

Impact of Communication Delay on the Bullwhip Effect in a Supply Chain Where Demand Information is Shared

Hirotaka MIZUNO ^{†1}, Hiroumi MORIYAMA ^{†1} and Takao HADA ^{†1}

Abstract

The bullwhip effect is an important phenomenon of supply chains where the demand fluctuations are amplified as they go up the supply chain. In some previous studies, it has been reported that sharing the final demand information among the participants of the supply chain is effective for suppressing the demand fluctuation amplifications. In many actual supply chains, however, there are not always capital relationships among all the participants. In such a case, it is difficult for the participants to share the final demand information, which is because the rule of profit distribution has not been established. In this paper, a new supply chain model is proposed that realizes the sharing of demand information in a different way. In this model, each participant provides the final demand information for the next participant along with its order information. Consequently, the final demand information can be relayed to every upstream participant in the supply chain although communication delays arise. Since there are business connections among each adjoining participant, it is considered to be easily realizable for each participant to transmit the final demand information along with its order information. Mathematical formulation and numerical simulations show that the proposed model suppresses the bullwhip effect despite sharing the delayed information, unlike the non-information-sharing model.

Key words: supply chain, bullwhip effect, information sharing, communication delay

^{†1} Tokai University

Received: August 6, 2013

Accepted: September 12, 2014

最終需要情報を共有するサプライチェーンにおいて 共有情報伝達の遅れがブルウィップ効果抑制に及ぼす影響の分析

水野 浩孝^{†1}, 森山 弘海^{†1}, 羽田 隆男^{†1}

サプライチェーンにおいて、最終需要の変動が増幅されながら上流側へ伝搬するブルウィップ効果と呼ばれる現象が知られている。ブルウィップ効果の抑制には最終需要情報の共有が有効と言わわれているが、現実のチェーンでは情報共有の実現は必ずしも容易ではない。本論文では、チェーンの各段階が上流段階に発注する際に、発注情報とともに最終需要情報も伝達するモデルを取り上げる。このモデルでは、上流側ほど遅れがあるものの、最終需要情報共有が実現される。評価式ならびにシミュレーション実験によりモデルを評価し、時間的に遅れた最終需要情報であっても、各段階がそれらを共有することでブルウィップ効果を抑制できることを明らかにした。

キーワード：サプライチェーン、ブルウィップ効果、情報共有、情報伝達の遅れ

1 は じ め に

サプライヤー、メーカー、卸、小売などの複数の企業が行う供給活動の連鎖であるサプライチェーンにおいて、顧客の需要（最終需要）がそれほどばらついていないにもかかわらず、チェーンの上流側での需要が大きくばらつくことが現実の問題として知られている。チェーンを上流に進むにしたがい需要の変動が増幅されるこの現象はブルウィップ効果（むち効果）と呼ばれ、上流側の企業での生産や在庫管理のコストが増大してしまう原因となる[1], [2]。

ブルウィップ効果の発生要因として、各企業が個別に行う需要予測、リードタイム、バッチ発注などが指摘され、それらの影響について分析されてきた[3]～[8]。

また、ブルウィップ効果の抑制には参加企業がチェーン内の各種情報を共有することが有効であると言われており、文献[4]～[7], [9]では最終需要情報の共有の有効性について報告されている。

それらの従来研究では、情報共有の際に、全ての参加企業が最終需要情報を時間遅れなしで利用できることを想定していた。しかし、サプライチェーンを構成する全企業に資本関係があるような場合以外、一般に、各々の参加企業に最終需要情報が遅れなしに提供されるようにすることは容易ではない。情報提供によって得られるチェーン全体の利益を各企業に分配するルール作成に関して全参加企業が合意することが困難だからである。

これに対し、本論文では、サプライチェーンの各企業が上流側企業に発注する際に、発注情報と併せて、下流側企業から受け取った最終需要情報も伝達するようなサプライチェーンのモデルを考える。直接の取引関係がある隣接する2つの企業の間の合意さえ出来れば2者の間で最終需要情報の授受が可能であるので、このモデルの方が実現容易であると考えた。このモデルでは、最終需要情報は中継されて上流まで届けられることになり、チェーン全体で最終需要情報の共有が実現される。ただし、上流側ほど最終需要情報の到着が遅れることになる。このモデルについて評価式ならびにシミュレーション実験による評価を行い、共有情報伝達の遅れがブルウィップ効果抑制に与える影響を分析する。

以下、第2節でブルウィップ効果を説明し、第3節では従来モデルならびに本論文で新たに導入するモデルを定義し、それぞれのモデル式を紹介する。そして、第4節では新モデルについてブルウィップ効果の評価式を導出し、評価式を用いて各モデルで発生するブルウィップ効果を定量比較する。第5節ではシミュレーション実験を行い、評価式による結果との比較を行い評価式の妥当性を検証する。最後に、第6節で結論と今後の課題を述べる。

2 ブルウィップ効果

ブルウィップ効果が起きると、上流側では需要の大きな変動に対応するために多くの在庫を持つなどの対策が必要となり、設備やコストの面で大きな負担となる。ブルウィップ効果の主な発生要因として、

- ・不正確な需要予測による発注のぶれ

^{†1} 東海大学

受付: 2013年8月6日, 再受付(3回)

受理: 2014年9月12日

- リードタイム（発注から入荷までの時間遅れ）
- ロットにまとめた発注による需要情報の歪み
- 在庫切れやバックオーダ発生による需要情報歪み
- 安全在庫の保有

があることが判っている[4], [5].

