非常時下でのサプライチェーンモデル分析

上　健吾

キーワード：SCM　定期発注方式　シミュレーション

１．はじめに

「在庫は持たない方が良い」という考え方がある[1]。そしてその言葉を裏付ける例として JIT(ジャストインタイム)システムにより、極めて少ない在庫で経営を行っている企業がある。JIT は災害など非常事態への対応が弱いという指摘がされているが[2]、非常事態が起こる確率が本当にわずかだとすれば、その確率を無視して無駄な在庫を持たない意思決定は適切なものと考えられる。

しかし 2011 年を振り返ると、日本では東日本大震災、タイでは大洪水という、非常時、つまり通常時では想定外の出来事が次々に起こった。その結果多くのサプライチェーンが崩壊し、完全復旧までに多くの時間を費やしている。現在でもハードディスクドライブの生産量減少による関連商品の値上げなど、サプライチェーンの崩壊が一般消費者に影響を与えている。少しずつではあるが、通常は想定外と思われている事象が起こる確率が無視できなくなっているように思われる。そうだとすると、企業は在庫所有の考え方を変える必要があるのではないだろうか。

本論文では、小売店に関わるサプライチェーンのモデルを作り、リードタイムの変化がサプライチェーン全体に与える影響を調べるためにシミュレーションを行う。そして在庫費用を観察してモデル分析を行う。このために必要となる在庫管理の考え方を第 2 節で紹介し、第 3 節でモデルの概要を示す。そして第 4 節では第 3 節で挙げたモデルの実行と分析を行う。

２．在庫管理の基礎理論

[1] 平野(1994) 15 頁～34 頁

[2] 西口(2007) 154 頁～155 頁

本節では、サプライチェーンモデルに使われる在庫管理の基礎理論を紹介する。在庫管理の方法は、発注量と発注時期によって決まる。これら 2 つの項目が、一定か不定かどうかで表 2.1 に示す 4 つのパターンに分類され、それぞれに対して様々な発注方式が提案されている。

表 2.1 基本的在庫管理方式

在庫管理方式	発注時期	発注量
発注点方式	不定	一定
定期発注方式	一定	不定
定量定期発注方式	一定	一定
不定量不定期発注方式	不定	不定

出典：吉田(1991) 71 頁を一部修正

ここではこれら 4 つの発注方式のうち、第 3 節で扱う定期発注方式について解説する。定期発注方式は一定の発注間隔を決め、その間隔ごとに発注量を決定する方法である。商品を販売する店を例に考えると、販売店は所有している在庫から需要に応じて商品を販売するが、その際に在庫切れを起こさないようにする必要がある。しかし在庫補充のために商品を発注しても、実際に配送されるまで数日を要するのが一般的である。この期間を調達期間またはリードタイムと呼ぶ。このことから販売店は需要と発注間隔、そしてリードタイムを考慮した上で発注量を決定しなければならない。

日々の需要が一定の場合、発注量は発注間隔とリードタイムの和に需要量を乗じたものから発注時点での在庫量を減じた量となる。ここで発注量を Q^*、発注間隔を T、リードタイムを LT、1 日の需要量を d、観察する日を t とし、在庫量を S(t) とすると、定期発注方式での発注量は 2.1 式のように示される。

$$Q^* = (T + LT) \times d - S(t) \qquad (2.1)$$
$$S(t) = LT \times d \qquad (2.2)$$

簡略化のために、まずは需要とリードタイムが完全に一定のケースを考える。この場合、在庫変動を示すグラフは図 2.1 のようになる。例えば d＝10、T＝7、LT＝4 の場合、発注量はリードタイムに関わらず必ず 70 となる。このように需要が完全に一定の場合、発注量は発注間隔のみに左右される。

次に需要が変動する場合を考える。ここでは毎日の需要量が平均 μ、分散 σ^2 の正

規分布（$N(\mu,\sigma^2)$ と記す）に従うと仮定する。また、日々の需要量は互いに独立であるとする。このとき、s 日間の需要量は $N(s\mu,s\sigma^2)$ に従い、図 2.2 に示されるように在庫量は変動する。

