

国際海上コンテナ輸送における最適コンテナ回送計画に関する考察

A Study on an Optimal Planning of Empty Containers
for the Sea-borne Containerized Transportation

吉川和広

三木楯彦**

今井昭夫***

by Kazuhiro YOSHIKAWA

Tatehiko MIKI

Akio IMAI

Minimizing the number of containers which carriers should prepare for the sea-borne containerized transportation is largely due to an effective transfer planning of empty containers, especially in the unbalanced trade situation as between Japan and U.S.. In this paper, an optimal transfer planning of empty containers is discussed. A mathematical model is built for this problem, which is solved by the Mixed Integer Programming. The efficiency of the model is showed by an example problem of transfer between 4 ports, located in 2 countries and connected by 2 lines.

1. はじめに

今日外貿定期船航路は一部の南北航路を除きほぼコンテナ化され、コンテナ輸送は世界的に円熟期に入った。コンテナ輸送は輸送効率を追求するため、巨額の設備投資が必要とされるが、コンテナ輸送の黎明期においては一応これらの設備計画が立案され、適正化が行われた。やがてコンテナ輸送が本格化するにしたがって船会社間の集荷競争激しくなり、サ

* 正会員 工博 京都大学教授

工学部土木工学科

(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 神戸商船大学教授

商船学部輸送科学科

(〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*** 正会員 神戸商船大学助手

商船学部輸送科学科

(〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

ービス水準の向上に拍車がかかった。このため運賃価格の下落や設備の過剰投資が見受けられ、従ってより緻密な整備計画が必要とされている。

コンテナ輸送に必要とされる設備はコンテナ船、コンテナ埠頭そしてコンテナである。この内単位当たりの投資額の大きな船と埠頭に関する整備計画はいくつか研究されているが、それらに比べて安価なコンテナ自体の整備計画はあまりなされていない。しかし日本の代表的船会社が運用するコンテナは約8万個であり、一個70万円としても560億円にもなりコンテナ保有量の適正化も非常に重要であることは明らかである。

さらに船や埠頭の整備計画を緻密化するためにも従来のような貨物量を基に立案するのではなく、実入り、空の両コンテナ数で決定される必要があり、コンテナ保有量の適正化が問題となる。しかし保有コンテナ数の最適化はコンテナの回送計画の良否に大きく左右されると考えてよい。そこで今回船会社

