

数理計画とシミュレーション

森戸 晋, 久保 幹雄

1. はじめに

1.1 数理計画はシミュレーション?

「シミュレーションしてほしい」という上司の言葉を受けて分析を行い、シミュレーションの結果を報告した、という文章を読んで違和感をいだく人はいないでしょう。1997年秋季研究発表会に、「商業物流における配送物流シミュレーションの試み」という題目の発表(アブストラクト集, pp.6-7)がありました。この研究は、組合せ最適化をもとに配送物流のやり方をあれこれ調べてみたというもので、ORの専門家の多くは、シミュレーションといわずに最適化と呼ぶと思われる内容です。ORの専門家にとっては、程度の差こそあれ違和感のある用語の使い方と感じられます。しかしながら、世の中の大半の人々にとっては、(最適化ならまだしも)数理計画という用語を持ち出すよりは、シミュレーションといった方がはるかに分かりやすい表現といえそうなものもこれまた事実です。

普通の人々にとっては、コンピュータを駆使してあれこれやってみるのがシミュレーションです。あれこれやってみるではカッコよくないので、少し気取ってwhat if分析と呼びますが、表計算による簡単なwhat if分析をシミュレーションと呼んでも人々は違和感を感じません。ましてや、モデルを用いた分析は、立派なシミュレーションであり、その意味でORは広義のシミュレーションということになります。

数理計画が最適な答を1つだけ提供すれば十分という状況はまずありません。結果が意味を持つためには、ほとんどの場合、狭義の感度分析を含め、パラメータの値を変えたり、モデルの前提を変えてwhat if分析を行うことが必要となります。これが「最適解」ですよといったところで、それだけでは使いものにならな

いのが普通です。What if分析をすることは「シミュレーション」に他なりません。そこで、数理計画はシミュレーションであるということになるわけです。この話を理解していただけない方には、数理計画の実用は難しいといったら言い過ぎでしょうか?

本稿をこのような書き出しで始めたのは、上の話が単なる用語の使い方にとどまらずに、数理計画(より一般的に、OR)の活用と深く関わっていると思われるからに他なりません。ORの専門家がシミュレーションというときには、待ち行列モデルを扱う離散型シミュレーションやシステムダイナミクスを考えます。

以下では、OR全体をも含む広い意味でのシミュレーションと、離散型に限定した狭義のシミュレーションという2つの視点を持ちながら、数理計画とシミュレーションとの関連を考えていくことにします。

1.2 オペレーションズ・リサーチの2大技法

数理計画がシミュレーションなんてとんでもない、と考える普通のOR屋さんも、実用という観点から考えたときに、LP/IPを中心とする数理計画法とともに、離散型シミュレーションがORの工具箱の中で一番よく使われるツールであることを認めざるをえないでしょう。実際、「ORの適用事例」を特集したOR誌(Vol.42, No.5)の創立40周年記念号でも、適用手法索引の分類によれば、数理計画法に次いで多いのがシミュレーションで、29件の事例報告の大半はこの2カテゴリーと統計手法のいずれかに含まれてしまいます。実際の活用という意味では、シミュレーションの活用事例はもっと多く、数の上では数理計画のそれを越えるのではないかと推測されます。

これらの技法に関しては、強力なソフトウェアが熾烈な競争を展開しており、コストパフォーマンスがよくユーザフレンドリーなソフトが手軽に利用可能であるという共通の特徴を見逃せません。INFORMSが刊行するOR/MS Todayでは1-2年に一度の割合

もりと すすむ 早稲田大学
くぼ みきお 東京商船大学

で数理計画やシミュレーション分野の詳細なソフトウェアのサーベイを掲載しています。

ソフトウェアに関連する最近の話題の1つとして、離散型シミュレーションソフトの最適化オプションの登場があります。具体的にはMicroSaintのOpt-Questオプション(Tabu Searchで有名なGlover, Kelly等が開発)やPROMODELのSimRunnerオプションのように、後に3.3(2)や4.2(3)で述べる形に近い、どちらかという腕力に頼ったヒューリスティックベースの準最適化が可能になりつつあります。

