

多段階のプレーヤーの意思決定に基づく サプライチェーン全体の在庫量変動に関する考察

— 需要が安定している場合の多段階の意思決定とブルウィップ効果 —

樋 口 徹

1. はじめに

現代の市場における競争は、一企業対一企業の間で行われるのではなく、サプライチェーン対サプライチェーンの間で行われるようになっている (Bradley et al., 1999)。Chopra and Meindl (2001, pp.4-6) は、サプライチェーンの特性を動的なものとし、そこには相互依存関係にある複数の段階が存在し、異なる段階の間を情報、製品、資金が流れているとしている。ゴールドラット (1992) はサプライチェーン全体の競争力はボトルネックの部分で決まることを指摘し、サプライチェーンの強い部分に磨きをかけることも重要であるが、弱点を克服することがサプライチェーン全体の競争力の向上につながるとしている。

サプライチェーンの内部には、川上から川下までの間に複数の段階が介在し、利害関係が異なる構成員が含まれているのが一般的である。サプライチェーン全体を通して提供される製品に関して、各プレーヤーが、その品質、品揃えの幅、サービス水準をどの程度に設定するかによって、サプライチェーン全体の利益が左右されることになる。このような状況を踏まえて、Gopal and Cahill (1992) はサプライチェーン・マネジメント¹ (以下、SCMと略す) の主要な取り組みは、サプライチェーン内部の利害を調整しながら、サプライチェーン内部のトレードオフをコントロールすることであるとしている。Lee et al. (1997) はSCMが抱える最大の課題の一つとして、ブルウィップ効果を挙げている。彼らはその原因をサプライチェーン内部の多段階で行われる意思決定に起因する情報の歪みとその増幅プロセスであるとしている。

本稿では、トレンドや周期性などが無く、需要が安定した商品に限定して、最適な安全在庫水準の存在およびその値を仮定し、サプライチェーンメンバーの各プレーヤーがどのように在庫目安を設定し、各プレーヤーの意思決定の結果がサプライチェーン全体にどの

¹ 米国SCMプロフェッショナル協議会 (Council of Supply Chain Management Professionals) はSCMを調達先確保・仕入・変換 (製造)・全てのロジスティクス活動に関する計画と管理を包括するものと定義し、SCMにおいて最も重要な活動は、協力企業・仲介業者・サードパーティ業者・顧客などのチャネルパートナーとの調整と協働である。特質はSCMが供給と需要管理を企業の枠を超えて統合することであるとしている。

ような影響を与えるかについてシミュレーションを行う。本稿の目的は、サプライチェーン内部のプレーヤーの意思決定プロセスをモデル化し、SCMの高度化とサプライチェーンの業績についての考察を進めることである。

2. モデルの設定と各プレーヤーの部分最適に基づく意思決定

サプライチェーンは消費者に製品が届くまでに関連する企業の集まりで、複雑なネットワーク構造を有している。しかし、単純化して、直線的な連鎖関係と捉えるのが一般的となっている。川上から川下までの流れの中で、各プレーヤーが製品や原材料などに関して販売と補充のサイクルを繰り返すことによって、製品が消費者に安定的に供給されているのである。本稿では、サプライチェーンを、上流から、メーカー（協力企業含む）、卸売り、小売り（消費者含む）の3段階に区分けして考察を進める²。

サプライチェーン内では、現金、モノ（製品や材料など）、情報などが流れるが、その意思決定のレベルは数年単位で行われるサプライチェーンの戦略あるいは設計レベル、年単位の計画レベル、週あるいは日単位のオペレーションレベルに区分けされるのが一般的である。ただし、日常のオペレーションにおいても上流と下流では構造あるいは運営上の制約の度合いが大きく異なる。例えば、小売りや卸売りなどの下流では特定商品の取扱量を倍に増やすと決定した場合でも、売り場のレイアウト変更、在庫スペースの拡充、発注数量や発注間隔の変更などによって対応することができる。それに対して、製造活動や採掘・採取活動などが含まれる上流では、生産能力を倍増することは、原材料の調達や設備・人員の制約もあり、短期的に対応することが不可能なケースの方が多い。しかし、本稿では議論を単純化するために、週や日単位でのオペレーションに限定して、話を進めるので、これらの制約に関しては取り扱わないこととする。