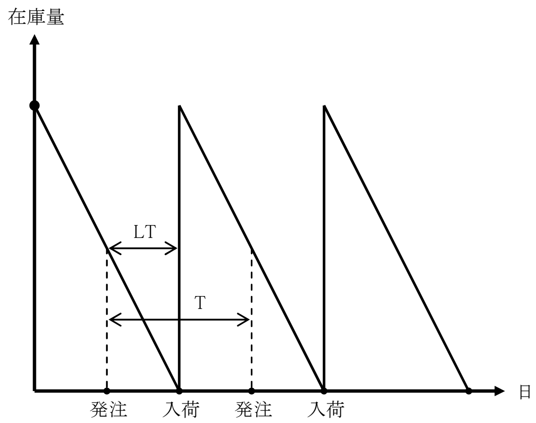

図 2.1 在庫変動のグラフ（需要一定時）

出典：平野（1994） 65 頁を参考に筆者作成

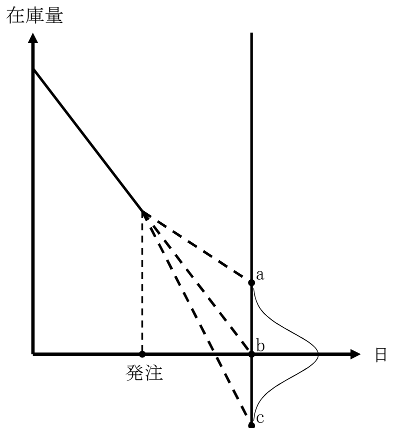

図 2.2 在庫変動のグラフ（需要変動時）

出典：平野（1994） 68 頁を参考に筆者作成

図 2.2 において、点 b を下回ると販売店は活動を継続できなくなる。そこで在庫切れを防ぐために、安全在庫と呼ばれる在庫水準を設定する。ただし、在庫は費用を発生させる原因となるので、必要以上に多くの在庫を保有するわけにはいかない。在庫

切れになる確率(欠品率)をどの程度に設定するかによって、顧客の需要を満たせる確率(サービスレベル)が決定する。サービスレベルは「1－欠品率」であり、図 2.3 の正規分布の黒色部分として表すことができる。例えば欠品率を 5%とすると、需要が変動しても 95%は需要に対応できるようになる。このように底上げされた分の在庫が安全在庫である。

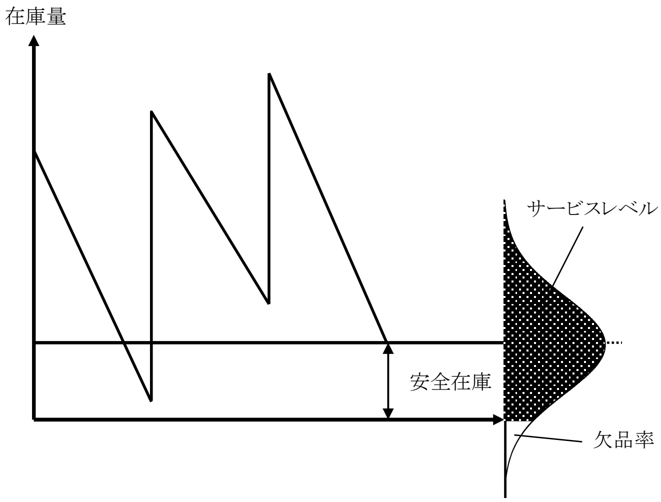

図 2.3 在庫変動のグラフ(安全在庫保有時)

出典：平野(1994) 67 頁を参考に筆者作成

安全在庫を考慮した時の発注量は 2.3 式のように示される。

$$Q^{*} = (T + LT)\mu + K - S(t) \qquad (2.3)$$

$$K = z\sqrt{T + LT}\sigma \qquad (2.4)$$

表 2.2 サービスレベルと z の関係式

サービスレベル(%)	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99.9
z	1.29	1.34	1.41	1.48	1.56	1.65	1.75	1.88	2.05	2.33	3.08

出典：久保(2001) 67 頁

ここで K は安全在庫量であり、z は安全係数と呼ばれる。z の値は、表 2.2 のように

サービスレベルに応じて決定される。

３．提案モデル

本論文では、工場・卸・販売店の 3 拠点からなる直列モデルを扱う。商品は工場で製造され、卸を経由して販売店に送られる。よって、販売店は卸に商品を発注し、卸は工場に発注する。これを図で示したのが図 3.1 である。

