

# サービス設計へのメカニズムデザインの活用

西野 成昭

本稿は、経済学の応用分野であるメカニズムデザインをサービス設計の問題へどのように活用できるか、その可能性について論じる。サービス設計の問題は、従前よりサービス工学の分野で研究がなされてきた。工学的な設計の考え方を基軸とするサービス工学とメカニズムデザインは、それぞれ独立に発展してきており、両者が交わることは、これまでにほとんどなかった。そこで、サービスの設計という問題を通じて両分野の接点について議論し、メカニズムデザインのサービス設計への活用について、具体的な研究例とともに述べる。

キーワード：サービス工学，サービス設計，メカニズムデザイン，サービスメカニズム，マッチング

## 1. はじめに

サービス設計の問題を対象として研究を行っている分野がサービス工学である。サービス工学は、東京大学人工物工学研究センターを起源とし、2000年頃に研究がスタートした。さらに、同センターで2002年にサービス工学研究部門が設置され、研究活動が加速した。その後、2008年に産業技術総合研究所にサービス工学研究センターが設置されるなど、ほかにも日本でサービス工学に関係する研究組織が幾つか設置され、現在までに大きな広がりを見せている。また、2012年に設立された文理融合を謳うサービス学会でも、サービス工学の研究は盛んに行われている。

サービスに対して科学的に研究を行う必要が世界的に認知され始めたきっかけは、やはり2004年の米国バルミザーノレポート内でService scienceという言葉が用いられたところ大きい。時期を同じくして、Service Dominant Logic [1]の論文が出版されたこともそれに拍車をかけた。サービスマーケティング分野では、それ以前からサービスについての研究が盛んにされていたし、情報科学やコンピュータ科学分野でも、サービスの側面に着目した研究は現在では盛んに行われている。サービスは、分野を超えて共通的に現れる根源的な性質をもつものであるといえるだろう。

加えて、実社会でも情報通信技術などの発展に伴って、これまでになかった新しい形式のサービスが数多く生み出されており、われわれに大きな価値をもたらしている。近年普及が拡大するシェアリングサービスやサブスクリプション型サービスなども、その新

しい形式のサービスの一端であるが、産業界でもサービスの側面の重要性が強くと認識されてきている。製造業においても、製品売り切り型のビジネスでは限界で、持続可能性の議論とも相まって、サービス化への潮流が拡大してきている。サービスという考え方は、狭義のサービス産業に限らず、あらゆる産業でその考え方が見え隠れする。以上のように、サービスとは学術界・産業界を問わず共通して現れる根源的なものである。

現在までに、サービスに関する研究はさまざまな領域で展開されているが、サービス工学は伝統的な工学的視点からの人工物の設計の考え方が基礎にあるところが特徴である。吉川の一般設計学 [2, 3]の考え方に拠れば、設計とは機能空間から属性空間への写像として捉えることができる。すなわち、要求仕様として必要な機能が定まれば、それを実現しうる属性をもつ実体を作り出すことで、人工物が完成する。一般に、人工物創出の行為は逆問題になるが、最適化などの手法をもとに、あるいは、時として経験と勘によって、適切な構造をもった人工物が作り出される。しかし、本来機能とは、人工物が何らかの環境で使われて初めて発現されるものであり、そこに利用者の意図が多かれ少なかれ含まれるため、主観的側面を機能表現から完全に排除することはできないといわれる [4]。人工物をもつその機能こそが、サービス工学が着目する部分である。すなわち、物理的実体をもつ製品も、その機能の利用プロセスはサービスと捉えることができる。

サービス工学は伝統的な人工物の設計論が根源的な考え方であるが故に、人間の意思決定を扱う社会科学の諸分野とは独立に発展してきた。しかし、社会科学の中でも経済学は、人々が主観的に感じる価値観に関する部分について、二項関係の一つとして選好を定義し、数理モデルとして非常に美しい理論体系を現在ま

にし の なりあき  
東京大学大学院工学系研究科  
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
nishino@tmi.t.u-tokyo.ac.jp

