北海道－本州間の貨物輸送における マルチモーダル複数品目貨物配分モデル

藏本　太郎[1]・峪　龍一[2]・内田　賢悦[3]

[1]学生会員　北海道大学　工学院（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: kuramoto.taro.s4@eis.hokudai.ac.jp

[2]正会員 北海道大学大学院 工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: r-tani@eng.hokudai.ac.jp

[3]正会員 北海道大学大学院 工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

北海道新幹線札幌延伸後の道内貨物列車の施策決定に活用することを目的に，北海道－本州間のコンテナ貨物輸送の輸送量配分モデルを開発する．本研究では，鉄道や船舶の容量制約や，貨物駅や海港などの荷役を行う場所で発生する混雑を考慮することにより，輸送方法ごとの特性を表現する．一般化輸送コストは，貨物フローに依存する待ち時間と商品の時間価値の積に，フローに依存しないコストを加えた形で表す．それを基に荷主の経路選択確率をロジットモデルで表現し，貨物配分問題を容量制約付きのマルチクラス・マルチモーダル確率的利用者均衡配分モデルとして定式化する．最適化問題は，ラグランジュ乗数で表した容量制約によって発生する遅延の緩和問題として再定式化し，逐次平均法と劣勾配法を組み合わせたアルゴリズムを用いて数値計算を行う．

Key Words: *stochastic user equilibrium, traffic assignment, multi-modal, multi-commodity, freight*

1.　はじめに

北海道運輸局 [1]によると，北海道－本州間の貨物輸送量は年間 6 千万トン弱であり，そのほとんどを海上輸送が担っている （図-1）．鉄道が占める比率は約 7%と高くはないが，日本国内の鉄道の輸送分担率が 1%未満[2]であることを考慮すると，鉄道が北海道－本州間の物流において重要な役割を担っていることが分かる．例えば，北海道の農協組合であるホクレンでは農畜産物の道外移出の 3 割を鉄道に頼っている [3]．

鉄道輸送には様々な利点がある．例えばトラックドライバーの必要数を減らせることが挙げられる．トラックドライバーは 1995 年頃から既に減少傾向にある [4]が，働き方改革関連法の改正によってドライバーの時間外労働の上限が年間 960 時間に制限される 2024 年問題も加わると，ドライバーの人員不足はますます顕著になると考えられる．鉄道輸送では，貨物列車 1 両につき 12 フィート級 5 トン積みの JR コンテナを 5 個積載することができるため，1 両で 10 トントラック 2.5 台分の輸送力に相当する．現状，北海道と本州を結ぶ貨物列車は最大で 20 両で 1 編成を組んでおり，1 編成当たりトラック 50 台分の輸送が可能である．また貨物駅が日本全国に立地しているため，海港と比較して集配地点との距離が近く，トラックの走行距離を抑えることが出来る．更に輸送単位当たりの二酸化炭素排出量が海上輸送の約半分，トラックの約 10%と非常に少なく，環境性にも優れている．以上の利点から鉄道へのモーダルシフトが推奨されている．

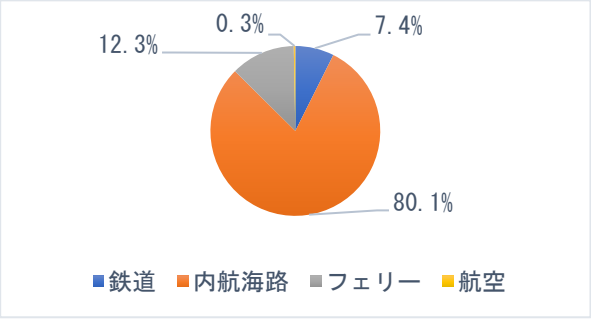


図-1　北海道－本州間の機関別輸送量の比率

しかし並行在来線問題により，北海道－本州間の鉄道輸送が今後も継続されるかは未定である．並行在来線問題とは，整備新幹線の建設に際して発生する，新幹線に並行する在来線に関する問題のことである．路線の廃止や，第三セクターなどに移管し存続させる場合も，優等

