

複数の輸送制限時間を考慮した 都市間小口物流ネットワークモデル

古屋 拓人¹・奥村 誠²

¹ 非会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, S502b)

E-mail: takuto.furuya.r8@dc.tohoku.ac.jp

² 正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, S502b)

E-mail: makoto.okumura.b6@tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

小口輸送の速達性・定時性はサービスの重要な側面であり、輸送制限時間の制約をふまえた小口物流の在り方を考察することは、今後さらに重要性を増してくるといえる。本研究は、物流ネットワークモデルに出発・到着時刻変数を導入することで、混合整数計画問題により計算可能とした従来モデルに対し、特定の荷受地からの速達荷物の割合を変化させることを可能とする拡張を行う。

Key Words: intercity transportation, logistics network, optimization

1. 研究の背景・目的

小口輸送の速達性・定時性はサービスの重要な側面であり、輸送制限時間の制約をふまえた小口物流の在り方を考察することは、今後さらに重要性を増してくるといえる。

古屋, 奥村(2022)¹では小口物流の都市間部分を対象とし、輸送時間とネットワークの関係をより詳細に表現することを目的に、出発・到着時刻を考慮した都市間小口物流ネットワークモデルを開発した。本研究は従来モデルに対し、特定の荷受地からの速達荷物の割合を変化させることを可能とする拡張を行った。先行モデルの詳細の解説は3章の付録にて行う。

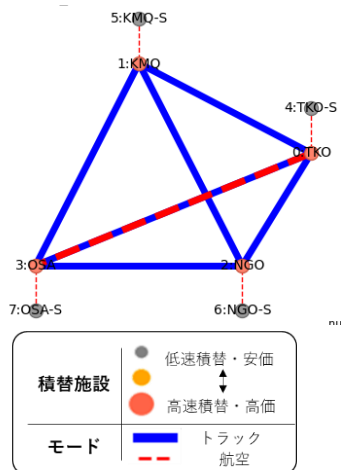


図-1 仮想ネットワーク

2. 計算方法

(1) 仮想ネットワークとパラメータ値の設定

図-1 に中日本4都市間を想定した仮想ネットワークを示す。本研究では速達荷物が出発するダミーノードおよび通過するダミーリンクを新たに設定し、荷受地別の時間制約を設けた場合のネットワーク形状の計算を可能とした。このネットワークは都市ノード数 $N=4+4$ (通常ノード+ダミーノード), リンク数 $L=12+2+4$ (トラックリンク+航空リンク+ダミーリンク), モード数 $M=3$ (トラック・航空機・ダミーモード) で構成されている。

各リンクにおける発着ノード番号($sN(l), eN(l) \in N$), 輸送モード $ml \in M$, 交通時間 t_l (分), 交通コスト o_l (円/便)を表-1 に示す。トラックリンクの交通コストは高速道路料金と制限時間から計算して与えた。航空リンクの交通コストは一律 200,000(円/便)と設定した。ダミーリンクの交通時間は 0(分), 交通コストは 0(円/便)としている。また、表-2 の通りに、設定可能な便数 v_l (便), 車両容量 q_m (個/便), およびリンク設定コスト ft_l (円)は輸送モード ml ごとに一定としている。

積替施設における積替作業容量 c_c (個/日), 固定積替作業時間 d^c (分), 変動積替作業時間 $e^{c,m}$ (分/個), 変動積替作業コスト g_i^c (円), 設置固定コスト fz_i^c (円)を表-3 に示す。また、ダミーノードにおけるこれらの値はすべてで 0 に設定を行った。

各都市間の輸送制限時間 $\tau_{k,i}$ (分)を表-4に示す。これは、各県の代表点同士の交通時間に一律の補正をかけたもので、180分刻みで設定している。ダミーノードを荷受地とする場合の輸送制限時間は、対応する通常ノードを荷受地とする場合の23倍の補正を行っている。各都市間の荷物量 $w_{k,i}$ (個/日)は全国貨物純流動調査⁹⁾から引用し、表-5の通りに設定している。 $0 \leq \alpha_k \leq 1$ は各荷受地ごとの速達が必要な荷物量の割合であり、ダミーノード発の荷物量にかけられる。

