九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

サプライチェーン形成における数理モデル分析について

時永，祥三
九州大学大学院経済学研究院

岸川，善紀
秋田県立大学経営システム工学科

https://doi.org/10.15017/7630

出版情報：經濟學研究. 72 (1), pp.55-84, 2005-08-27. 九州大学経済学会
バージョン：
権利関係：

サプライチェーン形成における数理モデル分析について

時永 祥三　　岸川善紀

1　まえがき

情報システムとインターネットを基本とする企業の経営情報システム形成が標準的になるにしたがって, これまでの企業間の連係関係を再構築する方法がとられるようになっている。その代表的なシステムとして, サプライチェーンの形成がある [1]-[2]。また, 不特定の企業の間で電子的なマーケットが創造され交互の部品調達を実現する, いわゆる B2B(Business to Business) の仕組みや, 企業とその協力企業などとの間で部品の調達を電子化する, いわゆる電子調達なども同様な試みであろう [1]-[6]。また, 自動車やコンピュータ製造で導入されているモジュール生産の方法論も, 同様に独立した企業の間の連係を目指すものである。本論文ではサプライチェーンという用語をやや広い意味にとらえて, このような電子的な企業間の取引関係の構築における数理モデル化の現状を分析する。

これまでの研究において, さまざまなサプライチェーン形成の事例分析や, システム (サプライチューンマネジメント) を実現するためのソフトウエアの紹介などがなされている。特に, システム実現にあたっては, 従来の伝統的な部品仕掛在庫や, 製品在庫管理の問題を改善する TOC(Theory of Constraints) による理論が大きな役割を果たしている。

しかし, 一方では, サプライチェーン形成における問題を数理モデルとして定式化し, 分析する方法に関しては, 開始されたばかりであると言えるであろう [6]。これまで, われわれはこの分野における研究において, 電子商取引におけるオープンネットワークの役割分析を企業アンケートをベースにして実施したり, 企業間の情報共有が在庫管理に果たす効果を分析するモデルを提案した。しかしながら, これらは, やはり部分的な分析であるといえ, 今後のサプライチェーン形成に課題を解明するには, 更に一般的なモデル分析が必要であろう。

本論文では, このようなサプライチェーン形成に関する数理モデル分析の現状を分析するとともに, われわれの行っている研究との関連性を中心として, 今後の課題と展望について述べる [3]-[6]。具体的には, 複数の階層関係をもつ企業間の利益構造からみた連係関係分析, 企業間連係における契約とその有効性, 企業間の情報共有がもたらす効果分析などである。特に, 最近ではゲーム理論に基づいた均衡モデルの導入や, エージェント理論の援用などにより興味ある結果が得られており, 今後の展開に大きく寄与すると思われる。しかしながら, サプライチェーン形成のモデル分析は, 伝統的な生産システム分析モデルや在庫管理の理論をベースにしており, まったく別のものとは言いがたい。また, 以前に実施された研究においても, 現在での基礎的な方法論を与えているものも少なくない。従って, 本論文では, これらの研究も含めて数理モデル分析の現状を整理していく。

以下,2. ではサプライチェーン形成と数理モデル分析の全体像について述べ3. ではサプライチェーンにおける利益シェアリングについて示す。4. では情報共有の効果分析について述べる。また,5. ではサプライヤに起因するリスクとオプションの分析について述べる。ではエージェント理論による分析について述べ,6. では製造と品質保証のモデル分析を示す。

2　サプライチェーン形成と数理モデル分析

2.1　サプライチェーン形成の意義

製造過程における多品種少量製品の一般化や, ライフサイクルの短縮化などの要因により, 企業が単独で, すべての製造工程を構築し管理する方法に, 大きな変更を加える必要性が生じている。このように, 製造工程や管理システムを分割し, 簡素化する議論は, 以前からも経営管理のモデルとして取り入れられている。その詳細は省略するが, 中間管理職の役割の見直しによる組織の簡素化や, 分社化による経営の効率化などの方向性は, これらを代表するものであろう。特に, 自動車産業においては, 日本のメーカが早期から取り入れている, いわゆるカンバン方式に対して, 自社製造を基本としていた米国メーカとの対比が議論された結果, 現在ではカンバン方式は, いわば世界標準となっている。

このように, 自社製造を適切な段階に分割して, それぞれを別の経営主体や自社の独立した部門の任せる方法論を定式化したものとして, サプライチェーンをとらえることができる。もちろん, 何をさしてサプライチェーンと呼ぶかなどの定義をめぐっては, 現在でも多くの議論があると思われるが, 本論文の目的からは外れるので, 詳細は省略する (最初に述べたように, 本論文ではサプライチェーン形成を, やや広い概念としてとらえておく)。

このようなサプライチェーンマネジメントを実施する場合には, 情報システムの導入や再構築が前提とされることが多い。情報システムの導入や, これを用いた取引の電子化の効果については実際にはそれほど多くの調査は存在しないが, 電子商取引に関して米国企業を対象に実施された結果はよく知られている。この調査が実施された時点では, 電子商取引に類する電子化された情報交換を本格的に実施している業界は, 自動車業界と電機業界がその大半を占めていた。従って, 製造業でも, ごく限られた業界にとどまっていたが, 現在ではこの比率は大幅に低下している。すなわち, 電子的な取引は多くの業界に拡大した結果として, 上にあげた自動車と電機業界の比率が低下している。