列車の廃止やそれに伴う利用者減少によって運営元の地方自治体の財政を圧迫することが挙げられる．2030 年頃を目途に北海道新幹線が札幌まで延伸されるが，それに伴って函館本線の函館から札幌が並行在来線となる．通称山線と呼ばれる長万部から小樽までの区間は既に廃止が決定しているが，函館から長万部間の存廃は未決定のままである．函館から長万部間の特急が廃止され普通列車のみの運行となると，当区間の輸送密度は極めて低くなり採算が取れなくなることが予想されるため廃止も検討されている．そこで問題となるのが貨物列車である．当区間は北海道－本州間の貨物列車が多数運行される物流の大動脈であり，臨時列車も合わせると上下約 50 本の貨物列車が運行されている．みずほ総研 [5]によると，仮に並行在来線を廃止して鉄道をすべて海上輸送に転換すると，繁忙期に道内で 700 人，道外で 1550 人，閑散期でも道内で 350 人，道外で 800 人の新たなドライバーが必要になり，更に 6 隻の 3000 トン級の RORO 船の新造が必須であると試算された．これらのドライバーや船が確保できず輸送が滞る場合，道内経済は最大で 1462 億円の損害を被ると予測されている．以上の背景より，鉄道貨物をこれまでと同程度に維持することも，完全に廃止することも難しい．

そこで，本研究では道外移出量に応じた機関分担モデルを提案する．まず本稿では，Li et al. [6]による中国－欧州間コンテナ貨物輸送におけるマルチモーダルネットワーク配分モデルを北海道－本州間にも適用させる．鉄道または船のモード選択に着目したため，コンテナ貨物を想定する．JR とコンテナを取り扱っている函館，室蘭，苫小牧，小樽，釧路の 5 港を経由する経路のみを考慮し，どのような経路を通ってコンテナが道外へ移出されるかシミュレーションする．

本稿の構成を以下に示す．第 1 章では，本研究を行う背景とモデルの概要を述べた．第 2 章では，参考とした既往研究を示す．第 3 章では，配分モデルの定式化を示す．第 4 章では，道内貨物ネットワークにおける数値計算例を示す．第 5 章で本研究をまとめ，今後の課題を示す．

2. 既往研究

これまでも Chow et al. [7]や Jourquin and Beuthe et al.[8]など，マルチモーダルを扱った貨物輸送ネットワーク配分モデルの研究はされていたが，貨物輸送の大きな特徴である貨物路線の容量制約や，貨物駅や海港などの荷役を行う場所で発生する待ち行列現象などは考慮されておらず，各輸送機関の混雑状況などの輸送特性が表現されていなかった．Li et al. [6]は，中国－ヨーロッパ間の貨物輸送を舞台に，これら容量制約や待ち行列を組み込んだマルチモーダル多品目貨物輸送ネットワーク配分モデルを開発した．経路選択確率をロジットモデルで表し，それを基に容量制約や荷役施設における待ち行列を組み込んだ最適化問題を定式化した．容量制約によって発生する遅延は，容量と輸送量が等しくなった際にラグランジュ乗数によって表され，待ち行列は多項式で近似され配分モデル内に組み込まれた．

3. モデルの定式化

(1) 仮定

- 各経路の時間やコストは，経路が通過するリンクごとに要するものの合計とする．
- 荷主は後述する一般化輸送コストが最小になる経路を選択するものとする．

(2) 記号

以下に，本研究で用いる記号について表記する．文字はそれぞれ組み合わせて使い，例えば鉄道リンクの集合はA_rと表記する．

O	起点ノードの集合
D	終点ノードの集合
M	商品カテゴリーの集合
p	海港
e	貨物駅
s	海路
r	鉄道
h	高速道路
A_l	リンクlの集合$(l \in \{= p, e, s, r, h\})$
x_l	リンクlのコンテナフロー
x^0	北海道から本州以外へのフロー
t_l	リンクlの輸送時間$(l \in \{= s, r, h\})$
t_l	リンクlの待ち時間$(l \in \{= p, e\})$
$\delta_{l,k}$	リンクlにおけるダミー変数 リンクlがパスkに含まれるときに 1，それ以外の時に 0 をとる
u_l	リンクlの輸送容量
v^m	商品カテゴリーmの時間価値
c_l^m	リンクlの商品カテゴリーmの利用コスト
g_k^m	パスk上の商品カテゴリーmの一般化輸送コスト
f_k^m	パスk上の商品カテゴリーmの輸送量
q_{od}^m	O-D ペア間の商品カテゴリーmの需要量
θ_m	商品カテゴリーmの知覚輸送コストの分散のスケールパラメータ

