

# 自動車産業の2段階サプライチェーンにおける ブルウィップ効果の定量化に関する基礎的解析\*

上 野 信 行\*\*

## 概 要

自動車産業のサプライチェーンにおけるブルウィップ効果 (Bullwhip Effect) の定量化を行う。サプライチェーンの下位に行くほど需要量のばらつきが増大する現象を「ブルウィップ効果 (Bullwhip Effect)」といい、変動に対応するために下位のサプライヤーほど在庫を多く保有する傾向にあり、経営課題が多い。

本論文は、完成車メーカーと1次サプライヤー間の2段階サプライチェーンを対象に、内示生産システムにおける不確実性を有する需要をもとにした発注行動からブルウィップ効果の発生要因把握とブルウィップ効果の定量化を行おうとするものである。

まず、小売業を主体として進められてきた先行研究について説明し、その導出の前提について考察する。次に、自動車産業の特徴である内示生産システムについて詳述し、内示情報が発注元から提示されるブレを含む参考値であることを示す。また、内示生産システムを基本としたときの発注業務の仕方を述べる。そして、週次内示を使った場合と月次内示を使った場合のそれぞれについてブルウィップ効果の定量化を行い、評価式を提案する。最後に、データ解析から内示情報のブレの特性を分析し、一定の条件下でブルウィップ効果の評価する。ブルウィップ効果の低減方法にも触れる。

ブルウィップ効果によりサプライチェーンの非効率性をもたらす。すなわち、過剰な在庫保有、顧客サービスの低下、収益減少、誤った設備投資、不効率な輸送、不適正な生産計画等を引き起こす。ブルウィップ効果の減少は経営効果の向上につながるものである。

キーワード：ブルウィップ効果、サプライチェーン、部品サプライヤー、内示生産システム、需要予測、発注法、内示情報

## 1. はじめに

自動車産業のサプライチェーンにおけるブルウィップ効果 (Bullwhip Effect) の定量化を行う。自動車産業において完成車メーカーは多数の1次サプライヤーから部品の供給を得て完成車を製造している。完成車メーカーは1次サプライヤーへ発注し、2次サプライヤーは3次サプライヤーへ発注するなど、大規模かつ多段のサプライチェーンを形成している。その取引シ

ステムは、完成車メーカーより事前に「内示」と呼ばれる確定注文情報の参考値が提示される。しかし、内示はあくまで参考情報であり、最終的に確定注文 (納入指示) が提示された時には、変更されることが多く、不確実性を有しているといえる。この変動は下位のサプライヤーに行くほど大きくなる傾向にある。このようにサプライチェーンの下位に行くほど需要量のばらつきが増大する現象を「ブルウィップ効果 (Bullwhip Effect)」 [1-3] といい、変動に対応するために下位のサプライヤーほど在庫を多く保有する傾向にあり、経営課題が多い。

一方、ブルウィップ効果については、小売業などを対象に、その発生要因と解決方法につい

\* 本研究は、石田学園広島経済大学特定個人研究費助成制度による助成を受けています。

\*\* 広島経済大学大学院経済学研究科教授

ていくつかの研究が進められてきた [4, 5]。しかし、小売業などに比較して、自動車産業においては、事前にやや長期の内示という予定情報が提示され、製造直近に確定注文（納入指示）を行うことを主体とする内示生産システムをベースとしており、独特の需要予測通知方法と発注方法を持つ [6]。また、組み立て型の製造システムであるために、納入部品ごとに、部品構成表を持ち、これに従って各サプライヤーの部品は、上位のサプライヤーに集約され、組み立てられるなどの加工形態をもつという特徴を有している。以前から、自動車産業ではブルウィップ効果について認識されていたが、内示生産システムの取引システムを前提とした研究は十分に行われてこなかった。

本論文は、完成車メーカーと1次サプライヤー間の2段階サプライチェーンを対象に、内示生産システムにおける需要の不確実性をもとにした発注行動からブルウィップ効果の発生要因把握とブルウィップ効果の定量化を行おうとするものである。

まず、小売業を主体として進められてきた先行研究について説明し、その導出の前提について考察する。次に、自動車産業の特徴である内示生産システムについて詳述し、内示情報が発注元から提示されるブレを含む参考値であることを示す。また、内示生産システムを基本としたときの発注業務の仕方を述べる。そして、週次内示を使った場合と月次内示を使った場合のそれぞれについてブルウィップ効果の定量化を行い、評価式を提案する。最後に、データ解析から内示情報のブレの特性を分析し、一定の条件下でブルウィップ効果の評価する。ブルウィップ効果の低減方法にも触れる。

ブルウィップ効果は、サプライチェーンの非効率性をもたらす。すなわち、過剰な在庫保有、顧客サービスの低下、収益減少、誤った設備投資、不効率な輸送、不適正な生産計画等を引き

起こす。ブルウィップ効果の減少は経営効果の向上につながるものである。

本論文の構成は、

- 2章では、小売業におけるブルウィップ効果
  - 3章では、内示生産システムとブルウィップ効果評価
  - 4章では、内示生産システムにおけるブルウィップ効果の試算
- である。

## 2. 小売業におけるブルウィップ効果

### 2.1 発注業務

先行研究 [4, 5] を参照し、顧客—小売業—卸売業のような2段階のサプライチェーンにおけるブルウィップ効果の定量化について述べる。小売業の発注方法は、翌期の需要量を予測して、翌期の始めには必要な在庫量が確保できるように、事前に発注しておき、補充する。想定している発注業務の流れを図1に示す。