2. 数理計画とシミュレーション

2.1 技法の一般的理解

(1) 目的の違い：最適化ツール vs. 評価ツール

数理計画とシミュレーションをいっしょに議論することに意味があるでしょうか。ここでは、数理計画とシミュレーションが、ORの主要技法として、ときに代替的な競合ツール、ときに補完ツールとして考えられたり、活用されているという事実にもとづいて、これらの技法の関係を考えることにします。まず、数理計画とシミュレーションでは、なんのための技法かという使用目的において明確に違うということから見ることにします：

どうすればよいかを決めたい ⇨ 数理計画

こうしたらどうなるかを評価したい ⇨ シミュレーション

皆さんご存知のように、数理計画モデルは一般的に

最小化 (または最大化) $f(x)$

制約 $g(x) \leq 0, x \in S$

と書けます。言うまでもなく、関数 f や g は既知でなければなりません。多くの場合、線形関数を想定し、単一目的関数からなる、確定的な状況を扱います。変数に整数条件がつくかどうかで、解きやすさがかなり影響を受けますが、解法/ソフトウェアやコンピュータの進歩によって、相当大規模な問題でも手軽に解くことが可能になりました。

数理計画問題に現れる変数 x は意思決定要因と直接関連しているはずですから、決定要因を定めたら何が起こるかはわかる、というのが数理計画の大前提です。つまり、Input/Output関係が既知であるときに、一定の制約のもとで、定められた評価尺度を最適化する政策を求めるツールが数理計画に他なりません。

これに対して、(狭い意味の)シミュレーションはI/O関係に未知の部分があり、所与の政策を採択した

ときのシステムの性能が分からないという状況を扱います。このような状況下で、変数と評価尺度間の未知の関係を明らかにする評価のツールがシミュレーションです。このように、数理計画とシミュレーションでは、一方が最適化、他方が評価と目的が異なります。

(2) 最適化のためのシミュレーション

冒頭に書いたように、世間一般の感覚から考えると、数理計画はシミュレーションの1つの形です。それでは最適化=数理計画かということ、必ずしもそうとは限らず、(狭義の)シミュレーションにもとづく最適化だったからといって驚いてはいけません。評価の背後には、ほとんどの場合最適化願望が潜んでいます。

離散型シミュレーションの理論と応用の最新状況を知るには、例年12月に米国で開催されるWinter Simulation Conference ([//www.wintersim.org](http://www.wintersim.org))とそのProceedings(最新のもの[1]が参考になります。1996年のWSCでは、F. Chanceらが半導体を中心とした製造の計画管理におけるシミュレーションの応用を紹介しています。この中でシミュレーションの適用がふさわしいとされている2つのプロジェクトには、1) Optimizing cycle time with equipment, 2) Optimizing cycle time with schedulingという表題がついています。文字どおり最適化です。

シミュレーションは評価のツールですが、政策を評価しようとする背後には、よりよい政策を見つけたいという願望が潜んでいると考えて間違いなさそうです。以下では、こうした背景をふまえて、数理計画とシミュレーションとの関係を考えていくことにします。

(3) モデルの柔軟性：甲殻モデル vs. 粘土モデル

数理計画において関数 f や g が既知とか、線形、確定的といった一見たわいのない仮定は、モデル作りにあたって柔軟性を制約したり、足かせとなることが少なくありません。状況にもよりますが、これらの仮定はかなり「硬い」条件となります。例外にあふれる世の現実を硬い殻を使って表現するのは、結構難しい、熟練を要する仕事といえるでしょう。

これに比べると、シミュレーションのモデル化は、変幻自在、「なんでもござれ」の世界です。いわば、粘土作りのモデルで、自由に形が作れるので曲線も直線も許されますし、手間がかかるという意味では大変かもしれませんが、細部を詳しく表現することも自由自在です。これだけは勘弁して欲しい、というような状況はほとんどありません。したがって、シミュレーションのモデル化はきわめて柔軟です。

このような自由度の大小は、技法の使い方にも少なからず影響を及ぼします。柔軟であればあるほどいいというわけではありません。シミュレーションの場合、なんでもござれの世界であるがゆえに、いっそう、どの程度の詳細をモデルに取り込むかが問題となります。詳しくしようと思えばいくらでも詳しくできる場合が多いからです。よく KISS, すなわち, Keep It Simple and Stupid と言われますが、これは、目的にふさわしいモデルでありさえすれば、単純明解なモデルの方がいいと理解すべきでしょう。