ブルウィップ効果への対策として、従来から、チェーン内の各種の情報を共有することが有効であると言われてきた。例えば、チェーンの各段階が最終需要情報を用いて需要予測を行うことによりブルウィップ効果を抑制できることが知られている。

3 モデルの定義

3.1 モデルの概要

本論文では3つの直列多段階サプライチェーンのモデルを用いる。2つは従来から取り扱われてきたモデルであり、との1つは本論文で新たに導入するモデルである。以下に各モデルの定義を述べる。

(1) 独立型モデル

独立型モデルでは、図1のように、チェーンの各段階は下流側段階から発注情報を受け取って、上流側段階への発注量を決定する。情報共有は行わない。図では Z は1期間だけ情報伝達を遅らせる演算子であり、各段階の発注情報は1期間遅れて上流側段階に届くことを表している。また、品物は、発注されてから補充リードタイムの期間だけ経過した後に上流側段階から到着する。このモデルではブルウィップ効果が顕著に現れることが知られている。

(2) 最終需要情報共有（遅れなし）型モデル

このモデルでは、図2にあるように、各段階は下流側段階からの発注情報に加えて最終需要情報も用いて上流側段階への発注量を決定する。最終需要情報は全ての段階に時間遅れなしで伝達されるものとする。このモデルではブルウィップ効果の発生が抑制されている。

(3) 最終需要情報共有（遅れあり）型モデル

本論文で導入する最終需要情報共有（遅れあり）型モデルを図3に示す。このモデルでも、各段階は下流側段階からの発注情報と最終需要情報を用いて上流側段階への発注量を決定する。最終需要情報共有（遅れなし）型モデルでは最終需要情報は一斉に各段階へ遅れなしで伝達されるのに対し、本モデルでは、各段階が隣接する上流側段階に発注情報とともに最終需要情報も伝達する。すなわち、各段階が最終需要情報を上流側へ中継してゆく。発注情報は上

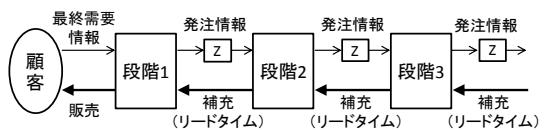


図1 独立型モデル

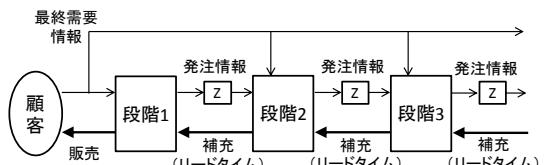


図2 最終需要情報共有（遅れなし）型モデル

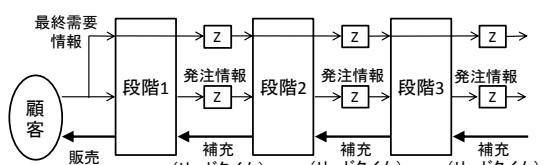


図3 最終需要情報共有（遅れあり）型モデル

流側の段階に1期間遅れて伝達されるとしており、最終需要情報もこれに同期して1期間遅れて上流側段階に伝達されるものとする。したがってチェーンの上流ほど遅れた情報となってしまうことになる。このように遅れが生じるもの、全ての段階で最終需要情報が利用可能になる。

3.2 共有型モデルの実現可能性

最終需要情報共有（遅れなし）型モデルの実現形態として、最下流にある段階あるいは企業本部などの別組織が最終需要情報を他の全ての段階へ送信する形が考えられる。サプライチェーンの全参加者の間に資本関係があるような場合以外、一般に、この形態の実施は困難と思われる。それは、共有情報提供によってチェーン全体が得る利益を分配するルールについて、互いに取引関係のない全ての参加者が合意することは難しいからである。

一方、最終需要情報共有（遅れあり）型モデルでは、隣接する2段階の間で最終需要情報が上流側へ順に中継される。隣接する2段階の間には直接の取引関係があり、2者間で発注情報の授受が行われる。この発注情報授受の経路を活用して、下流側から送られてきた最終需要情報を上流側へ中継することは、2者間の合意のみで実施可能である。さらに、本論文で

は情報共有のために送受信されるのは最終需要情報であるとしており、これは各段階の内部情報ではない。このため、各段階がこの情報を外部へ提供することの抵抗は少ないと思われる。