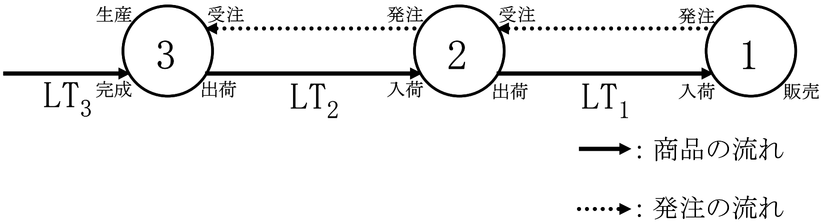

図 3.1 モデルの概念図

表 3.1 3 節で使用する文字と意味

使用する文字	意味
j (j=1, 2, 3)	拠点の番号
LT_j	拠点jへのリードタイム
$O_j(t)$	t 日目における拠点jの発注量
$I_j(t)$	t 日目における拠点jの入荷量
$D_j(t)$	t 日目における拠点jの需要量
$E_j(t)$	t 日目における拠点jの出荷量
$S_j(t)$	t 日目における拠点jの在庫量
$R_j(t)$	t 日目における拠点jの受注残量
μ_j	拠点jの1日の需要量
σ_j^2	拠点jの1日の分散
K_j	拠点jの安全在庫量

図 3.1 において、拠点(ノード)番号の 1,2,3 は販売店・卸・工場に対応している。また、実線の矢印は商品の流れを示し、点線の矢印は受発注の流れを示している。各拠点は定期発注方式により在庫を管理するものとする。また、t 日目に発注したものは、その上流で t+1 日目に確認され、同日中に出荷作業が行われる。出荷された商品

はリードタイム[3]の日数後に入荷される。需要量が在庫量と入荷量の和を上回った場合は受注残として認識され、出荷できる量を全て出荷する。

このように、各拠点では入荷量・出荷量・需要量・在庫量・受注残・発注量という6つの値を持つ。これらの量を文字として示したものが表 3.1 である。例えば $I_1(2)$ は販売店の 2 日目の入荷量、LT_2 は工場から卸へのリードタイムを示している。

次に全拠点に共通する設定を示し、補足が必要なものはその拠点ごとに再設定する。入荷量は、t－LT_j 日目における拠点 j＋1 の出荷量と等しい(3.1 式)。ただし、工場(拠点 3)に関しては商品を製造しているので、発注量がそのまま入荷量となる(3.2 式)。

$$I_j(t) = E_{j+1}(t - LT_j) \quad (j=1,2) \quad (3.1)$$

$$I_3(t) = O_3(t - LT_3) \quad (3.2)$$

需要量は拠点 j－1 が t－1 日目に拠点 j に対して発注した量とする(3.3 式)。ただし販売店(拠点 1)に関しては、$N(\mu,\sigma^2)$ に従うものとする(3.4 式)。

$$D_j(t) = O_{j-1}(t-1) \quad (j=2,3) \quad (3.3)$$

$$D_1(t) \sim N(\mu,\sigma^2) \quad (3.4)$$

出荷量は t 日目の需要と受注残に基づいて決定される。しかし、出荷量が在庫量と入荷量の和を上回っている場合、その差額は受注残として繰り越され、翌日以降の出荷となる(3.5 式)。

$$E_j(t) = \min(S_j(t-1) + R_j(t-1), I_j(t) + D_j(t)) \quad (3.5)$$

在庫量は t－1 日目の在庫量と t 日目の入荷量の和から、t 日目の出荷量を減じた量である。ここで、出荷量は t－1 日目の在庫量と t 日目の入荷量の和を超えないようにする(3.6 式)。また、どの拠点も初期在庫(t＝0 時点の在庫)は、リードタイム期間分

