



平成 17 年度  
博士論文

港湾物流における  
AGV 搬送システムの設計に関する研究

Design of AGV Transportation System  
in Port Logistics

指導教員 太田 順 助教授

東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻

星野 智史

Satoshi HOSHINO



# 概要

本論文では、港湾物流における AGV (Automated Guided Vehicle) 搬送システムに対する設計方法論の提案を行う。そのため、AGV が主要な作業機器として稼働している AGV 搬送システムを設計対象とする。なお、本搬送システムにおいて、AGV はそれぞれ自律的に行動することができる。そして、本論文では、(I) 搬送システムを一から設計していく場合、(II) 既存の搬送システムにおいて要求仕様の変更に対する改善・改修設計を行う場合、の 2 つの設計に焦点を当てる。本搬送システムには、AGV の他にも作業機器として埠頭クレーンである QCC (Quay Container Crane)、自動門型式移動クレーンである ATC (Automated Transfer Crane) や天井クレーンである OHC (Overhead Hoist Crane) などが稼働している。これらも AGV と同様に、それぞれ自律的に行動することができる作業機器となる。

本論文では海上輸送から陸上輸送といった大域的なコンテナ物流のうち、港湾コンテナ物流に関して、“港湾ターミナルに入港したコンテナ船より運び込まれたコンテナ群が、多種多様な機器により、ターミナル内の所定の蔵置場所までそれぞれ搬送ならびに蔵置されていく作業の流れ”のことをコンテナ搬送システムとして定義する。そして当該搬送システムにおける効率的なコンテナ物流の実現を目指す。本論文における搬送システムの設計とは、ある搬送完遂時間や搬送すべきコンテナの数が与えられた際、これらの要求に対して、当該搬送システム内において作業を行うさまざまな機器の投入台数、搬送システムのレイアウト、ならびにそれらを効率良く稼働させるための運用法について設計することを意味する。

港湾コンテナターミナルに自動搬送システムを導入する際、ターミナルのスペースに一から搬送システムを設計する場合と、すでに操業している搬送システムに対して、それらを改善あるいは改修するかたちで再設計を行う場合とで、それぞれ設計の具体的なアプローチが異なってくる。そこで本論文では、これら 2 つの場合について、それぞれ設計 (I) ならびに設計 (II) とし、扱う問題の違い、またそれにともなう設計アプローチの違いなどを明確にしながら議論を進める。

設計 (I) に対して、港湾物流における搬送システムには上述したさまざまな機器が投入され、それぞれが決められた作業を実行している。したがって、当該搬送システムは大規模かつ複雑であり、従来その設計方法に関しては、現場設計者の熟練度に依存した試行錯誤的なものにとどまってきた。そのため、設計段階には膨大な時間を必要としてきた。このような従来の設計現場における問題に対するブレークスルーとして、本論文では、さまざまな要求仕様、すなわち搬送完遂時間や、コンテナの数に応じた AGV 搬送システムの設計を、短時間で正確に行うための方法論を提案する。その際、作業機器の投入台数とそれに連動して変化する機器の作業時間をいかにして見積もるかが、搬送システムの最適設計方法論を提案する上でのチャレンジングポイントとなる。このチャレンジングポイントに対し、本論文では数理モデルとして待ち行列ネットワーク理論と実搬送システムを模倣するための搬送シミュレータをハイブリッドに組合せた設計方法論を提案する。

AGV 搬送システムのレイアウトを選定する際、すでに他の港湾において導入されているシステムレイアウトが選定の候補として考えられることがある。ここで、レイアウトの候補が複数挙げられる場合、それらを別々に発展させるのではなく、同等の要求仕様に対する最適設計を行い、設計結果に基づいた搬送システムの構築コストなどによって、それらの相対的な評価がなされなくてはならない。そのため、ある同等の要求仕様に対して、それらのレイアウトに基づいた AGV 搬送システムの最適設計を行い、その結果、得られたコストパフォーマンスを比較するなどといったことを行う必要がある。本論文では、港湾コンテナターミナルとしてもっとも代表的なレイアウトである垂直型と水平型の AGV 搬送システムを設計対象とする。このとき、本来であれば各搬送システムの運用までを同時に考慮した上で、要求仕様に対する適切な作業機器の投入台数を設計しなくてはならない。しかしながら、ここでは相対的な評価を行うという観点より、運用モデルは従来型のシンプルかつ天下りのなものにとどめ、さまざまな要求仕様に対する作業機器の最適な投入台数を算出する。

続いて、相対的な評価によりどちらか一方の搬送システムの有効性が示されたら、それに対する運用までを同時に考慮したシステム設計を行う。本論文では、港湾物流におけるコンテナ搬送に注目しているため、ここでは、コンテナの船から蔵置場所までの流れをいかにして効率良くするか、ということに着目する。その際、冒頭でも述べた通り、本論文で扱う AGV 搬送システムには、多種多様な作業機器がいるため、作業機器群の投入台数の他に、運用モデルとして、搬送システム内における協調行動則、コンテナ蔵置計画、コンテナ搬送計画を設計対象とする。そして、当該システムに対するもっとも効率的な運用モデルについて明らかにする。

一方，設計 (II) に対しては，既存の搬送システムに対する，要求仕様の変更にもなう改善・改修設計のための設計支援方法論を提案する．港湾管理者にとってコンテナ船の停泊時間は，作業を管理する上でもっとも重要な要素となる．そのため，船の停泊時間が短くなったり，コンテナ船に積まれているコンテナの数が従来と比べ増大した場合，既存の搬送システムを改善あるいは改修することにより，対応することが求められる．ただしその際，設計 (I) ではさまざまなパラメータを設計対象にしながら設計が行えたのに対し，設計 (II) の場合では常に既存のシステムの制約を考慮しなくてはならないといった問題が存在する．すなわち，設計 (II) では，搬送システムの抜本的な設計変更は困難であり，可能な限り部分的な改変により要求仕様を満たす搬送システムを構築しなくてはならない．本論文では，従来のシミュレータをベースにした，あるいは定点観測による実験的な再設計方法論ではなく，待ち行列ネットワーク理論をベースにしたハイブリッドな設計方法論を適用し，搬送システム内に生じている AGV 群の搬送渋滞の様子などを数理的に解析する．また，それらに対する改善設計案をロジックツリーとして網羅的に提示する．さらに，搬送システムに対するバランスングも考慮する．すなわち，搬送システムのスペックを与えたとき，それに対する妥当な要求仕様，さらにそれに対する適切な作業機器の投入台数を算出する．最後に，提案する設計支援方法論の有効性の検討を行うため，実際に操業している搬送システムを対象に，要求仕様の変更に対する，システムの改善設計を行う．



# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	2
1.1.1 港湾物流システム	2
1.1.2 本論文で対象とする港湾物流システム	3
1.1.3 自動搬送システムの設計問題	4
1.1.4 設計要求	6
1.1.5 搬送システム内に生じるボトルネック	9
1.2 港湾コンテナターミナルシステム	10
1.2.1 港湾コンテナターミナルにおける AGV 搬送システム	10
1.2.2 AGV 搬送システム内で稼動する作業機器	12
1.3 設計対象となる AGV 搬送システム	16
1.4 関連研究	18
1.4.1 搬送システムの設計方法論	18
1.4.2 レイアウト特性による有効性の評価	20
1.4.3 搬送システムの運用方法論	21
1.4.4 改善設計支援方法論	22
1.5 研究目的	24
1.6 本論文の構成	27
<b>第2章 垂直型・水平型 AGV 搬送システム</b>	<b>29</b>
2.1 はじめに	30
2.2 垂直型 AGV 搬送システム	31
2.2.1 システムの概要	31
2.2.2 搬送手順	31
2.2.3 システムの特徴	32
2.3 水平型 AGV 搬送システム	34

---

2.3.1	システムの概要	34
2.3.2	搬送手順	34
2.3.3	システムの特徴	35
2.4	レイアウト特性	37
2.5	要求仕様の設定	40
2.6	おわりに	41
<b>第3章</b>	<b>AGV 搬送システムの最適設計方法論</b>	<b>43</b>
3.1	はじめに	44
3.2	AGV 搬送システム設定	45
3.2.1	搬送システムのレイアウト	45
3.2.2	各エリアにおける機器の作業	45
3.3	待ち行列ネットワーク理論	50
3.3.1	待ち行列ネットワーク理論への入出力パラメータ	50
3.3.2	巡回型待ち行列ネットワークモデル	50
3.3.3	性能評価基準	52
3.4	問題設定	53
3.5	AGV 搬送システムのモデル化	55
3.6	AGV 搬送システムの定式化	58
3.7	システム設計方法論	61
3.7.1	設計アーキテクチャ	61
3.7.2	設計アルゴリズム	64
3.8	おわりに	67
<b>第4章</b>	<b>AGV 搬送システムの最適設計</b>	<b>69</b>
4.1	はじめに	70
4.2	設計条件	71
4.2.1	作業機器の仕様と入力パラメータ	71
4.2.2	垂直型 AGV 搬送システムの設計パラメータ	72
4.2.3	水平型 AGV 搬送システムの設計パラメータ	72
4.3	運用モデル	73



---

4.3.1	指令の割当て方 . . . . .	73
4.3.2	作業機器間でのコンテナ受け渡し動作：AGV → ATC . . . . .	74
4.4	システム設計 . . . . .	75
4.4.1	組合せ設計解 . . . . .	75
4.4.2	考察 . . . . .	77
4.5	AGV 搬送システムの性能評価 . . . . .	82
4.5.1	交通密度 . . . . .	82
4.5.2	平均滞在 AGV 台数 . . . . .	84
4.6	おわりに . . . . .	86
<b>第 5 章</b>	<b>レイアウト特性による垂直型・水平型 AGV 搬送システムの有効性の評価</b>	<b>87</b>
5.1	はじめに . . . . .	88
5.2	垂直型および水平型 AGV 搬送システムの設計パラメータ . . . . .	89
5.3	設計条件 . . . . .	90
5.4	コストパフォーマンスによる有効性の評価 . . . . .	92
5.4.1	コストモデル . . . . .	92
5.4.2	有効性の比較・評価 . . . . .	93
5.5	設計パラメータの影響解析 . . . . .	96
5.6	おわりに . . . . .	99
<b>第 6 章</b>	<b>高効率運用法を考慮した AGV 搬送システムの設計</b>	<b>101</b>
6.1	はじめに . . . . .	102
6.2	自動コンテナターミナルにおける AGV 搬送システム . . . . .	103
6.2.1	レイアウト設定 . . . . .	103
6.2.2	問題設定 . . . . .	104
6.2.3	設計条件 . . . . .	104
6.2.4	機器の作業仕様 . . . . .	105
6.3	アプローチ . . . . .	106
6.4	各作業機器間での協調行動則 . . . . .	107
6.4.1	行動則のフレームワーク . . . . .	107

6.4.2	行動則モデル	108
6.5	コンテナ蔵置スケジューリング	114
6.5.1	蔵置スケジューリングのフレームワーク	114
6.5.2	ランダム蔵置	114
6.5.3	蔵置スケジューリングを適用したコンテナ搬送・蔵置法	114
6.6	コンテナ搬送計画	117
6.6.1	搬送計画のフレームワーク	117
6.6.2	ランダム搬送	117
6.6.3	均等搬送	117
6.6.4	埠頭側加重搬送	118
6.7	システム設計	120
6.7.1	設計手順	120
6.7.2	運用モデルによる作業効率の評価	121
6.7.3	高効率運用法についての考察	123
6.7.4	コンテナ搬送計画の有効性	126
6.8	おわりに	129
<b>第7章</b>	<b>既存の搬送システムに対する改善設計</b>	<b>131</b>
7.1	はじめに	132
7.2	チャレンジングポイント	133
7.3	改善設計のための再設計支援方法論	136
7.3.1	待ち行列ネットワーク理論を適用した搬送システムの定式化	136
7.3.2	改善設計のための再設計支援アルゴリズム	138
7.4	ロジックツリーによる影響分析と改善設計案	141
7.5	実搬送システム（事例研究）	143
7.5.1	システム設定	143
7.5.2	搬送シミュレータ	144
7.5.3	搬送手順	145
7.5.4	搬送システムのモデル化	146
7.6	改善設計	149
7.6.1	再設計手順	149

---

7.6.2	システム解析 . . . . .	149
7.6.3	設計政策 . . . . .	149
7.6.4	双方向型・単方向型搬送経路（設計政策(1)と(2)）を適用 した改善設計 . . . . .	154
7.6.5	さまざまな要求仕様に対する再設計 . . . . .	156
7.7	バランスिंगの考慮 . . . . .	158
7.8	おわりに . . . . .	161
<b>第8章</b>	<b>結論と今後の課題</b>	<b>163</b>
8.1	結論 . . . . .	164
8.2	今後の展望 . . . . .	168
	論文用語説明	171
	謝辞	175
	参考文献	179
	研究業績	187



# 第1章 序論

---

1.1	研究の背景	2
1.1.1	港湾物流システム	2
1.1.2	本論文で対象とする港湾物流システム	3
1.1.3	自動搬送システムの設計問題	4
1.1.4	設計要求	6
1.1.5	搬送システム内に生じるボトルネック	9
1.2	港湾コンテナターミナルシステム	10
1.2.1	港湾コンテナターミナルにおける AGV 搬送システム	10
1.2.2	AGV 搬送システム内で稼動する作業機器	12
1.3	設計対象となる AGV 搬送システム	16
1.4	関連研究	18
1.4.1	搬送システムの設計方法論	18
1.4.2	レイアウト特性による有効性の評価	20
1.4.3	搬送システムの運用方法論	21
1.4.4	改善設計支援方法論	22
1.5	研究目的	24
1.6	本論文の構成	27

---

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 港湾物流システム

我が国企業の競争力は、今日まで港湾を中核とする物流システムに支えられてきた。しかしながら、近年、近隣アジア諸港がハブ港湾として躍進しており（Fig. 1.1 参照）、我が国のコンテナ港湾の相対的な地位は低下してきている [CDIT 2003]。Fig. 1.1 における縦軸の TEU とは、“Twenty-foot Equivalent Unit” のことで、20 フィートコンテナ換算のコンテナ取扱い個数の単位<sup>\*1</sup>のことを意味する。

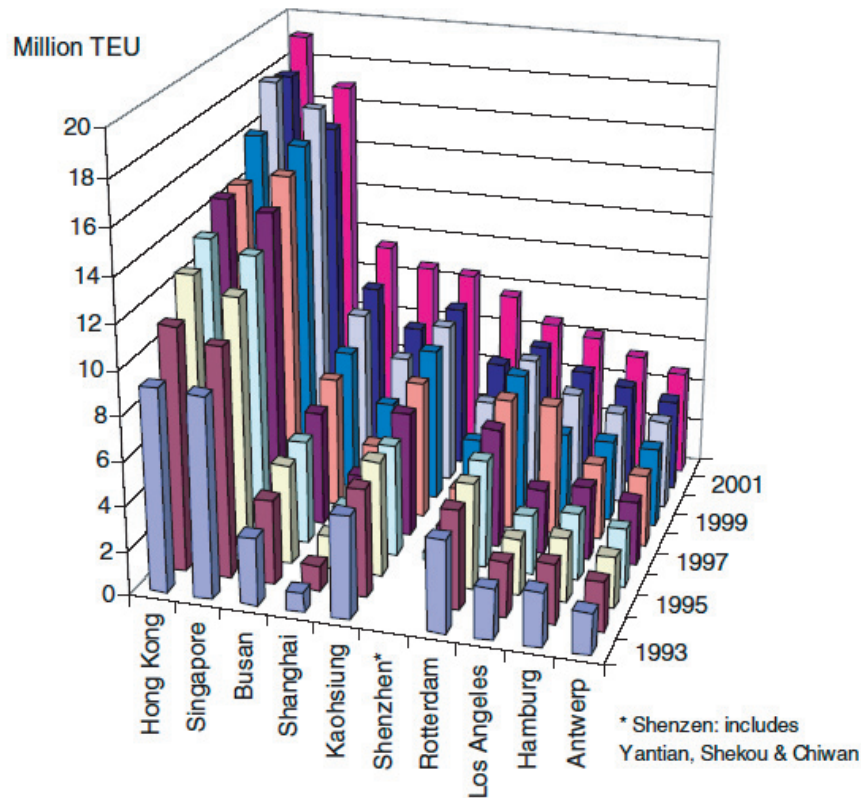


Fig. 1.1 1993～2002 年における世界のコンテナターミナルトップ 10  
（[Steenken 2004] より転載）

この理由として、国際定期海上輸送の主流となっているコンテナ輸送において、

<sup>\*1</sup> [TEU] = 1 個のコンテナと考えても差支えない。

コンテナ船の運航管理会社は、経済性を求めて大型船を投入するとともに、寄航する港を絞り込む傾向にあるといったことがあげられる。

コンテナ取扱量の上位を占める他のアジア諸国における多くの港湾では、安価な人件費などにより、有人によるコンテナ物流システムの操業が行われている。また、欧米においても、自動化が実現されている港湾は数が少ない。一方、このようなコンテナ取扱量の飛躍的な増大に対して、高価な人件費、24時間操業、などといった観点より、先進国の港湾物流における荷役・搬送システムの自動化が求められており [Günther 2005]、我が国においても最先端の自動コンテナターミナルの実現に向けた検討が必要となっている。

### 1.1.2 本論文で対象とする港湾物流システム

コンテナは、他の港湾においてコンテナ船へと荷積みされ、海上輸送される。そして、コンテナ船が目的ターミナルへ到着すると、輸送されてきたコンテナはそれぞれ所定の場所において、ターミナル内にて稼動する荷役・搬送・蔵置機器群により処理される。その後、トラックや鉄道などの輸送手段により国内におけるさまざまな目的地へと搬送されていく。ここで、本論文において題材とする荷役・搬送システムを明確にするため、Fig. 1.2 に対象となるコンテナ物流システムの概要を示す。

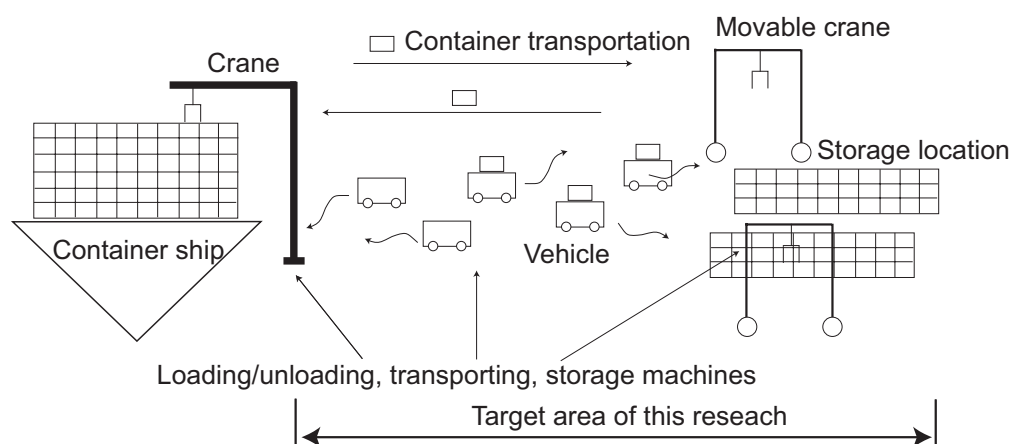


Fig. 1.2 本論文で扱う港湾物流におけるコンテナ搬送（搬入）の様子

コンテナ物流を大域的な視野でとらえた場合、港湾コンテナターミナル以外に

も、陸側におけるトラックとの作業も重要な課題となってくる。そのため、ターミナルに積み込まれているコンテナの出し入れをしやすくするため、夜間に横もちと呼ばれるコンテナの組替え作業などが行われている。また、コンテナ船の港への停泊時間も定められているため、船に積み込まれているコンテナは、時間内にすべて運び出されなくてはならない。これらのことから、本論文では、この港湾コンテナターミナルでの作業の効率化、すなわち高効率港湾コンテナターミナルの実現を目指す。その際、上述したコンテナ物流のうち、Fig. 1.2 の示すターミナル内において、コンテナ船から所定の蔵置場所までのコンテナの取扱いに焦点を絞る。一方、コンテナを他の港湾へ搬出する作業に関しては、上述したコンテナ物流の逆の作業がなされる。Fig. 1.2 にも示すように、ターミナル内においては、コンテナ蔵置場所からコンテナ船へのコンテナの流れがこの搬出作業に該当する。そこで本論文では、これら搬入・搬出作業は、ターミナル内においてそれぞれ逆の作業を行うものと設定し、それらのうち、コンテナの搬入作業のみを扱う。ここで、コンテナターミナル～陸地でのコンテナの搬入・搬出作業ならびにターミナル内での横もち作業に関しては、本論文において研究の対象としないものとする。なお本論文では、Fig. 1.2 において示されている目的蔵置場所の 1 つの山のことを以後“1 ロケーション”と呼ぶこととする。

### 1.1.3 自動搬送システムの設計問題

Fig. 1.2 に示した通り、本論文で扱う港湾物流システムは大規模搬送システムの 1 つであり、当該システム内にはコンテナ貨物の荷役・搬送・蔵置を行うための多種多様な作業機器群が、それぞれ自律して作業を行っている。そのため、当該搬送システムを設計対象にした際には、以下の設計問題（項目 (1)～(5)）に対する設計方法論の確立が必要となる。

- (1) コンテナの搬入・搬出場所設計
- (2) 作業機器のハードウェア設計
- (3) 搬送システムのレイアウト設計
- (4) 作業機器の投入台数設計
- (5) 作業機器・搬送システムの運用法の設計



(1)のコンテナの搬入・搬出場所設計とは、コンテナの海からターミナルへの荷役場所と、コンテナをターミナルから陸地へと輸送する際の受け渡し場所、すなわち、ターミナルにおけるコンテナの入口と出口の場所を設計する問題のことである。(2)のハードウェア設計とは、搬送システム内で作業を行う個々の機器の高機能化へ向けた設計問題のことである。(3)の搬送システムのレイアウト設計とは、問題(1)に対して設計されたターミナル内の入口から出口までをコンテナが搬送される際、搬送経路あるいはロケーション群の配置の大枠を選定あるいは設計する問題のことである。本設計問題をさらに細分化すると、搬送システムを一から構築していく場合と、すでに操業している搬送システムに対する改善あるいは改修設計を行う場合とで、それぞれ、(3-a)いくつかのレイアウトの候補の中から効果的なものを選択する問題、(3-b)すでに存在するレイアウトあるいは経路に対して付加的に経路を設計する問題、になる。(4)の作業機器の投入台数設計とは、搬送システムに課せられる要求仕様を満たすため、それに応じた機器の投入台数を適切に設計する問題のことである。(5)の作業機器・搬送システムの運用法の設計とは、システムの高効率化を図るため、いかにして搬送システム内にて稼動する機器群を作業させるかといった問題のことである。

ここで、上述の設計問題(3)のところでも触れたように、港湾コンテナターミナルに自動搬送システムを導入する際、(I)ターミナルのスペースに一から搬送システムを設計していく場合、と、(II)すでに操業している搬送システムに対して、要求仕様の変更にともない、改善あるいは改修設計を行う場合、とで、それぞれ研究としてのアプローチが異なってくる。この理由として、1.ターミナルのスペースに一から搬送システムを設計する(I)の場合、ある要求仕様を想定した上で、対象としているさまざまな設計パラメータを導出することができる、2.このとき、すでに存在している搬送システムの制約を受けることがない、などといったことがある。すなわち、(I)の場合では可能な“要求仕様に対する搬送システム抜本的な設計”が、(II)では困難となり、そのため、既存の搬送システムに対しては、可能な限り部分的な改変により、要求仕様を満たすための搬送システムを構築しなくてはならないといった問題が存在する。本論文では、これら設計アプローチの違いに対して、(I)と(II)の場合で、それぞれ設計(I)ならびに設計(II)と記述する。

本論文では、設計(I)に対するアプローチとして、上述した港湾物流に存在する(1)~(5)の設計問題のうち、以下に示す3つ((3-a),(4),(5))自動搬送システムの設計として扱う。

- 搬送システムに課せられる要求仕様に対して、投入される荷役・搬送・蔵置

機器群の投入台数ならびにそれらが作業を行う際に必要となる退避経路<sup>\*2</sup>を適切に決定する。

- 要求仕様に対して、より効率良く搬送システムとして構築が可能なレイアウトを選択する。
- 機器群が搬送システム内にて効率に作業を遂行するための運用モデルについて決定する。

一方、設計 (II) に対しては、要求仕様の変更にとまなう既存の搬送システムの改善設計というアプローチを採る。そのため、搬送システムのレイアウト、作業機器のハードウェアスペック、運用法など、上記した諸問題 (1)~(5) のうち、設計問題 (3-b), (4), (5) について考慮する必要がある。そして、

- 設計案を網羅的に列挙し、その中で、実際の制約を考慮し、設計問題 (3-b), (4), (5) に対してどの設計案が既存の搬送システムを扱う上で妥当か評価する。
- 提案する設計支援方法論の有効性を検証するため、実搬送システムに適用し、妥当性の確認された改善設計案に基づいて、設計政策を提示する。

なお、港湾コンテナターミナルにおいて、コンテナ船の停泊時間は、作業を行う上で港湾管理者が厳守しなくてはならないもっとも重要な項目である。そのため、港湾物流に自動搬送システムを設計する際には、入港してくるコンテナ船の停泊時間および当該コンテナ船に積まれているコンテナの総数を常に考慮しなくてはならず、“いかにしてある一定量のコンテナ群を、規定の時間内に運びきるか” といった目的のもと設計を行う。

#### 1.1.4 設計要求

第 1.1.3 項で述べた自動搬送システムの設計問題に対し、設計 (I)、すなわち港湾コンテナターミナルのスペースに一から自動搬送システムを導入しようとした場合、実際の設計現場では、作業経路や機器の配置設計、投入台数設計、運用モデルの設計、などといった各設計対象について、さまざまな作業仕様を仮決めし、

<sup>\*2</sup>退避経路に関しては、第 2 章にて詳細な説明を行う。

それらに対する設計解を算出し、それに基づいて作業仕様を再検討する、というサイクルを何度も繰返して導解することが多い。このことは、設計アルゴリズムの高速性、すなわち、現実的な問題規模に対して、数時間程度での導解が望ましいことを意味する。またこのとき、同時に正確性、すなわち、搬送システムの挙動を正確に把握している必要がある。

一方、設計 (II)、すなわち既存の搬送システムに対しては、要求仕様の変更に対して、速やかな再設計というものが求められる。ただし、すでにシステムとしてのキャパシティが設計されてしまっているため、作業機器の投入台数のみを設計しては、場合によっては機器同士による作業遅延（ボトルネック）が生じてしまう。そのような場合、ボトルネックを迅速に検出し、それに対する改善設計案の提示を行う必要がある。さらには、非効率な搬送システムを構築しないようにするための指標として、システムのバランスを考慮する必要がある。

以上のことから、第 1.1.3 項で述べた設計問題には、設計 (I) と設計 (II) の場合で、それぞれ以下に示す設計要求 ((A)~(C) と (A')~(C')) がある。

#### 設計 (I) に対する設計要求

- (A) 搬送システムの最適設計
- (B) レイアウト特性による有効性の評価
- (C) 搬送システムの運用設計

#### 設計 (II) に対する設計要求

- (A') 搬送システムの最適設計
- (B') ボトルネックの検出，改善設計案の網羅的な提示
- (C') 搬送システムのバランスの考慮

設計要求 (A) および (A') に関して、本論文では多種多様な機器が作業を行う自動搬送システムの設計を行う。したがって本設計問題は、与えられた要求仕様に対して、これら多種多様な設計対象をそれぞれ最適値に決定、すなわち、数種類の投入機器の台数を最適に設計する必要があり、これは組合せ最適化問題となる。そのため、要求仕様に対する組合せ最適化問題を可能な限り迅速に解くことが求

められている。さらに、設計した搬送システムの性能や機器の投入台数により刻々と変化するそれらの搬送システム内の挙動などを数理的に解析する必要がある。これは、設計段階において、想定し得るありとあらゆる要求仕様に対して、最適な設計パラメータを速やかに算出し、それに対する検討を厳密に行うためである。

設計要求 (B) に関して、作業機器の組合せやシステムのレイアウトの違いによっては複数の搬送システムが候補として考えられる場合がある。このような場合、それぞれ個別に研究・開発が進められてきたレイアウトに対して、それらを実際に搬送システムとして実装し、要求仕様に対する相対的な評価をレイアウト特性などに基づき行う必要がある。さらに、設計要求 (C) として搬送システムの運用方法を考慮しなくてはならない。これは、いかにして搬送システムを効率良く稼働させるかといった要求のことである。これまで、膨大な設計時間ならびにコストなどといった理由から、実際の設計現場では、この運用方法の設計と、機器投入台数設計は別々になされてきた。しかしながら、本来、これら 2 つの設計問題は同時に考慮されなくてはならない。

一方、設計要求 (B') に関して、要求仕様の変更にともない、作業機器の投入台数を増やした際、システム内にボトルネック、すなわち、稼働している機器群による作業遅延が生じてしまう可能性がある。その結果、単位時間あたりのコンテナ搬送量であるシステムのスループット<sup>\*3</sup>が悪化してしまう場合がある。そのため、システム内に生じているボトルネックを速やかに検出する必要がある [Blackstone 2001]。そして、ボトルネック箇所が検出されたら、それを解消するための改善設計案を可能な限り網羅的に提示する必要がある。これにより現場の設計者は、これら提示された改善設計案の中から、状況に応じて妥当なものを設計政策として選ぶことが可能となる。また、すでに存在している搬送システムには、最初に設計された段階で、システムとしてのキャパシティが決まってしまっている。そのため、このキャパシティ以下のシステムを構築すると、システムを十分に使いきれていないこととなり、一方で、キャパシティ以上のシステムを構築すると、オーバースペックとなってしまう、非効率なシステムとなってしまう。そこで、設計要求 (C') として、搬送システムのバランスを考慮し、搬送システムに対して妥当な要求仕様ならびにそのときの機器投入台数を明らかにする。以上、設計 (II) に対する設計要求 (A')~(C') をまとめると、要求仕様の変更にともない、既存の搬送システムを改善設計するための、設計支援方法論が必要であることがわかる。

---

<sup>\*3</sup>システムスループット、要求仕様の関係の詳細については第 2.5 節で述べることとする。

### 1.1.5 搬送システム内に生じるボトルネック

搬送システム内で作業を遂行している各機器あるいは環境のうち、もっとも作業負荷のかかっているものを、本論文ではボトルネックと定義する。たとえば、高い要求仕様にもかかわらず、コンテナ搬送車を1台しか投入しなければ、これは当該コンテナ搬送車がボトルネックであることになる。なお、環境とは、機器が作業を行う場所のことで、本論文では主に移動経路の本数、長さ、などのことを意味している。したがって、環境（作業経路）により作業機器の渋滞やそれにともなう作業遅延が起きた場合、環境に作業負荷がかかっているものとみなす。

当該ボトルネックを測る指標としては、後述するシステムスループット、平均滞在台数、そして交通密度などがあり、設計 (I) では平均滞在台数と交通密度を、設計 (II) においては、スループットを用いる。これは、さまざまな作業機器を設計対象にしている設計 (I) とは異なり、設計 (II) では既存の搬送システムの制約により、設計可能な対象が制限されてしまうためである。

## 1.2 港湾コンテナターミナルシステム

### 1.2.1 港湾コンテナターミナルにおける AGV 搬送システム

第 1.1.1 項で述べた通り，近年の港湾物流におけるコンテナ貨物の取扱量は，アジアを中心に世界規模で年々増加傾向にある [Steenken 2004]．このような傾向から，欧米諸国では港湾コンテナターミナルの自動化が進められている [Zhang 2004]．その中でも，無人搬送車である AGV (Automated Guided Vehicle) を主要な作業機器とした AGV 搬送システムが注目されている [Ioannou 2001]．AGV システムはすでに，工場などの生産現場に投入され，それらに関する研究もさまざまな視点からなされている（たとえば [高橋 2000] など）．



Fig. 1.3 スペインバルセロナ港における自動コンテナターミナル

Fig. 1.3 にスペインのバルセロナ港における自動コンテナターミナルを示す．Fig. 1.3 においても，Fig. 1.2 と同様に，埠頭においてクレーンにより荷役されたコンテナは，それぞれコンテナ搬送車により目的ロケーションまで搬送され，移動式クレーンによって蔵置されている．これらのことから，港湾自動コンテナターミナルには埠頭クレーン，コンテナ搬送車，ならびに移動式クレーンといった多様な機器群が投入され，コンテナの搬入・搬出作業を行っていることがわかる．



Fig. 1.4 埠頭側におけるコンテナ船～QCCでのコンテナ荷役作業  
([物流博物館]にて撮影)

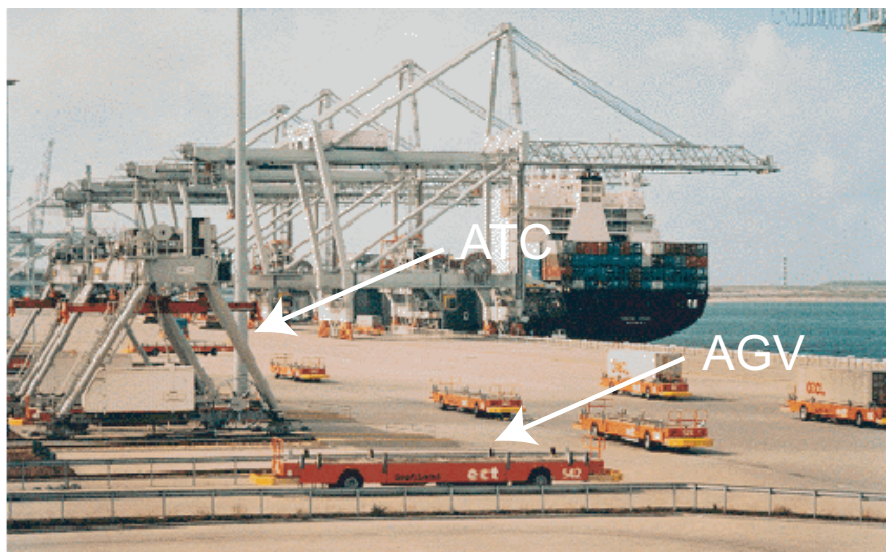


Fig. 1.5 陸側におけるAGV～ATCでのコンテナ搬送・蔵置作業  
([Ioannou 2001]より転載)

Fig. 1.4 は港湾コンテナターミナルの埠頭側におけるコンテナの荷役作業の様子を示している。コンテナ船により運び込まれたコンテナは、埠頭コンテナクレーンである QCC (Quay Container Crane) により荷揚げされ、AGV へ積み込まれる。また、コンテナ搬出の際には、AGV により搬送されてきたコンテナを QCC によりコンテナ船へと荷積みする。Fig. 1.5 は港湾コンテナターミナルの陸側に

おけるコンテナの搬送および蔵置作業の様子を示している。AGV へ荷積みされたコンテナは所定のロケーションへと搬送され、自動門型式クレーンである ATC (Automated Transfer Crane) により蔵置される。コンテナを埠頭より搬出する際には、その逆の作業がなされている。

以上、港湾コンテナターミナルにおける AGV 搬送システムでは、多種多様な機器群が、コンテナの搬入・搬出作業のため、それぞれが異なった作業を行っていることがわかる。

### 1.2.2 AGV 搬送システム内で稼動する作業機器

Fig. 1.6 ~ Fig. 1.10 は、港湾物流システムにおける AGV 搬送システムを構成する作業機器を示している。これらすべての作業機器は、それ自体が自動化に向けて研究・開発がなされており、それぞれ与えられた作業に対して自律分散的に行動し、その結果、ボトムアップ的に大域的な自動搬送システムを形成している。このことから、本搬送システムをマルチエージェント系と考えることもできるが、本論文においては、それらエージェント群のことを作業機器と呼ぶこととする。

Fig. 1.6 は無人搬送車の AGV を示している。AGV は、埠頭～陸側でのコンテナ搬送作業を受けもつ。生産工場などでは小型の無人搬送車が AGV として用いられている。一方、港湾コンテナターミナルにおいては、AGV は稼動するシステム環境の複雑さに応じて、有人式・無人式としてそれぞれ用いられている。日本においては、愛媛県東予港湾（日新製鋼東予工場）において、無人式 AGV を適用した AGV 搬送システムの完全自動化が実現されている例がある。

Fig. 1.7 は埠頭クレーンである QCC を示している。QCC は、それぞれ岸壁のサイズに見合った台数が投入され、ターミナル内の埠頭側において、入港してきたコンテナ船に積まれたコンテナの荷役作業を受けもつ。Meersmans や Henesey らは、コンテナの取扱量に応じた QCC の投入台数設計問題、また、そのための岸壁あるいは埠頭のサイズ設計に関する研究を行っている [Meersmans 2001] [Henesey 2004]。しかしながら、現実の港湾コンテナターミナルにおいては、すでに埠頭に対して適切な岸壁のサイズが設計されてしまっていることが多く、また、入港してくるコンテナ船のサイズにも規格がある。そのため、それらに見合った台数が投入されている。

Fig. 1.8 は ATC の中で、鉄道車輪式の RMGC (Rail-Mounted Gantry Crane)





Fig. 1.6 無人搬送車：AGV (Automated Guided Vehicle)  
( [Mitsubishi 2004] より転載 )



Fig. 1.7 埠頭コンテナクレーン：QCC (Quay Container Crane)  
( [Mitsubishi 2004] より転載 )

\*4 と呼ばれる作業機器を示している。RMGCは、従来型のAGV搬送システムにお

---

\*4 RMGCの詳細については第2.2節に述べる。

いて導入されてきた。RMGC の特徴としては、鉄道車輪式であるため、コンテナを把持した状態で搬送することができる。一方、Fig. 1.9 は ATC の中で、ゴムタイヤ式の RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane) \*<sup>5</sup> と呼ばれる機器を示している。ゴムタイヤ式であるため、ハードウェア上の理由から、コンテナの把持搬送は不可能であるが、鉄道を敷く必要がなく、当該機器を適用することにより、柔軟な AGV 搬送システムを構築することが可能となる。



Fig. 1.8 鉄道車輪式クレーン：RMGC (Rail-Mounted Gantry Crane)  
( [Mitsubishi 2004] より転載 )

Fig. 1.10 は天井巻上げ式移動クレーンである OHC (Overhead Hoist Crane) を示している。OHC は第 7 章の、既存の搬送システムにおいて用いられている作業機器である。天井から吊下げられた当該機器は、主に倉庫などの屋内環境などにおいて用いられており、上方に巻上げ、コンテナを蔵置するロケーション上を自由に移動することが可能である。

\*<sup>5</sup>RTGC の詳細については 第 2.3 節に述べる。



Fig. 1.9 ゴムタイヤ式クレーン:RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane)  
( [Mitsubishi 2004] より転載 )



Fig. 1.10 天井巻上げ式移動クレーン :OHC ( Overhead Hoist Crane )  
( [不二工業株式会社] より転載 )

### 1.3 設計対象となる AGV 搬送システム

コンテナ船から荷揚げされたコンテナは、最終的にはターミナル内のいずれかの場所に蔵置されなくてはならないが、その中間の作業プロセスは以下に示す 2 種類に分類することができる。これは、Fig. 1.11 が示すように、AGV と ATC でいかにして作業を分担するかによって変わってくるためである。たとえば、(1) の場合、Fig. 1.11 において AGV はコンテナを搬送エリア内、すなわち埠頭側の QCC からコンテナ蔵置側の受け渡し位置まで搬送するだけで良く、コンテナ蔵置エリアでは ATC による搬送そして蔵置が行われる。一方、(2) の場合、Fig. 1.11 において AGV は埠頭側の QCC から、コンテナ蔵置エリア内の目的蔵置場所まで搬送し、後は ATC によりコンテナ蔵置のみが行われるような作業プロセスとなっている。

(1) 荷役位置 → 搬送エリア → 受け渡し位置 → 目的蔵置場所

(2) 荷役位置 → 搬送エリア → 目的蔵置場所

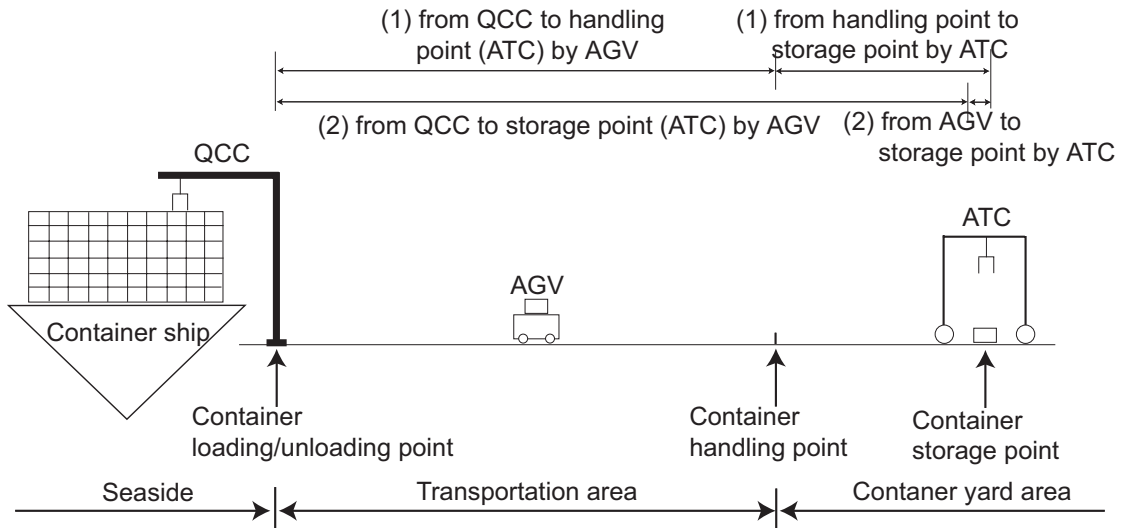


Fig. 1.11 港湾コンテナターミナルにおけるコンテナの扱われ方（荷揚げされたコンテナの、目的蔵置場所までの搬送プロセス）

ここで、世界における自動コンテナターミナルに注目すると、オランダのロッテルダム港では、本格的な自動搬送システムが導入されている。また、シンガポール港のパシール・パンジャンターミナルでは、自動化 OHBC (Over Head Bridge

Crane) が用いられている他, 将来的には AGV の導入が計画されている。この他, ドイツのハンブルグ港の自動コンテナターミナルでは, ATC と AGV を組合せた搬送システムが試験的に導入されている [CDIT 2003]。これらの AGV 搬送システムのレイアウトをまとめると Table 1.1 のようになる。Table 1.1 において, 垂直型と水平型の違いとは, コンテナ取扱われ方の違いのことを意味している。コンテナ取り扱われ方の違いとは, コンテナの船から目的蔵置位置までの中間プロセス (1) および (2) のことである。これら作業プロセスの違いにより, 蔵置エリア内におけるロケーション群の配置のされ方が異なってくる。そして, この蔵置側のレイアウトの違いにより, 各機器が行うべき作業も異なってくる\*<sup>6</sup>。また, 各機器にとって必要とされる作業が異なることから, それに応じて投入される作業機器の種類も変わってくる。現実のターミナルにおけるシステムレイアウトは, 第 1.1.3 項で挙げた設計問題 (I), すなわち, コンテナの出入り口を考慮し, 垂直型と水平型とに明確に分類することが困難な場合も存在しうる。しかし, そのような場合においても, 中間プロセスにおける作業形態の基本は同じものとなる。

Table 1.1 世界の自動コンテナターミナルにおける AGV 搬送システムのレイアウト

港名	ロッテルダム港	ハンブルグ港	シンガポール港
システムレイアウト	垂直型	垂直型	水平型

Table 1.1 が示す各コンテナターミナルのレイアウトより, 自動化を実現あるいは目指しているコンテナターミナルは, この他にもあるが, 上述した作業形態より, それらのシステムレイアウトは, 垂直型と水平型に大別することができる。このことから, 港湾物流において, AGV を主たる作業機器として搬送システムを構築する際, 垂直型と水平型のレイアウトに焦点をしばれば十分であることがわかる。したがって本論文では, 設計 (I) の研究を行うにあたって, 垂直型と水平型の AGV 搬送システムを設計対象に, 第 6 章までの議論を進める。

\*<sup>6</sup>各 AGV 搬送システムの詳細については, 第 2 章にて説明する。

## 1.4 関連研究

### 1.4.1 搬送システムの設計方法論

第 1.1.4 項で述べた設計要求 (A) および (A') に対し、従来研究では以下のような方法論が提案されている。

- (1) 数理モデルを適用した設計方法論 (設計 (I))
- (2) シミュレーションに基づいた最適化手法 (simulation-based optimization methodology [Gosavi 2003]) (設計 (I))
- (3) 搬送システムの詳細な情報や作業機器群の仕様を実装した厳密な搬送シミュレータを適用した設計方法論 (設計 (II))

(1) の数理モデルを用いた設計方法論に関して、阿部らは石炭埠頭におけるベルトコンベア搬送システムに対して、開放型待ち行列モデルを適用した設計方法論の提案を行っている [Abe 1991 $\alpha$ ][Abe 1991 $\beta$ ]。しかしながら、開放型の待ち行列ネットワークモデルではシステムの大域的なモデル化は困難となり、システムの局所的な評価・解析しかすることができない。また、このような数理モデルのみを用いた設計方法論では、数理モデルと現実のシステム内における機器の挙動の差までを考慮することは困難となる。さらに、想定している搬送システムがベルトコンベア式であるため、本論文で扱うような搬送システムは考慮されていない。

(2) のシミュレーションに基づいた最適化手法に関して、繰返し順問題解法による設計方法論の提案が行われている。Chiba らは遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を適用した統合的な AGV 搬送システムの設計手法の提案を行っている [Chiba 2002]。ここで、繰返し順問題解法とは、ある入力 (原因) から出力 (結果, 観測) を繰返し算出していき、ある評価関数の下、徐々に解を最適値へと近づける解法のことである。しかしながら、繰返し順問題解法による解探索手法では、最適解導出までに膨大な時間が必要となる。さらに、この設計方法論では、設計パラメータを変更した際のシステム性能や機器の挙動などを数理的に解析することは容易でない。Lee や Ventura らは、動的計画法 (DP: Dynamic Programming) を用いた設計方法論を提案し、この方法論を適用することにより、シングルループにより構成された搬送経路上における、AGV の待機所の最適設計を行っている [Lee 2001][Ventura 2003]。しかしながら、動的計画法に基づいた方法論では、シ

シングループといった単純なレイアウトにより構成されたシステムには適用できても、本論文で扱おうとしているような複雑かつ大規模な AGV 搬送システムに対しては、膨大な計算量が必要となる。Liu や Jula らは、リニアモータコンベアシステムや AGV システムを対象にした搬送システムの構築を行っている [Liu 2000] [Jula 2000]。ここでは、各搬送システム内で稼動しているシャトルおよび AGV の投入台数のみが設計パラメータとされている。単一の設計パラメータの最適解導出のため、これらの研究では MADM ( Multiple Attribute Decision Making ) 法が用いられている。しかしながら、本設計方法論を、複数の設計パラメータを同時に最適化しなくてはならないような組合せ最適化問題へ適用することは困難である。

