Journal of the Operations Research
Society of Japan
Vol. 44, No. 4, December 2001

© 2001 The Operations Research Society of Japan

自動販売機に対する在庫配送計画の事例

宮本裕一郎　　久保幹雄
東京商船大学

(受理 2001 年 2 月 9 日；再受理 2001 年 7 月 23 日)

和文概要　本稿では，清涼飲料水の自動販売機を例とした在庫配送計画の事例を紹介する．在庫配送計画問題は，配送車の配送ルートを決めるだけでなく，配送車による在庫補充を含むロジスティクス・システム全体の最適化を目的とする問題である．すなわち，配送車総稼動時間の最小化だけでなく，在庫・品切れ費用の最小化も併せて最適なルートを求める問題である．ここで，必要とされる配送車数（1 日あたりの最大ルート数）を越えてはならないという制約も考慮している．そして，その計画期間は多期間に及ぶ．本事例では 700 台程度の自動販売機を対象とした 30 日間の在庫配送計画を実用的な時間で求解できるシステムを開発し，シミュレーションにより 1/3 程度の配送車総稼働時間の低減が認められた．本事例で開発したシステムは実際に現場に導入されつつある．本事例は，従来の研究に比べると，各期ごとの需要が一定でないこと，また顧客数（自販機数）が多いこと，が特徴的である．

1. はじめに

2000 年末現在，日本全国には約 260 万台の飲料用自動販売機（以下，自販機と略す）が設置され，その年間売上金額は約 3 兆円である[1]．従来，自販機における売上状況は数日に 1 度行われる補充の際にのみ知ることができた．しかし近年の情報通信機器の高性能化と廉価化により，個々の自販機に通信機器が組み込まれ，リアルタイムな売り上げデータの収集が容易になってきた．

自販機に対する在庫配送計画に関して以下の 3 つの観点から費用の削減が考えられる．

1. 製品の配送拠点（デポと呼ばれる）および自販機の配置を変更する．
2. 個々の自販機の商品陳列を変更する．
3. 自販機への配送時期および配送ルートを決める．

以上 3 つはお互いに独立ではなく，密接に関係している．総費用の最適化だけを考えた場合，3 つの要素を同時に考慮したモデルを作り，そのモデルに対して最適化すれば良い．しかし，3 つを同時に考慮したモデルは求解が困難であり，また，意思決定のレベル (そして期間) が異なるため，同時に考慮することは適切でない．それぞれ大切な意思決定であるが，本稿では特に，3 に焦点を当てる．

一般に在庫配送計画問題は，顧客の需要量の動的な変化に追従しながら配送車の効率的なルートを求める問題の総称である．在庫配送計画問題は，配送車に関連する費用の他に顧客の在庫費用も考慮することによって，配送車による在庫補充を行うロジスティクス・システ

[1] 日本自動販売機工業会調べ

ム全体の費用最小化を目的とする．本事例では，在庫配送計画における意思決定支援システムを開発した．

本稿の構成は次の通りである．第 2 節では，本事例で扱う問題設定について説明する．第 3 節では，在庫配送計画における従来の研究を紹介する．第 4 節では，自販機が 1 台の場合を考え，配送時期の決定法を紹介する．ここでは手法として動的計画法を用いている．第 5 節では，第 4 節で紹介した動的計画法を挿入法に組み入れることで，在庫配送計画問題の初期解を生成する方法を紹介する．第 6 節では，初期解の改善法を紹介する．ここでは手法として Cross-opt 近傍を用いた局所探索法を用いている．第 7 節では，実務的な問題へ適用した結果を簡単に報告する．第 8 節は，まとめである．

2. 在庫配送計画問題の設定

本事例では，無限期間の在庫配送計画問題を有限期間の在庫配送計画問題に帰着する．具体的には，Rolling Horizon（あるいは Rolling Schedule と呼ばれる）方式 [18] を用いる．ここで，Rolling Horizon 方式とは，新しい情報が入ってきたときに，有限期間の問題を解き直す方式のことである．本事例の場合，有限期間として 30 日程度を採用した．この場合，実際の運用において使われる解は最初の 1 日だけであり，在庫配送計画問題を毎日解き直す．残りの 29 日の計画はあくまでも「短期に偏ったいびつな計画」を避けるためだけに立てる．よってこれ以降は，以下の仮定をもつ在庫配送計画問題を考える．

