港湾における木材荷役運搬システムの最適設計*

(第1報, システムのモデルと事例解析)

樋口 良之^{*1}, 阿部 雅二郎^{*2}, 伊藤 廣^{*2}

Optimum Design for Timbers Handling-Carrying System in Harbor

(1st Report, Model for System and a Case Study)

Yoshiyuki HIGUCHI, Masajiro ABE and Hiroshi ITO

For timbers logistics, the optimum design of the materials handling-carrying system in harbor is very important. In this system, there are some indefinite factors, including judgment of operators of materials handling machine and so on. For such a system, it is difficult to promote the automatic operation and to analyze the dynamic behaviors of the system theoretically. The purpose of this research is to construct the optimum design method for principal performances of materials handling machines and the system. As the first step, in this report, a simulation analysis method has been developed to clarify the system behavior. The judgment of shipping agent and shovel loader operator is treated logically on the basis of neural network and fuzzy systems theory. And the speed of load hoisting, jib hoisting, swing, travelling and so on can be considered.

Key Words: Optimum Design, Materials Handling Equipment, Timbers, Harbor, Simulation, Modelling, Neural Network, Fuzzy Set Theory

1. 緒 言

港湾を拠点とした物流ネットワークの拡大と効率化が求められている。対象が木材の場合、ネットワークで結ばれた港湾の荷役運搬システムが大きな役割を果たす。このシステムは、木材を荷役運搬する機械の運転者による経験的な判断などの不確定な要因を多く含んでいる。また、木材は、形状が様でないために、一本づつ品質検査を受け、管理される。このため、システムの自動化が進まず、最適化に不可欠な理論的な解析と評価が難しい。

本研究では、このようなシステムの挙動を把握できるモデルを構築し、これによるシミュレーション解析方法を確立する。この方法を用いて、荷役運搬機械の各種作業性能およびシステムの自動化に必要な運営方法について最適化する。

港湾を対象にしたシステムについては、待ち行列理論による簡易評価やシミュレーション解析を適用した最適設計に関する研究が行われている。待ち行列理論

を適用した例として、Asaf⁽¹⁾は、船舶の待ち時間と荷役能力の関係を示している。これは、単独の待ち行列系を評価する理論を用いるため、後方荷役部分とバース部分の連成挙動などを考慮した実状に即する解析ができない。従来の山谷⁽²⁾や著者ら^{(3)~(6)}は、荷役の時間と量、機械稼働状態のオン・オフに着目し、複数の待ち行列系の連成挙動を考慮したシミュレーション解析を行ってきた。船舶の運航や機械の挙動に見られる不確定要因は、モンテカルロ法により、ポアソン分布などに基づいて確率的に扱っている。この解析では、単位時間あたりの荷役能力だけをパラメータとしているため、機械の最適設計に必要な巻上げや走行などの作業性能は考慮できない。

本報では、これらの問題を解決するために、次の特徴をもつシミュレーション解析方法を確立する。

(1) 船舶の運航についてニューラルネットワークを適用し、合理的なモデリングを行う。

(2) つり荷巻上げ、巻下げ、シブ起伏、旋回、走行といった機械の作業性能を考慮し、これらの性能がシステム挙動に与える影響を解析できる。

(3) ショベルローダの挙動を決定する運転者の判断にファジィ理論を適用し、論理的なモデリングを行う。

* 原稿受付 1997年3月13日。

*¹ 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)。*² 正員, 長岡技術科学大学 (☎ 940-2188 長岡市上富岡町1603-1)。

解析モデルは、木材の輸移出入が盛んな港湾の実地調査結果に基づいて作成する。確立した解析方法を現在操業している港湾に適用して事例解析を行い、解析結果を港湾の実地調査結果により検証する。

