コンテナターミナルにおける最適荷役作業計画*
(第2報, バースの最適配置計画)金 淳^{*1}, 任 永 祥^{*2}
樋 口 良 之^{*3}, 伊 藤 廣^{*4}Optimum Planning on Material Handling Operation in Container Terminal
(2nd Report, Optimum Design on Berch Configuration)Chun JIN, Yongxiang REN,
Yoshiyuki HIGUCHI and Hiroshi ITO^{*5}^{*5} Nagaoka University of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Kamitomioka 1603-1, Nagaoka, Niigata, 940-2188 Japan

This paper describes the optimum design on the berth configuration extension plan of materials handling systems in container terminals. The operation model with flexible controlled operation rule, which was put forward on the first report of this research, is used to analyze the margin degree of operation ability of the system to increasing operation quantity within a long period. The whole problem is divided into two parts: (a). dynamic programming is used as a basic algorithm for the optimal path of decision-making; (b). nonlinear search programming combined with discrete event system simulation is used for configuration analysis of a given year, especially for the final year's. The minimum total ship waiting time is established as the objective function. Fuzzy set theory is applied to deal with the uncertainty in decision made by terminal management, and the optimal decision-making sequence on the system configuration plan is decided. A case study is analyzed to confirm the validity and effectiveness of the approach.

Key Words: Materials Handling System, Optimum Design, Production Planning, Simulation, System Engineering, Fuzzy Set Theory, Dynamic Programming, Scheduling, Container Terminal

1. 緒 言

コンテナターミナルにおける荷役作業の効率は、荷役量と荷役運搬システムの配置に深い関係がある。このため、荷役量が増大し、ターミナルの新設や再整備が行われる場合、システムの配置計画は、新設時の作業能力だけでなく、運用開始後の作業効率の検討も要求される。このため、ターミナルにおける荷役機械の台数と能力、バース岸壁長さ等の配置計画を将来にわたり合理的に決定する最適計画法を開発することが望まれている。

しかしながら、従来の研究^{(1)~(5)}には、コンテナ荷役量の増大に伴うシステムの配置に関するものはなかった。そこで、本論では、本研究の前報⁽⁶⁾で確立したコンテナターミナルにおける作業ルールをフレキシブル

に制御する荷役作業モデル⁽⁷⁾を適用し、荷役作業の効率化を目的とし、荷役作業量の増大に対応するシステムの最適な配置計画と時期の決定方法を確立する。解析方法は、離散型シミュレーション解析と探索法を併用し局所的な検討を行い、複数年にわたる長期的な配置計画を動的計画法によって行う。このとき、ファジィ理論によるターミナル管理者の満足度を考慮した評価を適用する。また、事例解析によって、確立する配置計画方法の妥当性と有用性を検討する。

2. モデリングと解析

2.1 荷役量の計画 解析期間 N 年間の計画荷役量 $Q_y(t)$ を年度 t ごとにベクトルとして考慮し、次式のように示す。

$$Q_y = (Q_y(1), Q_y(2), \dots, Q_y(N))^T \dots\dots\dots (1)$$

2.2 コンテナ船

(1) 船舶の年間到着数 $ls(t)$ を年度 t ごとに考慮し、次式で示す。

$$ls = (ls(1), ls(2), \dots, ls(N))^T \dots\dots\dots (2)$$

(2) t 年度の船舶到着比率 $r_i(t)$ は、重量トン別の船種数 ns に応じて、次式で表す。

$$a_s(t) = (r_1(t), r_2(t), \dots, r_{ns}(t))^T \dots\dots\dots (3)$$

* 原稿受付 1998年12月16日。

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学大学院 (☎ 940-2188 長岡市上富岡町1603-1)。^{*2} 正員, 住友重機械工業(株) (☎ 141-8686 東京都品川区北品川5-9-11)。^{*3} 正員, 山形県立産業技術短期大学校 (☎ 990-2473 山形市松栄2-2-1)。^{*4} 正員, 長岡技術科学大学。

