

道具箱としてのOR

野末 尚次

職業としてORを実践するためには、特定の理論の研究ではなく、実際の問題に理論を適用して、モデル化するプロセスの達人が求められます。対象とする問題によって、使用するモデルも多様となりますから、OR理論を道具箱として準備する必要があります。また実際の応用段階では、開発された技術の経験が蓄積されて、さらに有効な成果を生む場合も多くあります。このような視点から、筆者のORの実践を例に述べます。

キーワード：ORの実践、ORの応用、システム開発

1. はじめに

私は、ORに興味を持って仕事をしておりますが、特定の理論の開発よりは、実際の問題に理論を適用して、モデル化するプロセスに最大の関心があります。

解く対象の問題によって、使用する理論モデルは、数理計画モデル、グラフ・ネットワークモデル、確率モデル、制約プログラミングモデル等自在に変える必要があります。

したがって、私にとってORは、道具箱と言ったほうが適切だと思います。ただ、職業として使うには、最新の道具が必要であり、この面では、理論的な調査は随時行っています。

さらに職業として継続するためには、過去の知識の蓄積が利用可能でなければなりません。このためには、ソフトウェア・システムとしての開発が不可欠です。

私がORを職業と意識して活動を始めたのは、国鉄の民営分割により、所属していた鉄道技研が鉄道総研となり、受託開発を積極的に推進した時点からです。

アカデミックな研究では、研究成果が出来上がった時点で、論文を書き、査読により評価を受けますが、拒絶されても、自身の評価が得られないだけで、大きなペナルティはありません。

これに対して、職業としてのORでは、スタート時点で最終成果物を予見して契約を行い、納期時点で依頼者の評価を受け、満足する成果が提供できなければ損害賠償等のペナルティを支払うという厳しい研究開発のプロセスが本質的です。

鉄道総研の受託活動、および、私が設立した(株)数理モデリング研究所で行った活動の中から、2つの事例について、職業としてのORの展開例を紹介します。

最初の事例は、最適化ソフトウェアの開発を契機とした交通需要予測と、さらに地理情報処理システムを結合したバス路線計画システムです。

次に、列車乗継案内システムで開発したネットワークの代替経路生成アルゴリズムを契機とした鉄道運賃関連のシステムと、運賃規則のEXCEL上へ宣言的表現により可能となった汎用運賃計算システムです。

最後に、ORを職業として行う人には非常に重要な道具と考えられる制約プログラミング(ILOG社)をベースとした最適化の取組みにも触れます。

これらの事例から、応用を目指した開発プロセスから新しい方法論が生まれること、そして、ORの復権には、理論研究も産学連携による厳しい現実的な課題への挑戦が必要なることを感じていただければ幸いです。

2. 最適化と確率効用モデル(国鉄)

2.1 非線形最適化プログラムの開発

国鉄の研究所(鉄道技研)の先輩から「数値計算ハンドブック」に、非線形最適化のソフトウェアを執筆するよう話がありました。その時、偶然、Luenbergerの本を読んでおり、この本の自己スケールングDFPアルゴリズムをベースにすれば、良いソフトウェアが開発できると考え、引き受けました。

2.2 確率効用モデルの最尤推定プログラムの開発

鉄道技研で、高速化や新形式鉄道の評価に携わる中で、確率効用モデルによる輸送需要推定が必要となり、「非線形最適化プログラム」を使用した最尤推定プログラムを開発しました。

3. 地理情報処理と知識ベースの開発 (民営化直前)

国鉄の民営分割を直前に控えて、私の研究室が担当している需要予測も外部のシンクタンクと競合状態になると感じました。そこで、私達の武器であるコンピュータ利用技術で差別化を図るため、地理情報処理システム (TRAMPS) と交通計画用知識ベース (TRICKS) の2種類のシステムの開発を行いました。

1) 地理情報処理システム (TRAMPS)

このシステムは、以下の公的な情報をベースとした地理情報処理システムです。

- ・ 国土数値情報：自治体の境界や鉄道・道路の路線に関するデジタルデータ
- ・ 国勢調査メッシュデータ：500メートルのメッシュの集計データ、

事業所統計、商業統計、工業統計も含む

このシステムでは、メッシュデータと路線の表示以外に、指定エリア内の集計、データ間の演算、地理的多変量解析が可能で、商圈分析にも適用可能な、現時点で考えてみても、素晴らしいシステムです。