[3] ここでのリードタイムは、上流拠点が下流拠点に向けて出荷した商品が届くまでの日数を示している。また LT_3 に限り、商品の生産時間を示している。

の在庫を所有しているものとする(3.7式)。

$$S_j(t)=\max(S_j(t-1)+I_j(t)-E_j(t),0) \qquad (3.6)$$

$$S_j(0)=LT_j\mu_j+K_j \qquad (3.7)$$

受注残はt－1日目の受注残とt日目の需要量の和が、t期の出荷量を上回っている場合、その量が計上される(3.8式)。

$$R_j(t)=\max(R_j(t-1)+D_j(t)-E_j(t),0) \qquad (3.8)$$

発注量は定期発注方式の定める通りに決定されるものとする(3.9式)。

$$O_j(t)=\max((T_j+LT_j)\mu_j+K_j+R_j(t)-S_j(t),0) \qquad (3.9)$$

在庫管理費用は在庫維持費と機会損失費の2つとし、各拠点が所有する商品1個あたりの在庫維持費を2、受注残発生による商品1個あたりの機会損失を5とする。以上が本論文で扱うモデルの設定である。

４．シミュレーション

表4.1 パラメータの数値

使用する文字	値
t	$0 \leqq t \leqq 60$
LT_j	$LT_2=4$　$LT_3=2$
T_j	$T_1=3$　$T_2=6$　$T_3=4$
z	1.65
μ, σ^2	$\mu=8$　$\sigma^2=4$

本節では第3節で作成したモデルに具体的な数値を入力し、シミュレーションを実

施してデータの収集を行う。入力する数値は定期発注方式における発注間隔とリードタイム、販売店への需要、そして在庫の安全係数である。これらの値は表 4.1 のように設定する。本節で扱うモデルは、正常時のモデルと非常時のモデルの 2 つに分けることができる。どちらのモデルでも共通していることは、変数となるのは LT_1 のみで、LT_2 と LT_3 は固定する。

4-1 シミュレーション 1

まず正常時のモデルでは、LT_1 を 2 から 12 まで 2 ずつ増加させる。ここで、販売店の受注残の取り扱い方の違いにより、正常時のモデルをさらに 2 つに分ける。これまでの設定通りに受注残を翌日に繰り越すモデルをモデル 1、受注残を翌日に繰り越さないモデルをモデル 2 とする。受注残は出荷量にも影響を与える要素なので、モデル 2 では販売店の受注残を表わす式と、出荷量を表わす式が以下のように変わる。

$$R_1(t) = \max(D_1(t) - E_1(t), 0) \qquad (4.1)$$
$$E_1(t) = \min(S_1(t-1), I_1(t) + D_1(t)) \qquad (4.2)$$

以上の条件で 60 日分の在庫費用と機会損失費の合計を 2 万個ずつ集計し、得られたデータから費用の分布と基本統計量を調べる。分析の結果、正常時モデルはすべて正規分布に近い形が確認された。例として図 4.1 および図 4.2 に、モデル 1、モデル 2 の LT_1 が 4 の時の費用の分布図を載せている。モデル 1 およびモデル 2 の基本統計量は、それぞれ表 4.1、表 4.2 としてまとめた。

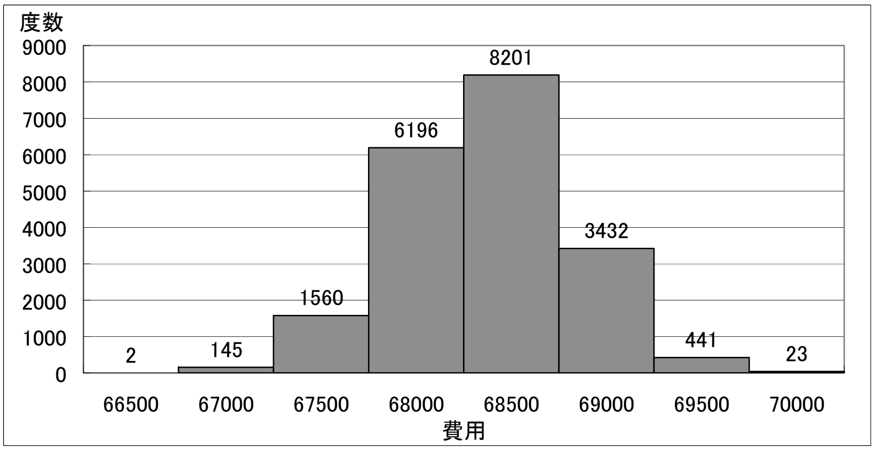

図 4.1 モデル 1 の費用分布図

基本統計量から判断すると、最大値や最小値、および平均に関しては同様の結果を示している。しかし標準偏差を見ると、LT_1の値が増加するにつれて 2 つのモデルに差が出てきている。このことから受注残を翌日に繰り越さない方が、分布が安定していると言える。

