

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K03567

研究課題名（和文）共謀行為を防止する腎臓交換メカニズムの設計

研究課題名（英文）Designing collusion-proof kidney exchange mechanisms

研究代表者

若山 琢磨（Takuma, Wakayama）

龍谷大学・経済学部・准教授

研究者番号：80448654

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本プロジェクトでは、「耐保有交換的」な腎臓交換メカニズムの構築を試みた。耐保有交換性とは、2組の患者が事前に（偽装結婚・養子縁組などを通じて）ドナーを交換することで、自分たちが有利になるようにメカニズムの結果を歪めることを防ぐ性質である。患者とドナーからなるペアの間の直接交換だけを考えると、トップ・トレーディング・サイクル・メカニズムだけが望ましい性質を満たす唯一の耐保有交換的メカニズムであることを示した。しかし、交換数に制限があると、望ましい性質を満たす耐保有交換的メカニズムは構築できないことがわかった。また、これまでに提案されてきた腎臓交換メカニズムの性能を比較する経済実験も実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

腎臓交換メカニズムを安定的に運用していくためには、偽装結婚・養子縁組などの共謀行為によるドナーの融通を未然に防止しておくという観点が重要である。これは、移植を切望する患者に、偽装結婚・養子縁組などの手段をあえて選択させる必要がなくなることから考えても重要である。そのため、本研究の成果により腎臓交換メカニズムの改善が示唆されれば、社会への大きな貢献となる。また、腎臓交換メカニズムそのものに関する実験研究がない現状を考えると、本研究を通じて、さまざまな腎臓交換メカニズムの働きが新たに解明され、貴重な基礎データの蓄積が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This project attempts to construct an “endowments-swapping-proof” kidney exchange mechanism. Endowments-swapping-proofness here states that no pair of patients manipulate the final outcome in their favor by swapping their donors (through false marriage, false adoption, and so on) prior to the operation of the chosen mechanism. We prove that when only direct exchanges among patient-donor pairs are considered, the top trading cycles mechanism is the only endowments-swapping-proof mechanism satisfying certain desirable properties. It turns out, however, that if constraints on the size of exchanges are imposed, then it is impossible to construct endowments-swapping-proof mechanisms with desirable properties. Furthermore, we conducted economic experiments to compare the performance of kidney exchange mechanisms proposed in the literature.

研究分野：メカニズム・デザイン

キーワード：経済理論 ゲーム理論 メカニズム・デザイン マーケット・デザイン マッチング 社会的選択理論

1. 研究開始当初の背景

重度の腎不全患者に対する有効な治療法は、今のところ腎移植であると考えられている。腎移植には、生きている人から臓器提供を受ける方法(生体腎移植)と、脳死者などから臓器提供を受ける方法(献腎移植)の2つがある。しかし、生体腎移植の臓器提供者(ドナー)になりえる人は限られており、患者とドナーとの間で血液型や抗体が適合していなければ移植はできない。生体腎移植ができない患者は、献腎移植の待機者リストに登録し移植を待たなければならないが、待機者の中で移植を受けることができるのは少数である。また、多くの国で臓器売買は禁じられているため、臓器売買市場によって腎臓の需給ギャップを解消できない。

そこで Roth, Sönmez, and Ünver (2004、以下では「RSU2004」と略記する)は、臓器売買に頼ることなく移植数を増やす仕組みとして「腎臓交換メカニズム」を考案した。これは、適合条件を満たさない患者とドナーのペアを集め、条件が適合するように患者間でドナーを交換することで移植数を増やそうとするものである。この仕組みは、近年世界の様々な地域で実施され、多くの人命を救っている。

