

独立行政法人科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
手一ム型研究 (CREST)
追跡評価用資料
(追跡調査報告書)

研究領域 「量子効果等の物理現象」
(1995～2002)
研究総括 川路 紳治

追跡調査要旨

(1) 追跡調査の目的

CREST 事業は、「科学技術創造立国」をめざし、明日の科学技術につながる知的資産の形成を図ることを目的とし、大学や国立試験研究機関などの研究ポテンシャルを活用しつつ、重点化した基礎研究を推進するものとして平成7年度に発足した。その後平成14年度には、国の科学技術政策や社会的・経済的ニーズを踏まえ、国が定めた戦略目標の達成に向けた基礎的研究を推進する戦略的創造研究推進事業として再編成されて今日に至っている。CREST の研究は研究総括のマネジメントのもと、研究総括と領域アドバイザーの助言を得て、研究代表者を中心とした研究チームを複数編成して推進される。

CREST 事業は平成19年度までに発足した52研究領域のうち、既に27研究領域が5年間の研究実施期間を終了し、成果の展開期に入っている。基礎研究の推進を目的とするCRESTにおいては、研究成果の学術的な評価を得ることや研究結果が実用化などに発展するには、一定の期間が必要になると思われる。このためJSTでは、領域終了から5年経過を目途に「研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、事業及び事業運営の改善に資すること」を目的とする追跡調査を実施することとした。

CREST 事業がスタートした平成7年度に発足し平成14年度に終了した「量子効果等の物理現象」領域を取り上げて、追跡調査を行い当該領域において実施された各課題に関して、(1) 研究成果から生み出された社会的・経済的な効果・効用及び波及効果、(2) 科学技術の進展への貢献を明らかにすることを目的とするものである。

本研究領域は、原子レベルで制御された極微細構造に特異的に現れる、量子効果などの物理現象についての研究、具体的には、半導体、金属などに形成される人工ナノ構造、自己組織性分子などに現れる電子と光子が量子性を示す現象、スピン自由度に関連する新規な現象、極微細領域に現れる量子効果以外の先端的な研究などを対象とし、将来的には量子効果を応用した新しいデバイスへの発展を期待して実施された。

(2) 研究領域における全課題の研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域の各研究課題研究期間中に発表された原著論文数は19の研究課題全体で1,511報であった。そのうち、平成20年4月の時点で被引用件数が100件を超えている原著論文が27報に上っていた(表A:参考資料7)。さらに各課題の主要論文について被引用件数の経年変化を調査した結果、課題終了から約5年を経過した現在に至るまで、顕著に学術的な注目を集めている論文があり、現在なお、その被引用数が増加し続けていることが明らかとなった。また、特許についてみると、課題研究期間中に19の研究課題全体で出願された出願特許数は230件であり、平成20年4月時点での成立特許数は82件(成立率;35.7%)となっていた(表A:参考資料7)。以上の客観的な数値データより、課題研究期間中の成果は調査対象分野の科学技術の進展に大きく貢献していると言えよう。

課題研究期間終了後の状況についてアンケート調査結果をもとに見ると、回答が得られたうち8割以上の研究課題がCREST研究の延長線上ないしは、そこから派生した研究を

継続していることが明らかになった。また、同じく回答者のうち 6 割前後の研究代表者が何らかの新知見が得られ、また研究規模が拡大したと回答している。各課題は研究期間以降においても研究展開・発展にともなう研究予算を獲得している（表 B）。さらに回答者の 8 割以上が研究課題の延長線上の成果が国際的にも広く評価されたと回答していた。研究期間後の原著論文の発表件数については課題研究期間中と比較すると少なくなっているものの、研究者自身により研究課題の延長線上にあるとされた論文のうち、発表から 3～5 年を経過した時点で、既に被引用件数が 100 件を超えているものが 4 報あった（表 C：参考資料 10）。特に寺崎元研究代表者の論文が 2000 年から 2005 年の間の化学分野における被引用件数で日本の第一位となっていることが特筆される。これらより、CREST において実施された各課題研究が、引き続いて基礎研究の進展に大きく貢献していることが判明した。

（3）研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果

産業技術的・経済的波及効果に関しては、19 課題全体としてみた場合、「CREST 研究あるいはその延長線上にある研究成果が、産業に応用可能な新技術・手法の開発・普及につながった」と考えている研究代表者が多いことが明らかとなった。具体例として、CNT バイオセンサ、赤外検出器アレイ、発光デバイスの実用化に向けた開発などが挙げられた。CREST 研究が具体的な成果に結実しつつあることを示すものと評価される。詳細調査を実施した 7 課題（代表研究者：青野 正和、筒井 哲夫、寺崎 治、家 泰弘、大塚 洋、小宮山 進、小倉 睦郎（敬称略））について見ると、量子効果原子スイッチ、有機 EL ディスプレイ、ゼオライトなどの多孔体の触媒への応用、自己形成ナノ構造パターンをテンプレートとする手法の開発などの量子コンピュータへの寄与、フォトディテクタ、量子細線 LED などが具体化に向けて進展している。産業化には今しばらくの時間を要する段階である。これらの中から特に特徴的な展開・発展事例をこれらの課題から 1～2 件本文中に示した。

一方、研究の成果が広く国民生活の質的向上に結びついたかという社会的な波及効果に関しては、肯定的な意見は少なかった。研究代表者へのアンケート調査では、磁性半導体の研究が近未来の情報社会に必要な新知見をもたらしたこと、ナノサイエンスの価値をある程度世に発信できたこと、人材の育成効果等が指摘された。また、詳細調査においては小型有機 EL ディスプレイの市場性、量子コンピュータの話題性等が挙げられた。本研究領域が物理現象を中心とする基礎研究的色彩の強い課題が多かったことを考慮すると、社会的な波及効果が顕在化するまでには、なお時間を要するであろう。

表A (参考資料7) 課題研究期間中における発表論文および出願特許の状況

論文の被引用状況については、平成20年4月調べ
出願特許の成立状況については、平成20年4月調べ

No.	代表研究者	原著論文							特許出願		
		論文数	被引用論文数	被引用件数/年の平均	平均被引用件数	最高被引用件数	被引用件数 ≥ 100 の論文数	50 \geq 被引用件数 >100 の論文数	出願数	成立特許数	成立数/出願数
1	青野 正和	71	49	2.48	21.79	202	2	3	8	2	25.0%
2	潮田 資勝	36	28	1.14	9.53	60	0	1	9	5	55.6%
3	雀部 博之	70	30	1.49	14.63	128	1	2	10	3	30.0%
4	清水 明	77	65	2.28	19.81	175	2	5	6	1	16.7%
5	筒井 哲夫	69	56	2.49	22.88	95	0	8	3	1	33.3%
6	寺崎 治	165	121	3.94	32.68	532	8	9	0	0	0.0%
7	廣瀬 全孝	45	21	1.05	9.40	66	0	1	9	2	22.2%
8	武笠 幸一	34	21	0.74	6.50	30	0	0	54	26	48.1%
9	家 泰弘	73	49	2.16	17.98	323	4	0	1	0	0.0%
10	大塚 洋一	81	61	2.98	26.17	872	3	2	7	2	28.6%
11	岡 泰夫	83	46	0.68	5.52	34	0	0	2	0	0.0%
12	小宮山 進	59	41	1.37	11.82	109	1	2	12	4	33.3%
13	山中 昭司	114	94	1.83	15.39	141	2	4	11	2	18.2%
14	横山 正明	29	10	1.08	11.00	24	0	0	27	11	40.7%
15	井口 家成	201	136	1.65	13.16	298	2	7	11	4	36.4%
16	小倉 睦郎	57	51	1.26	10.67	65	0	1	8	2	25.0%
17	讚井 浩平	71	41	2.15	16.71	214	2	1	29	12	41.4%
18	白田 耕藏	64	45	1.30	11.30	60	0	3	5	2	40.0%
19	山下 幹雄	112	76	1.21	9.73	78	0	1	18	3	16.7%

表B (参考資料 10) 課題研究期間終了後における発表論文および出願特許の状況

論文の被引用状況については、平成 20 年 4 月調べ
出願特許の成立状況については、平成 20 年 4 月調べ

No.	代表研究者	原著論文							特許出願					
		研究代表者の全論文							研究代表者の全出願特許			CREST関連出願特許		
		論文数	被引用論文数	被引用件数/年の平均	平均被引用件数	最高被引用件数	被引用件数 ≥ 100 の論文数	50 \geq 被引用件数 >100 の論文数	出願数	成立特許数	成立数/出願数	出願数	成立特許数	成立数/出願数
1	青野 正和	50	46	1.96	8.14	70	0	2	42	7	16.3%			
2	潮田 資勝	21	16	0.66	3.40	15	0	0	14	1	7.1%	0	0	0.0%
3	雀部 博之	36	27	2.56	9.25	46	0	0	47	0	0.0%			
4	清水 明	23	17	1.33	4.57	15	0	0	14	3	21.4%			
5	筒井 哲夫	48	38	2.27	10.81	79	0	2	18	2	16.7%	4	2	50.0%
6	寺崎 治	102	90	5.27	24.74	386	4	10	7	1	14.3%	0	0	0.0%
7	廣瀬 全孝	22	21	1.16	8.18	36	0	0	72	10	13.9%			
8	武笠 幸一	27	17	0.90	3.81	11	0	0	7	2	28.6%	0	0	0.0%
9	家 泰弘	45	29	1.64	7.47	61	0	2	5	0	0.0%	2	0	0.0%
10	大塚 洋一	22	13	1.50	5.55	45	0	0	1	0	0.0%	1	0	0.0%
11	岡 泰夫	59	37	0.99	3.76	23	0	0	2	0	0.0%	2	0	0.0%
12	小宮山 進	42	22	1.11	4.79	36	0	0	24	2	8.3%	8	1	12.5%
13	山中 昭司	74	60	1.61	6.68	47	0	0	8	1	12.5%	0	0	0.0%
14	横山 正明	42	28	1.11	4.12	22	0	0	20	0	0.0%			
15	井口 家成	15	9	0.47	1.73	11	0	0	13	1	7.7%	0	0	0.0%
16	小倉 睦郎	40	27	0.50	2.33	13	0	0	9	2	22.2%	5	1	20.0%
17	讃井 浩平	20	16	0.44	1.70	8	0	0	51	8	15.7%	34	3	8.8%
18	白田 耕藏	20	15	1.26	4.05	18	0	0	0	0	0.0%	0	0	0.0%
19	山下 幹雄	20	16	1.90	6.80	70	0	0	0	0	0.0%	0	0	0.0%

I. 調査概要	1
§ 1. 調査目的	1
§ 2. 調査対象	2
§ 2. 1 研究領域の概要	2
§ 2. 2 参加研究者と研究課題一覧	2
§ 2. 3 研究総括・領域アドバイザー	5
§ 2. 4 有識者	6
§ 3. 調査方法と経過	6
§ 3. 1 事前検討	8
§ 3. 2 書面でのアンケート調査	9
§ 3. 3 研究代表者聞き取り調査	10
§ 3. 4 有識者聞き取り調査	10
§ 3. 5 一般研究者アンケート調査	11
II. 研究領域における全課題の研究成果の発展状況や活用状況	13
§ 1. 事前検討:課題研究期間中における研究成果概要	13
§ 1. 1 人工ナノ構造の機能探索 (研究代表者:青野 正和)	13
§ 1. 2 STM発光分光法と近接場光学分光法による表面極微細構造の電子物性の解明 (研究代表者:潮田 資勝)	13
§ 1. 3 超構造分子の創製と有機量子デバイスへの応用 (研究代表者:雀部 博之)	14
§ 1. 4 量子場操作 (研究代表者:清水 明)	15
§ 1. 5 自己組織性分子を用いた新規発光機能材料の設計 (研究代表者:筒井 哲夫)	16
§ 1. 6 配列したマイクロ空間での新物質系の創製と物性 (研究代表者:寺崎 治)	17
§ 1. 7 3次元集積量子構造の形成と知能情報処理への応用 (研究代表者:廣瀬 全孝)	17
§ 1. 8 スピン計測ースピンスPMの開発とスピン制御ー (研究代表者:武笠 幸一)	18
§ 1. 9 微細構造におけるスピン量子物性の開拓 (研究代表者:家 泰弘)	19
§ 1. 10 金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用 (研究代表者:大塚 洋一)	19
§ 1. 11 ナノ構造磁性半導体の巨大磁気光学機能の創出 (研究代表者:岡 泰夫)	20
§ 1. 12 量子構造を用いた遠赤外光技術の開拓と量子物性の解明 (研究代表者:小宮山 進)	21
§ 1. 13 ナノ物質空間の創製と物理・化学修飾による物性制御 (研究代表者:山中 昭司)	22
§ 1. 14 有機/金属界面の分子レベル極微細構造制御と増幅型光センサー (研究代表者: 横山 正明)	23
§ 1. 15 異方的超伝導体の量子効果と新電磁波機能発現 (研究代表者:井口 家成)	24
§ 1. 16 原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果 (研究代表者:小倉 睦郎)	25
§ 1. 17 自己組織化量子閉じ込め構造 (研究代表者:讀井 浩平)	25
§ 1. 18 量子固体と非線形光学:新しい光学過程の開拓 (研究代表者:白田 耕藏)	26
§ 1. 19 サイクル時間域光波制御と単一原子分子現象への応用 (研究代表者:山下 幹雄)	27
§ 1. 20 まとめ	29

§ 2. 研究課題現状調査票および研究代表者に対するアンケート調査結果.....	30
§ 2. 1 各研究課題における課題研究期間中の成果状況.....	30
§ 2. 1. 1 課題研究期間中における発表論文の状況調査.....	30
§ 2. 1. 2 課題研究期間中における出願特許の状況調査.....	36
§ 2. 2 課題研究期間終了後における研究成果.....	38
§ 2. 2. 1 課題研究期間終了後における発表論文の状況調査.....	38
§ 2. 2. 2 課題研究期間終了後における出願特許の状況調査.....	43
§ 2. 3 研究代表者に対するアンケート調査結果.....	44
§ 2. 3. 1 研究の継続・発展状況.....	44
§ 2. 3. 2 代表的研究成果.....	46
§ 2. 3. 3 プロジェクトの波及効果.....	50
III. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果 (詳細調査対象の7課題)	59
§ 1. 人工ナノ構造の機能探索.....	59
§ 1. 1 研究期間中における状況.....	59
§ 1. 2 課題終了後の状況.....	61
§ 1. 2. 1 研究の継続・発展状況.....	61
§ 1. 2. 2 代表的研究成果.....	61
(1) QCAS	61
§ 1. 2. 3 課題の波及効果.....	62
§ 2. 自己組織性分子を用いた新規発光機能材料の設計.....	64
§ 2. 1 研究期間中における状況.....	65
§ 2. 2 課題終了後の状況.....	66
§ 2. 2. 1 研究の継続・発展状況.....	66
§ 2. 2. 2 代表的研究成果.....	66
§ 2. 2. 3 課題の波及効果.....	67
§ 2. 3 参考資料.....	68
§ 3. 配列したマイクロ空間での新物質系の創製と物性.....	69
§ 3. 1 研究期間中における状況.....	69
§ 3. 2 課題終了後の状況.....	70
§ 3. 2. 1 研究の継続・発展状況.....	70
§ 3. 2. 2 代表的研究成果.....	71
§ 3. 2. 3 課題の波及効果.....	73
§ 4. 1 研究期間中における状況.....	78
§ 4. 2 課題終了後の状況.....	79
§ 4. 2. 1 研究の継続・発展状況.....	79
§ 4. 2. 2 代表的研究成果.....	80
§ 4. 2. 3 課題の波及効果.....	81
§ 5. 金属微細トンネル接合システムの物理と素子への応用.....	84
§ 5. 1 研究期間中における状況.....	84
§ 5. 2 課題終了後の状況.....	86

§ 5. 2. 1	研究の継続・発展状況.....	86
§ 5. 2. 2	代表的研究成果.....	87
§ 5. 2. 3	課題の波及効果.....	88
§ 6.	量子構造を用いた遠赤外光技術の開拓と量子物性の解明.....	91
§ 6. 1	研究期間中における状況.....	91
§ 6. 2	課題終了後の状況.....	93
§ 6. 2. 1	研究の継続・発展の状況.....	93
§ 6. 2. 2	代表的研究成果.....	93
§ 6. 2. 3	課題の波及効果.....	99
§ 7.	原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果.....	103
§ 7. 1	研究期間中における状況.....	103
§ 7. 2	課題終了後の状況.....	105
§ 7. 2. 1	研究の継続・発展の状況.....	105
§ 7. 2. 2	代表的研究成果.....	105
§ 7. 2. 3	課題の波及効果.....	107
§ 7. 3	参考資料.....	108
IV.	一般研究者に対するアンケート調査結果.....	109
§ 1.	調査結果概要.....	109
§ 2.	研究成果.....	111
§ 3.	研究領域分野への貢献.....	112
§ 4.	研究領域分野の発展状況.....	113
§ 5.	社会的・経済的な波及効果.....	114
§ 6.	高額研究費の有効性.....	115
V.	調査総括.....	116

I. 調査概要

§ 1. 調査目的

戦略的基礎研究推進事業（Core Research for Evolutional Science and Technology, CREST）は、「科学技術創造立国」をめざし、明日の科学技術につながる知的資産の形成を図ることを目的とし、大学や国立試験研究機関などの研究ポテンシャルを活用しつつ、重点化した基礎研究を推進するものとして平成 7 年度に発足した。その後平成 14 年度には、第 2 期科学技術基本計画の重点 4 分野を中心に、国の科学技術政策や社会的・経済的ニーズを踏まえ、国が定めた戦略目標の達成に向けた基礎的研究を推進する事業として、新しい時代の要請に応えるべく、戦略的創造研究推進事業として再編成されて今日に至っている。

一方、平成 18 年 3 月に閣議決定された第 3 期科学技術基本計画では、政府研究開発投資の総額の規模を約 25 兆円とすることが必要と述べられるなど、第 2 期科学技術基本計画期間中に比べて更に厳しさを増している財政状況の下で、知の大競争時代に国際競争力を強化し、その成果を社会・国民に還元することが求められている。特に、基礎研究の推進、政策課題対応型研究開発における重点化など、科学技術の戦略的重点化を推し進めると共に、人材の育成・確保・活用の促進や、競争的環境の醸成等による科学の発展と絶えざるイノベーションの創出など、優れた成果の創出・活用のための科学技術システム改革などが引き続き重視されている。

またこれらの推進施策とともに、貴重な公的資金を使って行われる研究開発の質を高め、その成果を国民に還元していく上で、研究開発評価は重要な役割を担うものとされており、平成 17 年 3 月に「国の研究開発評価に関する大綱的指針」改定案（新大綱的指針）が内閣総理大臣決定され、また文部科学省においても平成 17 年 9 月に「文部科学省における研究及び開発に関する評価指針」（文科省評価指針）が策定された。

平成 7 年度に発足した CREST 事業は平成 19 年度までに発足した 52 研究領域のうち、既に 27 研究領域が 5 年間の研究実施期間を終了し、成果の展開期に入っている。基礎研究の推進を目的とする CREST においては、研究成果の学術的な評価を得ることや研究結果が実用化などに発展するには、一定の期間が必要になるケースが通常であると思われる。このため独立行政法人科学技術振興機構（以下、JST）では、領域終了から 5 年経過を目途に「研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、事業及び事業運営の改善に資すること」を目的とする追跡調査を実施することとした。

CREST 事業がスタートした平成 7 年度に発足し平成 14 年度に終了した「量子効果等の物理現象」領域を取り上げて、追跡調査を試行し当該領域において実施された各課題に関して、（1）研究成果から生み出された社会的・経済的な効果・効用及び波及効果、（2）科学技術の進展への貢献を明らかにすることを目的とするものである。

§ 2. 調査対象

§ 2. 1 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「大きな可能性を秘めた未知領域への挑戦」

我が国が、長引く景気の停滞や国内産業の空洞化を克服し、活力ある社会を維持・発展させていくためには、既存の概念にとらわれず、新たな分野・領域を開拓し、独創的・革新的な技術の創生を通じて、新技術・新産業を創出していかなければならない。また、我が国の国際的立場に鑑みれば、それ自身が価値を有するものとしての、人類の新しい知的資産の拡大にも積極的に貢献していく必要がある。

このような観点から、多くの新たな知見の獲得が期待されてはいるが、未だ知られていないことが多い領域、例えば、複雑で多様な生命現象の解明、分子・原子単位の極微細な領域の解明及び超高圧・超高真空等の極限的な状態における現象の解明、新たな情報技術の探索を通じて、革新的な技術の確立を目指す研究を進めることが不可欠である。

したがって、戦略目標を、以上のような多くの未知を抱えた領域の現象の解明等により知的資産を拡大するとともに、新技術・新産業の創出を目指す「大きな可能性を秘めた未知領域への挑戦」とする。

(2) 領域名称

「量子効果等の物理現象」

(3) 概要

原子レベルで制御された極微細構造に特異的に現れる、量子効果などの物理現象についての研究、具体的には、半導体、金属などに形成される人工ナノ構造、自己組織性分子などに現れる電子と光子が量子性を示す現象、スピン自由度に関連する新規な現象、極微細領域に現れる量子効果以外の先端的な研究などを対象としている。将来的には量子効果を応用した新しいデバイスへの発展を期待している。

§ 2. 2 参加研究者と研究課題一覧

表 1、表 2、表 3 に各研究課題の研究代表者と研究課題一覧を示す。各研究課題は平成 7 年度、平成 8 年度、および平成 9 年度採択分に分かれる。研究期間は各々平成 7～12 年度、

平成 8～13 年度、平成 9～14 年度である。表中の No.は（研究採択年度）－（各年度における研究代表者の通し番号）であり、本報告書中で便宜的に付けたものである。

表 1 研究代表者と研究課題一覧（平成 7 年度採択分）¹

No.	氏名	研究課題名	所属
7-1	青野 正和	人工ナノ構造の機能探索	当時) 大阪大学大学院工学研究科 教授、 (独) 理化学研究所 主任研究員 現) (独)物質・材料研究機構ナノテクノロジー基盤領域 コーディネータ
7-2	潮田 資勝	STM 発光分光法と近接場光学分光法による表面極微細構造の電子物性の解明	当時) 東北大学電気通信研究所 教授 現) 北陸先端科学技術大学院大学 学長
7-3	雀部 博之	超構造分子の創製と有機量子デバイスへの応用	当時) 千歳科学技術大学光科学部 教授、 (独) 理化学研究所 客員主幹研究員 現) 千歳科学技術大学 学長
7-4	清水 明	量子場操作	当時) 東京大学大学院総合文化研究科 助教授 現) 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻関連基礎科学系 教授
7-5	筒井 哲夫	自己組織性分子を用いた新規発光機能材料の設計	当時) 九州大学総合理工学研究院 教授 現) 九州大学先導物質化学研究所 教授
7-6	寺崎 治	配列したマイクロ空間での新物質系の創製と物性	当時) 東北大学大学院理学研究科 助教授 現) Structural Chemistry, Arrhenius Laboratory, Stockholm Univ. Professor
7-7	廣瀬 全孝	3次元集積量子構造の形成と知能情報処理への応用	当時) 広島大学工学部 教授 現) (独) 産業技術総合研究所次世代半導体研究センター センター長
7-8	武笠 幸一	スピン計測ースピン	当時) 北海道大学大学院工学研究科 教授

¹ <http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/intro/kadai/ryousi.html> 表 2、3 についても同じ。

		SPMの開発とスピン制御ー	現) 北海道大学創成科学共同研究機構戦略重点プロジェクト 特任教授
--	--	---------------	-----------------------------------

表 2 研究代表者と研究課題一覧 (平成 8 年度採択分)

No.	氏名	研究課題名	所属
8-1	家 泰弘	微細構造におけるスピン量子物性の開拓	当時) 東京大学物性研究所 教授 現) 東京大学物性研究所ナノスケール物性研究部門 教授
8-2	大塚 洋一	金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用	当時) 筑波大学物理学系 教授 現) 筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻学際物質科学研究センター量子制御コア 教授
8-3	岡 泰夫	ナノ構造磁性半導体の巨大磁気光学機能の創出	当時) 東北大学多元物質科学研究所 教授 現) 東北大学多元物質科学研究所 教授
8-4	小宮山 進	量子構造を用いた遠赤外光技術の開拓と量子物性の解明	当時) 東京大学大学院総合文化研究科 教授 現) 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻相関基礎科学系 教授
8-5	山中 昭司	ナノ物質空間の創製と物理・化学修飾による物性制御	当時) 広島大学大学院工学研究科 教授 現) 広島大学大学院工学研究科物質化学システム専攻応用化学講座 教授
8-6	横山 正明	有機/金属界面の分子レベル極微細構造制御と増幅型光センサー	当時) 大阪大学大学院工学研究科 教授 現) 山形大学工学部機能高分子工学科 特任教授

表 3 研究代表者と研究課題一覧 (平成 9 年度採択分)

No.	氏名	研究課題名	所属
9-1	井口 家成	異方的超伝導体の量子効果と新電磁波機能発現	当時) 東京工業大学大学院理工学研究科 教授 現) (独)物質・材料研究機構ナノシステム機能センター原子エレクトロニクスグループ 特別研究員
9-2	小倉 睦郎	原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子	当時) (独)産業技術総合研究所光技術研究部門 主任研究官

		効果	現) (独) 産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 主任研究員
9-3	讃井 浩平	自己組織化量子閉じ込め構造	当時) 上智大学理工学部 教授 現) 上智大学 名誉教授
9-4	白田 耕藏	量子固体と非線形光学：新しい光学過程の開拓	当時) 電気通信大学電気通信学部 教授 現) 電気通信大学電気通信学部量子・物質工学科 教授
9-5	山下 幹雄	サイクル時間域光波制御と単一原子分子現象への応用	当時) 北海道大学大学院理工学研究科 教授 現) 北海道大学大学院工学研究科 教授

§ 2. 3 研究総括・領域アドバイザー

表 4 研究総括²・領域アドバイザー³一覧 (敬称略)

氏名	所属 (当時)	所属 (現)	CREST との関係
川路 紳治	学習院大学 理学部長 理学部 教授	学習院大学 名誉教授	研究総括
川畑 有郷	学習院大学 理学部 教授	学習院大学理学部 教授	領域アドバイザー
小林 俊一	理化学研究所 理事長	秋田県立大学 学長	領域アドバイザー
榑 裕之	東京大学 生産技術研究所 教授	東京大学生産技術研究所 教授	領域アドバイザー
寺倉 清之	工業技術院 産業技術融合研究所 主席研究官	北海道大学 創成科学研究機構 教授 (兼) 産業技術総合研究所計算科学研究部門 研究コーディネータ	領域アドバイザー
花村 榮一	アリゾナ大学 光科学センター教授	千歳科学技術大学光科学部 教授	領域アドバイザー

² 研究総括：研究領域の運営の責任者として研究課題および研究代表者の事前評価(選考)、中間評価、事後評価を行う。中間評価、事後評価は、以下の URL 参照。

<http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/eval/eval.html>

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)、中間評価、事後評価、及び研究推進に関するアドバイスを行う。

渡辺 久恒	日本電気株式会社 中央研究所 研究開発グループ支配人	(株)半導体先端テクノロジーズ 代表取締役社長 (独)物質・材料研究機構 監事	領域アドバイザー
-------	----------------------------	--	----------

§ 2. 4 有識者

本件調査において協力いただいた有識者の一覧を表 5 に示す。

表 5 有識者一覧 (50 音順、敬称略)

氏名	現所属・役職
青柳 克信	東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授
神谷 武志	(独)大学評価・学位授与機構学位審査研究部 客員教授
川畑 有郷	学習院大学理学部 教授
榊 裕之	東京大学生産技術研究所 教授
曾根 純一	日本電気(株)基礎・環境研究所 所長
細野 秀雄	東京工業大学応用セラミックス研究所 教授
松本 繁幸	キャノン株式会社 常務取締役 デバイス開発本部 本部長
渡辺 久恒	(株)半導体先端テクノロジーズ 代表取締役社長 (独)物質・材料研究機構 監事

§ 3. 調査方法と経過

図 1 は調査方法の全体的なフローをまとめたものである。まず (1) 領域の概要や、研究代表者らの最新の連絡先等の基礎データを調査した後、(2) 研究期間中については研究終了報告書掲載のもの、研究期間終了後については検索により発表論文、出願特許等のリストを作成し、さらに論文については被引用件数を、特許については成立状況を調査した。次いで、(3) 整理したデータ及びアンケートを研究代表者に送付し、情報の補充と確認を行った。さらに、(4) 調査結果を基に聞き取り調査対象者を選定した上で、研究代表者への聞き取り調査を実施し、(5) 有識者の聞き取り調査、(6) 一般研究者へのアンケート調査を行い、最後に (7) 研究総括による総評、を受けて報告書を作成した。

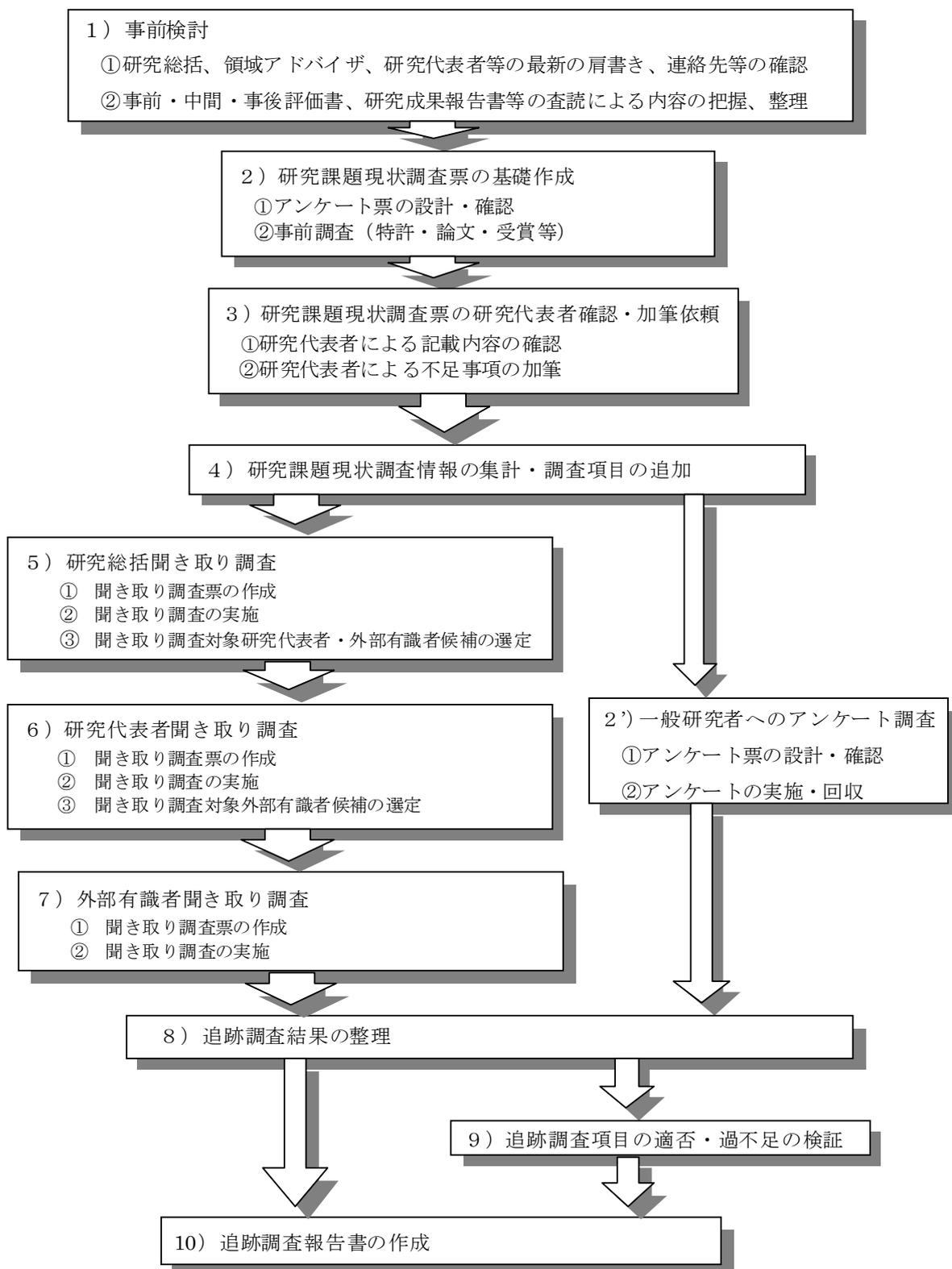


図 1 追跡調査の実施フローチャート

§ 3. 1 事前検討

(1) 追跡調査で参考とした資料と状況把握

調査対象研究領域に関する公開データ、即ち中間課題評価書、事後課題評価書、研究終了報告書、研究実施報告書、および事後領域評価結果等の資料について調査し、研究実施期間中および終了時の研究状況、研究成果を把握した。その上で、研究課題ごとの研究の狙い、研究成果等についてのポイントを一覧表にまとめた（別添参考資料4参照）。

(2) 各研究課題における成果の追跡調査

研究成果、発展状況等に関する情報収集のため、以下の項目で調査対象研究領域の全研究課題ごとに資料（研究課題現状調査票）を作成した。

－課題研究期間中の研究実績

- ・各課題の終了報告書に報告のあった全論文の被引用件数
- ・同じく報告のあった主要特許の概要と成立状況

(3) 課題研究終了から現在に至るまでの研究状況、研究成果の概要

－研究状況・研究実績

- ・課題研究の成果に基づく、論文およびその被引用件数
- ・課題研究の成果に基づく、特許の概要および成立状況

－競争的資金獲得状況

・課題研究期間中の研究成果に基づいて課題研究終了後に獲得した、もしくは現在実施中の競争的資金制度名

これらのうち、論文および被引用件数についてはトムソン ISI 社の Web of Science⁴および Google Scholar⁵を用いて平成 20 年 4 月に調査を実施し、特許検索については、基本的には日本国特許庁の電子図書館⁶および欧州特許庁の esp@cenet⁷ を用いて、平成 18 年 10 月および平成 20 年 4 月に調査を実施した。また競争的資金獲得状況については、内閣府の競争的研究資金制度一覧表⁸をベースとして平成 18 年 10～11 月時点での各制度のホームページを

⁴ <http://www.thomsonscientific.jp/>

⁵ <http://scholar.google.com/>

⁶ <http://www.ipdl.inpit.go.jp/homepg.ipdl>

⁷ http://ep.espacenet.com/advancedSearch?locale=jp_EP

⁸ <http://www8.cao.go.jp/cstp/compefund/ichiran.html>

閲覧することにより研究資金獲得者のリストを作成した上で、研究代表者および共同研究者の獲得した競争的研究資金を抽出した。

(4) 研究代表者による調査結果の確認

調査結果は研究代表者に送付し、内容を確認していただくとともに表 6 に示す情報を提供していただいた。なお、調査時期は平成 18 年 12 月であり、最終的には 14 名（74%）の研究代表者から回答をいただいた。

表 6 研究代表者に対する提供依頼情報

項目	提供依頼情報
研究期間中の発表論文	主要論文（5 報）の選択
研究期間終了後の発表論文	CREST との関連の有無
研究期間中の出願特許	特許実施の有無
研究期間終了後の出願特許	特許実施の有無、CREST との関連の有無
獲得した研究助成金	期間、名称、金額
受賞	時期、名称
その他の業績	時期、内容

§ 3. 2 書面でのアンケート調査

上記の調査だけでは把握が難しい、研究の継続・発展状況、波及効果等についての情報を提供していただくことを目的として、研究代表者に対するアンケート調査を実施した。アンケート票（別添参考資料 5 参照）は基本的には選択式の設問としたが、各項目の具体的内容について自由記述式での回答も併せて求めた。

調査時期は§3.1(4)と同時に行った。以下、その調査項目を示す。

①研究の継続・発展状況

課題研究終了後、さらに CREST 研究課題に関連する研究を継続して実施していた場合について、その取り組み状況。

②代表的研究成果

上記に関して創出された代表的な研究成果内容。

③科学的・学術的波及効果

課題研究終了後、CREST 研究課題の内容に関連して行われた研究の成果が、関連する他分野の研究に及ぼした間接的な学術的波及効果。

④産業技術的・経済的波及効果

課題研究終了後、CREST 研究課題の内容に関連して行われた研究の成果が、なんらかの産業活動に及ぼした技術的・経済的波及効果

⑤社会的波及効果

研究課題終了後の研究活動の中で、研究課題の内容に関連して行われた研究の成果が、社会への還元の見点から見て及ぼした波及効果

⑥人材育成効果

若手人材の育成という視点から見た影響

⑦JST、CREST 事業に対する意見・要望(自由記述のみ)

§ 3. 3 研究代表者聞き取り調査

「§3.1 事前検討」の調査結果を踏まえて、各研究課題を表 7 (29 ページ) に示す様にカテゴリ別に分類したうえで各カテゴリから代表的な研究課題を選定することを基本とし、研究課題現状調査票の結果も勘案して、聞き取り調査対象研究代表者を 6 名選定した。これらの研究代表者に対して、専門調査担当者が面談式の現地聞き取り調査を行うことにより、個別の研究課題まで踏み込んだ調査を実施した。調査時期は平成 19 年 1 月である。聞き取り調査に当たっては、§3.2 までの調査結果を整理した資料および質問事項を事前に送付して効率化を図った。質問項目は以下の通りである。

①当該研究課題の学術的な意義および位置づけ

当該研究課題のねらい・研究構想の今日的視点から見た場合の意義、位置づけ、また世界的に見た研究水準・技術水準の中での位置づけ

②当該研究課題の発展状況

③当該研究課題の特筆すべき研究成果、及び科学技術への貢献

④当該研究課題の社会的・経済的な効果・効用および波及効果

⑤当該研究課題に携わった研究者の成長・発展状況

⑥CREST 制度に対する意見

⑦イノベーション創出の観点からの JST や CREST 事業に対する意見

§ 3. 4 有識者聞き取り調査

本件調査対象研究領域に深い学識を有する領域アドバイザー、および領域アドバイザーから推薦していただいた学識経験者の中から、表 5 (6 ページ) に示す方々を有識者として選定し、平成 19 年 1 月に面談式の現地聞き取り調査を実施した。「§3.3 研究代表者聞き取り調査」を実施した各研究課題を中心として、研究期間終了後現在に至るまでの、CREST 研究課題に関連する、あるいは派生する研究成果、科学技術の進展への貢献等について客観

的な評価を得ることが目的である。聞き取り調査に当たっては、§3.3 までの調査を整理した資料および質問事項を事前に送付して効率化を図った。質問項目は以下の通りである。

