

OR研究に40年以上携わって —研究の変遷と将来への期待—

水野 眞治

本稿では、大学・研究所などで40年以上にわたってOR研究に携わってきた著者の経験をもとに、研究テーマの変遷、共同研究者との出会い、強く印象に残っている主な研究、学生との共同研究、研究に付随する活動を述べ、最後にOR若手研究者の将来への期待について簡単にまとめる。

キーワード：数理計画法、連続最適化、線形計画問題、内点法、単体法

1. はじめに

この特集の記事の執筆を編集理事の野々部先生から依頼されたのは、2022年の6月ごろであった。その依頼内容は、定年などある区切りに達した先輩方に、誌上最終講義として

- 研究分野の過去～現在の様子
- 当時のご自身の問題意識
- 研究内容の変遷

などをご執筆いただく企画に協力いただきたいということであった。ちょうど3月に退職したばかりであったので、二つ返事で執筆を了承してしまったが、実際に執筆を始めてみると、何をどのようにまとめてよいか、かなり迷ってしまった。いろいろと悩んだ末、3月の統計数理研究所の研究集会「最適化：モデリングとアルゴリズム」において「40年間にわたる最適化研究」というタイトルで最終講義のようなものを発表したの、そのときの内容に準じて、上の企画内容も考慮に入れてまとめることにした。

次節以降では、私自身の研究テーマの変遷、影響を受けた共同研究者との出会い、強く印象に残っている主な研究、学生との共同研究、研究に付随する活動を述べ、最後にOR若手研究者の将来への期待について簡単にまとめる。

2. 研究テーマの変遷

ORに興味をもったきっかけは、東京工業大学の学生のときに、所属していた経営工学科に「オペレーションズ・リサーチ」という講義があり、それを履修したことである。その講義は真壁肇先生が担当されていたが、その演習を助手の鈴木久敏先生が担当されていた。

この演習が当時の学生の間で伝説となっているもので、毎週のように出題される演習課題がありきたりの問題ではなく、数時間かけてもなかなか解けないような問題ばかりであった。しかも、そのレポートを鈴木先生のところ実際に持参しなければならず、いい加減なレポートはその場ですぐに突っ返されるというものであった。当時は大変であったが、振り返ってみると、懐かしく感じることもあり、ORに興味をもつきっかけとなった。

それ以来、オペレーションズ・リサーチに関する研究に携わって40年以上になる。研究テーマは、その時々世の中の研究の潮流と自分自身の所属あるいは環境に大きく依存するところがある。私の場合、研究生活において、いくつかの研究機関に所属した。そこで、これまでの自身の略歴に応じて、次の順でまとめる。

- 東京工業大学の学生のとき
- 千葉工業大学の助手のとき
- 東京工業大学の助手のとき
- 統計数理研究所の教員のとき
- 東京工業大学の教員のとき

まず初めに、東工大の学生のときであるが、学部学生として卒業研究のテーマを決めるときには、所属している研究室に大きく影響される。学部4年のときは、オペレーションズ・リサーチの講義をされた真壁研究室に所属していた。助手の鈴木先生の指導を受け、並列システムの信頼性に興味をもち、信頼性が最大となるような並列部品の冗長度を求める問題を整数計画問題としてモデル化し、それを解くアルゴリズムの研究を行った。学部時代は、このように組合せ最適化問題を扱ったが、大学院ではシステム科学専攻の小島研に進み、連続最適化に関する研究を行った。当時、連続最適化あるいは方程式系の解の計算に関連して、ホモトピー法が全盛であり、小島先生はその研究の第一人者

であった。当然のように、私もその影響を受け、修士課程では方程式系のすべての解を計算するホモトピー法、博士課程では実係数の方程式系のすべての解を計算するホモトピー法の研究を行った。

千葉工業大学には、1984年から2年間工業経営学科に所属したが、当時CADシステムの開発に携わったことから、曲線と曲面の交点あるいは曲面と曲面の交線の計算に関する研究を行った。その研究では、分枝限定法を応用することにより、効率よく計算できることがわかり、その研究成果をもとに論文 [1]などを発表した。

