

「場と反応」研究領域延長研究者・事後評価報告書

—平成13年度終了研究課題—

領域総括 吉森 昭夫

1. 研究領域の概要

この研究領域は、分子や原子をとりまく物質的、エネルギー的な環境としての「場」と原子や分子の相互作用およびそれに伴う物質の生成・変化の過程(反応)との関係に着目するものである。すなわち、反応の各過程におけるエネルギー状態、スピン状態、あるいは物質の相の変化などが場からどのような影響を受けているのか、さらには、その影響が、物質の生成・変化の過程での選択性、活性化、応答性、構造の秩序化や安定性などにどのように寄与しているのかを探究するものである。具体的には、物理的、化学的な場、生体の場などにおける原子や分子の挙動、状態変化、相互作用の解明、さらには場を用いた反応の時空間的制御および物質選択性の検討、機能的な場の設計および創出などの研究を含む。

2. 研究者名、所属

研究者名 (参加形態)	現 職 (延長時所属)
小川 誠 (兼任)	早稲田大学教育学部 助教授 (早稲田大学教育学部 専任講師)
竹内 繁樹 (兼任)	北海道大学電子科学研究所 助教授 (三菱電機㈱先端技術総合研究所 研究員)

3. 延長研究について

事後評価を行って、領域総括から「3 年間の研究結果を踏まえた上で、さらに一定期間の研究を行えば一層の展開が期待され、我が国の科学技術に大きな貢献をされると考えられる」との考察(別紙8)をもとに、事後評価の対象となった研究課題の一部について、研究期間の延長を試行的に行うこととした。具体的には、領域総括が必要に応じ領域アドバイザーの協力を得て選考を行い、事業団が以下の研究課題について、引き続いて研究を支援することとした。これらの課題についてはあらかじめ具体的な研究目標を明確化することとし、追加する研究期間は最長 2 年間とした。

研究期間を追加する研究課題名及び研究者名

「場と反応」領域

(1)研究課題:「無機固体表面にナノ空間を創る」

研究者名: 小川 誠(早稲田大学教育学部 助教授)

(2)研究課題:「量子計算の実現に向けて」

研究者名: 竹内 繁樹(三菱電機㈱先端技術総合研究所 研究員)

4. 研究実施期間

平成 11 年 5 月～平成 13 年 4 月

5. 研究状況

各研究者は、各自研究を実施するとともに、関連する進行中の研究領域(状態と変革)の領域会議、さきがけの研究報告会に積極的に参加し、研究進捗状況の報告と討論、研究交流を図るよう努めた。

6. 評価の手続き

領域総括が個人研究者からの報告・自己評価を基に必要なに応じて領域アドバイザーの協力を得て行った。

(評価の流れ)

平成 13 年 4 月	研究終了
平成 13 年 10 月まで	研究報告書及び自己評価提出
平成 13 年 11 月	領域総括等による評価

7. 評価項目

- (1) 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じた新たな知見の取得など、研究成果の状況
- (2) 得られた研究成果の科学技術への貢献

8. 研究結果

2名の追加研究者は、一人は無機化合物と有機化合物の界面における自己組織化を利用して分子サイズの空間をもつナノ複合構造の世界で、もう一人は量子計算を光子操作で実現する実験分野の世界でともに先頭集団を走っている人たちで、2年間の追加研究の期間もやはり充実し、さらに大きく展開させた研究期間であったということができる。「場と反応」の領域総括として、立派な成果をあげた11名の2期生の中から2名の追加研究者を選ぶのは難しい仕事であった。追加研究費がもっとも有効である方というのが、選ぶときの考え方の一つであったが、その考え方を充分生かしてもらえたといえる。

