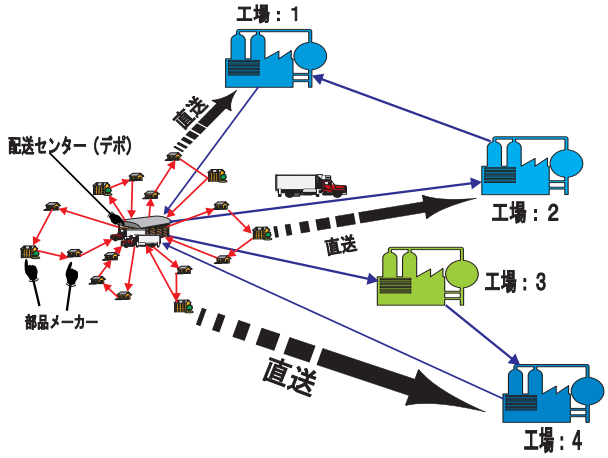

図 8: 某メーカーにおける事例の概念図．

考えられる．進化によりユーザは新たなオプションや，よい解を得ることが可能になる．

METRO に新たな遺伝子を付加し，進化に協力することに興味を持たれた方は，社団法人日本ロジスティクスシステム協会 (〒105 東京都港区芝大門 2-12-7 秀和第 2 芝パークビル) に，METRO(Ver.2.0) お試し版希望と明記し，返信用の封筒 (切手をお忘れなく) およびフロッピーディスク (1.4M フォーマット済み) を同封して送付されたい．

謝辞

本稿をまとめるにあたり，貴重なご意見を下さいましたレフェリーの方々に感謝致します．

参考文献

[1] J. E. Beasley. OR-Library: Distributing test problems by electronic mail. *Journal of the Operational Research Society*, 41:1069–1072, 1990.

[2] D. Bienstock, J. Bramel, and D. Simchi-Levi. A probabilistic analysis of tour partitioning heuristics for the capacitated vehicle routing problem with unsplit demands. *Mathematics of Operations Research*, 18:786–802, 1993.

[3] G. Clarke and J. W. Wright. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12:568–581, 1964.

[4] T. A. Feo, M. G. C. Resende, and S. H. Smith. A greedy randomized adaptive search procedure for maximum independent set. *Operations Research*, 42:860–878, 1994.

[5] P. C. Fishburn and H. O. Pollark. Fixed Route Cost Allocation. *American Mathematical Monthly*, 90:366–378, 1983.

[6] M. L. Fisher and R. Jaikumar. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11:109–124, 1981.

[7] M. Gendreau, A. Hertz, and G. Laporte. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management Science*, 40:1276–1290, 1994.

[8] B. E. Gillet and L. R. Miller. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. *Operations Research*, 22:340–350, 1974.

[9] F. Glover. Tabu search I. *ORSA Journal on Computing*, 1:190–206, 1989.

[10] 久保 幹雄. 離散構造とアルゴリズム IV (室田一雄編), メタヒューリスティックス. 近代科学社, 1995.

[11] 久保幹雄. 巡回セールスマン問題への招待 (I),(II),(III). オペレーションズリサーチ, 39:25–31,91–96,156–162, 1994.

[12] 毛利裕昭, 渡部隆裕, 森雅夫, 久保幹雄. 配送路問題における費用分担. 東京工業大学経営システム工学科 Technical Report, No. 95-9, 1995.

[13] I. H. Osman. Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 41:421–451, 1993.

[14] F. Semet and E. Taillard. Solving real-life vehicle routing problems efficiently using taboo search. *Annals of Operations Research*, 41:469–488, 1993.

[15] J. Skorin-Kapov. Tabu search applied to the quadratic assignment problem. *ORSA Journal on Computing*, 2:33–45, 1990.

[16] E. Taillard. Parallel iterative search method for vehicle routing problems. *Networks*, 23:661–673, 1993.

[17] 山本 芳嗣, 久保 幹雄. 巡回セールスマン問題への招待. 朝倉書店, 1996 (to appear).

