

# 折りたたみコンテナによる トレーラ集配送への効果

新谷 浩一<sup>1</sup>・今井 昭夫<sup>2</sup>・永岩 健一郎<sup>3</sup>・田中 康仁<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 大島商船高等専門学校准教授 商船学科 (〒742-2193 山口県大島郡周防大島町小松1091-1)  
E-mail: shintani@oshima-k.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 神戸大学大学院教授 海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)  
E-mail: imai@maritime.kobe-u.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 広島商船高等専門学校教授 流通情報工学科 (〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野4272-1)  
E-mail: nagaiwa@hiroshima-cmt.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 広島商船高等専門学校准教授 流通情報工学科 (〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野4272-1)  
E-mail: tanaka-y@hiroshima-cmt.ac.jp

近年、世界的規模でコンテナ貨物が急増する反面、貿易不均衡が拡大し、空コンテナの過不足問題が深刻化している。その緩和策として期待されるのが、折りたたみコンテナの導入である。しかし、折りたたみコンテナはすでに開発されているものの、未だ実用化されていない。その理由の1つに、折りたたみコンテナの経済性が示されていないことが挙げられる。そこで本研究では、港湾背後地におけるトレーラによる空コンテナの集配送に注目し、折りたたみコンテナが標準コンテナと比較して、どれ程のコスト削減効果をもたらすのか数理計画モデルを用いて検討した。その結果、折りたたみ組み立てコストの大小に影響を受けるものの、貿易不均衡の度合いが大きくなるにつれて、折りたたみコンテナが優位となることがわかった。

**Key Words :** *Foldable container, Empty container repositioning, Vehicle routing problem*

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景と目的

現在、世界的規模でコンテナ貿易量が急増する反面、アジア-欧米間の貿易不均衡が拡大している。コンテナ港およびその背後地では、大規模な空コンテナ(以下、空コンと呼ぶ)の過不足問題が生じている。空コン不足の地点では、輸出荷主が要求する数量の空コンを、適切なタイミングで、適切な場所へ用意する必要がある。そのため、他地点からの空コン回送やリースコンテナの借入が必要である。一方、空コン余剰の地点では、他地点への空コン回送や当該地点での蔵置が必要である。空コンの過不足の是正のためにかかるコスト負担は、コンテナ船社にとって経営を圧迫する大きな要因の1つとなっており、輸送サービスの安定供給を妨げることが懸念される。

空コンが問題となる理由は、空で運ぶ場合にも実入り

と変わらぬ輸送容量が必要となるからである。その問題を緩和するための1つのアイデアとして、折りたたみコンテナ(以下、折りコンと呼ぶ) (図-1)の導入が考えられる。折りコンは、空の状態で折りたたみ、複数個を積み重ね、束ねて扱うことができるので、(1)輸送容量、(2)荷役回数、(3)蔵置スペースの削減が可能である。期待される効果は、集配送コストの削減にとどまらず、道路交通量の減少、CO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>やSO<sub>x</sub>などの排出抑制もある。なお、ここではCO<sub>x</sub>などの排出抑制については明示的に取り扱わない。もし、折りコンの導入によって空コン問題の緩和が実現できれば、世界経済のさらなる発展に貢献できると考える。しかし、折りコンはすでにいくつかの企業によって開発されているものの、未だに実用化されていない。その理由の1つに、コンテナの主なユーザである船社に対して、折りコンの利点が示されていないことが挙げられる。

そこで本研究では、折りコンと標準コンテナ(以下、

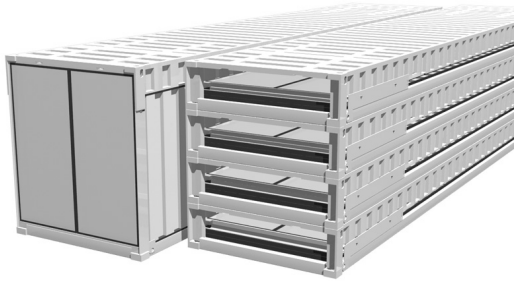
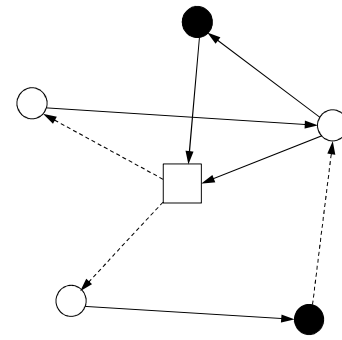


