

戦略的創造研究推進事業
個人型研究（さきがけタイプ）
追跡調査報告書

「構造と機能物性」領域（平成3年度発足）

平成16年8月



はじめに

戦略的創造研究推進事業の個人型研究（さきがけタイプ）は、時代を先駆ける科学技術の芽を創ることを目的とする事業であり、1991年に「さきがけ研究21」として発足してから10年以上の歴史を持つ。今後も個人型研究を、時代の変化に応じてより発展させていくためには、これまで培われてきた制度の運営方法のうち、目的を達するために有効であった部分と、改善すべき部分を正確に認識（評価）する必要がある。このため科学技術振興機構（以下、JSTと略記する）では、事後評価を補完するとともに基礎研究の事業に係わる評価に資することを目的として、研究終了後一定期間を経た後、研究成果の発展状況や活用状況、参加研究者の活動状況等について調査を行うこととしている。なぜなら、本追跡調査の調査対象である基礎研究の場合、その成果が目に見える形で実を結ぶまでに長い時間を要することが多く、研究終了直後の事後評価だけではその成果を知ることが困難だからである。

個人型研究の追跡調査では、時代を先駆ける科学技術の芽が創られるきっかけを提供することができたかどうかを評価することが最も重要である。このため、今回の調査では下記2点に焦点を絞った。

「さきがけ研究でどのような学术分野が拓かれたか」

「さきがけ研究者がどのように成長したか」

今回の調査では、研究者の発表論文数や主要成果論文の被引用件数も調査すると共に、各研究者ごとに研究サマリーを作成した。上記調査目的を達成するためには、数値情報だけでなく、研究分野の発展状況も含めた研究内容について、第三者の視点から客観的な調査も必要だと考えたからである。そのため、研究サマリーはJSTが外部調査機関の協力のもと独自に作成し、一部研究者にご協力頂いた。ただし、各課題の調査は実施したが、評価は実施していない。これは調査の趣旨が制度の運用方法の評価に資する客観的事実を提供することを目的としており、各課題の評価を目的としていないためである。

また、研究者の足跡をできるだけ具体的に追いかける努力をした。時代を先駆ける科学技術は、研究者の成長とともに育まれるものと考えたからである。この結果、インタビューの実施回数が昨年に比べて格段に多くなった。

さきがけ研究における追跡調査は昨年度（平成14年度）から開始したが、その方法論はまだ確立されていない。そのため、本追跡調査においても、昨年手法にとられることなく制度の目的に合った調査方法を模索するというスタンスをとった。

本調査報告書では、調査結果を示すと同時に、そこで得られた事例をもとにさきがけ研究制度の有効性と課題について記述した。また、追跡調査の課題についても最後に挙げた。調査にあたりご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表したい。

2004年6月

独立行政法人 科学技術振興機構

戦略的創造事業本部 研究推進部 研究第二課

目次

1	調査目的	3
2	調査対象	3
2.1	参加研究者と研究課題一覧	3
2.2	研究領域の概要	5
2.2.1	研究課題の分類	5
2.2.2	研究総括・領域アドバイザー	6
3	調査方法と経過	7
3.1	基礎データの収集	9
3.2	研究者に対する予備調査	9
3.2.1	調査対象及び回答者数	9
3.2.2	調査期間	10
3.3	アンケート調査	10
3.3.1	調査対象及び回答者数	11
3.3.2	調査期間	11
3.4	研究内容の調査・研究サマリーの作成	11
3.5	数値データの集計・統計	12
3.6	インタビュー調査	13
3.6.1	調査対象	14
3.6.2	調査期間	14
3.7	領域アドバイザーの意見調査	15
3.7.1	出席者	15
3.7.2	調査日時	15
3.8	研究総括による総評	16
4	調査結果	17
4.1	各課題の研究状況・成果（研究サマリー）	17
4.2	統計資料	65
4.2.1	論文数の推移	65
4.2.2	主要成果論文の被引用件数の推移	67
4.2.3	特許出願件数の推移	68
4.2.4	特許成立の割合と特許の利用状況	70
4.2.5	グラント獲得金額の推移	71
4.2.6	役職の年次推移	74
4.2.7	受賞	76
4.2.8	その他研究活動	77
4.3	参加研究者からのコメント	78
4.3.1	さきがけ研究に対する感想	78
4.3.2	今後のさきがけ研究制度に対する意見と要望	78
4.4	領域アドバイザーの意見調査	80
4.4.1	研究成果について	80
4.4.2	研究者の成長について	80
4.4.3	さきがけ研究制度について	80
4.4.4	追跡調査に対する意見	82
4.5	研究総括総評	83
5	分析	89
5.1	調査結果のまとめ	89
5.2	さきがけ研究制度の効果	91
5.3	追跡調査の課題	93

謝辞

1. 調査目的

戦略的創造研究推進事業の個人型研究(さきがけタイプ)(以下、さきがけ研究)において、事後評価を補完するとともに基礎研究の事業に係わる評価に資することを目的として、研究終了後一定期間を経た後、研究成果の発展状況や活用状況、参加研究者の活動状況等を調査し、客観的事実について収集する。

2. 調査対象

本調査では「構造と機能物性」領域を調査の対象とする。

2.1 参加研究者と研究課題一覧

表 2.1 参加研究者と研究課題一覧

氏名	期	現所属・現役職	さきがけ研究課題名	研究サマリ
石坂 彰利	1 期生	(株)日立製作所中央研究所 主任研究員	結晶表面に見られる魔法数	p17
今村 詮	1 期生	広島国際学院大学工学部バイオ・ リサイク学科 教授 / 工学部長	タンパク質の電子状態の理論 的合成	p19
大島 忠平	1 期生	早稲田大学理工学部応用物理 学科 教授	高分解電子分光と極高真空	p21
尾笹 一成	1 期生	理化学研究所バイオ工学研究 室 前任研究員	酸化膜作成・除去とプラズマパ ルスを利用した半導体作成プ ロセス	p23
川田 薫	1 期生	(有)川田研究所 代表取締役社長	ミネラルの構造と生体	p25
小林 謙三	1 期生	早稲田大学理工学部応用物理 学科 名誉教授	強誘電体の不整合相の光学活 性	p27
佐野 充	1 期生	名古屋大学大学院環境学研究 科兼名古屋大学情報文化学部 教授	分子ヒステリシス	p29
土佐 正弘	1 期生	物質・材料研究機構材料研究所 微小造形グループ 主席研究員	表面原子間力のサブナノメー トル計測	p31
鳥養 映子	1 期生	山梨大学大学院医学工学総合 研究部兼工学部電気電子シス テム 教授	スピン偏極原子線:新しい表面 プローブ	p33

氏名	期)	現所属・現役職	さきがけ研究課題名	研究 サマリ-
長谷川 修司	1 期生	東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 助教授	半導体表面の原子配列とその 電気伝導	p35
古川 猛夫	1 期生	東京理科大学理学部化学科 教授	強誘電性高分子の機能物性	p37
水谷 眞	1 期生	出光興産(株)中央研究所機能材 料研究室 研究員	異常金属の合成と物性	p39
大島 久純	2 期生	(株)デンソー第 1 開発部 主幹	分子で描くアラベスク	p41
小田 俊理	2 期生	東京工業大学量子効果エレク トロニクス研究センター 教授	シリコン超微粒子の量子効果 を探求する	p43
栗原 和枝	2 期生	東北大学多元物質科学研究所 教授	表面力: 表面分子を繋ぐ力は何 なのか	p45
松下 明	2 期生	一色国際特許業務法人	この不思議な粒子、ミュオニウ ム	p47
新井 正敏	3 期生	高エネルギー加速器研究機構 教授	中性子による物質の動的構造 の研究	p49
生島 豊	3 期生	産業技術総合研究所東北セン ター チーム長	超臨界流体を利用した化学反 応の高度化	p51
池上 栄胤	3 期生	ウプサラ大学 常任客員教授	サイクロトロンメーザー冷却 CMC	p53
大野 英男	3 期生	東北大学電気通信研究所・教授	半導体と磁性体を融合する	p55
瀬戸 孝俊	3 期生	(株)三菱化学科学技術研究セン ター サブリーダー	電気で制御するガス分離	p57
早川 和延	3 期生		表面の電子スピンを計測する	p59
山田 廣成	3 期生	立命館大学理工学部電子光情 報工学科 教授	PhSR (フォトン・ストレ ージ・リング) 発振機構の基礎研 究	p61
Gerhard Fasol	3 期生	(株)ユーロテクノロジー・ジャパ ン 代表取締役社長	スピン・エレクトロニクス	p63

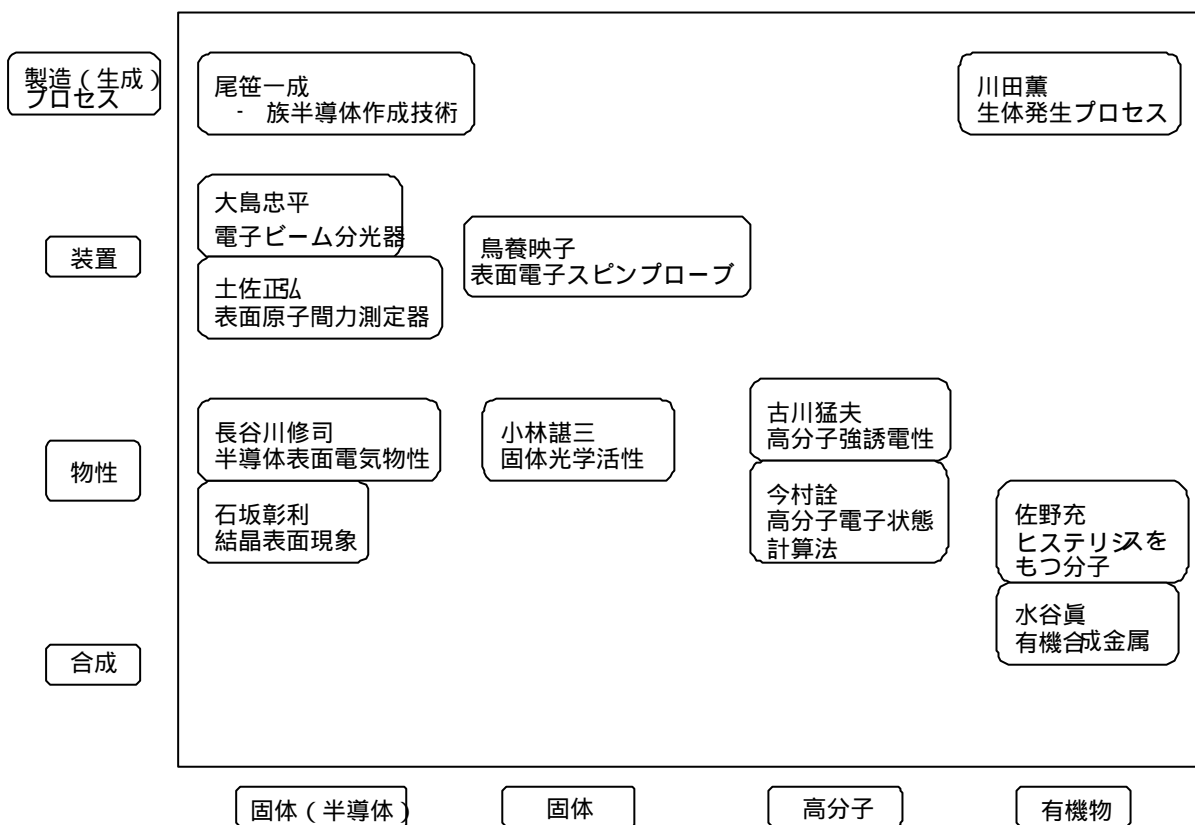
) 採択年度により 1 期生、2 期生、3 期生に分かれる。各研究期間は、1 期生：1992 年 1 月～1994 年 12 月、2 期生：1992 年 10 月～1995 年 9 月、3 期生：1993 年 10 月～1996 年 9 月である。

2.2 研究領域の概要

物質の構造と機能、物性との関係に着目し、種々の手法による物質構造の解析、構造に基づく電子状態などの理論解析、物性発現機構の解明および機能物性を有する物質および材料の創製に関する研究などを含む。¹

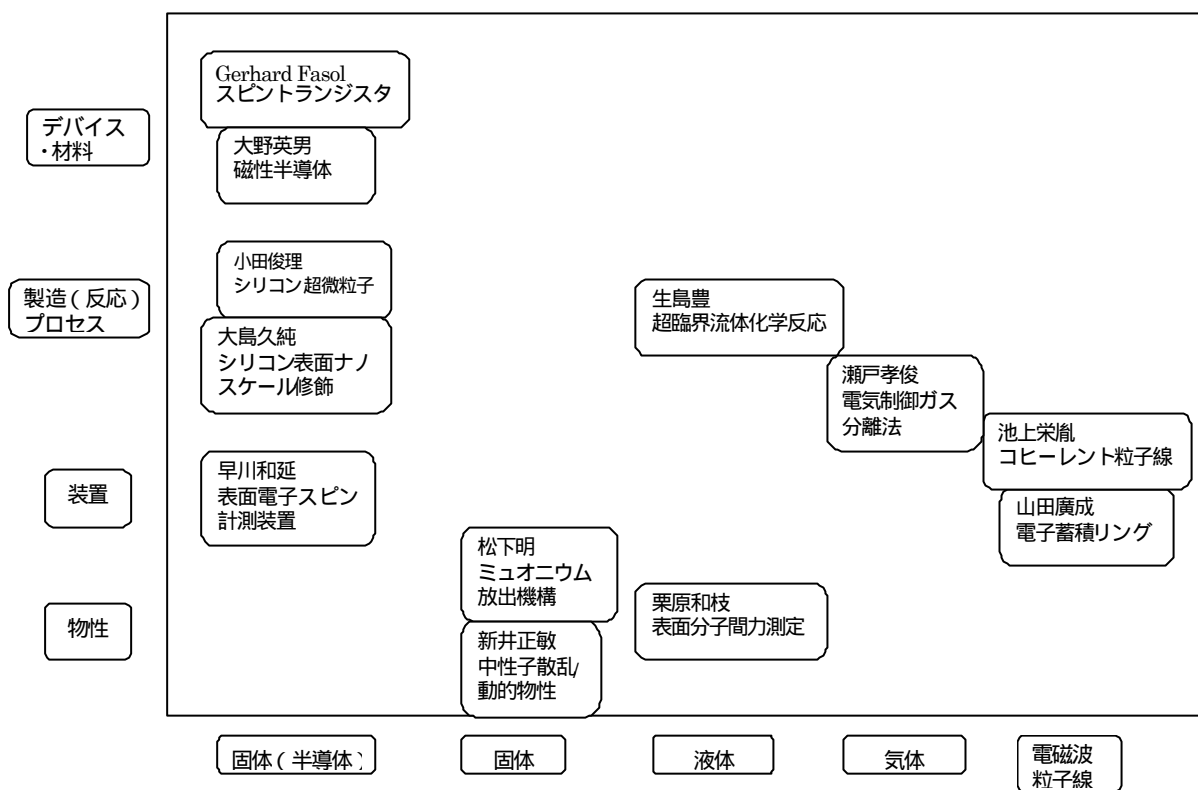
2.2.1 研究課題の分類

図 2.2-1 研究課題の分類(1 期生)



¹ 「構造と機能物性」領域の研究課題の中には、上記に加えて、解析のための装置開発や物質・材料創製に向けた作成プロセスに関する研究も行われた。

図 2.2-2 研究課題の分類(2 期生・3 期生)



2.2.2 研究総括・領域アドバイザー

表 2.2.2 研究総括・領域アドバイザー一覧

氏名	現所属	現役職	さきがけ研究との関係
高良 和武	東京大学	名誉教授	研究総括
菊池 誠	東海大学	名誉教授	領域アドバイザー
小出 直之	東京理科大学理学部	教授	領域アドバイザー
佐々木 昭夫	大阪電気通信大学	理事/ 名誉教授	領域アドバイザー
鈴木 増雄	東京理科大学理学部	教授	領域アドバイザー
藤木 良規	物質・材料研究機構	名誉顧問	領域アドバイザー
千川 純一	兵庫県立先端科学技術支援センター	所長	領域アドバイザー

3. 調査方法と経過

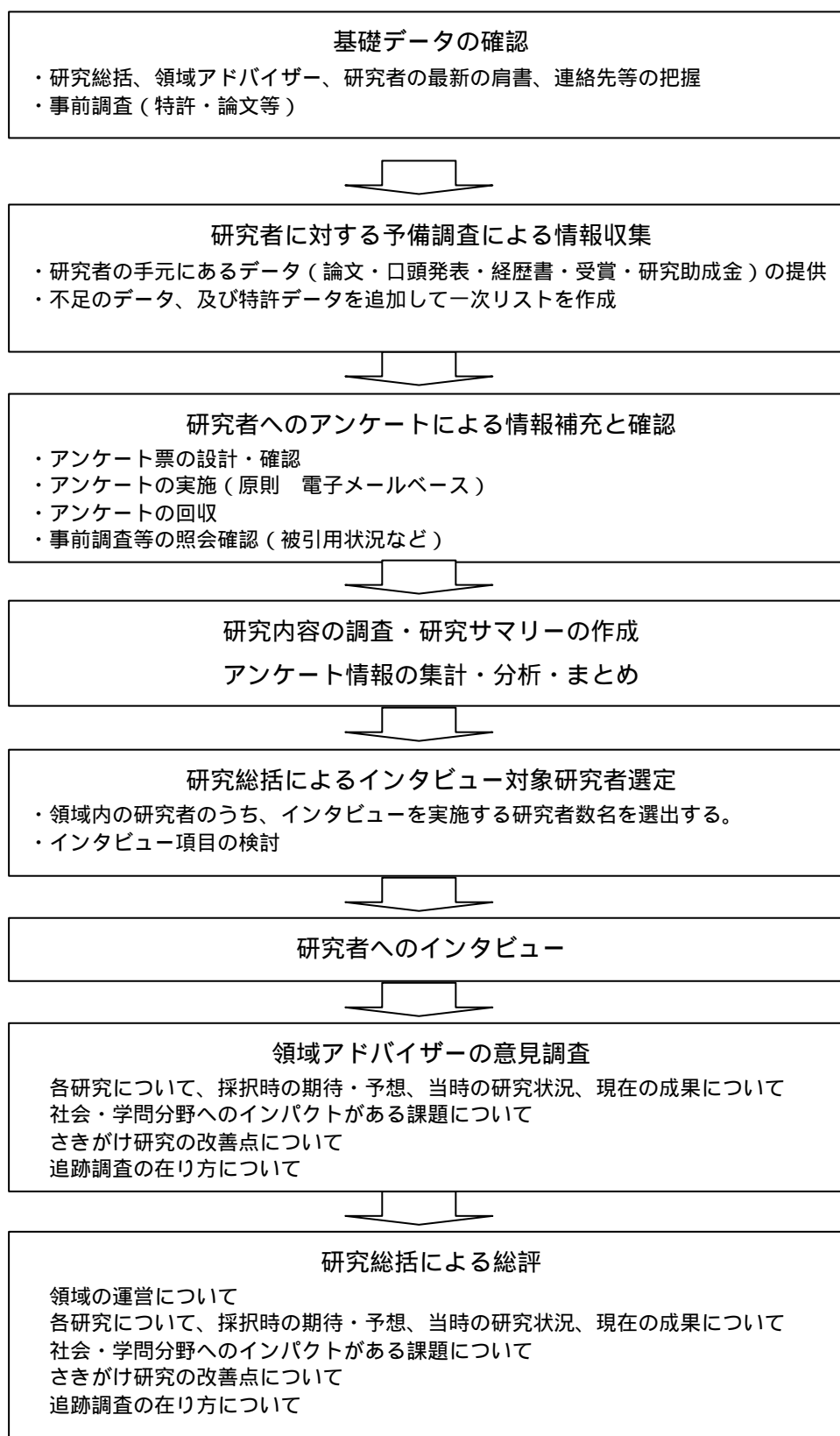
今回の調査では、A.さきがけ研究によりどのような学术分野が拓かれたか、B.さきがけ研究者がどのように成長したか、を知るために調査項目を設定した。

図3は調査方法をまとめたものである。昨年、研究者に論文等のリスト等の作成依頼をしたために研究者の手間と労力が増えてしまったという反省を踏まえ、まず(1)領域の概要や、研究者の最新の連絡先等の基礎データを調査した後、(2)研究者自身の手元にある発表論文、口頭発表リストなどを様式を問わずにそのまま提供してもらい、JST側で提供されたデータの整理および検索等によるデータの補完を行った後、(4)整理したデータ及びアンケートを研究者に送付し、情報の補充と確認を行った。次いで、(5)研究総括²との相談によりインタビュー対象者を選定した上で、研究者へのインタビューを実施した。最後に(6)領域アドバイザー³の意見調査、(7)研究総括による総評、を受けて報告書を作成した。

² 研究総括：研究領域の責任者。研究課題・研究者の事前評価（選考）、事後評価の開催、研究期間中の研究推進を行う。

³ 領域アドバイザー：研究総括に協力し、研究課題・研究者の事前評価（選考）、事後評価、及び研究推進に関するアドバイスを行う。

図 3 調査の流れ



3.1 基礎データの収集

研究総括、領域アドバイザー、研究者の所属、連絡先等については、JST 所有の「さきがけ研究 2 1」終了時の名簿をベースとし、インターネット検索等により最新情報を入手した。研究総括、領域アドバイザー、研究者について全員の連絡先を確認した。また、調査者側で可能な範囲で特許・論文等の事前調査を行った。情報収集に用いた手段としては以下のものである。

Jois⁴による検索

DIALOG⁵中の SciSearch による検索

Google⁶による検索

政府プロジェクトの報告書、公的研究機関の年報等

総説、解説、参考書

辞典類

科学雑誌類

3.2 研究者に対する予備調査

A. さきがけ研究によりどのような学術分野が拓かれたか、B. さきがけ研究者がどのように成長したか、という観点から、研究成果、研究活動、経歴に関する情報を調査した。調査項目を表 3.2 に示す。以上の情報は、さきがけ研究者自身も保有していると考えられたため、手元にある資料の提供を求めた。また、研究者の成長を調べるにはさきがけ研究以前からのデータを収集する必要があると考え、さきがけ研究開始 5 年前から平成 15 年 12 月現在までのデータの提供を求めた。

研究者から得られなかった場合、もしくは、欠落があった場合は、Jois のデータベースや研究者およびその所属機関のホームページなどから検索して補充した。(発表論文、受賞のみ)

表 3.2 予備調査における調査項目

-
- 発表論文リスト
 - 口頭発表一覧
 - 経歴書
 - 受賞一覧
 - 研究助成金取得一覧
-

3.2.1 調査対象及び回答者数

3.1 で連絡先を確認できた研究者 24 名に対して、予備調査への協力依頼状の送付、電子メールや電話での協力依頼を実施した。最終的には全員 (100%) の参加研究

⁴ <http://pr.jst.go.jp/db/jois/index.html>

⁵ <http://www.dialog.com/>

⁶ <http://www.google.com/intl/ja/>

者から回答を得た。

3.2.2 調査期間

2003年12月～2004年1月

3.3 アンケート調査

予備調査等で収集したデータを予めリストアップした調査票を送付し、データの確認、修正と、予備調査では得られなかった細項目に関して補充を求めた。また、A.さきがけ研究によりどのような学術分野が拓かれたか、という観点から、論文リストからさきがけ研究に関する主要成果論文を抽出するといった、付加的な情報についても求めた。アンケート調査項目を表 3.3 に示す。

なお、将来的に他の領域との比較検討を容易にする観点から、出来る限り領域横断的な質問項目となるように、調査票の標準化に努めた。

表 3.3 アンケート調査における調査項目

-
- 学術論文の発表状況
総説、主要成果論文 5 件の抽出
 - 学会等での口頭発表状況
国際学会での発表、招待講演、基調講演、主要発表 10 件の抽出
 - 職歴
所属機関、部署名、役職、常勤 / 兼務の別
 - 研究助成金獲得状況
研究助成金名、研究テーマ名、期間、金額、役割
 - 受賞状況
受賞名、受賞機関名、受賞年
 - 特許出願状況
出願年、出願番号、発明の名称、登録年、登録番号、国内出願 / 外国出願の別
 - その他の主要業績
シンポジウム、ワークショップ、分科会等の座長 / 総括
学会や研究グループの設立
研究成果の実用化、製品化等
 - さきがけ研究についての感想、意見等
研究経歴におけるさきがけ研究の意味
さきがけ研究制度に対する評価等

- 研究者情報

氏名、所属機関、部署名、役職、勤務先住所、電話番号、ファックス番号、E-メールアドレス

3.3.1 調査対象及び回答者数

3.2 の予備調査で未回答であった研究者も含めて、24名の研究者全員に対して、調査への協力依頼状や調査票の送付、電子メールや電話での協力依頼を実施し、調査票の送付は郵送で行った。最終的には15名(63%)の参加研究者から回答を得た。

3.3.2 調査期間

2004年1月～2004年3月

3.4 研究内容の調査・研究サマリーの作成

A. さきがけ研究によりどのような学術分野が拓かれたか、という観点から、各研究者個人別に、表 3.4-1 に示す整理項目に沿って、さきがけ研究以前、さきがけ研究中、さきがけ研究終了後(終了後2003年まで)の研究成果の状況・成果等について調査結果を整理し、研究サマリーを作成した。

研究サマリー作成にあたっては各研究者の発表論文、著作の他、JST 所有の下記の資料を参考にした。

「さきがけ研究21」研究報告会⁷講演要旨集

「さきがけ研究21」研究報告書⁸

表 3.4-1 各研究者別の調査結果整理項目

No.	結果整理項目	備考
1	氏名と現職	JST の資料および研究者からの情報による
2	さきがけ研究課題名	JST の資料による
3	さきがけ研究期間	JST の資料による(注 1)
4	さきがけ研究の目的・位置づけ	東レ経営研究所で調査(注 2)
5	研究分野マップ	東レ経営研究所で調査(注 2)
6	さきがけ研究以前の状況・成果	東レ経営研究所で調査(注 2)
7	さきがけ研究期間中の状況・成果	東レ経営研究所で調査(注 2)
8	さきがけ研究終了後の状況・成果	東レ経営研究所で調査(注 2)
9	当該研究分野の発展状況	東レ経営研究所で調査(注 2)

(注 1) 1 期生(12 名) : 1992 年 1 月～1994 年 12 月、2 期生(4 名) : 1993 年 10 月～1995 年 9 月、3 期生(8 名) : 1994 年 10 月～1996 年 9 月

⁷ 研究報告会 : 研究終了シンポジウム。終了年度に領域毎に開催する。

⁸ 研究報告書 : 研究結果に関する報告書。研究終了時に JST に提出する。

(注 2) 主として研究者の論文、総説、解説記事、等を参考にして作成した。インタビューを実施した研究者については、そのインタビュー結果も参考にした。

各研究サマリーは当該研究者に送付し校閲を受け、表 3.4-2 に示すとおり、公表許可が得られた研究者についてのみ本報告書に収録した(4.1 各課題の研究状況・成果 参照)。