で構築してきている。そのような経済学が長年積み上げてきた知見は、サービス工学が対象とする「人間が機能を利用する」という局面を科学的に取り扱う際に重要な役割を果たすはずである。経済学の中でも、特に社会制度などの設計の問題を扱うメカニズムデザインは、サービス設計への活用が期待される。

そこで本稿では、メカニズムデザイン分野の考え方・方法論をどのようにサービス設計へ活用するかについて、いくつかの観点から論じたい。以降、2節ではサービス設計における本質的な難しさがどこにあるのかについて議論し、次いで、3節でメカニズムデザインの一般的な考え方とサービス設計との接点について述べる。4節では、筆者らがこれまでにを行ったメカニズムデザインをサービスの設計へ応用した研究例について紹介し、5節で本稿をまとめる。

## 2. サービス設計の難しさ

サービス工学分野においては、サービスとは「サービスの供給者であるプロバイダが、対価を伴って受給者であるレシーバが望む状態変化を引き起こす行為」[5]という定義が用いられることが一般的である。すなわち、サービスを受ける主体（サービスレシーバー）として、そこに人間が直接的あるいは間接的に想定されている。これは、設計する対象範囲に人間の振る舞いまで含まれていることを含意する。この点が、従来の製品設計と決定的に異なる点であり、サービスの設計を困難にしている。

敢えて、サービスの設計問題を「サービスの受け手である人間を含めた設計」の文字のとおり解釈してみると、人間の行為自体を設計するという意味になってしまう。つまり、サービスを利用している人の行動が設計者に規定され、サービス利用のプロセスが強制されたものになってしまう。もちろんそのようなサービスもあってよいと思うが、設計者が人を操作することは非現実的であり、利用者はサービスで決められたルールや制約の中で自由に振る舞うことができることが通常である。自由に振る舞うサービスレシーバーを含めて設計する難しさが当然あるが、もっと決定的に深刻な問題は、サービスを利用して人々が感じる価値についてサービス設計者が操作変数として扱うことが不可能な部分である。それを直接設計できないところに、従来の工学的な設計問題と本質的に異なる難しさがある。

まず、このような問題に対して、従来のサービス工学研究で採用しているアプローチの一部を紹介したい。

Service CADの研究[6-8]では、サービスレシーバーも含めたモデルを構築し、Receiver State Parameters (RSP) と呼ばれるサービスを受ける主体の状態変化を表すパラメータを導入し、人の要素を含めた設計問題として解決を試みようとしている。加えて、ペルソナと呼ばれる代表的な消費者像を想定して、利用シナリオを用意して、サービスのプロセスが記述されている。具体例として、Hara et al. [7] や Shimomura et al. [8] では、実際のエレベーターのオペレーションを対象としてケーススタディも行われている。Service CADは、実用的で非常に有用なサービス設計支援ツールである一方で、人間の要素を扱うために、ペルソナや利用シナリオなどを前提としなければいけないという限界もある。人々の嗜好は多様であり、また、時としてサービス利用時に予想を超えた振る舞いを行うこともある。Service CADのようなアプローチは、人間を含む設計問題への一つの解決策であることは間違いないが、事前に膨大な数のペルソナや多次元のRSPでプロセスを記述するとなると、非常に手間とコストがかかるし、やはりサービスレシーバーが感じる価値の部分の扱いについては不十分さが残る。

このようなサービス設計が本質的にもつ困難さに対して、社会科学、中でも経済学や意思決定理論に、その解決の手がかりを求めることができるかもしれない。その中でも、メカニズムデザインは望ましい社会制度の「設計」を目指す分野であり、設計という点で共通しており、融合できる可能性が期待される。次節では、両分野の接点について議論を深めたい。

## 3. メカニズムデザインとサービス設計の接点

メカニズムデザインとは、経済学の応用分野であり、ゲーム理論のフレームワークを用いて、社会全体として望ましい結果をもたらすようなルールや制度(=メカニズム)を設計することを目的とした研究分野である。特に最近では、メカニズムデザインで蓄積された学術的な知見を、実社会へ応用する事例が多く見られる。たとえば、ボストンやニューヨークでの学校進学時における生徒の学校への割り当てにおいて、マッチング理論を専門とするメカニズムデザインの著名な研究者が参加し、実際の制度設計を行った[9-11]。さまざまな検討を経て、最終的に、理論的に優れた性質をもつことで知られるDeferred Acceptanceというマッチングメカニズムが用いられることとなった。ほかにも、腎移植において、ドナーと患者のマッチングの新しい仕組みを提案し、実応用がなされている例も有名

