

TR-H-051

シミュレーテッド・アニーリング法を用いた
配送計画支援システム

五十嵐 治一

1994. 2. 3

ATR 人間情報通信研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町光台 2-2 ☎07749-5-1011

ATR Human Information Processing Research Laboratories

2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02 Japan

Telephone: +81-7749-5-1011

Facsimile: +81-7749-5-1008

シミュレーテッド・アニーリング法を用いた 配送計画支援システム*

A Vehicle Schedule Planning System Using a Simulated Annealing Method

五十嵐 治一

Harukazu Igarashi

(株) ATR人間情報通信研究所

ATR Human Information Processing Research Labs.,

Kyoto 619-02, Japan

1. はじめに

組合わせ最適化問題の一つの解法として、シミュレーテッド・アニーリング(Simulated annealing)法が、Kirkpatrick-Gelatt-Vecchiらにより提案されており[Kirkpatrick 83]、多くの分野で応用が試みられている。Hopfield-Tankらの決定論的な動作を行なうアナログニューロンモデルを用いた方法[Hopfield 85]とは異なり、統計物理学における熱平衡状態の確率分布(Gibbs分布)の性質を利用しており、熱的なゆらぎによりエネルギー関数(目的関数)のローカル・ミニマムからの脱出が可能である。

シミュレーテッド・アニーリング法は、システムの規模が大きくなり、温度が低くなるにつれて熱平衡状態への到達時間が長くなり、Hopfield-Tankたちの方法に比べて、計算時間の点で問題があるとされてきた。しかし、近年の急速なワークステーション等の計算機の発達により、問題の規模が限定されていれば多くの分野で実用的に役立つ方法であると考えられるようになってきた。

たとえば、最近のわれわれの実験では、Hopfield-Tankらが例題として示した30都市からなる巡回セールスマン問題(Traveling salesman problem)[Hopfield 85]においては、Hopfield-Tankの方法では総経路長が5.6の解を得る(シグモイド関数の傾きを徐々に小さくするという平均場アニーリングを行なえば、総経路長が5.0の解を得る)のに対し、シミュレーテッド・アニーリング法では総経路長が4.18の解をワークステーション(SUN Sparc10)を用いて約9秒で求めることができた。Hopfield-Tankの論文[Hopfield 85]には、巡回セールスマン問題における代表的な近似解法としてLin-Kernighanの方法を用いた解が示されているが、この解の総経路長の値は4.26である。

このように、シミュレーテッド・アニーリング法は実用的にも有用であり、様々な分野において応用が期待されている。これまでに、上記の巡回セールスマン問題をはじめとして、LSI回路などの最適配置問題[Kirkpatrick 83]、操業計画などのスケジューリング問題[湯上93][山田93][若林93]、レンズなどの自動設計[松居93]、画像処理[Geman84][五十嵐92a][五十嵐93]などの多くの問題への応用が報告されている。

シミュレーテッド・アニーリング法が広範囲の分野で応用が可能な理由は、処理が簡単であることと、Hopfield-Tankらのモデルと異なり、必ずしもニューロン(あるいは、決定変数)の集団により問題

(*)このレポートは、筆者が人工知能学会誌に投稿した論文(94.1.)に加筆したものである。

を定式化する必要がないことである。たとえば、上記の巡回セールスマン問題においては、Kirkpatrickらは各都市に対応した記号を訪問順に並べた1次元リストを解(巡回路)の表現に用いている。解の表現を工夫することにより、冗長性をなくして探索空間を制限し、計算時間を短縮することができる。

本研究では、シミュレーテッド・アニーリング法を配送計画問題の解法に応用し、実用的な配送計画支援システムが構築可能かどうかを探る。配送計画問題は、2.でも述べるように、複雑な制約条件を持った多目的最適化問題であり、従来の数理計画法(OR)では、実用的な配送計画支援システムはいまだに構築できていない。しかし、3.で述べるように、配送計画案を配送先を表した記号からなる2次元行列で簡潔に表現し、最小にしたいコストの項と制約条件を表した制約項の線形和からなるエネルギー関数を用いることにより、この複雑な多目的最適化問題をシミュレーテッド・アニーリング法で取り扱うことができる。

4.では、実験により本システムの有効性を検証している。ここでは、複数台のトラックを用いて配送センター(単数)から配送先(46ヶ所)へ荷物を配送する問題を、現場の実データに基づいて解いている。5.では、本研究のまとめ、本システムに残された課題について述べる。なお、本レポートで提案している配送計画支援システムの構成や実行環境などについては付録にまとめてある。

2. 配送計画問題について

2.1 物流と配送計画問題

一般的に、製品が原材料から加工、組立を経て消費者に届けられるまでの過程は、製品の流れを中心に見ると、生産過程と流通過程とに2分される。後者の流通過程を、現在では物的流通(Physical distribution)の略で”物流”と呼んでいる[高橋93]。

生産過程においては、大規模化、量産化、機械化、コンピューター化、流れ作業化などにより生産コストの削減が図られてきた。しかしながら、近年、消費者需要が多様化し、大量生産による見込み生産から、売れただけ作るという受注生産の考え方に変わってきている。これに伴い、原材料や部品の流れは生産ラインの流れに同期化され、多品種小量生産を効率的に行なえるような、JIT(Just in Time)生産方式が主流となってきた。それとともに、原材料や部品の供給業者は、生産ラインに合わせた輸送活動(同期化輸送)を要求されてきた。一方、流通過程においても、製品や商品の多品種化に影響されて、小売店への少量高頻度輸送が要求されるようになってきた[忍田90]。

ところが、こうした同期化輸送と少量高頻度輸送を、多数の企業が行なうようになった結果、数々の問題点が生じてきている。一つは、積載率の低下に見られる輸送効率の悪さである。運輸省の調査によれば、小型トラックのによる都市内輸送における積載率は、1970年に33.7%であったものが、1980年には23.1%に、1990年には18.0%にまで減少している[川嶋92]。積載率の低下は、トラック走行台数の増加を意味し、ひいては、交通渋滞の深刻化、大気汚染、騒音、振動、交通事故の増大を招く結果となる。たとえば、東京都心部でのラッシュのピーク時の自動車の平均走行速度は、1983年から1988年の間に17.3km/hから16.0km/hに、東京都市圏における平均走行速度は、30.7km/hから28.3km/hに低下している[道路経済研92]。また、東京都近辺では、発生源別の窒素酸化物排出量のうち約7割を自動車占めている[今泉93]。当然、経済面においても、流通コストの増大につながり、最終的には製品価格の上昇や利益の減少をもたらすことになる。さらに、将来予想される若年労働力の絶対的な不足や、操業時間の短縮化などの問題も物流業界には残されており、事態を一層深刻化させている。

