

事例研究によるサービス数学の創成

— 日本酒醸造モデルとその可視化に関する基礎研究 —

工学部教育推進センター 准教授 伊藤 昭夫

1. はじめに

参考文献(1)は、そのまえがきの中で『サービスの受け手の満足という価値をサービスにおける重要な要素として捉え、新しい価値をもたらす新しいサービスの創出や既存のサービスの生産性を向上させる等、その重要性についての認識が高まりつつある』が、その一方で『サービスは未だ定まった概念や原理・原則、あるいは学術的な知の体系が未熟な分野であり、また「経験と勘」に依存する側面が強いのが実情である』と述べている。さらに、『サービスという分野が将来にわたって日本、また世界において重要性を増し、社会における課題や問題に対処する上でも、可能性に満ちたものであることは疑う余地はなく、模索しつつも新たな一步を踏み出すべき』であり、『サービスをサービス産業のみに留まる主題としてではなく、より幅広く捉えるとともに、科学的・工学的手法を導入することにより、社会における様々な課題や問題に対処しうる分野として、サービスに新たな可能性を求めると明示している。

言い換えれば、我々数学研究者も真剣に以下のような課題について議論しなければならない時代に突入したことを明確に示したと言える：

- (1) 実社会が直面している課題や要請に対して現在の数学は十分に応えているか？
- (2) 数学は実社会とどのように関わっていくべきか？
- (3) 実社会に貢献するために、数学はどのように発展すべきか？

もちろん、このような考え方を有した数学分野が現在に至るまで存在しなかったわけではない。例えば、欧米を中心として、20年ほど前から産業分野への貢献あるいは自然現象や社会現象の再現を目指した数学分野としてそれぞれ産業数学あるいは現象数学が誕生している。しかし、これらの分野は物理学、化学や経済学など他の自然科学や社会科学分野との関連が深く、現象の解明に主眼が置かれている。従って、国民や社会の要請に応えるサービスとしての『出口』を意識して構築されているとは言い難い。

このような現状を踏まえた上で、近畿大学次世代基盤技術研究所サービス工学研究センターでは国民や社会の要請に応えることを第一の目的とした新しい数学分野の創成を1つの研究テーマとして掲げる。

2. 『サービス数学』の創成と展開

本節で述べられる成果は、剣持信幸氏（佛教大学教育学部教授）との共同研究である。

本論に入る前に、我々の「新しい科学観」とそれに基づく新しい数学について触れておく。端的に言うならば、それは社会への貢献を第一の目標とし、時代の変化と共に生きていく科学のことである。科学の研究には、ただ単に自然界に起こる様々な現象のメカニズムの解明で終わることなく、それらが及ぼす人間社会への影響等を多面的に解析するとと

もに、《人間が永久に地球上で人間らしく生きることを可能にする》ためにその成果を積極的に役立てることも要求されている。さらに、それを可能にする新しい科学の創出も期待されている。「サービス科学」はそのような科学の 1 つとして位置づけられる。人間社会の営みは、自然・社会・文化・教育等の様々な分野が融合した極めて複雑な活動である。これらを構造的に捉え、1 つの有機的なシステムとして表現することが今後ますます重要視されてくると予想される。数学はそれを可能にする最も強力な学問であり、ここに新しい数学の展開が見出される。もちろん、同様な意味で役立つ既存の学問も、物理学・生物学・工学・経済学等数多く存在する。しかし、数学はその根底で他の分野とは明らかに考え方を異にする学問である。例えば、物理学では自然界に潜む法則を発見し、体系化することに力点が置かれている。特に、体系化には「科学の言葉」としての数学が用いられるが、そのため他分野の研究者から見れば数学と物理学との違いがはっきりしないと考えられがちである。それに対し、数学では解決が望まれる問題の本質を捉え、それを数学の枠組みで取り扱える形式に変換する。本稿では、以後この変換を『数理モデル化』と呼ぶことにする。その上で、数理モデル化された問題を取り扱うために必要な数理を自由に創造し、与えられた課題を数学の問題として定式化し解決することに力点が置かれている。

