

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」  
平成 17 年度採択研究代表者

堀 裕和

山梨大学大学院  
医学工学総合研究部教授

## ナノ光電子機能の創生と局所光シミュレーション

### 1. 研究実施の概要

新時代の高機能情報処理システムを構成する「光電子機能」の創生を目的として、ナノ空間固有の近接場光励起移動で機能し、これをマクロに接続する階層的インターフェースを持つ新概念デバイスの作製と、近接場光特有の機能に焦点を絞ったシミュレーション技術の開発を総合的に推進し、「ナノ空間機能の科学」および「局所光電子系の科学」の構築を目指す。

「スピンチェーン制御励起移動デバイス製作」では、量子井戸内局在励起子と希薄磁性半導体細線に配列した磁性イオンとの相互作用に基づいて局所光励起輸送を制御する機能素子開発を推進し、動作原理の検証を進展させた。今年度は、非磁性半導体量子井戸と希薄磁性半導体量子井戸が非磁性スペーサー層を介して結合した構造を製作し、磁性井戸から非磁性井戸への励起移動を、励起子のスピン偏極度に対応する局在励起子の円偏光発光特性から分析し、スピン選択的励起移動が制御可能であることを実証した。さらに、非磁性障壁層内に希薄磁性半導体障壁細線と非磁性半導体井戸細線を埋め込んだ構造を製作し、非磁性井戸細線局在励起子の外部磁界に依存する分極特性を確認し、励起移動に方向性を持たせる原理を実証した。これらの過程をナノ空間で実証し、近接場光相関の階層性を実証するために、トンネル電子制御による近接場光プローブの作製と顕微分光装置の開発を行った。これにより、STM計測レベルの平坦性を有し近接場光分布に情報を持つ背面光照射型金ナノロッド埋め込み構造の作製とその近接場光計測に成功した。さらに階層性的実験的評価を行うとともに、低温強磁場下での磁性量子井戸構造における近接場光励起輸送の評価実験を展開している。今後これらの研究を融合し、ナノ光電子機能デバイスの基礎研究を推進する。

「シミュレーション技術の開発」では、近接場光が生み出す機能をシミュレーションするための数値計算法の基礎的研究、特に精度保証法に関する研究を行った。基礎となる Maxwell 方程式にまつわるモデリングおよびその逆問題に関する研究を行った。さらに、この方程式を解く陰的 Symplectic FDTD 法の実装化と従来の FDTD 法との性能比較を行った。

「量子機能創生のための分子架橋系およびスピクラスター系の基礎研究」では、ナノ光電子系と関連する分子架橋の電子輸送現象、特に散逸と環境効果の理論を研究し、分子内電子

輸送における擬ポーラロン効果とポーラロンブロッケード効果を明らかにし、そのエキシトン系伝導への一般化を考察した。さらに電極から分子への電子・正孔注入過程の解明と制御、分子内キャリア移動と電磁場環境の相互作用を研究した。量子光電子機能探索の実験研究として、2次元ホールアレイとグリッドに挟み込んだ分子系のレーザー走査励起発光スペクトル計測から、局所環境に依存する発光特性を明らかにした。また、スピクラスター形成では、高密度冷却スピン偏極原子生成システム製作を進展させ、冷却原子のスピン偏極と近接場光による高密度化の研究を進展させた。

「ナノ情報通信システム設計理論の構築」では、デバイス微小化に伴う配線ボトルネックや既存技術との差異化等の問題を念頭に置いて、局在光励起輸送の物理的特徴的を活かしながら、応用システムに必要な機能や論理構造を備える、光情報処理システムの基盤技術開発を行った。アンギュラスペクトルに基づいた近接場光相互作用の階層性の分析、ならびに設計理論の開発を行った。今後、実験・理論研究との密な連携により、ナノ光デバイスにおける配線ネックや信号多重等のシステム機能に実証的に接近するとともに、局在光励起輸送が可能にする新しい価値の実現を目指す。

