東海大学紀要情報通信学部
Vol.12,No.2,2019,pp.1-7

論文

サプライチェーンにおいて間接的な需要情報共有によって ブルウィップ効果を低減する方法の検討

水野 浩孝*1

A Method of Reducing the Bullwhip Effect in Supply Chain by Sharing Demand Information Indirectly

by

Hirotaka MIZUNO*1

(received on Sep. 25, 2019 & accepted on Nov. 15, 2019)

あらまし

サプライチェーンを上流側に進むにしたがい需要量のばらつきが増幅されるブルウィップ効果と呼ばれる現象が発生する問題が知られている．ブルウィップ効果の低減策として，チェーン全体で需要量などの情報を共有することが有効であることが知られている．しかし，現実にはサプライチェーン全体で情報共有することが困難であることが多い．本論文では，情報共有が困難なチェーンを対象として，下流側の段階からの発注量からこの下流側段階への発注量（需要量）を推定し，この推定値を用いて情報共有を間接的に実現する（近似する）方法について検討し，この方式を組み込んだチェーンのモデルを提案する．そしてシミュレーション実験を行い提案モデルの有効性を検証する．

Abstract

In supply chains, a phenomenon called bullwhip effect is widely known, that variation in final demand is amplified as the demand information goes up the chain upstream. As an effective mean to reduce the bullwhip effect is known, that sharing various information throughout the chain. However, it is often difficult to share information throughout the chain. In this paper, we consider the way for a stage to estimate the demand quantity of its downstream stage from the order quantity of the downstream stage. Then, a new model is proposed where indirect information sharing is realized using the above estimated value. Finally, simulation experiments are conducted to verify the proposed model.

キーワード: サプライチェーン, ロジスティクス, ブルウィップ効果, 情報共有, 需要予測
Keywords: *Supply Chain, Logistics, Bullwhip Effect, Information Sharing, Demand Forecast*

1. はじめに

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，顧客の需要量（最終需要量）がそれほどばらついていないにもかかわらず，上流側での需要量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．需要量のばらつきがチェーンを上流に進むにしたがい増幅されるこの現象はブルウィップ効果と呼ばれ，上流側の企業での生産や在庫管理のコストを増大させてしまう[1),2)]．その発生要因として，各段階のリードタイムの存在，各段階が限られた情報に基づいて行う発注行動などが指摘されてきた[3)~7)]．

ブルウィップ効果を低減する手法として，チェーン内の様々な情報をチェーン全体で共有することの有効性がこれまでに報告されている[4),6),8),9)]．チェーン全体での情報共有は，メーカーとその系列企業のように参加企業間に資本関係がある場合であれば，比較的容易であろう．しかし，現実のサプライチェーンでは必ずしも全ての参加企業に資本関係があるわけではない．この場合，各々の参加企業に情報が提供されるようにすることは容易ではない．

本論文では，チェーン内での情報共有が困難な場合についてブルウィップ効果を低減する方法として擬似的情報共有型モデルを提案する．情報共有しない情報分散型モデル，従来研究の情報共有型モデル，そして提案する擬似的情報共有型モデルの3つについてシミュレーション実験を行い，発生するブルウィップ効果を比較し，提案モデルの有効性を検証する．

以下，第2節ではサプライチェーンの基本的なモデル（情報分散型と情報共有型）を紹介し，第3節では間接的な情報共有を行う提案モデルの概要ならびに提案モデルの中心的な処理である最終需要量推定について説明する．そして，第4節ではシミュレーション実験による提案モデルの有効性検証について述べる．

*1 情報通信学部 経営システム工学科 教授
School of Information and Telecommunication Engineering, Department of Management Systems Engineering, Professor

2. 直列多段階サプライチェーンの基本的なモデル

ここでは最終需要情報の共有によるブルウィップ効果の低減に関する従来研究について述べる.

2.1 情報分散型チェーンと情報中央集権型（情報共有型）チェーン

ここでは以下の2種類の直列多段階サプライチェーンのモデルを紹介しておく.

