都市間小口物流の拠点ネットワーク計画モデルへの時間制約の導入

Introduction of Time Constraint to the Hub Network Planning Model for Intercity Small-Lot Logistics

古屋 拓人*

Takuto FURUYA

*地域計画学・レジリエンス計画研究室(指導教員:奥村誠 教授)

宅配便業界の時間指定サービスの普及や 3PL 企業の台頭などが進み、時間制約が小口輸送へ与える影響を把握することの重要性が増している。本研究は小口物流の都市間輸送を行う拠点物流ネットワーク計画問題に時間制約を導入して、到着時間制約付きネットワーク計画モデル(1)、拠点ネットワーク出発時刻同時計画モデル(2)の二つの最適化モデルの提案を行う。そのうえで、日本国内の都市を抜粋した仮想ネットワーク上で、時間制約の厳しさを変化させながら計算を行い、モデルの性能の確認を行った。

Key Words: 都市間輸送,輸送ネットワーク,最適化計算

1. はじめに

宅配便業界の時間指定サービスの普及や 3PL 企業の 台頭などが進み、時間制約が小口輸送ネットワークに 与える影響を把握することの重要性が増している.

小口輸送における都市間輸送の部分では、各都市ノードに積替施設が設置され、その間を結ぶ輸送リンクによるネットワークが形成される。時間制約が緩い場合には直送から別の都市への変更や、荷物の混載に基づく便数削減による輸送コスト削減が積極的に行われる。時間制約が厳しい場合は輸送時間の増加を引き起こすこれらの対応が不可能となり、異なる形状のネットワークが出現すると予想される。拠点ネットワーク計画問題(HNDP)の研究を進めてきた Alumur, et al はレビュー論文(2021)11で、時間制約や規模の経済性を考慮した研究の重要性を述べている。

本研究は、拠点ネットワーク計画問題に到着時間を 導入したモデルを開発することを目的としている.

2. 二種類の計画モデルの特徴

本研究では想定する時間制約の厳しさに応じた二段階のモデルを提案する.第一段階として一部の荷物が時間制約をもつ状況を想定し,各都市に荷受地からの荷物が到着する時間を変数として設定した,到着時間制約付きネットワーク計画モデル(1)(以降,計画モデル(1))を提案する.有効になる経路に合わせて到着時刻間の関係を確認し,所与の到着時刻制約を満たすような解を求める.第二段階としてすべての荷物が時間制限を持つ状況を想定し,時間制約に加え,各リンクにおける出発タイミングを導入した,拠点ネットワーク出発時刻同時計画モデル(2)(以降,計画モデル(2))を提案する.これにより,出発タイミングになるまで他出

発地からの荷物を待ち、混載を行う状況を表現できる.

3. 計画モデル(2)の定式化

ノード、リンク、輸送モード、積替施設のレベル、出発タイミングの集合をそれぞれ、N,L,M,C,Jと定義する。ノードごとの出発リンク、到着リンクの集合を $(L_{in}(i),L_{out}(l))$ 、リンクの起終点を(sN(l),eN(l))、リンクに割り当てられる輸送モードをml(l)とする。連続変数としては、リンクを通る荷受地別荷物量 $Y_{l(j)}^k$ 、ノードでの積替え量 $X_{i(j)}^{cm}$ 、ノードへの荷受地別到着時刻 R_i^k 、ノードからのタイミングごとの出発時間 P_j^i 、整数変数として、リンクの輸送便数 $V_{l(j)}$ 、 $\{0-1\}$ 変数として、ノードの機械化レベル Z_i^c 、リンクの設定の有無 S_i 、出発タイミングの出発の使用の有無 $W_{i,j}$ 、リンクでの荷受地別荷物の有無 $U_{i(j)}^k$ を定義する。パラメータの詳細な説明は本文にて行っている。

本モデルは、輸送コストを最小化サブモデル(a)とそのコスト値の下での総輸送時間最小化サブモデル(b)という二つの混合整数計画問題を組み合わせによって構成させている.