9. 評価者

領域総括: 吉森 昭夫

領域アドバイザー

安保 正一 大阪府立大学工学部 教授
井上 頼直 理化学研究所光科学研究室 主任研究員・播磨研究所長代理
潮田 資勝 東北大学電気通信研究所 教授
北澤 宏一 東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授
小林 誠 高エネルギー加速器研究機構 教授
関 一彦 名古屋大学物質科学国際研究センター 教授
堀越 佳治 早稲田大学理工学部 教授
八木 克道 東京工業大学理学部 教授
米山 宏 国立阿南工業高等専門学校 校長

(参考)

(1) 外部発表件数

	国内	国際	計
論文	8	7	15
口頭	9	5	14
その他	0	0	0
合計	17	12	29

(2) 特許出願件数

国内	外国	計
2	0	2

(3) 受賞等

平成12年度日本粘土学会奨励賞

(4) 招待講演

国際 5件

国内 9件

研究課題別研究評価

1. 研究課題名:

無機固体表面にナノ空間を創る

2. 研究者名:

小川 誠

3. 研究のねらい:

無機化合物と有機化合物の界面における自己組織化を利用して分子サイズの空き空間を有するナノ複合構造を設計し、特定の化学種を選択的且つ効率的に吸着する物質を合成し、従来の結晶質多孔体では実現できない空間サイズの構造制御を行うことを目的とした。

4. 研究結果:

界面活性剤鋳型法によりチタン、アルミニウムなど異種金属を含有するメソポーラスシリカ薄膜を合成し、表面酸性、陽イオン交換性、光触媒特性を付与することに成功した。(1)

また層状ケイ酸塩の有機修飾を行い、吸着に伴い分光特性が変化する機能性吸着剤を設計することに成功した。(2)層状ニオブ酸塩の面内異方性を利用して、色素会合体の配向を制御することに成功した。(3)

5. 自己評価:

延長期間の課題については現在発表準備中の成果も含めて予想以上の結果が得られた。ナノ空間設計の意義を光触媒特性、色素会合体の異方性として評価することができ、新しい展開が開けてきた。大変有意義な延長期間であった。

6. 領域総括の見解:

本来の3年間では、界面活性剤を巧みに駆使し、種々のナノ空間を作り出すことが主で、ナノ空間生成の技術を確認したといえるが、それをを用いての応用が追加研究期間の主題であった。その点ナノ空間設計により光触媒特性、機能性吸着剤、色素会合体の異方性制御というような応用面を具体的に示すことができたことは評価できる。今後の展開に期待したい。

7. 主な論文等:

(1) "Transparent Self-Standing Films of Titanium-containing Nanoporous Silica", Chem.Mater.,13, 2900-2904 (2001)

(2) "Photocontrol of the basal spacing of azobenzene-magadiite intercalation compound", Adv.Mater., 13, 1107 (2001).

(3) "Uni-Directional Orientation of Cyanine Dye Aggregates on a K4Nb6O17 Single Crystal : Toward Novel Supramolecular Assemblies with Three-Dimensional Anisotropy ", J.Am.Chem.Soc., 123, 6949 (2001).

他計 20 報

受賞および招待講演:

・国内:MRS-J (1999 年 12 月)

- ・ 海外: Silica 2001 (2001 年 9 月, Mulhouse, France),
Bouyoucos conference on the environmental chemistry at clay-water
interfaces (2000 年 3 月, Hawaii)
- ・ 平成12年度日本粘土学会奨励賞

研究課題別研究評価

1. 研究課題名:

量子計算の実現に向けて

2. 研究者名:

竹内 繁樹

3. 研究のねらい:

量子計算の実現を目指した研究は、ここ数年で非常に活発化している。たとえば、半導体中の単一核スピンによる量子計算機の提案や、超伝導素子による単一キュビットの制御実験などである。しかし、それらはまだひとつのキュビットに対する操作の段階で、量子計算のアルゴリズムを実際にテストするための「テストベッド」としてはまだ用いることができないのが現状である。