各プレーヤーは、販売と補充（発注と受領）を繰り返すが、在庫が品切れを防ぐのに重要な働きをしているのは言うまでもない。図1は、各プレーヤーが最大在庫目標水準を設定し、定期的に発注する場合の典型的な在庫変動の様子を示している。各プレーヤーは定期発注方式〔(s,t)方式〕を採用し、売れ残りと品切れから発生する損失およびリードタイムを考慮しながら、発注目安（T）を設定し、特定の間隔で発注とする。製品を発注してから、その製品を受領して、次の補充を受けるまでの期間が在庫調整期間に該当する。各プレーヤーは一サイクルの当たりの期待利潤を最大にする安全在庫水準を設定しながら、特定期間を通して利潤が最大になるように発注間隔を調整する。尚、通常は売れ残りの機会費用を含めるが、保存期間が長い製品を想定し、売れ残りは発生しないものとする。

² 実際のサプライチェーンには、協力企業や卸売りだけで複数の段階を構成することもあるが、Chopra and Meindl（2001）でも、サプライチェーンを簡略化して協力企業、（セット）メーカー、卸売、小売、消費者の5段階で考察を進めている。

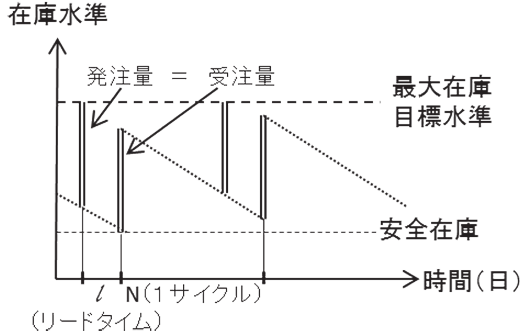


図 1：在庫調整期間における在庫水準の推移

小売りや卸売りの場合、粗利益の総額から品切れコストや在庫コストなどの費用を控除した額を最大にするように、安全在庫を含む在庫水準や発注間隔などを決定する。発注間隔を N 日、そして商品の注文から受領までのリードタイムを L 日とする。さらに、 $(N+L)$ 日間の需要を q 、発注目安を T とした場合、品切れ確率 (β) は数式 (1) のように表される。

$$\beta = \int_T^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left[-\frac{(q-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dq \quad \cdots(1)$$

但し、 T は最大在庫目標水準で $(N+L)$ 間の需要予測に安全在庫を加えたもの、
 q は $(N+L)$ 日間の需要、
 μ は q の平均値、
 σ は q の標準偏差。

発注間隔 (N 日) や商品の注文から受領までのリードタイム (L 日) を所与として、最適な T は以下の数式 (2) で表される Π を最大化する値を求めることによって特定することができる。

$$\Pi = (1-\beta)(p-c)q - \beta[(p-c)T - s(q-T)] - (N+L)\left(\frac{N}{N+L} \times \frac{q}{2} + k\sigma\sqrt{N+L}\right)h \quad \cdots(2)$$

但し、 p は販売価格、
 c は仕入れ価格、
 s は一個当たりの品切れコスト、
 k は安全係数、
 h は製品一個の一日当たり保管コスト。

(2) 式から、粗利益の総額から品切れコストと在庫の保管費用を控除したものを最大化するように、 k を設定することによって、 T や β も特定することができる。

小売りや卸売りの段階では、製造工程は含まれないので、小売りや卸売りの最大化の方法は基本的に同じ構造となる。数多くの小売りからの注文を集約しているのが卸売りであ

るので、小売りから卸売りへの注文量（需要）の期待値は小売りの需要の販売量の総和となる。各小売り間の需要が独立であると仮定した場合、卸売りへの注文の分散は、各小売りの分散の総和となる。

工場では、在庫管理活動に加えて、製造工程が含まれるので、設備投資、従業員の採用・訓練、原材料の調達（リードタイム）、加工時間など、小売りや卸売りとは異なる要素が含まれるようになる。一つの生産ラインで複数の製品を製造している場合、段取りの回数を絞り込むことによって、時間やコストを削減するのが一般である。工場が保持している完成品在庫には、サイクル在庫や安全在庫に加えて、少ない段取り回数やロットサイズの大きさから生じる過剰な在庫が含まれることになる。したがって、 $(N+L)$ 日間の在庫調整期間における製造コストを加味したものとして、工場側の利潤は数式（3）として表現できる。

$$\Pi = (1-\beta)(p-c)q - \beta[(p-c)T' - s(q-T')] - \left(\frac{Nq}{2} + (N+L)k\sigma\sqrt{N+L} \right) h - [f+v(n)]q \quad \cdots(3)$$