ナノ光電子機能探索のため、古典量子結合系については、古典的自由度と量子的自由度の結合した系において、量子的遷移が古典的自由度の運動に与える作用について、一般的な Pechukas 方程式を導出し、結合調和振動子系に対する微積分方程式を解析した。局所平衡に基づく線形応答理論において、「揺らぎの定理」を拡張し、一般の力学系と熱源の結合した系について、エントロピー生成速度の一般的定義を与え、それよりクラウジウスの式から、熱の定義を与えた。原子の励起と電子波動とが結合した系について、波動のサイトエネルギーの熱的揺らぎと伝播の熱的揺らぎを取り入れたモデル系について、原子のスピン緩和を求めた。全体として束縛条件を受けている自由度による運動は、ポアソン括弧ではなく、ディラック括弧に従って運動することがディラックによって示されている。我々は、計算機シミュレーションにおいて温度一定などの条件を取り入れたとされるノセ・フーバーの方法について、温度一定の条件についてディラックの方法を適用したところ、ノセ・フーバーの発展方程式に補正項が現れることを示した。今後その幾何学的に意味を変分法の関連で明らかにしたい。さらに、ナノにおいて有効となる熱揺らぎの効果を扱うために、「揺らぎの定理」を、白色ノイズでない場合、すなわち、記憶項が現れる場合に拡張した。揺らぎレベルでエネルギー増加分から仕事の部分を引いたものを熱と定義して、エントロピー増加をその熱で定義すると、記憶項をもつ抵抗係数の場合について、久保によって拡張された揺動散逸定理が導出されること示した。

これらの研究に基づき、さらにデバイス創生研究を進展させ、研究目標の達成を目指す。

## 2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

### 研究全体の推進と取りまとめ

新時代の高性能情報処理システムの要素となるナノ領域での機能を実現するためには、ナノ機能素子の基本構造開発と、ナノとマクロを接続するシステム構想、ナノ空間での信号伝達を散逸過程および局所環境系とともに取り扱う物理モデル、さらに間接的にのみ計測可能な現象を評価できる正確な数値シミュレーションの研究を、総合的に展開することが必須である。本研究では、

「スピンチェーン制御励起移動デバイス製作」、「シミュレーション技術の開発」、「量子機能創生のための分子架橋系およびスピクラスター系の基礎研究」、「ナノ情報通信システム設計理論の構築」の研究項目を掲げ、局所光による励起輸送および近接場光の階層的性質に基づく新機能デバイス創生のコンセプトのもとに統合した総合的研究を展開することによって、「ナノ空間機能の科学」および「局所光電子系の科学」の構築を目指す。

今年度は、これまでの成果に基づき、デバイス創生研究と理論研究における多様な側面を貫く共通の着眼点が明確になってきたことを踏まえ、最終目的を意識した研究活動を進展させ、「ナノ空間機能の科学」「局所光電子系の科学」の構築を含む目標達成を目指している。

### ナノ光電子機能の創生

スピンチェーン励起移動制御は、各種次元の量子井戸内に局在する励起子とその近傍に各種次元で配列させた磁性イオンとの相互作用の外部磁界による変調を基本動作原理とする。この動作原理を検証するために、非磁性半導体(NMS、nonmagnetic semiconductor)量子井戸と希薄磁性半導体(DMS、diluted magnetic semiconductor)量子井戸がNMSスペーサー層を介して結合した構造をMBE法で製作し、磁性井戸に注入された励起子が非磁性井戸に移動する状況を量子井戸局在励起子をプローブとして磁気光学的手法で調べた。DMS井戸の励起子エネルギーがNMS井戸のそれより大きくなるように構造を設計し、各井戸にエネルギー選択的に励起子を注入した。DMS井戸に注入された励起子はスピン偏極した後、NMS井戸に移動し発光再結合して消滅する。NMS井戸からの発光であるにもかかわらずDMS的な円偏光を示し、その円偏光度はスペーサー層厚が小さいほど、DMS井戸励起子とNMS井戸励起子のエネルギー差が小さいほど大きいことを見いだした[9]。両井戸のエネルギー準位とスペーサー層の厚みを変化させた一連の試料による詳細な実験から、励起子のDMS井戸のスピン分離基底準位からNMS井戸の励起準位へのスピン選択的共鳴トンネリングが示唆された。この結果、DMS井戸からNMS井戸へのスピン選択的な励起移動が制御可能であることが確認された。

