

物流最適化のためのモデリング・アプローチ

黒田 充

1. はじめに

近年、モデリングという言葉がよく用いられる。シミュレーション・モデリング、ファジィ・モデリング、階層的モデリング等々である。これらは単に使用するモデルの種類を表わすのではなく、問題の攻め方、解き方を表わす言葉、つまりこのような場合はこういう解き方がよいのだというモデル使用者の思いが込められた言葉であるような気がする。テーマにかかげたモデリング・アプローチは現実問題の解決に当って何らかの操作可能なモデルを利用することと理解していただければよい。本稿では、物流最適化に用いられる代表的なモデリング・アプローチの発展をふりかえりつつ、今後の方向について述べてみたい。

2. 人間の活動の最適化と数学的最適化

自然現象を対象にしてモデルを構築し、それをを用いて現象の説明や予測をすることに関して人類は長い歴史と豊富な経験を持っている。他方、人間の活動の最適化にモデルを利用するという考えが広く知られるようになったのは第二次大戦後のことである。いうまでもなく、この考えは第二次大戦中イギリスとアメリカで生まれ、ORの名のもとに日本に紹介された。

ORの定義によれば、ORはスタッフの仕事と位置づけられ、ラインに対して意思決定のための科学的な根拠を提供するものとなっている。この種のORの定義は、人間の意思決定とORにおける問題の取り扱い（つまり解析とか数学的最適化）の間に存在するある種のへだたりや相違を前提としており、両者の同一性や後者による前者の置換性を期待したものでない。言いかえればORは人間の意思決定者だけでは持ち得ない情報を生産し、提供するところにその役割があるという考えがその定義に込められている。

この意味で最もORらしいのは数理計画法による最適化である。生産計画や輸送計画のような活動の計画を目的関数と制約条件式によって表わし、目的関数を最適にする計画を演算によって求めるという発想は意思決定者がふだん行なっている活動の中で生まれてくるものではないし、計画の規模が大きくなると、人間が作る計画は数理計画法が与えるものに到底およばないからである。実際に、線形計画法をはじめとする数理計画法は、輸送計画、生産・在庫・輸送計画、工場倉庫の立地計画等の物流の主要領域において有効な定式化を提供し、数学的最適化は大きな利益を企業にもたらしてきた。しかし一方では、数学的最適化問題と人間の取り扱い最適化問題とのへだたりが認識され、別の問題解決法への期待を生むトリガーとなったのも事実である。両問題のへだたりを作る背景として、数理計画法の発展に伴って取り除かれる定式化能力の不十分さ、たとえば目的関数や制約条件式の非線形性、複数の目的関数、制約条件式の緩和等の取り扱いにくさについての不満だけではなく、定式化そのものへのあきらめがある。それは、ものごとの関係を線形代数とか微分方程式というような数学的なパターンとしてとらえることが不可能であったり、問題を構成する要素の一部が先行投資の評価のように定量化の対象として不適切であるという認識である。

このような問題そのものが持っている構造について、1958年にサイモンとニューエルが有名な論文を書いている。そのなかで彼らは問題の定式化が可能であるかどうか、また線形計画法のような既存のアルゴリズムが利用できるかどうかを基準にして問題を良構造のものと思構造のものに分け、後者の問題への接近手段として発見的問題解決法 (heuristic problem solving) の必要性を説いた。人間が意思決定に当ってどのように思考するかを観察し、観察結果にもとづいてモデルを作り利用するという方法論は、数理計画法を中心とするORの数学に基礎をおく方法論と全く異質のものであって、問題解決パラダイムの変化を予言したものであるといえる。

くろだ みつる 青山学院大学 理工学部

〒157 世田谷区千歳台 6-16-1

3. 人間の活動の最適化とシミュレーション

人間の活動の最適化が代替案の提出、評価、選択という段階をふんで行なわれるということについて異論を持つ人はおそらくいないだろう。通常、代替案の提出は意思決定者あるいは意思決定グループの才能に高度に依存し、科学的方法の関与しにくい領域と見なされている。評価に関しては、人間の直観に伴う判断の誤りを取り除いたり、またその客観性を高めるために科学的方法の利用が期待され、これに応じてシミュレーションが広く受け入れられている。

物流領域のシミュレーションは工場内の搬送系あるいは倉庫と消費者を結ぶ輸送系における設備の仕様や設備の制御ならびに利用方法の変更が系の持つ能力にどのような影響を与えるかを調べるためによく用いられる。設備数や搬送の対象になる品物の数が多いために、また搬送経路が多様であるために、モデルが複雑で大規模となり、ときにはシミュレーションは大変に高くつく。しかし、近年は高性能のコンピュータが普及するとともに、使いやすいシミュレーション言語や汎用シミュレータが出回って、モデル構築と解析に要する労力と時間は減少する傾向にある。