2) 交通計画用知識ベース (TRICKS)

交通計画では、データ項目、年次、集計ゾーンを指定して、複数のデータを揃える必要がありますが、項目により調査年次、集計ゾーン、集計カテゴリが異なるため苦勞します。しかし、データは、集計ゾーンの精粗 (国一県一市町村一メッシュ)、集計カテゴリの精粗 (…労働人口一第三次産業一飲食業一…)、調査年次 (…1995-1998-2001…) の構造を持っているので、この構造を利用して欠損データの階層的な推定方式を持ったデータベースを開発しました。

「民営化後」

TRAMPS は、友人が勤めていたシンクタンク経由

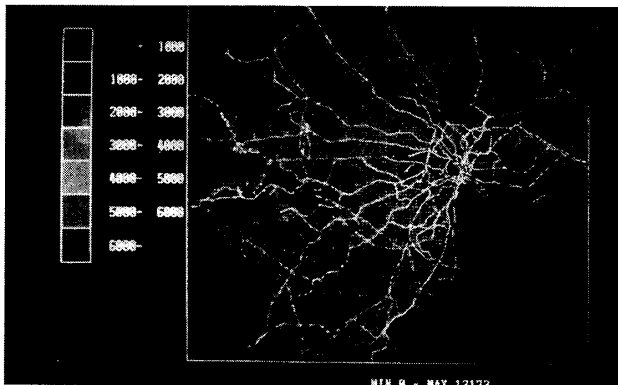


図1 TRAMPS：人口メッシュ・データ表示

で販売しました。数システムしか売れませんでした。この分野での技術的ベースと顧客を作ってくれました。

4. 交通需要予測 (民営化後)

民営化に伴って、受託開発が可能となり、各種の予測の受託開発を行いました。ここでは、最初に受託したバス路線計画システムを紹介します。

4.1 バス路線計画の調査

在職していた JR 総研に、民鉄の方が、国勢調査メッシュ・データの利用法の相談に来られました。

この時、私達が開発発売していた「地理情報システム TRAMPS」のデモを見ていただきました。お話をする内に、「地下鉄の開通に伴うバス路線網への影響を定量的に把握することが課題」と分り、メッシュベースの推定方式の可能性をお話した結果、プロポザルの提示を求められました。

私は、この問題は、都心方面への通勤交通が対象で、「ルートに水を注ぐような現象」であるので、結果はかなり良く合うと直感しました。この時には、以下の課題を意識しました。

- 1) 基本的な地理モデル：バスの選択特性を考慮して、200 m のメッシュベースのゾーニングを行う。この上に、バス路線と地下鉄路線のネットワークを構築して、各ゾーンから、(複数) 駅までのアクセス・ルートを自動生成して、交通サービスデータを自動計算する。
- 2) 基礎データの作成：これまでの経験から、国勢調査の調査区データから、作成可能と判断しました。

200 m メッシュの構築：国勢調査の調査区データを、200メートルメッシュに集計して作成可能

各メッシュからの方面別通勤者：大都市交通センサス+200 m メッシュデータで作成可能

地域の道路ネットワークの構成：国土数値情報を利用すれば、作成可能

- 3) 交通機関分担モデル：これまでの経験から、通勤



図2 地下鉄とバスの競合対象地域

客の現状調査を行えば可能と思われるが、バス+鉄道の選択行動が上手く説明できるかは多少不安。

バス+鉄道利用客の行動分析データの取得：

バスの実績データ：依頼主提供

概略の分析→定期券購入者の住所データから推定できないか？

詳細の分析→アンケートによる現状調査の実施

4) ソフトウェアの開発：

地理情報処理：TRAMPS の技術の転用で可能

路線選択モデル：開発済みのパラメータ推定ソフトで可能

「開発段階（初期）」

- ・ 住居表示位置データの取得：他の部署で購入されていた大型のディジタイザを利用して、「マウスに住居表示を提示して、地図上の位置をクリックする方式」のソフトウェアを開発して対応する
- ・ 調査区データを作成した住居表示位置データとリンクして、200 mメッシュ（夜間人口）の構築
- ・ 大都市交通センサスと 200 mメッシュ（夜間人口）とリンクして、各メッシュからの方面別（都心、横浜、川崎、八王子）の通勤交通量の作成
- ・ バス路線情報の入力：表示された道路上に、マウスでバス停を設定するソフトを開発して実施
- ・ バス+鉄道利用者の概略分析：住居表示位置データより、乗車駅別のメッシュデータを図上に表示し、特異な（分れば当然）行動を確認
- ・ メッシュ中心から、近傍の複数のバス停経路で、複数の駅経路の代替ルートの自動生成
- ・ バスの利用実態調査：郵送回収方式で実施
- ・ バス路線選択モデルのパラメータ推定

