

トランシップ内生化による港湾間輸送モデルの 組み合わせ要素の削減に関する研究

外井哲志

正会員 工博 九州大学助教授 大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

E-mail : toi@doc.kyushu-u.ac.jp

本研究の輸送モデルは、複数の港湾間でコンテナ貨物を輸送する場合に、荷役費用を含んだ輸送費用が最小になる最適輸送パターンを線形計画法に基づいて求めるものであり、施設整備の前後の条件を入力データとしてそれぞれの最適輸送パターンを計算し、輸送費用の変化を施設整備の効果としてとらえることが可能であるが、適用ケースの規模が大きくなった場合、貨物船の経路および貨物船間のトランシップの組み合わせが増大し、総組み合わせケースが膨大となるため、実質的に計算が不可能となる。そこで、本研究では、貨物船間のトランシップの組み合わせを内生化する変数と制約条件を導入して、それらの変数が最適化計算の過程で決定される数学モデルの定式化を試み、これに伴う計算量の削減効果について検討したものである。

Key Words : linear programming, transportation problem, container, port planning

1. 研究目的

本研究は、特定港湾における荷役システムの導入や大水深岸壁整備に基づく港湾機能の向上が、その港湾を取り巻くコンテナ貨物輸送の構造に与える影響について分析することを目的とした一連の研究の一部である。

関連する研究として次のような研究がある。

まず、コンテナ貨物の港湾間輸送を取り扱った研究として、福地¹⁾は、リニア駆動搬送台車を用いた高密度集積コンテナストックヤードの概念設計を行い、リニア駆動のコンテナ搬送システムの有効性を示した。

また、ゲーム論的な考え方に基づく研究として、黒田ら²⁾は、荷主と船社のゲーム的關係から国内コンテナ貨物の流動分析を行っている。藤野ら³⁾は、国際コンテナ航路の港湾別寄港頻度の予測を行って、荷主と船社の非協力ゲーム理論を用いている。著者ら⁴⁾は、特定港湾の施設整備による港湾機能の向上が港湾ネットワーク全体に与える影響について、荷主と船社の非協力ゲームに基づく港湾選択行動モデルを作成し、貨物取扱量や輸送コストの変化を算出した。

家田ら⁵⁾は、アジア圏の代表的な港湾を対象として、港湾内・港湾間の貨物流動をネットワーク配分問題としてモデル化している。

これらに対し、著者ら⁶⁾は、港湾ネットワーク全体の輸送コストが最小となるようにコンテナ輸送が行われると仮定し(システム最適化)、ある特定港湾の機能向上がネットワーク全体に与える影響について分析することを目的とした港湾間輸送モデルを開発した。また、港湾におけるコンテナのトランシップと港湾の係留容量(水深も含む)が相互に深く関わっていることに着目し、これを個々の港湾レベルでマイクロに表現するため、スケジュール制約を導入し、線形関数のみでトランシップを扱えるよう定式化を工夫した。さらに、需要をODではなく発生集中のみで与え、コンテナ流動、航路の自由度を与えた点など、他の研究にはみられない特徴である。

以下、このモデルを『基本モデル』と呼ぶことにする。基本モデルはシステム最適化の立場を取っており、所与の輸送条件に対して得られる輸送費用は、現実のいかなる輸送パターンよりも小さい。すなわち、システム最適化によって施設が最も効率的に利用された場合の輸送費用は、最低限必要な輸送費用であるとみなせることから、本研究では、施設整備によるその変化を施設整備の純粋な効果と考え、これを分析対象としようとするものである。

さらに、基本モデルを用いることにより、輸送の最適化の過程で生じるコンテナ貨物の積替えの発生量から、施設整備と港湾のハブ機能の関係についても考察を加え、ハブ港湾の実現を可能にするための

施設整備の質と規模について分析することもできる。

しかし、基本モデルでは、港湾数・貨物船数が大きくなった場合、貨物船の経路の組み合わせ、および貨物船間のトランシップの組み合わせが増大し、その結果として組み合わせ総数が膨大になるため、実質的に計算が不可能になるという欠点があった。

そこで、本研究では、上記2つの組み合わせ要素のうち、貨物船間のトランシップの組み合わせに着目し、これを条件として外生的に与えるのではなく、内生的に取扱うための変数と制約条件を導入することによって、組み合わせ総数の削減を図ろうとするものである。このため、それらの変数が最適化計算の過程で決定されるような数学モデルの定式化を試みるとともに、計算量に関する改良の効果について述べる。