これらの問題点を解決するには、道路の延長や拡張などの交通容量を増やすことや、物流センターの設立などのハードウェアに関する対策だけでは不十分である。根本的には、輸送効率の向上が必要である。このためには、輸送効率の良い配送計画を立てるというソフトウェア面での対策が必要である。トラックに関するこの種の問題は、”配送計画問題”(Vehicle scheduling problem)と呼ばれ、与え

られた配送先と配送すべき荷物を、トラックに割当てる”配車問題”と、各車両の配送経路を決定する”配送経路問題”との2つの問題から構成されている[川嶋93]。

配送計画問題は、デポ(Depot)と呼ばれる配送元から配送先への配送コストを最小にするための、配車組合わせと各車両の配送経路を決定する問題であるが、現実の問題として考えると複雑な制約条件下における多目的最適化問題となる。どのような制約条件を考慮して、どのようなコストを最小にするかによって、いろいろなバリエーションが考えられるが、ここではなるべく現実的で、かつ、一般的な問題を考えたい。また、アルゴリズムも汎用性があり、なるべくたくさんの現実的な配送計画問題を取り扱えるものを考えることにする。本論文では、1つのデポから指定された複数台のトラックにより複数の配送先に荷物を配送する問題を考える。具体的な制約条件としては、配送先側から要求される制約条件と配送者側から要求される2種類の制約条件がある。配送先側から要求される制約条件として、配送時刻の時間帯による指定、乗り入れ可能な車両サイズ(トン車数)の上限の指定、停車時間の指定、荷量の指定を考える。いずれも配送先ごとに異なる条件を指定できるものとする。また、配送者側から要求される制約条件として、使用車両のサイズ(トン車数)、車両の積載量の上限、配送完了後の帰着地点、最大回転数(空車状態でデポに戻って再び荷物を積んで配送に用いることを回転と呼ぶ)、車両のデポからの出発時刻の指定を考える。いずれも車両ごとに異なる条件を設定できるようにする。

最小にしたい配送コストとしては、各車両が配送に要した時間を総計した”総配送時間”、ある時刻からすべての配送が完了する時刻までの時間(”全配送完了時間”)、指定された車両間の配送時間の偏り(標準偏差)の3種類を考えることにする。総配送時間の短縮は、走行コストや人件費の短縮につながり、配送完了時刻を早めることは、生鮮食料品などの配送に要求される。また、各車両の配送時間の均等化は、労務管理の面で望まれている機能である。これら3種類の配送コストの最小化は、お互いに競合しあう場合があり、どのコストを優先的に最小化するかを指定できる必要がある。

2.2 先行研究

前節で述べた配送計画問題を、数理計画問題として定式化しようとする、非線形な目的関数を持つ0-1型の整数計画問題となってしまう、配送時刻の時間帯指定のない場合であっても厳密解を得ることは困難であるとされている[川嶋93]。したがって、実用的な配車・配送計画問題のために、これまでに用いられてきた解法はすべて近似解法である。

配送計画問題は、配車問題と配送経路問題を一体化して解かなければ最適解を得られないことは自明であるが、その困難性のために、配車と配送経路の2つの段階に分けて解く、”2段階法”が従来から用いられてきた。2段階法では、まず最初に車両の積載量の上限に注意して何らかの方法で配送先を各車両に割り当てる。これは一種のクラスターリングの問題である。次に第2段階では、各車両ごとに、配送時刻指定などに注意しながら割り当てられた配送先間の最適配送経路を求める。第2段階の配送経路問題は、制約条件付きの巡回セールスマン問題に帰着する。

第1段階のクラスターリングでは、デポを中心にした角度を基に、時計回りに扇状の領域でグループ化していくSweep法(Gillet-Miller法)[Bodin 83]や、車両台数個の種点となる配送先とデポとの往復路に配送先を1つずつ挿入していく一般化割当法[Bodin 83]などの方法が古くから考案されてきた。しかし、どの制約条件をどの段階で用いるかという点に関しては、かなり経験的な要素が加わる。また、制約条件や目的関数の変更・追加に柔軟に対処できるとは言いがたく、汎用性に欠けている。

最近では、2段階法の各段階で、決定論的な動作をするアナログニューラルネットワークモデルを用いた方法[川嶋93]が考案され、かなり複雑な制約条件を持った現実の配車・配送計画問題に適用され良い結果を得ている。しかし、2段階に問題を分割すること自体が、かなり大きな近似であり、2つの段階で取り扱われる問題の相互作用を無視していることには変わりがない。たとえば、第1段階では正確な配送経路が決定されていないので、配送時刻指定や各車両間の配送時間の均等化を考慮し

て配車を行なうことができない。また、車両を回転して使用する場合や車両ごとに帰着地点が異なる場合にも対処しにくい。

これに対して、配送計画問題を配車問題と配送経路問題に分割せずに、一体化したままで取り扱う方法としては、Saving法(Clark and Wright 法)[Bodin 83]を用いた方法[玉木74]があるが、一般にSaving法による解の質はあまり良くないとされている。また、数理計画法における組合わせ最適化問題のための代表的な手法である分岐限定法や、プロダクションシステムなどの従来からのAI技法を用いて、現実の配送の現場に役立つことのできる汎用性のあるシステムを作成することに成功した例はほとんど報告されていない。前節で述べたようなトラックによる配送の現場では、配車係の経験に基づいた手作業で配送計画が決定されているのが現状である[川嶋92]。

3. 配送計画支援システム

3.1 システムの機能と特徴

2.1でも述べたように、現実の配送計画問題には様々な制約条件が存在し、最小にしたいコストもただ1種類に限られるわけではない。特に、配車と配送経路の2つの計画問題を同時に取り扱うことは極めて困難とされ、先行研究の多くは、2段階法によるアプローチを採用してきた。しかし、本システムでは、配送先やデポを表す記号を要素とする2次元行列(2次元リスト)により、配車と配送順序の2つの計画案を簡潔に表現している。配送先と道路の位置、走行速度を与えれば、任意の2つの配送先間の最短移動時間とその経路は求めることができるので、配送順序が決定されれば実際の配送経路は容易に決定される。本システムの第1の特徴は、このように配送計画案の表現を工夫することにより、配車と配送経路の2つの計画問題を同時に取り扱うことができることである。したがって、2段階法よりも良質の解を得ることが期待できる。

第2の特徴は、配送計画支援システムとしての汎用性である。ある特定の配送計画問題だけを解くための支援システムであっては、現実の配送の現場で広く用いられることは期待できない。いろいろな制約条件やコストの追加・変更に対処できる必要がある。そのために、本システムでは、制約条件とコストを表現した項の線形和によりエネルギー関数(計画案が妥当でない程度を数値的に表現している)を定義しており、項の重み係数の値を各制約条件と各コストの重要さの度合いに応じて設定することが可能になっている。

