

# 部品サプライヤーの発注方式の評価

上 野 信 行

## 概 要

部品サプライヤーは、外部から自らの製品生産に必要な部品（購入部品という）を調達し、在庫として適正規模を確保する。これを部品補充という。しかし、近年、リスク感度の高まりとともに、顧客からの製品需要の変動等による過剰在庫や在庫品切れをリスクととらえ、購入部品在庫の補充についても対策が求められている。

不確実な環境における生産・在庫補充方法については多くの研究が進められ、従来から安全在庫方式、基点在庫方式、s-S在庫補充方式などの種々の手法が提案されているが、需要の変動が少ない場合やコスト中心の管理法であるといえる。

一方、需要の変動によって引き起こされるリスクがあり、これを不確実性リスクと呼ぶ。リスクの表現は、そのリスク量の期待値と期待値周りのバラツキで表わされることが多い。需要の不確実性から生ずるリスクとその対策については、変化の様相を「需要のトレンド」によるもの、内示と確定注文のブレに代表されるように「需要のバラツキ」によるもの、日常的な管理手法では解決できない「需要の急激な変化」によるものに区別し、それぞれに対応能力を強化することが必要である。

本論文では、従来のコスト中心の在庫補充方法ではなく、リスクの視点を加味した発注方式を扱う。すなわち、需要の不確実性から生じる変化について、「需要のトレンド」によるもの、内示と確定注文のブレに代表されるように「需要のバラツキ」によるもの、日常的な管理手法では解決できない「需要の急激な変化」によるものへの対応能力をそれぞれフレキシビリティ（柔軟性）、ロバストネス（強韌性）、レジリエンス（回復・継続

性)ととらえ、方式を比較するに際して、従来の指標に加えてフレキシビリティ指標、ロバストネス指標を考案する。発注方式の評価に際しては、発注・在庫シミュレーションモデルを作成し、コスト面、リスク面、および提案した指標を用いて、3つの購入部品を対象に種々の発注方式の比較検討を行う。

キーワード 内示生産システム 部品補充 安全在庫方式 基点在庫方式 s-S 在庫補充方式 リスク フレキシビリティ ロバストネス レジリエンス 発注方式 部品サプライヤー 評価

## 1. はじめに

部品サプライヤーは、外部から自らの製品生産に必要な部品（購入部品という）を調達し、在庫として適正規模を確保する。これを部品補充という。しかし、近年、リスク感度の高まりとともに、顧客からの製品需要の変動等による過剰在庫や在庫品切れをリスクととらえ、購入部品の補充についても対策が求められている。

不確実な環境における生産・在庫補充方法については多くの研究が進められ、従来から安全在庫方式、基点在庫方式、s-S 在庫補充方式などの種々の手法が提案されてきている<sup>1-3)</sup>。また、充足率指標を用いて数理計画法により生産量を定める方法が提案されている<sup>4,5)</sup>。安全在庫方式は、需要量のばらつきを吸収するバッファとなる安全在庫を求めるに際して、在庫品切れ率を所与とする。この確率でぴったりあらわされる在庫不足の機会となるような在庫レベルの持ち上げ（増加）量を示している。従来から多用されているが、需要量の期待値が一定となる期間に適用せざるを得ないので、需要の変化（トレンド）がある場合への適用は様々な工夫がある。基点在庫方式では、在庫コストと在庫品切れペナルティコスト（在庫不足による機会損失を金額で表現したもの）の合計のコストを最小化するように期別の在庫補充量を定めるものであり、コスト中心の管理法であるとい

える。実務上、在庫品切れペナルティコストの見積もりが困難であるという課題がある。s-S 在庫補充方式は、発注するときの費用（発注費用）が無視できない場合に用いられ、在庫コストと在庫品切れペナルティコストと発注費の合計のコストを最小化するように期別の在庫補充量を定めるものである。

一方、需要の変動によって引き起こされるリスクを不確実性リスクと呼ぶ。内示数量と確定注文数量の間に表れる需要量の変動（ブレ）によって在庫切れが生ずることなどのリスクをいう。リスクの表現は、そのリスク量の期待値と期待値周りのバラツキで表わされることが多い<sup>6,7)</sup>。

需要の不確実性から生ずるリスクとその対策については、変化の様相を「需要のトレンド」によるもの、内示と確定注文のブレに代表されるように「需要のバラツキ」によるもの、日常的な管理手法では解決できない「需要の急激な変化」によるものに区別し、それぞれに対応する能力を強化することが必要である<sup>8)</sup>。

本論文では、従来のコスト中心の在庫補充方法ではなく、リスク視点から、従来の在庫品切れ確率、充足率などに加えて新しい指標を加味した発注方式の評価を行う。すなわち、まず、発注業務と発注の仕方（週間の注文日、発注回数、内示、補充ルール等）の違いによる様々な発注方式を説明する。つぎに、需要の不確実性によって生じる変化の様相と対応能力の内容を規定する。「需要のトレンド」によるもの、内示と確定注文のブレに代表されるように「需要のバラツキ」によるもの、日常的な管理手法では解決できない「需要の急激な変化」によるものへの対応能力をそれぞれフレキシビリティ（柔軟性）、ロバストネス（強韌性）、レジリエンス（回復・継続性）にとらえ、方式を比較するに際して、フレキシビリティ指標、ロバストネス指標を考案する。発注方式の評価に際しては、発注・在庫シミュレーションモデルを作成し、コスト面、リスク面、および提案した指標を用いて、3つの購入部品を対象に、3種の発注方式の比較検討を行う。

