

配送計画の最適化—ある企業の事例—

M2020SS001 小林友哉

指導教員：鈴木敦夫

1 はじめに

近年、技術の進歩により、IT を活用した業務上の問題解決が可能になってきている。そうした中で、オペレーションズ・リサーチ（OR）における最適化手法は欠かせないものとなっている。OR とは、数学的・統計的モデル、アルゴリズムなどを利用することによって、複雑なシステムにおいて「制約条件を満たした最適解」を求める科学的手法である。OR は様々なシステムに取り入れられており、様々な分野での業務の効率化に活用されている [1]。しかし、自動化できることを人が手作業で行っていたり、最適化の手法が未だに普及が十分ではなく、効果を得られない場合もある。

われわれの研究室に研究を委託しているある企業も、配送の悩みを抱えている。この企業のある工場には、以前から多くの仕入れ先工場が存在し、そのそれぞれに部品を発注している。発注した部品の調達、生産管理室が手作業で作成した配送ルートに従って行っているが、手作業での配送ルート作成には膨大な時間が必要であることに加え、完成した配送ルートが本当に効率の良いものかを判断することは困難である。そのため、生産管理室は、発注による各種の部品入荷量の管理と調達物量の効率化を目指したいと考えているが、実際取り組むのに至っていない状況であった。そこで我々は、OR を用いることで業務の改善を目指し、OR の手法を用いたトラック配送ルートの自動算出とその実用化に向けて当該企業からの委託を受けて研究することにした。

OR の手法は日々進歩しており、様々な課題解決に用いられている。配送路問題においても長年研究が進められており、近年はより現実の要望に合わせた配送路問題の研究がなされている [3]。

参考文献 [2] では、トラック配送ルート自動算出に OR の手法の 1 つであるセービング法を用いている。セービング法は、発見的解法の一つであり、現実的な時間である程度良い解を出すことができる。しかし、セービング法を用いたトラック配送ルートは、納入回数、稼働時間などの条件が加味されていないことから現在の配送ルートとの差異が生まれ、システムの実装には至っていない。そこで、トラック配送ルートを作成する手順を見直しつつ加味されていなかった条件を加え、より効率的な配送ルートを自動で算出できるシステムを作成するとともに、現在の配送ルート作成にかかる時間の削減や、トラックの台数、トラックの容量、総走行距離の最小化を最終目標とした。また、現実的な時間で問題の解決をするために、いくつかの最適化問題に分割して解くこととした。

トラック配送ルートを算出する際に使用するデータは、現在の配送ルートを作る時に利用しているものを用いており、あらかじめ担当者が決めた荷量と立ち寄り回数が入力されたものを使用した。配送ルート算出システムは、CSV ファイルでデータの読み込みを行い、最適化計算を行った後 CSV ファイルに結果を出力する構成とした。また、最適化計算は Python の PuLP を用いた。配送ルートを算出するまでに行う操作は、現在使用している CSV ファイルの更新のみのため、企業の担当者に受け入れてもらいやすく、実用的なシステムの作成に成功した。

2 企業における配送路問題

2.1 現状のトラック配送ルートについて

研究対象の工場は、自動車関連部品の製造を行っており、その製造に必要な部品は仕入れ先の工場をトラックで巡回することで調達している。その企業の生産管理室では、トラック 1 台に対して数か所の仕入れ先工場をあらゆる面で効率良く巡回できるような配送ルートの作成を目指している。部品を仕入れる際には、必要な分量以上に調達すると倉庫の空き容量が不足する恐れがあるため、各仕入れ先の工場にはあらかじめ調達回数が決められている。現在、配送ルートは生産管理室の担当者が手作業で作成しており、その作業は、必要なトラック台数を決め、トラック毎の仕入れ先工場の割当を行い、トラックの順路と納入ダイヤグラムの作成にまでおよぶ。加えて、作業が属人化しているため配送ルートの作成に膨大な時間がかかり、担当者の負担となっている。そのため、生産管理室は、調達物流の効率化と調達における各仕入れ先工場の荷量の管理を目指しているが、この問題の解決には至っていないのが現状である。