(3) の厳密なシミュレータを用いる設計方法論に関して、これは主に設計要求 (A')、すなわち、設計 (II) に対して適用されている方法論である。既存の AGV 搬送システムに対し、たとえば、より高い要求を満たすために、港湾管理者側より作業機器である AGV などの追加投入といった要望がある。しかしながら、システムの環境スペックに対して、必要以上に AGV を投入した場合、そのシステムはオーバースペックとなり、システム内にボトルネックが生じてしまうことがある。しかしながら、従来研究においては、事前の厳密な評価ならびに解析などは行われておらず、シミュレーション実験や AGV 投入後の定点観測により、ボトルネック箇所やシステムスループットの評価ならびに解析、などといったことがなされてきた。イタリアの Tyrrherian ( Fig. 1.12 参照 ) やオランダの Rotterdam では、すでに港湾物流において実際に稼動している搬送システムを事例研究に、評価および解析のためのシミュレーションモデルが提案されている [Gambardella 1998] [Veeke 2002]。船橋らは、自動コンテナターミナルの効率的な運用を目的とし、機器運行管理に注目し、実コンテナヤードの動作・運用を表現可能で、運用ルールの決定や、設計条件の事前検証用ツールとして活用できるヤード運行管理シミュレータ ( Fig. 1.13 参照 ) を開発している [船橋 2003]。しかしながら、このような試行錯誤的なアプローチでは、再設計に至るまでの時間およびコストがかかってしまう。また、各機器の行動パターン、搬送ルール、そして日々の搬送スケジュールなど、詳細な情報やシステムの仕様をシミュレーションモデルに実装するためには、膨大な時間を必要とする。さらに、一度構築されたシミュレーションモデルを他の搬送システムに応用するためには、モデルの再構築を行う必要があり、困難なものとなる [Simchi-Levi 2000]。

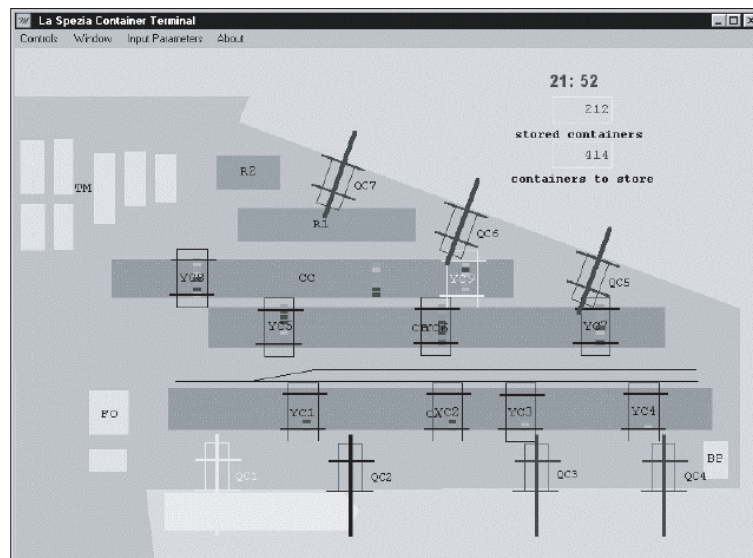


Fig. 1.12 港湾ターミナルのシミュレーションツール  
 ([Gambardella 1998] より転載)

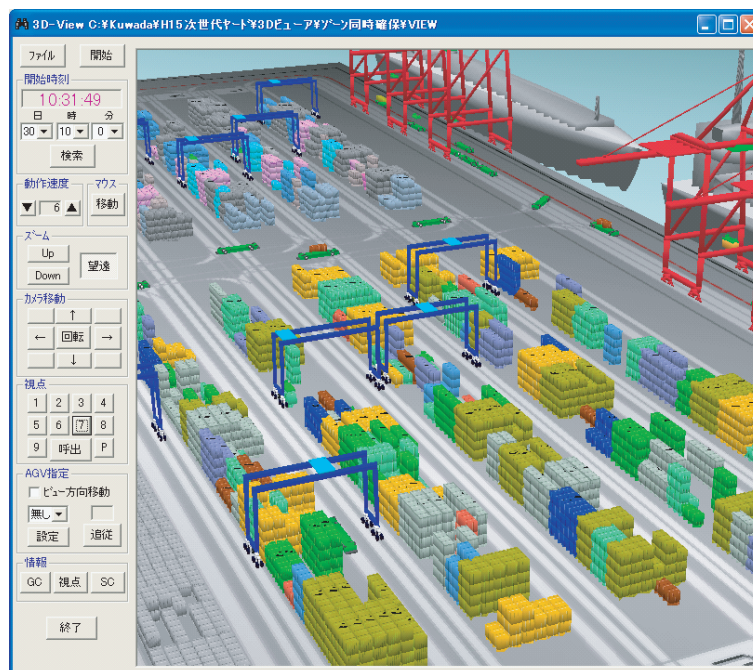


Fig. 1.13 ヤード機器運行管理シミュレータ ([船橋 2003] より転載)

#### 1.4.2 レイアウト特性による有効性の評価

第 1.1.4 項で述べた設計要求(B)に対し、より効率的なシステムを見極めるため、設計パラメータに基づいて構築されたシステムの比較および評価を行うなどといっ



た研究がなされている。

Liuらは、さまざまな搬送機器およびレイアウトを考慮に入れ、搬送システムを構築し、それらの性能評価を構築コストに基づき行っている [Liu 2002]。しかしながら、システムを構築するための各設計パラメータはすべて天下りの的に決定されているため、設計された搬送システムの最適性についての議論はなされていない。また、天下り的かつ試行錯誤的に設計パラメータを決定するような設計方法論では、設計段階に多大な時間が必要とされるため、特定の要求仕様に対してのみ、設計されたシステムの比較ならびに評価が行われている。ここで、天下り的なパラメータの設計とは、たとえば、設計パラメータを現場設計者の熟練度などに依存するかたちで適当に決定するアプローチのことを意味している。

港湾自動コンテナターミナルにおいてもっとも良く用いられている水平型と垂直型のAGV搬送システムの比較を行っている研究も存在する（たとえば [Liu 2004] など）。ここでは、比較を行うにあたって、搬送終了までに要した時間が比較されている。しかしながら、[Liu 2002] 同様、設計パラメータ群は天下り的に与えられており、要求仕様に対する搬送システムの最適性といったことは議論されていない。

以上、これら設計パラメータを天下り的に決定する方法論では設計された搬送システムの、要求仕様に対する最適性を考慮することができず、また、設計段階において人の手による試行錯誤が必要とされるため、結果として膨大な時間を必要としてしまうことがある。そのため、さまざまな要求仕様に対して搬送システムの最適性が考慮できるような設計を行う必要がある。

### 1.4.3 搬送システムの運用方法論

第 1.1.4 項で述べた設計要求 (C) に関する研究として、港湾コンテナターミナルの自動化に向け、ターミナル内で稼働している搬送システムの運用法に関する研究が行われている。その中で、Rebollo や Thurston らは、マルチエージェントを適用するための分散エージェントシステムアーキテクチャの提案を行っている [Rebollo 2000] [Thurston 2002]。しかしながらこれらの研究では、均質な機器群による搬送システムを想定しているため、それぞれの機器に対する行動ルールの設計は行われているものの、機器間での協調行動に関する議論などはなされていない。

自動コンテナターミナルにおける搬送システムの運用法に関する従来研究とし

て、さまざまな運用パラメータを決定することにより作業シナリオを生成し、これらをイベントベースシミュレーションにより評価するといったことがなされている [Hartmann 2004]。しかしながら、Fig. 1.4 が示すように、主に埠頭側（コンテナ船～埠頭）でのコンテナ荷役作業のシナリオに注目しており、陸側でのコンテナ搬送および蔵置問題に関しては、コンテナの搬送先の決定を行うのみにとどまっている。

均質なロボットシステムを扱った研究として、吉村らは、群ロボットを用いた多数物体の 2 点間における繰返し搬送計画を行っている [吉村 1998]。しかしながら、多点間搬送に関する議論はなされていない。太田らは、ベルトコンベア搭載型 AGV の協調動作による物体搬送システムの構築を行っている [太田 2001]。これら従来研究では、すべて同一種の機器群による物体の搬送および受け渡し動作などといった協調行動に注目している。しかしながら本論文では、多種多様な機器群が作業を行う搬送システムを対象としているため、機器間での仕様が異なり、そのため、すべての機器に対して同様の行動則を設計しただけでは効率的な協調行動を実現することは困難となる。

自動コンテナターミナルにおけるコンテナ蔵置スケジューリングに関する従来研究では、AGV に対して、何らかのディスパッチングルールに基づき蔵置指令を与え、それらの性能評価を行っている [Gunow 2004] [Liu 2003]。しかしながらこれらの研究では、作業機器として AGV のみが用いられているため、蔵置エリアにおける多種多様な機器間での協調行動などは考慮されていない。そのため、任意に生成された搬送・蔵置指令に対し、これらをどの AGV へ割当てるといったことのみが議論されている。すなわち、各ロケーションに対する搬送作業の順番は考慮されているが、ロケーション上における蔵置作業の順番を考慮した搬送・蔵置指令の割当てに関しては議論されていない。

コンテナ搬送計画に関して、どのロケーション上のどの蔵置位置にどの程度のコンテナを搬送したらもっとも作業効率が良くなるのかということについて、あらかじめ最適搬送計画を行うことは可能である [Nishi 2005]。しかしながら、自動コンテナターミナルのような大規模な搬送システムにおいては、最適な搬送計画を行うために膨大な計算時間を必要とし、さらに、最適搬送計画を行ったとしても実際のシステム内において機器群が計画通りに作業を遂行することは極めて困難である。

#### 1.4.4 改善設計支援方法論

第 1.1.4 項で述べた設計要求 (B') に関して、実際の設計現場では、第 1.4.1 項にも述べた通り、一般的にシミュレーションや定点観測によるボトルネックの検出がなされてきた。そして、検出されたボトルネック箇所は、現場の熟練設計者によるさまざまなシステムパラメータ（たとえば経路長や走行速度など）の試行錯誤的な変更、すなわち天下りのアプローチにより、解消されてきた。しかしながら、前述のように、このような試行錯誤的なボトルネックの検出ならびに解消法では、設計段階に膨大な時間がかかってしまう。

この問題に対し、Roser らは、ボトルネック検出の重要性に注目し、AGV システムにおけるいくつかのボトルネック検出法の比較を行っている [Roser 2003]。ここでは、AGV のシステム内における利用率、作業箇所での待ち時間、そして変動ボトルネック検出法 (shifting bottleneck detection method) に基づいてそれぞれボトルネックを検出し、それらの手法の有効性の評価が行われている。しかしながら、システムの数理的なモデル化などはなされていない。この他にも、利用率やサイクルタイムに基づいてボトルネックを検出する手法が提案されているが、これらの研究の多くはシミュレーション結果から得られたデータを基にボトルネックが検出されており、数理的なモデル化がなされている例は少ない。また、ボトルネックの検出後、それに対する網羅的な設計案ならびに設計政策の提示などはなされていないため、その適用範囲は限られたものとなっている。

設計要求 (C') に関しても、搬送システムのキャパシティに見合った要求仕様および作業機器の投入台数が適切に算出されなくてはならない。しかしながら、現状ではそのようなことはなされておらず、船会社の都合により要求仕様が、そして港湾管理者の都合により投入台数が定められてきた。そのため、作業機器によるボトルネックが生じた場合、再設計後の搬送システムにおいて、作業効率の改善がなされていないなどといった問題が生じる場合が存在する。

この問題に対して、Delp らは生産システムにおけるシステムスループットとサイクルタイムがトレードオフの関係にあることに注目し、さまざまな作業シナリオに対して、システムのもっとも効率的なキャパシティを見出す研究を行っている [Delp 2003]。ただし、この研究では、作業シナリオに対するシステムの効率的なキャパシティにのみ焦点を当てており、システム内で稼働している生産機器の投入台数などといったことについては議論がなされていない。

## 1.5 研究目的

以上，本論文では，港湾物流における AGV 搬送システムに対して，第 1.1.3 項で述べた設計 (I) ならびに設計 (II) に対して，最適設計方法論の提案を行う．そして，要求仕様に対する高速な設計パラメータの算出を行い，提案する設計方法論の妥当性について評価する．

設計 (I) に対して，設計の初期段階で運用までを考慮すると，評価する要素が膨大になってしまい，設計方法論の妥当性を評価することが困難となってしまう．そのため，機器間における協調行動則，コンテナの搬送指令の割当て（ディスパッチングルール），などといった AGV 搬送システムの運用法に関しては，もっとも単純なものを天下一的<sup>\*</sup>に与え，その下で提案設計方法論による機器の投入台数設計を行う<sup>\*7</sup>．また，垂直型および水平型 AGV 搬送システムを対象に，シンプルな運用法の下，さまざまな要求仕様に対して設計を行う．そして，構築コストによりどちらがより有効な AGV 搬送システムであるかを評価する．有効なシステムレイアウトが選定されたら，これまで天下一的に与えてきた運用法についても考慮し，対象となる AGV 搬送システムにおける台数・運用法の設計を同時に行う．

第 1.4.1 項より，AGV 搬送システムの最適設計を行うため，以下の設計課題を考慮しなければならない．

- 多種多様な機器群が作業を行っている搬送システムの数理的なモデル化および大域的なシステムの設計
- シミュレーションベースのみの手法に比べて組合せ最適解を高速に算出できる方法論の提案
- 設計システムの性能評価，および数理モデルと現実の搬送システム内における作業機器群の実際の挙動の差の考慮

Hax らは 2 層型のハイブリッドな設計方法論を生産在庫管理の分野において提案している [Hax 1984]．ここでは，設計プロセスにおいて，複雑なシステムをモデル化・定式化する際に，ある 1 つの数理モデルのみを適用するのではなく，2 つ，あるいはそれ以上のモデルを複合的，すなわちハイブリッドに組合せることの有効性が述べられている．ただし，複雑な数理モデルをハイブリッドに用いたとし

---

<sup>\*7</sup> “単純な運用法” の詳細については，第 4 章で説明することとする．

ても、システムの動的な挙動の変化を詳細に把握することは非常に困難な問題となる。そこで、本論文では、2つのアプローチをハイブリッドに用いることの有効性に着目し、数理モデルとして大規模計算機システム等の解析・設計に用いられている待ち行列ネットワーク理論を適用する。そして、シミュレーションベースによる手法とハイブリッドに融合させ、繰返し設計を行うことで、上述した設計課題を満たす設計方法論の提案を行う。

第 1.4.2 項より、港湾コンテナターミナルに AGV 搬送システムを構築する際、複数のレイアウトが候補として挙げられる場合がある。その場合、設計段階において、想定し得るさまざまな要求仕様に対して、それらレイアウトを実装した AGV 搬送システムの最適設計を行い、さらに、構築された AGV 搬送システムのコストパフォーマンスをそれぞれ相対的に評価する必要がある。そのため、まず、提案する設計方法論を適用し、各 AGV 搬送システムの設計パラメータの算出を行う。続いて、算出されたパラメータに基づき、AGV 搬送システムを構築した際の総合構築コストを算出し、これを他の AGV 搬送システムにおいても同様にして算出されたものと比較ならびに評価する。これらの過程を経ることにより、それぞれのレイアウトに基づいた AGV 搬送システムの、要求仕様に対するコストパフォーマンスを明確にする。さらに、総合構築コストにおける、各機器の投入コストが占める割合を考察することで、搬送システムを構築する際にもっとも影響力がある機器が何であるかを解析する。

第 1.4.3 項より、本論文においても、港湾自動コンテナターミナル内で稼動する荷役・搬送・蔵置機械群をそれぞれ作業機器群としてとらえ、これら多種多様な機器群による高効率な自動搬送システムを構築する。その際、要求仕様に対する機器の投入台数とそれらに対する運用モデルを同時に考慮し設計する必要がある。

設計 (II) に対しては、第 1.4.4 項より、要求仕様の変更にとまなう搬送システムの改善設計する際には、既存のシステムに対しあらかじめ適切な評価ならびに解析を行う必要がある。そして、要求仕様が高められた際には、ボトルネックが可能な限り生じないような改善設計を迅速かつ網羅的に行う必要がある。そこで本論文では、以下のことを行う。

- 要求仕様の変更に対する既存の搬送システムの改善設計のための設計支援方法論の提案

そのため、本論文の第 3 章で提案する AGV 搬送システムの最適設計方法論を適用し、既存の搬送システムに対する数理的な評価・解析を行うため、待ち行列ネッ

トワーク理論に基づいた定式化を行う。そして、定式化された結果より、ボトルネックへの影響因子をロジックツリーを用いて分析し、それらに基づいて改善設計案を可能な限り網羅的に列挙する。続いて、提案する改善設計方法論の有効性の検証を行うため、実際に操業している既存の AGV 搬送システムを題材に、当該搬送システムにおける設計制約を考慮し、現実的な設計案を示す。最後にそれらに対する設計政策を提示する。これにより、試行錯誤的なアプローチを行う必要がなくなり、その結果、迅速な改善設計が可能となる。

さらに、既存の搬送システム、改善設計の施された搬送システムに対して、システムのバランスを考慮する。そして、各搬送システムに対して、システムを有効に利用するための適切な要求仕様とそれに対する AGV の投入台数の関係について明らかにする。

## 1.6 本論文の構成

第1章では研究の背景を説明し、港湾コンテナターミナルにおける自動搬送システムの設計を行う際には、大別して、2つの設計対象（設計(I)，設計(II)）があり、本論文では、これら2つを設計対象とすることについて述べた。また、関連研究との比較を行った上で本論文の必要性を述べ、本論文の目的を明らかにした。

第2章では、本論文の第3章～第6章で研究の対象とする垂直型ならびに水平型のAGV搬送システムについて、それらの特徴について述べる。また、港湾物流システムにおけるAGV搬送システムに対して与えられる要求仕様について述べる。

第3章では、待ち行列ネットワーク理論と搬送シミュレータをハイブリッドに組合せた、AGV搬送システムの最適設計方法論を提案する。ここでは、第2章で述べた垂直型ならびに水平型のAGV搬送システムに対するモデル化および定式化、そして提案するアルゴリズムの詳細について述べる。

第4章では、第3章で提案した設計方法論を適用し、垂直型・水平型AGV搬送システムの最適設計ならびに設計されたAGV搬送システムの性能評価を行う。また、本設計方法論の有効性を検証する。そのため、垂直型を対象にし、システムの設計解導出までのプロセス、および計算時間の観点より、提案設計方法論の有効性について明らかにする。

第5章では、第3章で提案した設計方法論を垂直型ならびに水平型AGV搬送システムに適用し、さまざまな要求仕様に対して各搬送システムの最適設計を行う。そして、総合構築コストの比較および評価を行うことにより、要求仕様に対するレイアウト特性に基づいた有効性の評価を行う。

第6章では、第5章で明らかにされた“要求仕様に対するより効率的な搬送システム”を対象に、運用モデルを考慮した設計を行う。ここでも設計を行う際には、第3章で提案した設計方法論を適用する。そして、当該搬送システムを設計する際に、運用モデルを考慮することの重要性について明らかにする。

第7章では、設計(II)の既存の搬送システムに対する、改善設計について行う。ここでは、本論文で提案する設計方法論を適用し、既存の搬送システムに対する数理的なモデル化ならびに定式化を行う。定式化の結果に基づき、改善設計案をロジックツリーを用いて網羅的に提示する。そして、要求仕様の変更に対する搬送システムの再設計を行うための改善設計支援方法論について提案する。

第 8 章で本論文を結論づける。

本論文の構成を Fig. 1.14 に示す。

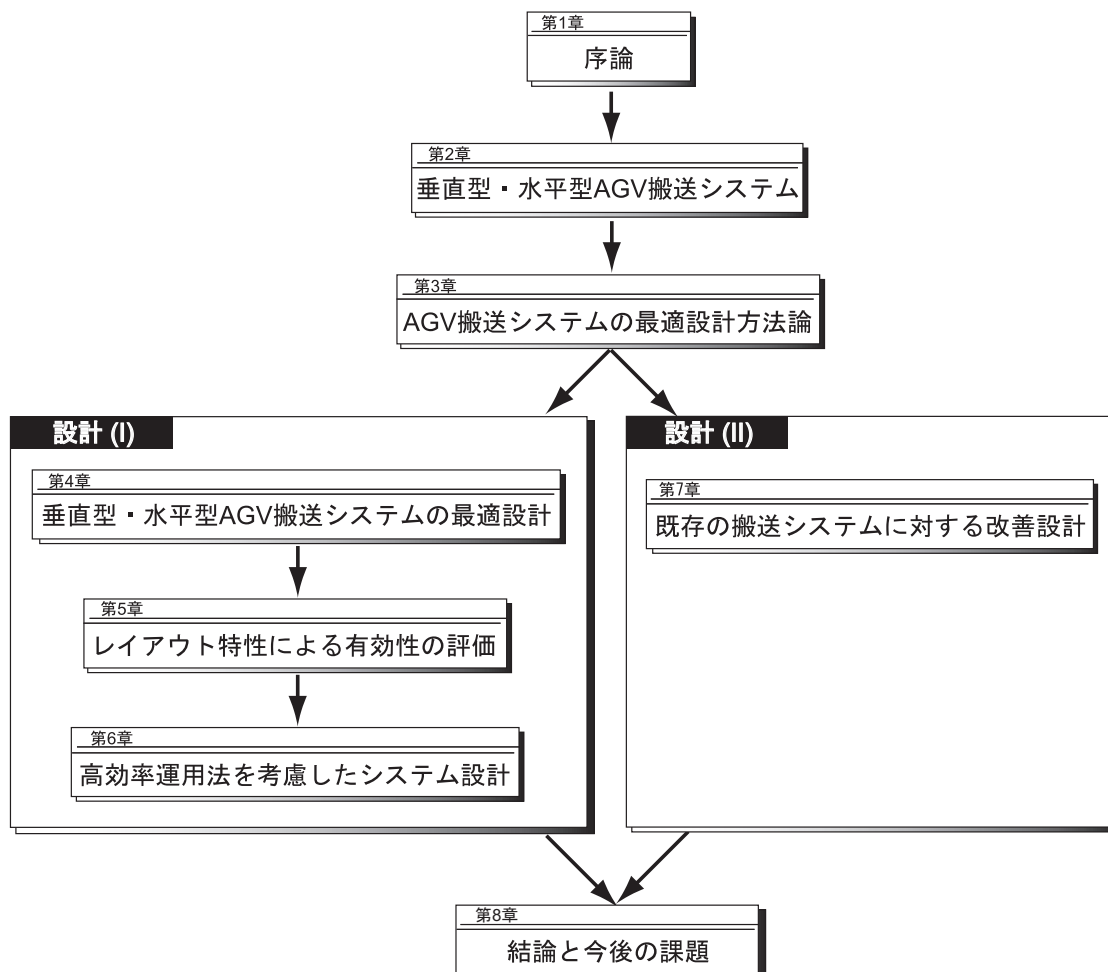


Fig. 1.14 本論文の構成



## 第2章 垂直型・水平型AGV搬送システム

---

2.1	はじめに . . . . .	30
2.2	垂直型 AGV 搬送システム . . . . .	31
2.2.1	システムの概要 . . . . .	31
2.2.2	搬送手順 . . . . .	31
2.2.3	システムの特徴 . . . . .	32
2.3	水平型 AGV 搬送システム . . . . .	34
2.3.1	システムの概要 . . . . .	34
2.3.2	搬送手順 . . . . .	34
2.3.3	システムの特徴 . . . . .	35
2.4	レイアウト特性 . . . . .	37
2.5	要求仕様の設定 . . . . .	40
2.6	おわりに . . . . .	41

---

## 2.1 はじめに

本章では，研究の対象となる垂直型 AGV 搬送システムと水平型 AGV 搬送システムについて，それらの概要，レイアウト特性，ならびにそれらに対して課せられる要求仕様について述べる．

第 2.2 節では，垂直型 AGV 搬送システムの概要，搬送手順，ならびにシステムの特徴について述べる．

第 2.3 節では，水平型 AGV 搬送システムの概要，搬送手順，ならびにシステムの特徴について述べる．

第 2.4 節では，垂直型と水平型の AGV 搬送システムに対して，天下りの設計アプローチにより明らかになったレイアウト特性について述べる．そして，天下りの設計アプローチによる設計の限界と最適設計の必要性について述べる．

第 2.5 節では，AGV 搬送システムに課せられる要求仕様について述べ，システムを設計する際の設計基準について明確にする．

第 2.6 節では，本章をまとめる．

## 2.2 垂直型 AGV 搬送システム

### 2.2.1 システムの概要

Fig. 2.1 は、オランダのロッテルダム港などで見られる港湾自動コンテナターミナルである、垂直型の AGV 搬送システムを示している。垂直型 AGV 搬送システムでは、作業機器として、QCC (Quay Container Crane)、AGV、そして第 1.3 節で述べた通り、コンテナの取扱われ方の違いから、ATC (Automated Transfer Crane) によるコンテナの把持搬送が必要となり、RMGC (Rail-Mounted Gantry Crane) が投入される。コンテナ船により搬入されたコンテナ群は、埠頭の岸壁において QCC により荷揚げされ、AGV に荷積みされる。その後、AGV により所定の受け渡し地点まで搬送され、RMGC に受け渡される。RMGC に受け渡されたコンテナは、RMGC によりロケーションの目的蔵置位置まで把持搬送され、蔵置される。受け渡しを終えた AGV は再びコンテナ搬送のため埠頭へと戻る。コンテナ蔵置を終えた RMGC は、所定のコンテナ受け渡し地点まで戻る。搬送システムのレイアウトならびに各機器の作業の詳細については、第 3 章で述べることとする。

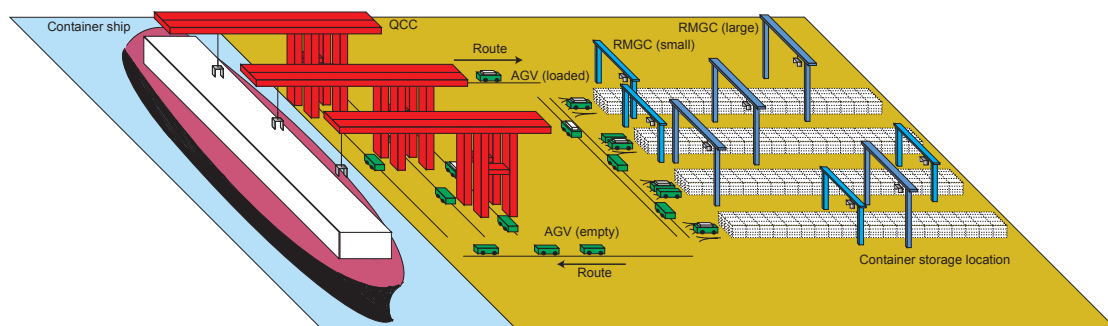


Fig. 2.1 垂直型 AGV 搬送システム

### 2.2.2 搬送手順

AGV 群は以下の搬送手順にしたがい、コンテナ船に積まれたコンテナ群をすべて所定の場所へ搬送し終えるまで、システム内の巡回を続ける。

ステップ 1 埠頭の岸壁において、QCC によりコンテナ船から AGV へとコンテナ

荷役作業が行われる。

ステップ 2 荷積みされたコンテナは、AGV により搬送経路上を通り、所定の蔵置ロケーションまで搬送される。

ステップ 3 AGV は当該ロケーションのコンテナ受け渡し位置へと向かう。

ステップ 4 RMGC がすでに他のコンテナ受け取りあるいは蔵置作業を実行中の場合、当該 AGV は退避経路上において作業を待たなければならない。

ステップ 5 AGV がコンテナ受け渡し位置に到着した際、RMGC が作業実行可能状態にある場合、コンテナの受け渡し作業を開始する。

ステップ 6 RMGC へコンテナの受け渡しを終えた AGV は、再びコンテナを積むために搬送経路を通り、埠頭で稼動する QCC のところへと向かう。

ステップ 7 コンテナを受け取った RMGC は、当該コンテナをロケーション上の所定の位置まで搬送し、蔵置位置まで搬送を終えたら、その場にコンテナを蔵置する。蔵置作業を終了した RMGC は、次の AGV からの指令にそなえ、コンテナ受け渡し位置へと戻る（ステップ 1 へ）

### 2.2.3 システムの特徴

Fig. 2.1 が示すように、垂直型 AGV 搬送システムでは、コンテナ蔵置ロケーション群は岸壁に停泊しているコンテナ船の前後方向に対して垂直に配置されている。垂直型 AGV 搬送システムの場合、あらかじめ搬送経路のレイアウトは固定されているため、搬送経路長はコンテナ蔵置ロケーションの数に依存しない。また、コンテナの受け渡し位置は各ロケーションに隣接する所に一箇所だけ設けられている。そのため、AGV はロケーション上の蔵置位置までのコンテナ搬送を行うことはできず、ATC によるコンテナ把持搬送が必要となる。以上のことから、垂直型 AGV 搬送システムは、以下に示す特徴を有する。

- レイアウトの外形が固定されているため、AGV は一定の長さの経路を巡回搬送することができる。
- コンテナの受け渡し位置は各ロケーションに隣接する所に一箇所だけ設けられているため、AGV はコンテナをコンテナ受け渡し位置までしか搬送することができない。

- コンテナ受け渡し作業経路上において他の AGV がすでに作業中である場合，当該 AGV は退避経路上において作業の待機を行うことができる．ただし，この際は退避経路も設計対象となる．

第 1.3 節でも述べた通り (Fig. 1.11)，垂直型 AGV 搬送システムでは ATC がコンテナの把持搬送を行う必要があるため，より大型の鉄道車輪式の RMGC が投入されている．また，一般的にコンテナ蔵置ロケーション上には 2 台のサイズの異なる RMGC が投入され作業を行っていることから，本論文でも 2 台の RMGC が当該ロケーション上にて作業を行うものとする．Fig. 2.2 は，蔵置ロケーション，作業経路，退避経路を示している．第 2.2.2 項の搬送手順でも述べた通り，AGV が当該ロケーションに到着する際，すでに作業経路上で他の AGV がコンテナ受け渡し作業を行っている場合，当該 AGV は退避経路に向かうこととなるが，作業経路上での AGV がコンテナを受け渡した後は，当該 AGV が退避している経路が作業経路となる．なお，ロケーション，作業経路，退避経路の関係については，1 本のコンテナ蔵置ロケーションと作業経路が一对の組として初期設計段階では構築される．退避経路に関しては，交通渋滞を避けるためにその都度付加的に設計される．

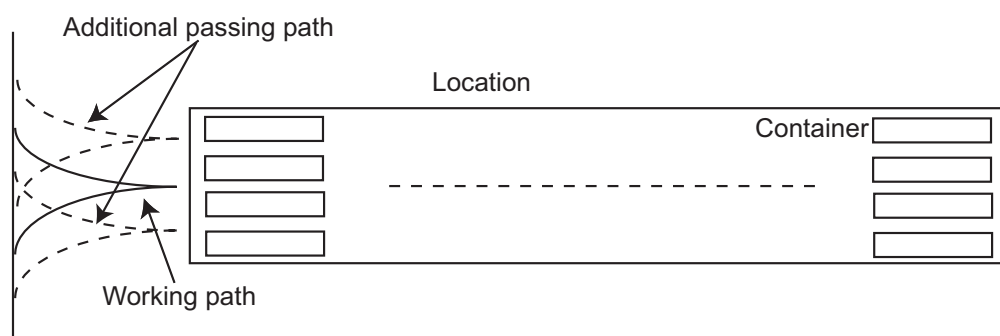


Fig. 2.2 蔵置ロケーション，作業経路，退避経路の関係

このような，AGV がコンテナ蔵置ロケーションが存在する領域の内部まで搬送する必要のないレイアウト特性を有する搬送システムは，AGV に対して複雑な走行制御を行う必要がなく，そのため，自動化を目指した多くの港湾コンテナターミナルにおいて導入されている．

## 2.3 水平型 AGV 搬送システム

### 2.3.1 システムの概要

Fig. 2.3 は、主に有人型の搬送システムとして用いられている水平型の AGV 搬送システムを示している。水平型 AGV 搬送システムでは、作業機器として、QCC、AGV、RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane) が投入される。コンテナ船により搬入されたコンテナ群は、埠頭の岸壁において QCC により荷揚げされ、AGV に荷積みされる。その後、AGV により所定の受け渡し・蔵置位置まで搬送され、RTGC に受け渡される。RTGC に受け渡されたコンテナは、その場の目的蔵置場所に蔵置される。受け渡しを終えた AGV は再びコンテナ搬送のため埠頭へと戻る。コンテナ蔵置を終えた RTGC は、次の AGV からの指令を待つ。垂直型 AGV 搬送システム同様、搬送システムのレイアウトならびに各機器の作業の詳細については、第 3 章で述べることとする。

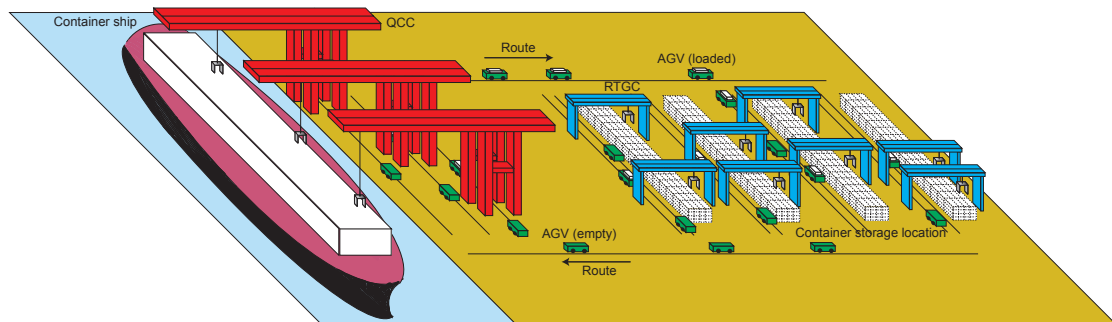


Fig. 2.3 水平型 AGV 搬送システム

### 2.3.2 搬送手順

AGV 群は以下の搬送手順にしたがい、コンテナ船に積まれたコンテナ群をすべて所定の場所へ搬送し終えるまで、システム内の巡回を続ける。

ステップ 1 垂直型 AGV 搬送システムと同様に、埠頭の岸壁において QCC がコンテナ船より AGV へコンテナの荷積み作業を行う。

- ステップ 2 AGV は搬送経路上を通過して、埠頭より当該コンテナの目的蔵置ロケーションまで、コンテナの搬送を行う。
- ステップ 3 AGV はコンテナ蔵置位置に隣接するコンテナ受け渡し位置まで向かい、RTGC を呼び出す。
- ステップ 4 当該ロケーション上にアイドリング状態にある RTGC が存在する場合は、当該 RTGC が受け渡し相手として AGV の位置まで向かうことができるが、そうでない場合は、AGV はその場にて RTGC を呼び続ける必要がある。
- ステップ 5 RTGC が AGV の待機位置までやってきたら、コンテナ受け渡し作業を開始する。
- ステップ 6 RTGC へコンテナの受け渡しを終えた AGV は、再びコンテナを積むために搬送経路を通り、埠頭で稼動する QCC のところへと向かう。
- ステップ 7 コンテナを受け取った RTGC は、その場のコンテナ蔵置位置にコンテナを蔵置し、次の AGV からの指令をその場にて待つ（ステップ 1 へ）

### 2.3.3 システムの特徴

Fig. 2.3 が示すように、水平型 AGV 搬送システムでは、コンテナ蔵置ロケーション群がコンテナ船の前後方向に対して平行に配置されている。水平型 AGV 搬送システムでは、ロケーションの数に応じてシステムのレイアウトは大きくなり、そのため、搬送経路長はロケーションの数に依存することとなる。しかしながら、第 1.3 節でも触れたが（Fig. 1.11 参照）、AGV はコンテナを所定の蔵置位置まで搬送することが可能であるため、コンテナの受け渡し位置は、経路上のいずれかの位置、すなわち複数あり、これらの位置は固定されてはいない。また、ATC によるコンテナの把持搬送は行われず、コンテナは AGV から受け渡された後、ATC によりその場に蔵置される。以上のことから、水平型 AGV 搬送システムは、以下に示す特徴を有する。

- 搬送経路はロケーションの数に応じて増加してしまうため、ロケーションの数によっては垂直型の場合に比べて、総搬送経路長が長くなってしまうことがある。

- AGV は目的地として、経路に隣接するコンテナ蔵置位置までコンテナを搬送することができる。
- 経路上において同時に複数台の AGV と ATC によるコンテナの受け渡し作業が可能である。しかしながら、AGV が進むべき経路上において、前方にすでにコンテナの受け渡し作業中の AGV がいた場合、追い越し経路が存在しない水平型 AGV 搬送システムにおいては、当該 AGV はその場に停止する必要がある。

以上のことから、水平型 AGV 搬送システムでは、ATC はコンテナの把持搬送を行う必要のない仕組みとなっており、そのため、RMGC に比べ小型で安価なゴムタイヤ式の RTGC が投入されている。水平型 AGV 搬送システムにおいても、垂直型同様、コンテナ蔵置ロケーション上には 2 台のサイズの異なる RTGC が投入されるものとする。



## 2.4 レイアウト特性

第 2.2.3 項と第 2.3.3 項に基づき，Table 2.1 に，垂直型と水平型の AGV 搬送システムのレイアウトの特徴を示す．垂直型・水平型 AGV 搬送システムのレイアウト特性を明確にするため，以下に示した特徴を有する各搬送システムを構築し，それぞれシミュレーション実験を行った．

Table 2.1 垂直型・水平型 AGV 搬送システムの特徴

システムのレイアウト	AGV の総走行経路長とロケーション本数との依存関係	コンテナ受け渡し位置	受け渡し位置の数	ATC のタイプ
垂直型	独立	固定	単一	鉄道車輪式
水平型	依存	可変	複数	ゴムタイヤ式

Fig. 2.4，Fig. 2.5 に，設計パラメータが天降りかつ試行錯誤的に与えられた際の垂直型および水平型 AGV 搬送システムにおける搬送シミュレーション結果を示す．本シミュレーション実験では，シミュレータへの入力値ならびに各設計パラメータは次のようにして与え，合計で 60 回のシミュレーションを行った．総搬送コンテナ数：200，400，600，800，1000 [TEU]．AGV 投入台数：10，20，30 [台]．ATC 投入台数：4，8，12，16，20 [台]．Fig. 2.4，Fig. 2.5 において，各設計パラメータの下，総搬送コンテナ数が増加するにつれて，一定の割合で搬送完了までに要した時間も増大することが確認できた．しかしながら，垂直型および水平型ともに，投入する AGV と ATC の台数の組合せによっては，搬送時間に大きな変化が見られない場合が存在することがわかった．

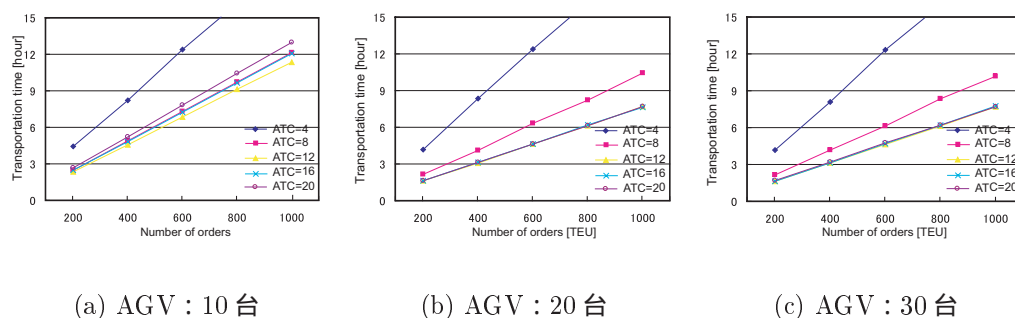
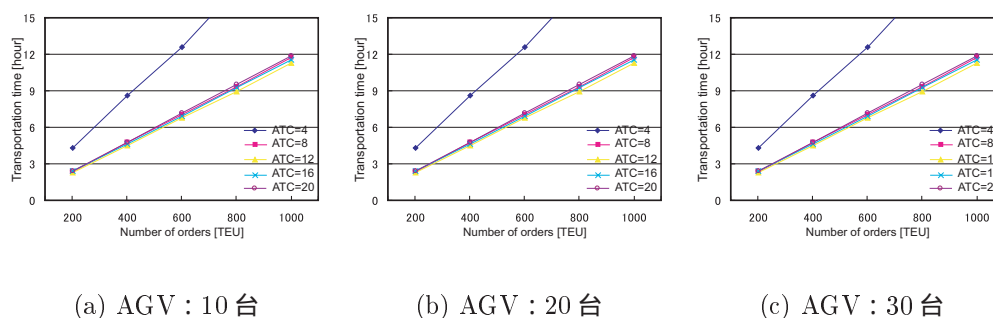


Fig. 2.4 垂直型 AGV 搬送システム



(a) AGV : 10 台

(b) AGV : 20 台

(c) AGV : 30 台

Fig. 2.5 水平型 AGV 搬送システム

Fig. 2.6 は Fig. 2.4 および Fig. 2.5 から明らかにされた垂直型と水平型の AGV 搬送システムの有効性を示した図である。AGV と ATC の投入台数を天り的に変化させていった際、搬送終了までに要した時間に基づいて、両搬送システムの有効性を評価している。Fig. 2.6 より、AGV と ATC の投入台数の組合せにより、垂直型と水平型の AGV 搬送システムのうち、ある程度はどちらがより有効であるかがわかるようになった。その結果、小規模の AGV 搬送システム、すなわち、少数の AGV および ATC から構成される搬送システムを構築しようとした際には垂直型が有効であり、大規模な AGV 搬送システム、すなわち、多数の AGV ならびに ATC から構成される搬送システムを構築しようとした際には水平型が有効であることがわかった。

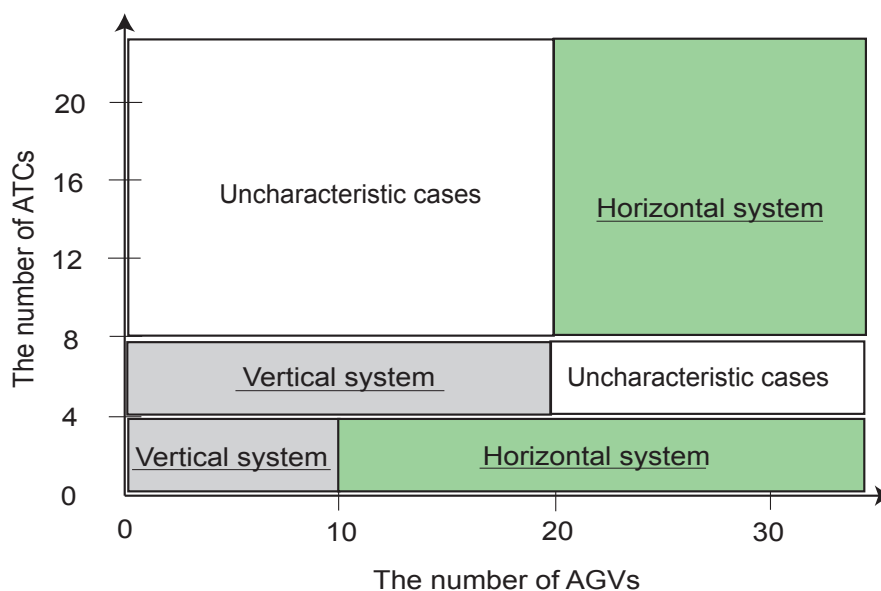


Fig. 2.6 AGV と ATC の投入台数による搬送システムの有効特性

しかしながら，Fig. 2.4，Fig. 2.5 より，AGV と ATC の投入台数の組合せのバランスの悪さから生じる AGV の搬送作業負荷，すなわちボトルネックが原因となり，Fig. 2.6 においても明確なレイアウト特性が得られない場合があることもわかった．このことから，天下りの的，すなわち経験則に基づき，かつ，試行錯誤的に AGV と ATC の設計パラメータを決定するアプローチでは，効率的な搬送システムを構築することが困難であることがわかる．本結果よりも，垂直型ならびに水平型 AGV 搬送システムの適切な評価を行うためには，それぞれ要求仕様に対する最適な設計，すなわち，同時に AGV と ATC の投入台数に関する設計解の導出を行う必要があることが示された．

## 2.5 要求仕様の設定

本論文では、(2.5.1) 式のようにしてシステムスループットを“単位時間におけるコンテナ搬送・蔵置数”と定義する。

$$\text{スループット [TEU/hour]} = \frac{\text{搬送・蔵置されたコンテナ数}}{\text{搬送終了までに要した時間}} \quad (2.5.1)$$

このとき、港湾管理者側より、コンテナ船の停泊時間が与えられると、この時間がそのまま要求搬送時間となる。また、その際のコンテナ船に積み残されているコンテナの総数が、搬送・蔵置されるべきコンテナの総数となる。したがって、(2.5.2) 式が搬送システムを設計する際の満たすべき要求仕様となる。

$$\text{要求仕様 [TEU/hour]} = \frac{\text{コンテナの総数}}{\text{コンテナ船の停泊時間}} \quad (2.5.2)$$

そのため、(2.5.1) 式と (2.5.2) 式の関係は、以下の (2.5.3) 式が示すようにならなくてはならない。

$$\text{システムスループット [TEU/hour]} \geq \text{要求仕様 [TEU/hour]} \quad (2.5.3)$$

以上、本論文では設計に際して、まずコンテナの総数ならびにコンテナ船の停泊時間を与える。そして、(2.5.2) 式に基づいて要求仕様を定め、これを対象となる AGV 搬送システムが満たすことができるように、設計パラメータを導出していく。

## 2.6 おわりに

本章では、研究の対象となる垂直型 AGV 搬送システムと水平型 AGV 搬送システムについて、それらの概要、レイアウト特性について述べた。さらに、設計を行うに際して、AGV 搬送システムに対して課せられる要求仕様について述べた。

第 2.2 節では、垂直型 AGV 搬送システムの概要、搬送手順、ならびにシステムの特徴について述べた。

第 2.3 節では、水平型 AGV 搬送システムの概要、搬送手順、ならびにシステムの特徴について述べた。

第 2.4 節では、垂直型と水平型の AGV 搬送システムに対して、天下りの設計アプローチにより明らかになったレイアウト特性について述べた。そして、天下りの設計アプローチによる設計の限界と最適設計の必要性について述べた。

第 2.5 節では、AGV 搬送システムに課せられる要求仕様について説明した。

次章では、AGV 搬送システムの最適設計を行うための、その方法論についての提案を行う。



# 第3章 AGV搬送システムの最適設計方法論

---

3.1	はじめに	44
3.2	AGV搬送システム設定	45
3.2.1	搬送システムのレイアウト	45
3.2.2	各エリアにおける機器の作業	45
3.3	待ち行列ネットワーク理論	50
3.3.1	待ち行列ネットワーク理論への入出力パラメータ	50
3.3.2	巡回型待ち行列ネットワークモデル	50
3.3.3	性能評価基準	52
3.4	問題設定	53
3.5	AGV搬送システムのモデル化	55
3.6	AGV搬送システムの定式化	58
3.7	システム設計方法論	61
3.7.1	設計アーキテクチャ	61
3.7.2	設計アルゴリズム	64
3.8	おわりに	67

---

## 3.1 はじめに

本章では、要求仕様に対する AGV 搬送システムの最適な設計法について、その方法論の提案を行う。港湾物流といった実問題を扱う本論文では、与えられた要求仕様に対して最適な機器の投入台数を求める必要がある。ここで最適とは、限られた、あるいは与えられた機器の作業仕様の下、要求仕様を満たすための必要最小限の投入台数を求めることを意味する。

第 3.2 節では、第 2 章で述べた垂直型・水平型 AGV 搬送システムについて、レイアウトや機器の作業仕様など、それらの詳細な設定を行う。

第 3.3 節では、提案する設計方法論において、ハイブリッドに用いられる数理モデル、待ち行列ネットワーク理論について、本論文でいかにして適用されるかについて述べる。

第 3.4 節では、本設計問題を組合せ最適化問題として解くための問題設定を行う。

第 3.5 節および第 3.6 節では、待ち行列ネットワーク理論に基づいた AGV 搬送システムのモデル化および定式化について説明する。

第 3.7 節では、提案する設計方法論の概要ならびに設計アルゴリズムについて説明し、入力から出力、すなわち要求仕様から設計解導出までのプロセスについて述べる。

第 3.8 節では、本章をまとめる。



## 3.2 AGV 搬送システム設定

### 3.2.1 搬送システムのレイアウト

Fig. 2.1 ならびに Fig. 2.3 で示されている 2 種類の AGV 搬送システムに対して、本論文では最適設計のため、まず、Fig. 3.1 に示すようにして、3 種類、4 つ（埠頭エリア、2 つの搬送エリア、コンテナ蔵置エリア）の作業エリアに分割する。レイアウトの詳細な寸法に関しては、Fig. 3.1(a) ならびに Fig. 3.1(b) に示されている通りである。なお、これらレイアウト寸法の詳細に関しては、共同研究先である三菱重工業（株）汎用機・特車事業本部からのデータを基に設定した。

AGV の搬送経路はそれぞれ単方向経路により構成されている。そのため、同一経路上における AGV 同士のすれ違い行動は行われない。さらに、経路の分岐・合流・交差点には、AGV 同士の衝突回避のための制御ゾーンを設けた。これにより、1 台の AGV がゾーンに進入した際、他の AGV が当該ゾーンに進入することはできないようになっている。そのため、本 AGV 搬送システムでは、デッドロック現象は生じない仕組みになっている。

Fig. 3.2 は、コンテナ蔵置ロケーションを示している。本来、垂直型と水平型において、RMGC (Rail-Mounted Gantry Crane) と RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane) のサイズに応じたロケーションが用いられているが、ここでは両 AGV 搬送システムの比較のため、同等なキャパシティを有する蔵置ロケーションが用いられるものとする。蔵置ロケーションは、640 (4 [Row] × 20 [Bay] × 8 [Tier]) [TEU] の蔵置スペースを有している。

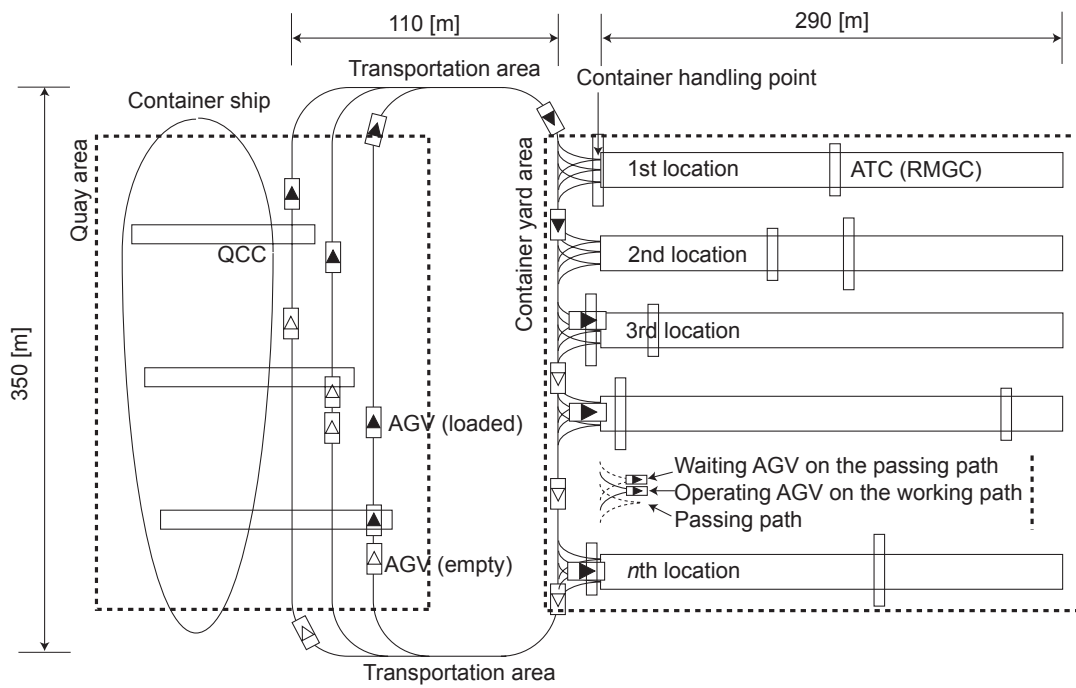
### 3.2.2 各エリアにおける機器の作業

コンテナ船により埠頭まで運び込まれたコンテナは、搬送システム内で作業を行っている機器群により、次のようにして所定の場所まで搬送・蔵置される。埠頭エリア（コンテナ船 → QCC (Quay Container Crane) → AGV) → 搬送エリア（AGV） → コンテナ蔵置エリア（AGV → ATC (Automated Transfer Crane)）。ここで、各エリアにおける機器の作業仕様に関しては以下のように定義する。

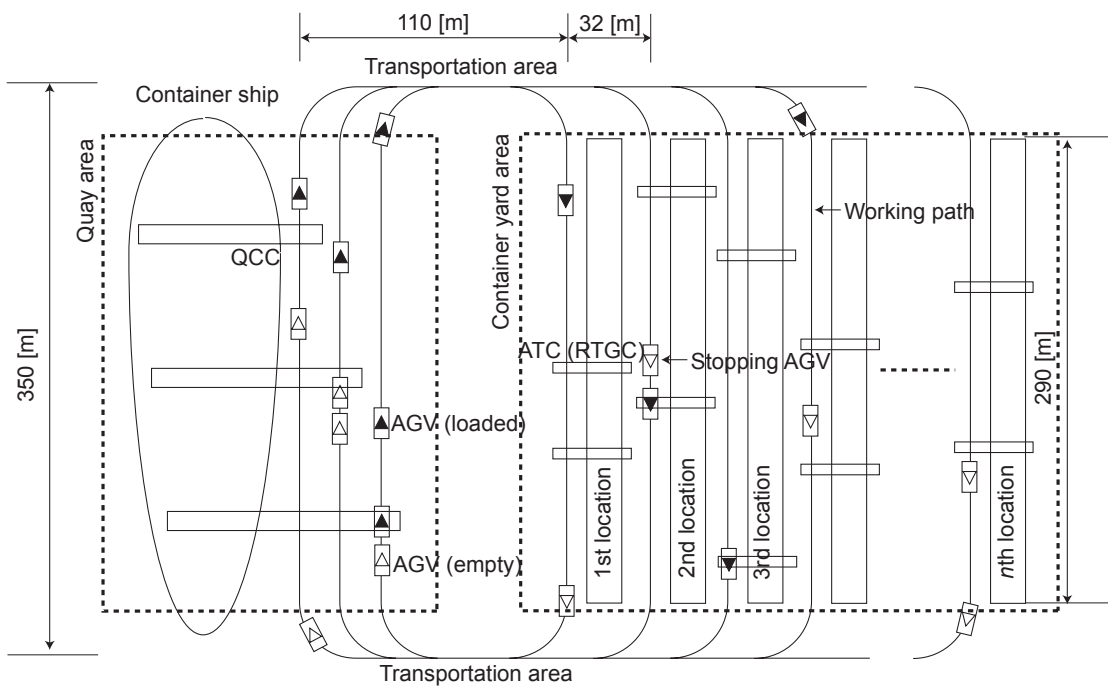
埠頭エリア (Quay area, Fig. 3.1 参照): Fig. 3.3 で示されている通り, コンテナ船と AGV との間に備え付けられている QCC がコンテナの荷役作業 (コンテナ船からコンテナを荷揚げし, AGV へと荷積みする作業) を行う.