本論文の構成は、

2. は、サプライヤーにおける様々な発注方式
  3. は、従来の在庫補充方式と課題
  4. は、フレキシビリティ・ロバストネス・レジリエンスと評価指標
  5. は、シミュレーションによる発注方式の評価
- である。

## 2. サプライヤーにおける様々な発注方式

### 2.1 発注業務

企業の発注業務は、自社の生産に必要な資材・部品を適正に調達することである。サプライヤーにとって顧客に製品を安定供給するためには、製造に先だって必要な資材・部品が適正なタイミングで、適正な数量が確保されていなければならない。

図1に代表的なサプライヤーの発注業務の仕組みを示す。発注に際しては、サプライヤーから部品納入業者へは、確定注文、日別内示、月別内示の3種の情報が伝えられる。

- (1) 確定注文 発注日(図中の▼印)から一定期間先(図1の場合は、翌々週)の1週間分の納入指示を行う。図中のAの部分である。
- (2) 日別内示 確定注文の翌週の1週間分の納入予定であり、内示として伝達する。図中のBである。これは、部品納入業者にとっての短期的な生産・出荷準備情報となる。
- (3) 月別内示 日別内示期間以降、注文日の翌々月末までの納入予定であり、翌月は日別、翌々月は月合計の納入予定であり、内示と

		M0月								M1月								M2月	M3月								
		W3週				W4週				W1週		W2週		W3週		W4週											
確定注文	注文日の翌々週の一週間	▼																A									
日別内示	確定注文期間の翌週の一週間	▼																B									
月別内示	日別内示期間以降注文日の翌々月末迄	▼																C									

図1 代表的なサプライヤーの発注業務の仕組み

して伝達する。図中のCである。これは、部品納入業者にとっての短・中期的な生産・出荷準備情報となる。

## 2.2 発注業務の規定

図1の場合では、毎週1回、月曜日に、2週間先の1週間（翌々週の火曜日から翌々週の月曜日まで）分が確定発注されることを示している。

したがって、発注業務を規定するためには、

- ①注文日、1週間当たりの発注回数と確定注文期間
- ②日別内示に対する内示日と内示期間
- ③月別内示に対する内示日と内示期間
- ④確定注文期間と内示期間における注文数量と内示数量の決め方
- ⑤手持ちの在庫量把握タイミングと補充ルール
- ⑥搬入ルール

等を明確にすることが必要である。

これらをどのように決定するかにより、様々な発注方式が考案される。

## 2.3 様々な発注方式

例えば、発注方式として、

- ①週1回発注で確定期間が翌々週の1週間の場合の発注方式（図1に相当する）
- ②週1回発注で確定期間が翌週の1週間の場合の発注方式（図2参照）
- ③週2回発注で確定期間がそれぞれ1週間先の3日間と2日間の場合の発注方式（図3参照）

特に、在庫把握タイミングにおける在庫量レベルを基に注文数量（搬入量）、搬入日をどのように決めるかは重要な課題であり、従来から在庫補充問題と言われてきた。

		M0月				M1月				M2月	M3月
		W3週	W4週	W1週	W2週	W3週	W4週				
確定注文	注文日の翌週の一週間	▼	A								
日別内示	確定注文期間の翌週の一週間	▼		B							
月別内示	日別内示期間以降注文日の翌々月末迄	▼			C						

図2 週1回発注方式

		M0月				M1月				M2月	M3月
		W3週	W4週	W1週	W2週	W3週	W4週				
確定注文	月：翌週の月～水 水：翌週の木～金	▼	A1	A2							
日別内示	月：確定期間以降注文日の3ヶ月前の月末迄	▼	B								
月別内示	なし										

図3 週2回発注方式

### 3. 従来の在庫補充方式と課題

調達リードタイムは1日とする。すなわち、発注日の翌日（朝）には、購買部品が納入されるとしておく。

#### 3.1 安全在庫方式

従来から、需要の変動に対応するためのバッファとなる在庫を安全在庫と称している。在庫のバラツキ（=需要のバラツキ）を $\sigma$ 、調達リードタイムを $L$ 、安全在庫係数を $k$ とすると、

$$\text{安全在庫量} = k \times \sigma \times \sqrt{L} \tag{3.1}$$

となる。すなわち、安全在庫（Safety Stock）が3つの要因（安全在庫係数、

需要のバラツキ，調達リードタイム）によって決まることを示している<sup>2)</sup>。ここで，安全在庫係数は許容される在庫品切れ率が決まれば求めることができるパラメータであり，在庫品切れ率5%の場合では， $k=1.645$ である。安全在庫方式は，目標とする安全在庫量を確保するように在庫補充を行う方法である。従来から多用されているが，需要量の期待値が一定となる期間の範囲内に適用せざるを得ないので，需要の変化（トレンド）がある場合への適用は様々な工夫がある。

課題としては，現実に推移する在庫のうち安全在庫量をどの範囲として特定するか，どの時点の在庫が安全在庫量を確保していればよいか？など運用上のバリエーションは多岐にわたる。

### 3.2 基点在庫方式

この方法は在庫コストと在庫品切れペナルティコストの合計のコストを最小化するように在庫目標（これを基点在庫という）を決め，この基点在庫を確保するように，補充量を求めることである。

