

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25380244

研究課題名(和文)腎移植問題におけるメカニズムデザイン

研究課題名(英文)Mechanism Design in the Kidney Exchange Problem

研究代表者

若山 琢磨(Wakayama, Takuma)

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本プロジェクトでは、「2人の患者が偽装結婚・偽装養子縁組を通じて自分のドナーを交換し合った後で腎臓交換メカニズムに参加しても、双方とも利益を得る機会はないこと」を腎臓交換メカニズムに対して要請する条件を考案し検討した。本研究ではこの条件を「耐事前交換性」と名付け、耐事前交換性のほかに個人合理性と耐戦略性を満たす腎臓交換メカニズムがトップ・トレーディング・サイクル・メカニズムに限られることを示した。また、腎臓交換メカニズムに参加する患者数が3人以上の場合、耐事前交換性を強めた条件は個人合理性と両立しなくなることがわかった。

研究成果の概要(英文)：This project formulates and studies the requirement on a kidney exchange mechanism that no pair of patients should be able to benefit by exchanging their donors with each other using either fake marriage or fake adoption prior to the operation of the chosen mechanism. We call this requirement “pre-exchange-proofness.” We show that the top trading cycles mechanism is the only mechanism satisfying individual rationality, strategy-proofness, and pre-exchange-proofness. Moreover, it turns out that a stronger version of pre-exchange-proofness is incompatible with individual rationality whenever there are three or more patients.

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

近年、日本では、透析患者数が増加の一途を辿っており、腎臓病医療の問題が関心を集めている。透析療法は日々発展しているものの、患者本人の生活の質の向上や医療費負担の軽減などを考えれば、現時点では、腎移植が腎臓病に対して最も有効な治療法であるといえる。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）があり、生体腎移植の方が献腎移植よりも手術の成功率が高い。ただし、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、日本では親族のみである。さらに、ドナーが見つかったとしても、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、生体腎移植は叶わない。生体腎移植を受けることができない患者は、献腎移植を受けるために待機者リストに登録して順番を待たなければならない。しかし、献腎移植を受けることができるのは一握りの患者である。また多くの国では臓器売買は禁じられているため、腎臓売買市場を創設して腎臓の需給ギャップを解消することはできない。

このように移植に適した腎臓が不足する状況において、Roth, Sönmez, and Ünver (2004)は、メカニズムデザイン研究の成果を土台として、臓器売買に頼ることなく、できる限り多くの腎移植を可能にする「腎臓交換メカニズム」という仕組みを考案した。これは、適合条件を満たさない患者とドナーのペアをたくさん集め、それらをできる限り適合条件を満たすように患者間でドナーの交換を行うことで、生体腎移植の数を増やそうとするものである。この仕組みは、実際にアメリカ東部の一部地域で実施されたのを皮切りに、近年アメリカでは実施数が急速に増え、多くの人命を救っている。この功績により、腎臓交換メカニズムの考案は、アルヴィン・ロスが2012年のノーベル経済学賞を受賞した理由の一つになっている。しかし、日本では未だその実施の目処は立っていない。アメリカにおける成功を見ると、生体腎移植の数を劇的に増加させうる腎臓交換メカニズムは、臓器売買の手段に訴えていないために、社会の合意も得られやすく、それゆえ魅力的な仕組みだといえる。

日本に限らず、腎臓交換メカニズムの導入を検討する際に、偽装結婚や偽装養子縁組を通じてドナーを融通する問題は看過できない。腎移植の際に、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、偽装結婚や偽装養子縁組を通じて、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。

実際、日本移植学会の調査(2011年)によれば、養子縁組による親子間あるいは結婚1年以内の夫婦間の生体腎移植を実施している病院が数件あった。そのため、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振り回されてしまう恐れがある。しかし、Roth, Sönmez, and Ünver (2004)の研究以降、これまで偽装結婚や偽装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。

2. 研究の目的

本研究の目的は、偽装結婚や偽装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ことである。腎臓交換メカニズムがこの性質を備えていなければ、本来受けることができた患者の移植の機会が阻害される恐れがある。腎移植を目的とした偽装結婚や偽装養子縁組を法律で完全に防ぐことは難しい。その反面、腎臓交換メカニズムがこの性質を備えていれば、その種の共謀行為は未然に防止でき、メカニズムの安定的運営が脅かされる心配はなくなる。さらに、移植を切望する患者に、偽装結婚や偽装養子縁組などの手段を選択させる必要がなくなることから考えても、この性質をメカニズムに要求することは重要である。

3. 研究の方法

本研究では、Shapley and Scarf (1974)が導入したモデル（以下、このモデルを「基本モデル」と呼ぶ）を用いて理論分析を行う。基本モデルは、以下の3つの特徴を持つものである。

- (1) 同時移植手術数に制限なし。
- (2) ドナーに対する患者の選好は線形順序（生着率が高いドナーほど好ましく、生着率の高い順番にドナーを並べたときに同順位がないこと）。
- (3) 各患者が持つドナーの数は一人だけ。