モデルと現実との関係は、一方でモデルの妥当性に、他方でモデル構築や計算・分析の時間に関わる大きな問題です。妥当性という観点から両者の関係を考えると、数理計画とシミュレーションとで微妙なニュアンスの違いが感じられます。数理計画では目的関数や制約条件が、最適化しようとするシステムの評価尺度や制約をそれなりに忠実に表現する必要があります。その中でなにか最適かを探るからです。これに対してシミュレーションは、人為的な仕組みや方式を評価対象とすることが多く、しかもそれらの多くは一定の枠内で変更可能です。

シミュレーションの場合、殻が柔らかくどんな条件も考慮できるために、つつい現実近づきすぎる恐れがあります。実際のシステムの細部を熟知した現場の人は、当然のことながら現場にこだわりを持つはずですが、現実近づき過ぎたり詳しく見過ぎると、本当の「美」が見えなくなる／見えにくくなる場合も少なくありません。

モデルは所詮モデルであって、現実ではありません。モデルが現実そのものであったらかえって困るという場合も考えられます。モデルにもとづいて考える利点の1つは、しがらみだらけの現実に固執せずに、モデルに美(=理想)を見ることができ、空想の世界に遊ぶことができるという点にあります。モデルが現実化の展望を持たない単なる夢や妄想であっては困りますが、モデル上で自由に遊べるという点を最大限に生かさないとせっかくのモデルが宝の持ち腐れになってしまうかもしれません。

2.2 いつシミュレーションを使うか？

(1) シミュレーションは「最後の手段」？

ORの本格的教科書の1つとして定評のある Harvey M. Wagner の *Principles of Operations Research* の初版本(1969)は、“Computer Simulation

of Management Systems”と題する章を、“WHEN ALL ELSE FAILS...”(他の手法がいずれもうまくいかなかったとき)という節で始め、「OR屋のほとんどはシミュレーションを最後の手段“method of last resort”, と考える」と述べています。

しかし、1977年のWSCの基調講演では、Wagnerはシミュレーションに対して肯定的かつ楽観的な見通しを示し、さらに1988年の講演では、数理計画モデル、統計モデルとともにシミュレーションを5つの基幹OR技法の1つと位置づけ、シミュレーションの応用事例が数理計画のそれに比べて1桁多い(probably exceed by a factor of ten to one)であろうと述べています。シミュレーションソフトが80年代から急速に伸びたのを追いかけるように、90年代に入って効率のよい数理計画ソフトが著しい伸びを示しており、両手法の応用事例の差は若干つまっているように見えますが、離散型シミュレーションの活用事例が多いことは間違いありません。

(2) シミュレーションの適用を考えるべき状況

シミュレーションにせよ、数理計画にせよ、これらの計画管理技術を使うことは手間を要し、各種リソースを費やすこととなりますから、それ自身コストとなります。したがって、必要なコストに余りある効果を上げなければいけません。それでは、どのようなときにこれらの技術を使うべきか／使わざるべきかと考えてみると、実は情報が完備しているとは思えません。

テキストのほとんどは、操作法、解法、簡単な例題にはあふれていても、どのようなときに何をどう使えばどの程度の効果が上がるのか教えてくれません。しようがないので、実務家の多くは事例を見て、あそこでやっているから、という形で情報を得ているというのが実状のようです。本当の問題に真正面から取り組んでいる専門家の知識が重要となります。

テキストがOR技法の使い方について何も言っていないかというところでもないかもしれませんが、当たり前のこと、あまりに一般的なことに見えてしまって、十分理解ができないということかもしれません。実際のシステムを対象とする実験が、1)膨大な手間やコストを要したり、2)リスクを伴う場合はシミュレーションの適用を考えるべきです。以下は、シミュレーションに置き換えられるのではないかと感じられる、ごく最近耳にした例です：

例1 共同配送の可否を決めるために、プレハブながら共同配送センターを実際に作って、実験した。

例2 道路を借り切って違法駐車の影響の交通流に与える影響の実験を行った。

例3 スーパーの棚割を実際に入れ替えて実験する。

シミュレーションは、とっつきやすい技法でありませんが、それなりのコストを生むので、本当にシミュレーションをしなければいけないのか、「ザックリ計算」、すなわち、たとえば表計算による大雑把な計算で十分なのかを見極める必要があります。この判断は、状況によりますから、難しいのですが、以下の条件が満たされるときには、シミュレーションの意味が大きいと考えてよいと思われま

