

ビジネスにおける不安定性の原因に対する仮説の検証

Verification of Hypotheses about Causes for Instability in Business Fields

松本 憲洋 (Norihito Matsumoto)

POSY Corporation

matsu@posy.co.jp

Abstract : Business is the system of which dynamic behavior is foreseen with difficulty. This article is results of computer experiments performed in order to analyze instability of supply chain systems. Chapter 2 shows that a cause of oscillation is delay on a balancing feedback loop like as the goal seek model. Chapter 3 shows operating conditions for minimum cost of a stock management model as an element of supply chain, which were calculated by virtual managements on a computer. Chapter 4 shows operating conditions for minimum cost and instability of the beer game model built as a simple supply chain, which were also calculated by virtual managements.

From the above experimental results, it was clarified that combinations of design variables derived from the computer experiments for minimum cost of supply chains are too difficult to understand logically. Since almost managers can not derive optimal condition logically for business complex systems without computer optimal tools, the managers should start to calculate optimal conditions using virtual management systems, and then construct logically future business scenarios based on the calculated optimal values.

キーワード：システム・ダイナミクス、シミュレーション、サプライチェーン、仮想経営、振動、遅れ、最適化

要旨：ビジネスは、動特性を把握することが難しいシステムである。本稿では、サプライチェーン・システムを取り上げ、その不安定性の原因を分析するために、計算機実験を行なった結果について述べる。2章では、ゴール・シーク・モデルに遅れ要素を加えて、システムの振動の原因が遅れにあることを示した。3章では、サプライチェーン・モデルの構成要素であるストック・マネージメント・モデルの費用最小条件について分析した。4章では、ストック・マネージメント・モデルを連鎖して、ビールゲーム・モデル（ビール製販サプライ・チェーン）を構築し、費用最小条件とその安定性について分析した。

5章では、最適化ツールにより費用最小条件を求めて得られた設計変数の組み合わせが、理論的に容易には説明できないものの、最適解を与える条件であることには違いがないことを示した後に、理論から追いかけて最適解を見出す解析的な流れではなく、まずは最適化ツールにより最適解を機械的に求め、その結果に近づくための方法を、できるだけ解析的に追いかける現実的な流れを提言した。

1. 緒言

1. 1 ビジネスにおけるシステム・アプローチ

経営は科学かアートか短絡的に論ずる議論は古くからある。その中で、アートであるとの論調では、経営環境の曖昧さが、その根拠となっていることが多い。筆者は経営環境の曖昧さ、すなわち不確実性はビジネス・リスクと定義し、それを含めて経営を科学として捉える立場に立つ。

ビジネスは、多数の構成要素が互いに関連し合って有機的な秩序を保ち、同一目的に向かって行動するものであり、正にシステムの定義そのものである。ただし、目的を誰もが納得して「同一」と明言できる場合だけではないことも留意しておくべきである。

システム方法論の分類法[1]である SOSM (System of System Methodology) では、右の図に示すように、横軸を「参加者数と種類」として3区分し、縦軸を「システムの大きさあるいは複雑さ」として2区分して、全体を6枠に分類している。その中で、システムの大きさに問わず参加者と種類が単一的である場合には、システムの必要な結果と目的は関係者に既知であり、実世界の問題においてその目的を実現するために、最も効率的な手法をシステムマテ

	単一的	参加者数と種類 多元的	強圧的
単純 システム の 大きさ （ 複雑さ）	ハードシステム・ アプローチ OR システム分析 システム工学	ソフトシステム・ アプローチ	解放システム思考
複雑	SD 組織サイバネティクス 複雑系理論	ソフトシステム方法論 :SSM 戦略的仮説検証法 :SAST	ポストモダン ・システム思考

ィックに追求するハードシステム・アプローチが適用できるとしている。

一方、参加者と種類が単一的でない場合には、システムの必要な結果と目的とは明快に断定できない場合が多く、関係者に既知とは言えない。例えば、社会システムに関する意思決定状況では、複数の関係者の目的は異なり対立の発生は避けがたく、互いにその対立を予測しながら、自らの行動の妥協点を見出さざるを得ない。そのため、システムの必要な結果と目的に合意点を見出すことはできず、対立点を残したままにアコモデーションを求めらることで妥協しながら前進することになる。

経営においても取り巻くステークホルダーの利害の対立の中で意思決定するにはそのような形態をとらざるを得ないが、その場合も全体の状況を科学的に表現し、全ての関係者にそれを開示し、それぞれの妥協点に関して一応の納得が得られるよう対策を講ずることが不可欠である。このような取り組み方は、ソフトシステム・アプローチと呼ばれておりビジネスを対象とした場合も大変重要であるが、今回の議論からは除外する。

本稿で論じるシステム・ダイナミクス (SD) は、オペレーションズ・リサーチやシステム工学などと共にハードシステム・アプローチの方法論として分類される。ハードシステム・アプローチでは、①既知のシステムの望ましい状態 (S1) が分かっている、②システムの現在の状態 (S0) も分かっている、③S0からS1へ到達する複数の選択肢がある、④S0からS1へ到達するための最も効率的な手段を見つけることができる、との流れで問題解決ができると考えられている。

したがって、対象のモデルでは物理モデルのように因果関係が明快に示され、数学モデルとしても表現され得ることが前提となる。また、対象の現状だけでなく望ましい状態も関係者間で合意されているから、対象が数学モデルとして表現されるなら目的変数と設計変数とは自明となり、その数学モデルを使って最適な解を見出すことが可能となる。

以上述べてきたように、経営にハードシステム・アプローチを活用する場合には、システムの必要な結果と目的を既知としたうえで、ビジネス対象をモデルとして表現するモデリング段階と、そのモデルを使って仮想経営を行なうシミュレーション段階とがある。このモデリングとシミュレーションの活用方法は後述するように様々であるが、活用方法に至る過程で行なうことは、ほとんどの場合が「仮説検証」である。仮説検証を実対象に対して行なうことができればそれに越したことはないが、それにはリスクが付きまとうだけでなく現実的でない場合も多い。そのために、対象に対する専門家として導出した仮説を基にモデリングして、その検証をシミュレーションにより実施することになる。このようにモデルを使った仮説検証により経営方針の情報を得て対処する方法論を「モデル・ベース経営」と呼んでいる[2]。

さて、ビジネスに適用するシミュレーションの形態は大きくは二種類に分類できる[3]。離散事象系シミュレーションと連続系シミュレーションである。離散事象系シミュレーションでは、対象とするシステムの中で活動の開始と終了という二つの事象でモデルを表現し、瞬間的に出来事が起きるとしてシステムを分析する。例えば、待ち行列問題で条件が複雑な場合には解析的に方程式を立てることができず解析解が得られないので、構築した確率的モデルに到着条件を確率分布で与えて、離散事象系シミュレーションを実施して、結果であるサービス分布の形からサービスの確率分布を得ることになる。

一方、連続系シミュレーションでは、連続に変化するシステムを取り扱い、微小な刻み時間ごとにシステムの状態を更新することでシミュレーションを実施する。SDのシミュレーションはこちらに分類される。連続系シミュレーションで取り扱うモデルは、一連の条件から結果が一意的に定まる決定的モデルとモデルの中に確率的要素を含んだ確率的モデルの両方である。ビジネス領域では確率的モデルを使って、経営環境の曖昧さである不確実性が、経営へ及ぼすビジネス・リスクについて分析する。

1. 2 ビジネスにおけるSDの活用

ビジネスにおける実世界と仮想世界 (モデルで表現した世界) に関して、John D. Sterman は教科書の中で仮想世界の効果について述べている[4]。図1において、実世界の活動情報として予期せぬ結果がもたらされたとする。対処するためにはマネージャはまずその原因を探る必要があるので、原因と思われる条件について仮説を立てて、仮想世界の中でシミュレーションすなわち仮想経営を実施し、原因と思われる仮説条件を探索する。その過程で重要なことは、仮想世界の活動情報を認識して、マネージャのメンタルモデルが学習成果を蓄積することであり、さらに意思決定ルール of 改善も進むことである。

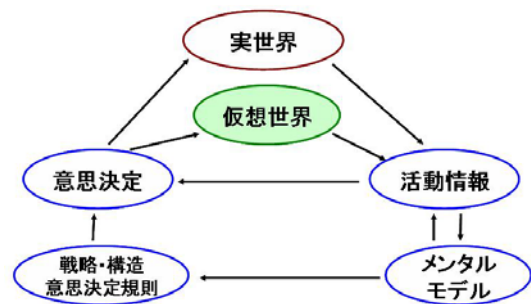


図1 モデル・ベース経営の仕組み

さらに、原因と思われる仮説が見出された後で、その対策の仮説も立案し仮想世界で経営を実施する。その結果、望ましい成果を導くことが可能となる対応策の候補を見出すことができたなら、それをベースに総合的な判断の下で実世界に対する対応策の意思決定を行う。

以上のプロセスにおいて SD に基づくシステム・アプローチでは2種類の方法論が存在する。図2に示すように、一つは定性モデルに基づくシステムズ・シンキングであり、もう一方は、定量モデルに基づく(狭義の)システム・ダイナミクスである。システムズ・シンキングでは、構成要素の因果関係を矢印で結び付けたコーザル・ループ・ダイアグラム(CLD)と、主要な構成要素の大まかな時間変化を表現した時系列挙動図をツールとして用いる。これにより、主に、経済・社会環境のシステム分析を行い、対象システムの目的とシステム構造を明確にして、問題解決のシナリオを描く。

狭義のシステム・ダイナミクスでは、定量モデルの活用方法が二つに分かれる。一つは、傾向分析用モデルとしての活用法であり、他は、数値分析用モデルとしての活用法である。前者では定量モデルを使うのではあるが、条件と結果の変数の数値そのものは重視せず、それらの時間的変化とか複数の変数間の総体的な差異の傾向に注目する。定性モデルによるシステムズ・シンキングの分析と同じく、主に、経済・社会環境のシステム分析を行なうが、定性モデル以上に具体的に行い、対象システムの目的とシステム構造を明確にして、問題解決のシナリオを描く。

