

# 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

古屋 拓人<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 学生非会員 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (〒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

<sup>2</sup> 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

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た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、時間制約の強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** : *Intercity transportation, Logistics Network, Optimization calculation*

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景

日本国内において、新型コロナウイルス感染症流行の影響もあり、宅配便小口物流の輸送量は増加傾向にある。ヤマト運輸では 2021 年次（2020 年 4 月から 2021 年 3 月）の輸送取扱数が前年次比 116% となっている<sup>1)</sup>。それに伴い輸送時間に関するサービスの向上も目指され、楽天や Amazon などといった企業では、自社倉庫を活用した速達輸送サービスなどを開始している。また、荷主・運送業者の間をとり持ち、輸送を包括的に管理する 3PL 企業も台頭している。このような状況の中で、到着時刻はサービスの重要な側面と認識されるようになり、その制約をふまえた小口物流の在り方を考察することは、今後重要性を増してくるといえる。

小口物流は、都市内輸送と、都市間輸送という二種類の輸送を結合して行われる。都市内輸送では、荷受地・最終目的地となる末端部と積替施設間の輸送が行われる。この積替施設の位置と末端部の接続

方法は、拠点配置問題 (Hub Location Problem : HLP) と呼ばれる分野で研究が進められてきている。一方、都市間輸送では、都市に配置される積替施設のノードと、その間に張られる高速道路や航空などによる輸送リンクから構成される輸送ネットワークを用いて輸送が行われており、本研究はこの部分に着目する。拠点配置問題の発展形として、都市間のネットワーク形成に関心を向けたものが、拠点ネットワーク計画問題 (Hub Network Design Problem : HNDP) と呼ばれ、近年さかんに研究が行われている。

### (2) 本研究の目的

小口物流の都市間輸送におけるコストを削減するため、迂回・混載が採用される可能性がある。迂回とは、荷物が少ない都市間においては、いったん別の都市を経由させることで直行便の設定をなくしてコストの削減を図るものである。この時多くの荷物が集まる都市に高い機械化レベルを持つ積替施設を設置することで積替作業コストを削減でき、規模の経済性を働かせることも可能である。一方、混載は、別

の都市から到着した荷物を一旦待機させ、同一のタイミングで出発する車両に積むことで、車両の容量を無駄なく使い切ることを通して便数とコストの削減を目指すものである。

これらの迂回・混載は、いずれも輸送時間の増加を引き起こす可能性がある。別の都市への迂回は、直行に比べて長い距離を走行する必要があり、積み替えにも積替作業時間がかかることから、直行時よりも輸送時間は増加する。また混載を行う上で、他の地点からの荷物を待つことが出発時刻を遅らせ、目的地の到着制限時間に間に合わなくなる可能性も生じる。したがって、到着時刻制約が厳しくなる状況においては、コスト最小のネットワークでは対応しきれず、輸送拠点配置やネットワークの形状を変更する必要が生じると考えられる。

本研究では、小口物流の都市間輸送ネットワークを対象とし、時間制約を加味することによるネットワーク形状、コスト、輸送時間への影響を確認し、今後の小口物流ネットワークの変化を見通すための数理最適化モデルを作成すること目的とする。

## 2. 本研究の特徴

### (1) 拠点ネットワーク計画問題への時間制約の導入

拠点ネットワーク計画問題 (HNDP) では、直行させる荷物の量が少ない都市間の直行輸送を省略して迂回を行うことで総運行台数・距離を減らし、交通コストを削減する効果を踏まえてネットワークの形状を最適化する。一方で、迂回を行うと交通時間、積替施設における積替作業時間が直送をするときに比べて余分に必要であるため、時間の側面からみると非効率なネットワークとなる可能性が高い。このように都市間輸送においては、時間とコストのトレードオフの関係が存在する。

