

令和 2 年 6 月 20 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14238

研究課題名(和文)高次元データのためのノンパラメトリックな仮説検定手法の提案と生命科学への応用

研究課題名(英文)Proposal of hypothesis test for high-dimensional data and Its application to life science

研究代表者

兵頭 昌 (Hyodo, Masashi)

大阪府立大学・理学系研究科・准教授

研究者番号：00711764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：多変量統計解析理論の分野である以下の(1)～(6)の問題に焦点を絞り、理論および実際問題への応用に関する研究成果をあげることを目的とした：(1)高次元非正規母集団におけるプロフィール分析における検定手法、(2)複数の高次元非正規母集団における平均ベクトルと分散共分散行列の同時検定法、(3)高次元正規母集団における共分散構造がブロック対角構造の検定法、(4)平均ベクトルの検定のための基本統計量の近似分布の開発、(5)高次元正規母集団における2元配置分散分析における検定手法、(6)多変量生物学的同等性試験に関する検定法。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な媒体、経路を通じて大規模データが、驚くほど低コストで入手できるようになった現在、多変量解析手法に対する学術界やビジネス界からのニーズは非常に高まっている。しかしながら、伝統的な多変量解析手法の多くは、直接には、大規模データへは応用できない困難な点が横たわっている。その典型的な問題点は、「高次元データ小標本問題」である。このような問題に対して、確固たる理論基盤の上で構成された実用的な方法論を与える本研究は、学術的十分な意義がある研究と考えられる。

研究成果の概要(英文)：We engaged in the following research tasks:(1)Proposal of multi-group profile analysis for high-dimensional data, (2)Proposal of simultaneous test of the mean vector and covariance matrix among  $k$  populations for high-dimensional data, (3)Proposal of test of block-diagonal covariance structure for high-dimensional data, (4)Derivation of high-dimensional asymptotic distribution of  $L_2$ -type test statistic for equality of means, (5)Proposal of two way MANOVA for high-dimensional data, (6)Derivation of new approximate multivariate test for population bioequivalence.

研究分野：統計科学

キーワード：高次元データ解析 検定論 多変量解析 非正規母集団 生物学的同等性 マルチンゲール中心極限定理 仮説検定

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

近年の情報化の進展により、様々なデータがインターネットなどを通じて簡単に手に入るようになった。特に最近では日々新しく生まれるデータがますます巨大化し、それらのデータが互いに融合し複雑化する「ビックデータ時代」となっている。このビックデータに関連して、最近では遺伝子データ、画像・音声データなどといった「高次元データ」の統計解析手法の研究が盛んに行われている。

このようなデータに対する平均ベクトルや共分散構造に関する検定は、自然科学や社会科学を問わず様々な分野で用いられる非常に重要な統計手法であるが、高次元データの構造を考慮した手法はいまだ提案されていないのが現状である。これらの手法は伝統的な多変量解析の分野において既に方法論が確立されている。しかしながら、それらの方法論は、標本サイズが次元よりも膨大であるという状況(大標本枠組み)の下で理論構築を行っているため、高次元データへ適用するには厳しいと言わざるを得ない。そこで、高次元データに対して使用可能な新たな理論と方法論の開発が望まれている。

## 2. 研究の目的

これまでの研究成果を勘案して、多変量統計解析理論の分野である以下の(1)~(6)の問題に焦点を絞り、理論および実際問題への応用に関する研究成果をあげることを目的とした。

- (1) 高次元非正規母集団におけるプロフィール分析における検定手法
- (2) 複数の高次元非正規母集団における平均ベクトルと分散共分散行列の同時検定法
- (3) 高次元正規母集団における共分散構造がブロック対角構造の検定法
- (4) 平均ベクトルの検定のための基本統計量の近似分布の開発
- (5) 高次元正規母集団における2元配置分散分析における検定手法
- (6) 多変量生物学的同等性試験に関する検定法

