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

情報基盤工学講座　　横井　稜

1. はじめに
2. 従来手法
3. 提案手法
4. おわりに

June 11, 2020

TOYAMA Prefectural University

1.1. 本研究の背景

サプライチェーンの課題の一つに、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要因が重なり、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がある。その現象をブルウィップ効果という。
変動に対応するために上流のサプライヤーほど在庫を多く保有する傾向にあり、余剰在庫が経営状態を悪化させる。先行研究では、ブルウィップ効果に影響する要因を限定して考察している。

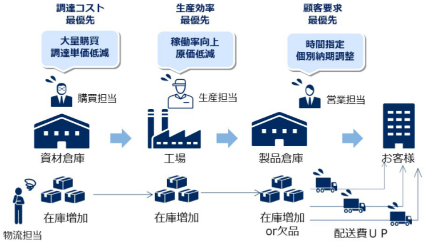


図１　サプライチェーンの問題

1.2. 本研究の目的

ブルウィップ効果には多くの複合的な要因が影響している。そこで、複合的要因を考慮した効果を明らかにする。また、要因が沢山あるので主効果だけではなくて交互作用がある。組み合わせ爆発が起こるので並列分散処理が必要である。
本研究では、シミュレータを開発し複合要因の影響度合いを明確化する。そして、ブルウィップ効果の低減方法を提案する。

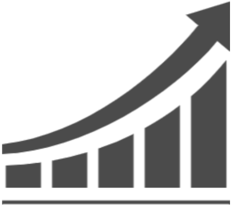
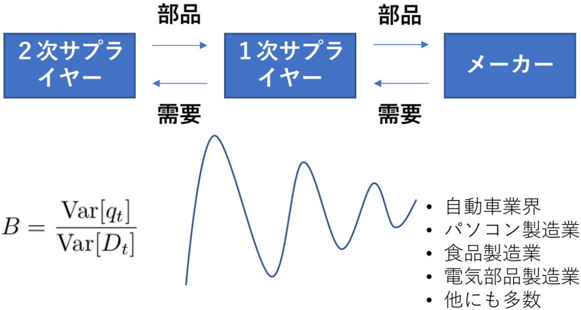


図 2　組み合わせ爆発

図 3　並列コンピュータ

2.1 サプライチェーンにおけるブルウィップ効果



$$B = \frac{\mathrm{Var}[q_t]}{\mathrm{Var}[D_t]}$$

需要に鞭のようなバラツキが発生

図 4　サプライチェーンとブルウィップ効果

B: ブルウィップ効果、q_t: 発注量、D_t: 需要量
$\mathrm{Var}[q_t]$: 発注量の分散、$\mathrm{Var}[D_t]$: 需要量の分散

D. Simchi-Levi, P.Kaminsky and E. Simchi-Levi:Designing and Managing the Supply Chain Concepts,Strategyies,and Case Studies,McGraw Hill(2000)

TOYAMA Prefectural University

小売業におけるブルウィップ効果

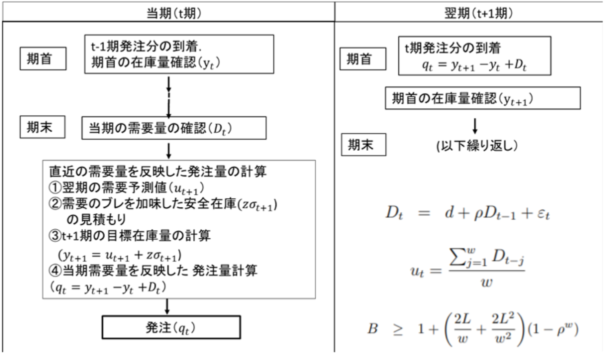


図 5　小売業の発注方法

ρ: 前期の需要量との相関を表すパラメータ，L: リードタイム
w: 移動平均における過去のデータの採取数，ε_t: 需要予測値の誤差
z: 安全在庫係数，σ_t: t 期における需要予測誤差の標準偏差の推定量
d: 需要量の平均

