

コンテナターミナルにおける荷役の効率化と 機能性評価に関する研究

(その1) コンテナ荷役シミュレーション

正員 篠田 岳 思* 正員 福地 信義*
竹内 悟**

Study on Improving the efficiency of container operation and
Functional Assessment of Oversea Container Terminals
(Part 1) A Simulation of the Container Handling Operation

By Takeshi Shinoda, *Member* Nobuyoshi Fukuchi, *Member*
Satoru Takeuchi

Summary

More than 80% of the material movements, except raw materials, between Japan and its trade countries are conducted today in the containerized mode.

In recent years, the transportation sector has been undergoing very rapid and multifarious changes due to the alliances between shipping companies, introduction of larger ships as a cost reduction measure and the application of integrated logistics to satisfy the needs of customers.

However, many shipping companies tend to avoid calling a port in Japan due to the inadequate terminal facilities and other services, insufficient channel depth, inefficient handling and the high cost of port fees and dues.

In this paper, an evaluation of the container handling efficiency of terminals is made and a functional assessment of some terminal facilities is conducted. A Petri net model of the container terminal operations is constructed for numerical simulations. Also, a practical simulation is attempted through field measurements conducted on the operational performance of some handling devices being used in a modern container terminal.

1. はじめに

日本の国際物流は原材料を除くと80%以上がコンテナ輸送に依存しており、最近では、コンテナ船会社の国際連携によるアライアンス化やコンテナ船の大型化、さらには荷主のニーズである物流ロジスティックに対応した複合輸送など、輸送環境が急速に変化してきている。このことから、日本のコンテナターミナルに求められるサービスとし

ては、港の大深水化、荷役の迅速化、低価格化などが挙げられるが、国際価格に合う十分なサービスを提供できていないため、コンテナ船会社が日本の港湾を避けるようになってきている。

本研究では、コンテナターミナルの荷役の効率化と機能性評価のために、第一報として現在のコンテナターミナルにおける業務やガントリークレーン、コンテナキャリアによる荷役や搬送の実況調査と荷役搬送時間の計測を行い、これを基に荷役業務をペトリネットを用いてモデル化してシミュレーションを試みる。

2. コンテナターミナルの形態

コンテナターミナルは陸上と海上の接点として、港頭区域に設置されるコンテナ輸送の拠点であり、施設の配置やコンテナ荷役方式により種々の形態がある。

* 九州大学工学部

** トヨタ自動車(株) (研究当時 九州大学大学院工学研究科)

2.1 コンテナターミナルの施設配置

コンテナターミナルは、コンテナ貨物の輸送や流通を効率よく運営するために、一般的には Fig.1 に示すような施設を配置する。ターミナル内の主要な施設としては、エプロン、マーシャリングヤード、インターチェンジスロット、コンテナフレートステーション、管理棟、その他メンテナンスショップなどがあり、以下の機能¹⁾がある。

1) エプロン

エプロン部はバースの前縁部にあり、ここにガントリクレーンのレールなどが敷設され、本船と陸上とのコンテナの授受が行われる。

2) マーシャリングヤード

マーシャリングヤードは、船積みするコンテナや陸揚げしたコンテナの整理保管場所である。ヤード内にはコンテナスロットが、コンテナのサイズに合わせて碁盤の目のように区画化されており、各スロットには蔵置管理のため番号されている。また、冷凍コンテナの置き場には電源プラグも併設されている。

3) トランスファーポイント

トランスファーポイントはインターチェンジスロットとも呼ばれ、コンテナターミナルと外部とのコンテナの受け渡しが行われる。

4) コンテナフレートステーション

コンテナフレートステーションは一般には CFS と呼ばれるが、小口の混載貨物のコンテナ詰めや取り出し、受け渡し作業を行う施設である。

5) 管理棟等

その他、管理棟では、コンテナの蔵置等の指示や、併設

されたゲートにおいて、コンテナの手続き、損傷のチェックなどをコンテナに関する管理全般を行う。また、付近にはコンテナや荷役機器のメンテナンスショップがある。

2.2 コンテナ荷役方式

本船からのコンテナの揚荷の主なプロセスは、1)本船のコンテナをガントリークレーンによりエプロン部に降し、2)コンテナ蔵置場所へ搬送機器による移動、3)マーシャリングヤードでの段積みなどによる蔵置、のように分けられる。また、コンテナの本船への積荷はこの逆の過程をたどる。これらのプロセスに用いられる荷役機器により種々の荷役方式に分類される。ここでは中大規模のストックヤードで主に用いられている次の3方式について述べる²⁾。

(1) ストラドルキャリア方式

ストラドルキャリア方式とは、コンテナターミナルでのコンテナの搬送、積降ろし、段積みのためにストラドルキャリアというコンテナ専用の搬送車両を用いる方式である。

ストラドルキャリアは運転手1名で運転され、長所としては小回りが利き、しかも高速運転できるため、狭いヤード内でも自由度が高く機動性に富んでいる。また、投資額が比較的少なく済むため、多くの港湾で用いられている。反面、短所としては、運転に熟練を要することや、蔵置のための段積みには3~4段程度が限度であり、さらにコンテナスロット間にストラドルキャリアの移動のためのスペースを設けるなどの制約がある。

(2) トランスファークレーン方式

トランスファークレーン方式とは、コンテナターミナルでのコンテナの搬送はストラドルキャリアやシャーシ（台

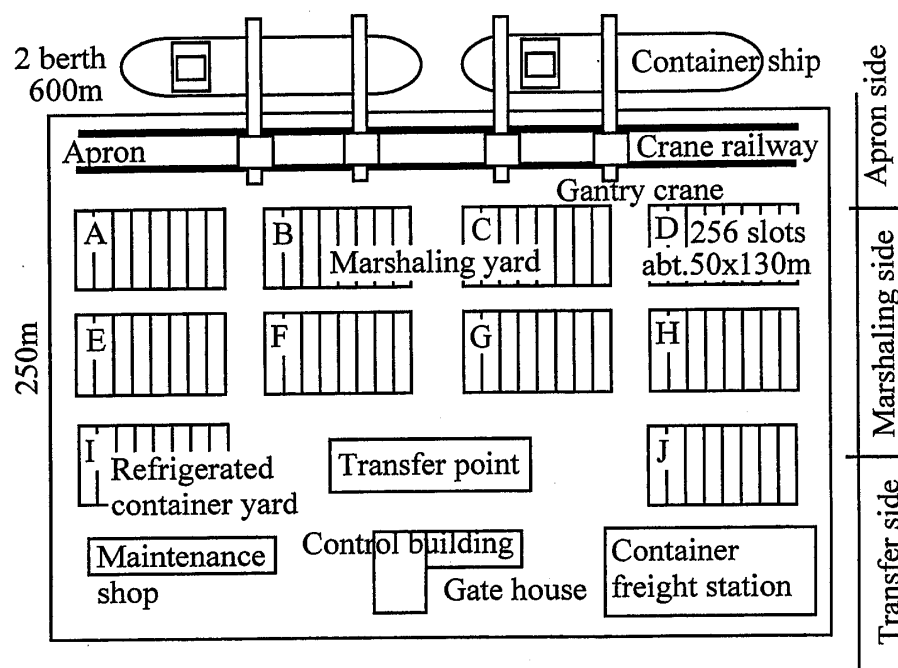


Fig.1 A typical arrangement of an overseas container terminal

車) 付のトレラーにより行すが、蔵置場所での搬送機器からのコンテナの積降ろしとコンテナの段積みのためにトランスファークレーンという門型クレーンにより扱われる。クレーンのうち大型のものでは、脚間に 7 列で 6 段積みの能力を有するものもある。