1986年に東京工業大学に移り、経営工学科の森雅夫先生の研究室で助手として研究を行った。1984年にKarmarkarが線形計画問題を解くための射影変換法を発表してから、内点法の研究が活発に行われていた。小島先生と当時森研の学生であった吉瀬さんと一緒に、われわれも内点法の研究に取り組んだ。射影変換法は、確かに多項式オーダーであることが示されていたが、アルゴリズムとして複雑であり、理解が大変なので、もっと単純なアルゴリズムができないかと考えていた。そのときに、主問題と双対問題を組み合わせる内点法の開発に取り組んだ。アルゴリズムとしては、比較的たやすく手順が考えられたが、そのアルゴリズムにより多項式時間で問題を解くことができることを証明するのに苦労した記憶がある。その結果は、統計数理研究所の研究集会で発表され、論文として文献 [2]にまとめられた。この研究成果は、その後多くの研究者の注目を浴びることとなり、主双対内点法として広く知れ渡るようになった。この論文の発表後には、主双対内点法のさらなる発展に関した研究を小島先生、吉瀬さん、野間君、森研学生らと実施し、東工大在任中に多くの研究成果をあげることができた。

1990年に統計数理研究所に移った後も、主双対内点法の研究を続けたが、このときには、たびたび出張する機会を得ることができ、海外の研究者を含め多くの研究者と共同研究を行った。特に長期の海外出張として、文部省の在学研究員としてコーネル大学でTodd氏と10カ月の共同研究を行い、フンボルト財団の研究員としてドイツのヴェルツブルク大学でStoer氏と1年間の共同研究を実施した。

1999年に東京工業大学の経営工学専攻に再び移り、定年まで在職した。この間、多くの優秀な学生にも恵まれ、共同研究を実施できた。このことについては、5節で詳しく述べる。また、経営工学専攻に所属していたことから、多くの企業との共同研究も実施した。

企業との主な共同研究として、たとえば、次のようなものがあった。

- GPIF (年金積立金管理運用独立行政法人) との基本ポートフォリオに関する研究
- 全労済との保険とリスクに関する研究
- 飛鳥コンテナ埠頭 (株) とのコンテナ最適配置に関する研究
- アスプローバ (株) との最適生産スケジュールに関する研究

企業との共同研究による研究成果は、そのほとんどが学生の卒業論文あるいは修士論文としてまとめられている。

3. 影響を受けた共同研究者との出会い

研究は一人でもできるが、私の経験では、より多くの研究者と共同で行うことにより、研究の幅が広がり、効率もぐんと上がる。多くの研究者と出会い、共同研究を実施することで、研究者としても成長できたのではないか。研究生活では、多くの研究者の影響を受けているが、その中でも特に影響の大きかった6人の研究者 (Kojima, Megiddo, Todd, Ye, Stoer, Jarre, 敬称略) との出会いについて以下では述べる。そこには、さまざまな偶然もあり、その偶然から生まれた機会を自身の研究生活に生かすことができたのではないかと考えており、若い研究者たちに、何らかの参考になれば幸いである。

私の研究生活において最も影響を受けたのは、大学院時代の指導教員である小島政和先生である。小島先生との出会いは、全くの偶然であり、この偶然なくしては、おそらく研究者にはなっていなかったと思うので、少し長くなるがその経緯を説明する。学部4年次において大学院を受験するとき、希望する指導教員の名を願書に書く。当時、東工大では、二つの専攻に希望を出すことができ、私は経営工学専攻の真壁先生とシステム科学専攻の市川悼信先生を指導教員として希望した。大学院受験の面接のときにはほかの教員でもよいかと聞かれたが、そこはハイと返答しておいた。大学院試験には無事合格できたが、指導教員はシステム科学専攻の森村英典先生であった。面接の際には、大学院で数理計画関係の研究をしたいと話したので、なぜ待ち行列などが専門である森村研に配属されたのか謎であった。その謎は、4月になり、大学院に入学してすぐに解決した。森村先生に呼ばれ、実は、小島先生がシステム科学専攻の新しい助教授となられたが、数理計画が専門なので、研究室を変更してはどうかと

聞かれた。もちろん、ハイよろしくお願ひしますと即答し、小島研への所属が決定したのである。それ以降、小島先生に公私にわたりご指導いただひており、私の研究生活の原点となった。