図-1 折りたたみコンテナ (Holland Container Innovations)

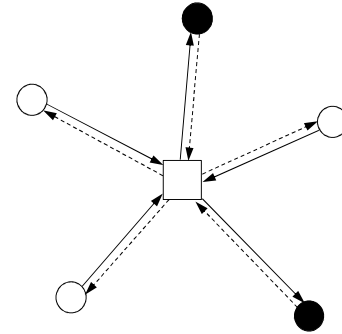
標準コンと呼ぶ)を使った空コンの集配送を比較し、経済的側面から折りコンが空コン回送で優位となりうるのかを検討する。具体的には、分析の対象範囲を港湾背後地の荷主-内陸デポ間および荷主-荷主間の空コンの集配送ネットワークとする。空コンの移動を担当するトレーラの集配送計画を数理モデルとして表現する。本研究では数値実験によって、折りコンが標準コンに比べてどれ程、集配送コストの削減に貢献できるのかを検討する。

## (2) 既往研究

折りコンの経済性を明示的に扱った既往研究はあまり多くない。Konings and Thijs<sup>1)</sup>は、既存の折りコンのデザインを取り上げ、実用化阻害要因について議論している。最大の要因として、折りたたみと組み立て作業の煩雑さを指摘している。Konings<sup>2)</sup>は、いくつかの単純なコンテナ輸送ネットワークを想定し、折りコンと標準コンのコンテナ1個あたりの輸送コストを比較して、折りコンの経済性について論じている。Shintani and Konings<sup>3)</sup>は、コンテナ船の航路ネットワークを流通するコンテナについて、3つのコンテナフリート構成(折りコンのみ、標準コンのみ、折りコンと標準コンの混合)のどれが、船社のコンテナ管理コストを最小とするのかを整数計画モデルによって検討している。その結果、折りコンと標準コンの混合フリートが最適であると結論づけている。Shintaniら<sup>4)</sup>は、港と内陸デポを含む背後地における空コン流動を取り上げ、折りコンか標準コンかの種別、および複数の流動パターンとの組合せをいくつか想定し、折りコンの回送コスト削減効果について分析を行っている。それによって、貿易不均衡の度合いが大きく、港と内陸デポとの距離が大きくなるにつれて、折りコンが有利となると述べている。ただしその研究では、空コンの移動をネットワークフロー問題としてモデル化し、ネットワーク全体から見た折りコンの経済性について議論しているものの、トレーラの運用面については考慮していない。現実問題として、陸上でのコンテナ移動の大部分は、トレーラによって行われる。トレーラはある2地点間を結ぶ道路ルート上を往来する。荷



(a) パターン DX



(b) パターン IX



図-2 トレーラによる集配送パターン

主の数がある一定数を越えると、稼働時間制約の関係で、複数台のトレーラが必要となり、複数のトレーラによる複数ルートが形成されることになる。

本研究では、より現実的な状況を想定するために、空コンの移動をトレーラの集配送問題として捉え、折りコンの経済性について分析を行う。

## 2. 問題設定

### (1) 問題の概要

分析の対象範囲は内陸デポを含む港湾背後地とする。輸入荷主の場所で空になったコンテナは、次節に示すようにトレーラによって2つの集配送パターンに沿って移動すると考える。つまり、i)荷主-内陸デポ間あるいは、ii)荷主-荷主間で移動する。その集配送計画は、想定する空コンの集配送パターンによって異なるが、i)に対応するパターンはピックアップ・デリバリーを考慮した配送計画問題(vehicle routing problem with pick-up and delivery, VRPPD)、ii)に対応するパターンは割当問題(assignment problem, AP)として定式化される。それらのモデルを用いて、折りコンが標準コンに比べてどの程度、集配送コストの削減に貢献できるのかを検討する。