数値分析用モデルとしての活用法は、ビジネス領域では実世界に密着した適用となり、仮想経営を介して、仮説検証と環境への適合、戦略・戦術の立案と環境変化への適応、対象システムのモデルへの同定などに応用される。

ビジネス領域における SD に基づくモデリングとシミュレーションの活用領域を図3に示す。前述のように、いずれも仮想経営における仮説検証を介して実世界への反映に至るわけで、その効果は対象システムに対する専門家としての仮説立案能力とその評価能力により大きく左右され、それが導かれる結果に対する決め手であることは最も重要な留意事項である。

また、対象とするビジネス向けに自ら開発し構築したモデルは、学習する組織としてはその企業に特化した学習教材である。このモデルを経営フライトシミュレーターとして演習に採用することで、次期を担う構成員のポテンシャルアップに顕著な成果をもたらすものと期待できる。

2. ビジネスの概念モデル

サプライチェーンの要素モデルについて検討を始める前に、簡略なビジネスの概念モデルを取り上げて、その挙動の特性を確認する。ビジネス形態の大小に関らず、最も簡単なビジネスの概念では、①成果には達成すべき目標がある、②成果目標と現状の成果との間の差異を

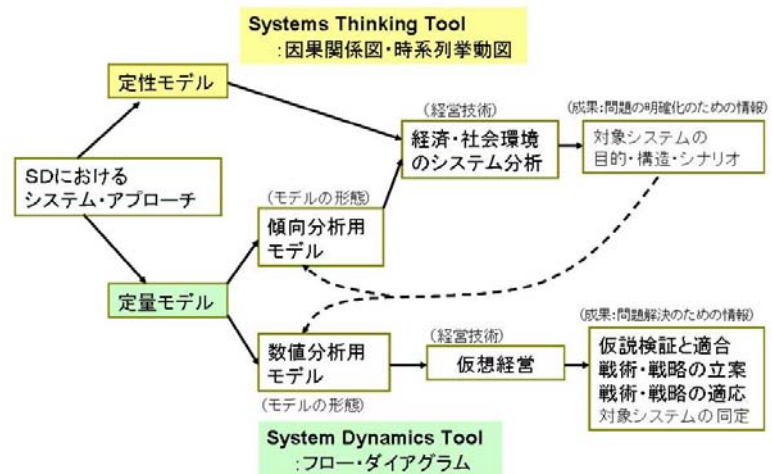


図2 SDに基づくシステム・アプローチの方法論

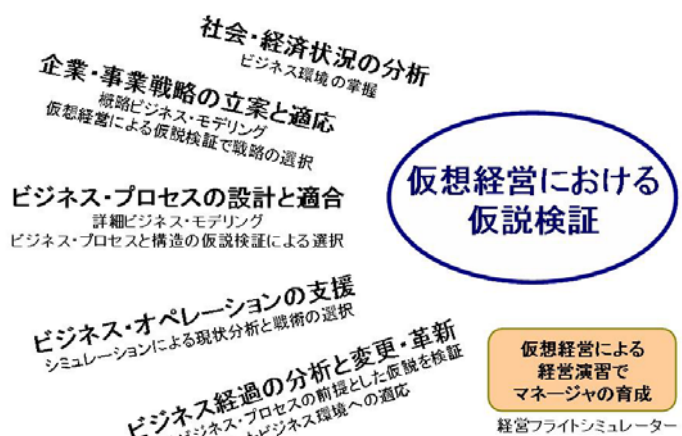


図3 ビジネスにおけるSDモデリングとシミュレーションの活用

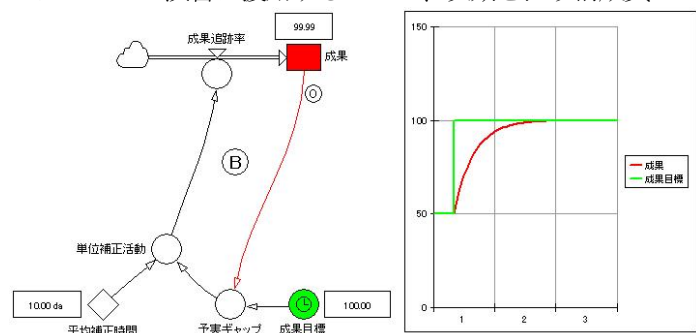


図4 ビジネスの概念モデル

計測する、③その差異が小さくなり成果が目標に近づくよう活動がなされる、④追求する成果を計測する、②に戻り、限りなく繰り返される。このビジネスの概念をSDモデルとして表現すると図4となり、方程式で表現すると下式となる。

$$\text{成果} = \int \text{成果追跡率} \, dt$$

$$\text{成果追跡率} = \text{予実ギャップ} / \text{平均補正時間}$$

$$\text{予実ギャップ} = \text{成果目標} - \text{成果}$$

成果から予実ギャップへのリンク線は **Opposite Direction** で、それ以外は成果追跡率から成果への因果リンクも含めて **Same Direction** であるから、このループは **balancing・フィードバック・ループ** である。

このモデルでは、当初の成果目標が 50 であったが、シミュレーション開始から 10 日後に成果目標が倍の 100 に引き上げられたとして、その追従状況を表示している。

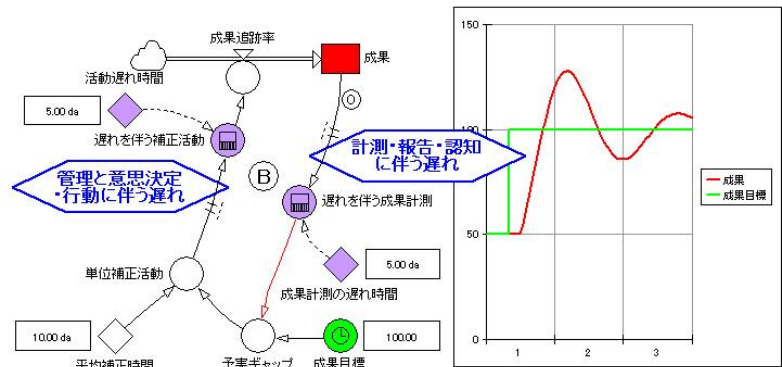


図5 遅れを伴う概念モデル

成果を計測してそれを報告し、マネージャが報告内容を認識するまでには遅れ時間が発生する。また、予実ギャップを計算してその補正のための単位補正活動量を決定し、その決定結果を担当部署に伝えて、担当部署が補正活動を実施するまでにも遅れが発生する。

遅れが全く発生していない場合の状況が前述の図4の右側に示されている。しかし、成果から予実ギャップまでの遅れと単位補正活動から成果追跡率までの間に、それぞれパイプライン遅れが存在すると、補正活動によって成果は成果目標に近づくが指令の遅れのために増加指令が出たままなので補正活動が続き、成果目標に達した時点で収束することなくオーバーシュートする。その後反転するものの、再び成果目標に近づいても減少指令が出たままなので補正活動が続き、アンダーシュートを起こし、図5の右側に示すように振動が発生する。

なお、パイプライン遅れは右式で表現する。

$$\text{遅れを伴う成果計測} = \text{delayapl}(\text{成果}, 5 \ll \text{da} \gg)$$

$$\text{遅れを伴う補正活動} = \text{delayapl}(\text{単位補正活動}, 5 \ll \text{da} \gg)$$

図4に示した遅れが存在しないビジネス

の概念モデルは、代表的なクローズド・ループ・モデルの一つである **ゴール・シーク・モデル** で、**balancing・フィードバック・ループ** が存在する線形1次のシステムである。このモデルの挙動は、指数増加・減少あるいは平衡維持となるが、振動は発生しない。また、このモデルに非線形要素を加えると、もう少し複雑な挙動を示すが振動はしない。

しかし、**balancing・フィードバック・ループ** のいずれかのリンク上に、有意な時間遅れが存在すると、システムの状態が目標値に到達した後も補正を続けるためにシステムは過剰に補正され、振動が発生する可能性が出てくる。振動は動的システムでは極普通の現象で、振動が発生しない場合が動特性の中ではむしろ特異な状況である。振動としては、図5に現れているような減衰振動、同じ振動状態が続く自励振動、振幅が拡大する発散振動、さらに特殊な場合としてカオスの振動などがある。

モデルを数式表現すると、振動が発生するのは2次以上の微分方程式の根が複素数の場合である。参考までに、微分方程式とSDモデルの対比を示すために、ゴール・シーク・モデルに情報遅れ要素を加えたモデルを図6に示し、図7に数式表現を示す。

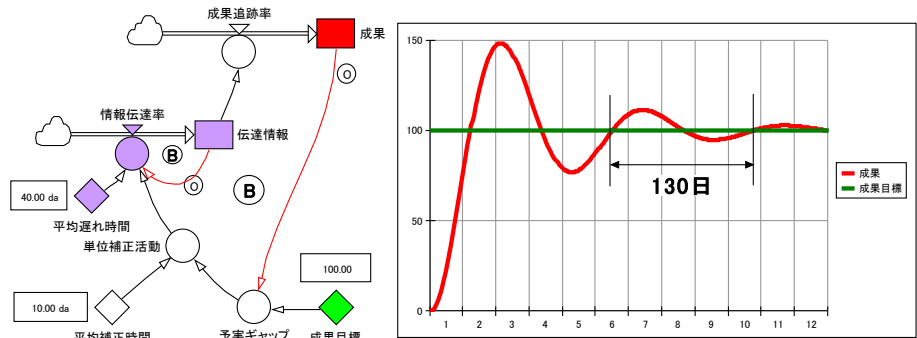


図6 情報遅れを伴うゴール・シーク・モデル

このモデルに関して言うならば、振動を含むシステムの挙動は次の条件で決まることになる。

自励振動 : $R < 0 \wedge C1 = 0 \dots$ このシステムでは発生しない

発散振動 : $R < 0 \wedge C1 < 0 \dots$ このシステムでは発生しない

減衰振動 : $R < 0 \wedge C_1 > 0$. . . 図6のシステムは減衰振動し、周期 T は約 130 日
 発散 : $R > 0 \wedge C_1 < 0$. . . このシステムでは発生しない
 減衰 : $R > 0 \wedge C_1 > 0$