腎臓交換メカニズムを利用する上で、偽装結婚・養子縁組などの共謀行為によってドナーを融通し合う問題は看過できない。腎移植の背後で金銭授受があると、それは違法であるために摘発を受ける可能性が高い。そこで、移植希望の患者と不適合ゆえに直接提供できないドナーのペアは、同じ境遇にある他のペアと共謀し、偽装結婚・養子縁組などを通じて、違法な金銭授受を介さずにドナーを融通し合う誘因が出てくる。したがって、適切にメカニズムを設計しておかなければ、このような共謀行為に翻弄されてしまう恐れがある。しかし、RSU2004以降、偽装結婚・養子縁組の問題を考慮に入れた腎臓交換メカニズムの研究はなされていなかった。そこで研究代表者の若山と研究分担者の藤中は、2013年～2016年度の科学研究費により、偽装結婚・養子縁組によるドナーの融通を抑止しうる腎臓交換メカニズムの研究を開始した。本プロジェクトは、この研究をさらに推進するものである。

また近年、新たな仕組みを考案・実装する際、理論分析だけでなく、経済実験による検証がますます重要性を帯びてきている。実際、そうした実験研究の成果がオークションや学校選択制などの改善に役立てられている。しかし、腎臓交換メカニズムについての実験研究はほぼ皆無といってよく、研究蓄積が乏しい現状にある。人命に関わる問題であるため、経済実験の実施によってデータを蓄積し、制度導入・改善に役立てることが急務である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、理論分析および経済実験により、望ましい腎臓交換メカニズムを明らかにし、得られた知見を既存制度の改善に役立てることである。具体的には、理論分析により、偽装結婚・養子縁組によるドナーの融通を抑止する望ましい腎臓交換メカニズムを明らかにする。また、理論分析を土台として、これまで提案されてきた腎臓交換メカニズムの性能を経済実験によって検証する。この実験を通じて、望ましいと思われた腎臓交換メカニズムが理論通りに機能するかどうか、またどの腎臓交換メカニズムが最も有効に機能するのかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 理論分析

① 腎臓交換メカニズムを提唱した RSU2004 のモデルは、Shapley and Scarf (1974) が定式化した「非分割財交換モデル」を拡張したものである。非分割財交換モデルをそのまま腎移植問題に適用すると、それは患者間のドナー交換(直接交換)のみを対象としたモデルとなる。研究代表者の若山と研究分担者の藤中は、このモデルにおいて偽装結婚・養子縁組によるドナーの融通を防ぐ望ましい腎臓交換メカニズムを特定する研究を、2013年～2016年度の科学研究費により開始していた。本プロジェクトでは、この研究を継続して行う。

② RSU2004 は、より多くの腎移植を実現するため、直接交換だけでなく、間接交換(自分のドナーの提供と引き換えに、献腎移植の優先順位を上げてもらうオプション)も考慮した。そこで本プロジェクトでは、直接交換モデルで得た理論成果を活用して、直接交換と間接交換を考慮し

たモデルにおいて、偽装結婚・養子縁組によるドナーの融通を抑制する望ましい腎臓交換メカニズムを明らかにする。

③ 腎臓交換メカニズムでは、患者とドナーの手術がすべて同時に行われることを想定している。実際は、3組以上を同時に手術するための設備・スタッフを揃えておくことは物理的に困難である。そのため、このような現実的な制約を無視して望ましい仕組みを考案したところで、それは画餅に終わる可能性が高い。そこで本プロジェクトでは、ドナーの交換数を制限したモデルにおいて、偽装結婚・養子縁組によるドナーの融通を抑制する望ましい腎臓交換メカニズムを明らかにする。

(2) 経済実験

これまで提案されてきた腎臓交換メカニズムを経済実験で比較検討し、その中で性能の良いものを明らかにする。その最初のステップとして、RSU2004 が提案した5つの腎臓交換メカニズムに焦点を当てる。そして、移植数、効率性、ドナーに対する希望順位について虚偽申告の程度、虚偽申告した人数などの指標に基づき、それらの中で最も性能の良いメカニズムを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 理論分析

偽装結婚・養子縁組などの共謀行為によるドナーの融通を防止する性質を、「耐保有交換性 (endowments-swapping-proofness)」として定式化した。これは「2人の患者間で予め自身のドナーを交換してメカニズムに参加した方が、そうしなかった場合よりも、その2人の患者はより良質な臓器移植を受けることができる」ことを防止する性質である。この性質を満たす腎臓交換メカニズムを構築できるかどうかを以下の3つのモデルで考察した。