1. 複数の自販機に対して，単一のデポから出た複数の配送車が複数の製品（清涼飲料水）の配送を行う．
2. 地点間の移動時間，移動距離，移動費用は既知である．
3. 計画期間は有限とし，期間の集合を $1, 2, \ldots, T$ と記す．本事例では各期間は日に対応している．週末（土曜日と日曜日）の配送を考慮しない場合には，それらの曜日を除いた日を計画期間と考える．本事例では $T = 30$ 程度である．
4. 各期における各自販機の需要は，あらかじめ予測されているものとし，各期，各製品ごとに一定量の確定値が消費されるものとする．
5. 各期の期首に配送車による補充が行われ，その後に製品の需要が発生するものと仮定する．期末に残っている製品量（すなわち次の期に持ち越される製品量）をその製品のその期における在庫量とする．期首の製品量（製品補充をした場合には補充後の製品量）がその期の需要量より少ない場合，その製品はその期に品切れを起こすと見なす．品切れした製品の需要は消滅するものとし，次の期以降における需要には影響を与えないものと仮定する．
6. 製品が品切れの場合には，ペナルティ費用（品切れ費用）がかかる．
7. 製品を在庫した場合には，在庫費用がかかる．一般に自販機に清涼飲料水を入れておいても劣化はしないが，ホット製品は長時間加熱すると成分分離などにより商品価値を失う．
8. 自販機は，複数の種類の在庫場所（自販機内部の棚を指す，以下これを「コラム」と呼ぶ）を持つ．各コラムに在庫される製品はあらかじめ決められているものと仮定する．コラムへの製品の割当てを決める問題は，配送計画よりも上位レベルの意思決定である．なお，一般に 1 台の自販機のコラム数は 20〜30 程度であり，各コラムあたり 20〜30 本程度の清涼飲料水を在庫できる．

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

9. 製品の初期在庫（期 0 から期 1 にもちこす在庫量）は既知であるとする．
10. 配送車が製品を補充する際には，全ての製品を容量の上限まで（すなわち満タンまで）補充する．
11. デポに待機している配送車の種類および最大積載量は既知とする．ここでは簡単のため，すべての配送車は同一と仮定する．また，最大積載量は自販機の最大容量よりも大きいと仮定する．
12. デポを出発して，1 つ以上の自販機を経由し，再びデポに戻る巡回路をルートと呼ぶ．1 つのルートに 1 台の配送車が対応する．1 つのルートに含まれる自販機への配送量の合計は，配送車の最大積載量を超えない．
13. 1 日あたりの最大ルート数が与えられており，それを超えた場合にはペナルティ費用がかかるとする．1 日あたりの最大ルート数を絶対に守って欲しい場合にはペナルティ費用を十分大きくすればよい．
14. 配送車の稼働時間は決められた上限を超えない．ちなみに，1 つの配送車が 1 期（1 日）に配送できる自販機は高々15 台程度である．これは主に自販機への製品の補充にかかる時間によって制限されている．

以上の仮定の元で，自販機への配送費用，自販機の在庫・品切れ費用，の合計を最小化することを目的とする問題を考える．なお，これらの仮定は現場の要望を元に，ロジスティクス・システム最適化に本質的に必要と思われる事項を抽出したものである．本事例の目的は意思決定支援システムを開発することであり在庫配送計画の全てを自動化することではない．よって，時間帯別の道路渋滞などは考慮しない．

3. 在庫配送計画における従来の研究

本節では，在庫配送計画に関する従来の研究を紹介する．在庫配送計画問題に対する研究は Bell，Dalberto ら [5] による Air Products & Chemical, Inc. における事例研究からはじまっている．この事例は産業用ガスの配送であり，顧客の需要量は既知でありしかも一定である．現実問題で発生する在庫配送計画問題は，本質的には無限期間における顧客需要を考慮する必要がある動的なモデルである．しかし彼らはそれを 5 日間の有限期間だけを考えることにし，さらに 1 時間を単位期とみることによって全体で 120 ($=24\times5$) 期の静的な問題に帰着させている．また，1 つのルートに含まれる顧客数が少ない（平均 2 であり，4 を超えることはほとんどない）ことから必要なルートをあらかじめ生成しておく方法を用いている．この問題は，整数計画法に定式化すると 80 万変数，20 万制約の巨大な問題になる．しかし，Lagrange 緩和を用いることによって精度の保証をもった実行可能解を効率的に算出できる．本事例において，無限期間の問題を有限期間の問題に帰着させるという考え方はこの文献に基づいている．しかし，本事例は顧客（自販機）の需要が毎日一定であるとするのは無理がある．また，1 つのルートに含まれる顧客（自販機）数が多く，同様の解法は適切でない．

