

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18079010
 研究課題名（和文） 情報エントロピーの概念に基づいた情報統計力学の再構築と情報通信理論への展開
 研究課題名（英文） Reconstruction of statistical mechanical informatics via the concept of information entropy and applications to information and communication theory
 研究代表者
 田中 利幸 (TANAKA TOSHIYUKI)
 京都大学・大学院情報学研究科・教授
 研究者番号：10254153

研究成果の概要（和文）：情報通信の分野における解析のための枠組みとしての情報統計力学を情報理論ならびに統計的推定理論の立場から再検討することを通じて、より現実的な問題設定における解析のための道具として情報統計力学の枠組みを整備し、その有効性の確立を図った。特に、無線通信において問題となる、通信路の状態に関する完全な知識を前提とすることができないような状況においても、情報統計力学にもとづく解析の結果として有用な知見が得られることを実証し、方法論としての情報統計力学の有用性を示した。

研究成果の概要（英文）：Through revisiting the framework of statistical-mechanical informatics for analyzing problems in the fields of information and communication in terms of information theory and statistical estimation theory, we have aimed at reformulating the framework of statistical-mechanical informatics, as well as consolidating its efficiency, as a toolbox applicable to more realistic problem settings. In particular, in situations where one cannot assume perfect knowledge about channel states, which are of principal concern in the context of wireless communication, we have shown that the analytical framework of statistical-mechanical informatics is successfully applied to such situations to yield useful findings in view of designing wireless communication systems, demonstrating its efficiency.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,100,000	0	6,100,000
2007年度	13,300,000	0	13,300,000
2008年度	14,400,000	0	14,400,000
2009年度	10,400,000	0	10,400,000
年度			
総計	44,200,000	0	44,200,000

研究分野：情報科学

科研費の分科・細目：情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：情報統計力学，CDMA通信，MIMO通信，レプリカ法，ランダム行列，圧縮センシング

1. 研究開始当初の背景

情報統計力学にもとづく解析へのアプロ

ーチが情報通信の多様な問題群に有効であるという認識が定着しつつある。特に、

CDMA 通信方式, MIMO 通信方式の数理的な基礎モデルである, ランダムな通信路行列をもつ線形ベクトル通信路モデルに対しては, 研究代表者自身によるもっとも基本的な条件設定のもとでの解析を皮切りに, 情報通信分野の研究者らによる方法論の受容と幅広い問題への適用が試みられるようになってきた. 中でも重要なのが, Guo-Verdu による「デカップリング原理」, すなわち, ランダムな通信路行列をもつベクトル通信路において送信シンボルと受信器における送信シンボルの事後平均推定結果との関係は, 大システム極限において, あるスカラーガウス通信路に同じシンボルを送信し, 受信側で事後平均推定を行った場合の両者の関係と統計的に等価である, という主張である. デカップリング原理は, 本質的に高次元の現象をスカラー通信路という平易な取り扱いが可能な土俵に引き下ろすことを可能にするという点で重要である.

一方で, 情報統計力学にもとづく解析は, 対象の巨視的な記述を与えるのみであり, 実用上重要な微視的な特徴づけが得られるかどうかについては議論がなされていなかった. また, 受信器における情報抽出のためのアルゴリズムとして多く検討されている並列干渉除去アルゴリズムについても, デカップリング原理を念頭に置いた十分な検討がなされていたとは言い難い. さらに, 情報統計力学にもとづくアプローチは, 解析を可能とするために限定された理想的な問題設定のもとでもっぱら試みられており, 実用上重要なより現実的な問題設定のもとでの有効性については十分な検討がなされていないという状況であった.

2. 研究の目的

情報通信の研究分野において情報統計力学のアプローチの有用性を示し, 解析手法としての位置を確立することを目指し, 解析の枠組みとしての情報統計力学を情報理論および統計的推定理論の立場から再検討しなおすことで情報理論的な意義をより明確にする. 併せて, より現実的な問題設定に対して実際に情報統計力学にもとづくアプローチを試みることによって, 本アプローチの適用範囲を拡大し, 有用性を実証していく.