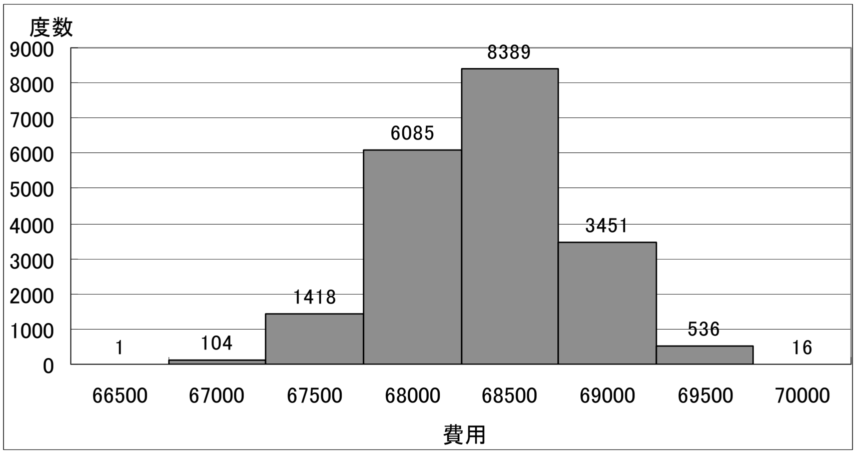

図 4.2 モデル 2 の費用分布図

表 4.2 モデル 1 の基本統計量

基本統計量 \ リードタイム	2	4	6	8	10	12
平均値	65672.59	68113.42	70967.24	70723.14	81833.38	92250.78
標準偏差	446.50	447.61	537.64	666.63	2067.83	1483.71
最小値	63980	66358	68896	68349	73284	85950
最大値	67492	70046	73074	73628	90009	97359

表 4.3 モデル 2 の基本統計量

基本統計量 \ リードタイム	2	4	6	8	10	12
平均値	65710.26	68129.04	70959.57	70723.56	80718.92	90107.84
標準偏差	437.48	441.62	533.73	670.17	1506.35	1198.12
最小値	64057	66434	69127	68590	72510	85721
最大値	67683	69724	73032	73614	85226	95133

4.2 シミュレーション 2

次に非常時のモデルでは、LT_2、LT_3 は正常時モデルと同じ値とするが、LT_1 は確率的に変動する。ここでは $LT_1=4$ が 99%、つまり正常時のものとして起こり、$LT_1=8$、$LT_1=20$ がそれぞれ 0.9%、0.1%の確率で起こるものとして LT_1 を乱数化した。ここで、非常時モデルも販売店の受注残に関して 2 つに分類される。販売店の受注残を翌日に繰り越すモデルをモデル 3、繰り越さないモデルをモデル 4 とする。ここでもシミュレーション 1 と同様に 60 日分のデータを 2 万個集計する。

