広島経済大学経済研究論集
第42巻第３号　2020年３月
http://dx.doi.org/10.18996/keizai2020420304

自動車産業のサプライチェーンにおける複合要因によるブルウィップ効果に関する解析

丹羽　啓一*・上野　信行**

概　　要

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を「ブルウィップ効果（Bullwhip Effect）」といい，変動に対応するために上流のサプライヤーほど過剰な在庫を保有し，需要のピークに対応した設備，輸送能力を持つ傾向にあり，サプライチェーンの非効率性を生じさせる。

すでに，内示生産システムにおいて，不確実性を有する需要プロセスと代表的な発注行動を前提とするブルウィップ効果の定量化を行った。しかし実際には多くの複合要因が加味されてブルウィップ効果が起こっている。例えば，完成車メーカーと１次，２次サプライヤー間は内示のばらつきのみならず，製造能力上限制約や製造バッチ単位へのまるめ，部品輸送ロットへのまるめ等が要因となりブルウィップ効果が起こっている。

本論文は，完成車メーカーと１次サプライヤー間の内示生産システムを前提に，複合的な要因によるブルウィップ効果の解析を行おうとするものである。特に，事前の内示に対して最終的に確定注文が変動するという不確実性を持つ需要プロセス，生産能力制約，生産・輸送におけるロットまとめ等の複合要因を加味したブルウィップ効果について論じる。

まず，ブルウィップ効果を引き起こす要因を列挙して，それぞれのブルウィップ効果への影響について文献を参照し，定性的に考察する。次に，データから内示，確定注文に示される需要量の推移が非定常過程であるが，確定注文と内示の差，月次内示と週次内示の差が定常過程であることを例証する。最終的に，先行研究を参照し，内示と確定注文の間の定常性を利用して内示生産システムにみられる不確実性を持つ需要プロセス，生産能力制約，生産・輸送におけるロットまとめ等の複合要因を加味したブルウィップ効果の統合式（Bullwhip Effect Formula for NAIJI Production System）を導く。この統合式を用いて，ケースごとに複合的要因によるブルウィップ効果への影響を論じる。

キーワード：自動車産業，ブルウィップ効果，サプライチェーン，部品サプライヤー，内示生産システム，需要プロセス，生産能力制約，ロットまとめ，定常過程

1.　は　じ　め　に

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を「ブルウィップ効果（Bullwhip Effect）」といい，変動に対応するために上流のサプライヤーほど過剰な在庫を保有し，需要のピークに対応した設備，輸送能力を持つ傾向にあり，サプライチェーンの非効率性を生じさせる［1, 2］。

すでに，内示生産システム［3］において，不確実性を有する需要プロセスと代表的な発注行動を前提とするブルウィップ効果の定量化を行った。ここでは，例えば，「短期の内示に合わせて発注量を決めている場合にはブルウィップ効果は小さくなり，とくに，期別に目標在庫量の変更をしない場合はブルウィップ効果が１になる」ことを示した［4］。しかし実際には多くの複合要因が加味されてブルウィップ効果が起こっている。完成車メーカーと１次，２次サ

＊ 広島経済大学メディアビジネス学部教授
＊＊ 広島経済大学大学院経済学研究科教授兼メディアビジネス学部教授

プライヤー間では内示のばらつきのみならず，製造能力上限制約や製造バッチ単位へのまるめ，部品輸送ロットへのまるめ等が要因となりブルウィップ効果が起こっている。とりわけ，小売業などとは異なり，自動車産業は組み立て型の製造システムである。そのサプライチェーンの中には，機械要素部品の製造を担っている企業もあり，製造計画はロット生産を前提にして，かつ平準化志向により日日の製造能力を超えることなく行われている。これらの活動がブルウィップ効果に及ぼす影響を見極めることは非常に重要である。

本論文は，完成車メーカーと１次サプライヤー間の内示生産システムを前提に，複合的な要因によるブルウィップ効果への影響の解析を行おうとするものである。内示生産システムは，事前に内示という参考情報が提示され，最終的に確定注文（納入指示）の提示があるが，この時点では当初の内容が変更されることが多く不確実性を有している。このような不確実性を持つ需要プロセス，生産能力制約及び生産・輸送におけるロットまとめ等の複合要因を加味したブルウィップ効果について論じる。

まず，ブルウィップ効果に影響する要因を列挙して，それぞれがブルウィップ効果への影響について文献［4–12］を参照し，定性的に考察する。次に，内示生産システムにおける需要プロセスを明らかにする。すなわち，データから内示，確定注文に示される需要量の推移が非定常であるが，確定注文と内示の差，月次内示と週次内示の差が定常過程であることを例証する。最終的に，先行研究［4, 5］を参照し，両者を統合し，内示と確定注文の間の定常性を利用して内示生産システムにみられる不確実性を持つ需要プロセス，生産能力制約，生産・輸送におけるロットまとめ等の複合要因を加味したブルウィップ効果の統合式（Bullwhip Effect Formula for NAIJI Production System）を導く。この統合式を用いて，ケースごとに複合的要因による効果への影響を明らかにする。

本論文の構成は，

2. では，ブルウィップ効果に影響を及ぼす要因と役割
3. では，内示生産システムにおける需要プロセスの特性
4. では，先行研究によるブルウィップ効果の式
5. では，内示生産システムにおけるブルウィップ効果
6. では，内示生産システムにおける複合的要因によるブルウィップ効果への影響

を述べる。

2. ブルウィップ効果に影響を及ぼす要因と役割

2.1 ブルウィップ効果の定義

ブルウィップ効果（Bullwhip Effect）とは，サプライチェーンの上流に行くほど発注量のばらつきが増大する現象であると定義される。需要量の分散に対する発注量の分散の比であらわされる［5–7］。内示生産システムを採用するサプライチェーンの場合では，図１のように，１次サプライヤーにおけるブルウィップ効果は，完成車メーカーからの納入指示のばらつき（分散）に対して２次サプライヤーへの発注量のばらつき（分散）の比率とすることが通常である。これは，発注者（下流）から受注者（上流）に向けての注文情報に基づいたものであり，Information flow ベースによる定義であるといわれる［8］。

対して，Material flow ベースによる定義が

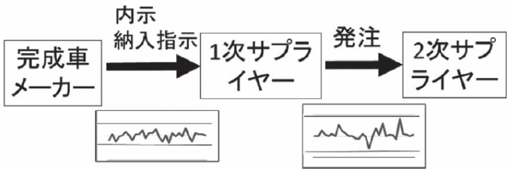

図１ ブルウィップ効果

ある。1次サプライヤーにおけるブルウィップ効果は，完成車メーカーへの売上数量（1次サプライヤーの出荷数量）のばらつき（分散）に対して2次から1次サプライヤーへの出荷量（1次サプライヤーの入荷数量）のばらつき（分散）の比率であらわされる。これは，上流から下流からに向けてのモノの流れに基づいたものであり，Material flow ベースによる定義であるといわれる［5］。1次サプライヤーの入荷量と出荷量の差は在庫増減になる。

モノの動きは，注文情報に合わせて行われるから，両者はほとんど同一であるが，発注タイミングと入荷タイミングが異なる場合などに違いが出る可能性がある。ブルウィップ効果を計量するときに，取得できるデータに制限があるのでどちらかを使用せざるを得ないが，表現するときにどちらの定義を用いたかはっきりさせておくことが大切である。本論文では，Information flow ベースによる定義に従う。

