配送方式の多様化による輸送コストの改善

児玉　謙治（沼田　一道　助教授）

1　はじめに

我々の日常生活にとってスーパーマーケットやコンビニは必要不可欠の存在である．そこに並べられる商品は生産場所（メーカー）から各店舗へ日々輸送されてくる．そのような店舗を多数抱える小売販売業者（の流通管理部門）は商品全体の輸送コストを少しでも削減したいと考える．このためには全店舗の要求量を把握し，配送システムの選択と配送ルートの決定をしなければならない．この状況を最適化問題として定式化し,（準）最適な計画を求めることにより，輸送コストを削減出来る可能性がある．

本研究では輸送コストを削減するために，従来のように１つの配送方式に固定して配送ルートを決定するのではなく，複数（２つ）の配送方式を併用して配送ルートを決めることを考える．配送方式の混在を許すことにより，単一方式の場合と比べて，輸送コストがどの位改善されるかについては既に Liu ら [1] が比較・検討している．しかし [1] は定式化と解法の点で不十分なように思われる．本研究では [1] に沿って問題を再設定し，定式化と解法を再検討する．

2　問題設定

一定の対象地域内に複数のメーカーと店舗が存在している状況を考える．各店舗は全メーカー（1 メーカー 1 商品）からの配送を必要としている．メーカーから店舗への輸送方法として,「直接輸送システム」と「ハブ＆スポークシステム」の２方式が可能であるとする [1].

直接輸送システム（図 1）　メーカーに属するトラックが当該商品を積載量の範囲内で 1 個以上の店舗へ配送（デリバリー）し，そのトラックはメーカーに戻る．ここで，各店舗が 1 つのメーカーに要求する量はトラック 1 台の容量以下とし，2 台（以上）に分けて配送することは出来ないとする．

ハブ＆スポークシステム（図 2）　複数メーカーの複数店舗向けの商品をハブと呼ばれる中央施設に集め，行先店舗ごと（積載限界ごと）にまとめて配送する．使用するトラックはハブに属する．トラックの出発地点はハブであり，収集／配送を終えたトラックはハブに戻るとする．収集時の前提として，まずそれぞれのメーカーに対してトラック積載量の整数倍部分をピストン輸送で集め，ピストン輸送で集めきれなかったメーカーごとの残りの商品をピックアップ収集をする．配送時の前提も収集時と同様に店舗へピストン輸送で配送した後に残りをデリバリー配送する．

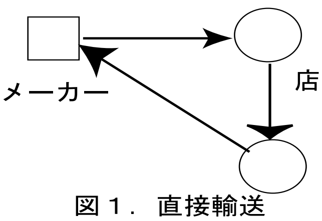

図１．直接輸送

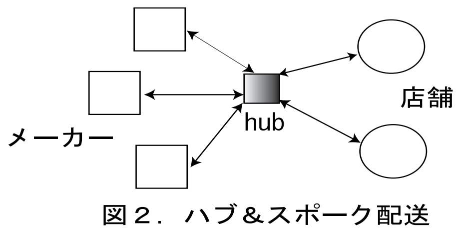

図２．ハブ＆スポーク配送

問題は「メーカー」と「店舗」の位置（相互距離），及びメーカーから店舗への「輸送要求量」が与えられたとき，各輸送要求の配送方式と各配送方式における（準）最適な配送ルート（同時に処理するメーカー／店舗の組合せとその順番）を決定することである．

ハブ＆スポークシステムを含む場合，ハブの位置はすべてのメーカー／店舗の位置の重心とする．またハブの維持費は別途考慮する．各メーカー，ハブにあるトラックはすべて同種であるとし, 全ての地点においてもトラック台数は充分にあるとする．ハブのトラックを用いる場合に対してメーカーのトラックを用いた場合, その輸送コストは走行距離の５％の手数料がかかるものとする．