### (2) 既往研究

拠点ネットワーク計画問題を精力的に研究してきた Alumur, et al (2021) <sup>2)</sup> のレビュー論文では、拠点配置問題及びその派生問題である拠点ネットワーク

計画問題に関する研究の流れがまとめられ、今後の研究の発展方向として、「規模の経済性の導入」「時間制約の導入」が挙げられている。規模の経済性に関しては、その源泉が輸送時間を同期化させることにありとされ、時間制約は、輸送サービスの質を決定づけるものと述べられている。

拠点配置問題への時間制約の導入を試みた研究として Alumur, et al (2018) <sup>3)</sup> がある。この論文ではすべての都市間において一律の制限時間を導入したうえで、ハブでの積替量に応じた混雑による遅延の影響を考慮した計算を行っている。この論文では、ハブ間の完全ネットワークを仮定しており、ハブ単位では各リンクには1つの OD のみ流れることから、時間の計算が容易となっている。

一方、ハブ間のネットワークが完全ではない場合、すなわち拠点ネットワーク計画問題では、時間制約の導入は困難である。Masaeli, et al (2018) <sup>4)</sup> は離散的な時間軸を採用し、限られたタイミングでのみ車両を出発させ、それまで荷物を滞留させる保管費用を考慮するモデルを提案している。しかし各変数が時間の次元を持つため制約式の数が膨大になり、簡単なネットワークでのみ計算が可能となっている。Karimi & Setak (2018) <sup>5)</sup> は、輸送経路を分類することで変数・制約式の増加を防いでいるが、輸送コストが総輸送量にのみ依存すると仮定しており、各リンクにおいて OD ごとに異なるタイミングで自由に発送できるという非現実的な仮定を置いていることになる。Hu, et al (2018) <sup>6)</sup> は、ハブ間のトラック台数の集中が道路混雑を引き起こし、輸送時間の増加を引き起こすことを考慮したモデルを提案している。しかし、輸送の制限時間は考慮されていない。

### (3) 本研究のモデルの特徴

本研究は、都市間小口物流における拠点ネットワーク計画問題に、時間制約を導入した最適化モデルの提案を目的とする。

ここでは、すべての荷物が制限時間内に到着する必要がある状況で、各リンクにおける便ごとの出発タイミングを決めるモデルを作成する。これは、他荷受地からの荷物の到着を待つ積み替え作業を行

い、その後に出発タイミングを設定できるという前後関係を明示的に表現しており、複数荷受地からの荷物を混載させ確実に輸送容量を無駄なく使用できることを保証するものである。

### 3. 最適化モデルの定式化

#### (1) モデルの基本構成

本研究で提案するモデルは既存の拠点ネットワーク計画モデルに時間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)を組み合わせた構成となっている。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。第 4 章では、Gurobi Optimizer version 9.1.2 を使用した計算例を示す。

#### (2) 変数・パラメータの定義

2 つのモデルで共通して用いる集合・変数・パラメータをそれぞれ表-1, 2, 3 に示す。

表-1 集合とその意味

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

表-2 パラメータとその意味

パラメータ (荷物・容量)	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
パラメータ (コスト)	
$fz_i^c$	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
$ft_l$	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
パラメータ (時間)	
$\tau_{k,i}$	荷受地 $k \in N$ からノード $i \in N$ への最大到着時刻 ( $\tau_{k,i} = 0$ )
$t_l$	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

表-3 変数とその意味

変数 (施設・サービス)	意味
$Z_i^c = \{0,1\}$	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
$S_l = \{0,1\}$	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 $j \in J$ に出発する流れる輸送便数 (整数)
$W_{i,j} = \{0,1\}$	ノード $i \in N$ においてタイミング $j \in J$ の出発があるとき 1 をとる $\{0,1\}$ 変数
変数 (荷物)	
$U_{i,j}^k = \{0,1\}$	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 $m \in M$ によって出発する荷物量
変数 (時間)	
$R_i^k$	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 $j \in J$ の出発時刻

