速達需要に対応する 都市間小口物流システムの最適化に関する研究

Research on optimization of inter-city small-lot logistics system to meet express demand

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）

In inter-city logistics transportation, there is a strong trade-off relationship between time and cost. In order for carriers to meet the increase of express demand, they must respond to rising costs by setting up express services and charging more freight. The purpose of this study is to determine how the division of express service with higher fare affects the inter-city small-lot logistics system design and cost. An optimal model with endogenous demand was created, and the social impact was analyzed for the case with and without express service divided from ordinal transport service.

Key Words: *Intercity logistics, Logistics Freight, Mathematical Optimization*

1.　はじめに

(1)　背景・目的

宅配便などの小口物流の輸送量は，コロナ禍を経ても依然増加傾向にある．一方で物流業界では，ドライバー不足や労働規制による輸送可能時間の減少などにより，物流コストがさらに増加することが予想される．輸送サービスの面では，ネット通販の輸送量の増加に伴い，時間指定が厳しい速達輸送の需要が増加している．これらの状況の変化に対応できる持続可能な小口物流システムを見出すことは喫緊の課題である．小口物流では個々の注文に対応することが重要であるが，個々の注文を受けてから輸送方法を用意することは難しく，輸送体制を事前に設定し,輸送時間と運賃の条件を顧客に明示して引き受けるべき注文を限定することが必要である．

小口物流の都市間輸送部分のコストは，用意するビークルの量に依存する部分が大きい．コストを軽減する主要な手段として混載，ビークルの反復利用がある．混載は，別の都市から到着する荷物を一旦待機させ，出発するタイミングを合わせて同一のタイミングで積むことで，車両の容量を無駄なく使い切ることで便数の削減を目指すものである．ビークルの反復利用は，出発機会を分散させることで各時間の便数を均一化し，用意するべきビークルを削減するものである．これらのコスト削減手段の採用は輸送時間の増大をもたらす．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くなる可能性も生じる．輸送制限時間に間に合わせるために早い時間の出発をせざるを得ない場合は，反復利用を取り止め，ビークルをある時間に偏らせる必要も生じうる．このため，輸送時間とコストの間に強いトレードオフ関係が存在することになる．

以上のことから，小口物流の都市間輸送部分においては，輸送時間とコストのバランスを考慮してネットワーク形状・便数・ビークルの運用方法などの輸送システムを計画することが必須である．速達需要が普及し，輸送時間の要求が難しくなると，混載やビークルの反復利用が難しくなり，高コストの輸送体制にならざるを得ない．このとき，顧客が適切な運賃を支払わなければ，その輸送体制の維持は不可能となり，輸送可能な荷物量が減少して，消費者余剰や輸送会社の利潤が減少し，社会的に大きな損失が生じうる．

本研究は，輸送会社が速達輸送サービスを区分して，高価な速達運賃を徴収することが持続可能な輸送システムの在り方に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする．

(2)　研究のアプローチ

本研究の目的を達成するために，速達運賃の設定の有無による物流システムの比較を行う．まず，利用者の中には厳しい時間制約内での輸送を要求する**速達輸送ニーズ**と，強い時間制約を求めない**通常輸送ニーズ**の両方が存在していると仮定する．この状態で小口物流会社のとる対応を 2 種類考える．すなわち，運賃は同一ですべての荷物を速達制限時刻内に輸送する**速達未区分ケース**と，高く設定した速達運賃を支払う速達荷物は制限時間内に輸送するが，安い運賃しか負担しない通常荷物は 24 時間以内に輸送する**速達区分ケース**を設定する．制約式やパラメータの設定値を変化させて数理最適化モデルにより最適解を求め 2 つのケースの結果を比較する．

