

運航モデルはほとんどない。本研究では、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ミ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。また、需要を OD ではなく発生集中のみで与え、コンテナ流動、航路の自由度をあたえている。

3. 品目別港湾間輸送モデル

本モデルは、複数の港湾間で輸出入量の決められた複数の品目からなる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ような最適輸送方法を線形計画法に基づいて求めるものである。図-1に解析全体フローを示す。

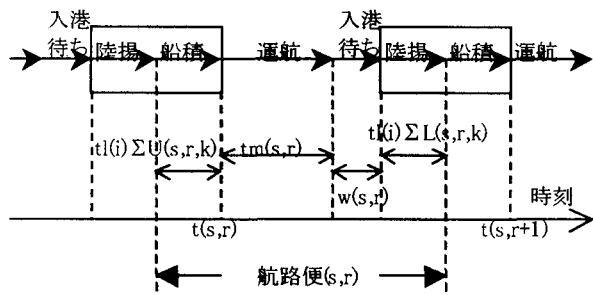


図-2 航路便と変数の定義

本モデルでは、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) と表す。 $r=e$ は一定期間内における貨物船 s の最終航路便を表す(図-2)。

(1) 輸送経路、トランシップ決定

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、各貨物船の入港可能な港湾を選択し、それらの中から、総寄港数が入力データのそれと同値である経路組み合わせの全ての場合について、次のトランシップ設定を行う。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。

設定された輸送経路において、異なる貨物船間で、航路便の目的港が、他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。このトランシップ輸送可能数を列挙し、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のトランシップ組み合わせにおいて、以後の計算を行う。ここで、ある経路組み合わせ m において、トランシップ輸送可能数が k 個ある場合、その経路組み合わせ m におけるトランシップ組み合わせ総数は、 $N(m)=2^k$ 通りとなる。

したがって、線形計画モデルの計算ケースの総数は、

$$\sum_{m=1}^M N(m) \text{ となる。}$$

(2) 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。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z = & \sum_s \sum_r Dis(o(s,r), d(s,r)) \cdot Fuel(s) \\ & + \sum_s \sum_r \left\{ f(s,r) \cdot \sum_k L(s,r,k) + g(s,r) \cdot \sum_k U(s,r,k) \right\} \\ & + \sum_s \left\{ t(s,e) + tm(s,e) + w(s,e) + u(s,e) \cdot \sum_k U(s,e,k) \right\} \cdot b(s) \\ & \dots (1) \end{aligned}$$

式(1)において、第1項は、貨物船の総運航費用、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等の減価償却費である。

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, $Fuel(s), b(s)$: 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 の貨物量(TEU)。

(b) 制約条件

図-3に港湾内コンテナ貨物流動図を示す。図-3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①~⑦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。

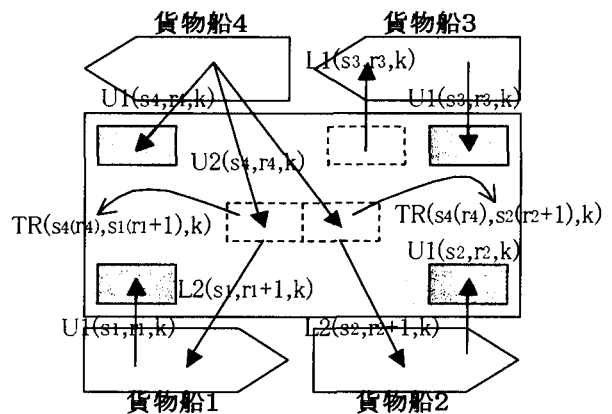


図-3 港湾内コンテナ貨物流動

①実輸送に関する条件

各港の輸出入量(輸出入量)は、その港湾を出港(入港)する貨物船の実輸出船積み量(実輸入陸揚げ量)の総和で表される。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{o(s,r)=i} L1(s,r,k) &= Sik & (for\ all\ i,k) \\ \sum_{d(s,r)=i} U1(s,r,k) &= Dik & (for\ all\ i,k) \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

ここに、 Sik, Dik :それぞれ港湾 i の品目 k の輸出力、 $L1(s,r,k), L2(s,r,k)$:それぞれ航路便 (s,r) の品目 k の実輸出力、トランシップ貨物船積み量、 $U1(s,r,k), U2(s,r,k)$:それぞれ航路便 (s,r) の品目 k の実輸入力、トランシップ貨物陸揚げ量。したがって、 $L(s,r,k)=L1(s,r,k)+L2(s,r,k)$, $U(s,r,k)=U1(s,r,k)+U2(s,r,k)$ である。

