

## 多臓器マッチング：腎臓と肝臓

05001368 東京工業大学 \*渡邊 燃 WATANABE Moyuru

## 1. はじめに

日本臓器移植ネットワークによれば、2016 年時点で 13683 人が臓器提供を待ち、年間 233 人が移植を受けられず死亡している。このような移植待機中の患者、並びに移植待機中に死亡する患者を減少させるための一つの方法として、交換移植がある。

交換移植とは、臓器が適合しないドナーと患者のペアが 2 組以上存在する場合に、ドナーを交換することで移植を可能にする手法である。臓器移植を必要とするペアが無数に存在する状況下で望ましい組み合わせを効率的に発見するためにはメカニズムを考案する必要がある。

望ましい組み合わせを発見するためのアルゴリズムは、Roth, Sönmez and Ünver (2004) 以降、様々なものが考案されてきた。しかし、複数の臓器を同時に扱い、尚且つその臓器に固有の問題を考慮に入れたモデルの経済学的分析は行われて来なかった。そこで、本研究では腎臓と肝臓を同一のプールでマッチさせるようなモデルの構築、並びにメカニズムの考案を行なった。腎臓と肝臓を同時に扱うことにより、図 1 のように移植件数の増加が見込める。異なる臓器を単一のプールで扱うことで、移植件数を増やすことが本研究の目的である。

## 2. モデル

本研究においては後述する肝臓固有の問題を扱うため、Ergin, Sönmez and Ünver (2019) の肝臓マッチングモデルに腎臓を加えたモデルを構築している。

腎臓と肝臓を扱った臓器マッチング問題を考える上で、血液型と肝臓のサイズについて考える必要がある。ここでは血液型の集合を  $B = \{O, A, B, AB\}$  とする。肝臓を提供する場合、ドナーは左葉(全体の 40%)と右葉(全体の 60%)のうち、いずれか一方を提供することになる。患者は自身の本来の肝臓のサイズの 40%程度を提供される必要がある。ここでは患者の必要とする臓器のサイズおよび、ドナーの左葉のサイズの集合を  $S = \{0, 1, \dots, S-1\}$  とする。人体は 2 つの腎臓を有しており、腎移植に際してはいずれか一方を全摘出し、移植することになる。従って、サイズについて考慮する必要はない。

また、本研究では臓器の需要と供給についても考える必要がある。腎臓が欲しい患者に肝臓を提供しても意味がなく、肝臓を提供できないドナーに肝臓の提供を強いることはできない。臓器の需給に関する情報の集合を  $C$  とする。

マッチングに参加する各個人のタイプは血液型の集合  $B$ 、肝臓のサイズの集合  $S$ 、需給を表す要素  $C$  の直積  $B \times S \times C$  で表される。この時、個人間の臓器の適合、不適合を表す半順序を  $\succeq$  とすると、 $(B \times S \times C, \succeq)$  と以下で定義される半順序  $(\{0,1\}^2 \times \{0,1, \dots, S-1\} \times \{0,1\}^2, \succeq)$  は順序同型である。

各タイプ  $T \in B \times S \times C$  に対して、ベクトル  $X \in \{0,1\}^2 \times \{0,1, \dots, S-1\} \times \{0,1\}^2$  を次のように定義する。(Xが腎臓病患者なら  $X_3 = 0$ )

$X_1 = 0, \Leftrightarrow T$  は A 型の抗体を持つ

$X_2 = 0, \Leftrightarrow T$  は B 型の抗体を持つ

$X_3 = s \Leftrightarrow s \in S: T$  の肝臓のサイズは  $s$  である。

$X_4 = 0, \Leftrightarrow T$  は腎臓が要らない/提供できない

$X_5 = 0, \Leftrightarrow T$  は肝臓が要らない/提供できない。

$\mathcal{T} := \{0,1\}^2 \times \{0,1, \dots, S-1\} \times \{0,1\}^2$  とする。この時、任意の  $X, Y \in \mathcal{T}$  について、 $X \leq Y$  ならば  $Y$  は  $X$  に腎臓、または左葉の提供が可能である。

各ドナーは右葉と左葉の 2 つのサイズを取り得るため、ドナー  $Y$  の右葉のサイズを  $Y_{3r}$  とし、 $Y^r := Y_1, Y_2, Y_{3r}, Y_4, Y_5$  とする。この時、任意の  $X, Y \in \mathcal{T}$  について、 $X \not\leq Y$  かつ  $X \leq Y^r$  ならば  $Y$  は  $X$  に右葉の提供が可能である。