単位あたりの在庫コスト  $h$ ，単位あたりの在庫品切れペナルティコスト  $b$  とすると，基点在庫レベル  $S^*$  は，不確実な需要量  $z$  の分布関数  $F(z)$  を用いて，

$$\text{基点在庫の関係式： } F(S^*) = b / (b + h) \quad (3.2)$$

となる。分布関数  $F(z)$  の逆関数  $F^{-1}$  を用いて，

$$\text{基点在庫レベル： } S^* = F^{-1}(b / (b + h)) \quad (3.3)$$

から求めることができる<sup>1,2)</sup>。

これをもとに繰越在庫量を  $S_0$  としたとき，

(i) 繰越在庫量  $S_0 \leq S^*$  なら，補充量  $x^*$  は，

$$x^* = S^* - S_0 = -S_0 + F^{-1}(b / (b + h)) \quad (3.4)$$

(ii) 繰越在庫量  $S_0 > S^*$  なら，補充量  $x^* = 0$  (3.5)

とすればよい。

すなわち，基点在庫方式（base-stock policy）とは，「もし繰越在庫量

が $S^*$ より小さければ、 $S^*$ まで引き上げ（補充し）、繰越在庫量がもともと $S^*$ 以上であれば、なにもしない（補充しない）」という在庫補充の方法である。

使用上の注意点としては、①単位あたりの在庫品切れペナルティコスト $b$ が求まっていること②発注のための経費（例えば、通信費、情報システム費、運送費など）がかからないことである。

課題としては、①補充量が在庫コスト、在庫品切れペナルティコストで決定されるコスト中心の管理方法であり、②不確実な需要量は分布関数 $F(z)$ のみで規定されることから、需要変動（トレンド）などによるリスクの考慮は限定される。

なお、発注のための経費を考慮する場合は、 $s-S$ 在庫補充方式となる<sup>1,2)</sup>。

## 4. フレキシビリティ・ロバストネス・レジリエンスと評価指標

### 4.1 フレキシビリティ・ロバストネス・レジリエンス

需要の変動によって引き起こされる不確実性リスクは様々である。例えば、景気変動などによる需要のトレンドの変化や内示数量と確定注文数量の間に表れる需要量の変動（ブレ）によって在庫切れが生ずることなどのリスクがある。リスクの表現は、そのリスク量の期待値と期待値周りのバラツキで表わされることが多い<sup>6,7)</sup>。すなわち、需要量全体の変化は、①トレンドとしての変化と②バラツキとしての変化と③大きくかつ急激な変化が混在していると考えられる<sup>8)</sup>。

リスクへの対応力をフレキシビリティ、ロバストネス、レジリエンスの視点から考察する。それぞれについて、多くの研究者が定義や意味を当てはめている<sup>9-13)</sup>。ここではフレキシビリティ（柔軟性）はトレンドとしての変化への対応、ロバストネス（頑強性）はトレンドに加えられる微小な変化（ばらつき）への対応、レジリエンス（継続性・回復力）は日常的な対応では不可能な激変への対応力と解釈する。

発注方式を強化するに際しては、従来の指標に加えて、それぞれの方式

がフレキシビリティ、ロバストネスの能力を有しているかどうかを評価しておくことが重要である。

発注に伴う在庫管理面においてこれらの能力を高めることの効果を述べる。在庫管理面におけるロバストネスの能力が高いとは、在庫の微小な変化（ばらつき）が小さいことであり、置き場スペースや品質管理のための特殊な保管設備容量が抑制できることを意味している。また、フレキシビリティの能力が高いとは、トレンドとしての変化が少ないことであり、置き場スペースや特殊な保管設備容量が抑制でき、漸増する在庫予想に対してこまめな配置換えによる置き場効率の悪化防止や現物管理工数等が抑制できることになる。したがって、これらの能力を高める対策をとることは、結果として、変動する需要への対応力が増すことを意味している。

## 4.2 評価指標の考案

需要の不確実性が少ない場合で、かつコスト面からの評価指標としては、平均在庫量、平均搬入量、平均搬入回数等がある。需要の不確実性などのリスク面を考慮する場合の評価指標としては、平均在庫切れ回数、充足率等がある。これらに加えて、フレキシビリティ・ロバストネスの視点から新たな評価指標を提案する。

### (1) ロバストネスの視点からの指標

一定期間においてバラツキ（微小な変動）に対する能力を評価する指標（これをロバストネス指標と呼ぶ）である。したがって、指標としては、「一定期間における月ごとの平均値からの差の分散の平方根（標準偏差）」を用い、この指標が対策の前後における変化（増減）を調べる。

対象期間  $n$  ヶ月、第  $i$  月  $j$  日の事象を  $x_{ij}(i=1, \dots, n)$ 、第  $i$  月の平均値を  $x_i$  とすると、

$$\text{ロバストネス指標} : \sqrt{\text{Var}(x_{ij} - x_i)} \quad (4.1)$$

この指標の図的解釈を図4(c)に示す。 $\text{Var}(x_{ij} - x_i)$  は、データ群  $(x_{ij} - x_i)$  の分散をとることを表す。

## (2) フレキシビリティの視点からの指標

一定期間においてトレンドの変化に対する能力を評価する指標（これをフレキシビリティ指標という）である。何をトレンドととらえるかは一般的には困難であるが、本研究で扱う内示生産システムにおける需要量が月の単位で大きく変化することに着目して、変化も月ごとに特徴的に表れると考え、月ごとの平均値の変化（増減）を調べる。この指標の図的解釈を図4 (b) に示す。月ごとの平均値の一定期間範囲における最大値と最小値の差を意味するものであるが、最大値、最小値が突発的な事象や特異事象に依存する場合があります、単純には使えない。それで、一定期間範囲における月別平均値の標準偏差 ( $\sigma$ ) を求め、 $\pm 2\sigma$ 、 $\pm 3\sigma$  の範囲における最大値と最小値の差で表わす。