### (3) 総費用最小化サブモデル(a)の定式化

まず、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、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。

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

時間制約として本研究では式(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、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。

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

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

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

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。

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

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

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

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

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

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

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

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。

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

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

$$\begin{aligned} U_{i,j}^k & \leq W_{i,j} \\ & \quad \forall l \in L_{out}(i), \forall k \in N, \forall i \in N, \forall j \in J \dots (14) \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned} \text{minimize } & \sum_{k \in N} \sum_{i \in N} w_{k,i} R_i^k \dots (15) \\ & \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} f z_i^c Z_i^c + \sum_{l \in L} f t_l S_l + h \sum_{i \in N} \sum_{j \in J} W_{i,j} + \\ & \sum_{l \in L} o_l \sum_{j \in J} V_{l,j} + \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} g_i^c \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} X_{i,j}^{c,m} \\ & \leq TC \dots (16) \end{aligned}$$

## 4. モデルの性能の確認

### (1) 仮想ネットワークとパラメータ値の設定

図-1に示す中日本4都市ネットワークを用いてモデルの性能を確認する。このネットワークは都市ノード数  $N=4$ 、リンク数  $L=14$ 、モード数  $M=2$  (トラックと航空機を想定) 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-4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。また、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(表-5)。

各都市に設置できる施設の機械化レベルは3通りあり、レベル0は主に人力による積替え、レベル1はある程度の機械化がされた積替え、レベル2はベルトコンベアなどで高く機械化され、ほぼ自動で積替えされるものをそれぞれ想定した設定としている。

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-6 に示す. 機械化レベルが上がることで設置固定コストが大きくなる分, より多くの荷物を低コストでかつ高速で積替えできる設定としている.

各都市間の輸送制限時間 $\tau_{k,i}$ (分)は表-7 に示すとおりである. 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あり, 180 分刻みで設定している. 各都市間の荷物量 $w_{k,i}$ (個/日)は全国貨物純流動調査<sup>7</sup>から引用し, 表-8 の通りに設定している.

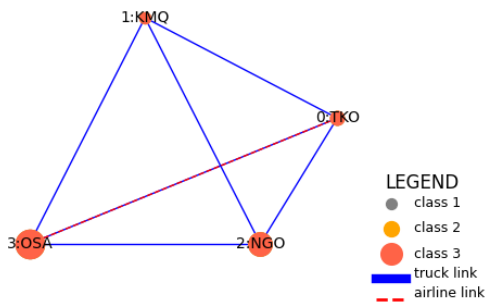


図-1 仮想ネットワーク

表-4 リンク別のパラメータ

ノード番号 (発,着)	輸送モード (0:航空,1:トラック)	交通時間 (分)	交通コスト (円/便)
(0, 1)	1	440	165056
(0, 2)	1	177	66380
(0, 3)	1	507	189595
(1, 2)	1	358	137048
(1, 3)	1	291	109180
(2, 3)	1	351	132285
(0, 3)	0	85	200000

表-5 輸送モード別のパラメータ

輸送モード	0	1
便数設定可能数 (便)	5	50
車両容量 (個/便)	200	200
リンクの設置固定コスト (円)	10000	0

表-6 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-7 都市間の制限時間

	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	-

表-8 都市間の荷物量

	0:東京	1:金沢	2:名古屋	3:大阪
0	-	17	18	45
1	22	-	21	8
2	114	10	-	110
3	146	79	127	-

(2) 時間制約の強さに対する最適解の変化

本モデルで導入した時間制約の影響を確認するため, 制約を徐々に変化させてモデルの解を求め, その変化を確認する. そのため, 定式化の式(3)で示した到着時刻制約に代わり, 実際には次の式(17)によって制約を与える.

$$R_i^k \leq \alpha * \tau_{k,i} \quad \forall k \in N, \forall i \in N \dots (17)$$

ここで,  $\alpha$ は到着時刻制約の強さを表す補正係数であり,  $(0.62 \leq \alpha \leq 1.5)$ 倍の範囲で変化させる. この $\alpha$ の最小値( $\alpha = 0.62$ )は, 総コストが十分大きい場合に実現可能な最も強い時間制約であり, 総コストに十分大きな値を与えて総輸送時間最小化サブモデルを解いたときに得られた $R_i^k$ の値から求めた値である.