以上の観点から、我々はサービス領域に貢献できる学問体系を有した数学の創成に挑もうと考えた。以下では、それを総称して『サービス数学 (Service Mathematics)』と呼ぶことにする。

2.1. サービス数学の創成

従来のサービス研究では、サービスの提供者と被提供者をそれぞれ 1 つの集団として固定し、その 2 つの集団をサービスの提供と提供されたサービスの評価という関係で結んでいた。例えば、「電器家電メーカーが製造・販売する電気製品と購入者の使いやすさ」・「化粧品会社による新商品のネット広告とネットユーザーの購買行動」・「製薬会社が開発した新薬と患者の満足度」などがその典型例として挙げられる。このような単純な設定においても、現在、以下に述べるような問題が生じている：

- (1) 情報量の肥大化：サービス被提供者のニーズの多様化に伴い、その情報量は指数関数的に増大している。その結果、サービス被提供者のサービスに対する評価がサービス提供者に正確に伝わらない。
- (2) 技術分野における経験知の存在：科学技術が高度化しているにもかかわらず「ものづくり」の領域には未だ「経験と勘」に依存している技術も数多く存在している。そのため、たとえサービス被提供者の多様なニーズが把握できたとしてもそれに応えられるサービスが技術的な問題によって提供できない。

しかし、このような具体的な個々の問題を解決するための数理だけが我々の掲げるサービス数学ではない。以下、我々が創成を目指すサービス数学の具体像について述べる。

参考文献(2)では問題解決型サービス科学研究開発プログラムの概要の中でサービスやサービス科学を次のように定義している：

- (1) サービスとは『提供者による、被提供者のための価値創造を目的とした機能の発見』である。
- (2) サービス科学とは『サービスに係わる科学的な概念・理論・技術・方法論を構築する学問的活動、及びその成果を活用すること』である。

さらに、サービス科学が従来の科学研究やサービス関連の研究開発と大きく異なる点として『既存のサービスに科学的アプローチを導入してその効率化や最適化を図るのみに留まらず、社会における様々なサービスについて、サービスの提供者と被提供者を含むアプローチにより、科学的な概念・理論・技術・方法論の知見を生み活用していくことで、新しい学問的基盤の構築と価値の向上や創造を実現しようとする』ことを挙げている。従って、サービス数学もサービス科学の1つの分野として上記の視点に立って展開されなければならない。

我々が構築を目指すサービス数学では、1つのサービスは複数の成分（以下、これをサービス要素という）から成るベクトルであり、サービスを施すことにより生じる効果をサービス効果という。これも時間や空間を離散または連続なパラメータとするベクトルで表現される。各サービス要素は固有の性質をもち互いに独立であるが、それがもたらす効果は他のそれと共鳴したり、反発したり、あるいは、互いに他を抑制したりと複雑な依存関係を形成しながら変化していく。我々が意味するサービスシステムとは、サービスを施して生じた効果によって、ある状態を新しい状態へと移行させる過程をいう。

次に、サービス構造の全体像について述べる。従来の手法では、サービス提供者と被提供者が将来に渡って固定されていた。しかし、同じサービスでも時と場合によってはサービス提供者と被提供者が入れ替わることもあり、この場合、サービスを連続的に捉えることが困難となる。そこで、サービスの提供者と被提供者を区別することなく、ともにサービス構造の中の1つの構成要素として考える。これによって、サービス全体を1つの集合として捉えることができる。また、このような考え方を適用することによって、数多くのサービスが同一の「場」で捉えられる。さらに、具体的な事例研究を通してそれぞれのサービス要素の役割を明確にする手法を確立することによって、考察の対象としているサービスの全体構造を明らかにする。その際、土台として必要となる学問領域の1つが我々の掲げるサービス数学であり、それらの成果を蓄積することによってサービス数学の構築を目指す。サービス数学が担うことができる役割の具体例を以下に挙げる：