コンテナ蔵置エリア (Container yard area, Fig. 3.1 参照): Fig. 3.4 および Fig. 3.5 が示す通り, AGV はロケーション上で作業を行っている ATC にコンテナを受け渡し, ATC はその後, コンテナを所定の場所まで搬送ならびに蔵置する.

搬送エリア (Transportation area, Fig. 3.1 参照): 当該エリアは, 埠頭とコンテナ蔵置エリア間とを結ぶ搬送経路を意味している. したがって, 搬送エリアには AGV あるいは AGV によって搬送されている最中のコンテナのみが存在する.



(a) 垂直型 AGV 搬送システム



(b) 水平型 AGV 搬送システム

Fig. 3.1 自動コンテナターミナルにおける 2 種類の AGV 搬送システム (上面図)

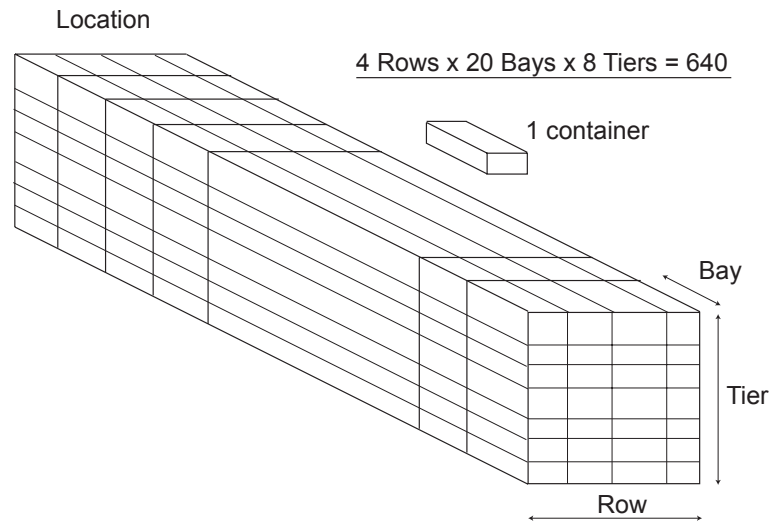


Fig. 3.2 コンテナ蔵置ロケーション

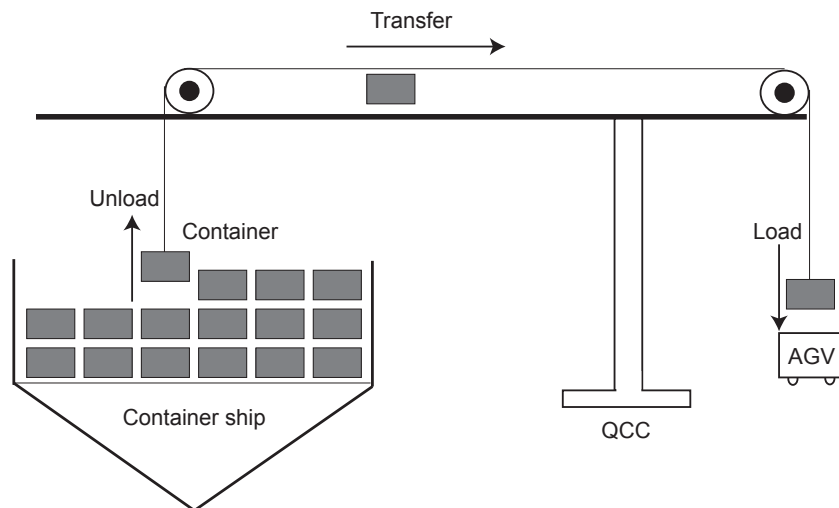


Fig. 3.3 埠頭エリアにおける QCC-AGV 間でのコンテナ荷役作業 (側面図)

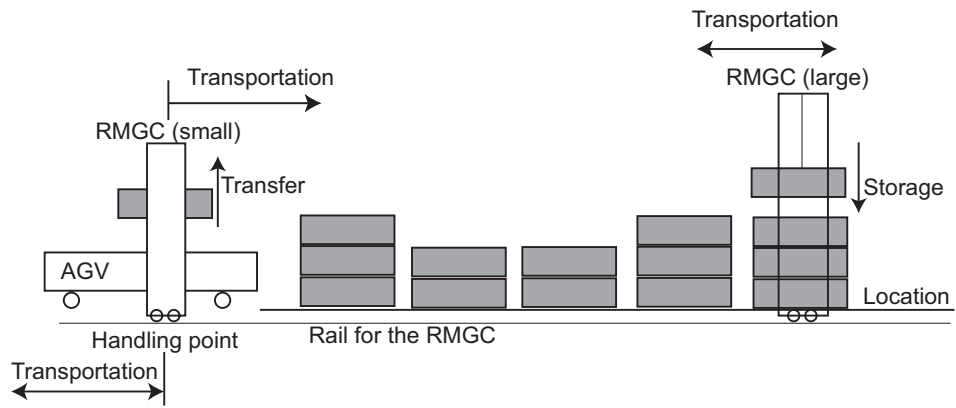


Fig. 3.4 搬送エリアにおける AGV および RMGC によるコンテナ搬送・受け渡し・蔵置作業（垂直型の側面図）

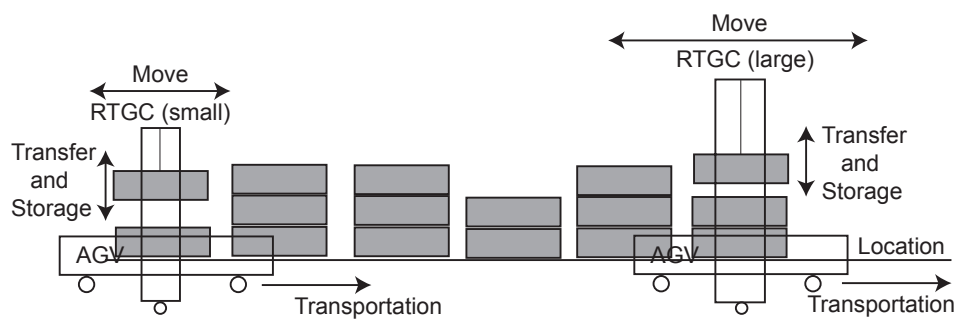


Fig. 3.5 搬送エリアにおける AGV および RTGC によるコンテナ搬送・受け渡し・蔵置作業（水平型の側面図）

### 3.3 待ち行列ネットワーク理論

#### 3.3.1 待ち行列ネットワーク理論への入出力パラメータ

荷役搬送システムの算定には、待ち行列理論を適用した例が多い。これは、搬送システムがノードによって構成されるネットワークとしてモデル化可能であれば、Fig. 3.6 が示すように、ネットワーク内のノードの数、ノードを構成する、あるいは当該ノードで作業を行っている機器台数、ネットワーク内を移動する搬送機器数、ネットワーク内を移動する搬送機器がそれぞれ定められた作業エリアを通過するのに要する時間、搬送システムに課せられる搬送コンテナ数、などが与えられると、これらを入力パラメータとして、搬送システムのスループット、各エリアにおける作業機器の待ち量（行列）を示す平均滞在 AGV 台数、ならびにそのときの交通密度といったシステムの大まかな挙動を数理的かつ高速に算出できるためである。そして、これら出力結果を評価することで、要求仕様に対する設計パラメータを算出することができる。なお、これら入力パラメータのうち、ノードを構成している機器の台数のことを、以降、サーバ数と呼ぶこととする。

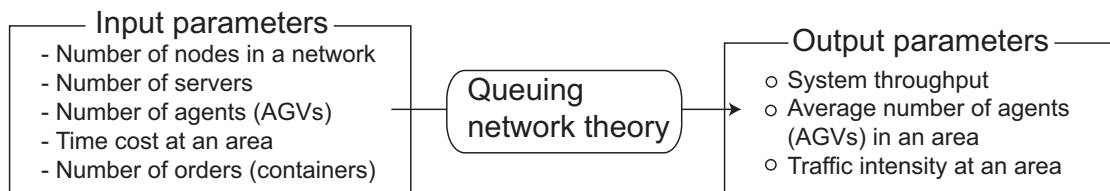


Fig. 3.6 待ち行列ネットワーク理論によりモデル化された搬送システムへの入出力パラメータ

以上のことから、本論文においても待ち行列理論を拡張し、各待ち行列をそれぞれネットワーク上に構成した、待ち行列ネットワーク理論を数理モデルとして適用する。

#### 3.3.2 巡回型待ち行列ネットワークモデル

待ち行列ネットワーク理論には、大別して開放型と閉鎖型の2種類のネットワークがある。閉鎖型待ち行列ネットワークとは、ある一定台数のネットワークエー

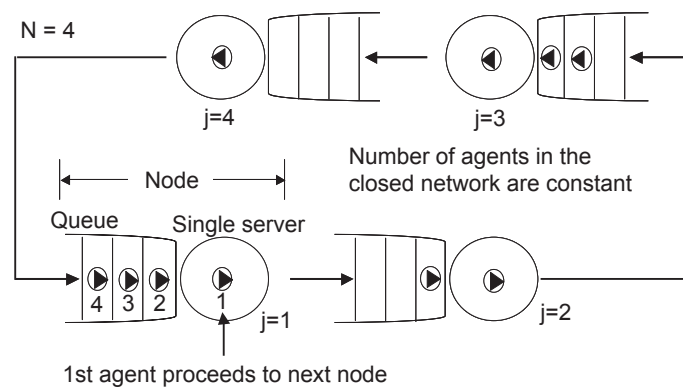
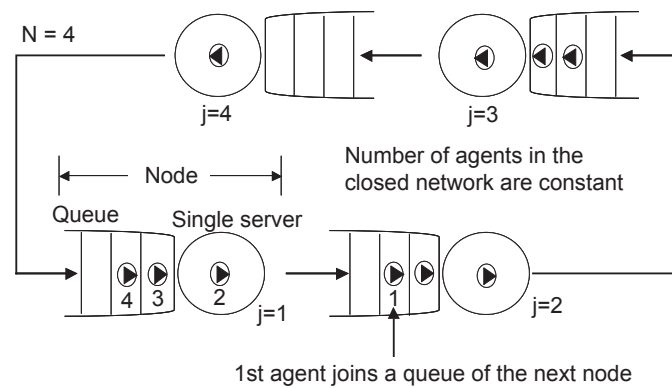
(a)  $n$  ステップ目の状態(b)  $n + 1$  ステップ目の状態

Fig. 3.7 単一サーバにより構成された巡回型単一連鎖待ち行列ネットワークモデルにおける状態遷移の様子 (ノード  $j$ , ノード数  $N$ )

ジェントがサーバと待ち行列から成るノードにより構成されたネットワーク内を移動し、その際、当該ネットワーク以外のネットワークから進入してくるネットワークエージェントや、当該ネットワークから外へ退去するネットワークエージェントが1台も存在しないネットワーク(移動経路)のことをいう [Buzen 1973]。そしてこの閉鎖型待ち行列ネットワークの中で、経路に分岐がなく、かつ2つ以上の待ち行列の間を機器が順に巡る構造をしたネットワークを巡回型待ち行列ネットワークという [Gordon 1967]。Fig. 3.7はシステム内にネットワークが一つのみ存在する場合、すなわち巡回型単一連鎖待ち行列ネットワークにおいて、状態  $n$  から  $n + 1$  に対してネットワークエージェント群がノード間を遷移する一例を示して

いる。Fig. 3.7(a)において、ノード ( $j = 1$ ) で作業中の 1 番のネットワークエージェントのみが次のノード ( $j = 2$ ) へと移動すると、次に待っていたネットワークエージェント (待ち行列の 2 番目) はサーバへ進入し、ネットワークエージェント 3 番と 4 番はそれぞれ待ち行列の一つ先へと進む (Fig. 3.7(b))。

### 3.3.3 性能評価基準

Ottjes らはロッテルダム港を題材に、専用の搬送シミュレータを開発し、自動化ターミナルの設計を行っている [Ottjes 1999][Duinkerken 2000]。その際、いくつかの評価指標がシステムの性能を評価するために用いられている。

本論文では、第 3.3.2 項で述べた待ち行列ネットワークを AGV 搬送システム、そして、ネットワーク内を移動するネットワークエージェントを当該搬送システム内における搬送機器、すなわち AGV と定義する。そして各搬送エリアに対してそれぞれノードを割当て、ノード数、ノードに要求される時間コスト、およびその他さまざまなパラメータ (ノードにおけるサーバ数、トラヒック係数、ノードへの相対訪問回数)<sup>\*1</sup>を入力として得られる (a) コンテナ搬送量であるシステムスループット、(b) 各ノードに平均的に滞在する AGV 台数、(c) AGV による各ノード内のサーバ使用率である交通密度、を評価基準として設計ならびに解析を行う。(a) は AGV による単位時間あたりのコンテナ搬送数を評価するために用いる。システムスループットが要求スループットを満たした場合、そのときの AGV 台数および、ATC 台数が算出される。(b) は必要な待避経路数を算出するために用いる。(c) はシステム内のボトルネックとなっているノードを見つけるために用いる。

巡回型待ち行列ネットワークモデルを用いた AGV 搬送システムのモデル化については第 3.5 節にて、定式化については第 3.6 節にて、それぞれ詳細に述べる。

---

<sup>\*1</sup> ノードにおけるサーバ数、トラヒック係数、ノードへの相対訪問回数に関しては、第 3.6 節にて詳細を述べる。



## 3.4 問題設定

本論文では，組合せ最適設計問題を解く際の設計パラメータに関して，埠頭へのQCCの投入台数は設計対象とはしないこととする．これは，第1.4.1項でも触れたが，多くの場合，埠頭における岸壁のサイズはすでに決められてしまっており，本論文で対象としている垂直型・水平型のAGV搬送システムにおいても同様に，岸壁のサイズが与えられているためである\*2．

続いて各ノードにおける搬送機器群の到着率ならびに作業機器群によるサービス率を仮定する．ここで，到着率とは，機器が各ノードにやってくる間隔を意味している．また，サービス率とは，あるノードにおいて作業を終えた機器が当該ノードを通過するまでにかかる時間間隔，すなわち，あるノードから次のノードへの出発間隔を意味している．Fig. 3.3が示す垂直型・水平型AGV搬送システムの埠頭エリアにおけるQCCによるコンテナの荷積み時間の間隔は一定とした．ただし，Fig. 3.4ならびにFig. 3.5も含め，コンテナ船からのコンテナ荷揚げ作業や，AGV群による経路上や交差点での搬送渋滞などといったブロッキング問題，そして，ATCによる搬送ならびに蔵置など，これら実際の搬送システム内における作業機器群の挙動を考慮すると，AGVが各ノードを通過するには，当該システム内における時間遅延によりさまざまな時間を要することが想定される．そこで，本論文ではこれら実際の搬送システム内で生じるブロッキング問題を考慮するため，搬送シミュレータを用いる．待ち行列ネットワーク理論に基づいた垂直型・水平型のAGV搬送システムのモデル化ならびに定式化を行うため，ここでは，AGVが各エリアを通過する際に要する時間は，ある期待値を有した指数分布に従うものと仮定する．ここで，これら指数分布の期待値は搬送システム内での作業機器台数に依存するため，それぞれのエリアにおける期待値は埠頭エリアを除いてすべて搬送シミュレータにより再計算される必要がある．埠頭エリアに関しては，3台の固定のQCCが投入されてコンテナ船と作業を行っているため，変動しない一定の期待値と仮定する．すなわち，当該エリアをAGVが通過する際に要する時間は特定の指数分布に従い，その期待値は変動しないものとなる．

分布関数に関してはさまざまなものが存在するが，本論文では待ち行列ネットワーク理論を適用して搬送システムのモデル化ならびに定式化を行うため，AGVの各エリアへの到着間隔は指数分布関数に従うものと近似した．この理由として，

1. 設計解を算出するために，厳密な搬送システムのモデル化を行うことは重要で

---

\*2仮に，岸壁のサイズが変更できた場合，QCCの投入台数も設計対象として，搬送システムのモデル化を行うことは可能である．

はない, 2. 指数分布関数は, 待ち行列ネットワーク理論の中でもっとも良く用いられている簡素な関数であるため, などといったことがあげられる. 第 3.7 節で述べるが, この指数分布関数に基づいてモデル化・定式化されたシステムの現実との差は, 搬送シミュレータをハイブリッドに用いることにより, 最終的に解消される構造になっている<sup>\*3</sup>.

---

<sup>\*3</sup>設計プロセスにおいて, 実際にこの差が解消されていくことの実証は, 第 4 章で行うこととする.

### 3.5 AGV 搬送システムのモデル化

Fig. 3.7 が示す巡回型単一連鎖待ち行列ネットワークモデルを用いて, Fig. 3.1 の各 AGV 搬送システムをモデル化すると, それらは Fig. 3.8 のようにして, ノードによって構成されるネットワークとして表現することができる. モデル化に際しては, 4つの分割された各エリアに対して, 1 から 4 のノードがそれぞれ割当てられる (Fig. 3.9 参照).

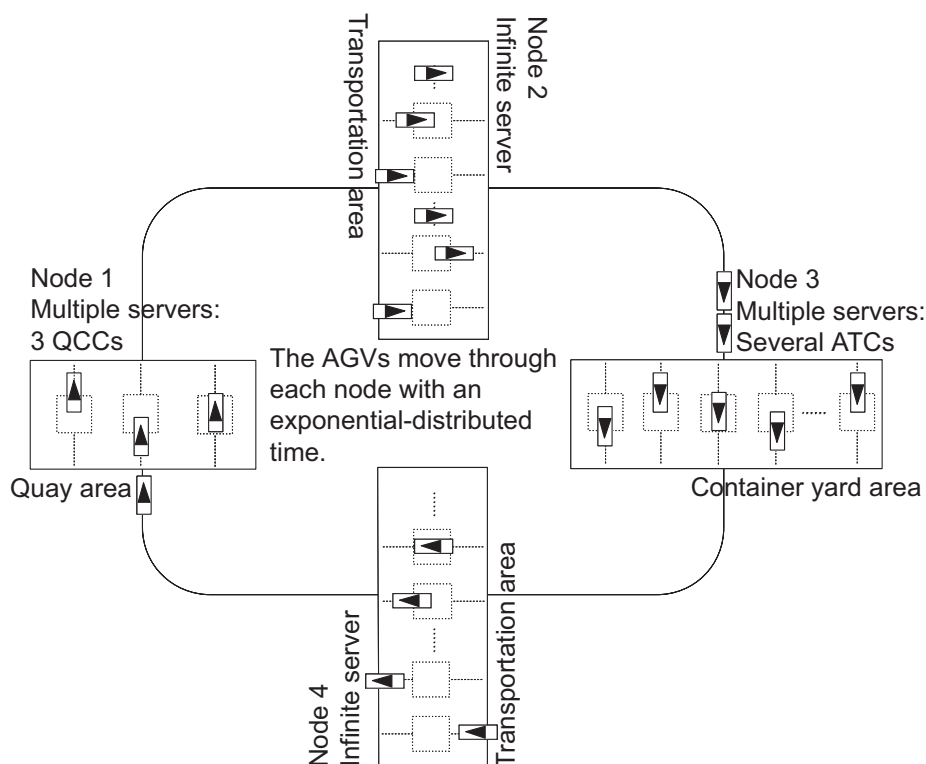


Fig. 3.8 巡回型待ち行列ネットワークモデルを適用した AGV 搬送システムのモデル化

AGV が各ノードを通過するのに必要とする時間コストに関しては, 次のように定義する. ノード1を通過するのにかかる時間コストは, 前のAGVが過ぎてから, 当該AGVがQCCによりコンテナの荷積みをされ, QCCを去るまでの時間に相当する (Fig. 3.9(a) 参照). ノード2および4の時間コストとは, ノード1と3の間を搬送するのに要する時間に等しい (Fig. 3.9(b), Fig. 3.9(d) 参照). ノード3を通過するのに要する時間コストは, AGVがコンテナ受け渡し位置に到着してからコンテナをATCに受け渡し終えるまでの時間に相等する (Fig. 3.9(c) 参照). なお, これらの時間コストとは, 各ノードにおける作業時間の期待値として

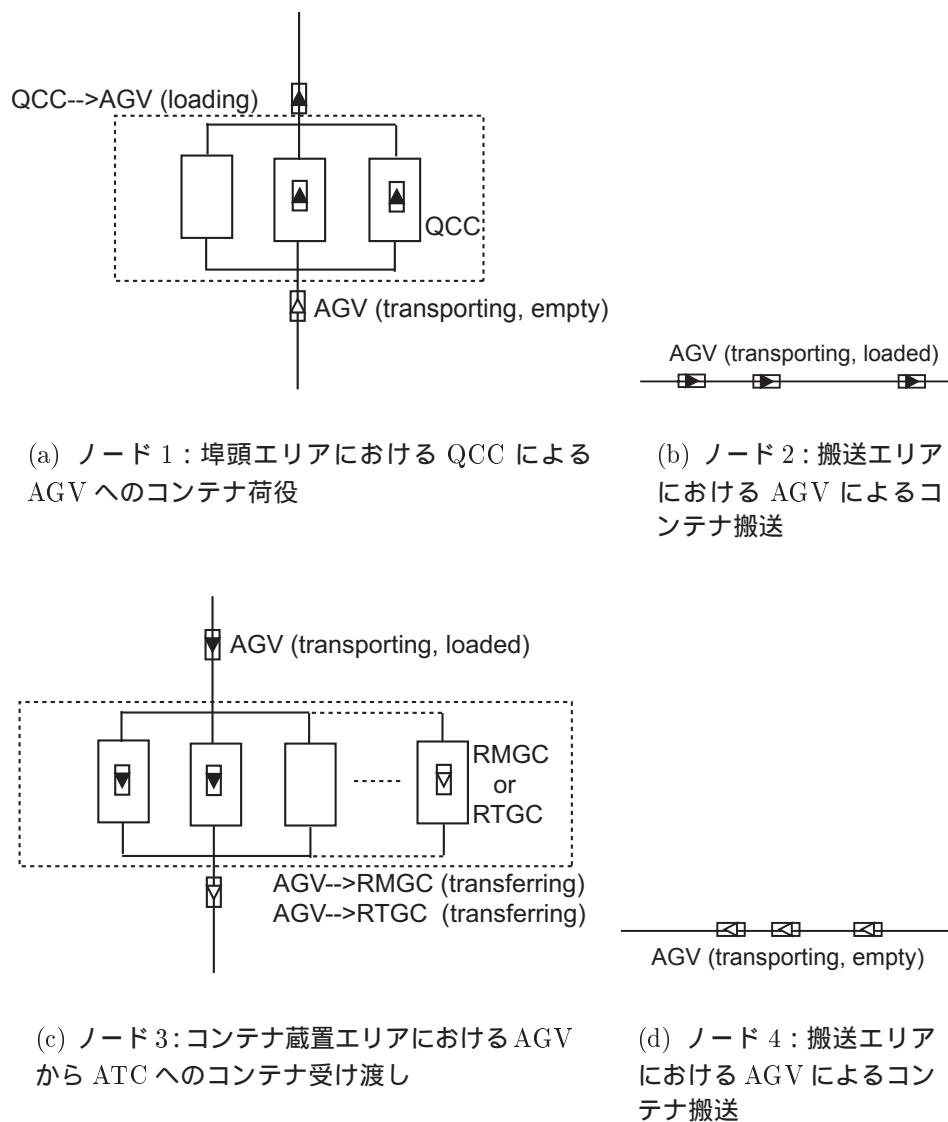


Fig. 3.9 各作業エリアに対するノードの割当て

用いられる。

埠頭エリア，すなわちノード 1 では，AGV は QCC により処理され，コンテナ蔵置エリアに相等するノード 3 では，AGV は ATC に処理される．そのため，これらのノードは複数サーバにより構成される．ここで，各ノードにおけるサーバ数は，それに相等するエリアにおいて稼動する QCC あるいは ATC の数に相等する．一方，搬送エリアに相等するノード 2 と 4 では，ノード間を移動中の AGV しかいないため，AGV が他の作業機器から処理を受けることはない．そのため，ノード間を移動するための時間コストを表現するため，これらのノードは無限サーバに

よって構成される．以上より， $j$  番目のノードを構成するサーバの数を  $S_j^{*4}$  とし，それらは， $S_1 = 3$  (QCC 台数)， $S_2 = \infty$ ， $S_3 = ATC$  台数/2， $S_4 = \infty$ ，と設定した．

AGV はモデル化された搬送システム内の各ノードを，それぞれ指数分布に従った時間コストに基づき通過して行く．また，このようにしてモデル化されたネットワーク内のノード間を，搬送をすべて終了するまで巡回する．

ここで，単一・複数・無限サーバにより構成されるそれぞれのノードを Fig. 3.10 に示す．Fig. 3.10(a) は単一サーバにより構成されるノードにおいて，1 台の AGV が当該サーバに処理されている様子を示している．当該ノードでは 1 台のみのサーバが稼働しているため，それ以上の AGV が同時に到着すると，当該ノード手前における待ちが発生する．Fig. 3.10(b) は 4 台のサーバ，すなわち複数サーバにより構成されるノードを示している．単一サーバと同様，サーバの台数以上の AGV が到着すると，AGV の待ちが生じる．当該ノードが本論文の埠頭エリアならびにコンテナ蔵置エリアに適用されている (Fig. 3.8 参照)．Fig. 3.10(c) は無限台のサーバにより構築されるノードを示している．サーバの台数が無限台に存在するということは，現実的にはありえないものの，当該ノードはネットワークエージェントを処理する機器が当該作業エリア内に存在しない場合，ネットワークエージェントが作業エリアを通過する時間を表現するために適用される．当該ノードは AGV の搬送経路上での移動時間を表現するため，本論文ではノード 2 ならびに 4 に適用されている (Fig. 3.8 参照)．

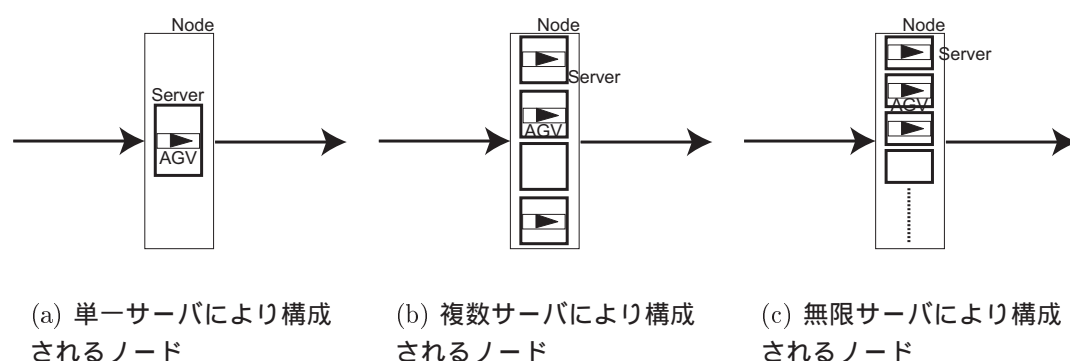


Fig. 3.10 単一・複数・無限サーバにより構成されるノード

\*4サーバ数は正規化定数を算出する計算プロセスにおいて用いられる．詳細については第 3.6 節で述べる．

### 3.6 AGV 搬送システムの定式化

第 3.5 節で行ったモデル化の結果，Fig. 3.1 の各 AGV 搬送システムは，第 3.3.3 項で述べた (a)~(c) の性能評価基準を考慮し，以下に示す (3.6.1) 式 ~ (3.6.4) 式のようにして定式化することができる．

(3.6.1) 式より AGV ならびに ATC の投入台数を，(3.6.2) 式ならびに (3.6.3) 式より，垂直型 AGV 搬送システムにおける退避経路数を設計することができる．また，(3.6.4) 式より，設計された AGV 搬送システム内の各ノードにおける AGV の交通密度を算出することができる．すなわち，搬送システム内における AGV 群の挙動を数理的に解析することが可能となる．

(a) システムスループット

$$\tau_j(K) = \theta_j \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (3.6.1)$$

(b) 平均滞在 AGV 台数 (無限サーバ)

$$\phi_j(K) = h_j \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (3.6.2)$$

(b) 平均滞在 AGV 台数 (複数サーバ)

$$\phi_j(K) = \frac{1}{G(K)} \sum_{0 \leq x \leq K} x q(x) G_{[j]}(K-x) \quad (3.6.3)$$

(c) 交通密度

$$\alpha_j(K) = h_j \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (3.6.4)$$

ただし，

$N$ : システム内の総ノード数

$K$ : システム内を巡回搬送する AGV の投入台数

$j$ : ノード番号 ( $j=1, \dots, N$ )

$\theta_j$ : ノード  $j$  への AGV の相対訪問回数

$h_j$ : ノード  $j$  のトラヒック係数

$G(x)$ : システム内に  $x$  台の AGV が存在する際の正規化定数 ( $0 \leq x \leq K$ )

$G_{[j]}(x)$ : システム内に  $x$  台の AGV が存在する際の  $j$  補完網における正規化定数 ( $0 \leq x \leq K$ )

$q(x)$ : あるノードに AGV が  $x$  台存在する際のたたみ込み係数

ここで、相対訪問回数 ( $\theta_j$ ) とは、ノード  $j$  を AGV が訪問した回数を意味する。本論文では搬送システムのモデル化にあたって、ネットワークに分岐のない巡回型単一連鎖待ち行列ネットワーク (Fig. 3.7 参照) を適用するため、相対訪問回数は各ノードで等しくなり、{ 相対訪問回数 } = { 総搬送コンテナ数 } として計算を行う。トラヒック係数 ( $h_j$ ) とは { AGV のノード  $j$  への相対訪問回数 }  $\times$  { ノード  $j$  における時間コスト } のことである。これらの値は第 3.3.1 項でも述べた通り、待ち行列ネットワーク理論を適用し、定式化された (3.6.1) 式 ~ (3.6.4) 式への入力パラメータとなる。なお、これら入力パラメータは、設計対象である搬送システムのスペックから計算することができる。正規化定数  $G(K)$  とは、各ノード周りの定常状態になる確率の和を 1 にするための定数のことである。 $j$  補完網とは対象とする閉鎖型待ち行列ネットワークの中から  $j$  番目のノードを取り除いて得られる正規化定数のことであり、 $G_{[j]}(K)$  はその  $j$  補完網に対して上述の正規化定数導出と同様の手続きにより、解を得たものである。本論文では正規化定数を計算するためにたたみ込み演算を行う [Buzen 1973] [紀 2002]。

以下に正規化定数算出のための計算プロセスを記述する。配列  $G(x)$ ,  $q(x)$  ( $x = 0, \dots, K$ ) を用意し、初期化を行った後、以下の手順を実行する。

$$G(x) \leftarrow \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$$

```

1 for ( $j = 1$ ;  $j \leq N$ ;  $j++$ ) {
2   for ( $x = 0$ ;  $x \leq K$ ;  $x++$ ) {
3
```

$$q(x) \leftarrow \begin{cases} \frac{h_j^x}{x!}, & x \leq S_j \\ \frac{x}{S_j! S_j^{x-S_j}} \frac{h_j^x}{x!}, & S_j < x \end{cases}$$

```
4   }  
5   for (k = K; k >= 0; k--) {  
6
```

$$G(k) \leftarrow \sum_{y=0}^k q(y)G(k-y)$$

```
7   }  
8 }
```

ただし,  $S_j (j=1, \dots, N)$  とは 第 3.5 節 で述べたノード  $j$  で稼働しているサーバ数のことである. ここで,  $S_3$ , すなわちノード 3 で稼働しているサーバ数は, Fig. 3.9(c) より, コンテナ蔵置エリアで作業を行っている ATC の投入台数に相当する. したがって, この  $S_2$  のパラメータにより, 当該作業エリアで稼働している ATC の投入台数を算出することができる.



## 3.7 システム設計方法論

### 3.7.1 設計アーキテクチャ

待ち行列ネットワーク理論を適用し，AGV 搬送システムの設計を行う際，第 3.3.1 項で述べた入力パラメータを正確に求めておく必要がある．Fig. 3.6 で示した入力パラメータのうち，ノードの数，サーバ数，総搬送コンテナ数などは，搬送システムのスペックから容易に求めることができる．しかしながら，機器の台数ならびに時間コストに関しては，以下のような問題が存在する．

- (1) 要求仕様を満たす最適な投入機器台数は，各ノードを通過するのに要する時間コストによって決定される．
- (2) 各ノードを通過するのに要する時間コストは，投入機器台数によって決定される．

そのため，AGV 搬送システムの最適設計を行うにあたっては，これら 2 つの互いに影響を及ぼし合うパラメータに対して，以下のチャレンジングポイントが存在する．

- 作業機器の投入台数に対して変化する各ノードにおける時間コストを厳密に見積る．

そこで本論文では Fig. 3.11 の概要図が示す設計方法論を提案する．本設計方法論では，2 つの設計アプローチがハイブリッド組合わされている．待ち行列ネットワーク理論に基づいて構成されたタスクフロー解析器では，数理モデルにより AGV 搬送システムはモデル化・定式化され，上述した入力パラメータにより，(a) システムスループット，(b) 平均滞在 AGV 台数，(c) 交通密度，などを算出することができる．そして，これら評価基準より，作業機器や経路数など，設計パラメータを高速に算出する．続いて，タスクフロー解析器より算出された設計パラメータに対し，解の妥当性を評価するためにシミュレーションが行われる．すなわち，システム全体を数理的にモデル化して解を算出し，続いて，作業機器の詳細な挙動を表現するために，シミュレータを用い，最終的な設計解を算出するアーキテクチャとなっている．これにより，待ち行列ネットワーク理論と搬送シミュレータ

をハイブリッドに適用した本設計方法論では，(1) 時間コストによって変化する最適な機器投入台数，(2) 投入された複数台の AGV 同士の渋滞による時間コストの変化量，を算出することが可能となる．

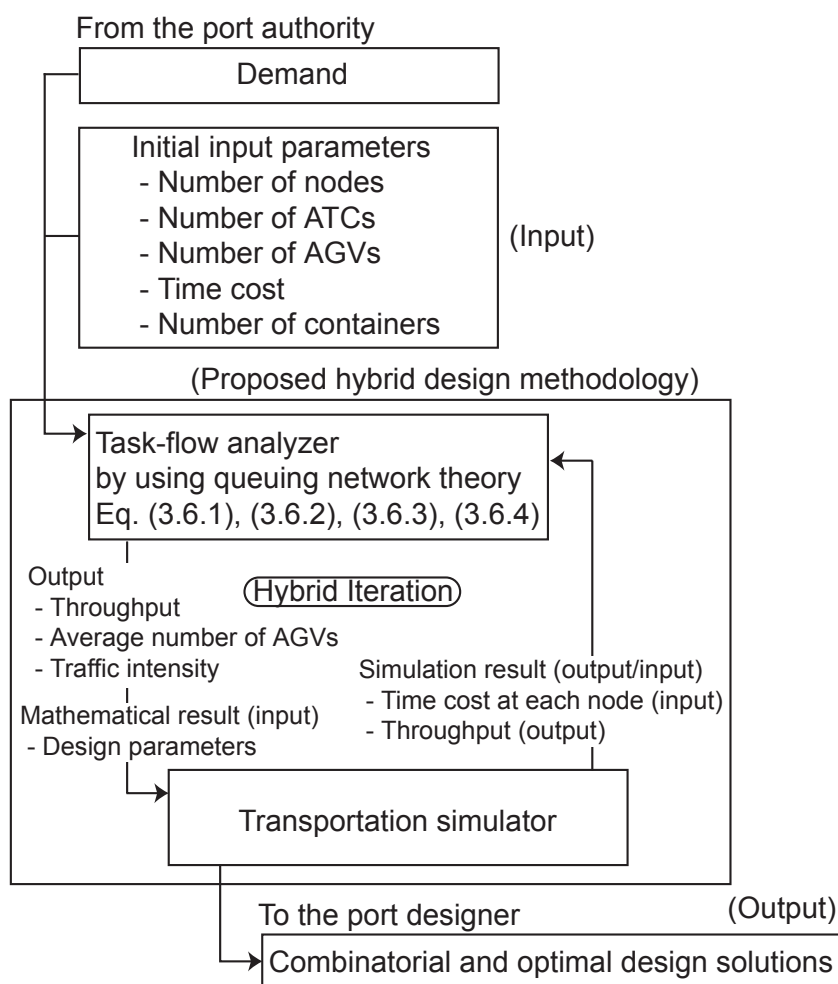


Fig. 3.11 提案する設計方法論の概要図

Fig. 3.11 において，まず要求仕様が与えられ，続いて初期パラメータが設計プロセスへと入力される．本設計プロセスでは，(3.6.1) 式～(3.6.4) 式に基づいて構成されるタスクフロー解析器より算出された出力（スループット，平均滞在 AGV 台数，交通密度）を評価し，数理結果として，要求仕様を満たす設計パラメータを得る．そして，これら得られた設計パラメータは，搬送シミュレータへの入力値となる．搬送シミュレーションの結果が数理結果と一致せず，要求仕様を満たすことができなかつた場合，シミュレーション結果より各ノードにおける時間コストを見積もり直し，タスクフロー解析器へと返す．すなわち，タスクフロー解析器により大まかなシステム性能が高速に算出され，詳細な機器群の挙動に関し

ては、シミュレータにより考慮することが可能となる。これら2つのアプローチはハイブリッドに繰返され、両方の出力が一致したら、最終的な組合せ設計解が算出される。本設計方法論を適用することにより、AGV搬送システムの数理的かつ動的なモデル化を行うことが可能となるため、第1.4.1項で述べた従来の設計方法論の問題点に対して、以下に示すような効果がある。

- 実際の搬送システムの性能評価ならびに数理モデルと実際の搬送システム内で作業を行っている機器群の挙動の差を考慮することができる。
- 従来型のシミュレーションに基づいた最適化手法に比べ、短時間でシステムを最適に設計することが保証できる。

また、本設計問題は組合せ最適化問題に属するため、解を一意に導出するには、たとえば作業機器の投入コストなどの評価関数を用いる必要がある<sup>\*5</sup>。しかしながら、各作業機器の投入コストなどは港湾物流を扱う管理者側により一様に決定することが困難となる。さらに、AGVとATC台数の解空間において、AGVの投入台数を最適に設計すると、ATCの台数が最適に設計することができず、また逆に、ATCの台数を最適に設計すると、AGVの台数が最適に設計することが不可能となる場合が生じる。そのような場合、本論文では、本組合せ最適化問題をAGVおよびATC投入台数の多目的最適化問題と考え、AGVとATCの投入台数をそれぞれ最小化するような組合せ最適解、すなわちパレート最適解(Pareto optimal solution)を導出することとする<sup>\*6</sup>。

ただし、ハイブリッドな設計方法論では、たとえば本論文の場合、数理モデルとシミュレーションを交互に繰り返すため、設計プロセスにおける数理モデルあるいはシミュレーションへの入力パラメータのいかんによって、解が最適に算出されない場合がある。すなわち、数理モデルやシミュレーションモデルにある程度の厳密性が欠けた場合、Fig. 3.12に示すように、数理モデルと搬送シミュレータ間での繰返し計算の際、入出力となる数値データに誤差が生じ、結果として誤った設計解が算出されてしまう問題が存在する。そのため、本設計方法論がAGV搬送システムの設計に対して有効であるのかどうか、実際の設計結果ならびにそのプロセスを基に、検討する必要がある。これについては次章で述べる。

<sup>\*5</sup> コストモデルの議論については、第5章で行う。

<sup>\*6</sup> パレート解の算出に関する議論は第4章で行う。

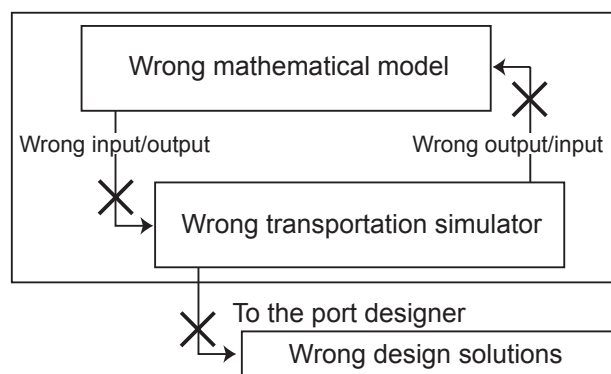


Fig. 3.12 ハイブリッドな設計方法論の問題点

### 3.7.2 設計アルゴリズム

Fig. 3.13 に本論文で提案する設計アルゴリズムを示す。まず、各ノードにおける時間コスト、QCC および ATC 台数を初期入力とし、待ち行列ネットワーク理論を適用したタスクフロー解析器によりシステムスループットが算出される。このとき、あらかじめ行った AGV の渋滞が一切発生しない理想状態での搬送シミュレーション<sup>\*7</sup>より、各ノードにおける初期入力時間コスト（ノード 1~4）が用いられる。また、ATC および QCC の初期入力台数をそれぞれ 2 台、3 台と設定した。