延長期間では、「単一の量子を用いる、現状唯一のテストベッド」としての線形光学素子量子計算機の利点を生かして、量子計算で生じるエラー原因の究明や、他のアルゴリズムへの展開を図る。また現在のスーパーコンピュータを凌駕する「量子計算機」の実現に向け、光子－光子間の相関を用いた量子計算の実現にも取り組んでゆきたい。

具体的な項目として、以下の3課題について取り組むべく計画を行った。

- 「量子計算」において生じるエラーの原因究明と評価
- 線形光学素子量子計算機による計算経過の観測、誤り訂正の研究
- 光子－光子間相関を用いた量子計算の実現に向けた研究

4. 研究結果:

全体として、さきがけ研究において取り組んだ単一光子を用いた量子計算については、延長期間中においてエラーの完全な解析を行うことができた。また、延長期間中に併せて目指した、「複数の光子」への拡張については、基礎的検討にとどまったものの、今後の方向性を得ることができた。以下、各項目別に結果について述べる。

a. 「量子計算」において生じるエラーの原因究明と評価

場と反応における3年間の期間中に行った「単一光子量子計算」の実際の実験結果について、エラーの原因の究明と評価を行った。その結果、生じたエラーを、論理ゲートの誤動作(システムエラー)や位相緩和、誤検出などの諸要因ごとに定量的に分別することに成功した。また、規模を拡大した場合、11 量子ビット程度までであれば現有技術で 20%程度のエラー率にとどめられることを導いた。(原著論文 2, 3, 4)

b. 線形光学素子量子計算機による計算経過の観測、誤り訂正の研究

計算過程の観測や、誤り訂正を実現するには、光子を2つ以上を用い、かつそれらのあいだに量子もつれ合いを発生する何らかの方法を確立する必要がある。延長期間においては、複数の光子を同時に発生する方法についてさらに研究を進めた結果、高い確率(80%)で同時に発生することに成功した。(原著論文1)

c. 光子－光子間相関を用いた量子計算の実現に向けた研究

複数の光子のあいだでの制御ノットゲートの実現が、光子を用いた大規模な量子計算の実現のボト

ルネットワークとなっている。私は1995年にカリフォルニア工科大学において行われた実験やその後発表された理論を調査研究を行った。その結果、理論面では、入出力光子の量子状態の変化を記述できる理論がまだ存在しないこと、また、個体化を行わない限りは安定した動作は難しいことがわかった。現在、そのような理論、ならびに個体化に向けた予備実験に着手しつつある。

5. 自己評価:

この2年間は、前半に、場と反応で行った「線形光学素子量子計算実験」の詳細な解析とそれに基づく限界の把握を行った。後半が限界の打破に向けた次世代の研究のための予備的研究に費やされた。

延長期間開始時に目標に掲げたうち、「量子計算で生じるエラー原因の究明」については、ある程度十分な検討ができたと考えている。しかし、同時に掲げていた「単一光子を用いた線形光学素子量子計算の多のアルゴリズムへの展開」は行わなかった。前半に行った解析から、より「光子-光子間の相関を用いた量子計算」への道を歩むべきだと判断したためであるが、「単一光子と線形光学素子によるショアのアルゴリズムの実現」という選択肢もあったかも知れない。また、後半は「光子光子相関の実現」へと研究をシフトしたが、思うようには進まなかったと思う。

今後は、延長期間中の後半に試行錯誤し暖めたアイデアを元に、この手強い課題「複数の光子を用いた量子計算の実現」に対して着実に研究を進めたいと考えている。

6. 領域総括の見解:

追加研究期間の成果としては二つのものがある。本来の3年間で成功した単一光子量子計算についてのエラーの詳細分析と複数光子の同時発生である。現在のところ量子計算を遂行するための実験装置という意味では、量子状態が乱されるまでの時間、ディコヒーレンスタイムの長い光子を用いるものが有力であるが、エラーの詳細分析は将来の発展のために重要である。光子を用いる量子計算機では2光子の量子もつれ合いを発生させる技術はかかせないが、そのための第1歩が複数光子の同時発生で80%の確率で発生させることができたのは注目に値する。今後の研究の進展を見守りたい。