2. 最適化モデルの定式化

(1) 既往研究

都市間物流の数理最適化に関する既往研究には，ハブネットワークデザイン問題における時間概念の導入，需要の性質の導入の重要性を述べた Alumur(2021)[1]や，サービスネットワークデザイン問題において混載によるコスト軽減や一部量の荷物の時間制約の緩和について考慮したモデルでの分析を行った Hewitt(2021)[2]などがある．古屋・奥村(2023)[3]はハブネットワークデザイン問題を改良し，他荷受地からの荷物の到着を待機したのちにまとめて積み替え作業を行い，その終了後に出発タイミングを設定できるという前後関係を定義し，複数荷受地からの荷物を確実に混載させることを保証した最適化モデルを構築した．

既往研究には需要を内生化し，顧客と輸送会社の運賃のやり取りを考慮するものは見当たらない．本研究では物流システムを，運賃，荷物量，ネットワーク形状や便数などの一連の相互作用であると定義し，それらを同時に最適化する需要内生化モデルの作成を目指す．

(2) 数理最適化モデルの説明

本研究では，時間制約の設定，混載・ビークルの反復利用の表現が可能な需要を内生化した数理最適化モデルを作成する．分析で用いる集合・パラメータ・変数の定義は**表–1**，最適化モデルの定式化は**表–2**に示す通りである．詳細な説明は本文にて行う．

本研究で使用するモデルでは，古屋・奥村(2023)[3]のモデルにならい，式(9)-(13)の時間制約式を使用して，混載を表現する．さらに，新たに需要の内生化とビークル数に関する制約の追加の二つの拡張を行う．

需要の内生化に関連して，式(1)のように，消費者余剰と輸送会社の利潤の和である社会的余剰の最大化を目的関数として設定する．消費者余剰・輸送量・運賃に関する制約式として式(2)-(8)を設定する．式(2)は線形の需要関数を仮定し，消費者余剰は式(3)で定義される．式(8)は，運賃とコストの関係を示し，全 OD・全サービスからの運賃収入の総和が，全ての輸送コストと輸送会社の利潤の和と等しいことを示す．式(6)-(8)は輸送コストを定義し，それぞれビークルを用意する合計コスト，ビークルを動かす合計コスト，輸送開始タイミングを設定するための合計コストである．ビークル数に関する制約として式(21)-(23)を設定する．式(21)は各時刻においてリンクごとに使用中の台数の合計を計上している．式(22)でそれを時刻別・モード別に計上し，式(23)ではそれらの全時刻における最大値VT_mを計算している．

表–1　集合・パラメータ・変数の定義

集合の定義
N：ノード　L：リンク　M：モード　J：時刻　S：輸送サービス　OD：OD　$oN(od)$：O ノード　$dN(od)$：D ノード　$Li(i)$：ノードに入るリンク　$Lo(i)$：ノードから出るリンク　$sN(l)$：リンクの開始ノード　$eN(l)$：リンクの終了ノード　$mL(m)$：輸送モードごとのリンク
パラメータの定義
v_l：出発可能台数　d：1便あたりの出発準備時間　q：車両積載容量　cv_m：車両準備コスト　cl_l：1 便あたりの運行単価　cj：輸送開始 1 時刻あたりの準備単価　τ_{od}^s：速達制限時間　t_l：交通所要時間　a_{od}^s：OD ペア最大支払意思額　b_{od}^s：需要関数の傾き　$wmax_{od}^s$：最大荷物量
変数の定義
B_{od}^s：消費者余剰　P_{od}^s：運賃　W_{od}^s：荷物量　H：輸送会社の利潤　G_{od}^s：総運賃収入額　$V_{l,j}$：便数（整数）　$VO_{l,k}$：各時間にリンクごとに使用中のビークル数（整数）　VM_k^m：各時間に使用中のビークル数の合計（整数）　VT_m：1 日に必要なビークル数（整数）　$Y_{l,j}$：輸送があるとき 1 をとる{0,1}変数　$X_{l,j}^{od,s}$：便の出発があるとき 1 をとる{0,1}変数　$Q_{l,j}^{od,s}$：リンク輸送量　$R_l^{od,s}$：到着時刻　$T^{od,s}$：OD 輸送時間　CM：ビークルを用意するコストの合計　CV：ビークルを動かすためのコストの合計　CJ：輸送開始タイミングを設定するためのコストの合計　WS_{od}^s：荷物量に関する二次錐制約のための補助変数　A_s：最大支払意思額に対する運賃水準

