

オペレーションズ・リサーチの確率モデルと 金融工学についての随想

大西 匡光

筆者が三つの国立大学を勤め終えた機会に、それらでオペレーションズ・リサーチの確率モデルと金融工学を主とした教育・研究で歩んできた道を振り返っての随想、そして筆者自身とこれらの分野での今後の方向性についてのわずかな雑感を述べたい。

キーワード：信頼性・保安全性、待ち行列、ゲーム理論、ファイナンス・金融工学、AI・データサイエンス

1. はじめに

2022年3月末に大阪大学大学院経済学研究科を定年退職し、同4月に大和大学に再就職しました。現在は政治経済学部在籍していますが、2023年4月より新設の情報学部に移籍します。

特集のタイトルにある「先導的」研究者とはほど遠く、特に最近では遙か先を走る若手研究者からの周回遅れになるまいと追いついていない状態で、野々部宏司編集委員長からお声がけいただいたときには面映ゆい気持ちで、お引き受けすることに躊躇しました。大阪大学を定年退職する際には、いわゆる最終講義のような機会をいくつかいただきながらも、異なる分野で教育・研究に関わっておられる方々向けに到底「面白いお話」はできないと丁重にお断りしてきました。しかしながら日本オペレーションズ・リサーチ学会は、私を育てていただき、最も大切にしていた学会であり、恩返しの意味も兼ねて、お引き受けすることに致しました。

私がオペレーションズ・リサーチ（以下、OR）を本格的に学習・研究し始めたのは、京都大学工学部数理工学科（現：情報学科）の4年に（故）三根久先生率いる研究室に配属された頃からです。その前年の3年のときに履修した4単位科目の「OR」の期末試験で、小さな線形計画問題に対して単体法を手計算で実行して最適解を求める、容易に予想された問題が出題され

たのですが、途中の何処かでピボット演算を間違ったせいで試験時間内に収束せず、恥ずかしながら、不可となってしまったことに由来します。当初は、仲の良い同期の者らで計算統計物理学の研究室を希望していましたが、単位を落としたことが悔しくて、雪辱・名誉挽回を期して、三根久先生率いるOR研究室を選択しました。新歓コンパで三根先生が、「『OR』を落としてわがOR研究室を選んだのは君が初めてだ」と仰ったことをハッキリと覚えています。確率モデル・不確実性下の意思決定に関連する警句として私が気に入っている中国古代の哲学書「淮南子（えなんじ）」からの故事『人間（じんかん）、万事塞翁（さいおう）が馬』の典型例といえるかも知れません。

私が、学生そして助手として在籍した当時のスタッフは、（故）三根久先生、（故）大野勝久先生、（故）河合一先生、福嶋雅夫先生、大西匡光（のちに、増山繁先生）でした。研究室の先輩には、博士後期課程1年生に木村俊一氏がおられました¹。非線形最適化を専門とされる福嶋先生以外は、信頼性・保安全性、待ち行列、Markov決定過程などの確率モデル（その頃は、応用確率と呼ばれていました）を主たる専門分野とされる方々でした。それらの分野の中で、私は「信頼性」という言葉の響きに惹かれて信頼性・保安全性を選択し、主として河合先生から研究指導を受けました。

ちなみに、同学科には三根研究室の兄弟研究室として、（故）長谷川利治先生率いる研究室があり、情報・通信システムの性能評価や効率化・最適化を主たる研究分野としていて、当時のスタッフは、（故）長谷川利治先生、茨木俊秀先生、宮原秀夫先生、高橋豊先生、室

おおにし まさみつ
大和大学政治経済学部
〒564-0082 大阪府吹田市片山町2-5-1
onishi.masamitsu@yamato-u.ac.jp
大阪大学数理データ科学教育研究センター招へい教授、大阪大学名誉教授
ohnishi@econ.osaka-u.ac.jp

