

## 配達経路最適化のアルゴリズムについて

流通経済大学 流通情報学部

倉田 是

最近，生鮮や冷凍の食料品などを定期的に配達する企業が増加している．多くの配達箇所は住宅街にあり，そのアクセス道路の道幅は狭い場合が多く，配達車両Uターンができるほどの空き地がない．本報告では，地図データを使って，Uターンを原則として禁止する配達経路最適化問題のアルゴリズムを説明し，シミュレーションでその合理性を実証した．同時に配送計画や巡回セールスマン問題で扱われている配達箇所を交換する手法のアルゴリズムを考え，コンピュータでシミュレーションを行ったが，Uターン禁止条件によると思われる原因で，期待通りの成果がえられなかった．なお，この手法ではさらにアルゴリズムの工夫が必要である．

## On Algorithms for Delivery Routing Problems

Ryutsukeizai University  
Faculty of Distribution and Logistics Systems

Tadashi Kurata

Companies delivering fresh or frozen food products are becoming increasingly common recently. There are numerous points of delivery in a residential area, access roads are often narrow, and there are few vacant lots which can be used by drivers to turn their vehicles. I developed algorithms for determining the shortest route in a residential area with many points of delivery, and incorporated it into some programs. I was able to solve that deliverers can evenly deliver many points of delivery.

E-mail [kurata@rku.ac.jp](mailto:kurata@rku.ac.jp)

キーワード：最適化，経路探索，配送計画

## 1. はじめに

かつては家庭で日用品（野菜・肉・魚など）を買う場合には、近くの個人商店に行くことが普通であった。しかし、郊外型の大型店やコンビニエンス・ストアなどの商店の進出により、住宅街の商店が減少し、さらに、これらの進出した店舗も、長期にわたる経済不況の影響により不採算店の撤退などが行われている状況にあり、住宅街の買い物環境はよいとはいえない。

一方高齢化も進んでいる。過疎地の高齢化が問題にされているが、都市部でも同傾向が認められる。特に、中高層住宅は距離の代わりに高低差が高齢者の日常生活を脅かしている。

長引く不況は消費者の家計を直撃し、さらに共働き家庭の増加も目立っている。このために消費の抑制や、買い物に出られない傾向がみえる。

このために店舗に替わって、生鮮食品を含めた日用品を配達する企業も増加傾向にある。創設以来「共同購入」として日用品を配達することを主要な業務としてきた生活協同組合もこの一つである。生活協同組合以外にも、コンビニエンス・ストアで配達を行っている。

おおよその仕組みを生活協同組合の例で説明する。1週間前(2週間前もある)に注文を受け、発注し、物流センターで品受けを行う。ここで、個人ごとの容器に仕分けして入れる。この容器を配達地域のほぼ中心に位置する配送センターに運ぶ。配送センターには、2~1トンの配送車があり、これに積み込んで配達する。

配達地域は区・市などの行政区域面積ほどの地域である。配達する個所は週で5,000~20,000、毎日1,000~4,000ある。1台の配達車で1コース20~50箇所に配達するから、配達コースは毎日20~100以上ある。一般に配達担当者は固定した担当コースを持っている場合が多い。

店舗や工場・事業所への荷物の配送を問題とした「配送問題」がある。この問題は、配達地域の割り当て、もっとも短い経路の探索、荷物の効率運送などが取り上げられている。本報告も似ているが、本報告で取り上げる問題は下記に述べるような特徴と相違点がある。

