欠品と在庫を考慮した多期間配送計画問題に対するモデルと解法の研究

花室　昌司　（沼田　一道 准教授）

1.はじめに

1.1　研究背景

物流の効率的管理・運営は製造業や流通業の経営において大きな課題の１つとなっている．最近では，調達・製造・在庫・販売という生産から最終需要（消費）にいたるまで，モノの流れを一元的に管理して，全体最適化を目指すサプライチェーンマネージメント（SCM）の考え方が普及している．本研究では，自動販売機（以下，自販機と略す）に製品を補給する企業の業務を取上げ[1]，SCM 的観点から配送時間を増やすことなく，欠品を防ぎ，自販機内の保管量を減少させることを考える．いわゆる配送経路問題[4]は，移動時間や距離（総移動コスト）を最小化するような配送先地点の分割とその経路を求める問題であるが，参考文献[1,2]は，欠品と在庫を考慮して一定期間内に配送車の走行限度以内で，できるだけ多く配送地点を訪れるように各期の配送先とその経路を求める多期間配送計画問題を提起した．しかし，そこでの問題解決方法は，目標が明示的でなく，できるだけ多数回，できるだけ均等に訪問するという基準で実行可能解を構築するものであり，数理計画的なモデル・解法の観点からは改善の余地がある．

1.2　研究目的

本研究では，延べ平均在庫量の最小化を目指す多期間配送計画問題のモデルと解法を扱う．具体的には，先行研究[1]の提起した問題をより明確に扱えるモデルと解法を提案し，その有効性を検証する．

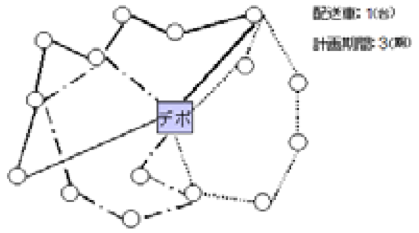

図１：多期間配送の例

2.問題

2.1　問題概要

欠品を起こさないという前提のもと，需要点全体の（延べ）平均在庫量を減らすことを目的とする配送計画を考える．配送車の日々の走行限度以内（稼動時間，積載量内）で，できるだけ多数の需要点（自販機）に配送するよう各期の配送先を決定する．決定した配送先は最短のルートで巡回する．

2.2　前提条件

配送区域には，１つの配送拠点（以下，デポと呼ぶ）が存在する．各期の需要は地理的に分散しているそれぞれの需要点にのみ発生し，その需要量は確定的である．配送は１台の配送車で行い，配送車の走行速度は一定であるとする．配送車は，デポを出発し，割り当てられた配送を行った後，デポに戻る．

3.定式化　記号の定義

配送車の訪問点をi (j) $\in\{0,1,\cdots,N\}$ で表す．計画期間をT（日），配送車の可能積載量をB（箱），配送車の最大移動時間をW（分），点i,j間の移動距離をc_{ij}，需要点iの計画期間内の総需要量をd_iとする．ただし，点 0 はデポを表し，d_0=0 とする．決定変数は，配送車がt期において点iからjに移動する(1)か，否(0)か，を表す 0-1 変数x^t_{ij}，配送車がt期において需要点iに配送する(1)か，否(0)か，を表す 0-1 変数y_i^tである．y_i^tが決まると，需要点i（i =1,…, N）に対する（期間内の）配送総回数n_i，1 回あたりの配送量Q_i，初期在庫量s_{i0}と，平均在庫量S_iが決まる．延べ平均在庫量(ΣS_i)を最小化するように各期の配送先とその経路を求める問題は，これらの記号を用いてつぎのように定式化される．

$$
\begin{aligned}
&\text{minimize} && \sum_{i=1}^{N} S_i && (1)\\
&\text{subject to} && \sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N} c_{ij}x_{ij}^{t} \le W \quad (t=1,2,\cdots,T) && (2)\\
& && \sum_{i=1}^{N} Q_i y_i^{t} \le B \quad (t=1,2,\cdots,T) && (3)\\
& && \sum_{j=0}^{N} x_{ij}^{t} \le 1 \quad (i=1,2,\cdots,N, t=1,2,\cdots,T) && (4)\\
& && y_i^{t} = \sum_{j=0}^{N} x_{ij}^{t} \quad (i=1,2,\cdots,N, t=1,2,\cdots,T) && (5)\\
& && n_i = \sum_{t=1}^{T} y_i^{t} \quad (i=1,2,\cdots,N) && (6)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&1 \le n_i \le T \quad (i=1,2,\cdots,N) && (7)\\
&\sum_{i=0}^{N} x_{ij}^{t} - \sum_{i=0}^{N} x_{ji}^{t} = 0 \quad (j=1,2,\cdots,N, t=1,2,\cdots,T) && (8)\\
&\sum_{i,j\in P} x_{ij}^{t} \le |P|-1 \quad ({}^{\forall}P \subseteq \{1,2,\cdots,N\}, t=1,2,\cdots,T) && (9)\\
&s_{i0} = \max\left[\max_{t=1,\cdots,T}\left(\frac{d_i}{T}\times t - \sum_{k=1}^{t} Q_i y_i^{k}\right), 0\right] && (10)\\
&S_i = s_{i0} + \frac{Q_i}{T}\sum_{t=1}^{T}(T+1-t)y_i^{t} - \frac{1}{2}\frac{(T+1)}{T}d_i && (11)
\end{aligned}
$$

