

戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)
追跡評価用資料

研究領域
「情報社会を支える新しい
高性能情報処理技術」

研究総括: 田中 英彦

2014年5月

目次

| | |
|--|----|
| 要旨 | 1 |
| 第 1 章 追跡調査概要..... | 2 |
| 1.1 研究領域概要 | 2 |
| 1.1.1 戦略目標 | 2 |
| 1.1.2 本研究領域概要 | 2 |
| 1.1.3 研究総括..... | 2 |
| 1.1.4 領域アドバイザー | 2 |
| 1.1.5 研究課題および研究代表者 | 3 |
| 1.2 本研究領域終了後の進展と波及効果..... | 6 |
| 1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況..... | 6 |
| 1.2.2 研究成果の科学技術的および社会・経済的な波及効果..... | 6 |
| 1.3 本研究領域の展開状況（系譜図） | 7 |
| 第 2 章 追跡調査 | 8 |
| 2.1 追跡調査について..... | 8 |
| 2.1.1 調査の目的..... | 8 |
| 2.1.2 調査の対象..... | 8 |
| 2.1.3 調査の方法..... | 8 |
| 2.2 アウトプット概要..... | 10 |
| 2.2.1 研究助成金から見た研究の発展状況..... | 10 |
| 2.2.2 論文 | 18 |
| 2.2.3 特許 | 19 |
| 2.3 アウトカム | 34 |
| 2.3.1 科学技術的アウトカム | 34 |
| 2.3.2 社会・経済的アウトカム..... | 36 |
| 第 3 章 各研究課題の主な研究成果および波及効果..... | 37 |
| 3.1 2001 年度採択課題 | 37 |
| 3.1.1 全シリコン量子コンピュータの実現（伊藤 公平） | 37 |
| 3.1.2 超高速ペタバイト情報ストレージ（井上 光輝） | 40 |
| 3.1.3 超低電力化技術によるディペンダブルメガスケールコンピューティング（中島 浩） | 43 |
| 3.1.4 多相的分子インタラクションに基づく大容量メモリの構築（萩谷 昌己） .. | 47 |
| 3.2 2002 年度採択課題 | 51 |
| 3.2.1 検証における記述量爆発問題の構造変換による解決（木下 佳樹） | 51 |
| 3.2.2 ディペンダブル情報処理基盤（坂井 修一） | 54 |
| 3.2.3 フルーエンシ情報理論にもとづくマルチメディアコンテンツ記述形式（寅市 和 男） | 57 |

| | |
|---|----|
| 3.2.3 量子情報処理ネットワーク要素技術（武藤 俊一） | 60 |
| 3.3 2003 年度採択課題 | 63 |
| 3.3.1 自律連合型基盤システムの構築（加藤 和彦） | 63 |
| 3.3.2 ヒューマノイドのための実時間分散情報処理（松井 俊浩） | 68 |
| 3.3.3 ディペンダブルで高性能な先進ストレージシステム（横田 治夫） | 70 |
| 第 4 章 科学技術イノベーションに資する研究成果の状況 | 73 |
| 4.1 全シリコン量子コンピュータの実現（伊藤 公平） | 73 |
| 4.2 多相的分子インタラクションに基づく大容量メモリの構築（萩谷 昌己） | 75 |
| 4.3 ディペンダブルで高性能な先進ストレージシステム（横田 治夫） | 77 |

要旨

本資料は、CREST 研究領域「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術（2001 年～2008 年度）」において、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を明らかにし、独立行政法人科学技術振興機構（JST）事業及び事業運営の改善に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。

第一章は、研究領域の戦略目標、領域概要、研究総括、領域アドバイザー、研究課題と研究代表者を記載し、本研究領域終了後の進展と波及効果について概説した。

第二章は、追跡調査の目的、調査の対象、調査の方法（研究助成金、論文、特許）を記載し、各研究代表者のアウトプットの概要と、受賞歴や報道等から見た科学技術的および社会・経済的アウトカムの概要を記述した。

第三章は、本研究領域終了後の各研究課題の研究の継続と発展状況について、科学技術の進歩の貢献および社会・経済的な波及効果の観点から詳述した。

第四章は、科学技術イノベーションに資する研究成果を、本研究領域終了後に特筆すべき研究成果を挙げている研究者へのインタビューに基づき記述した。

この領域では、「量子コンピュータや分子コンピュータ等を含む新しい原理に基づく情報処理システム」、「従来型のコンピュータの性能を新しい時代に合わせて飛躍的に向上させる要素技術」、「従来システムの安全性や信頼性向上のための技術」、「大負荷に耐えられる大容量システム技術等に関する研究」の大きく 4 つの研究目標が設定された。研究目標として非常にチャレンジングなテーマであったが、物性力学や量子力学と情報処理の間に横たわる諸問題の解決に資する様々な研究が行われ、情報通信技術の範疇を超えて各分野においても意義のある成果が実現されている。追跡調査の結果、本領域で得られた研究成果は終了後も発展、深化されているのみならず、量子力学の理論における新たな発見や原子レベルでの観測技術の高度化につながっていることがわかった。また、大容量システム技術としても、ディペンダブルという観点からもストレージの技術に関する技術についても様々な取り組みがなされた。企業や海外の研究機関との連携が進んでいる事例も数多く見られ、さらなる研究の加速が期待される。

特に注目すべき研究成果としては、量子コンピュータとしての動作確認（伊藤公平）、DNA コンピュータの一部であるメモリ機能を実現した DNA インキ（萩谷 昌己）、検索処理をストレージ側で効率よく行うための技術開発（横田 治夫）が挙げられ、これらの研究者にはインタビューを実施し、概要をまとめた。

第 1 章 追跡調査概要

1.1 研究領域概要

1.1.1 戦略目標

「新しい原理による高速大容量情報処理技術の構築」

現行のコンピュータをベースとした情報処理技術は、ハードウェア・ソフトウェア共に飛躍的な進歩を遂げ、20 世紀における情報革命として社会の変革に多大な役割を果たしてきた。しかしながら、デバイスの微細化やアルゴリズム上の限界によりこれまでのペースでの性能・容量の向上は望めなくなっている。

一方、コミュニケーションの多様化に伴う通信・計算容量の増大や、立体映像データ処理や複雑系の解析を行うための高速演算の必要性等、高速大容量情報処理技術に対する社会的ニーズは依然として高く、これらのニーズに応じた技術の確立が喫緊の課題となっている。

このため、戦略目標として「新しい原理による高速大容量情報処理技術の構築」を設定し、量子コンピュータ、分子コンピュータ、ニューロコンピュータ等を含む新しい原理に基づく計算機構の探索を行うとともに、ノイマン型コンピュータにおいても全く新しい技術を導入し、新デバイスや通信技術も含めた高速大容量情報処理環境を構築するための要素技術を探求・確立することを目指す。

なお、本戦略目標の下で行われることが想定される研究としては、例えば、量子計算理論及び量子システムの探索・開発、生体工学と情報処理科学による新規原理・システム等の探索・開発等が考えられる。

1.1.2 本研究領域概要

この研究領域は、高速大容量情報処理に不可欠な新しい情報処理システムの実現に向け、その技術についてのハードウェア、ソフトウェアの研究を対象とする。

具体的には、量子コンピュータや分子コンピュータ等を含む新しい原理に基づく情報処理システム、従来型のコンピュータの性能を新しい時代に合わせて飛躍的に向上させる要素技術、従来システムの安全性や信頼性向上のための技術、大負荷に耐えられる大容量システム技術等に関する研究が含まれる。

1.1.3 研究総括

田中 英彦（情報セキュリティ大学院大学 役職 情報セキュリティ研究科長・教授）

1.1.4 領域アドバイザー

アドバイザーの選定に当たっては、この広い領域をカバーできるように、ポイントとなる専門を備えたそれぞれの第一人者で、過去経験の豊富な見識ある人々を選ぶことを考えた。また、大学の研究者のみならず、企業経験のある人々の視点も重要であるため、そういった観点からも選考（アドバイザーの内、小関、小柳、杉江、三浦各氏は、長期に渉る企業経験

がある)を行った。

また、課題評価の公正さをより一層高めること、および研究を取り巻く諸情勢に関する幅広い視野を評価に取り入れること等を目的に、産業界の現役のメンバを含む外部評価者を選考して、平成17年より評価に参加していただいた。更に、中間領域評価での意見を取り入れて、後期はメンバ数を増強し、より多くのメンバにご協力を頂いた。

表 1-1 領域アドバイザー

| 領域アドバイザー | 所属 | 役職 | 任期 |
|----------|---------------------|------------|------------------|
| 大蒔 和仁 | (独) 産業技術総合研究所 | 研究コーディネーター | 平成13年12月～平成21年3月 |
| 小関 健 | 上智大学 | 教授 | 平成13年12月～平成21年3月 |
| 喜連川 優 | 東京大学 | 教授 | 平成13年12月～平成21年3月 |
| 小柳 光正 | 東北大学 | 教授 | 平成13年12月～平成21年3月 |
| 杉江 衛 | 法政大学 | 教授 | 平成13年12月～平成21年3月 |
| 三浦 謙一 | 情報・システム研究機構 国立情報研究所 | 教授 | 平成13年12月～平成21年3月 |
| 村岡 洋一 | 早稲田大学 | 教授 | 平成13年12月～平成21年3月 |

(注) 所属と役職はプロジェクト終了時点

1.1.5 研究課題および研究代表者

研究課題(研究者)の公募は2001年度から3年間、3期にわたり、総計11件の研究課題を採択した。次ページ以降に各期の研究課題、研究代表者、採択当時の所属機関と役職、終了時の所属と役職並びに現在の所属と役職を示した。

表 1-2 研究課題と研究代表者

| 採択年度 | 研究課題 | 研究代表者 | 採択時の所属・役職 | 終了時の所属・役職 | 追跡調査時の所属・役職 |
|-------|----------------------------------|-------|--|--------------------------------------|--------------------------------|
| H13年度 | 全シリコン量子コンピュータの実現 | 伊藤 公平 | 慶應義塾大学工学部物理情報工学科 専任講師 | 慶應義塾大学 理工学部 助教授 | 慶應義塾大学 理工学部 教授 |
| H13年度 | 超高速ペタバイト情報ストレージ | 井上 光輝 | 豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学系文部科学 教官、教授 | 豊橋技術科学大学 研究専任教授 | 豊橋技術科学大学工学(系)研究科(研究院) 教授 |
| H13年度 | 超低電力化技術によるディペンダブルメガスケールコンピューティング | 中島 浩 | 豊橋技術科学大学工学部・情報工学系 教授 | 京都大学 学術情報メディアセンター 教授 | 京都大学 学術情報メディアセンター 教授 |
| H13年度 | 多相的分子インタラクションに基づく大容量メモリの構築 | 萩谷 昌己 | 東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学 専攻 教授 | 東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授 | 東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授 |
| H14年度 | 検証における記述量爆発問題の構造変換による解決 | 木下 佳樹 | (独) 産業技術総合研究所情報処理研究部門情報科学研究グループ グループ長 | (独) 産業技術総合研究所システム検証研究センター 研究センター長 | 神奈川大学理学部 教授 |
| H14年度 | ディペンダブル情報処理基盤 | 坂井 修一 | 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授 | 東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授 | 東京大学情報理工学系研究科電子情報学専攻 教授 |
| H14年度 | フルエンシ情報理論にもとづくマルチメディアコンテンツ記述形式 | 寅市 和男 | 筑波大学電子・情報工学系 教授 | 筑波大学 先端学際領域研究センター 特任教授 | 筑波大学システム情報工学研究科リスク工学専攻 名誉教授 |
| H14年度 | 量子情報処理ネットワーク要素技術 | 武藤 俊一 | 北海道大学大学院工学研究科 教授 | 北海道大学 大学院工学研究科 教授 | 北海道大学 大学院工学研究科 教授 |

| | | | | | |
|-----------|-------------------------|-------|--|--|---|
| H15年 度 | 自律連合型基盤システムの構築 | 加藤 和彦 | 筑波大学電子・情報工学系 助教授 | 筑波大学 大学院 システム情報工学 研究科 教授 | 筑波大学 大学院 システム情報工学 研究科 教授 |
| H15年 度 | ヒューマノイドのための実時間分散情報処理 | 松井 俊浩 | (独)産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター センター長代理 | (独)産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター 副センター長 | (独)産業技術総合研究所 研究コーディネータ (情報・エレクトロニクス分野) |
| H15年 度 | ディペンダブルで高性能な先進ストレージシステム | 横田 治夫 | 東京工業大学 学術国際情報センター 教授 | 東京工業大学 学術国際情報センター 教授 | 東京工業大学 学術国際情報センター 教授 |

1.2 本研究領域終了後の進展と波及効果

1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域は、量子コンピュータ、分子(DNA)コンピュータ、ホログラムによる光ディスク記録など研究開始当時だけでなく現在においても先端的なテーマを対象としたものである。情報通信分野では、近年応用分野における研究が圧倒的に多く、コンピュータアーキテクチャ、プロセッサ、メモリ、ストレージというようなシステムを構成する要素技術を対象とした基礎研究で先端的な成果を挙げている研究機関も限られており、米国の企業や研究機関が中心になっていることもあり、国内の研究者が新しい基礎研究テーマに対して取り組む機会はそれほど多くないため、貴重な機会であったと考えられる。

また、ソフトウェア面では、ディペンダブルコンピューティングとして、システムの信頼性や安全性を確保するために、フォールトトレラント(FT)システムとしての技術だけではなく、大負荷に耐えられる大容量システム技術に発展している。

1.2.2 研究成果の科学技術的および社会・経済的な波及効果

(1) 科学技術の進歩への貢献

新しいコンピュータアーキテクチャを実現するための技術として、半導体以外材料で実現する技術開発に力を入れたため、実験設備、計測機器や材料費などの費用が増加し、研究費が不足する事態になった。しかしながら、その結果、実用化に近いものや量子分野における新しい成果が生まれ、世界的にも評価されている。

また、情報システムの研究分野は、ハードウェアの試作、ソフトウェアの作成が重要である場合が多い。単なるアイデアから、それを実現する具体的なシステムとの間には大きなギャップが有り、また、膨大な研究労力を必要とする。そのため、あるアイデアに基づいて研究を進め具体的な成果を出すまでには長い時間を必要とすると同時に、その間に発表することの出来る論文数も限られる。これは、情報システム分野の論文数の絶対値がデバイス研究に比して著しく少ない原因である。

(2) 社会・経済的波及効果

情報通信分野における研究開発は、応用分野における研究が圧倒的に多く、アプリケーションや製品化を想定したものが多い。本プロジェクトでは、以下のテーマについては、その後、企業との共同研究により高度化、製品化につながったケースがある。

- 超高速ペタバイト情報ストレージ
- 多相的分子インタラクションに基づく大容量メモリの構築
- フルーエンシ情報理論にもとづくマルチメディアコンテンツ記述形式

一方で、新しいアーキテクチャに基づくコンピュータなど先端的なテーマを対象とする基礎研究については、サイエンスの分野に近い分野となっている。そのため、すぐに経済的波及効果に現れるものではない。しかしながら、世界的にも同時に研究が行われている分野で

第 2 章 追跡調査

2.1 追跡調査について

2.1.1 調査の目的

追跡調査は、本研究領域終了から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を明らかにし、JST の事業及び事業運営の改善に資するために行うもので、本研究領域終了後の研究代表者の研究課題の発展状況等を調査した。

2.1.2 調査の対象

本追跡調査は、CREST 研究領域「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術（2001 年～2008 年度）」の研究代表者全員を対象とした。採択研究者は、2001 年度採択 4 名、2002 年度採択 4 名、2003 年度採択 3 名であり、いずれも研究期間は 5 年間であった。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

| | CREST 期間 | CREST 終了後調査対象期間 | 研究課題数 |
|-------|------------------------|-----------------------|-------|
| 第 1 期 | 2001 年 12 月～2007 年 3 月 | 2007 年 4 月～2013 年 9 月 | 4 |
| 第 2 期 | 2002 年 12 月～2008 年 3 月 | 2008 年 4 月～2013 年 9 月 | 4 |
| 第 3 期 | 2003 年 12 月～2009 年 3 月 | 2009 年 4 月～2013 年 9 月 | 3 |

2.1.3 調査の方法

(1) 研究助成金

本研究領域終了以降に、研究代表者が代表で獲得した外部研究資金を調査した。対象とした外部研究資金と調査方法は以下の通りである。

① 科研費

KAKEN 科学研究費助成事業データベース¹から、研究代表者が代表となっている研究課題を検索した。さらに、CREST 研究の規模から継続・発展が図られているという観点から大型（1 千万円／件 以上）のものを抽出した。

② JST 事業

JST ホームページ²のサイト内検索で研究代表者の情報を検索し、プロジェクト終了後に研究代表者が代表となって採択された事業もしくはプロジェクトを抽出した。

¹ <http://kaken.nii.ac.jp/>

² <http://www.jst.go.jp/>

③NEDO プロジェクト

NEDO ホームページ³のサイト内検索、および成果報告書データベース⁴から、研究代表者の情報を検索し、本研究領域終了以降に代表者（プロジェクトリーダー）を務めているプロジェクトを抽出した。

④最先端・次世代研究開発支援プログラム

最先端研究開発支援プログラムホームページ⁵および、最先端・次世代研究開発支援プログラムホームページ⁶から、研究代表者の採択実績を確認した。

⑤厚生労働科学研究費補助金

厚生労働科学研究費補助金のデータベース⁷から、研究代表者が代表となっている研究課題を検索した。さらに、CREST 研究の規模から継続・発展が図られているという観点から大型（1千万円／件 以上）のものを抽出した。

⑥その他

公益財団法人助成財団センター採択課題データベース⁸から、研究代表者が代表となっている研究課題を検索した。

また、JST の研究者データベース「ReaD&Researchmap⁹」を活用して、研究者代表者の情報を検索し、上記①～⑤の調査で抜け漏れがあった場合、情報の追加を行った。

(2) 論文

本研究領域期間中および本研究領域終了後の研究代表者の発表論文について Web of Science で検索を行った。論文抽出は、は著者名＋所属機関（採択時点／本研究領域終了時点／現時点）で検索を行った後、研究代表者の論文かどうかを論文題名を目視で確認することにより、絞り込みを行った。また、研究終了報告書に記載のある論文で、上記の検索方法で抽出されなかった論文については、リストに加えた。

次に、本研究領域期間中および本研究領域終了以降の論文数を求めた。対象は Article と Review に絞り込み、さらに本研究領域終了以降の論文については、研究代表者が筆頭著者（First Author）もしくは責任著者（Last Author）となっている論文の数を求めた。各論文については、被引用数の調査も行った。

³ <http://www.nedo.go.jp>

⁴ http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html

⁵ <http://first-pg.jp/about-us/about-30.html>

⁶ <http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/jisedai/saitakuichiran.pdf>

⁷ <http://mhlw-grants.niph.go.jp/niph/search/NIST00.do>

⁸ http://www.jfc.or.jp/search/ap_search.php

⁹ <http://researchmap.jp/search/>

(3) 特許

本研究領域期間中の出願特許の成立および海外出願の状況と、本研究領域終了以降の国内・海外出願特許について調査した。検索は特許データベース FOCUST (Wisdomain 社)¹⁰を用いて行った。当該データベースでは、研究者名で検索することにより、上記の必要な情報を一覧として得ることができる。

2.2 アウトプット概要

2.2.1 研究助成金から見た研究の発展状況

研究発展状況を把握するために、本研究領域終了後にどれだけ外部資金を獲得しているかを把握することは非常に重要である。当該領域の代表研究者の外部資金獲得状況を表 2-2 に示す。

本研究領域においては、科研費と共に NEDO の研究資金を獲得している研究代表者が多いことが特徴的である。また、木下佳樹、坂井修一は継続して CREST の研究代表者を務めている。

井上光輝は、科研費基盤研究(S)「ナノ構造高次元磁性フォトニック結晶の形成とスピン依存線形・非線形光機能」で総額 1 億円を超える大型プロジェクトを行っている。また、萩谷昌己は、科研費新学術領域研究(研究領域提案型)「構造化ゲルと化学反応場の協働による運動創発」で 1.5 億円のプロジェクトを行っている。

