

# 効率的な港湾ターミナル運用を目指したダブルコンテナ荷役作業

## Double Container-handling Operation for Efficient Seaport Terminal Management

正 星野智史（東京工業大学） 藤澤友晴（国土交通省）  
丸山繁久（港湾荷役機械システム協会） 日野寿人（東京大学） 正 太田 順（東京大学）

Satoshi HOSHINO, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, JAPAN  
Tomoharu FUJISAWA, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, JAPAN  
Shigehisa Maruyama, Japan Association of Cargo-handling Machinery Systems, JAPAN  
Hisato HINO and Jun OTA, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, JAPAN

**Abstract**— For an efficient seaport terminal management, we propose a novel operational model, namely, a double container-handling operation among operating machines, such as automated guided vehicles (AGVs), automated transfer cranes (ATCs), and quay container cranes (QCCs). In addition, a passing lane is provided in a container storage yard in order to activate the container-handling operation performed by the AGVs and ATCs. In this paper, the effect of the double container-handling operation and passing lane on the system utilization is examined. Finally, the effectiveness of the proposed operational model with a passing lane is discussed on the basis of the operating time and obtained number of operating machines for a given demand in consideration of a mega-container terminal.

**Key Words:** Double container handling, seaport terminal management, automated guided vehicle

### 1. 緒言

世界規模で増加傾向にある港湾ターミナルでのコンテナ取扱量の問題を受けて、ターミナルシステム内でのコンテナ取扱い作業の自動化や効率化が課題となっている。著者らはこれまでに、高効率な自動コンテナ荷役システムの実現を目指し、ある作業要求が与えられた際、それを満たすための作業機器の最小台数設計や効果的なシステムレイアウトの決定 [1], 作業モデルの設計 [2], 作業機器の性能・信頼度設計 [3, 4] などを行ってきた。また、機器のメンテナンス時における作業モデル設計に関する研究も行っている [5]。

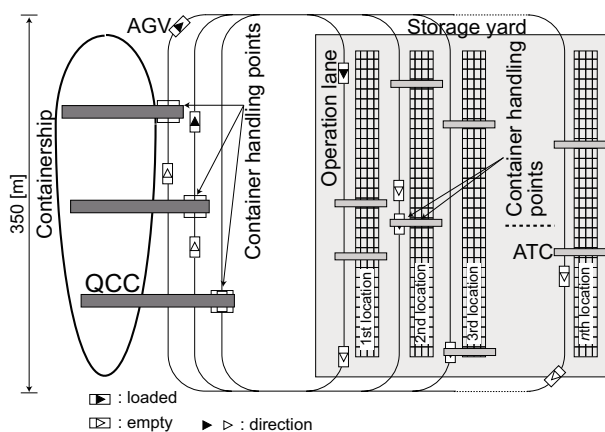
日本における輸出入コンテナの取扱いに関する現状は、コンテナ船～ターミナルシステムで、まず、コンテナ船に積み込まれているコンテナを必要なだけ卸した後、ターミナルから船へ輸出するコンテナの荷揚げ作業が行われている。そのためコンテナ搬送車は、埠頭と蔵置ヤード間を往復する際、往路か復路のいずれかにおいて空荷の状態で行き止るを得なくなる。以降、本作業方式のことをシングルコンテナ荷役作業方式と呼ぶ。

本研究では、コンテナ搬送車の空荷走行を削減するため、ダブルコンテナ荷役作業方式を新たに提案する。さらに、コンテナ搬送車や移動式のコンテナ蔵置クレーンなどを有効に活用するため、蔵置ヤード内に追越しレーンを設置する。そしてこれらの有効性の検討を行うため、シングル荷役作業方式とダブル荷役作業方式によるターミナルシステムの操業、ならびに追越しレーンを設置し、運転時間の比較および評価を行う。さらに、国内におけるメガコンテナターミナル実現を目指した作業要求をターミナルシステムに与え、この要求を満たす作業機器台数を算出し、提案作業方式ならびに追越しレーンの可能性について論じる。