すなわち、

フレキシビリティ指標 ( $2\sigma$ ) : 月別平均値の $\pm 2\sigma$ の範囲における最大値と最小値の差

フレキシビリティ指標 ( $3\sigma$ ) : 月別平均値の $\pm 3\sigma$ の範囲における最大値と最小値の差

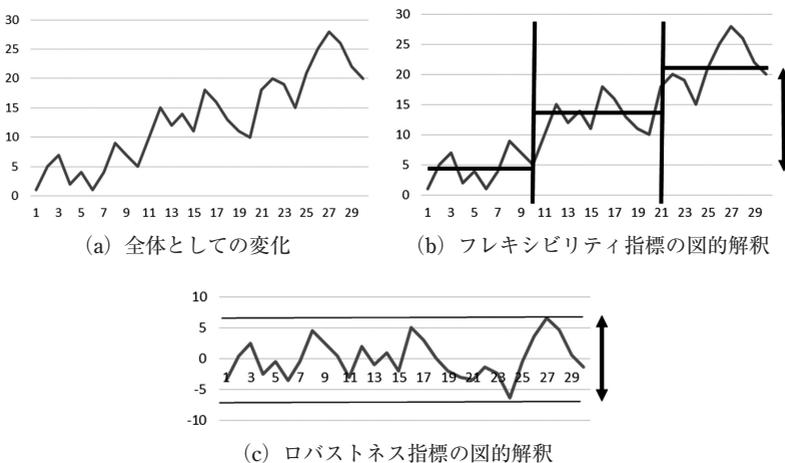


図4 ロバストネス指標とフレキシビリティ指標の図的解釈

## 5. シミュレーションによる発注方式の評価

### 5.1 発注・在庫シミュレーションモデル

本論文では、Microsoft Excel を用いて次の3種の発注方式でのシミュレーションを行う。

- ①週1回発注で確定期間が翌々週の1週間の場合の発注方式（Ⅰ型と呼ぶ）
- ②週1回発注で確定期間が翌週の1週間の場合の発注方式（Ⅱ型と呼ぶ）
- ③週2回発注で確定期間がそれぞれ1週間先の3日間と2日間の場合の発注方式（Ⅲ型と呼ぶ）

### 5.2 Excel によるシミュレーションの方法

#### (1) Excel シミュレーションシート

シミュレーションを行うにあたって作成したExcelシミュレーションシートを図5、6に示し、その計算方法を説明する。

	初期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	月	
① 内示	-	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
② 基準搬入量	-	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360
追加搬入量	-					0						0						3745
搬入量合計	-	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	5105
③ 工場使用量	-	1625	1581	1598	1690	1601	1605	1612	1411	1505	1636	1780	1665	1615	1453	1680	1524	
④ 安全在庫目標	-	4816	4836	4845	4841	4842	4850	4846	4848	4853	4866	4869	4868	4856	4865	4888	4871	
⑤ 繰越在庫	4800	4535	4314	4076	3746	3505	3260	3008	2957	2812	2536	2116	1811	1556	1463	1143	4724	
⑥ 緊急発注量	-					0					0							
⑦ 判定	-	□	□	□	□	□	□	□	□	□	×	×	×	×	×	×	□	
⑧ 充足量	-	1625	1581	1598	1690	1601	1605	1612	1411	1505	1636	1780	1665	1615	1453	1680	1524	

図5 週1回発注で確定期間が翌週の1週間の場合の発注方式（Ⅱ型）のシミュレーションシート

	初期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	月	
① 内示	-	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
② 基準搬入量	-	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360
追加搬入量	-					0					0	2449						0
搬入量合計	-	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360	3809	1360	1360	1360	1360	1360	1360
③ 工場使用量	-	1510	1715	1666	1658	1684	1489	1681	1638	1574	1445	1534	1422	1713	1695	1641	1617	
④ 安全在庫目標	-	4821	4830	4807	4794	4788	4774	4776	4767	4775	4789	4811	4819	4838	4818	4809	4800	
⑤ 繰越在庫	4800	4650	4295	3989	3691	3367	3238	2917	2639	2425	2340	4615	4553	4200	3865	3584	3327	
⑥ 緊急発注量	-					0				0	2449			0				
⑦ 判定	-	□	□	□	□	□	□	□	□	□	×	□	□	□	□	□	□	□
⑧ 充足量	-	1510	1715	1666	1658	1684	1489	1681	1638	1574	1445	1534	1422	1713	1695	1641	1617	

