

## 3 PL配送センターのシミュレーション分析

王 曉 華

### 1. はじめに

近年、経済のグローバル化、地球温暖化、情報技術の発達および顧客需要の多様化などに伴い、物流を取り巻く環境がめまぐるしく変化している。とりわけコンビニエンス・ストアの物流では、多品種・少量・ジャストインタイム（J I T）の配送が求められている。物流コストおよび排気ガスを削減すると同時に、多品種・少量・J I T物流を実現するためには、共同・一括納品ができるクロスドッキング・センターが多数利用されている。

クロスドッキングは、入荷した品物をほぼ保管しなく、あるいは短期間保管する倉庫システムである（Bozarth and Handfield 2008）。日本では、通過型センターあるいはトランスファー・センター（T C）とも呼ばれる（白井秀彰編著 2001）。小売業では、クロスドッキング・システムを導入し、そして成功した例が多数紹介されている。たとえば、世界では小売業の最大手のウォルマート社は、クロスドッキング・システムを導入することにより、法外な運送コストが発生せずに、在庫を削減することに成功した（Bowersox et al. 2007）。セブイレブンは、クロスドッキング・システムとミルクランの使用により、各店舗に小口納品を低配送コストで実現した（Chopra and Meindl 2007）。

本稿では、クロスドッキング・システムを使用し、コンビニエンス・ストアの物流業務を受託しているサードパーティー・ロジスティクス（3PL）企業の配送センターを対象とし、作業員数および入荷トラックの到着時間は、いかにシステムのパフォーマンスに影響するかを考察する。パフォーマンスの評価指標は、作業員稼働率、作業リードタイム、大分けと小分けの待ち時間などである。このようなシステムにおいて、トラック到着、需要の変動および作業員の能力などによる不確実さが存在するので、複雑かつ動的なシステムのモデルリングと解析に強いシミュレーション技法を研究方法とする。

シミュレーションは、数理モデルで解析しにくい複雑なシステムを理解するための有用なツールである（Simchi-Levi et al. 2008）。シミュレーションで倉庫作業に関する従来研究が多数紹介されている。Mason et al（2003）は、シミュレーション分析により、倉庫と輸送を統合する潜在的メリットを考察した。その結果は、統合した枠組みがサービスを改善できると同時に、コストとリードタイムも削減できる。Jansen et al（2001）は、多頻度・短リードタイムが要求される外食サプライチェーンを研究するために、シミュレーション・モデルを構築した。そして、多くの研究者が倉庫の作業を改善するために、シミュレーション分析を行った（Gopakumar et al. 2008; Takakuwa et al. 2000; Gagliardi et al. 2007; Magableh et al. 2005）。これらの研究は、シミュレーション技法がサプライチェーンおよび倉庫作業を分析するための有力かつ実用的なツールであることを明らかにした。しかし、シミュレーションを用いてクロスドッキング・システムのパフォーマンスを分析する事例は見当たらない。

本研究の目的は、シミュレーション分析により、クロスドッキング・システムのパフォーマンスを解明することである。2章では本研究で対象としたクロスドッキング・システムについて述べ、3章ではシミュレーション・モデルの構築を示している。4章では、シミュレーション実験を行い、その結果を分析・考察し、それにより考慮した要因はシステムに与える影響を明らかにしている。最後に、5章では本研究のまとめおよび今後の課題を述べる。

## 2. 対象システム概要

一般のクロスドッキング・システムは、入荷品はセンター内に保管されなく、即座に出荷ドックに搬送され、積み込まれる。本研究では、対象としたクロスドッキング・システムは、入荷品を店舗別に仕分けし、出荷時間になるまで配送センターで保管される。対象とした配送センターは、管轄エリア内の200以上のコンビニエンス・ストアに1日3便で、日配食品を配送する。およそ8時間で1便の作業を行う。たとえば、1便の入荷は13時から、最後の出荷積込は21時になる。センターにおける各便の作業プロセスは、検品、大分け、小分け、出荷およびラベル貼り付けなどの作業が含まれる。センター2階にある弁当・惣菜工場で製造される弁当商品を除いて、他の商品は複数のサプライヤーから入荷する。各店舗からの発注データが、情報センターを経由し、サプライヤーに伝送されると同時に、配送センターにも送られる。発注データに基づき、伝票、ラベルなどの書類を作成する。センターのレイアウトは、図1のとおりである。本研究は、1便を対象にし、納品トラックの到着から小分けの終わりまでのプロセスを分析し、システムのパフォーマンスを解明した。