シミュレーションに関する未解決の問題はモデルの妥当性の検証をする方法についてのものであり、従来と同様にできる限り現実をそのまま表わしたモデルを構築するという方向に沿って対処されている。シミュレーションの目的に応じてモデルの粗さを決めるという考え方とそれを支える理論が現われない限り、シミュレーションのモデル構築と実行上の膨大な無駄は今後も繰り返して生じよう。最近、待行列網解析 (queueing network modeling) が大規模な生産システムの性能評価に利用されており、限定された条件下であるけれどもシミュレーションに勝る特性を持つことが実証されている。このような解析的な方法との比較を手掛りとして、シミュレーションの使い方に関する論議が行なわれるとよい。

最適解を保証しないけれども何らかの評価尺度 (複数あってもよい) を満足する解を効率よく作成する計算手順をヒューリスティック・アルゴリズムと呼んでいる。この場合のヒューリスティックは“解の探索労力を削減するための何らかの方策を利用した”という意味を持ち、通常それらの方策はアルゴリズムの提出者によって考案される。この意味では、前述した発見的問題解決法

とその方法論に関して異なっている。

アルゴリズム中で用いられる方策の有効性は、分枝限定法におけるように界値にもとづいて理論的に与えられるのではなく、特定の条件下での数値実験を反復して実証的に与えられる。条件が予想できる現実の問題に対して、ヒューリスティック・アルゴリズムは有効であり、配送スケジューリングや各種の生産スケジューリングで利用されている。学術的には市民権が与えられているとは言いが、実用上価値の高いモデリングの方法である。

4. ヒューリスティック・プログラムからエキスパート・システムへ

2. で述べた発見的問題解決法のモデル化の段階では、人間の思考過程は手続き (アルゴリズム) として表現され、プログラム化された。当然、通常のシミュレーション・プログラムと同様にプログラムは多数のサブルーチンから構成され、1つのサブルーチンがいくつかのサブルーチンを持つという階層構造が形成される。これらのプログラムには人間の意思決定者に示されるものと同じ入力データが与えられ、人間の意思決定者が出す回答に似た結果を出力することが期待される。もちろん、人間の思考過程は簡単には分らないから観測とプログラムの修正が繰り返される必要があり、1つのサブルーチンの修正の影響は他のサブルーチンにおよび、プログラムの修正作業は大変やっかいなものとなる。このようなヒューリスティック・プログラムはいくつかの問題領域 (ポートフォリオ選択、倉庫の立地計画等) において一応の成功を収めるが、これは研究上の話であってモデリングの繁雑さのために実用化の日の目は見なかった。

いま述べた初期の人工知能のモデリングとは一線を画するものが後になって現われる。これは問題解決の過程を

条件→行為

という単純な過程 (プロダクションあるいはプロダクションルールと呼ばれる) の集合として眺めることに基礎を置いている。たとえば、1次方程式を解く場合は次の4種類のプロダクションがあればよい。

- P 1 式が変数=定数の形をとるならば→計算を終了する
- P 2 右辺に変数があれば→左辺に移項する
- P 3 左辺に定数があれば→右辺に移項する
- P 4 左辺に変数があり、その係数が1でなければ→

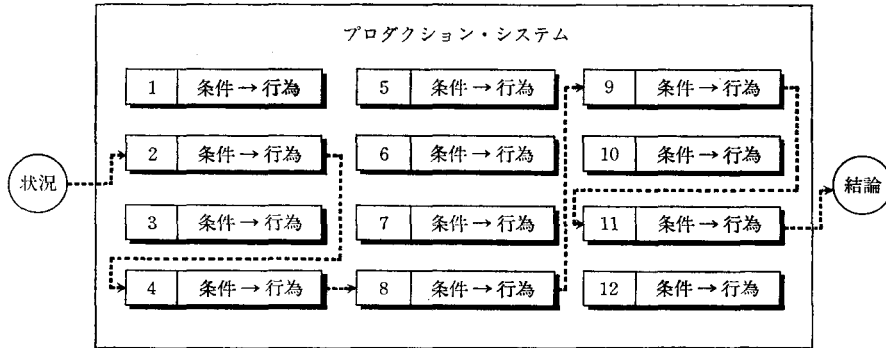


図 1 プロダクション・システムの概念図

両辺をその係数で割る

実際にどの順序でどのプロダクションの行為が実行されるかは与えられた問題の形によって異なる。これについては、問題の状況がプロダクションの条件に該当するかどうかを判断し(これをマッチングという)、もしそうならば行為を実行するというだけの単純な手続きにゆだねる。手続きは行為の実行の結果作られた状況に対して繰り返して実行され、結果として一連のプロダクションが作動し、最後に結論が導き出される。(図1参照)