¹⁰ <http://focustj.wisdomain.biz/Mitsubishi-Antlia/>

表 2-2 研究代表者のプロジェクト終了後の外部資金獲得状況

【H13 年度採択】

| 研究代表者 | 研究費名称 | 研究テーマ名 | 開始年度 | 終了(予定)年度 | 実施期間 | | | | | | | | | | | | 金額(百万円) | |
|-------|-----------------------------|---|------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|------|
| | | | | | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | | 2013 |
| | | | | | 期間中 | | | | | 終了後 | | | | | | | | |
| 伊藤 公平 | 科研費 基盤研究(A)→基盤研究(A) | シリコン中のエンタングルメント及び量子ホログラフィックメモリー動作に関する研究 | 2010 | 2014 | | | | | | | | | | | | | 46.02 | |
| | 科研費 基盤研究(B) | 次世代ゲート絶縁膜における不純物とシリコンの相互拡散 | 2004 | 2006 | | | | | | | | | | | | | 14.70 | |
| | 科研費 特定領域研究 | スピントロニクス量子操作研究調整班 | 2002 | 2005 | | | | | | | | | | | | | 15.60 | |
| | 科研費 特定領域研究 | 核スピンおよび電子スピン量子ビットの作製と量子操作の実現 | 2002 | 2005 | | | | | | | | | | | | | 43.00 | |
| | 科研費 基盤研究(B) | 高純度 ²⁸ Si 同位体単結晶の成長と評価 | 2001 | 2002 | | | | | | | | | | | | | 13.20 | |
| | NEDO 「スピントロニクス不揮発性機能プロジェクト」 | 不揮発性機能素子の可能性 ノーマリー・オフ・コンピュータの実現を目指して | 2008 | 2008 | | | | | | | | | | | | | - | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|---|------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------|--------|
| 伊藤 公平 | NEDO「若手研究 研究 Grant」 | 世代半導体Geチャ ネルを利用した 超低消費電力スピ ントランジスタの 開発 | 2011 | 2011 | | | | | | | | | | | | | | - | |
| 井上 光輝 | 科研費 基 盤研究(A)→ 基盤研究(A) | マグノニック結晶 のスピソ波制御機 能と室温超高感度 磁界センサへの応 用 | 2011 | 2014 | | | | | | | | | | | | | | 49.92 | |
| | 科研費 基 盤研究(S) | ナノ構造高次元磁 性フォトニック結 晶の形成とスピソ 依存線形・非線形光 機能 | 2005 | 2009 | | | | | | | | | | | | | | 112.06 | |
| | 科研費 基 盤研究(A) | ナノスケールで構 造を制御した高次 元磁性フォトニッ ク結晶の形成と線 形・非線形光機能 | 2002 | 2004 | | | | | | | | | | | | | | 54.08 | |
| | 科学技術試 験研究委託 費「ナノテクノロ ジ-材料を中心とした融 合新興分野 研究開発」 | ナノ構造磁性フォ トニック結晶を用 いた超光情報メモ リ(ナノ構造磁性フ ォトニック結晶を 用いた超高速光位 相変調デバイスに 関する研究) | 2005 | 2009 | | | | | | | | | | | | | | | 615.53 |
| | 科学技術振 興調整費 (戦略的創 造研究推進 事業) | 超高速ペタバイト 情報ストレージ | 2001 | 2006 | | | | | | | | | | | | | | | 265.26 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|------------------------|--|------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------|
| 井上 光輝 | 国再委託(文部科学省)知的クラスター創成事業 | 浜松地域オプトロニクスクラスター構想 | 2007 | 2011 | | | | | | | | | | | | | | 428.65 |
| | 産学官連携イノベーション創出事業費補助金 | 大学等発ベンチャー創出支援制度「超高速固体オブティカル・クロスコネクタ装置」 | 2004 | 2004 | | | | | | | | | | | | | | 50.70 |
| 中島 浩 | 科研費 基盤研究(B)→基盤研究(B) | 時空間タイリングによる高性能シミュレーションコードの生成 | 2011 | 2013 | | | | | | | | | | | | | | 19.11 |
| | 文部科学省 | シームレス高生産・高性能プログラミング環境/高生産並列スクリプト言語に関する研究 | 2008 | 2011 | | | | | | | | | | | | | | 143.46 |
| | 科研費 基盤研究(B) | 並列化技法ライブラリとその構築技術 | 2008 | 2010 | | | | | | | | | | | | | | 19.11 |
| | 科研費 特定領域研究 | 高性能計算の高精度モデル化技術 | 2007 | 2008 | | | | | | | | | | | | | | 10.80 |
| | 科研費 特定領域研究 | 高性能計算の高精度モデル化技術 | 2006 | 2006 | | | | | | | | | | | | | | 5.30 |
| | 科研費 萌芽研究 | 計算再利用と投機実行のためのプログラム変換方式の研究 | 2006 | 2008 | | | | | | | | | | | | | | 2.90 |
| | 科研費 基盤研究(B) | 高度情報機器開発のための高性能並列シミュレーションシステム | 2005 | 2007 | | | | | | | | | | | | | | 15.05 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------------------------------|---|------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------|
| 萩谷 昌己 | 科研費 新 学術領域研 究(研究領域 提案型) | 分子ロボティクス の支援と広報 | 2012 | 2017 | | | | | | | | | | | | | | 15.99 |
| | 科研費 新 学術領域研 究(研究領域 提案型) | 構造化ゲルと化学 反応場の協働によ る運動創発 | 2012 | 2017 | | | | | | | | | | | | | | 150.67 |
| | 科研費 基 盤研究(A)→ 基盤研究(A) | クラウドコンピュ ーティングミドル ウェアのソフトウ ェアモデル検査手 法 | 2011 | 2016 | | | | | | | | | | | | | | 29.90 |
| | 科研費 基 盤研究(B) | 分子ダイアル錠と ナノケージ | 2008 | 2010 | | | | | | | | | | | | | | 18.59 |
| | 科研費 特 定領域研究 | 分子プログラミン グ | 2002 | 2007 | | | | | | | | | | | | | | 54.50 |
| | 科研費 特 定領域研究 | 形態変化する分子 を用いた並行計算 と分散計算 | 2002 | 2006 | | | | | | | | | | | | | | 124.20 |

【H14 年度採択】

科研費
JST
NEDO
その他

| 研究代表者 | 研究費名称 | 研究テーマ名 | 開始年度 | 終了 (予定) 年度 | 実施期間 | | | | | | | | | | | | 金額 (百万円) | |
|-------|---|--|------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|-------|
| | | | | | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | | 2013 |
| | | | | | - | 期間中 | | | | | 終了後 | | | | | | | |
| 木下 佳樹 | JST CREST 「実用化を 目指した組 込みシステ ム用ディペ ンダブル・オ ペレーティ ングシステ ム」 | 利用者指向ディ ペンダビリティの研究 | 2008 | 2012 | | | | | | | | | | | | | | - |
| 坂井 修一 | 科研費 基 盤研究(B)→ 基盤研究(B) | 超セキュアプロセ ッサに関する研究 | 2010 | 2013 | | | | | | | | | | | | | | 18.20 |
| | 科研費 基 盤研究(B) | 次世代マイクロ プロセッサ向け省電 力方式の研究 | 2004 | 2006 | | | | | | | | | | | | | | 14.80 |
| | JST CREST 「ディペン ダブル VLSI システムの 基盤技術」 | アーキテクチャと 形式的検証の協調 による超ディペン ダブル VLSI | 2007 | 2011 | | | | | | | | | | | | | | - |
| 寅市 和男 | 該当なし | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 武藤 俊一 | 科研費 基 盤研究(B) | 量子ドットでの核 スピン光配向によ る量子情報処理の 研究 | 2006 | 2007 | | | | | | | | | | | | | | 14.99 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------|----------------------------|------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|
| 武藤 俊一 | 科研費 特定領域研究 | 量子ドットの電子スピン光操作による量子演算の研究 | 2002 | 2005 | | | | | | | | | | | | | | 19.70 |
| | 科研費 基盤研究(B) | 量子ドットにおける電子スピンのコヒーレント制御の研究 | 2002 | 2003 | | | | | | | | | | | | | | 17.10 |

【H15 年度採択】

| 研究代表者 | 研究費名称 | 研究テーマ名 | 開始年度 | 終了(予定)年度 | 実施期間 | | | | | | | | | | | | | 金額(百万円) | |
|-------|---------------------|-------------------------------------|------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|--------|
| | | | | | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | | |
| | | | | | - | - | 期間中 | | | | | 終了後 | | | | | | | |
| 加藤 和彦 | 科振費 重要課題解決型研究等の推進 | 高セキュリティ機能を実現する次世代 OS 環境の開発 | 2006 | 2008 | | | | | | | | | | | | | | | 283.47 |
| | 科研費 基盤研究(B) | 高水準なポリシー記述を可能にするアクセス制御機能 | 2008 | 2009 | | | | | | | | | | | | | | | 17.81 |
| | 総務省 SCOPE | ディペンダブルな自律連合型クラウドコンピューティング基盤の研究開発 | 2009 | 2011 | | | | | | | | | | | | | | | 36.43 |
| | 科研費 基盤研究(B)→基盤研究(B) | 仮想計算環境のためのプログラミングシステム・フレームワークに関する研究 | 2010 | 2012 | | | | | | | | | | | | | | | 17.94 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|-----------------------------------|------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|
| 加藤 和彦 | 総務省 先進的アプリケーション開発推進事業 | 耐災害性を有するクラウド型遠隔代替稼働システムの開発 | 2013 | 2013 | | | | | | | | | | | | | | 12.93 |
| 松井 俊浩 | NEDO「産業技術電子・情報通信ネットワーク」 | グリーンネットワーク・システム技術研究開発プロジェクト | 2008 | 2012 | | | | | | | | | | | | | | - |
| 横田 治夫 | 科研費 基盤研究(A)→基盤研究(A) | 電力消費を制御するスケーラブルな情報の蓄積と検索 | 2010 | 2013 | | | | | | | | | | | | | | 49.66 |
| | 科研費 特定領域研究 | 大量非構造データ間の概念構造を考慮した論理的検索ビューに関する研究 | 2007 | 2008 | | | | | | | | | | | | | | 11.00 |
| | 科研費 特定領域研究 | 教育的コンテンツを対象とした高度情報統合・配信に関する研究 | 2004 | 2005 | | | | | | | | | | | | | | 11.90 |

2.2.2 論文

論文発表件数は研究者の研究活動を示す重要な指標であるため、研究代表者について本研究領域期間中の論文数と終了後の論文数とを調査した。研究期間終了後については、研究代表者が筆頭著者（First Author）もしくは責任著者（Last Author）となっている論文の数を求めた。検索はいずれも2013年10月に実施した。

本研究領域期間中の発表論文数は全体で268報、期間後の発表論文数は343報であった。また、期間後発表論文のうち、責任著者となっている論文は216報であった。

期間中の論文数では、井上 光輝は93報と多くの論文発表を行っている。伊藤 公平も57報と次に多い。期間終了後もその2名が100報を超える論文を発表しており、論文数として突出している。

表 2-3 研究代表者の論文発表状況

| 採択年度 | 研究課題 | 研究代表者 | 期間中の論文数 | 終了後の論文数 | 終了後の責任著者数 |
|-----------|----------------------------------|-------|---------|---------|-----------|
| H13 年度 | 全シリコン量子コンピュータの実現 | 伊藤 公平 | 57 | 112 | 52 |
| | 超高速ペタバイト情報ストレージ | 井上 光輝 | 93 | 137 | 100 |
| | 超低電力化技術によるディペンダブルメガスケールコンピューティング | 中島 浩 | 6 | 6 | 0 |
| | 多相的分子インタラクションに基づく大容量メモリの構築 | 萩谷 昌己 | 22 | 9 | 5 |
| H14 年度 | 検証における記述量爆発問題の構造変換による解決 | 木下 佳樹 | 0 | 0 | 0 |
| | ディペンダブル情報処理基盤 | 坂井 修一 | 4 | 7 | 4 |
| | フルエンシ情報理論にもとづくマルチメディアコンテンツ記述形式 | 寅市 和男 | 13 | 4 | 1 |
| | 量子情報処理ネットワーク要素技術 | 武藤 俊一 | 34 | 25 | 17 |
| H15 年度 | 自律連合型基盤システムの構築 | 加藤 和彦 | 19 | 33 | 32 |
| | ヒューマノイドのための実時間分散情報処理 | 松井 俊浩 | 13 | 5 | 0 |
| | ディペンダブルで高性能な先進ストレージシステム | 横田 治夫 | 7 | 5 | 5 |
| 合計 | | | 268 | 343 | 216 |

2.2.3 特許

特許出願件数・登録件数は研究開発が応用に向けて進展していることを表す一つの指標であると考えられるため、本研究領域期間中と終了後の状況について調査し、下表に示した。

本研究領域期間中の研究代表者の特許出願は国内 93 件、海外 16 件であった。成立件数(期間中に出願した特許のうち、現時点で特許登録されている件数)は、国内 46 件、海外 13 件であった。期間中では、井上 輝、寅市 和男、横田 治夫が 10 件以上の特許を出願している。寅市、横田は国内登録件数が 10 件以上と多いことも特筆すべきである。

本研究領域終了後の特許出願は、国内 74 件、海外 23 件であり、うち国内 39 件、海外 6 件が特許として成立している。プロジェクト終了後も井上、寅市による特許出願が活発に行われている。寅市においては、26 件の出願のうち 24 件が特許化されており、海外登録も 2 件存在する。

表 2-4 研究代表者の特許出願・登録状況

| 採択年度 | 研究代表者 | プロジェクト期間中 | | | | プロジェクト終了後 | | | |
|--------|-------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| | | 国内 出願 | 海外 出願 | 国内 登録 | 海外 登録 | 国内 出願 | 海外 出願 | 国内 登録 | 海外 登録 |
| H13 年度 | 伊藤 公平 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 井上 輝 | 31 | 6 | 5 | 6 | 24 | 3 | 8 | 2 |
| | 中島 浩 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 萩谷 昌己 | 2 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| H14 年度 | 木下 佳樹 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 坂井 修一 | 4 | 0 | 1 | 0 | 4 | 1 | 3 | 1 |
| | 寅市 和男 | 18 | 4 | 13 | 2 | 26 | 16 | 24 | 2 |
| | 武藤 俊一 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H15 年度 | 加藤 和彦 | 9 | 4 | 5 | 4 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| | 松井 俊浩 | 2 | 0 | 2 | 0 | 6 | 0 | 2 | 0 |
| | 横田 治夫 | 21 | 0 | 16 | 0 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 合計 | | 93 | 16 | 46 | 13 | 74 | 23 | 39 | 6 |

表 2-5 研究代表者の期間中・終了後の成立特許

【H13 年度採択】

● 伊藤 公平

| 出願番号 | 公開番号 | 特許番号 | 発明者／考案者 | 出願人／権利者 | 発明の名称 | 国際出願番号 | 国際公開番号 | 海外での成立 |
|-------------------|-------------------|---------------|-----------------|--------------|--|--------|--------------|----------------|
| 特願 2006-137251 | 特開 2007-311444 | 特許 5004072 | 伊藤 公平, 清水 康雄 | 学校法人慶應 義塾 | イオン照射効果評価方法、 プロセスシミュレータ及び デバイスシミュレータ | | US2007267572 | US7800053 (B2) |

● 井上 光輝

| 出願番号 | 公開番号 | 特許番号 | 発明者／考案者 | 出願人／権利者 | 発明の名称 | 国際出願番号 | 国際公開番号 | 海外での成立 |
|-------------------|------------------|---------------|--|--|----------------------|--------------|--|----------------|
| 特願 2011-503774 | 再公表 10-103952 | | 井上 光輝 林 攀梅, 堀米 秀嘉 | 国立大学法 人豊橋技術 科学大学; 有限会社ホ ーリーマイ ン | 立体画像投影装置 | W02010103952 | EP2407813, EP2407813, KR20110127719, TW201040654, US2012062968 | EP2407813 (B1) |
| 特願 2009-524492 | 再公表 09-014133 | 特許 4792526 | 池田 順一, 森下 暢也, 新井 亮, 片平 知里, 高谷 佳弘, 横内 鋼三 郎, 井上 光輝, 林 攀梅 | 共栄社化学 株式会社; 国立大学法 人豊橋技術 科学大学 | ホログラフィック記録媒体 用組成物 | W02009014133 | CN101971106, EP2177956, EP2177956, KR20100057603, TW200922962, US2010128589 | US8383295 (B2) |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|--|---|-----------------------------|--|--|--|
| 特願 2007-133499 | 特開 2008-287823 | 特許 5298267 | 堀米 秀嘉, 井上 光輝, 林 攀梅 | 新オプトウ エア株式会 社; 国立大 学法人豊橋 技術科学大 学 | 光情報再生装置及び再生方 法 | | | |
| 特願 2007-075600 | 特開 2008-234787 | 特許 4697813 | 堀邊 隆介, 平野 敦也, 長島 賢治, 井上 光輝, 林 攀梅, 井村 智和 | 船井電機株 式会社; 国 立大学法人 豊橋技術科 学大学; F DK株式会 社 | ホログラム記録再生装置お よびホログラム記録装置 | | | |
| 特願 2007-075599 | 特開 2008-234786 | 特許 4697812 | 堀邊 隆介, 平野 敦也, 長島 賢治, 井上 光輝, 林 攀梅, 井村 智和 | 船井電機株 式会社; 国 立大学法人 豊橋技術科 学大学; F DK株式会 社 | ホログラム記録再生装置お よびホログラム記録装置 | | | |
| 特願 2007-035365 | 特開 2008-197575 | 特許 5099745 | 堀邊 隆介, 平野 敦也, 長島 賢治, 井上 光輝, 林 攀梅, 井村 智和 | 船井電機株 式会社; 国 立大学法人 豊橋技術科 学大学; F DK株式会 社 | ホログラム装置およびホロ グラム記録装置 | | | |
| 特願 2007-035364 | 特開 2008-197574 | 特許 5099744 | 堀邊 隆介, 平野 敦也, 長島 賢治, 井上 光輝, 林 攀梅, 井村 智和 | 船井電機株 式会社; 国 立大学法人 豊橋技術科 学大学; F DK株式会 社 | ホログラム装置およびホロ グラム記録装置 | | | |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|--|---|---------------------------------|---|---|--|
| 特願 2007-035363 | 特開 2008-197573 | 特許 5099743 | 堀邊 隆介, 平野 敦也, 長島 賢治, 井上 光輝, 林 攀梅, 井村 智和 | 船井電機株 式会社; 国 立大学法人 豊橋技術科 学大学; F DK株式会 社 | ホログラム装置およびホロ グラム記録装置 | | | |
| 特願 2006-024512 | 特開 2007-205844 | 特許 4961548 | 西村 一寛, 井上 光輝 | 国立大学法 人豊橋技術 科学大学 | 加速度評価装置 | | | |
| 特願 2004-061557 | 特開 2005-248267 | 特許 4117022 | 藤田 直幸, 井上 光輝 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | F e - C e - O グラニューラ 薄膜の製造方法 | | | |
| 特願 2003-280674 | 特開 2005-049187 | 特許 4430354 | 内田 裕久, 井上 光輝, 金 熙濬 | 金 熙濬; 内田 裕久 | 走査型トンネル顕微鏡の探 針位置制御機構 | | | |
| 特願 2003-092757 | 特開 2005-017311 | 特許 4427635 | 杉山 晃也, 井上 光輝, 申 東鶴, 益田 斉 | ペガサスネ ット株式会 社; 株式会 社 ティ エス フォ トン | オプティカルクロスコネク ト装置 | C423617, CN1449150, EP1351541, EP1351541, US2003185494, US2005249456 | CN100426712 (C), US6947626 (B2), US7013060 (B2) | |
| 特願 2003-084158 | 特開 2004-294579 | 特許 3920799 | 井上 光輝, ジャエヒュ ック パク | 独立行政法 人 科学技 術振興機構 | 空間光変調器及びその空間 光変調器の製造方法 | | | |
| 特願 2002-304866 | 特開 2003-315756 | 特許 3982685 | 井上 光輝, ジャエヒュ ック パク | 科学技術振 興事業団 | 空間光変調器 | | | |
| 特願 2001-370613 | 特開 2003-172909 | | 井上 光輝, 趙 在慶 | 株式会社オ プトウエア | 空間光変調器 | KR20030045629, US2004036947 | US6762872 (B2) | |
| 特願 2001-370612 | 特開 2003-172908 | | 井上 光輝, 趙 在慶 | 株式会社オ プトウエア | 空間光変調器 | KR20030045628, US2004036948 | US6788448 (B2) | |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|--|------------------------------------|--|-------------------|--------------|--|----------------|
| 特願 2001-117244 | 特開 2002-311403 | | 松下 毅, 井上 光輝, 加藤 英樹, 高山 昭夫 | ミネベア株 式会社 | ファラデー回転子 | | US2002149832 | US6785037 (B2) |
| 特願 2001-112826 | 特開 2002-311402 | | 松下 毅, 井上 光輝, 加藤 英樹, 高山 昭夫 | ミネベア株 式会社 | ファラデー回転子 | | US2002149831 | US6590694 (B2) |
| 特願 2001-118523 | 特開 2002-311387 | | 松下 毅, 井上 光輝, 加藤 英樹, 高山 昭夫 | ミネベア株 式会社 | 多段反射型ファラデー回転 子 | | US2002149833 | US6678092 (B2) |
| 特願 2011-503774 | 再公表 10-103952 | | 井上 光輝, 林 攀梅, 堀米 秀嘉 | 国立大学法 人豊橋技術 科学大学; 有限会社ホ ーリーマイ ン | 立体画像投影装置 | W02010103952 | EP2407813, EP2407813, KR20110127719, TW201040654, US2012062968 | EP2407813 (B1) |