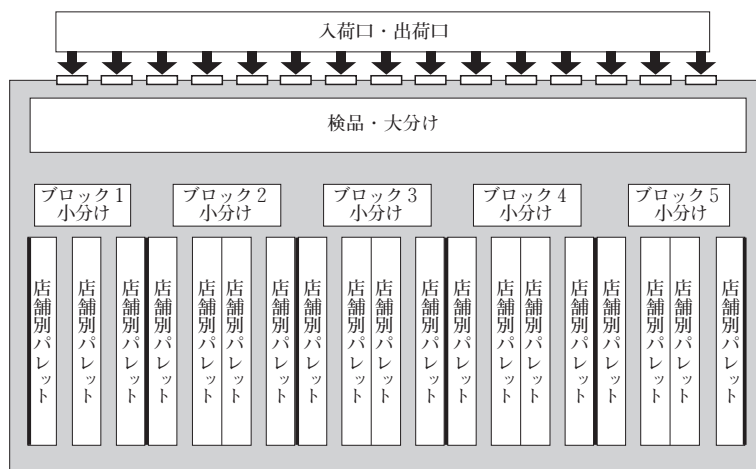


図1 配送センター内のレイアウト

### 3. シミュレーション・モデル

シミュレーション・モデルは、Arena/SIMAN (Kelton et al. 2004) を用いて構築した。

#### 3.1 モデルの目的

シミュレーション・モデルの目的は、対象とした配送センターのパフォーマンスを分析することである。パフォーマンス評価指標は、以下のとおりである。

- (1) 作業員稼働率：作業員の稼働時間が利用可能時間に占める率で計算する。
- (2) 作業リードタイム：商品が配送センターに入荷してから、小分けが終わるまでの平均時間とする。
- (3) 搬送待ち時間：大分けが終わってから、小分けステーションへ搬送するための待ち時間とする。
- (4) 小分け待ち時間：小分けをするために待つ時間とする。

#### 3.2 モデルのロジック

シミュレーション・モデルは、サプライヤーからの納品トラックが到着してから、小分けが終わるまでの業務プロセスに基づき、構築された。具体的に、納品業者のトラックがセンターに到着し、センターの受け入れドックが遊休状態であれば、運転手により積み下ろし、それと同時にセンターの作業員が検品し、大分け・小分けを行う。シミュレーション・モデルのロジックは図2のとおりである。