- 1) ランダムな変動が存在するとき
- 2) マクロな指標ではなく、ミクロな動きを見るとき
- 3) 複雑な制御ロジックがシステムの動きを定めるとき

ミクロな動きとは、例えば、ショップ全体の平均稼働率とか対象とする全ジョブに対する平均納期遅れというようなマクロな指標だけでなく、特定のジョブが納期を満たすかとか、納期遅れが何日かを見ることに対応します。生産や物流の場では、人為的かつ複雑な制御メカニズムにもとづいてシステムが動いている場合が少なくありません。

(3) シミュレーションの留意点

1) 手間がかかる：シミュレーションソフトの動向は、より簡単に、より短時間という方向に進んでおり、シミュレーションに要する時間は短縮されています。にも関わらず、シミュレーションプロジェクトはそれなりの規模となって、マンパワーを必要とします。

2) 結局、「よくわからん」ということもありうる：手間と時間をかけてあれこれ調べたにも関わらず、システム性能にいろいろな要因がどう効いているのか結局わからない、ということもありえます。骨折り損のくたびれ儲け、といったところでしょうか。モデル化があまりに柔軟すぎるのが、このような結末に終わることに深く関係しているように思われます。

3) シミュレーションで要因間の具体的関係の解明は難しい：たとえばM/G/1待ち行列システムのシミュレーションを行うことは、慣れてしまえば数分でできます。簡単なモデルを作って入力分布やそのパラメータを指定し、シミュレーション期間を定めれば、待ち時間や待ち人数の平均やバラツキが一瞬にして出ます。しかし、たとえば、M/G/1待ち行列における平均待ち人数に関する Pollaczek-Khinchine 公式 (ρ はトラフィック密度、 c はサービス時間の変動係数)：

$$\text{平均待ち人数} = \rho^2(1+c^2)/\{2(1-\rho)\}$$

のような関係をシミュレーションで推測することは、不可能ではないにせよ、極めて困難といえます。このような公式は、たとえば ρ 一定の下で平均待ち人数が c^2 の2次関数であること等、どの要因がどのように結果に効くかを具体的に示してくれます。

2.3 数理計画の弱点

数理計画の弱点を、解法の処理スピード以外の面で考えると、以下が上げられるでしょう：

- 1) どうやって解に至ったかの説明が困難
- 2) 本質的な条件変化には対応が困難

感度分析は貴重な情報を提供してくれるけれども、制約条件等がガラッと変わると対応が難しいというのが後者です。これに対して、前者は、「ぼーん」と突然、答が降って湧く感じが否めないということです。数理計画は極めて強力な計画技法を提供しているのですが、説得性という点からは弱点があるという指摘は昔からあり、最近もそういう話を耳にしました：

数理計画成功の代表例としてよく取り上げられるクルースケジューリングと同様、航空トラフィックマネジメント(ATM; Air Traffic Management)は、欧米を中心に、ORをはじめとするモデル化/シミュレーション技術がさかんに応用されている分野です(たとえば, Bianco, Dell'Olmo, and Odoni [2])。遅延が発生したときに、航空機を空中で待機させるのは、安全面とともにコスト的にも望ましくないために、過密な欧米の航空管制では、飛行機が飛び立つ前に地上で待機させる ground holding policies を採用しており、Bertsimas や Odoni を中心に最適化の研究がさかんに行われています。

しかしながら, Andreatta, Brunetta, and Guastalla [2] によると、「これらの最適化モデルは実際にはほとんど使われていない。(中略)たとえば米国 FAA (Federal Aviation Administration) が、ground holding policy の実施にあたって使用しているのは、最適化モデルではなくシミュレーションモデルである。これはシミュレーションの方が中で何が起きているのかはるかに理解しやすいために、中身のよくわからない (somehow obscure) 数理計画モデルに比べて、シミュレーションモデルの方が心理的に安心できるからだと思われる」と述べています。このように、シミュレーションは「ガラスばり」で中を自由に見られるので説得力という点では数理計画よりか

