

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03201

研究課題名（和文）深層機械学習理論の深化とその構造解析への応用

研究課題名（英文）Intensifying deep learning theory and its application to structure analysis of deep neural network

研究代表者

鈴木 大慈（Suzuki, Taiji）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：60551372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：深層学習は現在機械学習でも中心的な役割を果たしており、多くのタスクで高い性能を示している。一方で、その原理への理論的理解は進んでおらず、ブラックボックス化しているのが研究開始当初の状況であった。その状況を改善するために、本研究では深層学習の原理解明に関して以下の研究成果を得た。(1) カーネル法的視点による深層学習の圧縮型汎化誤差解析、(2) 統計自由度による最適なモデル構造の探索とモデル圧縮への応用、(3) 新しい確率的最適化手法の提案、(4) 深層学習のカーネル法への優位性の理論的証明。これらの研究を通して深層学習が他の方法に比べてなぜ良いのかという問いへ多くの知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深層学習は機械学習の社会実装が進む中、社会的重要な技術となっている。一方でその原理が解明されずに応用だけ進むことは、制御可能性や説明可能性という観点からも望ましくない。本研究では、種々の数学的道具を用いて深層学習の原理解明に貢献し、また理論の応用として最適なモデルの探索やモデル圧縮法を提案した。研究成果により研究開始時期と比べて非常に多くの理論的知見が得られた。これは、深層学習をホワイトボックス化するという意味で社会的意義が大きい成果である。

研究成果の概要（英文）：Deep learning currently plays a central role in machine learning and has shown high performance in many tasks. On the other hand, theoretical understanding of its principles has not progressed. Indeed, at the beginning of this research project, it was almost a black box. In order to change this situation, we have obtained the following research results on the principles of deep learning. (1) Compression based generalization error analysis of deep learning from the kernel method perspective, (2) Proposing a new method to obtain the optimal model structure based on statistical degrees of freedom and its application to model compression, (3) Proposal of new stochastic optimization methods, and (4) Theoretical proof of the superiority of deep learning over the kernel method and other classical methods. Through these studies, we have obtained many insights into the question of why deep learning is better than other methods.

研究分野：機械学習

キーワード：深層学習 カーネル法 汎化誤差解析 ノンパラメトリック統計 モデル圧縮

## 1. 研究開始当初の背景

第三次ニューラルネットワークブームの中、NIPS や ICML といった機械学習のトップカンファレンスへの参加人数は指数関数的に増大し、産業界でも人工知能技術および機械学習技術への投資額が増大の一途をたどり、世界的に機械学習技術への関心が急速に高まっていた。その中でも深層学習は様々な学習問題において高い性能を見せており、例えば ImageNet と呼ばれる大規模データにおける画像認識の精度を競うコンペティション (ILSVRC) においては 2012 年の AlexNet 以来、深層学習による手法がトップの成績を出し続けており、その判別精度は年々上昇し人間を凌ぐほどまでになっていた。これら産学の枠を超えた機械学習技術へのニーズの高まりは、応用研究の急速な加速を生んでいる。一方で、その理論的理解はある意味置き去りにされ、そこまで進んでいない状況であった。しかし、これは理論研究への期待が薄まっていることを意味しているわけでは決してなく、むしろ学术界だけでなく産業界においても、深層学習への理論研究へのニーズは一層高まっているという状況であった。というのも、深層学習はその実用的に高い性能を出している一方で、あらゆる現場で深層学習がブラックボックス的に用いられている現状は信頼性の観点から重大な問題をはらんでおり、多くの現場で不安をもたらしていた。例えば、現在自動運転の実用化が進められているが、深層学習がこちらの意図しない振る舞いをしたとしても、それを予測し防ぐ手立てがないという状況であった。よって、理論による深層学習の品質保証をはじめ、適切なネットワーク構造の選択や高速な学習アルゴリズムの構築といった深層学習のホワイトボックス化は実用的観点からも世界的に喫緊の問題であった。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、深層学習の原理解明をその汎化誤差解析を軸とし進め、その理論の実応用への還元を目指す。汎化誤差解析においては、カーネル法の理論を援用し、各中間層に対応する無限次元再生核ヒルベルト空間とそれに付随する「自由度」や「固有空間」といった量を用いて誤差を定量的に評価する。それによってデータの分布の特徴を利用した理論的にタイトな評価が得られるだけでなく、データ依存なネットワークの最適構造決定や予測結果の信頼性評価および深層学習の限界の評価を実現する。また、確率的最適化や並列計算を用いた高速な最適化アルゴリズムの構築と、学習された解の局所最適性/大域的最適性の解析を学習理論と最適化理論の両面から行う。理論研究の成果は実データで検証し、また企業との共同研究も進め実社会に還元する。