プロダクションの集合であるプロダクション・システムはこの手続きと一体となって1つの問題解決のモデルを与えている。このモデリングでは、プロダクション(人間の意思決定過程を部分的にスケッチしたもの)の追加、削除、変更が自由にできるばかりでなく、あるプロダクションに新しいプロダクションの作成、削除、変更の機能を持たせることも可能であり、学習過程のモデリングへの道も開いている。

実用化されているほとんどのエキスパート・システムはこのプロダクション・システムを用いて問題解決を行っており、特定の問題解決に必要な知識(通常、当該領域の専門家を通して獲得する)をプロダクションの形式で与え、シェル(エキスパート・システム構築用ソフト)に備わった推論エンジンと呼ばれる手続きによってプロダクションを作動させて推論を行なう。知識の表現手段としては、知識やデータの階層的表現に適したフレームを併用するのが一般的であり、問題に関する状況は初期のものも中間的なものもフレームによって表現することが多い。

物流領域では意思決定の自動化あるいは半自動化の要請が強く、人間の意思決定者の代わりにエキスパート・システムやそれを用いた意思決定支援システムを導入す

る企業が増えている。適用対象としては生産計画、生産スケジューリング、コンテナへの荷物の積み込み計画(3次元割り付け)、スーパーマーケットの客数予測と作業スケジューリング、航空会社のフライトスケジューリング等計画型の問題を中心に進められている。

計画型の問題の解決法はシミュレーションやアルゴリズムが従来主役を占めていたが、この傾向がその交替を意味しているわけでない。どのような計画問題でも、プロダクション・システムを利用して解こうとすると、多数のプロダクションを必要とし、推論に長い時間を要する。通常、推論の効率を上げるために、特定の状況に対してマッチングの対象になるプロダクション群を指定するモジュール化手法が利用されるが、そのような手続き的処理の導入をはかってもプロダクション・システムあるいはそれを用いるエキスパート・システムの効率が本質的に改善されるものではない。それゆえ、エキスパート・システムをうまく利用する方策は、従来の方法では解決が難しく、効率の悪さを気にしなくてもよい中小規模の問題を対象として選ぶことであるといえよう。

5. ハイブリッドモデリングへの期待

これまで、物流領域で利用されている代表的なモデリング・アプローチを述べてきたが、それぞれは長所と短所を持つため、アプローチが利用対象とうまく合わないと効力を発揮することは難しい。また現実の問題には多様な面があるので、2つ以上のモデリング・アプローチを用いて多角的な解析を行ない、その結果にもとづき最適な意思決定を下すことが行なわれる。このように、複数のモデリング・アプローチが1つの問題に対して利用され、それぞれが役立つ場合がある一方、1つのアプローチを使用することでさえ難しい状況もある。たとえば

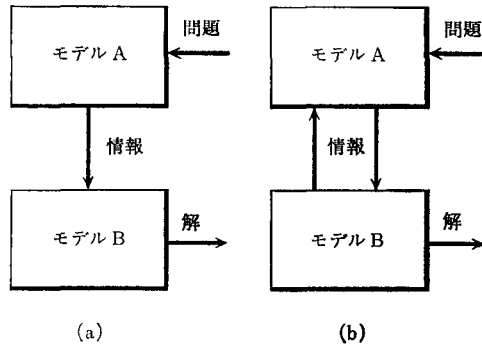


図 2 ハイブリッド・モデリング

工作機械が 100 台近くあり、仕掛中の注文が数 100 におよぶような大きな工場の負荷計画を作る場合、従来ならば問題を単純化した上シミュレーションを利用するというのが考えられる唯一の方法であった。しかし、負荷の変動を平滑化するに当って、顧客、注文の加工手順、加工時間、納期、機械の負荷状況等を考慮した工場の工程係が行なうのと変わらない負荷の山崩しを望むならば、エキスパート・システムの使用が望ましい。だがそのような負荷の山崩しをエキスパート・システムに行なわせるのはその規模を考えればいかにも無謀である。この例のように問題に合ったアプローチが見つからないことは意外に多い。

そこで、2つ以上のモデリング・アプローチを連携させ、単独のアプローチでは出せない持ち味を引き出すことによって問題をうまく解く方法が考えられる。連携のさせ方は問題によって異なるが、基本的には図 2 の(a)に示すように 1つのモデルが生産した情報を別のモデルに与えて問題を解く場合と(b)に示すように 2つのモデルのそれぞれが生産した情報を交換しながら問題を解く場合に分けられる。モデルとしてはなるべく性質の違うもの、つまり片方がアルゴリズム・モデルであれば、もう一方がプロダクション・システムのような非アルゴリズム・モデルであるという組合せがおもしろい。このような性質の異なるモデル間の連携を強調するために、このアプローチをハイブリッドモデリングと呼ぼう。