このように, 取引の電子化に代表されるサプライチェーンの導入, 特に, これを情報システムを中核として構築する効果には, 極めて大きなものがある。

2.2　サプライチェーン形成のモデル

サプライチェーン形成を実行する効果分析は, 今後もさまざまな形で行われるであろう。そこで, 以下では, サプライチェーン形成が効果的であるシステム構成を, 代表的なモデルを示すことでまとめておく。なお, モデルを示すことにするが, 必ずしも生産プロセスのモデルに限定されないで, サプライチェーン形成を考察する場合に, 対象となるであろう課題を図示することが目的で

ある。

(1) 顧客情報の多元的活用

Dell コンピュータ社のパソコン受注システムに代表されるシステムであり, 顧客からの製品注文の情報は, そのまま製造計画に反映されると同時に, 完成品を配送するための物流システムへも情報の伝達が行われる。同様なシステムは, 航空機製造のボーイング社でも構築されており, 顧客 (この場合には航空機を運用する航空会社) がボーイング社のエクストラネットを通じて, 修理部品の入手などを行うことができる。

サプライチェーン形成における顧客情報の多元的活用のメリットとしては, このような中間レベルの情報の中継を省略することができ, 情報共有 (information sharing) をはかることができることがある。

一方では, 顧客との間で情報を共有するためには調査などのコストが発生する。また, 同時に, 顧客の提供する情報が信頼できるものであるとは限らない問題がある。従って, 市場の需要情報を共有する効果の分析と同時に, その効果分析をコストのレベルで検証する必要がある。

(2) 在庫情報の多元的活用

製鉄会社などで見られるシステムであり, 第 1 次製品である鉄鋼鋼材を在庫として管理する倉庫の在庫状況を, 関係するさまざまな主体が, 情報として共有する仕組みである。製鉄会社の場合には, 特に, 第 2 次的な製品を製造する協力会社との関係を効率化するとともに, 製鉄会社のリスクを軽減する目的で, 中間に商社を介在させる取引が通例となっている。この場合, 従来の方式では, この商社を仲介として在庫の管理と配送が行われており, 常に余剰在庫を考慮する必要があった。しかし, この在庫情報を, 関連する企業が共有することにより, 在庫情報が的確に伝達され余剰在庫問題は解消される方向にある。

自動車産業におけるカンバン方式を基礎とする在庫管理の方法は, よく知られているので, ここでは省略するが, 上にあげた鉄鋼会社におけるシステム構成と同様なモデルとしてとらえることができるであろう。

商品や 1 次的な生産財を在庫として管理する場合には, 市場の急激な変化で, もはや商品としての価値をもたなくなる危険性もある。いわゆる, 在庫リスク (inventory risk) の発生である。この在庫リスクを考慮して生産する場合には, 商品を早期に売り払ってしまうことや, 注文があった時点で契約成立と見做す, 等の方法論も可能である。しかし, 本来的には, このような在庫リスクを回避するための情報交換, すなわち, 情報共有の仕組みを導入することが必要となっている。

(3) モジュール生産と価格数量決定

モジュール生産による生産方式に関する議論は, 最近開始されたばかりであり, この定義や効果分析に関しては, 今後の課題であろう。しかし, 自動車業界をはじめとして, 企業間の競争が激化しているケースでは, 新技術の取り入れや環境対策に大きなエネルギーを割く必要があるため, 従来の枯れた技術部門を他社に委託する方法が取り入れられている。日本では, 日産自動車が数年前から本格導入をはかっており, これに連動する形で, モジュール生産をになうアセンブラの再編がなされている。

モジュール生産を自動車製造を例にして示すと, アセンブラとよばれる部分モジュールを担当する企業は, あらかじめ工場の外部でモジュール部分を製造して, 組み立て工場に持ち込み, 本体に組み入れる。あるいは, 工場外部で製造が難しい場合には, 工場の内部にサブのラインを構成し

て, 本体の脇でモジュールを完成させ組み込む。

このようなモジュール生産では, 従来の生産システムのようなメーカ側からサプライヤ側への一方的な価格と製造数量の設定ではなく, 理論的には双方が, 自己の評価関数を最大化する取引がなされることになる。これは, 広い意味でのゲーム理論であり, その双方の評価関数をともに最大化する解, すなわち均衡解が存在するかどうかを判断する必要がある。

(4)e-マーケットプレイス

特定の企業どうしが, 部品や製品の取引に関する情報をネットワークで伝送したり, エクストラネットを介して共有するなどの事例と反対の極にあるものとして,e-マーケットプレイス (e-marketplace) がある。この e-マーケットプレイスに関しては, 数年前までは有力なビジネスモデルであり, 高度成長が期待できるとの見通しであった。しかし, 米国での実績や, 日本での現状から見て, その範囲や市場規模は限定的であることが明らかとなってきている。米国では, 研究用の資材の調達などで, 今日でも有効なシステムであるとの評価があり, 日本でも事務用品などに代表される間接財を購入するサイトとして活用されている。