- ①各研究課題の学術的な意義および位置づけ
- ②各研究課題の発展状況
- ③各研究課題の特筆すべき科学技術への貢献
- ④各研究課題の研究成果の具体化例

研究課題およびその後の関連研究から得られた成果が、産業的・経済的、社会的に波及効果を及ぼしている例

- ⑤各研究課題への参加研究者の活動状況
- ⑥CREST 制度に関する意見
- ⑦イノベーション創出の観点からの JST に対する意見

§ 3. 5 一般研究者アンケート調査

調査の客観性をさらに高めるためには、できるだけ幅広く外部の意見を採集することが望ましい。物理学、化学等、当該研究領域と関連のある分野における研究者を対象とした Web アンケート形式によるアンケート調査を平成 19 年 1 月下旬～2 月中旬にかけて行い、研究成果の意義・発展や波及効果等に関する意見を更に収集した。

アンケート対象者としては、JST のデータベースである研究開発支援総合ディレクトリ (ReaD) を利用して、本件調査対象領域と一致すると考えられる以下の研究分野にメールアドレスを登録している研究者の中からランダムに約 2,000 名の方を選定した。

- ①物理学 (振動・音響、流体力学、液体・プラズマ・放電、機械的性質と熱物性分野を除く) ; 登録数 6,439 件
- ②基礎化学; 登録数 3,219 件
- ③科学技術一般領域のうち計測学一般; 登録数 174 件

19 の研究課題のうち、回答していただく研究課題の選択はそれぞれの回答者に任せた。アンケートは無記名で実施したが、回答者に関する次のような情報は提供していただいた。

所属：大学等、公共研究機関、企業の別

年齢：20 歳代、30 歳代、40 歳代、50 歳代、60 歳代の別

所属学会：研究代表者の所属している学会のリストから選択

各質問項目は回答が容易になるように 4 段階評価とし、その評価の理由・背景およびコメント等を自由記述していただくようにした。質問項目の概要は以下のとおりである（なお、使用したアンケート票については別添参考資料 6 参照）。

回答者に関して；

当該課題と関連する領域において研究を実施しているか否か

各研究課題に関して；

当該領域における研究成果、及び当該領域分野への貢献の程度

当該領域を含む研究分野の現在の発展状況

当該領域における社会的・経済的な効果・効用および波及効果の程度

CREST のような高額の研究費の有効性

II. 研究領域における全課題の研究成果の発展状況や活用状況

§ 1. 事前検討:課題研究期間中における研究成果概要

調査対象研究領域に関する中間課題評価書、事後課題評価書、研究終了報告書、研究実施報告書、および事後領域評価結果等に基づいて、研究実施期間中及び研究終了時の研究状況、研究成果について整理した。各研究課題の研究成果概要を以下に示す。

§ 1. 1 人工ナノ構造の機能探索 (研究代表者: 青野 正和)

次世代のナノエレクトロニクス素子の開発を目指し、

1) その一つの主要な研究課題であるナノスケールでの電気特性を計測するために、独立に駆動できる 2、3、4 本の探針を持つ多探針走査型トンネル顕微鏡 (Multiprobe scanning tunneling microscope: MT-STM) を世界に先駆けて開発した。

2) この多探針 STM を用いて、シリコン半導体表面、フラーレン重合分子膜、シリサイドナノ細線などの電気伝導を直接計測することに成功した。

3) グラファイト下地の上に作成したジアセチレン化合物である 10,12 ペンタコサジン酸分子の単分子膜の 1 点に STM の探針を用いて電気パルスの刺激を与えることによって、連鎖重合を開始させ、ポリジアセチレン重合分子の導電性ナノワイヤを作成することに成功した。これはナノメートルの位置精度で任意の点を結ぶパイ共役重合分子のワイヤが形成できることを意味する。

4) ナノ構造のデバイスとして当初の構想にはなかった全く新しい概念で動作する独創的な量子効果原子スイッチ (Quantized-Conductance Atomic Switch: QCAS) の開発に成功した。これは Ag 原子のクラスタの析出と分解・消滅をオン、オフ動作に利用するまったく新しい動作概念のスイッチであり、スイッチング電圧は 10mV 程度と小さく、スイッチング速度は少なくとも 1MHz 以上であることを確認した (理論的には 10 GHz 程度まで期待できる)。1×2 のクロスバー型の量子電導原子スイッチのアレイを製作し、基本的な動作を確認した。さらに、この探針が多段の量子伝導を示すことから、多値のメモリに使うことも期待された。

5) ナノ構造機能の理論的探索も行い、分子によって架橋された接近した金属電極間に電流を流すと、架橋している分子の内部に電極間電流よりも桁違いに大きな渦電流が流れる場合があることが分かった。

§ 1. 2 STM 発光分光法と近接場光学分光法による表面極微細構造の電子物性の解明

(研究代表者：潮田 資勝)

表記課題を2つのグループが分担した。

東北大(当時)の潮田グループは、STM 発光分光と短パルスレーザーを組み合わせ、ピコ秒の時間分解能を有する STM 発光分光システムを構築し、究極的には、個々の分子を同定することを目指した。先ず Au(110)-(2×1)と Si(111)-(7×7)の清浄表面、Au(111)表面に弱く化学吸着した C60 分子と Cu(110)表面に(2×1)構造で化学吸着した酸素原子の原子分解能 STM 発光分光に成功し、スペクトルの発現機構も解明した。次いで半導体量子構造(超格子、ナノ微粒子、劈開面)を STS で計測し電子物性・光物性を解明した。またピコ秒レーザーでピコ秒の電子トンネルが誘起されることを発見し、時間分解 STM 発光計測に成功した。ハード面に関しては、高い STM 発光効率を有する探針と超伝導探針の製作技術を開発し特許を出願したこと、複数本の光ファイバを用いた STM 発光集光設計・試作・評価を行い、集光立体角をほぼ加算的に増加させうることを実証したことがあげられる。

宮野グループは、動的電気四重極トラップに捕捉された微小液滴の固有モードと液滴内色素発光の相互作用を初めて定量的に検証した。また走査電子顕微鏡(SEM)で観察しながら微小球を基板上に任意の構造に配列する他に例のない方法を確立し、その方法で作成した一層または二層の結晶構造(フォトニック結晶)における光の固有モードを調べ、理論計算とのよい一致をみた。二層構造の場合に特異的に発生する回折と屈折の相乗効果を発見し、この現象が近接場を介したモード結合様式のモデルで説明できることを示した。さらに形・大きさが既知の金属微粒子の局在プラズモン散乱スペクトルを観察し、理論と半定量的な一致を見た。表面、微小領域での磁性はプロジェクト発足後に取り上げた課題であるが、Ni のポイントコンタクトにおける量子化伝導が磁化に依存すること、FM 変調法による磁気力顕微鏡を開発し磁性酸化物薄膜の磁区観察を行ったこと、遷移金属酸化物の光励起による絶縁体・金属相転移を差分反射顕微鏡法によって実像観察することに成功するなどの成果があった。

§ 1. 3 超構造分子の創製と有機量子デバイスへの応用(研究代表者:雀部 博之)

本課題は、2つのグループが分担した。理化学研究所を中心とする「超構造分子」グループ(雀部ら)は、トポロジカルに構造制御された“超構造分子”(Hyper Structured Molecules, HSM)や超構造体を設計・合成し、量子ドット・量子細線等の光機能性量子効果デバイスを創製することを目指した。東京大学を中心とする「有機量子スピン素子」グループ(菅原ら)は、トポロジカルに設計された π 電子系が、結合切断・電子授受をトリガとして分子内でスピン整列し高スピン状態を実現することを利用して、“量子スピン素子”(Quantum Spin Device)を創製することを目指した。

「超構造分子」グループでは、コア、ラテラル双方部分での多様な機能発現が可能なポリアミン系 dendritic の合成法を確立し、種々の高世代 dendritic の一段階構築を可能に

した。光捕集系としてアントラセン誘導体を末端に有する剛直なカルバゾールデンドロンを合成し、カルバゾール部位からアクセプタ部位への高効率な分子内エネルギー移動を確認した。またデンドロンの世代が上がるにつれて光捕集能が向上することを明らかにした。多分岐構造での光エネルギー移動の発現は、自然界の光合成系に最も類似した人工光合成系である。一方、導電性と光透過性を有する光ファイバをカンチレバーとして用いた SNOM / STM 同時測定装置を開発し、同一箇所での原子スケールの分解能を有する STM 像と近接場光学像を直接観察した。

「有機量子スピン素子」グループでは、まず新規分子スピンシステムの構築を目指し、配列制御部位を組み込んだ種々のスピン分極分子が合成され、HQNN などの水素結合性結晶からなる有機強磁性体、低次元スピン系が実現された。次に、操作型スピンシステムの開発を行い、電子授受スピン変換系として“スピン分極ドナー”というドナーラジカルを創出した。集積化により伝導電子を介したスピン整列系について導電性と磁性を併せ持つイオンラジカル塩が得られている。さらに精密設計スピン分子として π 系ラジカルを、チオール基を介して直接金基板あるいは金ナノ粒子に化学蒸着できた。集積型量子スピンの開発に有用である。超構造分子を量子ドットとみなし、単分子計測を目指した超構造スピン分極ドナーを創製した。

平成 11 年から参加した「DNA」グループ（下村ら）は、気液界面における DNA とカチオン性単分子膜を利用することで、単一 DNA 分子を伸張し固体基板に固定化することに成功した。またアクリジンの長鎖誘導体を DNA 単分子膜にドーパントとしてインターカレートして、単一 DNA 分子の光導電性について、AFM 探針を用いた微小領域伝導度測定装置を作製して測定に成功した。

§ 1. 4 量子場操作（研究代表者：清水 明）

電子場と光子場が量子化される極微細構造を設計し、人工的に創製することを目標にした。具体的な研究テーマは、次の 4 つに大別される：①量子場レーザー・原子波レーザー、②少数光子光非線形、③微細発光ダイオードにおける光子場制御、④基礎理論の確立・新しい可能性の理論的検討。これらを、いくつかのグループごとに担当した。

清水グループでは、相互作用するボゾン系の基底状態の堅牢性に関する検討を行ったが、この結果は量子計算機に使われる量子状態の安定性の評価に適用可能性がある。また電子・正孔凝縮系に電子をドーピングした系で新しい相を発見、開いた系の非平衡統計物理学の問題点を解決、相互作用からくる量子系の測定限界を指摘、物質中の光の量子効果に関する従来理論の誤りを訂正、電子溜りと結合した電子系の超放射現象に特徴的振動の出現を指摘、励起子の有効相互作用を繰り込み効果を用いて導出、強相関係の非線形光学応答にポンプ光の寄与を繰り込む方法を提案、などの一連の成果を得た。

久我グループでは、Rb原子を用いて原子気体のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を日本で初めて実現した。また原子波をコヒーレントに増幅することに世界で初めて成功した。光-原子相互作用における共振器効果 (Cavity QED) では、1個の原子で光パルス伝播を制御可能であることを示した。量子ゲート (量子計算機) の基本的技術となりえる結果である。

清水富士夫グループでは、原子ホログラフィの高度化に成功、中性子光学に静電界凸レンズを利用できることを初めて実証して実時間電場制御原子ホログラムを実現、レーザー冷却した準安定状態ネオンを使って固体表面からの量子反射を初めて観測して高精度原子光学部品開発への道を開いた、などの成果を得た。

山西・角屋グループでは微細発光ダイオードにおける光子場制御について研究し、広帯域、微弱サブポアソン光発生のダイオードを提案し実証、定電圧源駆動におけるサブポアソン光発生を初めて提案し実証、共鳴励起した励起子・光子強結合系で THz 帯電磁波が放射されることを実証し量子ビット・制御 NOT 動作・位相シフタの実現方式を提案、などの成果を得た。

平野グループでは低速原子線を発生する方法を考案し (特許出願)、ボース凝縮の生成に必要な時間を大幅に短縮した。また全スピンの状態にある Rb 原子のボース凝縮体を光だけでトラップすることに初めて成功した。量子暗号通信では、微弱な光の検出に平衡型ホモダイナミクスを用いる量子暗号を考案し (特許出願)、実証実験、理論的評価を行った。面発光レーザーを用いた光子場操作では、外部共振器を用いて面発光レーザーの雑音を低減できることを明らかにした。

五神グループでは、新たな方法で作製した CuCl 結晶の微小球共振器でレーザー発振および光の分子状態、フォトリックバンド形成を実証、半導体励起子系の共鳴非線形光学応答についての実験と理論解析を行い、励起子を相互作用するボゾン系として扱えば 3 次の非線形光学応答が記述できることを示した、フェムト秒パルスによる縮退励起子分子系 (量子もつれ状態の利用の観点から注目される) を実現、などの成果を得た。

上田グループは、引力相互作用するボース粒子系では気体相の BEC は固体相に向かって巨視的量子トンネリング (MQT) を起こして崩壊することを理論的に予言した。

§ 1. 5 自己組織性分子を用いた新規発光機能材料の設計 (研究代表者:筒井 哲夫)

当初の構想である、有機材料の高度な自己組織性と分子配向性を活用した発光機能材料の開発および量子構造機能として新しい発光機能を発現させ、革新的な発光デバイスの突破口を切り開く目標に沿って、カイラルネマチック液晶構造を利用した円偏光発光、有機・無機ペロブスカイトの有機アミンへの発色団の組み込みによる無機ペロブスカイト励起子からの発色団三重項状態のエネルギー移動に伴う燐光発光の確認、シリカ微小球体配列 (シリカオパール) およびその空隙にポリマなどを充填してシリカを除去した逆オパールによ

るフォトニック結晶などの作成、微小共振器を用いた発光機能の探索などを行った。1999年に Baldo らの Ir (ppy)₃ における三重項の高い発光効率の発表に呼応する形で、有機 EL ディスプレイ実用化への予想を超えた急展開の中で、EL 発光素子の発光の高効率化に研究の重心を移し、三重項発光による量子効率の向上、および屈折率が空気に近い (1.1 以下) 固体としてシリカエアロゲルを発光取り出し面に用いることによる発光取り出し効率の向上などで、EL 発光素子の発光効率の向上を示した。

将来有機 EL は外部量子効率として 40% 程度、視感度効率としては 80~100 lm/W の高い効率を利用できる高効率面状光源に成長する道筋が見えてきた、との見通しを得た (当時)。

§ 1. 6 配列したマイクロ空間での新物質系の創製と物性 (研究代表者: 寺崎 治)

その微小さゆえに、従来から構造解析手法として確立している X 線回折を用いることのできないマイクロ多孔体 (ゼオライトなど、孔の径 20 Å 以下) とメソ多孔体 (孔の径 20~500 Å) に対して、電子線回折像から X 線回折の直接法を用いて構造解析する新しい手法を開発した。対象は SSZ-48 を手始めとして、さらに他のマイクロ、メソ多孔体まで広げ、その 3 次元構造を決定する方法を世界で初めて提示した。

やはり X 線回折では構造解析どころか晶系すら確定できない 3 次元のシリカメソ多孔体の例として SBA-1、SBA-16 を用いて、これに対する複数の方向からの HREM 像をフーリエ変換して原子構造因子の大きさと位相をコンピュータで一意的に決定し厳密に 3 次元構造解析する方法を開発した。

無機-有機ハイブリッドメソ多孔体の合成と構造評価に世界で初めて成功した。

多数の新型ゼオライト結晶およびメソ多孔体を合成し、それらの構造解析、構造評価、物性の解明を行なった。

層状ケイ酸塩を用いることによる、ゼオライトの新規合成法を開発した。

解析によって構造を確定され、さらに構造が制御されたゼオライトおよびメソ多孔体の配列空間を利用した新規な物質を創製した。例えばメソポーラスシリカを鋳型にしたメソ炭素多孔体の発見、またそれへの白金ナノワイヤの分散構造の解明などがある。

配列クラスタの作成と各種物性の研究から、多くの量子パラメータとクラスタの s 電子との関連を見つけ、強磁性の発現という劇的な物性変化の要因を突き止めた。

§ 1. 7 3次元集積量子構造の形成と知能情報処理への応用 (研究代表者: 廣瀬 全孝)

シリコン量子構造を用いて室温動作する知能情報処理機能を実現するために、Si 量子構造形成技術、1 電子トランジスタなどの素子化技術、それらの回路理論の開発を進めた。

Si 量子ドットの自然形成メカニズムの解明とドット位置制御法の開発では、SiO₂ 表面を局所的に水素化して SiOH 終端にすれば、その場所に Si ドットを形成できることを解明し、水素分圧下 STM の PtIr チップにより Si ドットの 2 次元配列が形成できることを示した。

Si 量子ドットフローティングゲート MOSFET の動作機構の解明では、ドレイン電流が正のゲートパルスに対して段階的に減少し、しきい値電圧も段階的にシフトすることを明らかにした。

30nm ゲート長 MOSFET の開発と動作解析では、ショートチャネル効果を抑えるためにソース・ドレイン接合深さ 20nm を Sb⁺イオン注入で実現し、ゲート長 26nm までのトランジスタの室温動作を確認した。

厚さ 1nm の SiO₂ 膜で隔てられた 3 層の Si 量子ドット (平均高さ 3.3 nm) 構造において、ランダム・テレグラフ・ノイズ (RTN) の電流ステップ高さがゲート電圧の指数関数に依存し、また RTN 周波数もゲート電圧の指数関数に依存することを見出した。

3次元集積量子構造による確率的連想処理システムの提案とシステム評価では、確率的な連想処理アルゴリズムを提案し、単電子トランジスタを用いた回路構成を提案した。またシステムとしての有効性を評価するために、既存 CMOS 技術を用いてエミュレータ LSI を開発、動作確認を行った。さらにシステム多重量子ドット連想処理回路を提案し、室温動作の可能性を示した。

§ 1. 8 スピン計測—スピン SPMの開発とスピン制御— (研究代表者:武笠 幸一)

本課題は、スピン状態が制御された表面状態の物質創製を行おうとするものであった。そのために、物質表面のスピン状態を原子分解能で測定可能な走査プローブ顕微鏡 (スピン SPM) —スピン偏極走査型トンネル顕微鏡 (SP-STM) 及び交換相互作用力顕微鏡 (EFM) の開発を行った。これは、ナノ構造の磁性の研究ならびに磁気記録等応用面においても強力な計測手段を提供することになる。

スピン偏極走査型トンネル顕微鏡 (SP-STM) の開発では、スピン偏極した表面準位を有する c (2×2) Fe 磁性体薄膜試料を作成し、GaAs 単結晶基板を (NH₃)₂S 中で劈開したスピンプローブを作製した上で、プローブへの右円偏光照射時と左円偏光照射時の電流変化を画像化することにより、Fe (100) エピタキシャル薄膜のスピン偏極の観測に成功した。

交換相互作用力顕微鏡 (EMF) の開発では、まず、第一原理計算を行い Fe 薄膜探針と試料間に働く相互作用力の理論的検討を行った。次いで試料としての反強磁性 NiO (100) 劈開面の作製技術を開発して、Si 探針および Fe 探針による非接触原子間力顕微鏡 (NC-AFM) 観察を行った。データ解析法 (重ね焼き法) を考案し、スピン偏極度を表わす原子高さの非対称性の大きさが結晶方位に依存する異方性を示すこと、異方性が NiO のスピン配列と一致すること、非対称性が Fe 探針に起因するもので、強磁性体探針を用いた NC-AFM により交換相互作用力が検出されたことを明らかにした。

ナノ構造におけるスピンの理論と応用では、プローブ顕微鏡の探針に適した III-V 族化合物 (GaN) のナノ構造における磁性を現象論的、第一原理的に調べ、探針先端のナノ構造内ではスピンの自発的に偏極していることを予測した。またナノワイヤの構造とスピン電子

状態について、異常原子間距離の生成と崩壊の原理が、第一原理計算によるスピン電子状態から説明できることを示した。磁気抵抗効果による交換相互作用の検出については、微細な磁気抵抗 (MR) 素子を搭載したマイクロカンチレバーを作製し、走査型磁気抵抗効果顕微鏡 (SMRM) を開発した。さらに fcc Fe 薄膜表面の磁気モーメントと Cu 基板の表面粗さとの相関を検証し、強磁性/AlGaAs/p-GaAs の接合でスピン偏極電子の強磁性金属から半導体へのトンネリング注入を AlGaAs/p-GaAs 接合での蛍光の円偏光で検証した。

§ 1. 9 微細構造におけるスピン量子物性の開拓 (研究代表者: 家 泰弘)

AlAs/GaAs 界面に形成される 2次元の電子ガスは、極低温 (ミリ K) 環境では電子の mean free path が 8 ミクロンという理想的な電子ガスである。

この状態を利用して、2次元電子系の面に平行な周期的空間変調磁場がある場合とない場合の抵抗の違いを測定し、その違いを電子散乱機構と不純物散乱機構によって解釈した。また 2次元電子系の面に垂直方向に磁場をかけた場合に、面に平行方向に流れる電流が示す量子ホール効果において、2次元面内にかかる静電ポテンシャルを周期的に変調させた場合の複合フェルミオンのスピン分極と高純度サンプルが示すストライプ相の性質を調べた。また、AlAs/GaAs の AlAs 上に電極を形成すると、電極の下だけに電子が流れるような系を作ることができる。このことを利用して、電子ビームを使って 0.1μ 幅の量子ワイヤで描いた、 2μ 径のアハラノフ・ボーム (AB) リングと AB リングの片側の腕の途中に形成した量子ドットとの複合系において、片方の腕にある量子ドットが示すクーロン振動が、他方の腕の電子波との干渉によって、非対称になるファノ効果を観測した。2次元系におけるファノ効果の観測はこの研究室が世界で始めてであった。

高品質の希薄磁性半導体 (Ga,Mn)As を作製する方法として、Mn をドーピングしながら GaAs を分子線エピタキシ (Molecular Beam Epitaxy, MBE) で成長した後に低温熱処理による膜質の大幅な改質方法を開発、確立した。この方法により、(Ga,Mn)As のキュリー温度は 150K まで上がった。

窒素吸着銅(100)表面に自己形成される 7nm 間隔の正方格子状ナノ構造を利用して Co、Fe 系の磁性ドット配列を作製する手法を開発した。Co ドット配列では面内磁化であるのに対して、Fe の場合には面垂直磁化であった。これを高密度磁気メモリに応用する可能性について民間企業との共同研究を進めている。

§ 1. 10 金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用 (研究代表者: 大塚 洋一)

実験を行う「微小トンネル接合」研究グループと理論の「量子カオス」研究グループの 2 グループ体制で研究を遂行した。

(1) 「微小トンネル接合」研究グループ

クーパー対数が 1 対だけ異なる 2 つのエネルギー的に縮退した量子状態を持つ 2 つの微小な超伝導体がトンネル結合すると、エネルギー分離した 2 つの量子状態に分裂する。このエネルギーの分離を分光学的手法と、接合にパルス電圧をかけた場合の振動電流の観察で証明した。これらの実験は、量子計算実現の観点から、世界的に注目され、欧米に複数の追従研究グループが生まれた（当時）。なお、電荷と共役な関係にある磁束を利用した量子ビットに関しても、予備的な実験を行った。

微小ジョセフソン接合と並列結合する抵抗の組からなる単一の素子、その 1 次元配列、2 次元配列を作成し、抵抗による散逸によって、超伝導から絶縁体への転移を観測し、理論解析した。次元が 2 次元から 1 次元に近づくと、量子揺らぎが大きくなって、超伝導から、絶縁体への転移が起こりやすくなることなどを実験的に検証した。このような系の超伝導絶縁体転移は理論の主要なテーマになっており、この実験はこうした分野の研究に基礎データを提供した。

単電子トランジスタ（Single Electron Transistor、SET）を用いた測定によって、Ni/Co/Ni を流れる電流が磁場に対して周期的に変化すること（磁気クーロン振動）、超伝導ディスクで、高磁場では巨大渦糸状態が、低磁場では複数渦糸状態が現れること、10nm 級のアルミニウム島電極中の離散電子準位が、外径 10nm の多層カーボンナノチューブの島電極の内部電子状態により観察できることなどを明らかにした。抵抗結合型 SET（R-SET）の開発、室温動作 SET の開発、電子トラップ型少数電子メモリの試作、SET 型走査型表面電荷顕微鏡の開発を進めた。

（2）量子カオス研究グループ

エネルギー準位がランダムに分布する微粒子の集合体からなる量子力学系のモデルとして、外場と結合する、ランダム行列モデルを導入し、外場の大きさを変えることにより、普遍的な領域から、非金属的領域へ移行する解析解を得られるようにした。この解析解で、行列の大きさ N を大きくして、準位間距離を小さくするダイソンの極限を調べることができ、普遍性の起源を調べる有力な手法を提供した。

§ 1. 1.1 ナノ構造磁性半導体の巨大磁気光学機能の創出（研究代表者：岡 泰夫）

II-VI 族半導体に磁性イオンを含む磁性半導体の量子ドット、量子細線、量子井戸、超格子をエピタキシ法とリソグラフィ極微細加工を用いて作成し、巨大磁気光学機能を観測した。次元性制御によって生じる新しい量子磁気光学機能を開拓した。研究は「ナノ構造形成グループ」、「ナノ構造評価グループ」の 2 グループ体制で推進された。

磁性半導体量子ドット内では磁氣的交換相互作用の働きで光放射過程が増大し、電子スピンと磁性イオンスピンの相互作用を外部磁場で制御できることが期待される。自己組織化により $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ および $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 量子ドットおよび $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ マトリクス中の CdSe 量子

ドットを作製し、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 量子ドットで、発光強度の磁場による顕著な増大現象を観察した。励起子発光の時間変化については、磁場の印加により $\text{Cd}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{Se}$ 量子ドットの発光寿命が 5 倍以上増大することを観測した。

磁性半導体量子細線の創製と巨大磁気光学機能の開発では、化学エッチング法、リソグラフィ/MBE 法により、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Mn}_y\text{Se}$ 系で世界的に最も細い 20nm の幅の磁性半導体量子細線を作製した。 $\text{Cd}_{0.90}\text{Mn}_{0.10}\text{Se}$ 、 $\text{Zn}_{0.69}\text{Cd}_{0.23}\text{Mn}_{0.08}\text{Se}$ 量子細線で、励起子発光における巨大ゼーマンシフトを観察。細線幅を 20nm まで狭くすると、励起子は高エネルギーシフトした。また [1-10] 方向の GaAs メサ上に、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 量子細線を形成し、高効率発光特性を持つ 1 次元巨大磁気光学機能を確認した。

磁性半導体量子井戸の創製と磁気光学機能性の開発では、 $\text{CdTe}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 系の「2 重量子井戸」における励起子スピン輸送・注入により、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 磁性量子井戸で生成されスピン分極した励起子が、 CdTe 非磁性量子井戸に高いスピン分極を保ったまま注入され、正孔のスピン緩和を経て発光する過程が捕らえられた。一方 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ 量子井戸では、上向きと下向きの電子正孔スピンの状態が $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 井戸層と $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ 障壁層に空間的に分離されることを確認した。また $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{ZnTe}$ 量子井戸では、磁場の大きさにより電子正孔の上向きと下向きスピン状態を、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 層と ZnTe 層で入れ替えることができる。これらの結果は電子正孔スピンの空間的制御を実現したものである。さらに超高速電子現象解明のために、波長可変フェムト秒レーザーパルスで励起し、励起子発光の時間変化を計測する「超高速時間分解発光測定システム」を構築した結果、微細構造における励起子発光の詳細がわかった。

§ 1. 1 2 量子構造を用いた遠赤外光技術の開拓と量子物性の解明 (研究代表者:小宮山進)

赤外光からサブミリ波にいたる電磁波領域は、分子や固体を構成する原子の振動、半導体の浅い不純物や人工ナノ構造の量子準位、超伝導体のエネルギーギャップ等のエネルギースケールに対応する。しかしこの領域は電波と遠赤外の間であり、分光測定がもともと難しい領域だった。本課題構想の第一は、このような電磁波領域の計測技術に、最新の人工ナノ技術を用いてブレークスルー的展開をもたらすことであり、第二はそれに関連して基礎物性研究に新たな展望を拓くことであった。

検出器の開発では、まず磁場中で動作する THz 光子検出器がある。 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ ヘテロ構造中に金属ゲート電極により平面型量子ドットを作成し、強い磁場を印加して、そこに遠赤外光子を入射させて発生する電子正孔対の分極を、量子ドットを単電子トランジスタとして動作させることで検知し、単一光子検出に成功した。次に磁場なしで動作する GHz 光子検出器がある。2 つの隣接する量子ドットを用意し、一方の量子ドット (D2) に光子を入射させて励起電子を一つ追い出す。その結果生ずる D2 のイオン化による静電ポテンシャル

変化を他方の量子ドット(D1)に及ぼして、単電子トランジスタをスイッチングするものであり、ゼロ磁場での単一光子検出に成功した。以上の2種類の単一光子レベルの高感度検出器は従来比1万倍以上の高感度であり、サブミリメートル波から遠赤外光のスペクトル領域の大半をカバーするものである。より短波長の中赤外光領域の検出器の開発も行った。直径4nmオーダの自己組織化InAs量子ドット中の束縛電子を量子井戸に励起する構成で、従来比数十倍の感度を持つ検出器を実現した。

単電子トランジスタはインピーダンスが高く、動作電圧が低いため高速動作が容易ではない。単電子トランジスタ検出器をLC共振器(タンク回路)に組み込み、低周波からマイクロ波領域にいたる雑音を除去することにより、THz単一光子を時定数 $10\mu\text{s}$ で検出することに成功した。

単電子トランジスタ検出器の応用としてイメージングがある。極微領域から放出される極微弱な電磁波を光子レベルで捉えてイメージングを可能にするために、単結晶シリコンの超半球レンズをソリッドイメーション型の対物レンズとした走査型顕微鏡を開拓した。これを用い、量子ホール電子系のダイナミクス理解が大いに進展した。

量子ホール系の基礎物性研究を通して、分数量子ホール電子系の端状態間遷移によるスピンのフィリップ散乱が、核スピン(GaとAs)を分極する事を見出した。核スピン分極の「初期化」「演算」「読み出し」を行い得る“量子ホール固体素子”の実現可能性を示した。

§ 1. 13 ナノ物質空間の創製と物理・化学修飾による物性制御 (研究代表者: 山中 昭司)

物性物理学では、物性制御に必要なキャリア数(電子と正孔)が連続的に変えられ、かつ結晶構造の骨組みは保持されるような物質群が用意されることが重要である。この様な系の実現のためナノスケールの空間(空隙)を有する物質を探索し、新しい高温超伝導体および、超高速スイッチング現象を発見した。研究チームは「物質創製」グループと「光物性」グループから構成された。

「物質創製」グループでは、①シリコンクラスレート化合物超伝導体、 $(\text{Ba}, \text{Na})_x\text{Si}_{146}$ 、(T_c = 約4K)の発見に続いて新超伝導体 $\text{Ba}_8\text{Si}_{146}$ ($T_c=8.0\text{K}$)の合成と物性測定を行った、②C60ポリマ単結晶を初めて合成し、X線による単結晶構造解析に成功した、③シリコン基板上にZintl相シリサイド CaSi_2 、 SrSi_2 、 BaSi_2 、 LaSi_2 、 CeSi_2 のエピタキシャル薄膜を合成し、成長の方位関係を明らかにした、④従来のBCS機構では理解できない、電子ドープ層状窒化物高温超伝導体 ZrNCl ($T_c=14\text{K}$)、 HfNCl ($T_c=25.5\text{K}$)を発見した、⑤MgO基板上にTiN窒化物薄膜をレーザーアブレーションにより一層ずつエピタキシャル成長させることに成功するとともに物性測定した、⑥新規マイクロポア多孔体マンガンチタン酸塩系を合成し触媒特性を検証した、などの成果が得られた。

「光物性」グループでは、無機有機ペロブスカイト半導体 $(\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_4\text{NH}_3)_2\text{PbI}_4$ 薄膜の励起子の室温および低温における光シュタルク効果を調べた。この半導体をフォトニック結晶

スラブに埋め込んだ系が室温で応答速度 200fs 以下の超高速光スイッチとして動作することを示した。また 1次元グレーティングポラリトンフォトリック結晶スラブにおいて、第二高調波が発生することを実験的に確かめた。相関励起子系では、低次元半導体中の「少数励起子系」の現象論的「少数準位モデル」を、励起子ボゾン化法から導出し非線形光学応答を調べた。金属でのフェルミ端異常については、キャリア密度を増加していった場合の励起子構造からフェルミ端異常のスペクトルのクロスオーバを調べ、低密度極限におけるトリオンの吸収につながることを明らかにした。非平衡状態での相転移のプロトタイプモデルとして、有限寿命を持つ粒子の相分離（スピノーダル分解）ダイナミクスを追跡する理論を構築し、有限寿命により長波長の揺らぎの増大が抑制されることで相分離が抑えられることを示した。量子井戸に閉じ込められた励起子の励起子超放射に関しては、バリア層を介して高密度 2次元励起子を配置すると寿命が長くなることを実験的に確認した。また 2次元フォトリック結晶スラブの固有電磁場モードを計算し、渦巻き状、鞍状の電磁場分布が存在することを明らかにし、GaAs 量子井戸のスペクトル分解 4光波混合により、励起子分子のみならずほぼ自由な 2励起子状態も存在することを確認した。

§ 1. 1 4 有機／金属界面の分子レベル極微細構造制御と増幅型光センサー（研究代表者：横山 正明）

本課題開始直前に、研究代表者らが発見した有機顔料薄膜での光電流増倍現象は、有機材料／金属接合界面で起こる電極現象であるとの知見を得ていた。そこで本課題では、まず、(1)電極界面における光電流増倍機構の解明、(2)ミクロな構造制御による増倍感度の向上、応答速度の向上、(3)光センサーだけでなく、光－光変換素子、光増幅素子、光スイッチングなどへの展開を目指した。

高電流増倍現象の解明では、まずペリレン顔料蒸着膜を 2枚の電極でサンドイッチしたデバイスで達成された 10万にも達する増倍率が、有機半導体で起こる普遍的現象であることを明らかにした。増倍現象は、電極金属／有機界面の極微細領域が深く係わった現象であることを解明し、増倍を引き起こす原因が、金属／有機界面の電界によって活性化される構造トラップであるとのモデルを提案した。界面の非接触部分におけるトンネル電子注入による増倍電流は数値計算および実験で確認した。また金電極を剥離し金蒸着膜裏面を AFM で直接観察することにより、光電流増倍の計算モデルの妥当性を確認した。さらに有機半導体 (NTCDA) 単結晶において同様の光電流増倍現象を観測するとともに、AFM 観察から構造的トラップに対応すると考えられる分子オーダのステップの存在を確認した。応用面を考慮すると最大の課題は増倍現象の応答速度であるが、C60／フタロシアニン共蒸着系で立ち上がり 3 ミリ秒の高速応答を達成した。

光電流増倍現象の光機能デバイスへの展開では、まず光－光変換デバイスに関して Me-PTC 分散樹脂膜（光電流増倍層）に Alq3（発光層）、ホール輸送層（TPD）を蒸着した

ITO/Me-PTC/ Alq3/TPD/Au 素子で赤外光 (780nm) から緑色光 (520nm) への短波長化を確認し、光の増幅も達成した。また大面積化が可能な顔料分散樹脂膜を有機感光体に組み込むことにより量子効率が1を越える感光体の創出に成功した。光演算デバイスに関しては、有機/有機ヘテロ接合面での光電流増倍を発見し、これを利用して NOT、OR、AND 光演算デバイスを実現した。増倍機構を組み込んだ有機トランジスタへのアプローチとして、金属/有機界面極近傍に電荷注入電極 (ベース電極) を挿入し、最大約 40 倍の電流増幅に成功した。またガスセンサーへの応用として、増倍光電流、暗電流が酸素ガス圧に敏感な応答を示すことを見出し、酸素ガスセンサーへの展開を図った。

§ 1. 15 異方的超伝導体の量子効果と新電磁波機能発現 (研究代表者:井口 家成)

本課題の目標は、異方的な層状結晶構造において c 軸方向に自然に形成されるイントリニックジョセフソン接合界面で起こる異方的 d 波超伝導体の量子効果の本質を明らかにすることと共に、高温超伝導体で期待される新たな電磁波発振機構を解明すること、その応用可能性を探ることにあつた。

d 波超伝導体の量子効果の研究では、まず Bi2212、YBCO の薄膜成長と微細加工技術を確立し、電極結晶方位接合面の角度がことなる複数のランプエッジ接合を1つの基板に作製し、接合角度をマイクロなレベルで制御した高品質なジョセフソン接合、トンネル接合を実現した。YBCO/I/Ag トンネル接合においては、ゼロバイアスコンダクタンスピークと接合角度の関係から、YBCO 超伝導体が dx^2-y^2 波ペアリング対称性をもつことを検証し、YBCO/PBCO/YBCO ジョセフソン接合では d 波接合の異方性で期待される接合角に依存するジョセフソン電流の存在を実証した。理論解析グループは、理論が予言するゼロエネルギーアンドレーフ束縛状態が表面のステップ近傍に存在することを STM 実験により特定し、その解明に寄与した。素子開発グループ (井口グループ) では、薄膜成長条件の最適化により Bi2212、YBCO を電極とするヘテロ接合の開発に世界で初めて成功し、d 波超伝導ヘテロ接合でジョセフソン効果が予想される計算結果と比較し、新知見を得た。量子効果とその発現機構の問題に対しては、走査 SQUID 顕微鏡を用いて磁束を観察し、転移温度 T_c 以下では、YBCO が転移温度 T_c に至るまで純粋な dx^2-y^2 波対称性をもつことを実証した。さらに T_c 以上では、LSCO 薄膜において新奇な反磁性ドメインを捉えた。これは高温超伝導発現機構に直接関わる超伝導前駆状態であると考えられており、注目された。

新電磁波機能の研究では、Bi2212 単結晶の層状構造への準粒子注入 (電流注入) により生じる鋭い電磁波発振を捉え、ジョセフソンプラズマ放射であることを検証した。フェムト秒レーザー照射技術を用いた研究では、 $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-y}$ (YPBCO)、 $Tl_2Ba_2CaCu_2O_y$ (Tl 2212)、Bi2212、 $Pr_{0.7}CaMnO_3$ (PCMO)、a-GaAs、a-Ge などの薄膜からのテラヘルツ電磁波放射を観測し、ジョセフソンプラズマ放射であることを検証した。応用面では、超伝導電流分布を可視化するテラヘルツ電磁波イメージングを開発した。

§ 1. 16 原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果 (研究代表者:小倉 睦郎)
デバイスへの応用を見据えた低次元量子ナノ構造の基礎物性の解明を目的として、まず、GaAs 半導体上に、約 50Å 径の細線を、外径を 1 原子層の精度で加工する技術を開発し、これまでになく均一で高純度の量子細線を作製することに成功した。方法として有機金属化学蒸着 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition、MOCVD) および分子線エピタキシ (Molecular Beam Epitaxy、MBE) による結晶成長を用いた。

MOCVD によって V 溝型 GaAs 量子細線を高純度化、均一化するために、流量変調法、基板再エッチングによる平滑化、有機砒素 (トリブチル砒素、TBA) によるステップバンチングの抑制などを行い、長さ 2μm 程度まで拡張した 1 次元エキシトン状態を実現した。

MBE による InP 基板上への InGaAs 量子細線の形成では、原子状水素やダイヤモンドソースを用い、幅 20nm、厚さ 10nm の世界最小の InGaAs 量子細線を形成した。