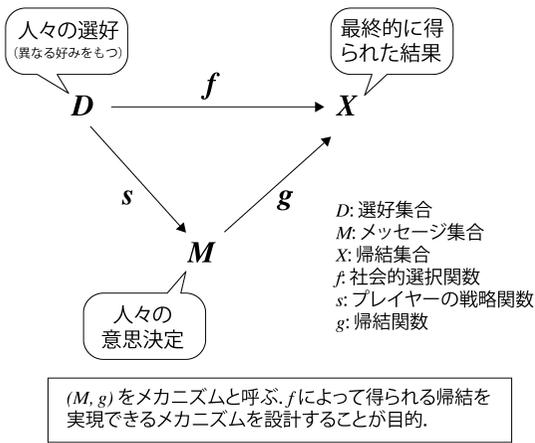


図1 メカニズムデザインの考え方

である [12, 13]. これ以外にも、現在は多くの実応用が展開されている。

メカニズムデザインの考え方は、図1に示されるような三角形を用いて説明されることが多い。Dは人々が取り得るすべての選好の組を含む集合で、多様な好みをもつ人々が存在しうることを表す。Xは帰結集合であり、制度やルールなどのメカニズムによって、実現される状態をすべて含んだ集合である。DからXへの写像を表すものが社会的選択関数  $f$  であり、社会における人々がもつ選好の組  $d \in D$  があったときに、そのような選好をもつ人々に対して社会的に望ましい状態  $x \in X$  を返してくれる写像を意味する。すなわち、 $f: d \mapsto x$  である。

一方で、人々の選好  $d$  がわかったとしても、トップダウンで望ましい社会の状態を実現できる訳ではない。つまり、人々はそれぞれの目的（自己の利益最大化）をもって自律的に行動しており、そのような行動の結果、ボトムアップで出てくる帰結は望ましい  $x$  になるとは限らない。それを表している部分が、 $s: D \rightarrow M$  と  $g: M \rightarrow X$  の写像である。ここで、Mとはメッセージ集合を表しており、人々が選択できる行動を「何らかのメッセージ（情報）を表明する」という形式で、一般化して表現されたものとして考えて欲しい。写像  $s$  は、人々が自身の利益が最大となるような行動を行う（メッセージを表明する）ことを表しており、ナッシュ均衡のような均衡概念としてこの写像を考えることになる。そして、表明されたメッセージを集約し、写像  $g$  によって最終的な帰結へ導かれる。望ましい  $x$  へ導くためには、 $g$  をどのように設計するかが重要となる。加えて、Mについても、どのようなメッセージを送ることができるのかという枠組みそのものであり、Mも

設計対象となる。一般に、 $(M, g)$  をメカニズムとして定義する。以上の枠組みで、メカニズムデザインが目指す最終的なゴールは、 $f$  の写像によって得られる帰結  $x$  を、三角形の下側のパスを通じて実現できる適切な  $(M, g)$  を設計することである。つまり、それぞれの意思決定主体が自身の利益を追求するという合理性を前提としながら、全体として望ましい帰結をもたらすようなインセンティブの構造を作り出すことと叫びかえることができるだろう。

この三角形の構造は、オークションを例に考えると非常にわかりやすい。ある財がオークションにかけられているとしよう。その財について、どれぐらい支払ってもよいか、その支払意志額の集合が  $D$  に相当するものであり、誰に財が配分されるか（オークションの勝者となるか）の帰結を表す集合が  $X$  である。各参加者は、落札したい金額を入札するため、 $M$  は入札可能な金額の集合になる。たとえば、 $f$  を効率性という指標で考えるならば、最も高い支払意志額をもつ人にその財を配分すればよいことになり、それが社会的に望ましい  $x$  である。しかし、実際には各参加者にとっては、他人がどうであれ自分が落札したいので、色々な戦略を講じて入札する。その結果、社会的には望ましくない人が勝者となることもある。 $g$  はオークションのルールに相当し、イングリッシュオークションならば最も入札額の高い人が落札するというルールになるし、Vickrey オークションならば最も高い価格を入札した人が2番目に高い入札額で落札するルールとなる。この場合、常に効率的な帰結を実現するようなメカニズム  $(M, g)$  を考えることがメカニズムデザインの目的ということである。