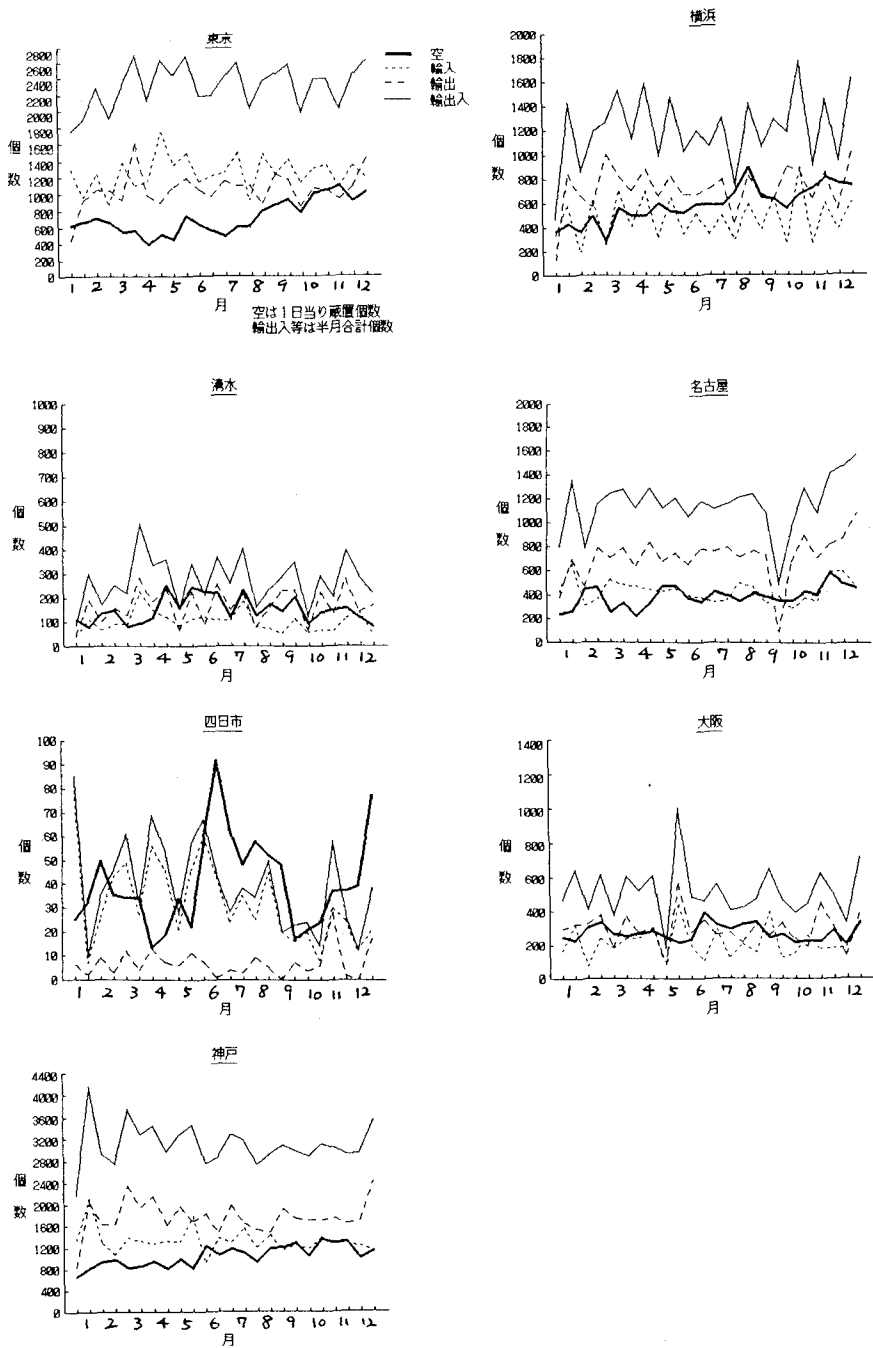


図1 コンテナの年内変動

が行うべきコンテナ回送計画の最適化について検討を行った。

2. 問題の概要

コンテナ輸送においては貨物は船で運ばれるというよりも、コンテナによって運ばれると考えるほうが適切である。従ってコンテナ埠頭には輸送需要を満たすコンテナが絶えず用意されていなければならない。日米間のように日本からの輸出量が多ければ、空コンテナがアメリカに溜り逆に日本では不足する傾向にある。このような場合適当な時期にアメリカから日本に空コンテナを回送するか、リースコンテナを借りるかする必要がある。もし回送計画が悪ければある港に空コンテナが大量に溜り、他の港ではリースコンテナを大量に借りることになる。

図1は昭和60年に日本の7大コンテナ港において、ある船会社が輸出入したコンテナ数とコンテナターミナルに蔵置されている空コンテナの個数について1年間の変化を示したものである。ここで輸出入の実入りコンテナは半月毎の合計値で、空コンテナは一日の数である。これを見ると横浜港、名古屋港、四日市港、大阪港そして神戸港では空コンテナは輸入コンテナ数に近い値を示し、清水港では輸出コンテナ数に近いことが分かる。いずれにしても当然ながら空コンテナ数は輸出入コンテナ数と関係が深いといえる。

一方、図2は同年1年間の日本における空コンテナの滞留日数分布であるが、40日間滞留しているコンテナが300個にもなっている。従って図1の1日当りの空コンテナのなかには相当長期間蔵置されているものが含まれており、回送計画が適正に行われているとはいいがたい。

3. 回送計画モデル

回送計画を立案する場合、基本となるのはある港に滞留している空コンテナを不足が予想される他港へ適時に運ぶことであるが、その他に次のことを考慮する必要がある。つまり、ある時点で複数の港へ輸出する貨物があり、そのための空コンテナが不足している。その場合リースコンテナを借りるが、自社のコンテナをどの貨物に使用するかが問題になる。単純に使用期間が完全に予測されたとした場合、短