7. 主な論文等:

(特許、受賞、招待講演等)

英文原著論文

- 1 Shigeki Takeuchi・Beam like twin photon generation using type-II parametric down conversion・Optics Letters・Vol. 26・843-845・2001 年
- 2 Shigeki Takeuchi・A Simple Quantum Computer: Experimental Realization of Quantum Computation Algorithms with Linear Optics・Electronics and Communications in Japan・Vol. 84 no.3 ・52-59・2001
- 3 Shigeki Takeuchi・Experimental demonstration of a three-qubit quantum computation algorithm using a single photon and linear optics・Phys. Rev. A ・Vol.62 ・032301.1-4・2000 年
- 4 Shigeki Takeuchi・Analysis of errors in linear-optics quantum computation・Phys. Rev. A ・Vol.61・052302 .1-15・2000 年

解説・総説

1. 竹内繁樹、「量子情報デバイス」、機能材料、投稿済み
2. 竹内繁樹、「量子計算、量子暗号の現状と今後」、ESTRELA 10月号 2-10(2001)
3. 竹内繁樹、「量子計算、量子情報通信の未来と展望」、数理科学・No.456・64-69・2001 年
4. 竹内繁樹、「量子計算と量子情報通信 - 何が可能になるのか - 」、電子情報通信学会誌・Vol. 84 (1)・17-25・2001 年
5. 竹内繁樹、「光子を用いた量子計算」レーザー研究、第 28 巻第 10 号 (2000) p671-676

6. 竹内繁樹、「光量子ビットを用いた量子計算機」 光学 Vol.29 No.12 (2000) p745-750.
7. 竹内繁樹、「量子計算機」の現状と今後 情報処理, Vol 40, No.12 pp1192-1197(1999).
8. 竹内繁樹、井須俊郎「量子計算の実現に向けて」 応用物理, Vol 68, No.9 pp1038-1041(1999).

招待講演:

・海外(国際) 3件

1. Shigeki Takeuchi, Experiments on quantum computers, 2000 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID STATE DEVICES AND MATERIALS, 2000/8/27, sendai, Japan, invited.
2. Shigeki Takeuchi, Quantum Information Technology Using Photons, CLEO Pacific Rim 2001, 2001/7/15, Makuhari, Japan, invited.
3. Shigeki Takeuchi, Twin photon Beams for Single photon Generation, ISQM-Tokyo'01(The 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology), Hatoyama, Japan, invited.

・国内 8件

1. 竹内繁樹、量子コンピュータと光技術、レーザー学会、2001/1/31、東京、招待講演
2. 竹内繁樹、シンポジウム開催にあたって、物理学会「量子情報と物理」シンポジウム、2001/3/26、東京、シンポジウム講演
3. 竹内繁樹、量子計算の実験：最近の話題と光の量子状態制御、応用物理学会応用電子物性分科研究会、2001/1/18、招待講演
4. 竹内繁樹、光子を用いた量子情報処理、理研シンポジウム、2000/11/22、和光、招待講演
5. 竹内繁樹、量子暗号- その現状と課題 -, Optics Japan 2000、2000/10/7、北見、招待講演
6. Shigeki Takeuchi, Quantum computation using photons, NTT Work shop 2000/6/11、厚木、招待講演
7. 竹内繁樹、量子計算の実現にむけて -光子を用いた量子計算-、量子計算ワークショップ(広大)、2000/1/25、広島、招待講演
8. 竹内繁樹、光子を用いた量子計算、東北大学通研研究会「大規模量子コンピュータの実現に向けて」、2001/9/27、仙台、招待講演

特許 2件 (さががけより出願)

- ・ルーティング機能付き量子暗号装置
- ・低損失高速光変調器