シミュレーション・モデルは、以下の前提条件に基づき構築した。

- (1) 作業員の作業能力が同一である。
- (2) 作業員の搬送以外の移動時間が無視された。

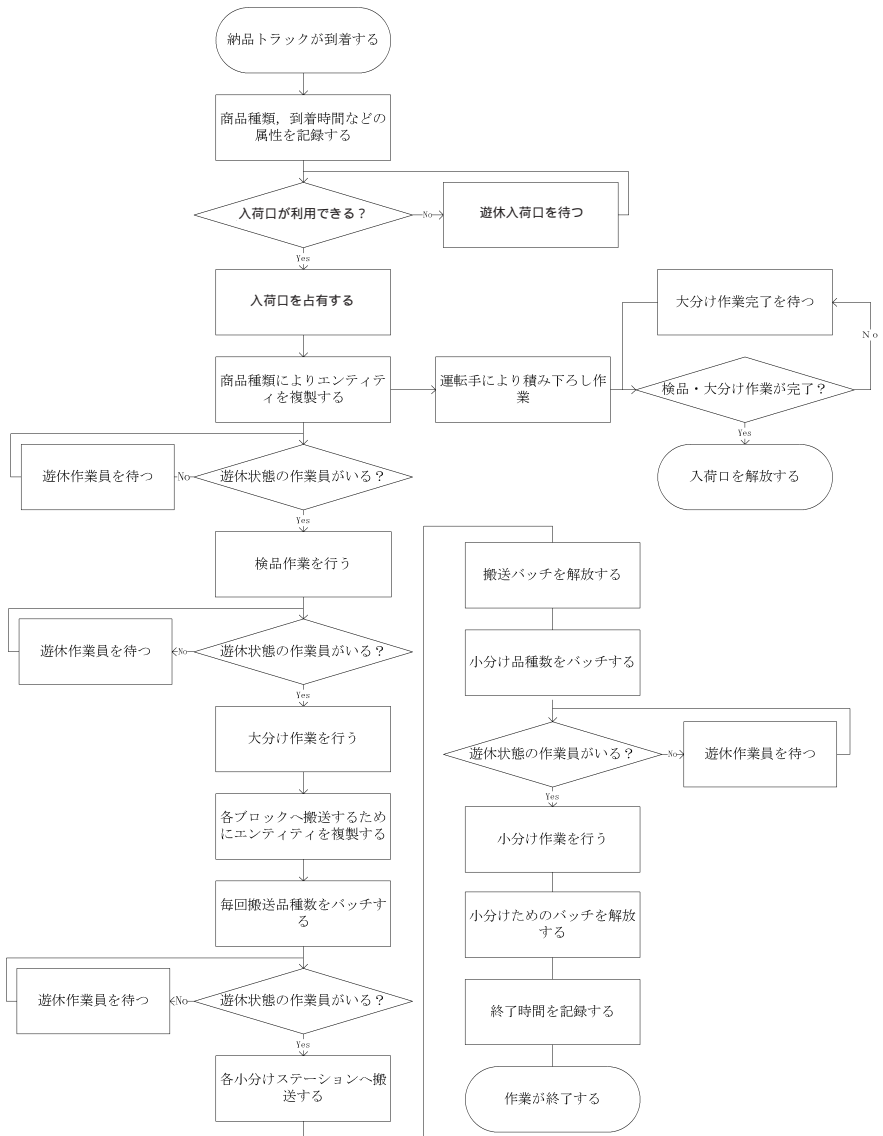


図2 シミュレーション・モデルのロジック

### 3.3 入力データ

シミュレーションためのデータは、時間研究および企業システムのデータベースから2つの方法で収集された。

#### (1) 時間研究によりデータの収集

- ① 積み下ろし所要時間
- ② 検品時間
- ③ 大分け時間
- ④ 搬送時間

#### (2) システム・データベースからのデータ

- ① 小分け時間
- ② 商品属性などに関する情報
- ③ サプライヤー情報
- ④ トラック情報

収集した生データをArena Input Analyzer およびエクセルを駆使し、シミュレーション・モデルに使用できるデータに加工した。表1は、シミュレーション・モデルに入力した一部のパラメータである。

表1 シミュレーション・モデルのパラメータ (一部)

作業	作業時間 (分)
検品	TRIA(0.5, 1, 1.5)
大分け	TRIA(1.2, 2, 3)
搬送	TRIA(0.15, 0.5, 0.9)
小分け	ERLA(0.905, 2)

作業	値 (個)
搬送バッチサイズ	DISC(0.8, 1, 1.0, 2)
小分けバッチサイズ	DISC(0.47, 1, 0.72, 2, 0.82, 3, 1.0, 4)
各トラック商品種類	6 + GAMM(6.59, 1.76)

シミュレーション・モデルの検証は、モデル作動中におけるアニメーションを観察したり、パラメータを定数で変えたりする方法により行った。

## 4. 実験と考察

### 4.1 実験の手続き

1回だけのシミュレーション実験であれば、直接にシミュレーション・モデルの画面にある作動ボタンを押したら可能である。しかし、シミュレーションの実験回数が複数の場合、毎回パラメータを変更する必要が発生し、前述の方法であれば、毎回パラメータを入力し、作動させなければならない。それにより、実験を実施する時間が長くなり、そして入力ミスも発生しやすくなる。従って、本研究では、Visual Basic for Applications (VBA) によって自動的に複数シミュレーション実験を一括して実行できる手続きを提案した。VBAコードの一部を付録Aに示している。シミュレーション実験を実施する手続きは、図3に示す。この手続きにより、実験を行う前に、変動させるパラメータをエクセル・ファイルに保存することだけで、シミュレーション実験を自動的に実行し、そして出力データも自動的にエクセル・ファイルに書き込まれる。