この方式の長所としては、コンテナ間に移動のためのスペースを設ける必要もなく、コンテナを高く積み上げられるため、土地の有効利用が可能である。また、コンピュータによる自動制御も可能である。反面、短所としては、コンテナが高く積み上げられているため指定のコンテナを取り出すのにリハンドリングにより時間がかかることや、設備が大規模のため初期投資額が大きいことなどが上げられる。

(3) シャーシ方式

シャーシ方式とは、コンテナをシャーシに乗せて、トラクターにより牽引して蔵置場所へ搬送し、シャーシに乗せたまま保管するものである。

この方式の長所として、シャーシに乗せたまま蔵置しているため、全てのコンテナが容易に取り出せることや、荷主のトラクターに直ぐに引き渡しできること、さらに平置きしているため、蔵置中のコンテナの損害発生がほとんどないことなどが挙げられる。反面、短所としては、シャーシに乗せたまま蔵置するため、広大な土地を要することや、コンテナ毎にシャーシが必要であることなどが挙げられる。

ここでは、シミュレーションの対象として、日本で多く採用実績のあるストラドルキャリア方式およびトランスファークレーン方式を扱う。

3. コンテナ荷役のモデル化

3.1 シミュレーション計算法

コンテナ荷役シミュレーションのモデル化には、ここでは離散事象システムの解析に有利であるペトリネット³⁾を用いる。

ペトリネットは、事象が非同期的かつ並列的に振舞うシステムに対して、情報の流れや制御を記述し解析するために、1962 年に Petri により考案されたネットワークモデルである。事象の発生の条件、順序、頻度などに制約が与えられているようなシステムをネットワークによりモ

デル化できるため、主に機械加工、組立ライン、プラントの運転過程、ロボット動作のシミュレーションなどに用いられており、プロセスの待ち時間、設備の配置の検討などに利用されることが多い⁴⁾。

利用対象に応じて種々のペトリネットが提案されているが、ここでは以下に述べる時間ペトリネットとカラーペトリネットを主に用いる。

(1) ペトリネット

ペトリネットは Fig. 2 に示すように、プレース、トランジション、アーク、トークンの主に 4 つの要素から構成されている。ここで、プレースは主に状態を表し、アークは矢印により状態推移の流れの方向を表す。トランジションでは条件の成立を判定し状態推移を行い、トークンは各時点での状態の発生を表す。

また、Fig. 3 には簡単な例として 3 つのプレースと 2 つのトランジションからなるペトリネットでのトークンの動きを示す。Step 1 の状態では、プレース 1 にトークンがあり状態はこのまま停止している。ここに、Step 2 のようにプレース 2 にトークンが入力されると、トランジション 1 に流れ込む 2 つのプレースの両方にトークンが存在する。この状態をトランジション 1 の発火可能状態といい、状態が推移するための条件がトランジションに整っている状態を意味する。次に、トランジション 1 が発火すると、トークンはプレース 3 に移動して Step 3 の状態に推移する。このときは、さらにトランジション 2 において発火の条件が整っているため、発火後トークンはプレース 1 に移動して、この場合には元の Step 1 の状態になる。

(2) 時間ペトリネット

トランジションが発火可能状態であっても、一定時間その発火を遅らせることにより、モデルに各状態でのトークン推移の遅延時間を考慮することができる。このようなペ

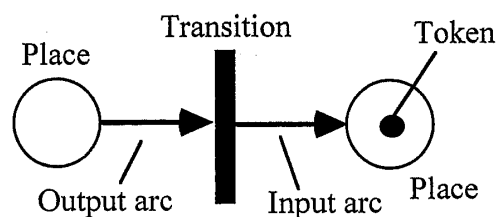


Fig. 2 The Petri net model

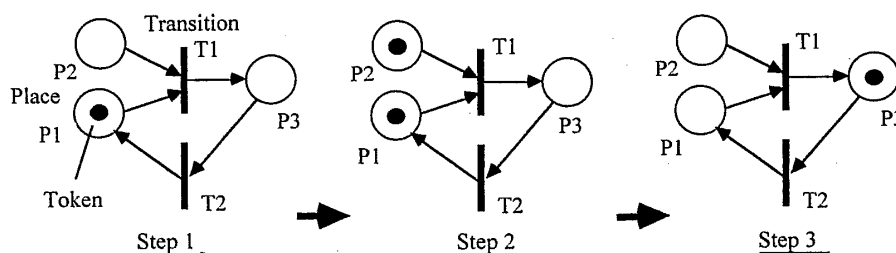


Fig. 3 An example of the transition of tokens

トリネットは時間ペトリネット (Timed Petri net) と呼ばれており、トークン推移の遅延時間をどの要素に考慮するかにより、大きくトランジット時間ペトリネットとプレース時間ペトリネットとがある。ここでは、Fig. 4 に示すようにトークン推移の遅延時間をプレースの入力アーク側に考慮したプレース時間ペトリネットを用いる。

(3) カラーペトリネット

類似なプロセスが多数存在したり、条件により類似プロセスに分岐するなどが原因でペトリネットが複雑化する場合には、カラーペトリネットと呼ばれるトークンに属性を持たせることにより、より簡潔なネットの構築が可能となる場合がある。例えば、ドライコンテナや冷凍コンテナなどコンテナの種類により、蔵置場所が異なる場合などは、Fig. 5(a) に示すように2つケースに分岐がある場合には、Fig. 5(b) に示すようにモデルが簡単化できる。

ここでは、以上に述べたペトリネットにより、コンテナ荷役のモデル化を行いシミュレーション計算する。

3.2 荷役オペレーションのモデル化

(1) コンテナターミナルの業務

コンテナターミナルでのコンテナ荷役は主に本船とマーシャリングヤード間、マーシャリングヤード内あるいはトランスファーポイントでの外来シャシへの荷役業務があり、次の大きく3つの業務に分けることができる。