表–2　最適化モデルの定式化

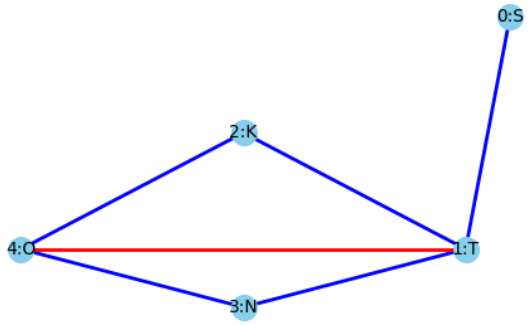
目的関数（社会的余剰最大化）		
$\max \sum_{s\in S}\sum_{od\in OD} B_{od}^s + H$		(1)
消費者余剰・輸送量・運賃に関する制約式		
$P_{od}^s = a_{od}^s - b_{od}^s \cdot W_{od}^s$	$\forall od \in OD, s \in S$	(2)
$B_{od}^s = 1/2 \cdot (a_{od}^s - P_{od}^s) \cdot W_{od}^s$	$\forall od \in OD, s \in S$	(3)
$G_{od}^s = P_{od}^s \cdot W_{od}^s$	$\forall od \in OD, s \in S$	(4)
$(CM + CV + CJ) + H \le \sum_{s\in S}\sum_{od\in OD} G_{od}^s$		(5)
$CM = \sum_{m\in M} cv_m \cdot VT_m$		(6)
$CV = \sum_{l\in L}\sum_{j\in J} cl_l \cdot V_{l,j}$		(7)
$CJ = \sum_{l\in L}\sum_{j\in J} cj \cdot Y_{l,j}$		(8)
時刻に関する制約式		
$j \ge R_{sN(l),s}^{od} + d\sum_{l\in Lo(sN(l))} V_{l,j}$	$\forall l \in L, od \in OD, j \in J, s \in S\ (\text{if } X_{l,j}^{od,s} = 1)$	(9)
$R_{eN(l)}^{od,s} \ge j + t_l$	$\forall l \in L, od \in OD, j \in J, s \in S\ (\text{if } X_{l,j}^{od,s} = 1)$	(10)
$R_{dN(od)}^{od,s} - R_{oN(od)}^{od,s} = T^{od,s}$	$\forall od \in OD, s \in S$	(11)
$T^{od,s} \le \tau_{od}^s$	$\forall od \in OD$	(12)
$R_{oN(od)}^{od,s} = 0$	$\forall od \in OD, s \in S, i \in N$	(13)
容量に関する制約式		
$\sum_{l\in Lo(oN(od))}\sum_{j\in J} Q_{l,j}^{od,s} = W_{od}^s$	$\forall od \in OD, s \in S$	(14)
$\sum_{l\in Li(dN(od))}\sum_{j\in J} Q_{l,j}^{od,s} = W_{od}^s$	$\forall od \in OD, s \in S$	(15)
$\sum_{l\in Li(i)}\sum_{j\in J} Q_{l,j}^{od,s} = \sum_{l\in Lo(i)}\sum_{j\in J} Q_{l,j}^{od,s}$	$\forall od \in OD, s \in S, i \in N - \{dN(od)\} - \{sN(od)\}$	(16)
$Q_{l,j}^{od,s} \le q \cdot v_l \cdot X_{l,j}^{od,s}$	$\forall l \in L, od \in OD, j \in J, s \in S$	(17)
$X_{l,j}^{od,s} \le Y_{l,j}$	$\forall l \in L, od \in OD, j \in J, s \in S$	(18)
$\sum_{od\in OD}\sum_{s\in S} Q_{l,j}^{od,s} \le qV_{l,j}$	$\forall l \in L, j \in J$	(19)
$V_{l,j} \le v_l Y_{l,j}$	$\forall l \in L, j \in J$	(20)
ビークル数に関する制約式		
$VO_{l,j} = \sum_{k=\min(j-t_l,0)}^{j} V_{l,k}$	$\forall l \in L, j \in J$	(21)
$VM_k^m = \sum_{l\in mL(m)} VO_{l,k}$	$\forall k \in J, m \in M$	(22)
$VT_m \ge VM_k^m$	$\forall k \in J, m \in M$	(23)
二次錐制約式		
$W_{od}^s \cdot W_{od}^s \le WS_{od}^s$	$\forall od \in OD, s \in S$	(24)
$B_{od}^s = 1/2 \cdot b_{od}^s \cdot WS_{od}^s$	$\forall od \in OD, s \in S$	(25)
$G_{od}^s \le a_{od}^s \cdot W_{od}^s - b_{od}^s \cdot WS_{od}^s$	$\forall od \in OD, s \in S$	(26)
最大支払意思額に対する運賃水準の定義		
$P_{od}^s = A^s \cdot a_{od}^{s=1}$	$\forall od \in OD, s \in S$	(27)