E-mail: hitoh@mech.nagaokaut.ac.jp

また、船舶の到着比率 a_s を次式とする。

$$a_s = (a_s(1), a_s(2), \dots, a_s(N))^T \dots\dots\dots (4)$$

2・3 バースの荷役運搬システム 図1は、 N 年間の平行式バースの荷役運搬システム拡張過程を示す。初年度($t=0$)に初期状態として、バース数 n_b 、長さ L_b 、岸壁用コンテナクレーン数 m_c とその荷役能力を設定する。その後、各年度ごとに、次の三つの事項から最適判断を決定する。

(1) d_1 : 現状の維持

(2) d_2 : 岸壁用コンテナクレーンの増設

クレーンの増設は、年度 t の初めに1回だけバースの許容設置台数の範囲内で行われる。

(3) d_3 : バース岸壁の拡張とクレーンの増設

バースの拡張は、年度に1回1バースだけ行われる。このとき、クレーンも増設される。

年度 t におけるシステム配置計画 $d_y(t)$ を次式で表す。

$$d_y(t) = (d_1, d_2, d_3) \dots\dots\dots (5)$$

式(5)より、 N 年間の計画ベクトル d_y は次式となる。

$$d_y = (d_y(1), d_y(2), \dots, d_y(N))^T \dots\dots\dots (6)$$

また、本解析の結果、得られた船舶の総待ち時間を最小にする最適計画 d_y^* は、次式で表す。

$$d_y^* = (d_y(1)^*, d_y(2)^*, \dots, d_y(N)^*)^T \dots\dots\dots (7)$$

バースのモデルでは、各バースに配置されるクレーンの荷役能力は同じとする。また、船舶は、その接岸長さとバースの岸壁長さ L_b に応じて、可能なかぎり接岸できる。

2・4 解析方法 本報では、各年度ごとのシステムの最適な配置計画を求める局所的な問題D1と N 年間を通して最適なシステム配置計画 d_y^* を求める問

題D2がある。

問題D1の場合、 t 年めにおけるシステムの配置計画を求めるために、探索法と離散型システムシミュレーションを併用する最適化手法⁽⁸⁾を利用する。

問題D2の場合、各年度 t の各決定による配置計画の組合せを N 年間解析するため、シミュレーションの計算回数は多く、現実的ではない。そこで、効率的な解析のために、動的計画法^{(9)~(11)}を用いる。最適性原理によって、まず、システムの初期配置条件を設定し、問題D1の最適な最終配置条件を求める。次に、動的計画法で問題D2の最適計画 d_y^* を求める。

3. システムの最適化評価

3・1 決定変数 本解析で決定する最適評価に必要な変数を次に示す。

x_1 : バース数 n_b

x_2 : バースの岸壁長さ L_b m

x_3 : 岸壁用コンテナクレーンの台数 m_c

x_4 : 岸壁用コンテナクレーンの作業能力 P_c (TEU/h)

3・2 システムの作業効率の評価

(1) 船舶の待ち時間: 年度 t における荷役作業の評価には、次式に示す船舶の待ち時間 $WT(t)$ を用いる。

$$WT(t) = E \left\{ \sum_{i=1}^{ls} W_{ti} / \sum_{i=1}^{ls} Q_{si} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 ls は年間の船舶到着総回数、 Q_{si} は i 番め船舶の荷役量、 W_{ti} は船舶 i の待ち時間である。

(2) 荷役作業に関する最適化目的関数 $f(x)$ は、次式に示す N 年間における船舶の総待ち時間を最小にすることである。

Fig. 1 Configuration extension of materials handling system in container terminals

minimize

$$f(x) = \sum_{i=1}^N WT(t) \dots\dots\dots (9)$$

(3) 評価のファジィ満足度：ターミナル管理者であるオペレータは、船舶待ち時間に影響を与える荷役作業効率を評価している。このとき、「待ち時間が短い」などのあいまいな情報を処理するために、ファジィ理論を用いる。あいまいなオペレータの満足度をメンバシップ関数で表現される。そして、一定のファジィ満足度を達成する満足化最適解を求める。