2.2　ブルウィップ効果に影響を及ぼす主要な要因

ブルウィップ効果に影響を及ぼす要因を参考文献［4–12］を引用し，筆者にて整理したものを図2に示す。

要因として，合理的な意思決定による場合と非合理的な人間判断による場合に大別している。合理的な結果をわざとずらしたり，需要の小さい変化に対しても極端なオーバーアクションをとることや一度の品切れに対して過剰な挽回アクション（例えば，必要量を大幅に超える在庫保有）などの非合理的な判断による要因により結果としてブルウィップ効果を増幅させる。一方，合理的な意思決定による場合でも，需要サイドの要因，供給サイドの要因，考慮する費用項目と在庫補充方法による要因，データ集約，

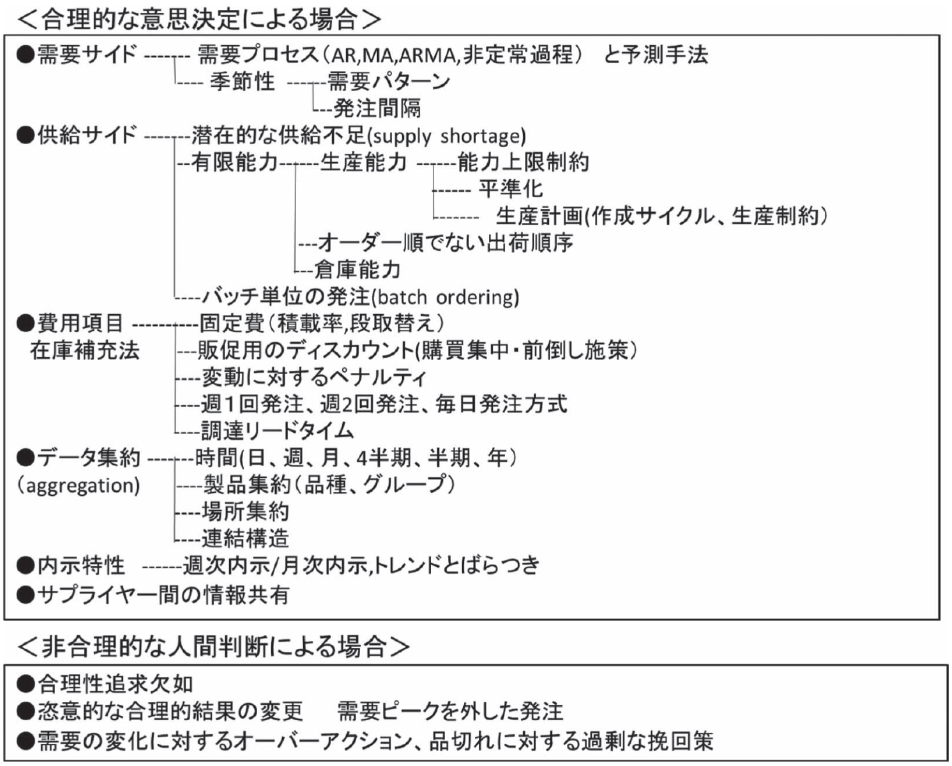

図2　ブルウィップ効果に影響を及ぼす要因

内示特性による要因，サプライヤー間の情報共有，価格割引などの要因がブルウィップ効果に影響する。要因によってはブルウィップ効果を減幅させたり（Dampening），見えなくしたり（Masking），逆にブルウィップ効果を増幅させる（Amplifying）ことがある。図２をもとに，定性的に考察していく。

2.3　供給サイドの要因の効果

２次サプライヤーが潜在的な供給能力不足の場合には，１次サプライヤーは，常に必要以上に発注しておこうという発注者側の判断により，ブルウィップ効果は増幅する。

内示生産システムを採用する業態においては，供給サイドの要因によるブルウィップ効果への影響は大きい。ブルウィップ効果を減幅させる要因として有限な生産設備能力や倉庫出荷能力があり，増幅させる要因としてバッチ発注（Batch ordering）があるが，要因が複合化した場合は，単調な変化ではなくなる。

⑴　生産能力

サプライヤーは通常，生産設備を新設・増設するに際して，常に余裕を持った生産能力ではなく，平均的な注文量の限度内にとどめる。そのために，需要の変動によりピーク的な需要に対しては，製造日程調整をせざるを得ない。また，日常的に，設備メンテナンス，資材調達，作業員の確保，品質確保等から考えて，平準化生産がのぞましい。これらは，すべて「生産量の変動の中でも，特に過大な生産は避ける」という意思決定が働くことにより，ブルウィップ効果は減幅化する。同様に，倉庫の出荷能力制約や出荷の制約によりオーダー順（通常そのままでは大きく変動する）を変えて出荷せざるを得ない場合には，結果的にブルウィップ効果は減幅化する。

⑵　バッチオーダー

バッチオーダーについて述べる。１次サプライヤーは，プレス処理や熱処理設備などのバッチ処理をする設備がある場合，その処理単位（バッチ）ごとに部品を手当てする。２次サプライヤーがバッチ生産の場合にも，それを勘案して，その処理単位（バッチ）ごとに部品を発注する。また，１次サプライヤーは２次サプライヤーからパレット単位に入荷（部品供給）を受ける場合や自社の工程間搬送もすべてパレット単位に行っている場合がある。このようにバッチ単位の発注はよく起こりうる。これらの場合には，必要な所要量を丸める（バッチ単位に切り上げあるいは切り下げする）ことからブルウィップ効果は増幅化する。

2.4　コストと在庫補充法の要因の効果

ブルウィップ効果を増加させる要因として，発注・配送にかかわる固定費用を考慮する場合，販売促進のためのディスカウントを考慮する場合などがある。また，減少させる要因として，顧客の注文変動に対するペナルティをかける場合があるが，通常は考えにくい。

⑴　固定費用

設備の段取り替え費用がかさむ場合，１回あたりの発注費（固定費）が大きくなる場合，発注・搬送時には積載効率を高めにキープせざるを得ない場合には，多数回の発注を避けたいために１回あたりの発注量はおおきく，発注間隔は長くなる傾向にある。このことは，ブルウィップ効果は増幅化する。

⑵　ディスカウント

マネージャーは販売促進のために価格政策を用いる。ディスカウントにより購買を特定日に集中化したり前倒しにする場合があるが，これによりブルウィップ効果は増幅化する。都度に，価格割引する場合にも同様である。

(3) 発注間隔

調達リードタイムが長くなれば発注量が大きく，この期間中に起こる変動は大きくなり，ブルウィップ効果は増幅化する。調達リードタイムが短くなれば発注量が小さくなり，ブルウィップ効果は減幅化する。

実務的に用いられる週1回発注，週2回発注，毎日発注方式を比較すると，毎日発注方式は発注回数が多く，見直しの間隔は短い。そのため品切れ予想に対して，大量の発注・入荷にならずこまめに調整できることからブルウィップ効果は他に比べて減幅化する [12]。

2.5　データ集約

需要量，発注量データを時間，製品，場所についてその単位を集約する（大きくする）とブルウィップ効果は減幅化する。

データを日単位から週単位に集約することや週単位から月単位，4半期単位に集約すると変化の増減がならされる（Masking)。需要プロセスが1次の自己回帰移動平均過程 ARMA (1,1) で表現される場合で，ブルウィップ効果が1より大きい時に，時間単位を大きくする（集約する）とだんだん1に減ってくるといわれている [5]。