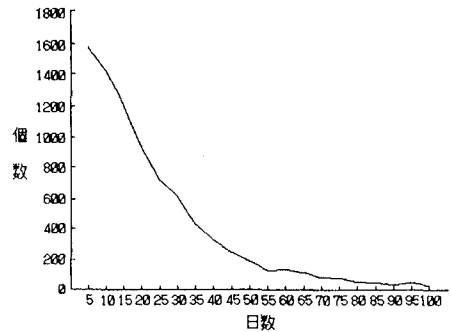


図2 空コンテナ滞留日数分布

いと予想される貨物にリースを、長い貨物に自社分を使えばよいことになる。しかし、自社コンテナはその仕向港で再利用できるため、もし当該港でコンテナ不足が予想されるのであれば短期貨物に自社コンテナを使用したほうがよいこともありうる。つまり自社コンテナの割り当ても回送計画の一部と考えられよう。そこで今回の回送計画モデルはこの2つの計画決定を対象とする。

3. 1 モデルの前提

本モデルの作成上の前提を以下に述べる。

(1)対象航路

日本を起点とするコンテナ航路は、米国航路、欧州航路、豪州航路などがあるが、これら大陸方面航路には、例えば米国航路では北米西岸(北)航路(PNW)、北米西岸(南)航路(PSW)そして北米東岸航路(NY)というように複数の航路がある。回送計画を立案する場合、個々の航路別に計画するよりも複数航路全体で計画するほうが効果的である。従って本モデルは図3に示すような複数航路を対象とする。

(2)貨物量

回送を最適化するには各港での必要コンテナ数が明確でなければならないが、輸送需要の予測は今回の検討の対象外とし、与件とする。

(3)コンテナの内陸流動

輸入されたコンテナは荷主戸口でデバンニングのため港から搬出され、一定期間後空となって戻る。さらに空コンテナは荷主戸口でバンニングするため搬出され実入りコンテナとして戻り本船に積まれて

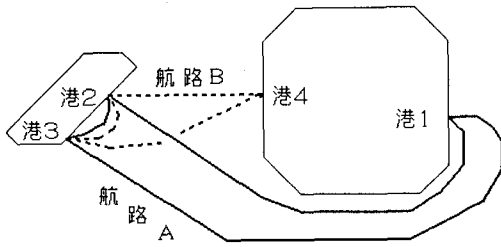


図3 対象航路

輸出される。これら内陸流動期間は一定ではないが、本モデルは一定値を与件とする。

(4) リースコンテナ

リースコンテナの借用形態にはいくつかの種類がある。例えば長期にわたって借りるロングタームリースや日本で借りて仕向国でデバンニングの後に返却する比較的短期のスポットリースなどがある。船会社はロングタームリースを自社コンテナと見なしで運用する。そこで本モデルで考えるリースコンテナはスポットリースとし、1貨物の輸送に供された後に仕向国で返却されるものとする。

(5) 回送手段

通常船会社は国際間の回送には本船の余席を利用する。もし余席以上のコンテナを回送するとすれば、実入りコンテナを次航海に廻して余席を大きくするか、船をチャーターして運ぶかすればよい。しかし前者はサービス水準の低下になるため通常行われないし、後者はチャーター料が高くこのようにしてわざわざ回送するよりリースコンテナを借りたほうが得策である。従って本モデルでも国際間の回送には本船を用い、国内間の回送には本船または陸送手段を使うこととする。

(6) 埠頭規模

回送計画では港の規模が大きく関係する。規模が大きければ回送に用いる本船の余席が小さい場合、港にしばらく蔵置しておき後の船で回送することができる。通常船会社が借りる埠頭規模が大きければ借用料も高くなる。従って埠頭規模も回送計画の評価に加えるべきである。しかし、これは全体的なコンテナ輸送計画の最適化で検討されるべきであり、本研究ではコンテナのみの計画であるため、埠頭規