● 中島 浩

| 出願番号 | 公開番号 | 特許番 号 | 発明者/考案 者 | 出願人/権利 者 | 発明の名称 | 国際出願番号 | 国際公開番号 | 海外での成立 |
|-------------------|-------------------|---------------|-------------|--------------------------|--|--------|--------------|----------------|
| 特願 2003-384971 | 特開 2005-149078 | 特許 3955843 | 中島 浩 | 株式会社半導 体理工学研究 センター | マイクロプロセッサの並列 シミュレーションシステム | | | |
| 特願 2002-238396 | 特開 2004-078599 | 特許 4243463 | 中島 浩 | 株式会社半導 体理工学研究 センター | 命令スケジューリングのシ ミュレーション方法とシミ ュレーションシステム | | US2004034852 | US7885806 (B2) |

● 萩谷 昌己

(該当なし)

【H14 年度採択】

- 木下 佳樹

(該当なし)

● 坂井 修一

| 出願番号 | 公開番号 | 特許番号 | 発明者／考案者 | 出願人／権利者 | 発明の名称 | 国際出願番号 | 国際公開番号 | 海外での成立 |
|-------------------|-------------------|---------------|--|--------------------------|---------------------------------|--------|--------------|----------------|
| 特願 2008-284574 | 特開 2010-113470 | 特許 5181127 | 塩谷 亮太, 五島 正裕, 坂井 修一 | 株式会社半導 体理工学研究 センター | 半導体集積回路 | | | |
| 特願 2009-067407 | 特開 2010-102679 | 特許 4669053 | 勝沼 聡, 五島 正裕, 入江 英嗣, 塩谷 亮太, 坂井 修一 | 株式会社半導 体理工学研究 センター | 情報処理装置、情報処理方法及びこれを実現させるためのプログラム | | US2010083379 | US8413240 (B2) |
| 特願 2007-339774 | 特開 2009-164733 | 特許 5212934 | 坂井 修一, 廣瀬 健一, 萬澤 康雄, 五島 正裕 | 国立大学法人 東京大学 | 集積回路装置 | | | |
| 特願 2005-128312 | 特開 2006-309335 | 特許 3795055 | 田代 大輔, 坂井 修一 | 株式会社半導 体理工学研究 センター | 値予測装置、マルチプロセスシステムおよび値予測方法 | | | |

● 寅市 和男

| 出願番号 | 公開番号 | 特許番号 | 発明者／考案者 | 出願人／権利者 | 発明の名称 | 国際出願番号 | 国際公開番号 | 海外での成立 |
|-------------------|------------------|---------------|---------------------------|------------------------|--|--------------|--|--------|
| 特願 2010-517838 | 再公表 09-157280 | 特許 5224219 | 寅市 和男, 中村 光晃, 諸岡 泰男 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | オーディオ信号圧縮装置、オーディオ信号圧縮方法、オーディオ信号復号装置及びオーディオ信号復号方法 | W02009157280 | EP2306453, EP2306453, US2011106547 | |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------|---|--|
| 特願 2008-334400 | 特開 2010-157859 | 特許 4744593 | 寅市 和男 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 画像処理装置、方法および プログラム | | | |
| 特願 2008-334955 | 特開 2010-157094 | 特許 4767313 | 寅市 和男, 亀山 啓輔, 平野 華世 子 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 画像処理装置、方法および プログラム | | | |
| 特願 2008-334401 | 特開 2010-156793 | 特許 4889718 | 寅市 和男 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 信号処理装置、方法および プログラム | | | |
| 特願 2008-310841 | 特開 2010-136168 | 特許 4693895 | 寅市 和男 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 画像処理装置および方法 | W02010058735 | | |
| 特願 2008-305828 | 特開 2010-130599 | 特許 4531835 | 寅市 和男, 李 佳, 大宮 康宏 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 画像処理装置および方法 | W02010058735 | | |
| 特願 2008-305829 | 特開 2010-128406 | 特許 4864070 | 寅市 和男 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 信号処理装置および方法 | | | |
| 特願 2008-297487 | 特開 2010-124346 | 特許 4650958 | 寅市 和男, 李 佳 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 画像処理装置、方法および プログラム | W02010058735 | | |
| 特願 2008-284443 | 特開 2010-114583 | 特許 5014312 | 寅市 和男 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 離散信号の実時間補間装置 および方法 | | | |
| 特願 2008-259780 | 特開 2010-093433 | 特許 5036677 | 寅市 和男 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 可変特性型信号変換装置お よび方法 | W02009133948 | EP2299368, EP2299368, US2011058686, US2012033830 | |
| 特願 2008-259410 | 特開 2010-093412 | 特許 4823290 | 寅市 和男, 李 佳, 大宮 康宏 | 独立行政法人科学技術 振興機構 | 画像編集装置 | | | |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|--|------------------------|---|--------------|--|--|
| 特願 2008-227630 | 特開 2010-062957 | 特許 5042172 | 寅市 和男, 大宮 康宏 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | 動画処理装置及び動画処理 方法 | W02010026839 | CN102187664, EP2330817, EP2330817, US2011188583 | |
| 特願 2008-227629 | 特開 2010-062956 | 特許 5042171 | 寅市 和男, ジョナ ガ ンバ, 大宮 康宏 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | フィルタリング処理装置及 びフィルタリング処理方法 | W02010026839 | CN102187664, EP2330817, EP2330817, US2011188583 | |
| 特願 2008-227628 | 特開 2010-062955 | 特許 5081109 | 寅市 和男, 武 徳安, 大宮 康宏 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | 映像信号変換システム | W02010026839 | CN102187664, EP2330817, EP2330817, US2011188583 | |
| 特願 2008-227627 | 特開 2010-062954 | 特許 4743449 | 寅市 和男, 武 徳安, ジョナ ガ ンバ | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | 対応点推定装置、対応点推 定方法及び対応点推定プロ グラム | W02010026838 | CN102187665, EP2330818, EP2330818, US2011187924 | |
| 特願 2008-227626 | 特開 2010-062953 | 特許 4931884 | 寅市 和男, 武 徳安, ジョナ ガ ンバ, 大宮 康宏 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | フレームレート変換装置、 フレームレート変換方法及 びフレームレート変換プロ グラム | W02010026838 | CN102187665, EP2330818, EP2330818, US2011187924 | |
| 特願 2008-226554 | 特開 2010-062879 | 特許 4832487 | 寅市 和男, 李 佳, 大宮 康宏 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | 画像処理装置、方法および プログラム | | | |
| 特願 2008-183043 | 特開 2010-021959 | 特許 4989575 | 寅市 和男, 諸岡 泰男 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | フィルタ及びフィルタの構 成方法 | | | |
| 特願 2008-151982 | 特開 2009-302664 | 特許 4968850 | 寅市 和男, 川崎 秀二 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | フィルタ、フィルタの設計 システム及び設計方法及び 設計プログラム | | EP2315353, EP2315353, US2011153704 | |
| 特願 2008-138827 | 特開 2009-288354 | 特許 4750153 | 寅市 和男, 中村 光晃, 諸岡 泰男 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | 音響装置及び音響調整方法 | | | |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|------------------------------------|------------------------|--------------------|--------------|---|--|
| 特願 2008-124906 | 特開 2009-278175 | 特許 4950119 | 寅市 和男, 中村 光晃, 武 徳安, 諸岡 泰男 | 独立行政法 人科学技術 振興機構 | 音響処理装置及び音響処理 方法 | W02009133948 | EP2299368, US2011058686, US2012033830 | |
|-------------------|-------------------|---------------|------------------------------------|------------------------|--------------------|--------------|---|--|

● 武藤 俊一

| 出願番号 | 公開番号 | 特許番号 | 発明者／考案者 | 出願人／権利者 | 発明の名称 | 国際出願番号 | 国際公開番号 | 海外での成立 |
|-------------------|-------------------|---------------|---|-----------------|---------------------------|--------|-----------|--------|
| 特願 2004-337992 | 特開 2006-146718 | 特許 4399597 | 武藤俊一 | 国立大学法人 北海道大学 | 光子ースピン量子ビット変 換方法及び変換装置 | | | |
| 特願 2005-082484 | 特開 2005-244248 | 特許 4854975 | 今村 健一, 武藤 俊一, 堀口 直人, 杉山 芳弘, 中田 義昭 | 富士通株式会 社 | 光半導体記憶装置の書き込み 読出し方法 | | US5936258 | |

【H15 年度採択】

● 加藤 和彦

| 出願番号 | 公開番号 | 特許番号 | 発明者／考案者 | 出願人／権利者 | 発明の名称 | 国際出願番号 | 国際公開番号 | 海外での成立 |
|-------------------|-------------------|---------------|--|---|--|--------------|--|------------------------------------|
| 特願 2007-085598 | 特開 2008-243034 | 特許 5081480 | 中山 雄大, 池部 優佳, 竹下 敦, 加藤 和彦, 阿部 洋丈, 鈴木 勝博 | 株式会社エ ヌ・ティ・テ ィ・ドコモ; 国立大学法人 筑波大学 | ソフトウェア挙動モデル化 装置、ソフトウェア挙動モ デル化方法、ソフトウェア 挙動検証装置及びソフトウ ェア挙動検証方法 | W02008117872 | CN101652755, EP2141598, US2011154487 | CN101652755 (B), US8407799 (B2) |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|---|---------------------------------|--|--------------|--|----------------------------------|
| 特願 2006-110036 | 特開 2007-286686 | 特許 5090661 | 金野 晃, 中山 雄大, 竹下 敦, 加藤 和彦, 阿部 洋丈, 鈴木 勝博 | 株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ; 国立大学法人筑波大学 | ソフトウェア動作モデル化装置、ソフトウェア動作監視装置、ソフトウェア動作モデル化方法及びソフトウェア動作監視方法 | W02007119781 | CN101432754, EP2026237, US2009187396 | CN101432754(B), US8301433(B2) |
| 特願 2004-264758 | 特開 2006-079479 | 特許 4484643 | 岡瑞起, 加藤和彦 | 独立行政法人科学技術振興機構 | 時系列データ判定方法 | | US2006069955 | US7698740(B2) |
| 特願 2004-254856 | 特開 2006-072666 | 特許 4476078 | 岡 瑞起, 加藤 和彦, 大山 恵弘 | 独立行政法人科学技術振興機構 | 時系列データ判定方法 | | | |
| 特願 2003-551654 | 再公表 03-050662 | 特許 4522705 | 加藤 和彦, 大山 恵弘 | 独立行政法人科学技術振興機構 | ソフトウェア安全実行システム | W003050662 | C469633, US2005228990 | CA2469633(C), US7690023(B2) |

● 松井 俊浩

| 出願番号 | 公開番号 | 特許番号 | 発明者／考案者 | 出願人／権利者 | 発明の名称 | 国際出願番号 | 国際公開番号 | 海外での成立 |
|-------------------|-------------------|---------------|--|---------------------------|------------------|--------|--------|--------|
| 特願 2008-251230 | 特開 2010-086038 | 特許 5245139 | 浜本 研一, 松永 義憲, 平松 雄二, 大塩 真, 松井 信行, 加賀美 聡, トンプソン サイモン, 松井 俊浩 | 鹿島建設株式会社; 独立行政法人産業技術総合研究所 | 移動体の誘導システム及び誘導方法 | | | |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------|---|--|--|--|
| 特願 2008-067639 | 特開 2009-219683 | 特許 5120939 | 三輪 洋靖, 松井 俊浩 | 独立行政法人 産業技術総合 研究所 | うつ状態検出装置 | | | |
| 特願 2007-236390 | 特開 2009-070043 | 特許 4984153 | 石綿 陽一, 加賀美 聡, 西脇 光一, 松井 俊浩 | 独立行政法人 産業技術総合 研究所 | 実時間タスクにおけるプロ ック回避方法 | | | |
| 特願 2007-236087 | 特開 2009-070014 | 特許 5146954 | 石綿 陽一, 加賀美 聡, 西脇 光一, 松井 俊浩 | 独立行政法人 産業技術総合 研究所 | マルチタスク処理装置、及 びマルチタスク処理方法、 並びに、プログラム | | | |

● 横田 治夫

| 出願番号 | 公開番号 | 特許番 号 | 発明者／考案 者 | 出願人／権利 者 | 発明の名称 | 国際出願番号 | 国際公開番号 | 海外での成立 |
|-------------------|-------------------|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|---|--------|--------|--------|
| 特願 2008-285787 | 特開 2010-114682 | 特許 5133850 | 横田 治夫, 高山 一樹 | 独立行政法人 科学技術振興 機構 | ストレージノード用再暗号 化システム及び方法 | | | |
| 特願 2007-161612 | 特開 2009-003553 | 特許 5057512 | 横田 治夫, 渡部 徹太 郎, 小林 隆志 | 国立大学法人 東京工業大学 | ファイル検索システム | | | |
| 特願 2007-033716 | 特開 2008-197998 | 特許 4882072 | 横田 治夫, 高山 一樹, 小林 大 | 国立大学法人 東京工業大学 | 分散ネットワークストレ ージシステムにおける暗号化 データ格納方法 | | | |
| 特願 2006-219201 | 特開 2008-046700 | 特許 4971717 | 横田 治夫, 吉原 朋宏, 小林 大, 田口 亮 | 国立大学法人 東京工業大 学; 日本放送 協会 | ディレクトリ分散型記憶装 置及びデータ処理要求移譲 プログラム | | | |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|--|----------------------------------|---|--|--|--|
| 特願 2005-236039 | 特開 2007-052556 | 特許 4992072 | 横田 治夫, 梁 文新 | 国立大学法人 東京工業大学 | 複数のXML文書の類似度 検出方法および類似性検出 システム、ならびに複数の XML文書の統合方法 | | | |
| 特願 2005-203896 | 特開 2007-025843 | 特許 4713257 | 上原 年博, 田口 亮, 横田 治夫, 中野 真那, 小林 大, 渡邊 明嗣 | 日本放送協 会; 国立大学 法人東京工業 大学 | データ記憶装置及びバージ ョン管理プログラム | | | |
| 特願 2005-043023 | 特開 2006-228060 | 特許 4644002 | 横田 治夫, 吉原 朋宏, 小林 大, 上原 年博, 田口 亮 | 国立大学法人 東京工業大 学; 日本放送 協会 | ディレクトリ更新方法及び ディレクトリ更新プログラ ム、並びに、木構造型デー タ記憶装置 | | | |
| 特願 2005-203524 | 特開 2006-185413 | 特許 4728717 | 横田 治夫, 小林 大, 渡邊 明嗣, 山口 宗慶, 田口 亮, 上原 年博, 林 直人 | 国立大学法人 東京工業大 学; 日本放送 協会 | 自律ストレージ装置、自律 ストレージシステム、分散 ストレージシステム、負荷 分散プログラム及び負荷分 散方法 | | | |
| 特願 2004-325865 | 特開 2006-139334 | 特許 4688201 | 横田治夫, 山口宗慶, 渡邊明嗣, 小林大, 上原年博, 田口亮, 林直人 | 国立大学法人 東京工業大 学; 日本放送 協会 | ストレージ装置、並びに、 コンテンツ蓄積管理方法及 びコンテンツ蓄積管理プロ グラム | | | |
| 特願 2004-190823 | 特開 2006-012005 | 特許 4528039 | 横田 治夫, 渡邊 明嗣, 田口 亮, 林 直人, 上原 年博 | 国立大学法人 東京工業大 学; 日本放送 協会 | 自律ストレージ装置、自律 ストレージシステム、ネッ トワーク負荷分散プログラ ム及びネットワーク負荷分 散方法 | | | |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|---|----------------------------------|---|--|--|--|
| 特願 2004-031042 | 特開 2005-222392 | 特許 4537724 | 小林 大, 山口 宗慶, 花井 知広, 渡邊 明嗣, 横田 治夫, 上原 年博, 田口 亮, 林 直人 | 国立大学法人 東京工業大 学; 日本放送 協会 | ソフトウェア更新方法及び ソフトウェア更新プログラ ム | | | |
| 特願 2003-376918 | 特開 2005-141475 | 特許 4464656 | 横田 治夫, 花井 知広, 渡邊 明嗣, 山口 宗慶, 田口 亮, 林 直人, 上原 年博 | 国立大学法人 東京工業大 学; 日本放送 協会 | コンテンツ蓄積システム、 その方法およびそのプログ ラム | | | |
| 特願 2003-132668 | 特開 2004-334739 | 特許 4272465 | 横田 治夫, 小林 隆志, 渡邊 明嗣, 花井 知広, 山口 宗慶, 田口 亮, 林 直人, 上原 年博 | 国立大学法人 東京工業大 学; 日本放送 協会 | データのバックアップ方法 及びバックアップデータ復 旧方法、並びに、ネットワ ーク蓄積装置及びネットワ ーク蓄積プログラム | | | |
| 特願 2003-058355 | 特開 2004-272339 | 特許 4263927 | 横田 治夫, 田口 亮, 林 直人, 上原 年博 | 東京工業大学 長; 日本放送 協会 | 蓄積制御装置、蓄積制御プ ログラムおよび蓄積制御方 法 | | | |
| 特願 2003-054217 | 特開 2004-265097 | 特許 3887685 | 横田 治夫, 小林 隆志, 村木 太一 | 東京工業大学 長 | プレゼンテーション資料検 索システムおよびその方法 並びにプログラム | | | |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------|------------------|----------------|-------------------|--|--|--|
| 特願 2002-319293 | 特開 2004-152209 | 特許 4273300 | 横田 治夫, 宇根田 純治 | 財団法人理工 学振興会 | Webアクセスログ解析方 法 | | | |
| 特願 2001-319143 | 特開 2003-122792 | 特許 3915888 | 横田 治夫 | 財団法人理工 学振興会 | マルチメディア同期検索方 法 | | | |

2.3 アウトカム

2.3.1 科学技術的アウトカム

(1) 受賞

科学技術の進歩への貢献や研究成果に関する評価を示す指標の一つとして、受賞歴が挙げられる。下表に、本研究領域終了後の研究代表者の受賞歴を示す。

日本 IBM 科学賞を受賞した伊藤や文部科学大臣表彰科学技術（研究部門）を受賞した井上、萩谷は、本研究領域期間中に研究成果が認められたものである。

その他、情報処理学会（萩谷、坂井、横田）、電子情報通信学会（横田）、日本ソフトウェア科学会（萩谷）の各学会において本研究領域期間中および本研究領域終了後にフェローになっていることから、国内外でのプレゼンスが高い研究者であったことがわかる。

