コンテナ・ターミナルにおけるコンテナの 在庫管理の研究（第2報）

三 木 楯 彦*

A Study of Container Inventory Control at the Container Terminal.....Ⅱ

Tatehiko MIKI

Abstract

By the use of system dynamics, computer runs were made to investigate the effects of various changes in the container inventory control model, either in parameters or policy statements upon system response. This will not only give insight into the inventory behaviors at a container terminal, but also permit continual refinements of the model. This work shows that system dynamics can be used effectively to investigate problems related to dynamic change in container trades.

1. 研究の目的と範囲

本研究は前報^{〔1〕}の拡張としてコンテナ・ターミナルのトータル・システム解析のために情報フィードバック・システムを適用しようとするものである。これは、コンテナの動きに見られる時間遅れやターミナルでのコンテナの滞留の拡大・増幅などの影響を考慮して、システムのダイナミックな特性を把握し、コンテナ在庫管理に関する意志決定メカニズムの研究・改善に資することを狙いとしている。

システム・ダイナミックス(SD)は当初、インダストリアル・ダイナミックス(ID)として創出されて以来、20年余りになるシステム解析手法である。その特徴はシステムの構造や相互関係を把握し、これに対応するシステムの動的挙動を理解する上で有力な手法である。

コンテナ化の進展の結果、長大な沿岸地域に対して少数の寄港地にのみコンテナ船が入港することになり、その寄港地の周辺に広大な背後地を持つに至った。神戸港に例をとれば、ここで船積みされる輸出貨物の生産地、荷卸しされる輸入貨物の消費地が広く及んでいることが判る(表1)。その結果、コンテナの適切なインベントリを維持するためにコンテナの内陸での滞留の特性を知ることが肝要である。

コンテナ・ターミナルにおけるコンテナ保有規模算定モデルとして、滞留日数の効果を考慮に入れた運用規模が算出できる公式がある。しかし、前報で示したようにコンテナ・ターミナルを中心としたコンテナ流動を表わすためには単純に過ぎるので、システム・ダイナミックスの方法により、主として背後地のコンテナの動きを説明しうるモデルを提示することにした。併せて若干の解析例を掲げる。

表1 神戸港の発生地・消費地別
輸出入コンテナ貨物量(昭和53.10)

生産地又は消費地		船積トン数	荷卸トン数
北海道・東北・関東・北陸 中 部		325,404 91,704	261,938 42,245
近畿	和歌山・奈良・滋賀	31,925	17,303
	京 都	15,204	13,351
	大 阪	39,032	64,221
	大 阪	101,098	78,113
	神 戸	14,339	28,771
	兵 庫	60,313	49,901
中四九	国 国	69,682	32,615
	州 州	16,926	11,127
	・ 沖 縄	61,903	14,190

(資料)「全国における輸出入コンテナ貨物流動調査
報告書」(大蔵省関税局ほか)(昭和54.7)

* 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5丁目1-1)

2. ダイナミック・モデルの構成

コンテナの在庫が発生するストック・ポイントは図1に見るようにコンテナ・ターミナルを中心にして多数存在している。これらの在庫点に置かれるコンテナと、本船に搭載されるコンテナおよび陸上を実入りまたは空で輸送途上にあるコンテナが海運会社の保有・運用するコンテナのすべてである。

コンテナ運用に影響する要因には配船隻数、配船間隔、1船平均積取個数、陸上での滞留日数が殊に重要であるが、これらの種々の組合わせに対して運用規模がどのように変化するかを調べるために以下に述べるような基本モデルを構築する。

モデルはコンテナ船の揚荷役から各在庫点を経て積荷役に至る範囲を対象とし、基本モデルではコンテナの新造・廃棄、リースあるいは、空コンテナの他地域への移動を含めない。

SD（システム・ダイナミクス）の表記法でフローダイアグラムを画けば図2のようになる。この図において、実線はコンテナ（実入り、又は空）の動きを、点線は情報の流れを表わす。各在庫点をレベルと呼び、バルブ記号で1つのレベルから他のレベルへの「もの」の流れの速さ（レート）を決定する意志決定機構を表わす。図はSD特有の記号の約束に従って作られている。