作製した量子細線におけるコヒーレント体積、エネルギー分裂、スピン状態、1 次元エキシトンの挙動などの基礎物性を解明するために走査型顕微鏡 PL、顕微磁気 PL、近接場顕微鏡を開発した。

量子準位がマクロサイズに拡張した V 溝 GaAs 量子細線や、高次 InP 基板上に作製した InGaAs 量子細線で FET を作成した。

量子細線 FET は、光を照射することによりゲート下にホールが蓄積することを利用し、フォトン 1 個あたり約 6 万個という高感度が判明し、高速フォトディテクタとしての可能性を示した。

AlAs/GaAs ファブリペロー型レーザーを流量変調法で作成した。

ファブリペロー型量子細線レーザーで、光導波モードと活性領域とのカップリング (閉じこめ係数) が低くなることへの対策として、利得結合型分布帰還型 (Distributed Feed Back、DFB) 量子細線レーザーを開発した。V 溝量子細線ダイオードを多数並列にならべ、レーザー光を高密度量子細線に対して直交させ、細線に沿った偏波方向を持つ双極子モーメントと結合させる構造をとり、閉じこめ係数の改善を図った。さらに、導波モードの周期に対応して量子細線を配置することにより、DFB レーザーとして発振波長の安定化を達成した。形状保存成長法を用いて一回の結晶成長による利得結合型 DFB 量子細線レーザーを作製した。更に、両端が閉じた有限巾量子細線アレイを形成し、3 次元的なキャリア閉じこめ構造を利用して高変換効率を実現した。

§ 1. 17 自己組織化量子閉じ込め構造 (研究代表者:讃井 浩平)

量子ドットや量子細線、量子井戸のような低次元系半導体は、励起子などの量子閉じ込め効果により、際立った光学特性を示す。そこで、有機・無機層状ペロブスカイト型物質

(RNH_3)₂ MX_4 を用いると、バリア層と閉じ込め層のバンドギャップ差が大きく、励起子を理想的に閉じ込めることができる。このような構造における閉じ込め効果を系統的に調べた。

新規量子閉じ込め構造については、有機・無機ペロブスカイト型化合物で1次元、2次元、3次元とその中間領域などの0次元以外の量子井戸構造を同一構成単位で構築する手法を確立し、低次元系励起子共鳴における大きな非線形性、井戸厚の薄い領域での誘電性増強効果を検証するなど1次元、2-3次元励起子物性の統一的理解を得た。

有機・無機超格子構造については、二段階蒸着法、Langmuir-Blodgett法、Self-assembly法、Self-intercalation法などを開発することにより、ナノスケールでの層状ペロブスカイト超格子形成、および金属性、半導体、強磁性体の物性を示すハロゲン化合物と単分子層レベルで組み合わせた超格子の形成が可能になった。また有機層に発色性の分子を導入して無機層とのエネルギー交換を実現し、さらに有機層に π 共役系高分子を導入し、有機無機半導体超格子を形成した。これによって高効率の非線形励起子共鳴を実現した。

層状ペロブスカイト化合物の応用については、層状ペロブスカイト超格子を発光層とした素子で効率よい緑および紫の発光を得た。またナフタレン発色団からの燐光をデバイスに利用できる可能性を確認した。層状ペロブスカイトは優れた耐放射線材料であり、放射線検出用シンチレータとして、超短パルス放射線の検出、ホジトロンエミッショントモグラフィへの応用が期待される。さらに励起子共鳴の大きな非線形性と速い応答を利用して、室温における超高速シリアルーパラレル変換を実現した。

§ 1. 18 量子固体と非線形光学：新しい光学過程の開拓（研究代表者：白田 耕藏）

本課題では、固体水素を用いて光・物質系の強結合の物理を発展させた。固体水素は、光学遷移のスペクトルが孤立分子（原子）の量子性と固体の高密度性をあわせ持ち、強結合の物理を展開する場として好適な系である。課題の目的は、①量子固体である固体水素で、光の場と物質が強く結合する系の非線形光学・量子光学の研究を系統的に展開する、②単結晶固体水素作製法を開発する、③非線形光学研究の基礎データを与えるものとしてのレーザー分光法に基づく固体水素の分光学的研究を行うこと、の3項目に分類される。

量子固体の非線形光学・量子光学では、固体水素の純振動ラマン遷移に大きなコヒーレンスを生成し強結合状態を準備することにより、高効率な非線形ラマンサイドバンド発生を実現した。この結果は、どのような光でも水素分子の振動周波数に対応する125THzという超高周波で効率良く変調できることを意味する。さらに固体水素の大きなコヒーレンスにより単一のサブフェムト秒光パルス発生を理論的に予測した。

単結晶固体水素作製法については加圧液相成長法および気相成長法を開発した。前者は3重点で単結晶を成長させる方法であり、後者は低温のサファイア等の基板上に水素ガスを吹き付ける方法である。

固体水素の分光学的研究は3つのグループで推進された。電通大非線形・量子光学グループでは、強結合系を実現するために固体水素バイブロン系を、東北大物性グループと共同で時間分解コヒーレント反ストークス光散乱、ラマン損失分光、コヒーレントブリルアン散乱、バイブロンエネルギー緩和計測等で評価した。量子コヒーレンスを用いたパラメトリック過程については、位相緩和の小さなバイブロン系にパルス的に最大に近いコヒーレンスを生成し、 2000cm^{-1} にもわたるバンド幅を持つインコヒーレント光を変調しサイドバンドを発生させること、インコヒーレント光の強度は1光子レベルでも良いことを示した。またパラメトリックビーティングでサブフェムト秒領域の光パルス発生が可能なことを示した。一方、固体水素バイブロンラマン遷移を用いて、透明系でも4桁以上にわたる光パルスの伝播速度が制御できることを理論的・実験的に示した。

京都大高分解能分光グループでは、固体水素中にメタン分子を微量に混在させた結晶を生成し、結晶構造の解析、固体内の励起状態の緩和過程に関する研究を進めた。また東北大物性グループでは、バイブロンの位相緩和、ブリルアン計測、熱緩和計測などを確立した。

§ 1. 1 9 サイクル時間域光波制御と単一原子分子現象への応用 (研究代表者: 山下 幹雄)

本課題は、極限光波研究グループおよび光走査トンネル顕微鏡研究グループで分担した。極限光波の研究では、高出力超広帯域化の研究において、独自の誘起位相変調法により $300\sim 1000\text{ nm}$ 、 $\Delta\nu = 700\text{ THz}$ 帯域高出力コヒーレント光波の発生に初めて成功した。またモノサイクル光化の研究において、超広帯域でかつ任意の分散補償が可能な空間光位相変調法により 3.6 fs (1.67 サイクル) の可視近赤外域では最短の光パルス発生、フォトニッククリスタルファイバ、テーパファイバによる初の光パルス圧縮に成功した。また誘起位相変調光パルス圧縮にも初めて成功した。極限光電場波束計測の研究においては、従来法に比し 100 倍の高感度でかつ初の 1 オクターブを越える超広帯域性を有する独自の変形 SPIDER 法を開発した。汎用性の極めて高いモノサイクル光パルス自動圧縮の研究では、計算機プログラム制御可能な超広帯域チャープ補償法と極限光電場波束計測法とを結合させ、サイクル光波束の一体フィードバック自動制御に初めて成功した。多波長同時波形整形とその STM 技術への応用の研究については、3つの異なる波長でかつ繰り返し THz 光パルス列周波数が互いに異なった光波発生に成功し、その応用として 1 原子レベルでの Si 選択脱離を初めて実現した。さらに極限光波束の非線形伝播の研究においては、緩包絡波近似のない独自のフーリエ直接法などにより、モノサイクル光波束のガラスファイバ非線形伝播でのスペクトル・時間波形のふるまいを初めて解明した。

光 STM の研究では、CW レーザー励起 STM における光変調構造の解析に関する研究において、光励起変調トンネル分光技術を確立し局所光変調バンド構造を初めて観察した、原子分子吸着系のフォトルテージ効果を明らかにすると共にその反応制御を行った、単一分

子制御を実現し直接観察を可能にした、Si 表面低温相構造のドーピング依存性と光変調特性を明らかにした、などの成果が得られた。超高時間分解光 STM 技術の開発に関しては、fs 時間分解 STM (FR-STM) の開発および FR-STM を用いた時間分解測定 (GaNAs) に成功した。

ダイナミクス測定・制御の研究については、BEDT-TTF 系低次元有機伝導体の相緩和とコヒーレントフォノン緩和を初めて観察し、また単一分子操作 (cis-2-butene の回転モード、化学反応制御) に成功した。次いで分子性結晶表面での分子構造緩和の存在を確認し、加えてナノ粒子、DNA 分子のパターニング技術の開発と電流計測を可能にした。さらに単一分子間力測定におけるブラウン運動を初めて観測した。

§ 1. 20 まとめ

各研究課題をそれらの特徴から、A. 物質（有機あるいは無機）、B. 測定法（STMあるいは時間分解）、およびC. ナノ半導体、ナノ金属の伝導、光、スピン、量子場と量子コンピュータ（量子場あるいはデバイス）に分類した。結果を表7に示す。

また、これまで述べてきた各研究課題の研究期間中における成果概要を、研究課題ごとに①対象物質、②構造、③物性、④応用、および⑤理論 に分類して整理した（別添参考資料4参照）。

表 7 各研究課題の分類

A.物質	無機	7-6 寺崎 (ゼオライト)	8-3 岡 (II-V族、磁性不純物、0,1,2次元、光)
		8-5 山中 (Siクラスレート)	
B.測定法	有機	7-3 雀部 (カルバゾール)	7-5 筒井 (キレート、)青色ダイオード
		8-6 横山 (ペリレン)	9-3 讚井 (層状ペロブスカイト)光センサー
C.ナノ半導体、ナノ金属の伝導、光、スピン。量子場と量子コンピュータ。	量子場	7-4 清水 (原子凝縮場、光場)	8-2 大塚 (金属超伝導トンネル、量子コンピュータ)
	デバイス	8-4 小宮山 (QHE、1光子検出)	9-1 井口 (高温超伝導トンネル)
		8-1 家 (QHE、AB効果、半導体に磁性不純物)	
		7-7 廣瀬 (Si 1D線ドット FET)	9-2 小倉 (GaAs、1D光、FET)

§ 2. 研究課題現状調査票および研究代表者に対するアンケート調査結果

§ 2. 1 各研究課題における課題研究期間中の成果状況

§ 2. 1. 1 課題研究期間中における発表論文の状況調査

はじめに、課題研究期間中の発表論文⁹について、19の研究課題ごとに、発表論文数、各論文の他論文による引用状況、発表論文数に対する被引用論文数の割合、発表論文の平均被引用件数および最大被引用件数（発表論文中で最も被引用件数が多かった論文の被引用件数）を調べた。ここで、発表論文の被引用状況に注目したのは、ある研究成果に基づく論文内容が、後続の他の論文に引用される状況を調査することで、元になる論文内容がおよぼす学術的な波及効果や、注目度を測る指標のひとつとなると考えたためである。

ここで、被引用論文とは、他の論文に引用された論文のことである。課題ごとの被引用総数は、各課題にみられる被引用論文の引用件数に関する合算を示す。また、課題ごとの平均被引用件数とは、各課題での発表論文全体数（引用されなかった論文も含む総数）で、課題ごとの被引用総数を除して得られた平均値である。以下、データは平成20年4月時点の調査に基づくものである。

19の研究課題の全発表論文の合計数は1,510報であり、一課題あたりの平均では79.5報となっていた。被引用論文については、全発表論文中1,040報あり、全体の68.9%の論文が引用を受けていた。なお、全論文を対象とした場合、一論文あたりの平均被引用件数は、15.1件であり、このうち、被引用件数が100件以上の論文数は27報に上った（別添参考資料7参照）。

次に、研究課題ごとの論文発表状況の調査概要を示す（図2～図7）。各研究課題については、表7（29ページ）に示した分類にそって、以下、「物質」系、「測定法」系、「ナノ」系（ナノ半導体、ナノ金属の伝導、光、スピン、量子場と量子コンピュータ）の3つにグループ化した。

物質系、測定法系、ナノ系の3グループに分類したうえで、グループごとに発表論文数でソートした結果を図2に示す。図中赤色点線は全課題の平均（79.5報）を示したものである。研究課題ごとの発表数では最多が井口研究代表者の研究課題の201報、最少が横山研

⁹ 研究終了報告書による。

究代表者の 29 報¹⁰と非常に幅が広がった。発表論文数が多かったのは、井口研究代表者に続いて、寺崎研究代表者（165 報）、山中研究代表者（114 報）、山下研究代表者（112 報）であり、以上の 4 課題で発表論文数が 100 報を超えていた。

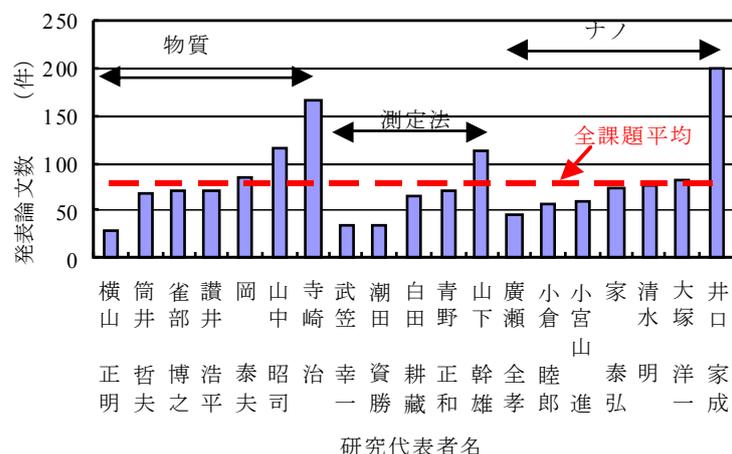


図 2 課題研究期間中における発表論文数（研究課題ごと）

次に、研究課題ごとに全発表論文数に対する被引用論文¹¹の割合（被引用率）を求めたところ、研究課題ごとに多少の差はみられるものの、おおむね平均値付近（65%前後）に分布した（図 3）。80%以上の高い被引用率を示しているのは、小倉研究代表者（発表論文数 57 報、被引用率 89.5%）、清水研究代表者（77 報、84.4%）、山中研究代表者（114 報、82.5%）、筒井研究代表者（69 報、81.2%）の 4 課題である。発表論文数との相関関係は特には認められない。

¹⁰横山研究代表者の研究終了報告書に掲載された論文数は 41 報であるが、課題が採択された平成 8 年以前の論文が 12 報含まれていたため、本報告ではこれを除外している。なお他の研究代表者についても同様の処理を行っている。

¹¹ トムソン ISI 社の Web of Science による検索で、被引用件数が 1 以上であった論文

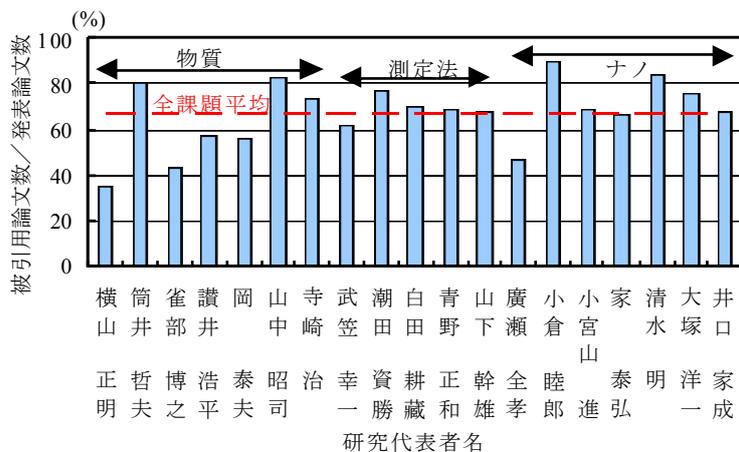


図 3 発表論文の被引用率（研究課題ごと。赤色破線は、全体の平均値を示す。）

平均被引用件数¹²を求めたところ、岡研究代表者の 5.5 件から寺崎研究代表者の 32.7 件まで広く分布していた（図 4）。寺崎研究代表者に次いで平均被引用件数が多いのは、大塚研究代表者（26.2 件）、筒井研究代表者（22.9 件）、青野研究代表者（21.8 件）である。これら 4 研究課題は、注目度の高い論文を多数発表していると考えられる。

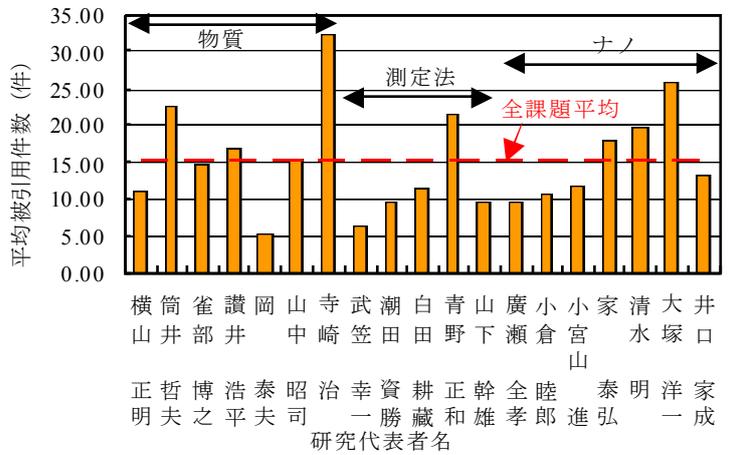


図 4 発表論文の平均被引用件数（研究課題ごと。赤色破線は全体の平均値を示す。）

また研究課題ごとの発表論文中で最も被引用件数が多かった論文の被引用件数（最大被引用件数）を図 5 に示す。大塚研究代表者の 872 件が群を抜いており、次いで寺崎研究代表

¹² トムソン ISI社の Web of Scienceによる検索でヒットした論文の平均被引用件数。従って同データベースに掲載されていない雑誌への投稿論文は含まれていない。

者の 532 件、家研究代表者の 323 件、井口研究代表者の 298 件、讃井研究代表者の 214 件、青野研究代表者の 202 件の順となっている。

なお、課題研究期間中の発表論文の中から、研究代表者に自身の研究において主要論文と位置づけられるもの 5 報を選定していただいた（参考資料 8）が、必ずしも各研究者の論文のうち、被引用件数が上位のものが選ばれているわけでは無かった。

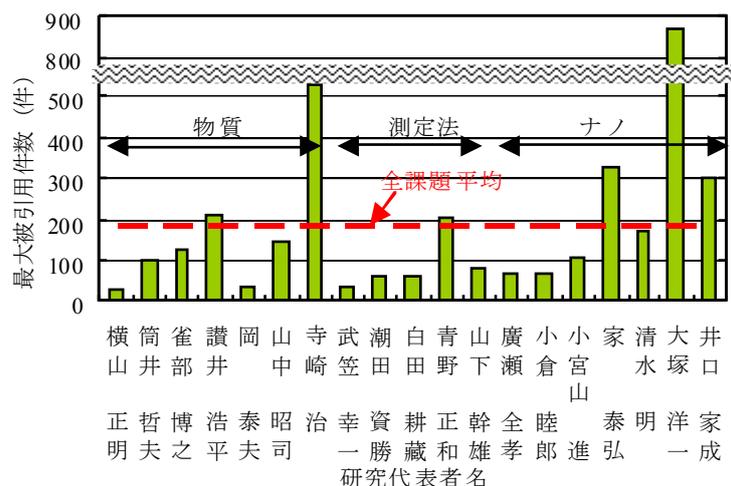


図 5 発表論文のうちに見られる、最大被引用件数（研究課題ごと）

次に、被引用論文について詳細に検討した。はじめに、研究課題ごとの平均被引用件数について、物理領域で出版された全論文の被引用件数と比較した。ここで、物理学領域全体の論文に関するデータは ISI Essential Science Indicators (ESI) の調査による、各出版年度の平均被引用件数（以下、ESI 平均値とよぶ）を参照した¹³。この値をひとつの基準として、被引用論文の質的評価を試みた。なお、各年次の ESI 平均値の推移に関しては、図 16 (41 ページ) を参照されたい。

ここでは、研究課題ごとの全論文について各論文の発表年ごとに、以下の基準で 3 つのカテゴリに分類し件数をもとめた¹⁴。

¹³ISI Essential Science Indicators では、平成 8 年 1 月 1 日から平成 18 年 12 月 31 日までの 11 年間に出版された論文について、分野ごとに分類し、各論文の出版年次ごとの被引用件数データを提供している。今回は、平成 19 年 3 月 1 日付けの「物理領域」に関するデータとの比較を行った。なお、ISI では論文の分類については「物理領域」が最小単位で、さらに細かい研究内容での分類は行っていない。

¹⁴ 「引用が無い論文」とは被引用件数がゼロ件のもののものであり、被引用件数の検索において被引用状況に関する情報が得られなかったものは除外してある。

- 1) 該当年における ESI 平均値と比較し、それ以上の被引用件数のあった論文数 (ESI 平均値以上の論文)
- 2) 該当年における ESI 平均値と比較し、被引用件数がそれに満たなかった論文数 (ESI 平均値未満の論文)
- 3) 引用がなされなかった論文数 (引用無し論文)

図 6 に、研究課題ごとにまとめた結果を示す。

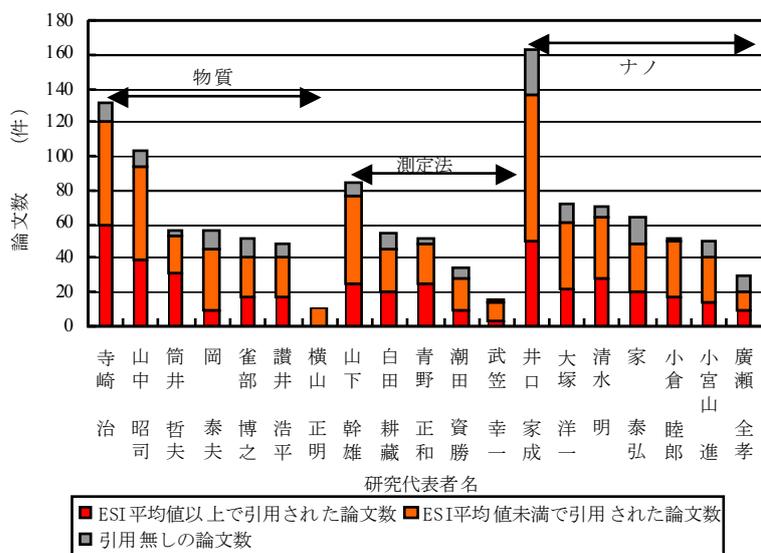


図 6 課題研究期間中の論文の被引用件数と物理領域全体の平均値との比較 —論文数—

被引用論文の総数 1,041 報のうち、ESI 平均値以上の論文は 408 報 (39.2%) であり、ESI 平均値未満の論文は 633 報 (60.8%) であった。ESI 平均値以上の論文が多いのは、寺崎研究代表者 (59 件)、井口研究代表者 (50 件)、山中研究代表者 (38 件)、筒井研究代表者 (31 件) であり、清水研究代表者の 28 件が続いている。平均被引用件数 (図 4) や最大被引用件数 (図 5) の大小との関連は特に認められない。

次に、課題ごとに ESI 平均値を上回る論文と ESI 平均値未満の論文との割合を見た (図 7)。ESI 平均値を上回る論文の割合が 50% を超えているのは筒井研究代表者 (58.5%) のみであり、青野研究代表者 (49.0%)、寺崎研究代表者 (48.8%)、白田研究代表者 (44.4%)、清水研究代表者 (43.1%) が続いている。

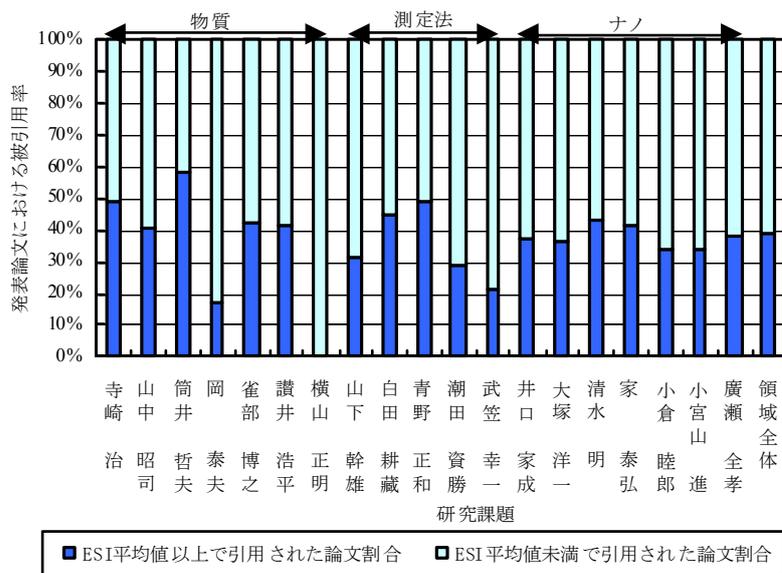


図 7 課題研究期間中の論文の被引用件数と物理領域全体の平均との比較 —論文割合—

最後に研究課題毎に発表論文数と被引用件数との関係を調べた。被引用件数の指標としては、論文発表からの経過年数による影響を排除し、さらに同様の研究分野で発表された他の研究論文との相対的な関係を明らかにするために Crown 指標¹⁵を用いた。この指標は、研究グループ、研究機関の活動評価の指標としてオランダで考案されたものであり、研究グループの評価に有効と言われている。図 8 は、研究課題毎の発表論文数に対して平均 Crown 指標¹⁶をプロットしたものである。全課題についての平均値を用いて図を 2 本の一点鎖線で区分される 4 つの領域に分割した。また図中には Crown 指標=1 のラインを黒色太線で示した。発表論文数、平均 Crown 指標とも本研究領域の平均を上回っているのは、寺崎研究代表者および大塚研究代表者の 2 課題、発表論文数は領域平均以下であるものの、平均 Crown 指標が領域平均以上であるのが、青野研究代表者、清水研究代表者、筒井研究代表者、家研究代表者、讚井研究代表者の 5 課題である。また発表論文数が領域平均以上で平均 Crown 指標が領域平均未満であるもののうち Crown 指標が 1 を超えるのは、井口研究代表者、山中研究代表者の 2 課題であった。

¹⁵一論文あたりの被引用回数を、その論文の同分野（同タイプ、同発表年）における一論文あたりの引用回数の平均で割った値として定義される。従って、Crown 指標=1 は、当該論文が同分野の平均被引用件数と同じ引用を受けていることを示す。同分野（同タイプ、同発表年）の平均被引用件数としては、トムソン I S I 社が 2008 年 1 月に発表した Essential Science Indicators (ESI)の値を用いた。

¹⁶ 各論文について求めた Crown 指標を研究課題毎に平均したものの。

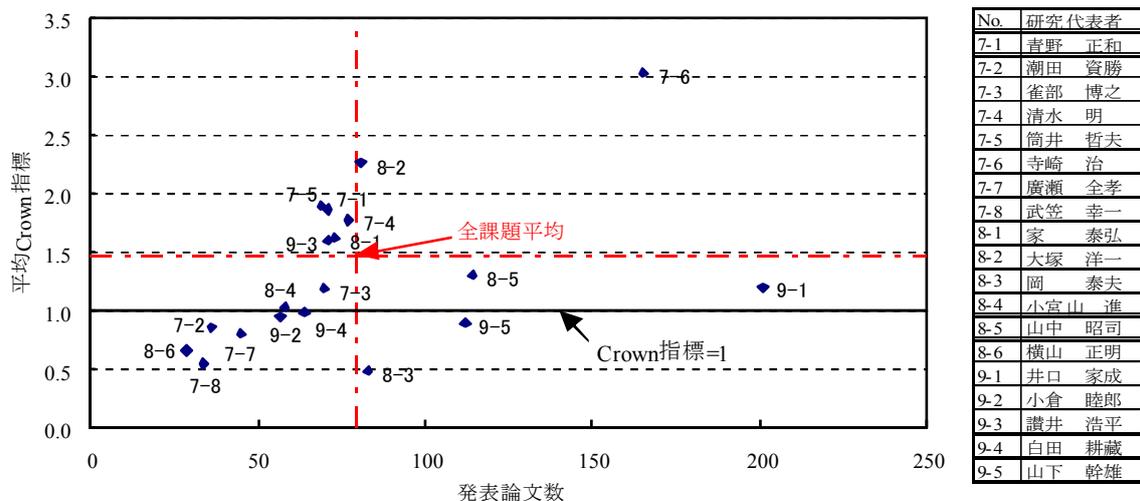


図 8 発表論文数と被引用状況（平均 Crown 指標）

以上、研究課題ごとに発表論文数とその被引用状況を見る限り、課題研究期間中の5年間では1,510報の論文発表がなされ、うち約70%近くの論文が他の後続の論文に引用されることで、学術的に影響を及ぼしていることがわかった。また、全体の約27%の論文については、物理学分野の論文での平均の被引用件数を上回って引用されており、このうち27報の論文では被引用件数が100件をこえるなど、注目度は高いと思われる。おしなべて一定以上の水準を保っていると考えられた。

§ 2. 1. 2 課題研究期間中における出願特許の状況調査

研究終了報告書に掲載された課題研究期間中における出願特許について、平成20年4月時点での特許成立状況を調査した。結果を図9および図10に示す。

図9は研究課題ごとの出願特許数を表7(29ページ)の分類に従って並べ替えたもの、図10は出願特許数に対する成立特許数の割合(特許成立率)を同様に並べ替えたものである。研究課題ごとにばらつきが大きいものの、出願特許数は19課題全体で230件であった。グループごとにみると「物質」系が82件、「測定法」系が94件、「ナノ」系が54件であった。研究課題毎では武笠研究代表者、讚井研究代表者、横山研究代表者、山下研究代表者の順であり、発表論文の場合とは状況が異なっている。

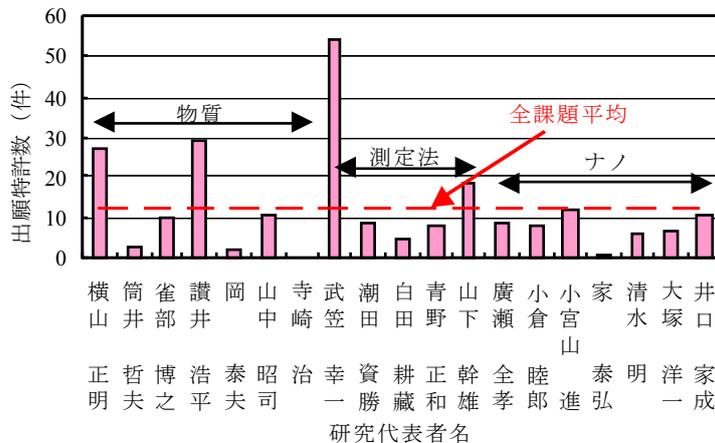
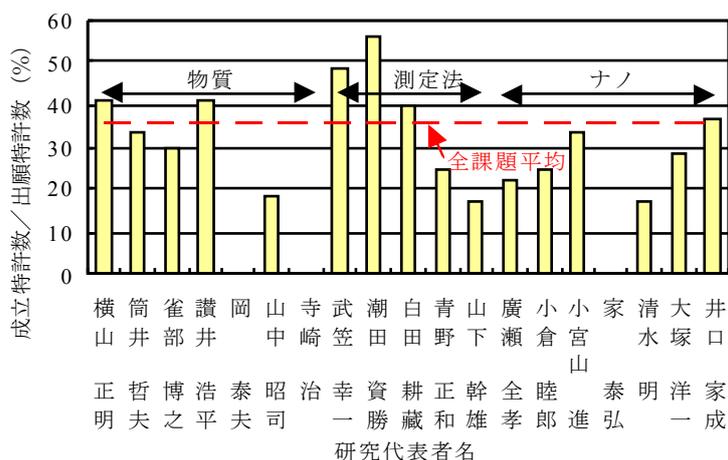


図 9 課題研究期間中における研究課題ごとの出願特許数

成立特許数は 19 課題全体で 82 件（特許成立率¹⁷、35.7%）であり、同様に内訳は「物質」系が 29 件（特許成立率、35.4%）、「測定法」系が 38 件（特許成立率、40.4%）、「ナノ」系が 15 件（特許成立率、27.8%）である。出願特許数、特許成立率とも「測定法」、「物質」、「ナノ」の順になっていた。課題別では、潮田研究代表者（特許成立率 55.6%、成立特許数 5 件）、武笠研究代表者（特許成立率 48.1%、成立特許数 26 件）、讃井研究代表者（特許成立率 41.4%、成立特許数 12 件）、横山研究代表者（特許成立率 40.7%、成立特許数 11 件）の特許成立率が高い。



¹⁷ 出願特許数に対する成立特許数の割合

図 10 研究課題ごとの出願特許数に対する成立特許数の比率（課題研究期間中）

§ 2. 2 課題研究期間終了後における研究成果

§ 2. 2. 1 課題研究期間終了後における発表論文の状況調査

課題研究期間以降の発表論文の数とその被引用件数を調査した。課題研究期間終了後の発表論文としては、研究代表者名をもとに検索し、次いで課題研究期間中の各論文の抄録および研究終了報告書、事後評価書の記述を参考にして、CREST 期間中の研究内容を表わすキーワードを設定して絞込みを行った。検索条件を別添参考資料 9 に示す。

図 11 は、課題研究期間終了後における研究課題ごとの発表論文数を示したものである。領域全体での発表論文数は 737 報であり、CREST 研究期間中の約 49%となっている。また研究課題毎の平均発表論文数は 38.8 報であった。CREST 研究期間中は共同研究者等の論文を含み、一方 CREST 研究期間終了後は研究代表者のみを対象としているため一概には言えないが、研究規模が縮小したことを示している可能性もある。発表論文数が 50 報を超えているのは、寺崎研究代表者（102 報）、山中研究代表者（74 報）、青野研究代表者（59 報）、岡研究代表者（59 報）の 4 名である。

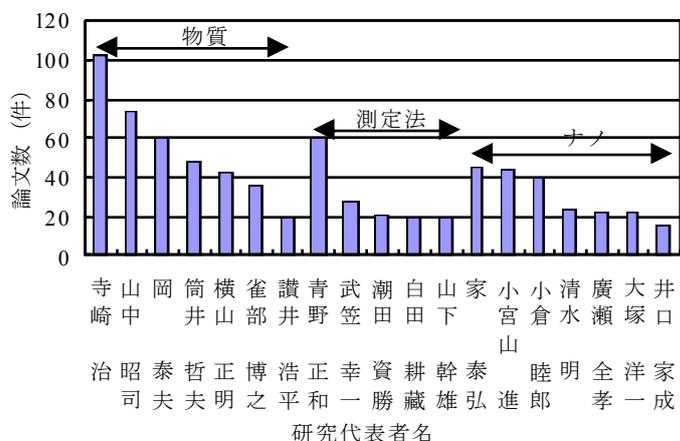


図 11 研究代表者の発表論文数（課題期間終了後）

次に、各論文の被引用状況を調査した。被引用件数は§2.1.1 と同様、平成 20 年 4 月時点で検索した結果である。結果を図 12、図 13 に示す。

図 12 は研究課題ごとの平均被引用件数を示したもので、寺崎研究代表者の 24.7 件が群を抜いている。平均被引用件数が 10 件を超えているのは、この他には筒井研究代表者（10.8 件）のみであり、以下雀部研究代表者（9.3 件）、廣瀬研究代表者（8.2 件）、青野研究代表者（8.1 件）の順となっている。全体の平均は 6.4 件であった。なお、図からも分るように、研究課題ごとの平均の被引用件数については、必ずしも研究課題ごとの発表論文数と相関が認められる訳ではなかった。

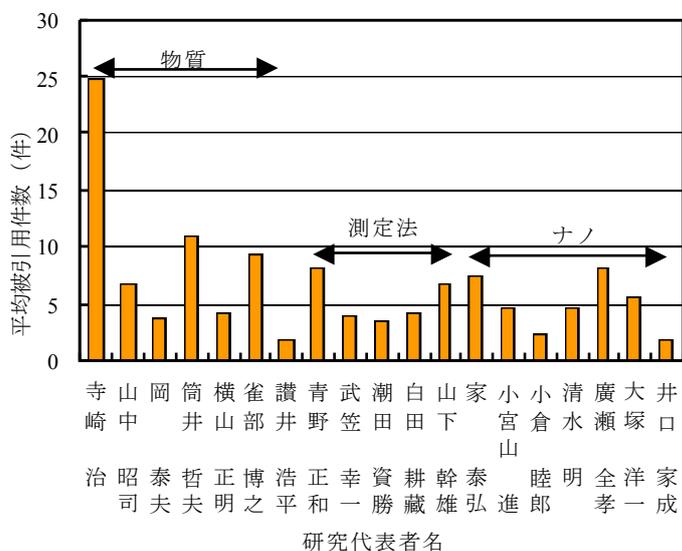


図 12 平均被引用件数（課題研究期間終了後）

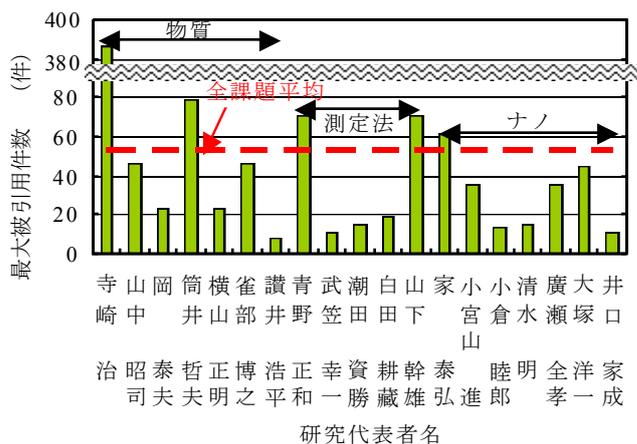


図 13 最大被引用論文の被引用件数（課題研究期間終了後）

図 13 は、各研究課題で最大の被引用件数を示した論文の被引用件数を示したものである。寺崎研究代表者が 386 件と飛び抜けた値を示している。寺崎研究代表者は他にも被引用件数 100 件以上の論文を 3 報出しているが、他の研究代表者からは 100 件以上の被引用件数を示す論文は出ていない。寺崎研究代表者に次いで大きいのは、筒井研究代表者の 79 件、青野研究代表者の 70 件、山下研究代表者の 70 件、家研究代表者の 61 件である。これらも含めて被引用件数が 50～99 件の論文は 17 報あり、そのうち寺崎研究代表者の論文が 10 報を占める（別添参考資料 10 参照）。

§2.1.1 と同様、平均被引用件数については物理領域全体との比較を行った。物理領域全体の平均被引用件数として、平成 20 年 1 月現在の ISI Essential Science Indicators (ESI) の値を用いた。結果を図 14 および図 15 に示す。なお、「平均値以上で引用された論文」、「平均値未満で引用された論文」、および「引用が無い論文」の定義については §2.1.1 と同様である。