次に、励起移動に異方性を導入する目的で、DMS障壁細線とNMS井戸細線をNMS障壁層内に埋め込んだ構造を製作し、NMS井戸細線局在励起子の分極方向が外部磁界の大きさと方向に依存することを確認した[22]。具体的には、GaAs(001)微傾斜基板上にステップフローモードでZnSe層、ZnCdSe/ZnMnSe分数超格子層、ZnSe層を順次成長させ、ZnCdSe量子細線井戸局在励起子遷移を偏光磁気光学的手法で測定した。細線中では励起子を構成する正孔に重い正孔成分と軽い正孔成分の混合が生じて細線方向の偏光が発生する。偏光度、言い換えれば励起子の分極方向は重い正孔と軽い正孔の混合比に支配される。この混合比は細線の作りつけ構造と外部磁界にも依存して磁界強度の増加とともに混合状態が変化するが、細線構造による量子化軸と磁界による量子化軸が一致する向きの磁界すなわち細線に垂直な磁界に対してより敏感に変化することがわかった。

これと並行して、スケールされない階層構造と散逸過程の分析から構築した、デバイス機能原理に基づいて、具体的に評価可能な光近接場励起輸送機構を実現する素子製作と評価技術開拓を行った。ナノ空間での局所光励起輸送過程と階層的近接場光相関特性の計測を可能にするために、トンネル電子制御可能な近接場光プローブを作製し、顕微分光装置の開発を推進した。今年度は特に、階層的近接場光相関の実証に適した、STM計測レベルの平坦性を有し、近接場光分布に情報を持つ、背面光照射型金ナノロッド埋め込み構造試料の作製に成功し、これに

基づく近接場光分布の階層性を示すデータの取得を行い、その解析を推し進めた。さらに、低温強磁場下において、磁性量子井戸構造における近接場光励起輸送の評価実験を展開し、理論研究と整合するナノ光電子機能の実証研究を推進している。

### 局所光シミュレーション技術の開発

局所光シミュレーション構築の基盤である階層構造的デバイス構成と階層構造的計算手法に基づく局所光機能開発のコンセプトを具体化し、機能と散逸過程の理論解析、情報通信システム理論、計算機シミュレーション、相互作用モデル構築を推進した。

近接場光シミュレーションの精度を把握するための基本的計算技術を研究した。昨年度開発した高速高精度なベクトルの内積計算技術を利用して、悪条件かつ巨大線形方程式の新しい解法および回路方程式の解法や線形計画法の精度保証法を開発した[22-28,6-8,16-19]。

また理論面の研究においては、近接場光の効率的な数値シミュレーションのための基礎的な知見を得る準備として、一般の微分方程式の差分化による解析の誤差を詳細に解析した。具体的には、Helmholtz 方程式に対応する Lippmann-Schwinger 方程式である特異積分方程式を定式化して、その解の存在と一意性を数値計算機援用証明するためのベッセル関数とハンケル関数の精度保証付き数値計算法を開発した。

さらに、FDTD シミュレーションがシンプレクティック差分法の一例になっているという観点から、より性能の良い拡張された FDTD シミュレータの実装化を行い、機能比較を進めている。そして近接場光の機能を、階層性を用いて発現するための数学的枠組みを追求する[2]と共に、近接場光が界面形態に与える影響についても研究を進めている[30]。

局在光励起輸送の理論展開では、昨年度までの研究内容を基礎にして、物質サイズの有限性と環境系との相互作用による緩和過程に焦点を当て、伝搬光では禁制となる局在光特有の量子ドット間励起移動に伴うスピン偏極、および環境系との相互作用によるスピン偏極の緩和機構、擬 1 次元系における電子励起の衣を着た光場の局在・非局在性とそれに関与するフォノン自由度の役割、および緩和過程の影響、について研究を進めた[4]。本年度から物質サイズの有限性と環境系との相互作用による緩和過程に焦点を当てた研究を開始し、物質系として(a)半導体量子ドット、(b)有限サイズの擬 1 次元系に加えて、(c)分子・クラスター系について研究を進めた。今後は実験グループと連携し、ナノ領域における局所環境制御と局所散逸構造によるナノ機能発現の科学基盤を総合的に探求する

