

# 北海道一本州間の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

A study on a multi-modal traffic assignment model for freight flows

北海道大学工学部 ○学生員 蔵本太郎 (Taro Kuramoto)  
 北海道大学大学院工学院 学生員 佐藤佑樹 (Yuki Sato)  
 北海道大学大学院工学研究院 正員 峪龍一 (Ryuichi Tani)  
 北海道大学大学院工学研究院 正員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

## 1. はじめに

北海道運輸局<sup>1)</sup>によると、北海道一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)。鉄道が占める割合は約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<sup>2)</sup>であることを考慮すると、鉄道が北海道一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<sup>3)</sup>。

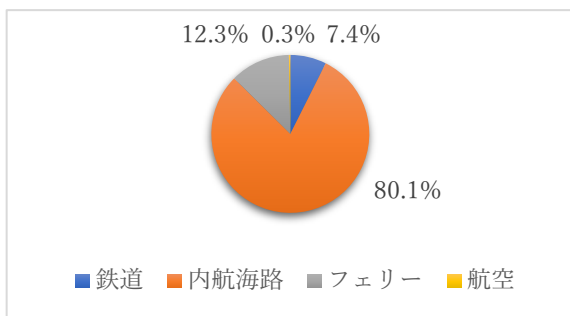


図-1 北海道一本州間機関別輸送量の割合

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既に減少傾向にあるが、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。

しかし並行在来線問題により、北海道一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。当区間は北海道一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<sup>4)</sup>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、本研究では貨物列車の輸送量を変数として、輸送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.<sup>5)</sup>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均衡モデルを北海道一本州間にも適用させる。

## 2. 記号

本稿で用いる主な記号を示す。

$p$	海港
$e$	貨物駅
$s$	海路
$r$	鉄道
$r_1$	単線
$r_2$	複線
$r_3$	単線複線混合
$r_t$	青函トンネル
$h$	高速道路
$i$	定期船路線
$j$	鉄道路線
$A$	各リンクの集合
$x$	各リンクのコンテナフロー
$x^0$	北海道から本州以外へのフロー

- $t$  各輸送時間 ( $s, r, r_1, r_2, r_3, r_t, h$ )
- $t$  各待ち時間 ( $p, e$ )
- $\delta_{l,k}$  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
- $u$  各輸送容量
- $L$  各路線の集合
- $v^m$  商品カテゴリ  $m$  の時間価値
- $c^m$  各リンクの利用コスト
- $g_k^m$  パス  $k$  上の商品カテゴリ  $m$  の一般化輸送コスト
- $f_k^m$  パス  $k$  上の商品カテゴリ  $m$  の輸送量
- $q_{od}^m$  O-D ペア間の商品カテゴリ  $m$  の需要量
- $\theta_m$  商品カテゴリ  $m$  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
- $P_0$  待ち行列に車両がない確率
- $s$  コンテナバース、荷役ホームの数
- $\lambda$  車両の到着率
- $\mu$  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
- $\rho$  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

- 貨物駅と海港は同じ地点に存在する。
- 貨物駅ノード(ダッシュ'が振られている方のノード)でトラック輸送と鉄道輸送、トラック輸送と海上輸送のモードチェンジが行われる。

