

# 実験計画法の並列分散処理によるブルウィップ効果における要因の部分効用の解明

富山県立大学大学院工学研究科情報システム工学専攻  
1955016 横井稜

指導教員：奥原浩之

## 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。

また、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。しかし、一部のみの定式化、またはモデルにより解析しており部分的な知見である。また、実データから直接分散を求めてブルウィップ効果を求めることもできるが、要因がわからない。

そこで、本研究では、シミュレーションにより、どのような要因がブルウィップ効果を増加させているのか調査し、それをもとにした、統一的なモデルを作成をする。

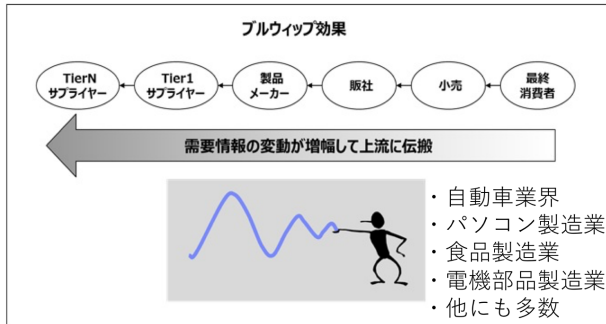


図1 ブルウィップ効果

## 2 従来手法

### 2.1 サプライチェーンにおけるブルウィップ効果

【記号】 $t$ : 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;  $t$  期の期末に、 $t$  期の需要量 ( $D_t$ )、当期と翌期の目標在庫量レベルとの差によって決まる。すなわち、次のようになる。

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

ブルウィップ効果 B は、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。

$$B = \frac{Var[q_t]}{Var[D_t]} \quad (2)$$

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ると考えられるから要因となる。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。

### 2.2 直交表による実験計画

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。

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[4]。図2が、4因子3水準の  $L_9$  直交表の例である。

| $L_9 (3^4)$ |     |   |   |   |
|-------------|-----|---|---|---|
| 実験No.       | 因子列 |   |   |   |
|             | A   | B | C | D |
| 1           | 1   | 1 | 1 | 1 |
| 2           | 1   | 2 | 2 | 2 |
| 3           | 1   | 3 | 3 | 3 |
| 4           | 2   | 1 | 2 | 3 |
| 5           | 2   | 2 | 3 | 1 |
| 6           | 2   | 3 | 1 | 2 |
| 7           | 3   | 1 | 3 | 2 |
| 8           | 3   | 2 | 1 | 3 |
| 9           | 3   | 3 | 2 | 1 |

図2  $L_9(3^4)$  直交表

2.3 MPI による並列分散処理

並列コンピュータのアーキテクチャは、3つに分類することができる。分散メモリ型、共有メモリ型、分散共有メモリ型である。今回は、クラスター環境は分散メモリ型並列計算機とする。その並列分散処理を行う方法として Message Passing Interface(MPI) と hadoop がある。MPI と hadoop は、並列コンピューティング利用するための標準化された規格である。MPI は、プログラミング言語とは独立の通信プロトコルで、並列計算機上で動くプログラムに使用される。hadoop は、java ベースの分散システムで、通信のコードを書く必要がない。

3 提案手法

3.1 直交表の作成

本研究の実験と合致する直交表がある場合は、その直交表を実験に用いる。無い場合は、直交表の定義を元に作成する。 $C = \{0, 1, \dots, c-1\}, c \in G$  とおく。C は水準の集合、c は水準数に対応する。直交表のフォーマルな定義は次のように与えられる。

C の元を要素とする  $G \times H$  の2次元配列が直交表であるとは、ある自然数  $q, \lambda$  が存在して、任意の  $G \times q$  部分配列 ( $0 \leq q \leq H$ ) が、行方向の  $t$  個の要素の組に対し、同じ組を  $\lambda$  回ずつ含んでいる事をいう。 $q, \lambda$  はそれぞれ 強度 (intensity), 指数 (index) と呼ばれる。定義から  $\lambda$  は自動的に、

λ = G/c^q (3)

と求まる。c^q は、C の要素の q 個の並びの組の種類の数である。

3.2 生産計画のシミュレータの開発

現状のシミュレーターについて説明する。まず、EXCEL のシミュレーターの例を図3に示す。

| 内示<br>σ | 1600 安目 |        | 150        |        |          |        |        |           |        |        |        |  |
|---------|---------|--------|------------|--------|----------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|--|
|         | 80      |        | 1M         |        |          |        |        |           |        |        |        |  |
|         |         | 初期     | 1<br>月     | 2<br>火 | 3<br>水   | 4<br>木 | 5<br>金 | 6<br>月    | 7<br>火 | 8<br>水 | 9<br>木 |  |
| ①       | 内示      | -      | 1600       | 1600   | 1600     | 1600   | 1600   | 1600      | 1600   | 1600   | 1600   |  |
| ②       | 基準搬入量   | -      | 1360       | 1360   | 1360     | 1360   | 1360   | 1360      | 1360   | 1360   | 1360   |  |
|         | 追加搬入量   | -      | 0          | 0      | 0        | 0      | 0      | 0         | 0      | 0      | 0      |  |
|         | 搬入量合計   | -      | 1360       | 1360   | 1360     | 1360   | 1360   | 1360      | 1360   | 1360   | 1360   |  |
| ③       | 工場使用量   | -      | 1792       | 1630   | 1484     | 1635   | 1679   | 1530      | 1611   | 1652   | 16     |  |
| ④       | 安全在庫目標  | -      | 4833       | 2410   | 2408     | 2413   | 2411   | 2400      | 2409   | 2403   | 23     |  |
| ⑤       | 繰越在庫    | 4800   | 4368       | 4098   | 3974     | 3699   | 3380   | 3210      | 2959   | 2667   | 23     |  |
| ⑥       | 緊急発注量   | -      |            |        |          |        |        | 0         |        |        |        |  |
| ⑦       | 判定      | -      | □          | ○      | ○        | ○      | ○      | ○         | ○      | ○      | □      |  |
| ⑧       | 充足量     | -      | 1792       | 1630   | 1484     | 1635   | 1679   | 1530      | 1611   | 1652   | 16     |  |
| ○       | □       | ×      | ×          | ×      | 平均在庫搬入回数 |        |        | 追加搬入在庫切れ回 |        |        | 充足率    |  |
| 7       | 619     | 359    | 15         | 1385   | 140      | 242051 | 15     | 100%      |        |        |        |  |
| 平均      | 標準偏差    |        | BULLWHIP効果 |        |          |        |        |           |        |        |        |  |
|         | 1605.66 | 78.57  | 7.97       |        |          |        |        |           |        |        |        |  |
|         | 242.05  | 625.99 |            |        |          |        |        |           |        |        |        |  |

