都市間最適小口輸送モデルを用いた効率的な速達・通常運賃のありかたの分析

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)

輸送コストの上昇傾向に対応して貨物運賃の値上げが検討されており，合理的な運賃を設定するための手法が必要であると考えられる．OD 間の通常運賃・速達運賃を操作変数として，全 OD の消費者余剰の総和を最大化する都市間最適小口輸送モデルを提案し，単純な仮想ネットワークを対象とする計算を行って，必要な輸送コストをまかないうる効率的な速達・通常運賃のありかたを分析する．

Key Words: *intercity transportation, logistics network, optimization*

1.　研究の背景・目的

近年，物流業界では，働き方改革による労働時間の制約及びトラックドライバー不足によって物流の維持が困難になる可能性が盛んに議論されている [1]．この状況下で物流を維持するためには，出発回数・便数の増発や賃上げ策など，より高コストなネットワークを形成して対応する必要がある．このような状況において，従来のような距離・輸送時間に応じた運賃徴取ではなく，出発回数・便数・用意すべきリソースなどをもとにネットワーク全体で最適化された運賃のありかたを分析することは重要性を増してくると考えられる．また，e-commerce の発展 [2]に伴い，到着時間がより厳密に設定されている輸送サービスも近年存在している．速達と通常の荷物が混在している場合，速達の余剰容量に通常荷物の輸送が活用されることがある．これらをより高付加価値の輸送として設定することで，潜在的な通常荷物の需要が喚起されることで，新たな運賃徴取方法の提案が期待される．

本研究は，荷物量が多く時間に関する制約をより大きく受ける都市間輸送部分を対象とし，速達・通常荷物が混在するネットワークで社会的に最適となるネットワークを求めるモデルを開発し，その際の運賃のあり方の分析を行う．

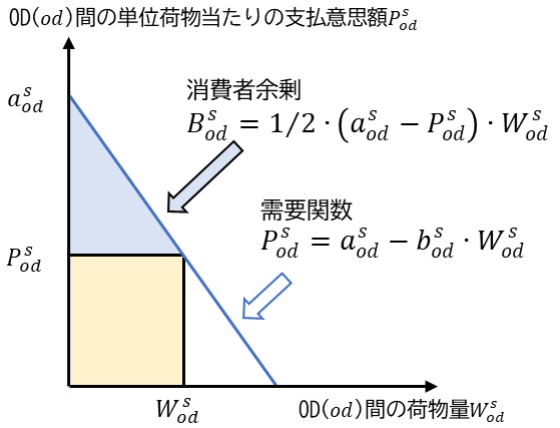


図-1　目的関数の概形

2.　最適化モデルの定式化

本モデルは，古屋・奥村(2023)[3]のモデルの需要を内生化したものであり，需要関数・制限時間・とりうるネットワーク形状などを所与とし，荷物量・運賃・便数・ネットワーク形状などを決定するモデルである．需要関数は速達・通常で二種類用意し，速達の需要関数は通常のものより最大支払意思額が高く，傾きで急であるように設定し，より高付加価値なものとしている．物流企業は運賃収入により輸送コストを賄うことを目的とし，収益は 0 とする．そのため，本モデルでは社会的余剰は消費者余剰と等しく，これの最大化を目的関数とする．本モデルでは**図-1** で示されるような線形の需要関数を仮定し，消費者余剰は青色で示される三角形の面積となる．

モデルは，0-1 変数を含む混合整数二次計画問題として定式化される．二次錐制約を導入することで，凸二次錐制約問題へ変形し，商用ソルバーでの計算を可能とする．

表-1 集合とその意味

N	ノードの集合
L	リンクの集合
M	モードの集合
J	時刻の集合
S	サービス（速達レベル）の集合
OD	OD ペアの集合
$oN(od)$	OD ペア$od \in OD$の発地ノード
$dN(od)$	OD ペア$od \in OD$の着地ノード
$L_{in}(i)$	ノード$i \in N$に入るリンクの集合
$L_{out}(i)$	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
$mL(m)$	輸送モード$m \in M$のリンク