表 3.4-2 研究サマリー収録数の概要

	1 期生	2 期生	3 期生	合計
対象研究者数	12	4	8	24
公表許可を得た研究者数	12	4	8	24
公表不許可の研究者数	0	0	0	0

3.5 数値データの集計・統計

3.2 研究者に対する予備調査、3.3 アンケート調査によって得られたデータを基に、「さきがけ前」(5 年間)、「さきがけ中」(3 年間)、「さきがけ後」(終了後 2003 年まで)の期間毎に、さきがけ研究者全体でのデータを各種集計した。統計項目を表 3.5-1 に示す。主な調査項目は、B.さきがけ研究者がどのように成長したか、の観点から、論文発表数等、研究活動の変化が分かるように設定した。ただし、主要成果の被引用件数の推移については、A.さきがけ研究によりどのような学術分野が拓かれたか、の観点から設定した。

表 3.5-1 統計項目

-
- 論文数の推移
 - 主要成果論文の被引用件数の推移
 - 特許出願件数の推移
 - 特許成立の割合と特許の利用状況
 - グラント獲得金額の推移
 - 役職の年次推移
 - 受賞
 - その他研究活動
-

実際のさきがけ研究期間は、1 期生(12 名): 1992 年 1 月 ~ 1994 年 12 月、2 期生(4 名):

1992年10月～1995年9月、3期生(8名)：1993年10月～1996年9月である(JST資料による)が、便宜上、2、3期生についても暦年(1-12月)で集計した。

表 3.5-2 さきがけ研究の調査対象期間

	1期生	2期生	3期生
さきがけ前(5年間)	1987 - 1991年	1988 - 1992年	1989 - 1993年
さきがけ中(3年間)	1992 - 1994年	1993 - 1995年	1994 - 1996年
さきがけ後(2003年まで)	1995 - 2003年	1996 - 2003年	1997 - 2003年
対象者数	12名	4名	8名

3.6 インタビュー調査

インタビュー調査では、アンケート調査等により明らかとなった各研究者の研究活動の足跡(さきがけ研究前、期間中、研究後) 各研究者の成長(役職、受賞、グラント)といった客観的事実とさきがけ研究との因果関係を明らかにすることを目的とした。

さきがけ研究の成果が十分に出世したか否か、当時の研究環境がどの様であったか等々各研究者の事情によってもさきがけ研究の影響は異なると想定し、表 3.6-1 の基準を設けて調査対象者を選定した。調査対象者案について研究総括の意見を求めた上で、最終的に調査対象者を決定した。

表 3.6-1 インタビュー調査対象者選定基準

-
- 研究成果に関して
 - 著しく成果の進展があった研究者
 - さきがけ研究後、研究テーマを変更した研究者
 - さきがけ研究後、研究活動を中止した研究者
 - 所属に関して
 - 所属機関(大学・国研・民間)
 - 所属を異動した研究者
 - 専任⁹ / 兼任¹⁰ (各1名以上)
-

なお、上表中の所属に関して採用した各選定基準は、以下に示す情報を得る目的で採

⁹ 専任：研究機関に所属せず、もしくは研究機関を退職・退職してさきがけ研究に参加する研究者。専任の報酬はJSTが負担する。

¹⁰ 兼任：研究機関に所属したまま、さきがけ研究に参加する研究者。

用したものである。

- 所属機関(大学・国研・民間); 所属機関において、さきがけ研究の実施や継続にあたり問題はなかったか。
- 所属を異動した研究者; 研究中、もしくは終了後に所属を異動した研究者について、さきがけ研究との何らかの関連はあるか。
- 専任/兼任(各1名以上); 特に専任にとってさきがけ研究が果たした役割はあるか。

選定された研究者に対して、調査担当者が訪問インタビューを実施した。またインタビューに際しては、可能な限り研究総括に同行頂いた。正確なインタビューを可能とするために、実際の訪問に先立ち、表 3.6-2 に示す事前質問票を送付する手法を用いた。また、インタビューでは研究内容を詳しく聞き、研究サマリーを補完する他、調査対象選定基準に記載した所属機関等の個別状況との関連を加味して調査した。

表 3.6-2 インタビュー事前質問票

-
- さきがけ研究前の状況、成果
 - さきがけ研究期間中の状況、成果
 - さきがけ研究終了後の状況、成果
 - ・ さきがけ研究テーマの発展状況、成果
 - ・ 社会、当該学問分野に対するさきがけ研究成果の波及効果
 - ・ 国内外におけるさきがけ研究関連分野の発展状況
 - さきがけ研究と経歴との関連
 - さきがけ研究制度の評価
-

3.6.1 調査対象

24名の研究者中から19名を対象者として選定した(標本抽出率79.2%)。また、さきがけ研究で開発した機器装置の見学のため、別途2件訪問した。

- ・ 朝日 透 (早稲田大学 客員助教授)
- ・ 佐藤 勇 (日本大学 教授)

3.6.2 調査期間

2004年3月 - 2004年5月

3.7 領域アドバイザーの意見調査

前項までの追跡調査結果を基に、領域アドバイザーの意見調査を実施した。研究サマリーは調査担当者が作成したものであるため、各研究分野において深い研究経験と見識を持つ領域アドバイザーから意見を伺うことで、研究成果に対する調査結果をより客観的・相対的に位置付けることが目的である。また、領域アドバイザーはさきがけ研究者の採択時からの状況を把握しているため、研究者の成長についての意見を伺うことを第二の目的とした。

意見調査は、領域アドバイザーに事前に研究サマリーを送付した上で 3.7.2 の日時に参集していただき、座談会形式にて実施した。意図した調査項目は、表 3.7-1 に示したとおりであるが、座談会形式ということもあり、各領域アドバイザーから自由に意見を述べて頂いた。

表 3.7-1 領域アドバイザーの意見調査における調査項目

-
- 各研究者・研究課題に対する意見
採択時の期待・予想、期間中の研究状況、現在の成果への感想、等
 - 社会・学問分野へのインパクトがある課題
 - さきがけ研究制度、研究助成制度等に対する意見・提言
-

3.7.1 出席者

座談会に出席頂いた領域アドバイザーを表 3.7-2 に示す。JST 職員 3 名、調査担当者 4 名が出席した他、内容に深く切り込んだ意見が得られるよう、研究総括にも参加して頂いた。

表 3.7-2 出席領域アドバイザー

菊池 誠	(東海大学 名誉教授)
小出 直之	(東京理科大学理学部 教授)
佐々木 昭夫	(大阪電気通信大学 理事/名誉教授)
鈴木 増雄	(東京理科大学理学部 教授)
藤木 良規	(物質・材料研究機構 名誉顧問)

3.7.2 調査日時

2004年5月6日 13:30 ~ 17:30

3.8 研究総括による総評

表 3.8 に示す追跡調査の資料を研究総括にお送りし、3.7 領域アドバイザーの意見調査等も踏まえた上で、領域を運営するに当たって配慮した点、各研究者・研究課題に対する意見、さきがけ研究制度、研究助成制度等に対する意見・提言などを中心に、総評を行っていただいた。

表 3.8 研究総括への送付資料

-
- 研究サマリー（4.1 参照）
 - 各研究者の統計資料（*）
 - 研究者全体の統計資料（4.2 参照）
 - 研究者インタビューの研究者コメント（要旨）
 - 領域アドバイザーの意見調査（要旨）
-

（*）研究者の経歴等、個人情報も含まれるため、非公開情報として取り扱った。

4. 調査結果

4.1 各課題の研究状況・成果（研究サマリー）

（1）石坂彰利

【さきがけ研究課題名】

結晶表面現象にみられる魔法数

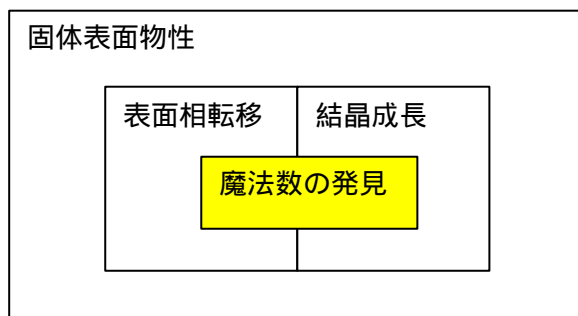
【さきがけ研究期間】

1992年1月～1994年12月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

結晶表面で生じる現象を理解することは学問的にも応用的にも極めて重要である。物質が変われば表面の現象も変わる。さきがけ研究の目標は多くの表面現象に共通の基本法則を見出すことである。従来、結晶成長と表面構造相転移を比較することは現象が異なるので困難であると思われてきた。さきがけ研究はこれらを共通の尺度に乗せて比較したことである。表面現象の根底には土台があり、その土台の上で種々の現象は比較できると考えた。低温で生じる表面構造の変化から高温で生じる surface melting まで比較の対象を広げた。

【研究領域マップ】



【さきがけ研究開始前の状況・成果】

シリコン結晶表面の清浄化に関する研究を行い、結晶表面の成長モードや清浄化現象が温度によって変わることを見つけた¹。それを系統的に追いかければ、ひとつの法則が見つかると考え、さきがけ研究に応募した。

【さきがけ期間中の状況・成果】

表面現象の変化を測定するために温度を変えながら測定できる μ -反射高速電子回折顕微鏡 (μ -RHEED) を試作した。なお、本顕微鏡の表面深さ方向の分解能は原子レベル、平

¹ A. Ishizaka, Philo. Mag., B64(1991),219

面方向の分解能は 200×2000 である。

Si(001)単結晶基板の上に Si 単結晶薄膜をエピタキシーさせたときの成長状態を、温度を変えながら観察した²。その結果、結晶膜の性質は融点 (T_m) の $1/2$ で急激に変化することがわかった。Calawa らによって報告された GaAs(001)の結果³を Si の結果と同じように整理すると、融点 (T_m) の $1/2$ で同様な変化が見られた。Si および GaAs の結晶面を変えても同じ結果が得られた。このことから $1/2$ という値は物質や結晶面に依存しない数であり、一種の魔法数とみなすことができると考えた。

つぎに Si(111)表面の構造と温度との関係について、回折スポットの強度の温度依存性を調べたところ、 $T/T_m=1/2, 2/3, 5/6, 1/6$ となる温度で、回折スポットの強度が等幅の階段のように変化していることがわかった⁴。

以上の実験結果を出発点として、他のさまざまな物質系で報告されている表面現象の遷移温度を調査し、その物質の融点 (T_m) で規格化して、魔法数の観点から整理した。その結果、物質が違って共通の魔法数があること、物質の違いよりも面方位の違いの影響が大きいこと、魔法数 $1/2$ は(111)、(001)、(110)面で共通に見られることがわかった。この魔法数の由来はテラス、レッジ、キンクに結合した結晶表面エネルギーの違いによるものと考えた⁵。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

固体表面や内部の原子の配列を制御する研究⁶を経て、現在は MOS 型素子の研究⁷を行っている。

【当該研究分野の発展状況】

魔法数といった観点から結晶の表面現象を基礎的に解析する研究は他では行われていない。

² A. Ishizaka and Y. Murata, J. Phys. Condens. Matter, 6(1994), L693-L698

³ G. M. Metzger and A. R. Calawa, Appl. Phys. Lett., 42(1983), 818

⁴ A. Ishizaka and T. Doi, Philo. Mag. Letters, 65(1995), 95-100

⁵ A. Ishizaka, Advance in Colloid and Interface Science, 71-71(1997), 165

⁶ 通産省工技院内アトムテクノロジー研究体(1995.4-1998.3)

⁷ T. Kusunoki et al., IEEE Trans. Elect. Devices, 49, 1059(2002)

本人談 (2004.3.16)

(2) 今村 詮

【さきがけ研究課題】

タンパク質の電子状態の理論的合成

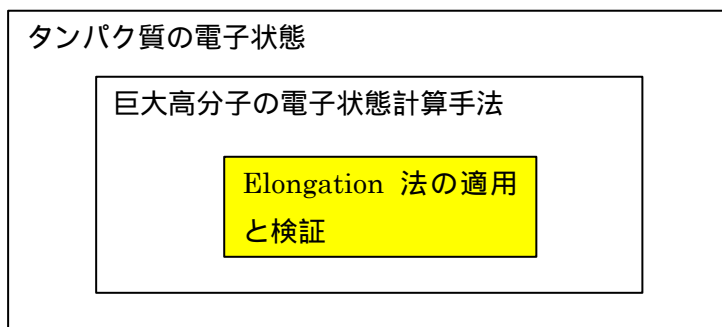
【さきがけ研究期間】

1992年1月～1994年12月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

電子計算機の長足の進歩により、分子の電子状態やエネルギーを精度良く計算することが可能になってきた。分子の電子状態、エネルギーが量子化学の手法を用いて精度良く得られるようになったために、化学の分野における材料探索の手法も大きく変貌してきた。すなわち、これまでさまざまな材料合成の実験的試行錯誤によって行われてきたものに代わって、理論計算によって機能物性を予測し、そのデータに基づいて分子を設計し、望まれる機能物性を有する材料を合成するという手法に変わってきたのである。しかしながら、量子化学の手法によって精度の良い結果を得るために必要な計算時間は、分子の大きさが大きくなるにつれてますます長くなる。巨大高分子の理論計算を現実的な時間で行う方法は確立されてなかったために、さきがけ研究では、任意のランダムな生体高分子の電子状態、エネルギーを比較的簡単に計算できる方法として提唱した Elongation 法¹の有効性を検証することにした。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

周期性高分子の電子状態の研究を行っていたが、生体内の現象と結びつけるためには非周期性高分子をどのように扱うかが問題であった。そのため理論計算を、化学の分野におけるタンパク質の合成と同じ手順で行うことによって任意のランダムな生体高分子の電子

¹ A. Imamura et al., J. Chem. Phys., 95, 5419-5431(1991)

状態、エネルギーを計算できる方法として Elongation 法を提唱した。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

Elongation 法を用いてポリグリシンが平面トランスジグザグ構造と、 α -ヘリックス構造をとった場合の全エネルギーを計算したところ、通常の方法による計算結果と一致した²。つぎに、生理活性を有するオリゴペプチドであるガラニンの電子状態を計算した。ガラニンの末端から 11 個までペプチド鎖を伸ばして電子密度を求めた³。

また Elongation 法を、電子状態を計算する既存の各種方法である拡張ヒュッケル法⁴、Ab initio 法⁵、半経験的分子軌道法⁶と比較してその有利性を実証した。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

Elongation 法の深化⁷、応用範囲の拡大（導電性高分子⁸、タンパク質⁹など）を進めた。その後青木百合子¹⁰がテーマを発展させている。青木らは現在 PRESTO で Elongation 法を用いて超効率的機能計算システムを開発している。

【当該研究分野の発展状況】

高分子の計算科学は計算技術の発展とともに、応用範囲を、タンパク質、高分子材料、機能性高分子の開発、データベースの構築と、着実に発展してきている。ヨーロッパでは Heidelberg のドイツがん研究センターの Suhai 教授、ベルギーの Namur の Andre 教授らのグループ、アメリカでは Kirtmann 教授らのグループなどがこの分野で研究をしている。

² M. Mitani et al., Int. J. Quantum Chem. 64(3), 301-323(1997)

³ 未発表

⁴ A. Imamura et al., Int. J. Quantum Chem., 52, 309-319(1994)

⁵ Y. Aoki et al., J. Chem. Phys., 97, 8432(1992)

⁶ M. Mitani et al., J. Chem. Phys., 100, 2346(1994)

⁷ G. Rather et al., Int. J. Quantum Chem., 74(1), 35-47(1999)

⁸ Y. Kurihara et. al., J. Chem Phys., 108(24), 10303-10308(1998)

⁹ A. Imamura and Y. Aoki, Adv. Colloid Interface Sci., 71/72, 147-164(1997)

¹⁰ 広島大学助教授 (2004年3月九州大学総合理工学府の教授)

(3) 大島忠平

【さきがけ研究課題】

高分解電子分光と極高真空

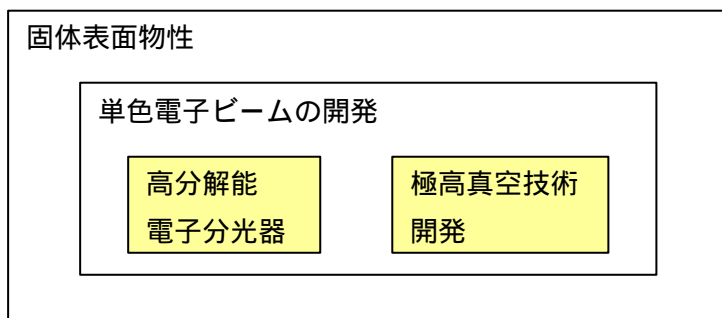
【さきがけ研究期間】

1992 年 1 月 ~ 1994 年 12 月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

電子ビームはナノメータ領域の物性を探る有力なプローブのひとつであり、材料開発・物性研究には不可欠である。通常の電子源から放出される電子ビームのエネルギー幅は 300meV 程度であり、単色器を使用した場合は 1meV 幅のビームが実現している。しかし、この単色器のためにビーム電流は 7 桁程度減少する。さきがけ研究では、エネルギーのそろった電子状態を持つ超伝導状態に注目し、超伝導状態の電子を直接トンネル効果によって真空中に取り出し、エネルギー幅の極端に狭い(1meV)電子ビームを得ることに目標を置いた。このアイデアは 1976 年に Gadzuk により提案されている¹が、実験的検証はされていない。さきがけ研究では世界最高性能の分光器の開発と極高真空技術を開発し、レーザーのようにエネルギー幅の狭い電子ビーム実現の可能性を探った。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

極高真空中 ($<10^{-10}$ Pa) における固体表面の原子構造、電子状態を研究してきた。ホウ化ランタンを使った高輝度低速電子線源と高分解能電子エネルギー分析器を開発して、エネルギー分解能 0.8meV の電子エネルギー損失分光器を実現した²。またこの装置を使って TiC やグラファイトの表面フォノンを初めて検出した^{3、4}。

¹ J. W. Gadzuk, Surf. Sci. Sci., 15, 466(1969)

² 石坂芳夫他, 真空, 29(11), 544-548(1986)

³ W. Wuttig et al., Surface Science, 193(1-2), 180-192(1988)

⁴ C. Oshima et al., Solid State Comm., 65(12), 1601(1988)

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

(1) 分光器(エネルギー分析器)

電子線の単色性(エネルギー幅)を精度良く測定するために静電円筒型3段のエネルギー分析器を開発した⁵。電極の寸法は軌道計算による角度収差を最小にするよう最適化した。分析器の軌道半径は1段から3段まで広がっており、角度収差で広がった電子ビームの強度を落とさずに、高いエネルギー分解能を維持できるように設計した。角度収差を考慮した軌道計算に基づく3段の分析器の理論エネルギー分解能は0.8meV(通過エネルギー0.6meV)になった。

(2) 極高真空技術の開発

電子源に吸着するガスを極限まで抑えるために極高真空装置を開発した。その際市販の真空計では測定できない低い圧力を測れる真空計を開発した。材質としては特殊なステンレス鋼(クリーンZ NKK)を使用し、装置全体を真空中600℃で焼き、ガスの放出速度を下げた。さらに2年間焼きだしを繰り返した結果、 10^{-11} Paの真空が実現した⁶。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

世界で初めてNb超伝導体から放出される単色電子波の検出に成功した⁷。またカーボンナノチューブの異なるサイトから放出される電子線の干渉を発見し、横方向のコヒーレンス長が100倍に伸張することがわかった⁸。

以上の研究成果をもとに、エネルギー幅の狭い(1meV)、干渉性(コヒーレンス)の優れた「超コヒーレント電子ビームの開発」を進めている⁹。

【当該研究分野の発展状況】

電子ビームはエネルギー幅が広がったため応用が限られていたが、最近の技術開発により、単分子の3次元原子構造を見るための新しい電子顕微鏡が生まれつつある。

⁵ T. Nagao et al., Rev. Sci. Instrument, V65, 515(1994)

⁶ C. Oshima et al., J. Vac. Sci. Japan. 37(9), 772-775(1994)

⁷ K. Nagaoka et al., Nature, V396 (No.6711) 557-559(1998)

⁸ C. Oshima et al., Phys. Rev. Letters, V88, No.3, 21 Jan. 2002

⁹ 1999年-2004年「未来開拓学術研究推進事業」

本人談(2004.3.15)

(4) 尾笹一成

【さきがけ研究課題】

酸化膜作成・除去とプラズマパルスを利用した半導体作成プロセス

【さきがけ研究期間】

1992年1月～1994年12月

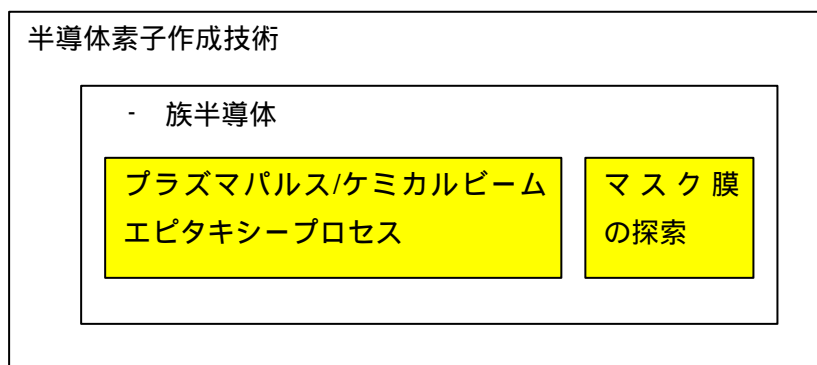
【さきがけ研究の目的・位置づけ】

高度な機能を持つ半導体素子を作るために、サブミクロン幅の半導体構造を幾層にも積み重ねた構造が注目されている。 - 族半導体(ガリウム-ヒ素など)でこのような構造を作れば、光コンピューターの基本要素となるような光で高速に情報をやり取りする半導体素子(光集積回路)が出来る。

一方、従来の半導体素子作成プロセスでは、平坦な半導体基板の上に写真技術を利用して微細な模様の穴が開いたマスクをつけて、別の半導体を堆積させる、あるいは不純物を注入している。多層化するためには、前のマスクを取り除いて次の層を作るためのマスクを改めてつけ、また同じように選択的な半導体堆積などを行う。

- 族半導体の高集積構造を作るためには、より洗練された方法が望まれる。さきがけ研究では、 - 族半導体の選択成長そのものの改善を行うための方法と、真空中でつけたりはがしたり出来るマスク膜の開発を行った。半導体を堆積する方法としては、真空中で半導体基板の上に原料ガスを吹き付けて熱分解反応で半導体を堆積させる化学分子線成長法を用いた。また真空中でマスク膜の堆積、パターン形成、除去が出来る金属酸化物のマスク膜を探索した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

有機金属分子線エピタキシーによる InGaP、InAlP、AlGaP 等の -V 族半導体作成プ

ロセスを研究し、真空度、温度などの条件検討や成長メカニズムを調べた^{1,2,3}。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

(1) 半導体作成方法としてガリウムやアルミニウムの有機金属と砒素の原料である AsH_3 と水素プラズマを一緒に短いパルス(100-200 ミリ秒)として基板表面に供給し化合物半導体を作る「短パルス化学分子線成長法」を検討した⁴。短パルスの水素プラズマを発生させる方法としては、マイクロ波放電方式のプラズマガンに水素ガスをパルスで供給する方法を開発した⁵。それぞれのガスをパルスで供給することによって、基板表面で起きる素反応(の位相)をコントロールすることが出来た。

(2) 酸化インジウム(In_2O_3)のマスキングは、GaAs 半導体の選択成長のマスキングとして有効なことがわかった⁶。トリメチルインジウムと過酸化水素ガスを交互に供給することによって GaAs 基板の上に In_2O_3 を堆積させることが出来た⁷。形成した In_2O_3 膜をマスクとして GaAs の選択成長を行うと、Ga 原子は In_2O_3 膜に吸収され、 In_2O_3 の還元反応がおきる。 In_2O_3 膜は化学変化をおこしながら徐々に熱脱離していくが、その間は GaAs の堆積は抑えられる。GaAs の選択成長後、 In_2O_3 マスキング膜は、水素プラズマによって還元され、除去することが出来た。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

電子ビームレジストによる GaAs のパターンエッチング⁸や InGaAs ドットにおける自己組織化形成の、その場コントロール⁹を研究した。

しかし、研究の重点は、ナノプローブ顕微鏡を用いた半導体局所領域物性評価¹⁰などナノ領域の物性を測定する研究に移している。

【当該研究分野の発展状況】

さきがけ研究の成果を半導体の製造プロセスとして実用化するためには、表面で起きる反応が励起パルスによってどんな影響があるのか、 In_2O_3 マスキングの微細パターンを如何に作るのか、 In_2O_3 マスキング膜が高温で還元脱離する欠点をどう克服するかなど、多くの課題が残されている。

¹ K. Ozasa et al., J. Cryst. Growth, 89(4), 485-495(1988)

² K. Ozasa et al., J. Cryst. Growth, 95(1-4), 171-175(1989)

³ K. Ozasa et al., J. Cryst. Growth, 102(1-2), 31-42(1990)

⁴ K. Ozasa et al., J. Journal of Appl. Phys., 32(3A), L329-L331(1993)

⁵ K. Ozasa and Y. Aoyagi, Appl. Phys. Lett., 64(17), 2220-2222(1994)

⁶ K. Ozasa et al., Appl. Phys. Lett., 63(A), 1634 (1993)

⁷ K. Ozasa et al., Appl. Phys. Lett., 65(13), 1635-1637(1994)

⁸ E. K. Kim et al., Semicon. Sci. and Tech., 10, 91-94(1995)

⁹ K. Ozasa and Y. Aoyagi, J. Crystal Growth, 188, 370-376(1998)

¹⁰ K. Ozasa et al., J. Mater. Sci. Lett., 22, 273-277(2002)

(5) 川田 薫

【さきがけ研究課題】

ミネラルの構造と生体

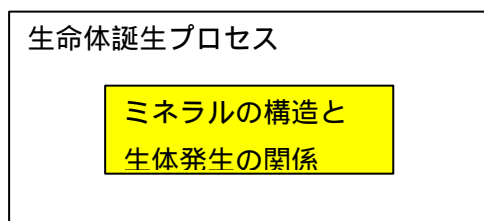
【さきがけ研究期間】

1992年1月～1994年12月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

地球上で生命体が誕生して30数億年が経っているが、「どのような道筋で生命体が誕生したのか」、なぜ「生命体誕生の実験」が今まで成功しなかったのか、まだ明らかではない。さきがけ研究では、大陸、海、大気、太陽の光のほか、これまでの研究で欠落していた岩石から抽出したミネラル(ケイ酸塩)に注目し、生命体誕生プロセスの解明に取り組んだ。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・結果】

高温・超高压に於ける物性、材料合成を研究した後、ダイヤモンドや超硬合金の合成法を研究した^{1,2,3}。それらの経験から、生命体の誕生に関心を持ち、常温・常圧でも生命体が誕生するのではないかと考えた。ミネラルが生命体の誕生の鍵を握っているという仮説を立て、花崗岩を硫酸で抽出してミネラルの水溶液を合成した。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

岩石からミネラルを抽出し、ミネラルが生体に与える影響を調べた。まずミネラルと水の構造を、液体窒素で冷却して走査型顕微鏡で観察した。水は約20の一次粒子が合体して約200の2次粒子を作り、この200の2次粒子がさらに合体して約1000の3次粒子を形成していることがわかった。次に岩石からミネラルを抽出して調べたところ、水と同様の約20の一次粒子、約200

¹ 大沢雄二ら、特許 2625840(1988.3.22 出願)

² 川田薫ら、特公平 8-5653(1987.2.12 出願)