## 3. 研究の方法

研究の目的を達成するために、以下の課題に沿って研究を実施した。

**課題(1)** 深層学習の汎化能力およびその学習機構の理論的解明、**課題(2)** 深層学習の構造最適化と信頼性確保技術の構築、**課題(3)** 高速最適化手法の構築、**課題(4)** 深層学習に限らない広い範囲の学習手法に関する、新しい学習形態の模索とその理論的解明、**課題(5)** 上記理論的基盤を基にした実データによる実証分析。

## 4. 研究成果

各課題について以下の結果を得た。

### **課題(1)** 「深層学習の汎化能力およびその学習機構の理論的解明」

(1) 深層学習のモデル圧縮とその理論：深層学習の理論ではモデル圧縮可能性によって汎化誤差を特徴づける理論が研究されているが、それらは圧縮した後のネットワークの汎化誤差であり、圧縮前のネットワークについては理論保証を与えなかった。そこで、ネットワークの隠れた自由度がどのように汎化誤差に影響するかを解析し、圧縮前のネットワークが潜在的にどれくらい圧縮可能かによって汎化誤差を特徴付ける理論を与えた。その結果、従来の圧縮後に適用可能なバウンドに比べてタイトなバウンドを得ることができ、また我々の解析に用いた統計的自由度は既存研究のそれに比べて大きく改善した評価を与えることが分かった。また、同様の理論を援用してテンソル分解による深層 NN の圧縮理論といった研究も実施した。

(2) 深層ニューラルネットワークの適応力の理論：機械学習では様々な形状の関数をデータから推定する必要がある。実は、深層学習はこの関数の形状に関して高い適応力を持っていることが示され、それによってカーネル法などの他手法と比べて高い推定精度を達成できることを示した。そのため、対象となる関数クラスとして Besov 空間を考え、スパース推定や関数近似理論を用いて深層学習の優位性を示した。また、真の関数が様々な方向に対して非常に滑らかであれば、次元の呪いを回避できることを非等方的 Besov 空間の理論を用いて示した。さらに、その理

論を拡張して無限次元入力ニューラルネットワークの理論を構築した。現実のニューラルネットワークは画像や音声などの高次元・無限次元入力を扱う。そのような状況でも汎化する機構を明らかにするために、真の関数が方向に依存した滑らかさを持つことを仮定し、その仮定の下で深層学習が次元の呪いを回避できることを示した。

(2) Neural Tangent Kernel (NTK) の確率的最適化と最適予測誤差：深層学習は非凸最適化問題に帰着されるが、横幅の広い過剰パラメータモデルを考えると線形モデルで近似できることが知られている。本研究ではこの近似が成り立つ状況において深層学習を確率的最適化することで、ある種の最適学習レートを達成できることを示した。この結果は ICLR2021 の outstanding paper award を受賞した。

(3) 最適化を含めた良性過学習の解析：ニューラルネットワークはデータに完全にフィットしても依然として良い予測性能を示す良性過学習と言われる現象を引き起こす。この良性過学習による予測誤差を複数の最適化法の間で比較し、いかなる状況でどの最適化法が有利であるかを特徴づけた。