その後の実務的な問題意識に基づく研究の多くは，Bell，Dalberto らと同様に無限期間の問題を有限期間の問題に帰着させる方針に基づくものである．Assan，Dahl [4] は，2 日以降の情報をその日に顧客をサービスできなかったときのペナルティに換算することによって，1 日の問題に帰着させる方法を提案している．Dror，Ball [11] は，無限期間の費用をいかにして短い期間の費用に還元させるかについて考察している．多期間の問題を解くのが困難な場合，例えば許容できないほど計算時間が大きい場合，は同様の手法が有効である．しかし

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

本事例の場合は，7節でわかるとおり，十分長い期間を対象とした問題の計算にかかる時間が数分であるので採用しなかった．

Dror, Levi [13], Dror, Ball ら [12] は，無限期間の問題を1日ではなく多期間（5日間）の配送計画問題に帰着させる方法を提案している．Dror, Levi [13] はセービング法と局所探索法の拡張を示し，Dror, Ball ら [12] は一般化割当法を提案している．Larson [21] は，在庫配送計画問題を用いたロジスティクス・システムの設計の事例を取り扱っている．Trudeau, Dror [24] は，需要の不確実性を考慮した確率的配送計画問題の要素を在庫配送計画問題に導入したモデルを考えており，在庫切れおよびルート欠損（route failure: 顧客巡回中に需要量の不確実性のために荷物が不足してしまうこと）を考慮した近似解法を提案している．いずれも，顧客の需要が一定であるという仮定をしており，本事例にそのまま適用できるものではない．

本事例に直接関係するものではないが，以下に近年の在庫配送計画に関する研究をまとめる．在庫配送計画問題は，数多くある在庫問題のバリエーションの各々に対する拡張が考えられる．現在までに提案されている在庫配送計画問題の理論モデルは，大きく分けて2つの古典的な在庫モデルである新聞売り子問題と経済発注量モデルの拡張であると考えられる．本事例は，経済発注量モデルの拡張に属する．

新聞売り子問題を拡張したモデルは，1期在庫配送計画問題とよばれる．Federgruen, Zipkin [15] は，1期間在庫配送計画問題問題を最初に考え，局所探索法を用いた近似解法と一般化 Benders 分解法を用いた厳密解法を提案している．この厳密解法は，Fisher, Jaikumar [16] が一般化割当法を導く際に用いたものと同じテクニックである．Chien, Balakrishnan ら [10] は，多期間の問題を Lagrange 緩和によって単一期間の問題に帰着させる方法についても考察している．

経済発注量モデルを拡張したモデルは無限期間在庫配送計画問題とよばれる．このモデルにおいては，顧客需要が定常であるという仮定の下で，在庫補充の最適な“方策”を考える．Burns, Hall ら [8] は，システムデザイン的アプローチを行っている．Anily, Federgruen [1] は，顧客が平面上に独立かつ同一な分布関数にしたがい分布しているという仮定の下で，特定の補充方策のクラスに限定したときに，漸近的に最適になる近似解法を構築している．この解法は，その補充方策の下では各グループごとに独立に補充頻度を決定すれば良いので，経済発注量モデルを用いることができる．そして，等需要配送計画問題に対する Haimovitch, Rinnooy Kan [19] の領域分割法に対する解析を利用したものである．その補充方策は顧客需要の分割を許すので，必ずしももとの問題に対しては最適な方策は与えないという指摘が Hall [20] によってなされている．Anily, Federgruen [2] は，Hall の指摘に対する返答であり，前論文の補充方策の実務的な意味での重要性について議論している．Anily, Federgruen [3] ([14] も参照）は，デポにおける在庫保管費用を考慮したモデルを考え，Roundy [22] による在庫補充方式（2のべき乗方策）を拡張することによる最適方策の 6% 増しの保証をもった近似方策を提案している．Gallego, Simchi-Levi [17] は，各顧客を独立に補充する直送方策 (direct shipping policy) の性能保証について調べている．Bramel, Simchi-Levi [7] は，別の補充方策を定義し，施設配置ヒューリスティックスを用いた近似解法が，固定分割方策の中では漸近的に最適解に収束する (asymptotically optimal) ことを示している．ここで，漸近的に最適解に収束とは，顧客数が増大するに従って，近似解法により得られた解の値と最適値との差が0に近づくことを表す．