当時、小島先生は、毎年のように夏になると IBM Almaden Research Center の Nimrod Megidido 氏を訪問し、共同研究を行っていた。私も教員になったある年のこと、小島先生から、Megidido 氏からお誘ひが来ているので、IBM で研究してみないかといわれた。こんな機会はまたとないと思ひ、すぐに OK の返事をした。小島先生と一緒に IBM を訪問し、夏のカリフォルニアで共同研究を実施することができた。このときに研究成果をあげることができ、その後も何回か Megidido 氏に誘われ、IBM で共同研究を実施するようになった。

Michael Todd 氏とは、1988 年に東京で開催された第 13 回の ISMP (International Symposium on Mathematical Programming) 国際会議で初めて会った。Todd 氏は若くして Mathematical Programming 誌の編集長を務められており、論文の投稿などを通じてその名前はよく知っていたが、そのときまで面識がなかった。ISMP の組織委員会の委員を務めていたこともあり、Todd 氏と会話する機会をもつこともできた。編集長としてしか知らないときは、Todd 氏は雲の上の人のような存在であったが、実際に会って話してみることで、同じ研究者なんだというように意識が変わった。そこで知り合うことができたおかげであると思われるが、その後、Todd 氏から、コーネル大学で 1 カ月間の Visitor を探しているが、興味はありますかといったメールが届いた。びっくりしたが、二つ返事でいきたい旨を伝えると、話がトントン拍子に進み、実際に訪問する運びとなった。その後は、文部省の在外研究でも Todd 氏を訪問するなどして、多くの共同研究を行うことができた。日本で国際会議が開催されたこと、そしてその委員を務めたことがきっかけで、Todd 氏と共同研究を行うまで発展することができたことは、とても幸運であった。

Yinyu Ye 氏は、同じ内点法の研究者として、名前を知っていた。彼と初めて会ったのは、Megidido 氏を訪問してカリフォルニアにいるとき、スタンフォード大学の学生であった Ye 氏が、滞在しているホテルに来たときである。1 時間ほど研究について会話をしたが、このときには、それ以上の発展はなく共同研究はしていない。その次に会ったのは、私が在外研究員としてコーネル大学に 10 カ月滞在していたときである。Ye

氏もコーネル大学を短期で訪問することがあった。このときに、Todd 氏、Ye 氏と 3 人で共同研究を始めることとなった。Ye 氏の滞在中に新しい研究成果をあげるところまではいかなかったが、この 3 人の共同研究は、メールなどを通して継続して行くようになり、実際にいくつかの研究成果を論文として発表することができた。

Josef Stoer 氏と知り合うきっかけとなったのは、大学院時代に小島研の助手をされていた山本芳嗣先生のおかげである。山本先生は、フンボルト財団の研究員としてドイツで共同研究されたことがあり、そのときの経験をお話くださったことがある。山本先生から、その素晴らしさを聞くにつれ、私もぜひフンボルト財団の研究員に応募したくなったものである。当時、ドイツで内点法関係の研究をしている先生としてヴュルツブルク大学の Stoer 氏がいたので、早速連絡をとったところ、研究員として応募することを勧めていただいた。幸いにも応募が採択され、ヴュルツブルク大学で 1 年間 Stoer 氏と共同研究を実施することになった。当時、Stoer 氏のところに Florian Jarre 氏が助手としていた。彼も内点法の研究者として頭角を現していたところであり、年齢的にも私と近いことから、ヴュルツブルク大学では、どちらかというとも Stoer 氏よりも Jarre 氏と共同研究することが多かったように記憶している。

4. 強く印象に残っている主な研究

40 年の研究生活において、最も印象に残っている研究成果は、線形計画問題を解くための主双対内点法を開発し、その計算量が多項式オーダーとなることを示したことである。小島先生、吉瀬さんとの共同研究であり、統計数理研究所の研究集会で初めて発表し、Megidido 氏が編集する論文集 Progress in Mathematical Programming に論文 [2] として掲載された。その論文は、多くの研究者の興味を引くこととなり、被引用数は 800 以上になる。1984 年に Karmarkar による新解法の発表があり、多くの最適化研究者がそれに関連する研究をする中で、主双対内点法を開発できたことは、時流にのることができ、とても幸運なことであった。

