



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

横井 稜

富山県立大学工学部電子・情報工学科情報基盤工学講座

要約

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う。データ解析から内示情報のブレの特性を分析し、ブルウィップ効果の評価に基づき、低減方法について示す。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。

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（Bull-whip 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いくほど大きくなる傾向にある。この現象を「ブルウィップ効果」[1]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ていくつかの研究が進められてきた[2]。しかし、自動車産業においては、事前に内示が提示され、製造直近に確定注文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いるように独特の需要予測通知法と発注法を持つ[3]。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。

本研究では、まず、小売業におけるブルウィップ効果を説明し、内示生産システムとブルウィップ効果評価を提案するそして、内示生産システムにおけるブルウィップ効果の試算を行う。

2 小売業におけるブルウィップ効果

2.1 発注業務

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。

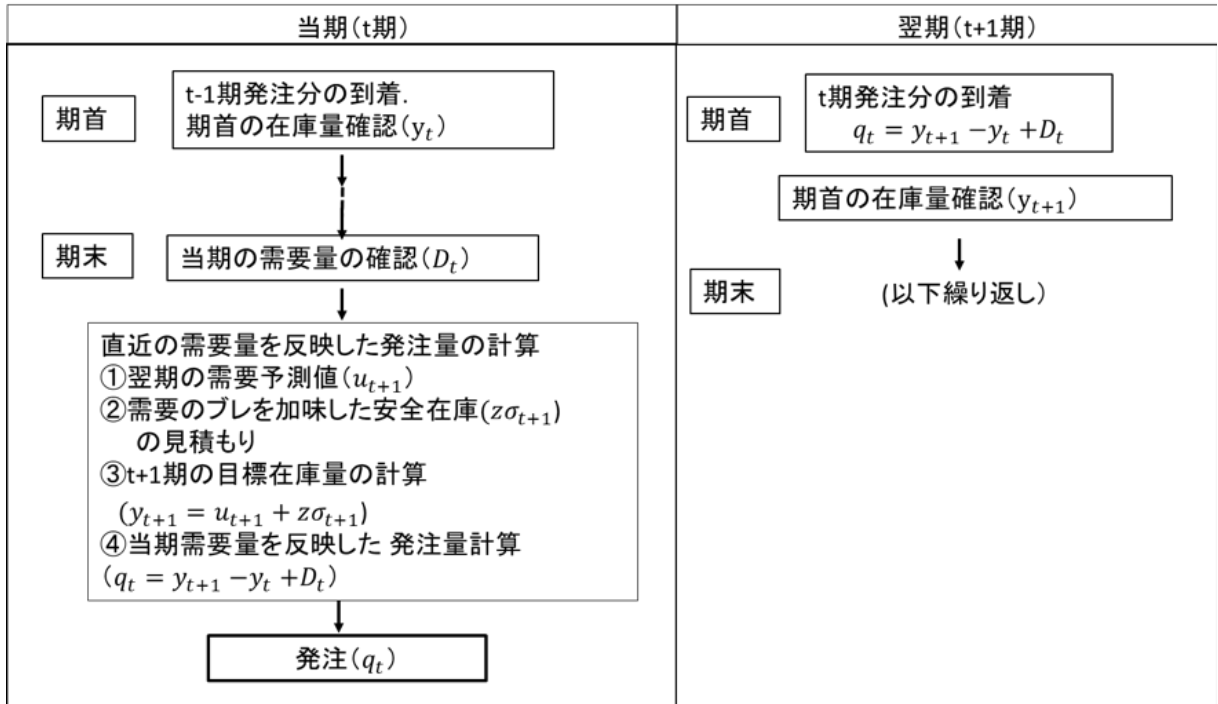


図1 発注業務の流れ

【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 σ_{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、

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

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、現実で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。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。