- (1) 配達利用者は増加したり、減少したり変動が激しい。最近では共働きが増加したためと高齢化の影響で増加傾向が著しい。配送問題では、配送個所は店舗等で、ほとんど変動がないと考えられる。
- (2) 配達地域はほとんど住宅街で、配達する住宅は公道に面するよりも住宅道路に面している。一般的に住宅街の道路の幅は狭い。配送問題の場合は、立地条件として店舗等は公道面していなければならない。
- (3) 配達担当者は、職員ばかりでなく、アルバイトの主婦や外部委託業者の派遣労働者(パートタイム労働者が多い)も多い。特に急増する配達に應えるために、急な増員が難しい職員でなく、素人の主婦や外部委託を利用する。一方配送問題では、専門家の職員や運送業者が行う。
- (4) 配達担当者自身が荷物を配送車両から家庭に運ぶ。エレベータ無しの中低層集合住宅の配達利用者は、重量物(米、ビールや水の飲料品)を注文することが多いので、1回の運搬で20~30Kgを運ぶ。これはかなりの重労働であり、腰痛などの職業病が発生しやすい。肉体的な負担を軽減するための運搬道具は未だに開発されていない。配送問題では、荷物の上げ下ろしには専用リフトを使うこともできるし、主として平面状の移動なので、台車を使うことができる。

このような特徴から、配送問題とは異なる解き方をする必要がある。最大の違いは、道路事情と配達担当者の違いである。狭い住宅道路と主婦のパートタイム職員がトラックを運転するので、原則としてUターンをしないことである。

以下に、配達経路問題のアルゴリズムとコンピュータシミュレーション結果を述べる。

## 2. 概要

### 2.1 地図データとその加工

地図データには MapInfo を利用した。特徴は以下の通りである。本報告では「全国道路地図 V2001」を用いた。道路点 ID, 道路区間 ID などからなり, 地図上の表示には経度・緯度が使われている。道路区間データは区間 ID と両側の道路点 ID, 区間長 (m), 幅員などからなる。地図上では, 経度・緯度を両端の線分の座標とした折れ線で表示される。

- (1) 道路を経度, 緯度を座標とするベクトル法で描いている
- (2) 日本全国の道路点(交差点, 袋小路及び行政境界を含んだ点データである)と道路点を両側に持つ道路区間がユニークな番号が付与されている
- (3) 道路区間距離, 道路点の分岐など, 表形式でデータが扱える
- (4) 地図と連動する MapBasic のプログラム言語が使える
- (5) MapBasic は Visual Basic および C++言語を使った統合環境ができる

これらの特徴は次のような利便性がある。(1)ベクトルで道路を描くことができるので, 最適配達ルートを描きやすい(2)すべての処理をこの道路点 ID と道路区間 ID を使って処理できる。

(3)表形式であるので, 他のプログラム言語でも処理可能である。(4)地図からデータを拾う時, 地図にデータを書き込むときに違和感なく使用できる。(5)利用者に便利なシステムを構築できる。このデータの道路点と道路区間のデータを用いる。なお, 地図上に市町村名, 町名, 施設名, 鉄道及び河川などは必要に応じて表示をするが, アルゴリズムと直接関連はない。

都市近郊の住宅地域を定め, 配送センター(報告中ではデポと表示する)と配達箇所を地図の道路上に, 配達箇所を 20~100 箇所乱数で設定する。デポからこの地域に向かう配達経路は, この地域に連結する道路を往復するとした。すなわちこの道路から地域に入り, 配達が完了すると, この道路からデポに戻るとした。

デポと配達箇所相互間の距離を求める方法は両木探索法を採用した。MapInfo の道路区間の距離を求める地点の両側から前方木と後方木を伸ばし, 枝が重なったところで距離を求めるのである。

前方木と後方木を求める方法として, 図 1 に示す交差点ごとに基本有向木を作り, 同図右に示すように, 有向きを連結しての(A)前方木と(B)後方木を作成する。この基本有向木を用いる利点は, 一方通行路・信号のある交差点を容易に設定できることである。これを利用して, 道路の平均走行速度, 交差点通過時間口スを含めた配達的最短時間を求めることもできる。