3. 研究の方法

解析手法の適用範囲を広げるために重要なのは, なるべく一般的な問題設定のもとで, 解析的な操作や結果の意味するところを慎重に吟味しながら解析を進めることである. Guo-Verdu のデカップリング原理は, 情報理論および統計的推定理論の枠組みが, 解析の

諸相の意味を解釈するために有効かつ重要であることを示唆していると考えられるため, 本研究ではこのような方法論を意識的に推し進めることによって, 情報統計力学にもとづく解析の方法論の適用範囲の拡大を図ることとした.

4. 研究成果

(1) 大システム極限における個々のユーザの振る舞いに関する微視的記述の解析

統計力学にもとづく解析は, 基本的には大システム極限(熱力学的極限)におけるシステムの巨視的な記述を与えることを目的とする. 一方で, 通信の問題を考える際には, 多元接続通信路であれば個々のユーザの通信環境がどのように特徴づけられるか, MIMO 通信路であれば各成分の情報伝送がそれぞれのくらい効率的になされるか, といったいわば微視的なシステムの特徴づけが重要になる.

本研究では, ランダムな通信路行列をもつ線形ベクトル通信路モデルに対するレプリカ解析において, 大システム極限における通常の鞍点評価よりも精密な, $O(1)$ の項まで含めた評価にもとづく解析を行った. 結果として, Guo-Verdu が見出したデカップリング原理がシステムの微視的な記述においても成立していることを示した. すなわち, 情報統計力学にもとづく解析は, 個々のユーザの通信環境に対する特徴づけを与えることができることが示された. この結果は, 通信理論の文脈における情報統計力学のアプローチの適用範囲を広げるという点で重要である.

(2) 並列干渉除去アルゴリズムの情報理論的解析

線形ベクトル通信路の受信側では, 成分間の相互干渉を有する受信信号から個々の送信シンボルを推定する必要があり, 確率伝搬法にもとづいて定式化される並列干渉除去アルゴリズム (Kabashima, 2003; Tanaka-Okada, 2005) は効率的な送信シンボル推定手法を与えているものと考えられ, その性質の解明は重要な検討課題である.

本研究では, 密度発展法および EXIT 法にもとづく並列干渉除去アルゴリズムの解析をおこなった. ランダムな通信路行列をもつ線形ベクトル通信路に対しては, 並列干渉除去アルゴリズムに対する密度発展方程式は少数パラメータの時間発展方程式に帰着させることができ, アルゴリズムの動的な性質を巨視的に効率よく記述することができる. 得られた密度発展方程式を検討した結果, 並列干渉除去アルゴリズムにおいては, 反復推

定の各ステージにおいて Guo-Verdu のデカップリング原理が成立することが確認された。すなわち、反復推定の任意のステージに注目すると、真の送信シンボルとそれに対する一時推定値との関係は、あたかも真の送信シンボルを単独でスカラーガウス通信路を介して送信し、受信側で事後平均推定量にもとづいて送信シンボルを推定したときの推定結果との関係と統計的に等価となることが示された。この結果にもとづいて、並列干渉除去アルゴリズムを情報理論的な視点で眺めると、成分間の相互干渉のためにシステム全体に拡散してしまった個々の送信シンボルに関する情報を反復推定によっていわば「精製」していく過程として解釈できる。

(3) CDMA 通信路における最適な拡散符号系列の設計

情報統計力学にもとづく解析は、基本的には与えられたシステムの性能評価を行うことを目的とするが、工学の立場からは与えられたシステムの解析だけでなく、好ましい性質を有するシステムの設計の問題も劣らず重要である。

本研究では、情報統計力学の適用範囲を解析のみならず設計にまで広げることを目指し、具体的な問題として CDMA 通信路における最適な拡散符号系列を設計する問題に取り組んだ。ガウス入力を仮定した場合には、最適な拡散符号系列はいわゆる（一般化）ウェルチ限界を達成する符号系列であることが知られていた。本研究では、二値入力かつ完全電力制御を仮定した場合には、やはりウェルチ限界を達成する符号系列が大システム極限において漸近的に最適であること、および、入力電力にばらつきがある場合には、ガウス入力に対して最適である一般化ウェルチ限界を達成する符号系列は、必ずしも二値入力に対して最適にはならないことを示した。ガウス入力と比較して二値入力の場合を考察することは実用上重要であるが、二値入力に対しては最適な拡散符号系列はこれまで知られておらず、本研究の結果は我々の知る限り二値入力の場合に関する最初の結果である。