(2) ネットワーク計算例

図-2に速達の荷物が存在しないケースとして、 $(\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7) = (0, 0, 0, 0)$ を設定して行ったネットワーク計算結果を、図-3に特定の荷受地からの荷物のうち半数が速達であるケースとして、名古屋発 $(\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7) = (0, 0, 0.5, 0)$ を設定して行ったネットワーク計算結果を左側に、金沢発 $(\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7) = (0, 0.5, 0, 0)$ を設定して行ったネットワーク計算結果を右側にそれぞれ示す。

図-2と図-3のネットワークを比較すると、速達荷物の設定により、リンク本数の増加や航空の便数増加が起きていることが分かる。図-3の二種のネットワークを比較すると一部リンクの輸送便数に変化が生じていることが確認できる。詳細な分析・考察に関しては研究発表会において報告を行う。

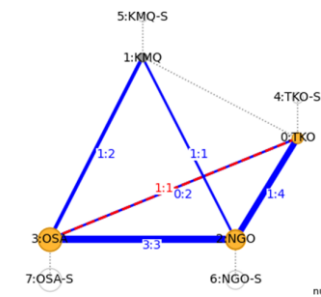


図-2 速達の荷物が存在しない時

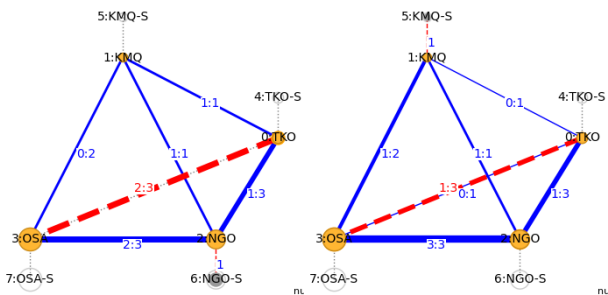


図-3 特定の荷受地からの荷物の半数が速達であるとき (左：名古屋発，右：金沢発)

表-1 リンク別のパラメータ

リンク番号	輸送モード (0:航空,1:トラック,2:ダミー)	ノード番号 (発,着)	交通時間 (分)	交通コスト (円/便)
0	1:トラック	(0,1)	440	165056
1	1:トラック	(0,2)	177	66380
2	1:トラック	(0,3)	507	189595
3	1:トラック	(1,2)	358	137048
4	1:トラック	(1,3)	291	109180
5	1:トラック	(2,3)	351	132285
6	0:航空	(0,3)	85	200000
7	1:トラック	(1,0)	440	165056
8	1:トラック	(2,0)	177	66380
9	1:トラック	(3,0)	507	189595
10	1:トラック	(2,1)	358	137048
11	1:トラック	(3,1)	291	109180
12	1:トラック	(3,2)	351	132285
13	0:航空	(3,0)	85	200000
14	2:ダミー	(4,0)	0	0
15	2:ダミー	(5,1)	0	0
16	2:ダミー	(6,2)	0	0
17	2:ダミー	(7,3)	0	0

表-2 輸送モード別のパラメータ

輸送モード	0:航空	1:トラック	2:ダミー
設定可能な便数 (便)	3	10	1
車両容量 (個/便)	50	50	10000 (荷物量に対し十分大きい)
リンク設置固定コスト (円)	10000	1000	0

表-3 機械化レベル別のパラメータ

機械化レベル	0	1	2
積替作業容量 (個/日)	2000	5000	20000
固定積替作業時間 (分)	60	30	10
変動積替作業時間 (分/個)	2	1	0.5
変動積替作業コスト (円/個)	100	50	10
設置固定コスト (円)	10000	50000	500000

表-4 都市間の輸送制限時間

	0:東京	1:金沢	2:名古屋	3:大阪
0		720	540	900
1	720		720	720
2	540	720		720
3	900	720	720	
4		480	360	600
5	480		480	480
6	360	480		480
7	600	480	480	