このモデルは一部に非線形式を含んで定式化されるが，二次錐制約(24)を導入することで二次錐制約問題へ変形が可能であり，商用ソルバーによって求解が可能となっている．本論文では，Gurobi Optimizer Ver 10.0.1 を用いた計算結果を示す．

3. 計算方法・結果の分析

(1) 仮想ネットワークの設定

計算にはノード数$|N| = 5$，OD 数$|OD| = 20$，リンク数$|L| = 12$，モード数$|M| = 2$（トラックと航空機を想定）で構成される仮想ネットワークを用いる．ネットワーク形状およびリンクの種類ごとのパラメータ設定値を**図–1** に示す．OD ごとのパラメータ設定値を**表–3** に示す．その他のパラメータとして，ビークルの準備コストを$(cv_0, cv_1) = (400000,40000)$，輸送開始 1 時刻あたりの準備費用を$cj = 60000$，出発 1 便当たりの準備時間を$d = 0.01$，ビークル 1 台当たりの容量を$q = 50$でそれぞれ設定する．計算で用いる時間の集合は$|J| = 24$であり，1 時間刻みの 24 時間で設定している．



	トラックリンク	航空リンク
t:交通所要時間	3	1
cl:1便あたりの運行単価	100000	500000
v:出発可能台数	6	2

図–1　仮想ネットワークの概形
ネットワークごとのパラメータ設定値

表–3　OD ごとのパラメータの設定値

a:最大支払意思額

s=0 s=1	N=0	1	2	3	4
0		12000 18000	24000 36000	24000 36000	30000 45000
1	12000 18000		12000 18000	12000 18000	24000 36000
2	24000 36000	12000 18000		24000 36000	12000 18000
3	24000 36000	12000 18000	24000 36000		12000 18000
4	30000 45000	24000 36000	12000 18000	12000 18000	

b:逆需要関数の傾き

s=0 s=1	N=0	1	2	3	4
0		30 90	80 240	80 240	100 300
1	12 36		40 120	12 36	24 72
2	80 240	30 90		60 180	24 72
3	80 240	20 60	48 144		15 45
4	100 300	24 72	20 60	10 30	

τ:速達制限時間

	N=0	1	2	3	4
0		4	8	8	10
1	4		4	4	8
2	8	4		8	4
3	8	4	8		4
4	10	8	4	4	

(2) 各ケースにおける計算方法

以下の分析においては，運賃の最大支払意思額に対する水準は，すべての OD で共通であるとして，運賃P_{od}^sを速達輸送の最大支払意思額$a_{od}^{s=1}$と運賃水準A^sを用いて式(27)として設定する．

$$P_{od}^s = a_{od}^{s=1} \cdot A^s \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (27)$$