³ 植田文洋ら、特公平 8-732(1987.1.16 出願)

の2次粒子、約1000の3次粒子からなる階層構造を持つことがわかった。

次にミネラルの濃度を変え、水がどのように変化するかを調べた。ミネラルを5ppm添加すると、水の3次粒子が再配列し、無添加のときよりも整然とすることが分かった。ミネラルを700ppm添加すると、水の一次粒子、二次粒子の形が無添加のときより鮮明になることが分かった。

次にミネラルを含んだ水に室温で種々のガス（窒素、酸素、炭酸ガス、メタンガス）を導入して紫外線を照射すると生体を構成する有機物が合成されることがわかった。また酵素（リゾチーム）をミネラルと室温で反応させると、アミノ酸とアデニンが出来ることがわかった。

以上の知見をもとに「生命体の誕生実験」を行った。ミネラルとして玄武岩抽出液を超純水に添加した溶液に、酵素としてリゾチームを添加して室温で24時間反応させると、ホスホリン、セリン、グリシン、タウリン、 γ -アラニンなどアミノ酸が生成した。反応後2-3日すると微生物様のものが発生した。この微生物用のものは分裂や増殖は行わなかったが、その後徐々に動き始め一個一個別々の動きをし、時間とともにコロニーを形成し、最初の発生から2ヵ月後には約10ミクロンの球状になることがわかった。

以上の結果から、「生命体の誕生」にミネラルが重要な役割を果たしているという新たな説を提起した⁴。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

研究は継続されていない。さきがけ研究で得られた知見をもとに実践の場で農業問題、環境問題に取り組んでいる。具体的には、岩石抽出ミネラル液の製造販売や土壌分析、植体分析、水質分析などをおこなっている。また農家の人たちに対するコンサルテーションを行い、農薬が残留しない野菜栽培や腐りにくい野菜作りを指導している。

【当該研究分野の発展状況】

生命体の誕生にミネラルの役割を論じた研究はある^{5,6}が、さきがけ研究に関連した研究は他では行われていない。

⁴ 川田薫、生き方を創造する生命科学（1997）（たま出版）

本人談(2004.4.21)

⁵ A. G. Cairns-Smith, *Origins of Life and Evol. of Biosphere*, 22, 161-180(1992)

⁶ F. H. Nielsen, *Eur. J. Nutr.*, 39(2), 62-66(2000)

(6) 小林 謙三

【さきがけ研究課題】

強誘電体の不整合相の光学活性

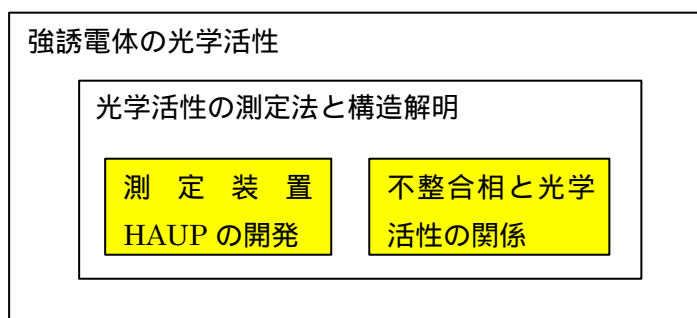
【さきがけ研究期間】

1992 年 1 月 ~ 1994 年 12 月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

これまで固体の光学活性は固体の異方性に起因する複屈折に妨げられ、光学活性より 3 桁大きい複屈折と分離して測定することが出来なかった。キラルな（左右性を持つ）固体の構造は光学活性を示す。固体の光学活性が測定できないことは、分子のスケールにおいて左右性の確実な知見を得る方法に欠けることであり、物質科学上問題があった。固体の光学活性が測定できれば、キラルな構造、たとえばタンパク質や核酸内の分子のらせん構造は勿論、すべての物質の構造の解明に役立つはずである。さきがけ研究では固体の光学活性を測定する装置 HAUP (High Accuracy Universal Polarimeter) の測定機能を完成すること、及び HAUP を用いて光学活性の知見が物質科学にとって有用であるかを実証することを目標とした。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況、成果】

1983 年に固体の旋光能、複屈折などを測定する機能を有する装置 HAUP を初めて製作した¹。強誘電体の不整合相はこれまで光学的に不活性であるとされてきたが、1985 年 HAUP によってはじめて不整合相が光学活性を有することを発見した²。この発表に対して賛否両論が展開された^{3,4}。さらに光学活性の知見より、不整合相の起因を初めて解明した⁵。

¹ J. Kobayashi and Y. Ueso, J. Appl., Cryst. 16, 204(1983)
² J. Kobayashi et al., Phys. Rev., B31, 4569 (1985)
³ E. Dijkstra et al., J. Phys., C4, 715(1992)
⁴ H. Meekees and A. Janner, Phys. Rev., B38, 8075(1988)
⁵ J.Kobayashi., Phys.Rev., B48,8332(1990)

【さきがけ研究期間中の成果】

さきがけ研究によって光学系を整備して HAUP の性能を向上させた。Ortega らは $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{ZnCl}_4$ 及び Rb_2ZnCl_4 の光学活性を否定したが⁶、これに対し、小林らは詳細な測定をおこなうことによって光学活性を有することを証明し、自分たちの主張が正しいことを明らかにした⁷。

$[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{ZnCl}_4$ 及び Rb_2ZnCl_4 結晶の臨界指数は 0.40 ~ 0.44 とほぼ一定値を示すことがわかった。またこれらの結晶には特殊な格子振動モード（フェーゾン）が存在することが実験的に確認された⁸。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

HAUP の適応範囲をさらに広げて研究が行われた。透明セラミックス PLZT の相転移機構の解明をおこなった⁹。らせん状コンフォーメーションを持つ高分子であるポリ乳酸の結晶状態の光学活性を測定して、溶液状態の光学活性よりも 10^3 倍程度高いことがわかった¹⁰。そのほか、グルタミン酸結晶¹¹、オキソアミド結晶¹²、L-アスパラギン酸¹³、リソチーム結晶¹⁴などの光学活性の研究が行われた。また HAUP を応用して高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_3$ の光学活性を測定して、相転移温度 T_c において 2 次の構造相転移が発生していることがわかった¹⁵。

【当該研究分野の発展状況】

HAUP によって光学活性と複屈折、屈折率曲面の回転角を同時に測定することがはじめて可能になった¹⁶。

HAUP は日本分光（株）で製作され、世界で 8 台実績がある。また世界でも HAUP の設計理論をもとにした測定器が製作され、各種固体の光学性能の研究が行われている。HAUP の開発によってキラルな構造を理論的に扱う「キラル物理学」が誕生しつつある¹⁷。

⁶ J. Ortega et al., Phys. Rev., B45, 5155(1992)

⁷ J. Kobayashi et al., Phys. Rev., B48, 10030(1993)

⁸ J. Kobayashi et al., Phys. Rev., B42, 8332(1990)

⁹ J. Kobayashi et al., Phys. Rev., B51, 763(1995)

¹⁰ J. Kobayashi et al., J. Appl. Phys., 77, 763(1995)

¹¹ T. Asahi et al., Acta Cryst., A52, 766-769(1996)

¹² T. Asahi et al., J. Am. Chem. Soc., 119, 3665-3669(1997)

¹³ T. Asahi et al., Acta Cryst., A53, 763-771(1997)

¹⁴ Y. Kobayashi et al., Acta Cryst., A54, 581-590(1998)

¹⁵ J. Kobayashi et al., Phys. Rev., B53, 11784(1996)

¹⁶ T. Asahi et al., Phys. Rev., B63, 094104(2001)

朝日透(早稲田大学理工学部)談(2004.3.19)

¹⁷ J. Kobayashi, Ferroelectrics, 203, 27-56(1997)

(7) 佐野充

【さきがけ研究課題】

分子ヒステリシス

【さきがけ研究期間】

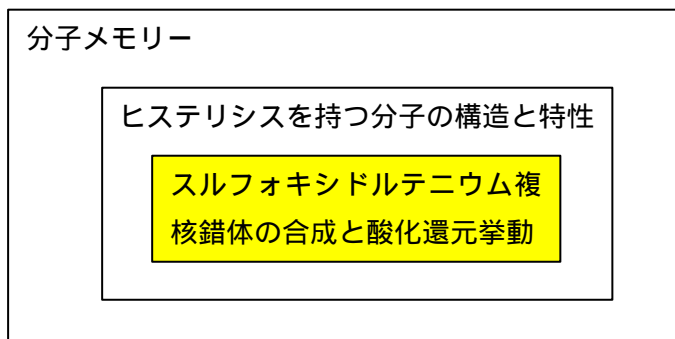
1992年1月～1994年12月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

ヒステリシスは履歴現象であり、多数の分子集団で観察される。しかしこれまで一つの分子がヒステリシスを持つとは考えられなかった。分子ひとつがヒステリシス挙動を示すならば、分子が記憶を持つことになる。このような分子ヒステリシスは多核金属錯体や多核金属酵素に見られる可能性が高い。分子記憶という概念そのものも、自然科学において重要な意味を持っている。過去を記憶する分子やタンパク質が見つければ、人間の記憶に関して新しい知見が得られる可能性がある。さらに自然現象すべてが記憶と関連することになるかもしれない。また実用面では、分子一個に情報を書き込めれば従来の記録媒体に比べ、はるかに高密度の記録が可能になる。

さきがけ研究では、可逆な酸化電位を持つサルファイド錯体とスルフォキシド錯体よりなる複核錯体を合成して酸化還元挙動を調べた。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・結果】

1990年にスルフォキシドペンタアンミンルテニウム錯体がヒステリシス挙動をすることを初めて見出した¹。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

スルフォキシド基とサルファイド基を含む環状配位子を用いてそれぞれの基にルテニウムペンタアンミンが配位した複核錯体を合成した²。

合成した錯体について、分子ヒステリシスの反応機構を調べた。電気的なスイッチにより、

¹ M. Sano and H. Taube, J. Am., Chem. Soc., 113, 2327(1991)

² A. Tomita and M. Sano, Inorg. Chem., 33, 5825(1994)

構造変化を起こすことができ、さらにその速度を分子により変えられることがわかった。スルフォキソドルテニウム錯体はルテニウムが2価のときはイオウ配位となり、3価のときは酸素配位錯体となる。両者は異なる構造を持つため、酸化電位と還元電位が異なる。今、可逆な酸化還元電位をもつサルファイド錯体とスルフォキソド錯体よりなる、複核錯体の酸化還元挙動を考えると、中間酸化状態は酸化されて生じる五価イオンと還元されて生じる五価イオンがあり、これらの構造は異なるはずである。酸化されて生じる五価イオンの構造は四価イオンの構造と似ており、還元されて生じる五価イオンは六価イオンの構造と似ていることがわかった。すなわち、五価イオンは過去の状態を記憶していることがわかった。

一連のスルフォキソド錯体を合成して、酸化還元後の構造変化の速度を測定したところ、還元速度はほぼ同じだったが、酸化速度はスルフォキソド錯体の種類によって四桁も異なることがわかった³。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

引き続き研究を継続しているが当初の期待に反して実用化への進展は見られない⁴。金属錯体を用いた情報記憶素子の研究を行った⁵が、読み出しのための信号強度が小さすぎるため実用化が困難であることがわかったからである。化学の分野でも面白い記憶現象が見出されていない。

新たに、環境・エネルギー問題に関連するテーマをとりあげ、窒素酸化物の還元⁶、燃料電池⁷、リチウムイオン電池⁸などを研究している。

【当該研究分野の発展状況】

分子メモリーの研究は世界的に行われているが、分子ヒステリシスの研究は他では行われていない⁹。さきがけ研究とほぼ同時期に Geiger¹⁰や Ogino¹¹らが外的刺激による分子変化(メモリー)を受ける分子を見出している。また Kaimら¹²も分子ヒステリシスの可能性を追求している。

³ M. Sano and H. Taube, *Inorg. Chem.* 33, 705(1994)

⁴ A. Tomita and M. Sano, *Inorg. Chem.*, 39, 200(2000)

⁵ A. Tomita and M. Sano, *Chem. Lett.*, 1996, 981

⁶ T. Inoue et al., *Solid State Ionics*, 130, 19(2000)

⁷ T. Hibino et al., *J. Electrochem. Soc.*, 147(4), 1338(2000)

⁸ K. Kondo et al., *J. Phys. Chem. B*, 104(20), 5040-5044(2000)

⁹ M. Sano, *Structure & Bonding*, 99, 117-139(2001)

¹⁰ W. E. Geiger et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 112, 7113(1990)

¹¹ S. Tobita et al., *Inorg. Chem.*, 30, 3039(1991)

¹² T. Roth and W. Kaim, *Inorg. Chem.*, 31, 1930(1992)

(8) 土佐正弘

【さきがけ研究課題】

表面原子間力のサブナノメートル計測

【さきがけ研究期間】

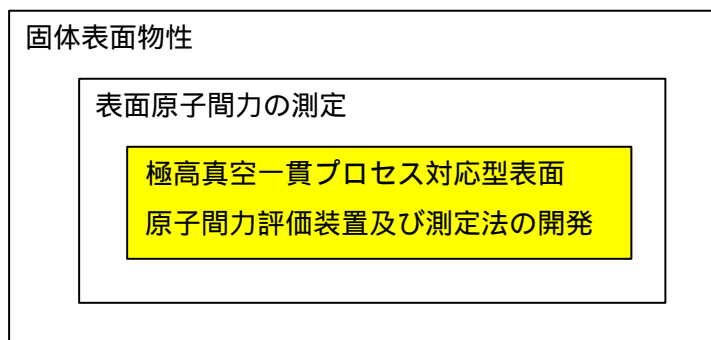
1992年1月～1994年12月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

固体表面における原子間力に関する知見は、単原子スケールで表面構造を観察したり、表面物性を原子レベルで改質したり、さらに単原子操作により新材料を創製するためには重要である。しかし、固体の最表面で作用する力を測定する場合、大気雰囲気下では酸化や分子吸着により表面状態が変化してしまうという問題点があった。このような表面汚染は極高真空中で測定することで解決されるが、原子レベルでの清浄表面の観察や表面構造の制御には、評価装置単体だけで行うことは不可能であり、多数の表面分析装置や表面処理装置との間で基板を授受できなければならない。

さきがけ研究では、原子間力の測定、表面清浄化及び、表面改質など原子レベルでの一貫操作を行うために、極高真空一貫プロセスの主幹搬送システムに直結して、基板を極高真空中で授受できる表面原子間力測定装置を開発した。またこの一貫プロセスの中で表面原子間力分布のサブナノスケール計測手法を確立することを目指した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

固体表面物性を原子レベルで改質する研究を行ってきた¹。そのためには極高真空中で操作する必要があるため、極高真空の発生、計測、利用技術に関する研究を進めた²。

¹ 吉原一紘ら、金材研報告集,11, 129-144(1990)

² 吉原一紘ら、金材研報告集, 14, 65-74(1993)

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

(1) 極高真空一貫プロセスに接続して作動できる表面原子間力評価装置を製作した³。装置は計測室、除振室、搬送系、排気系、導入室から構成されている。基板の搬送機構としては、多段受け渡し機構を採用することで、主幹搬送系から伝播してくる振動を排除するために装置本体を搬送システムから分離して、完全独立させることができた。また計測時の完全な除振を確立するために、計測ステージをばね式懸垂にし、分析ステージにも除振機構を装備した。このような除振システムにより、表面原子間力測定時の機械振動ノイズを完全に除去することができた。

(2) 表面原子間力評価装置を真空排気し、その到達圧力を求めた結果 $1.0 \cdot 10^{-9}$ Pa 台が得られた。ついで、試料の搬送を試み、壁開したグラファイト基板を走査型オージェ電子分光分析器中でイオン洗浄し、清浄表面を確認した後、主幹搬送系まで受け渡しし、 $1.0 \cdot 10^{-8}$ Pa 以下で表面原子間力評価装置内まで運び込むことができた⁴。

(3) 試料のグラファイト基板について表面原子間力分布を測定した⁵。測定機構として「光てこ」方式を採用した。測定された原子間力は 1.6nN であった。一方大気中のアルゴンガス雰囲気中で測定した原子間力は 25nN と大きく、本装置によりグラファイトの清浄表面を実測できたことを確認した。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

さきがけ研究を発展させて、清浄な表面を作成した基板について表面原子間力分布をサブナノスケールで計測することができるようになった。また極高真空一貫プロセスの中で表面改質を施した基板について原子間力分布を測定し、表面偏析により原子間力を制御する技術を開発した⁶。また表面原子間力の制御技術を利用して、マイクロトライボロジー材料創製のための自己組織化技術の研究を行った⁷。

【当該研究分野の発展状況】

応用分野としては、宇宙関係、真空および高温のトライボロジー、マイクロマシン関係が中心である。

実用材料レベルでのトライボロジーの関係で表面原子間力を研究しているところはほとんど他にない。

³ M. Tosa et al., Vacuum, 44(5), 549-551(1993)

⁴ 原田雅章ら、真空, 37(3), 244-247(1994)

⁵ 原田雅章ら、真空, 38(7), 650-652(1995)

⁶ 土佐正弘ら、Advance in Colloid and Interface Sci., 233-241(1997)

⁷ 土佐正弘ら、金材研報告集, 22, 335-341(2000)

本人談 (2004.4.22)

(9) 鳥養映子

【さきがけ研究課題】

スピン偏極原子線：新しい表面プローブ

【さきがけ研究期間】

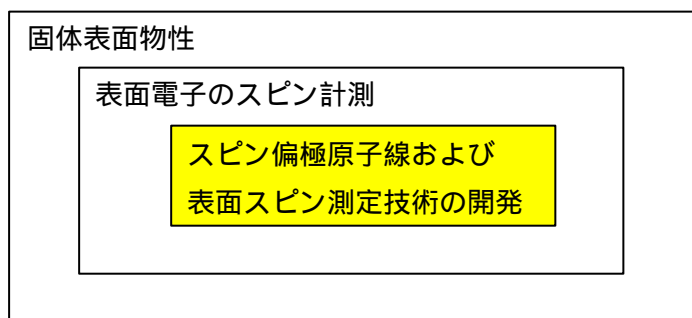
1992年1月～1994年12月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

電子の基本的な3つの性質（質量、スピン、電荷）の中で、スピンの表面の諸現象に及ぼす寄与は、磁性などの限られた分野でしか理解されていなかった。しかし、スピンは表面、界面において、電気伝導、反応、摩擦、触媒など電子交換を伴う全ての現象のミクロな機構に影響を与えられていると考えられている。

さきがけ研究では表面と原子の相互作用など、固体表面特有の性質にスピンがどう効くかを原子レベルで観測して調べるために、原子線のスピンを自在に制御することが出来る新しい表面プローブ：スピン偏極原子線の開発に取り組んだ。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

ミュオンスピン緩和法の研究に従事した¹。ミュオンを物質中にパルス状で入れると、ミュオンが陽電子に自然崩壊していく間の、背景放射線によるノイズが3桁低くなり、ミュオンスピン緩和関数が長時間（～30 μs）まで測定可能となることを実証し、磁気秩序相におけるスピン相関の測定が可能となることがわかった。これを用いて、酸化物超伝導体の磁性と超伝導の共存相を見出した²。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

(1)スピン偏極原子線の共鳴電荷交換を用いた表面スピンの量子計測の原理を提案し、熱エネルギーセシウム原子線の100%スピン偏極を成功させた。エネルギー範囲0.1～10KeVの原子線源とビームラインを完成させた³。

¹ E. Torikai et al., Solid State Commun., 58, 839-843(1986)

² E. Torikai et al., Hyperfine Interactions, 63, 271-278(1990)

³ E. Torikai, Advances in Colloid and Interface Science, 71-72, 317-336(1997)

(2) 真空放電プラズマ焼結法による寿命イオンエミッター材料の開発、周波数選択的光帰還法による半導体レーザーの自動同調技術の開発を行った⁴。

以上により原子 - 表面散乱における初めてのスピン・エネルギー依存性が観察できる見通しを得た⁵。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

固体表面におけるスピン相関を調べるためには、散乱原子のスピン偏極度とイオン化率の測定が必要であり、山梨大学堀研究室の協力を得てレーザーイオン化スピン偏極度検出装置と、マイクロチャンネルプレートによるイオン化率検出装置を開発した。検出系を組み込んだ実験システム全体が最近完成した⁶。さきがけ研究の課題であった新しい表面プローブがようやく生まれようとしている。

スピン偏極原子を用いて、スピンと原子配列の関係を解明する実験原理の提案を行った⁷。カナダトライアムフ研究所で負ミューオンによる酸化物超伝導体の酸素のスピン状態の研究⁸、高エネルギー研究所でミュオニウムによる半導体中への光励起スピン注入電流のマイクロな観測に成功した⁹。最近イギリスのラザフォード・アップルトン (RAL) 研究所での理化学研究所、高エネルギー加速器研究機構、RAL との共同研究で DNA における電子移動を調べるのにミューオンラベル電子スピン計測法が有効なことがわかった¹⁰。

【当該研究分野の発展状況】

表面の諸現象を解明するために「スピン」と「エネルギー」の両方を制御できるプローブは他所ではない。表面研究分野では、イタリアジェノバ大学の Mattera¹¹ 物材研の山内ら¹²がスピン偏極 MDS (脱励起分光) による表面第 1 原子層の電子状態を研究している。ドイツフンボルト大学の Winter らは入射粒子の運動エネルギーによって表面散乱で放出される偏極電子を観測し、表面スピン状態を調べている¹³。

また、ミューオンスピンによる物性研究はミューオン発生設備を持つ高エネ研、カナダのトライアムフ研究所、スイスの PSI、イギリスの RAL による国際共同研究が進んでいる

⁴ 廣瀬英二、鳥養映子、山梨大学工学部研究報告、45,42-51 (1994)

⁵ E. Torikai and H. Hori, Springer Series in Solid-State Sci., 121, 126-137(1996)

⁶ Y. Ikedo et al., Surface and Interface Analysis, 36, 2004 (accepted for publication)

⁷ E. Torikai, RIKEN Review 27, 82-85(2000)

⁸ E. Torikai et al., Hyperfine Interactions, 105, 175-179(1997)

⁹ E. Torikai et al., Physica B 289, 558-562(2000)

¹⁰ E. Torikai et al., Hyperfine Interactions, 138, 509-514(2001)

本人談 (2004.4.1)

¹¹ F. Bisio et al., Phys. Rev Lett. 83, 4868-4871(1999)

¹² M. Kurahashi et al., Phys. Rev. Lett., 91, 267203(2003)

¹³ R. Pfandzelter et al., Phys. Rev. B, 63, 14040(R) (2001)

本人談 (2004.4.1)

(1 0) 長谷川修司

【さきがけ研究課題】

半導体表面の原子配列とその電気伝導

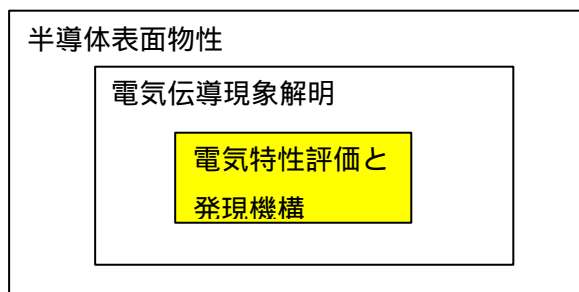
【さきがけ研究期間】

1992年1月～1994年12月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

半導体・金属・酸化物などの単結晶表面やエピタキシャル超薄膜では特異な原子配列構造と電子状態が形成される。さきがけ研究では、そのような薄膜構造を原子レベルで解析して、電気特性の発現機構を解明することを試みた。特にシリコン表面上に形成される表面超構造が電気伝導にどのような影響を与えるのかという点に絞って研究した。表面のわずか1-2原子層に形成される表面超構造の制御は反射高速電子回折(RHEED)を用いて行い、その電気特性の測定を同時に「その場」でおこなえる新しい実験手法を考案した。原子レベルの極微構造を構築するのに、単原子操作ではなく表面超構造やエピタキシー現象、表面超構造の分極境界などを利用した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

RHEED と X 線分光を組み合わせ、単結晶表面の1-2原子層がバルク結晶には見られない特異な原子配列と電子状態を形成することを見出した¹。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

(1)シリコン表面のわずか1、2原子層の原子の並べ方を変えるだけで、表面電気伝導度が異なることが初めて見出された²。これは表面空間電荷層による伝導の違いと解釈された。

¹ S. Hasegawa and S.Ino, Phys. Rev. Lett. 68, 1192-1195(1992)

² S. Hasegawa and S. Ino, Surface Sci. 283,438-446(1993)

(2)シリコン(111)表面上にさまざまな表面超構造を準備して、その上に Ag を蒸着し、原子配列構造の変化を電気伝導度で測定した^{3,4}。表面構造の違いによって表面電気伝導度が異なった挙動をし、原子層の成長様式が明らかに異なることがわかった。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

4つのプローブが独立にナノメートルスケールで配置できる「独立駆動型4探針超高真空走査トンネル顕微鏡(STM)装置」を製作した⁵。プローブの間隔は従来の数mmから600nmまで近づけることができた。

この装置を使って、表面電気伝導度のプローブ間隔の影響、表面状態の影響、試料と探針との距離の影響などを調べて、制御系およびソフトウェアの確立を目指している⁶。

Si(111)-7×7やSi(111)-3×3-Agの表面の探針近傍の電位分布を測定した⁷。その結果、表面近傍のみを電流が流れる2次元伝導であることを確認した。またカーボンナノチューブ(CNT)の電気伝導度を測定した結果、CNTが4探針STMの探針として有望であることがわかった⁸。

【当該研究分野の発展状況】

大阪大学では4探針のAFM(原子間力顕微鏡)/STMを使ったマルチプローブの開発を行っている⁹。デンマーク工科大学はマイクロ4端子プローブを開発しており、長谷川研究室と表面電気伝導度の測定について共同研究を行っている¹⁰。

³ S. Hasegawa and S. Ino, *Int. J. Mod. Phys. B*, 7(22), 3817-3876(1993)

⁴ S. Hasegawa and S. Ino, *Thin Solid Films*, 228, 113-116(1993)

⁵ 長谷川修司ら, *電子顕微鏡*, 38, p36(2003)

⁶ H. Morikawa et al., *Phys. Rev.*, B65, 201308(2002)

⁷ S. Hasegawa et al., *Current Appl. Phys.*, 2, 465(2002)

⁸ 東京大学長谷川研究室 2002年度年次報告(大阪大学青野研究室との共同研究)

⁹ *Japan Nanonet Bulletin*, 49(2004.1.13)

¹⁰ S. Hasegawa et al., *J. Phys. Condens Matter.*, 14(35), 8372-8392(2002)

(1 1) 古川猛夫

【さきがけ研究課題】

強誘電性高分子の機能物性

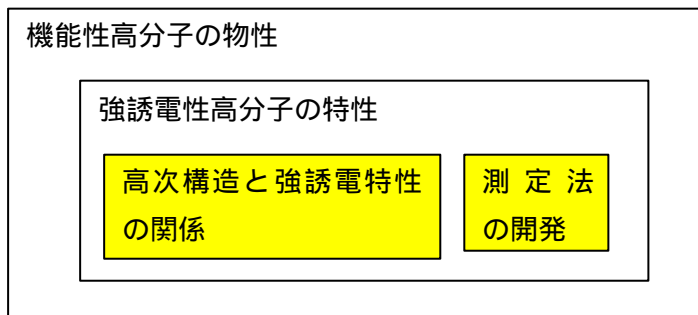
【さきがけ研究期間】

1991年1月～1994年12月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

強誘電性高分子はエネルギー変換素子やメモリー材料として利用されている。しかし高分子はその機能物性が定量的に十分理解されていないことがしばしば問題となる。これは固体高分子が結晶と非晶質の混合系であり、その機能物性は高次構造によって強く支配されるためである。さきがけ研究では強誘電性高分子について高次構造の制御と新しい測定法の開発を主題とし、機能物性について微視的機構の解明を目指した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

