

# デマンド輸送計画作成手法と鉄道貨物への応用

坂口 隆\* 福村 直登\* 武内 陽子\* 加納 敏幸\*\*

## Methods of On-Demand Transport Scheduling and Their Application to Railway Freight Services

Takashi SAKAGUCHI Naoto FUKUMURA Yoko TAKEUCHI Toshiyuki KANO

In order-type tramper allocation in coastal shipping, an operator receives orders for transport from cargo owners and prepares a shipping schedule to execute all the orders completely. We developed an optimization algorithm, which optimizes the tramper allocation in terms of fuel consumption as part of efforts for maritime logistics to address global warming issue. This paper presents the algorithm and demonstration results of it, and discusses a possibility that application of an on-demand transportation scheduling similar to the tramper allocation to the railroad logistics might improve the transportation costs and the convenience.

キーワード：デマンド輸送計画，配船計画，制約プログラミング，貨物輸送，組合せ最適化

### 1. はじめに

交通機関のうち、鉄道、バス、旅客船などは、時刻表に基づいた定期輸送を基本としている。これに対し、石油などの大口の海運貨物やトラック運送では、荷主の注文に応じて輸送計画を立てる輸送形態をとっている。また、東海道山陽新幹線では指定席券の売れゆきを監視し、必要に応じて、市販された時刻表にない臨時列車を増発させる輸送計画変更を日常的に行っており<sup>1)</sup>、増発する列車の利用者の多くは、もとの時刻表に関係なく利用できる列車に乗りするという利用形態をとっている。

このように、日々異なる輸送需要を何らかの方法で把握し、輸送需要に対応した輸送計画または輸送計画変更を行うことを、ここでは“デマンド輸送計画”と呼ぶ。デマンド輸送計画は、必要な地点間に必要な輸送力を充当することから、定期輸送に比べて低いコストで高い利便性が得られるが、計画業務への負荷が高い。例えば、海運における不定期な貨物輸送（不定期船）もデマンド輸送であり、約1ヶ月の注文に基づいて手作業で配船計画を立てているが、計画業務の複雑さに加え、天候等の事情により遅れが出るたびに配船を調整する必要があり、輸送コストを考慮した配船計画を作成することは難しい。そこで本研究では、内航海運の不定期船を対象に、コストの低い配船案を作成するアルゴリズム（配船アルゴリズム）を開発し、実際の配船計画に適用して、6～10%程度の輸送コスト削減効果を確認した。

本稿では、配船アルゴリズムの概要を述べ、次に、定

\* 輸送情報技術研究部（運転システム）

\*\* 独立行政法人海上安全技術研究所（物流研究センター）

期運行の形態をとっている鉄道貨物に対するデマンド型輸送計画の適用方法と、その場合の輸送計画作成アルゴリズムについて検討する。

### 2. オーダー式配船計画

石油製品などを対象とした内航の不定期船では、荷主からの注文（オーダー）を集約し、それに応じた船舶の運航計画を立てる。これをオーダー式配船計画（以下では配船と略す）という。1個のオーダーには、貨物の種類・量（体積）、積日、積地、揚日、揚地が指定される。

貨物の輸送には、船会社が所有する数隻から数十隻の、貨物の種類に適した積載設備を持つ船が使用される。積載設備は隔壁で数箇所に仕切られていて、個々の積載区域をホールドと呼ぶ（図1）。配船計画では、すべてのオーダーに対応するように、各船の輸送経路を決める。配船計画の作成条件を以下に示す。なお、実際には、複数のオーダーを同時に搭載したり、自社船で対応しきれないときに他社の船を借りる“傭船”を行ったりすることを考慮して、より複雑な条件の下で計画されるが、ここでは骨格となる基本的な条件について説明する。また以下では、貨物を船積みする作業を積荷役、船から港に荷揚げする作業を揚荷役と呼び、これらをあわせて荷役と呼ぶ。