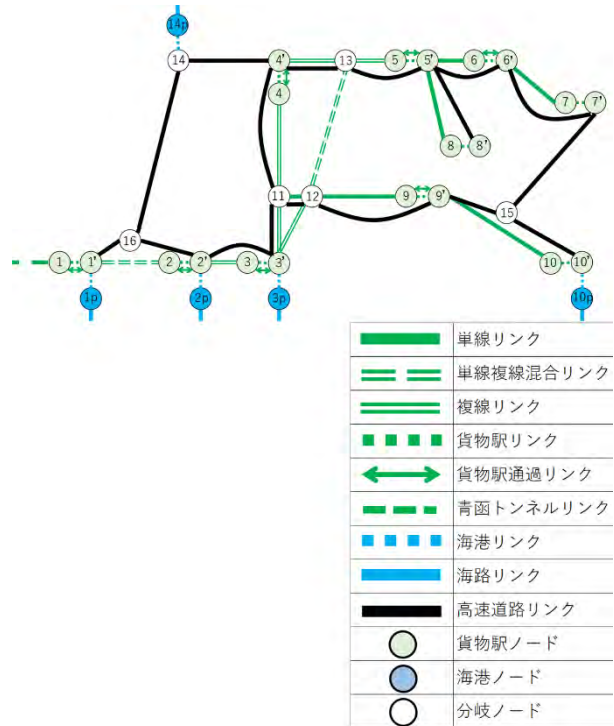


図-2 マルチモーダルネットワーク

表-1 ノード名一覧

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, 11'	千歳		
12, 12'	追分		
13, 13'	岩見沢		
14, 14'	小樽	14p	小樽港
15, 15'	本別		
16, 16'	長万部		

それぞれの文字の組み合わせにより表す場合もある。例えば海港リンクの集合であれば  $A_p$ 、定期船路線の輸送容量であれば  $u_i$  のように表す。

### 3. ネットワーク

鉄道、海上輸送、トラック輸送を考慮したネットワーク(図-2)を作成した。表-1 はノード番号と場所の対応表である。本州-北海道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、函館港のみを本稿では考慮する。その他、本稿で取り扱うネットワークでは以下を仮定する。

- 道路ネットワークは全て高速道路とし、図-2 のネットワークを構成すると仮定する。未開通区間(余市~長万部、北見~本別)や国道(富良野~滝川)も高速道路として仮定する。
- ORS(オフレイルステーション)と貨物駅間のトラックによる代替輸送は考慮しない。
- 鉄道と海路はそれぞれ独立であり、両方を経由するパスは無い。
- 高速道路リンクと海路リンクを經由する場合、出発地から最も近い海港を利用する。
- 高速道路リンクと鉄道リンクを經由する場合、出発地から最も近い貨物駅から鉄道を利用する。

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經由し、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經由するものとする。始発駅では必ず貨物駅リンクを經由するものとする。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。ボトルネックリンクである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。

## 4. 定式化

### 4.1 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。

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

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (2)$$

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

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

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} \quad (5)$$

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ない確率、式(5)は平均利用率を表している。これらを式(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。

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

4.3 節で扱う均衡モデルに組み込むため、式(6)を多項式で近似する。Li et al.<sup>5)</sup>は、海港リンクでの待ち時間  $t_p$  と貨物駅での待ち時間  $t_e$  は以下のように近似した。

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

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

### 4.2 輸送コストの一般化

一般化輸送コストは 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と、その商品が持つ時間価値と輸送時間の積の和によって求める。荷主はこれらのコストが最小になるパス  $k$  を選択するものとする。Li et al.<sup>5)</sup>よりパス  $k$  を通過する商品カテゴリー  $m$  の 1TEU あたりの輸送コストは以下のように計算される。

$$g_k^m = \sum_{r_1 \in A_r} \delta_{r_1,k} (v^m t_{r_1} + c_{r_1}^m) + \sum_{r_2 \in A_r} \delta_{r_2,k} (v^m t_{r_2} + c_{r_2}^m) + \sum_{r_3 \in A_r} \delta_{r_3,k} (v^m t_{r_3} + c_{r_3}^m) + \sum_{r_t \in A_r} \delta_{r_t,k} (v^m t_{r_t} + c_{r_t}^m) + \sum_{s \in A_s} \delta_{s,k} (v^m t_s + c_s^m) + \sum_{h \in A_h} \delta_{h,k} (v^m t_h + c_h^m)$$

$$+ \sum_{a \in A_p \cup A_e} \delta_{a,k} v^m t_a(x_a) + \sum_{s \in A_s} \delta_{s,k} v^m \mu_s + \sum_{r \in A_r} \delta_{r,k} v^m \mu_r \quad (9)$$