②貨物船におけるトランシップ貨物に関する条件

貨物船 s においてトランシップ輸送が行われる場合、貨物船 s におけるトランシップ船積み量（トランシップ陸揚げ量）は、貨物船 s へのトランシップ陸揚げ量（トランシップ船積み量）の総和に等しい。

$$\left. \begin{aligned} L2(s,r,k) &= \sum_{\sigma(sr,s'r')=1} TR(sr,s'r',k) & (for\ all\ s,r,k) \\ U2(s,r,k) &= \sum_{\sigma(sr,s'r')=1} TR(sr,s'r',k) & (for\ all\ s,r,k) \end{aligned} \right\} \dots(3)$$

ここに、 $TR(sr,s'r',k)$: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、 $\sigma(sr,s'r')$: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 となる。

③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くなければならない

$$\sum_{o(s,r)=i} L2(s,r,k) = \sum_{d(s,r)=i} U2(s',r',k) \quad (for\ all\ k,i) \quad \dots(4)$$

④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。

$$\left. \begin{aligned} x(s,1,k) &= L(s,1,k) & (for\ all\ s,k) \\ x(s,r,k) &= x(s,r-1,k) - U(s,r,k) + L(s,r,k) & (for\ all\ s,r > 1,k) \end{aligned} \right\} \dots(5)$$

ここに、 $x(s,r,k)$:航路便 (s,r) の品目 k の輸送量。

⑤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。

$$\sum_k x(s,r,k) \leq a(s) \quad (for\ all\ s,r) \quad \dots(8)$$

ここに、 $a(s)$:貨物船 s の積載容量。

⑥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(9)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(10)に示す。

T は貨物量の大小を決定するとともに、ある一定期間内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。

$$\left. \begin{aligned} t(s,1) &\geq l(s,1) \cdot \sum_k L(s,1,k) & (for\ all\ s) \\ t(s,r) &\geq t(s,r-1) + tm(s,r-1) + w(s,r-1) \\ &\quad + u(s,r-1) \cdot \sum_k U(s,r-1,k) + l(s,r) \cdot \sum_k L(s,r,k) & (for\ all\ s,r > 1) \end{aligned} \right\} \dots(9)$$

$$t(s,e) + tm(s,e) + w(s,e) + u(s,e) \cdot \sum_k U(s,e,k) \leq T \quad (for\ all\ s) \dots(10)$$

ここに、 T :単位輸送期間長。

⑦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、および航路便 (s',r') での船積み作業時間を加えた時刻以降となる。

$$\begin{aligned} t(s',r') &\geq t(s,r) + tm(s,r) + w(s,r) \\ &\quad + u(s,r) \cdot \sum_k U(s,r,k) + l(s',r') \cdot \sum_k L(s',r',k) \\ &\quad (for\ all\ \sigma(sr,s'r')=1) \dots(11) \end{aligned}$$

(3) 港湾容量制限

上記の線形計画法より算出されたデータが、あらかじめ設定した港湾毎の係留可能数、ストックヤード容量の上限を超過しないよう制限する必要があるが、この制約条件は線形式として表せない。このため、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する。

①貨物船係留数の容量制限に関する条件

各港湾には同時に利用できる岸壁数が決められており、各時刻において係留数は常にそれ以下でなければならない。下式右辺の第 1 項は、時刻 t までに港湾 i へ入港した貨物船数、第 2 項は、時刻 t までに港 i から出港した貨物船数である。

$$Wi(t) = \sum_{d(s,r)=i, t(s,r)+tm(s,r)+w(s,r) < t} h(s,r,i) - \sum_{o(s',r')=i, t(s',r') < t} h(s',r',i) \leq Pi \quad (for\ all\ i,t) \dots(12)$$

ここに、 $h(s,r,i)$:時刻 t において、航路便 (s,r) が港湾 i

に寄港している場合1，寄港していない場合0， $Wi(t)$ ：時刻tにおける港湾iの係留数， Pi ：港湾iの係留容量。

②ストックヤードの容量制限に関する条件

各港湾のストックヤードには容量が決められており、
 蔵置される貨物量は常にそれに以下でなければならない。
 ()内の式($t>0$)において、右辺第1項は、後背地から港湾iに輸送された貨物量、第2項は、港湾iから出港する貨物船に時刻tまでに船積みされた貨物量、第3項は、港湾iに入港した貨物船から時刻tまでに陸揚げされた貨物量、第4項は、時刻tまでに港湾iから後背地に輸送された貨物量である。

$$0 \leq Vi(t) \leq Yi \quad (for \text{ all } i, t) \qquad \cdots(13)$$

$$\left(\begin{aligned} Vi(t) = & (t/T) \cdot \sum_k Sik - \sum_{o(s,r)=i, t(s,r) \leq t} \sum_k L(s,r,k) \\ & + \sum_{d(s',r')=i, t(s',r') + m(s',r') + w(s',r') \leq t} \sum_k U(s',r',k) - (t/T) \cdot \sum_k Dik \end{aligned} \right)$$

