

鉄道貨物輸送における経路探索モデル構築とその適用に関する研究*

Building an Alternative Path-Searching Model for Rail Freight Transportation and Practical Application*

日野 智**・岸 滋***・岸 邦宏****・浅見 均*****・佐藤 馨一*****
By Satoru HINO**・Shigeru KISHI***・Kunihiro KISHI****・Hitoshi ASAMI*****・Keiichi SATOH*****

1. はじめに

近年、北海道と本州間の鉄道輸送網において、災害や事故に伴う不通事故が相次いで発生している。例えば、2000(平成12)年3月末に有珠山噴火災害、同年12月にはJR津軽海峡線津軽今別駅における貨物列車脱線事故が発生している(図1)。それ以外にも、大雨や大雪などの異常気象によってJR東北本線と函館本線における不通が発生している。

このような鉄道不通は旅客輸送だけではなく、貨物輸送にも大きな影響を及ぼしている。北海道と本州間の物流において、鉄道貨物輸送の占める分担率(輸送トン数)は10%程度で推移している。しかし、北海道の主要な産品である農水産物や生活に関連した雑貨品の輸送に大きな役割を果たしている。そのため、鉄道輸送ネットワーク上の災害・事故がもたらす輸送障害とそれが社会・経済に与える影響は深刻なものといえる。

災害や事故に対応し、JR貨物も輸送経路を変更し、影響が最小限となるように努めてきた。しかし、北海道は地理的条件から代替輸送経路が限定され、通常時と同様の輸送力を確保することは困難である。さらに、トラックや船舶などの代替機関による輸送は所要時間を増加させ、速達性という鉄道貨物輸送の長所を喪失させている。このため、鉄道輸送のシェアが高い農水産品では荷主の望む時間に間に合わない、商品として市場に出すことができない等の問題点が生じている。すなわち、代替輸送経路には輸送力の確保とともに所要時間の短縮が求められている。

本研究は鉄道貨物輸送の不通時における代替経路を探索するモデルを構築したものである。さらに、構築したモデルを津軽海峡線貨物列車脱線事故と有珠山噴火災害に適用し、その有効性を検証するとともに、鉄道貨物輸

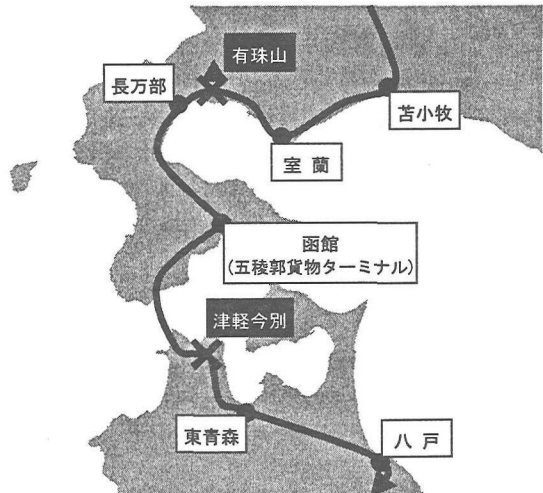


図1 鉄道貨物輸送における災害・事故関連地図
送における代替輸送方策について考察・評価することを目的としている。

これまでにも、南ら¹⁾や堀井²⁾は道路の代替性評価に関する研究を行っている。また、中川ら³⁾は信頼性から交通ネットワークを評価し、計算コストの削減を図る手法を提案している。しかし、これらの研究は道路交通を対象としたものである。例えば、高橋ら⁴⁾は被災地域への緊急車両の移動や物資流通のための最適経路探索をDijkstra法によって行っている。また、計算手法の改良等については相浦ら⁵⁾による研究などが存在している。本研究は鉄道貨物輸送をその対象としている。物資輸送の代替性に着目した研究事例は少ないのが現状であり、鉄道貨物を対象としたものはない。本研究で用いたDijkstra法は広く用いられているアルゴリズムであるが、構築したモデルは輸送機関の運行時刻を考慮していることが特徴である。運行時刻を考慮しているために経路だけではなく、利用される便も特定される。そのことが輸送力を反映させた代替経路探索を可能としている。

2. 代替経路探索モデルの構築

(1) Dijkstra法による代替経路の探索

本研究では鉄道貨物輸送における代替経路を探索するモデルを構築した。モデルにはネットワーク上のある始点ノードから各ノードへの最短抵抗を求めるDijkstra(ダ

*キーワード：物資流動、鉄道計画、経路選択、リダンダンシー

**正会員、博(工)、北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻(札幌市北区北13条西8丁目、TEL 011-706-6216、FAX 011-706-6216)

***正会員、修(工)、東日本旅客鉄道株式会社新潟支社(新潟市花園1丁目1-1、TEL 025-248-5106)

****正会員、博(工)、北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻(札幌市北区北13条西8丁目、TEL 011-706-6216、FAX 011-706-6216)

*****正会員、工 修、日本鉄道建設公団北陸新幹線建設局(長野市大字中御所字岡田45-1、TEL 026-223-9638、FAX 026-223-9681)

フェロー、工 博、北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻(札幌市北区北13条西8丁目、TEL 011-706-6209、FAX 011-706-6216)

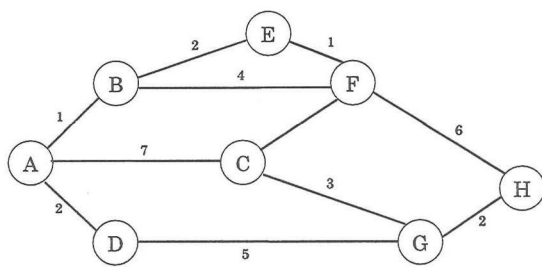


図2 Dijkstra法におけるネットワークの概念図

イクストラ法を用いた。Dijkstra法はネットワーク上のあるノードの周辺から各ノードへの最短経路を確定し、徐々に範囲を広げて全てのノードへの最短経路を求めるアルゴリズムである⁶⁾。以下に、Dijkstra法による最短経路探索の手順を示す(図2)。

