

生産・物流システムのモデリングと シミュレーション解析の動向

樋口 良之
Yoshiyuki Higuchi

1. はじめに

生産システムと物流システムは、融合しつつあるのではないと思われる。すなわち、事業所内の生産工程とそれらの工程を結ぶ搬送工程を包括した生産物流システムの解析ニーズが高まっている。一方、事業所間を結ぶような物流では、それぞれの事業所の特性、窓口処理などの生産性をより詳細にモデリングした上で、システムとして検証するニーズが高まっている。本論では、まず、このような生産物流システムの動向を解説する。

また、システムの評価に用いられるシミュレーションとそれに用いる解析モデル、特に、人間と機械が連携するシステムのモデリング方法について、港湾物流システムを対象に解説する。

さらに、この人間-機械系の連成モデルを用いたシミュレーションの事例として、木材荷役運搬システムと、コンテナ蔵置計画への適用を示す。

2. 生産・物流システム

生産・物流システムは、展開される時代、地域な

どの背景によって、異なる方向性をもって設計されている。いつの時代にも適用できる柔軟なシステムは、例えば、FMS (Flexible Manufacturing System) のように、確かに存在することがあるかもしれない。しかし、適用できるシステムとその時代に最も望まれるシステムの間には、差異が存在する。

表-1は、日本における近代の生産システムの動向を示したものである。大量生産の時代には、自動化された専用機のニーズが拡大した。その後、顧客ニーズの多様化に伴う多品種少量生産により、FMSが普及した。この1970年代に米国で定義付けられたFMSは、日本の安定した経済成長下において、熟練したオペレータの判断をシステムに組み込むなど、高度化され、かつ、大型化し、人間というリソースを伴わないシステム開発の傾向が続いた。

しかし、最近の不況下においては、積極的にオペレータを含んだ人間と機械などが連携したシステム設計も存在している。また、アジア、特に、中国における生産システムでは、新規の設備導入を抑制し、積極的にオペレータ（人間）の自由度を活かし

表-1 日本における近代の生産システムの動向

Trend of the system	Japan times
Automation of mass production	Development after W.W.II Mass consumption Everything was sold out
Multi production Flexible Manufacturing system based on full automation	From maturity to bubble High personnel expenses Workers are separated from the system
FMS based on re-arrangement of workers and machines High and empirical judgment of the operator is recognised as important device	Bubble collapse Cost reduction High unemployment rate Harmonization of workers and system

たシステムの設計と運用に重点が置かれている。これらのオペレータを活用した生産システムは、広義の意味でFMSととらえることができ、それらの生産システムの特徴の一つは、工程間の搬送を改善する点である。

一方、1909年にErlangによって検討された電話交換問題が、顧客からの電話接続要求のタスク量を時系列変化としてとらえ、待ち行列理論が確立された。これ以降、待ち行列理論などが多くのシステムに適用され、港湾などの物流システムの研究では、1960年前後に頻繁に輸送機械が出入りする鉄道と航空を利用した輸送を対象に解析が進められた。当時、港湾物流は、現在のように過密な状態ではなく、解析の適用例は多く報告されていない。日本では、司馬が大規模漁港の岸壁長さを解析した事例などが報告されている。

これらの解析によって、物流システムの改善がすすめられ、個別の物流窓口が多機能化、複合化、総合化し物流拠点として形成されるようになってきた。港湾物流に見られるように、物流拠点は競争化の時代を向かえ、拠点窓口部分の待ち行列系の改善のみならず、拠点全体あるいは内部の物流効率の向上が検討されている。この拠点全体あるいは内部の物流効率の検討には、物流機器の作業性能が大きな影響を与え、生産システムの設計、運用、それらの改善と同様な手法が用いられることが多い。

近年のシステム設計あるいは研究では、生産システムにおいて工程間の搬送性が着目され、物流システムにおいて構成機器の作業性が着目されていると思われる。このため、生産システムと物流システムを分類して設計するのではなく、それらは、生産・物流システムとして一体化した検討を必要としている。

