

Department of Social Systems and Management  
Discussion Paper Series

No.1135

計画情報共有システムを用いるサプライチェーン管理の構造的  
特徴について

川西亜矢子 佐藤亮 住田潮  
筑波大学大学院システム情報工学研究科

November 2005

UNIVERSITY OF TSUKUBA  
Tsukuba, Ibaraki 305-8573  
JAPAN

**題目:** 計画情報共有システムを用いるサプライチェーン管理の構造的特徴について

**要旨:** サプライチェーン管理において情報を共有することの重要性がよく指摘されるが、利用法や効果が具体的に明らかになっていない。本研究では簡潔だがモノの流れを正確に捉えたロジスティクスプロセスを用いて、情報共有の仕組みと効果を分析する。情報共有の効果を量るために、チェーン内でセットメーカーとサプライヤが需要情報を共有し素直な生産計画と在庫管理を行うというモデルを用いてシミュレーション実験を行い、サプライチェーンの変動の様子を調べた。結論として次を得た。(1) 販売計画の更新において計画と実需との差異を最適に用いることでプロセス全体に効果がある。(2) 販売予測が非常に正確でなければ情報を共有してもサプライチェーン全体での品切れ防止効果を期待できない。(3) サプライチェーン管理の構成において構造的不確実性が問題である。

**キーワード:** サプライチェーン、計画情報システム、情報共有、構造的不確実性

**Title:** A Structural Feature of Supply Chain Management with Information Sharing Systems

**Abstract:** Although the importance of information sharing in supply chain management is pointed out time after time, its mechanism and effect are not sufficiently clarified yet. By developing a model of logistics process and information sharing mechanism between a manufacturer and a vendor, this paper shows how it can be optimized and what limit it has. The both firms share sales plan, and they produce accordingly. The vendor adopts a straightforward inventory policy for its product. The behavior of the logistics process is studied through computer simulation. To conclude, the followings have been shown. (1) If the difference between planned sales and real sales is properly used in updating sales plan, then the performance of whole supply chain is effectively improved. (2) Sales forecasting needs to be very precise in order to prevent shortage of part or final product in the supply chain. (3) Structural uncertainty is an important design issue to get good supply chain management.

**Keywords:** supply chain, planning system, information sharing, structural uncertainty

## 1 はじめに

現代の生産プロセスは非常に多くの企業連携によって実現しており、モノと情報の流れはサプライチェーンを構成する (Silver et al.1998)。サプライチェーンの管理が非効率的であれば、ロジスティクスによる弊害は各組織における在庫コストの発生という問題だけにとどまらず、都市問題や交通問題、さらに全地球的な環境問題などの深刻な問題にも発展する。個々の企業境界を超えてロジスティクス問題を社会的問題と捉え、高付加価値物流によって社会全体の利益を追求すべきとの気運が高まっている。生産プロセスの高度化に比べ遅れがちな物流プロセスの改革や物流費削減のため、原料・部品調達と生産のジャスト・イン・タイム化が進められ (田中, 1988) また、物流委託費の大幅なカットがサプライチェーンの末端組織にまで迫られている。企業組織を上下関係で連鎖させるのではなく、企業間コラボレーション (松浦他,2001) という協同関係も注目されている。

これらのサプライチェーンの管理においては、情報を共有することの重要性が指摘されることが多い。例えば Chen et al.(2000) や鈴木他 (2005) は需要予測情報の共有化や発注サイクルがサプライチェーンに及ぼす影響をブルウィップ効果に関連して調べている。しかし、「どのようなしくみで、何の情報を共有し、どのような利用を行えば、どれほどの効果があるか」について具体的に明らかになっているという状況ではない。古くからの問いかけである「どれほどの在庫を持てばいいんだろう」という現実的な問いについての答えを見つけるのは困難なままであり、この問いかけに答える以前に問題の適切な設定自体が問題となる。どれほどのビジネスの範囲を考えなければならないか、問題に関連しそうな属性や事項として何をそろえればよいのか、どういうリスクや不確実性を考慮すべきか、といったことが明確ではないのである。たとえば、待ち行列モデルで単純な情報処理しか想定しない場合は、情報システムとして実践可能な共有情報の構造と利用方法は分からない。また、ソフトウェア購入によって計画情報システムを導入するにあたっては、自社が属するサプライチェーンの何に注意して、どのような運営を行えば適切かという設計計算は困難である。定量的にとらえられないため、経験によって磨いてくしかない。こうしたことから、サプライチェーン管理の工学的な分析・設計方法やサプライチェーン構造のより深い理解が求められている。特に、共有情報の扱いとサプライチェーン全体の動作を理解する方法を実践的に扱えるモデルが必要である。

本論文では、ビジネスプロセス工学の立場から、(1) 簡潔だが正確なロジスティクスプロセスを用いてサプライチェーン内の情報共有とその利用の効果を提示することにより、サプライチェーンの構造的な不確実性を明らかにする。(2) サプライチェーン管理を困難にしている本質的原因のひとつは需要の予測と計画とのずれにあることを示す。

## 2 ロジスティクスプロセスモデル

サプライチェーンの中にはモノや帳票を扱っている多くの組織と組織内の活動があって、ロジスティクス・プロセスというネットワークを構成している。ロジスティクス・プロセスはひとつのビジネスプロセスであって、その特性は構成要素であるそれらの諸活動と活動間をつなぐ結合変数から決まる (Sato and Praehofer,1997; 佐藤,2001)。活動の特性はその活動の「加工時間」で決まる。たとえば、機械や人間による機械加工や組立工程のようなモノを変換する活動や、注文処理や請求業務、生産管理の計画のようなコトを変換する活動がある。また、結合変数は蓄積し在庫となるものであって、たとえば、紙の注文伝票やデータベースの受注ファイルに記載された個々の要求のようなサービス待ちのコトの在庫や、加工を待つ原料や組立て待ちの中間部品などのモ

ノの在庫がある。在庫の量がロジスティクス・プロセスの特性に影響することは、オペレーションズ・マネジメントの分野の有名な定理であるリトルの定理から理解される (Hopp and Spearman, 2001)。ロジスティクス・プロセスにおけるこれらの構成要素の特性のあり方や配置が、生産・購買・物流計画による管理方法と顧客からの引合の強さに対してどのような全体的特性を示すのかは、大きな構造的不確実性である。

## 2.1 Activity Interaction Diagram によるサプライチェーンのモデル

サプライチェーンはひとつのビジネスプロセスであり、Activity Interaction Diagram(以下、AID) によって離散事象システムとしてモデル化できる。離散事象システムとは、システムの入力が離散的であり事象が並行的に起こりうるような時間的変数を持つ入出力システムである (Sato,2001)。AID 構造を持つ離散事象システムは次の 2 種類の要素から構成される。

- エンティティ(entity,object) : 離散事象システムの中に存在するモノとコトで、活動によって発生したり、処理され変化するもの。
- 活動 (activity) : エンティティに対して加工やサービスという処理を行い、エンティティに何らかの変換を加えること。

離散事象システムのモデルは、システムの中を流れるエンティティに対する種々の作業ネットワークであり、その図のことを AID と呼ぶ。AID は

1. 活動図形
2. 待ち行列図形
3. 活動図形と待ち行列図形をつなぐ矢印

の 3 つの構成要素からなり、どのように矢印をたどっても、活動と待ち行列が交互に現れる構成となっている決まりがある。待ち行列は活動同士をつなぐ結合変数であり、活動による変換を待っているエンティティが待ち行列となっている。

現在の典型的なサプライチェーンは住田 (2005)、奥村 (2004) によれば、ロジスティクスプロセスを構成する要素や計画管理による統合機構から成る。また各企業とビジネスの都合によって多くの実現型がある。本論文では次節で AID によって基本生産型サプライチェーン・プロセスとというシンプルなロジスティクスプロセスをモデル化する。

## 2.2 基本生産型プロセス

基本生産型プロセスのモデルを図 1 に示す。図 1 下側はサプライヤに原材料が入荷されてから加工、組立を経てメーカーから市場へ出荷されるまでの実際のモノの流れを示し、上側がメーカーの販売予測情報作成からサプライヤの原材料発注情報作成までの情報の流れを表している。なお、情報の流れのモデルでは待ち行列図形を平行四辺形で表す。基本生産型プロセスの特徴は次のとおりである。