(1) 情報分散型チェーン

Fig. 1に示すように，情報分散型ではチェーンの各段階は下流側の段階から発注情報のみを受けて，上流側の段階への発注量を決定する. 情報共有は行わない. 図でZは情報の伝達を1期間遅らせる演算子であり，各段階から発注情報は1期間遅れて上流側段階に伝達されることを示している. また，商品は，発注されてから補充リードタイム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) 情報中央集権型（情報共有型）チェーン

情報中央集権型(情報共有型)では, Fig. 2のように，各段階は下流側からの発注情報に加えて最終需要量の情報も受け取って，これらの情報を総合して発注量を決定する. 最終需要情報は全ての段階に遅れなしで伝達される. このモデルではブルウィップ効果の発生が抑制されることが知られている.

2.2 記号の定義

本論文で用いる記号を以下に列挙しておく.

d_t： 期間tにおける最終需要量（顧客の需要量）
$D_t^{(i)}$： 期間tにおける段階iの需要量
$Y_t^{(i)}$： 期間tにおける段階iの出荷量
$Q_t^{(i)}$： 期間tにおける段階iの発注量

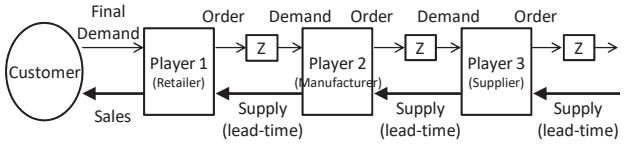


Fig. 1 Decentralized Supply Chain Model

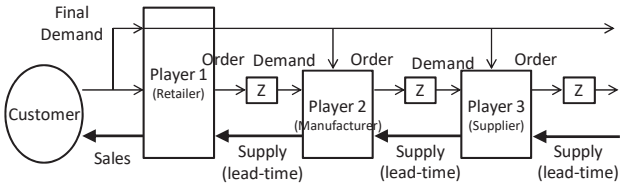


Fig. 2 Centralized Supply Chain Model (Sharing Demand Information)

$X_t^{(i)}$： 期間tにおける段階iの入荷量
$S_t^{(i)}$： 期間tにおける段階iの期末在庫
$\hat{D}_t^{(i)}$： 期間tにおける段階iの需要予測値
$SS^{(i)}$： 段階iの安全在庫量（一定値とする）
L_i： 段階iの補充リードタイム
p_i： 段階iの需要予測時の移動平均計算期間

2.3 チェーンの各段階の行動

本論文では2.1で紹介した2つのチェーンのいずれでも，期間tにおいて各段階iは以下の手順1～4に従い行動するものとする. そして，発注については定期発注方式で行うとする.

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

各段階の発注情報は1期間遅れて上流側に伝達されるとものとすると，段階iの需要量 $D_t^{(i)}$ について次式が成り立つ.

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

まず，段階iの期末在庫量について，期間tでの値 $S_t^{(i)}$ と期間t-1での値 $S_{t-1}^{(i)}$ との間には次式の関係が成立する.

$$S_t^{(i)} = S_{t-1}^{(i)} + X_t^{(i)} - Y_t^{(i)} = S_{t-1}^{(i)} + Y_{t-L_i}^{(i+1)} - Y_t^{(i)} \tag{2}$$

各段階において安全在庫量が適切な値に設定され，チェーンのいずれでも在庫切れの状況が起きていない場合，式(2)は次式のように書き換えられる.

$$S_t^{(i)} = S_{t-1}^{(i)} + D_{t-L_i}^{(i+1)} - D_t^{(i)} = S_{t-1}^{(i)} + Q_{t-L_i-1}^{(i)} - D_t^{(i)} \tag{3}$$

つぎに，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次式に従い求める.