しかし, 当初期待されたネット上での新規企業の参入や, 余剰在庫の活発な取引は実現されてはいない。この問題点については, ソニーや NEC などの電機産業の企業の経験からも明らかなように, 日本では取引相手の企業の信用調査に長い時間がかかることや, このような新規企業を製造工程にスムーズに組み込む有効な手段がないことが理由となっている。従って,e-マーケットプレイスには必ず商社が介在しており, この商社が製造業の企業に代わって, 新規参入企業の信用力調査や, これに起因するリスクをカバーしているのが実態である。

(5) トレーサビリティと品質保証

市場の出された商品の流通過程において, 商品の所在や, 在庫の有無の管理に RFIC タグなどを利用した管理が導入されている。先進的な取り組みとして紹介されている米国の例では, スーパーマーケットの Walmart が納入業者に義務付けており, 米国国防総省 DoD への武器などの納入に関しても, RFIC タグの導入がはかられている。その効果については, おおよそ予測できるが, 日本の場合には, 導入コストと効果とのバランスに議論があること, 更に, タグ導入にともなう費用負担を誰が行うかなど, 不透明な部分の存在するため, 限定的な導入にとどまっている。また, 日本の場合には, 牛肉や生鮮野菜などの食品が主流であり, 米国のような広い範囲をカバーしていない問題がある。

トレーサビリティを考察する場合には, 商品の品質保証などのほかに, 製造業の場合には, 着実に協力業者からの部品納入を保証するなどの, リスク管理の側面も重視される必要がある。従って, 流通段階における所在管理だけではなく, その途中での損傷などのリスクを, どのように, 誰が分担するかのルールと関連させた議論が必要となる。

3　サプライチェーンにおける利益シェアリング

3.1　操作の柔軟性分析

サプライチェーンにおけるメーカとサプライヤの関係に代表されるような, 調達を実施するかどうかを決定する問題は, 主として為替レート変動などの不確実性がある要因を前提として議論さ

れている。この研究の歴史はそれほど長くはない。1980 年代から 1990 年代にかけて, McDonald and Siegel, Dixit, Pindrick などの研究者により, いわゆる投資選択の問題として定式化され, 投資を休止するか, 投資により市場に参入する時期を決定する問題として議論されてきている。この問題は投資決定問題 (irreversibility, uncertainty in investment) とか参入撤退問題 (entry and exit under uncertainty) と呼ばれている。これらの研究においては, 連続型のベルマン方程式を基礎として, 関数解析から決定の性質を議論している。

製品開発投資の参入・撤退のタイミングに関する議論は, McDonald and Siegel [7][8], Pindyck [9], Dixit [10][11] などにより行われている。特に, Dixit による解析方法では製品開発投資の参入とこれよりの撤退を 2 つの状態として区別し, 投資環境が変化した場合に対応するモデル化を行っており, これを含まずに投資や退去が継続される McDonald and Siegel らのモデルの不備を指摘している。また,Dixit のモデルでは, 投資により参入した後に撤退を行うことによるサンクコスト (Sunk Cost) や低価格における制限との関連を考察しており, 結論的には参入を開始するタイミング, 投資を継続する時期, 撤退のタイミングなどが価格情報として示されている。

その後, 為替レート変動を前提として, 工場の立地を国内に求めるか海外に求めるかの決定を, 動的計画法の問題として定式化し, 数値的な計算と決定の性質を議論する研究がなされている [12]。投資や資源配分を柔軟化することによる利益を見積もる問題であることから, 一般に操作の柔軟性分析 (operating flexibility) と呼ばれている。また, 株式市場における株式オプションの評価方法を投資の応用する言う意味で, 最近では, リアルオプション (real option) という呼び方も一般化している。この分野の研究としては,Kogut and Kulatilaka, Huchzermeier and Cohen による研究などがある [12][13]。Huchzermeier による研究では, プロジェクトへの投資問題への拡張がなされている。近年, ファイナンス分野においてリアルオプションが, 従来の株式オプションの理論の応用として注目されている。リアルオプションの応用範囲は極めて広く, 石油などの取引から, 不動産の取引, あるいは企業への投資案件 (とくにベンチャー企業への投資など) を含んでいる。

これらの問題では, 裁定なしなどの条件を満足することを前提としながらも, やや複雑な原料の調達や製造のネットワークを仮定すること, 複数の通貨の間の相対的な変動相関などを取り入れることができるなどのメリットがある。また, 連続型では明示的に導入することが難しかった切り替えコストを, 容易に導入することができるメリットがある。

これらの問題の定式化においては, 条件の設定は一様ではないが, ほぼ次のような手順をとっている。最初に, 基礎となるベルマン方程式を導出する。これを解くことができる場合には, 解析解を求める。しかし, 問題がやや複雑になると, もはや解析解は期待できないので, 動的計画法によるバックワードの数値解を求める。さまざまな条件のもとで, この解決定の性質を検討する [15]-[17]。

決定の検討では, 操作の柔軟性による利益を見積もることと, この効果を分析することに重点が置かれている。その評価による結論として, 為替レート変動などが小さい場合や, 切り替えコストが過大である場合には, 操作の柔軟性の優位さは失われるであろうという点にある。あるいは, この切り替えに必要な情報の収集における問題を議論した研究もある。