表-5 都市間の荷物量

	0:東京	1:金沢	2:名古屋	3:大阪
0		$17 \times (1 - \alpha_4)$	$18 \times (1 - \alpha_4)$	$45 \times (1 - \alpha_4)$
1	$22 \times (1 - \alpha_5)$		$21 \times (1 - \alpha_5)$	$8 \times (1 - \alpha_5)$
2	$114 \times (1 - \alpha_6)$	$10 \times (1 - \alpha_6)$		$110 \times (1 - \alpha_6)$
3	$146 \times (1 - \alpha_7)$	$79 \times (1 - \alpha_7)$	$127 \times (1 - \alpha_7)$	
4		$17 \times \alpha_4$	$18 \times \alpha_4$	$45 \times \alpha_4$
5	$22 \times \alpha_5$		$21 \times \alpha_5$	$8 \times \alpha_5$
6	$114 \times \alpha_6$	$10 \times \alpha_6$		$110 \times \alpha_6$
7	$146 \times \alpha_7$	$79 \times \alpha_7$	$127 \times \alpha_7$	

3. 付録：先行モデルの詳細

(1) モデルの基本構成

本モデルは既存のハブネットワークデザイン問題に出发・到着時刻制約を付加して拡張したものであり、総費用を最小化するサブモデル(a)と、その最小費用の下で総輸送時間を最小化するサブモデル(b)を連続して解くという構造をとっている。これは総費用が同一の配置案でも、輸送時間が異なる多数の最適解が存在する可能性があり、それを探索する必要があるからである。いずれも 0-1 変数を含む混合整数計画問題として定式化され、商用ソルバーによって求解が可能となっている。

(2) 変数・パラメータの定義

モデルで用いる集合・パラメータ・変数とその意味を表-6に示す。

(3) 総費用最小化サブモデル(a)の定式化

総費用最小化サブモデル(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、出発タイミング設定コスト、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。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} f z_i^c Z_i^c + \sum_{l \in L} f t_l S_l + \\ & h \sum_{i \in N} \sum_{j \in J} W_{i,j} + \sum_{l \in L} o_l \sum_{j \in J} V_{l,j} + \\ & \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} g_i^c \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} X_{i,j}^{c,m} \\ & \hspace{15em} = TC \quad (1) \end{aligned}$$

出発・到着時刻制約として式(2),(3)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发できないこと、式(3)は出発時刻後リンク間交通時間が経過しなければリンクの終点に到着しないことを意味する。

$$P_{SN(l)}^j \geq R_{SN(l)}^k + \sum_{c \in C} d^c Z_{SN(l)}^c + \sum_{c \in C} e^{c,ml(l)} X_{SN(l),j}^{c,m} \quad \forall l \in L, \forall k \in K, \forall j \in J \text{ (if } U_{l,j}^k = 1) \quad (2)$$

$$R_{eN(l)}^k \geq P_{SN(l)}^j + t_l \quad \forall l \in L, \forall k \in K, \forall j \in J \text{ (if } U_{l,j}^k = 1) \quad (3)$$

