

高齢者通所送迎バスの巡回スケジュール決定支援システムの開発と適用*

Computer Aided System for Day Care Services for the Elderly using GIS : Development of Courtesy Bus Scheduling System and Its Application

堤盛人**・加藤究***・成松雅子****

Morito TSUTSUMI, Kiwamu KATOH and Masako NARIMATSU

1. はじめに

我が国において介護保険法が施行されて1年が過ぎるが、訪問介護や通所介護など様々なサービスの提供に際し、要介護認定の方法やヘルパーの不足など多くの問題が明らかになっており、今なお試行錯誤が続けられている。

介護保険の給付対象である訪問介護・通所介護のいずれにおいても、サービスを提供する側が利用者の居住する地域を巡回する必要がある。訪問介護では各利用者の住居を訪問し、ホームヘルパーによる介護や掃除・洗濯・買い物などのサービスを提供する。一方、通所介護においては、利用者が自ら通所施設へ通う場合や家族が送り迎えをする場合などを除き、小型バスによる送迎をサービスとして提供している場合が多い。このような送迎や訪問のスケジュールリングでは、GISを用いたコンピュータ・システムが果たし得る役割は大きい。

本研究では、通所介護サービスにおける送迎バスの巡回路/スケジュール決定を支援するシステムの開発を行う。

2. 通所サービスとのバスによる利用者送迎の実態

本研究では、介護保険の給付対象となる在宅サービスのうち「通所介護」「通所リハビリテーション」の二つを総称して「通所サービス」と呼ぶこととする。通所サービスでは、各利用者はその要介護の程度や嗜好、予算等に応じて、週に2回程度施設に通所するのが一般的である。筆者らがヒアリングを行った社会福祉法人聖風会（本部所在地：東京都足立区）では、一回に概ね1時間かけて利用者の送迎を行っており、月曜日と木曜日、火曜日と金曜日、水曜日と土曜日を一つのセットにし、それぞれについて、

サービスの開始時刻が10時・11時・12時という三つの時間帯を用意し、利用者をこれら計9つのグループに分けている。その上で、それぞれのグループについて利用者の位置を紙の地図上にプロットし、ベテランのドライバーが手行でルートの決定、各利用者のところへの到着時間の算出を行っている。実際にバスを使った試走等により、仮決定したルートが通行可能であるか等の確認も行うため、この手順が完了するのに、最大で一週間もの時間を費やしている。しかも、利用者の入れ替えや利用希望時間帯の変更が生じるたびにこのような膨大な作業を繰り返しているとのことである（堤・朴（2001））。

3. 巡回スケジュール決定のために考慮すべき要件

そこで本研究では、特に都市の密集市街地における支援を念頭に、通所サービスにおける送迎バスの巡回路/スケジュールの決定をGISを用いて支援することとした。

なお、巡回路を決めても必ずしも巡回スケジュールが決まるわけではないが、逆に巡回スケジュールを決める際には巡回路も決まる。また、長時間バスに乗車するのが困難な利用者があることなどを考慮する際には、何時にバスに乗って何時に施設に到着するかという時刻が重要となる。このことを意識した上で、以後、誤解を生じない範囲で、標題にあるように「巡回スケジュール決定」という言葉を巡回路決定と同じ意味で用いることとする。

(1) 巡回路/スケジュール決定支援の基本的考え方

送迎バスの巡回路決定を行う際には、利用者の希望や特性を考慮しながら、全体としてなるべく総走行時間を少なくするという考え方に基づくのが合理的であろう。ただし、軽度の痴呆や身体的な障害を有する高齢者をあまり長くバスに乗せておくのは難しいといった問題がある一方で、バスの移動中に知り合いと団らんすること自体が楽しみで、乗車時間が少しくらい長くても問題にならない場合があるなど、必ずしも総走行時間を最小化することがここで

