

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]。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]。そのサプライチェーンを良くする一つの考え方が SCM であり、藤野によると、「不確定性の高い市場変化にサプライチェーン全体をアジル（機敏）に対応させ、ダイナミックに最適化を図ること」である [5]。

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。例えば、顧客の必要としているものの把握が遅れ、その会社の中だけで閉じたサプライチェーンになっている等である [6]。

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][7][4]。

ブルウィップ効果については、小売業や内示生産システムなどを対象に、その発生要因と解決方法

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

図 1 内示生産システムの例

についていくつかの研究が進められてきた [8][?]. 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。

また、実験計画法を用いることで、要因が組み合わせることで発生する影響についても調査する。

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。自動車産業における取引システムを図 1 に示す。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。

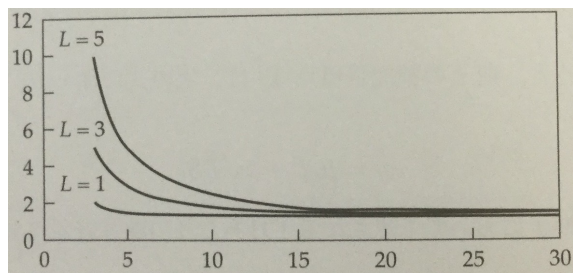


図 2 小売業におけるブルウィップ効果

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，

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

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．この式を，縦軸 B ，横軸 w のグラフに表すと図 2 のようになり，ブルウィップ効果は単調的な結果となる．これは，限定されたパラメータを用いているからである．

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 需要のばらつき
- ④ サプライヤーの生産計画手法

- ⑤ 意思決定者のオーバーアクション
- ⑥ 複数の要因を考慮した発注方式
- ⑦ 週単位計画から日単位計画
- ⑧ 製造ロットによる上流と下流のマッチングの難しさ
- ⑨ サプライヤー間の情報共有
- ⑩ 価格割引

- ⑪ 内示変動のときのトレンドやばらつきの変動
- ⑫ 安全在庫目標の決め方
- ⑬ 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，または，最低注文数を決定してそれ以上注文することを指す．つまり，倍数ロット数による注文方式及び最小ロット数による注文方式である．需要のばらつきは，需要量の標準偏差が変わることでブルウィップ効果の式に需要量の分散が含まれていることから影響を与える事が分かる．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，意思決定者による来期の不足の予想及び不安の感情などにより多めに注文することを指す．複数の要因を考慮した発注方式は，複合的に要因を考えた場合に，要因それぞれが互いに及ぼしあう影響からブルウィップ効果に影響を与えられから要因となる．製造ロットによる上流と下流のマッチングの難しさとは，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．内示変動の時のトレンドやばらつきの変動とは，内示

にトレンド性がある場合に、内示のばらつきを調べる期によって変化することを表し、発注量に影響を与えると考えられる。安全在庫目標の決め方は、多くの方法がある。緊急注文タイミングのアルゴリズムは、安全在庫目標と現在の在庫の差によって緊急注文のタイミングを決める。

2.4 直交表による実験計画

直交表とは、任意の2因子（列）について、その水準のすべての組合せが同数回ずつ現れるという性質をもつ実験のための割り付け表である。その、直交表を用いるもののの中に実験計画法がある。実験計画法とは、実験を効率良く進めるために作られた技術である。実験計画法を行うと、要因それぞれの主効果と交互作用が分かる。主効果とは、それぞれの独立変数がそれぞれ「独自」に従属変数へ与える単純効果のことである。交互作用とは、独立変数を組み合わせた場合の複合効果のこと、要因Aの主効果と要因Bの主効果だけでは説明できない組み合わせ特有の効果がみられることである。

2.5 MPI による並列分散処理

MPI(Message Passing Interface)とは、分散メモリ間のメッセージ通信API(Application Programming Interface)の規格である。つまり、計算機が他の計算機とメッセージの送受信をするためのものである。MPIにはいくつかの実装方法がある。

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。図3が作成したシミュレータである。

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

内示		1162 安目				150						
σ		80		1M								
		初期	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月		
①	内示	-	1162	1162	1162	1162	1162	1162	1162	1162	1162	1162
②	基準搬入量	-	922	922	922	922	922	922	922	922	922	922
	追加搬入量	-	0	1797	0	0	0	1044	0	0	0	0
	搬入量合計	-	922	2719	922	922	922	1966	922	922	922	922
③	工場使用量	-	1190	1095	1210	1152	1210	1287	1344	13		
④	安全在庫目標	-	1709	1738	1750	1773	1774	1772	1768	17		
⑤	繰越在庫	180	-88	1536	1248	1018	730	1409	987	5		
⑥	緊急発注量	-	1797	0	0	0	1044	0	0	11		
⑦	判定	-	×	×	□	□	□	×	□	×		
⑧	充足量	-	1102	1095	1210	1152	1210	1287	1344	13		