- メーカーは向こう 6 か月分の販売計画を持っている。6 か月分の月次計画とその中の直近 2 か月分の週次計画、更にその内直近 2 週間分の日次計画である。

- 顧客オーダーは毎日到着する。顧客オーダーは販売実績値である。計画値と実績値の差異は販売計画の更新に使われ、売り上げ好調の場合は計画を上方修正し、不調なら減らす。更新は週に1回行う。
- メーカーはその日の販売実績値である受注分をその日の内に組立生産する。部品が不足している時には部品在庫数からみて可能な最大数を生産する。1日の内に生産完了し毎日出荷する。メーカーは生産計画値を持っておらず、販売計画を実質的に生産計画として利用する。販売の計画と実績及び在庫に基づき、目標在庫レベルを満たすのに必要な個数を日々部品サプライヤに発注する。目標在庫レベルは在庫日数を用い、3日間の生産をカバーする部品数である。この意味で、目標在庫レベルを維持するのに必要な量を補充するように生産をするという考え方である。
- メーカーからサプライヤへ開示する販売計画データを共有情報と呼ぶ。サプライヤの製造リードタイムを考慮した上で、1カ月分の最新の週次計画を開示する。この開示データはメーカーにとって直接には何らの拘束とならず、その後、メーカーからの注文は内示数には制約されずに日々到着する。
- サプライヤは、サプライヤの製造リードタイムに1カ月分を加えた計画期間の販売計画を持つ。メーカーからの共有情報をそのまま1ヶ月分の販売計画とする。

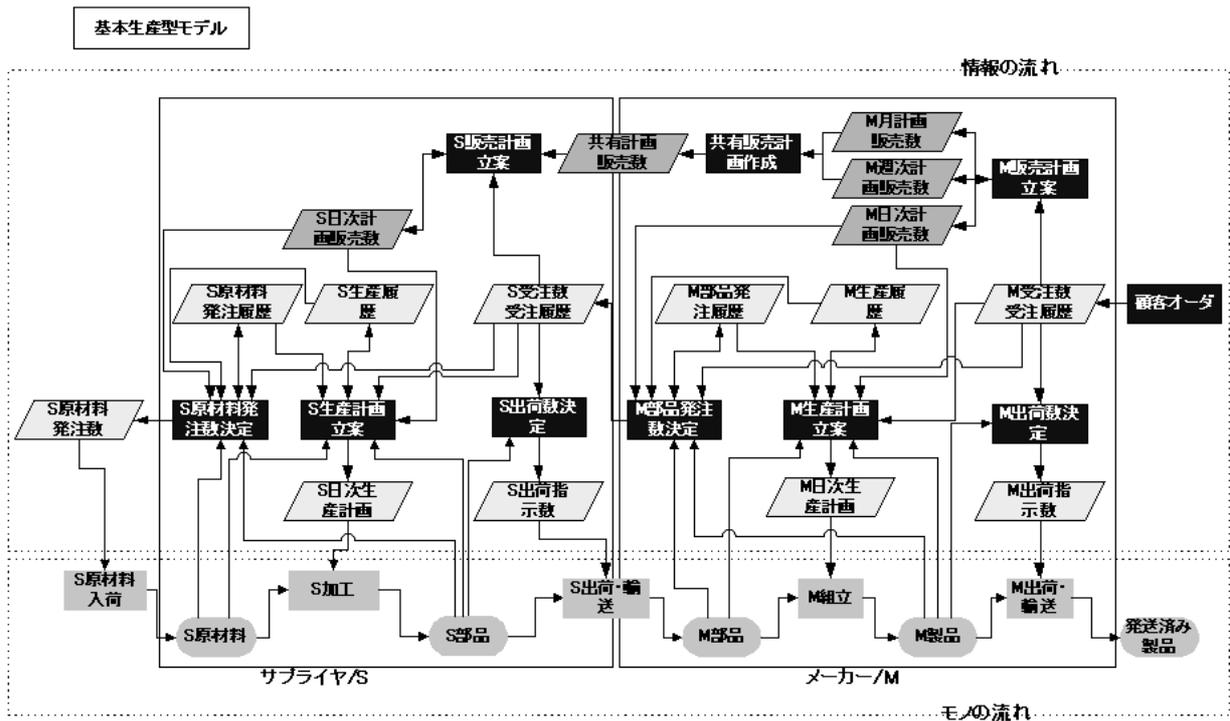


図 1: 基本生産型モデル

### 2.3 ビジネスプロセスのモデルと動作について

本論文においてはビジネスプロセスのモデル化にあたって、業務取引システムという名称の概念枠組みを用いる (Sato and Praehofer,1997)。モデルはプログラム言語 Java によって実現され

ている。そのモデルとプログラムの動作がエラーを含まないことは、プログラム実行の結果得られる状態遷移表が業務取引システムの動作機構に従っているかを確認することで、十分なレベルで得られる。計算機科学の分野の理論的結果である停止性決定問題の不可能性から逃れられないが、アドホックなモデル化とそれのプログラム実現とは全く異なり、モデル自体の離散事象システムとしての妥当性と、モデルを実現したプログラムの正当な動作が得られている。

### 3 サプライチェーンの情報構造

本節では、2節のロジスティクスプロセスモデルの詳細な定式化を行う。

#### 3.1 記号

下添え字  $d$  は計画データの更新日を表す。

$W(n), M(k)$	: それぞれ第 $n$ 週、第 $k$ 月を表す数値
$roundW(x)$	: $x$ 日が属する週番号
$roundM(x)$	: $x$ 日が属する月番号
$SHRW_d(W(n))$	: 第 $W(n)$ 週の共有週次計画販売数
$mproinv$	: メーカー製品在庫日数
$spartinv$	: サプライヤ部品完成品在庫日数
$mpartinv$	: メーカー部品在庫日数
$smatinv$	: サプライヤ原材料在庫日数
$mproLT$	: メーカー完成品製造日数
$spartLT$	: サプライヤ部品加工日数
$mtranLT^+$	: メーカーからの製品出荷後納品までにかかる輸送日数
$mtranLT^-$	: メーカーへの部品入荷にかかる輸送日数
$stranLT^+$	: サプライヤからの部品出荷後納品までにかかる輸送日数
$stranLT^-$	: サプライヤへの原材料入荷にかかる輸送日数
$MDF_d(j)$	: $d$ 日付け、 $j$ 日のメーカー日次計画販売数
$MWF_d(W(n))$	: $d$ 日付け、第 $n$ 週のメーカー週次計画販売数
$MMF_d(M(k))$	: $d$ 日付け、第 $k$ 月のメーカー月次計画販売数
$MDD(j)$	: $j$ 日のメーカー日次実需要数
$MWD(W(n))$	: 第 $W(n)$ 週のメーカー週次実需要数
$MMD(M(k))$	: 第 $M(k)$ 月のメーカー月次実需要数
$MPL(j)$	: $j$ 日のメーカー製品生産オーダ数
$MPI(j)$	: $j$ 日末のメーカー製品在庫数
$MI(j)$	: $j$ 日末のメーカー部品在庫数
$MO(j)$	: $j$ 日のメーカー部品発注オーダ数

- $MShip(j)$  :  $j$  日のメーカー製品出荷数
- $SDF_d(j)$  :  $d$  日付け、 $j$  日のサプライヤ日次計画販売数
- $SDD(j)$  :  $j$  日のサプライヤ日次実需要数
- $SWD(W(n))$  : 第  $W(n)$  週のサプライヤ週次実需要数
- $SMD(M(k))$  : 第  $M(k)$  月のサプライヤ月次実需要数
- $SPL(j)$  :  $j$  日のサプライヤ部品生産オーダー数
- $SPI(j)$  :  $j$  日末のサプライヤ部品在庫数
- $SI(j)$  :  $j$  日末のサプライヤ原材料在庫数
- $SO(j)$  :  $j$  日のサプライヤ原材料発注オーダー数
- $SShip(j)$  :  $j$  日のサプライヤ部品出荷数

### 3.2 メーカーの販売計画データ構造

メーカーは6か月分の販売計画を用いる。計画データの基本構造は図2の通りであり、現時点から直近2ヵ月は週次の販売計画、3ヶ月目から6ヶ月目は月次販売計画である。更に、直近2週間は日次販売計画を持つ。