(4) より現実的な問題設定への情報統計力学的アプローチの応用

CDMA 通信方式や、MIMO 通信方式は、主に無線通信への応用が想定されて研究が展開されている技術であるが、無線通信においては、通信路の状態は通信が実際に行われる環境に依存し、なおかつ時間的にも変動するため、現実的な問題設定においては通信路の状態に関する完全な知識を前提とすることはできない。一方で、情報統計力学にもとづく

解析へのアプローチはこれまで、通信路の状態に関する完全な知識が入手可能であることを仮定していたため、現実的な状況を前提とした場合の有効性が限定されていた。

本研究では、通信路の状態に関する完全な知識を前提としない現実的な問題設定のもとで、情報統計力学にもとづく解析の適用を試みた。通信路推定、マルチユーザ検出、各データストリームの復号という 3 要素の様々な組み合わせ方に対して解析を行い、どのような条件においてどのような受信器の構成が情報伝送の効率と計算複雑度とのトレードオフの観点で好ましいものであるかに関しての定量的な評価を可能とする解析的枠組みを構築した。これらの検討は、ノルウェー理工科大学の Muller 教授の研究グループとの協力関係のもとに実施された。情報統計力学にもとづくアプローチが通信理論分野での解析手法として定着するためには、このような現実的な問題設定への適用可能性を示すことは非常に重要であり、本研究は直接的な結果のみならず、適用可能性の実証例という点においても大きな意義を有する。

(5) 疎なランダム共分散行列の漸近固有値分布の検討

多自由度の無線通信においては、通信路行列をランダム行列としてモデル化することがよく行われ、通信路行列をデータ行列としたときの標本共分散行列の固有値分布が、通信路の理論的な性質を議論するために基本的である。ランダム共分散行列の固有値分布は大システム極限では漸近的に Marcenko-Pastur 則と呼ばれる分布に従うことが多いが、通信路行列が疎行列である場合には普遍性が失われ、多様な漸近固有値分布が現れる。しかしながら、疎なランダム共分散行列の漸近固有値分布に関しては、理論的な研究がほとんどなされていなかった。

本研究では、レプリカ法、およびグラスマン変数を使った解析手法の双方を使い、疎なランダム共分散行列の漸近固有値分布について解析的に検討し、行列の重み分布および非零要素がしたがう分布に依存して多様な漸近固有値分布が見られることを明らかにした。

(6) 圧縮センシングへの展開

未知ベクトルに対する線形観測の結果からもとの未知ベクトルを再構成する問題において、未知ベクトルに疎性が仮定できる場合には、完全な再構成に必要な線形観測の個数は未知ベクトルの次元よりも小さくできることが認識され、「圧縮センシング」の名で大きな理論、応用研究の潮流が生まれつつある。

本研究では、圧縮センシングの問題設定が線形ベクトル通信路における情報推定の問題設定と数理的に同型であることに着目し、後者に対する情報統計力学的解析の蓄積を援用して圧縮センシングの問題に関する解析を試みた。具体的には、線形計画法にもとづく再構成法によって完全な再構成が可能となるために必要な観測数の閾値を評価し、高次元ランダム組み合わせ幾何にもとづく考察で得られていた閾値と一致する結果を得た。さらに、未知ベクトルの疎性に関する事前知識が入手可能であるような場合について考察し、事前知識の利用によって必要となる観測数を減らすことができることを示した。この検討は、本特定領域研究の構成員である樺島氏、和田山氏との共同研究であり、研究プロジェクトを組織していたことによりはじめて可能となった研究である。

5. 主な発表論文等

(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 15 件)