3　定式化

トラックの最大積載量を W，u_0 をハブのラベル，メーカーのラベル集合を $V_s = \{u_1, u_2, \ldots, u_m\}$，店舗のラベル集合を $V_c = \{u_{m+1}, u_{m+2}, \ldots, u_{m+n}\}$ とする．メーカー i に対する店舗 j の要求量を q_{ij}，距離を t_{ij} とする．また全店舗の要求量の総計を Q，メーカー i から直接輸送する要求量の総計を A_i，メーカー i に対しハブを介して収集する要求量の総計を B_i，店舗 j に対しハブを介して配送する総計を C_j とすると，$Q = \sum_{i=1}^{m}(A_i + B_i) = \sum_{i=1}^{m} A_i + \sum_{j=m+1}^{m+n} C_j$ である．ハブからメーカー i へピストン輸送で収集するトラック台数は $\lfloor \frac{B_i}{W} \rfloor$，ハブから店舗 j へピストン輸送で配送するトラック台数は $\lfloor \frac{C_j}{W} \rfloor$ で与えられる．ハブからピストン輸送で収集（配送）しきれなかった残量をそれぞれ b_i（c_j）で表す．要求量 q_{ij} の配送方式と各トラック（メーカー i から出発するもの，ハブから出発して収集を行なうものと配送を行なうもの）の動きを表現するために，x_{ij}（q_{ij} を直接輸送する場合 1，q_{ij} をハブ＆スポーク配送する場合 0）とすると，$A_i = \sum_{j=m+1}^{m+n} q_{ij}x_{ij}$，$B_i = \sum_{j=m+1}^{m+n} q_{ij}(1 - x_{ij})$，$C_j = \sum_{i=1}^{m} q_{ij}(1 - x_{ij})$ である．

メーカー i に対して直接輸送を行なうトラックについて，$y_{jlk}^{(i)}$（トラック k が j の直後に l を訪れる場合 1，それ以外 0），$z_{lk}^{(i)}$（トラック k が l を訪れる場合 1，それ以外 0）とすると，総コスト（距離）$f^{(i)}(x_{ij}, y_{jlk}^{(i)}, z_{lk}^{(i)})$ は次式で与えられる．

$$f^{(i)}(x_{ij}, y_{jlk}^{(i)}, z_{lk}^{(i)}) = 1.05 \sum_{k} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{l=1}^{m+n} t_{jl} y_{jlk}^{(i)}$$

ここで，直接輸送するトラックにおいて輸送すべきある 1 つの店舗を訪れるのは 1 回だけであることと，1 台のトラックに積む量はトラックの容量以下であるということ，また必ず全ての店舗に配送するという制約がある．

$$\sum_{j=1}^{m+n} \sum_{l=1}^{m+n} y_{jlk}^{(i)} = \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{l=1}^{m+n} y_{ljk}^{(i)} = z_{lk}^{(i)}, \qquad \sum_{l=1}^{m+n} q_{il} z_{lk}^{(i)} \leq W \qquad i = 1, 2, \ldots, m \tag{1}$$

$$x_{ij} \leq \sum_{k} z_{jk}^{(i)} \qquad i = 1, 2, \ldots, m, \qquad j = m+1, m+2, \ldots, m+n \tag{2}$$

ハブ＆スポーク配送するもので収集時については $y_{ilk}^{(hm)}$（トラック k が i の直後に l を訪れる場合 1，それ以外 0），$z_{ik}^{(hm)}$（トラック k が i を訪れる場合 1，それ以外 0）とすると，ピストン輸送で収集を行なうトラックの総コスト（距離）$g^m(x_{ij})$，ピストン輸送で収集しきれなかった残量をピックアップ収集するときの総コスト（距離）$h^m(x_{ij}, y_{ilk}^{(hm)}, z_{ik}^{(hm)})$ は次式で与えられる．

$$g^m(x_{ij}) = 2 \sum_{i=1}^{m} \lfloor \frac{B_i}{W} \rfloor t_{0i}, \qquad h^m(x_{ij}, y_{ilk}^{(hm)}, z_{ik}^{(hm)}) = \sum_{k} \sum_{i=0}^{m} \sum_{l=0}^{m} t_{il} y_{ilk}^{(hm)}$$

ここで，使用するトラックが収集すべきある 1 つのメーカーを訪れるのは 1 回だけであることと，1 台のトラックに積む量はトラックの容量以下であるということ，またハブ＆スポーク配送するものは必ず全て収集するという制約がある．

$$y_{i0k}^{(hm)} + \sum_{l=1}^{m} y_{ilk}^{(hm)} = y_{0ik}^{(hm)} + \sum_{l=1}^{m} y_{lik}^{(hm)} = z_{ik}^{(hm)}, \qquad \sum_{i=1}^{m} b_i z_{ik}^{(hm)} \leq W \qquad i = 1, 2, \ldots, m \tag{3}$$

$$1 - x_{ij} \leq \sum_{k} z_{ik}^{(hm)} \qquad i = 1, 2, \ldots, m, \qquad j = m+1, m+2, \ldots, m+n \tag{4}$$