表 2-6 研究代表者の本研究領域終了以降の受賞リスト

| 研究代表者 | 賞の名称 | 授与機関 | 受賞理由・業績、対象論文等 | 受賞年 |
|-------|---|--|---|------|
| 伊藤 公平 | 日本 IBM 科学賞 | 日本 IBM 科学賞事務局 | Si と Ge の同位体の制御とエレクトロニクス応用の開拓 | 2006 |
| | 第5回(平成20年度)日本学術振興会賞 (JSPS PRIZE) | 独立行政法人日本学術振興会 | 半導体同位体工学の創出 | 2009 |
| 井上 光輝 | ICF 11 New Product & Novel Technology Award | 一般社団法人粉体粉末冶金協会 | Novel 3D Display using Garnet-Based Magnetophotonic Crystals with Large-Number Magneto-Optic Nano-Pixel | 2013 |
| | 文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門) | 文部科学省 | 磁気光学を用いた固体空間光変調器の研究 | 2008 |
| | 第36回市村学術賞 | 新技術開発財団 | 磁気光学を用いた超高速固体空間光変調デバイス | 2004 |
| | 船井情報科学振興賞 | (財)船井情報科学振興財団 | 光体積記録のための超高速固体空間光変調デバイスの開発 | 2004 |
| | 電気科学技術奨励賞(オーム賞) | (財)電気科学技術奨励会 | 磁性フォトニック結晶の創生と機能性ITマイクロデバイスへの応用 | 2002 |
| | 教育特別貢献賞 | 豊橋技術科学大学 | 教育 | 2010 |
| | International Workshop on Holographic Memories and Display Award fo 2009 | International Workshop on Holographic Memories & Display, 2009 (IWHM&D 2009) | For the activation of the research activities in holographic memory | 2009 |
| | International Workshop on Holographic Memories and Display Best Paper Award | International Workshop on Holographic Memories & Display, 2009 (IWHM&D 2009) | Development of Direct Light Scanning 3-D Display Proto-type System | 2009 |

| | | | | |
|------------|---|---|---|---|
| 井上 光輝 | 平成 19 年度日本応用磁気学会・優秀研究賞 | (社)日本応用磁気学会 | 磁性フォトニクスの基礎および応用に関する研究 | 2007 |
| | 第 55 回全日本教職員発明展 入選 | (社)発明協会 | 研究成果「磁気反発型振動加速度スイッチ」 | 2007 |
| | 2013 Joint MMM/Intermag Conference Winners of the Best Poster Award | American Institute of Physics, Magnetic Society of IEEE | Three-dimensional display with magnetic hologram composed of a large number of nano-scale magnetic pixel in magnetic thin film with perpendicular magnetization | 2013 |
| 中島 浩 | 情報処理学会 CS 領域奨励賞 | 一般財団法人情報処理学会 | ワークロード最適化によるキャッシュシミュレータの高速化. | 2006 |
| | 船井ベストペーパー賞 | 公益財団法人船井情報科学振興財団 | 自動メモ化プロセッサの消費エネルギー評価 | 2007 |
| | フェロー | 一般財団法人情報処理学会 | 並列マシンアーキテクチャおよび並列処理技術に対する学術的貢献 | 2011 |
| | ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム最優秀論文章 | 一般財団法人情報処理学会 | ブロック化赤-黒順序付け法による並列マルチグリッドポアソンソルバ | 2012 |
| 萩谷 昌己 | フェロー | 日本ソフトウェア科学会 | 記号処理, 関数型, 論理型, オブジェクト指向など様々なプログラミング言語の処理系を開発するとともに, 意味論, 型理論, 検証系などの基礎理論に関する研究を幅広く推進してきたため | 2010 |
| | 大川出版賞 | 大川情報通信基金 | 論理と計算のしくみ | 2008 |
| | 論文賞 (理論部門) | 日本応用数理学会 | 関数部分知識と匿名性検証 | 2008 |
| | Tulip Award (DNA Computing Person of the Year) | International Conference on DNA Computing and Molecular Programming | | 2008 |
| | 論文奨励賞 | 日本ソフトウェア科学会 PPL | Modal μ -calculus on min-plus algebra \mathbb{N}^∞ | 2008 |
| | 文部科学大臣表彰科学技術賞 (研究部門) | 文部科学省 | ヘアピン構造を活用した分子コンピューティングの研究 | 2007 |
| | フェロー | 情報処理学会 | 記号処理プログラミングから分子プログラミングまでプログラミング言語の研究 | 2007 |
| | 木下 佳樹 | 国際規格開発賞 | 情報処理学会 | Systems and software engineering -- Systems and software assurance -- Part 2: |
| 情報処理学会フェロー | | 情報処理学会 | 計算機アーキテクチャ, 並列処理ソフトウェア, 相互結合網, 省電力プロセッサ, ディペンダブルシステム等の研究において本邦を代表する業績をあげているため. | 2010 |
| 坂井 修一 | 電子情報通信学会フェロー | 電子情報通信学会 | 新世代コンピュータシステムに関する研究開発 | 2011 |

| | | | | |
|-------|----------------|-------------|--|------|
| 坂井 修一 | 大川出版賞 | 大川情報通信基金 | ITが守る、ITを守る－天災・人災と情報技術 | 2012 |
| 寅市 和男 | 井上春成賞 | 科学技術振興機構内 | フルーエンシ情報理論とそのマルチメディアシステムへの応用に関する研究 | 2005 |
| | FFIT 学術賞受賞 | 船井情報科学振興財団 | フルーエンシ情報理論とそのマルチメディアへの応用に関する研究 | 2004 |
| | 日本印刷学会論文賞 | 日本印刷学会 | D. T. P. へのフルーエンシ関数近似化手法 | 2003 |
| 武藤 俊一 | なし | | | |
| 加藤 和彦 | 情報処理学会論文賞 | 情報処理学会 | 静的解析に基づく侵入検知システムの最適化 | 2005 |
| | 論文賞 | 日本ソフトウェア科学会 | 安全なソフトウェア実行システム SoftwarePot の設計と実装 | 2004 |
| 松井 俊浩 | なし | | | |
| 横田 治夫 | DEIM2009 優秀論文賞 | DEIM | 暗号化データの複製を利用した権限失効処理手法の評価 | 2009 |
| | 情報処理学会フェロー | 情報処理学会 | 早くから高信頼で高効率な情報の蓄積と蓄積された情報の高度な活用に関する研究に従事し、これまでに多数の傑出した先駆的な研究業績を残しているため | 2009 |
| | DEWS2008 優秀論文賞 | DEWS | キーワード非含有ファイルを検索可能とするファイル間関連度を用いた検索手法の評価 | 2008 |
| | 電子情報通信学会フェロー | 電子情報通信学会 | データベースシステムとディペンダブルシステムに関する先駆的研究 | 2007 |
| | DEWS2006 優秀論文賞 | DEWS | Web サービスベースのワークフロー管理における障害を考慮したアクティビティスケジューリング手法 | 2006 |
| | DEWS2006 優秀論文賞 | DEWS | 並列 Btree 構造 Fat-Btree におけるリクエスト委譲コストを削減する並行性制御手法 | 2006 |

2.3.2 社会・経済的アウトカム

(1) 新聞報道等

伊藤公平は、研究を通じて、さまざまな国の大学・研究機関と共同研究を実施し、提携先で必要な試料や測定方法などを活用できるように学生を派遣している。そうした経験を生かして「4 学期制、国際性鍛える」として 2013 年 6 月 3 日付の日本経済新聞にクォータ制に関する寄稿している。

第 3 章 各研究課題の主な研究成果および波及効果

3.1 2001 年度採択課題

3.1.1 全シリコン量子コンピュータの実現（伊藤 公平）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

シリコン中の電子スピンと核スピンを量子ビットとして用いた実用的な量子コンピュータの構成を考案し、量子情報分野におけるその位置づけを計算機科学および基礎スピン物性の立場から明らかにし、その実現にむけた要素技術の開発を進めた。具体的には、核スピンの持たない ^{28}Si 安定同位体基板上に、核スピンを有する ^{29}Si 安定同位体を一列に並べるナノテクノロジーを開発した。この列をなす ^{29}Si 安定同位体の 1 個 1 個の核スピンのビット情報 (0 または 1) を格納した量子コンピュータを提案し、その情報処理の意義を計算機科学的に明らかにする。

②期間中の主な研究成果

(i)位相緩和時間の計測および長時間の実現

量子情報を失うことなく保持できる位相緩和時間内に、できるだけ多くの量子演算を実行し、結果を読み取る必要がある。特に、演算に要する時間に対して位相緩和時間が短い場合は、その量子ビットを用いて量子コンピュータを構築しても意味がない。そこで本研究は、シリコン結晶中の ^{29}Si 核スピン量子ビットの位相緩和時間測定から着手した。その結果、室温における位相緩和時間は 20 ミリ秒であることを、核磁気共鳴法を用いて明らかにし、さらに核スピンの位相緩和時間を短くする主要因の核スピン同士の双極子相互作用を切るためのラジオ波パルス照射手法の開発に成功した。その結果として、位相緩和時間が 25 秒と固体中の量子システムとして測定された世界最長のコヒーレンスを得ることに成功した。

この位相緩和時間内では量子エラーコレクションなどの重要なアルゴリズムが十分に実行できることが期待される。また、核スピンの初期化と読み出しにはシリコン中の電子スピンの利用が重要であることを見出した。特に、シリコン中の電子スピンの量子情報保持時間が同位体濃縮によって飛躍的に延びることを示し、結果として 8K では 1 ミリ秒以上の位相緩和時間を実験により得ることに成功した。

(ii)量子コンピュータとして動作

この素子を量子コンピュータとして動作させるために必要な、1) 初期化：始めにすべての核スピンを 0 状態にセット、2) 量子計算：1 量子ゲート演算と 2 量子ゲート演算の

実行、3) 読み出し：演算終了後に個々の核スピン量子ビットの向きが上か下かを測定、に関する詳細なる基礎研究を展開し、電子スピンを用いた核スピン量子ビット初期化や、励起子を介した核スピン量子ビット読み出しなど、極めて独創的なアイデアを実験により検証し、ナノ領域特有の様々なスピン物性の解明に成功した。

初期化では、まずは直接遷移型の半導体(GaAs 系)を用いて光によって誘起された電子スピンと核スピンの相互作用を調べる予備実験を行った。その結果から一方に偏った電子スピンを半導体中に注入することから、核スピンの方向をそろえられることを明らかにした^[1]。次にシリコンに対して、直接遷移バンドギャップに相当する高いエネルギーの光を照射し、さらにマイクロ波を照射することから偏極した電子スピンを注入することに成功した。これによりシリコンに対しても、電子スピンを介して核スピンの方向を揃えられることを明らかにした。

演算は独自に開発をしたマイクロマグネットによって生じる磁場勾配によって、各量子ビットを共鳴周波数の差異で差別化し、選択的な量子演算の実行が可能であることを示した。

核スピン量子ビットの読み出しに向けては、バルク試料による予備実験ではあるが、不純物に束縛された励起子の崩壊に伴う発光または光電流によって読み出すことに成功した。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1]E. Abe, K. M. Itoh, J. Isoya, and S. Yamasaki, "*Electron-Spin Phase Relaxation of Phosphorus Donors in Nuclear-Spin-Enriched Silicon*," *Physical Review B* **70**, 033204 (4 pages) (2004).

[2]T. D. Ladd, D. Maryenko, Y. Yamamoto, E. Abe, and K. M. Itoh, "Coherence Time of Decoupled Nuclear Spins in Silicon," *Physical Review B* **71**, 014401 (12 pages) (2005).

[3]R. Van Meter, and K. M. Itoh, "Fast Quantum Modular Exponentiation," *Physical Review A* **71**, 052320 (12 pages) (2005).

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

現在のスーパーコンピュータの能力を凌駕する量子コンピュータの実現はなされていないが、2 量子ビットのシリコン量子コンピュータの開発に成功し、その成果は高く評価されている。International Technology Roadmap for Semiconductors 委員会に招かれ、知見を披露し、その結果は全世界に影響を与えており、科学的なインパクトは高い。研究の進捗に伴う妥当な変化はあったが、その他は概ね当初の計画の通りであり、最終的な固体量子計算の要素技術を数多く開発している。全固体という世界的に例の無いシステムを目指しており、その基本技術を実現し、従来にない、興味深い要素技術を生み出している。この技術は、Si 内部の微細な原子レベルでの動きを調べる技術としても期待されており、今後の重要なナノテクノロジーの一つとなる可能性があるなど、5 年間の基礎研究としてのイ

ンパクトは大きい。

今後、完全な量子コンピュータを実現するには、現在の構造をリファインして、原子列単位の分離配置、量子状態の読み出し、それを用いたスピンを揃える初期化、演算などを組み込むことが必要である。それには原理的な手法のみならず、デバイスレベルでの環境制御、システムの設計手法、エンジニアリング的な統合技術が必要であり、マンパワー、研究費、時間が必要である。本研究によって、問題点が整理され、方向性や解決すべき課題が明らかになった。

②社会・経済的波及効果

「シリコン量子計算機 読み出しにめど」などの一般新聞メディア等に掲載されており、一般に対しても量子コンピュータの実現に向けた基礎研究のアピールにつながっている。国内外の研究機関においても同時期に量子コンピュータに関する研究が行われることで、量子スピンによる微小な変化など計測器のノウハウやお互いの試料も共有されることになり、非常にコストのかかる研究開発のコスト削減にもつながる。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4報以内）

[1]Wu, H; George, RE; Wesenberg, JH; Molmer, K; Schuster, DI; Schoelkopf, RJ; Itoh, KM; Ardavan, A; Morton, JLL; Briggs, GAD, "Storage of Multiple Coherent Microwave Excitations in an Electron Spin Ensemble" , PHYSICAL REVIEW LETTERS, 105, (2010)

[2]Tyryshkin, AM; Tojo, S; Morton, JLL; Riemann, H; Abrosimov, NV; Becker, P; Pohl, HJ; Schenkel, T; Thewalt, MLW; Itoh, KM; Lyon, SA, "Electron spin coherence exceeding seconds in high-purity silicon" , NATURE MATERIALS, 11, 143-147 (2012)

[3]Simmons, S; Brown, RM; Riemann, H; Abrosimov, NV; Becker, P; Pohl, HJ; Thewalt, MLW; Itoh, KM; Morton, JLL, "Entanglement in a solid-state spin ensemble" , NATURE, 480, 69-72 (2011)

[4]Abe, E; Tyryshkin, AM; Tojo, S; Morton, JLL; Witzel, WM; Fujimoto, A JW; Haller, EE; Isoya, J; Lyon, SA; Thewalt, MLW; Itoh, KM , "Electron spin coherence of phosphorus donors in silicon: Effect of environmental nuclei" , PHYSICAL REVIEW B, 82, (2010)

④その他

本研究の成果により研究代表者・伊藤が2006年日本IBM科学賞を受賞した。

分担者である大野（東北大学）が2004年サー・マーチン・ウッド賞と第1回日本学術振興会賞（2005年）を受賞し、同じく分担者である山本（国立情報学研究所）が2005年応用物理学論文賞と2005年紫綬褒章を受賞した。

3.1.2 超高速ペタバイト情報ストレージ（井上 光輝）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

光ディスク技術とホログラムメモリとの融合によって、究極的には 1 PB（ペタバイト）の記憶容量と、10Gbps（ギガビット/秒）のデータ転送レートを同時に具備する「超高速ペタバイト情報ストレージ」の基礎的研究開発を目的とする。具体的には、基本メモリとして、1TB（テラバイト）/ディスクの容量と 1Gbps のデータ転送レートをもつホログラム光ディスクメモリを開発し、これをジュークボックス技術と連携させることで究極的なペタバイト情報ストレージを実現する。

②期間中の研究成果

(i) コリニアホログラフィーによる記録方式

ホログラム光ディスクメモリと言っても、回転する光ディスクにホログラムの記録再生を実用レベルで実現した例は国内外にない。コリニアホログラフィーという光ディスク技術との整合性が極めてよい手法を用いて、装置の小型化さえも見据えた装置開発を行った。そこでは、高密度記録を支える新しいフォトポリマ材料の開発や、高速データ転送を達成するに不可欠な空間光変調デバイスなどのキーコンポーネントの開発を材料レベルから実施した^[1]。

本研究は、開始当初は米国スタンフォード大学との共同研究によって光学系評価や信号処理法などについて基礎的検討を行い、その後、産学官の強い連携によりプロジェクト目標の達成を図った。ホログラムメモリ装置開発および、記録メディア開発は企業が担当した。またプロジェクト協力企業にはフォトポリマ記録材料そのものの開発をお願いし、豊橋技術科学大学で開発した磁気光学式空間光変調デバイスの実用化も企業に担当していただいた。更に、企業 2 社には、共同してユニバーサルな利用が可能なコリニアホログラム光ディスクメモリの構築を協力していただいた。

(ii) ホログラム光ディスクにホログラムの記録再生

1 ピクセルあたり 10ns 以下の速度で駆動可能な世界最高速度を有する固体空間光変調器（磁気光学式空間光変調器：MOSLM）と、ナノスケールで反応場を制御したナノゲル構造をもつ新しいフォトポリマ材料、並びにこれらと連携させたコリニア方式ホログラムメモリ装置を開発し、連続回転するホログラム光ディスクにホログラムの記録再生に世界で初めて成功した。現時点で容量は密度換算で約 200GB/disc のユーザエリア記録再生が、約 120 Mbps の転送レートで達成した。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1]Inoue, M; Fujikawa, R; Baryshev, A; Khanikaev, A; Lim, PB; Uchida, H; Aktsipetrov, O Fedyanin, A; Murzina, T; Granovsky, A, "Magnetophotonic crystals" , JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS, 39, R151-R161 (2006)

[2]Kato, H ; Matsushita, T; Takayama, A; Egawa, M; Nishimura, K; Inoue, M, "Theoretical analysis of optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals" , JOURNAL OF APPLIED PHYSICS , 93, 3906-3911 (2003)

[3]Vinogradov, AP; Dorofeenko, AV; Erokhin, SG; Inoue, M; Lisyansky, AA; Merzlikin, AM; Granovsky, AB, "Surface state peculiarities in one-dimensional photonic crystal interfaces" , PHYSICAL REVIEW B , 74, (2006)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

当初の目的であった 1TB, 1Gbps のプロトタイプの完成には至っていないが、方式的にはその見通しは立っており、妥当な成果が出ている。従来、ホログラムの記録は停止状態かつ 2 高速光学系が必要とされ、コンパクトで扱いが簡単な民生用への展開は見えなかった。しかし、今回、コリニア方式を用い、連続回転する光ディスクでホログラムの記録と再生を実証したことは、科学的・技術的にも大きなインパクトがあったといえる。これによって、DVD の先となるデバイスの可能性が示され、世界の技術方向を作ったという意味が大きい。この実現は、世界に誇れる成果である。

今後は、実用化と、更なる高性能化である。広く使われるためには未だ実用化のさまざまな研究が必要ではあるが、密度の向上、速度の向上、他分野への応用など、未だ展開の余地があり、この分野の発展が期待できる。

②社会・経済的波及効果

「豊橋技科大 超光メモリー開発へ 映画 1 万 4000 本分 1 枚のディスクに」や「標準化狙うホログラム光ディスク 欧州審査機関に申請」というようなメディア報道が多数されており、この分野で国際標準化が達成されれば社会的なインパクトは多大である。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト (4 報以内)

[1]Rybin, MV; Khanikaev, AB; Inoue, M; Samusev, KB; Steel, MJ; Yushin, G; Limonov, MF, "Fano Resonance between Mie and Bragg Scattering in Photonic Crystals" , PHYSICAL REVIEW LETTERS, 103, (2009)

[2]Khanikaev, AB ; Baryshev, AV ; Inoue, M ; Kivshar, YS, "One-way electromagnetic Tamm states

in magnetophotonic structures" , APPLIED PHYSICS LETTERS, 95, (2009)

[3]Goto, T ; Baryshev, AV ; Inoue, M ; Dorofeenko, AV ; Merzlikin, AM ; Vinogradov, AP ; Lisyansky, AA ; Granovsky, AB , "Tailoring surfaces of one-dimensional magnetophotonic crystals: Optical Tamm state and Faraday rotation" , PHYSICAL REVIEW B, 79, (2009)