以上から、本論文で提案する最終需要情報共有（遅れあり）型モデルの実現性の方が高いと考える。

3.3 記号の定義

本論文では以下の記号を用いる。

d_t ：期間 t における最終需要量

$D_t^{(i)}$ ：段階*i*での期間 t における需要量

$Y_t^{(i)}$ ：段階*i*での期間 t における出荷量

$Q_t^{(i)}$ ：段階*i*での期間 t における発注量

$X_t^{(i)}$ ：段階*i*での期間 t における入荷量

$S_t^{(i)}$ ：段階*i*での期間 t における期末在庫量

$\hat{D}_t^{(i)}$ ：段階*i*での期間 t における需要量の予測値

$SS^{(i)}$ ：段階*i*での安全在庫量（十分大きい一定値とする）

L_i ：段階*i*での補充リードタイム

p_i ：段階*i*での需要予測時の移動平均計算期間

3.4 各段階の行動と前提条件

3種類のモデルのいずれについても、チェーンの各段階*i*は期間 t に以下の手順に従って行動するものとする。なお、発注は定期発注方式により行うとする。

1. 上流側の段階*i+1*から入荷量 $X_t^{(i)}$ を受け入れる
2. 下流側の段階*i-1*から需要量 $D_t^{(i)}$ を受注する
3. 段階*i-1*に対して出荷量 $Y_t^{(i)}$ を出荷する
4. 段階*i+1*への発注量 $Q_t^{(i)}$ を決定して発注する

発注情報は1期間遅れて上流側に伝達されるとしており、段階*i*の需要量 $D_t^{(i)}$ について次式が成り立つ。

$$D_t^{(i)} = \begin{cases} d_t & (i=1) \\ Q_{t-1}^{(i-1)} & (i \geq 2) \end{cases} \quad (1)$$

本論文では、安全在庫は十分にあり、在庫切れやバックオーダは発生しないものとする。また、ロットまとめによるバッチ発注も行わないものとする。

3.5 各段階の発注量決定方法

まず、段階*i*の期末在庫量について期間 t での値 $S_t^{(i)}$ と1期前の値 $S_{t-1}^{(i)}$ とは、

$$\begin{aligned} S_t^{(i)} &= S_{t-1}^{(i)} + X_t^{(i)} - Y_t^{(i)} \\ &= S_{t-1}^{(i)} + Y_{t-L_i}^{(i+1)} - Y_t^{(i)} \end{aligned} \quad (2)$$

の関係にある。各段階の安全在庫量が適切な値に設定されて、チェーンのどの段階にも在庫切れが起きないような状況では、式(2)はさらに、

$$\begin{aligned} S_t^{(i)} &= S_{t-1}^{(i)} + D_{t-L_i}^{(i+1)} - D_t^{(i)} \\ &= S_{t-1}^{(i)} + Q_{t-L_i-1}^{(i)} - D_t^{(i)} \end{aligned} \quad (3)$$

と書き換えられる。

段階*i*の期間 t での発注量 $Q_t^{(i)}$ は、目標在庫レベルと有効在庫量の差として以下の式により求める。

$$Q_t^{(i)} = ((L_i + 1)\hat{D}_t^{(i)} + SS^{(i)}) - (S_t^{(i)} + \sum_{k=1}^{L_i} Q_{t-k}^{(i)}) \quad (4)$$

式(4)において t の代わりに $t-1$ とすると次式が成り立つ。

$$Q_{t-1}^{(i)} = ((L_i + 1)\hat{D}_{t-1}^{(i)} + SS^{(i)}) - (S_{t-1}^{(i)} + \sum_{k=1}^{L_i} Q_{t-k-1}^{(i)}) \quad (5)$$

式(4)から式(5)を引くと、

$$\begin{aligned} Q_t^{(i)} - Q_{t-1}^{(i)} &= ((L_i + 1)(\hat{D}_t^{(i)} - \hat{D}_{t-1}^{(i)}) \\ &\quad - (S_t^{(i)} - S_{t-1}^{(i)} + Q_{t-1}^{(i)} - Q_{t-L_i-1}^{(i)})) \end{aligned} \quad (6)$$

となり、

$$Q_t^{(i)} = ((L_i + 1)(\hat{D}_t^{(i)} - \hat{D}_{t-1}^{(i)}) - (S_t^{(i)} - S_{t-1}^{(i)} - Q_{t-L_i-1}^{(i)})) \quad (7)$$

が得られる。式(3)からは $S_t^{(i)} - S_{t-1}^{(i)} - Q_{t-L_i-1}^{(i)} = -D_t^{(i)}$ が成り立つので、式(7)は以下のようになる。

$$Q_t^{(i)} = (L_i + 1)(\hat{D}_t^{(i)} - \hat{D}_{t-1}^{(i)}) + D_t^{(i)} \quad (8)$$

$D_t^{(i)}$ については式(1)が成り立つのので、最終的に、

$$Q_t^{(i)} = \begin{cases} (L_i + 1)(\hat{D}_t^{(1)} - \hat{D}_{t-1}^{(1)}) + d_t & (i=1) \\ (L_i + 1)(\hat{D}_t^{(i)} - \hat{D}_{t-1}^{(i)}) + Q_{t-1}^{(i-1)} & (i \geq 2) \end{cases} \quad (9)$$

