空輸送距離を最小にする配送経路問題の解法に関する研究

服部　孝一（沼田　一道　助教授）

1．はじめに

工場で製造された製品は工場から倉庫へ，倉庫から顧客へ，あるいは工場から直接顧客へと輸送される．多数の輸送要求を拠点に待機している複数台のトラックで処理する場合，どのトラックにどの要求を割り当て，割り当てられた要求をどのような順番で処理するかが非常に大きな問題となる．無計画に輸送した場合，無駄な走行つまり余計な時間・費用が発生してしまう可能性が高く，経営上好ましくない．そこで効率のよい輸送計画の立案が望まれるが，このような問題ではさまざまな制約条件が絡み合っていることが多く，過去の経験，直感による判断だけで良い計画を立てるのが困難である．

本研究では製品輸送時の輸送費用削減のために，トラックの走行距離をできるだけ小さくするようなトラックへの輸送要求の割り当てとトラックの輸送順序を求めるアルゴリズムを構築し，実際問題を意識した試験データに適用してその性能を評価する．

2．問題の概要

本研究が想定する事例においては，積み込み地点でトラックに製品を満載し目的地ですべて降ろすという形態の輸送が行われている．積み込み／積み降ろし地点は工場，倉庫，顧客の工場である．倉庫には製品を一時的に保管し顧客の需要に応じて輸送を行う近傍倉庫と，遠距離の顧客の要求に速やかに応えるための拠点倉庫がある．工場で製造された製品は一度近傍倉庫に輸送，保管されることが多い．このため工場と近傍倉庫の間では多数の輸送要求が存在する．また工場，倉庫，顧客の工場間の輸送の他に，いったん顧客の工場に製品を輸送してから中身をつめるなどされた製品を顧客の倉庫または顧客の顧客に輸送する場合もある．この問題における輸送要求の例を図1に示す．トラックは積み込み地点で一括して製品を積み込み，積み降ろし地点で一括して降ろすため，積み降ろした後次の積み込み地点までは何も積まずに空で走らなければならない．ここでA，B 2つの輸送要求を考えたとき，図2に示すように$A \rightarrow B$の順で輸送した場合と，$B \rightarrow A$の順に輸送した場合では空で走っている距離（以下，空輸送距離と呼ぶ）が異なってくる．本研究で扱うのはこのような性質を持つ輸送要求から成る配送経路問題である．

以下にこの問題を扱う上での前提を示す．

- トラックは工場から出発して工場に戻るものとする．
- 輸送要求はトラックの台数単位で与えられる．
- 各トラックの走行距離の差をできるだけ小さくする．
- 積み下ろし，積み込み時間，渋滞は考慮しない．
- 地点間の距離は直線距離で考え，各地点をユーグリット座標で与える．

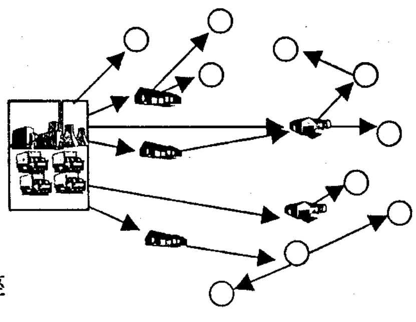

図1．輸送要求例

このような条件のもとで，総走行距離を最小とするようにトラ

ックに輸送要求を割り当て，トラックが輸送を処理する（準）最適な順番を求める．図２からわかるように総走行距離＝実輸送距離＋空輸送距離であり，実輸送距離は一定なので総走行距離を最小にするには総空輸送距離を最小にすれば良い．

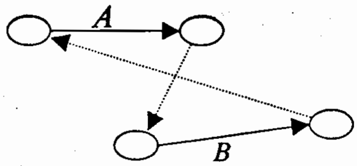

図２.輸送例

３．定式化

トラックの台数をk，トラックの集合を$T=\{t_1,t_2,\cdots,t_k\}$とする．輸送要求の数をn，輸送要求の集合を$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$とする．D_iをトラックt_iに配分された輸送要求の集合，$\sigma^{(i)}$をトラックt_iがD_iを回る順番とする．またトラックt_iが配分された輸送要求をすべて行い工場に戻るときの巡回路長を$L_i(D_i,\sigma^{(i)})$　$(i=1,2,\cdots k)$で表わす．前節で述べた問題は総空輸送距離を最小にするD_iと$\sigma^{(i)}$を決める問題となり，以下のように定式化される．

$$
(\mathrm{P})\quad \begin{cases} \min & f=\sum_{i=1}^{k} L_i(D_i,\sigma^{(i)})+\alpha*\{\max L_i(D_i,\sigma^{(i)})-\min L_i(D_i,\sigma^{(i)})\} \\ \text{sub.to} & D_i=\{v_j \mid x_{ij}=1\} \\ & x_{ij}\in\{0,1\} \qquad \sum_{i=1}^{k} x_{ij}=1 \end{cases}
$$