内示生産システムにおけるブルウィップ効果

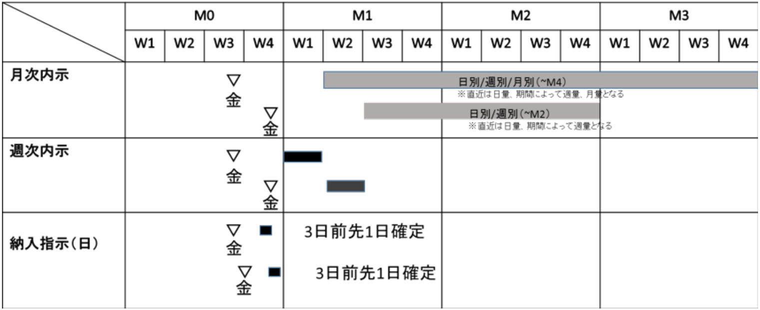


図 6　内示生産システムの発注方法

$$B_{\mathrm{w}} = \frac{M + z^2 \mathrm{Var}[(\widehat{\sigma}_{t+1} - \widehat{\sigma}_t)])}{M} \quad B_{\mathrm{m}} = \frac{2M + N + z^2 \mathrm{Var}[(\overline{\sigma}_{t+2} - \widehat{\sigma}_{t+1} - \widehat{\sigma}_t)]}{M}$$

M: t 期における週次内示と確定注文のブレの分散,
N: t 期における週次内示と月次内示のブレの分散,
$\widehat{\sigma}_t$: t 期における週次内示と確定注文のブレの標準偏差の推定量,
$\overline{\sigma}_t$: t 期における週次内示と月次内示のブレの標準偏差の推定量

1. はじめに
2. 従来手法
3. 提案手法
4. おわりに

実際の週次内示 $\hat{D}_t$ と確定注文 D_t との差

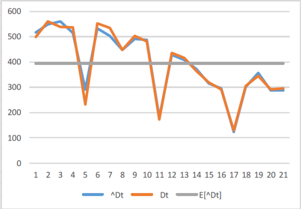


図 7　$\hat{D}_t, D_t, E[\hat{D}_t]$ のグラフ

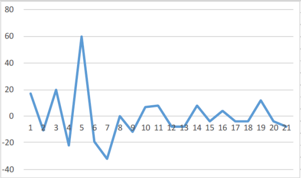


図 8　$\hat{D}_t - D_t$ のグラフ

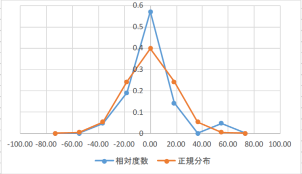


図 9　$\hat{D}_t - D_t$ の相対度数分布

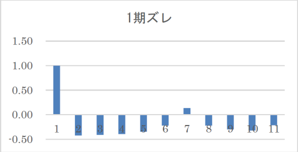


図 10　$\hat{D}_t - D_t$ の自己相関係数

TOYAMA Prefectural University

ADF 検定

ADF 検定

ADF 検定とは時系列データが定常過程に従っているか判断する時に使われる方法．”単位根過程である”を帰無仮説として，”単位根じゃない”を対立仮説とするため，この検定で棄却された場合は定常過程であると言える．

今回の実験に用いる値の検定

実際に実験に用いるデータに対して検定を行うと p 値が 0.3084745720297343 だったため帰無仮説を棄却できず単位根過程つまり非定常なものとして扱わなければならない．

ブルウィップ効果の実際的な要因

＜合理的な意思決定による場合＞

●需要サイド ------- 需要プロセス（AR,MA,ARMA,非定常過程） と予測手法
---- 季節性 ------需要パターン
--発注間隔
●供給サイド -------潜在的な供給不足(supply shortage)
--有限能力------生産能力 ------能力上限制約
------ 平準化
------- 生産計画(作成サイクル、生産制約)
---オーダー順でない出荷順序
--倉庫能力
----バッチ単位の発注(batch ordering)
●費用項目 ----------固定費（積載率,段取替え）
在庫補充法
---販促用のディスカウント(購買集中・前倒し施策)
----変動に対するペナルティ
----週１回発注、週2回発注、毎日発注方式
----調達リードタイム
●データ集約 -------時間(日、週、月、4半期、半期、年)
(aggregation)
----製品集約（品種、グループ）
----場所集約
----連結構造
●内示特性 ------週次内示/月次内示,トレンドとばらつき
●サプライヤー間の情報共有