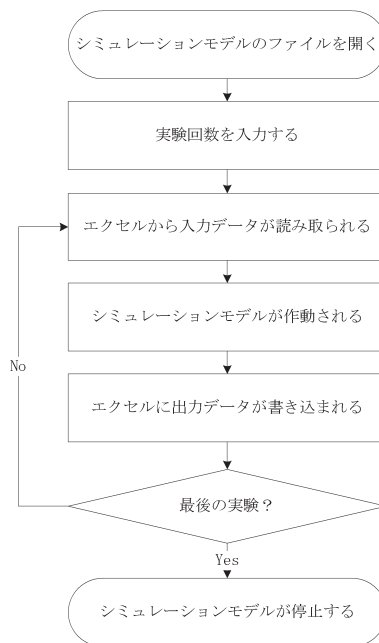


図3 シミュレーション実験の手続き

## 4.2 実験計画

本研究では、トラック到着時間間隔と作業員数の2つの変数が選択された。サプライヤーから納品のトラックは、到着時間が指定されているが、定時どおりに到着できない場合が多い。到着時間がいかにシステム・パフォーマンスに影響するかを明らかにするために、トラックの到着間隔を変数とする。また、この配送センターは自動倉庫ではなく、センター内の作業は主に作業員の手作業により行っている。従って、作業員の人数はいかにシステムに影響を与えるか解明するために、作業員数も変数とする。2つの変数に対し、5つの水準の完全実施要因計画でシミュレーション実験を行った。水準値はそれぞれ、以下のとおりである。

- ・ トラック到着時間間隔：指数分布に従い、パラメータはそれぞれ5, 10, 15, 20, 25である。
- ・ 作業員数：それぞれ10, 12, 14, 16, 18に設定した。

## 4.3 結果の考察

前節の実験計画に基づき、シミュレーション実験を行い、本節ではその実験結果を用いてトラック到着時間間隔と作業員数が、各評価指標にどのような影響を与えるか考察する。

### (1) 作業員稼働率

表2は、実験計画に基づき得た作業員稼働率に関する実験結果である。図4はそれを図式したものである。図4より、作業員の稼働率は、トラック到着間隔の値が5から20までの間、ほぼ変化しない。換言すれば、作業員稼働率がトラック到着間隔に依存しないことが分かる。しかしながら、トラック到着間隔が20から25へ変化する場合、作業員の稼働率は、下降の傾向が示されている。これは、トラック到着時間間隔が小さい場合、入荷した商品が多くなり、作業



員が忙しくなり、それに反してトラック到着時間間隔が大きい場合、入荷した商品が少なくなくなり、所要の作業員も少なくなることを意味する。一方、図4より、作業員の稼働率は、作業員数の増員により下降し、作業員の減員により、上昇することも分かる。

表2 作業員稼働率に関する実験結果

到着間隔	作業員稼働率				
	作業員数 =10	作業員数 =12	作業員数 =14	作業員数 =16	作業員数 =18
5	99%	87%	70%	64%	58%
10	98%	84%	72%	70%	57%
15	97%	95%	77%	68%	56%
20	92%	87%	79%	66%	60%
25	82%	84%	65%	57%	48%