- (1) Toshiyuki Tanaka, "Moment problem in replica method," *Interdisciplinary Information Sciences*, vol. 13, no. 1, pp. 17-23, 2007. (査読あり)
- (2) Taro Nagao and Toshiyuki Tanaka, "Spectral density of sparse sample covariance matrices," *Journal of Physics A: Mathematical and General*, vol. 40, no. 19, pp. 4973-4987, 2007. (査読あり)
- (3) Mika Yoshida, Tatsuya Uezu, Toshiyuki Tanaka, and Masato Okada, "Statistical mechanical study of CDMA multiuser detectors - Analysis of RS and 1RSB solutions -," *Journal of Physical Society of Japan*, vol. 76, no. 5, 054003 (10pp), 2007. (査読あり)
- (4) 矢野亨, 中村一尊, 田中利幸, 「確率伝搬法に基づく CDMA マルチユーザ検出方式における通信路パラメータ同時推定方式の基礎的検討」, *電子情報通信学会論文誌 A*, vol. J90-A, no. 11, pp. 861-869, 2007. (査読あり)
- (5) Toshiyuki Tanaka, "Asymptotics of Harish-Chandra-Itzykson-Zuber integrals and free probability theory," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 95, 012002 (9pp), 2008. (査読あり)
- (6) Keigo Takeuchi and Toshiyuki Tanaka, "Statistical-mechanics-based analysis of multiuser MIMO channels with linear dispersion codes," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 95, 012008 (11pp), 2008. (査読あり)
- (7) 中村一尊, 田中利幸, 「CDMA マルチユーザ検出における量子化の影響」, *電子情報通信学会論文誌 A*, vol. J91-A, no. 5, pp. 550-556, 2008. (査読あり)
- (8) Keigo Takeuchi, Toshiyuki Tanaka, and Toru Yano, "Asymptotic analysis of general multiuser detectors in MIMO DS-CDMA channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 3, pp. 486-496, 2008. (査読あり)
- (9) Toshiyuki Tanaka and Kazutaka Nakamura, "Mean field theory of communication - statistical-physics approach to wireless communications," *European Physical Journal B*, vol. 64, nos. 3-4, pp. 625-631, 2008. (査読あり)
- (10) Toru Yano, Toshiyuki Tanaka, and David Saad, "A mean field theory of coded CDMA systems," *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, vol. 41, no. 32, 324022 (15pp), 2008. (査読あり)
- (11) Ryuhei Mori and Toshiyuki Tanaka, "Performance of polar codes with construction using density evolution," *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 7, pp. 519-521, 2009. (査読あり)
- (12) Toshiyuki Tanaka, "Re-classification of quantified classical simulated annealing," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 143, 012020 (8pp), 2009. (査読あり)
- (13) Yoshiyuki Kabashima, Tadashi Wadayama, and Toshiyuki Tanaka, "Typical reconstruction limit of compressed sensing based on L_p -norm minimization," *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, L09003 (12pp), 2009. (査読あり)
- (14) Koichiro Kitagawa and Toshiyuki Tanaka, "Optimization of sequences in CDMA systems: A statistical-mechanics approach," *Computer Networks*, vol. 54, no. 6, pp. 917-924, 2010. (査読あり)
- (15) Keigo Takeuchi, Mikko Vehkaperä, Toshiyuki Tanaka, and Ralf R. Müller, "Performance analysis of optimal channel estimation and multiuser detection in a randomly-spread CDMA channel," *Journal of Systems Science and Complexity*, vol. 23, no. 1, pp. 22-34, 2010. (査読あり)

[学会発表] (計 62 件)]