- Step1. 始点(ノード A)に接続される全てのリンクを抽出し、それを抽出リンクとする
- Step2. 抽出リンクで抵抗最小となる経路A→Bがノード B までの最短経路として確定される
- Step3. ノード B に接続される全てのリンクを抽出リンクに追加し、抽出リンクで抵抗最小となる経路A→Dをノード D までの最短経路として確定する
- Step4. ノード D に接続される全リンクを抽出リンクに追加し、抽出リンクで抵抗最小となる経路A→B→Eをノード E までの最短経路として確定する
- Step5. 以降、全てのノードについて最短経路が確定するまで順次繰り返す

本研究では交通抵抗を所要時間とし、それを最短とする経路を代替経路と定義する。すなわち、鉄道貨物輸送の長所は速達性であり、輸送時間を最短とする経路は事故や災害に伴う鉄道不通がもたらす影響を軽減させる上で望ましいものと考えられる。さらに、事故・災害発生時に輸送事業者は費用等の要因よりも輸送時間を重視した代替輸送を行っている。

(2) 運行時刻を考慮した経路探索モデルの構築

鉄道貨物輸送に対する代替輸送機関はトラックだけではなく、船舶やフェリー、航空等が考えられる。そのため、代替経路の選択は輸送機関の運行時刻や頻度の影響を受ける。本研究で構築したモデルは時刻の要素を組み入れることで輸送機関の運行時刻を考慮することとした。

基準時刻と対象列車の時刻・位置情報、輸送機関の各ノードからの発着時刻をモデルに入力することで、各代替機関との接続時に発生する待ち時間が求められる。それらによって全てのリンク間の所要時間を確定させ、Dijkstra法による最短経路探索から対象列車の代替経路を求める。

すなわち、基準時刻($t=0$)の設定から最も近い時間である便の出発時刻の基準時刻からの経過時間を確定し、以

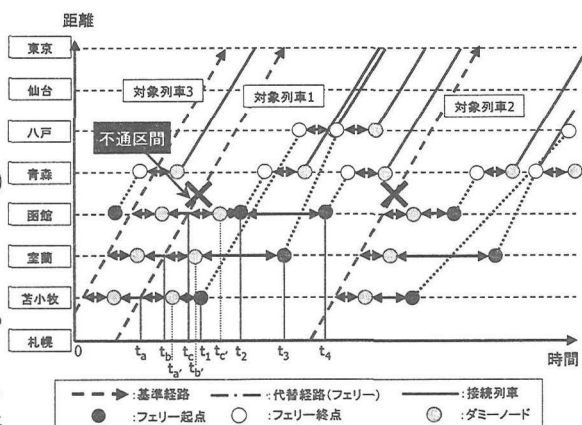


図3 ダイアグラムによる代替経路探索の表現

後の時間帯の便については前便の出発時刻との時間間隔を確定する。対象列車の現在地と出発時刻から、利用可能であるフェリー航路等の起点での待ち時間が確定する。

図3における対象列車1を例とすると、基準時刻の設定から列車の各フェリーターミナル近郊の駅への到着時刻が t_a, t_b, t_c と確定される。本研究では、異なる輸送機関間をダミーノードで接続させ、積み替え等に必要とされる時間を表現している。基本モデルではこれらの時間を考慮した上で、輸送機関の利用可否を判断している。すなわち、対象列車のフェリー航路を利用可能となる時刻が t_a, t_b, t_c と確定され、この時刻以降に出航するフェリーが利用可能な経路となる。フェリー出発時刻の基準時刻に対する経過時間は t_1, t_2, t_3 として求められ、接続に伴う待ち時間は $t_1-t_a, t_2-t_b, t_3-t_c$ として求められる。また、同一航路の次便に対する待ち時間は出発時刻の間隔 t_4-t_3 から求められ、 t_4-t_c となる。

これらの待ち時間をダミーノード間のリンク所要時間として、最短経路探索を行う。このようなプロセスによって、運行頻度の多さや運行時刻の設定から代替経路を探索・評価することができる。本研究では列車毎に代替経路を探索するこのモデルを代替経路探索基本モデル(以下、基本モデル)と称する。

(3) 輸送力を考慮した経路探索モデルの構築

代替経路は輸送機関の運行時刻とともに、各輸送機関の輸送力によっても制限を受ける。本研究では基本モデルによる経路探索後に代替機関の輸送力を確認し、その機関による輸送が不可能または貨物の一部のみが輸送可能な場合、そのリンクを除いたネットワークで再度、代替経路を探索する。具体的には、以下の手順で各列車の代替輸送経路を確定させる。

- Step1. 全対象列車について、基本モデルによる代替経路の探索を行う
- Step2. 複数の対象列車が代替経路とした代替輸送機関

について、出発時間が早い対象列車をその輸送機関を利用できる列車として確定する

Step3. 列車の確定によって、余需輸送力が0となった代替輸送機関をネットワークから除外する

Step4. 代替経路が確定していない対象列車について、基本モデルによって再度代替経路を探索する

Step5. 以降、全ての対象列車の代替経路が確定するまで経路探索を繰り返し、代替経路を決定する

図3において、対象列車1・3の基本モデルによる代替経路として t_2 に出航するフェリー航路が選択された場合を例とする。該当する便が一方の貨物のみを輸送可能である場合、出発時間が早い対象列車3をその航路を利用する列車として確定する。その後、 t_2 に出航するフェリーをネットワークから除外し、再度、経路探索を行う。すなわち、基本モデルによる列車毎の代替経路探索を繰り返すことで輸送力を考慮した代替経路を求める手法がこのプロセスである(図4)。本研究ではこれを代替経路探索の拡張モデル(以下、拡張モデル)と称する。