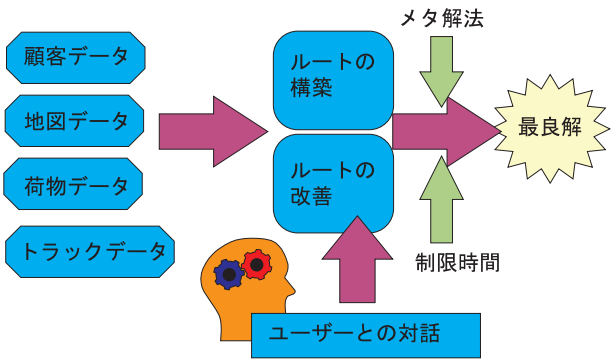

図 6: インターフェィスの概念図．

2. 初期ルート生成の枠で囲まれたボタン往復輸送，ルート合併法（セービング法），確率的合併法（GRASP），割当法（一般化割当法）の何れかを押すことによって初期ルートを生成する．

3. 最適化の枠に囲まれたボタンから探索開始および最良解に戻す（またはパラメータ変更）を適宜押すことによってルートを改善していく．

4. 満足する解が得られたらルート保存のボタンを押すことによって，得られたルートを保存する．

6. 事例

ここでは，METROを用いた事例について述べる．

某メーカーではある地区に点在する部品メーカーから複数の生産工場への多対多の輸送を行っている．現状では部品メーカーからの直送が主体となっているが，地区にある生産工場を配送センター（デポ）として利用することによる輸送の効率化を検討している．このとき，部品メーカーからデポへの集荷は，小型トラックを主体とした地区内配送計画問題であり，デポから生産工場への配送は，中長距離を大型トラックを主体として運ぶ幹線配送計画問題である．使用できるトラック（およびトレーラー）は，積載重量（トン），容量（m^3），高速料金が異なる 4 タイプであり，荷物も重量・容量に大きなばらつきがある．地区内・幹線配送計画問題の両者ともMETROを用いて短時間に求解できるが，問題となるのは，部品メーカーから生産工場への荷物量が比較的大きい場合の直送の是非の判定である．

METROの費用配分の機能を用いると，集荷および配送を行ったときの各顧客の荷物の費用負担が求まる．これは各荷物がデポ経由で運ばれたときの費用分担で

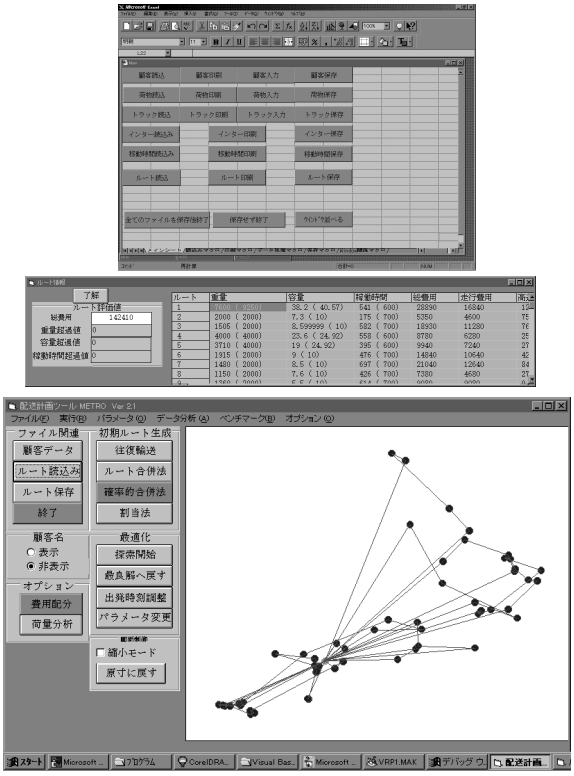

図 7: METROの画面構成．

あり，線形計画における潜在価格（shadow price）のアナロジーを持つ．各荷物ごとに，集荷費用の分担分+配送費用の分担分+デポでの積み替え費用が計算でき，この値と直送費用を比較し，直送に変えたときの費用の減少量の大きい荷物を直送に切り替えることによって，解の改善が期待できる．しかし，ある荷物が直送に切り替わったときの実際の費用の変化量を求めるためには，集荷および配送に対応する配送計画問題を解き直す必要がある．したがって，子問題でMETROによる配送計画問題の近似解および費用分担の算出を行い，親問題で直送への切り替えを行う二段階の階層型モデルができる．このモデルを用いることによって，少なく見積もっても年間 3億 6 千万円の費用削減（34.4% の削減率）が可能であると推定されている．