## 3. 研究の方法

研究の目的で述べたタスク(1)~(6)に対して、以下の方法で研究を遂行した。

- (1) L2 ノルムに基づく検定統計量を構成し、マルチンゲール中心極限定理を利用して、帰無仮説の下での漸近分布、対立仮説の下での漸近分布を導出する。漸近的な帰無分布を近似分布として用いた場合の精度評価をシミュレーションにより行う。さらに、実際のデータへ提案法を適用する。
- (2) 2標本問題における結果を多標本へ拡張し、近似検定を提案する。近似検定の精度をシミュレーションにより検証する。
- (3) 正規母集団の下で、共分散行列の構造の類似度を測る尺度であるRV係数を導入し、母集団におけるRV係数の値が0である事と共分散行列がブロック対角構造を持つことが同値であることを利用し、検定統計量を構築する。自然な検定統計量である標本RV係数に修正を施した高次元RV係数を提案し、その近似帰無を導出し、近似検定を与える。また、高次元データを想定したシミュレーション実施し、提案法の精度を確認する。
- (4) 均ベクトルの検定における基本的な統計量であるChen and Qin (2012)の検定統計量の帰無分布の(エッジワース展開とモーメントマッチングによる)近似分布を新たに提案し、それらが極限分布をオーダーの意味で改良していることを、誤差限界を導出することにより

証明する。

- (5) 2元配置多変量分散分析における各仮説を行列で表現し、それに関係する二次形式型の検定統計量を提案する。さらに、適当な高次元枠組みの下で、提案検定統計量の漸近正規性を証明する。
- (6) 生物学的同等性試験とは、2種の薬剤の治療学的な同等性を保証することを目的に行われる試験であり、主に先発医薬品と後発医薬品のバイオアベイラビリティを比較するために用いられる。近年では、Chervoneva et al. (2007) は、多変量生物学的同等性基準とその極限分布による検定を提案した。本研究では、彼女らが提案した多変量の生物学的同等性の基準の分布のエッジワース展開やマルチスケールブートストラップ法を応用し、近似検定の精度改良を目指す。シミュレーションを利用し、これらの提案検定と従来法を数値的に比較する。

#### 4. 研究成果

研究の目的(1)~(6)に対して、期間内に以下の研究成果を得ることができた。

- (1) 高次元経時測定データの解析で用いられるプロフィール分析のための新たな検定を開発した。次元が発散するという漸近枠組みの下で、提案検定のサイズは名目有意水準に収束することを示した。また、モンテカルロ・シミュレーションを実装し、提案検定は実用上十分な精度を有することを確認した。これらの成果は、学術誌 *Journal of Multivariate Analysis* に掲載された。
- (2) 複数の高次元非正規母集団における平均ベクトルと分散共分散行列の同時検定法を開発した。従来の尤度比検定は、高次元データへ適用することができない。そこで、高次元データへ適用可能であるような検定統計量を提案した。さらに、次元が十分大きいときに、検定統計量の帰無分布が標準正規分布へ収束することを示した。また、数値実験の結果から、提案検定は実用上十分な精度を有することを確認した。これらの成果は、学術誌 *Communications in Statistics - Theory and Methods* に掲載された。
- (3) 多変量正規母集団において、遺伝子群間の相関の有無を検証する方法を与えることを目的とした。各遺伝子群に含まれる遺伝子の数は数千のオーダーであり、従来検定(尤度比検定)を利用した検証は厳しい。そこで、RV係数の一致推定量を検定統計量として提案した。さらに、検定統計量の漸近正規性を示し、近似検定を提案した。また、モンテカルロ・シミュレーションを実装し、提案検定は実用上十分な精度を有することを確認した。これらの成果を纏め、学術誌 *Journal of Multivariate Analysis* に投稿した。
- (4) 高次元データにおける平均ベクトルの同等性検定には、平均ベクトルの差のL2ノルムに基づく統計量が利用される。この統計量の分布関数は、いくつかの適当な仮定の下で、 $p$ とすると正規分布へ収束することが知られている(Chen and Qin (2012))。本論文では、真の分布と正規分布のコルモゴロフ距離を解析的に評価し、その上界が共分散行列の最大固有値と固有値の2乗の総和の比に依存することを示した。さらに、モーメントマッチングやエッジワース展開を応用した新たな近似を提案し、それらと真の分布のコルモゴロフ距離を解析的に評価した。そして、これらの提案近似は、真の分布への収束レートの意味で従来の正規近似を改良していることを理論的に証明した。これらの成果は、学術誌 *Statistics and Probability Letters* に掲載された。