### ナノ情報通信システム設計原理の構築

前年度に引き続き、局在光の階層性に基づいた光学的相関の基礎理論の整備を進めるとともに、これを用いた機能システムの原理検討や具体的実験を想定した応用検討を行った。具体的には、ナノ構造体からの近接場及び遠隔場における光学応答特性を、ナノ構造体を構成する個々の要素形状 (elemental shape) ならびにそれらの相対的な配置関係(layout)に基づいて統一的に説明する理論を構築した[11]。また、この理論に基づいて、二つのナノ構造体(構造Aと構造B)が各々適正な形状として構成され、かつ、両者が近接した場合にのみ出力信号が発生するシステム、すなわち構造Aと構造Bのマッチングシステムを提案した[13]。また、適当な密度で構成された量子ドットシステムからの発光スペクトルが近接場領域において階層的な性質を有することを示し、これに基づいた新たなメモリア

ーキテクチャを提案した[12]。

### **量子機能創生**

前年度に引き続き、ナノ光電子系と関連する分子架橋の電子輸送現象、特に散逸と環境効果の理論を研究し、分子内を輸送される電子の擬ポーラロン効果およびポーラロンブロッケード効果を明らかにした。エキシトン系伝導への一般化を考察している。さらに電極から分子への電子・正孔注入過程の解明と制御、分子内キャリア移動と電磁場環境の相互作用を研究した。ポーラロンブロッケードについては、電極から分子へと電子移動に伴い環境系を擾乱することによるエネルギー損失スペクトルの解析的な標識を得て、これから零バイアス異常や非弾性トンネルスペクトル、コヒーレント遷移確率などが得られることを明らかにした。擬ポーロン伝導では、分子鎖が電極間を架橋した系の電子伝導の特徴を明らかにし、擬ポーロン伝導の特長を見いだした。特に振電相互作用の相対的強さやバイアスなどの効果によって、どのように架橋分子内の電子輸送速度が移り変わるかを明らかにし、種々の有機分子系について電圧－電流特性を調べた。

実験研究では、量子光電子機能探索のために、ナノメートルスケールでの情報の相関を得るために新たな実験を試みた。発光性分子を基板の上に配列した場合に、分子スケールでは異なった配向をとることによって分子間相互作用が基板の場所によって異なることが期待される。分子の配列の差を観測するためにグリッドの中での数10  $\mu\text{m}$ 異なる場所3箇所の発光スペクトル比較を試みた。発光する空間の範囲を限定するために、直径150nmのホール(金属膜に孔を開けた領域)を500nmピッチで配列したホールアレイをポルフィリン分子の上に配置し、レーザー励起による分子の発光を測定した。これにより、空間上の異なる点でのスペクトルの比較を試みた。この結果、ホールアレイが配置されていない場合に比べ配置したときには、より多くのピークが見出され、これは視野をホールで制限したことの効果といえる。さらに局所環境の相違による分子発光スペクトルの相違が検出されていることが期待され、来年度以降さらに確認を進める。

局所光機能に量子効果を付与するスピクラスター創生の基礎技術開発では、スピクラスター創生局所光機能に量子効果を付与するために、コアグループと伊藤グループは、前年度までに整備したスピクラスター創生の基礎技術とアトムフォトニクスによる原子堆積技術の実験計測環境の複合装置の開発を進めた。これらの装置を用いて、Cs原子の冷却トラップ実験を開始した。年度内にCsの冷却原子トラップとそのスピン偏極を目指して実験を進めている[10]。Csのスピン偏極用の二重磁気光学トラップシステムの開発を進め、Cs原子のレーザー冷却・トラップが可能になった。磁気光学トラップで生成した冷却 $^{85}\text{Rb}$ 原子の超微細基底準位間における光ポンピングを行い、ほぼ100%の $^{85}\text{Rb}$ のポンピングを確認した。原子の冷却・収集を行うエバネッセント光を原子ファネルに誘起するための中空レーザービームを形成し、出射後20cm下方(スピクラスター形成用のArコート基板を配置する位置)での原子数の変化を中空径の関数として調べた。期待される理論値には達していなかったため、さらなる改良を進める。併せて、原子密度を増加させる表面近傍での近接場光によるスピン偏極原子捕獲実験も進展させた[5]。