本研究における目的関数 $f(x)$ と制約条件のファジィ化には、「ファジィ小」と「ファジィ相等」の2種類がある。図2(a)は「 $f(x)$ はおおむね f^1 以下になる」というファジィ化関数 $f(x)^{(12)(13)}$ をメンバシップ関数 $\mu_f(x)$ で表している。 $\mu_f(x)$ は、区間 $[f^1, f^0]$ 内で次式に示すようになる。

$$\mu_f(x) = 1 - \frac{f(x) - f^1}{d_f}, d_f = f^0 - f^1 \dots\dots\dots (10)$$

また、図2(b)に示すようにファジィ化関数 $f(x)$ のメンバシップ関数 $\mu_f(x)$ は、設定する区間 $[a_0, a_2]$ において、次式となる。

(a) Fuzzy minimum

(b) Fuzzy equal

Fig. 2 Membership function of $f(x)$

$$\mu_f(x) = \begin{cases} 0 & f(x) < a_0 \\ \frac{f(x) - a_0}{a_1 - a_0} & a_0 \leq f(x) < a_1 \\ 1 - \frac{a_1 - f(x)}{a_2 - a_1} & a_1 \leq f(x) < a_2 \\ 0 & f(x) \geq a_2 \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

本文で使用している記号「 $\leq$ 」と「 $\approx$ 」は、それぞれ「ファジィ小」と「ファジィ相等」を示す。この結果、評価関数 $WT(t)$ の満足度は次式となる。

$$\mu_f(t) = 1 - \frac{f(t) - f^1}{f^0 - f^1} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 f^0 と f^1 は、設定した $WT(t)$ の最大と最小の満足度に対応する関数 $WT(t)$ の値である。

3.3 制約条件 制約条件(1)：年間実荷役量 Q_{yi} が年間計画荷役量 Q_y を満足する。

$$g_1(x) = Q_y - E(Q_{yi}) \approx 0 \dots\dots\dots (13)$$

制約関数 $g_1(x)$ のファジィ化は、図2(b)に示したファジィ相等メンバシップ関数で $\mu_{g1}(x)$ を求めることである。

制約条件(2)：バースの年間利用率 $\rho_s(t)$ は、期待値 ρ_{s1} の区間 $[\rho_{s0}, \rho_{s2}]$ の範囲内になる。

$$g_2(x) = \rho_s(t) \approx \rho_{s1} \dots\dots\dots (14)$$

$\rho_s(t)$ は、次式で求める。

$$\rho_s(t) = \frac{1}{(365 \times 24) L_b} \left\{ \sum_{i=1}^{Is} L_{si} \times T_{si} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 L_{si} は船舶 i の接岸長さ、 T_{si} は船舶 i の在港時間である。関数 $g_2(x)$ のファジィ化は、図2(b)に示したファジィ相等メンバシップ関数で $\mu_{g2}(x)$ を求めることである。

制約条件(3)：一つのバースにおける岸壁用コンテナクレーンの台数 m_c は、許容設置台数 m_{ca} を超えないとする。

$$g_3(x) = m_c - m_{ca} \leq 0 \dots\dots\dots (16)$$

制約条件(4)：コスト面では、岸壁の長さ L_b が小さいほうがよい。 t 年度めに拡張するバースの場合、岸壁長さ $L_b(t)$ は、最大船舶の接岸長さ L_s を起えない。

$$g_4(x) = L_b(t) - L_b(t-1) - L_s \leq 0 \dots\dots\dots (17)$$

関数 $g_4(x)$ のファジィ化は、図2(a)に示したファジィ小メンバシップ関数で $\mu_{g4}(x)$ を求めることである。

4. 最適化問題の定式化

4.1 問題 D1 の最適化の定式化 年度 t における統合メンバシップ関数の値 λ_t の最大値をファジィ満足度の高い最適解とし、式(8)に示した $WT(t)$ を目的関数 $f(x)$ とする問題 D1 は、次のように表現さ

れる.

maximize

$$\lambda_1 \dots \dots \dots (18)$$

subject to

$$1 - \frac{f(x) - f^1}{d_f} \geq \lambda_1 \dots \dots \dots (19)$$

$$\mu_{gj}(x) \geq \lambda_1, j=1, 2, 3, 4 \dots \dots \dots (20)$$

$$x_i \min \leq x_i \leq x_i \max, 1 \leq i \leq 4, \dots \dots \dots (21)$$

$$0 < \lambda_1 \leq 1 \dots \dots \dots (22)$$

この結果, 最適化問題 D1 は, 制約条件のあるファジィ非線形計画問題に帰着する.