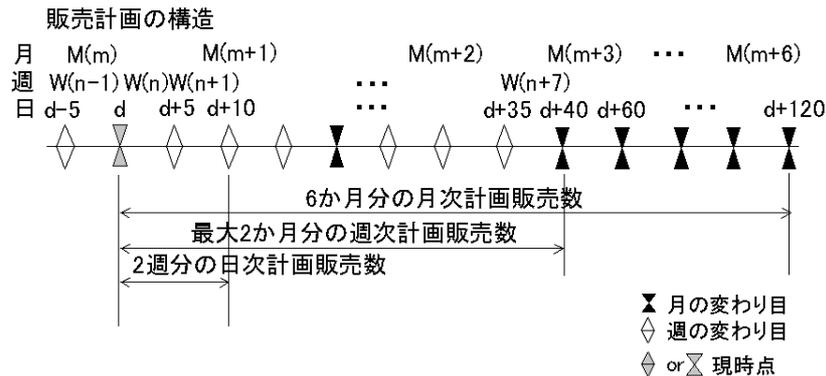


図 2: 販売計画データの基本構造

### 3.3 メーカー・サプライヤ間の共有情報構造

メーカーからサプライヤへの1ヶ月分の週次販売計画を開示する。このデータのことを共有情報と呼ぶ。

データ作成時を第  $W(n)$  週として、 $W(n + \text{round}W(\text{spartLT}))$  以降4週分のメーカー週次計画販売数を共有週次計画販売数とする。

$$SHRW_d(i) \triangleq MWF_d(i) \quad n + \text{round}W(\text{spartLT}) \leq i \leq n + \text{round}W(\text{spartLT}) + 3 \quad (1)$$

図3は共有情報作成の様子をあらわしている。

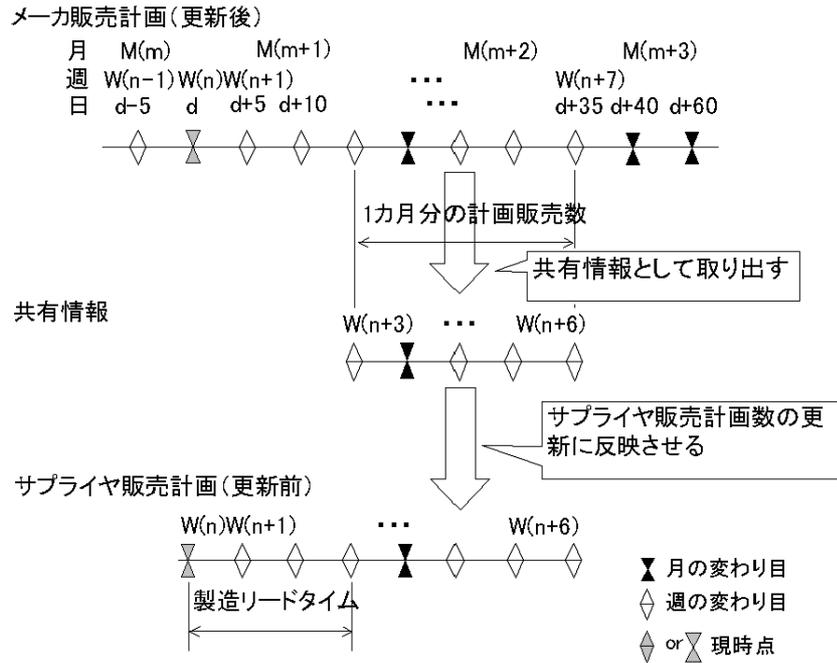


図 3: 共有情報の構造

### 3.4 日次計画販売数の更新

販売計画は実需要の変動に合わせて週に1度の割合で更新しながら保持する。販売計画が図2のような構造を持つので、月次、週次、日次それぞれのデータの更新が必要となる。以下、 $k$ :作成時の月番号, $n$ :作成時の週番号, $d$ :作成時の日番号, $d'$ :前回の作成日番号, $d''$ :当該計画データの最終更新日番号とする。また、更新とは $d'$ 日付けの計画値を $d$ 日付けの計画値に直すことである。

#### 3.4.1 メーカー日次計画販売数の更新

更新日である $d$ 日から見た過去2ヶ月分の実需要数と計画販売数の平均差異率を反映させて、本日 $d$ 日から2週間(10日分)の日次販売計画を更新する。更新は毎週1回行う。

- 直近1週間分( $d+1 \leq j \leq d+5$ )の計画値は前回作成済みの日次計画販売数に過去8週分の計画値と実績値の差を反映させて更新する。
- その後1週間分( $d+6 \leq j \leq d+10$ )の計画値は週次計画販売数から日次計画販売数に落とし込む。週次計画販売数を5等分した数に過去8週分の実需と週次計画販売数/5との差分を反映させて日次計画販売数とする。

次式(2)の第一式は次のことを意味する。

$$d \text{ 日付け日次計画数 (第 } j \text{ 日)} = d' \text{ 日付け計画数 (第 } j \text{ 日)} + \text{係数} \times \text{平均差異率} \times d' \text{ 日付け計画数 (第 } j \text{ 日)}$$

$$MDF_d(j) \triangleq \begin{cases} MDF_{d'}(j) + \beta\sigma_{mdd}MDF_{d'}(j) & \text{if } d+1 \leq j \leq d+5 \\ \frac{MWF_d(W(n+2))}{5} + \beta\sigma_{mwd}\frac{MWF_d(W(n+2))}{5} & \text{if } d+6 \leq j \leq d+10 \end{cases} \quad (2)$$

2ヶ月間平均差異率

$$\sigma_{mdd} = \frac{1}{8} \sum_{w=0}^7 \frac{MDD(j-5-5w) - MDF_{d''}(j-5-5w)}{MDD(j-5-5w)}$$

$$\sigma_{mwd} = \frac{1}{8} \sum_{w=0}^7 \frac{MDD(j-5-5w) - \frac{MWF_{d''}(W(n-w))}{5}}{MDD(j-5-5w)}$$

上式における係数  $\beta$  は、計画と実績の平均差異を更新値に反映させる大きさを決めている。 $\beta$  を計実差異反映係数と呼ぶ。モデル内の計画更新で同一の  $\beta$  を用いる。

### 3.4.2 サプライヤ日次計画販売数の更新

1. 共有計画販売数を過去2か月分の実需要と共有計画販売数の差分に基づいて微調整する。
2. 修正済み共有計画販売数を元に日次計画販売数を作成する。

以降式中の上付き記号は修正後データを表す。 $\overline{SHRW_d(W(n))}$  は、 $d$ 日付けの第  $W(n)$  週から始まる共有週次販売計画数  $SHRW_d(W(n))$  の修正値を表す。

#### (1) 共有計画販売数の修正

式(3)は次のことを意味する。ただし、共有計画数は全てサプライヤ製造日数だけシフトしたものである。

$d$ 日付け修正共有週次計画数 =  $d$ 日付け共有週次計画数 + 係数  $\times$  平均差異率  $\times d$ 日付け共有週次計画数

$$\overline{SHRW_d(W(i))} \triangleq SHRW_d(W(i)) + \beta\sigma_{shw}SHRW_d(W(i)) \quad (3)$$

2ヶ月間平均差異率

$$\sigma_{shw} = \frac{1}{8} \sum_{w=0}^7 \frac{SWD(W(n-w)) - \overline{SHRW_{d''}(W(n-w))}}{SWD(W(n-w))}$$

#### (2) サプライヤ日次計画販売数の立案

(1)で修正した共有週次販売数から日次計画販売数に落とし込む。共有週次計画販売数を5等分した数に過去2か月分の実需と週次計画販売数/5との差分を反映させて日次計画販売数とする。次式(4)は次のことを意味する。

$d$ 日付け日次計画数(第  $j$ 日) =  $d$ 日付け修正共有週次計画数の1日分 + 係数  $\times$  平均差異率  $\times d$ 日付け修正共有週次計画数の1日分

$$SDF_d(j) \triangleq \frac{\overline{SHRW_d(W(n'))}}{5} + \beta\sigma_{shmd}\frac{\overline{SHRM_d(W(n'))}}{5} \quad (4)$$

$$n' = n + \text{round}W(\text{spart}LT)$$

$$\sigma_{shwd} = \frac{1}{8} \sum_{w=0}^7 \frac{SDD(j-5w) - \frac{\overline{SHRW_{d''}(W(n-w))}}{5}}{SDD(W(n-w))}$$