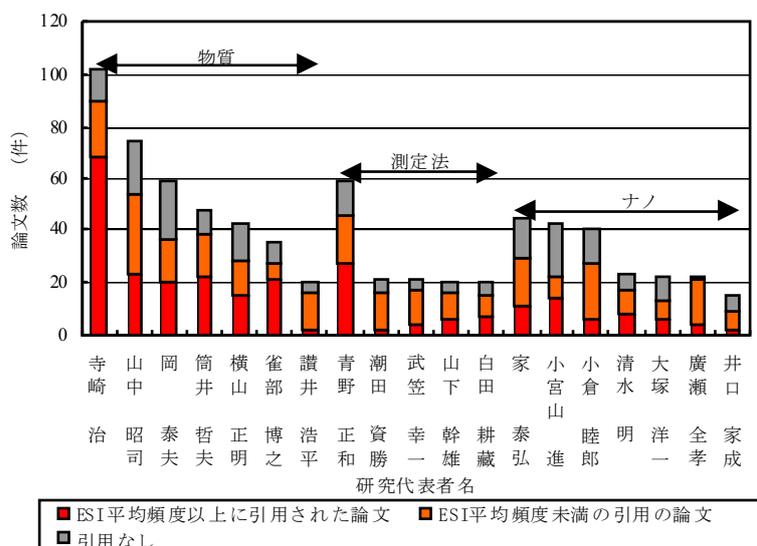


図 14 被引用件数と物理領域全体の平均との比較 — 論文数 —

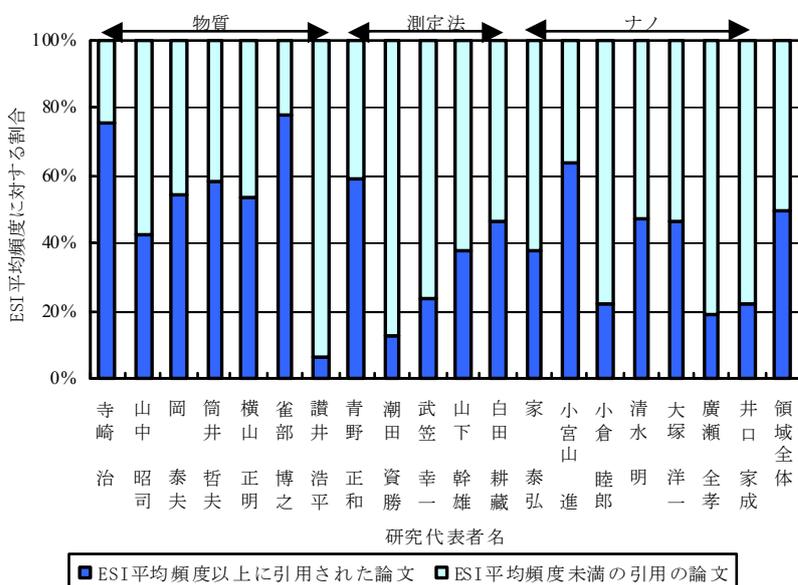


図 15 被引用件数と物理領域全体の平均との比較 — 論文割合 —

被引用件数の検索でヒットした 731 報の論文のうち、被引用数がゼロで無い論文（被引用論文）は 538 報であり、全体としての被引用率は 73.6%であった。また、被引用論文 538 報のうち、被引用件数が ESI 平均値以上の論文は 267 報（49.6%）、ESI 平均値未満の論文は

271 報 (50.4%) であった。ESI 平均値以上の論文の割合は、先に示した課題研究期間中の割合 (39.2%) より約 10% 向上している。ESI 平均値以上の論文数が多いのは、寺崎研究代表者 (68 報)、青野研究代表者 (27 報)、山中研究代表者 (23 報)、筒井研究代表者 (22 報)、雀部研究代表者 (21 報)、岡研究代表者 (20 報) の順となっている (図 14)。また ESI 平均値以上の論文割合が高いのは雀部研究代表者 (77.8%)、寺崎研究代表者 (75.6%)、小宮山研究代表者 (63.6%)、青野研究代表者 (58.7%) である (図 15)。

次に全研究課題の、課題研究期間中および課題研究期間終了後の発表論文について、論文の発表年ごとの平均被引用件数を ESI の平均と比較した。結果を図 16 に示す。

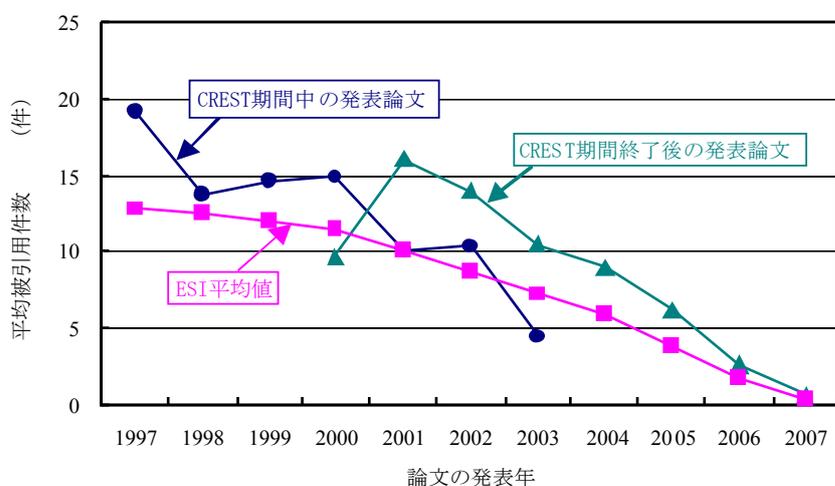


図 16 発表論文の平均被引用件数推移 (ESI平均値との比較)

発表論文の発表年ごとの平均被引用件数は、おおむね ESI による物理学関連論文の平均被引用件数と比較して大きな値を示しており、影響力のある論文が発表されていることが分かった。特に課題研究期間終了後における 2001 年および 2002 年の発表論文の平均被引用件数が大きかった。当該年において、発表された総論文数は、50~100 報程度と多くはないものの (図 17)、学術的に注目度の高いものが含まれていたためと思われる。なお、2001 年は平成 7 年度採択課題が研究期間を終了した翌年であり、2002 年は同じく平成 8 年度採択課題終了の翌年であった。それぞれの課題研究期間終了直後に、研究の集大成として、注目度の高い論文が発表されたことが、その一因であろうと思われる。

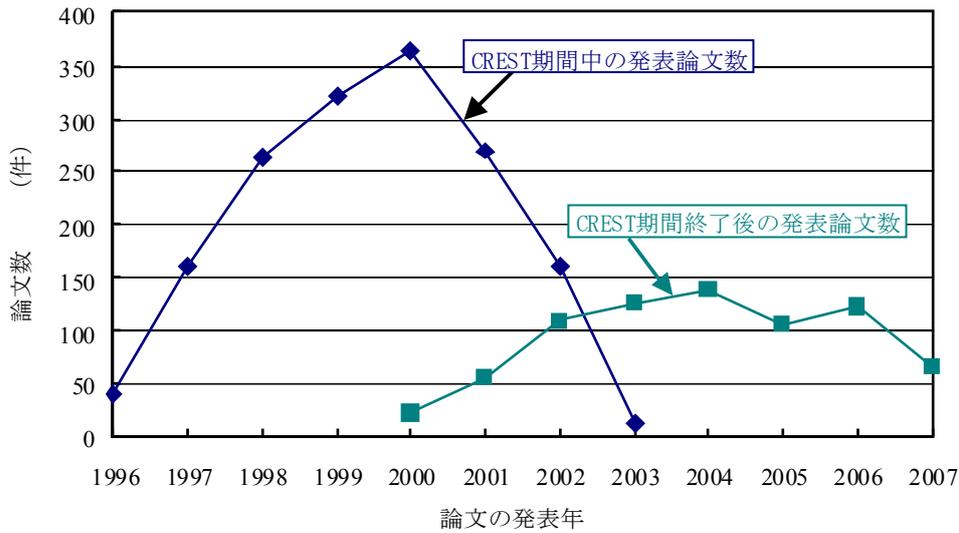


図 17 論文の発表件数推移

最後に § 2.1.1 と同様、研究課題毎に発表論文数と被引用件数（Crown 指標）との関係を調べた。図 18 は、研究課題毎の発表論文数に対して平均 Crown 指標をプロットしたものである。全課題についての平均値を用いて図を 2 本の赤色一点鎖線で 4 つの領域に区分したこと、Crown 指標=1 のラインを黒色太線で示したことは図 8 と同様である。発表論文数、平均 Crown 指標とも本研究領域の平均を上回っているのは、寺崎研究代表者、青野研究代表者および筒井研究代表者の 3 課題、発表論文数は領域平均以下であるものの、平均 Crown 指標が領域平均以上であるのが、雀部研究代表者、山下研究代表者、白田研究代表者の 3 課題である。また発表論文数が領域平均以上で平均 Crown 指標が領域平均未満であるもののうち Crown 指標が 1 を超えるのは、家研究代表者の課題だけであった。また課題研究期間中および課題研究期間終了後を通して発表論文数、平均 Crown 指標とも領域平均を上回ったのは寺崎研究代表者だけであった。

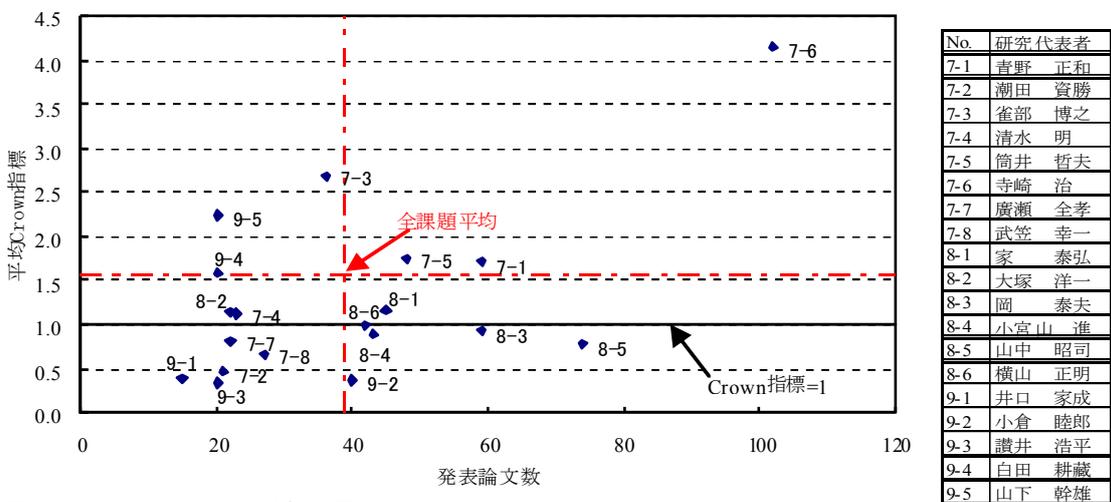


図 18 発表論文数と被引用状況（平均 Crown 指標）

§ 2. 2. 2 課題研究期間終了後における出願特許の状況調査

課題研究期間以降の出願特許とその平成 20 年 4 月時点での成立状況を調査した。研究代表者名をもとに検索し、次いで結果を本人に示し、検索結果として挙げた成果が確かに本人のものかどうか確認の上、CREST 研究課題との関連性について判定してもらった。以下、調査結果の返答が得られた 14 課題についてのみ考察する。図 19 は 14 課題についての課題ごとの出願特許数を、また図 20 は同じく課題ごとの出願特許数に対する成立特許数の割合を示したものである。CREST 関連特許に着目すると、出願数が最も多かったのは讃井研究代表者の 34 件で、小宮山研究代表者の 8 件、小倉研究代表者の 5 件、筒井研究代表者の 4 件が続いている（図 19）。成立特許があるのはこの 4 名のみであり、成立率は各々 8.8%、12.5%、20%、50%であった。

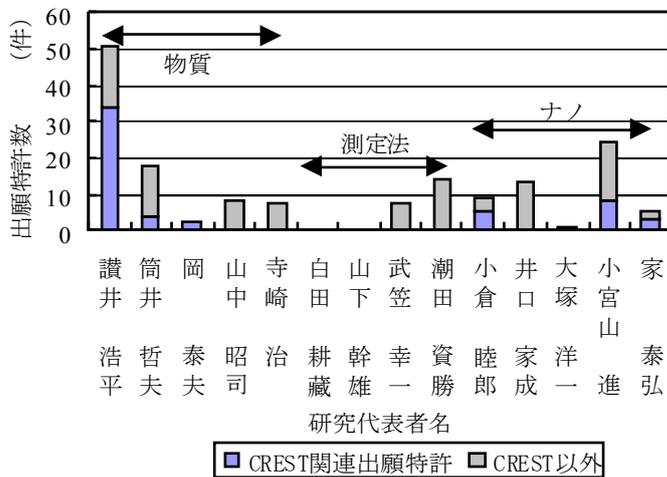


図 19 課題研究期間終了後における研究課題ごとの出願特許数

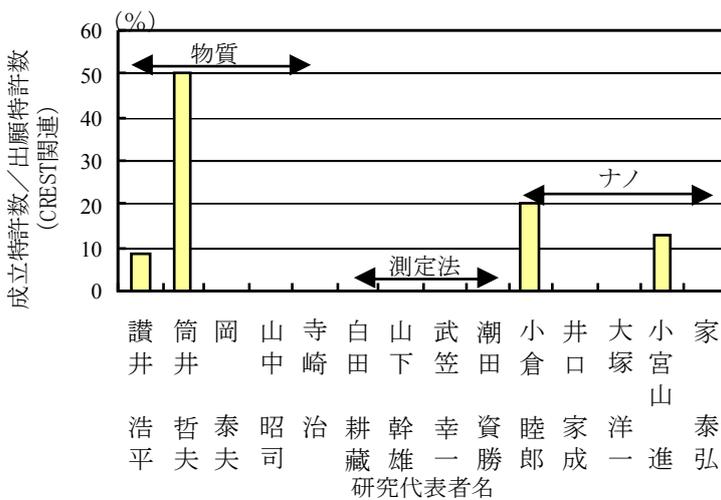


図 20 研究課題ごとの CREST 関連出願特許数に対する成立特許数の比率

また課題研究期間後において、14研究課題の研究代表者による出願特許数は159件であり、そのうち57件(35.8%)がCREST関連の出願であった。ここで、57件のCREST関連出願特許中7件が成立(成立割合、12.3%)していた。この割合は研究期間終了後の全出願特許に関する値(159件中21件が成立、成立割合;13.2%)と比率的には同程度になっていた。内訳は、「物質」系のCREST関連出願特許数/全出願特許数が40件/86件、CREST関連出願特許の割合は46.5%であり、以下同様に「測定法」系が0件/21件、0%、「ナノ」系が17件/52件、32.7%となっていた。出願特許の成立状況については、「物質」系の成立特許数/出願特許数が5件/40件、12.5%であり、同様に「ナノ」系が2件/17件、11.8%となっていた。

§ 2. 3 研究代表者に対するアンケート調査結果

以下、研究代表者に対して実施したアンケート調査結果について、回答のあった14名の研究代表者より得られた結果の概要を示す。

§ 2. 3. 1 研究の継続・発展状況

CRESTで取り組んだ研究課題に関連する研究について、研究代表者を対象として、課題研究期間終了後の研究の取り組み状況をアンケートにより調査した。結果を図21に示す。

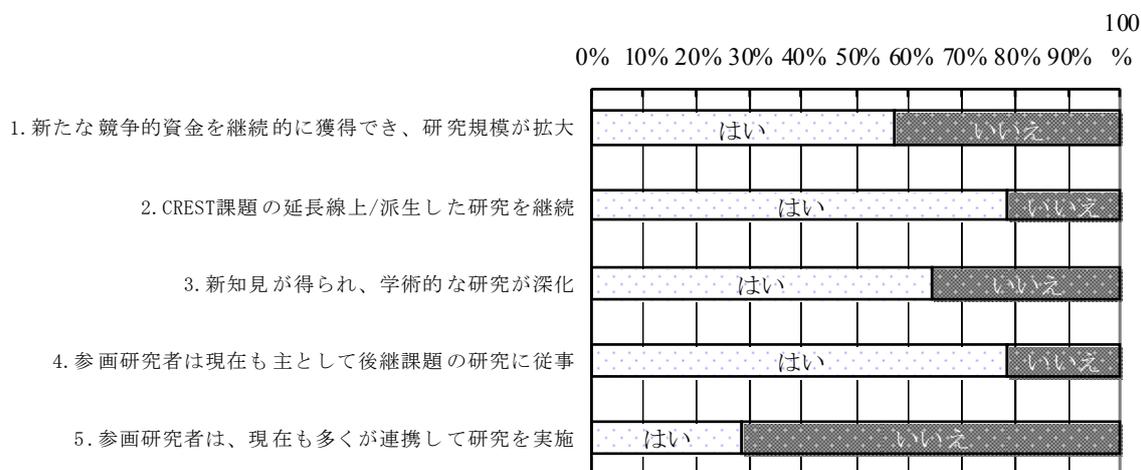


図 21 CREST課題に関連する研究についての取り組み状況 (アンケート調査)

研究の継続性については、「2.CREST 課題の延長線上あるいは派生した研究を継続している」、「4.参画研究者は現在も主として継続課題の研究に従事している」と答えている研究代表者数が80%近くに達しており、CREST 研究課題に関連する研究が、研究者も含めて現在まで継続しており、研究の発展状況に関しては、「3.新知見が得られ、学術的な研究が深化した」とする回答が65%程度あった。

研究資金面の状況から見ても、「1.新たな研究資金を継続的に獲得でき、研究規模が拡大している」とする回答が57%程度あり、アンケートに回答のあった14課題全体で、課題研究期間後に獲得した競争的研究資金の件数が44件であるとの調査結果（表8）と対応すると考えられる。全体の60%程度の研究が順調に発展しているとの結果であった。

一方、CREST研究者どうしの課題研究期間終了後の研究活動における連携状況であるが、「5.参画研究者の連携が現在も継続している」と回答した研究代表者数は30%弱にとどまっており、4の結果も合わせて考えると課題研究期間終了後は研究者の多くが互いに独立した形で研究を継続していると推察される。

表 8 課題研究終了後の競争的研究資金獲得状況

競争的研究資金 名称	件数
科学研究費補助金 基盤 A	9 件
科学研究費補助金 基盤 B	9 件
科学研究費補助金 基盤 C	2 件
科学研究費補助金 特定領域研究	5 件
科学研究費補助金 萌芽研究	3 件
科学研究費補助金 特別推進研究	2 件
科学研究費補助金 一般研究	1 件
科学研究費補助金 重点領域研究	1 件
学振 未来開拓フェージビリティスタディ	1 件
学振 21世紀 COE プログラム	1 件
JST 大学発ベンチャー創出推進	1 件
JST CREST	2 件
JST 発展研究 (SORST)	1 件
JST 重点地域開発促進事業	1 件
JST 技術移転支援センター事業	1 件
NEDO ナノテクノロジープログラム	1 件
NEDO 大学発事業創出実用化研究開発事業費	1 件
内閣府 戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) ①特定領域重点型研究開発	1 件
(財) 村田学術振興財団 研究助成金	1 件
合計	44 件

§ 2. 3. 2 代表的研究成果

研究代表者に対する アンケート調査において、課題研究終了時から現在までの期間において、研究課題に関連して創出された研究成果について、研究代表者および研究チーム全体を対象として、質問を行った。結果を図 22 に示す。また、具体的な研究成果の代表例などを記述式で回答していただいた。結果を表 9 に示す。

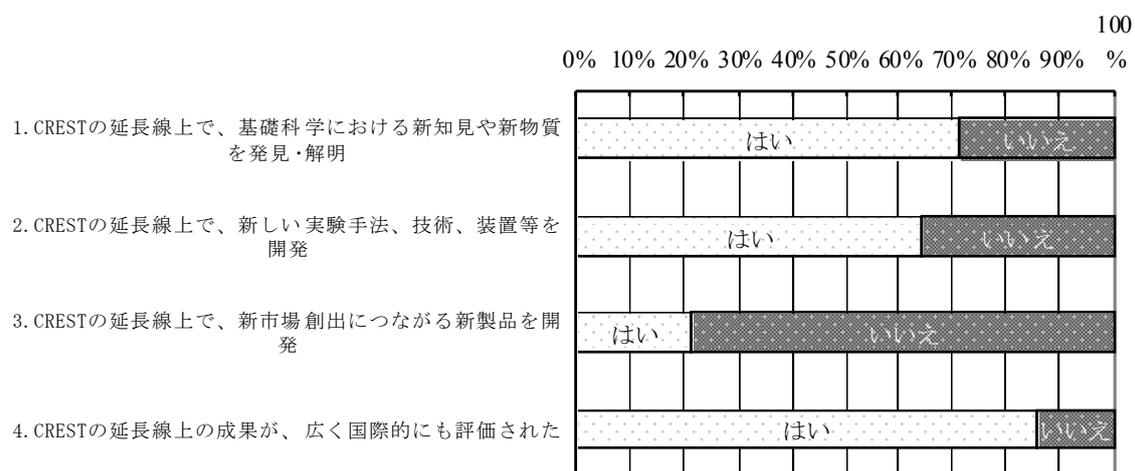


図 22 CREST研究課題に関連する代表的研究成果（アンケート調査）

CREST 研究課題の延長線上で、「1.基礎科学における新知見や新物質を発見・解明したか」との質問には 70%以上の研究代表者が肯定的に回答していた。また「2.新しい実験手法、技術、装置等を開発したか」との質問に対する肯定的回答率は 64%であったが、「3.新市場創出に繋がる新製品を開発したか」との質問になると肯定的回答率は 20%強と大幅に低下していた。基礎研究の分野では大きな成果を上げているが、実用化に近づくにつれて成果が少なくなっているとの自己評価を反映したものと思われる。ただし、そうした中でも「新市場創出に繋がる新製品」の実用化に向けた開発の具体例として、超広帯域なフィードバックチャープ補償装置、量子細線型 DFB レーザーなどの新規デバイス類、スピン SEM、走査型磁気抵抗効果顕微鏡などが挙がっていた。

「4.CREST 研究の延長線上にある研究成果が、広く国際的にも評価されたか」との質問には 85%以上の研究者が肯定的に回答しており、多くの研究代表者が研究成果に対して自信を持っていることが伺える。

表 9 CREST課題に関連する代表的研究成果（アンケート調査）

回答者	記述式回答
潮田 資勝	1.CREST 終了後に STM 発光分光によって、表面吸着分子の振動が観測でき、個々の分子を同定できるようになった。 2.CREST 研究の発展形の業績が評価され、上原共同研究者がナノプローブテ

	クノロジ賞を受賞、東北大学教授に昇任した。
筒井 哲夫	<p>1. 有機 EL に関して、CREST の中で取り組んだ、マイクロキャビティ効果の研究は現在では有機 EL の高効率化や色調整に不可欠の知見となって広く用いられている。特に光取りだし効率に関する先駆的な成果は国際的にも高く評価されている。</p> <p>2. 新材料研究の一部として取り組んだ燐光発光材料の研究は、ディスプレイ向けの燐光発光材料を実践的に研究開発するきっかけを内外の企業に与えた意味で大きな貢献となっている。</p>
寺崎 治	<p>We have published following papers after 2002;</p> <p>1. S. Inagaki, S. Guan, T. Ohsuna and O. Terasaki, An ordered mesoporous organic-silica hybrid material with a crystal-like wall structure, <i>Nature</i> 416 (2002), 304-307.</p> <p>2. Z. Lai, G. Bonilla, I. Diaz, G. Nery, K. Sujaoti, M.A. Amat, E. Kokkoli, O. Terasaki, R.W. Thompson, M. Tsapatsis & D.G. Vlachos, Microstructural Optimization of a Zeolite Membrane for Organic Vapor Separation, <i>Science</i> 300(2003), 456-460.</p> <p>3. S. Che, A.E. Garcia-Bennett, T. Yokoi, K. Sakamoto, H. Kunieda, O. Terasaki & T. Tatsumi, Mesoporous Silica of Novel Structures with Periodic Modulations Synthesized by Anionic Surfactant Templating Route, <i>Nature Materials</i> 2(2003), 801-805.</p> <p>4. S. Che, Z. Liu, T. Ohsuna, K. Sakamoto, O. Terasaki & T. Tatsumi, Synthesis and Characterization of Chiral Mesoporous Silica, <i>Nature</i> 429(2004), 281-284.</p> <p>5. P. Sozzani, S. Bracco, A. Comotti, R. Simonutti, P. Valsesia, Y. Sakamoto & O. Terasaki, Complete shape retention in the transformation of silica to polymer micro-objects, <i>Nature Materials</i> 5(2006), 545-551.</p> <p>6. F. Gramm, C. Baerlocher, L. B. McCusker, S. J. Warrender, P. A. Wright, B. Han, S. B. Hong, Z. Liu, T. Ohsuna & O. Terasaki, For the complex zeolite structure solved by combining powder diffraction and electron microscopy, <i>Nature</i> 444(2006), 79-81.</p>
武笠 幸一	<p>1. 研究の継続・発展状況</p> <p>①工学研究科を停年退官（'04.3）し、「スピントロニクス」については後任者が継続して研究を行っている。</p> <p>② 研究の展開としては、CREST（平 8～13）→JST プラザ北海道：重点地域研究開発促進事業（平 13～15：NC-AFM の要素技術開発）→北大創成科学共同研究機構（平 16～19：振興調整費、人獣共通感染症等に対する CNT セ</p>

	<p>ンサーの研究開発) および「21世紀 COE」(平 14~19: 北大、メンバー) → JST 産学連携イノベ(平 18~20、センサーの事業化)。各テーマから次の研究成果が生まれた。</p> <p>2. 研究成果</p> <p>① 室温 NC-AFM で原子分解能でのスピン計測に成功。CREST 終了後、極低温、高磁場、超高真空 NC-AFM の開発がほぼ終了。本年研究に入りつつある。</p> <p>② スピン SEM、走査磁気抵抗効果顕微鏡、劈開機、SPM 用探針の研究開発から現在事業化の準備中。</p> <p>③ スピンメモリのアイデア創出(出願)、迅速・高感度 CNT バイオセンサーの研究開発、事業化の途を進行中。</p>
岡 泰夫	<p>1. 基礎科学における新しい知見: 磁性半導体量子ドットや量子井戸におけるスピン注入過程の解明</p> <p>2. 新しい物質の開発: 強磁性金属と磁性半導体の複合構造の創製、ナノマグネットの開発、規則配列磁性半導体量子ドットの作製</p> <p>3. 研究成果の国際的評価: 米国 MRS シンポジウムでの招待講演(2003)、ドイツ Duisburg 大学・ナノスケールの構造とダイナミクスシンポジウムでの招待講演(2005) など</p>
家 泰弘	<p>1. 量子ドット AB リング複合系におけるファノ効果の実証とそこから発展(ファノ近藤効果の研究など) ⇒ 井上賞、国際会議等における招待講演多数</p> <p>2. 希薄磁性半導体の低温アニーリングによる改質はこの分野のスタンダードな手法として確立した</p> <p>3. 走査プローブ顕微鏡による Ge 表面再構成構造の可逆的操作 ⇒ 物理学会論文賞</p>
大塚 洋一	<p>超伝導を使用した量子ビットの実現及びその操作に関連し、主に NEC 研究グループの成果が高い評価を受けている。</p>
小宮山 進	<p>◎ 赤外単一光検出器の開発</p> <p>◎ フォトンカウンティングによる THz 顕微鏡の開発</p> <p>◎ 超音波誘起電磁波によるイメージング手法の開発</p> <p>◎ 赤外光の超高感度アレイ検出器の開発</p>
山中 昭司	<p>1. シリコンクラスレート超伝導体の高圧合成</p> <p>2. 電子をドーブした層状窒化物で高温超伝導を発見し、物性物理研究者と協力して、機構の解明を進めた。</p>
井口 家成	<p>走査 SQUID 顕微鏡による高温超伝導体の局所磁場の観察により、ほとんど</p>

	<p>研究が行われていないマイスナー状態やコヒーレント電磁波発振につながる層間ジョセフソンボルテックスの動的挙動などについて新しい知見が生まれつつある。</p> <p>(現在未投稿の論文含めて今後の重要な知見と考えられる)</p>
小倉 睦郎	<p>①現在も、欧州（スイス、フランス）との共同研究が継続しており、量子細線中の電子のコヒーレント波動状態や量子細線中の多体効果（フェルミ端異常やウィグナ結晶など）について研究が進んでいる。</p> <p>②段差基板上の自己形成効果を用いて、3次元的なデバイス構造が、簡単なプロセスにより実現できることから、いくつかの新規デバイスが生まれ、CREST 終了後も発展している。</p> <p>量子細線型 DFB レーザー：基板にあらかじめグレーティングとリッジを形成することにより、1回の成長で、利得結合型 DFB レーザーが実現できた。</p> <p>高効率量子細線 LED：量子細線を発光領域とすることにより、内部量子効率の改善とともに、効率のよいキャリアの選択注入構造による外部量子効率の改善が得られた。</p> <p>量子細線 FET が、高感度光ディテクタとして有望であることを見出した。</p>
讃井 浩平	<ul style="list-style-type: none"> ・フラーレンやオリゴチオフェン類などの有機半導体を無機半導体層に導入することができた。 ・ペロブスカイト型有機・無機ハイブリッド化合物の次元性制御法を開発し、その次元性と光物性の関係を明らかにした。 ・Langmuir-Blodgett 法による薄膜作製課程を解明し、新たな作製手法を開発した。 ・自己組織性を用いて新しい機能を持つ多様な物質系を創造した。 ・新規ペロブスカイト型有機・無機ハイブリッド化合物を発光層とした電界発光素子を開発した。
白田 耕藏	<ol style="list-style-type: none"> 1.光波長以下の直径の光ファイバによる原子や光子の操作方法を開発した。 2.固体水素中の分子遷移を用いて量子計算が実現でき得ることを示した。 3.パラメトリックビーティングによる光パルス合成を実現した。
山下 幹雄	<ul style="list-style-type: none"> ・世界最短の光パルス発生技術及び計測技術が開発された。 ・極限的な光パルスを制御する装置として有用な、超広帯域なフィードバックチャープ補償装置が開発された。 ・極短光パルス技術と STM とを結合させることによって、時空間極限計測技術が開発された。

§ 2. 3. 3 プロジェクトの波及効果

研究代表者に対する アンケート調査において、課題研究終了時から現在までの期間において、CREST における研究課題の内容に関連して行われた研究の成果が、関連する研究分野や産業分野に対して、間接的にどのような波及効果を及ぼしたかを尋ねた。

(1) 科学的・学術的波及効果

科学的・学術的波及効果に関する質問項目にたいする回答結果を図 23 に整理して示す。また、具体的な代表事例などを記述式で回答していただいた結果を表 10 に示す。

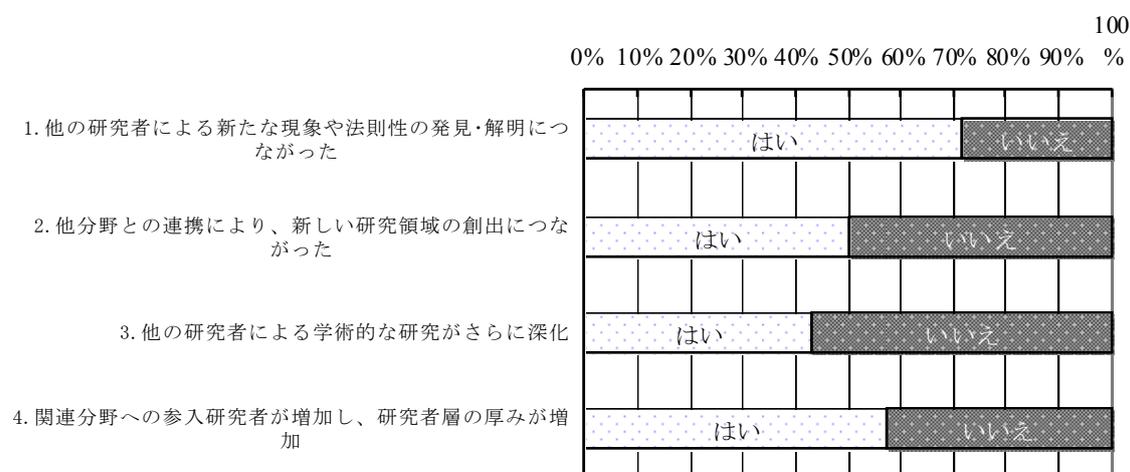


図 23 課題研究期間終了後の関連研究の科学的・学術的波及効果（アンケート調査）

「1.CREST あるいはその延長線上にある研究の成果がきっかけとなり、他の研究者による関連分野での新たな現象や法則性の発見・解明につながった」かについては、70%以上の研究代表者が肯定的回答をしていた。そのほかの選択肢で肯定的回答が50%以上であったものは、「4.関連分野への参入研究者が増加し、研究者層が厚みを増した」（58%）および「2.他分野との連携により、新しい研究領域の創出につながった」（50%）との質問に対してであるが、新しい研究領域の創出は一般には難しいことを考えると、この結果は高く評価されよう。「3.CREST あるいはその延長線上にある研究で得られた知見をきっかけに、他の研究者による関連研究分野での学術的な研究がさらに深化した」を選択したのは43%の研究代表者であった。第1の質問結果と比較して考えると、関連する研究分野全体への波及効果よりは、関連する個別の研究課題そのものの進展に関する波及効果として評価している傾向が窺える。

表 10 課題研究終了後の関連研究の科学的・学術的波及効果（アンケート調査）

回答者	記述式回答
筒井 哲夫	有機半導体材料・デバイスに関する研究分野と規模は国内でも、国際的にもこの5年拡大を続けている。このような世界的な動きを加速するという意味の大きな貢献があった。
寺崎 治	For the Q1, we have received JST-VINNOVA grant on Novel Transdermal Drug Delivery System: Designing meso-structured crystals for controlled and trigger release. I have also received a big grant (about 6 million US\$) from Wallenberg Foundation to build up Electron Microscope Facilities at Stockholm University
武笠 幸一	<p>科学的・学術的波及効果</p> <p>①ハンブルク大学 Wiesendanger らにより、NC-AFM によりスピン計測が始まった (2006)。</p> <p>② (本グループでは、2000.11 に計測に成功)。世界のスピン研究者が研究を開始。</p> <p>③CREST で始めたナノテクとプラザの他グループのバイオとを融合して、ウイルス等の検出可能な CNT バイオセンサーの研究開発をスタートしている (北大・創成、振興調整費)。</p> <p>④原子 1 ヶに 1 ビットのメモリのアイデア (スピンメモリ) を創出し、開発中の極低温 NC-AFM での実証実験に入る。</p> <p>⑤DNA 等分子の有するスピンの計測を行う準備に入っている。</p>
岡 泰夫	<p>最近の 10 年間で、世界的に盛んになった半導体スピントロニクス研究の先駆けとなる「ナノ構造磁性半導体の創製と磁気光学機能性」の研究を行い、国内外の研究者の注目を受けた。</p> <p>その結果、スウェーデン・リンショピン大学、ドイツ・マールブルグ大学、ロシア・サンクトペテルスブルグ・イオッフエ物理工学研究所、中国・復旦大学などの教授、研究者に興味をもたれ、関連した研究を促した。また依頼を受けて共同研究を行い、新規磁性半導体ナノ構造の作製、量子ドット中の電子状態、キャリアスピン注入のダイナミクス、超高速電子エネルギー緩和現象などを解明し、関連研究分野での研究が深化した。</p>
家 泰弘	もちろん当グループだけの貢献ではないが、ここ数年スピントロニクス分野の急速な発展があり、その中でも特に(Ca,Mn)Asをはじめとする希薄磁性半導体が注目を集めている。われわれが開発した(Ca,Mn)Asの低温アニリングによる改質はこの分野のスタンダードな手法として確立し、世界の研究グ

	<p>ループにより利用されている。わが国では関連研究者が結集して特定領域研究を組織するなどの活動が行われており、当グループのメンバーがその中心的役割を果たしている。量子ドットにおける電子コヒーレンスの問題は近年量子計算などとの関連から大いに注目を集めている。コヒーレンスに関する情報を得る手段としてファノ共鳴の手法は広く認められるところと成っている。</p>
大塚 洋一	<p>CREST での超伝導電荷量子ビットの実現が契機となり、その後、磁束量子ビット、位相量子ビットの実現、多量子ビット操作の実現など、超伝導を用いた固体量子ビットの研究分野が世界的に成長している。</p>
小宮山 進	<p>①ロンドン大学(Dr. V.Antonov)のグループによる、孤立量子ドットの物理の研究</p>
山中 昭司	<p>1.シリコンクラスレートの超伝導体の発見、高圧合成の成功により、この分野の研究者が増大した。 2.層状窒化物超伝導体の発見が注目され、物性物理研究者による活発な研究が進められた。これまでの BCS 超伝導機構では理解できない unconventional な超伝導体の可能性がある。 研究の広がり、これらの発表論文の被引用回数からも理解できる。</p>
井口 家成	<p>異方的超伝導体の角度の異なる薄膜接合を集積した多接合ジオメトリは、d 波超伝導体の基礎研究および新デバイスの開発に向けてヨーロッパ(オランダ、イタリア)、日本、イスラエルなどの各国がまねして取り組んでいる。</p>
小倉 睦郎	<p>①量子細線中の電子のウィグナ結晶化の観測結果がきっかけとなって、数人の理論家が同現象の理論的研究に取り組むようになった。</p>
讃井 浩平	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽電池のホールおよび電子輸送層への応用展開があり、現在デバイスの作成、評価を他研究機関と共同して行っている。 ・ ペロブスカイト型有機・無機ハイブリッド化合物が強い発光強度と短い時間定数を併せ持つことを明らかにし、これをシンチレータとして用いる新規放射線検出装置を開発した。 ・ 新規ペロブスカイト型有機・無機ハイブリッド化合物を発光層とした電界発光素子を開発した。
白田 耕藏	<p>パラメトリックビーティングによる光パルス合成法によりアト秒領域の光パルス発生が実証された。 固体水素中の分子分光に量子もつれ等の着想が導入され、分子遷移を用いて量子計算を実現する方法が提案された。</p>

山下 幹雄	<ul style="list-style-type: none"> ・ X線、アト秒パルス発生への応用展開がすすめられつつある。 ・ 光領域下のさらなる短パルス化への研究展開がはかられている。 ・ 有機分子系・生体分子系の量子制御への研究展開がはかられつつある。
-------	---

(2) 産業技術的・経済的波及効果

産業技術的・経済的波及効果に関する質問項目にたいする回答結果を図 24 に整理して示す。また、具体的な代表事例などを記述式で回答していただいた結果を表 11 に示す。

