

輸送ネットワークにおける就航パターンの設計

黒川 久幸^{*}・嶋 邦彦^{**}・鶴田 三郎^{*}

1.序論

海上コンテナ輸送は目覚ましい発展を遂げながら現在に至っている。特に、東・東南アジアにおける海上コンテナ貨物取扱量の増加傾向は著しく、10年間で3.3倍になっており、1994年のコンテナ貨物流動量は、5222万TEUにも達している。このような状況の中、世界の主要な定期航路において、コンテナ貨物輸送の合理化、効率化のため、コンテナ船の大型化が進行している。そのためハブ港湾を中心とした新たな輸送形態が形成されており、大規模なコンテナ航路の見直しが行われている。

しかし、コンテナ航路の設定や大型船の配船方法に関して、実際、輸送ネットワーク全体から見た場合に合理的、かつ、効率的なものとなっているかどうか不明であり、この指針となるような研究はほとんどなされていない。

そこで本研究では、港湾間の輸送需要を満たすように望ましいコンテナ航路をどのように設定すればよいか、その設計手法を構築することを目的とする。

2.輸送ネットワーク

2.1 輸送ネットワークの概要

図1に輸送ネットワークを示す。このネットワークは、港湾間の輸送需要を満たすように設定された船舶の運航ルートとその運航ルート上を就航する船舶によって構成される。図には、輸送ネットワークとして二つの運航ルートが存在し、二種類の船舶が各運航ルート上に就航している状況を示している。なお、運航ルート上の船舶の数は、就航隻数を意味している。

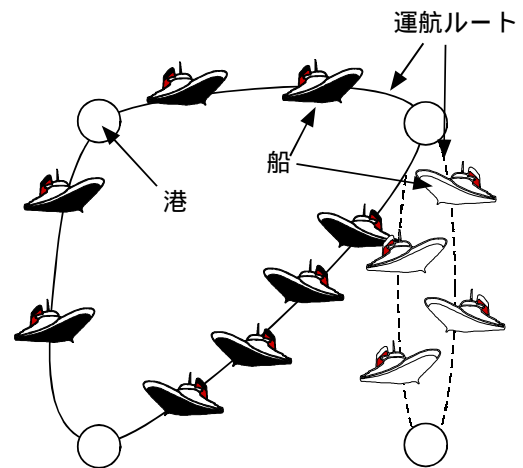


図1 輸送ネットワーク

2.2 輸送ネットワークの設計

図1に示す輸送ネットワークを対象とし数理計画法を用いて輸送ネットワークの設計を行なう。なお、本研究では輸送ネットワークの設計を次の二段階に分けて行う。

(1)就航パターンの設計

(2)運航ルートの設計

図2に輸送ネットワーク設計の流れを示す。まず、第一段階の就航パターンの設計は、各港間の就航状況及び就航船舶の積載量、隻数を求める設計である。また、第二段階の運航ルートの設計は、第一段階で求められた就航パターンを基に積み替え費用等を考慮して、最も望ましい船舶の運航ルートを求める設計である。

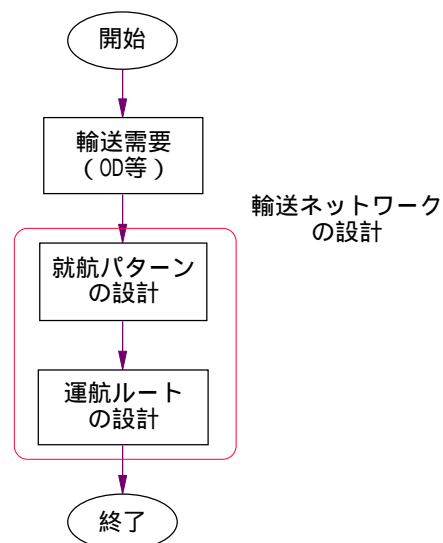


図2 輸送ネットワーク設計の流れ

3.就航パターンの設計

3.1 設計の概要

本研究で検討を行なう第一段階の就航パターンの設計は、前提条件として港湾間のOD表、距離表等が与えられたとき、輸送にかかる総費用を最小とすように就航パターンを求める設計である。具体的には、図3に示すように船舶を就航させるリンクを求めると共にそのリンク上において何隻就航させればよいか求める設計である。