模の制約は設けない。

3.2 モデルの定式化

本モデルでは図4に示すように一定の日数を単位期間とし、本船は各期首に入港し、荷役後当該期首にすばやく出航すると考える。従って実入り、空の両コンテナの荷役は期首に行われる。またコンテナの荷主戸口への搬出入は本船停泊中に行われるとする。そこで本モデルでは各港での各期首における空コンテナ数と必要コンテナ数の関係を満たすように空コンテナの回送とリースコンテナの使用を検討すればよい。

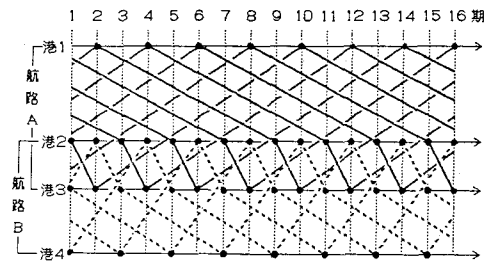


図4 計画期間

(1) 港におけるコンテナ数

ある時点の期首における空コンテナの利用可能数と在庫数を考える。この場合本船が寄港するときと、寄港しないときとが考えられる。本船寄港のときは、前期の在庫数、当期に荷主戸口から戻った空コンテナ数、他港から陸路回送された空コンテナ数、そして本船で回送された空コンテナ数の合計が利用可能コンテナ数となる。本船が寄港しないときは本船回送分は含まれない。すなわち次式のように定義される。

$$A_{it} = S_{i,t-1} + R_{it} + I_{it} + K_{it} \cdot G_{it} \quad (1)$$

A_{it} : i 港での t 期における利用可能空コンテナ数

$S_{i,t-1}$: i 港での $t-1$ 期におけるコンテナ在庫数

R_{it} : i 港で t 期に荷主戸口から戻った空コンテナ数
 I_{it} : t 期に他港から i 港に陸路で回送された空コンテナ数
 G_{it} : t 期に他港から i 港に本船で回送された空コンテナ数
 K_{it} : t 期に本船が i 港に寄港するとき 1、しないとき 0

ここで、

$$I_{it} = \sum_{h,s} X_{h,i,t} \quad (2)$$

$$G_{it} = \sum_{h,s} E_{h,i,t} \quad (3)$$

$$R_{it} = \sum_{g,q} r_{g,i,t} \cdot B_{g,i,t} \quad (4)$$

$X_{h,i,t}$: h 港で s 期に陸路回送され i 港に t 期の時点に到着した空コンテナ数

$E_{h,i,t}$: h 港で s 期に本船で回送され i 港に t 期の時点に到着した空コンテナ数

$B_{g,i,t}$: g 港から q 期に実入りコンテナとして i 港に輸出され s 期に i 港に到着した自社コンテナ数

$r_{g,i,t}$: i 港で s 期に輸入されたコンテナが荷主戸口でデバンニング後 t 期に戻ってくる確率

である。

この利用可能数から当期に荷主戸口へバンニングのために必要なコンテナと他港への回送数を減じた数が当期首の在庫コンテナ数となる。ここでもし利用可能数が必要数より少なければ、その差がリースコンテナ数となる。つまり、

$$S_{it} = A_{it} - N_{it} - K_{it} \cdot O_{it} - H_{it} \quad (5)$$

$$L_{it} = 0 \quad (6)$$

($A_{it} \geq N_{it}$ の場合)

$$S_{it} = 0 \quad (7)$$

$$L_{it} = N_{it} - A_{it} \quad (8)$$

($A_{it} < N_{it}$)

