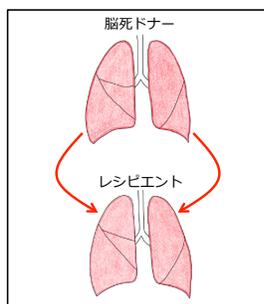


1 背景

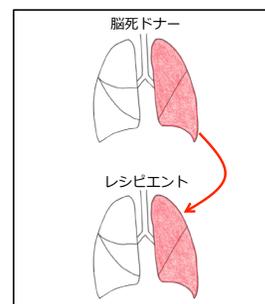
日本では、脳死ドナーから提供された臓器は臓器移植ネットワークを通じて移植希望者へ割り当てられている。腎臓移植や心臓移植の場合には通常1個の臓器を移植する以外の術式はないが、脳死肺移植には片肺移植と両肺移植の2形式があるため、移植希望者は希望する術式をあらかじめ臓器移植ネットワークに登録しておく必要がある。すなわち、片肺移植と両肺移植のどちらを希望するか、両方を希望する場合にはどちらを第1希望とするのかを事前登録しておくことになる。臓器移植ネットワークは登録情報に基づいて、公表しているレシピエント選択基準に記述された方法で割り当てを行っている。2019年末時点で肺移植のために待機していた患者数は392名である一方で、2020年に実行された脳死肺移植手術は58件となっている。²

慢性的な脳死ドナー不足に対応するため、肺移植に携わる医療従事者達は様々な工夫を重ねてきた。2人の生体ドナーからの寄付で移植片 (graft) をまかなう生体肺移植や、1人の生体ドナーと脳死ドナーからの片肺の寄付によって移植片をまかなうハイブリッド移植など術式の選択肢を増やすことにより、移植機会が増加するよう努めている。³



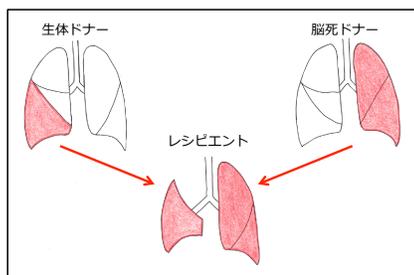
脳死両肺移植

(Deceased-donor double-lung transplant)

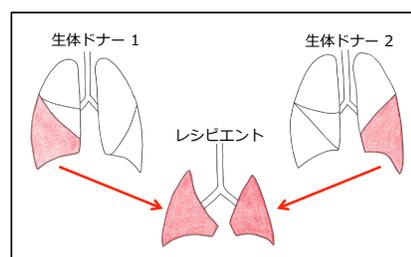


脳死片肺移植

(Deceased-donor single-lung transplant)



ハイブリッド肺移植 (Hybrid lung transplant)



生体肺移植 (Living-donor lung transplant)

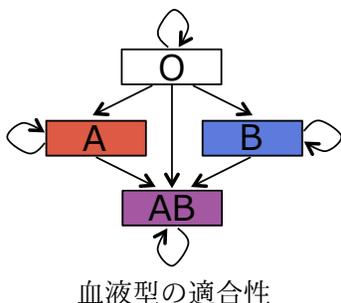
移植市場において配分を考える際に重要な制約の一つとして適合性がある。血液型、組織型やサイズなどの条件が合うドナーからレシピエントに対して臓器の移植を行うことは可能であるが、一つでも条件が合

¹本文書は筑波大学社会工学commons Discussion paper series DP NO. 1352 “Dual-Organ Markets: Coexistence of Living and Deceased Donors” (<http://infoshako.sk.tsukuba.ac.jp/~databank/pdf/1352.pdf>) の要約である。