[4]Uchida, H ; Masuda, Y ; Fujikawa, R ; Baryshev, AV ; Inoue, M , "Large enhancement of Faraday rotation by localized surface plasmon resonance in Au nanoparticles embedded in Bi:YIG film" , JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS , 321, 843-845 (2009)

3.1.3 超低電力化技術によるディペンダブルメガスケールコンピューティング（中島 浩）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

ハードウェア／ソフトウェア協調による低電力化技術、大規模並列タスクの実行モデル構築・利用技術を柱として、種々のコモディティ技術を活用したメガスケールコンピューティングの基盤技術を確立することにあつた。すなわち、この 2 つの技術を中核としてプロセッサ、コンパイラ、ネットワーク、クラスタ管理、およびプログラミングに関する研究を行い、それらにより 100 万プロセッサ級の汎用メガスケールコンピューティングが実現できることを示すことと、そのプロトタイプとして、低電力・高密度大規模クラスタ MegaProto を構築して技術の有効性を実証することが、本研究の目的である。

②期間中の研究成果

(i)ハードウェア／ソフトウェア協調による低電力化技術

研究の鍵となるハードウェア技術は、SCIMA (Software Controlled Integrated Memory Architecture) と呼ぶ、ソフトウェアから可視かつ構成の変更が可能な高速メモリ階層アーキテクチャである。SCIMA は、通常のキャッシュとの境界が可変である高速メモリ SCM を中心に構成され、配列などのデータは再利用性、アクセスの規則性、容量に応じて SCM あるいは通常のキャッシュ可能な空間に割付けられる。この割付けをコンパイラが最適化することにより、プロセッサチップと主記憶の間のデータ転送の回数や量を大幅に削減することができ、さらにオンチップメモリのアクセスによる消費電力も削減できる。この結果、実行時間と消費エネルギーの両面で、大きな削減効果が達成された。

一方、従来型のプロセッサについても、ハードウェア機構、特に電源電圧や周波数を動的に変更する DVS (Dynamic Voltage Scaling) 機構を、最適化コンパイル技術により活用して、消費電力を削減することができる。本研究ではこの DVS とコンパイラの協調技術を多角的に追求し、プログラムフェーズごとの電力プロファイルに基づく最適化、負荷不均衡プロセス群の電圧・周波数最適設定、実効消費電力の動的制御による性能最適化、性能カウンタの統計情報に基づく電力最適化といった技術を提案し、いずれも優れた効果を得た^[1]。

(ii)大規模並列タスクの実行モデル構築・利用技術

実行モデルの構築のために、並列タスクの挙動情報を記述可能なタスク並列スクリプト言語 MegaScript を設計した。この言語ではコンパイラの解析情報からは決定困難なタスク挙動に関する量的情報を与えることができ、静的あるいは動的な実行モデルを高精度に構築することができる。生成されたモデルは、MegaScript で記述された並列タスク実行のスケジューリングのために用いられ、タスク粒度の調整や最適な配置が行われる。

また、実行モデルの別の重要な応用として、システムの信頼性向上に関する研究も行った。この研究では、大規模システムの各ノードで実行される、挙動が類似したプロセスの関数呼出／復帰のトレースにより挙動モデルを構築し、モデルから大きく外れたプロセス挙動を異常なものとして統計的に分別する。またこの手法を 129 ノードの大規模クラスタに適用して、長期間の運用中に生じたシステムダウンの原因を解析した結果、システムのミドルウェア中に間歇的に生じる異常の原因となる 2 つのバグを発見することができた^[2]。

また大規模システムにおける脆弱性の主要因であるネットワークの耐故障性のために、ノード間リンクやスイッチ間のパスを多重化して高バンド幅と高信頼性を同時に実現する、RI2N (Redundant Interconnection with Inexpensive Network) と、VFREC-Net (VLAN-based Flexible, Redundant and Expandable Commodity Network) を提案し、MegaProto 含む種々のクラスタに実装して性能・信頼性の両面での有効性を実証した。さらにハードウェアレベルの耐故障機能や、チェックポイントの生成・回復機能を統合した、耐故障 MPI フレームワークである Cuckoo を開発した。

(iii) 低電力・高密度大規模クラスタ MegaProto

多数の低電力プロセッサを高密度に実装し、それらを高信頼・高バンド幅のネットワークで結合したプロトタイプシステム MegaProto を開発した。また MegaProto は、プロジェクトで研究・開発中の様々な技術の実証プラットフォームとしても利用された。

MegaProto の仕様設計は 5 名のグループリーダーを中心とした設計チームを組織して行い、TM5800 (Crusoe) を用いたテスト機 (MegaProto/C) と、TM8820 (Efficeon) を用いた実用機 (MegaProto/E) の詳細な仕様を定めた。この仕様に基づき実装設計および製造を外注し、MegaProto/C を 2 台(32PE)、また MegaProto/E は 20 台(320PE) をそれぞれ製造した。これらの MegaProto システムはいずれも優れた電力性能比を達成し、特に MegaProto/E の 100MFLOPS/W はコモディティ技術を用いた並列システムとしては世界最高の値を達成した^[3]。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] 藤田元信, 田中慎一, 近藤正章, 中村宏. ソフトウェア制御オンチップメモリにおけるスタティック消費電力削減手法. 情報処理 ACS, Vol. 45, No. SIG11 (ACS7), pp. 219-228, Oct. 2004.

[2] Alexander V. Mirgorodskiy, Naoya Maruyama, Barton P. Miller. Problem Diagnosis in Large-Scale Computing Environments. In SC'06, Nov. 2006.

[3] Hiroshi Nakashima, Hiroshi Nakamura, Mitsuhiro Sato, Taisuke Boku, Satoshi Matsuoka, Daisuke Takahashi, and Yoshihiko Hotta. MegaProto: 1 TFlops/10 kW Rack Is Feasible Even with Only Commodity Technology. In SC'05, Nov. 2005.

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

汎用部品を用いて高性能なシステムを低電力で実現するという手法を提案してその実現方式を与えた。これには様々な要素技術が関係しており、それらの要素技術の新規性ととともに、科学的・技術的なインパクトは高い。特に、ネットワーク技術、キャッシュとローカルメモリの動的なバウンダリー化技術、高性能計算における低電力技術、耐故障技術、モデリング技術などがそれで、この分野の研究は世界でも精力的におこなわれているが、その先駆けとして優れた成果を出した。

また、当初は余り考えられていなかった性能予測手法のチューニングが進み高精度な並列計算モデルを実現した。これらの成果は、戦略目標としての、今後求められる超高性能なスーパーコンピュータの重要な要素技術を与えるものである。

ここで開発した諸要素技術は、システム技術として今後様々に利用され発展することが考えられる。その後、PC ベースのスーパーコンピュータである T2K Open Superdcomputer (筑波大学、東京大学、京都大学)^[1]や TSUBAME(東京工業大学)^[2]などの開発につながっている。

②社会・経済的波及効果

本研究成果のソフトウェアの多くは実用レベルに達しており、基盤環境が整備されることで、新たな実験と展開が期待される。省電力化プロセッサとして、マルチコアプロセッサの出現が見込まれており、実際に市販されているプロセッサはすべてマルチコア、メニーコア構成になった。そのため本研究でなされた省電力プロセッサ や高性能結合網の構成技術などは、関連技術の発展に伴い更に深化・向上するものと見込まれ、実際に本研究に関わった研究者によるさまざまな発展研究も行われている^[3,4]。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト (4 報以内)

[1]石川裕, 中島研吾, 中島浩, 朴泰祐. T2K オープンスパコンが創る新しい計算機環境. 計算工学, Vol. 14, No. 1, January 2009.

[2]Satoshi Matsuoka, "The Road to TSUBAME and Beyond", in Petascale Computing Algorithms and Applications, David Bader (ed.), Chapter, 14, the CRC Press, 2007.

[3]H. Nakamura, W. Wang, Y. Ohta, K. Usami, H. Amano, M. Kondo, and M. Namiki, "Fine-Grained Run-Time Power Gating through Co-optimization of Circuit, Architecture, and System Software Design", IEICE Transactions on Electronics, Vol.E96-C No.4 pp.404-412, 2013 (Invited).

[4]S. Otani, H. Kondo, I. Nonomura, A. Ikeya, M. Uemura, Y. Hayakawa, T. Oshita, S. Kaneko, K. Asahina, K. Arimoto, S. Miura, T. Hanawa, T. Boku, M. Sato, "An 80Gb/s Dependable

Communication SoC with PCI Express I/F and 8 CPUs", Proc. of ISSCC2011, San Francisco, CD-ROM, 2011.

3.1.4 多相的分子インタラクションに基づく大容量メモリの構築（萩谷 昌己）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

DNA 分子によって情報を記憶する超高密度・超大容量の分子メモリを構築することを目標に、DNA 分子同士のハイブリダイゼーションに加えて、温度、光など、様々な反応の組み合わせ（多相的分子インタラクション）によって分子のアドレッシングを行う技術を開発した。また、アドレッシングを含む各種の分子操作を実装するために、特に光を用いた新しい反応制御技術（マイクロリアクター）の開発を行った。しかし、分子メモリは超高密度・超大容量ではあるが、現状では読み書きにかかる時間が非常に大きい。本研究領域では、現時点における分子メモリの実用的な応用として、液状の分子メモリをもとに DNA インキの開発を行うとともに、表面上に固定された分子メモリの高密度性を生かした生体イメージングとナノ構造の構築のための基盤技術の開発を行う。

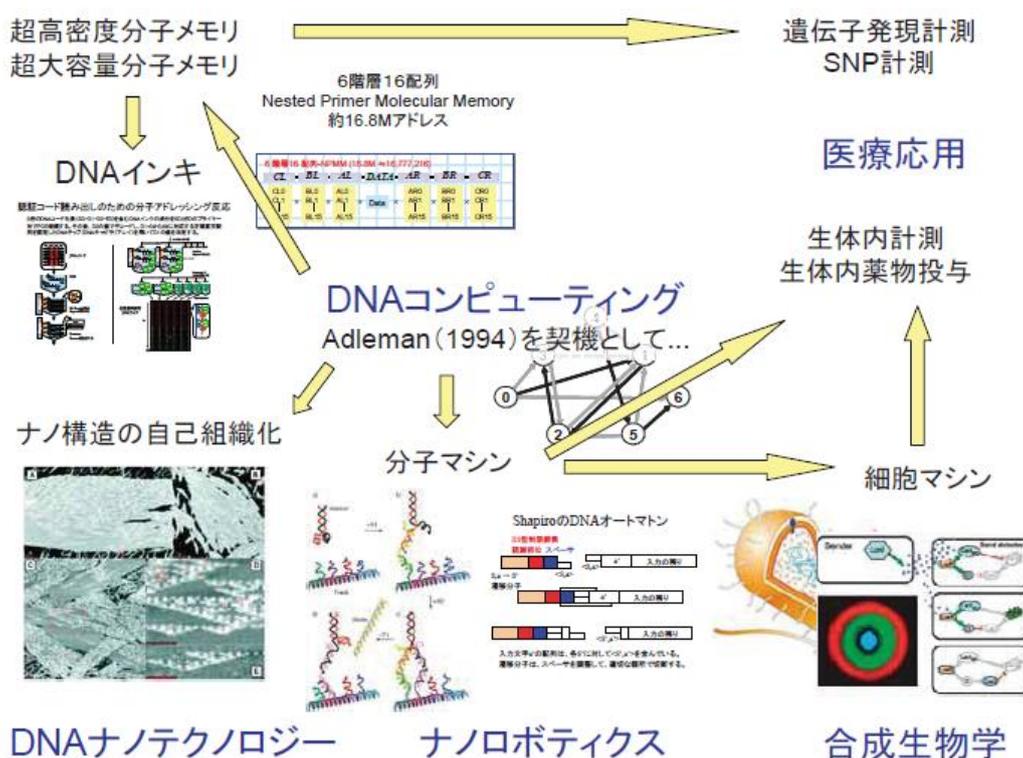


図 3-1 DNA コンピューティングの研究分野概要

②期間中の研究成果

(i)液状の分子メモリ

NPMM (Nested Primer Molecular Memory) は、大内グループが中心となって開発してき

た分子メモリである。メモリ素子は二本鎖の DNA 分子として実現されている。DNA 分子の中央にデータを表現する配列があり、その両側にアドレス部分が 3 桁ずつ置かれている。合わせて 6 桁のアドレスによって個々のメモリ分子がアクセスされる。各桁には 16 通りの DNA 配列が割り当てられているので、アドレス空間の大きさは約 16.8M (16 進法で 6 桁) になる。個々のメモリ分子にアクセスするには、両側の 2 桁にハイブリダイズするプライマのペアによる PCR 増幅を三回行い、目的のアドレスを持つメモリ分子だけを増幅・抽出する。

(ii)DNA インキ

一方、陶山グループが中心となり、分子メモリの現実的な応用として実用的な DNA インキの開発を行った。DNA インキとは、認証情報や秘密情報（例えば暗号通信のための鍵）を含む DNA 分子を混ぜたインキのことで、本プロジェクトで開発された DNA インキは、陶山グループが開発した正規直交配列から作られたメモリ分子と、それらに対するアドレッシング技術に基づいており、300 ビットの暗号化が可能である。陶山たちは、実際に紙に塗布した DNA インキを回収して分析することにより、300 ビットの情報を正確に回復することに成功した。

NPMM に対しても、萩谷グループが中心になって、分子レベルのランダム性を活用した DNA インキの可能性を検討し、そのための基礎実験を行った。分子メモリのランダムな希釈過程を活用して、中身がそれを作ったものにもわからないような DNA インキを作成した。紙から回収されたインキが同じマスターのインキをもとにしているかどうかは、十分な数の種類の分子の有無を調べれば、十分な信頼度で確認することができる。

(iii)表面上の分子メモリとその応用

陶山グループは、微小なスポットの中に多種類の固有アドレスを持つ分子がランダムに植えつけられた「アモルファス分子メモリ」を構築した。レーザーにより微小スポットの温度をあげ、さらに個々のメモリ分子を参照するためのプローブ分子を拡散させることによりメモリ分子のアドレッシングを行う。数 μm 平方あたり 1,000 アドレスの実現が可能であることを確認した。さらに、微小スポットに多種類の分子が固定されているという特徴を活用して、アモルファス分子メモリを複数遺伝子の発現の空間分布を同時に観測する生体イメージング技術に応用することを提案し、そのための基礎技術の開発を行った。

一方、アモルファス分子メモリはミクロンスケールの構造形成にも応用できるが、アモルファス状ではなく、分子が固有アドレスに従って規則正しく固定された「結晶性分子メモリ」は、ナノスケールの構造形成に応用することが可能である。陶山グループは、DNA タイル間の光ライゲーションを利用して、各 DNA タイルをそのアドレスに従って平面上にアセンブルすることが可能で、しかも結晶が耐熱性を有するタイリング技術の開発を進めた。

(iv)多相的分子インタラクションによる分子アドレッシング技術

NPMM では、PCR 増幅を繰り返すことによって、多数桁のアドレス（階層的アドレス）を持つメモリ分子を増幅・抽出している。これに対して、表面上に固定されたメモリ分子を

参照するためには、表面上に固定されたままで、特定のアドレスを持つメモリ分子の状態を遷移させなければならない。そこで萩谷グループが中心となって、アドレスを表すオープン分子のハイブリダイゼーションによって DNA 分子の複数のヘアピン構造が逐次的に変化することを活用した conformational addressing の技術を開発した。conformational addressing は、アモルファス分子メモリにおける温度によるアドレッシングや、アゾベンゼンが挿入された DNA 分子に対する光アドレッシングと融合され、DNA の二次構造変化を活用した分子システムの汎用的な枠組へと発展した（多相的分子インタラクション）。

分子メモリを実現するには、液状にせよ、表面上にせよ、アドレッシング、データの移動、メモリの初期化など、分子メモリを操作するために各種の反応を制御する技術が必要である。特に、以上で述べたような多相的分子インタラクションを実装するためには、微量な分子に対して多種多様な反応を制御する汎用的な技術が望まれる。本プロジェクトでは、既存の反応制御技術を発展させるだけでなく、谷田グループを中心に、特に光を用いて分子を制御する新しいマイクロリアクター技術の開発を行った。アモルファス分子メモリの位置によるアドレッシングにはレーザーを利用するが、分子の移動においても、レーザーで制御されたマイクロ・ビーズを用いることができる。また、マイクロ・ビーズ上に固定された DNA 分子と回りの溶液中にある DNA 分子のインタラクションも、レーザーで制御可能である。これらの技術は、「光 DNA 制御技術」としてより汎用的な技術へと展開した。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1]Kameda, A; Yamamoto, M; Uejima, H; Hagiya, M; Sakamoto, K; Ohuchi, A, “Conformational addressing using the hairpin structure of single-strand DNA”, DNA COMPUTING, 2943, 219-224(2004)

[2]Takahashi, K ; Yaegashi, S ; Asanuma, H ; Hagiya, M , “ Photo- and thermoregulation of DNA nanomachines”, DNA COMPUTING, 3892, 336-346(2006)

[3]Rose, JA; Deaton, RJ; Hagiya, M; Suyama, A, “Coupled equilibrium model of hybridization error for the DNA microarray and tag-antitag systems”, IEEE TRANSACTIONS ON NANOBIOSCIENCE, 6, 18-27(2007)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

今回の研究領域は、分子メモリという新しい学術分野の開拓という色彩が強い。液状の分子メモリについては、その実質的な最大容量を実現するとともに、その限界を明らかにした。また、その応用として理想的な認証技術となり得る DNA インキを開発した。更に、4 連続ヘアピンの conformational addressing、表面上の消去可能なヘアピンメモリ、光 DNA 制御技術、などを開発した。これによって、分子に対する多様なアクセス方式（多相分子インタラクション）を確立し、これらを組み合わせることにより、大容量の分子メモリを実現できる可能性を実証したことも重要な成果である。

アモルファス分子メモリに関しては、生体イメージングなどの技術としての可能性を明らかにしたが、今後広汎な利用が考えられる。

従って、DNA 分子メモリを構築するという当初の戦略目標は実現されている。また、各種の応用など当初の計画には無かったテーマも追加され新しい成果を生んだ。

②社会・経済的波及効果

DNA インキに関しては、安定性・信頼性の改良や手軽なデータ読み取り装置の開発などを進めることにより、秘密情報の厳重管理や文書の安全認証方法など、特徴ある応用が可能になってくるものと考えられる。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4報以内）

[1]Tanaka, F ; Mochizuki, T ; Liang, XG ; Asanuma, H ; Tanaka, S ; Suzuki, K ; Kitamura, S ; Nishikawa, A ; Ui-Tei, K ; Hagiya, M , "Robust and PhotocontrollableDNACapsules Using Azobenzenes" , NANO LETTERS, 10, 3560-3565 (2010)

[2]Ayukawa, S ; Kobayashi, A ; Nakashima, Y ; Takagi, H ; Hamada, S ; Uchiyama, M ; Yugi, K ; Murata, S ; Sakakibara, Y ; Hagiya, M ; Yamamura, M ; Kiga, D , "Construction of a genetic AND gate under a new standard for assembly of genetic parts" , BMC GENOMICS , 11, (2010)

[3]Sekine, R ; Yamamura, M ; Ayukawa, S ; Ishimatsu, K ; Akama, S ; Takinoue, M ; Hagiya, M ; Kiga, D , "Tunable synthetic phenotypic diversification on Waddington's landscape through autonomous signaling" , PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA, 108, 17969-17973 (2011)

[4]Murata, S; Konagaya, A; Kobayashi, S; Saito, H; Hagiya, M, "Molecular Robotics: A New Paradigm for Artifacts", NEW GENERATION COMPUTING, 31, 27-45(2013)

3.2 2002 年度採択課題

3.2.1 検証における記述量爆発問題の構造変換による解決（木下 佳樹）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