ここに、 $Vi(t)$ ：時刻tにおける港湾iのストックヤード内に保管されている貨物量， Yi ：港湾iのストックヤードの容量。

4．仮想港湾への適用例

(1) 仮想港湾における条件設定

仮想港湾に品目別港湾間輸送モデルを適用して、港湾改善効果の評価を行った。

貨物船データは、各貨物船とも表-2のように設定し、貨物船数2，総寄港数5とした。また、港湾数と港湾間距離を図-4，輸出入品目数を表-3，港湾機能を表-4のように設定した。計算ケースとして、図-4，表-2，表-3の条件を固定し、表-4の港湾2のみ、①ストックヤード容量を800から1000へ改善した場合、②貨物船可能係留数を1から3へ改善した場合、③貨物船入港サイズを10から12へ改善した場合(その場合貨物船の大型化に伴って積載容量も1000から1200へ改善する)、④コンテナ処理時間(積み込み・荷下ろし)を1から0.5へ改善した場合、⑤①②を同時に改善した場合、⑥①②④を同時に改善した場合、⑦①②③④を同時に改善した場合、の7ケースを設定し、改善前と改善後それぞれの航路パターン、総輸送費用、貨物の流れを求めた。なお、条件で設定した数量には具体的な単位は与え

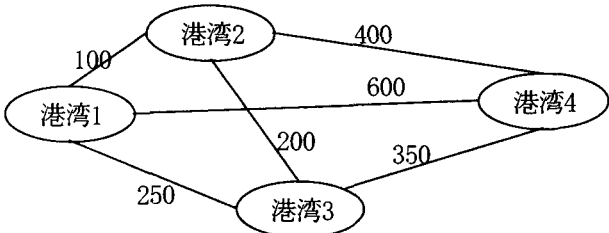


図-4 港湾配置図

表-2 貨物船データ

貨物船入力データ	
貨物船サイズ	10
貨物船の積載能力	1000
燃費	10
貨物船の時間単価	5
貨物船の速度	1
貨物船の重量	10000

表-3 品目別輸出入量

	港湾1		港湾2		港湾3		港湾4	
	輸出力	輸出力	輸出力	輸出力	輸出力	輸出力	輸出力	輸出力
品目A	20	0	0	300	0	20	300	0
品目B	350	0	100	0	0	350	0	100
品目C	200	0	0	400	100	0	100	0
品目D	0	180	30	0	50	0	100	0
品目E	0	30	0	70	0	100	200	0

表-4 港湾施設と港湾料金

港湾2改善前の港湾入力データ	港湾1	港湾2	港湾3	港湾4
港湾の貨物船入港可能サイズ	12	10	12	12
貨物船の係留可能数	2	1	2	2
ストックヤード容量	800	800	800	800
コンテナ単位量当たりの積み込み費用	50	50	50	50
コンテナ単位量当たりの荷下ろし費用	50	50	50	50
コンテナ単位量当たりの積み込み時間	1	1	1	1
コンテナ単位量当たりの荷下ろし時間	1	1	1	1
港湾使用料	100	100	100	100

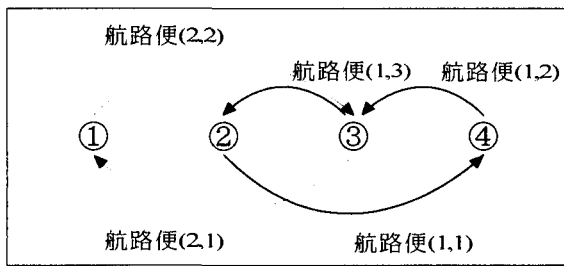
表-5 改善効果

解析① スtockヤード容量を25%改善	0
解析② 貨物船係留可能数を1から3に改善	0
解析③ 貨物船入港可能サイズ改善	0
解析④ コンテナ処理速度を2倍改善	0.2%改善
解析⑤ ①②を同時に改善	15%改善
解析⑥ ①②④を同時に改善	15.7%改善
解析⑦ ①～④を同時に改善	17.1%改善