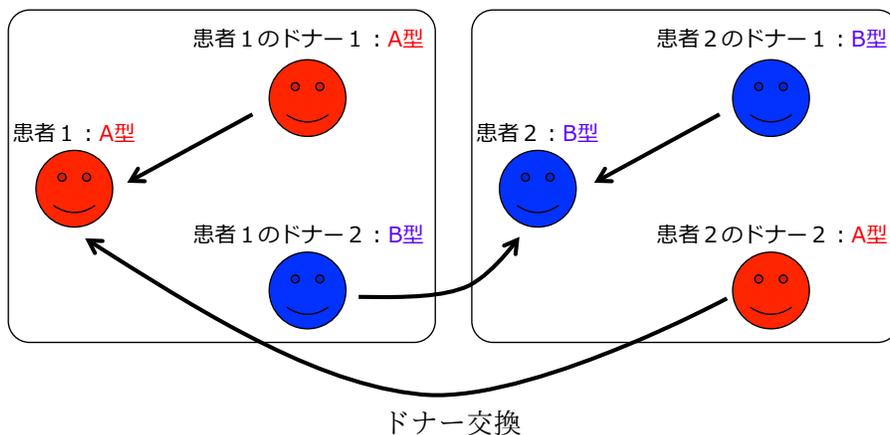
²前者のデータは日本移植学会発行ファクトブック 2020 より。後者は、日本臓器移植ネットワーク HP <https://www.jotnw.or.jp/data/offer.php?year=2020> より。

³人間の左肺は上葉と下葉の2部分から成り、右肺は上葉・中葉・下葉の3部分からなる。生体ドナーが寄付をする場合には、ドナーの健康上の理由から左肺または右肺の下葉のみを寄付する。

わない場合には移植後の拒絶反応の原因となるため移植は実行できない。例えば、(その他の適合性条件がすべて満たされる場合に) 血液型がO型のドナーから摘出した臓器はA型のレシピエントに移植することができるが、逆はできない。血液型適合性条件は下図のようにまとめられる。図中の矢印は、矢印の根元にある血液型のドナーは、矢印の先にある血液型の患者に寄付できるということを表している。本稿では話を単純化するために、適合性条件は血液型のみで定義されるものと仮定する。



移植機会が非常に希少なものとなっていることの原因は第一にドナーの不足であるが、適合性の制約がそれをさらに深刻な問題にしている。仮に手術を行うために十分な数のドナーを見つけることが出来たととしても、適合性条件が満たされないために手術を断念せざるを得ない場合があるからである。この第二の問題を取り除くための一つの方法として、ドナー交換が提案されている (Ergin, Sönmez and Ünver, 2017)。⁴ 下図の患者1と2はそれぞれ2名の生体ドナーを見つけることが出来ているので、数の上では生体肺移植を実行するに十分なドナーがいると言える。しかしながら、適合性条件から自身のドナーからのみ寄付を受けて生体肺移植を行うことはできない。両者が直面している困難は、両者のドナー2の寄付先を交換することによって両方同時に解決することができる。



2 問題

肺ドナー配分市場とは、 n 人の患者が移植機会を求めて参加する市場のことである。それぞれの患者は有限人の生体ドナーを伴っており(0人も可)、さらに市場には脳死ドナーも1人いるとする。患者らは、生体ドナーと死体ドナーから提供された移植片を用いた移植手術を受け取ることができるが、必ずしも全員が移植

⁴日本移植学会が公表している現行のガイドラインでは、生体ドナーからの寄付は近親者に限定されるべきとされている(ただし、非近親者からの寄付が違法という訳ではない)。よって、患者が伴っている生体ドナーは通常患者自身の近親者である。本稿で記述するような患者間での生体ドナー交換を行うためには、病院内の倫理委員会などの審査を経てガイドライン外の手術を実行することの承認を受けなくてはならない。

手術を受けられるだけの移植片が市場にあるとは限らない。よって、誰がどの術式の移植手術を受けるのか、その際にどのドナーがどの患者に寄付を行うのかを決定するルールをあらかじめ決めておく必要がある。