速達未区分ケースでの計算は，制約式(28)を加えて行う．この際，速達・通常輸送は共に厳しい輸送制限時間内で運ばれる．

$$A^{s=1} = A^{s=0} \quad (28)$$

速達区分ケースでの計算は，制約式(29)を加えて行う．この際，通常輸送は 24 時間の輸送制限時間を設け，速達輸送のみに厳しい輸送制限時間を設ける．

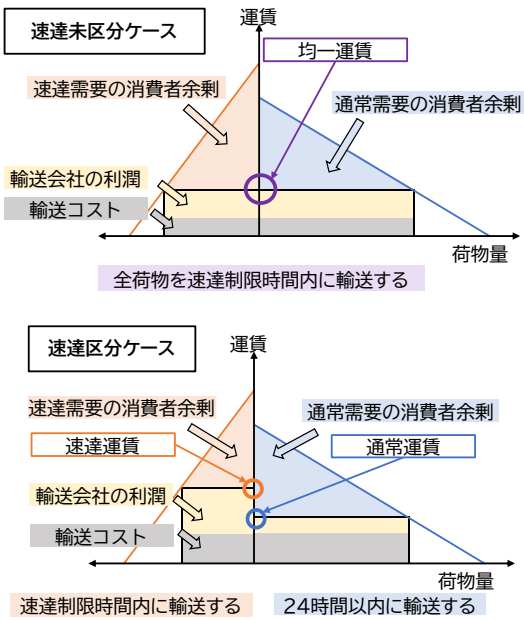
$$A^{s=1} \geq A^{s=0} \quad (29)$$

両ケースにおける運賃・荷物量は**図–3** のように設定されることとなる．

(3) 計算結果の分析

表–4 に，各ケースにおける内生変数の値の比較を示す．**速達区分ケース**では社会的余剰・消費者余剰ともに大幅に増加する．これは通常輸送の運賃が下がり，荷物量が大きく増加したことの結果である．

表–4 の CV/CM はビークルの回転率の指標であり，値が大きいほど単位ビークルあたりの出発回数が多い．速達の区分により値が増加している．これは荷物量が増えることでコストが増加する一方，通常輸送サービスの荷物を制限時間に縛られずに運ぶことが可能になり，ビー



図–2　各ケースにおける運賃・荷物量の概略

クルの反復利用が可能になったことによる．

図-3 に各ケースにおける各時間で使用中のビークル数の比較を示す．**速達未区分ケース**では，輸送制限時間に間に合わせるために，速達性の高い航空で比較的多くのビークルが必要となり，使用時間も全体的に前倒しになる．**速達区分ケース**では，荷物量の増加に伴い必要なビークル数は大きく増加する一方で，時間的制約が緩くなり，ビークル数を均一化する余裕が生まれている．

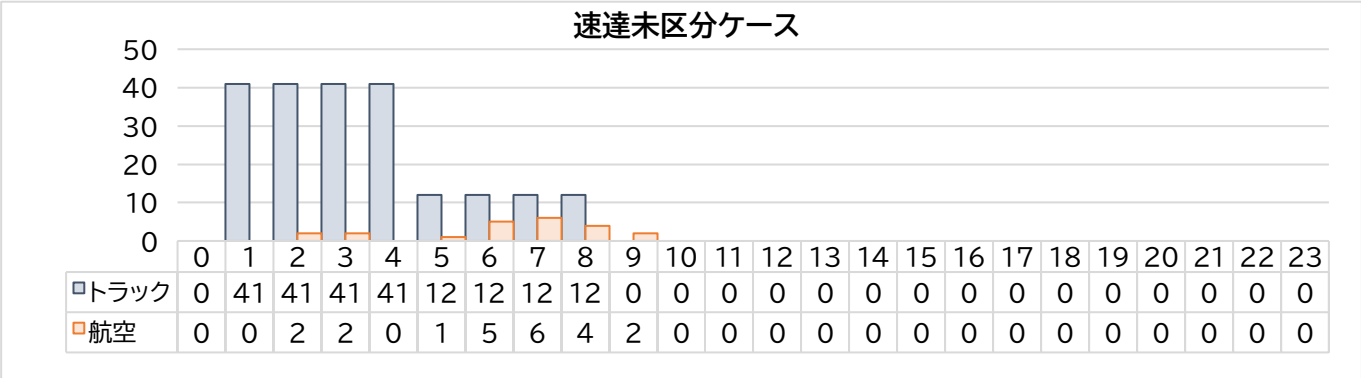
4.　まとめ・今後の課題

本研究は，速達を区分してサービスを設定することによって，社会的余剰・消費者余剰ともに改善が見られることを示し，社会的に大きなメリットをもたらすことを明らかにした．このことは，物流においてシステムを維持可能にするためには高付加価値なサービスの提供に見合う，適切な運賃を顧客に課すことが必要不可欠であることを示唆している．