計画モデル(2)の輸送コスト最小化サブモデル(a)の定式化を示す.式(1')は目的関数の総輸送コストで,左から積替施設の設置固定コスト,リンクの設置固定コスト,タイミングコスト,リンクの運行コスト,積替施設での作業コストの和である.

 $\begin{aligned} & \text{minimize} \, \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} f \, z_i^c \, Z_i^c \, + \sum_{l \in L} f \, t_l \, S_l \, + h \, \sum_{i \in N} \sum_{j \in J} W_{i,j} \\ & \quad + \sum_{l \in L} o_l \, \sum_{j \in J} V_{l,j} \, + \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} g_i^c \, \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} X_{i,j}^{c,m} \\ & \quad = TC \dots (1') \end{aligned}$

時間制約として式(2')-(4')を設定する. 式(2')は荷物が積替施設での作業が終了しなければリンクを出発できないこと,式(3')は出発時間後リンク間所要時間が経

過しなければリンクの終点に到着しないこと,式(4')は 所与の制限時間内で輸送が完了することを意味する.

$$P_{sN(l)}^{j} \ge R_{sN(l)}^{k} + \sum_{c \in C} d^{c} Z_{sN(l)}^{c} + \sum_{c \in C} e^{c, ml(l)} X_{sN(l), j}^{c, ml(l)}$$

 $\forall l \in L, \forall k \in K, \forall \, j \in J \left(if \; U_{l,j}^k = 1 \right) \dots (2')$

 $R_{eN(l)}^k \ge P_{sN(l)}^j + t_l$

 $\forall l \in L, \forall k \in K, \forall j \in J (if U_{l,i}^k = 1) \dots (3')$

 $R_i^k \le \tau_{k,i}$

 $\forall k \in N, \forall i \in N \dots (4')$

容量制約として式(5')-(11')を設定する.式(5')は積替作業容量の制約,式(6')はリンクの容量制約,式(7'),(8'),(9)は荷物量のバランス制約,式(10')は出発前の積替施設作業の制約,式(11')は各都市の積替施設の容量を選択する制約をそれぞれ意味する.

$$\sum_{m \in M} X_{i,i}^{c,m} \le c_c Z_i^c$$

 $i \in N, \forall c \in C, \forall j \in J \dots (5')$

 $\sum_{\forall k \in N} Y_{l,j}^k \le q_{ml(l)} V_{l,j}$

 $\forall l \in L, \forall j \in J \dots (6')$

 $\sum_{l \in L_{out}(k)} \sum_{j \in J} Y_{l,j}^k = \sum_{n \in N-k} w_{k,n}$

 $\forall k \in N \dots (7')$

 $\sum_{l \in L_{in}(k)} Y_{l,j}^k = 0$

 $\forall k \in N, \forall j \in J \dots (8')$

 $\sum_{l \in L_{in}(i)} \sum_{j \in J} Y_{l,j}^k - \sum_{l \in L_{out}(i)} \sum_{j \in J} Y_{l,j}^k = w_{k,i}$

 $\forall k \in N, \forall i \in N - k \dots (9')$

 $\sum_{l \in L_{out}(i) \land ml(l) = m} \sum_{k \in N} Y_{l,j}^{k} = \sum_{c \in C} X_{l,j}^{c,m}$

 $\forall i \in N, \forall m \in M, \forall j \in J \dots (10')$

 $\sum_{c \in C} Z_i^c = 1$

 $\forall i \in N \dots (11')$

リンクとタイミングの割り当てに係る制約として式(12')-(14')を定義する.式(12')は有効なリンクにのみ荷物を流す制約,式(13')は便数容量制約,式(14')は有効なタイミングでのみ荷物を流す制約をそれぞれ意味する.