SD モデルの定義式

Name	Unit	Definition
平均遅れ時間	da	$40 \ll da \gg$
情報伝達率	da^{-1}	(単位補正活動 * TIMESTEP / 伝達情報) / 平均遅れ時間
伝達情報		0
成果		0
成果追跡率	da^{-1}	伝達情報 / TIMESTEP
予実ギャップ		(成果目標 - 成果)
単位補正活動	da^{-1}	予実ギャップ / 平均補正時間
成果目標		100
平均補正時間	da	$10 \ll da \gg$

数学モデル (数式表現)

$$\frac{d^2}{dt^2}(\text{成果}) + C_1 \frac{d}{dt}(\text{成果}) + C_2 * (\text{成果}) = C_2 * (\text{成果目標})$$

$$C_1 = 1 / (\text{平均遅れ時間})$$

$$C_2 = 1 / (\text{平均遅れ時間} \cdot \text{平均補正時間})$$

$$\text{特性方程式の 2 根} = -C_1 / 2 \pm i\sqrt{-R}$$

$$R = C_1^2 / 4 - C_2$$

$$\text{振動する場合: } R < 0 \Rightarrow 0.25 * \text{平均補正時間} < \text{平均遅れ時間}$$

$$\omega = \sqrt{-R} \quad T = 2\pi / \omega$$

図7 情報遅れを伴うゴール・シーク・モデルの数式表現

3. サプライチェーンの構成要素としてのストック・マネージメント・モデル

サプライチェーンは顧客が必要とするモノを、必要なだけ必要なタイミングで提供するシステムである。必要なモノとは製品などの物理的資源だけではなく、人的資源、金融資本、顧客、顧客サービス、知的資産などの有形、無形を問わず様々な形態のモノがある。このようにサプライチェーンはビジネスの多くの領域に組み込まれているので、本章以降ではサプライチェーンをビジネスの構成要素の代表として取り上げ、その安定性をはじめとする特性を分析する。

3. 1 スtock・マネージメント・モデルの構造

John D. Sterman は教科書の中でサプライチェーンの構成要素としてストック・マネージメント・モデルを取り上げている[5]。もともと、このモデルは、後述する4階層で構成されたビールゲームのモデルを構築する際に要素モデルとして組み込まれたものである。ビールゲームは、複数の参加者がフィードバック、非線形性、時間遅れなどを含む模擬的な生産流通在庫システムにおいて、不確実な需要の下で在庫を適切に管理することにより合計費用の最小化を目指すゲームである。John D. Sterman は被験者によるゲームの実験結果とビールゲームのSDモデルによるシミュレーション結果とを対比させることにより、人が経営において意思決定するメカニズムを、以下に概説するように解明した[6] [7]。

ストック・マネージメント・モデルにおいて、被験者の意思決定プロセスを“Anchoring and Adjustment Heuristic”ルール (以下では、AAHルール) で表現できると仮定し、このルールが被験者の行動をよく説明すると結論したが、その過程で、被験者が意思決定する際、フィードバック情報を誤認する可能性が高く、被験者には以下の特徴が多く見られることを明らかにしている。

- ① 対処行動をとったにもかかわらず効果がもたらされない場合には、その対処行動について説明できない。
- ② 自らの行動が環境に及ぼすことのフィードバックについて認識できず、反応もできない。
- ③ 実際には自らの活動によって内生的に引き起こしたダイナミクスの発生原因を、外部事象に求める。
- ④ 外生的事象からダイナミクスが生じるとの考えが、より高い能力に向けての学習や改革を遅らせる。

本稿でも、図8に示すストック・マネージメント・モデルを取り上げ、先ずその特性を分析する。このモデルは主要部分として上部にストック管理部があり、補助部として合計費用の計算処理部がある。ストック管理部はさらに二つに分かれ、ストック&フロー・システムの主構造を表す上部と、マネージャの意思決定ルールを表す下部とからなる。

モデルの機能と制約は、ビールゲームに倣って以下としている。顧客の注文は注文リードタイムとして設定さ

れている2週間後に当該システムに届く。その注文数は意思決定ルールを経て実行され、注文残として記録される。同時に、供給リードタイムとして設定されている2週間前に注文残として記録された注文数が、注文残から在庫へ供給される。その後、顧客注文数と受注残とを合わせた合計が、在庫として存在しているだけ排出され、(顧客注文実行-排出率)が未排出率として累積されて受注残となる。

ここで細かいことではあるが、SD ではフローレートから流入して在庫になるまでに、刻み時間分の時間が必要であることは注意すべきである。例えば、このモデルでは刻み時間が1週間となっているが、ビールゲームの操作法のように週の初めに配送が終り直ちに在庫となり、その在庫をその週に使用して排出するのであるなら、図8のモデルにもあるように、排出可能量は在庫数だけから判断するのではなくて、下式のようにその週に供給される供給数を加えた量により判断しなければならない。

Name	Unit	Definition
排出率	case/wk	$\text{MIN}((\text{在庫}/\text{TIMESTEP} + \text{供給率}), \text{顧客注文実行} + \text{MAX}(0, \langle\langle \text{case} \rangle\rangle, \text{受注残}) * \text{受注残加算指示} / \text{TIMESTEP})$

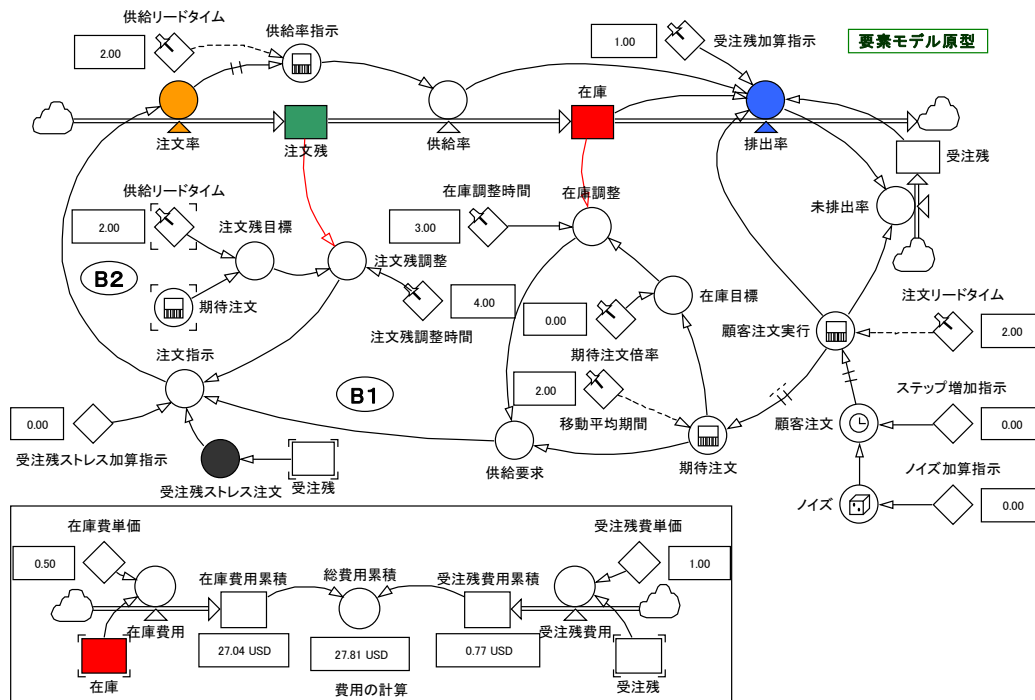


図8 ストック・マネージメント・モデル

次に、マネージャの意思決定ルールの表現には様々な考え方があがるが、このモデルでは前述のように、AAHルールを採用する。AAHルールでは、意思決定に際して未知の量を、既知の量を思い起こすことによってまず評価し、その後、曖昧さの残る効果について微調整を加味する。ある時点の変数の値を推測するとき、長期間の平均値を思い起こし、次に経過時間などの諸条件による調整量を加味して、ある時点の推測値とした経験を多くの者が持っているが、ここでの長期間の平均値がAnchor値に相当し、諸条件による調整量がAdjustment値に相当する。

このモデルでは、在庫の管理だけでなく、在庫へと配送されるべき注文残についても管理が必要であるから、AAHルールを2段階に適用する。第一段階では、顧客注文の期待値をAnchor値とし、在庫目標と実在事のギャップを在庫調整時間で除した在庫調整をAdjustment値とする。第二段階では、第一段階のAnchor値とAdjustment値とを加えた供給要求をAnchor値とし、注文残目標と注文残のギャップを注文残調整時間で除した注文残調整をAdjustment値とする。供給要求と注文残調整を加算した注文指示がこの週の注文量となる。

上記のルールの第一段階と第二段階のそれぞれにおいて、Anchor値とAdjustment値とを加算した供給要求と注文指示とはいずれも発注量であるから、負にはならないとの制約条件を設けている。マネージャの意思決定ルールに関係するモデルの定義式を以下に示す。

第一段階 マネージャの意思決定ルール

Name	Unit	Definition
顧客注文実行	case/wk	$\text{DELAYPL}(\text{顧客注文}, \text{'注文リードタイム'} * \text{TIMESTEP}, 4 \langle\langle \text{case} \rangle\rangle / \text{TIMESTEP})$
移動平均期間		2
期待注文	case/wk	$\text{SLIDINGAVERAGE}(\text{顧客注文実行}, \text{移動平均期間} * \text{TIMESTEP})$

期待注文倍率		0.0
在庫目標	case	期待注文倍率*期待注文*TIMESTEP
在庫調整時間		3.0
在庫調整	case/wk	(在庫目標-在庫)/(在庫調整時間*TIMESTEP)
供給要求	case/wk	MAX(0<<case>>/TIMESTEP, 期待注文+在庫調整)