¹ 本拙稿を通じて、名前を挙げた方に付した所属と敬称、用いる敬語は慣例やマナーに反しているかも知れませんが、何卒御容赦ください。

(現：西尾) 章治郎先生 (のちに、河野浩之先生、滝根哲哉先生) でした (後輩には、笠原正治氏、三好直人氏が居られました)。

その数年後に、三根先生が定年退官され、その1年後に、茨木俊秀先生が研究室を継承されました。発足当時のスタッフは、茨木俊秀先生、福岡雅夫先生、増山繁先生、大西匡光 (のちに、永持仁先生) となり、離散・組合せ最適化、非線形最適化などが主たる研究分野となりました。

確率モデルを専門とする者は私1人となったため、学生の研究テーマを決定する際には、自分の研究の本籍がある信頼性・保全性に限定せず、待ち行列、生産・在庫など、学生自らが希望する対象で自分の手の届く範囲なら何でも、という方針で、学生とともに学び、また研究指導をしました。そうした経験がこれまで、新たな研究分野に臆せず積極的に参入してきたことに繋がっているように思います。

また、わが国がバブルを迎える1980年代後半から1990年代初めにかけては、工学部の学生にも、金融・証券に関心をもつ者が少なからず現れ、ポートフォリオ最適化、デリバティブの価格付けなどを、学生とともに学習・研究したことが、自分の研究上の関心がファイナンス、金融工学に移行していき、現在の専門分野となっている大きな要因になっています。日本OR学会の中でも、数理最適化 (以前は専ら数理計画と呼んでいました)、あるいは確率モデルを主たる研究分野としていた少なからずのわが国の研究者が、数理・計量ファイナンス/金融工学に参入する流れが起きたのもその頃でした。ちなみに、最近では、「金融工学」は、「FinTech (フィンテック)」との区別のためか、「数理・計量ファイナンス」という呼称に (吸収され、取って) 代わられつつあるように思います。

2. 信頼性・保全性

40年以上も前のことで恐縮ですが、修士論文研究で取り組んだ問題で適用した方法論が、その後の研究に大きな影響を与えたので、少し詳しく説明します。

修士論文研究では、河合先生の御指導のもと、信頼性・保全性の中でも「劣化システムの最適保全政策」の研究を行いました。

保全問題・政策の分類としては：

1. システムの状態を稼働状態1と故障状態0のみに分類して、したがって、主として新品の状態からの経過時間である年齢に基づいて保全政策を立案する問題 (時間基準保全 (あるいは時間計画保

全, Time Based Maintenance: TBM)),

2. システムには、新品の状態0、故障状態 N 以外の中間的な劣化レベルの稼働状態が複数あり、それらを $1, \dots, N-1$ として状態の集合を $S := \{0, 1, \dots, N-1, N\}$ と定義し、システムのそれら劣化レベルの時間変化に基づいて、適切な保全活動を行う、劣化システムの保全政策を立案する問題 (ごく最近では、状態基準保全 (あるいは状態監視保全, Condition Based Maintenance: CBM) と呼ばれ、IoT (Internet of Things) 技術の利活用が期待されています) があります。

1の時間基準保全においては、任意時刻での意思決定は年齢と状態との組 (t, i) , $t \in [0, \infty)$; $i = 0, 1$ を決定過程の状態として、各状態において選択することのできる保全活動 (小修理, 取替え (=大修理), など) のうちいずれを選ぶのが問題となり、年齢 $t \in [0, \infty)$ で稼働状態にある $(t, 1)$ においては、システムの故障時間、あるいは寿命を非負値の確率変数 X で表すと、年齢 t のシステムの残余寿命を表す (条件付きの) 確率変数 $[X - t | X > t]$ の年齢 t についての振る舞い (確率的単調性) が最適保全政策の構造への重要な決定要因となります。すなわち何らかの非負値確率変数間の確率順序関係 \succcurlyeq を用いて、その残余寿命が \succcurlyeq の意味で確率的に短くなっていくこと：

$$[X - s | X > s] \succcurlyeq [X - t | X > t], \quad 0 \leq s \leq t < \infty$$

を適切に表現し、適切なコスト構造を仮定したうえで、『経年に連れて、適切な保全活動を行う必要がある』などの結論を導くことが、最適化モデル分析の筋書きとなります。私が研究を開始した頃には、広島大学の (故) 尾崎俊治先生、愛知工業大学の中川覃夫先生はすでにこの学界をまさに先導されていました。私も Semi-Markov 決定過程による定式化のアプローチで、若干の貢献をしています。