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

本論文では安全在庫量 $SS^{(i)}$ は一定値としており，式(3)と式(4)を用いて $S_t^{(i)}$ と $SS^{(i)}$ を消去すると，

$$\begin{aligned} Q_t^{(i)} &= (L_i + 1)\left(\hat{D}_t^{(i)} - \hat{D}_{t-1}^{(i)}\right) + D_t^{(i)} \\ &= \begin{cases} (L_1 + 1)\left(\hat{D}_t^{(1)} - \hat{D}_{t-1}^{(1)}\right) + d_t & (i = 1) \\ (L_i + 1)\left(\hat{D}_t^{(i)} - \hat{D}_{t-1}^{(i)}\right) + Q_{t-1}^{(i-1)} & (i \geq 2) \end{cases} \end{aligned} \tag{5}$$

が得られる．この式(5)における需要予測値 $\hat{D}_t^{(i)}$ の算出方法が2つのモデルで異なる．これについては2.4で述べる．

2.4 情報分散型のモデル

情報分散型モデルでは，段階iの期間tでの需要予測値 $\hat{D}_t^{(i)}$ 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，以下の式により求める．

$$\hat{D}_t^{(i)} = \frac{1}{p_i}\sum_{k=1}^{p_i} D_{t-k+1}^{(i)} = \begin{cases} \dfrac{1}{p_1}\displaystyle\sum_{k=1}^{p_1} d_{t-k+1} & (i=1) \\ \dfrac{1}{p_i}\displaystyle\sum_{k=1}^{p_i} Q_{t-k}^{(i-1)} & (i \geq 2) \end{cases} \tag{6}$$

式(5)と式(6)を組み合わせて，情報分散型の段階iの発注量は，

$$Q_t^{(i)} = \left(1 + \frac{L_i + 1}{p_i}\right) D_t^{(i)} - \frac{L_i + 1}{p_i} D_{t-p_i}^{(i)} \tag{7}$$

と求めることができる．式(1)の関係を考慮すると，段階1での発注量の計算式は次式のようになる，

$$Q_t^{(1)} = \left(1 + \frac{L_1 + 1}{p_1}\right) d_t - \frac{L_1 + 1}{p_1} d_{t-p_1} \tag{8}$$

また，段階 2 での発注量計算式は次式のようになる．

$$Q_t^{(2)} = \left(1 + \frac{L_2 + 1}{p_2}\right) Q_{t-1}^{(1)} - \frac{L_2 + 1}{p_2} Q_{t-p_2-1}^{(1)} \tag{9}$$

2.5 情報中央集権型（情報共有型）のモデル

情報中央集権型（情報共有型）型では，全ての段階iが，期間tでの需要予測値 $\hat{D}_t^{(i)}$ 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，次式に従って算出する．

$$\hat{D}_t^{(i)} = \frac{1}{p_i}(d_{t-p_i+1} + d_{t-p_i+2} + \cdots + d_{t-1} + d_t) = \frac{1}{p_i}\sum_{k=1}^{p_i} d_{t-k+1} \tag{10}$$

段階1については情報分散型と同じものとなる．

式(5)と式(10)を組み合わせて，情報中央集権型（情報共有型）型の段階iの発注量の計算式は次式のように求められる．

$$Q_t^{(i)} = \frac{L_i + 1}{p_i}(d_t - d_{t-p_i}) + D_t^{(i)} \tag{11}$$

式(1)の関係を考慮すると，段階1の発注量計算式は次式のようになる．

$$Q_t^{(1)} = \left(1 + \frac{L_1 + 1}{p_1}\right) d_t - \frac{L_1 + 1}{p_1} d_{t-p_1} \tag{12}$$

式(12)は情報分散型での式(8)と同一である．段階 2 の発注量の計算式は次式のようになる．

$$Q_t^{(2)} = \frac{L_2 + 1}{p_2}(d_t - d_{t-p_2}) + Q_{t-1}^{(1)} \tag{13}$$

2.6 両モデルの振る舞いのシミュレーション例

3 段階のチェーンについて，基準パラメータとして各段階のリードターム L=3，移動平均の期間 p=4 と設定し，最終需要量として平均 1000，標準偏差 100 の正規乱数系列を与えた場合のシミュレーションを行った．

Fig. 3 に情報分散型モデルについてのシミュレーション結果を示す．各段階の発注量のばらつきがチェーンを上流側ほど大きくなっており，ブルウィップ効果が発生していることが判る．

