- (9) ダイヤモンド超伝導・半導体に起こる新しい超伝導(ダイヤモンド物性)
- (10) 強誘電体薄膜のダウンサイズ化・多機能発現(マルチフェロイック)
- (11) ナノシートを用いた機能開発(ナノ空間制御)
- (12) 全固体電池 (ナノ空間制御)
- (13) 高機能フォトニック材料(ナノガラスなど)

このような研究開発を推進するために、既存の拠点を使って、日本にまだ2台しかない収差補正のできるTEMなどを設置し、電子状態計算を駆使した界面構造制御の超精密計算にもとづく革新的なプロセス技術拠点のネットワーク化、また、イオン・量子ビーム・光・レーザー・プラズマなどの制御による革新的加工・プロセス技術拠点のネットワーク化をここでは提案したい。

め

# 2.3.3 薄膜及び微細構造形成による無機系材料の多様性発現:河本邦仁(名大)

(1) 自然に学ぶ材料テクトニクス (Nature-Guided Materials Tectonics)

「自然に学ぶ材料テクトニクス」を基本姿勢に研究開発を進めている。どの時代においても材料が非常に重要であったことは周知のことだ。20世紀のものづくりはエネルギーを大量に消費し、資源を非常に無駄遣いするスタイルであったが、21世紀のものづくりはこれを改め、材料が持つ機能あるいは物質本来の機能を最大限に発現する、あるいは革新的な機能を開発するために、最少エネルギー消費・最少資源消費・低環境負荷を製造技術の基本とすべきだ。エネルギーや資源をあまり使わないで材料を作ることは容易ではないが、今まで積み上げてきた材料技術を活かして作っていきたい。そのような新しい製造・ものづくりのプロセスをどのように作っていけばいいか、手本とすべきものが自然界で生物がものづくりをしている姿である。マクロ構造から、ミクロ構造、デバイス、ナノメートルオーダー、原子レベルに至るまで、様々な階層レベルで材料を作り、機能を発現する技術が開発されたが、これらは大量エネルギー消費のもとで進められた。今後は自然界に学び、改めていかなければならない。(図 2.3.3-1)

# 「自然に学ぶ材料テクトニクス」の必要性

<mark>材料</mark>ー土・石、金属、セラミックス、 半導体、プラスチックス

→ 文明進化

グローバル規模で環境破壊・エネルギー枯渇

- → 持続可能な社会に暗雲
- → 材料開発・利用のあり方に疑問

21世紀の"ものづくり" → 最少エネルギー消費・最少資源消費・低環境負荷型 の製造技術を基本とすべき!

<材料開発の目標> あらゆる構造レベルで組成と構造を精密に制御 → 物質が本来持つ機能を最大限発現 電子・原子・分子のナノ集積構造を設計どおりに構築 → 革新的機能の発現

近年の材料ナノテクノロジー → ナノ材料構築学

Tectonics: 構造学、構築学、地質構造・・・Plate tectonics, Architectonics Materials tectonics, Chemo-tectonics, Nanotectonics, Microtectonics, Vectorial tectonics, Nature-guided tectonics, Bioinspired tectonics, ・・・・

図 2.3.3-1 「自然に学ぶ材料テクトニクス」の必要性

バイオミネラリゼーションは自然界で長い間行なわれてきた、生物が鉱物をつくるプロセスである。生物間の共存共生、環境を汚さない材料・製造システムあるいはリサイクルシステムを作り上げていく姿を謙虚に学ぶことが大事だ。このプロセ

スは4段階に分けられる。①反応場を設計し、②位置を選択し、③結晶を析出させ、 ④高次構造を常温常圧下で組み上げている。これらをナノテク研究戦略の観点から 見ると次の3ステップが重要である。まず、無機材料を作るにあたって有機物で ある生体高分子が上手くアセンブリーされた構造体を使い、それをテンプレートに 無機材料を形成する。そして結晶成長させるときに分子を作用させることである。 自己組織化プロセスにも分子を関与させ、階層構造を作っていくことがある。さら に、様々な酵素または触媒を作り、各反応に応じ使い分けながら低温合成し、ナノ・ ミクロの構造・形態制御をして、欲しい機能を出していくことだ。(図2.3.3-2) すでに色々なところで研究が行われているが、まだまだ十分ではなく多くの課題が 存在している。現在、例えばシリコン基板の表面に分子を並ベテンプレートにし、 セラミックスのパターニングをするということができる。また、水溶液中でパター ンニングをして、焼かずにセラミックスの薄膜を作成したり、粒子の集合体を作り そこから機能発現をすることがかなりできるようになってきた。ポリマーと共生す るようなデバイスあるいは材料を作っていくプロセスにも展開していけると考えら れる。欧米や中国も取り組んでおり、世界的に重要な研究分野になってきている。

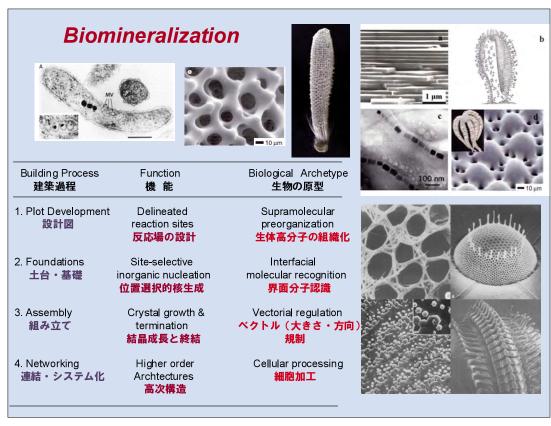


図 2.3.3-2 Biomineralization

# (2) 高効率熱電変換材料(High-Performance Thermoelectric Materials)

90年代半ば頃、低次元のナノ構造を作ると熱電変換効率が上がることが理論的に予言された。それゆえナノ構造を作ることが欧米と日本で盛んに行われ、性能指

数である ZT が急速に上がってきた。PbTe や BiTe など、非酸化物系の従来材料を ナノ粒子にする、あるいは、2次元人工超格子にするだけでも、ZTがかなり上がる ことが実証されている。しかし、未だ実用化に至る材料にはなっていない。DOE では 2005 年からの研究で、炭酸ガス排出抑制に熱電変換技術が使えないかどうか を検討したところ、自動車排熱に利用すればかなりの効果が期待できるという調査 結果をもとに研究費を投じ、6年間で予算約200億円の「フリーダムカープログラ ム」という研究開発を進めている。

我々は酸化物系のチタン酸ストロンチウムの人工超格子を組み、1 または2単位 格子層程度の厚みに電子を閉じ込めると、巨大な熱起電力が発生することをつかん だ。300K の室温で ZT=2.4 の世界で最も高い値を示す。ナノ構造の量子閉じ込め効 果を使い、ZTを上げることが原理的には出来るようになった。これをバルクの材 料の中へ、ある秩序をもって埋入するようなプロセスを開発しなくてはならない。 (図 2.3.3-3)



図 2.3.3-3 量子ナノ構造バルク熱電変換材料

既に世界は、ナノ構造制御によって従来の性能を凌駕するような材料が作れそう だという、この方向へ乗り出して盛り上りを見せている。界面やナノ構造から生じ る機能を上手く融合して利用することが、熱電変換材料に限らずいろいろな材料系 に共通する開発項目になる。

# 2.3.4 微粒子プロセスの高度化によるイノベイティブセラミックスの開発:

# 目 義雄 (NIMS)

日本の発展は製造業に依存し、それは材料技術によって支えられているといっても過言ではない。ここでは、焼結セラミックスに関連した技術を提案する。IT・半導体、環境、原子力、航空宇宙等の先端産業分野における新デバイス開発や機器の高効率・省エネルギー・低環境負荷化に必要なイノベイティブセラミックスが求められている。そのためには、ナノ粒子プロセスの開発、高度化およびナノ領域の構造、組成、状態の設計が必要である。その要素技術は、①均一な組成、結晶子径の制御されたナノ粒子の合成、②粒径の揃ったナノ粒子配列・集積化、分散制御、③マイクロメートルからナノメートルオーダーまでの高次構造制御、④局所構造と対象機能の発現との理論的・実験的検討によるナノ構造設計である。

ナノ構造体に関しては、30年前の林超微粒子プロジェクトのナノ粒子から作製する方法と、人工粘土研究会が進めていたナノ空間を利用する方法がある。いずれも日本が先導してきた技術であり、今後も発展が期待される技術である。

# 焼結セラミックの研究開発動向

セラミックスガスタービンの開発やとシナジーセラミックスなどのプロジェクト 以降は、焼結セラミックスのプロジェクトはほとんどなく、全体として系統的な開 発研究は低調である。

セラミックス業界は先端産業として活況を呈しており、平成 19 年度は 2 兆 3 千億円の売り上げである。主体は電磁気・光学用セラミックスで、機械用、生体用と続く。材料のメインは焼結体で、この分野での国際競争力はきわめて強い。これを維持し続けるための技術開発項目は、ナノ化、高純度化、組織制御になる。特に、ナノ化(微細・均一組織)で強度や性質が飛躍的に改善するだろう。この時に粉末を合成し、それを成型、焼結するというのはそれぞれ切り離せない技術である。最近、日本が独自に開発してきたパルス通電焼結技術が産業的にペイ出来る段階にまで来た。

今後は、官学でより基礎·基盤研究に力を入れ、系統的に進めるべきだ。今のセラミックスの基礎になる焼結理論は物性理論、強度理論に比べて欠陥が多い理論である。先端焼結技術の開発を含めて、理論、技術の発展が望まれる。

# 「焼結セラミックス」についての動向

- 1. 国家的プロジェクトが終わり、系統的開発研究が低調である。
- 2. 先端産業のキーマテリアルとして、セラミックス産業界は活況を呈し、ファインセラミックスの生産額は平成19年で2兆3千億円に上る。
- 3. 主体は電磁気・光学用セラミックスで約67%。機械(14%)、化学・生体 (11%)と続く。
- 4. 材料のメインは焼結体で、この分野の国際競争力は極めて強い。

# 将来

- 5. ナノ、高純度、組織制御が変わらない技術開発項目。
- 6. ナノ(微細・均一組織)化で強度や性質が飛躍的に改善するだろう。
- 7. 粉末合成、プロセッシングと焼結は切り離せない。
- 8. 新焼結プロセス(SPS等)が産業的にペイする段階にきた。
- 9. 官学が基礎研究に力を入れるべき。
- 10. 新しい焼結理論の進展

セラミックスの基礎である、物性理論、強度理論にくらべて、焼結理論は欠 陥が多い。

田中英彦氏(セラミックス協会エンジニアリングセラミックス部会長)

図 2.3.4-1 『焼結セラミックス』についての動向

# 微粒子プロセスの技術動向

粒子を作って成型して焼結する、ここまでを微粒子プロセスという。粒子が小さくなると凝集を起こし、このまま成形、焼結すると欠陥品となる。これをなくすために、溶液中に粒子を分散させ成形するコロイドプロセスが注目されて来た。ナノ粒子を使う場合は凝集をとるのは困難なため、孤立したナノ粒径のそろったものを作る必要があった。ホットソープ法などの溶液から作る方法と、レーザーアブレーションなどにより気相から作製する方法があるが、これらは非常に少量で、とても焼結に使えるものではない。

最近、市販の凝集したナノ粒子の解砕技術が進展し、従来不可能とされていたナノ粒子の再分散が可能となって来た。サスペンションを高圧で衝突、キャビティーを発生させる方法と 50 μm以下の微小ビーズを使ったビーズミル法が、注目されている。これらの技術により、大量にナノ粒子が作られる状況になり、今後のナノ粒子プロセスの発展が期待される。

焼結による薄膜化技術に関しては良く知られたテープキャスト法がある。この方法による積層誘電体では、その特性を上げるには膜厚を薄くして積層する手法が取られ、現在では膜厚 0.8 μmまで出来ている。この粒子のサイズは 100nm あたりであるが、これより薄くするには更に細かい粒子を使用したプロセスの高度化や、パウダープロセスとは異なる方法が検討されている。プロセスの高度化手法として、電気泳動堆積法が注目されている。これは帯電している粒子を直流電圧下で堆積さ

せる方法で、電流電圧、時間などによって膜圧をコントロールできる。特に粒子自 身が動くので他のコロイドプロセスに比べてナノ粒子の成形には優れているといわ れている。

成形した後、焼結する。今の焼結論には欠陥が多く、エンジニアリングセラミッ クスの理論としてあるのは焼結、粒成長と破壊力学だけで、後はノウハウの固まり である。焼結論は、Frenkel → Kucynski → Kingery・Coble で構築され、1980 年 代に Mullines, Nichols によって整備された。以後、計算科学と数値計算によって 多岐に発展したが、最近、従来論には大きな欠陥があることが分かった。特に粒界 エネルギーの無視は非酸化物やナノ粒子にとっては大きな問題で、焼結理論の再構 築が必要である。

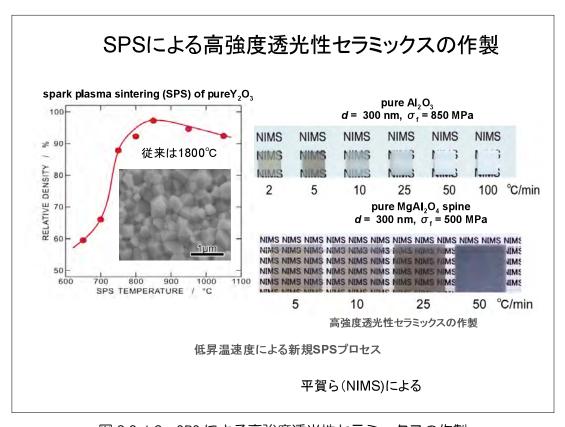


図 2.3.4-2 SPS による高強度透光性セラミックスの作製

新しい焼結技術としてミリ波やマイクロ波を応用する方法があり、これは外部か らではなく、内部で材料自身が加熱するというもので、急速に、かつ選択的に加熱 する事が出来るため注目されている。パルス通電加熱、または放電プラズマ焼結 (SPS: Spark Plasma Sintering) 法は、日本で開発された技術で、セラミックにプ ラズマが発生するのかの議論はあるが、有効な焼結法として、欧米では国家プロジェ クトとして開発が進められている。SPS は、高速焼結法として知られているが、最 近通常の焼結法と同様な比較的ゆっくり過熱することにより、イットリアでは、通 常 1800℃で焼結するが、900℃でも緻密焼結体が得られる。また、アルミナやス

ピネルでは、透光性のある高強度焼結体が得られている。この SPS の焼結メカニズムの解明が重要になってきている。

# 今後重要となる研究領域と課題

# (1) 高性能セラミック多孔体の開発

ディーゼルエンジンの排ガスフィルターとして世界中に使われているセラミック 多孔体、また、メソポーラスやゼオライト、粘土、活性炭などを利用した多孔材料 の高機能化で日本のポテンシャルは高い。これをベースに、気孔の寸法や形体と配 置分布を自由自在にコントロールできる技術を開発し、より高機能な多孔体を創製 する。また、メソ多孔体からの多機能ナノ構造材料を創製する。

(2) コロイドプロセスの高度化による高次構造制御体の作成とイノベイティブセラミックスの開発

コロイドプロセスは微細粒構造体を作るには有用な方法で、さらに外場を印加することにより高度な構造制御が可能となる。電場を印加することにより積層体の作製(電気泳動堆積法)、強磁場を印加することにより配向体の作製、さらに磁場と電場を重畳させることで配向を制した多用な積層体が作製できる。微構造と特性の相関を明らかにし、様々な外場を利用することにより構造制御にフィードバックする事ができれば、多様な革新的セラミックスの開発が可能になる。

# (3) 粒界設計と機能セラミックスの創製

セラミックスの機能発現を担う添加元素の開発、代替や効率的利用がもとめられており、そのためには結晶粒界のナノスケールでの構造・組成制御が重要となる。 結晶粒界での原子配列・構造・電子状態の計測・分析技術の開発、高度化と第一原理的量子力学などの計算科学に基づいた材料設計技術の開発。高度化を目指す。

# (4) セラミックス長繊維を用いた複合材料の進展

ガラスマトリックスや単結晶の炭化物繊維として、現在はシリコンカーバイトの繊維が使われるが、耐熱温度が 1500℃位で 2000℃以上の耐熱性を保てるようにする研究が世界で進められている。その為にはシリコンカーバイトの表面に超高温用のセラミックスを複合化する必要がある。このような研究は日本では極めて弱体であり、国の支援が望まれる。

# (5) 低温・高速超塑性セラミックスの創製と精密塑性加工への応用

高速で、かつ低温の超塑性セラミックスを使って精密加工技術を開発する。従来のセラミックス超塑性体の変形速度遅くは200%変形するのに3,4時間かかった。高速超塑性セラミックスは、数分で変形が可能である。加工速度の増大と加工温度

の低温化が要求される。現在、耐熱合金で使われている塑性加工の温度域で高速成 形が出来るようになって来た。精密塑性加工への応用のためには、セラミックに適 合した軟加工の体系化と、加工した後の調質処理、およびシミュレーションと組み 合わせて進める。

# 2.3.5 生体無機材料の展望と開発戦略:立石哲也 (NIMS)

バイオマテリアルの研究開発に 1970 年代から携わっており、ここでは特にセラ ミックスの研究開発の展望と戦略について話す。牛体にはセラミックス代替が可能 な箇所が頭から足までのすべてにわたる。その多くは骨組織と歯であり、長管骨、 関節部海面骨はもとより、顎骨や歯槽骨が多く、歴史的にはバイオステイブル(生 体内安定性)なアルミナセラミックス、その後のジルコニアに始まり、バイオアク ティブ(生体活性)な水酸化アパタイト、リン酸3カルシウムが現在は多く利用 されている。(図 2.3.5-1) これまで日本は無機生体材料で常に世界をリードして きた。1990年代に入り、骨芽細胞の誘導性にはタンパク質が作用していることが 分かり、リン酸カルシウムと高分子の複合体や天然のたんぱく質であるコラーゲン を組み合わせ、より骨に近い構造体が可能となってきた。これは即ち、骨組織の基 盤材料として骨芽細胞をいかに騙すかということだった。次世代は、DDS(ドラッ グデリバリーシステム)機能を持たせることや、時間的及び空間的な制御機能を備 えた人工骨およびそれに接合した軟組織の開発が中心になるであろう。現在は、強 くて生体適合性が良いという2つの目標をほぼ達成しつつあるという状況だ。原 材料で考えればそれほど大きい市場ではないが、メディカルデバイスとしてはかな り大きな市場である。金属系の人工関節等体内埋入型のデバイスや、人工血管等の 循環器系の多くは輸入に頼っているが、セラミックス系はほぼ国内製であり、日本 の技術は世界的にトップレベルの地位にある。

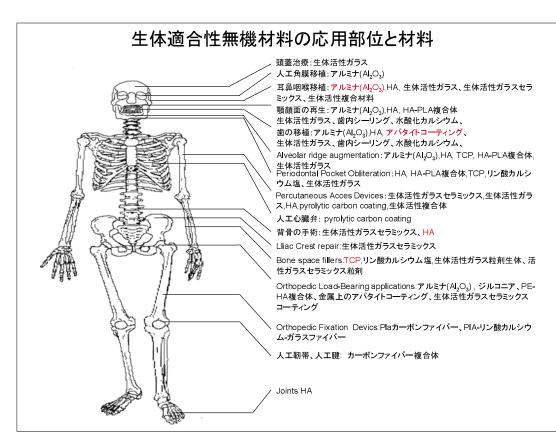


図 2.3.5-1 生体適合性無機材料の応用部位と材料

重要研究領域と課題について整理をする。細胞の活性は遺伝子発現とタンパク質 によるが、ナノバイオ技術を利用し、メディカルデバイスを材料科学の助けを借り ながら開発していくことが最も大きな目標になる。即ちセラミックスだけでは目標 を達成できないということだ。関節を例に取ると、骨、軟骨、靭帯、血管、神経、 皮膚、脂肪、と様々あり、これらを再生医療で全て作り出すことは難しいであろう。 従って材料科学とロボティクスのシステム化融合、即ち一部は機械関節になるため に、生体と如何に合理的に接合するかという意味で材料科学が必要となる。そして ナノレベルで空間を制御し且つ時間的にも色々な細胞を適切に刺激するものを創製 していくことが必要だ。研究の推進方策としては、医工連携の推進と規制の適正化 および材料標準化・規格化へのイニシアティブが重要である。日本ではなかなか上 手くいかないために、多くのメディカルデバイスを海外に依存することになった。 今後はセラミックス、金属、ポリマーの3要素が複合化(Advanced Bio-Composites) しなければならず、さらには材料だけではなく、デザイン(D)、エ バリュエーション(E)、ファブリケーション(F)が統合化した技術とならなけれ ばならない。すなわち、ABC を支援する D.E.F トライアングル技術が必要不可欠 である。細胞活性制御では、アパタイトやリン酸カルシウムに様々な表面加工をす るが、表面性状によって階層型クラスタリング手法を用い、DNA マイクロアレイ を使って遺伝子発現の整理を行った。これにより、材料の化学的な組成よりもむし ろ力学的な表面ナノトポグラフィが大きく影響していることがわかった。この観点 でさらに研究すれば、材料設計は格段に進歩するであろう。(図 2.3.5-2)

### 重要研究領域および課題

- 1) ナノバイオ・医学・材料科学の融合研究領域
- 2) 材料科学・ロボティクスのシステム化融合研究領域
- 3) 時空制御・メカノバイオ型バイオマテリアルの創製
- 4) 医工連携の推進と規制の適正化
- 5) 生体無機材料の標準・規格化へのイニシアチブ
- 〇 問題提言による情報共有化と解決策の提言
- 異分野研究者ネットワークの構築(環境構築による人材育成)
- 人的・空間的共有体制の構築(異分野の人材を同一空間で育成)
- 設備の効率利用(エンジニアの育成)
- 空間マネジメント人材の育成(研究効率の促進)

### 図 2.3.5-2 重要研究領域および課題

細胞を取り巻く時間・空間的な環境を如何に最適なものにするか、細胞足場材料 の活性を時間・空間的に制御し、大型の複合組織・臓器構造体を作り上げることが 次のターゲットになる。時空制御した大型複合組織・臓器構造体の再生には、時間 的にも空間的にも、それぞれの組織を作るために必要な遺伝子発現が存在する。こ れには様々なファクターがあり、そのファクターを表面修飾していくという問題が ある。セラミックスには骨芽細胞を選択的に付ければよいが、骨・軟骨のペアを考 える場合などは、骨と軟骨細胞組織をいかに接着させるか、または余分に入り込ん だものをいかに排除するかが問題となる。細胞を選択的に付ける場合には各種高分 子技術を併用する。例えばセラミックスの上に骨芽細胞が直接付くわけではなく、 必ずタンパク質が介在し、さらに細胞の種類によって必要なタンパク質が変わって くることになる。従って材料設計をする際に最適なタンパク質を位置決めして付け る技術が完成すれば、アレイセンサのようなものが出来、いくつかの細胞を部位別 に接着させることが出来るようになる。このように表面装飾技術が色々な意味で重 要になってくる。セラミックスの他に高分子や金属を含め、生体由来物質・遺伝子・ タンパク質を第4番目の材料とするような姿勢がなければ、大きな組織欠損を長 期間安定に治癒することは出来ないだろう。(図 2.3.5-3)

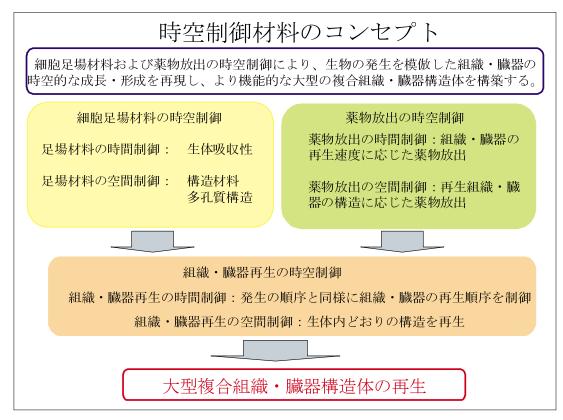


図 2.3.5-3 時空制御材料のコンセプト

以上から、今後取り組むべき研究としては「生体との精密制御界面を有する次世代バイオマテリアル」というような研究開発領域を提案したい。

### 2.3.6 ナノエレクトロニクス、エネルギー応用で重要となる材料技術: 曽根純一(NEC)

エレクトロニクスとエネルギーの両分野でキー材料である無機材料、特に酸化物 系材料が果たしている役割について話したい。

半導体集積回路は微細化の歴史とも言われるが、今はこれだけでは難しくなっている。ここ数年、半導体デバイスにはナノエレクトロニクスとして新しい3つの技術トレンド(More Moore; More Than Moore; Beyond CMOS)が議論されている。More Moore あるいは Beyond CMOS の領域では微細化を補完するために、あるいは微細化を超える機能を生み出すために、新材料の導入が不可欠である。

もう一方で、デバイスの多様性に関心が集まっている。今までのシリコンは演算ができ、記憶が出来るだけで良かったが、将来はシリコン上に色々な機能を搭載し、シリコンチップの付加価値を高めていくことになるだろう。これは More Than Moore と呼ばれる流れだが、ここでもシリコン上へ新たな材料を導入することが必要になってくる。

### 注目技術の現状

以下、我々が注目している材料技術の例をいくつか紹介したい。

### (1) 不揮発スイッチ

フラッシュメモリーの微細化限界を見据えた技術、材料として抵抗可変型の不揮 発スイッチが登場し始めている。

NIMS との共同研究で我々はナノブリッジを開発した。その材料はタンタルオキサイドで、ナノブリッジは酸化還元反応で、電圧をかけると電極からオキサイド中へ銅がイオン化して溶けだし、電荷を帯びているので対極電極のプラチナへ向かって動いていく。プラチナ電極へたどり着くと、電荷を失ってイオンが金属として析出してどんどん積もり、数ナノメートルの金属フィラメントが生成され、やがて両電極間をつなぐようになる。このように数ナノメートルという非常に微小な不揮発性のスイッチが出来る。オフ電流を小さくすれば消費電力が下がり、メモリに応用することが提案されている。我々はプログラマブルロジックのスイッチに利用しようと考えている。これまでのプログラマブルロジックの回路で必要とされた SRAMが不要なため、スイッチ回路の大幅な小型化が可能になるためである。上記金属フィラメントが形成されているか否かで、電圧 0 ボルト近辺の、電圧、電流属性に 2 つのブランチが存在する。それまでの電圧印加履歴によってオンの状態とオフの状態が成立し、しかもこの状態は 10 年間ほど不揮発に保たれることが加速試験で確認されている。

図 2.3.6-1 Switching Characteristics of NanoBridge

### (2) カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブで実際にデバイスを作ってみると、今のシリコンデバイスの 10 倍位の gm(相互コンダクタンス)が簡単に得られる。しかし、グラフェンシートの巻き方のひずみ度によって半導体になったり金属になったりしてしまうというやっかいな問題がある。材料の問題がまだかなり大きいのが現状である。ポストシリコンという事で期待されているが、まだ長い時間が必要だ。グラフェンも同じような状況にあると見ている。

### (3) 有機材料、カーボンナノ材料(CNT, C<sub>m</sub>)

フレキシブル・エレクトロニクスという流れが出てきており、電子回路がフィルム状に出来るようになりつつある。これはユキビタスのウェアラブルな情報端末の1つの方向性を作り出すポテンシャルを持っている。有機トランジスタだけでなくて色々な可能性のデバイスが出現している。大画面 OLED やプラスチックシートのように曲げられる太陽電池も、そのエキサイティングな例の1つである。

CNT分散インクの開発でネット状のカーボンナノチューブが作れるようになり、 印刷 CNT トランジスタへの応用が期待される。ただ、まだまだ材料の問題が残っ ており、カーボンナノチューブの金属性と半導体性をどう作製分離するか、これは 依然として課題である。金属だけを使う例として、プラスチックの中に埋め込めば、 透明導電膜の ITO 代替として使える。

### (4) 有機ラジカル材料

通常のポリマー材料では電子が偶数個、最外殻の電子軌道を回り、安定な状態を維持している。それに対して有機ラジカル材料ではポリマー材料ではありながら、最外殻の電子軌道を電子 1 個で周回しても、安定性を維持している。ポリマーの構造自体がその安定性をサポートしており、これを使うと最外殻の電子の出入りを使って蓄電を行う事が出来る。リチウム電池と同じような原理で動作するが、材料が有機物のため、基本的には自由に曲げても電池の能力としてはなんら問題はない。ディスプレイとしては OLED があり、それをカーボンナノチューブか ZnO か、あるいは有機材料からなるトランジスタ電子回路がドライブし、さらにそれを有機材料の太陽電池、ここで述べた 2 次電池が電力的にバックアップする集積化されたシート状エレクトロニクスが可能になるのではないか。