- (1) 各サービスに要求されるニーズに関するデータは膨大であり、その解析は既に困難を極めている。サービス数学は、膨大なデータを俯瞰的に眺めることによってその本質を捉え、抽象化することによって数理モデル化し、その数理的解析を可能にする。
- (2) 高度な科学技術や情報技術に依存しているサービス要素が数多く存在する。例えば、「ものづくり」では流体力学、電磁気学や熱力学など様々な学問領域で用いられる各種自然法則が利用されている。さらには、未だ法則として確立されていない「経験や勘」という領域も数多く存在する。特に、「経験や勘」は「匠」の技術であり、その継承は困難を極める。このような領域では「次世代技術者の育成」という大きな課題に必ず直面する。サービス数学は「経験や勘」に潜む技術者の経験知を定式化することに挑むことのできる学問である。
- (3) サービス数学は、サービスがもたらす各種の効果を有機的なネットワーク上で表現し、サービス効果の時間的空間的变化を1つの力学系として数理モデル化することを可能にする。さらに、それらを人間社会の事例に適応することで、サービス分野と科学・技術革新の相乗効果によるブレークスルーが期待できる。

以上より、我々はサービス数学を「1つのサービスを構成する各要素が持っている役割と

それがもたらす効果の変化を抽象化・一般化し、その背後に潜むメカニズムを解析する手法を確立することによって、サービス分野に貢献できる形式知としての学問体系を展開する学問」と定義する。

2.2. サービス数学の具体的な展開

本小節では、サービス数学の具体的な展開を示す。我々が直面している課題の数理モデル化は、大きく離散型問題と連続型問題という2つのタイプに分類できる。離散型問題とは空間あるいは時間に関して離散的に取り扱うことのできる数理モデルであり、OR理論・線形計画法・組合せ論などの数理が既にサービス分野で適用されている。一方、連続型問題とは空間あるいは時間に関して連続的に取り扱うことのできる数理モデルであり、微分方程式論・微分幾何・関数解析学などの数理が適用できる。

しかし、従来のサービス分野に現れる数理モデルのほとんどが離散型問題であり、それが問題の解析を困難にしている要因の1つとなっている。言い換えれば、サービスに期待されるニーズがあまりにも膨大となり、離散数学の枠組みだけではサービスの全体構造の定式化ができない事態が生じている。このように肥大した離散型問題は連続型問題として捉え直すほうが適切で、結果的には、サービスの構造をより深くかつ簡潔に解析することができるのではないかと考えている。

上記のような視点から、我々はサービス全体の中で主にサービスの提供という役割を果たす要素が利用した各種法則と主に多様なニーズの提供という役割を果たす要素との関連をネットワーク上の数理モデルとして捉え直す。さらに、「サービス指標」と呼ばれる尺度を導入することによって設定目標までの達成度を評価するシステムを同時に構築する。ここで、我々が提案する「サービス指標」とは、1つのサービスを構成するサービス要素全体の総合的な満足度を示す指標であり、サービス効果の関数によって定義される値である。

また、実践事例を通して我々が提案する数理モデルの多くは各種の自然法則等を記述する従来の変数（温度・圧力・体積・濃度など）とサービス指標やサービス効果の融合によって記述される。これによって、科学技術の進歩がサービス指標やサービス効果に与える影響を数値として評価することができる。逆に、サービス指標やサービス効果を改善するために必要な科学・技術革新を誘導することができる。これが我々の言うところのサービス革新と科学技術革新に期待される相乗効果である。

最後に、実践事例に基づいて創出されたサービス数学が将来にわたって継続的な発展を遂げるためには、社会への成果の還元と大学や地域で展開される教育プログラムの開発が必要不可欠であることを述べておく。

3. 実践事例—数式による日本酒醸造—

本研究は村瀬勇介氏（名城大学理工学部助教）との共同研究である。また、詳細については参考文献(3)に記載されている。

3.1. 研究の動機と目的

日本酒は並行複発酵と呼ばれる発酵方式によって醸造される酒類の1つである。並行複発酵は数ある発酵方式の中で最も複雑なもの1つであり、その複雑さから今日に至るまで詳細な情報が得られずにいる。そのため、日本酒醸造過程においては杜氏の「経験と勘」に依存している場面が未だに存在している。その一方で、杜氏の人数は減少の一途を辿っ