第二段階 マネーজヤの意思決定ルール

Name	Unit	Definition
供給リードタイム		2
期待注文	case/wk	SLIDINGAVERAGE(顧客注文実行, 移動平均期間*TIMESTEP)
注文残目標	case	'供給リードタイム'*期待注文*TIMESTEP
注文残調整時間		4.0
注文残調整	case/wk	(注文残目標-注文残)/(注文残調整時間*TIMESTEP)
注文指示	case/wk	MAX(0<<case>>/TIMESTEP, 供給要求+注文残調整) +受注残ストレス注文*受注残ストレス加算指示
注文率	case/wk	注文指示
供給率指示	case/wk	DELAYPPL(注文率, '供給リードタイム'*TIMESTEP, 4<<case>>/TIMESTEP)
供給率	case/wk	供給率指示
注文残	case	8<<case>>
在庫	case	12<<case>>

ストック・マネージメント・モデルでは、在庫と品切れ（受注残）が最小であることが望ましいが、そのための諸条件は相反する。そこで、妥協点を見出すことになるが、基本に戻るなら、モデルの構造の最適化を求めた後に、その構造を前提とした設定変数の最適化を図るべきである。しかし今回は、構造としてはストック・マネージメント・モデルありきとして、その設定変数の最適化を図ることとする。このときの評価条件もビールゲームに倣って、在庫費用単価は1週間に1ケース当たり0.5ドル、受注残費用単価は1週間に1ケース当たり1ドルとする。費用評価のモデルに関する定義式を以下に示す。

費用の評価セクター

Name	Unit	Definition
在庫費単価	USD/(wk*case)	0.5<<USD/case>>/TIMESTEP
受注残費単価	USD/(wk*case)	1<<USD/case>>/TIMESTEP
在庫費用	USD/wk	在庫費単価*在庫
受注残費用	USD/wk	受注残費単価*受注残
総費用累積	USD	在庫費用累積+受注残費用累積

ストック・マネージメント・モデルの構造の特徴は、二つのバランシング・フィードバック・ループである。図8では、B1とB2の記号で示している。B1については、在庫から在庫調整までのリンクが Opposite Direction で、それ以外のリンクは全て Same Direction である。B2については、注文残から注文残調整までのリンクが Opposite Direction で、それ以外のリンクは全て Same Direction である。前章でビジネスの概念モデルについて述べたように、バランシング・フィードバック・ループ上に供給リードタイムの遅れが存在するので、振動が発生する可能性については容易に理解できる。

なお、ストック・マネージメント・モデルは、在庫問題に限らず表1に示す対象について適用可能であり、ビジネス領域では汎用性の高いモデルである。

表1 スtock・マネージメント・モデルの適用可能領域

番号	システム名	ストック	注文残	排出率	供給率	注文率	典型的な行動・挙動
				単位時間当たりの	単位時間当たりの	単位時間当たりの	
1	在庫管理	在庫	商品の発注残 (図8では、注文残)	顧客への出荷 (図8では、排出率)	供給者からの入荷 (図8では、供給率)	商品の発注 (図8では、注文率)	ビジネスの循環
2	資本投資	資本設備	建設中の設備	減価償却	建設完工	新規契約	建設工事の循環
3	機器・装置	機器・装置	注文中の機器・装置	減価償却	機器・装置の納品	新規機器・装置の注文	ビジネスの循環
4	人的資源	従業員	欠員と訓練中の従業員	レイオフと退職	雇用	欠員の発生	ビジネスの循環
5	資金繰り	現金残高	審理中の融資申し込み	支出	借入れ	融資申し込み	キャッシュフローの循環
6	マーケティング	基盤顧客数	見込み顧客数	競合社への離脱	新規顧客の獲得	新規顧客との接触	顧客基盤の好況と不況
7	養豚業	養豚数	若豚と懐妊豚	屠殺	成育	交配	養豚の循環
8	農産物	在庫	農場の作物	消費	収穫	植え付け	農産物の循環
9	商業用不動産	建物数	開発中の建物	減価償却	開発完了	開発	不動産の好況と不況
10	電熱器による調理	ポットの温度	レンジのコイルの熱	空中への放散	コイルからポットへの伝播	レンジの火力の設定	煮過ぎた夕食
11	自動車運転	後ろの車との距離	車の運動量	後ろの車の速度	速度	加減速のペダル操作	交通渋滞
12	シャワー (*)	水温	パイプの中の水温	排水	シャワーヘッドからの流出	蛇口の設定	燃焼そして凍結
13	人のエネルギー水準	血糖	消化管における砂糖類	新陳代謝	消化	食糧消費	エネルギー水準の循環
14	付き合い酒	血液中のアルコール	胃中のアルコール	アルコール性代謝	胃から血液への拡散	飲酒	酩酊

参照モデル: GenericStockManagementModel.sip

出典: John D. Sterman; Business Dynamics, The McGraw-Hill, 2000年, P.677 Table 17-1

3. 2 ストック・マネージメント・モデルの挙動

構築したストック・マネージメント・モデルは、要素数が 40 以下の小さなモデルであるが、人の判断に基づいて帰納的に費用最小の条件を求めるにはかなりの困難さを伴う。このモデルで、マネージャが意思決定するにあたり、操作可能な変数は、移動平均期間、期待注文倍率、在庫調整期間、注文残調整時間、そして注文残目標を計算する上で用いている供給リードタイムである。

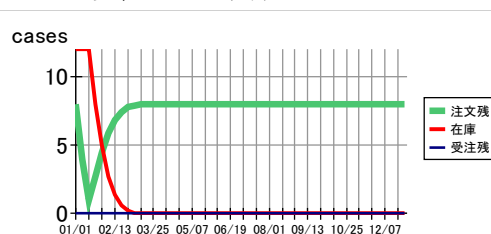
しかし、在庫は少ないほうが望ましいのだから在庫目標を最少とするために期待注文倍率は基本的にはゼロに近づき、在庫の安定供給の観点から注文残目標を計算する上で用いている供給リードタイムは、実際に設定されている供給リードタイムである 2 週間が妥当であることが推測できる。その結果、在庫調整時間と注文残調整時間が、主要な設計変数となる。

ビールゲームでは、初期値として在庫には 12 ケースを、注文残には 8 ケースを保管する。注文と供給の遅れはパイプライン遅れであるが、その初期値は毎週 4 ケースを設定することになっているので、このストック・マネージメント・モデルにおいてもそれに倣った。ビールゲームの顧客注文は、最初から 4 週目までが毎週 4 ケースで、5 週目からは 8 ケースに増加することになっているのでこのステップ入力パターンを基本にして、それ以外に短期の変動パターン、トレンドパターン、季節変化のような長期の変動パターンについても取り上げる。

次に、シミュレーション設定条件として、期間を 1 年間、刻み時間を 1 週間として、各種の条件下で費用が最少となる解を求め、そのシステムの挙動を観察する。

(1) 顧客注文が毎週 4 ケースのまま変化しない場合

初期状態の在庫は 12 ケース、注文残は 8 ケースと設定されているので、このままの状態が続くなら、受注残は発生しないものの年間 306 ドルの在庫費用が発生する。



最適条件を導く係数		
期待注文倍率	在庫調整時間	注文残調整時間
0.0	3.0	4.0

最適条件における費用		
総費用累積	在庫費用累積	受注残費用累積
USD27.8	USD27.0	USD0.8

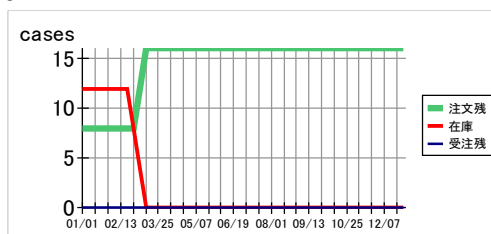
図9 初期在庫からの費用最小パターン

ここで、顧客注文は最初から 4 ケースのまま推移するとして、費用最小となる条件を求め、図 9 に示す。初めに在庫が目標在庫以上の 12 ケースあり、ストック調整が負になって期待注文と打ち消しあうため供給要求はゼロとなる。このため、当初は注文残が減少するが、在庫の減少と共に注文残は目標の 8 ケースに復旧する。これは実に簡単な条件設定であるが、一般人がここで求まっている解を直感的に求めることは不可能と思われる。

(2) ビールゲームの条件で顧客注文が 5 週目に 4 ケースから 8 ケースに増加する場合

これはビールゲームと同じ操業条件である。図 8 のモデルに描かれている“期待注文”は、マネージャに顧客注文が届いて実行に移る時点で、その値を認識し、次に自らの注文数を決定する判断ステップを意味している。

仮に、AAHルールの二つの Adjustment 値である在庫調整と注文残調整とを無視してゼロとおく。さらに先週の顧客注文実行数をそのまま自らの今週の注文数とする場合には、ここでの遅れは 1 週間となるから供給リードタイムの 2 週間と合わせて 3 週間の遅れが発生する。したがって、在庫から新しい注文数 8 ケースが排出される時から 3 週間の遅れを経て、



最適条件を導く係数		
期待注文倍率	在庫調整時間	注文残調整時間
----	∞	∞

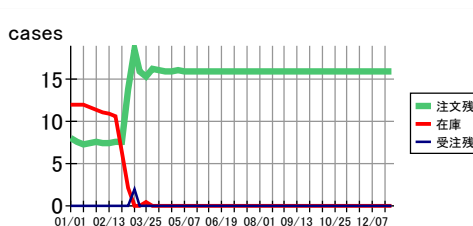
最適条件における費用		
総費用累積	在庫費用累積	受注残費用累積
USD54.0	USD54.0	USD0.0

図10 在庫調整と注文残調整を無視 (注文数認識遅れ=1週間)

初めの 8 ケースが在庫に供給されるので、初期の注文数 4 ケースと新しい注文数 8 ケースとの差の 3 週間分の 12 ケースが不足する。初期在庫として在庫にその分が準備されておれば、図 10 に示すように受注残を発生させず、在庫ゼロへと収斂する。