システム検証での大きな課題の一つにスケーラビリティを得ること、つまりシステムやその性質の記述の量が爆発的に増えても、とり扱うことができる原理を与えることがある。スケーラビリティを得るための有力な手法が抽象化である。一般に、具体的なシステムの性質のうち、注目したい性質を保つが、他の性質は保つとは限らないようなシステムを、元のシステムを抽象化したものという。逆に、抽象的なシステムから始めて、その性質をすべて保つような具体化を行ったシステムを得ることを、詳細化といっている。抽象化と詳細化は、たがいに逆の関係にあるが、この問題を整理して解決方法を探る。

②期間中の研究成果

(i)意味論研究

抽象化の関手的意味論の適用範囲を、入力出力型システムから刺激応答型システムに拡大するための意味論研究を行った。命題様相 μ 計算の部分体系ではあるが CTL を含む体系 $R\mu$ の構築とそこで抽象化の意味論構築と自由生成の存在証明がその内容である。

(ii)抽象化支援システムを試作

既に具体的な理論が立てられている入力出力型システムについては、研究代表者らの意味論が示す方向で、抽象化支援システムを試作することとした。抽象化支援ツール周辺の文献調査を経て、ポインタ処理を行う while 命令に関する抽象化を支援するシステム MLAT を試作し、これを用いて Deutsch-Schorr-Waite マーキング算法の正当性を検証してそのフィージビリティを示した。一方で、定理証明支援系を作業台(workbench)として用いながら抽象化の正当性を検証する統合検証環境 Agda-IVE を研究開発した。

(iii)実問題の検証

MLAT を Agda-IVE に組み込み、研究計画の最終段階において、Agda-IVE のフィージビリティを確かめるために、実問題の検証を試みた。MPI の実装のひとつである YAMPII の開発者の協力を得て、そのなかから、ポインタ操作に問題が起り得る部分を抽出し、その部分の正当性を Agda-IVE を用いて行なうという作業を行なった。その結果、Agda-IVE における、Agda と MLAT の相互作用が、システムの検証対象を確定する試行錯誤の段階において極めて有用であることがわかった。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

本研究領域実施期間中に発表された論文は特にない。

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

(i)得られた研究成果の科学的・技術的インパクト

証明支援系を他の自動検証系の作業台としてもちいるという統合検証環境のアイデアはこの研究から出た実用的な考えである。従来の証明支援系は、厳格ではあるが、大規模なソフトウェアには適用困難で、それがこのようなシステムの実用を阻んでいた大きな原因である。検証システムを実際開発し、それを用いて実証的にシステム検証の研究成果を出しているグループは世界的に見ても数少なく、この研究により、実用性に向けた道筋を与えたことは大きな成果であり、インパクトは大きい。検証事例、検証システムや方法論の開発をとおして実証的にそのインパクトを示していくことが今後重要である。

理論的な成果については、その評価にいま少し時間が必要であり、方法論や検証システムの開発をとおしてその有効性を実証していくことになる。

(ii)国内外の類似研究成果と比較した、研究成果のレベルと重要度

形式的手法の研究は欧米で地道ではあるが息長く続けられてきた。フランスではそのための資金が国から出ているし、米国ではスタンフォードの研究などが著名である。わが国の研究はその点、立ち遅れていた状況にあり、国内で比較できる研究は殆ど存在しない。この研究は優れた成果を生んだとは言え、この分野で未だ世界をリードする状況に至っているとは言い難い。しかしながら、世界のトップレベルの成果を生み、トップレベルに追いつく段階になったと言えよう。また、本研究は国内の研究活動をリードしており、学会で活発に活動し、この分野を活性化している点は高く評価される。

一方、この研究は、現在情報システムで大きな問題となっているディペンダビリティを向上させる切り札となる研究と考えられ、それをいち早く開始させたことは時宜を得た研究であったと言える。

(iii)研究成果のさらなる展開

本研究で作成した統合検証環境を用いて、様々な実用ソフトウェアの信頼性を向上させる実用化研究への展開が期待できる。例えば、ソフトウェアのキー要素となるコンポーネントプログラムの検証がそうで、言語処理系、OS の部分モジュール、組み込み系ソフトウェア、プロセッサ仕様記述などが考えられる。更に、この環境と最近発展しつつあるフリーのモデル検査システムや SAT 解決システム(SAT Solver)などとの連携を図り、より強力な検証システムを実現することも期待される。

また、この研究領域で確立した論理 FOM μ に基づいた検証支援ツールの開発や、統合検

証環境自体の改良と洗練は、重要な研究テーマであり、それによってこの分野が更に大きく発展する可能性がある。

②社会・経済的波及効果

形式技法の基礎研究から技術移転にわたる幅広い活動をおこなうシステム検証研究センターが、本研究を契機に設立され、この分野の研究組織としては国内最大規模の組織として、本研究領域終了後も活動が続く情勢にあることを付け加えておきたい。3名の博士号取得者も輩出している。これは本研究の直接の研究成果ではないが、重要なアウトカムあるいは波及効果である。本研究開始時に比べ、現在ではソフトウェア不具合の社会的影響が格段に強く認識されており、この分野への社会的要請は強い。経済産業省による組み込みシステム検証試験施設の設立も、本研究が開始した研究センターの存在があつてこそ可能になったとさえいえる。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4報以内）

発表された論文は特にない。

3.2.2 ディペンダブル情報処理基盤（坂井 修一）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

情報システムのディペンダビリティ(dependability) の確保が大きな課題となっている。ディペンダビリティは、信頼性・安全性・可用性・堅牢性・拡張性などの複合的・総合的な性質である。本研究では、超分散型情報処理環境に必須なディペンダビリティを高度に実現する情報処理基盤を研究開発する。

②期間中の研究成果

(i)高度なディペンダビリティを実現

情報処理の効率を落とすことなく、また、アプリケーションプログラマに負荷をかけることなく、高度なディペンダビリティを実現した。特に、アーキテクチャやサーバ用基礎ソフトウェアの新技术をディペンダビリティの基本要素として、再構成による安全性確保、メモリ操作高信頼化、効率と安全性を高度に高めた暗号処理の導入、サーバの高信頼なスケジューリングなどを実現した。また、アプリケーション用基盤ソフトウェアとして、ミドルウェアが呼び出す方式によってプログラマとディペンダビリティ管理者の役割を分けることで、ディペンダビリティ向上の要素技術開発を行うとともに、情報インフラ全体にわたる基盤技術を確立した。

(ii)CPU アーキテクチャ

CPU アーキテクチャにおいては、ディペンダビリティのためのアーキテクチャ基本要素をディペンダビリティマネージャが呼び出す方式によって、確実にディペンダビリティを向上させた^[1]。

(iii)セキュリティ

ネットワーク侵入防止のために、ハードウェアからソフトウェアまでさまざまなレベルで侵入検知システムを提案・試作し、統合・実証した。

(iv)国内外の類似研究成果と比較した、研究成果のレベルと重要度

国内的にみると、この分野では疑いもなくトップレベルにある。国際的にみると、ディペンダビリティ技術の草分けとして、本研究は世界を先導した。要素技術的にみると、高信頼なアーキテクチャ技術は、世界的に様々なものが出されつつあり、本研究がすべてそれらを包含する訳ではないが、その幾つかでトップであって、総合的にみれば米国の先端

と同レベルにある。侵入検知システムに関しては、効率よいハードウェアアルゴリズムの提案で、40Gbps という超高速なシステムの実現性を示し、世界最高性能を示した。アスペクト指向プログラミング技術に関しては、その有効性を始めて具体的に示し、国際的に認知されており、世界トップレベルである。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1]Sakai, S ; Goshima, M ; Irie, H, "Ultra dependable processor " IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS, E91C, 1386-1393 (2008)

[2]Kenichi Kourai, Shigeru Chiba: A Fast Rejuvenation Technique for Server Consolidation with Virtual Machines. DSN 2007: 245-255 (2007),

[3]Akiyoshi Sugiki, Kenji Kono, and Hideya Iwasaki: Tuning mechanisms for two major parameters of Apache web servers, Software: Practice and Experience, Vol.38, No.12, pp.1215--1240, (Oct. 2008).

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

ディペンダブル技術の歴史は長いものの、統一的な取り扱いが極めて難しい領域である。従来、情報システムのディペンダビリティへの対応技術はアドホックな対応しか存在しなかったが、アーキテクチャから応用レベルに至る基本的な対応技術のセットを提案し、それぞれの効果を定量的に評価した。これによって、従来のコンピュータシステム研究とは質の異なった新技術を複数提案できており、情報システムの構築にインパクトを与えた。

更に、学術的にも情報の信頼性評価手法を開発するとともに、新しいプログラミング手法として、アスペクト指向技術の有用性を実用的なソフトウェアの開発を通して実際に検証し、この分野の国際会議で高い評価を得た。これらにより新分野を開いたといえる。

②社会・経済的波及効果

ディペンダブルアーキテクチャについては、本手法をベースに、今後出てくる微細実装技術、35nm 以下のテクノロジーで、プロセッサなどの論理回路を実現する場合に発生することが予想されている回路の不安定性に対処する技術として使われ今後実用化されることが考えられる。

具体的な実用分野として、侵入検知システムでは高速システムをハードウェアで実現する場合に有効である。フィルタ技術についても、従来対応が困難であった新たな脅威に対応する技術として実用される可能性がある他、応用レベルのプロトコル情報を用いた高精度な侵入検知手法として発展することも考えられる。プログラミングの分野では、開発したアスペクト指向言語 GluonJ を更に普及させ、様々な応用を開拓し、求められる信頼性や安全性、安定性などへの要請に、応用本体とは独立な形で対応する一般的な手法として

発展することが期待できる。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4報以内）

[1]Ryota Shioya, Daewung Kim, Kazuo Horio, Masahiro Goshima, and Shuichi Sakai:Low-overhead architecture for security tag,IEEE Int'l Symp. on Pacific Rim Dependable Computing (PRDC 2009),

[2]Toshihiro Yokoyama, Miyuki Hanaoka, Makoto Shimamura, Kenji Kono, Takahiro Shinagawa: Reducing Security Policy Size for Internet Servers in Secure Operating Systems, IEICE Trans. on Information and Systems, Vol.E92-D, No.11, pp.2196--2206, (Nov. 2009).

3.2.3 フルーエンシ情報理論にもとづくマルチメディアコンテンツ記述形式（寅市 和男）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

本研究の目的は、Post-Shannon として体系化されてきている日本独自に開発して来ているフルーエンシ情報理論と言われているものの、各種マルチメディア共通記述形式としての有効性を実証することにある。そして、この統一された共通記述形式により、各種コンテンツの編集・配信・提示・検索・インターネットのなかで効率的・容易に行えることを実証する。

②期間中の研究成果

(i) 高精細かつ高圧縮な符号化フルーエンシ DAC (D/A コンバーター)

音声、印刷・静止画、映像・動画が混在したメディアからコンテンツ及び領域が全自動で分類され、分類された領域毎に、輪郭線函数化、濃淡函数化、周波数函数化が施され、高精細かつ高圧縮な符号化を行う。符号化された情報は、少ないデータ量で高精細な提示が行え、編集・配信・検索も容易となる。同一のデジタル信号は DA 函数の違いにより異なるアナログ信号波形に変換される。フルーエンシ理論は、超函数の導入により深化させ従来の正則信号空間の理論から非正則信号空間の理論に展開し、区分多項式函数による不均等間隔変換函数、特性可変型変換函数、多変数変換函数等を導出した。これらの函数を信号の特徴に応じて適応的に選択することで、音・印刷・静止画・映像・動画情報を統一的に記述し、編集・配信・提示・検索が高品質、高圧縮、高速に処理可能なマルチメディアシステムを実現した。

D. T. P. (Desk Top Publishing) へのフルーエンシ函数近似化手法を適用することにより印刷技術の向上につながったと評価されている。

このこと印刷・静止画、映像・動画においても、高精細拡大・縮小技術が企業との共同研究により実用化、製品化へと広がっており、Post-MPEG としてのデファクトスタンダード技術を確立しつつある。画像のリサイズ化技術は、従来技術に比べて精細さと処理時間で飛躍的に効果があることをモバイル画像コンテンツの処理技術として通信事業者が自社製品に組み込んで製品化している。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1]Kwan, PWH ; Kameyama, K ; Toraiichi, K , "On a relaxation-labeling algorithm for real-time contour-based image similarity retrieval", IMAGE AND VISION COMPUTING, 21, 285-294 (2003)

[2]Toraiichi, K ; Kwan, PWH ; Katagishi, K ; Sugiyama, T ; Wada, K ; Mitsumoto, M ; Nakai, H ;

Yoshikawa, F , "On a Fluency Image Coding System for Beef Marbling Evaluation", PATTERN RECOGNITION LETTERS, 23, 1277-1291 (2002)

[3]Kameyama, K ; Kim, SN ; Suzuki, M ; Toraiichi, K ; Yamamoto, T , "Content-based image retrieval of kaou images by relaxation matching of region features", INTERNATIONAL JOURNAL OF UNCERTAINTY FUZZINESS AND KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS, 14, 509-523 (2006)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

(i)得られた研究成果の科学的・技術的インパクト

フルーエンシ情報理論の確立は、この分野における科学的成果であり、その有効性の実証と要素技術の開発は技術的成果である。この情報理論に基づく共通記述形式は、音・静止画・動画など様々なマルチメディア情報を、それぞれに適した最適な関数で表現することを可能にするもので、従来のアドホックな寄せ集めの世界から、より統一された世界を開くものである。

技術的には、音響では非常に高品質な方式を実現し、静止画では高精細でスケーラブルな方式を開発し、動画では従来の方式を超える優れた圧縮方式を実現した。これらはそれぞれに優れた技術的成果である。現存する音響や映像コンテンツに汎用的に適用できる理論の構築とその有効性をプロトタイプで実証している点、および今後登場が期待されているスーパーハイビジョン等の高精細コンテンツに対しても応用可能な理論である。

(ii)国内外の類似研究成果との比較

音響の分野では、高品質な領域においてオーディオ企業に既に採用され、定評もあり、世界でトップであって十分に先行している。静止画や画像分野の技術研究では、静止画に対しては従来技術よりも優れた品質を実現することが印刷業界の画像評価技術者に確認されている。画像に対しても、優れた圧縮技術として、厳しい使用環境である携帯電話に採用されていることから優れた成果であると考えられる。

②社会・経済的波及効果

音響装置ではゴールデンサウンド賞他 52 の賞に輝き、フルーエンシ DAC は世界標準技術となっている。この音響信号処理及びテレビ用信号処理技術は、国内企業により IC 化、高解像度変換処理 LSI として製品化されており、世界市場へ展開している。画像のリサイズ化技術については、従来技術に比べて精細さと処理時間で飛躍的に効果があることをモバイル画像コンテンツの処理技術として通信事業者が自社製品に組み込んで製品化している。

マルチメディア処理の技術の基本となる信号記述方式に影響与えており、広く使われる可能性がある。音響では、補聴器やテーラーメイドオーディオ、静止画では高精細の DTP システム、映像では遠隔医療、4K/8K に対応した映像の高解像度化、モバイル機器画像処理

の高速化などが期待できる。

今後映像は 4K/8K に代表されるように高精細化の一途をたどって、表示装置もその傾向を踏襲する。その中で過去の膨大なコンテンツを高精細に見せるかが大きな課題であり、フルーエンシ理論による高周波成分の補間は、いわゆる「超解像度化」という大きな研究分野の最も強力なツールとなり得る。処理量も重要なファクタであり、今後は低処理量・高性能な動画像向けアルゴリズムの構築にも期待できる。

上述したように、フルーエンシ技術は学会発表、論文投稿を通じて学術的進展に貢献すると共に、多くのベンダからの引き合いが来るなど、技術的インパクトは極めて高く、企業との事業化も行われている。

テレビ信号の高解像度化技術の一部が、防犯カメラ映像の解像度変換に有効なことから、警視庁を始め各都道府県警から画像解析依頼を受け、科学捜査に貢献した。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4報以内）

[1]Kazuki Katagishi, Kenichi Ikeda, Mitsuteru Nakamura, Kazuo Toraichi, Yasuhiro Ohmiya and Hitomi Murakami, Quadratic Fluency DA Functions as Non-uniform Sampling Functions for Interpolating Sampled-values, WSEAS (World Scientific and Engineering Academy and Society) Transactions on Circuits and Systems, Issue1, Vol 8, pp.125-135 (January 2009).

[2]Kentaro Miyamoto, Tetsuo Kamina, Tetsuo Sugiyama, Keisuke Kameyama, Kazuo Toraichi and Yasuhiro Ohimiya, Function Approximation Method for Images with Grading Regions, International Journal of Image and Graphics Journal vol.9, pp101-119, (January 2009).

[3]Masakazu Higuchi, Shuji Kawasaki, Kazuki Katagishi, Mitsuteru Nakamura, Kazuo Toraichi, Hitomi Murakami and Yasuhiro Ohmiya, “A Design Method of Narrow Band FIR Filters Based on Fluency Sampling Function of Quadratic Piecewise Polynomial”, WSEAS (World Scientific and Engineering Academy and Society) Transactions on Systems, Issue 6, Vol.8, pp.733-742 (June 2009).

[4]寅市和男、片岸一起、現代波形解析：フルーエンシ解析、電子・情報・通信学会出版会 (近刊)

④その他

「D. T. P. へのフルーエンシ関数近似化手法」が日本印刷学会論文賞、印刷朝陽会賞を受賞した。また、国際会議 CCCT2004 から「フルーエンシ情報理論およびその応用システム」の招待シンポジウムを開催し、国際的にも学術的貢献をおこなった。音響装置ではゴールデンサウンド賞他 52 の賞に輝き、フルーエンシ DAC は世界標準技術となっている。

3.2.3 量子情報処理ネットワーク要素技術（武藤 俊一）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

将来の量子情報処理ネットワークに必要な要素技術として、特に量子中継器と単一光子源に注目し、これを半導体量子ドット中の電子スピンを用いて実現するための基礎研究を行う。高性能な中継器は、量子暗号通信の通信距離を飛躍的に増大させ得るものであるが、むしろ量子コンピューティング間のネットワークのための中継器を研究開発する。

②期間中の研究成果

(i)単一光子光源として InAlAs 量子ドットを用いた光子源を開発

光子相関測定による光子アンチバンチングの確認を行い、高感度の光子検出が可能な 0.7-0.8 ミクロンでのオンデマンド光子発生の可能性を確認した。また予期しない成果として 1990 年から提案されていた Datta-Das 型スピントランジスタを実現した。InAlAs 量子ドットの荷電励起子を選択励起することにより、ゼロ磁場で 73%の円偏光度を実測した。世界最高の特性であると共に、光子-電子スピンの量子情報保存変換の可能性を示すことができた^[1]。

(ii)核磁場を用いた量子ビットの変換手法を提案

InAlAs 量子ドットの実験により十分な核磁場の大きさが得られ、これが制御可能であることを示したことは世界初であった^[2]。更に核分極のスイッチングを実測し、データを分析した結果、変換に必要な電子のエネルギー構造が自動的に、したがって安定して実現していることも初めて見出した^[3]。ゼロ磁場での円偏光度のデータと合わせると、この条件で量子ビット変換が可能であることを強く示唆すると考えられる。

以上是个々の要素に関する成果であるが、単光子光源も含めてすべて InAlAs 量子ドットで実現したことは、すべてを共振器の中に集積化できる可能性を示している。量子情報処理ネットワークの基礎技術を開発したと考えている。

特に、核磁場については、それまでは、量子ドットといっても量子井戸の界面での凹凸によるものを用いた研究が殆どであった。InAlAs 自己集合量子ドットにおいて光照射により大きな核磁場が形成できること、またその大きさが照射する光の円偏光度により制御できることを示したことは、その後の自己集合量子ドットでの核磁場研究の世界的な流れを作ることになった。更に科学的インパクトとして、核分極スイッチング時に電子スピン分極も同時にスイッチングを見出したことにより、「電子スピンの分極は核スピンの無関係に決まる」という定説を覆したと考えている。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1]Kumano, H ; Kimura, S ; Endo, M ; Sasakura, H ; Adachi, S ; Muto, S ; Suemune, I , "Deterministic single-photon and polarization-correlated photon pair generations from a single InAlAs quantum dot", JOURNAL OF NANOELECTRONICS AND OPTOELECTRONICS, 1, 39-51 (2006)

[2]Yokoi, T ; Adachi, S ; Sasakura, H ; Muto, S ; Song, HZ ; Usuki, T ; Hirose, S , "Polarization-dependent shift in excitonic Zeeman splitting of self-assembled In_{0.75}Al_{0.25}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum dots", PHYSICAL REVIEW B, 71, (2005)

[3]Kaji, R; Adachi, S; Sasakura, H; Muto, S, "Hysteretic response of the electron-nuclear spin system in single In(0.75)Al(0.25)As quantum dots: Dependences on excitation power and polarization", PHYSICAL REVIEW B 77, 115345/1-5 (2008).