「開発段階（現況再現）」

- ・ 各メッシュ中心から、近傍のバス停（路線別）の利用率の推定
- ・ 各メッシュの通勤交通量にこのバス停（路線別）の利用率を掛けて、利用客数の推定
- ・ 同一路線の全てのバス停の利用客（乗車と降車）を集計して、推定断面交通量の作成
- ・ 現況再現の問題の特定と解決：
 - 特定のバス停の乗降人が少ない→新設のマンション等調査して、メッシュの夜間人口の修正

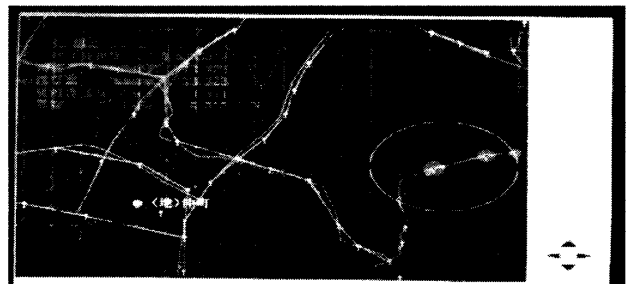


図3 メッシュ中心からのバス停利用率（路線別）

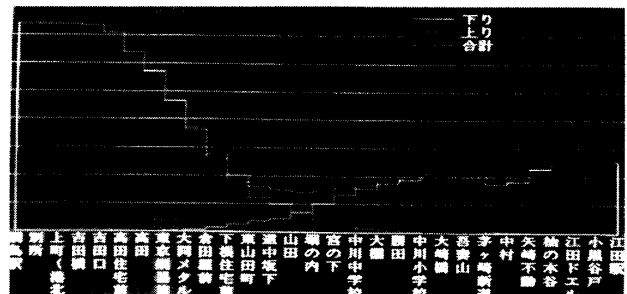


図4 バス路線の断面交通量

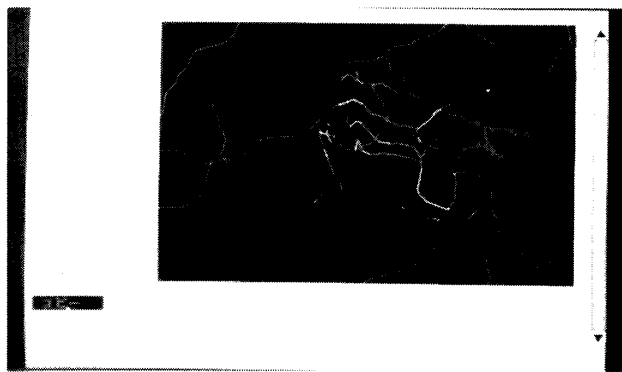
- 駅付近の行動が異なる→駅近傍の渋滞を考慮した走行時分の設定と近傍バス停での下車を可能とする
- モデルの感度が高すぎる→感度を鈍化

「開発段階（終盤）」

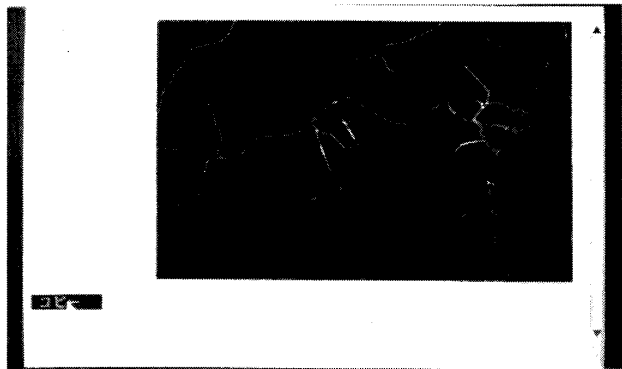
- ・ 現状への影響度の評価：地下鉄路線を設定し、バス路線網が現状の場合、各バス路線への影響度の評価
- ・ バス路線案の評価：上記の結果を踏まえて、複数の新規バス路線網案を作成し、影響度の評価
- ・ 評価結果：上記の改善案を行った後でも、当該地域のバス路線全体の乗客が約 30%減として推定