図1には、5名の患者(患者1~5)がそれぞれ生体ドナーを伴って参加している市場が描かれている。それぞれの患者が伴う生体ドナーの数は、患者1,2,5がそれぞれ2名、患者3が0名、患者4が1名である。各患者およびその生体ドナーから成るグループが1つのボックスで表現されている。例えば一番左上のボックスは患者1グループを表しており、患者1の血液型(A型)が同ボックス内の左側に、患者1が伴う2名の生体ドナーの血液型(B型)がボックス内の右側に書かれている。その他のボックスの読み方も同様である。1名の脳死ドナーが d_c という記号で表されている。⁵脳死ドナーは2単位の肺(左肺と右肺)を市場に提供し、片肺が①と表されている。記号 d_c の右に書いてあるBは脳死ドナー d_c の血液型である。また、待ち時間の長さや病状に基づいて患者には脳死肺を受け取る優先順位が与えられている。すなわち「患者1,2,3,4,5の順で高い優先順位が与えられている」のような順位付けが外生的に一つ与えられて固定されているものとする。

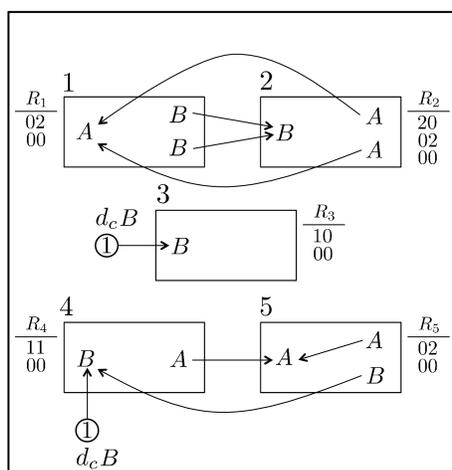


図1

各患者は術式上に選好を持っているとする。記号20,10,11,02,00でそれぞれ脳死両肺移植、脳死片肺移植、ハイブリッド移植、生体肺移植、手術なしの5つの術式を表すことにしよう。⁶形式的に言えば、各患者は{20,10,11,02,00}上に強選好を持ち、例えば図1において患者2は脳死両肺移植、生体肺移植、手術なしの順に希望していることを

$$\frac{R_2}{20 \ 02 \ 00}$$

図1における患者2の選好

という形式で表している。その他の患者の選好についても同様の読み方で理解する。図中における矢印は、矢印の根元に書かれたドナーが矢印の先に書かれた患者に寄付を行うことを表している。従って図1には、患者1が患者2の2名の生体ドナーからそれぞれ1単位の肺葉を受け取って生体移植手術を受け、逆に患者2は患者1の2名の生体ドナーからそれぞれ1単位の肺葉を受け取って生体移植手術を受ける割り当てが描かれている。さらに、患者3は脳死ドナーから片肺を受け取って脳死片肺移植を受け、患者4と5は生体ド

⁵ d_c のcは、cadavericの頭文字に由来する。脳死ドナーは死体ドナー(cadaveric donor)とも呼ばれることからそのような記法にした。

⁶十の位の数を使用する脳死肺の個数を、一の位の数を使用する生体肺葉の個数をそれぞれ表している。

ナーを交換してそれぞれハイブリッド肺移植、生体肺移植手術を割り当てられている。誰がどの手術を割り当てられているかを記述したリストを移植手術配分または単に配分と呼ぶ。⁷ 本研究では、ドナー交換が社会にもたらす便益については考察対象とするが、“過激な”交換がもたらす便益は排除して考察を進めることにする。何をもちて過激な交換と定義するかの基準は明確で、例えば患者 i が市場において肺葉 1 単位の寄付を受けることと引き換えに患者 i の生体ドナー達が肺葉 2 単位以上を患者 i 以外のドナーに寄付するような不均等な交換は過激であると考えことにする。患者 i が他の患者の生体ドナーから受け取る肺葉数は、患者 i の生体ドナー達が患者 i 以外の患者に寄付する肺葉数と同じになるような配分は平衡条件 (**Balanced condition**) を満たすということにし、本研究では平衡条件を満たす配分のみが実行可能であるとする。