このハイブリッドモデリングの特徴がよく現われていると思われる筆者の研究室で行なった事例を示しておく。航空会社が定期的に解かねばならない問題にフライトスケジューリングがある。これは一定数の機材（航空機）を使用してできる限り多数の乗客を運べる航空機の運行ダイヤを作成する問題であり、大規模組合せ問題の

特徴をそなえている。運行ダイヤの評価尺度として(1)就航フライト数、(2)未配置計画フライト数、(3)ダイヤの雁行が通常とりあげられ、制約条件としては(1)機種別機材数、(2)計画フライトの織り込み、(3)空港別始発・終着時刻、(4)空港別機種別夜間駐機数、(5)最小ステイ時間、(6)空港別スポット数がある。

評価尺度(3)を除けばこの問題はすべて定量化の可能な要素から構成されているので、整数計画法による定式化が可能である。しかし、問題が大規模であるため、この方法は計算労力の点で実用性を欠く。一方、スケジューラのノウハウやスケジュール作成上の要件をプロダクションルールに表わし、シェルの推論エンジンの力で解を探索する方法、つまりエキスパート・システムを利用する方法が考えられる。この方法は実行可能解が簡単に求められる問題に対しては有効であるが、本問題のように厳しい制約条件が多数あって実行可能解を求めることだけでも容易でない場合には解の探索能力に不安がある。そこで、現実の問題を対象として、次のようなエキスパート・システムのみによるモデリングとエキスパート・システムと数理計画法を併用するハイブリッドモデリングの適用を試みる。

- (a)エキスパート・システム (ES) を用いて問題を縮小し、縮小した問題をさらに ES を用いて解く。
- (b) ES を用いて問題を縮小し、縮小した問題を数理計画法 (MP) を用いて解く。
- (c)(a)で求めた解を初期解として MP を用いて解く。

表 1 は 3通りの方法で 3つの現実問題を解いた結果を示している。(1)は運行ダイヤ中に織り込まれたフライトの数であり、(2)は予定したフライトのうち運行ダイヤに織り込めなかったものの数であり、もちろん(1)は多いほどよく(2)は少ないほどよい。これらの結果から、数理計画法が持っている解の探索能力がうまく働いていることがわかる。(3)は同一の 2 空港間のフライトが適当な間隔で運行ダイヤに織り込まれているかを主観的に判断した結果を示しており、○印は“満足”、△印は“やや不満足”を表わしたものである。この結果から、縮小問題を対象にしてエキスパート・システムでフライトを配置することの効果が推し量れる。(4)は探索に要するステップ数であり、数理計画法による場合は当然のことながら圧倒的に多い。しかし、数理計画法だけで解く場合に比べれば、この数は許容できる程度のものでいえる。これは多様なハイブリッドモデルの一例にすぎないが、その特徴がこれよりうかがえる。

6. おわりに

以上、物流領域（本稿では生産も含めた）を対象として主要なモデリング・アプローチの発展の概略を述べ、特に今後期待が持てるアプローチであるハイブリッドモデリングの概念と意義を示した。本稿を執筆するに当たってとった基本的な立場は、システム設計やAI技術の利用という実務上の課題の中に埋没しがちであるモデリングの問題をオペレーションズ・リサーチの観点から眺め直すというものである。プロダクション・システムをシミュレーション等と同列のモデリングの一方

表 1 ハイブリッドモデリングの効果を示す例

(1) 総フライト数				(2) 未配置計画フライト数			
方法	問題 1	問題 2	問題 3	方法	問題 1	問題 2	問題 3
(a)	134	139	148	(a)	2	2	8
(b)	148	153	160	(b)	0	1	5
(c)	145	147	153	(c)	0	0	6

(3) ダイアの雁行				(4) 探索ステップ数			
方法	問題 1	問題 2	問題 3	方法	問題 1	問題 2	問題 3
(a)	○	○	△	(a)	2621	2849	2918
(b)	△	△	△	(b)	1899702	1977157	2175842
(c)	○	○	△	(c)	1672641	1971079	2172659

として取り扱ったのはそのためである。筆者はこのように物の見方がややもすると離れがちになるオペレーションズ・リサーチと情報処理を結びつけ、これらの領域間での思考の交流に役立つことを願っている。

報文集価格表（会員価格）

T-73-1	ネットワーク構造を有するオペレーションズ・リサーチ問題の電算機処理に関する基礎研究	1200円
T-76-1	オペレーションズ・リサーチのためのデータとプログラムに関する研究	4000円
T-77-1	システムダイナミックス——方法論と適用例	2500円
R-79-1	「ORの実践とその有効活用」視察団報告	1200円
R-82-1	「欧州におけるOR実施状況」視察団報告書	1200円
R-84-1	「米国におけるORの実践」視察団報告	1200円
T-86-1	「南北協力の新しい戦略——マイクロ電子技術を起爆として——」	3500円
R-88-1	「南米諸国とのOR交流視察団」報告書	1200円