なり有利です。

3. 最適化とシミュレーションの接点

3.1 絞り込み機能としての数理計画

シミュレーションが分かりやすいといっても、評価のツールであるシミュレーションはどうしたらよいかに答えてくれません。どうするのがよさそうかさえ決まればシミュレーションは力を発揮します。そうかといって、ありとあらゆる場合をしらみつぶしに調べるわけにもいきません。シミュレーションするためにはとっかかりが必要となります。そこで、ラフなモデルであれ、最適化が考えられれば、どういう設定をシミュレートすればよいかのきっかけを与えてくれます。

1997年のWSCにおけるPanel on Transportation and Logistics Modeling [1, p.1244]で、Georgia Tech.のLogistic Instituteを率いるDon Ratliffは、サプライチェーンの設計やロジスティックや経路計画のデジジョンサポートでは、考えられるネットワーク形態やパラメータの組合せが多すぎてシミュレーションは適当でなく、数理計画で設計案を絞り込んだ後でこそシミュレーションが力を発揮すると述べています。

3.2 数理計画で取り込まなかった要因の評価

モデル化にあたっては、むやみに要因を多く取り込めばよいというわけでは決してありません。殻の硬い数理計画モデルの場合、取り込むことが困難な要因も少なからず存在します。また、現実的な時間と精度で解を算出するために、モデルの条件を厳しくしなければいけないということもよくあります。

そこで、数理計画で求められた解や絞り込まれた選択肢に対して、「なんでもあり」のシミュレーションで、数理計画に取り込まなかった要因を加えてシミュレーションを行い、最適化の結果を評価・検証することが考えられます。たとえば、ロジスティックネットワーク設計の数理計画モデルでは、通常、顧客サービスレベルを近似的に扱いますが、本当にサービスレベルが大丈夫かどうかは需要の確率変動や在庫管理方式を考慮したシミュレーションを用いるのが安全です。

最適化から得られる解の「実行可能性」や「妥当性」をシミュレーションで検証するという使い方は、これまでも行われており、デポ等の施設配置等の応用で、花王や秩父小野田の事例が知られています。また、D. Smichi-Leviのホームページ([//primal.iems.nwu.edu/levi](http://primal.iems.nwu.edu/levi))を覗くと、Software Tools for

Logistics Problem Solvingの中に、最適化で得られた施設配置案のフィージビリティをより詳細な条件下で検証するためのLocation Modeling Tool Simulatorがあります。なお、Don Ratliffは、ロジスティック計画の場合、数理計画系ソフトとシミュレーション系ソフト間のインターフェースが悪く、改善が必要であることを指摘しています。

3.3 シミュレーションによる最適化

シミュレーションは、定性的であれ、定量的であれ、決定要因と評価尺度との間の関係を明らかにしようとします。シミュレーションの背後にはほとんどの場合「よりよくしたい」という願望が潜んでいますから、決定要因と評価尺度の関係が明らかになれば、どうすれば評価尺度がよくなるかを考えたいのが人情というものです。ということで、シミュレーションで評価尺度の値を計算しながら最適化を図るという考え方(simulation via optimizationとかsimulation optimization)がごく自然に出てきます。このような考え方は、実験や実績にもとづいて最適条件を探るという形で昔から存在し、研究や応用が進められていますが、シミュレーションとのからみでも60年代から話題にのぼっていました。

しかし、シミュレーションによる最適化の研究が活発になったのは80年代以降で、主に以下の2つの流れで活発に研究が進められています。詳細はFuのサーベイ[4]やWSCのProceedingsを参照してください。ただし、こうした最適化の研究成果の応用は、在庫管理の(s,S)ポリシーやGI/G/1待ち行列といった「理論」モデルが中心で、実際の応用はまだ腕力に頼ったものが大半を占めています。

(1) シミュレーションメタモデル

一般に、対象システムの制御可能要因と評価尺度との間に多項式を当てはめようとする回帰分析的な方法に応答局面法(response surface method)があります。シミュレーションへの応答局面法の応用として、1)メタモデルの構築/最適化と、2)逐次最適化というアプローチが存在します。

前者は、問題を応答局面の推定フェイズと最適化フェイズに分割するアプローチで、まずメタモデルと呼ばれる応答局面を変数全域にわたって推定します。次にメタモデルを確定的な関数とみなして確定的な数理計画手法を適用することにより最適化を図ろうというわけですが、変数全域にわたって応答局面を正確に推