但し、 f は製品一個当たり固定費の配賦額、

$v(N)$ は製品一個当たりの変動費用（段取り費用含む）、

T' はロットサイズの端数分だけ T より大きくなる。

数多くの卸売りからの注文を集約しているのが工場であるので、卸売りから小売りへの注文量（需要）は卸売りの需要の販売量の総和となる。各卸売り間の需要が独立であると仮定した場合、工場への注文の分散は、各卸売りの分散の総和となる。

3. R 統計ソフトによるモデル構築

本研究では、R 統計ソフトを活用する。図 2 は本研究で用いる要素間の関係を図示したものである。行列形式で表現されるものは 4 つのアルファベットの大文字から構成されている。左側の 2 つのアルファベットが C （消費者）、 R （小売り）、 W （卸売り）、 M （工場）の組み合わせであり、川上から川下までのどの部分での出来事かを示している。そして右半分が項目の説明で、 IN （在庫）と TS （在庫目安）を意味し、 D （需要）に付随するものは、 G （乱数）、 S （サンプル）、 O （注文）、 P （サイクル）を意味する。最適な危険係数（ K ）は、数式（2）から求めるべきであるが、そのために多くの仮定が必要となるので、その過程を省略して、最適な危険係数（ K ）を 2.33（品切れ確率 1 %）とする。さらに、サイクルタイム（ N ）は 3 日、リードタイム（ L ）は 1 日とし、サプライチェーンの各プレイヤーは同期して活動を行うものとする。

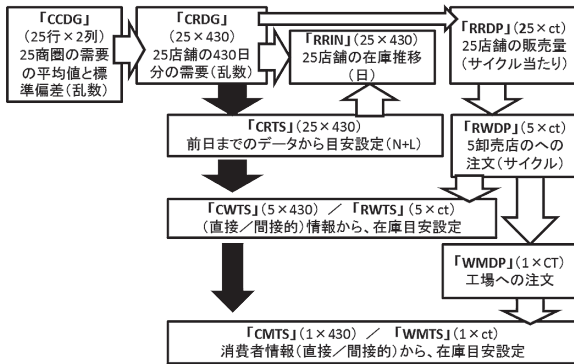


図2：モデル内の要素の関係図

「CCDG」は25地域の商圈に関する需要の平均値と標準偏差を行列形式で表したものである。CCDGの数値は乱数（正規）から発生させている。その中身は25行（商圈）×2列の行列で、需要の平均値（平均100、標準偏差10）と標準偏差（平均10、標準偏差3）を用いて、数式（4）の形で特定している。次に、「CRDG」はCCDGで特定した平均と標準偏差を基に、数式（4）のように、乱数（正規）を発生させ、それらを一の位で四捨五入し、25行（小売店舗）×430列（日）の行列を作成したものである。

```
>x<-0 ..... (4)
>for(i in 1:25){x<-x+1
+ CCDG[x,1]<-rnorm(1,100,10) *CCDGの1列目
+ CCDG[x,2]<-rnorm(1,10,3) *CCDGの2列目
+ CRDG[x,]<-round(rnorm(430,CCDG[x,1],CCDG[x,2]))} *CRDG
```

「CRTS」はCRDGの前日までのデータから各小売りの平均需要（日）や標準偏差（日）を特定し、在庫目安を算出したものである。在庫目安は、森田（2004）に基づいて、サイクルタイム（発注間隔）にリードタイムを考慮した日数の平均需要に、危険係数（K）×標準偏差×（サイクルタイム+リードタイム）^{0.5}を加えたもので、数式（5）のように表すことができる。

```
x<-0 ..... (5)
>for(i in 1:25){x<-x+1
+ yy<-0
+ for(jj in 2:430){yy<-yy+1
+ CRTS[x,yy]<-round((N+L)*mean(CRDG[x,1:yy-1])
+ K*sd(CRDG[x,1:yy-1])*(N+L)^0.5)}}}
```

「RRIN」は在庫目安S（CRTS）から発注後N日内の販売数量を差し引いたもので在庫保有量になり、数式（6）の前半部分のように表すことができる。そして、「RRDP」は一