本システムでは、具体的な制約条件としては、2.1でも述べたように、配送先側から要求される制約条件として、配送時刻の時間帯による指定、乗り入れ可能な車両サイズ(トン車数)の上限の指定、停車時間の指定、荷量の指定を考えている。いずれも配送先ごとに異なる条件を指定することが可能である。また、配送者側から要求される制約条件として、使用車両のサイズ(トン車数)、車両の積載量の上限、配送完了後の帰着地点(制限なし/出発地点へ戻る/指定された店舗へ戻る/のどれかを選択)、最大回転数、デポからの出発時刻の指定、を考慮している。いずれも車両ごとに異なる条件を設定することができる。また、最小にしたい配送コストとしては、総配送時間、全配送完了時間、配送時間の偏り(標準偏差)を考えている。本システムでは、制約条件とコストの削除・変更や、上記以外の制約条件やコストをエネルギー関数中に追加することも容易であり、システムの拡張性に優れている。また、配送計画案が簡潔な2次元行列で表現されていることから、複数のデポを取り扱うことや出発地点の指定などの現実の配送の問題に応じてカスタマイズすることも容易であり、本システムはかなり広い範囲の配送計画問題を取り扱うことができると予想される。

第3の特徴は、エネルギー最小化の手法としてシミュレーテッド・アニーリング法を用いている点である。1.で示した巡回セールスマン問題の例からもわかるように、シミュレーテッド・アニーリング法は、うまく状態の表現を工夫して冗長性をなくし、探索空間を制限することができれば、実用的な時間で十分に良質な近似解を与えてくれる。

なお、本システムは、研究用のバージョンではあるが、実際にSUNワークステーション上で作成され、評価テストを行なっている段階である。システムの概要については付録で述べる。

3.2 配送計画案の表現

本節では、本システムにおける配車と配送順序の表現方法を説明する。本システムでは、1つの配送計画案は以下に述べる1つの2次元行列で表されている。今、 $M \times L$ の2次元行列 X を考える。行列 X の要素を x_{ij} ($i=1, \dots, M, j=1, \dots, L$)で表す。 i は、車両を識別し、 j は配送順序に対応している。 M は配送に利用する車両の台数である。 L は、 $L=N+N_{\max}+2$ で定義される定数とする。ただし、 N は、配送先(契約している店舗)の総数であり、 N_{\max} は $N_{\max} = \max_{i=1, \dots, M} [n_{\max}^0 - 1]$ (n_{\max}^0 : 各車両の最大回転数)で定義される自然数である。図1では、次章(4.)の実験で仮定された、デポが1ヶ所で全車両がそこから出発する場合の2次元行列の初期状態が示されている。この場合、 x_{ij} は、 $\{-1, 0, 1, \dots, N\}$ のどれかの値をとる。ここで、0は出発地点のデポ(配送センター)を表し、1から N は、配送先の番号を表している。

	←	L列	→								
M行	0	1	2	3	.....	N	0	0	0	0	-1
	0	0	0	0	-1	.....	-1				-1
	0	0	0	-1	-1	.....	-1				-1
	0	-1	-1	-1	-1	.....	-1				-1

図1 配送計画案を表現した2次元行列の例(初期状態).

各行が各車両に割り当てられた配送先の店舗(配車計画)とその配送順序(配送経路計画)とを表している。 M は車両台数、 N は配送先の店舗数、行列要素の値0はデポ、1から N は配送先を表す記号で、-1はダミー記号である。

図1で、第1行は、最初の値は0(デポ)に固定され、2番目からは、配送先の契約店舗を表す番号が1から N まで昇順に並べられている。次に、番号1の車両に指定された最大回転数 n_{\max}^0 から1を引いた個数だけ0が並べられる。第1行の残りの場所には、すべて-1を並べる。2行目以降(第 i 行、 $2 \leq i \leq M$)は、 n_{\max}^0 個の0を並べた後ろには、すべて-1を並べる。

1つの配送計画案は、このような2次元行列で表現される。各行の番号の列は、各車両ごとの配送順序を左から順に表している。ただし、2列目以降に出現する0は配送センターへ戻ること(回転)を表しており、-1はダミー記号で配送順序には関係なく読み飛ばすものとする。ダミー記号を用いると、ある店舗をある車両の配送順序に挿入するという試行変形が、3.4で述べる2つの行列要素の入れ替え操作(互換)により容易に実現できるという利点がある。今回は、2次元行列 X のサイズを L に固定しているが、これはコンピュータ計算において2次元行列 X の値を格納するメモリー領域の大きさを固定するため、ダミー記号の個数が必要以上に多くなり冗長な点もあるが、上記の試行変形操作や実際のプログラミングの上では、可変長の2次元リストよりも固定サイズの2次元配列の方が取り扱やすい。なお、ダミー記号を読み飛ばせば、2次元行列 X の任意の状態が1つの配送計画案に対

応し、逆に、任意の配送計画案はある2次元行列Xにより表現することができる。ただし、対応する2次元行列はただ一つとは限らない。

3.3 エネルギー関数

3.2で定義された2次元行列Xに対して、エネルギー関数E(X)を定義する。どのようなエネルギー関数を考えるかは、配送計画で考慮しなければならない制約条件や最小にしたいコストの種類によるが、ここでは、2.1や3.1で述べた機能を実現させるために、次の制約項 $[E_{\text{cnst}}^{(k)}]$ ($k=1,2,3$)とコスト項 $[E_{\text{cost}}^{(k)}]$ ($k=1,2,3$)とを考えた。

$$E(X) = a_1 E_{\text{cnst}}^{(1)} + a_2 E_{\text{cnst}}^{(2)} + a_3 E_{\text{cnst}}^{(3)} + b_1 E_{\text{cost}}^{(1)} + b_2 E_{\text{cost}}^{(2)} + b_3 E_{\text{cost}}^{(3)} \quad (1)$$

[制約項]

$E_{\text{cnst}}^{(1)}$: 積載量の上限に対する超過量の総和。すなわち、

$$E_{\text{cnst}}^{(1)}(X) = \sum_{1 \leq i \leq M} \sum_k \max\{0, w_i^{(k)} - w_i^{\text{max}}\} \quad (2)$$

である。ただし、 w_i^{max} は車両iの積載量の上限を表し、 $w_i^{(k)}$ は車両iのk回転目のデポにおける積載量を表している。(2)では積載量の上限を超過する度合いに応じてペナルティが大きくなっている。

$E_{\text{cnst}}^{(2)}$: 各配送先に設定された配送時刻に関する制約条件を表す。配送先 k への到着時刻を $t_k(X)$ で、到着時刻の指定を時間帯 $[t_k^{\text{lower}}, t_k^{\text{upper}}]$ で表せば、

$$E_{\text{cnst}}^{(2)}(X) = \begin{cases} 0 & \text{if } t_k^{\text{lower}} \leq t_k(X) \leq t_k^{\text{upper}} \text{ for all } k = 1, \dots, N, \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