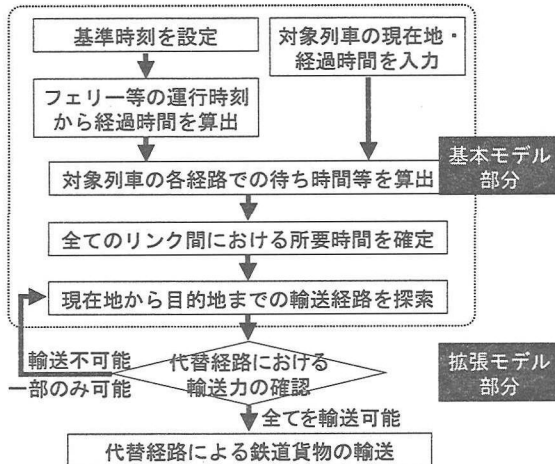


図4 本研究における代替経路探索モデルのフロー

本研究ではフェリー航路を代替輸送機関とし、輸送力の制約が存在するものとした。そして、フェリーの出発地が同一港湾である場合、すなわち、苫小牧→八戸・大洗などの複数航路に経路探索対象列車の貨物を分割して輸送することが可能なものと仮定している。そのため、経路探索手順のStep1.において、全ての対象列車の代替経路を探索している。

代替経路探索の基本モデルと拡張モデルは分離したプロセスとなっており、基本モデルのみによる代替経路の探索も可能である。各輸送機関における輸送量は日・便毎に異なるため、事故・災害時においては拡張モデルに必要な情報が全て得られないことが考えられる。そのような場合においても、基本モデルによる経路探索結果は代替輸送方策に対する判断・決定を支援可能なものといえる。

3. 代替経路探索モデル適用における仮定条件

(1) 基本モデル適用時の仮定条件

本研究では、トラックやフェリー、船舶代行輸送を鉄道貨物輸送の代替輸送機関とした。航空輸送は輸送力や費用の点から代替輸送機関としては非現実的と考えられるため、除外している。現状の貨物列車の運行本数や貨物輸送量を考慮し、札幌～東京・大阪間における貨物輸送ネットワークを設定した(図5)。貨物列車の所要時間は、JR貨物時刻表⁷⁾からリンク間の所要時間を算出した。列車によって所要時間は異なるため、利用率が高い列車を代表的なものと考えてリンク間の所要時間を求めている。フェリーの所要時間についても時刻表⁸⁾から、トラックについてはリンク間距離から所要時間を求めている。

鉄道とトラック間の貨物の積み替えには30分、フェリーや船舶代行輸送の利用には乗船前に90分の時間が必要と仮定している。ネットワークにおいて、異なる輸送機関間はダミーノードで接続させている。そして、その間のリンクに与える交通抵抗で積み替え等に必要なとされる時間を表現している。

船舶代行輸送や各フェリー航路に接続する貨物列車は現状の列車ダイヤから運行時刻を設定している。すなわち、本研究はこれらの各便に接続列車が存在することを仮定したものである。

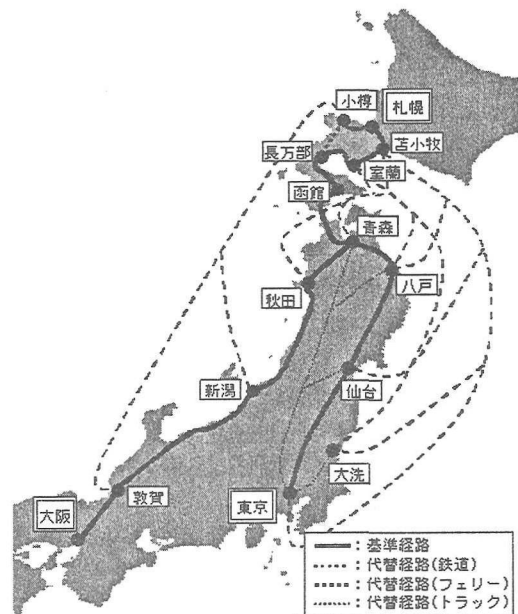


図5 本研究における基本対象ネットワーク

(2) 拡張モデル適用時の仮定条件

拡張モデルによる輸送力を考慮した代替経路探索には、対象列車の輸送量、すなわち、代替輸送に対する需要量と代替輸送機関の余剰輸送力に関する情報が必要とされ

表1 フェリー航路のトラック輸送能力と輸送実績⁹⁾

	トラック最大 輸送能力	トラック 輸送台数	トラック 搭載率
海峡航路	327,405	297,200	90.7%
中・長距離航路	1,832,665	824,800	45.0%

表2 各航路におけるトラックの余剰輸送可能台数

航路	最大航走 可能台数 (台/便)	トラック 搭載率	余剰 輸送可能数 (台/便)
函館～青森	95	90.7%	9
室蘭～青森	95	45.0%	53
室蘭～八戸	95	45.0%	53
室蘭～大洗	180	45.0%	99
苫小牧～八戸	95	45.0%	53
苫小牧～仙台	95	45.0%	53
苫小牧～秋田	150	45.0%	83
苫小牧～大洗	175	45.0%	97
苫小牧～東京	200	45.0%	110
小樽～新潟	186	45.0%	103
小樽～敦賀	154	45.0%	85

表3 有珠山噴火時におけるトラック代行輸送の
コンテナ平均積載数¹⁰⁾

	2個積	3個積	平均積載数
4月	3,748	1,990	2.35 個/台
5月	4,914	2,992	2.38 個/台
6月	978	578	2.37 個/台
合計	9,640	5,560	2.37 個/台

る。本研究では、列車一編成の輸送可能なコンテナ数を100個(5tコンテナ換算)、その利用率を80%と仮定し、通常時の輸送量を全ての列車についてコンテナ80個と設定した。

鉄道輸送における事故・災害発生時にもフェリー航路による輸送が平常時と同様に行われているものと仮定し、年間の平均トラック積載率(表1)と各航路に就航している船舶の航送可能台数からフェリー航路の代替経路としての輸送力を求める(表2)。海峡航路と中・長距離別にトラック積載率が各航路で同一であると仮定すると、トラック最大輸送能力とトラック輸送台数からトラック積載率が求められる。そして、就航している船舶の最大航走可能台数とトラック積載率から航路毎の余剰輸送可能台数を求めている。

算出の結果、海峡航路である函館～青森及び室蘭～青森間は平均トラック搭載率が90.7%と高いため、輸送可能なトラック台数が9台/便と少なくなっている。そのため、本研究では両区間のフェリー航路をネットワークから除外した。