*キーワード：GIS、交通弱者対策、高齢者介護福祉

正会員、博士（工学） *学生会員 ****学生会員
東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤工学専攻
（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
E-mail: tsutsumi@plamertu.tkyo.ac.jp）

の問題を解くうえで最適な基準である保証はないことを断っておく。

(2) 考慮すべき要因・制約の整理

ここで扱う問題を数理最適化問題として定式化するために、通所サービスにおける送迎バスの巡回路・スケジュールを決定するうえで考慮すべき重要な要因・条件等と、そのための情報管理の方法について簡単に整理した。(以後、「条件⑦」あるいは単に「⑦」のように記す場合には、以下の番号に対応している。)

(a) 道路等に関わる物理的な情報 介護サービスに限らず、道路を利用して巡回を行う際には、道路のリンクやノードに関する以下の条件を考慮する必要がある。

- ①幅員： バスの場合には、幅員が小さいために通行が不可能なリンクや、右左折が不可能なノードが多く存在する。従って、道路リンクに幅員データを持たせる必要がある。
- ②一方通行・進入禁止・右折(左折)禁止： 都市部、とりわけ密集市街地での適用を想定した場合に、これらの規制が設けられた道路が多い。一方通行・進入禁止については各リンクに、右左折禁止についてはノードもしくはリンクの組合せに対し、それぞれ情報を持たせる必要がある。
- ③リンクごとの所要時間： 都市部では、道路によって混雑が発生し、さらに時間帯によってこれが変化する。そのため、適当な時間帯ごとに、例えば平均的な所要時間の情報をリンクに持たせる必要がある。

(b) 利用者に関わる個人の情報

- ④希望するサービスの内容： 通所介護か通所リハビリテーションか、あるいは入浴サービスを希望するか否かなど、希望するサービス内容が多様である。
- ⑤乗車可能時間： 心臓疾患や痴呆を患っている場合など、長時間バスに乗るのが困難な場合がある。
- ⑥待機可能時間： ⑤と同じ理由で、屋外の停留所で余り長く待てない場合がある。
- ⑦その他の考慮すべきこと： ⑤・⑥とも関連するが、様々な理由から利用者の居住地のすぐ前まで迎えに来て欲しいとか、あるいは希望する時間帯に送迎して欲しいといった希望もある。曜日について希望のある利用者もいる。

乗降車する場所については、利用者の特性に応じた工夫もある程度可能であるが、時間帯や曜日については、サービスを提供する事業者の都合もあり、例えば月曜日と木曜日、火曜日と金曜日、水曜日と土曜日を一つのセットにし、それぞれについてサービスの開始時刻が10時・11時・12

時という三つ程度を用意した上で利用者の希望を聞く程度が限界であろう。また、同じ施設に通う他の利用者と同じグループ(曜日・時間帯)にして欲しいとか、その逆の希望がある場合もある。その他、利用者の心身の機能障害によっては、家族等の付き添いが必要な場合があり、さらに、車椅子利用者か、杖が必要な人かといった情報も施設の方で情報を管理しておく必要がある。

(c) その他主として施設側の制約から考慮すべき情報

- ⑧バスの乗車定員： 通常小回りの利く小型バスが利用され、10数名程度が乗車人数の上限となる。
- ⑨車椅子の数の上限： 車椅子に乗ったまま乗降可能なバスが利用されることが多いが、一台のバスに乗れる車椅子の数には制限があるため、一つの巡回ルートに車椅子利用者が集中しないように配慮しなければならない。
- ⑩利用者グループごとの人数のばらつき： ある時間帯に送迎する利用者のグループは、その後概ね共通のプログラムに従ってサービスを受けるため、グループ間であまり人数のばらつきがあるとサービスを提供する上で支障が生じたり、利用者からのクレームとなる可能性がある。

4. 支援システムの構築

(1) システムの概要

本研究で扱う巡回バスの総費用(時間/距離)最小化問題の本質は「配車配送計画問題 Vehicle Routing Problem: VRP」である(例えば、谷口・根本(2001))。本研究では、次のような2つのステップに分けて支援システムを構築する(図-1参照)。