また，製品の単位を製造部品番号単位からたとえばグループ単位などのように大きくする場合や2か所以上の設備，工程からの共通部品を集約する場合には，リスクプーリング [3] により発注の変動が抑えられやすいので，ブルウィップ効果は減幅になりやすい。

データの集約はどの程度がいいのか？は難しい判断となるが，例えば，日日の生産指示量をどのようにするかの検討をするときには，製品番号単位，日単位などが望ましく，目的に合致した単位の粗さ（メッシュ）とすべきであろう。そして，ブルウィップ効果の数値を比較するときには，データ集約法について明示しておくべきである。

2.6　需要サイドの要因の効果

需要のばらつきは，ブルウィップ効果が発生する大きな要因の1つであるから，影響は大きい。しかし，需要のばらつきが発注のばらつきに直結する場合は，ブルウィップ効果は1より大きくなるが，直結しない場合は1より小さくなる。

理論的には，受注量のばらつきのみを考慮して，マネージャーの思惑が入らない場合（例えば，各期の在庫量目標値を変動させず一定になるように発注する場合）は，ブルウィップ効果は1となり，増幅・減幅なしである。したがって，これ以外の要因はブルウィップ効果に影響する（増幅・減幅の要因となる)。予測手法を用いて目標在庫を決める場合（結果的に，目標在庫変動がおこり，ブルウィップ効果が発生する）や月次内示を用いる場合などである。

季節性について述べる。設備能力制約なし／バッチオーダー条件なしの場合で，季節性を考慮しないときでもブルウィップ効果がみられる場合に，さらに季節性が加わりその変動が大きくなるとブルウィップ効果の値はだんだん小さくなる。さらに，季節性を極端に大きくするとどんどん1に近づくことが知られている [5]。

また，需要の時系列（需要プロセスと呼ぶことにする）が非定常の場合は検討を難しくする。需要プロセスが非定常であるか定常性を有するかの見極めは極めて重要である。次章で，内示の需要プロセスの特性を確認する。

3.　内示生産システムにおける需要プロセスの特性

内示生産システムにおける需要プロセスの特性を明らかにする。すなわち，データ解析により内示，確定注文データの推移が非定常過程であっても，確定注文と内示の差，月次内示と週

次内示の差は定常過程であることを例証する。完成車メーカーのファイナル組み立てラインに供給されている部品Ａについて，2019年１月のデータを用いる。

3.1　時系列モデルの定常性

（定義）「時系列データ y_t において，任意の t と k に対して

$$\mathrm{E}\left[y_t\right]=\mu \quad (1)$$

$$\mathrm{Cov}\left[y_t, y_{t-k}\right]=\mathrm{E}\left[\left(y_t-\mu\right)\left(y_{t-k}-\mu\right)\right]=\gamma_k \quad (2)$$

が成立する場合は，過程は定常である」といわれる［13］。ここで，$\mathrm{E}\left[\cdot\right]$ は期待値をとることを，$\mathrm{Cov}\left[\cdot,\cdot\right]$ は共分散をとることを表している。この定常性は厳密には弱定常であるが，ここでは単に定常であると呼ぶ。（1）式は，過程の期待値は，t によらず一定値 μ をとり，（2）式より自己共分散は時点 t には依存せずに時間差 k のみに依存することを表している。

（定義）「各時点のデータが互いに独立でかつ同一の分布に従う系列を iid（independently and identically distributed）系列である」といわれる［13］。

3.2　週次内示と確定注文

週次内示（$\hat{D}_t$）・確定注文（D_t）・週次内示の平均値（$\mathrm{E}[\hat{D}_t]$），確定注文と内示の差（$D_t-\hat{D}_t$）およびその相対度数分布を図３，図４，図５に示す。図３より，内示，確定注文は，右下がりであり，トレンドがあることが分かる。このことから，内示，確定注文は定常過程とは

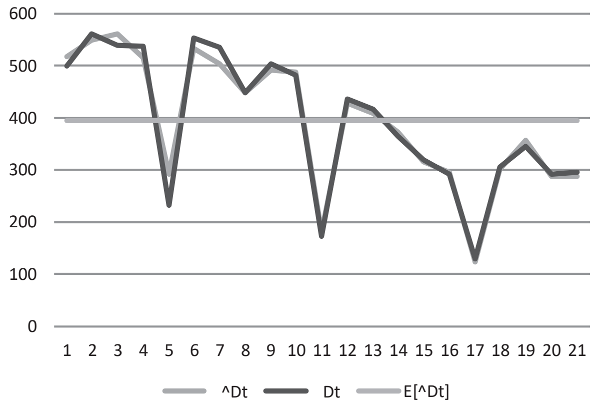

図３　$\hat{D}_t$・D_t・$\mathrm{E}[\hat{D}_t]$ のグラフ

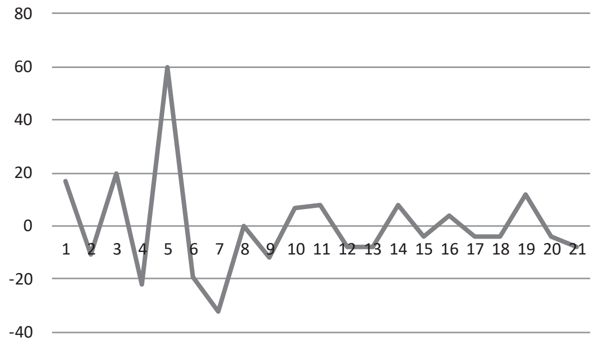

図４　$D_t-\hat{D}_t$ のグラフ

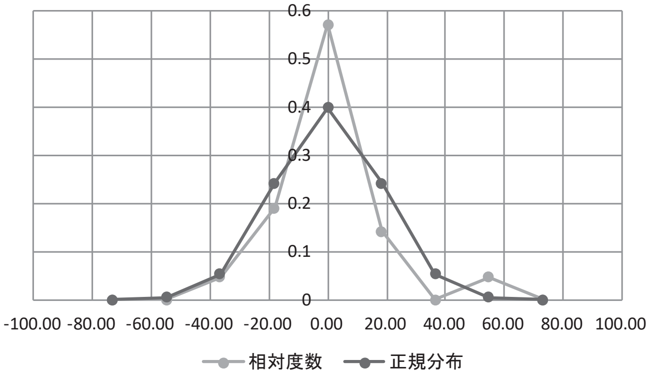

図５　$D_t - \hat{D}_t$ の相対度数分布

言えず，非定常過程である。一方，内示と確定注文の差を考えると，図４よりグラフは０の上下に適当にばらついており，図５の相対度数分布では，ほぼ左右対称であり，やや正規分布に近い。平均値０，標準偏差18.3である。

内示と確定注文の差の１期ずれについて10ケースの自己相関係数を図６に示す。係数はほぼそろっており，１つをのぞき，−0.22から−0.44である。なお，グラフの最左側の棒グラフは，自己相関を表しており，1.0である。