図6 週2回発注で確定期間がそれぞれ1週間先の3日間と2日間場合の発注方式（Ⅲ型）のシミュレーションシート

図5をもとにシミュレーションシートの各行の説明を行う。

- ①内示…内示数1600としていることがわかる。ケースの条件設定については後述する。
- ②基準搬入量…最小レベルの工場使用量と同じとしている。  
基準搬入量 = 内示 - (基準の標準偏差) × 3 である。
- ③工場使用量…工場の生産レベルに合わせて購入部品を使用すると考える。工場の生産トラブル、内示のブレ等の不確実な要因により工場使用量がブレることを表現するために、シミュレーションに乱数<sup>14)</sup>を用いる。現実的には、生産数量は極力一定にしているにもかかわらず、内示数量は変動するというケースが多いが、シミュレーションの技巧上、内示数量が一定で、工場使用量のブレが起こると考える。
- ④安全在庫目標…工場使用量の30日分の平均値 × 3 日分
- ⑤繰越在庫…初期値は内示 × 3 日分（例えば、1600 × 3 = 4800）と想定。
- ⑥発注量…安全在庫運用ルールに基づいている。指定期日において「繰越在庫が安全在庫目標1/2以上ならば、そのまま」とし在庫不足とは判断しない。「繰越在庫が安全在庫目標1/2未満であれば、安全在庫目標レベルに達するように補充する」とする。そのために、1/2未満であれば、緊急発注し、翌日に搬入するとする。
- ⑦判定…日ごとに繰越在庫レベルを区分するために下記のように記号表示する。
  - ・繰越在庫が安全在庫目標以上ならば「○」を表示
  - ・繰越在庫が安全在庫目標1/2以上ならば「□」を表示
  - ・繰越在庫が安全在庫目標1/2未満ならば「×」を表示
  - ・繰越在庫が0未満ならば「××」を表示、在庫品切れが起こったことを表わす。
- ⑧充足量…当日の工場使用量へ充当できる部品の数量。全量充当できていれば、工場使用量の数値が表示されている。全量充当できていなければ、充当できた数量だけ表示されている。

## (2) シミュレーションの方法

1回につき1000日間のシミュレーションを行い、それを100回繰り返す。これにより10万日分のシミュレーションを行う<sup>14)</sup>。

## 5.3 シミュレーションの条件設定

### (1) 対象購入部品

対象部品は、1次サプライヤーで使う電子部品とし、需要平均1600、標準偏差120（注文日の翌々週）、80（注文日の翌週）、初期在庫量は内示3日分、安全在庫目標は内示3日分とする。

### (2) 内示変動のある場合の扱い

内示変動の様相をトヨタの月別生産台数を比率化して、月ごとに内示数量が変化していると想定する（表1参照<sup>15)</sup>）。

表1 トヨタ月別生産台数比率

年	月	比率
2012年	1月	100.00%
	2月	88.02%
	3月	82.93%
	4月	102.10%
	5月	94.06%
	6月	91.15%
	7月	92.18%
	8月	104.03%
	9月	104.12%
	10月	102.81%
	11月	103.18%
	12月	123.53%
2013年	1月	99.71%
	2月	99.86%
	3月	90.70%
	4月	97.06%
	5月	94.07%
	6月	95.85%
	7月	93.39%
	8月	108.75%
	9月	93.28%
	10月	88.59%
	11月	91.05%
	12月	103.84%

2014年	1月	94.68%
	2月	95.21%
	3月	87.18%
	4月	97.29%
	5月	98.53%
	6月	91.31%
	7月	91.12%
	8月	106.61%
	9月	88.32%
	10月	114.69%
	11月	97.53%
	12月	99.95%

例えば最初の30日間（2012年1月）はベースと考え、「内示×100%」の値を表示している。

次の30日間（2012年2月）では「内示×88.02%」の値を表示している。それ以降も同様に30日ごとに内示変動を表す比率を変更してシミュレーションを行っている。

## 5.4 シミュレーション結果と考察

### 5.4.1 シミュレーション結果

シミュレーション結果を表2に示す。各項目を説明する。

- ・ 繰越在庫0未満（在庫切れ）(xx)：期間1000日において繰越在庫が0未満となる日数について、100回のシミュレーション結果の平均値をあらわしている。
- ・ 繰越在庫安全在庫1/2未満 (x)：期間1000日において繰越在庫が安全在庫の1/2未満となる日数について、100回のシミュレーション結果の平均値をあらわしている。
- ・ 平均在庫量：期間1000日における在庫の平均値について、100回のシミュレーション結果の平均値。いわば、10万日の平均在庫量を表している。
- ・ 平均搬入量：期間1000日における搬入量合計について、100回のシミュレーション結果の平均値を表している。

表2 電子部品のシミュレーション結果

		内示変動なし			内示変動あり		
		I型	II型	III型	I型	II型	III型
繰越在庫	安全在庫以上 (○)	0	0	0	0	0	0
	安全在庫1/2以上 (□)	625	764	847	611	778	842
	安全在庫1/2未満 (×)	375	236	153	389	222	158
	0未満 (在庫切れ) (××)	0	0	0	0.1	0	0
平均在庫量		2829	3157	3332	2706	3100	3234
平均搬入量		359255	238724	239566	359824	239984	239805
平均搬入回数		100	79	88	101	84	91
充足率		100%	100%	100%	99.999%	100%	100%
ロバストネス指標		1055	900	788	1059	862	779
フレキシビリティ指標 3σ		468	654	405	1218	892	875
フレキシビリティ指標 2σ		389	614	352	1161	764	689

・平均搬入回数：期間1000日における搬入があった日数について、100回のシミュレーション結果の平均値を表している。

・充足率：期間1000日における

(充足量合計) / (工場使用量合計) \* 100 (%)

について、100回のシミュレーション結果の平均値を表している。

#### 5.4.2 考察

##### (1) 内示変動なしのケース

①すべての方式において在庫切れ (××) は発生しない。

②繰越在庫が安全在庫目標の1/2未満になる場合 (×の場合) は、I型→II型→III型の順に小さくなっており、III型が1/2以上の在庫量を確保している比率が高いことがわかる。