2. 木材と荷役運搬システム

流通過程において、木材は、表1に示すように産地と品種⁽⁷⁾⁽⁸⁾によって銘柄として分類される。さらに、銘柄ごとに寸法によって分類される。

このように分類される木材の物流経路は、産地近くの港湾と消費地近くの港湾をネットワーク状に結んだものとなる。図1(a)に、一例として、ロシア極東部で産出される北洋材の港湾物流ネットワークを示す。図1(b)は、ネットワーク状に結ばれた港湾のふ頭における一般的な木材荷役運搬システムである。

積出しふ頭では、木材は、産地からトラックなどで輸送され、貯木場に収容される。貯木場の木材は、ショベルロードなどの運搬機械を使ってバースへ運ばれ

る。その後、木材は、バースでトラッククレーンや船上クレーンなどの荷役機械によって船舶に積込まれる。

一方、荷揚げふ頭では、木材は積出しふ頭の逆工程で荷役運搬される。バースにおいて、木材は、船舶から荷役機械を使って積下ろされる。積下ろされた木材は、運搬機械を使って銘柄に応じて大まかに分類され、貯木場に収容される。その後、木材は、数日間くん蒸され、後背地域へトラックなどで輸送される。

本研究のシミュレーション解析では、ネットワーク状に展開される海上輸送も考慮し、図1(b)に示したようなふ頭の荷役運搬システムを対象とする。

3. システム構成要素のモデル

3・1 海上輸送 海上輸送を行う船舶について、以下のように各項目を考慮してモデリングする。

(1) 積載銘柄と積載重量

船舶1隻により、数銘柄の木材が輸送される。積載重量 V_{sh} は船舶の積載能力を越えないものとする。モデルでは、積載する木材の銘柄数と V_{sh} は、それぞれ任意に設定できる確率に依る。

(2) 入港先の決定

従来の山谷や著者らのシミュレーションでは、船舶の運航について、ふ頭ごとに平均到着率 λ_s を設定し、単位時間 Δt に k_s 隻の船舶が到着する確率 P_s が次式で求められるポアソン分布⁽⁹⁾に従うとしてきた^{(1)~(6)}。

$$P_s(X=k_s) = \frac{e^{-\lambda_s} \lambda_s^{k_s}}{k_s!} \left. \begin{array}{l} \dots\dots\dots (1) \\ (\lambda_s > 0, k_s = 0, 1, 2, \dots) \end{array} \right\}$$

しかし、物流ネットワークでは、船舶の運航状況がネ

Area	Breed
Far East of Russia	Dahurian larch Scots pine Yezo spruce, etc.
North America	Douglas fir Western hemlock Western redcedar Yellow cypress, etc.
Southeast Asia South Pacific area	Radiata pine, etc.

Fig. 1 Harbor logistics network of timber and handling-carrying system

ットワーク状に結ばれた各ふ頭の荷役運搬システムの状況と互いに連成して影響を及ぼす。そこで、本研究で研究では、ふ頭ごとに単独に λ_s に従って船舶を到着させるのではなく、物流ネットワーク上の船舶1隻ごとに運航を考慮する。

木材を輸送する船舶は、母港を出航し、輸移出入先で荷役され、再び母港に帰港する。モデルでは、船舶ごとに、母港と任意の確率に応じて1航海ごとに入港先を決定する。

また、木材を輸送する船舶の入港先は、入港予定地で円滑な荷役が期待できない場合、変更されることがある。この入港先の変更は、実地調査結果に基づき、次の条件によって判断されるものとする。

- ・船舶の現在地から入港予定地までの距離
- ・木材需要のある港の荷役状況

ここで、港の荷役状況とは、注目している港における船舶平均在港時間である。この二つの条件から、入港予定地での船舶平均在港時間が設定値より大きくなったとき、入港先を変更できるように、ニューラルネットワーク⁽¹⁰⁾を適用する。これにより、過去の運航データなどに基づき、実状に即した船舶の運航を再現できる。図2に、二つの条件を入力とする構築したニューラルネットワークを示す。出力は、入港すべき港である。ニューラルネットワークを学習させる方法は、図2に示した入力に応じた判断経験則を教師信号とするバックプロパゲーション法⁽¹¹⁾である。