主双対内点法の開発の後、それに関する多くの研究、たとえば、必要とする計算量のオーダーの改善、より一般の問題への拡張などを行った。その中でも印象に残っているのは、インフィージブル内点法に関する研究成果である。当初発表した主双対内点法は、初期解

が実行可能であることが理論的に必要であった。ところが、主双対内点法は、初期解が実行不能であっても、多くの場合に問題を解くことができるということが、実験結果から観測されていた。そこで、初期解が実行可能でない場合でも、問題を解くことができることを理論的に証明できるのではないかという問題意識をもって、それを解決し、インフィージブル内点法の大域的な収束性を証明したのが、Kojima, Megiddo との共著 [3] である。その後、計算量が多項式オーダーで抑えられることを示すこともでき、論文 [4] に発表した。

主双対内点法の大域的な多項式オーダーの計算量に関する研究が一段落するころ、次に研究されだしたのは、その局所的な収束に関するものであった。大域的に多項式オーダーの計算量で収束し、かつ局所的に超一次収束する主双対内点法として開発したのが、プレディクタ・コレクタ法である。学生時代に方程式系を解くホモトピー法として、プレディクタ・コレクタ法を研究していたことが、とても役に立ったことになる。その結果を Todd, Ye との共著 [5] に発表した。この内点法は、発表後に Mizuno-Todd-Ye のプレディクタ・コレクタ法と呼ばれるようになった。開発したアルゴリズムが自分の名前付きで呼ばれることは、大変光栄に感じている。

内点法の局所的な収束性に関しては、より高次の収束に関する研究も行われた。その中で、Stoer 氏らとの共同研究で、ハイオーダー内点法を開発し、論文 [6] に発表した。また、内点法の探索方向の計算では、線形方程式を解く必要があるが、その計算を正確に行うと計算量が多くかかるため、近似計算を採用することがある。そのような近似計算を採用する場合にも内点法が収束することを Jarre との共著 [7] で発表した。実用的なアルゴリズムの理論的な性質を明らかにするという意味で内点法の研究に貢献できたのではと思っている。

内点法以外の研究では、線形計画問題を解くための単体法の計算量に関する新しい評価を北原君との共同研究で得ることができた。単体法は、ほとんどのピボット規則に対して、指数オーダーの反復回数を必要とする例題が知られており、多項式オーダーの解法である単体法を開発することはとても難しいと考えられている。論文 [8] では、Dantzig のピボット規則を採用した単体法の計算量の新しい上界を得ることに成功した。その上界は、線形計画問題の基底解の正の要素の最大値と最小値の比を使って表すことができる。一般には、

この比がとても大きくなりうるが、ネットワーク最適化問題などの特殊な問題では、その比が小さくなるために、反復回数を小さく抑えることが可能となる。

5. 学生との共同研究

研究者であると同時に大学教員であるときには、学生あるいは卒業生が主体となる研究も数多く実施することができた。自分自身が主体となる研究では、線形計画問題を解くための内点法あるいは単体法に関する研究が主であったが、学生にはなるべく自分で研究テーマを見つけるような指導を心がけた。その結果、次のように OR に関するさまざまな研究を実施し、論文として発表することができた。

- 2 次錘計画問題によるロバスト・トラッキングエラー最小化：稲葉, 水野, 中田 [9]
- ミニマックス判別問題：北原, 水野, 中田 [10]
- CVaR を用いた保険料決定の最適化モデル：柴崎, 南條, 高野, 水野 [11]
- 線形計画問題に対する LP-Newton 法：北原, 水野, Shi [12]
- スポーツスケジュールにおけるトーナメントの研究：Zeng, 水野 [13]
- 単体法を使った Tardos のアルゴリズム：水野, 鮎川, Deza [14]
- 平均 C-VAR ポートフォリオ最適化：高野, 南條, 鮎川, 水野 [15]
- 多段階多機械スケジューリング：Deeratanasrikul, 水野 [16]
- カバーリング問題の近似アルゴリズム：高澤, 水野, 北原 [17]
- 多目的最適化問題の効率解集合上の最適化問題：Lu, 水野, Shi [18]
- スケジューリング問題の近似アルゴリズム：橋本, 水野 [19]
- デュアルチャンネルサプライチェーンにおける動的な価格決定と在庫管理：Li, 水野 [20]