Campbell, Clarke ら [9] は，在庫配送計画問題に対する混合整数計画を用いたアプローチ

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

と動的計画を用いたアプローチを提案している．Campbell, Clarke らは，良いクラスターの集合を得るために，まずクラスターの候補を生成し，その費用を混合整数計画問題を解くことによって評価し，さらに集合分割アプローチによってクラスターを選択する方法を用いている．

4. 対象とする自販機が1台の場合

複数の自販機への在庫配送計画を考える前に，単純な場合として，1台の自販機への在庫配送計画を考える．本節で示すアルゴリズムは，5節で紹介する初期解の生成や改善法を設計するときの礎となるものである．自販機が1台の場合は，デポと自販機を往復するだけなので，配送ルートを考える必要はない．配送期を決めれば良いだけである．需要，在庫・品切れ費用が確定的であり，製品は満タンまで補充する事を仮定すると，最適な在庫配送計画を立てることができる．(最適な配送期を決めることができる.) 以下しばらく簡単のため，1期から T 期を計画期間とし初期在庫は0とする．期 t における配送費用を固定費用として F_t と記す．また，自販機を表す添え字は省略して記述する．$T=7$ の場合に，配送期を1期，3期，5期，6期，とした配送計画を図1に示す．

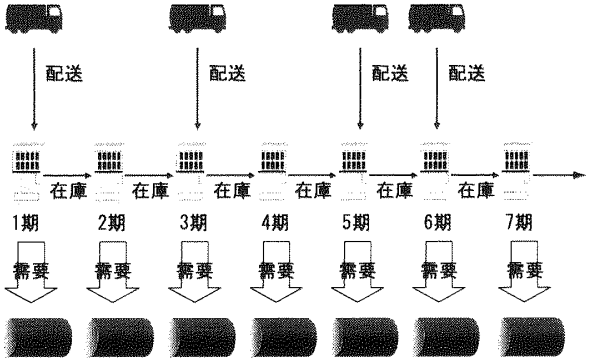

図 1: 製品の流れ

以下ではこのモデルを有向ネットワークで表す．ダミー期（0期）を加えた $0,1,\ldots,T$ 期を有向ネットワークの点とする．有向ネットワークの枝 $(s,t), 0 \le s < t \le T$ は $s+1$ 期に製品を配送し $t+1$ 期まで配送しないこと（次に配送するのは $t+1$ 期であること）を表すものとする．枝 (s,t) の長さは，$s+1$ 期の次の補充が $t+1$ 期のときの $s+1$ から t 期の間にかかる総費用とする．ここで総費用とは配送費用，在庫費用，品切れ費用の和を表す．ただし，在庫費用には t 期から $t+1$ 期にもちこすための在庫費用も含まれる．この有向ネットワークにおいて，0期から T 期への有向パスは配送計画に対応し，その有向パスの長さはその配送計画にかかる総費用に対応する．有向ネットワークを図2に示す．図1に対応するパスは図2において太線で表されている．全ての配送計画の中で，最適な配送計画を見つけるためには，0期から T 期までの最短路を求めれば良い．

枝 (s,t) の長さを δ_{st} とする．製品の集合を $P=\{1,2,\ldots,p,\ldots,|P|\}$ と記す．期 t における製品 p の需要量を d_t^p と記す．製品 p の品切れ費用を L_p，在庫費用を H_p，自販機における製品 p の容量を C_p と記す．本事例においては費用の見積もりを

$$\delta_{st} = F_{s+1} + \sum_{p\in P} H_p \sum_{t'=s+1}^{t} \left[C_p - \sum_{s'=s+1}^{t'} d_{s'}^p \right]^+ + \sum_{p\in P} L_p \left[\sum_{s'=s+1}^{t} d_{s'}^p - C_p \right]^+$$

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

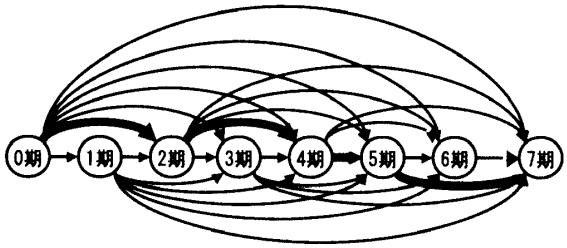

図 2: 有向ネットワーク

とする．ここで，$[\cdot]^+ = \max\{\cdot, 0\}$ である．実際の計算においては δ_{st} の計算と最短路の計算はまとめて行うと効率が良い．それらは $s = 0, t = 1$ から再帰的に計算することによって $O(|P|T^2)$ 時間で計算することができる．