情報分散型モデルでは，最終需要量の分散 $Var[d_t]$ と，段階iの発注量の分散 $Var[Q_t^{(i)}]$ との間には，次式に示す関係が成り立つことが知られている．

$$\frac{Var[Q_t^{(i)}]}{Var[d_t]} = \prod_{k=1}^{i}\left(1 + 2\frac{L_k + 1}{p_k} + 2\left(\frac{L_k + 1}{p_k}\right)^2\right) \tag{14}$$

式(14)から，情報分散型モデルでは最終需要量の変動は積の形で増幅されることが判る．

つぎに，Fig. 4 に情報中央集権型モデルのシミュレーション結果を示す．Fig.3 と比較して，発注量のばらつきが増幅されるスピードが小さくなっており，ブルウィップ効果が大幅に低減されていることが判る．

情報中央集権型モデルでは次式の関係が成り立つことが知られている．

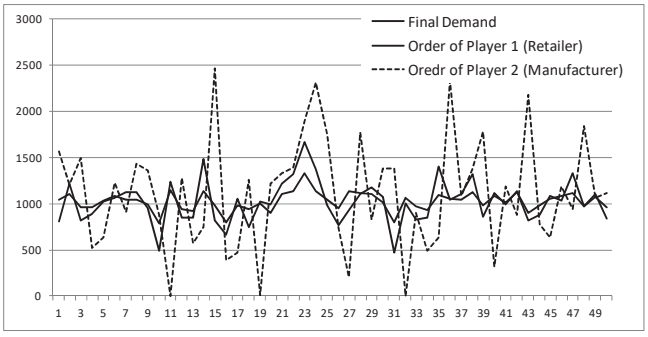


Fig. 3 Order Patterns of Player 1 and Player 2 of Decentralized Model (L=3, p=4))

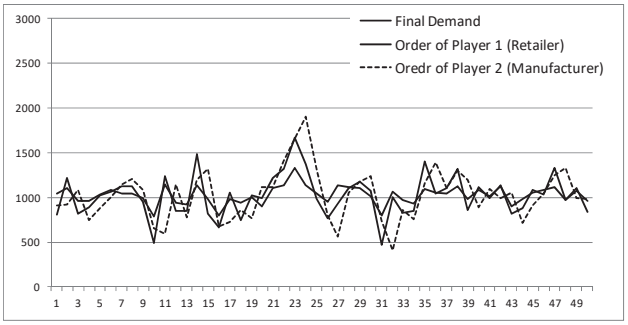


Fig. 4 Order Patterns of Player 1 and Player 2 of Centralized Model (L=3, p=4)

$$\frac{Var[Q_t^{(i)}]}{Var[d_t]} = 1 + 2\frac{L_k+1}{p_k} + 2\sum_{k=1}^{i}\left(\frac{L_k+1}{p_k}\right)^2 \tag{15}$$

式(15)から，情報共有型モデルでは，最終需要量の変動は和の形で増幅されるに過ぎないため，情報共有型ではブルウィップ効果を大幅に抑制できることが判る．

3. 下流側段階の需要量推定により間接的に情報共有を行うモデルの提案

ブルウィップ効果を低減するための手段として最終需要情報を共有することが有効であることを述べた．しかし，現実のサプライチェーンでは異なる企業グループから構成されるチェーンが多く存在する．このような場合，ひとつの企業グループからなるチェーンと異なり，需要情報の共有を行うのが困難であることも少なくない．

本論文では，情報共有を行うことが難しいサプライチェーンを想定し，そのようなチェーンにおいてブルウィップ効果を低減させる方法を検討する．情報共有に必要な情報は最終需要情報である．小売業者が卸売業者に発注した発注情報をもとに小売業者の需要量（顧客の最終需要量）を推定することで，間接的に情報共有を行うモデルを提案する．

3.1 提案モデルの方式概要

情報中央集権型モデルで，段階2が段階3への発注量 $Q_t^{(2)}$ を決定する際に必要な情報は最終需要量 d_t の情報である．もしも，段階2が段階1から受け取った発注量 $D_t^{(2)}(=Q_{t-1}^{(1)})$ の情報から最終需要量を推定することが可能であるならば，段階2は最終需要量 d_{t-1} の推定値 $\tilde{d}_{t-1}$ を用いて需要予測を行い，それをもとに段階3への発注量 $Q_t^{(2)}$ を決定することができる．Fig. 5は提案モデルの情報の流れとものの流れを示したものである．