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

2.2 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、 $y_t = u_t + z\sigma_t$ であることから、(1) 式に代入して、発注量は

$$q_t = u_{t+1} + z\sigma_{t+1} - (u_t + z\sigma_t) + D_t \quad (3)$$

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[2]では、 D_t の挙動については、平均を表すパラメータ d 、前期の需要量との相関を表すパラメータ ρ 、ならびに t 期における需要予測値の誤差（ブレ）を表す ε_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と考える。

$$\begin{aligned} D_t &= d + \rho D_{t-1} + \varepsilon_t \\ E[\varepsilon_t] &= 0, \forall t \\ Var[\varepsilon_t] &= \sigma_{\varepsilon_t}^2, \forall t \\ E[\varepsilon_t \varepsilon_{t+j}] &= 0, \forall t, \forall j > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

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。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、

$$u_t = \frac{\sum_{j=1}^p D_{t-j}}{p} \quad (5)$$

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。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。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は次のようになる。

$$B = \frac{Var[q_t]}{Var[D_t]} \geq 1 + \left(\frac{2L}{p} + \frac{2L^2}{p^2} \right) (1 - \rho^p) \quad (6)$$

(6) 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に影響を受けることがわかる。

2.3 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、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していて、 $\rho = 0$ 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。 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期前の需要量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、需要 D_t の動特性が明示的に記述できない、かつ、自己回帰型であるとは言えない。また、需要量は期ごとに変化し、内示を需要予測値として採用できる可能性がある。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は当てはまらない。

- 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、最終的に確定注文が提示される。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。

| | 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 | | | | | | | | | | | | | |
| 週次内示 | | | ▽ 金 | | | | | | | | | | | | | |
| 納入指示(日) | | | ▽ 金 | | | | | | | | | | | | | |

図2 内示の配信

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2参照)。当月の第3週目の金曜日には、月次内示として、翌月は日別に、翌々月は週別に、翌々々月以降は月別に、一定の先まで提示される。週次内示としては、翌々週の1週間分、日別に提示される。当月の第3週目以外の金曜日、例えば、M0-W4には、月次内示として、翌月は日別に、翌々月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、翌々週の1週間分、日別に提示される。確定注文は、日ごとに、3日先の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、納品しなければならない。

このように、内示情報は、1次サプライヤーの予想値ではなく、完成車メーカーから提示される部品番号別の生産数量予定値である。そのために、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、週次内示に比べて、月次内示のブレの方が大きい。

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, 生産トラブル、ブレ及び生産能力制限等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、目標在庫量が確実に保有できていること、すなわち期首には、目標在庫量を確保する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、当期の目標在庫量との差を調整し、当期に使った量(需要量)を補充して、発注量(q_t)を決めることである。発注量は、 $q_t = y_{t+1} - y_t + D_t$ となる。

また、翌期の目標在庫量 y_{t+1} は、翌期の需要予測値 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)

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、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[3]。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。

| 1W | | | | 2W | | | | 3W | | | | 4W | | | | | |
|----|---|---|---|----|---|---|---|----|---|---|---|----|---|---|---|---|---|
| 水 | 木 | 金 | 月 | 火 | 水 | 木 | 金 | 月 | 火 | 水 | 木 | 金 | 月 | 火 | 水 | 木 | 金 |
| | | △ | | ▲ | ● | ● | ● | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | | | | | |
| | | 配 | | 発 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 信 | | 注 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 日 | | 日 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | △ | | | ▲ | ● | ● | ● | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |

図1 オプションの権利行使構造を表す

サプライヤーは、各週の金曜日、例えば図5の1Wの金曜日に、配信日(△印)から見て、翌々週の1週間分の内示情報を受け取る。そ

して、翌週の火曜日以降に、2Wに使用される確定分を反映して発注を行う。発注された部品は、翌々週の月曜日までに納品される。発注計画は翌々週の1週間分を週ごとに繰り返され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。