一方、2の状態基準保全においては、時間パラメータの集合 \mathcal{T} を離散時間 $\mathcal{T} = \{0, 1, \dots\}$ 、あるいは連続時間 $\mathcal{T} = [0, \infty)$ として、時刻 $t \in \mathcal{T}$ でのシステムの状態 X_t の時間変化を確率過程 $(X_t, t \in \mathcal{T})$ で表し、それが時間斉次な Markov 性をもつとすれば、離散時間、あるいは連続時間の時間斉次 Markov 連鎖 $(X_t, t \in \mathcal{T})$ の推移確率関数

$$p_{ij}(t) := \mathbb{P}(X_t = j | X_0 = i), \quad i, j \in S; t \in \mathcal{T}$$

の「確率的単調性」が最適保全政策の構造への重要な

決定要因となります。すなわち、 S -値確率変数の適切な確率順序関係 \preceq を用いて、時間間隔 t に関する影響（時間単調性）：

$$[X_s | X_0 = i] \preceq [X_t | X_0 = i], i \in S; s \leq t, s, t \in \mathcal{T}$$

（初期）状態 i に関する影響（空間単調性）：

$$[X_t | X_0 = i] \preceq [X_t | X_0 = j], i \leq j, i, j \in S; t \in \mathcal{T}$$

を適切に表現し、やはり適切なコスト構造を仮定したうえで、『経年に連れて、システムは徐々に劣化を進め、稼働コストも負担になっていき、ついには適切な保全活動を行うことが必要となる』などの結論を導くことが、最適化モデル分析の筋書きとなります。

修士論文研究では、リスク分散のため、2通りの「不完全状態観測」のもとでの上記2の劣化システムの最適保全問題に取り組みました。まず第1のモデルでは、「点検」というコストを要する能動的な活動によってしか現在の劣化状態が観測できない状況です。この場合、ある時点で点検によってシステムの状態を観測した際、その結果に基づいて、「取替え」を行うか否か、もし取替えないなら、つぎの点検の時刻を何時にスケジュールするか、を決定するという逐次決定過程（Semi-Markov 決定過程）として定式化するものです。つぎに第2のモデルでは、離散時間の設定で、時々刻々、システムの劣化状態に確率的に依存したシグナル $(Y_t, t \in \mathcal{T})$ を観測できるとした設定です。この場合、当時に新しい決定過程モデルとして登場した部分（不完全）観測 Markov 決定過程という、システムの状態空間 S 上の確率分布を決定過程の状態とする Bayes 流の動的計画のアプローチを取ることにしました。

いずれのモデル設定の場合でも、結局は、ある程度満足のできる結果を得ることができ、幸い、国際的査読ジャーナルに掲載されました。ちなみにこれらは、引用件数の点で、恥ずかしながら自分の代表作となっています。

これらの研究を通じて培った方法論は、

1. さまざまな確率順序（確率優位）関係に基づく確率比較
2. 離散時間、あるいは連続時間の Markov、および Semi-Markov 決定過程、さらには部分観測 Markov 決定過程