すなわち、当期 ( $t$  期) の発注業務は、①当期終わりに、最新の需要を確認する。次に、②翌期の需要予測を行い、③需要のブレを加味して安全在庫量を含めた目標在庫量を設定する。④翌期の目標在庫量になるように当期需要を反映した発注量 ( $q_t$ ) を計算するという流れである。

#### 【記号】

$t$ : 期

$D_t$ :  $t$  期における需要量

$y_t$ :  $t$  期における目標在庫量

$u_{t+1}$ :  $t+1$  期における需要予測値

$\sigma_{t+1}$ :  $t+1$  期における需要予測誤差の標準偏差の推定量

$z$ : 安全在庫係数であり、欠品率の許容範囲を規定する係数

$q_t$ :  $t$  期における発注量;  $t$  期の期末に、 $t$  期の需要量 ( $D_t$ )、当期と翌期の目標在庫量レベルとの差によって決まる。すなわち、

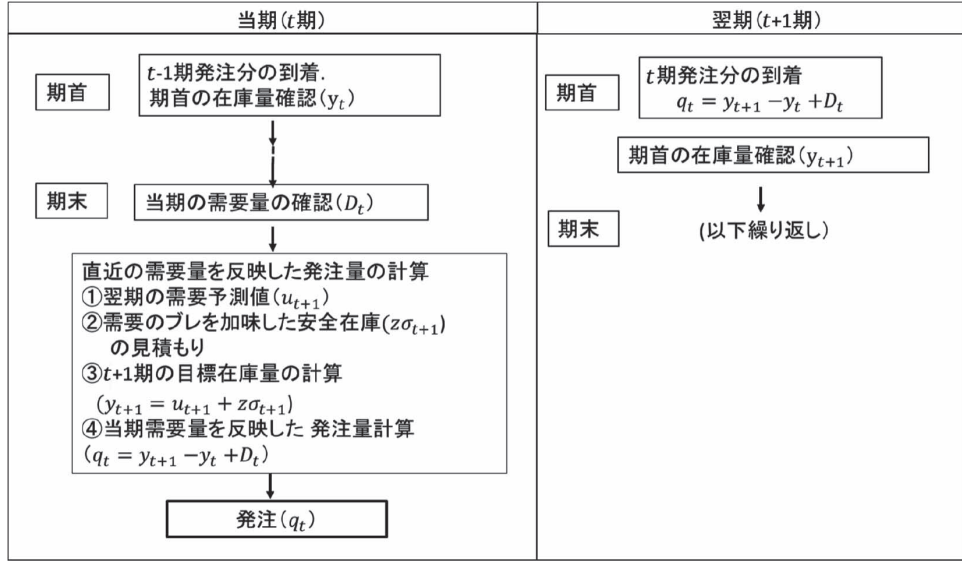


図1 発注業務の流れ

$$q_t = y_{t+1} - y_t + D_t \quad (1)$$

なお、式(1)の発注量が負になった場合は返品を表す。その場合の返品費用は0であると仮定する。ただし、現実には発注量が負になることはほぼありえないため、返品費用0という仮定はモデルの結果に影響は与えないと思われる。

## 2.2 ブルウィップ効果の定義

ブルウィップ効果  $B$  は、需要の分散に対する発注量(発注者の需要量)の分散の比で表す。

$$B = \frac{\text{Var}[q_t]}{\text{Var}[D_t]} \quad (2)$$

## 2.3 小売業におけるブルウィップ効果の解析的モデル

$t$ 期、 $t+1$ 期における目標在庫量から、発注量  $q_t$  を求める。

目標在庫量は、需要予測誤差を考慮して、

$$\begin{aligned} y_{t+1} &= u_{t+1} + z\sigma_{t+1} \\ y_t &= u_t + z\sigma_t \end{aligned} \quad (3)$$

であることから、(1)式に代入して、発注量は

$$q_t = u_{t+1} + z\sigma_{t+1} - (u_t + z\sigma_t) + D_t \quad (4)$$

$D_t$  と  $u_t$  をどのようにモデル化するかにより様々なバリエーションがある。先行研究 [4, 5] では、 $D_t$  の挙動については、一定値のパラメータ  $d(\geq 0)$ 、前期の需要量との相関を表すパラメータ  $\rho(-1 < \rho < 1)$ 、ならびに  $t$  期における需要の誤差(ブレ)を表す  $\varepsilon_t$  を用いて以下のように自己回帰型の式により規定されると考える。

$$D_t = d + \rho D_{t-1} + \varepsilon_t \quad (5)$$

$$E[\varepsilon_t] = 0, \forall t$$

$$\text{Var}[\varepsilon_t] = \sigma^2, \forall t$$

$$E[\varepsilon_t \varepsilon_{t+j}] = 0, \forall t, \forall j > 0$$

また、 $u_t$  は  $t$  期の需要予測値であり、過去の需要の履歴をもとに算出する。次期の需要量を予測する方法として移動平均法と指数平滑法を挙げている。ここでは移動平均法について詳述する。

$p$  期の移動平均法を用いた場合は、 $t$  期の需要予測値は、

$$u_t = \frac{\sum_{j=1}^p D_{t-j}}{p} \quad (6)$$

となる。ここで、予測の対象としているのは、季節変動、トレンド、周期変動、プロモーション活動（マーケティング要因）による変動を取り除いた基本要因である。実際に予測を行う場合には、上記の諸要因を考慮して行う必要がある。