N_{it} : i 港で t 期に荷主戸口でバンニングのため必要な空コンテナ数

L_{it} : i 港で t 期に借りるリースコンテナ数

O_{it} : i 港から t 期に本船で他港へ回送される空コンテナ数

H_{it} : i 港から t 期に陸路で他港へ回送される空コンテナ数

ここで

$$O_{it} = \sum_{j,u} E_{i,j,t,u} \quad (9)$$

$$H_{it} = \sum_{j,u} X_{i,j,t,u} \quad (10)$$

である。

(2) 輸出コンテナに対する自社コンテナとリースコンテナの割当て

(1) で述べたように利用可能コンテナが不足した場合リースコンテナを借りるが、その時輸出の仕向港が複数であれば、どの港向けに自社コンテナを使うかによって以降の仕向港の空コンテナの在庫数が変わる。当期における必要コンテナ数 N_{it} は次式で定義される。

$$N_{it} = \sum_{j,v} s_{itv} \cdot F_{ijv} \quad (11)$$

s_{itv} : t 期に荷主へ搬出されバンニングの後 v 期に戻る確率

F_{ijv} : v 期に i 港から j 港に輸出されるコンテナ数

従って F_{ijv} の内、自社コンテナで v 期に i 港から j 港に仕向けられ w 期に着く数 B_{ijvw} は、

$$B_{ijvw} \leq F_{ijv} \quad (12)$$

でかつ、

$$\sum_v B_{ijvw} \leq A_{ij} \quad (13)$$

を満足する決定変数となる。

さらにリース料は前提で述べたように仕出港、仕向港間で一定の借用期間を与え、これに対してリース料を計算するので、当期での仕向港別リースコンテナ数も求める必要がある。

これは次式で表される。

$$L'_{ijt} = \sum_v s_{itv} \cdot (F_{ijv} - B_{ijvw}) \quad (14)$$

L'_{ijt} : t 期に i 港から j 港向けのリースコ

ンテナ数

(3) 船型の制約

コンテナ回送を本船で行う場合は余席を利用する。本船が港1、港2、港3の順で寄港する場合、港2・港3間の余席は船型から港1から港3への実入り／空コンテナ数と港2から港3への実入りコンテナ数を引いたものである。従って船型制約は次式で表される。

$$\sum_{j,k} P_{ijkw} \cdot (\sum_u E_{ijku} + F_{ijk}) \leq V_k \quad (15)$$

(全てのk, wにおいて)

P_{ijkw} : i 港から j 港へ向かう船が途中w期に k 港に寄港する場合1、しない場合0

V_k : k 港をw期に寄港する船の船型

(4) 目的関数

目的関数は自社コンテナの回送費用とリースコンテナ費用の合計とする。

ここで自社コンテナの回送で、本船利用の場合、船自身は本モデルでは検討対象項目とは考えないので、回送費用としては港での荷役費用のみを考える。陸路の場合はコンテナトレーラの陸送費用を回送費とする。リース料は港間で一定の借用期間を与件とするので、港間別に一定である。

従って目的関数は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } C \\ C = \sum_{i,j} [C_{Lij} \cdot L'_{ij} \\ + \sum_{k,u} \{ (C_{Hi} + C_{Hj}) \cdot E_{ijk} \\ + C_{Tij} \cdot X_{ijk} \}] \end{aligned} \quad (16)$$