次章では、このように時代の変遷とともに移り変わる生産・物流システムを評価するシミュレーションとそれに必要なシステムモデリングについて解説する。

3. シミュレーション解析

3.1 シミュレーション

より現実的に物流の時刻歴応答を調べるために

シミュレーションが電算機の発達に伴い開発された。当初は、情報処理言語を用いて汎用的なモデルを記述し、それを組み合わせるなどしてシミュレーションを行っていた。1961年には、効率よくシステムをモデリングできるシミュレーション言語 GPSS、SIMSCROPT がそれぞれ開発された。その後、いくつかのシミュレーション言語が開発され、改良が続けられた。

港湾物流を対象にしたシミュレーションは、1980年前後に数多く導入されている。このころのアジアを中心とした電力需要の高まり、また、石油からの代替エネルギーとして石炭の見直し、環境負荷を考慮した石炭にかかわる技術開発により、石炭火力発電所の稼働が大幅に進展した。これにより、石炭火力発電所に隣接する石炭ふ頭の荷役運搬能力を検討するために、電算機の発達とともに活用が進んできたシミュレーションを用いた解析が行われるようになり、港湾物流システムのシミュレーションが本格的にはじまった。このときの解析対象はふ頭のバースあるいはヤード部分が中心であった。両部分の1時間あたりの石炭処理能力とヤード部分の貯炭容量がシミュレーションにより、試行錯誤され検討された。これらのシミュレーションを使ったシステム解析では、シミュレーションで考慮される機械などは、既に用意されているいくつかのモデルの中から選択し適用される。モデルのパラメータを設定することで、近似的あるいは厳密に機械などの容量、作業時間などを表現できる。その結果、機械などのモデルは、時間に連動して逐次動作し、状態（イベント）が変化し、時刻歴に応答する。

1980年後半から、シミュレーション結果を動画像としてグラフィカルに表示することが盛んになり、複雑なモデルを記述でき、より広範に応用できる現在のシステムシミュレータに至っている。

1990年に入り、港湾物流システムのシミュレーションでは、著者らによって、ふ頭の後背地域からの陸上輸送を受入れる後方荷役部分を考慮し、バース部分とヤード部分を加えてそれらの連成挙動をシミュレーション解析する研究がはじまった。また、事例解析のみならず、規模の異なるシステムにも適用できるように、解析結果をまとめて最適設計に運

用できる情報資料の構築がはじまった。

1990年代後半では、港湾は高速化と情報化が求められた。これにより、情報管理された高速コンテナ物流が実現し、港湾物流システムの解析対象はコンテナターミナルが中心になった。著者らは、システムを構成する機械の作業性能、ふ頭配置様式と機械の作業経路を考慮したモデルを検討した。また、このとき、システム挙動に影響を与えるターミナルオペレータの判断について、合理的なモデリングをほどこすために、ファジィ理論などを適用した推論モデルを構築した。

システムのモデリングにファジィ、ニューラルネットワークといった人間の判断に近い推論技術を用いることで、次節に述べる人間-機械系の連成したモデルを構築でき、シミュレーションが行われるようになった。例えば、港湾物流システムのシミュレーションを例にあげてみる。石炭を対象にした港湾物流では、比較的、画一的な荷役運搬作業であるため自動化が進んでおり、機械系のシミュレーションととらえることができる。対照的に、木材物流では、作業の自由度が高くオペレータの判断が重視され、また、木材形状が荷役を難しくし、自動化が遅れており、人間-機械系のシミュレーションと言える。経済活動の指標としても扱われるコンテナ物流では、ターミナルオペレータあるいは機械オペレータの判断と自動化された高性能荷役機械による制御が混在している。このオペレータの判断を組込んだシステムの研究も進んでおり、このような知的システムも人間-機械系のシミュレーションの対象となる。

