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)

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

(1st Report, Flexible Control and Modeling on Operation Planning)

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

In this paper, the analysis approach of flexible control on material handling operation in container terminal is presented. By considering the fact that container operation can be regulated by means of production management mechanism, the conventional queuing model is modified by its flexible operation model. To realize the optimum operational performance such as minimum ship waiting time, according to the variation of system status parameters, the operation rule and operation scheduling of quayside container cranes are dynamically determined with knowledge-based controller in the form of fuzzy neural network. The whole analysis process is divided into four steps: simulation execution, system status evaluation, system status prediction, and decision making on the coming operation rule. An actual case has been studied to demonstrate the effectiveness and validity of the presented model. By comparing with those from a conventional model, the results have shown that the flexible operation model can yield satisfactory operational results.

Key Words: Materials Handling Equipment, Modelling, Production Planning, Neural Network, Optimal Control, Fuzzy Set Theory, Production Management, Simulation, Container Terminal, Flexible Operation

1. 緒 言

近年, 世界中でコンテナ物流の自動化, 省力化と情報化が推進され, コンテナターミナルの新しい設計法⁽¹⁾と評価法⁽²⁾を開発することが望まれている. ターミナルの取扱能力を最大に発揮するために, 運営管理にフレキシブル制御機能を導入することも要求されている.

ターミナルの荷役運搬作業に関する従来の研究⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾は, シミュレーション解析に基づいて, コンテナの流れとスタッキングヤードの蔵置容量の関係を分析し, 荷役運搬効率を向上する方法を検証してきた.

しかし, 従来のコンテナ荷役作業のモデリング⁽¹⁾⁽³⁾⁻⁽⁷⁾には, 次に示す改善が必要である.

(1) コンテナの荷役量は船舶の積載量に応じて変動しているが, 季節的な変動も考慮する.

(2) 定期船舶以外に, 非定期船舶の入港も考慮した船舶の入港スケジューリングを行う.

(3) 一般的な平行式バースに船舶が接岸する場合, 船舶の全長と岸壁長さを考慮する.

(4) 船舶の大きさ, 荷役量, 許容荷役時間によって荷役機械の台数を決定する.

また, 高度に情報化されたターミナルの運営管理において, 作業を最適に制御することは重要である. そこで, ターミナルにおける運営管理, 特に, 荷役運搬作業における作業ルールのフレキシブル制御方法を提案する. 作業ルールのフレキシブル制御⁽¹¹⁾とは, システムの状態に応じて適切な作業ルールを選択し, 荷役運搬作業を計画し, 船舶の待ち時間を短縮する等の最適作業を実現する. なお従来の解析モデルには, 作業ルールをフレキシブルに制御する機能はない.

本論文では, はじめに, ターミナル, 船舶, 荷役運搬機械等をモデリングする. また, ファジィ・ニューラルネットワークを用いて, 作業ルールをフレキシブルに制御するメカニズムを明らかにする. このとき, 制御に必要なシステムの状態把握に, ファジィ理論を適

* 原稿受付 1998年11月17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

用した評価方法を確立する。

さらに、本研究で提案する作業ルールのフレキシブル制御に基づく作業計画の妥当性と有効性を検証するために、事例解析を行い、実地調査結果や従来の解析モデルと比較、検討する。

2. システムモデリング

2.1 作業概要 図1に示す典型的なコンテナターミナルは、本船作業とそれに伴うスタッキングヤードでの蔵置作業とゲート搬出入作業から構成される。輸移入の本船作業では、コンテナ船が接岸すると、岸壁用コンテナクレーンが予定量のコンテナを荷揚げし、トレーラでヤードに搬入する。ヤードでは、トランスファークレーンがコンテナを積上げる。輸移出では、輸移入とは逆に、コンテナをヤードから搬出し、岸壁用コンテナクレーンで船舶に積込む。ゲート搬出入作業では、コンテナをトレーラでヤードに搬入し、コンテナ船の到着まで蔵置する。あるいは、輸移入コンテナを後背圏へ搬出する。

2.2 本船作業モデル 本船作業モデルのおもな要素は次のとおりである。

(1) ターミナル：年間作業日数を T_y 、バース数を n_b 、岸壁長さを L_b とする。1年間のコンテナ輸移

入量 Q_{yu} と輸移出量 Q_{yl} を合せて、コンテナ取扱量 Q_y とする。 Q_y は、季節的な変動による乱れを考慮し、次式で表す。

$$Q_y = \sum_{i=1}^{12} Q_m(i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $Q_m(i)$ は第 i 月の荷役量である。