第1項から第4項までが鉄道リンク(単線リンク、複線リンク、単線複線混合リンク、青函トンネルリンク)、第5項が海路リンク、第6項が高速道路リンクの輸送コストである。第1項から第6項まではパスフローのパターンに依存しない。第7項がボトルネックリンク(貨物駅リンク、海港リンク)上で発生する遅延コストである。第8項と第9項がコンテナ船とコンテナ貨物列車それぞれの容量制約のラグランジュ乗数に対応する遅延コストである。任意の海路リンク、鉄道リンク上のフローが、貨物船路線、貨物列車路線の容量に達した時、遅延コストが発生する。これは以下のラグランジュ乗数の条件式によって示される。

$$\begin{aligned} \mu_a &= 0 \text{ if } x_a < \sum_{l \in L_s \cup L_r} \delta_{a,l} u_l \\ \mu_a &\geq 0 \text{ if } x_a = \sum_{l \in L_s \cup L_r} \delta_{a,l} u_l \\ \forall a &\in A_s \cup A_r, l \in L_s \cup L_r \end{aligned} \quad (10)$$

### 4.3 均衡モデル

荷主が認知する輸送コストは 4.2 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、パス選択確率は式(11)のように求まる。

$$p_k^m = \frac{\exp(-\theta_m g_k^m)}{\sum_{k \in K_{od}} \exp(-\theta_m g_k^m)} \quad (11)$$

続いて Li et al.<sup>5)</sup>で開発された均衡モデルを基に、以下の均衡モデルを立式する。

$$\begin{aligned} \min \quad Z(f) &= \sum_{a \in A_p \cup A_e} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \\ &+ \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K_{od}} f_k^m \left( \begin{aligned} &\left( \sum_{r_1 \in A_r} \delta_{r_1,k} \left( t_{r_1} + \frac{c_{r_1}^m}{v^m} \right) \right. \\ &+ \sum_{r_2 \in A_r} \delta_{r_2,k} \left( t_{r_2} + \frac{c_{r_2}^m}{v^m} \right) \\ &+ \sum_{r_3 \in A_r} \delta_{r_3,k} \left( t_{r_3} + \frac{c_{r_3}^m}{v^m} \right) \\ &+ \sum_{r_t \in A_r} \delta_{r_t,k} \left( t_{r_t} + \frac{c_{r_t}^m}{v^m} \right) \\ &+ \sum_{s \in A_s} \delta_{s,k} \left( t_s + \frac{c_s^m}{v^m} \right) \\ &\left. + \sum_{h \in A_h} \delta_{h,k} \left( t_h + \frac{c_h^m}{v^m} \right) \right) \\ &+ \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K_{od}} \frac{1}{\theta_m v^m} f_k^m \ln(f_k^m) \end{aligned} \right) \quad (12) \end{aligned}$$

subject to

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

$$x_s \leq \sum_{i \in L_s} \delta_{s,i} u_i \quad \forall s \in A_s \quad (14)$$

$$x_r \leq \sum_{j \in L_r} \delta_{r,j} u_j \quad \forall r \in A_r \quad (15)$$

$$\begin{aligned} x_p, x_e, x_s, x_r, x_{r_1}, x_{r_2}, x_{r_3}, x_{r_t}, f_k^m &\geq 0 \\ \forall p \in A_p, e \in A_e, s \in A_s, r \in A_r, r_1 \in A_{r_1}, r_2 \in A_{r_2}, \\ r_t \in A_{r_t}, k \in K_{od}, o \in O, d \in D, m \in M &\quad (16) \end{aligned}$$

where

$$x_a = \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K_{od}} \delta_{a,k} f_k^m \quad \forall a \in A_p \cup A_e \quad (17)$$

$$x_s = \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K_{od}} \delta_{s,k} f_k^m \quad \forall s \in A_s \quad (18)$$

$$x_r = \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K_{od}} \delta_{r,k} f_k^m \quad \forall r \in A_r \quad (19)$$

$$x_{r_1} = \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K_{od}} \delta_{r_1,k} f_k^m \quad \forall r_1 \in A_{r_1} \quad (20)$$

$$x_{r_2} = \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K_{od}} \delta_{r_2,k} f_k^m \quad \forall r_2 \in A_{r_2} \quad (21)$$

$$x_{r_3} = \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K_{od}} \delta_{r_3,k} f_k^m \quad \forall r_3 \in A_{r_3} \quad (22)$$

$$x_{r_t} = \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K_{od}} \delta_{r_t,k} f_k^m \quad \forall r_t \in A_{r_t} \quad (23)$$