2. 港湾間輸送モデルの基本型

(1) 基本モデルの概要⁶⁾

本モデルは、港湾配置、港湾規模（水深別バース数）と荷役速度、港湾での使用料金、貨物船の数と規模、各港湾での輸出入量、輸出入量を既知量としたうえで、各港での各貨物船の積降ろし量、貨物船相互のトランシップ量、各貨物船の出港時刻を変数として求める。本モデルは、港湾の規模、荷役速度、料金等を政策変数とし、これらを変化させつつ、最小輸送費用の変化を分析するといった使い方ができる。

計算は、①輸送経路とトランシップの設定、②線形計画法による計算のための入力データの作成、③線形計画法による最適解の計算、④港湾容量のチェック、の手順で実行するが、②～④は①で設定した輸送パターンごとに行う。

本モデルでは、図-1に示すように船積→運航→入港待ち→陸揚の一行程を貨物船sの第r番目の航路便(s,r)と表し、これを単位とした変数の設定を行った。なお、r=eは一定期間内における貨物船sの最終航路便を表す。

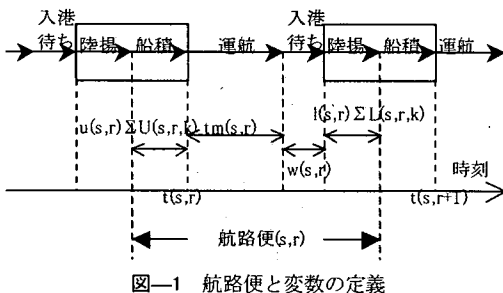


図-1 航路便と変数の定義

(2) 輸送経路、トランシップの組み合わせ数

入力データの貨物船の大きさと港湾の岸壁水深を考慮して、寄港可能な港湾の中から最大寄港数の範囲内で、いくつかを経由する経路を全て列挙する。ここで、貨物船 $s(1 \leq s \leq S)$ の経路数を $r(s)$ とすると、経路組み合わせ総数は、 $M=r(1) \times r(2) \times \dots \times r(S)$ 通りである。

ある貨物船の航路便の目的港が、他貨物船の航路便の出発港となっている場合、この2つの航路便間でトランシップ輸送が可能である。ある経路組み合わせ(m)の全体でトランシップ輸送可能な航路便の組み合わせ数が $k(m)$ である場合、トランシップ輸送を全く行わない場合から全てを行う場合まで含めると、トランシップ組み合わせ総数は $2^{k(m)}$ 通りとなる。したがって、計算ケースの総数は $\sum_{m=1, M} 2^{k(m)}$ となる。

(3) 線形計画モデル

a) 目的関数

目的関数はコンテナ輸送に関わる総費用であり、これを最小化する以下の式で表す。

式(1)において、第1項は貨物船の総運航費用と入港料、第2項は港湾での荷役費用、第3項は貨物船乗組員の賃金および減価償却費等の船費である。

Minimize

$$Z = \sum_s \sum_r \left\{ Dis(o(s,r), d(s,r)) \cdot Fuel(s) + fp(d(s,r)) \right. \\ + \sum_s \sum_r \left\{ f(s,r) \cdot \sum_k L(s,r,k) + g(s,r) \cdot \sum U(s,r,k) \right. \\ \left. \left. + g(s,r) \cdot \sum_{o(sr,s'r')} \sum_k TRk(sr,s'r') \right\} \right\} \\ + \sum_s \left\{ t(s,e) + tm(s,e) + w(s,e) + u(s,e) \cdot \sum_k U(s,e,k) \right. \\ \left. + u(s,e) \cdot \sum_{o(se,s'r')} \sum_k TRk(se,s'r') \right\} \cdot b(s) \quad (1)$$

ここに、

$Dis(i,j)$: 港湾 i と港湾 j 間の海上距離(km),
 $o(s,r), d(s,r)$: それぞれ航路便(s,r)の出発港、目的港,

$fp(d(s,r))$: (s,r)の目的港における入港料等,
 $Fuel(s), b(s)$: それぞれ貨物船 s の燃料費(円/km), 船費(円/時間),

$t(s,r), tm(s,r), w(s,r)$: それぞれ航路便(s,r)の出発時刻、運航時間(時間)、入港待ち時間(時間),

$f(s,r), g(s,r)$: それぞれ航路便(s,r)の出発港、目的港での 1TEU 当たり荷役費用(円/TEU),

$l(s,r), u(s,r)$: それぞれ航路便(s,r)の出発港、目的港での 1TEU 当たりの荷役時間(時間/TEU),

$L(s,r,k)$, $U(s,r,k)$: それぞれ航路便(s,r)の品目 k の船積み量と陸揚げ量(TEU),

$TR_k(sr,s'r')$: 航路便(s,r)から航路便(s',r')への品目 k に関するトランシップ貨物量,

$\alpha(sr,s'r')$: 航路便(s,r)と航路便(s',r')の間でトランシップ輸送を行う場合は1, 行わない場合は0.