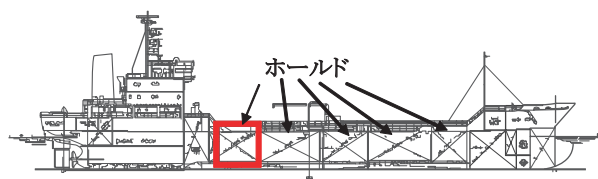


図1 貨物船（タンカー）のホールド



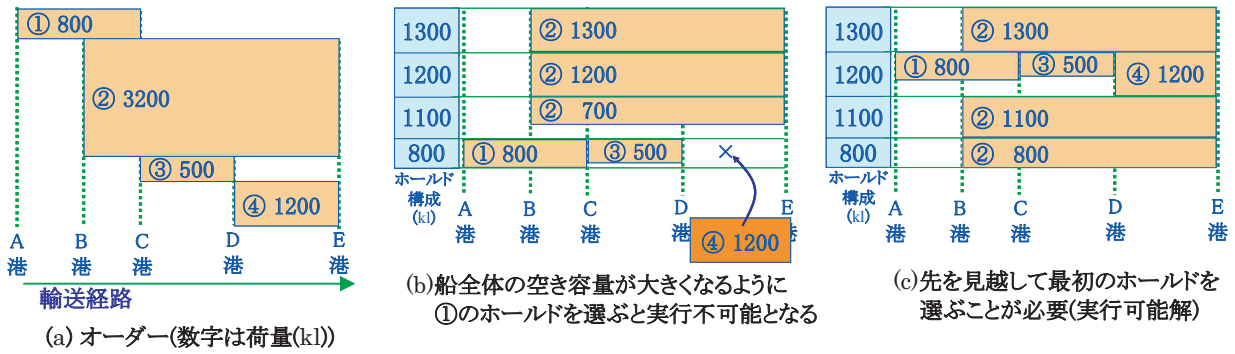


図3 ペアに対するホールド割当てが単純でない例

とを示している。①～④の4個のオーダーを図のようなホールド構成の船で輸送する場合、(b)は①を載せる時点で残りのホールドの容量が最大となるので、その部分だけをみると最も効率的であるように見えるが、実際には最後のオーダー④を載せることができない。このケースでは(c)のように、最初にあえて大きなホールドを選ばなければならない。ホールド割当ての可能性を判定するには、基本的には、すべての割当て方を試みる必要がある。

### 3. 配船計画の解法

#### 3.1 制約プログラミング

本研究では、複雑で厳しい制約条件を持つ組合せ最適化問題に対する有効なアプローチである、制約プログラミング (Constraint Programming, CP) と呼ばれる手法<sup>2)</sup>を適用する。変数集合  $X = \{x_i | i=1..n\}$ 、各変数の取り得る範囲 (ドメイン) の集合  $D = \{d_i | i=1..n\}$ 、とし、 $X$ に関する制約の集合  $C$ を充足するように  $X$ の実現値を求める制約充足問題を  $P(D, X, C)$ と表す。CPによる  $P(D, X, C)$ の一般解法は再帰呼び出しを用いると図4のように書ける。なお  $d_i$ は変数  $x_i$ のドメイン ( $x_i \in d_i$ )を表し、アルゴリズムは各変数のドメインを制約条件  $C$ に関する整合性を維持しながら徐々に縮小し、最終的にすべての変数のドメインをある一つの値に限定することによって解を得るように構成される。ある変数  $x$ のドメインが縮小されたとき、それに起因して、 $C$ の上で  $x$ から制約を受けている他の変数のドメインから  $C$ を満たさないものが検出され、ドメインから削除されることで、ドメインの縮小が連鎖的に発生する。この制約伝播<sup>3)</sup>と呼ばれるメカニズムによって探索空間を先見的に縮小でき、効率的に解を探索することができる。