上記の記号を用いて 移動平均法を用いた場合のブルウィップ効果を求める [4, 5]。

なお、 $L$  は、リードタイムであり、 $t$  期の期末に発注された商品は  $t+L$  期の期首に到着するものと仮定する。また、 $u_t^L$  は、 $L$  期間の需要予測値、 $\sigma_t^L$  は  $L$  期間の需要予測値の誤差の標準偏差の推定量とする。

まず、発注量  $q_t$  はつぎのように示すことができる。

$$\begin{aligned} q_t &= D_t + (u_{t+1}^L - u_t^L) + (z\sigma_{t+1}^L - z\sigma_t^L) \\ &= \frac{L \sum_{j=1}^p D_{t+1-j}}{p} + z\sigma_{t+1}^L - \frac{L \sum_{j=1}^p D_{t-j}}{p} \\ &\quad - z\sigma_t^L + D_t \\ &= \left(1 + \frac{L}{p}\right) D_t - \frac{L}{p} D_{t-p} + (z\sigma_{t+1}^L - z\sigma_t^L) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[q_t] &= \left(1 + \frac{L}{p}\right)^2 \text{Var}[D_t] \\ &\quad + \left(\frac{L}{p}\right)^2 \text{Var}[D_{t-p}] \\ &\quad - 2\left(1 + \frac{L}{p}\right) \left(\frac{L}{p}\right) \text{Cov}[D_t, D_{t-p}] \\ &\quad + 2z\left(1 + \frac{2L}{p}\right) \text{Cov}[D_t, \sigma_{t+1}^L] \\ &\quad + z^2 \text{Var}[\sigma_{t+1}^L - \sigma_t^L] \end{aligned}$$

定常時における需要量の分散  $\text{Var}[D_t]$ 、 $\text{Var}[D_{t-p}]$  および共分散  $\text{Cov}[D_t, D_{t-p}]$  は、

$$\begin{aligned} \text{Var}[D_t] &= \text{Var}[D_{t-p}] = \frac{\sigma^2}{1-\rho^2} \\ \text{Cov}[D_t, D_{t-p}] &= \frac{\rho^p \sigma^2}{1-\rho^2} \\ \text{Cov}[D_t, \sigma_{t+1}^L] &= 0 \end{aligned}$$

となる [4, 5]。これらの式を用いると、

$$\begin{aligned} \text{Var}[q_t] &= \left(1 + \frac{L}{p}\right)^2 \text{Var}[D_t] \\ &\quad + \left(\frac{L}{p}\right)^2 \text{Var}[D_{t-p}] \\ &\quad - 2\left(1 + \frac{L}{p}\right) \left(\frac{L}{p}\right) \rho^p \text{Var}[D_t] \\ &\quad + z^2 \text{Var}[\sigma_{t+1}^L - \sigma_t^L] \\ \text{Var}[q_t] &= \left\{1 + \left(\frac{2L}{p} + \frac{2L^2}{p^2}\right) (1-\rho^p)\right\} \text{Var}[D_t] \\ &\quad + z^2 \text{Var}[\sigma_{t+1}^L - \sigma_t^L] \\ &\geq \left\{1 + \left(\frac{2L}{p} + \frac{2L^2}{p^2}\right) (1-\rho^p)\right\} \text{Var}[D_t] \end{aligned}$$

を得る。よって、 $\text{Var}[q_t]$  と  $\text{Var}[D_t]$  の関係は、

$$B = \frac{\text{Var}[q_t]}{\text{Var}[D_t]} \geq 1 + \left(\frac{2L}{p} + \frac{2L^2}{p^2}\right) (1-\rho^p) \quad (7)$$

である。

(7) 式よりブルウィップ効果は、リードタイム  $L$ 、移動平均における過去のデータの採取数  $p$ 、前期の需要量との相関を表すパラメータ  $\rho$  に影響を受けることがわかる。

#### 2.4 小売業のブルウィップ効果の導出の前提についての考察

先行研究における小売業のブルウィップ効果の式の導出の前提としては、

- ① 需要  $D_t$  の動特性を明示的に記述できるとし、それは自己回帰型であるとの仮定を置いている。
- ② 一定値のパラメータ  $d$  を正か 0 の一定数であるとしている。 $\rho=0$  のときは、

$$D_t = d + \varepsilon_t$$

となり、需要  $D_t$  の平均は、期ごとに変化せず、一定値をとると限定している。

- ③  $t$  期の需要予測値  $u_t$  は過去の需要の履歴をもとに算出するとし、その方法は移動平均法

を用いている。過去のデータを使う需要予測手法により効果が大きく依存していることがわかる。また、 $p=1$ の時は、 $u_t = D_{t-1}$ となり、1期前の需要実績をそのまま使っている。

内示生産システムにおいては、

- ①需要  $D_t$  の動特性が自己回帰型であるとは言えない。
- ②需要量は期ごとに化する。
- ③内示を需要予測値として採用できる可能性があるなどである。

これらのことから、小売業のブルウィップ効果は、内示生産システムを採用している自動車業界や内示生産とは称していないが、事前の予約情報を提示している取引システムを行っている業界に、直接的には適用することができない。

### 3. 内示生産システムとブルウィップ効果評価

#### 3.1 内示生産システムと内示情報の配信

自動車産業における取引システムは、完成車メーカーから1次サプライヤーへ、事前に「内示」と呼ばれる確定注文情報の参考値が提示され、最終的に確定注文（納入指示）が提示される（図2参照）。1次サプライヤーは、一般的

に、事前の内示情報により生産準備あるいは開始しておき、確定注文（納入指示）に従って、最終的な製造を行い、完成車メーカーに納品する。

完成車メーカーからは、毎週金曜日に、月次内示と週次内示の2種類の内示配信がある（図3参照）。当月（M0）の第3週目（W3）の金曜日には、月次内示として、翌月（M1）は日別に、翌々月（M2）は週別に、翌々々月（M3）以降は月別に、一定の先まで提示される。週次内示としては、翌々週（M1-W1）の1週間分、日別に提示される。