で定義される。(3)は、すべての到着時刻指定が完全に満足されていれば0、そうでなければ1の値を取る2値関数である。これ以外にも、各到着時刻指定に対する違反量に応じてきめ細かくペナルティの量を設定することも考えられる。

$E_{\text{cnst}}^{(3)}$: 各配送先に設定された受け入れ車両のサイズ(トン車数)に関する制約条件を表す。車両iのサイズを g_i (例、4トン車ならば $g_i = 4$)、配送先 k で受け入れることのできる車両の最大トン車数を G_k 、配送先 k に乗り入れる車両を $i(k)$ で表すと、

$$E_{\text{cnst}}^{(3)}(X) = \begin{cases} 0 & \text{if } g_{i(k)} \leq G_k \text{ for all } k = 1, \dots, N, \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

で定義されている。また、(4)の代わりに、制約が満たされた配送先の数に応じて、きめ細かくペナルティの量を設定することも考えられる。

[コスト項]

$E_{\text{cost}}^{(1)}$: 各車両が配送に要した時間の総和 $\{t_i\} (i=1, \dots, M)$ (総配送時間)。各車両の配送時間 $\{t_i\}$ の定義は、各車両の帰着地点に関する指定状況 (制限なし / 出発地点へ戻る / 指定された店舗へ戻る / のどれか) により異なり、デポ (今回は単一のデポ) を出発した時刻から、次の3つのいずれかの時刻までの時間である:

(i) 帰着地点の制限がない場合:

その車両に割り当てられた最後の配送先における積み下ろし作業の完了時刻。

(ii) 出発地点へ戻る場合:

配送完了後、出発地点へ帰着した時刻。

(iii) 指定された店舗へ戻る場合:

配送完了後、指定された店舗の地点へ帰着した時刻。

$E_{\text{cost}}^{(2)}$: すべての配送先での積み下ろし作業が完了するまでの全配送完了時間。4.の実験では、午前零時から全配送が完了するまでの時間を用いている。

$E_{\text{cost}}^{(3)}$: 指定した車両間での配送時間 $\{t_i\}$ の標準偏差。

(1)に示したエネルギー関数は、上記の制約項とコスト項の線形和で表されている。制約が満たされて、コストが小さくなればエネルギー関数が小さな値を取るよう定義されている。さらに、制約条件の重要性やコスト項の優先順序に応じて、各項の重み係数 $\{a_k\} (k=1,2,3)$ 、 $\{b_k\} (k=1,2,3)$ の値を調整することが可能である。また、上記項目の定義を変更することや、上記以外の制約項やコスト項を追加することも容易である。したがって、本システムは現実の複雑な配送計画問題に対処できるだけの柔軟性がある。

3.4 シミュレーテッド・アニーリング法

シミュレーテッド・アニーリング法は、熱平衡状態にある体系の温度を徐々に下げながら、最終的に最小エネルギー状態に到達する方法である [Kirkpatrick 83]。各温度において熱平衡状態を実現するために、本システムでは状態遷移則としてメトロポリス法を用いた。

メトロポリス法による状態遷移則は、次のようにまとめることができる。以下では、体系の状態 X のエネルギーを $E(X)$ で表している。

[メトロポリス法による状態遷移則]

- (i) 体系の状態 X を試行変形させて状態 X' を選択する。
- (ii) $\Delta E = E(X') - E(X) < 0$ であれば、状態 X' に遷移する。
 $\Delta E > 0$ であっても、 $\exp(-\Delta E/T)$ の確率で状態 X' に遷移する。

この操作を十分な回数だけ繰り返すことによりその温度における熱平衡状態、すなわち、確率分布が Gibbs 分布 (Boltzmann 分布) で表される状態に到達することが保証されている [上坂90]。

(i) の試行変形としては、現在の状態の近傍を選ぶのが一般的であり、本システムでは 3.2 で定義した 2 次元行列 X の第 1 列を除いた 2 つの要素をランダムに選んで互いの位置を入れ換えるという操作

を採用した。ただし、次の禁則条件を設定した。

[試行変形における禁則条件]

ランダムに選ばれた2つの行列要素 $x_{i,j}$ と $x_{i',j'}$ に対して、

- (i) $x_{i,j} = x_{i',j'} = -1$ または $x_{i,j} = x_{i',j'} = 0$ である場合、または、
- (ii) $i \neq i'$ で、 $x_{i,j} = 0$ または $x_{i',j'} = 0$ である場合

には試行変形をやり直す。

上記の禁則条件を設定した理由は、(i)の場合は試行変形を行っても配送順序が全く変化していないからであり、(ii)の場合は、各車両に与えた最大回転数の条件が変更されてしまうからである。このような試行変形を棄却することにより探索空間を制限することができる。また、互換操作の対象から第1列の行列要素を除いたのは、本システムでは出発地点が指定されていると仮定したからである。

3.5 本システムの処理フロー

本システムの処理フローを以下にまとめる。

[本システムの処理フロー]

- (i) データ入力と初期設定。
- (ii) 配送先間の最短移動時間とその経路をDijkstra法により求める(付録参照)。
- (iii) メトロポリス法により体系の状態を遷移させ、熱平衡状態に到達させる。途中で出現した実行可能解の中で、エネルギー値が最小である状態を記録する。
- (iv) 温度を下げて最終温度以下ならば終了、そうでなければステップ(iii)へ戻る。

配送先の位置情報としては、配送先と交差点（これらをノードと呼ぶ）の位置情報が与えられており、道路に関する情報は、ノード間を結ぶリンクごとに実際の道路の長さが付加されている。ステップ(ii)では、これらの情報を基に、指定された走行速度における配送先間の最短移動時間とその経路を、Dijkstra法[茨木93]によりあらかじめ計算しておく。ステップ(iii)では、この情報を用いてエネルギー関数 $E(X)$ の計算を行なっている。

4. 実験

4.1 問題設定と実験条件

性能評価のための具体例として、配送先(No.1からNo.46までの46ヶ所)と道路が図2に示すような配置である問題を考える。ただし、図2で、No.0で示された地点は配送センター(デポ)であり、すべての車両の出発地点はこの地点であるとする。この例題は、あるコンビニエンスストア会社が、埼玉県三郷市周辺の自社チェーン店に食品をトラックで配送している実際の事例をベースにしている。

図2でノードは配送先の店舗と交差点を表しており、ノードをつなぐリンクは道路を表している。

各配送先間の最短移動時間とその経路は、3.5のステップ(ii)でDijkstra法により計算される(付録参照)。道路の走行速度は以下の実験ではすべて一律に10km/hと仮定している。

また、アニーリングの温度スケジュールは、[0.0001,10.0]の間で乱数により20個の温度ステップを選んで挿入して作成した。試行変形の回数は、各温度で一律に10000回と設定した。配送先における停車時間は、若干の例外を除いてほぼ一律に3分としている。