初期在庫がこのバランスにいたる在庫より多いと、費用の最小条件から求めた在庫は余剰在庫を抱えることになり、少ないと受注残を抱えることになる。

この設定条件では費用が最小になっていないので、最小条件を求めて図 11 に示す。図 10 と



最適条件を導く係数		
期待注文倍率	在庫調整時間	注文残調整時間
2.1e-3	32.3	3.9

最適条件における費用		
総費用累積	在庫費用累積	受注残費用累積
USD52.8	USD50.5	USD2.2

図11 ビールゲーム対応の費用最小化 (注文数認識遅れ=1週間)

図 11 との総費用累積を見ると大きな差はないので、先週に認識した顧客注文を今週の自らの注文数として Anchor

値とし、在庫調整と注文残調整の Adjustment 値は無視してしまえば、費用最小に近い操業ができることを意味している。

ただし、今後の基準となる操業条件としては、自らの注文数を顧客注文数の2週間の移動平均値として表現する。この場合には、顧客注文がステップ・アップする時点では、顧客注文を認識・判断するのが前述の1週間ではなく、1.3週間程度遅れる。その結果を図12に示す。

現実問題としては、初期の注文数が続いた場合に費用を最小化する前述の(1)の条件で操業し、注文数がステップ・アップ変化した時点で操業条件を切り替えることになる。新しい操業条件は、切り替える時点の状態が初期値となり、新しい注文数が将来にわたって継続すると仮定して費用を最小化する条件から求める。

注文のステップ・アップ変化が操業開始後20週目に発生し、それに適応して操業条件を途中で切り替えた場合の結果を図13に示す。1年間を通して費用最小

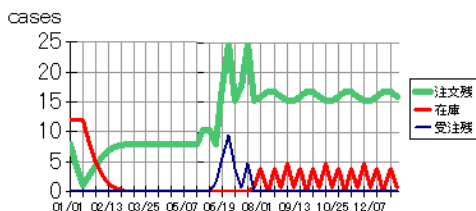


図13 途中で条件を切り替えたビールゲーム対応のオペレーション

化すると求めた総費用が141ドルであるから、ステップ変化を認識して操業条件を切り替えると費用は半分程度になることが分かる。

(3) 顧客注文の平均は4ケースのまま短周期の変動が加わる場合

ビールゲームのように、あるとき顧客注文がステップ状に増加することだけでなく、注文が安定せず短い周期で変動することも多い。期待値が4ケースで、変動の標準偏差が1.2ケースの顧客注文を想定する。

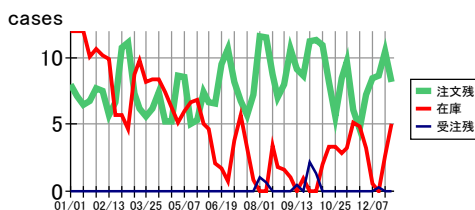


図14 平均4ケース、変動の標準偏差1.2ケースの場合

この場合の費用最小の結果を図14に示す。図8のモデルで、在庫が不足して排出できない場合に、受注残として記録し在庫余裕のあるときに排出する条件(注文残加算支持=1)では、期待注文倍率はほぼ変動する注文の標準偏差に近い値となる。一方、在庫が不足する場合に後刻に余裕ができて再排出しない条件では、期待注文倍率は図15に示すように大きな値になる。

なお、この場合のようにランダム変数がモデルに含まれる場合には、サンプル数をできるだけ多く集めるために、シミュレーション期間を長くする必要がある。今回は20年間のシミュレーションを実施して、費用等の累積値は1/20を乗じて年間の値に換算している。

(4) 顧客注文が4ケースから1年間で12ケースまで増加するトレンドが加わる場合

顧客注文が週に4ケースから単順に増加して、1年終了時点で週あたり12ケースに達する場合の費用最小の結果を図16に示す。

現実問題では前述のように、在庫がゼロを維持できなくなった時点で最適条件を再び求めることになる。

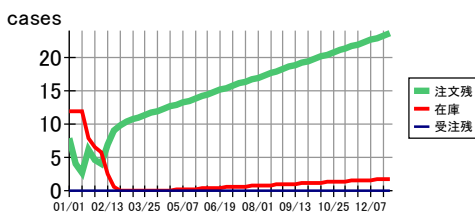


図16 トレンドを伴う場合

最適条件を導く係数		
期待注文倍率	在庫調整時間	注文残調整時間
0	433.0	3.6

最適条件における費用		
総費用累積	在庫費用累積	受注残費用累積
USD55.4	USD54.0	USD1.4

図12 ビールゲーム対応の費用最小 (注文数認識遅れ=2週間)

最適条件を導く係数			
適用領域	期待注文倍率	在庫調整時間	注文残調整時間
前半	0.0	3.0	4.0
後半	0.3	0.5	1.0

最適条件における費用			
適用領域	総費用累計	在庫費用累計	注文残費用累計
前半	\$27.2	\$27.0	\$0.2
後半	\$52.6	\$26.0	\$26.6
合計	\$79.8	\$53.0	\$26.8

最適条件を導く係数		
期待注文倍率	在庫調整時間	注文残調整時間
0.3	12.9	5.2

最適条件における費用		
総費用累積	在庫費用累積	受注残費用累積
USD 62.3	USD 38.1	USD 24.1

最適条件を導く係数		
期待注文倍率	在庫調整時間	注文残調整時間
1.3	19.0	2.8

最適条件における費用		
総費用累積	在庫費用累積	受注残費用累積
USD 160.5	USD 152.9	USD 7.6

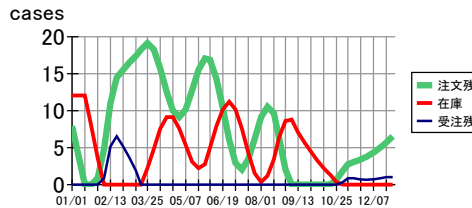
図15 受注残を排出しない場合

最適条件を導く係数		
期待注文倍率	在庫調整時間	注文残調整時間
0.3	1.5	1.5

最適条件における費用		
総費用累積	在庫費用累積	受注残費用累積
USD47.1	USD46.9	USD0.2

(5) 顧客注文の平均が4ケースで振幅3ケースの季節変動が加わる場合

季節変動のように長期の周期で顧客注文が変動する場合について費用最小条件を求める。ここでの変動は、顧客注文が振幅3ケースで周期1年間の正弦波状であると仮定する。費用最小条件とその結果を図17に示す。



最適条件を導く係数		
期待注文倍率	在庫調整時間	注文残調整時間
0.8	1.5	90.0

最適条件における費用		
総費用累積	在庫費用累積	受注残費用累積
USD137.6	USD107.3	USD30.3

図17 季節変動を伴う場合

このような長期の周期変動の場合には原因が明らかでないことが多いので、現実には年間を通じて最適条件を求めるのではなく、期間を区切って最適条件を求めるか、または、見越し在庫の考え方で供給能力に余裕がある時期に、不足予測分を先行生産することなどにより対処するのが一般的である。

3.3 定期発注方式モデルとの対比

前節ではマネージャの判断がAAHルールに基づくとして、顧客注文が変動する場合に、費用が最小となる条件を探索した。一般に実務で用いる在庫理論では、需要変動に対応するための在庫は需要変動予防在庫（安全在庫）と呼ばれている[8][9][10]。この需要変動の主な原因は、需要それ自体のばらつきと、注文時点と排出時点の時間差に伴う需給の差である。

さて、前節のストック・マネージメント・モデルは、毎週、受発注するモデルであるから、発注間隔を固定する定期発注方式の安全在庫を取り上げ、前節のストック・マネージメント・モデルと対比してその関係について述べる。需要変動は正規分布で表現できるとすると、定期的な発注量は以下の式で求められる。

発注時の必要在庫量=サプライチェーン系で発生する在庫量 (F) + 安全在庫量 (S)

$$F = \text{平均需要} \times (\text{供給リードタイム} + \text{発注間隔})$$

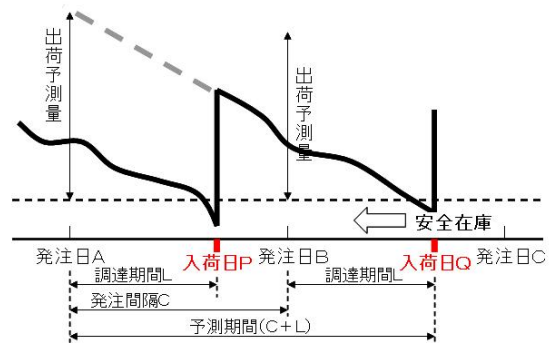
$$S = \text{安全在庫係数} \times \text{単位時間当たりの需要の標準偏差} \times (\text{供給リードタイム} + \text{発注間隔})^{0.5}$$

安全在庫係数：総需要件数に対してそのサービス率を満足させる正規分布の範囲を標準偏差に対する割合で表した値。サービス率と安全在庫係数の関係を以下に示す。

サービス率	: 0.999	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.9	0.8	0.7
安全在庫係数	: 3.09	2.33	2.05	1.88	1.75	1.64	1.28	0.84	0.52

供給リードタイム+発注間隔：定量発注方式では供給リードタイム分の在庫を考慮すれば良いが、定期発注方式では、発注間隔分も考慮する必要がある。右の略図を使って説明する。

発注日Aにおける発注量を考える。時点A/Bで発注すると、リードタイム後の時点P/Qで入荷する。発注日Aから入荷日Pまでは、既存の在庫から出荷し、入荷日Pから次の入荷日Qまでは、入荷日Pに入荷した在庫から出荷する。したがって、発注日Aでは、入荷日Qの時点で在庫が安全在庫以上残っていることを考慮して必要発注量を決める。すなわち、定期発注方式においては、平均出荷に伴う必要在庫量と安全在庫量の計算において、算定期間をリードタイムと発注間隔との和とする。



定期発注方式のモデルもストック・マネージメント・モデルと同様に、仕入れ販売部分と在庫管理部分とから成り立っている。上述の需要変動の標準偏差を使って安全在庫量を算定する場合には、需要に対して在庫が不足した場合には、既存の在庫で対応できる範囲内で対応としている。その変動する需要に対応できる割合がサービス率である。サービス率と需要変動の標準偏差とから目標在庫を算定する。