当月（M0）の第3週目（W3）以外の金曜日、例えば、M0-W4には、月次内示として、一定期間は日別に、その後の翌々月（M2）は週別に配信される。それ以降の内示提示はない。週次内示としては、翌々週（W2）の1週間分、日別に提示される。

確定注文（納入指示）は、日ごとに、3日前に先1日分の注文の納入指示がある。

内示は、生産対象週・日に近づくにつれ、月

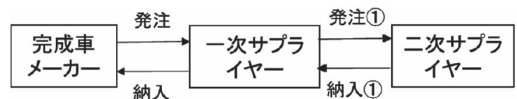


図2 自動車産業における取引システム

	M0				M1				M2				M3			
	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4
月次内示			▽ 金	▽ 金	日別/週別/月別（～M4） ※直近は日量、期間によって過量、月量となる											
					日別/週別（～M2） ※直近は日量、期間によって過量となる											
週次内示			▽ 金		■											
				▽ 金					■							
納入指示(日)			▽ 金	■	3日前先1日確定											
				▽ 金	■				3日前先1日確定							

図3 内示の配信



	2W					1M					4W					1W					2M					3W					4W														
	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金					
2W	▲	●	●	●	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
3W																																													
4W																																													

凡例： ▲現時点 ●確定注文 ◎週次内示 ○月次内示（日別） □月次内示（週別）

図4 サプライヤーが受取る内示情報（[6] 図3.4の再掲）

次内示から週次内示に置き換えられる。最終的には、確定注文情報に基づいて、サプライヤーは、欠品することなく納品しなければならない。

このように、内示情報は、1次サプライヤーの積み上げる予想値ではなく、完成車メーカーの生産計画にリンクした発注部門から提示される部品番号別の生産数量予定値である。そのため、内示の数量は1次サプライヤーにとって、自社の積み上げの予想値より確度は高い需要予測値と思われるが、納入指示は大いにおれる。なお、内示は一般的には、先に行くほど確度が落ちる。それでも、1次サプライヤーは、内示情報をベースに生産計画を作成し、必要な部品を2次サプライヤーに発注することになる。また、一般的に、週次内示に比べて月次内示のブレの方が大きい。

日ごとに、サプライヤーサイドから見たサプライヤーが受け取る確定注文、週次内示、月次内示を図4に示す。金曜日ごとに、配信日（▲印）から見て翌々週には、月次内示に入れかわって新しい週次内示（◎印）が配信されることがわかる。

### 3.2 発注業務

1次サプライヤーの発注は、一般的に自社の生産計画（購入する部品の消費予定ともいえる）、生産トラブル、ブレ及び生産能力制限などに対する余裕代としての安全在庫保有、2次

サプライヤーへの発注政策等に基づき行われる。

ブルウィップ効果を考えるときには、効果に影響を与える需要量、発注量の変動に対する基本的な項目に着目する。生産能力制限、発注政策などのように短期的には変動しないものは一旦除き、需要予測値のブレと安全在庫保有を考える。

発注の基本的骨子は、発注するに際して、期ごとに必要とする在庫（目標在庫量という）が確実に保有できていること、すなわち期首には、目標在庫量が確保できているように確実に発注が行われていることであり、小売業と同等である。具体的には、当期（ $t$ 期）の発注においては、翌期（ $t+1$ 期）の目標在庫量（ $y_{t+1}$ ）が確保されるように、当期（ $t$ 期）の目標在庫量（ $y_t$ ）との差を調整し、当期（ $t$ 期）に使った量（需要量）を補充して、発注量（ $q_t$ ）を決めることである。

$$q_t = y_{t+1} - y_t + D_t$$

また、翌期（ $t+1$ 期）の目標在庫量  $y_{t+1}$  は、翌期（ $t+1$ 期）の需要予測値  $u_{t+1}$  と需要予測値からのブレに対応する安全在庫  $z\sigma_{t+1}$  の和として見積もる。すなわち、

$$y_{t+1} = u_{t+1} + z\sigma_{t+1}$$

である。

### 3.3 内示生産システムのブルウィップ効果（週次内示を使う場合）

#### (1) 発注方法

小売業と自動車産業の大きな違いとして需要予測値の把握の仕方が挙げられる。小売業の需要予測が主に過去の需要量をもとに需要予測値を算出するに対して、自動車産業では、内示生産システムを採用しており、完成車メーカーから受け取る内示が貴重な情報である [6]。部品サプライヤーが受け取る内示情報と発注の考え方（週次内示を使う場合）を図5に示す。

サプライヤーは、各週の金曜日、例えば図5の1W金曜日に、配信日（△印）から見て、翌々週（3W）の「週次内示」（1週間分の内示情報）を受け取る。そして、翌週（2W）の火曜日以降に、2Wに確実に使用される確定分を反映して発注を行う。（先3日間はすでに確定注文が届いているので、2W全体の確定量は明らかになっている）。発注された部品は、翌々週（3W）の月曜日までに納品される（図5参照）。

発注計画は翌々週の1週間分を週ごとに繰り返してたてる場合であると考え、そのために、1週間分を1期と考える。したがって、この場合は納入リードタイムが1期と想定していることになる。

週次内示にブレがない限り、翌々週の確定注文（部品サプライヤーが完成車メーカーへ納める納品数）は内示数量でいいはずであるから、これが需要予測値として尤もらしいと考えられる。