「契約上の課題」

この契約は、民営化して間もない時期でしたので、契約の経験も少なく、どのような見積もりを行えばいいのか迷いました。最終的には、国鉄時代の（人件費を除く）研究費の7~8倍程度を提案し、先方の部長の了解を得ました。しかし、翌年に契約の段階になると、先方から、ソフトウェア開発には、提案額の半分以上の予算は無理なので、半額程度にして欲しいとの申し入れがありました。これに対して、今回の案件は、地下鉄開業の影響の交渉を行うためのベースとなる資料を作成することであり、社内的に提案趣旨を調査に変更するようお願いしました。この結果、当初の提案額で契約に至りました。この交渉を通じて、「契約額



開通前



開通後

図5 全路線の予測結果

は、自分のコストではなく、先方の得るメリットである」との認識を強く持ちました。

5. 代替経路生成アルゴリズム

5.1 列車乗継案内システム (EST³)

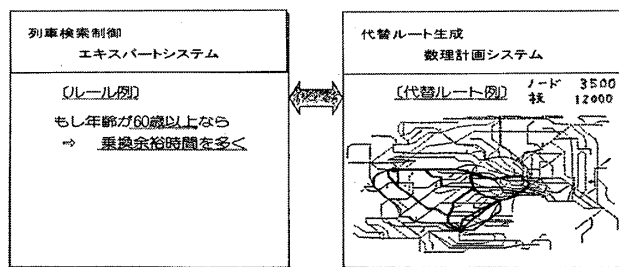
民営分割直後の状況で、新しい計画システムの枠組みを造ろうと考え、「AIのエキスパートシステム」と「数理計画システム」を融合したシステムの開発の研究を始めました。その時に、ケーススタディとして、「時刻表ベースの列車の乗継案を提案するシステム」の開発を取り上げました。

「開発」

- 1) 首都圏全体の鉄道ネットワークの作成
- 2) 2駅間の代替ルート生成アルゴリズムの開発
- 3) 時刻表ベースのルート内の乗継案作成アルゴリズムの開発
- 4) 入力に応じたパラメータ設定と作成案評価用エキスパート・システムの開発
- 5) 表示用 GUI システムの開発

「開発後」

このシステムが1990年に完成して、部外へ発表しました。利用客からこのシステムの利用に関してJR



列車乗継案内システム EST³

図6 ハイブリッド型エキスパート・システム

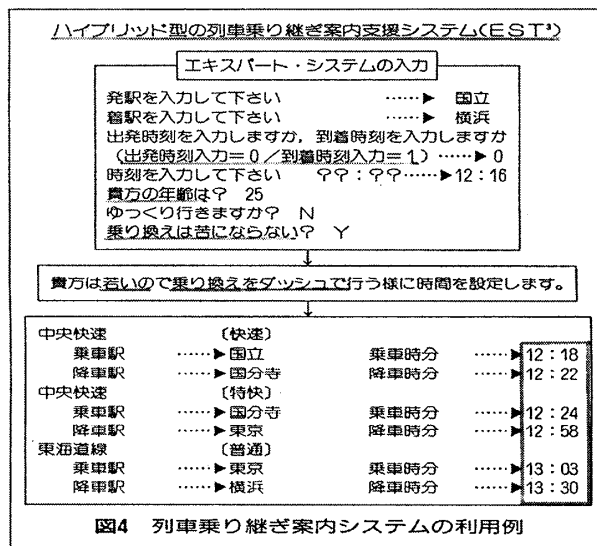


図4 列車乗り継ぎ案内システムの利用例

図7 乗継案内システム利用例

サイドへ問合せが行った結果、実用化前提でないシステムの公表にクレームが付き、実質的に中断しました。

「日経コンピュータ」の取材に対しても、実用化に関して消極的な態度を示したため、「宝の持ち腐れにしないで」と文末に記載されたが、その通りになりました。

ここで開発した代替経路生成アルゴリズムは、大きな発展の契機を与えてくれましたが、現在の「駅すぱーと (ヴァル研究所)」の普及をみると、もう少し頑張る必要があったと反省しています。