Fig. 3.14 にタスクフロー解析器の中で行われている計算プロセスを示す。(3.6.1) 式に基づいて、AGV 台数を変えた際に算出された各 AGV の投入台数に対するスループットを評価し、与えられた要求仕様を満たす場合、最適 AGV および ATC 台数が算出される。続いて、これら算出された AGV および ATC 台数に基づき、(3.6.2) 式および (3.6.3) 式を用いて各ノードに平均的に滞在する AGV 台数を算出する。算出された平均滞在 AGV 台数と各ノードの容量を基に、待避経路数を設計する。たとえば、ノード 3 には初期状態ではロケーションの数 (ATC 台数 / 2) だけ作業路が設定されているため、ノード 3 の平均滞在 AGV 台数がこの作業路数を上回ると、それに対応した待避経路が設計されることとなる。これら設計パラメータおよび QCC 台数がシミュレータへの入力値として得られる。なお、(3.6.4) 式は第 4.5.1 節のシステム解析で用い、直接設計には用いない。AGV をあらかじめ設定した上限台数まで投入しても要求仕様を満たさない場合、ATC 台数を変え、各ノードにおける時間コストを初期化し、再度設計を繰り返す。なお、設計を行うにあたっては、AGV ならびに ATC の投入台数を無意味に投入することを避けるため、あらかじめ AGV および ATC の最大投入台数を設定する。そのため、AGV、ATC を

<sup>\*7</sup>搬送システム内に AGV を 1 台、ATC を 2 台、すなわちロケーション 1 本を投入して行ったシミュレーションのこと。

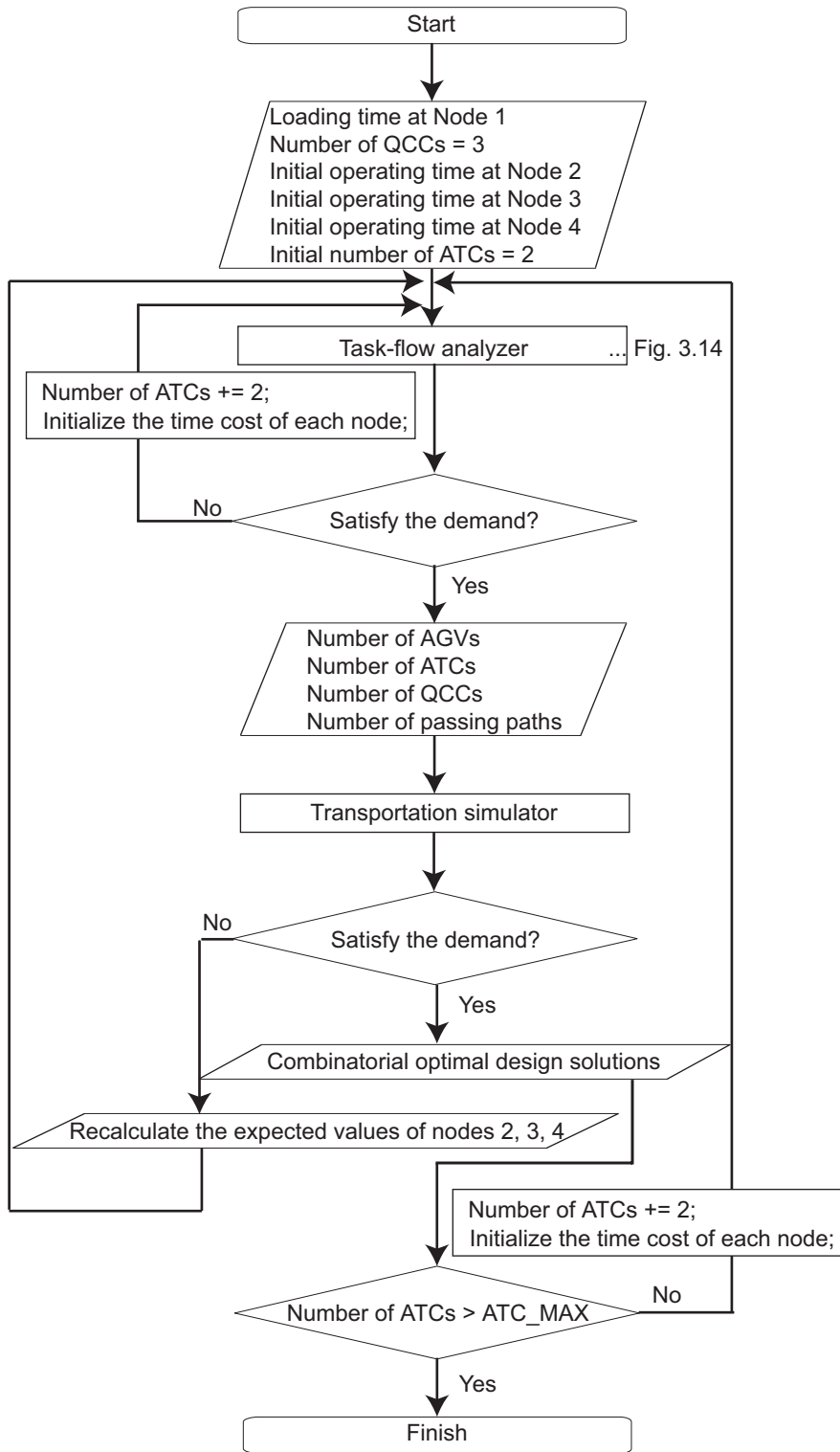


Fig. 3.13 設計アルゴリズム

最大投入台数まで増やしてもなお要求仕様を満たすことができない場合，本設計プロセスは終了する．

```
Task-flow analyzer
for (k = 0 to k <= AGV_MAX) {
  throughput = calc_throughput(k); — Eq.(3.6.1)
  if (throughput >= demand) {
    p-paths = design_p-paths(k); — Eq.(3.6.2), (3.6.3)
    traffic_intensity = analyze_bottleneck(k); — Eq.(3.6.4)
    break;
  }
}
```

Fig. 3.14 タスクフロー解析器内部の計算プロセス

算出された設計パラメータを基に搬送シミュレーションを行う．シミュレーションによる搬送結果が理論値通り要求仕様を満たす場合，組合せ設計解が算出され，さらに ATC 台数を変えた設計が繰返される．要求仕様を満たさない場合，AGV のノード 2, 3 および 4 に要する時間コストの期待値をシミュレーション結果より算出し，それらを基に積形式解が実際のシステムを近似する形で再度設計を繰返す．なお，提案アルゴリズムにおいて，待ち行列ネットワーク理論を用いることにより得られた計算値および搬送シミュレーションによる結果が同様の要求仕様を満たしているかどうかを判断するため，“Satisfy the demand” を 2 回用いた．

## 3.8 おわりに

本章では、要求仕様に対する AGV 搬送システムの最適な設計法について、その方法論の提案を行った。そして、作業機器の投入台数を最適に設計するためのプロセスについて説明した。

第 3.2 節では、垂直型・水平型 AGV 搬送システムについて、レイアウトや機器群の作業など、それらの詳細な設定を行った。

第 3.3 節では、提案する設計方法論において、ハイブリッドに用いられる数理モデルである待ち行列ネットワーク理論について、本論文でいかにして適用されるかについて述べた。

第 3.4 節では、本設計問題は組合せ最適化問題として解くための問題設定を行った。

第 3.5 節および第 3.6 節では、待ち行列ネットワーク理論に基づいた AGV 搬送システムのモデル化および定式化について説明した。

第 3.7 節では、提案する設計方法論の概要ならびに設計アルゴリズムについて説明し、入力から出力、すなわち要求仕様から設計解導出までのプロセスについて述べた。

次章では、本提案設計方法論の有効性を検証するため、垂直型および水平型の AGV 搬送システムを対象に、特定の要求仕様に対する最適設計を行う。また、垂直型 AGV 搬送システムの設計プロセスおよび設計時間を考察し、本方法論の有効性について明らかにする。





## 第4章 AGV搬送システムの最適設計

---

4.1	はじめに . . . . .	70
4.2	設計条件 . . . . .	71
4.2.1	作業機器の仕様と入力パラメータ . . . . .	71
4.2.2	垂直型 AGV 搬送システムの設計パラメータ . . . . .	72
4.2.3	水平型 AGV 搬送システムの設計パラメータ . . . . .	72
4.3	運用モデル . . . . .	73
4.3.1	指令の割当て方 . . . . .	73
4.3.2	作業機器間でのコンテナ受け渡し動作：AGV → ATC . . . . .	74
4.4	システム設計 . . . . .	75
4.4.1	組合せ設計解 . . . . .	75
4.4.2	考察 . . . . .	77
4.5	AGV 搬送システムの性能評価 . . . . .	82
4.5.1	交通密度 . . . . .	82
4.5.2	平均滞在 AGV 台数 . . . . .	84
4.6	おわりに . . . . .	86

---

## 4.1 はじめに

本章では、提案する設計方法論の有効性を検証するため、垂直型・水平型 AGV 搬送システムに対する最適設計を行う。また、垂直型 AGV 搬送システムの設計プロセスおよび設計時間を考察し、本方法論の有効性について明らかにする。

第 4.2 節では、設計解として、垂直型・水平型 AGV 搬送システムを設計するに際しての設計プロセスへの入出力パラメータ、作業機器、仕様、設計対象となるパラメータについて説明する。

第 4.3 節では、各搬送システムにおける運用モデルとして、搬送指令の割当て方、ならびに作業機器間での行動則について説明する。

第 4.4 節では、垂直型・水平型 AGV 搬送システムの、要求仕様に対する最適設計、そして、垂直型 AGV 搬送システムを対象に、その設計プロセスについて考察する。

第 4.5 節では、垂直型 AGV 搬送システムを対象に、その性能評価を行う。

第 4.6 節では、本章をまとめる。

## 4.2 設計条件

### 4.2.1 作業機器の仕様と入力パラメータ

本論文では設計条件として、総搬送コンテナ数を 600[TEU]、コンテナ船の停泊時間を 5[hour] とした。すなわち、要求仕様を 120[TEU/hour] として、それを満たす搬送システムの設計解を算出する。また、AGV および ATC (Automated Transfer Crane) として、RMGC (Rail-Mounted Gantry Crane) と RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane) の搬送仕様を Table 4.1 に示す。AGV および RMGC は、コンテナ搬送時と非搬送時で移動の最高速度が異なるため、それらは在荷時および空荷時で示されている。また、ATC はロケーション上での直線運動しか行わないため、回転速度に関しては表記されていない。

Table 4.1 AGV, RMGC, RTGC の仕様

	AGV 在荷 / 空荷	RMGC 在荷 / 空荷	RTGC 在荷 / 空荷
最高速度 [m/s]	5.56 / 6.94	2.0 / 2.5	- / 2.5
回転速度 [m/s]	1.39 / 1.39	- / -	- / -
加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	0.15 / 0.15	0.1 / 0.1	- / 0.1
減速度 [m/s <sup>2</sup> ]	0.63 / 0.63	0.4 / 0.4	- / 0.4

Table 4.1 に示した各作業機器の仕様を実装した搬送シミュレータを構築し、第 3.7.2 項における“各ノードにおける初期入力時間コスト”を算出した結果、Node 1 = 60 [s]、Node 2 = 165 [s]、Node 3 = 30 [s]、Node 4 = 122 [s]、となった。ただし、ノード 2~4 は設計段階において設計パラメータにより変化する値であるため、その都度シミュレータより見積もられる。なお、初期入力コスト算出するために行ったシミュレーション実験では、垂直型・水平型 AGV 搬送システムともに、AGV を 1 台、ATC を 2 台、ロケーション本数は 1 本として、同じ搬送経路長を設定した。

埠頭エリアにおける QCC (Quay Container Crane) の投入台数に関しては、第 3.4 節の問題設定より、設計アルゴリズムの初期投入台数において 3 台とし、この値は設計段階で一定とする。さらに、ノード 1 の時間コストに関しては、設計ア

ルゴリズムにおいて、初期入力の際に  $\text{Node } 1 = 60$  [s] として与え、この値も設計段階で一定の値となるものとする。AGV ならびに ATC の最大投入台数に関しては、それぞれ  $\text{AGV\_MAX} = 30$  台、 $\text{ATC\_MAX} = 20$  台とした。

#### 4.2.2 垂直型 AGV 搬送システムの設計パラメータ

以下に垂直型 AGV 搬送システムを設計する際の対象となる設計パラメータを示す。

- AGV の投入台数
- RMGC の投入台数
- 退避経路の数

#### 4.2.3 水平型 AGV 搬送システムの設計パラメータ

以下に水平型 AGV 搬送システムを設計する際の対象となる設計パラメータを示す。

- AGV の投入台数
- RTGC の投入台数

## 4.3 運用モデル

### 4.3.1 指令の割当て方

ターミナルオペレーションについて、AGV 群は埠頭エリアより所定のロケーションまで、またロケーションから埠頭エリア内の特定の QCC の所まで、以下に示す指令にしたがって移動を行う。

- 埠頭エリア内

1. 3 台すべての QCC が作業待ち状態にある場合、各 QCC は AGV のコンテナ荷役相手として均等に決定され得る。
2. ただし、作業中の QCC がいる場合には、作業待ち状態にある QCC が優先的に AGV のコンテナ荷役相手として決定される。
3. すべての QCC が作業中の場合、各 QCC はランダムに AGV の荷役相手として決定される。

- コンテナ蔵置エリア内

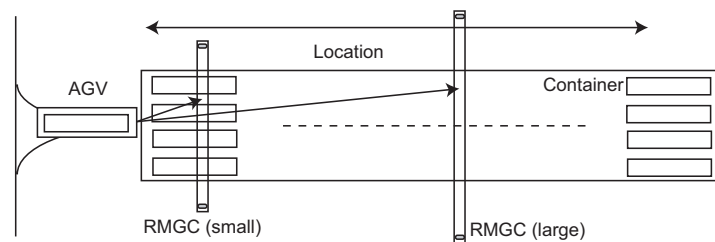
1. すべての蔵置ロケーションは、コンテナおよび AGV の目的ロケーションとして均等に決定され得る。
2. ロケーション上で ATC が稼働している場合、作業待ち状態にある ATC がいるロケーションが、当該コンテナおよび AGV の目的ロケーションとして優先的に決定される。
3. すべての ATC がコンテナ蔵置エリア内で作業中の場合、すべてのロケーションはコンテナと AGV の目的ロケーションとしてランダムに決定される。
4. 当該ロケーション内のコンテナの蔵置位置はランダムに決定される。

すなわち、搬送システム内に作業を割当て可能な QCC あるいは ATC が存在する場合、AGV 群に対してどのロケーションまでコンテナを搬送し、どの QCC のところへコンテナ荷役のために戻るかを指令するすべての搬送タスクは、First-In

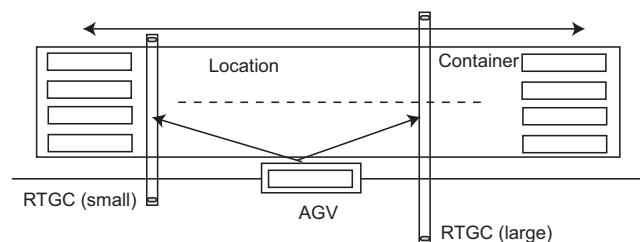
First-Out (FIFO) ルールに基づいて割当てられる。また、これらの指令は QCC からコンテナを受け取る際にその目的ロケーションと蔵置位置が、ATC にコンテナを受け渡し終えた際に目的 QCC がそれぞれ割当てられる。

#### 4.3.2 作業機器間でのコンテナ受け渡し動作：AGV → ATC

Fig. 4.1 は、AGV から ATC へのコンテナ受け渡し行動を行う際の、AGV の ATC を選択する動作を示している。垂直型 AGV 搬送システムにおいては、AGV がコンテナ受け渡し位置に到着してから、先に受け渡し位置まで戻ってきた RMGC を受け渡し相手として選択する。ただし、2 台の RMGC ともすでに受け渡し位置にて待ち状態の場合、AGV はランダムに RMGC を選択する (Fig. 4.1(a) 参照)。水平型 AGV 搬送システムにおいては、蔵置位置に隣接する受け渡し位置に AGV が到着すると、2 台の RMGC のうち、いずれかをランダムに選択する。ただし、作業中の RMGC がいた場合、他方を選択する (Fig. 4.1(b) 参照)。



(a) 垂直型 AGV 搬送システムにおける AGV から RMGC へのコンテナ受け渡し



(b) 水平型 AGV 搬送システムにおける AGV から RTGC へのコンテナ受け渡し

Fig. 4.1 各 AGV 搬送システムにおけるコンテナ受け渡しのための AGV による ATC の選択行動 (ランダム選択)

## 4.4 システム設計

### 4.4.1 組合せ設計解

Fig. 4.2 に、それぞれ要求仕様に対する垂直型と水平型の AGV 搬送システムに対する解空間とその設計解を示す。

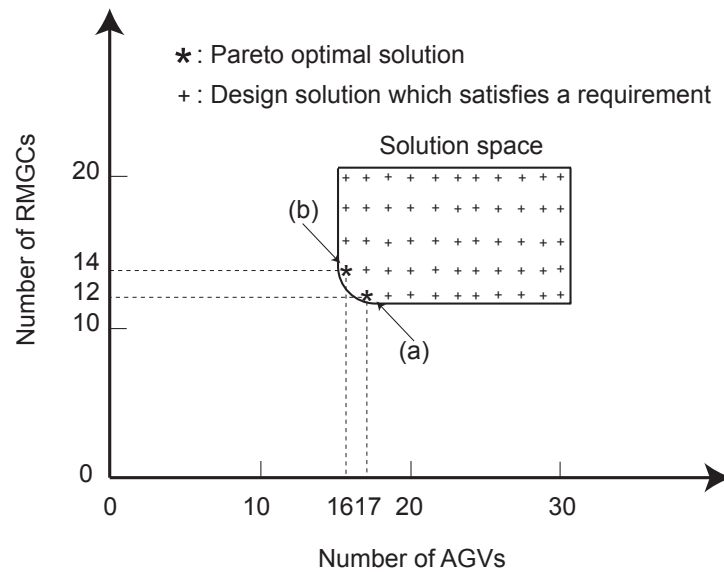
本論文では、多目的最適化問題における組合せ設計解としてパレート最適解の導出を行う。ただし、Fig. 4.2(b) が示す通り、水平型 AGV 搬送システムでは、最適解を一意に算出することができたため、ここでは垂直型 AGV 搬送システムにおける設計結果を基に議論を進める。Fig. 4.2(a) に得られた AGV および RMGC の設計パラメータの解空間を示す。\* がパレート最適解、+ が要求仕様を見たすことのできる組合せ設計解を示している。その結果、本設計では (a)、(b) の 2 通りの解を得ることができた。

パレート解 (a) および (b) が得られた際の各ノードにおける平均滞在 AGV 台数を Table 4.2 に示す。ここでは、今後これら平均滞在 AGV 台数より搬送システムの最適経路長なども設計することを視野に入れ、実数で算出された AGV 台数を四捨五入して整数で表記することとした。Table 4.2 より、ノード 3 における平均滞在 AGV 台数は、ロケーションの数より少ないことがわかる。一方、AGV のノード 3 に費やされる時間分布を考慮すると、瞬間的に AGV 台数がロケーション数を上回ることも考えられる。しかしながら、シミュレーションによる搬送性能を確認し、その結果、待ち行列ネットワーク理論により算出された結果と同様の性能が得られたことから、今回の設計では待避経路を 0 本と設計した。

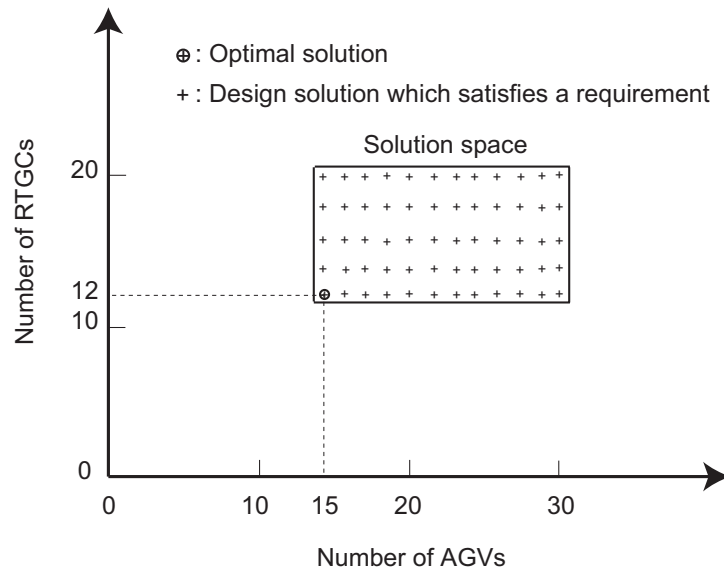
Table 4.2 各ノードにおける平均的に滞在する AGV 台数

設計解	ノード 1	ノード 2	ノード 3	ノード 4
垂直型 (a)	6	4	3 < ロケーション数: 6	4
垂直型 (b)	5	4	3 < ロケーション数: 7	4

Table 4.3 にそれぞれ得られたパレート解ならびに水平型 AGV 搬送システムにおける最適設計解、その際のノード 2, 3, 4 に要した時間コストを示す。パレート解が得られた垂直型 AGV 搬送システムでは、(a) RTGC を最適台数の 12 台にすると、AGV は 17 台となり、一方、(b) AGV を最適台数の 16 台にすると、RTGC



(a) 解空間におけるパレート最適解（垂直型 AGV 搬送システム）



(b) 解空間における最適解（水平型 AGV 搬送システム）

Fig. 4.2 垂直型と水平型の AGV 搬送システムに対する解空間とその設計解

が 14 台と最適台数でなくなっていることがわかる。また，上述した通り，退避経路は (a)(b) の場合で両方とも 0 本と設計した。水平型 AGV 搬送システム



の場合では，AGV=12台，RTGC=15台とそれぞれ最適台数を算出することができた．

Table 4.3 組合せ設計解と各ノードにおける時間コスト

設計解	ATC	AGV	退避経路数	各ノード(2, 3, 4)の搬送時間コスト [s]
垂直型 (a)	12 (RMGC)	17	0	178, 45, 144
垂直型 (b)	14 (RMGC)	16	0	170, 36, 140
水平型	12 (RTGC)	15	—	184, 36, 156

#### 4.4.2 考察

##### 4.4.2.1 設計プロセスにおける近似誤差の考察

Fig. 3.13 中において，本設計プロセスは AGV のノード 2, 3 および 4 に要する搬送時間コストの期待値をシミュレーション結果より算出し，それらを基に積形式解が実際のシステムを近似する形で行われる．したがって，この近似解の誤差が危険側の誤差か安全側の誤差かを検討する必要がある．ここで，危険側とは近似誤差の影響により，AGV の必要台数が実際より多く見積もられてしまい，パレート最適解ではない解が得られる場合のことを意味する．一方，安全側とは，AGV の必要台数が実際よりも少なめに見積もられるため，シミュレーションを行うことにより最終的に最適解を得ることが可能である場合を意味する．

Table 4.4 に垂直型 AGV 搬送システムの設計プロセスにおけるタスクフロー解析器に対する各ノードの時間コストおよび得られた設計解，シミュレーションから得られた実際に要した時間コストの遷移の様子を示す．初期入力時間コストに対し，Fig. 3.14 の示す待ち行列ネットワークを用いた計算に基づいて各設計パラメータが算出される．ただし，試行 1 回目の示す RMGC 台数 2 台の場合は，AGV の投入台数を  $AGV\_MAX$  まで増加させても，(3.6.1) 式から計算されるシステムスループットが要求スループットを満たすことができず，設計パラメータが得られなかった．そのためシミュレーションを行わず，2 回目の設計プロセスで再び初期入力値に基づき RMGC の投入台数を 2 台増やして再度計算が行われている．その

Table 4.4 設計段階における搬送時間コスト（入出力パラメータ）の変化

試行回数	各ノードの時間コスト (1, 2, 3, 4)	待ち行列ネットワーク理論により得られた設計解 (RMGC, AGV, 退避路数)	搬送シミュレータにより再計算された時間コスト
1回目	60, 165, 30, 122	RMGC = 2 → 設計解なし	–
2回目	60, 165, 30, 122	(4, 23, 2)	60, 828, 114, 169
3回目	60, 828, 114, 169	RMGC = 4 → 設計解なし	–
4回目	60, 165, 30, 122	(6, 18, 1)	60, 288, 96, 145
5回目	60, 288, 96, 145	RMGC = 6 → 設計解なし	–
6回目	60, 165, 30, 122	(8, 18, 0)	60, 246, 65, 157
7回目	60, 246, 65, 157	(8, 25, 1)	60, 357, 95, 149
8回目	60, 357, 95, 149	RMGC = 8 → 設計解なし	–
9回目	60, 165, 30, 122	(10, 17, 0)	60, 186, 71, 144
10回目	60, 186, 71, 144	(10, 21, 1)	60, 207, 84, 144
11回目	60, 207, 84, 144	(10, 23, 1)	60, 194, 78, 159
12回目	60, 194, 78, 159	RMGC = 10 → 設計解なし	–
13回目	60, 165, 30, 122	(12, 17, 0)	設計解算出 60, 178, 45, 144
14回目	60, 165, 30, 122	(14, 16, 0)	設計解算出 60, 170, 36, 140
15回目	60, 165, 30, 122	(16, 16, 0)	–
16回目	60, 165, 30, 122	(18, 16, 0)	–
17回目	60, 165, 30, 122	(20, 16, 0)	–

結果，要求仕様を満たす設計パラメータが得られたため，それらに基づいた搬送シミュレーションが行われる．しかしながら，得られた設計パラメータでは実際には搬送渋滞が起きてしまうため要求仕様は満たすことができない．そこで，シ

シミュレーションにより再計算された各ノードの時間コストを見積もりなおし、それらが再び待ち行列ネットワーク理論への入力値となり、3回目の設計プロセスへ進む。しかしながら、2回目のシミュレーション結果より得られた時間コストを入力値として行った3回目における計算では、設計パラメータの導出が不可能となったため、RMGC台数が再び2台投入され、設計プロセスが進められる。17回目でRMGC台数が設定した  $ATC\_MAX = 20$  台となったため、ここで設計プロセスが終了した。

本結果より、AGVの投入台数を増やすにつれて、AGV群による渋滞が頻繁に生じてしまうようになり、各ノードに要する時間コストは、投入するAGV台数に対して単調増加の傾向を示すことがわかった。一方、待ち行列ネットワーク理論のみでは、AGV同士の渋滞を考慮することができないため、1回前の搬送シミュレーションにより得られた各ノードの時間コストに基づき計算が行われる。このことから、設計プロセスにおいても、タスクフロー解析器の計算プロセスに入力される各ノードの時間コストの総和が、実際の搬送システムにおける各ノードの時間コストの総和より常に大きく見積もられることとなる。その結果、Fig. 4.3の2本の曲線（数理モデルとシミュレーション結果(1)）が示すように、同等のAGVの投入台数に対しても、シミュレーション結果よりも数理モデルにより算出されたスループットが常に高いことがわかる。このように、数理モデルの結果と、シミュレーションの結果の値に上述したような関係がある場合、得られた解は実際の解に比べ常に必要最小台数以下になる。したがって、近似誤差を考慮しても、提案する設計アルゴリズムにより最適な解を得ることが可能である。すなわち、本設計方法論ではハイブリッドな設計アプローチによる問題は生じていないことが示された。

Fig. 4.3において、投入台数に対するスループットの関係がシミュレーション(2)および(3)のような場合、すなわち、1. 実際の搬送システムにおけるスループットが数理モデルよりも大きな値をとってしまう場合、2. 実際の搬送システムのスループットが、AGVの投入台数に対して単調な増加傾向を示さない場合、などは、設計パラメータが実際の解より多く見積もられてしまうか、設計解周辺で振動してしまうため、本設計方法論により最適解を算出することは不可能となる。しかしながら、本論文における設計プロセスにおいて、このような現象は起きなかった。

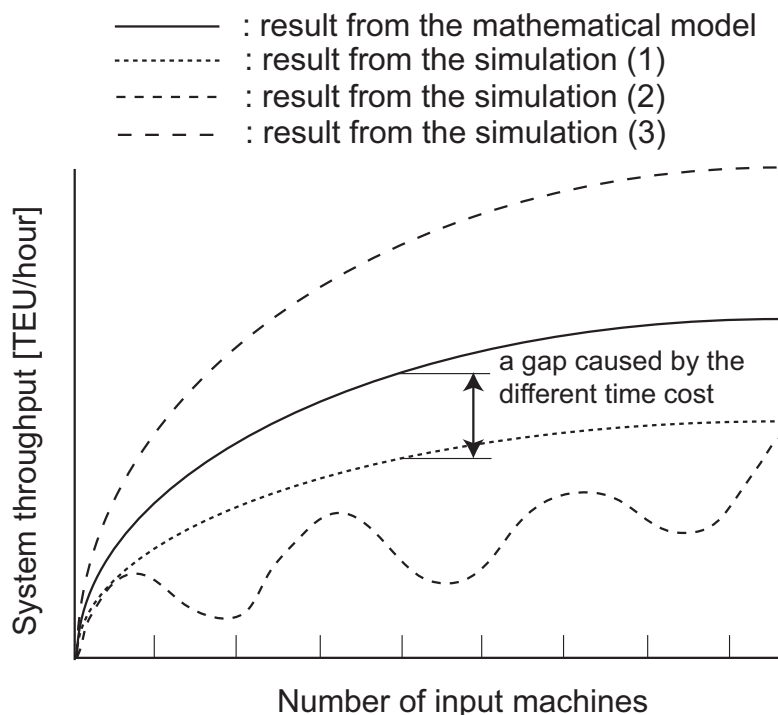


Fig. 4.3 AGV の投入台数とそれともなうシステムスループットの関係

#### 4.4.2.2 計算コストの考察

本論文で扱っている設計問題をシミュレーションベースのみで解の組に対する全探索を行おうとした場合、RMGC20 台に対して AGV30 台、さらにたとえば待避経路数最大 2 本の組合せをすべて解こうとすると、900 回の試行を行わなくてはならない。これに対し、本手法では待ち行列ネットワーク理論を用いることにより、Fig. 4.2 および Table 4.4 が示すように解の探索コスト（空間）を削減することができる。今回の設計では、解を算出するまでに行った搬送シミュレーションの試行回数が 9 回、すなわち、全探索法に比べ計算コストが 1/100 程度で済むことを確認した。また、1 回のシミュレーションにかかる時間は、Pentium 4 CPU 2.8 GHz の計算機を使用し、数秒程度<sup>\*1</sup>であることから、設計解の導出までにかかる時間も 1 分程度である。また待ち行列ネットワーク理論を用いた設計パラメータの計算時間は 0.1[s] 以下で、搬送シミュレーションにかかる計算時間と比較して無視できる程度の計算コストである。一方、本設計問題を全探索手法で解いた場合、1 日程度かかってしまうことがわかる。さらに、探索する設計パラメータの範

\*1シミュレーションの様子を表示させた場合は数十分あるいはそれ以上かかる場合もある。

困 ( $AGV\_MAX$ ,  $ATC\_MAX$ , など)が増したり, 本設計問題では対象としてこ  
なかつた QCC など, 他の作業機器も設計対象とした場合, 設計解導出までには数  
日 ~ 数週間, あるいはそれ以上の時間がかかってしまう. また, 搬送経路の構成  
が変更されあ場合, 設計をはじめからやりなおさなくてはならない. このよう  
な場合に対しても, 本設計方法論では, ネットワークの構成, または, ノードを構  
成するサーバ数を変更するのみで, 対応が可能である.

以上, これら設計時間あるいはパラメータ変更に対する適応性の観点からも本  
設計方法論が有効であると考ええる.

## 4.5 AGV 搬送システムの性能評価

### 4.5.1 交通密度

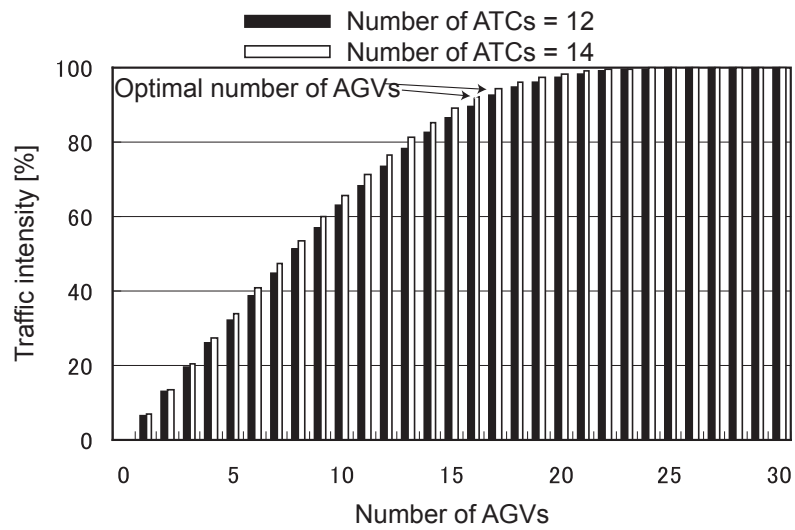
ここでは、垂直型 AGV 搬送システムを題材にし、Table 4.3 における最適設計解 (a), (b) に基づいて構築された搬送システムの性能評価を行う。そのため、搬送システムにおけるノード1および3の交通密度の比較結果を Table 4.5 に、また、AGV の投入台数に対するノード1および3における交通密度の変化の様子を Fig. 4.4 に示す。

Table 4.5 ノード1と3の交通密度の比較

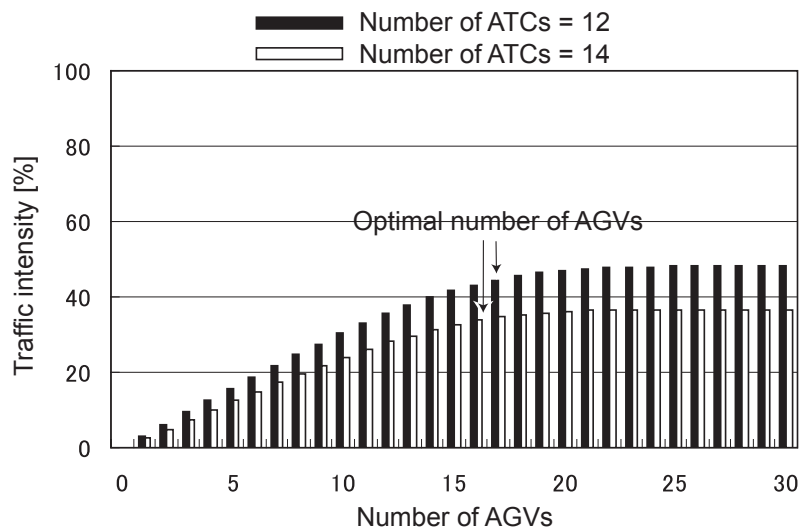
解	ノード1 [%]	ノード3 [%]
(a)	92.4	44.5
(b)	91.9	33.7

Table 4.5 より、設計解 (a), (b) に基づいて垂直型 AGV 搬送システムを構築した場合、ノード1、すなわち埠頭エリア側の交通密度が非常に高くなってしまふことがわかる。これは、第4.2節の設計条件で述べた通り、QCC は設計対象としていないため、埠頭側にボトルネックが生じた際、それに対するの改善設計を行わなかったためである。

Fig. 4.4 のそれぞれの設計解が得られた時点における交通密度を比較すると、Fig. 4.4(a) の示すノード1の埠頭エリアでは、AGV、ATC の投入台数の増加に対して、交通密度はいちじるしく増加傾向にあり、AGV の投入台数が20台以上では、ほぼ100[%]に達してしまっている。一方、Fig. 4.4(b) では、AGV、ATC の投入台数の増加に対して、ノード3のコンテナ蔵置エリアにおける交通密度が最高でも約50[%]程度であることがわかる。すなわち Fig. 4.4 より、交通密度で搬送システム内の性能を評価すると、得られた設計パラメータによりシステムを構築した場合、埠頭エリアにおける高い交通密度により、システムのボトルネックが埠頭エリアに生じてしまう可能性があることがわかる。また、ノード1の交通密度はノード3に比べ先にほぼ100[%]に達してしまっていることから、AGV や RMGC 台数をむやみに増加させても、埠頭エリアにおける AGV の交通渋滞が増加するのみで、搬送効率の低下にしかならないことが示された。



(a) ノード 1 (埠頭エリア)



(b) ノード 3 (コンテナ蔵置エリア)

Fig. 4.4 交通密度による垂直型 AGV 搬送システムの性能評価

なお、水平型 AGV 搬送システムにおいても、最適設計パラメータに基づいた交通密度の評価を行った。その結果、ノード 1 : 84.6 [%]、ノード 3 : 8.7 [%]、となり、垂直型と比べ、埠頭および蔵置エリアの交通密度は低いものの、埠頭側にボトルネックが生じてしまっていることがわかった。

### 4.5.2 平均滞在 AGV 台数

AGV 台数を増加させていったときの各ノードにおける平均 AGV 滞在台数，すなわちシステム内の各エリアにおける AGV の挙動を Fig. 4.5 に示す．待ちの発生しないノード 2 および 4 では，搬送中の AGV がどの程度滞在しているかがわかる．また，待ちの生じるノード 1 および 3 ではコンテナの受け渡し作業中の AGV 台数および，作業待ちしている AGV 台数が合計で何台存在しているかがわかる．

Fig. 4.5 より，AGV の投入台数の増加にともない，ノード 1 における AGV の平均滞在台数も増加してしまっていることがわかる (Fig. 4.5(a) 参照)．一方で，Fig. 4.5(b) ~ Fig. 4.5(d) では，AGV の投入台数に対して，ある台数までは，各ノードにおける平均滞在 AGV 台数が増加していることが見てとれる．しかしながら，AGV の投入台数が約 20 台になるあたりからは，投入台数に対して横ばいになっている．このとき，Fig. 4.5(a) の示すノード 1 の平均滞在 AGV 台数に注目すると，Fig. 4.5(b) ~ Fig. 4.5(d) とは逆に，AGV の投入台数が 20 台以降になると，その増加傾向が強まっていることがわかる．これは，Fig. 4.4(a) において，AGV の投入台数が 20 台程度になるあたりから，ノード 1 における交通密度がほぼ 100[%] に漸近してしまっており，そのため，AGV を投入しても，その分だけ埠頭エリアにおける AGV の作業待ち台数を増加させてしまっているためである．その結果，これ以上のシステムスループットが要求仕様として課せられた場合，埠頭エリアにおける作業待ち中の AGV 台数の増加が顕著になり，AGV を投入することにより搬送効率が逆に悪化してしまい，システムとして破綻してしまうことが予想される．

以上のことより，今回設定した以上の搬送要求を満たすためには，上述のボトルネックのことを考慮すると，埠頭エリアにおける QCC の作業の効率化を何らかの形で図る必要がある．



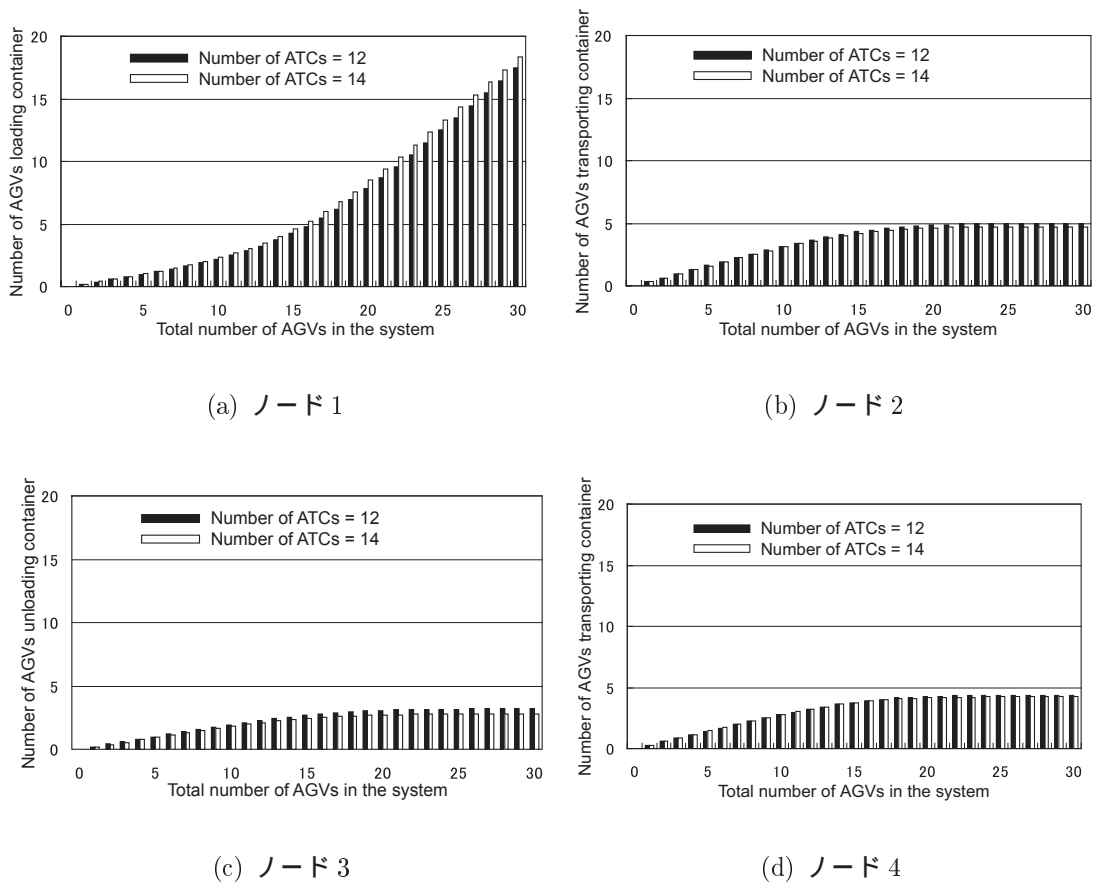


Fig. 4.5 投入 AGV 台数を増加させていった際の各ノードにおける平均滞在 AGV 台数

## 4.6 おわりに

本章では、提案した設計方法論の有効性を検証するため、垂直型・水平型 AGV 搬送システムに対する最適設計を行った。また、垂直型 AGV 搬送システムの設計プロセスおよび設計時間を考察し、本方法論の有効性について明らかにした。

第 4.2 節では、設計解として、垂直型・水平型 AGV 搬送システムを設計するに際しての設計プロセスへの入出力パラメータ、作業機器、仕様、設計対象となるパラメータについて説明し、明らかにした。

第 4.3 節では、各搬送システムにおける運用モデルとして、搬送指令の割当て方、ならびに作業機器間での行動則について説明した。

第 4.4 節では、垂直型・水平型 AGV 搬送システムの、要求仕様に対する最適設計、そして、垂直型 AGV 搬送システムを対象に、その設計プロセスについて考察した。

第 4.5 節では、垂直型 AGV 搬送システムを対象に、その性能評価を行った。

次章では、さまざまな要求仕様に対する垂直型・水平型 AGV 搬送システムの最適設計を行い、コストパフォーマンスに基づいたレイアウト特性による有効性の評価を行う。

# 第5章 レイアウト特性による垂直型・ 水平型 AGV 搬送システムの 有効性の評価

---

5.1	はじめに . . . . .	88
5.2	垂直型および水平型 AGV 搬送システムの設計パラメータ . . . . .	89
5.3	設計条件 . . . . .	90
5.4	コストパフォーマンスによる有効性の評価 . . . . .	92
5.4.1	コストモデル . . . . .	92
5.4.2	有効性の比較・評価 . . . . .	93
5.5	設計パラメータの影響解析 . . . . .	96
5.6	おわりに . . . . .	99

---

## 5.1 はじめに

本章では，さまざまな要求仕様に対する垂直型・水平型 AGV 搬送システムの最適設計を行い，コストパフォーマンスに基づいたレイアウト特性による有効性の評価を行う．そして，自動コンテナターミナルとして，どちらがより優れているかについて議論する．

第 5.2 節では，両 AGV 搬送システムを設計する際のそれらの設計パラメータについて述べる．

第 5.3 節では，設計条件について述べる．また本章では，解を一意に求めるための構築コストに対する評価関数を導入し，それらについても説明する．

第 5.4 節では，コストパフォーマンスによる垂直型・水平型 AGV 搬送システムの有効性の評価を行う．そして，与えられた設計条件の下，どちらの搬送システムがより有効であるかということについて相対的に評価する．さらに，算出された設計パラメータの構築コストへ与える影響についての解析を行う．

第 5.5 節では，各 AGV 搬送システムにおける作業機器の扱われ方やそれぞれのパラメータ間で互いに及ぼしあう関係などについて明確にする．

第 5.6 節では，本章をまとめる．

## 5.2 垂直型および水平型 AGV 搬送システムの設計パラメータ

第 4.2.2 項および第 4.2.3 項と同じく、垂直型 AGV 搬送システムでは、以下に示すように、投入 AGV 台数、RMGC (Rail-Mounted Gantry Crane) 台数、退避経路数が設計パラメータとなる。一方、水平型 AGV 搬送システムでは、Fig. 3.1(b) が示す通り、コンテナ蔵置エリア内には作業経路のみが存在し、退避経路を設計する必要はない。そのため、AGV ならびに RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane) の投入台数のみが設計パラメータとなる。

- 垂直型 AGV 搬送システム

- AGV の投入台数
- RMGC の投入台数
- 退避経路の数

- 水平型 AGV 搬送システム

- AGV の投入台数
- RTGC の投入台数

### 5.3 設計条件

第 4.4 節で述べた通り，本設計問題は組合せ最適化問題に属するため，設計プロセスの最終段階において，制約充足解 (Fig. 4.2 参照) が複数算出される．第 4.4.1 項では本問題に対して，パレート解あるいは最小投入台数の組合せを組合せ最適設計解として算出したが，本章では設計プロセスにおいて (5.3.1) 式が示す構築コストに対する評価関数を設け，これを最小にするような設計解の組合せを組合せ最適解として一意に算出する．構築コストの算出課程およびコストモデルに関しては，第 5.4.1 項にて説明する．

$$\text{Minimize } f_{\text{construction\_cost}}(\text{design\_solutions}) \quad (5.3.1)$$

搬送要求に関して，本章ではさまざまな要求仕様に対する垂直型・水平型の両 AGV 搬送システムを構築し，それらのレイアウト特性による有効性の評価を行う．そのため，第 4.2 節と同様に，本設計プロセスにおいても総合搬送コンテナ数を 600[TEU] とし，要求仕様を 10, 20, 30, … [TEU/hour] と徐々に高くして与えていき，そのときの各要求仕様に対する両 AGV 搬送システムの最適設計を行う．AGV ならびに ATC (Automated Transfer Crane) の最大投入台数に関しては，それぞれ  $AGV\_MAX = 30$  ,  $ATC\_MAX = 20$  とした．

Table 5.1 AGV , RMGC , RTGC の仕様

	AGV 在荷 / 空荷	RMGC 在荷 / 空荷	RTGC 在荷 / 空荷
最高速度 [m/s]	5.56 / 6.94	2.0 / 2.5	- / 2.5
回転速度 [m/s]	1.39 / 1.39	- / -	- / -
加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	0.15 / 0.15	0.1 / 0.1	- / 0.1
減速度 [m/s <sup>2</sup> ]	0.63 / 0.63	0.4 / 0.4	- / 0.4

Table 5.1 に第 4.2.1 項で述べたものと同様の AGV , RMGC , RTGC の仕様を示す．垂直型 AGV 搬送システムでは AGV および RMGC が，水平型 AGV 搬送システムでは AGV および RTGC が，Table 5.1 で示されている仕様を実装し，それぞれの作業を行っている．

運用モデルに関して、作業指令の割当ては、第 4.3.1 項で述べた方法と同じようにして行われる。また、与えられた作業指令を実行する際の、AGV と ATC 間での行動則モデルについては、第 4.3.2 項で説明したものと同様の行動則を実装した。

## 5.4 コストパフォーマンスによる有効性の評価

### 5.4.1 コストモデル

第 5.3 節の (5.3.1) 式の示す評価関数に関して,  $f_{construction\_cost}(design\_solutions)$  が意味する構築コストは, 垂直型と水平型の AGV 搬送システムでそれぞれ総合構築コストを  $TC_v$ ,  $TC_h$  とし, (5.4.1) 式 および (5.4.2) 式の示すコストモデルに基づいて算出する.