また、在庫に関しては、ストック・マネージメント・モデルと違って、納品待ち（注文残）と実在庫とを加算した値を有効在庫と呼び、目標在庫と有効在庫との差を発注量とする。モデルの構造を図18に示す。

前節のストック・マネージメント・モデルと同じ諸条件に設定する。受注残についても在庫に余裕がある時点で販売するとし、在庫と受注残の費用が最小となる安全在庫係数を求め図19に示す。この結果は、ストック・マネージメント・モデルにおいては、図14に相当する。

ストック・マネージメント・モデルでは、注文残目標を算出する時間を供給リードタイムと固定しているから、

注文残は期待注文の2倍の値の周りで変動する。それに比べて、定期発注方式モデルでは、納期待ち（注文残に相当）と在庫とをあわせた有効在庫が、目標在庫を目指すように発注がかけられており、納期待ちについての目標値が設定されていないので変動振幅は大きく、またその平均値も変動している。在庫については両モデルとも0から5ケースの間で変動しているが、定期発注モデルのほうが、初期値の12ケースからこの範囲に低下するのが早く、その分だけ受注残も頻発している。

図19の評価は、ストック・マネージメント・モデルでは図14の総費用累積に相当するが、その値はそれぞれ82と62であり、このような問題では顕著な差とはいえない。また、安全在庫係数は0.76と小さな値を示しており、サービス率に換算すると77%となる。高い需要に対し、たとえその時点の在庫で対応できなかったにしても、不足分は受注残に累積され、在庫に余裕ができた時点で販売するので、安全在庫係数としては低い値になったものと考えられる。

その時点の在庫で対応できない需要が発生した場合に、在庫で対応できる範囲内でのみ対応し、受注残に対して後刻に再度対応しない条件の下で費用が最小となる安全在庫係数を求め、図20に示す。ストック・マネージメント・モデルでは、図15に相当する。サービス率は100%に近い値で、在庫は受注残を発生させないように高い値で推移している。

サービス率を98%とすると、安全在庫係数は2.05となる。この状態でのシミュレーションによると、2%の欠品率の影響が評価値を1,129ドル/年まで押し上げている。

この章では、受注残に対して1ドル/ケース・週、在庫に対して0.5ドル/ケース・週の費用単価の下で、費用最小条件を求めてきた。費用単価の条件を変えると、求まる最小化の条件が異なるのは当然である。実用に当たっては、最終目的に見合った評価関数（目的変数）を設定して最適解を求めるべきである。したがって、この節で述べた定期発注方式モデルでは、安全在庫の考え方が需要変動に対してどのくらいの割合で対応できるかを設定しているだけで、それがビジネスの評価にどのように結びつくかが明らかにされていないことが問題である。

また、在庫最小だけを標榜する場合も多いが、品切れによる機会損失との兼ね合いで最小在庫は論じられるべきで、在庫最小だけを最適化の評価関数とするのは適切ではない。確かに以前は、仮想経営における最適化を机上で簡便に活用できなかったのが次善の策として上記のような方法がとられていたのだが、今では仮想経営を簡単に実施できる環境が誰にも提供されているので仮想経営を有効に活用すべきであろう。

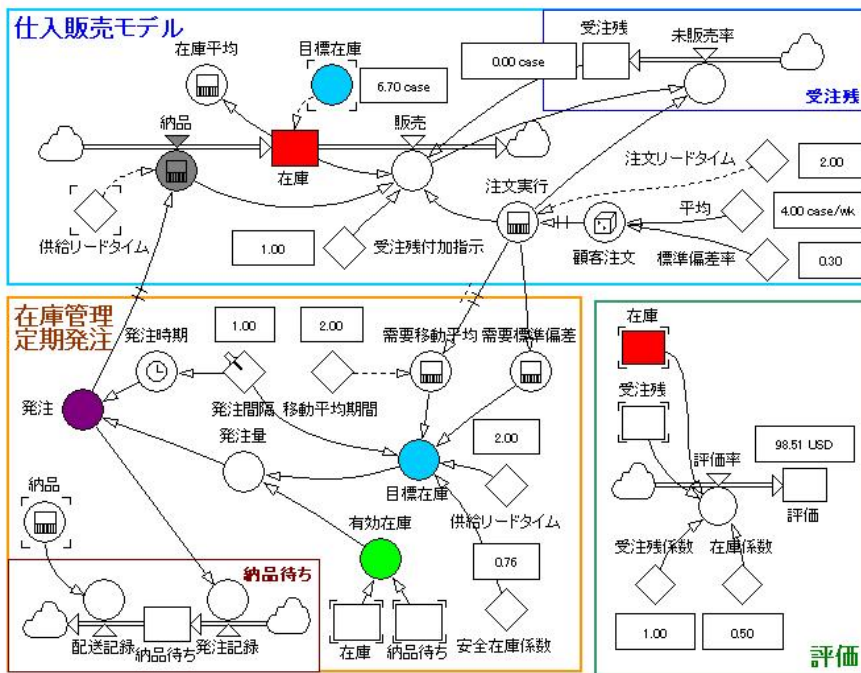


図18 定期発注方式のSDモデル表現

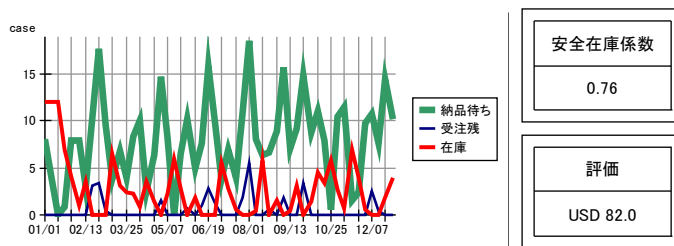


図19 費用最小から求めた安全在庫係数

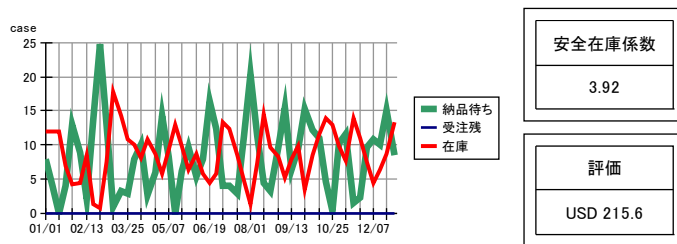


図20 受注残に再度対応しない場合

4. ビールゲームによるサプライチェーンの安定性の検討

4. 1 ビールゲーム対応のサプライチェーン・モデル

サプライチェーンの一例として John D. Sterman に倣って、ストック・マネージメント・モデルを連鎖した4階層のモデルであるビールゲームのサプライチェーンを取り上げる。ビールゲームは Jay W. Forrester が MIT のスローンスクールに着任して景気循環に興味を持ち、一産業部門における潜在的不安定性の研究を始めた。その際、学生が概念をしっかりと把握できるようにビールの流通過程を取り上げたと言われている[11]。ビールゲームは、ビール工場、一次卸商、二次卸商、小売商からなるサプライチェーンのモノポリー・ゲームである。具体的なゲームの進行方法やゲーム結果については多くの解説がある[12][13][14][15]。

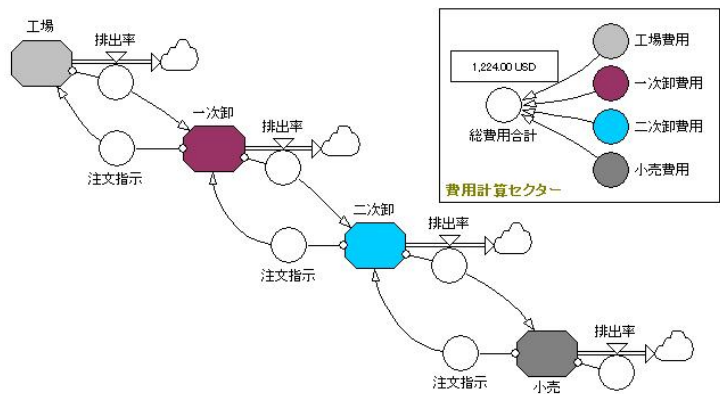


図 21 ビールゲームのサプライチェーン

ビールゲームの主構造を図 21 に示す。八角形のシンボルが必要な一部の修正を加えた前述のストック・マネージメント・モデルである。右上の費用計算セクターでは、各階層の費用を集計する。以降ではシステムの安定性を評価するために、以下で定義する実効在庫を結果を示すグラフ上で用いる。

$$\text{実効在庫} = \text{在庫} + \text{注文残} - \text{受注残}$$

ビールゲームの初期値は、在庫が 12 ケース、注文残が 8 ケース、注文と供給は初めの 2 週間は毎週 4 ケースと設定されている。その状態をそのまま維持するためには、在庫目標が 12 ケース、注文残目標が 8 ケースになるように、それぞれの目標に関する倍率条件を設定する。

そのままの状態でも 5 週目に小売への顧客需要が 4 ケース/週から倍の 8 ケース/週になった場合の実効在庫の推移を図 22 に示す。典型的なブルウィップ効果が現れていて、小売から上流に異動するにつれて実効在庫は大きな値に達している。

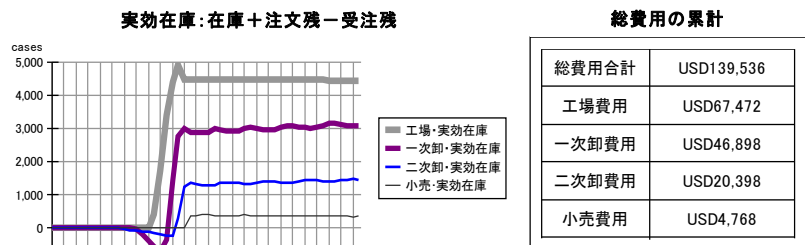


図 22 初期条件維持で顧客注文の倍増ステップがある場合

しかし、このままの設定では、費用が膨大な値に達するので、現実的ではない。在庫については目標在庫として当初の値を維持するのではなく、4 階層全てで期待注文倍率をゼロとして、在庫目標がゼロに収束することを目指したシミュレーション結果を図 23 に示す。全範囲で小さくはなったが、費用最小は達成されていない。