＜非合理的な人間判断による場合＞

●合理性追求欠如
●恣意的な合理的結果の変更　　需要ピークを外した発注
●需要の変化に対するオーバーアクション、品切れに対する過剰な挽回策

図 11　ブルウィップ効果の実際的な要因

数理モデルとシミュレータの違い

本研究で考慮する要因

1. 内示のトレンドの変動 (水準数:27) ←理論でも考慮
2. 内示のばらつきの変動 (水準数:5) ←理論でも考慮
3. 発注量のバッチサイズ (水準数:5+10) ←理論でも考慮
4. 能力上限制約 (水準数:6) ←理論でも考慮
5. 発注から納入までのリードタイム (水準数:7)
6. 需要のばらつき (水準数:5)
7. 安全な在庫目標の決め方 (水準数:5)

1. 2 要因 (i, j) の組み合わせが ${}_6C_2 = 15$
2. 2 要因以外の特定の組み合わせに対して 1000 回
3. 期間は 400 日間 $y_{ij1} \sim y_{ij1000}$

3.1. 数理モデルによるブルウィップ効果の把握

表 1　要因による週次内示のブルウィップ効果

ケース		考慮する項目 需要プロセス	設備能力制約	バッチオーダー	内示生産システムのブルウィップ効果の式（週次内示の場合）
①	・$y_{t+1}-y_t=0$ ・設備能力制約なし ・バッチオーダーなし	○	×	×	1
②	・$y_{t+1}-y_t\neq 0$ ・設備能力制約なし ・バッチオーダーなし	○	×	×	$\frac{M+\mathrm{Var}[y_{t+1}-y_t]}{M}$
③	・$y_{t+1}-y_t\neq 0$ ・設備能力制約あり ・バッチオーダーなし	○	○	×	$\frac{M+\mathrm{Var}[y_{t+1}-y_t]}{M}\cdot\frac{\mathrm{Var}[\hat{Q}_t]}{\mathrm{Var}[Q_t]}$
④	・$y_{t+1}-y_t\neq 0$ ・設備能力制約なし ・バッチオーダーあり	○	×	○	$\frac{M+\mathrm{Var}[y_{t+1}-y_t]}{M}\cdot\left(1+\frac{E[X_t(OS-X_t)]}{Var[\hat{Q}_t]}\right)$
⑤	・$y_{t+1}-y_t\neq 0$ ・設備能力制約あり ・バッチオーダーあり	○	○	○	$\frac{M+\mathrm{Var}[y_{t+1}-y_t]}{M}\cdot\frac{\mathrm{Var}[\hat{Q}_t]}{\mathrm{Var}[Q_t]}\cdot\left(1+\frac{E[X_t(OS-X_t)]}{Var[\hat{Q}_t]}\right)$

y_t: 在庫目標，Q_t: 発注量
$\hat{Q}_t$: 設備能力制約ありの時の発注量，OS: バッチサイズ
X_t: Q_t を OS で割った余り

ブルウィップ効果への交互作用 (在庫目標の変動・バッチサイズ)

④	・$y_{t+1}-y_t \neq 0$ ・設備能力制約なし ・バッチオーダーあり	○	×	○	$\frac{M+\mathrm{Var}[y_{t+1}-y_t]}{M}\cdot\left(1+\frac{E[X_t(OS-X_t)]}{Var[\hat{Q}_t]}\right)$