以上で定式化した肺ドナー配分市場において、各患者の希望登録 (選好プロフィール) (R_1, \dots, R_n) に対して一つの移植手術配分 (a_1, \dots, a_n) を対応させる関数 φ はメカニズムと呼ばれ、これを適切に設計することが本研究の目的である。メカニズムの良し悪しは、その値である配分が望ましい性質 (効率性や公平性など) を満たすか否かによって評価される。以下の諸概念はマッチング理論において標準的な性質である。配分 $a = (a_1, \dots, a_n)$ が、提出された希望登録 $R = (R_1, \dots, R_n)$ に対して個人合理的であるとは、どの患者 i にとっても割り当て a_i が手術なしと同等かそれ以上に望ましい手術となっていることをいう。配分 a が、提出された希望登録 R に対してパレート効率的であるとは、別な配分 $b = (b_1, \dots, b_n)$ において、全患者が a と同等かそれ以上に望ましい手術に改善していて、かつ少なくとも一人の患者が a より厳密に望ましい手術に改善していることが不可能であることをいう。次に優先順位に基づいた公平性を定式化するために一つ概念を定義する。患者 i が配分 $a = (a_1, \dots, a_n)$ において希望登録 R_i に照らし患者 j に羨望するとは、 j は i より脳死肺を受け取る優先順位が低いにも関わらず a_j には脳死肺が含まれており、 i は自分より優先順位が高い患者の厚生を損なうことなくその脳死肺を利用してより望ましい手術を受けることが可能であることをいう。⁸ 配分 $a = (a_1, \dots, a_n)$ が、提出された希望登録 $R = (R_1, \dots, R_n)$ に対して公平であるとは、どの患者 i も配分 a において希望登録 R_i に照らし誰にも羨望しないことをいう。以上 3 つの性質はどれも、提出された希望登録に照らして定義される概念となっている。よって、虚偽の選好表明によって結果が歪められる場合には真の選好に照らしてそれらの性質が失われる可能性がある。この危険を避けるためにはあらかじめメカニズムを、他の患者の表明にかかわらず真の選好を表明することが最適となるように定めておけば良い。この性質は耐戦略性という。

本研究でメカニズムが満たすべき望ましい性質として追求する概念は以上の 4 つである。これらの性質をすべて満たすメカニズムは存在するか？ あるとすればどのようなメカニズムか？ ないとすればどの性質を諦めて、具体的にどのようなメカニズムを採用するのが良さそうか？ こういった疑問に答えることが本研究の目的である。

3 配分メカニズムの提案

肺ドナー配分市場で割り当てを定める方法として本研究が推奨するメカニズムは、優先順位メカニズム (**Priority mechanism**) と呼ばれる非常にシンプルで自然な方法である。このメカニズムは、個人合理的な配分の中から、脳死肺を受け取る優先順位が高い患者から順に好きな配分を順次選んで絞り込んでいき、最後に残った配分をメカニズムの値とする、というものである。図 2 に描かれた、3 名の患者 1, 2, 3 から成る市場でその挙動を説明する。各患者は 2 名の生体ドナーを伴っており、それぞれの血液型は図中に描かれ

⁷各患者にとって同じ術式の手術は無差別であると仮定する。配分において各患者の割り当ては、具体的にどのドナーから寄付を受けて成立した手術かが記述されている。例えば、患者 1 と 5 の割り当てはどちらも A 型の生体ドナー肺葉 2 単位を用いた生体肺移植である。よって、彼らにとっては互いの割り当てが無差別である。

⁸厳密な定義は Anno and Kurino (2017) を参照。

た通りである。また、市場には2単位の肺(左肺と右肺)を提供する脳死ドナーが1名いて、その血液型はB型であるとする。各患者の希望登録は図中に描かれた $R = (R_1, R_2, R_3)$ であるとする。脳死肺を受け取る優先順位は1,2,3の順であるとする。