投資問題においては時間を逆にたどることはできないが, 最適な時期まで投資をまつ, あるいは投資している場合にペイしないと判断し撤退する時期を決定する方法は可能である。このような選択は, 株式オプションにおけるオプションと同様であり, 投資すなわち資産の所有に関する権利を, 留保することに対応している。これにより, 投資により得られる利益を最大化しながら, 同時

に付随するリスクを限定することができる。このような投資における柔軟な選択を, 株式投資におけるオプションと同様に考え, リアルオプションとよぶ。

3.2 離散時間表示と動的計画法による解法

リアルオプションの例題とその動的計画法による解法を以下に例示する。以下での定式化は, 主として文献 [14] に従っている。いま, 時刻 t における設備のレベルが i であるプロジェクトの価値 (project's value) を $V_i(t)$ とすると, これは一般的に, 完成されるべき設備の能力, コスト, 市場での需要, および時間の関数になる (変数として表現することを省略している)。これらの変動要因の中で, 以下では, 設備の能力と市場の需要を総合したもの (これを市場でのペイオフとよぶ (payoff)) を 1 つの変数とし, これらのほかに, 関数 $V_i(t)$ を設備の能力と時間 $t = 1, 2, ..., T$, コストにより表現しておく。

時刻 t における設備のレベル, 状態は, 数値 i により代表させる。ただし数値 i は整数ではなく, 一定の範囲にある離散的な実数の集合である。更に, 設備の能力が高いほど市場でのペイオフは大きくなる傾向にあるので, これを 1 つの分布関数 Π_i により表現する。関数 Π_i の代表例は正規分布関数 (密度関数の積分) であり, 状態 i が増加するに従って, 関数値は単調に増加する。投資の最終時刻を T とすると, 投資の最終価値は $V_i(T) = \Pi_i$ により表現される。設備の状態は, 確率的な変動をするとともに, 投資の状況によっても変動すると仮定する。最初に, 継続的な投資を実施する場合を考察する。

状態が離散的な値をとることを前提としながら, 時刻 t と $t+1$ との間で, 次のような状態 i から j への遷移を行なうと仮定する。ただし, i, j, ε_t はすべて整数である。

$$j = i + \varepsilon_t \tag{1}$$

ここで, ε_t は平均が μ で分散が σ である正規乱数である。以下では, 簡単のため, $\mu = 0$, $\sigma = 1$ としておく。

ただし, 状態 i は $2N+1$ 個の離散的な集合から選択されると仮定しているので, ε_t の値も, $2N+1$ 個に離散化されている。具体的には, ε_t の変化幅を $\Delta\varepsilon = 1$ とした場合に, ε_t が $+k, -k$ 番目の値をとる場合には, それぞれ, $\varepsilon_t = k, \varepsilon_t = -k$ とする。このように $k = -N, ..., -1, 0, 1, ..., N$ となるように離散化され, 状態 i から状態 j への遷移の大きさが正規分布をする。なお, 状態が境界値を越える場合には, この境界値に収容する処理を行なう簡単化を行なっている。

プロジェクトにより施設を建設する問題を考え, プロジェクトは, 完成時刻までの間に確率的な変動の影響を受けると仮定し, 施設が時刻 t で持っている能力を i とする。時刻 $t = 0$ から時刻 $t = T$ まで, 確率的な変動過程をたどって, 最終的に施設は完成される。

次に, このように中間段階におけるプロジェクトの状態は変動過程に従って変化するので, これを制御する方法について考察する。プロジェクトを進行する管理者は, 初期投資と, このような追加投資を考慮し, 次に示す 4 つの投資の状況のいづれかを選択すると仮定する。

1) 投資をあきらめる (abandon)
2) 投資を縮小する (shrink)
3) 通常の投資をする (continue)

4) 追加投資をする (improve)

投資をあきらめた場合には, この時点までの企業価値はゼロに戻ってしまうが, 投資を継続しても意味がないと判断した場合にはこれを選択する。

通常の投資では, 式 (1) に示すようなプロジェクトの状態遷移が実現する。更に, 追加投資を選択した場合には, 式 (1) に示す状態遷移ではなく, 一般にプロジェクトの状態が改善されるような, 次に示す遷移を行うと仮定する。

$$j = i + 1 + \varepsilon_t \tag{2}$$

同様に投資を縮小した場合には状態が悪化するので次のような状態の遷移をすると仮定する。

$$j = i + 1 + \varepsilon_t \tag{3}$$

同様に投資を縮小した場合には状態が悪化するので次のような状態の遷移をすると仮定する。

$$j = i - 1 + \varepsilon_t \tag{4}$$

プロジェクトの進行にあわせて, どの状態を選択することが有利であるかを求める問題となる。

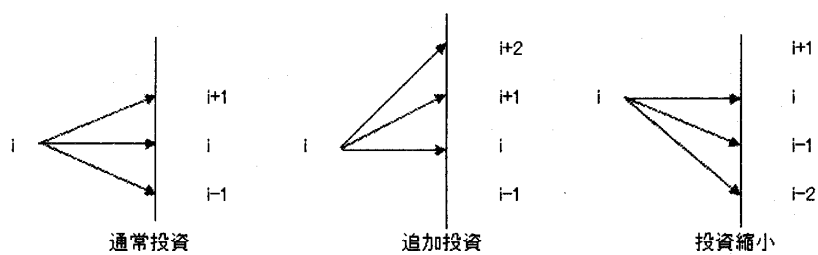

図 1. 投資選択と状態遷移の関係

追加投資により, プロジェクトの価値 $V_i(t)$ がたかまることが予想されるので, 以下では, 追加投資と状態遷移には相関があると仮定する。通常投資の費用を $c(t)$, 追加投資の費用を $\alpha(t)$ とする。また, 投資縮小による投資削減の大きさを $d(t)$ とする。