(3) 到着時刻

船舶の入港先への到着時刻は、出港時刻に、航海距離に応じた平均航海時間と天候不良などによる遅れ時間 k_i を考慮して決める。 k_i は、平均遅れ時間率 λ_i を設定し、式(1)に示したポアソン分布に従う確率 P_i によって求める。

3・2 ふ頭荷役

3・2・1 荷役サイクル ふ頭における荷役は、ト

Fig. 2 Decision of arrival port based on neural network

ラッククレーンや船上クレーンなどのクレーンによる荷役とショベルローダによる荷役運搬で成り立っている。図3に、これらの荷役運搬機械による荷揚げ工程の荷役サイクルを示す。クレーンは、船舶からショベルローダの待機する荷役場所へ木材を積下ろす。この木材を、ショベルローダは、貯木場へ荷役運搬する。このため、クレーンとショベルローダが連携した作業が行われる。積出し工程は、荷揚げ工程の逆順で行われる。ふ頭荷役のモデリングは、クレーンとショベルローダについて以下を行う。

3・2・2 クレーン クレーン荷役は、時間 T_{cp} で荷役準備した後、開始する。荷役は、荷揚げ工程の場合、図3に示したとおり、バケットで船上の木材をつかむことから始まる。このとき、バケット定格荷重 C_c 分の木材量をつかむ。つかみに要する時間 T_{ch} は、荷役の進行状況に応じて変化する。 T_{ch} は、船舶1隻の荷揚げ開始時には、比較的短時間である。しかし、荷揚げ作業が終了に近づくと、船舶内底に残る木材のさらい作業に時間を費やし、 T_{ch} は長時間になる。 T_{ch} について調査結果をまとめたものを図4に示す。図4において、 T_{cho} は船舶の荷揚げを開始した直後のつかみに要する時間である。 T_{ch} は、次式に示す荷役率 σ に対応して増加することがわかる。

Fig. 3 Operation cycle for unloading process

Fig. 4 Relationship between grasping time T_{ch} and handling rate σ

$$\sigma = \frac{V_{un}}{V_{sh}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 V_{un} はすでに荷揚げした木材量、 V_{sh} は船舶の積載重量である。シミュレーションでは、 T_{ch} を図4に基づき、次式によって求める。

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{ch}}{T_{cho}} &= 1.0 & (\sigma \leq 0.4) \\ \frac{T_{ch}}{T_{cho}} &= 5.25\sigma^2 - 1.78\sigma + 1 & (\sigma > 0.4) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

木材のつかみに時間 T_{ch} を費やした後、速度 v_{cl} で巻上げ作業に入る。単位時間 Δt に $v_{cl}\Delta t$ だけ巻上げ、この値が所定の巻上げ距離 l_{cl} になると、巻上げ作業を終了する。続いて、同様に作業速度と距離を考慮して、ジブ起こし、旋回、ジブ下げ、巻下げと次々に作業が進行する。そして、ショベルローダが待機する荷役場所でバケットを開き木材を離す。その後、巻上げ、ジブ起こし、旋回、ジブ下げ、巻下げと作業を進め、再び木材をつかむ。

このようにして、モデルでは各種作業の速度および距離を考慮し、荷役運搬機械の重要な仕様である巻上げや旋回などの作業性能がシステムに与える影響を考慮できるようにした。荷役作業において、一定速度に達する前の過渡状態は、一定速度での作業の時間に比べて、十分少ないため無視する。

3・2・3 ショベルローダ 荷揚げ工程の場合、図3に示したように、ショベルローダは、バースでクレーンが荷役した木材をかかえ、貯木場へ運搬し積上げる役割を果たす。

ショベルローダの運転者は、図5に示すように、クレーンが積下ろした木材が置かれた複数ある荷役場所の中から一つの荷役場所を選択し、荷役作業のために走行する。この運転者である人間の判断を論理的に扱うために、ファジィ理論⁽¹²⁾⁽¹³⁾を適用し、モデリング