### 3.5 週次計画販売数の更新

過去 2ヶ月分の実需要数と計画販売数の差分を反映させてメーカー週次計画販売数を更新する。

$d$  日付メーカー週次計画数 ( $i$  週) =  $d'$  日付メーカー週次計画数 ( $i$  週) + 係数 × 平均差異率 ×  $d'$  日付メーカー週次計画数 ( $i$  週)

$$MWF_d(i) \triangleq MWF_{d'}(i) + \beta\sigma_{mww}MWF_{d'}(i) \quad (5)$$

2ヶ月平均差異率

$$\sigma_{mww} = \frac{1}{8} \sum_{w=0}^7 \frac{MWD(W(n-w)) - MWF_{d'}(W(n-w))}{MWD(W(n-w))}$$

### 3.6 月次計画販売数の更新

過去 2ヶ月分の実需要数と計画販売数の差分を反映させてメーカー月次計画販売数を更新する。

$d$  日付メーカー月次計画数 ( $k$  月) =  $d'$  日付メーカー月次計画数 ( $k$  月) + 係数 × 平均差異率 ×  $d'$  日付メーカー月次計画数 ( $k$  月)

$$MMF_d(M(k)) \triangleq \begin{cases} MMF_{d'}(M(k)) + \beta\sigma_{mmm}MMF_{d'}(M(k)) & m+2 \leq k \leq m+5 \\ MMF_d(M(k)) + \beta\sigma_{mmm}MMF_d(M(k-1)) & k = m+6 \end{cases} \quad (6)$$

2ヶ月平均差異率

$$\sigma_{mmm} = \frac{1}{2} \sum_{r=0}^1 \frac{MMD(M(m-r)) - MMF_{d'}(M(m-r))}{MMD(M(m-r))}$$

### 3.7 生産数の決定

#### 3.7.1 メーカー製品生産数の決定

今期  $j$  日よりメーカー製造リードタイム ( $mproLT$ ) 経過後の期末に、設定した在庫日数 ( $mproinv$ ) 分の完成品在庫を持つよう以下のように今期生産開始数を決定する。

$$MPI(j + mproLT - 1) = \sum_{d=j+mproLT}^{j+mproLT+mproinv-1} MDF(d) \text{ を満たすように } MPL(j) \text{ を決定する。}$$

ただし、部品が必要数に満たない場合は可能数だけ生産する。また上式で第 ( $j + mproLT - 1$ ) 日における製品安全在庫数=在庫日数分の販売計画数、が成立することに留意されたい。

第  $j$  日におけるメーカー生産数 = 第  $j$  日の実所要数 + 第 ( $j + mproLT - 1$ ) 日の安全在庫数 - 第 ( $j - 1$ ) 日の見込み在庫数

$$MPL(j) \triangleq MDD(j) + \sum_{d=j+1}^{j+mproinv+mproLT-1} MDF(d) - \left\{ MPI(j-1) + \sum_{d=j-mproLT+1}^{j-1} MPL(d) \right\} \quad (7)$$

式 7 の前半部分は今期より製造リードタイム後期末までに必要な完成品数を、後半の ( ) 内は前期末在庫数と既に仕掛中でリードタイム期間内に完成する数の総和を表している。

### 3.7.2 サプライヤ部品生産数の決定

今期  $j$  日よりサプライヤ製造リードタイム ( $spartLT$ ) 経過後の期末に、設定した在庫日数 ( $spartinv$ ) 分の部品在庫を持つよう以下のように今期生産開始数を決定する。

$SPI(j + spartLT - 1) = \sum_{d=j+spartLT}^{j+spartLT+spartinv-1} SDF(d)$  を満たすように  $SPL(j)$  を決定する。ただし、原材料が必要数に満たない場合は可能数だけ生産する。

$$SPL(j) \triangleq SDD(j) + \sum_{d=j+1}^{j+spartinv+spartLT-1} SDF(d) - \left\{ SPI(j-1) + \sum_{d=j-spertLT+1}^{j-1} SPL(d) \right\} \quad (8)$$

## 3.8 発注数の決定

### 3.8.1 メーカー部品発注数の決定

今期  $j$  日よりメーカーの調達リードタイム ( $mtranLT^-$ ) 経過後の期末に、設定した在庫日数 ( $mpartinv$ ) 分の部品在庫を持つよう以下のように今期部品発注数を決定する。

$$MI(j+mtranLT^- - 1) = \sum_{d=j+mtranLT^-}^{j+mtranLT^-+mpartinv-1} MPL(d) \text{ を満たすように } MO(j) \text{ を決定する。}$$

$$MO(j) \triangleq \text{目標在庫数}(j + mtranLT^- - 1) - \text{見込み在庫数}(j + mtranLT^- - 2) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{目標在庫数}(j + mtranLT^- - 1) &= MDD(j) + \sum_{d=j+1}^t MDF(d) - MPI(j-1) - \sum_{d=t'}^{j-1} MPL(d) \\ \text{見込み在庫数}(j + mtranLT^- - 2) &= MI(j-1) + \sum_{d=t''}^{j-1} MO(d) \\ t &= j + mtranLT^- + mpartinv + mproLT + mproinv - 2 \\ t' &= j - mproLT + 1 \\ t'' &= j - mtranLT^- + 1 \end{aligned}$$

式 (9) では、前半部分が今期より調達リードタイム後期末までに必要な部品数を、後半部分が前期末在庫数と既に発注済みでリードタイム期間内に入荷する数の総和を表している。今期発注分の部品は (調達リードタイム+部品在庫日数) 経過後の生産引当予定分なので、発注数決定の際には (調達リードタイム+部品在庫日数+製造リードタイム+完成品在庫日数) 経過後期末の完成品在庫数を考慮する必要がある。

### 3.8.2 サプライヤ原材料発注数の決定

### 3.8.3 サプライヤ発注数の決定

今期  $j$  日よりサプライヤ調達リードタイム ( $stranLT^-$ ) 経過後の期末に、設定した在庫日数 ( $smatinv$ ) 分の原材料在庫を持つよう以下のように今期部品発注数を決定する。

$SI(j + stranLT^- - 1) = \sum_{d=j+stranLT^-}^{j+stranLT^-+spartinv-1} SPL(d)$  を満たすように  $SO(j)$  を決定する。

$$SO(j) \triangleq SDD(j) + \sum_{d=j+1}^t SDF(d) - SPI(j-1) - \sum_{d=t'}^{j-1} SPL(d) - SI(j-1) - \sum_{d=t''}^{j-1} SO(d) \quad (10)$$

$$t = j + stranLT^- + smatinv + spartLT + spartinv - 2$$

$$t' = j - spartLT + 1$$

$$t'' = j - stranLT^- + 1$$

### 3.9 出荷数の決定

#### 3.9.1 メーカー製品出荷数の決定

メーカーは当日の生産終了後在庫から  $MDD(j)$  を出荷する。ただし、製品在庫数が必要数を満たさない場合は可能数だけ出荷する。

$$MShip(j) \triangleq \min(MDD(j), MPI(j')) \quad (11)$$

$j'$  は  $j$  日の生産終了後かつ出荷前を表す

#### 3.9.2 サプライヤ部品出荷数の決定

サプライヤは前日末在庫から  $SDD(j)$  を出荷する。ただし、部品在庫数が必要数を満たさない場合は可能数だけ出荷する。

$$SShip(j) \triangleq \min(SDD(j), SPI(j-1)) \quad (12)$$

## 4 情報共有するロジスティクスプロセスの基本動作

前節のモデルはサプライヤとセットメーカーから成るサプライチェーンと、計画情報共有システムによる全体的管理機構を組み込んだもので、全体として離散事象システムである。本節ではそのサプライチェーンへの基本的な2種類の入力パターン(顧客からの注文パターン)を設定し、全体的な動作を調べる。サプライチェーンの全体的な評価を行うために、次の2つの指標を用いる。

- 不足率の期間平均  $= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\text{第 } j \text{ 日の必要数} - \text{第 } j \text{ 日の出荷や生産の可能数}}{\text{第 } j \text{ 日の必要数}} \times 100$
- 在庫比率の期間平均  $= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\text{第 } j \text{ 日末の在庫数}}{\text{第 } j \text{ 日の受注数や生産数}}$

ひとつめの評価尺度の不足率とは、サプライヤ、メーカーそれぞれにおいて、ある日において必要な量と利用可能な実在庫量との比率である。必要量がそれ以上が確保されていれば不足率はゼロとなる。また、在庫比率は保有在庫を目標在庫と比較する量であり、安全在庫として例えば、目