(4) ネットワークの学習ダイナミクスとスパース性：真が横幅の狭い二層ニューラルネットワークであるなら、適切な正則化のもと勾配法を用いたニューラル

ネットワークの最適化はスパース性の効果が働いて真のニューラルネットワークのパラメータに収束してゆくことを示した。

### 課題(2)「深層学習の構造最適化と信頼性確保技術の構築」

課題(1)で実施した汎化誤差理論解析を援用して、Spectral-Pruning というネットワーク圧縮技術を提案し、その技術を転用して転移学習などにおけるネットワーク構造自動決定方法も提案した。

### 課題(3)「高速最適化手法の構築」

(1) 我々のこれまでの研究で提案した二重確率的分散縮小勾配降下法が実はミニバッチサイズの効率性と言う意味でも最適であることを示した。この結果より、ミニバッチサイズはサンプルサイズ  $n$  の平方根より増やしても収束効率は上がらないことが分かった。

(2) 再生核ヒルベルト空間上の確率的最適化を考え、真の分布が強低ノイズ条件という性質を持っていれば判別誤差が更新回数に対して指数的に収束することを示した。

(3) 無限次元勾配ランジュバン動力学を用いた深層学習の最適化：深層学習の学習は非凸最適化問題を解く必要があり、通常の勾配法では局所解に陥る可能性がある。また、深層ニューラルネットワークは多数のパラメータを有するため、超高次元非凸最適化問題を解く必要がある。そこで、本研究では、無限次元非凸最適化問題を解くための無限次元勾配ランジュバン動力学を用いることを考え、その大域的最適性および汎化性能を解析した。結果として fast learning rate と呼ばれる学習効率のバウンドを得た。また、カーネルリッジ回帰のような浅い学習方法に対して優越することを理論的に示した。

(4) 再生核ヒルベルト空間上の確率的最適化を考察し、重みづけたデータのサンプリングをすることで学習のレートを改善できることや、ランダム特徴量を用いたカーネルの低ランク近似を用いても判別誤差を指数的に減少させることができることを示した。

(5) 横幅の広いニューラルネットワークのいわゆる平均場設定において、理論保証有りで大域的最適解に収束する新しい手法を提案した。手法のオリジナルな発想として双対平均加法に基づく手法から始め、それを発展する形で双対確率的座標降下法に基づく方法を提案した。この手法は指数オーダーでの収束を達成するものである。

### 課題(4)「深層学習に限らない広い範囲の学習手法に関する、新しい学習形態の模索とその理論的解明」

グラフ CNN はグラフ上の深層学習モデルであり、現在注目されているが、層を深くすると精度が悪くなるという性質が知られていた。そこで、グラフ CNN の理論解析によって、グラフ CNN には過平滑化の効果があることを示し、層を積んでも学習がうまくいかない理由の一部を理論的に示した。さらに、その過平滑化を防ぐための方法である mutli-scale GCN と呼ばれる手法を Boosting 法として再定式化し、その最適化および汎化誤差を導出し、実験的にも手法の有用性を実証した。

課題(5)における実データの実証分析は上記研究と並行して各課題ごとに適宜実施した。特に課題(2)における Spectral-Pruning や最適ネットワーク構造の探索は公開データを用いてその有用性を確かめた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計40件（うち査読付論文 30件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 35件）