### (5) リチウムイオン電池

リチウムイオン電池の高性能化、エネルギーのパワー容量アップへの研究開発が精力的に進められている。最近、大型のリチウムイオン電池は電気自動車のバッテリーとして期待がふくらんでいるが、その実用化への課題は性能向上に加えて低コスト化と安全性、信頼性の確保にある。実際、事故時の発火は人命にかかわる問題につながるであろう。通常のリチウムイオン電池では、正極にコバルト系リチウム酸化物材料が、また負極にグラファイトシートが使われている。その間にリチウムイオンが含まれた電解液を貯めている。コバルト系リチウム酸化物材料は層状構造を持っているため、過充電の際に結晶構造がつぶれ、発熱する可能性がある。これに対してマンガン系リチウム酸化物材料はスピネル構造を持っているため、過充電でリチウムが抜けても結晶構造はつぶれないという特徴を持っている。また、マンガンはコバルトに比べ、地球上に豊富に存在し、コストも安い。高い信頼性と安全性の確保、低コスト化へ向かってさらに研究開発を進めていく必要があるが、一部は電気自動車用バッテリーとして市場に投入できるステージに達しつつある。

### (6) カーボンナノチューブ使った燃料電池

カーボンナノチューブを混ぜた炭素電極の中に白金触媒を入れて、燃料電池として動作させることに成功した。カーボンナノチューブの複雑なナノ構造に析出されたナノスケール・サイズの白金触媒は安定に保持され、高出力特性を可能にする。この燃料電池はノート PC に組み込まれ、長時間、安定に動作することを確認した。一方で、プラチナは値段が高い希少金属であり、プラチナの代替材料が望まれる。また燃料電池の高い信頼性を確保するためには、保管状態におけるプラチナの酸化反応を抑えないといけない。白金代替材料としては、物質として地球上に豊富に存在し、安価であることに加えて、触媒性能が高いこと、耐酸化性、高信頼性を備えた材料であることが要請される。材料科学の力で、そのような代替材料の開発を可

能にして欲しい。

### (7) ランタンストロンチウムマンガンオキサイド

ランタンストロンチウムマンガンオキサイド(LaSrMnO)は、低温で金属、高温で絶縁体に変化する希な性質の強相関材料である。組成比を変えることで温度特性を色々自由自在に変えられる。輻射の関係で高温下では温度を逃がし、低温下では温度を輻射で守る。このような温度調整機能は、一方の面を太陽にさらされ、他方を極低温の深宇宙に向けている人工衛星で必要になってくる。これまではルーフの開閉を電動で行い、温度制御を行っていたが、貴重な電力の消費、可動部に伴う信頼性の問題などがあった。

人工衛星関連のタイル材料として実際に搭載され、既に機能が確認済みである。 材料物性という基礎科学の研究者であっても、アプリケーションに対して非常に鋭い感覚なり問題意識を持っている人とぶつかると、とんでもない面白い発想が出て くるという1つの例として、最後に紹介した。

### 2.4 有機・高分子材料分科会/コーディネータ:澤本光男(京大)

分科会の目的とバックグラウンドを説明する。

この有機高分子分科会は、有機化学、有機合成、有機材料と高分子関係、それから高分子有機がともに関係するバイオ、医療、有機高分子に軸足を置いたエレクトロニクスの専門家で構成されている。

プレゼンテーションや議論にあたっては、以下に留意されたい。

- ・俯瞰図の検討にあたっては、全体の行く末を見た上で何が重要かということを比較的広く見ることが大事。
- ・融合した新領域も含める。
- ・夢を持ちつつ、現実的なところも考える(システムの提案とか、研究推進のため の提案も)。
- ・俯瞰図の赤で囲った部分を主に議論する。
- ・何を創成すべきか、という材料についてと共に、その合成の手法についても議論 すべき。
- ・化学 / 材料は社会 / 地球との良好な関係を保つべき。すなわち、地球の資源と持続性を考慮するご提案や、経済・政治と材料・資源の不幸な絡まり(例:バイオエタノールを作るために食用とうもろこしの値段が急騰。投機的理由で石油の値段が急騰。このことは材料合成や産業界に色々影響を与えている)をも踏まえたご提案をいただきたい。

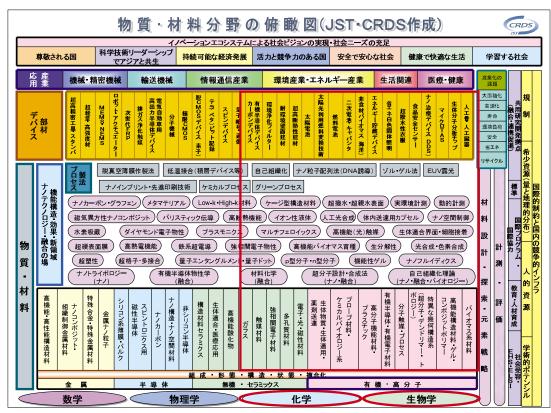


図 2.4-1 有機・高分子材料分科会が主に議論する、俯瞰図の部分

今回のWSとよく似た試みがアメリカで2件あった。1つは10年前の「National Science Council」と「National Academic of Sciences to Engineering」がパネルを作り、1つの提言をしている。これは材料科学と工学においてアメリカの研究開発の方向性を決めるための提言をベンチマーキングしている。もう1つは、2007年「National Science Foundation」のサポートを受けた、複合領域をカバーする高分子の化学と工学はどういう方向にあるかの議論。両者とも、その結果をWEB(\*)や.冊子で公開している。

専門分野にとらわれず、将来発展するであろう基本的な動向について議論しているので参考のため紹介する。

前者は、「National Academy of Science」と「National Research Science Council」、「National Academy of Engineering」が選んだ 10 人が「材料科学と工学」についてアメリカの現在と未来(例えば 10 年後)の国際競争力(今アメリカはトップにいるけれども、うかうかしていると他の国に追いつかれる分野とか)、や有望になる分野を提言している。「有機・高分子材料分科会」に関係する分野では、触媒(特に多い)、高分子、バイオマテリアルズ、これに絡んだコンポジット、光工学材料、電子材料がある。例えば、触媒では整合性、触媒のキャラクタリゼイションとか、ポリマーはバイオメディカルポリマー、精密に制御された重合とか、バイオマテリアルではほんど現在と同じだが、再生医療に繋がる色々なバイオミメティックス、バイオインスパイヤードマテリアルズ、骨材料などが挙がった。各分

Curre	Table 3. Relation  Current position			Likely future position			Fι	uture Where US?	
Subfield	forefront 2	Among world leaders		5 Behind world eaders	1 2 Gaining or extending	3 Maintaining	4	5 Losing	(Catalysts)
Asymmetric analysis		Х					Х		A highly specialized field of great importance in the limited-quantity manufacture of products (significantly below the commodity level) such as pharmaceuticals and agricultural chemicals. Industry leaders are in the United States, Europe, and Japan.
Catalysis		Х					X		Shape-selective catalysis, metallocene catalysis for polymerization, and application of catalysts for automobile emissions control are economically critical in the United States.
Catalyst characterization		X				X			This area has benefitted from advances in atomic resolution microscopy; it is necessarily equipment dependent. Utility of work depends on strong links to applications.
Combinatorial catalysis	Х					X .			Field is still in its infancy; the U.S. position is strong.
Environmental catalysis		Х						X	Environmental progress requires highly sophisticated industrial work. Advances made in concert with applications. Strong capabilities are in the United States, Europe, and Japan.
Selective oxidation			X				Х		This growing area has applications from small to heavy chemical synthesis (30–40 million tons/year). Industry leaders are in the United States and Europe.
Solid acid-base catalysis		Х						X	Highly competitive, secretive industrial activity is focused largely in the United States.

図 2.4-2 触媒についての現在と未来のアメリカの国際競争力の評価

野で国際会議をやると仮定しそこで想定する招待講演者をヒントにして、将来の動向を探るという興味ある手法をとっている。図は触媒についての現在と未来のアメリカの国際競争力の評価で、このような作業を全分野についておこなっている。

後者でも同様に、国際競争力が激しくなる中でアメリカのとるべき姿勢を提言し、また教育や社会における必要性についても議論している。高分子合成、精密制御高分子材料系の構築のモデルと理論、解析、加工等のテクノロジーはもとより、アメリカらしく、重要応用分野としてディフェンス、セキュリティーも対象としている。その他、新しいリソグラフィープロセス等々すべて議論している。こういうアメリカの全てを真似する必要はないし、アメリカと日本は全く違う状況なので、決してアメリカのやり方を導入する必要はないが、頭に置いておく必要はある。

この分科会では、ほかに、従来の議論では若干抜けていたところ(例えば、石油から離れることなど)も議論したい。

### メンバーからのコメント:

- 有機高分子に閉じた議論だけでなく、他の分野との融合領域に亘って 10 年、また 20 年の重要な課題を挙げ、分科会を超えた提案をしていただきたい。もちろん、 俯瞰図の項目をあげることも重要。注目の iPS 再生治療は、保険対象となって治療に利用されるのはまだ先だが、iPS の技術を使って病気の原因の解明や化学生物学的な面での応用にバイオミメティックス的に使っていくのが大事。
- 一有機高分子は無機化学と共にすべての分野の基礎である。触媒化学はキーテクノロジーだが、この俯瞰図では触媒が単なるツールとしか扱われていない。
- 一この俯瞰図の切り口はアカデミックに見え、ボトムアップ式に見えるが、日本が 進むべき方向、例えばこの分野は日本が守るという色を出すべきだ。
- 一俯瞰図、僕のところだけ再生医療、医療とアウトプットが名前になっていて、決してボトムアップになっていないところが他の先生のところと違う。もう1つ、再生医療は新しいものを作っても研究としては成り立つが、他の分野と違って体内に入れるため規制の問題があり、なかなか産業だとか実用化まで行かない。研究で2倍とか3倍位しか良くならないのだとFDAも厚労省もなかなか認めないが、200倍とか2000倍良くなると認めざるを得なくなる。そのためにどうしたらよいかといった観点で話をしたい。
- (\*) http://www.nap.edu/catalog.php?record\_id=9443 http://people.ccmr.cornell.edu/~cober/NSFPolymerWorkshop/index. html

### 2.4.1 概念融合による協奏機能触媒化学の創成

### 一協奏機能触媒化学を機軸とする物質・材料開発:碇屋隆雄(東工大)

触媒化学はある物質を作るときにはなくてはならないセントラルサイエンスのはずだ。俯瞰図を見ると触媒という言葉はあるが、有機高分子で分子触媒・プロセス、セラミックスの触媒材料、あるいは高機能光触媒といったように、単なるツールのレベルの性格付けが強い。しかし、触媒化学は、無機化学、有機化学、高分子化学と並ぶ基幹学術であるべき。この概念融合による協奏機能触媒化学は、物質、材料および環境・エネルギー研究を支える基礎学術となる。

協奏機能触媒化学はなぜ重要か。3点指摘したい。

まず、石油資源をはじめとする化石資源への依存から、10、20年後には脱却しなければならず、例えば水、メタン、二酸化炭素から炭素や水素を求めなければならない。これを実現できる化学体系、新しい発想を持った触媒化学が必要になる。これは現在のエネルギー問題や環境問題の解決につながる。

第2に、元素戦略と触媒化学は絡み合っている。従来の分子変換プロセスでは 元素を結合形成したり、また結合を開裂することに焦点があたっていた。しかし、 これからは結合と開裂を自在にリバーシブルに制御できる合成反応プロセス系を作 る必要がある。つまり必要なものを必要なだけ元素を組み合わせて作り、不要にな れば結合を開裂して元素を再生させる、といったバランス制御の技術であり、その ために革新的触媒が鍵となる。

第3として、生体触媒を積極的にものづくりに活用すること。生体が持つ酵素の機能を完全に理解し、模倣して新しい触媒化学として使いこなす。そのために、協奏機能の概念が重要になる。また、遺伝子操作による生体触媒の高機能化の是非の議論も必要であるが、高い生産性を有する生体触媒開発も必要である。以上のように、社会の要請や学術の変革に的確に対応するために、新たな触媒化学が必須であるう。

触媒化学は生体触媒、固体触媒、有機触媒、そして金属ベースの分子触媒の4つに分けられる(図2.4.1-1)。歴史的には、アンモニア合成、石油精製、自動車排ガス触媒など独立して固体触媒が発展してきた。しかし、固体表面の解析技術の遅れから、触媒設計は多くは経験則に基づくもので、原子あるいは分子レベルでの研究は立ち後れている。

一方、最近の野依 /Sharpless 触媒や Grubbs/Schrock 触媒などに代表されるように、分子触媒は、分子レベルで精密に設計可能であり、反応機構も詳細に研究できる。精密化学品、医薬、農薬などの重要中間体合成に幅広く利用されるだけでなく、汎用化学品の製造にも大きく関わっている。更に近年、活発に研究されている有機分子を触媒とする有機触媒化学は、有機化学の基本原理を展開したもので、技術化も視野に、独立に展開している感がある。生体触媒は、分子生物学のスタートに伴って、触媒化学が確立されつつあり、技術展開も開始されつつある。

このように、これまでの触媒化学は、それぞれの分野において独立に研究されており、今や触媒化学は、様々な学術分野に大きな影響を与える科学となっている。 同時に、我々の生活に非常に密接に関係し、大いに役立っている。社会や自然からの環境負荷低減の強い要求に的確に対応して次世代モノづくりに役立つためには、元素戦略に基づく原子・分子レベルでの設計概念に基づく、革新的触媒開発が急務である。個々に発展展開している触媒化学における概念統一である、協奏機能触媒化学の必要性がそこにある。

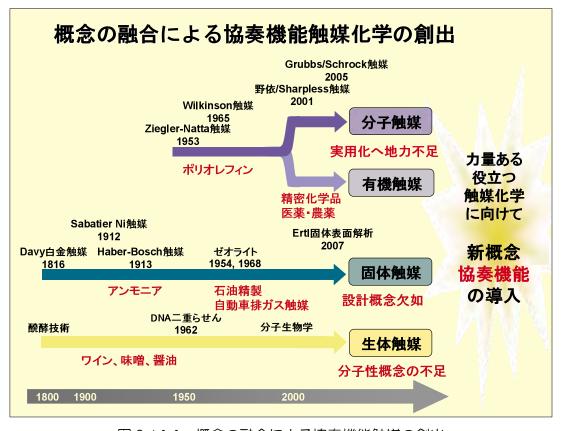


図 2.4.1-1 概念の融合による協奏機能触媒の創出

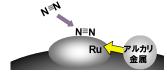
概念融合による協奏機能触媒の開発例を示す(図 2.4.1-2)。1913 年ノーベル賞の Harber-Bosch のアンモニア合成触媒は、幅広いスクリーニングを基に開発された触媒だが、その実態は必ずしも明らかでなかったが、2007 年にノーベル賞を受賞した Ertl は、新たに開発した表面解析技術を駆使して、その触媒表面で水素や窒素の活性化機構の解明に多大に貢献した。一方、窒素の活性化機構や反応機構に関する詳細な研究に基づいて、1985 年に新たな尾崎触媒が開発された。このように、原子・分子レベルでの詳細な触媒研究により、革新的な触媒開発が可能となる。

### 概念融合による協奏機能触媒の開発例

### アンモニア合成触媒における革新



Habor-Bosch 1913



1985

反応の機構解明 尾崎触媒 窒素錯体の発見

高度な表面反応解析法による反応機構の詳細解明 2007ノーベル化学賞: G. Ertl

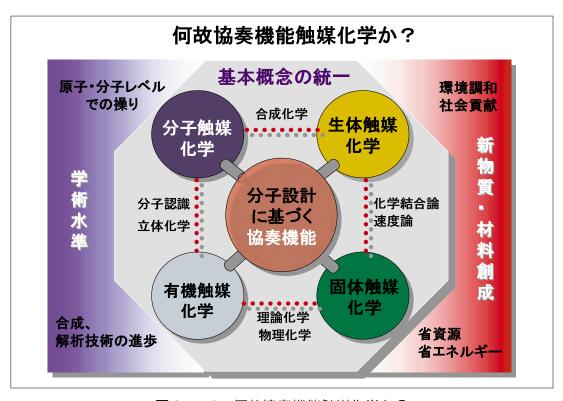
原子、分子レベルでの物質、材料表面の 修飾、機能賦与

図 2.4.1-2 概念融合による協奏機能触媒の開発例

更に、2005 年にノーベル化学賞を受賞した Grubbs と Schrock のオレフィンメ タセシス触媒も、分子レベルでの研究の成果と言える。オレフィンメタセシス技術 は、もともと固体触媒によるトリオレフィンプロセスとして工業化された。 Chauvin が膨大な実験結果を基に、このメタセシス反応が金属カルベン錯体機構 によるものと推論し、この提唱の下、Grubbs と Schrock は有機金属化学の手法 を駆使してカルベン錯体触媒を詳細に研究し、高活性なルテニウムアルキリデン触 媒とモリブデンアルキリデン触媒の開発にそれぞれ成功した。このメタセシス触媒 は、従来の有機合成に革新をもたらした。このように、固体触媒で展開してきた反 応プロセスの機構を分子レベルでの研究により革新的触媒開発に繋がったもので、 固体触媒化学と分子触媒化学の概念融合の成果でもある。

異分野の概念融合の成果は、第2世代の野依触媒の開発においても実現されて いる。野依新触媒は、従来の第1世代の水素化触媒に新たにアミン成分を加えた だけの単純な分子の組み合わせであるが、水素化触媒に革命を起こしている。これ は反応機構の解明と新しい概念、つまり触媒化学に酸塩基複合効果といったような 有機化学の概念を融合して発見された画期的な触媒であり、まさに概念融合の成果 である。

現在の有機化学、無機化学、高分子化学は設計図があれば簡単に複雑な分子でも 合成できる、という高いレベルにある。すなわち、分子や原子を自在に扱える技術 レベルにある。このような学術レベルをもってすれば個々に発展してきた触媒化学 から脱却して、原子や分子レベルでの触媒設計が可能であり、もって革新的触媒の 基本概念が構築できるであろう。結果的には新しい物質や材料創成にも直結する(図 2.4.1-3)。この概念融合に基づく協奏機能触媒化学がエネルギー問題、環境問題と いった問題の解決に重要な基幹学問になるものと考える。



何故協奏機能触媒化学か? 図 2.4.1-3

### 質疑討論:

- ―ある包括的な目的を定め、その目的に達するためにはこういう触媒が具体的に必 要であると提案し、その提案の裏には基礎研究が随分盛り込まれている、という のが望ましい。協奏触媒概念図の右の新物質・材料創成のところに、例えば基幹 化学物質の構造プロセス(例、エチレンをメタンから作るという触媒プロセス) の設計、といったキーワードを書き込むとよいのでは。エチレン、プロピレン等々 に至るアルコール、アンモニア生成の触媒プロセスを探す、といったような目標 を定めるのが重要ではないか。
- 一個別的な話ではなく、もう少し包括的な立場で触媒化学の研究を取り上げたい。 勿論資料の中の分子触媒プロセスでは、分子触媒開発もプロセス設計も重要で、 コストの問題、反応効率の問題があり、それらを勘案すれば課題設定は容易であ る。しかし、このような個別の問題ではなく、無機・有機・生物、有機金属化学 の基盤の上に新たな触媒化学の構築が必要であり、新たな学術創成のためのテー マアップもあって良いのではないか、ということである。
- 一例えばメタンからエチレンを作ることは画期的なことだが、かなり困難。実現す

るために、触媒化学の総力を結集する必要がある。同様に、水や二酸化炭素更に 窒素を有効利用することは、次世代化学の必然であり、そのために触媒は必須で ある。

- -協奏機能触媒化学は、どういうものに使え、どういうことが実現するのか具体例を知りたい。触媒化学は、先にも述べたように、モノづくりの化学の基幹科学であり、個別の課題解決に必要な触媒の設計指針である。原子・分子レベルで触媒設計するための触媒化学である。
- 一環境問題が取り上げられるが、この問題に取り組むためにも触媒を考えるべきだ。
- ー環境に負荷のかからない触媒反応プロセスが開発されれば、たとえコストは掛かっても既存の合成プロセスを代替すべきだ。
- 一生体関連分野では、動物に埋め込むなら金属触媒でも問題はないが、人間の医療用に作る場合は認可されないわけで、プロセスが代わってしまう。そういう観点からの医療用に特化した触媒化学はもっと増えて欲しい。
- -生体触媒を完全に理解することは非常に大事で、思わぬことが分かってきたりする。例えば酵素触媒機能を完全模倣する場合、研究要素として酵素の構造と触媒機能の相関を詳細に調べることになる。その際に、タンパク質の巨大構造体と分子レベルでの触媒機能の間には橋渡しの研究分野が存在するであろう。しかし、具体的に研究するには非常に難しい領域であろうが、そこから新たな展開が期待できる。
- 自然の模倣といっても、完全に模倣すべきか、部分的で良いのか、あるいは全く 自然の触媒系を使った方が良いのか、それはケースバイケースだ。例えば、メタ ンや水などを化学原料にする場合、これまでにない化学体系であるから、人工系 と生体系を使い分けるか融合するかは、最終製品に大きく依存するであろう。そ の都度議論が必要。
- CO<sub>2</sub>から触媒を使って炭素を作る技術があるが、その実用可能性についてはどうか?
- CO₂の固定化では、エネルギーを多く使い、新たに CO₂を排出するという矛盾を含んでいる。従って、分解して炭素にすることはあまり意味がなく、むしろ付加価値の高い化学品誘導体合成の方法を考えるべきであろう。更に、CO₂を削減することは、現行の技術では原理的に不可能。ただし、有用材料としてCO₂を固定化することで、固定化/分解/再固定化の循環システムを構築できれば、長期的に有用であろう。しかし、それでもその系に封じ込めるためのエネルギーを加えることは必要である。そのエネルギーとして究極的に太陽エネルギーが最適であろう。
- ー触媒は非常に大事、ただブレイクダウンしようとすると焦点がぼけてしまう。しかし、基幹学術といえども革新のためには、集中研究が不可欠である。そのための基礎研究プロジェクトがあっても良いのではないか?

### 2.4.2 超分子ケミストリー: 相田卓三(東大)

セルフメンディングというかセルフヒーリングという自己修復型材料分野で、最近セルフメンディングラバーという材料がネイチャーに出ていた。超分子化学で昔からレーンとかバートマイヤーが水素結合を使ったポリマーを作るということをやっていたが、それをもう少し3次元的な系に拡張し、ゴムみたいに引っ張って、当然あるところで切れるが、切れたところを20分以内にもう1度繋ぎ、37℃で温めておくと完全に前と同じように繋がる。構造は、基本的な骨格は部分的にゴムと同じで、3次元架橋を一部無視しているものである。修復のメカニズムは、非共有結合。これは何回も繰り返せる。

1回だけの使用という例では、カプセルの中にノルボルネンとグラーブスの触媒を一緒に入れておき、壊れたところをちょっと加熱するとカプセルの中身が染み出てきて、重合してカプセルが修復されるものもある(UC サンタバーバラ校のウッドルー)。このようなセルフヒーリング材料というのは、例えば、車の傷から色々なエレクトロニクスまで関係し、省エネ・省資源という点で非常に大切になるが、日本ではそれほど真剣には行われていない。

フレキシブルなディスプレイ、またはフレキシブルなエレクトロニクスについて。フレキシビリティよりもストレッチャビリティの方が大事だと言う人もいる。それはフレキシビリティというのは企業側のメリットが多いが、それに対してストレッチャビリティというのは人間の凹凸ある体に、エレクトロニクスがシェイプとして馴染む、手を曲げても追従してくれる。色々な人間の、例えば患者とか、色々な立場の人が継続的に情報をとっていくのに、エレクトロニクスと人間の一体化は大切である。

延伸可能な材料で、エレクトロニクスの特性も維持できるものもある。300 倍位に伸ばしたり縮めたりしても殆ど導電性が変わらない材料である。200%まで伸ばすと数回で切れるが、70%位だと 1000 回くらい延ばしても特性が全く変わらない。 導電性は若干延伸に依存する。ナノチューブが入った材料でストレッチャブルなエレクトロニクスというのは、ヒューマンフレンドリーな材料としては今後非常に重要になってくるであろう。

界面ソフトマテリアルという材料も面白いが、これはヤモリの手足みたいな皮膚の材料である。ポリマーのレオロジーと凹凸に依存した特性で、力を入れると凹凸がつぶれた時にレオロジーがフッと変わってペタリと付く。ヤモリがガラスに付いているのは吸盤ではない。よく見ると非常に細かな繊維が階層構造で埋め込まれていて、ペタッとつけると付くが、徐々にはがすと離れるのである。

ナノは最近のキーワードだが、ナノというのは高分子の分野では当たり前で、分子とマクロというのはどのようにつながっているか。マクロまでつながるとリアリティのある、材料になって、人が使える訳だが、理想的にはナノ構造から作った方が良いが、やはりマクロスコピックな材料というのは重要ではないか。しかしそれ

を実現するには、ナノ構造まで制御しなければならないということになる。意外に ナノからマクロにつなぐのが難しい。分子からナノまでは今、例えばボトムアップ でいけるが、ナノ構造が出来たものを例えば太陽電池でいえば、ホメオトロピック にあるオブジェクトを配合させ、太陽電池の電極の間にはさんでいくが、それをど うやって立てるかは、分子からナノに行くよりはもっと難しい。磁場配向や電場配 向という程は簡単にいかないのである。

### 2.4.3 有機エレクトロニクス:笠原二郎(ソニー)

昨年、有機 EL のフレキシブルなプラスチック上のディスプレイを発表した。その背景としての、エレクトロニクスの有機材料の話が俯瞰図の検討に役立てば嬉しい。

エレクトロニクスには有機材料が長い間使われている。例を挙げれば、半導体のパターニングに使うフォトレジスト、液晶ディスプレイに使われている液晶も有機材料だ。今までの有機材料(液晶、レジスト)には電気は流していないが、ここ 5、6年盛んに取り上げられる有機エレクトロニクスでは、有機材料そのものに電気を流す。キーアプリケーションはディスプレイ、照明すなわちライティング、太陽エネルギー利用だ。ソーラーセルには、色素増感型とバルクヘテロ接合型の有機太陽電池があるが、シリコンに比べて効率はよくない。ソニーでは色素増感型の太陽電池を開発しているが、蛍光灯など微弱光の場合にはシリコンよりも効率がいい。有機化合物の面白い応用としては、ケミカルセンサがある。プリンティングテクノロジー(プリンティッドエレクトロニクス)も、有機材料の重要な応用である。



図 2.4.3-1 有機 EL ディスプレイ I.Yagi et al., J.SID, 16, 15 (2008)

図 2.4.3-1 は、有機 E L ディスプレイをプラスチックフィルムの上に作っており、曲げても全然画質の変化はない。厚さが 0.3mm、重さが 1.5g、画面は 2.5inch で実証した。ただこの時は非常に短命で、短命を克服しないと産業としては成立しない。新しい材料が期待される。商品化には 5 年以上かかるであろう。

ソニーが商品化した CCD や半導体レーザーは研究を初めて 10 年から 15 年かかっており、他の商品も同じ。研究開発から実用化までは時間が掛かる。

エレクトロニクスの変遷を改めて眺めると、真空管が発明され、社会にエレクトロニクスのインフラができていった。その後、徐々に家庭の中にもエレクトロニクスが入りこんで来て、デジタル化の時代になり、今はネットワークの時代である。ネットワークを使って知識と情報が多量に得られる時代になった。次は何が欲しいかというと心の豊かさ。クオリティーオブライフ(QOL)の時代がネットークや

あるいはブロードバンドの時代の次に来るだろう。これからは情緒的満足な時代、例えば感動、満足、癒し、安心などに持っていかなければならない。ではこのような時代にエレクトロニクスは何が出来るか。筆者は、アンコンシャスエレクトロニクスを提案する。今使っている PC は落下すれば壊れる、持ち歩きには重い、AC アダプタが邪魔などなど。そこで、エレクトロニクスを意識しないで使えるエレクトロニクスを実現したい。今の冷蔵庫や洗濯機、炊飯器などマイコンが入っているが、マイコンを気にせずに使える。情報家電でも、このようなフレキシブルエレクトロニクスを考えたい。

インテリジェントペーパーもその 1 つで、PC 機能のみならず他の機能を搭載し、 紙のように薄くて軽く、しかも畳めて仕舞える。紙のような PC はウォークマンの ように文化を変えることができるだろう。また、生体内で発生している何がしかの 分子をつかまえるセンサができれば面白い。これらを実現するには、まだまだ有機 半導体材料やその他の有機材料が大きく発展しなければならない。

テレビの歴史を見ると、白黒が出来て、カラーが出来たのが最初のイノベーション、その次に大きいのがフラットパネルディスプレイだ。薄くて軽量、すなわち CRT と較べると奥行きが非常に小さい。大画面でも置き場所に困らない。これを 自発光でプラスチックフィルム上に作られた有機 EL で実現できると大画面でもよ り軽くなり、壁掛けテレビが可能になる。ただ、まだまだ、材料的に色々と問題が ある。

プリンティッドエレクトロニクスで大画面フラットパネルを作りたい。今の液晶パネルの工場は造船所のように大規模だ。今のリソグラフィはサブトラクティブエ程で、捨てる材料が90%以上になる。印刷法はアディティブ、必要なものをつける工程なため材料がセーブでき、環境負荷が非常に軽い。今、1ミクロンでラインアンドスペースがきれるくらいまで、印刷でできる。昨年の暮れ、トッパンさんと一緒に発表した(T. Okubo et al., Proc. 14th IDW, AMD5-4L, 463. Sapporo, Dec. 6, 2007.)。まだ欠陥は多いが、10.5インチのプラスチック上に全部印刷で、1回もリソグラフィを使わないで回路を形成した。プラスチックを使って物を作るときにその特性で困っているのは、ガラスと較べると、水とか酸素の透過率が非常に高いこと(図 2.4.3-1)。ほかにフラットネスや表面上の突起物の問題もある。