以下では、問題の目的と制約条件を変えて、実験1から実験4までの4種類の実験を行なった。各実験で用いたコスト項と制約項ならびに諸条件を表1に、実験結果を表2に示す。各実験ともに、乱数のシードを替えて10回ずつ実験を行ない、表2にはその平均値が記されている。

表2では、総配送時間 J (各車両の配送時間 t_i の総和)、全配送完了時刻 t (最終配送先に到着する時刻)、配送時間の差 D (t_i の最大値と最小値の差)が示されている。参考として、配車係が定めた運行ルート(トラック3台)に沿って配送を行なった場合の(J, t, D)の値も記されている。

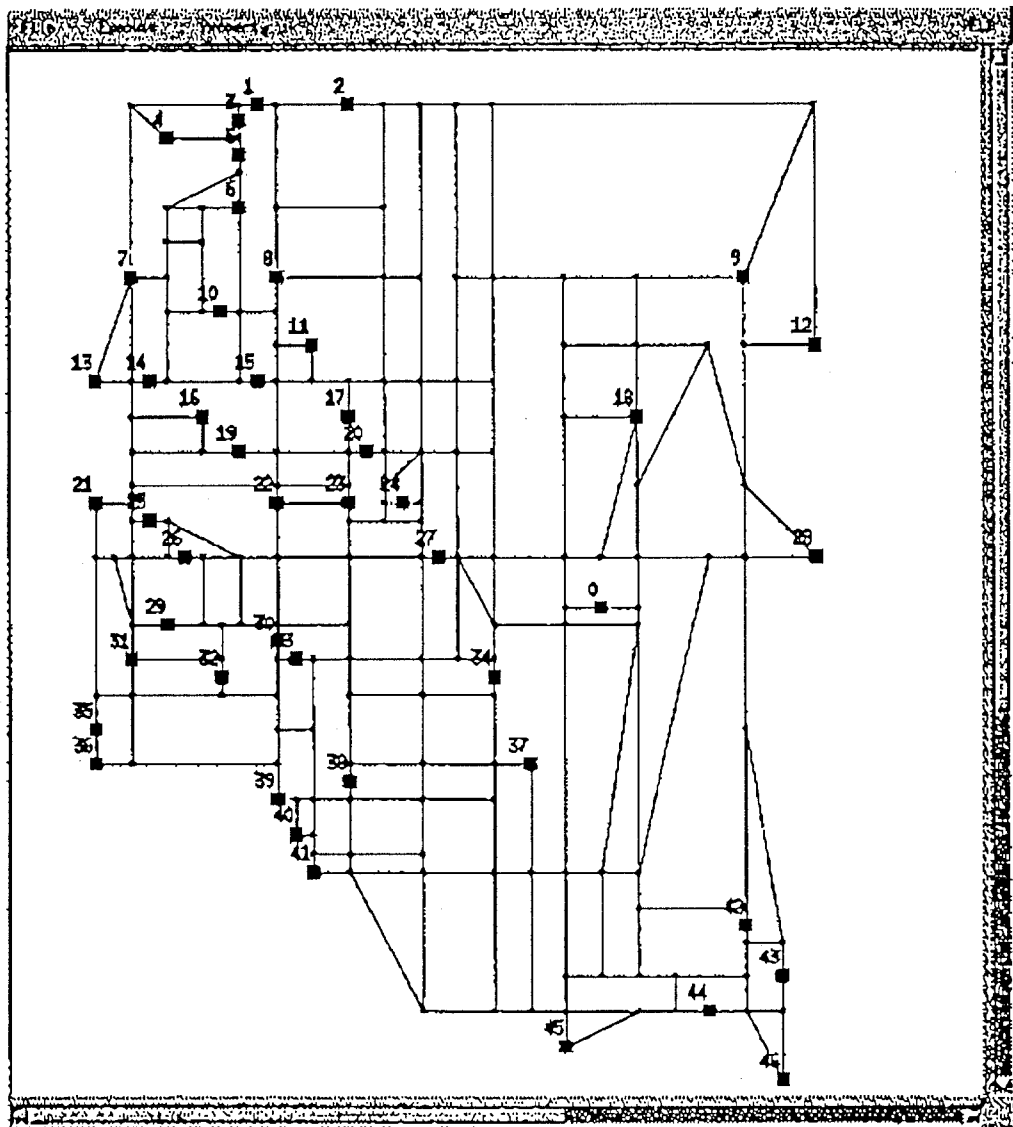


図2 配送先の店舗と道路のマップ (記号■は、配送センターと契約店舗を、リンクは道路を表している)

	コスト項	制約項	トラックに関する制約条件	パラメータ
実験1	全配送完了時間	積載量の上限	4トン車(3台) 帰着制限なし	$a_1 = b_2 = 1$
実験2	総配送時間	積載量の上限	4トン車(3台) 帰着制限なし	$a_1 = b_1 = 1$
実験3	総配送時間 全配送完了時間	積載量の上限	4トン車(3台) 帰着制限なし	$a_1 = b_1 = 1$ $b_2 = 0.5072$
実験4	総配送時間 全配送完了時間 配送時間の標準偏差	積載量の上限 配送時刻の指定(3ヶ所) 車両サイズの上限(3ヶ所)	4トン車(1台)、2トン車(3台) 出発時刻、帰着地点が異なる 最大回転数5	$a_1 = a_2 = a_3 = 578.66$ $b_1 = 1.0, b_2 = 0.5072$ $b_3 = \{0.1, 1.0, 4.0\}$

表1 実験で用いたコスト項・制約項と諸条件

	総配送時間J	全配送完了時刻t	配送時間の差D
現行ルート	663.08(分)	20:02	103.06(分)
実験1	669.69	19:11	2.85
実験2	592.83	19:14	52.57
実験3	597.38	19:00	31.06
実験4			
($b_3=0.1$)	781.25	19:11	86.56
($b_3=1.0$)	791.30	19:04	48.04
($b_3=4.0$)	905.98	19:14	1.31

表2 実験結果 (各実験を10回ずつ実行した平均値)

4.2 実験1 -全配送完了時刻を最も早くする配送計画案-

本節では、制約項として車両積載量の上限のみを考え、コスト項としては全配送完了時間を最小にすることだけを考えた。項の重みは、 $a_1 = b_2 = 1.0$ とし、残りの係数はすべて0に設定した。実験1では、4トン車のトラック3台がすべて配送センターを15:30に出発するものとし、帰着地点の制限は付けていない。また車両の回転もしないと仮定した。

現行ルートと実験1の結果を比べると、全配送完了時刻tが大幅に(51分)早まっていることがわかる。また、3.3で定義した $E_{\text{cost}}^{(2)}$ の項は全配送完了時間を短くするだけでなく、トラックごとの配送時間の偏りも小さくする効果があることがわかる。