- 積荷業務：コンテナをストックヤードの蔵置場所からコンテナ本船に積み込むまでの業務。
- 揚荷業務：コンテナを本船から積降ろしてコンテナターミナルの指定場所まで蔵置するまでの業務。
- 搬出入業務：コンテナの外来シャシへの引渡しと受取り業務であり、外来シャシにストックヤードの蔵置場所

からコンテナを引渡す業務と、この逆の受取り業務。

ここでは、これら3つの荷役業務の中でコンテナの搬送を中心にしモデル化を行う。

(2) 荷役機器のオペレーション

各業務の中でコンテナの搬送には、ガントリークレーン、門型クレーンなどの積荷揚荷機器、シャシ、ストラドルキャリアなどの搬送機器が用いられる。ここでは、初めにそれぞれの荷役機器の作業オペレーションをユニットとして捉えて、ペトリネットによりモデル化する。これは各オペレーションを連結すると、積荷、揚荷、搬出入業務が容易にモデル化でき、複雑なモデルの拡張や修正も容易になるためである。

例として、本船への積荷のために用いられるガントリークレーン (以下GCと略す) のオペレーションをペトリネットモデルにより表す。

GCの積荷オペレーションは、大きく次の作業要素により構成されている。1) GCのスプレッドでエプロン上のコンテナを掴む、2) コンテナを掴みながら本船上へ移動、3) 船倉内またはハッチカバー上にコンテナを納める、4) さらにコンテナを掴むためにスプレッドを陸側のエプロンへ移動、の主として4つの作業要素からなり、これらをペトリネットモデルではトランジションとして表す。また、これらの作業要素はさらに詳細に分けられるが、ここでは作業の概略を把握するためこの程度に留める。次に、トランジションにどのような条件が整えば作業要素が遂行できるかを、ペトリネットでのプレースにより表現する。以上を考慮してGCのオペレーションをペトリネットによりモデル化すると Fig. 6 により表せる。図中、表には各トランジションとプレースの説明を併記している。

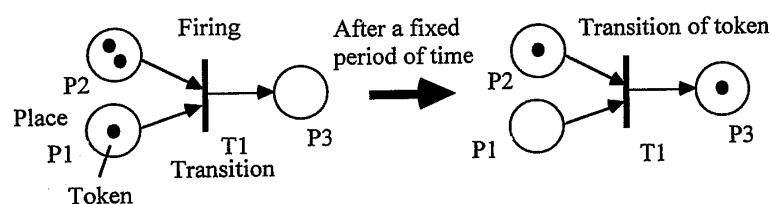


Fig. 4 Timed Petri net model

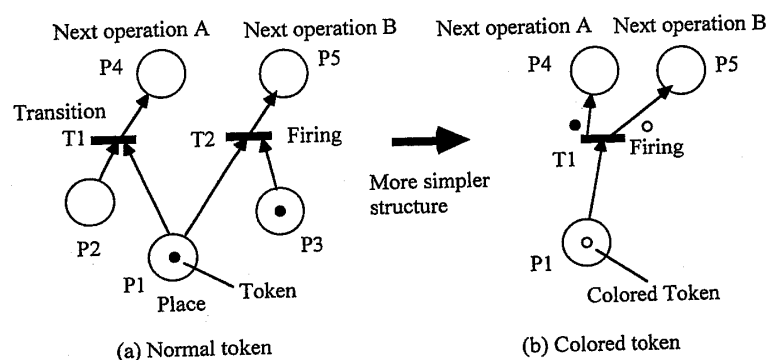


Fig. 5 Colored Petri net model

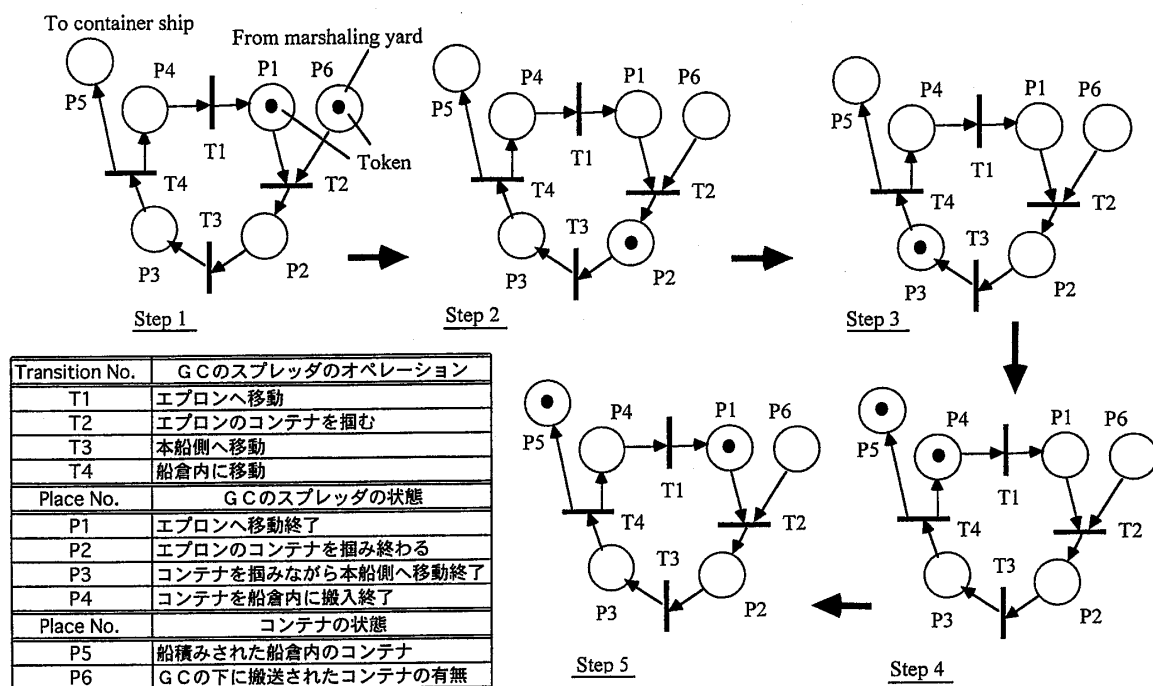


Fig. 6 A Petri net model of gantry crane operations

この図において、Step1において、プレース P6 は「GCの下に船積みのために搬送されたコンテナの有無」を表しており、ここにトークンがある場合は、「船積みされるコンテナが存在している」ことを意味している。また P1 は「スプレッドのエブロンへの移動終了」という状態を表している。P1 と P6 の両方にトークンが存在すると、トランジションが発火可能となり、スプレッドがコンテナを掴むことができ、Step2 に示すようにトークンはプレース P2 の「スプレッドのコンテナ掴み終わり」の状態に移る。