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。

$$R_i^k \leq \tau_{k,i} \quad \forall k \in N, \forall i \in N \quad (4)$$

表-6 集合・パラメータ・変数とその意味

集合	意味
N	ノードの集合
L	リンクの集合
M	輸送モードの集合
C	積替施設の機械化レベルの集合
J	積替施設からのリンクごとの車両の出発タイミングの順序番号の集合 (最大 $N-1$ 個)
$L_{in}(j)$	ノード $j \in N$ に入るリンクの集合
$L_{out}(j)$	ノード $i \in N$ から出るリンクの集合
$sN(l)$	リンク $l \in L$ の開始ノード
$eN(l)$	リンク $l \in L$ の終了ノード
$ml(l)$	リンク $l \in L$ の輸送モード
パラメータ	意味
$w_{k,i}$	荷受地 $k \in N$ からノード $i \in N$ へ輸送される荷物量
c_c	機械化レベル $c \in C$ の積替作業容量
v_l	リンク $l \in L$ の設定可能な便数
q_m	輸送モード $m \in M$ の容量
$f z_i^c$	ノード $i \in N$ に機械化レベル $c \in C$ の積替施設を置くための固定コスト
$f t_l$	リンク $l \in L$ に輸送を設定するための固定コスト
o_l	リンク $l \in L$ での車両一台あたりの交通コスト
g_i^c	機械化レベル $c \in C$ の施設があるノード $i \in N$ での出発前の単位当たりの積替作業コスト
h	出発時刻を一つ設定するためのコスト
$\tau_{k,i}$	荷受地 $k \in N$ からノード $i \in N$ への標準的な輸送時間 ($\tau_{k,i} = 0$)
t_l	リンク $l \in L$ の交通時間
d^c	機械化レベル $c \in C$ での固定積替作業時間
$e^{c,m}$	機械化レベル $c \in C$ の施設からモード $m \in M$ の車両への単位当たりの積替作業時間
変数	
Z_i^c	ノード $i \in N$ にレベル $c \in C$ の施設が置かれている時 1 をとる{0,1}変数
S_l	輸送がリンク $l \in L$ に設定されている時 1 をとる{0,1}変数
$V_{l,j}$	リンク $l \in L$ をタイミング $j \in J$ に出发する流れる輸送便数 (整数)
$W_{i,j}$	ノード $i \in N$ においてタイミング $j \in J$ の出发があるとき 1 をとる{0,1}変数
$U_{l,j}^k$	荷受地 $k \in N$ 発の荷物が、タイミング $j \in J$ においてリンク $l \in L$ を通る時 1 をとる{0,1}変数
$Y_{l,j}^k$	タイミング $j \in J$ においてリンク $l \in L$ を通る都市 $k \in N$ 発の荷物量
$X_{i,j}^{c,m}$	タイミング $j \in J$ において、機械化レベル $c \in C$ が置かれたノード $i \in N$ からモード $m \in M$ によって出发する荷物量
R_i^k	荷受地 $k \in N$ 発の荷物が、ノード $i \in N$ に到着する到着時刻
P_j^i	ノード $i \in N$ における、タイミング $j \in J$ の出发時刻

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での作業量の制約, 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.

$$\sum_{m \in M} X_{i,j}^{c,m} \leq c_c Z_i^c \quad \forall i \in N, \forall c \in C, \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{k \in N} Y_{l,j}^k \leq q_{ml(l)} V_{l,j} \quad \forall l \in L, \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{l \in L_{out}(k)} \sum_{j \in J} Y_{l,j}^k = \sum_{n \in N-k} w_{k,n} \quad \forall k \in N \quad (7)$$

$$\sum_{l \in L_{in}(k)} Y_{l,j}^k = 0 \quad \forall k \in N, \forall j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{l \in L_{in}(i)} \sum_{j \in J} Y_{l,j}^k - \sum_{l \in L_{out}(i)} \sum_{j \in J} Y_{l,j}^k = w_{k,i} \quad \forall k \in N, \forall i \in N - k \quad (9)$$

$$\sum_{l \in L_{out}(i) \wedge ml(l)=m} \sum_{k \in N} Y_{l,j}^k = \sum_{c \in C} X_{i,j}^{c,m} \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{c \in C} Z_i^c = 1 \quad \forall i \in N \quad (11)$$

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出発させることをそれぞれ意味する.

$$U_{l,j}^k \leq S_l \quad \forall l \in L, \forall k \in N, \forall j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J} V_{l,j} \leq v_l S_l \quad \forall l \in L \quad (13)$$

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

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

総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.

(4) 総輸送時間最小化サブモデル(b)の定式化

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.

$$\text{minimize } \sum_{k \in N} \sum_{i \in N} w_{k,i} R_i^k \quad (15)$$

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

参考文献

- 1) 古屋拓人, 奥村誠: 出発・到着時刻を考慮した都市間小口物流ネットワークモデル, 第 65 回土木計画学研究会発表会・講演集, 2022.

(?)

Optimal intercity network model with multilevel time requirements for small parcel 3PL

Takuto FURUYA, Makoto OKUMURA

Express and on-time delivery of small-lot transportation is an important aspect of service, and it will become even more important to consider the state of small-lot logistics in light of transportation time constraints. This study introduces departure and arrival time variables into the logistics network model to extend the conventional model, which can be computed using a mixed integer programming problem, to allow the proportion of express shipments from a specific destination to be varied.