#### 3.2 ネットワークモデルによる定式化

積/揚荷役を点(ノード)、船が行う荷役の順序関係を有向辺(アーク)で表したネットワーク(配船ネットワークと呼ぶ)を考える。荷役全体の集合を  $V'$ 、船隊  $S$ に対して、船の初期配置(計画上、既に決定している各船

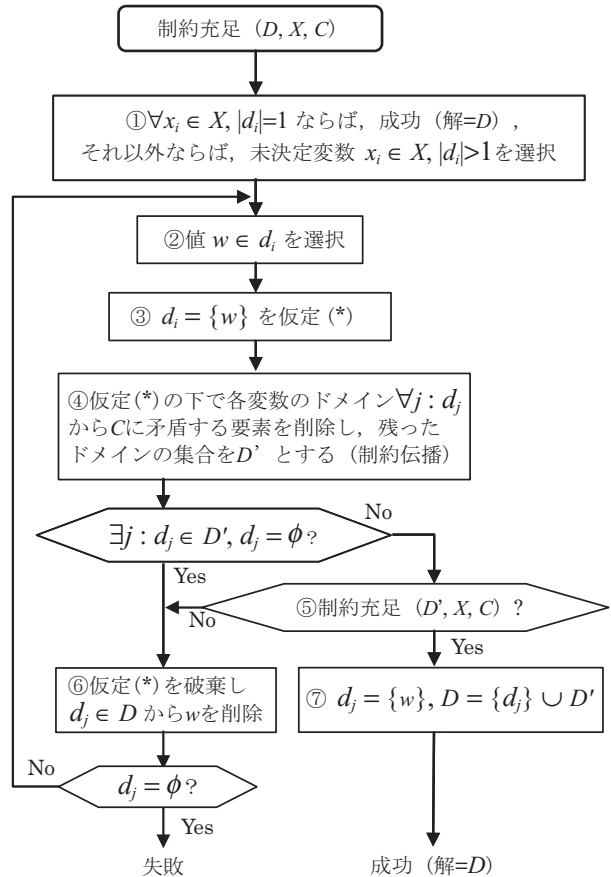


図4 制約プログラミングによる一般解法

の最後の荷役に相当)の集合を  $V'' = \{v_s | s \in S\}$  とする。また、 $d_v \subset V' \cup V''$ ,  $v \in V'$  を、荷役  $v$ の直前に行う可能性のある荷役(または船の初期配置)の集合とする。このとき、配船ネットワーク  $G=(V, E)$ を次のように定義する。  
ノード集合:  $V = V' \cup V''$ , (1)  
アーク集合:  $E = \{(w, v) | v \in V', w \in d_v\}$ . (2)

図5のような配船ネットワークは、例えば、オーダー4の積荷役 ( $v$ )の直前に行う可能性のある荷役が  $w_1, w_2, w_3, w_4$ の4つであることを示している。

求める配船において、(ある船によって)荷役  $v$ の直前に行われる荷役を表す変数を  $x_v$ とおくと、 $x_v \in d_v$ 、つまり  $d_v$ はCPにおける  $x_v$ の初期のドメインであり、任

特集：電力技術

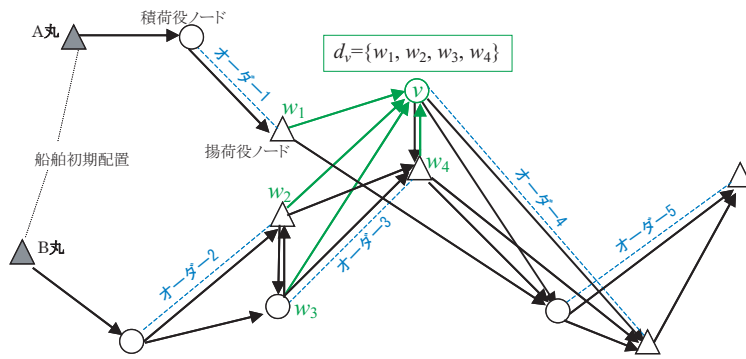


図5 配船ネットワークの例

意の配船計画は、 $E^* = \{(x_v, v) | v \in V\}$  のインスタンス(実現値)によって表される。 $E^*$  が配船計画として実行可能であるための条件は次の通り。