また、有珠山噴火時におけるトラック1台当たりの平均コンテナ積載数である約2.4個/台(表3)を用い、各フェリー航路の余剰輸送可能台数によって輸送されうるコンテナ数を算出し、輸送力制約とした。なお、本研究では代替輸送に利用可能であるトラック台数の制約を考慮していない。

4. 津軽海峡線貨物列車脱線事故へのモデル適用

(1) 海峡線貨物列車脱線事故の概要

2000(平成12)年12月6日、津軽海峡線津軽今別駅において、貨物列車の脱線事故が発生した。事故は6日19時頃に発生し、運行再開は下り線が7日3時24分、上り線が8日15時36分であった。そのため、上り線で33本・下り線で14本の貨物列車が途中で停車または運休とされた。

上り線では不通期間が長く継続したため、事故の翌々日まで列車が不通となった。一方、下り線は比較的早期に開通したために途中停車した列車を最寄り駅で待機させる対応もとられた。しかし、その待機時間は最長で48時間に達した。

(2) 基本モデルによる代替経路の探索

脱線事故時に途中停車・運休された貨物列車に対し、基本モデルによる代替経路探索を行った結果の一部を表4に示す。例えば、3057列車は東福島を6日20時42分に出発し、八戸～苫小牧間のフェリーを利用し、苫小牧からの接続列車に貨物を積み替えて札幌貨物ターミナルへと向かう経路が所要時間最短であり、代替経路となる。

代替経路探索の結果、列車の発地や発時刻の違いによって選択される代替経路は異なることが明らかになった。その中で、苫小牧～八戸間のフェリー航路を代替経路とする列車が非常に多い。同区間が代替経路として、運行頻度や運航時刻等の高い機能性を有していることが明らかとなった。

表4 途中停車・運休列車を対象とした探索結果

日時	列車番号	最短経路	所要時間(分)
(上り)	6日 3086 (札幌～名古屋タ)	東室蘭(20:03発)→苫小牧→苫小牧港(00:00発)→フェリー→八戸港→八戸→仙台→東京→名古屋タへ	*1369
	3092 (札幌～隅田川)	札幌タ(20:53発)→苫小牧→苫小牧港(0:00発)→フェリー→八戸港→八戸→仙台→隅田川	1373
	7日 4090 (札幌～大阪タ)	札幌タ(16:45発)→苫小牧→苫小牧港(20:15発)→フェリー→秋田港→秋田→新潟→敦賀→大阪タ	2099
	3076 (札幌～宮城野)	札幌タ(5:01発)→苫小牧→苫小牧港(9:30発)→フェリー→八戸港→八戸→宮城野	1160
(下り)	5日 4099 (梅田～札幌タ)	秋田貨物(19:00発)→青森→八戸→八戸港(5:30発)→フェリー→苫小牧港→苫小牧→札幌タ	1374
	6日 3057 (隅田川～札幌タ)	東福島(20:42発)→仙台(21:55)→八戸→八戸港(5:30発)→フェリー→苫小牧港→苫小牧→札幌タ	1331
	3099 (福岡～札幌タ)	富山貨物(21:43発)→新潟(1:24)→秋田→青森→八戸→八戸港(17:30発)→フェリー→室蘭港→室蘭→苫小牧→札幌タ	1858
	7日 3085 (名古屋～札幌タ)	名古屋タ(21:43発)→東京(7:00)→仙台→八戸→八戸港(17:30発)→フェリー→室蘭港→室蘭→苫小牧→札幌タ	*1596

*: ネットワーク内での所要時間

(3) 輸送費用による代替経路の探索

本研究は所要時間を最短とする経路を代替経路としたが、費用を交通抵抗とした経路探索も可能である。その場合、運賃等の費用を最小化する代替経路が選択されるが、運行時刻による制約、拡張モデルによる輸送力の制約を考慮することはできない。ここでは、運賃を最小とする代替経路を探索する。なお、鉄道・フェリー・トラックなど各輸送機関の運賃については、1 トンあたりの正規運賃を用いている¹¹⁾。

途中停車・運休列車を対象に、費用を考慮した代替経路探索結果の一部を表5に示す。ほとんど全ての列車において、所要時間による代替経路と費用による代替経路が一致する結果となった。本研究の対象区間においては、所要時間に優れた代替経路が費用においても優れているものと考えられる。

表5 輸送費用を考慮した探索結果

日時	列車番号	最短経路	輸送費用(円)
(上り)	6日 3092 (札幌～函館川)	札幌(20:53発)→苫小牧→苫小牧港(0:00発)→フェリー→八戸港→八戸→仙台→函館川	12,890
	7日 4090 (札幌～大坂)	札幌(16:45発)→苫小牧→苫小牧港(20:15発)→フェリー→秋田→新潟→敦賀→大坂	13,390
	3076 (札幌～宮城野)	札幌(5:01発)→苫小牧→苫小牧港(9:30発)→フェリー→八戸港→八戸→宮城野	8,720
(下り)	6日 3057 (函館川～札幌)	東福島(20:42発)→仙台(21:55)→八戸→八戸港(5:30発)→フェリー→苫小牧港→苫小牧→札幌	11,760
	3099 (福岡～札幌)	富山貨物(21:43発)→新潟(1:24)→秋田→青森(3:30発)→青森(12:30発)→函館→フェリー→室蘭港→室蘭→苫小牧→札幌	13,160
	7日 3085 (名古屋～札幌)	名古屋(21:43発)→東京(7:00)→仙台→八戸→八戸港(17:30発)→フェリー→室蘭港→室蘭→苫小牧→札幌	*13,160

※: ネットワーク内での輸送費用

5. 復旧時刻を考慮した代替経路の探索

(1) 復旧時刻を考慮した経路探索

災害・事故による不通時間が短期である場合、代替輸送を行わずに列車を待機させることが多い。津軽海峡線貨物列車事故においても、貨物列車を最寄り駅で待機させる対応がとられていた。すなわち、待機も代替経路の一つとして表現すべきといえる。