なお, (s,e)は貨物船 s の最終航路便を表しており, 式(1)の第3項の { } 内は最終航路便で目的港に到着し荷役を終える時刻である. 本モデルでは, 計算開始時刻 $t=0$ を輸送開始時刻としているので, 式(3)の { } 内は貨物船 s の総稼働時間を意味しており, これに船費 $b(s)$ を乗じて運航費用を求めたものである.

b) 制約条件

図-2 に港湾内コンテナ貨物流動の一例を示す.

この図では, 貨物船3は港湾の実輸出入コンテナの積み降ろしを行い, 貨物船1, 2, 4は実輸入の陸揚げとともに, 貨物船4から1と2へのトランシップを行っている様子を示している.

図-2のようにコンテナ輸送種類別に変数を作ると, 制約条件には, 以下①~⑥の制約条件が考えられ, これらの制約条件式は線形式で表現できる.

① 実輸送に関する条件

各港の輸出货量(輸入量)は, その港湾を出港(入港)する貨物船の実輸船舶積み量の総和で表される.

$$\left. \begin{aligned} \sum_{\sigma(s,r)=i} L(s,r,k) &= Sik & (\text{for all } i,k) \\ \sum_{d(s,r)=i} U(s,r,k) &= Dik & (\text{for all } i,k) \end{aligned} \right\} (2)$$

ここに,

Sik , Dik : それぞれ港湾 i 品目 k の輸出货量, 輸入量.

② 港湾におけるトランシップ貨物に関する条件

各港湾において, トランシップ船積み量の総和とトランシップ陸揚げ量の総和は等しい.

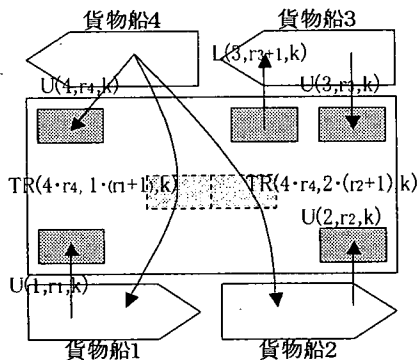


図-2 港湾内コンテナ貨物流動

$$\sum_{\sigma(s,r)=i} \sum_k TR_k(s'r',sr) = \sum_{d(s'r')=i} \sum_k TR_k(s'r',sr) \quad (3)$$

③ 品目別の積載量と輸送量に関する条件

航路便(s,r)の積載量は, $r \neq 1, e$ の場合, 航路便(s,r-1)の積載量から航路便(s,r-1)の陸揚げ量を除き, 航路便(s,r)の船積み量を加えたものに等しい.

$$\left. \begin{aligned} x(s,1,k) &= L(s,1,k) & (\text{for all } s,k) \\ x(s,r,k) &= x(s,r-1,k) - U(s,r,k) + L(s,r,k) \\ & - \sum_{\sigma(sr,s'r')=1} \sum_k TR_k(sr,s'r') + \sum_{\sigma(sr,s'r')=1} \sum_k TR_k(s'r',sr) & (\text{for all } s,r > 1,k) \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに, $x(s,r,k)$: 航路便(s,r)の品目 k の輸送量.

④ 貨物船の積載量に関する条件

航路便(s,r)の積載量は, 貨物船 s の積載容量を上限とする.

$$\sum_k x(s,r,k) \leq a(s) \quad (\text{for all } s,r) \quad (5)$$

ここに, $a(s)$: 貨物船 s の積載容量.

⑤ 運航時刻に関する条件

航路便(s,r)の出港時刻は, 航路便(s,r-1)の出港時刻に運航時間 $tm(s,r-1)$ と入港待ち時間 $w(s,r-1)$ を加え, さらに航路便(s,r-1)の陸揚げ作業時間と航路便(s,r)の船積み作業時間を加えた時刻以降でなければならない. この関係を式(6)に示す. なお, 航路便(s,1)の出港時刻は船積み作業時間のみとなる. また, 最終航路便(s,e)においては, すべての貨物の荷下ろしが終了する時刻は単位輸送期間長 T 以下でなければならない. この関係を式(7)に示す.