情報フィードバック機能は、システムの予期した行動と現実の結果としての行動との間の誤差に関する情報を再び入力としてシステムにとり入れ、システムの次の行動をコントロールする働きをいうが、そのしくみによりさまざまなモデルをつくることができる。それゆえ、図2ではこれらを輸入量および輸出量決定サブシステムと名づけたが、いくつかの意志決定機構の吟味をこのサブシステムの機能の変更によって行ないうる。

標準ケースのシステム・モデルとして1週間の配船間隔でコンテナの内地における平均滞留日数3週間を選んだ。その他の関係諸元は、神戸港ポートアイランドのコンテナ専用バースにおいて、北米西岸（PSW）航路に関するパラメータを用いた。図3は典型的なコンテナ・ターミナルの空コンテナ蔵置場所の在庫変動を見る毎日の記録をカーブプロッターで画いたものである。複雑な荷動きを反映して空コンテナの在庫水準も季節変動と貿易量の変動を受けている。標準ケースでは20と40フィート・コンテナの合計数をシミュレートさせた。

図1 コンテナ・ターミナルを中心としたコンテナの流動図

図2 コンテナ・ターミナルモデルの範囲

図3 空コンテナの在庫変動

(神戸港ポートアイランドの某ターミナル)

3. SD によるシミュレーション

3.1 標準ランのシステム挙動

週1便の配船の標準ケースの場合のシステム挙動は図4のようになる。この計算ではシステム内のすべての在庫点でのコンテナ個数を零からスタートさせたので、約3週間の過渡的期間を経て定常状態に入っている。輸入コンテナ(M), 輸出コンテナ(X)は入港日ごとに規則正しい鋸歯状を描き、空コンテナの在庫も一定の波形を成す。その結果、コンテナ船から荷卸しされるコンテナと、船積みされるコンテナがほぼ均衡を保つ。輸出入コンテナの累積個数は●と◆記号で示すように入港船がある毎に階段状に増えるが、図2で表わされるシステム内のコンテナ個数は一定の範囲内に落ちつく。

3.2 感度分析

基本モデルにいくつかの修正を加えて、以下のようなインベントリに関係する要因の影響の大きさを測定する。

(1) 寄港隻数の変更

1カ月間に取扱うコンテナ個数を一定に保って、種々の寄港間隔(1, 2, 3および5週)によるコンテナ・ターミナルでの在庫変動を調べる。この分析は、コンテナの回転率を検討する上で基本的なものであり、SDによるプログラムのステートメントの僅かの修正で様々のコンテナ配送状況をシミュレートすることができる。

在庫点でのコンテナ蔵置個数を低位に保つには、配船間隔を短く、少量ずつ揚積荷役を行なうのが最も有効である。例えば、空コンテナの在庫は週1便の配船では1,000~1,050個の水準であるが、2週1便の配船で1,100~1,500個、3週1便の配船で1,100~2,000個、月1回の配船で1,100~3,100個と振幅が大きくなる。

(2) 内陸への平均輸送日数の変化

SDでは現実のシステムの中で「もの」が移動するときに現れる遅れを個々のものの動きに着目しないでマクロ的に扱う。基本モデルではこの遅れを3次の指数遅れとして、図2に示すように輸入コンテナの内陸輸送途上と、輸出コンテナの内陸輸送途上にそれぞれ遅れ機構を置いた。

この遅れ機構の遅れの大きさを1, 2, 4の3通りに変化させることにより、内陸輸送の平均日数が増加する。その結果、内陸でのコンテナ滞留が増え、システム内のコンテナ数を多く必要とすることになる。

一連のシミュレーションにより表2がえられるが、週1回のコンテナ船の寄港の場合、遅れの大きさを4倍に増やすと、同じ6,000個の輸入コンテナを処理する能力が60日間に3,800個から1,600個に低下し、システム内に滞

図4 標準モデルのシミュレーション (60日間)
週1回寄港、揚荷 600個

図5 寄港回数の変化による空コンテナの在庫変動
(月間取扱個数3,000個(一定)の場合)

表2 内陸輸送の遅れの影響比較

モデル番号	配船間隔	遅れの大きさ	60日後の累積輸入コンテナ数	60日後の累積輸出コンテナ数	システム内のコンテナ個数	空コンテナの返却日数	コンテナの陸上滞留日数
①	1週1回	1	6000	3800	2200	4	18
②		2	6000	3400	2600	4	18
③		4	6000	1600	3000	5	18
④	3週1回	1	3600	1800	1800	4	19
⑤		2	3600	1400	2200	6	23
⑥		4	3600	600	3200	11	28
⑦	5週1回	2	1200	0	1200	4	20
⑧		4	1200	0	1200	6	22