$W(t)$	待ち行列系内にいる時間の期待値
W_q	1 車両（コンテナ船，コンテナ列車）当たりの待ち時間の期待値
L_q	待ち行列にいる車両数の期待値
P_0	待ち行列に車両がいない確率
s	コンテナバース，荷役ホームの数
λ	車両の到着率
μ	バース，ホームで単位時間あたりに処理できるコンテナ量
ρ	平均利用率
$\alpha^1, \alpha^2, \beta$	輸送コスト関数の関数パラメータ
t^0	自由流輸送時間

(3) 定式化

a) ボトルネックリンク

本稿で用いるネットワークでは貨物駅と海港で荷役作業による混雑で遅延が発生するとし，これら貨物駅と海港をボトルネックリンクとして定式化する．ここでは s 台の窓口によって処理される M/M/s 待ち行列モデルを利用する．以下の式より待ち行列系内にいる時間の期待値 $W(t)$ を求める．

$$W(t) = W_q + \frac{1}{\mu} \tag{1}$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \tag{2}$$

$$L_q = \frac{\rho(s\rho)^s}{s!\,(1-\rho)^2} P_0 \tag{3}$$

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(s\rho)^n}{n!} + \frac{(s\rho)^s}{s!\,(1-\rho)}} \tag{4}$$

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} \tag{5}$$

式(2)は 1 車両（コンテナ船，コンテナ列車）当たりの待ち時間の期待値，式(3)は待ち行列にいる車両数の期待値，式(4)は待ち行列に車両がいない確率，式(5)は平均利用率を表している．式(2)-(5)を式(1)に代入すると，待ち行列系内にいる時間の期待値 $W(t)$ は以下のように求められる．

$$W(t) = \frac{(s\rho)^s \rho}{\lambda s!\,(1-\rho)^2}\left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{1}{n!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n + \frac{1}{s!}\frac{1}{1-\rho}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s\right]^{-1} + \frac{1}{\mu} \tag{6}$$

次節で扱う配分モデルに組み込むため，式(6)を多項式で近似する．Li et al[6]は，海港の利用率 $\rho = \lambda/\mu$ を新たに $\rho = (x + x^0)/u$ と求めることで，海港リンクでの待ち時間 t_p と貨物駅 t_e での待ち時間を以下のように近似した．

$$t_p = \alpha_p^1 \cdot \left(\frac{x_p + x_p^0}{u_p}\right)^{\beta_p} + \alpha_p^2 \cdot \frac{x_p + x_p^0}{u_p} + t_p^0 \tag{7}$$

$$t_e = \alpha_e^1 \cdot \left(\frac{x_e + x_e^0}{u_e}\right)^{\beta_e} + \alpha_e^2 \cdot \frac{x_e + x_e^0}{u_e} + t_e^0 \tag{8}$$

b) 輸送コストの一般化

Li et al[6]より，経路 k を通過する商品カテゴリー m の 1TEU あたりの一般化輸送コストは，式(9)で計算される．

$$\begin{aligned} g_k^m = &\sum_{r \in A_r} \delta_{r,k}(v^m t_r + c_r^m) \\ &+ \sum_{s \in A_s} \delta_{s,k}(v^m t_s + c_s^m) \\ &+ \sum_{h \in A_h} \delta_{h,k}(v^m t_h + c_h^m) \\ &+ \sum_{a \in A_P \cup A_e} \delta_{a,k} v^m t_a(x_a) \\ &+ \sum_{l \in A_s \cup A_r} \delta_{l,k} v^m \mu_l \\ &\forall m \in M, k \in K_{od}, o \in O, d \in D \end{aligned} \tag{9}$$

一般化輸送コストは，リンクフローに依存しないコスト，ボトルネックリンク上で発生する遅延コスト，容量制約によって発生するコストの 3 つの項の合計で表される．式(9)の第 1 項から第 3 項までが，リンクフローに依存しないコストである．経路 k がリンク l を含む場合に発生する．経由するリンクごとに発生し，フローに関係なく一律である．その商品が持つ時間価値と輸送時間の積と，1TEU（20 フィートで換算したコンテナ個数を表す単位，JR 貨物で扱うコンテナサイズは 12 フィート）あたりに掛かる運賃の和によって求められる．第 4 項はボトルネックリンク上で発生する遅延コストである．各経路からのフローによって貨物駅や海港で発生する待ち時間 $t(x)$ と時間価値の積によって求められる．第 5 項は容量制約によって発生するコストである．各経路からのフローの合計が鉄道リンクや海上リンクの持つ容量に達するとコストが発生する．各リンクの容量制約に対応するラグランジュ乗数の和として求められる．各リンクの容量制約に対応するラグランジュ乗数の条件式は式(10)の通りである．