4.2 問題 D2 の最適化の定式化

問題 D2 において, N 年間の統合評価のために, まず, システムの初期状態と最終状態を決める. 設定される初期状態 $S(0)$ を次式で表す.

$$S(0) = \{x_1(0), x_2(0), x_3(0), x_4(0)\} \dots \dots \dots (23)$$

また, 求める最適な最終状態 $S(N)$ を次式に表す.

$$S(N) = \{x_1(N), x_2(N), x_3(N), x_4(N)\} \dots \dots \dots (24)$$

$S(N)$ の解析方法には, 式(18)~(22)に示す問題 D1 の定式化を用いる. 組合せ数を減少させるために, $S(N)$ と $S(0)$ の間の状態変化の差を求め, 全期間のシステム状態数を求めることができる.

$$\begin{aligned} \Delta S &= \{x_1(N) - x_1(0), x_2(N) - x_2(0), \dots, \\ &\quad x_4(N) - x_4(0)\} \\ &= \{\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4\} \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

決定 d_3 の個数 nd_3 : $nd_3 = \Delta x_1$

決定 d_2 の個数 nd_2 : $nd_2 \leq \Delta x_3 - m_0 \Delta x_1 - x_{30}$

決定 d_1 の最小個数 nd_1 : $nd_1 \geq N - nd_2 - nd_3$

この結果, 問題 D2 は nd_3 個の d_3 , nd_2 個の d_2 , nd_1 個の d_1 からなる最適組合せ問題に帰属する. ただし, ターミナルのシステムの配置計画について, パース拡張と運営, クレーン増設と運営, 新パース拡張等という順序がある. 配置計画の決定は, d_3, d_1, d_2, d_1, d_3 等さまざまな順序があり, その組合せについて制約と規則がある. このため, 次式のとおりに, 決定ベ

Fig. 3 State transition sequence

クトル d は二つの種類 K (Keep) と E (Extend) に分ける.

$$d = \{K, E\} = \{(d_1), (d_2, d_3)\} \dots \dots \dots (26)$$

決定順序ベクトルには, K の決定 d_1 が任意の位置に設置できるが, E の決定では d_2 と d_3 の順序に制約がある. 図3に, 本研究におけるシステム配置の進行過程を示す.

問題 D2 の動的計画法による定式化は, 次式となる.

$$f(t) = \min \begin{cases} WT_k(t) + f(t+1) & \text{case } K \\ WT_e(t) + f(t+1) & \text{case } E \end{cases} \dots \dots (27)$$

$$\{d_t\} = \{d - S_t\} \dots \dots \dots (28)$$

ここで, $f(t)$ と $f(t+1)$ はそれぞれ t 年め以降の $N-t$ 年, $t+1$ 年め以降の $N-t-1$ 年の最適作業効率, $WT_k(t)$ は決定種類 K の t 年めの船舶待ち時間, $WT_e(t)$ は決定種類 E の t 年めの船舶待ち時間である. また, d_t は t 年めの決定選択集合, S_t は t 年め以降の $N-t$ 年間に選択した決定集合である.

問題 D2 の満足化最適化の定式化では, N 年間に, 統合メンバシップ関数の値 λ_2 の最大値をファジィ満

Fig. 4 Flowchart of algorithm for optimization with problems D1 and D2

足化最適解とする。問題D2の解決は、式(29)～(31)に示すファジィ化目的関数と制約関数によって、 N 年間における各年度ごとの作業評価の満足度 $\mu_f(t)$ の和を最大にすることである。

maximize

$$\lambda_2 = \sum_{t=1}^N \mu_f(t) \quad \dots\dots\dots (29)$$

subject to

$$\mu_{gj} \geq \lambda_1, \quad j=1, 2, 3, 4, \quad t=1, \dots, N \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \quad 1 \leq i \leq 4, \quad \dots\dots\dots (31)$$