留するコンテナは2,200個から3,200個に増えてしまう。寄港回数が減少しても同様の結果となる。

(3) ステップ入力に対するシステム応答

入港船のもたらすコンテナ個数に1つの変動を与えたとき、これによりシステム内部の構成要素がどのように反応するかを観察する。図6は、基本モデルによる60日および120日の経過後に、1船から揚荷されるコンテナ個数を400個から800個、さらに1,200個に増したときの様子を示す。

システムが新たな平衡状態に達するまでに、空コンテナでは約3週を要し、平均130個から250個に在庫水準が増加する。さらに、輸出コンテナでは1箇月後によりやうく平衡に達し、最大305個の在庫水準が最大700個の水準に達し、落ち着く。コンテナの荷役能率の限界内にあるためにシステムは安定であることが判る。

4. コンテナ在庫管理モデル

SDによるコンテナ在庫管理モデルをダイナモという特別のコンピュータ・プログラム言語で書いた方程式を使って数式モデルとして書く代りに汎用言語であるBASICによって作成した。基本モデルのプログラム・リストを付録に掲げる。

以下でこのプログラムについて若干の説明を加える。まず、文番号30~60および850~990でグラフの大きさの制御、最大・最小、ステップ関数、任意の分布関数といった関数の定義を行なっている。

図6 ステップ入力(60日目および120日目)による標準モデルのシステム応答。図4に引続く140日間のシミュレーション。

付 録 コンテナ・インベントリーのSDモデル (BASIC言語)

— 基 本 モ デ ル —

```

10 'container inventory at terminal
20 DIM P$(80),A(30),B(30)
30 DEFFNG(Z0,Z1)=INT(Z0*H*Z1+11.5)
40 DEFFNMAX(Z1,Z2)=(Z2-Z1)*(1-SGN(Z1-Z2))/2+Z1
50 DEFFNMIN(Z1,Z2)=(Z1-Z2)*(1-SGN(Z1-Z2))/2+Z2
60 DEFFNS(Z1)=INT((SGN(T-Z1)+2)/2)
70 TIME$="00:00:00"
80 READ C2,C5,L0,D0:DATA0,0,200,1
90 D=240:M=12000
100 INPUT "table(1) print table(2) graph(3) printgraph(4)";Z9
110 IF Z9<1 AND Z9>4 GOTO 110
120 IF Z9<>4 GOTO 140
130 D=480:M=24000
140 FOR I=1TO 80:P$(I)=" ":NEXT I
150 H=(D-C)/M
160 READ D2,D3,D4,D5,E1,E2,E3,E4,E5,C1,C2,C5,C6,W7,C7:DATA 2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,300
,100,0,100,6,0
170 READ L9,L0,R1,R2,R3,R4,R5,S1,S2,S3,S4,S5:DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
180 READ L1,L2,L3,L4,M1,M2,M3,M4,N1,N2:DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
190 I9=I9+1
200 ON Z9 GOTO 210,230,210,230
210 PRINT "*****";I9;"*****":PRINT "L0,D0,N1,N2,C3,C5,C6,D2,3=";L0:D0:N1:N2:C3
:C5:C6:D2:D3:PRINT "D4,D5,E1,E2,E3,E4,L1,L2,L3,4,M1,M2,M3,M4=";D4:D5:E1:E2:E3:E4
:L1:L2:L3:L1:M1:M2:M3:M4
220 PRINT"  T   L1   L2   L3   L4   L0   M1   M2   M3   M4   L1+M4   N1   N2   R1
R2   R3   R4   R5   S1   S2   S3   S4   S5":GOTO 240
230 LPRINT "*****";I9;"*****":LPRINT "L0,D0,N1,N2,C3,C5,C6,D2,3=";L0:D0:N1:N2:
C3:C5:C6:D2:D3:LPRINT "D4,D5,E1,E2,E3,E4,L1,L2,L3,4,M1,M2,M3,M4=";D4:D5:E1:E2:E3
:E4:L1:L2:L3:L1:M1:M2:M3:M4
240 ON Z9 GOTO 250,260,270,280
250 PRINT"  T   L1   L2   L3   L4   L0   M1   M2   M3   M4   L1+M4   N1   N2   R1
R2   R3   R4   R5   S1   S2   S3   S4   S5":GOTO 290
260 LPRINT"  T   L1   L2   L3   L4   L0   M1   M2   M3   M4   L1+M4   N1   N2   R1
R2   R3   R4   R5   S1   S2   S3   S4   S5":GOTO 290
270 PRINT "+.....+.....+.....+..... T":Z3=36:GOTO 290
280 LPRINT "+.....+.....+.....+..... T":Z3=76
...+... T":Z3=76
290 FOR T=0TO150STEP 1
300 RESTORE 350
310 T0=(T MOD W7)+1
320 'Cargo Handling Rate
330 X2=T0:GOSUB 850
340 C3=C1+C2*FNS(100):R1=C3*Y2:Y0=Y2
350 DATA 1,2,3,4,5,6,1,1,0,0,0,0
360 'container Delivery
370 L1=L1+D0*(R1-R2)
380 IF T0<> 2 GOTO 400
390 L9=L1
400 X2=T0:GOSUB 850
410 R2=L9*Y2
420 DATA 1,2,3,4,5,6,0,.8,.15,.05,0,0
430 R3=L2/D3
440 L2=L2+D0*(R2-R3)
450 R4=L3/D4
460 L3=L3+D0*(R3-R4)
470 R5=L4/D5
480 L4=L4+D0*(R4-R5)
490 S1=FNMIN(C5+C6*FNS(15),L0/3)
500 L0=L0+D0*(R5-S1)
510 S2=M1/E2
520 M1=M1+D0*(S1-S2)
530 S3=M2/E3
540 M2=M2+D0*(S2-S3)
550 S4=M3/E4
560 M3=M3+D0*(S3-S4)
570 N1=N1+R1
580 M4=M4+D0*(S4-S5)
590 S5=FNMIN(C3*Y0,M4)
600 N2=N2+S5
610 N3=L0+L1+L2+L3+L4+M1+M2+M3+M4
620 ON Z9 GOTO 700,800,630,630
630 FOR Z0=1TO 23