標在庫 3 日分と設定している部品については 3 という値が適正值となる。また式中の  $n$  はシミュレーションの全期間を表し、1000 日の場合は  $n = 1000$  となる。

サプライチェーンの中の種々の在庫の量と、サプライチェーン内の種々の活動が必要とする入力要求への不足発生率の間にはトレードオフがある。活動とは、メーカーにおける完成品組立や、サプライヤにおける加工であり、それらの入力とはサプライヤからの部品や原材料である。もし大量に在庫していれば瞬時に要求に応えられるが、大量在庫のビジネスプロセスは大量のムダにつながる可能性を持ち、現代社会では受け入れられない。また、リトルの定理がサプライチェーン全体について成立する状況では、在庫が多いほどリードタイムが長いという傾向があり、やはり大量在庫ベースのビジネスは受け入れ難い。

基本動作を分析するためのシミュレーションの設定は以下の通りである。

- 安全在庫を在庫日数で定める。メーカーの製品完成品在庫日数:0 日, 部品在庫日数:3 日, サプライヤの部品在庫日数および原材料在庫日数:各 3 日
- メーカーの生産日数:0.7 日, サプライヤの加工日数:15 日
- サプライヤの原材料調達日数:2 日, サプライヤ・メーカー間の部品輸送日数:0.5 日, メーカーから顧客までの製品輸配送日数:1 日
- シミュレーションの期間は 1000 日とした。種々の変動の長期的方向性を見るためである。

以下では次の 2 通りの顧客からの注文パターンについてシミュレーションを行い分析した。

- メーカー需要が急激に増加する場合
- メーカー需要が緩やかに増加する場合

#### 4.1 メーカー需要が急激に増加する場合

メーカーへの実需要が日に比例して増加する ( $y = x + 30, x$ : 日,  $y$ : メーカーの実需要数) 場合が表 1, 図 4, 5, 6 である。

指標	$y = x + 30$ の場合のパフォーマンス
サプライヤ原材料不足率平均	0.00 %
サプライヤ部品出荷不足率平均	9.21 %
メーカー部品不足率平均	1.51 %
メーカー完成品出荷不足率平均	1.51 %
サプライヤ原材料在庫率平均	3.00
サプライヤ部品在庫率平均	3.03
メーカー部品在庫率平均	2.73

表 1: 実需パターン: $y=x+30, \beta = 0.13$  の場合のパフォーマンス表

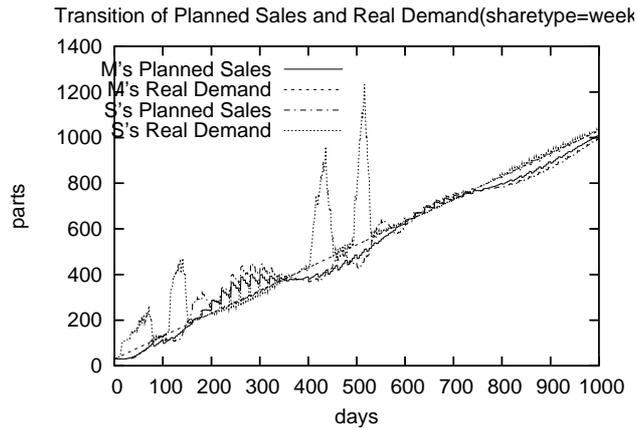


図 4: 実需パターン: $y=x+30, \beta = 0.13$  の場合の計画販売数と実需数の推移

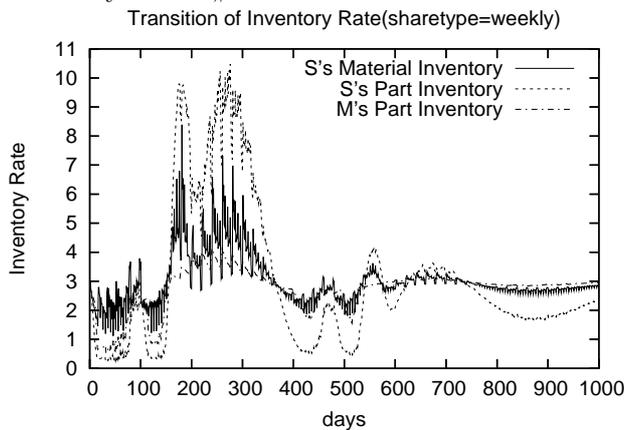


図 5: 実需パターン: $y=x+30, \beta = 0.13$  の場合の在庫比率推移

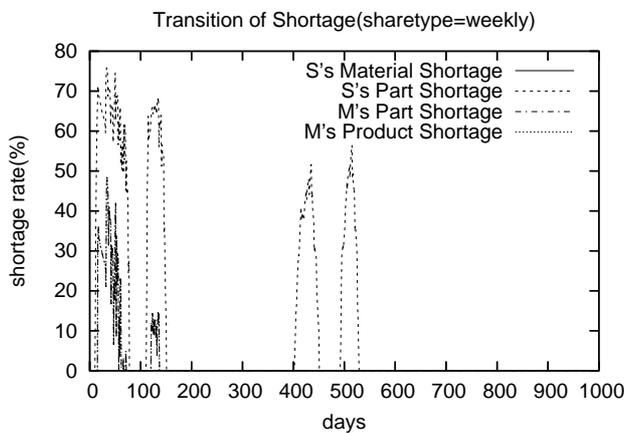


図 6: 実需パターン: $y=x+30, \beta = 0.13$  の場合の不足率推移

図 4 から図 6 のモデルの挙動は驚くべき点を含んでいる。基本生産型モデルはランダム的な要素をどこにも含まない決定論的モデルである。しかも、実需要が直線に沿って増加していくにも関わらず、計画販売数 (式 (4)) や在庫変動 (式 (5))、サービス率を示す不足率 (式 (6)) は、いずれもランダム的な変動を示し、しかも長期に渡って不安定的なのである。この現象の分析は 6 節において行う。

## 4.2 メーカー需要が緩やかに増加する場合

メーカーの実需要が日に比例して増加する ( $y = x + 300, x$ : 日,  $y$ : メーカーの実需要数) 場合についても前節同様にシミュレーションを行い、同様の結果を得た。(表 2, 図 7, 8)

指標	$y = x + 300$ の場合のパフォーマンス
サプライヤ原材料不足率平均	0.00 %
サプライヤ部品出荷不足率平均	0.00 %
メーカー部品不足率平均	0.00 %
メーカー完成品出荷不足率平均	0.00 %
サプライヤ原材料在庫平均	2.87
サプライヤ部品在庫率平均	2.51
メーカー部品在庫率平均	2.97

表 2: 実需パターン: $y=x+300, \beta = 0.25$ , の場合のパフォーマンス表

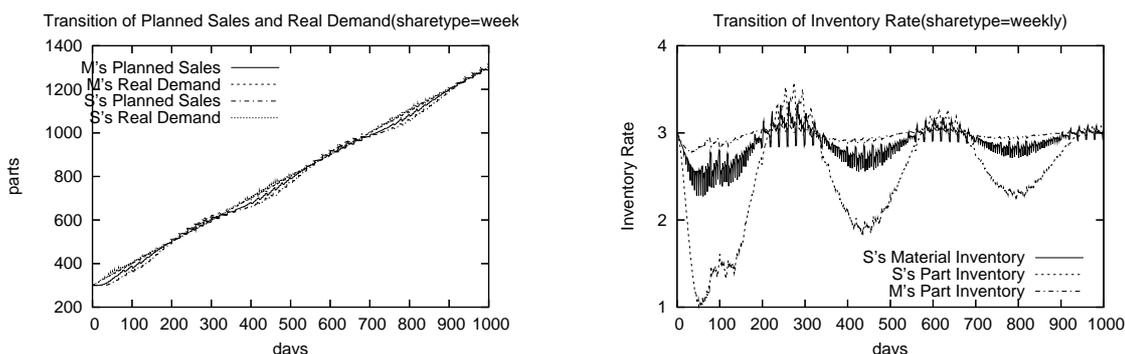


図 7: 実需パターン: $y=x+300, \beta = 0.25$  の場合の計画販売数と実需数の推移および在庫推移

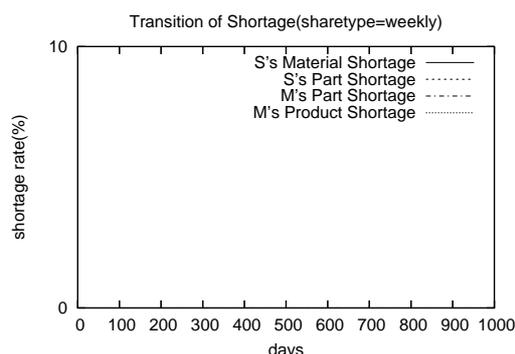


図 8: 実需パターン: $y=x+300, \beta = 0.25$  の場合の不足率推移

## 5 計実差異反映係数 ( $\beta$ ) がロジスティクスパフォーマンスに与える影響

本節では式 (2) から式 (6) の式中の  $\beta$  (計実差異反映係数) を  $0 \leq \beta \leq 1$  で変化させてパフォーマンスの変化を観察する。 $\beta$  を変えることによって過去の実績値と計画値との差が今期の販売計画