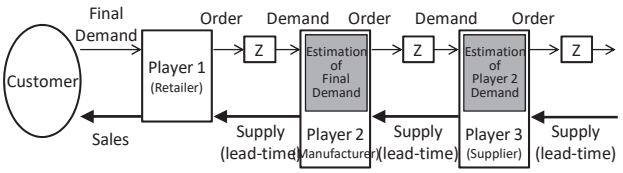


Fig. 5 Proposed Model (Sharing Demand Information Indirectly)

提案モデルでは，段階2は期間tにおいて以下のステップにしたがい行動し，発注量を決定する．

(1) 段階2は，需要量 $D_t^{(2)}$（＝段階1の発注量 $Q_{t-1}^{(1)}$）から段階1の需要量すなわち最終需要量 d_{t-1} の推定を行う（推定値を $\tilde{d}_{t-1}$ とする）
(2) 段階2は，ステップ(1)で求めた最終需要量の推定値 $\tilde{d}_{t-1}$ を用いて需要予測を行う
(3) 段階2は，ステップ(2)で求めた需要予測値 $\hat{D}_t^{(2)}$ を用いて段階3への発注量を決定する

段階1については，情報分散型モデル，情報中央集権型モデルと同一である．異なるのは，段階2の処理である．段階2において，段階1から受けた発注量をもとに最終需要量を推定するステップ(1)を追加することが提案モデルの特徴である．

情報分散型モデルでは，段階1から受けた発注量を用いて需要量を予測し段階3への発注量を決定していたためブルウィップ効果を引き起こしていた．これに対し，情報中央集権型モデルでは，段階1から受けた発注量でなく最終需要情報を用いて需要予測することで精度の高い需要予測を行うことでブルウィップ効果を低減できていた．

これらに対し，提案モデルでは，情報分散型モデルのように段階1から受けた発注量をそのまま用いるのではなく，段階1からの発注情報をもとに最終需要量を推定するステップを付加することで，推定した最終需要情報を用いることで間接的な需要情報の共有を行うおうとする．

最終需要量の推定値からの需要予測値の算出は次式により行われる．

$$\hat{D}_t^{(2)} = \frac{1}{p_2}\sum_{k=1}^{p_2}\tilde{d}_{t-k} \tag{16}$$

3.2 下流側段階の需要量の推定方法

提案モデルのステップ(3)での最終需要量の推定について詳しく述べる．段階1の小売業者は，段階2の卸売業者に，式(4)を用いて発注している．段階1については式(17)のようになる．

$$D_t^{(2)} = \left(1 + \frac{L_1 + 1}{p_1}\right) d_{t-1} - \frac{L_1 + 1}{p_1} d_{t-p_1-1} \tag{17}$$

式(17)において，tの代わりにt-p_1とすると，

$$D_{t-p_1}^{(2)} = \left(1 + \frac{L_1 + 1}{p_1}\right) d_{t-p_1-1} - \frac{L_1 + 1}{p_1} d_{t-2p_1-1} \tag{18}$$

が得られる．同様にtの代わりにt-$2p_1$とすると，

$$D_{t-2p_1}^{(2)} = \left(1 + \frac{L_1 + 1}{p_1}\right) d_{t-2p_1-1} - \frac{L_1 + 1}{p_1} d_{t-3p_1-1} \tag{19}$$

が得られる．まず，式(17)と式(18)から，$d_{t\text{-}p1\text{-}1}$を消去した等式を求める．つぎに，求めた等式と式(19)から，$d_{t\text{-}2p1\text{-}1}$を消去した等式を求める．この操作を無限に繰り返すと，期間t-1での需要量$d_{t\text{-}1}$のみが残るような等式を最終的に得ることができる．これを整理すると，段階1の過去の発注量の系列から段階1の期間tの需要量を逆算する以下のような推定の式を得ることができる．

$$d_{t-1} = \left(\frac{p_1}{p_1 + L_1 + 1}\right) \sum_{k=0}^{\infty} \left(\left(\frac{L_1 + 1}{p_1 + L_1 + 1}\right)^k D_{t-kp_1}^{(2)} \right) \tag{20}$$