```

```

640 ON Z9-2 GOTO 650,660
650 PRINT USING "!";P$(Z8);:GOTO 670
660 LPRINT USING "!";P$(Z8);
670 P$(Z8)=" "
680 IF (T+1) MOD 10<>0 GOTO 700
690 P$(Z8)="."
700 NEXT Z8
710 ON Z9-2 GOTO 720,730
720 PRINT USING "###":T:GOTO 740
730 LPRINT USING "###":T
740 FOR Z0=1TO Z3 STEP 10:P$(Z0)=" ":NEXT Z0
750 P$(FNG(L1,1))="M":P$(FNG(L0,1))="E":P$(FNG(M4,1))="X":P$(FNG(L4,1))="O":P$(FNG(M1,1))="*":P$(FNG(N1,.25))="●":P$(FNG(N2,.25))="◆":P$(FNG(N3,.25))="#":GOTO 820
760 PRINT L1:L0:M4:L4:M1:N1:N2:N3
770 PRINT L1:L0:M4:L4:M1:N1:N2
780 PRINT USING "#### #### #### #### #### #### #### #### #### ";T,
L1,L2,L3,L4,L0,M1,M2,M3,M4,L1+M4,N3;
790 PRINT USING "#### #### #### #### #### #### #### #### ";N1,N2,R1,R2,
R3,R4,R5,S1,S2,S3,S4,S5:GOTO 820
800 LPRINT USING "#### #### #### #### #### #### #### #### ";T,
L1,L2,L3,L4,L0,M1,M2,M3,M4,L1+M4,N3;
810 LPRINT USING "#### #### #### #### #### #### #### #### ";N1,N2,R1,R2,
R3,R4,R5,S1,S2,S3,S4,S5
820 NEXT T
830 PRINT TIME$
840 END
850 'Table Function
860 Z1=W7
870 ERASE A,B:DIM A(Z1),B(Z1)
880 FOR I=1TO Z1:READ A(I):NEXT I
890 'FOR I=1TO Z1:PRINT A(I):NEXT I:PRINT
900 FOR I=1TO Z1:READ B(I):NEXT I
910 'FOR I=1TO Z1:PRINT B(I):NEXT I:PRINT
920 IF X2>A(1) GOTO 940
930 Y2=B(1):GOTO 990
940 FOR Z0=1TO Z1-1
950 IF X2<A(Z0) OR X2>=A(Z0+1) GOTO 970
960 Y2=B(Z0)+(B(Z0+1)-B(Z0))*(X2-A(Z0))/(A(Z0+1)-A(Z0)):RETURN
970 NEXT Z0
980 Y2=B(Z1)
990 RETURN