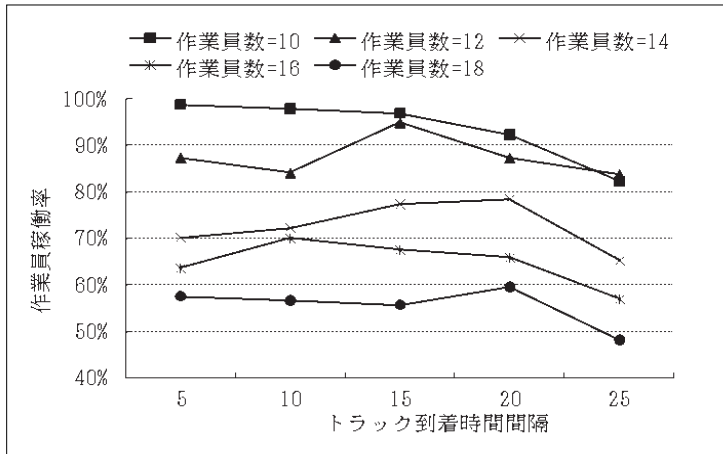


図4 作業員稼働率とトラック到着時間間隔の関係

(2) 作業リードタイム

商品の配送センターにおける作業リードタイムに関する実験結果を付録B (1) に示す。図5は実験結果を図式したものである。図5より、トラック到着時間間隔が大きければ大きいほど、作業リードタイムが短くなる。これは、トラック到着時間間隔が大きくなり、作業員の余裕があり、入荷品が到着したらず各作業が始まり、各作業を待つ時間が短くなることを示している。しかし、トラック到着時間間隔の増大につれて、作業リードタイムの変化が鈍化になり、さらに作業員の人数が大きい時、ほぼ変化しないことが分かる。これは、到着時間間隔と作業員数の間、交互効果があることを意味する。つまり、納品トラックの到着時間間隔が、ある値に達したら、作業員の人数を増やしても、作業リードタイムを改善しない。その代わりに、その到着時間間隔が短い場合、作業員を増員することによって、作業リードタイムが大いに改善できる。

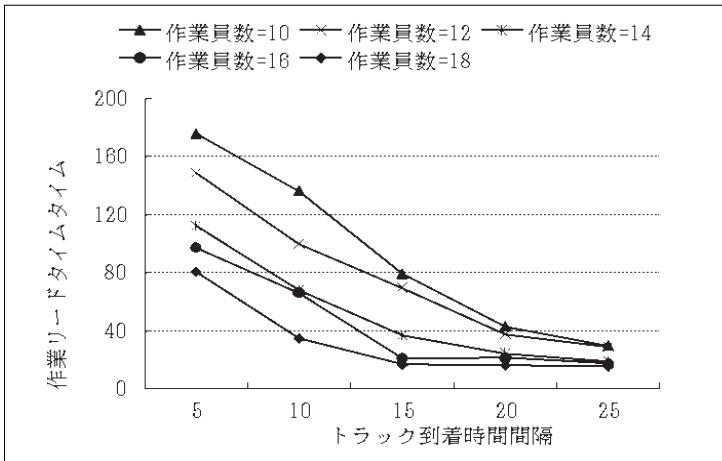


図5 作業リードタイムとトラック到着時間間隔の関係

(3) 搬送待ち時間と小分け待ち時間

搬送待ち時間と小分け待ち時間に関する実験結果を付録B (2), (3) に参

照する。図6と図7はそれぞれ、その実験結果に基づき図式したものである。図6と図7より、搬送待ち時間と小分け待ち時間が類似の変化傾向を有することが分かる。つまり、作業員の人数の増加につれ、両方の待ち時間が減少する傾向があり、トラック到着時間間隔が大きい値をとり、作業員の人数が一定値（たとえば14）より以上の場合、待ち時間の変化が鈍化になる。この傾向は、作業リードタイムに類似であることがわかる。本研究では、定義した作業リードタイムは、入荷品が配送センターに到着してから、小分け作業が終わるまでの時間経過とした。従って、作業リードタイムに搬送待ち時間と小分け待ち時間が含まれ、三者に類似の傾向を有することを確認できた。