投資の期間 (長さ T) を通じて, プロジェクトの価値を最大とする計画は, 動的計画問題として記述すると, 状態を表す添字である i を用いて, 次のようになる。

$$V_i(T) = \Pi_i \tag{5}$$

$$V_i(t) = \max \begin{cases} 0, & \text{abandon ;} \\ -c(t) + d(t) + \eta \sum_{j=-N}^{N} p_{ij} V_j(t+1) & \text{shrink;} \\ -c(t) + \eta \sum_{j=-N}^{N} q_{ij} V_j(t+1) & \text{continue;} \\ -c(t) - \alpha(t) + \eta \sum_{j=-N}^{N} r_{ij} V_j(t+1) & \text{imporve ;} \end{cases} \tag{6}$$

ただし, $\eta = 1/(1+\rho)$ (ρ は割引率) であり, p_{ij}, q_{ij}, r_{ij} は, 式 (3),(1),(2) に示す状態推移に対応する確率であり, それぞれ, 投資の縮小, 通常投資, 投資増強における状態変化の確率である。Π_i はプロジェクト終了時における状態 i に対する評価値 (ペイオフ) である。

3.3 サプライヤのリアクションモデル:ゲーム理論による均衡分析

しかし, 最近,Kamrad and Siddique により提起された問題は, これらの静的な評価とは異なり, メーカとサプライヤの双方に利益を還元する構造や, サプライヤの側にも選択権を与えるモデルであり, 興味ある研究である [18]。これまでの議論では, メーカに主導権があり, サプライヤの選択や工場立地を一方的に選択できるモデルを仮定している。しかし, 現実には, サプライヤの側でもメーカの過大な要求を拒否できる権利や, 別のメーカとの比較検討の余地が残されているはずである。すなわち, サプライチェーンを形成するメンバーの間での win-win の構造を保証するモデルが必要とされている。

このモデルでは変動要因として相手国の為替レートをとっており, 原料の調達をこの国から実施することが有利かどうかをメーカが判断する形となっている。そのために, 複製ポートフォリオ (replicating portfolio) を構成し, 為替レート変動により無裁定となる条件を求めている。このようなオプション評価の理論が含まれて入るが, 基本的には操作の柔軟性の基本的な手法を用いて, 調達を切り替えることが, どの程度利益の向上に有利かを求める方法となっている。

しかし, これまでの操作の柔軟性の議論と大きく異なっているのは, メーカがこのような原料の調達を自由に選択できる半面として, サプライヤのサイドにおいても, 調達の割合を減らされた場合にはそれだけ値段の高い原料価格を設定できること, および, 一時的に調達の割合を減少させることができる範囲を設定できることにある。メーカ側の最適政策は, 次のようになる。

$$\max_{q,u}\sum_{j=1}^{M}V_{X_j}(r_p-r_j)+V_R(D-q)+0.5\sum_{j=1}^{M}V_{X_j{}^2}X_j^2\sigma_j^2+V_t+\sum_{j=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}V_{X_iX_j}X_iX_j\sigma_i\sigma_j\rho_{ij}+$$

$$P(t)D(t)-]A(q(t))+H(R(t))+\sum_{j=1}^{M}C_j(u,\varepsilon,t)+\sum_{j=1}^{M}(\varepsilon_j))-r_pV]=0 \tag{7}$$

ただし,X_j は国 $j=1,2,...,M$ における通貨の変動を記述するブラウン運動により記述される過程に従う確率変数であり,σ_j はこれを与える分散, ρ_{ij} はこれら通貨 i,j の相関行列である。r_p,r_j はメーカおよびサプライヤが立地する国 p,j における無リスク資産の利子率である。$P(t)$ は商品価格,$D(t)$ は商品需要,$R(t)$ は商品の在庫レベル,$q(t)$ は商品の製造数量,$A(q(t))$ は商品の生産コスト,$H(R(t))$ は在庫保有コストである。関数 $C(u,\varepsilon,t)$ が特有のものであり, サプライヤのマージン率 (gross margin rate) である。u_j は国に立地するサプライヤからの調達割合で,u はこのベクトルである。調達が減少するとマージンが増加するので, $\partial C_j(.)/\partial u_j<0$ とする。$\pi_j(\varepsilon_j)$ はサプライヤが許容する通貨リスクの範囲を限定する関数 (supplier defined penalty band) である。

$$|u_j(t)I(t)-u_j(s)I(s)|>\varepsilon_j(t) \tag{8}$$

$I(t)$ は原料の全投入量である。関数の定義から $\partial\pi_j\varepsilon_j(t)/\partial\varepsilon_j>0$ であるとする。

