

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19700262

研究課題名（和文）反事実モデルに基づく因果的効果推測法の統計数理基盤の強化とその応用

研究課題名（英文）Reinforcement of Statistical Aspect of Causal Inference based on Counterfactuals and its Application.

研究代表者

黒木 学 (KUROKI MANABU)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：60334512

研究成果の概要（和文）：

本研究では、因果的効果の識別不能問題として、intermediate confounding, ケースコントロール研究, 原因の確率の評価問題, 測定誤差問題を取り上げ, 反事実モデルを利用して「最も狭い因果的効果の存在範囲」を定式化した. また, 線形構造方程式モデルに基づいて, ある処理変量に対する外的操作が誤差を伴って行われる場合において, その外的操作による反応変数のばらつきの変化を定式化した.

研究成果の概要（英文）：

In this research, I considered evaluating causal effects in the non-identification problems of causal effects: the probabilities of causation, case-control studies, measurement error problems. To solve the problems, I formulated the sharp bounds on the causal effects using the potential outcome approach and linear programming methods. In addition, in the framework of linear structural equation models, I formulated the change of the variance of the response when conducting an imperfect control plan.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	0	1,000,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	690,000	3,990,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・統計科学

キーワード：構造モデル, 因果的効果, 反事実モデル

## 1. 研究開始当初の背景

実質科学の諸分野では、(1)観察された結果に対する原因の究明、(2)観察された因果関係における因果的効果の定量的評価、(3)観察された因果関係に対する因果メカニズムの解明を解決するために、グラフィカルモデルを基調とする統計的因果分析法が用いられてきた。その一方で、実質科学の諸現象を引き起こす因果メカニズムは複雑であるため、グラフィカルモデルを基調とする統計的因果モデルに対するいくつかの問題点が指摘されている。本研究は、このような問題を解決することを目的として実施された。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下のことを中心に研究を行った。

(1) 未観測交絡因子問題に代表される因果的効果の識別不能問題に対して、「最も狭い因果的効果の存在範囲」を定量的評価する方法論を開発すること。

(2) 構造方程式モデルに基づいて、ある処理変量に対する外的操作が誤差を伴って行われる場合において、その外的操作による因果メカニズムの変化を明らかにすること。

## 3. 研究の方法

国内では、統計的品質情報解析研究会を立ち上げ統計的因果推論の工学的応用を視野に入れた研究を推し進めた。また、10年近く参加しているテクノメトリクス研究会に引き続き参加・議論することで、幅広い学術的視野を取り入れるよう心がけてきた。さらに、京都大学の佐藤俊哉教授が主催する京都生物統計学セミナーに参加し、発表することで統計的因果推論の医学的応用を模索してきた。海外では、北京大学のGeng教授、UCLAのPearl教授との共同研究を積極的に推し進めた。

## 4. 研究成果

2007年度には、測定誤差問題に統計的因果推論の視点を導入することに成功しただけでなく、ランダム化臨床試験における共変量情報と有効利用法について明らかにした。2008年度には、未観測交絡因子問題と因子モデルとの関連性を明らかにすることにより、潜在変数モデルの新たな見方を与えた。また、分散に対する因果効果の枠組みを体系化することに成功し、線形構造方程式モデルの枠組みにおいて、ある処理変量に対する外的操作が誤差を伴って行われる場合において、その外的操作による因果メカニズムの変化を明らかにすることが可能となった。さらには、新たな交絡概念としてintermediate confounderの存在を明らかにしている。2009年度には、ケースコントロール研究における因果効果の存在範囲を分数計画法を用いることで定式できることを示すとともに、ケースコントロール研究における因果効果の推測法の理論的限界を明らかにした。2010年度には、原因の確率の統計的推測問題における共変量情報の役割について議論し、その存在範囲の定式化と推定精度の検討を行った。

## 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 16 件)

- ① 黒木学・水関裕人：無向独立グラフに基づく線形回帰モデルにおける弱併合可能条件、品質、2011、査読有、印刷中
- ② M. Kuroki and Z. Cai, Statistical analysis of “probabilities of causation” using covariate information, Scandinavian Journal of Statistics, 2011, 査読有、掲載決定
- ③ H. Chan and M. Kuroki: An extended set of graphical criteria for the identification of direct causal effects in linear SEMs, Artificial Intelligence and Statistics, 13, 73-80, 2010, 査読有