が導かれる。式(9)の中の需要量予測値 $\hat{D}_t^{(i)}$ をどのような情報を用いて算出するかがモデルにより異なる。

3.6 モデル別の各段階の需要量予測値算出方法

(1) 独立型モデル

独立型モデルでは、段階*i*の期間 t での需要量予測値 $\hat{D}_t^{(i)}$ として、直近 p_i 期分の需要量の移動平均を用いるものとする。すなわち、次式により算出する。

$$\begin{aligned}\hat{D}_t^{(i)} &= \frac{1}{p_i} \sum_{k=1}^p D_{t-k+1}^{(i)} \\ &= \begin{cases} \frac{1}{p_1} \sum_{k=1}^{p_1} d_{t-k+1} & (i=1) \\ \frac{1}{p_i} \sum_{k=1}^{p_i} Q_{t-k}^{(i-1)} & (i \geq 2) \end{cases} \quad (10)\end{aligned}$$

(2) 最終需要情報共有（遅れなし）型モデル

最終需要情報共有（遅れなし）型では、全ての段階*i*が、期間*t*での需要量予測値 $\hat{D}_t^{(i)}$ として直近 p_i 期分の最終需要量の移動平均を用いるものとする。すなわち、各段階とも以下の式を用いて算出する。

$$\begin{aligned}\hat{D}_t^{(i)} &= \frac{1}{p_i} (d_{t-p_i+1} + d_{t-p_i+2} + \dots + d_{t-1} + d_t) \\ &= \frac{1}{p_i} \sum_{k=1}^p d_{t-k+1} \quad (11)\end{aligned}$$

段階1については独立型と同じになる。

(3) 最終需要情報共有（遅れあり）型モデル

最終需要情報共有（遅れあり）型の場合、期間*t*において、段階1は期間*t*までの最終需要情報を入手済みであるが、段階2は1期間前の期間*t-1*までの最終需要情報を入手済みである。同様に、段階3は2期間前の期間*t-2*までの最終需要情報を入手している。期間*t*での段階*i*の需要量予測値 $\hat{D}_t^{(i)}$ として、入手済みの p_i 期分の最終需要量の移動平均を用いるものとする。具体的には、段階1、段階2、段階3について、それぞれ、

$$\hat{D}_t^{(1)} = \frac{1}{p_1} (d_{t-p_1+1} + d_{t-p_1+2} + \dots + d_{t-1} + d_t) \quad (12)$$

$$\hat{D}_t^{(2)} = \frac{1}{p_2} (d_{t-p_2} + d_{t-p_2+1} + \dots + d_{t-2} + d_{t-1}) \quad (13)$$

$$\hat{D}_t^{(3)} = \frac{1}{p_3} (d_{t-p_3-1} + d_{t-p_3} + \dots + d_{t-3} + d_{t-2}) \quad (14)$$

を用いて算出する。段階1では独立型と同じになる。一般に、段階*i*については次式のように表せる。

$$\hat{D}_t^{(i)} = \frac{1}{p_i} \sum_{k=1}^{p_i} d_{t-k+i-2} \quad (15)$$

3.7 各モデルのモデル式

最終需要量からチェーンの各段階の発注量を算出

するモデル式を導く。

(1) 独立型モデル

式(9)と式(10)から、これまでに知られた独立型の差分方程式表現の以下のモデル式が求まる。

$$Q_t^{(1)} = \left(1 + \frac{L_1 + 1}{p_1} \right) d_t - \frac{L_1 + 1}{p_1} d_{t-p_1} \quad (16)$$

$$Q_t^{(i)} = \left(1 + \frac{L_i + 1}{p_i} \right) Q_{t-1}^{(i-1)} - \frac{L_i + 1}{p_i} Q_{t-p_i-1}^{(i-1)} \quad (i \geq 2) \quad (17)$$

さらに、式(16)と式(17)について、それぞれ両辺にz変換を施すことにより、次式のように段階*i*についての伝達関数表現のモデル式が得られる。

$$\frac{Z[Q^{(i)}]}{Z[d]} = z^{-i+1} \prod_{k=1}^i \left(\left(1 + \frac{L_k + 1}{p_k} \right) - \frac{L_k + 1}{p_k} z^{-p_k} \right) \quad (18)$$

$Z[\cdot]$ は時系列データのz変換を表している。式(18)は、最終需要量にインパルス状の変動 Δd が与えられると、それがチェーンを伝搬し、段階*i*では発注量に複数のインパルス状変動が現れるることを表している。さらに、これらの変動のうちの最大振幅のものは最終需要量の変動から(i-1)期間だけ遅れて現れる変動であり、大きさは Δd の $(1 + (L_1 + 1)/p_1)(1 + (L_2 + 1)/p_2) \dots (1 + (L_i + 1)/p_i)$ 倍であることが分かる。全ての段階で $L_i = 3$ 、 $p_i = 4$ とすると、倍率は 2^i となり、チェーンを遡るに従い累乗で増大することになる。

(2) 最終需要情報共有（遅れなし）型モデル

式(9)と式(11)から、これまでに知られた最終需要情報共有（遅れなし）型の差分方程式表現のモデル式が求まる。

$$Q_t^{(1)} = \left(1 + \frac{L_1 + 1}{p_1} \right) d_t - \frac{L_1 + 1}{p_1} d_{t-p_1} \quad (19)$$

$$Q_t^{(i)} = \frac{L_i + 1}{p_i} (d_t - d_{t-p_i}) + Q_{t-1}^{(i-1)} \quad (i \geq 2) \quad (20)$$