- 垂直型 AGV 搬送システムの総合構築コスト

$$TC_v = a \times AGVs + b \times RMGCs + d \times \text{経路長} \quad (5.4.1)$$

- 水平型 AGV 搬送システムの総合構築コスト

$$TC_h = a \times AGVs + c \times RTGCs + d \times \text{経路長} \quad (5.4.2)$$

(5.4.1) 式 および (5.4.2) 式において,  $AGVs$  とは AGV の投入台数,  $RMGCs$  と  $RTGCs$  はそれぞれ RMGC と RTGC の投入台数のことを意味する. 各搬送システムは, 以下の設計パラメータにより構築されているため, 各設計パラメータにそれぞれコスト係数 ( $a, b, c, d$ ) を乗じ, 合計した値がそれぞれの総合構築コストとなる.

- AGV の投入台数
- ATC (RMGC, RTGC) の投入台数
- AGV の総搬送経路長

ここで, ライフサイクルコストや (5.4.3) 式に示されているような構築コストの大小関係, すなわち, 作業機器の投入コスト ( $[cost/台]$ ), AGV に対する磁気テープや経路上の通信装置などの設置コスト ( $[cost/m]$ ), などを考慮し, 各コスト係数は以下のように設定した.  $a = 1, b = 4, c = 2, d = 1.5 \times 10^{-4}$ . RMGC ならびに RTGC の投入コストに関して, RMGC は第 2.2.3 節で述べた通り, コンテナの把持搬送を行う必要があるため, RTGC と比べてより大きく, また鉄道の施設



コストも考慮しなくてはならず、2倍の投入コストがかかるものとした。これらのコスト係数比は、共同研究先である三菱重工業（株）汎用機・特車事業本部からの助言を基に設定した。なお、本論文では(5.4.1)式ならびに(5.4.2)式において、各作業機器の燃料費などといったランニングコストに関して、それらを考慮したコスト係数の設定は行っていない。これに関しては、今後、検討の余地があるものの、本論文で設定したコスト係数とさほど大きな違いが生じるものでもないと考える。

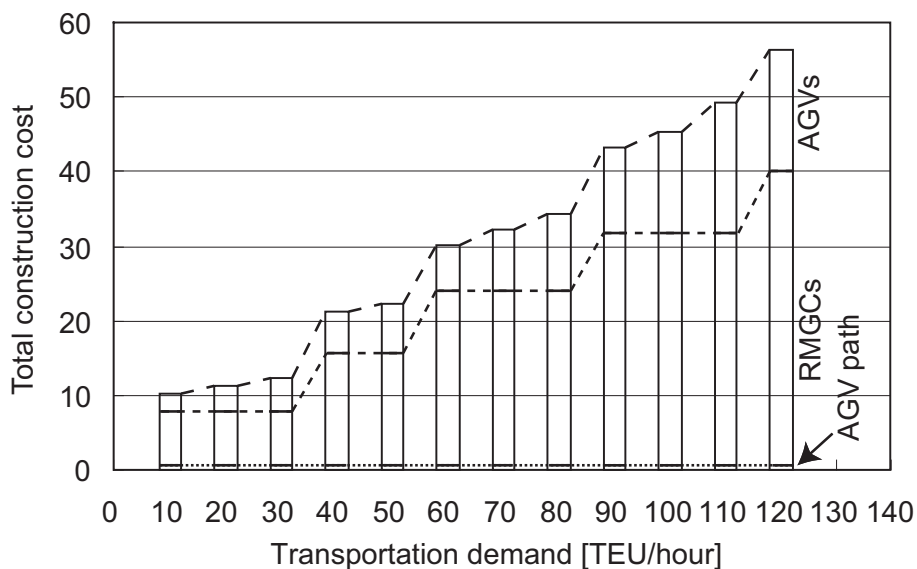
$$AGV \text{ の経路} < AGV < RTGC < RMGC \quad (5.4.3)$$

#### 5.4.2 有効性の比較・評価

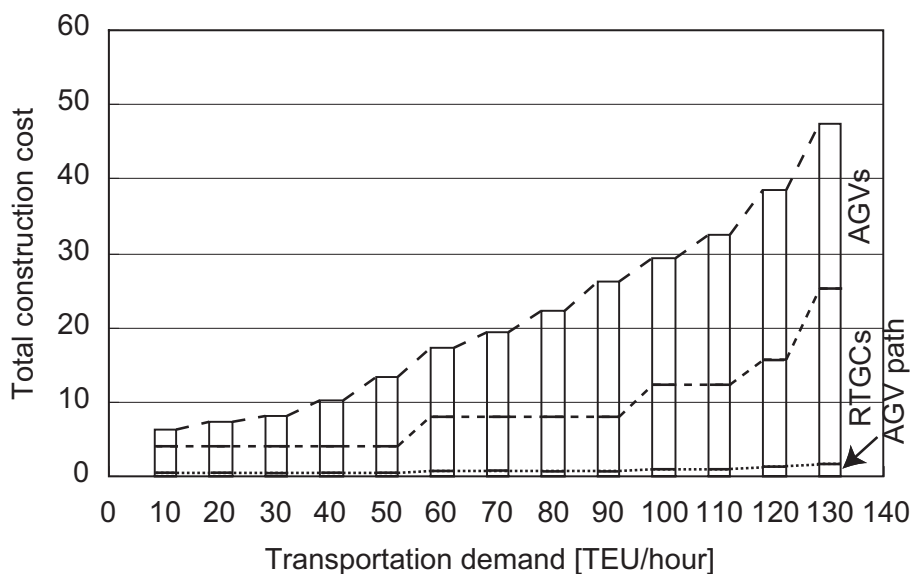
Fig. 5.1 は垂直型ならびに水平型 AGV 搬送システムの総合構築コストの比較結果を示している。Fig. 5.1(a) および Fig. 5.1(b) において、横軸が各搬送システムに対する要求仕様、縦軸がそれら要求仕様に対して算出された設計パラメータに基づいて搬送システムを構築した際の総合構築コスト（[point]）を示している。構築コストに影響を与える各設計パラメータが占める割合に関しては、Fig. 5.1 においてそれぞれ破線で示されている。これらの結果より、各 AGV 搬送システムのコストパフォーマンスに関して、以下のような結果を得た。

- 垂直型に比べ水平型 AGV 搬送システムの方が、与えられたほぼすべての搬送要求に対して低コストでシステムを構築することが可能である。

すなわち、本結果より水平型の AGV 搬送システムの方がよりコストパフォーマンスが高いということが言える。本結果が得られた要因としては、水平型搬送システムでは搬送性能が高く、また RMGC や RTGC と比べてコストも低い AGV を重点的に搬送に用いているためと考える。また、要求スループット 130 に対しては、水平型のみ要求を満たすことが可能であった。これは、要求仕様を満たすために多くの AGV を垂直型 AGV 搬送システムに投入していった結果、第 2.2.3 項で述べた搬送システムの特徴の一つであった“一定の長さの経路”が、AGV によって飽和状態になってしまったためである。なお、埠頭側に生じたボトルネックにより搬送効率が上がらなくなり、スループット 140 以上では設計解を得ることができなかった。



(a) 垂直型 AGV 搬送システム



(b) 水平型 AGV 搬送システム

Fig. 5.1 要求仕様に対する各 AGV の搬送システムの設計パラメータの占める割合と総合構築コスト

各設計パラメータが総構築コストに与える影響を考察するため、構築コストの変化の様子に着目すると、要求仕様に対して、Fig. 5.1(b) の総構築コストが滑ら

かな右肩上がりの増加傾向を示しているのに対し，Fig. 5.1(a) の総構築コストは階段状に増加していることが確認できる．これは，Fig. 5.1 の各破線が示す評価要素のシステム構築のための総コストに与える影響比率より，AGV の搬送経路長が与える影響は無視できる程度に小さいのに対し，作業機器群においては，AGV，RMGC，RTGC の中では RMGC がもっとも大きな影響を与えるためであると考えられる．そのため，RMGC の投入台数の増加が，Fig. 5.1(a) の示す階段状の変化を引き起こしていることがわかる．すなわち，コンテナの把持搬送能力を有する RMGC は，その反面，高コストであるため，投入台数の変化がシステムを構築する際のコストに対し大きな影響を与えることを示している．

これらのことから，コストパフォーマンスの低い垂直型 AGV 搬送システムを対象とした場合，水平型 AGV 搬送システムに比べ，今後は RMGC の低コスト化に向けたハードウェアの開発，あるいは RMGC に頼らない垂直型 AGV 搬送システムの運用法の設計などを行う必要がある．ただし本研究では，従来のシンプルな運用法を各 AGV 搬送システムに実装した上で，どちらが有効な搬送システムであるかを評価しているため，上述したように，第 6 章では，水平型 AGV 搬送システムを対象に，その効率的な運用法の設計に関する議論を進める．

## 5.5 設計パラメータの影響解析

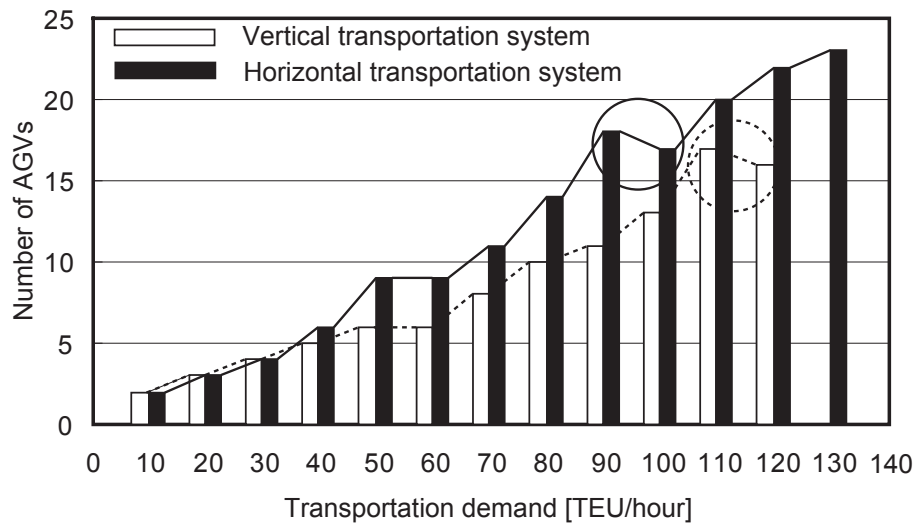
垂直型および水平型 AGV 搬送システムにおける、各要求仕様に対する導出された最適 AGV, RMGC, RTGC 台数を Fig. 5.2 に示す。Fig. 5.2(a) より、要求仕様の低い段階では各システムに投入される AGV 台数は垂直型でも水平型でも変わらないが、徐々に要求仕様を高めるにつれて水平型に投入される AGV 台数の方が多くなっていることがわかる。これは、水平型 AGV 搬送システムでは、垂直型 AGV 搬送システムと比べ、AGV がより頻繁に用いられているためである。Fig. 1.11 でも示した通り、垂直型 AGV 搬送システムでは、AGV は単純に蔵置エリア内のコンテナ蔵置ロケーションに隣接する所定のコンテナ受け渡し位置までしか搬送できないが、水平型 AGV 搬送システムでは、AGV はコンテナ蔵置ロケーション内の蔵置位置までコンテナを搬送することができる。一方、Fig. 5.2(b) より、投入する ATC の台数では、要求仕様が高まるにつれ、垂直型における RMGC の台数が水平型における RTGC の台数を上回る結果となった。これは、垂直型の搬送システムでは RMGC による搬送が行われているため、蔵置作業しか行わない水平型搬送システムに比べより多くの台数が必要であるためだと考える。すなわち、垂直型 AGV 搬送システムでは RMGC もまた主要な搬送機器として用いられているということがわかる。以上、これらのことから、垂直型・水平型 AGV 搬送システムはそれぞれ投入されている作業機器の使用頻度に関して、それぞれ Table 5.2 が示す特徴があることがわかった。

Table 5.2 垂直型・水平型 AGV 搬送システムにおける作業機器の使用頻度

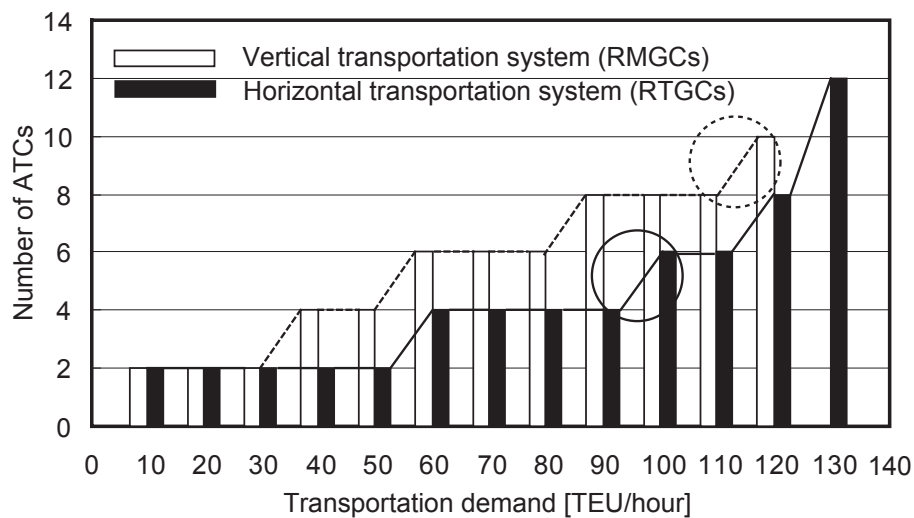
システムレイアウト	AGV の使用頻度	ATC の使用頻度
垂直型 AGV 搬送システム	中	高 (RMGC)
水平型 AGV 搬送システム	高	中 (RTGC)

各作業機器の投入台数の変化の様子では、Fig. 5.2(a) において要求仕様が垂直型と水平型でそれぞれ 90~100[TEU/hour]、110~120[TEU/hour] に高められる際、Fig. 5.2(b) において AGV 台数が減少していることがわかる。これは、Fig. 5.2(b) における各要求仕様に対する ATC 台数が増加する際に見られる変化であり、(5.3.1) 式の評価関数により、ATC を投入することにより、AGV 台数を減少させることが可能な場合があることがわかった。搬送経路長の変化の様子では、水平型搬送システムにおいて、ロケーションが 1 本増えることによる経路長の変化

は 414[m] となり、コストに与える影響は 0.7 ポイントとなる。したがって、経路長の増加という問題はコストの面からもまた搬送効率の面からもシステムに与える影響は無視できる程度に少ないことがわかった ( Fig. 5.1(b) 参照 ) 。



(a) 要求仕様に対する算出された AGV の投入台数の変化の様子



(b) 要求仕様に対する算出された ATC の投入台数の変化の様子

Fig. 5.2 要求仕様に対する設計解の変化の傾向

以上のことより、要求仕様に対する有効な搬送を実現するためには、搬送性能が高く、また低コストの AGV に可能な限り搬送を行わせ、ATC は蔵置位置で蔵置

作業のみを行うシステム，すなわち水平型 AGV 搬送システムが，与えられたコストモデルの下，今回の要求仕様に対しては有効であることがわかった．第 5.4.2 項でも述べた通り，垂直型の AGV 搬送システムにおいても，RMGC の低コスト設計あるいは，“AGV → RMGC → 蔵置目的位置”におけるコンテナの取扱い作業の効率化を行うことで，コストパフォーマンスは向上するものと考えられる．しかしながら，互いにシンプルな運用法を実装した上でのコストパフォーマンスの比較・評価，そしてより有効な搬送システムの選定，といった観点より，以後，第 6 章では水平型 AGV 搬送システムを設計対象とする．

## 5.6 おわりに

本章では、さまざまな要求仕様に対する垂直型・水平型 AGV 搬送システムの最適設計を行った。そして、コストパフォーマンスに基づいたレイアウト特性による有効性の評価を行った。また、得られた結果より、自動コンテナターミナルを実現するための搬送システムとして、水平型搬送システムがより有効であることを示した。

第 5.2 節では、両 AGV 搬送システムを設計する際、それらの設計パラメータについて述べた。

第 5.3 節では、設計条件について述べた。また本章で用いた構築コストに対する評価関数についての説明をした。

第 5.4 節では、コストパフォーマンスによる垂直型・水平型 AGV 搬送システムの有効性の評価を行った。そして、本章で与えた設計条件の下、どちらの搬送システムがより有効であるかについて評価した。さらに、算出された設計パラメータの構築コストへ与える影響についての解析を行った。

第 5.5 節では、各 AGV 搬送システムにおける作業機器の扱われ方やそれぞれのパラメータ間で互いに及ぼしあう関係などについて明確にした。

次章では、自動コンテナターミナルに対して、高効率運用法を考慮した AGV 搬送システムの設計を行う。





# 第6章 高効率運用法を考慮した AGV搬送システムの設計

---

6.1	はじめに . . . . .	102
6.2	自動コンテナターミナルにおける AGV 搬送システム . . . . .	103
6.2.1	レイアウト設定 . . . . .	103
6.2.2	問題設定 . . . . .	104
6.2.3	設計条件 . . . . .	104
6.2.4	機器の作業仕様 . . . . .	105
6.3	アプローチ . . . . .	106
6.4	各作業機器間での協調行動則 . . . . .	107
6.4.1	行動則のフレームワーク . . . . .	107
6.4.2	行動則モデル . . . . .	108
6.5	コンテナ蔵置スケジューリング . . . . .	114
6.5.1	蔵置スケジューリングのフレームワーク . . . . .	114
6.5.2	ランダム蔵置 . . . . .	114
6.5.3	蔵置スケジューリングを適用したコンテナ搬送・蔵置法 . . . . .	114
6.6	コンテナ搬送計画 . . . . .	117
6.6.1	搬送計画のフレームワーク . . . . .	117
6.6.2	ランダム搬送 . . . . .	117
6.6.3	均等搬送 . . . . .	117
6.6.4	埠頭側加重搬送 . . . . .	118
6.7	システム設計 . . . . .	120
6.7.1	設計手順 . . . . .	120
6.7.2	運用モデルによる作業効率の評価 . . . . .	121
6.7.3	高効率運用法についての考察 . . . . .	123
6.7.4	コンテナ搬送計画の有効性 . . . . .	126
6.8	おわりに . . . . .	129

---

## 6.1 はじめに

第 5 章より，本論文で設定した要求仕様の下では，垂直型に比べ，水平型 AGV 搬送システムが有効であることがわかった．しかしながら，水平型 AGV 搬送システムでは，AGV 以外にもコンテナ蔵置エリアにおいて稼働している RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane) もシステムにおける重要な作業機器となるため，垂直型と比べ搬送システム全体として複雑な制御を行う必要がある．そのため本章では，水平型 AGV 搬送システムを対象に，その運用方法論を中心に議論を進める．

第 6.2 節では，自動コンテナターミナルにおける AGV 搬送システムとして，水平型 AGV 搬送システムのレイアウト設定，問題設定，設計条件，機器の作業仕様などについて述べる．

第 6.3 節では，高効率運用法を考慮するにあたり，そのためのアプローチについて述べ，研究のブレークスルーについて明らかにする．

第 6.4 節では，作業機器間での協調行動則について，その詳細なモデルについて説明する．

第 6.5 節では，コンテナの蔵置スケジューリング法についての詳細なモデルについて説明する．

第 6.6 節では，コンテナの搬送計画についての詳細なモデルについて説明する．

第 6.7 節では，各運用モデルを実装し，水平型 AGV 搬送システムにおける作業機器の投入台数と運用モデルの同時設計を行う．

第 6.8 節では，本章をまとめる．

## 6.2 自動コンテナターミナルにおける AGV 搬送システム

### 6.2.1 レイアウト設定

本章では水平型 AGV 搬送システムにおける運用方法論を考慮するため、Fig. 3.1(b) が示すレイアウトを対象とする。実際の港湾自動コンテナターミナルでは、埠頭の幅 (1 [Berth]) はあらかじめ固定されている。そのため、一般的には埠頭の長さに応じた台数の QCC (Quay Container Crane) がトップダウン的に投入される。本章においても Fig. 3.1(b) が示す通り、1 [Berth] の長さを 350 [m] とし、3 台の QCC を投入し、これらを設計対象とはしない。なお、コンテナ搬送指令は埠頭エリアにおいて各 3 台の QCC から均等に出される。さらに、各ロケーションに投入される RTGC 台数は 2 台とした。また、コンテナ蔵置エリアにおける AGV の作業経路を 1 本と設定した。ここで、作業経路とは、蔵置エリア内における AGV の搬送および RTGC とのコンテナの受け渡しを行うための専用経路を意味する。

Fig. 6.1 に RTGC 専用のコンテナ蔵置場所となるコンテナ蔵置ロケーションを示す。第 3 章、第 4 章、第 5 章では比較のため同等の蔵置キャパシティを仮定してきたが、本章では、1 ロケーションあたり、320 [TEU] (4 Rows × 20 Bays × 4 Tiers) のコンテナ蔵置キャパシティを有するものとする。

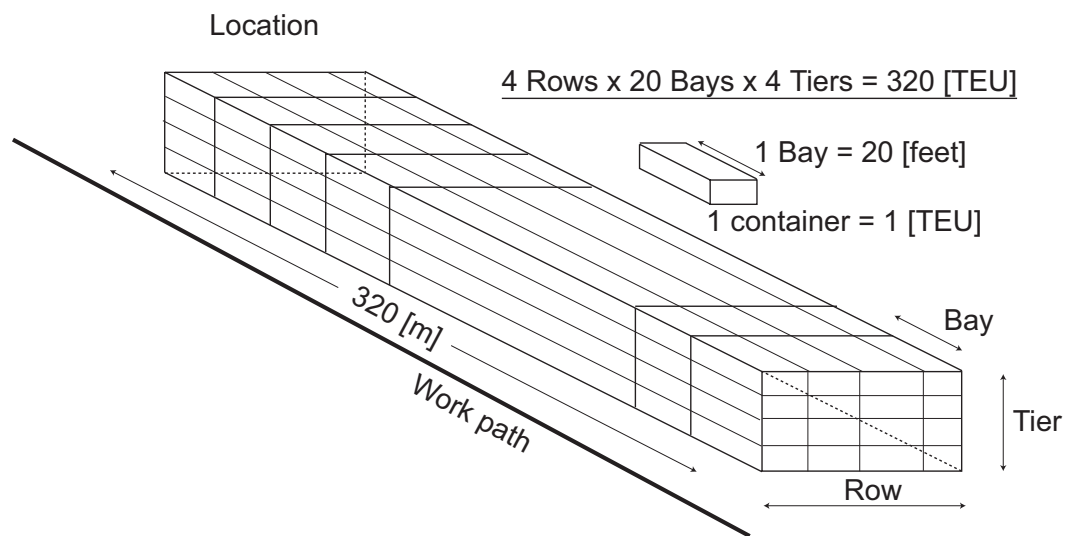


Fig. 6.1 RTGC 専用コンテナ蔵置ロケーション

### 6.2.2 問題設定

Fig. 1.2 が示す通り，本論文ではコンテナターミナル内におけるコンテナ船から所定の蔵置ロケーションまでのコンテナの流れに注目している．そのため本章では，搬送システムの高効率化を目指し，そのための高効率運用法について考慮する．したがって，コンテナ群のスムーズな流れの実現のため，AGV および RTGC の投入台数の他に，以下に示す運用モデルを設計対象とする．

- ・ AGV 投入台数
- ・ RTGC 投入台数
- ・ 作業機器の行動則
- ・ コンテナ蔵置スケジューリング
- ・ コンテナ搬送計画

設計された AGV および RTGC の投入台数は，構築された AGV 搬送システムにおける評価要素となる．その際，本章では (6.2.1) 式の示すコストモデルを設計段階における評価関数として導入し，AGV および RTGC の投入台数を一意に算出し，構築コストの比較ならびに評価を行う．ただし，コストモデルを導入しても搬送システムの構築コストが同一の値となる場合は，設計パラメータを複数算出した．

$$\text{構築コスト} = \alpha \times \text{AGV の投入台数} + \beta \times \text{RTGC の投入台数} \quad (6.2.1)$$

ここで， $\alpha$ ， $\beta$  のコスト係数は，第 5.4.1 項と同様に， $\alpha : \beta = 1 : 2$  と設定した．

### 6.2.3 設計条件

AGV は第 2.3 節の搬送手順にしたがって，Fig. 3.1(b) 内を巡回搬送する．その際，蔵置制約として，コンテナ蔵置エリア内における各ロケーションの最終蔵置率に大きなばらつきができないように蔵置を行う必要がある．蔵置制約は，実際の自動コンテナターミナルにおける蔵置率を参考にし，コンテナの搬送・蔵置を

行う際、各ロケーションの蔵置率が、平均蔵置率に対して  $\pm 30[\%]$  以内になるようにする。

AGV 搬送システムの設計を行うにあたっては、第 4 章、第 5 章と同様に、設計段階で無駄に AGV および RTGC の投入台数を増やすことを避けるため、投入台数の上限をそれぞれ  $AGV\_MAX = 30$ 、 $RTGC\_MAX = 20$  と設定した。これらの設計条件の下、総搬送・蔵置コンテナ数を 600 [TEU] とした。要求仕様は 10 [TEU/hour] から 10 ずつ、最高で 130 [TEU/hour] まで与え、各要求仕様に対する設計解を算出する。

#### 6.2.4 機器の作業仕様

Table 6.1 AGV、RTGC および QCC の作業仕様

AGV		在荷時 / 空荷時
最高移動速度	[m/s]	5.56 / 6.94
加速度	[m/s <sup>2</sup> ]	0.15 / 0.15
減速度	[m/s <sup>2</sup> ]	0.63 / 0.63
RTGC		
最高移動速度	[m/s]	2.5
加速度	[m/s <sup>2</sup> ]	0.1
減速度	[m/s <sup>2</sup> ]	0.4
蔵置時間	[s]	30
受け渡し時間	[s]	30
QCC		
荷役時間	[s]	60

Table 6.1 に AGV、RTGC、および QCC の作業仕様を示す [Mitsubishi 2004]。AGV はコンテナを搬送中の場合と非搬送の場合でそれぞれ走行速度ならびに加減速度が異なるため、それらは“在荷時”および“空荷時”で示されている。RTGC

は移動走行時以外の仕様として、コンテナ蔵置エリアにおけるコンテナの受け渡しならびに蔵置作業に要する時間が示されている。QCC は自身による移動は行わないため、埠頭エリアにおけるコンテナの荷役作業に要する時間のみが示されている。

## 6.3 アプローチ

第1.5節で述べた通り、本論文では、港湾コンテナターミナルの陸側における作業の詳細なモデル化を行う。そのため、“当該コンテナを蔵置エリア内のどこへ搬送・蔵置するか、それらの順番はどうするか、蔵置エリアではどのRTGCが作業を担当するか、当該RTGCをどのタイミングで決定するか”、などといったことについて考慮する。そのため運用モデルを以下の3つと定義し、これらの設計を行う必要がある。

- 異質作業機器間における協調行動則の設計  
AGV搬送システムでは多種多様な機器が稼動しているため、作業仕様の異なる作業機器群により同一の作業を効率的に行うためには、各作業機器に適した行動則設計を行う必要がある。具体的には、AGVとRTGC間における協調行動の設計を行う。
- コンテナ蔵置ロケーションでの蔵置順序の設計（蔵置スケジューリング）  
AGV搬送システムでは、作業指令は複数の地点から発生し、かつ作業目的地が複数である（多点間搬送）。そのため、AGVが行う搬送およびRTGCが行う蔵置作業の効率化を図るため、作業を行う順序をスケジューリングする必要がある。
- コンテナの搬送・蔵置先の設計（搬送計画）  
多点間搬送を行うAGV搬送システムにおいて、どの作業目的地へコンテナをどれだけ搬送・蔵置するか、あらかじめ計画する必要がある。

ついで、これら構築された各運用モデルを水平型AGV搬送システムへ実装する。第3章で提案した設計方法論を用いることにより、さまざまな要求仕様に対するAGVおよびRTGC台数の算出を行う。そして、各搬送システムの構築コストの比較ならびに評価を行い、もっとも効率の良い運用モデルを導出する。さらに、運用モデルの構築コストへ与える影響を考察し、運用法を考慮することの必要性について検証する。

## 6.4 各作業機器間での協調行動則

### 6.4.1 行動則のフレームワーク

第 1.4.3 項の作業機器間における協調行動則に関して、たとえば、Table 6.1 より、AGV と比べ移動性能の低い RTGC はロケーション上において俊敏な行動をとることが不可能である。そのため、第 2.3 節の搬送手順で述べた協調行動（ステップ 3~5）のみでは、AGV が先に目的位置に到着し、そこへ RTGC が後から向かってくる作業工程になってしまうため、受け渡し作業開始までに時間がかかってしまう。すなわち、異質作業機器間における効率的な作業の実現のためには、“いつ、どこで、いかにして協調行動を行うか”，といったことを考慮する必要がある。そのため本論文では、以下に記す (i) AGV の RTGC 選択法，(ii) AGV の RTGC 選択・呼び出しタイミング，について注目し、 $2 \times 2 = 4$  通りの行動則設計を行う。

- AGV の RTGC 選択法

- 近傍選択法：AGV からの相対距離に基づいて RTGC を選択する方法 —  
( $\alpha$ )
- 作業空間選択法：RTGC の作業空間に基づいて RTGC を選択する方法 —  
( $\beta$ )

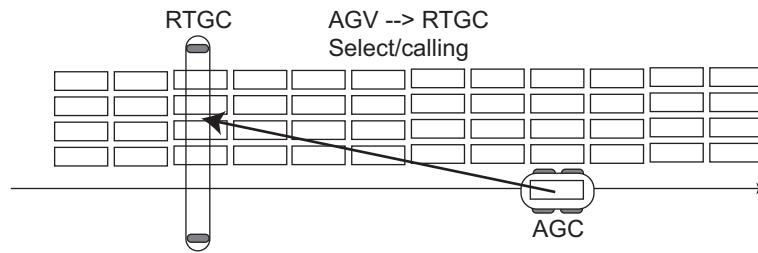
- AGV の RTGC 選択・呼び出しタイミング

- 作業経路上の目的位置\*1到着後：AGV は当該目的位置で RTGC を呼び出す — ( $\gamma$ )
- 目的作業経路進入後：AGV は当該作業経路に進入した時点で RTGC を呼び出す — ( $\delta$ )

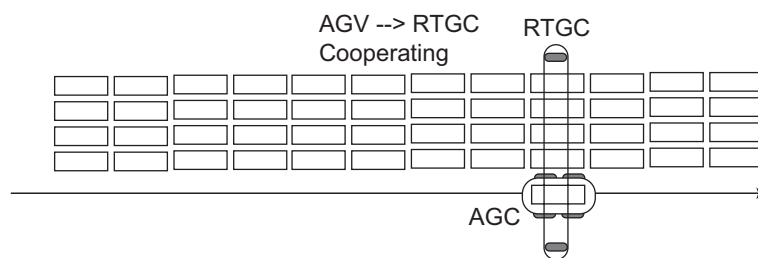
第 6.4.2 項において、それぞれの行動則の詳細について説明する。なお、各行動則の説明をする際には、RTGC の状態をそれぞれ、状態 (1) すでに他の AGV によりコンテナの受け渡し相手として選択・呼び出しされている状態 (Fig. 6.2(a) 参照)，状態 (2) すでに他の AGV とコンテナ受け渡し・蔵置作業中の状態 (Fig. 6.2(b) 参照)，状態 (3) 作業指令を待っている、すなわちアイドルの状態 (Fig. 6.2(c) 参照)，と定義し、これらを用いることとする。

\*1 コンテナ搬送・蔵置指令先のこと。AGV は目的（作業）位置に到着後、RTGC に対して、コンテナ受け渡し作業を開始する。

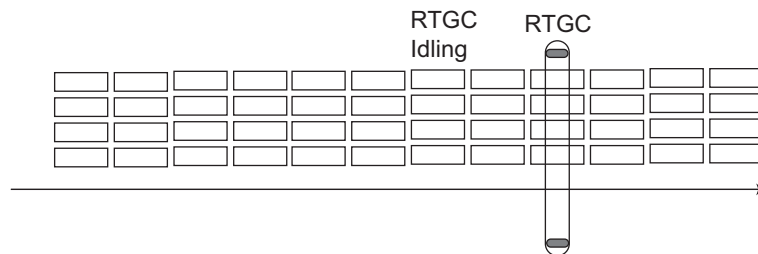




(a) 選択・呼び出され状態



(b) 作業状態



(c) アイドリング状態

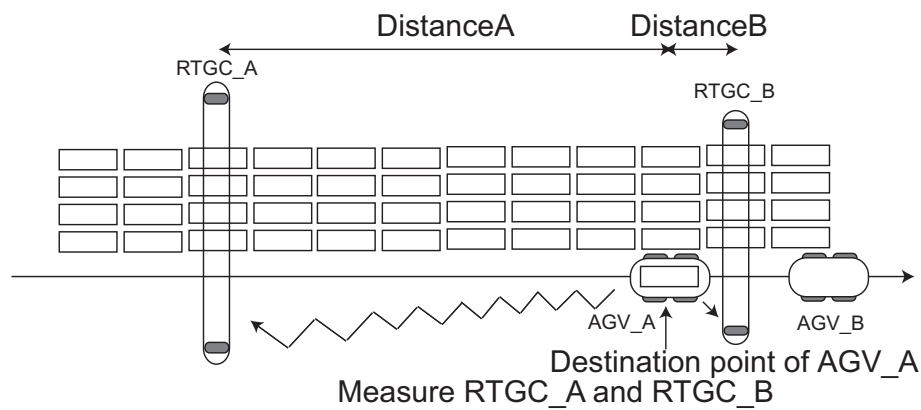
Fig. 6.2 RTGC の3状態 (上面図)

## 6.4.2 行動則モデル

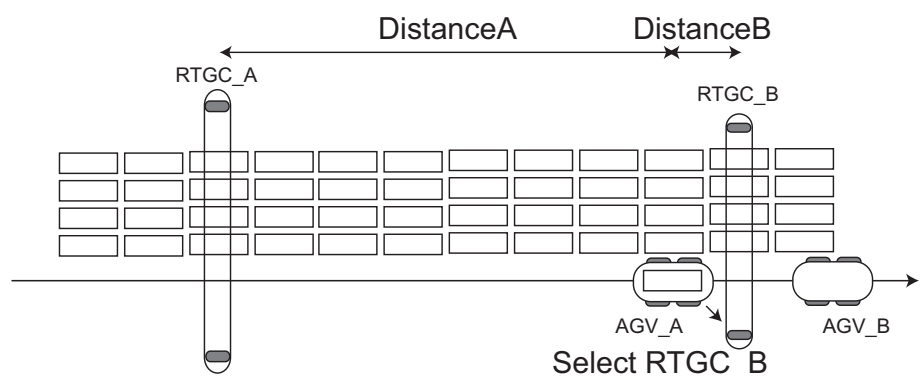
### 6.4.2.1 AGVによる近傍選択法に基づいた目的位置到着後のRTGC選択・呼び出し — $(\alpha + \gamma)$

Fig. 6.3 は AGV の目的作業位置到着時における近傍選択法による RTGC 選択行動過程を示している。AGV<sub>A</sub> が作業目的位置に到着した際、当該ロケーション

上で稼働している各 RTGC までの距離をセンシングする ( Fig. 6.3(a) 参照 ) . このとき 2 台の RTGC とも状態 (3) の場合 , AGV\_A と RTGC\_A ならびに RTGC\_B との相対距離 (  $Distance A > Distance B$  ) により , AGV\_A に近い方に位置する RTGC\_B が受け渡し相手として選択・呼び出される ( Fig. 6.3(b) 参照 ) . ただし , RTGC\_B が近い位置にいる場合においても , RTGC\_B が状態 (1) あるいは状態 (2) にある場合 , AGV\_A は遠くに位置している RTGC\_A を選択する . さらに , RTGC\_A , RTGC\_B の両方の RTGC とも状態 (1) あるいは状態 (2) にある場合 , AGV\_A は当該目的地においてそのままどちら一方の RTGC が状態 (3) になるまで待機する . すなわち , 本選択法では , 状態 (3) にある RTGC がロケーション上に 1 台しかいない場合 , 相対距離に関係なく当該 RTGC を選択することとなる .



(a) AGV\_A が RTGC\_A と RTGC\_B の相対距離を計測する



(b) AGV\_A は相対距離に基づいて近くにいる RTGC\_B を選択する

Fig. 6.3 AGV による近傍選択法に基づいた作業経路上の目的地到着後の RTGC 選択 ( 上面図 )

#### 6.4.2.2 AGVによる作業空間選択法に基づいた目的位置到着後のRTGC選択・呼び出し — ( $\beta + \gamma$ )

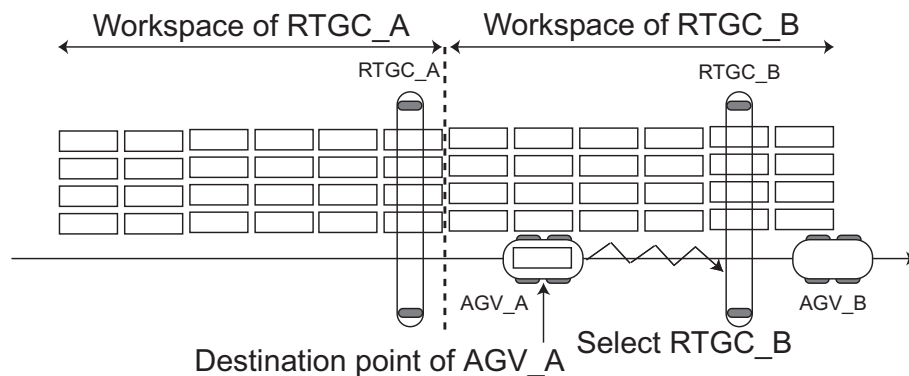
Fig. 6.4 に AGV の目的作業位置到着時における作業空間に基づいた RTGC の選択行動過程を示す。この場合、RTGC 間での交差行動は行わず、各 RTGC に対してそれぞれ独立した作業空間を割当て、割当てられた作業空間内における受け渡し・蔵置作業を各 RTGC が受けもつようにする。Fig. 6.4(a) の示す通り、AGV\_A が作業目的位置に到着し、コンテナ受け渡し RTGC を選択する際、目的位置に対して、RTGC\_A が RTGC\_B に比べ、近いところに位置している。しかしながら、当該コンテナの受け渡し・蔵置作業空間が違うことから、AGV\_A は RTGC\_B を選択し、目的地へと呼び出す (Fig. 6.4(b) 参照)。そのため、AGV\_A が目的位置に到着した際に、RTGC\_B が状態 (1) あるいは状態 (2) にあったとしても、本選択法の下では、AGV\_A は RTGC\_A でなく RTGC\_B がアイドリング状態になるのを待つこととなる。

なお、本論文では各ロケーションに投入される 2 台の RTGC に対して均等に作業空間を割当てた。すなわち、Fig. 6.1 において各 RTGC は 4 [Row]  $\times$  10 [Bay]  $\times$  4 [Tier] の作業空間を有する。

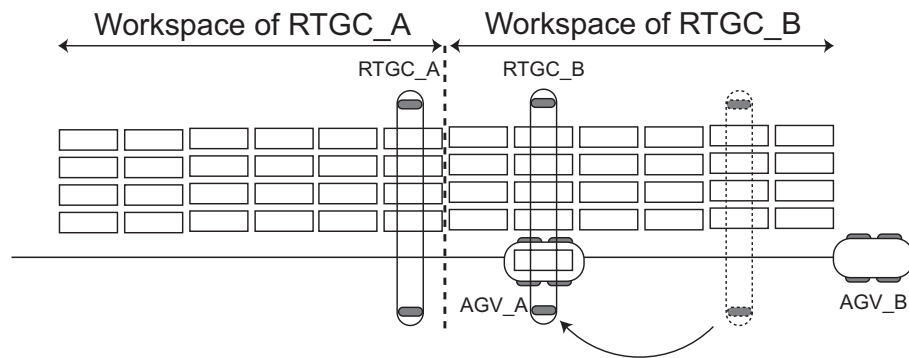
#### 6.4.2.3 AGVによる近傍選択法に基づいた目的作業経路進入後のRTGC選択・呼び出し — ( $\alpha + \delta$ )

Fig. 6.5 は AGV の作業経路進入時における、近傍選択法に基づいた RTGC の選択・呼び出し行動過程を示している。AGV\_A は作業経路に進入後、各 RTGC と通信を行い、走行中に目的地に対する各 RTGC との相対距離をセンシングし、目的位置に近い方に位置する RTGC\_B を受け渡し相手として選択する (Fig. 6.5(a) 参照)。RTGC\_B には AGV が目的位置に到着する前に同様の目的位置が設定され、移動を開始する (Fig. 6.5(b) 参照)。

ここで第 6.4.2.1 項同様、RTGC\_B が近い位置にいても、RTGC\_B が状態 (1) あるいは状態 (2) にある場合などは、AGV は遠くに位置している RTGC\_A を選択する必要がある。ただし、作業経路上における AGV の走行密度が高くなるにつれ、前方ですでに RTGC と通信を行っている AGV や RTGC を選択・呼び出しを行っている AGV が存在する場合が増加する。その場合、後方 AGV は当該 AGV の通信が終了するまで通信を開始しないものとする。すなわち、作業経路に進入して



(a) AGV\_A は当該作業空間において作業を行う RTGC\_B を選択する



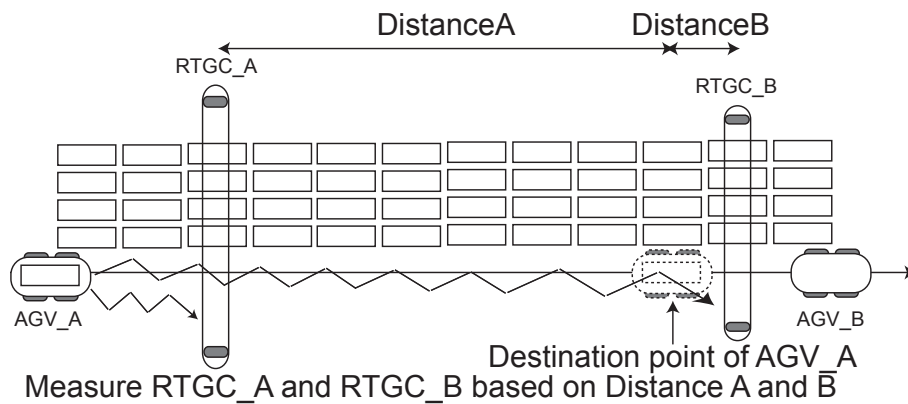
(b) RTGC\_B が受け渡し位置まで移動する

Fig. 6.4 AGV による作業空間選択法に基づいた目的位置到着後の RTGC 選択・呼び出し (上面図)

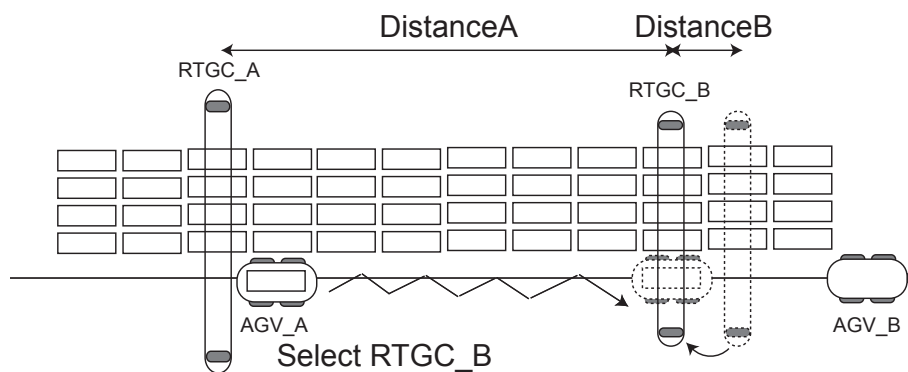
も、RTGC を選択・呼び出さずに経路を走行することとなる。なお、AGV-RTGC 間での通信は、コンテナの受け渡し作業開始時まで行われる。

#### 6.4.2.4 AGV による作業空間選択法に基づいた目的作業経路進入後の RTGC 選択・呼び出し — ( $\beta + \delta$ )

Fig. 6.6 は AGV の作業経路進入時における、作業空間選択法に基づいた RTGC の選択・呼び出し行動過程を示している。AGV\_A は作業経路に進入後、各 RTGC と通信を行い、当該コンテナの目的蔵置位置に対応する作業空間を有した RTGC を認識する。そして RTGC\_B を選択し、目的位置へと呼び出す (Fig. 6.6(a) 参



(a) AGV\_A が RTGC\_A と RTGC\_B の相対距離を計測し、RTGC\_B を選択する

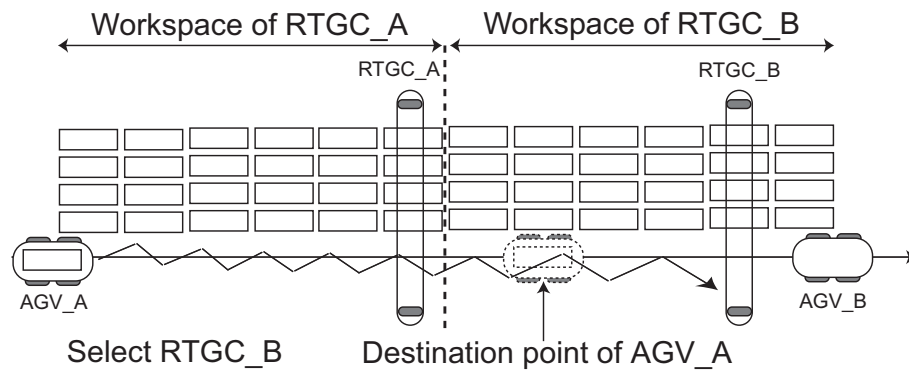


(b) RTGC\_B は AGV\_A が到着する前に受け渡し位置まで移動する

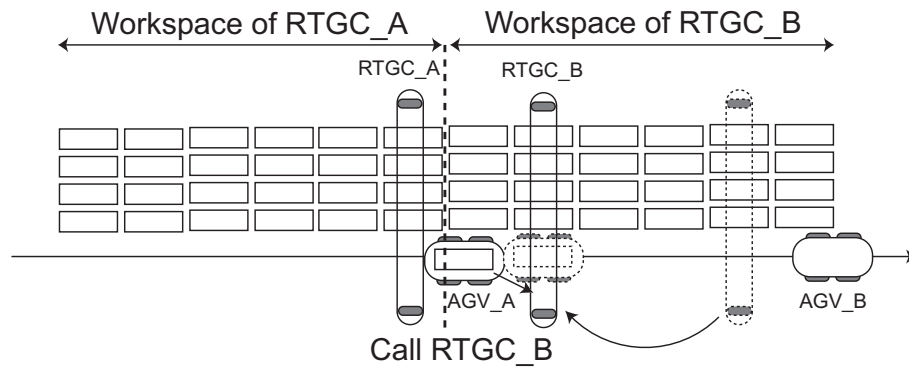
Fig. 6.5 AGV による近傍選択法に基づいた目的作業経路進入後の RTGC 選択・呼び出し (上面図)

照) . 呼び出された RTGC\_B は移動を開始する ( Fig. 6.6(b) 参照 ) .