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

単一光子光源の可能性を与えた。スピントランジスタをほぼ実現した。核磁場を用いた光-スピン間の量子ビット変換手法を提案しその高い実現性を与えた、など。これらは世界で初の成果である。特に、核磁場の方式については、世界で自己集合量子ドットを用いた研究の流れを作ったことはかなり大きなインパクトである。また、励起子における核スピン反転や円偏光との結合など、丁寧な実験によって新しい現象を見いだしている。

これらの成果は、それぞれに今後発展が期待できる。具体的には、単一光子源は量子暗号通信に、スピン FET は non-volatile 素子として、量子ドットのバンド構造解明は、スピン系のコヒーレンス時間の増長に、それぞれインパクトを与える。

InAlAs を用いて量子情報処理に向けた一連の研究で、かなり多くの要素技術を開発した。中でも核磁場を用いた研究の先鞭を付けたことは高い成果である。また、国際会議での招待講演を少なからず受けていることから、世界的に見て優れているのは、量子ビット変換用バンド構造の実現であろう。しかしながら、量子情報処理の研究自体は世界でも数多く、他の成果は、他と比較して同等レベルである。

②社会・経済的波及効果

社会・経済的に大きなインパクトを生み出す遠距離の量子通信を実用化するためには、光検出-増幅-光再送信という従来の方式ではなく、未だ可能性が見えていない量子演算を実現した上で、量子操作による量子中継器を実現することなどが期待される。このために、テレポーテーションあるいは量子もつれ合いスワッピング等の各要素技術の実現性に対する細かな詰めのデータ集積とプロセス技術の開発加速が必要である。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4報以内）

[1]“Discrimination of quantum dots using an optically created nuclear field”, H. Sasakura, R. Kaji, S. Adachi, and S. Muto, Applied Physics Letters 92, 041915/1-3 (2008).

[2]Ohno, S ; Adachi, S ; Kaji, R ; Muto, S ; Sasakura, H , "Optical anisotropy and photoluminescence polarization in single InAlAs quantum dots", APPLIED PHYSICS LETTERS, 98, (2011)

[3]Kaji, R ; Adachi, S ; Shindo, T ; Muto, S , "Quasiresonant exciton spin orientation and alignment in a single quantum dot under zero and nonzero magnetic fields", PHYSICAL REVIEW B, 80, (2009)

[4]Kaji, R ; Adachi, S ; Sasakura, H ; Muto, S , "Direct observation of nuclear field fluctuations in single quantum dots", PHYSICAL REVIEW B, 85, (2012)

3.3 2003 年度採択課題

3.3.1 自律連合型基盤システムの構築（加藤 和彦）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

インターネットは、ローカルなネットワークを相互接続するネットワークとして発展してきたものであるが、単に地球規模で広域的かつ巨大なネットワークの相互接続網であるだけでなく、巨大数の自律ネットワークの、微妙とも言える協調・連合によって維持された、中央管理者や中央管理ポリシーのない分散システムと見ることができる。さらにインターネットは成長する、複雑ネットワーク(**complex network**)の一種であり、何らかの全体計画的な設計の元で成長していくのではなく、ローカルに隣接するネットワーク管理者の同意に基づき、総体として成長していく。本研究では、インターネットを一つの分散システム環境と見なし、その上で分散サービスを構築・提供するための基盤技術の開発を行った。基盤ソフトウェアを構成する、オペレーティングシステムとミドルウェア層、ネットワーク層、データインターオペラビリティ層、プログラミング言語層の 4 層に渡って、今後の情報社会の発展に寄与し得ると考えられる技術開発を総合的に行った（図 3-2 参照）。

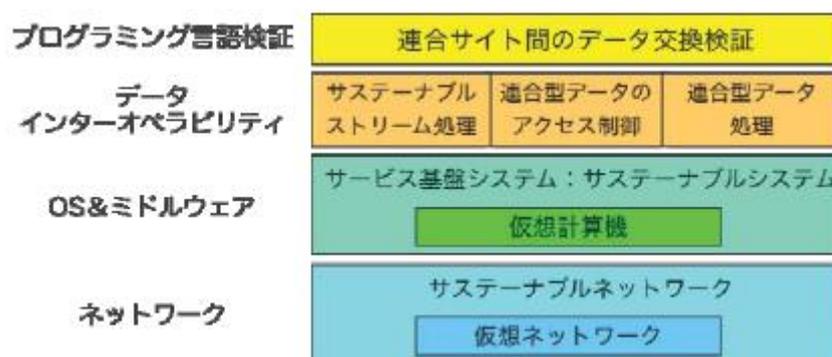


図 3-2 自律連合型基盤システムの概要

②期間中の研究成果

(i) オペレーティングシステムとミドルウェア層

仮想計算機を利用した特定のサービスによらない障害対策手法を開発した。インターネット環境における自律連合システムのためのサステナブルサービスという概念を着想し、その着想に基づいたシステムの設計と実装を行った。2007 年秋頃から、米国の IT 産業界を中心としてクラウドコンピューティングシステムと呼ばれる概念が注目されるようになったが、本研究はそれらの動きとは全く独立に、同時期に同様の概念を形成し、そして、クラウドコンピューティングシステムの基盤システムとして機能し得るシステムを構築し

たものである。代表的な技術内容は次の通りである。

- 軽量仮想機械モニタである Scrap Book User-Mode Linux (SBURL)、および、ネットワークで結合された複数の計算機を、仮想的な一つの並列計算機と OS に認識させることができる並列仮想計算機モニタを開発した。
- 広域分散アーカイブストレージに関する研究を進めた。複雑ネットワークの一種であるスモールワールドモデルに基づいた広域分散アーカイブストレージの設計と、その基本的な性質の評価を行った。
- プロセスレベル仮想化技術を用いて、現実の分散アプリケーションの動作テスト・性質調査を可能とするシステムを開発した。20 台の PC クラスタ上で、実際の P2P アプリケーションを 6000 個の仮想ノードで立ち上げ、稼働させることができる。
- OS 環境をインストールした仮想ディスクをネットワーク上のサーバに置き、インターネットを介して OS をブートするシステムの開発を行った。インターネットのレイテンシーを考慮し、ディスクブロックの最適転送手法、近くのサーバ検索により、高速ブートを可能とする最適化手法を開発した。また、仮想ディスクを管理するサーバをサステナブルシステムとして稼働させるシステムの開発も行った。

(ii) ネットワーク層

- L3 レベルでネットワークを仮想化し、一台もしくは複数台のコンピュータ上に、計算機資源が許す限りの任意個の仮想ルータを生成し、仮想的なインターネットを構築することを可能とするシステムの開発を行った。
- ストリーム通信の中継サービス機能をサステナブルに提供するシステムを開発した。
- ネットワークレイヤでサステナビリティを提供するために、DDoS (分散サービス拒否攻撃) に対する耐性を有する仮想ネットワーク技術 Burrows/overfort の提案を行った。
- 耐障害性を向上させるネットワークレイヤ技術として、one-hop source routing を用いて、ルータで一度だけパケットを反射させることによってリンク障害を回避する AIRONE というシステムの開発を行った。

(iii) データインターオペラビリティ

- 自律した連合サイト間でストリームデータ (センサ情報、位置情報、カメラ映像等) の分散処理を行うシステム StreamSpinner の開発を行うと共に、そのシステムと OS・ミドルウェア研究で開発したサステナブルシステムの技術を統合して、耐障害性を有しながらストリームデータ処理を行うシステムの開発を行った。
- 自律的に運用されるサイト群における統合データモデルに基づいた分散処理を行なう「水平方向」のセキュアなメディアーション処理と、アダプタを介して各種情報源から統合データモデルへの変換を行なう「垂直方向」のセキュアなラッピング処理について研究を行った。問合せ発行者のみならず、処理に参加する各自律サイトについてもデータアクセス権を設定するものとし、それら全てに違反しないような

問合せ最適化手法を実現した。

- 構造型 P2P ネットワークの一種である分散ハッシュ表 (DHT) を対象に、汎用の XML データ検索・格納機構を開発した。

(iv) プログラミング言語検証

- プログラム解析の技術を Web プログラムに適用し、Web システムを構成するシステム間で生じる不整合を検証する技術を開発した。プログラムの文字列出力を、文脈自由文法を用いて近似するプログラム解析 (文字列解析) 技術を考案し、このプログラム解析をサーバサイド・プログラムに適用することで、生成されうる Web ページの近似を得ることができ、サーバサイド・プログラムの脆弱性の検出や生成される Web ページの妥当性検証が可能になる。この解析をサーバサイド・プログラミング言語 PHP に対して実装し、Web 上で公開した。この解析器を用いてフリーソフトウェアを検査し、妥当性等のプログラムの誤りを発見することに成功した。
- サーバサイド・プログラムが生成する Web ページが常に文法的に正しいか (妥当であるか) 文字列解析を用いて検証する研究を行った。
- 文字列解析と情報流解析を融合することにより、クロスサイトスクリプティング問題を引き起こす脆弱性検出技術の開発を進めており、単純な場合の脆弱性検出に成功している。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] Y. Minamide, Static Approximation of Dynamically Generated Web Pages. In Proc. of the 14th International World Wide Web Conference, pp. 432-441, 2005.

[2] 小磯知之, 阿部洋丈, 鈴木与範, Richard Potter, 池嶋俊, 加藤和彦: サステナブルサービスのための基盤ツールキットの設計, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol. 48, No. SIG3 (ACS 17), 2007 年 2 月, pp. 13-26.

[3] Richard Potter and Kazuhiko Kato: SBUML: Multiple Snapshots of Linux Runtime State, JSSST Computer Software, Vol. 26 (2009), No. 4, pp. 120-137.

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

① 科学技術の進歩への貢献

本研究は、仮想計算機技術を駆使したサービス構築基盤を開発した。今日、クラウドコンピューティング基盤の技術として IaaS (Infrastructure as a Service) という技術が定着しており、商用では米国 Amazon 社の EC2 システムが有名である。本研究は、それとは独立に、IaaS クラウド基盤技術を開発したものである。

CREST 研究に基づいた展開として、競争的研究資金、総務省 戦略的情報通信研究開発推

進制度 (SCOPE) ICT イノベーション促進型研究開発を獲得し、研究プロジェクト「ディペンダブルな自律連合型クラウドコンピューティング基盤の研究開発」(2009-2011 年度) (直接経費計 10,727 万円) を実施した。このプロジェクトでは、CREST 研究を含む、本研究代表者らのそれまでの研究成果を発展させると共に、実用的な環境での有効性を実証することを目的とした。そのために、富士ソフト株式会社の協力を得て、同社のソフトウェア技術者 3 名が筑波大学に 3 年間常駐し、いかのような研究を行った。また、同社の 3 箇所 (東京、横浜、福岡) の商用データセンターと、筑波大学のサーバー設備、計 4 箇所をネットワーク接続して、仮想計算機技術を駆使したサービス構築基盤の開発と実用性に関する検証実験を行った。

また、本研究の発展として、「仮想計算環境のためのプログラミングシステム・フレームワークに関する研究」(文科省 科研費基盤 B、2010-2012 年度、直接経費計 1,380 万円) を実施した。この研究では、CREST 研究で開発したシステムの後継ソフトウェアシステムであるクラウド基盤システムソフトウェア Kumoi を拡張し、アプリケーションサービスを制御したり、アプリケーションサービスの最適化パラメータチューニングや、耐障害性を向上させる機能の開発を行った。

さらに、「耐災害性を有するクラウド型遠隔代替稼働システムの開発」(総務省 先進的通信アプリケーション開発推進事業、2013 年度直接経費 995 万円) では、独立行政法人 情報通信研究機構 (NICT) が主体となって運営する JGN-X という高速広域ネットワークプラットフォーム上に、CREST 研究で開発した技術を発展させて、耐災害性を有するクラウド型遠隔代替稼働システムの開発を進めた。

②社会・経済的波及効果

CREST 研究で行った研究は、今や一般社会の情報システムの一形態として一般的となった「クラウドコンピューティング」を、全く独自の発想と研究の積み重ねによって開発したものである。CREST 研究がきっかけとなり、研究代表者の加藤は、クラウドコンピューティングの分野で、国内において最も著名な研究者の一人となった。例えば、2011 年 (クラウドコンピューティングが社会的に注目された時期の) だけでも 9 回もの招待講演を行っている¹¹。また、独立行政法人 情報処理推進機構 (IPA) の「クラウドコンピューティング社会の基盤に関する研究会」の座長を務め、中心となってクラウドコンピューティングが社会に与える影響を調べる調査と調査書の執筆、およびその一般公開を行った¹²。この報告書は、公開当時、大きな反響を呼び、IPA が公開した報告書の中でも最もダウンロード数が多い報告書の一つとなった。また、その作成に携わった経済産業省「SaaS 向け SLA ガイドライン」¹³は、クラウドコンピューティングの主要利用形態の一つである SaaS (Software as a Service) を利用する上での公的なガイド指針として、社会で広く利用されるものとなっている。

さらに加藤は、2012 年 4 月に筑波大学学術情報メディアセンター教育クラウド室室長と

¹¹ <http://www.oss.cs.tsukuba.ac.jp/kato/index-j.html>

¹² <http://www.ipa.go.jp/about/press/20100324.html>

¹³ <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80207c05j.pdf>

なった。これは、本学執行部の要請により、筑波大学全学（教職員と学生を併せて約2万1千人規模）のeラーニングシステムの構築をクラウドコンピューティングの概念に基づいて構築していくためである。さらに加藤は、文部科学省の医学がんプロ¹⁴の全国eラーニングクラウドのシステム管理責任者を担当している。これは「がん」に関連する、全国の約80の医学関連大学院（医学、薬学、理学療法学、看護学等）のeラーニング教育（動画ベース）を筑波大学の医学部と教育クラウド室が一手に担っている。登録学生ユーザ数は約2千人、関係する教職員数も約2千人である。これらの教育クラウドシステムの構築は、CREST研究で行っていたことの実践であり、その研究があったからこそ、実用レベルでシステム構築することに成功しており、学内および日本全国の多くのユーザの実用に供しているものである。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4報以内）

[1]Akiyoshi Sugiki, Kazuhiko Kato, Yoshiaki Ishii, Hiroki Taniguchi, and Nobuyuki Hirooka, “Kumoi: A High-Level Scripting Environment for Collective Virtual Machines”, IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS 2010), pp. 322-329 (December 9th, 2010).

[2]Jumpei Okoshi, Koji Hasebe and Kazuhiko Kato. Power-Aware Autonomous Distributed Storage Systems for Internet Hosting Service Platforms. 3rd International Conference on Cloud Computing (CloudComp 2012), 10 pages, Sep., 2012.

[3]杉木章義, 奥畑聡仁, 加藤和彦: クラウド基盤ソフトウェアにおける Failure-Oblivious Computing の導入”, 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (ACS) , 5 (5), pp. 103-117, 2012年.

¹⁴ <http://kanto-kokusai-ganpro.md.tsukuba.ac.jp/>

3.3.2 ヒューマノイドのための実時間分散情報処理（松井 俊浩）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

ヒューマノイドロボットのような大規模で複雑なシステムの実現には、実時間制御機能と高い情報処理性能の両立が必要である。従来のヒューマノイドロボットは、1-2 個のプロセッサによる集中制御が行われているが、約 30 の関節プロセッサによる実時間・分散制御の実現によってこの課題に挑戦する。本研究は、次の三つで構成する。①RMTP の開発：実時間性にすぐれたマルチスレッドアーキテクチャ、高並列のベクトルユニット、実時間通信チャンネルを備えたプロセッサを作成する、②実時間基盤ソフトウェア：Linux-2.6 を拡張して優先度に基づく実時間スケジューリングを可能にし、プログラムの実行時間を静的に予測する技術を開発する、③ロボット実証：認識、対話、歩行、経路計画などの機能をモジュラーに構成することで分散化し、並列処理を活用して性能向上を図る。プロセッサのマルチスレッド並列、ベクトル並列、分散処理によって、Pentium 級の処理性能を低消費電力で実現する。プロセッサをセンサやアクチュエータの近くに配置することで、信号線の延長を大幅に削減し、高い信頼性を実現する。分散制御のため、通信およびマルチスレッド実行を実時間化し、優先度や資源割り当て等を行う基盤ソフトウェアを開発する。これらの技術をロボットに集積することで、高度で高信頼のロボット制御を実現する。

②期間中の研究成果

- 実時間・分散向きの新規なプロセッサアーキテクチャ RMTP を設計し、システムオンチップとして試作した。CPU とメモリを小型の SiP として実装し、Linux を動作させた。
- 実時間分散制御に必要な通信機能を Responsive Link として開発し、ISO/IEC-24740 として国際規格化を達成した。
- Linux に実時間スケジューリング機能を実現した。各種のプロセッサとメモリモデルに基づいて C と C++ プログラムに適用可能な WCET 解析ツールを開発した。
- ロボットの関節に分散させたノードをレスポンスリンクで結合するアーキテクチャを提案し、体積比で従来の 1/17 の関節ノードモジュールを開発した。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1]Matsui, T (Matsui, T); Inuzuka, N (Inuzuka, N); Seki, H (Seki, H), “On-line profit sharing works efficiently”, KNOWLEDGE-BASED INTELLIGENT INFORMATION AND ENGINEERING SYSTEMS, PT 1, PROCEEDINGS, pp.317-324 (2003)

[2]Ishiguro, T (Ishiguro, T); Matsui, T (Matsui, T); Inuzuka, N (Inuzuka, N); Wada, K (Wada, K), “Reinforcement learning methods to handle actions with differing costs in MDPs”,

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

実時間制御用プロセッサのアーキテクチャを示し、実時間処理の解析手法を与え、ロボット制御に対する分散アーキテクチャのあり方を示したことは科学的に大きなインパクトを与えたといえる。また、最新の SiP 実装をトライし、その可能性を示すことで技術的なインパクトを与えた。それらを融合してデモするところまで達成すれば、誰にでも分かりやすい大きなインパクトになったであろう。

国内・国外を問わず、厳しい今後に求められる実時間制御を可能にするロボット技術を、プロセッサから OS、実装まで一貫しておこなっているプロジェクトは、これ以外に存在しない。従って、この成果は明らかに世界でトップレベルにある。また、その重要な要素技術の一つ Responsive Link が国際標準になったことは、この技術が、他の通信技術に比して飛びぬけて優れた性能を有することの証明でもある。更に、実時間カーネルと解析技術 WCET の技術は、ロボットのみならず、他の実時間制御で十分通用する優れた技術である。

これらの技術を使って様々な実装が行われれば、その利用価値が広く明らかになり、更に発展する可能性がある。特に、Responsive Link や実時間カーネルは、広く使われる可能性がある。一方、プロセッサ技術に関しては、商用の Core2 などに比して、明らかに方式上の優位性を有するが、それだけでは広く使われるとは限らない。プロセッサの系列を継続的に開発してゆく体制が伴わない限り、面白い技術に留まる可能性が高い。しかし、組み込みチップベンダーがこの優位性を取り入れることがあれば、大変大きな展開となる可能性がある。

②社会・経済的波及効果

高信頼の実時間通信方式である Responsive Link が 2002 年に情報処理学会において標準化、2007 年に ISO/IEC-JTC1 SC25(コンピュータ・デバイスネットワーク部門)で ISO/IEC 24740 として国際標準化されたことで、ロボット他の分野にも広がる可能性がある。