ここで、サービスの設計問題に話を戻そう。誤解を恐れずに極端に表現すると、サービス工学におけるサービスの設計とは「サービスレシーバーの利用の局面を含む一連のプロセスの設計」と言い換えることができるだろう。しかし、多くの困難さがあることは、2節で述べたとおりである。一方、メカニズムデザインの理論が秀逸である所以は、メカニズムという媒介を通して、望ましい状態を間接的に制御し実現するところにある。この部分にこそ、両分野の重要な接点が隠れていると筆者は考える。サービス設計者が望むように、サービスの利用を通じてサービスレシーバーの状態変化を起こすためには、メカニズムに相当するものを適切に設計すればよい。サービスにおいて、あるメカニズムの下で利用者が自律的に行動し、その結果、設計者が考えるような望ましい状態へ導かれるはずである。

それであれば、サービスを利用する人間の行為自体を設計するという厄介な問題を回避できる。ここに、メカニズムデザインがサービス設計に大きく貢献できる余地がある。

ここでのメカニズムとは、サービス提供の局面に当てはめて考えるならば、それはサービスにおいて利用者が明示的／暗黙的に守べきルールのことであり、それを適切に設計することこそが、サービスの設計問題として新たに定義することができるだろう。このサービスにおけるルールのことを、改めて「サービスメカニズム」と呼ぶことにする。なお、筆者らの研究グループでは、サービスメカニズムを対象とした新しいサービス工学研究を展開している。

以上のように考えると、メカニズムデザインやマーケットデザインの分野がこれまでにやってきたことは、実はサービス設計の重要な一つの側面を担っていると解釈できよう。現在、関連する書籍も多く出版されており、実践的に行われたケースも多く掲載されている。たとえば、Haeringer による書籍 [14] には、キーワードオークション、周波数オークション、研修医マッチング、学校選択問題、講義科目配分マッチング、腎臓交換マッチングなどの実践例が説明されている<sup>1</sup>。加えて、Roth はこれまでにメカニズムデザインの理論的な成果をどのように実社会へ応用するに至ったかという話を、彼自身が経験してきた内容とともに、一般読者向けに非常にうまくまとめている [15]。これらの実応用のケースは、やはりサービス設計の一翼を担っていると解釈できよう。

しかし、メカニズムデザインとサービス設計には、決定的な違いがある。それは、図 1 で説明した社会的選択関数  $f$  である。社会的に望ましい状態を考えるメカニズムデザインに対して、サービス工学でサービスを設計する局面は、往々として、利益を追求する企業が展開するビジネスである。すなわち、 $f$  とはサービスを設計する企業などの利益を追求する主体がもつ評価軸を反映したものになる。企業がどのようなサービスを実現したいか、いわば、要求仕様のようなものであり、それを実現するようにサービスメカニズムを設計することになる。利益を最大限追求する場合もあれば、可能な限り利用者の満足度を高めたいと考える場合もあるだろう。さらには、持続可能社会へ貢献するようなサービスを提供したい企業も存在する。そのため、 $f$  は設計者次第で多種多様なものとなるだろう。この部分

<sup>1</sup> 栗野によって日本語翻訳版が出版されているので、興味をもった読者は是非読んでいただきたい。

については、より深い検討やさらなる研究が必要である。

加えて、工学的観点からみれば、メカニズムデザインの分野での知見は、実社会への実装段階における泥臭い部分には、未だ及ばない点がある。実環境で適切に作動させるための方法論などを追究してきた工学分野は、その部分での蓄積が多い。たとえば、安全率のような体系が工学分野では整備され、構造物を作る際には満たすべき基準として整えられている。一方で、そのような考え方は、残念ながらメカニズムデザイン分野では乏しい。加えて、簡便に検証などができるシミュレーションツールなどの整備もまだ不十分である。適切にサービスを設計していくためには、そのような工学的な考え方を積極的に取り入れていかなければならない。工学的な考え方を基礎に、文理融合のアプローチでメカニズムデザインを活用するサービス工学の発展は、これから取り組むべき重要な課題であるといえるだろう。