でした。後に、2のゲーム理論版に当たる

3. 離散時間、あるいは連続時間の Markov、および Semi-Markov ゲーム（一般的には確率ゲーム）も私の好みの方法論に加わりました。

京都大学に在籍した頃には、関西地区で開催された応用確率、決定理論などの研究会に積極的に参加しました。私自身も幹事や主査を務めたこともあります。大阪大学工学部の西田俊夫先生率いる研究室や大阪大学基礎工学部の坂口実先生率いる研究室の門下の多くの研究者の方々、などが集う研究会で得た研究情報、また人的交流は、私にとっての大きな資産になっています。特に、多様な逐次決定過程、動的計画、最適停止問題、数理的ゲーム等々に出会い、非常に新鮮でした。さらに、それらの研究会での人的交流を通じて、京都大学数理解析研究所において、九州大学、大阪大学、千葉大学、新潟大学などにゆかりをもつ研究者によって、毎年秋に開催されていた計画数学の研究集会にも参加・発表するようになり、より数学的に洗練された方法論を修得することができました。その定例の研究集会は、その後、発表希望者多数という理由から、（分類するならば）主として確定的な数理最適化を扱う夏の研究集会、そして主として確率・不確実性下の意思決定・最適化を扱う秋の研究集会の二つのコミュニティに分かれて開催されることになって現在に至っています。

また、信頼性・保全性に関連して、OR 学会以外の学会、シンポジウム、研究集会にも積極的に出席・発表をしました。それらの経験から、信頼性・保全性の分野は、OR が得意とするシステム工学的管理技術よりは、電気・電子系、機械系、建築・構造系、材料系等々、それぞれでの特性に強く依存する固有技術的側面が多いと感じるようになりました。

信頼性・保全性の確率モデルでは、通常、システムの信頼性・保全性に関する確率的特性が既知とされますが、その実際への適用のためには、故障時間・寿命データの統計分析も学術上・實際上重要な領域です。それまで（そして、おそらく今でもなお）これらの領域が別個に扱われていることに不満をもち、保全活動を行いながらリアルタイムで入手した各種信頼性・保全性データをその後の保全活動の効率化に活用する、いわば「適応型の最適保全問題」に関する研究にも着手しましたが、確率論・数理統計学に関して全くの学識・能力不足で、ほとんど歯が立たずで、自明な結果しか得られず、悔しい思いをしました（が、未だ執着しています）。

3. 待ち行列

1980年代に入る頃には、確率モデル、とりわけ待ち行列理論において、活用される方法論にいくつかの

イノベーションがありました。それまでの研究の多くは、待ち時間や待ち行列長などの特性量の確率分布の Laplace 変換や積率母関数を導出することを目標としていましたが、それらから必要な次数のモーメントや逆変換（数値的に）導出したり、評価したりすることが、必ずしも容易ではなく、また数値計算上も不安定であったりしました。そのような状況で登場したり、研究上関心をもち始められたりしたのが以下の三つのアプローチです：

1. 到着時間間隔やサービス時間を表す非負の確率変数の確率分布を、「連続時間の吸収 Markov 連鎖の吸収時刻の従う確率分布」として分類される「相型分布」で近似し、そのことによって待ち行列システムの「状態」を連続時間の（大規模）Markov 連鎖で表現し、その定常分布を数値的に求めることを通じて、興味ある特性量を求めようとするアプローチ。
2. 時間軸上にランダムに散らばる、さまざまな事象の発生時刻列の構成する「(定常)点過程」を分析することで、(待ち行列では最も有名な) Little の公式に代表される、興味ある特性量の間になり立つ関係式を導き出すアプローチ。
3. 解析が困難な確率システムを構成する確率要素(到着時間間隔、サービス時間など)の確率分布のうちのいずれか、あるいはすべてを、適切な確率順序関係を用いて、ほかの解析が容易な確率分布に置き換えて、対象システムに関する興味ある特性量の確率分布を、やはり適切な確率順序関係を用いて他方の確率分布と「確率比較」するアプローチで、これによって興味ある特性量の期待値などの上下限を求めたりできることがあります。

私は、博士後期課程 1 年を終えた後、河合先生が京都大学から転出されるのに伴い、京都大学工学部助手として採用されました。その頃から、大野先生が主催される少人数の勉強会で、定常点過程、待ち行列ネットワークなど、待ち行列で用いられる各種の方法論について学びました。その勉強会は、大野先生が京都大学から転出された後も（当時、長谷川研究室の博士後期課程の学生で待ち行列の研究に従事していた三好直人氏を加えて）毎週土曜日に継続していました。私自身は、確率モデルの教育・研究指導を背負わなければならない思いもあり、学生の卒業論文研究や修士論文研究では、自分の専門分野の真中にあった信頼性・安全性に限定せず、学生が希望した場合には待ち行列も、自分の手が届く範囲であれば、積極的に研究指導しま

