

# サプライチェーンにおける鞭効果(ブルフィップ効果)の 測定と制御法

北岡 正敏

## Measuring and Controlling the Bullwhip Effect in Supply Chain

Masatoshi KITAOKA\*

### 1. はじめに

世界経済を混乱に陥れているサブプライムローン問題の現象はサプライチェーンにおける鞭効果(The Bullwhip Effect:ブルフィップ効果)と同じ現象である。これまでのサプライチェーンにおける最大の問題は鞭効果である。鞭効果とは生産流通システムにおいて、消費者のような末端で起きた小さな変動による小波は最終の生産工場においては大波の変動を起こすことである。経済面では景気変動とかビジネスサイクルとも言われている。これまで鞭効果による需要の周期変動, 需要の増幅, 時間差(time-lag)は企業の経営を大きく混乱させ, 悪化させてきた(1)。同じ業界の中で他企業を巻き込んで産業界全体の経営を悪化させる原因となり, 中には企業衰退の原因になっている。今回のアメリカで発生したサブプライムローン問題もその現象から判断して鞭効果の一種と見なせる。特に基幹産業における技術の衰退はその国のGDPを下げるだけでなく国力の低下をまねき, 国家の衰退へと導く。その良い例がアメリカの工作機械業界である(1)。アメリカの工作機械業界は1970年代に衰退し多くの企業が倒産した。その原因を日本の工作機械産業に技術的, 品質的, コストの面で敗北したためだといわれている。しかし, 直接の原因は鞭効果により需要の変動に対応できなくなったためである。その波及効果が経営問題から技術問題にまで影響し, 日本の工作機械メーカーに対抗できなかった。鞭効果は食品産業, 繊維, 産業自動車産業, 半導体業界などあらゆる産業で発生している。鞭効果による影響は不必要な設備投資をし, 過剰在庫を保管して一国の経済に悪影響を与えてきた。この報告では鞭効果に関するこれまでの研究成果を整理してみた。そして, 鞭効果の発生メカニズムをシステムダイナミクス(System Dynamics)により実際の生産企業をモデル化して解析した。さらに, 現在の生産メーカーが採用しているサ

プライチェーンの構造と鞭効果発生メカニズムをシステムダイナミクスにより解明する。あわせてサプライチェーンにおいて企業で使用している管理手法である情報システム, 生産システム, 在庫管理, 需要予測, 輸配送などの各手法から鞭効果発生メカニズムを明らかにする。最後に, サプライチェーンにおける鞭効果低減の方法について整理してみる。

### 2. 鞭効果(The Bullwhip Effect)

#### 2.1 鞭効果の内容

鞭効果は, たとえば衣料分野に関して, 顧客から小売店への需要変動が $\pm 5\%$ になると, 小売店から衣類メーカー(Garment maker)への需要変動は $\pm 10\%$ になる。さら衣類メーカーから繊維メーカーへの需要変動を $\pm 20\%$ に増大させる。次に繊維メーカーから毛糸メーカーへの需要変動は $\pm 40\%$ に増大することがStalk and Houtによって報告されている(2)。このように下位のエシェロン階層から上位のエシェロン階層にいくほど変動は拡大される。この現象はあらゆる産業や企業経営に見られる。たとえば, 図1の上段はアメリカにおける工作機械の受注量と自動車産業の販売高とGDPの関係を示したものである(3)。GDPの変動は自動車産業の販売に大きな影響を与えて変動を起こす。さらに, 自動車生産において先行投資として工作機械は欠かせないものである。このため, 自動車の生産量が変動すると工作機械の受注量の変動は自動車販売高を大きく上回ってくる。このようにGDPの変化に対して自動車産業の受注変動から最終的に工作機械の受注量に影響を与えて需要量の変動を大きくしている。過去のデータによればアメリカでは1961年から1991年までの国内総生産(GDP)は $\pm 2\%$ から $3\%$ の範囲で変動してきた。これにともなう自動車産業は $\pm 20\%$ の範囲で変動してきた。これにたいして, 工作機械産業の受注量の変動は $\pm 60\%$ から $80\%$ の範囲で変動してきた。周期変動の大きさに比例して, アメリカの工作機械産業は生産計画に対応できず経営が悪化し多くの企業が倒産をした。図1の下段は

アメリカにおける半導体産業の生産高と工業製品の生産高を示している(4)。半導体業界の鞭効果による変動は周辺の産業や半導体装置製造業にも影響が及び企業経営に混乱をきたした(4)。

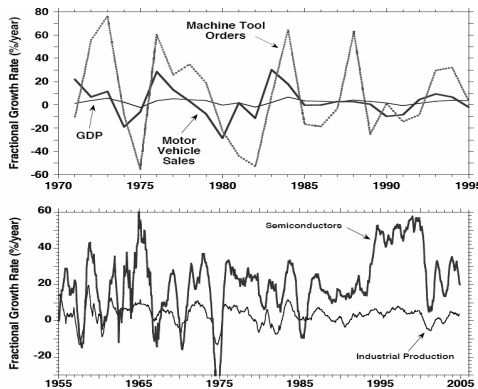


図1 サプライチェーンにおける需要変動と増幅効果  
(出典：US Federal Reserve, series G211 and N213111)

### 3. 鞭効果の研究

鞭効果の原因を科学的に分析したのはインダストリアル・ダイナミクス(Industrial Dynamics)を開発したフォレストである(5)。フォレストの後に同じ手法を用いて研究したのが Streman(6)、Senge(7)である。この問題を別の手法で検討したのは Magee(8)である。Magee は在庫管理を中心に生産と在庫管理から在庫変動を解析している。マクロ経済面では Holt et al(9)、Blinder(10)、Blanchard(11)の研究がある。経営工学の面からはLPW(Lee, Padmanabhan and Whang, Cachon, Chen と Santorengraja(12)がある。特に LPW は数学的に鞭効果を証明した。初期の研究では Streman はビールゲーム(Beer Games)からシステムダイナミクスの変動と遅れの現象から鞭効果を解明した。サプライチェーンの管理者の意思決定の特性を Simon(13)、Forrester, Sterman は4段階のエシェロン構造からモデル化している。Sterman の研究は小売店から工場まで品物の流れを対象にして在庫変動を解析している。特殊なサプライチェーンの構造に関する最近の研究としては Dejonckheere や Towill(14)の論文がある。Towill は最適制御を求めるという目的で研究し、多くの要因がなぜサプライチェーンの構造に影響を与えているかを分析している。サプライチェーンの構造は Bullwhip 効果として特色づけられ Lee, Chen 等は統計モデルを用いた研究をしている。しかし、ここで重要な点は Bullwhip を発生させている原因は構造であって要因ではないという立