## 3. ペアの種類

メカニズムの構築に先立ち、ペアの分類を行う。ペアが取り得る移植形態は、患者とドナーの組み合わせに応じて 20 通りに分類可能である。この分類により、アルゴリズム記述が容易になる。

#### 4. メカニズム

本研究で考案したメカニズムは、ペア間でのマッチの可否を表したグラフのノードとエッジを以下のように設定した優先順位に基づいて更新することで、効率的なマッチングを実現している。

任意のペア  $X - Y$  と  $U - V$  について、優先関係を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} & X - Y \text{ が } U - V \text{ に優先する} \\ \Leftrightarrow & X \leq Y, U \not\leq Y \text{ \& } U \leq \rho(Y) \end{aligned}$$

上記の優先関係に基づき、全てのペアについて同順位が存在しないような優先順位を設定する。具体的な設定方法については発表中に解説を行う。

本研究で提案するメカニズムは上記の優先関係に基づき設定された優先順位を使用し、優先順位が高いペアから順にマッチと変換を繰り返す。あるドナー  $Y$  が変換を行った場合、以後そのドナーのタイプを  $\rho(Y)$  として扱う。変換を行なったペアが他のペアとマッチした場合、そのペアは右葉の提供を行うことになる。従って、変換を行わずに他のペアとマッチすることが、どのペアにとっても望ましい。

提案メカニズムは優先順位に基づいて各ペアの変換のタイミングを管理することで、パレート効率性を実現している。提案メカニズムの詳細については発表中に解説する。

**定理: 提案メカニズムは耐戦略性・パレート効率性・個人合理性を満たす。**

耐戦略性・パレート効率性・個人合理性の具体的な定義については発表中に解説する。

#### 5. 倫理的批判への回答

臓器マッチングメカニズムの応用に際して、倫理的諸課題をクリアにしなければならない。本研究で提示するメカニズムは第一段階で腎臓病患者のペア同士を、第二段階で腎臓病患者のペアと肝臓病患者のペア同士を、最終段階で肝臓病患者のペア同士を組み合わせている。このような手法は Samstein, Benjamin, Inmaculada Melo-Martin, Sandip Kapur, Lloyd Ratner, and Jean Emond (2018) で指摘されているようなリスクに差異のある交換移植の件数を増やしてしまう。しかし、本研究では Samstein et al. (2018) の指摘に従い腎臓病同士、肝臓病同士を優先し、余ったペア間で交換移植を行わせるメカニズ

ムがパレート効率性を満たさないことを示した。

また、交換移植が許容されるケースは直接移植が不可能な場合のみと考えられている (Live Organ Donors Consensus Group, 2000)。しかし、本研究では直接移植が可能なペアに常に直接移植をさせるようなメカニズムがパレート効率性を満たさないことを示している。

#### 6. おわりに

本研究では移植件数の増加を目的とし、3つの望ましい性質を満たすメカニズムの考案に成功した。今後の課題として、静学的な分析であることや、腎臓と肝臓以外の臓器を考慮していないこと、一人のドナーのみを考慮していることが挙げられる。Ergin, Sönmez and Ünver (2017) のような複数のドナーの存在を仮定したモデルなどを応用し、更なる拡張を行う必要がある。また、本研究では想定される倫理的批判に完全に答え、尚且つ前述の3つの性質を満たすようなメカニズムは存在しないことを示した。次善の策として倫理的批判を最小にし得るようなメカニズムを検討する必要がある。

#### 参考文献

- [1] 公益財団法人日本臓器移植ネットワーク「臓器提供・移植データブック 2017」  
<https://www.jotnw.or.jp/datas/databook/> (2021年1月5日閲覧)
- [2] Ergin, Haluk, Tayfun Sönmez, and M. Utku Ünver (2017). “Dual-Donor Organ Exchange” *Econometrica*, 85(5): 1645-1671.
- [3] Ergin, Haluk, Tayfun Sönmez, and M. Utku Ünver (2018). “Efficient and Incentive-Compatible Liver Exchange” *Boston College Working Papers in Economics*, 951: 828-851.
- [4] Live Organ Donors Consensus Group (2000). “Consensus Statement on the Live Organ Donor” *Journal of the American medical association*, 119(2): 457-488.
- [5] Roth, Alvin E., Tayfun Sönmez, and M. Utku Ünver (2004). “Kidney exchange” *Quarterly Journal of Economics*, 119(2): 457-488.
- [6] Samstein, Benjamin, Inmaculada Melo-Martin, Sandip Kapur, Lloyd Ratner, and Jean Emond (2018). “A liver for a kidney: Ethics of trans-organ paired exchange.” *American Journal of Transplantation*, 18(5), 1077-1082.