## (2) 想定する集配送ネットワーク

本研究では図-2(a)および(b)に示すような、次の2つのトレーラ走行パターンを想定する。

### i) Direct exchange (DX)

トレーラは、荷主-内陸デポ間および荷主-荷主間を自由に走行する。(VRPPD)

### ii) Indirect exchange (IX)

トレーラは、荷主-内陸デポ間のみの走行が可能で、すべての空コンは一旦、内陸デポに集められる。空コンを要求する荷主へは、内陸デポを経て配送される。(AP)

パターンDXは、トレーラによる荷主間の直接的な空コン移動も可能となっており、パターンIXに比べて効率的なトレーラの集配送が可能であると考えられる。一方、パターンIXは、すべての空コンの移動が内陸デポを経由するので実状に近い。ただし、パターンDXは、次の3つの理由で実現は難しい<sup>9)</sup>。1つ目は、複数の船社をまたがるコンテナの共同利用は不可能である。2つ目は、コンテナは通常、使用された後に港や内陸デポで検査、整備・修理、洗浄が行われるが、それらの拠点を介さない荷主-荷主間の移動では、途中で故障・トラブルが発生した場合に責任の所在が曖昧となる。3つ目は、情報共有システムの不備が挙げられる。

本研究では、2つの集配送パターンを比較して、折りコンがどれほどの集配送コストの削減に寄与するポテンシャルを保有しているのかを確認する。

## (3) 前提条件

以下にモデル作成上の主な前提条件を示す。

i) 本問題の計画期間は、ある時間断面とし、トレーラはその期間内にすべての空コンの移動を完了することとする。

ii) すべてのトレーラは一旦、内陸デポに集結し、そこから集配送を開始する。一通りの作業が終わると、再び内陸デポに戻ってくるものとする。

iii) すべての折りコンは、トレーラへの積み卸しの際に折りたたみ組み立て作業も同時に行われるとする。例えば、組み立てられた状態の折りコン1個のみをトレーラで運ぶ場合は、折りたたみ組み立て作業は必要ない。しかし、折りコンが組み立てられた状態か否かを表す変数を導入すると、モデルが複雑になってしまう。ここではそれを避けるためにこのように考える。

iv) 各地点に移動されたすべての空コンは、トレーラシャーシから卸されるとする。

一般的には、シャーシの状態でバンニングされるが、複雑なモデルを避けるためにこの前提を設ける。

## 3. 定式化

本研究では、2種類のコンテナ(折りコン、標準コン)に対して、それぞれ2つのトレーラの集配送パターン(DX, IX)を考慮するので、合計4つのモデルを構築する。ここでは紙面の都合上、折りコンのパターンDXに関する定式化[FLD\_DX]のみを記述する。

このモデルはVRPPDとして定式化される。各荷主のもとで集配送されるコンテナ数を1台のトレーラで移動できないときは、他のトレーラで運ぶことができるもとする。海上コンテナ輸送で一般的に使用されるコンテナサイズは2種類(20フィート、40フィート)であるが、今回は20フィートコンテナについてのみ考慮する。

[FLD\_DX]

$$\text{Minimize } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} TC_{ij} X_{ij}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} (HC_i + UC_i) H_i^k + VC \cdot V + FC \cdot F \quad (1)$$

subject to

$$1 \leq \sum_{k \in K} Y_i^k \leq V \quad \forall i (\neq d) \in N, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} Y_d^k = V, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ij}^k = \sum_{j \in N} X_{ji}^k = Y_i^k \quad \forall i \in N, k \in K, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} X_{ij}^k \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq N - \{d\}, k \in K, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} Z_{ij}^k - \sum_{h (\neq d) \in N} \sum_{k \in K} Z_{hi}^k = P_i - D_i \quad \forall i (\neq d) \in N, \quad (6)$$

$$Z_{ij}^k \leq 4X_{ij}^k \quad \forall i, j \in N, k \in K, \quad (7)$$

$$-H_i^k \leq \sum_{j \in N} Z_{ij}^k - \sum_{h (\neq d) \in N} Z_{hi}^k \leq H_i^k \quad \forall i (\neq d) \in N, k \in K, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} T_{ij} X_{ij}^k \leq L^k \quad \forall k \in K, \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N} P_i = F, \quad (10)$$

$$Z_{ij}^k \geq 0 \text{ and integer}, \quad \forall i, j \in N, k \in K, \quad (11)$$

$$H_i^k \geq 0 \text{ and integer}, \quad \forall i \in N, k \in K, \quad (12)$$

$$F, V \geq 0 \text{ and integer}, \quad (13)$$

$$X_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, k \in K, \quad (14)$$

$$Y_i^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, k \in K. \quad (15)$$