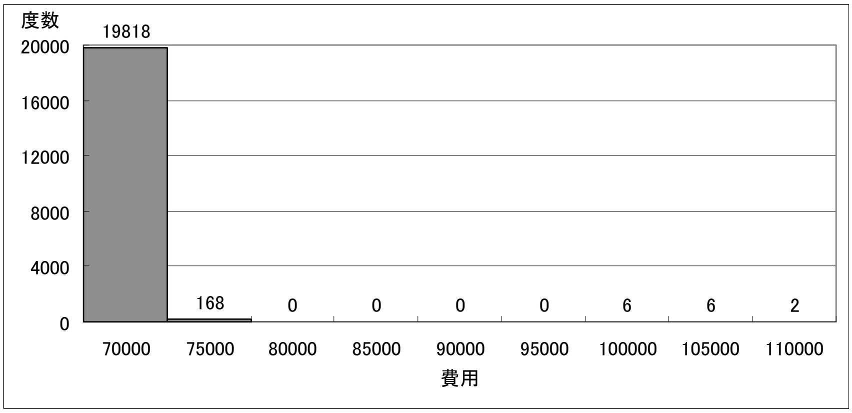

図 4.3 モデル 3 の費用分布図

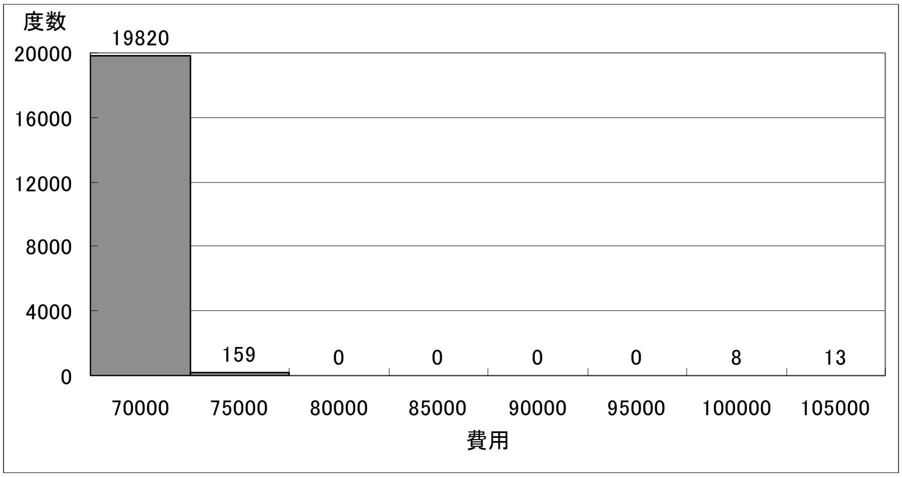

図 4.4 モデル 4 の費用分布図

分析の結果、非常時モデルは強いて言うと指数分布に近い形になり、リードタイムの発生確率が示す通り、分布が左側に集中している。

また、データのほとんどがモデル1およびモデル2の費用分布の範囲内に含まれている。図4.3と図4.4はそれぞれモデル3、モデル4の費用分布で、表4.3はモデル3およびモデル4の基本統計量である。

表4.3 モデル3・モデル4の基本統計量

リードタイム / 基本統計量	モデル3	モデル4
平均値	68160.91	68177.81
標準偏差	1026.69	1090.90
最小値	66340.00	66048.00
最大値	106837.00	101844.00

4-3 シミュレーション3

このモデルはビールゲームを参考にしたものである。ビールゲーム型サプライチェーンの全体最適化を試みる前例として、日高(1998)が行った方法をとりあげ、これが本モデルでどのような結論をもたらすかを示す。

日高のモデルはリードタイムが一定のモデルであり、ランダムに変化する場合は検証されていない。よって、非常時下でもサプライチェーン全体の改善が示されるのかを検証する。日高は『SDモデリング環境の現状とリエンジニアリングへの適用例』の中で、ビールゲーム型サプライチェーンモデルの改善案として、①ジャストインタイムシステムの導入、②卸をなくした産地直送型モデル、③拠点間での情報共有の3つを提案している。この中で費用を最も小さくできたのは②の産地直送型モデルだった。ここで産地直送型モデルとは、卸をなくして工場から販売店に直接商品を届けるというものである。ここでも産地直送型モデルを扱い、新たにデータを2万個集める。

図4.5および図4.6はそれぞれ直送モデル3、直送モデル4の費用分布で、表4.4は直送モデルの基本統計量である。表4.3と表4.4を比較して分かるように、産地直送型モデルでは卸をなくしたことで費用の最大値と最小値の差が小さくなっている。このことから産地直送型モデルは非常時でも一定の効果をもたらす可能性があると言える。