場である。多くの企業はそれぞれの会社の歴史、文化、経験、業種、技術のような要素に依存しながら独自の構造を展開させている。

### 4. システムダイナミクスによるサプライチェーンシステムの要因解析

#### 4.1 システムダイナミクスの応用

1960年代に日本では食品産業において鞭効果により受注量は大きく変動し生産工場の稼働状況は不規則な周期変動をきたし、稼働率の低下、原料の確保、従業員の一時的解雇などいろいろな問題点が発生した。このような現象がなぜ起きるのかこの時代にはまだ原因は不明であった。このような中で 1960年代の食品業界を対象にして生産工程から流通工程にいたる詳細な工程をモデル化して鞭効果の分析をした報告がある(15)。

#### 4.2 生産過程の詳細記述モデル

ここでは食品業界の詳細なモデルを用いて鞭効果を分析する。生産工程はバッチ処理方式にしたがって原材料を攪拌し、混合する。次の工程でそれぞれの製品に必要な加工を実施して製品を生産し、最終工程で完成した製品を個々に包装する。そして、包装された製品を必要な単位にまとめて輸送・配送に適した形に包装する。使用する機械は加工機械と包装機械から構成されている。生産統制の流れは平滑化された注文、本社からの注文、適正在庫、受注情報にもとずいた生産計画が立てられる。包装材料在庫は生産計画指示により、望ましい包装材料在庫から計算する。加工機台数は生産指示量と加工機能力から求める。原材料に対する加工能力は加工工程の作業数と加工機台数それに加工能力から求める。製品が加工されて完成した品物の包装能力も包装機械の能力と作業数から求める。図2はこの関係をブロック図で示し、図3はフローダイアグラムで示したものである。レベルに相当するのが原材料在庫、生産計画生産量、加工工程遅れによるものと注文中の外装材料と注文中の内装材料、外材料在庫と内装材料在庫、包装工程作業人数、加工工程作業人数、加工機台数、製作中の加工機、包装機台数、製作中の包装機台数があげられる。

#### 4.3 流通過程の詳細記述モデル

流通過程の中でメーカー側としては配送センター(デポ、倉庫など)までであるが、分析の対象として卸店までとした。小売店から卸店への受注にしたがってシステムに変動が生じる。卸店での受注残は小売店からの受注と卸店からの出荷量に応じて変化する。メーカーの地域別の販売部に対して卸店から発注がなされる。地区販売部での受注残は卸店からの発注レイトと配送センターからの出荷

量により変化する。地区販売部は受注残と卸店からの発注レートにより本社に対して発注する。本社では地区

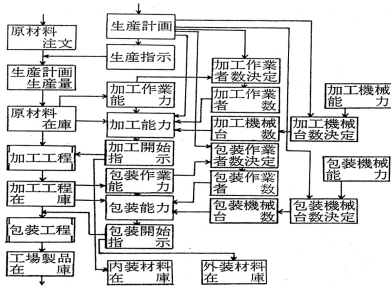


図2 生産システムのブロックダイアグラム

販売部の発注レートにしたがって工場に発注する。

本社の受注残は販社からの発注レートと工場からの生産計画にしたがって変化する。工場では生産計画が立案されるが、工場での受注残は工場倉庫からの出荷レートと本社からの発注レートにより変化する。工場で生産された製品は工場倉庫に入庫され出荷要求と出荷能力にしたがって配送センターに輸送される。出荷要求量は発注レートと工場在庫により求める。図4はこれらの関係をブロック図で示し、図5は流通過程のフローダイアグラムで示す。

#### 4.4 シミュレーション結果

ここではステップ需要のみを取り上げる。ステップ型需要に対して生産システムは図6のようになり、流通システムは図7のようになった。加工工程は55週目にピークになった後で変動を繰り返しながら定常状態になる。包装工程も60週目にピークになった。包装材料の在庫は70週目にピークに達した。加工機や包装機の台数は40週目から定常状態になった。流通システムも卸点の受注残と地区販売部の受注残は40週目にピークになった後は変動しながら定常状態になった。以上のようなシミュレーション結果の特性結果は情報の遅れ、生産の遅れ、輸送の遅れ、事務処理の遅れなどから発生する現象である。システムダイナミクスを工程分野にまで詳細に分析しても解析の結果は企業内の、生産在庫変動、流通変動などの単純化したモデルの結果と同じ現象になった。このため、鞭効果を発生させている要因を追求するには図3、図5のような詳細なモデルを利用する必要はなく、単純化したモデルでも解析は可能である。鞭効果をサプライヤを含めたサプライチェーン面から解析するにはより単純化されたモデルでおこなっても同じ現象が得られる。