実験結果に対し、モデルのあてはめを行い、2つの変数が4つの評価指標に与える効果をそれぞれ、付録Cに示す。寄与率はそれぞれ、 $R^2 = 0.908915$ ,  $0.920851$ ,  $0.92009$ ,  $0.905386$ となっている。統計分析の結果より、1) 作業員の稼働率に対して、0.05の有意水準のもとで、両変数とも有意性を表したが、0.01の場合、作業員数だけ有意であることがわかる。図4で説明したように、トラック到着時間間隔が稼働率に与える効果は小さいと考えられる。2) 稼働率を除いた3つの評価指標に対して、2つの要因の主効果、交互作用が全部有意であることがわかる。

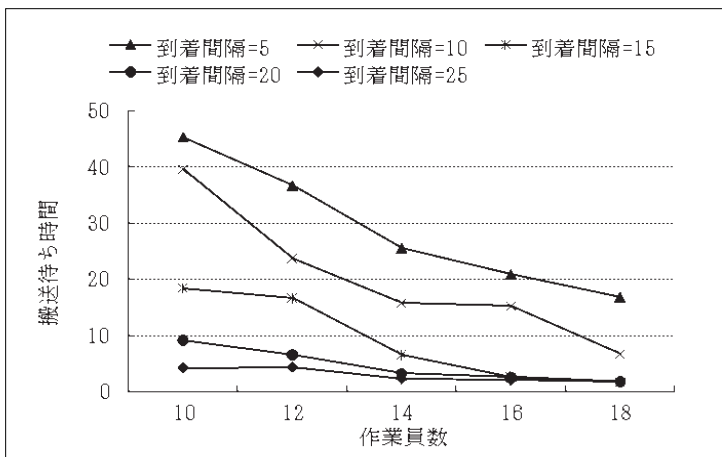


図6 搬送待ち時間と作業員数の関係

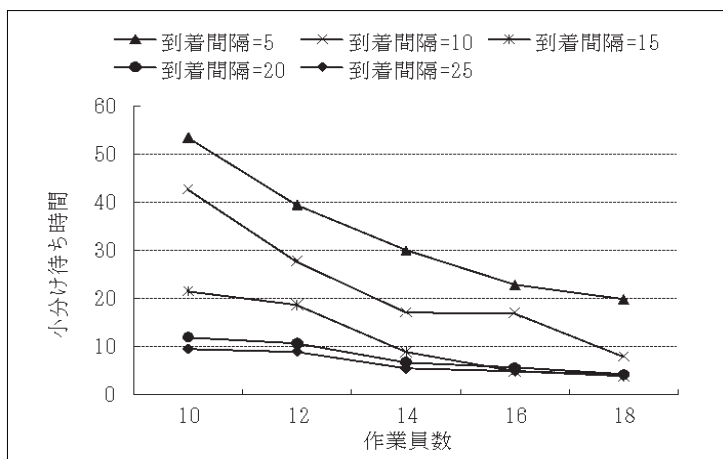


図7 小分け待ち時間と作業員数の関係

## 5. おわりに

本論文では、クロスドッキングを用いた一括配送センターのパフォーマンスを、シミュレーション技法を利用し分析した。作業員の稼働率、作業リードタイム、搬送待ち時間と小分け待ち時間を評価指標とし、作業員の人数と納品トラックの到着時間間隔を変数とした。シミュレーション実験と分析を通して、次のことを明らかにした。1) 作業員の稼働率に影響する要因は、主に作業員の人数であるが、到着時間間隔が大きくなれば、稼働率が影響される。2) 作業リードタイム、搬送待ち時間と小分け待ち時間が、到着時間間隔と作業員数の両方に影響される。従って、納品トラックの到着時間および作業員のスケジュールを作成する際に、両方の要因を真剣に配慮する必要がある。今回の研究は作業員の能力が同一で、シフトも同じであることを仮定したが、より詳細かつ柔軟なシミュレーション分析を今後の課題とする。