2.2 問題の解決方法

先で述べた問題を解決するために、4 段階からなるトラック配送ルートの自動算出システムの開発を行い、このシステムの実用化を最終目標とした。1 段階目として、研究対象の工場が部品を調達している全ての仕入れ先工場の中から単独輸送の仕入れ先工場を除き、残っている仕入れ先工場をいくつかの主要取引先工場を中心としてグループに分ける。単独輸送の仕入れ先工場には、遠方の工場や調達頻度が低い工場などがあり、主要取引先工場は仕入れ先工場の中で立ち寄り回数が多い工場を指す。なお、グループの作成方法に関しては後述する。2 段階目として、1 段階目で作成した各グループを対象に、荷量の平準化と等時間間隔での部品調達を可能にするための最適化問題を解く。3 段階目として、各グループにおいて最適な配送ルー

トを決定する。4段階目として、2段階目と3段階目の結果を基に、トラックの割り当てを行う。

この方法を用いた理由は3つある。1つ目は、得られる配送ルートが現在の配送ルートに近いことである。この方が、われわれが算出した配送ルートを現場の方々に提示した際、その配送ルートを受け入れてもらいやすいと考える。2つ目は、グループ化により対象となる工場を分割することで、各グループについては、現実的な時間で最適解を求められることである。3つ目は、配送ルートの修正がしやすいことである。これにより、配送ルートの比較がしやすく、作業時間の短縮に繋がる。

3 仕入れ先工場のグループ分け

トラックの配送ルート算出の1段階目として、あらかじめ調達回数が設定されている全ての仕入れ先工場を複数のグループに分割する。研究対象の工場では、以前から仕入れ先工場をいくつかのグループに分けて部品調達を行っていたものの、分割の仕方に決まりはなかった。そこで、仕入れ先工場を分割する際にいくつかの方法を試し、担当者の方々と話し合いを行った結果、主要取引先工場を中心とし、その他の仕入れ先工場を最も近い主要取引先工場と同じグループとする方法を採用した。主要取引先工場とは部品の調達回数が一定以上の仕入れ先工場のことを指す。この方法は、主要取引先工場の決め方によって結果に差が出てしまうが、現場の方々の経験から決めることで解決し、現在のグループと似ており現場の方々に受け入れてもらいやすいという理由から採用に至った。

4 部品調達に関する最適化問題

4.1 荷量の平準化と等時間間隔での部品調達

1段階目で作成された各グループに対して、荷量の平準化を行う。これによって、調達する部品の量が均等になり、トラックの容量の無駄が少なくなるとともに、ドライバーの負担を低減できる。定式化では1段階目で分割した1つのグループの仕入れ先工場を、「立ち寄り先の工場」と呼ぶ。

研究対象の工場は、各仕入れ先工場から異なる部品を調達し、それを組み合わせて製品を作っている。しかし、1つの仕入れ先工場から連続で部品を調達した場合、倉庫の空き容量が不足してしまう。そこで、等時間間隔で部品を調達することで、常時必要な部品の供給を止めることなく倉庫の空き容量の不足を防ぐ。

はじめに、部品調達に必要な立ち寄り回数のうち最大のものを m とし、各部品は m 回の調達の中で等時間間隔で調達される。等時間間隔での部品調達は、立ち寄り回数が最大立ち寄り回数 m の半分以下か、最大立ち寄り回数 m の場合、「最大立ち寄り回数を立ち寄り回数で割った値」の間に1度だけ立ち寄ることで実現する。例えば図1のように、3回目から8回目までの6回のうち1回だけ立ち寄る。さらに、図2のように、最後尾から先頭にかけても等時間