した（中出康一氏はその中の 1 人です）。ただし、自分にとって、研究上で競争優位のある方法論である確率動的計画（Markov 決定過程、確率制御など）を適用できる、待ち行列の制御（やスケジューリングの）問題をテーマとすることが多かったかも知れません。1. サービス要求量の特性や待ちに対するコスト特性の異なる複数の客がある場合のスケジューリング（サービス順序の動的決定）、2. 個々の客がサービスの完了に対して独自のデッドラインをもつ場合のスケジューリング、3. サービス・スピードの異なる複数のサーバがある場合の客の動的割当て等々、興味深い（が、難しい）問題に特に関心がありました [1]。私が待ち行列の制御問題に取り組んだのは、京都大学工学部で助手を務めていたころに集中しています。振り返れば、まさに浅学非才で、あまり大きな貢献はできなかったし、学生に適切な研究指導ができなかったのでは、と今なお申し訳なく想っています。

さて、国内では、待ち行列を主たる対象とするシンポジウム、研究集会として、京都大学の（故）長谷川利治先生、高橋豊先生、そして東京工業大学の森村英典先生とその門下の方々の御努力により、京都大学数理解析研究所での研究集会、次いで科学研究費補助金を財源とするシンポジウムが、その頃から開催されるようになりました。それらを経て、関係各位の継続的な御努力のおかげで、現在の「待ち行列シンポジウム」へと引き継がれてきています。

わが国において、ようやく、さまざまな大学・部局、そして NTT, NEC, IBM に代表される民間企業に在籍して、待ち行列に関わる専門分野で研究・応用する者たちが一堂に会し、たとえば、待ち行列理論と通信トラフィック理論での専門用語の対応の確認などの基本的な意思疎通から最新の研究情報の交換まで、そして何よりも関連分野の人的・研究交流がここから始まったと言って過言ではないと思います。

私自身も、(Rochester 大学 ⇒) 筑波大学の住田潮先生、東京理科大学の宮沢政清先生、東京都立科学技術大学の（故）山崎源治先生、等々、待ち行列、応用確率などの分野で国際的に活躍された（ている）研究者の講演・発表を聴講したり、直に交流できたりして、教育・研究活動上の大きな刺激を受けました。

4. ゲーム理論

京都大学工学部在籍時代には、当時、同じ吉田キャンパスにある経済研究所に居られた今井晴雄先生、岡田章先生のお二人が主催するゲーム理論の研究會から

お誘いを受けて、参加させていただいていました。ORの標準的な教科書にもゲーム理論には1章は割かれていましたし、鈴木光男先生、そして(故)坂口実先生、西田俊夫先生の著されたゲーム理論の入門的テキストなどは読了して、ある程度の理解はありましたが、すでにゲーム理論の分野のリーダー的存在だった方々から直接に学んだことは多かったです。また、1992年に、私が東北大学経済学部に移籍したのちは、同僚で先輩の武藤滋夫先生の学部ゼミ/大学院研究室に参加して、学生たちとともに学びました。また、経済学部棟の隣に文学部棟があり、文学部で数理・計量社会学/行動科学を教育・研究されていた佐藤嘉倫先生らの研究グループに参加して、ゲーム理論の本格的専門書やゲーム理論の政治学への応用を扱った専門書を輪読したことも貴重でした。ゲーム理論には数理的側面のみならず、社会(科学)の分析ツールとしての側面も奥深いことを徐々に感じるようになりました。さらには、武藤先生を通じて、国内のゲーム理論、社会選択理論などの研究分野のコミュニティに潜り込んで得た人的繋がりは貴重でした。吉田兼好の「徒然草」第52段「仁和寺にある法師」の一節『少しのことも、先達はあらまほしき事なり。』を実感することばかりでした。