に与える影響度を変えることになるため、この値を適切に定めることは重要である。

前章の指標に加えて計画精度をパフォーマンス指標として定義する。

$$\text{計画誤差率} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{\text{第 } j \text{ 日の実需要数} - \text{第 } j \text{ 日の計画販売数}}{\text{第 } j \text{ 日の実需要数}} \right| \times 100 \quad (13)$$

計画誤差率は実需要数に対する計画販売数と実需要数の差分の比を期間平均したものである。すなわち実需要に対して計画数がどれくらい正しかったかということを表しており、この値が小さい程計画の精度は高い。

前節と同じ2パターンのメーカー実需要についてシミュレーションを行った結果以下の結論を得た。

- 計実差異反映係数は計画誤差率に大きな影響を与える。
- 計画誤差率が低い範囲にあるとき、パフォーマンスが高くなる。

以下で係数  $\beta$  の変化によるサプライチェーンの動作を詳しく述べ、最適値を求める。

### 5.1 メーカー需要が急激に増加する場合

下図9はメーカーの実需要が日に比例して急激に増加する ( $y = x + 30, x : \text{日}, y : \text{メーカーの実需要数}$ ) 場合について、計実差異反映係数  $\beta$  とパフォーマンスとの関係を表している。図の左側は  $\beta$  による計画誤差率と在庫比率の変化を、右側は計画誤差率と不足率の変化をプロットしたものである。

計画誤差率および不足比率が100%以内となるのは  $0.031 \leq \beta \leq 0.328$  の範囲であった。図9において  $\beta$  の変化によって、サプライヤとメーカーの計画誤差率が椀状に変化している。特にサプライヤの計画誤差率は  $\beta$  によって大きく変化した。  $0.1 < \beta < 0.2$  の範囲が椀形の底となっており、この範囲でサプライヤ、メーカーともに計画精度が高いといえる。更に、在庫比率は  $\beta$  の変化によって増加する傾向にある。また部品不足率は一気に減少し、  $\beta > 0.15$  の範囲では一定となるが、原材料および完成品に関してはほとんど不足は発生しない。

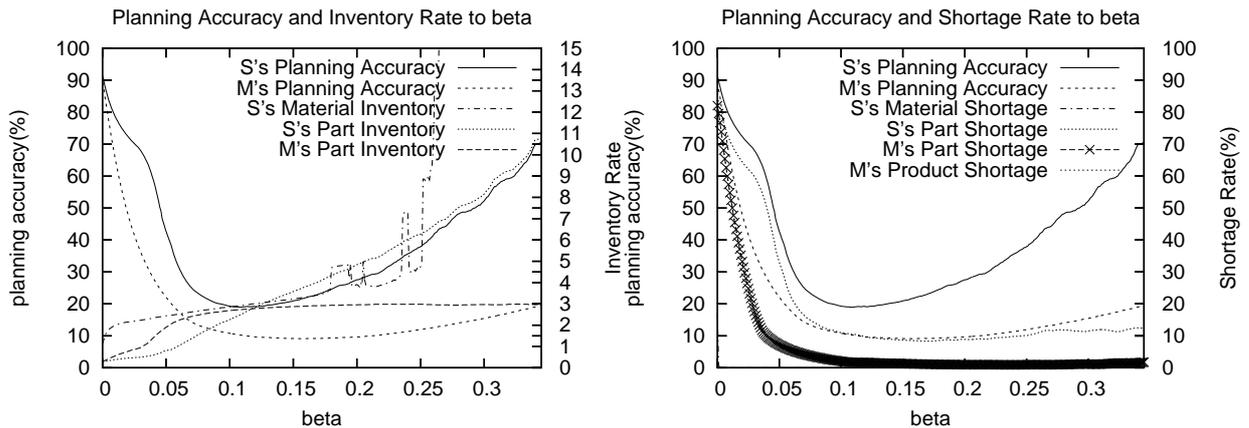


図9: 実需パターン:  $y=x+30$ , 計実差異反映係数  $\beta$  とパフォーマンスとの関係

図9をグラフの傾向別に3つの部分に分け、各部分の代表的な  $\beta$  についてパフォーマンスをまとめると表3になる。表から、  $\beta$  によって計画誤差率が大きく変化することが分かる。更に、

$\beta = 0.13$  のとき  $\beta = 0.03, 0.25$  の時と比べてメーカー、サプライヤ共に計画誤差率が高くなっていることから、 $\beta = 0.13$  周辺が最適的な計実差異反映係数であるといえる。

図 10 から図 12 は表 1 で示した  $\beta$  でシミュレーションした結果である。 $\beta = 0.03$  のとき (図 10) は生産実績が常に実需要に追いつけない。メーカーの計画販売数が実需要数を常に一定数下回って比例的に増加し、サプライヤの実需要数すなわちメーカーからの部品受注数が急激に増加した。このとき、部品と原材料の在庫数は急激に増加し続けた。在庫数の増加に伴い完成品と部品の不足率は減少するが、メーカーの完成品不足は 200 日以降、部品不足が減少し始めるのは 900 日以降である。 $\beta = 0.13$  のとき (図 11)、サプライヤの実需要数がジャンプする箇所もあるが、600 日以降計画販売数が実需要数に追従し定期的になり、在庫数も必要数に対して約 3 倍の量 (すなわち在庫比率が 3) に落ち着く傾向にある。また  $\beta = 0.25$  のとき (図 12) は定常状態にならず発散傾向にある。

指標	$\beta = 0.03$	$\beta = 0.13$	$\beta = 0.25$
サプライヤ原材料不足率平均	0.00 %	0.00 %	0.00 %
サプライヤ部品出荷不足率平均	59.79 %	9.21 %	10.12 %
メーカー部品不足率平均	17.58 %	1.51 %	0.94 %
メーカー完成品出荷不足率平均	17.58 %	1.51 %	0.94 %
サプライヤ原材料在庫平均	2.14	3.00	4.66
サプライヤ部品在庫率平均	0.41	3.03	6.19
メーカー部品在庫率平均	0.87	2.73	2.89
メーカー計画誤差率	36.23	9.47	11.96
サプライヤ計画誤差率	68.00	19.61	37.91