ポリフッ化ビニリデン (PVDF) の延伸分極膜が高い圧電性を示すことは知られていたが、空間電荷の分極に起因するのか、永久双極子の回転によるのかわかっていなかった。そこで、空間電荷が動くことができない - 100 という低温で電気変位と電界の間にヒステリシスを観測し¹、永久双極子が回転していることを証明したが、強誘電体の特徴である相転移現象は観測できなかった。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

高分子としてフッ化ビニリデン (VDF) 三フッ化エチレン共重合体 (TrFE) および Nylon

¹ T. Furukawa, Phase Transitions, 18, 143(1989)

11 を選んで強誘電特性を調べた^{2,3}。電気測定として新たに非線形誘電分光器を開発し、時間領域と周波数領域における電気特性を調べた。その結果分極反転過程ではトランス鎖の軸周り回転が素過程であること、反転分極量が電場によらず一定であること、反転速度は電場とともに速くなることがわかった。高次構造の熱処理効果を詳細に調べた結果、融点直下の熱処理により結晶化が最も進み最大の分極量が得られた。この状態では結晶の薄層が大きく成長していることがわかった。強誘電性にもっとも強く影響を及ぼす残留分極は理論的に推定される最大値にほぼ達していた⁴。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

高分子強誘電体の強誘電特性と高次構造との関連において定量的に調べる研究を継続的に行い^{5,6,7}、高結晶化度、高分子配向厚膜についての基本的な理解が得られた。そこで研究の中心を薄膜に移行し、厚さ 10-500nm のいわゆるナノフィルムの作成とその強誘電性と微細構造の関連を明らかにするプロジェクトを開始した⁸。ナノフィルムでは微結晶のサイズが厚さと同等になり、したがって無視できない厚さの分布が現れること、さらに厚さあるいは結晶サイズさらには電極の金属種に依存して、強誘電性の消失の傾向が存在することがわかってきた。このような現象の詳しい理解に向けて、さらに研究が行われている。

[当該研究分野の発展状況]

高分子強誘電体の超薄膜研究の推進力のひとつは、不揮発メモリーへの応用にある。近年セラミックス強誘電メモリーの開発競争と平行して、Polymer Ferroelectric Random Access Memory が実現する可能性もある。

² T. Furukawa et al., Macromol. Chem., Macromol. Symp., 70/71, 183(1993)

³ T. Furukawa et al., Ferroelectrics, 171, 33-44(1995)

⁴ Y. Takahashi et al., Pro. of 8th Int. Symp. on Electret, p674, 1994

⁵ H. Kodama et al., Jpn. J. Appl. Phys., 38, 3589(1999)

⁶ Y. Takahashi et al., IEEE Trans. Diel. Elec. Insul., 5, 957(1998)

⁷ Y. Takahashi et al., Macromolecules, 37, 2807(2004)

⁸ T. Furukawa et al., Mat. Res. Soc. Proc., 698, 71(2002)

本人談 (2004.5.24)

(1 2) 水谷真

【さきがけ研究課題】

異常金属の合成と物性

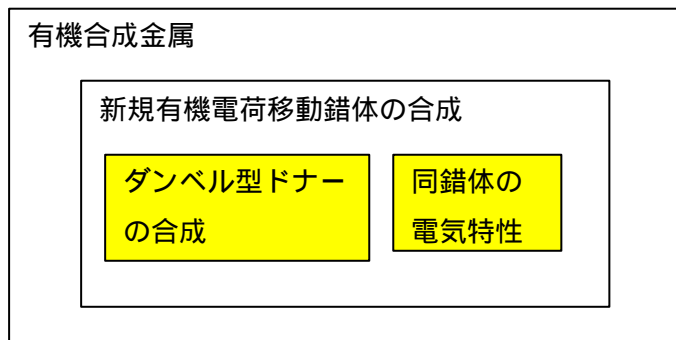
【さきがけ研究期間】

1992年1月～1994年12月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

有機物は本来絶縁体であるが、電子を出しやすい化合物(ドナー)と電子を受けやすい化合物(アクセプター)を反応させ、有機電荷移動錯体を作る事で導電性の化合物とすることが出来るようになった¹。この有機電荷移動錯体ではドナーからアクセプターへの電荷の移行量が一分子当り一個の電子が移った状態では絶縁体(モット絶縁体と呼ばれる)になってしまうため、金属状態を実現するには部分酸化状態が必要であると思われてきた。しかしながら何らかの方法により一価の状態でも金属的な錯体を形成できれば酸化物超伝導体のような高温超伝導体が有機物でも実現する可能性がある。さきがけ研究では巨大な電子共役系を持つドナーを合成しその錯体化により、一価の状態でも良好な電気伝導体を得られるような新規な錯体を作成することを目的とした。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況、成果】

酸化物超伝導材料が発表された時²に研究の対象として有機物を取り上げ、探索研究をおこなった結果、抵抗異常を示す有機金属錯体を見つけた³。

【さきがけ研究期間中の成果】

¹ J. P. Ferraris et al., J. Am. Chem. Soc., 95, 948 (1973)

² J. G. Bednorz and K. A. Muller, Zeit. fur Physik B, 64(2), 189-193 (1986)

³ K. Kawabata et al., Synthetic Metals, 39(2), 191-194 (1990)

(1) 1,4-ビス[2-(ピレン-1-イル)ビニル]-2,5-ジメチルベンゼン (BPE-DMB)、1,4-ビス[2-(テトラチアフルバレン-2-イル)ビニル]-2,5-ジメチルベンゼン(BTFE-DMB)などの各種ダンベル型分子を合成した⁴。ピレンダンベル型ドナー-BPE-DMB の結晶構造解析の結果、アリレン環の結合距離は 1.368 となっており、ベンゼン環のときの結合距離よりも短くなっていることがわかった。また電子を出す性能を示す酸化電位はピレンのみの酸化電位よりも低く、電子共役が分子全体に伸びていることが明らかになった。硫黄系のドナーである BTFE-DMB についても同様な結果が見られ、ダンベル型構造とすることで電子共役を伸ばせることがわかった⁵。

2)ダンベル型ドナーはトリハライドと良電気伝導性の錯体を作りやすいことがわかった⁶。(BPE-DMB)(IBr₂)錯体の単結晶は室温で約 0.01 cm と小さい電気抵抗を示し、室温近傍では温度が低下するとともに電気抵抗も低下するという金属的な電気伝導性を示した。一方、230K 近くから温度を下げていくと電気抵抗が急に大きくなっており、絶縁体に転移することがわかった。また中央の芳香環の電子共役の状態を知るために IR 測定をしたところ、この芳香環の吸収ピークは錯体化することで、大きく低エネルギー側にシフトした。このことは電子共役が分子全体に広がっており、中央の芳香環では切れていないことを示している。したがって(BPE-DMB)(IBr₂)錯体は一価のカチオン塩であるにもかかわらず金属状態になる、今までの常識に反する新規な錯体であることが明らかにした⁷。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

BPE-DMB の化学構造と電気伝導性を調べ、(BPE-DMB)(IBr₂)が金属伝導挙動を示す原因を調べた^{8,9}。しかし、発見した合成金属は結晶構造をコントロールするのが難しく、実用化の可能性は低いと判断して研究を中止した。最近では環境関連のテーマに取り組んでいる¹⁰。

【当該研究分野の発展状況】

有機超伝導体の研究は現在も盛んである¹¹。超伝導体としてはまだ実用化されていないが、有機 EL など関連分野の研究成果は実用化され始めている¹²。

⁴ M. Mizutani et al., *Synthetic Metals*, 46, 201-205(1992)

⁵ M. Mizutani and Y. Shimae, *Synthetic Metals*, 55-57, 2185-2188(1993)

⁶ M. Kawabata et al., *Synthetic Metals*, 70(1/3), 1141-1142(1995.3.15)

⁷ K. Ikeda et al., *Synthetic Metals*, 55-57, 2007-2012(1993)

⁸ M. Mizutani et al., *Adv. Colloid Interface Sci.*, 71/72, 111-124(1997)

⁹ M. Kawabata et al., *J. Phys. 1*, 6(12), 1575-1580(1996.12)

¹⁰ 澤田佳代ら, *化学工学論文集*, 29(2), 309-312(2003)

¹¹ 村田恵三, *化学工業*, 2002年1月, p 43-47

¹² 林秀介, 須藤茂, *電子材料*, 2004年4月, p34-38

(1 3) 大島久純

【さきがけ研究課題】

分子で描くアラベスク

【さきがけ研究期間】

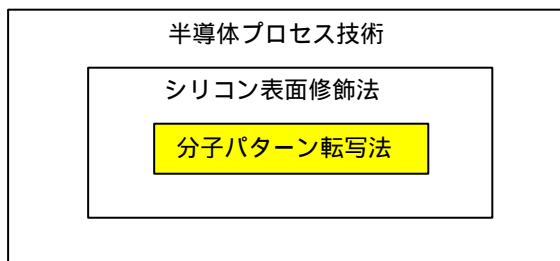
1992年10月～1995年9月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

固体表面において原子や分子の周期構造を実現する手法「分子パターン転写法」の開発を目指し、具体的には、nmレベルでの周期構造を形成するための下記の4要素技術の開発を行った。

- 1)分子が周期的に吸着可能な基板表面の作製技術
- 2)分子の基板表面への物理吸着技術
- 3)選択的原子結合形成による分子の固定(化学結合の形成)
- 4)不要分子の選択的除去技術

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

化合物半導体の研究をテーマとして博士課程を終了後、LSIプロセスの開発に従事した。具体的には、シリコン表面やアルミニウム表面上へのタングステン選択CVD法の研究開発を担当した。さらに、表面反応の制御方法、表面の解析方法について、特にシリコンと水素の作用などを中心に研究した¹。この間に、理想的な表面修飾法として分子パターン転写法を着想した。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

フッ化アンモニウム溶液洗浄により原子レベルで平坦化した水素終端 Si(111)面を形成、

¹ T.Yasaka et al., Jpn. J. Appl. Phys., 30(12B), p.3567. (1991)

個々の終端水素原子を走査型トンネル顕微鏡にて観察・確認することに成功した²。

有機系ゲルマニウム化合物として、トリメチルゲルマニウムクロライド (TMGC) とテトラエチルゲルマニウム (TEGe) を用い波長 172nm の真空紫外光照射効果を調べた。TEGe では紫外線照射に無関係に Ge が基板に吸着するのに対し、TMGC では紫外線照射時のみ Ge が基板に吸着した²。これは TMGC に含まれる Ge-Cl 結合が光選択吸着をもたらしていると考えられる²。

新たな基板表面評価方法として、従来より一桁近く表面感度の高い「高感度反射吸収方式フーリエ変換赤外分光法」を開発した³。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

修飾後の表面の状態や機能を評価するためにはナノ・オーダーからミクロン・オーダーの領域で表面の構造や化学結合状態を観察する装置を必要としたが、当時はそのような装置は未開発であったため、ふたたび LSI プロセス開発に戻った。平行して、新分野研究の探索も担当して先端的分野を調査した。現在はその結果を基に開発部にて燃料電池関連の研究開発に従事している。

【当該研究分野の発展状況】

金チオールを使用した自己整合的な表面ナノレベル修飾方法の研究が実施されている⁴。また、有機分子を自己整合的に基板表面へ吸着させる研究も盛んになりつつある⁵。さらにはサブミクロンオーダーからのアプローチとして、微細パターンの鋳型を使用するスタンプ方式も研究がすすんでいる⁶。

² H. Ohshima, Proc. 3rd Inter. Symp. on Atomically Controlled Surfaces and Interfaces, p.85-89. (1996)

³ 特許 2807724 特許 2965842

本人談

⁴ G.E.Poirier and E.D.Pylant, Science, 272, p.1145. (1996)

⁵ G.M.Whitesides and B.Grzybowski, Science, 295, p.2418. (2002)

⁶ http://www.keytech.ntt-at.co.jp/nano/prd_0018.html

(14) 小田俊理

【さきがけ研究課題】

シリコン超微粒子の量子効果を探求する

【さきがけ研究期間】

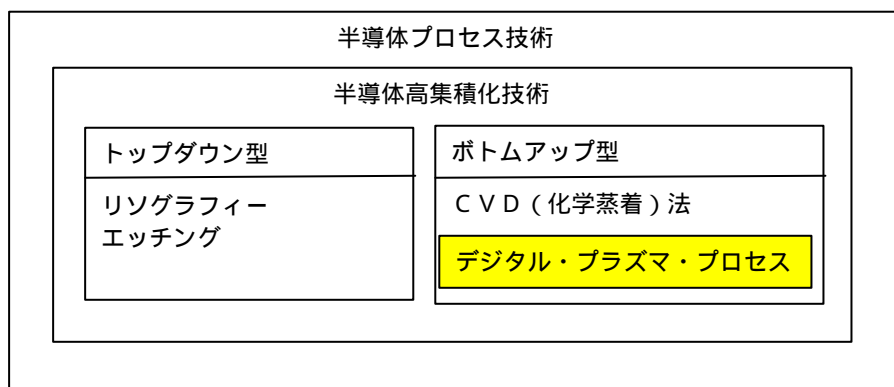
1992年10月～1995年9月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

半導体集積回路はあらゆる技術の基盤を支えるツールとして、高集積化が進み、具体的にはリソグラフィーとエッチングによる大(ウエファ)から小(微小チップ)へのトップダウン技術により進展してきた。高集積化に必要な超微細加工技術の最小加工寸法は、現在200nmであるが、2020年には10nmに達すると予想されている¹。しかし、10nmを実現する技術に加えて、素子寸法の微細化に伴う量子力学的効果によるリーク電流等の問題も未解決であった。

さきがけ研究では、デジタル・プラズマ・プロセスにより、シリコン超微粒子の粒径と配列とを精密に制御する方法を開発し、シリコン超微粒子の構造に特有な量子効果物性を解明することを目標とした。これは従来技術の延長線上から離れて、ボトムアップ型ともいべき手法による高集積化のための基礎技術の開発として位置づけられる。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

1980年代にアモルファスシリコンの研究に着手した。アモルファスシリコンの中にどうしても結晶性シリコンが一部生成するため、この結晶性シリコンの用途を考えたのが、シリコン超微粒子研究のスタートであった。シリコン結晶の結晶成長メカニズムに及ぼす水素ラジカルの影響を実証した²。

¹ S.Oda,T.IEEE Japan, 121-C(1),p.19-22.(2001)

² M.Otobe and S.Oda, Jpn. J. Appl. Phys.,31,p.L1443-L1445.(1992)

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

プラズマの発生を通常の 13.56MHz から VHF 帯の 144MHz に変えて行った所、偶然にもナノシリコンができた³。それから発展したデジタル・プラズマ・プロセス(プラズマ・セル中で、シランガスを連続的に供給しつつ、水素ガスを 0.5s 供給して、次の 0.5s は供給を止めるというデジタル的なプロセス)により、粒径 4 ~ 10nm のシリコン超微粒子を作製することができた⁴。その間、プロセス中におけるシリコン超微粒子の核形成、結晶成長における水素ラジカルの役割を明確にすることができた⁴。基板上の微小段差を利用したり AFM で操作することによりシリコン超微粒子の配列制御ができることも明らかにした⁵。さらに、室温可視光発光、クーロンブロック特性、室温共鳴トンネル効果などシリコン超微粒子における量子効果特性の観測をすることができた⁵。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

ナノ結晶シリコン量子ドットの作成、デバイス特性評価を研究し以下の成果を得た⁶。

- 1) パルスプラズマプロセスによりナノ結晶シリコンを作成し、粒径 8nm、分散 1nm という世界最高水準の超均一粒径量子ドットを得た。
- 2) 酸化の自己停止機構を利用して粒径 4nm のナノ結晶シリコンを再現性良く得る技術を開発した。
- 3) 電子ビームリソグラフィー技術による微細電極形成技術とナノ結晶シリコン堆積技術を組み合わせて、単電子トランジスタを作成し、明瞭なクーロン振動特性を得た。さらに、論理素子およびメモリ素子の特性を得た。
- 4) 極微細シリコン縦型バリスティックトランジスタを作製し、明瞭な量子化コンダクタンスを観測した。
- 5) 表面酸化ナノ結晶シリコンから高効率可視光発光を観測し、フォノン支援の無い疑似直接遷移型発光機構を実証した。
- 6) ナノ結晶シリコン冷陰極電子放出素子を作製し、高効率電子放出現象を観測した。

【当該研究分野の発展状況】

類似の研究を実施しているのは、米国ではカリフォルニア工科大学、日本では、広島大学である。

³ S.Oda and M.Otobe, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 358,p.721-731.(1995)

⁴ M.Otobe et al.,Journal of Non-Crystalline Solids,198-200,p.875-878.(1996)

⁵ 小田俊理、さきがけ研究 21 研究報告会 構造と機能物性講演要旨集(1995)

⁶ 本人より提示された資料による。

本人談

(15) 栗原和枝

【さきがけ研究課題】

表面力：表面分子を繋ぐ力は何なのか

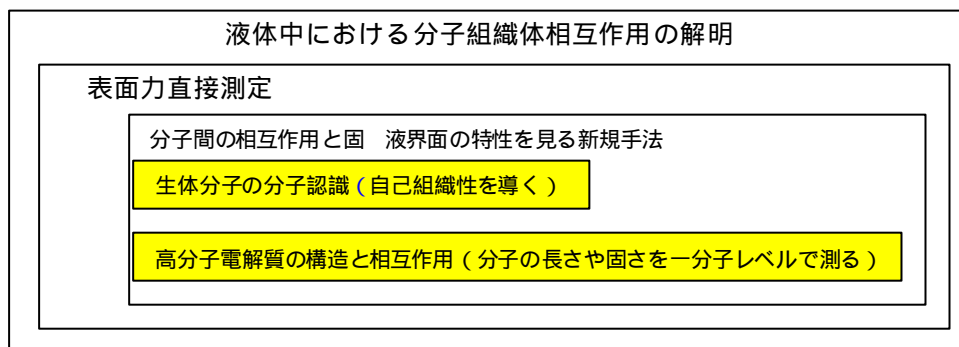
【さきがけ研究期間】

1992年10月～1995年9月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

すべての物質は分子組織体間相互作用により、その形を保っているが、分子組織体が特に液体中におかれた時、その間にどのような力がどのくらいの大きさを働かせるかは未だ解明されていない。さきがけ研究では、分子組織体の表面力（表面に働く様々な力）の直接測定により、表面の構造と相互作用を分子スケールで解明することを目標とした。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

主テーマを単分子膜上の分子認識、副テーマを表面力直接測定として研究を行った¹。

【さきがけ期間中の状況・成果】

「表面力測定」を中心テーマとして研究を行った。

- 1) 核酸塩基間の相互作用について、相補的な場合には、超長距離にまで及ぶ安定な引力が常に働くことを見出した²。
- 2) 高分子電解質単分子膜の相互作用について、表面力は表面の間隔が大きいときには電気二重層斥力であり、近づいて高分子電解質鎖が接触すると立体斥力になることが分かった^{3,4}。
- 3) 立体斥力成分を解析し、高分子層の圧縮弾性率を求めることができた⁴。溶媒中で高分子配向1分子層の圧縮弾性率を得た初めての例である。

¹ ERATO 国武化学組織プロジェクト 1987-1992

² K.Kurihara et al.,Langmuir,12(17),p.4053-4056.(1996)

³ K.Kurihara et al., Trans.Mater.Res.Soc.Jpn.,15A,p.517-520.(1994)

⁴ K.Kurihara et al.,J.Phys.Chem., 99 ,p.1820-1823, (1995)

4) 構造変化については、イオン化した高分子電解質を圧縮すると、途中で弾性率が変わる構造変化(転移)が起こり、この変化は鎖長によらず常に起こることを見出した⁵。以上の成果は液体中の分子間相互作用ならびに高分子電解質の液中での構造を定量的・直接的に解明したものである。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

ふたつの表面に挟まれた極微細空間における液体のレオロジー⁶、トリボロジー⁷は、特に小型化装置の中での流れの制御や、効果的な潤滑のために重要であるという観点から、「ずり測定装置⁸」を自作した。これには、ノイズに強く、薄膜のレオロジー特性の変化に敏感な共振法を採用した⁹。

最近では、測定法ならびに測定対象について、生体分子から液晶まで、さらに制限空間中での液体の挙動まで拡大している⁹。

2002年には「固-液界面の液体のナノ構造形成評価と制御」に関する研究を開始した¹⁰。本研究は、様々な医療材料やマイクロマシンで用いられる微小管中での流れ、ならびに材料表面での摩擦や潤滑の精密制御方法を開発すると共に、固体表面の新規な分子組織化ならびにナノコーティング法の確立を目指している。(1)固-液界面の液体の新規ナノ評価法の開発では、Fringes of Equal Chromatic Order (FECO)分光法ならびに次世代ずり測定装置の開発を目指す。(2)固-液界面の分子マクロクラスターの研究では、水素結合による液体のマクロクラスターの解明を目指す。(3)微細空間の液体の特性評価では、閉じ込めによる液体の構造化の解明を目指す。

【当該研究分野の発展状況】

近年、ナノテクノロジーの発展により表面評価の重要性が特に認識されるようになりつつある¹¹。

ナノテクノロジーの基盤技術として、表面力測定技術はその地位を確立しつつある¹¹。まだ研究グループの数は世界的に見ても少ないが、活躍している学者には、Israelachvili、Klein、Tirrell、Horn、Kurihara、Leckband、Granickらがあり、幅広い対象が研究されている⁹。

⁵ K.Kurihara et al., Langmuir, 15, p.7725-7731, (1999)

⁶ レオロジー：物質の変形と流動に関する科学(rheology)

⁷ トリボロジー：摩擦、摩耗、潤滑など、二つの物体面が直接、あるいは間接に接触して滑り合うように相対運動したときの接触面に見られる現象や過程などに関する科学・技術

⁸ ずり装置：2つの表面の一方を横にずりながら、その時の応答を測定する装置。表面間に液体をはさみ、その時の応力を測定する例などがある。

⁹ 栗原和枝、表面科学、18(10),p.618-624.(1997)

¹⁰ JST戦略的創造研究推進事業(CREST)、研究者代表：栗原和枝、2002-2007

¹¹ 栗原和枝、日本化学会：21世紀の化学の潮流を探る NO.18.(2003)

(16) 松下 明

【さきがけ研究課題】

この不思議な粒子、ミュオニウム

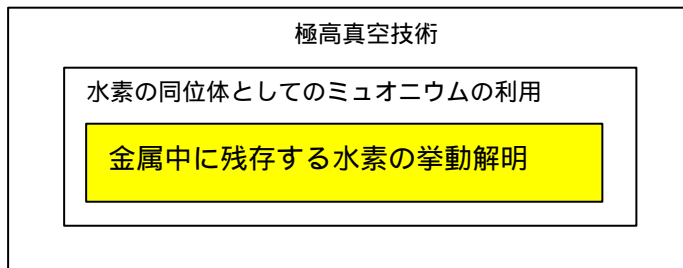
【さきがけ研究期間】

1992年10月～1995年9月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

近年、真空技術が進み、極高真空 (10^{-13} Torr 以下) という言葉がよく使用される。この段階で最も顕著な残留気体は水素原子であり、その発生源は真空槽の金属内壁と言われている。ミュオニウムは人工的に作った軽い水素原子である。およそ2マイクロ秒で崩壊し、速い陽電子になる。この陽電子を検出することで、1個1個のミュオニウムを特定し追跡可能となる。さきがけ研究ではミュオニウムの上述の特性を利用して金属に最後まで残存する水素原子の挙動について解明することを目指した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

スウェーデンでのミュオン国際会議 (1986年) で Harshman 博士が「ミュオンおよびミュオニウムと表面の相互作用」という題で招待講演を行った¹。Harshman 博士らの一連の仕事に関心を持ち、予備調査を行った。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

高エネルギー物理学研究所内にある、最大エネルギー～4 MeV のミュオンビームの取りだし口である B チャンネルを用いて、ミュオニウム検出装置を含めた全体の実験装置の設

¹ D.R.Harshman et al., Phys.Rev.Lett.,56,p.2850.(1986)

計・製作をした²。本実験装置による具体的な成果を列記する。

- 1) タングステン薄膜が超高純度(99.9998%)で、その表面が清浄でかつ高温(およそ1230 K)であればミュオンはタングステン中に拡散し、真空中にミュオニウムとして放出された³。
- 2) 強制的にタングステン中にミュオンを注入した場合、当該ミュオンは正イオンのままでタングステン中を拡散し、その寿命内にタングステン表面に到達したものはミュオニウムとなって極高真空中に100%放出された³。
- 3) タングステン表面が一層以下の酸化膜に覆われると、表面近くのミュオンの平均拡散レートと表面でのミュオニウムの脱離レートが同程度になり、ミュオンまたはミュオニウムの表面からの放出は酸化膜の被覆がない場合と比較して~0.1 マイクロ秒のオーダーで表面からの放出が遅れた³。
- 4) ミュオニウムは、イリジウムの場合もタングステンと類似の挙動を示した³。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

Si からミュオンを出す研究を実施したが、成功しなかった。
一時期クラスターの研究に従事した⁴。

1997年にミュオンの装置を英国ラザフォードに移設した。レニウムについて興味あるデータが出た。論文の準備中に事情により、研究を中断した。

【当該研究分野の発展状況】

1990代ミュオンに関する研究が盛んであったカナダのトライアンフ研究所は最近その研究を縮小中である。

国内では、高エネルギー加速器研究機構・物質科学研究所・ミュオン科学研究施設において、 μ SR(ミュオンスピン回転/緩和/共鳴)、ミュオン移行現象、および μ CF(ミュオン触媒核融合)の3分野で研究を実施している⁵。また理化学研究所は英国ラザフォード・アップルトン研究所内のパルス状ミュオンファシリティ(理研RAL支所)にて、ミュオン触媒核融合、不安定核ミュオン原子、超低速ミュオンビーム創成、および μ SR物性(高温超電導体、有機物質)などの研究を実施している⁶。

² 松下明、さきがけ研究21研究報告書(1996)

³ A.Matshita and K.Nagamine, Chem.Phys.Lett.,259,p.407.(1996)

⁴ A.Terasaki et al, J. Chem. Phys., 114, p.9367-9370. (2001)

⁵ <http://www.kek.jp/activity/index.html>

⁶ <http://www.riken.jp/r-world/research/lab/wako/meson/index.html>

(17) 新井正敏

【さきがけ研究課題】

中性子による物質の動的構造の研究

【さきがけ研究期間】

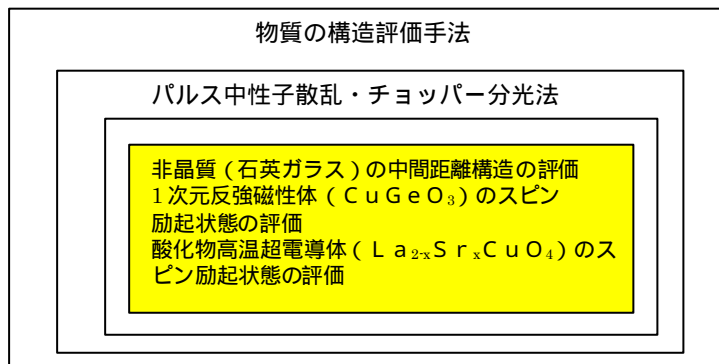
1993年10月～1996年9月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