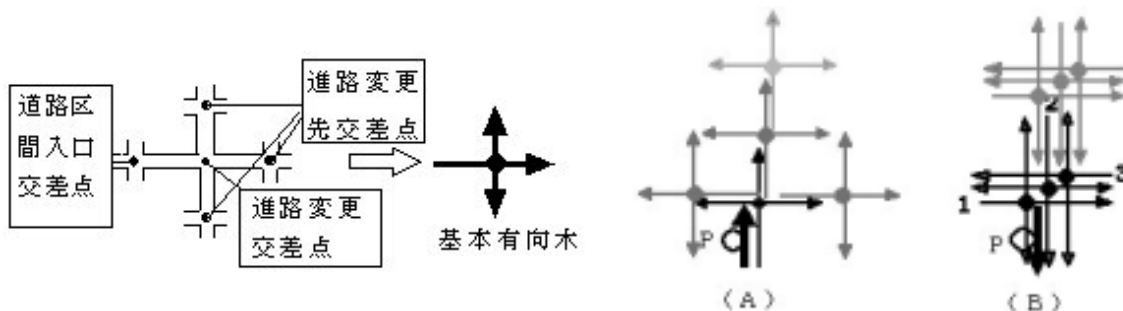


図 1 交差点の基本有向木と前方木と後方木の作成方法

基本有向木の数は例題に使ったある行政区域では 6,822, 本報告に例題とした地域では 675 である。道路区間数は, それぞれ 3,416, 388 である。

最も離れた地点間の道路区間数は数十を越えることもある。前方木, 後方木の枝数を仮に 30 とすると, 全ての交差点を 4 差路として  $2 \times 3^{30} \approx 4 \times 10^{14}$  の計算量となる。さらに配達箇所は数

百～数千であるから、計算量は膨大なものとなる。したがって前方木、後方木の枝の深さを制限する。

表 1 最短距離表

項番	内 容
1	出発デポ・配達箇所
2	出発デポ・配達箇所の道路の進行方向
3	到着デポ・配達箇所
4	到着デポ・配達箇所の道路の進行方向
5	最短距離
6	前方木と後方木の合致道路点 I D 1
7	前方木と後方木の合致道路点 I D 2
8	前方木番地
9	後方木番地
10	区間距離
11	道路区間 I D

デポ及び配達箇所相互間の最短距離を表 1 に示す。原則として U ターン禁止の条件があるために道路の進行方向の項目を用意してある。この項目は、出発点と到着点の両者である。一般に使われる最短距離は進行方向に無関係で、一方通行がない限りどちらの点からでも距離は同じである対して、進行方向によって異なる。ある 2 点間の距離は、出発する 2 方向と到着する 2 方向、計 4 方向のそれぞれの距離が異なる。つまり、2 点間の距離は 4 個ある。

項番 8, 9 は前方木と後方木のファイルの番地（配列のインデックス）を記録している。この番地によって、それぞれの木の枝のポイントを

使って、経路を辿ることができる。最適経路探索と結果の経路を地図上に表示するときを使う。

他の経路最適化の問題では、すべての点間の距離が与えられるが、本報告では、両木探索の木の枝が短いので、離れた遠方の点同士の距離が求められないことが多い。

## 2.2 最短経路を求めるアルゴリズム

原則として U ターン禁止（なお、袋小路の場合は、自動的に戻るアルゴリズムがある）であるので、配達箇所地点の前の道路に入る時と出る時の進行方向は同一でなければならない。このために、進行方向に影響されないユークリッド距離による最短経路を求める問題とは異なった局面があらわれる。

次の配達箇所の進入方向は 2 方向あり、この距離は等しいとは限らない。したがって異なる距離が 2 個ある。さらにその次の配達箇所へは、2 倍の 4 個の距離があることになる。さらに 2 倍と続く。この計算量を求めてみよう。n 箇所の配達場所があるとする。デポから出て、デポに帰るのであるから、途中の経路は n+2 である。すべての組み合わせ K は式 (1) となる。

$$K = n \times 2 \times (n-1) \times 2 \times (n-2) \dots 2 \times 2 \times 1 \times 2 = n! \times 2^n \quad (1)$$