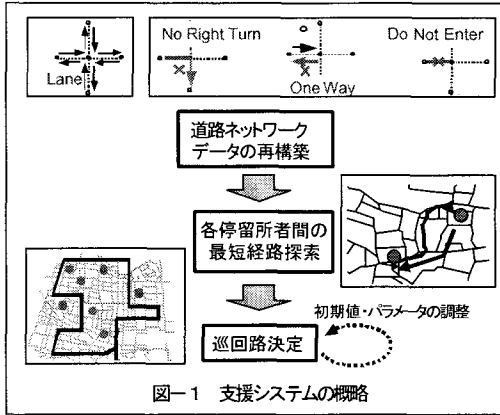
[Step 1] 3.(2).(a)を念頭に、道路ネットワークデータをGIS上で再構築する。その上で、利用者の乗車位置について各2点間の最短経路と時間を検索する。

[Step 2] Step 1で得られた最短時間をもとに、3.(2).(b)並びに3.(2).(c)に示した要因・条件を考慮したVRPを解く。

都市間の物流の問題や、都市内でもある程度距離的に離れた固定ターミナルの間の巡回の問題では、2点間の時間(距離)は対称、すなわち地点*i*から地点*j*の費用(時間/距離) c_{ij} に関して、 $c_{ij} = c_{ji}$ を仮定しても問題の無いことが多い。しかし、本研究のように数km四方の地域を対象とする巡回路の決定では、3.(2).(a)で述べたような種々の制約により、一般に、最短経路並びに時間は乗車位置の組合せに関して非対称を前提とした方が実用的である。

なお、バスが*i* → *i+1* → *i+2* と巡回する場合には、ノー

ド $i+1$ において再度 3.(2).(a)①・②の条件からチェックを行う必要があり、場合によっては $i \rightarrow i+1$ 及び $i+1 \rightarrow i+2$ の最短時間経路を、前後に巡回するノードに応じて複数用意する必要が生じる。



(2) 問題の定式化とアルゴリズム

(a) 乗車・下車位置間の最短経路/時間の探索

利用者にとっては、なるべく乗車位置が各居住地前の道路であることが望ましいが、密集市街地で全利用者の居住地の前まで行き、かつ1~3分程度バスを停めるには問題が多いので、予め施設と利用者の間で合意の上、居住地とは少し離れた場所を乗車・下車場所（停留所）として決めておくことも多い。ここでは、簡単のため、利用者とその乗車位置を同一視することにする。この場合、複数の利用者が同一の停留所を利用する可能性もあるが、その場合にはその停留所を利用する者の番号分だけそれぞれ異なる停留所と見なせば良い。ただし、その場合には、巡回路の探索において、少なくとも各停留所に関しその停留所を利用する人数の順列の分だけ無差別な最適解が存在することになり、計算効率を下げる可能性もある。そのような場合には、同じ位置にある停留所を、便宜的にその位置の付近で適当な距離を置いて利用者の数の分だけ分けることとする。

2点間の最短路を求めるアルゴリズムには、Ford 法などのアルゴリズムが知られているが、本研究では、リンクの費用（時間）が非負であることを利用した Ford 法より効率的な Dijkstra 法を利用する（土木学会（1998）など）。この場合、3.2.(1)に示したような道路の特性を考慮するためには、交差点のノードを分割して新たなノードとリンクを設定する必要がある。また、利用者が反対車線に横断す

