

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

A Fundamental Study on the Effects of Improvement of Harbor Functions

by the Transportation Model between Harbors by Items

川崎隆広*, 太田俊昭**, 外井哲志***, 山内誉史****

by Takahiro KAWASAKI*, Toshiaki OHTA**, Satoshi TOI***, Motoshi YAMAUCHI****

1. 研究の目的

今日、国際物流の厳しい大競争時代にあって我国のハブ港湾の発展を期する上で緊急かつ重要な課題は、迅速、確実しかも低コストで質の高いサービスを提供することができるような港湾物流機能の強化、充実にある。その抜本的対応策の一つとして、高密度集積コンテナストックヤードシステムが提案されている¹⁾。これは、ストックヤードを高層化するとともに、ストックヤードとガントリークレーン、またはトランスファーポイント間をリニアモーター駆動の台車によってコンテナを自動搬送することによって、物流の高効率化を目指すものである。こうした荷役システムの導入や、大型コンテナ船寄港が可能で15m級の大水深岸壁の整備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について分析するとともに、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必要がある。そこで、本研究では、線形計画法を適用した、貨物船の品目別港湾間輸送モデルの定式化を試み、仮定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。

2. 品目別港湾間輸送モデル

本モデルは、需要量、供給量の定まった複数の品目からなるコンテナ貨物を複数の港湾間で輸送する場合に、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パターンを線形計画法に基づいて求め

キーワード 港湾計画、物資流動、整備効果計測法
*学生員 九州大学大学院工学研究科都市環境システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 TEL 092-641-3131 内線 8651 FAX 092-642-3306)
**フェロー 工博 九州大学工学部地球環境工学科教授
***正会員 工博 九州大学工学部地球環境工学科助教授
****正会員 工修 三菱重工業

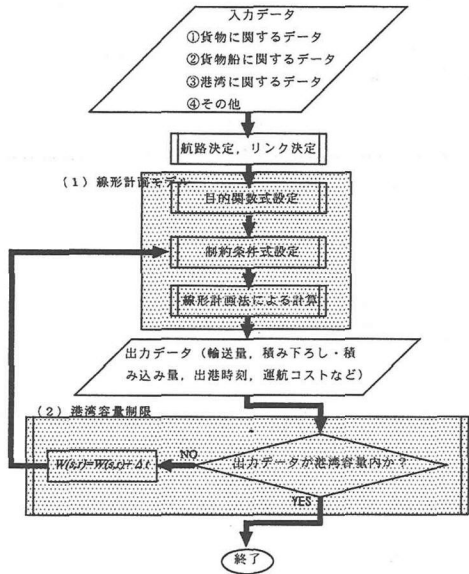


図-1 解析全体フロー

るものである。図-1に解析全体フローを示す。

本モデルでは貨物船 s の第 r 番目の航路便を (s,r) と表す。 $r=e$ は一定期間内における貨物船 s の最終の便を表す (図-2)。

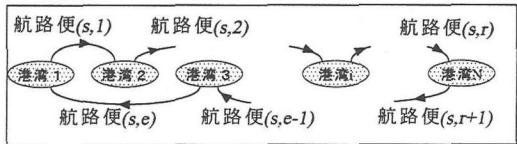


図-2 航路便の定義

(1) 線形計画モデル

目的関数はシステム全体の輸送費用であり、次式で表す。

Minimize $Z = \sum_s \sum_r c(s,r) + \sum_k \sum_s \sum_r (f(s,r)L(s,r,k) + g(s,r)U(s,r,k)) + \sum_s \{t(s,e) + tm(s,e) + w(s,e) + \sum_k u(s,e,k)U(s,e,k)\}b(s)$ (1)

この式において、第1項は貨物船 s の運航費用、第2項は港湾 j での荷役費用、第3項は賃金等の運航時間に比例する費用である。

ここに、 $c(s, r)$: 航路便 (s, r) の運航費用 (目的港 j の港湾使用料を含む)、 $f(s, r)$: (s, r) の出発港での単位量当たりの積み込み費用、 $g(s, r)$: (s, r) の到着港での単位量当たりの荷下ろし費用、 $L(s, r, k)$: (s, r) の出発港で積載される品目 k の貨物量、 $U(s, r, k)$: (s, r) が目的港で荷下ろしする品目 k の貨物量、 $t(s, r)$: (s, r) の出航時刻、 $tm(s, r)$: (s, r) の運航時間、 $w(s, r)$: (s, r) が目的港に入港するため、および貨物積み替えのために待機する時間、 $u(s, r)$: (s, r) の到着港での単位量当たりの荷下ろし時間、 $b(s)$: 貨物船 s の時間単価 (借上げ料、乗組員の賃金など)。