5. ファイナンス・金融工学

1980年代の中盤にわが国がバブルを迎える頃には、工学部の学生の中にも、卒業論文に金融、証券などに関わる研究テーマを希望する者が現れてきて、それが私のファイナンス・金融工学の分野に参入するきっかけになりました。ポートフォリオ最適化、金融デリバティブの価格付けなどがORとの親和性の高い、当時の代表的な研究テーマです。ポートフォリオ最適化では平均・分散アプローチの提唱者であるMarkowitz, H. M.が元々はOR研究者であることは周知のことと思いますが、1970年代の終わりに、金融デリバティブの価格付けの基本理論であるマルチンゲール(無裁定)価格付け理論の基礎を構築したHarrison, J. M., Kreps, D. M., Pliska, S. R.の3名も、ともにStanford大学において、確率動的計画や確率制御の理論と応用を主たる研究分野としたOR研究者、あるいはORに親しい研究者です。ちなみに、Harrison, J. M.は、1970年代前半には、非有界なコスト・報酬構造をもつMarkov決定過程、待ち行列の制御・スケジューリング、優先権付き待ち行列などを研究テーマとした優れた研究成果を上げていて、その後も待ち行列の拡散近似・流体

近似の分野で著しい研究成果を上げています。

さて、京都大学工学部に在籍していた頃から、ファイナンス・金融工学の研究を開始していましたが、東北大学、そして大阪大学では経済学部在籍して、図らずも(あるいは、図って)、いわゆる「文転」を経験しました。その頃のORでの応用確率/確率モデルの2大分野である、待ち行列、信頼性・保全性については、残念ながら、経済学部の学生たちは全くといってよいほど関心・興味をもってくれないことに気が付き始めて、ファイナンス・金融工学の分野へと研究の対象を移行させていきました。京都大学工学部時代からの知人やOR学会の仲間からは『「向こう」に行った』と言われていたようです。一方、ファイナンス/金融経済学のコミュニティの方々からは『「向こう」から来た』と思われていたでしょうし、当初は、いわば、「コウモリ」のような存在だったのかも知れません。私自身は、ファイナンスにおける統計学があるように、ファイナンスにおけるORがあり、まだまだORの研究対象となり得るテーマが山積みであると考えています。ただし、新しい研究分野に参入するときには、いつもこうした参入障壁を乗り越えなければなりませんし、新分野のコミュニティに受け入れられるまでには少なからずの時間を要します。

大阪大学経済学部に移籍してからは、専ら、ファイナンス・金融工学の教育・研究に取り組みました[2]。定評のある成書はほぼすべて、学部ゼミ、大学院研究室でのテキストとして輪読しました。さらに、同僚で大先輩の田畑吉雄先生が主催し、近隣の大学の研究者が毎週火曜日にはほぼ欠かさず大阪大学豊中キャンパスに集って開かれる「田畑研究会」では、一人では到底読破する気が起こらないほど難解・大部の数理・計量ファイナンス/金融工学のテキストを選んで、参加者の皆で徹底的に輪読し、意見交換しました。この研究会は、田畑先生が定年退職された後も弛まず、私が着任して以降のみを勘定しても、私が定年退職するまでの26年間継続しました。この永年にわたる地道な勉強会で得た理論・知識・スキルが私のファイナンス・金融工学研究の基盤となっています。ちなみに、大阪大学経済学部在籍時代には、応用確率を専門とされる少し先輩の三道弘明先生と10年ほど同僚として御一緒しました。三道先生も研究上の本籍が信頼性・保全性なのですが、生産・在庫、マーケティング、流通、小売業などの分野で広く教育・研究されていて、研究テーマの選定、モデリングのアイデアなどで参考になることが多々ありました。