本研究で構築したモデルは時刻を考慮しているため、不通区間の開通時間を想定した代替経路の探索が可能である。基本モデルにおいて、代替輸送機関であるフェリー・航路などと同様に不通区間(リンク)における各列車への接続情報を与えることで、復旧時刻を考慮した経路を探索することができる。

(2) 貨物列車脱線事故における代替経路探索結果

6日3時24分に復旧した下り線を対象に、基本モデルによる経路探索を行った結果の一部を表6に示す。4099

列車(1374→975分)や3057列車(1331→873分)など開通まで待機し、通常の輸送経路(津軽海峡線)を利用した方が所要時間の短い列車がほとんどを占めている。

代替経路による輸送が不可能な場合、また、輸送が可能である場合も列車待機が代替経路の一つとなりうる。本研究で構築した代替経路探索モデルは現実採用されている列車待機を代替経路として表現可能である。

この際、事故・災害に対する復旧時刻の正確な予測が重要となる。代替経路の決定には不通区間の開通時刻が極めて重要な情報となる。また、復旧時刻の正確な予測は鉄道貨物利用者にも重要な情報となる。

表6 復旧時刻を考慮した代替経路の探索結果

	列車番号	最短経路	所要時間(分)
復旧時間設定有	4099 (梅田～札幌)	秋田貨物(19:00発)→青森(23:48着)→青森(3:30発)→函館→長万部→室蘭→苫小牧→札幌	975
	3057 (函館川～札幌)	東福島(20:42発)→仙台(21:55)→八戸→青森(2:55着)→青森(3:30発)→函館→長万部→室蘭→苫小牧→札幌	873
	3099 (福岡～札幌)	富山貨物(21:43発)→新潟(1:24)→秋田→青森(11:35着)→青森(12:30発)→函館→長万部→室蘭→苫小牧→札幌	1352

(3) 拡張モデルによる代替経路の探索

(2)において、基本モデルによる復旧時刻を考慮した代替経路を探索した。しかし、現実にはフェリーなどの代替輸送機関と同様に線路区間には輸送力の制限が存在する。そのため、本研究では拡張モデルによる輸送力を考慮した経路探索を行った。

本研究では途中停車した下りの貨物列車11本を対象とした(表7)。また、津軽海峡線(函館～青森)の制約条件として、2時間間隔での列車運行を仮定した。すなわち、7日3時30分の列車運行以降、5時30分・7時30分・9時30分に貨物列車が走行可能なものとしている。

表7 対象貨物列車と発地・発時刻

4091(秋田タ・19:00)	4099(秋田タ・19:00)	4093(秋田タ・21:18)
4097(余目・19:00)	4051(郡山タ・21:15)	3087(青森信・21:26)
3077(東青森・21:12)	3055(盛岡タ・20:00)	3057(東福島・20:42)
8053(宇都宮タ・20:45)	3099(富山貨物タ・21:43)	

表8 各代替輸送機関の利用状況(貨物列車脱線事故)

列車待機(計: 560 個)	
03:30 発	3087(80 個)
05:30 発	3077(80 個)
07:30 発	4091(80 個)
09:30 発	4099(80 個)
11:30 発	4093(80 個)
13:30 発	4097(80 個)
15:30 発	3057(80 個)
フェリー輸送(八戸～苫小牧)(計: 240 個)	
05:30 発	4051(40 個)・3055(80 個)
13:00 発	4051(40 個)・8053(80 個)
22:00 発	なし
フェリー輸送(八戸～室蘭)(計: 80 個)	
17:30 発	3099(80 個)

経路探索結果による各輸送機関の利用状況を表8に示す。基本モデルにおいて、対象とした列車のほとんどが待機を代替経路として選択した。しかし、全ての列車について代替経路とすることは輸送力から不可能である。

苫小牧～八戸間のフェリー航路の輸送量も比較的多い。すでに苫小牧～八戸間のフェリー航路の代替性が高いことを示したが、このケースにおいてもその代替性の高さが明らかとなった。

(4) モデルによる代替経路探索結果の比較

3057 列車と 3099 列車を例とし、モデルによる代替経路探索結果を比較する(表9)。拡張モデルによる 3057 列車の代替経路をみると、基本モデルのみによる結果と比べ、所要時間が大きく増加している。基本モデルによって選択された経路は、輸送力の制約から輸送不可能となったことが、この結果をもたらしている。しかし、その運賃は増加していない。

3099 列車においても、最も所要時間が短い列車待機による輸送は行うことはできない。しかし、フェリーによる輸送は可能であるため、所要時間の増加は 3057 列車よりも小さくなっている。運賃については、わずかながらも増加する結果となった。これらのことから、輸送力を考慮しない場合とは異なり、拡張モデルでは所要時間と運賃のそれぞれを最小のものとする経路が必ずしも一致しないと考えられる。

輸送力を考慮すると、列車待機やフェリー航路のみによる代替輸送は総輸送時間を大きく増加させる可能性がある。すなわち、これらの輸送手段を組み合わせることが輸送時間を短縮するためには有効な方法となる。そのためにも復旧時刻の正確な予測が必要不可欠である。

表9 モデルによる所要時間と運賃との比較

列車番号	3057 列車	3099 列車
基本モデルのみ (列車待機無)	1,331 分 11,760 円 フェリー利用 八戸～苫小牧 05:30 発	1,858 分 13,160 円 フェリー利用 八戸～室蘭 17:30 発
基本モデルのみ (列車待機有)	873 分 11,250 円 列車待機・3:30 発	1,352 分 10,850 円 列車待機・12:30 発
拡張モデル (列車待機有)	1,593 分 11,250 円 列車待機・15:30 発	1,858 分 13,160 円 フェリー利用 八戸～室蘭 17:30 発

※ 基本モデルのみ(列車待機無)における所要時間と運賃とは双方が最小となる経路が一致している

※ 列車待機を考慮した場合の経路探索結果は所要時間を最小となる経路である

6. 有珠山噴火時における代替輸送の比較と評価

(1) 有珠山噴火災害時における代替輸送¹²⁾

2000(平成12)年3月29日、有珠山噴火の二日前にJR室蘭本線長万部～室蘭間が不通とされた。不通に伴い、JR貨物は以下のような代替輸送経路を確保した(図6)。