さらにトークンは Step3 のように GC がコンテナを掴みながら本船に移動し、Step4 ではトークンは P4 の「コンテナを船倉内に搬入終了」状態と P5 の「船積みされた船倉内のコンテナ」の2つに分岐する。分岐した一方の GC の作業の流れは、Step5 に示すようにスプレッドがコンテナを掴むため陸側移動し、以下 Step1 から同様のオペレーションを繰り返す。

なお、個々の作業時間はプレースの入力アークを考慮し、また GC がコンテナだけでなくハッチカバーを扱う場合も、トークンをカラー化して属性を持たせることにより積荷物の種類を表すことができる。このようにして、ペトリネットを用いて GC の一連の作業をモデル化できる。また、ペトリネットでの状態推移の定式化については付録に述べる。

(3) オペレーションの連結

積荷、揚荷、搬出入の各業務はコンテナターミナルにより方式は異なるため、ペトリネットにより業務をモデル化するには、各々の荷役や搬送機器のオペレーションのペト

リネットを連結することにより得られる。

例えば、ストラドルキャリア方式によるコンテナの積荷では、ガントリークレーン (GC) とストラドルキャリア (以下 SC と略す) の組み合わせからなるが、これをペトリネットによりモデル化するには、GC と SC の各オペレーションのペトリネットを連結する。これを Fig.7 に示す。斜め線によりハッチされた部分がエブロン部での GC のオペレーションであり、点によりハッチされた部分がマージヤリングヤードでの SC のオペレーションである。P6 と P7 は、GC と SC のオペレーションを連結する部分であるため、両方のオペレーションに互いに影響し合い、ここでのトークンの停滞が機器の待ちにつながる。なお、図中の表には、ストラドルキャリアのオペレーションのペトリネットのトランジションとプレース内容を併記している。

4. コンテナ荷役シミュレーション

コンテナターミナルでのコンテナ荷役シミュレーションを、日本で多くの採用実績のあるストラドルキャリア方式およびトランスファークレーン方式について行う。

4.1 シミュレーション計算の仮定

(1) コンテナターミナルのレイアウト

Fig.1 にストラドル方式のコンテナターミナルのレイアウトを示す。このターミナルは2バース、ガントリークレーン4基を有するものであり、コンテナのストックヤードは A~J まで10のブロックがある。各ブロックは、256 スロット (8×32) あり、コンテナを3段積みで蔵置するものとする。このうちストックヤード I, J は冷凍コンテナ

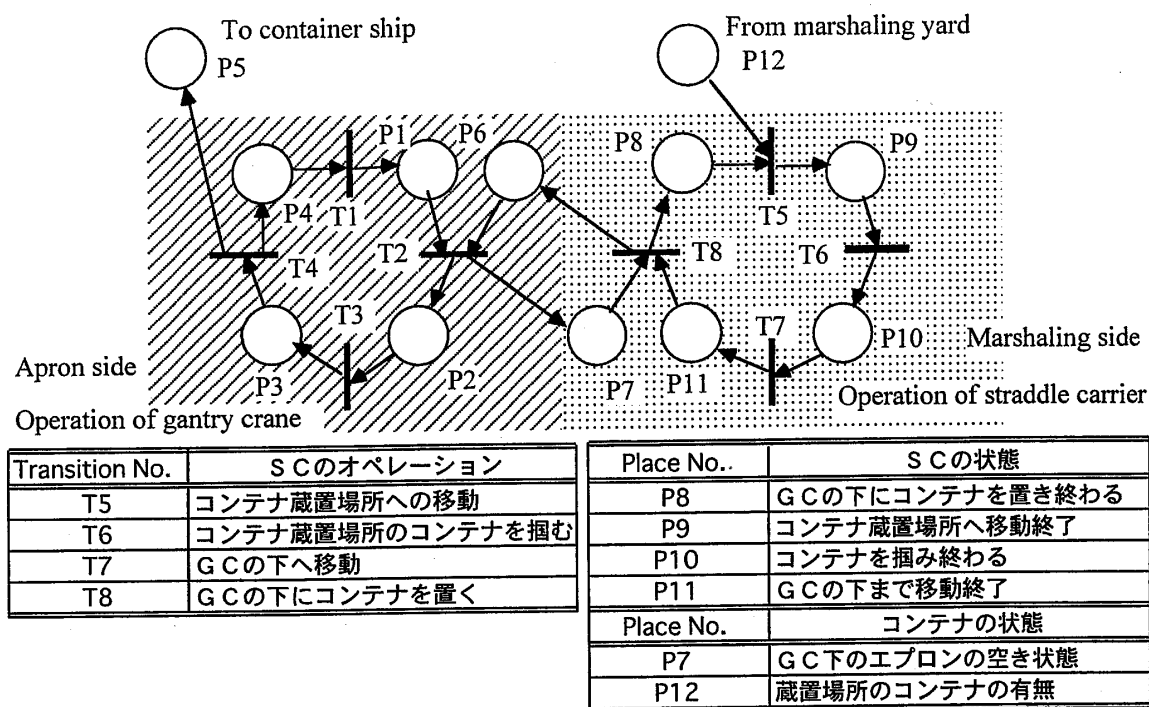


Fig. 7 A combined model of the operation of gantry crane and the operation of straddle carrier

を2段積みで蔵置するものとする。コンテナを年間30万TEU程度扱える地域の主要港程度の規模を想定している。

なお、コンテナの蔵置場所は本船への積荷用やフィーダー用のコンテナはバース側のA～Dブロックに、また陸側へ搬出用コンテナは陸側のE～Hブロックに蔵置するものとする。

さらに、陸側のヤード入り口には、ゲートそばに外来シャーシとのコンテナの受け渡しのため、トランスファーポイントに10レーン設置している。

また、トランスファークレーン方式のコンテナターミナルは、ストラドルキャリア方式のレイアウトとは一般には異なるが、ここでは、A～Jまで8つの各ブロックは、120スロット(6×20)としてコンテナを4段積みで蔵置するものとし、また各ブロックにはシャーシの通行レーンの他に追い越しレーンがあるものとして、この程度の差は無視して同様のレイアウトで考える。なおトランスファーポイントは無視する。

(2) 取り扱いコンテナの範囲

コンテナターミナルでの積替えコンテナの比率は、ターミナルが、幹線と支線間の積替えコンテナを主力に取り扱うハブ型ターミナルか、内陸輸送と連結した後背地の輸出入コンテナを主に扱うOD (Origin and Destination) 型ターミナルかによるが、ここでは地域の主要港や中小港と同じOD型を想定して、コンテナ積み替え比率を10%とする。

また、空コンテナ比率は積替えコンテナ以外のコンテナ

のうち陸揚コンテナのうち10%、船積コンテナのうち40%とする。空コンテナの比率が多いと、蔵置場所の確保など荷役効率の面で悪影響が出るが、今回の搬送シミュレーションでは、この影響は考慮していない。さらに最近増加傾向にある冷凍コンテナは取扱量の10%とし、タンクコンテナなどの特殊コンテナは考慮しない。さらに、40ftコンテナと20ftコンテナは6:4とする。本船の寄港と規模は曜日により異なるが、平均的に1日当たりの取り扱い個数は500-600個程度を想定している。