ここで、 $N$  : 荷主および内陸デポのノード集合、 $K$  : トレーラの集合、 $S$  : 集合  $N$  の部分集合、 $d$  : 内陸デポのノード番号、 $P_i$  : ノード  $i$  で集荷されるコンテナ数、 $D_i$  : ノード  $i$  へ配送されるコンテナ数、 $L^k$  : トレーラ  $k$  の稼働時間、 $TC_{ij}$  : リンク  $ij$  のトレーラの変動費、 $HC_i$  : ノード  $i$  での荷役コスト、 $UC_i$  : ノード  $i$  での折りたたみ組み立てコスト、 $VC$  : トレーラの固定費、 $FC$  : 折りたたみコンテナの保有コスト、 $X_{ij}^k$  :  $=1$  トレーラ  $k$  がリンク  $ij$  間を移動するとき、 $=0$  そうでないとき、 $Y_i^k$  :  $=1$  トレーラ  $k$  がノード  $i$  に立ち寄るとき、 $=0$  そうでないとき、 $Z_{ij}^k$  : トレーラ  $k$  によるリンク  $ij$  でのコンテナ輸送量、 $H_i^k$  : ノード  $i$  においてトレーラ  $k$  へ積み卸しされるコンテナ数、 $V$  : トレーラの台数、 $F$  : ネットワーク中の保有コンテナ数。

ここでは、一般的に知られているVRPPDの基本的な定式化とは異なる部分についてのみ説明を加える。目的関数(1)はトレーラ変動費、荷役コスト、折りたたみ組み立てコスト(以下、F/UFコストと呼ぶ)、トレーラ固定費およびコンテナ保有コストを合計した総コストの最小化である。式(2)は各ノードへすべてのトレーラが立ち寄ることを許可する。荷主ノードにおいて、トレーラの集配送で積み残しあるいは不足が生じた場合は、他のトレーラによってそれを満たすことができると考える。式(6)ではトレーラ  $k$  によるリンク  $ij$  のコンテナ輸送量を算出している。式(7)はリンク  $ij$  の輸送容量の制約である。本研究では、4個のコンテナを折りたたみ、束ねると、もとのコンテナ1個分の容積と等しくなる折りコンを採用するので“4”という数字が入る。式(8)はノード  $i$  で荷役されるコンテナ数を算出している。この値は絶対値をとることから、この形の式となる。式(10)はネットワーク上で集配送されるコンテナを合計し、それを船社の保有コンテナと定義する。

#### 4. 数値実験

本問題の数値計算を行うにあたって、LINDO社の数理計画パッケージソフトLINGO10.0を用いた。ここでは、折りコンと標準コンの総コストの差が大きかった集配送パターンDXの計算結果のみを示す。なお、講演時にはパターンIXの結果も示す予定である。本研究で扱うパターンDXのVRPPDは、ノード数や取り扱いコンテナ数がある一定数を上回ると、現実的な計算時間内の求解が困難となる。ただし今回は、折りコンが持つ基本的な性能を考察することを目的とするので、ヒューリスティック解法の開発は行わない。これについては今後の課題とする。

#### (1) データ設定

分析対象エリアとして、オランダ・ロッテルダム港の背後地を取り上げ、ドイツとの国境付近に所在する内陸デポと、その周辺に点在する荷主を想定する。以下にその他のデータ設定を示す。各コストデータはコンテナメーカーへのヒアリング調査の結果を参考にして設定する。