③平均在庫量はI型→II型→III型の順に多い。その比率は、III型はII型に比べて、5.5%増程度である。

平均在庫量についてIII型がII型にくらべて大きくなる理由を説明する。

Ⅱ型、Ⅲ型の典型的な在庫推移プロフィールは、ともにこのぎりの刃のように変動しているが、特に、Ⅱ型は在庫変動の幅が大きく、低位にも推移する場合が比較的が多い。一方、Ⅲ型は在庫変動の中が小さく（小刻み）、低位に推移する場合はⅡ型に比べて少ない。その結果平均在庫レベルでは、Ⅲ型がⅡ型より比較的高めに推移することになる。

- ④平均搬入量はⅠ型→Ⅱ型・Ⅲ型の順に小さい。Ⅱ型とⅢ型はほぼ同じである。
- ⑤ロバストネス指標については、Ⅰ型→Ⅱ型→Ⅲ型の順に少なくなっている。このことから、Ⅲ型は、他に比べて、バラツキを抑える能力が高い。
- ⑥フレキシビリティ指標 ( $3\sigma$ )、フレキシビリティ指標 ( $2\sigma$ )とも、Ⅱ型→Ⅲ型の順に少なくなっている。Ⅲ型は、他に比べて、トレンドの変化を抑える能力が高い。

これらのことから、Ⅲ型は、他の方式に比べてロバストネス、フレキシビリティ能力が高いことがわかる。

## (2) 内示変動ありのケースの考察

- ①Ⅰ型において、充足率が100%ではなく、在庫切れ (xx) が極小（平均的に、1000日のうち0.1日）発生している。
- ②繰越在庫が安全在庫目標の1/2未満になる場合 (xの場合) は、Ⅰ型→Ⅱ型→Ⅲ型の順に小さくなっており、Ⅲ型が1/2以上の在庫量を確保している比率が高いことがわかる。
- ③平均在庫量はⅠ型→Ⅱ型→Ⅲ型の順に多い。ただし、その比率は、Ⅱ型に比べて、4.3%増程度である。
- ④平均搬入量はⅠ型→Ⅱ型・Ⅲ型の順に小さい。Ⅱ型とⅢ型はほぼ同じ程度である。
- ⑤ロバストネス指標については、Ⅰ型→Ⅱ型→Ⅲ型の順に少なくなっている。このことから、Ⅲ型は、他に比べて、バラツキを抑える能力が高い。

- ⑥フレキシビリティ指標 ( $3\sigma$ )、フレキシビリティ指標 ( $2\sigma$ )とも、Ⅱ型→Ⅲ型の順に少なくなっている。Ⅲ型は、他に比べて、トレンドの変化を抑える能力が高い。

これらのことから、Ⅲ型は、他の方式に比べてロバストネス、フレキシビリティ能力が高いことがわかる。

### (3) 内示変動なしとありのケースの考察

- ①内示変動がある場合は、ない場合に比べて、平均搬入量、平均搬入回数ともにほぼ同じか若干増加気味である。
- ②内示変動がある場合は、比較的平均搬入回数が多いことから、こまめな在庫補充を行っており、平均在庫量は同程度かやや低く推移していることがわかる。
- ③ロバストネス指標については、内示変動がない場合とある場合の数値はほぼ同じであることから、ばらつきは同程度に起こっていると考えられる。また、Ⅱ型に対するⅢ型の効果は、内示変動がない場合  $900 \rightarrow 788$  (差は112)、内示変動がある場合  $862 \rightarrow 779$  (差は83) であり、内示変動がある場合には、ばらつき低減効果能力が少し落ちる。
- ④フレキシビリティ指標 ( $3\sigma$ ) については、内示変動がある場合は、ない場合に比べて数値は大幅に大きい。これは、内示変動の変化がトレンドの変化に加味されて評価されるからである。

また、Ⅱ型に対するⅢ型の効果は、内示変動がない場合  $654 \rightarrow 405$  (差は249)、内示変動がある場合  $892 \rightarrow 875$  (差は17) であり、内示変動がある場合にはトレンドの変化の低減効果能力が大幅に落ちる。 フレキシビリティ指標 ( $2\sigma$ ) を用いても同様な結果が得られている。

## 5.5 様々なケースにおけるシミュレーション結果

### 5.5.1 シミュレーションの条件設定

#### (1) 対象購入部品

プリント板、ステアリングウォーマースイッチのケースを検討する。ど

ちらも初期在庫量は内示の3日分、安全在庫目標は内示の3日分とする。

#### ①プリント板の場合

需要平均120 標準偏差5 (注文日の翌々週), 3 (注文日の翌週) とする。電子部品の場合が需要平均, 標準偏差ともに大きかったに比べて, 需要平均, 標準偏差ともきわめて小さい場合である。

#### ②ステアリングウォーマースイッチの場合

需要平均350 標準偏差80 (注文日の翌々週), 60 (注文日の翌週) とする。電子部品の場合に比べて, 需要平均に比べて標準偏差がきわめて大きくなった場合である。