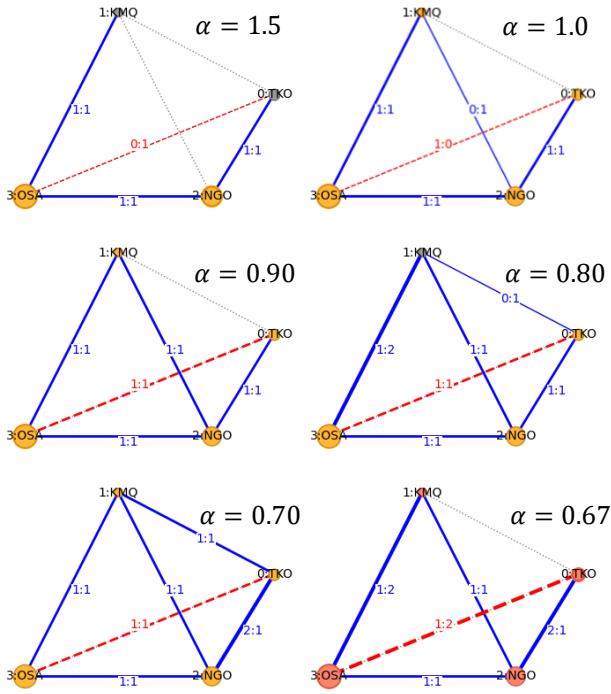


図-2 時間制約の強さ $\alpha$ に対応する最適解のネットワーク

初めに、時間制約の強さ $\alpha$ に対応する最適解のネットワークを図2に示す。時間制約が強くなるにつれ、積替施設を機械化したり、航空リンクを増加させたりすることによって輸送時間の短縮を図っていることがわかる。

図-3、4は、時間制約の強さ $\alpha$ に対応するコストの変化、輸送時間の変化をそれぞれ示している。図-3を見ると、時間制約が厳しくなる強くなるにつれ、輸送コストが増加している。これは、時間制約をクリアするため、輸送リンクの設定数の増加、機械化施設の設置、便数の増加などが起こっているためである。図-4から、時間制約が強くなった際は、総輸送時間が減少し、特に出発待機時間が特に大きく減少していることが確認できた。

さらに図-5、6は、時間制約の強さ $\alpha$ に対応する総輸送便数・混載を含む出発回数をそれぞれ示している。時間制約が強くなった際は、他の荷受地からの荷物を待つことにより制限時間が間に合わなくなるため、混載が発生しなくなることが分かる。