Table 1 Field measurement on the operational performance of some handling devices

ガントリークレーン	
船上でのコンテナハンドリング	12sec.
エプロン上でのコンテナハンドリング	5sec.
シャーシへのハンドリング	18sec.
トロリ移動時間	29sec.
ハッチカバーのハンドリング	30sec.
エプロン移動時間(/40ft)	38sec.
ストラドルキャリアー	
通路 (通路)	5.3m/s
(ブロック内)	2.5m/s
旋回時間	4.6sec.
コンテナハンドリング (つかみ置く)	9sec.
トランスファークレーン	
シャーシへのコンテナハンドリング	17sec.
積み上げコンテナのハンドリング	15sec.
スプレッド移動時間	23sec.
軌道上移動時間 (/40ft)	6sec.
ゲートでの手続きの時間	120sec.

(3) 作業要素時間

各荷役方式で搬送や荷役に使われる機器の作業時間は、博多港香椎パークポート、神戸港の神戸国際コンテナターミナル (KICT) PC-14, 15 パースにおいて実地調査した数値を用いた。これを Table 1 に示す。

4.2 ストラドルキャリア方式による荷役シミュレーション

Fig. 1 のターミナルのレイアウトにおいて、ストラドルキャリア方式による積荷業務を Fig. 7 のペトリネットモデルによりシミュレーションしたものうち、ガントリークレーン (GC) の積荷能力を Fig. 8 に示す。

Fig. 8(a) は、GC がコンテナを陸側から本船に移動させる荷役能力を 1 基当たりの個数として示す。この図によると、GC が扱える個数には 1 時間当たり 37 個という稼働能力の制約があるが、これは本船にセルガイドに沿ってコンテナを下ろすなど、積み出しに比べ荷役時間を必要とするためである。またこの図では、例えば本船のコンテナを GC 4 基で対応し、SC が 4 台でエプロン上にコンテナを供給する場合には、GC 能力に余裕があり GC に待ちが生じ、さらに SC を 6 台まで増やすと、この待ちは解消される可能性があることを示している。さらに、SC を 7, 8 台と増やすと逆に SC に待ちが生じる可能性があることも

分かる。

また、1 日の作業時間 (8 時間) 当たり、積荷として取り扱い可能なコンテナ総数を Fig. 8(b) に示す。この図から、GC の稼働能力に制約があるため、コンテナ取り扱い総数を増加させるには、新たに GC の導入か荷役体制を 24 時間にするなどの対策が必要である。

揚荷業務をシミュレーションしたものうち、ガントリークレーン (GC) の揚荷能力を Fig. 9 に示す。なお、シミュレーションに用いたネットは Fig. 6 のほぼ逆の過程をとる。

Fig. 9(a) には、GC がコンテナを本船から陸側に移動させる荷役能力を 1 基当たりの個数として表している。この図によると、GC が扱える個数には 1 時間当たり 44 個という稼働能力の制約があるが、例えば、本船のコンテナを GC 2 基で対応し、SC が 4 台でエプロン上にコンテナを供給する場合には、GC 能力に余裕があり、GC に待ちが発生することを示している。この場合には SC の必要台数は、5~6 台程度であり、現状のターミナルの業務態勢においては、GC が 1 基につき SC を 3 台配備しており、よく一致している。Fig. 9(b) には、1 日の作業時間当たり揚荷として取り扱い可能なコンテナ総数を示す。この図により、取り扱い総数から GC の基数なども計画できる。

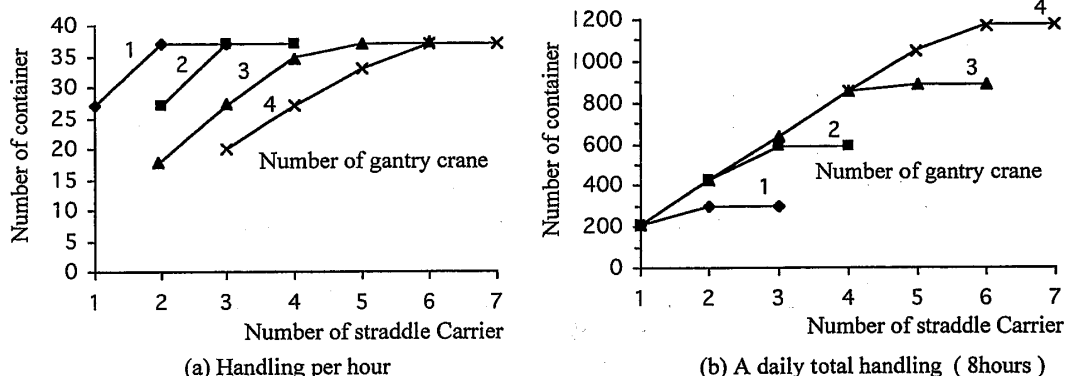


Fig. 8 Performance of the lift-on handling of gantry crane under the straddle carrier system

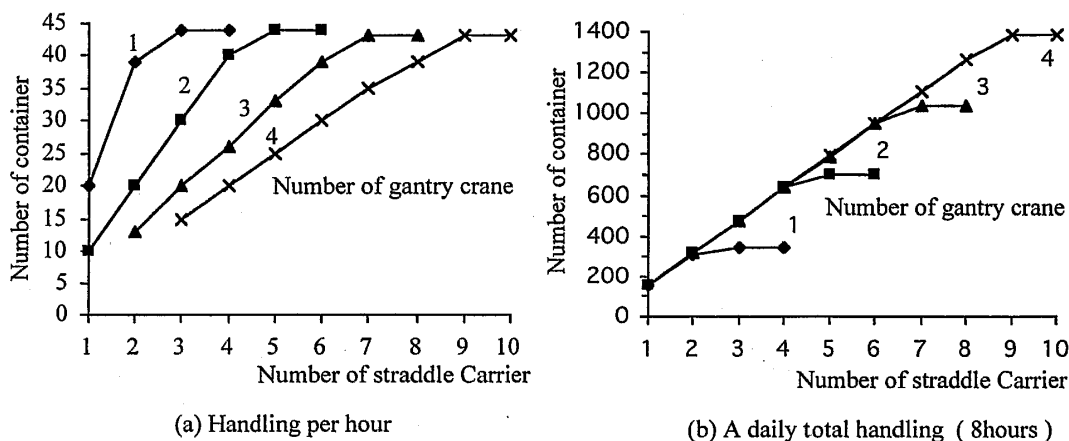


Fig. 9 Performance of the lift-off handling of gantry crane under the straddle carrier system