物質のミクロスコピックな研究手段としては、エックス線回折、電子線回折、中性子散乱などがある。中でも中性子は(1)物質を構成する原子の原子間隔程度(~ 1)の波長を有する(2)物質内部の原子の動きに相当する程度のエネルギーを持つという、2つの特徴をあわせ持っているために、物質の原子配列(空間的情報)と物質内部の原子等の動き(時間的情報)の両者を同時に観測できるという他の手段では出来ない利点を有している。

さきがけ研究では、パルス中性子散乱・チョッパー分光法により、物質の動的構造(=構造+運動)についてのミクロスコピックな情報を広いエネルギー・運動量空間で得、その膨大なデータの処理方法を確立することにより、物質の性質の本質を理解することを目的とした。

【さきがけ分野マップ】



【さきがけ研究前の状況、結果】

高エネルギー物理学研究所で中性子散乱の研究に従事した(1985～1990)、英国ラザフォードでMARI(陽子加速器による中性子発生装置)の建設に携った(1990～1992)。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

1) 非晶質(石英ガラス)

これまで困難であった非晶質の中間距離構造を、格子振動による動的構造の解析により明らかにすることができた¹⁾。

¹⁾ A.Hiramatsu et al., Physica B, 219&220, p.287-289. (1996)

2) 1次元反強磁性体 (CuGeO₃)

量子効果によるスピン励起の全体像を明らかにすることが出来た。観測結果は全体として理論的計算値と一致をしているが、スピン・パイエルズ転移による格子の二重体形成に伴って、特異的な励起現象があることが判明した²。

3) 酸化物高温超電導体 (La_{2-x}Sr_xCuO₄)

酸化物高温超電導体機構に重要と考えられるスピン励起、揺動についてその全体像を明らかにした³。

これらの成果はその後の世界における相次ぐ大型中性子発生装置の建設計画に寄与した。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

中性子散乱による物質の動的構造の研究に従事した^{4,5,6,7}。

後述の J-PARC 計画にも参画中である。

【当該研究分野の発展状況】

米国は 1999 年に、2006 年完成、1800 億円規模の大型中性子発生装置の建設計画 (Spallation Neutron Source 計画, オークリッジ国立研究所) を決定した。

日本では 2001 年、高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所の協力のもと、1500 億円規模の大強度陽子加速器施設を建設する J-PARC 計画がスタートした。加速された陽子は物質・生命科学実験施設、原子核素粒子実験施設、ニュートリノ実験施設、核変換実験施設に運ばれ、そこに設置された標的に衝突することで二次粒子 (中性子、中間子、ニュートリノ) を発生させ、各施設での研究に利用する^{8,9}。

自然科学分野において下記のような中性子の利用が広がりつつある。

*金属の非破壊検査: 中性子残留応力測定法および中性子ラジオグラフィーが利用されている⁸。

*植物の根の生育過程の観察: X 線では水分子を透過するが中性子は透過しないという特長により、中性子ラジオグラフィーで、通常見る事のできない土壌中の生きた根の生育過程が可視化された。肥料開発への応用が期待される¹⁰。

*タンパク質の解析: 水溶性タンパク質の周囲は水で取り巻かれている。いくつかの水分子はタンパク質を構成している酸素、窒素、水素原子と水素結合している (水和水)。中性子散乱によって、水和水の構造や水和水を含めたタンパク質の構造解析が期待される¹⁰。

² M.Arai et al., Phys. Rev. Lett., 77, p.3649-3652. (1996)

³ K.Yamada et al., J. of Phys. Soc. Jpn, 64, p.2742-2745. (1995)

本人談

⁴ M.Arai et al., Phys. Rev. Lett., 83, p.608-611. (1999)

⁵ M.Arai et al., Philosophical Magazine B, 79, p.1733-1739. (1999)

⁶ M.Arai et al., J. of Neutron Research, 8, p.71-83. (1999)

⁷ J.H.Chung et al., Physical Review B, 67, p.014517-1-9. (2003)

⁸ 新井正敏、日本物理学会誌、56(10), p.737-743. (2001)

⁹ <http://j-parc.jp>

¹⁰ 中西友子、波紋、14(1), p.44-45. (2004)

(18) 生島 豊

【さきがけ研究課題】

超臨界流体を利用した化学反応の高度化

【さきがけ研究期間】

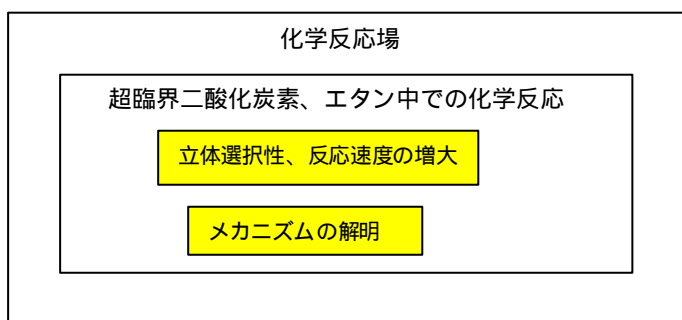
1993年10月～1996年9月

【さきがけ研究の目的、位置づけ】

化学反応の新たな反応場として超臨界流体が利用可能である。超臨界流体の臨界点付近では、わずかな温度、圧力変化によって溶質 - 溶媒、溶媒分子間の相互作用が著しく変化し、溶媒あるいは溶質クラスターが形成される可能性が指摘されている。しかし、どのような因子が化学反応性と強く結びついているか理論的な証明は何らなされていない。

さきがけ研究では、これを解明して、超臨界流体中に形成される反応場を温度、圧力といったマクロな操作で制御することを目指した。具体的には、超臨界流体（二酸化炭素、エタン）中で種々の化学反応を行い、その特異性を検証することにした。さらに分光学的その場（in situ）測定法を新たに開発し、分子レベルでの反応メカニズムの解明を目指した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

1982年から超臨界流体を使用する研究を開始した。超臨界二酸化炭素で魚類からDHAを効率良く抽出する技術を開発した¹。1987年に超臨界流体中の反応メカニズムを解明するために高圧FT-IRを開発した²。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

1) 超臨界二酸化炭素の臨界点近傍でリパーゼ酵素を使用してエステル合成反応を実施

¹ 生島豊ら、化学工学論文集、15(3),p.511.(1989)

² Y. Ikushima et al., J. Phys. Chem., 96, p.2293.(1992)

した。従来の水溶液中では不可能であった立体選択性を発現させた³。

2)超臨界エタン中に分散した直径数 nm の両親媒性ミセル中で、クリスタルバイオレットのアルカリ褪色反応を実施した。有機溶媒中に比較して、反応速度定数が最大 100 倍以上増大することを見出した⁴。

これらの成果は超臨界流体中で高選択的・高速度反応を実現できる可能性を示唆している。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

1998 年英国で、超臨界水中では水の水素結合が消滅することが、中性子散乱によって証明された。この事実に触発されて、超臨界水の挙動を研究し、超臨界水中でのプロトン生成や酸触媒機能発現の可能性を提案した⁵。これを検証するために、シクロヘキサノンオキシムから ϵ -カプロラクタムを無触媒で合成する研究を開始した。収率 3%と低いものの合成に成功した⁶。収率を向上するための研究の中で急速昇温システムを発明し、収率 80%まで向上した⁷。本技術は、現行技術と異なり、硫酸ゼロ（従って、副生硫酸ゼロ）でナイロン原料となる ϵ -カプロラクタムを合成できる画期的なプロセスである。実用化のために、さらに収率向上に向けて研究を継続している。

プロピレンカーボネートの合成法において、極めて毒性の強いホスゲンの代わりに二酸化炭素を使用する基本原理が発見されて以来 50 年にもわたってさまざまな固体（酸）触媒を用いて有機溶媒中、あるいは超臨界二酸化炭素中で検討が重ねられてきた。しかし、最近の国内外の研究結果においても、反応速度の改善は進展がなく、現在も環境面への懸念が大きいホスゲン法にその生産のほとんどを依存している。生島研究者らはホスゲンを用いない新しいプロセスとして「超臨界二酸化炭素 + イミダゾール系イオン性液体」の多相系反応システムを開発した。反応温度 100℃、圧力 14MPa、反応時間 5 分の条件下ではほぼ 100%のプロピレンカーボネート収率を達成した⁸。

【当該研究分野の発展状況】

JOIS のデータベースを用いたキーワード検索では、「超臨界流体 / 化学反応」のキーワードが Title/Abstract に含まれる論文数は 1996 年には 160 件であったのが、2002 年には 594 件になり、当該分野の研究が発展傾向にある様子が伺える。

³ Y. Ikushima et al., J.Phys.Chem.,99,p.8942.(1995)

⁴ Y. Ikushima et al., J. Colloid and Interface Sci., 191, p.177.(1997)

本人談

⁵ Y. Ikushima et al., Angew.Chem.Int.Ed.Engl.,38,p.2910.(1999)

⁶ Y. Ikushima et al., J.Am.Chem.Soc.,122,p.1908.(2000)

⁷ Y. Ikushima et al., Chem.Commun.,p.2208.(2002)

⁸ Y. Ikushima et al., Chem.Commun.,p.896.(2003)

(1 9) 池上栄胤

【さきがけ研究課題】

サイクロトロンメーザー冷却 CMC

【さきがけ研究期間】

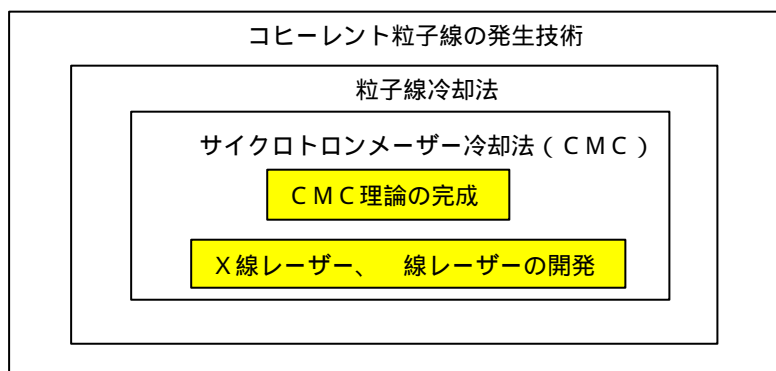
1993 年 10 月～1996 年 9 月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

サイクロトロンメーザー冷却 (CMC) とは荷電粒子線を冷却する (運動量の広がりを小さくする) 新しい手法である。ソレノイド磁界中に荷電粒子を入射させ、旋回運動をさせることで、ランダウ準位にエネルギーを量子化させ、その他のエネルギーを高周波電磁波 (メーザー) 印加による誘導で取り除くというものである。冷却時間が一般的に用いられている Meer 法 (制御工学的粒子線冷却法) よりも 100 万倍早く、到達温度も低い点の特徴である。

さきがけ研究では、第 1 原理から出発した CMC 基本理論を完成させ、CMC 用の装置を開発し、CMC 理論を実験的に証明することを目的とした。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の成果・状況】

1988 年に自由ポジトロニウム放射光の原理を発表した¹。粒子線をコヒーレント化することができる CMC の原理を、1990 年に発表した²。1992 年に CMC 第 1 号機の実験において CMC を示唆する現象を観測した。1993 年、CERN (欧州合同原子核研究機関) 副所長主催の CMC 講演会で発表した所、先述の Meer 法の発明者である、Simon van der Meer³ 氏から反対を受けたが、2、3 の CERN の研究者たちは、Meer 氏の反論には論理性がな

¹ H.Ikegami, Phys.Rev.Lett.,60,p.929.(1988)

² H.Ikegami, Phys.Rev.Lett.,64, p.1737.(1990)

³ 「素粒子 (ウィークボゾン) の発見をもたらしたプロジェクトへの貢献」によりノーベル物理学賞を受賞 (1984 年) その貢献の最も重要な部分は上述の Meer 法である。

いと述べ、池上研究者の研究に賛成した。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

CMC 装置の 2 号機を 1995 年、完成させた。この装置から電子群を抽出して観測した結果、CMC は電子集団がリウビル相から加熱性非リウビル相へ、相転移する過程で起こっている事が実証され⁴、第一原理から出発した CMC 理論が完成した⁴。

CMC 及び自由サイクロトロン放射冷却と強制サイクロトロン放射冷却の全機構を同時に解明する巡回粒子群の冷却に関する一般法則を確立した⁴。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

CMC とは別に、1998 年、コヒーレント粒子線の延長線上で、ポジトロニウム分子の系は量子凝縮系であり、消滅の際、ガンマー線レーザーになることを発見し、この理論を 1999 年に発表した⁵。検証を目的として、走査クラスター顕微鏡を設置した⁶が、事情により実験が中断している。

また、池上研究者は、その後の理論的研究で、溶液中の化学反応における巨視的コヒーレントなダイナミクスが、熔融金属中の核反応レートを 10 桁以上増進させる機構を着想し、2002 年にウプサラ大学でこの現象を確かめた⁷。この現象は、最近では「化学核融合 (chemo-nuclear fusion)」と呼ばれている。

この研究は 2003 年 1 月、日本で、「熔融リチウム中の Li+D 核融合加速」と題して発表された⁸。本研究の追試を国内 2 大学、2 企業が行っている。また、池上研究者は国内 1 社と共同で研究を推進中である。

【当該研究分野の発展状況】

1999 年、CMC 装置 2 号機を活用した 3 号機を住友重機社量子機器開発センターに建設した⁶。同社 CMC グループの解散により、2002 年、当該装置は日本大学物理系佐藤研究室に移管され現在、CMC 理論の実用化に向けた研究が実施されている。なお、CMC 理論が加速器研究者に普及すれば、実用化が促進されるとの見方もある⁹。

化学核融合については、米国 Naval.Res.Inst や Purdue 大学の研究所長らが化学核融合に取り組んでいる¹⁰。

本人談

⁴ H.Ikegami, *Advances in Colloid and Interface Science*, 71-72, p.393-401.(1997)

⁵ H.Ikegami, *Int.J.Quant.Chem.*, 71, p.83-99.(1999)

⁶ JST 独創性モデル化事業

⁷ H.Ikegami, *Jpn. J. Appl. phys.*, 40, p6092-6098.,(2001)

⁸ 池上栄胤、日本学術振興会第 141・第 145 委員会共催特別講演会、2003 年 1 月

⁹ Julich KFA 原子核研究所 Otto Schult 元所長 池上研究者宛書簡

¹⁰ H.Ikegami et al., *International Conference FUSION03, Matsushima*, (2003), *Prog.Theo. Phys.Suppl*,(2004), (in printing)

(2 0) 大野英男

【さきがけ研究課題】

半導体と磁性体を融合する

【さきがけ研究期間】

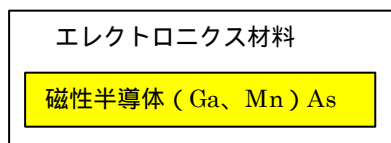
1993 年 10 月 ~ 1996 年 9 月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

現代のエレクトロニクスを支える材料は半導体と磁性体である。エレクトロニクスに使われている半導体は非磁性体であって磁性体とは構成元素や結晶構造が異なる。そのため半導体と磁性体は別のものであり取り扱われ発展してきた。

さきがけ研究では半導体と磁性体を融合したとき、すなわち電子デバイス、光デバイス、磁気デバイスが融合した新しいデバイスおよび新しい工学(半導体スピン工学)において、どのような新しい視野が開けるかを明らかにするため新しい材料の創製を目指した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究開始前の状況、成果】

磁性半導体 (In,Mn) As の試作に成功した¹。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

分子線エピタキシにより - 族ベースの磁性半導体 (Ga, Mn) As の創製に成功した²。最大 Mn 濃度 0.07、面内に磁性容易軸を持つ強磁性体であった。最高キュリー温度は 109K であった。さらに強磁性秩序を示す (Ga, Mn)As/GaAs 超格子の成長に成功した³。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

さきがけ研究を進展させ、スピン制御された半導体超構造の電子物性と応用及び半導体超構造における電子のスピンコヒーレンスとその制御について研究を行った⁴。また磁性体/半導体、絶縁体/半導体、金属/半導体を融合した新規材料の創生に取り組んだ。非平衡表面層における原子ダイナミクスの評価と制御、非平衡成長マテリアルデザインについても

¹ H. Ohno et al., Phys. Rev. Lett., 68(17), p.2664-2667. (1989)

² H. Ohno et al., Appl. Phys. Lett., 69(3), p.363-365. (1996)

³ H. Ohno et al., Physica E, 2(1-4), p.904-908. (1998)

⁴ 文部省特定領域研究、1997 年 4 月 ~ 2003 年 3 月

研究を行った⁵。

これまでの成果は以下の通り。(Ga,Mn)As 強磁性半導体の電氣的・磁氣的性質が、Zener モデルで記述できることを発表した⁶。強磁性半導体(In,Mn)As をチャネル層とする電界効果トランジスタ(FET)を形成し、電界印加によってキャリア密度を変化させることにより、残留磁化、強磁性転移温度、保磁力など磁性を制御できることを実証した⁷。

超高密度記憶デバイスに応用できる、強磁性半導体の磁化反転方法を発表した⁸。光デバイスへの展開では、(Ga,Mn)As 強磁性半導体で発光素子を作り、向きの揃ったスピンを注入し輸送する事を実証した。発光素子からの放出光の偏光を測定すると、スピンの向きに従って右向き左向きの円偏光を示し、スピンの向きが揃っていることが確認できた⁹。

実用化に向けて技術的課題を解決するため現状室温以下であるキュリー温度を室温まで高めた強磁性半導体材料の創生や半導体材料や半導体と整合性のよい完全スピン偏極材料の創生を目指している¹⁰。

上述の半導体系スピントロニクス以外でも、金属系のスピントロニクス分野である、TMR (トンネル磁気抵抗)¹¹をベースとした新しい磁気記憶デバイスの開発にも従事している¹²。

【当該研究分野の発展状況】

米国では、DARPA (国防先端研究促進機構) の「SPINTRONICS and SPINS」プロジェクト(2000~2005)が組織され、75 億円/5 年の資金を投じて、スピンレーザ・トランジスタの開発、量子計算の実用化を目指している。EU でも、FENIKS/Spinosa プロジェクト(2001~2006)が組織されて、強磁性半導体、半導体スピンの研究を実施している。

なお、金属系のスピントロニクス分野でも、米国でDARPAのMRAM(Magnetic Random Access Memory)プロジェクト、ドイツで工業省プロジェクトが組織されている。

⁵ 日本学術振興会未来開拓推進事業、1997年4月~2002年4月

⁶ T.Dietl et al., Science, 287, p.1019-1022. (2000)

⁷ H.Ohno et al., Nature, 408(6815),p.944-946. (2000)

⁸ D.Chiba et al., Science, 301, p.943-945. (2003)

⁹ Y.Ohno et al., Nature, 402, p.790-792. (1999)

¹⁰ JST-ERATO 2002年11月~2007年10月

¹¹ T.Miyazaki and N.Tezuka J. Magn. Magn. Mater., 139, p.L135. (1995)

¹² 文部科学省メモリプロジェクト RR2002

(2 1) 瀬戸孝俊

【さきがけ研究課題】

電気で制御するガス分離

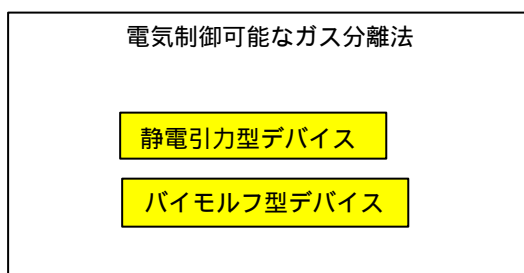
【さきがけ研究期間】

1993年10月～1996年9月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

強誘電体を用いて10nm以下の極小の隙間を作製し、この隙間の間隔を電気で制御して、ガス分離をしたり、触媒反応を制御するためのデバイスの作製を目指した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

企業の研究所にて触媒の研究に従事した。

強誘電体は電場により肉眼で見えないほど微妙に伸縮する物質である。そのためまったく動かない固体と強誘電体との界面には電場により10nm以下の極小の隙間を作ることができる。この隙間を分子が通ったり、隙間で反応させたりすると、外部の電気で制御可能な物質分離や触媒反応が可能になるだろうと予想した。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

1) 静電引力型デバイス

強誘電体平面とステンレス平面とを重ね合わせてその隙間に金属を蒸着させ、それにより均一な隙間を作る。両固体間に電場を印加することによって、隙間の距離を変化させる新規デバイスを作成した。

H₂, He, N₂ および CH₄ 等の軽く小さな分子の単位圧力あたりの透過速度は、圧力に対しほぼ一定であり、Knudsen 拡散であった。電圧400V下でもKnudsen型が維持された。プロパンとn-ブタン等の少し大きな分子の透過速度は圧力の増加と共に直線的に増加した。電圧400V下で圧力依存性が消失した。透過機構は、電圧の増加と共にPoiseuilleと

Knudsen の混合拡散から Knudsen 拡散のみへと変化した。これにより電気による透過機構のスイッチングが示された¹。

2) バイモルフ型デバイス

分極が逆向きの強誘電体を 2 枚張り合わせたバイモルフを使用して、Al 金属蒸着法で固・固界面を作製した。電場印加によるバイモルフの微小な反りにより、Al 蒸着膜とバイモルフ強誘電体との間に 10nm 以下の微小間隙を作るデバイスを作製した。比較的小さな分子である H₂ と CO₂ の混合ガスを導入すると、その分離係数が Knudsen 理論比 4.7 を超え、6~7 であった。この結果は分子の大きさによる分離の可能性を示している²。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

終了後、さきがけ研究テーマから離れた。引き続き、構造と機能に関する研究に従事している。1996~2001 年に、XAFS (X 線吸収微細構造) による材料の構造と機能に関する研究を、2001 年より構造からみた光機能性材料に関する研究をした。さきがけ研究に見出した高分子表面の外部電場によるモルフォロジー変化の研究は、Wenzel と Shew に影響を与え、高分子の外部電場によるコンフォーメーション変化の一般理論へと発展した³。

¹ T.Seto, Appl. Phys. Lett., 67 ,p.1786. (1995)

² T.Seto, Chem. Lett., 1997, p.557, (1997)

³ R. Wenzel and C.-Y. Shew, J. Chem. Phys., 114, p.4717 (2001)

(2 2) 早川和延

【さきがけ研究課題】

表面の電子スピンを計測する

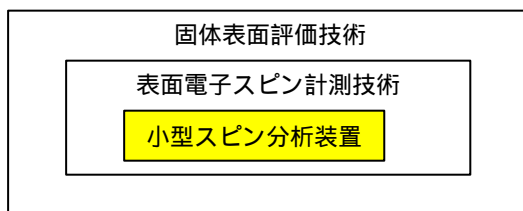
【さきがけ研究期間】

1993年10月～1996年9月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

電子は 質量 電荷 スピンという電子に固有な 3 つの値を有する。強磁性試料に電子線を照射すると、照射部位の電子がそのスピン磁気モーメントを保ったまま二次電子として放出される。この二次電子の偏極ベクトルを検出することで電子線照射部位の磁化方向を知ることができる。さきがけ研究では、固体表面の電子スピンを直接計測する基盤技術を開発し、その応用分野を切り拓くことを目指した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

固体表面の結晶解析、および固体表面の電子スピン計測の研究に従事した。表面電子スピンマイクロアナライザを開発した¹。電子スピンを信号媒体とする表面磁区観察法を開発した¹。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

- 1) 世界最小でかつ1原子層の分解能を持つ電子スピン分析装置を開発した²。
 - 2) 反射高速電子回折の「表面波共鳴」条件下で電子スピンを計測した³。
- 表面第一原子層の電子スピン計測の糸口を得ることができた。

¹ K.Koike et al., Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, 24(8) p.1078-1081. (1985)

² K.Hayakawa et al., Annu. Rep. Catal. Res. Cent. Hokkaido Univ., NO.8, p.6-7. (1997)

³ K.Hayakawa et al. Adv. Colloid Interface Sci., 71/72, p.337-351. (1997)

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

ニッケル単結晶成長平坦表面のスピ分布分析と結晶解析に成功した。

第一原子層のスピ分布の計測の研究に従事した。反射高速電子回折で励起した2次電子のスピ計測を目指して、RHEEDパターンにより試料表面の結晶構造を観察し、同時に同照射領域から放出する2次電子のスピ偏極度を測定するMott分析器とRHEED装置の複合システムを開発し、その性能を評価した。この複合システムは2次電子スピ計測が可能でありかつ表面近傍の磁化状態を知る有効な分析手段であることを確認した。今後は試料表面の準備法、温度測定の精度を改良して表面第1原子層の電子スピ計測を行う⁴。本さきがけ研究で開発した電子線プローブスピ計測装置は山梨大学工学部の居島薫氏に移管した(2003年11月)。また同大学同学科所属の鳥養(原子スピ)、堀(ナノオプティクスと光スピ)研究室との共同研究も企画している。

【当該研究分野の発展状況】

スピ計測は早川らが1984年に世界に先がけて開発した⁵スピSEMによって研究が進められている。この手法は試料形状に制約がないことや、スピ偏極ベクトル方向の定量検出ができることなど優れた特長を有している。

スピ計測の分野について、上記から分岐した研究でも進展が見られ、分解能が1994年には20nm以下になり⁶、2001年には5nmになったという報告がある⁷。

本人談

⁴ 居島薫ら、真空、42(5)、p.557-564。(1999)

⁵ K.Koike and K.Hayakawa, Jpn. J. Appl. Phys., 23, p.L187.,(1984)

⁶ H.Matsuyama and K.Koike, J. Electron Microsc., 43,p.157。(1994)

⁷ T.Kohashi and K.Koike, Jpn. J. Appl. Phys., 40, p.L1264。(2001)

(2 3) 山田廣成

【さきがけ研究課題】

PhSR (フォトン・ストレージ・リング) 発振機構の基礎研究

【さきがけ研究期間】

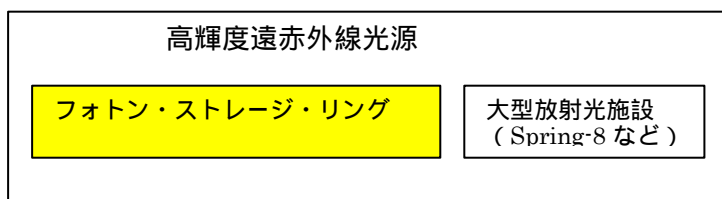
1993 年 10 月 ~ 1996 年 9 月

【さきがけ研究の目的・位置づけ】

すべての光の中で遠赤外線は未開の分野が最も多く残されている。その原因は大強度の遠赤外線光源が開発されていないことにある。現状の放射光装置の遠赤外出力は μW 、自由電子レーザーの出力は高々数 mW である。

さきがけ研究ではフォトン・ストレージ・リング実現のための基盤となる諸テーマ即ち、理論の深化、低エネルギー電子蓄積リングの制御方法の確立、X線発生方法の確立、小型フォトン・ストレージ・リングの最適化設計、要素開発、出力特性の検討、利用方法の検討などを目指した。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・成果】