5.2 鉄道運賃計算用代替ルート生成システム

「列車乗継案内システム」の内容に着目した会社から、「発駅と着駅を指定した時、営業規則で許されるルートを複数生成し、各ルートの券面に表示する分岐駅の系列を生成する」システム開発の依頼がありました。

従来は、駅の窓口で、ルートを指定した乗車券の購入要求が発生した場合に、駅員が時刻表を調べて、券面の分岐駅の系列を入力する必要がありました。この非効率性をクリアしたシステムを開発して、売込みを

図りたいメーカーからの依頼でした。

基本的には、「列車乗継案内システム」のアルゴリズムが適用可能と判断しました。

- 1) 代替経路生成：「列車乗継案内システム」で開発したアルゴリズムが使用可能
- 2) JRの運賃規則：ルートに関しては、それほど複雑な規則はないと感じた
- 3) 券面の表示駅の系列：基本的には、ルートをトラバースすれば可能

「開発（初期）」

- ・ 鉄道ネットワークの表現：全国規模となったため、分岐点ベースのネットワーク処理の導入
- ・ 営業規則の深度化：新幹線と在来線の別線処理等

「開発（中期）」

- ・ 券面表示用データ作成：ネットワーク処理の改良
- ・ 民鉄との連絡運輸：専用データの追加

「開発（終盤）」

- ・ ソフトウェアの技術移転：先方のSEに、6ヶ月で、アルゴリズムの移転

「契約」

JRの出資比率が一定割合以上の会社に対する利用権の許諾を行いました。基本的には、利用個数ベースにすべきだったと反省しました。

6. 宣言型汎用運賃計算システム

非接触型の乗車券を開発するプロジェクトに参加していた友人から、デモンストレーション用に、運賃計算のプロトタイプシステムの開発を依頼されました。

運賃計算は、「鉄道運賃計算用代替ルート生成システムの開発」の際に、一応調べていたのですが、今回はJRと民鉄の複数社が対応し、営業規則も異なるた

め、不安はありましたが、下記の見込みで引き受けました。

1) 運賃計算方式のモデル：

運賃計算には、複数の排他的な割引規則があります。発駅～着駅までのルートが一意に決まる場合もあれば、複数のルートが対象になる場合もあります。また、同一ルートに対しても、複数の適用可能なパターンがあります。通常は、運賃計算のベテランのノウハウで、利用すべき経路や、適用すべきルール群が判定され、事前に組み込まれたソフトウェアが開発されています。

これに対して、先程述べた「鉄道運賃計算用代替ルート生成システムの開発」で、利用可能な複数のルートの生成技術が有りますので、複数の利用可能なルートを生成して、各ルートの運賃を全て計算して、最も安い運賃を選択すれば良いと考えました。

2) 運賃規則の表現

今回の対象が主に民鉄であったので、複数のデータを作成する必要がありますが、依頼側にデータを作成していただく都合上、基本的にはEXCELで表現することにしました。

運賃規則に関しては、演算式のタイプによる表現を想定しました。

「開発段階（初期）」

運賃割引規則の演算式による定義では、可能な表現に制約があり、問題があることが分りました。

汎用表現形式の導入：この問題をクリアするために、かなり悩みましたが、最終的には、ネットワークをトラバースする際に情報を設定する方式に気が付き、非常に分かりやすい表現方法が考案できました。