#### (2) 需要のブレに対する安全在庫

実際は、内示にはブレがあるために、また、生産・輸送のトラブルなどによるブレに対するために、目標在庫量には安全在庫も確保しておくなければならない。

$\hat{\sigma}_{t+1}$  を  $t+1$  期における週次内示と確定注文のブレの標準偏差の推定量、 $z$  は安全在庫係数とし、これらを使って安全在庫量は、

$$z\hat{\sigma}_{t+1}$$

と見積もればよい。

#### (3) 目標在庫量

$\hat{D}_{t+1}$  は  $t+1$  期の週次内示であるとする、目標在庫量  $y_{t+1}$ 、 $y_t$  は、

$$\begin{aligned} y_{t+1} &= u_{t+1} + z\hat{\sigma}_{t+1} = \hat{D}_{t+1} + z\hat{\sigma}_{t+1} \\ y_t &= u_t + z\hat{\sigma}_t = \hat{D}_t + z\hat{\sigma}_t \end{aligned}$$

である [7-9]。

#### (4) 発注式

$t+1$  期の需要予測値に週次内示を用いる場合の  $t$  期における発注量の式は、

$$\begin{aligned} q_t &= y_{t+1} - y_t + D_t \\ y_{t+1} &= \hat{D}_{t+1} + z\hat{\sigma}_{t+1} \\ y_t &= \hat{D}_t + z\hat{\sigma}_t \end{aligned}$$

より、

$$q_t = D_t + (\hat{D}_{t+1} - \hat{D}_t) + (z\hat{\sigma}_{t+1} - z\hat{\sigma}_t) \quad (8)$$

である。表1に  $t$  期における発注業務と発注式の求め方を示す。

1W			2W				3W				4W						
水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金
	△		▲	●	●	●	◎	◎	◎	◎	◎						
	配信日		発注日				週次内示										
						△		▲	●	●	●	◎	◎	◎	◎	◎	◎

図5 部品サプライヤーが受け取る内示情報と発注の考え方（週次内示を使う場合）

表1 発注業務と発注式の求め方

	$t$ 期	$t+1$ 期
$t$ 期発注分の到着 (納品)		$q_t = y_{t+1} - y_t + D_t$
目標在庫量	$y_t$	$y_{t+1}$
需要予測値 (内示)	$\hat{D}_t$	$\hat{D}_{t+1}$
実現値 (確定注文)	$D_t$	
$D_t$ を反映した 発注量計算 ( $t$ 期末)	$q_t = y_{t+1} - y_t + D_t$ ここで、 $y_{t+1} = \hat{D}_{t+1} + z\hat{\sigma}_{t+1}$ $y_t = \hat{D}_t + z\hat{\sigma}_t$	
発注 ( $t$ 期末)	$q_t$	

(5) プルウィップ効果の式の導出

①目標在庫量に変化がない場合

事前の検討として、目標在庫量に変化がない場合を考察する。

目標在庫量  $y_t$  に変化がない場合は、

$$y_{t+1} - y_t = 0$$

より、

$$q_t = D_t$$

となる。この場合のプルウィップ効果  $B$  は、

$$B = \frac{\text{Var}[q_t]}{\text{Var}[D_t]} = \frac{\text{Var}[D_t]}{\text{Var}[D_t]} = 1$$

となり、プルウィップ効果は発生しない。

実際は、内示が期別に変動したり、安全在庫量目標が変化したりすることから、目標在庫量は、期別に変化すると考える方が妥当である。今後は、

$$y_{t+1} \neq y_t, \forall t$$

と考える。

②需要の動特性

自動車産業においては、需要予測値として内示情報があり、内示自体が時間により変動することから、小売業で仮定したような一定値のパラメータ  $d$  を含む自己回帰型の需要の動特性

は当てはまらない。

週次内示 ( $\hat{D}_t$ ) と確定注文 ( $D_t$ ) の間のブレの表現を考える。確定注文  $D_t$  は、週次内示  $\hat{D}_t$  と同じになる頻度は高いが、ブレも生じる。ブレは、週次内示  $\hat{D}_t$  に対して増加・減少の両方向に変動し、比較的左右対称であることから、週次内示  $\hat{D}_t$  を平均とする左右対称型の確率分布に近似できると考えられる [6]。なお、内示配信において初めは内示数量を意図的に小さくし、実績ではおおきくなる傾向にある (すなわち、 $\hat{D}_t - D_t < 0$ ,  $E[\hat{D}_t - D_t] \neq 0$ ) という考え方もあるが、ここでは、前者とする。プルウィップ効果の解析という観点からは、差異はない。

このことから、改めて、週次内示  $\hat{D}_t$  と確定注文  $D_t$  のブレを  $\varepsilon_t$  とする。

$$D_t = \hat{D}_t + \varepsilon_t \quad (9)$$

$$E[\varepsilon_t] = 0, \forall t$$

$$E[\varepsilon_t \varepsilon_{t+j}] = 0, \forall t, \forall j > 0$$

$$\text{Var}[\varepsilon_t] = (\hat{\sigma}_t)^2 \equiv M$$

③プルウィップ効果

$$q_t = D_t + (\hat{D}_{t+1} - \hat{D}_t) + (z\hat{\sigma}_{t+1} - z\hat{\sigma}_t)$$