7. おわりに

配送計画の実際問題は千差万別であり，現場ごとに何らかの異なった前提条件を持つものと考えられる．したがって，METROを実際問題に適用するには，現場に応じた付加条件を加味する必要がある．実際に，METROはそのプロトタイプを作成してからずっと，現場の声を反映しながら進化しており，今後も進化し続けるものと

の移行を促す方法 (Tabu Navigation 法; 例えば [15] に類似の解法の記述がある) を採用している．ここではあるルートから別のルートへ顧客 1 人を移した状態を基本近傍としてとらえ，単に費用関数値の変化量を考えるのではなく，重量，容量，稼働時間の上限を超えた分をペナルティとし，さらに点を移動させた回数を長期メモリとして貯え，同じ点を繰り返し移動させることを長期的に避けるようにしている．

Tabu Navigation 法は，Tabu Search による強力な探索と，ユーザーの経験による探索の方向付けとの融合であり，多くの複雑な問題において良好な解を短時間で探索できる．もちろん予備的な実験によって，ある程度の推奨値は与えており，また，探索途中で得られる情報によるパラメータの自動チューニング機能も組み込まれている．

Tabu Search をはじめとするメタ解法についての詳細と効率的な実装のための注意点については [10] を参照されたい．

3.2 METRO の費用配分機能

配送計画において各顧客に対してどの程度の費用が発生しているかを知る必要性はさまざまな場面で生じる．卸や小売の流通業者の組合等が共同配送を行なう場合に各組合員 (顧客) がどの程度の負担をするのが公正であるかを知る必要がある場合，また, 共同配送の組織を構成する際にその構成員 (顧客) が異なれば費用分担が変化することを考慮するための組織構成のシミュレーションをおこないたい場合，物流会社の営業が顧客に対して発生費用のシミュレーションを行いたい場合などである．METRO では，配送計画問題をメタ解法で解いた後，その総走行費用が各顧客に対してどのように負担されるべきかを計算する機能を持っている．

費用配分の問題に対する考え方としては限界費用をもとにしたアプローチや協力ゲームの公理論的アプローチが考えられる．METRO では, 基本的に後者のアプローチを採用している．しかし, Shapley 値, コアといった協力ゲームの伝統的アプローチではなく，[5] を拡張した筆者ら [12] の費用配分方法を採用している．この方法を採用した理由は, 以下のような理由による．協力ゲームの理論は緻密に整備されているものの Shapley 値やコアなどの伝統的な解では, 解を求めるために解かなければならない $\mathcal{NP}$-困難な問題である配送計画問題の数が顧客の増加に対して指数的に増加してしまうという欠点がある．一方, METRO で採用した方法は配送計画問題を一度解くのみでよいという利点をもつ.

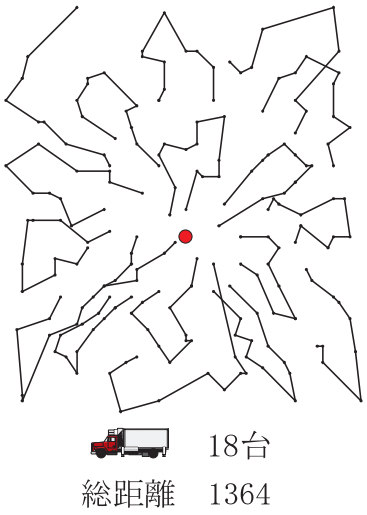

図 5: Tabu Search による解の例．

費用配分に関する詳細な公理系はここでは述べず費用配分方法の結果のみを示す．具体的な費用配分方法は, 各顧客の単独配送の場合の費用から顧客全体での配送による利益をある割合で差し引いたものとなっている．ここでのある割合とは, 各顧客のデポからの距離や需要量によって決定されるように配慮されている.

また, METRO で得られた解をもとにしてルートごとに上記の配分方法を適用するというオプションも提供している.