(2) コンテナ船：重量トンによる種類を n_s 、各種類ごとの到着比率を α_i と定義する。船舶がターミナルに到着する回数 l_s 、 j 回めに到着するときの荷役量 Q_{sj} とする。第 i 月の船舶到着数を $l_m(i)$ とすると、総到着回数は次式のとおりでである。

$$l_s = \sum_{i=1}^{12} l_m(i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

定期船舶の到着は毎週定曜日に到着する。非定期船舶の到着はポアソン分布^{(5)~(10)}に従う。船舶の出港時刻は計画的に決められる。ただし、繁忙期には、作業完了次第に出港できる。

(3) 船舶の接岸方式：接岸している船舶が k 隻とすれば、空いている岸壁の長さが $k+1$ 隻めに接岸する船舶の長さ $L_s(k+1)^{(12)}$ より長い場合、次式が成立し、接岸できるものとする。

$$L_b - \sum_{i=1}^k L_s(i) \geq L_s(k+1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

(4) 荷役機械：バース部分に配置される岸壁用コンテナクレーン数を m_s 、1時間あたりのコンテナ荷役回数を P_s とする。

・ j 番めの船舶の作業時間 $T_o(j)$ は、その船舶の作業に用いるクレーン数 m_j により、 m_j -アーラン分布に従うものとする。

・作業ルール、船舶の停泊許容時間および荷役量によって m_j を決定する。

・クレーンのメンテナンスと故障：時間 T_m 間隔で保守を行い、作業中の故障率を q とする。

2.3 ヤード蔵置とゲート搬出入作業 スタッキングヤードのコンテナ蔵置能力を Y_c 、ヤードのコンテナ初期蔵置量を Y_0 とする。最大蔵置期間 T_{ys} は、コンテナの種類(実、空、冷蔵)によって制限される。ゲート搬出入作業における荷役量とトレーラの到着時刻は、指数分布とする。本研究では、ヤードにおける荷役運搬機械であるトレーラとトランスファークレーンの数と能力および蔵置容量が十分にあるとして、バースにおける本船作業を中心に解析を行う。

2.4 ターミナルの作業ルール 作業ルールは、最適な作業を実現するために重要な要素である。作業ルールを決定してから、本船作業計画を行う。作業ルールは、作業の忙しさによって、繁忙期、通常期と閑散期に分ける。作業ルールは、次の項目の内容を考慮

Fig.1 Operation system on container terminal

できる。

- (1) 本船作業の順序
- (2) 週間作業日数
- (3) 1日の作業時間
- (4) 岸壁用コンテナクレーンの数
- (5) クレーンのメンテナンス規則
- (6) 船舶出港時刻
- (7) 船舶の接岸方式

2.5 荷役作業の予測 ターミナルにおいて、船舶の到着時刻と荷役量は長期的な予測が困難である。そこで、本研究では、一定の時間間隔で予測できるモデルを用いた。時刻 t において、 $[t, t + \Delta t]$ の間に船舶が到着する時刻と荷役量を予測し、到着時刻に基づいて、クレーンの配置計画を立案する。

3. システム状態の評価方法

3.1 最適作業の定義 ターミナルにおける最適な作業とは、計画荷役量を達成するために、次式に示す船舶の総待ち時間 W_t を最小にすることである。

minimize

$$W_t = \min \sum_{j=1}^{I_t} T_w(j) \quad (4)$$

s.t.

$$Q_{yt} = Q_y \quad (5)$$

$$T_w(j) \geq 0 \quad (6)$$

ここで、 $T_w(j)$ は船舶 j の待ち時間、 Q_{yt} は実荷役量である。

3.2 作業のフレキシブル制御 式(4)に示した最適な作業を実現するには、作業ルールのフレキシブル制御と作業ルールに基づく本船作業の計画が必要である。図2に示す最適な作業を実現するメカニズムは、システム状態の評価、作業ルールの制御、作業計画、本船作業の四つで構成される。

- (1) システム状態の評価：時刻 t におけるシステ

Fig. 2 Diagram of simulation for flexible operation system

ムの状態に、特に、船舶の待ち時間と荷役量を統計し、 $[t, t + \Delta t]$ の間における船舶の到着と荷役量を予測する。

(2) 作業ルールの制御：システム状態の評価結果に基づいて、運営管理知識ベースにより、 $[t, t + \Delta t]$ の間で使用する作業ルールをフレキシブルに決定する。