作業経路進入時における本選択法においても、第 6.4.2.2 項や第 6.4.2.3 項と同様に、当該 RTGC が状態 (1) あるいは状態 (2) にあるか、または、前方 AGV との通信状態にある場合、本 AGV はこれらの状態がすべて終了するまで経路上を RTGC と通信を行うことなしに走行する .



(a) AGV\_A は当該作業空間で作業する RTGC\_B を選択・呼び出す



(b) RTGC\_B は AGV\_A が到着する前に受け渡し位置まで移動する

Fig. 6.6 AGV による作業空間選択法に基づいた目的作業経路進入後の RTGC 選択・呼び出し (上面図)

## 6.5 コンテナ蔵置スケジューリング

### 6.5.1 蔵置スケジューリングのフレームワーク

第 1.4.3 項で述べたコンテナ蔵置スケジューリングに関する従来研究より，本論文では，各ロケーション上における作業順序のスケジューリングについて，作業順序を考慮しないランダム蔵置の場合と，作業順序を考慮した場合について設計する．

### 6.5.2 ランダム蔵置

ランダム蔵置とは，各ロケーション上における作業順序が考慮されていない蔵置法のことである．本蔵置法は，第 4 章，第 5 章において，従来のシンプルな運用モデルとして採用されているものである．

Fig. 6.7 はロケーション上におけるコンテナ蔵置作業の順番を示している．コンテナ蔵置エリアには通常複数本のロケーションがあるが，ここでは説明のため 1 つのロケーションに注目する．Fig. 6.7 の “Initial orders” がコンテナ搬送計画により決定されたコンテナ搬送・蔵置指令の初期状態を示している．ロケーション上の空き蔵置位置 A~L にはすべて (Row, Bay) 情報が収められている．ランダム蔵置の場合，AGV はこれら生成されたコンテナ搬送指令を初期状態のまま順番に実行し，搬送されたコンテナは RTGC により順番に蔵置される．したがってランダム蔵置では，作業を行っている RTGC のロケーションにおける往復運動が多くなってしまい，その結果，作業時の RTGC の総移動量が無駄に増加してしまう場合が存在する．そのため，AGV に対して RTGC の作業が追いつかなくなり，作業経路上における AGV の渋滞が発生してしまい，作業効率が悪化してしまうことが予想される．

### 6.5.3 蔵置スケジューリングを適用したコンテナ搬送・蔵置法

本論文では，任意に生成された初期蔵置指令に対して，RTGC の移動性能を考慮する．すなわち，(A) RTGC の総移動量の最小化，(B) 各ロケーションおよび

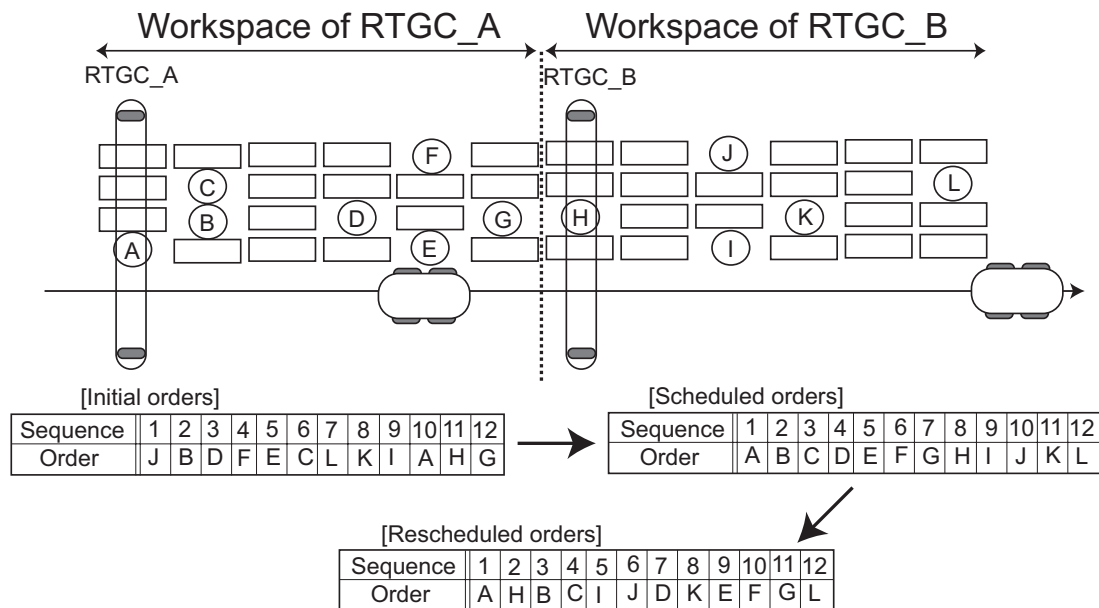


Fig. 6.7 コンテナ蔵置スケジューリングの例（上面図）

作業経路上における AGV-RTGC の作業密度の均等化，を目的としたコンテナ蔵置スケジューリングを行う．そのため，各ロケーションに対して RTGC の作業空間を設ける．なお，ここでの作業空間は，第 6.4.2.2 項と同様に，各 RTGC に対して均等となるように与えている．

Fig. 6.7 の RTGC\_A ならびに RTGC\_B の位置を作業開始時の初期位置とし，任意に生成された蔵置指令に対し，(A) に基づき RTGC が一方向へ移動しながら作業を行えるように作業順序を入れ替え，これを “Scheduled orders” とする．本スケジューリングにより，ロケーション上における RTGC の往復運動は無くなる．しかしながらこれらスケジューリングされた蔵置指令をそのまま実行しようとする， $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \dots$  の順番で作業を行うため，ロケーション左側で作業を行っている RTGC\_A の作業密度が高くなってしまふ．そのため，(B) に基づいた再スケジューリングを行う．すなわち，Fig. 6.7 の示す各 RTGC の作業初期位置から近い場所で行われる蔵置作業の順に，指令の順番を入れ替える．Fig. 6.7 の作業指令 D および K といった，各 RTGC の初期作業位置からの距離が等しかった場合，これらの作業順序はランダムに決定する．そして，これを “Rescheduled orders” とする．

なお，本節では説明のため，ロケーション数が 1 本の場合のみを扱っているが，ロケーション数が 2 本以上の場合も，同様のスケジューリングが各ロケーションに対して行われる．その際，コンテナをどのロケーションへ搬送・蔵置するかは，



次章で述べるコンテナ搬送計画により算出されるコンテナ搬送頻度に基づき，乱数により決定する．AGVはこれらオフラインでスケジューリングされた搬送指令を順に実行し，搬送されたコンテナは順番にRTGCにより蔵置される．

## 6.6 コンテナ搬送計画

### 6.6.1 搬送計画のフレームワーク

第 1.4.3 項のコンテナの搬送計画に関する従来研究より，本論文では，コンテナ搬送計画を行う際に，コンテナの搬送・蔵置先をランダムに決定するランダム搬送以外に，均等搬送および埠頭側加重搬送ルールを設け，これら搬送ルールに基づいた各ロケーションに対する搬送・蔵置コンテナ数を，蔵置制約を満たす範囲内で短時間に決定する．ただし，埠頭側加重搬送ルールにおいて，埠頭側のロケーションに重点的に搬送・蔵置を行うことにより，短い搬送経路による作業時間の短縮が可能であるが，RTGC の各ロケーションに対する投入バランスを考慮すると，ロケーションごとにある程度の負荷分散を行う必要がある．ここで，簡単化のため，作業開始時にはロケーション上に蔵置されているコンテナはないものとして搬送計画を行った．なお，実際のコンテナターミナルにおいては，前のコンテナ船により搬入されたコンテナ群がすでにロケーションに蔵置されているような場合がある．このような状況に対しては，Fig. 6.1 の示すコンテナ蔵置キャパシティを減じることにより，同様の搬送計画を行うことができる．

### 6.6.2 ランダム搬送

ランダム搬送ルールでは，コンテナの搬送・蔵置される目的ロケーションはランダムに決定される．そのため，ロケーションごとの搬送コンテナ数が乱数の影響により多少不均等になる．ロケーションのコンテナ蔵置キャパシティとして，Fig. 6.1 より，1 ロケーションあたりに最大で蔵置できるコンテナ数は 320[TEU] とする．なお，第 4 章および第 5 章のシンプルな運用法の下では，このランダム搬送に基づいてコンテナの搬送先が決められている．

### 6.6.3 均等搬送

第 6.6.1 項で触れた通り，RTGC の各ロケーションに対する投入バランスを考慮すると，ロケーションごとにある程度の負荷分散を行う必要がある．そこで，均等搬送ルールでは，各ロケーションに搬送されるコンテナの数をすべて均等に決定

する．したがって，総搬送コンテナ数が600[TEU]でロケーション数が4本の場合，各ロケーションには150[TEU]搬送されることとなる（Fig. 6.8 参照）．なお Fig. 6.8の横軸に関して，第1ロケーションから順に埠頭側より配置されている．また，Fig. 6.1より1ロケーションあたりのコンテナ蔵置容量は320[TEU]であることから，最終蔵置率は各ロケーションで均等の46.9[%]となる．ここで，蔵置率とは，“蔵置されたコンテナ数 / ロケーションのコンテナ蔵置容量”を意味している．

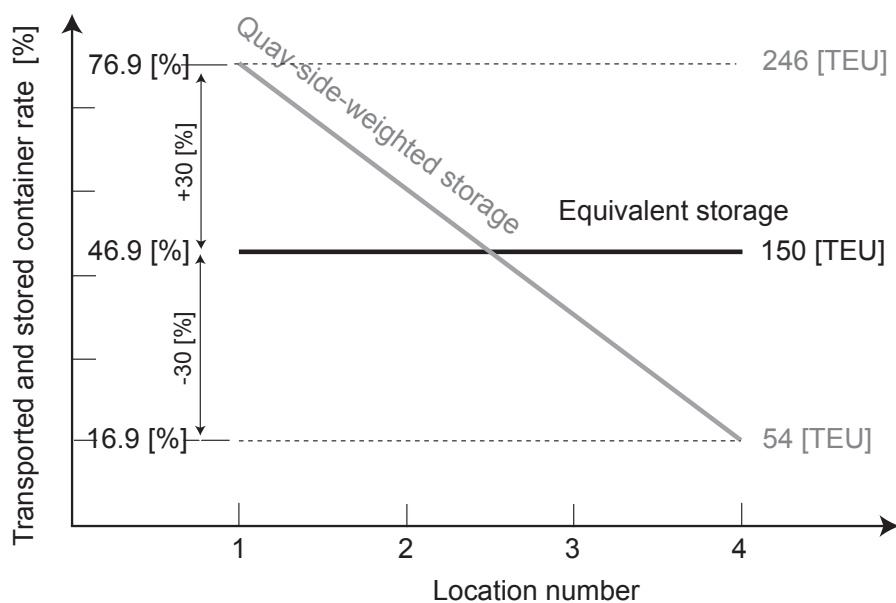


Fig. 6.8 均等・埠頭側加重搬送ルールによる搬送計画の例

#### 6.6.4 埠頭側加重搬送

AGVによるコンテナの総搬送時間を短縮する方法の1つとして，AGVの総搬送経路を短くするといった経路計画方法がある．そこで，埠頭側加重搬送ルールでは，Fig. 6.8が示す通り，埠頭側のロケーションより優先的に搬送を行う．しかしながら，埠頭側より順にロケーションのコンテナ蔵置容量の上限に達するまでコンテナを搬送・蔵置しては，結果として蔵置率の極端に高い埠頭側のロケーションと，そうでないロケーションが生じてしまうことになる．実際の搬送現場ではこのようなことは行われておらず，本論文でも第6.2.3項での議論を考慮し，蔵置制約として，均等搬送を行った際の各ロケーションの最終蔵置率に対して，最大，最小蔵置率がそれぞれ $\pm 30$ [%]の蔵置率におさまるように，搬

送・蔵置コンテナ数に勾配をつけ搬送計画を行う。したがって、総搬送コンテナ数が 600[TEU] で、ロケーション数が 4 本の場合、埠頭側の第 1 ロケーションより順に第 4 ロケーションまで、246, 198, 102, 54[TEU] だけ搬送される。

## 6.7 システム設計

### 6.7.1 設計手順

入力として与えられる総搬送コンテナ数およびコンテナ船の停泊時間より得られる要求仕様から，設計解算出までの設計手順(1~5)について述べる．第6.4節，第6.5節，第6.6節で構築してきたAGV搬送システムの運用モデルをすべて実装した場合，4通りの行動則，2通りの蔵置スケジューリング，3通りの搬送計画となり，評価する対象が膨大になってしまう．そのため，手順1で与えられた要求仕様に対して，手順2として，コンテナ搬送計画はランダムの下，Table 6.2に示す各運用モデル1)~6)に基づいたAGV搬送システムを構築する．手順3ではAGVとRTGCの投入台数を提案した設計方法論を用いて設計する．そして，設計されたAGV搬送システム各構築コストを比較・評価し，運用モデル1)~6)のうち，もっとも効率の高い運用モデルを算出する．次いで手順4では，手順3で算出された運用モデルにコンテナ搬送計画として均等および埠頭側加重搬送ルールを適用したAGV搬送システムを構築する．手順5では手順3同様にAGV，RTGCの台数設計，構築コストの比較・評価を行う．そして，最終的にはAGVおよびRTGCの投入台数ならびに，もっとも効率的な運用モデルを設計する．

手順 1. 要求仕様の入力．

手順 2. ランダム搬送 + 第6.4節，第6.5節で構築してきたAGV搬送システムの運用モデル1)~6)のシステムへの実装．

手順 3. 投入台数の設計，構築コストの評価，および，もっともコストの低い運用モデルの算出．

手順 4. 手順3から算出された運用モデルに，第6.6節で構築したコンテナ搬送計画として均等および埠頭側加重搬送ルールを適用．

手順 5. 投入台数の設計，構築コストの評価，もっともコストの低い運用モデル，およびそのときのAGV，RTGC投入台数を設計解として算出．

作業機器の行動則およびコンテナ蔵置スケジューリングに関して，RTGC選択法(DS, WS)，選択・呼び出しタイミング(DP, WP)，コンテナ蔵置スケジューリングの有無(×, ○)をそれぞれ実装すると，合計8パターンのシステムが考え

Table 6.2 ランダム搬送下での各運用モデル

RTGC 選択法	RS	DS	DS	DS	DS	WS	WS	WS	WS
RTGC 選択・呼び出し	DP	DP	WP	DP	WP	DP	WP	DP	WP
コンテナ蔵置	×	×	×	○	○	×	×	○	○
運用モデル	1)	2)	3)	-	-	-	4)	5)	6)

DS: 近傍選択法, WS: 作業空間選択法, RS: ランダム選択法

DP: 作業目的位置, WP: 作業目的経路

×: ランダム蔵置, ○: 蔵置スケジューリング

られる (Table 6.2 参照)。これに, 第 4 章や第 5 章において用いられてきた従来の運用モデルとして, ランダム蔵置の下 AGV が目的位置に到着後, RTGC をランダムに選択する方法 (モデル 1)) を構築した。Table 6.2 において, 蔵置スケジューリングは RTGC の作業空間を基に行われるため, RTGC 選択法 DS をとった場合, 蔵置スケジューリングが行われることはない。また, RTGC 選択法 WS をとる場合, 目的位置よりも作業経路進入後に RTGC を選択し, 呼び出した方が効率が良いことは明らかである。したがって, それらを Table 6.2 において “-” で示し, 本論文では比較対象とはしない。

### 6.7.2 運用モデルによる作業効率の評価

運用モデルによる作業効率の評価を行うため, Fig. 6.9 にランダム搬送計画の下, 各要求仕様に対して算出したそれぞれの運用モデルによる搬送システムの構築コストの比較結果を示す。横軸は与えられた要求仕様, 縦軸が要求仕様に対する構築コストを示している。Fig. 6.9 において, モデル 1) 以外では, 要求仕様が低い段階では確認されなかった構築コストの差が, 要求仕様が高くなるにつれて顕著になっていることがわかる。その結果, 運用を考慮しないで設計されたシステム (モデル 1)) ともっとも構築コストの低かったシステム (モデル 6)) との構築コストの差は, 要求仕様 120 で最大 18[point] (max. 48, min. 30) となり, 最大値に対して約 38[%] の効率化を確認した。

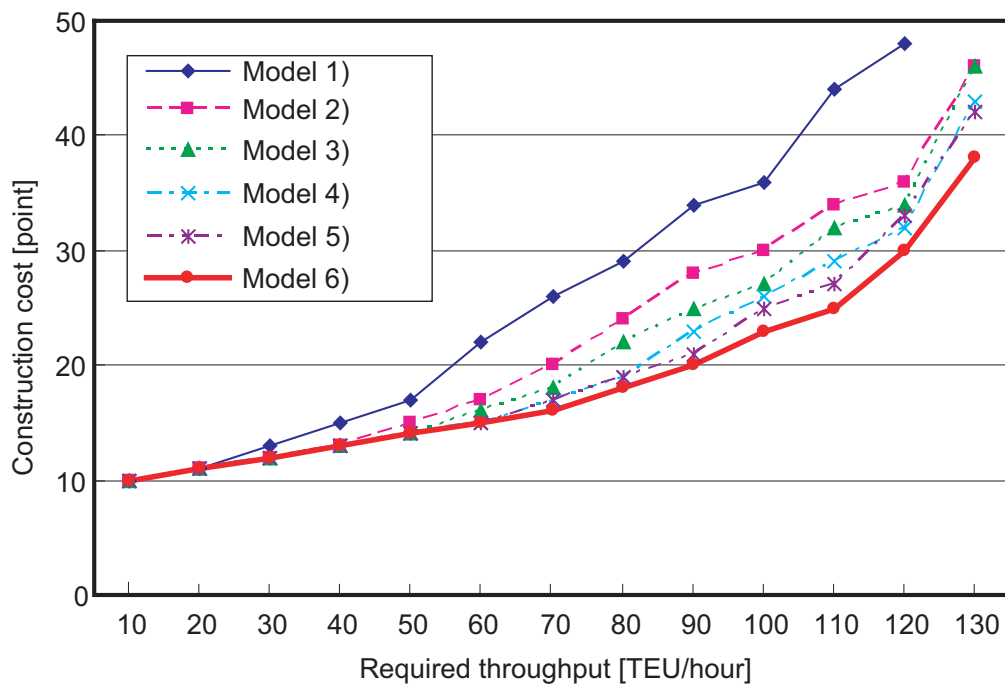


Fig. 6.9 ランダムコンテナ搬送計画の下で各要求仕様に対して算出された運用モデルによる構築コストの比較

Fig. 6.10 に、各運用モデルの下、要求仕様に対して算出された設計パラメータ (AGV, RTGC) の組合せを示す。ランダム蔵置における行動則の有効性の確認を行ったモデル 2)~4) では、モデル 4)、すなわち作業経路進入時に作業空間選択法に基づき RTGC を選択・呼び出す行動則がもっとも効率的であることがわかった。一方で、モデル 2) と 3) では、要求仕様が 120 から 130 に高められる際、AGV 投入台数に大きな増加があり (Fig. 6.10(b), Fig. 6.10(c)), 作業経路進入時における RTGC の選択・呼び出しの有効性が確認できなかった。これは、システム内における作業機器群の作業密度が高くなり、その結果、作業経路上での AGV 台数が増加する一方でアイドル状態の RTGC が減少してしまい、AGV が作業経路上を走行中に RTGC と通信を行い、受け渡し目的位置へ移動させることが困難となってしまったためである。次に蔵置スケジューリングを行った場合では、モデル 5) に比べ 6) がより効率的に搬送を行うことがわかった。これは、作業空間を RTGC ごとに分離させることにより作業密度を低減させ、その結果、作業経路での AGV-RTGC 間での通信が有効に機能したためであると考えられる。

以上のことより、コンテナ蔵置スケジューリングを行った上で、AGV が作業経路上に進入した際、RTGC を作業空間選択法に基づき選択・呼び出す運用モデル 6)、がもっとも効率的であることがわかった。

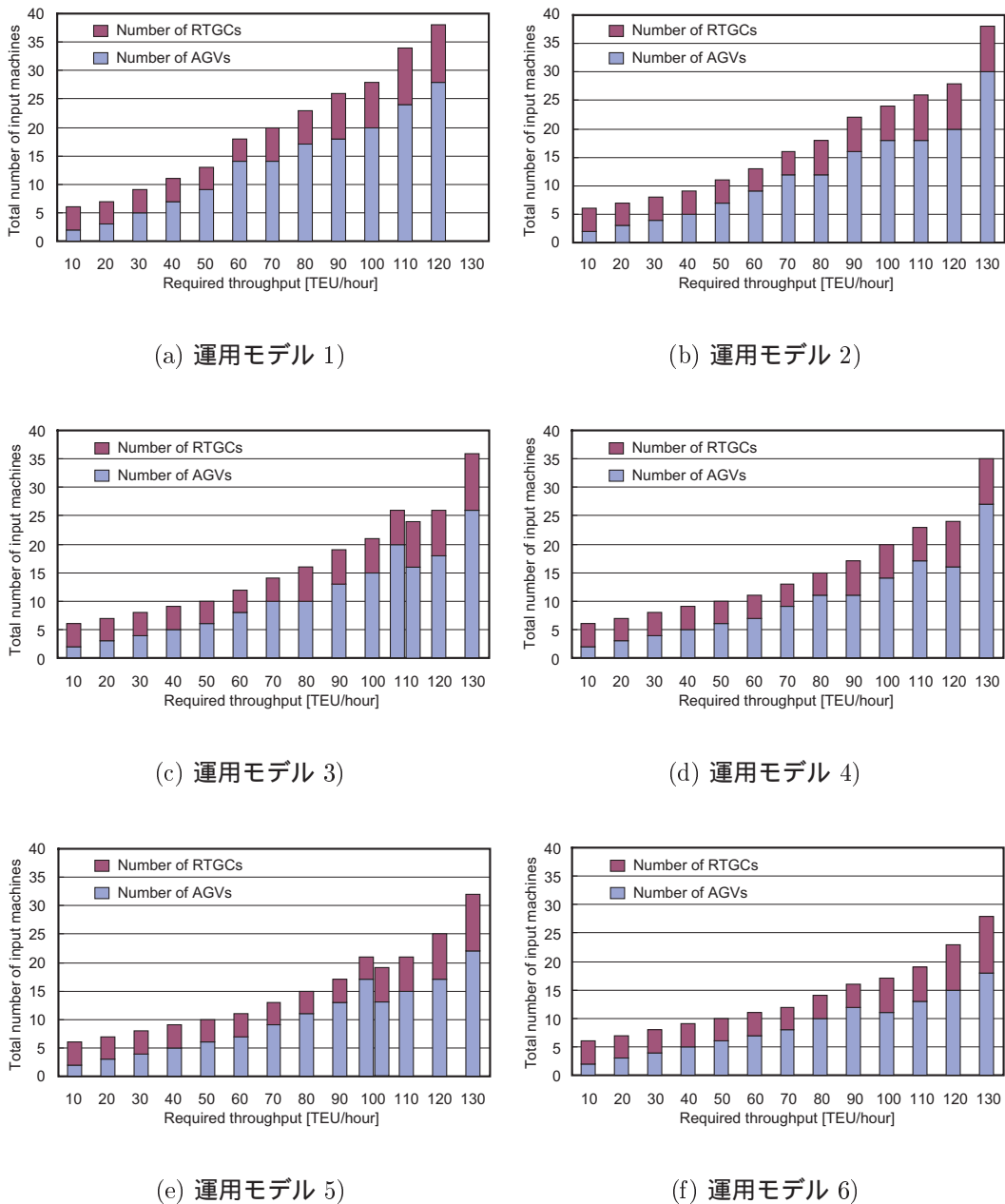


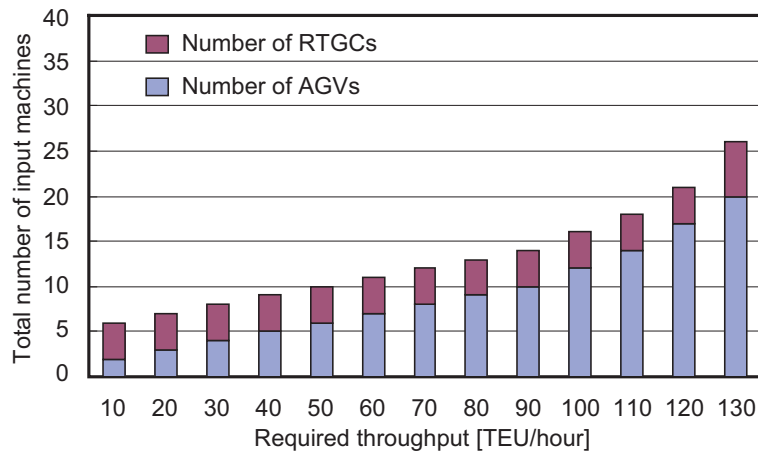
Fig. 6.10 ランダムコンテナ搬送計画の下で各要求仕様に対して算出された AGV と RTGC の投入台数

### 6.7.3 高効率運用法についての考察

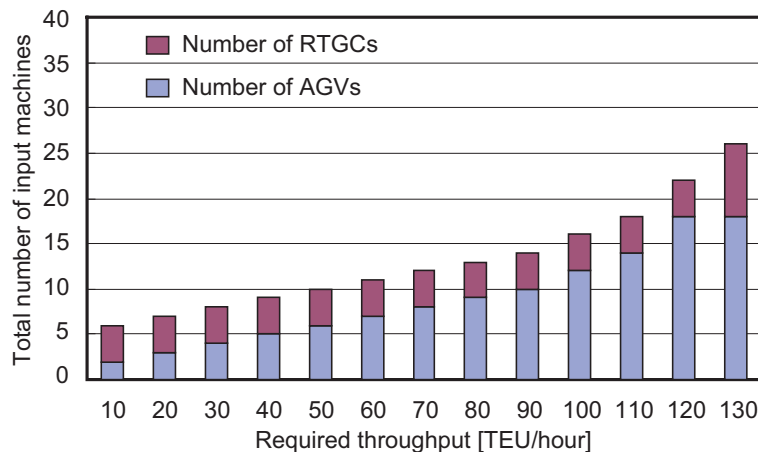
Fig. 6.11 は、もっとも作業効率の高い運用法であるモデル 6) を採用し、コンテナ搬送計画として、均等搬送および埠頭側加重搬送ルールを適用した際に得られ



た，AGV および RTGC 台数を示している．



(a) 運用モデル 6) + 均等搬送ルール



(b) 運用モデル 6) + 埠頭側加重搬送ルール

Fig. 6.11 均等・埠頭側加重搬送計画 + 運用モデル6) の下で各要求仕様に対して算出された AGV と RTGC の投入台数

ランダム搬送による運用モデル6)の結果，得られたAGVおよびRTGCの設計パラメータ (Fig. 6.10(f)) と比べ，Fig. 6.11(a) および Fig. 6.11(b) におけるAGVとRTGCの台数は少なく算出されていることがわかる．本結果より，ランダム搬送より，均等および埠頭側加重搬送が高効率であることがわかる．ただし，Fig. 6.11(a)，Fig. 6.11(b) とともに，要求仕様130に対してRTGCがそれぞれ6台，8台必要となっている．これは，ロケーション2本の場合では埠頭側加重搬送

を行うと極端に第1ロケーション上の作業密度が高くなり、作業効率が低下してしまい(第1ロケーションへのコンテナ搬送・蔵置数:320[TEU],第2ロケーションへのコンテナ搬送・蔵置数:280[TEU]),そのため,ロケーションが3本,4本必要になったためである。

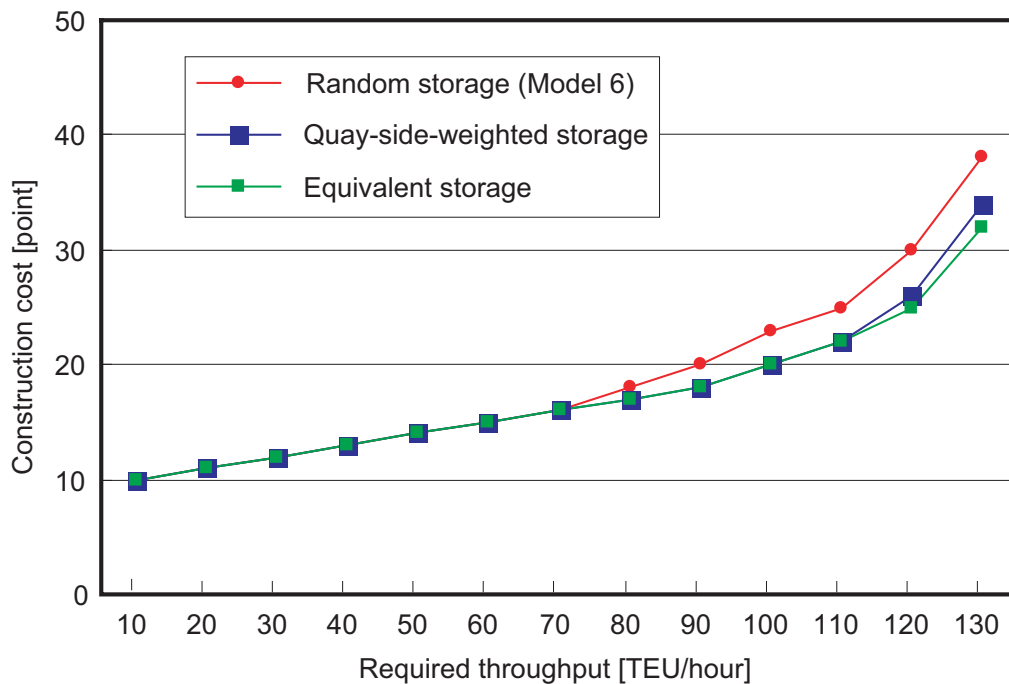


Fig. 6.12 各搬送ルールを適用した運用モデルによる構築コストの比較

Fig. 6.12 に各搬送ルールを運用モデルとして実装した際に得られたシステムの構築コストの比較結果を示す。要求仕様が70までは運用モデルによる構築コストの差はないが、要求仕様が高められるにつれ、ランダム搬送(モデル6)では均等搬送および埠頭側加重搬送を行った運用モデルに比べ作業効率が悪化してしまっていることがわかる。要求仕様が130のときに各モデルによる構築コストの差が最大となり、均等搬送では32[point]、埠頭側加重搬送では34[point]となった。作業効率では、ランダム搬送を適用したモデル6)に対し、均等搬送を適用した場合で16.3[%]、埠頭側加重搬送を適用した場合で10.5[%]の効率化を確認した。さらにFig. 6.9における、従来運用モデル1)と比較すると、要求仕様120の際に、均等搬送の場合で48[%]、埠頭側加重搬送の場合で46[%]の効率化が図られた。この結果より、均等搬送ルールに基づいた搬送計画がもっとも効率的であることがわかった。これは、各ロケーションに投入されているRTGC台数が均等であるため、埠頭側加重搬送を行った場合、埠頭側のRTGCがボトルネックになってしまうためであると考えられる。

以上のことから，本論文で設定した機器の作業仕様（Table 6.1），コストモデル，および要求仕様に対して得られた AGV および RTGC の投入台数では，以下の運用法がもっとも高効率であることがわかった．

- 均等搬送計画によりコンテナの搬送・蔵置目的ロケーションを決定し，蔵置スケジューリングを行った上で，AGV が作業経路に進入後，RTGC を作業空間選択法に基づき選択・呼び出す．

これらの結果より，本論文で構築した運用モデルの有効性，および，これら運用までを詳細に考慮した設計を行う必要があることを確認した．また，ランダム蔵置計画による各ロケーションに対するコンテナ搬送・蔵置数のばらつきは，ロケーション 3 本の場合，第 1 ロケーション 180[TEU]，第 2 ロケーション 202[TEU]，第 3 ロケーション 218[TEU]，ロケーション 4 本の場合では，第 1 ロケーション 146[TEU]，第 2 ロケーション 144[TEU]，第 3 ロケーション 149[TEU]，第 4 ロケーション 161[TEU] であった．このロケーションごとのコンテナ搬送・蔵置数の差が，ランダムおよび均等搬送による構築コストの差をもたらしている．

#### 6.7.4 コンテナ搬送計画の有効性

第 6.6 節において提案した，均等および埠頭側加重搬送ルールの有効性を搬送時間の観点より考察する．そのため，搬送時間がもっとも短くなるよう各コンテナの搬送・蔵置先が計画された最適搬送計画に基づいて行われた場合の搬送時間，および各搬送ルールに基づいて行われた場合の搬送時間の結果を，それぞれ Table 6.3 に示す．なお，コンテナの最適搬送計画を行うにあたっては，コンテナの探索きざみは 5[TEU]，蔵置制約として最終蔵置率を最大値，最小値をそれぞれ  $\pm 30$ [%] 以内とし，解空間に対する全探索を行った．AGV と RTGC の設計パラメータはそれぞれ天下りの的に，ロケーション本数が 3 本（AGV13 台，RTGC6 台），ロケーション本数が 4 本（AGV15 台，RTGC8 台），ロケーション本数が 5 本（AGV18 台，RTGC10 台），と設定した．

Table 6.3 より，最適コンテナ搬送計画を行った場合，均等ならびに埠頭側加重搬送に比べ，ある程度作業時間の短縮が見られる．しかしながら，この程度の時間の短縮が作業効率へ与える影響はほとんどなく，作業機器台数を減らせる程の効率化は達成できなかった．したがって，これらの結果から，本論文で設けた各搬送ルールは作業効率の観点からも有効であることが示された．

Table 6.3 搬送時間の比較

ロケーション本数	3	4	5
最適計画	5.23 [h]	4.76 [h]	4.57 [h]
均等搬送	5.32 [h]	4.87 [h]	4.60 [h]
埠頭側加重搬送	5.29 [h]	4.84 [h]	4.59 [h]

計算時間に関して、一組の AGV、RTGC 台数パラメータに対するコンテナの最適搬送計画終了までに要した時間は、Pentium 4 CPU 2.8 GHz の計算機を使用し、ロケーション 3 本の場合で約 8 分、ロケーション 4 本で約 2 時間 15 分、ロケーション 5 本で約 53 時間 52 分だった。すなわち、最適搬送計画をさまざまな要求仕様および運用モデルに対して行った場合、1 回の計画時間 × 要求仕様の数 × 運用モデルの数、だけの計算時間が必要となることがわかる。これに対し、各搬送ルールを適用した際の計算時間は、それぞれ 1 回の計画時間がロケーション本数に関わらず 1.0 秒程度だった。10~130[TEU/hour] までの 13 通りの要求仕様、および 6 + 2 通りの運用モデルに対して設計を行うと、設計プロセスにおけるシミュレーション回数の合計は 104 回程度となる。ここで、一組の AGV および RTGC の組合せ設計解算出に要する時間は、約 10 秒程度であることから、最終的に 17 分程度ですべての設計解を算出することが可能である。したがって、計算時間の観点からも、本搬送ルールの有効性を確認することができる。

Fig. 6.13 は、各ロケーション数に対する最適搬送計画結果を示している。本結果より、ロケーション数が 3 本の場合では、埠頭側に対してある程度重点的に搬送する傾向が見てとれる。一方、ロケーション数が 4、5 本の場合、上述したような傾向はなく、このことより、ある種のヒューリスティック関数により最適解を探索することの困難さがうかがえる。したがって今後、コンテナの搬送計画に関して、最適性が求められるような現場に対しては、その計画法について、時間を考慮した方法論が必要なる。

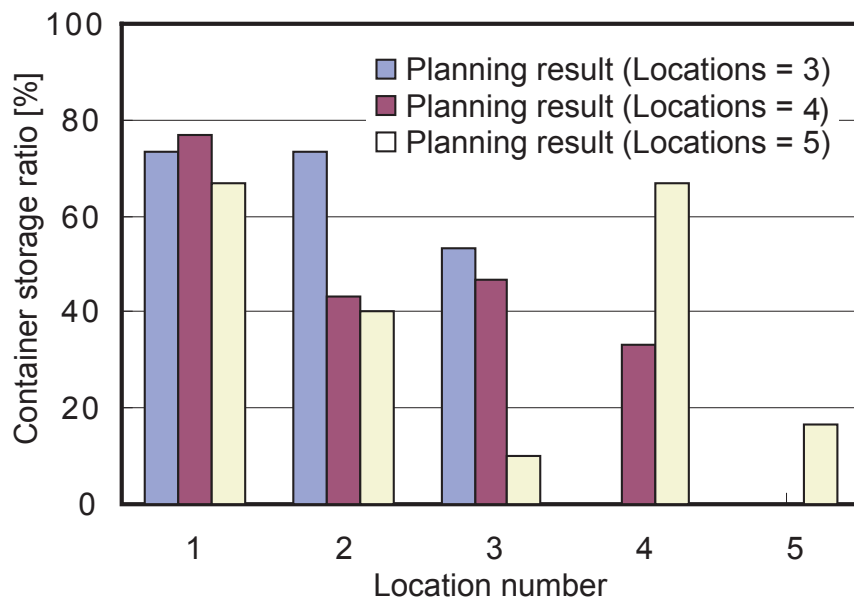


Fig. 6.13 ロケーション本数に対する各最適搬送計画結果 (蔵置率: 蔵置コンテナ数/320)

## 6.8 おわりに

本章では，水平型 AGV 搬送システムを対象に，自動コンテナターミナルにおける運用法を考慮したシステム設計を行った．その結果，高効率 AGV 搬送システムの設計を行うことが可能となった．

第 6.2 節では，自動コンテナターミナルにおける AGV 搬送システムとして，水平型 AGV 搬送システムのレイアウト設定，問題設定，設計条件，機器の作業仕様などについて述べた．

第 6.3 節では，高効率運用法を考慮するにあたり，そのためのアプローチについて述べ，研究のブレークスルーについて明らかにした．

第 6.4 節では，作業機器間での協調行動則について，その詳細なモデルについて説明した．

第 6.5 節では，コンテナの蔵置スケジューリング法についての詳細なモデルについて説明した．

第 6.6 節では，コンテナの搬送計画についての詳細なモデルについて説明した．

第 6.7 節では，各運用モデルを実装し，水平型 AGV 搬送システムにおける作業機器の投入台数と運用モデルの同時設計を行った．

次章では，第 1.1.3 項で述べた設計 (II) を扱うため，第 3 章で提案した設計方法論を適用し，要求仕様の変更にもなう既存の自動搬送システムに対する再設計のための設計支援方法論について提案する．

# 第7章 既存の搬送システムに対する 改善設計

---

7.1	はじめに . . . . .	132
7.2	チャレンジングポイント . . . . .	133
7.3	改善設計のための再設計支援方法論 . . . . .	136
7.3.1	待ち行列ネットワーク理論を適用した搬送システムの定式化 . . .	136
7.3.2	改善設計のための再設計支援アルゴリズム . . . . .	138
7.4	ロジックツリーによる影響分析と改善設計案 . . . . .	141
7.5	実搬送システム（事例研究） . . . . .	143
7.5.1	システム設定 . . . . .	143
7.5.2	搬送シミュレータ . . . . .	144
7.5.3	搬送手順 . . . . .	145
7.5.4	搬送システムのモデル化 . . . . .	146
7.6	改善設計 . . . . .	149
7.6.1	再設計手順 . . . . .	149
7.6.2	システム解析 . . . . .	149
7.6.3	設計政策 . . . . .	149
7.6.4	双方向型・単方向型搬送経路（設計政策(1)と(2)）を適用した 改善設計 . . . . .	154
7.6.5	さまざまな要求仕様に対する再設計 . . . . .	156
7.7	バランスの考慮 . . . . .	158
7.8	おわりに . . . . .	161

---

## 7.1 はじめに

本章では、第 1.1.3 項で述べた設計 (II) を扱うため、第 3 章で提案した設計方法論を適用し、要求仕様の変更にもなう既存の自動搬送システムに対する再設計のための設計支援方法論について提案を行う。

第 7.2 節では、既存の自動搬送システムに対して、要求仕様の変更にもなうシステムの再設計を行う際のチャレンジングポイントについて述べる。

第 7.3 節では、要求仕様の変更にもなう、搬送システムの改善設計を行うため、まず、待ち行列ネットワーク理論を適用した搬送システムの定式化を行う。そして、再設計支援アルゴリズムの提案を行う。

第 7.4 節では、定式化結果に基づき、ロジックツリーを適用し、ボトルネックに影響を与えるパラメータについて分析し、これらを改善設計案として網羅的に列挙する。

第 7.5 節では、事例研究として、実際に稼動している既存の AGV 搬送システムを取り上げ、それらの詳細な説明ならびにモデル化の手順について述べる。

第 7.6 節では、第 7.4 節で取り上げた既存の AGV 搬送システムにたいして、現在の要求仕様から高いものへと変更された際に、いかにして改善設計が行われるのかについて、述べる。

第 7.7 節では、搬送システムのバランシングについて議論する。すなわち、システムに対する適切な要求仕様とそれに対する AGV 投入台数について明らかにする。

第 7.8 節では、本章をまとめる。



## 7.2 チャレンジングポイント

既存の AGV 搬送システムに対し、要求搬送量の増加等、仕様変更の要求が発生するケースが多く存在する。その際、現状のシステムの変更をできるだけ少なく、かつ、必要十分に改善するための設計案をできるだけ網羅的に提示することが重要である。しかしながら、実際の設計現場においては、このような仕様の変更に対し、天下りの、すなわち設計者の経験則に基づいた設計パラメータそして改善案の提示しかなされていない場合が多い。また要求仕様に対して、必要以上に AGV を投入した結果、搬送システム内に AGV の渋滞が生じてしまい、AGV を投入しても要求仕様を満たすことが不可能となってしまうどころか、効率の悪い搬送システムを構築してしまうといった問題が存在する。なお本章においても、第 1.1.5 項で述べたボトルネックの有無が基準となり、改善設計が行われることとなる。

変更された要求仕様を満たす搬送システムを構築するためには、システムの作業効率を向上させる必要があり、そのためには、上述したボトルネックを改善するための再設計を行わなくてはならない。従来、既存の搬送システムの再設計を行う場合、再設計後の搬送システムのスループットや AGV 群の渋滞状況を示すボトルネックなどの挙動の解析は、市販あるいは Fig. 1.12 や Fig. 1.13 に示したような独自開発のシミュレータを適用したり（たとえば [ARENA] など）、あるいは、実際の搬送現場における定点観測を長期間にかけて実施することにより行われてきた。しかしながら、このような改善設計のアプローチでは、試行錯誤的かつ天下りの設計パラメータを変え、それに対する搬送システムの挙動解析しか行えない。さらに、シミュレーションを行うためには、普段行っている作業データの詳細なども必要となり、設計までに膨大な時間が必要となる。また、検出されたボトルネックに対しても、それに対する改善設計案を網羅的に列挙することは困難であり、極めて場当たりの改善設計しか行うことができない。この結果、膨大な時間コストを費やして改善設計を行ったとしても、搬送システム内の別の場所に再びボトルネックが生じてしまう可能性もある。

そこで本章では、“搬送システムの再設計を行う過程で、作業機器により、搬送システム内にボトルネックが生じてしまった場合、これらのボトルネックを上述したシミュレータを用いた定点観測を行う方法などに比べいかにして速やかに検出し、解消するか”，といったことが課題となる。ただし、第 6 章までの議論とは異なり、既存の搬送システムに対する再設計という立場から、システムの制約が多く存在するため、当該システムの抜本的な改善設計を行うことは困難となる。そこで、ボトルネックに対して影響を与えている因子を分析し、それに対する改善

策を網羅的に列挙することが必要となる。しかしながら、システムがオーバースペックになってしまっている状態では、システム内のある場所におけるボトルネックを何らかの対策により解消しても、その結果、別の場所にボトルネックが生じてしまう可能性がある。そのため本章では、以下のチャレンジングポイントを克服する必要がある。

- (1) 自動搬送システム内に生じているボトルネックを迅速に検出・解消するための改善設計案の網羅的な列挙
- (2) 搬送システムのバランシングの考慮

第 1.4.4 項より、チャレンジングポイント (1) に対しては、要求仕様の変更にもなう搬送システムの再設計を行う際、作業機器の投入台数により発生するかもしれないボトルネックに対して、第 3 章で提案した、数理モデルとシミュレーションをハイブリッドに用いた設計方法論を適用する。そして、待ち行列ネットワーク理論に基づいた搬送システムの評価および解析を行う。

- ここでは、待ち行列ネットワーク理論により搬送システムが定式化され、この結果に基づいて、ボトルネックに対する改善設計案をロジックツリーとして考え得る限り網羅的に列挙する。

そしてこれら列挙された設計案の中から、実際の搬送システムにおける制約を考慮したうえで、設計政策を提示する。

チャレンジングポイント (2) に対しては、搬送機器である AGV のスペックと、搬送システムの環境スペックのバランスを考慮する。たとえば、AGV の投入台数や搬送能力などといった AGV のスペックが、経路長や経路数、ならびに各エリアにおいてコンテナのやりとりを行う作業機器の投入台数や処理能力などといったシステムの環境スペックを上回ってしまっている、すなわちシステムがオーバースペック状態にある場合、ボトルネック箇所に対し、試行錯誤的な改善設計を行っても、その結果、他の場所に新たにボトルネックが生じてしまう可能性がある。一方、システムの環境スペックが AGV のスペックを上回ってしまっている場合、ボトルネックは生じないかもしれないが、システム内において常にアイドル状態になってしまっている機器が生じてしまい、非効率な搬送システムとなってしまう。以上のことから、高い搬送効率を維持した状態で、ボトルネックを解消するためには、AGV と環境のスペックを均等にするようシステムを構築する必要がある。

- ここでは、各搬送システムにおいてAGVの投入台数に対するシステムスループットをそれぞれ評価することにより、適切な要求仕様ならびにそれに対するAGVの投入台数を算出する。

## 7.3 改善設計のための再設計支援方法論

### 7.3.1 待ち行列ネットワーク理論を適用した搬送システムの定式化

現状の搬送システムに AGV が  $n$  台投入されている場合において、要求仕様が  $throughput_{old}$  から  $throughput_{new}$  へ増加した状況を想定する。コンテナ搬送を行うため、搬送システム内を移動する AGV をネットワークエージェントとし、巡回閉鎖型待ち行列ネットワークモデルを適用すると、 $K$  台の AGV が投入された際の搬送システムにおける単位時間のコンテナ搬送量であるスループット ( $\tau_j(K)$  [TEU/hour]) は、(7.3.1) 式より算出することができる。本論文では、このスループットを設計プロセスにおいて要求仕様に対する設計基準とし、これを満たすよう AGV 台数 ( $K$ ) を設計する。

$$\tau_j(K) = \theta_j \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (7.3.1)$$

(7.3.2) 式 ~ (7.3.4) 式は、 $K$  台の AGV が投入された際の搬送システムにおいて、それぞれ単一サーバ (7.3.2 式)、複数サーバ (7.3.3 式)、無限サーバ (7.3.4 式) によって構成される各ノードにおいて平均的に滞在する AGV 台数 ( $\phi_j(K)$ ) を示している。(7.3.2) 式 ~ (7.3.4) 式により算出された各ノードでの平均滞在 AGV に基づいて、ボトルネックノードを数理的かつ高速に検出することができる。

$$\phi_j(K) = h_j \frac{1}{G(K)} \sum_{0 \leq x \leq K-1} q_j(x) G(K-1-x) \quad (7.3.2)$$

$$\phi_j(K) = \frac{1}{G(K)} \sum_{0 \leq x \leq K} x q_j(x) G_{[j]}(K-x) \quad (7.3.3)$$

$$\phi_j(K) = h_j \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (7.3.4)$$

ここで、

$N$ : システム内の総ノード数

$K$ : システム内を巡回搬送する AGV の投入台数

$j$ : ノード番号 ( $j=1, \dots, N$ )

$\theta_j$ : ノード  $j$  への AGV の相対訪問回数

$h_j$ : ノード  $j$  のトラヒック係数

$G(x)$ : システム内に  $x$  台の AGV が存在する際の正規化定数 ( $0 \leq x \leq K$ )

$G_{[j]}(x)$ : システム内に  $x$  台の AGV が存在する際の  $j$  補完網における正規化定数 ( $0 \leq x \leq K$ )

$q_j(x)$ : ノード  $j$  に AGV が  $x$  台存在する際のたたみ込み係数

$\theta_j$  に関して、ネットワークに分岐がない場合、相対訪問回数は各ノードで等しくなり、 $\{\text{相対訪問回数}\} = \{\text{総搬送コンテナ数}\}$  となる。しかしながら、もし、ネットワークに分岐（たとえば搬送経路上のジャンクションのようなもの）が存在する場合、 $\{\text{各分岐点における遷移率}\} \times \{\text{総搬送コンテナ数}\}$  により、各ノードにおける相対訪問回数を算出する。 $h_j$  のトラヒック係数は、 $\theta_j \times \{\text{ノード } j \text{ における時間コスト}\}$  により算出することができる。正規化定数  $G(K)$  とは、各ノード周りの定常状態になる確率の和を 1 にするための定数のことである（(7.3.5) 式）。 $j$  補完網とは対象とする閉鎖型待ち行列ネットワークの中から  $j$  番目のノードを取り除いて得られる正規化定数のことであり、 $G_{[j]}(K)$  はその  $j$  補完網に対して上述の正規化定数導出と同様の手続きにより、解を得たものである（(7.3.6) 式）。なお、正規化定数ならびに  $j$  補完網の導出過程に関しては、第 3.6 節ですでに述べた通りであるため、ここでは省略する。

$$G(K) = \sum_{x_1+x_2+\dots+x_N=K} \prod_{j=1}^N q_j(x) \quad (7.3.5)$$

$$G_{[j]}(K) = \sum_{x_1+\dots+x_{j-1}+x_{j+1}+\dots+x_N=K} \prod_{i=1, i \neq j}^N q_i(x) \quad (7.3.6)$$

(7.3.5) 式および (7.3.6) 式におけるそれぞれのたたみ込み係数 ( $q_j(x)$ ) に関しては, 単一 ( (7.3.7) 式 ), 複数 ( (7.3.8) 式 ), 無限サーバ ( (7.3.9) 式 ) が適用されたそれぞれのノードに対して, 以下の式から算出することができる.

$$q_j(x) = h_j^x \quad (7.3.7)$$

$$q_j(x) = \begin{cases} \frac{h_j^x}{x!}, & x \leq S_j \\ \frac{x}{S_j! S_j^{x-S_j}} \frac{h_j^x}{x!}, & S_j < x \end{cases} \quad (7.3.8)$$

$$q_j(x) = \frac{h_j^x}{x!} \quad (7.3.9)$$

(7.3.8) 式において,  $S_j$  ( $j=1, \dots, N$ ) とは ノード  $j$  で稼働しているサーバ数のことである.