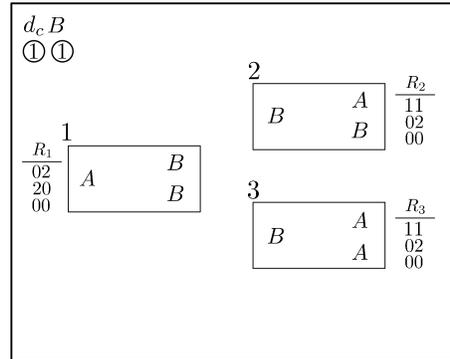


図2

優先順位メカニズムは次の n ステップ(この例では $n = 3$) を経て配分を決定する。

優先順位メカニズム

まず $\Phi_0(R)$ で、提出された希望登録 R に対して個人合理的な配分の集合を表す。

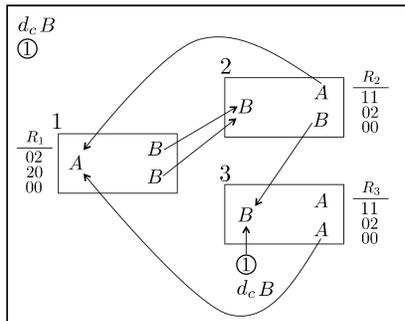
ステップ1. $\Phi_0(R)$ に含まれる配分の中で、患者1にとって自身の割り当てが最も好ましい手術となっている配分を全て選んで、その集合を $\Phi_1(R)$ と置く。今回の例で言えば、下図の配分 a, b, c は全て患者1の第1希望である生体肺移植を患者1に割り当てているので、これらの配分が全て $\Phi_1(R)$ に含まれる。

ステップ2. $\Phi_1(R)$ に含まれる配分の中で、患者2にとって自身の割り当てが最も好ましい手術となっている配分を全て選んで、その集合を $\Phi_2(R)$ と置く。今回の例で言えば、下図の配分 b, c は共に患者2の第1希望であるハイブリッド肺移植を患者2に割り当てているので、これらの配分が全て $\Phi_2(R)$ に含まれる。一方で配分 a は患者2にとってハイブリッド肺移植より希望順位の低い生体肺移植を患者2に割り当てているので、 $\Phi_2(R)$ に含まれない。

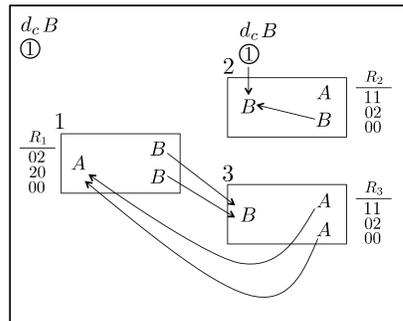
ステップ3. $\Phi_2(R)$ に含まれる配分の中で、患者3にとって自身の割り当てが最も好ましい手術となっている配分を全て選んで、その集合を $\Phi_3(R)$ と置く。今回の例で言えば、下図の配分 c は患者3の第1希望であるハイブリッド肺移植を患者3に割り当てているので、配分 c は $\Phi_3(R)$ に含まれる。一方で配分 b は患者3にとってハイブリッド肺移植より希望順位の低い生体肺移植を患者3に割り当てているので、 $\Phi_3(R)$ に含まれない。⁹

$\Phi_n(R)$ (= $\Phi_3(R)$) に含まれる配分をどれでもいいので一つ選んで、希望登録が R の時の優先順位メカニズムの配分とする。

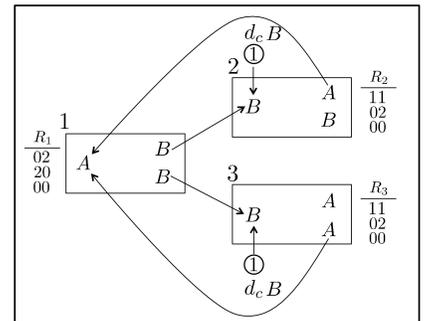
Allocation a:



Allocation b:



Allocation c:



⁹配分 c の他にも $\Phi_3(R)$ に含まれる配分は存在する。例えば、患者1の2人の生体ドナーの寄付先が入れ替わった配分も $\Phi_3(R)$ に含まれる。重要なことは、 $\Phi_3(R)$ に含まれる配分は全て、どの患者にとっても無差別であるということである。

ドナー交換が許容されないケース(すなわち、配分において他患者の生体ドナーから寄付を受ける患者がないケース)においては、優先順位メカニズムは第2節で導入した4つの望ましい性質を全てみたす。現在の日本は(日本移植学会のガイドラインに照らして)ドナー交換が許容されていない社会である。Anno and Kurino (2017)で詳しく検討しているのでここでは詳述しないが、現行の日本式配分メカニズムは個人合理性とパレート効率性をみたす一方で、公平性と耐戦略性をみたさない。よって、優先順位メカニズムを実装することによってこれら2つの観点からメカニズムを改善することができると言える。