サイクル内での販売数量を集約したもので、数式(6)の後半部分のように表すことができる。

```

>ct<-420/N                                * ctはサイクル数（整数）…………… (6)
>x<-0
>for(i in 1:25){x<-x+1
+y<-0
+for(j in 1:ct){y<-y+1
+ll<-(y-1)*N+1l                                * 各サイクルの始まり
+RRDP[x,y]<-sum(CRDG[x,ll:ll+N-1])
+z<-0
+for(m in 1:N){z<-z+1
+ul<-ll+z-1                                * 各サイクルの終わり
+RRIN[x,ul]<-CRTS[x,3]-sum(CRDG[x,ll:ul])}}
```

「RWDP」は各卸売り店が各サイクル中に5店舗から受けた注文を集約したものである。そして「RWTS」は卸売り店からの受注（RWDP）に基づいて設定する在庫目安であるので、数式（7）のように表すことができる。「CWTS」もRWTSと同様に卸売り店の設定する在庫目安であるが、CWTSは前日までの販売データを小売店と共有している場合なので、CRDG（CRTSを卸売り店単位で集約したもの）から各卸売りの在庫目安を算出しているので、数式（8）のように表すことができる。CMTS（工場での在庫目安）も同様に算出することが可能である（数式（8）の最終式）。

```

>y<-0                                           …………… (7)
>for(j in 1:ct){y<-y+1
+xx<-0
+for(ii in 1:5){xx<-x+1
+llp<-(xx-1)*5+1
+ulp<-llp+4
+RWDP[xx,y]<-sum(RRDP[llp:ulp,y])
+RWTS[xx,y]<-round(mean(RWDP[xx,1:y-1])*(N+L)/N
+K*sd(RWDP[xx,1:y-1])*((N+L)/N)^0.5)}}
>yy<-0                                           …………… (8)
>for(jj in 1:430){yy<-yy+1
+xx<-0
+for(ii in 1:5){xx<-x+1
+llp<-(xx-1)*5+1
+ulp<-llp+4
```

多段階のプレーヤーの意思決定に基づくサプライチェーン全体の在庫量変動に関する考察

```
+ cwts[xx,yy] <- sum(CRDG[llp:ulp,yy])
+ CWTs[xx,yy] <- round(mean((cwts[xx,1:yy-1]))*(N+L)
+ sd(cwts[xx,1:yy-1])*K*(N+L)^0.5){
+ cmts[1,yy] <- sum(CRDG[,yy])
+ CMTs[1,yy] <- round(mean(cmts[,1:yy-1])*(N+L)+sd(cmts[,1:yy-1])*K*(N+L)^0.5){
```

「WMDP」は卸売りから工場へのサイクル単位での注文であるので、RWDPを集約したものとなる。そしてWMDPのデータを基に在庫目安を算出したのが「WMTS」となる。両者は数式(9)のように表現することができる。

```
> y <- 0 ..... (9)
> for(j in 1:ct){y <- y + 1
+ WMDP[1,y] <- sum(RWDP[1:5,y])
+ WMTs[1,y] <- round(mean(WMDP[1,1:y-1])*(N+L)/N
+ K*sd(WMDP[1,1:y-1])*((N+L)/N)^0.5)
```

工場の場合は、生産能力や生産効率などに起因する問題があるので、最適なサイクル(N)に関しては幅を持たせる必要がある。工場のサイクルの日数を1日から7日(ラグを考慮すると2日から8日)の在庫目安の推移は、数式(10)のように表すことができる。

```
> zz <- 0 ..... (10)
> for(mm in 1:7){zz <- zz + 1
> yy <- 0
> for(jj in 1:430){yy <- yy + 1
+ CMTs[zz,yy] <- round(mean(cmts[,1:yy-1])*(zz+L)+sd(cmts[,1:yy-1])*K*(zz+L)^0.5){
```

4. 分析結果

在庫目安の設定が注文時に重要な働きをするので、理想的な在庫目安に到達するまでの時間とプロセスに注目して、結果の説明をする。CRTSは前日までの消費の購入情報に基づいて、在庫目安を日々更新していくものである。表1では、CRDGから430日分のデータを基に算出した理想的な在庫目安の±5%範囲内に収まり続けるようになった最初の日数が示されている。25件の小売りの中で、17件ほどがサンプル対象期間の10日以内に収まるようになったが、残りの8件は収まっていなかった。RRINは、140回のサイクル(420日)中に小売りの保有する在庫水準の最大と最小値を示している。