4. METRO の性能

METRO は先に述べたように OR-Lib. で配布されているような標準的なベンチマーク問題に対しても，良好な解を短時間で算出するように設計かつチューンアップされている．ほんの一例として，図 5 は OR-Lib. の顧客数 199 の問題 (vrpnc10) の解を示しており．セービング法の解の値は Tabu Search の 25.1%増しであり，一般化割当法の解の値は Tabu Search の 9.4%増しである．

5. METRO のインターフェイス

METRO のインターフェィスの概念図を図 6に，実際の画面を図 7 に示す．

ユーザーは以下の手順により良好なルートを生成することができる．

1. 顧客データと書かれたボタンをマウスで押すことによって，全ての関連データを読み込む．

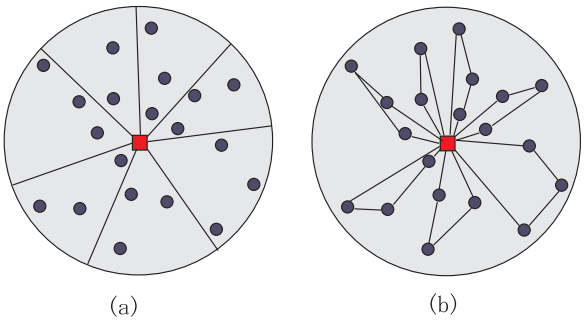

図 3: スイープ法による車両担当領域と解の例．

プ法による解は最適値の約 44.6%増しの解を算出する!) ことが Bienstock, Bramel と Simchi-Levi のエレガントな確率的解析によって“証明”されている [2]．

この弱点を克服するための巧みなクラスター分けの方法が Fisher と Jaikumar [6] によって提案されている．この近似解法は，一般化割当問題と呼ばれる ($\mathcal{NP}$-困難な) 問題を解くことによって顧客のクラスター分けを行うことから，一般化割当法 (generalized assignment method) と呼ばれている．

この近似解法は現時点で最強のクラスター先・ルート後法であり，METRO にも組み込まれている．METRO では種々の付加条件を考慮したクラスター分けを行う必要から，一般化割当問題の求解にも後述する Tabu Search の変形 (Tabu Navigation 法) を用いている．

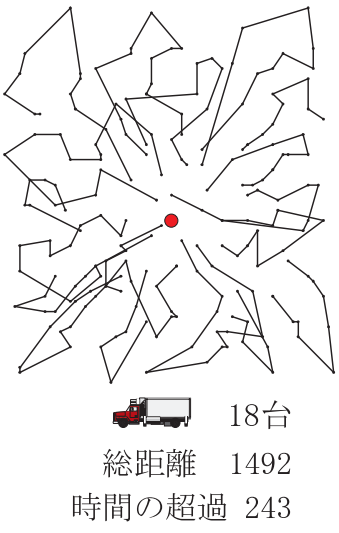

図 4: 一般化割当法による解の例．

クラスター先・ルート後法に付随する弱点として，稼動時間の上限制約を陽的に組み込んでいないことがあげられる．(図 4参照．ここでの問題は OR-Lib. の顧客数 199 の問題 (vrpnc10). この解は稼動時間の上限を破っている．) したがって，一般化割当法による解も稼動時間の上限を破っている可能性があるが，これは後述する Tabu Search を用いて解を改善することによって克服できる．

3. METRO に組み込まれている解法と機能

METRO は，配送計画問題を解く機能と配送費用配分問題を解く機能を持っている．ここではその解法と機能について記す．

3.1 METRO に組み込まれているメタ解法

メタ解法とは，組合せ最適化問題を解くためのヒューリスティックを有機的に結合させたものである．これは，従来の近似解法の枠組みを超えた新しいパラダイムであり，ヒューリスティックにパラメータを追加し，そこで生まれた自由度を用いて問題を巧みに解くテクニックである．パラメータの追加はユーザーによるチューニングの自由度を与え，より現実的な解を求めるために利用される．