段階2では，段階1から受けた発注量と段階1における移動平均の期間pならびにリードタイムLの値が判れば，式(20)を用いて最終需要量の推定が可能となる．移動平均期間pは，段階1が需要予測する際に用いるパラメータであり，段階2は知らない情報である．リードタイムLは，段階2が発注を受けて，段階1に商品を送り，到着するまでの時間であるので，段階2は知っている情報である．

ただし，式(20)は，段階1から受けた過去の発注量をすべて遡る形の無限級数となっており．まじめにこれを計算することはできない．また，式(19)では，発注量にかかる係数が $(L_1+1)/(p_1+L_1+1)$ の累乗となっており，過去のデータほど0に近づく．すなわち過去に遡るほど影響は小さく無視できるものになる．そこで，有限個の過去の発注量を用いる以下の式(20)を用いて近似計算を行うことを考える．

$$\tilde{d}_{t-1} = \left(\frac{p_1}{p_1 + L_1 + 1}\right) \sum_{k=0}^{n} \left(\left(\frac{L_1 + 1}{p_1 + L_1 + 1}\right)^k D_{t-kp_1}^{(2)} \right) \tag{21}$$

4. 数値実験による提案モデルの評価

4.1 実験の概要

まず，式(21)を用いて最終需要量の推定が可能であるかを検証する実験を行った．基準パラメータとしてL=3，p=4とし，最終需要量として平均1000，標準偏差100の正規乱数系列を与えた．実験では，式(21)においてn=1，2，3とし，200期間に亘ってのシミュレーションを行って最終需要量を推定した．なお，段階1の移動平均期間pは本来は段階2が知り得ない情報であるが，ここでは既知であると仮定した．

つぎに，最終需要量の推定値を用いることにより間接的に最終需要情報の共有を行う提案モデル，そして，実際に最終需要情報を共有する情報中央集権型モデル，情報共有を行わない情報分散型モデルの3つのモデルについて，ブルウィップ効果の発生状況をシミュレーション実験により検証した．

4.2 下流側段階の需要量の推定

Fig. 6は，式(21)を用いて最終需要量を推定した結果のグラフである．式(21)では，nの値が大きいほど，より過去の発注量の情報まで用いて推定することを意味している．グラフを見ると，n=1，2，3のすべてのケースで，最終需要量の推定結果の形状と実際の最終需要量の形状はほぼ一致している．そして，nが大きくなるにつれて，上方にスライドしながら実際の最終需要量に近づいている．このことから，nの値を大きくするほど精度よく最終需要量を推定できるものと推測される．

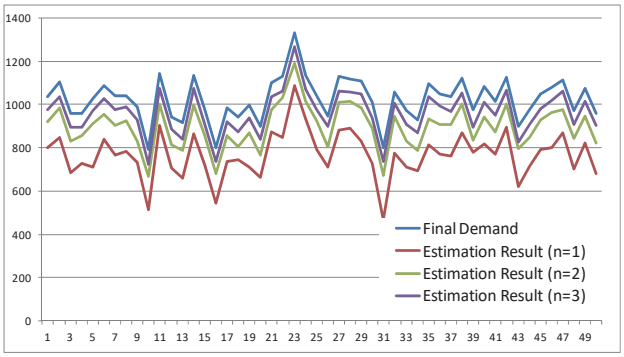


Fig. 6 Estimation of Final Demand Quantities (L=3, p=4)

Table 1 Estimation of Final Demand Quantities (L=3, p=4)

n	Average of Estimated Values	Standard Deviation	Estimation Error (RMS)
1	758.5	101.8	253.8
2	885.0	98.6	126.8
3	948.2	98.8	63.3
∞	1011.2	97.7	0

Table 1に，200期間分の最終需要量の推定値の平均と推定誤差（RMS：二乗平均平方根）を示す．この表から，n=3としたときには誤差が約6%の精度で推定できていることが判る．すなわち，本実験で用いた基本パラメータについてはn=3で十分であると考えられる．ただし，移動平均期間p=4であるならば，n=3の場合では12期前までさかのぼった発注量の情報を用いる必要があることになる．一方，n=1であれば4期前までさかのぼればよいのであるが，推定誤差は約25%になってしまう．