4.3 実験2 -総配送時間を最短とする配送計画案-

制約項として車両積載量の上限のみを考え、最小にしたいコストとしては総配送時間だけを考えた。すなわち、項の重みは、 $a_1 = b_1 = 1.0$ とし、残りの係数はすべて0に設定した。それ以外の条件はすべ

て実験1と同じに設定してある。

実験2の結果を見ると、現行ルートに比べて総配送時間 J (トラック3台分)が、約70分短縮されている。また、全配送完了時刻 t もかなり早くなっており、配送時間の差 D も半減されている。しかし、総配送時間は実験1の場合よりも短縮されているが、全配送完了時刻は実験1の場合よりも遅くなっており、エネルギー関数中に $E_{\text{cost}}^{(2)}$ の項が存在しないことによる悪影響が見られる。

4.4 実験3 -簡単な多目的最適化問題-

制約項として車両積載量の上限のみを考え、最小にしたいコストとして総配送時間と全配送完了時間との2つを考える。この場合、目的が2つあるので、多目的最適化問題の簡単な例になっている。多目的最適化問題を(1)のようなエネルギー関数最小化の枠組みで解く際には、項の重みの設定が問題となる。ここでは、実験1の10回の実験の内得られた $E_{\text{cost}}^{(2)}$ の最小値 V_2 (=1141.0)と、実験2の10回の実験の内得られた $E_{\text{cost}}^{(1)}$ の最小値 V_1 (=578.66)とを用いて、コスト項の第1項と第2項のおおよその大きさを見積り、これらの値を用いてエネルギー関数に対する2つの項の寄与が同程度となるように重みを設定することにする。すなわち、 $a_1 = b_1 = 1.0$ と仮定し、さらに、 $b_1 V_1 = b_2 V_2$ となるように $b_2 = 0.5072$ と設定する。残りの係数はすべて0に設定した。それ以外の条件はすべて実験1や実験2と同じである。

実験3の結果を見ると、実験1の結果よりも総配送時間 J が大幅に短縮され(約72分)、実験2よりも全配送完了時刻 t がかなり早まっている(14分)。したがって、2つのコスト項をエネルギー関数中に線形和の形で入れることにより、総配送時間の最小化と全配送完了時間の最小化の2つの目的を同時に実現するような、バランスのとれた解を求めることができたと言える。実験3の結果は、現行ルートよりも総配送時間 J を9.9%短縮し、全配送完了時間を22.8%短縮し、配送時間の差 D を3分の1以下に抑えている。

4.5 実験4 -複雑な多目的最適化問題-

さらに複雑な多目的最適化問題を考える。制約項として車両積載量の上限の他に、新たに配送時刻に関する制約条件と、配送先の受け入れ可能な車両サイズの制約条件を考える。前者の制約条件として、No.22,32,36の3軒の店舗への配送時刻の指定範囲を[15:30,18:00]の時間幅で指定し、その他の配送先には19:30までに配送すればよいという制約条件を設定する。後者の制約条件としては、No.15,30,45の3軒の店舗では2トン車以下のトラックしか受け入れ可能でないとする。また、コスト項としては総配送時間と全配送完了時間の他に、新たに配送時間の標準偏差($E_{\text{cost}}^{(3)}$ の項)を考える。

さらに、用いるトラックは、4トン車1台(帰着地点の制限なし、最大回転数5、15:30出発)と、2トン車3台(積載量の上限は4トン車の半分、最大回転数5)とする。2トン車は積載量の上限が小さいので車両の回転を考慮した。さらに、現実の複雑な配送問題を想定して、3台の2トン車は次のようにお互いに異なる条件を設定した。1台目は帰着地点の制限なし、2台目はNo.1の配送先に帰着することとする。3台目はデポに帰着することとし、出発時刻を他の3台と異なり14:00とする。ただし、出発時刻が異なるので、この3台目の2トン車は、第3のコスト項である配送時間の標準偏差の計算には入れないように指定する。このように複雑な条件をトラックや配送先ごとに指定できるのが本システムの特徴の一つである。

したがって、エネルギー関数としては(1)のすべての項を考えることになる。ここで、項の重みが問題となるが、すべての項が同程度の寄与をするように重みを設定することにする。積載量の制約条件($E_{\text{cost}}^{(1)}$)の違反量を1程度に抑えたいのと、 $E_{\text{cost}}^{(2)}$ と $E_{\text{cost}}^{(3)}$ のとりうる値は0または1であることを考慮して、 $b_1 V_1 = b_2 V_2 = a_1 = a_2 = a_3$ となるように重みを設定する。ただし、 b_1 と b_2 は4.4で用いたもの

と同一である。実験1の結果からわかるように、コスト項の第2項 $E_{\text{cost}}^{(2)}$ にはすでに配送時間の偏りを小さくする効果があり、コスト項の第2項 $E_{\text{cost}}^{(2)}$ と第3項 $E_{\text{cost}}^{(3)}$ とは配送時間の偏りを小さくするという効果において独立ではないので、 b_3 の値を理論的に設定するのは難しい。そこで、 b_3 の値を0.1, 1.0, 4.0の3種類の場合を実験し、その結果を表2に示した。

表2からわかるように、 b_3 の値が大きい場合($b_3=4.0$)には、配送時間の偏りはほとんどなくなる($D=1.31$)が、総配送時間は長くなり($J=905.98$)、全配送完了時刻も遅くなる($t=19:14$)。逆に、 b_3 の値が小さい場合($b_3=0.1$)には、総配送時間と全配送完了時刻は b_3 の値が大きい場合($b_3=4.0$)よりも改善されるが、配送時間の偏りが大きくなり過ぎてしまう($D=86.56$)。中間の $b_3=1.0$ の場合が最もバランスがとれており、得られる解の性質が重み係数の値によって大きく変化していることがわかる。本システムでは、各目的に対応するコスト項の重み係数をうまく調節できれば、目的に応じた最適解を見つけることができる。

5. むすび

本論文では、現実の複雑な制約条件下での多目的最適化問題である配送計画問題に対して、シミュレーテッド・アニーリング法を用いる近似解法を提案した。従来法の多くは、配送計画問題の持つ複雑さから、配車と配送経路の2つのサブ問題に分けて解くという2段階法によるアプローチをとらざるを得なかった。しかし、本システムでは、配送先やデポを表す記号を要素とする2次元行列を用いて配送計画案を表現することにより、配車と配送順序の2つの計画問題を同時に取り扱うことができる。また、種々の制約条件を制約項とし、問題の目的をコスト項としてエネルギー関数中に線形和の形で組み入れることにより、現実の複雑な制約条件下において多目的である配送計画問題の取り扱いを容易にすることができた。