### 5. サプライチェーンの構造解析

#### 5.1 詳細モデルから簡易モデルによる分析

サプライチェーンを対象にして解析するためできるだけサプライチェーンのモデルを簡略化して分析する。

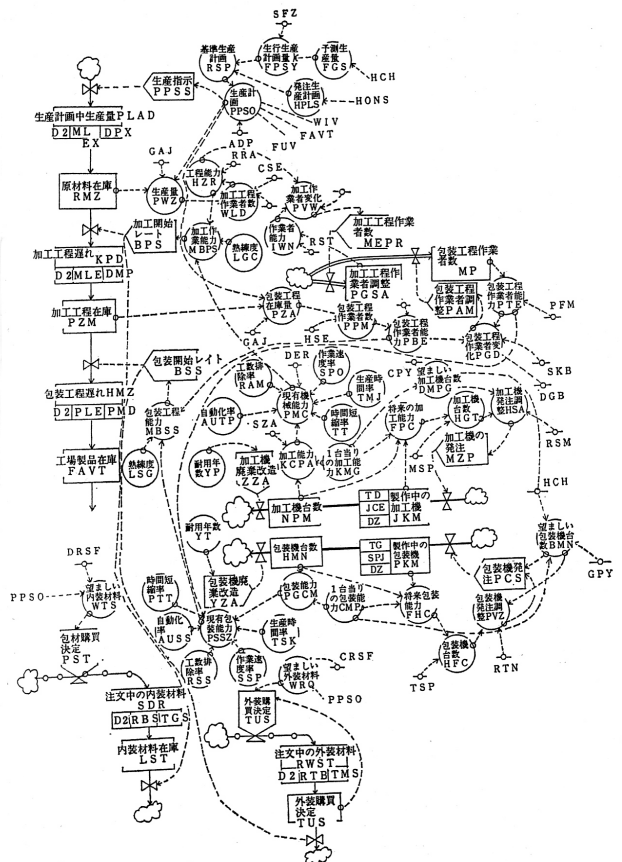


図3 生産システムフローダイアグラム

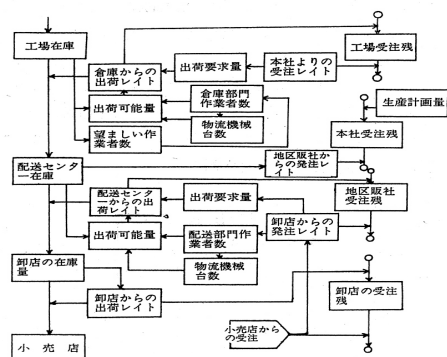


図4 流通システムのブロックダイアグラム

鞭効果を測定するために対象として工作機械、自動車などのサプライヤから部品を購入して工場で組み立てて製品にする商品を取りあげる。すなわち、サプライヤから部品や半製品を購入し、中心となる工場で組立て加工する

ものとする。図 8 のような3つのエシェロン階層をもつサプライチェーンモデルを対象にして解析をおこなう。

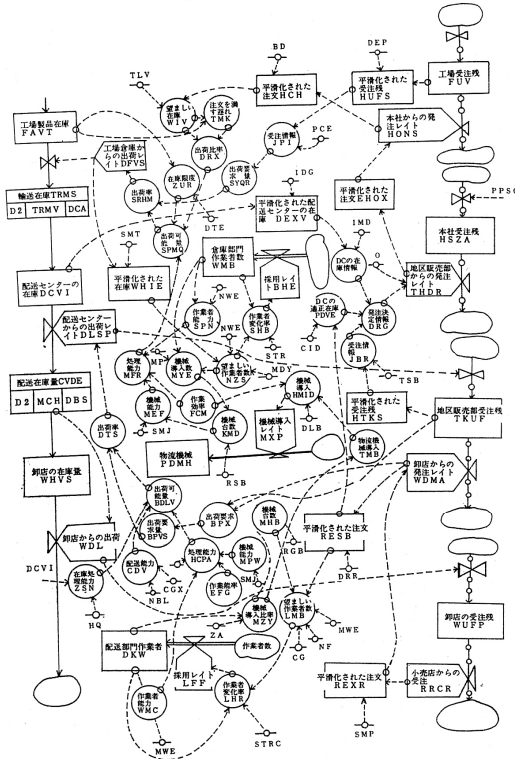


図5 流通システムのフロー・ダイアグラム

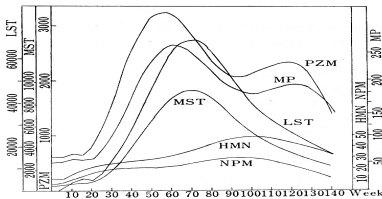


図6 生産工程のシミュレーション結果

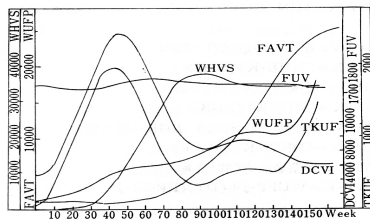


図7 流通システムのシミュレーション結果

#### 1) 工場セクターモデル：

工場セクターにおけるフローダイアグラムは図9のようになる。1) レベル方程式はつぎのようなレベルから構成される。工場での受注残(UO1), 工場での在庫量(IA1), 工場での平均需要量(RS1) 工場への生産注文量(MO1),

工場での事務処理量(CP1), 工場への輸送量(MT1), 工場で受け取る在庫量(SR1), 工場での生産中の生産量(OP1). 2) 補助方程式とレイト方程式：工場の在庫限度(NI1), 適正在在庫量(ID1), 遅れ変数(DF1), 流出レイト(ST1), 適正受注残(UN1), 適正パイプライン注文(LD1), 実際のパイプライン注文(LA1), 生産決定レイト(MW1)などを用いた。

2) サプライヤ（セクター2）におけるフローダイグラムは図10のようになる。サプライヤのシステム方程式は工場の方程式と同様の形式になる。生産規模などの違いはパラメータにより変化させることができる。注文処理とモノの流れによる処理の異なった遅れの間隔や在庫調整速度に関する政策もパラメータの変更で可能になる。