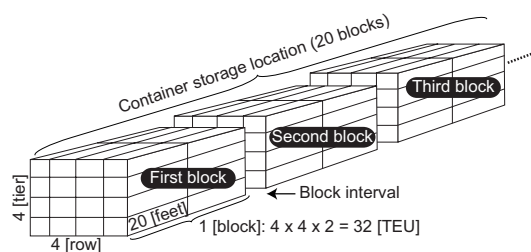
### 2. 港湾ターミナルコンテナ荷役システム

#### 2.1 システム設定

本研究では、水平型のレイアウトを有するコンテナ荷役システムを対象とする。当該システム内には、コ



(a) Terminal system layout (1 berth from top view)



(b) Container storage location

Fig.1 Horizontal Container-handling System

ンテナ荷役のための作業機器として、埠頭クレーン（QCC：Quay Container Crane）、自動搬送車（AGV：Automated Guided Vehicle）、門型式移動蔵置クレーン（ATC：Automated Transfer Crane）が稼働している。

Fig. 1(a) は、1 パース分の荷役システムを示している。本研究では、このターミナル 1 パースの幅を、大

型コンテナ船の船長に対応できるよう 350 [m] とし、3 台の QCC が稼働しているものとする。Fig. 1(b) はヤード内に設置されたコンテナ蔵置ロケーションを示している。1 ロケーションは 3 [m] の間隔で 20 ブロックから構成され、1 ブロックには 32 (4 tiers × 4 rows × 2) [TEU (Twenty-foot Equivalent Unit)] のコンテナ蔵置スペースがあるものとした。なお、1 ロケーションにつき、大小 2 台の ATC が投入されるものとした。

## 2.2 作業機器の性能

各作業機器の性能は以下のとおり設定した。AGV は在荷時の最高搬送速度が 5.56 [m/s]、コーナリング速度が 1.39 [m/s]、空荷時の最高速度が 6.94 [m/s]、コーナリング速度が 2.78 [m/s]、空荷・在荷状態に関係なく、加速度が 0.15 [m/s<sup>2</sup>]、減速度が 0.63 [m/s<sup>2</sup>]。ATC の最高移動速度は 2.5 [m/s]、加減速度はそれぞれ 0.1 と 0.4 [m/s<sup>2</sup>]、コンテナ 1 個を受取り蔵置するまでのサイクルタイムは 135 ~ 150 [s] とした。QCC が 1 つのコンテナを荷役するためのサイクルタイムは 90 [s] とした。

## 2.3 シングルコンテナ荷役方式による作業手順

シングルコンテナ荷役作業方式によって操業されている港湾ターミナルでは、はじめに輸入コンテナが蔵置ヤードへと荷役され、その後、輸出コンテナがコンテナ船へと荷役される。本荷役方式による作業手順の詳細を以下に述べる。

1. QCC により、輸入コンテナが AGV へと荷役される。全輸入コンテナの取扱いを終了すると、続いて、AGV が搬送してきた輸出コンテナが、QCC によりコンテナ船へと荷役される。
2. AGV は輸入コンテナを埠頭から蔵置ヤードへと搬送する。輸出コンテナの場合、埠頭から蔵置ヤードへは空荷走行をする。
3. 蔵置ヤードでは、AGV から ATC へと輸入コンテナが受渡され、ATC によりロケーションへと蔵置される。全輸入コンテナの取扱いが終了した後、蔵置ロケーションのいずれかの輸出コンテナが ATC により AGV へと受渡される。
4. 輸入コンテナを ATC へ受渡した AGV は、埠頭へと空荷走行を開始する。輸出コンテナを ATC から受取った AGV は埠頭の QCC へとコンテナ搬送を開始する。