(3) 作業計画：作業ルールにより、 $[t, t + \Delta t]$ の間で本船作業に用いるクレーンの配置を計画する。

(4) 本船作業： $[t, t + \Delta t]$ の間に作業計画により本船作業を行う。作業計画を事前に決定しても、実施時に変更することもある。

作業をフレキシブルに行うには、(1)から(4)までの過程を繰返すことで実現でき、本船作業を動的に制御できる。

3.3 システム状態のファジィ評価 システムの状態評価⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾には、次に示す四つの統計値と一つの予測値が必要である。

- (1) 船舶の待ち時間統計値 ST

$$ST(t) = \frac{\sum T_w(j)}{Q_{yw}(t)} \quad (7)$$

ここで、 $T_w(j)$ は統計する時刻 t までの $[t - \Delta t, t]$ の間の船舶待ち時間、 $Q_{yw}(t)$ は同期間の荷役量である。 ST は、三つの変数 (Small, Medium, Big) で図3に示すメンバシップ関数で表される。図3に示した a_1, a_2 は、 ST の統計データからターミナルの運営基

Fig. 3 Membership function of ST

Fig. 4 Membership function of ΔST

準に基づき任意に設定できる.

(2) ST の差分統計値 ΔST

$$\Delta ST(t) = \frac{ST(t) - ST(t - \Delta t)}{Q_{yw}(t)} \dots\dots\dots (8)$$

ここで, $\Delta ST(t)$ は時刻 t までの $[t - \Delta t, t]$ の間に
変化した ST の差分統計値である. ΔST は, 三つの
変数 (Negative, Zero, Positive) で図4に示すメンバ
シップ関数で表現した. 図4に示した d は, 図3に示
した a_1, a_2 と同様に設定できる.

(3) 荷役量の統計値 SQ

$$SQ(t) = \frac{Q_{yw}(t)}{Q_w} - 1 \dots\dots\dots (9)$$

ここで, Q_w は, 年間計画より Δt の間に荷役される
平均量で, 次式で求められる.

$$Q_w = \frac{365 Q_y}{T_y} \Delta t \dots\dots\dots (10)$$

$SQ(t)$ のファジィ評価は, ΔST と同様に, 図4に
示したメンバシップ関数と三つの変数を用いた.

(4) SQ の差分統計値 ΔSQ

$$\Delta SQ(t + \Delta t) = \frac{SQ(t + \Delta t) - SQ(t)}{Q_w} \dots\dots\dots (11)$$

ΔSQ のファジィ評価にも, 図4に示したメンバシ
ップ関数と三つの変数を用いた.

(5) 荷役量の予測値 SC

時刻 t から $[t, t + \Delta t]$ 範囲内に, 予定した k 隻の船
舶の到着時刻, 在港時間, 本船のコンテナ荷役量, 船
舶トン数をそれぞれ次式の時系列ベクトル $T_a, T_s,$
 Q_s, W で表す.

$$T_a = (t_{a1}, t_{a2}, \dots, t_{ak})^T \dots\dots\dots (12)$$

$$T_s = (t_{s1}, t_{s2}, \dots, t_{sk})^T \dots\dots\dots (13)$$

$$Q_s = (q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sk})^T \dots\dots\dots (14)$$

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_k)^T \dots\dots\dots (15)$$

この結果, 荷役量の予測値 SC は, 次式となる.

$$SC(t) = \frac{\sum_{j=1}^k q_{sj}}{Q_w} - 1 \dots\dots\dots (16)$$

SC のファジィ評価には, 図4に示したメンバシ
ップ関数と三つの変数を用いた.

この五つのシステム状態のファジィ評価値を用い
て, フレキシブルに作業ルールを制御するファジィ・
ニューラルネットワークモデルの前件部とする.

4. 作業ルールのフレキシブル制御

4.1 作業ルールのファジィ制御 作業ルール
 RO の制御では, システムの状態評価値と計画平均値
の比較によって, 調節量が生じる. この調節量に応じ
て, Idle, Regular, Busy といった三つの結果から成る
 RO が制御される. RO のファジィルールでは, 入力

変数 $ST, \Delta ST, SQ, \Delta SQ, SC$ が, それぞれ Small,
Medium, Big あるいは Negative, Zero, Positive の三
つに分けられ, 前件部を構成している. この結果,
 $3^5 (= 243)$ 個の組合せが考えられるが, 本研究では, そ
のうちの 25 個を用いてファジィルールとしている.
図5は 25 個のルールに対応する荷役量を示す. 一例
として, 図5に示した 1, 4, 7, 16, 25 と表示したファ
ジィルールを if then 形式により次に示す.