1. 著者名 Lv Shaogao, Fan Zengyan, Lian Heng, Suzuki Taiji, Fukumizu Kenji	4. 巻 152
2. 論文標題 A reproducing kernel Hilbert space approach to high dimensional partially varying coefficient model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Statistics & Data Analysis	6. 最初と最後の頁 107039 ~ 107039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.csda.2020.107039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Watanabe Chihiro, Suzuki Taiji	4. 巻 154
2. 論文標題 Goodness-of-fit test for latent block models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Statistics & Data Analysis	6. 最初と最後の頁 107090 ~ 107090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.csda.2020.107090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takada Masaaki, Suzuki Taiji, Fujisawa Hironori	4. 巻 32
2. 論文標題 Independently Interpretable Lasso for Generalized Linear Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neural Computation	6. 最初と最後の頁 1168 ~ 1221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/neco_a_01279	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Taiji Suzuki, Hiroshi Abe, Tomoaki Nishimura	4. 巻 8
2. 論文標題 Compression based bound for non-compressed network: unified generalization error analysis of large compressible deep neural network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ICLR2020	6. 最初と最後の頁 --
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenta Oono, Taiji Suzuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Graph Neural Networks Exponentially Lose Expressive Power for Node Classification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ICLR2020	6. 最初と最後の頁 --
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Jimmy Ba, Murat Erdogdu, Taiji Suzuki, Denny Wu, Tianzong Zhang	4. 巻 8
2. 論文標題 Generalization of Two-layer Neural Networks: An Asymptotic Viewpoint	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ICLR2020	6. 最初と最後の頁 --
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Jingling Li, Yanchao Sun, Ziyin Liu, Taiji Suzuki and Furong Huang	4. 巻 108
2. 論文標題 Understanding of Generalization in Deep Learning via Tensor Methods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AISTATS2020, Proceedings of Machine Learning Research	6. 最初と最後の頁 504--515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Atsushi Nitanda, Taiji Suzuki	4. 巻 108
2. 論文標題 Functional Gradient Boosting for Learning Residual-like Networks with Statistical Guarantees	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AISTATS2020, Proceedings of Machine Learning Research	6. 最初と最後の頁 2981--2991
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taiji Suzuki, Hiroshi Abe, Tomoya Murata, Shingo Horiuchi, Kotaro Ito, Tokuma Wachi, So Hirai, Masatoshi Yukishima, Tomoaki Nishimura	4. 巻 29
2. 論文標題 Spectral pruning: Compressing deep neural networks via spectral analysis and its generalization error	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IJCAI-PRICAI 2020	6. 最初と最後の頁 2839--2846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24963/ijcai.2020/393	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Laurent Dillard, Yosuke Shinya, Taiji Suzuki	4. 巻 31
2. 論文標題 Domain Adaptation Regularization for Spectral Pruning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 BMVC2020 (British Machine Vision Conference 2020)	6. 最初と最後の頁 --
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenta Oono, Taiji Suzuki	4. 巻 33
2. 論文標題 Optimization and Generalization Analysis of Transduction through Gradient Boosting and Application to Multi-scale Graph Neural Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems	6. 最初と最後の頁 18917--18930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taiji Suzuki	4. 巻 33
2. 論文標題 Generalization bound of globally optimal non-convex neural network training: Transportation map estimation by infinite dimensional Langevin dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems	6. 最初と最後の頁 19224--19237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鈴木 大慈	4. 巻 50
2. 論文標題 深層学習の統計理論	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本統計学会誌	6. 最初と最後の頁 229 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11329/jjssj.50.229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Ami, Suzuki Taiji	4. 巻 20(3)
2. 論文標題 Bayesian optimization design for dose finding based on toxicity and efficacy outcomes in phase I/II clinical trials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Pharmaceutical Statistics	6. 最初と最後の頁 422--439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pst.2085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kazuma Tsuji, Taiji Suzuki	4. 巻 15 (1)
2. 論文標題 Estimation error analysis of deep learning on the regression problem on the variable exponent Besov space	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Electronic Journal of Statistics	6. 最初と最後の頁 1869--1908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1214/21-EJS1828	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鈴木大慈	4. 巻 685
2. 論文標題 数理工学とAI	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 数理科学	6. 最初と最後の頁 13--19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taiji Suzuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Adaptivity of deep ReLU network for learning in Besov and mixed smooth Besov spaces: optimal rate and curse of dimensionality	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The 7th International Conference on Learning Representations (ICLR2019)	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Nitanda, Taiji Suzuki	4. 巻 89
2. 論文標題 Stochastic Gradient Descent with Exponential Convergence Rates of Expected Classification Errors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research (AISTATS2019)	6. 最初と最後の頁 1417--1426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Heishiro Kanagawa, Hayato Kobayashi, Nobuyuki Shimizu, Yukihiro Tagami, and Taiji Suzuki	4. 巻 なし