### 7.3.2 改善設計のための再設計支援アルゴリズム

要求仕様変更に対する改善設計のためのアルゴリズムを Fig. 7.1 に示す. AGV の初期入力台数は 1 台とする. 第 3 章で提案したハイブリッドな設計方法論を適用し, (7.3.1) 式により AGV が  $K$  台投入された際の搬送システムのスループットが算出され, (7.3.1) 式とシミュレーションの結果が一致して要求仕様を満たす場合, 設計は終了する. 要求仕様を満たせない場合, 搬送システム内にボトルネックが生じているかどうかの解析を行うため, 投入台数に対するシステムのスループットの増加量を (7.3.10) 式に基づいて評価する. そして, この増加量が 0 になったら, スループットはボトルネックにより横ばいになっていると判断し, このときの各ノードにおける AGV の占有率を算出する. スループットが増加傾向にある場合, ボトルネックが生じているとは見なされず, AGV の投入台数を増やし, 要求仕様を満たすかどうかの評価がなされる. ここで, ノードにおける AGV の占有率とは,  $\{ \text{ノードの平均滞在台数} (\phi_j(K)) \} / \{ \text{AGV の投入台数} (K) \}$  のことを意味している. 各ノードの平均滞在 AGV 台数に関しては, 単一・複数・無限サー

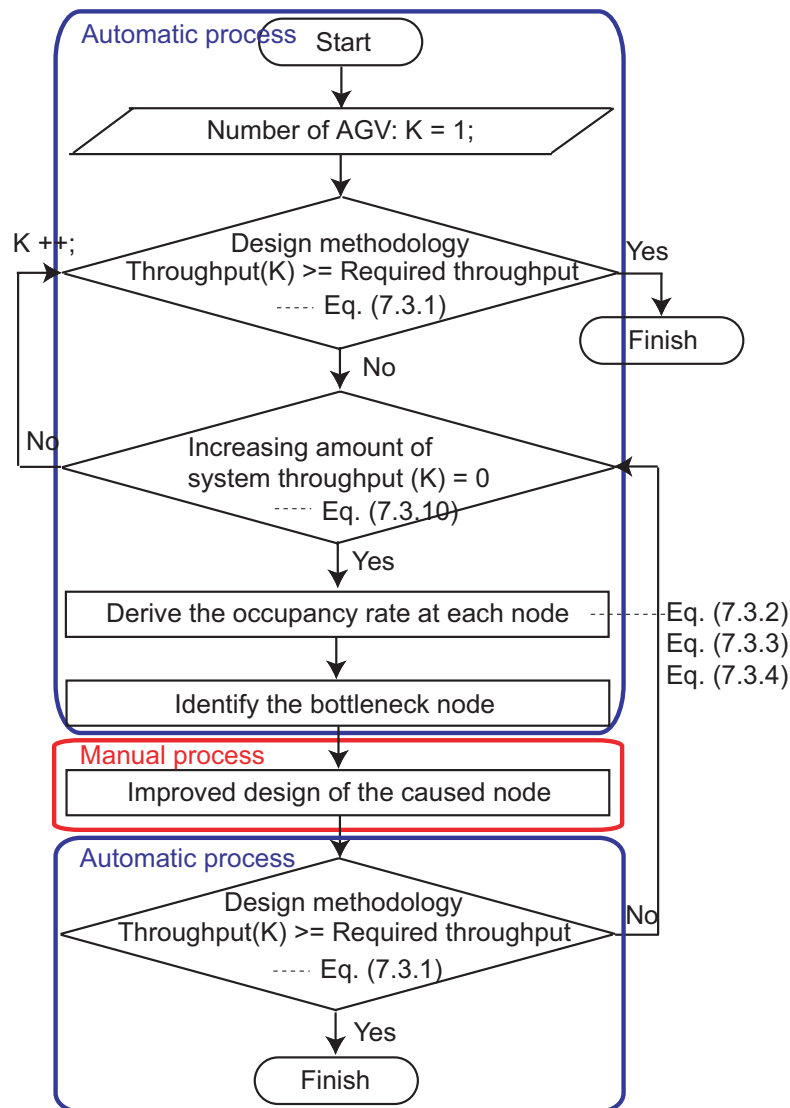


Fig. 7.1 要求仕様の変更に対する既存の搬送システムの再設計プロセス

により，それぞれ (7.3.2) 式，(7.3.3) 式，(7.3.4) 式より求めることができる．本設計アルゴリズムにより，AGV 台数の変更ともなうボトルネックノードの変化に対して迅速な検出・解消が可能となる．

$$\text{Increasing amount } (K) = \{\tau(K) - \tau(K - 1)\} \quad (7.3.10)$$

Fig. 7.2に隣接ノード間におけるボトルネックと原因ノードの関係を示す。ボトルネックノードが検出されたら、当該ノードと下流に隣接しているノード（これを連結ノードと呼ぶ）を抽出し、その連結ノードの容量を拡大するための改善設計を行う。ただし、連結ノードが複数個ある場合、これらのうち、占有率がもっとも高いノードをボトルネックの原因となっており、設計改善が必要なノード、すなわち、原因ノードと見なす。改善設計された搬送システムに対しては、再びAGVを $K$ 台投入した際のスループットを算出し、これが要求仕様を満たす場合、設計は終了するが、そうでない場合、再びスループットの増加量が評価される。設計を行うに先立ち、AGVの投入台数の上限（ $AGV\_MAX$ ）を決め、設計プロセスにおいて、AGVの投入台数（ $K$ ）がこの上限台数に達したら、設計を終了する。

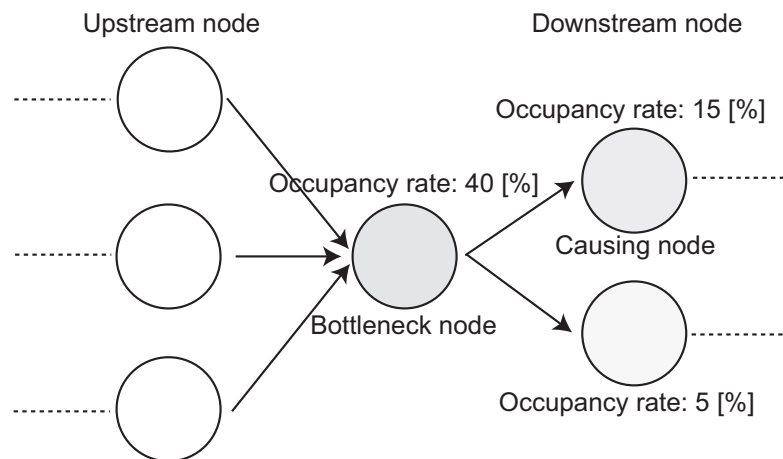


Fig. 7.2 隣接ノード間におけるボトルネックと原因ノードの関係

Fig. 7.1において、青で囲まれている部分に関しては、要求仕様に対するAGVの投入台数、システムスループット、ならびに各ノードにおけるAGVの占有率は待ち行列ネットワークとシミュレータをハイブリッドに適用した最適設計方法論により自動的に算出することが可能である。しかしながら、赤で囲まれている部分に関して、占有率が閾値を超えた際、ボトルネックに対する再設計は後述する設計政策に基づいて手作業で行われる。



## 7.4 ロジックツリーによる影響分析と改善設計案

(7.3.2) 式 ~ (7.3.4) 式および (7.3.8) 式より，改善設計の際，ボトルネックに影響を与えるパラメータを分析すると，それらは， $K$ ， $h_j$ ， $S_j$ であることがわかる．また， $h_j$  は  $\theta_j$  とノードを通過するのにかかる時間コスト，さらに  $\theta_j$  は遷移率と搬送コンテナ数より算出することができる．以上のことから，ボトルネックを解消するための改善設計案をロジックツリーを用いて網羅的に列挙すると，それらは Fig. 7.3 のようになる．すなわち，Fig. 7.3 において，下線で示されているパラメータをそれぞれ調節することで，以下に示すような効果により，ボトルネックを解消することができる．

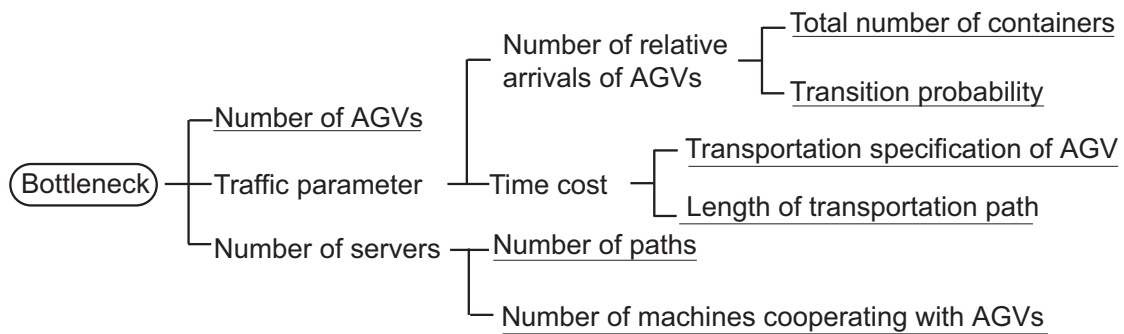


Fig. 7.3 ロジックツリーを用いて網羅的に列挙された搬送システムの改善設計案

- AGV の投入台数：AGV の投入台数を変更することにより，搬送システム内における交通量を減らし，AGV 渋滞を緩和することができる．
- トラヒック係数：相対訪問回数 × 時間コスト
  - － 相対訪問回数：総コンテナ搬送数 × 搬送遷移率
    - \* 搬送コンテナ数：搬送コンテナ数を変更することにより，各ノードに訪問する回数を減らし，AGV 渋滞を緩和することができる．
    - \* 遷移率：搬送遷移率を変更することにより，渋滞が生じているエリアへ向かう AGV 台数を減らし，AGV 渋滞を緩和することができる．
  - － 時間コスト：AGV が各ノードを通過するのに要する時間コストを変更することにより，AGV が各ノードを通過するのに要する時間を減らし，

AGV の渋滞緩和をすることができる。なお、時間コストは、

- \* AGV の搬送能力（速度）
- \* 搬送経路長

に依存するパラメータである。

- サーバ数：サーバ数に相当する搬送経路数あるいは処理機器の台数を変更することにより各ノードにかかる処理の負担を分散することができ、渋滞を緩和することができる。

## 7.5 実搬送システム（事例研究）

### 7.5.1 システム設定

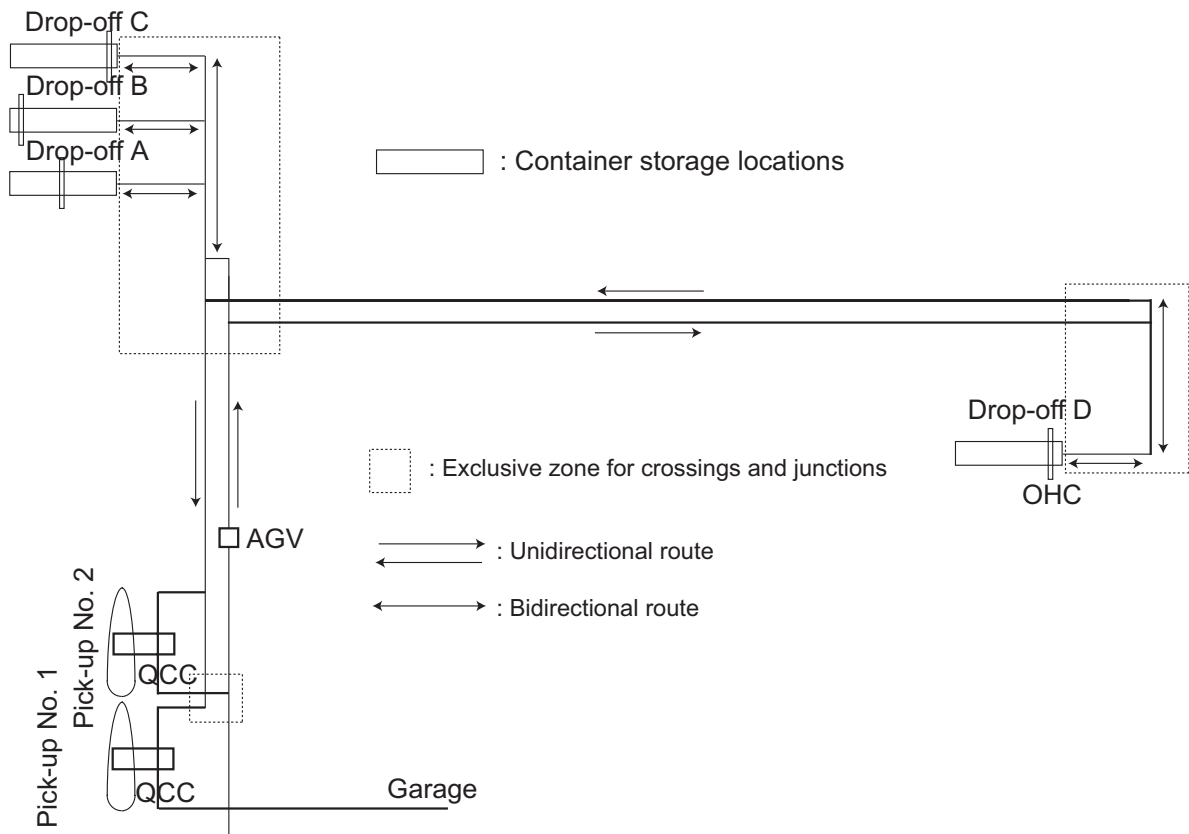


Fig. 7.4 既存のAGV搬送システム

提案した改善設計方法論の有効性の評価を行うため、本論文では事例研究として、Fig. 7.4に示す港湾ターミナルにおいて実際に操業している既存のAGV搬送システムを題材とする。第6章までの議論では、第1.1.3項の設計(I)を対象としていたため、港湾物流として主に垂直型と水平型のAGV搬送システムに焦点を当ててきた。これは、海→コンテナターミナル→陸、といったコンテナ物流を想定していたからで、そのためのコンテナターミナルにおける搬送システムのレイアウトは垂直型と水平型の2つのレイアウトに分類できたためである。これに対し、ターミナル内に加工工場などが設けられ、海→コンテナターミナル→工場→コンテナターミナル→海、といった港湾物流も存在する。このようなターミナルにおける既存の搬送システムは、土地の制約や工場の配置のされ方などにより、

システムのレイアウトを垂直型か水平型のいずれかに大別することは困難である。ただし、Fig. 7.4 において、ロケーションに対する搬送経路のアプローチのしかたから分類すると、本搬送システムも垂直型が土地の制約などにより変化したレイアウトとして考えることができる。このようなターミナルにおける既存の搬送システムを再設計する際には、土地や工場の配置のされ方、そしてシステム制御のしやすさ、などといった実際の制約を考慮する必要がある、この点において、第 6 章までと本章は大きく異なる。

Fig. 7.4 では、コンテナ Pick-up 場所 (No. 1, No. 2) が海に面しており、Drop-off 場所の A~D のロケーションの先に工場が隣接しているレイアウトとなっている。AGV はコンテナ船により運び込まれたコンテナ群をロケーションまで搬送し、搬入されたコンテナの中身が工場で加工され、再びコンテナへ詰められ、AGV によりターミナル内をコンテナ船へと搬送される。AGV は矢印で示された単方向の搬送経路上を走行する。各 Pick-up 場所においては、それぞれ 1 台の QCC (Quay Container Crane) が投入され AGV へのコンテナの荷役作業を行う。Drop-off 場所では、A, B, C, D の 4 つのロケーションに対しそれぞれ 4 台の OHC (Overhead Hoist Crane) が投入され、コンテナの搬送・蔵置作業を行う。各 Drop-off 場所のロケーションへ進入する経路のみ、双方向により構成され、AGV はスイッチバック行動をとる。また、システム内には作業を行わない AGV が待機するためのガレージが設けられ、作業を終了した AGV はガレージへと戻る。点線の枠は、AGV の排他ゾーンを示している。排他ゾーンは、経路の交差、分岐・合流地点における AGV 同士によるデッドロックを回避するために設けられる。したがって、1 台の AGV が排他ゾーンに進入中に他の AGV が当該ゾーンに進入することはできない。また、搬送指令は、各 Pick-up 場所の QCC から均等に出され、搬送先も各 Drop-off 場所の各ロケーション均等に決定される。

当該 AGV 搬送システムに対し、現状では 20[TEU/hour] の要求仕様を想定し、6 台の AGV が投入されている。

## 7.5.2 搬送シミュレータ

Fig. 7.4 に対して開発した搬送シミュレータを Fig. 7.5 に示す Fig. 7.5 において、後述する搬送システムのモデル化のため、搬送システム内の各作業場所をそれぞれ Pick-up, Drop-off, 搬送エリアとして定義する<sup>\*1</sup>。本シミュレータを、設

<sup>\*1</sup> エリアとノードの関係の詳細は次節の Fig. 7.6 を用いて説明する。

計プロセスにおいて、後述する待ち行列ネットワーク理論とハイブリッドに用いることにより、高速かつ最適なボトルネック検出ならびに再設計が可能となる

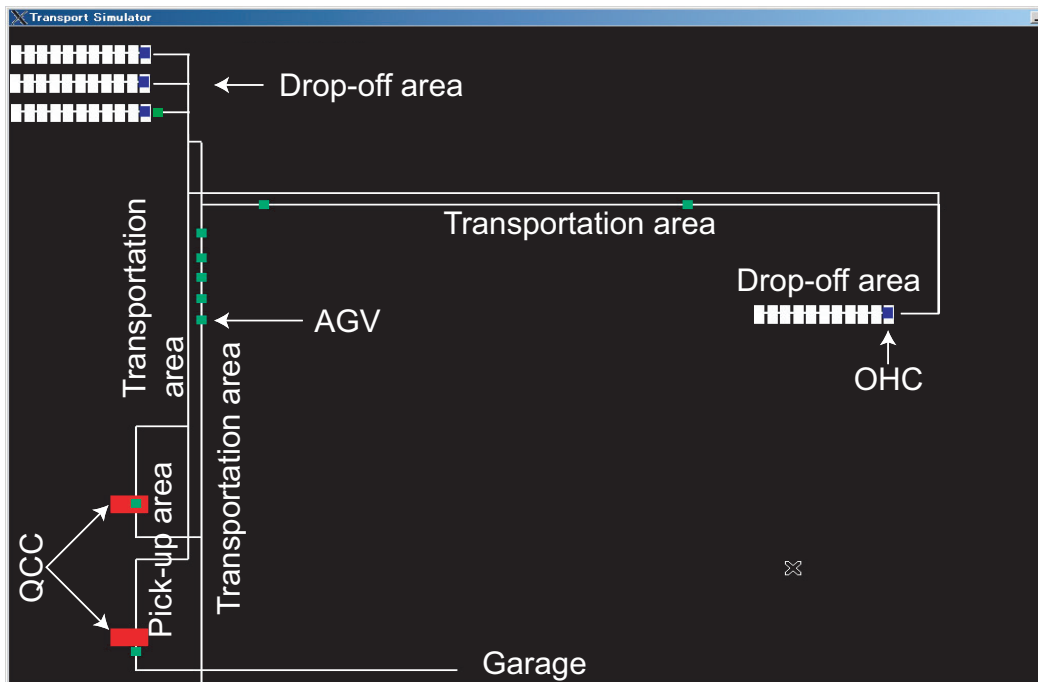


Fig. 7.5 AGV 搬送システムシミュレータ

Fig. 7.5 において、QCC は AGV が Pick-up エリアに到着すると作業を開始する。ここで、QCC によるコンテナの荷役時間は  $60[s]$  とした。AGV はコンテナの荷積み状態に関わらず、経路上にあるトランスポンダーユニットを介して通信を行い、他の AGV との車間制御、速度制御、排他ゾーンにおける制御を行う。その際、走行速度は経路により異なり、搬送エリアでは  $2.78[m/s]$ 、Pick-up ならびに Drop-off エリアでは  $1.39[m/s]$  を最高速度とし、車間距離を制御しながらこれら規定速度に従う。Drop-off エリアにおける AGV と OHC とのコンテナの受け渡しに要する時間は  $30[s]$  とした。

### 7.5.3 搬送手順

AGV は以下に示す搬送手順でコンテナを Pick-up エリアより Drop-off エリア内のコンテナ蔵置ロケーションへと搬送する。また、作業を終了した AGV はガレー

ジへと待避する。なお，第7.5.1項で述べたコンテナ物流のうち，本章では，コンテナ船 → コンテナターミナル → 工場，のコンテナの流れに注目する。

- 手順1. Pick-up エリアにおいて，QCC による AGV へのコンテナ荷役
- 手順2. Drop-off エリア内の蔵置ロケーションの割当て
- 手順3. AGV による目的ロケーションまでのコンテナ搬送
- 手順4. AGV の目的作業位置到着
- 手順5. AGV と OHC によるコンテナの受け渡し作業
- 手順6. OHC によるコンテナ搬送・蔵置
- 手順7. AGV は Pick-up エリアへ（手順1へ）

#### 7.5.4 搬送システムのモデル化

Vandaele らは，開放型待ち行列モデルを用いた局所的な交通流のモデル化を行っている [Vandaele 2000]。ここでは，従来なされてきた連続的な交通流を実験的に求め，それらについて評価・解析する手法に対し，交通量に基づいた解析的な交通流の挙動のモデル化を行っている。その結果，交通管理，渋滞緩和，道路設計，などに影響を与える因子を明らかにしている。しかしながら，開放型では巡回するシステム全体のモデル化を行うことが困難である。そのため本論文では，Fig. 7.4 の AGV 搬送システムに対して，閉鎖型待ち行列ネットワークモデルを適用し，システム全体のモデル化を行う。

本論文では，はじめに各エリアを Fig. 7.6 が示すように 10 個のノードに分割する。ここでは，分岐・合流点ならびに経路の交差点の有無によりそれぞれノードが適用される。各ノードは，単一，複数，無限サーバのいずれからなる。ノード3には A, B, C の3つのロケーションがあり，3台の OHC が作業していることから，サーバ3台の複数サーバ，ノード5では各ロケーションに1台の OHC が作業しているため，サーバ1台の単一サーバ，その他のノードは AGV の移動時間コストを表現するため，無限サーバを適用する。

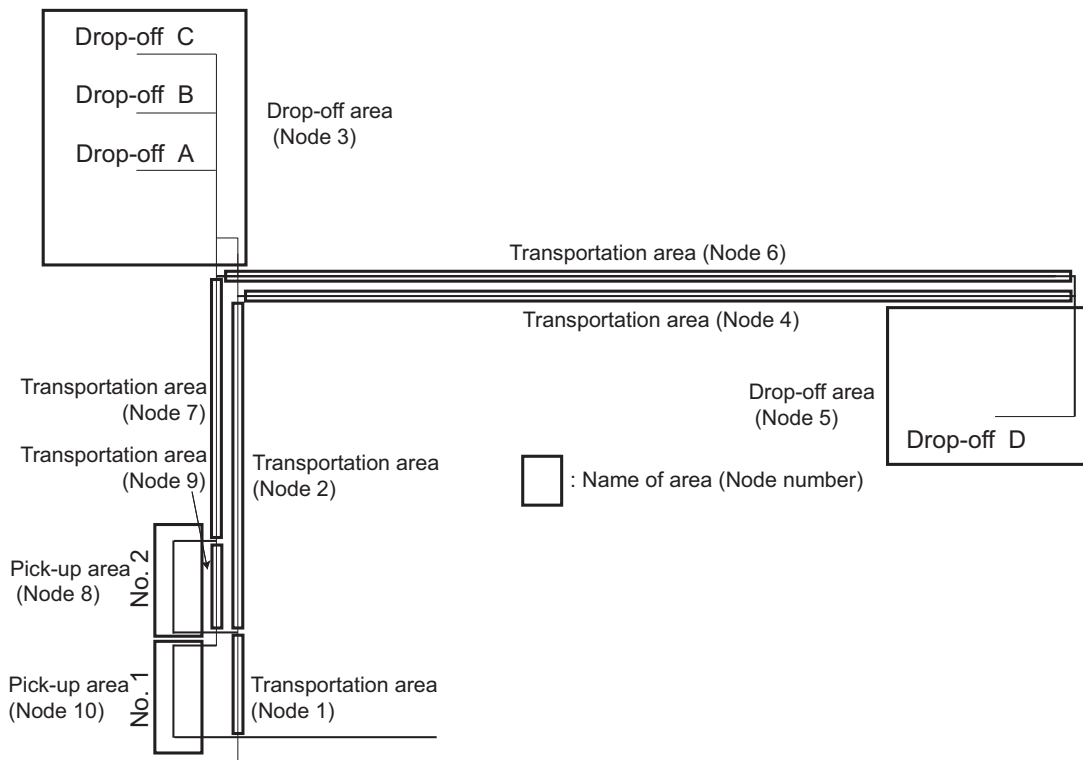


Fig. 7.6 各作業エリアに対するノードの割当て

これらノードにより構成されたAGV搬送システムは、Fig. 7.7に示すように巡回閉鎖型待ち行列ネットワークモデルとして表現することができる。Fig. 7.7において、ネットワークが分岐する箇所には、AGVが進む際の遷移率が示されている。これらの値は、第7.5.1項に述べた搬送・蔵置指令の均等な割当てという前提の下に定められている。

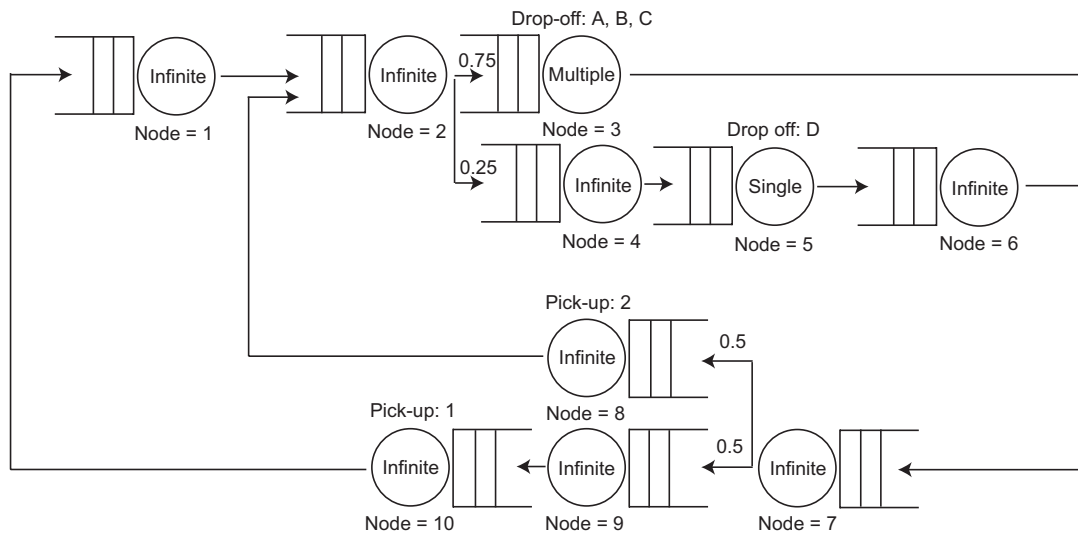


Fig. 7.7 待ち行列ネットワークを適用してモデル化された既存 AGV 搬送システム



## 7.6 改善設計

### 7.6.1 再設計手順

第 7.3.2 項で述べた設計アルゴリズムにしたがい、要求仕様の変更に対する AGV の投入台数を算出する。そのため、本章では、当該搬送システムに対する要求仕様が、従来の 20[TEU/hour] から新たに 25[TEU/hour] になった状況を想定する。なお、本設計プロセスにおいては、Fig. 7.1 において、追加投入される AGV の台数は 1 台ずつとした。総搬送コンテナ数を 600[TEU] とし、変更された要求仕様に対して AGV の投入台数が上限達するまで与えていく。本再設計プロセスでは、AGV の投入台数の上限を  $AGV\_MAX = 10$  台とした。したがって、AGV の投入台数が 10 台に達すると、設計プロセスは終了する。

### 7.6.2 システム解析

設計プロセスにしたがい、変更された要求仕様に対する AGV の投入台数を算出する。しかしながら、要求仕様 25[TEU/hour] に対して AGV の投入台数を 7 台とした際、ボトルネックが原因でシステムのスループットが横ばいとなった。

Fig. 7.8 に、課せられる要求仕様が 25[TEU/hour] に変更された既存の搬送システムに、AGV を 7 台投入した際の各ノードにおける AGV の占有率を示す。Fig. 7.8 より、ノード 2 の占有率は 36.8[%] と非常に高く、続いてノード 3 の占有率が 16.3[%] であることがわかる。一方、ノード 2, 3 以外のノードにおける占有率は数パーセントで、無視できる程度であった。なお、このときのノード 2 における AGV の平均滞在台数は約 2.6 台であった。そのため、第 7.3.2 項で述べた通り、ボトルネックとなっているノード 2 に連結する次ノード 3 および 4 のうち、ノード 3 がボトルネックの原因となっているノードと考えることができる。したがって、ノード 3 を改善設計し、ノード 3 の容量を大きくする必要がある。

### 7.6.3 設計政策

第 7.6.2 項の解析結果より、要求仕様の変更にともない、既存の搬送システムでは、ノード 3 を原因としてノード 2 にボトルネックが生じてしまうことがわかっ

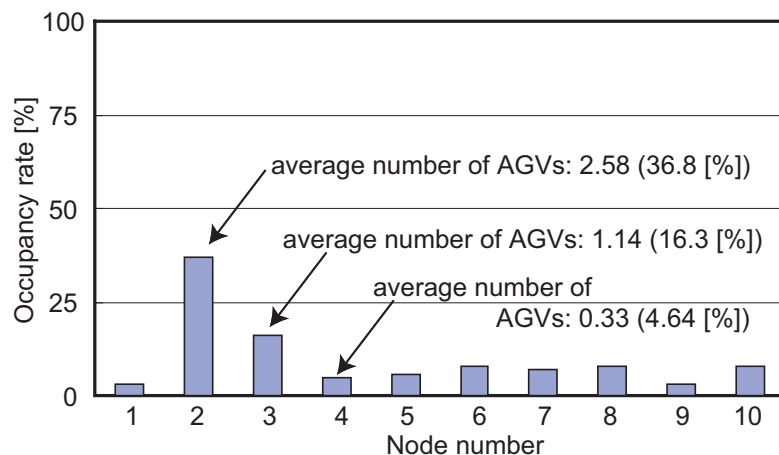


Fig. 7.8 既存の AGV 搬送システムに対して，要求仕様が 25[TEU/hour] へ変更された際，設計プロセスにおいて，AGV を 7 台投入したときに算出された各ノードにおける AGV の占有率

た．また，当該ボトルネックが原因となり，AGV の追加投入を行ったとしても搬送システムのスループットは横ばいになってしまう．そのため，ノード 3 を改善設計する必要がある．

第 7.4 節で列挙された改善設計案を，Fig. 7.4 が示す既存の搬送システムにおける制約を基に評価する\*<sup>2</sup>．まず，AGV 台数に関しては要求仕様を満たすための設計対象であり，ボトルネックを解消するために AGV の投入台数を減じることは不可能である．その他の改善設計案に関して評価すると，総搬送コンテナ数ならびに搬送遷移率などは，船会社により与えられるパラメータである．また，時間コストに影響を与える AGV の搬送能力に関しては，そのハードウェアの仕様によるものであり，変更は困難である．一方，サーバ数に着目した場合，AGV が搬送するコンテナを処理する機器の投入台数に関しては，コストの面から，その追加投入が困難な場合がある．そのため本論文では，Fig. 7.3 が示すロジックツリーにおいて，搬送経路の長さおよび数に注目する．すなわち，Drop-off エリア内における搬送経路の構成を変更することにより，ボトルネックを解消する．

千葉らは，天下り的に AGV 群の行動則を与えた上で，GA を用いた AGV 搬送システムにおける走行経路の設計を行っている [千葉 2004]．ここでは，Pick-up と

\*<sup>2</sup>本論文では，総搬送コンテナ数，搬送遷移率，ハードウェアの仕様，処理機器の投入台数などは変更不可能なパラメータと仮定しているが，変更ができる場合，それらも設計案として考えることは可能である．

Drop-off ポイントに対して，セル分割された搬送システム内における経路が設計されている．しかしながら，既存の搬送システムにおける搬送経路の再設計といったことはなされていない．そこで本論文では，以下に示す経路設計政策を提示する．ちなみに，本例題においては，実際の改善設計解として，3種類をとりあげたが，実際の場合においては，より多くの改善解も試すことも可能である．すなわち，設計解の網羅性が保たれていることに注意されたい．

- (1) 双方向型搬送経路による設計<sup>\*3</sup>
- (2) 単方向型搬送経路による設計<sup>\*4</sup>
- (3) ショートカット型搬送経路による設計

(1) 双方向型搬送経路とは，既存の搬送システムと同様，搬送経路上における AGV の双方向の往復移動が可能である経路を意味する．ただし，1本の経路上における AGV の往復移動が行われるため，設計された経路は排他経路が多くなる．排他経路は可能な限り独立（経路同士が交差しない）するようにして設計されるため，搬送経路が交差しあうことは少なく，そのため，制御が容易であるといった特徴がある．ここで，設計された経路が他に設計された経路に対して完全に交差することがない場合，当該経路は完全独立であり，部分的に独立・交差している場合，部分独立という．しかしながら，排他経路が多くなることから，作業効率を飛躍的に向上させることが困難な場合があり，そのような場合，(2)の単方向型搬送経路設計が有効となる．単方向型搬送経路では，双方向型とは異なり，1本の経路上における AGV の走行方向は一方向に定められており，そのため，往復移動は不可能となるため，AGV は搬送経路上を巡回するように走行することとなる．しかしながら，排他経路は少なく，また巡回する多数の搬送経路により搬送経路の交差が多くなり，そのため，AGV 群の走行制御は難しくなってしまうといった問題がある．(3) ショートカット型搬送経路とは，ノード3からノード2に連結するノードをショートカットするように，もう1本別の搬送経路を設計し，そこを往復・巡回搬送する経路を意味する．ただし，既存の経路を迂回する形で新たに経路が設計されるため，他の2つの設計政策に比べ経路の敷地面積は大きくなってしまう．

以上，これらの経路設計政策を既存の搬送システムの経路構成（Fig. 7.9 参照）と比較するため，Fig. 7.10 に示す．

<sup>\*3</sup>以降，本論文では設計政策 (1) と呼ぶ．

<sup>\*4</sup>以降，本論文では設計政策 (2) と呼ぶ．

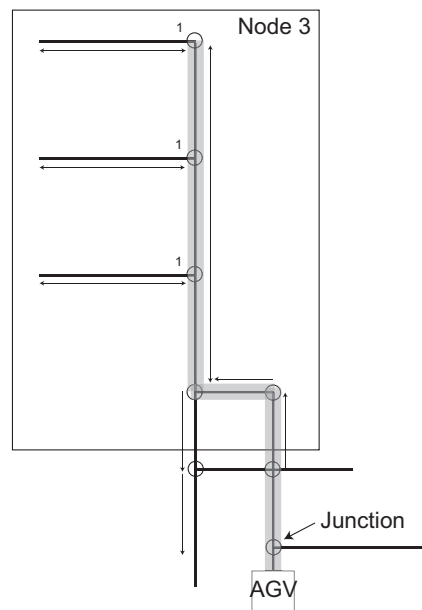


Fig. 7.9 既存の搬送システムにおけるノード3 (Drop-offエリア) 周辺の経路構成図

Fig. 7.9 および Fig. 7.10 の経路上において、 $\circ$  で示された箇所は合流・分岐・交差点を示している。灰色・水色で示されている経路はそれぞれ排他経路を示している。排他経路の有無により、合流・分岐・交差点における AGV の制御箇所の数が変わってくる。 $\circ$  の周りに印された番号が制御点の数を示している。たとえば、Fig. 7.9 に比べ、Fig. 7.10(a)~Fig. 7.10(c) は経路数が多く設計されていることがわかるが、それらはすべて独立あるいは部分独立の形、すなわち排他経路として設計されているため、エリア内における制御点の数に大きな違いが見られない。一方、Fig. 7.10(d)~Fig. 7.10(f) は、Fig. 7.9 に比べ排他経路は少なく、そのため高効率な AGV の走行制御が可能な経路構成となっているものの、交差点における制御点の数が非常に多くなってしまい、制御の難易度としてはとても高い搬送経路になってしまう。また、ショートカット型を示す Fig. 7.10(e) および Fig. 7.10(f) では、上述した通り、迂回する形で経路が設計されているため、他のレイアウトと比べて敷地面積は大きくなっている。以上、これら考え得る設計政策により構築される搬送経路には Table 7.1 に示すような特徴がある。

そこで、本稿では以下に示す 2 つの評価基準を設け、これらを基に上記した設計政策 (1) ~ (3) の評価を行い、既存の搬送システムに生じているボトルネックの改善設計を行う。

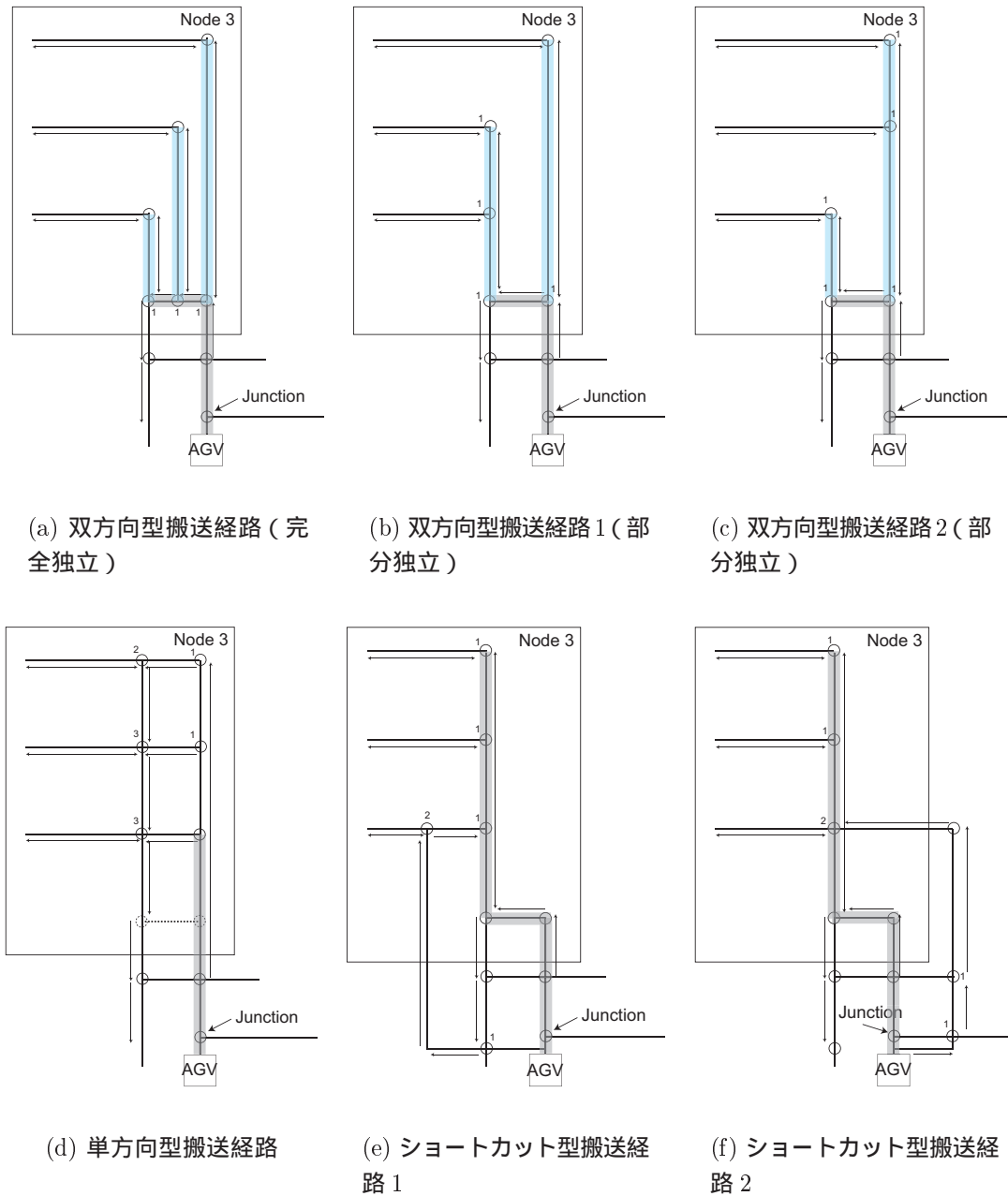


Fig. 7.10 各設計政策によるノード 3 (Drop-off エリア) 周辺の経路構成図

- 経路の敷地面積
- 制御の難易度

経路の敷地面積に関して，既存のシステムに対して経路を付加的に設計してい

Table 7.1 それぞれの設計政策に基づいて構築された搬送システムの特徴

設計政策	作業効率	排他経路	制御度	敷地面積
既存型	低	多	易	小
(1) 双方向型	中	多	易	中
(2) 単方向型	高	少	難	中
(3) ショートカット型	高	中	難	大

くため、システムレイアウトによっては適用不可能な経路構成になる場合がある。そのため、重要な評価項目の1つとなる。制御の難易度に関しては、高効率な搬送システムを構築するのに必要な項目となるが、一方で自動化を行うにあたって、安全性の観点より、複雑な制御を行うためには、その分のスペースが必要となる。

本論文では、Table 7.1 ならびに上述の2つの評価基準より、設計政策(1)および設計政策(2)、すなわち、双方型と単方向型の搬送経路を適用した再設計を行う。ここで、実際の搬送現場の状況を考慮すると、Fig. 7.10(a) が示す完全独立の双方向型搬送経路は、レイアウトのスペースから実現が不可能である。そのため本論文では、Fig. 7.10(b) あるいは Fig. 7.10(c) が示す部分独立の搬送経路設計を行う。ここで、Fig. 7.10(b) と Fig. 7.10(c) では、部分独立という観点より、経路構成の本質は同じであるため、Fig. 7.10(b) を採用した。また、Fig. 7.10(d) が示す単方向型搬送経路は、本来、その制御の難易度より、実際の搬送システムでは構築が困難であると考えられているが、本論文では、経路の敷地面積という評価基準より、比較のため再設計政策として採用した。Fig. 7.10(e) と Fig. 7.10(f) のショートカット型に関しては、今回の設計実験では土地あるいはレイアウトの制約を考慮し、設計政策としては採用しないこととした。

#### 7.6.4 双方向型・単方向型搬送経路（設計政策(1)と(2)）を適用した改善設計

Fig. 7.11 ならびに Fig. 7.12 に、設計政策(1)および(2)に基づいて改善設計された搬送システムに対し、Fig. 7.8 の場合と同様に AGV を7台投入した際得ら

れた各ノードにおけるAGVの占有率を示す。なお、設計政策(1)では、設計された搬送システムによりAGV8台で、設計政策(2)では7台で、それぞれ要求仕様25[TEU/hour]を満たすことができた。また、両設計政策により、ノード2における占有率も減少し、システムのスループットも増加傾向へと移行した。

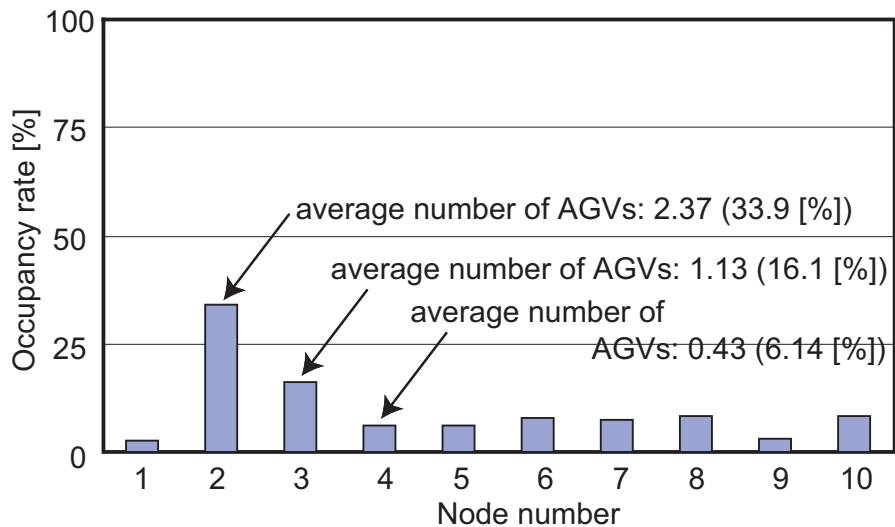


Fig. 7.11 設計政策(1)に基づいて再設計された搬送システムにAGVが7台投入された際の各ノードにおけるAGVの占有率

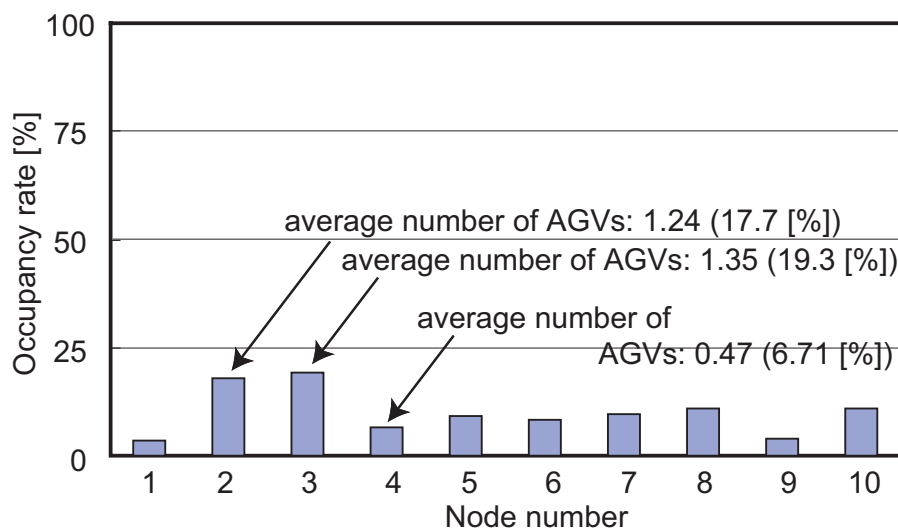


Fig. 7.12 設計政策(2)に基づいて再設計された搬送システムにAGV7台投入された際の各ノードにおけるAGVの占有率

Fig. 7.11 より，設計政策 (1) の部分独立な双方向型搬送経路による改善設計により，ノードの 2 の占有率が 33.9 [%] まで減少した．ノード 2 における AGV の平均滞在台数もまた約 2.4 台となり，既存の搬送システムのノード 2 における AGV の平均滞在台数と比較しても，減少したことがわかる．ノード 3 に関して，既存の搬送システムのノード 3 と比較し (Fig. 7.8 参照)，当該ノードの容量拡大が占有率や平均滞在 AGV 台数の観点からは確認することができなかった．しかしながら，ノード 4 における占有率が増加しており，これは，ノード 3 の容量が改善設計により拡大され，その結果ノード 2 で渋滞することなく，ノード 4 へ AGV がスムーズに移動したことを示している．