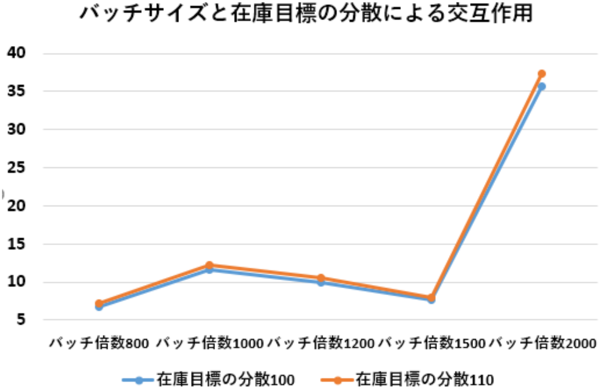


図 12　数理モデルによる交互作用

3.2. シミュレータによる交互作用の把握

実験計画法

実験計画法とは、ばらつきの存在のもとで、確率論に基づく客観的な評価を行う技法である。また、決められた条件下での特性の絶対的な値を求めることが目的ではなく、条件間での相対的な差を評価することが主眼であり、この相対的な差について再現性のある結論が導ければよい。

表 2　二元配置の実験表

	B_1	B_2	$\cdots$	B_b
A_1	y_{111}	y_{121}	$\cdots$	y_{1b1}
	$\vdots$	$\vdots$	$\cdots$	$\vdots$
	y_{11k}	y_{12k}	$\cdots$	y_{1bk}
A_2	y_{211}	y_{221}	$\cdots$	y_{2b1}
	$\vdots$	$\vdots$	$\cdots$	$\vdots$
	y_{21k}	y_{22k}	$\cdots$	y_{2bk}

A_1, A_2, B_1, B_2, B_3:要因 A, B の水準
$y_{111}, \cdots, y_{2bk}$:結果のデータ (自分の研究ではブルウィップ効果)

様々な効果について

単一効果と主効果と交互作用

単一効果とは、一つの要因の水準を固定したときのもう一つの要因の特性値の差のこと。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。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。

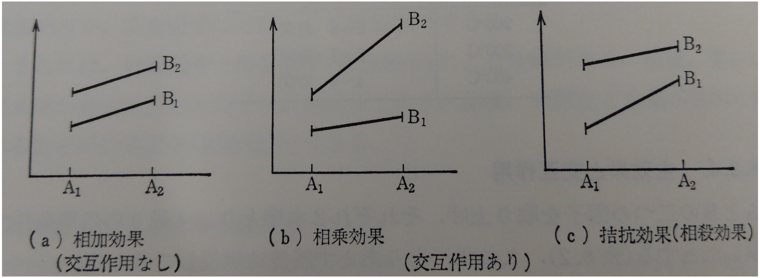
表 3　水準数 2 での二元配置の実験表

	B_1	B_2
A_1	x_{11}	x_{12}
A_2	x_{21}	x_{22}

単一効果：$x_{21} - x_{11}, x_{22} - x_{12}$
主効果：$[(x_{21} - x_{11}) + (x_{22} - x_{12})]/2$
交互作用：$(x_{21} - x_{11}) - (x_{22} - x_{12})$

様々な効果について

表 4　水準数 2 での交互作用



一部実施法

要因実験と一部実施法

2 つ以上の要因を同時に取り上げる実験を多因子実験という。その中で、それらの要因の水準のあらゆる組み合わせを各々一回以上実施するものを要因実験という。これに対してその一部のみを実施するものを一部実施法という。直交表は一部実施法の実験計画を作成するためのツール。

省く実験の選択

3 要因以上の交互作用は無視できるという前提で要因実験の実験計画からそれに相当するところを省く。

シミュレータにより複数の要因から交互作用を導出するために実験計画法を活用する。

多元配置法　因子が $r \geq 3$ の場合は，(6), (7) を必要なだけ繰り返す．

(1)　二つの因子の組合わせ全てについて，二元配置実験表を作成する．

(2)　修正項 CT，総二乗和 S_{TE} を求める．自由度 f_{TE} は総データ数 -1 である．

$$CT = \frac{(\text{総計})^2}{\text{総データ数}}, \qquad S_{TE} = \sum(\text{個々のデータ値})^2 - CT$$