表-2 パラメータとその意味

v_l	リンク$l \in L$の 1 時刻の最大出発可能台数
μ	同一ノードの 1 時刻の最大出発可能台数
q	車両積載容量
cv_m	モード$m \in M$の車両準備コスト
τ_{od}^s	OD ペア$od \in OD$間のサービス$s \in S$の輸送時間制約
t_l	リンク$l \in L$の交通所要時間
cl_l	リンク$l \in L$の一便あたりの運行費用
cj	輸送開始 1 時刻あたりの準備費用
d	車両一台あたりの出発前準備時間
a_{od}^s	OD ペア$od \in OD$のサービス$s \in S$の最大支払意思額
b_{od}^s	OD ペア$od \in OD$のサービス$s \in S$の需要関数の傾き
px	速達サービスの付加料金の最大値

表-3 変数とその意味

B_{od}^s	OD ペア$od \in OD$のサービス$s \in S$利用者の消費者余剰
P_{od}^s	OD ペア$od \in OD$のサービス$s \in S$の利用者の単位当たりの支払額
W_{od}^s	OD ペア$od \in OD$の速達レベル$s \in S$のサービス利用者の荷物量
WS_{od}^s	荷物量に関する二次錐制約のための補助変数
G_{od}^s	OD ペア$od \in OD$のサービス$s \in S$のからの総運賃収入額
$V_{l,j}$	リンク$l \in L$を時刻$j \in J$に出発準備する便数（整数）
$VO_{l,k}$	リンク$l \in L$で時刻$k \in J$に使用中の車両数の合計（整数）
VM_k^m	時刻$k \in J$に使用中のモード$m \in M$の車両数（整数）
VT_m	同時に使用されるモード$m \in M$の最大車両数（整数）
Z_l	リンク$l \in L$に輸送が設定されている時 1 をとる{0,1}変数
$Y_{l,j}$	リンク$l \in L$にタイミング$j \in J$で輸送があるとき 1 をとる{0,1}変数
$X_{l,j}^{od,s}$	OD ペア$od \in OD$のサービス$s \in S$の荷物が，リンク$l \in L$を時刻$j \in J$に出発する便で輸送される時 1 をとる{0,1}変数
$Q_{l,j}^{od,s}$	OD ペア$od \in OD$のサービス$s \in S$の荷物のうち，リンク$l \in L$を時刻$j \in J$に出発する便で輸送される輸送量
$R_i^{od,s}$	OD ペア$od \in OD$のサービス$s \in S$の荷物の全てがノード$i \in N$に到着する時刻
$T^{od,s}$	OD ペア$od \in OD$のサービス$s \in S$の荷物の輸送が完了するまでの所要時間
CM	ビークルを用意する合計コスト
CV	ビークルを動かす合計コスト
CJ	輸送開始タイミングを設定するためのコスト（混載の発生を促進する）

(1) モデルの定式化

モデルで用いる集合・パラメータ・変数とその意味は**表-1**，**表-2**，**表-3** に示す.

式(1)は目的関数であり，消費者余剰の全 OD・速達サービスの総和を最大化する.

$$\max \sum_{s\in S}\sum_{od\in OD} B_{od}^s \quad (1)$$

消費者余剰・輸送量・運賃に関する制約式として式(2)-(10)を設定する．式(2)は需要関数を定義する．本モデルでは線形の需要関数を仮定し，消費者余剰は図 1 で示される三角形の面積となり，式(3)で定義される.

式(4)-(8)は，運賃とコストの関係を示し，輸送会社は運賃の全 OD・全サービスからの運賃収入の総和で，全ての輸送コストを回収することを意味する．式(8)-(9)は，速達サービスが通常サービスより高い支払いを受けるが，上限があることを意味する.