定理 1. ドナー交換が許容されないケースにおいて、優先順位メカニズムは個人合理性、パレート効率性、公平性および耐戦略性をみたす。

次の命題1にまとめられているように、市場にドナー交換が導入された場合には、優先順位メカニズムは耐戦略性を失ってしまう。その一方で、その他の性質は全て維持する。

命題 1. ドナー交換が許容されるケースにおいて、優先順位メカニズムは個人合理性、パレート効率性および公平性をみたすが、耐戦略性はみたさない。

命題1の結果を受けて、ドナー交換が許容されるケースにおいて4つの性質全てをみたすメカニズムは存在するのか? という自然な疑問は検討に値する興味深い問題である。次の定理2はこの疑問に対する完全な解答を与えている。

定理 2. ドナー交換が許容されるケースにおいて、個人合理性、パレート効率性、公平性および耐戦略性の全てをみたすメカニズムは存在しない。

定理2から得られる重要な示唆は、具体的なメカニズム設計に際して4つの性質全てを追求することは理論的に不可能なので、少なくとも一つの性質を諦めざるを得ないということである。よって、命題1と合わせて考えれば、優先順位メカニズムは4つの性質中3つをみたすような「可能な範囲内でベスト」なメカニズムのうちの一つであることがわかる。

最後に、(本研究で注目する4つの性質に関して)優先順位メカニズムの唯一の欠点である耐戦略性の欠如が、致命的な欠陥なのか?あるいは大きな問題ではないと言えるか?ということについて考察したい。図3には、2名の患者がそれぞれ2名の生体ドナーを伴っている市場が描かれている。2単位の肺を寄付する脳死ドナーはB型であるとする。脳死肺を受け取る優先順位は患者1,2の順であるとする。図3左図には真の選好が描かれているとし、患者1は生体肺移植のみを希望している一方で、患者2は第1希望が脳死両肺移植で第2希望が生体肺移植となっている。この時に希望登録 $R = (R_1, R_2)$ の下で優先順位メカニズムは、左図にあるように両患者がドナー交換を行って生体肺移植を受ける配分を指定する。ここで患者2が希望登録を変更して、右図にあるように脳死両肺移植のみを希望する選好 R'_2 にしたとする。この時に優先順位メカニズムが指定する配分は、右図にあるように患者1が手術なしとなって患者2が脳死両肺移植を受けるものになる。¹⁰以上より、患者2は真の選好が図3左図の R_2 である時に、あえて R'_2 と希望登録すれば図3右図が実現して受けられる移植の術式が改善することがわかった。よって優先順位メカニズムが耐戦略性をみたしていないことがわかる。

¹⁰個人合理的配分において患者2は脳死両肺移植か手術なしのどちらかを受ける。よって、平衡条件から患者2の生体ドナーから寄付を受ける患者は発生しない。よって、優先順位メカニズムは患者1に手術なしを割り当てる。その結果、患者2は脳死両肺移植を割り当てられる。

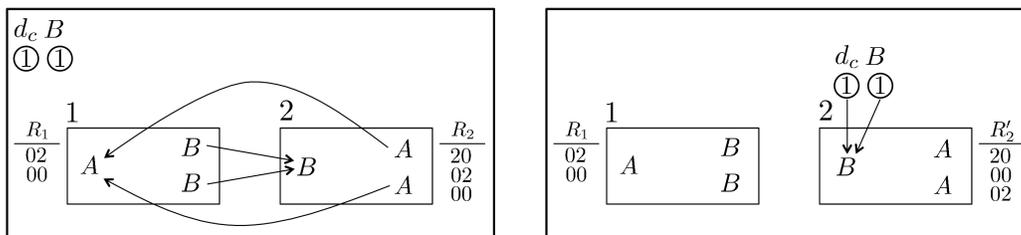


図3：戦略的希望登録が成功する場合

ここで注目すべきは、虚偽登録 R'_2 において、実際には受け入れ可能な生体肺移植を受け入れ不可能であると表明している点である。この虚偽申告が成功して受ける手術の術式が改善したことの背景には、患者2が自身の置かれた市場の状況（他患者やその生体ドナーの血液型、脳死ドナーの血液型、他患者の希望登録）を正確に把握していることが不可欠である。¹¹ 実際、仮にこの市場に現れた脳死ドナーの血液型がA型であった場合には、正直な希望登録 R_2 の下では患者1と生体ドナー交換を行って生体肺移植を受けることができるが、虚偽登録 R'_2 の下では手術なしを受け取ることになる（図4）。