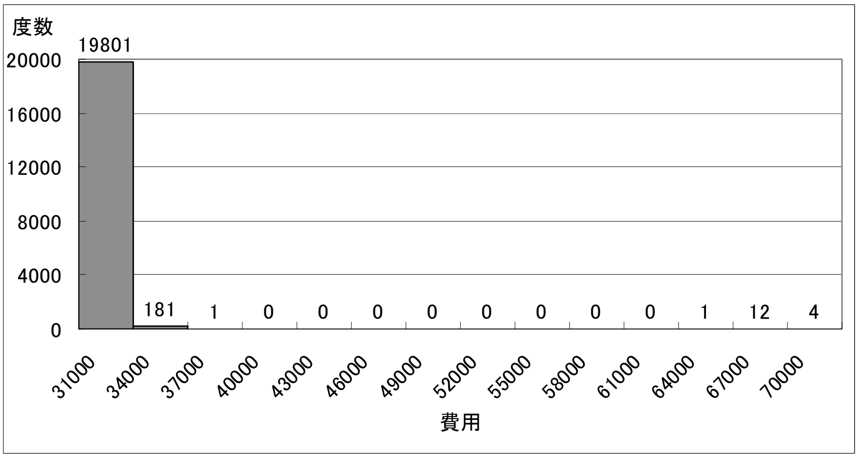

図 4.5 直送モデル 3 の費用分布

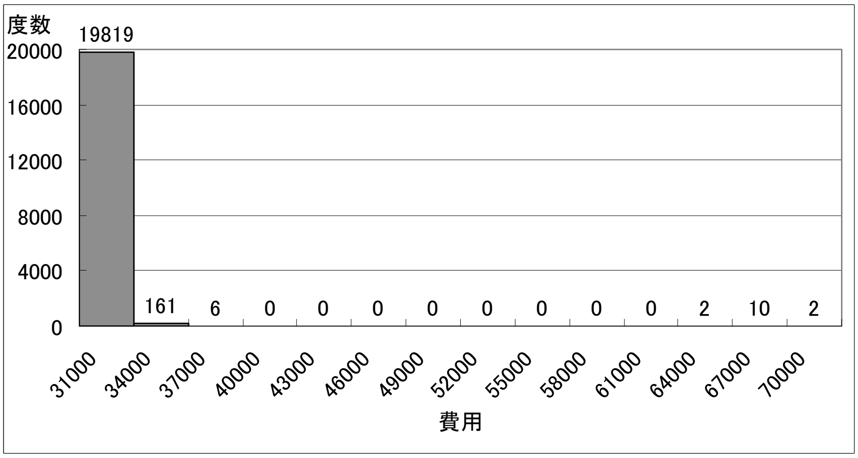

図 4.6 直送モデル 4 の費用分布

表 4.4 直送モデル 3・直送モデル 4 の基本統計量

基本統計量 ＼ モデル	直送モデル3	直送モデル4
平均値	29599.20	29615.13
標準偏差	1144.11	1236.73
最小値	28581.00	28648.00
最大値	68082.00	67795.00

5. 結び

費用に焦点を当て、リードタイムが与える影響を観察してきた。実際に 1%の確率で起こる非常時のために、サプライチェーン全体の費用が 3 万程度増加することを示せたのは 1 つの結果といえるだろう。しかし標準偏差に焦点を当ててみると、値が減少せずに増加している。理想は直送モデルで費用と標準偏差の値を減少させることだったが、そのモデル作成は今後の課題としたい。

＜参考文献＞

久保幹雄『ロジスティクス工学』朝倉書店, 2001

黒野宏則「構造的動的モデリングによる社会システム論の構築に向けて:「ビールゲーム」実験から得られたこと」市川新『財団法人科学技術融合振興財団研究助成成果報告書・問題解決のためのゲーミングシステムダイナミックスの研究開発』, 1998

西口敏宏『遠距離恋愛と近所づきあい―成功する組織ネットワーク戦略』 NTT 出版, 2007

日高昇治「SD モデリング環境の現状とリエンジニアリングへの適用例」市川新『財団法人科学技術融合振興財団研究助成成果報告書・問題解決のためのゲーミングシステムダイナミックスの研究開発』, 1998

平野裕之『在庫管理の実際』 日経文庫, 1994

藤野直明『サプライチェーン経営入門』 日経文庫, 1999

柳沢滋『在庫管理のはなし』 日科技連, 1988

吉田照彦『生産システム理論』工学研究社, 1991