伝達関数表現のモデル式は以下のようになる。

$$\frac{Z[Q^{(i)}]}{Z[d]} = z^{-i+1} + \sum_{k=1}^i \left(\frac{L_k + 1}{p_k} (1 - z^{-p_k}) z^{-i+k} \right) \quad (21)$$

式(21)を見ると、最終需要量にインパルス状の変動が与えられると、各段階*i*では発注量にいくつかのインパルス状の変動が現れるが、それらの中で、(i-1)期間後に現れる、最終需要量の変動が $(1 + (L_1 + 1)/p_1)$

倍に増幅されたものが最大振幅の変動であることがわかる。全ての段階で $L_i = 3$, $p_i = 4$ の場合、上流に進んでも一定の倍率2となり、増大しない。

(3) 最終需要情報共有（遅れあり）型モデル

式(9)と式(15)より、今回導入した最終需要情報共有（遅れあり）型の差分方程式表現のモデル式は以下のように表せる。

$$Q_t^{(i)} = \left(1 + \frac{L_i+1}{p_i}\right)d_t - \frac{L_i+1}{p_i}d_{t-p_i} \quad (22)$$

$$Q_t^{(i)} = \frac{L_i+1}{p_i}(d_{t-i+1} - d_{t-p_i-i+1}) + Q_{t-1}^{(i-1)} \quad (i \geq 2) \quad (23)$$

式(23)を繰り返し用いると

$$\begin{aligned} Q_t^{(i)} &= \frac{L_i+1}{p_i}(d_{t-i+1} - d_{t-p_i-i+1}) \\ &\quad + \frac{L_{i-1}+1}{p_{i-1}}(d_{t-i+1} - d_{t-p_{i-1}-i+1}) \\ &\quad + \dots \\ &\quad + \frac{L_2+1}{p_2}(d_{t-i+1} - d_{t-p_2-i+1}) \\ &\quad + \left(1 + \frac{L_1+1}{p_1}\right)d_{t-i+1} - \frac{L_1+1}{p_1}d_{t-p_1-i+1} \end{aligned} \quad (24)$$

となり、最終的に次式が得られる。

$$Q_t^{(i)} = \left(1 + \sum_{k=1}^i \frac{L_k+1}{p_k}\right)d_{t-i+1} - \sum_{k=1}^i \left(\frac{L_k+1}{p_k}d_{t-p_k-i+1}\right) \quad (25)$$

さらに、式(25)の両辺にz変換を施すことで、伝達関数表現のモデル式が次式のようになる。

$$\frac{Z[Q_t^{(i)}]}{Z[d]} = \left(1 + \sum_{k=1}^i \frac{L_k+1}{p_k}\right)z^{-i+1} - \sum_{k=1}^i \left(\frac{L_k+1}{p_k}z^{-p_k-i+1}\right) \quad (26)$$

式(26)を見ると、最終需要量にインパルス状の変動が与えられると、各段階*i*では発注量にいくつかのインパルス状の変動が現れるが、それらの中で、(i-1)期間後に現れる、最終需要量の変動が $(1+(L_1+1)/p_1+(L_2+1)/p_2+\dots+(L_i+1)/p_i)$ 倍に増幅されたものが最大振幅の変動であることがわかる。全ての段階で $L_i = 3$, $p_i = 4$ の場合、倍率は $(1+i)$ となり、上流に進むにつれて直線状に増大することになる。

4 ブルウィップ効果評価式による各モデルの分析

最終需要量 d_t が定常系列である場合、各段階*i*の発注量 $Q_t^{(i)}$ の分散 $Var[Q_t^{(i)}]$ と最終需要量の分散 $Var[d_t]$ の比で定義される指標を用いてブルウィップ効果を定量評価できる。 $Var[\cdot]$ は分散を表す。ここでは本論文で導入した最終需要情報共有（遅れあり）型モデルについて、ブルウィップ効果の評価式を導く。

4.1 評価式

(1) 独立型モデル

式(16)と式(17)から、これまでに知られた独立型についてのブルウィップ効果の評価式が得られる[4], [5]。

$$\frac{Var[Q_t^{(i)}]}{Var[d_t]} = \prod_{k=1}^i \left(1 + 2\frac{L_k+1}{p_k} + 2\left(\frac{L_k+1}{p_k}\right)^2\right) \quad (27)$$

評価式の導出にあたり、最終需要量 d_t には自己相関が無いとしている。式(27)は、独立型では、チェーンを上流に進むにしたがい、最終需要量のばらつきが積の形で増幅されることを表している。増幅は、補充リードタイムが長くなると大きく、移動平均計算の期間数を増やすと小さくなることが分かる。

(2) 最終需要情報共有（遅れなし）型モデル

一方、式(19)と式(20)からは、これまでに知られた最終需要情報共有（遅れなし）型についての評価式、

$$\frac{Var[Q_t^{(i)}]}{Var[d_t]} = 1 + 2\frac{L_1+1}{p_1} + 2\sum_{k=1}^i \left(\frac{L_k+1}{p_k}\right)^2 \quad (28)$$