3.2 人間-機械系の連成モデル

生産・物流システムは、各種の機械とそれらを運用するオペレータなどにより構成されている。オペレータが機械などを効率的に運用し、すなわち、人間と機械が連携し、システムの効率化をはかるためには、オペレータの判断と機械などの作業性能の検討が重要である。この検討のために、オペレータの判断と機械などの作業性能がシステム効率に影響を与える人間-機械系の連成を扱えるシミュレーションのモデルを解説する。

例えば、石炭ふ頭のように自動化され画一的に荷

役運搬作業が行われる場合、システムの効率性は、機械の作業性能のみに依存する。しかし、自由度の大きな作業、すなわち、機械を運転するオペレータがいくつかの作業の中から任意に作業を選択できる場合、システム効率はオペレータの判断と機械の作業性能に依存する。例えば、図-1に示すように、コンテナターミナルにおいて、スプレッド仕様のリフトのオペレータは、走行などの作業の中から適切と思われる作業を選択する。そして、その作業を終了するために費やす時間は、機械の作業速度に依存する。

この人間-機械系の連成を考慮するために、オペレータの判断について合理的かつ論理的に扱うことのできるファジィ理論を適用した推論モデルを作成した。また、オペレータの判断で行われる作業が機械の作業速度で進捗するように、機械をモデリングする。例えば、港湾物流システムで運用される機械は、シミュレーションのモデルとして、単位時間の処理能力が設定されてきた。本モデルでは、この処理能力を構成するメカニズムを、より詳細にモデリングする。詳細なモデリングとは、機械の容量と作業を特定し、その作業特性を明らかにすることである。例えば、クレーンの場合、容量は定格荷重であり、作業はつり荷巻上げ下げ、ジブ起伏、旋回などである。作業特性は、巻上げ下げなどの作業速度の動特性である。

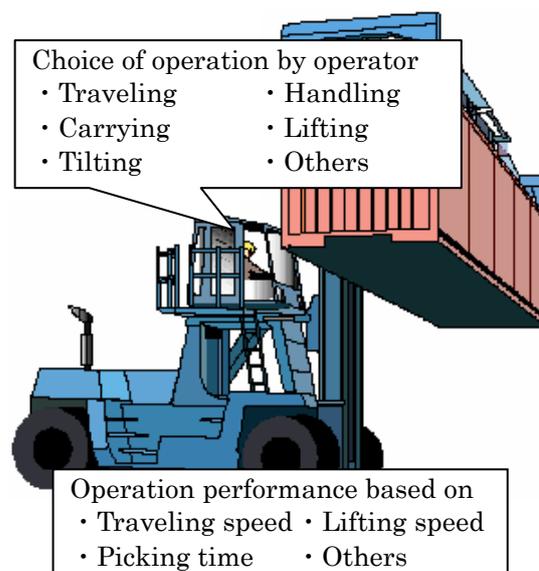


図-1 人間-機械系の連成モデルの一例

これらのオペレータの判断と機械の詳細なモデリングにより、具体的にオペレータの判断と機械作業のどの部分を改善すれば、効率化がはかれるのか考察でき、人間-機械系の連成シミュレーションが可能になる。

4. 事例解析

4.1 木材荷役運搬システム

(1) システム概要

例えば、図-2に示す木材ふ頭の荷役運搬システムは、荷役運搬機械のオペレータ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、形状が一様でないために、一本ずつ品質検査を受け、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。

従来、不確定な要因は、確率モデルにモンテカルコ法を適用することが一般的であった。しかし、木材荷役運搬システムにおいて、その挙動に大きな影響を与えるオペレータの判断を確率モデルでモデリングすることは、合理的ではない。そこで、オペレータの判断は、ファジィ理論を適用した推論モデルで構築し、合理的かつ論理的なモデリングを行う。また、これまでの解析では、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、荷役運搬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。そこで、つり荷巻上げ、巻下げ、ジブ起伏、旋回、走行といった機械の作業性能を考慮し、3.2節に示した人間-機械系の連成モデルを用いたシミュレーションを行う。