```

文番号100でシミュレーションの出力形式を数表かプロットグラフの選択、CRTディスプレイか印刷装置の選択を行ない、630~750で図4のようなプロットグラフを画く機構を与えている。以上は任意のSDモデルに共通して用いるプログラム部分であり、在庫管理モデル本体は文番号290~610に記される。変数の初期値は80, 160~180で与えられる。シミュレーションは1日単位で行なっているが、出力は任意の間隔で与えることもできる。Tは日付で、TOは曜日を示すが、日曜日は業務を停止しているので1週を6日としてシミュレートした。

週1回配船の場合、月曜日にコンテナ船が入港し1.5日の停泊を仮定している。在庫点としてコンテナ・ヤードの輸入コンテナ、輸出コンテナの蔵置個数をL1, M4で、空コンテナのそれをL0で表わす。3次の遅れ機構を3.2節(2)で述べたように430~480および510~560で与えている。輸入・輸出コンテナの累積取扱個数をN1, N2, ターミナルを含めて内陸に流通しているコンテナの全個数（システム内のコンテナ数）をN3として、プロットグラフに表示させている。グラフの目盛りは累積個数を他の変数の目盛りの1/4の縮尺で画かれている。

5. 結 語

現実のコンテナ運用において、情報やフローの移動の遅れが現れるが、SDは個々のものの動きに着目しないので、遅れを時間でなく、システム内部の種々のフローの停留や蓄積として捉える。このためコンテナ・ターミナル・システムの有効性を空コンテナの在庫レベルや一定期間のコンテナ処理能力で測定するのに便利である。

今回の分析からコンテナの在庫管理に敏感に影響する要因が、(1)一定期間の空コンテナに対する需要量とその変動、(2)空コンテナの払い出しからコンテナ・ヤードへの搬入に至る内陸輸送の期間（リードタイム）であることが確かめられた。

SDモデルは、システム内の因果連鎖が明瞭な形で組み込まれるので、効率的なターミナルの経営方針を検討するために有用である。しかし、特定のターミナルにおける分析を可能にするためには、なおモデルの水準をあげる必要がある。

参 考 文 献

- (1) 三木楯彦：コンテナ・ターミナルにおけるコンテナの在庫管理の研究，本論文集第62号，pp. 105～111

質 疑 応 答

奥山育英（運輸省港湾技研）：講演では、コンテナ・ターミナルにおける空コンテナの滞留個数の感度分析において、コンテナ船の寄港回数と実入りコンテナの陸上搬出入の日数とで別々にやった結果を示されたが、本来これらは一体のものであって、一方が与えられれば、残りをうまく adjust することにより空コンの滞留個数を少なくできる性質のものであると思われますが？

三木楯彦：コンテナが本船から陸揚げされてから空コンテナとなって戻ってくるまでの日数は僅か1～2日から、長い場合には数十日に及ぶ滞留まで分布しています。3.2 (2)はこの滞留日数分布を用いて配船隻数増に伴う空コンの在庫レベルを調べたものです。

これは現実的な滞留日数分布を用いた配船隻数と所要コンテナ・セット数の関係が例えば下表のようになることにヒントを得ています。

配船隻数		1 隻	2 隻	3 隻	4 隻
配 船 間 隔		30日	15日	10日	7.5日
コン テ ナ 回 転 率	次 船 積 み	100%	80%	40%	20%
	第2船積み	—	20%	53%	60%
	第3船積み	—	—	7%	15%
	第4船積み	—	—	—	5%
平均滞留日数		30日	18日	17日	15日
所要セット数		1	1.2	1.7	2.1
1隻当りセット数		1	0.6	0.56	0.51