さて、4 階層の相互作用を追跡しながら、費用の合計を最小にする条件を人が帰納的に見出すことは不可能と思われるので、遺伝的アルゴリズムを組み込んだ最適化法を使うことにする。4 階層全ての期待注文倍率、在庫調整時間、注文残調整時間を、4 階層の費用の合計が最小になる条件の下で求めると、総費用合計は 900 ドルと小さくなる。導かれた設定変数を図 24 に示す。これによると、在庫調整時間がいずれの階層でも 100 週以上と大きく、結果的に在庫調整をほぼ無視したことになる。

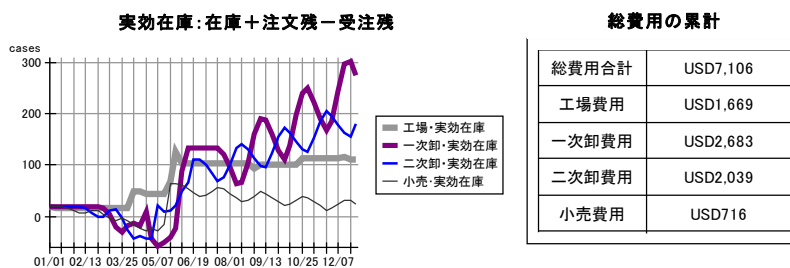


図 23 在庫目標を強制的にゼロの設定した場合

	注文残調整時間	在庫調整時間	期待注文倍率
工場	3.7	947.8	0.0
一次卸	3.0	689.0	50.7
二次卸	10.0	1000.0	64.3
小売	187.0	891.8	39.0

図 24 費用最小化から求めた設定変数

現実問題としては、在庫調整をゼロと置くと期待注文倍率も意味を失うので、総費用合計の最小化を4階層の注文残調整時間だけを調整して求め、結果を図 25 に示す。求まった工場と小売の注文在庫調整時間が、100 週以上に大きく、現実的にはこの二つの階層では、注文残調整もほぼ無視していることになっている。

結局、小売階層と工場階層とでは、届いた顧客あるいは下流からの注文の平均を計算して、その値をそのまま上流階層または醸造工程に持ち込んでいることになる。図 25 によると工場の実効在庫は当初の値である 20 ケースをほぼ維持し、小売の実効在庫はゼロに収斂してその周りで変動している。総費用合計は前述の機械的に最小化を図った場合の 900 ドルに比べて 70%程度大きくはなっているが、工場では実効在庫が変動に左右されず、小売では実効在庫ゼロを目指す方針を掲げることができるので、現場では分かり易い現実的な方針かも知れない。

各階層の実効在庫の変動を相互に比較すると、シミュレーションが 20 週程度進んだ近辺で変化が最も大きい。その大きさの順はブルウィップ効果の現れ方とは逆で、大きい順に、小売、二次卸、一次卸、工場である。また、変動の位相は小売から上流に移るにつれて遅れていることが明瞭に分かる。この位相遅れは、サプライチェーンの挙動における不安定性の主原因の一つでもある。

取り扱う商品によっては、在庫が不足して受注残となったものを後日排出したのでは意味を成さないものもある。受注残を後刻に排出しないでそれを機会損失と見なし総費用の最小化を探索すると、総費用合計は 2000 ドルとなる。受注残を再排出する場合は前述のように 900 ドルであるから、再排出しないシステムのほうが倍以上の大きな費用が発生する可能性があることが分かる。

このビールゲームのモデルは、階層順に情報を伝達するシステムであるが、それぞれの階層の中には3種類の遅れが含まれている。顧客注文を実行するまでの注文リードタイム、決定した上流への注文が実行されるまでの供給リードタイム、変動する顧客注文の期待値を認識するための時間遅れの3種類である。3番目の時間遅れでは、仮に先週の顧客注文の実行された値を今週の期待値とするなら、そこには1週間の遅れが発生することになる。また、複数週間の移動平均を使えば、平均遅れ時間に相当する遅れが発生する。遅れの最小費用に対する影響を見るために、現在の2週間の供給リードタイムを1週間から5週間まで変えて、それぞれに対して最小費用の条件を探索すると最小の総費用は図 26 となる。供給リードタイムが短くなると、その時間にほぼ比例して総費用が削減される可能性があることが確認できる。

このビールゲームのモデルは、階層順に情報を伝達するシステムであるが、それぞれの階層の中には3種類の遅れが含まれている。顧客注文を実行するまでの注文リードタイム、決定した上流への注文が実行されるまでの供給リードタイム、変動する顧客注文の期待値を認識するための時間遅れの3種類である。3番目の時間遅れでは、仮に先週の顧客注文の実行された値を今週の期待値とするなら、そこには1週間の遅れが発生することになる。また、複数週間の移動平均を使えば、平均遅れ時間に相当する遅れが発生する。遅れの最小費用に対する影響を見るために、現在の2週間の供給リードタイムを1週間から5週間まで変えて、それぞれに対して最小費用の条件を探索すると最小の総費用は図 26 となる。供給リードタイムが短くなると、その時間にほぼ比例して総費用が削減される可能性があることが確認できる。

4. 2 POS システムの導入を想定したビールゲームのサプライチェーン・モデル

前節まではビールゲームの仕様に基づいてモデルを構築しているが、この節ではビールゲームの仕様から離れて、図 27 に示すように、小売が受け取る顧客注文がそのまま上流の3階層への注文として伝達され、各階層の注文数の決定に使用される状況を想定する。このようなサプライチェーン・システムでは、決定された各階層の注文がその直上の階層に伝えられ、排出が実行される。小売の POS システムの顧客情報が上流階層で共有される場合と考えてもよい。

ビールゲーム・モデルの原型モデルとこのモデルの構造と機能とを比較して説明するために、代表例として一次卸モデルの注文を受け付けて排出する部分を取り上げ、図 28 に示す。

ビールゲームの原型モデルは図 28 の左側であるが、その下端の顧客注文が注文リードタイム後に顧客注文実行に移り、その情報が瞬時に、排出率と移動平均を求める期待注文とに伝えられている。ここでの顧客注文とは、

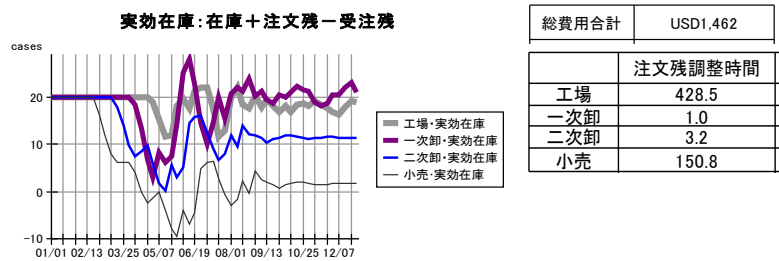


図 25 在庫調整を無視した場合

供給リードタイム	1	2	3	4	5	week
総費用合計の最小値	419	858	1463	1777	2163	ドル

図 26 供給リードタイムによる最小総費用の変化

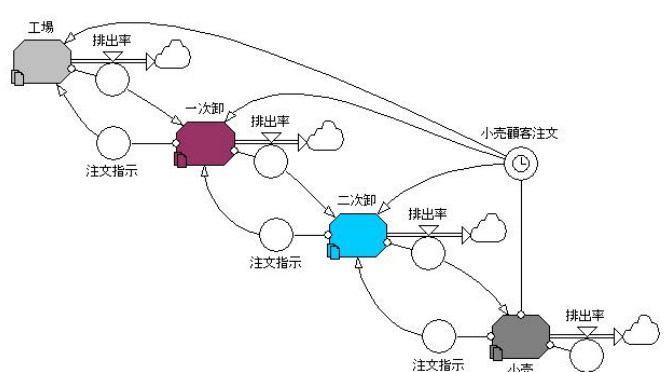


図 27 小売の最終顧客注文を共有する場合

小売に対して最終顧客から伝えられた注文ではなく、小売が最終顧客の注文を認識して二次卸への注文として意思決定した値である。

一方、右側の小売が受け取る最終顧客の顧客注文を共有するモデルにおける顧客注文とは、小売に最終顧客が注文した値である。この顧客注文は注文リードタイムを経て、移動平均を求めめる期待注文に伝えられ、二次卸はそれを認識した後に直ちに注文指示を決定して一時卸に伝える。

二次卸の排出は、小売が最終顧客の注文を認識して意思決定した二次卸への注文指示を、下流注文指示として受けて、注文リードタイム経過後に実行する。小売の顧客注文を共有するモデルでは、下流への排出指令と上流への注文指令が別々のデータに基づき決定される。

サプライチェーンでは、最終顧客の情報を共有することによる効果は大きいと言われている。初期状態を維持する操業中の5週目に、顧客注文が倍になるビールゲームの注文条件の場合に、このシステムの実効在庫と総費用合計をシミュレーションして図29に示す。

この結果は、ビールゲームの原型については図22に相当する。その総費用合計は14万ドル弱であったが、それと比べて今回の結果6000ドル弱で目覚しく小さくなっていて、ブルウィップ効果も現れていない。

次に、この条件の下で、費用最小化の条件を探索して結果を図30に示す。ビールゲームの原型の結果では、総費用合計が900ドルまで低下する可能性が得られている。その設定条件を現場で分かり易くなるように変形した結果では、図25に示すように総費用合計は1500ドル弱になっている。図30によると、顧客の小売情報を共有化する場合には、総費用合計が400ドルまで低下している。

小売の最終顧客の注文を全階層で共有化することによる総費用低減効果は、想定した通り大きいことが確認できた。

5. 結言

サプライチェーンはビジネスの様々な構成要素になっているので、サプライチェーンの構成要素に注目してその単独の挙動と、それを連鎖した場合の挙動とについて計算機実験により分析した。この章では、初めに、前の各章の主要な結果を再整理し、次に、ビジネス領域における計算機実験の活用方法について提言する。