さらに、本アルゴリズムの性能評価のために現実の配送計画問題の事例に適用したところ、配車係が立案した配送計画よりも、総配送時間を9.9%短縮し、全配送完了時間を22.8%短縮し、しかも、トラック間の配送時間の差を3分の1以下に抑える(いずれも10回の平均値)というバランスのとれた良質の配送計画案を得ることができた。

今後に残された問題としては、アニーリング温度列の設定法と重み係数の決定法がある。前者の問題に対しては、エネルギーのゆらぎである比熱の値を用いることが一つの方法として考えられる[山下90]。また、後者の問題については、2層確率場モデルにおけるパラメータ更新則を利用することが考えられる[五十嵐92b]。しかし、いずれも容易には解決しがたい問題である。

また、1回の求解に費やされる計算時間は、実験4の場合が最も長く、SUN Sparc10で約7分であった。本システムの実用化のためには、処理速度の高速化も必要な条件の一つである。このほか、実用化に際しては、デジタルマップ化された道路データベースを入力データとして直接利用することや、各道路における走行速度の時間的な変動をも考慮することなども重要な課題である。

謝辞

研究の機会を与えて下さった(株)ATR人間情報通信研究所、東倉洋一社長、下原勝憲第六研究室室長と、本研究に関してご討論頂きました奈良先端科学技術大学院大学、福島雅夫教授に感謝いたします。また、実験用データを提供していただいた(株)コーベック、山本正社長と、本システムの表示関連のプログラミングにご協力頂いた(株)CSKの吉川徹氏に感謝いたします。

参考文献

- [Bodin 83] Bodin, L. Golden, B., Assad, A. and Ball, B.: Routing and Scheduling of Vehicles and Crews, *Comput. & Ops Res.*, Vol.10, No.2, pp.63-211(1983).
- [Geman 84] Geman, S. and Geman, D.: Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images, *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, PAMI-6, pp.721-741(1984).
- [Hopfield 85] Hopfield, J.J. and Tank, D.W.: Neural Computation of Decisions in Optimization Problems, *Biol. Cybern.*, Vol.52, pp.141-152(1985).
- [茨木93] 茨木俊秀、福島雅夫: 最適化の手法, pp.43-44, 共立出版(1993).
- [五十嵐92a] 五十嵐治一、川人光男: 標準正則化理論の2層確率場モデルへの拡張, 電子情報通信学会論文誌(D-II), J75-DII, No.1, pp.157-161(1992).
- [五十嵐92b] 五十嵐治一: シミュレーテッドアニーリング法におけるエネルギー関数中のパラメータ値の決定法, 電子情報通信学会論文誌(D-II), J75-DII, No.7, pp.1232-1240(1992).
- [五十嵐93] 五十嵐治一、川人光男: 2層確率場モデルを用いた特徴点からのエッジ修復, 電子情報通信学会論文誌(D-II), J76-DII, No.9, pp.2066-2074(1993).
- [今泉93] 今泉伸一郎: 自動車NO_x削減法と道路行政について, *道路交通経済*, No.63, pp.84-88(1993.4)
- [道路経済研92] (財)道路経済研究所: 道路貨物輸送における情報通信システムの高度化と道路整備に関する調査研究報告書, 第4章, p.118, 建設省道路局(1992).
- [川嶋92] 川嶋弘尚: ロジスティクスのいまとこれから, *道路*, 6月号, pp.11-14(1992).
- [川嶋93] 川嶋弘尚、国府方久史、齋藤公一朗、佐野方俊: ロジスティクス高度化のための配車・配送計画, *交通工学*, Vol.28, No.5, pp.21-28(1993).
- [Kirkpatrick 83] Kirkpatrick, S., Gelatt, Jr. C.D., Vecchi, M.P.: Optimization by Simulated Annealing, *Science*, Vol.220, pp.671-680, (1983).
- [Kirkpatrick 84] Kirkpatrick, S.: Optimization by Simulated Annealing: Quantitative Studies, *Journal of Statistical Physics*, Vol.34, pp.975-986 (1984).
- [松居93] 松居寛: レンズ設計における最適化法, *システム/制御/情報*, Vol.37, No.4, pp.206-213(1993).
- [西川82] 西川、三宮、茨木: 最適化, pp.83-91, 岩波書店(1982).
- [忍田90] 忍田和良: 多品種少量化時代の物流戦略, *オペレーションズ・リサーチ*, 5月号, pp.263-267(1990).
- [高橋93] 高橋輝男: 物流システムの現状と将来, *システム/制御/情報*, Vol.37, No.6, pp.321-326(1993).
- [玉木74] 玉木将二郎: コンピュータによる配車計画, *オペレーションズ・リサーチ*, 9月号, pp.16-24(1974).
- [上坂90] 上坂吉則、尾関和彦: パターン認識と学習のアルゴリズム, pp.163-172, 文一総合出版(1990).
- [若林93] 若林一敏: VLSI設計における最適化算法, *システム/制御/情報*, Vol.37, No.4, pp.214-222(1993).
- [山田93] 山田武士、Rosen, B.E.、中野良平: ジョブジョブスケジューリング問題とクリティカルブロックSA法, *情報処理学会研究報告*, 93-AI-90-7(93.9.28).
- [山下90] 山下明良、秋山泰、安西祐一郎: エントロピーを用いた改良シミュレーテッドアニーリングに関する研究, *電子情報通信学会技術研究報告*, NC89-67(1990).
- [湯上93] 湯上伸弘、原祐貴: Simulated Annealingによる大規模生産計画問題の解法, *情報処理学会研究報告*, 93-AI-90-8(93.9.28).