表 1：消費者と小売りレベルの需要と在庫情報

CRDG (430日分の需要情報)				RRDP (140回分)		CRTS		RRIN (140回)	
商圈	平均値	標準偏差	在庫目安	平均値	標準偏差	理論値	±5%内	最大	最小
小売店 (1)	111.6	11.0	497.6	334.6	18.3	497.6	6	394	83
小売店 (2)	108.8	12.8	494.7	326.1	20.2	494.7	32	426	119
小売店 (3)	93.1	7.7	407.9	279.0	12.8	407.9	3	332	93
小売店 (4)	117.4	6.9	502.1	352.3	12.7	502.1	5	377	93
小売店 (5)	94.1	8.4	415.3	282.0	14.1	415.3	3	337	93
小売店 (6)	94.8	10.3	427.1	284.4	17.9	427.1	7	320	64
小売店 (7)	88.1	8.3	390.8	264.2	14.8	390.8	4	350	108
小売店 (8)	103.3	5.7	439.5	309.7	9.6	439.5	3	359	110
小売店 (9)	94.8	9.1	421.7	284.4	16.1	421.7	10	336	84
小売店 (10)	91.9	7.6	403.2	276.0	13.5	403.2	9	326	93
小売店 (11)	89.0	12.9	416.0	266.9	21.5	416.0	11	342	53
小売店 (12)	91.3	7.3	399.4	273.9	12.7	399.4	3	341	105
小売店 (13)	86.6	13.4	408.9	260.0	22.6	408.9	17	378	115
小売店 (14)	101.6	13.1	467.2	304.0	21.1	467.2	13	395	101
小売店 (15)	109.0	8.4	475.2	327.5	14.6	475.2	24	411	130
小売店 (16)	97.3	5.4	414.3	291.9	9.2	414.3	3	337	108
小売店 (17)	92.8	14.1	437.0	278.2	25.9	437.0	10	328	31
小売店 (18)	105.1	12.5	478.9	315.4	23.9	478.9	7	344	31
小売店 (19)	100.3	12.7	460.4	301.0	20.1	460.4	4	452	153
小売店 (20)	104.5	5.1	442.0	313.9	8.2	442.0	5	311	67
小売店 (21)	79.6	13.2	380.0	238.6	23.9	380.0	18	351	97
小売店 (22)	98.6	8.5	434.3	296.1	15.6	434.3	20	292	32
小売店 (23)	89.7	11.0	410.1	269.1	19.2	410.1	8	327	45
小売店 (24)	92.5	5.5	395.5	277.6	10.1	395.5	5	276	46
小売店 (25)	104.9	10.8	470.2	315.2	19.8	470.2	16	388	97
合計	2,440.7		10,889.1	7,321.8					

※在庫目安は4 (N=3、L=1) 日分の在庫目標

表2の上段は卸売りレベルで集約した一サイクル当たりの需要と在庫目安の推移を示したものである。CWTSは消費者の前日までの購買情報を共有して在庫目安を算出したものであるのに対し、RWTSは小売りから集約されたサイクル単位からの注文から在庫目安を算出したものである。最新の情報に更新するためには、一期遅れが生じ、さらに標準偏差を算出するのに少なくとも2つ以上のデータが必要であるので最短でも3日あるいは3回となる。集約を進めることにより、小売店単位や一日単位の平均需要は、数式(11)で示しているように分散が小さくなるので、期待値付近に収まりやすくなる。

$$V\left(\frac{\sum D_n}{N}\right) = E\left(\frac{\sum D_n - \mu}{N}\right)^2 = \frac{V(\sum D_n)}{N^2} = \frac{\sum [V(D_n)]}{N^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

