

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2009

課題番号：18079001

研究課題名（和文） 量子揺らぎの最適制御による確率的情報処理と情報統計力学

研究課題名（英文） Probabilistic information processing and statistical mechanics of information by optimal controlling of quantum fluctuation

研究代表者

井上純一（JUN-ICHI INOUE）

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：30311658

研究分野：情報統計力学

科研費の分科・細目：知能情報学

キーワード：量子統計力学，量子情報，量子揺らぎ，情報統計力学，スピングラス

### 1. 研究計画の概要

古典的な熱揺らぎを用いて様々な問題に対して成功を収めてきた確率的情報処理を，量子力学的な揺らぎを用いた枠組みで再構成することで情報統計力学の深化を図る．確率的情報処理で扱われていた誤り訂正符号，画像処理，CDMA マルチユーザ復調器等に対し，適切な量子確率モデルで問題を表現することにより量子揺らぎに基づく確率推論法を定式化し，その性能を情報統計力学により解析評価する．さらに，これらの問題に留まらず，量子揺らぎの制御が問題解決に対して有効に機能するような新しい問題（対象）の開拓，それを解析評価するための情報統計力学（方法論）の整備も視野に入れ，量子ランダムスピン系への技術的フィードバックを行うことを目的とする．

### 2. 研究の進捗状況

多体相互作用を持つ無限レンジ・スピングラスモデルで記述されるソーラス符号と呼ばれるクラスの誤り訂正符号に対し，横磁場項を導入した量子版のベイズ最適解に関する統計的性質を調べるため，1段階レプリカ非対称解についての相図に対し，ゼロ誤り限界（シャノン限界）と強磁性-スピングラス相転移点の関係についての普遍性を明らかにするため，その限界を達成する具体的復号アルゴリズムを修正TAP平均場方程式に基づき構成し，そのアルゴリズムの収束限界/収束速度を調べた．また，無限レンジ・反強磁性横磁場イジングモデルの相転移に関し，解

析的および計算機実験により有限温度，有限横磁場では相転移が生じないことをつきとめた．また，縮退した系において量子アニーリングを適用すると，古典的なアニーリングで得られるような各縮退状態が等確率で得られることがなく，偏りが生じることがいくつかの先行研究により指摘されていた．そこで，我々はJ1-J2模型と呼ばれる基底状態に縮退を持つような量子スピン系の基底状態近傍のエネルギー・スペクトルをスピン波理論により調べ，この量子アニーリング特有の縮退状態の実現確率の偏りが，スペクトル情報から部分的に説明できることを示した．また，本研究課題では量子揺らぎを用いた情報処理についての知見を深めるとともに，新たな情報処理の諸問題を開拓していくことも目的とする．この試みとして印刷技術として用いられるデジタル・ハーフトーン処理，及び，逆デジタル・ハーフトーン処理の情報統計力学の方法を用いて定式化，CDMAマルチユーザ復調器のMAP解の個数をスピングラスに対して開発されたTanaka-Edwardsの方法で計数，インターネット・トレーディングシステムにおける第1通過時間の解析，不規則性を持つ壺模型における占有分布の冪則とボース凝縮の関係についての数理解析が研究成果として得られている．

### 3. 現在までの達成度

#### ②おおむね順調に進展している．

理由：ソーラス符号と呼ばれる全結合型のスピングラスモデルで記述されるクラスの間

題に対し、量子力学的な揺らぎを用いた枠組みでの再構成を達成することができた(平均的性能の評価法、反復的アルゴリズムの構成)。しかし、従来の目的の一つであった疎結合スピン模型で記述される低密度パリティ検査符号に関しては現在実行中である。この場合の平均的性能評価法、反復アルゴリズムの構築がなされることで、当初の目的のほとんどが遂行されたことになる。また、量子スピン系へのフィードバックに関しては、現在、スピン波理論を縮退のある量子アニーリング系に適用し、その系のマクロな性質を分担者を中心に解析しており、この方法が確立すれば、スピン波理論を量子情報の観点から見直す契機となり、この方法の洗練化が期待できる。情報統計力学の展開としては、ハーフトーン処理をはじめとするいくつかの新規な問題を開拓し、その問題に対するアプローチを提示することができた。これは良い意味で当初の予想をこえて得られた研究成果であると考えられることができる。

#### 4. 今後の研究の推進方策

希釈スピニングラス模型である低密度パリティ検査符号(LDPC)に拡張する。その際、昨年度から継続して検討しているレプリカ法による解析で用いた静的近似の妥当性を議論するため、量子モンテカルロ法による計算機実験を行い、様々な虚時間対の組み合わせに対する秩序変数分布を求め、静的近似からの外れ具合をこの分布の形状から調べる。さらに、得られた経験分布を下に鞍点方程式を再構成し、静的近似の下での相図と比較検討を行う。また、これと平行して縮退のある系の量子アニーリングの性能を評価するため、J1-J2模型の基底エネルギー及び低励起エネルギーをスピン波理論に基づき解析評価を行う。

#### 5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Analysis of a long-range random field quantum antiferromagnetic Ising model, B. K. Chakrabarti, A. Das and J. Inoue, European Physical Journal B: Condensed Matter Physics, vol.51, pp. 321-329 (2006).
- ② J. Inoue and N. Sazuka, Crossover between Levy and Gaussian regimes in first-passage processes, Physical Review E, Vol.76, pp. 021111(1)-021111(9) (2007).
- ③ J. Inoue and J. Ohkubo, Power-law behavior and condensation phenomena in disordered urn models, Journal of Physics A: Mathematical and

Theoretical, Vol. 41, pp. 324020-1 - 324020-14 (2008).

④ A. K. Chandra, J. Inoue and B. K. Chakrabarti, A novel quantum transition in a fully frustrated transverse Ising antiferromagnet, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 143, pp. 012013-1 - 012013-9 (2009).

⑤ J. Inoue, Y. Saika and M. Okada, Quantum mean-field decoding algorithm for error-correcting codes, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 143, pp. 012019-1 - 012019-10 (2009).

[学会発表] (計 3 件)

① J. Inoue and N. Sazuka, Queuing Theoretical Analysis of First Passage Processes in Foreign Currency Exchange Rate, Research Workshop of the Israel Science Foundation Statistical Physics and Its Applications to Complex Problems in Communication, 2007年3月14日, Eilat, Princess Hotel [招待講演]

② J. Inoue, Y. Saika and M. Okada, On the convergence of quantum-mechanical variant of the Thouless-Anderson-Palmer equation, International Workshop on Quantum Phase Transition and Dynamics: Quenching, Annealing and Quantum Computation, 2009年2月6日, Saha Institute of Nuclear Physics, Kolkata, India [招待講演]

③ J. Inoue and J. Ohkubo, Condensation phenomena and wealth re-distribution: Statistical-mechanical analysis of disordered urn models, Econophysics-Kolkata IV: International Workshop on Econophysics of Games and Social Choices, 2009年3月12日, Indian Statistical Institute, Kolkata, India [招待講演]

[図書] (計 1 件)

① 井上純一「ビギナーズガイド情報理論」プレアデス出版, 2008年9月(総167ページ)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]