4.3 最適化問題のアルゴリズム

図4に本研究のアルゴリズムを示す。問題D1の定式化によって解析期間の最終年度($t=N$)におけるシステムの最適配置を求めるアルゴリズムは、離散型システムシミュレーション方法を併用した修正パターン探索法^{(14)~(16)}である。問題D2^{(9)~(11)}については、年度 $N-1$ から1までの各年度 t において、決定した K, E に応じて荷役運搬作業の解析を行い、 t までの最適な決定、目的関数とファジィ満足度を求める。そして、全年度における目的関数の和を求め、ファジィ満足度が最大になる決定 d_1, d_2, d_3 の順序を示す d_g^* を決定する。

本研究では、前報で確立した作業ルールをフレキシブルに制御する荷役作業モデルを適用している。荷役量が等しい場合、このモデルでは船舶の待ち時間を短縮し、クレーンとバースの作業能力を十分に発揮できる。本モデルによる荷役作業の効率が悪くなったとき、バース拡張等が必要になる。

5. 事例解析

5.1 解析条件 第4章に述べたファジィ最適化手法を用いて、図1に示す中国南部のコンテナターミ

ナルを対象にバースにおける荷役運搬システムの拡張について解析する。表1に実地調査に基づくターミナルの解析条件を示す。表2にシステムの初期配置条件を示す。解析期間10年間におけるコンテナ荷役量の年ごと変動曲線を図5に示す。年ごと船種別の到着比率を図6に示す。調査結果により、バースを新設する d_3 を選択した場合、新設バースに初期設置されるクレーン数 m_c は2台である。クレーンを増設する d_2 を選択した場合、1台加えて3台になる。本事例では、3.1節で述べた決定変数を次に示す範囲とした。

- (1) $2 \leq x_1 \leq 6$;
- (2) $470 \leq x_2 \leq 1800$;
- (3) $4 \leq x_3 \leq 18$;

Table 3 Sequence of decisions (Case A)

Year	Decision making $d_g(t)$	Design variables			
		n_b	L_b m	m_c	$m_c \times P_c$ TEU/h
0	(0,0,0)	2	470	4	100
4	(0,1,0)	2	470	6	150
7	(0,0,1)	3	770	8	200
8	(0,1,0)	3	770	9	225
9	(0,0,1)	4	1070	11	275
10	(0,1,0)	4	1070	12	300

Fig.5 Prediction curve for container quantity to be handled within N years

Table 1 Premise of case study

Item	Value	Item	Value
N	yr 10	n_s	7
T_y	d 360	ρ_{s1}	0.50
ρ_{s0}	0.25	ρ_{s2}	0.75
f^1	0.0	f^0	2.40
m_0	2	m_{ca}	3

Table 2 Initial condition ($t=0$)

Item	Value	Item	Value
Q_y	TEU 180×10^3	x_1	2
Q_{y1}	TEU 124×10^3	x_2	m 470
n_s	4	x_3	4
l_s	500	x_4	TEU/h 25

Fig.6 Prediction for ratio of ship arrival by ship dead weight tonnage

(4) $20 \leq x_4 \leq 50$.

これから、各目的関数と決定変数の関係を検討し、図4に示したアルゴリズムを用いてシステムの最適な計画順序を求める。

5.2 解析結果と検討 次の二つの事例AとBを解析し、その結果を比較して、本研究の解析方法の妥当性と有用性を検討する。

事例A：従来のコンセプトによるシステム拡張計画。
事例B：本研究で確立した方法による計画。

従来の事例Aでは、バース利用率が制限値に達したとき、システムの拡張を行う。バース利用率の制限値 ρ_{lim} は、港湾の事情により異なる。本事例では、 ρ_{lim} は0.6とする。表3は、事例Aにおける更新時期と各決定変数の結果を示す。

事例Bでは、動的計画法を利用するために、まず、4.1節に述べた定式化D1を用いて、年度 N における満足度の高い最適解である配置計画を求める。

図7(a)、(b)に第 N 年度の目的関数 $f(x)$ とバース岸壁長さ L_b の関係をクレーンの台数 m_c をパラメータに示す。クレーンの荷役能力 x_3 は25 TEU/hとした。図7から、 $f(x)$ は、 m_c より L_b の影響を大きく受けることがわかる。図7(a)より、 L_b を900か