以上のことから，

「確定注文，内示は非定常過程であるが，内示と確定注文の差は定常過程に近く，実務的には定常過程という扱いが可能である」と判断できる。

次に，月次内示（$\tilde{D}_t$）を用いたときについて述べる。図３に月次内示を追加して，月次内示（$\tilde{D}_t$），週次内示（$\hat{D}_t$），確定注文（D_t），週次内示の平均値（$\mathrm{E}[\hat{D}_t]$）を図７に示す。図７より，月次内示も同様に，右下がりであり，トレンドを持っていることが分かる。また，月次内示（$\tilde{D}_t$）と週次内示（$\hat{D}_t$）の差 $\tilde{D}_t - \hat{D}_t$ のグラフを図８に示す。グラフは０の上下に適当にばらついている。なお，図８の１−６期の $\tilde{D}_t - \hat{D}_t$ が０であるのは，月次内示の１週目は週次内示そのものであるからである。

月次内示も週次内示と同じ方法で確認して，

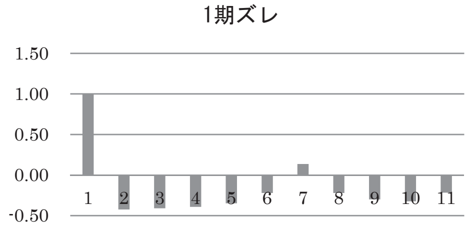

図６　$D_t - \hat{D}_t$ の自己相関係数（１期ズレの場合）

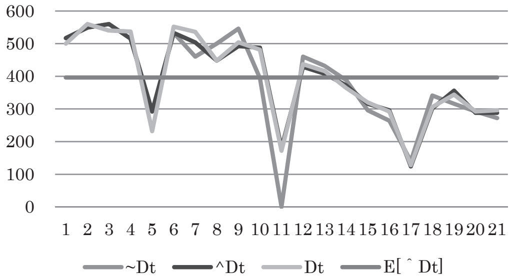

図７　$\tilde{D}_t$・$\hat{D}_t$・D_t・$\mathrm{E}[\hat{D}_t]$ のグラフ

図８　$\tilde{D}_t - \hat{D}_t$ のグラフ

「月次内示は非定常過程であるが，月次内示と週次内示の差は定常過程に近く，実務的には定常過程という扱いが可能である」と判断できる。

さらに厳密的な議論のためには，計量時系列分析における単位根過程の検定［13, 14］を行うことにより，定常過程であることの確認を行っていく必要がある。

4.　先行研究によるブルウィップ効果の式

L. Chen & H. L. Lee［5］を参照し，定常な需要プロセスを前提に，設備能力制約とバッチオーダーを考慮したシステム（capacitated batch ordering system）のブルウィップ効果の関係式を示す。

【記号】

t：期

D_t：t 期における需要量

Q_t：t 期における設備能力制約なし／バッチオーダー条件なしの場合の発注量

$\hat{Q}_t$：t 期における設備能力制約あり／バッチオーダー条件なしの場合の発注量

$\tilde{Q}_t$：t 期における設備能力制約あり／バッチオーダー条件ありの場合の発注量

なお，Q_t，$\hat{Q}_t$，$\tilde{Q}_t$ は，整数値をとると仮定しておく。

ブルウィップ効果の Information flow ベースによる定義より，

$$B = \frac{\mathrm{Var}\left[\tilde{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[D_t\right]}$$

である。また，B は，以下のように積形式に分解される。

$$B = \frac{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}{\mathrm{Var}\left[D_t\right]} \cdot \frac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]} \cdot \frac{\mathrm{Var}\left[\tilde{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]} \tag{3}$$

右辺の第１項は，設備能力制約なし／バッチオーダー条件なしの場合のブルウィップ効果である。第２項は，設備能力制約ありの場合，第３項は，バッチオーダー条件のある場合に組み込まれた項である。オペレーションズリサーチと在庫理論を援用して，逐次に関係式を説明していく。

4.1　発注式

①設備能力制約なし／バッチオーダー条件なしの場合

【記号】

S_t：t 期における基点在庫目標（base-stock level）

設備能力制約なし／バッチオーダー条件なしの場合の発注量 Q_t は，基点在庫方策（base stock policy）が最適である［15–18］。すると，

$$Q_t = S_{t+1} - S_t + D_t \tag{4}$$

である。図９に Q_t の求め方の模式図を示している。

②設備能力制約あり／バッチオーダー条件なしの場合

【記号】

OS：バッチサイズ（正の整数であると仮定する）

C：設備能力制約（バッチサイズ OS の倍数であると仮定する）

I_t：t 期における発注後の在庫位置（inventory position after ordering）

有限な設備能力制約がある場合は，状態依存修正基点在庫方策（state-dependent modified

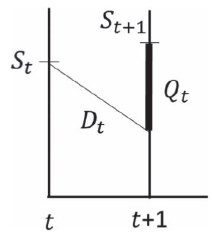

図９　設備能力制約なし／バッチオーダー条件なしの場合の発注量の求め方

base-stock policy）が最適である［19–21］。したがって，

$$
\begin{aligned}
\hat{Q}_t &= min\left\{S_{t+1}-\left(I_t-D_t\right),C\right\} \\
&= min\left\{(S_{t+1}-S_t+D_t)+\left(S_t-I_t\right),C\right\}
\end{aligned} \quad (5)
$$

図10に $\hat{Q}_t$ の求め方の模式図を示している。具体的には，設備能力制約なし／バッチオーダー条件なしの場合の Q_t を用いて，設備能力制約あり／バッチオーダー条件なしの場合の $\hat{Q}_t$ は，

$$
\hat{Q}_{t+i} = \begin{cases} C & (1 \le i \le \tau) \\ \sum_{j=1}^{\tau+1} Q_{t+j} - \tau C & (i = \tau+1) \end{cases} \quad (6)
$$

ここで，τ は，t 期に一旦，$S_t - I_t = 0$ となり，その後に，再び，$S_{t+\tau+1} - I_{t+\tau+1} = 0$ となる期のことである。(6) 式より，下記の式であらわされる条件が成立する。

$$
\begin{aligned}
&Q_{t+1} > \mathrm{C} \\
&\cdots \\
&Q_{t+1} + \cdots + Q_{t+\tau} > \tau\mathrm{C} \\
&Q_{t+1} + \cdots + Q_{t+\tau} + Q_{t+\tau+1} \le \left(\tau+1\right)\mathrm{C}
\end{aligned}
$$

これは，発注量が大きく，設備能力を超える場合は，発注量は設備能力上限に抑えられ，能力よりオーバーする分は逐次に後ろ倒しをせざるを得ない。発注量が設備能力上限に収まると後ろ倒しは起こらないが，上限を超える期が来るとまた後ろ倒しが始まることを表している。

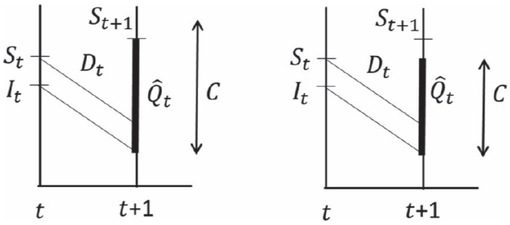

図10　設備能力制約あり／バッチオーダー条件なしの場合の発注量の求め方
（左：$S_{t+1}-\left(I_t-D_t\right)<C$ の場合
右：$S_{t+1}-\left(I_t-D_t\right)\ge C$ の場合）