間隔になるように条件を加える。これは、実際の部品調達スケジュールにおいて、最後尾から先頭にかけて連続してトラックが運行されているためである。

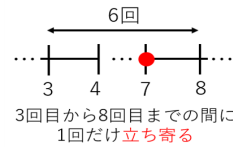


図1 立ち寄る場合1

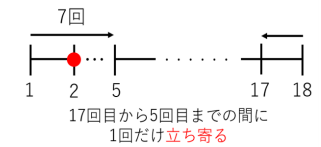


図2 立ち寄る場合2

また、立ち寄り回数が最大立ち寄り回数 m の半分より多い場合、何回目に立ち寄るかを定めるより、図3、図4のように「最大立ち寄り回数 m を立ち寄らない回数 (最大立ち寄り回数と立ち寄り回数の差) で割った値」の間に1度だけ立ち寄らない所を決める方が簡単であるので、そのようにする。

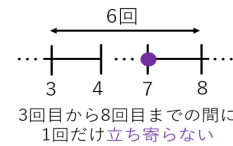


図3 立ち寄らない場合1

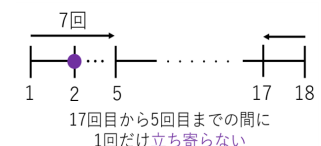


図4 立ち寄らない場合2

4.2 荷量の平準化と等時間間隔での部品調達の定式化

添え字

a : 立ち寄る回をあらわす添え字 ($a=1, \dots, m$)

定数

N : トラックが立ち寄る工場 i の集合 ($i=1$ は拠点)

L_i : トラックが立ち寄る工場 i の立ち寄り回数

($1 \leq L_i \leq m, i \in N$)

W_i : トラックが立ち寄る工場 i の1回あたりの荷量

変数

$$p_{ia} = \begin{cases} 1 & \text{トラックが立ち寄り先の工場 } i \text{ を} \\ & a \text{ 回目に立ち寄る} \\ 0 & \text{トラックが立ち寄り先の工場 } i \text{ を} \\ & a \text{ 回目に立ち寄らない} \end{cases}$$

$$q_{ia} = \begin{cases} 1 & \text{トラックが立ち寄り先の工場 } i \text{ を} \\ & a \text{ 回目に立ち寄らない} \\ 0 & \text{トラックが立ち寄り先の工場 } i \text{ を} \\ & a \text{ 回目に立ち寄る} \end{cases}$$

M : 各ルートの荷量の上限

目的関数

$$\min. M$$

制約条件

$$\sum_{i \in N} W_i p_{ia} \leq M \quad (a = 1, \dots, m) \quad (1)$$

$$\sum_{a=1}^m p_{ia} = L_i \quad (i \in N) \quad (2)$$

$$p_{ia} + q_{ia} = 1 \quad (i \in N, a = 1, \dots, m) \quad (3)$$

$1 \leq L_i \leq \lfloor m/2 \rfloor$ または $L_i = m (i \in N)$ の時

$$\sum_{k=1}^{\lfloor m/L_i \rfloor} p_{i,a+k-1} \leq 1 \quad (4)$$

$(i \in N, a = 1, \dots, m - \lfloor m/L_i \rfloor + 1)$

$$\sum_{k=1}^{m-a+1} p_{i,a+k-1} + \sum_{k=1}^{\lfloor m/L_i \rfloor + a - m - 1} p_{ik} \leq 1 \quad (5)$$

$(i \in N, a = m - \lfloor m/L_i \rfloor + 2, \dots, m)$

$\lfloor m/2 \rfloor < L_i < m (i \in N)$ の時

$$\sum_{k=1}^{\lfloor m/L_i \rfloor} q_{i,a+k-1} \leq 1 \quad (6)$$

$(i \in N, a = 1, \dots, m - \lfloor m/L_i \rfloor + 1)$

$$\sum_{k=1}^{m-a+1} q_{i,a+k-1} + \sum_{k=1}^{\lfloor m/L_i \rfloor + a - m - 1} q_{ik} \leq 1 \quad (7)$$