- (1) 田中利幸, 「ランダム線形ベクトル通信路の情報伝送能力の解析」, 第 29 回情報理論とその応用シンポジウム, 2006 年 11 月.
- (2) 池原崇至, 田中利幸, 「確率伝搬法にもとづく CDMA マルチユーザ検出アルゴリズムにおけるデカップリング原理」, 第 29 回情報理論とその応用シンポジウム, 2006 年 11 月.
- (3) 吉田実加, 田中利幸, 上江洩達也, 「シグネチャ系列がスパースな CDMA モデルについての統計力学的解析」, 第 29 回情報理論とその応用シンポジウム, 2006 年 11 月.
- (4) 竹内啓悟, 田中利幸, 「マルチユーザ MIMO-CDMA 通信路のスペクトル効率のレプリカ解析」, 第 29 回情報理論とその応用シンポジウム, 2006 年 11 月.
- (5) Toshiyuki Tanaka, “Mean field theory of communication over random vector channels,” Statistical Physics and its Applications to Complex Problems in Communication, Eilat, Israel, March 2007.
- (6) 竹内啓悟, 田中利幸, 「MIMO-CDMA 通信路に対する階層的平均場理論」, 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月.
- (7) 中村一尊, 田中利幸, 「CDMA マルチユーザ検出における完全汎化」, 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月.
- (8) Keigo Takeuchi and Toshiyuki Tanaka, “Hierarchical decoupling principle of a MIMO-CDMA channel in asymptotic limits,” 2007 IEEE International Symposium on Information Theory, Nice, France, June 2007.
- (9) Toshiyuki Tanaka, “On dualistic structure involving Shannon transform and integrated R-transform,” 2007 IEEE International Symposium on Information Theory, Nice, France, June 2007.
- (10) Takashi Ikehara and Toshiyuki Tanaka, “Decoupling principle in belief-propagation-based CDMA multiuser detection algorithm,” 2007 IEEE International Symposium on Information Theory, Nice, France, June 2007.
- (11) Toshiyuki Tanaka, “Limiting eigenvalue distributions of random matrices,” Common Concepts in Statistical Physics and Computer Science, Trieste, Italy, July 2007.
- (12) Toshiyuki Tanaka, “Mean field theory of communication,” 23rd IUPAP International Conference on Statistical Physics, Genova, Italy, July 2007.
- (13) Toshiyuki Tanaka, “Spin glasses in wireless communications,” Viewing the World through Spin Glasses: An International Conference in Honour of David Sherrington, Oxford, United Kingdom, September 2007.
- (14) Toshiyuki Tanaka, “Asymptotics of Harish-Chandra-Itzykson-Zuber integrals and free probability theory,” International Workshop on Statistical Mechanical Informatics 2007, Kyoto, Japan, September 2007.
- (15) Keigo Takeuchi and Toshiyuki Tanaka, “Statistical-mechanics-based analysis of multiuser MIMO channels,” International Workshop on Statistical Mechanical Informatics 2007, Kyoto, Japan, September 2007.
- (16) 竹内啓悟, 田中利幸, 「ランダムベクトル通信路における自由エネルギー分布の漸近解析」, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月.
- (17) 田中利幸, 「ランダム行列理論における R 変換の積分とシャノン変換との間の双対構造」, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月.
- (18) 中村一尊, 田中利幸, 「CDMA 通信路における個別ユーザの周辺事後確率の評価」, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月.
- (19) 矢野亨, 田中利幸, David Saad, 「符号化 CDMA システムの平均場描像」, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月.
- (20) 竹内啓悟, 田中利幸, 「マルチユーザ MIMO 通信路における低レート時空間符号の漸近性能解析」, 第 30 回情報理論とその応用シンポジウム, 2007 年 11 月.
- (21) 田中利幸, 「Itzykson-Zuber 積分に関するいくつかの結果」, 第 30 回情報理論とその応用シンポジウム, 2007 年 11 月.
- (22) 北川幸一郎, 田中利幸, 「Welch 限界を達成する拡散符号系列を用いた CDMA 通信路の統計力学による解析」, 第 30 回情報理論とその応用シンポジウム, 2007 年 11 月.
- (23) 吉田実加, 田中利幸, 上江洩達也, 「周波数ホッピング方式に基づく拡散符号系列がスパースな CDMA モデルについての統計力学的解析」, 第 30 回情報理論とその応用シンポジウム, 2007 年 11 月.
- (24) 中村一尊, 田中利幸, 「ランダムベクトル通信路におけるデカップリング原理の精密化」, 第 30 回情報理論とその応用シンポジウム, 2007 年 11 月.
- (25) 矢野亨, 田中利幸, David Saad, 「符号化 CDMA システムの情報伝送量の統計