- $C_0$ :  $x_v, v \in V'$  は互いに異なる。(この条件によって  $E^*$  は各船  $s$  の初期配置  $v_s$  を始端とする有向パス  $P_s$  の集合となる)
- $C_1$ : 任意のオーダーについて、積荷役から揚荷役へのパスを含んでいる。
- $C_2$ : 各  $P_s$  を荷役順序とするときの荷役開始時刻が、各オーダーの指定日の条件を満たす。
- $C_3$ : 各  $P_s$  の荷役順序によって決まる各ペアを船  $s$  のホールドに割当てることができる。

これらの制約条件を  $C$  として、実行可能な配船を求める制約充足問題は、

$$P(D, X, C), D = \{d_v | v \in V'\}, X = \{x_v | v \in V'\} \quad (3)$$

と表される。

3.3 配船アルゴリズム

(1) 制約条件

アルゴリズムは基本的に図4のフローに従うが、前項に示した  $E^*$  の制約条件のうちホールド割当てに関する制約  $C_3$  は含めず、代わりに次の制約を含める。これは  $C_3$  の緩和条件であり、これによりホールド割当てを試行せずに高い確率で  $C_3$  に違反するペアを除去できる。

- 各オーダー  $k$  を各船  $s$  に積載するとき使用するホールドの総容量の最小値を  $l(k, s)$ 、船  $s$  のホールドの総容量を  $L(s)$  とすると、 $E^*$  において船  $s$  の任意の積荷役終了時に  $s$  に積載しているオーダーの集合  $K'$  について、

$$\sum_{k \in K'} l(k, s) \leq L(s) \quad (4)$$

- 各オーダー  $k$  を各船  $s$  に積載するとき使用するホールドの数の最小値を  $n(k, s)$ 、船  $s$  のホールドの数を  $N(s)$  とすると、 $E^*$  において船  $s$  の任意の積荷役終了時に  $s$  に積載しているオーダーの集合  $K'$  について、

$$\sum_{k \in K'} n(k, s) \leq N(s) \quad (5)$$

これらの制約を満たす解が実際にホールド割当て可能であることは、探索の過程である船に対して、あるペアが決定した時点で実際にホールド割当てを試行して調べる。

(2) 未決定変数の選択

図4①で行う、未決定変数の選択は次のルールによる。 $x_v$  が未決定変数 ( $|d_v| \geq 2$ ) である荷役  $v$  の集合を  $\tilde{V}$ 、荷役  $v$  を開始する時刻の取り得る範囲の最大値を  $u_v$  として、

$$V_1 = \{v \in \tilde{V}, D_v = \min_{v \in \tilde{V}} |D_v|\}, \quad (6)$$

$$x_v \in \{x_v | v \in V_1, u_v = \min_{v \in V_1} u_v\}. \quad (7)$$

式(6)は未決定変数の中でそのドメインの大きさ(要素数)が最小のものを選択肢とすることを意味し、これはFirst-Failの原理<sup>3)</sup>と呼ばれ、よく使われる有効な未決定選択ルールである。そのような変数の中で、式(7)は荷役開始時刻の締め切りが最も間近に迫っている荷役から優先的に処理することを意味する。

(3) 変数の値の限定

変数  $x_v$  の値をドメイン  $d_v$  の中から選ぶルールは、筆者らが開発した探索ヒューリスティクスである部分解近傍探索<sup>4)</sup>による。これは、深さ優先探索において、現在に至るまでの過程で最も深くまで探索できたときの各変数の実現値を“部分解”として記憶しておき、部分解の近傍から順に変数に割当ててる値を選択する、という局所探索法である。