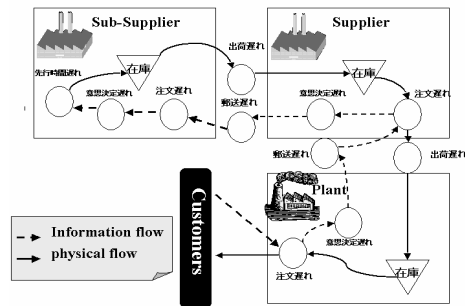


図8 3つのエシェロン構造から構成されるサプライチェーンシステム

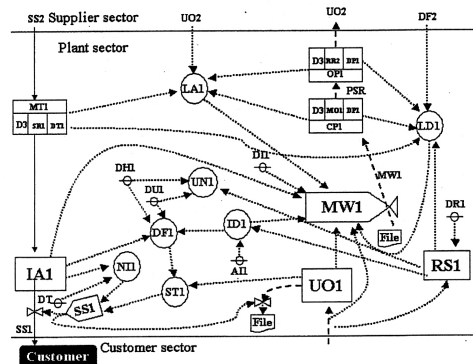


図9 工場（セクター1）におけるフローダイグラム

3) サブサプライヤにおけるフローダイグラムは図11のようになる。サブサプライヤにおけるシステム方程式はサプライヤや工場と同様の式で表現できる。サプライチェーンにおいてはサブサプライヤの遅れが工場に大きな影響を与える。

5.2 システム・ダイナミクスによる要因解析の結果  
鞭効果発生は多くの要因が影響をしている。ここではつぎの2つの要因を解析してみる。

1) 需要パターン：需要パターンがサプライチェーンシス

テム（以下 SCS と略する）にどのような影響を与えるかを分析する。

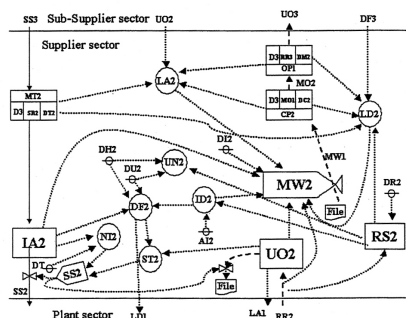


図 10 サプライヤーにおけるフローダイグラム

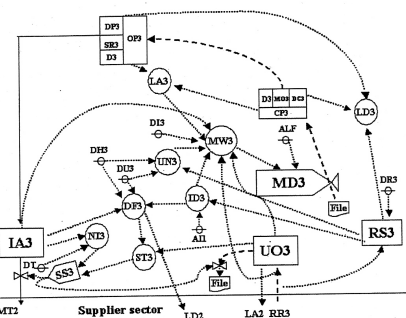


図 11 サブサプライヤーにおけるフローダイグラム

2) 在庫調整速度：SCS では各工程において在庫や受注残が滞留するため、各プロセスにおける生産レートの修正をしながら決定していく必要がある。生産レートを決定するうえで在庫調整速度に対する因果関係を明らかにしていく。3種類の需要パターンを用いてシミュレーションを行った。

- 1) Case1: ステップ関数による需要系列(15%増加)
  - 2) Case2: 周期性のある需要系列(周期:24, 振幅:150)
  - 3) Case3: ランダムな需要系列(平均:1000, 標準偏差:150)
- ステップ関数による需要パターンをSCSに入力することによりシステムの応答を明らかにする。もし、SCSが振動するような応答ならばステップ関数は振動の自然周期の減衰などを判断する目安になる。Case2の周期変動はライフサイクルが短く、製品開発の周期が短いものにたいしてどのような反応を示すかを明らかにした。ランダムな需要系列は予期できない外乱にたいしてSCSがどのような修正行動をおこなうかを分析する。各Caseにおいてシミュレーションを行った結果を表1, 表2に示す。表1より周期性における在庫量の変動が大きい。そして、工場、サプライヤ、サブサプライヤの順に変動が大きくなる。つまり、SCSが多段階になると需要パターンは各エシェロ

ン階層に順番に拡大しながら影響をあたえていく。この

表 1 初期値から在庫増加(%)

レベル	ステップ関数	周期性	ランダム
工場	15.07	18.54	3.60
サプライヤ	29.59	28.56	5.42
サブサプライヤ	44.74	50.82	8.98

表 2 初期値からの在庫量低下(%)

レベル	ステップ関数	周期性	ランダム
工場	-12.21	-11.99	-3.74
サプライヤ	-12.08	-29.72	-6.22
サブサプライヤ	-14.62	-33.63	-9.27

ため、部品調達をするサプライヤでも中小の部品メーカーでは鞭効果が大きく出る。これは経営にも大きな影響をあたえ、部品メーカーや中小企業は厳しい状況に立たされていることが理解できる。

### 5.3 各エシェロン階層の在庫

#### 1) 工場での在庫変動

工場における在庫変動を図12に示す。3つの入力パターンにより在庫変動が大きく異なる。Case1はステップ型需要が一時的に増加後に変動が激しくなるが、時間の経過とともに収束していく。Case2は周期性需要量の変動に比例して、在庫変動にも周期性が出ている。この周期は変動も大きく、一定の周期で変動している。Case3はCase2と比較して全体に振幅は小さいが、在庫変動は不安定になる。

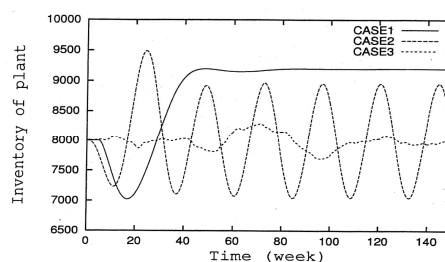


図 12 工場における在庫変動

#### 2) サプライヤの在庫変動

図13から各Caseにおける在庫変動は工場とほぼ同様の特徴がある。しかし、Case1ではステップ入力後に発生する需要量の増加による在庫量の減少率が工場に比べて低くなっている。また、Case2について工場と比較すると在庫量が周期的に変動しているが位相のずれが発生している。

#### 3) サブサプライヤの在庫変動

サブサプライヤにおいてもサプライヤ、工場と同様に在庫変動を示すが、値は大幅に異なる。特にCase3のランダムな需要に対して工場では在庫変動は不規則な状態になっている。しかし、サブサプライヤでは在庫は不規則であるが値は平滑化された変動になっている。これは顧客の