実時間制御向けのプロセッサについては一定のニーズがあるものの、複雑なシステム LSI として開発にかかるコストや手間を一つ研究機関で負担するのは難しいのも事実である。そのような環境ながら、本プロジェクトの中では、プロセッサを開発するにあたり ART-Linux などの開発環境や動作環境を整備することにつながった。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト (4 報以内)

特になし

3.3.3 ディペンダブルで高性能な先進ストレージシステム（横田 治夫）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

①研究のねらい

情報技術の発達により、個人や組織のシステムが保持するデータの種類や数・容量が爆発的に増加している。これからの情報社会においては、そのような膨大なデータを確実に蓄積し、安定して供給することが強く求められている。これまでの情報システムでは、多種・大量のデータの蓄積・供給のために、専門家が関わって緻密に管理してきた。しかし、人間の管理能力には限界があり、システムの構築や運用における管理コストの増大を招いている。特に、システム中に故障や負荷の偏りが発生した場合に、情報提供サービスの品質の保持するための管理が困難となってきた。さらに、利用者が必要とする情報を探し出し、有効に活用するための格納方法や検索方法もデータの多種・大量化に対応する必要も生じている。

本研究では、これからの情報社会に求められる情報システム基盤としてのストレージ機能を提供することを目的に、以下の要素技術を確立することを目指して研究を行う。

- データの数・容量が増加しても容易にシステムを拡張し性能を向上
- システム規模が拡大しても低管理コストでコンテンツを安定して提供
- 故障や負荷
- の偏りが発生しても提供するサービスの品質を保持、
- 蓄積された多種多様なコンテンツの特徴を活かした管理・検索を可能とする

②期間中の研究成果

システムに拡張性を持たせ管理コストを削減するため、従来はサーバで行われてきた管理・検索処理をストレージ側で分散して行うアプローチを取り、その実現のために必要となる一連の技術を提案した。実験等によってその有効性を示し、トップレベルの国際会議や各種論文誌等でその成果を多数公表し、高い評価を得た。

さらに、提案技術の組み合わせによって実際にこれまでにないストレージ環境が実現できることを示すために、プロトタイプハードウェアとその上のソフトウェアを開発し、デモンストレーションを行って、提案技術の効果をわかり易く公開してきた。

(i)先進ストレージ研究統轄・推進グループ

ストレージ管理・検索処理をストレージ側で効率よく行うための様々な手法を提案し、実際の並列環境を用いた実験によってその効果を示した。例えば、分散環境での同時多数アクセスに対応するために、通信コストを抑えた分散ディレクトリ用の同時実行制御手法を提案し、多数ノードを用いた実験によって、高性能でシステムの拡張性に優れていることを実証した^[2]。また、ストレージノード間でデータの一貫性を保つための効率的な分散コミットプロトコルを提案し、従来プロトコルと比較して非常に効率的であることを実証し

た。さらに、ストレージノード間のアクセスバランスと容量バランスを両立させるために、プライマリ・バックアップ構成の特徴を活かしたデータ配置手法と、差分バージョンを有効利用した手法を提案すると共に、それらの均衡化処理の際に発生するデータ移動によるサービス品質の低下をできるだけ抑えるノード間データ転送手法に関する提案も行い、その効果を確認した。この他、ストレージにおける暗号化手法や、ストレージに格納される XML を効率よく扱うための、ラベリング手法や索引構造、類似した XML 部分木を効率よく発見する方法等に関して提案を行い、その効果を示した。

(ii)高度メディア蓄積・管理手法研究グループ

先進ストレージシステムに格納される高度メディアのメタデータあるいはデータそのものとして XML に着目し、XML の分散格納方式と高速検索手法に関して提案を行い、効果を示した。ストレージ側で XML 処理を行う独自のエンジンの開発を行い、これまでの手法に比べて格段に高速に検索が可能なることを示した。また、XML のデータ分割および分散配置に関しても独自の手法を提案し、類似研究に比べて高い性能が得られることを示した。

(iii)ストレージネットワーク研究グループ

先進ストレージシステムの利用範囲拡大のために、広域分散を考慮したストレージネットワーク技術に関して研究を行った。広域分散環境で安全に利用するための VPN を想定し、VPN 上でストレージネットワークの信頼性と性能を向上させる手法に関して提案と評価を行い、その効果を示した。

(iv)システムアーキテクチャ研究グループ

先進ストレージシステムの機能を実証するための開発プラットフォームとして、自律ディスクプロトタイプのシステムアーキテクチャの検討及び試作を行った。プロトタイプシステム上の自律ディスクソフトウェアへの機能追加と汎用環境へ対応する I/F の追加を行い、先進ストレージシステムの機能検討と実環境での検証を可能とした。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1]Watanabe,A; Yokota,H; "Adaptive Overlapped Declustering: A Highly Available Data-Placement Method Balancing Access Load and Space Utilization", in Proc. of 21st International Conference on Data Engineering (ICDE2005), IEEE, pp.828-839,(2005)

[2]Yoshihara,T; Kobayashi,D; Yokota,H; "MARK-OPT: A Coucurrency Control Protocol for Parallel B-Tree Structures to Reduce the COST of SMOs", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E90-D, No. 8, pp.1213-1224, (2007)

[3]Liang, WX ; Yokota, H , "LAX: An efficient approximate XML join based on clustered leaf nodes for XML data integration", in Proc. of 22nd British National Conferences on Databases (BNCOD22),

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

①科学技術の進歩への貢献

今後の情報システムはストレージがキーである。そのストレージ構成に対して、今後の方向性を見据えた先進的な機能を実現する手法を与えた。分散制御、データ配置、コンテンツ管理などで、これらは、この分野に大きなインパクトを与えている。ストレージに関する研究は元々、企業による開発が主体となっており、他の類似研究と比較することは容易でなく、また、世界の大学における研究に比べても完成度の高い優れた研究となっている。そのような領域の研究が一流の国際会議に採択されることは大変難しい。世界の研究に比して、十分にレベルの高い研究となっていると言える。

②社会・経済的波及効果

クラウドに代表されるようにシステムが物理的に集約される傾向にあり、ストレージの重要性は今後ますます高まると予想されている。企業と連携して研究開発を進めており、既にプロトタイプを構築しており、実用化を目標としたものである。既に完成度の高い技術であるが、既存技術から移行には様々な制約があるため、すぐに普及につながるものではないと考えられる。普及のためには、オープンソース化などの情報発信を進めることが重要である。

③上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4報以内）

[1]Ben Lakhall, N ; Kobayashi, T; Yokota, H , "FENECIA: failure endurable nested-transaction based execution of composite Web services with incorporated state analysis", VLDB JOURNAL, 18, 1-56 (2009)

[2]Liang,WX; Takahashi, A; Yokota, H; "A Low-Storage-Consumption XML Labeling Method for Efficient Structural Information Extraction" Database and Expert Systems Applications of LNCS (Proc. of DEXA2009), (2009)

[3]Luo, M; Yokota, H; "Comparing Hadoop and Fat-Btree based access method for Small File I/O Applications", Web-Age Information Management, Springer LNCS, Springer, 6184/2010, 182-193, (2010)

[4]Luo M; Watanabe, A; Yokota, H; "A Compound Parallel Btree for High Scalability and Availability on Chained Declustering Parallel Systems", IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, IEICE, Vol. E94-D, No. 3, pp. 587-601, (2011)

第 4 章 科学技術イノベーションに資する研究成果の状況

追跡調査時点において、科学イノベーション創出に資する展開をしていると思われる数事例について、研究代表者にインタビューを行い、基礎研究からの展開について本章にまとめた。

4.1 全シリコン量子コンピュータの実現（伊藤 公平）

(1) 研究テーマの状況

全シリコン量子コンピュータの実現を目的にスタートしたものであるが、要素技術としては、デバイス作製、初期化、量子操作（コヒーレンス制御方法と演算）、読出し方法の開発が重要である。スピンの情報が読み出せる測定器はなかったため、デバイス作製に関しては、核スピン制御に必要なシリコン原子鎖の作製と評価に成功し、平行して量子ビットの選択的アクセスに必要な強磁性体ストライプの開発を実現した。

^{29}Si 核スピン量子ビットの位置制御にむけては、世界にさきがけて 3 種類のすべてのシリコン安定同位体 (^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si) の単結晶の成長に成功し、続いて、 ^{28}Si ウエハー中に ^{29}Si 核スピン原子面を埋め込んだ周期構造の作製と評価に成功し、最終的に大きな目標であった Si 原子線の作製に成功した。

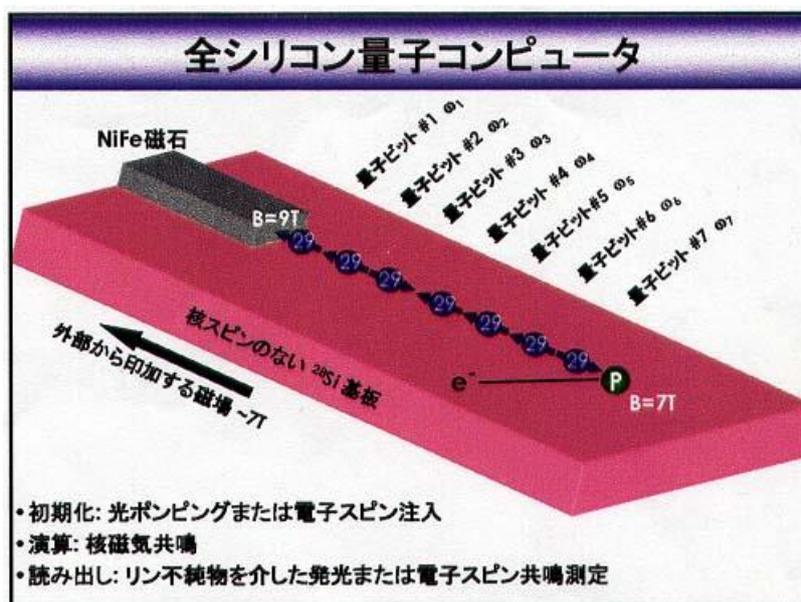


図 4-1 ^{28}Si 基盤に ^{29}Si を打ち込んで開発した量子コンピュータ用シリコン原子線

量子ビットとして役に立つためには、量子情報を失うことなく保持できる位相緩和時間内に、できるだけ多くの量子演算を実行し、結果を読み取る必要がある。特に、演算に要する時間に対して位相緩和時間が短い場合は、いくら、その量子ビットを用いて量子コンピュータを構築しても意味がない。そこで本研究は、シリコン結晶中の ^{29}Si 核スピン量子ビットの位相緩和時間測定から着手した。その結果、室温における位相緩和時間は 20 ミリ

秒であることを核磁気共鳴法を用いて決定し、さらに核スピンの位相緩和時間を短くする主要因の核スピン同士の双極子相互作用を切るためのラジオ波パルス照射手法の開発に成功し、結果として、位相緩和時間が 25 秒と量子システムとして測定された世界最長のコヒーレンスを得ることに成功した。25 秒という極めて長い位相緩和時間中には、最も難しいとされる 2 量子ビット演算でさえ 1 万回以上実行可能であることを理論的に示した。

量子コンピュータとして動作させるための基礎技術として、半導体(GaAs 系)上での電子スピンを用いた核スピン量子ビット初期化、励起子を介した核スピン量子ビット読み出しなどを実現し、ナノ領域特有の様々なスピン物性の解明に成功した。

(2) 科学技術への波及と展望

2002 年に最初に発表した技術が基になっており、コア技術である試料を他の有力な研究機関に提供することで、米国、ドイツ、イギリス、オーストラリアとの共同研究につながっている。一部には競合する研究機関でもあるが、最新の計測装置や技術を持つ各大学に、研究室の学生を派遣し、計測方法や試料の作り方などを提供することで、量子コンピュータにかかわる分野全体の技術向上を促した。

(3) 社会経済への波及と展望

共同研究として試料を提供するだけでなく、研究室の学生を海外の他大学へ派遣することで、海外の研究機関の各研究員とのディスカッションや作業を通じて、学生の研究能力やコミュニケーション能力の向上に大いに役に立っている。また、海外から研究員も受け入れており、国内にいる研究者への波及効果もある。量子スピンによる微小な変化など計測器のノウハウやお互いの試料も共有されることになり、非常にコストのかかる研究開発のコスト削減にもつながる。

さらには、「シリコン量子計算機 読み出しにめど」などの一般新聞メディア等に掲載されており、一般に対しても量子コンピュータの実現に向けた基礎研究のアピールにつながっている。

(4) その他

2006 年には、「Si と Ge の同位体の制御とエレクトロニクス応用の開拓」として日本 IBM 科学賞を受賞、2008 年には第 5 回日本学術振興会賞 (JSPS PRIZE) を受賞しており、学术界においても非常に高く評価されている。

4.2 多相的分子インタラクションに基づく大容量メモリの構築 (萩谷 昌己)

(1) 研究テーマの状況

DNA 分子によって情報を記憶する超高密度・超大容量の分子メモリを構築することを目指したものである。多相的分子インタラクションによって分子のアドレッシングを行う技術を開発、アドレッシングを含む各種の分子操作を実装するために、特に光を用いた新しい反応制御技術（マイクロリアクター）の開発を行った。分子メモリは超高密度・超大容量ではあるが、現状では読み書きにかかる時間が非常に大きいため、現時点における分子メモリの実用的な応用として、液状の分子メモリをもとに DNA インキの開発を行うとともに、表面上に固定された分子メモリの高密度性を生かした生体イメージングとナノ構造の構築のための基盤技術の開発を行った。

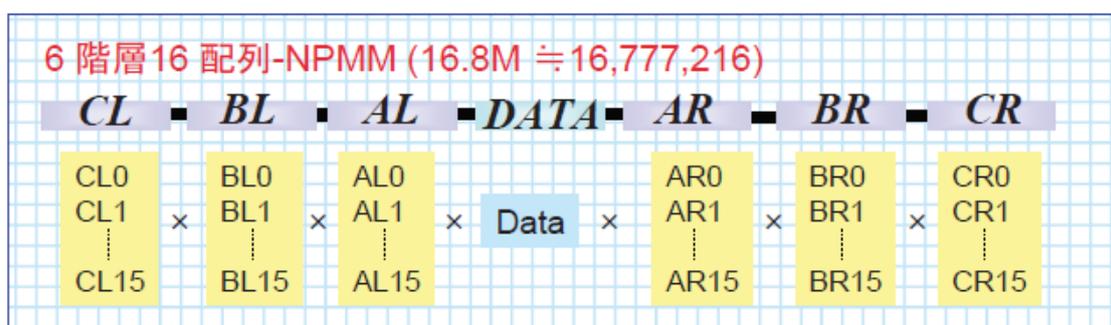


図 4-2 分子メモリ素子の構造

DNA インキは、認証情報や秘密情報（例えば暗号通信のための鍵）を含む DNA 分子を混ぜたインキのことで、本研究領域期間中に開発された DNA インキは、正規直交配列から作られたメモリ分子と、それらに対するアドレッシング技術に基づいており、300 ビットの暗号化が可能である。実際に紙に塗布した DNA インキを回収して分析することにより、300 ビットの情報を正確に回復することに成功した。

通常 DNA インキを検証するには、DNA シーケンスが必要であった。PCR 増幅することでインキの情報が読み取れる仕組みになっていた。本研究で開発した DNA インキはアドレッシング技術に基づいており、暗号化することができるため、コピーを作ったり、そのまま増幅することはできないような工夫がされていた。

NPMM (Nested Primer Molecular Memory) のメモリ素子は二本鎖の DNA 分子として実現されている分子メモリに対しても、萩谷グループが中心になって、分子レベルのランダム性を活用した DNA インキの可能性を検討し、そのための基礎実験を行った。分子メモリのランダムな希釈過程を活用して、中身がそれを作ったものにもわからないような DNA インキを作成した。紙から回収されたインキが同じマスターのインキをもとにしているかどうかは、十分な数の種類の分子の有無を調べれば、十分な信頼度で確認することができる。

(2) 科学技術への波及と展望

分子コンピューティングのうち、約 16.8M (16 進法で 6 桁) という大きなアドレス空

間を持つ分子メモリは本研究領域内で実現されたものである。分子メモリという新しい学術分野の開拓したものである。実質的な最大容量を実現するとともに、その限界を明らかにした。その応用として理想的な認証技術となり得る DNA インキを開発した。合わせて、分子に対する多様なアクセス方式（多相分子インタラクション）を確立し表面上の消去可能なヘヤピンメモリ、光 DNA 制御技術などを開発した。これらを組み合わせることにより、大容量の分子メモリを実現できる可能性を実証できた。

(3) 社会経済への波及と展望

本研究で開発した DNA インキを東京大学の TLO 経由で企業に対して技術供与をしており、安定性・信頼性の改良や手軽なデータ読み取り装置の開発などを進めており、現在量産化を進めている段階である。今後、DNA インキなどのアプリケーションが実用化されたり、この研究で開発された手法が利用されることで、この分野は一気に拡大するものと考えられる。

4.3 ディペンダブルで高性能な先進ストレージシステム（横田 治夫）

(1) 研究テーマの状況

データが爆発的に増加し、データを複数の計算機で管理するようになってきている中で、ディペンダブルで高性能な先進ストレージシステムを構築するための基本的な技術の確立を目指した研究であり、ストレージシステムの管理コストを削減することを目的としたものである。

分散されたデータへのアクセスを効率化するためにインデックスを用いるが、インデックスを集中管理すると負荷が増大するため、一般に分散インデックスという手法が採用されている。横田らは、分散インデックスに Fat-Btree を用いてストレージ側の各要素を高機能化してクラスタを構成し、ストレージクラスタ内の自律的な制御によって、ストレージに対するアクセス負荷の均衡化や容量の均衡化を行い、故障対策を行う 自律ストレージの提案している。

並列分散ストレージシステムの管理コスト削減を目指して、160 台規模のシミュレータと 2 種類のプロトタイプシステムを試作し、各ストレージデバイスのアクセス負荷と容量バランスの両立、通常処理とデータ管理処理のプライオリティ管理、それらのための管理データ構造の同時実行制御等の機能を実現し、評価を行った。実験の結果、高頻度の問い合わせ要求に対し、インデックスを単一 PE で管理する方式と比較して Fat-Btree の利用が高いスループットをもたらすことを明らかにした。シミュレータは主に管理機能とその拡張性の確認を目的とし、プロトタイプシステムは提案する自律ディスクがサイズ、電力的にフィージブルに実現可能であることを示すことを目的としたものである。

(2) 科学技術への波及と展望

本研究領域終了後の主要な研究成果について以下に示す。その自律ストレージの構成技術をさらに発展させ、アクセス負荷バランスと容量バランスの両立、負荷均衡化や対故障処理と通常処理の両立、格納されるコンテンツの特徴を生かした柔軟なデータ管理といった技術の開発を進めており、Fat-Btree を用いた PostgreSQL 分散化におけるページ分割手法の検討を進めている。データアクセスにおいては属性値の範囲内に入るデータを検索する範囲問合せというデータアクセスがよく行われ、複数の計算機にデータが分散されても効率よく検索できることが要求される。このような環境で、範囲問合せ可能な分散インデックスが新たに提案されている。しかし、それらの分散インデックスはまだ十分には比較はされていないことから、同じ環境において範囲問合せ可能な分散インデックス手法を比較することを目的とする。

(3) 社会経済への波及と展望

ビッグデータというような用語を使うまでもなく、蓄積され巨大化した情報に対する検索が情報処理の多くを占めるようになってきている。クラウドに代表されるようにシステムが物理的に集約される傾向にあり、ストレージの重要性は今後ますます高まると予想さ

れている。実用化を目標にプロトタイプを構築しており、普及には、企業と連携、オープンソース化などの情報発信を進めることが重要である。

また、情報処理にかかる電力も膨大になってきており、蓄積すべき情報量に合わせてスケールアップ可能な情報蓄積と検索処理を対象とした省電力化のアプローチが考えられている。データ配置や検索処理を工夫することで、コンピュータシステムの消費電力をこれまで以上に削減し、省電力化手段を取り入れた高信頼でスケーラブルな情報の蓄積と検索処理の実現を目標に進めている。「電力消費を制御するスケーラブルな情報の蓄積と検索」として、平成 22 年度～24 年度に実施しており、その中で省電力検索 ecoim という仕組みを生み出している。