ら1100メートルに拡張する間に、目的関数は5 hr/100 mほど変化しているが、図7(b)では、 L_b を1100から1400メートルに拡張する間に、約0.6 hr/100 mほど変化している。したがって、 L_b がある程度の長さに到達すると、目的関数 $f(x)$ は、あまり変化しないと言える。 $f(x)$ には、制約条件を満足する配置計画の最適領域が存在している。事例Bでは、 $f(x)$ の満足度値 λ_1 が0.81になるとき、次式に示す最適な配置計画となる。

$$x^*(N) = (5, 1300, 15, 25) \dots \dots \dots (32)$$

次に、式(29)に示した N 年度の配置計画に基づいて、問題D2の定式化によって $N-1$ 年度からの各年度の決定を求める。表4は、事例Bにおける最適なシステムの拡張の決定を示す。

図8～10に作業評価である平均待ち時間 $WT(t)$ 、バース利用率、クレーン稼働率の年度推移の関係を事例Aと合せて示す。事例Aでは、バース利用率が制限値になるとき、システムの拡張を行う。これに対して、ターミナル管理者の満足度によって拡張を決定する事例Bでは、判断基準は、単年度のバース利用率の最適化だけでなく、式(29)に示す船舶待ち時間 $WT(t)$ に対する満足度の総和に基づき、 N 年間を通した最適化を行っている。また、動的計画法による最適化方法は、最適性原理によって、最終年度から最適

Fig. 7 Objective function $f(x)$ with respect to berth length L_b and the number of cranes m_c

Table 4 Optimal decision sequence (Case B)

Year	Decision making $d_y(t)$	Design variables			
		n_b	L_b m	m_c	$m_c \times P_c$ TEU/h
0	(0,0,0)	2	470	4	100
4	(0,1,0)	2	470	6	150
6	(0,0,1)	3	750	8	200
7	(0,1,0)	3	750	9	225
8	(0,0,1)	4	1000	12	300
9	(0,0,1)	5	1300	14	350
10	(0,1,0)	5	1300	15	375

Fig. 8 Operation evaluation function $WT(t)$ with respect to year history

Fig. 9 Utility rate of berth with respect to year history

Fig. 10 Utility rate of quayside container cranes with respect to year history

な決定順番 d_i^* を求めるので、年度が進行するにつれて、事例 B は安定し、両事例の結果の差異は大きくなる。

図 9 にバース利用率と年度推移の関係を示す。図 8 と同じ傾向がある。事例 A では、バース利用率が許容限界になると、バースが拡張される。事例 B では、バース利用率がシステム拡張の決定基準ではないので、必ずしも許容限界にならない。例えば、図 9 から、 $t=9$ のとき、 $t=5$ より高いバース利用率になるが、図 8 から、前者の目的関数値は、後者より低いことがわかる。図 10 にクレーン稼働率の年度推移を示す。同様に、事例 B では、クレーン稼働率が高いものの船舶の待ち時間 $WT(t)$ を短縮できていることがわかる。

図 11 に事例 A, B による待ち時間 $WT(t)$ に対する満足度の年度推移を比較する。事例 A は、満足度の評価がないので、事例 B の基準で評価を行う。明らかに、事例 B は、A より各年度ごとに良好な満足度になる。また、事例 B は、A のようにある年度に生じるに悪い満足度を避け、A より安定することがわかる。

したがって、本研究で確立した満足度評価に基づく拡張計画の決定方法は、動的計画法の原理によって、

Fig. 11 Degree of satisfaction $\mu_f(t)$ with respect to year history

船舶待ち時間、バース利用率、クレーン稼働率が良好な満足度を達成する最適な決定順番を求めることができる。この方法は、従来の設備更新のコンセプトと違い、高く、安定的な満足度を確保できる。