表 3: 実需パターン: $y=x+30$  の場合のパフォーマンス比較表

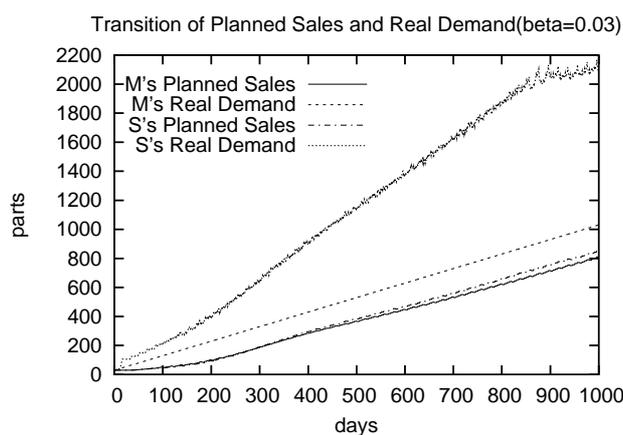


図 10: 実需パターン: $y=x+30, \beta = 0.03$

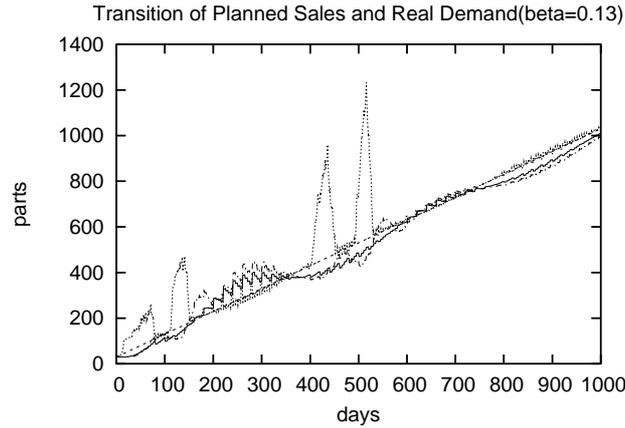


図 11: 実需パターン: $y=x+30, \beta = 0.13$

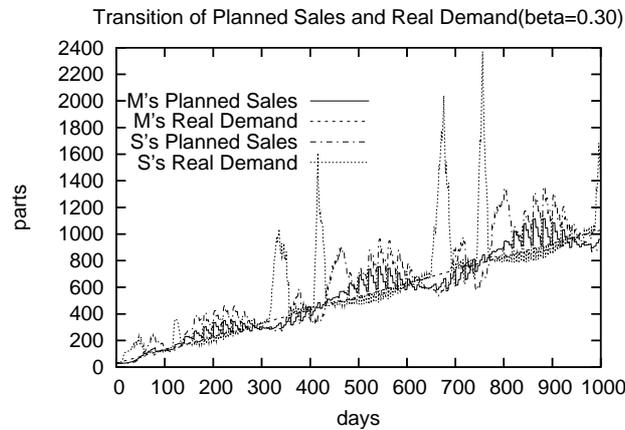


図 12: 実需パターン: $y=x+30, \beta = 0.25$

## 5.2 メーカー需要が緩やかに増加する場合

計実差異反映係数  $\beta$  の値と、サプライチェーン全体のパフォーマンスをみると、図 13 と表 4 のようになる。 $\beta = 0.25$  が最適値であり、そのときのサプライチェーンの動作は図 14 となる。理想的に動作している。

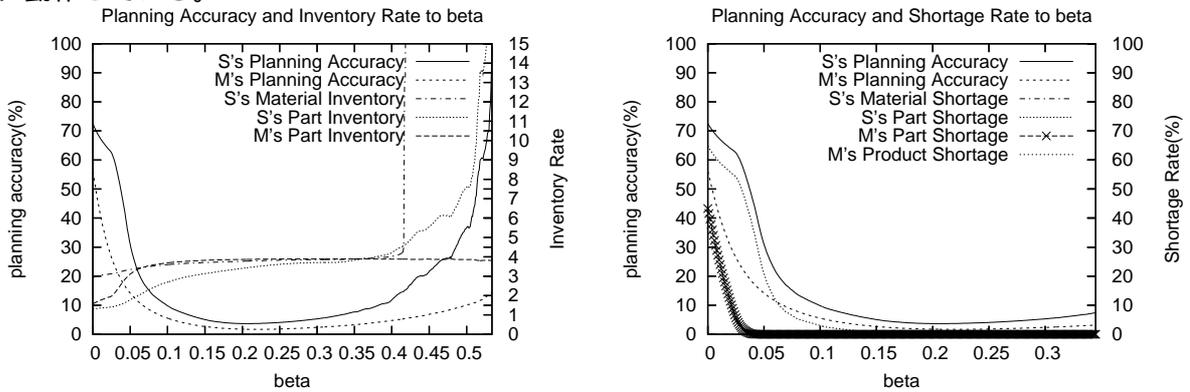


図 13: 実需パターン: $y=x+300$ , 計実差異反映係数  $\beta$  とパフォーマンスとの関係

指標	$\beta = 0.05$	$\beta = 0.25$	$\beta = 0.40$
サプライヤ原材料不足率平均	0.00 %	0.00 %	0.00 %
サプライヤ部品出荷不足率平均	20.8 %	0.00 %	2.06 %
メーカ部品不足率平均	0.00 %	0.00 %	0.00 %
メーカ完成品出荷不足率平均	0.00 %	0.00 %	0.00 %
サプライヤ原材料在庫平均	2.45	2.93	3.13
サプライヤ部品在庫率平均	0.89	2.71	3.32
メーカ部品在庫率平均	2.21	2.99	2.99
メーカ計画誤差率	14.15	1.80	4.75
サプライヤ計画誤差率	30.90	4.06	11.85

表 4: 実需パターン: $y=x+300$  の場合のパフォーマンス比較表

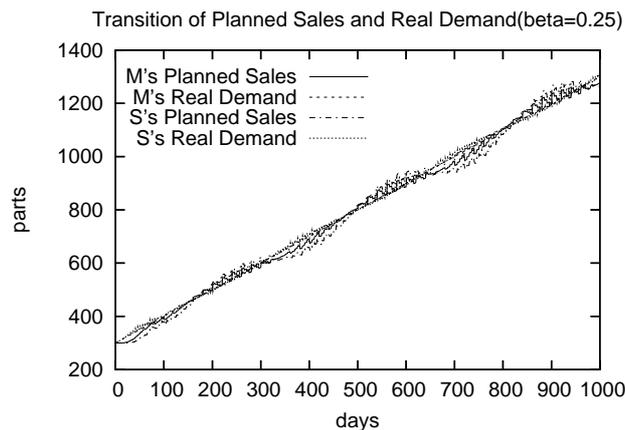


図 14: 実需パターン: $y=x+300, \beta = 0.25$

## 6 情報共有の限界

基本生産型サプライチェーンにおいては共有販売データを用いて目標在庫を保持することを目指した生産を継続的に行っている。しかし、4節と5節で見たように、サプライチェーンの中で材料不足が発生すると、この不足が発注や生産行動のばらつきを増大させ、プロセス全体の動作安定性に負の影響を与える。本節では2つの方向から不足を発生させないための方策を調べる。

### 6.1 正確な販売予測を使用する場合

4節で示したように、1セットメーカ・1サプライヤの単純な構造をしたサプライチェーンに決定論的な実需要パターンを適用した場合であっても、直感に反して図4のような複雑な動きをした。

例えば図4の場合、0日から200日、400日から600日などの期間でサプライヤの計画販売数が実需要数を下回る周期にはメーカからの部品発注数が爆発的に増加し、図6に見られるようにサ

ブライヤがメーカからの需要にまったく対応できなくなるという現象が発生する。ところが、それ以降においてはサプライヤの計画販売数が実需要数を下回ってもサービス率 100%, 在庫比率も目標の 3 に保ったまま (図 5) 理想的に動作している。シミュレーション期間の後半になるほど計画と実績との誤差が小さくなっているため、こうした複雑な動作は計画誤差と強い関連があると考えられる。したがって本節で前節で用いた計画誤差率 (式 (13)) に着目し、加工や組立、輸配送の処理時間、安全在庫としての在庫保有日数等を前節までと同様の設定とし、サプライヤの計画誤差率を 10%、5% と変化させてシミュレーション分析を行う。図 4 の場合には結果として得られたサプライヤの計画誤差率は約 20% であった。

サプライヤの計画誤差率を 10% にするには、まずあらかじめ定めた顧客の需要関数より将来の正確な実需要数を計算する。この実需要数と図 4 の通りプログラム実行結果から算出される計画数との誤差が 20% であることから、実需要数と計画値との誤差を半分にするように計画値を修正することで計画誤差率を 10% にする。5% の場合も同様に行う。将来の需要の正確な値を用いることで計画の誤差を小さくしているの、シミュレーションであるから可能なのであって、現実の世界では計画誤差を思うように小さくすることはできない。

サプライヤの計画誤差率が 10% のとき図 15 の左図のようになる。図 4 と比較すると、400 日から 600 日期間での動作が落ち着いたが、0 日から 200 日期間ではメーカ部品発注数の爆発的に増加している。図 15 の右図は計画誤差が 5% の時の推移である。計画誤差が 5% 以下に小さくなるとメーカ部品発注における複雑な動きはほぼ見られなくなる。