$$\begin{aligned} &\mu_l = 0 \; if \; x_l < u_l \\ &\mu_l \geq 0 \; if \; x_l = u_l \\ &\forall l \in A_s \cup A_r \end{aligned} \tag{10}$$

c) 配分モデル

荷主が認知する輸送コストは前節で立式した一般化輸送コストと認知誤差の和で表すことが出来る．ランダム効用理論に基づくロジットモデルを用いて，経路選択確率は式(11)と求まる．

$$p_k^m = \frac{\exp(-\theta_m g_k^m)}{\sum_{k\in K_{od}} \exp(-\theta_m g_k^m)} \quad (11)$$
$$\forall m \in M, o \in O, d \in D$$

続いてLietal[6]で開発された配分モデルを基に，以下の配分モデルを立式する．

Min

$$Z(f) = \sum_{a\in A_p\cup A_e} \int_0^{x_a} t_a(\omega)\, d\omega + \sum_{m\in M}\sum_{o\in O}\sum_{d\in D}\sum_{k\in K_{od}} f_k^m \left(\sum_{r\in A_r} \delta_{r,k}\left(t_r + \frac{c_r^m}{v^m}\right) + \sum_{s\in A_s} \delta_{s,k}\left(t_s + \frac{c_s^m}{v^m}\right) + \sum_{h\in A_h} \delta_{h,k}\left(t_h + \frac{c_h^m}{v^m}\right) \right) + \sum_{m\in M}\sum_{o\in O}\sum_{d\in D}\sum_{k\in K_{od}} \frac{1}{\theta_m v^m} f_k^m \ln(f_k^m) \quad (12)$$

subject to

$$\sum_{k\in K_{od}} f_k^m = q_{od}^m \;\forall\, o \in O, d \in D, m \in M \quad (13)$$

$$x_l \le u_l \forall\, l \in A_s \cup A_r \quad (14)$$

$$x_p, x_e, x_s, x_r, f_k^m \ge 0 \quad \forall\, p \in A_p, e \in A_e, s \in A_s, r \in A_r, k \in K_{od}, o \in O, d \in D, m \in M \quad (15)$$

where

$$x_a = \sum_{m\in M}\sum_{o\in O}\sum_{d\in D}\sum_{k\in K_{od}} \delta_{a,k} f_k^m \quad \forall\, a \in A_p \cup A_e \quad (16)$$

$$x_l = \sum_{m\in M}\sum_{o\in O}\sum_{d\in D}\sum_{k\in K_{od}} \delta_{l,k} f_k^m \quad \forall\, l \in A_s \cup A_r \quad (17)$$

式(12) の第 1 項がボトルネックリンクでの待ち時間関数の積分和，第2項が経路フローに依存しない輸送時間の合計，第 3 項がエントロピー項を表している．制約式(13)は経路フローと OD フローの関係，式(14)は海路と鉄道の各リンクの輸送容量制約，式(15)はリンクと経路のフローに関する非負条件を表している．式(16)，(17)は，リンクフローと経路フローの関係式である．この最適化問題と式(11)で示されたロジットモデルとの等価性を調べるため，ラグランジュ関数$L(\mathbf{f}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ (18)を定義する．

$$L(\mathbf{f}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = Z(f) + \sum_{m\in M}\sum_{o\in O}\sum_{d\in D} \lambda_{od}^m \left(q_{od}^m - \sum_{k\in K_{od}} f_k^m \right) + \sum_{s\in A_s} \mu_s \left(x_s - \sum_{i\in L_s} \delta_{s,i} u_i \right) + \sum_{r\in A_r} \mu_r \left(x_r - \sum_{j\in L_r} \delta_{r,j} u_j \right) \quad (18)$$

式(18)に関する KKT 条件より，以下の関係式が得られる．

$$\frac{\partial L(\mathbf{f}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})}{\partial f_k^m} = \sum_{a\in A_p\cup A_e} \delta_{a,k} t_a(x_a) + \sum_{r\in A_r} \delta_{r,k}\left(t_r + \frac{c_r^m}{v^m}\right) + \sum_{s\in A_s} \delta_{s,k}\left(t_s + \frac{c_s^m}{v^m}\right) + \sum_{h\in A_h} \delta_{h,k}\left(t_h + \frac{c_h^m}{v^m}\right) + \frac{1}{\theta_m v^m}[ln(f_k^m) + 1] + \lambda_{od}^m + \sum_{s\in A_s} \delta_{s,k}\mu_s + \sum_{r\in A_r} \delta_{r,k}\mu_r = 0 \quad (19)$$
$$\forall m \in M, k \in K_{od}, o \in O, d \in D$$