### **ナノ空間励起輸送・散逸過程の解析と局所光・電子系のサイエンス構築**

理論研究では、ナノ光電子機能をより具体化し、多数の半導体量子構造間の励起輸送と相関

制御機構の開拓、局所光電子機能システム設計理論、ナノ光電子機能に関わる散逸と階層的接続による情報伝達等について、広い視野に立つ融合科学の基礎概念構築を目指す研究を進展させた。今年度は特に、以下の項目について研究を進展させた。

1. 古典量子結合系については、古典的自由度と量子的自由度の結合した系において、量子的遷移が古典的自由度の運動に与える作用について、一般的な Pechukas 方程式を導出し、結合調和振動子系に対する微積分方程式を解析した。
2. 局所平衡に基づく線形応答理論において、平衡状態における揺らぎの経路の統計的重みは経路積分で表示できる。ある時間の向きの揺らぎとその時間反転の揺らぎの実現確率の比の対数が、エントロピー生成速度に対応することが分かる(「揺らぎの定理」)。これを拡張して、一般に熱源と接する系の運動について、熱源との相互作用を Langevin 的な雑音で表現し、その系のある揺らぎとその時間反転の揺らぎの実現確率の比の対数をエントロピー生成速度と定義すると、熱の移動に関するクラウジウスの式が導かれる。すなわち、熱源に流入する熱(制御できないエネルギー流)とエントロピー排出量と結びつく。これらの概念を用いると、異なる温度の熱源に接する系における熱流について、線形応答理論が導かれた。さらに、外力によって仕事定常的に流入している場合について、熱の移動に関する一般的公式を導くことができることを示した。これをさらに量子系に一般化することが今後の課題である。
3. ナノレベルにおける電磁場と物質の輸送における揺らぎの効果を明らかにし、それをマクロに制御する方法を確立することが目的として、全体で制御されている変数の運動は何かを明らかにする研究を展開した。束縛条件として制御することが一つの考えである。上述したノセ・フーバーはその一例であるが、一般的に力学変数が束縛条件のもとにあり、その条件を制御することにより全体を制御する方法論を確立できると、実用上も有効であるので、その力学変数として電磁場/原子系を考えた場合にどうなるかという点に着目し研究を推進した。
4. ナノでは揺らぎを扱う必要がある。現在揺らぎの定理は、順方向の揺らぎと逆方向の揺らぎの実現確率の比が、エントロピー生成速度と関係していることを主張している。これは、ブラウン運動の場合に証明できるが、一般に記憶項をもつ場合には拡張できると、扱える領域が大きくなる。つまり、マクロとミクロの時間スケールの分離が難しい場合にも使える方法論となる。記憶項の在るブラウン運動に拡張できたことに基づき、これを一般の電磁場を含む緩和過程について拡張する研究を発展させている。
5. 原子の励起とエネルギー散逸に関して、電子励起状態が一次元系を移動するモデルについて[現実系としては、ポリアセチレン中の電子移動による二重結合の組み替え]、外部磁場、内部磁場の変動、さらに局所的な局在粒子[現実系としてミュー中間子など局在スピン]との超微細構造相互作用などで、スピンの揺らぐ現象について、古典的なブラウン運動的な移動ではなく、量子拡散によるはどのの広がり、サイト・エネルギーやトンネル移動の揺らぎによる波動の局在化を入れたモデルの計算を進めている。

今後は、これらの基礎的な研究をもとに、電磁場と相互作用する古典—量子系結合モデルによる時間発展理論、電磁場の照射による局所平衡定常状態に関する量子統計理論、環境変数を制御系として扱う力学理論を構築する。

### 3. 研究実施体制

#### (1)「堀」グループ

①研究分担グループ長：堀 裕和(山梨大学大学院、教授)

②研究項目

ナノ電子機能の創生  
局在光励起輸送の理論展開

#### (2)「大石進一」グループ

①研究分担グループ長：大石 進一(早稲田大学、教授)