#### 4. 研究事例の紹介

本節では、メカニズムデザインを用いたサービス設計の研究例として、筆者らによる研究 [16] を紹介する。本研究は、Top Trading Cycles (TTC) [17] と呼ばれる非分割財マッチングの文脈で議論されているマッチングメカニズムを、サブスクリプション型サービスの設計へ応用した研究である。

現在、自動車や家電、さらには、衣服や家具など、サブスクリプションの形式を利用したさまざまなサービスが広がっている。サブスクリプションとは、本来、定期購読を意味し、動画配信サービスや電子書籍などのデジタルコンテンツなどで基本的に使われているビジネスモデルである。しかし、これらの仕組みが、さまざまな耐久消費財に広がり、現在ではさまざまな製品のサブスクリプション型のサービスが広がっている。そのようなサービスでは、基本的に製品自体の所有権は企業にあり、製品の利用権だけを消費者が有している。利用者は一定の月額費用を支払っているため、価格設定の問題をひとまず棚上げすれば、「誰がどの製品を利用するか」というマッチング問題としてサービスの構造を捉えることができる。

図 2 に、本研究が提案するサブスクリプション型サービスにおけるマッチングメカニズムを示す。TTC は、所有する財を交換する局面で考えられたものであり、各プレイヤーは欲しい財をもっているプレイヤーを指名し、その指名を辿ってサイクルができれば（最初に指名した人まで戻ってくれば）、そのサイクル内で

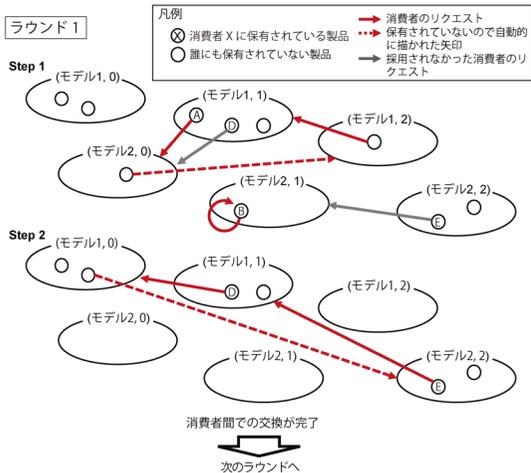


図 2 サブスクリプション型サービスにおける提案マッチングメカニズム (出所: 文献 [16] を基に作成)

財の交換を行うというメカニズムである。それを製品のサブスクリプション型サービスの局面に拡張すると、図 2 のようになる。直接所有する人を指名する代わりに、欲しい製品カテゴリを指定するという形式にしたものである。なお、図中の楕円が製品カテゴリを表しており、例えば、(モデル 1, 0) はモデル 1 で新品 (後ろの数字は使用年数) を意味する。TTC と同様にサイクルができれば、そこで交換が行われる。ただし、所有者がいない製品も含まれるので、その場合には自動的にサイクルを閉じて交換が成立するようにしている。

この新しいサービスの仕組みの提案の背景には、循環経済 (Circular Economy) がある。製品を企業が所有したまま、製品を利用させ、必要に応じて回収し補修し、場合によってはリマニュファクチャリングなどで新品に近い状態にまで機能回復させ、別のユーザーに使用させることがマッチングメカニズムの応用としてできないか、という問題意識から研究が始まった。詳細は論文 [16] に譲るが、TTC を応用した新しいサブスクリプション型サービスの設計を行った研究といえる。

このメカニズムの有効性について、シミュレーションで検証しており、その結果の一部を図 3 に示す。この図は消費者が 3 人のケースの単純な場合の結果であり、提案メカニズムによって効率的なマッチング配分ができているかを検証した結果である。左下の大きな赤い点が提案メカニズムによって実現した場合で、それ以外はランダムにマッチングした結果である。膨大な組み合わせで、ランダムにマッチングさせても、提案メカニズムによって得られたマッチングを上回る結果は得られず (小さな青い点の各軸の値が 1 以下にな