- 力学的評価」, 第 30 回情報理論とその応用シンポジウム, 2007 年 11 月.
- (26) Kazutaka Nakamura and Toshiyuki Tanaka, “Statistical-mechanics approach to approximate algorithms for Bayesian inference problems,” Chinese Academy of Sciences-Kyoto University Joint Workshop on Mathematical Methods for Informatics, Engineering and Management, Beijing, China, March 2008.
- (27) Keigo Takeuchi, Toshiyuki Tanaka, Mikko Vehkaperae, and Ralf R. Mueller, “Large-system analysis of MIMO-CDMA channels with imperfect channel state information,” Chinese Academy of Sciences-Kyoto University Joint Workshop on Mathematical Methods for Informatics, Engineering and Management, Beijing, China, March 2008.
- (28) 吉田実加, 田中利幸, 上江渕達也, 「拡散符号系列がスパースな CDMA マルチユーザ復調器の統計力学的解析」, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月.
- (29) 中村一尊, 田中利幸, 「線形ベクトル通信路に対する RSB 解におけるデカップリング原理」, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月.
- (30) 竹内啓悟, 田中利幸, 「符号間干渉通信路に対する統計力学的解析」, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月.
- (31) 北川幸一郎, 田中利幸, 「CDMA 通信路における最適拡散符号系列の検討」, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月.
- (32) Toshiyuki Tanaka, “Limiting eigenvalue distributions of random matrices,” 7th International Conference on Applications of Physics in Financial Analysis, Tokyo, Japan, March 2008.
- (33) Toshiyuki Tanaka, “Interference reduction in CDMA channels: A statistical-mechanics approach,” 1st Workshop on Physics-Inspired Paradigms in Wireless Communications and Networks, Berlin, Germany, April 2008.
- (34) Keigo Takeuchi, Mikko Vehkaperae, Toshiyuki Tanaka, and Ralf R. Muller, “Replica analysis of general multiuser detection in MIMO DS-CDMA channels with imperfect CSI,” 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, Canada, July 2008.
- (35) Kazutaka Nakamura and Toshiyuki Tanaka, “Microscopic analysis for decoupling principle of linear vector channel,” 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, Canada, July 2008.
- (36) Kouichiro Kitagawa and Toshiyuki Tanaka, “Optimal spreading sequences in large CDMA systems: A statistical mechanics approach,” 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, Canada, July 2008.
- (37) Mikko Vehkaperae, Keigo Takeuchi, Ralf Muller, and Toshiyuki Tanaka, “Asymptotic analysis of iterative channel estimation and multiuser detection with soft feedback in multipath channels,” 16th European Signal Processing Conference, Lausanne, Switzerland, August 2008.
- (38) Toshiyuki Tanaka, “Re-classification of ‘quantified’ classical simulated annealing,” International Workshop on Statistical Mechanical Informatics 2008, Sendai, Japan, September 2008.
- (39) 竹内啓悟, 田中利幸, 「MIMO DS-CDMA における通信路推定とマルチユーザ検出の統計力学的検討」, 電子情報通信学会 2008 ソサイエティ大会, 2008 年 9 月.
- (40) 竹内啓悟, 田中利幸, 「チャネル推定を考慮した CDMA マルチユーザ検出問題の統計力学的解析」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月.
- (41) 福本知也, 田中利幸, 「重み一定の疎なランダム行列の漸近固有値分布」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月.
- (42) 北川幸一郎, 田中利幸, 「不完全電力制御 CDMA 通信における最適拡散符号系列の統計力学的検討」, 第 31 回情報理論とその応用シンポジウム, 2008 年 10 月.
- (43) 竹内啓悟, 田中利幸, 「MIMO DS-CDMA 通信路における通信路推定とマルチユーザ検出」, 第 31 回情報理論とその応用シンポジウム, 2008 年 10 月.
- (44) Keigo Takeuchi and Toshiyuki Tanaka, “Asymptotic performance bounds of joint channel estimation and multiuser detection in frequency-selective fading DS-CDMA channels,” 2008 International Symposium on Information Theory and Its Applications, Auckland, New Zealand, December 2008.
- (45) Keigo Takeuchi, “Optimal amount of pilot information for MIMO channel estimation,” Joint Workshop of Beijing,