 $U_{l,j}^k \leq S_l$

 $\forall l \in L, \forall k \in N, \forall j \in J \dots (12')$

 $\sum_{j \in I} V_{l,j} \le v_l S_l$

 $\forall l \in I$. (13)

 $U_{l,i}^k \leq W_{i,i}$

 $\forall l \in L_{out}(i), \forall k \in N, \forall \ i \in N, \forall \ j \in J \ \dots (14')$

費用最小化サブモデル(a)は式(2')-(14')の制約下で式(1')を最小化する問題として定式化される.

一方,総輸送時間最小化サブモデル(b)は、サブモデル(a)の制約式に式(16')を追加して、式(15')の総輸送時間を最小化する問題として定式化される.

minimize
$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_{i,j} R_i^i$$

... (15')

$$\begin{split} \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} f z_i^c \, Z_i^c + \sum_{l \in L} f t_l \, S_l + h \sum_{i \in N} \sum_{j \in J} W_{i,j} + \\ \sum_{l \in L} o_l \sum_{j \in J} V_{l,j} + \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} g_i^c \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} X_{i,j}^{c,m} \\ & \leq TC \dots (16') \end{split}$$

4. 計画モデルの性能の確認

二つの計画モデルについて、日本国内の都市を一部 抜粋した仮想ネットワークにおける計算を行い、モデルの性能を確認する. 以下、4 都市ネットワークでの計画モデル(2)の計算結果を示す。輸送モードMは航空・トラックの 2 種類、積替施設の機械化レベルCは 3 種類から選択する. 制限時間に関する制約式(4')を $R_i^k \le \alpha * \tau_{k,i}$ として再定義し、時間制約の厳しさを示す α の値を

変化させることによる最適解の変化を考察する.

αの異なる値に対するネットワーク形状を図 1 に示す. 制約を厳しく設定することによって, リンク数の増加や航空リンクの便数増加, 機械化レベルの上昇などが起こっていること確認できる.

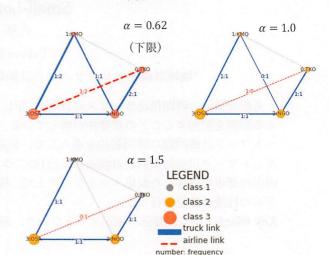


図 1: αの異なる値に対するネットワーク形状

表1にはαの異なる値に対する最適解のコスト値, 総輸送時間,便数,混載の状況を示している.時間制 約の緩和(αの増加)による総コストの減少と総輸送 時間の増加が確認できる.同時に輸送便数の減少と別 荷受地からの荷物の同時出発が増加しており,荷物の 混載によるコスト削減が表現できている.一方,時間 制約が厳しい場合は,他荷受地からの荷物を待つ時間 的余裕がなく,コストを増加させても便数を増やす必 要性が生じている.

表 1:αの異なる値に対するコスト等の計算結果

:時間制約の厳しさ		0.62	0.7	0.8
CF:積替施設(の設置コスト	2000000	200000	160000
CL:リンクの	设置コスト	20000	20000	10000
CJ:タイミン:	グの設定コスト	100000	100000	80000
CT : リンクのi	運行コスト	1665346	1686278	1552183
CH :積替コス	F	8035	36125	40650
総コスト		3793381	2042403	1842833
総輸送時間		247493	314024	412521
総輸送便数		11便	11便	11便
他荷受地の荷物の同時出発		0回	0回	00

5. おわりに

本研究は拠点ネットワーク計画問題に到着時間の制約を導入し、時間とコストのトレードオフ関係を正確に表現できるモデルを提案した。今後の課題として、計算規模の拡大、到着時間と需要量との関係性をモデルに導入することなどが挙げられる。

参考文献

1) Alumur, S.A., Campbell, J.F., Contreras, I., Kara, B.Y., Marianov, V. and O'Kelly, M.E. (2021) Perspectives on modeling hub location problems, Eur. J. Oper. Res., Volume 291, Pages 1-17.

(2022年2月7日提出)