つまり、 $2^n$  の係数部分が多くなるのである。

例として 20 箇所を廻ることとすると、

$$K = 2432902008176640000 \times 1048576 = 2551082656125828464640000 \quad (2)$$

となり、極めて膨大な数となる。生活協同組合の 1 日の配達コースが約 50 箇所であるから、さらに膨大な天文学的数となる。完全解を得ることは断念しなければならない。

多くの類似する問題では、最近傍の配達箇所を連結する方法、出来上がった経路の一部を交換して最適解を求める方法などが用いられている。

本報告では、近傍の複数の配達箇所を確率的に選択して探索する手法と、一度経路を作った上で配達箇所を交換して最適経路を探索する方法の 2 種類のアルゴリズムを提案した。

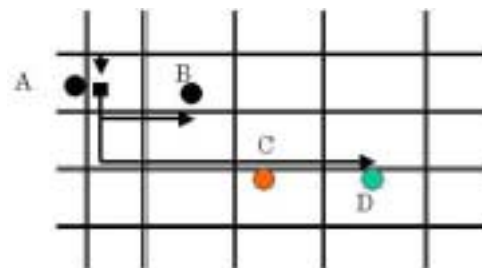


図 2 近傍の選択方法説明図

### 2.2.1 近傍の配達箇所を確率的に選択する方法

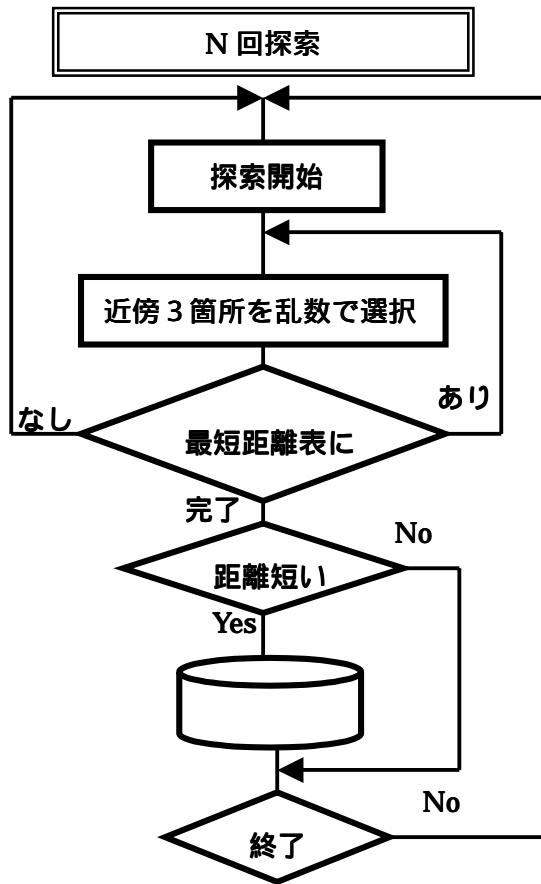


図3 2.2.1の流れ図

D地点を経由することにした場合である。A地点からD地点には、2個の距離のうち短い距離を選択するが、B地点に向かう経路選択では、B地点の進行方向に合わせた経路を選択しなければならない。つまり、A地点の進行方向とB地点の進行方向を保存した条件で経路を選択する必要がある。なお、ユークリッド距離の場合には、単に経路を取り替えるだけでよい。

図5はこの流れ図である。2.2.1の方法で一つの経路を求めた後に、乱数で交換する配達箇所を指定し、交換する。これを繰り返す。次の配達箇所が最短距離表にあるかどうかを調べる。あれば経路距離を以前の最短距離と比較して、最短距離だった場合には、経路情報と共にファイルに保存する。最短距離表になければもとに戻して異なる交換配達箇所を探索する。