## 3. ダブルコンテナ荷役作業方式

### 3.1 作業サイクル

Fig. 2 は、ダブルコンテナ荷役作業方式による埠頭～蔵置ヤードでの、QCC、AGV、ATC による作業サイクルを示している。図の左側が埠頭における本船荷役作業、右側が蔵置ヤードでの荷役作業、中間が AGV によるコンテナ搬送作業を示している。

AGV が QCC の下へ到着すると、蔵置ヤードより搬送されてきたコンテナが QCC により AGV からコンテナ船へと荷揚げされる。荷揚げ作業が終了すると同時に、続いて、輸入用のコンテナが船から AGV へと荷役される。AGV は当該コンテナを、蔵置ヤード内の所定のロケーションまで搬送し、到着後、ATC がこれを受取り、そして蔵置する。作業終了後、ATC は連続して

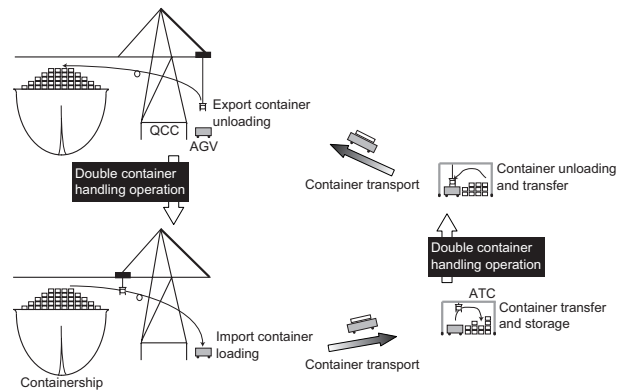


Fig.2 Cycle of the Double Container-handling Operation

AGV へ輸出用のコンテナを荷役する。AGV は輸出コンテナの搬送を開始し、QCC の下へと戻る。以上、埠頭側ならびに蔵置ヤード内にて、同時に 2 回分のコンテナ荷役作業を行うことで、AGV は空荷走行することなく作業を遂行することが可能となる。

なお、AGV への作業タスクの割当て方策やコンテナ搬送先の決定則、ATC によるコンテナ荷役作業実行順序スケジューリング、AGV による ATC の呼び出しタイミング、そして、AGV と ATC 間でのコンテナ荷役のための協調行動等、これらの作業モデルの詳細に関しては、文献 [2] を参考にされたい。

### 3.2 シングル・ダブルコンテナ荷役作業方式の特徴

シングルコンテナ荷役とダブルコンテナ荷役には、その作業方式の違いから、作業に要する時間ならびに AGV の空荷走行に関して、以下の特徴がある。

- シングルコンテナ荷役作業方式：コンテナ船に積まれた卸しコンテナを全て荷役した後、蔵置ヤードにある揚げコンテナを荷役する。
  - 埠頭ならびに蔵置ヤード内で荷役作業を行う際、AGV が QCC、ATC とコンテナ荷役を行うのに要する時間は、コンテナ 1 個（荷役 1 回）分に相当する。
  - AGV は、取扱うコンテナの数だけシステム内を巡回する。その内半分は空荷走行となる。
- ダブルコンテナ荷役作業方式：コンテナ船から卸すコンテナを 1 個荷役する直前（した直後）、蔵置ヤードから揚げるコンテナを 1 個荷役する。
  - 埠頭ならびに蔵置ヤード内で荷役作業を行う際、AGV が QCC、ATC とコンテナ荷役を行うのに要する時間は、コンテナ 2 個（荷役 2 回）分に相当する。
  - AGV は、取扱うコンテナの半数分だけシステム内を巡回する。埠頭～蔵置ヤード間で、往路・復路ともに在荷搬送を行う。

### 3.3 追越しレーン

シングル荷役方式に対してダブル荷役方式では、AGV が QCC や ATC とコンテナ荷役を行う時間が倍増してしまう。そのため、蔵置ヤード内の ATC 投入台数を増やすためにロケーションを増設したとしても、コンテナ

