

要約

内示生産システムを持つ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。

キーワード：
サプライチェーン、需要予測、ブルウィップ効果

1 はじめに

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、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、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。この変動は図1のように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、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、サプライチェーンの非効率性をもたらす。

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、内示生産システムは独特の需要予測通知法と発注法を持つ[3]。以前から、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。

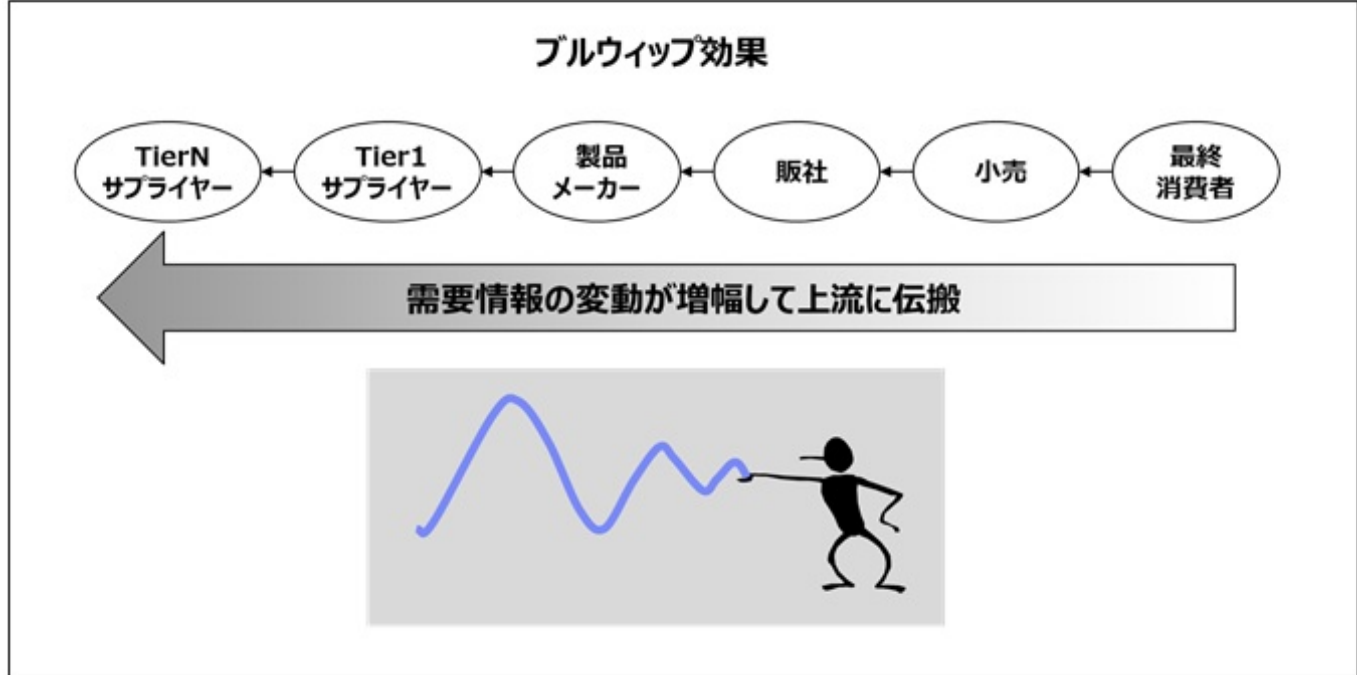


図1 ブルウィップ効果

2 小売業における需要予測

2.1 小売業の発注業務

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2に示す。

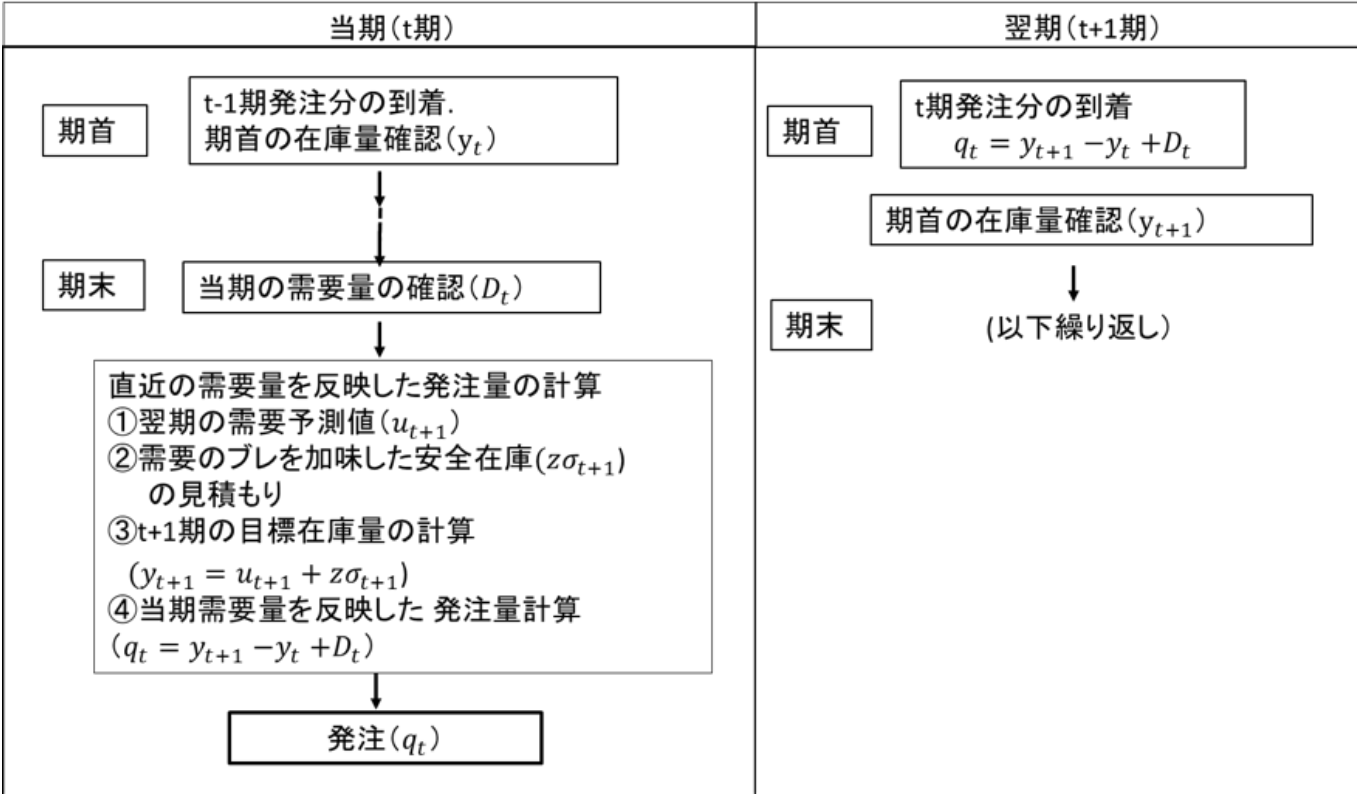


図2 発注業務の流れ

なお、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、図3のように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。

$$q_t = y_{t+1} - y_t + D_t$$
$$B = \frac{Var[q_t]}{Var[D_t]}$$

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
 q_t : t 期における発注量

図3 ブルウィップ効果の式

2.2 小売業のブルウィップ効果

t 期、 $t+1$ 期における目標在庫量 $y_t = u_t + z\sigma_t$ から、発注量 q_t を求めると、図3のようになる。ここで、 z は安全在庫係数で欠品率の許容範囲を規定する係数である。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、図4のように自己回帰型の式により規定されると考える。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。 L は、リードタイムであり、 p 期の移動平均法を用いた場合は、 t 期の需要予測値は、図5のようになる。

$$D_t = d + \rho D_{t-1} + \varepsilon_t \quad Var[\varepsilon_t] = \sigma_t^2, \forall t$$
$$E[\varepsilon_t] = 0, \forall t \quad E[\varepsilon_t \varepsilon_{t+j}] = 0, \forall t, \forall j > 0$$

σ_t : t 期における需要予測誤差の標準偏差の推定量

図4 自己回帰型の式

小売業のブルウィップ効果

$$u_t = \frac{\sum_{j=1}^p D_{t-j}}{p}$$
$$B = \frac{Var[q_t]}{Var[D_t]} \geq 1 + \left(\frac{2L}{p} + \frac{2L^2}{p^2} \right) (1 - \rho^p)$$

図5 小売業のブルウィップ効果

2.3 小売業の需要予測の前提

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、期ごとに变化せず、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、需要量は期ごとに变化し、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、内示生産システムや事前の予約情報を提示している取引システムには当てはまらない。

3 内示生産システムの需要予測

3.1 内示生産システムと内示情報の配信

内示生産システムは、事前に内示が提示され、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納品する。内示の配信方法を図6に示す。