### 2.3 地図上に経路を表示する

上記2方法とも、最後にファイルに保存したデータが近似解の最短経路である。このデータを地図上に表示する。このためのプログラムを用意してある。

図2には近傍地点を選ぶ方法を図示したものである。図の格子は道路を表している。A地点に配達した後、次の地点を選ぶ方法である。距離を調べて近傍の3箇所B,C,Dを選ぶ。距離順では

$$B < C < D \quad (3)$$

である。このうちどれを選ぶかを確率で決める。Bは1/2、Cは1/3、Dは1/6である。Bを選べばそのままBを次の配達箇所とする。C,Dを選んだ場合には、その経路の途中に、より近い配達箇所があったならば、そこを選ぶ。図のDを選んだ場合には、次の配達箇所はCとなる。

処理の流れ図を図3に示す。N回の繰り返し探索を行う。図2で示した配達箇所を選択し、この配達箇所が最短距離表にあるかどうかを調べる。なければ再び探索を開始する。最短距離表にあり、かつすべての配達箇所を巡っていないならば次の配達箇所を選択する。すべてを巡った場合には、経路距離を以前の最短距離と比較して、最短距離だった場合には、経路情報と共にファイルに保存する。

### 2.2.2 配達箇所を交換する方法

Uターン禁止の条件がこの方法に現われる影響を考察する。図4はこの説明図である。A地点からB地点に至る経路で、途中のC地点の代わりに

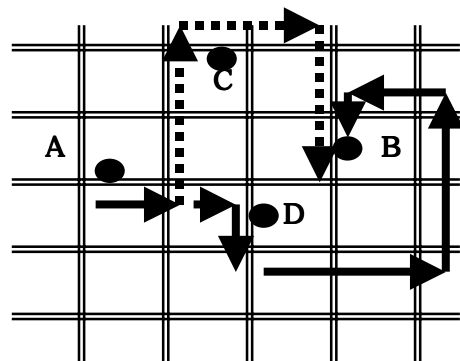


図4 交換の経路変更

- ( 1 ) 最適経路データを道路区間の進行方向順に並べたデータを作成する
- ( 2 ) 上記データを地図上の道路を折れ線図で描く

( 1 ) は 2 . 1 で作成した前方木と後方木を利用して、枝から幹にさらに枝と辿りながら道路区間を進行方向のデータを付加して作成する。  
 ( 2 ) はこのデータを進行方向に合わせた矢印の線で描く。

### 3 . コンピュータシミュレーション結果

使用したコンピュータの CPU は Pentium4 1.5GHz , メモリ容量 512MB で、既製品ではなく、組み立てたものである。インターネットに接続せず、スクリーンセーバーも使わず、プログラムのみが占有して使用している状態である。

前方木と後方木を作成する時間は、枝の深さを大きくすると無視できないものがある。交差点有向基本木が 6,822 の地域で 50 箇所地点の枝の深さ 14 である木を求めるのに、約 8 時間要した。都合最短距離表を求めるまでに約 24 時間かかった。枝の深さを 8 とすればほとんど無視できる時間である。ちなみに枝の深さを 14 とすると、平均枝数は 1,236 である。なお、処理はとりあえず木を作ってから、無駄な枝を剪定する方法を採用している。剪定前の枝数は 497,962 であった。木を作る時間と剪定の時間はほぼ同等である。枝の深さ 8 では、約 140 である。

20 の配達箇所をランダムに分布させたテストデータを用いた。

- ( 1 ) 近傍の配達箇所を確率的に選択する方法では、10,000,000 回の繰り返しを行ったが、3,626,701 回目に 6,919m の最短の近似解が得られた。ちなみに、最初の近似解は 9,233