定するには一般に膨大な計算を必要とします。

本当に必要なのは最適解周辺の応答局面であり、それ以外の領域では大雑把な推定ができていれば十分でしょう。そこでシミュレーションを反復することによって逐次、局所的な応答局面を推定し、解の改善を図るというのが後者です。いずれの方法も、応答局面を同定するための統計的手法と、実験計画の進め方が鍵となります。

(2) シミュレーションによる勾配の推定と最適化

実験的最適化では、得られるデータがどのようにして生成されたかを問いません。それだけに、一般的な方法を提供するわけですが、シミュレーションではユーザがモデルを構築したはずですから、結果データの生成メカニズムに関する情報を持っています。この情報を有効に活用して、変数の微小変化に対する評価尺度の感度、すなわち、勾配を効率よく求めるアプローチとして、perturbation analysis, likelihood ratio, frequency domain experimentationといった方法が提案されています。さらに勾配の情報をもとに、確率近似法などを用いて最適化を図る方法が提案されていますが、現実規模の問題に適用可能かは不明です。

4. 具体例

筆者が関わっている課題で、最適化とシミュレーションとの融合を考えたい例を簡単に紹介します。

4.1 ロジスティクス：空容器の効率的回送

ものの輸送に際して、なんらかの「容器」に入れて送らなければならない場合が少なくありません。容器としては、ビール瓶のケース、各種パレット、船舶や鉄道輸送のコンテナの他、トラックや貨車も一種の容器と考えられます。省資源化の動向を背景に、容器を繰り返し用いる場合が少なくありません。このようなシステムでは、短期的にみると、システム内には一定個数の容器が回っていることになります。

「中身」の輸送需要に伴って容器も移動しますが、輸送需要に方向の偏りが存在し、容器の空輸送が必要となる場合があります。こうした空輸送が総トラフィックの4割にも達するという推測もありますが、1-2割程度の輸送が空で行われるのは珍しくありません。空容器の輸送は中身の「実」輸送と違って、避けられるものなら避けたい輸送です。そこで、輸送方法の改善によって空容器の効率的な回送を考えたいです。

郵便の輸送では、大都市から地方への郵便流出量が

流入量よりかなり多く、これに伴って、郵便を入れるパレットが適当な制御をしないと地方に溜まり、都市部からの輸送にあたってパレットが不足して困るという状況が発生します。このような問題が発生しないように、どこからどこに、どういうタイミングで、どれだけの容器=パレットを、どういう手段で戻してやればよいかという問題が発生します。

余っているところから足りないところへ効率よく輸送するということになりまますから、輸送問題風の最適化が存在します。と同時にこのようなシステムでは、需要（中身を積んだ容器の実輸送）に不確実性が伴います。そこで、各拠点で、1) 容器がどれだけ必要か、2) 容器をどれだけ放出可能か、を算出し、不足点から余剰点に容器を経済的に回送するにあたって、確率的な在庫モデルを最小コスト回送計画と組み合わせる必要が出てきます。在庫モデルには、解析的に解けるモデルも考えられますが、実輸送量の変動や実/空輸送のリードタイムとその変動等の詳細を考慮するとなると解析モデルでは困難です。

このような状況では、在庫モデルの分析をシミュレーションに頼るのは自然でしょう。こうすると、空容器の回送最適化モデルと在庫シミュレーションモデルの組合せが浮かび上がってきます。空貨車やコンテナの効率的回送を想定した応用が報告されています(Dejax and Crainic [3] の関連情報を参照)。

4.2 ディスパッチングにおける優先順序最適化

(1) 複雑なショップ環境

小バッチ化とこれに伴うロットストリーミングと呼ばれる考え方は、リードタイム短縮や設備稼働率向上に役立つ基本的考え方として注目を浴びています。JIT生産やFMSは、このような考え方を具現化したシステムの典型と考えられます。一方、顧客需要の多様化に対応しうる経済性に優れた自動生産システムとしてFMSが定着しています。

これらのシステムでは、種類の異なる多数のジョブが同時並行的に流れ、しかもそれらが競合します。ある作業を処理可能な機械が複数存在することも少なくありません。このようなシステムの制御はジョブに優先順序を与え、優先度の高いジョブから流していくというディスパッチングによる制御が一般的です。