KKT 条件について解くと，式(20)が得られる．

$$f_k^m(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \exp(-\theta_m g_k^m - \theta_m v^m \lambda_{od}^m - 1) \quad (20)$$
$$\forall m \in M, k \in K_{od}, o \in O, d \in D$$

式(13)よりq_{od}^mは式(21)で表される．

$$q_{od}^m = \sum_{k\in K_{od}} \exp(-\theta_m g_k^m - \theta_m v^m \lambda_{od}^m - 1) \quad (21)$$
$$\forall m \in M, o \in O, d \in D$$

式(20)と(21)より経路の選択確率は式(22)で与えられる．

$$p_k^m = \frac{f_k^m(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})}{q_{od}^m} = \frac{\exp(-\theta_m g_k^m - \theta_m v^m \lambda_{od}^m - 1)}{\sum_{k\in K_{od}} \exp(-\theta_m g_k^m - \theta_m v^m \lambda_{od}^m - 1)} \quad (22)$$
$$\forall m \in M, o \in O, d \in D$$

θ_m，v^m，λ_{od}^mはそれぞれ経路によらないため，最適化問題が式(11)で示したロジットモデルと等価であることが示すことができた．

4. 数値計算

⑴ ネットワーク

北海道－本州間の総貨物輸送量のうち，航空輸送によるものは 1%未満と少ないため，本稿のネットワークでは考慮しない．また，2014 年に本輪西-札幌貨物ターミナル間を結んでいた道内唯一の石油タンク貨物列車が廃止されて以来，道内の貨物列車はコンテナ貨物のみになったため，道内の港のうちコンテナを取り扱う函館港，室蘭港，苫小牧港，釧路港と，国内フェリー定期便が運航されている小樽港のみを本稿では考慮する．本研究では鉄道，海上輸送，トラック輸送を考慮した道内ネットワーク（**図-2**）を作成した．起点は道内各貨物駅とし，

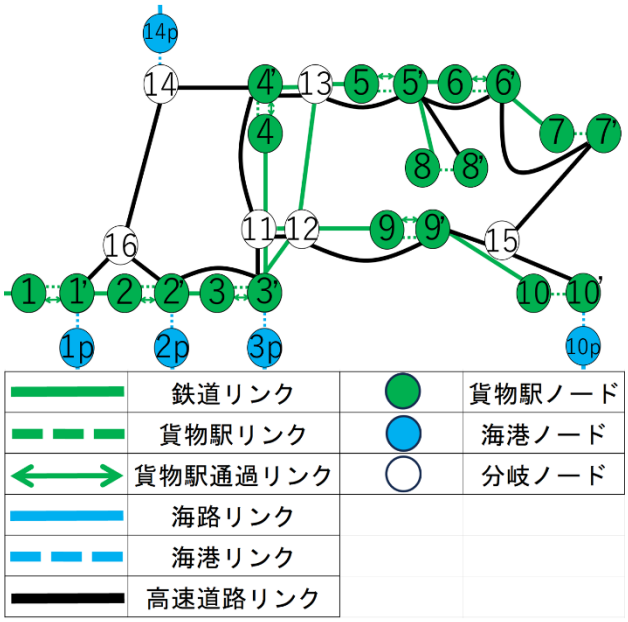


図-2　マルチモーダルネットワーク

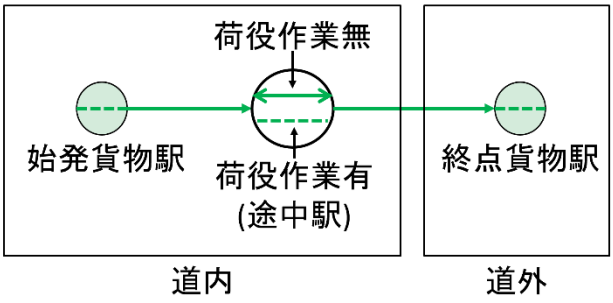


図-3　貨物駅の仕組み

表-1　ノード一覧

No	ノード名	No	ノード名
1，1’	函館駅	1p	函館港
2，2’	東室蘭駅	2p	室蘭港
3，3’	苫小牧駅	3p	苫小牧港
4，4’	札幌駅		
5，5’	滝川駅		
6，6’	北旭川駅		
7，7’	北見駅		
8，8’	富良野駅		
9，9’	帯広駅		
10，10’	釧路駅	10p	釧路港
11	千歳		
12	追分		
13	岩見沢		
14	小樽	14p	小樽港
15	本別		
16	黒松内		