②研究項目

局所光シミュレーション

#### (3)「成瀬」グループ

①研究分担グループ長：成瀬 誠((独)情報通信研究機構、主任研究員)

②研究項目

局所光を用いた情報処理システムの基盤技術の研究

#### (4)「北原」グループ

①研究分担グループ長：北原 和夫(国際基督教大学、オスマー記念科学教授)

②研究項目

局所光励起輸送の電磁界及び統計力学理論の展開

#### (5)「塚田」グループ

①研究分担グループ長：塚田 捷(早稲田大学、教授)

②研究項目

ナノ光電子系の理論とシミュレーション

#### (6)「根城」グループ

①研究分担グループ長：根城 均(物質材料研究機構、主席研究員)

②研究項目

電子トンネル励起型分子架橋ナノデバイスの研究

#### (7)「伊藤」グループ

①研究分担グループ長：伊藤 治彦(東京工業大学大学院、准教授)

②研究項目

近接場光ファネルを用いたスピン偏極原子誘導とスピנקラスタ形成

#### 4. 研究成果の発表等

##### (1) 論文発表 (原著論文)

###### 国内

1. 塚田捷、田上勝規、光武邦寛、分子ナノデバイス新機能の理論的予言、機能材料、**28**, 71-83 (2008)

###### 国際

2. A. Kitada, Y. Ogasawara: Note on a property specific to the tent map, *Chaos, Solitons & Fractals*, **35** (2008) 104-105.
3. T.Yamamoto, S.Oishi and Q.Fang: Discretization principles for linear two-point boundary value problems, II. *Numer. Funct. Anal. Optimz.* **29** (2008) 213-224
4. Y. Tanaka and K. Kobayashi, "Optical near field dressed by localized and coherent phonons," *Journal of Microscopy* Vol. **229**, Pt.2, 228-232 (2008).
5. Y. Ohdaira, T. Inoue, H. Hori, and K. Kitahara, "Local circular polarization observed in surface vortices of optical near-fields", *Optics Express*, Vol. **16**, Issue 5, pp. 2915-2921, 2008.
6. S. M. Rump, T. Ogita, S. Oishi: Accurate Floating-Point Summation Part I: Faithful Rounding, *SIAM Journal on Scientific Computing*, **31**(1): (2008) 189-224 .
7. N. Yamanaka, T. Ogita, S. M. Rump, S. Oishi: A Parallel Algorithm for Accurate Dot Product, *Parallel Computing*, **34**:6-8 (2008), 392-410.
8. Øystein Birkenes, Tomoko Matsui, Kunio Tanabe and Tor André Myrvoll:Automatic Speech Recognition via N-Best Rescoring using Logistic Regression (2008), 225-240, *Speech Recognition (France Mihelic and Janez Zibert, eds)*, IN-TECH.
9. M. Ito, M. Tajima, K. Omori, T. Muranaka, Y. Nabetani, T. Kato and T. Matsumoto, Magneto-optical properties of ZnMnSe-ZnSe-ZnCdSe quantum structures, *J. Korean Phys. Soc.*, **53**, 2972-2975 (2008).
10. E. Hirose and E. Torikai, "Dynamics of spin exchange in alkali atom-surface scattering", *Surface and Interface Analysis*, **40**, 1705-1708, 2008.
11. M. Naruse, T. Yatsui, H. Hori, M. Yasui, and M. Ohtsu: Polarization in optical near- and far-field and its relation to shape and layout of nanostructures, *Journal of Applied Physics*, Vol. **103**, No. 11, pp. 113525 1-8, June 2008.
12. M. Naruse, K. Nishibayashi, T. Kawazoe, K. Akahane, N. Yamamoto, and M. Ohtsu: Scale-dependent Optical Near-fields in InAs Quantum Dots and their Application to Non-pixelated Memory Retrieval, *Applied Physics Express*, Vol. **1**, No. 7, pp. 072101 1-3, June 2008.
13. M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, N. Tate, H. Sugiyama, and M. Ohtsu: Nanophotonic Matching by Optical Near-Fields between Shape-Engineered

Nanostructures, Applied Physics Express, Vol. 1, No. 11, pp. 112101 1-3, October 2008.