ところで、私が自分の研究分野を紹介する際には、『研究の本籍は、ORの各種確率モデルや不確実性下の意思決定にあるが、最近では、専ら、ファイナンス・金融での経済学的あるいは工学的な諸問題に関する研究で仕事しています』ということにしている、実は工学的とは分類されないような経済学的なテーマにも、応用確率での仲間木島正明先生との共同研究などで取り組んできました。1. Markowitz, H. M. の平均・分散アプローチでは、リスク尺度（測度）として分散、あるいはその平方根である標準偏差が選ばれていますが、このようなアプローチに採用できるリスク尺度についての公理的検討、そしてそのときの（Arrow-Pratt の）リスク回避度に関する比較静学、2. 市場の投資家の不確実性への信念がある確率順序（経済学・ファイナンスでは、確率優位と呼びます）で変化したり、市場の投資家のリスク回避度が変化したりしたときに証券市場での（競争）均衡価格に与える影響についての比較静学等々です。

一方、ORの確率モデルの確率動的最適化で培った方法論に研究上の競争優位があると考え、金融デリバティブの価格付け、価格インパクトを考慮した証券市場における取引執行等々への応用もあれこれと行いました。

多くの金融デリバティブでは、その契約・証券の買い手に原資産の売買についての権利（オプション）を付与することが多いのですが、行使のタイミングが満期において許されるヨーロッパ型と満期までの任意時点で許されるアメリカ型、そして予め規定された複数の時点で行使が許されるバーミューダ型などに分類されます。アメリカ型、あるいはバーミューダ型では、デリバティブの価格評価の問題には、デリバティブの買い手にとって最適な権利行使のタイミングを求める問題〔最適行使問題〕が内包されていて、それらは（多くは、リスク中立確率測度のもとで）最適停止問題として定式化され、多くはMarkov決定過程で定式化され、確率動的計画のアプローチが適用できるようになります。われわれは、さらに複数回の行使が許されるような金利デリバティブの最適行使問題などに取り組みました。また、（市場金利と固定）金利のスワップに入るタイミングを選ぶことのできるデリバティブ（金利スワップション）において、固定金利支払い側のみならず、市場金利支払い側もそのタイミングを選ぶことのできるゲーム型の金利スワップションを提案し、Markovゲーム（確率ゲーム）として定式化し、数値的解法手順を与えました [3]。金利スワップションに限ら

ず、デリバティブの売り手・買い手の両側に何らかの権利行使を許すと、両者にとってのいわゆるオプション価値が減じて、ほぼコストなしに両者同士のリスク・マネジメントに資する契約が設計できて、今後、実際上有用で、学術上有望なテーマとなるのではと期待しています。

さて、数理・計量ファイナンス／金融工学での研究のトレンドは、リーマン・ショックの影響もあって、金融デリバティブの価格付け・ヘッジングから、トレーディング、とりわけ、マーケット・インパクト・モデルとそのもとでの売買取引の執行に関わるトレーディングへと移行していきました。

金融市場には、年金ファンドのように巨額の投資資金を運用し、その売買取引が当該資産の市場価格にインパクトを与えるようなラージ・トレーダーが存在します。ごく最近、われわれは、一般化された市場価格インパクト・モデルをいくつか提案し、そのもとで、1人のラージ・トレーダーによってなされる取引執行の最適化問題をMarkov決定過程として定式化し、その最適執行戦略を導出して特徴付けたり、2人のラージ・トレーダーによって為される戦略的な取引執行の問題をMarkovゲーム（確率ゲーム）として定式化し、そのMarkov完全均衡を導出して特徴付けたりしました [4]。取引執行問題の研究は、数理・計量ファイナンスの分野の多くの研究者・実務家が研究にしのぎを削る競争的分野で、われわれも懸命に一般化を図ったり、新しい定式化のアプローチに取り組んだりしています。今後の残された課題として、少数の「合理的」ラージ・トレーダーとそれらに追従する多数の「限定合理的」スモール・トレーダーが存在する場合に、新たな均衡概念を定義したうえでの均衡取引戦略の分析、などに挑戦したいと考えています。