### (2) シミュレーションの方法

Excel シミュレーションシート, 計算回数とも電子部品の場合と同じである。

#### 5.5.2 シミュレーション結果

表3 プリント板シミュレーション結果

		内示変動なし			内示変動あり		
		I 型	II 型	III 型	I 型	II 型	III 型
繰越在庫	安全在庫以上 (○)	0	0	0	0	0	0
	安全在庫1/2以上 (□)	774	869	918	766	866	914
	安全在庫1/2未満 (×)	226	131	82	234	134	86
	0 未満 (在庫切れ)(××)	0	0	0	0	0	0
平均在庫量		241	254	260	233	247	253
平均搬入量		14943	8915	8924	14986	8961	8992
平均搬入回数		67	44	46	68	45	48
充足率		100%	100%	100%	100%	100%	100%
ロバストネス指標		65	57	54	65	57	54
フレキシビリティ指標 3σ		29	52	41	76	72	67
フレキシビリティ指標 2σ		25	48	37	73	61	58

表4 ステアリングウォーマースイッチシミュレーション結果

		内示変動なし			内示変動あり		
		I型	II型	III型	I型	II型	III型
繰越在庫	安全在庫以上 (○)	0	0	0	0	0	0
	安全在庫1/2以上 (□)	345	492	503	332	475	496
	安全在庫1/2未満 (×)	436	485	476	424	482	471
	0未満 (在庫切れ)(××)	219	23	20	244	43	33
平均在庫量		330	510	518	300	479	495
平均搬入量		239976	179831	179672	240022	180174	179660
平均搬入回数		200	200	204	200	200	208
充足率		89.424%	99.582%	99.684%	87.085%	99.005%	99.346%
ロバストネス指標		361	271	267	362	274	267
フレキシビリティ指標 3σ		156	124	133	188	256	238
フレキシビリティ指標 2σ		134	104	112	285	204	191

### 5.5.3 考察（プリント板の場合）

#### （1）内示変動なしのケースの考察

電子部品の場合と同様である。

#### （2）内示変動ありのケースの考察

電子部品のI型において発生していた在庫切れ(××)が皆無になった。需要平均に比べて、標準偏差がきわめて小さいからである。

#### （3）内示変動なしとありのケースの考察

電子部品の場合と同様である。

### 5.5.4 考察（ステアリングウォーマースイッチの場合）

#### （1）内示変動なしのケースの考察

①在庫切れ(××)が多数回発生する。II型→III型の順に少なくなっている。充足率は、II型→III型の順に大きくなっている。

②それ以外の評価項目（繰越在庫が安全在庫目標の1/2未満になる回数、充足率、平均在庫量、平均搬入量）に対しては、電子部品の場合と同

様である。

- ③ロバストネス指標については、Ⅰ型→Ⅱ型→Ⅲ型の順に少なくなっている。しかし、このような大きなバラツキのケースでは、Ⅱ型、Ⅲ型の数値はほぼ同じであることから、Ⅲ型の効果はⅡ型とほぼ同程度である。
- ④フレキシビリティ指標 ( $3\sigma$ )、フレキシビリティ指標 ( $2\sigma$ ) とともに、Ⅰ型→Ⅱ型、Ⅲ型の順に少なくなっている。Ⅱ型、Ⅲ型の数値はほぼ同じかⅢ型が若干高いことから、Ⅲ型の効果は、Ⅱ型とほぼ同程度である。このような極端に大きなバラツキがある場合には、Ⅲ型は、他の方式に比べてロバストネス、フレキシビリティ能力が特段に高いとは断定できない。

## (2) 内示変動ありのケースの考察

- ①在庫切れ (××) が多数回発生する。Ⅱ型→Ⅲ型の順に少なくなっている。充足率は、Ⅱ型→Ⅲ型の順に大きくなっている。
- ②それ以外の評価項目 (繰越在庫が安全在庫目標の1/2未満になる回数、平均在庫量、平均搬入量) に対しては、電子部品の場合と同様である。
- ③ロバストネス指標については、Ⅰ型→Ⅱ型→Ⅲ型の順に少なくなっている。しかし、このような大きなバラツキのケースでは、Ⅱ型、Ⅲ型の数値はほぼ同じであることから、Ⅲ型の効果はⅡ型とほぼ同程度である。
- ④フレキシビリティ指標 ( $3\sigma$ )、フレキシビリティ指標 ( $2\sigma$ ) とともに、Ⅱ型→Ⅲ型の順に少なくなっている。Ⅲ型はⅡ型より数値が若干小さいことから、Ⅲ型はⅡ型より有利である。このような極端に大きなバラツキがある場合には、Ⅲ型は他の方式に比べてロバストネス能力は同程度であるが、フレキシビリティ能力はやや高いといえる。

## (3) 内示変動がなしとありのケースの考察

- ①内示変動がある場合は、ない場合に比べて、在庫切れ (××) が大幅に増加する。充足率は、若干減少する。

- ②それ以外の評価項目（繰越在庫が安全在庫目標の1/2未満になる回数、平均在庫量、平均搬入量、平均搬入回数）に対しては、内示変動がある場合とない場合の顕著な違いはない。
- ③ロバストネス指標については、内示変動がない場合とある場合の数値はほぼ同じであることから、バラツキは同程度に起こっていることがわかる。元々の需要のバラツキが内示変動を超えて大きいためであると考えられる。
- ④フレキシビリティ指標 ( $3\sigma$ ) については、内示変動がある場合は、ない場合に比べて数値は大幅に大きい。これは、内示変動の変化がトレンドの変化に加味されて評価されるからである。