6. 結 言

コンテナターミナルのバース部分における荷役運搬システムの配置を対象に、荷役量の拡張と船舶の船種別到着比率の変動に応じた最適なシステム拡張計画の決定方法を確立し、次の結論を得た。

(1) 複数年度にわたる多段階最適化問題において、各年度ごとの局所的なシステム配置計画に離散型シミュレーション解析を併用した探索法を適用し最適化した。また、動的計画法を用いて、解析期間を通した長期の最適解を導出した。

(2) ターミナル管理者の判断のあいまい性を考慮し、ファジィ理論による満足度の高い最適化を導入し、評価した。

(3) 作業ルールをフレキシブルに制御する荷役作業モデルを適用し、その作業効率が低下したときが、システムの拡張時期になることを明らかにした。

(4) 事例解析によって、本研究で確立した方法の妥当性と有用性を検討した。解析期間における船舶の待ち時間を最小にし、管理者の満足する最適バース拡張時期と方法を決定できた。また、本方法は、安定した高い満足度が確保できることを明らかにした。

次報では、ヤードの荷役作業を含めたシステムを対象に、船舶待ち時間と荷役機械の稼働率に関する多目的最適荷役作業計画について検討する。

最後に、コンテナターミナルの現地調査に協力していただいた中華人民共和国交通部第四航務工程勘察設計院の関係各位に厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) 渡辺逸郎, コンテナターミナルの理論と計画, (1996), 96, 日本コンテナ協会.
- (2) 大和裕幸・角田智弘・大金知子, シミュレーションによるコンテナターミナルの設計に関する研究, 日本機械学会第5回交通物流部門大会, (1996-12), 3209-3212.
- (3) 阿部雅二郎・伊藤廣・樋口良之, 石炭ふ頭における荷役運搬システムの最適設計(第1報, モンテカル法を用いたシミュレーション解析), 機論, **59**-563, C(1993), 2257-2263.
- (4) 阿部雅二郎・伊藤廣・樋口良之, 石炭ふ頭における荷役運搬システムの最適設計(第2報, 積出し及び荷揚げふ頭の事例の解析), 機論, **59**-565, C(1993), 2898-2904.
- (5) Wang, Z. and Liao, J., Economical optimization of the Construction Scale of Wharf, *Port and Waterway Engineering (in Chinese)*, No. 10(1993), 12-17.
- (6) 金淳・任永祥・樋口良之・伊藤廣, コンテナターミナルにおける最適荷役作業計画(第1報, 作業ルールのフレキシブル制御とモデリング), 機論, **65**-640, C(1999), 4931-4938.
- (7) Gans, N. and Ryzin, G.V., Optimal Control of A Multiclass, Flexible Queueing System, *Operations Research*, **45**-5(1997), 677-693.
- (8) 金淳・任永祥・樋口良之・伊藤廣, ばら物埠頭におけるロジスティクスシステムのファジィ理論による最適設計, 機論, **65**-635, C(1999), 3010-3017.
- (9) 鍋島一郎, 動的計画法, (1973), 19, 森北出版社.
- (10) Cheng, S., Theory of fuzzy selection for multistage and multiobjective decision making system, *J. Fuzzy Mathematics*, **2**-1(1994), 155-162.
- (11) 孔永建・福田正, 動的計画法に基づくアスファルトの最適舗装設計, 土木学会論文集, **25**-502(1994), 167-170.
- (12) 日本ファジィ学会, ファジィ OR, (1993), 41, 日刊工業新聞社.
- (13) 坂和正敏・矢野均, 多目的非線形計画問題に対するファジィ目的計画法, 電子通信学会論文誌, Vol. J67-A-12(1984), 1134-1145.
- (14) Chang, N. B., Chen, Y. L. and Wang, S. F., A fuzzy multiobjective mixed integer programming approach for the optimal planning of solid waste management system, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 89(1997), 35-60.
- (15) 田村義正・浜田年男・人見勝人, 生産計画に対する多基準最適化解析(ファジィ数理計画法の応用), 機論, **50**-450, C(1984), 425.
- (16) 高桑右衛門, フロー形多段機械生産システムにおけるバッチ容量の最適化に関する研究, 機論, **56**-527, C(1993), 348-352.