1989 年に光蓄積リング (フォトン・ストレージ・リング = PhSR) と名付けた新しいタイプの自由電子レーザーの原理を発明した¹。PhSR は電子蓄積リングでの強制誘導放出によって発生した放射光をミラ - で集めて外に取り出す構成になっている。相対論的電子から光を強制誘導放出させるという点で自由電子レーザーと言えるが、周期磁場を全く用いないという点で自由電子レーザーとは異なるために光蓄積リングと命名した。

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

1) 光蓄積リングの設計を完了して、実機の建設を開始した。

PhSR のための常伝導磁石は櫛型磁極を採用し、シミュレ - ションで理想磁場の発生を確認した²。2/3 共鳴入射をシミュレ - ションで実施した結果、90%の入射効率があること

¹ H.Yamada, Jap. J. Appl. Phys., 28, p.L1665-L1668. (1989)

² H.Yamada et al., Proc. 10th Symp. on Accl. Science and Tech., Oct 25-27 Hitachinaka Japan. (1995)

を確認した³。円筒光共振器に関しては、モード解析プログラムを開発してバレル型のミラ - 形状を最適化することができた⁴。高周波加速のための 2.45GHz 加速空洞を試作し、所定のモードの発生を確認し、パワーの投入に成功した⁵。

2) コヒーレント放射光が関与する新しいレーザー増幅機構を発見した³。

3) レーザーとベータトロン振動の共鳴を用いた新しいビームバンチング法を発明した³。

4) 偏光磁石部分で逆コンプトン散乱実験を実施し、非常にバンド幅の狭いハード X 線スペクトルを観測した³。

5) 電子軌道に微細ターゲットを挿入する高輝度ハード X 線を提唱し、超低エネルギー電子で Spring-8 に匹敵するハード X 線の発生が可能であることを理論的に証明した⁶。

6) 遠赤外線を用いて化学反応を制御する新しい研究分野を提唱した⁵。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

2001 年、光蓄積リングのための世界最小卓上型シンクロトロン“みらくる 20”(軌道半径 15 cm、外径 1.5m) の開発に成功した^{7,8}。SPring-8 と比較して、10~100 倍の遠赤外線強度を実現し、選択的遠赤外線励起により生命反応や化学反応を制御する研究⁵を推進している^{10,11}。2003 年、上記 5) にもとづく X 線専用マシンで、さらに小型の(外径 0.6m) “みらくる 6X”を開発した^{9,10}。放射光発生点の大きさが、数ミクロンと SPring-8 の 1/10 で、軟 X 線からハード X 線まで発生でき、輝度が高いという意味で、最高品質の X 線ビームが実現した。みらくる 6X では、10 倍までの鮮明な拡大イメージを撮ることができ、成鶏を造影剤なしで、0.5 秒間で撮像して、臓器から羽や肺胞まで観察することができた^{10,11}。タンパク質構造解析、X 線顕微鏡、医用診断・治療、非破壊検査などへの応用を目指した研究を実施している。物理学、化学、生物学、医学共同のプロジェクトが活動中である^{11,12}。

【当該研究分野の発展状況】

卓上放射光発生装置であることと、最高品質の X 線を発生しているという点で世界で唯一であり、該当する技術はない。(株)光子発生技術研究所を設立し¹³、市場開拓に努めている。

³ さきがけ研究 21 研究報告会 構造と機能物性講演要旨集(1996)

⁴ A.I.Kleev et al., Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A358 p.362. (1995)

⁵ H.Yamada, Adv.Colloid and Interface Sci. 71-72, p.371-392 (1997)

⁶ H.Yamada, Jpn. J. Appl. Phys., 35, p.L182-L185. (1996)

⁷ H. Yamada, J. Synchrotron Rad. 5, p.1326-1331 (1998)

⁸ H. Yamada., Nucl.Instrum. Methods in Phys. Res. B199, p.509-516.(2003)

⁹ 山田廣成、21 世紀 COE 拠点形成プログラム、立命館大学・放射光生命科学研究センター - 研究成果報告書 (2002.10-2003.12)

¹⁰ ed. by H. Yamada, Proc. of International Symposium on Portable Synchrotron Light Sources and Advanced Applications, AIP Press, (2004)

¹¹ 21 世紀 COE 拠点形成プログラム、立命館大学・放射光生命科学研究センター -

¹² 山田廣成、ポータブルシンクロトロンで開ける新しい放射光利用、放射線と産業、102 号、pp.18-29.(2004)

¹³ <http://www.photon-production.co.jp>

(2 4) Gerhard Fasol

【さきがけ研究課題】

スピン・エレクトロニクス

【さきがけ研究期間】

1993 年 10 月 ~ 1996 年 9 月

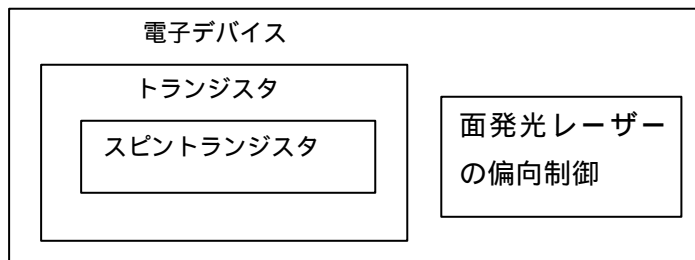
【さきがけ研究の目的・位置づけ】

従来の電子装置（VLSI、レーザー等）はその信号処理に際して電荷あるいは電子密度等の性質を利用している。一方、電子にはその他に電子スピンという性質もあり磁気モーメントを生じさせる。

さきがけ研究では、電子スピンを利用した新しい概念のデバイス誕生の可能性を探ることを目的とし、具体的なテーマとして

- 1) スピン・トランジスタ・デバイスの開発
- 2) 表面発光レーザーから出る偏向の制御
- 3) 新しい光 - 磁気ストレージに応用する、磁気 - 半導体 - 磁気 超格子の調査
- 4) 電子スピン・デバイスの設計と実験データ解釈のためのシミュレーション方法の開発を取り上げた。

【研究分野マップ】



【さきがけ研究前の状況・結果】

1982 年より半導体光デバイス開発のための分光学的研究に従事した¹。

1992 年より来日し、量子波制御技術、新規物性・機能の創出に関するプロジェクトに参加した²。

¹ G.Fasol and H.P.Hughes, Physy. Rev. B, 33, p.2953. (1986)

² 新技術事業団量子波プロジェクト

【さきがけ研究期間中の状況・成果】

- 1) スピントランジスタを設計し、製作方法を開発した³。
- 2) スピントランジスタ構造の研究中に、極微磁気細線（直径 20nm）の制作方法を発明した⁴。
- 3) 電子スピンを利用して表面発光レーザーの偏向制御方法を開発した⁵。
- 4) 磁場における電子の量子輸送をモデル化するシミュレーション方法を開発した⁶。

【さきがけ研究終了後の状況・成果】

企業(株)ユーロ・テクノロジー⁶を設立したため研究は実施されていない。

【当該研究分野の発展状況】

1)電界効果スピントランジスタについて⁷

スピン偏極電界効果トランジスタ(スピン FET)のデバイス原理としてユニークな点は、スピン軌道相互作用によって二次元電子ガス中に注入されたスピン偏極した電子の向きを回転させる、というところにある。スピン FET のデバイスとしての可能性は、強磁性体電極から半導体チャネルへのスピン注入効率にかかっている。

2)スピントランジスタについて⁸

スピン(バルブ)トランジスタはオランダ、トエンテ大学の Monsma らによって提案された。高密度磁気記録デバイスとしては、すでに巨大磁気抵抗効果素子(GMR 素子)が実用化されている。また、トンネル磁気抵抗効果素子(TMR 素子)は次世代の不揮発メモリとして期待されている。このスピン(バルブ)トランジスタはこれらの二端子型磁気抵抗効果素子に比べて、外部磁場の変化による出力の変化率が1桁以上大きいという特長を有している。実用化には現状の素子特性の向上が要請されている。実現すれば、数百 G ビット/in²の超高密度磁気記録が可能である。

³ G.Fasol and H.Sasaki, Jap. J. Appl. Phys. , 33, p.879-886. (1994)

⁴ G.Fasol and K.Runge, Appl. Phys. Lett., 70, p.2467-2468. (1997)

⁵ G.Fasol さきがけ研究研究報告会 構造と物性講演要旨集(1996)

⁶ <http://www.eurotechnology.com/>

⁷ 新田淳作、応用物理、70(3), p.296-299. (2001)

⁸ 東芝レビュー、58(6), p.64-65. (2003)

4.2 統計資料

実際のさきがけ研究期間は、第1期生(12名)：1992年1月～1994年12月、第2期生(4名)：1992年10月～1995年9月、第3期生(8名)：1993年10月～1996年9月である(JST資料による)が、便宜上、2、3期生についても暦年(1-12月)で集計した。

表 4.2 さきがけ研究の調査対象期間

	1期生	2期生	3期生
さきがけ前(5年間)	1987 - 1991年	1988 - 1992年	1989 - 1993年
さきがけ中(3年間)	1992 - 1994年	1993 - 1995年	1994 - 1996年
さきがけ後(2003年まで)	1995 - 2003年	1996 - 2003年	1997 - 2003年
対象者数	12名	4名	8名

4.2.1 論文数の推移

論文は原著論文に限定し、総説や著書は含めなかった。ほとんどが、英文の論文であるが、邦文の原著論文がある場合はその数も集計に加えた。

さきがけ研究開始5年前から、2003年までの総論文数は、研究者によって異なるが、0報から20報の研究者が7名で最も多く、100報以上の研究者は6名、最高は196報であった。

領域全体の合計論文数は1537報であり、さきがけ前(5年間)では338報、さきがけ中(3年間)では316報、さきがけ終了後2003年末まで(1期生は9年間、2期生は8年間、3期生は7年間)では883報であった。

図 4.2.1 は1人当たりの年平均論文数(n)の区別研究者数の推移である。

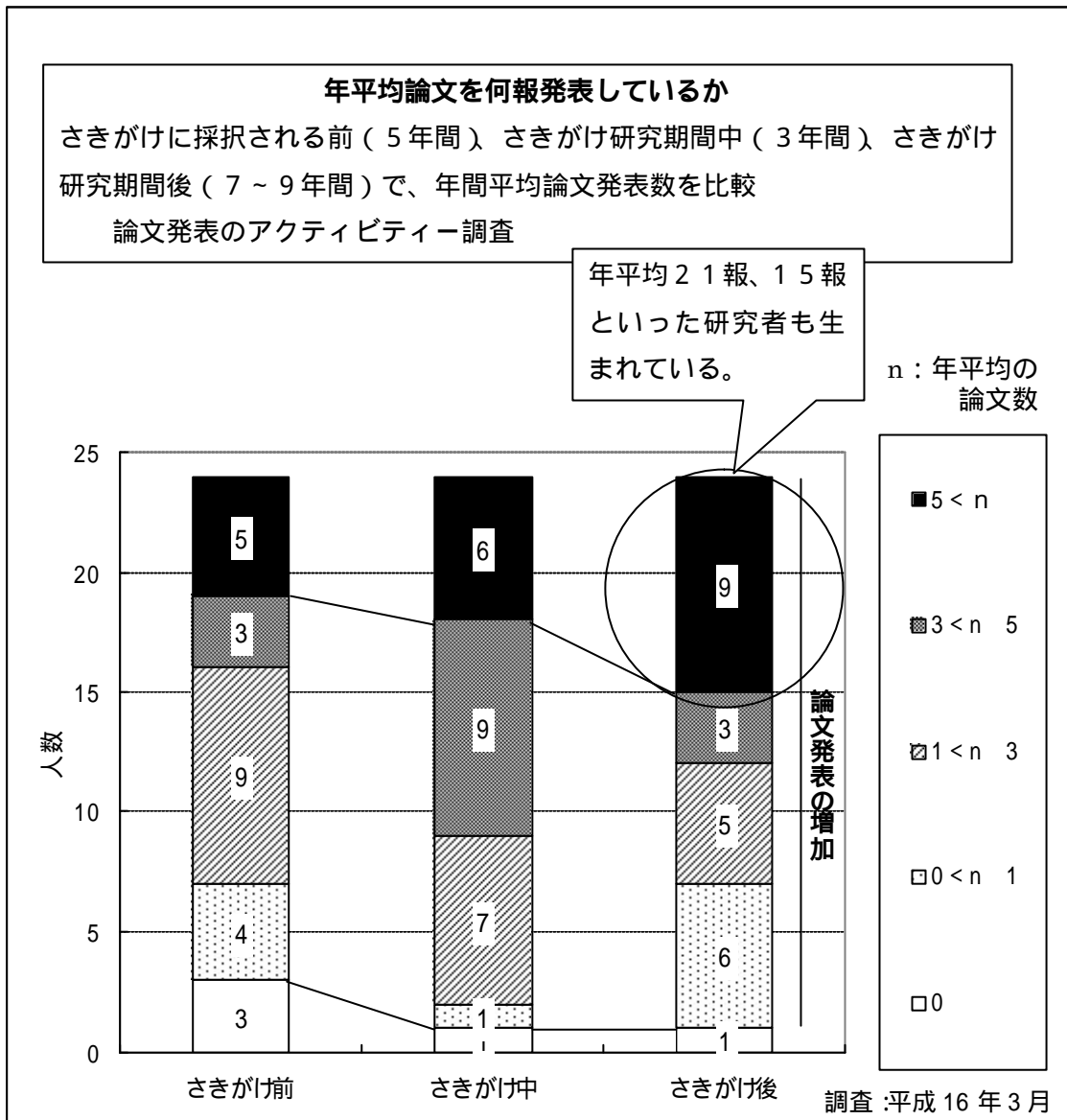


図 4.2.1 年平均論文数の分布

さきがけ後、年平均5報以上発表する研究者が増加している。

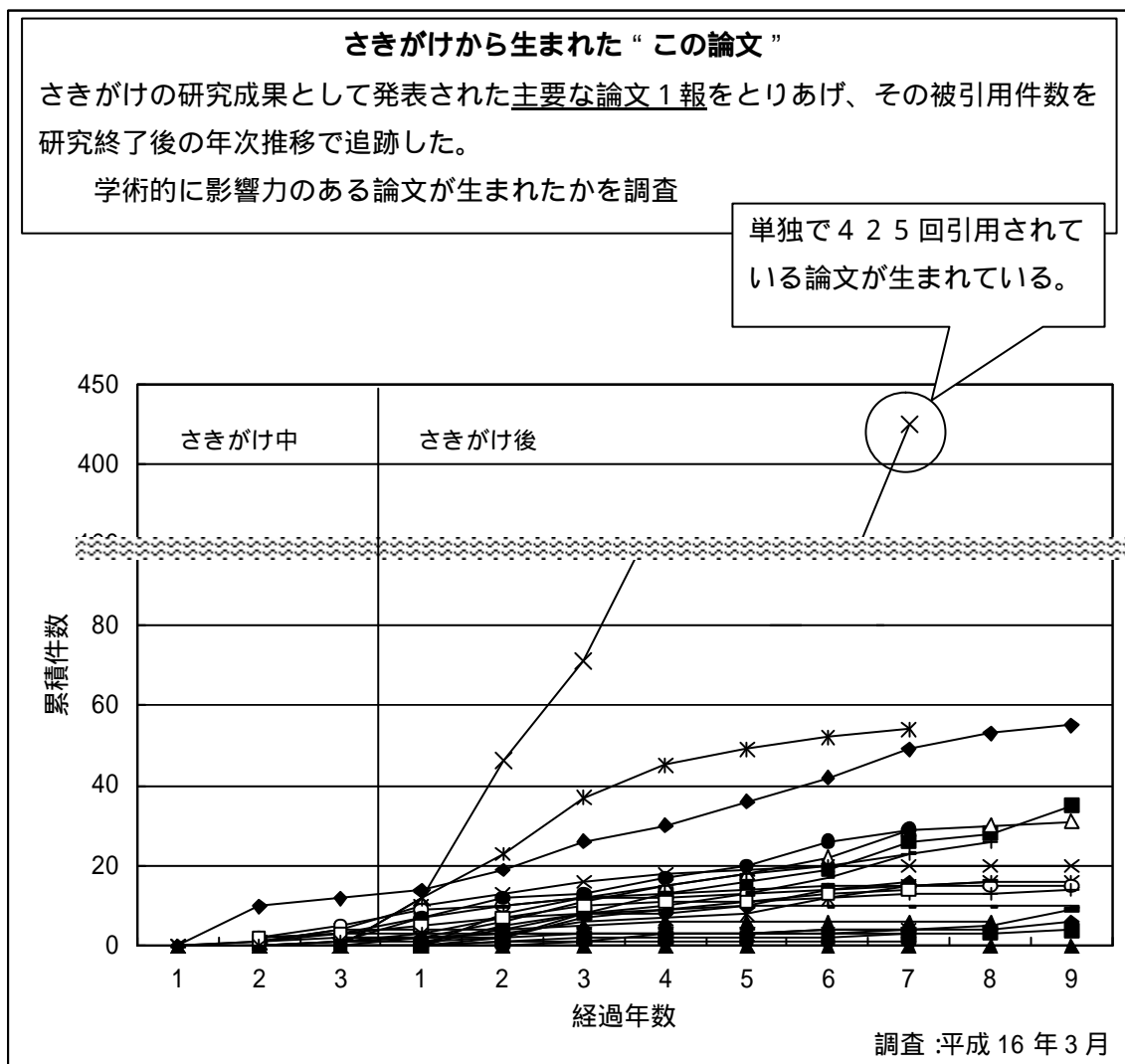
さきがけ研究の場合、まさに「先駆け」的なために、独創的な論文でも学会で認められず、審査で却下される場合がある。ある研究者の場合、外国の権威ある雑誌に投稿した2報は拒絶され、同一論文が日本の雑誌で受理された。また、別の研究者の論文では、日本の雑誌では審査は通らなかったが、外国の権威ある雑誌に掲載された。このように外的要因により研究成果が論文に結びつかない場合もあり、結果として論文数が少なくなっている場合もある。

4.2.2 主要成果論文の被引用件数の推移

各研究者のさきがけ研究関連の主要成果論文(さきがけ期間プラス1年間に発表された論文のうち最も被引用件数の多い論文)を1報選び出し、その累積被引用件数の年次推移を調べた。被引用件数は2003年12月時点でのSciSearchのデータベースを用いて調査した。

図4.2.2は主要成果論文(各研究者1報)の累積被引用件数を、さきがけ研究終了後の年数でプロットしたものである。

図 4.2.2 主要成果論文の累積被引用件数



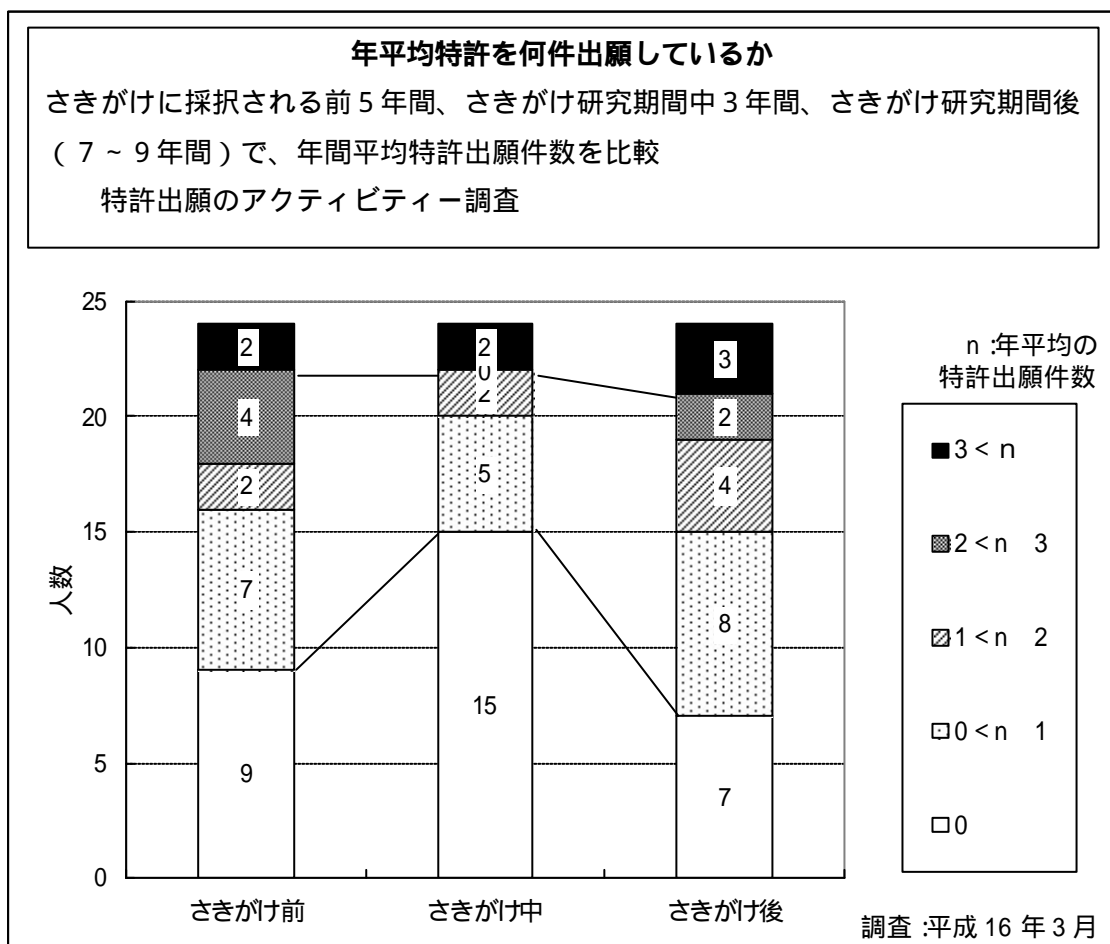
研究者 24 名のうち、上記 4 年間に論文の発表がなかった 1 名は調査対象から外した。このうち 1 名の研究者の論文の被引用件数が飛びぬけて多く 425 件であった。内容的に独創性が高いものの被引用回数は少ない論文もあったことから、被引用件数で論文の独創性を調べるには、さらに長期間にわたって調べる必要がある。

4.2.3 特許出願件数の推移

図 4.2.3 は 1 人当たりの年平均特許出願件数(n)の区分別研究者数の推移である。

特許件数の調査は、特許庁のデータベース¹、JST の特許データベース、および研究者本人からの申告をもとにして実施した。特許出願件数は、発明の内容が同一の場合においても、日本出願、外国出願、PCT 出願（国際出願）を各国 1 件として計算した。

図 4.2.3 年平均特許出願件数の分布



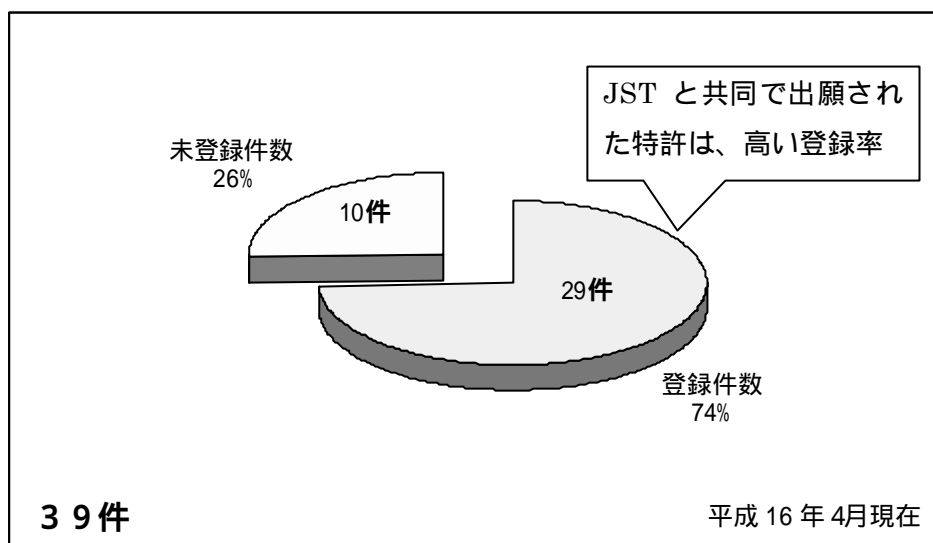
¹ <http://www.ipdl.jpo.go.jp/homepg.ipdl>

合計 416 件の特許出願の内訳は、さきがけ前(5 年間)120 件、さきがけ中(3 年間)48 件、さきがけ後 (7~9 年間) 248 件であった。さきがけ研究は基礎研究にもかかわらず、JST が出願人であるさきがけ関連の特許が 39 件出願されていた。これは JST から特許出願の奨励活動、出願時の支援があったことも関連している。

4.2.4 特許成立の割合と特許の利用状況

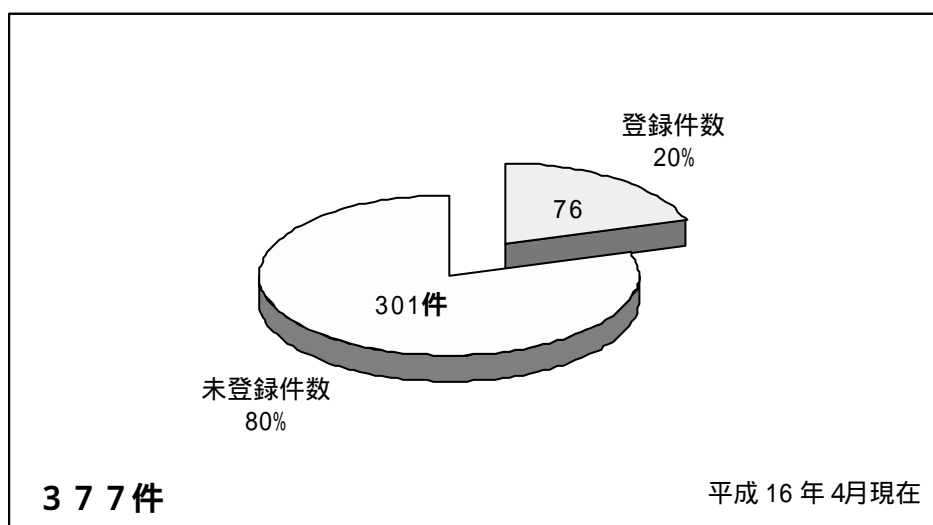
図 4.2.4-1、図 4.2.4-2、および図 4.2.4-3 はさがけ研究者が行った特許出願のうち、現在までに登録されたものと未登録のものの件数の割合を示したものである。図 4.2.4-1 は JST 名義で出願したもの、図 4.2.4-2 は JST 名義でないもの（多くは、さがけ研究期間前、もしくは後に出願したもの）、図 4.2.4-3 は全出願についてまとめたものである。