③設備能力制約あり／バッチオーダー条件ありの場合

【記号】

$\tilde{I}_t$：t 期におけるバッチサイズに丸めた後の在庫位置（inventory position after order rounding）

設備能力制約あり／バッチオーダー条件なしの場合の $\hat{Q}_t$ をもとにバッチサイズに丸めることにより発注量 $\tilde{Q}_t$ を求める。

$\hat{Q}_t$ は，バッチサイズの m_t 倍であり，余りが r_t とすると，

$$
\begin{aligned}
&\hat{Q}_t = m_t \times OS + r_t \\
&r_t \in \left\{0,1,\cdots,OS-1\right\}
\end{aligned} \quad (7)
$$

また，$\tilde{I}_t$ は I_t とは異なり，バッチサイズの倍数に丸められた後の在庫位置であることから，バッチオーダー条件を考慮した場合には在庫位置がずれ，そのずれの値 $\Delta\tilde{I}_t$ は，

$$
\begin{aligned}
&\Delta\tilde{I}_t = I_t - \tilde{I}_t \\
&\Delta\tilde{I}_t \in \left\{-\frac{\lfloor OS \rfloor}{2}+1,\cdots,-1,0,1,\cdots,OS-\frac{\lfloor OS \rfloor}{2}\right\}
\end{aligned} \quad (8)
$$

ここで，$\lfloor OS \rfloor$ は，OS に最も近い OS より小さい整数であることを表す。

$$
\begin{aligned}
\tilde{Q}_t &= min\left\{S_{t+1}-\left(\tilde{I}_t-D_t\right),C\right\} \\
&= min\left\{\left(S_{t+1}-I_t+D_t\right)+(I_t-\tilde{I}_t),C\right\} \\
&= min\left\{(S_{t+1}-S_t+D_t)+\left(S_t-I_t\right)+\left(I_t-\tilde{I}_t\right),C\right\}
\end{aligned} \quad (9)
$$

一方，(5) (7) 式より，

$$
\hat{Q}_t = min\left\{S_{t+1}-\left(I_t-D_t\right),C\right\} = m_t \times OS + r_t
$$

であるから，バッチオーダー条件がない場合の $t+1$ 期の発注量は，

$$
\hat{Q}_t + \Delta\tilde{I}_t = m_t \times OS + r_t + \Delta\tilde{I}_t
$$

であるから，これをもとに，次にバッチオー

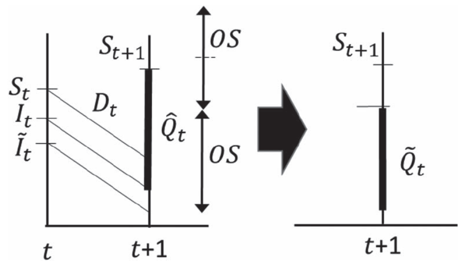

図11　バッチオーダー条件を考慮した発注量の求め方（$\hat{Q}_t$ から $\tilde{Q}_t$ の求め方）

ダー条件を考える。$r_t+\Delta\tilde{I}_t$ が，OS の半分以上のときは，上方向に丸められ，$r_t+\Delta\tilde{I}_t$ が OS の半分未満なら下方向に丸められるルールとする。

$$\tilde{Q}_t=\begin{cases} C & \left(\hat{Q}_t=C\right) \\ (m_t+1)\times OS & \left(r_t+\Delta\tilde{I}_t\geq\dfrac{OS}{2}\text{かつ}\,\hat{Q}_t<C\right) \\ m_t\times OS & \left(r_t+\Delta\tilde{I}_t<\dfrac{OS}{2}\text{かつ}\,\hat{Q}_t<C\right) \end{cases} \tag{10}$$

$r_t+\Delta\tilde{I}_t\geq\dfrac{OS}{2}$ かつ $\hat{Q}_t<C$ のケースにおける $\tilde{Q}_t$ の求め方の模式図を図11に示している。

$\tilde{Q}_t$ の分散を求めるためには，$\Delta\tilde{I}_t$ の確率分布を求める必要があるが，次に示す R_t の分布から求められる。

$$R_t=\left(\tilde{I}_t\,mod\,OS\right) \tag{11}$$
$$R_t\in\{0,1,\cdots,OS-1\}$$

なお，R_t の定常分布が $\{0,1,\cdots,OS-1\}$ の上で，一様分布であることが知られている［5］。

4.2　設備能力制約あり／バッチオーダー条件ありを考慮したブルウィップ効果の式

前節の発注式を用いて，次のような命題が導かれている［5］。

【L. Chen & H. L. Lee の命題】

(i)　Q_t が定常過程で，$\mathrm{E}\left[Q_t\right]<C$ であると仮定する。

(ii)　R_t の定常分布が $\{0,1,\cdots,OS-1\}$ の上で一様分布であるとすると，$\Delta\tilde{I}_t$ は，$\left\{-\dfrac{\lfloor OS\rfloor}{2}+1,\cdots,-1,0,1,\cdots,OS-\dfrac{\lfloor OS\rfloor}{2}\right\}$ の上で，一様分布になる。

(iii)　ブルウィップ効果は，

$$B=\frac{\mathrm{Var}\left[\tilde{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[D_t\right]}=\frac{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}{\mathrm{Var}\left[D_t\right]}\cdot\frac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}\cdot\left(1+\frac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}\right) \tag{12}$$

ただし，

$$X_t=\left(\hat{Q}_t\,mod\,OS\right) \tag{13}$$

(iv)　$\dfrac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}\leq 1$

特に，$C=\infty$ のときは，$\dfrac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}=1$　　(14)

(v)　$\dfrac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}\geq 0$ 特に，$OS=1$ のときは，

$X_t=0$ となり，$\dfrac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}=0$　　(15)

5.　内示生産システムにおけるブルウィップ効果

設備能力制約とオーダーバッチ条件を考慮した先行研究［5］をもとに，内示生産システムの需要プロセスを基にした先行研究［4］を総合してブルウィップ効果の統合式（Bullwhip Effect Formula for NAIJI　Production System）を導く。3. で示したように，週次内示と確定注文の差異，月次内示と週次内示の差異が定常過程であることの性質を活用している。

5.1　内示生産システムのブルウィップ効果（週次内示を使う場合）

【記号】

ε_t：週次内示 $\hat{D}_t$ と確定注文 D_t のブレ

d_t：確定注文と週次内示の差

M：確定注文と週次内示の差の分散

（1）需要プロセスのモデル化

$$
\begin{aligned}
&D_t = \hat{D}_t + \varepsilon_t \qquad (16)\\
&\mathrm{E}\left[\varepsilon_t\right] = 0, \forall t\\
&\mathrm{E}\left[\varepsilon_t \varepsilon_{t+j}\right] = 0, \forall t, \forall j > 0\\
&\mathrm{Var}\left[\varepsilon_t\right] \equiv M
\end{aligned}
$$