以上より、本モデルは、時間とコストのトレードオフ関係を正しく表現できていることが確認できた。

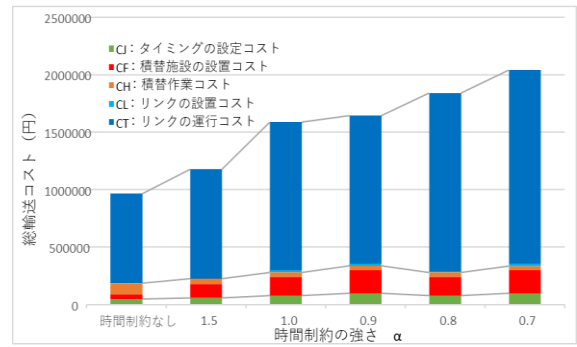


図-3 時間制約の強さ $\alpha$ に対応するコストの変化

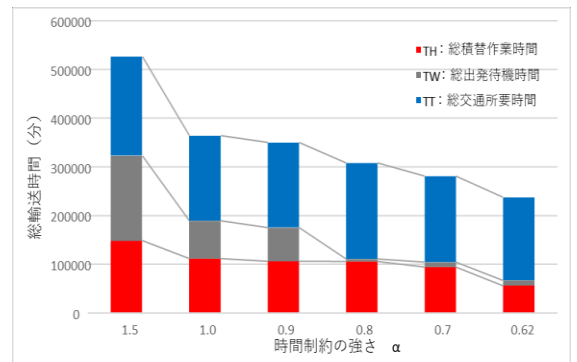


図-4 時間制約の強さ $\alpha$ に対応する輸送時間の変化

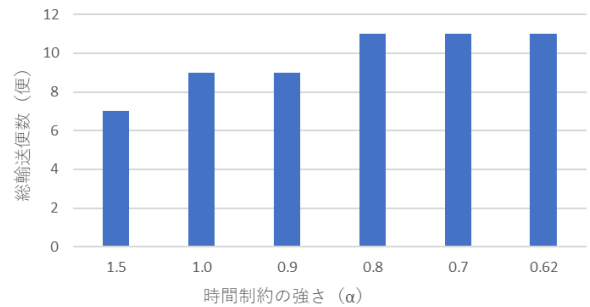


図-5 時間制約の強さ $\alpha$ に対応する総輸送便数

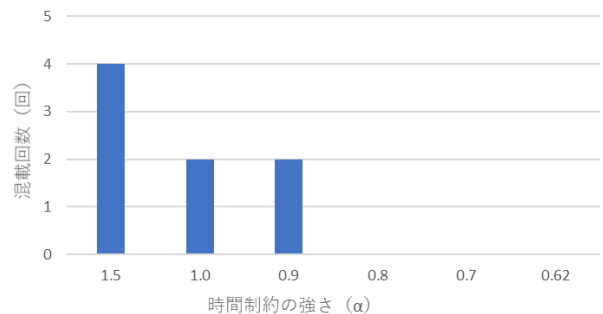


図-6 時間制約の強さ $\alpha$ に対応する混載を含む出発回数

(3) 出発・到着時刻の確認

$\alpha = 1.0$  のケースを例に、出発・到着時刻の計算結果を確認する。表-9 は各都市ノードにおけるタイミング別の出発時刻を示している。表-10 は荷受地別の到着時刻を示しており、すべての到着時刻が表-7 に示した制限時間内に収まっている。

図-7 は東京から金沢までの輸送を例にとり、輸送経路と出発時刻 $R$ 、到着時刻 $P$ の関係を示している。先に示した図-2 より、 $\alpha = 1.0$  のケースでは東京金沢間には直送リンクが設定されず、大阪への航空便を用いた迂回輸送が行われる。図-7 から東京発金沢着の荷物は、東京発の全荷物の積替作業が完了する 92 分後に大阪行荷物と混載して出発し、航空便（85 分間）の大阪到着（177 分）の後に大阪発金沢着の荷物と合わせた 126 分間の積替作業を行い、その終了時（303 分）に出発している。このように計算された出発時刻と到着時刻に沿って、積替作業と混載が実行可能となっていることが確認できる。

表-9 都市ノードにおけるタイミング別出発時刻

P		j (タイミング)		
		1	2	3
i (出発地)	0		92	
	1	120	150	
	2	140	170	
	3	157	303	609

表-10 都市ノードにおける荷受地別の到着時刻

R		i (到着地)			
		0	1	2	3
k (荷受地)	0		594	269	177
	1	694		508	411
	2	347	528		491
	3	694	594	508	