ており、技術の継承が困難になりつつある。さらに、シャンパン風の日本酒など女性が気軽に飲むことのできる日本酒を開発するなど日本酒醸造会社は様々な工夫をしてはいるが、従来の日本酒そのものの消費自体は減少傾向にある。

つまり、日本酒は技術の継承と消費の落ち込みという大きな課題を抱えているのが実情であり、このような課題に対応できるサービス数学を創成したいと考えている。従って、本研究の目的は主に以下の4つである：

- (1) 日本酒醸造過程の数理モデル化とサービス数学に基づく解析
- (2) 日本酒醸造における発酵過程の予測手法や制御法の開発
- (3) 次世代技術者としての杜氏の育成プログラムの開発
- (4) 全自動日本酒醸造法の開発に向けた基礎的研究

3.2. 日本酒醸造過程について

本小節では、参考文献(4)を参考にし、三段仕込みと呼ばれる日本酒醸造過程について簡単に説明する。

(1) 麴

蒸米に麴菌の孢子等を塗し、単一の麴菌を繁殖させることが主目的である。ここで、繁殖した麴菌はデンプン分解酵素であるアミラーゼを分泌し、蒸米に含まれるデンプンをブドウ糖に分解するという『糖化』を実施する。

(2) 酒母

(1)で作られた麴と水、蒸米を混ぜたものに酵母と乳酸を加えた酒母と呼ばれるものを作成する。この酒母が適切に作成されれば多量の酵母と適切な量の乳酸が含まれ、以降の日本酒醸造過程が円滑に進むことになる。

(3) 初添

(2)で作成した酒母に(1)で作成した麴・水・蒸米の一部を混合する。この混合材料は醪と呼ばれ、この段階から麴による『糖化』と酵母による『アルコール発酵』が同時に引き起こされる。つまり、初添の段階から並行複発酵が本格的に実施される。

(4) 仲添

(3)で作成した醪に再度残りの麴・水・蒸米の一部を加え、並行複発酵を継続する。

(5) 留添

(4)で作成した醪に残った麴・水・蒸米をすべて加え、並行複発酵を継続する。

3.3. 数理モデル化

我々の目的は、麴の作成から留添までの一連の日本酒醸造過程を数理モデル化することである。特に、サービス数学の観点から制御変数として温度、サービス効果としてアルコール度数（ボーメ度）に着目していることに注意する。将来的には、サービス指標として人間の感覚そのものである「美味しい」を選択し、「美味しい」と日本酒に含まれる様々な成分を関連付ける。そのためには、日本酒の仕込みデータには存在しない成分も変数として数理モデルの段階から考察する必要がある。現段階では、3種類の細菌【麴菌・酵母・その他の雑菌】と12種類の物質【乳酸・デンプン・タンパク質・脂肪・ブドウ糖・ペプチド・脂肪酸・グリセリン・アルコール・有機酸・高級アルコール・エステル】、さらに、制御変数となる温度を考察している。

実際に構成した数理モデルは非線形偏微分方程式系であり、その記述は参考文献(3)に委

ねることとする。現在，構築した数理モデルの解析を理論と数値（現象の可視化）の両面から進めるとともに，実測データとの比較・検討に入る予定である。

謝辞

ポーランド・ワルシャワ大学での近畿大学長期在外研究員としての1年間の留学と帰国後の参考文献(1)との遭遇が本研究を始める大きな動機となった。特に，参考文献(1)を提供して頂いた儀我美一氏（東京大学大学院数理科学研究科教授）には，今後の数学のあり方についても貴重なご意見を頂いた。この場をお借りして，改めて感謝の意を表したいと考える。

参考文献

- (1) サービス科学・工学の推進に関する検討会，サービスに新たな可能性を求めて－サービスイノベーションのための提言－，2009年1月
- (2) <http://www.ristex.jp/examin/service/index.html>
- (3) 村瀬勇介，伊藤昭夫，日本酒醸造過程を記述する数理モデルとその解析，to appear in 京都大学数理解析研究所講究録
- (4) 財団法人日本醸造協会，増補改訂最新酒造講本，2007年