$(i \in N, a = m - \lfloor m/L_i \rfloor + 2, \dots, m)$

$$p_{ia} \in \{0, 1\} \quad (i \in N, a = 1, \dots, m) \quad (8)$$

$$q_{ia} \in \{0, 1\} \quad (i \in N, a = 1, \dots, m) \quad (9)$$

● 目的関数の説明

各配送ルート上の荷量の上限を最小化する

● 制約条件の説明

- (1) 各配送ルート上の荷量は上限を超えない
- (2) 立ち寄り先の工場には必要な回数だけ立ち寄る
- (3) 立ち寄るか否かの決定
- (4) 立ち寄るのは $\lfloor m/L_i \rfloor$ 回に一度
- (5) 最後尾から先頭にかけて (4) と同様
- (6) 立ち寄らないのは $\lfloor m/L_i \rfloor$ 回に一度
- (7) 最後尾から先頭にかけて (6) と同様
- (8) バイナリ条件
- (9) バイナリ条件

5 配送路問題とトラックの割当について

5.1 配送路問題の条件

グループ毎に行った荷量の平準化、等時間間隔での部品調達の結果をもとに、各グループにおいて配送路問題を解く。配送路問題を定式化する上での条件を以下に記述する。

● 使用するトラックについて

- トラックの積載上限を超えない
- トラックの1日の走行時間の上限を超えないのが

望ましく、超えると残業となる

● 立ち寄り先の工場について

- 立ち寄り先の工場ごとに定められた荷量を積載する

● 配送路（目的関数）について

- 使用するトラック台数は少ない方が望ましい
- 配送時間は短い方が望ましい

5.2 配送路問題の定式化

定数

E : 立ち寄り先の工場 i を回るときの枝の集合

$E = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$ ($i = 1$ は拠点)

t_{ij} : 枝 (i, j) の走行時間 ($(i, j) \in E$)

K : トラックの配送回数

c_i^k : 立ち寄り先の工場 i の k 回目の荷量

$i \in N, k = 1, \dots, K$

f_i : 立ち寄り先の工場 i の作業時間 $i \in N$

C : トラックの荷量の積載上限

T : トラックの走行時間の上限 (運転手の労働時間の上限)

α : トラック台数の重みを表す定数

β : 残業時間の重みを表す定数

変数

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{枝 } (i, j) \text{ が } k \text{ 台目の配送路に含まれる} \\ 0 & \text{枝 } (i, j) \text{ が } k \text{ 台目の配送路に含まれない} \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1 & k \text{ 台目のトラックを使用する} \\ 0 & k \text{ 台目のトラックを使用しない} \end{cases}$$

u_i^k : 立ち寄り先の工場 i の k 回目の配送路についてのポテンシャル変数

γ : 残業時間を表すサープラス変数

目的関数

$$\min. \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in E} (t_{ij} + f_j) x_{ij}^k + \alpha \sum_{k=1}^K k y_k + \beta \gamma$$

制約条件

$$\sum_{i=2}^N x_{i1}^k = y_k \quad (k = 1, \dots, K) \quad (10)$$

$$\sum_{j=2}^N x_{1j}^k = y_k \quad (k = 1, \dots, K) \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}^k = \sum_{l=1}^N x_{jl}^k \quad (j \in N, k = 1, \dots, K) \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N x_{ij}^k = 1 \quad (j \in N, j \neq 1) \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^N x_{jl}^k = 1 \quad (j \in N, j \neq 1) \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^K y_k \geq 1 \quad (15)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} c_i^k x_{ij}^k \leq C \quad (k = 1, \dots, K) \quad (16)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} (t_{ij} + f_j) x_{ij}^k \leq T + \gamma \quad (k = 1, \dots, K) \quad (17)$$

$$u_i^k - u_j^k + N x_{ij}^k \leq N - 1 \quad (i \in N, j \in N, i \neq 1, j \neq 1) \quad (18)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad (i \in N, j \in N, k = 1, \dots, K) \quad (19)$$