Fig. 5 Choice a stock for a shovel loader operator

する。図5に示した Stock i は、運転者から最短距離にある荷役場所のことで、ファジィ理論適用の際に荷役場所を識別するために便宜的に設けたものである。

実地調査によって、運転者は、次の二つの情報から、後にファジィルールとして示す基準により、総合的な判断を下し、荷役場所を選択することがわかった。

(1) 荷役場所の木材量

運転者は、最短距離にある荷役場所 i の木材量 V_{th} を判断している。 V_{th} が多ければ、 i で荷役する。 V_{th} が少なければ、 i 以外の場所へ走行し荷役する。

(2) 他のショベルローダの動き

ショベルローダの運転者は、他のショベルローダとの接触事故防止と効率的な作業に気を配る。このために、最短距離にある荷役場所 i で荷役しているショベルローダの数 N_{fs} を判断する。 N_{fs} が多い場合、 i 以外の場所へ走行し、荷役する。 N_{fs} が少ない場合、そのまま i で荷役する。

これら二つの情報をもとに、次に定めた6つのファジィルールに従って荷役場所を決定する。

- ・ V_{th} が多ければ、 i へ走行
- ・ V_{th} が適量ならば、 i または他へ走行
- ・ V_{th} が少なければ、 i 以外へ走行
- ・ N_{fs} が多ければ、 i 以外へ走行
- ・ N_{fs} が適量ならば、 i または他へ走行
- ・ N_{fs} が少なければ、 i へ走行

V_{th} が多いか少ないかを判断するために、ショベルローダの定格荷重 C_{sl} に応じて次式で定義する負荷率 ε を用いる。

$$\varepsilon = \frac{V_{th}}{C_{sl}} \dots \dots \dots (4)$$

ε を用いて、図6に示すとおり、 V_{th} に関するメンバーシップ関数を定める。また、 N_{fs} が多いか少ないかを判断するためには、ショベルローダの総数 N_{sl} と荷役場所の総数 N_{sk} に応じて次式で定義する混雑率 η を

Fig. 6 Membership function for V_{th} Fig. 7 Membership function for N_{fs}

Fig. 8 Membership function for travelling direction

用いる.

$$\eta = \frac{N_{sh}}{N_{sl}} N_{fs} \quad \dots\dots\dots (5)$$

η を用いて, 図 7 に示すとおり, N_{fs} に関するメンバシップ関数を定めた. また, 走行方向に関するメンバシップ関数を図 8 に示す. これらのメンバシップ関数は, 実地調査結果に基づき定めた. 個々のショベルローダの荷役場所の選択は, 図 6~8 により作成するファジィ関係に基づき, V_{th} と N_{fs} によって決定される.

このようにして決定した荷役場所へ, 次式⁽¹⁴⁾ の特性に従って速度 v_{st} で走行する.

$$v_{st} = v_m \{1 - (1 + K_0 t) \exp(-K_0 t)\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, v_m は定常速度, K_0 は起動特性を表す定数, t は走行開始からの時間である. 図 9 に式 (6) に示した速度特性を示す. ショベルローダは, 荷役場所までの

Fig. 9 Characteristic of travelling speed

距離だけ v_{st} で走行し, 定格荷重 C_{sl} 分の木材量を時間 T_{sh} でかかえる. 次に, 運搬している銘柄に対応した貯木場の荷役場所に v_{st} で走行し, 時間 T_{su} で木材を積上げる.

このようにして, 走行速度と距離を考慮し, ショベルローダの作業性能の影響を解析できるようにする. なお, 3・2・2 項に示したクレーンのモデルでは, ファジィ理論を用いていない. これは, ショベルローダと異なり, クレーンの運転では, 作業において選択できることが少なく, 画一的な荷役になるためである.