- i) ノード数 : 内陸デポ×1, 荷主×6
- ii) 内陸デポと荷主との距離 : 5~120 km
- iii) 取り扱いコンテナの総数 : 50 TEU
- iv) トレーラ変動費( $TC_{ij}$ ) : 7~174 US\$  
トレーラの走行距離によって異なる
- v) 荷役コスト( $HC_i$ ) : 70 US\$/TEU
- vi) F/UFコスト( $UC_i$ ) : 70 US\$/TEU (基準値)  
折りコンのみにかかる。ここでは基準値を荷役コストと等値であると仮定する
- vii) トレーラ固定費( $VC$ ) : 105 US\$
- viii) コンテナ保有コスト( $FC$ ) : 24 US\$/TEU (折りコン), 12 US\$/TEU (標準コン)  
折りコンは標準コンの2倍と仮定する

#### (2) 数値実験で注目する要因

数値計算において、次の2つの要因に注目する。それらが解にどのように影響を及ぼすのかを考察する。

##### (a) 貿易不均衡

空コンの回送量は、貿易不均衡の度合いに依存する。分析対象とするエリアでの輸入量と輸出量の比は、概ね2:1程度である<sup>4)</sup>。ここでは、その比率を3段階に変化(1:1, 2:1, 3:1)させて計算を行う。ただし、この比はすべての荷主の輸出量と輸入量の合計の値である。つまり、その比率が1:1の場合は港背後地の貿易量が均衡している状態を表し、3:1の場合は輸入コンテナ数が輸出の3倍であることを意味する。なお、貿易不均衡の度合いが変化しても、輸入量と輸出量の総量は一定とする。ここでの計算では、F/UFコストは基準値を用いる。

##### (b) F/UFコスト

折りコンの実用化の障壁となっている1要因である、F/UFコストを7段階に変化(×1(基準値)~×4)させて計算を行う。その意図は、各荷主によってF/UFコストの捉え方が異なるからである。また、折りコンがどの程度までのF/UFコストであれば、標準コンに対して有利であるのかを考察するためである。

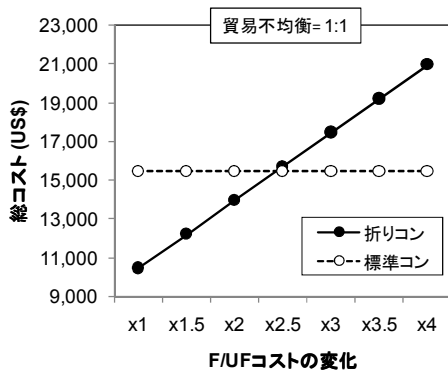
#### (3) 実験結果

##### (a) 貿易不均衡

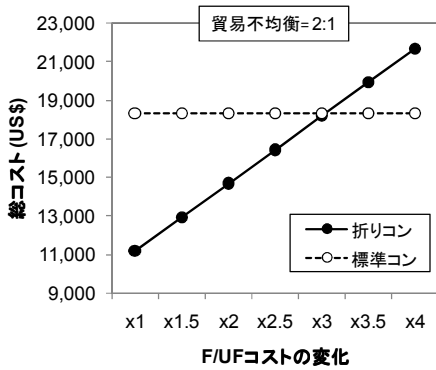
表-1は、貿易不均衡の度合いを段階的に与えたときの折りコンと標準コンの総コストおよびその他の比較を表している。貿易不均衡の度合いが大きくなっても、折りコンの総コストは標準コンのようには上昇しない。トレ

表-1 折りコンと標準コンの比較

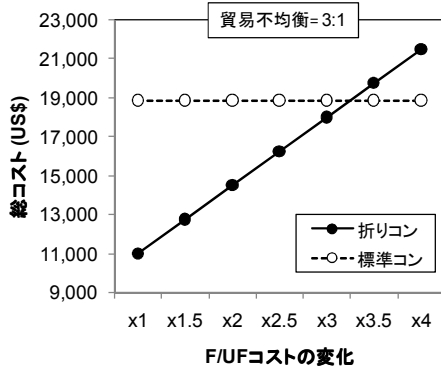
貿易不均衡= 1:1	折りコン	標準コン
総コスト(US\$)	10,469	15,463
トレーラ使用台数	6	21
トレーラ総走行距離(km)	1,596	5,392
貿易不均衡= 2:1		
総コスト(US\$)	11,180	18,331
トレーラ使用台数	8	29
トレーラ総走行距離(km)	1,658	5,526
貿易不均衡= 3:1		
総コスト(US\$)	11,001	18,853
トレーラ使用台数	8	31
トレーラ総走行距離(km)	1,485	5,615