道外の 1 点を終点とする（八戸，仙台など道外の終点は区別しない）**表-1** はノード番号と場所の対応表である．貨物駅リンク 5 本と海港リンク 5 本はボトルネックリンクとし，それぞれ待ち行列が発生する．各貨物駅ノードで経由するリンクについては**図-3** に示す．貨物駅ノードでは，荷役作業を行う時のみ待ち行列が発生するため，ボトルネックリンクの貨物駅リンクを経由し，荷役作業がない場合は待ち行列は発生しないため，貨物駅通過リンクを経由する．始発駅では必ず荷役作業が発生するため貨物駅リンクを経由する．ボトルネックリンクである

表-2　リンクと待ち時間の関係

リンクの中身	輸送に掛かる時間	容量制約
鉄道 海路 高速道路	一定 (容量超えると待ちが発生)	あり
貨物駅 海港	フローに依存	なし

貨物駅リンクと海港リンクは，荷役作業などの施設内作業を表す仮想的なリンクである．分岐ノードはリンクの結節点のため便宜上設定したノードである．高速道路リンクを除く計 42 のリンクにはそれぞれ容量制約があり，そのうち鉄道リンク計 15 本，海路リンク 5 本は，リンクフローが容量と等しくなった場合遅延が発生する．各リンクと待ち時間の関係は**表-2** に示した通りである．これら待ち行列と容量制約を含んだネットワークで配分を考えていく．

⑵ 計算結果

今回は国交省の貨物地域流動調査 [9]，湾港関係統計データの湾港取扱貨物量ランキング [10]，湾港別コンテナ取扱量ランキング [11]を基に，道内各貨物駅からの道外移出コンテナ量を求めた．鉄道輸送によるコンテナ移出量は，国土交通省による貨物地域流動調査 [9]を基に算出した（**表-3**）．北海道内の鉄道貨物は全てコンテナ列車で運行されているため，鉄道による総移出量を全て TEU に変換した．貨物地域流動調査 [9]には滝川，富良野，苫小牧発のデータが含まれていなかったため，まず元データの各出発地の貨物駅ノードに半分を振り分け，残りを元データの出発地からの距離の逆数の比によって振り分けた．海上輸送の内，コンテナ船によるコンテナ移出量は，国土交通省の湾港別コンテナ取扱量 (TEU) ランキング [10]を基に，フェリーによるコンテナ移出量は，国土交通省の湾港取扱貨物量ランキング [11]を基に算出した（**表-4**）．移出量は総量の半分と仮定し，フェリーで扱う貨物は全てコンテナとする．海上輸送によるコンテナ移出量も上述の鉄道輸送と同様に，元データの各出発港と同じ地域の貨物駅ノードに半分を振り分け，残りを元データの出

発地からの距離の逆数の比によって振り分けた．小樽には貨物駅ノードはないと仮定している（実際には札幌ー小樽築港 ORS 間でトラック代行便は運行されている）ため，小樽港の取扱量全体を距離の逆数の比によって各貨物駅ノードに振り分けた（**表-5**）．また，**表 3-5** のデータに基づく鉄道輸送と海上輸送の分担率，また海上輸送を選択する場合の各海港の選択率は**図-4**，**図-5** のようになった．

シミュレーションの結果，鉄道輸送と海上輸送の分担率，また海上輸送を選択する場合の各海港の選択率は**図-6**，**図-7** となった．この結果は各リンクの容量に依る．一般的に海上輸送の方が鉄道輸送よりも一度の輸送量が大きいため，海上輸送の容量を鉄道よりも大きく設定した．また，**表-4** で求めた各海港の移出量の大小を基に，

表-3　鉄道輸送 OD 表（振り分け後）

		TEU
発	北見	28, 516
	北旭川	28, 238
	富良野	13, 312
	滝川	16, 961
	札幌	48, 626
	釧路	14, 520
	帯広	30, 865
	苫小牧	21, 253
	室蘭	21, 267
	函館	13, 224

表-4　各海港の移出量（合計）

		コンテナ船	フェリー	合計
発	苫小牧港	53, 913	3, 328, 800	3, 382, 713
	釧路港	4, 751	0	4, 751
	函館港	2, 505	1, 309, 200	1, 311, 705
	室蘭港	1, 389	48, 600	49, 989
	小樽港	0	665, 400	665, 400
	全港	62, 557	5, 352, 000	5, 414, 557