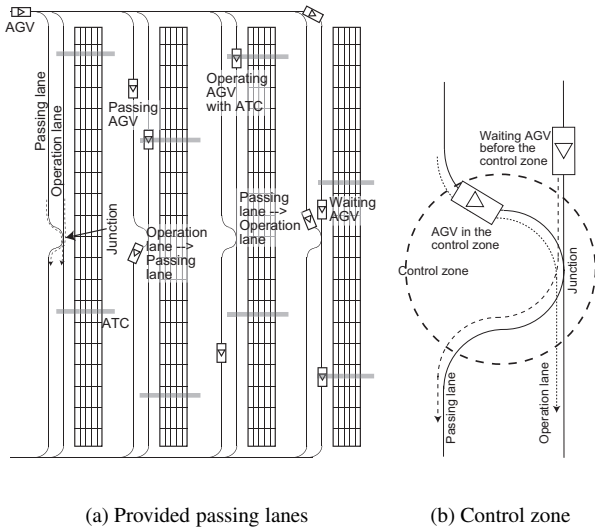


Fig.3 AGVs Behavior Model in the Container Storage Yard

荷役のために停止している AGV が後方 AGV の搬送の妨害となってしまう場合、作業効率が低下してしまう。

そこで、Fig. 3(a) が示すように、各作業レーンに加え、これに隣接するようにして追越しレーンを一本設ける。なお、作業レーンと追越しレーンは、それぞれロケーションの中央部分にて交差している。蔵置ヤード進入時、AGV は自分の向かうロケーションの目的位置に基づき（ロケーションの中央より上か下）、作業レーンか追越しレーンのいずれかに進入する。これにより、停止中の AGV が他のコンテナ搬送中の AGV の妨害とならず、AGV と ATC が有効に活用され、蔵置ヤードでの作業効率を改善することが可能となる。

各レーンの交差点には、Fig. 3(b) に示す制御ゾーンを設け、当該ゾーンへ先に進入した AGV が通過のための優先権を持ち、その他の AGV はゾーン内に当該 AGV がいなくなるまで待機する。

## 4. シミュレーション実験

### 4.1 シミュレーションシナリオ

本シミュレーション実験では、10,000 [TEU] クラスの大型コンテナ貨物船が入港してくることを想定し、2,000 [TEU] のコンテナ荷役を行う。このうち、1,000 [TEU] のコンテナが輸入、1,000 [TEU] のコンテナが輸出されるものとする。投入台数は、QCC が 3 台で固定（2.1 節参照）、AGV は 1 ~ 30 台、ATC が 4 ~ 20 台まで 2 台ずつ増やされ、これらがシミュレーションを行う際の入力パラメータとなる。

上記シナリオの下、以下の 3 つのシステムを構築し、各入力パラメータの組合せに対して 10 回のシミュレーション実験を行う。荷役作業時間に関して、2.2 節の性能に基づき、シングル荷役方式では、AGV と ATC 間でのコンテナ蔵置作業が 135 [s]、ダブル荷役方式では  $150 \times 2$  [s] 要するものとした。

1. シングルコンテナ荷役作業方式による操業 + 作業レーンのみ（従来システム 1）
2. ダブルコンテナ荷役作業方式による操業 + 作業

レーンのみ（提案システム 2）

3. ダブルコンテナ荷役作業方式による操業 + 作業レーンと追越しレーンの設置（提案システム 3）

### 4.2 運転時間の比較

Fig. 4 に、3 つのシステムによる 2,000 タスク完遂までに要した運転時間を示す。Fig. 4(a) ~ Fig. 4(c) 全ての結果より、AGV の投入台数が少ないシステムでは、ATC の台数が増えるにしたがって、運転終了までに要する時間が増大していることが分かる。これは、ATC 台数に伴い、ロケーション本数も増加し、その結果、AGV の総搬送距離が伸びたためである。したがって、AGV の投入台数が少ないシステムでは、ATC を増加させると、逆に非効率なシステムとなる結果となった。