METRO に採用されているメタ解法は，セービング法をベースにしたものと改善法 (Tabu Search) をベースにしたものの二つである．

前者は，Feo らのグループによる GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) [4] に Tabu Search の提案者である Glover が提案している Probabilistic Tabu Search [9] のアイディアを加味したものである．セービング法との最大の違いは，ランダム性を含む操作を何度も (実務的に許容される時間の範囲内で) 繰り返すことにあり (実際には，解の改善量の上位からある確率パラメータにより選択する)，幾つかのパラメータを予備的な実験によってチューニングしておくことによって，一度だけセービング法を実行したときにはまってしまう悪い解からの脱出が可能になる．

後者はユーザーとの対話形式によって解を改善していく Tabu Search の変形である．配送計画問題に対する Tabu Search は既に幾つか提案されており，その有効性も実験および事例によって確認されている [7, 13, 14, 16]．これらの研究者による実験結果と将来の METRO の拡張性を検討した上で，METRO では，定期的にユーザーにパラメータの調整や途中の探索で得られた最良解へ

いるメタ解法について述べる．§ 3.2では，METRO に組み込まれている費用配分方法について述べる．§ 6.では，集荷と配送を同時に考慮した複雑な事例の解決を紹介する．§ 7.では，まとめと METRO の入手方法について述べる．

2. 従来の近似解法とその弱点

以下に，配送計画問題を解くために従来よく使われてきた近似解法とその弱点を示す．

2.1 セービング法

セービング法 (節約法: saving method) は，1964 年に Clarke と Wright [3] によって提案されて以来，その単純さと若干の実用性のため，実務家の間では配送計画問題の代名詞にもなっている近似解法である．アルゴリズムは古典的な近似最適化の原理である “貪欲性” に基づくものである．

セービング法によって得られた解の特徴は，幾つかの横に広がったルート (図 2の太線) を形成することである．図 2にセービング法による解の典型的な例を示す．見易さのためにデポ (大きい丸) と顧客 (小さい丸) 間の枝は省略している．問題は OR-Lib. の顧客数 199 の問題 (vrpnc10) で，距離は 2 点間の直線 (Euclid) 距離を切り捨てて整数にした値，積載重量の上限 = 200，顧客上での作業時間 = 10，運搬車の稼動時間の上限 = 200 となっている．このような解はベテランのスケジューラーにとって受け入れ難いものであり，コスト的にもしばしば非常に悪い値を算出する．例えば，標準的なベンチマーク問題に対しては，後述する Tabu Search で得た解と比べて悪いときで 30%，平均的には 15%増し程度の解を算出する [7, 16]．

METRO でもセービング法 (に種々の付加条件を加味した変形) を初期解生成法の一つとして採用しているが，単独利用で得られる解には限界があるので，後述のメタ解法と組み合わせて用いられる．

2.2 クラスター先・ルート 後法

クラスター先・ルート後法 (cluster-first/route-second method) は，熟練したスケジューラーが配送計画問題を解くときにしばしば用いている方法であり，花王のシステムでも採用されている．この解法を一般的な形で書くと次のようになる．

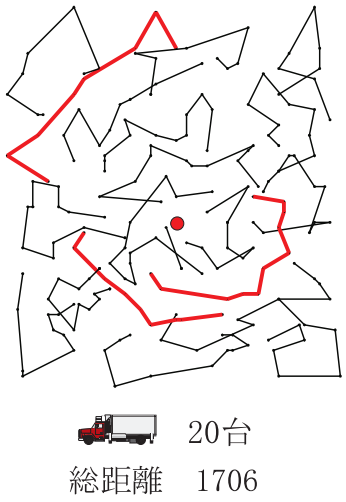

図 2: セービング法による解の例．

クラスター先・ルート 後法

1. 顧客を幾つかのグループ (クラスター) に分ける．その際，クラスターに含まれる顧客の需要量の合計が，運搬車の積載重量の上限を超えないようにする．
2. 各々のクラスターに含まれる顧客にデポを加えた点を巡回する最適 (または近似) 巡回路を求める．

クラスター先・ルート後法の後半では，巡回セールスマン問題と呼ばれる $\mathcal{NP}$-困難問題を解く必要がある．巡回セールスマン問題を解くための種々の方法や実装の例については [11, 17] などを参照されたい．

スケジューラーは地図とにらめっこをしながらクラスター分けを行うが，通常の計算機には “にらめっこ機能” は付いていない．以下では，計算機によって実行できる代表的なクラスター分けの方法を紹介する．