	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						日別/週別(≒M4) ※ 直近は日量、期間によって週量、月量となる				日別/週別(≒M2) ※ 直近は日量、期間によって週量となる			
週次内示			▽ 金	▽ 金												
納入指示(日)			▽ 金	■ 金				3日前先1日確定								
			▽ 金	■ 金				3日前先1日確定								

図6 内示の配信

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、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、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が高い需要予測値と思われるが、納入指示は大いにぶれる。

3.2 内示生産システムの発注業務

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 週次内示のブルウィップ効果

小売業と内示生産システム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、内示生産システムでは、内示が貴重な情報である[3]。

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。週次内示 \hat{D}_t と確定注文 D_t のブレを ε_t とすると、 $D_t = \hat{D}_t + \varepsilon_t$ となる。また、 $Var[\varepsilon_t] = (\hat{\sigma}_t)^2 \equiv M$ とすると、ブルウィップ効果が図7のようになる。現実的には、 $\hat{\sigma}_t$ は、常に $\hat{\sigma}_{t+1}$ と等しくなく、差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 を大きくとると、ブルウィップ効果は1よりますます大となる。

週次内示のブルウィップ効果

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

図7 週次内示のブルウィップ効果

3.4 月次内示のブルウィップ効果

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。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。また、 $Var[\delta_t] = (\bar{\sigma}_t)^2 \equiv N$ である。よって、ブルウィップ効果 B は図8のようになる。また安全在庫係数 z を大きくとると、ブルウィップ効果もますます大となる。

月次内示のブルウィップ効果

$$q_t = D_t + D_{t+1} + (\bar{D}_{t+2} - \hat{D}_{t+1} - \hat{D}_t) + (z\bar{\sigma}_{t+2} - z\hat{\sigma}_{t+1} - z\hat{\sigma}_t)$$
$$B = \frac{2M + N + z^2 Var[(\bar{\sigma}_{t+2} - \hat{\sigma}_{t+1} - \hat{\sigma}_t)]}{M}$$

図8 月次内示のブルウィップ効果

4 需要予測の影響の定量評価

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、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。月次内示と確定注文との需要量の分散を小さくする。安全在庫係数 z をむやみに大きくしないが挙げられる。

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]。

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、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。今後の課題として、シミュレーションをして、ブルウィップ効果がどのようになるか確かめることが挙げられる。

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 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)
- [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)