2. 論文標題 Cross-domain Recommendation via Deep Domain Adaptation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Information Retrieval 41st European Conference on IR Research, ECIR 2019	6. 最初と最後の頁 20--29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenta Oono and Taiji Suzuki	4. 巻 97
2. 論文標題 Approximation and Non-parametric Estimation of ResNet-type Convolutional Neural Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research (ICML2019)	6. 最初と最後の頁 4922--4931
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nitanda Atsushi, Murata Tomoya, Suzuki Taiji	4. 巻 なし
2. 論文標題 Sharp Characterization of Optimal Minibatch Size for Stochastic Finite Sum Convex Optimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)	6. 最初と最後の頁 488--497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICDM.2019.00059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yosuke Shinya, Edgar Simo-Serra, and Taiji Suzuki	4. 巻 なし
2. 論文標題 Understanding the Effects of Pre-training for Object Detectors via Eigenspectrum	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ICCV2019, Neural Architects Workshop	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Hayakawa and Taiji Suzuki	4. 巻 123
2. 論文標題 On the minimax optimality and superiority of deep neural network learning over sparse parameter spaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 343--361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2019.12.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Taiji	4. 巻 12
2. 論文標題 Fast learning rate of non-sparse multiple kernel learning and optimal regularization strategies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Electronic Journal of Statistics	6. 最初と最後の頁 2141 ~ 2192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1214/18-EJS1399	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mori Yuichi, Suzuki Taiji	4. 巻 165
2. 論文標題 Generalized ridge estimator and model selection criteria in multivariate linear regression	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Multivariate Analysis	6. 最初と最後の頁 243 ~ 261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmva.2017.12.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taiji Suzuki	4. 巻 84
2. 論文標題 Fast generalization error bound of deep learning from a kernel perspective	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research (AISTATS2018)	6. 最初と最後の頁 1397--1406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaaki Takada, Taiji Suzuki, and Hironori Fujisawa	4. 巻 84
2. 論文標題 Independently Interpretable Lasso: A New Regularizer for Sparse Regression with Uncorrelated Variables	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research (AISTATS2018)	6. 最初と最後の頁 1008--1016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Nitanda and Taiji Suzuki	4. 巻 84
2. 論文標題 Gradient Layer: Enhancing the Convergence of Adversarial Training for Generative Models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research (AISTATS2018)	6. 最初と最後の頁 454--463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Nitanda and Taiji Suzuki	4. 巻 80
2. 論文標題 Functional Gradient Boosting based on Residual Network Perception	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research (ICML2018)	6. 最初と最後の頁 3819--3828
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yaguchi Atsushi, Suzuki Taiji, Asano Wataru, Nitta Shuhei, Sakata Yukinobu, Tanizawa Akiyuki	4. 巻 17
2. 論文標題 Adam Induces Implicit Weight Sparsity in Rectifier Neural Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)	6. 最初と最後の頁 17--20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomoya Murata, and Taiji Suzuki	4. 巻 31
2. 論文標題 Sample Efficient Stochastic Gradient Iterative Hard Thresholding Method for Stochastic Sparse Linear Regression with Limited Attribute Observation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems	6. 最初と最後の頁 5312--5321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yonekura Kazuo, Hattori Hitoshi, Suzuki Taiji	4. 巻 1
2. 論文標題 Short-term local weather forecast using dense weather station by deep neural network	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)	6. 最初と最後の頁 10--13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/BigData.2018.8622195	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鈴木 大慈	4. 巻 28
2. 論文標題 統計的学習理論とその深層学習への応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 28 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11540/bjsiam.28.4_28	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鈴木 大慈	4. 巻 28
2. 論文標題 機械学習における確率的最適化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 27 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11540/bjsiam.28.3_27	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鈴木 大慈	4. 巻 28
2. 論文標題 過学習と正則化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 28 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11540/bjsiam.28.2_28	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鈴木 大慈	4. 巻 28
2. 論文標題 機械学習の概要	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 32 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11540/bjsiam.28.1_32	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鈴木大慈	4. 巻 686
2. 論文標題 数理のクロスロード / 機械学習の数理 / (2) カーネル法とニューラルネットワーク	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 数学セミナー	6. 最初と最後の頁 68--73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鈴木大慈	4. 巻 685
2. 論文標題 数理のクロスロード / 機械学習の数理 / (1) 深層学習の理論	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 数学セミナー	6. 最初と最後の頁 66--71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鈴木 大慈	4. 巻 62
2. 論文標題 再生核ヒルベルト空間の理論によるガウス過程回帰の汎化誤差解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 396 ~ 404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.62.10_396	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鈴木大慈	4. 巻 662
2. 論文標題 「機械学習と数理統計」 ~ 統計的学習理論を通じて ~	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 数理科学	6. 最初と最後の頁 20--25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計67件（うち招待講演 36件 / うち国際学会 23件）