αは非負のパラメータで「トラック間の走行距離の格差最小化」重視の度合いを表すものである．制約条件は，すべての輸送要求が，あるトラックによって必ず処理されることを意味している．$\alpha=0$とすれば格差を無視し，$\alpha=\infty$とすれば総走行距離を無視したことになる．

４．解法

本研究で扱う問題は，与えられた制約を満たすものの中で最適な組み合わせを探す組合せ最適化問題である．問題の規模が小さければ全解の列挙により厳密な最適解を求めることができるが，規模が少し大きくなると全列挙は不可能である．また巡回セールスマン問題を含むので，明らかにNP－困難であり，能率の良い厳密解法は存在しそうもない．先に述べたように問題（P）は制約を満たす最適なD_i，$\sigma^{(i)}$を求める問題だといえる．[２]では与えられた輸送要求に対して総走行距離最小となるような空輸送を付加して，一筆書きのできる経路（オイラー路）を作成し，その経路を複数台のトラックに分割するという解法を提案した．しかし与えられた輸送要求によっては部分巡回路が出来てしまうという問題があり，また１台のトラックの走行経路としては最適であっても複数のトラックに分割した場合には，最適であるとは限らないという問題点も指摘されていた．本研究では最適なD_iをメタヒューリスティックスの一つである禁断探索法を用いて求めることを考え，最適な$\sigma^{(i)}$の決定については文献[４]の結果を利用する．

５．禁断探索法の本研究への適応

禁断探索法は，近傍中の最良の解x'が現在の解xよりも悪くても$x:=x'$と更新することによって，局所最適解で探索が終了してしまうことを避ける発見的解法の枠組みである．また，タブーリストを用いて近傍に含まれる解から少し前に探索した解を除くことにより直前の解に戻ってしまう循環を防

いでいる．すなわち一度入れ替えに選ばれた $v_j\ (j=1,2,\cdots n)$ にタブー期間 q（乱数）を与え，入れ替えに選ばれてからその回数は入れ替えの対象にはならないものとする．本研究ではこの改悪を許し一旦悪い解に移ってから良い解を見つける可能性を考慮して，禁断探索法を採用した．近傍を広く（近傍に含まれる解の数が多い）とると計算量が増大してしまうため，本研究では近傍を図３で示すように v_j を現在の D_i から他の $D_m\ (i \neq m)$ へ移動する入れ替え一回の範囲で得られる解の集合とした．実際には近傍に含まれる解からタブー期間が残っている v_j の入れ替えで得られる解を除いたものの中で最良の解に移動する．改悪を許しながら探索を繰り返し C 回続けて目的関数値の更新がなければ，それ以上良い解がないとみなして終了する．解法の手順は以下のように書ける．

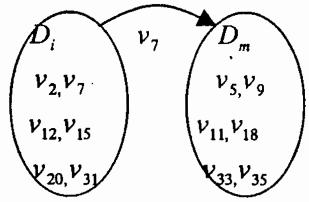

図３.輸送要求の入れ替え例

Tabu：タブーリスト，*fcount*：連続非改善回数，これが C を超えたら終了，x：現在解

Step1．*Tabu*，*fcount* を初期化する．$D_i\ (i=1,2,\cdots k)$ にランダムに $v_j\ (j=1,2,\cdots n)$ を割り当てそれを初期解 $x=\{D_1, D_2, \ldots\ldots, D_k\}$ とし、準最適な $\sigma^{(i)}$ を求めて各トラックの走行距離を求める．最大走行格差を求め目的関数値を計算する．それを最良目的関数値 f^* とする．

Step２．$Tabu[v_j]=0$ である全ての v_j を D_i から $D_m\ (i \neq m)$ へ移し $\sigma^{(i)}$ を最適化して目的関数値を計算する．それらの中で目的関数が最小の解(値)をそれぞれ x'，$f(x')$ として改悪であっても $x=x'$ と更新する．またその時移動させた輸送要求を v_{idou} とする．

Step３．$f(x') < f^*$ であれば $f^* = f(x')$ とする．*fcount* ＝０とし，そうでなければ *fcount* ＝ *fcount* ＋１とする．

Step４． *fcount* ＞C であれば探索を終了して結果を出力する。
そうでなければ移動した輸送要求は $Tabu[v_{idou}]=q$，その他の輸送要求は $Tabu[v_j]>0$ ならば $Tabu[v_j]=Tabu[v_j]-1$ とそれぞれ更新して Step２へ戻る．