(1) ビジネスの概念モデル

▼振動の発生条件

対象システムに振動が発生するには、以下の条件が満たされている必要がある。

▽バランシング・フィードバック・ループが存在する。

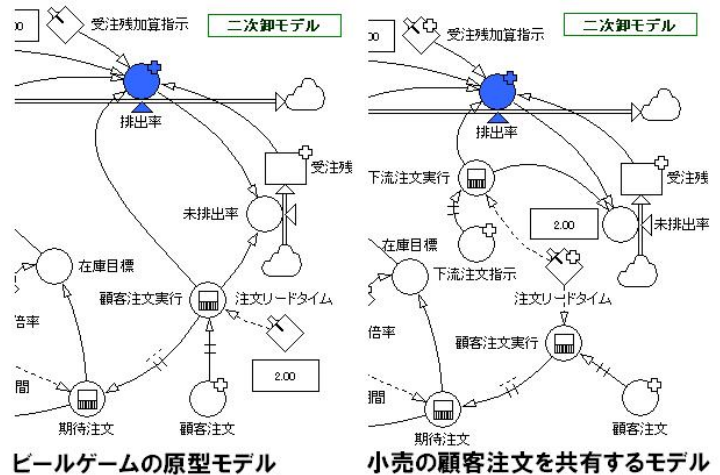


図28 小売の最終顧客の注文と下流階層からの注文の使い分け

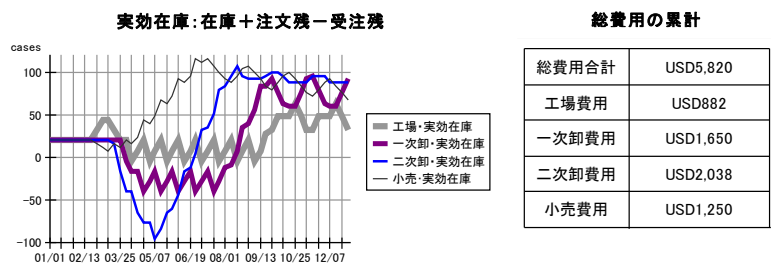


図29 初期状態維持の5週目に注文が倍増した場合

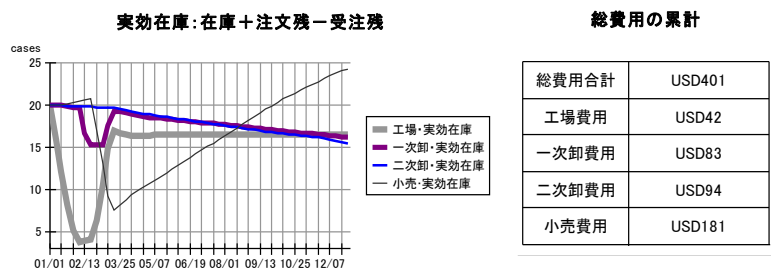


図30 小売の最終顧客注文を共有する場合の費用最小結果

▽そのループ上に遅れが存在する。

ただし、以上の条件を満足していても、必ずしも振動が発生するわけではない。

振動が発生する可能性のある SD モデルでは、何らかの接続がある二つ以上のレベルが存在する。

このような場合に、対象システムの数学モデルは、2次以上の微分方程式で表記される。

(2) ストック・マネージメント・モデル

▼ストック・マネージメント・モデルの適用性

人の意思決定のプロセスは、Anchoring and Adjustment Heuristic (AAH) ルールで説明できる。

AAH ルールを組み込んだストック・マネージメント・モデルは、サプライチェーンの構成要素として適用可能な機能を有している。

ストック・マネージメント・モデルは 40 要素程度の小さなモデルであり、ビールゲームで規定されている費用評価ルールも簡単ではあるが、両者を組み合わせて、費用最小の条件を人が直感的に探索するのは不可能である。

▼人の最適化能力

最小化を PC で機械的に求めることはできるが、人はそのようにして得られた外生変数の値について理論的に整合性を持って説明できることは少ない。

▼望ましいオペレーション

入力条件が顕著に変化する場合には、それに適応してシミュレーションの途中で最適な結果を与える外生変数を PC で機械的に求め、それにより設定条件を切り替えながらオペレーションすると、総合的により望ましい結果が得られる。

▼一般在庫理論の問題点

一般在庫理論に基づいた発注方式では、需要変動に対するサービスの可能性を安全在庫量として設定しているだけで、それはビジネスの評価全体に直接結びついているわけではない。したがって、安全在庫量に関係した係数のみを業績判定に適用したのでは十分とは言えない。

(3) ビールゲームに倣ったサプライチェーン・モデル

▼ブルウィップ効果

ビールゲームの原型モデルで、初期状態維持のオペレーションを実施中に、ビールゲームで規定された注文倍増の入力が与えられると、実効在庫には典型的なブルウィップ効果が現れる。

▼在庫調整の無視による思いがけない結果

在庫管理において全階層で在庫調整を無視して、総費用最小条件で求めたシステムの挙動は、在庫調整を無視しない場合の真の最小総費用に相当する挙動にそれなりに近い。このときの実効在庫の変動振幅はブルウィップ効果とは大きさの順が逆で、小売が最大で、工場が最小である。

▼遅れ時間の影響

最小総費用は、供給リードタイムにほぼ比例して増加する。

▼小売の顧客注文の全階層での共有化の影響

小売における最終顧客の注文情報を全階層で共有して各階層の注文量を求めると、最小総費用は、その注文情報を共有しない場合に比べて約半分になる。

サプライチェーンの諸条件の設計において、階層構造のなかでのダイナミクスを人の経験的な知識だけで推測することは不可能である。また、低次の微分方程式で表現できる程度の簡単な対象システムなら、ある程度は理論的に振動を発生させない安定条件を求めることができるが、少し複雑になれば解析的にダイナミクスを追跡することはできない。そのような場合に工学においては、数値シミュレーションを活用する。

サプライチェーンは、正に数値シミュレーションの適用されるべき領域であり、本稿ではその適用方法についてプリミティブなビールゲームを対象にして論じた。

サプライチェーンの最適化のステップについて以下に整理して提言とする。

ステップ1：評価のために、経営目標に直結した目的関数（目的変数）を選択する。

ステップ2：システム・ダイナミクス・モデルを構築する。

定量モデルのうちの傾向分析用モデルと捉えて、定性的傾向の妥当性を検証する。

ステップ3：設定した目的変数についての最適化を実施し、得られた設計変数値を AAH ルールにおけるそ

それぞれの Anchor 値とする。

構築した対象モデルを使った仮説検証による知識と既存の知識とを総合して、Adjustment 値となりうる変数の組み合わせを、極力、理論的にかつ全体の整合性を保てるように選択する。

ステップ4：Anchor 値と調整した Adjustment 値とを組み合わせ、それぞれの設計変数の現実的な値を設計する。

おわりに

本稿をまとめるに当たって、今回、多分 500 ケース以上の仮想経営を実施した。仮想経営とは、計算機実験であり、数値解析であり、コンピュータ・シミュレーションである。それにより、総費用の最小化条件を数多く求めたが、最小化された総費用を導く設計変数の組み合わせについて、理論的に整然と説明できないことが多かった。それゆえ、具体的なビジネス・システムの設計に結び付けるには更なるチャレンジが必要である。

しかしながら、最適化のツールにより導かれた最小総費用よりも小さい数値が得られる設計変数の組み合わせを、人が理論的に正面から取り組んで追求したとしても、結果的には解には到達できないのが事実である。

革新的な行動をとる場合に、このまま進めて求めたい解が見出せるのか否か、見出せるとした場合にどの程度の満足度が得られる解なのか、それが分からないままに活動するならば、常に多大なエネルギーを浪費し、場合によっては息切れして挫折を味わうことにもなる。その点、最適値が見出されており、仮に、既存の知識ではそれを直ぐには説明できないにしても、それを導いた設計条件が存在することが明確なのだから、マネージャは勇気をもって革新的行動をとり続けることができるのではないだろうか。

日本でも経営分野において、いよいよ計算機実験が不可欠となる時代が目前に迫ってきていると実感している。今回は仮想経営としての計算機実験を、最適化問題に適用する方法に関して提言したが、今後はビジネスの不確実性（リスク）の分析に計算機実験を適用する方法の研究に取り組む所存である。

参考文献

- [1]木嶋恭一、中條尚子編著：ホリスティック・クリエイティブ・マネジメント，丸善株式会社，15 ページ，2007 年
- [2]松本憲洋：モデル・ベースト経営，システムダイナミックス Vol.3，27 ページ，2003 年
- [3]大成幹彦：シミュレーション工学，オーム社，39-72 ページ，1993 年
- [4]J.D.Sterman：Business Dynamics，Irwin MacGraw-Hill，34 ページ，2000 年
- [5]J.D.Sterman：Business Dynamics，Irwin MacGraw-Hill，663-841 ページ，2000 年
- [6]J.D.Sterman：Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in Dynamic Decision Making Experiment, Management Science, Vol.35, 321-339 ページ，1989 年
- [7] [6] の日本語訳 黒野宏則訳：管理者行動のモデル化：ダイナミックな意思決定の実験におけるフィードバックの誤認，システムダイナミックス，Vol.2，79-96 ページ，2001 年
- [8]勝呂隆男：適正在庫の考え方・求め方，日刊工業新聞，35-62 ページ，2003 年
- [9]森田道也：サプライチェーンの原理と経営，新世社，117-159 ページ，2004 年
- [10]光國光七郎：グローバル SCM 時代の在庫理論，コロナ社，62-71 ページ，2005 年
- [11]ラース・トゥヴェーデ著，赤羽隆夫訳：信用恐慌の謎，ダイヤモンド社，195 ページ，1998 年
- [12]MIT の Home Page：http://beergame.mit.edu/guide.htm
JSD の Home Page：http://wwwsoc.nii.ac.jp/jsd/Beer/index.html
- [13]Peter M. Senge：Fifth Discipline，Currency Doubleday，27-54 ページ，1990 年
- [14] [13] の日本語訳 守部信之訳：最強組織の法則，株式会社徳間書店，39-73 ページ，1995 年
- [15]黒野宏則ほか：ビールゲームの改定案，システムダイナミックス Vol.2，53 ページ，2001 年