T は貨物量の大小を決定するとともに, ある一定期間に発生した輸送需要をその期間内に輸送することを表現するために設定した時間である.

$$\left. \begin{aligned} t(s,1) &\geq l(s,1) \cdot \sum_k L(s,1,k) & (\text{for all } s) \\ t(s,r) &\geq t(s,r-1) + tm(s,r-1) + w(s,r-1) \\ & + u(s,r-1) \cdot \left\{ \sum_k U(s,r-1,k) + \sum_{\sigma(sr,s'r')=1} \sum_k TR_k(sr-1,s'r') \right\} \\ & + l(s,r) \cdot \left\{ \sum_k L(s,r,k) + \sum_{\sigma(sr,s'r')=1} \sum_k TR_k(sr,s'r') \right\} & (\text{for all } s,r > 1) \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned} t(s,e) + tm(s,e) + w(s,e) \\ + u(s,e) \cdot \left\{ \sum_k U(s,e,k) + \sum_{\sigma(sr,s'r')=1} \sum_k TR_k(sr,s'r') \right\} &\leq T & (\text{for all } s) \end{aligned} \right\} (7)$$

ここに、 T : 単位輸送期間長.

⑥積み替えのための時間調整に関する条件

航路便 (s,r) から航路便 (s',r') へトランシップ輸送が行われる場合、航路便 (s',r') の出発時刻は、航路便 (s,r) の出港時刻に、航路便 (s,r) の運航時間、入港待ち時間と航路便 (s,r) での陸揚げ作業時間を加えた時刻以降となる。

ここで、貨物船 s' が貨物船 s の到着を待っていた場合には、貨物船 s の陸揚げと同時に貨物船 s' の船積みを始めることができるので、 (s',r') の船積み作業時間は、式(8)の右辺第4項となる。すなわち、式(8)は (s,r) から (s',r') へのトランシップが可能であるための最低条件(必要条件)である。

$$t(s',r') \geq t(s,r) + tm(s,r) + w(s,r) + \sum_{\sigma(sr,s'r')=1} u(s,r) \sum_k TR_k(sr,s'r') \quad (\text{for all } \sigma(sr,s'r')=1) \quad (8)$$

(4) 港湾容量制限

上述のモデルによって計算された貨物船の運航があらかじめ設定した港湾毎の係留可能数の上限を超過しないよう制限する必要がある。しかし、この制約条件は線形式として表現することは容易ではない。そこで本研究では、計算結果が容量を超過した場合は、その貨物船の入港を単位時間 (Δt) だけ遅らせ $(w(s,r)=w(s,r)+\Delta t)$ 、それを制約条件の制限値に加え再計算を行うものとしている。

3. トランシップの内生化

本研究では、 (s,r) から (s',r') へのトランシップの有無を内生的に求める数理モデルについて述べる。

以下では、従来の港湾間輸送モデルである『基本モデル』に対して、トランシップ内生化型モデルを『内生化モデル』と称して両者を区別する。

(1) 定式化

本研究では、 (s,r) から (s',r') へのトランシップの有無を内生的に求める数理モデルについて述べる。

式(8)は、航路便 (s,r) から (s',r') へのトランシップコンテナがすべて陸揚げされた後でなければ、 (s',r') は出航できないことを示している。また、式(8)は (s',r') が行うトランシップ回数だけ必要であり、それらの中で右辺が最大となる式が真の必要条件として機能することになる。

さて、ここで、トランシップの有無と制約条件の働きの関係について考える。 (s,r) から (s',r') へのトランシップがある(必要な)場合には、 $\sum_k TR_k(sr,s'r') \geq 0$ となり、同時に式(8)が成り立っていないなければならない。一方、トランシップがない(不要な)場合には $\sum_k TR_k(sr,s'r') = 0$ であり、式(8)が成り立つ必要はない。したがって、こうした関係を同時に成立させるために、トランシップ量が正值の場合には式(8)を保存し、トランシップ量が0の場合には式(8)を無力化する方法を考える必要がある。そこで、式(8)を次式(9)のように修正し、式(10)、式(11)の制約条件を追加する。

$$t(s',r') \geq t(s,r) + tm(s,r) + w(s,r) + \sum_{\sigma(sr,s'r')=1} u(s,r) \sum_k TR_k(sr,s'r') + M \left\{ \sum_k TR_k(sr,s'r') - \theta(sr,s'r') \right\} \quad (9)$$

$$\sum_k TR_k(sr,s'r') \leq \theta(sr,s'r') \quad (10)$$

$$\theta(sr,s'r') \geq \varepsilon \quad (11)$$

ここに、 M は極めて大きな正数、 ε は小さな正数、 εM は十分大きな正数であるとする。

式(9)は、式(8)右辺に第5項を追加したものであり、トランシップが正值の場合には第5項が0となって式(8)が成立し、トランシップが0の場合には第5項が絶対値の大きな負値をとることによって式(8)が成立しないようにすることを意図したものである。