これらの研究成果には、博士課程の学生による研究のみではなく、学部あるいは修士の学生による研究も含まれている。

6. 研究に付随する活動

研究者として最も重要なことは、目的をもってあるテーマに関して研究を実施して、独創的な新しい研究成果をあげ、それを国際会議などで発表あるいは論文としてまとめて発表することであることは間違いない。

しかし、それだけでは十分ではなく、研究に付随する活動も大切であり、たとえば次のようなものがある。

- 学会活動、OR の普及活動
- 論文誌などの編集補助、投稿論文のレビュー
- (国際) 会議の開催補助
- 研究資金の獲得

私自身の経験についていえば、学会活動については、OR 学会の各種委員あるいは編集理事を務めさせていただいた。論文誌の編集補助については、Mathematics of Operations Research, Journal of the Operations Research Society of Japan (JORSJ), Pacific Journal of Optimization (PJO) などの編集委員を務め、投稿論文のレビューは数多くした。これらの活動を通じて、自分自身の論文の書き方あるいはまとめ方のスキルも向上したのではと感じている。また、JORSJ の編集委員長も務めたが、この経験を通して、自分の専門以外も含めた OR 全般について理解が深まり、OR の普及などについても活動した。

OR 学会の春と秋の大会については実行委員を何回かと委員長を 1 回、そして、RAMP 研究部会の実行委員、委員長ならびに主査などを経験した。普段は、会議などに参加あるいは論文発表をしている立場であったとしても、それが支障なくできるのは、裏で活動している同僚の研究者たちがいることを忘れてはならないと思う。

私にとって最も記憶に残っている活動は、Mathematical Optimization Society (MOS) 主催の国際会議 ICCOPT 2016 の組織委員会の委員長を務めたことである。多くの組織委員ならびに実行委員の協力により、会議開催の応募申請から、採択され、実際に会議を開催するまで無事にやり遂げることできた。このことについて詳しくは、OR 誌に掲載された各委員による記事ならびに文献 [21] にまとめられているので、参考にさせていただければと思う。

大学などに所属する教員らにとって、所属機関から支給される研究資金は毎年のように減少し、研究活動に支障をきたさないためには、外部資金を獲得することが必要となる。外部資金として科学研究費などがあるが、申請しないことには獲得できないので、私自身としては、申請可能な年はほぼ毎回申請してきた。幸いにも高い確率で採択されたが、採択の確率を上げるために努力してきたことがある。それは、申請のために研究グループを毎回作り、研究課題の決定から研究計画調書の作成までをグループ内で十分に（メールなどで）相談しながらすすめることである。これをする

ことにより、多くの目で調書を検討できるので、その完成度が上がると同時に、各自の調書の作成スキルも上昇したのではと感じている。実際、グループの各メンバーは、それぞれ別の科研費に代表者として申請しており、ほぼ全員が採択に成功している。

7. OR 若手研究者への期待

最後に自分自身の経験も踏まえたうえで、僭越ではあるが、次世代に活躍するであろう若手の研究者の将来への期待を簡単に述べる。

まず、研究者として、常に目的をもって研究に取り組んでもらいたい。学生のころは、教員から与えられたテーマについて、その目的もよくわからずに研究することがあるかと思うが、研究者として自立するためには、自分自身で研究目的をしっかりとつことが必要である。OR という学問は、どちらかといえば実学であるので、理論的な面だけでなく、企業との共同研究などを通して、実用あるいは応用の面からも研究を実施することを望む。また、できれば、国際的に多くの研究者が興味をもつような研究テーマにも挑戦してもらいたい。そのためには、国内外の多くの研究者と交流を深め、共同研究を実施することが大切である。そして、6 節で述べたような研究に付随する活動にも積極的に参加し、OR の普及に取り組むと同時に、OR 研究の国際的な発展に貢献されることを期待する。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 20H02385 の補助を受けて実施された。