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。

①実輸送の和

各港の輸出品 (輸入品) はその港湾を出港 (入港) する貨物船に輸出品に積み込まれる (輸入品に荷下ろされる) 貨物量の総和で表される。

$$\sum_{(s,r)|o(s,r)=i} L_i(s,r,k) = S_{ik} \quad (k=1 \sim K, i=1 \sim N) \quad (2)$$

$$\sum_{(s,r)|d(s,r)=i} U_i(s,r,k) = D_{ik} \quad (k=1 \sim K, i=1 \sim N) \quad (3)$$

ここに、 $o(s, r)$, $d(s, r)$: 航路便 (s, r) の出発港と目的港、 S_{ik} , D_{ik} : 港湾 i の品目 k の供給量、需要量、 $L_i(s, r, k)$, $L_2(s, r, k)$: それぞれ、 (s, r) の出発港で積載される品目 k の量のうち、同港からの輸出品と同港での積替量 ($L(s, r, k) = L_1(s, r, k) + L_2(s, r, k)$)、 $U_i(s, r, k)$, $U_2(s, r, k)$: それぞれ、 (s, r) が目的港で荷下ろしする品目 k の貨物量のうち同港での輸入品と同港での積替量 ($U(s, r, k) = U_1(s, r, k) + U_2(s, r, k)$)、 K : 取扱貨物の種類、 N : システム内の港湾数。

②各貨物船における積み替え貨物のバランス

航路便 (s, r) へ中継輸送が行われる場合 $L_2(s, r, k)$, $U_2(s, r, k)$ は、それぞれ受け渡し可能な航路間の受け渡し量 $TR(sr, s'r', k)$, $TR(s'r', sr, k)$ の総和に等しい。

$$L_2(s, r, k) = \sum_{(s',r')|o(s',r')=i} TR(s'r', sr, k) \quad (\text{for all } s, r, k) \quad (4)$$

$$U_2(s, r, k) = \sum_{(s',r')|d(s',r')=i} TR(sr, s'r', k) \quad (\text{for all } s, r, k) \quad (5)$$

ここに、 $TR(sr, s'r', k)$: 航路便 (s, r) から航路便 (s', r') に積み替えられる品目 k の貨物量、 $\delta(sr, s'r')$: (s, r) と (s', r') の接続状況を表す、 (s, r) の目的港と (s', r') の出発港が同じである場合に $\delta(sr, s'r') = 1$ 、そうでない場合に $\delta(sr, s'r') = 0$ となる。

③各港湾における積み替え貨物のバランス

各港における中継輸送貨物については、積み込み量の合計と荷下ろし量の合計が等しい。

$$\sum_{(s,r)|o(s,r)=i} L_2(s,r,k) = \sum_{(s',r')|d(s',r')=i} U_2(s',r',k) \quad (\text{for all } k, i) \quad (6)$$

④品目別の積載量と輸送量の関係に関する条件

航路便 (s, r) の貨物船の積載量は、 $r \neq l, e$ の場合、 $(s, r-1)$ の積載量から $(s, r-1)$ で荷下ろされた貨物量を除き、 (s, r) で積み込まれた貨物量を加えたものに等しい。

$$\begin{aligned} x(s, l, k) &= L(s, l, k) \\ x(s, r, k) &= x(s, r-1, k) - U(s, r-1, k) + L(s, r, k) \quad (r \neq l, e) \\ x(s, e, k) &= U(s, e, k) \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 $x(s, r, k)$: 航路便 (s, r) が輸送する品目 k の量。

⑤貨物船の積載条件

貨物船 s の港湾間輸送量は、貨物船 s の積載容量を上限とする。

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

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、1つ前の航路便 $(s, r-1)$ の出港時刻にその便の運航時間 $tm(s, r-1)$ と入港待ち時間 $w(s, r-1)$ を加え、さらに $(s, r-1)$ での荷下ろし時間と (s, r) での積み込み時間を加えた時刻以降でなければならない。なお、航路便 (s, l) の出港時刻は荷積み時間のみとなる。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。

$$\begin{aligned} t(s, l) &\geq \sum_k l(s, r) L(s, l, k) \\ t(s, r) &\geq t(s, r-1) + tm(s, r-1) + w(s, r-1) \\ &\quad + \sum_k u(s, r-1) U(s, r-1, k) + \sum_k l(s, r) L(s, r, k) \\ t(s, e) + tm(s, e) + w(s, e) + \sum_k u(s, e) U(s, e, k) &\leq T \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 T ：単位輸送期間長、 $l(s,r)$ ：航路便 (s,r) の出発港での単位量当たりの積み込み時間。

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') へコンテナが積み替えられる場合、 (s',r') の出発時刻は (s,r) の出港時刻に、 $tm(s,r-l)$ 、 (s,r) での荷下ろし時間、および (s',r') での積み込み時間を加えた時刻以降となる。

$$t(s',r') \geq t(s,r) + tm(s,r) + \sum_k u(s,r)U(s,r,k) + \sum_k l(s',r')L(s',r',k) \quad (10)$$

(2) 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。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 $(w(s,r)=w(s,r)+\Delta t)$ 、それを入力データ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