図 4.2.4-1 さがけ研究者の特許出願・登録状況（JST 単独出願・JST と共願）



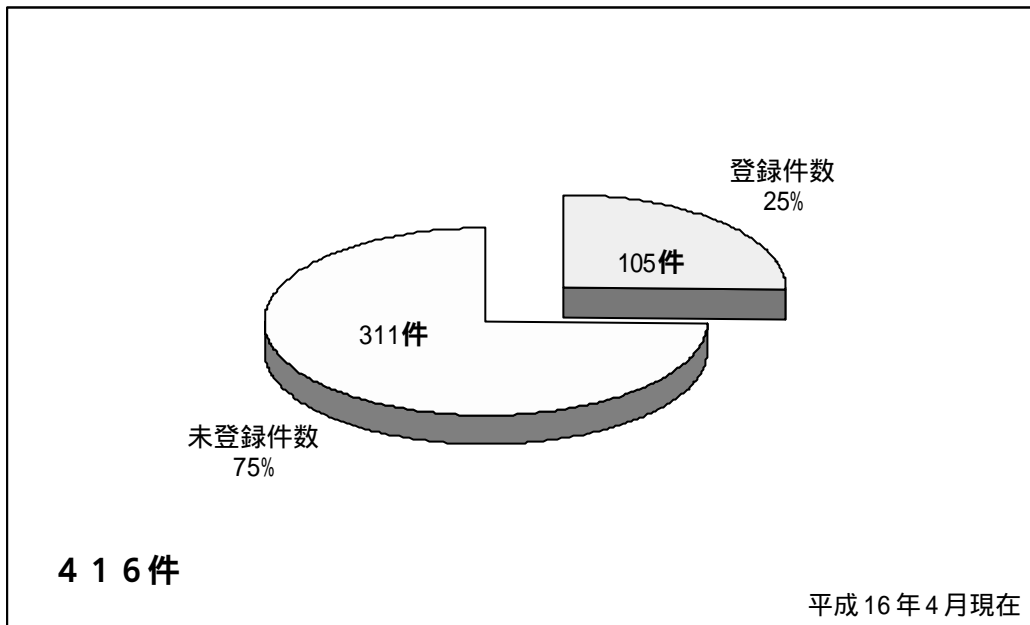
JST が出願人である、さがけ関連の特許件数は 39 件あるが、その内 29 件が特許登録されており、特許化率は 74%であった。

図 4.2.4-2 さがけ研究者の特許出願・登録状況（JST と共願でないもの）



JST が出願人に含まれていない特許件数は 377 件あるが、その内特許登録されているのは 76 件で、特許化率は 20%であった。

図 4.2.4-3 さきがけ研究者の特許出願・登録状況（全て）



全特許出願件数 416 件の内、現在までに特許登録されている件数は 105 件で、全体の特許化率は 25%であった。未登録の特許件数 311 件の内訳は、さきがけ前 84 件と、さきがけ中 45 件、さきがけ後 182 件であり、さきがけ後のものについては、出願後の経過年数が短いために特許化される率が低く出ている可能性がある。しかし、その点を考慮しても JST が出願人となっている特許については登録率が高い傾向にあるといえる。

4.2.5 グラント獲得金額の推移

図 4.2.5-1 は 1 人当たりの年平均グラント獲得金額(n) (単位：百万円) の推移である。なお、さきがけ研究の研究資金は、さきがけ期間中の 3 年間については、研究者から申告がない場合にも毎年 10 百万円ずつ均等に割り振った。なお、獲得グラントに関しては、公開されたデータベースは存在しないため、この調査は参加研究者の自己申告により行っている。

図 4.2.5-1 年平均グラント獲得金額の分布（研究者の自己申告による）

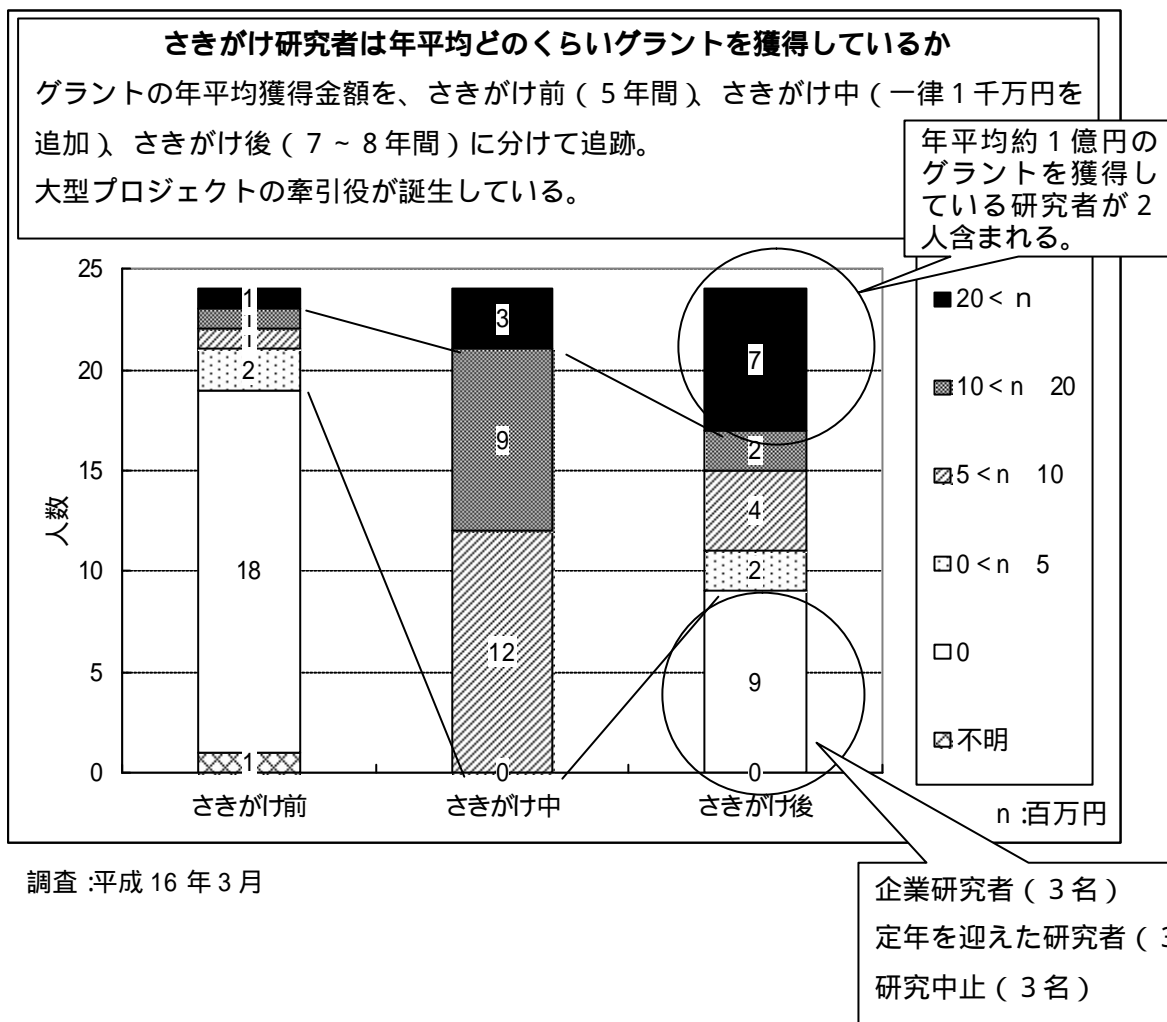


図 4.2.5-2 および図 4.2.5-3 は、獲得したグラントのうち、総額が最大のものについて、金額別の研究者の割合をさきがけ前とさきがけ後に分けて調べた結果を示している。大型グラントは3年又は5年等の複数年にまたがるものがほとんどであった。さきがけ前は、1件10百万円以上、30百万円以上、50百万円以上および100百万円以上の大型グラント獲得者数は各々、0名、1名(4%)、1名(4%)、1名(4%)であったが、さきがけ後は各々、4名(17%)、3名(13%)、2名(8%)、6名(25%)に増えていた。

図 4.2.5-2 グラントの獲得状況（さきがけ研究前）

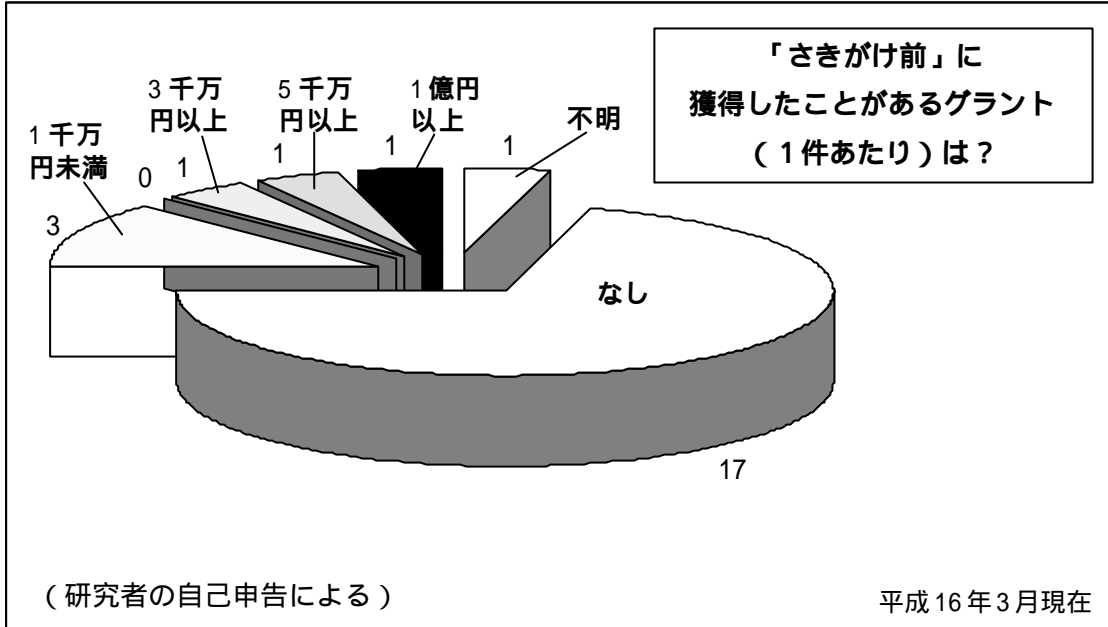
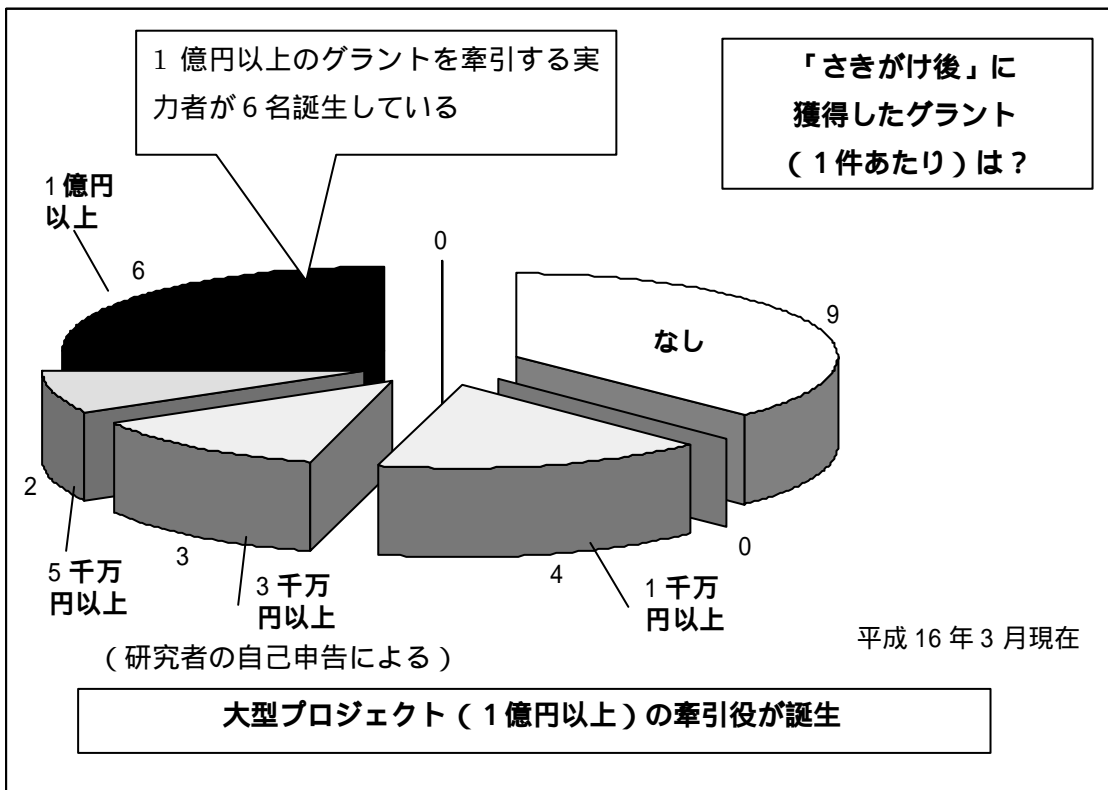


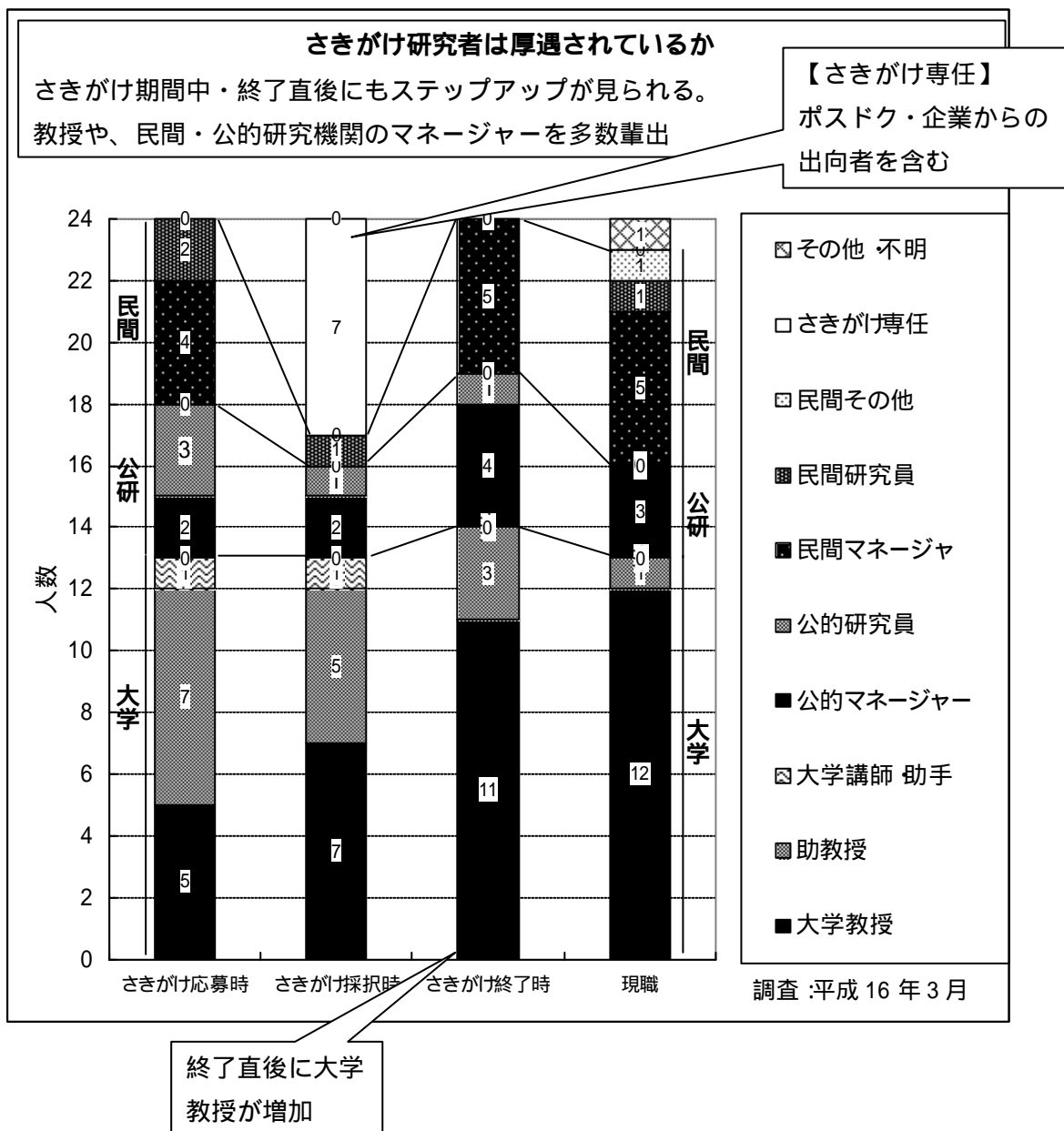
図 4.2.5-3 大型グラントの獲得の有無（さきがけ研究後）



4.2.6 役職の年次推移

図 4.2.6-1 は研究者の職位の推移を示している。さがけ応募時、さがけ採択時、さがけ終了時の所属・職位は JST の資料を研究者のアンケート結果と照らし合わせて適宜修正した。現職は研究者のアンケート結果に記載された役職を用いた。

図 4.2.6-1 職位の推移

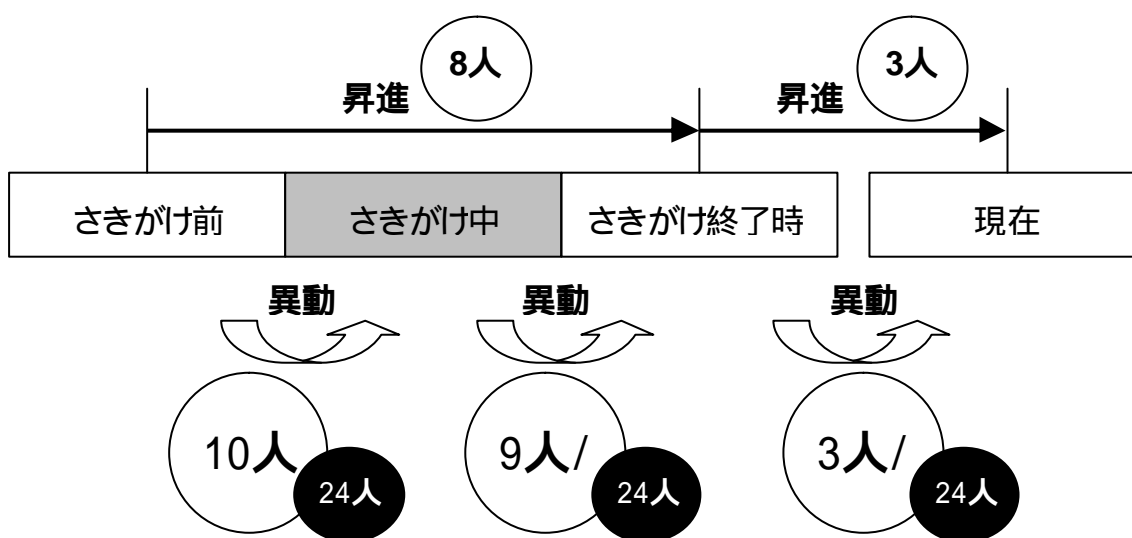


さきがけ期間中は、専任者が7名、兼任者が17名であり、さきがけ専任比率は29%であった。なお、現職7名のうち2名は研究活動を中止している。

大学では、応募時は教授5名、助教授7名、講師1名であったが、現職は教授が12名に増加していた。公的研究機関では、応募時はマネージャー2名、研究員3名であったが、現職ではマネージャーが3名に増加していた。民間では、応募時はマネージャー4名、研究員2名であったが、現職ではマネージャーが5名に増加し、研究員1名、その他1名であった。

図4.2.6-2は、さきがけ研究期間前、中、終了時、及び現在の職位から、研究者の異動と昇進の数を調査したものである。さきがけ研究期間を挟んで、昇進している研究者が多い(常勤の職位でより高位の職位を得た、もしくは非常勤の職位から常勤の職位を得た研究者を昇進とした)。また、さきがけ研究終了時に所属を異動する研究者も多い(ただし、さきがけ専任者7名を含む)。

図 4.2.6-2 研究者の異動と昇進



4.2.7 受賞

表 4.2.7-1、表 4.2.7-2、表 4.2.7-3 は研究者の受賞リストである。全部で 25 件の受賞があった。

表 4.2.7-1 さきがけ以前の受賞

番号	賞の名称	受賞年
1	真空技術賞	1988
2	日本 IBM 科学賞	1988
3	科学技術長官賞	1989
4	ホンダ記念研究奨励賞	1989
5	科学技術長官注目発明選定	1989
6	ウプサラ大学名誉哲学博士	1990
7	注目発明賞	1991

表 4.2.7-2 さきがけ中の受賞

番号	賞の名称	受賞年
8	早稲田大学大隈学術記念賞	1993
9	住友財団研究助成賞	1994
10	Performance Awards,ISTEC and MRS	1995
11	工業技術院賞	1995
12	日経サイエンス Computer Visualization Contest 優秀賞	1995

表 4.2.7-3 さきがけ以後の受賞

番号	賞の名称	受賞年
13	科学技術長官賞	1996
14	日本女性科学者の会奨励賞	1997
15	三菱財団研究助成賞	1997
16	日本 IBM 科学賞	1998
17	勳三等瑞宝賞	1999
18	電気自動車論文賞	2000
19	藤野研究賞	2000
20	Visiting Professor Award of Canon Foundation Europe	2000
21	日本化学会学術賞	2000
22	日本 IBM 科学賞	2000
23	科学技術長官賞	2000
24	ナノプロ - プテクノロジー - 賞	2001
25	IUPAP Magnetism Prize	2003

4.2.8 その他研究活動

特記事項なし。

4.3 参加研究者からのコメント

4.3.1 さきがけ研究に対する感想

- 領域総括の「目先の成果でなく自分が興味を持つものを追及せよ」という方針が良かった。
- 研究とは何かを教わった。企業の研究者としては目からうろこだった。
- 専門、所属、年齢、性別、実績を問わないのが良かった。
- 特に実績が無くても発想だけで採用されたことが嬉しかった。
- 優れた高齢の研究者から知識や情熱を学ぶことが多かった。
- 領域の範囲が広がったため、異分野の人との交流が出来た。
- 領域会議がすばらしかった。単なる成果発表会ではなく、専門の異なる研究者が、年齢を超えて、自由に顔の見える場で、討論できたことが刺激になった。
- 個人の意識とレベルが高かったので刺激を受けた。
- 領域事務所のスタッフが研究者の立場に立って面倒を見てくれ、ありがたかった。
- さきがけがきっかけとなって、専門が確立できた。
- さきがけがきっかけになって、テーマが発展した。
- さきがけで基礎研究ができたので、それが基盤となって発展した。
- さきがけによって、これまでの研究成果を確実なものにした。
- お金がついたことが、ありがたかった。
- 今も研究できているのは、さきがけのおかげであり高良先生のおかげである。
- さきがけがきっかけになって、研究テーマの方向を変えた。
- さきがけに参加して、自分もやって行けるという自信が出来た。
- さきがけ研究は人生の重要な転機になった。さきがけを終了した時点で、研究生生活をやめ、ビジネスの世界に転じた。
- 大学の研究者にとっては登竜門になった。
- 新しい人脈ができて、財産になった。
- さきがけを経験したことが研究者としてのキャリアアップにつながった。
- (企業の研究者にとって)大学の先生との距離感が無くなった。
- 企業の研究者にとっては外の人を知る良い機会になった。
- (企業の研究者にとって)環境が変わったために、終了後の身の処し方が難しかった。

4.3.2 今後のさきがけ研究制度に対する意見と要望

- 「過去の経歴や実績を問わない」、「年齢を問わない」、「個人の自由に任す」という制度がすばらしい。
- 特に高齢の研究者の情熱と知識を大事にすべきである。
- テーマ選択を個人の自由に任せるのが良い。

- 予算の運用は融通性が必要である。さきがけはかなり弾力性があった。装置を直す自由度もあった。それでも予算が単年度制だったので問題はあった。
- 3年間は短すぎる。成果を出すのに少なくとも5年はほしい。
- テーマの評価委員として大学人ばかりでなく、企業人それも先見性のあるオーナー経営者を入れるべきだ。
- 企業からの参加者を増やしてほしい。
- 企業研究者の場合、企業テーマ、企業環境と遊離しないで実施できる配慮がほしい。
- JSTのスタッフは研究者の立場にたって現場に密着したサービスをしてほしい。

4.4 領域アドバイザーの意見調査

座談会にて得られた領域アドバイザーからの意見を項目別に整理した。

4.4.1 研究成果について

- 期待通りの成果を上げ、今も発展を続けているテーマもあれば、さきがけ期間中は面白い成果をあげたが、その後中断されているテーマもある。
- 論文の被引用件数、グラントの金額などが多くて、明らかに発展しているテーマもあれば、論文の数や被引用件数も少ないが、今尚挑戦しつづけている野心的なテーマもある。
- さきがけ期間中は、成果がほとんど無かったが、その後大きく発展したテーマがある。
- さきがけの成果はまさに先駆け的成果であるために、科学的にしる、産業的にしる、評価が定まるためには、今後まだ時間がかかる。
- 推進が中断されているテーマには、研究者が自ら他のテーマに転換した場合と、研究環境によって中断されている場合がある。
- 基礎研究では、思わざる結果が生まれることが大切であるが、今回の追跡調査を見る限り、驚嘆に値する成果が少なかったように思える。
- 基礎研究の成果は、生産性などの問題ですぐには実用化されない場合が多い。さきがけのようなテーマの場合、さきがけ研究期間中は成果として実らなくても、後になって評価されることもあるのだから、さきがけ期間中に行った研究は必ず論文にまとめておくべきである。
- 優れた発明があった場合でも特許を出していない研究者がいる。優れた装置を作った場合などは特許をとっておくべきである。

4.4.2 研究者の成長について

- さきがけ研究に採択されたことで、その後のキャリアアップにつながった場合がある。さきがけ研究者は既に研究者として認められた地位（＝ステータス）となっている。
- 成果を応用に発展させて活躍している人がいる。

4.4.3 さきがけ研究制度について

- あらかじめ研究テーマを決めるというやり方（戦略的）ではなく、さきがけの当初がそうだったように、幅広い領域にして個人の自由な発想を持ち込んで行うほうが、萌芽的研究の場合はよい。
- 研究が大掛かりになるにつれてプロジェクトを特定の組織に任せる傾向があるが、組織を越えた「さきがけ」のようなやりかたを残すべきである。
- テーマによっては理論屋と実験屋が組んで行ったほうが良いときがある。それを可能にさせるような仕組みを考えるべきである。