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層学習の最適化と汎化誤差：非凸性の観点から
3. 学会等名 物性研究所短期研究会 「量子多体計算と第一原理計算の新展開」(FQCS2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層学習の数理：カーネル法，スパース推定との接点
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 機械学習における最適化理論と学習理論的側面
3. 学会等名 第17回組合せ最適化セミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 無限次元勾配ランジュバン力学による深層学習の最適化理論と汎化誤差解析
3. 学会等名 九州大学統計科学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 無限次元勾配ランジュバン動力学による深層学習の最適化と汎化誤差解析
3. 学会等名 第23回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Optimization and statistical efficiency of neural network in mean field regimes
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層学習の理論
3. 学会等名 言語処理学会第27回年次大会(NLP2021) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Recent theoretical developments about statistical and optimization efficiency of deep learning
3. 学会等名 First Australia-Japan Workshop on Machine Learning
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 大慈
2. 発表標題 無限次元勾配ランジュバン動力学によるニューラルネットワークの最適化理論と汎化誤差解析
3. 学会等名 2020年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野 健太, 鈴木 大慈
2. 発表標題 勾配ブースティング法を用いたマルチスケールグラフニューラルネットの学習とその最適化・汎化性能解析
3. 学会等名 2020年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二反田 篤史, 鈴木 大慈
2. 発表標題 確率的勾配降下法のNTK理論による最適収束率
3. 学会等名 2020年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊 千紘, 鈴木 大慈
2. 発表標題 Latent Block Modelのブロック構造に関する選択的推論
3. 学会等名 2020年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 寛司, 鈴木 大慈
2. 発表標題 再生核ヒルベルト空間上の非凸最適化問題に対する勾配ランジュバン力学の収束誤差解析
3. 学会等名 2020年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻 和真, 鈴木 大慈
2. 発表標題 変動指数Besov空間の回帰問題に対する深層学習の推定誤差解析
3. 学会等名 2020年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野 健太, 鈴木 大慈
2. 発表標題 マルチスケールグラフニューラルネットの勾配ブースティング法による解析
3. 学会等名 第23回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻 和真, 鈴木 大慈
2. 発表標題 変動指数Besov 空間の回帰問題に対する深層学習の推定誤差解析
3. 学会等名 第23回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二反田 篤史, Denny Wu, 鈴木 大慈
2. 発表標題 粒子双対平均化法：平均場ニューラルネットワークの大域的収束保証付最適化法
3. 学会等名 第23回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Statistical efficiency and optimization of deep learning from the view point of non-convexity
3. 学会等名 Applied Mathematics and Computation Seminar at UMass Amherst (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Statistical efficiency and optimization of deep learning from the view point of non-convexity
3. 学会等名 "AI + Math" Colloquia, Institute of Natural Sciences, Shanghai Jiao Tong University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Statistical efficiency and optimization of deep learning from the viewpoint of non-convexity
3. 学会等名 Math Machine Learning seminar MPI MIS + UCLA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Benefit of deep learning: Statistical efficiency and optimization guarantee with non-convex noisy gradient descent
3. 学会等名 Statistics Seminar at University of Bristol (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Generalization error bound of deep learning via spectral analysis and its application to model compression
3. 学会等名 3rd International Conference on Econometrics and Statistics (EcoSta2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Nitanda, Taiji Suzuki
2. 発表標題 Exponential Convergence of Stochastic Gradient Descent for Binary Classification Problems
3. 学会等名 Data Science, Statistics & Visualization (DSSV2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta Oono, Taiji Suzuki