直接的な情報を活用しなくても、集約されたデータを用いることによって、理想的な値に収まりやすくなる。同様のことは、表2の下段に示されている工場レベルでも言える。

表2：卸売りと工場レベルの需要と在庫情報

	RWDP (140回)			在庫目安	CWTS(日)	RWTS(回)
	平均値	最大	最小	理論値	± 5 %範囲内 (以降)	
卸売り (1)	1,574	1,664	1,463	2,200	3	3
卸売り (2)	1,419	1,499	1,340	1,978	3	3
卸売り (3)	1,432	1,547	1,326	2,028	5	4
卸売り (4)	1,500	1,648	1,378	2,112	5	3
卸売り (5)	1,397	1,486	1,287	1,967	3	5
工場	RWDP (140回)			在庫目安	CMTS(日)	RMTS(回)
	平均値	最大	最小	理論値	± 1 %範囲内 (以降)	
工場	7,322	7,510	7,121	9,997	8	3

表3では、工場レベルでは、生産活動や調達時間などによって、最適な生産間隔が異なる場合があるので、生産間隔が1日～1週間（リードタイム1日を考慮して2～8日）の場合の更新される在庫目安を理論値で除したものの推移を比較したものである（％で表記）。サイクル間隔が長くなればなるほど、理論値付近で安定的に推移することになる。数式（11）で示したように、工場レベルのように集約が進んだ場合、期待値付近に収束することになる。

表3：工場レベルのサイクル間隔が異なる場合の在庫目安の推移

CMTS s	理論値	最大	最小	範囲
2日 (N=1)	5046	100.8%	98.1%	2.7%
3日 (N=2)	7523	100.7%	98.5%	2.2%
4日 (N=3)	9995	100.7%	98.7%	2.0%
5日 (N=4)	12463	100.6%	98.8%	1.8%
6日 (N=5)	14929	100.6%	98.9%	1.7%
7日 (N=6)	17392	100.6%	99.0%	1.6%
8日 (N=7)	19854	100.6%	99.1%	1.5%

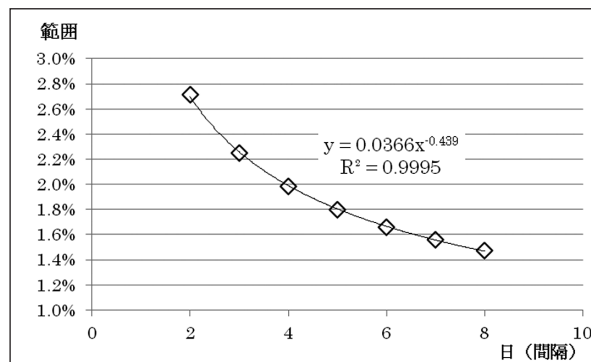


図3：工場レベルでのサイクル間隔と在庫目安の幅

5. おわりに

ブルウィップ効果は、サプライチェーン内の多段階のプレーヤーが各自にとって最適なバッチサイズや発注間隔などを設定することによって、需要情報の歪みが生じ、その歪みがサプライチェーンを遡りながら増幅されていく現象であると説明されることが多い。確かに、小売りから卸売りあるいは卸売りから工場への注文があった日とそうでない日などを日単位で考えれば、川上に遡るほど変動が大きくなると言えるかもしれない。しかし、各プレーヤーは最適なサイクル（発注間隔）を設定しているので、彼らの抱える需要をサイクル単位で捉える必要がある。本研究からは、トレンドや周期性などが無い場合は、分散している小売りからの注文を卸売りレベルに集約、さらに工場レベルに集約することによって需要の安定性が増した。このことは中心極限定と一致している。

本研究では、安定した需要下で、適正なマネジメントを行っていれば、ブルウィップ効果の悪影響がほとんど表面化しないことを確認した。しかし、今後は、ブルウィップ効果を検証するために、需要に周期性やトレンドなどを付与するかあるいはサプライチェーン内部のマネジメントの問題として歪みや遅れを想定し、更なる研究を進める予定である。

【参考文献】

- 森田道也（2004）『サプライチェーンの原理と経営』、サイエンス社。
- Bradley, P. J., Thomas, T. G., & Cooke, J. (1999) . Future Competition: Supply Chain vs. Supply Chain. Logistics Management and Distribution Report, 39 (3) , 20-21.
- Goldratt, E. M. and Cox, J. (1992) . The Goal: A Process of Ongoing Improvement. Second Rev. Ed. Croton-on-Hudson, NY: North River Press.
- Gopal, C. and G. Cahill (1992) , Logistics in Manufacturing, Homewood, IL: Business One Irwin.
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997) . Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. Management Science, 43 (4) , 546-558.
- Sunil, C. & Meindl, P. (2001) . Supply Chain Management. New Jersey, NJ: Prentice Hall.