一方, サプライヤ j の最適政策は, 契約することによる価値 $W_j(.)$ に関して, 次のようになる。

$$\max_{C_j,\varepsilon_j}[\sum_{k=1,k\neq j}^{M}\partial W_j/\partial Y_{jk}Y_{jk}(r_j-r_k)+0.5\sum_{k=1,k\neq j}^{M}\partial W_j^2/\partial Y_{jk}^2Y_{jk}(\sigma_j^2+\sigma_k^2-2\sigma_j\sigma_k\rho_{jk})$$

$$+\partial W_j/\partial t+\pi_j(\varepsilon_j(t))+C_j(u,\varepsilon,t)-r_jW_j] \tag{9}$$

$$Y_{jk}(t) = X_j(t)/X_k(t) \tag{10}$$

このモデル化により, メーカにおける最適政策とサプライヤにおける最適政策を, それぞれベルマン方程式により記述することができる。

しかし, このモデル化の式は複雑であり, 解析解は求められないので文献においては, 等価な方法として動的計画法による数値解を求めている。具体的には, 2つの通貨, すなわち原料の調達先の国が2つである場合に, 為替レート変動がリスク中立となる5つのケースを設定し, 再帰式を解析的に求めている。この再帰式をもとにして, 操作の柔軟性を用いない場合, すなわち2つの国の中の1つからしか原料を調達しない場合と比較した利益の増加幅を推定している。

このシミュレーションで問題となっているのは, メーカとサプライヤの双方における最適政策が存在するので, この両者が均衡するところを求める必要があることにある。すなわち, 繰り返し計算により, はじめてメーカとサプライヤの双方が満足できるマージンと, 調達抑制のレベルが決定できる。いわば, ゲーム論的な定式化ではあるが, 繰り返し計算による解法である。

3.4 モジュール生産システムと利益共有

モジュール生産における部品価格の決定, と生産設備の増強のレベル (生産容量) の決定を, ゲーム論的な方法で定式化した研究がある [19]。3階層のモジュール生産システムを仮定し, 最初の部品を製造する企業をサプライヤとよび, これを基にして組み込み型のモジュールを製造する企業をサブアセンブラとよび, 最終的に部品を全部組み立てて市場へ送り出す企業をアセンブラと呼んでいる。この3階層のシステムにおいて, アセンブラは1社であるが, サブアセンブラとサプライヤは複数存在すると仮定し, サプライヤはサブアセンブラのもとで, 階層構造をなしているとする。

この3者のそれぞれに, 生産コスト (単価), 部品あるいは製品モジュールの価格, および上層からの部品の調達率が変数として与えられている。最初に, 生産コストと調達率を固定した場合の問題が, 最適化問題として定式化され, それぞれの主体が, どれだけの生産容量を投じれば良いかが解として与えられる。

(サプライヤ)

$$\max_{Q_{ij}} \pi_{ij} = -k_{ij}Q_{ij} + (\alpha_i\gamma_{ij} - c_{ij}E[\min(Q_{\min}(Q), D] \tag{11}$$

(サブアセンブラ)

$$\max_{Q_i} \pi_i = -(k_{i0} + k_i)Q_i + (\alpha_i\gamma_{i0} - (c_{i0} + c_i)E[\min(Q_{\min}(Q), D] \tag{12}$$

(アセンブラ)

$$\max_{Q_0} \pi_0 = -k_0Q_0 + (\alpha_0\gamma_0 + (\alpha_0 - c_0)E[\min(Q_{\min}(Q), D] \tag{13}$$

これらの式において,γ, c, k はそれぞれ下位の構成員への支払い比率,c, k は上位の構成員のための部品を製造するためのコスト (unit cost for component production), 設備コスト (unit capacity cost for component production) である。これらの変数についている添え字は, それぞれ自分から相手への方向を識別するためのものである。Q は選択された生産容量である。

この問題の解法は, 従来から存在する newsvendor problem の解法により求められる。

次に, 生産コストと調達率が変化する場合のモデルが示され, 同様に, それぞれの主体における最適な生産コストと調達率を決定する方法が示される。しかし, 基本的に, それぞれの主体が均質であることから, 解は1つの主体だけについて解けばよいとされ, 解の形式は第1番目の主体についてだけ示される。

4 情報共有の効果分析

4.1 基本モデル

製造工程における上流工程と下流工程における生産情報のやりとりが, 製品の仕掛在庫に大きな影響を及ぼすことは, 従来から議論されている。しかし, これは単独の企業内部における課題である場合には, 内部の情報システムを高度化することにより, 解決可能な部分も少なくない。しかし, 現在ではサプライチェーンのもとでの製造を前提とした場合には, 必ずしも情報の伝達がうまくいくとは限らない問題がある。すなわち, メーカとサプライヤの間, あるいは卸売り業者とこの製品を製造する企業との間における, 製造数量の決定をめぐる問題が発生する。これを, 企業間の情報共有の問題として分析する方法論が提案されている。

仕掛在庫数量の分析まで研究をさかのぼると, 多くの研究が存在するが, 現在行われているこの分野の研究に大きな影響を与えた点から考察するとに,Bullwhip Effect 関する議論と, 情報共有 (information sharing) による在庫コスト削減見積もりの研究が代表的なものであると言えるであろう。この分野では, Cohen による研究,Lee,So and Tang による研究がよく知られている [20]-[24]。