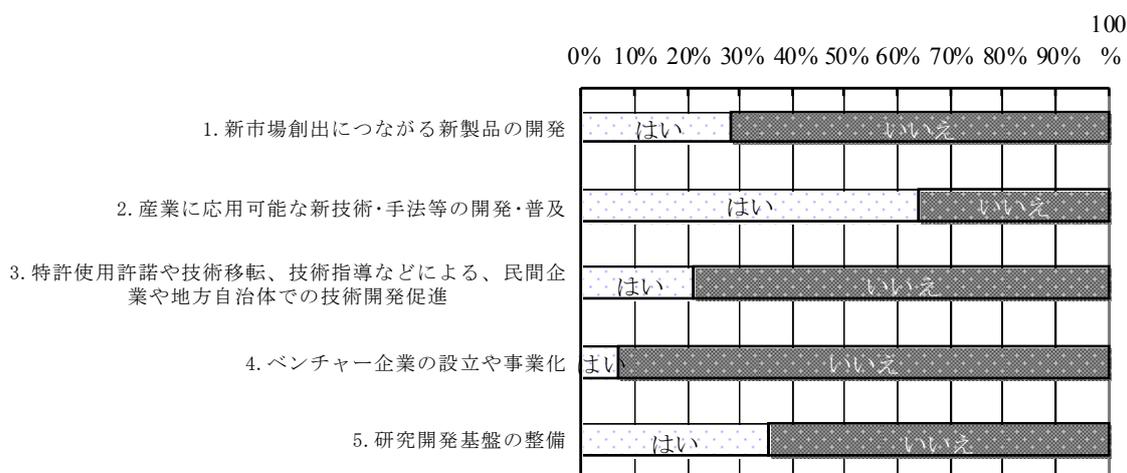


図 24 課題研究期間終了後の関連研究の産業技術的・経済的波及効果 (アンケート調査)

最も多かったのは、「2.CREST あるいはその延長線上にある研究成果が、産業に応用可能な新技術・手法等の開発・普及につながった」との回答であり、64%の研究代表者が肯定的に回答した。次いで、「5.CREST あるいはその延長線上にある研究成果が、研究開発基盤の整備につながった」との回答が 36%あった。「1.CREST あるいはその延長線上にある研究成果が、新市場創出につながる新製品の開発に結びついた」、「3.CREST あるいはその延長線上にある研究成果に基づく特許使用許諾や技術移転、技術指導等により、民間企業や地方自治体での技術開発促進につながった」、「4.CREST あるいはその延長線上にある研究成果が、ベンチャー企業の設立や事業化につながった」との回答は各々3割以下(28、22、7%)と低かったが、課題研究終了後未だ4年しか経過していないことおよび本研究領域が基礎研究的な性格を有していたことなどを反映したためであろう。

表 11 課題研究期間終了後の関連研究の産業技術的・経済的波及効果（アンケート調査）

回答者	記述式回答
潮田 資勝	特許を数件取得。アメリカから特許使用の打診があったが、未だ実際には使用されていない。
筒井 哲夫	有機 EL ディスプレイはこの 5 年ほどで実用化が進み、小型ディスプレイにおいては定常的な市場を形成しつつある。また、有機トランジスタや有機太陽電池などの有機半導体材料・デバイスの研究が急速に展開されつつある。
武笠 幸一	①CNT バイオセンサーの応用として、感染症、健康科学、食の安心・安全、環境保全、治安管理等の領域が考えられ、これら領域に向けての事業化が企てられようとしている。 ②バイオセンサー、スピン SEM、走査磁気抵抗効果顕微鏡、劈開機などでベンチャー企業を作りたいとする企業が出ている（函館市、S 社）。各テーマについて出願済み。 ③バイオセンサーについては、道立畜試、農試、日赤血液センター、IC メーカー、検査薬等のユーザー企業との共同開発が進行中。
岡 泰夫	分子線エピタキシ成長、電子線リソグラフィ極微細加工、超高速レーザー分光などを有機的に組み合わせた半導体ナノ構造の機能性開拓研究が、大学の研究室で行えることを実証した。その結果、国内外の研究者に刺激を与え、関連する研究を促すことになった。
家 泰弘	自己形成ナノ構造パターンをテンプレートとする手法は、微細加工では作製不可能な微小スケールの磁性ドットアレイを作製する手段として注目され、高密度磁気記録への応用の可能性が企業との共同研究で進行中である。
大塚 洋一	未だ基礎研究段階にある。NEC における研究も、研究費は政府資金だのみの色彩が濃い。
小宮山 進	②イギリス、および米国における、THz 光子検出を環境安全（防衛）に応用する動き ③キヤノンとの共同研究による赤外検出器アレイと新たな顕微鏡開発の動き
井口 家成	高温超伝導体を用いたマルチジャンクションジオメトリは、超伝導の d 波オーダーパラメータのふるまいが実空間に反映されるので（接合角度によってオーダーパラメータが変わる）、通常半導体型デバイスとは異なる非線形デバイス（例えばニューロ型デバイス）に応用可能な新手法を生み出したものと考えられる。
小倉 睦郎	量子細線 FET がフォトダイオードと増幅用 FET の組み合わせで高感度が得ら

	<p>れていることを見だし、より一般的な構造を用いた高感度、高波長域フォトディテクタを開発した。現在、JST 大学発ベンチャープロジェクトに採択され、実用的なフォトディテクタの開発が進行している。</p> <p>量子細線 LED においても、現在高効率化が遅れている赤色 LED の効率改善に有効であることが期待されており、産総研内の特許支援制度に採択され、検討が進んでいる。</p>
讃井 浩平	<ul style="list-style-type: none"> ・本研究において、真に分子レベルで複合した有機・無機ハイブリッド材料の作成法が見出され、当該分野の基盤整備に大いに貢献した。 ・発光デバイスに応用した。 ・飛行時間型陽電子断層画像装置 (TOF-PET) への応用展開があり、現在デバイスの作成、評価を他研究機関と共同して行っている。
山下 幹雄	超広帯域フィードバックチャープ補償装置は製品化の可能性がある。

(3) 社会的波及効果

社会的波及効果に関する質問項目にたいする回答結果を図 25 に整理して示す。また、具体的な代表事例などを記述式で回答していただいた結果を表 12 に示す。

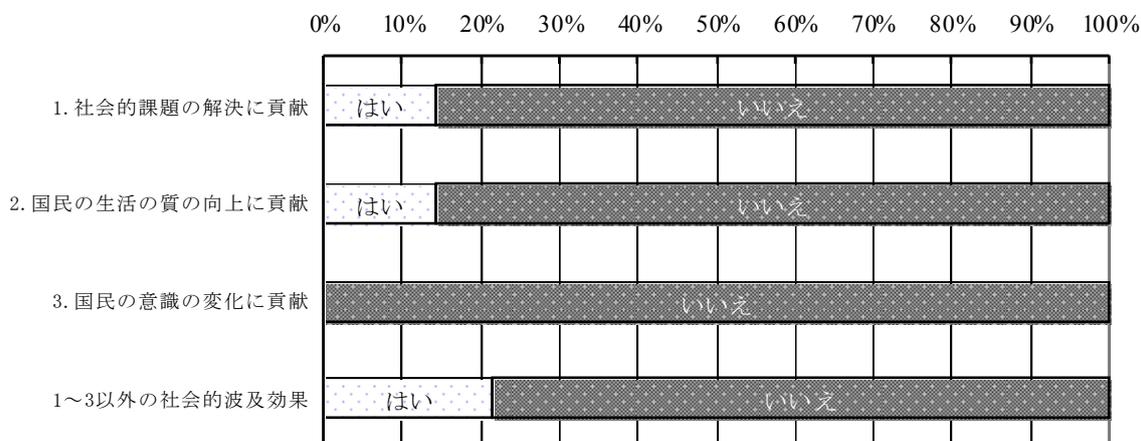


図 25 課題研究終了後の関連研究の社会的波及効果 (アンケート調査)

社会的波及効果があったと答えている研究代表者は非常に少なかった。「1.CREST あるいはその延長線上にある研究成果が、社会的課題の解決に貢献した」としているのが 2 名、「2.CREST あるいはその延長線上にある研究成果が、国民の生活の質の向上に貢献した」としているのが 2 名で、それぞれ高感度光ディテクタ、量子細線高効率 LED が具体例として挙げられた。「3.CREST あるいはその延長線上にある研究成果が、国民の意識の変化に貢

献した」と答えた研究代表者はいなかった。それ以外の社会的波及効果があったと答えているのは3名であり、事例として「近未来の情報社会に必要な課題に対して知見をもたらした」、「多くの若手研究者を育成し社会に送り出した」、「ナノサイエンスの分野の価値を世に発信することができた」、「光通信・光情報処理の基盤・基礎技術に貢献した」をあげていた。

表 12 課題研究期間終了後の関連研究の社会的波及効果（アンケート調査）

回答者	記述式回答
武笠 幸一	社会に成果がまだ還元されていないが、ここ5年の間には事業化がスタートする予定。
岡 泰夫	基礎科学的な立場より、磁性半導体ナノ構造の機能性創出、半導体スピントロニクスへの応用に関する研究を行い、近未来の情報社会に必要な課題に対して知見をもたらした。 また、この研究推進の過程で、多くの若手研究者を育成し社会に送り出した。
小倉 睦郎	高感度光ディテクタは、赤外領域で高い感度を持ち、医療、セキュリティ、リモートセンシングの分野での活用が期待されている。（実用的な性能を実証しようとしている段階） 量子細線高効率LEDは、赤色、黄緑色など、視感度は高いが高効率LEDが作りにくい波長帯で高い性能を持つことが予測され、3原色のバランスを取るのに重要で、演色効果や省エネルギー照明に重要。（GaAs系近赤外材料で、効果が立証された段階）。
讃井 浩平	・ 現段階では、基盤研究の域を脱していないので、社会への直接的な還元について言及することは困難であるが、ある程度ナノサイエンスの分野の価値を世に発信することができたと思う。 ・ この研究を通じて多くの優れた研究者を社会に送り出すことができ、今後の社会貢献が期待される。
山下 幹雄	光通信・光情報処理の基盤・基礎技術に貢献する。

（4）人材育成効果

人材育成効果に関する質問項目にたいする回答結果を図 26 に整理して示す。また、具体的な代表事例などを記述式で回答していただいた結果を表 13 に示す。

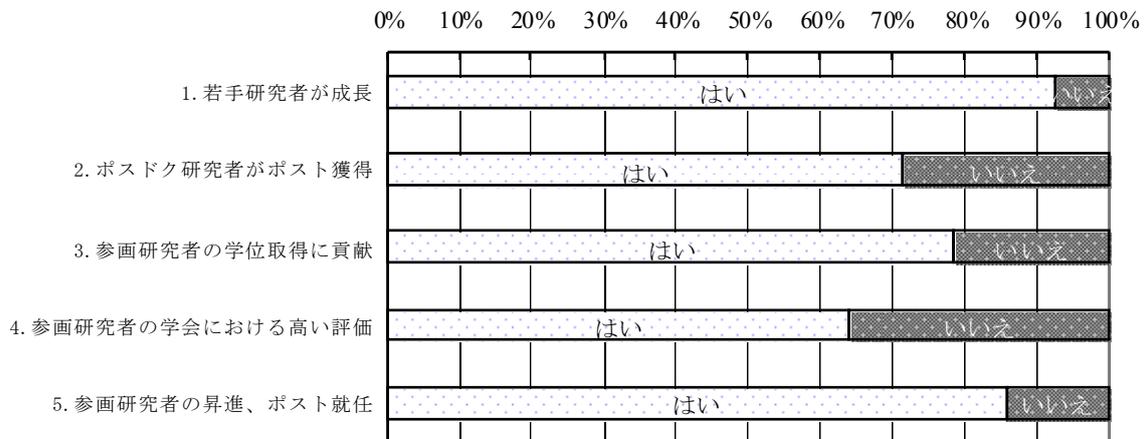


図 26 人材育成効果（アンケート調査）

人材育成効果に対しては、研究代表者は高く自己評価している。「1.若手研究者の成長につながった」としている研究代表者は93%であり、以下「5.参画研究者の昇進やポスト就任につながった」が86%、「3.参画研究者の学位取得に貢献した」が78%、「2.ポスドク研究者のポスト獲得につながった」が72%、「4.参画研究者の学会での評価が高まった」が64%の順になっている。CRESTが人材育成の面で果たした効果は大きいと言えよう。

表 13 人材育成効果（アンケート調査）

回答者	記述式回答
筒井 哲夫	ポスドクや企業研究者と一緒に研究することで、大学院学生が大きく成長した。 CRESTで雇用した研究者、共同研究者として参画した外国人若手研究者達が各国で活躍している。
寺崎 治	Postdocs: Y.Sakamoto: Assistant Prof., Stockholm University Z.Liu: Research Scientist at AIST, Prof Iijima's group N. Fujita: Assistant Prof., Tohoku Univ J. Yu: Changjian Prof, Jilin Univ, China G. Zhu: Prof. Jilin Univ., China Members: Promoted to Prof Y. Nozue: Prof. Osaka Univ K. Sugiyama: Prof. Tohoku Univ

武笠 幸一	<p>①CREST のメンバーで、教授（北大）、助教授（三重大）のポストを得て活躍している人材が輩出。</p> <p>②プロジェクトに加わった院生の多くが、メーカーに就職し磁気記録も含め、材料、素子の領域で活躍している。</p>
岡 泰夫	<p>1.ポスト獲得：ポスドク研究者より、中国・復旦大学の教授への昇進、米国、スイスの電気通信関連企業への就職、国内公立研究機関への就職</p> <p>2.学位取得： 大学院博士課程修了・学位取得者 3人、民間企業研究者・学位取得者 2人</p>
家 泰弘	<p>研究に参画した研究者の昇進やポスト獲得の事例として 助教授⇒教授(1), 助手⇒助教授(2), ポスドク⇒常勤研究者(3), などの実績が上がった。</p> <p>プロジェクトに参加した院生から7名の学位取得者が出た。</p>
小宮山 進	<p>①～③、⑤ CREST でのポスドク 2名が大学の（ロンドン大学、東京大学）講師、助教授に就任。2名が民間企業の研究者となった。博士号取得者は2名。</p> <p>④ 参画研究者が極めて多くの国際会議や研究会で招待講演を行った。</p>
小倉 睦郎	<p>CREST 終了後、基盤研究を中心として研究の継続が困難になったが、CREST の成果のうち、実用的に重要と思われるいくつかのデバイスに関して、いくつかの研究テーマが採択され、進展している。プロジェクトに参画したポスドクの内、外国人研究者は、自国あるいは、米国において、パーマネント職を得ている。また、日本人ポスドクの1名は、大学助教授に就任した。</p>
讚井 浩平	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究員であった学生 13名が学位を取得し、内一人は現在大学の講師に昇進した。 ・ 研究員 1名は、この CREST 終了後、「さきがけ研究」に採択された。
白田 耕藏	<p>若手研究者がさきがけ研究を獲得した。</p> <p>参画研究者が新規 CREST を獲得した。</p> <p>参画研究者が昇格（助手から助教授）した。</p>

Ⅲ. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果 (詳細調査対象の7課題)

19の研究課題は表7(29ページ)に示したようにカテゴリ別に分類したが、各カテゴリから選ぶことを前提として、さらに研究課題現状調査結果およびアンケート調査結果も勘案して、表14に示す7件を選定し、研究代表者に対する聞き取り調査、有識者に対する聞き取り調査を中心とした詳細調査を行った。

表14 詳細調査対象研究代表者および研究課題

No	氏名	表7による分類	研究課題名
7-1	青野 正和	測定法(SFM)	人工ナノ構造の機能探索
7-5	筒井 哲夫	物質(有機)	自己組織性分子を用いた新規発光機能材料の設計
7-6	寺崎 治	物質(無機)	配列したマイクロ空間での新物質系の創製と物性
8-1	家 泰弘	ナノ(量子場)	微細構造におけるスピン量子物性の開拓
8-2	大塚 洋一	ナノ(量子場)	金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用
8-4	小宮山 進	ナノ(量子場)	量子構造を用いた遠赤外光技術の開拓と量子物性の解明
9-2	小倉 睦郎	ナノ(デバイス)	原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果

§ 1. 人工ナノ構造の機能探索

研究代表者氏名：青野 正和

(現) 独立行政法人物質・材料研究機構 ナノテクノロジー基盤領域 コーディネータ

§ 1. 1 研究期間中における状況

研究成果概要については、以下に当時の事後評価結果を転記する。

(1) 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

イオン伝導体の数原子内の原子の移動を電気接点で起こさせて電流を on-off する量子伝導原子スイッチ(Quantized-Conductance Atomic Switch: QCAS)の開発、SFM 探針による有機薄膜への電気パルス刺激によって連鎖重合反応を誘起することによる π 共役重合分子ナノワイヤの作成など、今後のナノ電子デバイスの創製につながる独創的な成果を出したこと

は、大きな成果として評価できる。さらに、スピン偏極電子の探針への入射によって発生する円偏光の偏極度を観測するスピン STM を開発したこと、多探針 STM については 4 探針まで発展させ、Si (111) 7×7 表面、Si (111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag 表面の電気伝導、電子照射した C60 重合膜の電気伝導の測定などを実現したこと、ナノ構造の理論的探索として、リカージョン伝達行列法を開発し、ナノ電極間では電極間の架橋構造に依存して電極間電流より大きな渦電流が誘起されることを見出したこと、なども先進的研究として評価できる。総合的には、当初の研究構想の線に沿った研究が果敢に進められ、その中からイオン伝導体を用いた量子スイッチの開発など、構想を超えるいくつかの独創的な成果を生み出してきており、大いに満足すべき結果となった。

論文の総数としては、英文 64 件、和文 11 件と他のチームに較べて多い方である。ただし、サブグループの数を考えるともっと出てもよかつたかもしれない。注目すべき成果が後半にも多く出てきており、未発行の重要論文もあった。また、学会発表も国内学会 55 件、国際学会 62 件行われた。特許に関しては、研究の進展に伴い意識が高まり、重要な成果については漏れの無い特許出願申請（8 件）がなされた。

（2）得られた研究成果の科学技術への貢献

イオン伝導体の量子スイッチ素子は、1 個単位の原子イオンの移動をスイッチングに使うという、従来どこも実現したことのない量子伝導原子スイッチであり、極めて独創的なものである。すでに AND、OR、NOT 素子の室温、大気中での動作を確認していること、また高速駆動が可能なことなど、実現可能性の高い量子素子としてインパクトは大である。このスイッチを実用的に機能素子化する研究が、基礎的研究発展推進事業に「新しい量子効果スイッチの機能素子化」として平成 12 年度の研究課題に採択され、新たな研究体制による開発が進められることになり、今後の発展が期待される。 π 共役重合分子ナノワイヤは、分子ナノワイヤ作成に先鞭をつけたものであり、今後の分子デバイスの発展に与える寄与は大と予想される。また、多探針 SPM の開発も世界の先端を行くもので、微細構造の量子伝導現象を直接測定する技術として科学的にも大きな波及効果を持つ。また、将来のナノデバイスのナノテスタとしての発展も有望であり、技術的、産業的インパクトも期待できる。

受賞は、花王技術・化学財団 平成 12 年度 第 3 回研究奨励賞（表面の科学）を次の研究で受賞した。中山知信：C60、CaF 単層結晶膜の形成と欠陥導入の原子プロセス研究

（3）その他の特記事項

イオン伝導体を用いた量子スイッチ素子の開発は、基礎的研究発展推進事業に採択され、応用の可能性が追求されるが、その中で、多探針 STM も多探針 AFM（原子間力顕微鏡）へ

と更なる進展も図りながら開発が進められることに成っている。新産業創出に迫る成果を期待する。

§ 1. 2 課題終了後の状況

以下は、聞き取り調査から得られた結果をまとめたものである。

§ 1. 2. 1 研究の継続・発展状況

終了後も各テーマは継続し、さらなる発展を見せている。特に QCAS は、

①2001～2003 年 JST の SORST（発展研究）「新しい原子スイッチの機能素子化」
（研究代表者：青野）

②2003 年～ JST の ICORP（国際共同研究事業）「ナノ量子アレー・プロジェクト」
（研究代表者：青野）

③2005 年～ 文部科学省ナノテクノロジー・材料を中心とした融合新興分野研究
開発

<産学官連携型> 「原子スイッチを用いた次世代プログラマブル論理演算デバイスの開発」

（提案代表者：青野）

に採択されるなど、国の大きなプロジェクトとして取り上げられ、実用素子化へ向かってさらなる発展が期待される。

多探針 STM も実用装置を目指して企業との共同研究を実施している。装置がねらいどおり再現性よく動作するようになり、測定例が増加している。

§ 1. 2. 2 代表的研究成果

（1）QCAS

CREST の中で発見された原子スイッチは、その後 SORST に発展的に引き継がれ、現在は ICORP および次世代デバイスをめざした文科省のプロジェクトである ナノテクノロジー・材料を中心とした融合新興分野研究開発<産学官連携型> 「原子スイッチを用いた次世代プログラマブル論理演算デバイスの開発」で日本電気（NEC）を研究参画者としてさらなる発展をめざしている。（IEEEJ.SSC,40,168(2005)）。

NEC は、集積化の試みとして、1k ビット不揮発性メモリ、プログラム IC、4×4 クロスバススイッチ、プログラムスイッチアレイなどを試作し、集積回路としての基本的な動作を確認した。またデバイスに関しては書き込み消去の動作と速度、繰り返し書き込みによる特性の劣化などの基本的な特性を調査した。（IEEEJ. SSC, 40, 168(2005)）

(2) 多探針 STM

堀場製作所からひとり常駐で2年以上開発研究しており、4探針を独立にコンピュータで自動位置制御できる見通しである。当面2探針で発売する予定である。探針の圧力の自動化も計画している。さらに、STMが適用できない絶縁体上で測定可能な原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope : AFM) でも4探針を実現した。これらを駆使して、金属ナノワイヤ以外に、DNA、カーボンナノチューブ、高分子ナノワイヤなどの電気伝導度測定に挑戦している。

Si (001) の上の厚さ 0.67nm、幅 2.3nm の ErSi_2 ナノ細線の電気伝導を2探針 STM で測定し、細線の抵抗 $1.9\text{k}\Omega/\text{nm}$ を得た。一方の探針を細線上に固定し、他方の探針を細線上で移動させて抵抗を測定し、抵抗の探針間距離依存性から探針の接触抵抗成分を消去し上記抵抗値を得た。このサイズの ErSi_2 ナノワイヤの電気伝導度についてこのような測定を行ったのは世界で初めての成果である。

(ナノネットインタビュー : <http://www.nanonet.go.jp/japanese/mailmag/2004/049a.html>)

太さ 1nm の単層カーボンナノチューブの電気伝導度を測定し、mean free path が 470nm と、金属での 10~20nm に比べて大きな値であることが分かった。カーボンナノチューブの mean free path を実験的に測定したのは世界で初めてである。(ナノエレクトロニクス日独合同ワークショップ 2006.10.30-11.17)

(3) ポリジアセチレン導電性ナノワイヤ

STM を用いてその電氣的性質を測定した。外径がおよそ 2.6nm のポリジアセチレン重合分子ワイヤのアレイを作成し、抵抗を測定した。 I_2 をドーピングすると、比伝導度は $2.9 \times 10^{-3} \text{S/cm}$ と3桁増大することも確認した。単層ポリジアセチレンのワイヤを STM 探針で測定し、電気伝導に深く関わる正のポーラロンと負のポーラロンに対応する現象を確認した。単一 STM 探針とワイヤの間の電圧を高くしていくと、ワイヤは低密度ポーラロンの状態から高密度ポーラロンの状態になって、最終的にはある電界を境にして、バンドが半分充満した状態の金属状態に転移する。転移のしきい値電界は 6V/nm であった。さらに、FET と単一光子エミッタなどのアプリケーションを見据えての研究に取り組んでいる。(Australia-Japan Workshop/Symposium on Nanomaterials, Canberra, November 20-21, 2006)

§ 1. 2. 3 課題の波及効果

(1) 科学的・学術的波及効果

課題研究期間中の論文の平均被引用件数は 17.4 と、大きな科学的・学術的波及効果を示している。ISI Essential Science Indicators によると 1993 年から 2003 年の間における物理領域の論文の平均被引用件数は 6.61 であり、それに比較して十分大きな数字となっている。以下に要因を列挙する。

A. 量子伝導原子スイッチは画期的なアイデアに基づくものであり、LSI テクノロジーとしてはイノベティブである。米国でも注目され、スタンフォード大学でも似たプロジェクトが立ち上がっている。未だ研究段階であるが、その実用素子化は世界の注目を集めている。

B. 原子スイッチという現象で国際会議に発表して反響は大であった。(独)物質・材料研究機構(NIMS)の筆頭成果となっており、またナノテストもNIMSの成果に入れられている。原子スイッチは次世代LSIの主要技術とみなされている。

C. 多探針STMによる電気伝導測定は、理論的に厳密解が存在する場合が少ない1次元系の物理の解明への貢献が期待される。金属ナノワイヤの1次元電気伝導、カイラリティによって変わるカーボンナノチューブの電気特性、特にバリスティック電気伝導、高分子鎖のソリトンやポーラロンによる電気伝導など、ナノスケールの構造に現れる特異な物性の解明は新たなデバイスを実現するための基礎となる。特にカーボンナノチューブのバリスティック伝導の測定は理論家の予測が実証されたものであり重要な成果である。また金属の1次元電気伝導で理論的に予測される電荷密度波が本プロジェクトの長谷川たちによって観測されていることも注目に値する。この装置はこうした1次元電気伝導測定のための強力な武器になることが期待される。

D. 3探針STM測定では、孤立した極微な島にトンネル接合された極微な細線の3電極からなる単電子トランジスタ(SET)の特性の測定が可能である。4探針AFM/STMによって高分子化し導電体化しC₆₀薄膜の電気伝導の測定が可能である。

E. この方法によって孤立した島の内部量子状態を調べることもまた可能である。

F. 従来は、微小な構造の集合体の平均値的な性質しか測定できなかったが、上のようなSTM測定では、探針の数にかかわらず、微細な構造体の個々の物性を測定でき、革命的な道具である。

(2) 産業技術的・経済的波及効果

A. QCASは、不揮発性メモリとして、低電圧動作が可能、構造が簡単で高密度などの特長があり、将来トランジスタの微細化が進んだときにフラッシュメモリに対抗できることが期待される。しかしながら、メモリとしては、高集積、低価格が要求される。また論理回路に組み込むには、集積度は多少低くてもいいが、速度が要求される。QCASは、こうした条件を満たすべく、研究開発が進められている。

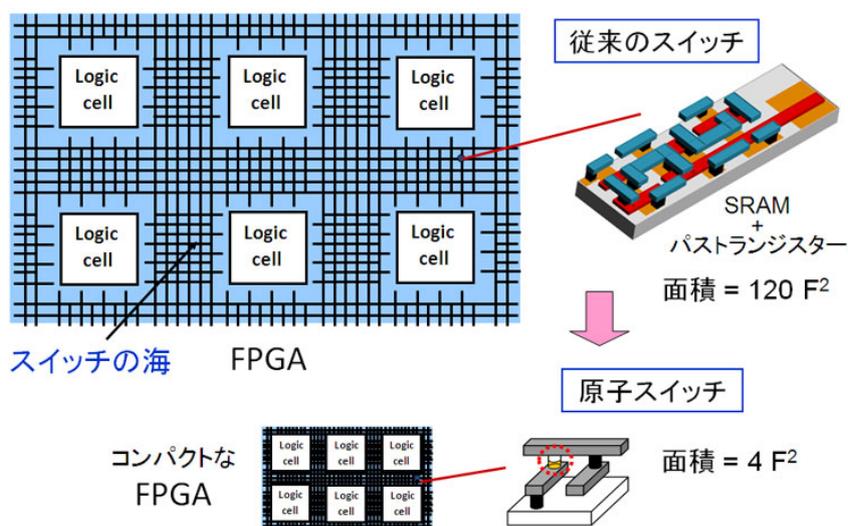
B. 研究に参加した NEC は、当面はプログラマブル IC への応用を試みている。将来、自動翻訳機を携帯電話に搭載することが考えられているが、NEC はそこを狙っているといわれている。NEC はプログラマブル IC の中で、出荷時にメーカーのみ仕様変更ができるが、ユーザーは仕様変更できない ASSP を狙っている。

C. QCAS の商品化については、未だ基礎研究段階なので不明であるが、従来の CMOS デバイスとの混載のためのスイッチング電圧の関係から、硫化物を使用しない材料を発見して解決しようとしている。

青野グループの代表的展開・発展事例

「原子スイッチを用いたプログラム可能な IC の実用化をめざす」

原子スイッチは、高密度メモリー、論理演算回路、新しい型の脳型コンピューターなど多くの目的に実用化できる可能性があるが、もっとも実用化に近づきつつあるのは、原子スイッチのサイズがきわめて小さいことを利用して、コンパクトなプログラム可能な IC を実現することである (NEC との共同研究)。すでに予備研究を終えて、実用化に向けた研究が行われています。



§ 2. 自己組織性分子を用いた新規発光機能材料の設計

研究代表者氏名：筒井 哲夫

(現)九州大学 先導物質化学研究所 教授

§ 2. 1 研究期間中における状況

研究成果概要については、以下に当時の事後評価結果を転記する。

(1) 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

当初の構想としては、有機材料の高度な自己組織性と分子配向性を活用した発光機能材料の開発及び量子構造機能として新しい発光機能を発現させ、革新的な発光デバイスの突破口を切り開くのを目標としていた。この目標に沿った成果として、カイラルネマチック液晶構造を利用した円偏光発光、有機・無機ペロブスカイトの有機アミンへの発色団の組込みによる無機ペロブスカイト励起子からの発色団三重項状態のエネルギー移動に伴う燐光発光を確認したこと、シリカ微小球体配列(シリカオパール)及びその空隙にポリマなどを充填してシリカを除去した逆オパールによるフォトニック結晶の作成などは、独創性のある成果として評価できる。偏光発光、燐光発光についてはいずれもフォトルミネッセンス発光のレベルであり、電界発光への具体的な進展を期待したい。微小共振器を用いた発光機能の探索は加工プロセスと自己組織性を利用する3次元微小共振器と1次元共振器を用いた研究がなされたが、1次元共振器による指向性発光については、(株)豊田中央研究所との共同研究により、デバイスとしてのかなりの技術的進展が見られた。指向性の強い発光素子として利用法があれば、使える技術までになっている。

当初、革新的発光デバイスの突破口を求めるということで、多くの新規テーマが探索されたが、それらからは突破口が何なのか必ずしも明確にはならなかった。研究の後半になって、有機EL発光素子の商用化の予想を越えた急展開に呼応する形で、EL発光素子の発光の高効率化というところに研究の重心を移し、三重項発光による量子収率の向上、及び屈折率が空気に近い(1.1以下)固体としてシリカエアロゲルを発光取りだし面に用いることによる発光取りだし効率の向上などで、EL発光素子の発光収率の向上を示したことは、応用上重要な技術で、この分野をリードしている意義は高く、評価できる成果である。

上記の成果は、論文発表として英文65件、和文4件なされた。また、学会発表も国内学会81件、国際学会25件行われた。特許は3件であった。特許は有機ELと結びつくものとして今後に期待したい。

(2) 得られた研究成果の科学技術への貢献

EL発光素子の研究成果として、三重項発光、取りだし効率の向上など発光効率を上げる研究は、EL発光素子の実用化の範囲を著しく増大させるもので、先進的研究としてインパクトは大きい。有機EL素子はディスプレイ分野でカラー液晶に変わるものとしてその期待が大きく、高効率の発光材料、発光方式が発見されれば可能性は益々大きくなる。また、

有機 EL 発光素子は低電力長寿命照明装置など、ディスプレイ以外の発光素子としての実用上の利用価値も大きいことが予想される。本研究の成果がさらに具体的に発展すれば、有機 EL 発光素子として新産業創出につながる技術となる。

受賞：山口淑久（CREST 研究員）The Fifth International Display Workshop (IDW'98) で Outstanding Poster Paper Award を受賞（平成 10 年 10 月）

§ 2. 2 課題終了後の状況

以下は、聞き取り調査から得られた結果をまとめたものである。

§ 2. 2. 1 研究の継続・発展状況

有機 EL の研究は継続されている。有機 EL のデバイスを構成するには電気系統も有機材料で実現することが求められることから、発光材料だけでなく、FET、光電変換素子などの電子デバイスにも研究領域を拡大している。

科研費プログラムなどの新たなファンディング状況は、材料開発としては、

①2000～2003 年科研費一般研究(B)の「簡素構造分子の概念による有機エレクトロルミネセンス材料の設計」(研究代表者:筒井)

デバイス関連では、

②2003～2004 年大学発事業創出実用化研究開発事業費の「自己発光素子を励起光源とするフォトクロミック表示デバイスの開発」(研究代表者:筒井)

③2004～2005 年科研費基盤研究 B の「モノドメイン液晶を形成するフルオレンオリゴマーを用いた高移動度有機トランジスタ」(研究代表者:筒井)

④2006～2007 年科研費基盤研究 B の「分子配向を利用した偏光検出型面状イメージセンサー」(研究代表者:筒井)

などに採択されている。

しかしながら、これまでも研究室に企業の研究者を招き、共同研究することで業界を指導してきたことを踏まえると、実用化が視野に入らな中での研究の発展には企業の参画が不可欠であるが、昨今の各企業の有機 EL からの撤退情勢は研究の発展にも厳しい状況を与えている。

§ 2. 2. 2 代表的研究成果

(1) Ir (ppy)₃ の発光効率の改善

イリジウム錯体の分子構造を変え、加えて薄膜デバイスの多層膜の構造を最適化することで、外部量子効率を改善した。Ir (ppy)₃ が 8.7 重量%、4.2V 駆動、電流密度 0.215mA/cm²、照度 100cd/m² の条件で、外部量子効率 14.9%、電力照度効率 43.3lm/m² を達成した。

(2) 青色と青緑色発光材料、紫外発光材料

青の発光体として、oligo(9,9-dihexyl-2,7-fluorene ethynylene)s を合成した。青緑の発光体として、fluorenyl-substituted poly(p-phenylene vinylene)s を合成し、キャリアの移動度を調べた。Spirobifluorene derivatives で紫外発光ダイオードを試作した。

(3) その他

有機 FET の研究を実施し、キャリアの移動などの電氣的な基礎研究論文を多数発表した。

§ 2. 2. 3 課題の波及効果

(1) 科学的・学術的波及効果

有機 EL 材料として構造を取り入れた材料開発では先駆的であり、この分野での蓄積に寄与し、またディスプレイ向けの燐光発光材料を実践的に研究開発するきっかけを内外の企業に与えた意味で大きな貢献といえる。発表論文からも研究代表者が世界的に一流の研究者であることが示されているとの評価もある。

松下と共同研究した光取りだしへのエアロゲルの使用は技術的に難しく使われなかったが、「光取りだし」ということに注目を集めさせた。光取りだし効率が重要要因であることは今や共通概念となっている。光取りだし効率に関する先駆的な成果は国際的にも高く評価されている。マイクロキャビティ効果の研究は現在では有機 EL の高効率化や色調整に不可欠の技術として広く用いられている。

(2) 産業技術的・経済的波及効果

有機物は単結晶ではないので作成するのが容易で、大量生産が可能である。また薄膜もできるしフレキシブルであるとの長所も備えている。中・長期的に有機エレクトロニクス化することは疑いの余地がないとの基本的認識もある。CREST 応募時の目標であるまったく新規な有機 EL 材料を開発し、それをブレイクスルーとして大々的な商品化への展開を期待した向きからすれば、期待に全面的には応えていないという評価がある。しかしながら実際に商品化されている数少ない分野であることは事実であり、研究代表者が、業界各社とのつながりや技術だけではなく、経営に影響されるという商品化の生々しいやりとりを肌で経験していること、すなわち有機 EL の基礎が分かりかつ応用についても話せることへの評価が高い。

技術的には、研究代表者は三重項発光、取りだし効率の向上など発光効率を上げる研究によって、EL 発光素子の実用化の範囲を著しく増大させるのに指導的な役割を果たした。

CREST だけの波及効果ではないが、有機 EL が米国で発表された 1980 年代から 20 年余有機 EL の研究に携わり、世界で初めて製品化したパイオニア、三洋電機、TDK を初め、多くの企業研究者との直接（筒井研の出身者が多数関係している）、間接的な関わりの中で、

現在実用化に至っている有機 EL ディスプレイ産業への波及効果は多大である。有機 EL 素子はディスプレイ分野でカラー液晶に変わるものとしてその期待が大きく、高効率の発光材料、発光方式が発見されれば可能性は益々大きくなる。有機 EL ディスプレイはこの5年ほどで実用化が進み、小型ディスプレイにおいては定常的な市場を形成しつつある。松下の携帯電話の第2画面（ディスプレイはおそらくパイオニア製）、ソニーのPDAクリエの7インチほどのディスプレイも有機 EL である。現在有機 EL のシェアで多くを占めている韓国のサムスン、台湾のメーカーにも人材が及んだという意味で波及している。有機材料メーカーである住友化学、メルク、出光興産にも直接、間接的に影響を及ぼしてきた。また有機 EL 発光素子は低電力長寿命照明装置など、ディスプレイ以外の発光素子としての実用上の利用価値も大きいことが予想される。有機トランジスタや有機太陽電池などの有機半導体材料・デバイスの研究が急速に展開されつつある。

（3）社会的波及効果

小型の有機 EL ディスプレイは薄型化に適しているために、ある一定の市場があり、社会的波及効果があるといえる。最も期待されている大型ディスプレイにおいては、筒井とは直接関係がないものの、ソニーが2006年に発表したのが、安定した市場を形成して大きな社会的波及効果を及ぼすには特に液晶ディスプレイとのコスト競争という問題があり、簡単ではないと思われる。

トピックスとして、2007年2月5日に昭和電工が30cm角の有機 EL パネル量産で市場参入すると発表し、併せて有機 EL 関係の人材を募集していることを記しておく。

（4）人材育成効果

1980年代から研究を継続しているので、各界への人材の供給など人的影響は大きい。CRESTにおいては、ポスドクや企業研究者と一緒に研究することで、大学院学生が大きく成長した。CRESTでの雇用もしくは共同研究者として参画した外国人若手研究者達が各国で活躍している。

山口淑久（CREST 研究員）が、平成10年10月、The Fifth International Display Workshop (IDW'98) で Outstanding Poster Paper Award を受賞した。

§ 2. 3 参考資料

「有機半導体材料/デバイスの現状と将来展望 古典的な有機半導体の定義が復活 有機半導体のルネッサンスが到来」(Semiconductor FPD World 2006.8,38-40、別添参考資料 11)

§ 3. 配列したマイクロ空間での新物質系の創製と物性

研究代表者氏名：寺崎 治

(現) Structural Chemistry, Arrhenius Laboratory, Stockholm Univ. Professor

§ 3. 1 研究期間中における状況

研究成果概要については、以下に当時の事後評価結果を転記する。

(1) 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

透過電子顕微鏡像から結晶構造因子の位相と振幅情報を得ることによって、メソ多孔体の空隙の3次元周期構造を解析する手法を開発した。さらには、透過電子顕微鏡像の位相データに制限視野回折図形の振幅情報を併用することによって、結晶構造をとるマイクロ多孔体の骨格構造を決定する方法を開発した。マイクロ、メソ多孔体の3次元構造を一義的に決定する方法を世界で初めて提示したことになり、多様な機能の発現が期待できるマイクロ、メソ多孔体の開発に必須のツールを提供した。従来のX線解析では、位相情報が直接得られないこと、回折ピークが少ないことなどのために、マイクロ、メソ多孔体の3次元構造を一義的に決定することは不可能であった。実際に、この構造解析法を使って多様な新奇な多孔体の解析と発見に成功している。例えば、メソポーラスシリカを鋳型にしたメソ炭素多孔体の発見、またそれへの白金ナノワイヤの分散構造の解明、無機-有機複合メソ多孔体の世界初の合成とその構造決定、ケイ酸構造を維持したメソ多孔体の発見などが注目される。