$$P_{od}^s = a_{od}^s - b_{od}^s \cdot W_{od}^s \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (2)$$

$$B_{od}^s = 1/2 \cdot (a_{od}^s - P_{od}^s) \cdot W_{od}^s \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (3)$$

$$G_{od}^s \le P_{od}^s \cdot W_{od}^s \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (4)$$

$$CM + CV + CJ \le \sum_{s\in S}\sum_{od\in OD} G_{od}^s \quad (5)$$

$$CM \ge \sum_{m\in M} cv_m \cdot VT_m \quad (6)$$

$$CV \ge \sum_{l\in L}\sum_{j\in J} cl_l \cdot V_{l,j} \quad (7)$$

$$CJ \ge \sum_{l\in L}\sum_{j\in J} cj \cdot Y_{l,j} \quad (8)$$

$$P_{od}^1 - P_{od}^0 \ge 0 \qquad \forall od \in OD \quad (9)$$

$$P_{od}^1 - P_{od}^0 - px \le 0 \qquad \forall od \in OD \quad (10)$$

時間に関する制約として，式(11)-(15)を設定する．式(11)は荷物が積替施設に到着した後，同一時刻に同一ノードから出発する便数に比例する積替準備時間が経過しなければ出発できないこと，式(12)は出発後，リンクの交通所要時間が経過しなければ終点に到着しないことを意味する．式(13)，(14)は OD 間で輸送が，所与の制限時間内に完了することを意味する．式(15)は，運ぶ必要がある荷物が，時刻 0 において O ノードに集約されており輸送が開始できることを意味する.

$$j \ge R_{sN(l),s}^{od} + d \cdot \sum_{ll\in Lout(sN(l))} V_{ll,j} \qquad \forall l \in L, od \in OD, j \in J, s \in S \left(\text{if } X_{l,j}^{od,s} = 1\right) \quad (11)$$

$$R_{eN(l)}^{od,s} \geq j + t_l$$
$$\forall l \in L, od \in OD, j \in J, s \in S \left(\text{if } X_{l,j}^{od,s} = 1\right) \quad (12)$$

$$R_{dN(od)}^{od,s} - R_{oN(od)}^{od,s} \leq T^{od,s} \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (13)$$

$$T^{od,s} \leq \tau_{od}^{s} \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (14)$$

$$R_{oN(od)}^{od,s} = 0 \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (15)$$

容量に関する制約として，式(16)-(23)を設定する．式(16)は$X_{l,j}^{od,s} = 1$のときにのみ$Q_{l,j}^{od,s}$が値をもつことを意味する．
式(17)はリンクの出発時刻ごとの容量制約を示している．式(18)，(19)はそれぞれ O ノード，D ノードにおけるフローバランス制約を示している．(20)，(21)は$Y_{l,j}$，Z_lに値を設定するための制約である．式(22)は各ノードにおいて各時刻に積替え作業ができる台数の制約を意味する．式(23)は各ノードにおいて同一時刻に設定できる出発便数の制約を意味する．

$$Q_{l,j}^{od,s} \leq q \cdot v_l \cdot X_{l,j}^{od,s} \quad \forall l \in L, od \in OD, j \in J, s \in S \quad (16)$$
$$\sum_{od \in OD} \sum_{s \in S} Q_{l,j}^{od,s} \leq q V_{l,j} \qquad \forall l \in L, j \in J \quad (17)$$
$$\sum_{l \in L_{out}(oN(od))} \sum_{j \in J} Q_{l,j}^{od,s} \geq W_{od}^{s} \quad \forall od \in OD, s \in S \quad (18)$$
$$\sum_{l \in L_{in}(dN(od))} \sum_{j \in J} Q_{l,j}^{od,s} \geq W_{od}^{s} \quad \forall od \in OD, s \in S \quad (19)$$
$$X_{l,j}^{od,s} \leq Y_{l,j} \qquad \forall l \in L, od \in OD, j \in J, s \in S \quad (20)$$
$$Y_{l,j} \leq Z_l \qquad \forall l \in L, j \in J \quad (21)$$
$$\sum_{l \in Lout(i)} V_{l,j} \leq \mu \qquad \forall i \in N, j \in J \quad (22)$$
$$V_{l,j} \leq v_l Z_l \qquad \forall l \in L, j \in J \quad (23)$$

