

複合要因を考慮した内示生産システムのブルウィップ効果

富山県立大学 横井 稜、広島経済大学 上野 信行、富山県立大学 奥原 浩之

近年、社会が、天然資源の枯渇問題及び地球環境への負荷の低減のために、持続可能な循環型社会を目指していることから、サプライチェーンマネジメント (Supply Chain Management:SCM) が注目されている。しかし、SCM には多くの課題がある。その課題の一つとして、サプライチェーンの上流に行くほど需要量のばらつきが増大する現象のブルウィップ効果がある。ブルウィップ効果を増加・減少させる要因は多く挙げられているが、一部のみを要因としているため、要因ごとの影響度合いを明確にする必要がある。また、データから直接ブルウィップ効果を求めた研究もあるが、何が要因か分からない。本研究では、シミュレーションによって複合的な要因を含むブルウィップ効果が単調的な変化ではない場合があることを示した。このことから、発注量の分散ではなく、発注量の数量の大きさ、発注の間隔、間歇性などを考慮する必要があることが分かる。

Bullwhip Effect of NAIJI Production System Considering Compound Factors

Toyama Prefectural University Ryo YOKOI

Hiroshima University of Economics Nobuyuki UENO

Toyama Prefectural University Koji OKUHARA

Abstract: In recent years, supply chain management is drawing attention because the depletion of natural resource happened, the global environment got worse and aimed for sustainable recycling-oriented society. However, supply chain management has many problems. One of them is bullwhip effect. Bullwhip effect of NAIJI production system considering compound factors is unknown. Here we show that some bullwhip effects didn't have monotonous change on simulation by the random data. The normal model of bullwhip effect is variance of order quantity divided by variance of demand quantity. This model doesn't include factors. Our results give an example that model of bullwhip effect doesn't hold. This knowledge is used for making a bullwhip effect model by others. We will make a new model of bullwhip effect in the future.

Key Words: supply chain, bullwhip effect

1 緒論

近年、モノを作る世界では、消費量が減少したことから大量に生産することにリスクが生じ始め、また社会が、天然資源の枯渇問題及び地球環境への負荷の低減のために、持続可能な循環型社会を目指していることから、サプライチェーンマネジメント (Supply Chain Management:SCM) が注目されている [1]。しかし、SCM には顧客との関わり方やリスク管理、コストなど様々な課題がある。サプライチェーンとは、原材料・部品の調達から、配送までの製品の全体的な流れを一つの連続したシステムとして捉えることである [2]。

その課題の一つとして、取引する人の心的要因やサプライチェーンの上流から下流への情報伝達

の遅れなどの様々な要因が重なり合って、サプライチェーンの上流に行くほど需要量のばらつきが増大する課題がある。その現象をブルウィップ効果といい、変動に対応するために上流のサプライヤーほど余剰在庫が発生する傾向にあり、問題となっている [3]。

ブルウィップ効果を増加・減少させる要因は多く挙げられているが、一部のみを要因としているため、要因ごとの影響度合いを明確にする必要がある [4]。また、データから直接ブルウィップ効果を求めた研究もあるが、何が要因か分からない。そこで、需要のばらつき、ロット数、リードタイム等の要因を考慮したブルウィップ効果を求めるシミュレータを作成することで、要因を複合的に考える。

2 先行研究

2.1 内示生産システム

内示生産システムとは、事前に内示が提示され、最終的に確定注文が提示される生産システムである。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、納入指示は大いにぶれる。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。

2.2 ブルウィップ効果の数理モデル

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 (D_t)) を補充して、発注量 (q_t) を決めることである。発注量は、

$$q_t = y_{t+1} - y_t + D_t \quad (2.1)$$

となる。以上の式からブルウィップ効果 B は発注量の分散 ($\text{Var}[q_t]$) 及び需要量の分散 ($\text{Var}[D_t]$) から次のように表される。

$$B = \frac{\text{Var}[q_t]}{\text{Var}[D_t]} \quad (2.2)$$

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、

$$y_{t+1} = u_{t+1} + z\sigma_{t+1}, \quad (2.3)$$

$$y_t = u_t + z\sigma_t$$

であることから、式 (2.1) に代入して、発注量は

$$q_t = u_{t+1} + z\sigma_{t+1} - (u_t + z\sigma_t) + D_t. \quad (2.4)$$

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则认为る。

$$D_t = d + \rho D_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (2.5)$$

$$E[\varepsilon_t] = 0, \quad \forall t, \quad (2.6)$$

$$\text{Var}[\varepsilon_t] = \sigma_t^2, \quad \forall t, \quad (2.7)$$

$$E[\varepsilon_t \varepsilon_{t+j}] = 0, \quad \forall t, \quad \forall j > 0. \quad (2.8)$$