より、(9) 式を代入して、

$$\begin{aligned} q_t &= \hat{D}_t + \varepsilon_t + (\hat{D}_{t+1} - \hat{D}_t) + (z\hat{\sigma}_{t+1} - z\hat{\sigma}_t) \\ &= \varepsilon_t + \hat{D}_{t+1} + (z\hat{\sigma}_{t+1} - z\hat{\sigma}_t) \end{aligned}$$



$$\text{Var}[q_t] = \text{Var}[\varepsilon_t] + z^2 \text{Var}[\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t] + 2z \text{Cov}[\varepsilon_t, (\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]$$

$$\text{Cov}[\varepsilon_t, (\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] = 0$$

と仮定して、

$$\text{Var}[q_t] = \text{Var}[\varepsilon_t] + z^2 \text{Var}[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]$$

となり、 $B$  は

$$\text{Var}[D_t] = \text{Var}[\varepsilon_t]$$

$$B = \frac{\text{Var}[q_t]}{\text{Var}[D_t]} = \frac{\text{Var}[\varepsilon_t] + z^2 \text{Var}[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]}{\text{Var}[\varepsilon_t]} = \frac{M + z^2 \text{Var}[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]}{M} \quad (10)$$

現実的には、週次内示と確定注文のブレの標準偏差の推定量は、時期によって異なったり、発注者の思惑により変化することが一般的である。すなわち、

①  $\hat{\sigma}_t$  は、常に  $\hat{\sigma}_{t+1}$  と等しくなるということはない。

②  $(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)$  が一定であることもない。

したがって、

$$\text{Var}[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] > 0$$

であるから、ブルウィップ効果は1より大となる。また、在庫の品切れ率を低くするために、安全在庫係数  $z$  を大きくすると、 $z^2 \text{Var}[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]$  は、ますます大きくなり、ブルウィップ効果も1よりもますます大となる。

### 3.4 内生産システムのブルウィップ効果（月次内示を使う場合）

#### (1) 発注方法

発注計画が翌々週の1週間分をたてるとする場合は、月次内示を使うことになる。

これは、納入リードタイムが2期の場合で、例えば、2Wに発注すると、4Wの期首に納品せざるを得ないために、配信日の翌々週の発注計画（4W）を立てる場合である。

翌々週の発注計画（4W）を立てる場合には、配信日から翌々週は週次内示が、翌々週は月次内示が提示されているので、これらの内示情報を活用することになる。

部品サプライヤーが受け取る内示情報と発注の考え方（月次内示を使う場合）を図6に示す。

#### (2) 発注式

表2に発注業務と発注式の求め方を示す。

$\bar{D}_t$  は、 $t$ 期の月次内示、 $\hat{\sigma}_t$  は $t$ 期における週次内示と確定注文のブレの標準偏差の推定量、 $\bar{\sigma}_t$  は $t$ 期における週次内示と月次内示のブレの標準偏差の推定量を表している。

$t$ 期、 $t+1$ 期、 $t+2$ 期にまたがる在庫推移は、

$$(y_t - D_t) + (y_{t+1} - D_{t+1}) + q_t = y_{t+2}$$

より、 $t+2$ 期の需要予測に月次内示を用いる場合の発注量  $q_t$  を求めると、

$$q_t = y_{t+2} - (y_t - D_t) - (y_{t+1} - D_{t+1}) \quad (11)$$

ここで、

1W			2W			3W			4W			翌月1W					
水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金	月	火	水	木	金
		△		▲	●	●	●	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○
		配信日		発注日									月次内示				
							△		▲	●	●	●	◎	◎	◎	◎	◎

図6 部品サプライヤーが受け取る内示情報と発注の考え方（月次内示を使う場合）

表2 発注業務と発注式の求め方

	$t$ 期	$t+1$ 期	$t+2$ 期
$t$ 期発注分の到着 (納品)			$q_t$
目標在庫量	$y_t$	$y_{t+1}$	$y_{t+2}$
需要予測値 (内示)	$\hat{D}_t$	$\hat{D}_{t+1}$	$\bar{D}_{t+2}$
実現値 (確定注文)	$D_t$	$D_{t+1}$	
$D_t, D_{t+1}$ を反映した発注量 計算 ( $t$ 期末)	$q_t = y_{t+2} - (y_t - D_t) - (y_{t+1} - D_{t+1})$ ここで、 $y_{t+2} = \bar{D}_{t+2} + z\bar{\sigma}_{t+2}$ $y_{t+1} = \hat{D}_{t+1} + z\hat{\sigma}_{t+1}$ $y_t = \hat{D}_t + z\hat{\sigma}_t$		
発注 ( $t$ 期末)	$q_t$		

$$\begin{aligned} y_{t+2} &= \bar{D}_{t+2} + z\bar{\sigma}_{t+2} \\ y_{t+1} &= \hat{D}_{t+1} + z\hat{\sigma}_{t+1} \\ y_t &= \hat{D}_t + z\hat{\sigma}_t \end{aligned}$$

すると、

$$\begin{aligned} q_t &= D_t + D_{t+1} + (\bar{D}_{t+2} - \hat{D}_{t+1} - \hat{D}_t) \\ &\quad + (z\bar{\sigma}_{t+2} - z\hat{\sigma}_{t+1} - z\hat{\sigma}_t) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。

(3) ブルウィップ効果の式の導出

①月次内示のプレの表現

月次内示は、1期後には、変化して週次内示に代わる。このことから、月次内示 ( $\bar{D}_t$ ) と週次内示 ( $\hat{D}_t$ ) の間のプレを  $\delta_t$  とする。

$$\begin{aligned} \bar{D}_t &= \hat{D}_t + \delta_t \quad (13) \\ E[\delta_t] &= 0, \forall t \\ E[\delta_t \delta_{t+j}] &= 0, \forall t, \forall j > 0 \\ \text{Var}[\delta_t] &= (\bar{\sigma}_t)^2 \equiv N \\ E[\varepsilon_t \delta_t] &= 0, \forall t \end{aligned}$$