① 直接交換モデル：このモデルでは、トップ・トレーディング・サイクル・メカニズム（以下では「TTC」と呼称する）が中心的なメカニズムとして知られている。TTCは耐保有交換性を満たすだけでなく、個人合理性（メカニズムへの自発的参加）・耐戦略性（虚偽情報申告の防止）・耐保有交換性の3つの性質を同時に満たす唯一のメカニズムであることがわかった。しかし、効率性・個人合理性・耐保有交換性を満たすメカニズムはTTC以外にもある。さらに、耐保有交換性は事前のドナー交換を通じた共謀行為の防止を意味するものであるが、事後のドナー交換を通じた共謀行為の防止を意味する「耐再配分性」（とその変種）との論理関係も明らかにした。これらの研究成果を含めた論文は、ゲーム理論分野のトップジャーナルである *Games and Economic Behavior* に受理・公刊された。

② 直接・間接交換モデル：このモデルにおいて、RSU2004はTTCに基づく腎臓交換メカニズム（以下では「拡張TTC」と呼称する）が複数構築でき、そのそれぞれで異なる性質を持つことを示した。そして、RSU2004はその中で耐戦略性と効率性を満たす拡張TTCがただ一つ存在することを明らかにしている。本研究では、耐戦略性と効率性を満たす拡張TTCが耐保有交換性も満たすことを示した。しかし、その証明が長大・複雑なため、より簡明な形でまとめることを試みている。

③ 同時移植数に制限があるモデル：同時移植数に少しでも制限があると、個人合理性と耐保有交換性を満たす腎臓交換メカニズムの構築は断念せざるを得ないことがわかった。そのため、この不可能性を克服するために、患者が移植可能な臓器に対して持ち得る選好について、適切な仮定を入れて可能性定理を探る研究に着手した。現在は Nicolò and Rodríguez-Álvarez (2017) が導入した「年齢に基づく選好」（すべての患者は年齢の若いドナーの臓器ほど望ましいと考える）において考察を行っている最中であり、既にいくつか準備的の結果を得ている。他方で、ドナーと患者がある程度年齢を一致させて腎移植を行ったほうが良いとの見解もある（日本移植学会のHP：<http://www.asas.or.jp/jst/general/qa/kidney/qa10.php>）。これは、ドナーの臓器を若い順に一列に並べた場合、生着率の観点から患者は自分の年齢と近いドナーの臓器ほど望ましいと考えており、単峰型の選好を成していると考えられる。このような単峰型選好は、近年 Bade (2019) などによって非分割財経済で積極的な探求が進んでおり、本研究においても将来的に考察を行うことを予定している。

(2) 経済実験

本研究で実験対象としているのは、RSU2004 が導入した 5 つの拡張 TTC である。RSU2004 に従って、この 5 つの拡張 TTC (拡張 TTC-a、拡張 TTC-b、拡張 TTC-c、拡張 TTC-d、拡張 TTC-e) を効率性と耐戦略性の観点から分類すると、以下の表の通りになる。

	効率性	耐戦略性
拡張 TTC-a	×	○
拡張 TTC-b	×	×
拡張 TTC-c	○	×
拡張 TTC-d	×	○
拡張 TTC-e	○	○

本研究の実験では、それぞれのメカニズムについて 3 回の実験を行う計画を立てた。1 回の実験につき 21 人の被験者を集め、7 人を一つの組として、PC 上で 5 回意思決定を行う実験デザインを考案した。

実験は、理論的に最も性能の良いメカニズムである拡張 TTC-e に加えて、拡張 TTC-a と拡張 TTC-c については実施することができた。拡張 TTC-b と拡張 TTC-d については新型コロナウイルスの影響によって実験を完了できなかった。しかし、プログラムなど実験実施の準備は整っているため、新型コロナウイルスが収束した後はすぐに実験実施に取り掛かることができる。

実験を実施した 3 つのメカニズムの実験結果については、正直申告率は 3 つのメカニズムで大差がなかった。他方、効率性については、理論予測通り、拡張 TTC-c や拡張 TTC-e の方が拡張 TTC-a よりも良好だった。他にも、各メカニズムで被験者が「どの程度嘘をついたのか」や利得の違いなど様々な指標を使ってデータを分析しているところである。

(3) その他

本研究課題に関連するメカニズムデザイン研究について、査読付きの国際的学術雑誌に 4 本掲載し、また 5 本をワーキングペーパーとして公表した。

<参考文献>

Sophie Bade (2019) "Matching with single-peaked preferences," *Journal of Economic Theory*, **180**, 81-99.