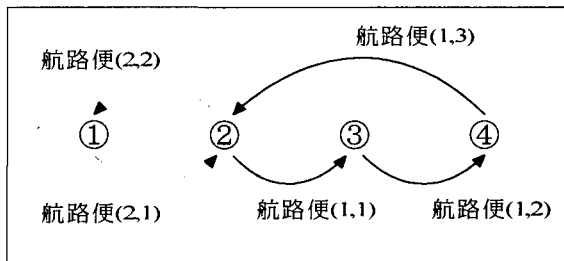
ていない。

(2) 解析結果

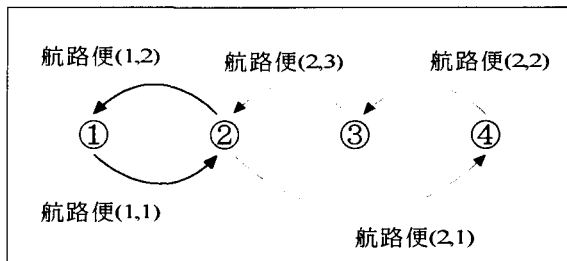
表-5に、解析条件①から⑦より得られた、総輸送コストでみる改善率を示す。この表より、解析条件①から④においては、港湾2の改善効果が直接的には現れず、最適航路、総輸送コストは変化しなかった。この点について、例題のデータ設定の範囲では、単独の機能改善が線形計画モデルの目的関数、制約条件に及ぼす影響が小さく、基底解の構造を変化させるほどではなかったと解釈できる。また、解析条件⑤から⑦については、最適航路や総輸送コストが大きく変化した。このことから、総合的な改善が効果的であることがうかがえる。さらに、解析条件④⑤⑥より、条件⑥は④と⑤を合わせたものであるが、改善率をみると条件⑥の改善率は単に④と⑤の改善率を合計したものよりも若干大きくなっており、このことから複合的な改善効果の高さがうかがえる。図-5に港湾2の港湾機能を改善する前の最適航路を示し、図-6，7に解析条件⑤，⑦における港湾機能改善後の最適航路を示す。これらの図より、港湾2の機能改善に



図一5 最適航路（改善前）



図一6 最適航路（改善後，解析⑤）



図一7 最適航路（改善後，解析⑦）

より，港湾2が積み替え港湾としての役割を担うようになったことで，システム全体の輸送距離が大幅に減少している様子が分かる。

5. 結論と今後の課題

本研究では，品目別港湾間輸送モデルの定式化を行い，このモデルにより，港湾機能の改善効果を評価することが可能であるかどうかを例題を用いて検討した．4で行った7ケースの解析より，品目別港湾間輸送モデルは港湾機能の改善効果をうまく表現しており，このことから本モデルの有効性を期待できることがわかった．また例題による解析結果ではあるが，特定の機能のみを改善しただけでは改善効果の恩恵は少なく，複合的に改善することが必要かつ重要となること，さらには，港湾機能の改善によって，その港湾が積み替え港としての役割を担う可能性があることも明らかにした．

しかし，次に示した点に課題が残されている。

- ① 機能改善の前後で支配的な制約条件の明確化
- ② 船舶数・寄港数を変数化することによるモデルの一般化
- ③ 整備すべき港湾の選定モデルへの拡張
- ④ OD別輸送需要への対応

⑤ 航路別採算性の考慮

⑥ 計算手法として，GA等の効率的な九開放の導入

⑦ 東アジアを対象とした実在する港湾の機能改善効果の検討

今後、これらの課題のうち可能なものから順次取り組んでいく予定である。

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・エクスプレス構想(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：国際海上コンテナ航路の港湾別寄港頻度予測モデルの開発，土木計画学研究・講演集 No18(2)，pp 517-520，1995.12
- 4) Satoshi Toi, Toshiaki Ohta: 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)，1997.11，pp.101-104

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

川崎隆広・外井哲志・太田俊昭・山内誉史

わが国の港湾の課題は、荷役サービスの迅速化、低コストという質の高いサービスを提供することができる港湾物流機能の強化、充実であり、その解決策として、高密度集積コンテナストックヤードが考案されている。本研究では、このシステム導入による特定港湾の機能向上が、その港湾を取り巻くコンテナ貨物の輸送構造に与える影響を明確にし、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。そこで、輸送費用が最小となる輸送経路や輸送方法を線形計画法を適用して求める、品目別港湾間輸送モデルの定式化を行い、仮想の港湾におけるコンテナ物流にこのモデルを適用し、物流環境の改善効果を算出した。

A Fundamental Study on the Effects of Improvement of Harbor Functions using the Transportation Model between Harbors

Takahiro KAWASAKI, Satoshi TOI, Toshiaki Ohta, Motosi YAMAUCHI

The aim of this study is to analyze the change of transportation route and volume using The Transportation Model between Harbors, in the case that the function of one port involved in the international transportation network is improved by constructing High-integrated Container Stockyard. This model is able to find transportation route and volume that enable the transportation cost to be minimized, including the fuel and depreciation cost of each container ship, and loading and unloading cost in each port. And as the results of analysis, we can also define the conditions of facilities in Hub-Port.