## 付録A シミュレーション実験のためのVBAコード (一部)

```
Private Sub CommandButton1_Click ()
    Dim exNum As Long
    exNum = frmDOE.TextBox1.value
    frmDOE.Hide

    Dim i,j As Integer
    Dim modTime As Module
    Dim modWorker As Module
    Dim dockUti As Double
    Dim workerUti As Double
    Dim operationTime As Double
    Dim waitHandTime As Double
    Dim waitPutTime As Double

    'Set the global SIMAN variable
    Set g_Model = ThisDocument.Model
    Set g_SIMAN = g_Model.SIMAN

    'Open the Excel spreadsheet to be read as input
    smutils_InitializeExcel False, 1
    g_ArenaDir = Mid(g_Model.FullName, 1, Len(g_Model.FullName) - Len(g_
    Model.Name))
    g_XLInputFile = smutils_OpenExcelWorkbook(g_ArenaDir & "DC_input.xls")
    ' Create the Excel spreadsheet for output
    ' Write headers to the output file
    g_XLOutputFile = smutils_NewExcelWorkbook
    smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "A1", "arrival time"
    smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "B1", "workders"
```

```
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "C1", "Dock Utilization"  
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "D1", "Worker Utilization"  
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "E1", "Operation Time"  
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "F1", "Waiting Time for  
Handling"  
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "G1", "Waiting Time for  
Putaway"  
' Read the data from the Excel spreadsheet into global VBA variables  
Set g_ExperimentData = smutils_ReadExcelRange(g_XLInputFile, "sheet1",  
"experiment_data")  
For j = 1 To exNum  
' Read input data form Excel  
With g_ExperimentData  
g_time = .Cells(j + 1, 1)  
g_worker = .Cells(j + 1, 2)  
End With  
  
' Set the module's data  
i = g_Model.Modules.Find(smFindTag, "tag_exp1")  
Set modTime = g_Model.Modules.Item(i)  
modTime.Data("Value") = g_time  
i = g_Model.Modules.Find(smFindTag, "tag_worker")  
Set modWorker = g_Model.Modules.Item(i)  
modWorker.Data("Capacity") = g_worker  
g_Model.QuietMode = True  
g_Model.Check  
g_Model.Go  
i = g_SIMAN.SymbolNumber("dock utilization")  
dockUti = g_SIMAN.OutputAverageAcrossReplications(i)
```

```
i = g_SIMAN.SymbolNumber("worker utilization")
workerUti = g_SIMAN.OutputAverageAcrossReplications(i)
i = g_SIMAN.SymbolNumber("average operation time")
operationTime = g_SIMAN.OutputAverageAcrossReplications(i)
i = g_SIMAN.SymbolNumber("waiting for handling")
waitHandTime = g_SIMAN.OutputAverageAcrossReplications(i)
i = g_SIMAN.SymbolNumber("waiting for putaway")
waitPutTime = g_SIMAN.OutputAverageAcrossReplications(i)
' Write the data out to the next row of the output file:
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "A" & j + 1, g_time
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "B" & j + 1, g_worker
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "C" & j + 1, dockUti
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "D" & j + 1, workerUti
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "E" & j + 1, operationTime
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "F" & j + 1, waitHandTime
smutils_WriteExcelValue g_XLOutputFile, "Sheet1", "G" & j + 1, waitPutTime
g_Model.End
Next
' Save the output file and close Excel
smutils_SaveExcelWorkbook g_XLOutputFile, g_ArenaDir & "DC_report.xls"
smutils_ExitExcel
' Set the range variables to Nothing to free the memory storing the data
Set g_ExperimentData = Nothing
EndSub
```

## 付録B 実験結果データ

## (1) 作業リードタイムに関する実験結果

到着間隔	作業リードタイム				
	作業員数 =10	作業員数 =12	作業員数 =14	作業員数 =16	作業員数 =18
5	175.78	148.78	112.00	96.91	80.53
10	136.30	99.77	67.73	65.88	34.76
15	79.08	69.55	36.49	20.91	16.39
20	42.74	37.28	24.29	21.05	16.16
25	29.64	28.84	18.87	17.30	15.37

## (2) 搬送待ち時間に関する実験結果

作業員数	搬送待ち時間				
	到着間隔 =5	到着間隔 =10	到着間隔 =15	到着間隔 =20	到着間隔 =25
10	45.33	39.57	18.44	9.13	4.16
12	36.69	23.70	16.64	6.52	4.28
14	25.55	15.67	6.54	3.23	2.23
16	20.90	15.16	2.53	2.56	1.98
18	16.84	6.64	1.64	1.75	1.72