次に，各時刻からの輸送を遂行するために必要なモードごとの台数に関する制約として式(24)-(27)を設定する．式(24)，(25)は各時刻に各リンクで使用中の台数の合計を計上している．式(26)でそれをモード別に時刻ごとに計上し，式(27)で全時刻での最大値をVT_mとして定義する．

$$VO_{l,j} \geq \sum_{k=\lceil j - t_l \rceil}^{j} V_{l,k} \qquad \forall l \in L, j \in J \ (if\ j \geq t_l) \quad (24)$$

$$VO_{l,j} \geq \sum_{k=0}^{j} V_{l,k} \qquad \forall l \in L, j \in J \ (if\ j \leq t_l) \quad (25)$$
$$VM_k^m \geq \sum_{l \in mL(m)} VO_{l,k} \qquad \forall k \in J,\ m \in M \quad (26)$$
$$VT_m \geq VM_k^m \qquad \forall k \in J,\ m \in M \quad (27)$$

⑶ 二次錐制約の導入

以上のモデルは，式⑶，⑷という非線形式を含む．これらに式変形を施し，0–1 変数を含む凸二次錐計画問題に変換して計算を行う．需要関数である式⑵を式⑶，⑷に代入し，$W_{od}^{s} \cdot W_{od}^{s}$を$WS_{od}^{s}$へ置き換え，式(29)，(30)を得る．二次錐制約式(28)と式(30)によってWS_{od}^{s}に上限と下限が設定される．

$$W_{od}^{s} \cdot W_{od}^{s} \leq WS_{od}^{s} \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (28)$$
$$B_{od}^{s} = 1/2 \cdot b_{od}^{s} \cdot WS_{od}^{s} \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (29)$$
$$G_{od}^{s} \leq a_{od}^{s} \cdot W_{od}^{s} - b_{od}^{s} \cdot WS_{od}^{s} \qquad \forall od \in OD, s \in S \quad (30)$$

3. 仮想ネットワークを用いた計算

4nodes ネットワークを用いてモデルの性能を確認する．ネットワークおよびパラメータ設定の詳細は，**表–4**, **表–5** に示すとおりである．本論文ではモデルの性能確認として，時刻制約式(14)の速達輸送（$s = 1$）のみに$\alpha/6$の倍率をかけた式(14')式を設定し，α=[1,2,3,4,5,6]と変化させた際のネットワーク形状，運賃の変化について確認する．詳細な計算・考察に関しては研究発表会当日に行う．

$$T^{od,s=1} \leq (\alpha/6) \times \tau_{od}^{s=1} \qquad \forall od \in OD, s = 1 \quad (14')$$

Gurobi Optimizer version(10.0.1)[4]を使用して計算を行う．計算時間の都合上，最適値とのギャップを 0.05%で計算を打ち切って結果を取得した．

表–4 仮想ネットワークの設定（集合）

N	4
L	12+2
M	2（0:トラック，1:航空）
J	24
S	2
OD	12
$oN(od)$	(0,0,0,1,1,1,2,2,2,3,3,3)
$dN(od)$	(1,2,3,0,2,3,0,1,3,0,1,2)
$L_{in}(i)$	((0,1,2),(6,3,4),(7,9,5),(8,10,11))
$L_{out}(i)$	((6,7,8),(0,9,10),(1,3,11),(2,4,5))
$sN(l)$	(0,0,0,1,1,2,1,2,3,2,3,3)
$eN(l)$	(1,2,3,2,3,3,0,0,0,1,1,2)
$mL(m)$	((0×12),(1×2))

表–5 仮想ネットワークの設定（パラメータ）

v_l	(5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5)
μ	10
q	100
cv_m	100
τ_{od}^{s}	((12,9,15,12,12,12,9,12,12,15,12,12),(24×od))
t_l	(7,3,8,7,5,7,7,3,8,7,5,7)
cl_l	(17000,7000,19000,14000,11000,13000, 17000,7000,19000,14000,11000,13000)
cj	10000
d	0.05
a_{od}^{s}	((72000,54000,90000,72000,72000,72000, 54000,72000,72000,90000,72000,72000), (86000,65000,108000,86000,86000,86000, 65000,86000,86000,108000,86000,86000))
b_{od}^{s}	((160,120,200,160,160,160,120,160,160,200,160,160), (290,220,360,290,290,290,220,290,290,360,290,290))
px	50000