ランダムな注文に対して工場、サプライヤを通して、いわ

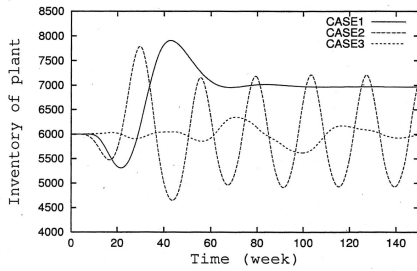


図 13 サプライヤにおける在庫変動

ゆる 2つのエシェロン階層により変動が滑らかになっている。

#### 5.4 在庫調整速度が与える影響

在庫調整速度の要因が SCS にどのように影響を与えているかを分析する。在庫調整速度は次式で決定される。

$$MW = RR + \left[ \frac{1}{DI} \right] (EIA + ELA + EUN)$$

ここで、MW: 適正生産レート、DI: 在庫調整速度、EIA: 在庫量誤差、ELA: パイプライン誤差、EUN: 受注残誤差。

上式より在庫調整速度(DI)は適正生産レートに影響を与える要因である。各ステージにおける在庫調整速度(DI)が在庫とパイプラインのモノの流れを調整する場合の速さを決定する。つまり、発注レートに導入される在庫やパイプライン誤差の日を表す重要な要因である。ここでは各ステージにおける在庫調整速度の値を変化させて SCS にどのような影響をあたえるかを 3 個の Case によりシミュレーションをおこなった。図 14 より在庫調整速度の値が小さいときはサブサプライヤにおける生産レートの振幅が大きく、変動が安定しないために収束が遅れてくる。在庫調整速度が大きくなるにつれて誤差に対する調整がゆるやかになり生産レートの振幅が小さくなる。以上から在庫調整速度は SCS に大きな影響をあたえる要因である(16)。

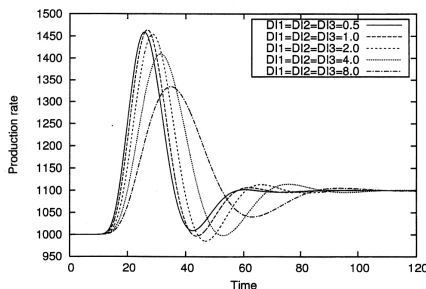


図 14 在庫調整時間によるサブサプライヤの生産レートの変化

#### 5.5 待ち行列理論によるサプライチェーンの解析

マクロ面からみると図 8 のようなサプライチェーンは図 15 のような待ち行列理論におきかえることができる。サプライチェーン上の各ステージにおける製品のリードタイム（滞留時間）は待ち行列に相当し、処理時間（生産能力）はサービス時間に相当する。このため、図 8 のようなサプライチェーンはオープン型待ち行列理論で解析できる。

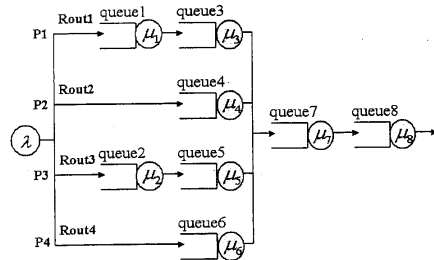


図 15 サプライチェーンのオープン型待ち行列

図 8 のサプライチェーンシステムにおいて到着率 $\lambda$ 、サービス率 $\mu$ 、分岐確率を P とすると図 15 のようなオープン型待ち行列のネットワークになる。ここでは到着率 $\lambda = 10.0$ 、サービス率をそれぞれサービス窓口の順番に決めて、分岐確率を 0.25 としてシミュレーションをおこなった。図 16 はサプライヤのリードタイムである。図 16 より各ステーションにおけるリードタイムは出力個数が少ないと振幅が大きな状態が続くが、個数が増えると理論的に収束する。Queue3、Queue5 が他の値に比べて振幅が大きく収束までの時間がかかっている。Queue3、Queue5 はサブサプライヤから部品を調達してモジュール生産するため、サブサプライヤからの影響を大きく受けている。以上のようにサプライチェーンのリードタイムの変動は鞭効果と同じ現象を示す。定常状態になっても受注率が変化すると再び同じような変動が発生する。

#### 6. サプライチェーンの構造とモデル

##### 6.1 システムの構造

5 章はフォレストアの提案したシステムダイナミクスを基本にしている。しかし、現実の鞭効果を分析するにはこの基本モデル以外に多くのモデルが現実適用されている。ここでは F.V.Moran と P.Barrar (17) の提案した RUS, OUT, CSI, SRS, DSC, AFC の 6 個のモデルの中から 4 つのモデル特性を STELLA に変形し調べてみる。

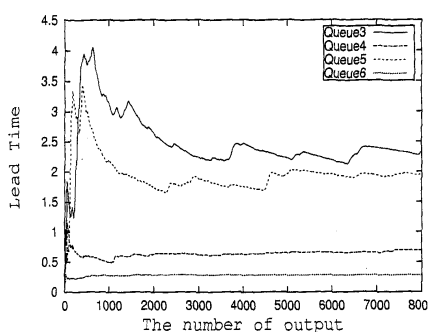


図 16 サプライヤーにおけるリードタイム

## 6.2 制約型システム入力構造モデル: Constrained System's Input structure (CSI)

CSI は, Goldratt (18) によって提案された制約理論 (Theory of Constraints) を拡張したものである。これらの研究から多くの変形モデルが提案されている。しかし, 基本はすべて CSI を拡張したものである。CSI モデルは図 17 のように『ロープとドラム』システムとして表示できる。『ロープ』は売上高による市場情報と工場を直接接続したもので, 工場ではリアルタイムに市場の需要がオンラインで入る。このロープにより, 工場と結合した市場に必要な品物を流しその途中にある流通センターと地域流通センター (DC-RDC) へは何も流さない。在庫量は市場の需要量で決定される。

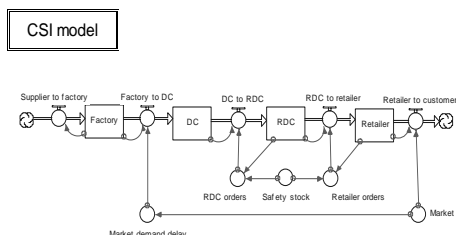


図 17 CSI モデル (出典: F. V. Moran and P. Barrar を STELLA に変形)