$$y_k \in \{0, 1\} \quad (k = 1, \dots, K) \quad (20)$$

$$u_i^k \in \mathbb{R} \quad (i \in N, k = 1, \dots, K) \quad (21)$$

- 目的関数の説明
所要時間とトラック台数、残業時間の重みつき和を最小化する
- 制約条件の説明
 - (10) 各配送ルートにおいて拠点に入ってくるトラックの台数は1台
 - (11) 各配送ルートにおいて拠点から出ていくトラックの台数は1台
 - (12) 各立ち寄り先の工場に入ってくるトラックの台数と出ていくトラックの台数が等しい
 - (13) 各立ち寄り先の工場に入ってくるトラックの台数は1台
 - (14) 各立ち寄り先の工場から出ていくトラックの台数は1台
 - (15) 配送ルートが必ず存在する
 - (16) 各配送ルートにおいて、トラックの荷量の積載上限を超えない
 - (17) 各配送ルートにおいて、トラックの走行時間と各立ち寄り先の工場での作業時間の和が、トラックの走行時間の上限と残業時間の和を超えない
 - (18) 部分巡回路排除制約
 - (19) バイナリ条件
 - (20) バイナリ条件
 - (21) 実数条件

5.3 トラックの割当について

2段階目の荷量の平準化と等時間間隔での部品調達の結果を基にしてトラックの割当を行う。トラックの割当は、等時間間隔になっている結果を守るため、使用するトラックの台数に応じて先頭から順に割当を行う。等時間間隔になっている結果に対して先頭から順にトラックの割当を行うため、等時間間隔での部品調達ができていることとなる。

6 結果

使用したデータとプログラムを実行した結果は以下の通りである。

表1 仕入れ先の工場のデータ

立ち寄り先	立ち寄り回数	荷量 (m ³ /回)	作業時間 (分/回)
工場 A	18	12	15
工場 B	4	1	15
工場 C	6	6	15
工場 D	6	2	15

表1のデータを利用し各段階の計算を行った結果は以下の表2、表3、表4のようになった。

表2 荷量の平準化と等時間間隔での部品調達の結果

巡回数	1回目	2回目	3回目	...	18回目
工場 A	1	1	1	...	1
工場 B	1	0	0	...	0
工場 C	1	0	0	...	0
工場 D	0	1	0	...	0

(1:立ち寄る, 0:立ち寄らない)

表3 算出した配送ルート

配送ルート名	出発点	1番目	2番目	3番目	4番目	所要時間(時間)
ルート1	拠点	工場 B	工場 C	工場 A	拠点	2.02
ルート2	拠点	工場 A	工場 D	拠点		2.94
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
ルート18	拠点	工場 A	拠点			1.74

表4 トラック2台の割当結果

トラック名	配送ルート名				所要時間(時間)
トラック1	ルート1	ルート2	...	ルート9	20.65
トラック2	ルート10	ルート11	...	ルート18	20.65

7 おわりに

本研究では、ある企業の工場における効率的なトラックの配送ルートの自動算出と、そのシステムの実用化に取り組んだ。4段階からなるシステムにすることで、現実的な時間内で最も効率的な配送ルートを自動算出することに成功した。今後、担当者の方々にシステムを使っていただき、現在の配送ルートと比較していく必要がある。その比較の中で見つかった課題をもとにして、現場の方々が満足していただける結果が得られるように改良を行っていく。

参考文献

- [1] 森雅夫, 松井知己:『経営システム工学ライブラリー8 オペレーションズ・リサーチ』朝倉書店, 2004.
- [2] 小林友哉, 山崎遥:『トラック配送ルート自動算出システムの開発』. 南山大学理工学部システム数理学科, 2019年度卒業論文, 2020.
- [3] A.Mor and M.G.Speranza, Vehicle routing problems over time: a survey, 4OR, volume 18, pp.129-149, 2020.