R1: if ($ST=M$ and $\Delta ST=Pos$ and $SQ=ZE$ and
 $\Delta SQ=Pos$ and $SC=ZE$), then ($RO=Regular$)

.....

R4: if ($ST=M$ and $\Delta ST=Pos$ and $SQ=ZE$ and
 $\Delta SQ=Pos$ and $SC=Pos$), then ($RO=Busy$)

.....

R7: if ($ST=B$ and $\Delta ST=Pos$ and $SQ=Pos$ and
 $\Delta SQ=Pos$ and $SC=Pos$), then ($RO=Busy$)

.....

R16: if ($ST=S$ and $\Delta ST=Neg$ and $SQ=ZE$ and
 $\Delta SQ=Neg$ and $SC=Neg$), then ($RO=Idle$)

.....

R25: if ($ST=M$ and $\Delta ST=Pos$ and $SQ=ZE$ and
 $\Delta SQ=Pos$ and $SC=ZE$), then ($RO=Regular$)

4.2 ニューラルネットワークの構築 ファジィ
推論では, 制御要素が多くなると, ルールが複雑にな
り, 満足度の同定が困難になる. そこで, 要素の増大
にも, 柔軟に対応できるニューラルネットワークを用
いて, 複雑な不確定要素である荷役作業を制御する.
図6は, 前節で述べた RO を制御する階層型ファジ
ィ・ニューラルネットワーク⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾ である. このファ
ジィ・ニューラルネットワークには, 5 項目の入力層,
ファジィ化層, ファジィルール層, 非ファジィ化層,
および 1 出力の出力層の 5 層が構成する. 入力層で
は, 五つの入力変数となる評価値が計算される. ファ
ジィ化層では, 各メンバシップ関数でファジィルールの
前件部のファジィ適合度が計算される. ファジィル
ール層では, ファジィルールの後件部のファジィ適合

Fig. 5 Operation rules and variation of operation quantity of container

Fig. 6 Architecture of the fuzzy neural network for control of RO

度が計算される。非ファジィ化層では、出力変数の非ファジィ化が処理される。出力層では、最後の出力変数とする作業ルールの調節量が決定される。ニューラルネットワークの学習則は、バックプロパゲーション法を用いる。

4.3 本船作業計画 フレキシブルに制御した作業ルールにより、本船作業計画では、船舶の到着時刻と許容作業時間等に基づいて、岸壁用コンテナクレーンの配置を決定する。このとき必要となる $[t, t + \Delta t]$ の間に予測する k 隻の船舶の到着時刻と船舶の荷役量、トン数は、前述した式(12)～(15)に示す。

本船作業計画におけるクレーンの配置はスケジューリング問題⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾である。このスケジューリング問題に対して、これまでの適切なアルゴリズムが確立されていない。本研究では、本船作業に関する知識ベースを構築し、予測区間 $[t, t + \Delta t]$ に船舶の作業順序とクレーンの最適配置台数をシミュレーション解析で求める。この作業計画では、式(4)に基づいて、次式に示す $[t, t + \Delta t]$ の間の船舶待ち時間 $W_i(t)$ を最小にする。

$$W_i(t) = \min \sum_{j=1}^k T_w(j) \quad t \in [t, t + \Delta t] \quad \dots\dots (17)$$

5. 事例解析

本研究におけるモデリングの妥当性と有用性を検証するために、図7に示すシミュレーション解析手順でコンテナターミナルを対象に事例解析を行う。本研究で提案したフレキシブルに制御する作業モデル(モデルA)と従来のモデル(モデルB)を比較するために、事例として、コンテナ物流が急増している中国南部のターミナルを対象とした。表1は、モデルAとモデルBを比較したものである。

Fig. 7 Flowchart of simulation based on flexible regulation by fuzzy neural network

Fig. 8 Ratio of different kinds of ship tonnages

表2にモデルAにおける作業ルールの内容を示す。モデルBは、作業ルールをフレキシブルに変更できず、毎月の荷役量がランダムな値をとる。調査結果により、解析条件を表3と図8～10のように設定した。図8～10は船型別の到着割合、毎月の荷役量と船舶到着数をそれぞれ示している。