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、

$$u_t = \frac{\sum_{j=1}^p D_{t-j}}{p} \quad (2.9)$$

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。 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と、ブルウィップ効果は、

$$B = \frac{\text{Var}[q_t]}{\text{Var}[D_t]} \geq 1 + \left(\frac{2L}{w} + \frac{2L^2}{w^2} \right) (1 - \rho^w) \quad (2.10)$$

である。式 (2.10) 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収数 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。この式を、縦軸 B 、横軸 w のグラフに表すと図のようになり、ブルウィップ効果は単調的な結果となる。

2.3 ブルウィップ効果の要因

次に、ブルウィップ効果の要因を考える。12個がブルウィップ効果の要因として考えられる。

- ① 発注から納入までのリードタイム
- ② 緊急発注量のバッチ単位の注文方式
- ③ サプライヤーの生産計画手法
- ④ 意思決定者のオーバーアクション
- ⑤ 複数の要因を考慮した発注方式
- ⑥ 週単位計画から日単位計画
- ⑦ 製造ロットによる上流と下流のマッチングの難しさ
- ⑧ サプライヤー間の情報共有
- ⑨ 価格割引
- ⑩ 内示変動のときのトレンドやばらつきの変動
- ⑪ 安全在庫目標の決め方
- ⑫ 緊急注文タイミングのアルゴリズム

それぞれの要因について説明する。リードタイムは、発注から納入までかかる日数を表す。つまり、サプライヤー側は先に生産しておく必要があることが要因となる。バッチ単位の注文とは、部品を1個ずつ注文するのではなくて、1000個ずつなど複数個ずつ注文することを指す。サプライヤーの生産計画手法は、サプライヤーの設備能力や製品品質のばらつき等による供給不足時の対応を指す。オーバーアクションは、通常時に連続で供給不足に陥った時などに、多めに注文することを指す。ロットとは、生産・出荷の最小単位のこと、1次サプライヤー間では10個から生産できるが、2次サプライヤーの部品は1000個からしか生産できず、1次サプライヤーの部品が2次サプライヤーの部品は一つだけ必要な場合などに発生する。価格割引とは、月によって部品が安いことがあることを指す。

3 シミュレータの開発

3.1 シミュレータの構成

本研究では、内示生産システムを用いるサプライチェーンにおける一つの企業の物の流れを模したシミュレータを作成した。内示や目標在庫量などを設定するとブルウィップ効果などの評価指標を算出するものである。

シミュレーターの各行について説明する。内示 \hat{D}_t は、需要予測値を表す。基準搬入量 H_t は、確実に生産する数量を表す。つまり、内示が的確なものならば需要予測値と基準搬入量は等しいが、そうでない（需要量と内示に差が出る）ならば、余剰在庫を出さないために、内示より低く設定する。

追加搬入量 V_t は、前日の緊急発注量と同値である ($V_t = K_{t-1}$)。搬入量合計は、発注量 q_t であり、基準搬入量及び追加搬入量の合計を表し、 $q_t = H_t + V_t$ である。工場使用量は、メーカーが必要としている部品の数のことである。つまり、需要量 D_t を表す。安全在庫目標 Z_t は、自由に決めることができる。

繰越在庫 S_t は、翌日に繰り越される在庫であり、自由に初期値を決めることができる。また $S_t = S_{t-1} + B_t - D_t$ である。緊急発注量 K_t は、繰越在庫が安全在庫目標の半分以下の場合に値が入り、 $K_t = Z_t - S_t$ である。判定は、安全在庫目標を達成できているかを表し以下のように記号で表示する。

- ① 繰越在庫が安全在庫目標以上ならば○を表示
- ② 繰越在庫が安全在庫目標の1/2以上ならば□を表示
- ③ 繰越在庫が安全在庫目標の1/2未満ならば×を表示
- ④ 繰越在庫が0未満ならば××を表示（在庫切れ）

充足量 J_t は、当日の工場使用量へ充当できる部品の数量を表す。 $J_t = D_t + S_t (S_t < 0)$, $J_t = D_t (S_t \geq 0)$ である。