(1)は，問題を「各需要点の平均在庫量の総和の最小化」として捉えたものである．(2)は，配送車の各期の総移動時間がW以内であるという制約を示している．(3)は，各期の総配送量が配送車の積載量（B）以下であることを示している．(4)は，各期に各需要点に配送できるのは多くても 1 回であることを示している．(5)は，y_i^tが需要点から配送車が出ていく回数に等しいことを示している．(6)は，各需要点における計画期間内の配送回数n_iが，その需要点から配送車が出ていく回数に等しいことを示している．(7)は，計画期間内に各需要点に配送する回数が 1 回からT回の範囲であることを示している．(8)は，各期において，需要点jに入った配送車は必ず需要点jを出ていくことを示している．(9)は，配送ルートが部分巡回路を持つことを禁止するものである．(10)と(11)は目的関数を定義している．まず，計画期間中に欠品が生じないようにするため需要点iに与えられる（必要最小限の）初期在庫量（s_{i0}）を(10)式で与える．需要点iにおける期間中の平均在庫量（S_i）は，初期在庫量s_{i0}と計画期間内の配送在庫の和から計画期間分の各期の需要量和を引いた値の（期中）平均であり，(11)式で与えられる．S_iを全ての需要点において足し合わせた値が延べ平均在庫量(目的関数：ΣS_i)である．

4.解法

4.1　方針

本研究で扱う問題規模において，上記問題の厳密な最適解を現実的な時間内に求めるのは困難である．そこで，準最適解を比較的短時間で求めることにする．提案法は 2 段階からなる．まず，需要点を T 個のグループに分割し，T 個の（最短）巡回路を求める．つぎに，各グループに(そのグループで未訪問の)需要点を貪欲的に追加して，各点への期間内訪問回数の増加を目指す．グループの生成は，需要点番号を並べた順列を T 分割して得る．最初のグループ分割は，需要点番号順列全体の集合（順列空間）の中を近傍探索し，巡回時間ができるだけ均等で，総巡回時間ができるだけ小さい分割（グルーピング）を与える順列を求めて構成する．探索近傍としては，順列の 2 要素を交換する互換近傍探索を用いる．

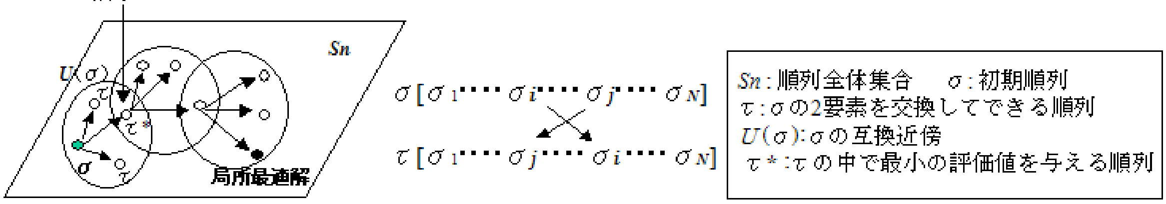

図 2：互換近傍探索

4.2　解法手順

Phase1　1グループの巡回時間ができるだけ均等になるよう全需要点を T 個に分割し，グループの総巡回時間和が最小な T 個の巡回路を求める．

Step1　需要点番号をランダムに並べた初期順列σを与える．

Step2　各需要点が，$[N/T]-2$ 以上となるように順列σを T 分割するすべての仕方について，各グループの需要点とデポの最短巡回時間を 2-opt 法で求め，各グループの巡回時間の合計値(これを評価値とする)とそのグループ間での標準偏差を求める．すべての分割の仕方の中で，最小な標準偏差をもつ分割の評価値を f(σ)とする．

Step3　順列σの 2 要素を交換したすべての順列から成るσの近傍 U(σ)に属する順列τについて，Step2 と同様の f(τ)を求める．最小値となる順列τをτ*とする．

Step4　f(τ*)<f(σ)ならば，σをτ*で更新して，Step3 へ．そうでなければ，Step5(Phase2)へ．

Phase2　T 個のグループそれぞれに需要量の多い需要点から可能な限り順に追加し,新たな巡回路を求め,延べ平均在庫量を出力する．

Step5　移動時間制約を超えるまで，1 グループに需要量の多い需要点から追加する．これを全てのグループについて行う．（全ての需要点において配送量が決まる.）

Step6　積載量制約以内ならば，Step7 へ．そうでなければ，Step1～5 を繰り返す．

Step7　各需要点の回数・訪問日パターンから在庫量を求め，目的関数値を出力．終了．

5.数値実験

比較のため，先行研究[1]が扱った例題（各需要点の総需要量と座標）を取上げる．計画期間 T は 5(日). デポは 1 つ. 需要点は 36 店舗である. 需要点の移動時間に関しては, 直線距離で回帰する. その回帰式は, 移動時間(分) = 直線距離×1.55＋7.60 である[1]. 移動時間制約は，W=240(分), 車両積載制約は，B=65 (箱) としている．プログラムは Borland 社の Delphi6 で実装した．また本実験では，多スタート法[3]を用いて初期解の生成（初期順列の生成）を 100(回)反復させ，その中で最も良い解を出力する．