2. 発表標題 Toward Understanding Expressive Power of Graph Convolutional Neural Networks
3. 学会等名 Data Science, Statistics & Visualization (DSSV2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早川知志, 鈴木大慈
2. 発表標題 スパースなパラメータ空間における深層ニューラルネットワークのミニマックス最適性および優位性について
3. 学会等名 2019年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋亜実, 鈴木大慈
2. 発表標題 Bayesian optimization for dose finding studies
3. 学会等名 2019年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層ニューラルネットワークの圧縮可能性を用いた非圧縮ネットワークの汎化誤差解析
3. 学会等名 2019年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二反田 篤史, 鈴木大慈
2. 発表標題 識別問題に対する高次元二層ニューラルネットの勾配法による汎化性能解析
3. 学会等名 2019年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野健太, 鈴木大慈
2. 発表標題 グラフスペクトルを介した深層グラフモデルの漸近挙動解析
3. 学会等名 2019年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八嶋晋吾, 二反田 篤史, 鈴木大慈
2. 発表標題 カーネル法における random featureを用いた確率的勾配法の期待識別誤差の線形収束性
3. 学会等名 2019年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八嶋晋吾, 二反田篤史, 鈴木大慈
2. 発表標題 Random Featureを用いた確率的勾配法の期待識別誤差の収束解析
3. 学会等名 IBIS2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊千紘, 鈴木大慈
2. 発表標題 Latent Block Modelのクラスタ数に関する適合度検定
3. 学会等名 IBIS2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二反田篤史, 鈴木大慈
2. 発表標題 高次元二層ニューラルネットに対する勾配降下法による識別誤差の大域収束性と汎化性能解析
3. 学会等名 IBIS2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Generalization error of deep learning and its learning dynamics from compression ability point of view
3. 学会等名 The 11th Innovation with Statistics and Data Science (ICSA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層ニューラルネットワークの適応能力：関数空間におけるスパース推定との接点
3. 学会等名 第9回 脳型人工知能とその応用ミニワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Adaptivity of deep learning in Besov space with its connection to sparse estimation
3. 学会等名 Third International Workshop on Symbolic-Neural Learning (SNL-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Compression Based Bound for Non-compressed Deep Neural Network Models and Their Data Adaptivity
3. 学会等名 Data Science, Statistics & Visualization (DSSV2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Introduction to machine learning and deep learning theories: statistics and optimization
3. 学会等名 4th International Symposium on Research and Education of Computational Science (RECS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層ニューラルネットワークの適応能力：関数空間におけるスパース推定との接点
3. 学会等名 武蔵野大学数理工学シンポジウム2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Generalization analysis and optimization of deep learning: adaptivity and kernel view
3. 学会等名 EPFL Machine Learning Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Estimation ability of deep learning with connection to sparse estimation in function space
3. 学会等名 4TU AMI annual event Mathematics of Deep Learning (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層学習における汎化誤差理論とその応用および非凸確率的最適化
3. 学会等名 第七回数理ファイナンス合宿型セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層学習における高次元性
3. 学会等名 金融工学・数理計量ファイナンスの諸問題 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 数学で解き明かす深層学習の原理
3. 学会等名 CREST・さきがけ・AIMaP合同シンポジウム『数学パワーが世界を変える』 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Fast learning rate of neural tangent kernel learning and nonconvex optimization by infinite dimensional Langevin dynamics in RKHS
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Generalization Error and Compressibility of Deep Learning via Kernel Analysis