さらに、SC方式による外来シャシーによるコンテナターミナルからの搬出入シミュレーションを Fig. 10 に基づくペトリネットモデルにより試みる。図中の表には各オペレーションを併記している。ゲート、トランスファーポイント、SC、外来シャシーの各オペレーションを組み合わせるため、ネットが複雑化している。なお、仮定したコンテナターミナルでは、1日当たり平均550個のコンテナが外来シャシーにより搬出入されるものとして計算しており、搬入だけあるいは搬出だけ、さらには搬入出の両方の場合を扱う外来シャシーなどもカラーペトリネットにより扱っている。

Fig. 11 には、SCの1時間当たりの荷役個数を示している。図中、正方形の印を付加したものは、全ての外来シャシーが既にゲートに待機しているものと仮定した場合であり、三角印を付加したものは外来シャシーが平均的に連続してゲートに到着する場合を表す。この図によると、平均的シャシーがゲートにコンテナを集荷に来る場合には、搬出入業務に対応するSCの台数は3台程度で済むが、朝夕のコンテナ搬出入のラッシュ時などでは、これでは十分に対応できない可能性があることを示している。

また、Fig. 12(a)にはゲート前でのシャシー1台当たりの平均待ち時間を示す。ゲートでの手続きに問題が生じると、待ち時間はさらに増大する。さらに、トランスファーポイントでの待ち時間を Fig. 12(b)に示す。現状のターミナルでは、朝夕のラッシュ時には通常はSCを6台程度で対応しており、トランスファーポイントでも平均的な

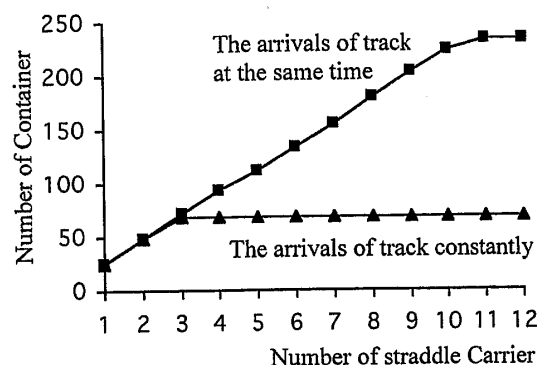


Fig. 11 Performance of the container interchange between the chassis and the straddle carriers under the straddle carrier system

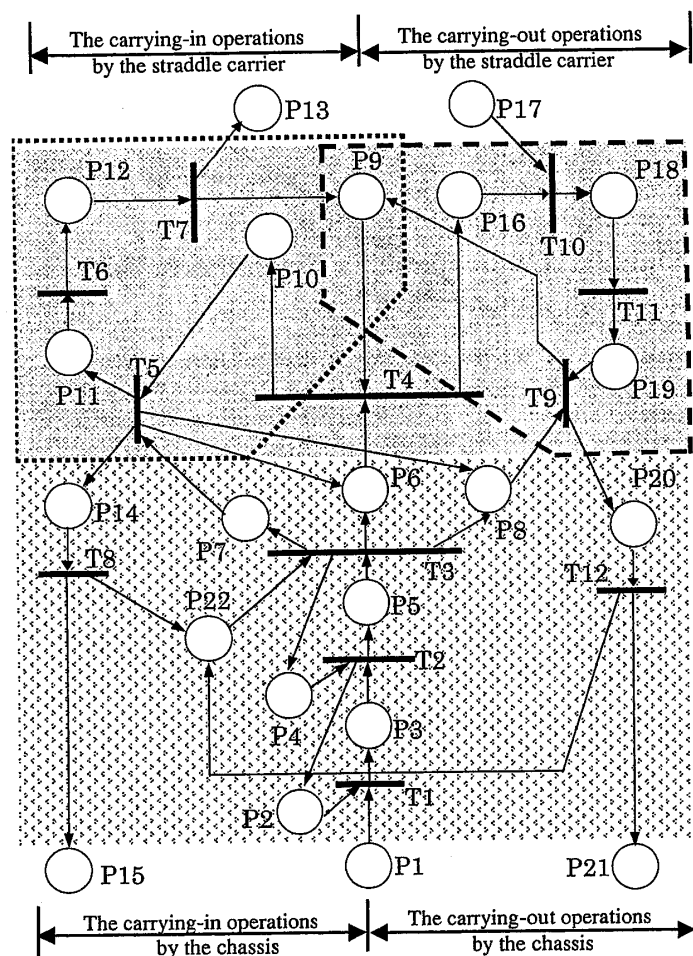


Fig. 10 A Petri net model of the container interchange between the chassis and the straddle carriers under the straddle carrier system

Trans. No.	外来シャシー(CH)のオペレーション
T1	ゲート手続きを行なう
T2	TP 脇に待機
T3	TP に移動
T8	搬入を終えゲートへ移動
T12	搬出を終えゲートへ移動
ストラドルキャリア(SC)のオペレーション	
T4	TP あるいはコンテナ蔵置場所へ移動
T10	蔵置場所にあるコンテナを掴む
T11	TP へコンテナを掴みながら移動
T9	CH にコンテナを積載
T5	CH からコンテナを降ろす
T6	蔵置場所へ移動
T7	コンテナを蔵置場所に置く
Place No.	CH の状態
P1	ゲート前での行列
P2	ゲートが空き
P3	ゲート手続き終了
P4	TP の空き
P5	TP 脇に待機終了
P6	TP に移動終了
P7	CH(搬入・搬出)がSCを待つ状態
P8	CH(搬入・搬出)がSCを待つ状態
P14	コンテナ積降し終了
P15	搬入の終えゲート外へ
P20	コンテナ積荷終了
P21	積荷を終えゲート外へ
SC の状態	
P9	搬入搬出作業終了
P10	TP または蔵置場所へ移動終了
P11	CH からコンテナを降ろし終わる
P12	蔵置場所へ移動終了
P16	TP またはコンテナ蔵置場所へ移動終了
P18	コンテナを掴み終わる
P19	TP へコンテナを掴みながら移動終了
P22	TP の空き
コンテナの状態	
P13	コンテナの蔵置
P17	蔵置場所のコンテナ