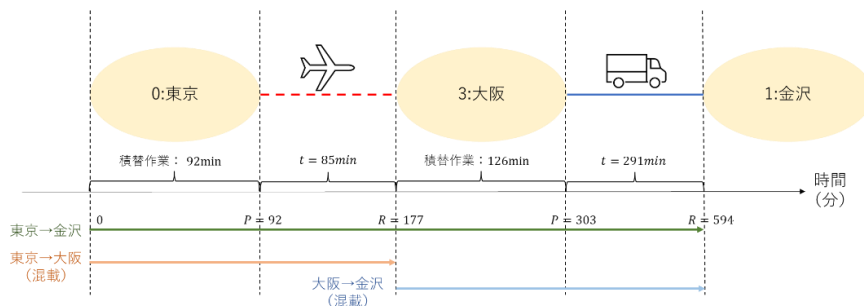


図-7 東京発金沢着の荷物の輸送経路

5. おわりに

(1) 本研究のまとめ

近年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、時間制約下で荷物輸送を行う際のネットワーク形状への影響を把握することの重要性が増している状況をふまえ、本研究は小口物流を対象とし、物流ネットワーク計画問題に時間制約を導入した最適化モデルを作成した。

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、時間制約が厳しくなることで、直送リンクや航空の速達リンクによる輸送時間の短縮や高い機械化レベルを持つ施設の設置による積替時間の短縮が図られる様子が確認できた。

(2) 今後の課題

今後の課題としては、モデルの計算規模の拡張が挙げられる。既往研究でも述べた通り、輸送ネットワーク問題へ時間制約を導入するにあたっては変数や制約式の個数の増加に伴い、現実的な計算時間で求解できるネットワーク規模は限られている。効率的な定式化、計算方法の開発が必要である。

輸送時間が輸送サービスの重要な要素である点から、輸送時間と需要量の関係をモデルに組み込むことで、消費者の戦略も考慮した、より正確なモデルへ発展させることも可能である。これを実現させるためには、目的関数が総余剰最大問題となるため、混合整数計画問題で求解するためには、定式化の工夫が必要である。

## REFERENCES

- 1) ヤマトホールディングス. “小口貨物取扱実績”. ヤマトホールディングス公式ホームページ. 2022-02-04  
<https://www.yamatohd.co.jp/investors/financials/monthlydata/>, (参照 2022-02-04)
- 2) 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.
- 3) Alumur, S.A., Nickel, S., Rohrbeck, B., and daga, F.S. (2018) Modeling congestion and service time in hub location problems, *Appl. Math. Model.*, vol.55 pp.13-32.
- 4) Hossein, K. and Setak, M. (2018) Flow shipment scheduling in an incomplete hub location-routing network design problem, *Comp. Appl. Math*, Vol.37, pp.819-851.
- 5) Masaeli, M., Alumur, S.A. and Bookbinder, J.H. (2018) Shipment scheduling in hub location problems, *Transp. Res. B*, Vol.115, pp.126-142
- 6) Hu L., Zhu J.X., Wang Y. and Lee, L.H. (2018) Joint design of fleet size, hub locations, and hub capacities for third-party logistics networks with road congestion constraints, *Transp. Res. E*, Vol.118, pp.568-588.
- 7) 国土交通省. “(V) 都道府県間流動表-その2 (代表輸送機関別流動量)”. *e-Stat*. 2020-02-05  
<https://www.e-stat.go.jp/statsearch/files?page=1&layout=datalist&toukei=00600620&tstat=00001103136&cycle=0&tclass1=000001103142&tclass2val=0>, (参照 2022-02-04)

(?)

(?)

## Inter-city small-lot logistics network model considering departure and arrival times

Takuto FURUYA, Makoto OKUMURA

With the spread of time-specific services in the parcel delivery industry and the rise of 3PL companies, it has become increasingly important to understand the impact of time constraints on small-lot transportation. In this study, we propose an optimization model that introduces time constraints into the base logistics network planning problem for intercity transportation of small-lot logistics, namely, a simultaneous planning model for base network departure times. The performance of the model is verified by performing calculations on a virtual network of selected cities in Japan, varying the severity of the time constraints.