デリバリーについては $y_{jlk}^{(hc)}$（トラック k が j の直後に l を訪れる場合 1，それ以外 0），$z_{jk}^{(hc)}$（トラック k が j を訪れる場合 1，それ以外 0）とすると，収集時と同様に総コスト（距離）と制約の式を以下に示す．

$$g^c(x_{ij}) = 2 \sum_{j=m+1}^{m+n} \lfloor \frac{C_j}{W} \rfloor t_{0j}, \qquad h^c(x_{ij}, y_{jlk}^{(hc)}, z_{jk}^{(hc)}) = \sum_{k} \sum_{j=0}^{m+n} \sum_{l=0}^{m+n} t_{jl} y_{jlk}^{(hc)}$$

$$y_{j0k}^{(hc)} + \sum_{l=m+1}^{m+n} y_{jlk}^{(hc)} = y_{0jk}^{(hc)} + \sum_{l=m+1}^{m+n} y_{ljk}^{(hc)} = z_{jk}^{(hc)}, \qquad \sum_{j=m+1}^{m+n} c_j z_{jk}^{(hc)} \leq W \qquad i = 1, 2, \ldots, m \quad (5)$$

$$1 - x_{ij} \leq \sum_{k} z_{jk}^{(hc)} \qquad i = 1, 2, \ldots, m, \qquad j = m+1, m+2, \ldots, m+n \quad (6)$$

以上より，最小化すべき総コスト（距離）は

$$\sum_{i=1}^{m} f^{(i)}(x_{ij}, y_{jlk}^{(i)}, z_{lk}^{(i)}) + g^m(x_{ij}) + g^c(x_{ij}) + h^m(x_{ij}, y_{ilk}^{(hm)}, z_{ik}^{(hm)}) + h^c(x_{ij}, y_{jlk}^{(hc)}, z_{jk}^{(hc)})$$

で与えられる．制約条件は（1），（2），（3），（4），（5），（6）である．また部分巡回路（デポに辺が接続していない閉路）を禁止する．

4　解法

本研究で扱う問題は個々の要求量に対しどちらの配送方式を選択するかが問題を解く鍵となる．メーカー数を m，店舗数を n とすると要求量は $m \times n$ 個であり，全要求量における配送方式の取り得る組み合わせは $2^{m \times n}$ 通りである．全要求量の数が少なければ配送方式の組み合わせを全列挙することで上記の問題のより良い（準）最適解を求めることができるが，その数が多ければ全列挙は困難と思われる．本研究ではこのことを考慮して Local Search を用いた近似解法で個々の要求量に対し配送方式を決定する．

2 つの配送方式に要求量を分割した後，それぞれの配送方式ごとに配送問題を解くときに用いる解法は，本研究で扱う問題ではリードタイム制約を設けていないのでその制約を考慮せずに（準）最適解が得られるセービング法とする．また D をメーカーと店舗すべての「対」の集合, D^d を店舗への要求量が直接輸送されるメーカーと店舗の対集合, D^h を店舗への要求量がハブ＆スポーク配送されるメーカーと店舗の対集合とする．解法の手順は以下に示す.

Step 1.　直接輸送の配送方式のみで解（輸送コスト）を求め，その値を Z^d とする．

Step 2.　ハブ＆スポーク配送の配送方式のみで解（輸送コスト）を求め，その値を Z^h とする．

Step 3.　$Z^d \leq Z^h$ なら，Z^d を暫定解とし直接輸送を Active とし，$D^d = D$,$D^h = \phi$ とする．そうでなければ，Z^h を暫定解とし，ハブ＆スポーク配送を Active とし，そして $D^h = D$,$D^d = \phi$ とする．暫定解の値を $Z = min\{Z^d, Z^h\}$ とする．

Step 4.　暫定解を検討する．
Case(1)：直接輸送が Active ならば $(u_i, u_j) \in D^d$ を満たすペアに対して，D^d から D^h に移した場合の解の改善の評価値 v_{ij}^d を設定し計算する（詳細は本論文参照）．そのときに $v_{ij}^d > 0$ のペアを D^d から D^h に移動させる．
Case(2)：ハブ＆スポーク配送が Active ならば $(u_i, u_j) \in D^h$ を満たすペアに対して，D^h から D^d に移した場合の解の改善の評価値 v_{ij}^h を設定し計算する（詳細は本論文参照）．そのときに $v_{ij}^h > 0$ のペアを D^h から D^d に移動させる．