本研究が基本モデルから分析を開始する理由は、腎臓交換メカニズムを初めて考案したRoth, Sönmez, and Ünver (2004)のモデルが基本モデルを拡張したものであり、彼らの導出した結果が、基本モデルで得られた結果を基盤としているためである。したがって、基本モデルでの分析結果は、本研究での目的を達成するための重要なステップとなる。

基本モデルでは、トップ・トレーディング・サイクル・メカニズム（以下では「TTCメカニズム」と呼ぶ）が、効率性や耐戦略性（移植可能なドナーに関する情報の虚偽申

告により利益を得ないことを要請)など様々な良い性質を持つことが知られている。したがって、まずTTCメカニズムが偽装結婚や偽装養子縁組によるドナーの融通を未然に抑止しうるメカニズムかどうかを検討する。そして、TTCメカニズムがそのような性質を持っているのであれば、TTCメカニズムの公理的な特徴付けを試みる。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 「偽装結婚や偽装養子縁組によるドナーの融通を抑止する」という性質を「耐事前交換性」として定式化した。この性質の具体的な内容は次の通りである。いま2人の腎不全患者が何らかの腎臓交換メカニズム(以下では単に「メカニズム」と呼ぶ)に参加する前に、その2人の中で偽装結婚・偽装養子縁組を通じて自分のドナーを交換し合ったとする。このとき、その2人の患者は、ドナーを事前に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良質な臓器の移植を受けることができるようになるかもしれない。耐事前交換性は、この種のペアによるメカニズムの操作を防止するものである。

(2) TTCメカニズムは、耐事前交換性、個人合理性(メカニズムへの参加によって損をすることがないことを要請)、耐戦略性の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判明した。つまり、メカニズムへの自発的な参加を促しつつ、虚偽情報報告の防止や、偽装結婚や偽装養子縁組によるドナーの融通を防ぐとすれば、TTCメカニズムに頼らざるを得ないことが明らかになった。

(3) 耐事前交換性を適切に強めた性質である「強耐事前交換性」についても考察した。強耐事前交換性は、「2人の患者間で自分のドナーを事前に交換することによってメカニズムの指定する配分を操作した結果、その内の一人が提供を受ける臓器の質を悪化させることなく、もう片方の人がより良質な臓器提供を受けること」を防ぐものである。分析の結果、TTCメカニズムは強耐事前交換性を満たさないことがわかった。さらに、強耐事前交換性と個人合理性を満たすメカニズムが皆無なことを示した。つまり、偽装結婚・偽装養子縁組によるドナーの融通の防止を強い意味で要請すれば、それは必ずメカニズムへの自発的な参加を犠牲にせざるを得ないことになる。

(4) その他の成果として以下が得られた。

① 文献調査の結果、耐事前交換性よりも強い性質(本研究ではこの性質を「連立耐事前

交換性」と名付けた)が Postlewaite (1979) や Moulin (1995)によって既に発案されていたことがわかった。連立耐事前交換性は、(耐事前交換性のようにペアに限らず)調整・実施が困難と考えられる大規模グループによるドナーの事前交換をも防止しようとしているため、過度に強い要請のように見える。実際、耐事前交換性を満たすものの連立耐事前交換性を満たさないメカニズムが存在し、これは連立耐事前交換性が耐事前交換性よりも実質的に強い要請であることを示している。他方で、TTCメカニズムは連立耐事前交換性も満たすことがわかった。

② 耐事前交換性とコア(ペアワイズ・コア)との関係について考察した。コア(ペアワイズ・コア)配分とは、「一部のグループ(ペア)が自分たちだけで交換し合えば、グループ内の全員を得させる」ことが起こらない配分である。これは配分決定後の結託行動を防ぐものと見なすことができる。考察の結果、耐事前交換的(連立耐事前交換的)なメカニズムが選び取る配分はペアワイズ・コア(コア)に属することがわかった。耐事前交換性は事前の結託を防ぐ概念だと考えることができるため、この結果は事前と事後の結託防止に密接な関連があることを示唆している。

③ 耐事前交換性、耐戦略性、効率性、個人合理性の4つの代表的な性質間の関係について、以下のことがわかった。

1) 耐事前交換性と耐戦略性(あるいは耐事前交換性と個人合理性)を満たすメカニズムが必ずしも効率性を満たすわけではない。この結果より、有名な Ma (1994)の定理を使って、(2)で述べたTTCメカニズムの特徴付け定理は導出できないことが明らかとなった。

2) TTCメカニズム以外にも耐事前交換性、効率性、個人合理性を満たすメカニズムが存在する。その上、これら3つの性質に匿名性や非介入性などのよく知られた性質を加えても、TTCメカニズムを特徴付けることができない。

3) TTCメカニズム以外にも耐事前交換性を満たすメカニズムが多く存在する。また、そうしたメカニズムがどのような性質を満たすのかについても調べた。

上記の(1)~(4)の研究成果は、国内外のセミナーやコンファレンスで報告した後、論文としてまとめ([その他]のディスカッション・ペーパー①)、現在は査読付きの国際的学術雑誌に投稿中である。