表-5　海上輸送 OD 表（振り分け後）

		TEU
発	北見	140, 508
	北旭川	204, 395
	富良野	280, 743
	滝川	274, 884
	札幌	812, 448
	釧路	156, 884
	帯広	229, 822
	苫小牧	1, 895, 191
	室蘭	617, 119
	函館	802, 562

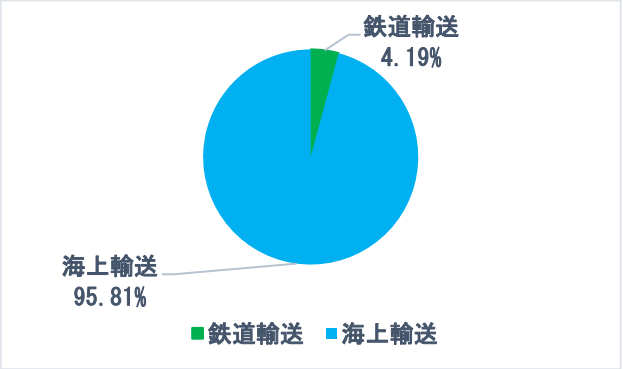


図-4　実データに基づくコンテナ輸送における鉄道輸送と海上輸送の分担率

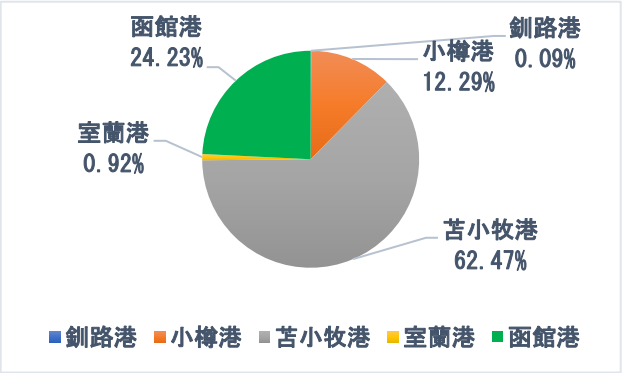


図-5　実データに基づく海港の選択率

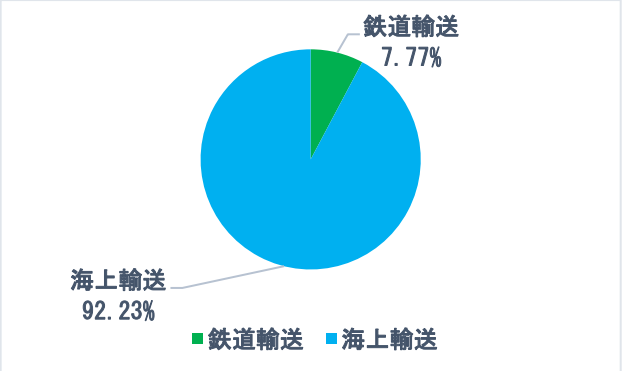


図-6　シミュレーションに基づくコンテナ輸送における鉄道輸送と海上輸送の分担率

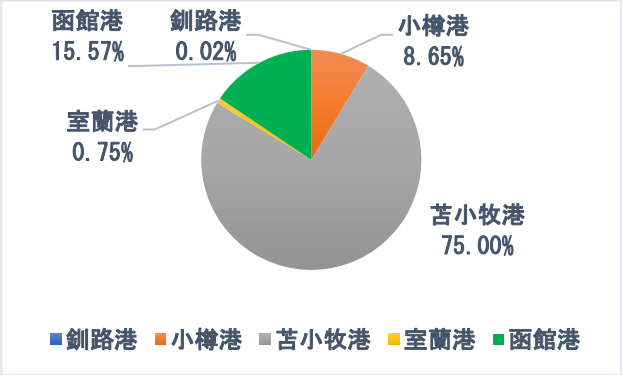


図-7　シミュレーションに基づく海港の選択率

表-6　各リンクの容量制約

リンク	容量(TEU/時)
鉄道	50
海路	1000
貨物駅	10
函館港	150
室蘭港	20
苫小牧港	180
小樽港	40
釧路港	15

各海港の容量を設定した（表-6）．経路選択の主な要素はコストと時間だが，各リンクの待ち時間や遅延は容量に大きく依存する．そのため，容量が大きい海港を経由する経路が選択されたと考えられる．