式(10)、(11)は、式(9)がその機能を果たすことができるよう $\theta(sr,s'r')$ の範囲を限定したものである。以下、上の3式を連立させることによって、上述の目的を達成できるか考察する。まず、

$$\alpha = \sum_k TR_k(sr,s'r') \quad (12)$$

$$\beta = t(s',r') - t(s,r) - tm(s,r) - w(s,r) - \sum u(s,r)\alpha \quad (13)$$

とおく。

ここで、 β は (s,r) が港に到着してからトランシップ貨物を下ろし終える時刻と、 (s',r') の出港時刻との差を表しており、前者が後者よりも小さければ正、大きければ負の値をとる。

$\theta(sr,s'r')$ を単に θ と表現すると、式(9)は、

$$\beta \geq M \{ \alpha - \theta \} \quad (9)$$

調整変数 y_0 を導入して式(9)を等式化すれば、

$$\beta - y_0 = M \{ \alpha - \theta \} \quad (9-1)$$

さらに、調整変数 y_1 と y_2 を導入して、式(10)と式

表-1 可能解の存在条件($\alpha=0$ の場合)

① $y_0' = 0$ の場合 $\theta = -\beta', y_1 = -\beta', y_2 = -\beta' - \varepsilon$ ($\beta' < 0$ かつ $\varepsilon \leq -\beta'$ のとき, 可能解)
② $y_1 = 0$ の場合 $\theta = 0, y_0' = \beta', y_2 = -\varepsilon$ (可能解なし)
③ $y_2 = 0$ の場合 $\theta = \varepsilon, y_1 = \varepsilon, y_0' = \varepsilon + \beta'$ ($\beta' \geq 0$ のとき, または $\beta' < 0$ かつ $\varepsilon \geq -\beta'$ のとき, 可能解)

(11)を等式化すると,

$$\alpha - \theta + y_1 = 0 \quad (10-1)$$

$$\theta - y_2 = \varepsilon \quad (11-1)$$

が得られる.

さて, $\alpha = \Sigma_k \text{TR}_k(s_r, s'_r) = 0$ のとき, 式(9-1)より,
 $\theta + \beta' - y_0' = 0 \quad (9-2)$

ここに, $\beta' = \beta/M, y_0' = y_0/M$

したがって, $\alpha = 0$ のときには, 式(9-1), (10-1), 式(11-1)は, それぞれ,

$$\theta - y_0' = -\beta' \quad (9-2)$$

$$\theta - y_1 = 0 \quad (10-2)$$

$$\theta - y_2 = \varepsilon \quad (11-2)$$

と表すことができる.

これらの3式は, 制約条件を等式化したものである. 可能解が存在するためにはこれらが同時に成立しなければならない. 3つの式の未知数が5個であり解が一意に定まらないので, 各未知数を非基底変数としたときに可能解が存在するかを調べる. ところで, θ は式(11)より正值であることが明らかである. また β' は, 複数の決定変数の合成変数であるため, 非基底変数として取り扱うことができない. そこで, y_0', y_1, y_2 の3変数を非基底変数の候補として, 可能解の存在条件を調べたのが表-1である.

ケース②では y_2 が負となるため可能解は存在しないが, ケース①とケース③では, β' と ε の関係によっていずれかに可能解が存在する. すなわち, $\beta' < 0$ かつ $\varepsilon \leq -\beta'$ の場合にはケース①が可能解をもち, $\beta' \geq 0$ の場合または $\beta' < 0$ かつ $\varepsilon \geq -\beta'$ の場合には, ケース③が可能解をもつことがわかる. したがって, $\beta'(\beta)$ の正負に関わりなく, 可能解が存在するといえる.