「開発段階（中期）」

個々の運賃営業規則をEXCEL上に表現することは可能となりましたが、複数の会社間を移動する際の、連絡割引ルール相互間の排他制約の処理が上手くいき

39	ルール11	乗継個	発着	乗継割引	割引個別 *	*			2 阪神	神戸高速									
40		地域定義		3															
41		開始地域	地域A		1 区間A														
42		終了地域	地域B		2 区間B	区間C													
43		積算地域	地域C		2 区間B	区間D													
44		区間定義		4															
45		駅間指定	区間A	阪神	阪神本線	三宮	三宮	*	*	*	内								
46		駅間指定	区間B	神戸高速	神戸高速	高速神戸	西代	*	*	*	内								
47		駅間指定	区間C	神戸高速	神戸高速	西元町	高速神戸	*	*	*	内								
48		駅間指定	区間D	神戸高速	神戸高速	元町	高速神戸	*	*	*	内								
49		接続定義		1															
50		駅間接続	接続A	対称	阪神	阪神本線	元町	神戸高速	神戸高速	元町	0 *								
51		積算定義		1															
52		換算距離	距離A		1 地域C		1												
53		割引定義		2															
54		割引個別	阪神	距離方式	距離A		2	3170	1	3	3180	4	5						
55		割引個別	神戸高速	距離方式	距離A		2	380	1	3	370	4	5						
56		排他定義		2															
57		会社排他	阪神	*	全体														
58		会社排他	神戸高速	*	全体														
59		配分定義		1															
60		乗継配分																	

図8 連絡割引の表現例

ません。この問題には、相当苦しめられましたが、対象となる運賃規則群の排他条件をグラフ上に表現し、この最大独立集合問題を解けば良いことに気がつき、解決できました。

「開発段階（後期）」

このプロトタイプが完成した頃に、友人のプロジェクトは失敗したため、私の開発した運賃計算システムを販売する計画になりました。このキーポイントは、通常の運賃計算システムでは、ベテランのノウハウを組み込んだソフトウェアのため、各社の新駅の開業や運賃規則の修正に対しては、ソフトウェアの改修が必要となります。さらに、会社間の連絡切符を発売するため、他の会社の運賃計算が必要となり、他社の変更により、自社のソフトウェアの改修が発生しており、毎年1,000万円程度の改修費が発生しています。私の提供するソフトウェアは、営業規則等のデータがEXCEL上に表現されていますので、ソフトウェアの改修は必要ありません。また、通常の運賃計算では、ベテランのノウハウ部分の間違いによる運賃計算ミスが時々発生して、マスコミの話題になりますが、これらの面でも品質が高く維持されます。

「契約」

このシステムでは、ソースコードのライセンス契約を結んで、このノウハウを使用した新規契約額の一定割合を支払っていただく方式としています。また、先方のSEに対して、数ヶ月の技術移転を行い、メンテナンスも移管しました。

7. 制約論理，制約プログラミング

JR総研在職中に、友人がフランスのソフト(COSYTEC社CHIP)を日本で発売したいが、性能を評価して欲しいとの依頼がありました。ソフトは、PROLOG上で制約伝播をベースとした制約論理ですが、サンプルのプログラム(正方形の埋め戻し問題)を動かしてみて、その能力に驚嘆しました。

このソフトの国内販売を勧めると同時に、私の研究所でも購入して、制約論理の勉強をしました。この友人の会社の宣伝にも協力して、普及に努力しました。

最初に「乗務員の交番表」の作成に仲間と挑戦し、あるレベルの解が得られましたが、その頃、JR総研を退職しました。

制約論理系のパッケージとしては、C++上で記述可能な制約プログラミング(ILOG社Solver)があり、退職を機に、このシステムに変えました。

このシステムの利用法の研究をかなり行い、有効性を確信したので、JR系のSI会社に推奨して、若手の教育を行いました。

これらの成果が、現在JRの次期輸送計画システムの開発に採用され、若手が頑張っています。

私も列車の運転整理システムに対して、制約伝播を中心としたソフトウェアの開発を行い、ノウハウのライセンス許諾をしています。

現在は、他のSI会社の社員を教育して、物流系のシステム提案を目指しています。

8. おわりに

今回の話で、一つのモデル化の筋を絶やさずに続ける事により、チャンスが生まれることを理解していただけたのではないかと思います。

さらに、多くの最新の道具を調達することにより、新しい実践が生まれてくることも分っていただけたと思います。

私自身は、今回お話しした以外にも、他の道具を用いて、多くのシステムを開発しております。

これらの開発のベースには、最新のOR理論を理解しようとする情熱が有るからだと思います。

是非、ORの実践の面から、最新の理論を勉強してください。

参考文献

- 1) 特集：交通・輸送計画のための意思決定支援，鉄道総研報告8, 2, 1994.
- 2) 野末：意思決定支援システムの開発と統合モデリング，オペレーションズ・リサーチ，50, 4, pp.233-237, 2005.
- 3) 数理モデリング研究所：<http://www.math-model.co.jp>