一方，設計政策 (2) の単方向型搬送経路を適用した改善設計後の搬送システムでは，Fig. 7.12 より，Fig. 7.8 のノード 2 と比べて，ノード 2 における AGV の占有率が大きく減少していることがわかる．またそれによるボトルネックも解消された．これは，ノード 3 における難易度の高い AGV 群の走行制御により，作業効率の向上がなされたためである．そのため，常にノード 3 において AGV と OHC による作業が行われ，ノード 3 における AGV の平均滞在 AGV 台数ならびに占有率が上回る結果となった．

以上のことから，本論文で改善設計に適用した各搬送経路は，AGV によるボトルネックを解消するのに効果的であり，提示した設計政策 (1) および (2) が本論文で扱った既存の搬送システムを改善設計するのに有効であるということが確認された．また，困難とされてきた AGV 群の走行制御を行うことにより，搬送システムの作業効率が飛躍的に向上する可能性があることがわかった．

### 7.6.5 さまざまな要求仕様に対する再設計

続いて，提案する設計方法論の有効性の検証のため，さまざまな要求仕様に対する既存の AGV 搬送システムの再設計を行う．ここでは，総搬送コンテナ数を 600[TEU] とし，要求仕様に関しては，5[TEU/hour] から 5 ずつ，AGV の投入台数が上限に達するまで与えていく．

Table 7.2 に要求仕様に対して算出された AGV の投入台数を示す．要求仕様が 20[TEU/hour] までは既存の搬送システムにて満たすことができたが，25[TEU/hour] 以上ではボトルネックが原因となり，要求仕様を満たすことはできなかった．一方，設計政策 (1) および (2) に基づいて改善設計された搬送システムでは，要求仕様 25[TEU/hour] に対しては，それぞれ投入 AGV 台数は 8 台，7 台で満たすことが



Table 7.2 要求仕様に対する算出された AGV の投入台数

要求仕様 [TEU/hour]	5	10	15	20	25	30	35
AGV 投入台数 [台]	2	3	4	6	8 (1), 7 (2)	8 (2)	9 (2)

できた。しかしながら、Table 7.1 にも示した通り、設計政策 (1) では設計されたシステムの作業効率に大きな向上は期待できず、30[TEU/hour] 以上に対しては、要求仕様を満たす搬送システムの再設計を行うことはできなかった。30[TEU/hour] および 35[TEU/hour] に対しては、設計政策 (2) に基づいて改善設計された搬送システムのみが、その要求仕様を満たすことができ、それぞれ 8 台、9 台と算出された。40[TEU/hour] 以上の要求仕様ではすべての搬送システムで満たすことができなかった。

以上のことから、本章で提案した改善設計方法論は、既存の AGV 搬送システムに対して、要求仕様の変更にもなう AGV の投入台数の最適設計、さらに作業機器により引き起こされるボトルネックの改善設計には有効であることを示した。また、要求仕様の変更から再設計までの時間に関しても、要求仕様が 20[TEU/hour] までであれば AGV の投入台数のみを設計するだけで良く、数分程度で、一方、要求仕様が 25[TEU/hour] であっても、経路の改善設計を行うのに要する時間は数時間程度であった。そのため、再設計に要する時間コストの観点よりも、提案した再設計方法論の有効性が確認された。

## 7.7 バランシングの考慮

Fig. 7.13 は、既存の AGV 搬送システム，設計政策 (1) および設計政策 (2) の双方向型・単方向型の搬送経路に基づいて改善設計された搬送システムに対して，AGV 台数を 1 台ずつ投入していった際のシステムスループットの傾向を示している．AGV の投入台数が少ない段階では，各搬送システムともシステムスループットに大きな差は見られないが，Table 7.1 で述べた作業効率の違いが影響し，AGV の投入台数が 6 台になるあたりからその差が見られるようになり，設計政策 (2) の単方向型，設計政策 (1) の双方向型，既存の搬送システムの順にスループットが高いことがわかった．また，各搬送システムとも，AGV の投入台数の増加にともないシステムスループットの増加が確認されるが，既存の搬送システムでは 7 台，設計政策 (1) により改善設計された搬送システムでは 9 台になると，(7.3.10) 式より，システムスループットが横ばいになっていることがわかる．一方，設計政策 (2) により改善設計された搬送システムでは，AGV が 10 台投入された際にもシステムスループットが横ばいにはならなかった．しかしながら，要求仕様 40[TEU/hour] を満たすことはできなかった．要求仕様 35[TEU/hour] に対しては，AGV が 9 台でも満たせているため，以上のことを考慮すると，Table 7.3 のような結果が得られる．

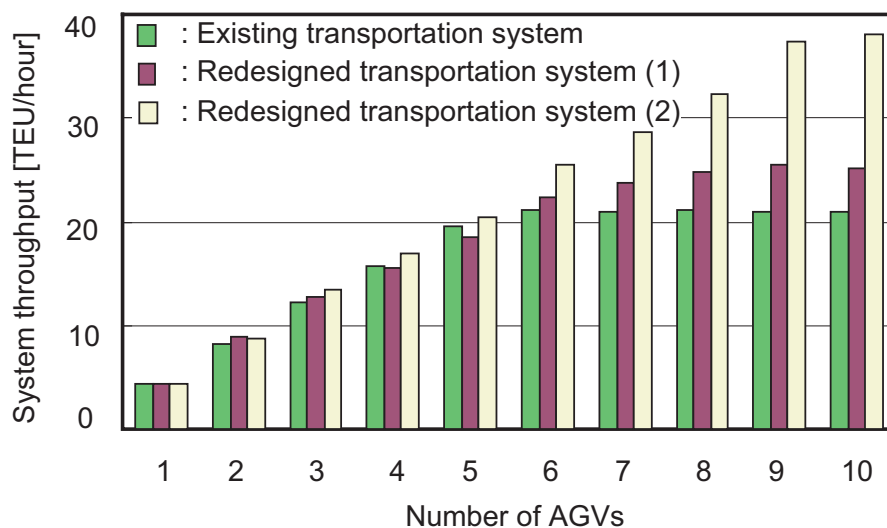


Fig. 7.13 各搬送システムにおける AGV 投入台数に対するシステムスループット

Table 7.3 が示す結果より，本設計プロセスで与えた条件の下では，既存の AGV

Table 7.3 各搬送システムに対する適切な要求スループットとそれに対する AGV の投入台数

搬送システム	既存型	設計政策 (1)	設計政策 (2)
システムスループット [TEU/hour]	20	25	35
AGV 投入台数 [台]	6	8	9

搬送システムを無駄なく効率的に稼働させようとした場合、要求スループットは 20[TEU/hour] とし、それに対して AGV を 6 台投入することがもっとも AGV と搬送システムの環境スペックのバランスがとれたシステムとなることがわかった。設計政策 (1) および設計政策 (2) に基づいて設計された双方向型ならびに単方向型搬送システムの場合は、それぞれ要求スループット 25[TEU/hour] に対して AGV は 8 台、35[TEU/hour] に対して AGV は 9 台、の組合せが良いことがわかった。

ここで、設計政策 (1) により設計された搬送システムに AGV を 9 台、設計政策 (2) により設計された搬送システムに AGV を 10 台投入した際に得られた各ノードにおける AGV の占有率を Fig. 7.14 ならびに Fig. 7.15 に示す。

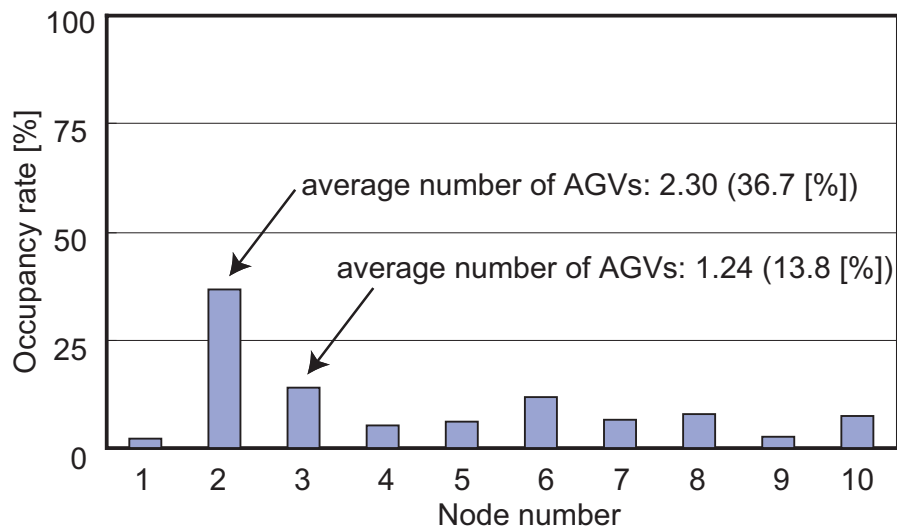


Fig. 7.14 設計政策 (1) に基づいて再設計された搬送システムに AGV が 9 台投入された際の各ノードにおける AGV の占有率

Fig. 7.14 より、双方向型経路を適用した搬送システムに AGV を 9 台投入した

際、ノード2におけるAGVの占有率が最も高くなっていることがわかる。これは、より高い要求仕様に対しては、設計政策(1)の部分独立な双方向型では不十分であるということの意味している。そのため、敷地面積を大きくしてもショートカット経路を追加設計するか、あるいはDrop-offエリア内における複雑な制御を行う必要がある。

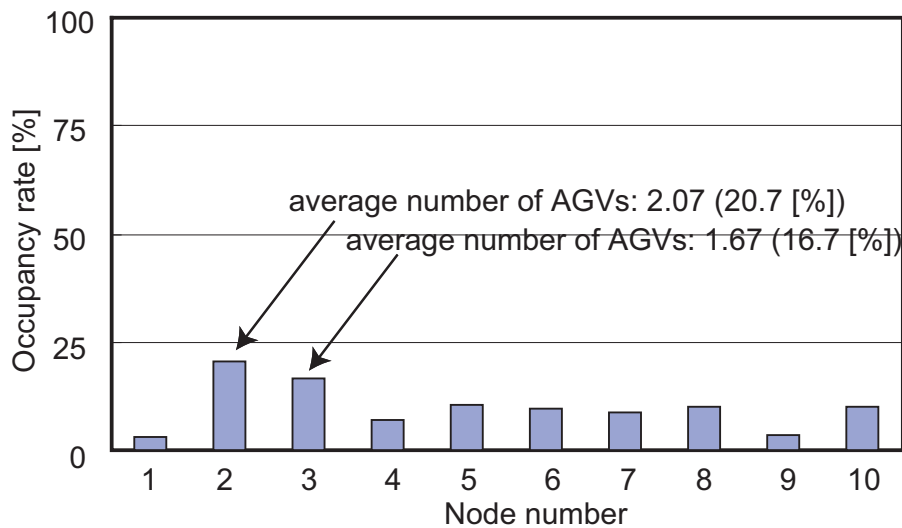


Fig. 7.15 設計政策(2)に基づいて再設計された搬送システムにAGVが10台投入された際の各ノードにおけるAGVの占有率

一方、Fig. 7.15より、単方向型経路を適用した搬送システムでは、ノード2および3において、AGVの占有率が他のノードに比べ極大化していないことがわかる。これはノード3における複雑なAGV群の走行制御により、AGV台数を増やしていても、追加投入されたAGVとOHCによるコンテナの受け渡し作業がノード3において頻繁行われ、その結果、AGVがノード2において一旦停止する必要がなくなったためである。このような場合、AGVによるボトルネックは生じていないものの、今後さらに高い要求仕様を満たす搬送システムを構築するためには、搬送システムの環境のスペック、すなわちPick-upおよびDrop-offエリアにおけるQCCやOHCのコンテナ処理能力や蔵置計画を考慮しなくてはならないと考える。

## 7.8 おわりに

本章では、第 1.1.3 項で述べた設計 (II) を扱うため、第 3 章で提案した設計方法論を適用し、要求仕様の変更にもなう既存の自動搬送システムに対する再設計のための設計支援方法論について提案を行った。

第 7.2 節では、既存の自動搬送システムに対して、要求仕様の変更にもなうシステムの再設計を行う際のチャレンジングポイントについて述べた。

第 7.3 節では、要求仕様の変更にもなう、搬送システムの改善設計を行うため、まず、待ち行列ネットワーク理論を適用した搬送システムの定式化を行った。そして、再設計支援アルゴリズムの提案を行った。

第 7.4 節では、定式化結果に基づき、ロジックツリーを適用し、ボトルネックに影響を与えるパラメータについて分析し、これらを改善設計案として網羅的に列挙した。

第 7.5 節では、事例研究として、実際に稼働している既存の AGV 搬送システムを取り上げ、それらの詳細な説明ならびにモデル化の手順について述べた。

第 7.6 節では、第 7.4 節で取り上げた既存の AGV 搬送システムにたいして、現在の要求仕様から高いものへと変更された際に、いかにして改善設計が行われるのかについて、述べた。

第 7.7 節では、搬送システムのバランシングについて議論し、システムに対する適切な要求仕様とそれに対する AGV 投入台数について明らかにした。

次章では、本論文の結論を述べる。



## 第8章 結論と今後の課題

---

8.1 結論 . . . . .	164
8.2 今後の展望 . . . . .	168

---

## 8.1 結論

本論文では、港湾物流における AGV 搬送システムに対する設計方法論を提案した。

本論文では、まず港湾物流における搬送システムについて、その体系の説明を行い、要求仕様に対する搬送システムの最適設計を行うことの重要性について述べた。また、搬送システムの設計を行う際、設計 (I) 搬送システムを一から設計していく場合、設計 (II) 既存の搬送システムにおいて要求仕様の変更に対する再設計を行う場合、とで、それぞれ研究としてのアプローチが異なってくることにについて論じ（第 1.1.3 項参照）、設計 (I) ならびに設計 (II) に対する問題定義ならびに設計要求について明確にした。

設計 (I) に対して、本論文では、AGV 搬送システムを設計対象とした。AGV 搬送システムの最適設計を行う際、当該システムには多種多様な機器が作業を行っているため、異質系であり、さらにそれは港湾の大規模なターミナルに存在するシステムであることから、以下のような問題を克服する必要がある。ここで、数理モデルと実際の搬送システム内で作業している機器群の挙動に関して、AGV 群の搬送挙動、すなわち作業時間と AGV の投入台数は、互いに依存関係にあるパラメータであるため、最適設計を行う上でのチャレンジングなポイントとなる。

- 要求仕様に対する設計パラメータの速やかな算出
- 数理モデルによる AGV 搬送システムのモデル化・定式化
- 作業機器群による実際の挙動の見積もり

本論文ではこれらの設計課題に対して、待ち行列ネットワーク理論と搬送シミュレーションをハイブリッドに適用した設計方法論を提案した。これにより、AGV 搬送システムは、待ち行列ネットワークモデルによりモデル化ならびに定式化された。さらに数理モデルのみでは表現困難な作業機器群の実際の搬送挙動を、搬送シミュレーションにより表現することができるようになった。これにより、数理モデルと実際の搬送システム内で作業を行っている機器群の挙動の差を考慮することが可能となった（第 4.4.2 項参照）。

続いて、提案した設計方法論の妥当性を検証するため、港湾コンテナ物流においてもっとも頻繁に導入されている垂直型と水平型のレイアウトを有する AGV 搬



送システムに、本設計方法論を適用し、それぞれ特定の要求仕様に対する最適設計を行った。その結果、数理結果に基づいた搬送シミュレーションを行うことで、計算時間の観点では、設計解算出までの時間は従来のシミュレーションのみに基づいた手法と比べ、約 1/100 程度で済むことが確認された。また、ハイブリッドに 2 つの設計手法を組合せた際に問題となる、設計解の妥当性についても、その評価を設計プロセスにおける設計解ならびに入出力パラメータの遷移を基に行った。その結果、本設計方法論では、要求仕様に対して最適な設計解を算出することが可能であることを示した。さらに、設計された AGV 搬送システムの性能評価を行うため、各エリアにおける交通密度や AGV 群の平均滞在台数を算出し、要求仕様に対して設計された搬送システム内で生じているボトルネックについて議論した。

垂直型 AGV 搬送システムと水平型 AGV 搬送システムに関して、これまで、それらは港湾コンテナターミナルにおいて別々に研究・開発がなされてきた。本論文では、垂直型と水平型の AGV 搬送システムの相対的な評価が必要であると考え、想定されるさまざまな要求仕様に対する各搬送システムの最適設計、設計パラメータによる総合構築コストの算出、総合構築コストによる各搬送システムのコストパフォーマンスの比較を行った。その結果、各搬送システムのレイアウト特性から生じる違いに注目し、設計パラメータの総合構築コストに占める割合を考察すると、水平型 AGV 搬送システムにおける経路長のコストは、垂直型と比べても無視できる程度であることがわかった。また、AGV と RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane) の割合はほぼ同等であるにもかかわらず、RMGC (Rail-Mounted Gantry Crane) の投入コストが総合構築コストに与える影響が非常に大きく、設計の際には重要視しなくてはならない機器であるということがわかった。また、これらの結果より、本論文で設定したコストモデルならびに要求仕様の下では、垂直型に比べ水平型 AGV 搬送システムがほぼすべての要求仕様に対して有効であることを明らかにした。さらに、設計パラメータ同士が互いに及ぼしあう影響を解析した結果、要求仕様に対して、RMGC あるいは RTGC を追加投入すると、AGV の投入台数を減らすことができる場合があることが確認された。また、第 2.4 節で述べた各搬送システムにおけるレイアウト特性以外にも、垂直型と水平型 AGV 搬送システムにおける、AGV と RMGC ならびに RTGC の使用頻度にもそれぞれ特性があることがわかった。

本論文では、第 5 章の結果を踏まえ、水平型 AGV 搬送システムに焦点を当てた。そして、これまで考慮してこなかった、搬送システムの運用までを同時に考慮した AGV 搬送システムの最適設計を行った。ここでは、異質系におけるコンテナ船～コンテナ蔵置ロケーションへのコンテナの流れに注目し、AGV ならびに RTGC の投入台数の他に、以下に示す運用法をそれぞれモデルとして設計の対象とした。

- 異質作業機器間における協調行動の設計
- コンテナ蔵置場所での蔵置順序の設計（蔵置スケジューリング）
- コンテナの搬送・蔵置先の設計（搬送計画）

その結果，均等搬送計画によりコンテナの搬送・蔵置目的ロケーションを決定し，蔵置スケジューリングを行った上で，AGV が作業経路に進入後，RTGC を作業空間選択法に基づき選択・呼び出す運用モデルがもっとも効率的であることがわかった．さらに，最適搬送計画を行った場合と，均等および埠頭側加重搬送を行った場合での搬送時間を比較し，提案した搬送計画の有効性も確認した．

一方，設計 (II) に対して，既存の搬送システムにおいて，要求仕様の変更にとともなう，システムの再設計のための設計支援方法論を提案した．その際，本論文でのチャレンジングポイントを以下の 2 つと設定し，これらを克服するため，要求仕様に対するシステム設計の部分においては第 3 章で提案した待ち行列ネットワーク理論とシミュレーションをハイブリッドに組合せた設計方法論を適用した．

- 搬送システム内に生じているボトルネックの迅速な検出・解消するための改善設計案の網羅的な列挙
- 搬送システムのバランスの考慮

そして，待ち行列ネットワーク理論を適用した搬送システムの定式化結果に基づき，ロジックツリーを用いてボトルネックに対する改善設計案を網羅的に列挙した．また，本設計方法論の有効性について検討するため，事例研究として実際に操業している AGV 搬送システムを対象に，要求仕様の変更に対する再設計を行った．ここでは，搬送システムの土地の制約などを考慮し，当該ノードに対して，双方向型ならびに単方向型の搬送経路を適用した設計政策を提示し，改善設計を行った．その結果，これら設計政策に基づいた改善設計結果の，ボトルネック解消への有効性が確認された．また，搬送システムのバランスを考慮するために，3 つの搬送システムに対して，AGV の投入台数に対するシステムスループットを評価し，それぞれ適切な要求仕様ならびに最適 AGV 投入台数を算出した．

上記より，本論文全体として以下の事柄が結論できる．

- 待ち行列ネットワーク理論と搬送シミュレーションをハイブリッドに適用した設計方法論により，静的な数理モデルと動的な実際の搬送システム内で作

業を行っている機器群の挙動の差を考慮した上で、要求仕様に対して1分程度で設計解の導出が可能となった。

- 本設計方法論は、AGV 搬送システムだけに限らず、各エリアを待ち行列として表現可能であるシステムであれば、さまざまな適用範囲がある。
- 垂直型と水平型の AGV 搬送システムに対し、さまざまな要求仕様に対する最適設計を行った。そして、各設計パラメータに基づきそれぞれの搬送システムを構築するための総合コストを算出し、それらを比較・評価することにより、本論文で与えた要求仕様ならびにコストモデルの下では、水平型 AGV 搬送システムが有効であることがわかった。
- 高効率搬送システムを構築するため、それまで天下りの与えてきた運用モデルも設計対象とし、水平型 AGV 搬送システムの設計を行った。その結果、従来の運用を考慮してこなかった AGV 搬送システムに対して、50[%] 近い効率化を図ることができた。このことから、設計を行う際、投入機器と運用モデルを同時に考慮することの必要性を示した。
- 既存の搬送システムにおける、要求仕様の変更に対する改善設計を行った。ここでは、本論文で提案した設計方法論を再設計プロセスの中で部分的に適用し、再設計の高速化を図った。また、改善設計を行うため、ボトルネックに対する改善設計案を網羅的に列挙した。これにより、長くても数時間程度で改善設計を行うことが可能となった。
- バランシングの考慮を行うことで、既存のシステムならびに2つの改善設計されたシステムにおける適切な要求仕様およびそれに対する AGV の投入台数を算出した。これにより、無駄なく搬送システムを操業することが可能となった。

## 8.2 今後の展望

本論文では、実問題として港湾物流における AGV 搬送システムを研究の対象として扱ってきた。そのため、大規模かつ複雑な実搬送システムへの適用という観点からは十分な成果を得ることができた。今後、本論文の研究成果を港湾物流だけでなく、さらに普遍的あるいは学術的な方面へ発展させていく際に、そこには以下に記すような展望があると考えられる。

- AGV 群の自律分散型走行制御
- AGV 搬送システムの運用モデルの発現
- 搬送環境の動的な変動に対する作業機器の適応行動
- 作業機器の故障を考慮したシステム設計
- さまざまな搬送・物流システムへの拡張

AGV 群の自律分散型走行制御とは、搬送経路上における車間距離、交差・合流・分岐点における進入時の、各機器によってそれぞれ自律分散的になされる制御のことを意味する。本論文では、実際の AGV 搬送システムを考慮したため、これらの制御はすべて局所的に行ってきた。すなわち、各 AGV はその前後の AGV との車間距離情報しか得ることができず、また進入制御に関しては、各交差・合流・分岐点に進入する際、経路上に設置された磁気テープや通信装置などから情報を得ることができるものとした。このような制御方式に対し、今後は、各機器が他の機器の情報を共有できるものと仮定し、車間や交差・合流・分岐点の制御を自律分散かつ周期的に行うことにより（たとえば [杉 2003] など）、より効率的な搬送システムが設計できるものと考えられる。また、遂行すべき作業がより複雑になると、他の機器の行動を当該機器が予測する必要もでてくると考えられる。

AGV 搬送システムの運用モデルの発現とは、本論文の第 6 章で議論した課題のことである。本論文では、実際の港湾物流におけるコンテナの流れをスムーズにするため、実際の搬送現場で重要視されている 3 つの運用モデルについて、現場サイドからの助言を基に設計対象を絞り、現実かつ実用的な運用モデルを設計した。これに対し、今後の展望としては、異質作業機器群の搬送システム内における相互作用による、コンテナ物流のための作業の発現といったことが考えられる（[太田 2005]）。また、AGV の動作計画に関して、本論文では、単純な経路構成で

あったため、コンテナの荷積み場所と蔵置場所が指令で与えられた際、そこまでの搬送経路を一意に与えてきたが、今後、さらに複雑な経路を考慮する場合には、他の機器を考慮しながら、作業効率を最大化するような動作な経路計画手法を考える必要がある [千葉 2005] .

搬送環境の動的な変動に対する機器の適応行動とは、[藤井 2005] においても触れられているが、本論文における要求仕様が、時間とともに変動するような場合に対して、それらを満たすようにして各作業機器がリアクティブに適用した行動を取ることを意味する。港湾コンテナターミナルにおける搬送システムでは、船が到着すると、停泊できる時間が与えられ、それを満たすように作業が行われる。これが要求仕様となるが、例えば、隣接するターミナルに停泊中のコンテナ船から作業指令が出される場合、当初与えられた要求仕様は変更されることとなる。このような場合にも対応できるような搬送システムの構築が今後必要となると考える。また、港湾物流システムをターミナル内におけるコンテナ船 → 蔵置場所だけでなく、そこから陸への流れ、さらには陸からの流れ、ターミナル間での流れ、など、これらを複合的に考えると、ある蔵置ロケーションへのコンテナの流れの負荷なども動的に変わってくることが想定される。そのような場合にも対応できるような搬送システムの構築が行われる必要があると考える。東らは、上述した搬送システムを構築するために、作業負荷に応じて台数が増減する搬送システムや環境の変化を群ロボット自身が確認して能動的に適用するシステムの研究を行っており [東 1998] [東 2001]、今後の研究の展望の一つとして、これら従来研究を統合したシステム設計が考えられる。

作業機器の故障を考慮したシステム設計とは、搬送システム内には多種多様な機器が作業しているため、これらのうちどれかが故障した際、周りにはいる機器群で故障した機器をサポートできるような搬送システムを設計することを意味する。ここでは、集団群知能 (Swarm intelligence) の分野においてなされているさまざまな研究を取り入れることにより実現が可能であると考えられる。

さまざまな搬送・物流システムへの拡張に関しては、これまで港湾物流におけるコンテナ搬送システムのみ当ててきた焦点を、たとえば、ラインレス生産システムや動的な道路交通など (たとえば [藤井 2003] や [Petti 2005] など)、搬送システムが適用可能な環境にまで研究領域が広げられるものと考えられる。



# 論文用語説明

本論文で用いている略語ならびに用語について、それらの解説を Table 8.1 ならびに Table 8.2 に示す。

Table 8.1 論文中で用いられている略語

略語	解説
AGV (Automated Guided Vehicle)	無人コンテナ搬送車のこと。移動性能が高く、搬送機器としてはさまざまな環境で用いられている。
QCC (Quay Container Crane)	埠頭コンテナクレーンのこと。埠頭に備え付けられ、コンテナ船から AGV へ、または AGV からコンテナ船へコンテナを荷役する機器。
ATC (Automated Transfer Crane)	自動コンテナ搬送クレーンのこと。種類によって車輪型の RMGC かゴムタイヤ式の RTGC に分類される。
RMGC (Rail-Mounted Gantry Crane)	車輪式コンテナ搬送・蔵置クレーンのこと。コンテナの把持搬送が可能な機器。
RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane)	ゴムタイヤ式コンテナ蔵置クレーンのこと。コンテナの把持搬送はできない機器。
OHC (Overhead Hoist Crane)	天井巻上げ移動式クレーンのこと。屋内環境において、コンテナの把持搬送・蔵置作業を行う機器。
TEU (Twenty-foot Equivalent Unit)	20 フィートコンテナ換算のコンテナ取扱い単位のこと。1 [TEU] = 1 個のコンテナと考えても差支えない。



Table 8.2 論文中で用いられている用語

用語	解説
港湾コンテナターミナル	海上と陸地間でコンテナ貨物のやり取りをするため、港湾埠頭に設けられた作業場所。
AGV 搬送システム	(港湾コンテナターミナルの)自動化を目指し、AGV を投入した搬送システムのこと。
埠頭エリア	QCC がコンテナ船と AGV との間でコンテナ荷役をする作業エリアのこと。
コンテナ蔵置エリア	荷役された(る)コンテナが一時的に保管されるエリアのこと。蔵置作業は ATC が行う。
搬送エリア	コンテナが、埠頭エリア～コンテナ蔵置エリアを、AGV により搬送されるエリアのこと。
コンテナ蔵置ロケーション	コンテナ蔵置エリア内のコンテナが蔵置される山のこと。
ボトルネック	搬送システム内において、もっとも作業負荷のかかっている機器あるいは環境のこと。たとえば、必要以上に AGV が多い場合、他の作業機器は搬送経路がボトルネックとなり、一方、AGV が少ない場合、AGV 自身がボトルネックとなる。
垂直型 AGV 搬送システム	岸壁に停泊中のコンテナ船に対して、コンテナ蔵置ロケーションが垂直に配置されるようなレイアウトを有する AGV 搬送システムのこと。
水平型 AGV 搬送システム	岸壁に停泊中のコンテナ船に対して、コンテナ蔵置ロケーションが水平に配置されるようなレイアウトを有する AGV 搬送システムのこと。
要求仕様	単位時間あたりに要求されるコンテナの搬送量 ([TEU/hour]) のこと。
天下り設計	現場の設計者の熟練(経験)度に依存したパラメータ設計のこと。



# 謝辭

本論文は、筆者が東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻知能システム部門（新井・横井・太田研究室）所属の博士課程において行った研究をまとめたものです。多くの方に支えられ、ご指導・ご協力をいただきました。本論文を書き上げることが出来たのも、皆様のお力添えがあればこそ、と思っております。

その中で、筆者の指導教官であり、多大なるご指導を賜った

東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 助教授 太田 順 先生

に心から感謝いたします。研究に行き詰まった時には示唆に富む指摘をいただき、また、順調に研究をしている時には足場を固める発言をいただきました。先生に常に支えられることにより、本論文を執筆することができました。研究上の議論のみならず、研究者としての日々の心構えや人としてのあり方等、勉強になることをたくさん教えていただきました。

また、本論文の副査をお引き受けくださいました

東京大学人工物工学研究センター長 教授 上田 完次 先生

東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 教授 新井 民夫 先生

東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 教授 高増 潔 先生

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境学専攻 教授 大和 裕幸 先生

には、厚く謝意を申し上げます。論文をまとめるにあたりさまざまな建設的意見をいただき、また適切な助言および指摘等、貴重なご指導をいただきました。ここに、謹んで感謝の意を表します。

特に新井民夫先生には、本論文の副査以外にも多大なご恩を受け、感謝の念にたえません。

東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 助教授 横井浩史先生には多大なご恩を受け、感謝の念にたえません。

本研究室の秘書である、小坂井順子様、酒井友美子様、また、元秘書である、小島恵様には、経理および事務手続きの面で、非常に大きなご協力をいただきました。

また、本論文の執筆にあたり多大な協力を頂いた三菱重工業（株）汎用機・特車事業本部の方々に深く感謝いたします。

宇都宮大学大学院 工学研究科 情報制御システム科学専攻 助教授 尾崎功一先生には、宇都宮大学での3年間にわたる研究指導，ならびに，学会参加時における多大なご恩を受け，感謝の念にたえません。

その他にも，友人，先輩，後輩など，多くの人に支えられていたおかげでこの論文を執筆し終えることができました。

最後に，いつも私を見守ってくれた両親，そして，私の最愛の人であり，また良き理解者でもある清水恵美子さんに感謝して，謝辞の結びとします。

2006年（平成18年）2月9日

星野 智史



## 参考文献

## 参考文献

- [CDIT 2003] 国土交通省 港湾局 環境・技術課. 特集 1-1 国際コンテナターミナルの機能強化. 財団法人 湾岸開発技術研究センター 機関誌, No. 9, pp. 4-6, 2003.
- [Steenken 2004] D. Steenken, S. Voss, and R. Stahlbock. Container Terminal Operation and Operations research - A Classification and literature review. *OR Spectrum*, Vol. 26, No. 1, pp. 3-49, 2004
- [Günther 2005] H.-O. Günther, K.H. Kim. Container Terminals and Automated Transport Systems, *Springer-Verlag*, 2005.
- [Blackstone 2001] John H. Blackstone. Theory of constraints - a status report. in *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 6, pp. 1053-1080, 2001.
- [Zhang 2004] J. Zhang, P. Ioannou, and A. Chassiakos. Automated Container Transport System Between Inland Port and Terminals. *83rd TRB Annual Meeting Interactive Program*, Jan. 2004.
- [Ioannou 2001] P. Ioannou, H. Jula, C. I. Liu, K. Vukadinovic, H. Pourmohammadi, and Ed Dougherty Jr. Advanced Material Handling: Automated Guided Vehicles in Agile Ports. CCDoTT Technical Report, *Center for Advanced Transportation Technologies*, University of Southern California, Jan. 2001.
- [高橋 2000] 高橋輝男 (研究代表者). 製造現場における自律型無人搬送車システムの運営戦略に関する研究成果報告書 (IMS99A-1), 財団法人 製造科学技術センター, 2000.
- [物流博物館] 物流博物館.  
<http://www.lmuse.or.jp/>



- [Mitsubishi 2004] MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. Advanced Technology Cargo Handling Systems. Products Guide, 2004.
- [Meersmans 2001] P.J.M. Meersmans, and A.P.M. Wagelmans. Dynamic Scheduling of Handling Equipment at Automated Container Terminals. in *Technical Report IE (Econometric Institute Reports) 2001*, 2001.
- [Henesey 2004] L. Henesey, P. Davidsson, and J. A. Persson. Using Simulation in Evaluating Berth Allocation at a Container Terminal. in *T3rd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries*, 2004.
- [不二工業株式会社] 不二工業株式会社.  
<http://www.fuji-kougyo.co.jp/crane.htm>
- [Gosavi 2003] A. Gosavi. Simulation-Based Optimization: Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning. Kluwer Academic, Boston, 2003.
- [Abe 1991 $\alpha$ ] M. Abe, H. Ito, Y. Higuchi, and T. Otsu. The Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf (1st Report; Simulation Analysis by Monte Carlo Method). in *Proc. of Int. Conf. on Materials-Handling Equipment and Logistics*, pp. 133–143, 1991.
- [Abe 1991 $\beta$ ] M. Abe, H. Ito, Y. Higuchi, and Y. Tanaka. The Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf (2nd Report; Trends of Materials Handling-Carrying System in Japan). in *Proc. of Int. Conf. on Materials-Handling Equipment and Logistics*, pp. 144–157, 1991.
- [Lee 2001] C. Lee and J.A. Ventura. Optimal Dwell Point Location of Automated Guided Vehicle to Minimize Mean Response Time in a Loop Layout. *The International Journal of Production Research*, vol. 39, no. 17, pp. 4013–4031, 2001.
- [Ventura 2003] J.A. Ventura and C. Lee. Optimally Locating Multiple Dwell Points in a Single Loop Guide Path System. *IIE Transactions*, vol. 35, no. 3, pp. 727–737, 2003.
- [Chiba 2002] R. Chiba, J. Ota, and T. Arai. Integrated Design with Classification of Transporter Routing for AGV Systems. in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems*, pp. 1820–1825, 2002.

- [Liu 2000] C. I. Liu, H. Jula, K. Vukadinovic, and P.A. Ioannou. Comparing Different Technologies for Containers Movement in Marine Container Terminals. in *Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Transportation Systems*, pp. 488–493, 2000.
- [Jula 2000] H. Jula, C.I. Liu, E. B. Kosmatopoulos, and P.A. Ioannou. Container Terminals Using Automated Shuttles Driven by Linear Motors. in *Proc. of 9th IFAC Symposium on Control in Transportation System*, 2000.
- [Gambardella 1998] L.M. Gambardella, A.E. Rizzoli, and M. Zaffalon. Simulation and Planning of an Intermodal Container Terminal. *SIMULATION, Special Issue of on Harbour and Maritime Simulation*, Vol. 71, No. 2, pp. 107–116, 1998.
- [Veeke 2002] H.P.M. Veeke and J.A. Ottjes. A Generic Simulation Model for Systems of Container Terminals. in *Proc. of the 16th European Simulation Multiconference*, pp. 581–587, 2002.
- [船橋 2003] 船橋淳, 西崎純一, 桑田知江, 小林雅人, 草野利之, 鳥田修之. 高効率自動化ターミナルのシミュレーション技術. 第12回交通・物流部門大会, pp. 65–66, 2003.
- [Simchi-Levi 2000] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi. Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Cases. McGraw-Hill, Boston, 2000.
- [Liu 2002] C. I. Liu, H. Jula, and P.A. Ioannou. Design, Simulation, and Evaluation of Automated Container Terminals. in *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 12–26, March 2002.
- [Liu 2004] C. I. Liu, H. Jula, K. Vukadinovic, and P.A. Ioannou. Automated Guided Vehicle System for Two Container Yard Layouts. in *PTransportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol 12, No. 5, pp. 349–368, 2004.
- [Rebollo 2000] M. Rebollo, V. Julian, C. Carrascosa, and V. Botti. A Multi-Agent System for the Automation of a Port Container Terminal. *Autonomous Agents 2000 workshop on Agents in Industry*, 2000.
- [Thurston 2002] T. Thurston and H. Hu. Distributed Agent Architecture for Port Automation. in *Proceedings of the 26th Annual Int. Computer Software and Applications Conference*, pp. 26–29, 2002.

- [Hartmann 2004] Sönke Hartmann. Generating Scenarios for Simulation and Optimization of Container Terminal Logistics. *OR Spectrum*, Vol. 26, No. 2, pp. 171–192, 2004.
- [吉村 1998] 吉村裕司, 太田順, 井上康介, 平野智一, 倉林大輔, 新井民夫. 群ロボットによる多数物体の繰返し搬送計画. *日本ロボット学会誌*, Vol. 16, No. 4, pp. 499–507, 1998.
- [太田 2001] 太田順, 新井民夫, 井上康介, 千葉龍介, 平野智一, 前田雄介. ベルトコンベア搭載型 AGV の協調による物体搬送システム. *日本機械学会論文集 (C 編)*, 67 巻, 658 号, pp. 1905–1911, 2001.
- [Gunow 2004] M. Gunow, H. Güther, M. Lehmann. Dispatching Multi-load AGVs in Highly Automated Seaport Container Terminals. *OR Spectrum*, Vol. 26, No. 1, pp. 211–235, 2004.
- [Liu 2003] Chin.I. Liu and P. Ioannou. A Comparison of Different AGV Dispatching Rules in an Automated Container Terminal. *The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 3–6, 2003.
- [Nishi 2005] M. Agou, T. Nishi, M. Konishi, and J. Imai. A Dynamic Optimization Model for Storage Yard Logistic Systems. in *International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology*, pp. 3254–3259, 2005.
- [Roser 2003] C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka. Comparison of Bottleneck Detection Methods for AGV Systems. in *Proc. of the 2003 Winter Simulation Conf.*, pp. 1192–1198, 2003.
- [Delp 2003] D. Delp, J. Si, Y. Hwang, and B. Pei. A Dynamic System Regulation Measure for Increasing Effective Capacity: The X-factor Theory. in *Proceedings of the 14th Annual IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, pp. 81–88, 2003.
- [Hax 1984] A. Hax and D. Candea. *Production and Inventory Management*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1984.
- [Buzen 1973] J.P. Buzen. Computational Algorithms for Closed Queueing Networks with Exponential Servers. *Comm. ACM*, vol. 16, no. 9, pp. 527–531, 1973.

- [Gordon 1967] W.J. Gordon and G.F. Newell. Closed Queuing Systems with Exponential Servers. *Operations Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 254–265, 1967.
- [Ottjes 1999] J.A. Ottjes and H.P.M. Veeke. Simulation of a New Port-Ship Interface Concept for Inter Modal Transport. in *Proc. of the 11th European Simulation Symposium*, 1999.
- [Duinkerken 2000] M.B. Duinkerken and J.A. Ottjes. A Simulation Model for Automated Container Terminals. in *Proc. of the Business and Industry Simulation Symposium*, pp. 134–149, 2000.
- [紀 2002] 紀 一誠. 待ち行列ネットワーク. 朝倉書店, 2002.
- [Vandaele 2000] N. Vandaele, T. V. Woensel, and A. Verbruggen. A Queuing-Based Traffic Flow Model. in *Transportation Research-D: Transportation and Environment*, 5, pp. 121–135, 2000.
- [Lazowska 1984] E. Lazowska, J. Zahorjan, G. Graham, and K. Sevcik. Quantitative System Performance: Computer System Analysis Using Queueing Network Models. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, 1984.
- [千葉 2004] 千葉龍介, 太田順, 新井民夫. AGV 搬送システムにおける投入台数および双方向性走行経路設計法. 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 102–108, 2004.
- [ARENA] 株式会社リョーイン.  
<http://www.ryoin.co.jp/ARENA/>
- [杉 2003] 杉正夫. グラフ上の反応拡散方程式による交通信号網の自律分散制御. 平成 14 年度東京大学大学院工学系研究科 精密機械工学専攻 博士論文, 2004.
- [太田 2005] 太田順. 適応的行動と協調の発現原理. 計測と制御, 44 巻, 9 号, pp. 628–633, 2005.
- [千葉 2005] 千葉龍介, 太田順, 新井民夫. AGV 搬送システムにおける計画時間を考慮した行動則の情報パラメータ化による設計. 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 4, pp. 343–350, 2005.
- [藤井 2005] 藤井信忠. 生産システムの自己組織的構成法に関する研究. 平成 16 年度東京大学大学院工学系研究科 博士論文, 2005.

- [東 1998] 東俊光, 関山浩介, 福田敏男. AGV 搬送システムにおける戦略の自律形成の研究. 日本機械学会論文集 (C 編), 65 巻, 629 号, pp. 185–191, 1998.
- [東 2001] 東俊光, 関山浩介, 福田敏男. 群知能システムの自己言及的構成 戦略多様性拡張メカニズムに基づく AGV 搬送システムの搬送順序制御 . 計測自動制御学会論文集, Vol. 37, No. 5, pp. 438–445, 2001.
- [藤井 2003] 藤井信忠, 鳩野逸生, ヤリワーリオ, 上田完次. 己組織化を用いたラインレス生産システム構築に関する研究. 精密工学会誌 , Vol.69, No.6, pp. 820–824, 2003.
- [Petti 2005] Stephane Petti and Thierry Fraichard. Safe Motion Planning in Dynamic Environments. in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems*, pp. 3726–3731, 2005.



## 研究業績

### 査読あり学術論文

- (1) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
待ち行列ネットワーク理論を用いた AGV 搬送システムの最適設計論  
(計測自動制御学会産業論文集, 第 4 巻, 第 1 号, pp. 1-9, 2005.)
- (2) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
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, 第 4 巻, 第 14 号, pp. 98-108, 2005.)
- (3) Satoshi Hoshino, Jun Ota, Akiko Shinozaki, and Hideki Hashimoto:  
Hybrid Design Methodology and Cost-effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems  
(IEEE Transaction on Automation Science and Engineering.) Under review.
- (4) Satoshi Hoshino, Jun Ota, Akiko Shinozaki, and Hideki Hashimoto:  
Improved Design Methodology for an Existing Automated Transportation System with AGVs in a Seaport Container Terminal  
(Advanced Robotics.) Under review.

### 査読あり講演論文

- (1) Satoshi Hoshino, Jun Ota, Akiko Shinozaki, and Hideki Hashimoto:  
Optimal Design Methodology for an AGV Transportation System by Using the Queuing Network Theory  
(7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS2004), pp. 391-400, 2004.)
- (2) Satoshi Hoshino, Jun Ota, Akiko Shinozaki, and Hideki Hashimoto:  
Comparison of an AGV Transportation System by Using the Queuing Network Theory  
(IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004), pp. 3785-3790, 2004.)
- (3) Satoshi Hoshino, Jun Ota, Akiko Shinozaki, and Hideki Hashimoto:  
Optimal Design, Evaluation, and Analysis of AGV Transportation Systems Based on Various Transportation Demands



(IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2005), pp. 1412–1418, 2005.)

- (4) Satoshi Hoshino, Jun Ota, Akiko Shinozaki, and Hideki Hashimoto:  
Highly Efficient AGV Transportation System Management Using Agent Co-operation and Container Storage Planning  
(IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2005), pp. 2330–2335, 2005.)
- (5) Satoshi Hoshino, Jun Ota, Akiko Shinozaki, and Hideki Hashimoto:  
Design of an AGV Transportation System by Considering Management Model in an ACT  
(The 9th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-9), 2006.) In press.

## 解説記事・報告書

- (1) 星野 智史, 太田 順:  
港湾物流における AGV 搬送システム構築のための最適設計方法論とシステムの有効性の評価  
(港湾荷役, 第 50 巻, 第 3 号, pp. 318–324, 2005.)

## 口頭発表

- (1) 星野 智史, 太田 順, 戸田 和行, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
待ち行列理論による AGV 搬送システムの設計  
(第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2B25, 2003.)
- (2) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
待ち行列ネットワーク理論による港湾物流 AGV システムの性能評価法  
(第 16 回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 325–330, 2004.)
- (3) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
待ち行列ネットワーク理論による AGV 搬送システムの最適設計法  
(2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 1309–1310, 2004.)

- (4) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
港湾物流 AGV 搬送システムのレイアウト評価  
(第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1G35, 2004.)
- (5) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
港湾物流 AGV 搬送システムの最適設計とレイアウト評価  
(日本機械学会 第 13 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2004), pp. 47-50, 2004.)
- (6) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
港湾物流搬送システムのためのコンテナ蔵置計画とエージェント行動則設計  
(第 17 回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 75-80, 2005.)
- (7) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
運用を考慮した AGV 搬送システムの設計  
(第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1E26, 2005.)
- (8) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
高効率 AGV 搬送システムの設計  
(日本機械学会 第 14 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2005), pp. 59-62, 2005.)
- (9) 星野 智史, 太田 順, 篠崎 朗子, 橋本 英樹:  
実搬送システムへの設計支援方法論  
(日本機械学会 第 14 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2005), pp. 62-66, 2005.)

## 本研究に直接関係しない学術論文

- (1) 尾崎 功一, 星野 智史, 山本 純雄:  
ズーム計測法と視差による不確かな領域の評価  
(精密工学会誌, 第 70 巻, 第 4 号, pp. 512-516, 2004.)