参考文献

- [1] 水野真治, “分枝限定法をもちいた方程式の解法と関数の最小化,” *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **30**, pp. 41–58, 1987.
- [2] M. Kojima, S. Mizuno and A. Yoshise, “A primal-dual interior-point algorithm for linear programming,” *Progress in Mathematical Programming, Interior Point and Related Methods*, N. Megiddo (ed.) Springer-Verlag, pp. 29–47, 1980.
- [3] M. Kojima, N. Megiddo and S. Mizuno, “A primal-dual infeasible-interior-point algorithm for linear programming,” *Mathematical Programming*, **61**, pp. 261–280, 1993.
- [4] S. Mizuno, “Polynomiality of infeasible-interior-point algorithms for linear programming,” *Mathematical Programming*, **67**, pp. 109–119, 1994.
- [5] S. Mizuno, M. J. Todd and Y. Ye, “On adaptive-step primal-dual interior-point algorithms for linear programming,” *Mathematics of Operations Research*, **18**, pp. 964–981, 1993.
- [6] J. Stoer, M. Wechs and S. Mizuno, “High order infeasible-interior-point methods for solving sufficient

- linear complementarity problems,” *Mathematics of Operations Research*, **23**, pp. 832–862, 1998.
- [7] S. Mizuno and F. Jarre, “Global and polynomial-time convergence of an infeasible-interior-point algorithm using inexact computation,” *Mathematical Programming*, **84**, pp. 105–122, 1999.
- [8] T. Kitahara and S. Mizuno, “A bound for the number of different basic solutions generated by the simplex method,” *Mathematical Programming*, **137**, pp. 579–586, 2013.
- [9] 稲葉広記, 水野真治, 中田和秀, “2次錐計画問題によるロバスト・トラッキングエラー最小化,” *Transactions of the Operations Research Society of Japan*, **48**, pp. 12–25, 2005.
- [10] T. Kitahara, S. Mizuno and K. Nakata, “Quadratic and convex minimax classification problems,” *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **51**, pp. 191–201, 2008.
- [11] 柴崎佑翔, 南條慶輔, 高野祐一, 水野真治, “リスク評価に CVaR を用いた保険料決定の最適化モデル,” *オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学*, **58**, pp. 469–475, 2013.
- [12] T. Kitahara, S. Mizuno and J. Shi, “The LP-Newton method for standard form linear programming problems,” *Operations Research Letters*, **41**, pp. 426–429, 2013.
- [13] L. Zeng and S. Mizuno, “On the separation in 2-period double round robin tournaments with minimum breaks,” *Computers & Operations Research*, **39**, pp. 1692–1700, 2012.
- [14] S. Mizuno, N. Sukegawa and A. Deza, “A primal-simplex based Tardos’ algorithm,” *Operations Research Letters*, **43**, pp. 625–628, 2015.
- [15] Y. Takano, K. Nanjo, N. Sukegawa and S. Mizuno, “Cutting plane algorithms for mean-CVaR portfolio optimization with nonconvex transaction costs,” *Computational Management Science*, **12**, pp. 319–340, 2015.
- [16] L. Deeratanasrikul and S. Mizuno, “Multiple-stage multiple-machine capacitated lot-sizing and scheduling with sequence-dependent setup: A case study in the wheel industry,” *Journal of Industrial and Management Optimization*, **13**, pp. 411–426, 2017.
- [17] Y. Takazawa, S. Mizuno and T. Kitahara, “An approximation algorithm for the partial covering 0-1 integer program,” *Discrete Applied Mathematics*, **275**, pp. 126–133, 2020.
- [18] K. Lu, S. Mizuno and J. Shi, “A mixed integer programming approach for the minimum maximal flow,” *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **61**, pp. 261–271, 2018.
- [19] S. Hashimoto and S. Mizuno, “A tight approximation ratio of a list scheduling algorithm for a single-machine scheduling problem with a non-renewable resource,” *Journal of Scheduling*, **24**, pp. 259–267, 2021.
- [20] M. Li and S. Mizuno, “Dynamic pricing and inventory management of a dual-channel supply chain under different power structures,” *European Journal of Operational Research*, **303**, pp. 273–285, 2018.
- [21] 水野真治, “国際会議 ICCOPT 2016 Tokyo 開催の経験と教訓 (7) —組織委員会委員長として—,” *オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学*, **62**, pp. 378–380, 2017.