(2) 静的ショップ環境を想定可能

ディスパッチングによる制御では、投入対象のジョブの品種やその工程に優先順序が定められてさえいれ

ばシステムが機能します。優先順序をつける対象となるジョブは、多くの生産システムではスケジューリング意思決定時に既知と考えられます。これは素材等の手配の必要性や高稼働率維持のためです。対象となるジョブが既知という状況で適正な優先順序を見つける問題は、スケジューリング理論の分類では、静的環境のスケジューリング問題となります。

(3) 静的環境における優先順序の最適化

静的環境のスケジューリング問題の王様は、ジョブショップスケジューリング問題 (JSSP) と呼ばれる組合せ最適化問題です。JSSP の制御可能要因はスケジュールそのもので、個々の作業をスケジュール上で動かすことが可能です。これに対してディスパッチング制御下の制御可能要因は優先順序に限られます。

世の中のスケジューリングのほとんどはディスパッチングで生成されたり、制御されています。FMS の場合ディスパッチング制御が標準ですから、いわゆるジョブショップスケジューリング型のスケジュールを作っても、それでシステムを動かすことができないのが現状です。このような状況を反映して、性能のよい優先順序を見つける規則、すなわちディスパッチングルールを探る研究は今でもさかに行われています。

処理時間が短いジョブを優先する SPT (Shortest Processing Time) に代表されるように、ディスパッチングルール (= 優先規則) は、通常、ジョブやショップの特性を単一の優先指標に変換して、優先指標の値のソーティングにより優先順序を定めるもので、最適な「優先順序」を見つける組合せ最適化問題に対する one-path 型の「構築型解法」とみることができます。しかし、スケジューリング環境が静的とみなせるならば、考えるすべての優先順序の中から、定められた評価尺度を最適化する優先順序を「探索する」という視点があってもよいはずで

す。多品種少量生産が当たり前とはいえ、多くの FMS 環境では、試作等の場合を除いて、ある品種に対する注文の生産要求量が複数というのが普通です。そこでショップには同品種のジョブが繰り返し、しかし一括してではなく「1 個流し」で、他の品種のジョブと競合しながら、バラバラと流れることとなります。

このような環境では、たとえば注文ごとに与えられた納期に対する納期遅れを最小化する最適優先順序を設定したいという問題が起こります。ところが、優先

順序を見ても、実際どのようなスケジュールが生まれるかは分かりません。ある程度の精度でスケジュールの様子を見るためには、シミュレーションするということになりそうです。そこで、シミュレーションを繰り返しながら、最適な優先順序を探るというアプローチが出てきます。たとえば、Morito and Lee [1, p. 872] ではシミュレーションと最適化を併用して、(準) 最適な優先順序の探索を試みています。

5. 最後に

数理計画とシミュレーションでは、一方が最適化、他方が評価と本来の目的が異なります。しかし、これらの技法は代替的な競合技法ともなりえますし、実際、そう考えられている場合も多いようです。どちらの手法が適切かは、モデル作成者の知識や好みによったり、利用する環境や組織等に依存し、一概にこちらがよいとは言えないでしょう。当然、技法がなんであれ、効果的に活用するためには、きちんとした専門家の知識が必要と考えられます。

両技法は、本来の目的が異なる上に、それぞれの強みと弱みがありますから、実際の問題解決では、両者をセットで考えることによる相乗効果が期待できます。数理計画とシミュレーションをどう統合すればよいかは、両者が最大限に機能し、計画管理に必要不可欠となるようなモデリング環境、活用環境をいかに提供すればよいかという課題と考えられます。確かなのは、OR が提供するモデルベースの計画管理技術を利用する人にとって、それが数理計画か離散型シミュレーションかはどうでもよく、計画管理に役立てばいい/役立たないならいらなだけで、ということです。

参考文献

- [1] S. Andradottir, et al.(eds), *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, ACM, 1997年.
- [2] L.Bianco, P. Dell'Olmo, A.R. Odoni(eds.), *Modelling and Simulation in Air Traffic Management*, Springer, 1997.
- [3] P. Dejax and T. Crainic, "A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation", *Transportation Science*, Vol. 21, No.4, 1987年.
- [4] M. C. Fu, "Optimization via Simulation: a review", *Annals of OR*, Vol.53, pp.199-247, 1994年