## (3) 小分け待ち時間に関する実験結果

作業員数	小分け待ち時間				
	到着間隔 =5	到着間隔 =10	到着間隔 =15	到着間隔 =20	到着間隔 =25
10	53.48	42.68	21.62	11.92	9.61
12	39.53	27.79	18.80	10.63	9.02
14	30.01	17.15	8.95	6.75	5.56
16	22.87	17.04	4.96	5.62	4.97
18	19.89	7.99	3.92	4.24	4.12



## 付録C 統計分析の結果

## (1) 作業稼働率における効果

要因	パラメータ数	自由度	平方和	F値	p値 (Prob>F)
トラック_到着間隔	1	1	0.0125653	5.5054	0.0284
作業員数	1	1	0.4884881	214.0276	<.0001

## (2) 作業リードタイムにおける効果

要因	パラメータ数	自由度	平方和	F値	p値 (Prob>F)
トラック_到着間隔	1	1	32301.488	167.1555	<.0001
作業員数	1	1	11637.91	60.2245	<.0001
トラック_到着間隔* 作業員数	1	1	3273.914	16.942	0.0005

## (3) 搬送待ち時間における効果

要因	パラメータ数	自由度	平方和	F値	p値 (Prob>F)
トラック_到着間隔	1	1	2304.0122	153.5463	<.0001
作業員数	1	1	974.9862	64.976	<.0001
トラック_到着間隔* 作業員数	1	1	349.2048	23.2721	<.0001

## (4) 小分け待ち時間における効果

要因	パラメータ数	自由度	平方和	F値	p値 (Prob>F)
トラック_到着間隔	1	1	2291.5906	117.5467	<.0001
作業員数	1	1	1236.334	63.4175	<.0001
トラック_到着間隔* 作業員数	1	1	389.696	19.9894	0.0002

## 参考文献

- Bowersox, J. D., D. J. Closs, and M. B. Cooper. 2007. *Supply Chain Logistics Management*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- Bozarth, C. C., and R. B. Handfield. 2008. *Introduction to Operations and Supply Chain Management*. 3rd ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Chopra, S., and P. Meindl. 2007. *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. 3rd ed. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Gagliardi, J. P., J. Renaud, and A. Ruiz. 2007. A simulation model to improve warehouse operations. In *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, edited by S. G. Henderson, B. Biller, M. H. Hsieh, J. Shortle, J. D. Tew and R. R. Barton: Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012-2017.
- Gopakumar, B., S. Sundaram, S. Wang, S. Koli, and K. Srihari. 2008. A simulation based approach for dock allocation in a food distribution center. In *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, edited by S. J. Mason, R. R. Hill, L. Monch, O. Rose, T. Jefferson and J. W. Fowler: Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers., 2750-2755.
- Jansen, D. R., A. van Weert, A. J. M. Beulens, and R. B. M. Huirne. 2001. Simulation model of multi-compartment distribution in the catering supply chain. *European Journal of Operational Research* 133 (1) :210-224.
- Kelton, W. D., R. P. Sadowski, and D. T. Sturrock. 2004. *Simulation with Arena*. 3rd ed. New York: McGrawHill.
- Magableh, G. M., M. D. Rossetti, and S. Mason. 2005. Modeling and analysis of a generic cross-docking facility. In *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, edited by M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B.

- Armstrong and J. A. Joines: Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1613-1620.
- Mason, S. J., P. M. Ribera, J. A. Farris, and R. G. Kirk. 2003. Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review* 39 (2) :141-159.
- Simchi-Levi, D., P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi. 2008. *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Takakuwa, S., H. Takizawa, K. Ito, and S. Hiraoka. 2000. Simulation and analysis of non-automated distribution warehouse. In *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, edited by J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang and P. A. Fishwick: Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers., 1177-1184.
- 白井秀彰編著. 2001. 『17の成功事例に学ぶ 一括物流& サプライチェーン・ロジスティクスの具体策』 経林書房.