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項がパスフローに依存しない一般化輸送時間の合計、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)、(15)はそれぞれ貨物船路線と貨物列車路線の輸送容量制約、式(16)はリンクとパスのフローに関する非負条件を表している。式(17)-(23)は、リンクフローとパス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  $L(\mathbf{f}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$  (24)を定義する。

$$\begin{aligned} L(\mathbf{f}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = & Z(f) + \sum_{m \in M} \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \lambda_{od}^m \left( q_{od}^m - \sum_{k \in K_{od}} f_k^m \right) \\ & + \sum_{s \in A_s} \mu_s \left( x_s - \sum_{i \in L_s} \delta_{s,i} u_i \right) + \sum_{r \in A_r} \mu_r \left( x_r - \sum_{j \in L_r} \delta_{r,j} u_j \right) \quad (24) \end{aligned}$$

式(25)に関するKKT条件より、以下の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(\mathbf{f}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})}{\partial f_k^m} = & \sum_{a \in A_p \cup A_e} \delta_{a,k} t_a(x_a) \\ & + \sum_{r_1 \in A_r} \delta_{r_1,k} \left( t_{r_1} + \frac{c_{r_1}^m}{v^m} \right) + \sum_{r_2 \in A_r} \delta_{r_2,k} \left( t_{r_2} + \frac{c_{r_2}^m}{v^m} \right) \\ & + \sum_{r_3 \in A_r} \delta_{r_3,k} \left( t_{r_3} + \frac{c_{r_3}^m}{v^m} \right) + \sum_{r_t \in A_r} \delta_{r_t,k} \left( t_{r_t} + \frac{c_{r_t}^m}{v^m} \right) \\ & + \sum_{s \in A_s} \delta_{s,k} \left( t_s + \frac{c_s^m}{v^m} \right) + \sum_{h \in A_h} \delta_{h,k} \left( t_h + \frac{c_h^m}{v^m} \right) \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{\theta_m v^m} [\ln(f_k^m) + 1] + \lambda_{od}^m + \sum_{s \in A_s} \delta_{s,k} \mu_s + \sum_{r \in A_r} \delta_{r,k} \mu_r = 0 \quad (25)$$

これを  $f_k^m$  について解くと、式(26)が得られる。

$$f_k^m(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \exp(-\theta_m g_k^m - \theta_m v^m \lambda_{od}^m - 1) \quad (26)$$

式(13)と(26)より経路の選択確率は式(27)で与えられる。

$$p_k^m = \frac{f_k^m(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})}{q_{od}^m} = \frac{\exp(-\theta_m g_k^m - \theta_m v^m \lambda_{od}^m - 1)}{\sum_{k \in K_{od}} \exp(-\theta_m g_k^m - \theta_m v^m \lambda_{od}^m - 1)} \quad (27)$$

以上から最適化問題が式(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。

## 6 本研究のまとめと今後について

本研究では北海道内のマルチモーダルネットワークを作成し、先行研究<sup>5)</sup>で開発された均衡モデルを北海道一本州間に適用させた。拡張性を持たせるため、本研究では鉄道リンクを更に単線、複線、単線複線混合、青函トンネルリンクと細分化した。これらのリンクを活用した今後の方向性としては以下の2つである。

1. 各鉄道リンクに制約を設け、貨物列車の本数を変数とした機関分担モデルの定式化
2. 貨物列車と青函トンネルリンクを共用する新幹線と航空機の旅客輸送の機関分担モデルを定式化し、貨物列車の運行本数が旅客輸送に与える影響を数値化

## 7 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://www.tb.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) 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) .
- 5) Xinyan Li, Chi Xie, Zhaoyao Bao: A multimodal multicommodity 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.