顧客が二次元のある領域に分布していると仮定する．デポを中心とした円を全ての顧客を囲むように設定し，その円を対象領域とする．このとき，自然なクラスター分けは，領域を小領域に分けることである．領域をどのように分けるかによって種々の解法が導かれるが，最も簡単な分け方は図 3 (ここでは，運搬車の最大積載重量 = 3．顧客の需要量 = 1．(a) 領域を積載重量を超えないように分割する．(b) 分割した領域ごとに巡回セールスマン問題を解き運搬車のルートを決める .) のように中心から出る半直線だけによって領域を扇形に分割する方法である．Gillet と Miller によって提案されたスイープ法 [8] は，この分割法に基づいている．

スイープ法による解は漸近的な意味で (顧客数を無限にしたときに) 非常に悪い (一般的な仮定を持つある確率分布にしたがって発生させた問題に対してスイー

1. ロジスティクス関連費用はGNP(国民総生産)の2割にも達し，輸送費用はその半分弱を占める．さらに今後も人件費の高騰などによってロジスティクス関連費用は増大の一途とたどると予想されている．

2. ロジスティクスシステム改善に対する数理的な手法の適用は，国内では極めて少ない．

3. ほとんどのロジスティクス関連のテキストでは古典的なアプローチ(セービング法，スイープ法など)を紹介しているに過ぎず，多くのロジスティクス改善手引書にあるのは精神論と新聞・雑誌から切り抜いた中身不明の事例だけである．

4. 配送計画問題は， システム全体を改善する際の土台となる重要な問題である．例えば，数箇所の候補地点から適当な施設を選択する問題は，配送計画問題を用いた what if 分析によって解くことが可能である．

5. 配送計画問題は極めて難しい組合せ最適化問題(もちろん$\mathcal{NP}$-困難)であり，汎用の数理計画ソフトウェアでは，特殊な例外[1] を除いて求解は困難である．

6. 配送計画問題は数ある組合せ最適化問題でも特に意地の悪いタイプの問題であり，適切なアルゴリズム設計の指針なしでは，実用的なソフトウェアを作成することは困難である．

7. (くどいようだが) 配送計画問題は組合せ最適化問題の中でも最も難しいとされる問題の一つであり，組合せ最適化問題に対する研究が実務的に役に立つことを示すには良い問題である．

開発したシステムは以下の特徴を持つ．

1. 安価な環境で動作し，また極めて単純で使いやすいインターフェースをもつ．

2. システムの名前 (METRO:*MEta* Truck Routing Optimizer) から連想されるように，幾つかのメタ解法 (meta-heuristics) [10] を導入しており，実務的に限られた時間内で最良の解を導くことを目標にしている．

3. メタ解法の性格上，付加条件を加味し易い．すなわち，適用される現場の状況に応じて千差万別である付加条件を，最小限の手間でツールに組み込めるように設計されている．

4. 標準装備でも，幾つかの事例から抽出した付加条件を考慮している．現在のバージョン (Ver. 2.1) で加味されている条件としては，以下のものがあげられる．

   (a) (重量，(高速) 料金などの属性が異なる) 複数種類のトラックの考慮

   (b) 高速および通常道路から成るネットワークを保持し，地点間の移動時間および移動費用(含高速料金)を考慮して通過する道路を選択する機能

   (c) 積載量条件として重量(トン)および容量(m^3)の両者を考慮

   (d) 顧客上での作業開始時刻に対する時間枠条件 (何時から何時までの間に作業を開始しなければならないという条件) の考慮

   (e) 一日の稼動時間の上限の考慮 (または残業費用の考慮)

   (f) 運搬車と顧客の相性の考慮 (例えば，10トントラックが入れない顧客や，ある種類のトラックでないと訪問できない顧客の考慮)

   (g) 協力ゲームの理論を用いて総費用を顧客に公平に配分する機能(配送計画問題を子問題として含んだ階層型の意思決定(§ 3.2参照)，共同配送のときの費用分担，料金決定などに使用)