め

# **Plastic Substrates**

	PES	PC	PET	PEN
CTE ppm/°C	54	60-70	15	13
Transparency % (400-700 nm)	90	>90	>85	85
Refractive index	1.65	1.59	1. 66	_
Retardation	<10 nm	<15 nm	large	large
Water absorption %	1.4	0.4	0.14	0.14
Tg (°C)	223	155	78	120
Chemical torelance				
acetone	Χ	Δ	0	0
ethanol	0	0	0	0
HCL	0	(-)	0	0
NaOH	0	0	0	0

SONY

図 2.4.3-1 Plastic Substrates

### 質疑討論:

- -何が本当に欲しいのか。有機 EL の基板に使うプラスチック基板としては、水の 透過率が小さいものが欲しい。有機 TFT 用の材料はかなり丈夫だが、発光材料が 弱い。材料の改良が必要。インテリジェントペーパーで簡単なプロセッサーを作 るにも、今の有機半導体材料では不足で、1 桁上がった特性が欲しい。
- 一(未来のテレビを考えていくと)視覚を通さないで後ろにある視神経に直接情報を放射する、そのためのエレクトロニクスは必要といわれている。奈良先端大の学生のベンチャービジネスコンテストで、アイデアが出ていた。
- ーセンサは安心安全と医療にもかかわってくる。

# 2.4.4 Biomimetics あるいは Bio-related Molecule による先端材料開発:木村俊作(京大)

ケミカルバイオロジーと高分子の立場から重要研究領域を考えてみると、以下のような領域を挙げることができるだろう。

1. 分子エレクトロニクス、2. 人工光合成、3. 分子機械、4. DDS・分子イメージングおよびバイオセンサ、5. 定序配列分子組織化、などである。ここでは、1 と 5 について言及したい。

分子エレクトロニクスでは、従来のシリコンベースの電子デバイスとは全く異なった搭載・動作原理を使ったデバイスを念頭に置いている。最初に言いたいことは、ナノテクではボトムアップテクノロジーを利用することが重要と言われているが、その認識は必ずしも正しくなく、トップダウンで、充分にできる状態になってきているということだ。よってトップダウンに物理的な限界が見えているからボトムアップにするというのではなく、トップダウンで充分にできるが、ボトムアップの手法を加えればもっと応用が広がると言い直すべきである。

その理由を以下に示す。ITRS(国際半導体ロードマップ)では、2010年で 45nm、2016年には何と 22nm までトップダウン手法で微細加工が可能だとして いる。2005 年と 2007 年の予測は、実際の微細加工とほぼ一致している。2022 年 には 11nm の微細加工が可能だとしている。 すなわちトップダウンで 11nm まで できるとしている。同時に従来の CMOS の機能を超えていく、低電力で動くシス テムを提唱している。更に、More Than Moore といって、センサバイオチップと の組み合わせや MEMS との組み合わせで新しい機能を作り出そうとしている。こ れを見るとシリコンベースの半導体技術の進歩には目を瞠るものがあり、とても有 機の分子を使っていては商品化のプロセスまで考えると勝てないというのが実情で ある。実際、今の半導体は、エレクトロニクスからナノエレクトロニクス、すなわ ちより小さなものへと向かっている。量子ドットを使うとさらに低電力化が図られ、 ナノエレクトロニクスは量子効果に基づく素子部を含めて、総合的なアプローチが 計画されている。これはムーアの法則で成長していく、その延長線上での話で可能 としている。よって、量子効果を含んだナノシステムというのはトップダウン技術 で充分にでき、ボトムアップ技術を標榜する分子エレクトロニクスが取って代わる 理由はなにもないのである。従って、分子エレクトロニクスが本質的に目指すべき ものは、シリコン半導体の能力の限界を超えたもの、動作原理などの基本的コンセ プトが異なるデバイスでなければならないが、そこまで行けるかどうかは、現時点 では不明である。しかしながら、分子エレクトロニクスの進歩は最近、急展開して いる。分子エレクトロニクスは、ラトナーが 1974 年に提案したのが最初で、その ラトナーは、現在、単分子レベルのコンダクタンスがトンネル効果で理解できるよ うになったと言っている。実際、単分子レベルのコンダクタンスについて再現性の ある実験結果が得られるようになり、これらの結果が理論で説明できるようになっ

ている。この分野の現在の研究の主流は、次のステージに入っており、分子の振動 とカップリングするような研究が始まっている。単分子についての I-V 応答にヒス テリシスが見え、分子の中にチャージがトラップされることで、いろんな非線形的 な面白い現象が見えてくるようになった。よって、これからの単分子に関する研究 は、単分子に極めて特徴的な現象を追求することになり、分子エレクトロニクスの 本来目指すべきデバイス開発にとって、非常に重要な局面となる。実際、ベンゼン 核とイミンが交互に並んでいる分子を用いると、この鎖長を長くしたときの抵抗上 昇を調べると、あるところでクリーク現象が観測される。これは、最初はトンネル 電流が流れているが、あるところからはホッピング状態すなわち、分子に電子が入っ てくる状態になる。このように、モレキュラージャンクションにおける単分子のコ ンダクタンスに関しては、チャプター1が終わってチャプター2に入ろうとしてい る。チャプター2では、分子のバイブロニックなモードと電子移動とのカップリン グが非常に重要であるとラトナーは述べている。実際こういった分子を使って、電 圧をかけて電流を測定すると、図に示すようなヒステリシスが起こる。流れない部 分とよく流れる部分、こういったところでスイッチングが起こるのである。従って、 この分子を2つの電極ではさんでスイッチングができる。これは全く新しいアイ デアである。従来の FET は、3 つの電極があり、ゲートで電流をコントロールして いる。ところが単分子を使えば、わずか1分子でスイッチングができ、2つの電極 で済むのである。単分子の導電性を調べていくことで、非常に新しい機能が見えて くる、非常に面白い時期にあると思っている。

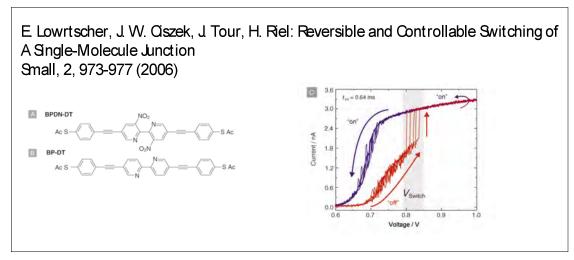


図 2.4.4-1 単分子ジャンクションによるスイッチング

一方、定序配列分子組織化であるが、下図に示すように、DNA でこのようにスクエアーなもの、星型のもの、にこちゃんマーク、それから三角形などの形状のものが、100nm くらいのサイズで非常にきれいにできるようになってきている。この例では、天然にある DNA をスキャフォールド(足場)として使っているが、それに、ステープルを打ち込むような DNA を混ぜることで自己組織化的にこのような形になったのである。この技術は DNA 折り紙と呼ばれている。このような DNA 折り紙の技術を使うと、今のところ 6nm の精度だが、思うもの(例えば金のナノ粒子)を思うところにきちんと並べるということができる時代になってきた。問題は、そこからどのようにして情報を読み出すかということであるが、これはまだできていない。しかしこれは単なる技術的な問題で、そう難しくない問題だと考えている。

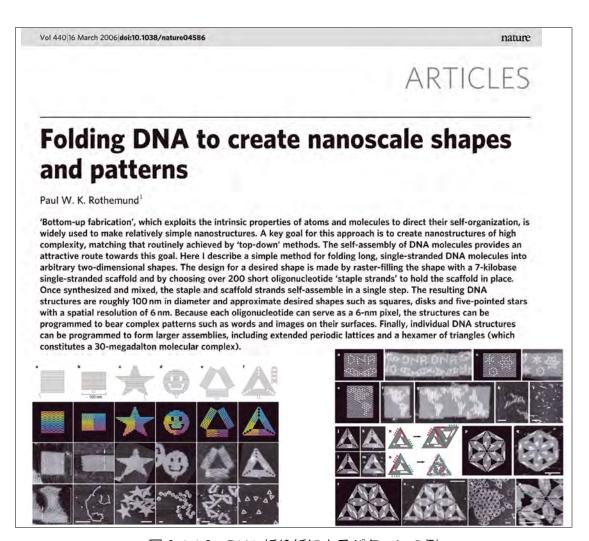


図 2.4.4-2 DNA 折り紙によるパターンの例

### 質疑応答

- ●俯瞰図について
- Q 今回提案された重要領域は、俯瞰図に追加するということか?
- A 分子エレクトロニクスと定序配列分子組織化は、今回の俯瞰図から抜けている。
- ●分子エレクトロニクスの実用化の可能性について
- Q カーボンナノチューブの研究は日本で相当に進んでいるが、それに抗体などを 付けてセンサとして使う例が殆どないようであるが、その理由は何か?
- A 日本では従来からバイオセンサの研究者とナノチューブを研究している人との 交流がなかったため、バイオセンサにナノチューブを使うことがなかったので はないか。欧米では交流があった。
- Q 分子エレクトロニクスは産業化したいが、マニピュレーションの部分は本当に 出来るのか?
- A できると思う。例えばアルカンチオールで SAM(自己組織化単分子膜)を作る。 そして、その上に金をコートして、SAM のコンダクタンスを測る。この方法 が長い間できなかった。なぜかというと金をコートした途端に欠陥があるため に電極がショートしてしまう。ところが今は、100 μ m のポアに SAM を並べ て、上に金を乗せてコンダクタンスを再現性良く測れるようになっているので ある。
- Q 分子は測定できたが、実際にはどんなメリットがあるのか?
- A 単分子を使うには従来の FET の動作は一切考えるべきではない。全く違う動作でからないといけない。有機分子を使うときには、電子が入って還元状態になった段階で分子の特性が大きく変わるということを使っている。 それを読み出すときに、また電子を流してしまったら、かなりの温度上昇になる。 そのようなところから、電子を流すのではなく、電圧で読み出すというような工夫がいる。

### 2.4.5 医療分野における材料研究への期待:大和雅之(女子医大)

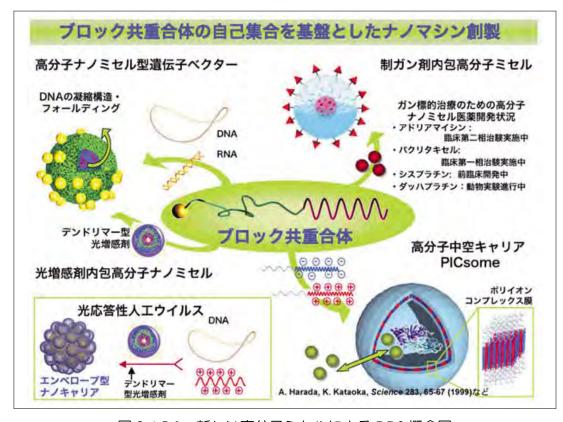
自動車や電子機器等、日本の先端技術は世界的にもきわめて高い評価を得ている が、医療関連分野では例外的に日本の国際競争力は高くないと指摘せざるを得ない。 国内最大手の製薬企業でさえ世界ランクでトップ 10 に入れない他、国内の医療機 器メーカーのほとんどは診断機器にのみ注力しており、今後さらなる市場の拡大が 期待される治療機器では欧米に大きく遅れをとっている。現実に、医療機器は輸入 超過であり毎年赤字が増大している。この傾向は医学研究でも顕著に現れており、 サイエンス、ネイチャー、セルなどの基礎医学系雑誌に掲載された論文数の比較で、 日本はアメリカ、イギリス、ドイツに次いで4位となっているが、NEJM、 JAMA、ランセットといった臨床医学系の雑誌では 14 位になってしまう。医学研 究の出口を臨床応用であると考えると、培養細胞や小動物を用いた基礎研究から始 まって、大形動物を用いた前臨床研究を経て、小規模な臨床研究(トランスレーショ ナル・リサーチ)に至り、最終的に医療として定着するまでには膨大な時間とコス トがかかるが、日本では大動物実験以降が極端に弱い傾向がある。臨床研究に関す る制度上の不備も一つの原因であると考えられるが、臨床を前提とした先進的な医 学研究を避ける傾向が、行政にも国民にも現場の研究者にも共有されているように 思える。自動車や家電の市場が伸び悩んでいる一方、医療分野は現在でも大きく成 長しており、メディカルデバイスでは年間11%の成長である。さらにドラッグデ リバリーシステム(DDS)の分野は年率25%以上の高成長率を誇っている。

図 2.4.5-1 は、東大の片岡教授が発明した新規 DDS 技術である。ブロックコポリマーを用いた直径数 10nm の高分子ミセルであるため腎排泄を免れ、またミセル表層は高度な親水性を示すため肝臓等の細網内皮系にトラップされることなく高度な血中滞留性を示す。多くの薬剤は疎水性であるため、内核を疎水性とすることで、ミセル内部に薬剤を内包することができる。すでに同教授らが創業したナノキャリアなどで複数の治験が進行中である。ガン組織中の血管は正常組織に比べ漏洩性が高く、長時間血中を流れる間に、ガン組織にのみ高分子ミセルが漏出し、正常組織への副作用のない薬物送達が可能となる。同技術は遺伝子導入への応用も検討されている。

ハーバード大学の Ingber と Whitesides は、マイクロコンタクトプリンティングという方法で限局した細胞接着ドメインを任意の形状、大きさで作れることを示した。数ミクロンの接着ドメイン上では細胞は伸展できず丸くなり、接着ドメインを大きくすると平たく伸展する。この研究から、DNA 複製(細胞増殖)やプログラム細胞死の誘発、細胞の分化機能の発現は、細胞形態に大きく支配されていることが明らかになった。同様の観察はすでに経験的には得られていたが、実際に細胞接着ドメインの大きさを制御し、人為的に細胞形態を制御して科学的に証明したのは大きな業績である。化学の Whitesides と、外科医であり細胞生物学者であるIngber が一緒になってやったために実現できた仕事であると言える。MIT の Toner

CRDS-FY2008-WR-05

と Bhatia は、微細加工技術を使って肝細胞が接着するドメインと、肝細胞に栄養 を与える別の細胞が接着するドメインを制御することに成功した。通常、肝細胞を 長期に培養することはきわめて困難であり、数日のうちに分化機能を消失してしま うが、この方法で共培養すると、数週間、肝細胞の分化機能が維持できる。



新しい高分子ミセルによる DDS 概念図 図 2.4.5-1

Hubbell は材料屋だが、分子生物学に依存した新しい材料の創製ではトップを 走っている。体の中にはコラーゲンやラミニンという細胞の外側にいて形を作るの に重要な役割を果たすタンパク質の一群があり、これを細胞外マトリックスと言う。 昔は単なる足場に過ぎないと考えられていたが、最近では細胞の様々な機能を制御 する重要な要素であることが理解されている。このような高度な細胞機能制御を実 現する細胞外マトリックスを、ポリ乳酸やポリグリコール酸などの単純な人工材料 で代替することは不可能であることが分かってきた。Hubbell は、このような細胞 制御機構を有する人工材料製細胞外マトリックスを開発している。

最近、日本でも医工連携、産学連携が唱えられているが、従来通りのやり方、す なわち「工」の製作物を「医」で試験をし、また「工」にもどして改良するという のは、なかなか上手くいかない。アメリカではむしろ医工融合、産学融合に近い。 組織工学を提唱した2人であるバカンティとランガーは外科医と応用化学者であ り若い頃から20年以上のつきあいがあり、ランガーは生物学をよく分かっている。 しかし日本では、一般に材料の研究者はあまり生物学に興味をもっておらず、臨床 を理解しようとしない。このようなタイプの研究者を育てる、または融合したタイプの研究テーマにファンディングをつけると、この分野で日本が巻き返せるかもしれない。東京女子医大では、医者とメーカーのエンジニア、理学部、工学部の学生が1つ屋根の下で研究に励む環境を構築してきた。真の意味での融合に向けての一歩であると考えている。

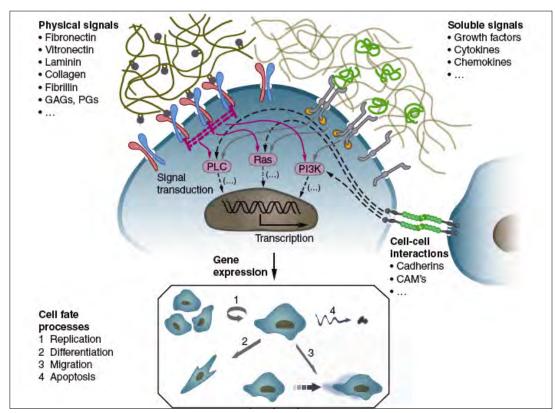


図 2.4.5-2 本物の細胞外マトリックスを真似た人工材料

### 質疑応答

- Q 焦点を当てたい研究テーマは?
- A 短期的には DDS、中期的には再生医療。
- Q コスト的な問題は考えなくても良いか?
- A DDS や再生医療で飛躍的な治療効果が認められる場合は、薬価を高くつけられる仕組みにすべきである。遅かれ早かれ現在の保険医療システムは改革されると考えるが、コストを意識した研究開発は絶対に必要である。
- Q 医工連携の推進策はどうか?
- A 医者と工学部の人が本当に手を組んでいると証明した上で、そのグループにファンドするような仕組みはできないか?そういう条件の予算の作り方が、良い効果を生むだろう。現在の CREST、ERATO でもそうなっていない。しかし、いわゆる共同研究という程度では、このような集学的な領域の研究はなかなかうまくいかない。同じ釜の飯を食って自由に話せるような環境の構築を目指すべき。

### 3. 全体討議

ここでは、7月25日に開催された個々の分科会での議論の結果を各分科会のコーディネータから報告していただき、参加者全員で各分科会における議論の状況を認識した後、全体での討議が行われた。

### 3.1 各分科会からの報告

### 3.1.1 金属材料分科会/コーディネータ:馬越佑吉(NIMS)

俯瞰図の検討結果について

# 1. 俯瞰図の検討結果

- 金属、半導体、無機・セラミックス、有機・高分子を一緒にしたらどうか
- ・ 機能と材料が混在している
- 特殊合金 特殊金属材料?
- ・ 資源的な観点からベースメタルとレアメタルを追加
- 耐食材料、耐熱材料を追加
- ・ エネルギー変換材料を追加
- ・ 永久磁石を追加
- 電子・光・磁性材料は分けた方が良い
- ・ 超硬材料を追加
- 金属ナノ粒子に金属ガラスを追加
- ・ 計算科学を追加
- 鉄系超伝導と狭めない方がよい→新規超伝導では?
- 巨大磁気抵抗を追加
- 分野分けはしない方が良いのでは?
- ・ 人工骨・人工臓器に医療デバイスを追加
- ・ モーターを追加
- ・ ライフと医療は分けた方が良い

### 図 3.1.1-1 俯瞰図の検討結果

### 重要な研究領域について

金属分科会が主に担当する、または、関連する分野について3領域を挙げ、この分野の顕著な研究成果ならび今後の展開について議論した。個々の研究分野の内容はそれぞれの研究者の発表内容を参照して戴くとして、ここではその要約を示す。

まず、「省エネルギー構造材料」という観点から、発電用ガスタービンや航空輸送機用エンジン用材料などの燃焼効率を上げるための材料開発と、軽量化によってそのエネルギー消費を少なくする材料である。すなわち、CO<sub>2</sub> 排出削減のための省エネルギー構造材料として、耐熱材料、あるいはコーティング技術など、軽量化あるいは超微細粒による高強度構造材料は、わが国の国際競争力が強い研究分野と

### して挙げられる。

「エネルギー変換・貯蔵・輸送材料」という括りでは、熱電変換材料、2次電池、 永久磁石というような材料についての研究開発が重要である。

「資源対策・リサイクル技術」も忘れてならない。どのような材料を作るにしても、 資源に対する国家戦略性と、それを再利用するリサイクル技術の構築が必要である。 資源は豊富に存在する場合も多いが、それをメタルとして活用するに至るまでに大 きなエネルギーの消費を伴い、CO<sub>2</sub>を大量に発生する。省エネ型の製錬技術や、 稀少元素という観点からレアメタルやベースメタルの製造、リサイクルに対する対 策が必要である。

# 2.① 重要領域(分野中心)

### ・省エネルギー構造材料

発電用ガスタービンや航空機用ジェットエンジンなどの熱機関に使われる構造材料の高耐熱化、軽量化、 高強度化により化石燃料の需要を削減し、CO2排出の大幅削減を図る。

- 一耐熱材料(タービン用、輸送機用)
- ーコーティング技術、防食技術
- 一軽量構造材料
- 一超微細粒構造材料

### ・エネルギー変換・貯蔵・輸送材料

熱を電気に変換する熱電素子、電気を貯蔵する二次電池、電気を動力に変換するためのモータ・発電機に必要な永久磁石、軟磁性材料、ゼロロス送電を可能とする超伝導線材、水素を電気に変換する燃料電池、水素を貯蔵する水素貯蔵材料、磁場変化で冷凍を可能とする磁気冷凍材料など、エネルギー・環境問題に必須の材料。

- 一熱電変換材料
- 一二次電池材料
- 一永久磁石
- 一軟磁性材料
- 一超伝導線材
- 一燃料電池
- 一水素貯蔵材料
- 一磁気冷凍材料

### ●資源対策・リサイクル技術

ベースメタル(銅、亜鉛など)は資源損耗枯渇化が早く、劣質資源とリサイクルに対応する技術が必要である。 レアメタルは資源はあるが偏在し、製錬・リサイクルに大きなエネルギーを要する。政治的、資源的供給制限 に対応するため省エネルギー資源技術・リサイクル技術の開発が必要。

- 一省エネ型製錬技術
- ーレアメタル・ベースメタル

### 図 3.1.1-2 重要な研究領域①

他の分科会にも大きく関連する横断的な分野についても議論した。例えば、触媒材料、スピントロニクス材料(トンネル磁気抵抗、巨大磁気抵抗材料)などが挙げられる、半導体スピン注入に必要なスピン分極率の高いハーフメタル材料の開発も重要である。これは半導体の分科会でも挙げられていた。それからデータストレージ。ナノテクが威力を発揮する分野である、それから、生体機能医療デバイス材料。これは無機材料あるいは高分子有機材料にも関連するが、体内に入ったらその力学機能を担うためには、金属が中心となって、その複合的な利用が必要である。それから材料設計。従来のような説明のための計算科学ではなくて、予測というか計算科学に基づいて新たな材料設計が重要である。

## 2.② 重要領域(分野横断的)

- 触媒
  - ナノ粒子触媒
- スピントロニクス材料

トンネル磁気抵抗(TMR)、巨大磁気抵抗(GMR)、半導体スピン注入に必要なスピン分極率の高いハーフメタル材料の探索。

- ハーフメタル
- ・データストレージ

テラビット記録を実現するための高磁気異方性材料のナノグラニュラー薄膜創製。

- 磁気記録媒体
- 生体機能医療デバイス材料

体内埋入部材の70%以上を占める金属材料に対して、合金開発による生分解性、低磁性の 実現、表面機能化による骨形成、軟組織接着、抗血栓、バイオフィルム非形成の創製を行う。

- 生体機能表面
- 低磁性・非磁性
- 生分解性
- 材料設計

計算科学はハイパフォーマンススーパーコンピューター時代には重要。説明の道具ではない、 予言性を持つ計算を行い、材料設計に供する。

- 計算科学
- 機能元素
- ナノ解析

図 3.1.1-3 重要な研究領域②

金属分野に関係する省エネルギー構造材料に耐熱構造材料がある。この代表例は、 航空機のエンジン部分に適用される材料、ニッケル系超合金であり、この金属間化 合物析出物を含む2相組織のナノサイズ構造制御によって高機能化、高耐熱性化 を図っている。わが国で最近、さらに高燃焼温度で熱効率・低消費エネルギー、 CO<sub>2</sub>の削減に繋がるコバルト基超合金が新たに発見されている。これをナノ組織 制御によって高性能化し、我が国が開発しようとしている環境適応型の小型航空機 エンジンやガスタービンなどに資することが出来る。

同じく省エネルギー構造材料としての軽量構造材料では、資料に示した金属材料の内で一番軽いのがリチウムで、その次がマグネシウム、アルミニウム、チタンが挙げられる。省エネルギーを考えると、出来るだけの軽量化が必要である。ただリチウムは使いにくいので、現実的に使いうる金属元素としてはマグネシウムがターゲットとなる。従来から自動車をはじめかなりの部分に使われているが、結晶構造から非常に加工性が悪く、ほとんどの場合は鋳造材として使われている。鋳造ではコストや成型・形状の問題等で必ず制限されため、加工性の良い材料を開発する必要があり、2つのアプローチが考えられる。

1 つはナノレベルの微細析出物をコントロールするという考え方、もう 1 つは積層構造をコントロールした金属間化合物を析出させて高強度で尚且つ展延性に富んだ材料を開発する考え方である。従来のアルミのような加工性を有し、尚且つ高強度耐熱強度が高い材料が開発されている。さらにナノレベルの組織制御によって、新たな分野を開拓する必要性が議論された。

<背景> 民間航空機の需要ニーズは年率約5%レベルの成長見込まれており、2026年には約30,000~35,000機必要(2006年の約2倍)とされている. 化石燃料消費量およびCO₂削減の観点から、エンジンの燃料消費効率(SFC)の向上が必要不可欠である. 国内においては、次世代型リージョナルジェット(MRJ)の開発が始まり、また環境適応型小型航空機用エンジン研究開発も行われている. これらの新しい技術開発の実現のためには、それを支える新しい耐熱構造材料の開発が必要である.

<目標>現在の民間航空機用エンジンのタービン入口ガス温度は1600°C以上(離陸時)にも到達する. 新型エンジンでは燃料消費効率向上のためには、さらなる高温化、高効率化が有効策である。そこで、 燃焼ガス温度上昇を可能にする優れた高温タービン部材の開発を行う.

<研究課題> Ni基超合金の性能向上に関する研究を行うとともに、新規耐熱構造材料として、Co基超合金、金属間化合物材料(遷移金属アルミナイド、遷移金属シリサイド)をターゲットとし、高温タービン部材としての実用化を目指した研究を行い、新しいナノサイエンスの構築を目指す。

- 1. 高耐熱性をもつ新材料探索
- 2. 基本材料のナノ・ミクロ構造制御による高機能化
- 3. 高温曝露下での組織の安定化と異相界面の 構造・組織学の構築
- 4. 耐熱構造体創製のためのプロセス構築
- 5. 結晶塑性学, 材料組織学(金属系材料の変形と 物質移動)の基礎



図 3.1.1-4 省エネルギー構造材料(耐熱構造材料)①

# 省エネルギー構造材料(耐熱構造材料)

<背景> 現在用いられている大容量ガスタービン発電システム(出力25万kW程度, コンバインド出力40万kW)の高効率化のためには、ガスタービンのサイクル最高温度の向上が有効である. 現行の1500℃級を1700℃級ガスタービンに代替した場合、熱効率を約52%から約56%まで上昇させることが可能であり、さらにFC/GTハイブリッド発電化により60%までに高めることができる. これにより、省エネルギー化が図れるとともにCO2の大幅な削減が見込める. このような高効率大容量ガスタービンシステムの実現のためには、優れた高温タービン部材の開発が必要不可欠である.