が得られる[4], [5]。独立型では最終需要量のばらつきが積の形で増幅されるのに対し、式(28)は、最終需要情報共有（遅れなし）型では最終需要量のばらつきが和の形で増幅されるにとどまるこを表している。

(3) 最終需要情報共有（遅れあり）型モデル

本論文で導入した最終需要情報共有（遅れあり）型について評価式を導く。式(25)の両辺の分散をとると次式のようになる。

$$\begin{aligned} Var[Q_t^{(i)}] = & \left(1 + \sum_{k=1}^i \frac{L_k + 1}{p_k}\right)^2 Var[d_{t-i+1}] \\ & + Var\left[\sum_{k=1}^i \left(\frac{L_k + 1}{p_k} d_{t-p_k-i+1}\right)\right] \\ & - 2 \left(1 + \sum_{k=1}^i \frac{L_k + 1}{p_k}\right) \times \\ & Cov\left[d_{t-i+1}, \sum_{k=1}^i \left(\frac{L_k + 1}{p_k} d_{t-p_k-i+1}\right)\right] \end{aligned} \quad (29)$$

ここで $Cov[\cdot, \cdot]$ は共分散を表す。 d_t に自己相関がない場合、式(29)は次式のように簡単化できる。

$$\begin{aligned} Var[Q_t^{(i)}] = & \left(1 + \sum_{k=1}^i \frac{L_k + 1}{p_k}\right)^2 Var[d_t] \\ & + \left(\sum_{k=1}^i \left(\frac{L_k + 1}{p_k}\right)^2\right) Var[d_t] \end{aligned} \quad (30)$$

式(30)から最終的なブルウェイップ効果の評価式、

$$\frac{Var[Q_t^{(i)}]}{Var[d_t]} = \left(1 + \sum_{k=1}^i \frac{L_k + 1}{p_k}\right)^2 + \sum_{k=1}^i \left(\frac{L_k + 1}{p_k}\right)^2 \quad (31)$$

が得られる。評価式(31)と式(28)を比べると、常に(式31)の右辺) $>$ (式(28)の右辺) が成立する。よって、共有する最終需要情報の伝達に遅れがある場合には、遅れなしの場合に比べて、最終需要量のばらつきの増幅のスピードが大きくなることが判る。しかし、式(31)からはまた、最終需要量のばらつきは二乗和の形で増幅されるに止まり、共有しない場合と比べると増幅のスピードは小さくなることも判る。

4.2 評価式による分析結果

4.1項の評価式(27), (28), (31)を用いて、各モデル

表1 評価式から求めた各段階の発注量と最終需要量の標準偏差比 ($L_i=3$, $p_i=4$)

	段階1	段階2	段階3
独立型	2.24 ($\sqrt{5}$)	5.00 ($\sqrt{25}$)	11.18 ($\sqrt{125}$)
最終需要情報共有(遅れなし)型	2.24 ($\sqrt{5}$)	2.65 ($\sqrt{7}$)	3.00 ($\sqrt{9}$)
最終需要情報共有(遅れあり)型	2.24 ($\sqrt{5}$)	3.32 ($\sqrt{11}$)	4.36 ($\sqrt{19}$)

について段階1～段階3の発注量の標準偏差と最終需要量の標準偏差の比 $\sqrt{Var[Q_t^{(i)}]} / \sqrt{Var[d_t]}$ を計算した。

パラメータ値として各段階とも $L_i=3$, $p_i=4$ を用いた場合の計算結果を表1と図4に示す。つぎに、補充リードタイムの影響を調べるために、各段階の L_i の

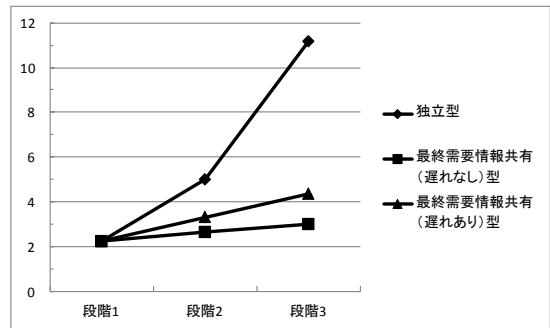


図4 評価式から求めた各段階の発注量と最終需要量の標準偏差比 ($L_i=3$, $p_i=4$)

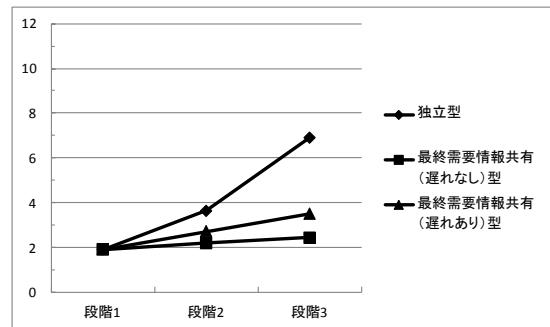


図5 評価式から求めた各段階の発注量と最終需要量の標準偏差比 ($L_i=2$, $p_i=4$)