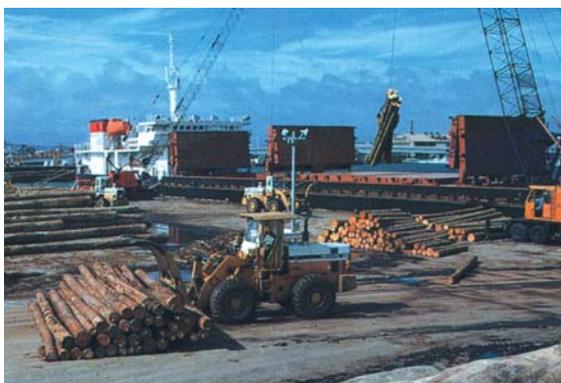


図-2 木材荷役運搬システム

このような特徴のシミュレーション解析方法を現在操業している港湾に適用して事例解析し、解析結果と実地調査結果を比較し、本解析方法の妥当性を検証する。

(2) ショベルローダのモデリング

荷揚げ工程の場合、図-3に示すように、ショベルローダは、パース部分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。ショベルローダのオペレータは、図-3に示したように、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。このオペレータである人間の判断を論理的に扱うために、ファジィ理論を適用した推論モデルでモデリングする。図-3に示した Stock i は、オペレータ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、オペレータは、次の2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。

・荷役場所の木材量

オペレータは、最短距離にある荷役場所 i の木材量 v_i を判断している。 v_i が多ければ、 i で荷役する。 v_i が少なければ、 i 以外の場所へ走行し荷役する。

・他のショベルローダの動き

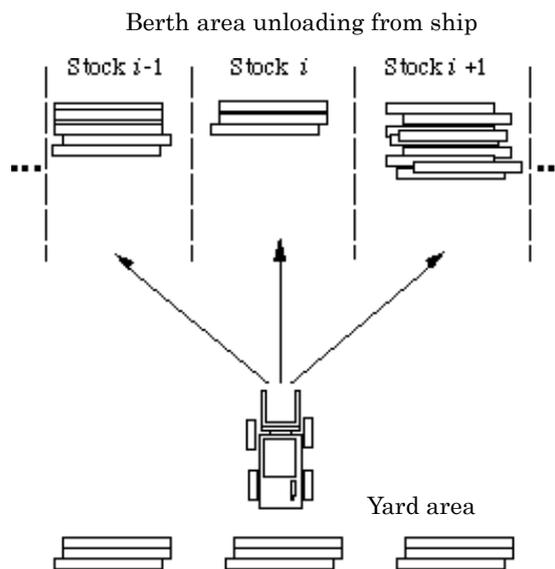


図-3 オペレータの荷役先の選択

ショベルローダのオペレータは、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_i を判断する。 N_i が多い場合、 i 以外の場所へ走行し、荷役する。 N_i が少ない場合、そのまま i で荷役する。

これら2つの情報をもとに、次に定めた6つのファジールールに従って荷役場所を決定する。

R1 : v_i が多ければ、 i へ走行

R2 : v_i が適量ならば、 i または他へ走行

R3 : v_i が少なければ、 i 以外へ走行

R4 : N_i が多ければ、 i 以外へ走行

R5 : N_i が適量ならば、 i または他へ走行

R6 : N_i が少なければ、 i へ走行

ここで、 R_i は、便宜上、 i 番目のファジールールという意味である。

ファジールールには、木材量 v_i とショベルローダの数 N_i が多い、あるいは、少ない、 i 以外へ走行、 i または他へ走行といったあいまいなファジ表現が含まれている。このあいまいな項目については、実地調査結果などにに基づき、メンバシップ関数で表現する。例えば、 v_i については、多い、あるいは、少ないといった感覚は、ショベルローダの定格荷重 Csl に依存する。すなわち、定格荷重が大きなショベルローダを運転している場合には、わずかな木材量では荷役量が大きいと感じることはないが、小さなショベルローダを運転している場合には、同じ木材量でも荷役量が大きいと感じる。このため、メンバシップ関数として表現する場合、例えば、 v_i と Csl の比をとった荷役率 ε のような概念を導入して、図-4に示すようなメンバシップ関数を定めることもある。