（2）確定注文と週次内示の差

$$d_t \equiv D_t - \hat{D}_t \qquad (17)$$

より，

$$d_t = \varepsilon_t$$

したがって，

$$
\begin{aligned}
&\mathrm{E}\left[d_t\right] = 0, \forall t\\
&\mathrm{E}\left[d_t d_{t+j}\right] = 0, \forall t, \forall j > 0\\
&\mathrm{Var}\left[d_t\right] = M
\end{aligned}
$$

d_t を新しく需要とみなせば，3. より，d_t は定常過程である。

なお，d_t は負の値をとることがあり，需要量を非負と考えたいので，技巧的に大きな一定値 B を付加しておく。

$$d_t^* \equiv D_t - \hat{D}_t + B = d_t + B$$

しかし，d_t^* を含んだ分散をとると B を含んでもそうでなくても変わらないので，これ以降は B を省略する。d_t^* も単に d_t と書く。

（3）発注式

【記号】

y_t：t 期における週次内示を想定した時の目標在庫量

q_t：t 期における発注量

t 期の期末の発注量は，表 1 に示すように，t 期の需要量（d_t），当期と翌期の目標在庫量レベルの差によって決まる。すなわち，

$$q_t = y_{t+1} - y_t + d_t \qquad (18)$$

（4）ブルウィップ効果

（3）式の第 1 項に，$D_t \leftarrow d_t$，$Q_t \leftarrow q_t$ を代入すればいい。

第 1 項は，

$$
\begin{aligned}
\frac{\mathrm{Var}\left[q_t\right]}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]} &= \frac{\mathrm{Var}\left[y_{t+1} - y_t + d_t\right]}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]}\\
&= \frac{\mathrm{Var}\left[d_t\right] + \mathrm{Var}\left[y_{t+1} - y_t\right] + 2\mathrm{Cov}\left[y_{t+1} - y_t, d_t\right]}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]} \qquad (19)
\end{aligned}
$$

$$\mathrm{Cov}\left[y_{t+1} - y_t, d_t\right] = 0$$

と仮定すると，

表 1　週次内示を用いた発注量

	t 期	$t+1$ 期
t 期発注分の到着（補充）		$q_t = y_{t+1} - y_t + d_t$
目標在庫量	y_t	y_{t+1}
需要予測値	$\mathrm{E}[d_t] = 0$	$\mathrm{E}[d_{t+1}] = 0$
実現値	d_t	
d_t を反映した発注量（t 期末）	$q_t = y_{t+1} - y_t + d_t$	
発注（t 期末）	q_t	

$$\frac{\mathrm{Var}\left[q_t\right]}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]}=\frac{M+\mathrm{Var}\left[y_{t+1}-y_t\right]}{M} \tag{20}$$

需要プロセスが iid（independently and identically distributed）であり，在庫保管費，在庫品切れ費用が一定なら，最適在庫方策は，基点在庫方策（base-stock policy）［16, 18］であり，

$$y_{t+1}=y_t,\forall t$$

であるから，

$$\frac{\mathrm{Var}\left[q_t\right]}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]}=\frac{M}{M}=1 \tag{21}$$

となる。この場合では，ブルウィップ効果は起こらない。

5. 2　内示生産システムのブルウィップ効果（月次内示を使う場合）

【記号】

δ_t：月次内示 $\tilde{D}_t$ と週次内示 $\hat{D}_t$ のブレ

$\tilde{d}_t$：月次内示と週次内示の差

N：確定注文と週次内示の差の分散

（1）需要プロセスのモデル化

$$\tilde{D}_t=\hat{D}_t+\delta_t \tag{22}$$
$$\mathrm{E}\left[\delta_t\right]=0,\forall t$$
$$\mathrm{E}\left[\delta_t\delta_{t+j}\right]=0,\forall t,\forall j>0$$
$$\mathrm{Var}\left[\delta_t\right]\equiv N$$

（2）月次注文と週次内示の差

$$\tilde{d}_t\equiv\tilde{D}_t-\hat{D}_t \tag{23}$$

より，

$$\tilde{d}_t=\delta_t$$

したがって，

$$\mathrm{E}\left[\tilde{d}_t\right]=0,\forall t$$
$$\mathrm{E}\left[\tilde{d}_t\tilde{d}_{t+j}\right]=0,\forall t,\forall j>0$$
$$\mathrm{Var}\left[\tilde{d}_t\right]=N$$

$\tilde{d}_t$ を新しく需要とみなせば，3. より，$\tilde{d}_t$ は定常過程である。

なお，$\tilde{d}_t$ は負の値をとることがあり，需要量を非負と考えたいので，技巧的に大きな一定値 $\tilde{B}$ を付加しておく。

$$\tilde{d}_t^*\equiv\tilde{D}_t-\hat{D}_t+\tilde{B}=\tilde{d}_t+\tilde{B}$$

しかし，$\tilde{d}_t^*$ を含んだ分散をとると $\tilde{B}$ を含んでもそうでなくても変わらないので，これ以降は $\tilde{B}$ を省略する。$\tilde{d}_t^*$ も単に $\tilde{d}_t$ と書く。

（3）発注式

【記号】

$\tilde{y}_t$：t 期における月次内示を想定した時の目標在庫量

q_t：t 期における発注量

表2　月次内示を用いた発注量

	t 期	$t+1$ 期	$t+2$ 期
t 期発注分の到着（補充）			q_t
目標在庫量	y_t	y_{t+1}	$\tilde{y}_{t+2}$
需要予測値	$\mathrm{E}[d_t]=0$	$\mathrm{E}[d_{t+1}]=0$	$\mathrm{E}[\tilde{d}_{t+2}]=0$
実現値	d_t	d_{t+1}	
d_t, d_{t+1}を反映した発注量（t 期末）	q_t $=\tilde{y}_{t+2}-(y_t-d_t)$ $-(y_{t+1}-d_{t+1})$		
発注（t 期末）	q_t		

t 期の期末の発注量は，表2より，t 期，$t+1$ 期の需要量 d_t, d_{t+1} を勘案して，

$$q_t = \tilde{y}_{t+2} - (y_t - d_t) - (y_{t+1} - d_{t+1}) \tag{24}$$

(4) ブルウィップ効果

(3) 式の第1項に，$D_t \leftarrow d_t, Q_t \leftarrow q_t$ を代入すればいい。

$$\begin{aligned} q_t &= \tilde{y}_{t+2} - (y_t - d_t) - (y_{t+1} - d_{t+1}) \\ &= \tilde{y}_{t+2} - y_t - y_{t+1} + (d_t + d_{t+1}) \end{aligned}$$

また，

$$\tilde{y}_{t+2} = y_{t+2} + \tilde{d}_{t+2}$$

より，

$$q_t = y_{t+2} - y_t - y_{t+1} + \left(\tilde{d}_{t+2} + d_t + d_{t+1}\right)$$

$$\begin{aligned} \mathrm{Var}\left[q_t\right] = {} & \mathrm{Var}\left[d_t\right] + \mathrm{Var}\left[d_{t+1}\right] + \mathrm{Var}\left[\tilde{d}_{t+2}\right] \\ & + \mathrm{Var}\left[y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right] \\ & + 2\mathrm{Cov}\left[d_t, \left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right] \\ & + 2\mathrm{Cov}\left[d_{t+1}, \left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right] \\ & + 2\mathrm{Cov}\left[\tilde{d}_{t+2}, \left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right] \\ & + 2\mathrm{Cov}\left[d_t, d_{t+1}\right] + 2\mathrm{Cov}\left[d_t, \tilde{d}_{t+2}\right] \\ & + 2\mathrm{Cov}\left[d_{t+1}, \tilde{d}_{t+2}\right] \end{aligned}$$

$$\mathrm{Cov}\left[d_t, d_{t+1}\right] = 0$$

である。

$$\begin{aligned} & \mathrm{Cov}\left[d_t, \tilde{d}_{t+2}\right] = 0 \\ & \mathrm{Cov}\left[d_{t+1}, \tilde{d}_{t+2}\right] = 0 \\ & \mathrm{Cov}\left[d_t, \left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right] = 0 \\ & \mathrm{Cov}\left[d_{t+1}, \left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right] = 0 \\ & \mathrm{Cov}\left[\tilde{d}_{t+2}, \left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right] = 0 \end{aligned}$$