## 6.3 簡易補充構造モデル Simple Replenishment Structure models (SRS)

SRS モデルはパイプラインシステムとして表現できる。製品の注文が工場レベルで出されると, 最終的には小売店まで, サプライチェーンの中を直接流れる。SRS モデルはサプライチェーンで意思決定をするために市場からの情報をとる。しかし, CSI モデルとは異なり市場からの情報はジャストインタイムの構造をしている。そして, 部品の調達と生産指示を出すのに需要予測をおこなう。図 18 は SRS モデルで, 予測は過去のデータを用いて線形予測を

おこなう。

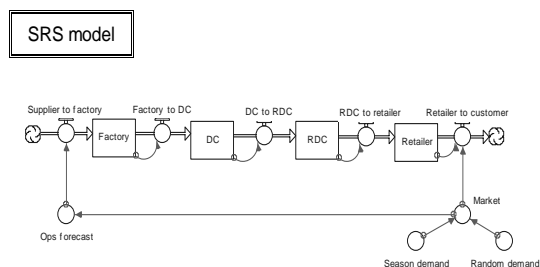


図 18 SRS モデル (出典: F. V. Moran and P. Barrar を STELLA に変形)

## 6.4 需要情報共有調整構造モデル Full Demand-sharing Coordination structure model (FDC)

FDC モデルとは ERP システムを含んでおり, 従来の古典的なモデルになっている。この原理は, サプライチェーンですべての管理者がリアルタイムに需要情報を共有することである。現在の在庫と安全在庫の情報に基づいて, 注文量を決定する。図 19 に示すように, それぞれの決定は 1 週遅れで実行される。FDC モデルでは 1) 需要予測も未来予想もおこなわないという前提と, 2) 在庫管理では受注残を認めないという前提に立っている。FDC モデルにおいて, すべての管理者は ERP により需要情報を共有する。

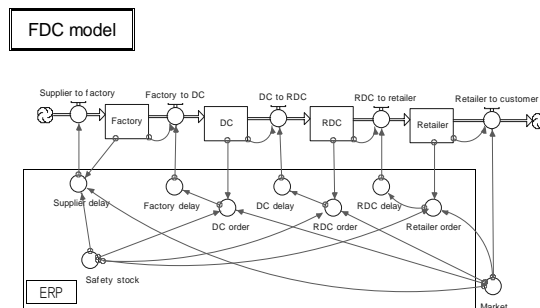


図 19 FDC モデル (出典: F. V. Moran and P. Barrar を STELLA に変形)

## 6.5 予測共有調整モデル Advanced Forecasting-sharing coordination model (AFC)

AFC モデルは, サプライチェーン管理者が市場需要の情報をを使うだけでなく管理者が将来の需要予測をする。そして, この予測値を管理者の間で共有する。このモデルでは, 調達担当は市場から輸送配送保管などのロジスティクス時間について既知とする。たとえば DC と RDC がそれぞれ 2 週と 1 週の予測をする間に, 管理者は 4 週先の予測をおこなう。予測値は実際値と異なるため, 管理者は目標在庫に近づけるために現在の在庫量の過不足を修正す

る。図20はAFCモデルであり、市場での需要予測値は各週前にそれぞれのエシエロン階層間で管理者によって販売予測をおこなう。意思決定における要因としては現在の在庫数と安全在庫量である。そして、意思決定者は市場に影響を与える時間を考慮しなければならない。

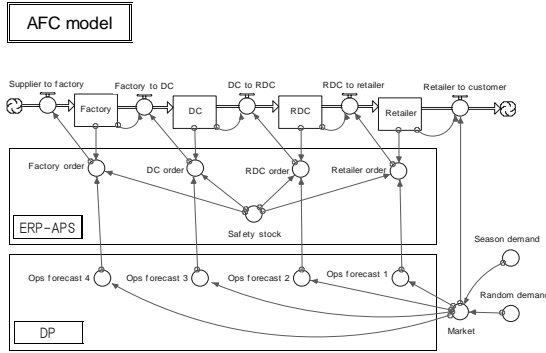


図 20 AFC モデル（出典：F.V.Moran and P.Barrar を STELLA に変形）

## 6.6 SCM 構造の比較

F.V.Moran and P.Barrar (17) は 6 個のモデルの特性をシミュレーションから比較している。比較はステップ型需要、季節型需要、ランダム型需要から分析している。分析の結果 AFC, SRS, CSI が良い結果が出ている。しかし、FDC モデルも情報を共有しているためモデル構造の改良で SRS, CSI と同じような結果が得られる。1) SRS のような単純なモデルが FDC のような複雑なモデルよりも優れた結果を出している。2) 正確な需要予測ができない場合に、CSI は需要予測を用いないで生産システムの処理とその反応をするようなシステムになっている。このため、予測に依存しないときは CSI モデルが参考になる。とくに季節変動のある需要において APS, SRS よりも優れた結果が出ている。

## 7. 鞭効果の発生原因とその対策

### 7.1 SRS モデルにおける鞭効果の理論的解析

鞭効果の変動を起こす原因の中でサプライチェーンの構造における業務内容からみると、特に影響の大きいのが 1) リードタイム、2) 予測法、2) 情報集中化である。ここではこの 3 つの要因からその原因を整理した。

#### 1) リードタイムと予測期間による鞭効果の原因

小売業者は過去のデータから売上高の動向を知ることができる。そのデータにより工場に発注を出す。工場は注文量にしたがって生産をおこなう。小売業者が工場に発注を出して品物が入荷するまでのリードタイムを  $L$  とする。ある時点  $t$  期で小売業者が発注をすると商品は  $t+L$  期に