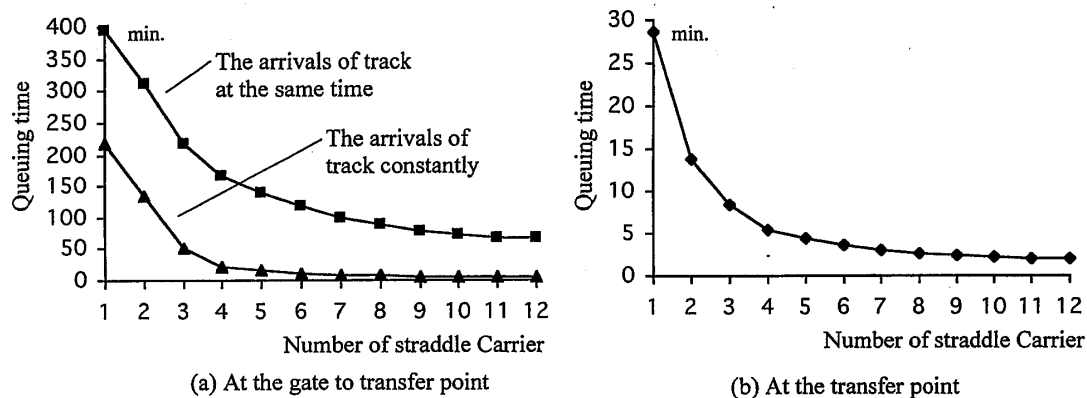


Fig. 12 Queuing time of the chassis from outside under the straddle carrier system

待ち時間が5分程度であることから、本シミュレーションがよく一致していることが分かる。

4.3 トランスファークレーン方式による荷役シミュレーション

Fig. 1のターミナルのレイアウトでの、トランスファークレーン (TC) 方式による積荷業務を Fig. 13に基づくペトリネットモデルにより試みる。図中の表には各オペレーションを併記している。

シミュレーションしたものうち、ガントリークレーン (GC) の積荷能力を Fig. 14に示す。Fig. 14(a)には、ト

ランスファークレーンを6基配備した場合を表すが、GCが2基の場合には4~5台程度の構内シャーシで対応できるが、GCを4基設置した場合にはTCが不足するため、最大でも30個程度しか扱えず、GCに待ちが生じる。

Fig. 14(b)にはトランスファークレーンを9基配備した場合を表すが、2バースで4基のクレーンを想定した場合には、GCの積荷能力を最大に引き出すには、構内シャーシは6~7台必要であることが分かる。

また揚荷業務において、TCを9基としてGCの1時間当たりの取り扱い個数を Fig. 15に示す。この場合には積

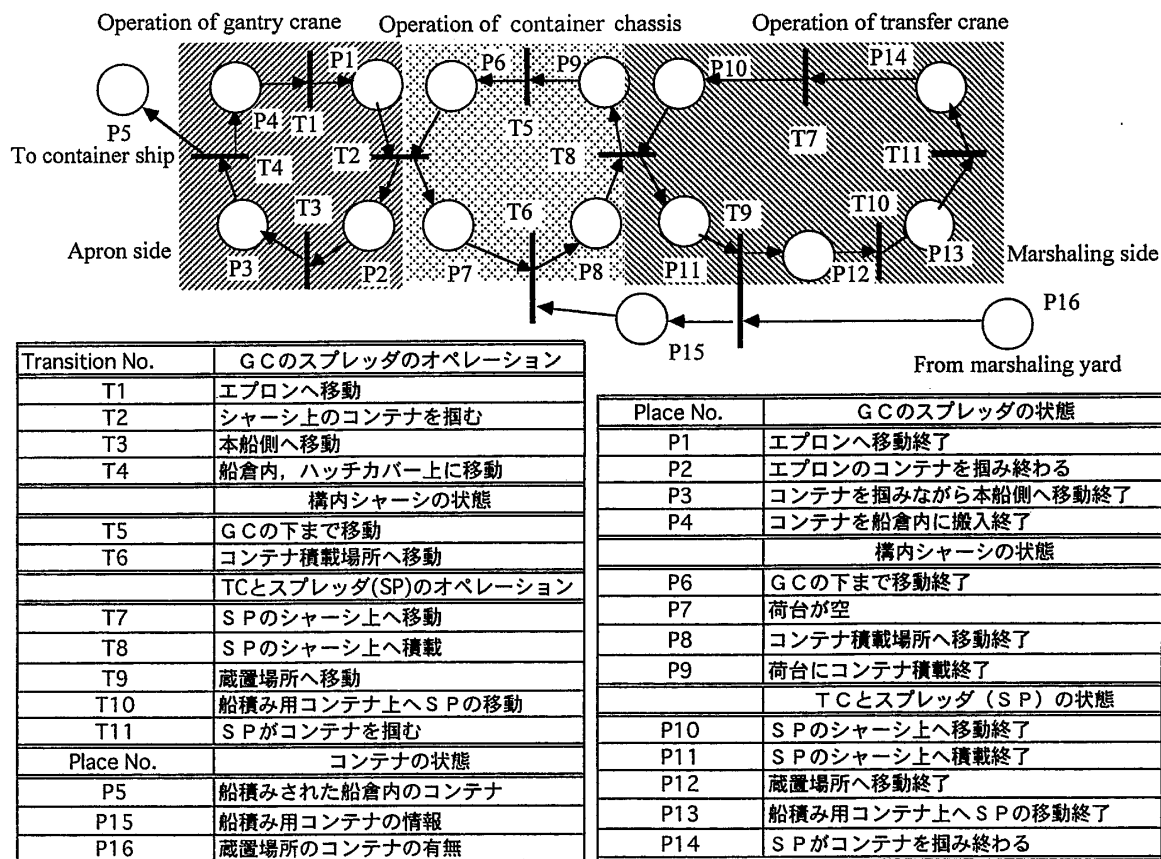


Fig. 13 A Petri net model of the container loading under the transfer crane system

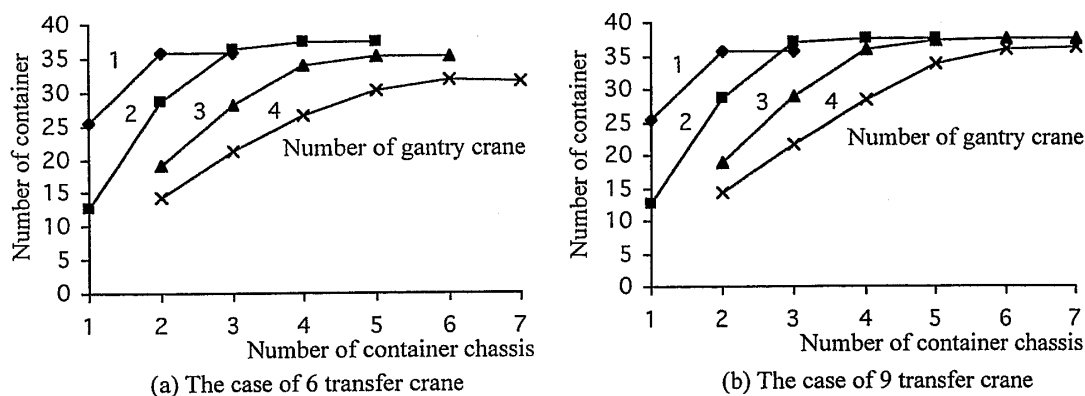


Fig. 14 Performance of the lift-on handling of gantry crane under the transfer crane system