②ブルウィップ効果

$$\begin{aligned} q_t &= D_t + D_{t+1} + (\bar{D}_{t+2} - \hat{D}_{t+1} - \hat{D}_t) \\ &\quad + (z\bar{\sigma}_{t+2} - z\hat{\sigma}_{t+1} - z\hat{\sigma}_t) \end{aligned}$$

より、(9) (13) を代入して、

$$\begin{aligned} q_t &= \hat{D}_t + \varepsilon_t + \hat{D}_{t+1} + \varepsilon_{t+1} \\ &\quad + (\hat{D}_{t+2} + \delta_{t+2} - \hat{D}_{t+1} - \hat{D}_t) \\ &\quad + z(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t) \\ &= \varepsilon_t + \varepsilon_{t+1} + (\hat{D}_{t+2} + \delta_{t+2}) + z(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[q_t] &= \text{Var}[\varepsilon_t] + \text{Var}[\varepsilon_{t+1}] + \text{Var}[\delta_{t+2}] \\ &\quad + z^2 \text{Var}[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] \\ &\quad + 2z \text{Cov}[\varepsilon_t, (\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] \\ &\quad + 2z \text{Cov}[\varepsilon_{t+1}, (\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] \\ &\quad + 2z \text{Cov}[\delta_{t+2}, (\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] \\ &\quad + 2 \text{Cov}[\varepsilon_t, \varepsilon_{t+1}] + 2 \text{Cov}[\varepsilon_t, \delta_{t+2}] \\ &\quad + 2 \text{Cov}[\varepsilon_{t+1}, \delta_{t+2}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\varepsilon_t, \varepsilon_{t+1}] &= 0 \\ \text{Cov}[\varepsilon_t, \delta_{t+2}] &= 0 \\ \text{Cov}[\varepsilon_{t+1}, \delta_{t+2}] &= 0 \end{aligned}$$

である。

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\varepsilon_t, (\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] &= 0 \\ \text{Cov}[\varepsilon_{t+1}, (\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] &= 0 \\ \text{Cov}[\delta_{t+2}, (\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] &= 0 \end{aligned}$$

と仮定すれば、

$$\begin{aligned}\text{Var}[q_t] &= \text{Var}[\varepsilon_t] + \text{Var}[\varepsilon_{t+1}] + \text{Var}[\delta_{t+2}] \\ &\quad + z^2 \text{Var}[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] \\ &= 2\text{Var}[\varepsilon_t] + \text{Var}[\delta_{t+2}] \\ &\quad + z^2 \text{Var}[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] \\ \text{Var}[D_t] &= \text{Var}[\varepsilon_t]\end{aligned}$$

となり、 $B$  は

$$\begin{aligned}B &= \frac{\text{Var}[q_t]}{\text{Var}[D_t]} \\ &= \frac{2\text{Var}[\varepsilon_t] + \text{Var}[\delta_{t+2}] + z^2 \text{Var}[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]}{\text{Var}[\varepsilon_t]} \\ &= \frac{2M + N + z^2 \text{Var}[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]}{M} \quad (14)\end{aligned}$$

現実的には、週次内示と確定注文のブレの標準偏差の推定量は、時期により異なったり、発注者の思惑により変化することが一般的である。すなわち、 $(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)$  が一定であることもない。したがって、

$$\text{Var}[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] > 0$$

であるから、月次内示を使う場合のブルウィップ効果は、

$$B = \frac{\text{Var}[q_t]}{\text{Var}[D_t]} > \frac{2M + N}{M}$$

である。

また安全在庫係数  $z$  を大きくとると、 $z^2 \text{Var}[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]$  は、ますます大きくなり、ブルウィップ効果もますます大となる。

## 4. 内示生産システムにおけるブルウィップ効果の試算

### 4.1 前提データ

完成車メーカーからサプライヤー A 社に配信される2017年9月から12月の内示情報（週次内示、月次内示）と納入実績データをもとに解析を行った。代表的な部品番号について (10)、(14) 式に従って試算した。

結果は、

①週次内示を用いた場合で、かつ  $\text{Var}[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] = 0$  としたときには、ブルウィップ効果は1である。すなわち、最新の内示情報である週次内示を使って、内示—確定注文のバラツキ管理をきっちりしている範囲においては、ブルウィップ効果は起こりにくい。実際は、 $\text{Var}[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] > 0$  であるから、ブルウィップ効果は1より大である。

②月次内示を用いた場合で、かつ  $\text{Var}[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] = 0$  としたときには、部品番号により2.08から5.13であった。月次内示を用いざるを得ない場合は、ブルウィップ効果が2より大きくなる。週次内示と確定注文のブレ、月次内示と週次内示のブレ、リードタイム増によるブレ等の要因が影響しているからである。実際は、 $\text{Var}[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] > 0$  であるから、ブルウィップ効果はさらに大きくなる。

今回の基礎的検討の範囲で、ブルウィップ効果を抑える方法は、

- ①極力、月次内示を用いないようにし、週次内示を中心とする予測方法をベースとした発注形態に移行する。
- ②月次内示と確定注文との需要量の分散を小さくする。
- ③安全在庫係数  $z$  をむやみに大きくしない。