6. 業績連動ストック・オプションの価値評価

元々はあまり興味がなかった研究テーマながら、最近意地になつて取り組んでいるのが、業績連動ストック・オプションのための確率モデルです。

近年、成長企業を中心にリストラクティブ・ストック（譲渡制限付き株式）とともに、ストック・オプションへの関心は高まりつつありますが、売上げや利益などの業績に、権利行使の条件を付したり、付与する株数を連動させたりするストック・オプションも国内外で多数発行されています。しかしながら、それら業績連動ストック・オプションの価値を評価する標準的な方法はなく、各企業が独自の判断で価値評価していて、

到底公正とは言えない状況にあることを最近になって知り、驚きました。そこで、ささやかな社会的正義感から、連続時間の設定で、連続的変動する株価と離散的な時刻で業績が報告される同時（結合）モデルを提案し、業績連動を外した特別な場合には通常のオプションの価格評価のための Black-Scholes 価格形式に帰着され、それに業績連動部分を組み込む形での、業績連動ストック・オプションのための新たな価値評価モデルの構築を試みています。

7. 文理融合教育・研究

年齢を経るに連れて所属する部局や大学本部の運営・管理に関わる仕事もあれこれと務めました。大阪大学では、いわゆる理工系と人文社会系の部局に在籍した「コウモリ」の経験を買われてか、

1. 経済学研究科経営学系専攻と工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻との連携による、経営と技術の両方に精通した人材育成を目指す文理融合型の技術経営 (MOT) 教育の設計・施行・運営、
 2. 基礎工学研究科、経済学研究科、情報科学研究科、理学研究科の4研究科による部局横断的な連携のもとでの金融・保険分野での高度専門職業人育成のための学際的・文理融合的教育・研究の設計・施行・運営 [金融・保険教育研究センター ⇒ 現在の数理・データ科学教育研究センター]、
- などです。

現在所属する大和大学において 2023 年度に開設する新学部の「情報学部」でも、文部科学省が、近年、全国的に推し進めている文理融合の AI・データサイエンス教育に携わることになります。

詳しく理由は述べませんが、文系と理系の溝は、今なお決して狭くも浅くもなく、「文理融合」は古代中国漢時代の経済政策書「塩鉄論」の利議（りぎ）篇にある『言うは易く行は難し』の典型例ではと思っています。

ますが、自分のこれまでの経験を活かして是非とも成功例にしたいと少し意気込んでいます。

8. おわりに

まだもう少しの間、大学人として、教育・研究に携わることができるので、少しでも前進したいと考えています。当然、あまり大それたことはできませんが、短期的には、1. 業績変動ストック・オプションの価値評価のための標準となり得る確率モデルの構築、2. 短・中期的には、ラージ・トレーダーに加えて群衆行動を取る多数の限定合理的なスモール・トレーダーの存在を組み入れたマーケット・インパクト・モデルのもとでの最適・均衡取引執行戦略の特徴付け、をやっつけたいと思っています。

中・長期的に挑戦してみたいのは、若い頃には全く歯が立たなかった、確率動的最適化モデルにおいて、確率法則の統計的推測を伴うような、いわば適応型の確率動的最適化です。たとえば、消費者の商品・サービスの選択行動（の離散選択）モデルの統計的推測を組み入れたダイナミック・プライシングなどは多くの産業での応用が期待できると考えています。

謝辞 オペレーションズ・リサーチに関わるすべての方々に感謝致します。

参考文献

- [1] 大西匡光, “待ち行列の制御問題 2 題—負荷分散と経路選択の最適化をめざして—,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **36**, pp. 179–184, 1991.
- [2] 大西匡光, 森田浩, 滝根哲也, 乾口雅弘, “大阪大学における OR 教育の系譜と現在,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **64**, pp. 40–42, 2019.
- [3] 落合夏海, 大西匡光, “一般化 Ho-Lee モデルに基づくゲーム・スワップションの価格評価について,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **61**, pp. 756–757, 2016.
- [4] 大西匡光, 下清水慎, “金融市場における価格インパクトを考慮した取引執行ゲーム,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **65**, pp. 271–278, 2020.