4.　まとめと今後の展望

本研究では，荷役作業によって発生する待ち行列と容量制約によって発生する遅延を含んだ貨物配分モデルを提案した．一般化輸送コストに待ち行列と容量制約による遅延も加えることにより，各リンクの混雑を考慮した経路選択がされることが可能となった．数値計算では，鉄道と船のモード選択に着目し，北海道内のコンテナ貨物を想定した，鉄道，海港，高速道路を含んだネットワーク上で検証を行った．単純なリンクの輸送時間や輸送費用のみに依らず，上記の通り混雑も考慮することにより，鉄道輸送と海上輸送の異なる輸送特性をより明確に表すことができた．本研究では，正確な OD データが得られなかったため，数値計算において推測や仮定の下で入力データを求めている箇所が多く，政策分析を行うためには，豊富な観測に基づく入力データの精緻化が必要である．より精度の高い配分モデル作成のため，物流センサスを基に，北海道－本州間を輸送する荷主の経路選択の特性を抽出し，各パラメータに反映させることが今後の課題として挙げられる．

参考文献

1) 北海道運輸局：数字で見る北海道の運輸 機関別貨物輸送量の推移，https://wwwtb.mlit.go.jp/hokkaido/content/000275792.pdf，(閲覧日 2022.10.20).
2) 総務省統計局：第 13 章運輸観光 輸送機関別輸送量，https://www.stat.go.jp/data/nihon/13.html，(閲覧日 2022.10.20).
3) 国土交通省：第 3 回今後の鉄道物流のあり方に関する検討会ホクレン農協連資料，https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001485830.pdf，(閲覧日 2022.10.7).
4) 日本ロジスティクスシステム協会：ロジスティクスコンセプト 2030，https://www.mlit.go.jp/jidosha/content/001334732.pdf，(閲覧日 2023.10.8)
5) 東洋経済 ONLINE：北海道新幹線 vs JR 貨物「青函共用問題」の核心，https://toyokeizai.net/articles/-/351128?page=3，(閲覧日 2022.11.10).
6) Xinyan Li, Chi Xie, Zhaoyao Bao：A multimodal multi-commodity network equilibrium model with service capacity and bottleneck congestion for China-Europe containerized freight flows：Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review, Volume 164, 102786, 2022.
7) Joseph Y.J. Chow, Stephen G. Ritchie, Kyungsoo Jeong：Nonlinear inverse optimization for parameter estimation of commodity-vehicle-decoupled freight assignment：Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review, Volume 67, Pages 71-91, 2014
8) Michel Beuthe, Bart Jourquin, Jean-François Geerts, Christian Koul à Ndjang' Ha：Freight transportation demand elasticities: a geographic multimodal transportation network analysis：Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review, Volume 37, Pages 253-266, 2001
9) 国土交通省：貨物旅客地域流動調査 https://www.mlit.go.jp/k-toukei/kamoturyokakutiikiryuudoutyousa.html，(閲覧日 2022.10.30).
10) 国土交通省：港湾関係情報・データ 港湾取扱貨物量ランキング https://www.mlit.go.jp/statistics/details/content/001517674.pdf，(閲覧日 2023.1.10).
11) 国土交通省：港湾関係情報・データ 港湾別コンテナ取扱貨物量(TEU)ランキング https://www.mlit.go.jp/statistics/details/content/001517676.pdf，(閲覧日 2023.1.10).

(? 受付)

A STUDY ON A MULTI-MODAL MULTI-COMMODITY FREIGHT ASSIGNMENT MODEL FOR HOKKAIDO-HONSHU FREIGHT NETWORK

Taro KURAMOTO, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

An assignment model for containerized freight transport between Hokkaido and Honshu is developed for use in determining policies for freight railways within Hokkaido after the extension of the Hokkaido Shinkansen to Sapporo. The model represents the characteristics of each transportation method by taking into account capacity constraints of railways and ships, and congestion that occurs at freight stations, seaports, and other locations where freight is handled. Generalized transportation costs are expressed as add flow-independent costs to the product of waiting time, which depends on freight flow, and the time value of goods. Based on this, the shipper's route choice probability is expressed in a logit model, and the freight assignment problem is formulated as a capacity-constrained multiclass multimodal stochastic user equilibrium assignment model. The optimization problem is reformulated as a problem of mitigating delays caused by capacity constraints expressed in terms of Lagrange multipliers, and is numerically computed using an algorithm that combines the sequential average method and the subgradient method.