3.2 条件

シミュレータに要因を組み込んだ発注方式の場合のブルウィップ効果を取得する。ブルウィップ効果の要因は多くあるが、今回はより影響があると考えられるリードタイム、倍数ロット数、需要のばらつきを要因として考え、その中から2つの要因を選択し値を変更してシミュレーションを行った。リードタイムは、発注から届くまでの日数、倍数ロット数は、発注量の最小単位、需要のばらつきは、需要量の精度をそれぞれ変化させることで実装した。今回は、内示 $D_t = 1162$ 、基準搬入量は $D_t - 240 = 922$ 、工場使用量は平均 1162、安全在庫目標は内示の次の30日間の平均値を3倍したものの、繰越在庫の初期値は180とした。また、繰り越し在庫が安全在庫目標の1/2未満であれば、その不足分を発注する。

4 数値実験ならびに考察

それぞれの要因を組み込んだ発注方式で、10回シミュレーションを行う。つまり、1万日分のシミュレーションを行う。要因を変化させた場合のブルウィップ効果の値は、表1, 2, 3のようになった。表1からは、ロット数が一定の場合に、リードタイムが大きくなると、ブルウィップ効果は大きくなることがわかる。一方、リードタイム一定の場合に、ロット数の変化に対してブルウィップ効果は単調的な変化ではない。需要の平均に対してロット数が小さい場合には、発注量は変動が微小となり、また、需要の平均に対して大きい場合は、ロット数で発注することになり、ともに分散が小さくなる傾向である。さらにロット数が増えると発注が間欠的になり、分散が大きくなる傾向である。表2より、需要のばらつきが大きくなると、ブルウィップ効果は小さくなる。ブルウィップ効果の算定式の分母が大きくなるからであり、単調的な変化である。また、リードタイムを同時に考慮しても、単調的な変化となる。表3より、ロット数と需要のばらつきにより、発注の数量の大きさが変化する。

表1 リードタイムとロット数による

ブルウィップ効果

	ロット数				
リードタイム	800	1000	1200	1500	2000
1日	0.32	1.52	0.63	0	3.03
2日	0.41	1.52	0.57	0	3.01
3日	0.42	1.51	0.69	0	3.09
5日	0.63	1.60	0.81	0	3.11
10日	2.12	2.50	2.39	1.61	3.51
15日	3.53	3.86	3.95	3.45	4.26
30日	6.20	6.21	6.90	6.48	6.48

表2 リードタイムと需要のばらつきによる

ブルウィップ効果

	需要のばらつき				
リードタイム	10	50	100	200	300
1日	3.19	1.53	1.00	0.73	0.68
2日	3.06	1.51	0.98	0.76	0.65
3日	3.11	1.56	0.99	0.73	0.64
5日	3.22	1.54	1.02	0.91	0.91
10日	7.77	3.79	3.43	2.90	2.70
15日	23.83	6.32	4.65	3.98	3.81
30日	94.11	20.25	11.31	7.23	6.28

また、発注の間隔が変化したりするために、結果として発注量の分散は多岐に変化する。単調的な変化の傾向はない。

5 まとめ

本研究では、複合要因を考慮した場合の内示生産システムのブルウィップ効果をシミュレータを作成することで求めた。ブルウィップ効果は、需要量の分散と発注量の分散の比率により定義されてきた。しかし、ロット数などの実際的な条件を織り込んだ複合的な要因を考慮する場合には単に発注量の分散ではなく、発注量の数量の大きさ、発注の間隔、間歇性などを考慮する必要があることがわかる。今後、統一的な算定式を考案していく。

参考文献

- [1] <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r01/pdf.html> (2019年7月3日)
- [2] 生天目章, 岡田知仁, 佐藤浩: エージェントモデル

表 3 ロット数と需要のばらつきによる

ブルウィップ効果

	需要のばらつき				
ロット数	10	50	100	200	300
800	0	0	0	0.12	0.51
1000	0	4.18	3.52	2.26	1.48
1200	0	0	0	0.41	0.78
1500	0	0	0	0	0
2000	0	9.15	6.15	4.41	3.27

に基づくサプライチェーンマネジメント支援ツール (特集 MAS コンペティション), オペレーションズ・リサーチ = Communications of the Operations Research Society of Japan : 経営の科学, Vol.62, No.8, pp.515-520, 2017

- [3] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, E. Simchi-Levi and R. Shankar : Designing and managing the supply chain: concepts, strategies and case studies, Tata McGrawHill Education, 2008
- [4] 上野信行 : 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, 広島経済大学経済研究論集, Vol. 41, No. 2-3, pp. 5-17, 2018