Antonio Nicolò and Carmelo Rodríguez-Álvarez (2017) "Age-based preferences in paired kidney exchange," *Games and Economic Behavior*, **102**, 508-524.

Alvin E. Roth, Tayfun Sönmez, and Utku Ünver (2004) "Kidney exchange," *Quarterly Journal of Economics*, **119**, 457-488.

Lloyd Shapley and Herbert Scarf (1974) "On cores and indivisibility," *Journal of Mathematical Economics*, **1**, 23-37.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Mizukami Hideki, Wakayama Takuma	4. 巻 104
2. 論文標題 Dominant strategy implementation of bargaining solutions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematical Social Sciences	6. 最初と最後の頁 60～67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mathsocsci.2020.01.008	査読の有無 有
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 Takuma Wakayama, Takehiko Yamato	4. 巻 2019-4
2. 論文標題 Comparison of the voluntary contribution and Pareto-efficient mechanisms under voluntary participation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東京工業大学経営工学系ワーキングペーパー	6. 最初と最後の頁 1～45
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takehito Masuda, Toyotaka Sakai, Shigehiro Serizawa, and Takuma Wakayama	4. 巻 1048R
2. 論文標題 A strategy-proof mechanism should be announced to be strategy-proof: An experiment for the Vickrey auction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ISER Discussion Paper	6. 最初と最後の頁 1～89
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takuma Wakayama and Takehiko Yamato	4. 巻 2019-4
2. 論文標題 Comparison of the voluntary contribution and Pareto-efficient mechanisms under voluntary participation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東京工業大学経営工学系ワーキングペーパー	6. 最初と最後の頁 1～45
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuji Fujinaka and Takuma Wakayama	4. 巻 111
2. 論文標題 Endowments-swapping-proof house allocation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Games and Economic Behavior	6. 最初と最後の頁 187 ~ 202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.geb.2018.05.004	査読の有無 有
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 Tatsuki Homma, Junyi Shen, Takuma Wakayama, Hirofumi Yamamura, and Takehiko Yamato	4. 巻 DP2018-23
2. 論文標題 The pivotal mechanism versus the voluntary contribution mechanism: An experimental comparison	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 RIEB Discussion Paper Series	6. 最初と最後の頁 1 ~ 40
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takuma Wakayama	4. 巻 49
2. 論文標題 Bribe-proofness for single-peaked preferences: Characterizations and maximality-of-domains results	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Social Choice and Welfare	6. 最初と最後の頁 357 ~ 385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s00355-017-1068-2	査読の有無 有
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 Yuji Fujinaka, Toshiji Miyakawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Ex-post incentive compatible and individually rational assignments in housing markets with interdependent values	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 SSRN Working Paper	6. 最初と最後の頁 1 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3008266	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 Hideki Mizukami, Takuma Wakayama	4. 巻 152
2. 論文標題 New necessary and sufficient conditions for secure implementation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Economics Letters	6. 最初と最後の頁 76～78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.econlet.2016.12.009	査読の有無 有
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1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Takehito Masuda
2. 発表標題 A strategy-proof mechanism should be announced to be strategy-proof: An experiment for the Vickrey auction
3. 学会等名 International Workshop on Experimental Economics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

若山琢磨のホームページ https://sites.google.com/site/takumawakayama/home
--

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
研究分担者	星野 裕二 (藤中裕二) (Fujinaka-Hoshino Yuji) (20552277)	関西大学・経済学部・准教授 (34416)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	舛田 武仁 (Masuda Takehito) (80725060)	大阪大学・社会経済研究所・講師 (14401)	