○	□	×	×	×	平均在庫	搬入回数	追加搬入量合計	在庫切れ回数	充足率
156	634	210	0	1272	210	230097	0	100%	

	平均	標準偏差	BULLWHIP効果
工場使用量	1167.54	310.09	1.51
追加搬入量	246.79	468.32	

図3 シミュレータの例

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。

追加搬入量は、発注量 q_t であり、前日以前の緊急発注量と同値であり、リードタイム L によって何日前の緊急発注量が決まり、その値と同値になり次式で表される。

$$q_t = K_{t-L} \quad (3.1)$$

搬入量合計 V_t は、基準搬入量及び追加搬入量の合計を表し、次式で表される。

$$V_t = H_t + K_t \quad (3.2)$$

工場使用量は、メーカーが必要としている部品数のことである。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。

$$S_t = S_{t-1} + B_t - D_t \quad (3.3)$$

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、

$$K_t = Z_t - S_t \quad (3.4)$$

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。

$$J_t = D_t + S_t (S_t < 0), J_t = D_t (S_t \geq 0) \quad (3.5)$$

そして、ブルウィップ効果 B は、式 (2.2) から、追加搬入量の分散 $Var[q_t]$ 及び工場使用量の分散 $Var[D_t]$ より求められる。今回は、追加搬入量の値が 0 の部分を省いた場合のブルウィップ効果を求めた。

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、最小ロット数、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、緊急発注量が決定されてから届くまでの日数である。倍数ロット数は、1000 が倍数ロット数であれば、緊急発注量の値を 1000 ずつ増加させ当日の式より割り出された値を上回った時の値とすることで実装した。最小ロット数は、1000 が最小ロット数であれば、緊急発注量の値が 1000 を超えてなければ緊急発注量の値を 1000 とすることで実装した。需要のばらつきは、需要量の標準偏差をそれぞれ変化させることで実装した。

今回は、内示 $\hat{D}_t = 1162$ 、基準搬入量は $D_t - 240 = 922$ とする。工場使用量は通常の場合、平均 1162、標準偏差 312 の疑似データとしてその中の値から一様乱数で決定された値が入り、要因として需要量の標準偏差 σ を設定した場合は、平均 1162 及び標準偏差 σ で正規分布する乱数の値が入る。安全在庫目標は内示の翌日から 30 日間の平均値を 3 倍したものの、繰越在庫の初期値は 3000 とした。また、繰り越し在庫が同日の安全在庫目標の

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, 4, 5 のようになった。

表 1 は、リードタイム及び倍数ロット数を要因として考慮し変化させた場合のブルウィップ効果の値である。表 1 から、倍数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、倍数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倍数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、倍数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。さらに倍数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 は、リードタイム及び需要のばらつきを要因として考慮し変化させた場合のブルウィップ効果の値である。表 2 より、リードタイム一定の場合に、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。これは、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 は、倍数ロット数及び需要のばらつきを要因として考慮し変化させた場合のブルウィップ効果の値である。この時のリードタイム L の値は 1 とした。表 3 より、倍数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。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。

表 4 は、最小ロット数及び需要のばらつきを要

表 1 リードタイムと倍数ロット数による

ブルウィップ効果

倍数ロット数 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

因として考慮し変化させた場合のブルウィップ効果の値である。この時のリードタイム L の値は 1 とした。表 4 からは、需要のばらつきが大きくなると、ブルウィップ効果は大きくなる。最小ロット数が大きくなると、ブルウィップ効果は小さくなる。ブルウィップ効果は、単調的な変化となった。

表 5 は、最小ロット数及びリードタイムを要因として考慮し変化させた場合のブルウィップ効果の値である。表 5 からは、最小ロット数が一定で、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。リードタイム一定では、リードタイム 30 日の場合を除いて、最小ロット数の変化に対して効果は単調的な変化となった。リードタイム 30 日の場合に変化が少なかったのは、ほとんど発注が行われないため緊急発注量が膨大になり最小ロット数によって制御されるのが最初の発注のみとなるからである。

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

表 3 倍数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 倍数ロット数	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

表 4 最小ロット数と需要のばらつきによる

ブルウィップ効果

最小ロット数 需要のばらつき	2000	2500	3000	3500	4000
10	0.01	0	0	0	0
50	0.12	0	0	0	0
100	0.25	0	0	0	0
200	0.4	0	0	0	0
300	0.43	0.03	0	0	0

の分散と発注量の分散の比率により定義されてきた。要因を個別にブルウィップ効果への影響は、倍数ロット数の場合を除いて単調的な変化である。しかし、ロット数などの実際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
- [5] ダイヤモンド・ハーバード・ビジネス編集部編: サブ

表 5 最小ロット数とリードタイムによる

ブルウィップ効果

最小ロット数 リードタイム	2000	2500	3000	3500	4000
1	0.36	0.01	0	0	0
2	0.37	0.01	0	0	0
3	0.38	0.01	0	0	0
5	0.7	0.08	0	0	0
10	2.39	1.88	0.96	0.13	0
15	3.57	3.49	2.86	2.32	1.31
30	5.96	6.22	5.87	5.86	5.65

ライチェーン理論と戦略, pp. 3-43, ダイヤモンド社,
1998

[6] https://www.noc-net.co.jp/blog/2017/05/column_215/ (2019 年 1 月 27 日)

[7] 菊地竜也, 石黒一彦, 稲村肇, 石倉智樹: scm による
建設プロジェクト在庫削減効果の検討, 土木計画学研
究・論文集, Vol.18, pp. 395-402, 2001

[8] F. Chen, Z. Drezner, J. K Ryan, and D. Simchi-
Levi : Quantitative models for supply chain man-
agement, pp. 417-439, Springer, 1999

[9] F. Chen, Z. Drezner, J. K Ryan, and D. Simchi-
Levi : quantifying the bullwhip effect in a sim-
ple supply chain: The impact of forecasting,
lead times, and information, Management science,
Vol.46, No. 3, pp. 436-443, 2000