<目標>耐用温度1100℃以上を有し、優れたクリープ特性と熱疲労特性を兼ね備えた1700℃超級発電ガスタービン用Ni基超合金の開発および、高性能遮熱コーティング材の開発を行う。

<研究課題> 現在最高の性能をもつ第5世代Ni基超合金をベースとして、従来は両立が困難とされてきた、クリープ特性と熱疲労特性のバランスに優れた新しい合金、遮熱コーティング材料を、ナノスケールからマクロスケールまで横断的に理解することを通じて開発する。また第5世代合金では希少金属元素であるReやRuが大量に使用されているため、それら希少元素の元素置換に関する研究を行う。

- 1. クリープ特性と熱疲労特性のバランスに優れたナノ組織、欠陥構造制御
- 2. 耐熱性向上のための遮熱コーティングの開発
- 3. 高温曝露下での組織の安定化と異相界面の 構造・組織学の構築
- 4. 希少金属元素の元素置換

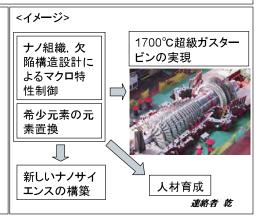


図3.1.1-5 省エネルギー構造材料(耐熱構造材料)②

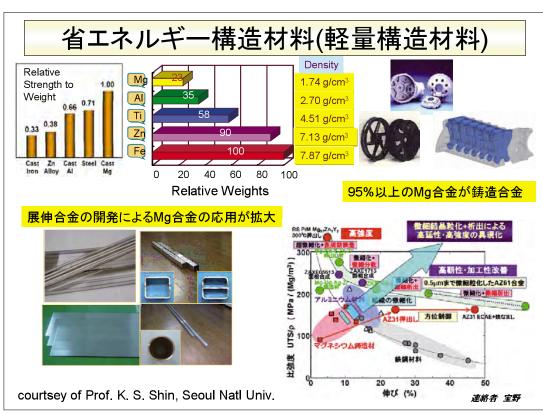


図 3.1.1-6 省エネルギー構造材料(軽量構造材料)

エネルギー変換、貯蔵、輸送材料について考える。エネルギーのかなりの部分が 排熱として放出されている。これを直接電気エネルギーとして変換するためには、 熱電変換材料は非常に重要である。その場合の指針として、高い電気伝導を維持し ながらフォノン散乱源を導入して、熱伝導度を低減し材料特性の向上を図る。ナノ レベルでの組織制御によって新たな熱電変換材料の開拓の可能性が議論された。

それから同じく、永久磁石の重要性は高い。わが国で発明されたネオジウム鉄ボロンという非常に優秀な高磁性性材料がある。動作温度が出来るだけ高いところでこの材料の高保磁力を維持したい。そこで、ディスプロシウム(Dy)を入れて特性が改善できるが、この Dy を入れるとエネルギー積が下がる。 Dy を出来るだけ使わないで高いエネルギー積を保ちながら高保持力を維持するには、ナノレベルの結晶粒微細化と界面でのネオジムリッチ層のような、ある元素の局在化が必要。そのためのナノ界面のマルチスケール解析や複合的な技術が必要であろう。

軟磁性材料についてであるが、現在、鉄シリコン系であるとかパーマロイ等が実用化されている。これもナノレベルにコントロールすることによって高い飽和磁化率を与えられて優れた軟磁性材料が得られるということが予測される。

水素貯蔵材料は、燃料電池自動車や水素エネルギー社会の実現には無くてはならない材料である。水素吸蔵量を出来るだけ大きくするために、高圧合成によって水素吸蔵の極限状態を実現して、そのデータをもとに合金探索を行う新しい試みも最近なされている。

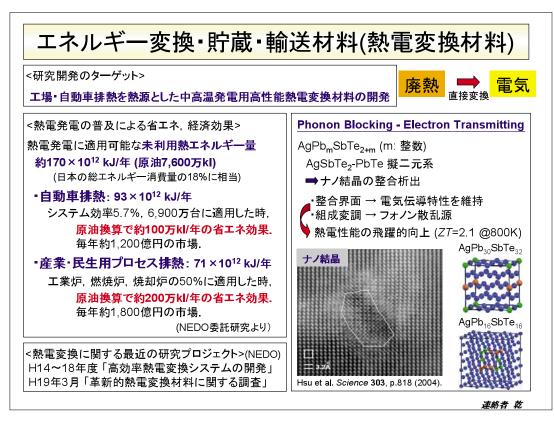


図 3.1.1-7 エネルギー変換・貯蔵・輸送材料(熱電変換材料)

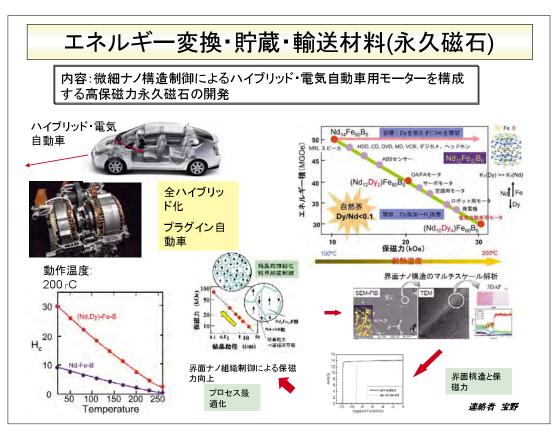
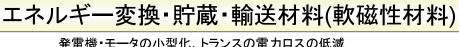


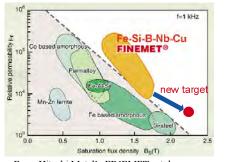
図 3.1.1-8 エネルギー変換・貯蔵・輸送材料(永久磁石)

ح

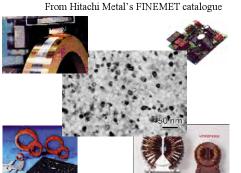
め

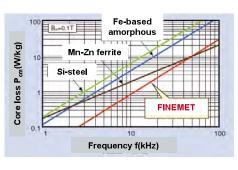


発電機・モータの小型化、トランスの電カロスの低減



10 FINEMET®





連絡者 宝野

図 3.1.1-9 エネルギー変換・貯蔵・輸送材料(軟磁性材料)

# エネルギー変換・貯蔵・輸送材料(水素貯蔵材料)

### 水素貯蔵材料

<現状>TiCrV系BCC合金で3mass%達成に目処 使用例:2.6~3mass%(<100°C) 材料コスト 30,000~40,000円/kg、反応熱 ΔH 30~40kJ/molH2

### <長期的テーマ>

●6mass%以上級貯蔵合金材料

Mg系、超高圧合成や超積層複合化等の新規水素化物の探索

·無機系貯蔵材料

アラネート系(Na-Al-H)、アミド(N-H)・イミド(N-H2)系(Li-N-H)、 ボロハイドライド系(Na-B-H)、複合系材料で3~13mass% 作動温度高い

### 水素貯蔵材料容器(ハイブリッド容器)

水素高圧タンク中に水素吸蔵合金をハイブリッドする

水素量/容器/容器重量(充填圧力): 5kg/200L/567kg(3MPa)

・ハイブリッド容器

水素量/内容量/外体積/容器重量(充填圧力): 7.3kg/150L/200L/420kg(3.5MPa)

連絡者 岡田

図 3.1.1-10 エネルギー変換・貯蔵・輸送材料(水素貯蔵材料)①

# エネルギー変換・貯蔵・輸送材料(水素貯蔵材料)

### 研究開発のターゲット:

コンパクトで安全な水素輸送媒体としての水素貯蔵材料(150°C以下、5. 5μασσ%)の開発

経済・社会での活用に関する具体的ビジョン: 燃料電池自動車の水素貯蔵タンクとして、350気圧の高圧水素ガスタンクが試用されているが、安全性が高く、コンパクトな水素貯蔵材料タンクが待望されている。本プロジェクトでは、1回の充填で500km走行可能なように150°C以下で5. 5μασσ%の水素容量を有する高容量新規水素吸蔵材料を開発する。

### 開発法の特徴:

・超高圧(GPα(1万気圧))による合成法の特徴 融点の上昇(Mgは4GPαで900℃まで上昇)で 融点以上の高い温度で固相反応が進行。 原子半径の減少(Mgは5GPαで10%減少)

### 研究の概要:

1~6GPαの超高圧により、高容量の新規水素化物 を合成する。本合成法が新規水素化物探索に適用例 が少ないことから2元系合金から着手する。

- ① Mg-X系合金(X: 遷移金属など)
- ② Mg-Re(希土類元素)-X系合金
- ③ Mg-Li-X系合金
- ④ Li-X系合金 これまでにMg-X2元系合金において20以上の新規 化合物の合成に成功している。

# 高圧合成によりMgーY系の新規水素合成に成功

(My0.33Ψ0.67)4H12の結晶構造

高圧合成アン ビル模式図

### 安心安全な燃料電池自動車の実用化

安全な水素吸蔵合金タンクの搭載





連絡者 岡田

### 図 3.1.1-11 エネルギー変換・貯蔵・輸送材料(水素貯蔵材料)②

資源対策リサイクル技術は非常に重要である。ベースメタルとして鉄とかアルミとか銅があるが、このなかで銅とかアルミは極めて古典的で大量に存在するように思われるが、これまでの消費が非常に多く、資源の枯渇が早いといわれている。また資源的に不都合な随伴不純物を排除するためには技術開発が必要である。一方、レアメタルと称されるものはトータルとして資源はあるが、品位が大きな問題である。また多くの場合、主要な金属副産物として製造され、そのため需要の変動に即して量産することが困難で価格変動が激しくなる傾向がある。また、それを製造あるいはリサイクルするに当たっては、大きなエネルギー消費を伴う。出来るだけエネルギーの消費を抑える、あるいはその変換過程での排出 CO2 ガスの量を減らすような技術開発が必要である。

もう1つ資源戦略という観点からすると、その存在が非常に局在化しているような場合、今現在問題にならなくともある時期に供給制限を伴ったりする場合が考えられ、絶えず対策が必要である。

資源をその存在量だけで表すクラーク数のみで元素を議論すると誤解を招くことがあり、現実問題として我々が使う資源は品位と存在量を考えねばならない。元素としては存在するが実際には使えない部分が多い。そういう意味では採掘されている部分をさらに有効に利用するための技術開発が必要であろう。

# 資源対策・リサイクル技術(レアメタル・ベースメタル)

- ベースメタル
  - 銅、亜鉛、鉛など古典金属 これまでの消費量が多く資源損耗枯渇化が早い
  - 資源的に不都合な随伴不純物を排除する技術が必要
- レアメタル
  - ベースメタル、鉄とアルミ以外 資源はあるが、製錬・リサイクルに大きなエネルギーが必要
- いずれも地球科学的に偏在している
  - 供給制限 >> カウンター資源・製錬・リサイクル技術の確保
- 鉄、アルミ:資源的には豊富
  - GDP的基盤的材料
  - エミッションとエネルギー消費による生産制限を受ける
    - ・ 炭酸ガス(鉄)、エネルギー課題(アルミ)
- 省エネルギー資源技術・リサイクル技術の開発

連絡者 前田

図 3.1.1-12 資源対策・リサイクル技術(レアメタル・ベースメタル)

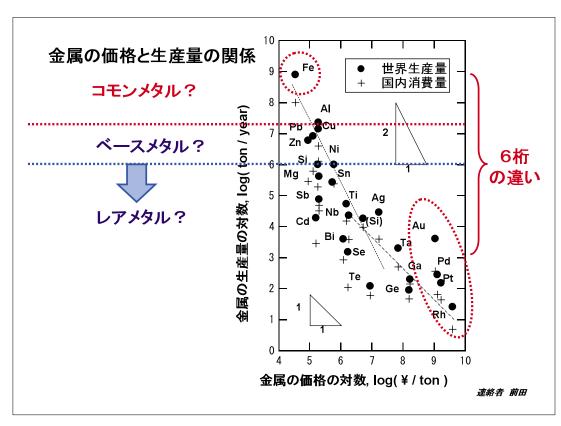


図 3.1.1-13 金属の価格と生産量の関係

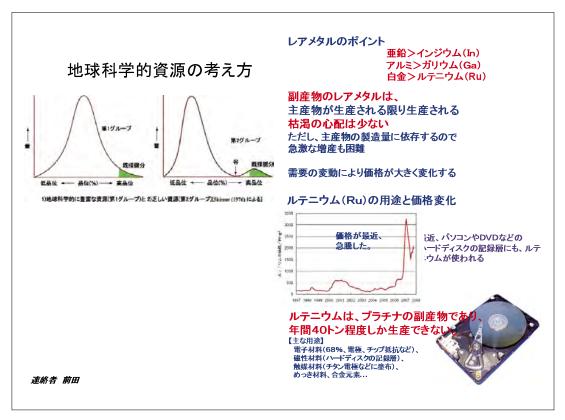


図 3.1.1-14 地球科学的資源の考え方

次に他分野が関係するもので、最初にスピントロニクス材料を挙げる。いわゆるハーフメタルと言うもので、これはナノ積層構造の制御によって、トンネル磁気抵抗や、巨大磁気抵抗、あるいはスピン分極率の高い材料が創出できる。例えば、ある元素を入れ置換することによって、そのスピン分極率を大幅に変えて、それによってスピントロニクス材料の飛躍的な改善、新しい材料の創製が出来ていくであろう。データストレージ材料・磁気記録媒体は、巨大な磁気異方性を利用し、これをナノレベルに制御し、かつ、その熱的安定性を制御することによって実現可能になる。ナノテクノロジーの駆使が重要である。

生体機能医療デバイス材料分野では金属材料に限らず、バイオアパタイト等のセラミックスあるいは、再生医療材料等に対して、様々な材料が考えられる。しかし、例えば力学的機能を大幅に要求されるような部分については、依然として金属材料が主に使われる状態である。その上のコーティングや、他の分野との複合によって機能医療デバイスの開発が実現可能になるという意味で、材料の分類にとらわれず、複合的な領域の研究者がお互いに連携しあって開拓していくべき分野であろう。

材料設計・計算科学も必要不可欠である。第一原理計算であるとか、マルチスケール・シミュレーションなど様々な計算手法の開拓が必要であるとともに、それが従来の特性の理由づけや原因を説明するだけに留まらず、新たな材料特性を設計するような考え方の展開が必要である。材料の高機能化や新機能の探索において、計算科学とナノ計測技術や解析手法の開拓がさらに進めば、新たな材料開発が可能にな

るだろうと思われる。

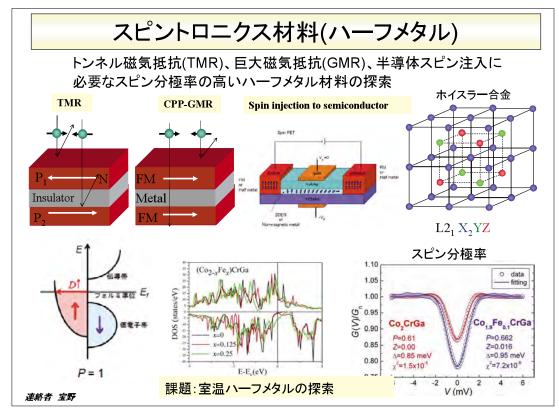


図 3.1.1-15 スピントロニクス材料(ハーフメタル)

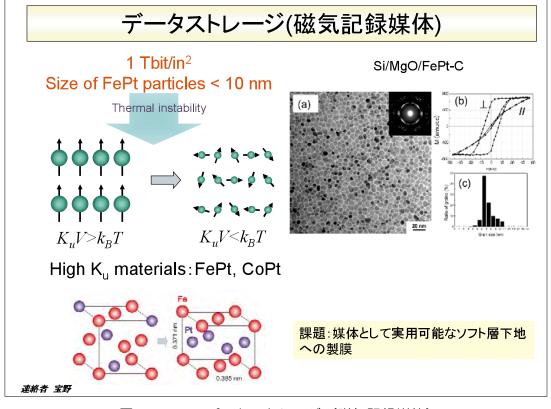


図 3.1.1-16 データストレージ(磁気記録媒体)

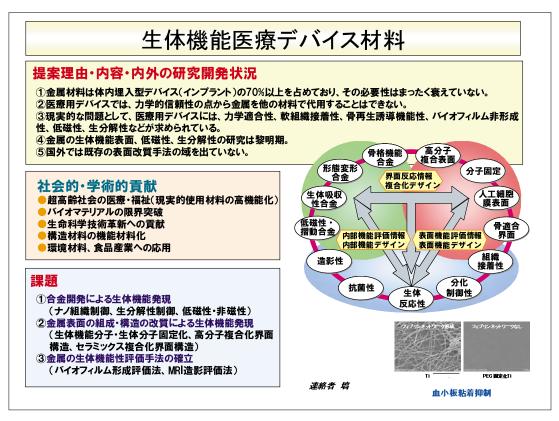


図 3.1.1-17 生体機能医療デバイス材料

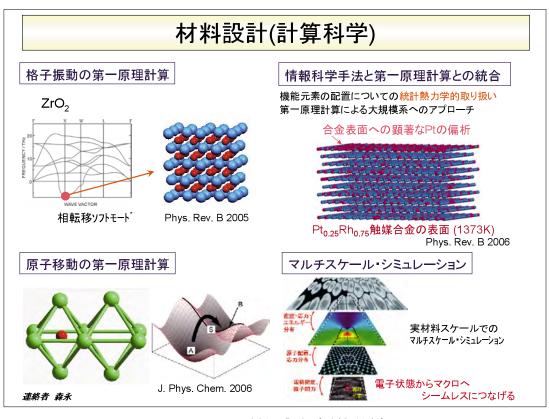


図 3.1.1-18 材料設計(計算科学)

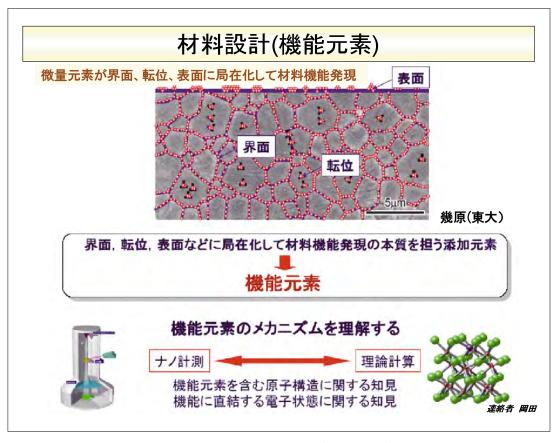


図 3.1.1-19 材料設計 (機能元素)

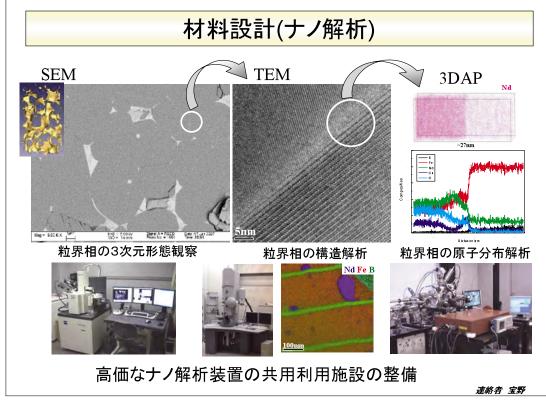


図 3.1.1-20 材料設計(ナノ解析)

## 今後の推進方策について

ナノテクノロジー・材料分野は、第2期、第3期と行われた。昨日の議論では ナノテクノロジーを時間軸から考えて、3つの大きな考え方でアプローチしてはど うかという提案が田中先生からあった。

我々としても、そのナノテクを使い、物質探索、物質から材料への展開、それからさらに材料からデバイス、あるいは製品まで展開すべきであると考えている。物質探索、創製からはじまり、地球規模問題の解決、あるいは産業競争力、快適な生活を送るために必要なことを実現可能とするよう意識して研究開発しなければならない。さらにナノの持っている特性、その機能を先鋭化・複合化・組織化にすることによって高機能デバイスにしていく「物質材料ナノシステム」という分野を設定することを提案する。

# 『物質・材料・ナノシステム』

物質探索・創製にはじまって、地球規模問題解決・産業競争力強化・生活の質の向上へ向けた実用展開を可能とする材料開発、さらにナノの先鋭化・複合化・組織化による高機能システムの実現。

図 3.1.1-21 物質・材料・ナノシステム

推進、研究システム、ファンディング等に関して以下のような議論を行った。いまや1人の研究者、あるいは1グループ、あるいはある組織のみが、高価な装置を専用するという時代は終わった。共用拠点や、設備を充実させて全研究者への開放によって分野全体の活性化を図ることが、限られた研究予算の中で必要である。そのような思想で拠点が作られても、自分達が必要とする装置のみを装備するような傾向にあるので、社会が要請するものを揃えていくことも重要である。そして共同研究とするのか、あるいは個々の研究者の支援とするのか、問題意識をもった共通拠点の議論と整備が必要であろう。

先端的で持続的なわが国の科学技術の発展を図るためには、継続的なファンディングが必要である。イノベーションというのは、本来我々が意図して設定した分野ではなくて、非常にチャレンジングな仕事から生まれることが多い。よって、ハイリスク、ハイリターンの研究システムやテーマ設定も必要である。途中で打ち切る勇気、継続する勇気を備える必要がある。1つのゴールを目指していても、複数の

8

アプローチを意識的に採択して競わせて、途中で他のものは打ち切り、打ち切る研究から得られた成果も十分に反映するようなシステムもあっても良い。

# 推進方策・研究システム①

- 共用拠点設置・整備の重要性
  - 人材育成と継続性の視点が重要
  - 個別に買えない高価な装置 電顕、アトムprobe、微細加工装置
  - 共同研究・単純使用の仕分けが重要
  - 誰にでもアクセスが容易で使いやすい
  - 戦略性をもった機器配備

図 3.1.1-22 推進方策・研究システム①

# 推進方策・研究システム②

- 先端研究に限らないファンディング
  - 継続的なファンディング(戦略的継続研究)
- ハイリスク・ハイリターンの研究システム、 テーマ設定
  - -途中で打ち切る勇気、継続する勇気
  - 広く採択し、途中で選択と集中を行う

図 3.1.1-23 推進方策・研究システム②

## 3.1.2 半導体材料分科会/コーディネータ:金山敏彦(産総研)

半導体デバイスで使われる材料は半導体だけではないので、半導体がメインエレメントとして活躍する分野は何かという意識合わせを最初に行ってから議論を進めた。半導体という媒体を用いて処理、変換等を行う対象が情報であるかエネルギーであるかによって、図 3.1.2-1 に示したようなカテゴリーがある。この表のどこに位置するか、すなわち利用目的をまず想定して、それに対応する材料の開発課題として何があるかを議論した。上述のように半導体デバイスは半導体材料だけでなく、色々なものの組み合わせの妙でできている訳だが、これがナノになると、むしろ組み合わせの妙をどう制御するかで特性が変わってくるので、そのような総合的な議論が必要となる。

# 議論のポイント

- ・ 半導体デバイスは種々の材料・プロセスの組み合わせ
  - 単独の材料の物性では特性は決まらない
  - ナノレベルの材料集積が重要⇒界面特性が重要
  - 異種材料の本質的な融合が重要
  - 物性modification技術(プロセスひずみなど)が重要
- 定量的な相互比較による位置づけの明確化
  - ナノテクノロジーの研究成果を総合的な技術に結実させるには?

半導体材料の対象・	重告 来	フピい	スの他
	m 101 TT	A [ ]	7 (/ ) 1111

	情報	エネルギー	
処理,変換	処理	変換	
記録, 蓄積	記録		
伝送	伝送, 配線	伝送	
入出力	センシング、表示	生成,消費	

図 3.1.2-1 半導体材料分科会における議論のポイント

### 俯瞰図について

我々はこの俯瞰図の整合的な美しさにはあまり立ち入らないで、与えられた宿題として、抜けがないことを担保するという観点で検討した。この観点から見ると、かなり抜けている。逆にいうとここで抜けがないようにすることは、おそらく不可能であろう。むしろここで作成したものに抜けがないと思ってしまうことが危険である。この俯瞰図を使う場合に、この点は留意しておく必要がある。図 3.1.2-2、図 3.1.2-3 に分科会で出されたコメントをまとめた。

ح

め

#### 俯瞰図について

知京:紫部分に抜けはないように思える

「テラヘルツ計測・分析顕微鏡」は露わに入れるべき 非破壊計測手法として有効

\*動的&高空間分解能計測手法

佐藤: 欠陥の可視化を可能とする評価手法

金山: low-k, high-kは分けるべき。右上の「寿命」は、むしろ「信頼性」とすべき。

high-k & metal 配線

low-k & 配線遅延 & 光インターコネクト、 高移動度半導体、ワイドバンドギャップ、3次元ナノ計測

田中:高移動度MOSFETチャネル材料(Ge, SiGeなど)

金属人工格子·多層膜(GMR素子)

強磁性トンネル接合(TMR素子,強磁性金属、強磁性半導体、絶縁体などを含む) ハーフメタル材料

吉田:別紙 軽元素系半導体,「高機能」という言葉は意味がない.「光」の観点の材料がない. フォトニック結晶. "非"シリコンという呼び方はよくない. オプトエレの材料が入っていた方が良いのではないか?

野々村:ナノ構造を制御することによる連続的バンドギャップ制御

畠:初見した際に、内容、構成、意味合いがわかりづらいのではないか?

物質・材料俯瞰図としてナノカーボンが半導体に「だけ」分類されているのはいかがなものか? (通常のナノカーボン材料は、金属・半導体混在)

産業化の課題は「大面積化」「高速化」より、「量産化」がより包括的であると考えます

産業化の課題に通常もつともクリティカルない因子である「コスト」があった方がいいのではいか?

産業課の課題で「寿命」より、「信頼性」がより高次の概念ではないのか?(再現性、寿命、安定性等を包含する)

粟野:シリコンフォトニクス,酸化物エレクトロニクス,シミュレーション,液浸用材料が抜けているのではないか

秋永:今ある材料の延長を考えるのか、必要な機能を持った材料を配置するのか?

"脱"CMOSはよろしくない 縦型・3次元CMOSを入れるべき

照明用材料、光メモリ、(フレキシブル)ディスプレイ、レーザー材料

「半導体材料」なのか「半導体デバイス用材料」なのか不明. 材料で区分することに無理がきている.

外枠からマトリックス状に紫部分の材料を見れるような俯瞰図にした方が良い

#### 図 3.1.2-2 俯瞰図に関するコメント(1)

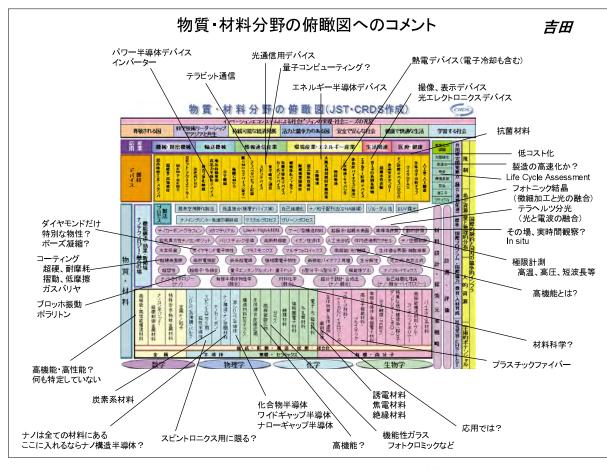


図 3.1.2-3 俯瞰図に関するコメント(2)

## 重要領域の提案

半導体材料分科会では、今回の主題である重要領域について、まず図 3.1.2-4 に示すように、2つの軸を考えて整理した。時間軸で先を狙うものは難易度が高く不確実性が高いものになる。材料分野では、必ずしもハイリスク・ハイインパクトの研究に重点投資するだけが良い訳ではなく、基盤技術とし

て長期に亘り継続する研究も

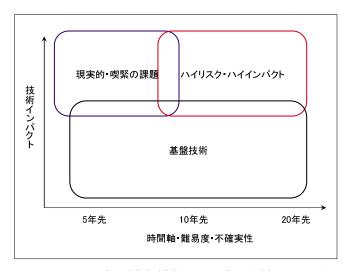


図 3.1.2-4 時間軸と技術インパクト軸チャート

非常に重要である。また、かなり近い将来に実現するのが現実的な要請として高い というのが左上の領域である。

以下、図 3.1.2-5~図 3.1.2-10 に 6 つの例を示した。図中、赤枠で囲んであるのは、より他分野との融合性が高い技術課題である。これはまさに半導体材料分科会だけで閉じるテーマではなく、他の分科会と密接な協力が必要なテーマである。また、これらのチャートで示した重要課題で共通的に議論されたことを、図 3.1.2-11 に挙げた。