この他、設計では空コンテナの回送や港湾の水深制約による大型船の入港制限についても考慮している。

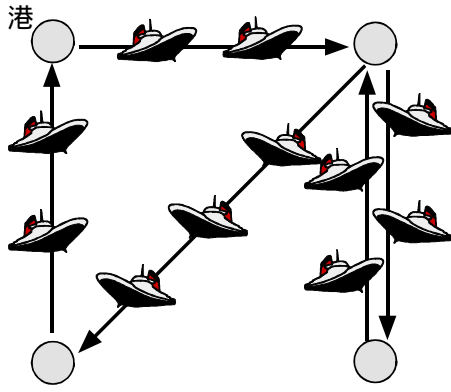


図3 就航パターン

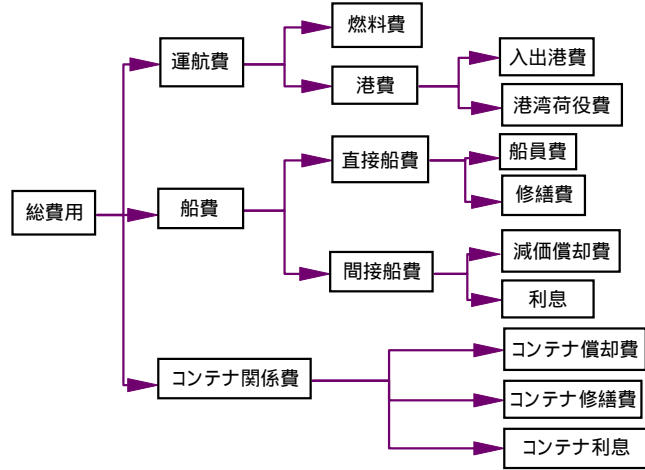


図4 海上コンテナ輸送にかかる総費用

3.2 目的関数

図4に海上コンテナ輸送にかかる総費用を示す。本研究では、図4及び式(1)に示すように、総費用を運航費、船費、コンテナ関係費の合計で表す。この総費用を最小となるように設計を行う。

以下、これらの費用について定式化を示す。

$$Call = Ca1 + Ca2 + Cc \quad (1)$$

式(2)に運航費($Ca1$)を示す。第1項は燃料費で、第2項は入出港費で、第3項は港湾荷役費である。

$$Ca1 = c1 \cdot \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} \left\{ f \cdot c2 \frac{d_{ij}}{v_k} \cdot R_{ij}^k \cdot c3 (c4 w_k)^{\frac{2}{3}} \cdot v_k^3 \right\} + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} \left\{ f \cdot R_{ij}^k \cdot (pc1_i \cdot w_k + pc2_i) \right\} + \sum_{i \in N} c5_i (X_i + Y_i) + c6 \cdot \sum_{i \in N} c5_i (X_i + Y_i) \quad (2)$$

式(3)に船費($Ca2$)を示す。第1項は船員費で、第2項は修繕費で、第3項は間接船費である。

$$Ca2 = \sum_{k \in K} \left\{ c10 hu_k \cdot \sum_{(i,j) \in A} r_{ij}^k \cdot R_{ij}^k \right\} + \sum_{k \in K} \left\{ c11 c8_k \cdot w_k \cdot \sum_{(i,j) \in A} r_{ij}^k \cdot R_{ij}^k \right\} + \sum_{k \in K} \left\{ (c7 + c9) \cdot c8_k \cdot w_k \cdot \sum_{(i,j) \in A} r_{ij}^k \cdot R_{ij}^k \right\} \quad (3)$$

式(4)にコンテナ関係費(Cc)を示す。

$$Cc = \{(c9 + c12 + c14) \cdot c13 \cdot \left(\sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \frac{\sum_{u \in U} x_{ij}^{k,u} + y_{ij}^k}{f} \cdot r_{ij}^k + \sum_{i \in N} \frac{X_i + Y_i}{f} \right)\} \quad (4)$$

各変数の意味は次の通りである。

$Call$: 総費用[円/年]、 $Ca1$: 運航費[円/年]、 $Ca2$: 船費[円/年]、 Cc : コンテナ関係費[円/年]

d_{ij} : 距離[mile]、 w_k : 船の大きさ[TEU]、 v_k : 船の速度[ノット]、 R_{ij}^k : 船舶の就航状況、 r_{ij}^k : 就航隻数[隻]

f : 寄港頻度[回/年]、 $x_{ij}^{k,u}$: 流量[TEU/年]、 y_{ij}^k : 空コンテナの流量[TEU/年]、 $pc1_i$ 、 $pc2_i$: 入出港費係数