(3) シミュレーション解析

時刻歴で状態が進捗するシミュレーションにおいて、個々のショベルローダの荷役場所の選択は、ファジールールとメンバシップ関数により作成されるファジ関係に基づき、選択時の v_i と N_i によって決定される。シミュレーションの中で、時間に連動して、ショベルローダは決定した荷役場所へ走行特性に従って走行する。荷役場所へ到着すると定格荷重に応じた木材量を所定の時間でかかえる。次

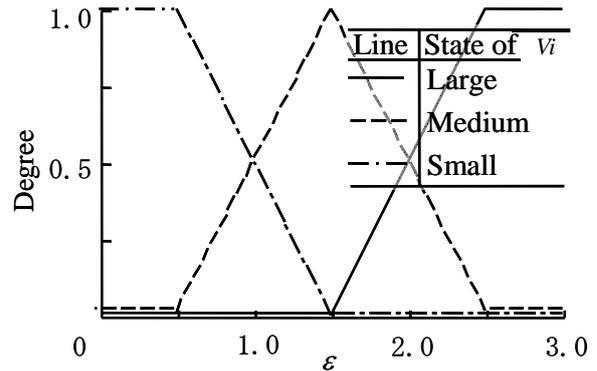


図-4 荷役量 ε に関するメンバシップ関数

に、運搬している銘柄に対応した貯木場の荷役場所へ走行し、木材を積上げる。これら一連の作業の流れの中で、ショベルローダの走行速度、距離とオペレータの判断を考慮し、人間-機械系の連成したシミュレーション解析が可能になる。解析により、ショベルローダのオペレータの判断基準を改善したり、熟練したオペレータの判断を用いてシステムの自動化を検討することもできる。

4.2 コンテナ蔵置計画

(1) システム概要

ターミナルオペレータは船積み順番を計画した荷役プランを作成し、そのプランに従い本船作業が行われる。始めに船積みするコンテナがヤード内のコンテナブロックの下段に蔵置されていると、その取出しのために、上部のコンテナをリハンドリングする必要があり、荷役時間が増大する。したがって、荷役時間は、荷役運搬機械の作業性能のほか、スタッキングヤードにおけるコンテナの蔵置状態に影響される。

荷役プランは、重量、仕向地などのコンテナの明細に基づいて作成される。本船の荷揚先で荷役しやすいように、最初の荷揚先へ輸送するコンテナを本船上部に積上げる。最終荷揚先へ輸送するコンテナを本船内底部に船積みする。また、安定した操船を実現するために、可能であれば重量コンテナを内底部へ、軽量コンテナは重量コンテナの上へ積上げる。

(2) コンテナ積上げ方法のモデリング

スタッキングヤードでの最適な蔵置を実現するコンテナ積上げ方法についてファジ理論を用いて検討する。ファジ理論を導入することで、論理的な積上げ場所の選択が可能になる。論理的なファジ

イルールを変更したり、メンバシップ関数を修正することで、規模や荷役船舶の大きさなどが異なる様々なターミナルに適用できる。また、積上げ場所の選択に必要な情報が不足した場合でも、限られた情報から適切な積上げ場所を選択できるといった実用性も有する。

コンテナの蔵置は、図-5に示すように、荷役プランに合致することが望ましい。そこで、荷役プランで考慮しているコンテナの荷揚先と重量を条件に、ファジィルールを次のように定めた。