ここで, 式(9)の右辺第5項 $M(\alpha - \theta)$ は, ケース①では $\beta'M (= \beta)$ となり, 式(9)が $\beta = \beta$ となって無意味な解であるといえる. また, ケース③では $M(\alpha - \theta) = -\varepsilon M$ となるが, εM は絶対値が十分に大きな正の数であることから式(9)の右辺は負となり, 式(9)は無力化される. 以上のように, ケース

表-2 可能解の存在条件($\alpha > 0$ の場合)

① $y_0' = 0$ の場合 $\theta = \alpha - \beta', y_1 = -\beta', y_2 = \alpha - \beta' - \varepsilon$ (可能解なし)
② $y_1 = 0$ の場合 $\theta = \alpha, y_0' = \beta', y_2 = \alpha - \varepsilon$ ($\alpha > \varepsilon$)
③ $y_2 = 0$ の場合 $\theta = \varepsilon, y_1 = \varepsilon - \alpha, y_0' = \varepsilon + \beta' - \alpha$ ($\alpha < \varepsilon$)

①, ケース③のいずれの場合も, $t(s,r)$ と $t(s',r')$ の関係は式(9)によって規定されず, 結局 $\alpha = 0$ の場合には, 式(9)は無力化されることがわかる.

次に, $\alpha > 0$ の場合を考える. 同様に,

$$\theta - y_0' = \alpha - \beta' \quad (9-3)$$

$$\theta - y_1 = \alpha \quad (10-3)$$

$$\theta - y_2 = \varepsilon \quad (11-3)$$

と表わされる.

$\alpha > 0$ の場合, (s,r) と (s',r') の間のトランシッブが生じるので, 式(8)が成立する必要がある. $\beta' > 0$ でなければならない. このことを考慮して, 可能解の存在条件を分析すると表-2が得られる.

$\alpha > 0$ の場合は, $\beta' > 0$ を前提とすると $y_1 < 0$ となり, ケース①は可能解が存在しない. ケース②と③は $\alpha > 0$ であれば, $\alpha > \varepsilon$ と $\alpha < \varepsilon$ に関わらず可能解が得られることを示している. そして, ケース②では $\theta = \alpha$ なので, 式(9)右辺の第5項 $M(\alpha - \theta)$ は0となり, 式(9)は式(8)に一致する.

一方, ケース③では, $\alpha < \varepsilon$ の条件下で可能解が得られるが, この場合, (s,r) から (s',r') へのトランシッブが ε 以下と微小であり, 実質的にはトランシッブは発生しない.

また, 計算結果に対する式(9)による拘束の程度については以下のように考えられる.

ケース③では $\theta = \varepsilon$ であるため, 式(9)右辺の第5項が $M(\alpha - \varepsilon) < 0$ となる. α が ε に対して十分に小さければ, $M(\alpha - \varepsilon)$ が絶対値の大きな負値をとるため, 式(9)は無力化される. しかし, α と ε の差が小さくなるにつれ, $M(\alpha - \varepsilon)$ が0に近づくため, 式(9)は近似的に式(8)とみなされる. すなわち, ケース③ではトランシッブ量の大小と式(9)の拘束の強弱が連動し, 連続的に変化する構造であることが理解できる.

以上の考察のように, トランシッブの有無にかかわらず, 式(9), (10), (11)の連立によって可能解が得られ, 意図した制約条件も機能することがわかる.

(2) 内生モデルの適用例

これまで述べた内生モデルに関して, 港湾で2

隻の貨物船が相互にコンテナをやり取りする状況と、そのトランシップがお互いに出港時刻に影響を与える状況を同時に確認することを目的として、4 港湾、2 貨物船、2 品目の簡単なケースに適用する。本例では、図-3 に示したように、貨物船1は港湾1と2に寄港でき、貨物船2は港湾2、3、4に寄港できることとした。また、港湾2において貨物船1と2の間で貨物のトランシップが可能であるので、(1,1)→(2,2)と(2,1)→(1,2)の2組の積替え量に関する変数を導入した。基本モデルによる計算では、可能なトランシップすべての有無を組み合わせると4回の計算が必要であるが、内生モデルを用いた本法では、トランシップが効果的な場合のみ、積替え量の変数が正値をとるため、1回の計算で済む。

表-3に港湾の入港料、タグボート使用料、コンテナ取扱い時間、岸壁使用料を、表-4に貨物船の重量、積載能力、運航速度、燃費、船費を示す。表-3の内容は全港湾に共通とした。本例では、普通と大型の2つのタイプの貨物船を使用した。各港湾の品目別輸出入量を表-5に示す。最適解は表-6、図-3に示すとおりである。

本例の場合には2隻の貨物船の間で同時に2組の

表-3 港湾使用の費用等

入港料 (円/ton)	タグボート使 用料(円/ton)	コンテナ取扱時 間(時間/TEU)	岸壁使用料間 (円/時/ton)
2.6	3.0	0.0125	0.75