当初の構想は、ゼオライトで代表されるマイクロ多孔体の研究に重点があり、アルカリ金属のゼオライト空隙への修飾による磁性の発現に関するメカニズムの探求と、新奇な物性の発現を期待して、水熱合成による多数のゼオライト単結晶合成とゼオライトの結晶構造解析を進めることであった。

その過程で研究代表者の得意とする結晶構造解析法の研究で地道な努力が進められ、従来不可能であった、マイクロ・メソ多孔体の3次元構造解析法を、透過電子顕微鏡像を用いて確立したことは、マイクロ多孔体の研究が世界的に盛んになるという時宜も得て、大変に意義深い成果となった。国内外の有力なマイクロ、メソ多孔体の材料研究者との共同研究が進展し、多くの有望な多孔体が創製されてきているのは、好ましい展開であり、今後の発展が期待できる。

論文数は英文161件、和文12件で、2件がNature誌に掲載され、その内1件はNature誌の表紙となり、対外的にも大いに評価された。また、学会発表も国内学会93件、国際学会40件行われた。特許は2件と多くはないが、構造解析の基本的特許となっている。

(2) 得られた研究成果の科学技術への貢献

マイクロ、メソ多孔体の構造解析法の確立とメソ炭素多孔体など、新多孔体の発見はインパクトが高い。特に構造解析法の確立は国内外から評価は高く、研究代表者に構造解析が依頼されて、世界の多孔体材料研究者の情報集約センター的な役割を担っている感がある。構造解析法は今後の各種の多孔体材料研究への応用、また、生体分子の構造解析への応用などへの展開なども期待できる。メソ炭素多孔体及びそのナノ白金分散、無機-有機複合メソ多孔体などの発見は、水素吸蔵材料、触媒、シリコンLSの低誘電率層間膜材料などとしての機能性材料として、新産業創出に結びつく発展が期待できる。

受賞としては、*Journal of Electron Microscopy*, 48(6), 795-798(1999)に掲載された *The structure of MCM-48 determined by electron crystallography*. A. Carlsson、金田瑞枝、阪本康弘、寺崎治、R. Ryoo、S. H. Joo が日本電子顕微鏡学会論文賞を受賞している。

(3) その他の特記事項

平成12年8月に"New World Produced by Micro & Mesoporous Materials"と題した国際シンポジウムを開催し、CRESTの研究成果を発表した。マイクロ、メソ多孔体関連の世界の代表的な研究者を集めて好評を受けた。研究代表者は国際ゼオライト学会から、*International Zeolite Association (IZA)*、*Council Member* と *Member of Structure Commission of IZA* として6年間任期の理事に選出された。

§ 3. 2 課題終了後の状況

以下は、聞き取り調査から得られた結果をまとめたものである。

§ 3. 2. 1 研究の継続・発展状況

終了後も課題研究期間中の分野の研究は、構成研究員によってマイクロ、メソ多孔体の構造解析法のさらなる発展、新多孔体の発見、ゼオライト細孔内クラスタ合成から高活性触媒の調整への発展、ゼオライト空孔内にクラスタを作成した物質系の合成、強磁性、電子状態など物性解明の発展など継続され、ますます発展し、新境地を開いている。

寺崎は2003年にストックホルム大学に転出新しい電子顕微鏡のセンターを建設し、イタリア、スペイン、ドイツ、フランス、イギリス、ノルウェー、中国、日本と共同研究を続けている。

科研費プログラムなどの新たなファンディング状況は、以下のようになっている。

①2001年 科研費特定領域研究(A)の「マイクロ、メソ多孔体複合機能場のナノ空間制御(電子顕微鏡を用いた3次元構造の研究)」(代表研究者：寺崎)

②2001年 科研費基盤研究(C)の「マイクロ・メソ多孔性結晶内における新反応場の構築」(研究分担者:寺崎)

③2001~2003年 科研費基盤研究(B)の「マイクロ,メソ多孔体を用いた新しいナノ構造体の創製場(構造決定とその空隙の利用)」(代表研究者:寺崎)

④2002年 科研費特定領域研究の「電子顕微鏡による複合機能ナノ空間場の構造解析・評価」(代表研究者:寺崎)

§ 3. 2. 2 代表的研究成果

(1) 電子顕微鏡構造解析手法の開発

A. ゼオライトへの電子線新構造解析法の適用:シリカゼオライトベータ ITQ-14 はベータゼオライト(A型B型の混合)の上に微小な柱状粒子ベータC型がエピタキシャルに成長した結晶であることを解析手法を新しく展開しながらベータC型の構造を解いた。この方法では、微小領域のHRTEM像のフーリエ解析から得たポテンシャルマップ上に原子位置を、解の一意性を失わない様に電子回折パターンからパターンソン対を見出し精密化する方法である。

B. シリカゼオライト TNU-9($\text{H}_9.3[\text{Al}_{0.3}\text{Si}_{182.7}\text{O}_{384}]$)の構造をX線回折とHRTEMの併用によって解明した。一連の電子回折図形から格子系、格子定数と可能な空間群を求め、シンクロトロン高分解能X線粉末回折パターンで観測された回折強度の大きい反射についてHRTEMで得た位相を入力し、スイス・チューリッヒ工科大学が開発した粉末回折法ソフトFOCUSを用い構造決解析に成功した。ゼオライト TNU-9($\text{H}_9.3[\text{Al}_{0.3}\text{Si}_{182.7}\text{O}_{384}]$)は24個の(Si,Al)原子と52個のO原子を非対称要素としてもち、これまでに解析されたどの構造よりも複雑である(Nature, 444(7115), 79-81(2006))。

(2) 新規なゼオライト及びメソ多孔体材料の創出

A. 結晶様気孔壁を有するメソ多孔質有機・シリカハイブリッド材料

寺崎は、稲垣らと共同で、親水性のシリカと疎水性のベンゼンとが交互に規則正しく配列した細孔壁を有するメソ多孔体を世界で初めて創出し、Natureに発表した(Nature, 416(6878), 304-7(2002))。これはメソ多孔体の応用である吸着剤や触媒の可能性を大きく広げるものと期待されている。

B. 有機化合物蒸気分離用の新規ゼオライト膜の創出

寺崎は、米国マサチューセッツ大学のLaiらと共同で、アルミナ基板上にメソポーラスシリカ層、その上にゼオライト膜を堆積させるという手法により新規ゼオライト膜を創出した。サイズの差が0.1nm未満のo-キシレンとp-キシレンの分離に成功し、Scienceに発表した

(*Science*, 2003 Apr 18; 300(5618): 456-60)。Davis は、同誌の解説で、この成果はモレキュラシーブ用のゼオライト膜の発展に大きな刺激となるであろうと述べている(同誌: 438-39)。

C. ユニークな構造のメソポーラスシリカ合成のための新規陰イオン界面活性剤テンプレート法

寺崎は横浜国立大学の Che らと共同で、従来使用されていなかった陰イオン界面活性剤をテンプレートとして使用して、メソポーラスシリカの合成に成功し、*Nature Materials* に発表した(*Nat. Mater.*, (12), 801-5 (2004))。構造指向剤としてアミノシラン(3-アミノプロピルトリメトキシシランまたは四級化アミノシラン)を中間に使用し、これと無機前駆体(トリエトキシシラン)とを使用した。メソ構造の孔径は 2.0-6.2nm の範囲にあり均一であった。

D. キラルなメソポーラスシリカの合成と特性の解明

寺崎は、上海交通大学の Che らと共同で、キラルメソポーラスシリカを合成し *Nature* に発表した(*Nature*, 429(6989), 281-4 (2004))。ねじれた六角柱状の外形を有し、直径は 130-180nm、長さは 1-6 μ m である。透過型電子顕微鏡法と計算機シミュレーションの組み合わせにより、六方晶系に規則的に配置された直径 2.2nm のキラルチャンネルが棒の中心軸のまわりを巻いていることを確認した。これはメソポーラスシリカや他のキラル孔材料の新たな利用法を開くものであり、形状選択性とエナンチオ選択性の両方を兼ね備えた触媒や分離媒体などとして、純粋なエナンチオマとしての化学物質や医薬品の製造に応用されることが期待される。

E. メソポーラスシリカの形状を完全に残留させた高分子微小体の創出

寺崎は、ミラノービコッカ大学の Sozzani らと共同で、シリカ MCM-41 母型にスチレンや MMA を含浸した後、ラジカル重合して高分子化し、ふっ酸でシリカを溶出して元のシリカの形態を残留する高分子微小体を創出し、*Nature Materials* に発表した(*Nat. Mater.*, (7), 545-51 (2006))。

(3) 高度に制御されたナノ空間材料の創製

黒田は、従来の無機・有機・高分子・セラミックス・金属等の従来の枠組みを超え、ナノレベルで物質を精緻に組成構造制御して、資源・エネルギー的に実用材料へ展開しやすい無機系および無機有機ナノ複合材料次世代材料の開発をすると同時に、その実用的展開の為に基礎的検討を(CREST「環境保全のためのナノ構造制御触媒と新材料の創製」) 研究代表者として進めた。

(4) ゼオライト細孔内 Co-Mo-S クラスタ触媒

岡本は、ゼオライト細孔内に Co-Mo-S クラスタ触媒を調製する手法が Co-Mo 水素化脱硫触媒の新規キャラクターゼーション法として有用であることを見出し、軽油サルファーフリー触媒の開発に適用して、優れた成果を挙げた。

(5) ゼオライト細孔内のアルカリ金属クラスタの物性研究

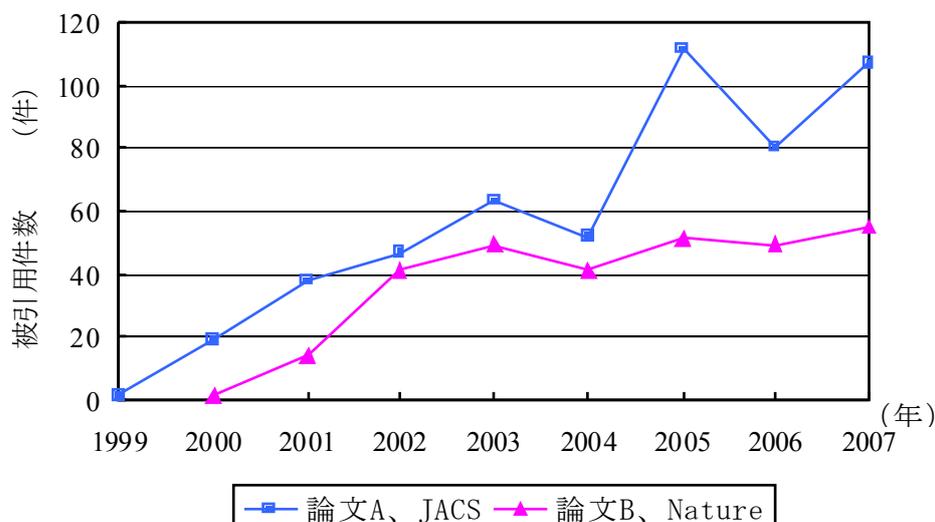
野末は、

- A. ゼオライト LSX にカリウムクラスタを作成した物質系における N 型フェリ磁性の発見
 - B. s 電子を含む新しいアルカリ金属クラスタにおける新規な強磁性の発見
 - C. ゼオライト A 中のカリウムクラスタの試料を大気にさらさずに μ SR 実験を行う方法の開発
 - D. ゼオライト A という巨大なユニットセルと空洞を持つ物質系において第一原理計算が可能であることの証明
 - E. 十分高品質なゼオライト A 中に作成したルビジウムクラスタでの s 電子系における新しい磁気秩序の発見
- などの研究成果を得た。

§ 3. 2. 3 課題の波及効果

(1) 科学的・学術的波及効果

課題研究期間中の論文の平均被引用件数は、32.7 と極めて大きく、19 研究課題中第 1 位である。研究代表者が選定した 5 つの主要論文（別添参考資料 8 参照）のうち、被引用件数が最大の論文（論文 A）および研究代表者自身が最重要と考えている論文（論文 B）について、発表年以降の被引用件数の経年変化を調べた。結果を図 27 に示す。なお被引用件数の経年変化は平成 20 年 4 月 17 日に調査した。



論文 A、B は、2008 年 4 月 17 日調べ。

図 27 寺崎研究代表者の主要 2 論文の被引用件数の経年変化

	論文 A ^{※1}	論文 B ^{※1}
著者	Inagaki S, Guan S, Fukushima Y, Ohsuna T, Terasaki O	Sakamoto Y, Kaneda M, Terasaki O, Zhao DY, Kim JM, Sucky G, Shin HJ, Ryoo R
題名	Novel mesoporous materials with a uniform distribution of organic groups and inorganic oxide in their frameworks	Direct imaging of the pores and cages of three-dimensional mesoporous materials
原典	J Am Chem Soc, 121, 9611-9614, 1999	Nature, 408, 449-453, 2000
被引用件数	518	301

※1：2008 年 4 月 17 日調べ

両論文とも発表の翌年から被引用件数が大きく伸びており、現在でも継続して引用されている。科学的・学術的に大きなインパクトを与えた論文と言えよう。

さらに研究代表者寺崎は、2000 年～2005 年 8 月の化学部門における被引用件数の日本第 1 位である。このように課題研究期間中及び期間後における本チームの科学的・学術的波及効果は極めて大である。この要因を列記する。

A. ゼオライト多孔体及びメソ多孔体は、機能性材料として触媒、吸着剤、イオン交換剤などとして工業的に広範な用途を有する。従来はシンクロトロン放射のような巨大装置が必要であった多孔体の構造解析に、電子顕微鏡による手法が確立されたために、小さな実験室で多孔体の構造解析ができるようになり、多孔体の理解が急速に進んだ。電子顕微鏡

の解析能力をさらに複雑な物質にまで使えるようにするために、X線解析との組み合わせを考え、そのためにX線解析の世界の権威たちとの共同研究を積極的に進めている。

B. 研究代表者が、初めから成果技術を開放し、広く使って貰うことを意図して研究グループを構成したため、本研究代表者が開拓したマイクロ、メソ多孔体の電子顕微鏡を用いた構造解析手法が、国内外に広がっている状況にあることも重要である。日本国内、中国、韓国、アメリカ、欧州にわたって、多孔体研究の優秀な人材のネットワークが作られ、これによって大変強力な研究チームができ、目覚ましい研究成果の達成に貢献した。このことは世界の評価が物語っている。

C. 研究代表者は、装置が何もない状態から、CRESTの資金で装置から開発して、成果を出した。すなわち電子顕微鏡でゼオライトの形を精密に構造解析して、それを元に新しい物質を作った。期間中に解析手法を開発したことが評価される。情報集約センターになっているということは、CRESTとしても評価できる。

D. 多数の多孔体が合成され、構造解析され、触媒研究の進歩に多大の貢献をした。

E. 金属においては通常の技術では実現できない3次元低密度電子系を、ゼオライトの孔にアルカリ金属を押し込むことによって実現し、磁性が現れたり絶縁体になったりするそのユニークな系の実験を可能にした。金属電子は低密度になるほど、電子間相互作用エネルギーが運動エネルギーに対して大きくなり、強相関係問題と呼ばれ、金属電子の量子論が始まったところから残された難問の分野になっている。野末は、理化学研究所とミュオン実験、東大物性研と強磁場の実験、東大と第1原理計算などの分野に積極的に進出し、多くの協力者を引き込んでこの分野を発展させている。

F. 寺崎氏の方法論の開発は大きな成果である。このような解析をやっている人は日本で他にいない。

G. 研究代表者へのアンケートであげられている論文(表9、46ページ)は、何れもネイチャー、サイエンスに載っており、どれも立派な論文であると評価されている。

H. 論文の引用件数が多いのは、ゼオライト分野の研究者が多いこととも関係するが、インパクトであることは確かと評価されている。

I. CRESTでの研究は単なる従来の研究の延長ではない。ジャンプがある、イノベーティブである、ナノポーラスの世界で画期的であった。またこの分野には解析屋がいないので、

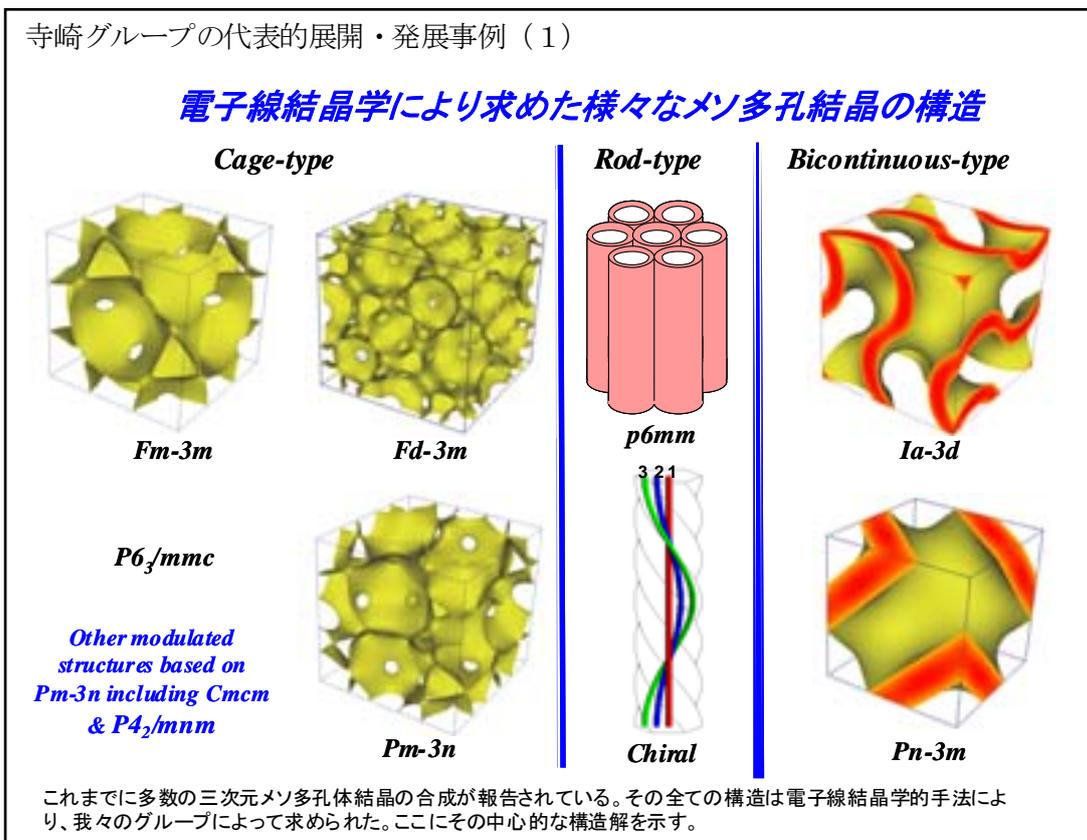
大きな意味があった。波及効果は大である。ただし実用化には 20 年かかる。大きな応用分野がまだない。寺崎氏の解析法を応用することによってますますはっきり構造解析ができたと評価されている。

(2) 産業技術的・経済的波及効果

すぐに新産業に結びつくかについては、5 年くらいではとても無理であるとの意見がある。また本研究の成果は特許にはならないとの指摘がある。特許として成立しても抵触のチェックが難しく効力がないため、解析法は装置化する必要があるとの意見である。多孔体の産業的応用は、触媒である。触媒技術を通して環境、エネルギー、バイオ分野への貢献が期待される。

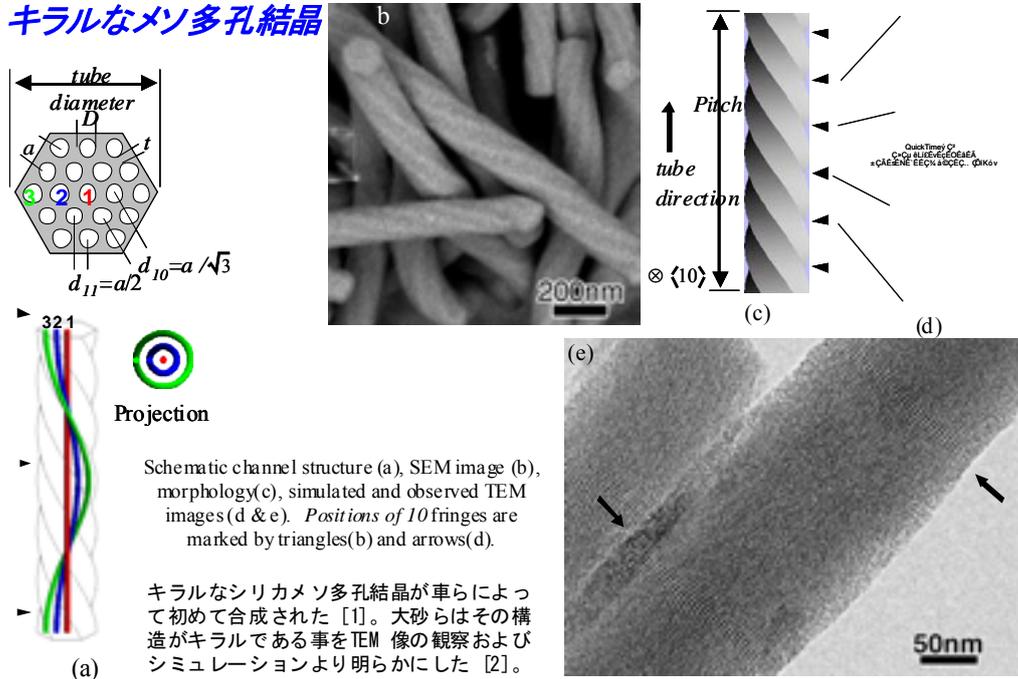
岡本の水素化脱硫過程の基礎研究は、石油の浄化と環境の改善に役に立つ。企業との共同研究では三井物産とゼオライトを使用して、水とアルコールの分離に協力した。プラントを作り順調に稼働している。

メソ炭素多孔体及びそのナノ白金分散、無機-有機複合メソ多孔体などの発見は、水素吸蔵材料、シリコン LSI の低誘電率層間膜材料など、新産業創出に結びつく機能材料への発展が期待できる。



寺崎グループの代表的展開・発展事例（2）

キラルなメソ多孔結晶



[1] S. Che, Z. Liu, T. Ohsuna, K. Sakamoto, O.Terasaki & T. Tatsumi, *Nature* 429(2004), 281-284.

[2] T. Ohsuna, Z. Liu, S. Che & O. Terasaki, *small* 1(2005), 233-237.

(3) 人材育成効果

野末は、2001年に東北大学助教授から大阪大学教授に昇進した。寺崎は、2003年にそれまでの東北大学教授から、ストックホルム大学のアレニウス研究所教授、構造化学部門責任者に着任した。

(4) その他

寺崎は、平成19年8月に国際ゼオライト学会から The Breck Award を、また、平成20年3月に Humboldt Research Award を受賞した。

§ 4. 微細構造におけるスピン量子物性の開拓

研究代表者氏名：家 泰弘

(現) 東京大学物性研究所 ナノスケール物性研究部門 教授

§ 4. 1 研究期間中における状況

研究成果概要については、以下に当時の事後評価結果を転記する。

(1) 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

2次元電子系およびそれに人工周期を付加した系、量子ドット、希薄磁性半導体、表面自己形成ナノ構造、金属ナノワイヤ、微細構造超伝導体などを対象として、それらにおける伝導と磁性とのさまざまな関わりを明らかにすることを目指し、基礎物性物理として幾つか重要な成果をあげることができた。ただし、研究対象が多岐にわたり、相互の関連が必ずしも明確でなく、現時点ではそれぞれの分野で世界に競合できる成果を得ているところである。その中のどれかが、突出した成果として将来に育つことを期待する。本プロジェクトの研究活動は基礎物性物理の探求を主眼とするものであるが、扱った系のいくつかは将来の応用への発展の可能性を秘めている。いま、量子計算など未来の量子デバイスへの関心が高まっているが、量子計算素子として最も基本的な問題は電子のデコヒーレンス機構を明らかにあることである。この観点から、ABリング系で見出された「プローブ配置に依存するデコヒーレンス」はさらに追求すべきテーマである。量子ドット/ABリング系で見出されたファノ干渉効果は、コヒーレンスの制御という観点から興味深い。半導体デバイスにおける磁性の利用という観点からは、将来のスピン트로ニクスを支える物質としての希薄磁性半導体が特に注目される。実際の応用に至るまでには物質科学の問題点が山積しているが、本研究で見出された低温熱処理効果は材料制御の有力な一手段となり得るであろう。強磁性体微細構造を用いて作り出すメゾスコピック・スケール空間変化磁場中の電子のふるまいも半導体/磁性体複合デバイスへの発展の可能性を秘めている。また、ナノスケール構造や表面といった特殊状況での磁性の諸相の解明は、物質科学としての興味とともに、極微細磁気デバイスとして、将来の応用発展の基礎としても重要である。一部は、応用を目指した研究が外部企業の研究機関との共同研究としても開始されており、基礎物性物理の成果を具体的に発展させて欲しい。

外部発表は290件、特許は1件であった。外部発表については質量ともに評価されるべき結果となっているが、特許は、磁性半導体の熱処理による安定化の1件のみであった。基礎物性研究ということで、応用に直接つながる特許は書きにくいということがあるかもしれないが、将来の量子デバイスや極微細磁気デバイスとの接点を意識した物性物理の研究

であること、新しい物理現象を発見する手段などは独創的であることなどを考えると、知的所有権への関心を持ち、努力すべきであったと惜しまれる。

(2) 得られた研究成果の科学技術への貢献

科学的貢献として、量子ドット系、人工構造中の2次元電子系、磁性半導体、表面磁性などの分野の展開に、一部不定の要素もあるが、十分に貢献ができたと判断できる。2次元電子系、ABリングに関しての基礎的な物理現象にかかわる実験は、物理の理解に立脚した科学として重要な成果であり、教科書の題材になりそうな内容である。

研究内容の大半は現状では、直接応用に結びつく性格のものではないが、その中で磁性ドット配列の研究は高密度磁気記録への応用を念頭において外部機関との共同研究に発展している。また、希薄磁性半導体の低温熱処理の手法は、本材料の実用材料化段階において有用技術となる。

当研究チームの試料作成技術や測定技術にかなりの向上があった。これらをさらに洗練させればナノテク技術への波及効果が期待される。

§ 4. 2 課題終了後の状況

以下は、聞き取り調査から得られた結果をまとめたものである。

§ 4. 2. 1 研究の継続・発展状況

2次元電子ガス系では、以下に示す科研費プログラムなどの新たなファンディングを得て、ファノ効果を中心に基礎的な研究を精力的に進めている。

①2000～2004年科研費COE形成基礎研究費の「量子ドット構造による電子物性の制御と次世代エレクトロニクスへの応用」(研究分担者：家)

②2001～2004年科研費基盤研究(A)の「超周期構造中2次元電子系の量子輸送」(代表研究者：家)

③2004～2008年科研費特定領域研究の「超構造における異常磁気伝導現象の発現」(代表研究者：家)

④2006～2008年科研費基盤研究(A)の「量子ホール系におけるコヒーレント現象の研究」(代表研究者：家)

2次元電子ガス系では、2次元の量子ホール効果、1次元の量子細線やリング、0次元の量子ドットを同じサンプルの上に作成することができ、また、量子力学的なパラメータを自由に選んで実験することができるという特徴があり、さらにこれらの実験を行うのに必要な、サブミクロンを加工できる微細加工技術や10mKの極低温実験装置、金属蒸着装置などの大型実験装置がCRESTを契機として大学でもそろってきたことも受け、いろいろな実験系を作って、課題研究期間中に始めた量子ドットとABリングあるいは量子細線との複合

形におけるファノ効果の研究のさらなる追求、近藤効果とファノ効果の共存系などに発展しつつある。

(Ga,Mn)Asの強磁性の発現機構に関しては、X線分光実験とアニールとの関係をもつことでその解明を継続している。

§ 4. 2. 2 代表的研究成果

(1) 2次元電子ガス系におけるファノ効果

量子ドットを埋め込んだ AB リングにおけるファノ効果によって、2次元系における近藤効果を観測した。量子ドットの電子数が偶数の場合は、エネルギーの最上のレベルはスピンの反対の電子2つが占有している。ドットとしてはスピンゼロの状態にある。これに対して、量子ドットの電子数が奇数の場合は、エネルギーの最上レベルには過剰電子1個があって、たとえば上向きスピンの状態になっている。ドットを島とする単電子トランジスタ (Single Electron Transistor, SET) では、この状態ではスピンの下向きの電子が入ってくる。次に量子ドットから上向きのスピンの電子が出て行くときは、最上レベルにスピン下向きの電子が残る。このとき、量子ドットの過剰電子のスピンは反転され、出て行く電子のスピンは入射したときの電子のスピンの向きと反転しているため、出て行く電子のコヒーレンスは失われる。これは、電子は量子ドットの中に電子がいた形跡を残したことになるからである。散乱電子のスピンは反転しない場合は、量子ドット内の過剰電子のスピンは反転されず電子のコヒーレンスは失われない。このような現象を、ABリングと量子ドットの複合系で観測した。クーロン振動の非対称性に起因して、ドット内部の電子数の偶奇に応じて、ゲート電圧の関数としてピークの高い電圧側と低電圧側に交互に現れることからこの現象が起こっていることがわかった。

近藤効果は、希薄合金で伝導電子が局在スピンによって散乱され抵抗極小を引き起こす現象であった。2次元系では奇数電子の量子ドットが、局在スピンの役割を果たし、これに電子がスピン反転の散乱をうける。2次元系では現象をさらに詳しく調べることが出来る。量子細線に量子ドットが強く側面結合した系で、ファノ近藤反共鳴を観測した。弱結合の領域では、伝導度とゲート電圧の関係にファノ効果による凹みが現れた。結合強度を増していくと、凹みの間の伝導度が交互に減少した。温度依存性と磁場依存性からこの伝導度の減少はファノ近藤反共鳴であると結論した。近藤谷の近くで、系がユニタリティリミットの近くにあるときは、位相変化はゲート電圧が変化しても $\pi/2$ に固定された。この結果は Garland 達の理論と一致する。

(2) ガリウムマンガン砒素

課題研究期間中に発見し、今やガリウムマンガン砒素高品質化の標準的手法となっているマンガンをドーピングしたガリウム砒素の低温アニーリングは、X線分光実験および赤外吸収分

光とアニールとの関係を見ることで強磁性の発現機構の解明へと発展しており、強磁性の機構には自由な正孔と2重交換相互作用の2つの作用がきいていることを明らかにした。2重交換相互作用がきいていることは、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ の赤外吸収分光および中性Mnアクセプタ高分解共鳴エックス線放出分光で、MnL3線の放出端をしらべることによって解明された。正孔が強磁性にきいていることは、Mn2p吸収をみると、強磁性 Mn^{2+} イオンの吸収と低温アニールで強磁性体になるMnAs複合体の吸収成分の比が、正孔の濃度とTcに比例していたこと、および時間分解磁気光学カー効果でわかった。低温アニールのIII-V希薄磁性半導体の結晶性への改質効果はAsの除去によることが分かった。磁性のナノ薄膜の研究では、メモリへの発展を見据えて研究が継続、発展している。

§ 4. 2. 3 課題の波及効果

(1) 科学的・学術的波及効果

家は2次元電子系における電子の平均自由行程 $8\mu\text{m}$ の距離の中に、1次元のワイヤ、リング、量子ドットなどを配置して、電子を量子力学的に自由に飼いならしている。2次元系のファノ効果の注目すべきところは、束縛状態と連続状態が別のパスにあって、それらが合体した後に、ファノの干渉が起こっていることである。つまり連続波と束縛状態の干渉が散乱体(量子ドット)と別の場所で起こっている。このため、散乱体と入射波を電氣的、磁氣的に別々に制御できる。このような系は、原子のイオン化実験や、原子核の散乱実験などのような自然界の散乱現象には存在しない。これらの系では、散乱体と同じ場所で干渉が起こっている。従って、散乱体と連続波には同じ摂動をかけるしかない。その意味でこの2次元系は大変特異な系である。このことを利用した研究が今後大いに展開される可能性がある。

この研究室は、このような2次元電子系のアカデミックなテーマを追求しながら、電子を制御する抜群のエンジニアリングセンスも併せ持っている。電子の未知の振る舞いを少しずつ追い込んで解明している。電子の振る舞いがよく見えているものと思われる。

家は国際会議等における招待講演多数でファノ効果といえば家という様相を呈しているといっても過言ではない。勝本の量子ドットにおける電子コヒーレンスの問題は近年量子計算などとの関連から大いに注目を集めている。コヒーレンスに関する情報を得る手段としてファノ共鳴の手法は広く認められるところと成っているとも言われている。

このような実験は、nmサイズの微細加工技術とmKの極低温技術がないと遂行できない。この研究室は、CRESTで購入した装置を存分に活用して世界で最先端の実験を続けている。

ここ数年来のスピン트로ニクス分野の急速な発展の中で、特に(Ga,Mn)Asをはじめとする希薄磁性半導体が注目を集めており、当該グループが開発した(Ga,Mn)Asの低温アニールによる改質はこの分野のスタンダードな手法として確立し、世界の研究グループにより利

用されている。この手法は、まず原子がきちんと並んでいない低品質のものを作り、後に熱処理（低温アニーリング）で高品質化する方法だが、手法自体は以前からあったが、それを磁性体に応用したことが評価されている。わが国では関連研究者が結集して特定領域研究を組織するなどの活動が行われており、当該グループのメンバーがその中心的役割を果たしている。

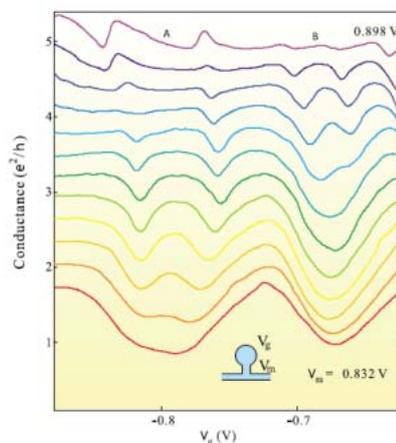
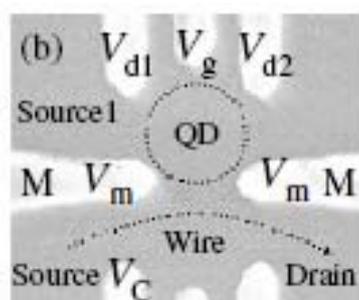
この研究室の論文は多くが *Phys. Rev. Letters* に発表されており、学会で高く評価されている証拠である。被引用件数も平均して多い。また発表論文は研究室の HP で公開され、インターネットでダウンロードできる。本調査でも、当研究室の論文を短時間で多数入手できた。

家グループの代表的展開・発展事例（1）

量子ドットにおけるファノ・近藤効果の観測

量子細線と結合した量子ドットにおいて、電子が細線を直接通る経路と量子ドットを経由する経路との量子干渉によるファノ効果が観測される状況において量子ドット内の電子が奇数の場合に生じるファノ近藤効果を観測し、近藤効果によって量子力学的コヒーレンスが回復する様子を実験的に明らかにした。

1) M.Sato, H.Aikawa, K.Kobayashi, S.Katsumoto and Y.Iye, *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 066801-1-4.



（左）量子ドットと結合した量子細線の試料の SEM 写真.

（右）ファノ・近藤効果を示すデータ

家グループの代表的展開・発展事例（2）

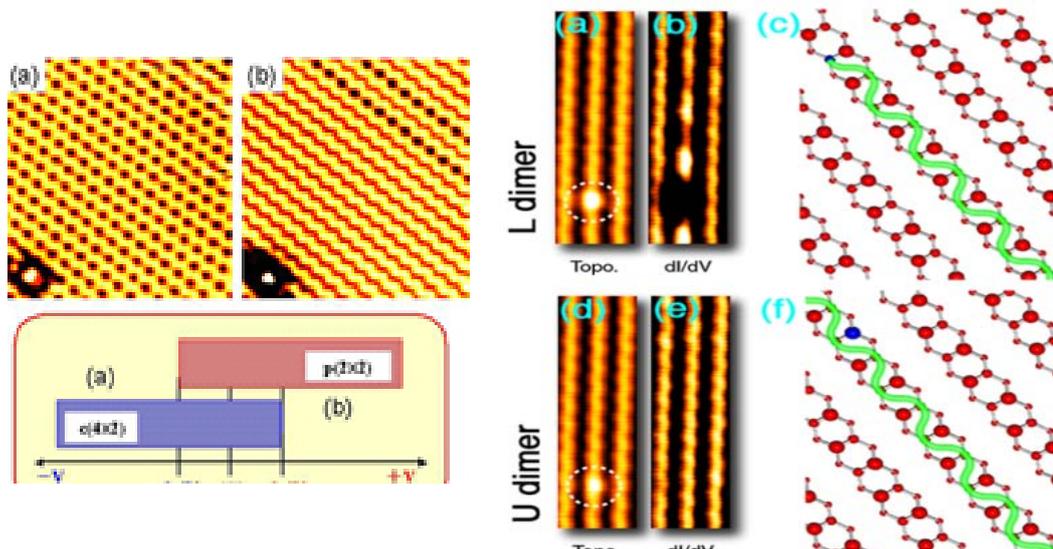
G e 表面超構造の局所制御

走査トンネル顕微鏡の探針からの電子注入によってG e 表面超構造を局所的かつ可逆的に制御できることを実証した¹⁾。構造変化は、表面原子がつくる傾斜ダイマーが連続して反転していく過程であることを明らかにした。さらにこの研究の発展として、表面一次元電子系に対する原子スイッチを実現した²⁾。これらの成果は、今後ナノスケールの極微メモリやスイッチの実用開発に役立つ知見を与えるものである。

参考文献

Y. Takagi, Y. Yoshimoto, K. Nakatsuji, F. Komori, J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2003) 2425.

K. Tomatsu, K. Nakatsuji, T. Iimori, Y. Takagi, H. Kusuhara, A. Ishii and F. Komori: Science



(左) G e 表面への局所電子注入による表面長構造の制御.

(右) 表面 1 次元電子系に対する原子スイッチの実現とその概念図.