X_i : 実入りコンテナ取扱量[TEU/年]、 Y_i : 空コンテナ取扱量[TEU/年]、 hu_k : 船員数[人/隻]

$c1 \sim c14$: 費用に関する係数

3.3 制約条件

次に、制約条件を示す。ここでは、実入りコンテナ及び空コンテナをネットワーク上のフローとして表わし、そのフローは船舶の就航から制約を受けるとして定式化する。

実入りコンテナのフローの制約条件

$$\sum_{k \in K} \sum_{\{j|(i,j) \in A\}} x_{ij}^{k,u} - \sum_{k \in K} \sum_{\{j|(j,i) \in A\}} x_{ji}^{k,u} = s_i^u, \forall i \in N, \forall u \in U \quad (5)$$

$$0 \leq x_{ij}^{k,u}, \forall (i, j) \in A, \forall k \in K, \forall u \in U \quad (6)$$

空コンテナのフローの制約条件

$$\sum_{k \in K} \sum_{\{j|(i,j) \in A\}} y_{ij}^k - \sum_{k \in K} \sum_{\{j|(j,i) \in A\}} y_{ji}^k = t_i, \forall i \in N \quad (7)$$

$$0 \leq y_{ij}^k, \forall (i, j) \in A, \forall k \in K \quad (8)$$

コンテナの流動量は船舶の最大積載容量以下である制約条件

$$\sum_{u \in U} x_{ij}^{k,u} + y_{ij}^k \leq w_k \cdot f \cdot R_{ij}^k, \forall (i, j) \in A, \forall k \in K \quad (9)$$

港における入出港船舶数は等しいという制約条件

$$\sum_{\{j|(i,j) \in A\}} f \cdot R_{ij}^k = \sum_{\{j|(j,i) \in A\}} f \cdot R_{ji}^k, \forall i \in N, \forall k \in K \quad (10)$$

港、海峡等における水深の制約条件

$$R_{ij}^k, R_{ji}^k = \begin{cases} \{0,1\}, & h_i > D_k \\ 0, & h_i < D_k \end{cases}, \forall (i, j), \forall (j, i) \in A, \forall k \in K \quad (11)$$

N : 節点の集合、 A : 辺の集合、 h_i : 水深[m]、 K : 船種の集合、 D_k : 喫水[m]、 U : 分布量の集合、

s_i^u : 流入量[TEU/年]、 t_i : 空コンテナの流入量[TEU/年]

4. 就航パターン設計例

4.1 対象地域及び港湾

対象地域として、海上コンテナ貨物取扱量の増加傾向が著しく、かつ、世界のコンテナ貨物流動量に占める割合が高い、東・東南アジアを対象とする。また、アジア地域と特に貿易量の多い米国も対象とする。そして対象港湾として、1994年の年間取扱貨物量がアジア地域では50万TEU以上、米国では100万TEU以上の港湾を対象とする。なお設計では、東京港と横浜港のように近距離の港湾はまとめて一つの港とした。

以下、対象地域における対象国と港湾を示す。

対象国: 日本、韓国、香港、シンガポール、タイ、台湾、フィリピン、マレーシア、インドネシア、米国

対象港湾: 東京/横浜、名古屋、大阪/神戸、釜山、香港、シンガポール、バンコク、基隆、高雄、マニラ、ポートケラン、ジャカルタ、シアトル/タコマ、オークランド、ロスアンジェルス/ロングビーチ、ニューヨーク