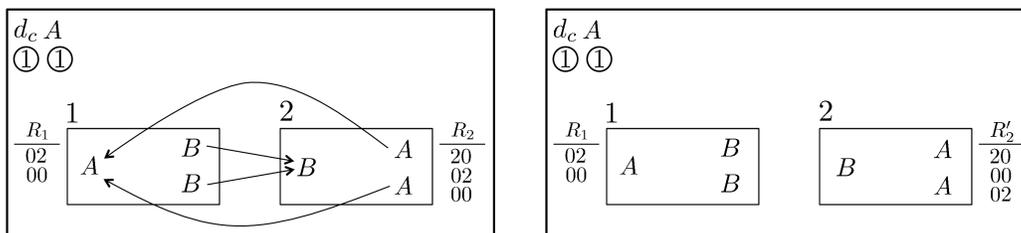


図4：同じ戦略的希望登録で移植機会を逃す場合

この例に限らず優先順位メカニズムにおいて、どのようなタイプおよび選好を持つ患者も、虚偽登録によって受け取る術式を改善することができる時には必ず、その虚偽登録が「実際には受け入れ可能な術式を受け入れ不可能であると偽る形式」を持つことが証明できる (Anno and Kurino (2017) の補題 2)。そしてその時に、図4右図で見たのと同様に、他患者のタイプや希望登録によっては真の希望を登録しておけば「受け入れ不可」と偽った術式が得られたはずなのに、虚偽登録をしたばかりに手術なしという結果に終わる状況が必ず存在することも証明できる (Anno and Kurino (2017) の定理 3)。すなわち、術式の改善を狙って行う虚偽登録は、実際には手術なしとなるかもしれない危険な賭けを含んでいる。よって、このようリスクを冒すことの損失を、虚偽登録で得られる術式改善によるゲインよりもはるかに大きく評価する場合¹²には、ドナー交換が許容される場合においても優先順位メカニズムの元で戦略的行動をとることは得策ではないと言える。まとめると、優先順位メカニズムはドナー交換が許容されるケースにおいて耐戦略性は満たさないものの、一定のインセンティブ両立性を維持していると言える。

4 結語

本研究では、肺移植市場において脳死ドナーからの寄付を受ける優先順位に基づいて配分を決定する優先順位メカニズムが、配分（メカニズム）の様々な望ましい性質から支持されることを示した。同様の性質をみたすメカニズムが他にもあるかどうかは理論的に興味深い問題である。脳死ドナーが複数存在する場合や、

¹¹極めて個人的な情報である患者やドナーの健康状態や術式の希望が、市場参加者間で共有されることは考えづらい。また、脳死ドナーの発生はコントロール不能である。以上より、患者は自分自身や自身のドナーのことを除いて、市場の状況については把握していないと想定するのが自然であると思われる。

¹²この市場で配分される財は移植機会であり、これを逃すことは死に直結することから、適当な仮定であると考えられる。

逐次的に市場に到着する場合など、拡張されたモデルにおいても優先順位メカニズムを用いて市場を運営することができるが、それらの場合にも優先順位メカニズムが優れた配分方法と言えるかどうかの検討も重要な残された課題である。

References

Anno, H. and M. Kurino (2017): "Dual-Organ Markets: Coexistence of Living and Deceased Donors," University of Tsukuba, Discussion Paper Series NO. 1352.

Ergin, H., T. Sönmez, and M. U. Ünver (2017): "Dual-Donor Organ Exchange," *Econometrica*, **85(5)**, 1645-1671.