本節の最初のほうで初期在庫は 0 であると仮定した．初期在庫が 0 でない場合は 0 期の直前期を表す新たなダミー期を適切に設ければよい．具体的には 0 期の前期として -1 期を用意し，-1 期から各期へ枝を張ればよい（図 3 参照）．このとき枝 $(-1, t)$ は初めて配送する

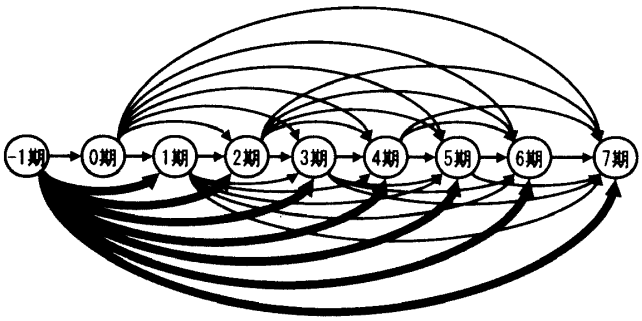

図 3: 初期在庫を考慮した場合の有向ネットワーク

期が $t+1$ であること（すなわち，t 期まで配送しないこと）を表す．枝の費用は対応する総費用とする．例えば，枝 $(-1, T)$ は，全計画期間において，全く配送しないことを表す．

現実問題では，訪問する期に制限が付加される場合がある．訪問期に対する制限として以下の 3 つを考える．

訪問禁止日: ある期は訪問してはいけない．これは，自販機管理者の定休日などを考慮するために用いられる．

訪問間隔上限: 訪問する間隔が決められた値以下でなければならない．これは，ゴミ捨て場の清掃や釣り銭の回収・補充に関する制約に対処するために用いられる．この条件を必ず満たすように制約を加えると，実行可能解が存在しないケースが出てくる．そのため本事例では，この条件を破っている解に対してペナルティ費用を付加することによって処理する．

訪問指定日: ある期は必ず訪問しなければならない．この条件も，上の訪問間隔上限と同じように，必ず満たすように制約を加えると，実行可能解が存在しないケースが出てくる．したがって，この条件を満たすように指定日に訪問することを推奨するように費用を人為的に変更することによって処理する．

上の 3 つの条件は，前述の有向ネットワークを変更することによって簡単に対処できる．

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

訪問禁止日は枝の削除によって対応できる．訪問上限間隔，訪問指定日は枝の長さを変えることによって対応できる．このような変更によっても，最悪の場合の計算量は変わらない．

5. 初期解の生成

本事例では，初期解の生成法として挿入法を採用する．挿入法で一番重要なのは挿入する順番である．本事例では，挿入する順番を決める要素として自販機の地理的関係と配送期の時間的関係という2つの要素があるので注意が必要である．ここでは，1台の自販機について計画期間の全ての配送計画を決め，その操作を全ての自販機について繰り返すことにする．逆に1つの期に注目して全ての自販機の配送計画を立てると，短期的には良い解が出るかもしれないが多期間の総費用は悪いものとなってしまう．

挿入法の概要は以下の通りである．自販機 i を期 t の適切なルートに挿入したときの移動費用の増加量 Δ_{it} を計算する（図4参照.）．ここで適切なルートとは，自販機 i 挿入時に