4.2 OD表及び距離表

まず対象港湾間のOD表を示す。

表1 OD表

単位: 千TEU

	TK/YH	NG	OS/KB	BS	HK	SP	BK	KL	KS	MN	PK	JK	ST/TM	OL	LA/LB	NY
東京・横浜(TK/YH)				67.97	201.13	110.47	63.69	61.57	79.41	23.62	26.32	14.16	122.58	116.27	206.93	16.07
名古屋(NG)				15.38	58.70	56.58	27.26	28.47	12.58	12.25	14.30	11.44	45.59	33.17	72.81	6.49
大阪・神戸(OS/KB)				68.82	185.10	111.89	55.44	67.43	66.76	24.74	22.73	14.48	117.59	105.78	167.82	19.64
釜山(BS)	90.76	23.68	112.09		165.48	34.44	17.25	10.42	34.89	19.53	5.02	31.67	35.89	21.91	74.84	29.89
香港(HK)	134.81	25.07	149.68	31.08		69.00	18.96	23.20	77.72	18.00	11.96	31.20	93.60	57.15	195.20	77.96
シンガポール(SP)	124.63	51.19	132.31	18.48	58.00		31.60	12.00	40.20	15.00	16.56	31.20	12.86	7.85	26.81	10.71
バンコク(BK)	57.35	20.64	64.78	14.60	38.71	28.44		7.90	26.47	6.30	3.34	5.65	25.12	15.34	52.39	20.92
基隆(KL)	44.84	14.58	56.67	7.73	88.00	11.40	6.95			5.85	3.86	5.98	18.55	11.33	38.69	15.45
高雄(KS)	115.04	33.19	108.74	25.89	294.80	38.19	23.29			19.60	12.94	20.03	62.16	20.50	129.63	51.77
マニラ(MN)	26.38	4.47	16.51	3.15	10.50	5.03	1.30	1.65	5.53		0.86	2.44	8.50	5.19	17.73	7.08
ポートケラン(PK)	18.95	5.17	27.22	6.18	16.56	16.56	2.91	2.58	8.63	1.24		3.59	9.48	5.79	19.76	7.89
ジャカルタ(JK)	16.31	5.35	29.44	15.29	25.35	23.40	4.11	7.15	23.95	4.10	3.59		13.66	8.34	28.49	11.38
シアトル・タコマ(ST/TM)	162.91	23.77	127.68	47.04	52.40	18.39	11.69	13.38	44.84	15.26	4.13	12.90				
オークランド(OL)	99.15	24.68	91.19	28.72	32.00	11.23	7.14	8.17	27.38	6.33	2.52	7.30				
ロス・ロングビーチ(LA/LB)	256.37	46.06	215.77	98.09	109.28	38.35	24.37	27.91	93.50	21.62	8.62	24.93				
ニューヨーク(NY)	8.37	1.04	16.98	39.18	43.65	15.32	9.73	11.15	37.34	8.64	3.44	9.96				

表1に示すOD表は、国間の貨物流動量を基に各国の全取扱貨物量に占める各港湾の割合を用いて推定した。

次に対象港湾間の距離表を示す。

表2 距離表

単位: mile

	TK/YH	NG	OS/KB	BS	HK	SP	BK	KL	KS	MN	PK	JK	ST/TM	OL	LA/LB	NY
東京・横浜(TK/YH)	0	217	368	600	1593	2920	3047	1153	1363	1791	3201	3210	4311	4559	4843	9708
名古屋(NG)	220	0	239	470	1483	2829	3006	1029	1240	1702	3110	3212	4433	4675	4866	9834
大阪・神戸(OS/KB)	371	238	0	363	1387	2727	2854	927	1138	1600	3008	2967	4544	4826	5118	9990
釜山(BS)	600	470	363	0	1145	2503	2582	715	944	1413	2784	2841	4660	4969	5435	11076
香港(HK)	1593	1483	1387	1145	0	1425	1500	475	342	633	1706	1782	5830	6050	6363	11215
シンガポール(SP)	2915	2829	2726	2503	1425	0	844	1821	1625	1342	281	533	7085	7370	7652	12507
バンコク(BK)	3042	3006	2853	2582	1500	844	0	1900	1704	1485	1125	1294	7325	7567	7861	14290
基隆(KL)	1148	1029	926	715	475	1821	1900	0	298	766	2102	2158	5398	5640	5934	10799
高雄(KS)	1358	1240	1137	944	342	1625	1704	298	0	547	1906	1963	5609	5851	6145	11010
マニラ(MN)	1786	1702	1599	1413	633	1342	1485	766	547	0	1623	1571	6055	6220	6520	11374
ポートケラン(PK)	3196	3110	3007	2784	1706	281	1125	2102	1906	1623	0	814	7479	7721	8015	12880
ジャカルタ(JK)	3205	3212	2966	2841	1782	533	1294	2158	1963	1571	814	0	7581	7823	8117	12982
シアトル・タコマ(ST/TM)	4311	4433	4523	4660	5740	7085	7325	5398	5609	6055	7479	7581	0	790	1132	6044
オークランド(OL)	4559	4675	4826	4969	6520	7370	7567	5640	5851	6220	7721	7823	790	0	366	5264
ロス・ロングビーチ(LA/LB)	4843	4866	5117	5435	6363	7652	7861	5934	6145	6520	8015	8117	1132	366	0	4928
ニューヨーク(NY)	9708	9834	9990	11076	11215	12507	14290	10799	11010	11374	12880	12982	6044	5264	4928	0