入荷する。このとき小売店は在庫管理を発注点法を用い、発注量は需要予測により予測量を発注する。発注点法では期間  $t$  の補充目標点は次式になる

$$y_t = \hat{\mu}_t L + \alpha \sigma_t \sqrt{L} \quad (1)$$

ここで  $\mu_t$  は需要の平均値で  $\sigma_t$  は需要の標準偏差である。小売店は売り上げ情報から平均値と標準偏差から計算する。小売店は売り上げ予測を  $k$  期間の移動平均法（指数平滑法もこの一種になる）を用いるものとする。需要の平均値と分散は次式になる (19) (20) (21)。

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_t &= \frac{\sum_{i=t-k}^{t-1} S_i}{k} \\ V_t &= \frac{\sum_{i=t-k}^{t-1} (S_i - \hat{\mu}_t)^2}{k-1} \end{aligned} \quad (2)$$

小売店は発注点法と  $k$  期の移動平均予測式を用いて生産工場に発注をしている。小売店は需要の平均値と分散式を用いて発注点を計算する。このため、在庫水準は毎期変化。小売店の発注量が変化するため工場での生産計画は大きく変動する。SRS モデルで小売店における需要の分散を  $V_R(S)$  とする。小売店から工場に対する発注量の分散を  $V_F(Q)$  とするとその比は次式になる。

$$\frac{V_F(Q)}{V_R(S)} \geq 1 + \frac{2L}{k} + \frac{2L^2}{k^2} \quad (3)$$

この式は小売店から工場への発注変動と小売店での需要変動の比率  $P$  である。移動平均の期間  $k$  を大きな値にし、リードタイム  $L$  を小さい値にすると予測誤差による変動比率  $P$  の値は小さくなる。すなわち鞭効果は減少する。逆にリードタイム  $L$  を長くして、移動平均の期間  $k$  を小さくすると比率は大きくなる。

### 2) 情報集中による鞭効果減少の効果

#### 2.1 情報集中化による効果

情報共有化は AFC モデルと FDC モデルになる。FDC モデルは各エシエロン階層の需要予測はサプライチェーンの 1 つ下流のエシエロン階層の注文情報でなく、顧客の情報を共有することになる。小売店は移動平均により過去  $k$  期の実績データを用いて予測をする。予測結果により目標在庫レベルを計算する。その情報から卸店に発注する。1 階層上の卸業者は小売業者の注文とともに小売店の実績データを受け取る。卸業者はこのデータを用いて予測をして流通センター DC に発注を出す。以下、流通センターも小売店の情報を共有化して予測する。在庫管理方式は発注点と移動平均法による予測を用いる。ここで顧客の需要変動の分散を  $V_R(S)$  でサプライチェーン内での  $e$



番目のエシェロン階層の業者からの注文の分散  $V(Q_e)$  とするとつぎのような式が導入できる。

$$\frac{V_F(Q)}{V_R(S)} \geq 1 + \frac{2 \sum_{i=1}^e L_i}{k} + \frac{2 \left( \sum_{i=1}^e L_i \right)^2}{k^2} \quad (4)$$

リードタイム  $L_i$  はエシェロン階層  $i$  とエシェロン階層  $i+1$  との間のリードタイムである。小売店と卸店の間でのリードタイムは  $L_1=1$  とする。以下同様に卸店から配送センター(DC)の間は  $L_2$ , 配送センター(DC)から工場の間は  $L_3$  とする。FDC モデルでは小売店から工場までは  $L=L_1+L_2+L_3$  となる。図 21 はリードタイムが 3 個のエシェロンの中で  $L$  の値と移動平均の期間の関係を示す。リードタイムが大きくなると変動比率は大きくなる。すなわち FDC モデルでは小売店から工場と上流になるほど変動は大きくなるという現象を示す。

## 2.2) 個別情報による非集中化の効果

サプライチェーンの中で顧客の需要情報が小売店のみにしか伝わらないものである。このため各階層では前のエシェロン階層の売り上げ予測をする。小売店の売り上げ

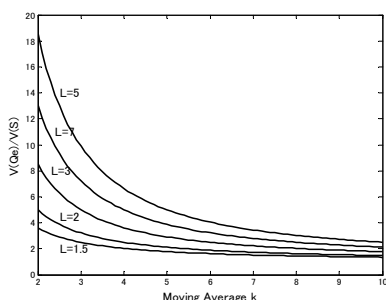


図 21 小売店の情報共有化による変動比率

情報は卸店 RDC には届かない。卸店は小売店からの注文情報から独自に需要予測をする。以下同様に流通センターでは卸店での予測をし、工場も流通センターでの売り上げ予測をする。予測は移動平均を用いる。各エシェロン階層では望ましい在庫を発注点と移動平均予測で決定する。各階層では前段階のエシェロン階層の売り上げ予測を  $k$  期の移動平均で求める。このとき先と同様に顧客の需要変動の分散を  $V_R(S)$  でサプライチェーン内での  $e$  番目のエシェロン階層の業者からの注文の分散  $V(Q_e)$  とするとつぎのような式が導入されている。

$$\frac{V_R(Q_e)}{V_R(S)} \geq \prod_{i=1}^e \left( 1 + \frac{2L_i}{k} + \frac{2L_i^2}{k^2} \right) \quad (5)$$

図 22 は小売店から工場までのリードタイムが  $L=2, 3, 4$  のときの小売店の情報を共有化しないときの変動比率である。図 21 と図 22 を比較すると移動平均  $k=5$  で情報を共

有化しないときは共有化したときに比べて  $L=4$  で 15 倍,  $L=3$  で 8 倍,  $L=2$  で 4 倍以上の変動が起きる。すなわち、小売店から工場に向かって鞭効果は大きくなっていることを示す。