3・3 陸上輸送 陸上では, 木材はトラックなどの車両で輸送される. 船舶と同様に, 積載する銘柄と重量を考慮する. また, 車両は, 船舶に比べて積載量が少ないため, 到着回数が多い. このため, ポアソン分布に従うランダム到着として扱う.

4. シミュレーション解析

システム全体を 3 章に示した荷役運搬機械などのモデルとこれまで著者らが開発したふ頭構造に基づいたモデル⁽³⁾ を組合せモデリングする. これにより, さまざまなシステムに対して, 汎用性をもたせる. また, これらのモデルは, その特性に応じて, ニューラルネットワークあるいはファジィ理論を適用したモデル, 確率モデルおよび確定モデルに分類される.

図 10 にシミュレーション全体のアルゴリズムを示す. 組合されたモデルに基づき, 荷役機械の性能などのデータを入力し, 初期状態を定義する. シミュレーションは, 海上輸送, ふ頭荷役, 陸上輸送を対象に順に行われる. これら三つの部分が連成したシミュレーションを, シミュレーション終了時刻まで行う.

海上輸送と陸上輸送のシミュレーションでは, 船舶と車両の状態の変化に着目する. なお, 船舶と車両の状態は, 到着, 入港待ち, 入港, 荷役待ち, 荷役, 出港待ち, 出港によって表される. ふ頭荷役のシミュレーションでは, クレーンによる船舶からの荷役とショベ

Fig. 10 Simulation analysis algorithm

ルロードによるバースと貯木場での荷役運搬が解析される。なお、シミュレーション開始時刻における機械の配置などの初期条件は、任意に設定できる。

以上のシミュレーションによって、機械と船舶などの稼動状況と木材量の変化を時刻歴で把握でき、待ち行列特性と操業特性を導出できる。

シミュレーション開始時刻の直後では、出力結果は初期条件の影響を受ける。このため、船舶の待ち行列特性などが安定した後の出力結果をシミュレーション結果として扱う。また、システムをモデリングする際、一部分に確率モデルを用いているため、解析結果は複数回のシミュレーション結果を平均したものとする。

5. シミュレーション解析方法の検証

5.1 待ち行列理論による海上と陸上輸送の検証

解析方法を検証するためには、海上輸送、ふ頭荷役、陸上輸送の各部分について単独に解析結果の妥当性を示し、さらに、三つの部分が連成した解析結果の妥当性を示す必要がある。連成した解析結果の妥当性は、本研究の第2報に事例を示して検証する。

本報では、本節で確率モデルによる海上輸送と陸上輸送について、次節でファジィモデルを含むふ頭荷役についてそれぞれ単独に検証する。3.1節に示したニューラルネットワークモデルを適用した海上輸送についての検証は、船舶運航方法の最適化とあわせて、本研究の第2報以降に示す。

確率モデルによる海上輸送のシミュレーションアルゴリズムは、陸上輸送と同様なものとなる。そこで、独立した待ち行列系に対して有効な待ち行列理論を用い、海上輸送と陸上輸送の解析精度についてまとめて述べる。解析精度は、待ち行列理論値を基準に、シミュレーション解析値の偏差の割合として示す。

待ち行列理論で十分な精度の解析ができることが知られている⁽¹⁵⁾ M/D/1 特性を有する単純なモデルに対して検討した。船舶や車両の到着確率はポアソン分布に従い、一定時間に一定量の木材を荷役することになる。次式の利用率 ρ をパラメータとし、平均荷役待ち数 L_q 、平均荷役待ち時間 W_q 、平均在港数 L 、平均在港時間 W について検討した。

$$\rho = \frac{V_{sh}}{A_b} \lambda_{sh} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 V_{sh} 、 λ_{sh} はそれぞれ船舶などの積載重量と平均到着率、 A_b は荷役能力である。待ち行列理論では、次式により L_q 、 W_q 、 L 、 W が求められる。