5. OR-Lib. [2] で配布されているような標準的なベンチマーク問題に対しても，良好な解を短時間で算出するように設計かつチューンアップされている．

以下では，従来の方法について述べた後，METROに含まれている機能の概要，理論的背景および適用事例について述べる．

§ 2.では，従来の配送計画問題の近似解法とその弱点について述べる．§ 3.1では，METRO に組み込まれて

[1] 一台の運搬車が高々数箇所の顧客を巡回する場合，または総顧客数が極端に少ない場合．

[2] OR-Lib. に関する情報は o.rlibrary@imperial.ac.uk に info のメッセージを入れて電子メイルを出すか，http://mscmga.ms.ic.ac.uk/ または ftp: mscgma.ic.ac.jp から得られる [1]. より多くのベンチマーク問題は OPT-NET (http://www.zib-berlin.de/ または ftp: elib.zib-berlin.de) から入手できる．

1. はじめに

配送計画問題(運搬経路問題: Vehicle Routing Problem, 以下 VRP と略す) を解くためのシステム METRO(MEta Truck Routing Optimizer) を開発したので，ここに報告する．このソフトウェアは，幾つかの運送業者およびメーカーに対するコンサルティングから生まれたものである．実際には物流業者のみならず，様々な物流部門をもつ製造流通業者もこのソフトウェアが適用可能と考えられる．例えば，ビール，清涼飲料水，食料品，ガソリンなどの消費財の小売りへの配達や，メーカーにおける工場への部品調達，スクールバスや航空機のスケジューリングなどが適用可能な現場と考えられる．

一般に，配送計画問題は以下の仮定を持つ．

- デポと呼ばれる特定の地点を出発した運搬車 (トラック) が，顧客 (需要地点) を経由し再びデポに戻る．このとき運搬車による顧客の通過順をルートと呼ぶ (図 1参照)．
- デポに待機している運搬車の種類および最大積載重量は既知である．
- 顧客の位置は既知であり，各顧客の需要量も事前に与えられている．
- 地点間の移動時間，移動距離，移動費用は既知である．
- 一つのルートに含まれる顧客の需要量の合計は運搬車の最大積載重量を超えない．
- 運搬車の台数は，決められた上限を超えない (ただし，超過した運搬車に対するレンタル料を考える場合もある .)
- 運搬車の稼働時間が一日の上限を超えない (ただし，超過時間を残業費用として考える場合もある .)

上の仮定の下で総費用 (目的関数) を最小化するルートを求めることが配送計画問題の目的である．

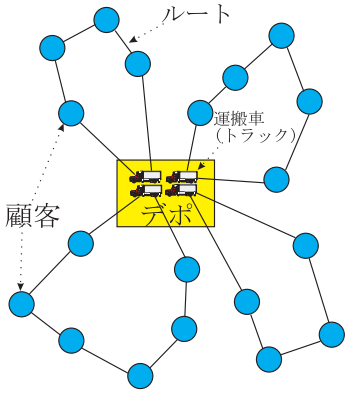

図 1: 配送計画問題の概念図．

念のため，配送計画問題の基本形に対する厳密な定義もあげておく．

運搬車の集合を $K = \{1, 2, \cdots, m\}$，点の集合を $N = \{0, 1, 2, \cdots, n\}$ と書く．ここで，点 0 はデポを表し，他の点は顧客を表す．顧客の集合 $N \setminus \{0\}$ を N_0 と書く．顧客 $i \in N_0$ は需要量 q_i を持ち，その需要はある運搬車によって配送される (または収集される) ものとする．運搬車 $k \in K$ は有限の積載重量 Q_k を持ち，運搬車によって運ばれる需要量の合計は，その値を超えないものとする．点 i から点 j に移動するときにかかる費用 (距離，時間) を c_{ij} と書く．このとき，配送計画問題の目的は全ての顧客の需要を満たす m 台の運搬車の最小費用のルート (デポを出発して再びデポへ戻ってくる単純閉路) を求めることである．

METRO を開発した動機は以下の通りである．

くぼ　みきお 東京商船大学 流通情報工学
〒 135 東京都江東区越中島 2-1-6
もうり　ひろあき
東京工業大学 経営システム工学，(株) 三菱総合研究所
〒 152 東京都目黒区大岡山 2-12-1
受付　95. 10. 9　　採択　96. 5. 2