(3)　1 因子の主効果 (例えば A) の二乗和 S_A を求める．自由度 f_A は水準数 -1 である．

$$S_A = \sum_{i=1}^{a} \frac{(A_i\text{で測定されたデータの合計})^2}{A_i\text{で測定されたデータ数}} - CT$$

(4)　2 因子の組合わせ効果 (例えば AB) の二乗和 S_{AB} を求める．

$$S_{AB} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} \frac{\{(A_i, B_j)\text{で測定されたデータの合計}\}^2}{(A_i, B_j)\text{で測定されたデータ数}} - CT$$

実験計画法の活用 (2)

(5)　2因子の交互作用 (例えば $A \times B$) の二乗和 $S_{A\times B}$ を求める．自由度 $f_{A\times B}$ は $f_A \times f_B$ である．

$$S_{A\times B} = S_{AB} - S_A - S_B$$

(6)　3因子の組合わせ効果 (例えば ABC) の二乗和 S_{ABC} を求める．

$$S_{ABC} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} \frac{\{(A_i, B_j, C_k)\ \text{で測定されたデータの合計}\}^2}{(A_i, B_j, C_k)\ \text{で測定されたデータ数}} - CT$$

(7)　3因子の交互作用 (例えば $A \times B \times C$) の二乗和 $S_{A\times B\times C}$ を求める．自由度 $f_{A\times B\times C}$ は $f_A \times f_B \times f_C$ である．

$$S_{A\times B\times C} = S_{ABC} - S_A - S_B - S_C - S_{A\times B} - S_{B\times C} - S_{C\times A}$$

(8)　残差二乗和 S_E を S_{TE} から各要因の変動を全て取り去ることで求める．自由度 f_E は f_{TE} から各要因の自由度を全て取り去ることで求める．

MPI

MPI とは，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．

実験環境

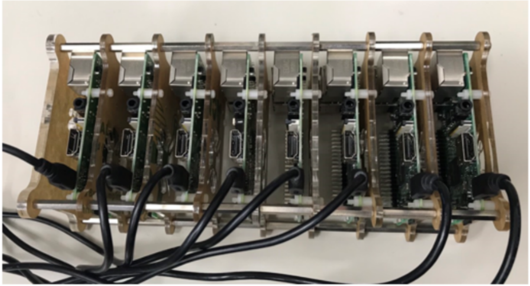


図 13　並列計算機

3.4. 直交表の定義

直交表

1. 釣合い：すべての列において各列ごとの出現する水準の数が同じになっている状態
2. 直交：どの 2 列の相関係数もゼロとなっている状態
3. 自由度：実験数-1$>$ 各列の自由度の合計

直交表

$C = \{0, 1, \cdots, c-1\}, c \in G$ 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, λ 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 λ 回ずつ含んでいる事をいう．q，λ はそれぞれ 強度 (intensity)，指数 (index) と呼ばれる．定義から λ は自動的に，

$$\lambda = G/c^q \tag{1}$$

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．

まだ不明なところ

1. 強さ 2 のまま、3 要因以上の交互作用の実験を省く方法
2. 交絡の影響
3. 直交していない場合、結果にどれほどの影響を及ぼすか
4. なぜ直交表というものが存在するのか

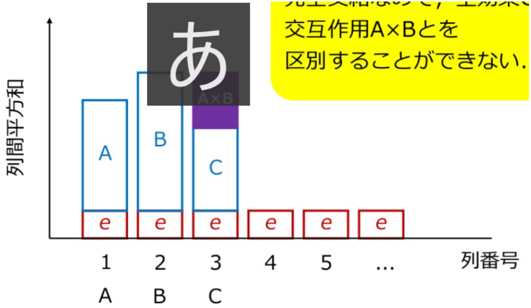


図 14　交絡

4. まとめと今後の課題

まとめ

1. 直交表についての調査

今後の課題

1. 実験回数の減らし方についての調査
2. 直交表作成
3. MPI を用いたシミュレーター完成
4. それを用いて実験