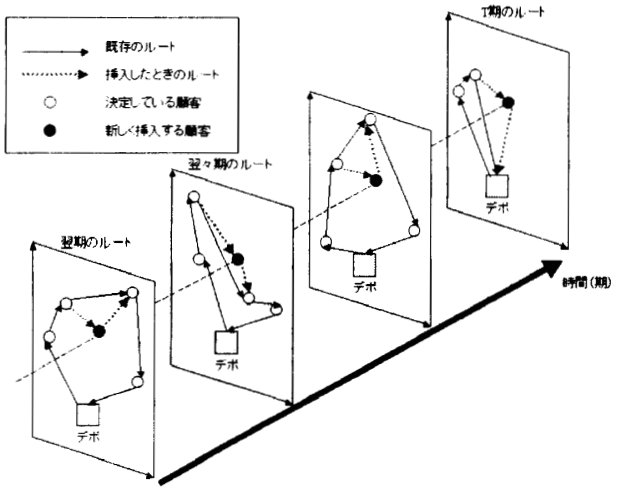

図 4: 移動費用の増加の計算の概念図

実行可能性を破らない，かつそのルートにおける移動費用の増加が最小となるルートのことである．本事例では，補充製品の総量が配送車の最大積載量以下であること，配送車の稼働時間が決められた上限を超えないこと，が満たされる場合に実行可能であるとしている．各自販機に対する製品の補充量は挿入以前には決まらないので，各自販機の最大容量（自販機のコラム容量の総和）を製品の補充量として容量制限をチェックする．また，自販機を挿入するルートとして空ルートも考慮する，空ルートに自販機を1台挿入するとデポと自販機を往復するだけのルートとなる．Δ_{it} を，期 t の配送固定費用 F_t と考えて，前節の手法を適用し，補充を行う期を決定する．この操作をあらかじめ決めた自販機順に行い，すべての自販機の配送計画を決める．自販機の順番を決める方法として，デポから遠いものを優先する方式をとる．

実際には，デポが保有する配送車数は有限であり，1日あたりのルート数はそれ以下であることが望ましい．もちろん，ルート数の均等化を図った場合，費用最小化はある程度犠牲とせざるを得ない．しかし，理論的に最適なアルゴリズムであっても実務で使えなければ意味はない．期 t のルート数を R_t，1日あたりの最大ルート数を $R_{\max}$ とする．上述の挿入法において $\Delta_{it} := \Delta_{it} + [\alpha(R_t - R_{\max})]^+$ とすれば，アルゴリズムに大きな変更を加えずに対

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

応できる．ここでαは配送車の最大数を超過したルートに対するペナルティ費用と理解できる．

6. 解の改善法

本節では，前節で生成した実行可能解を改善する方法を紹介する．改善法には様々なバリエーションがあり，その選択には注意を要する．改善される値の精度，計算時間なども重要ではあるが，それにも増して実務においては，実装のしやすさ（アルゴリズムの単純さ）や運用のしやすさ（アルゴリズムの拡張しやすさ）などが重要である．以上の理由に基づき本事例では，Cross-opt 近傍[23]に基づく局所探索法(local search)を採用した．挿入法を近傍とした局所探索法も考えられる．しかし挿入法は，期ごとに独立した固定費用（挿入費用）を決めてから，訪問期を動的計画アルゴリズムで決定するので，他の訪問期に依存した挿入費用を考慮することが困難である．たとえば，前の訪問期に依存して配送量が変化し，さらに配送量の違いによって荷物の積み降ろしの時間などが変化することを考慮することは，挿入法を近傍とした局所探索法では難しい．また，意思決定支援システム，特に本事例のように入力データ（需要予測データ）の信頼性が低い場合には，得られる解の精度よりも求解時間が重要である．それが，タブーサーチなどを使わずに，局所探索法を採用した理由である．

Cross-opt 近傍は，2つのルートに注目しその部分列を交換する手法である．どのルートに注目するか，それぞれのルートのどの部分を交換するかという自由度があり，全ての可能性を走査すると要領の悪いものになってしまうので，一般には走査範囲に何らかの制限を加えるのが普通である．在庫配送計画における Cross-opt 近傍はそのルートを選ぶ候補として，同じ期のルートだけではなく，異なる期のルートも考えられるので，近傍の数が膨大なものとなってしまう．そのため近傍に以下の制限をする．ある解において，自販機iを訪問する期の1つをtとし，そのとき自販機iを含むルートをr_{it}とする．tの前にiを訪問した期をt_i^-とし，tの次にiを訪問した期をt_i^+とする．r_{it}と交換するルートが含まれる期はt_i^-とt_i^+の間（t_i^-とt_i^+を含まない区間）に限定する．あまりにも離れた期のルートと交換することは直感的にも無駄であると思える．このようにして Cross-opt 近傍を制限すると探索が高速化される．

走査の計算そのものも高速化することが望ましい．期tのルートに含まれる自販機の連続した部分列が他のルートに移動したときの在庫・品切れ費用の変化量の計算は補助配列として各自販機iに以前の訪問期t_i^-からtまでの累積需要量およびtから次の訪問期t_i^+までの累積需要量を準備することによって高速化される．

本稿では触れないが，アルゴリズムの実装において K-d 木[6]の使用により計算の高速化を図っている．

7. 実務的な問題への適用

前節までに説明したアルゴリズムを組み込んだ意思決定支援システムを開発し，富士電機(株)で試験的に使用してもらった．今回用いたデータは，デポが1，自販機が727台，計画期間は30日，製品は315種類，というものであり，これは現実のデータである．現状における毎日のルート数は25で一定であり，配送車の30日間の総稼働時間は7297.35時間である．また，製品の品切れ回数が57回以上であることがわかっている．配送費用は，現在の人件費を配送車の総稼働時間で割ったものとした．在庫費用，品切れ費用は現在考慮されて