図3 EXCEL 版シミュレーター

内示は、需要予測値  $\hat{D}_t$  を表し、今回は、一様乱数で実データが入る。基準搬入量  $B_t$  は、最小レベルの工場使用量で、 $\hat{D}_t - 3\sigma$  が入る。追加搬入量は、発注量  $q_t$  を表し、前日の緊急発注量と同値である ( $q_t = K_{t-1}$ )。搬入量合計  $M_t$  は、 $M_t = B_t + q_t$  である。工場使用量は、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、今回は、 $(D_t + D_{t+1} + \dots + D_{t+29}) \div 30 \times 1.5$  とする。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。今回は、初期値を 4800 とする。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す。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

平均在庫  $N_t$  は、繰越在庫の平均値を表す。よって、 $N_t = \sum_{i=1}^{1000} S_t$  である。搬入回数は、緊急発注の回数である。充足率  $R_t$  は、充足量合計と工場使用量合計の商に 100 をかけたものである。よって、 $R_t = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{1000} J_t}{\sum_{i=1}^{1000} D_t} [\%]$  である。目標在庫  $y_t$  は、検討中である。 $y_t = L\hat{d}_t + z\sqrt{L}\sigma$  である。 $L$  はリードタイム、 $\hat{d}_t$  は需要予測値、 $z$  は安全在庫係数である。

4 数値実験並びに考察

影響度は主効果の絶対値の和である。影響度は図4のようになった。需要のばらつきが一番影響していることが分かる。図5は2つの要因を取り出した時のブルウィップ効果を表す図で、結果から需要のばらつき10の時にバッチ倍数の値は影響を及ぼさないことがわかる。図6は、並列分散処理の結果を表していて、直線的に下がらないのは、通信のオーバーヘッドによるものだと考えられる。

影響度

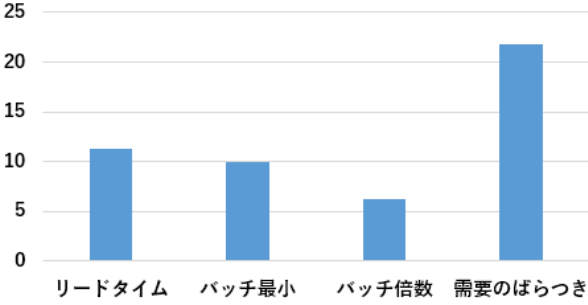


図4 ブルウィップ効果に対する影響度

需要のばらつきとバッチ倍数による交互作用

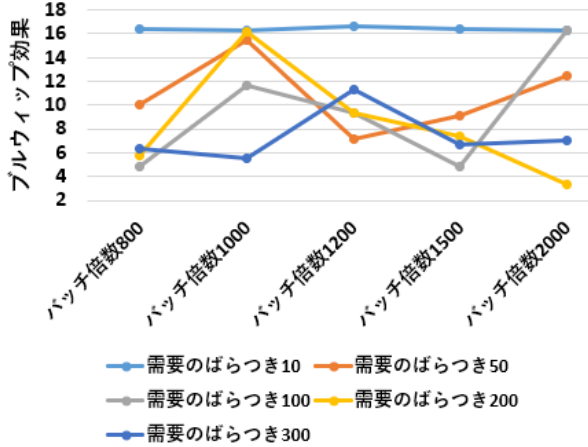


図5 シミュレータによる数理モデルで考慮されていない要因の交互作用

並列化の処理時間

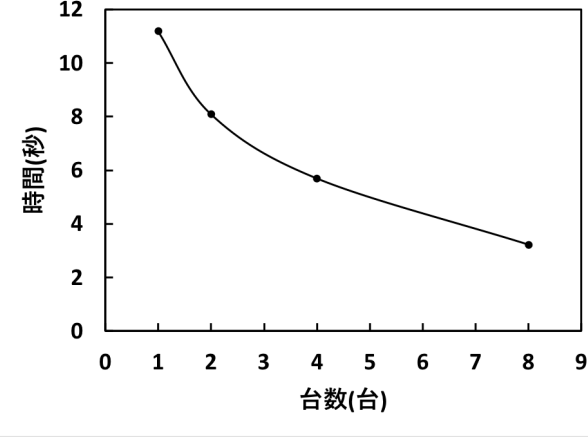


図6 並列分散処理の結果

5 おわりに

ブルウィップ効果に対する様々な要因の主効果と交互作用を出した。需要のばらつきを変更することでブルウィップ効果を大きく低減させることができるが、需要のばらつきは操作できないものであるから考慮が必要である。

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] (株) 日科技研：直交表とは（実験計画法）| 製品案内 - 日本科学技術研修所, <https://www.i-juse.co.jp/statistics/product/>