① トラック代行輸送+折返列車

室蘭本線の運行中止によって、18本の列車が停車した。これらの列車は五稜郭貨物駅で貨物の取り卸しを行い、3月29日には五稜郭貨物駅～札幌貨物ターミナル間でトラック代行輸送が開始された。トラック代行輸送にあわせ、五稜郭貨物駅と各地の貨物駅とを結ぶ列車(折返列車)が運行された。折返列車は5往復/日運行され、函館・五稜郭貨物駅で発生していた滞貨の解消とトラック代行輸送の区間短縮による輸送効率向上を目的とした長万部駅の仮設コンテナホーム設置(4月21日)後は7往復/日にまで増便された。

② 函館本線(山線)経由の迂回貨物列車

室蘭本線の運行中止に伴い、旅客列車とともに3月30日から函館本線(札幌～小樽～長万部)を迂回する貨物列車を運行した。4月5日には迂回列車は5往復/日にまで増便された。しかし、該当区間は路線規格等が低いために長大編成列車への対応が不可能であり、通常時よりも短い編成で列車が運行された。そのため、迂回列車は五稜郭貨物駅で車両を増結・分離する措置がとられていた。しかし、単線であるために室蘭本線と同等の列車本数を確保することは不可能であった。

③ 船舶による代行輸送

トラックによる代行輸送や迂回列車の運転とともに、4月1日から五稜郭貨物駅～札幌貨物ターミナル間の貨物を輸送するため苫小牧～東青森、室蘭～函館間に貨物船のチャーター便が導入された。これらのうち、苫小牧～東青森間については、不通区間の24時間運行に至る6月まで輸送が行われた。

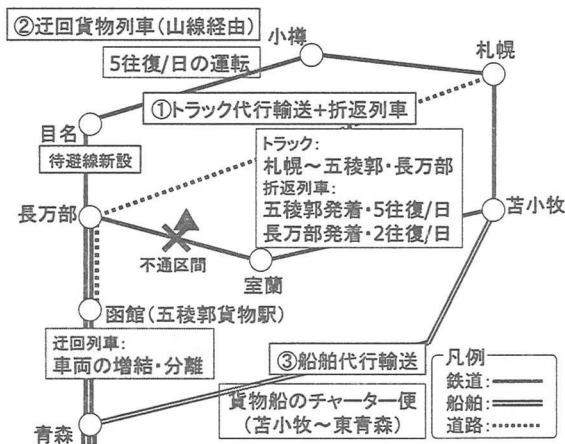


図6 有珠山噴火時における代替輸送経路の概略

噴火当初から迂回列車の輸送量が多かったが、トラック等の手配がスムーズに行われるようになった5月の連休以後はトラック代行輸送+折返列車の輸送量も増加していった。一方、船舶代行輸送による輸送量は運航頻度が少ないこともあり、少ない数字にとどまっていた。日中に限られていたが4月29日、不通区間の運転が再開され、5月9日には2往復/日に増便された。この運行再開によって、輸送力は平常時の90%にまで回復した。6月1日には7往復/日、8日からは24時間運行によって23往復/日とほぼ平常通りに回復した。それに伴い、迂回列車の運行も終了された。

また、山線の迂回に際し、運行管理システムの修正や目名駅行き違い設備の新設が行われた。しかし、目名駅行き違い設備については完成前に室蘭本線の運転が再開され、実際に効力を発揮することはなかった。

(2) 代替輸送経路の設定と経路探索

4.と5.において、構築したモデルを短期間の不通である貨物列車脱線事故へと適用した。本モデルは緊急時における迅速な経路探索が可能であることが特徴の一つである。しかし、モデルは長期間にわたる鉄道不通を想定した経路探索も可能である。そこで、有珠山噴火災害事例へと拡張モデルを適用する。

本研究では代替経路として、1. トラック代行輸送+折返列車、2. 鉄道による迂回輸送、3. 船舶代行輸送(苫小牧～青森)+折返列車を想定した(ケース①)。

対象列車は札幌ターミナルを出発地、東京以西を目的地とする上り貨物列車の16本とした(表10)。これらの列車が定刻通りに出発するものと仮定し、1日を単位とした各列車の代替経路を探索した。

迂回列車と折返列車は実際に運行された列車から運行時刻を設定した。本研究では、実際に行われた代替輸送と同じ本数・輸送力が確保できるものと仮定し、出発時刻と目的地から3064・4098・3092・3054・4094列車を迂回列車とした。また、これらの迂回列車が札幌～函館間はコンテナ50個を輸送し、函館からコンテナ50個を増結して輸送するとしている。船舶代行輸送についても、実際に行われた代替輸送を参考にコンテナ120個/便の輸送力を持つ船舶を5往復/日運航するものとした。

さらに、ケース①にフェリー航路を代替輸送経路に含め、船舶代行輸送を2往復/日とした場合(ケース②)と山線の線路容量増加を仮定し、4090列車が迂回列車として

表10 対象貨物列車と着地・札幌発時刻

3064(隅田川・0:20)	4098(梅田・0:34)	3094(梶ヶ谷・2:20)
3060(越谷・2:26)	3080(西浜松・3:08)	3084(名古屋・4:30)
3076(宮城野・5:01)	8052(東京・6:14)	3078(東青森・7:22)
3062(越谷・16:15)	4090(大阪・16:45)	3050(東京・17:45)
3086(名古屋・18:10)	3092(隅田川・20:53)	3098(福岡・21:27)
3054(隅田川・21:47)	3088(広島・22:21)	4094(名古屋・23:11)

追加された場合(ケース③)についても代替経路を探索し、結果の比較を行う。

(3) ケース①における経路探索結果

ケース①における各輸送機関の輸送状況を表11に示す。トラック代行輸送と折返列車によって輸送されるコンテナ数が550個と最も多く、輸送時間と輸送力の両方に優れた代替経路といえる。