付録. - 配送計画支援システムの概略仕様 -

(1) 機能：

●単数のデポから複数の車両を用いて複数の配送先に配送するための最適計画を立案する。

●目的関数：

- 総配送時間、
- 全配送完了時間、
- 配送時間の偏り、

の3種類を考慮することができる。詳細は本文3.3を参照のこと。

●配送先側からの制約条件：

- 配送時刻の時間帯による指定、
- 乗り入れ可能な車両サイズ(トン車数)の上限の指定、
- 停車時間の指定、
- 荷量の指定、

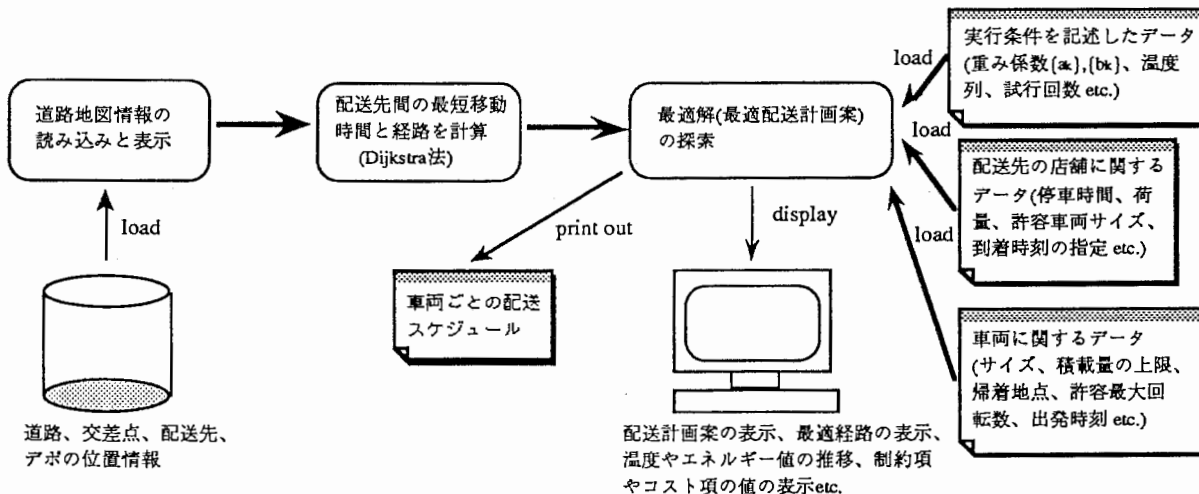
いずれも配送先ごとに異なる条件を設定できる。

●配送者側からの制約条件：

- 使用可能な車両のサイズ(トン車数)の指定、
- 車両の積載量の上限の指定、
- 配送完了後の帰着地点の指定 (制限なし/出発地点へ戻る/指定された店舗へ戻る/のいずれか) 、
- 最大回転数の指定、
- デポからの出発時刻の指定、

いずれも車両ごとに異なる条件を設定できる。

(2) システムの概略図：



配送計画支援システムにおける処理の流れ

(3) 配送先間の最短移動時間と経路の計算法(Dijkstra法) :

- Dijkstra 法[西川82]による配送先間の最短移動時間とその経路の計算アルゴリズムを以下に述べる。以下では、配送先、デポ、交差点をノードと呼び、道路をリンクと呼ぶ。ある配送先またはデポを始点とし、他の配送先またはデポを終点としたときに、始点から終点までの最短移動時間とその経路を以下のアルゴリズムにより求めることができる。

[DIJKSTRA法]

```
begin
  k:=0 ; ik:=0 ; G(ik):=0 ; P:={ 1,2,...,N} ;
  for i=1 until N do g(i) := ∞ ;
  while ik ≠ N do
    begin
      for every i ∈ P do
        begin
          g(i) := min [ g(i), G(ik)+d(ik,i) ]
        end
      find g(i*) = mini ∈ P g(i) ;
      k := k + 1 ;
      ik := i* ; G(ik) := g(ik) ; P:=P - {ik} ;
    end
  end
end
```

ただし、ノード集合Pでは、始点ノードを0、終点ノードをN、それ以外のノードを1から(N-1)で表している。また、始点ノードからノードiまでの最短移動時間をG(i)とし、その上限値をg(i)で表している。d(i,j)は、ノードiからノードjへのリンク上での移動時間であり、該当するリンクがないところは∞である。上のアルゴリズムは、d(i,j)≠d(j,i)の場合も取り扱うことができる。

(4) 使用言語と動作環境 :

- 対応機種 : SUN Sparc-2 または Sparc-10。
- 動作環境 : SUN OS 4.1.2 または 4.1.3、X-window system (X11R5)、OSF/Motif 1.2。
Motif については、IXI 社製のMotif 1.2 を使用している。
- プログラム言語 : Cをベースにしているが、ウインドウ上での表示関連のプログラムはUIL(User Interface Language) で記述されている。
- プログラムサイズ : ソースプログラムはコメント行を含めて約 17,000 行 (約400 KB)。

(5) 入力データ：

●地図情報を記述したデータ：

ノード(交差点、配送先、デポ)とリンク(道路)に関する情報が以下の様に記述されている。

4	5	1.0		#ノード数(交差点、配送先、デポ),リンク数(道路),縮尺
5.0	5.0	?		#ノード番号0のX座標値、Y座標値、地名
10.0	5.0	MITA		#ノード番号1のX座標値、Y座標値、地名
5.0	15.0	GOTANDA		#ノード番号2のX座標値、Y座標値、地名
19.0	20.0	?		#ノード番号3のX座標値、Y座標値、地名
0	1	1.6	20.0	#リンク番号0の両端のノード番号、長さ(km)、走行速度の推定値(km/h)
1	2	2.0	10.5	#リンク番号1の両端のノード番号、長さ(km)、走行速度の推定値(km/h)
2	3	1.8	11.0	#リンク番号2の両端のノード番号、長さ(km)、走行速度の推定値(km/h)
3	0	1.6	13.0	#リンク番号3の両端のノード番号、長さ(km)、走行速度の推定値(km/h)
0	2	3.2	14.3	#リンク番号4の両端のノード番号、長さ(km)、走行速度の推定値(km/h)

●実行条件を記述したデータ：

考慮する制約項、コスト項の指定、重み係数の値の設定、アニーリングの温度列の指定、各温度における試行回数の指定などを以下のように記述する。

	127972546			← 乱数発生のためのseed
この回数ごとに経路表示	1			← 実行可能解かどうかのチェック(1:する/0:しない)
	20			
{a _k }	1	1	1	← 制約項の指定 (1:考慮する/0:しない)
	0.1	1.0	0.1	
{b _k }	1	1	0	← コスト項の指定 (1:考慮する/0:しない)
	50.0	150.0	100.0	
	20.0	20000		
	15.0	20000		
	10.0	20000		
	9.0	20000		
	8.0	20000		
	7.0	20000		
	6.0	20000		
	5.0	20000		
	4.0	20000		
	3.0	20000		
	2.0	20000		
	1.0	20000		
	0.001	20000		
	↑	↑		
	温度スケジュール			
		↑		
		各温度での試行変形回数		

実行時の各種パラメータを指定した例

● 配送先側からの制約条件を記述したデータ：

店舗No.	停車時間(分)	荷物量(ケース数)	配送先の店舗を指定 (1:配送する/0:配送しない)
0	30	4.0	0
1	3	4.0	11
2	3	4.0	14
3	3	2.0	9
4	3	4.0	12
5	3	4.0	18
6	10	4.0	14
...
46	3	2.0	8

乗入れ可能なトラックの種類(積載可能トン数) 到着時刻指定 (負の値は制限がないことを表している)

配送先の店舗に関する入力データの例

● 配送者側からの制約条件を記述したデータ：

トラックNo.	積載可能な荷物量 (ケース数)	許容される 最大回転数	拘束時間を均等化する トラックのための識別子 (1:均等化する/0:しない)
1	4.0	220	-1
2	4.0	220	0
3	4.0	220	-1
4	2.0	110	15
5	2.0	110	-1

種類(積載可能トン数) 帰着地点(-1:制限なし/
0:出発地点/店舗の番号) 配送地点を出発する時刻

トラックに関する入力データの一例