６． 実験

試験データを作成し，それを前節で述べた方法で解き，結果を観察する．その結果を図４に示す．また[２]と同じ例題（図５）を解き，最適解，（値）を比較し，その結果を表１にまとめた．

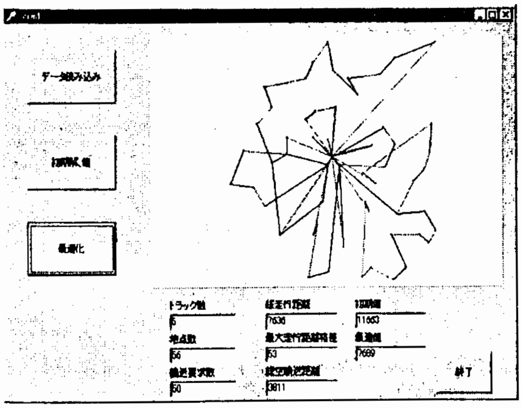

図４． 実行画面（準最適解）

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	3	1	2	1	4	3	2
2	1	*	3	2	1	0	2	1
3	2	1	*	2	3	0	2	1
4	2	2	1	*	2	2	3	1
5	3	2	1	2	*	1	0	1
6	2	0	1	0	2	*	2	2
7	1	4	3	0	1	2	*	1
8	3	2	1	1	2	0	2	*

輸送要求量

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	35	32	16	32	26	24	15
2	35	*	30	19	21	48	34	18
3	32	30	*	30	28	57	35	23
4	16	19	30	*	16	30	38	24
5	32	21	28	16	*	46	50	36
6	26	48	57	30	46	*	46	41
7	24	34	35	38	50	46	*	15
8	15	18	23	24	36	41	15	*

地点間距離

図５． 輸送要求データ[２]

表１．［２］と本研究の比較

	[2]		本研究	
トラック数	総走行距離	総空輸送距離	総走行距離	総空輸送距離
10	2799	77	2884	162
12	2909	187	2932	210
24	3359	637	3328	606

７．結果と考察

試験データを繰り返し解いた結果，最良と思われる経路を求めることができた．また[２]と同じ例題を解いた結果，[２]で最適値として求められた総空輸送距離（総走行距離）と比べてトラック台数が少ない時は劣ったが，トラックの台数を増やすと[２]よりも少ない空輸送距離となった．しかし現時点ではトラックの輸送順序を求めるのにセービング法を用いているので，輸送要求の数が多くなると誤差による最適値，最適解への影響が生じ，結果が安定しなかった．そのため繰り返し同じデータを解いてみて良いものを選ぶしかないのが現状である．本研究では輸送順序を求める部分のアルゴリズムは近傍探索の際，何度も繰り返し実行されるため実行時間を重視したが，精度の点から，[４]の結果をふまえて再検討すべきであろう．トラックの台数を変えて走行距離との関係を見た結果，トラックの数が少ないほうが総走行距離は短くなる傾向があった．これは現時点では走行距離に上限を設定していないため工場から出て，工場に戻るという部分の空輸送距離を，工場に帰らず直接次の積み込み地点に行くことにより短縮できる可能性が高いからである．トラックは，実際には一日に走行することができる時間，距離に制限がある．本研究ではこの制約をトラック台数とトラック間格差の重視度のパラメータとして間接的に扱おうとしたが，走行距離上限を陽に考えるべきであったかもしれない．現時点では完全とは言えないが[２]のように部分巡回路ができてしまうことがないため，より現実に近い問題を解くことが出来ると言える．

６．まとめ

本研究では各施設の位置とその間の輸送要求が与えられている配送経路問題に対し，禁断探索法を基本とする解法を構成し，そのプログラムを作成した．$n=50$，$k=5$ 程度の例題に対しては，作成したプログラムにより空輸送距離を最小とするトラックの経路を構成することが出来た．現実的な規模の，実際に即した問題を扱うには，定式化の再検討，解法の高速化，精密化に関する工夫が必要と思われるが，これらは今度の課題である．

参考文献

[1] 室田一雄編：“離散構造とアルゴリズムⅣ” 近代科学社，1997.
[2] 江村潤，坂井晴正：“空輸送と台数を考慮したトラック経路問題” 東京理科大学工学部第一部経営工学科卒業論文，2000.
[3] 渡辺哲史：修士論文中間審査資料，2000.
[4] 吉村央紀 ：“非対称巡回セールスマン問題に対する近似解法の検討” 東京理科大学工学部第一部経営工学科卒業論文，2001.