Step 5.　$\{D^d, D^h\}$ という需要分割を持った混合配送問題を解く．求めた値を Z' とする．

Step 6.　$Z' < Z$ ならば，新しい解を暫定解 $Z = Z'$ とし，そうでなければ直接輸送が Active であるならハブ＆スポーク配送を Active にし，ハブ＆スポーク配送が Active であるなら直接輸送を Active にする．暫定解が 5 回連続で改善されないならば終了；そうでなければ Step 4 に戻る．

5　数値実験

前節の解法で，各要求量に対して 2 つの配送方式から 1 つを選択し，配送ルートを決定することで

輸送コストを最小にする．データはメーカー数 30，店舗数 10，トラックの最大積載量 20，要求量は 1 ～ 20 の範囲でランダムに与えるものとする．プログラムは Borland 社の Delphi6 で作成した．

6　実験結果及び考察

表１．（準）最適解と改善率

	輸送コスト	改善率
従来（直接輸送）	117816	10.94%
従来（ハブ＆スポーク配送）	119388	12.14%
（準）最適解	104325	

表２．配送方式の割合

	要求量の割合
直接輸送数	35.4%
ハブ＆スポーク配送数	64.6%

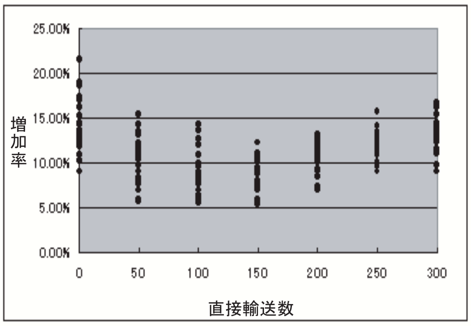

図３．（準）最適解に対する増加率

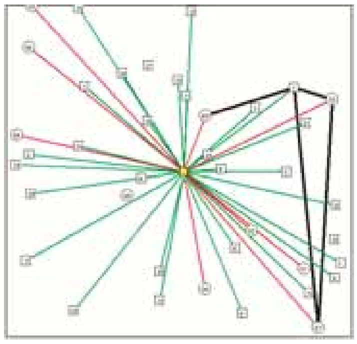

図４．プログラム実行画面

表 1 の計算結果から，直接輸送システムのみを用いた時の解と比較すると削減量は平均約 10.94%，ハブ＆スポークシステムのみを用いた時の解と比較すると削減量は平均約 12.14 %であるので，2 つのシステムを混合した方が従来のどちらかの単一のシステムより能率的であると云える．図 3 のグラフでは総配送要求数 300 のときの直接輸送数とハブ＆スポーク配送数をあらかじめ決定した上で解を求めたときの（準）最適解に対する増加率を示した．この図 3 のグラフからも 2 つのシステムを混合した方が能率的であることがわかる．表 2 と図 4 から直接輸送するものは，メーカーと店舗が近い位置にあるときと 1 店舗への要求量がトラックの最大積載量に十分近いときに行なった方が効果的で，それ以外はハブ＆スポーク配送を行なった方が効果的であると考えられる．またハブの維持費について，ハブは 1 回だけの使用というわけではなく長期間使用するものなので，1 日当りの固定費は非常に小さいものと思われる．人件費などの変動費はハブを用いていない従来の輸送コストとハブを用いた混合配送方式の輸送コストの差額に満たないコストに抑える必要があると考えられる．

7　まとめ

本研究では [1] に沿って問題を再設定し，独自に定式化を行い，混合配送問題を解いて，混合方式は従来の単一方式より輸送コストが約 11.54%改善されるという結果を得た．[1] の結果は約 10%の改善であるが，ハブの位置決定など問題設定が [1] と異なる点と同じデータで実験を行なっていない点から [1] の結果と本研究の結果を厳密に比較することはできない．しかし本研究の実験では [1] よりも大きなサイズの問題を扱い，より詳細なモデルで解いたときに [1] と同等の改善が見られたので，[1] で不十分と思われた点を再検討することに意味があったと考えられる．さらに複雑な状況（ハブの複数使用，同一でない車両の使用，あるいは配送時間制約の設定）下での検証を行なうことは今後の課題である．

参考文献

[1] Jiyin Liu・Chung-Lun Li・Chun-Yan Chan； Mixed truck delivery systems with both hub-and-spoke and direct shipment ；Transportation Reseach Part E 39 pp.325-339，2003.

[2] E.L.Lawler, J.K.Lenstra, A.H.G.Rinnooy Kan, D.B.Shmoys, ‘ The Traveling Salesman Problem ’pp.431-436，1985.

[3] 久保幹雄；「ロジスティクス工学第７章配送計画モデル」 http://www.ipc.tosho-u.ac.jp/ kubo/lecture/2.