図11に、モデルAの作業ルールの時刻暦制御結果を示す。ルール値1, 2, 3は、それぞれ作業ルールが閑散、通常、繁忙期となっている状態を表す。図9と比べると、モデルAの作業ルールの制御結果が、荷役量の時刻暦結果と同じ傾向で変動し、妥当であること

Table 1 Comparison between two kinds of models

Item	Conventional model (B)	Flexible model (A)
Operation management	No	Yes
Operation rule regulation	No	Yes
Operation forecast	No	Yes
Operation scheduling	No	Yes
Operation quantity	Random	Plan
Unscheduled ships	No	Yes
Scheduled ships	Yes	Yes
Enter berth by ship length	No	Yes
Operation ability	Given	Given
Breakdown of machine	Yes	Yes

Table 2 Contents of operation rules in model A

Item	Idle	Regular	Busy
Operation sequence ^{*1}	FCFS	FCFS	FCFS
Working days a week	7	7	7
Working hours a day	16	24	24
Unscheduled ships ^{*2}	0	1	1
Scheduled ships ^{*2}	0	0	1
Machine operation ^{*2}	1	1	1

*1: FCFS: First Come, First Served

*2: regulation code:1—can be regulated, 0—can not

Table 3 Analysis conditions

Item	Value	Item	Value
Q_y TEU	180×10^3	P_s TEU/h	25
T_y d	360	m_s	6
n_b	2	T_m h	300
L_b m	470	q %	3
n_s	6	Δt d	7
l_s	640	Y_c TEU	13×10^3

が理解できる。

図12～15に、荷役量、船舶待ち時間、クレーンの稼働率、バースの占有率の解析値を実地調査に基づくターミナルの運営データと比較して示す。

モデルA、Bにおける各項目の時刻暦結果と実地調査との差異を変動係数を導入して評価する。例えば、荷役量の変動分析では、モデルA、モデルB、実地調査の時刻暦結果を Q_{yf} 、 Q_{yc} 、 Q_{yl} とし、 Q_{yc} の実地調査 Q_{yl} に対する変動係数 COV_c は次式となる。

$$COV_c = \frac{\sqrt{\text{var}(Q_{yc} - Q_{yl})}}{E(Q_{yl})} \quad \dots\dots\dots (18)$$

図12は、荷役量の変動時刻暦結果を示す。二つのモデルの時刻暦結果と図9に示した実地調査結果 Q_{yl} との変動分析を行った結果、モデルBの変動係数 COV_c が18%と求められた。本モデルAの変動係数 COV_f は、8%となった。 COV_f は COV_c より小さくなることがわかった。したがって、モデルAは、時刻暦結果において、実地調査結果との差異がモデルBより小さく、荷役量の動的な変動に対して、フレキシブ

Fig.9 Monthly operation quantity by plan

Fig.10 Monthly number of ship arrival

Fig.11 Time history of rule regulation

Fig.12 Time history of operation quantity

ルに対応している。

図13は、船舶待ち時間 W_t の時刻暦結果を示す。図13では、モデルBは、実地調査結果と一致していない。一方、モデルAは、実際の船舶待ち時間の動的な変動とほぼ同じ傾向になるが、総待ち時間が短い。

Fig. 13 Time history of waiting time of ships

Fig. 14 Time history of utility rate of machine

Fig. 15 Time history of utility rate of berth

これは、モデル A における作業ルールのフレキシブル制御が、図 11 に示したように動的に作用し、式(4)に示した船舶の待ち時間 W_i が短縮したことになる。

図 14 に岸壁用コンテナクレーンの稼働率 ρ_m の時刻歴結果を示す。モデル A の結果は、実地調査結果とおおむね一致している。また、平均値では、三つのモデルの結果ともほぼ同じである。したがって、モデル A は船舶の総待ち時間 W_t が短縮し、本船作業を改善できる。その原因は、荷役機械の荷役作業能力の向上でなく、作業をフレキシブルに制御した効果である。

図 15 はバースの占有率 ρ_b の時刻歴結果を示す。モデル A は、バースの岸壁長さ L_b によって船舶の接岸を考慮しており、同じ荷役量の場合、モデル B よりバース占有率が低くなり、将来的な荷役量の拡大に対しても余裕がある。