ることが困難な場合には、一つのリンクを車線ごとに分けた上で進行方向を考慮しながら停留所の設定を行う必要がある。

(b) 最適巡回路/スケジュールの探索

VRP やその特殊形である巡回セールス問題（TSP）は、NP 困難な組合せ最適化問題の典型であり、これを解くアルゴリズムについては様々な研究がある（電気学会 GA 等組合せ最適化手法応用調査専門委員会編（1998）など）。本研究では、それらを参考にしながら、可能な限り 3.(2)で掲げた条件を考慮するという方針を採る。ただし、ここでは必ずしも厳密解を求める必要はなく、目的関数の値が本来の最適値より数%程度悪くてもあまり問題にならないこと、制約条件が多いため解空間がかなり絞られること等から、局所探索法の中で最も単純なルールに従う方法の一つである 2-opt 最適化手法を用いる（Lawler et al. (1985) など参照）。

VRP を定式化する方法は、地点と順序の組合せを変数として管理するものや、地点の接続関係を変数として管理するものがある。ここでは、2-opt 最適化手法の適用を容易にするため、地点の接続関係を変数として管理する次のような方法を用いる。

今、施設を除いた、巡回する地点（停留所）の数を $\bar{I}$ とし、変数を次のように定義する。

$S = \{i=0,1,2,\dots,\bar{I}\}$: 利用者に対応した停留所 ($i=1,2,\dots$) と施設 ($i=0$ 一つのみとする) の集合

c_{ij} : 停留所若しくは施設 i から j への最短時間

$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{: 停留所 (施設) } i \text{ から停留所 (施設) } j \text{ から} \\ & \text{へ移動する場合。} \\ 0 & \text{: それ以外の場合。} \end{cases}$

添え字が煩雑になるため、ここでは施設を1つとし、1台のバスが $\bar{K}$ 回に分けて全利用者の間を巡回する ($T_k \subset S, k=1,2,\dots,\bar{K}$) としている。

$$\min_{x_{ij}} \quad C = \sum_{i \in S} \sum_{j \in S - \{i\}} c_{ij} x_{ij}$$

$$+ \alpha \left\{ \sum_{\forall k} \left(\sum_{i \in T_k} \sum_{j \in T_k - \{i\}} c_{ij} x_{ij} - \frac{1}{\bar{K}} \cdot \sum_{i \in S} \sum_{j \in S - \{i\}} c_{ij} x_{ij} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in S - \{j\}} x_{ij} = 1 \quad (\forall j \in S - \{0\}), \quad (2) \quad (1)$$

$$\sum_{i \in S - \{0\}} x_{i1} = \bar{K}, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in S - \{i\}} x_{ij} = 1 \quad (\forall i \in S - \{0\}), \quad (4)$$

$$\sum_{j \in S - \{0\}} x_{1j} = \bar{K}, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{j \in T_k - U} x_{ij} \geq 1 \quad (\forall U (\neq \emptyset) \subset T_k \subset S, \forall k), \quad (6)$$

$$|T_k| - 1 \leq \bar{T} \quad (\forall k), \quad (7)$$

$$\sum_{i \in T_k - \{0\}} y_{li} \leq \bar{y}_l \quad (\forall k, \forall l), \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{1, 0\} \quad (\forall i, \forall j \in S), \quad (9)$$

$$\bigcup_{k=1}^{\bar{K}} T_k = S, \quad (10)$$

$$T_k \cap T_{k'} = \{0\} \quad (\forall k, k' (k \neq k')). \quad (11)$$

式(1)の第一項は総時間を表す。第二項の α (≥ 0) はパラメータであり、後の括弧内は巡回時間の標準偏差を表す。

式(7)は条件⑧ (バスの容量制約) に対応し、 $\bar{T}$ はバスの乗車定員を表す。ただし、 $|\cdot|$ は集合の要素の個数を表し、式(10)及び(11)より次式が成立する。

$$\sum_{\forall k} |T_k| - \bar{K} + 1 = |S| = \bar{T} + 1 \quad (12)$$

式(8)は④・⑨に対応している。 y_{li} ($i \neq 1$) は、利用者 i がそこで考慮する事項をその属性として持つ可否を示すものであり、例えば次のように与えるものとする。

$$y_{li} = \begin{cases} 1 & : \text{車椅子利用者の場合} \\ 0 & : \text{それ以外の場合} \end{cases}$$