つまり，式(21)を用いると，大きくさかのぼる事が出来れば最終需要量を推定することが可能であると言えるが，現実的に，それは難しいと考える．また，短い期間しかさかのぼらなかった場合は，最終需要量よりも小さく需要量を見積もってしまうという問題点があげられる．

この問題は，式(21)では $(L_1+1)/(p_1+L_1+1)$ を過去の発注量そのものにかけていることに起因する．そこで，最終需要量の平均を μ とする．μ が既知であると仮定して，μ からのずれの分だけを乗じることにした以下の修正式を用いる．

$$\tilde{d}_{t-1}=\left(\frac{p_1}{p_1+L_1+1}\right)\sum_{k=0}^{n}\left(\left(\frac{L_1+1}{p_1+L_1+1}\right)^{k}\left(D^{(2)}_{t-kp_1}-\mu\right)\right)+\mu \tag{22}$$

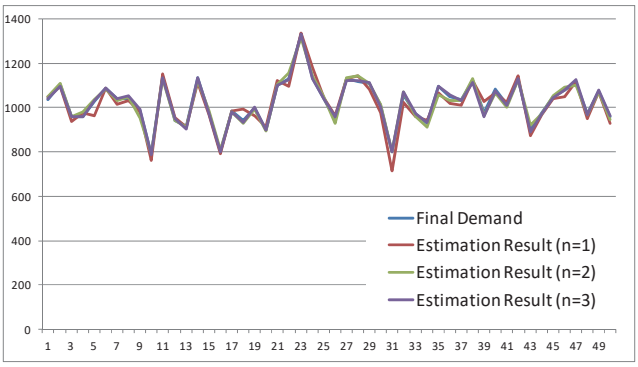


Fig. 7 Estimation of Final Demand Quantities (L=3, p=4) in Case that Mean μ is Known

Table 2 Estimation of Final Demand Quantities (L=3, p=4) in Case that Mean μ is Known

n	Average of Estimated Values	Standard Deviation	Estimation Error (RMS)
1	1008.5	101.8	24.3
2	1010.0	98.6	12.1
3	1010.7	98.8	6.0
∞	1011.2	97.7	0

Fig. 7は，式(22)を用いて最終需要量を推定した結果のグラフである．グラフから，n=1，2，3のすべてのケースで推定結果が実際の最終需要量とほぼ一致していることが判る．Table 2に，200期間分の最終需要量の推定値の平均と推定誤差を示す．表を見ると，すべてのケースで誤差3%以下の精度で推定できており，式(21)を用いた場合に比べて大幅に推定精度を向上できている．式(22)を用いることで，n=1あるいはn=2ならば，4期前あるいは8期前までの発注量情報を用いることで最終需要量の推定が可能であり，最終需要量を小さく推定してしまうという問題点を解決できる．

4.3 提案モデルにおけるブルウィップ効果の低減

本節では，式(11)を用いて算出した最終需要量の推定値を用いることにより間接的に最終需要情報の共有を行うという提案モデル，そして，実際に最終需要情報を共有する情報中央集権型モデル，情報共有をしない情報分散型モデルの3つのモデルについて，ブルウィップ効果の発生状況をシミュレーション実験により検証する．

式(21)を用いた提案モデルがどの程度ブルウィップ効果の低減に有効であるかを確認する．なお，式(21)を用いるため，最終需要量の平均 μ は本来は段階2が知るはずのない情報であるが，平均 μ が既知であると仮定して実験を行う．また，移動平均期間pは既知であると仮定する．