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かなければならない。 $\hat{\sigma}_{t+1}$ 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。 \hat{D}_{t+1} は $t+1$ 期の週次内示であるとなると、目標在庫量は、 $y_{t+1} = u_{t+1} + z\hat{\sigma}_{t+1} = \hat{D}_{t+1} + z\hat{\sigma}_{t+1}$ 、 $y_t = u_t + z\hat{\sigma}_t = \hat{D}_t + z\hat{\sigma}_t$ である[2]。

$t+1$ 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、次のようになる。

$$q_t = D_t + (\hat{D}_{t+1} - \hat{D}_t) + (z\hat{\sigma}_{t+1} - z\hat{\sigma}_t) \quad (7)$$

目標在庫量に変化がない場合は、ブルウィップ効果 $B = 1$ となり、ブ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ので、 $y_{t+1} \neq y_t, \forall t$ とする。

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平均を表すパラメータ d を含む自己回帰型の需要の動特性は当てはまらない。週次内示と確定注文の間のブレの表現を考える。確定注文は、週次内示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[3]。このことから、週次内示 \hat{D}_t と確定注文 D_t のブレを ε_t とすると、 $D_t = \hat{D}_t + \varepsilon_t$ となり、 B は

$$\begin{aligned} B &= \frac{Var[\varepsilon_t] + z^2 Var[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]}{Var[\varepsilon_t]} \\ &= \frac{M + z^2 Var[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]}{M} \end{aligned} \quad (8)$$

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、発注者の意思により変化することが一般的である。すなわち、 $\hat{\sigma}_t$ は、常に $\hat{\sigma}_{t+1}$ と等しくなるということはない。 $\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t$ が一定であることもない。したがって、 $Var[(\hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)] > 0$ 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、ブルウィップ効果は1よりますます大となる。

3.4 内示生産システムのブルウィップ効果(月次内示)

発注方法生産計画が翌々週の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、配信日の翌々週の生産計画(4W)を立てる場合である。翌々週の生産計画(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。表1に発注業務と発注式の求め方を示す。

表1 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} | \hat{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、 $y_{t+2} = \hat{D}_{t+2} + z\hat{\sigma}_{t+2}$ $y_{t+1} = \hat{D}_{t+1} + z\hat{\sigma}_{t+1}$ $y_t = \hat{D}_t + z\hat{\sigma}_t$ | | |
| 発注(t期末) | q_t | | |

は、 t 期の月次内示、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、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、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、次のようになる。

$$q_t = y_{t+2} - (y_t - D_t) - (y_{t+1} - D_{t+1}) \quad (9)$$

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

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、月次内示と週次内示の間のブレを δ_t とすると、 $\bar{D}_t = \hat{D}_t + \delta_t$ となる。よってブルウィップ効果 B は次のようになる。

$$\begin{aligned} B &= \frac{2Var[\varepsilon_t] + Var[\delta_{t+2}] + z^2 Var[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]}{Var[\varepsilon_t]} \\ &= \frac{2M + N + z^2 Var[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]}{M} \end{aligned} \quad (10)$$

が一定であることもない。したがって、である。また安全在庫係数 z を大きくすると、ブルウィップ効果もますます大となる。

4 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、Var=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。Var0としたときには、ブルウィップ効果は1より大である。2月次内示をもちいた場合で、Var=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1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。Var<0としたときには、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 [4]。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。それ以外では、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、上流と下流のマッチングが難しくなる。3価格割引4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素晴らしいが、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。

5 おわりに

小売業を主体の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、週次内示と月次内示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。週次内示での、ブルウィップ効果は1よりおおきくなる。月次内示での、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。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、2.08から5.13以上である。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。

参考文献

[1] David Simchi-Levi, Xin Chen, Jullien Bramel: The Logic of Logistics -Theory ,Algorithm, and Application for Logistics and Supply Chain Management(2nd ed.),Springer,2004

[2] F.Chen,Z.Drezer,J.K.Ryan and D.Simchi-Levi:Quantifying the Bull-whip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting ,Lead Times, and Information, Manageme. Management Science,Vol.46,No.3,pp.436-443(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] 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)