- (5) 正規性を仮定した下で、2元配置多変量分散分析における各仮説を行列で表現し、それに関係する二次形式型の検定統計量を提案した。さらに、適当な高次元枠組みの下で、提案検定統計量の漸近正規性を証明した。
- (6) 多次元生物学的同等性検定における新たな近似検定を提案した。具体的には、検定統計量の帰無分布の高次漸近展開および検定統計量の分位点のコーニシュ・フィッシャー展開を導出し、その結果を利用した近似検定を与えた。モンテカルロ・シミュレーションの結果から、小標本において、提案検定は先行研究の検定より精度が良いということを確認した。これらの成果は、学術誌 *Journal of Statistical Planning and Inference* に掲載された。

#### 参考文献

- Chen S. X., Qin Y. L., A two-sample test for high-dimensional data with applications to gene-set testing, *The Annals of Statistics* 38 (2010), 808-835.
- Chervoneva I., Hyslop T., Hauck W. W., A multivariate test for population bioequivalence, *Statistics in Medicine*, 26 (2007), 1208-1223.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Takatoshi Sugiyama, Masashi Hyodo, Hiroki Watanabe, Shin-ichi Tsukada, Takashi Seo   | 4. 巻<br>55                    |
| 2. 論文標題<br>Test for equality of generalized variance in high-dimensional and large sample settings   | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>SUT Journal of Mathematics   | 6. 最初と最後の頁<br>133 - 148       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Hyodo Masashi, Nishiyama Takahiro, Pavlenko Tatjana  | 4. 巻<br>157                   |
| 2. 論文標題<br>On error bounds for high-dimensional asymptotic distribution of L2-type test statistic for equality of means                    | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Statistics & Probability Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>108637 - 108637 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.spl.2019.108637">https://doi.org/10.1016/j.spl.2019.108637</a>              | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Hyodo Masashi, Shutoh Nobumichi  | 4. 巻<br>-                     |
| 2. 論文標題<br>Asymptotic power comparison of T2-type test and likelihood ratio test for a mean vector based on two-step monotone missing data | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Communications in Statistics - Theory and Methods  | 6. 最初と最後の頁<br>1 - 18          |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1080/03610926.2019.1597122">https://doi.org/10.1080/03610926.2019.1597122</a>      | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Hyodo Masashi, Nishiyama Takahiro  | 4. 巻<br>-                     |
| 2. 論文標題<br>Simultaneous testing of the mean vector and covariance matrix among k populations for high-dimensional data                     | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Communications in Statistics - Theory and Methods  | 6. 最初と最後の頁<br>1 - 22          |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1080/03610926.2019.1639751">https://doi.org/10.1080/03610926.2019.1639751</a>      | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Watanabe Hiroki, Hyodo Masashi, Yamada Yuki, Seo Takashi  | 4. 巻<br>49              |
| 2. 論文標題<br>Estimation of misclassification probability for a distance-based classifier in high-dimensional data | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Hiroshima Mathematical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>175 ~ 193 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.32917/hmj/1564106544   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Hyodo Masashi, Onobuchi Akihiro, Kurakami Hiroyuki  | 4. 巻<br>200           |
| 2. 論文標題<br>An approximate multivariate asymptotic expansion-based test for population bioequivalence                            | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Statistical Planning and Inference   | 6. 最初と最後の頁<br>74 ~ 86 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.jspi.2018.09.006">https://doi.org/10.1016/j.jspi.2018.09.006</a> | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Masashi Hyodo, Hiroki Watanabe, Takashi Seo  | 4. 巻<br>168           |
| 2. 論文標題<br>On simultaneous confidence interval estimation for the difference of paired mean vectors in high-dimensional settings | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Multivariate Analysis   | 6. 最初と最後の頁<br>160-173 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.jmva.2018.07.008">https://doi.org/10.1016/j.jmva.2018.07.008</a>  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Masashi Hyodo, Takahiro Nishiyama  | 4. 巻<br>27            |
| 2. 論文標題<br>A simultaneous testing of the mean vector and the covariance matrix among two populations for high-dimensional data | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>TEST   | 6. 最初と最後の頁<br>680-699 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s11749-017-0567-x  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Hiroki Watanabe, Masashi Hyodo, Yuki Yamada and Takashi Seo   | 4. 巻<br>49 (2)        |
| 2. 論文標題<br>Estimation of misclassification probability for a distance-based classifier in high-dimensional data | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>Hiroshima Mathematical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>175-193 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>Hyodo Masashi, Shutoh Nobumichi  | 4. 巻<br>-          |