プレイヤー3人の場合の結果

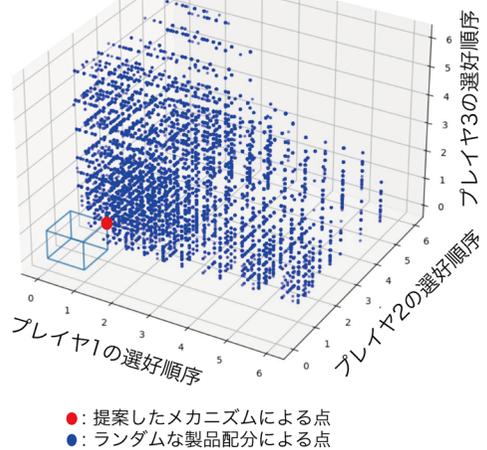


図 3 効率性の検証シミュレーション

れば上回ることを意味する), 提案メカニズムが効率的な配分を実現することが確認された。TTC は効率性を実現するメカニズムであり、その性質を適切に引き継いでいる。

さらに、耐用年数まで使用する「環境優先メカニズム」と選好に基づき製品を切り替えられる「新品優先メカニズム」の二つと比較した。図 4 は、消費者数 50, 3 種類の製品の設定で、毎期の新品投入量を変化させた結果である。グラフの縦軸は製品利用率であり、全製品の耐用年数をすべて使い切った場合に 1 になるように正規化した指標である。横軸が新品投入量である。毎期の新品投入量を変えることで、環境優先や新品優先のメカニズムの結果に近づけることができることがわかった。

現時点では、未だ提案メカニズムをシミュレーションによって検証した段階でしかないが、企業などとの連携を通じて、実フィールドでこのメカニズムが有効かどうか検証していくことが必要である。

## 5. おわりに

本稿では、サービス設計の問題に対して、メカニズムデザインの活用の可能性について論じた。サービス工学では、工学的設計の思想を基礎として、サービスの問題へと展開してきた。一方で、メカニズムデザインは経済学やゲーム理論の応用分野として、社会科学としてこれまでに学理を築いてきた。これまで、両分野は交わることなく発展を遂げてきたが、サービスが重要視され、科学的に取り組む必要性が謳われている現在、両分野が融合し、新しい文理融合型の学問領域

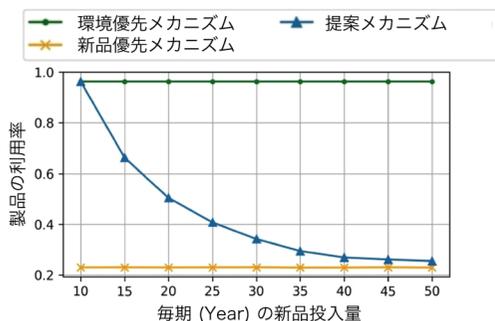


図4 製品利用率の変化 (出所: 文献 [16] を基に作成)

へと昇華させる好機となっていると筆者は感じている。本稿で述べた重要な問題の一つは、サービス設計における人間の扱いの困難さであり、その問題を解決し、サービス設計への学術的な取り組みをさらに一歩前進させることを可能とするには、メカニズムデザインの考え方の応用・拡張が必要不可欠である。

4節では、筆者らが取り組んでいるメカニズムデザインを活用したサービス設計の研究の一例を紹介した。図3で示した効率性の検証シミュレーションは、メカニズムデザインを工学的な思想をもってサービス設計へ展開する一つの好例である。従来、メカニズムデザインでは、数理的モデルの均衡解を解析的に求めたり、数学的な証明を通じて、効率性を満たすかどうかを示すのが典型である。一般に、そのプロセスは時間と手間がかかり、実社会でのビジネスの速度についていけない。一方で、当該研究で示した効率性検証は、モンテカルロ法をベースとした比較的簡便な方法で検証が可能である。このようなシミュレーションなどのサービス設計を支援するツールは、実社会でサービスを実装していくためには、必要不可欠となる。