## 5.6 方式の比較

- ①コスト視点から発注方式を検討した場合は、
  - I型は平均在庫量が最も少ないことからコスト的には有利である。III型はII型と比べて、平均在庫量は約4～5%程度増加する。
- ②リスク視点から発注方式を検討した場合は、
  - a. I型はステアリングウォーマースイッチのようにばらつきが大きくなる場合には、在庫切れ(××)が大巾に発生するリスクがある。
  - b. III型は内示変動なしとありのケース両方を通じて、繰越在庫が安全在庫目標1/2未満(×の場合)が最も少なく、充足率が最も高くなることから他に比べて優れているといえる。
- ③ロバストネス視点、フレキシビリティ視点から見ても、III型はII型と同等かそれ以上に優れていることがわかる。  
特に、下記のような特徴がみられる。
  - a. 電子部品のように需要平均、標準偏差ともに大きい場合(トレンドの変化、ブレともに大きい場合)については、ロバストネス、フレキシビリティ両方に対する効果が他の方式より高い。
  - b. プリント板のように需要平均、標準偏差ともに小さい場合(需要

平均120 標準偏差5) については、フレキシビリティに対する効果が他の方式より少し高い。

- c. ステアリングウォーマースイッチのように需要平均に比べてばらつきがきわめて大きい場合(需要平均350 標準偏差80) には、
- ・ 内示変動がない場合は、ロバストネス、フレキシビリティに対する効果が他の方式より高いとは言えない。
  - ・ 内示変動がある場合は、ロバストネス能力は他と同程度であるが、フレキシビリティ能力はやや高いといえる。

## 6. おわりに

従来の需要の変動が少ない場合やコスト中心の在庫補充方法ではなく、リスク視点から従来の指標に加えて、フレキシビリティ、ロバストネスを表す評価指標を用いて様々な発注方式を検討した。

- (1) まず、発注の仕方(週間の注文日、発注回数、内示、補充ルール等)による様々な発注方式を示した。
- (2) 需要の不確実性による変化の様相である「需要のトレンド」によるもの、内示と確定注文のブレに代表されるように「需要のパラツキ」によるもの、日常的な管理手法では解決できない「需要の急激な変化」によるものへの対応能力をそれぞれフレキシビリティ、ロバストネス、レジリエンスと位置づけた。そして、それぞれの能力を比較できる指標として、フレキシビリティ指標、ロバストネス指標を考案した。
- (3) 発注・在庫シミュレーションモデルを作成し、3つの購入部品を対象に、従来のコストのみならず、リスク視点から従来の指標に加えて提案したフレキシビリティ指標とロバストネス指標を用いて評価を行った。指標の妥当性が確認できた。
- (4) 3つの発注方式について比較・検討し、Ⅲ型は他の方式に比べて優位であることを示した。

今後は、さらにレジリエンスを加味した考察を進めていく必要がある。

## 謝辞

本研究に際して、ヒアリング調査を受け入れていただき、事例の提供や深い議論をしていただきましたNSW 倉本様に深く感謝いたします。また、データ整理、シミュレーションモデルの作成とケーススタディは本学泉田和希君の協力を得た。本研究は、石田学園広島経済大学研究費助成制度による助成を受けています。

## 参考文献

- 1) 大野勝久：Excelによる生産管理，朝倉書店（2011）
- 2) P. H. Zipkin：Foundation of Inventory Management, McGraw-Hill（2000）
- 3) 上野信行：内示情報と生産計画－持続可能な社会における先行需要情報の活用－，朝倉書店（2011）
- 4) 上野信行，川崎雅也，奥原浩之：内示情報を用いた未達率による生産計画システムの提案，システム制御情報学会誌，Vol. 23, No. 7, pp. 147-156（2010）
- 5) 上野信行，角本清孝，奥原浩之：内示情報を用いた未達率による生産計画システムの提案（Ⅱ）－未達率尺度の特性解析と基点在庫方策との比較－，システム制御情報学会誌，Vol. 24, No. 3, pp. 43-53（2011）
- 6) S. E.ハリントン，G. R. ニーハウス，米山高生ら（監訳）岡田太ら（訳）：保険とリスクマネジメント，東洋経済新報社（2010）
- 7) 岩沢宏和：リスク・セオリーの基礎，培風館（2010）
- 8) 上野信行：内示生産システムにおける需要の不確実性への対応，広島経済大学経済研究論集，第39巻3，4号合併号，pp. 1-12（2016）
- 9) 藤本隆宏：生産マネジメント入門Ⅰ，日本評論社（2001）
- 10) D. Bertsimas and A. Thiele: A Robust Optimization Approach to Inventory Theory, Operations Research, Vol. 54, No. 1, pp. 151-168（2006）
- 11) D. Bertsimas, D. B. Brown and C. Caramanis: Theory and Applications of Robust Optimization, SIAM Review, Vol. 53, No. 3, pp. 464-501（2011）
- 12) D. Bertsimas and V. V. Misis: Robust Product Line Design, Operations Research, Vol. 65, No. 1, pp. 19-37（2017）
- 13) E. Hollnagel, D. D. Woods, N. Leveson, 北村正晴（監訳）：レジリエンスエンジニアリング概念と指針，日科技連（2012）

- 14) 大野勝久：Excel による経営科学，評論社（2011）
- 15) トヨタ HP：トヨタ自動車生産台数 [http://www.toyota.co.jp/jpn/company/about\\_toyota/data/monthly\\_data/j001\\_12.htm](http://www.toyota.co.jp/jpn/company/about_toyota/data/monthly_data/j001_12.htm)