- 企業研究者の場合、さきがけ後のテーマ継続が困難な場合がある。継続を可能にさせる手だてを考えるべきである。
- 研究期間は3年では短すぎる。金額は少なくてよいから装置の維持費などを含めてもっと長期間の支援が必要である。
- もっと研究をやってもらいたい人には、何らかの支援を考えるべきである。
- 会社の研究者が採用された場合、会社も、研究者が孤立することのないように支援することが重要である。大学でも同じような問題はあつた。採用されても、他の業務があり、研究に専念できるわけではない。さきがけに研究者が採用された場合、研究に専念できるよう、その所属機関(大学の研究室等)にJSTから何らかの人的支援(例えば、強い希望がある場合にはさきがけ研究期間中、他の業務を支援するための人材を採用できるようにする等)の工夫が望まれる。JSTの専任が、期間終了後に戻るポストが保証されない点についても支援が必要である。
- 高齢の研究者特に定年退職した大学や企業の研究者で、優秀で情熱を持った研究者の活用を「さきがけ」のような研究に活用する制度を考えるべきである。
- 国は研究者の身になって応援する姿勢がほしい。本当に良い仕事があつたら、国は金を出すだけではなく、研究者と一緒に開発するという姿勢が必要である。
- 予算に関して「さきがけ」は他のプロジェクトより弾力的扱いが許されているが、それでも融通が利かない面がある。研究者の招聘等に融通がきくとよい。
- 特許は数が多ければよいというものではない。維持に金がかかるからだ。特許を取るに値する内容のものを出すような仕組みが要る。
- さきがけは3年間で成果を挙げることを考えるのではなく、将来スケールの大きなことが出来るようなきっかけになつてほしい。失敗しても思い切つたことをやる人を応援してほしい。
- さきがけで作られた独自の装置の活用に関して、継承を含めて、何らかの支援・アフターケアが必要である。人件費を含めた維持費を負担する制度はさきがけに限らず必要である。金額は少なくてよいから出来るだけ長期間支援してほしい。
- 着想がすばらしい研究でも事情により、その後進展していない研究がある。見直しを行つて、面白そうなら研究を再開してもらうための支援を考えてはどうか。
- 領域のリーダーの選択が極めて重要である。研究者を盛り立てて、自由に思い切つてやらせる人が良い。総括に高良先生を選んだことが非常に良かった。先生のお人柄と、自由にのびのびとやらせるという方針が良かった。
- 研究者として個性的な人が選ばれたこと、研究者間で良く交流がなされたことが良い成果につながつたと思う。
- 領域の選定と運営が良かった。領域の幅が広がつたので、専門分野の異なる人が議論を戦わせたことが良かった。
- 年齢、所属、専門、実績、性別などを問わないのが良かった。特に高齢の研究者たち

の情熱が若い人たちへの刺激になった。

- 成果の実用化に関して、支援する仕組みがほしい。成果が眠っている可能性がある。実用化には研究とは別の視点が必要となることもあるので、別の人をお願いするという場合によっては必要である。
- 成果利用については技術移転制度が出来ているが、現状は単なるお金とか数の問題として済ませている。もっと一緒になって開発するという姿勢が必要である。

4.4.4 追跡調査に対する意見

- 成果を評価するためには、論文数や論文の被引用件数を調べるだけでは、不十分である。内容に踏み込んだ調査が必要である。
- さきがけのようなテーマの場合、成果は5年後、10年後、場合によってはもっと時間がかかる場合がある。そのような場合、継続して追跡調査が必要である。追跡調査は10年後では遅すぎる。少なくとも5年後をめぐりに実施すべきである。

4.5 研究総括総評

高良 和武

さきがけ研究「構造と機能物性」の追跡調査において、追跡調査の為の資料、途中段階での分析の報告などを見せていただき、とくに多くの研究者との面談に同行させていただいた。ほとんどの研究者が生き生きとして研究を続け、あるいは新しい仕事に取り組んでおられるのを知って、力強く嬉しく思った。その過程で、研究者はもちろん、追跡調査担当の方々と、研究の進め方などについて意見や情報の交換をする機会があり、研究の現場から離れて久しい者にとって、非常に刺激的で有益で楽しい一時であったことを、感謝している。この間に、制度について、また個々の研究者の研究について、いろいろなことを考えさせられた。そのような個人的感想を少し述べて、総評に代えさせて頂きたい。

1. 成果の評価について

(1) 客観的評価を補う研究現場における面談

一人ひとりの研究者が強い個性の持ち主であり、研究テーマもユニークでオンリーワンのものばかりで、また研究環境が千差万別で、どの研究者にも適用できるような客観的な評価の尺度というものが通用しにくい。もちろん、発表論文、論文の被引用件数、特許件数、獲得した研究費などの資料も不可欠な資料であり、その分析もまた有効である。ただ、数値的分析だけではなく、研究者一人ひとりについて、研究現場において対面し、客観的評価のみならず、内在的評価あるいは主観的評価も加える必要があるのではないかと思う。

その点で、今回の研究者との面談は研究成果を理解する上で非常に役立ったように思う。現場で実験室や装置を視察し、また沢山の実験データなどを研究者本人による説明でみる事ができた。また研究の裏話、苦労話、今後の研究の見通し、夢など、生身の説明を聞くことができ、また率直な意見交換も行われ、文書による報告では得られない豊富で貴重な情報が得られた。

(2) 発表論文数、論文の被引用件数について

同じような研究に従事する研究者が多く、発展が急速な研究分野では、一般に発表論文数や被引用件数が多い。また新しい材料を創る研究も一旦、方法論が確立されると、論文数が多い。全くの未踏の領域ではなく、既にある程度研究法も分かっており、多くの研究者・技術者による競争が激しく、スピードがものを言う研究分野は、真の意味での「さきがけ」の時代は終わっているのではないかと思う。

先頭を走るという意味で、先駆けということもできるが、一つの目的に向かって同じコースを先を争って走り、その先頭に立っているというのでは、真の先駆けではないように思う。さきがけに相当する英語は pioneer であろうが、英和辞書には開拓者、先駆(創始)者という訳が記載されている。pioneer は未知、未踏の領域を開拓して進む人で、競争者

がおらず、むしろ孤独ではないかと思う。成功するかどうか分らず、ギャンブルに通ずるものがあるように思われる。したがって論文数、被引用件数が増えた時は既に、「さきがけ」の段階は成功裡に終わったとみるべきであろう。

さきがけ研究の総括を勤めた者として、まだ論文が少なく、論文の被引用件数が少ない研究者へのフォローが、たいへん気になる。まず、その理由について分析したい。

新しい装置を作ることが当面の目標である場合、完成した装置を使って初めて研究論文が書かれることが多いため、論文の数は研究当初は少なく、論文数や被引用件数の増加はかなり遅れるのが普通と思われる。昔、私の大学院時代の恩師、篠原健一教授は、「装置だけで論文を書くべきではない、それを使って実験を行い、成果が出たとき、成果を報告する論文のなかに装置の説明をすればよい。」と言われた。

独創的な研究には、最初は反対が多い。このような現象は、研究分野が一応成熟した分野に多く見られる。40～50代の、現在、目前の研究に没頭している研究者が、独創的な論文の査読者となる場合、論文を虚心坦懐に読み、理解しようとする余裕が心理的にも時間的にもない場合もあるだろう。むしろ一通り自分の研究が終った視野の広い、年配の方が、新しい研究に寛容で、興味を持つことが多いのではないと思われる。

独創的研究を自負している研究者には、どの雑誌に論文を提出するかについて、非常に慎重な人がいる。論文を受理した後、査読者が故意にクレームをつけ、その間に、同じアイデアの論文を先に出すというような反道徳的行為を味わった苦い経験があるためである。このようなことが海外の著名な学術雑誌でも時々行われるといわれる。一方、日本の学術雑誌では、独創的な研究を認めることに慎重というか、自信がなく、いろいろな理由を付けて拒否したり、海外の研究者に査読を回したりするというケースがあると聞いたこともある。同じような事が、国際特許についても起こった例を複数回聞いた。特にアメリカの特許制度では起こりやすい。また、アメリカでは、バイオ、ナノ、など国策として推進する場合、研究費を出すだけでなく、知的財産権の国家的保護としてしたたかな戦略を実施している。

以上、論文数（特許数）の影の部分について詳し過ぎるほど書いたが、論文数の取り扱いについて一応、心得て置くべきことと思ひ、敢えて書かせていただいた。

さきがけ研究「構造と機能物性」に在籍した研究者で、JST から要求された研究成果報告と、参加研究者の仲間が自発的に編集した単行本*以外に、サーキュレーションのよい学術雑誌に発表をしたことのない研究者がいることを今回の調査で知った。新しい研究に興味に移り、古い研究を纏めることが面倒である場合もあるかもしれないが、多くの応募者の中から選ばれ、恵まれた条件で研究を行ったのであるから、得られた成果を分かりやすい形で広く研究者に向けて発表する義務がある。今にして思えば、それについて助言支援するのが、研究総括の責任ではなかったかと感じている。

*「構造と機能物性」領域の研究者全員が寄稿したものが、コロイド関係の国際学術誌の特集号

として出版された。雑誌の性質上、研究テーマによっては、あまり読まれていない可能性もある。この雑誌に投稿したから、同じ内容のものを他の雑誌に投稿することはできないという原則を非常に厳格に守って、他の雑誌には一切投稿していない研究者もいる。研究総括として、その研究が素晴らしく、大きく発展する可能性を秘めていると感じている私には、他の雑誌に、何らかの形で投稿することを支援することが出来たのではないかと残念である。

2. 研究の継続について

今回の追跡調査で、研究が中断されているケースが幾つかある。それらの研究の大部分は、将来、大きく発展する可能性を秘めている。ほとんどの場合が民間の研究者であるが、本人が継続したくても、周囲の状況で不可能なケース、また本人の興味が他に移り、さきがけで始めた研究を継続する意志が(現時点では)ないケースもある。

このような研究については、それを発展させる方策をもっと早い時期に(さきがけの期間が終わった後でも)、研究総括として研究者とともに考えるべきであったと今頃になって思う。

このような研究者に対しては一つの案として共同研究を提案したい。中断している研究者は殆ど企業の研究者であるが、彼等に共同研究者として大学の研究者を紹介する。とくに実験研究の解析のため理論研究家を紹介できれば、より一層の研究の進展が期待できる。また研究者自身も大学等の研究機関に移籍したり、大学の客員教授となって大学院学生を受け入れて研究したりする方法がとれば有効である。最近、大学で言われる技術移転の逆方向である。この場合、勤め先の企業の理解、協力が不可欠である。また、このためには、研究費の獲得が重要であるが、具体的な計画を立てて、積極的に研究費を申請することを推奨したい。研究費は文科省のみならず、経産省、厚労省なども視野に入れるとよい。その際にも発表論文があるとより有利である。

私個人としては、二、三の研究者に対しては色々な形で支援してきたが、個人的な努力では支援の効果も限られていることを痛感した。何らかの形で制度化されるとよいと思う。

また、研究者との相談相手には、研究総括ひとりでは心もとないこともあり、限界もあるので、領域アドバイザーあるいはその道の専門家に頼むのもよいと思う。このような制度ができることに越したことはないが、実質的には、今の段階でも個人的な心がけや努力である程度できないことはない。また、さきがけ研究のOBたちの懇話会をJSTで支援していることも最近知ったが、これを活用することも考えられる。

今回の追跡調査インタビューで初めて知ったことであるが、ある民間企業の研究者は、研究環境の大きな変化にあたって、随分悩み、一時はノイローゼになったと聞いた。このような時にもっと相談にのって上げることが出来たのではないかと思うことであった。

3. 研究者の成長について

(1) 領域会議について

領域会議では、違った研究分野の研究者たちが集まり、極めて自由な雰囲気、銘々が

自分の研究の話をして、それを聞くことが非常に刺激になったようである。とくに年配の研究者の情熱に圧倒されたという人が多かった。できるだけ、専門外の人に分かって貰うように、表現を工夫し、考えを整理することができるようになったり、さらに独創的な研究をしなければと、研究意欲が増したようである。また、独創的な研究の意味を改めて考え、その後の研究態度が変わったという研究者もいた。

(2) 企業に対するさきがけ研究の効果について

前に述べたように、企業の研究者の場合さきがけを終了してから、本人は「さきがけ研究」のテーマの継続を希望したが、会社の方針で続けることができなかったケースがほとんどであった。しかし、さきがけ研究は継続できなかったものの、研究者自身は企業で活躍している。「構造と機能物性」の課題が終了した時期（1994年～1996年）は、バブルの後遺症で、我が国の経済界は不況で、多くの企業は事業を縮小、とくに研究開発関係の予算、人員をカットする機会が多かったが、「構造と機能物性」のメンバーではリストラにあった人はおらず、会社で研究関係の仕事が続いているということは、本人の優秀なことが第一の理由であろうが、本人が「さきがけ」で成長し、会社にとって有用な人間として認められているのではないかと思う。この意味で、さきがけ研究が独創的企業研究者の養成に役立っていると思うのは、思い過ぎであろうか。

4. さきがけ制度について

(1) 独創的個人研究の推進について

最近ではCRESTやCOEのように、特定のテーマや一つの組織で纏まるのが多く、さらに国研や国立大学の法人化に伴い、組織の生き残りをかけて個人の研究より、組織的研究に偏重する傾向がある。このような一般的傾向の中で、個人の研究を尊重するさきがけ研究の制度は貴重である。また、萌芽研究に対する助成があるが、これは広く研究者が参加できるものの1テーマ当たりの研究費が少なく、支援も一時的である。さきがけの制度のように独創的研究が独り立ちして発展するまで支援するという制度はこれからますます重要になると思われる。

（最近のさきがけ研究では、一部の研究課題について、2年研究期間を延長して最大5年までの研究実施が認められたり、またポストク参加型領域で研究者を雇うことが可能になるなど、ある程度、我々の初期の「さきがけ」で要望していたことが認められたようで結構である。しかし、実際には5年以上かかる研究も多い。）

(2) 高年齢の研究者の参加について

さきがけの研究者は若い人が多いが、「構造と機能物性」では、定年後あるいは定年間近の高年齢の研究者も採用した。ある高年齢の研究者が、採用のための面接の際、「これまでの研究は過去の研究と連続的に繋がったものだったが、今度の研究こそ、全く新しい独創

的な研究だと自信がある。しかし年齢的に科研費も貰えないし、また(独創的であるため)論文も通らない。」と言われたのは印象的であった。

またあるアドバイザーが、「年配の研究者が独創的と言うときは信用できることが多い。」と発言されたことも印象に残っている。

「さきがけ研究」に選ばれた高年齢の研究者は、いずれも若者以上の情熱があり、また自分で実験や計算を行う元気さの持ち主でもあった。追跡調査の面談の中で、「さきがけに選ばれてからのこの10年が、最も充実した研究を送っている」と言った高年齢の研究者もいる。

とくに、長年にわたる経験と広い視野を持ち、現在一般に通用している理論について、その成立前後の論争などについて科学的にも深く理解した上で、その根拠となる仮説についての根源的考察を行った研究者達もあり、優れた能力の持ち主であることを感心させられた。このような考察は年季を積まなければなかなかできないことである。

何れの高年齢の研究者も、期待通り、あるいはそれ以上の研究成果を上げられたと思う。大学の若い研究者たちの恵まれた環境(研究費、研究協力者、研究設備など)に比べたら厳しい条件であったが、もう少しよい条件を提供できたらさらにより研究ができたと思う。

アメリカでは年齢による差別は法律的に禁止されている。欧州でも、高年齢の研究者が大学に研究室をもって研究活動を続けている。もちろん、例外的で少数ではあるが、研究意欲も能力も若い人に負けない高年齢の研究者がいる。このような研究者が学生の講義だけ行うのでは、誠に勿体ない。このような研究者には少数の若い研究者も加え、研究を続けさせる環境を用意することが望まれる。若い研究者にとっても、学問書だけでは身につけることのできないような技術や、研究に対する考え方を学ぶ貴重な機会となるであろう。

5. 評価制度(日本版品質管理)について

昔、近藤次郎先生(東大名誉教授、元日本学術会議議長)から「研究者の評価は、それによって、研究をさらに向上させることが目的である」と聞いたことがある。

私は、日本版品質管理のことを思った。戦後、アメリカから日本の産業界に導入されたデミングの品質管理(QC: Quality Control)では、製品の品質管理部門は、製造部門と完全に独立させる。製品の抜取試験をして、その結果、不良品を発見したら、その不良品を製造したブロック(同一の製造セクション、ある期間など)の製品はすべて不良品として捨てる。このようにして、出荷される製品の信頼性は向上する。しかし、その代償として価格は高くなる。これに対して、デミングの品質管理を改良した日本版品質管理(TQC: Total Quality Control)では、管理部門と製造部門が協力して不良品発生の原因を追及する仕組みをとった。その結果、不良品の発生確率は減り(歩留まりが向上)、価格も安くなった。この方法は後にアメリカに逆輸出されたことはよく知られている。

この考えは、研究の評価にも当てはまるように思う。評価の最終目的は、客観的な結果

の評価に留まらず、どのようにしたら、よりよい成果が上げられるかを研究し、それを提案実行することにある。

5. 分析

5.1 調査結果のまとめ

今回の追跡調査の焦点は主として次の2点であった

- さきがけ研究は新たな研究分野の開拓に貢献したか。
- さきがけ研究を行った研究者は研究者として成長したか。

(1) さきがけ研究は新たな研究分野の開拓に貢献したか

新しい分野は確実に開拓されている。例えば、高分子の計算機化学の分野で Elongation 法という巨大高分子の電子状態を解明する技術を開発し、その完成を目指して今も活動を続けられている (p19)。また、超伝導状態の電子源からの電子の引き出しに成功し、電子源の単色性向上に先鞭がつけられている (p21)。

装置開発は、新たな研究分野の開拓にしばしば貢献するが、「構造と機能物性」領域では、そうした成果も多い。例えば、世界で初めて固体の光学活性測定装置を開発され、キラル物理学という新しい学問分野が誕生しつつある (p27)。また、「独立駆動型4探針超高真空走査トンネル顕微鏡」というユニークなプローブが開発されている (p35)。また、スピン走査顕微鏡が世界に先駆けて開発されて、強磁性体表面の磁区構造の直接観察が実現している (p59)。フォトン・ストレージ・リングという新しい自由電子レーザーの原理が発明され、装置が実際に組み立てられたが、その後、その原理は大強度 X 線を発生する世界最小の卓上型シンクロトロン“ミラクル 20”の実現につながり、市場に投入されつつある (p61)。

産業技術志向の研究分野を開拓したものもある。例えば、ナノシリコンの製造プロセスを、CVD プロセスで実現したもの (p43)、超臨界流体中でのポリプロピレンカーボネートの製造技術などが、実用化に向けて進行中である。また、 d 族の磁性半導体の発見については、その後大きなプロジェクト (大野半導体スピントロニクスプロジェクト: JST 戦略的創造研究推進事業) に発展している (p55)。

上記成果の多くは、今なお大きな研究予算がついて、推進されている。

サイクロトロンメーザー冷却 (CMC) の原理については、いまだに広く認知されているとはいえない (p53)。ただし、さきがけ期間中に開発された装置は、高良総括の尽力により、日本大学に搬入され、研究が進められている。

一方で、さきがけ研究では独創的成果を出したが、その後研究が継続されていないテーマに「結晶表面現象に見られる魔法数」(p17)、「酸化膜形成・除去とプラズマパルスを利用した半導体作成プロセス」(p23)、「この不思議な粒子、ミュオニウム」(p47)、「電気で制御するガス分離」(p57)、「分子で描くアラベスク」(p41)、「分子ヒステリシス」(p29)、「異常金属の合成と物性」(p39)、「ミネラルの構造と生体」(p25)、「スピン・エレクトロニクス」(p63) がある。継続されていない9テーマのうち、最初の4テーマは研究環境が

継続を許さなかったため、次の3テーマは、研究者が研究テーマを方向転換させたため、最後の2テーマは研究者が事業家に転じたため、研究が中断されている。しかし、それらの研究でも将来ふたたび注目されて発展する可能性が残されている。

以上の成果が、さきがけ研究だけによって得られたものであると断言することはできないが、萌芽的な段階の着想を、実現に向けて努力する資金と機会が得られたことが、研究、及び研究者人生の転機となっているというコメントが多く聞かれている。

残念ながら、今回の調査で、さきがけ研究の成果を論文・特許化していないことがあった。基礎研究の成果は数年、数十年後になって脚光を浴びる場合、またすぐには実用化されなくても後になって実用化される場合もある。そのような場合も考えて、さきがけ研究の成果は必ず論文発表すべきである。また産業的成果が期待できるものは特許化することが望ましい。

(2) さきがけ研究を行った研究者は研究者として成長したか

さきがけ研究が研究者の成長に与えた影響は非常に大きい。さきがけ研究がきっかけとなって、テーマが発展して ERATO (大野研究者)、CREST (小田研究者、栗原研究者、生島研究者) や未来開拓研究事業 (大島忠平研究者)、21世紀 COE (山田廣成研究者)、J-PARC (=大強度陽子加速器計画) 中性子グループ (新井正敏研究者) などのプロジェクトのリーダーになった人がいる。こうしたプロジェクトのリーダーは、当該分野の第一人者であることを意味する。このことから、若い大学関係者にとって、さきがけ研究が登竜門になった人は多い。一方、大学を定年退職した、あるいは退職目前である高齢の研究者にとっては、長年温めてきたテーマに没頭できる機会を得た。

さきがけ研究の経験は、研究者に質的な影響を与えている。研究総括の「目先の成果でなく、自分がやりたいことを研究せよ」という方針は「目からうろこ」だったという研究者がいる。優れた人たちと接触したことにより精神的影響を受けたという意見も多く聞かれた。研究の面白みを再発見し、生涯一研究者でありたいと心に誓った人がいる。新しい人脈ができたため、新たな協力関係が生まれ研究の幅が広がったという人もいる。さきがけ研究によって研究基盤が出来て、仕事の厚みが増したという人もいる。研究者によっては仲間の研究者に刺激を受け、さきがけ研究後に研究の方向を変えた人もいる。

企業の研究者にとっては、さきがけ研究終了後に環境が急激に変化したため、研究の続行が困難だった研究者もいる。

研究を支援するということは、人を支援することであり、素晴らしい研究成果は、研究者の成長と表裏一体をなすものであるといえる。領域における研究者、総括の人的交流が、非常に重要な意味を持つことが、インタビューにより得られたコメントから推察される。

5.2 さきがけ研究制度の効果

(1) 独創性を重視した萌芽的研究の育成

すぐに具体的な成果が期待されるテーマよりも、幅広い学問領域から独創的アイデアおよびそれを実現する実行力や情熱を判断基準として、個人研究者を経歴、実績、年齢などを問わずに集めるという趣旨が徹底されたことで、多彩な能力を持った精力的な研究者が集められた。この結果、萌芽的段階にある研究に機会を提供することができ、新分野の開拓につながっていると考えられる。

(2) 研究者の自由意志を尊重した研究環境の確保

雇用制度等の支援体制、大型の研究資金が提供されれば、将来成長が期待される若い研究者や、独創的で素晴らしいアイデアを持ちながらそれを検証し発展させる研究環境に恵まれない研究者に、独立して自分の研究を行える機会を提供することができた。こうした機会の提供が、新分野の開拓につながっていると考えられる。また、若手の研究者は、大型の研究費を管理し、自ら研究を主導していく初めての経験をする場合が多く、研究者として自立成長するための重要な成果を提供できたと考えられる。

研究者の自由意志を尊重し、研究総括はメンターとしての役割に徹することで、研究者の意欲を引き出した。領域専属の技術参事、事務参事による研究者の立場に立った支援により、研究者の事務負担を軽減した。資金面だけでなく、こうした人的支援も、モチベーションを維持して研究に没頭する環境を提供し、研究者の成長や、新分野の開拓に間接的な影響を及ぼしていると考えられる。

ただし、「構造と機能物性」領域では、定年退職した研究者の参加があったが、さきがけ研究終了と同時に雇用支援や研究環境支援も終了するため、研究を続けられない場合があった。また、企業から出向で参加した研究者は、会社の方針や環境がさきがけ研究テーマの継続を許さない場合も多く見られた。こうした立場の研究者を支援する研究制度の充実が領域関係者より求められている。

(3) 合宿形式の会議を中心とした研究者同士の相互啓発と、人脈形成

合宿形式の会議（領域会議¹）を中心とした、異分野の研究者、年齢層の異なる研究者との交流の機会を提供することで、新しい研究のアイデアを得たり、研究に対する情熱やモチベーションが増大した。これらの交流は、研究者の成長に結びついたと言える。

¹ 1年に2回(2004年現在は1年に2回)研究総括、領域アドバイザー、研究者が一堂に会し、各研究者が研究内容・進捗状況を報告する合宿形式の会議。

採択する研究者の中に幅広い年齢層を確保することで、異分野交流という意義だけでなく、異なる世代の交流という意義も生まれる。こうした、視点の異なる人を集める努力は、領域会議の場をより有益なものにし、研究者の成長、ひいては新分野の開拓の貴重な機会を提供することになると考えられる。

さきがけ研究は基礎研究的性格が強いため、研究者は大学関係者に偏りがちであるが、企業研究者にとっては、優れた基礎研究者として養成される、あるいは大学や公的研究機関の優れた研究者とも知り合えるなど、特に強い影響があった。企業の中でだけでは得難い研究者としての成長は、企業という組織にとってもメリットがあると考えられる。

5.3 追跡調査の課題

(1) テーマの評価尺度として、論文数、論文の被引用数、グラント金額などを調べたが、テーマの発展と必ずしも関連していないことがわかった。評価と論文数、招待講演数、被引用件数或いはグラント金額などが相関するテーマもあれば、相関しないテーマもある。さきがけ研究が個人の発想に基づく先駆的テーマであるため、優れた研究でも評価が確定していないテーマや、成果がまだ発想段階或いは提案段階のものがあるためだと考えられる。こうした基礎研究を追跡する場合、個別の内容に立ち入って行わなければ、その価値をとらえることは困難である。今回、各研究者の研究サマリーを作成したことは、研究内容及び成果を追跡する上で有効であることが確認された。今後の追跡調査でも実施するとともに、内容の正確性を高めていく努力が必要である。

(2) 研究者に対する調査の趣旨説明と研究者への資料提供の依頼は早い段階に行い、調査は時間的に十分余裕を持って行うべきである。調査担当者が個別研究者について事前調査を行うことは極めて重要であるが、この調査にはかなりの時間を要するためである。また、研究者がアンケートを提出する際の負担も軽減できる。また、調査担当者側で調査できる内容は、研究者の負担を軽減させるために、情報提供を求めないようにすべきである。

(3) 研究者への直接インタビューは、調査担当者が研究内容を理解し、研究者の研究歴や、考え方を知る上において非常に有効である。出来れば対象者全員にインタビューすることが望ましい。インタビュー前にアンケートや事前調査で十分調査内容を深めてから、事前調査で不明の部分や、どうしても研究者本人でないといわれない本音の部分を中心に聴取することが望ましい。基本的には全員にインタビューすることが望ましい。

(4) 研究総括協力は、調査の有効性や質を高めるのに大変役立った。研究者に対するインタビューが、当初は全体の約三分の一にあたる7名~8名の研究者に面接する計画だったが、研究総括の全面的な協力により、19名に直接インタビューすることができた。インタビューを受ける研究者にとっても、研究総括との再会がインタビューを受ける大きなインセンティブとなったと考えられる。

(5) 領域アドバイザーのコメントも追跡調査に有効であった。採択当時の様子を調査担当者が知る機会となるとともに、調査対象者への理解が深い有識者からの意見を、多くの説明をする手間をかけずに、効率的に聞き出すことができるからである。

(6) 研究成果を活かすためにも、継続的な調査を適切に行うことは有効である。基礎研究の成果は、その価値が目に見える形になるまでに、比較的長期間を要するからである。

謝辞

本追跡調査に重要な指針を与えてくださり、研究者へのインタビューに同席頂き、貴重な助言を数多くくださった高良和武研究総括、またお忙しい中、座談会にご参集くださった領域アドバイザーに深く感謝したい。今回の調査では、さきがけ研究者の各研究サマリーを初めて作成したが、この作業を担当して頂いた東レ経営研究所の片岡俊郎氏、浅野元彦氏に深く感謝したい。また、この調査の方針策定にあたっては、筑波大学大学研究センター助教授の小林信一先生に多くの貴重なアドバイスをいただいた。関係各位の温かいご協力に対して、この場を借りて感謝したい。