SCM 分析の場合に, 多段階のシステムとして表現される全体の分析について, 2段階の部分システムに分解して行うことが多い。2段階の部分システムを, 例えば注文を出す小売業者と製造する製造業者として考察した場合に, 情報の差異により, 実際に市場で発生している需要と, メーカが受けとる要求生産数量が, 大きく隔たる場合が発生することが知られている。これを Bullwhip Effect と呼んでいる [20]。すなわち, 市場の実際の需要情報が拡大・歪曲され, 牛の尻尾のように大きく振動することを指している [20]。

Bullwhip Effect 発生の原因として, 次のようなものがあることが数理モデルを用いて分析されている。

(1) 需要情報の処理と共有方法 (Demand Signal Processing)
(2) 製品獲得の競合 (Rationing Game)
(3) 注文のバッチサイズが大きい (Order Batching)
(4) 製造業者の価格政策 (Price Variation)

4.2 LST モデル

Lee,So and Tang の研究 (このモデルを, 著者の頭文字をとって LST モデルと呼ぶ) においては, 卸売り業者とメーカの間において, 市場での販売数量の見積もり誤差 (需要の予測誤差) を両者が共有することにより, 製品在庫を削減できることを示している [22]。

また, われわれの研究においても, 予測モデルが未知である場合に, 多段ファジイ推論システム

を用いてモデルを推定しながら, 需要情報を共有した場合の効果に関する分析を行っている [15]-[17][25[26]。その結果として, モデルで用いられている需要の回帰モデル (AR(1) モデル) よりやや複雑な需要カーブが推定されるが, この推定の精度は必ずしも需要予測には完全には反映されないこと, 実際の需要は複雑な動きをしており, モデル化に工夫が必要であることを結論として与えている。

このような, 需要カーブ推定の問題などが存在するが, サプライチェーンにおける情報共有の効果分析の方法論として,Cohen, LST らの研究は, 現在でも基本となっている。2 段階のシステムを部分システムを仮定し, 注文を出す小売業者と製造するメーカが存在する。卸売業者の行なう需要予測と, これに基づく製造業者の製造数量の決定にいたる手順について, 文献 [22] のモデルをもとに, 簡潔に次に示すことにする。

市場における製品の種類は 1 つであると仮定し, 製造する業者と, この業者から製品を購入する小売業者を仮定する。時刻 t における市場での製品の需要 D_t は, AR(1) モデルに従って変動すると仮定する。

$$D_t = d + \rho D_{t-1} + \varepsilon_t \tag{14}$$

ここで, $d > 0, -1 < \rho < 1$ であり, ε_t は平均ゼロ, 分散 σ^2 の正規乱数である。小売業者, 製造業者は製品の在庫のレベルを定期的に点検すると仮定し, 製造業者は部品業者から部品を納入してもらう場合に要する遅れ時間 (リードタイム) を L とする。同様に, 小売業者が製造業者から製品を受けとるまでのリードタイムを l とする。現在の時刻 t における需要 D_t が分かったあとに, 小売業者は在庫レベルを参考にしながら, 製造業者への注文数量 Y_t を決める。

一方, 製造業者は, 時刻 t において小売業者が求める製品需要量を満たす行動にでる。もし, 注文数量を満たすことができない場合には, いくらかの追加的なコストを負担して, 注文数量を満たす。このようなシステムは bakcorder と同様な規則で動くことになる。

小売業者の注文決定ルール

最初に, 小売業者の時刻 t における注文数量 Y_t の決定ルールについて関係式を導出する。これまで説明した関係より

$$Y_t = D_t + (S_t - S_{t-1}) \tag{14}$$

となる。ここで, S_t, S_{t-1} は時刻 $t, t-1$ における製品在庫レベルである。Y_t はマイナスとなる可能性もあるが, 以下では, ρ が d に比較して十分小さいと仮定し, Y_t は常にプラスであると仮定する。

このような前提のもとで, 期間 $t+l+1$ における在庫費用を最小化する戦略を考える。式 (2) に示す関係より, この期間における需要の合計は,$D_{total} = \sum_{i=1}^{l+1} D_{t+i}$ により与えられる。

次に, D_{total} の平均と分散を計算し, それぞれ, m_t, v_t としておく。m_t, v_t は, リードタイム l にかけての需要の条件付平均 $m_t = E(D_{total}|D_t)$ と分散 $v_t^2 = Var(D_{total}|D_t)$ である。計算の結果,m_t, v_t は l と d, ρ, D_t, σ を用いて表現することができる (詳細は文献 (8) に示されているので, 省略する。$v_t^2 = \sigma^2 v$ となる,v は定数)。

このとき小売業者のとるべき (s,S)-policy のもとでの在庫レベルの最適値は, 次の式で与えられることが示される。

$$S_t = m_t + k\sigma\sqrt{v} \tag{16}$$

ただし, $k = \Phi^{-1}[p/(p+h)]$ であり, $\Phi(.)$ は標準正規分布関数であり, h, p は holding cost, storage cost である。これと式 (16) における第 2 項が定数となることを用いて式 (15) を変形すると, Y_t を ρ, l, L, D_t, D_{t-1} を用いて表現することができる (結果は省略する)。