表-4 貨物船のサイズと費用

重量 (ton)	積載能力 (TEU)	運航速度 (km)	燃費 (円/km)	船費 (円/時間)
40000	300	23	825	146886
60000	500	24	1203	209306

表-5 輸出入量 (単位:TEU)

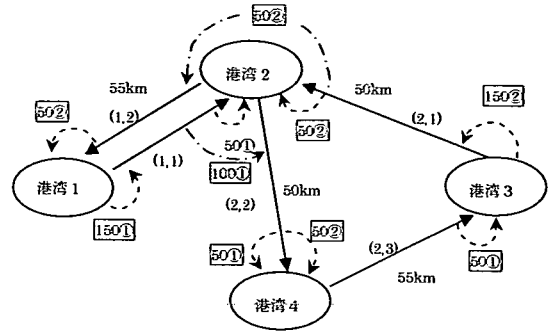
港湾	品目 1		品目 2	
	輸出	輸入	輸出	輸入
①	150	0	0	50
②	0	50	0	50
③	0	50	150	0
④	0	50	0	50

注) 左: 輸出品, 右: 輸出品

表-6 ケース1の最適解 (単位:TEU)

航路便とト ランシップ	出港時刻 (日)	品目 1		品目 2	
		船積	陸揚	船積	陸揚
(1,1)	1.875	150	50	0	0
(1,2)	6.766	0	0	0	50
(2,1)	1.875	0	0	150	50
(2,2)	6.548	0	50	0	50
(2,3)	9.973	0	50	0	0
トランシップ(1,1)→(2,2)		100			0
トランシップ(2,1)→(1,2)		0		50	

*上段を普通貨物船、下段を大型貨物船とする。



* 直線の矢印は航路便、破線矢印は実需給の積み降ろし、一点鎖線はトランシップ、枠囲い内の数字はコンテナ数 (TEU)、丸数字は品目、を表している。

図-3 港湾配置とコンテナ輸送の計算結果

トランシップが行われるが、両貨物船ともにすべての貨物を降ろし終えた後でないで、トランシップ貨物を積みこめない。すなわち、航路便(1,2)では、 $6.141 (=1.875+55/23+150 \times 0.0125)$ 以降に積み込みを開始できる。一方、貨物船2がトランシップ貨物を降ろし始めることができる時刻は $4.673 (=1.875+50/23+50 \times 0.0125)$ であるため、航路便(1,2)の出港時刻は $6.766 (=6.141+50 \times 0.0125)$ 以降となる。航路便(2,2)についても同様であり、得られた最適解は式(8)の制約条件を満たしている。

4. 基本モデルと内生モデルの計算量の比較

(1) 検討ケース

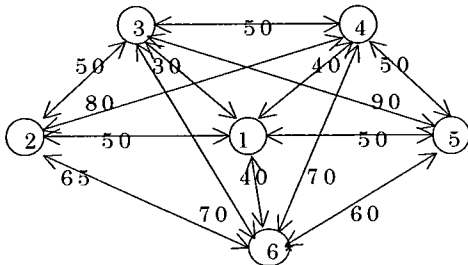
基本モデルと内生モデルの計算量に関する比較検討を行うため、4 ケースを用いた。

計算回数は貨物船数と最大寄港数によって定まるので、ケース設定に当っては、貨物船数と最大寄港数を適度に組合せるとともに計算時間を考慮して、貨物船に関して2隻と3隻、最大寄港数に関して3と4とし、表-7に示すケース1~ケース4を設定した。ケース1は前節で採用したものと同一である。

また、ケース4は図-4に示す港湾配置のもとに港湾数6、貨物船3、最大寄港数3という条件を設定した。ケース2,3では、ケース4を基本として港湾数、貨物船数、最大寄港数を変化させた。

(2) 解析結果

表-7に解析結果を示す。同表には、基本モデルに対する内生モデルの性能、および基本モデルの計算回数、計算時間の絶対値を示した。



* 九数字は港湾番号, その他数字は港湾間距離(km)

図-4 ケース4の港湾配置

表-7 検討ケース別計算結果の比較

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
港湾数	4	5	5	6
貨物船数	2	2	2	3
最大寄港数	3	3	4	3
変量数平均の比	1.02	1.03	1.08	1.09
条件式数平均の比	1.1	1.1	1.17	1.16
LP 計算回数	44	150	42180	407878
LP 計算回数の比	0.27	0.48	0.07	0.02
計算時間(秒)	0.61	2.85	1182.0	38940.0
計算時間の比	0.36	0.48	0.12	0.03