実験結果・考察

多スタート法による 100 回の実験によって得られた最小の目的関数値である延べ平均在庫量と先行研究[1]で得られた延べ平均在庫量の結果を表 1 に，またそのときの日程別の移動時間，積載量，配送回数を表 2 に示す．各需要点に対する訪問回数パターンと訪問日パターンの結果が表 3 である．

表 1：本実験と先行研究[1]の延べ平均在庫量

本実験	先行研究[1]
30.50(箱)	40.32(箱)

表 2：移動時間，積載量と訪問点数

日程	移動時間 (分)	積載量 (箱)	訪問点数 (個)
1 日目	223.060	58.1	14
2 日目	239.485	61.1	17
3 日目	239.293	64.6	15
4 日目	238.632	56.6	13
5 日目	239.562	62.6	15

本研究で求めた延べ平均在庫量は先行研究[1]をおよそ 24%改善している（表 1）．順列空間での互換近傍探索を基本とする提案法は，配送頻度を増加させると同時に期毎の配送回数のばらつきを減少させ（表 2），在庫量圧縮に大きな効果をもたらしたといえる．これは，最初のグルーピングの際にできるだけ移動時間のばらつきが小さく，総巡回時間の短いものを求め，需要量の多い需要点から順に各グループに追加することで達成できたと考えられる．すなわち，提案法のアイデアはよく機能しているといえる．

次に移動時間に関する評価を行う．計画期間の配送車の稼動時間は 240(分)×5(日)=1200(分)である．これに対し，本実験の総移動時間は表 2 から，1180(分)となる．20 分ほど余すものの殆どの時間を活用できているといえる．

表 3：回数パターンと訪問日パターン

需要点	需要量	訪問回数	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目
1	50	5	1	1	1	1	1
2	43	5	1	1	1	1	1
3	32	5	1	1	1	1	1
4	30	5	1	1	1	1	1
5	17	5	1	1	1	1	1
6	14	5	1	1	1	1	1
7	12	5	1	1	1	1	1
8	10	5	1	1	1	1	1
9	9	2	0	0	1	0	1
10	8	2	0	0	1	0	1
11	7	2	0	0	1	0	1
12	6	2	0	0	1	0	1
13	5	2	0	1	0	0	1
14	5	2	1	0	0	0	1
15	5	1	0	1	0	0	0
16	4	1	1	0	0	0	0
17	4	1	0	0	0	1	0
18	4	1	0	0	0	1	0
19	4	1	1	0	0	0	0
20	4	1	0	0	0	1	0
21	4	1	0	0	1	0	0
22	3	1	0	1	0	0	0
23	3	1	1	0	0	0	0
24	3	1	0	0	1	0	0
25	2	1	0	1	0	0	0
26	2	1	0	1	0	0	0
27	2	1	0	1	0	0	0
28	2	1	1	0	0	0	0
29	2	1	0	0	0	1	0
30	1	1	0	0	1	0	0
31	1	1	0	1	0	0	0
32	1	1	1	0	0	0	0
33	1	1	0	0	0	1	0
34	1	1	0	0	0	0	1
35	1	1	0	1	0	0	0
36	1	1	0	1	0	0	0

6.まとめと今後の課題

本研究では，欠品と在庫を考慮した多期間の配送計画問題を取り上げ，延べ平均在庫量を最小化させるという明確な数理計画問題として整理し，定式化を行った．さらに，互換近傍探索を用いた解法を提案して，比較実験を行ったところ，延べ平均在庫量をかなり改善した．本研究の提案は，移動時間制約と積載容量制約を満足するような多頻度小ロットの配送を実現する上で，役に立つものと考えられる．

在庫費用や現在社会問題となっている燃料費などの変動費を計上し，より現実に適応できるモデルを考えることは今後の課題である．また，対象範囲の拡大やより長い計画期間でのモデルへの適応も今後の課題の 1 つである．

7.参考文献

[1] 圓川隆夫，伊藤謙治，笠原鉄雄，陳大：欠品ゼロと在庫最小化を目指した多期間配送計画問題とその解法 ,日本経営工学会論文誌，Vol.46，No.5，pp.492-502（1995）

[2] 曹徳弼，圓川隆夫：需要の変動および配送平準化を考慮した多期間配送計画問題 ,日本経営工学会論文誌，Vol.48，No.6，pp.321-330（1997）

[3] 柳浦睦憲，茨木俊秀： 組合せ最適化 ―メタ戦略を中心として― ，朝倉書店（2001）

[4] 久保幹雄： ロジスティック工学 ，朝倉書店（2003）

[5] 掌田津耶子： Delphi パーソナルプログラミング ，毎日コミュニケーションズ（2002）