(2) 産業技術的・経済的波及効果

極めて基礎的な分野であり、磁性半導体はまだ物理現象にとどまっている。現段階では産業技術的・経済的波及効果は顕著には現れていない。2次元電子系で電子の自由行程の間に、コヒーレンスを破壊しない多数の素子を配置して、量子コンピュータを作る方向へつながることも期待される。

自己形成ナノ構造パターンをテンプレートとする手法は、微細加工では作製不可能な微小スケールの磁性ドットアレイを作製する手段として注目され、高密度磁気記録への応用の可能性が企業との共同研究で進行中である。

(3) 人材育成効果

研究に参画した研究者の昇進やポスト獲得の事例として、助教授から教授へ1名、助手から助教授へ2名、ポスドクから常勤研究者へ3名、などの実績が上がった。

プロジェクトに参加した院生から7名の学位取得者が出た。

勝本は平成17年度「井上學術賞」受賞した。

小森は走査プローブ顕微鏡によるGe表面再構成構造の可逆的操作で第10回物理学会論文賞を受賞した。

§ 5. 金属微細トンネル接合システムの物理と素子への応用

研究代表者氏名：大塚 洋一

(現) 筑波大学 数理物質科学研究科 物理学専攻

学際物質科学研究センター量子制御コア 教授

§ 5. 1 研究期間中における状況

研究成果概要については、以下に当時の事後評価結果を転記する。

(1) 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

「微小トンネル接合研究グループ」の成果であるが、固体素子量子ビット(qubit)、巨視的量子トンネル現象と散逸との関連、金属ドットによる室温動作 SET、磁気クーロン振動など、それぞれにおいて最先端の成果を得ている。特に、単一クーパ対箱を用いた量子2準位系固体素子量子ビットの成果は、固体電子素子での世界初の量子ビット実現ということで、世界的に強いインパクトを与え、その後、ヨーロッパやアメリカに複数の追随研究グループが生まれているのは高く評価できる。散逸と超伝導転移の研究成果は量子力学の観測理論につながる重要な成果である。また、この散逸問題は、量子コンピュータの基本となる量子ビットのコヒーレンスの持続時間(デコヒーレンス時間)を決定する重要な問題でもある。超伝導量子ビットは、デコヒーレンス時間が比較的長く、微細加工技術も半導体微細加工技術をそのまま利用できるということもあり、半導体量子ドット、核スピンなど、いくつか提案されている固体素子量子ビットの中で優位にある。その意味で、本研究チームの成果は、量子コンピュータの実現への入り口に最も近いところにある。2量子ビットの達成は遅れているが、その早い実現を期待する。その他成果として、室温動作 SET を実現したのは意義のある成果である。単電子トランジスタ (SET) が広く実用に供されるためには、室温での動作は達成されなければならない大条件であり、そのためには単電子トラン

ジスタの超微細化が不可欠となる。これを電子ビーム露光法による超微細加工技術で成功したことは、将来の応用への展開を考えると意義は大きい。また、本研究チームの命名になる磁気クーロン振動の初めての発見も注目すべき成果である。強磁性単電子トランジスタにおける単一電子帯電効果とスピン偏極の相関で発生するクーロン閉塞状態における大きな異常磁気抵抗は、新奇な機能デバイスの可能性がある。これも強磁性金属の微細加工の独自の工夫によって達成されたもので、成果の内容とともにそれを達成するための努力を評価する。その他の成果も、現状では不定な要素もあるが、それぞれに評価できる成果である。総じて、科学・技術的に先端的で、レベルの高い成果を得ている。

「量子カオス研究グループ」は、金属微粒子、量子ドット、超伝導渦中の準粒子などに適用され、実験との一致が見られているランダム行列理論をさらに拡張することを目指し、外場と結合したランダム行列の解法に成功したことは大きな成果である。本グループは、本研究分野で世界的に先頭を走る多数の理論家を組織し、数学者の参加も得て、5回の国際研究集会で議論を戦わせた、大きな発展があったことは意義の大きいことである。今後の、この分野の新しい進展が、このグループを中心に展開されることは、間違いない。外部発表は310件、特許は3件となっている。外部発表は質量ともに十分と言える。特許については「不揮発性メモリ」、「金属微粒子秩序構造形成法」、「力センサー及び力検出装置並びに力検出方法」の3件となっているが、主要成果に対する特許が出願されていない。基礎科学的で特許として有効性が不定という要因があるかも知れないが、もう少し出願出来たはずである。

受賞は以下の通りとなっている。仁科記念賞など中村氏の受賞が目立つが、これは固体量子ビットの実現による成果に対して与えられたものである

中村泰信 第1回 Sir Martin Wood 賞(1999.11)

中村泰信 第45回仁科記念賞(1999.12)

大野圭司・島田宏・大塚洋一 第4回日本物理学会論文賞(1999.3)

大野圭司 第16回井上研究奨励賞(2000.2)

(2) 得られた研究成果の科学技術への貢献

その実現は、まだ遠い先で、夢の段階にあるが、量子コンピュータは国の内外で、大変に高い関心が持たれている。量子コンピュータに関する学会、講演会などには、非常に多くの研究者が集まるが、その端緒となったのが、本研究成果である単電子クーパー対箱による世界初の固体素子量子ビットの成功であった。本研究成果は夢実現の入り口の扉を開く役割を果たしたもので、科学的にも、将来への技術的可能性への指針として、内外の研究者に与えたインパクトは大変に大きく、量子コンピュータの内外の重要シンポジウムでは本成果の招待講演が定番メニューに入る状況が続いている。2量子ビット、さらには多数量子ビットの実現が強く期待されている。また、強磁性金属の接合トンネルによる磁気クー

ロン振動と異常磁気抵抗増大、電流ミラー効果などは独自の発見であり、科学的意義とともに、技術的にも展開が考えられる。技術的なインパクトとしては、金属材料による室温動作 SET のインパクトは大きい。抵抗結合型 SET、金属クラスタを自己組織的に配列し利用するためのプロセス開発（特許出願）、また強誘電体と SET を組み合わせたメモリ素子（特許出願）などは、単電子デバイス応用を考える上で技術的に重要な研究成果である。その他の成果も含めて、本研究の微小トンネル接合の成果は、個別の素子は既にできており、これらが基になって応用研究が実現に向けて進むことが期待される。

（3）その他の特記事項

研究チームの「微小トンネル接合研究グループ」は大学の研究者と企業の基礎研究所の研究者が協力して研究が進められて、個々の成果は、それぞれの機関で独立に出されているが、相互に十分に議論がなされるなかでの成果である。

§ 5. 2 課題終了後の状況

以下は、聞き取り調査から得られた結果をまとめたものである。

§ 5. 2. 1 研究の継続・発展状況

散逸と超伝導絶縁体転移の実験は、

①2000～2001年学振未来開拓フェージビリティスタディの「極微構造導体における量子伝導」（研究分担者：大塚）

②2000～2001年科研費基盤研究（C）の「一次元微小ジョセフソン接合列の散逸誘起超伝導転移」（研究代表者：大塚）

に採択された後、研究を終了した。強磁性単電子トランジスタにおける単一電子帯電効果とスピンの研究は、上記①および

③2002～2003年科研費萌芽研究の「単一電子トランジスタにおける圧力によるクーロン振動」

に採択されたが、その後マンパワーがなく中断した。微小な伝導体の内部量子状態に関連する実験に関しては、CRESTが契機となって微細加工技術、極低温実験装置、金属蒸着装置などの実験装置も揃い、

④2003～2005年科研費基盤研究（A）の「単一金属量子ドットの電子状態」（代表研究者：大塚）

⑤2005～2009年科研費特定領域研究の「固定電極にリンクしたナノスケール導体の電気伝導特性」（代表研究者：大塚）

などに採択され、金属クラスタや単原子ポイントコンタクト、単一分子伝導などのより微小な構造体の電気伝導の研究へと発展している。

超伝導量子ビットの研究は以下のように NEC グループを中心にして継続・発展し、現在も世界をリードしている。CREST 平成 15 年度「量子情報処理システムを目指した新技術の創出」（研究総括：山本喜久 スタンフォード大学 教授／国立情報学研究所 教授）に、日本電気（株）のグループが「超伝導量子ビットシステムの研究開発」で採択された他、理化学研究所巨視的量子コヒーレンス研究チームの担当ともなっている。本研究課題で実現に成功した超伝導量子ビットは電荷の自由度を使った電荷量子ビットであったが、以後磁束量子ビット、位相量子ビットなどいろいろな方式が出てきて研究が盛んになっている。この中で磁束量子ビットはデルフト大学が開発を進めていたものであるが、中村泰信氏との共同研究によって初めて実現した。磁束量子ビットはコヒーレンス時間が長いという特長がある。NEC グループ（蔡氏、中村氏、パシュキン氏）はこれらの多ビット化に向けた研究を推進している。参加メンバーの中ではこのほか島津氏（横浜国立大）も NTT グループとの共同研究によって磁束量子ビットに関する研究をすすめている。

§ 5. 2. 2 代表的研究成果

（1）金属微粒子中の 1 電子状態のトンネル分光

継続している。科研費で低温 STM 購入した。リソグラフィで作製した 10nm 級の Al ドットをトンネル分光で調べ、島電極中の離散電子準位による電流の階段構造を観測した。

チオール／ジチオール単層膜上に自発成長した Au ナノクラスタは、SET 構造を作り、電流電圧特性はクーロン階段を示す。クラスタのサイズが大きくなるにつれて、全キャパシタンスが増大し、それに伴って、オフセット電荷分布の標準偏差も増大する。

（2）単一電子トランジスタにおける背景電荷揺らぎ

金属微粒子中の電子数は粒子ごとに異なり、それが粒子ごとの化学ポテンシャルの違いとなって現れる。ヘキサンジチオール／Au (111) 下地面上に支持された Au ナノクラスタの化学ポテンシャルのキャパシタンス依存性を SET のオフセット電圧によって調べた。クラスタの化学ポテンシャルは、接地された下地金属 Au のフェルミレベルのまわりで揺らぐ。クラスタの周りの空間に対する全キャパシタンスは揺らぎの分散に強く影響する。揺らぎの分散は全キャパシタンスが減少すると減少する。0.1～2aF のキャパシタンス領域で揺らぎを詳しく解析すると、クラスタの電気的中性が破れることを明らかにした。

（3）微小な単一超伝導リングやディスクにおける磁束状態の研究

外国での理論研究と相俟って展開している。微小トンネル接合を用いた「局所的超伝導ギャップ測定法」を用いて、微小な超伝導円板を貫通する磁束が、微小磁束の集まりと巨大磁束状態の間を転移する関係について、磁場の強度、測定温度を変えて調べた。また同様のギャップ測定法でリングを貫通するフラクソイドの数と磁場の関係などを調べた。

(4) カーボンナノチューブの電気伝導

ナノチューブを使った実験を続けている。バナジウム/多層カーボンナノチューブ/バナジウム構造のゼロバイアス電気伝導の温度依存性を調べた。低温では、電気伝導度はべき乗で減少した。べきが、ゲート電圧に依存することを初めて観測した。このべき依存性は、1次元バリステック伝導のラッティンジャ液体理論では説明できない。強く乱れた多層ナノチューブ系の異常クーロン・ブロッケード理論で解釈した。

さらにその後、ナノチューブと同様炭素の同素体であり、純粋な2次元物質である単層グラファイト(グラフェン)に研究対象を移し研究をすすめている。これまでに、グラフェンを用いた超伝導トランジスタの実現、スピンバルブ効果の観測などに成功している。

(5) 素子の微細化・高温動作

2つの微小な超伝導体をトンネル結合すると、SETの開発では200Kで動作できた。

(6) 超伝導量子ビット

NECグループは2003年2月には2個の電荷量子ビットの量子絡み合い状態の生成、同年10月には2個の電荷量子ビットを使ったC-NOT(制御付き否定ゲート)の実現実証にそれぞれ成功した。さらに、2007年にはコヒーレンス時間の長い磁束量子ビットに対する可変式結合回路を考案し、量子ビット間の結合制御に世界で初めて成功した。これによって超伝導量子ビットの研究分野で世界をリードしている。

§ 5. 2. 3 課題の波及効果

(1) 科学的・学術的波及効果

課題研究期間中の論文の平均被引用件数は、26.2と極めて大きく、寺崎研究代表者に次いで19研究課題中第2位である。研究代表者が選定した5つの主要論文のうち、被引用件数が最大の論文(論文C)について、発表年以降の被引用件数の経年変化を調べた。結果を図28に示す。この論文の被引用件数は課題研究期間中の19課題の発表論文の中で最大となっている。なお被引用件数の調査は、2009年4月17日に実施したものである。



図 28 主要論文の被引用件数の経年変化

著者	Nakamura Y, Pashkin YA, Tsai JS
題名	Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box
原典	Nature, 398, 786-788, 1999
被引用件数	872

論文の発表後すぐに被引用件数が立ち上がっていること、現在まで継続して引用されていることは寺崎研究代表者の場合と同様である。この論文は超伝導を使って量子ビットが実現できることを初めて実証した実験に関するものであり、それまでとは異なる固体素子系であること、マクロな量子系であることから非常に注目を集めた。この論文を契機として超伝導量子ビットの研究が全世界的に始まっている。被引用件数は2003年以降120～140件の間で推移しているが、このうち2003年の急増については、この年に新しいタイプの超伝導量子ビット（磁束量子ビット）実現の報告があったことを反映していると考えられる。

超伝導を使用した量子ビットの実現及びその操作に関連し、主に NEC 研究グループの成果が高い評価を受けている。CREST での超伝導電荷量子ビットの実現が契機となり、その後、磁束量子ビット、位相量子ビットの実現、多量子ビット操作の実現など、超伝導を用いた固体量子ビットの研究分野が世界的に成長している。今は超伝導を利用した磁束量子ビットが主流である。これは、磁束が右回りか左回りかのエネルギー的に縮退した量子状態をもつ超伝導の2つのリングを重ねると、2つの量子状態が混合してエネルギーが分離した新しい2つの量子状態を形成することを利用したものである。磁束量子ビットの原型はデルフト大学 Mooij 氏の考案であるが、その実証には NEC 中村氏の寄与が大きい。超伝導量子ビット分野の研究の進展には目を見張るものがあるが、デコヒーレンスの抑制、量子エラー補正の実証など量子計算実現のために解決すべき課題は多く、未だ基礎研究段階にある。

蔡氏、中村氏が示したことの意味は、量子力学の検証ができるようになったという点が大
きい。繰り返しになるが、固体素子における量子ビットの実現は世界初であり、重要な物
理現象の発見である。

強磁性単電子トランジスタにおける単一電子帯電効果とスピンの研究は中断したが、他
でこの研究が始まる契機となった。

微小トンネル接合を用いた「局所的超伝導ギャップ測定法」は微小な超伝導体、特に磁
束状態検出のための新しい測定法である、従来実験的な検証が困難であったメソスコピッ
ク超伝導体の磁束の研究で力を発揮した。今後の発展が期待される。

STM で超伝導金属微粒子の内部状態を調べる研究は新しい分野である。超伝導状態がどの
サイズまで維持されるかという問題が前途にある。従来は、超伝導微粒子は、集合体とし
てしか測定できなかった。

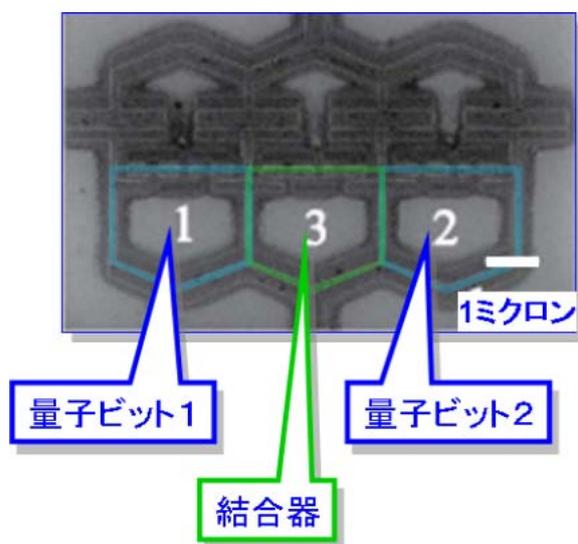
STM によって個々の微粒子の性質を見ることができるようになった。このような実験は、
nm サイズの微細加工技術と mK の極低温技術がないと遂行できない。この研究室は、CREST
で購入した装置を活用して世界で最先端の実験を続けている。

大塚グループの代表的展開・発展事例 (NEC 蔡 兆申)

「超伝導量子ビットで量子プロトコル実行に成功」

結合制御が可能な量子ビットの開発

量子コンピュータの実現には、その構成要素である量子ビットの量子状態の制御技術と、量
子ビット間の情報のやり取りをダイナミックにオン/オフするビット間の結合制御技術の二
つが必要である。このたび新たに開発した可変式結合回路により、量子ビット間の結合制御
に世界で初めて成功した (*Science*, **316**, 723, 2007)。この回路により結合された 2 量子ビット
系において、量子プロトコルの実行に成功し、量子コンピュータの実現に向けて大きな前進
した。



オン・オフ可能な結合器により結合された二つの磁束量子ビット

(2) 産業技術的・経済的波及効果

量子コンピュータは科学の世界では大きなイノベーションであるが、基礎研究が多く、産業として量子コンピュータが話題になっているものの、実現には20~30年かかるとの声が多い。顕著な産業技術的・経済的波及効果は現れているとはいえない。

(3) 人材育成効果

中村氏のジョセフソングランジョンを用いたものは仁科賞、ヨーロッパの Sir Martin Wood 賞を獲得、Nature にも掲載された。蔡兆申氏も仁科賞、つくば賞などの賞を受賞している。中村氏の量子ビットはノーベル賞候補になっている（ノーベル賞選考委員からの個人情報）との情報も得られた。ヨーロッパで有名であり、デルフト大学の先生と3人で貰うのではと、この3~4年継続して言われているとの内容である。

§ 6. 量子構造を用いた遠赤外光技術の開拓と量子物性の解明

研究代表者氏名：小宮山 進

(現) 東京大学大学院総合文化研究科 教授

§ 6. 1 研究期間中における状況

研究成果概要については、以下に当時の事後評価結果を転記する。

(1) 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

遠赤外領域での高感度検出器開発という未踏の領域に、単電子トランジスタの特性を使う物理的な考察に基づいたユニークな発想により、感度として極限の“単一光子検出”を達成する困難な目標に果敢に挑戦した。その結果、単一光子の検出に成功して、従来の検出器に比較して1万倍も高感度な検出器の開発に成功したことは、高く評価出来る成果である。しかも、当初は磁場を用いる検出器であったが、2個の量子ドットを用いることによって磁場を必要としない検出方式を実現したこと、さらに高速動作回路を開発するなど、本検出器の実用的展望を拓くために次々と新しいアイデアを発想し、それを実現してきたことは、物理的発想基盤が確実であると同時に、目標に向けて、ぶれのない研究遂行を示すものと、高く評価できる。いろいろな個別成果の寄せ集めでというのではなく、目標に対する一貫した姿勢が見られる。遠赤外単一光子検出器を用いた走査型遠赤外顕微鏡開発にも、検出器開発の成果を具体的に広く応用していくために、全く正しい目標設定である。その実現に向けて外堀を埋める作業を着実に進めており、将来の成功が大いに期待で

きる。また、平川グループが開発した、高感度中赤外検出器も、従来の検出器に比べて数十倍程度の感度を持つ検出器であることで、注目すべき成果である。さらに、上記の中赤外検出器と遠赤外・サブミリ波の光子検出器開発で得た知見と組み合わせることにより、研究プロジェクトの所期の目標を大きく超えて、赤外—サブミリ波の全スペクトル領域での単一光子検出器開発が構想されている（特許出願済み）。このスペクトル領域の検出技術は、物理、生物、医学、天文学などに応用されると、学際的に波及効果が大きく、利用価値が極めて高い未踏の領域である。このことを考えると、本研究の成果は、科学技術に与えるインパクトは大きく、今後の発展が大いに期待できる。さらに、副産物的成果ということではあるが、固体量子ビット素子を量子ホール系の端状態を用いて実現する可能性を開いたことも興味深い。微細加工した金属電極によって RF 磁場を端状態近傍のみに印加して核磁気共鳴 (NMR) を起こし、その信号を伝導度変化により検知することに成功して、核スピン分極の「初期化」、「演算」、「読み出し」を行い得る“量子ホール固体素子”の実現可能性を示したことは、量子ビット素子、量子コンピュータの実現へ向けての内外の研究に、ユニークな手法として、一石を投じるであろう。

外部発表は 226 件、特許は 4 件となっている。特許件数は少ないが、「ミリ波・遠赤外光検出器」という名称で出願されている特許に、本研究で開発された遠赤外検出器の基本的なアイデアはすべて含まれており、アイデア先行型で知的所有権を確保してから、実際の研究でアイデアを具体的に実現してきており、その意味では件数は少ないが、理想的な出願をしている。これも、研究代表者の発想基盤が確実であったことを示すものである。ただし、付随した成果で、幾つか特許に出来るものもあったはずで、万全ではなかった。

(2) 得られた研究成果の科学技術への貢献

遠赤外単一光子検出は、光電子増倍管の波長限界を数百倍破って単一光子検出を可能にし、対応する波長での従来型検出器に比べると 1 万倍程度の感度を持つもので、量子ドットの分光的な研究手段を初めて与えるなど、革新的な貢献である。今後、本研究成果を応用して、さまざまな研究が進むと考えられる。単電子トランジスタの顕著な応用例として、科学・技術的インパクトは絶大で、国内外を問わず類似の研究はない。特に、**narrow-band gap** 半導体のバンド間遷移を利用する商業的赤外線検出器が、将来的には本研究で着想した単一光子検出可能な量子井戸／SET 複合検出器で置き換わる可能性が高い。また、今後、赤外—ミリ波領域の光子検出器群＋顕微鏡系の研究がさらに進展し、計測技術として確立すれば、電波天文学・固体物理学・分析化学・生体高分子分光等に広い応用が期待できるなど、新しい産業の創出に繋がる可能性は極めて高い。

(3) その他の特記事項

小グループによる「一点突破・全面展開」で、CREST プロジェクトとして、極めて望ましい形で、研究が進められた。本研究の遠赤外検出器の開発に関する成果は、「赤外—サブミリ波領域の光子検出器開発と走査型顕微鏡の開発」として、平成 13 年度の基礎的研究発展推進事業に採択され、JST のプロジェクトとして、研究が継続発展することになった。

§ 6. 2 課題終了後の状況

以下は、聞き取り調査から得られた結果をまとめたものである。

§ 6. 2. 1 研究の継続・発展の状況

CREST (1996-2001) 終了後、SORST¹⁸ (2001-2005) および新 CREST¹⁹ (2006-2011) が採択され、SORST では検出器・遠赤外測定技術の開発および量子ホール系の基礎物性研究を、新 CREST ではテラヘルツ検出器と顕微鏡の開発およびテラヘルツ検出の新機構の探索研究を継続・発展させている。また SORST と平行して科研費特別推進研究²⁰ (2001~2006) が採択され、走査型テラヘルツ顕微鏡の開拓およびイメージング、量子ホール系の基礎物性研究を継続・発展させている。

§ 6. 2. 2 代表的研究成果

(1) SORST における代表的研究成果

A. 遠赤外・サブミリ波検出器の開発

①量子ドット(QD)単一光子検出器 (磁場中)

強磁場中に置いた QD の励起エネルギーを、1 光子検出器を用いた分光技術で調べた。スペクトルは 1 つの共鳴線からなっていた。サイクロトロン共鳴 (CR) 周波数より数%高いが、磁気プラズマ周波数よりは低く、コーンモードと解釈された(論文リスト B29(2002))。

¹⁸ 戦略的創造研究推進事業 発展研究 (SORST) 平成 13 年度採択
課題名：赤外—サブミリ波領域の光子検出器開発と走査型顕微鏡の開拓
http://www.jst.go.jp/kisoken/sorst/hyouka/2006/pdf/h18_komiyama.pdf

¹⁹ 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 CREST 研究領域「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」研究総括：田中通義 (東北大学 名誉教授) 平成 18 年度採択
課題名：半導体量子構造の探索とテラヘルツ波計測技術開拓

<http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/intro/kadai/h1601.html>

²⁰ 科学研究費補助金特別推進研究 平成 13 年度採択 (～平成 18 年度まで)

課題名：半導体量子構造の平衡・非平衡電子ダイナミクスの解明と量子制御 (代表研究者：小宮山)

強磁場中 QDI 光子検出器を光子計数型顕微鏡の検出器として使用した。波長 $132\mu\text{m}$ で、 $100\text{--}100,000$ 光子/sの感度を達成した。He3 冷凍器で 0.3K に冷やして、量子ホール効果 (QHE) の観察に使用した(論文リスト B9(2006))。

②二重量子ドット(DQD)単一光子検出器 (磁場なし)

この系は CREST の終わりに出来たが、未完結だったので SORST に継続された。100mK の温度で実験し、マイクロ波周波数 500GHz 近辺の 1 フォトンカウンティングに成功した。変調ドープした GaAs/AlAs 系に金属配線で作った DQD と一方の QD が構成する単電子トランジスタ (SET) の組み合わせになっている。2つの DQD は点接触 (PC) していて、1つの電子が 1光子によって励起され 1つの QD から他の QD に逃れる結果、電子が去ったほうの QD は長寿命の光励起された+のイオン化状態になる。この電荷の変化を SET の電流変化として検知するものである (論文リスト B36(2002))。半導体 QD+金属 SET の構成で $200\mu\text{m}$ より長波長領域でも高感度を達成した。(論文リスト B16(2004))。

③多層構造の閉じ込め型量子ドット(QD)構成の 1光子検出器

メサエッチングと金属ゲートで作成した平面型の $1\mu\text{m}$ 径の QD を、容量結合した SET で調べた。SET は QD の安定状態と準安定状態における電荷を検出する。準安定状態に未知の問題を残したが、利用法を提案した (論文リスト B4(2006))。

閉じた QD を変調ドープした GaAs/AlGaAs の 2次元電子ガス (2DEG) 上にゲートバイアスして形成し、その上に Al-SET を形成する。これらは、容量性結合しており、測定温度 70mK では Al-SET は超伝導 SET になっている。この電流の変化で QD を調べた結果、2つの異なるクーロン・ブロッケード振動を発見した。QD には 2つの励起状態 (静電ポテンシャルが上がる励起状態と下がる励起状態) があり、2つの状態は 20 分と長い寿命を持っている。これらの状態を説明するモデルを提案した (論文リスト B6(2006))。

閉じた QD 構造の作成をさらに容易にするため、PC型の 2次元伝導チャンネルの上に閉じた QD を形成した。これらは積層された半導体伝導チャンネルで形成され、面で強く容量性結合している。閉じた QD には準安定な励起状態が存在し、トランジスタに履歴現象が観測されたが、光照射により履歴は消滅した。それを利用して 1光子を検出できた (論文リスト B5(2007))。

④InAs の自己組織化量子ドット(QD)の内部電子状態

この系では微細加工よりも小さな QD が作れるので、動作温度を上げることが出来る。直径 $60/80\text{nm}$ の InAs QD の SET 特性を調べた。QD への電子のつまり方は、12電子まで s,p,d の殻構造のエネルギー準位に従っていることがわかった (論文リスト B12(2005))。また s,p,d

の殻構造によるチャージングエネルギーの違いを SET 特性によって測定し、QD 中の電子の波動関数が広がっていることが分かった(論文リスト B8(2006))。

⑤二重量子井戸 (DQW: Double Quantum Well) 検出器

DQD の動作温度を上げるために、DQW をもちいた新規構造の複合検出器を開拓した。光でイオン化する QD2 のかわりに、第 2 の量子井戸 (QW2) を使っている。また SET に替えて第 1 の量子井戸 QW1 を電流の通路にするトランジスタ (FET) とした。受光用の量子井戸 QW2 を FET の上に積層し容量で結合している。光照射により QW2 は+にチャージアップし、フローティングゲート (FG) の役割を果たすが、その中に溜まった正電荷は FET が感知する。トランジスタを流れる電流が大きいので、正孔の寿命が長ければ、大きな増幅感度 (電荷) が得られる。その結果 4.2K 動作を達成した(論文リスト B14(2005))。また感度飽和の原因となる再結合長寿命化を制御する機構が作れた (論文リスト B1(2006))。さらに FG に正孔が溜まって感度が低下するのを、放電させて感度を回復する、リセット動作をもつ検出器を開発した (論文リスト B3(2007))。

DQW では QW2 の井戸の厚さを変えることによって、光を感じる波長領域を広い範囲で変えることが出来る。DQW 検出器は SORST の最後に完成した。量子井戸 QW2 の上に QW1 が縦に重なっているので、製造プロセスが簡単である。また検出器のアレイ化も比較的容易にできるので、極めて重要な新しい展開である。狭帯域対応で、目指す波長に対して±3% のシャープな感度があるものを開発した。

B. 遠赤外測定技術の開拓

①QHE 検出器を用いた走査型顕微鏡

単結晶シリコンの超半球レンズをソリッド・イマーシオン型の対物レンズとし、試料を XY-ステージで掃引する走査型顕微鏡を開発した。CREST 期間中に開発した装置では、開口数²¹ (NA) が 1.39 と小さく、コンデンサレンズが無かったのに対して、ポリオレフィン (TPX、屈折率 $n=1.475$) のコンデンサレンズを使用した結果、シリコン・ソリッド・イマーシオン・レンズ (SL) を $NA=2.39$ に設計できた。検出器は、QHE 素子の CR でチューニングして高

²¹開口数 NA.(Numerical Aperture)は、対物レンズの分解能、焦点深度、像の明るさ等を決める重要な値で、次式で表わされる。数値が大きいほど高解像で焦点深度の浅い像が得られる。

$$N.A.=n \cdot \sin \theta$$

ここで n: 対物レンズ先端と試料との間の媒質が持つ屈折率

θ : 対物レンズの一番外側を通る光線と光軸とのなす角度

感度にできる。検出素子の面積を小型化して、SN比を稼いだ。空間分解能 $50\mu\text{m}$ で、18倍の改良を達成した。

この顕微鏡で、電子を素子に注入する側の電極端子付近のスポットの広がりを見た。これから QHE の局所的破壊によって QHE の非平衡電子が電極近傍で発生するのを観察することが出来た。分光器としての使用は、QHE 検出器のチューニング限界によって制限されるが、検出器への光の照射と、バックゲートへの負のバイアス電圧で克服することができた（論文リスト B26(2003)）。

②THz フォトンカウンティング顕微鏡

磁場中の CR を使用した QD 形 1 光子検出器は、He3 冷凍器温度 0.3K で使用される。電子正孔の分極の寿命が $1/100$ になり、検出速度が $10\mu\text{s}$ に高速化した。アンテナの量子効率を 10% に設計したことと合わせて感度は 1 光子/s になった。これは、最先端の天文学センサーの 1000 倍の感度になる。スペクトルの分解能は $\Delta\lambda/\lambda < 0.05$ の狭帯域を達成した。波長領域は $120\text{-}170\mu\text{m}$ である。

この検出器を用いてフォトンカウンティング顕微鏡を作成した。対物レンズおよびディテクタ・レンズが単結晶シリコンのソリッド・イマーション型超半球レンズ (SIL) で作られている。この光学系で、対物レンズの SIL からの THz 光は検出器に集光される。試料を XY-ステージで掃引して走査型顕微鏡として動作させる。波長 $132\mu\text{m}$ に対して、 $100\text{-}100,000$ 光子/s までの感度を達成した。空間解像度は $50\mu\text{m}$ である。

この顕微鏡を用いて、QHE の低電流領域におけるサイクロトロン放出 (CE) の可視化を検討した。サンプルは完全な QHE 状態にあり、縦抵抗と電極の接触抵抗は非常に小さく、ホール抵抗は量子化されている。この状態で CE フォトンが SET の電流スイッチングのパルス波形としてカウントされた。サンプルの対角線上に電極付近の領域が光っているが、磁場と電流を反転すると光る電極部分が移動することから、QHE で起こっている現象であることが確認された。またこの発光に閾値があることが分かった。以前の装置では、このような小さな電流領域の発光を観測することは出来ず、大きな電流では QHE の状態を乱した。この装置は系を乱さずに観測することを可能にした（論文リスト B9(2006)）。

③孤立量子ドットと AI-SET を容量 C で結合させた検出器で、QD に 2 つの閉じ込めがあることが分かった。また準孤立 QD を用いて、光子計数が可能なことを示した（論文リスト B10 (2006)）。

C. 基礎物性研究

①量子ホール素子中の非平衡電子イメージング

QHE 検出器を用いて、2次元の QHE 系の端状態のチャンネルに沿って運動している非平衡電子が放出する CE の場所による違いをしらべた。QHE 素子の端状態からの THz 光は SIL とコンデンサレンズを通して、QHE 検出器に集光された。サンプルは XY ステージを移動させて走査した。この THz 顕微鏡によって、外部から光を照射しないで映像を観察することが出来た。従来の顕微鏡では、空間解像度の不足から観察不可能であったものである。QHE バーの低ポテンシャル側の境界に沿って、QH 平坦部の低磁場側 ($\nu < 2$) だけで弱い CE を観測した。磁場と電流を反転すると、光るエッジも反転する。電子はエッジの境界では $n=1$ のランダウ順位 LL1 に集まり、 $n=0$ の LL0 には少なくなるために、CE が低ポテンシャルエッジ側だけで起こる。また、このことからエッジで分布反転が起こり、レーザー発振が可能になることを示した (論文リスト B19(2004))。

THz QHE 走査顕微鏡を用いて、空間分解能 $50 \mu\text{m}$ において 2次元 QHE 系の電極のホットスポットと端状態からの CE の分光を行った。QHE のサンプルは $\nu=2.0$ 、 $\nu=2.5$ の状態で、測定温度 4.2K 、電流は $I=50$, $300 \mu\text{A}$ に設定した。端状態のスペクトルは狭いローレンツ型で、電流が変化しても形は変化しない。電流の入口と出口におけるホットスポットでの CE スペクトルは低周波側に伸びており、 $300 \mu\text{A}$ の方が非対称性が大きかった。また $n=4$ の高いランダウ順位にある 300K の非平衡電子が電極付近で出入りしていることが分かった。バルクの平均の電子温度は $25\text{-}30\text{K}$ であった (論文リスト B11(2006))。

②量子ホール系端状態の研究

QHE の端効果に関しては、継続して研究された。THz 光子顕微鏡を用いて端状態の観察などの研究も行った。最近、核スピンの用いた量子コンピュータの可能性が発見された。核スピンの制御に関しては、スピン分離した端チャンネルへの分離の違いによって電気的に分極させることが出来、RF 磁場で起こされるパルス核磁気共鳴によって制御される。また核磁気的分極はエッジチャンネルの電気伝導度の変化で検出でき、分数 QHE 効果 (FQHE) のスピン分極が核との超微細相互作用によって調べることが出来る。ランダウ準位間の遷移を利用して 1 光子検出の可能性を示した (論文リスト B23(2003))。

(2) 新 CREST における代表的研究成果

小宮山グループは「テラヘルツ検出器と顕微鏡の開拓」、平川 一彦 (東京大学生産技術研究所第3部 教授) グループは「結晶成長およびテラヘルツ検出の新機構探索」を担当している。

A. 25K 動作 FET 型検出器の開発。

4.2K で作動する DQW は、SORST の最後で完成した (論文リスト B14(2005))。新 CREST でも継続して開発をすすめ、最近、動作温度を 25K と従来比 2 桁近く高温にすることが出来

た。波長範囲は一桁小さい範囲で使用する。これまで使用してきた SET をやめて FET にするなど、デバイスをより簡単なものにしたことによって検出器は格段に使いやすくなり、実用の可能性がでてきた。論文は現在執筆中である。

B. 4.2K 動作の分光計

1 光子検出器を 4.2K で評価するための分光計を試作した。液体ヘリウム中で、DQW 検出器を計測し、優れた分光特性、感度 ($D^* = 5 \times 10^{14} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)、量子効率 (1%) を得た。これらの結果を基に、波長範囲の拡大と量子効率の改善について今後の着想を得た。

C. 新たな THz 検出機構の探索

量子井戸に量子ドットを埋め込んだ $10\mu\text{m}$ 帯赤外光検出器の感度改善のために、素子中のテラヘルツ光吸収層には、テラヘルツの光子エネルギーに相当する束縛エネルギーを持つ浅い不純物 (Si や Be) や量子ドットを十分な吸収を得られる程度に挿入する。浅い不純物や量子ドットから励起された正孔 (電子) は電界により走行し、二重障壁共鳴トンネル構造界面にある InAs 量子ドットにトラップされる。この時、トラップされた光励起キャリアにより共鳴トンネル構造付近の電位が変化し、トンネル電流が変化することにより光検出を行う。トラップされた正孔 (電子) の寿命が十分長ければ、縦型フォトトランジスタのように機能し、高感度が期待できる。二重障壁共鳴トンネル構造の最適化のための設計、可視光パルスを入射したときの光励起キャリアの寿命の測定などを開始した。

D. QHE 顕微鏡を用いた端状態の観察

端状態は、フィリングファクター $\nu < 2$ では存在しないが、CE パターンがサンプルの内部で見られた。 $\nu > 2$ では端状態が存在し、このとき CE は低ポテンシャルと高ポテンシャルのエッジに局限された。スペクトルからオージェタイプのエッジ間遷移が起こっていると解釈される (論文リスト B1(2007))。

E. GaAs2 次元電子ガス (2DEG) 系における QH 平坦部から絶縁体平坦部への遷移

システムサイズ L はポテンシャルのゆらぎの相関長 L_{cor} に近い値になっている。低温では遷移は L で変化するが、アンダソン局在では説明できない。高温では遷移の幅が L の冪乗依存性を示したが冪はユニバーサルな値にはならなかった。 $L < L_{\text{cor}}$ では遷移はアンダソン局在から半古典的なパーコレーションが支配的な領域への移り変わりにあると考えられる (論文リスト B2(2007))。

F. 電荷感受性赤外トランジスタ (Charge Sensitive Infrared Phototransistors (CSIP))

光と電荷を感知する CSIP デバイスの動作を 4.2K で調べた。GaAs/AlGaAs DQW 構造で作成し、活性領域の面積を $16 \times 4 \mu\text{m}^2$ に設定した。検出波長の中心は $\lambda=14.7 \mu\text{m}$ 、バンド幅 (FWHM) は $\Delta\lambda=1 \mu\text{m}$ である。量子効率 $\eta=2 \pm 0.5\%$ 、電流応答性 $R=4 \times 10^{-6} \text{A/W}$ 、雑音等価電力 $\text{NEP} \approx 6.8 \times 10^{-19} \text{W/Hz}^{1/2}$ 、検出感度 $D^* \approx 1.2 \times 10^{15} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ を得た。検出のダイナミックレンジは 10^6 (~aW to pW) を超えたが、上限は発生源側の上限で制限された。本来の値は 10^{13} (~aW to pW) になると予想される。検出速度は約 3 ns (300MHz) であった。CSIP は非常に高感度なので、1 光子の信号が光電流に階段状に現れるのが観察される。D* の値が現状の多 QW 赤外光検出器 (QWIPs) より 数桁高いので、長波長領域における超高速イメージングと超高解像の受動型顕微鏡の実現の可能性が開けた²²。