Fig. 4(a) と Fig. 4(b) を比べると、ATC の投入台数に関わらず、AGV の台数が低い段階（1 ~ 3, 4, 5 台ぐらいまで）では、いずれも提案システム（2）の運転時間が短縮される結果となった。これは、AGV の投入台数が少ないシステムにおいて、シングル荷役方式による AGV の空荷走行が、よりシステムの稼働効率に悪影響を及ぼしているためである。しかしながら、AGV 台数が増えるにしたがって、ATC の台数が少ない場合（14 台ぐらいまで）、両者の差がほとんど無くなっていることが分かる。これは、ロケーション本数が少ない段階では、ダブル荷役を行うことで AGV の渋滞が発生し、稼働効率に悪影響が及んでしまったのが原因である。続いて、Fig. 4(b) と Fig. 4(c) を比較すると、システム 3 では、追越しレーンを追加することにより AGV の渋滞を緩和し、その結果、蔵置ヤード内での作業効率が改善され、ATC が 14 台以下の場合に対しても、AGV の台数増加に伴い、運転時間が減少していることが分かる。

平均減少作業完遂時間（運転時間の差の総和 / シミュレーション回数）は、システム 1 に対してシステム 2 が 8.01 [h]、システム 2 に対してシステム 3 が 3.79 [h] という結果となった。本結果より、従来のシングル荷役方式に比べ、提案したダブル荷役方式および、追越しレーンを設けることがシステム稼働効率の向上に有効であることが確認された。

### 4.3 メガコンテナターミナルを目指して

#### 4.3.1 問題設定

現在、国内の主要な港湾コンテナターミナル（例えば横浜港本牧 BC、名古屋港飛島、神戸ポートアイランド、等々）は、国土交通省によってスーパー中樞港湾として指定されている。さらに、南本牧ふ頭 MC-1・2 コンテナターミナルでは、2 パースのみのターミナルであるにも関わらず、年間 1,000,000 [TEU] のコンテナ取扱量を達成している [6]。そこで本研究でも南本牧ふ頭 MC-1・2 同様、1 パースで年間 500,000 [TEU] のコンテナ取扱いを達成することを目的とする。

自動コンテナターミナルシステムは、1 年間 365 日、1 日 20 時間実稼働するものと仮定する。そのため 1 パースにて、年間 500,000 [TEU] のコンテナを取扱うためには、 $500,000 / (365 \times 20) \approx 68.49$  [TEU/hour] の要求スループットを満たすシステム設計が必要となる。