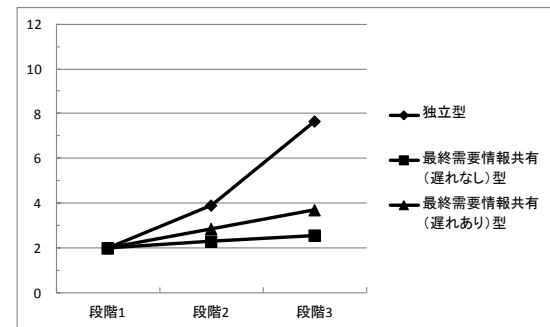


図6 評価式から求めた各段階の発注量と最終需要量の標準偏差比 ($L_i=3$, $p_i=5$)

値を3から2に変更して計算した。その結果を図5に示す。また、需要予測値算出での移動平均計算期間の影響を調べるために、各段階の p_i の値を3から5に変更して計算した。その結果を図6に示す。

4.3 考 察

表1と図4を見ると、独立型では、発注量のばらつきは1段階上流に進む毎に $\sqrt{5}$ 倍ずつ増幅されており、ブルウィップ効果が顕著に現れている。一方、最終需要情報共有（遅れなし）型では、発注量のばらつきはそれぞれ2.24, 2.65, 3.00とほぼ直線的な増加にとどまり、独立型に比べて増加のスピードは大幅に小さくなる。これらに対し、最終需要情報共有（遅れあり）型においても、2.24, 3.32, 4.36とほぼ直線的に増加している。増加のスピードは、最終需要情報共有（遅れあり）型でのそれより大きいものの、独立型と比べるとブルウィップ効果が大幅に低減されている。このことから、最終需要情報の伝達に遅れがあったとしても、その情報の利用価値は大きいと言える。

つぎに図5を見ると、独立型では各段階のリードタイムを短縮するとブルウィップ効果が低減されることが再確認できる。一方、最終需要情報共有（遅れあり）型と最終需要情報共有（遅れなし）型では、リードタイムの短縮の影響をそれほど受けていない。しかし、独立型と比べると大幅に抑制されている。

また図6を見ると、独立型では需要量予測値算出での移動平均計算期間を増加することもブルウィップ効果低減に有効であることが再確認できる。これに対し、最終需要情報共有（遅れあり）型と最終需要情報共有（遅れなし）型では、移動平均計算期間の増加の影響をそれほど受けていない。しかし、独立型と比べて大幅に抑制されている。

5 シミュレーション実験による各モデルの分析

最終需要情報共有（遅れあり）型の評価式の妥当性と有用性を確認するため、ここでは4節と同様のパラメータ値を設定してシミュレーション実験を行った。なお、実験では各段階の在庫量の変動についても評価した。

5.1 実験方法

3節で定義した3つのモデルに、それぞれ、最終需要量 d_i として平均1000、標準偏差100の正規乱数系列

表2 各段階の発注量と最終需要量の標準偏差の比
($L_i=3$, $p_i=4$)

	段階1	段階2	段階3
独立型	2.27	5.57	11.60
最終需要情報共有（遅れなし）型	2.27	2.77	3.19
最終需要情報共有（遅れあり）型	2.27	3.66	4.99

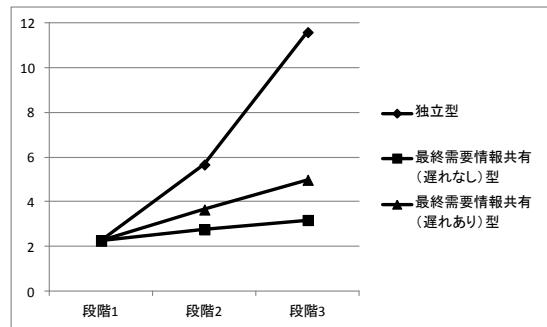


図7 各段階の発注量と最終需要量の標準偏差の比
($L_i=3$, $p_i=4$)

表3 各段階の期末在庫量の標準偏差 ($L_i=3$, $p_i=4$)

	段階1	段階2	段階3
独立型	305	784	1866
最終需要情報共有（遅れなし）型	305	554	740
最終需要情報共有（遅れあり）型	305	610	910

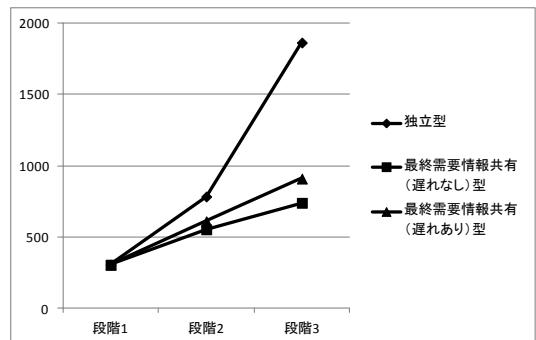


図8 各段階の期末在庫量の標準偏差
($L_i=3$, $p_i=4$)