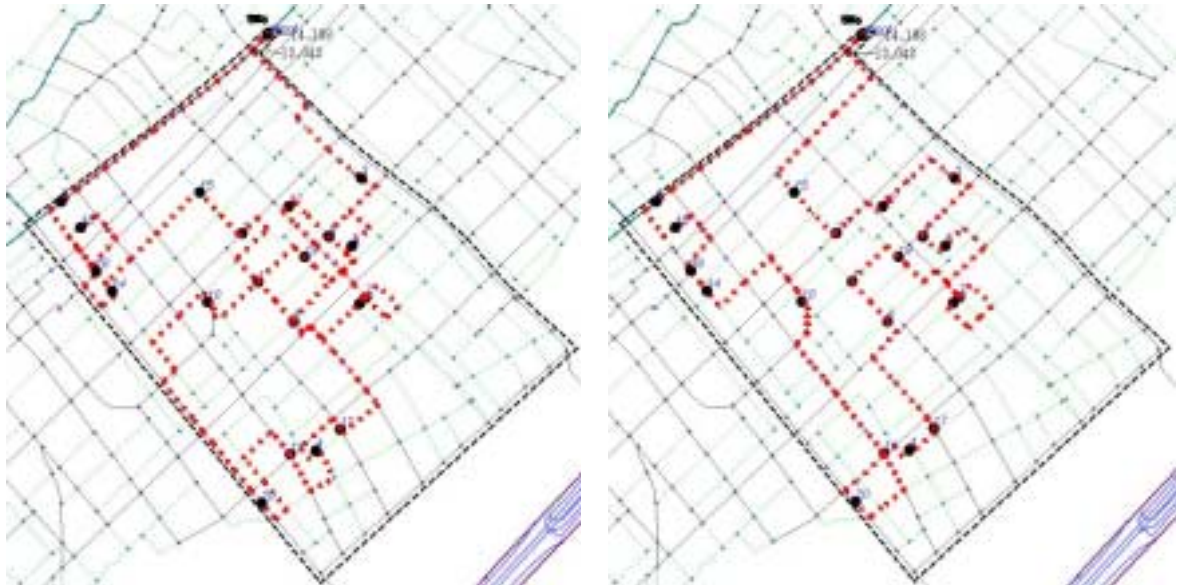


図 6 近傍の配達箇所を確率的に選択する方法によって得られた解 ( 左 : 初期 , 右 : 最終 )

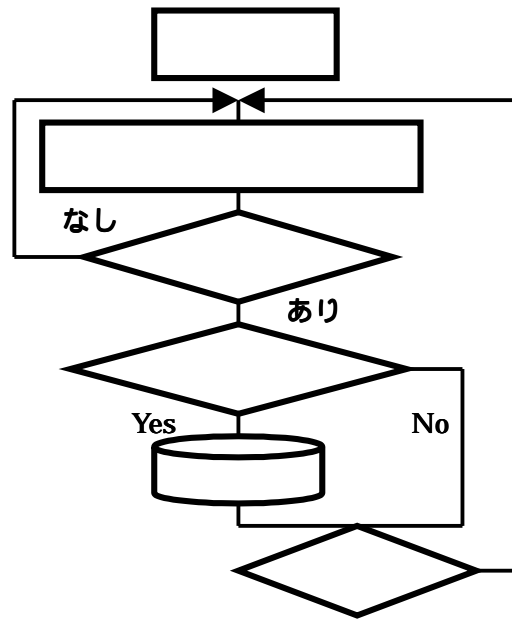


図 5 2 . 2 . 2 の流れ図

mであった．途中 15 回ほど近似解が得られての上である．CPU time は 3361.7 s であった．

- ( 2 ) 配達箇所を交換する方法では，100,000,000 回の繰り返しを行ったが，最初に与えた近似解以上に距離の短いデータを得ることができなかった．不成功の理由は 71%が近似解より長く，29%が最短距離表に見当たらないとのことであった．CPU time は 4186.4 s で ( 1 ) の 10 倍の繰り返しにもかかわらず，処理が局所的で早いことを表している．もちろん，繰り返し回数の短いものでも行ったが，結果は同じであった．