4. 配船アルゴリズムの適用例

ある船社を対象に、その中で中核となる5千DWT(載貨重量トン)の船隊を対象に、総燃料消費量の最小化を目的として約2週間の配船計画を作成する試験を行った。試験に使用した船舶およびオーダーの概要を表1に示す。

試験では、配船担当者が作成した配船計画を本アルゴリズムにより改善するプログラムを作成し、これを一般的なパーソナルコンピュータ上で約40分間実行したところ、総燃料消費量を元の計画より7.5%削減する配船が得られた。このとき、総航行距離は5.3%減少した。また、同社の他の期間(17日間)を対象に改善を2時間行っ

表1 適用試験データ

|      |           |                |
|------|-----------|----------------|
| 船隊   | 船数        | 16隻            |
|      | 船のホールド数   | 5~6            |
|      | 船のホールド総容量 | 約5300kl~6200kl |
| オーダー | 対象期間      | 14日間(発日基準)     |
|      | オーダー数     | 194            |
|      | 平均荷量      | 約1900kl        |
|      | 発着港数      | 44港            |
|      | 輸送日数      | 1~9日           |
|      | 平均輸送日数    | 2.64日          |

た結果、総燃料消費量を9.2%減少させることができた。

## 5. デマンド型輸送の鉄道貨物への適用

鉄道貨物輸送はCO<sub>2</sub>排出量が営業用トラックの約8分の1と環境負荷の非常に小さな輸送モードであり、地球温暖化対策として鉄道貨物が果たすべき役割は大きい。これに対し国土交通省は、平成19年3月に「JR貨物による輸送品質改善・更なる役割発揮懇談会」を設置し、そこで抽出された課題を受けてJR貨物では「JR貨物による輸送品質改善アクションプラン」を策定し、利用者のニーズにマッチした輸送品質の改善に取り組んでいる。その中で、ニーズの高い直行ルートの新設、中継作業体制の整備による大型コンテナネットワークの拡大、機動的な臨時列車の運転による幹線区間の輸送力確保などといった、利用者ニーズへの対応策を打ち出している<sup>5)</sup>。このような対策の延長線上に、前章までで扱ったオーダー式配船計画のようなデマンド型輸送の形態が考えられる。ここでは、貨物輸送のデマンドの集合に対して、それらを輸送するように輸送計画（列車、車両運用）を策定し、貨物を列車に割当てる輸送方式およびその計画を、デマンド貨物輸送、デマンド貨物輸送計画と呼ぶ。以下では、デマンド型貨物輸送の可能性について考察する。

### 5.1 デマンド型貨物輸送の想定

#### (1) デマンド

実際の鉄道貨物輸送ではコンテナ貨物と車扱貨物が混在するが、ここでは、単純化のため貨物はすべてコンテナ貨物であるものとする。デマンド型輸送では、荷主は予約の際、輸送手段（列車）を直接指定するのではなく、発駅への届け日時、着駅および到着希望日時（時間帯）を指定する。これを1個のデマンドとし、一定期間の全国のデマンドを集約し、貨物輸送計画全体へのデマンドとする。なお、コンテナの空回送もデマンドの一つとして扱うことができる。

なお、ここでは予約された貨物をデマンドとしているが、予約情報の代わりに貨物の輸送ニーズを何らかの方法で推定し、それをデマンドとすることも考えられる。

#### (2) 列車ダイヤ

ダイヤ改正において、需要予測をもとに列車ダイヤを設定するという点では現行と変わらないが、すべての列車を現在での予定臨に位置付けた「影スジ」として設定する（ダイヤ図上の列車の線、停車駅、着発時刻などを総称して「スジ」と呼ぶ）。深夜帯など、設定に余裕のあるところでは、同じところに速度種別や停車駅の異なる複数のスジを重ねて設定し、デマンドに応じて使用するスジを選択できるようにすることもできる。なお、現行のように、必ず運転する、いわゆる定期列車を含んでも