を1000期間にわたって与え、段階1、段階2、段階3の発注量の系列を求めた。用いた1000個の数値は、平均1003.4、標準偏差100.0、かつ1次と2次の自己相関係数がそれぞれ0.021と0.023であり、乱数系列とみなして差し支えないものである。全ての段階について、補充リードタイム $L_i=3$ 、需要予測値算出での移動平均計算期間 $p_i=4$ 、安全在庫量 $SS^{(i)}=3000$ とした。

5.2 実験結果

各モデルについての実験で得られた各段階の1000期間分の発注量 $Q_i^{(i)}$ の標準偏差を求める、さらに最終需要量 d_i の標準偏差との比 $\sqrt{Var[Q_i^{(i)}]} / \sqrt{Var[d_i]}$ を求めた。結果を表2と図7に示す。また、各段階の1000期間分の期末在庫量 $S_i^{(i)}$ の標準偏差も求めた。その結果を表3と図8に示す。

5.3 考察

表2と図7において、段階1の発注量は全モデルで同一である。独立型では、発注量のばらつきは1段階上流に進む毎に2.27, 5.57, 11.60と指指数関数的に増加し、ブルウィップ効果が顕著に現れている。一方、最終需要情報共有（遅れなし）型では、発注量のばらつきは2.27, 2.77, 3.19と直線的な増加にとどまっている。これらに対し、最終需要情報共有（遅れあり）型では、2.27, 3.66, 4.99と直線的な増加となっている。最終需要情報共有（遅れなし）型には及ばないが、独立型よりもブルウィップ効果が大幅に低減されている。これらの結果は、評価式を用いた計算結果（表1）と良く一致している。このことから、本論文で導出した最終需要情報共有（遅れあり）型モデルの評価式の妥当性が検証できたと考える。

つぎに表3と図8を見ると、期末在庫量のばらつきは、独立型では上流段階ほど指指数関数的に増大しており、品切れ防止のためには安全在庫を大量に持つ必要があることがわかる。これに対し、最終需要情報共有（遅れなし）型、最終需要情報共有（遅れあり）型ともに、上流段階での期末在庫量のばらつきの増加は直線的であり、独立型に比べて安全在庫を大幅に削減できることが分かる。

6 おわりに

本論文では、各段階が上流側に発注を行う際に、下流側から受け取った最終需要情報を発注情報と併せて伝達するサプライチェーンのモデルを取り上げ、

このモデルについてブルウィップ効果を分析した。このモデルでは、上流に行くほど遅れが大きくなるものの、全段階で最終需要情報が利用可能となる。評価式ならびにシミュレーション実験による評価を行い、各段階が遅れなしに最終需要情報を共有する場合と比べるとブルウィップ効果の抑制効果が劣るもの、最終需要情報の共有を行わない場合と比べると大幅にブルウィップ効果を抑制できることを明らかにした。現実のサプライチェーンでは、全企業に遅れなしに情報を提供して情報共有を実現することが困難なケースがある。その点、本論文で導入したモデルの方が実現容易であろうと考えられる。

本論文では、サプライチェーンのモデル化にあたって、各段階で在庫切れが起きないこと、各段階が移動平均を用いて需要予測することなど、多くの単純化を行っている。今後の課題として、需要予測の方法、ロット単位の発注、在庫切れの発生などの諸要因を考慮したモデルについての分析があげられる。

参考文献

- [1] Lee, H. L., Padmanabhan, V. and Whang, S.: "The Bullwhip Effect in Supply Chains," *Sloan Manage. Rev.*, Vol. 38, Issue 3, pp. 231-240 (1997)
- [2] Lee, H. L., Padmanabhan, V. and Whang, S.: "Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect," *Manage. Sci.*, Vol. 43, No. 4, pp. 546-558 (1997)
- [3] Chen, F., Drenzer, Z., Ryan, J. K. and Simchi-Levi, D.: "The Bullwhip Effect: Managerial Insights on the Impact of Forecasting and Information on Variability in a Supply Chain," *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers, pp. 417-439 (1999)
- [4] Chen, F., Drenzer, Z., Ryan, J. K. and Simchi-Levi, D.: "Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information," *Manage. Sci.*, Vol. 46, No. 3, pp. 436-443 (2000)
- [5] 久保幹雄：「ロジスティクス工学」，朝倉書店（2001）
- [6] 鈴木定省、三島理、圓川隆夫：“定期発注方式を用いたサプライチェーンにおけるブルウィップ効果の量化に関する研究”，日本経営工学会論文誌，Vol. 56, No. 3, pp. 148-154 (2005)
- [7] 挿間雅義、宋宇：“ブルウィップ現象に影響を与える要素の特定”，日本経営工学会論文誌，Vol. 58, No. 2, pp. 106-114 (2007)

- [8] 水野浩孝, 森山弘海, 羽田隆男：“定期発注方式を採用したサプライチェーンにおいてロット発注がブルウィップ効果に及ぼす影響の定量評価”, 日本ロジスティクスシステム学会誌, Vol. 10, No. 1, pp. 13-20 (2010)
- [9] 水野浩孝, 森山弘海, 羽田隆男：“最終需要共有可能のサプライチェーンにおける非定常状態でのブルウィップ効果の分析”, 日本経営システム学会誌, Vol. 29, No. 3, pp. 191-200 (2013)