- ④ 黒木学・陳希:線形構造方程式モデルに基づく因果効果のグラフィカル識別可能条件, 人工知能学会誌, 25, 819-825, 2010, 査読有
- ⑤ M. Kuroki, Z. Cai and Z. Geng: Sharp bounds on causal effects in case-control/cohort studies, *Biometrika*, 97, 123-132, 2010, 査読有
- ⑥ 黒木学・渡邊創人: 無向独立グラフによる I 因子モデルの特徴づけとその応用, 品質, 40, 55-63, 2010, 査読有
- ⑦ M. Kuroki and Z. Cai: Formulating tightest bounds on causal effects in studies with unmeasured confounders, *Statistics in Medicine*, 27, 6597-6611, 2008, 査読有
- ⑧ 黒木学: 分散に対する因果効果の定量的評価と工程解析への応用, 品質, 38, 87-98, 2008, 査読有
- ⑨ Z. Cai, M. Kuroki, J. Pearl and J. Tian: Bounds on direct effects in the presence of confounded intermediate variables. *Biometrics*, 64, 695-701, 2008. 査読有
- ⑩ Z. Cai and M. Kuroki: On identifying total effects in the presence of latent variables and selection bias, *Uncertainty in Artificial Intelligence*, 24, 62-69, 2008, 査読有
- ⑪ M. Kuroki and Z. Cai: The evaluation of causal effects in studies with an unobserved exposure/outcome Variable: Bounds and Identification, *Uncertainty in Artificial Intelligence*, 24, 333-340, 2008, 査読有
- ⑫ M. Kuroki and Z. Cai: Evaluation of the causal effect of control plans in non-recursive structural equation models, *Uncertainty in Artificial Intelligence*, 23, 227-234, 2007, 査読有
- ⑬ 黒木学: 未観測交絡因子が存在する場合の総合効果の識別可能条件, 応用統計学, 36, 71-85, 2007, 査読有
- ⑭ Z. Cai, M. Kuroki and T. Sato: Nonparametric bounds of treatment effects with noncompliance by covariate adjustment, *Statistics in Medicine*, 26, 3188-3204, 2007, 査読有
- ⑮ 黒木学: 統計的因果推論---因果的効果の識別可能問題におけるベイジアンネットワークの役割---, 人工知能学会誌, 22, 328-335, 2007, 査読有
- ⑯ M. Kuroki: Graphical identifiability criteria for average causal effects in studies with an unobserved treatment/response variable, *Biometrika*, 94,

37-47, 2007. 査読有

[学会発表](計 33 件)

- ① 黒木学, 統計的因果推論, 第 8 回知識創造支援システム・シンポジウム「知の創造への数理科学的接近」, 2011.2.26, 北陸先端科学技術大学
- ② F. Kobayashi and M. Kuroki, Statistical inference of natural direct and indirect effects and its application, The 1<sup>st</sup> International Workshop on Advanced Methodologies for Bayesian Networks, 2010.11.19, 東京工業大学
- ③ 渡邊創人・黒木学, 1 因子モデルの無向独立グラフによる特徴づけとその応用---その 2---, 日本品質管理学会第 40 回研究発表会, 2010.10.30, 成城大学
- ④ 水関裕人・黒木学, 線形回帰モデルにおける弱併合可能条件について, 日本品質管理学会第 40 回研究発表会, 2010.10.30, 成城大学
- ⑤ 佐野夏樹・小林悠太・黒木学, MT システムのカーネル化とその応用, 日本品質管理学会第 40 回研究発表会, 2010.10.30, 成城大学
- ⑥ N. Sano, Y. Kobayashi and M. Kuroki, Kernel MT System and its application, The 8<sup>th</sup> ANQ Quality Congress, 2010.10.21, JIIT, New Delhi, India
- ⑦ 黒木学, 測定誤差データを利用した自然な因果効果に基づく代替エンドポイントの評価, 2010 年度統計関連学会連合大会, 2010.9.8, 早稲田大学
- ⑧ H. Chan and M. Kuroki, Generalization of identifiability criteria for causal effects in linear structural equation models, 2010 年度統計関連学会連合大会, 2010.9.7, 早稲田大学
- ⑨ 小林史明・黒木学, Natural Causal Effect を用いた複数の代替エンドポイントの評価, 2010 年度統計関連学会連合大会, 2010.9.6, 早稲田大学
- ⑩ M. Kuroki, Selection of graphical identifiability criteria for causal effects, The 30<sup>th</sup> Annual Conference of the International Society for Clinical Biostatistics, 2010.8.30, Montpellier Sup Agro, Montpellier, France
- ⑪ 黒木学, Graphical identification of linear causal effects, 人工知能学会第 75 回人工知能基本問題研究会「ベイジアン・ネットワークと応用および一般」, 2009.11.13, 電気通信大学
- ⑫ 陳希・黒木学, An extended set of graphical criteria for the identification of direct causal