### 4.2 先行研究によるブルウィップ効果の算定と所見

D. H. Taylor は、英国における自動車産業におけるブルウィップ効果を試算している。完成車メーカーの需要のバラツキ（分散）とプレス部品サプライヤーの生産量のバラツキ（分散）を週単位のデータに基づき解析し、ブルウィップ効果（生産量の分散／需要量の分散）は、6.1であることを示している [10]。そして、ブルウィップ効果が起こる原因は、種々な局面にお

ける意思決定の仕方にあるとし、例えば、需要の変化に対して意思決定者はオーバーアクションを行う傾向にある。その他では、②供給のバラツキ、すなわち機械のトラブルと製品品質のバラツキ、設備能力制限による供給不足などにより、前の期で供給不足が起これば、挽回の為に今期は不足分も加味して発注する。③上流にいくほど製造ロットが大きくなり、上流と下流の需給のマッチングが難しくなる。④価格割引⑤ロットまとめ、リードタイムを考慮した発注方式等を挙げている。

この研究アプローチは、データから完成車の需要のバラツキと部品サプライヤーの生産量のバラツキを直接算出し、その比率からブルウィップ効果を求めており、実態の把握としてはすばらしいが、論文にもあるように、一貫した多数のデータの採取が困難であることや効果に影響を与えるすべての要因が含まれていることから、要因ごとの効果への影響度合いを明確にすることが難しいことが想定される。

A. V. Mollick による日本の自動車産業の9つのカテゴリーについて、MITIによる2年間にわたる月単位の生産、販売、在庫データを用いた報告 [11] や J. Shan らによる上海と深圳証券取引所における1,273社について2002年から2009年までの4半期の生産、販売のデータを用いた報告 [12] があるが、産業別の経済的視点からの分析であり、企業レベル、部品番号レベルのオペレーショナルな視点ではないことから、詳細には立ち入らない。

## 5. おわりに

本論文においては、

(1) 小売業を主体として進められてきた先行研究について説明し、その導出の前提について考察し、限界を示した。次に、自動車産業の特徴である内示生産システムについて詳述し、内示情報が発注元から提示されるブレを含む参考

値であることを示した。また、内示生産システムを基本としたときの発注業務フローを示した。そのうえで、週次内示を使った場合と月次内示を使った場合のそれぞれについてブルウィップ効果の評価式を提案した。

週次内示を用いた場合には、ブルウィップ効果は1よりおおきくなる。月次内示をもちいた場合には、週次内示と確定注文のブレ、月次内示と週次内示のブレ、リードタイム増によるブレ等の要因がブルウィップ効果を大きくしている。

(2) データ解析から内示情報のブレの特性を示し、一定の条件下でブルウィップ効果を評価した。月次内示をもちいた場合は、部品番号により2.08から5.13以上である。

(3) 今回は、内示配信方法をもとに、発注業務フローを明確にし、これをもとに検討のフレームワークを示し、需要のブレを主要因とする基本的なブルウィップ効果の定量化を行った。今回考慮に入れていない下記の項目もブルウィップ効果を増加・減少させる要因であるとおもわれる。今後、更に、検討を進めていく必要がある。

- ①リードタイム
- ②バッチ単位の注文方式
- ③サプライヤーの生産計画手法（生産計画サイクル、生産制約条件の考慮など）
- ④供給不足に対するポリシー
- ⑤週単位計画から日単位計画化
- ⑥サプライヤー間の情報共有等

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、データや事例の提供や深い議論をしていただきましたマツダ（株）の機械部品系の一次サプライヤー殿に深く感謝いたします。ITコーディネーター、中小機構アドバイザー（元マツダ（株））慶徳晴司氏には共同にてヒアリング調査を行うとともにテーマの進め方、解決の方向等について貴重なヒントをいただきました。共同研究者の富山県立大学原浩之教授には、理論面の深い議論を得た。また、本学大学院経済学研究科泉田和希君にはデータ整理、

モデル化, シミュレーション等の協力を得た。

### 参 考 文 献

- [1] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky and E. Simchi-Levi: Designing and Managing the Supply Chain Concepts, Strategies, and Case Studies, McGraw Hill (2000)
- [2] David Simchi-Levi, Xin Chen, Jullien Bramel: The Logic of Logistics –Theory, Algorithm, and Application for Logistics and Supply Chain Management (2<sup>nd</sup> ed.), Springer (2004)
- [3] 黒田 充, 大野勝久監訳: サプライチェーンハンドブック, 朝倉書店 (2008)
- [4] F. Chen, Z. Drezer, J. K. Ryan and D. Simchi-Levi: The Bullwhip Effect: Managerial Insights on Forecasting and Information on Variability in a Supply Chain, S. Tayur et al. (eds.), Quantitative Models for Supply Chain Management, Springer (1999)
- [5] F. Chen, Z. Drezer, J. K. Ryan and D. Simchi-Levi: Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information, Management Science, Vol. 46, No. 3, pp. 436–443 (2000)
- [6] 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)
- [7] P. H. Zipkin: Foundation of Inventory Management, McGraw-Hill (2000)
- [8] 大野勝久: Excelによる経営科学, 評論社 (2011)
- [9] 大野勝久: Excelによる生産管理, 朝倉書店 (2011)
- [10] D. H. Taylor: Measurement and Analysis of Demand Amplification Across the Supply Chain, The International Journal of Logistics Management, Vol. 10, No. 2, pp. 55–70 (1999)
- [11] A. V. Mollick: Production Smoothing in the Japanese Vehicle Industry, International Journal of Production Economics, Vol. 91, pp. 63–74 (2004)
- [12] J. Shan, S. Yang, S. Yang and J. Zhang: An Empirical of the Bullwhip Effect in China, Production and Operations Management, Vol. 23, No. 4, pp. 537–551 (2013)