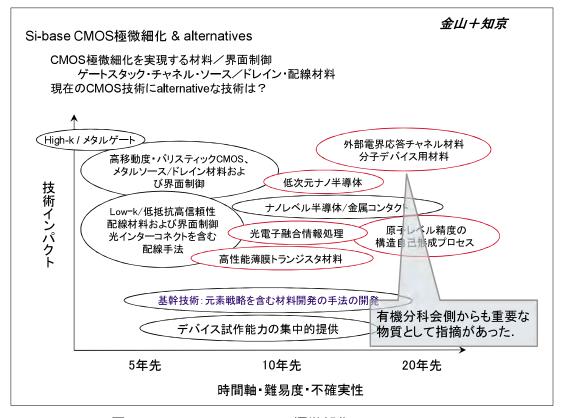


図 3.1.2-5 Si-base CMOS 極微細化 & alternatives

め

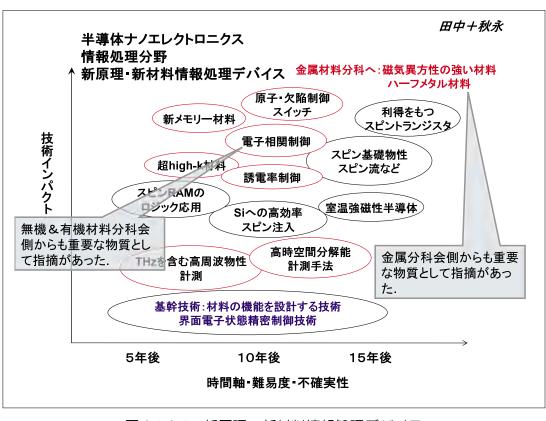


図 3.1.2-6 新原理・新材料情報処理デバイス

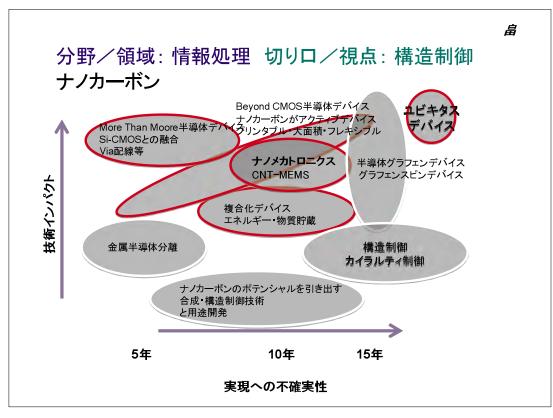


図 3.1.2-7 ナノカーボン

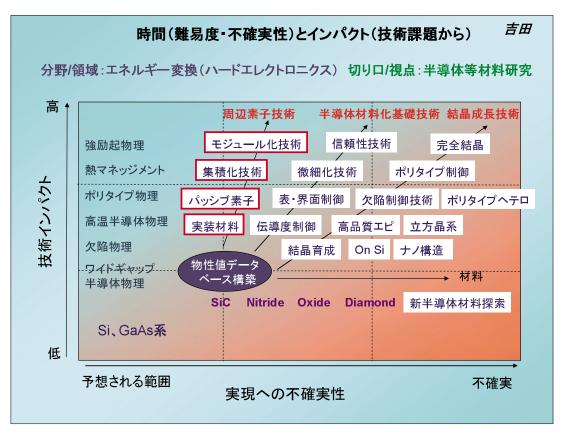


図 3.1.2-8 ハードエレクトロニクス

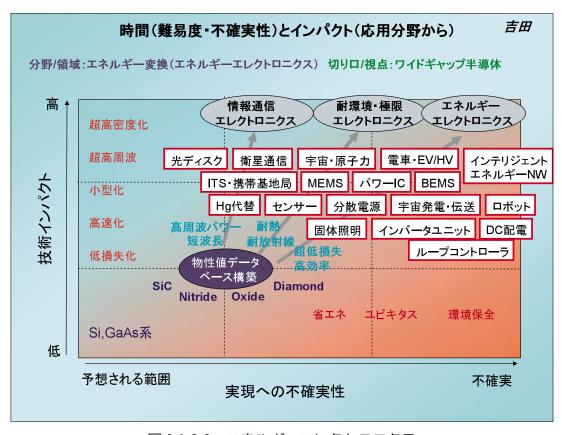


図 3.1.2-9 エネルギーエレクトロニクス

め

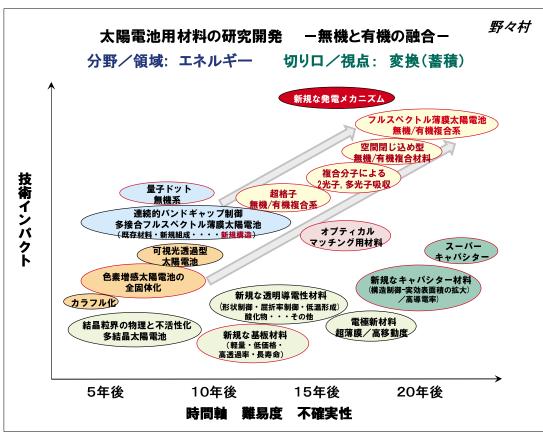


図 3.1.2-10 太陽電池用材料の研究開発

# 上位の視点(人材育成の視点は後述)

- 1, 材料研究は基盤的であり、継続的に材料の高度化を図るべき.
- 2. 重点領域への集中的な投資と相補的であるべき.
- 3, 研究拠点がないことが、基盤研究の応用化への速度を遅らせている大きな原因の1つと考えられる.
- 4, 俯瞰図は位置づけを理解するために用いる. 実施すべきプロジェクト立案には、必要な機能を大まかに示し、それに応える提案を募るほうがかえって漏れなくEmerging Researchへの投資ができるのではないか?
- 5,新材料を実用化し、製品化する前には、戦略的にESH問題を解決しておくべきである。

図 3.1.2-11 上位の視点から

## 重点課題例の詳細説明

## 研究領域名: CMOSトランジスタ 用新チャネル材料

内容: 既存のバルク材料を代替し、CMOSトランジスタの特性を飛躍的に向上させられる半導体材料の探索・実証

高移動度・バリスティック

低次元ナノ半導体

外部電界応答チャネル材料 分子デバイス用材料

高性能薄膜トランジスタ材料

ナノレベル半導体/金属コンタクト

## 時間軸について:

5~20年先までの内容を含む

#### 中心的な研究者

#### 他分野・社会に対する重要性の説明:

情報処理デバイスは全ての分野の基盤技 術である。その性能を向上させながら、低 消費電力化を達成し、社会の継続的発展 を維持するために必要。

#### 諸外国の状況

米国では産業界が主導して政府資金を投入し、大学などの研究機関を組織し幅広いテーマについて県有を推進。 EUでは研究拠点を中心に展開、アジアでは一部のテーマについて、韓国・台湾で研究が行われている

### 実現するために必要な研究システム:

材料についての種々の基礎的なアイディアを、 極微細デバイスの試作実証に結びつけるため のネットワーキング・拠点形成が必要。





低次元構造

原子スケール新材料 探索(例:グラフェン)

- ●高キャリア濃度・速度⇒低消費電力化
- ●薄膜チャネル⇒三次元集積
- 外部電界応答性の半導体材料(分子を含む)⇒熱雑音限界を超える超低消費電力化

連絡者:金山 敏彦

## 図 3.1.2-12 CMOS トランジスタ用新チャネル材料

ナノレベル半導体/金属コンタクト

原子レベル精度の 構造自己形成プロセス

## 研究領域名:ナノエレクトロニクスのためのマテリアルインフォマティクス

## 内容・内外の研究開発状況:

次世代ナノエレクトロニクスに関係する材料は半導体、金属、酸化物、窒化物など多岐におうおび、現在、周期律表の80%の元素がその対象になっている。また、材料には複数の性能、たとえば、仕事関数と微結晶構造など複数の性能が求められる。そのためのコンビナトリアル材料開発、ハイスループット材料評価技術に情報工学を組み合わせたマテリアルインフォマティクスの構築すすめる。この試みはアメリカの公的機関、複数の大学で活発化しつつあり、エレクトロニクス材料開発に特化したベンチャー企業など誕生している。

## 時間軸について:

材料開発の基盤技術であり、今後、欧米を中心に材料開発のための標準的ツールとなる可能性がある。

## 実現するために必要な研究システム:

複数の機関でナノエレ材料を中心として系統的なデータを蓄積し、 互いに共有、データマイニングを進める環境が必要

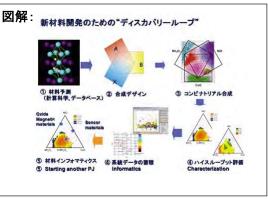
#### 中心的研究者

#### 他分野・社会に対する重要性の説明:

材料開発のための基盤技術であり、資源の有効活用や他の材料開発分野にも適用可能である。また、構造評価、誘電率、磁性、仕事関数などは標準的に計測するために、触媒やコーティング材料など、他の分野でも使える材料データを提供することが可能

#### 諸外国の状況

米国ではNISTを中心に公的機関、大学など EUでは、多国間プロジェクト アジアでは・韓国がこの分 野の開発に積極的



連絡者:NIMS,知京豊裕

### 図 3.1.2-13 ナノエレクトロニクスのためのマテリアルインフォマティクス

原子 欠陥制御 電子相関制御 外部電界応答チャネル材料 分子デバイス用材料

## 研究領域名:新状態変数エレクトロニクス

#### 内容 内外の研究開発状況:

現在のエレクトロニクスは,電子の有無と動きやすさを制御することによって成り立っている.よって,素子の大きさが小さくなる と情報処理に必要な変化を得ることが困難になってくる. 一方、エレクトロニクスに全く新しい状態変数、あるいは新しいキャリア を導入することによって、超微細化に耐えられる可能性がある。 さらに本研究領域は、自ずから異分野融合の場となる。

#### 時間軸について:

極めて不確実性が高いので、2025~2030年頃に実用化 研究開発がなされれば大成功.

#### 中心的な研究者

## 他分野・社会に対する重要性の説明:

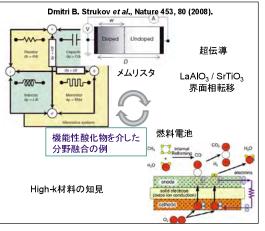
低環境負荷エネルギー源用材料やグリーンケミストリー触 媒としての研究開発が進む酸化物を例にとると、その研究 分野とエレクトロニクス分野の知的基盤の共有が相乗的 な分野推進を担うはず、このように、エレクトロニクスとして の不確実性は高くとも、他分野への波及効果は高い

#### 諸外国の状況

米国では、産学連携で研究開発が進行中、 EU, アジアでは、個別の研究が進行中.

#### 実現するために必要な研究システム:

人材育成的な仕組みを取り入れた研究指向拠点形成が必要.



連絡者:秋永広幸(産総研)

#### 図 3.1.2-14 新状態変数エレクトロニクス

利得をもつ スピントランジスタ スピンRAMの ロジック応用

スピン基礎物性 スピン流など

## 研究領域名: スピン流デバイス

## 内容・内外の研究開発状況:

化合物半導体を用いた半導体スピントロニクスは盛んに研究がなされたが、Ⅳ族半導体を用い た研究開発はまだ始ったばかり 加速が必要

### 時間軸について:

速やかに立ち上げるべき

#### 中心的な研究者

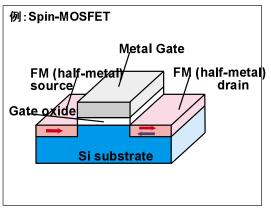
他分野・社会に対する重要性の説明:

- (1) 熱散逸無しのエレクトロニクス構築
- (2) シリコンのスピン拡散長が長いことを活 用する新エレクトロニクス

## 諸外国の状況

米国では集中的なファンディングがなされている

#### 実現するために必要な研究システム:



連絡者:田中雅明

図 3.1.2-15 スピン流デバイス

## 研究領域名: インテグレート・ナノカーボンデバイス

#### 課題:

- , 単一ナノカーボンデバイスから集積化ナノカーボンデバイスへ(ナノカーボンをインテグレート)
- ①:信頼性・制御性があるナノカーボンデバイス製造プロセス技術
  - 任意に場所・密度・配向・構造が制御されたCNTを配設し設計された機能を持つデバイス(実用カへの最大の課題)
- ②: 革新的製造プロセス開発(プリンタブル・大面積・フレキシブル)
- アクティブデバイスとして、様々な能動デバイスを駆動.(ユビキタスデバイスへ) 2、ナノカーボンと異材料をインテグレート(複合化)して高機能化 機能設計可能な異材料融合による既存デバイスでは不可能な革新的機能デバイスを創出(スピンーグラフェン)

#### 時間軸について:

~10年

#### 中心的な研究者

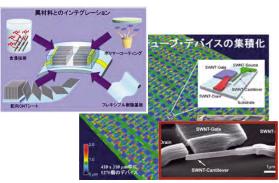
## 他分野・社会に対する重要性の説明:

ナノカーボンには過去10年に渡り政策的資金が投入され、 ナノカーボン材料の高いポテンシャルが示された。今後は ナノカーボンを社会に還元することが肝要となる。本領域 では、従来の単一デバイスのデモンストレーションより 歩踏み込んで、ナノカーボン素材を軸として、物理・化学・ プロセス・デバイスを融合させ、実用化の基盤となる製造 プロセスを開発するとともに、従来のデバイスでは実現不 可能な未来のユビキタス社会を支える革新的なデバイス の創出を目指す。.

#### 諸外国の状況

米国ではJ.Rogers(イリノイ)、Dai Hongai(スタンフォー

実現するために必要な研究システム:素材・プロセス・デバイス・システムの専門家を必然性を持って連携するシステム



自己組織化による集積力されたCNT-MEMS

連絡者: 畠 賢治

## 図 3.1.2-16 インテグレート・ナノカーボンデバイス

# 研究領域名: エネルギー半導体エレクトロニクス

### 内容・内外の研究開発状況:

エネルギー(電力)の発生、貯蔵、伝送を制御する回路の電気回路(真空遮断機、トランス等)か ら電子回路(半導体エレクトロニクス)へのシフトを、ワイドギャップ半導体等を用いた革新的パ ワー半導体デバイスを用いることによって可能にし、エネルギー(電力)ネットワークの革新をも たらすことを目指して研究開発が行われるべき。

### 時間軸について:

#### 中心的な研究者

他分野・社会に対する重要性の説明:

- (1) エレクトロニクス分野とエネルギー分野 の融合領域
- (2) エネルギー発生、変換、伝送を横断す る新領域
- (3) 半導体、磁性体、誘電(絶縁)体を含む 統合領域

#### 諸外国の状況

米国ではNSF傘下のCPES 大学中心

EUではECPE(産学連携,人材育成)、アジアには無い

## 実現するために必要な研究システム:

物性基礎からシステム応用までを一貫した視点 からのプロジェクト構成、組織

#### 研究開発課題:

- (1) 革新的パワー半導体デバイスの開発: ワイドギャップ半導体デバイス開発
- (2) 革新的パワーエレの開発:

周辺素子技術開発

(3)各種電力ネットワークシステムの開発:

スーパーノッド

連絡者:吉田貞史

図 3.1.2-17 エネルギー半導体エレクトロニクス

ع め

## 研究領域名:構造制御による連続的バンドギャップ制御 (無機材料)

#### 内容・内外の研究開発状況:

生産性が高い次世代薄膜太陽電池では、太陽光スペクトルとマッチングしたバンドギャップエネルギーを有する無機半導体材料を自由に 選べることが重要である。組成比制御によるバンドギャップエネルギーの制御は一般的に行われているが、希少元素、環境の観点から使 用できるものが限られている。生産性と環境にも対応できる高効率太陽電池を実現するには、環境に優しい一般的な元素を用いて構造制 御により広範囲で連続的なバンドギャップエネルギーの制御を可能とすることが重要となる。

例:金属内包Siクラスレートから金属を脱利したゲストフリーSiクラスレートは半導体的特性を示す新材料である。またゲストフリーGeクラスレートも作製されるようになりつつある。SiGeクラスレートでは1.3~2.0eV程度の範囲でパンドギャップエネルギーを変えることが可能で、 直接遷移型の光吸収であることが理論的に示されている。この様な材料開発を開発できれば、太陽光スペクトルとマッチングした高効率な フルスペクトル薄膜太陽電池が実現可能となる。

#### 時間軸について:

開発段階の入口; 3~7年後。 現況のフェーズは; 初期フェーズ

#### 実現するために必要な研究システム:

研究拠点リーダーによる学際的な研究組織が必要。建物・装置の集中 化は不要。人材育成用ファンディングは重要。

#### 中心的な研究者

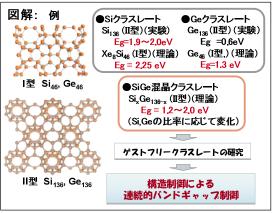
## 他分野・社会に対する重要性の説明:

環境・エネルギー分野

低環境負荷エネルギー源用材料(次世代フルスペクトル薄膜太 陽電池用材料)、リサイクル、グリーン電力

#### 諸外国の状況

米国ではG.S. Nolas(SouthFlorida大、Ge,Snクラスレート合 成、熱電変換)。EUではC. Clos(フランス・ボルドー大、Si(Na) クラスレート合成)、 アジアではU,J.Z.Jiang(中国Zhejiang 大、Siクラスレート超伝導)



連絡者:野々村修-

図 3.1.2-18 構造制御による連続的バンドギャップ制御

## 研究領域名: 空間閉じ込め型 無機/有機複合材料

#### 内容・内外の研究開発状況:

太陽光スペクトルを電気エネルギーに変換するとき、長波長光の利用が一般的に難しい。超格子や2光子吸収を用いることができれば、 長波長光の量子効率を上げることができる。 特に2(多)光子吸収を無機材料で実現する場合にはサブバンドを形成する必要があるが、巧 くいっていないのが現状である。一方、光合成は2段階励起により実現されていることから類推すれば、複合分子で2光子吸収が実現できる 可能性がある。また励起された電子の再結合を減らすためには周囲との相互作用を極力抑える必要がある。クラスレートのような内部に空 間を持つ材料内に複合分子を閉じ込め、励起された電子を取り出すことにより2光子励起を太陽電池に応用でき、赤外光の量子効率を向 上できる可能性がある。この様な問題を解決するためには無機/有機複合材料の研究開発が必要と考える。

## 時間軸について:

開発段階の入口; 7~10年後。 現況のフェーズは; 初期フェーズ

## 実現するために必要な研究システム:

研究リーダーを中心とする学際的な研究組織が必要。建物・装置の集 中化は不要。人材育成用ファンディングは重要。

#### 中心的な研究者

## 他分野・社会に対する重要性の説明:

環境・エネルギー分野

低環境負荷エネルギー源用材料(長波長光有効利用ー次世代 フルスペクトル薄膜太陽電池用材料) リサイクル、

グリーン電力

#### 諸外国の状況

## 図解: 例 空間閉じ込め型 酸化亜鉛/色素超格子 複合分子による 無機/有機複合材料 2光子吸収 材 光合成からの類推 GaN 長波長光の有効利用 骨格→無機材料

連絡者:野々村修一

### 図 3.1.2-19 空間閉じ込め型 無機/有機複合材料

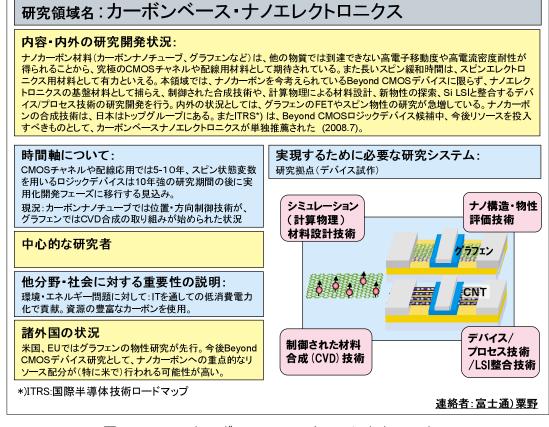


図 3.1.2-20 カーボンベース・ナノエレクトロニクス

#### 研究開発手法や拠点形成の提案

今まで挙げたすべての例について、今後このような半導体を用いたデバイスはナノあるいは原子レベルでの制御が重要となる。そこでは、広い意味でのナノテクノロジーと、デバイス技術の融合が必要である。これを実現するには単純な材料研究ではなくて、最終的にはデバイス研究であるため、材料研究からデバイス研究に早く立ち上げられるような集中的な拠点が必要であるが、それがないというのが日本の弱みになっている。そこでは、単純に物が作れる装置が並んでいれば良いということではなく、計算シミュレーションでなるべく試行錯誤の回数を減らす、あるいは作ったものがどういうものかというキャラクタリゼーションが的確にできる、といったものが揃っており、それらの知識がまとまって溜まる、こういう仕掛けが作られていることが非常に重要だ。

このような集中拠点があると、例えば若手研究者がある非常にいいアイデアを思いついた場合に、自分で自前の装置を揃えなくても、そこでアイデア実証が出来るということで、人材育成にも欠かすことができない。同時に、基盤的な材料研究からどうやって応用に早く結びつけるかということを考えた場合に、こういう拠点を通じてアプリケーション、これからのニーズが継続的に入ってきて、これをドライブするという仕掛けにもなる。

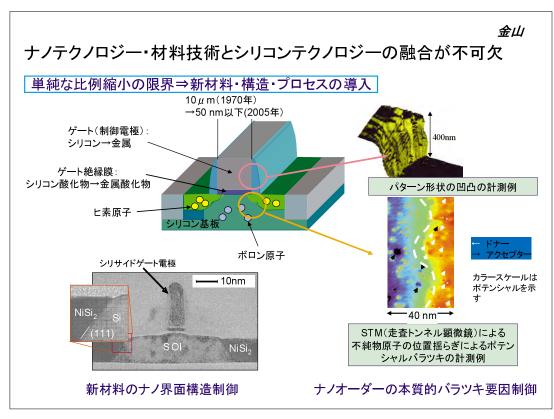


図 3.1.2-21 ナノテクノロジー・材料技術とシリコンテクノロジーの融合

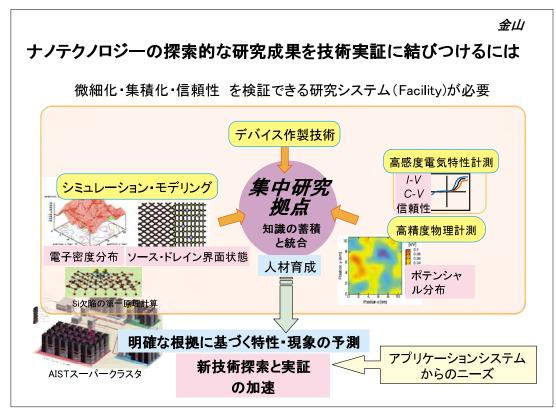


図 3.1.2-22 ナノテクノロジーの探索的な研究成果を技術実証に結びつけるには

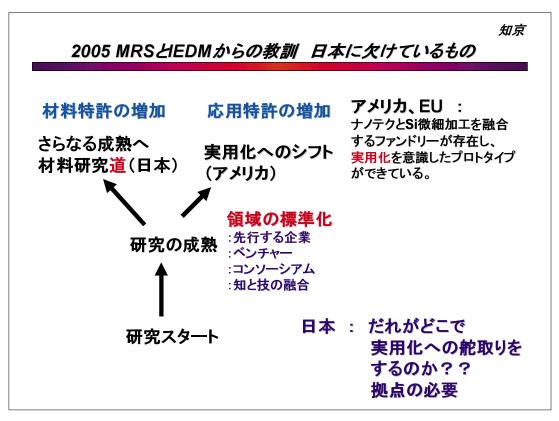


図 3.1.2-23 日本に欠けているもの

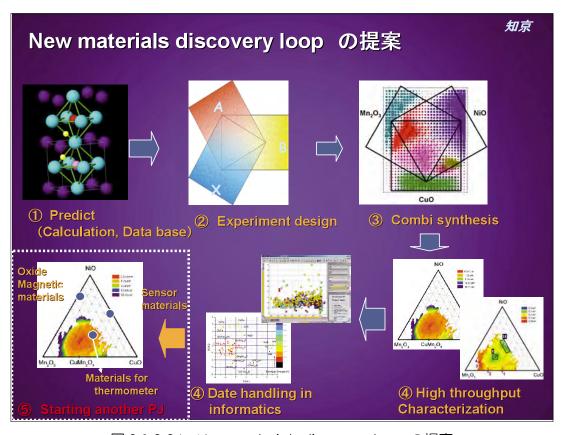


図 3.1.2-24 New materials discovery loop の提案

ع

め

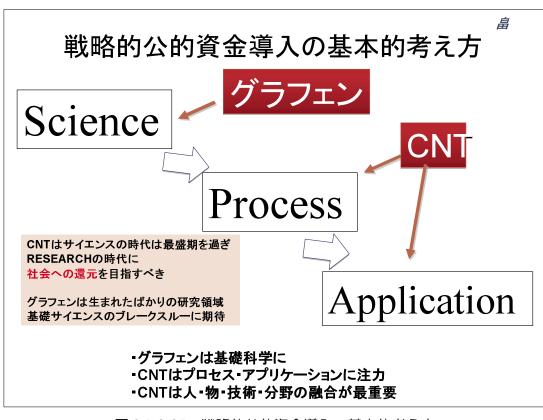


図 3.1.2-25 戦略的公的資金導入の基本的考え方

畠

# 融合促進のための研究システム提案

①異分野融合を促進するための、異分野の専門家(企業)が必然性をもって垂直連携する仕組み

(例えば、材料の専門家とプロセス・デバイスの専門家の間の垂直連携)

- →従来のナショナルプロジェクトみたいに日の丸船団寄り合い所帯では駄目。
- →強力な者同士が連携し、WIN-WINの関係を構築し、世界との競争に勝つための戦略・施策
- (予算集中等様々な予算制度の制約で、複数の強者同士が連携するのは、容易でない場合がある)
- →本当に良い玉があれば、国から声をかけてもいいのでは?(お見合い仲介)
- ②融合と連携を強化するためには、複数の力を束ねなくはならない拠点形成の必要
- ・デバイス等のpre-competition研究領域では、日本の力を束ね、効率的にスピード感を持って研究開発を遂行し、世界との競争に打ち勝つ施策が必要ではないのか(例えばIMEC、アルバーニ、カーネギー、コンソーシアムのように)
- ③グラフェンのような若いフィールドには若手研究者が大いに活躍できる仕組みを

図 3.1.2-26 融合促進のための研究システム提案

吉田

## 研究推進のための施策(要望)

- ▶応用分野を特定する研究推進では、物性基礎からシステム応用までを一貫した視点からのプロジェクト構成、組織とする。
- ▶応用指向のプロジェクトでも、成果(実用化や起業)を問いすぎるあまり、 基礎研究がおろそかになっているきらいがある。NEDO研究費と科研費の 中間にあって、応用を追いながら、その基礎となっている研究が十分に行 え、「ノウハウ」ではなく、理屈が分かった「材料科学」として残せるような 研究システムとする。

図 3.1.2-27 研究推進のための施策(要望)

### 人材育成について

知京:ナノエレを担う人材開発

デジタル世代の若い人材をいかに少人数で効果的に育成するか?

- → 単なる OJT ではなく, DB を用いたシミュレータを作成し, ノウハウ 継承の効率化を図る.
- 野々村:若手研究員が属人的に予算を持って3年間程度渡り歩けるよう な制度があっても良いのではないか?
- 秋永:融合拠点を若手研究者育成の場,予算的インセンティブをつける場として活用すべき。

融合拠点を国際的な IP のストック&フローの場として活用する.

- →国際的に通用する人材の育成に結実する.
- 田中+知京:アジアから優秀な人材を集めるための仕組みを作る.

具体案:実践的カリキュラムを企業出身者に提供していただく.

学術的な視野を拡げる機会を大学生に与える.

サイエンスリテラシーのある人材を小・中学校に送り込む.