基本モデルのみによる経路探索では、全列車が函館本線の迂回経路や札幌～函館間のトラック代行輸送を代替経路として選択している。しかし、輸送力の制約から全ての列車が代替経路とすることはできない。現実にもトラックによる代替輸送に貨物が集中したため、五稜郭貨物ターミナル駅に莫大な滞貨が発生することとなった¹³⁾。このことは輸送力を考慮した代替経路探索、すなわち、拡張モデルの必要性を示すものといえる。

表11 各代替輸送機関の利用状況(ケース①)

迂回列車(計:250個)	
う3094	3064(50個)
う4092	4098(50個)
う3058	3092(50個)
う3064	3054(50個)
う3084	4094(50個)
トラック代行(札幌-函館)+折返・迂回列車(計:550個)	
う3064	3050(50個)
う3058	3064(30個)・3092(20個)
う3094	3092(10個)・3054(30個)・3088(10個)
う3084	3094(50個)
8052	8052(80個)・3094(20個)
3086	3062(80個)・3094(10個)・3060(10個)
4098	4090(80個)・3098(10個)・4098(10個)
う4092	3098(50個)
船舶代行輸送(苫小牧-青森)(計:450個)	
15:00発	4098(10個)・3088(70個)・4094(40個)
16:00発	3060(70個)・4094(10個)・3080(40個)
18:00発	3060(10個)・3080(40個)・3084(50個)
19:00発	なし
22:00発	3050(30個)・3086(80個)

(4) ケース②・③における経路探索結果と輸送案評価

ケース②・ケース③における各輸送機関の輸送状況を表12・表13に示す。ケース②では、船舶代行輸送が代替経路として選択されない結果となった。

本研究は、コンテナ1個あたりの輸送時間を全て足し合わせた合計値から各ケースの比較を行う(図7)。総輸送時間はケース①で2,099,010[分・個]、ケース②で1,941,550[分・個]、ケース③で2,051,660[分・個]となった。すなわち、迂回列車の増発によって輸送時間全体は短縮されうが、それ以上にフェリー航路による代替輸送を行うことの方が輸送時間短縮には効果的であることを示している。

輸送機関別の構成を比較すると、船舶代行輸送・フェリー輸送によって運送されるコンテナにおいて、総輸送

表 12 各代替輸送機関の利用状況(ケース②)

迂回列車(計: 250 個)	
う 3094	3064(50 個)
う 4092	4098(50 個)
う 3058	3092(50 個)
う 3064	3054(50 個)
う 3084	4094(50 個)
トラック代行(札幌-函館)+折返・迂回列車(計: 530 個)	
う 3064	3050(50 個)
う 3058	3064(30 個)・3050(20 個)
う 3094	3054(30 個)・3088(20 個)
う 3084	3094(50 個)
8052	8052(80 個)・3094(20 個)
3086	3062(80 個)
4098	4090(80 個)・3098(10 個)・4098(10 個)
う 4092	3098(50 個)
船舶代行輸送(苫小牧-青森)(計: 0 個)	
15:00 発	なし
18:00 発	なし
フェリー輸送(苫小牧-八戸)(計: 240 個)	
00:00 発	3050(10 個)・3092(30 個)・3086(80 個)
09:30 発	3094(10 個)・3060(80 個)・3080(30 個)
18:45 発	なし
フェリー輸送(苫小牧-大洗)(計: 130 個)	
09:45 発	3080(50 個)・3084(80 個)
23:59 発	なし
フェリー輸送(室蘭-八戸)(計: 90 個)	
06:00 発	3088(60 個)・4094(30 個)
フェリー輸送(小樽-新潟)(計: 20 個)	
10:30	4098(20 個)

表 13 各代替輸送機関の利用状況(ケース③)

迂回列車(計: 300 個)	
う 3094	3064(50 個)
う 4092	4098(50 個)
う 3058	3092(50 個)
う 3064	3054(50 個)
う 3084	4094(50 個)
う 4090	4090(50 個)
トラック代行(札幌-函館)+折返・迂回列車(計: 530 個)	
う 3064	3050(50 個)
う 3058	3064(30 個)・3092(20 個)
う 3094	3092(10 個)・3054(30 個)・3088(10 個)
う 3084	3094(50 個)
8052	8052(80 個)・3094(20 個)
3086	3062(80 個)・3094(10 個)・3060(10 個)
4098	4090(30 個)・3098(60 個)・4098(10 個)
う 4092	4098(30 個)
う 4090	なし
船舶代行輸送(苫小牧-青森)(計: 420 個)	
15:00 発	3088(70 個)・4094(50 個)
16:00 発	3060(70 個)・3080(50 個)
18:00 発	3060(10 個)・3080(30 個)・3084(50 個)
19:00 発	なし
22:00 発	3050(30 個)・3086(80 個)

ことは可能であった。長期間にわたる不通においてもフェリー航路を代替経路として検討すべきといえる。

実際に、JR 貨物は代替輸送経路としてフェリー航路を利用することを検討している。そのため、年間を通じたフェリー航路による輸送が計画されている。

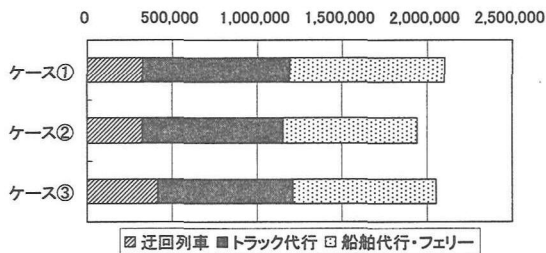


図 7 コンテナ総輸送時間の比較[分・個]

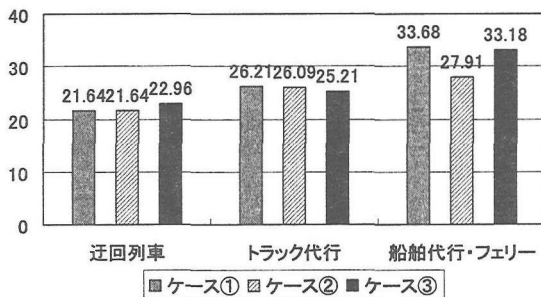


図 8 平均コンテナ輸送時間の輸送機関間比較[時間/個]