$$L_q = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} \dots \dots \dots (8)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{sh}} \dots \dots \dots (9)$$

$$L = \frac{\rho(2-\rho)}{2(1-\rho)} \dots \dots \dots (10)$$

$$W = \frac{L}{\lambda_{sh}} \dots \dots \dots (11)$$

シミュレーション解析値は、1年間のシミュレーションを20回行った結果の平均値とした。

表2に、海上輸送と陸上輸送の解析精度を示す。待ち行列理論値との偏差は $\pm 8\%$ 以下である。これにより、確率モデルによる海上輸送と陸上輸送のシミュレーション解析には、問題がないと言える。

5.2 事例解析によるふ頭荷役の検証 ふ頭荷役

のシミュレーション解析について検証するために、実際の木材荷役運搬システムを対象に事例解析を行う。解析対象は、環日本海交流で木材荷役の盛んな山形県酒田北港である。この事例では、木材は、船舶から3台のトラッククレーンで3つの荷役場所に積下ろされ、5台のショベルローダで貯木場へ荷役運搬される。表3に解析条件として用いた荷役運搬機械などの作業性能を示す。解析時間は1隻の船舶の荷役開始から終了までとした。解析刻み時間は1秒である。

図11に、ファジィモデル部分の妥当性を示すため、ショベルローダ運転者による荷役場所の選択結果を示す。この事例では、ショベルローダは3つの場所から、それぞれ3つの荷役場所を選択する。示されている数値は、荷役場所を選択した割合である。上段は実地調査結果、下段はシミュレーション結果である。両結果を比較すると、3つの荷役場所の選択割合は、同様の傾向を示している。これにより、荷役場所の選択に対

するファジィ理論の適用は妥当であると判断できる。

表4には、船舶1隻分の総荷役時間 T_w 、トラッククレーンとショベルローダによる1回の荷役に要する平均時間 W_c および W_s のほか、 W_c および W_s にそれぞれ含まれる平均荷役待ち時間 W_{qc} および W_{qs} について、解析結果と実地調査結果を比較して示す。ショベルローダ運転者の判断という不確定要因を含んでいるにもかかわらず、両結果はよく一致し、解析結果の差異は最大で約13%である。

Table 3 Analytical conditions for handling-carrying machines

Item			Value
Ship			
Carrying capacity	V_{sh} [t]		3000
Truck crane			
Number	N_c		3
Capacity	C_c [t]		15
Preparing time	T_{cp} [min]		10
Grasping time	T_{cho} [s]		90
Load hoisting speed	v_{cl} [m/min]		100
Load hoisting length	l_{cl} [m]		18
Jib hoisting speed	ω_{ej} [rpm]		0.3
Jib hoisting angle	α_{ej} [°]		30
Swing speed	ω_{cs} [rpm]		0.8
Swing angle	α_{cs} [°]		80
Shovel loader			
Number	N_s		5
Capacity	C_{sl} [t]		3
Picking time	T_{sh} [s]		30
Travelling speed	v_m [km/h]		30
Travelling characteristic	K_v		1
Carrying area	[m ²]		100×100
Piling time	T_{su} [s]		20

Table 2 Error of L_q , W_q , L and W of the sea and land transportation

ρ	L_q [%]	W_q [%]	L [%]	W [%]
0.1	0.0	0.5	2.3	3.5
0.2	2.4	2.4	2.3	5.2
0.3	2.2	2.4	5.6	7.8
0.4	3.6	1.0	3.6	4.2
0.5	6.2	5.5	7.9	3.6
0.6	2.3	2.3	2.3	5.3
0.7	2.3	2.3	2.3	2.3
0.8	5.6	2.3	4.6	1.5
0.9	4.6	3.2	3.3	7.8