よいが、定期列車が少ないほど機動力の高い輸送サービスが提供できる。

#### (3) デマンド貨物輸送計画

各デマンドの到着希望時間帯にできる限り間に合うように（早着はかまわない）、

- ・ 運転する列車およびその運転区間
- ・ 各デマンドの輸送手段（列車および中継作業）
- ・ 運転する列車の機関車運用

を決定する。また、デマンドに対する満足度が同じならば、計画全体での機関車走行距離（またはCO<sub>2</sub>排出量）ができるだけ少ない計画を立てる。

#### (4) 期待される効果

各デマンドに対して到着希望時間帯を超えない範囲で適当な列車を割当てることにより、最小限のスジを運転することができ、省エネ効果が期待できる。現行では機関車運用が決まっているため、需要のないスジは空席（空荷）で走らせることになるが、本方式では車両運用もデマンドに応じて決めるため、列車の無駄な運行を回避できる。また、需要の多い幹線では、到着希望時間帯に余裕のあるデマンドほど、後発の余裕のある列車に割当てたり、中継作業を必要とする列車に割当てたりすることで、逆に必要とするデマンドには速達性を確保でき、結果として現行より多くのニーズに応えることができる。また、このメリットを利用して、到着希望時間帯によって運賃を割引くといった制度を併用することにより、潜在ニーズを顕在化することも可能であると考えられる。

## 5.2 オーダー式配船計画の手法の応用

### 5.2.1 オーダー式配船計画との相違点

#### (1) 輸送デマンド

一度に機関車が運べるコンテナの数は、船舶に載せられるオーダーの数の約10倍であり、1輸送デマンド=1件の予約（コンテナ輸送）とすると、配船に比べてデマンドの数が大きくなりすぎる。したがって、輸送計画を作成するときは、属性（発駅、着駅、届け日時、到着希望時間帯）が同等に扱えるデマンドをまとめて1個の輸送デマンドとする。

#### (2) 輸送経路

船舶は任意の港間を任意の時刻に移動できるが、機関車は予め設定されたダイヤの影スジの上を移動するため、

- ・ 発着時刻が限定される
- ・ 移動できる駅が限定される（つまりオーダーの中継が必要）
- ・ 同じスジ上を複数の機関車が走行できないという特徴がある。

### 5.2.2 デマンド貨物輸送計画の計算モデル

上記のように、想定するデマンド貨物輸送計画は、鉄道の特性により、同じ概念に基づくデマンド型輸送で

特集：電力技術

あってもオーダー式配船計画とは条件が大きく異なる。したがって、その計算モデルである配船ネットワークをそのまま適用することはできない。ここで、配船ネットワークの特徴をデマンド型輸送計画の解法という観点で捉えると、

- ・ 各輸送デマンドは固有のイベント列を生成する
- ・ イベント（積荷役および揚荷役）を巡回する経路によって輸送媒体（船舶）の移動経路を表す
- ・ すべてのイベントについてイベント間の遷移（アーク）を決定することにより、輸送媒体の移動経路が決定される

という構造であることがわかる（図6）。そこで、この基本構造をデマンド貨物輸送計画に適用する。

(1) イベント（ノード）

コンテナ輸送の輸送デマンドからイベントを生成するが、イベントは移動媒体である機関車の経路上の点となるものである。機関車の経路を構成する点は、機関車運行経路における1列車区間（1本の列車を1台の機関車が運転する区間で区切ったもの）に相当する。そこで、輸送デマンドを輸送ルート上の列車区間および貨物中継駅で区切ったものをイベントとする。なお、イベントを割当てる列車（スジ）は巡回路に伴って決まり、各イベントを、他の巡回路と競合せず、なおかつ、最も早く実行するスジである。