14. M.Harada, M.Tsukada, Theoretical Simulation of noncontact atomic force microscopy of 5-(4-methylthiophenyl)-10,15,20-tris(3,5-di-*t*-butylphenyl) porphyrin, Phys. Rev. B 77, 205435 (2008)
15. A.Masago, S.Watanabe, K.Tagami, and M.Tsukada, Adsorption of benzene on Si(001) from noncontact atomic force simulation, Jpn. J. Appl. Phys. 47 6092-6095 (2008)
16. T. Ogita, S. Oishi: Tight Enclosures of Solutions of Linear Systems, International Series of Numerical Mathematics, 157(2009), 167-178, (Inequalities and Applications, C. Bandle, A. Gilanyi, L. Losonczy, Z. Pales, M. Plum eds., Birkhauser Verlag).
17. Shin'ichi Oishi and Kunio Tanabe: Numerical Inclusion of Optimum Point for Linear Programming, JSIAM Letter, Vol.1 (2009) pp.5-8.
18. S. M. Rump, T. Ogita, S. Oishi: Accurate Floating-Point Summation Part II: Sign, K-fold Faithful and Rounding to Nearest, SIAM Journal on Scientific Computing, Vol.31, No.2 (2008).
19. T. Aso, B. Gustavsson, K. Tanabe, U. Brandstrom, T. Sergienko, I. Sandahl: A proposed Bayesian model on the generalized tomographic inversion of aurora using multi-instrument data, IRF Sci Rep., 292 (2008), 105-109.
20. A. Masago, S. Watanabe, K. Tagami and M. Tsukada, Simulation of Atomic Force Microscopy of Hydrogen- and Methyl-Terminated Si(001) Surfaces, Jpn., J. Appl. Phys., 48 025506-025511 (2009).
21. Y. Ohtsuka and M.Tsukada, Theoretical Study of Crystal Structures and Energy Bands of Polyacene and Pentacene Derivatives, J.Phys. Soc. Jpn., 78, 024713-024725 (2009).

未発行論文 国外

22. T. Matsumoto, K.Omori, K.Nakamura and Y.Nabetani, MBE growth and magneto-optical properties of ZnCdSe-ZnMnSe wire systems, phys. stat. sol.(c), in press.
23. Y. Ohtsuka and M. Tsukada, Theoretical Study of Crystal Structures and Energy Bands of Polyacene and Pentacene Derivatives, J. Phys. Soc. Jpn., in press
24. M. Tsukada and K. Mitsutake, Theory of Dissipative Electron Transport of a Molecule at the Interface, J. Phys. Soc. Jpn., submitted
25. T. Ogita, S. Oishi: Fast Verified Solutions of Linear Systems, accepted for publication in JJIAM.
26. S. Miyajima, T. Ogita, S. M. Rump, S. Oishi: Fast Verification for All

- Eigenpairs in Symmetric Positive Definite Generalized Eigenvalue Problem, Reliable Computing, accepted for publication.
27. Yusuke Nakaya, Tetsuo Nishi, Shin'ichi Oishi and Martin Claus: Numerical Existence Proof of Five Solutions for Two-transistor Circuit Equations, accepted for publication in JJIAM.
  28. S. Oishi, T. Ogita, S. M. Rump: Iterative Refinement for Ill-Conditioned Linear Systems, accepted for publication in JJIAM.
  29. K. Ozaki, T. Ogita, S. M. Rump, S. Oishi: Adaptive and Efficient Algorithm for 2D Orientation Problem , accepted for publication, Apr. 2009.
  30. Y. Ogasawara and A. Kitada: Addendum to "A Consideration of the Morphological Stability of an Interface", Journal of the Physical Society of Japan, in press.
  31. A. Sato, Y. Tanaka, F. Minami, and K. Kobayashi, "Photon localization and tunneling in a disordered nanostructure," Journal Luminescence (2009) in press.
  32. M.Tsukada and N.Watanabe, Theoretical Analyses of Cantilever Oscillation in Dynamic AFM in Liquids, J. Phys. Soc. Jpn., 48, no.3 (2009), in press.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 2 件 (CREST 研究期間累積件数 : 2 件)