図 6 に ( 1 ) の最初と最後の解を図示した．

#### 4．その他の配達に対する付加機能

すでに学会で発表した報告にあるが，配達問題で重要と思われる開発した機能を紹介する．

- ( 1 ) 道路及び交差点ロスを考慮する

初期に研究を行った．現在は道路事情の調査が先であるので，休止中である．基本的には，アルゴリズムに変わりはなく，交差点の信号の有りの無しのマークや道路区間種類と優先道路の指定を交差点基本木構造にデータとして載せればよい．なお，現在使用中のデータ構造には，将来利用を見越して，この領域を確保してある．

- ( 2 ) 複数の配達者が同一地域を分担して配達する

配達地域を主要道路などで分割して地域を分けて配達することは，配達者にとってはわかりやすい．しかし狭い住宅地域に，密集して配達箇所が分布している場合などは，地域を明確に分割できない．このような場合に，複数 ( 2 人以上 ) の配達者の各自の配達距離がほぼ平等になるように機能を付加し，プログラム化した．

- ( 3 ) 配達箇所をグループ分けして，グループ順に配達する

配達を受ける家庭も種々の事情があり，午前，午後，夜間と配達時間帯を注文する．この機能は，グループ分けした配達箇所を次々と廻るもので，プログラム化した．( 1 ) の機能を付加すれば，時間指定などができる実用的な機能となる．

- ( 4 ) 持ち上げ労働負担を分担させる機能

中高層集合住宅の 4 . 5 階に持ち上げ労働負担を平等にする機能である．大都市には 20 ~ 30 年経過した中高層集合住宅が多い．居住者が高齢化する様子が見られ，日常の買い物を配達に依存する傾向がある．主として重量物 ( 米，水を含めた清涼飲料水，ビールなど ) を注文する．配達者は人力で荷物を持ち上げるので，きわめて労働負担が多い．複数の配達者を労働負担 ( 持ち上げ階数の総和 ) がほぼ等しくなるようにするプログラムを開発した．