| 2. 論文標題<br>Asymptotic power comparison of T2-type test and likelihood ratio test for a mean vector based on two-step monotone missing data | 5. 発行年<br>2019年    |
| 3. 雑誌名<br>Communications in Statistics - Theory and Methods  | 6. 最初と最後の頁<br>1~18 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1080/03610926.2019.1597122">https://doi.org/10.1080/03610926.2019.1597122</a>      | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Hiroki Watanabe, Takashi Seo, Masashi Hyodo   | 4. 巻<br>55          |
| 2. 論文標題<br>An estimator of misclassification probability for multi-class Euclidean distance classifier in high-dimensional data | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>SUT Journal of Mathematics  | 6. 最初と最後の頁<br>11-23 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Hyodo Masashi, Nishiyama Takahiro  | 4. 巻<br>27            |
| 2. 論文標題<br>A simultaneous testing of the mean vector and the covariance matrix among two populations for high-dimensional data | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>TEST   | 6. 最初と最後の頁<br>680-699 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Masashi Hyodo  | 4. 巻<br>162         |
| 2. 論文標題<br>Tests for the parallelism and flatness hypotheses of multi-group profile analysis for high-dimensional elliptical populations | 5. 発行年<br>2017年     |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Multivariate Analysis   | 6. 最初と最後の頁<br>82-92 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>林大将, 兵頭 昌              |
| 2. 発表標題<br>不均一分散をもつ場合における高次元多重比較法 |
| 3. 学会等名<br>日本計算機統計学会第33回シンポジウム    |
| 4. 発表年<br>2019年                   |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>古賀直大, 兵頭昌, 渡邊弘己, 杉山高聖   |
| 2. 発表標題<br>高次元における共分散行列のトレースの同等性検定 |
| 3. 学会等名<br>日本計算機統計学会第33回シンポジウム     |
| 4. 発表年<br>2019年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>杉山 高聖, 兵頭 昌, 渡邊 弘己, 塚田 真一, 瀬尾 隆 |
| 2. 発表標題<br>高次元大標本枠組みにおける一般化分散の同等性検定        |
| 3. 学会等名<br>統計関連学会連合大会                      |
| 4. 発表年<br>2019年                            |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Watanabe, Masashi Hyodo, Takashi Seo                             |
| 2. 発表標題<br>Inference on High-dimensional Mean Vectors Under Alternative Hypothesis |
| 3. 学会等名<br>DSSV (Data Science, Statistics & Visualization) (国際学会)                  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takahiro Nishiyama, Masashi Hyodo and Tatjana Pavlenko                                 |
| 2. 発表標題<br>On error bounds for high-dimensional asymptotic distribution of L2-type test statistic |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Theories and Methodologies for Large Complex Data (国際学会)    |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takahiro Nishiyama, Masashi Hyodo and Tatjana Pavlenko                                       |
| 2. 発表標題<br>Asymptotic distribution of test statistic for two sample test under high-dimensional setting |
| 3. 学会等名<br>10th International Workshop on Simulation and Statistics (国際学会)                              |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>小川楓, 兵頭 昌, 西山 貴弘      |
| 2. 発表標題<br>複数の高次元確率ベクトル間の無相関性の検定 |
| 3. 学会等名<br>2018年度統計関連学会連合大会      |
| 4. 発表年<br>2018年                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>林大将, 兵頭昌, 瀬尾隆               |
| 2. 発表標題<br>高次元データのための平均ベクトルの差の信頼区間について |
| 3. 学会等名<br>日本計算機統計学会大会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>西山貴弘, 兵頭昌, PAVLENKO Tatjana |
| 2. 発表標題<br>高次元データに対するRV係数に基づく独立性検定     |
| 3. 学会等名<br>日本計算機統計学会大会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>M. Hyodo, H. Watanabe   |
| 2. 発表標題<br>On simultaneous confidence interval estimation for the difference of paired mean vectors in high-dimensional settings |
| 3. 学会等名<br>CFE-CMStatistics 2018 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Nishiyama, M. Hyodo, T. Pavlenko   |
| 2. 発表標題<br>Testing independence in high-dimensional data: $\rho$ -coefficient based approach |
| 3. 学会等名<br>CFE-CMStatistics 2018 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Nishiyama, M. Hyodo   |
| 2. 発表標題<br>Simultaneous test for mean vectors and covariance matrices among k populations for high-dimensional data |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Computational Statistics (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>斧淵晃宏, 兵頭昌, 倉上弘幸     |
| 2. 発表標題<br>多次元データのための生物学的同等性試験 |
| 3. 学会等名<br>日本計算機統計学会第31回シンポジウム |
| 4. 発表年<br>2017年                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takahiro Nishiyama, Masashi Hyodo  |
| 2. 発表標題<br>Simultaneous test for mean vectors and covariance matrices in high-dimensional settings  |
| 3. 学会等名<br>New Zealand Statistical Association and the International Association of Statistical Computing (Asian Regional Section) Joint Conference(University of Auckland, Auckland, New Zealand) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>兵頭昌, 西山貴弘                                 |
| 2. 発表標題<br>多標本問題に対するユークリッド距離を利用した平均ベクトルと分散共分散行列の同時検定 |
| 3. 学会等名<br>日本数学会秋季総合分科会(山形大学)                        |
| 4. 発表年<br>2017年                                      |