§ 6. 2. 3 課題の波及効果

(1) 科学的・学術的波及効果

A. 単一光子検出器の開発

passive 計測につかえる高感度 THz 検出器は、世界中で小宮山らが開発した以下の検出器だけである。

QD(H) : 磁場を用いる単一 QD 検出器。CREST で最初に開発した。従来の検出器に比較して 1 万倍の高感度を達成した。

DQD : 2 個の量子ドットを用いる磁場を必要としない検出器。CREST で 2 番目に開発した。期間中には完璧には動作しなかったが、SORST で完成した。

QD+AI-SET : SORST で開発。

以上の検出器の感度は良かったが、SET を動作させるのに 1K が必要だった。

DQW : 4.2K で作動した。SORST の最後で完成した。

DQW は平成 18 年度採択の新 CREST でも継続している。最近、SET (単電子トランジスタ) をやめて FET (Field Effect Transistor) にしたところ、動作温度が 25K まで上昇することがわかった。これにより検出器は格段に使いやすくなった。

²² Ueda T, An Z, Hirakawa K, Koniyama S, Charge sensitive infrared phototransistors: Characterization by an all-cryogenic spectrometer, を現在 IEEE に投稿中

以上のとおり、小宮山研究室では遠赤外単一光子検出の目標を設定したうえで、次々と新しいアイデアを発想し、検出器を実現してきた。それらの成果は極めて独創的であり、世界の先頭を走っているといえる。実現の背景には深い量子力学的理解と洞察があり、今後の研究の更なる進展が期待される。

B. 走査型遠赤外顕微鏡

QHE 単一光子検出器を用いた走査型遠赤外顕微鏡開発、磁場存在下での QD 型単一光子検出器を用いた走査型遠赤外顕微鏡開発を行った。後者においてはフォトンカウンティングタイプを開発した。

DQW+FET の検出器を用いた 25K の走査型遠赤外顕微鏡の開発も期待できる。

C. QHE 電子の解明

走査型遠赤外顕微鏡をもちいて、QHE の電極からの CR 放出やエッジからの CR 放出を観測し、QHE 電子系の理解を深めた。

D. 核スピン分極利用量子ビットの可能性

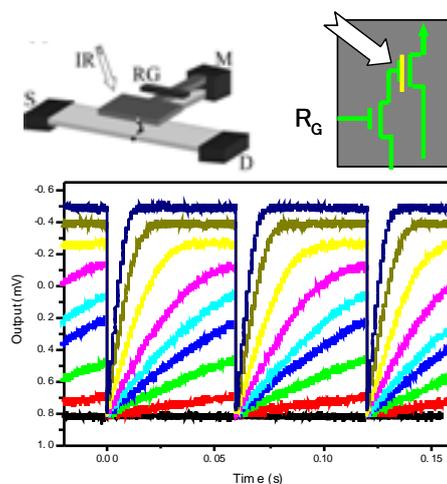
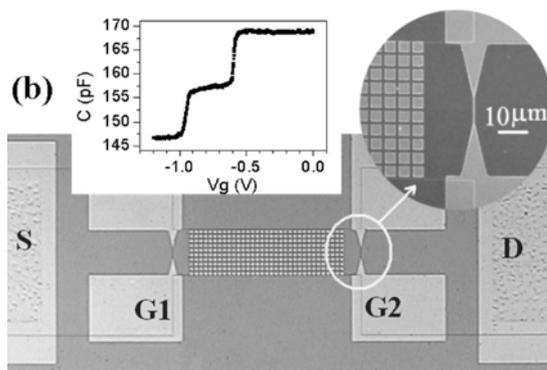
量子ホール系の端状態を用いて核スピン分極を用いた“量子ビット”の実現可能性を示した。量子コンピュータの実現へ向けての内外の研究に、ユニークな手法として、一石を投じるであろう。

小宮山グループの代表的展開・発展事例 (1)

「汎用性超高感度 THz 検出器(CSIP)の開発」

CMOSセンサーに類似した使い勝手の良い超高感度赤外検出器を実現

GaAs・AlGaAs系二重量子井戸結晶を用いて電荷敏感型赤外トランジスタ(Charge Sensitive Infraered Phototransistor: CSIP)を開発しました。赤外光が量子井戸の一方に電荷を誘起し、その電荷が、隣のもう一つの量子井戸の伝導度を変化させることを利用して赤外光を検知します。ヘリウム温度(4.2K)で単一光子検出(14 ミクロン)の感度を有し23Kまで動作可能、また6桁を超えるダイナミックレンジを持ち、将来的には、アレー化してGaAs系LSIに組み込んでモノリシックな赤外センサーが実現する可能性があります。



CSIP 検出器 ; 受光面積は広範囲(1 μm~200 μm)で設計可能

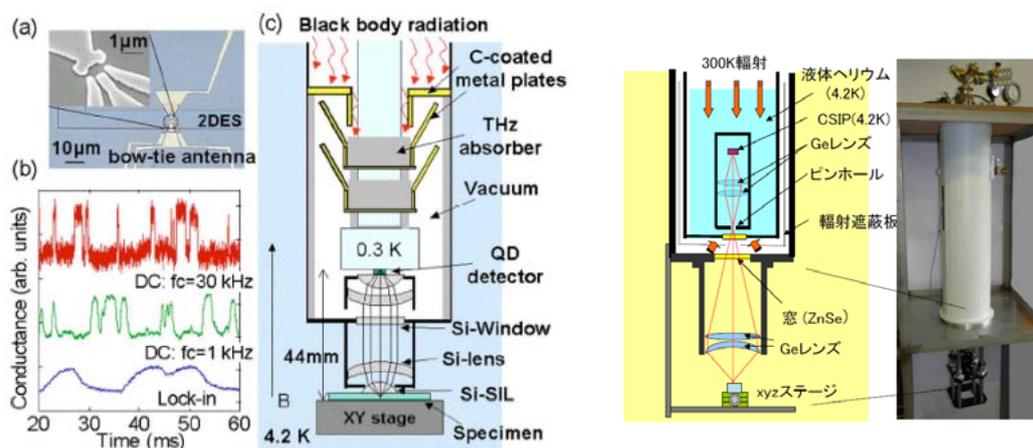
CMOSセンサーに類似した機能(上)とリセット動作(下)

小宮山グループの代表的展開・発展事例（2）

「走査型 THz 顕微鏡の開発」

THz 領域でフォトンカウンティング・イメージングを実現

波長 $120\mu\text{m}\sim 150\mu\text{m}$ の領域でフォトンカウンティング・イメージングを行える走査型顕微鏡を GaAs・AlGaAs 系の量子ドット光子検出器を利用して実現しました。低温試料（4.2K、 $3\text{mm}\times 4\text{mm}$ ）からの THz 光をイメージングします。さらに、波長 14 ミクロンで超高感度イメージングを行う走査型顕微鏡を、CSIP (Charge Sensitive Infrared Phototransistor) を用いて開発しました。後者はさらに、非開口式近接場技術を導入して波長よりはるかに小さな空間分解能を目指して改良が可能です。



波長 150 ミクロンでフォトンカウンティング・イメージングを行う走査型顕微鏡

波長 14 ミクロンで超高感度のイメージングを行う走査型顕微鏡

（2）産業技術的・経済的波及効果

A. プロジェクトの成果から期待される技術革新・イノベーション

DQW によって 4.2K の単一光子検出器が完成したので、スキャナーや走査型遠赤外顕微鏡の開発が見えてきた。

新 CREST の最近の画期的な成果として SET の代わりに FET にすることにより測定温度を 25K に上げることに成功した。実用化に向かって、確実に前進している。測定温度を液体窒素温度(77K)まで上昇させることも夢ではなくなっている。

アレイ化ができれば、実用化も遠い先の話ではなくなるだろう。応用としては、民生用途では医療、美容や健康目的の機器の開発が期待できる。国家目的では、ミサイルの赤外線センサー、爆発物、麻薬、薬物などの識別など国家の防衛、安全用途に期待が持てる。

赤外一ミリ波領域の光子検出器群+顕微鏡系の研究がさらに進展すれば、電波天文学・固体物理学・分析化学・生体高分子等に、広い応用が期待できる。

B. プロジェクトの成果の応用に向けた取り組み

前項A. で述べたように、応用の可能性がようやく射程距離に入ってきた。25K の検出器のアレイ化が出来れば、具体的製品の開発に向けて乗り出す会社が出てくると考えられる。しかし、実用化を実現させるためにクリアしなければならない技術的課題は、更なる高温化、低温技術、小型化技術、システム化技術、ガリウム砒素結晶化技術など、数多く残されている。

(3) 人材育成効果

平井宏：国立群馬工業高等専門学校電気工学科 准教授（CREST 当時助手）

川口康：株式会社 アドバンテスト 知的財産部戦略特許推進課（CREST 当時ポスドク）

Oleg Astafiev：NEC Fundamental Research Laboratories においてパーマネントポスト（CREST 当時ポスドク）

Vladimir Antonov：Physics Department, Royal Holloway, University of London 講師（CREST 当時ポスドク）

町田友樹：東京大学生産技術研究所 准教授（CREST 当時ポスドク）

李承雄：Dongguk University, Quantum-Functional Semiconductor Research Center, 准教授
（CREST 当時 研究補助員→ポスドク）

河野行雄：独立行政法人理化学研究所 石橋極微デバイス工学研究室 研究員（CREST 当時 大学院生/CREST 研究補助員）

久津輪武史：東北大学電気通信研究所 ナノ・スピン実験施設 研究員（CREST 当時 大学院生/CREST 研究補助員）

荒木利之：平田国際特許事務所 特許技術者（CREST 当時 大学院生/CREST 研究補助員）

§ 7. 原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果

研究代表者氏名：小倉 睦郎

（現）独立行政法人産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 主任研究員

§ 7. 1 研究期間中における状況

研究成果概要については、以下に当時の事後評価結果を転記する。

(1) 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

当初から一貫して MOCVD 及び MBE による量子細線の作製技術の開発を進め、その結果、それぞれに、従来にない量子細線作成技術を発展させたことは高く評価出来る。特に、MOCVD において、流量変調法、基板再エッチング、有機砒素によるステップバンチングの抑制などにより、当初の $0.1\mu\text{m}$ から $2\mu\text{m}$ 程度にまで単一量子レベルとして拡張したエキシトン状態を実現し、1次元励起子の特徴を明らかにした成果は大きい。また、この MOCVD 量子細線を用いたファブリペロー型レーザーにおいては、単一サブバンドのみからの室温発振の成功、利得結合型の量子細線分布帰還型 (DFB) レーザーを試作、更には、両端が閉じた有限巾量子細線アレイを形成し、3次元的なキャリア閉じこめ構造を実現したことなどは、今後の量子細線レーザーの実現の可能性を示すものとして、高く評価出来る。一方、MBE においても、原子状水素やダイマ砒素ソースを用いて巾 20nm 、厚さ 10nm の世界最小の InGaAs 量子細線を形成することによって、 30K 付近程度までの量子コンダクタンスを観測したこと、1次元細線 FET による極めて低い加速電圧 ($\sim 0.2\text{V}$) において、実空間遷移による負性抵抗が発生することを見いだしたことなど、1次元電子の伝導機構の解明、及び電子デバイスへの発展などが期待できる。

総じて、着実に研究を進め、当初の目標に沿って、世界トップの高品質量子細線作成技術の開発に成功し、1次元電子や1次元励起子の特色を明らかにし、多彩な実験ができるようになったことは、一度衰退した半導体量子細線の可能性を新たに切り拓くものとして、十分に満足できる成果である。実験技術はトップレベルにあるので、今後は、基本的なところでの独創性を発揮して、新しい概念、新しいデバイスを発掘することを期待する。

外部発表は 72 件(英文論文 34、和文論文 1、国際学会発表 14 件、国内学会発表 23 件)、特許出願は 3 件というのは物足りない。量子細線作成技術、量子細線デバイスなどに関し、外部発表、特許として、もっと成果を出すことができるはずである。今後に期待する。

(2) 成果の戦略目標・科学技術への貢献

良質の量子細線作成技術は、今後の量子細線の物性理解およびデバイス展開の可能性を広げている。 $2\mu\text{m}$ という巨視的な距離まで量子準位が拡張し、コヒーレント体積と発光再結合寿命、エキシトンの異方性に伴うエネルギー分裂、高温における AB 効果と散乱要因など低次元ナノ構造における発光や輸送現象の解析が可能となるなど、従来は不均一性のために真の物性が不明確であった 1次元電子・光物性とその制御可能性が示された科学的な意義は大きい。また、量子細線レーザーの室温発振、量子細線 FET での負性抵抗などは、量子細線デバイスへの新展開が期待できる成果である。量子細線レーザーでは、通信波長帯の $1.5\mu\text{m}$ 帯までに長波長化できれば産業上の波及効果としての技術的貢献は大となる。ま

た、量子細線 FET は超高感度光センサーとしての応用なども考えられる。具体的に使えるデバイスの開発はこれからであるが、量子細線作製技術に加えて、デバイスプロセス技術、評価技術について確かなものを構築しており、その科学技術への貢献は評価できる。

(3) その他の特記事項

良質の量子細線の供給基地としての立場から、日、仏、スイス、アメリカと協同的な研究をリードして、その成果に基づいて内外の第一線の研究者を集め、2 回の国際ワークショップを開くことに成功し、関連分野の国内外における影響力を高めた。

§ 7. 2 課題終了後の状況

以下は、聞き取り調査から得られた結果をまとめたものである。

§ 7. 2. 1 研究の継続・発展の状況

課題研究終了後継続して資金が得られず、継続が困難なテーマもあったが、実用的なデバイスに関するいくつかの重要と思われるテーマが産総研スタートアップ開発戦略タスクフォース（ベンチャータスクフォース）²³、総務省 SCOPE²⁴、JST 大学発ベンチャー²⁵などに採択され進展している。基礎（物性）研究についてもその重要性を認識し、地道な研究が続けられており、基礎研究の上に立ったデバイス開発でベンチャーに結びつくことを目指している。

§ 7. 2. 2 代表的研究成果

(1) 基礎研究

課題研究終了後も細線の均一性の改善が続けられている。2003 年には、AlGaAs/GaAs V 溝形の量子細線（Quantum Wire、QWR）の光ルミネッセンス(Photoluminescence、PL) の温度安定性に著しい改善を達成した。また、欧州（スイス、フランス）との共同研究が継

²³ 独立行政法人産業技術総合研究所 スタートアップ開発戦略タスクフォース 平成 16 年度採択
研究科題名：量子細線デバイス
<http://staffaist.go.jp/ogura-m/>

²⁴ 総務省 戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE） 平成 16 年度採択
研究課題名：超高感度広波長域量子細線フォトディテクタアレイの開発（研究代表者：小倉）
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/scope/subject/s_h16.html

²⁵ JST 独創的シーズ展開事業 大学発ベンチャー創出推進 平成 18 年度採択
研究課題名：高感度赤外光 FET および赤外 DFB レーザーによるハイブリッド分光・撮像モジュール（開発責任者：小倉）
<http://www.jst.go.jp/pr/info/info309/besshi.html>

続しており、励起子の PL、量子細線中の電子のコヒーレント波動状態や量子細線中の多体効果（フェルミ端異常やウィグナ結晶など）について研究が進んでいる（Applied Physics Letters, 193 (24), (2003)）。

（２）応用研究

CREST できれいな量子細線を作り、長さ 1μ の 1 次元の電子雲ができた。その応用として、量子細線 FET、量子細線レーザーあるいはフォトニクススイッチ、高感度フォトディテクタなどの具体的な量子デバイスで優れた特性を実現した。

A. 量子細線 FET

InGaAs/InAlAs 量子細線光 FET を試作した。感度は室温で 350A/W とフォトン一個に対し 35 万個の電子電流を発生させたことに相当する。このデバイスの特徴は、低バイアス 1V 程度で、超高感度、低雑音であることである。（Electronics Letters, 42 (7), 413-414 (2006)）

B. 量子細線 LED

量子細線 LED において、現在高効率化が遅れている赤色 LED の効率改善に有効であることが期待されており、産総研の特許支援制度に採択され、検討が進んでいる。高効率量子細線 LED では量子細線を発光領域とすることにより、内部量子効率の改善とともに、効率のよいキャリアの選択注入構造による外部量子効率の改善が得られた。

C. フォトディテクタ

量子細線 FET がフォトダイオードと増幅用 FET の組み合わせで高感度（ソース・ドレイン間電圧が 1V で、 350kA/W ）が得られることを見だし、より一般的な構造を用いた高感度、高波長域フォトディテクタを開発し、現在 JST 大学発ベンチャープロジェクトに採択された。実用的なフォトディテクタの開発が進行中で、ベンチャーの立ち上げが計画されている。

SCOPE プロジェクトでは、室温において 100KA/W 以上の超高感度を有する量子ナノ構造光ディテクタを 1 次元または 2 次元に配列することにより、高感度かつ広波長域のリニアおよびイメージセンサーを開発することを目的として研究開発が進められている。（特願 2004-5580、2004/1/13、光検出素子、特開 2005-203428、独立行政法人産業技術総合研究所、小倉 睦郎、永宗 靖、菅谷 武芳）

D. 量子細線型 DFB レーザー

量子細線型 DFB レーザーでは基板にあらかじめグレーティングとリッジを形成することにより、1 回の成長で、利得結合型 DFB レーザーが実現できた。

自己形成量子ナノ構造を用いて埋め込み型(BH-QWR)量子細線DFBレーザーを試作した。GaAs基板上にグレーティングを作製し、形状保存MOCVD成長法を用いて、一回の結晶成長により、光導波路と電流狭窄機構を実現した。比較的簡単な成長プロセスにより、低次元構造による利得特性の向上、利得結合型DFBモードによる高いサイドモード抑制比がえられた。レーザーの閾値電流は15mA（電流密度850 A/cm²）で、電流狭窄効果により、大幅に低減した。安価で高性能な利得結合型DFBレーザーが実現した。この埋め込み型DFBレーザーの閾値電流を下げるために、量子細線の両端を閉じてキャリアの散逸を防いだ有限長量子細線DFBレーザーを試作した。サイドモード抑制比が大きい、温度特性の改善のためにAlを含んだクラッド層を形成することができるなどの点が、波長安定化レーザーの低コスト、高性能化に有利である。

§ 7. 2. 3 課題の波及効果

(1) 科学的・学術的波及効果

半導体の量子細線は、1次元の電気伝導や励起子の性質を調べるには最適、理想的な系である。半導体で、長さ2ミクロンの巨大な量子力学的状態を実現した。このような巨視的量子状態の実現を受けて、量子細線中の電子のウィグナ結晶化の観測結果がきっかけとなって、数人の理論家が同現象の理論的研究に取り組むようになった。

(2) 産業技術的・経済的波及効果

光 FET センサーは、量子ドットの光感度と量子細線の電気伝導度の長所を併せ持つすばらしいデバイスである。このような特性は他のデバイスでは期待できないほどのものである。量子細線は発光体としてもまたユニークである。理論どおり、励起子の束縛エネルギーが大きいことによって、室温での発光スペクトルが量子井戸よりもいい特性がえられるようになった。分布帰還型レーザーも量子細線の特徴をうまく利用している。これらがうまく動作すれば優れたデバイスが出来ると期待される。また流量変調法のようなすぐれた製造技術が、GaAs系以外のたとえばInP系その他の物質系にまで発展することが期待される。現在、JST 大学発ベンチャープロジェクトに採択され、実用的なフォトディテクタの開発を目指して進行しているが、具体的効果はまだ現れていない。

量子細線 LED においても、産総研内の特許支援制度に採択され、検討が進んでいるが、具体的効果はまだ現れていない。

実現されれば、高感度カメラ、熱画像、赤外カメラ、アレイ分光器や新規市場である医療（がん、糖尿病無侵襲診断、光 CT、内視鏡）分野が市場となると予測される。

(3) 人材育成効果

プロジェクトに参画したポストドクの内、外国人研究者は、自国あるいは米国においてパーマネント職を得ている。また、日本人ポストドクの1名は、大学助教授に就任した。

§ 7. 3 参考資料

小倉睦郎ホームページ (<http://staff.aist.go.jp/ogura-m/index.html>)

IV. 一般研究者に対するアンケート調査結果

§ 1. 調査結果概要

本調査では CREST 研究課題には直接携わっていない有識者に聞き取り調査を実施した。しかしながら面談人数は限られており、何らかの方法で客観的評価を補完する必要があると思われた。この点について、多数の研究者の意見を聴取する目的で一般研究者に対する Web アンケート調査を試みた。

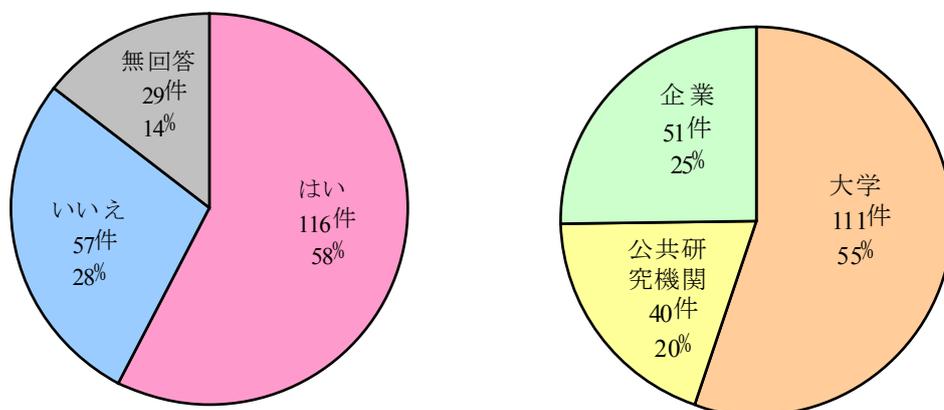
アンケートを依頼した研究者の人数は 2,012 名であり、1つの研究課題に対する回答を 1件と数えた場合の回答数は 202 件、有効回答率 10.0%であった。以下、その概要を示す。

表 15 研究代表者ごとの回答数（一般アンケート）

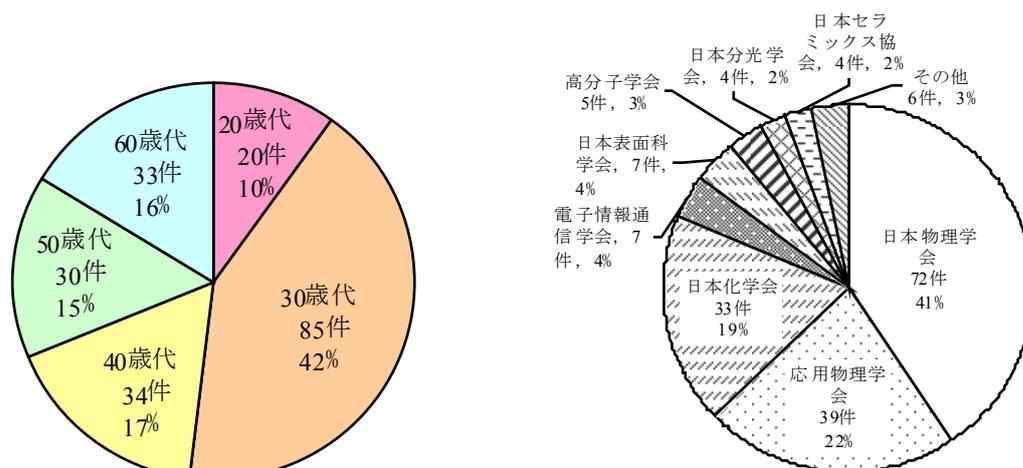
No.	研究代表者	回答数	割合
7-1	青野 正和	25	12.4%
7-2	潮田 資勝	13	6.4%
7-4	清水 明	13	6.4%
7-6	寺崎 治	12	5.9%
8-4	小宮山 進	12	5.9%
8-5	山中 昭司	12	5.9%
7-8	武笠 幸一	11	5.4%
7-3	雀部 博之	10	5.0%
7-5	筒井 哲夫	10	5.0%
8-1	家 泰弘	10	5.0%
8-2	大塚 洋一	9	4.5%
8-3	岡 泰夫	9	4.5%
8-6	横山 正明	9	4.5%
9-4	白田 耕藏	9	4.5%
7-7	廣瀬 全孝	8	4.0%
9-1	井口 家成	8	4.0%
9-2	小倉 睦郎	8	4.0%
9-3	讃井 浩平	7	3.5%
9-5	山下 幹雄	7	3.5%

表 15 に、研究代表者ごとの回答数を示す。回答が最も多かった研究者については、全体の 10%を越えていた。その他の研究代表者に対する回答率は 3.5%から 6.4%の間で分布してい

た。本調査では、どの研究代表者について回答するかを選択を回答者に委ねたが、回答対象者は比較的うまく分散し、極端に偏らなかった。



1. 研究課題と関連のある研究をしているか 2. 所属機関



3. 年齢

4. 所属学会 (複数回答)

図 29 回答者の属性 (一般アンケート)

図 29 に回答者の属性を示す。回答した研究課題と関連のある研究をしていると答えた研究者は 58%であり、いいえと答えた研究者の 28%の 2 倍以上となった。同様の領域で研究している研究者がこのアンケートにより強い関心を持ったと言えそうである。所属機関について見ると、大学等が 55%、公共研究機関が 20%、企業が 25%であった。

回答者の年齢について見ると、30 歳代の 42%が最も多かった。40 歳代、50 歳代、60 歳代は 15~17%とほぼ同じ割合となった。20 歳代は 10%と最も少なかった。回答者の所属学会は幅広く分散していたが、日本物理学会、応用物理学会、日本化学会の会員からの回答が

多くなっていた。これは研究代表者の所属学会と同様の傾向であり、回答者が自身の研究領域と近い研究課題に関心を持っていることを示唆するものと考えられる。

§ 2. 研究成果

設問：研究成果があったと思われますか？

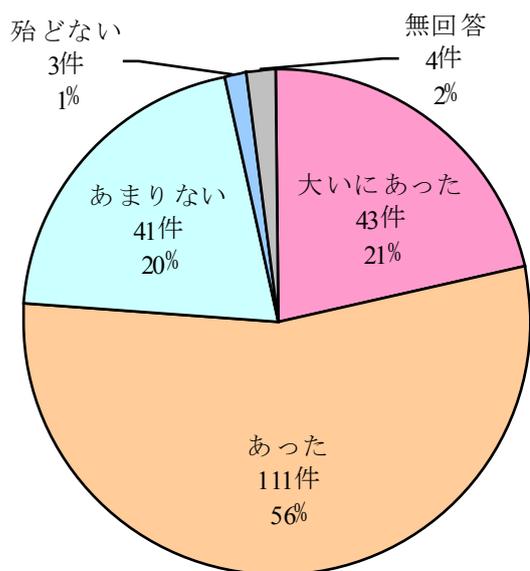


図 30 研究成果があったか（一般アンケート）

全体としてみると、「研究成果が大いにあった」と「研究成果があった」とを合わせて回答者の4分の3の方が肯定的に評価していた。CRESTの成果が広く評価されていることを裏付けていると言えよう。このような評価が得られていることは、外部の研究者の意見としては、本件研究課題が大きな成果を上げたと受け止められていると結論付けて良いものとする。

§ 3. 研究領域分野への貢献

設問：その成果は当該領域分野に貢献したと思われますか？

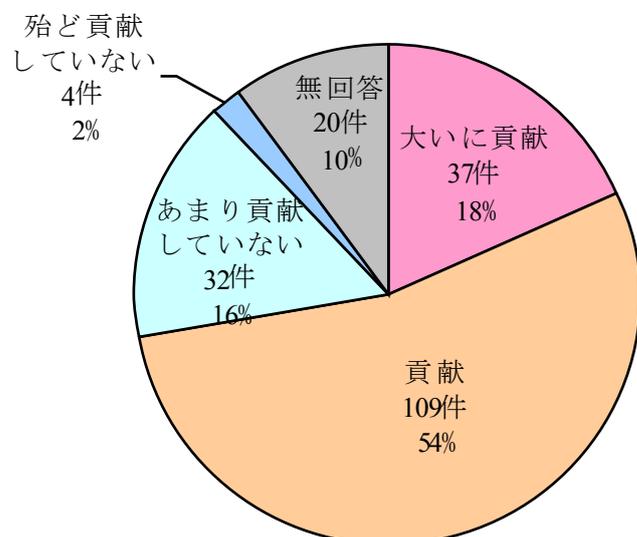


図 31 研究領域分野への貢献（一般アンケート）

全体としてみた場合、「CREST の研究成果が当該研究領域・分野に貢献したか」との問いに対して、「大いに貢献した」と「貢献した」とを合わせた肯定的評価の割合は 72% (146 件) であり、十分に高い評価がなされていると考えられる。「ほとんど貢献していない」と回答しているのはわずかに 2% (4 件) であった。「研究成果」に対する評価傾向 (§2) と、「研究領域分野への貢献」に対する評価傾向が同様になっていることは、外部の一般研究者が、「研究成果」が直ちに「研究領域分野への貢献」に結びついていると見ていることを示唆していると考えられ、これは「研究成果」が個別的なものではなく、「研究領域」全体を押し上げるような研究成果であったと評価しているとも考えられる。

§ 4. 研究領域分野の発展状況

設問：当該研究分野の現在の発展状況はどうですか？

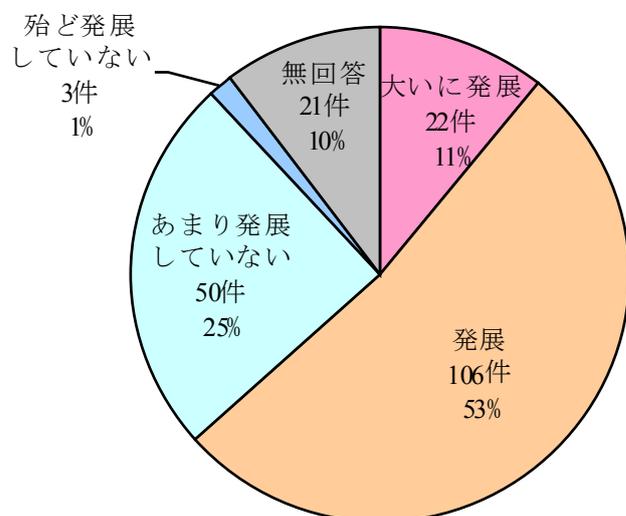


図 32 研究領域分野の発展状況（一般アンケート）

「当該研究分野の現在の発展状況」に対する肯定的評価の割合はこれまでの設問に対する割合よりも肯定の割合はやや低下していたものの、64%（128件）でありおおむね当該研究分野が順調に発展しているとの見方が過半数を占めた。

§ 5. 社会的・経済的な波及効果

設問：社会的・経済的な効果・効用あるいは波及効果がありましたか？

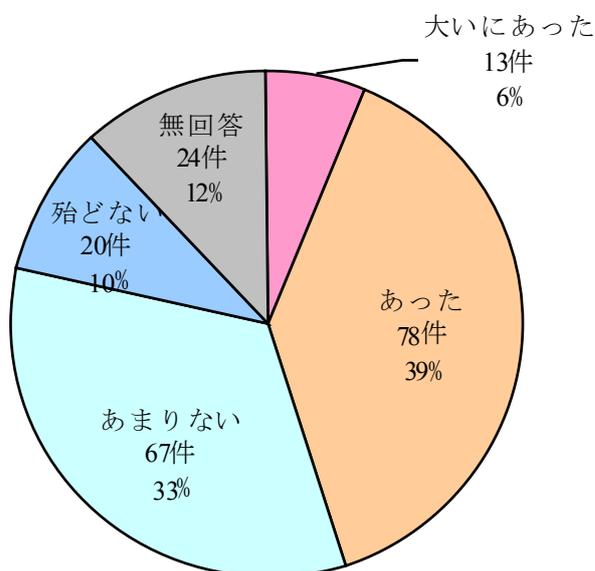


図 33 社会的・経済的波及効果（一般アンケート）

社会的・経済的な波及効果については、他の設問よりも肯定的な評価が少なくなっているが、それでも「大いにあった」と「あった」とを合わせた割合が 45% (91 件) に達していることは、本研究領域が基礎研究的な性格を有していたなかで、注目すべき点である。ただし具体例を示した回答は殆ど無く、将来性への期待感が多い。「大いにあった」との回答で寄せられたコメントを以下に示す。

- ①社会的な効果という点では、学術研究として人類共通の自然に対する理解増進に大きな効果があったことは間違いない。
- ②学術研究の進展により、未開拓の知識領域の先端があらたに拓かれ、拡大したことには大きな意義があり、このような知識の創造は国際的に日本への尊敬の念を高める効果があることは明らかであり、経済効果とは相補的に国際的な日本のステータスを高め、間接的かもしれないが日本の安全保障にも大きな貢献がある。
- ③量子情報処理に関する知見を大きく前進させたことは将来的に大きな技術的あるいは産業的な発展に繋がる可能性を秘めている。
- ④遠赤外・サブミリ光子検出で達成された高い感度は広範な分野への応用が期待される。

§ 6. 高額研究費の有効性

設問：CRESTではまとまった金額の研究費が支給されています。このような高額の研究費の支給は有効であったと思われますか？

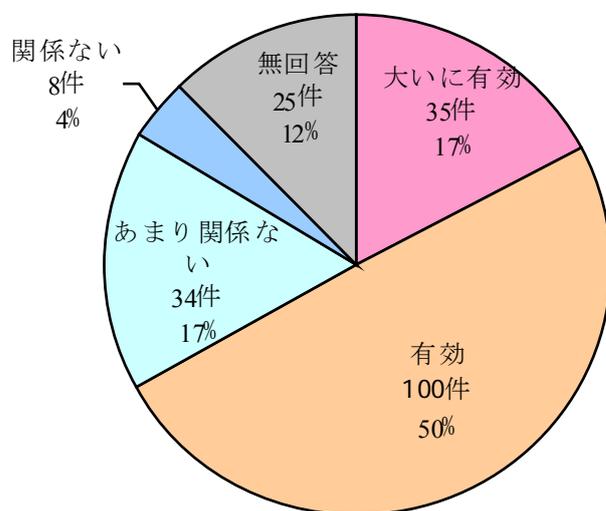


図 34 高額研究費の有効性（一般アンケート）

全体としてみると、「高額の研究費の支給の有効性」について、「大いに有効」とする割合は 17% (35 件) であり、「有効である」の割合は 50% (100 件) と半数に上っていた。

「あまり関係ない」は、「大いに有効」とほぼ同じ 17% (34 件)、「関係ない」が 4% (8 件) となっていた。以上から、高額の研究費の有効性が評価された背景として、これまで示したように本件の対象研究領域が投入した資金に対してそれに見合う結果を出した、との評価があると考えられる。

V. 調査総括

<追跡調査目的>

本追跡調査では、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し、各研究課題の事後評価を補完するとともに CREST 事業の評価に資することを目的とした。具体的には、戦略目標を踏まえて (1) 科学技術の進展への貢献、(2) 研究成果から生み出された社会的・経済的な効果・効用及び波及効果を明らかにするとともに、平成 18 年度は、調査項目・方法の適否・過不足等を検証することにより平成 19 年度以降に実施予定の追跡調査（本調査）の適切な実施方法を検討することを目的とした。

<追跡調査結果>

上記目的を達成するために図 1（7 ページ）に示した一連の調査を実施した。以下に本件追跡調査を構成する主要調査項目ごとに、明らかになった点を示す。

(1) 事前検討

研究成果報告書等の内容を調査することにより、課題研究期間終了時点における成果や、研究期間終了後の科学的・社会的・経済的波及効果に対する期待等が明確になったことは、調査のポイントをどこに置くかなどその後の調査を進める上で重要な指針となった。この段階での各研究課題の内容把握や整理の結果が、調査全体の方向性や深度に影響を与えることは明らかである。

(2) 研究課題現状調査票の作成

19 研究課題全てについて、課題研究期間中、課題研究期間終了後の原著論文およびその被引用件数、出願特許及びその成立状況、研究助成金の獲得状況、受賞の状況、その他を内容とする研究課題現状調査票の基礎作成を行った後、調査票を各研究代表者に送り、主要論文の選定、課題研究期間終了後の原著論文や出願特許の研究課題との関連性を聞くとともに、不足情報の提供を求め、回答が得られた 14 研究課題を中心として、さらに解析を行った。

これらのファクト・データは、研究領域や各研究課題の評価に対する定量的・客観的な視点を提供するが、特に論文の被引用状況の調査からは、被引用件数が 100 件を越えている論文が課題研究期間中で 22 報（19 研究課題全体）、研究期間終了後の CREST 関連論文でも 5 報（14 研究課題中）あったこと、14 研究課題の CREST 関連論文の発表年ごとの平均被引用件数は、ISI Essential Science Indicators (ESI) による物理領域全体の平均被引用件数と比較しておおむね大きな値を示したこと、などが明らかとなり、CREST 研究の成果が科

学技術の進展や新技術の創製に資する知的財産の形成に関して大きく貢献していることがわかった。

(3) 研究代表者に対するアンケート調査

上記(2)と併せて、研究の継続・発展状況、代表的研究成果、波及効果等に関する研究代表者へのアンケート調査を実施した。

その結果、回答のあった14研究課題では80%以上がCREST研究課題の延長線上ないしは派生した研究を継続していること、回答者の60%前後は何らかの新知見が得られ、また研究規模が拡大したこと、回答者の30%前後が新市場創出に繋がる新製品を開発したこと、回答者の60%以上が産業に応用可能な新技術・手法等の開発・普及ができたこと、CREST研究が人材育成面で大きな効果があったことなど、ファクト・データからはわからない各研究代表者の現状についての重要な情報を得ることができた。

(4) 研究代表者聞き取り調査

以上の結果を総合的に勘案して、詳細調査の対象とする6課題を選定し、聞き取り調査を実施した。

その結果、各研究課題のより詳細な発展状況、特筆すべき研究成果や科学技術への貢献、具体的な波及効果など、各研究課題の現状に応じたきめの細かい詳細情報を得ることができた。

(5) 有識者聞き取り調査

有識者として領域アドバイザーおよび領域アドバイザーから推薦していただいた学識経験者併せて7名を選定し、上記(4)の6研究課題に関する聞き取り調査を実施した。

その結果、第三者の視点からの、各研究課題の成果や発展状況や波及効果等に対する補足的な情報を含めた、確度の高い重要な情報を得ることができた。

(6) 一般研究者に対するアンケート調査

本研究領域に関連のある分野で研究している一般研究者に対するアンケート調査を実施し、研究成果、研究領域分野への貢献や発展状況、波及効果等についての意見の収集を試みた。

約2,000件のアンケート出状に対して有効回答が約200件と、回収率が低い結果となり今後の課題も残ったが、有限数の有識者聞き取り調査を補完する形で、研究成果、発展状況、波及効果等に対する多くの意見が得られたことは、調査結果を客観的なものにする上で一定の効果が得られたと考えられる。

(7) 研究総括聞き取り調査

最後に研究総括への聞き取り調査を実施し、全体に対するご意見を伺った。

研究領域全体を俯瞰した観点からの成果、発展状況や波及効果の捉え方、補足情報など研究総括以外から得ることは難しい情報が得られ、調査結果を整理する上で非常に有効であった。