#### 5．考察

配達区域を行政区域越えるまで拡大して，多数の配達者がそれぞれ平均的な配

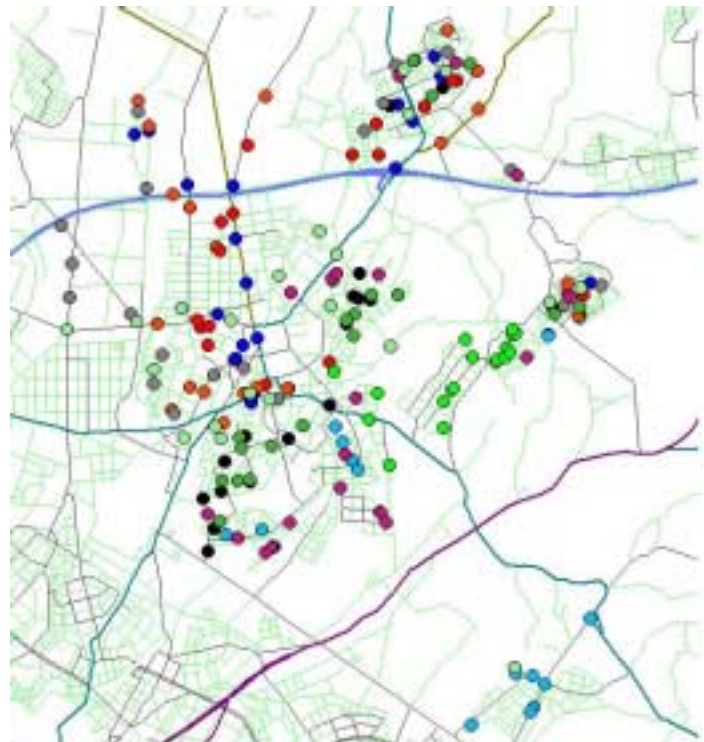


図 7 10 人による配達箇所の分担例

達経路長の配達経路を求めることも行った。面積 35km<sup>2</sup>、人口約 8 万人の東京のベットタウンになりつつある農村部が残っている都市である。200 配達箇所を乱数で配置し、10 人が 20 箇所を回る配達経路問題である。図 7 はこの結果の一例で、10 人が担当する配達箇所を図示したものである。担当区域がまとまっていることを期待したが、やや分散し、かつ配達距離も十分に平均化されたものではなかった。もっとも、計算時間が長かかったので、十分な繰り返しができなかったことが最大の原因でもある。

農村部では、配達地域が広く、1 コースの配達距離が数十キロに及ぶところもあるが、大都市近郊の住宅街の配達距離は数キロ程度が多い。膨大な計算負荷が掛かることから、本報告の例題で処理した東京近郊の住宅都市の一区域、面積 1.3km<sup>2</sup>を対象とした。

配達箇所を交換する方法で近似解が得られなかった理由の分析はできていない。あえて理由を上げると、図 4 の説明図に示すように、最初に U ターン禁止の規則でできあがった経路の一部を変更することによる経路短縮効果は薄いのではないと思われる。数箇所を同時に変更する、あるいは交換した先の配達箇所の進行方向を続けて変化させる、いわゆる玉突き現象を組み込むなどの工夫が必要と思われる。推測では、このようなアルゴリズムの実現はやや困難と思われる。

## 6. むすび

U ターンを原則として禁止する配達経路最適化問題のアルゴリズムを説明し、シミュレーションでその合理性を実証した。同時に配送計画や巡回セールスマン問題で扱われている配達箇所を交換する手法のアルゴリズムを考え、コンピュータでシミュレーションを行ったが、U ターン禁止条件によると思われる原因で、期待通りの成果がえられなかった。なお、この手法ではさらにアルゴリズムの工夫が必要である。

## 謝辞

流通経済大学に移り、物流関係の学部と大学院に所属して本研究を始めた。種々ご支援を頂いた、佐伯弘治学園長はじめ教職員に感謝する。高価な MapInfo の一式のソフトウェア購入を図っていただいた付属図書館の職員に特に感謝の意を表する。

現在、非常勤監事として仕事をしている生活協同組合ちばコープでは、共同購入の配達の状況をつぶさに見ることができた。現場で発生する諸問題を解決するという目標があってはじめて、一連の本研究を進めることができた。生活協同組合ちばコープの役職員に感謝する。

最後に、本研究の手伝いをしてもらった本学の学生、大学院生に感謝する。

## 発表リスト (すべて倉田是単著)

- (1)“配達ルート最適化問題”,日本シミュレーション&ゲーミング学会第 10 回全国大会、1998,11
- (2)“配達経路最適化の一方法”流通経済大学流通情報学部紀要 Vol.4, No. 1,1999,10,
- (3)“配達経路最適化問題について”,日本シミュレーション&ゲーミング学会第 11 回全国大会,1999,10
- (4)“地図データを使った配達経路最適化アルゴリズム”,流通経済大学流通情報学部紀要 Vol.4, No.2,2000,4
- (5)“地図データを使った戸別配達経路最適化”,情報処理学会高度交通システム研究会,2000,10
- (6)“道路の渋滞に対応して経路を変換することが可能な戸別配達経路最適化”,日本シミュレーション&ゲーミング学会第 12 回全国大会,2000,10
- (7)“U ターンを行わない配達経路探索問題”,日本シミュレーション&ゲーミング学会第 13 回全国大会,2001,10
- (8)“配達順のグループ分け可能な U ターンを行わない配達経路探索”,電気四学会東海支部連合大会, 2001,11
- (9)“配達経路最適化問題について”,情報処理学会高度交通システム研究会,2001,11
- (10)“複数の配達経路最適化問題の一方法”,情報処理学会全国大会,2002,2