時間が異なっている。フェリー輸送を考慮しない場合、船舶代行輸送の運行時刻による待ち時間から輸送時間は大きく増加してしまう。船舶代行・フェリー輸送のコンテナ 1 個あたりの平均輸送時間においても、ケース①・③では 30 時間を超えている(図 8)。

現実にはフェリー航路による代替輸送は行われなかったが、フェリー航路の利用によって鉄道貨物を輸送する

7. おわりに

本研究では列車単位に代替経路を探索する基本・拡張モデルを構築し、それを短期・長期の二つの事故・災害事例に適用したものである。その結果、構築したモデルの有効性と同時にフェリー航路が代替輸送に有用であることが明らかにできた。すなわち、フェリーも鉄道貨物輸送における代替経路として考慮すべきであり、輸送規格の統一や荷役施設の改善等の対策を考える必要がある。

本研究におけるモデルは時刻を考慮しているため、便毎に経路を探索することができる。そのため、運行頻度や発着時刻等を含めた代替経路の評価が可能である。また、現実に採用されている列車待機を代替経路の一つとして、表現可能なものである。しかし、モデル適用には事故・災害発生後における貨物列車や代替輸送機関の位置や貨物に関する情報が必要とされる。そのため、適切な代替輸送の確保にはこれらの情報を迅速に得られる体制を構築しなければならない。

山形ら¹³⁾は鉄道貨物利用者への意識調査から事故・災害時における要望として情報の伝達を挙げている。本研究におけるモデルは JR 貨物だけではなく、利用者にとっても有用なものである。すなわち、モデルの効果的な利用が利用者の望む貨物の到着時刻や輸送時間などの情報提供の一環となりうる。

本研究では主に輸送時間を評価指標とした代替経路の探索を行った。しかし、輸送時間以外の要因、また、輸送時間や費用の双方を考慮した一般化費用等も代替輸送の評価には必要と考えられる。そのため、今後は新たな代替経路の評価指標の構築と代替経路の配分も含めた最適な輸送経路探索が可能なモデルへの改良が望まれる。さらに、事故・災害発生時に望まれる代替輸送計画を検討するため、代替輸送方を設定した規範的立場に基づいた分析も必要とされる。

参考文献

- 1) 南正昭・高野伸栄・佐藤馨一：道路網における代替ルートへの整備水準の一評価手法に関する研究，土木学会論文集，No.530 IV-30，pp67-77，1996
- 2) 堀井雅史：迂回度を用いた自然災害時における道路網の代替機能に関する評価方法，都市計画論文集，Vol.31，pp769-774，1996
- 3) 中川真治・若林拓史・飯田恭敬：n 番目最多員経路探索を用いた簡便な道路網信頼性解析法とその交通運用策への適用，土木計画学研究・論文集，Vol.13，pp861-868，1996
- 4) 高橋誠・栗田哲史・福島誠一郎・嶋田昌義・高橋聡：

緊急車両ルートおよび救援物資流通経路の探索，地震工学研究発表会講演論文集，Vol.26，pp1461-1464，2001

- 5) 相浦宣徳・佐藤馨一・唐澤豊・嘉松孝友：多親組換え法を用いた Saving 手法組込み型 GA による輸送経路の最適化，土木計画学研究・論文集，Vol.18，pp403-408，2001
- 6) 河西朝雄：C 言語によるはじめてのアルゴリズム入門，技術評論社
- 7) 日本貨物鉄道(株)：JR 貨物時刻表，2000
- 8) JTB：JTB 時刻表，第 78 巻第 6 号，pp860-861，2000
- 9) (財)北海道物流開発研究センター：フェリー利用貨物流動実態，季刊物流開発，No.49，p11，1998
- 10) 北海道旅客鉄道(株)編：有珠山噴火 鉄道輸送の挑戦，北海道旅客鉄道(株)，p41，2001
- 11) 交通日本社刊：貨物運賃と各種料金表，交通日本社，1998
- 12) 前掲 10)などを参考にした
- 13) 前掲 10)，p28
- 14) 山形創一・日野智・佐藤馨一：札幌圏-東京圏における JR 貨物の選択特性に関する研究，土木学会第 55 回年次学術講演概要集第 4 部，pp246-247，2000

鉄道貨物輸送における経路探索モデル構築とその適用に関する研究*

日野 智**・岸 滋***・岸 邦宏****・浅見 均*****・佐藤 馨一*****

近年、北海道と本州間の鉄道輸送網において、事故・災害による不通が多発している。鉄道輸送網の不通は旅客だけではなく、物資輸送にも多大な影響を与えている。本研究は鉄道貨物輸送における代替経路探索モデルを構築し、津軽海峡線貨物列車脱線事故と有珠山噴火災害に適用したものである。本研究で構築したモデルは時刻を考慮しているため、便毎に経路を探索することができる。そのため、運行頻度や発着時刻等を含めた代替経路の評価が可能である。また、現実採用されている列車待機を代替経路の一つとして、表現できる。モデルを事故・災害事例へと適用した結果、フェリー航路が代替輸送に有用であることが明らかにされた。すなわち、今後はフェリーも鉄道貨物輸送における代替経路として考慮すべきといえる。

Building an Alternative Path-Searching Model for Rail Freight Transportation and Practical Application*

By Satoru HINO**・Shigeru KISHI***・Kunihiro KISHI****・Hitoshi ASAMI*****・Keiichi SATOH*****

By accidents and disasters, the railway service was often suspended between Hokkaido and Honshu. In this study, path-searching model for rail freight transportation is built and is applied practical case. Since the model can search an alternative route considering the timetable, it can evaluate alternative routes involving the frequency and departure time of transportation. It can also evaluate considering the opening time at the suspended link. As a result, it is clarified that car ferry lines are effective in alternative transportation from the viewpoint of transportation time shortening. Therefore car ferry lines should be considered as an alternative transportation for rail freight.