加えて、図4の結果は毎期の新品投入量をコントロールすることで、消費者満足度を上げるか、環境パフォーマンスを増加させるかを、メカニズムを通じて間接的に制御できる可能性を示している。これは、3節で議論した  $f$  の問題に通じるものである。サービス設計者が  $f$  を設定し (環境と満足度のどちらを優先するか)、適切なサービスメカニズムの設計 (新品投入量の調整) により、望ましいサービスを実現しようという可能性を示したシミュレーション結果である。

メカニズムデザインをサービス設計に活用する研究は、まだ未解決の問題も多く、取り組むべき研究課題は山積である。一方で、そのような文理融合型の新しい研究領域に果敢に取り組もうとする研究者が少ないことも事実である。本稿を機に、このような研究を志

す研究者が少しでも増えれば、この上ない喜びである。

## 参考文献

- [1] S. L. Vargo and R. F. Lusch, "Evolving to a new dominant logic for marketing," *Journal of Marketing*, **68**, pp. 1–17, 2004.
- [2] 吉川弘之, "一般設計学序説—一般設計学のための公理的な方法—," 精密機械, **45**, pp. 906–912, 1979.
- [3] 吉川弘之, 『一般デザイン学』, 岩波書店, 2020.
- [4] Y. Umeda and T. Tomiyama, "FBS modeling: Modeling scheme of function for conceptual design," In *Proceedings of the 9th International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, pp. 271–278, 1995.
- [5] 下村芳樹, 原辰徳, 渡辺健太郎, 坂尾知彦, 新井民夫, 富山哲男, "サービス工学の提案—第1報, サービス工学のためのサービスのモデル化技法—," 日本機械学会論文誌 (C編), **71**, pp. 669–676, 2005.
- [6] T. Arai and Y. Shimomura, "Proposal of service CAD system: A tool for service engineering," *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, **53**, pp. 397–400, 2004.
- [7] T. Hara, T. Arai, Y. Shimomura and T. Sakao, "Service CAD system to integrate product and human activity for total value," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **1**, pp. 262–271, 2009.
- [8] Y. Shimomura, T. Hara and T. Arai, "A unified representation scheme for effective PSS development," *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, **58**, pp. 379–382, 2009.
- [9] A. Abdulkadiroğlu, P. A. Pathak, A. E. Roth and T. Sönmez, "The Boston public school match," *American Economic Review*, **95**, pp. 368–371, 2005.
- [10] A. Abdulkadiroğlu, P. A. Pathak, A. E. Roth and P. Milgrom, "The New York City high school match," *American Economic Review*, **95**, pp. 364–367, 2005.
- [11] A. Abdulkadiroğlu, P. A. Pathak and A. E. Roth, "Strategy-proofness versus efficiency in matching with indifference: Redesigning the NYC high school match," *American Economic Review*, **99**, pp. 1954–1978, 2009.
- [12] S. L. Saidman, A. E. Roth, T. Sönmez, M. U. Ünver and F. L. Delmonico, "Increasing the opportunity of live kidney donation by matching for two- and three-way exchanges," *Transplantation*, **81**, pp. 773–782, 2006.
- [13] A. E. Roth, T. Sönmez and M. U. Ünver, "Efficient kidney exchange: Coincidence of wants in markets with compatibility-based preferences," *American Economic Review*, **97**, pp. 828–851, 2007.
- [14] G. Haeringer, *Market Design: Auctions and Matching*, MIT Press, 2018. (栗野盛光訳, 『マーケットデザイナーオークションとマッチングの理論・実践—』, 中央経済社, 2020.)
- [15] A. E. Roth, *Who Gets What—and Why: The New Economics of Matchmaking and Market Design*, Houghton Mifflin Harcourt, 2015.
- [16] N. Nishino, K. Kimita and T. Ito, "Mechanism for matching circular products and customers with top trading cycles," *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, **71**, pp. 5–8, 2022.
- [17] L. Shapley and H. Scarf, "On cores and indivisibility," *Journal of Mathematical Economics*, **1**, pp. 23–37, 1974.