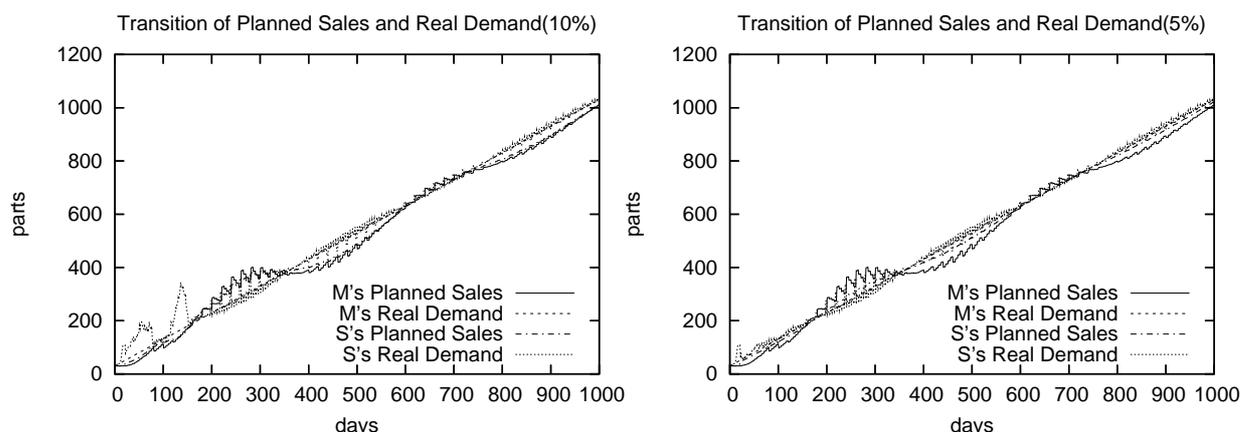


図 15: メーカ実需要:  $y=x+30$  で誤差 10%, 5% で計画した場合の推移

これらの結果から、本論文の基本生産型サプライチェーン構造ではメーカ、サプライヤ間でいかに精度の高い情報を共有しても、極めて正確な販売計画を立案しなければ計画値と実績値の誤差のために、チェーンに複雑な動作が生じてしまうということが分かる。これは正確な需要を把握することの重要性と共に、予測が不確実である以上、この不確実性を補うための有効な方法論が必要であることを意味する。たとえばサプライチェーン全体の構造を統合的に変更することが考えられる。

## 6.2 大量の安全在庫を使用する場合

図4と図6に見るように、基本生産型サプライチェーンが持つ全体的な需要への反応能力は、需要パターンが $y = x + 30$ のように直線的に増加する時、600日経過前後からは順調に推移する。そこで、サプライヤの初期在庫を600日分の出荷及び生産に必要な量として180,000コと設定すると、図16のようになる。図16には図4に見られるメーカ発注量の爆発的な増加が現れず、シミュレーションの全期間に渡って動作が安定している。

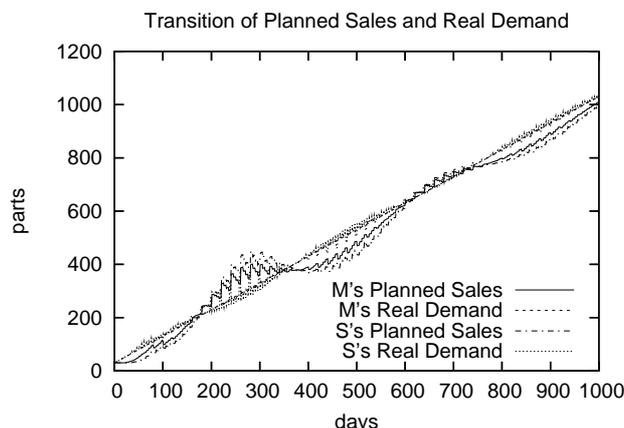


図 16: サプライヤ初期在庫を 600 日分とした場合の推移

サプライチェーンプロセスが需要の変化を販売計画と生産計画に反映し、全体として安定した活動を行えるように、計画システムが適応するわけである。つまり大量の在庫を使ってオペレーションを行いながら、計画量を需要量に合わせている。言い換えると、これは在庫が大量にあれば需要変化に対応することができるという例になっている。しかし、これほど大量の在庫を保有することはもちろん理想的な方策とは程遠いものである。

## 7 結論

本論文のモデルは、モノの流れとしては1単位の原料がサプライヤによって1単位の部品となり、セットメーカによって1単位の製品となって出荷される。はなはだ簡潔なものであり、部品表や作業工程を明示的に扱っていない一方で、メーカもサプライヤも販売計画と生産指示の情報システムを使用し、かつ共有情報としてメーカからの1カ月分の販売データの内示を用いる。

本研究の成果を列挙すると次のようになる。

- 計画情報システムによって制御される基本的なロジスティクスプロセスを基本生産型プロセスとしてモデル化した。このモデルにおいて販売計画共有データを定義し、メーカから開示された販売計画をサプライヤの販売計画に反映させる。
- 販売計画の更新において計実差異反映係数 ( $\beta$ ) を最適にコントロールすることによってサプライチェーンネットワークのパフォーマンスを向上させることができる。
- 基本生産型プロセスモデルはランダムな構成要素を持たない決定論的モデルである。そのモデルに対して顧客からの需要を与えると、在庫、生産量、サービス率などの動的特性の変動は、例えば図4のように複雑でランダムな振る舞いとなり、制御可能性を感じさせない。

本論文で扱った簡単なサプライチェーンでも予想外な複雑な振る舞いとなることから、現実のサプライチェーンの構造では遥かに複雑な動きとなることが予想できる。このことから、ロジスティクスの業務や業務間を接続する各種在庫、さらに計画情報システムの計画機能や指図発行機能といったビジネスプロセスの構成要素のバランスに構造的な不確実性が存在すると言える。

- 情報を共有している基本生産型プロセスにおいて、サプライヤの複雑な動きを安定的にするには、6節の考察のように未来の需要の正確な値を用意することが有効な手段の1つであった。しかし、いかなる需要予測技法も「常に95%以上の精度を保証する」ようなことは不可能であり、少しの期間でも予測がはずれるとサプライチェーン全体の動きが暴れる可能性がある。本研究が示した微少予測誤差のサプライチェーンによる増幅効化は、現実の複雑なサプライチェーンでは大きな問題となっていると考えられる。また、正確な需要予測以外に十分な在庫保有によっても需要変動に対応できるが、在庫大量保有はもちろん理想的な方策とは程遠いものである。こうしたことから「情報の共有化」は大事であるがそれだけでは好ましい動特性を得るためには不十分であると言える。

計画情報システムや共有情報の利用法について取り扱うためには、従来の確率分布によってモデル化されるランダム的事象の不確実性の扱いとは別に、構造的な不確実性を扱う設計理論の開発が一つの大きな研究課題である。

## 参考文献

- [1] E.A.Silver,D.F.Pyke,R. Peterson, Inventory management and production planning and scheduling,Third Edition, Jhon Wiley,1998
- [2] 田中一成, 生産・物流統合管理システム:D/SNS 法, 日刊工業新聞社,1988
- [3] 松浦春樹, 山田勝也, 尾西克治, サプライチェーン・コラボレーション 原材料調達・生産・販売システム最適化の追求, 中央経済社,2001
- [4] Franc Chen,Zvi Drezner,Jennifer K.Ryan,David Simchi-levi,Quantifying the Bullwip Effect in a Simple Supply Chain:The Impact of Forecasting, Lead Times,and Information,Management Science,Vol.46,No.3,March, pp.436-443,2000
- [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, 日本経営工学学会論文誌, Vol.56,No.3,pp.148-154,2005
- [6] Ryo Sato and Herbert Praehofer,A discrete event model of business system - A Systems Theoretic Foundation for Information Systems Analysis:Part 1,IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics, 27-1,pp.1-10,1997
- [7] 佐藤亮, ビジネスプロセスの離散事象モデリングと業務取引ペトリネットによる特性分析, システム/制御/情報,45-8,pp470-479, システム制御情報学会,2001
- [8] Hopp,W.J.,Spearman,M.L.,Factory physics:fundations of manufacturing management,Irwin/McGraw-Hill,2001
- [9] Ryo Sato,Realization theory of discrete-event systems and its application to the uniqueness and universality of DEVS formalism, Int.J. of General Systems,30(5),pp.513-549,2001
- [10] 住田潮,Advanced Logistics Practices By Japanese Corporations, 筑波大学第三学群:社会基盤と情報・ロジスティクス産業講義資料,2005
- [11] 奥村雅彦, ロジスティクス改革:業務プロセスと物流リソースの全体最適, 日本経済新聞社,2004