3. 学会等名 Tokyo Deep Learning Workshop (Deep Learning: Theory, Algorithms, and Applications) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 統計・機械学習における確率的最適化
3. 学会等名 統計数理研究所公開講座 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層学習の統計的学習理論：カーネル法とウェーブレット解析による視点
3. 学会等名 第3回統計・機械学習若手シンポジウム「統計・機械学習の交わりと拡がり」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 機械学習における構造を利用した確率的最適化技法
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層学習の汎化誤差理論とそのモデル解析への応用
3. 学会等名 2018年日本数学会秋季総合分科会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 機械学習の現状と深層学習の数理
3. 学会等名 山形大学データサイエンス推進室キックオフミーティング（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Adaptivity of Deep ReLU Network for Learning in Besov Spaces
3. 学会等名 Forum "Math-for-Industry" 2018 - Big Data Analysis, AI, Fintech, Math in Finances and Economics - (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層学習のカーネル法による汎化誤差解析とその適応能力の評価
3. 学会等名 京都大学数学教室・数理解析研究所談話会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層ニューラルネットワークの汎化誤差とそのスパース推定との接点
3. 学会等名 応用統計ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Adaptivity of deep ReLU network and its generalization error analysis
3. 学会等名 The Second Korea-Japan Machine Learning Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Compressing deep neural network and its generalization error analysis via kernel theory
3. 学会等名 Reinforcement Learning & Biological Intelligence, learning from biology, learning for biology（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 Besov空間における深層学習の汎化誤差解析およびモデル解析への応用
3. 学会等名 愛媛大学理学部理学科数学・数理情報コース数学談話会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大慈
2. 発表標題 深層ニューラルネットワークの適応能力と汎化誤差解析
3. 学会等名 AIMaPワークショップ「非ノイマン型計算、理論と応用」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Generalization error of deep learning with connection to sparse estimation in function space
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二反田 篤史, 鈴木 大慈
2. 発表標題 強低ノイズ条件下識別問題に対する確率的勾配降下法の線形収束性
3. 学会等名 IBIS2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二反田 篤史, 鈴木 大慈
2. 発表標題 確率的勾配降下法による期待識別誤差の線形収束性
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Generalization error analysis of deep learning: avoiding curse of dimensionality and practical application
3. 学会等名 統計関連学会連合大会, 2018 CSA-KSS-JSS Joint International Sessions: Machine Learning (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 大慈
2. 発表標題 統計学と機械学習, そして人工知能
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Takada, Taiji Suzuki and Hironori Fujisawa
2. 発表標題 Sparse Modeling with Uncorrelated Variables
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Accelerated stochastic optimization for finite sum regularized empirical risk minimization
3. 学会等名 First Conference on Discrete Optimization and Machine Learning (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taiji Suzuki
2. 発表標題 Estimating nonlinear tensor product in infinite dimensional functional space by kernel and neural network models
3. 学会等名 IMS-APRM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 大慈
2. 発表標題 深層学習の汎化誤差理論とモデル圧縮への応用
3. 学会等名 「人工知能を用いた統合的ながん医療システムの開発」CRESTセミナー
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 気象予測システム、気象予測方法、および気象予測プログラム	発明者 米倉一男, 鈴木大慈	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-227904	出願年 2018年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Taiji Suzuki's home page  
<http://ibis.t.u-tokyo.ac.jp/suzuki/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
カナダ	University of Toronto	Vector Institute		
フランス	CREST	INRIA	Universite Paris-Saclay	