- effects in linear SEMs, 日本品質管理学会第 39 回年次大会研究発表会, 2009. 10. 31, 大阪大学
- ⑬ H. Chan and M. Kuroki, Extending the use of instrumental variables for the identification of direct causal effects in SEMs, 第 12 回情報論的学習理論ワークショップ, 2009. 10. 20, 九州大学
- ⑭ 黒木学, 未観測交絡因子が存在する場合の総合効果の識別可能条件, 2009 年度統計関連学会連合大会, 2009. 9. 8, 同志社大学
- ⑮ 黒木学, 因果効果の評価, 2009 年統計数理研究所夏期大学院「実験研究および観察研究における因果推論」, 2009. 8. 27, 統計数理研究所, 東京都
- ⑯ Z. Cai, Covariate selection for estimating the standardized risk ratio/risk difference using causal diagrams, The 30<sup>th</sup> Annual Conference of the International Society for Clinical Biostatistics, 2009. 8. 25, University of Econometrics, Prague, Czech Republic
- ⑰ 渡邊創人・黒木学, 1 因子モデルの無向独立グラフによる特徴づけとその応用, 日本品質管理学会第 89 回研究発表会, 2009. 5. 30, 日本科学技術連盟, 東京都
- ⑱ 野見山修二・黒木学, 因果リスク比推定のための共変量選択基準について, 日本品質管理学会第 89 回研究発表会, 2009. 5. 30, 日本科学技術連盟, 東京都
- ⑲ 黒木学, 因果モデリング研究の最前線. 人工知能学会第 72 回人工知能基本問題研究会「ベイジアンネット, ヒューマンモデリング」(SIG-FPAI), 2008. 11. 7, 電気通信大学, 大阪
- ⑳ 黒木学, 交絡・選択バイアスデータに基づく因果効果の推定について, 日本品質管理学会第 88 回研究発表会, 2008. 9. 19, 中央電気倶楽部, 大阪
- ㉑ M. Kuroki and Z. Cai, On identifying total effects in the presence of latent variables and selection bias, The 29<sup>th</sup> Annual Conference of the International Society for Clinical Biostatistics, 2008. 8. 18, The School of Architecture, Copenhagen, Denmark
- ㉒ Z. Cai, A. Kada and M. Kuroki, Bounding methods for evaluating the performance of a medical diagnostic test, The 29<sup>th</sup> Annual Conference of the International Society for Clinical Biostatistics, 2008. 8. 18, The School of Architecture, Copenhagen, Denmark
- ㉓ M. Kuroki, Identification of causal effects in the presence of unmeasured confounders between an exposure and an outcome. The 1<sup>st</sup> International conference on statistics in biopharmaceutics, 2008. 7. 1, Jian Guo Hotel, Shanghai, China
- ㉔ J. Yin, Z. Geng, M. Kuroki and Z. Cai, Local learning of causal structures based on kernel association measures, The 2008 IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2008. 6. 3, Hong Kong Convention and Exhibition Centre, Hong Kong, China
- ㉕ J. Yin, Z. Geng, M. Kuroki and Z. Cai, Partial orientation and local structural learning of dags for prediction, The 2008 IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2008. 6. 3, Hong Kong Convention and Exhibition Centre, Hong Kong, China
- ㉖ 黒木学, Introduction to statistical causal inference, International workshop on the interface between statistical causal inference and Bayesian networks, 2007. 11. 3, 東京工業大学
- ㉗ R. Shingaki and M. Kuroki, Causal inference in dynamic systems, The 5<sup>th</sup> ANQ Quality Congress, 2007. 10. 27, ハイアットリージェンシー仁川, 仁川, 韓国
- ㉘ Z. Cai and M. Kuroki, Evaluating treatment effects with instrumental variables, The 9<sup>th</sup> Japan-China Joint Symposium on Statistics, 2007. 9. 26, 北海道大学
- ㉙ M. Kuroki and Z. Cai, Nonparametric bounds for causal effects with a latent response, The 9<sup>th</sup> Japan-China Joint Symposium on Statistics, 2007. 9. 26, 北海道大学
- ㉚ 黒木学, 非逐次的線形構造方程式に基づく条件付き介入効果の定式化と工程解析への応用, 日本品質管理学会第 85 回研究発表会, 2007. 9. 21, 中央電気倶楽部, 大阪府
- ㉛ Z. Cai and M. Kuroki, New estimators for treatment effects in the presence of noncompliance, The 28<sup>th</sup> Annual Conference of the International Society for Clinical Biostatistics, 2007. 8. 1, Tharaki Palace Hotel, Alexandroupolis, Greece
- ㉜ M. Kuroki and Z. Cai, Bounds of average causal effects in studies with unmeasured confounders, The 28<sup>th</sup> Annual Conference of the International Society for Clinical Biostatistics, 2007. 7. 30, Tharaki Palace Hotel, Alexandroupolis, Greece
- ㉝ 黒木学・蔡志紅, Bounds on the causal effects in studies with a latent response

variable, 日本人工知能学会第21回全国大会, 2007.6.22, ワールドコンベンションセンターサミット宮崎

2010年

〔図書〕(計1件)

- ① 黒木 学: 共立出版, 統計的因果推論-モデル・推論・推測-, (2009), 424 ページ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黒木 学 (KUROKI MANABU)  
大阪大学・基礎工学研究科・准教授  
研究者番号: 60334512

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

研究協力者

Judea Pearl  
UCLA・Cognitive System Lab・Professor  
2007年・2010年

Jin Tian  
Iowa State University・Computer Science  
Dep.・Assistant Prof.  
2007年

Zhihong Cai (蔡 志紅)  
日本イーライリリー株式会社・臨床開発部・  
アソシエイト  
2007年～2010年

Zhi Geng  
北京大学・数学科学研究院・教授  
2008年～2009年

Hei Chan (陳 希)  
統計数理研究所・データ科学研究系・特任研究員  
研究者番号: 10601213  
2009年～2010年

佐野 夏樹 (SANO NATSUKI)  
大阪大学・サイバーメディアセンター・  
特任助教  
研究者番号: 60568971