荷揚先の早いコンテナは、本船上部へ積載するために、荷役プランでは後半に荷役作業が指示される。このため、スタッキングヤードでは、下段へ積む。荷役プランで前半に指示される荷揚先の遅いコンテナは、上段に積上げる。これにより、できる限り、前半に荷役するコンテナを上段に積上げ、リハンドリングを少なくし、コンテナ一個の荷役時間を短縮できる。また、さらに時間を短縮するために、荷揚先ごとにまとめてコンテナを積上げ、トランスファークレーンなどの荷役機械の走行動作も少なくする。これらのことから、次の2つのファジィルールを作成した。

R1：荷揚先が早ければ、下段陸側へ積む。

R2：荷揚先が遅ければ、上段海側へ積上げる。

コンテナの重量については、重いものは船舶内底部に船積みされるため、スタッキングヤードでは上段へ積上げる。このため、さらに次の2つのファジィルールを作成した。

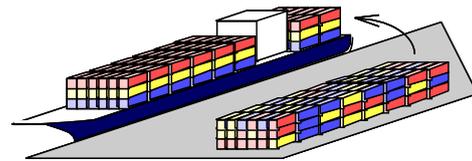
R3：重量が重ければ、上段へ積上げる。

R4：重量が軽ければ、下段へ積む。

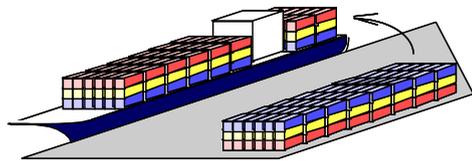
これらのファジィルールに示された「早い」、「重い」といったあいまいではあるが、汎用的に用いることができる情報をメンバシップ関数で表現する。このとき、荷揚先の数、取扱いコンテナの重量分布などが異なる様々なターミナルに対して、汎用的に活用できるように、4.1(2)項で解説した ε のようなモデリングを行う。

(3) シミュレーション解析

シミュレーションにより、無作為に到着順にコンテナをブロック端から積上げた場合と、前項のモデルによる方法でコンテナを積上げた場合、それぞれ



Actual state
Layout is complicated.



Ideal state

図-5 コンテナ蔵置と本船作業

を再現し、それぞれの場合に費やされる本船作業に必要な時間を求めることができる。この結果、無作為に到着順にコンテナをブロック端から積上げた場合に比べて、前項のモデルは、リハンドリングが少なく、本船作業時間を大幅に低減できるといった効果を検証することも可能である。

5. おわりに

生産と物流のそれぞれのシステムの動向を解説し、最近では、それらが融合した生産・物流システムといった概念があることを考察した。また、人間と機械が連携するシステム、エキスパートシステム導入システムを評価できるシミュレーションと、必要なモデリングの動向について解説した。特に、人間-機械系の連成したシステムのシミュレーションの事例として、木材荷役運搬システム、コンテナ蔵置計画の概要を示し、モデリングと解析効果について解説した。

文 献

- (1) Abe, Ito, Higuchi, Ren, Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf, Proc. Int. Conf. Materials Handling Equipment, Logistics, (1991), 133-167.
- (2) 阿部, 伊藤, 樋口, 石炭ふ頭における荷役運搬システムの最適設計, 機論, 59-563, 565(1993), 2257-2263, 2898-2904.
- (3) 樋口, 阿部, 伊藤, 港湾における木材荷役運搬システムの最適設計, 機論, 64-618(1998), 730-737.
- (4) 樋口, 阿部, 伊藤, ファジィ理論を用いたコンテナターミナルの最適蔵置法, 機論, 65-634(1999), 2591-2598.
- (5) 濱田, 中村, 樋口, 伊藤, コンテナターミナルにおける物流システムの最適設計, 機論, 65-635, 637(1999), 3018-3031, 3876-3882.