C_{Lij} : i 港から j 港までのリース料

C_{Hi}, C_{Hj} : i 港および j 港での荷役料

C_{Tij} : i 港から j 港までの陸送費

本モデルは多段階決定モデルであり動的計画法が有効であるが、計算すべき組合せが膨大となるため混合整数計画法で解を求めた。

4. 計算事例

計算例として図3で示すような自国の港2、港3

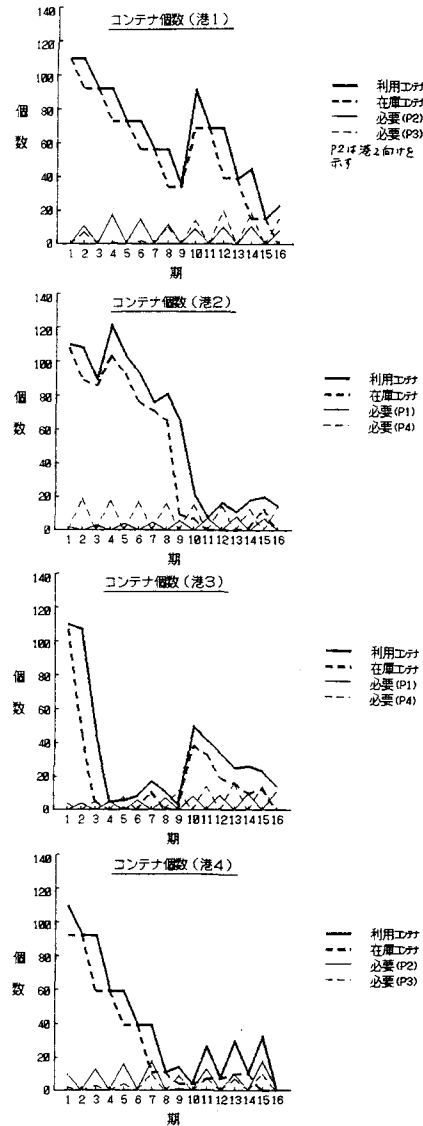


図5 各港でのコンテナ数の変動

と他国の港1と港4との間でA、B2つの航路を設定する。3日を単位期間として図4に示すように16期の計画期間を考え、表1に示す条件で計算を行った。なお自社保有コンテナの初期配置も計画に大きく影響を与えるが、計算時間が膨大になるため今回は各港に均等に配置されることにした。

まず、船型を各船100個積とし、自社コンテナ110個を各港に配置して計算した。図5は各港での必要コンテナ数、利用可能コンテナ数そして在庫

表1 計算事例の設定値

項目	設定値
投入隻数	8隻（航路A）、4隻（航路B）
航海期間	7期間（港1－港2）、1期間（港2－港3） 8期間（港3－港1）、4期間（港3－港4） 3期間（港4－港2）
荷役費用	各港5万円
陸送費用	15万円（港1－港4）、7.5万円（港2－港3）
リース費用	16万円（港1－港2、港1－港3） 15万円（港4－港2、港4－港3）
内陸流動日数	各港2期間

表2 リースコンテナ数

港	期	個数
3	4	1
3	9	4

表3 回送コンテナ数

仕出港	仕向港	期	手段	個数
4	3	1	本船	6
4	3	3	本船	17
3	1	2	本船	58
2	3	5	陸送	7
2	3	9	陸送	50
2	3	12	陸送	2
2	3	13	陸送	3
2	3	14	陸送	3
3	2	3	陸送	36

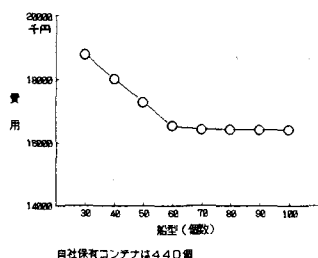


図6 船型による費用の変化

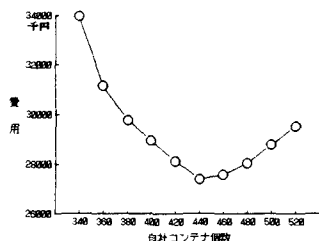


図7 保有数の変化による費用の変化

コンテナ数の変動を示し、表2はリースコンテナ数を、表3は回送コンテナ数を示している。

次に図6に示すように船型を各船100個から一部で余席が0になる30個まで10個ずつ変化させた場合の総費用の変化を求めた。船型の増大とともに

に余席が増え、本船回送が有効にできるため総費用は減少している。しかし船型が70以上は最適回送個数以上の余席ができるため総費用の低下は限界に達している。

さらに自社コンテナの数を変化させた場合の自社コンテナ費用を含めた総費用の変化を求めた。ここで自社コンテナ数は20個ずつ変化させた。これにより最適保有コンテナ数が求まることになる。コンテナ費用は計画対象期間の減価償却費を考え1個2万5千円とした。図7に結果を示すが、これによると440個が最適値となっている。

5. おわりに

今回検討を行ったコンテナ回送計画はコンテナ輸送の設備計画の一部でしかない。例えば、先の計算事例で示した船型による変化も船賃を含めた全体費用の観点から検討する必要がある。つまり、単にコンテナだけの問題ではなく船、埠頭を包含した整備計画が不可欠である。今後この方面の検討を加えたい。