と仮定すれば，

$$\begin{aligned} \mathrm{Var}\left[q_t\right] &= \mathrm{Var}\left[d_t\right] + \mathrm{Var}\left[d_{t+1}\right] + \mathrm{Var}\left[\tilde{d}_{t+2}\right] \\ & \quad + \mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right] \\ &= 2\mathrm{Var}\left[d_t\right] + \mathrm{Var}\left[\tilde{d}_{t+2}\right] \\ & \quad + \mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right] \end{aligned} \tag{25}$$

となり，

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{Var}\left[q_t\right]}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]} &= \frac{\begin{array}{c} 2\mathrm{Var}\left[d_t\right] + \mathrm{Var}\left[\tilde{d}_{t+2}\right] \\ + \mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right] \end{array}}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]} \\ &= \frac{2M + N + \mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right]}{M} \end{aligned} \tag{26}$$

5.3 内示生産システムにおけるブルウィップ効果の統合式

下記のように集約することができる。

(週次内示を用いる場合)

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mathrm{Var}\left[q_t\right]}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]} \\ &= \frac{M + \mathrm{Var}\left[y_{t+1} - y_t\right]}{M} \\ & \quad \cdot \frac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]} \cdot \left(1 + \frac{E\left[X_t\left(OS - X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}\right) \end{aligned} \tag{27}$$

(月次内示を用いる場合)

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mathrm{Var}\left[q_t\right]}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]} \\ &= \frac{2M + N + \mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2} - y_t - y_{t+1}\right)\right]}{M} \\ & \quad \cdot \frac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]} \cdot \left(1 + \frac{E\left[X_t\left(OS - X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}\right) \end{aligned} \tag{28}$$

なお，Q_t，$\hat{Q}_t$，$\tilde{Q}_t$ は，改めて需要量 d_t に対する設備能力制約なし／バッチオーダー条件なしの場合の発注量，設備能力制約あり／バッチオーダー条件なしの場合の発注量，設備能力制約あり／バッチオーダー条件ありの場合の発注量を表しているとする。

統合式の各項目の注釈を表3に示す。

表３　ブルウィップ効果統合式の項目

	要　因	ブルウィップ効果の式の注釈
第１項	需要プロセス $\dfrac{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}{\mathrm{Var}\left[d_t\right]}$	（週次内示）B の第１項 $=\dfrac{M+\mathrm{Var}\left[y_{t+1}-y_t\right]}{M}$ （月次内示）B の第１項 $=\dfrac{2M+N+\mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2}-y_t-y_{t+1}\right)\right]}{M}$
第２項	設備能力制約 $\dfrac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}$	（能力制約あり）$\dfrac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}<1$ （能力制約なし $C=\infty$）$\dfrac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}=1$
第３項	バッチオーダー条件 $1+\dfrac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}$	（バッチオーダー条件あり）$\dfrac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}>0$ （バッチオーダー条件なし）$\dfrac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}=0$

6.　内示生産システムにおける複合的要因によるブルウィップ効果への影響

複合的要因によるブルウィップ効果への影響を週次内示，月次内示を使った場合にわけて表４，表５に示す。

表４より，

（ケース①）需要プロセスが iid 系列で，在庫保管費，在庫品切れ費用が時期により変化しないとみなせるなら，最適在庫方策は，基点在庫方策となり，目標在庫の変動はない。生産設備能力制約なし／バッチオーダー条件なしの場合には，（27）式の各項とも，1.0となり，ブルウィップ効果は１となる。すなわち，ブルウィップ効果は発生しないことを示している。

（ケース②）目標在庫の変動はあるが，生産設備制約なし／バッチオーダー条件なしの場合は，（27）式の第２，３項は1.0であり，第１項のみとなる。ブルウィップ効果は発生し，増幅する。この結果は，［4］と同じである。

（ケース③）目標在庫の変動はあるが，生産設備制約あり／バッチオーダー条件なしの場合は，第３項は1.0であり，第１，２項のみとなる。ブルウィップ効果は発生し，増幅と減幅が複合化する。単調的な変化とは言えない。このケースは実際的に良く見られるタイプである。

（ケース④）目標在庫の変動はあるが，生産設備制約なし／バッチオーダー条件ありの場合は，第２項は1.0であり，第１，３項のみとなる。ブルウィップ効果は発生し，増福する。

表 4　複合的要因によりブルウィップ効果への影響（週次内示）

ケース		考慮する項目：需要プロセス	考慮する項目：設備能力制約	考慮する項目：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）	ブルウィップ効果への影響
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	ブルウィップ効果なし
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	○	×	×	$\frac{M+\mathrm{Var}\left[y_{t+1}-y_t\right]}{M}$	在庫目標の変動により増幅
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	○	○	×	$\frac{M+\mathrm{Var}\left[y_{t+1}-y_t\right]}{M}\cdot\frac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}$	在庫目標の変動により増幅 設備能力制約により減幅の複合化
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	○	×	○	$\frac{M+\mathrm{Var}\left[y_{t+1}-y_t\right]}{M}\cdot\left(1+\frac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}\right)$	在庫目標の変動により増幅 バッチサイズにより増幅の複合化
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	○	○	○	$\frac{M+\mathrm{Var}\left[y_{t+1}-y_t\right]}{M}\cdot\frac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}\cdot\left(1+\frac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}\right)$	在庫目標の変動により増幅 設備能力制約により減幅 バッチサイズにより増幅の複合化

表 5　複合的要因によりブルウィップ効果への影響（月次内示）

ケース		考慮する項目：需要プロセス	考慮する項目：設備能力制約	考慮する項目：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（月次内示の場合）	ブルウィップ効果への影響
①	・$y_{t+2}-y_t-y_{t+1}=0$ ・設備能力制約なし ・バッチオーダーなし	○	×	×	$\frac{2M+N}{M}$	ブルウィップ効果は２以上
②	・$y_{t+2}-y_t-y_{t+1}\neq 0$ ・設備能力制約なし ・バッチオーダーなし	○	×	×	$\frac{2M+N+\mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2}-y_t-y_{t+1}\right)\right]}{M}$	在庫目標の変動により増幅
③	・$y_{t+2}-y_t-y_{t+1}\neq 0$ ・設備能力制約あり ・バッチオーダーなし	○	○	×	$\frac{2M+N+\mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2}-y_t-y_{t+1}\right)\right]}{M}\cdot\frac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}$	在庫目標の変動により増幅 設備能力制約により減幅の複合化
④	・$y_{t+2}-y_t-y_{t+1}\neq 0$ ・設備能力制約なし ・バッチオーダーあり	○	×	○	$\frac{2M+N+\mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2}-y_t-y_{t+1}\right)\right]}{M}\cdot\left(1+\frac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}\right)$	在庫目標の変動により増幅 バッチサイズにより増幅の複合化
⑤	・$y_{t+2}-y_t-y_{t+1}\neq 0$ ・設備能力制約あり ・バッチオーダーあり	○	○	○	$\frac{2M+N+\mathrm{Var}\left[\left(y_{t+2}-y_t-y_{t+1}\right)\right]}{M}\cdot\frac{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}{\mathrm{Var}\left[Q_t\right]}\cdot\left(1+\frac{E\left[X_t\left(OS-X_t\right)\right]}{\mathrm{Var}\left[\hat{Q}_t\right]}\right)$	在庫目標の変動により増幅 設備能力制約により減幅 バッチサイズにより増幅の複合化