(2) アーク

機関車が辿ることのできるイベントの間にアークを設定する。同一区間のイベント  $v$  から  $w$  へのアークは、 $w$  を  $v$  と同じ列車（したがって同じ機関車）で輸送することを意味する。異なる区間のイベント  $w$  から  $x$  へのアークは、機関車が  $w$  の区間の次に  $x$  の区間を運転し、 $x$  を輸送することを意味する（図7）。

クは、機関車が  $w$  の区間の次に  $x$  の区間を運転し、 $x$  を輸送することを意味する（図7）。

5.2.3 デマンド貨物輸送の制約条件

以上のようにして構築したネットワークモデル上ですべてのイベント間の“実行可能な”アークを決定することによりデマンド貨物輸送計画を作成することができる。最後に、実行可能性に関する主な制約条件を以下に示す。

- ・ イベントの実行日時の範囲
- ・ 同一区間間のアークにおける列車の輸送量の上限
- ・ デマンドの中継の可能性（余裕時間）
- ・ 連続しないイベントの同一列車への割り当て禁止

6. おわりに

内航海運の不定期貨物輸送に関して、環境負荷を低減可能なオーダー式配船計画作成の作成アルゴリズムの開発事例を紹介し、デマンド型輸送計画作成のモデリング手法を示した。また、デマンド型輸送の概念を鉄道貨物に適用したデマンド貨物輸送を想定し、その効果と、上記の手法を応用した計画作成モデルを示した。モデルを簡略化するため、現行のJR貨物の営業制度などの前提条件とは乖離した部分があり、また機関車の検査や乗務員運用などもモデルに含めていないが、デマンド貨物輸送のひとつの可能性を議論する基盤としては十分であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、独立法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の受託研究「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」の一環として、旭タンカー株式会社、西部タンカー株式会社の協力を得て実施されているものである。関係各位に感謝する。

文献

- 1) 小島泰昌, 佐藤敬範: 東海道新幹線の知られざる特徴, 365日の輸送力チューニング, 運輸協会誌, Vol.46, No.3, pp.9-13, 2006
- 2) Hentenryck, P., V., "Constraint Satisfaction using constraint logic programming," *Artificial Intelligence*, Vol.58, pp.113-159, 1992.
- 3) Tsang, E.P.K., *Foundations of Constraint Satisfaction*, Academic Press, 1993.
- 4) 坂口隆: 制約論理プログラミングの探索手法と対話型スケジューリング, オペレーションズ・リサーチ, Vol.47, No.1, pp.16-21, 2002
- 5) <http://www.jrfreight.co.jp/press/pdf/200707-04.pdf>

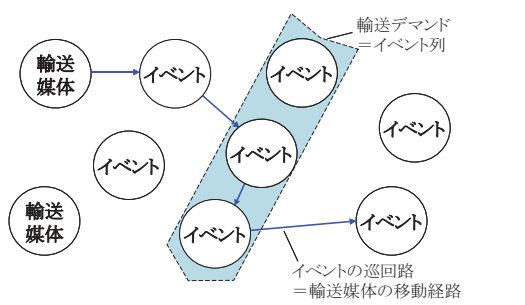


図6 デマンド型輸送計画の計算モデル

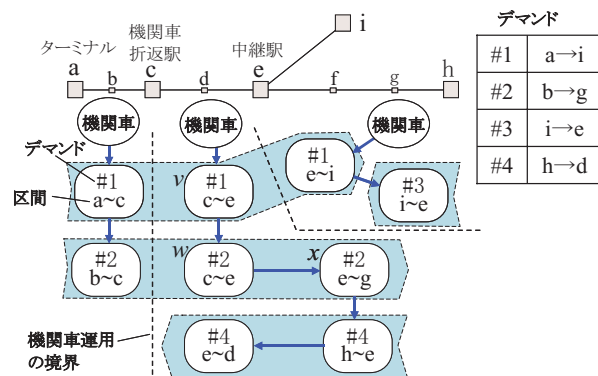


図7 デマンド貨物輸送計画の計算モデルの具体例