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

いない．よって在庫配送にかかる総費用も現状ではわかっていない．実際の意思決定においても，在庫費用・品切れ費用はデータとして提供されるものではなく，製品が売れないことをどの程度の損失と考えるか，製品を売る機会を失ったことをどの程度の損失と考えるか，を表す重みの係数であると考えられる．実際，本事例において開発したシステムは，長期にわたって固定された在庫・品切れ費用にたいして天下り的に解を出力するものではなく，意思決定者が在庫・品切れ費用を変えつつ計画を立てるための意思決定支援システムである．

まず，すでに得られている需要データを需要予測として入力し計算してもらった．すなわち，需要予測が100%当たるとした．在庫・品切れ費用の設定にもよるが，計算実験の結果は，1日あたりのルート数が15前後，総稼働時間が4500時間前後，品切れ回数は20前後であった．ルート数，総稼働時間ともに減少した．

実際には需要予測ははずれることも多い．次に，実際の需要とは異なる需要予測を入力して計算実験を行った．在庫・品切れ費用の設定にもよるが，計算実験の結果，1日あたりのルート数は20前後，総稼働時間は6000時間前後，品切れ回数は50前後であった．需要予測が必ず当たる場合に比べて，ルートに無駄ができて，ルート数，稼働時間ともに大きくなっている．また，売切れ回数は増えている．しかし，現状に比べればルート数，稼働時間ともに減少していることがわかる．

30日分の計画を立てるための計算時間はいずれも，初期解生成に約30秒，改善に約160秒，であった．用いた計算機はPentium III 400MHzのCPUを搭載したパソコンである．各デポにおいて配送計画問題は1日1回解けば十分であるので，これは十分な速さである．1つの事業所あたりのデポの数は100程度であり，事業所で一括して問題を解くとしても支障はない．現在は，それぞれのデポが担当する自販機が決まっており，その範囲で在庫配送計画を立てれば十分である．今後は担当範囲をなくし，より費用を削減する方向に向かうと思われる．

8. 結び

本稿では，清涼飲料水の自販機を例とした在庫配送計画の事例を紹介した．ロジスティクス・システムはまだまだ人海戦術に頼る場面も多い．しかし近年の情報技術の進歩により確実に変化している．現在は情報基盤が整備され，現場の情報を安価に迅速に収集でき，また，中央の指令を現場に的確に指示できるようになった段階である．ロジスティクス・システムへの最適化アルゴリズムの適用はまだ始まったばかりであり，今後の活用が期待されている．最後に，参考までに本事例で開発された在庫配送計画システムの画面を図5に示す．

謝辞

本研究は富士電機（株）との共同研究であり，ご協力いただいた皆さんに感謝したい．また，本研究を進めるにあたりご協力をいただいた，久保研究室の皆さんにも感謝したい．

参考文献

[1] S. Anily and A. Federgruen: One warehouse multiple retailer systems with vehicle routing costs. *Management Science*, **36** (1990) 92–114.

[2] S. Anily and A. Federgruen: Rejoinder to: Comments on one-warehouse multiple-retailer systems with vehicle routing costs. *Management Science*, **37** (1991) 1497–1499.

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

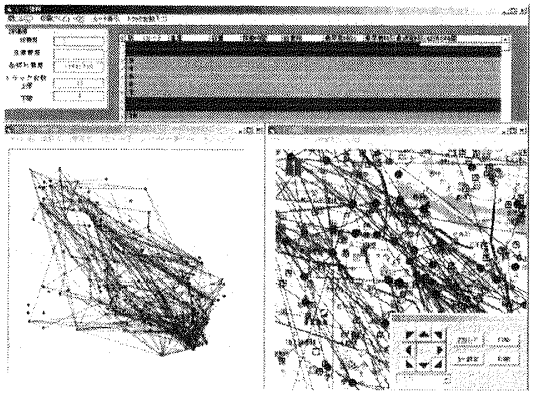

図 5: 在庫配送計画システムの画面

[3] S. Anily and A. Federgruen: Two-echelon distribution systems with vehicle routing costs and central inventories. *Operations Research*, **41** (1993) 37–47.

[4] B. A. Assan and R. Dahl: Analysis of a large scale routing problem with an inventory component. *Large Scale Systems*, (1984) 181–190.