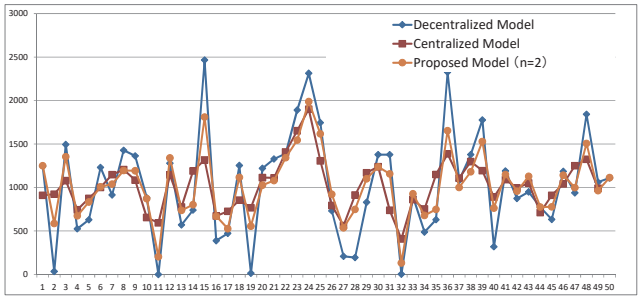


Fig. 8 Simulation Results of Three Models (L=3, p=4) (Order Pattern of Player 2 on Each Model)

Table 3 Amplification of Order Quantity of Three Models (Ratio of Order Standard Deviations) (L=3, p=4)

	$\sqrt{\frac{\mathrm{Var}\left[Q_t^{(1)}\right]}{\mathrm{Var}[d_t]}}$	$\sqrt{\frac{\mathrm{Var}\left[Q_t^{(2)}\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t^{(1)}\right]}}$
Decentralized Model	2.21	2.51
Centralized Model		1.10
Proposed Model (n=2)		1.61

基準パラメータは，第5節での実験と同様に，最終需要量として平均μ=100，標準偏差10の正規乱数系列を与えた．移動平均期間p=5，リードタイムL=4とする．最終需要量の推定結果には式(21)でn=2を用いたときの結果を用いる．2段階の直列型サプライチェーンについて，100期間の実験を行った．

Fig. 8は，本論文の提案モデル，情報中央集権型モデル，情報分散型モデルのブルウィップ効果の発生状況を調べるために，3つのモデルの段階2の発注量を比較したグラフである．グラフを見ると，提案モデルは情報共有型モデルとほぼ一致していることがわかる．情報分散型モデルに比べて発注量の変動は小さく抑えることができており，ブルウィップ効果の低減に有効であることが確認できる．また，Table 3に示すように，3つのモデルにおける発注量の標準偏差（ばらつき）の比（増幅率）を見ても，提案モデルと情報中央集権型では，値がほぼ等しい．最終需要量の平均，移動平均期間の値が既知である場合，提案モデルは情報中央集権型モデルと同様にブルウィップ効果の低減に有効であることが確認できた．

5. おわりに

本研究では，サプライチェーン内で最終需要情報の共有が困難である場合に，チェーン内で発生するブルウィップ効果を低減させる方策を検討し，この方策を組み込んだチェーンのモデル提案した．小売業者が卸売業者に発注した数値をもとに消費者の最終需要量を推定することで，間接的な情報共有を実現する（近似する）モデルを提案した．情報共有をしない情報分散型モデル，情報共有を行う情報中央集権型モデル，そして，提案モデルの各モデルでシミュレーション実験を行い，それぞれブルウィップ効果の発生状況と低減効果を比較・評価した．

提案モデルでは，段階1の移動平均期間pの値と，最終需要量の平均の値が既知であるならば，ほぼ正確に最終需要量を推定することが可能であった．推定した最終需要量を用いることで，情報中央集権型モデルに近いレベルでブルウィップ効果を低減できることを確認した．

本研究では，下流側の段階での需要予測方法を移動平均法に固定し，移動平均計算期間や最終需要量の平均が既知であるとするなど，現実とは異なるような仮定をいくつか置いている．今後の課題として，前段階での需要予測方法が指数平滑法であるなど，条件を緩めて検討する必要がある．また，3段階以上のチェーンについて考える必要がある．

参考文献

1) 森田道也：「サプライチェーンの原理と経営」，新世社，2004
2) H. Lee, V. Padmanabhan and S. Whang: "Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect," *Management Science*, Vol.43, No.4, pp.546-558, 1997
3) F. Chen, Z. Drenzer, J. Ryan and D. 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
4) 久保幹雄：「ロジスティクス工学」，朝倉書店, 2001
5) 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定量化に関する研究"，日本経営工学会論文誌，Vol.56, No.3, pp.148-154, 2005
6) 挾間雅義，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
7) 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
8) 水野浩孝，森山弘海，羽田隆男："最終需要情報共有型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
9) 齊藤史哲："在庫に関する知識共有のブルウィップ効果に及ぼす影響について ー 在庫シミュレーションモデルの提案と検証 ー"，日本経営工学会論文誌，Vol.66, No.1, pp.40-48, 2015