今後は、本研究の成果を土台として、Roth, Sönmez, and Ünver (2004)が開発した「拡張モデル」の分析を行っていく。拡張モデルは、

基本モデルに「間接ドナー交換」を許したものである。間接ドナー交換とは、自分のドナーを他人に提供する代わりに、献腎移植を待つ順番を上げてもらうオプションのことである。ロスらは、この拡張モデルにおいて、TTCメカニズムに基づいた6つのメカニズムを提案した。したがって、それら6つのメカニズムの中で、どのメカニズムが耐事前交換性を満たすのかをまず明らかにしたい。また、本研究の成果および財交換モデルにおける実験研究などを参照しつつ、ロスたちの提案した6つのメカニズムのパフォーマンスを経済実験により比較し、優劣を付ける研究も今後行うつもりである。

その他に、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3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>

- ① Jinpeng Ma (1994) "Strategy-proofness and the strict core in a market with indivisibilities," *International Journal of Game Theory*, **23**, 75-83.
- ② Herve Moulin (1995) *Cooperative Microeconomics*, Princeton University Press, Princeton.
- ③ Andrew Postlewaite (1979) "Manipulation via endowments," *Review of Economic Studies*, **46**, 255-262.
- ④ Alvin E. Roth, Tayfun Sönmez, and Utku Ünver (2004) "Kidney exchange," *Quarterly Journal of Economics*, **119**, 457-488.
- ⑤ 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

(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4件)

- ① Hideki Mizukami and Takuma Wakayama (2017) "New necessary and sufficient conditions for secure implementation," *Economics Letters*, **152**, 76-78. (査読有り)
DOI: 10.1016/j.econlet.2016.12.009
- ② Hideki Mizukami and Takuma Wakayama (2015) "Ex post self-implementation," *Economic Theory Bulletin*, **3**, 357-367. (査読有り)
DOI: 10.1007/s40505-014-0050-8

- ③ Yuji Fujinaka and Takuma Wakayama (2015) "Maximal manipulation of envy-free solutions in economies with indivisible goods and money," *Journal of Economic Theory*, **158**, 165-185. (査読有り)
DOI: 10.1016/j.jet.2015.03.014

- ④ 藤中 裕二・若山 琢磨 (2014) 「非分割財交換の分析—TTC アルゴリズムの活用」, 『経済セミナー』, **680**, 43-49. (査読無し)

〔学会発表〕(計6件)

- ① 藤中 裕二, "Pre-exchange-proof house allocation," The 5th Meeting on Applied Economics and Data Analysis, 法政大学(東京都), 2015年12月20日.
- ② 若山 琢磨, "Pre-exchange-proof house allocation," The 12th Meeting of the Society for Social Choice and Welfare, Boston College (USA), 2014年6月21日.
- ③ 藤中 裕二, "A model of housing markets with interdependent values," ゲーム理論セミナー, 東京工業大学(東京都), 2013年12月6日.
- ④ 若山 琢磨, "Pre-exchange-proof house allocation," 経済学会研究会, 岡山大学(岡山県), 2013年10月30日.
- ⑤ 藤中 裕二, "A model of housing markets with interdependent values," SWET2013, 小樽商科大学(北海道), 2013年8月8日.
- ⑥ 藤中 裕二, "A model of housing markets with interdependent values," 六甲台セオリーセミナー/六甲フォーラム, 神戸大学(兵庫県), 2013年6月3日.

〔その他〕

ディスカッション・ペーパー (計5件)

- ① Yuji Fujinaka and Takuma Wakayama (2017) "Pre-exchange-proof house allocation," SSRN working paper.
DOI: 10.2139/ssrn.2927361
- ② Kazuhiko Hashimoto and Takuma Wakayama (2017) "Fair reallocation in economies with single-peaked preferences," ISER Discussion Paper No. 947.
<http://www.iser.osaka-u.ac.jp/library/dp/2015/DP0947.pdf>

- ③ Yuji Fujinaka, Tokinao Otaka, and Shuta Terui (2017) “Nash implementation and single-peaked preferences,” SSRN working paper. DOI: 10.2139/ssrn.2893465
- ④ Takuma Wakayama (2016) “Bribe-proofness for single-peaked preferences: Characterizations and maximality-of-domains results,” SSRN working paper. DOI: 10.2139/ssrn.2813259
- ⑤ Yuji Fujinaka and Toshiji Miyakawa (2015) “A model of housing markets with interdependent values,” SSRN working paper. DOI: 10.2139/ssrn.2556059

ホームページ等

http://www.geocities.jp/takuma_wakayama/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若山 琢磨 (Wakayama, Takuma)
龍谷大学・経済学部・准教授
研究者番号：80448654

(2) 研究分担者

藤中 (星野) 裕二 (Fujinaka-Hoshino, Yuji)
大阪経済大学・経済学部・講師
研究者番号：20552277