## 〔図書〕 計2件

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>杉山 高一, 藤越 康祝, 塚田 真一, 西山 貴弘, 首藤 信通, 村上 秀俊, 小椋 透, 竹田 裕一, 榎本 理恵, 櫻井 哲朗, 土屋 高宏, 兵頭 昌, 中村 好宏, 川崎 玉恵, 伊谷 陽祐, 杉山 高聖 | 4. 発行年<br>2020年 |
| 2. 出版社<br>勉誠出版   | 5. 総ページ数<br>272 |
| 3. 書名<br>R・Pythonによる 統計データ科学   |                 |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>ピーター フラッハ (著), 竹村 彰通 (監修, 翻訳), 田中 研太郎 (翻訳), 小林 景 (翻訳), 兵頭 昌 (翻訳), 片山 翔太 (翻訳), 山本 倫生 (翻訳), 吉田 拓真 (翻訳), 林 賢一 (翻訳), 松井 秀俊 (翻訳), 小泉 和之 (翻訳), 永井 勇 (翻訳) | 4. 発行年<br>2017年 |
| 2. 出版社<br>朝倉書店   | 5. 総ページ数<br>392 |
| 3. 書名<br>機械学習 データを読み解くアルゴリズムの技法  |                 |

## 〔産業財産権〕

## 〔その他〕

|  |
|--|
| Testing independence in high-dimensional data<br><a href="https://people.kth.se/~pavlenko/publ.html">https://people.kth.se/~pavlenko/publ.html</a> |
|--|

## 6. 研究組織

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