（ケース⑤）目標在庫の変動はあり，かつ生産設備制約あり／バッチオーダー条件ありの場合は，第１，２，３項のすべてが関連する。ブルウィップ効果は発生し，要因の影響度合いにより増幅と減幅が混在して起こる。要因ごとの単調的な変化とは言えず，複雑化する。このケースも実際的に良く見られるタイプである。

7. おわりに

本論文においては，

(1) ブルウィップ効果が起こる要因を列挙して，それぞれがブルウィップ効果に及ぼす影響について文献を参照し，定性的に考察した。要因を人間の非合理的な判断によるものと合理的な意思決定によるものに大別した。合理的な意思決定による場合でも，需要サイドの要因，供給サイドの要因，考慮する費用項目と在庫補充方法による要因，データ集約，内示特性による要因，サプライヤー間の情報共有，価格割引などの要因がブルウィップ効果に影響することを述べた。非合理的な人間判断による場合のみならず，たとえ合理的な意思決定を行ったとしてもブルウィップ効果を増幅してしまうことを示した。

(2) 次に，内示生産システムにおける需要プロセスの特性を明らかにした。すなわち，データから内示，確定注文データの推移が非定常過程であるが，確定注文と内示の差，月次内示と週次内示の差は実務的には定常過程であると扱うことができることを例証した。

(3) 論文［4, 5］を統合し，内示生産システムにみられる不確実性を持つ定常過程の需要プロセス，生産能力制約，生産・輸送におけるロットまるめ等の複合要因を加味したブルウィップ効果の統合式を導いた。

①週次内示を使って，目標在庫の変動なく，生産能力制約なし，生産・輸送におけるバッチオーダー条件なしの場合には，ブルウィップ効果は発生しないことを示した。

②週次内示，月次内示を先行需要情報とする不確実性を持つ定常過程の需要プロセス，生産制約条件，バッチオーダー条件ありの場合の統合的な式を示した。

③ケースによりブルウィップ効果の増幅，減幅が起こり，要因の影響が複雑化する。単一項目ごとには，ブルウィップ効果は単調的に，増加・減少を示す場合でも，要因が複合化すると単調的な変化ではないことがわかる。

今後は，

①統合式に組み込まれていない要因の定量的な考察を進めていく。

②内示と確定注文の差異の単位根過程の検定［13］を行うことにより定常性の厳密な検証を行う。

③内示生産システムにおける最適な予測と確定注文によるブレ補正を組み込んだ在庫補充方式の理論と手法の考案を進めていく。

本論文で，週次内示と確定注文の差異が定常過程として扱えることを示した。この性質を使えば，需要が AR 過程で，誤差が iid 系列で，正規分布に従うなら平均２乗誤差（MSE; mean squared error）の意味で最適な予測が可能になる［13］。今回の場合では，週次内示と確定注文の差異の最適予測値はゼロであることから，確定注文の最適予測値は内示そのものとなる。したがって，内示と確定注文のブレに対応して保有すべき在庫目標量は，内示と予測誤差の標準偏差の安全在庫係数倍の合計である。

この知見を活用すれば，「内示そのものの最適予測→内示と確定注文のブレに対する安全在庫の設定→短い間隔での部品発注」という根拠に基づいたかつ実務的な発注業務手順が考案できる。例えば，「内示の３か月平均値とそれに基づいた品切れ率１％の安全在庫目標の設定および毎日発注方式の組み合わせ」とする場合である。不確実でかつ非定常過程をも含む需要環境における合理的かつ実務的な発注方法を提案できる可能性がある。

謝辞：本研究に際して，ヒアリング調査を受け入れていただき，データや事例の提供や深い議論をしていただきました NSW 倉本氏に厚く感謝いたします。マツダ（株）の機械部品系の一次サプライヤー殿には機械部品の受発注業務などの教示をいただき感謝いたします。IT コーディネーター，中小機構アドバ

イザー（元マツダ（株））慶徳晴司氏には共同にて調査を行うとともにテーマの進め方，解決法等について貴重なヒントをいただきました。共同研究者の富山県立大学奥原浩之教授には，統合式についての理論面の深い議論を，また，本学経済学部得津康義教授には時系列データの計量検定法について多くの教示をいただきました。本学大学院修了生泉田和希君（当時）にはデータ整理，資料整理等の協力を得た。

本研究は，石田学園広島経済大学研究費助成制度による助成を受けています。

参　考　文　献

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

［2］黒田　充，大野勝久監訳：サプライチェーンハンドブック，朝倉書店（2008）

［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］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，経済研究論集，第41巻，第２・３号，pp. 5−17（2018）

［5］L. Chen and H. L. Lee: Bullwhip Effect Measurement and Its Implications, Operations Research, Vol. 60, No. 4, pp. 771−784（2012）

［6］F. Chen, Z. Drezer, J. K. Ryan and D. Simchi-Levi: The Bullwhip Effect: Managerial Insights on Forecasting and Information on Variability in a Supply Chain, S. Tayur et al.（eds.）, Quantitative Models for Supply Chain Management, Springer（1999）

［7］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）

［8］H. L. 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）

［9］L. Chen and H. L. Lee: Information Sharing and Order Variability Control Under a Generalized Demand Model, Management Science, Vol. 55, No. 5, pp. 781−797（2009）

［10］X. Wang and S. M. Disney: The Bullwhip Effect: Progress, trends and directions, European Journal of Operational Research, Vol. 250, pp. 691−701（2016）

［11］D. H. Taylor: Measurement and Analysis of Demand Amplification Across the Supply Chain, The International Journal of Logistics Management, Vol. 10, No. 2, pp. 55−70（1999）

［12］上野信行：部品サプライヤーの発注方式の強化―在庫補充方法の改善と毎日発注方式の提案―，経済研究論集，第40巻，第２・３号，pp. 5−14（2017）

［13］沖本竜義：経済・ファイナンスデータの計量時系列分析，朝倉書店（2019）

［14］福地純一郎，伊藤有希：R による計量経済分析，朝倉書店（2012）

［15］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）

［16］P. H. Zipkin: Foundation of Inventory Management, McGraw-Hill（2000）

［17］大野勝久：Excel による経営科学，評論社（2011）

［18］大野勝久：Excel による生産管理，朝倉書店（2011）

［19］Y. Aviv and A. Federgruen: Capacitated multi-item inventory systems with random and seasonally fluctuating demands: Implications for postponement strategies, Management Science, Vo. 47, No. 4, pp. 512−531（2001）

［20］R. Kapuscinski and S. Tayur: A capacitated production-inventory model with periodic demand, Operations Research, Vol. 46, No. 6, pp. 899−911（1998）

［21］S. Tayur: Computing the optimal policy for capacitated inventory models, Commun. Statist. -Stochastic Models, Vol. 9. No. 4, pp. 585−598（1993）