図 3.1.2-28 人材育成についてのコメント

## 質疑:

- -日米の研究の進め方の違いで、実用化への舵取りが日本では不足しているという 話があったが、開き直って日本のやり方の良いところをさらに伸ばすという考え 方はないか?
- 一研究がずっと続くと良いのだが、心配なのは途絶えてしまう可能性である。最近 CMOS 用のチャネル材料として2つの新しい材料が注目を集めている。1つは Ⅲ-V族化合物半導体で、この研究がアメリカやヨーロッパでかなり活発化して いるのだが、日本ではほとんどやられていない。化合物半導体 CMOS が本当に 使われるかどうかは分からないが、研究をやらなくていいかというと、それは危 険だ。過去を振り返ると、日本では情報処理用、トランジスタ向けの化合物半導 体は非常に高いポテンシャルがあった。しかし実用化研究の道がなかったので、企業は別として、大学ではこの研究は消えてしまった。2番目はグラフェンで、今急激にヨーロッパで出てきており、またアメリカが一生懸命立ち上げている。 振り返ってみると、昔ながらのカーボン、あるいはグラフェンに特化しても、非常に強力な研究ポテンシャルが日本にはあった。今、世界でやられていることと、日本が過去やったことと実は質的にはあまり違いはない。トランジスタにしているか、していないかというぐらいの違いであるが、今みてみると日本にはその研究をやっている人はもういないという状況だ。もう少し研究のピークをどう保存するか、あるいはそれを育てるかというその仕掛けを考える必要がある。
- -基礎研究は確かに重要であるが、研究の資産を、後世の人がそれを使える形にして残しておくということは極めて重要である。過去に問題になっていて、解決方法はある程度あったが、それが今、一見消えているように見えるというケースはたくさんある。例えば金属の酸化物への拡散係数などは、最近 High-k メタルゲートで、再注目されているが、これは恐らくセラミックスの世界では、かつては非常に良くやられた研究のはずだ。残念ながらその研究データがどこにあるのか知らないために、もう1回やらなくてはいけないことになる。
- -日本のやり方の良いところをさらに伸ばすという点に関しては、材料研究の強さをいかに維持するかということが喫緊の問題だと思う。そのためには人材育成、教育を含めて考えなければならない。一方、実用化へのシフトあるいは応用特許については、やはり企業に相当頑張っていただかなくてはならない。企業が日本の大学のポテンシャル、あるいはその公的機関から出る研究成果をいかにうまく育て、あるいは誘導して使っていくかということが重要だ。

## 3.1.3 無機材料分科会/コーディネータ:木村茂行(未踏協)

### 俯瞰図について

JST/CRDS 提示の俯瞰図に対し、以下のようなコメント・意見が出た。

- 一歪み材料:電子構造の歪みという意味。(半導体でいう歪みという意味ではない)
- 一新型超伝導:鉄系超電導に限定するのでは範囲が狭すぎるので変更。(修正)
- EUV 露光: やや過去に属するので要らない。
- ープラズマプロセス、ナノビーム加工、極限環境プロセス、先端焼結を新たに入れる。
- ーケミカルプロセスとグリーンプロセスを統合し、何か別の言葉で表現する。(修正)
- ーゾル・ゲル法:このままでは、いわゆるソフト化学と理解されそうで、うまく融合させたような名称がいる。
- ーフォトニックデバイス:デバイス部材に加える。(修正)

## 重要領域の提案

無機材料分野は無機材料だけでは難しく、色々な材料分野につながっているという前提で議論を進めた。分科会で挙がった重点領域は20件強で、時間軸を優先基準とした。すなわち喫緊に取り組まなくてはならないのものと、基盤的なものであり中長期視点に立って継続的に取り組むべきものという分類とした。喫緊のものは4件で、以下、その内容を少し説明する。

# ◎重要領域の提案

喫

1. 新型超伝導

2. 全固体電池 太陽電池 二次電池

緊

- 3. 生体との精密制御界面を有する再生医療バイオマテリアル
- 4. ナノシート・コロイド分散粒子を用いた新機能材料開発

炭素ナノファイバーコンポジット(ナノカーボン)

高性能セラミック多孔体の開発

基盤

ナノ粒界設計による低温・高速超塑性セラミックス

高効率熱電変換材料・システム

セラミックス半導体

強相関機能材料

マルチフェロイックス・強誘電体薄膜

環境調和型構造マテリアル(ガラス、セメント、コーティング、光触媒など)

図 3.1.3-1 重要領域の提案

「新型超伝導」、これは最近の鉄系超電導体、強相関系の材料、それから十分な展開が出来ていないこともあり  $MgB_2$  も含めて新型超伝導とし、第 1 番目の緊急度とした。2 番目以降は必ずしも数字が順位を表してはいない。

## 新型超伝導

最も緊急度が高いと設定した領域である。新型超伝導ということで室温超伝導体や Tc が室温に達せずとも使いやすい新超電導物質開発への要請が大きい。ごく最近の鉄系超伝導の発見や MgB<sub>2</sub> の発見に象徴されるように、新超伝導体開発の動きはきわめて活発である。日本は現在その中心にいるが、中国をはじめとする諸外国の追い上げには目を見張るものがある。新しい材料は日本から出てくるが、フォローアップが上手くない。その典型的な例が鉄系の超伝導体であり、あっという間に中国の方が本物ではないかといわれるような状況になった。

# 研究領域名:新型超伝導

内容・内外の研究開発状況:超伝導の実用化に向けて、室温超伝導体やTcが室温に達せずとも使いやすい新超電導物質開発への要請が大きい。ごく最近のFe系超伝導の発見やMgB2の発見に象徴されるように、新超伝導体開発の動きはきわめて活発である。日本はその中心にいるが、中国をはじめとする諸外国の追い上げには目を見張るものがある。

#### 時間軸について:

送電線の開発は一部実用レベルに達しているが、エネルギー貯蔵や強力磁石の応用には、新しい超伝導体の開発が必要である。筋の良い超伝導体が発見されれば5年から10年くらいで実用になる可能性もある。

### 他分野・社会に対する重要性の説明:

環境エネルギー対策のキーテクノロジー。

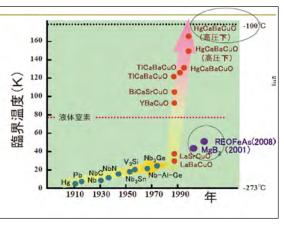
超伝導ケーブルを用いたロスの少ないエネルギー輸送と貯蔵。消費電力の極めて少ない超伝導デバイス。強力磁石を用いMRIなどの医療機器や材慮プロセシングなどきわめて広範な応用がある。

## 諸外国の状況

米国ではDOEのもとで超伝導の国家プロジェクトが検討されている。中国、台湾などでこの分野への投資がきわめて活発で、論文投稿の伸長には目を見張るものがある。

## 実現するために必要な研究システム:

セレンディピティも重要な因子となるので、ロードマップ的な図式 が最も適用しにくい研究領域である。失敗を恐れず新物質への 挑戦意欲を促進するようなメカニズムを研究計画の採択や評価 に入れるべき。



連絡者:高木英典

図 3.1.3-2 新型超伝導

## 全固体電池・太陽電池・2 次電池

電池・電源関係でこれらが今後重要なものであることはいうまでもない。本報告では詳細の説明を割愛する。

## 生体との精密制御界面を有する再生医療バイオマテリアル

開発のターゲットとしては生体材料・デバイスの寿命延長と生体適合性、長期機能化を実現するための表面技術開発である。無機材料以外の分野も当然入ってくる。

金属系の人工関節等体内埋入型のデバイスや、人工血管等の循環器系の多くは輸入 に頼っているが、無機・セラミックス系はほぼ国内製であり、日本の技術は世界的 にトップレベルの地位にある。この力を維持したい。

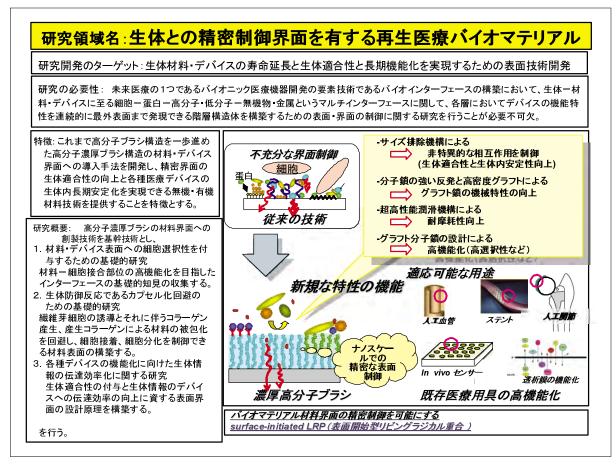


図 3.1.3-3 生体との精密制御界面を有する再生医療バイオマテリアル

### ナノシート・コロイド分散粒子を用いた新機能材料開発

この提案は、2件をひとつにまとめた名称であり、1つは「セラミックスナノシートを用いた新機能材料開発」、もう一方は「コロイドプロセスの高度化による高次構造制御体の作製とイノベイティブセラミックスの開発」である。いずれも水溶液を中心とした分散粒子を使っている。「ナノシートを用いた機能性材料開発」は結晶であり、格子定数の厚みぐらいのナノシートが開発されている。非常に特徴的な性質を持っていると同時に、水溶液で色々な薄膜の作製ができるということから、部分的かもしれないが従来の薄膜合成手法を変えることになる。従来の薄膜合成法というのは CVD にしても、真空を使うものにしても非常に高価なものであったが、これをブレイクスルーするものになる可能性がある。

もう一方は最近成果が著しい分野であり、非常に強い磁場を使ってコロイドプロセスにより高配向なものを作ることが出来る。この方法を更にシェイプアップしていくことによって付加価値の高いセラミックスが作れるのではないか。

め

## 研究領域名: セラミックスナノシートを用いた新機能材料開発

#### 内容・内外の研究開発状況:

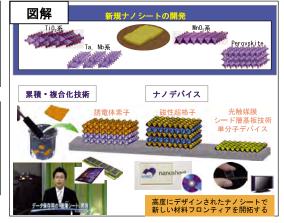
直接合成法と剥離合成法が研究され、チタン酸化物、マンガン酸化物、チタン・ニオブ酸化物、 粘度鉱物など多種が対象となっているが、扱いが容易であるにもかかわらず、量子サイズ効果 が発現することが特徴。現在、ナノシートの機能に関する研究開発が旺盛。将来、MBEやCV Dを置き換えて、ナノテクノロジーのビルディング・ブロックとしての活用が期待される。

#### 他分野・社会に対する重要性の説明:

ナノテクノロジー特有の高価な合成装置を 用いずにナノ構造物質を合成する技術の 確立が期待される。

#### 諸外国の状況

米国では有機ポリマーとの複合化や、多層ナノ薄膜形成技術が、EUではフランスでナノシートの液晶性に関して、アジアでは韓国、中国、インドなどで合成の基礎研究が、それぞれ進んでいる。



連絡者:木村茂行

図 3.1.3-4 セラミックスナノシートを用いた新機能材料開発

# 研究領域名:コロイドプロセスの高度化による高次構造制御体の作製とイノベイティブセラミックスの開発

### 内容・内外の研究開発状況:

コロイドプロセスは、溶液中の粒子の分散・凝集を制御し成形する手法で、微粒子の均一で高密度な成形手段として注目されてきた。微粒子分散系に外界から電界印加(電気泳動堆積法)により積層体の作製、強磁界印加による配向構造体の作製、さらに電界と強磁界を重畳させた新規プロセスにより配向積層体などの高次組織制御体の作製が可能となってきた。今後、適用系の拡大とともに、粒子サイズを変化させること、さらに、ヘテロ凝集、表面被覆などのスラリー中での複合粒子作製手段と併用し、先端焼結技術を駆使することで、ナノポア構造、傾斜組織構造、高次の階層構造などの特殊な物質・材料の創製への適用が期待できる。特性と微構造の相関を明らかにし、構造制御にフィードバックすることで多様なイノベイティブセラミックスの開発につながることが期待される。

## 時間軸について:

5年後を目処に開発段階。

現況のフェーズは機能特性と微構造の関係の精緻化により、高次構造制御体作製技術の高度化を図っている 段階

### 他分野・社会に対する重要性の説明:

環境・エネルギー問題に対して: 低環境負荷エネルギープロセスであること、高次構造制御燃料電池、イオン伝導体、太陽電池、熱電セラミックス、非鉛系圧電セラミックス、原子力用材料

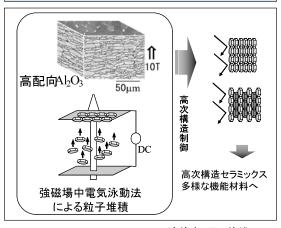
医療応用:生体材料

#### 諸外国の状況

米国、EU、中国、インドではコロイドプロセス、電気泳動 堆積法は活発に行われているが、強磁場印加プロセス による配向構造体の作製は日本独自の技術である。最 近中の研究が活発。

#### |実現するために必要な研究システム:

外場としての強磁場、特殊焼結などには、拠点が必要。



連絡者:目 義雄

図 3.1.3-5 コロイドプロセスの高度化による高次構造制御体の作製とイノベイティブ セラミックスの開発

# 高効率熱電変換材料・システム

10 数年前までずっと低迷していた熱電変換効率が、ナノ構造制御により格段に上昇してきている。欧米を中心に研究開発熱が非常に高まっており、国際競争が激しくなってきた。ナノ構造制御に基づく熱電変換効率の高い材料、ほとんどが金属系の非酸化物であるが、やはり地球上で使うのなら酸化物の方が良いという観点で酸化物に重点を置いた研究が重要になってくる。しかしながら、酸化物/非酸化物いずれにせよ眼目は高効率の熱電変換材料の開発である。

## 研究領域名: 高効率熱電変換材料・システム

#### 内容・内外の研究開発状況:

10数年前までずっと低迷していた熱電変換効率が、ナノ構造制御により格段に上昇してきていて、欧米を中心に研究開発熱が非常に高まっており、今やナノ構造制御に基づく熱電変換効率の高い材料・素子の開発が国際競争になっているといえる。しかし、それらのほとんどが金属系の非酸化物材料であり、今後地球上での様々な応用を展開していくには、耐熱性、耐酸化性、資源面等で問題がある。高効率酸化物熱電変換材料が強く求められているのが現状である。日本がそれを先導している。

#### 時間軸について:

各種研究プロジェクト、民間等との連携ですでに研究 開発はあちこちで始まろうとしている。欧米中では少 し前から研究が盛んに行われているが、未だ実用試 験の段階にも至っていない。今が、日本が乗り出す チャンスである。

#### 他分野・社会に対する重要性の説明:

将来的には、量子ナノ構造を内蔵したバルク熱電変換材料の開発によって更に性能が向上し、産業・運輸・民生分野の廃熱回収・電力変換によってエネルギー利用効率を上げ、二酸化炭素排出抑制をはじめとする地球環境保全に貢献する技術になることが期待される。

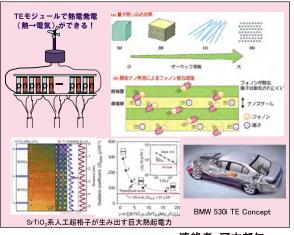
## 諸外国の状況

米国では、DOEが6年間総額約200億円を投じて自動車廃熱発電システムの開発に取り組んでいる。目的は二酸化炭素抑制技術の開発である。

中国でも熱電と太陽電池の組み合わせシステムの開発を見込んだ国家プロジェクトが進行中である。

#### 実現するために必要な研究システム:

研究拠点が必要。産官学の一線級研究者のチームが拠点に集合して研究推進。日常的交流ができる環境で一定期間(3~5年)集中的に研究するのが良い。研究費の額も通常の10倍くらいにして、自由な発想の元で研究できるようにすべき。



連絡者:河本邦仁

図 3.1.3-6 高効率熱電変換材料システム

## ナノ粒界設計による低温・高速超塑性セラミックス

この提案は、2件をひとつにまとめた名称であり、「粒界設計と機能セラミックスの創製」という計算科学を組み合わせた手法からの提案と、「低温・高速超塑性セラミックスの創製と高強度・精密塑性加工技術の開発」という2つを組み合わせた名称である。「粒界設計と機能セラミックスの創製」では、計算と実際とを比較し、測定しながら作製していくということである。

セラミックスの超塑性は、長年うまくいかなかったが少し前に新技術が開発された。しかし、温度を高くしなければうまくいかない、スピードが上がらない、という問題が残る。これはある程度までは解決できる見通しがあり、精力的に研究を進める必要があるのではないか。現在叫ばれている省エネルギーのセラミックス製造法に大きく寄与するのではないか。

め

## 研究領域名:粒界設計と機能セラミックスの創製

内容・内外の研究開発状況:機能セラミックスにはさらなる機能向上と共に多機能化が求められている一方、省資源・省エネルギーの観点から、セラミックスの機能発現を担う添加元素の代替若しくは効率的利用が課題となっている。これらの課題のブレイクスルーには、結晶粒界のナノ/サブナノスケールでの構造および組成制御を積極的に利用した機能セラミックスの設計開発が有効である。粒界における原子配列・構造・電子状態の計測・分析技術の導入により、粒界ナノ/サブナノ領域における原子構造(静的構造)および輸送現象(動的構造)を評価。これらの実験データと第一原理動的量子力学計算に基づき、機能発現に最適な元素・原子配列・原子間相互作用を予測し、材料設計を行と共に、新しい学術および産業のフロンティアを開拓する。①新規機能セラミックスの創製およびその製造技術の開発(高機能セラミックス開拓)②ナノ/サブナノ粒界構造制御により多機能を発現する材料開発(ナノ/サブナノ輸送現象制御の開拓)③動的量子力学計算に支援された高機能・多機能セラミックスの設計(第一原理粒界設計)④ナノ/サブナノ輸送現象評価技術の開発(輸送評価)。

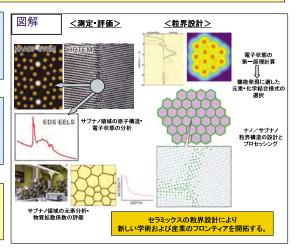
#### 時間軸について:

ナノノサブナノ領域における郵送現象の測定システムの開発が必要。現況のフェーズは、焼結のその場観察、粒界構造・電子状態解析と輸送現象の解明を目指した研究の段階。

#### 他分野・社会に対する重要性の説明:

セラミックスナノ粒子プロセッシングと原子レベルに迫る 微構造観察・解析技術および粒界設計に基づく高機能・ 多機能セラミックスの開発を図るとともに、異分野融合に よる新しい学術および産業のフロンティアを開拓する。

諸外国の状況:高純度セラミックスナノ粒子プロセッシングは日本の学界・産業界が世界に誇れる強い基盤技術の一つである。原子レベルに迫る微構造観察・解析技術および粒界設計技術は欧米と同等。



連絡者:目 義雄

図 3.1.3-7 粒界設計と機能セラミックスの創製

## 研究領域名: 低温・高速超塑性セラミックスの創製と高強度・精密塑性加工技術 の開拓

内容・内外の研究開発状況: 超塑性を利用すると、雑形状のセラミックスを精密に塑性成形でき、かつ研削・研磨を経ないために成形体の高強度化と長寿命化が同時に期待できる。その実現には、(1)耐熱超合金の塑性加工温度域で高速成形が可能な材料(低温・高速超塑性セラミックス)の創製、(2)セラミックスに適合した塑性加工体系、(3)同じく成形後調質法の開拓が必要である。そのためには、(1)低温・高速超塑性材料の創製: 変形加速および負の随伴現象(粒成長、損傷)の抑制を包含した局所構造・組成設計、設計を材料中で実現するためのプロセス技術開拓、(2)最適成形手法の開拓: 粒界損傷の発生・成長を強く抑制する塑性加工法、成形治具および潤滑手法、塑性流動のシミュレーション・制御技術、(3)成形後調質法の開拓: 残留応力分布のシミュレーション・制御技術、結晶粒組織および粒界局所組成・構造の制御手法、を開発する必要がある。

#### 時間軸について:

10年後開発段階の入口をむかえる。金属系では、高速超 塑性が開発されてから実用まで10年を要した。

現況のフェーズは、高速超塑性体の低温化の段階。

#### 他分野・社会に対する重要性の説明:

航空・宇宙・自動車・機械等の分野における精密部材および構造体の軽量・高強度・高寿命化による省資源・エネルギーおよび低環境負荷の実現

## 諸外国の状況:

我が国はセラミックス超塑性の発見、機構解明、高速化の 実現で研究をリードしており、本研究によって、高強度・精 密塑性加工技術を世界に先駆けて構築することができる。 米国、欧州、インドは基礎研究中心。

# 実現するために必要な研究システム: 人材育成的なファンディングおよび総合的な取り組みが可能な拠点が必要。

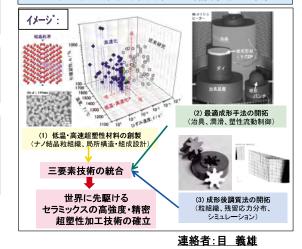


図 3.1.3-8 低温·高速超塑性セラミックスの創製と高強度·精密塑性加工技術の開拓

## 質疑から出た意見

- 一「生体との精密制御界面を有する再生医療バイオマテリアル」について、分野融合という括りで提案されている。ステントは金属がベースで、高分子ブラシはもちろん高分子材料であり、相当な分野融合になると期待している。生体材料、すなわちバイオマテリアルの分野ほど、実現の時間軸があいまいになっている分野はなく、すぐ実現できるか、あるいは将来出来るかもはっきりと分からない。出来れば融合の議論の中で時間軸をはっきりさせ、長期的に投資しなければならない部分と、すぐ投資しなければいけない部分とを明確にしたい。また、例えばセラミックスと金属は、今、完全にはっきりと適応例が出来ている状態だと思われる。よって、高分子の力がかなり重要で、融合していければ良いと思う。
- ー材料で区分けするのではなく、出口で分類して、医療なら医療で金属の人もセラミックスの人も高分子の人も参加するような会議を別個に設けると大きな実りが 期待できるのではないだろうか。
- 2008 年 4 月から CRDS が検討を開始した「産業技術マテリアルマネジメント」 というものがある。産業応用を重視して、そこからのニーズを引っ張り出し、 材料への要求を決めていこうというプロジェクトチームが CRDS 内で走っている。
- ーセラミックスの超塑性は、超耐熱合金の塑性加工が今 1350℃ぐらいで出来るので、これがそのままセラミックスの塑性加工に使えるような状態にある。かなり実用レベルに近いところまで来ている状況にある。超塑性を使うのは、構造用途機能材料にも使える技術だからである。加工費用がコストのほとんどを占めているケースが多くある。超塑性加工をすれば、材質的な加工はしなくても良いという領域なので、最終的な製品のコストが格段に下がることが期待できる。

## 3.1.4 有機・高分子材料分科会報告 / コーディネータ: 澤本光男(京大)

## 基本的な考え方

分野間の鬩ぎあいを避け、各分野の特長を共に生かして相乗効果を上げる、そう いう提案を考えていくべきではないか。有機・高分子材料は全ての分野に関係して おり、これを細かく分けることは非常に困難ではあるが、6つの分野(超分子化学、 有機触媒化学、有機電子材料、化学生物学・高分子合成、計算化学、再生医療材料) に注目して、日本独自の一歩先に出た次の世代のそういうテーマを考えた。有機・ 高分子材料は特に触媒化学と、ポリマーとバイオマテリアル、さらに光学材料、コ ンポジット複合材料、それからエレクトロニクスマテリアルに重要な役割を果たす。 ということからも、俯瞰図の領域を再度考えてみた。俯瞰図の右側の赤枠のところ すべてが有機・高分子材料に関係している。生物学との関係を益々深めつつ、有機 高分子材料は様々なところに進展していくというのが我々の考え方である。こうい う考え方に立って色々と議論をした。

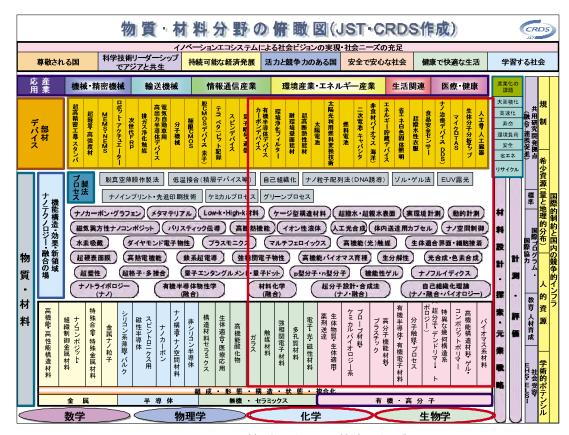


図 3.1.4-1 俯瞰図上での議論の領域

## 重要領域の抽出

特に我々が取り上げた重点領域は次の12テーマである。これに優劣をつけるこ とは難しく、特に重要な提案領域に★印を付けてある。

## ★資源対応型機能触媒化学

(石油資源依存の化学体系から脱却、高効率光エネルギー変換)

- ・電界制御型有機・分子エレクトロニクスを目指す次世代材料の基盤研究 強相関電子材料(無機)
- ★単分子機能型デバイス材料 (Single Molecular Device Science)
- ・高効率光エネルギー変換材料(色素・有機薄膜太陽電池、光合成)
- ・分子センサ(分子の特異性を活かした環境・生体物質センサ)
- ★バイオロジーとの融合に基づく再生医療材料
- ・アクティブターゲティングに用いる DDS 材料
- ★アクティブソフトマテリアル(自己修復機能ビルトイン材料等)
- ・分子からマクロに繋がる階層制御型へテロ組織化材料 (シーケンス制御型機能分子等、ヘテロ界面制御)
- ・位相空間をあらわに考慮した反応設計
- ★高機能分子の設計・探索戦略の確立
- ★先進分子技術(有機分子、高分子材料)

まず、材料そのものの創製と精密な設計と制御に関係する触媒化学の新しいパラダイムに基づく触媒の設計が地球の資源、特に石油依存の科学体系から脱却を図れる。また、人工光合成に代表される鉱物、あるいは太陽電池、有機太陽電池に採用される高効率光エネルギー変換は新しいパラダイムを生む触媒にかかっている。

単分子機能型デバイス材料。有機分子の1分子をモジュラー化して設計することで、これまでの無機、有機材料の集合体で発現していたトランジスタ機能を、1分子で実現することがほぼ確実に分かりつつある。

バイオロジーとの融合に基づく再生医療材料。これは先ほどの色々な分野でも出ていたが、材料をやっている人はもっと生物や医学を勉強すること、それに基づいた本当の医学と本当の生物学に基づいた真の意味での再生医療材料が必要で、そのために有機分子材料が不可欠である。

アクティブソフトマテリアル。もう 1 つの我々のテーマは、パッシブに状況に 反応して機能を出すのではなくて、自ら意思があるようにアクティブにこちらから 特定の機能を狙う。そういういわゆるスマートマテリアルと言われていたものを、 能動的なソフトマテリアルと捕らえて、それに対して自己修復機能、傷が付いたら すぐ直るようになっている、そういう材料なども目指したい。

そしてこの4つの基盤になるのが、高機能分子の設計、探索のための新しいパラダイムに基づく計算科学の確立である。

## ★ 1) 資源対応型戦略触媒化学

石油以外の材料を用いて、これまでの材料を作り出す。より新しい触媒と反応を 考え出すことによって、新しい材料を作り出すことは恐らく、不可欠であると考え られる。そのキーになるのは、分子触媒や有機触媒つまり金属を含まない触媒で、

[1]

1分子で働く触媒。また、固体触媒、これは無機とも関係する。あるいは、酵素に 代表される生体触媒。

こういった個別にそれぞれ発展してきた触媒の概念を複合的に融合することによって、革新的にひとつの触媒ユニットの中に酸化する部分、基質を認識する部分、さらに還元を行って変換する部分、というように複合化された多機能な新しい触媒がしかもお互いにケミカルにエレクトロニカルに競争しながら働く触媒。それがこれからの新しい材料創成には不可欠である。それによって出てくる材料が多岐に及んでいる。水やメタン、二酸化炭素、窒素のようにありきたりの材料を高効率で、あるいは光エネルギーを使うことによって、新しい触媒を開発する戦略。また基幹化学物質と考えられるエチレン、アルコールなどを、ごくありふれたメタンなどから高効率で作り出す触媒系を開発することで、これまで石油に頼っていたものを、あるいは資源の希少なものに頼っていたものを、非常に効率的な触媒反応で作り出す。

## 研究領域名: 資源対応型戦略触媒の化学(石油資源体系からの脱却)

#### 内容・内外の研究開発状況:

これまで、独立に発展展開してきた分子触媒、有機触媒、固体触媒、生体触媒の概念融合による革新的多機能触媒の化学の確立と、その触媒による化石資源の脱却に対応する触媒反応プロセス開発を目指す。同時に、水(H, O)、メタン(C, H)、二酸化炭素(C, O)、窒素(N)の再資源化、光エネルギーの活用して、基幹化学物質(エチレン、アルコール、など)を石油以外の原料から合成するプロセスの開発を目指す。

#### 時間軸について:

資源の変遷に対応した触媒開発に十分対応できる研究ポテンシャルを保有している。

#### 中心的な研究者

## | 他分野・社会に対する重要性の説明:

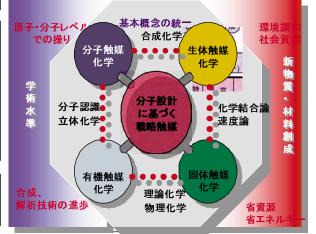
環境・エネルギー問題に対して:低環境負荷エネルギー源 用材料(次世代燃料電池用触媒)、グリーンケミストリー触 媒

#### 諸外国の状況

我が国の研究ポテンシャルは、米国、EUにほぼ匹敵するか、あるいはそれ以上にある。

## 実現するために必要な研究システム:

触媒化学における異分野研究者の実質的融合による研究システム作り



連絡者: 碇屋隆雄

図 3.1.4-2 資源対応型戦略触媒の化学(石油資源体系からの脱却)

## ★ 2) 単分子機能型デバイス材料

これは 1 つの有機分子で、決して大きな分子の集合体ではないが、両端に例えば、 金と結合できるイオウの端子を持った 1 つの分子である。この分子が、しかも電 流に対応するのではなくて、例えば電場とか、電圧によってトランジスタ機能を出 したりすることが可能になっている。多くの元素や多くの分子を集合させることによって作られている現在のデバイスを越える、はるかに小さく、はるかに高速にしかもモジュラー型に設計できる単分子デバイスといわれるものが実現できることが、ほぼ確実になってきているのである。まだ端緒に付いたばかりだが、このような電界によって、つまりある種の電子の信号は、分子の還元ないし、ホールの生成にあるが、それを新たに電流を流すのではなく、電場におかれ、電界で制御される新しい考えに基づく、様々なモジュール化された機能を組み込んだ分子デバイスである。

あるいは自ら能動的に組織を作り上げる複合自己組織化能力を用いることで、新たな機能型のデバイス材料を開発できると考えられている。今こそ、早く立ち上げることによって重要な展開が見られると思う。同時に重要なのは、電界と金属と分子あるいは、そういうところの界面を正確に解析し、それに基づいて設計に繋げる。そういう部分のプロジェクトもこれに融合することによって、さらに系統的な体系が築かれると考えられる。

## 研究領域名: 単分子機能型デバイス材料

#### 内容・内外の研究開発状況:

内容:・分子デバイスへの信号I/O(電界制御型)・ヘテロ材料界面の高性能化・有機分子の直接観察・単分子複合化分子デバイス・自己組織化複合機能・分子からマクロへの架橋・分子設計・シミュレーション・分子デバイスの特性を考慮した計算アーキテクチャの開発

研究開発状況:単分子レベルで、信頼性ある電気特性が、漸く測定できる様になってきた。 電極金属と分子の界面については、 実験と計算の附合も出つつある。

#### 時間軸について:

プラクティカルな可能性が見えてくるのは、早くて2020年

#### 他分野・社会に対する重要性の説明:

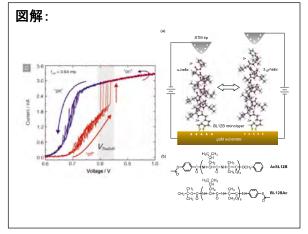
現状のコンピューティングを補完する、脳の機能へ近付ける道を拓く可能性がある。 電流を流さないデバイスにより、 超低消費電力エレクトロニクスとなる。 脳科学等生体科 学分野との融合が必須。

#### 諸外国の状況

米国では、基礎研究として実験、理論が整備されたと感じており、分子に基づく非線形効果の観察と理論的解明に向けて基盤研究推進態勢が整っている。

## 実現するために必要な研究システム:

拠点形成が必要



連絡者:笠原二郎

図 3.1.4-3 単分子機能型デバイス材料

## ★ 3) バイオロジーとの融合に基づく再生医療材料

前述のバイオロジーとメディカルサイエンスの知識と経験を十分に融合した有機 高分子材料に基づく、自らの細胞の再生をある方向に助成するための、再生医療材 料が必要である。特に長期に渡って使用できる真にバイオロジーと、メディカルに 基づく再生医療材料が必要である。高度な生体機能を再生できるような足場だとか、 iPS 細胞などに代表される幹細胞用の培養基材、あるいは次世代型で自ら生分解し つつ特定の方向に細胞を働かせる、そういうひとつ進んだ究極の医療というものを 有機高分子材料は作り出すことが出来ると信じられている。そういうものをここに 提案する。