4.3 設計結果

船舶の最大積載容量を1500(TEU)、航海速力19(ノット)、喫水 9.5(m)、そして船員数 23(人)と設定したときの就航パターン設計結果を図5に示す。図中に示す矢印は、船舶の就航状況を表しており、太い線程多くの船舶の就航を意味する。図より、特に香港に船舶の就航が集中していることが判り、東・東南アジアの地域におけるハブ港湾となっていることが判る。これは香港が東・東南アジア地域の中心に位置し、地理的に有利なためと考えられる。

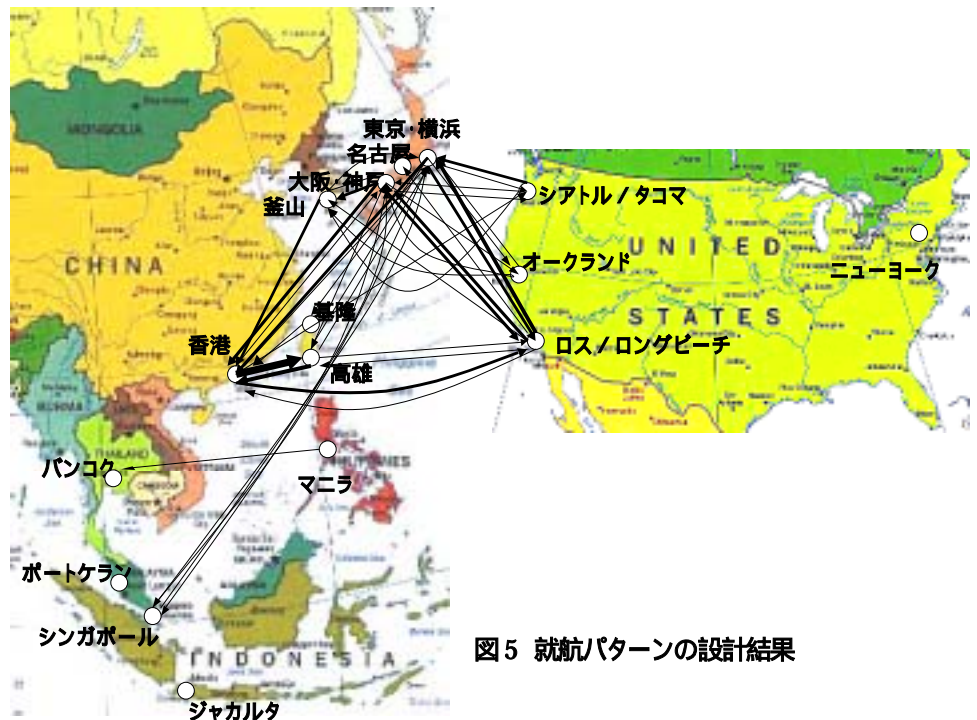


図5 就航パターン設計結果

5. 結論

輸送ネットワークにおける就航パターンの設計を数理計画問題としてモデル化した。そして、具体的な港湾間の OD 表と距離表を基に就航パターンの設計例を示した。

今後は就航船舶の望ましい最大積載容量の検討を行なうと共にハブ港湾の整備に関して港湾荷役料金の廉価や大水深バースの建造による就航パターンの変化について検討を行なっていく予定である。

最後に、この研究は運輸分野における基礎的研究推進制度により行われたものである。ご支援頂いている関係各位に深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 大和裕幸・角田智弘・小山健夫・伏見彬：「数理計画法によるコンテナ船航路の設計手法について」, 日本造船学会論文集, 第 184 号, 1998 年
- (2) 日本海運集会所：「日本船舶明細書 1998」, 日本海運集会所, 1997 年 12 月
- (3) 林 厥輝：「台湾・北米間コンテナ輸送システムにおける船社の運航コストに関する分析」, 東京商船大学大学院修士論文, 1992 年 3 月
- (4) 下條哲司：「配船の経営科学」, 成山堂書店, 1986 年 9 月