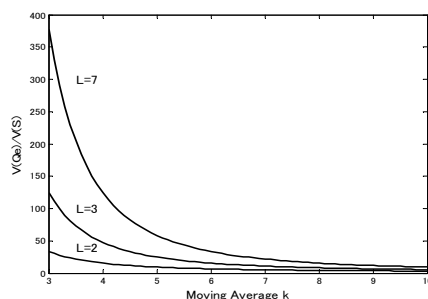


図 22 小売店の情報を非共有化したときの変動比率

## 7.2 サプライチェーンにおける鞭効果低減の方法

鞭効果低減の中で有効な手法にインダストリアル・エンジニアリング(IE)があり、その手法が広く利用され効果をあげている。その代表的な IE 手法は 1) ジャストインタイム(JIT), 2) カンバン方式, 3) MRP II 方式, 4) APS(Advanced Planning Systems), 5) TOC(Theory of Constraints)である。その効果の大きさはケース研究などで報告されている。情報は共有化すると鞭効果は減少できることを明らかにした。小売店での需要情報を卸店、流通センター、工場で共有化することで鞭効果は下流の階層ほど少なくなる。しかし、情報を完全に共有化し、科学的管理法を適用しても鞭効果は小さくなるが完全になくならない。エシェロン階層があるところには必ず鞭効果が発生する。サプライチェーンにおける鞭効果を減少させるのに IE 手法以外に次のような方法が提案されている。

- 1) 需要情報を共有化するためにはサプライチェーンの中で不確定要素をなくすることで鞭効果を減少させることができる。
- 2) 小売店での需要の変動を減少させることで鞭効果を減少させることができる。特に小売店での売り上げ変動は卸店、流通センター、工場に行くほど拡大される。このため、小売店での変動をできるだけ小さくすることで鞭効果を減少できる。
- 3) 図 21, 22 で示したようにリードタイムは短くなると鞭効果は減少する。このためリードタイムをできるだけ短縮させることが鞭効果を減少させることができる。

## 8. 結論

鞭効果の産業への波及効果についてその一例としてアメリカの工作機械産業を例にとり検討した。しかし、アメリカの工作機械業界は衰退したとはいえ宇宙航空などの高

度な工作機械技術では世界一である。つぎに、鞭効果のこれまでの研究成果について整理してみた。ここでは1960年代後半の食品企業を例にして詳細なシステムダイナミクスモデルを構築して鞭効果を測定した。遅れが原因でシステムの変動が大きくなる。また、生産と流通システムの詳細なモデル化をして分析した。単純化したモデルで分析した結果と詳細なモデルも同じ内容が得られた。詳細なシステムダイナミクスモデルのかわりに基本となる要因のみをとらえた単純なモデルでサプライチェーンの構造を記述できる。そして、サプライチェーンにおける需要変動と生産調整の特性について検討した。また、同じシステムをネットワーク型の待ち行列理論により解析し、鞭効果発生の原因を示した。つぎにサプライチェーンにおける構造を明確にするために6つの代表的なモデルの特徴について検討した(17)。さらに鞭効果の原因を理論式から明確にするために文献(20)(21)を用いて在庫理論・予測理論からその理由を明らかにした。最後に鞭効果低減の方法を整理した。

#### 参考文献

- (1) C. Fines. 小幡照雄訳” サプライチェーンデザイン”. 日経 BP 社(1999)
- (2) G. H. Stalk and T. H. Hound. ” Competing Against Time: How Time Based Competition is Reshaping Global Markets”. New York. Fress Press. (1990)
- (3) US Federal Reserve. Series G211 and N213111
- (4) de Kok, T. F., Janssen, . et al. ” Phillips Electronics Synchronizes Its Supply Chain to End the Bullhps”. Interfaces. 35(1). (2005). p. 37-48
- (5) J. W. Forrester ” . Industrial Dynamics”. Cambridge. MA: MIT Press. (1961)
- (6) J. D. Sterman. ” Operational and Behavioral Causes of Supply Chain Instability”. Palgrave Macmillan. (2006). p. 17-56
- (7) P. Senge. ” The Art and Practice of the Learning Organization”. New York. Double Currency (1990)
- (8) J. F. Magee and D. Boodman. ” Production Planning and Inventory Control. 2ndedn”. New York: McGraw-Hill. (1967)
- (9) C. Holt. . F. Modigliani. J. Muth and H. A. Simon. ” Planning Production. Inventories and Work Force”. Englewood. (1987).
- (10) A. Blinder. ” Retail Inventory Behavior and Business Fluctuations”. Brooking Papers on Economic Activity. Vol. 2. (1982). p. 443-520
- (11) O. Blanchard. ” The Production and Inventory Behavior of the American Automobile Industry”. Journal Political Economy. Vol. 91. (1983). p. 365-400
- (12) H. V. Lee. V. Padmanabhan and S. Wang. ” Information Distortion on a Supply Chain. : The Bullwhio Effect”. Management Science. Vol. 43 (4). (1997). Vol. 43. No. 4. p. 546-58
- (13) H. A. Simon. ” On the Application of Servomechanism Thoery in the Study of Prduction Control”. Econometrica. (1952). Vol. 20. p. 247-67
- (14) J. Dejonckheere. S. M. Disney. M. R. Lambrecht and D. R. Towill. ” Transfer Function Analysis of Forecasting Induced Bullwhip in Supply Chains”. International Journal of Production Economics. (2002). Vol. 78. p. 133-44
- (15) 北岡正敏. ” バッチ処理工程をともなった製造工業での生産と流通システムに関するシステム・ダイナミクスによる分析”. 神奈川大学工学部研究報告. 第17号. (1979). pp. 49-58.
- (16) 北岡正敏, ” ファジィ物流管理”, 中央経済社. (1993), p. 24-76
- (17) F. M. Moran and P. Barrar. ” Supply Chain Dynamics: Structural Causes of the Bullwhio Effect”. The Bullwhip Effect in Supply Chainjs. (2006). p. 71-92
- (18) E. Golddraft. ” Theory of Constraints”. North Croton-on Hudson. NY. North River Press. (1999).
- (19) 久保幹雄, ” ロジスティクス工学” 朝倉書店. (2003). p. 47-62
- (20) H. L. Lee. V. Padamanabhan. and S. Whang. ” Information distortion in a supply chain”. The Bullwhip Effect. Management Science. Vol. 43 (4). (1997). p. 546-558
- (21) D. Simichi-Levi and P. Kaminsky. ” Designing and Managing the Supply Chain”. McGraw-Hill. (2000)