#### バイオロジーとの融合に基づく再生医療材料 研究領域名:

#### 内容・内外の研究開発状況:

根治治療を可能にする再生医療は近年大きな期待を集めているが、そのさらなる発展には、高度な生体組織機能を再生する新 規材料の開発が必要である。iPS細胞などの幹細胞用培養基材や生体に埋入する次世代型生分解性細胞足場等、先進的な 生命科学の成果に依拠した新しい材料設計思想に基づく革新的再生医療用材料を創製する。細胞成長因子や細胞外マトリック ス分子等の生体高分子中に存在する生理活性ドメインを導入した合成高分子材料や、遺伝子組換え技術を活用した人工タン パク質、それらのハイブリッドなど、新規材料の開発が内外の先進的な研究室で始まっている。

#### 時間軸について:

機は十分に熟している。しかし、我が国の現行の教育シス テムでは、材料科学と先端生命科学を同時に理解するよ うな人材の育成をおこなっておらず、本研究領域のような 異分野融合型の研究の足かせとなっている。

#### 中心的な研究者

## 他分野・社会に対する重要性の説明:

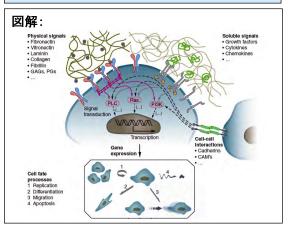
超高齢化社会を迎える我が国において高いQOLを維持す る治療技術の開発は急務であり、再生医療には最も大き な期待が寄せられている。日本は、再生医療研究では高 い国際競争力を有しており、またiPS細胞の発明に代表さ れるように幹細胞生物学でも国際的に高い評価を得てい

#### 諸外国の状況

EUのJ. Hubbell (EPFL)が圧倒的に世界をリードしている。 また、米国ではR. Langer (MIT)、S. Stupp(ノースウェス タン大)らがリードしている。

## 実現するために必要な研究システム:

医理工融合的な研究環境と、高度な生命科学と材料工学、再 生医学を同時に理解する新しい人材の育成が必要である。



連絡者:大和雅之

図 3.1.4-4 バイオロジーとの融合に基づく再生医療材料

## ★ 4) アクティブソフトマテリアル

もう1つ、最近の有機高分子材料で重要なことは、ソフトでしなやかで我々に 非常にフレンドリーでありながら、しかもこれまでのように、硬い鱗のようなもの ではなくて、ソフトで例えばいつもは柔らかいながら刺激があると硬くなって体を 守ってくれるもの。あるいは何かで傷が入ったときに、自らの中に水素結合認識能 を持っている部材を入れておくことによって、それが自ら修復され、いわゆる自己 修復型、セルフヒーリング的なもの。能動的に外部刺激に応答する有機高分子材料 で、しかもソフトでしなやかで、生体にやさしい材料をこれから作り出すことが十 分に可能になってくる。つまり、精密に設計された有機分子の合成法により、ほぼ 確実に出来るようになってきた。それに基づいて、例えばイモリの足は、全く吸着 によらず、ナノスケールの階層構造に基づいて、しっかりくっつきながら、かつ簡 単に剥がれることができる。

このような事象をヒントにナノスケールの材料分子の合成が出来るようになった。つまり、これまではナノの分子を攻めて、少し大きな分子で応答を出す、ということは出来ているが、分子レベルのものがマクロ的な我々の目に見えるところに、分子の精密な制御に基づいて、発現する。そういうアクティブソフトマテリアルと呼ぶものが実現する可能性は十分に素地があり、そういうものは特にバイオロジーとの融合と共に、触媒や高分子・有機の超分子までの融合によって出来上がる新たな研究領域であると考えている。

## 研究領域名: アクティブソフトマテリアル

内容・内外の研究開発状況:有機・高分子材料はソフトであることが特徴。堅さの必要な応用は不利。力、破壊、電場、磁場、イオン、pHなど、様々な外部刺激に応答してマクロスケールな変形をする材料。傷を自分で消す、切断面が自発的に接着する材料。大面積で一義的な組織構造からなる有機半導体薄膜。イモリの足のような接着・脱着機能を有する素材。やさしくさわると変形するが、強くさわると堅い材料は、低速での車と人の接触によるダメージを軽減する。このような能動的にスマートで知的なソフトな材料をまとめて、このカテゴリーにいれる。

## 時間軸について:

6、7年後

ここ数年で実用的にも重要な例がではじめている

#### 他分野・社会に対する重要性の説明:

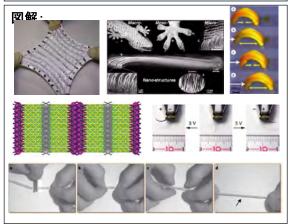
自己修復機能:たてもの・自動車への利用で環境低負荷、 キャストによる大面積構造規制:有機半導体、伸縮性エレクトロニクス:動的対象との電気的情報交換、ショック応答 材料:自動車産業での死亡事故軽減、アクチュエータ:人 工筋肉、カテーテル、タッチディスプレー、いもりの足:接 着・脱着材料

#### 諸外国の状況

米国、EUはすでに活発に研究をスタートしている。さまに 分野横断型の研究、日本での研究例は限られている。リ アルワールドにつながる研究なので、日本も早くスタート する必要がある。

## 実現するために必要な研究システム:

新しいアイデアでの研究が必要。後追いはできない。まず基礎が大事。後は、産学連携により育てて行く必要がある。



連絡者:相田卓三

図 3.1.4-5 アクティブソフトマテリアル

## ★ 5) 高機能分子の設計・探索戦略の確立

上述の基礎になるのが、分子の設計あるいは、反応の設計に基づく計算科学の確立である。これは決して計算速度が大きくなって、並列計算で様々なものが早く行われる、そういう単純なものではない。分子は室温で動いている、激しく動いているわけだが、そういうダイナミックな分子を決して絶対零度、真空下、溶媒なしで今までシミュレーションされた反応や分子の設計ではなくて、分子の様々なダイナミックな動きと外場の状況や、そういうものを全く新しい量子化学計算のパラダイム、ないしアルゴリズムの創製を目指して、それと共に計算速度の究極に大きくなった計算機と組み合わせた新たな分子の設計、あるいは物性の予測、それに基づく材料設計の指針の提供などを目指す新たな計算化学、特に高精度でしかも様々な光と物質の相互作用、あるいは分子そのものの持っている局在的な動きなどを組み入れ

た新たな分子探索設計戦略の確立を目指すシステムも重要だと考えている。

これに基づいて高機能、高付加価値の分子の合理的な設計と合成への一種のメッセージ、あるいはそれに基づくフィードバックが可能になると考えている。これには様々なキーパーソンも必要で、今すぐやらなければそのうちできなくなるというテーマになると思う。

以上、他にもいろいろ重要なプロジェクトがあるが、今、特に申し上げたものは有機高分子材料の特徴を生かしつつ、他の分野との融合に基づいて、今の分野を俯瞰してやるのではなく、それに基づいて一歩進んだ日本だけで独自にやれる、そういうナショナルプロジェクトとなるようなテーマをあえて選んだつもりである。決して他の分野を排除するということではなく、無機材料の場合、セラミックスと金属との融合は不可欠であり、そういうところの特徴を生かしつつ、特にソフトでしなやかで能動的な先進分子材料としての有機高分子分子そういうものの特徴を生かせる領域をこれから重要視することが大事であると考えている。

## 研究領域名: 高機能分子の設計・探索戦略の確立

## 内容・内外の研究開発状況:

非線形光学物質、有機EL、有機太陽電池など、持続可能な社会の実現に貢献する高機能・高付加価値分子の合理設計が求められている。このような研究分野で重要な、光と物質・分子との相互作用の理解には、複雑な量子過程の精密な把握が必要であり、このためには超高精度の量子化学手法の開発が必要である。光過程の理解は理論・計算が最も得意とする研究分野であり、この分野に計算化学的手法を組織的に導入することは、高効率な分子探索・設計戦略の確立の端緒となろう。

#### 時間軸について:

開発の鍵を握る超高精度の量子化学手法は満足できる 段階に入りつつある。光過程のダイナミクスとの融合は、 研究着手が可能な状態になっている。

## 他分野・社会に対する重要性の説明:

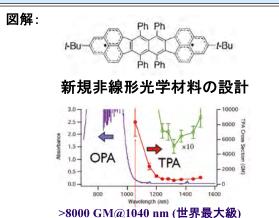
高機能性分子の開発は、光変換材料、エネルギー変換材料、新規記録材料など環境・エネルギー問題に対して直接的に大きな影響を与える課題である。体系的で効率的な物質探索方法が確立できれば、今後の物質設計に革命をもたらすであろう。

## 諸外国の状況

特に米国では量子ダイナミクスの研究者の層が厚く、実用化を意識した基礎研究が広く行われている。

#### 実現するために必要な研究システム:

既にある研究拠点の強化と幅広い人材育成(計算化学を化学・材料分野の教育。研究の基盤に据える)



連絡者:中村栄一

## 図 3.1.4-6 高分子機能の設計・探索戦略の確立

## ★ 6) 融合分子技術

このテーマは、当日の議論では「先進分子技術」として紹介されたものであるが、 後日提案者の中村栄一先生から「融合分子技術」として提案シートが送付された。 ここでは、提案シートのみを紹介する。 内容・内外の研究開発状況:「化学」は理解を主目的とする「分子の科学」と、物質創造と制御という「分子の技術」的側面を合わせ持つために、「分子科学vs.分子技術」という対比概念が希薄であった。材料開発やバイオメディカル研究における分子性物質がますます重要性を増す世界的背景の中で、「分子技術」という概念を今、明確に認識することを提案し、さらに分子技術と社会要請を融合(概念の融合:syncretism)させた研究分野を「融合分子技術」と定義したい、具体的には、分子および有機エレクトロニクスから化学生物学、創薬・医療、工業生産技術などの出口を意識して、「合目的性を持った機能分子を特定し、これらの分子の機能設計と機能発現を目的とした技術」を国策として推進ための大きな研究領域の提案である。幅広い化学関連分野で超高水準を保つ我が国の化学研究を、「融合分子技術」の側面から見直して、これを一層促進する。

時間軸について:分子技術という概念は丁度花咲き始めたところである.今すぐに開始して来る五年で世界をリードする思考形態・研究組織を確立する.

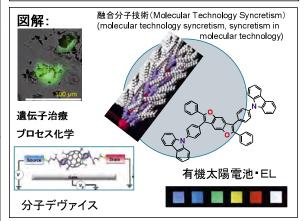
中心的な研究者: 化学の中心分野から、物理、生物、 工学との学際的分野で、また多様な年齢層において日本 の研究者層は極めて厚いことは良く知られている。

#### 他分野・社会に対する重要性の説明:

国民が日々その恩恵にあずかっている調味料, 化粧品から医薬, 液晶テレビ, 携帯電話まで, その根底では高度機能化有機物質が重要な役割を果たしていることが, 社会的認知を得てきた. 有機EL, 有機太陽電池など「有機」に関した先端技術もマスコミ等に頻繁に取り上げられている. 今や有機, 分子, などが生活の向上, 資源エネルギー問題の解決に重要なことは広く受容されてきている.

諸外国の状況: 世界的に見ると、分子科学と分子技術の差異は、未だ明確に認識されていないので今が施策始動の好機である。 中国では分子科学を飛び越してナノテク志向分子技術へと突入し、米国では医療、環境などのキーワードで分子技術とナノテクの融合が進んでいる。 一方欧州は大学・企業とも研究者層が薄くなる傾向.

実現するために必要な研究システム: 異分野に属する2人のPIからの申請に限定する, 企業と大学の共同研究寄附講座からの申請に限定する, など絞り込んだ申請としてはどうか. (ただし成果審査では目的達成度だけを指標とはしない)



連絡者:中村栄一

図 3.1.4-7 融合分子技術

#### 俯瞰図の見直し

俯瞰図については他の分科会と全く同感で、言い出したらきりがない。完全な見 直しは原理的に不可能であり、それから、あれもいるこれもいると言い出すと恐ら くこの部屋全体の紙がいるかもしれないので、あえて少しだけ言わせて頂く。

このあたりは前はテラ、ペタと書いてあったが、もう少し進んでいるという話もある。それからケミカルプロセス、グリーンプロセスというのは、どうも分からない。妥協案はグリーンケミカルプロセス。つまりケミカルプロセスというのは、多分環境的なプロセス変換だと思う。グリーンプロセスもある意味そうだが、それを組み合わせたグリーンでしかも高効率の反応という意味で、このあたりが良いでのはないか。それから出来れば、分子触媒だとか、資源対応型機能触媒というような新たな触媒科学の領域を入れることで、ここに挙げておいた分子触媒やプロセスを多機能触媒科学という基礎的な分野に変えるべき、つまり加えるべきだ。それ以外にもこの人工骨、人工臓器というのはいささか概念が、階層が違う。むしろ今、重要になるのは再生医療と人工臓器とか。それからここもむしろまとめて、バイオチップで良いのではないか。

ブルーのところは加えていただきたいところ、赤いところは言葉を直すところである。基幹分野に十分腰を据えた上で、材料の出口を求める。そういうポリシーが

非常に大事で、それはリーダーとファンディングエージェンシーの 1 つの思想によっていると思うので、そのあたりを良く考えていただきたい。

# 俯瞰図の修正

●デバイス・部材 人工骨・人工臓器 → 再生医療・人工臓器 テラ(ペタ)ビット記録 → エクサバイト記録

マイクロTAS、生体分子分析チップ →

バイオチップ・マイクロTAS

分子イメージング(追加)

●製法・プロセス ケミカルプロセス、グリーンプロセス → グリーンケミカルプロセス

●新領域の追加 資源対応型機能触媒 分子触媒

●最下段 分子触媒・プロセス → 多機能触媒化学

図 3.1.4-8 俯瞰図の修正について①

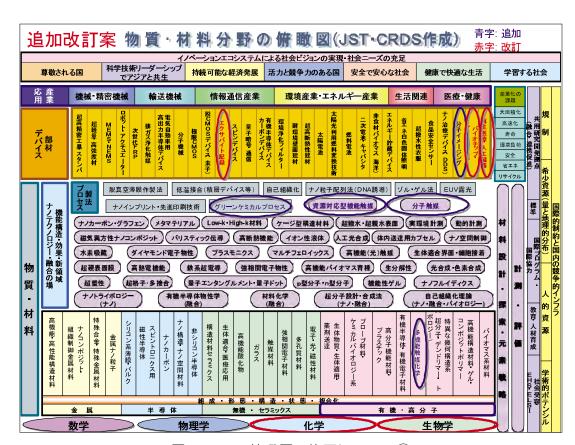


図 3.1.4-9 俯瞰図の修正について②

#### 研究推進システムの在り方

日々同じところで同じ釜の飯を食って、医学者の隣に有機合成化学者がおり、それによってすばらしい材料が出来たというのが、アメリカや日本で散見されるが、このような真の異分野融合を人間のレベル、しかも感覚のレベルで行われるような、そういう制度が必要である。それから、そういう意味では巨大なチームを率いて、その中に様々な分野の研究が同時進行するような異分野融合の促進をぜひ図っていただきたいと思う。

それからこれはいささか僭越かもしれないが、我々はそろそろ何か便利にするとか、少し物が早くなるとか、小さくなるとか、そういう領域をそろそろもう超えて、これからは我々が心穏やかに、しかも何か豊かな目的を持って生きていける、そういう文化の質、あるいはアフリカにおいては、むしろ食糧増産のための材料とか、水を新たに見つけるための材料、あるいは蚊を防ぐとか、そういう様々な文化に対して、日本のマテリアルサイエンスとケミストリーとオーガニックケミストリーが貢献できる道は一杯あると思う。

そういう意味での単に何かを良くするというよりも、あるいはヨーロッパ、欧米だけに目を向けた便利さの社会ではなくて、文化の質を向上させる、いわゆるクオリティーオブライフの全人的な向上に向くようなそういう新たな研究領域の立ち上げも大事である。腰を長く据えて持続的にファンディングをサポートする。もちろんこれには厳密な成果の評価が必要だが。しかし時には、10年ものの研究によって始めて培われる成果が新たなパラダイムの変換をもたらすことは歴史が良く知らせているところである。

# 研究推進システムの在り方

基礎科学の重視

拠点の重視

測定装置の共有、維持管理の困難性

異分野融合の促進

日々同所にて議論、真のマルチファンディング

QOL(文化の質向上)

産業界の必要性からコミュニティでの必要性へ 研究の継続性をもたせる(評価を経た上で)

図 3.1.4-10 研究推進システムの在り方

#### 質疑討論

- ー単分子デバイスというのはハイリスク、ハイリターンだ。デバイスが出来たといっても、確かに欧米の研究者がデータはいっぱい出したが、ただ測定しただけで、 やっと少し信頼性のおけるものが出てきたなという状況で日本が遅れているとは 言えない。実際にデバイスとして考えられるように、別に単分子でなくても集合 となったものでもちゃんと測れるような方向にもっていくという意味ではまだ日 本が遅れている。
- 一決してすぐに明日から実用が出来るわけではないが、今、基礎的なところに腰を据えて日本の持っている有機合成、高分子合成、電子的な材料の合成、そういったところの実力を生かすことで、このところに1つ足場を置いておくということが重要である。先進分子材料ともいえる、合成材料設計の統合された1つの最も重要な分野ではないかと思う。
- ー議論されていたのは界面、電極的なところだと思うが、そこに関する非常に新し いアプローチ、ブレイクスルーがあったのか。
- -いろんなレベルの界面があるが、今回の場合は、金のチャックに分子を挟むということも行われている。最近になって、いわゆる単分子を挟んだ IV の測定。これが再現性良くできてきたこと。それから 12 種類の分子について IV 特性を検査したところ、80%、すなわち 10 種類の分子で実測値と理論値があったということから、分子の大きさでいくと 1nm ぐらいまでの話だが、そういったベースがしっかりしてきた。そこで、第 2 段階として今度は分子に原子が留まるような、即ちバイブレーションと共役するようなシステム系、いよいよ分子を使った電極形成が出てくる領域の研究も進めましょうということで、漸くこの分野、進展が得られそうな状態にあると判断する。
- ーコンタクト部分というか、配線、デバイスの外側の機能を持っている部分まで引 き伸ばして、あまりアクティブなところだけの分子ではなくて。
- 一先ほど話したように、金のクラスターに容易にイオウ(S)のマイナスイオンがくっつく。したがって両端にSの、例えばいわゆる結合端子を付けた分子は簡単に、単分子でもって両方をイオウで金と繋ぐという、そういうものも出来ていると思う。イオンを使うタイプのものではない。
- 一確かに今もそうだが、電極からが一番簡単だったが、これから先はそれにこだわる事は全然なくて、電極が分子でもよく、そういうシステムを考えていかなくてはいけない。このような段階まで進むためにも、有機合成触媒による基本的な分子の精密な設計がますます重要になってくる。
- -今の話にも関係するが、その新しい領域に挑戦したとき、サイエンスとして、こういう領域は重要ですよ、という領域はあると思う。例えば今の話だと、こういう領域はできるかどうか分かりませんけど、単分子デバイスフィジックスとか、あるいは、有機、例えば太陽電池の有機薄膜太陽電池でみられるような有機半導

体デバイスフィジックスとか、そういったものがいくつか提示されているとありがたい。それから、これは他の分科会にも聞きたかったのだが、新しいサイエンスの分野として何があるのか。俯瞰図の方では、一番下のほうに5つほど書いたが、ナノトライボロジー、有機半導体物性学、材料化学、超分子設計合成法、そして自己組織化理論というようなものが出てくると面白い。

- ー資源の枯渇に基づく全く新しいケミカルエンジニアリングは、いわゆる物質移動 論ではなくて、触媒とケミストリーの融合に基づくパラダイムである。分子から マクロへの翻訳がようやく階層構造を通じて、明確にできるようになってきた段 階で、それぞれについてのサイエンスが必要だと思う。
- 一先ほど先進分子技術とお話したところなど、まだ提案できるところが随分ある。
- -薬の生産段階は今も 20 段階だが、このまま進んでいくと恐らくこういう材料でも 10 段階ぐらいの工程で作れる。本当によくデザインしたものが必要になるのは間違いない。そういう意味で分子技術というか分子化学という、モレキュラーエンジニアリングとしての基礎的な合成法。これをいつもカップルしておかないと、実際どれもこれは実現できない。それからプロジェクトの中に物を作る基礎的なサイエンスとしての科学をベースにして、単分子デバイスをやって欲しい。

### 3.2 全体討議

各分科会からの報告の後、全体討論が行われた。以下の4つの論点について活発な討議がなされた。

#### 【融合的な課題と拠点形成について】

- 様々な分野の方にコラボレーションを真に興味を持って行わせるためには、 融合の重要性を十分に認識した領域の設定と組織の構造が重要である。
- ファンディングとして異分野融合を誘導するか、見える成果が出なければファンディングを切るという勇気が必要である。
- ・ ファンディングの集中を避けるために、タイムシェアリングで頭を使える先生が排除されるのは日本全体として損だ。研究管理の工夫をして、研究成果で判断して欲しい。
- ・ 縦型連携(政策目標型と課題設定型)で成功するには様々な融合が必要であるが、基礎研究は基礎研究のモチベーション / インセンティブで動けるような運営が確保されるべきだ。異分野融合の場合には、物理空間を共有して行うことが重要だ。ファンディングのときに、異分野連携による共同提案を優先的に採択するような工夫が必要ではないか。
- ・ 先端融合領域イノベーション創出拠点の形成は、短いサイクルで評価を入れられる。拠点というのは、10年ぐらいのターム、5年で中間見直しのピッチでやっていただくと、大学のピッチと比較的良く合う。企業と共同研究のファンドも少しピッチが早いので、タイムスパンが難しい。共同研究拠点は整備していただいているが、設備拠点だけになるとスタッフを配置する余力がない。
- ・ 材料では、最先端で1つの大学では維持できない装置を、国の方針として 継続的にオープンな形で運営することが必要だという議論が非常に多く出 た。
- ・ 教育に重点があるグローバル COE のような拠点は、もう少し長期的な視野が必要ではないか。教育を考えるには 5 年間は短すぎると思う。さらに中間評価が入り、かつ評価の間隔も非常に短い。この期間では本当の教育は出来ない。
- ・ 異分野融合を図る拠点を一番必要としているのは半導体領域であり、集積化 や複合化が進んでいる。半導体分野では拠点は海外にあり、日本には拠点が ない。大学と産業界が一体となって拠点作りのデザインをして、実際に拠点 を経営するのは産業界の経営のプロに任せるべきだ。
- ・ 装置群を作る場合、ある 1 つの大きな分野を設定して、これを推進するにはどういうものが必要かということを真剣に議論してやる必要がある。1 機

関からの提案ではうまく機能しない可能性がある。

- 拠点にパーマネントの職員がいなければ、装置だけたくさんあっても機能しない。
- ・ 共用の設備はあるが、装置の単純使用は(共同研究で無ければ)認めないというケースが多い。我々も含めて企業の人達も、設備にいるエンジニアの力を借りて、あるいはトレーニングを受けて単純使用できるような共用設備を強く望んでいる。
- ・ 高度に管理され、データの信頼性が保障された形で出来ると良い。大学の装置を課金制度で利用し、保守管理はプロパーの方にやっていただき、尚且つ誰でも広く使える。特に大学の先生方に使っていただけるような装置拠点があれば全体の技術レベルアップに繋がるのではないか。
- ・ 装置は重要だが、実際には装置をきちんと管理・運営し、仕様通りのものが 出来るような研究ポテンシャルを拠点自身が持っていることが重要だ。各拠 点に継続性の高いポテンシャルを維持できるような仕掛けが本当になされて いるか、その拠点が自立性を持てるかが非常に重要だ。国あるいはファンディ ングエージェントとして、どこかの組織を拠点化したいのであれば、拠点を 使ったときにファンディングが受けられる、あるいは人のネットワークも行 えるようなファンディングシステムを作り、積極的に誘導しない限りは人手 が育っていかない。
- ・ 突き詰めていくと大学共同利用研究機関になる。少なくとも技術職員が教員 よりたくさん給料がもらえるぐらいのシステムが拠点作りには必要だ。拠点 のファンドから技術職員への給料を払えるような仕組みにすると共同利用が 進んでくる。
- ・ 民間企業の設備を大学あるいは一般に公開し、国の資金を入る方が効果的かもしれない。

#### 【第4期科学技術基本計画に向けて】

- ・ ナノテクノロジーに対する批判の1つは、目に見える形のものがわからないということだが、我々の議論では、ようやくナノの上にある分子をさらに 階層的に組織化することでマクロな目に見える形の成果がようやく出てきたと思う。
- ・ ナノテクノロジー・材料というのは、ある一定の成果を修めたと思う。同時に、分子から組み上げて階層を作って、何か作っていくというのは分かった。 しかし、そこからどういう機能が出るのか、どういうものが出来たかという ところが見えにくいのではないか。
- ・ ナノテクノロジーが目に見える形で成果が上がったかどうかを議論するには、 NEDO のように数値目標を使えば必ず目に見える。企業と一緒にやりなが

ら数値目標の達成を日々やっているが、これは大学にはそぐわないと思う。

- トゥルーナノには非難・批判があるが、それはそれなりに意味があったと思う。
- 特にナノテクこそ材料になっているが、実際に得られた成果は情報科学、情報通信、生命科学等さまざまな分野に応用されている。
- ・ これは総合科学技術会議で次の期間の一種のスローガンみたいなもの、国民 の目から見ると、ナノテクノロジーは恩恵をもたらすものという形になり、 まだ結果が見えないという話になっていると思う。国民の視点は避けられないが、これを考えていくというのが重要じゃないか。
- 我々が専門家として集められているので、我々の高い視点を言うのが肝要だ。
- ・ 半導体分野からいうとナノテクが重要だなんていうことは当たり前の話だ。半導体テクノロジーはナノによって成り立っているという当たり前のことをアピールする必要がある。
- ナノテクノロジーとナノ材料、またはナノ構造というのは少し違うように思う。
- 多様なナノテクを利用して多様なアプローチの仕方があるということは周知のことと思う。ただ社会がその認識に乏しいということでは、我々も絶えずそういう情報を発信する必要があると思う。
- ・ 見せ方の問題でナノテクノロジーはもっと基盤的だということをアピールする。もう 1 つはナノテクノロジーを使うと製造技術の効率が画期的に良くなるということをアピールする。
- ・ 今、考えられる範囲内で考察するととても出来そうにないが、あらゆる分野がこれから進んでいくことを考えると、そのエスカレーションの先のことは何かあるだろうという気がする。それに対して国がファンドするのかしないのかが課題だ。企業ではとても無理。

#### 【人材育成について】

- ・ 工学部の電気電子工学科は人気が低迷していて学生が来ない。将来的に見て、この分野の基礎体力に影響するような状況になっている。中・高校生に対する科学教育自体も問題で、研究者レベルでもそこまで視点を入れて強化策を考えないといけない。
- 高校と大学の接続というか、高等学校の教育に対する大学人の無関心がある。 高校がややベイカントになっている。高等学校の理科の教科書は我々が今 もっているテクノロジーとは違うセンスで書かれている。よって、その部分 のファンディングは、今少しずつ文科省でもしており、高校と大学の接続プログラムみたいなことをやっているファンディングがかなり影響していて、 大学の経営者としてはファンドを目指して頑張ることになる。電気に限って

言えば、柏崎原発事故のような不幸なことも重なった気がする。よって一時的な気もするが、高校に対するいろいろな支援というのは今後も必要になっていくと思う。ファンディングについても、日本の産業界を支える基盤的な工業技術に対する継続的な支援もしておくと、基盤的なところは残るのではないかと思う。

- ・ 工学部の進学者が全国的に半分以下になっている傾向があり、その傾向が端的に現れているのが電気電子系だ。研究者、あるいは研究をやることに魅力がないという風に映っていることをすぐに回復するのは難しく、複合的な要因がある。人材育成の観点から非常に問題であるという認識だ。いろいろ努力はしているが、我々の努力が若い学生に伝わらないのは、社会的な状況もあるし、中学・小学ぐらいからの問題もあると思う。先生の質をもう少し上げることが必要かなという気がする。それからもう1つ、産業界の若い技術者のイメージがマイナーである。これはマスコミの問題、原発事故や半導体の不況など悪いことばかりがマスコミに出てくる。まずは技術者の待遇を上げていただくことも必要じゃないかなと思う。
- ・ タイのチェラロンコンの大学の視察に行った。大学 1 年生に人気のある分野を聞くとナノであった。大学の教育の中に分野融合的な教科も入っており、進んだ仕組みを持っていた。南アジアの風景がここ 10 年のうちでかなり変わるという、凄い脅威をもった。
- ・ ポスドクを増やす制度を始めたが、当初1万人計画だったはずが、すでに1万6千人を超えてポスドクが増えている。ポスドクに費やす予算が多く、本当に戦略的な研究推進が出来るかどうか疑問をもっている。ポスドクを通らないと研究者になれないルートを作ってしまったことへの再検討が必要。特に大学院重点化大学がいくつかあるが、その大学の使命は優秀なドクターを出すことだ。博士の高価値化、大学全体として、その方向を考えなくてはいけない。人材育成という点で大きな岐路にたっている。
- ・ ポスドクを中心に据え、研究者養成のあり方を検討しなければならない。ポスドクを研究者としてのキャリアパスとして持つためには、文科省または財務省でポスドクのためのファンドをとっていただき、特任助教のような形で先生に配置し、パーマネント教員への道が開けるようにしたい。重点化大学としてドクターの質の保証については、継続的にやっている。ドクターコースへ学生が志望しないという点、これは奨学金の免除制度が無くなったことが大きく影響している。国としてドクターコースに入ってくる方に対する支援策を頼みたい。
- ・ ポスドクの問題は制度ではなく、本人に一番問題があるような気がする。残 念ながら雇いたいと思う人が非常に少ない。元来、工学部の大学院というの は産業界で活躍できる人材を育てることだろうから、どんどん企業に行って