内生モデルでは基本モデルに比べて平均の変量数, 条件式数がともに大きく, ケース1では両者の比(内生モデル/基本モデル)がそれぞれ1.02, 1.1である。また, 計算回数, 計算時間で両者の比を取ると, それぞれ0.27, 0.36であり, 計算量は内生モデルの方が小さい。

ケース2~ケース4へと規模が大きくなるにしたがって, 変量数の比は1.03~1.09, 条件式数の比は1.1~1.16の幅で多少増加する変化するものの, 特に大きな変化はない。これに対し, 計算回数の比は0.48~0.02, 計算時間の比は0.48~0.03の幅で大きく減少している。すなわち, 計算の負荷は内生モデルを用いることによって大幅に削減でき, 内生モデルが計算ケースの大規模化に対応できる可能性を示唆している。ちなみに, 基本モデルを用いたケース4の計算時間(ノートPC, クロック周波数800MHz程度)は, 38940sec(約10.8h)に達しており, 所要時間の観点からこれ以上の規模の計算は基本モデルでは実質的に不可能である。

5. 結論と今後の課題

本研究では, 既往研究で定式化した品目別港湾間輸送モデルを基本として, トランシップを内生的に求める内生モデルの定式化を行い, このモデルによって基本モデルから得られる最適解のうちの1つ

が得られること, および計算時間を大幅に減じることが可能であり, より大規模な事例への応用が可能であることを示すことができた。

本研究で対象としたような組合せ最適化問題は, 近年, 遺伝的アルゴリズム等の試行錯誤法で短時間に優秀な近似解を得られることが示され, 試行錯誤法の有効性が実証されつつある。しかし, こうした方法は, 実用的である反面, 最適解に達する保証がなく, また, 計算過程でどの程度最適解に接近したかも明らかでないなど, 解の選択(計算の打ち切り)にあいまいさが残る。

こうした観点から, 著者は最適解を求めることに価値をおきつつ計算量を削減する方向で研究を進めて来た。また, 一方で組み合わせ最適化問題に試行錯誤法を援用する場合においても, 組み合わせ要素を削減し計算量を少なくすること, すなわち, モデルを軽くすることの意味は大きいと考えられる。

港湾間輸送モデルにおける組合せ要素としては, 本研究で取り扱ったトランシップのほかにも, 貨物船経路の組み合わせがあり, この組み合わせ要素の削減が課題である。また, 組み合わせ要素の削減とは異なるが, 任意時間における港湾容量制限をいかに定式化し線形計画モデルに組み入れるかという課題もある。今後はこうした課題に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 福地信義: リニア駆動搬送台車を用いた高密度集積コンテナストックヤードの概念設計, マリーン・エキスプレス構想(Phase-2)に関する調査研究報告(平成8年度), pp.11-22, 1997.5.
- 2) 黒田勝彦, 楊 賛, 竹林幹雄, 安東昌輝: フィーダーサービスによる国内コンテナ貨物流動分析, 土木計画学研究・講演集 No19(2), pp. 203-205, 1996.11.
- 3) 藤野直明, 郡司浩太郎, 加藤博敏, 中崎 剛: 国際海上工学研究・講演集 No18(2), pp. 517-520, 1995.12.
- 4) TOI, S. and OHTA, T.: The Introduction Effect of High-density Integrated Stockyard into a Port, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.3, No.2, September, 1999, pp.155-165.
- 5) 家田仁, 柴崎隆一, 内藤智樹: アジア圏国際コンテナ貨物流動モデルとその配分原理に応じた特性比較, 土木計画学研究・講演集, No.20(2), pp.101-104, 1997.11.
- 6) 川崎隆広, 外井哲志, 太田俊昭, 山内誉史: 品目別港湾間輸送モデルを用いた港湾機能の改善効果に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集17, pp. 729-734, 1999.9.

(2002.9.30 受付)

TRANSPORTATION MODEL BETWEEN HARBORS TREATING TRANSSHIP AS INTERNAL VALUABLES

Satoshi TOI

Author developed the mathematical model to minimize transportation cost between harbors, using the linear programming. This model enables us to study the change of the transportation cost based on the condition of facilities. But when the scale of the transportation grows, the total combination case becomes rapidly huge, and the calculation becomes impossible substantially. Then, in this research, the internal variables concerning transship combination were introduced and the formulation was attempted to save calculation. Finally the introduction effect was tested through a simple harbor network.