このとき、 $\bar{y}_l$ はバスに乗れる車椅子の数の上限を表す。その他にも、通所介護か通所リハビリテーションか、また、入浴サービスを受けるかについて、それぞれ上記のように $y_{2i}, y_{3i}, \dots$ ($i \neq 0$) と定義し、必要に応じて条件式を加えればよい。例えば入浴サービスを希望する人が仮にサービス可能な上限の人数以下であっても、特定のグループに集中せず、ある程度分散して欲しいということが施設側の要望としてある場合には下限値を設定する。

さらに、⑦で述べたように、例えば利用者 m と利用者 n が同一のグループに属することを希望する場合には、次のような制約式を追加すれば良い。(利用者 m と利用者 n が違うグループに属すと、左辺が0になる。)

$$\prod_{\forall k} \left[\sum_{i \in T_k - \{m\}} x_{im} + \sum_{i \in T_k - \{n\}} x_{in} - 1 \right] = (-1)^{\bar{K}-1} \quad (13)$$

この他の条件、例えば⑤についても同様に数式として表現することは可能であるが、若干記述が複雑になるため、ここでは省略する。ただし、数式表現が困難な条件でも、コンピュータ上での処理は容易なことも多い。

5. システムの適用

4. に示した考え方に基づき実際のシステム構築を行い、

社会福祉法人聖風会の高齢者在宅サービスセンター「六月」(東京都足立区)を対象に、システムの適用を行った。

対象地域の道路のノード数は約 2800、リンク数は約 3900 であったが、3.(2).(a)で説明した理由による処理のため、データの再構築を行った結果、ノード数は100程増えて約 2900 に、リンク数は倍以上の 8000 となった。600MHz のパソコンを用いたところ、Step 1 (2点間の最短経路探索) に約20分、Step2 (巡回路の決定) に約5分を要した。本研究で利用したデータに基づく計算では、現状が2巡回で39分+31分=70分を要しているのに対し、システムによる計算結果では26分+26分=52分となっている(図-2参照)。1巡回あたり平均10分弱短縮されたのは、考慮している要因の違いや、リンク所要時間の精度に依存していると思われる。現在、結果の妥当性も含め、当該施設担当者へのヒアリングを継続しているところである。適用結果の詳細は、今後の課題と合わせ、発表会場で報告したい。

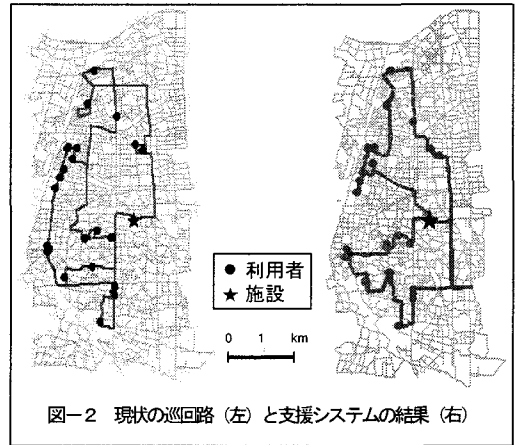


図-2 現状の巡回路(左)と支援システムの結果(右)

参考文献

- 1) 谷口栄一・根本敏則(2001): シティロジスティクス, 森北出版
- 2) 堤盛人・朴成元(2001): GISを用いた高齢者通所サービス支援システム—送迎バスの巡回スケジュール決定システムの開発, 応用測量論文集, Vol.12, pp.51-58.
- 3) 電気学会 GA 等組合せ最適化手法応用調査専門委員会編(1998): 遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワーク スケジューリングと組合せ最適化, コロナ社
- 4) 土木学会(1998): 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, 土木学会
- 5) E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan and D. B. Shmoys (1985): The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization, John Wiley & Sons.