Table 4 Comparison between simulation results and actual operation results

Item	Actual operation results	Simulation results	
		Flexible Model (A)	Conventional Model (B)
Q_{y1} TEU	181×10^3	181×10^3	181×10^3
I_s	640	640	640
W_t h	447	383	489
T_s h	19.2	16.6	19.8
T_o h	7.90	7.83	7.98
ρ_m %	20	19	20
ρ_b %	68	57	69
COV %	0	8	18

表 4 は、実地調査結果、モデル A、モデル B による結果をまとめたものである。モデル A は、次に示す改善を図ることがわかった。

(1) 荷役量が等しい場合、作業ルールの制御によって、船舶の待ち時間 W_t はモデル B より短縮できる。

(2) 変動係数がモデル B より小さく、動的に制御された本船作業が実地調査結果にほぼ一致している。

(3) バース利用率の向上が期待でき、クレーンとバースの作業能力を十分に発揮し、より作業効率を向上できる。

6. 結 言

本研究では、コンテナターミナルの荷役作業を対象に、フレキシブルに制御を行い、次の結果を得た。

(1) 荷役作業をモデリングし、船舶の待ち時間の短縮を目的とし、ファジィ・ニューラルネットワークを用いて、作業ルートをフレキシブルに制御できるメカニズムを明らかにした。

(2) 制御に必要なシステムの状態把握にファジィ理論を適用した評価方法を確立した。

(3) 制御された最適な荷役作業を解析できるシミュレーション方法を確立した。

(4) 事例解析を行い、本研究の妥当性を検証し、フレキシブルに作業ルートを制御する有用性を示した。

次報では、フレキシブル制御の作業モデルに基づいて、コンテナターミナルの荷役作業における最適な荷役搬送システムの配置計画と配置時期を検討する予定である。

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ます。

文 献

- (1) 竹原亨・浦崎巖, コンテナターミナルの自動化計画手法, (第1報, 自動化コンテナターミナルのコンセプト), 三井造船技報, 164(1998), 12-19.
- (2) 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(1999-7), 3010-3017.
- (3) Chung, Y. G., Randhawa, S. U. and McDowell, E. D., A Simulation Analysis for A Transstainer-Based Container Handling Facility, *Computers and Industry Eng.*, 14-2(1988), 113-125.
- (4) 酒井浩二・浜田賢二, コンテナふ頭の実態および物流シミュレーションの開発, 港湾技研資料, No. 794(1994), 29.
- (5) 中島晋・明神秀, コンテナターミナルの蔵置容量に関する一考察, 港湾技研資料, No. 897(1998), 21, 運輸省港湾技術研究所.
- (6) 渡辺逸郎, コンテナターミナルの理論と計画, (1996), 74, 日本コンテナ協会.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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, 積出しおよび荷揚げふ頭の事例の解析), 機論, 59-565, C(1993), 2898-2904.
- (10) 樋口良之・阿部雅二郎・伊藤廣, 港湾における木材荷役運搬システムの最適設計(第1報, システムモデルと事例解析), 機論, 64-618, C(1998), 730-737.
- (11) Gans, N. and Ryzin, G. V., Optimal Control of A Multiclass, Flexible Queueing System, *Operations Research*, 45-5(1997), 677-693.
- (12) 阿式邦弘・根本貴史・村田利治, 船舶の主要寸法の統計解析, 港湾技研資料, No. 652(1989), 13, 運輸省港湾技術研究所.
- (13) Negoita, C. V., Dan Ralescu, *simulation, Knowledge-based Computing, and Fuzzy Statistics*, (1987), 27, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York.
- (14) 日本ファジィ学会, ファジィ制御, (1993), 38, 日刊工業新聞社.
- (15) 市橋秀友・渡辺俊彦, 簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御, 日本ファジィ学会誌, 2-3(1990), 429-437.
- (16) 馬野元秀・江澤義典, ニューラル・ネットワークによるファジィ推論の実行, 日本機械学会第1回インテリジェントシステムシンポジウム, (1991), 267-272.
- (17) Agnihothri, S. R., Narasimhan, S. and Pirkul, H., An Assignment Problem with Queueing Time Cost, *Naval Research Logistics*, Vol. 37(1990), 231-243.
- (18) Fisher, M. L. and Rosenwein, M. B., An Interactive Optimization System for Bulk Cargo Ship Scheduling, *Naval Research Logistics*, Vol. 36(1989), 27-42.