本研究の課題として，計算規模の問題がある．本モデルはネットワーク・運賃を同時に決定することに主眼を置いているため，ネットワーク規模や一部制約式などに対する拘束が厳しい．例として，到着時刻を各 OD の荷物においてあるノードへの最終到着時刻としている．これは，他のルートの荷物を待たずに出発することを許しておらず，出発方法の柔軟性を下げてしまう定式化となっている．これの改善のためには，0-1 変数・整数変数を減少させた定式化への改良や，最適性を放棄する代わりにヒューリスティックスの手法を選択することなどが挙げられる．

表-4　各ケースにおける内生変数の値の比較

			速達未区分ケース	速達区分ケース
B+H	社会的総余剰		19007500	81499224
B	消費者余剰	s=0	57375	40817618
		s=1	9095625	11880000
		合計	9153000	52697618
H	輸送会社の利潤		9850000	28801607
G	収入:P×W	s=0	4826250	45501607
		s=1	33783750	35640000
		合計	38610000	81141607
W	荷物量	s=0	258	7384
		s=1	2013	2300
		合計	2270	9684
A	運賃割合	s=0	0.65	0.24
		s=1	0.65	0.60
CM	ビークル数に比例		16640000	18120000
CV	荷物量に比例		10800000	30800000
CJ	出発回数に比例		1320000	3420000
CM+CV+CJ	コストの合計		28760000	52340000
CM+CV+CJ/G	コストが収入に占める割合		74%	65%
CV/CM	ビークルの回転率の高さの指標		0.65	1.70
CJ/CV	出発回数の指標		0.12	0.11



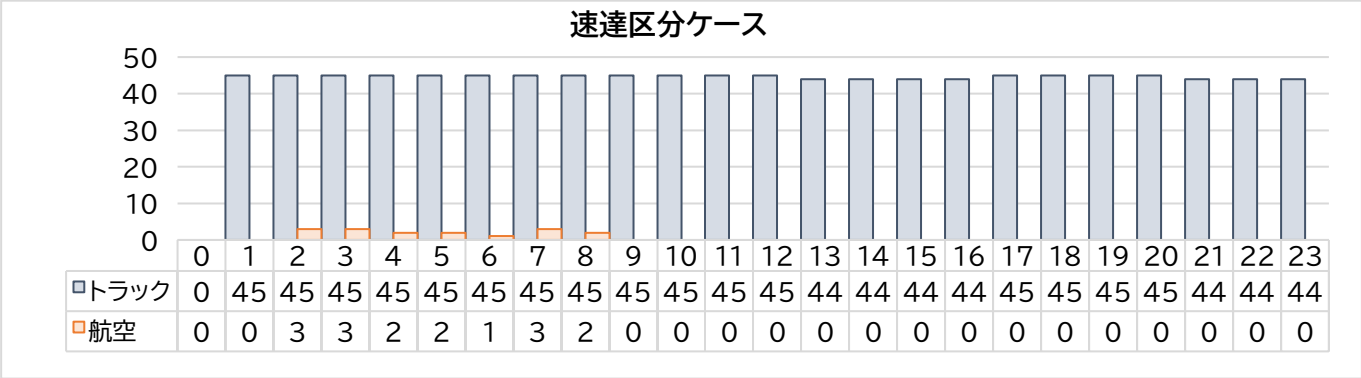


図-3　各ケースにおける各時間で使用中のビークル数の比較

参考文献

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

2) Hewitt M: The Flexible Scheduled Service Network Design Problem,*Transportation Science*.,Vol.56, pp.799-1110,2022.

3) 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，土木学会論文集，78 巻 5 号，pp587-604，2023.