- Hong Kong and Kyoto on Computational Mathematics, Computer and Systems Sciences 2009, Kyoto, Japan, March 2009.
- (46) Mikko Vehkaperä, Keigo Takeuchi, Ralf Muller, and Toshiyuki Tanaka, "On asymptotic performance of iterative channel and data estimation in large DS-CDMA systems," 2nd Workshop on Physics-Inspired Paradigms in Wireless Communications and Networks, Seoul, Korea, June 2009.
- (47) Keigo Takeuchi, Ralf Mueller, Mikko Vehkaperä, and Toshiyuki Tanaka, "A new signaling scheme for large DS-CDMA channels without CSI," 2nd Workshop on Physics-Inspired Paradigms in Wireless Communications and Networks, Seoul, Korea, June 2009.
- (48) Keigo Takeuchi, Ralf Mueller, Mikko Vehkaperä, and Toshiyuki Tanaka, "Practical signaling with vanishing pilot-energy for large noncoherent block-fading MIMO channels," 2009 IEEE International Symposium on Information Theory, Seoul, Korea, June 2009.
- (49) Mikko Vehkaperä, Keigo Takeuchi, Ralf Muller, and Toshiyuki Tanaka, "How much training is needed for iterative multiuser detection and decoding?" 2009 IEEE International Symposium on Information Theory, Seoul, Korea, June 2009.
- (50) 田中利幸, 「 H 復元の統計力学」, 日本物理学会 1009 年秋季大会, 2009 年 9 月.
- (51) 福本知也, 田中利幸, 「疎な共分散型ランダム行列の漸近固有値分布」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月.
- (52) 野中成吾, 田中利幸, 「系の縮退が量子アニーリングの高速化技法に及ぼす影響」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月.
- (53) 田中利幸, 「通信路分極とポーラ符号」, 電子情報通信学会情報理論研究会, 2009 年 11 月.
- (54) 竹内啓悟, Ralf Mueller, Mikko Vehkaperä, 田中利幸, 「バイアスに基づく通信路推定 Part I: MIMO」, 第 32 回情報理論とその応用シンポジウム, 2009 年 12 月.
- (55) 竹内啓悟, Ralf Mueller, Mikko Vehkaperä, 田中利幸, 「バイアスに基づく通信路推定 Part II: DS-CDMA」, 第 32 回情報理論とその応用シンポジウム, 2009 年 12 月.
- (56) 樺島祥介, 和田山正, 田中利幸, 「 L_p ノルム最小化に基づく圧縮センシングの統計力学的解析」, 第 32 回情報理論とその応用シンポジウム, 2009 年 12 月.
- (57) 矢野亨, 田中利幸, 「圧縮センシングにおける事後平均推定量にもとづく復元方式の統計力学的解析」, 第 32 回情報理論とその応用シンポジウム, 2009 年 12 月.
- (58) 大山賀己, 田中利幸, 「CDMA マルチユーザ検出における二値化受信信号に対する並列干渉除去法の性能評価」, 第 32 回情報理論とその応用シンポジウム, 2009 年 12 月.
- (59) Mikko Vehkaperä, Keigo Takeuchi, Ralf Muller, Toshiyuki Tanaka, "How much training is needed for iterative multiuser detection and decoding?" Global Telecommunications Conference (Globecom), Honolulu, USA, December 2009.
- (60) Toshiyuki Tanaka, "Properties of a certain stochastic dynamical system, channel polarization, and polar codes," International Workshop on Statistical Mechanical Informatics 2010, Kyoto, Japan, March 2010.
- (61) Toshiyuki Tanaka, "Statistical-mechanics-based analysis of compressed sensing," International Meeting on "Inference, Computation, and Spin Glasses", Kyoto, Japan, March 2010.
- (62) 田中利幸, 福島孝治, 「数独に対する平均場模型」, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月.
- [図書] (計 1 件)
- (1) Dongning Guo and Toshiyuki Tanaka, "Generic multiuser detection and statistical physics," Chapter 5 of M. L. Honig (ed.), Advances in Multiuser Detection, Wiley, 2009, pp. 251-309.
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
田中利幸 (TANAKA TOSHIYUKI)
京都大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号: 10254153
- (2) 研究分担者
中村一尊 (NAKAMURA KAZUTAKA)

京都大学・大学院情報学研究科・助教
研究者番号：
(平成 18-19 年度)

竹内啓悟 (TAKEUCHI KEIGO)
電気通信大学・電気通信学部・助教
研究者番号：30549697
(平成 21 年度)

(3) 連携研究者
(該当なし)