[5] W. J. Bell, L. Dalberto, M. L. Fisher, A. J. Greenfield, R. Jaikumar, P. Kedia, R. G. Mack and R. J. Prutzman: Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. *Interfaces*, **13** (1983) 4–23.

[6] J. L. Bentley: K-d trees for semidynamic point sets. *Proceedings of the 6th Annual Symposium on Computational Geometry*, 1990.

[7] J. Bramel and D. Simchi-Levi: A location based heuristic for general routing problem. *Operations Research*, **43** (1995) 649–669.

[8] L. D. Burns, R. W. Hall, D. E. Blumenfeld and C. F. Daganzo: Distribution strategies that minimizing transportation and inventory costs. *Operations Research*, **33** (1985) 469–490.

[9] A. Campbell, L. Clarke, A. Kleywegt and M. Savelsbergh: The inventory routing problem. *Technical report, The Logistics Institute* (Atlanta), *TLI Reports*, **LEC-97-07** (1997).

[10] T. W. Chien, A. Balakrishnan and R. T. Wong: An integrated inventory allocation and vehicle routing problem. *Transportation Science*, **23** (1989) 67–76.

[11] M. Dror and M. Ball: Inventory/routing: reduction from an annual to a short-period Problem. *Naval Research Logistics*, **34** (1987) 891–905.

[12] M. Dror, M. Ball and B. Golden: A computational comparison of algorithms for the inventory routing problem. *Annals of Operations Research*, (1986) 3–23.

[13] M. Dror and L. Levi: A vehicle routing improvement algorithm comparison of a "greedy" and a matching implementation for inventory routing. *Computers and Operations Research*, **13** (1986) 33–45.

[14] A. Federgruen and D. Simchi-Levi: Analyses of vehicle routing and inventory-routing problems. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 8, chapter 4 (Elsevier, 1995), 297–371.

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

[15] A. Federgruen and P. Zipkin: Combined vehicle routing and inventory allocation problems. *Operations Research*, **3** (1984) 1019–1037.

[16] M. L. Fisher and R. Jaikumar: A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, **11** (1981) 109–124.

[17] G. Gallego and D. Simchi-Levi: On the effectiveness of direct shipping strategy for the one warehouse multi-retailer *R*-systems. *Management Science*, **36** (1990) 240–243.

[18] S. C. Graves, A. H. G. R. Kan and P. H. Zipkin eds.: *Logistics of production and inventory*. Vol. 4 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Northholland, 1993.

[19] M. Haimovitch and A. Rinnooy Kan: Bounds and heuristics for capacitated routing problem. *Mathematics of Operations Research*, **10** (1985) 527–542.

[20] R. W. Hall: Comments on: One-warehouse multiple-retailer systems with vehicle routing costs. *Management Science*, **37** (1991) 1496–1497.

[21] R. C. Larson: Transporting sludge to the 106-mile site: an inventory/routing models for fleet sizing and logistics system design. *Transportation Science*, **22** (1988) 186–198.

[22] R. Roundy: 98% effective integer ratio lot sizing for one warehause multi-retailer systems. *Management Science*, **31** (1985) 1416–1430.

[23] E. Taillard, P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin and J. Y. Potvin: A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows. *Transportation Science*, **31** (1997) 170–186.

[24] P. Trudeau and M. Dror: Stochastic inventory routing: route design with stockouts and route failure. *Transportation Science*, **26** (1992) 171–184.

宮本裕一郎
〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6
東京商船大学
E-mail: yuichiro@ipc.tosho-u.ac.jp

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

ABSTRACT

CASE STUDY: THE INVENTORY ROUTING FOR VENDING MACHINES

Yuichiro Miyamoto Mikio Kubo
Tokyo University of Mercantile Marine

In this paper, we present an integrated vender managed inventory system currently being developed for large soft drink firms in Japan. The heart of our system is a heuristic algorithm for the inventory routing problem that is concerned with the supply of a set of products from a single depot to a set of customers over a given planning horizon. The objective is to minimize the sum of distribution, inventory, and shortage costs during the planning periods. Our two-phase algorithm determines the set of customers to be supplied each day and finds routes for vehicles to serve those customers. The first phase of the algorithm constructs an initial feasible solution using an insertion method, and the second improves the initial solution using a local search based on Cross-opt neighborhood. Due to the size and complexity of our real application, we adopt sophisticated data structures and speed-up techniques. Typical problems involve a depot and about 700 vending machines. For the problems, the system has been saving about 40% of total working hours and the number of roots.

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.