良いと思う。

- ・ わが国でナノテクノロジー・材料分野を活性化するため、他の分野とは異なったような方策を絶対にやるべきだと思っていて、社会受容と強烈にリンクしていると思う。ナノという、ある程度の知識を持つほうが、社会受容の問題をディスカッションするような時に必ずプラスに働くと思う。ぜひ JST 等々でそういったものが出来るのであれば、イニシアティブをとって進めていただきたい。
- ・ 博士について、今グローバル COE で外部の調査会社といっしょに調べているが、博士になっても生涯賃金が低いのでメリットが全然ない。マスコミの影響は極めて大きいことも確か。教育という意味では、ナノテクノロジーはもう少しマスコミに載せて宣伝させると一般に周知されるだろう。戦略的にやらないと、教育現場まで浸透しない。

#### 【社会受容について】

- ・ 難しい問題で心配しているのは、非常に不正確な形でいろいろ世の中に出て しまっている。きちんと科学的に抑える必要がある。そういうことのために 新しい技術、新しい科学への挑戦に阻害があってはならない。そういうこと を我々が注意して頭に入れてやっていかなくてはならないのは当然。
- ・ 基本的に企業としては全く同じ立場で、何か本当にサイエンスに基づかない ことでもって、マスコミが騒ぎ出すと反論のしようがない。そうならないよ うに下準備をするなら、サイエンティフィックに基盤を固め、証明し、それ を尚且つ一般の国民の方々にどういう風に街宣するかを考える必要がある。
- ・ そこの働きをするのが、恐らく JST の理解増進、あるいは広報ではないか。 説明責任としてあると思う。みんなが不安に思っていることに対して、きちんと説明するのは JST がやらないと、どこもやらない。そういう意味での広報活動、理解増進活動はやっていかないといけない。きちんとした科学知識に基づく理解増進を図り、非常に短い時間で宣伝するべきだ。
- ・ 危ないというのが先に出てしまうと、根拠がどうであれ大変なことになって しまう。民間会社も何か質問が来たときには、きちっと対応し、材料につい ての科学的根拠をもって説明しなければならない。現場にいる人間は、現状 で最善の方法を作ることはやっている。大事なことは、こういう情報を出来 るだけ民間の消費者団体でもいいから、皆さんにきちんと正しい情報を出す。 NEDO で良いプロジェクトが走っていて、標準物質を作ってきちんとした ものでやっている。
- ・ ナノ粒子のリスク評価については、NEDO のプロジェクトが一番評判良い。 ナノ粒子の危険性を評価する手順がきちんと打たれている。社会リスク評価 こそ相当の分野の人が融合しないと出来ない。しかしながら、リスクとベネ

フィットの両方を含めての社会受容を確立していくため、リスクの面での 我々の手の打ち方を強調していかなければまずいのではないか。相当にサイエンスのデータを積んで、早目早目に広報していくことが重要である。

## 4. まとめ

本章はワークショップ全体のまとめである。第 1 章「1.1 本ワークショップの趣旨」に記したように、産学官の物質・材料分野専門家による 2 日間に亘る議論の結果を次の 3 点に整理して概要を記し、結論とする。

- 1. 物質・材料分野俯瞰図(最終版)
- 2. 重要研究領域と課題(各分科会からの提案のまとめ)
- 3. 研究システム提案(ファンディング制度、研究拠点、異分野融合など)。

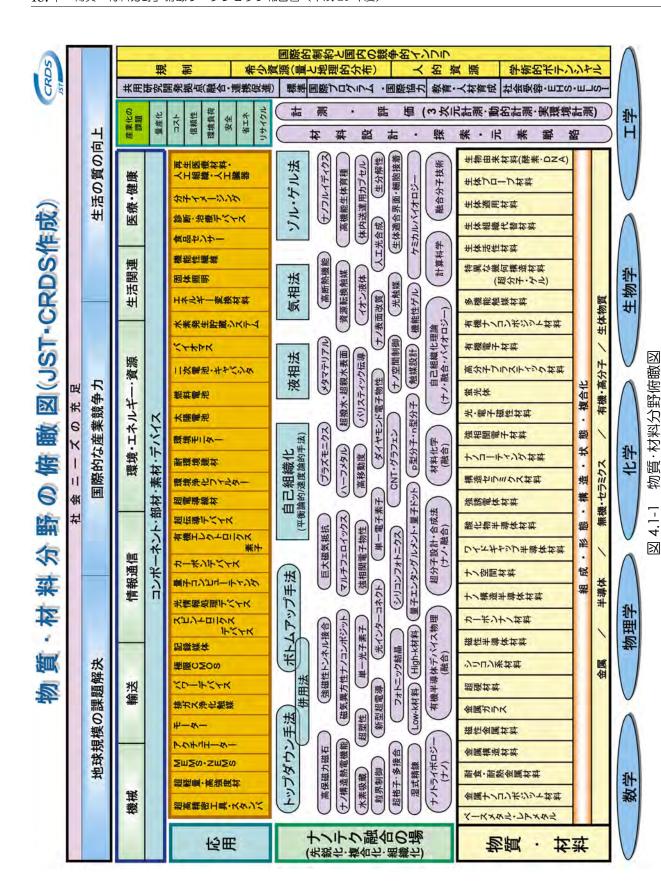
### 4.1 物質・材料分野俯瞰図

当センターでは本ワークショックで得られた俯瞰図案に対するご意見・ご指摘に基づき、俯瞰図のブラッシュアップを行った。物質・材料分野の俯瞰図を図 4.1-1 に示す。

CRDS は平成 20 年 4 月より「ユニット制」に組織変更され、センター長の判断で「ナノテクノロジー」ユニットと「物質・材料」ユニットを分離することとした。当然の帰結として、今回のワークショップの主眼の 1 つは、新たに独立した「物質・材料」ユニットの俯瞰図を作成することであった。

物質・材料分野の先端的開発部分はナノテクノロジーと大きく重なっていて、これは世界の共通認識である。そこで、CRDS として今回のワークショップには、日本の重点 4 分野の 1 つに指定されている「ナノテクノロジー・材料」分野を、「物質・材料」という視点で俯瞰的かつ具体的に整理する、という基本的なスタンスで臨んだ。そのため、ワークショップ開催前にたたき台とする俯瞰図案(図 1.2-2 参照)を作成、ワークショップ参加メンバーにあらかじめ配布してコメントを求め、当日、4 つの分科会でそれぞれ加筆修正を含めた議論をしていただいた。次頁の図 4.1-1 は、ワークショップ後、さらに CRDS の「ナノテクノロジー」ユニットと「物質・材料」ユニットが共同で議論して最終的に仕上げたものである。

尚、この俯瞰図は、物質・材料分野(ナノテクノロジーを含む)における今後の 重点領域や課題を抽出する際の基本設計図であり、「物質・材料」軸、「(産業) 応用」 軸、「社会ニーズ」軸など重要な視点からの各種キーワードが含まれていて、これ らを多元座標として領域や課題の俯瞰的位置づけが可能になるように設計されてい る。



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

4.1-1

## 4.2 重要研究領域と課題

本ワークショップでは、「物質・材料分野俯瞰図」の完成を目指すとともに、今後の重要研究領域や課題を掘り起こすべく、事前アンケートや仮説の分析も含めて集中的に議論した。「金属材料」、「半導体材料」、「無機材料」、「有機・高分子材料」の4つの分科会で集中議論、その結果をさらに全体討論へ通すことにより最終的に中長期の重要研究領域と課題が抽出された。分科会毎に表 4.2-1~表 4.2-4 に整理して示す。表中の図番は本報告書中のものであり、詳細はそれらの図を参照されたい。また、併記した研究課題は各分科会からの提案シートから大まかに読み取ったものである。これに加え、図 4.2-1 は、事前アンケートと各分科会で共通して議論された個々の研究課題を、応用分野で分類し、時間軸上に整理した重要研究課題である。但し、分科会で時間軸の議論が無かった課題については、事前アンケートでの時間軸を参考とした。

物質・材料分野俯瞰図(図 4.1-1)および重要課題のまとめ(図 4.2-1)が今回の ワークショップにおける主な結論である。

表 4.2-1 中長期の重要研究領域と研究課題―金属材料分科会―

	研究領域	研究課題		
	省エネルギー構造材料	耐熱構造材料(図 3.1.1-4~5)		
		軽量構造材料(図 3.1.1-6)		
	エネルギー変換・貯蔵・輸	熱電変換材料(図 3.1.1-7)		
	送材料	永久磁石(図 3.1.1-8)		
		軟磁性材料(図 3.1.1-9)		
		水素貯蔵材料(図 3.1.1-10~11)		
	資源対策・リサイクル技術	レアメタル・ベースメタル(図 3.1.1-12)		
金	触媒	ナノ粒子		
金属材	スピントロニクス材料	ハーフメタル(図 3.1.1-15)		
料	データストレージ	磁気記録材料(図 3.1.1-16)		
	生体機能医療材料	合金開発による生体機能発現		
	(図 3.1.1-17)	金属表面の組成・構造の改質による生体機能		
		発現		
		金属の生体機能性評価手法の確立		
	材料設計	計算科学(図 3.1.1-18)		
		機能元素(図 3.1.1-19)		
		ナノ解析(図3.1.1-20)		

表 4.2-2 中長期の重要研究領域と研究課題―半導体材料分科会―

	研究領域	研究課題	
	CMOS トランジスタ用新	低次元ナノ半導体材料、外部電界応答チャネ	
	チャネル材料	ル材料、分子デバイス用材料、高性能薄膜ト	
	(図 3.1.2-12)	ランジスタ材料	
	ナノエレクトロニクスのた	原子レベル精度の構造自己形成プロセス、系	
	めのマテリアルインフォマ	統的なデータの蓄積と共用化	
	ティクス		
	(図 3.1.2-13)		
	新状態変数エレクトロニク	原子・欠陥制御スイッチ、電子相関制御、外	
	ス	部電界応答チャネル材料、分子デバイス用材	
	(図 3.1.2-14)	料	
	スピン流デバイス	利得を持つスピントランジスタ、スピン	
	(図 3.1.2-15)	RAM のロジック応用、スピン基礎物性	
半	インテグレート・ナノカー	集積化ナノカーボンデバイス、ナノカーボン	
半導体材料	ボンデバイス	と異なる材料との複合化	
材	(図 3.1.2-16)		
料	エネルギー半導体エレクト	ワイドギャップ半導体、周辺素子技術、スー	
	ロニクス	パーノッド	
	(図 3.1.2-17)		
	構造的制御による連続的バ	(混晶)クラスレート、太陽光スペクトルに	
	ンドギャップ制御(無機材	対応する広範囲バンドギャップ制御	
	料)		
	(図 3.1.2-18)		
	空間閉じ込め型無機/有機	酸化亜鉛/色素超格子、複合分子による2光	
	複合材料	子吸収	
	(図 3.1.2-19)		
	カーボンベース・ナノエレ	シミュレーション材料設計技術、ナノ構造・	
	クトロニクス	物性評価技術、制御された材料合成技術デバ	
	(図 3.1.2-20)	イス・プロセス技術・LSI 整合技術	

表 4.2-3 中長期の重要研究領域と研究課題一無機材料分科会一

	研究領域	研究課題	
	新型超伝導	鉄系を含む新規な超伝導材料の開発	
	(図 3.1.3-2)		
	生体との精密制御界面を有	生体材料・デバイスの寿命延長	
	する再生医療バイオマテリ	生体適合性と長期機能化のための表面技術開	
	アル	発	
	(図 3.1.3-3)		
	ナノシート・コロイド分散	セラミックナノシートを用いた新機能材料開	
	粒子を用いた新機能材料開	発	
	発	(図 3.1.3-4)	
無		コロイドプロセスの高度化による高次構造制	
無機材		御対の作製とイノベイティブセラミックスの	
料		開発	
		(図 3.1.3-5)	
	高効率熱電変換材料・シス	ナノ構造制御に基づく高効率熱電変換材料素	
	テム	子の開発	
	(図 3.1.3-6)		
	ナノ粒界設計による低温・	粒界設計と機能セラミックスの創製	
	高速超塑性セラミックス	(図 3.1.3-7)	
		低温・高速超塑性セラミックスの創製と高強	
		度・精密塑性加工技術の開拓	
		(図 3.1.3-8)	

表 4.2-4 中長期の重要研究領域と研究課題―有機・高分子材料分科会―

	研究領域研究課題					
	資源対応型機能触媒化学	分子触媒や有機触媒、1分子で働く触媒、固				
	(石油資源体系からの脱却)	体触媒、生体触媒				
	(図 3.1.4-2)					
	単分子機能型デバイス材料	複合自己組織化能力を用いた新たな機能型デ				
	(図 3.1.4-3)	バイス材料				
有	バイオロジーとの融合に基	高度な生体機能を再生できるような足場材				
有機	づく再生医療材料	料、幹細胞用の培養基材				
高	(図 3.1.4-4)					
高分子材	アクティブソフトマテリア	自己修復機能ビルトイン材料など				
材料	ル					
不当	(図 3.1.4-5)					
	高機能分子の設計・探索戦	全く新しい量子化学計算のパラダイム、ない				
	略の確立	しアルゴリズムの創成				
	(図 3.1.4-6)					
	融合分子技術	出口を意識した機能分子の特定と機能設計か				
	(図 3.1.4-7) ら発現までを実現させる技術					

ま

とめ

## (量子ナノ構造)		
は様様 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	高出力高信賴燃料電池 革新的高効率熱電変換材料	熱電変換材料
6度析料 (NI基,Co差,TIAI,達移 水素工本技術(触媒、貯蔵技術) 磁性材料 環境・エネ系材料の機能設計 (ALL非形成(感染症対策) (ALL非形成(感染症対策) (ATL 上大表面の調和型材料創製技術 (ATL 上 表面の調和型材料創製技術 (ATL 上 表面の調和型材料創製技術 (ATL 上 表面の調和型材料創製技術 (ATL 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 和 を属立 (ATL 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上 上	熱電変換材料(ナノモジュール化)	
はよいまでは、機能分子複合体(血 ルム非形成(感染症対策) デラックス) を通合化、機能分子複合化(血 デラックス) サナノ表面の調和型材料創製技術 が適合化、機能分子複合体材料 を能向上無機系複合体材料 を能向上無機系複合体材料 を能向上無機系複合体材料 を		室温超伝導材料(新型超伝導材料)
ルム非形成(感染症対策) 液適合化、機能分子複合化(血 ヒナノ表面の調和型材料創製技術 能にする複合材料 ラミックス) 生ナノ表面の調和型材料創製技術 能にする複合材料 一きシックス) 生体機能の経時的制御が可能な無機生体材料、無機 とよびのS、メタルソースドレイン 別面制御 またよび男面制御 キカよび男面制御 シクCMOS、メタルソースドレイン チョーブ合成・プロセス技術 レノフレキシブルカーボンナノチューブ電子デバイス カーボンナノチューブ電子デバイス カーボンナノチューブ電子デバイス を使ん(異材料融合)カーボンナノチューブ電	環境・エネ系材料の機能設計 材料機能学(探索設計学)	梁索設計学)
とナノ表面の調和型材料創製技術 能にする複合材料 シラミックス) 生体機能の経時的制御が可能な無機生体材料、無機 にする複合材料 コテミックス) コナノ粒子、刺激応答性付与) コナノ粒子、刺激応答性付与) カテエレクトロニクス は下ランジスタ材料、Low・N低抵 はかマトリックス等) カテエレクトロニクス は下ランジスタ材料、Low・N低抵 はかマトリックス等) カテエレクトロニクス なりルゲートの開発とCMOS延長 スタルゲートの開発とCMOS延長 オおよび界面制御 カタルゲートの開発とCMOS延長 オカナび非面制御 カタルゲートの開発とCMOS延長 オカナびチョーブ電子デバイス カーボンナノチューブMEMSデバイス カーボンナノチューブ電子デバイス カーボンナノチューブ電 後合化(異材料融合)カーボンナノチューブ電	in the second	バイオセンシング 機能構造材料
### ### ### ### ### ### ### ### #######	細胞機能と調和し、細胞機能制御を可能にする複合材料	生体とデバイスの革新的インターフェイス材料(神経、関節・皮膚などの組織含む)
S	生体機能の経時的制御が可能な無機生体材料、無機系複合体材料	
**クCMOS、メタルソースドレイン       分子エレクトロニクス         **男面制御       低次元ナノ半導体、ナノレベル半導体/金属コンタクト         **クルゲートの開発とCMOS延長       大面積印刷カーボンナノチューブ電子デバイス         **クルゲートの開発とCMOS延長       大面積印刷カーボンナノチューブ電子デバイス         **レノフレキシブルカーボンナノ       カーボンナノチューブ電子デバイス         **テデバイス       大面積印刷カーボンナノチューブ電子がイス         **ロセス技術       カーボンナノチューブ電子がイス		生体及び血液に適合する高度材料
<ul> <li>(4) たっとシンスタ材料、Low-k/低抵</li> <li>(4) たっとび界面制御</li> <li>(5) カラト</li> <li>(6) カラト</li> <li>(7) カーボンナノ</li> <li>(7) カーボンナノ</li> <li>(4) 大コーブ合成・プロセス技術</li> <li>(5) カーボンナノ</li> <li>(6) 化(異材料融合)カーボンナノチューブ電子デバイス</li> <li>(5) カーボンナノチューブ電子デバイス</li> <li>(6) 化(異材料融合)カーボンナノチューブ電</li> </ul>	分子エレクトロニクス	外部電界に応答して物性が変化する材料 (強相関電子材料など)
メタルゲートの開発とCMOS延長 ノチューブ合成・プロセス技術 レノフレキシブルカーボンナノ キデバイス チデバイス サデバイス せだれたカーボンナノチューブMEMSデバイス 後合化(異材料融合)カーボンナノチューブ電		
レノフレキシブルカーボンナノ 子デバイス 子デバイス -トされたカーボンナノチューブ電 複合化(異材料融合)カーボンナノチューブ電		
ートされたカーボンナノチューブ電		ナノカーボンユビキタスデバイス
チデバイス・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	看を合化(異材料融合)カーボンナノチューブ電子・MEMSデバイス	
ゲラフェン合成技術開発 (スピントロニクスの全領域(材料、物性、デバイス、回路)にわたる研究)		半導体グラフェン電子デバイス
10年先   10年先   10年先   10年光   10年末   10年末	10年先	F先

### 4.3 研究システム提案

本ワークショップの主要な目的の1つである『融合促進のための研究システム提案』に関係する意見を全体討論から抽出し、整理した。全体討議では、①ファンディング制度としての異分野融合研究の促進と、②研究拠点形成による異分野研究促進の、2点に意見が集中して討議されたが、CRDSにおける過去の蓄積も含めて、以下のように整理しておく。

#### ①ファンディング制度としての異分野融合研究促進

- ーファンディング制度として、融合を重視した研究領域の設定や異分野連携提案の 優先的採用などによる誘導が必要である。見える成果が無ければファンディング を切る勇気も場合によっては必要であるが、融合には時間がかかることに注意し、 継続的な努力を促すことが肝要である。
- ーファンディング制度として、ファンドの集中を避けるという理由のために、タイムシェアリングで頭を使える優秀な人材を排除するのはわが国として損失となることもある。ファンディングが過剰なのか、人材の能力を有効に使っているのか、 状況を良く見極め、運営は実態に応じて柔軟に行われるべきである。
- 一異分野間の人的交流や共用施設の幅広い利用を促すため、受け入れ研究機関の トップマネージメントのサポートを求める(あるいは誘導する)ファンディング 制度が必要である。

### ②研究拠点形成による異分野研究促進

- 一異分野融合研究の運営形態として、異なる分野の研究者が物理的空間を共有して 研究を実行することが重要である。
- ー拠点形成に関するファンディング制度での評価サイクルが短すぎる。中長期的視 野で見ること、また受け入れ研究機関側のサポートが必要である。
- 一研究拠点は、国の方針としてオープンな形で設計・運営すべきであり、可能ならば大学と産業界が一体となってデザインし、実際の運営は産業界の経営のプロに任せる形が理想的である。また、研究拠点の装置群は、高度に運営・管理され、データの信頼性が保証されなければならない。高度なスキルを持った拠点プロパー職員よる運営・管理が重要である。米国の共用施設拠点の運営は大変参考になる。(当 CRDS の下記資料を参照)

#### (参考)

海外調査比較報告書「わが国の研究開発拠点構築に資する主要各国のナノテクインフラ投資戦略調査」(CRDS-FY2006-GR-02)

戦略プロジェクト「自立志向型共同利用ナノテク融合センターの設置」(CRDS-FY2006-SP-10)

一研究拠点運営のためのコストを賄うために、あるいは装置利用に対する課金制度 を運用するために障害となる制度的問題を洗い出して、今後、国として解決策を 考えるべきである。

# **Appendix**

# A.1 本ワークショップの開催日時・場所

日時: 平成20年7月25日(金)11時00分

~平成20年7月26日(土)13時30分

場所:(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 2F 大会議室

# A.2 本ワークショップのプログラム、参加者の構成について

表 1 本ワークショップのプログラム

【1日目】7月25日(金)					
プロローグ		11:00~12:00			
開会挨拶及び趣旨説明、事前アンケートの結果説明					
		オーガナイザー:田中一宜			
		総括コーディネータ:馬越佑吉			
第1部 分科会		13:00~20:30			
分科会内発表					
「金属材料」	コーディネータ	:馬越佑吉			
「半導体材料」	コーディネータ	:金山敏彦			
「無機材料」	コーディネータ	:木村茂行			
「有機・高分子材料」	コーディネータ	:澤本光男			
簡単なラップアップと今後	後の作業内容確認				
分科会内討議					
【2日目】7月26日(土)					
第2部 全体討議		9:00~13:30			
オープニング		総括コーディネータ:馬越佑吉			
各分科会からの発表					
「金属材料」	コーディネータ	:馬越佑吉			
「半導体材料」	コーディネータ	:金山敏彦			
「無機材料」	コーディネータ	:木村茂行			
「有機・高分子材料」	コーディネータ	:澤本光男			
全体討論		司会:馬越佑吉			
閉会		総括コーディネータ:馬越佑吉			
		副総括コーディネータ:澤本光男			
		オーガナイザー:田中一宜			

### 表 2 本ワークショップ参加者一覧

## (a) 発表者

	氏	名	所 属	役 職
	馬越	佑吉	(独)物質・材料研究機構	理事
	乾	晴行	(国)京都大学大学院工学研究科	教授
金	岡田	益男	(国)東北大学	副学長
属材	塙	隆夫	(国)東京医科歯科大学生体材料工学研究所	教授
料	宝野	和博	(独)物質・材料研究機構	フェロー
	前田	正史	(国)東京大学	副学長
	森永	正彦	(国)名古屋大学大学院工学研究科	教授
	金山	敏彦	(独)産業技術総合研究所 ナノ電子デバイス研究センター	研究センター長
     半	秋永	広幸	(独)産業技術総合研究所 ナノ電子デバイス研究センター	副センター長
導	田中	雅明	(国)東京大学大学院工学系研究科	教授
体	知京	豊裕	(独)物質・材料研究機構 半導体材料センター	センター長
材	野々村	修一	(国)岐阜大学大学院 工学研究科	教授
料		賢治	(独)産業技術総合研究所 ナノチューブ応用研究センター	チーム長
	吉田	貞史	(国) 埼玉大学大学院 理工学研究科	教授
	粟野	祐二	(株) 富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター	主席研究員
	木村	茂行	(社)未踏科学技術協会	理事長
	平尾	一之	(国)京都大学大学院工学研究科	教授
無	河本	邦仁	(国)名古屋大学大学院工学研究科	教授
機 材	目	<b>遠雄</b>	(独)物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニ クス研究拠点	副拠点長
料	高木	英典	(国)東京大学大学院新領域創成科学研究科	教授
	立石	哲也	(独)物質・材料研究機構	名誉フェロー
	曽根	純一	日本電気(株)中央研究所	支配人
	澤本	光男	(国)京都大学大学院工学研究科	教授
有機・	木村	俊作	(国)京都大学大学院工学研究科	教授
	相田	卓三	(国)東京大学大学院工学系研究科	教授
局 分	碇屋	隆雄	(国)東京工業大学大学院理工学研究科	教授
高分子材料	笠原	二郎	ソニー(株)マテリアル研究所	統括部長
料	中村	栄一	(国)東京大学大学院理学系研究科	教授
	大和	雅之	東京女子医科大学 先端生命医科学研究所	教授

発表者の所属・役職は WS 開催時のものである。

# (b) その他の参加者

氏 名	所 属	役 職
成瀬 雄二郎	内閣府 総合科学技術会議 ナノテク・材料事務局	参事官
不動寺 浩	内閣府 総合科学技術会議 ナノテク・材料事務局	研修員
高橋雅之	文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課 ナノテクノロジー・材料開発推進室	室長
阿部義男	文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課 ナノテクノロジー・材料開発推進室	文部科学省調査員
河本 洋	文部科学省 科学技術政策研究所	特別研究員
岡田義明	文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター	特別研究員
大木 雅文	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課 ナノテクノロ ジー・材料戦略室	課長補佐
藤代 芳伸	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課 ナノテクノロ ジー・材料戦略室	調査員
西村 顕	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課 ナノテクノロ ジー・材料戦略室	調査員
小柳 淳也	経済産業省 製造産業環境局 研究開発課	ナノテク担当
丸山 太一郎	経済産業省 製造産業環境局 研究開発課	情報通信担当
小嶋 典夫	(独)物質・材料研究機構 理事長室	室長
平原 奎治郎	(独)物質・材料研究機構 NIMS ナノテクノロジー拠 点運営室	室長
西村 睦	(独)物質・材料研究機構 燃料電池材料センター	センター長
山口 智彦	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 ナノテク ノロジー・材料技術開発部	プログラムマネー ジャー
亘理 誠夫	ナノテクノロジービジネス推進協議会	事務局長
記村 隆章	ナノテクノロジービジネス推進協議会	事務局長代理
小間 篤	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部	研究主監
石田 秋生	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部	参事役
佐藤 勝昭	(独) 科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 基礎研 究制度評価タスクフォース	上席メンバー
中川 正広	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 基礎研 究制度評価タスクフォース	メンバー
落合 幸徳	(独)科学技術振興機構 科学技術振興調整費業務室	科学技術振興調整 費プログラム主管
松村 郷史	(独)科学技術振興機構 研究領域総合運営部	主査
河村 誠一郎	(独)科学技術振興機構 研究領域総合運営部	主任調査員
小澤 亮介	(独) 科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部	主查

斉藤 隆行	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部	調査役		
屠耿	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部	副調査役		
古川雅士	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部	主查		
米澤 崇礼	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部	係員		
田中 一宜	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	上席フェロー		
村井 眞二	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	特任フェロー		
田中秀治	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	特任フェロー		
安藤健	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	シニアフェロー		
石原 聰	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー		
石森 義雄	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー		
嶋林 ゆう子	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー		
豊蔵 信夫	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー		
中山 智弘	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー		
永野 智己	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー		
西木 玲彦	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー		
波多腰 玄一	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー		
前田 智子	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー		
伊東 義曜	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター	主任調查員		
参加者の所属・役職は WS 開催時のものである				

参加者の所属・役職は WS 開催時のものである。

#### ■ワークショップ企画メンバー■

田中 一宜 上席フェロー(物質・材料/ナノテクノロジーユニット)

石原 聰 フェロー (物質・材料ユニット)

石森 義雄 フェロー (ナノテクノロジーユニット)

木村 茂行 特任フェロー(物質・材料ユニット)

田中 秀治 特任フェロー (ナノテクノロジーユニット)

豊蔵 信夫 フェロー (ナノテクノロジーユニット)

中山 智弘 フェロー (物質・材料ユニット)

永野 智己 フェロー (ナノテクノロジーユニット)

西木 玲彦 フェロー (物質・材料ユニット)

波多腰玄一 フェロー (物質・材料ユニット)

村井 眞二 特任フェロー(物質・材料ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

### 「物質・材料分野」俯瞰ワークショップ

#### 一ナノテクの成果・融合の効果・今後の課題— 報告書

#### CRDS-FY2008-WR-05

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 平成20年12月

物質・材料ユニット/ナノテクノロジーユニット

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地 電話 03-5214-7483 ファックス 03-5214-7385 http://crds.jst.go.jp/ ©2008 JST/CRDS

許可無く複写・複製することを禁じます。 引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