Fig. 11 Selection of a stock by shovel loader operators

Table 4 Comparison between analysis and field work

Item	Simulation	Field work	Error [%]
Working time until the unloading is completed T_w [h]	5.72	6.0	4.7
Truck cranes behavior for a cycle work			
Average cycle time W_c [s]	313	335	6.6
Average waiting time W_w [s]	28	32	12.5
Shovel loaders behavior for a cycle work			
Average cycle time W_s [s]	106	104	1.9
Average waiting time W_{φ} [s]	27	30	10.0

6. 結 言

本報では、港湾における木材荷役運搬システムの最適設計に必要なシミュレーションモデルおよび解析方法を示した。船舶の運航にはニューラルネットワークを、荷役運搬機械の運転者の判断にはファジィ理論を適用し、機械のつり荷巻上げや走行などの作業性能を考慮できるものである。

確率モデルで表現できる海上輸送および陸上輸送の待ち行列特性について、シミュレーション解析値を待ち行列理論値により検証した。さらに、実際の荷揚げふ頭を対象に、ふ頭荷役における荷役運搬機械の稼働状態の解析値を実地調査結果により検証した。いずれの場合も実用上十分な精度の解析が可能であることが確認された。

本研究の第2報以降では、事例解析を通して、海上および陸上輸送とふ頭荷役が連成した総合的な解析を行う。また、輸移出入量に応じて、バースの荷役能力と機械のつり荷巻上げ、巻下げ、ジブ起伏、旋回、走行などの作業性能をいかに最適化すべきかを示す。さらに、ニューラルネットワークを適用した海上輸送モデルを用いた事例解析を行い、船舶運航方法の最適化に

についても検討する予定である。

最後に、木材荷役運搬システムの実地調査に協力し貴重な資料を提供していただいた酒田海陸運送、東方水上シルクロード貿易促進協議会各位、ニューラルネットワークとファジィ理論についてご助言いただいた東京大学甘利俊一名誉教授に厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) Asaf, A., *Productivity and Handling Capacity in San Juan Port*, (1991), 1, World Wide Shipping.
- (2) 山谷弘幸, ふ頭に関する一考察, 港湾技研資料, 646(1989), 1-16
- (3) 阿部雅二郎・伊藤廣, 石炭ふ頭における荷役運搬システムのORに基づく設計, 長岡技術科学大学研究報告書, 13(1991), 1-5.
- (4) Abe, M., Ito, H., Higuchi, Y. and Otsu, T., The Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf (1st Rep: Simulation Analysis Based on Monte Carlo Method), *Proc. Int. Conf. Materials-Handling Equipment and Logistics*, (1991), 133-143.
- (5) Abe, M., Ito, H., Higuchi, Y. and Ren, Y., The Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf (3rd Rep: Planning in Wharf Plant and Equipment by Simulation Analysis), *Proc. Int. Conf. Materials-Handling Equipment and Logistics*, (1991), 158-167.
- (6) 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, モンテカルロ法を用いたシミュレーション解析), 機論, 59-563, C(1993), 2257-2263.
- (7) 上村武, 木材の知識, (1994), 7, 経済調査会.
- (8) 農林水産省林業試験場, 木材工業ハンドブック, (1994), 14, 丸善.
- (9) 例えば, 国沢清典・本間鶴千代, 応用待ち行列事典, (1983), 20, 廣川書店.
- (10) 菊池豊彦, ニューロコンピュータ, (1991), 59, オーム社.
- (11) 矢川元基, ニューラルネットワーク, (1992), 4, 培風館.
- (12) 向殿政男, ファジィ理論がわかる本, (1992), 134, HBJ出版局.
- (13) 田中英夫, ファジィモデリングとその応用, (1992), 7, 朝倉書店.
- (14) 伊藤廣, これからのマシン・デザイン, (1989), 51, 森北出版.
- (15) 例えば, 国沢清典・本間鶴千代, 応用待ち行列事典, (1983), 528, 廣川書店.