(a) 貿易不均衡= 1:1



(b) 貿易不均衡= 2:1



(c) 貿易不均衡= 3:1

図-3 F/UFコストの変化に対する総コスト

ーラの使用台数と走行距離をみると、折りコンを使ったケースの方が数値が小さい。

(b) F/UFコスト

図-3(a)~(c)は、F/UFコストを段階的に与えたときの総コストの変化を示している。貿易不均衡の度合いが大きくなるにつれて、折りコンと標準コンの総コストの交点は、右上方向に移動している。これは、貿易不均衡の度合いが大きくなるほど、折りコンが有利となることを意味する。

5. おわりに

近年、アジア諸国の経済発展によって、アジア-欧米間で貿易不均衡が拡大し、空コンテナの回送問題が深刻化している。その問題を緩和するための1つの方策として、折りたたみコンテナの導入が考えられる。

そこで本研究では、折りたたみコンテナと標準コンテナを使った空コンテナの集配送を経済的側面から比較し、折りたたみコンテナが空コンテナの回送の観点から優位性を持つのかを検討した。具体的には、分析の対象範囲を港湾背後地の荷主-内陸デポ間および荷主-荷主間の空コンテナの集配送ネットワークとし、空コンテナの移動を担当するトレーラの集配送計画を数理モデルとして表現した。本研究では数値実験によって、折りたたみコンテナが標準コンテナに比べてどの程度、集配送コストの削減に貢献できるのかを検討した。

その結果、次のことが明らかになった。

- 1) 折りたたみコンテナは、貿易不均衡が大きくなるにつれて有利となる。これは折りたたみコンテナの場合、1台のトレーラに複数個のコンテナを積んで運ぶことができるので輸送効率がよいからである。しかし、折りたたみコンテナの優位性は、組み立てコストに依存するため、如何にこのコストを下げるかが課題となる。
- 2) 折りたたみコンテナは、標準コンテナに比べて、トレーラの必要台数や走行距離を大幅に減らすことができる。つまり、折りたたみコンテナは、道路渋滞の緩和や間接的であるがCO<sub>x</sub>などの排出抑制に貢献できると考える。

今後の課題としては、本研究で扱うモデルは、荷主のノード数および取り扱いコンテナ数がある一定以上となると、現実的な計算時間での求解が困難となる。その問題の解決には、ヒューリスティック解法の開発が必要である。

謝辞：本研究の一部は、科研費(基盤(C) No.22510149)によった。

## 参考文献

- 1) Konings, R., Thijs, R.: Foldable containers: a new strategy to reduce container repositioning costs, technological, logistics and economic issues, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, Vol.1, No.4, pp.333–352, 2001.
- 2) Konings, R.: Foldable containers to reduce the costs of empty transport? A cost-benefit analysis from a chain and multi-actor perspective, *Maritime Economics & Logistics*, Vol.7, No.3, pp.223–249, 2005.
- 3) Shintani, K., Konings, R.: The impact of foldable containers on container fleet management costs in liner shipping networks, Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation and Logistics, CD-ROM, 2010.
- 4) Shintani, K., Konings, R., Imai, A.: The impact of foldable containers on container fleet management costs in hinterland transport, *Transportation Research Part E*, Vol.46, No.5, pp.750–763, 2010.
- 5) Hanh, L. D.: The Logistics of Empty Cargo Containers in the Southern California Region: Are Current International Logistics Practices a Barrier to Rationalizing the Regional Movement of Empty Containers?, METRANS Research Project Final Report, 2003.

## EMPTY CONTAINER MANAGEMENT WITH THE VEHICLE ROUTING PROBLEM ON FOLDABLE CONTAINERS IN HINTERLAND TRANSPORT

Koichi SHINTANI, Akio IMAI, Ken'ichiro NAGAIWA and Yasuhito TANAKA