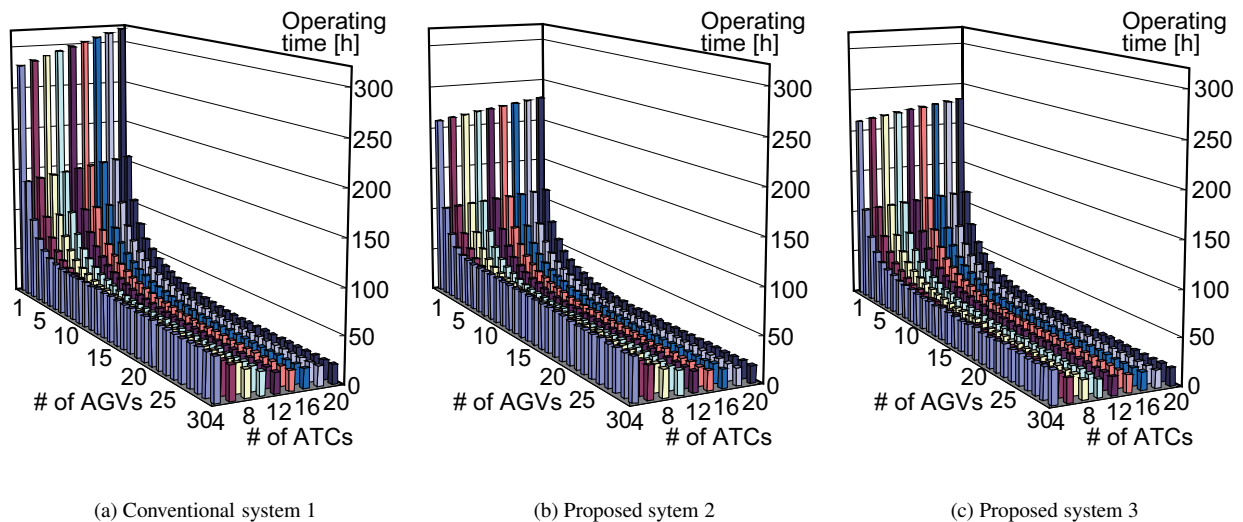


Fig.4 Comparison Result of the Operating Time for 2,000 Container-handling Tasks

**Table 1** Number of AGVs and ATCs Obtained for the Demand

System	# of AGVs	# of ATCs (locations)
1 (conventional)	13	10 (5)
	12	12 (6)
2 (proposed)	11	10 (5)
	10	12 (6)
	9	14 (7)
3 (proposed)	11	6 (3)
	10	8 (4)
	9	10 (5)

#### 4.3.2 AGV と ATC の投入台数の比較

Fig. 4 より、要求スループット 68.49 [TEU/hour] を満たす AGV と ATC の投入台数の組合せを算出し、それらを Table1 に示す。なお、各 ATC の投入台数に対して、表示されている AGV の投入台数以上の組合せであれば、それらは全て要求スループットを満たしていることに注意されたい。また、ATC を増加させても、AGV の台数が減少しない場合、それらの組合せは Table1 に載せないものとした。

システム 1 と 2 の結果を比較すると、同じ 10 台と 12 台の ATC の投入台数に対して、システム 2 では、算出された AGV の投入台数がどちらも少ないことが分かった。また、ATC を 14 台投入すると、AGV を 9 台にまで減らすことができる結果となった。さらに、追越しレーンを設置したシステム 3 においては、ATC の投入台数が 6, 8 台のときでも、AGV を 11, 10 台投入することで、要求スループットを満たすターミナルシステムを設計することができた。また、ATC10 台のときでは、AGV の台数がシステム 1 で 13 台、2 で 11 台だったのに対して、システム 3 では 9 台と、その投入台数を減らすことができた。

以上の結果より、メガコンテナターミナルを実現するといった観点からも、ダブル荷役方式および追越し

レーンを設置することの可能性が示された。

## 5. 結論

本研究では、従来のシングル荷役作業方式に対して、AGV の空荷走行を削減するため、ダブルコンテナ荷役作業方式を提案した。さらに、蔵置ヤードで荷役機器を有効に活用するため、追越しレーンを設置した。シミュレーション実験を通じて、効率的な港湾ターミナル運用に対する本方式、ならびに追越しレーンの有効性、およびメガコンテナターミナルへの可能性を示した。

## 参考文献

- [1] S. Hoshino *et al.*, Hybrid Design Methodology and Cost-Effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4 3 (2007) 360–372.
- [2] 星野智史, 他, 自動コンテナターミナルにおける運用を考慮した AGV 搬送システムの設計, 計測自動制御学会産業論文集, (2005) 98–108.
- [3] S. Hoshino *et al.*, Performance Design of Operating Robots in a Seaport Container-Handling System, *IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, (2007) 692–697.
- [4] S. Hoshino *et al.*, Design of an Automated Transportation System in a Seaport Container Terminal for the Reliability of Operating Robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2007) 4259–4264.
- [5] S. Hoshino *et al.*, Reactive Robot Control with Hybrid Operational Models in a Seaport Container Terminal Considering System Reliability, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2008) 143–148.
- [6] 南本牧 MC-1・2 コンテナターミナルコンテナ取扱量年間 100 万個を達成 ~ 単一コンテナターミナルとしては国内初の快挙! ~ <http://www.city.yokohama.jp/me/port/press/2007/1219.pdf>