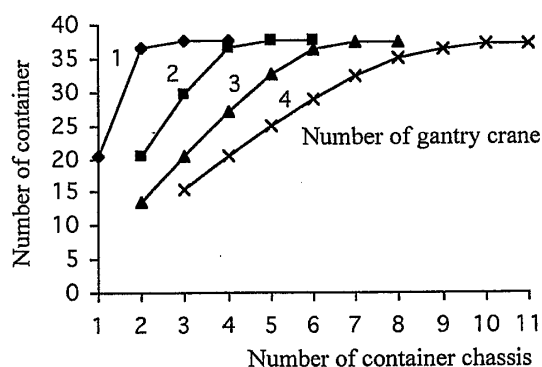


Fig. 15 Performance of the lift-off handling of gantry crane under the transfer crane system

荷業務に比べ、揚荷業務のコンテナハンドリングの容易さ、蔵置場所の距離差などから、GCに待ちを生じさせないためには必要シャシー台数は多く必要とする。

さらに、トランスファークレーン方式による搬出入業務のうち、TCの1時間当たりの荷役個数を Fig. 16 に示す。シミュレーションでは、TCが9基以上を仮定しており、ヤード内に進入する外来シャシーの数には制限を設けてい

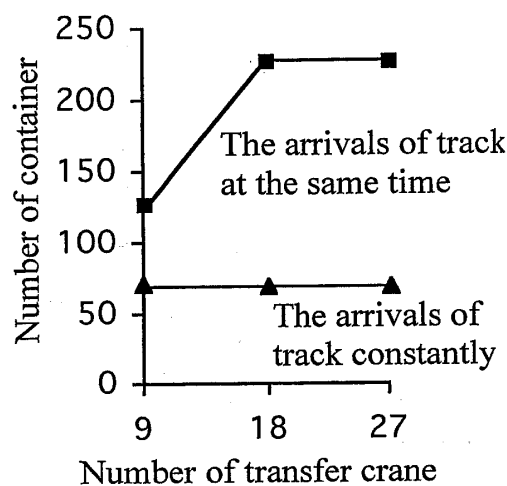


Fig. 16 Performance of the container handling for the chassis from outside under the transfer crane system

ない。図中、正方形の印を付した線は外来シャシーが既にゲートに待機しているものと仮定した場合であり、三角印を付した線は外来シャシーが平均的にゲートに到着する場合を表す。仮定した規模でのコンテナヤードでは9基程度で外来シャシーの需要を捌けるが、朝夕のラッシュ時には、これには対応できない可能性も有る。また、この上に積荷および揚荷業務が重なった場合には、TCの必要台数はさらに増大する。

また、Fig. 17 には TC の横での、外来シャシー1台当たりの平均待ち時間を示す。なお、ヤード内に進入する外来シャシーの数には制限を設けていないため、ゲートでの待ち時間は控除されている。TCの投入基数に応じて待ち時間は大きく緩和されるが、TC1基当たりの経費との兼ね合いも問題となる。

5. 結 言

本研究では、現在のコンテナターミナルにおけるコンテナ荷役業務をペトリネットによりモデル化して、荷役搬送機器の実測地を基にシミュレーションを試み、このモデル

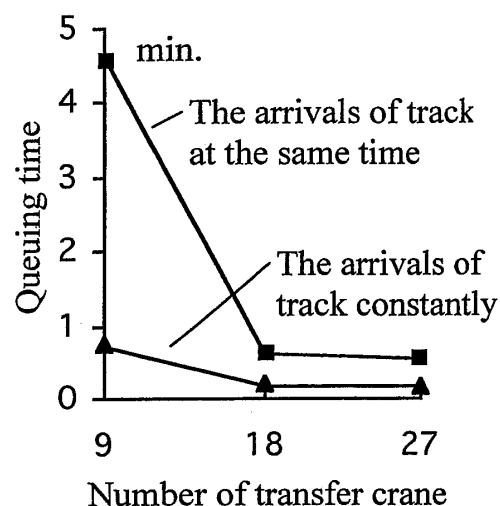


Fig. 17 Queuing time of the chassis from outside under the transfer crane system

からコンテナヤードでの荷役効率を把握することができることを確認した。次報では高効率化のための機能性評価と現状の最適化について述べる。

参 考 文 献

- 1) 宮本 榮：船舶・荷役の基礎用語, 成山堂, (1992)
- 2) 天田乙丙：港運がわかる本, 成山堂, (1995)
- 3) 椎塚久夫：実例ペトリネット, コロナ社, (1992)
- 4) 離散事象システム研究専門委員会編：ペトリネットとその応用, コロナ社, (1992)

付 録 ペトリネット

(1) 状態推移の定式化

各トランジション T_j における, プレース P_i との接続構造を表すトランジションベクトルを t_j とする。ここで, t_j を列ベクトルとして, ペトリネット全体の接続構造を表す接続マトリックス N は次式となる。

$$N = [t_1, t_2, \dots, t_m] \quad (1)$$

ここに, N の要素 n_{ij} は, $T_j \rightarrow P_i$ から入力アークがある場合には-1, 出力アークがある場合には1, 何も関連がない場合には0を取る。

また, トランジションに入力するプレースにトークンが有る場合に発火の条件となるため, N の要素の内-1 のものを集めた行列をここでは, 発火条件マトリックスと呼び F と表す。 F の要素を f_{ij} とすると次式となる。

$$f_{ij} = n_{ij} \text{ and } (-1) \quad (2)$$

ある状態 k におけるプレースの状態ベクトル s^k とすると, トランジション発火後の状態 s^{k+1} は次式により表せる。

$$s^{k+1} = s^k + t_m \quad (3)$$

ここに, m は F の列ベクトル f_m の内, 次式を満たすものをとる。

$$s^k \text{ and } f_m = f_m \quad (4)$$

(2) 計算例

Fig. 6 でのガントリークレーンのオペレーションの計算例を以下に示す。

本船への積荷のための GC のオペレーションのペトリネットモデルでは, ペトリネット全体の接続構造を表す接続マトリックス N と発火条件マトリックス F は次式で表せる。

$$N = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで, プレースの初期状態 s^1 は Fig. 6 の Step 1 に示すようにプレース P_1, P_6 にトークンがあるため, $\{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1\}^T$ とすると, 次のステップのプレースの状態 s^2 は, (4) 式より f_2 が発火の条件を満たすため, このときの t_2 を用いると (3) 式より次式となる。

$$s^2 = s^1 + t_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

このプレースの状態はトークンが P_2 にあり, Fig. 6 の Step 2 に対応している。同様に, 次のステップのプレースの状態 s^3 は (4) 式より f_3 が発火の条件を満たすため, このときの t_3 を用いると (3) 式より次式となる。

$$s^3 = s^2 + t_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

このプレースの状態は, Fig. 6 の Step 3 に対応しており, 以下同様にして, 次のステップのプレースの状態が順に求まる。