(1) 計算結果

図-2，図-3，図-4，図-5 は，それぞれ，時間制約の厳しさαの変化に応じた，消費者余剰B_{od}^{s}の全ODの和・支払額G_{od}^{s}の全ODの和・荷物量W_{od}^{s}の全ODの和・支払を行うODの総数の変化を示したものである．

時間制約が厳しい$\alpha \leq 3$では一部のODのみで速達輸送の設定が可能であり，輸送が行われる通常輸送の1ODにすべての支払いを負担させる結果が得られた．$\alpha \geq 4$の時間制約が緩い区間では，速達輸送の設定が多くのOD で可能であり，すべての OD・輸送サービスで支払いが行われている．

時間制約が厳しい場合に一部 OD のみで支払いが起こっている点など，数値計算上の誤差のため，一部不自然な結果が得られている可能性がある．これらの問題の解決を発表時までに試みる．

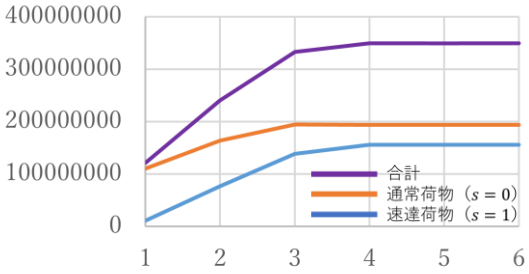


図-2　αの変化に対応した消費者余剰B_{od}^{s}の全 OD の和

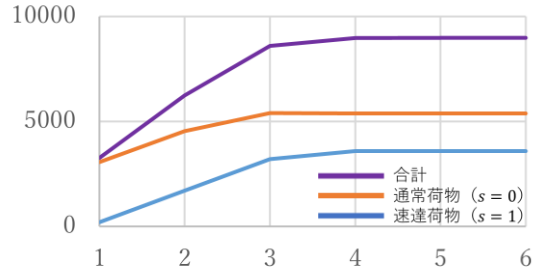


図-3　αの変化に対応した荷物量W_{od}^{s}の全 OD の和

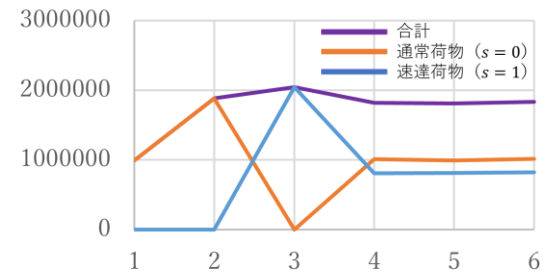


図-4　αの変化に対応した支払額G_{od}^{s}の全 OD の和

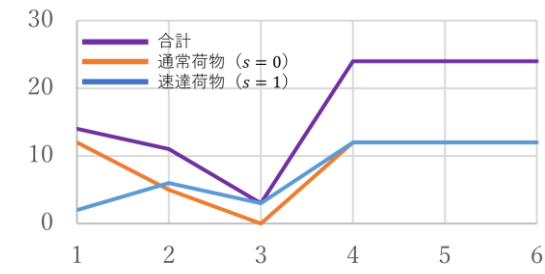


図-5　αの変化に対応した支払いを行う OD の総数

参考文献

1) 首藤若菜：「2024 年問題」とは，連合総研レポート，36 巻 6 号，pp6-9，2023. https://www.jstage.jst.go.jp/article/rengosoken-dio/36/6/36_6/_article/-char/ja
2) 経済産業省：第 1 回 持続可能な物流の実現に向けた検討会 開催資料，資料 2，pp11，2022. https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/sustainable_logistics/001.html
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．https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejipm/78/5/78_I_597/_article/-char/ja/
4) Gurobi Optimization：Gurobi Optimizer Release Notes version 10.0.1．(参照 2023-10-12) https://www.gurobi.com/downloads/gurobi-optimizer-release-notes-v10-0-1/

(?)

Analysis of efficient express and normal freight rates using an optimal intercity small-lot transportation model.

Takuto FURUYA, Makoto OKUMURA

In response to the rising trend of transportation costs, an increase in freight rates is being considered, and a method for setting reasonable freight rates is considered necessary. The model is then computed for a simple hypothetical network to analyze how efficient express and normal fares can be to cover the necessary transportation costs.