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

$$W_j(t) = \sum_{(s,r)|d(s,r)=j,t(s,r)+tm(s,r)+w(s,r)<t} h(s,r,j) - \sum_{(s,r)|d(s,r)=j,t(s,r+l)<t} h(s,r,j) \leq P_j \quad (\text{for all } j,t) \quad (11)$$

ここに、 $h(s,r,j)$ ：航路便 (s,r) が港湾 j に立ち寄る場合1、そうでないとき0、 $W_j(t)$ ：時刻 t における港湾 j の係留数、 P_j ：港湾 j の係留容量。

②ストックヤードの容量制限に関する条件

各港のストックヤードには容量が決められており、保管される貨物量は常にそれに以下でなければならない。ただし、時刻 $t=0$ においては各港湾のストックヤードには、各港湾から輸出される貨物量が貯蔵されているものとする（第1式）。下式の第2式 $(t>0)$ において、右辺第1項は、後背地から港湾 j に輸送された貨物量、第2項は、港湾 j から出港する貨物船に時刻 t までに積載された貨物量、第3項は、港湾 j に入港した貨物船から時刻 t までに荷

下ろされた貨物量、第4項は、時刻 t までに港湾 j から後背地に輸送された貨物量である。

$$V_j(t) = \sum_k S_{jk} - \sum_k \sum_{(s,r)|o(s,r)=j,t(s,r)<t} L(s,r,k) + \sum_k \sum_{(s,r)|d(s,r)=j,t(s,r)+tm(s,r)+w(s,r)<t} U(s,r,k) - q_t \leq Y_j \quad (\text{for all } j,t) \quad (12)$$

ここに、 $V_j(t)$ ：時刻 t における港湾 j のストックヤード内に保管されている貨物量、 Y_j ：港湾 j のストックヤードの容量、 q_t ：単位時間あたりに港湾 j の後背地に輸送される貨物量。

3. 仮想港湾への適用例

(1) 仮想港湾における条件設定

本研究の最終的な目的は、高密度集積コンテナストックヤードを港湾に導入した場合の導入効果を予測することである。今回はその前段階として、仮想港湾を用いて品目別港湾間輸送モデルが港湾改善効果を評価できるかどうかの検討を行った。貨物船入力データは表-2のとおりである。また、港湾数と港湾間距離を図-3、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-3、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。

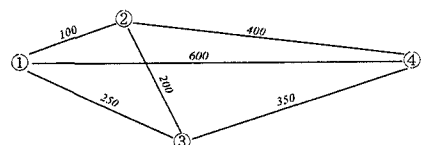


図-3 港湾配置図

表-2 貨物船入力データ

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 輸出入貨物取扱量

	港湾1		港湾2		港湾3		港湾4	
	輸出品	輸入品	輸出品	輸入品	輸出品	輸入品	輸出品	輸入品
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 港湾入力データ

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
貨物船のけい留可能数	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

(2) 解析結果

表-5に、解析条件①から⑦より得られた可能航路パターン数（可能解数）、最適解における総輸送コスト、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。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、港湾を整備する際には総合的な改善が必要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-4に港湾2の港湾機能を改善する前の最適航路を示し、図-5、6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。

4. 結論

本研究では、品目別港湾間輸送モデルが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を行った。3（1）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は港湾機能の改善効果の評価に有効な手法であることを確認した。また港湾機能を改善するには、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も明らかにした。今後は実際のデータを用いて、実在する港湾の機能改善効果について検討する。

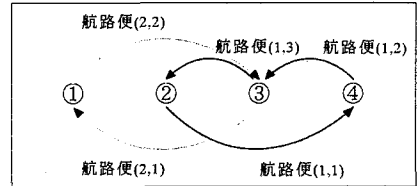


図-4 最適航路（改善前）

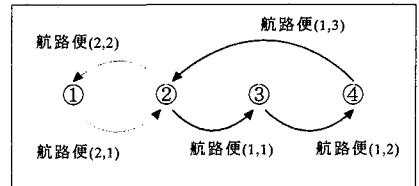


図-5 最適航路（解析⑤）

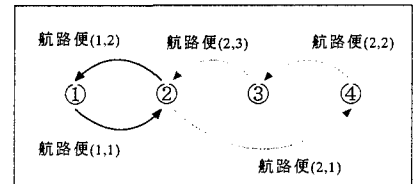


図-6 最適航路（解析⑦）

表-5 港湾機能の改善効果

総輸送コスト	可能解数	最適航路における総輸送コスト	総輸送コストでみる改善率
港湾2の港湾機能改善前	3	1693507	
① スtockヤード容量改善	7	1693507	0%
② 貨物船可能けい留数改善	3	1693507	0%
③ 貨物船入港サイズ改善	7	1693507	0%
④ コンテナ処理速度改善	6	1690932	0.2%改善
⑤ ①②を同時に改善	11	1438770	15%改善
⑥ ①②④を同時に改善	9	1427545	15.7%改善
⑦ ①～④を同時に改善	23	1404747	17.1%改善

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