製造業者の製造数量

次に, 製造業者の最適な製造数量について考察する。ここで, 製造業者は小売業者とのやりとりで, 需要の AR(1) 過程についての情報をもっていると仮定する。すなわち, 式 (1) に含まれるパラメータについて, 知っていると仮定する。この関係を用いて, 製造業者は小売業者の注文数量 Y_t を基礎として, 真の需要 D_t を推定することを行なう。

時刻 t において, 製造業者は小売業者からの注文を受けつけるとともに, 時刻 t においてリードタイムにわたる製品の在庫レベルを回復するための部品の注文を, サプライヤに対して行なう。その結果, 補充のための部品が時刻 $t+L+1$ に製造業者に到着する。

この場合, リードタイムにわたって回復すべき在庫レベルを決定するために, 製造業者は全部の需要を推定する必要がある。その数量は, 小売業者から製造業者へとあげられた製品要求の和となるので, $B_t = \sum_{i=1}^{L+1} Y_{t+i}$ となる。これを, 式 (1)〜(3) の関係を用いて計算を実施することにより, B_t を求めることができる。次に, B_t の平均 M_t と分散 $V_t(= \sigma^2 V)$ を計算する。これは, Y_t, d, ρ, l, L および正規乱数の関数となる (結果は省略する)。

LST モデルでは, 小売業者と製造業者との情報非共有と共有の区別を, 小売業者が需要を予測した場合に, 製造業者に対して需要の予測値だけを知らせるか (非共有), 予測誤差まで知らせるか (共有) により区別している。

製造業者と小売業者との間に情報共有がない場合, すなわち, 製造業者が Y_t, D_t, d, ρ, l, L からなる情報だけを知り得る場合には, 製造業者が行なうべき最適な製造数量は, 次の式で与えられる。

$$T_t^* = M_t + K\sigma\sqrt{V} \tag{17}$$

ただし, $K = \Phi^{-1}[P/(P+H)]$ であり, $\Phi(.)$ は標準正規分布関数であり, H, P は製造業者における holding cost, storage cost である。このように情報非共有の場合には, 確定部分だけで注文数量を判断する。

情報共有がある場合

次に, 製造業者が小売業者の Y_t と同時に, 予測誤差の項目である ε_t をも知り得る場合には, 製造業者が行なうべき最適な製造数量は次の式で与えられる。

$$T_t^* = M_t' + K\sigma\sqrt{V}' \tag{18}$$

$$M_t' = M_t - f_1(\rho, l, L)\varepsilon_t, V' = f_2(\rho, l, l) \tag{19}$$

ただし, $f_1(.), f_2(.)$ はある関数を表す (詳細は省略する)。この式は, 数量の平均が需要予測の誤差 ε_t で修正されていることを意味する。

4.3 予測された時系列への拡張

これまでの記述では需要の時系列が AR(1) であることが既知であったが, 一般にはモデルは不明であり, 推定する必要がある。以下では, このようなケースへの拡張を議論する [26]。これまで

の議論と同様に, リードタイムにわたって需要を予測し, これをもとに製造要求を提示することと(情報非共有), 小売業者の需要予測とその誤差も含めて製造業者と共有する (情報共有) かを区別する。

現在の時刻の需要 D_t が過去の p 期間の値 $D_{t-1}, D_{t-2}, ..., D_{t-p}$ により決まると仮定し, 次のようにモデル化する。

$$D_t = \hat{D}_t + \varepsilon_t \tag{20}$$

$$\hat{D}_t = f(D_{t-1}, D_{t-2}, ..., D_{t-p}) \tag{21}$$

ここで, $f(.)$ は需要の予測式であり, ε_t は予測誤差であり正規乱数であるとする。その平均をゼロとし, 分散を σ^2 とする。なお, 予測式は簡単な形にはならないケースが多いので, 数値計算により以下の推定を行なう [26]。

小売業者は, リードタイムにわたって必要と推定する量の合計 $D_{total} = \sum_{i=1}^{l+1} D_{t+i}$ を計算するが, この量の定数 (平均値) 部分の推定は, 予測値の補外により求める。すなわち,

$$\hat{D}_{t+1} = f(\hat{D}_t + \varepsilon_t, \hat{D}_{t-1}, ..., D_{t-p}) \tag{22}$$

$$\hat{D}_{t+2} = f(\hat{D}_{t+1} + \varepsilon_{t+1}, \hat{D}_t + \varepsilon_t, ..., D_{t+1-p}) \tag{23}$$

$$\hat{D}_{t+3} = f(\hat{D}_{t+2} + \varepsilon_{t+2}, \hat{D}_{t+1} + \varepsilon_{t+1}, ..., D_{t+D21-p}) \tag{24}$$

のように, 予測値 (関数により推定を行なった量) に乱数を加えて, これを観測値とみなして, 予測をリードタイムの期間にわたり継続する。

式 (22) においては, $D_t, D_{t-1}, ..., D_{t-p}$ 以外はすべて推定値であるので, 結局式 (22) は単独の $D_t, D_{t-1}, ..., D_{t-p}$ だけの関数として書き変えることができる。この式は特に示さないが, このような置換えが実施されているとの仮定で議論を進める。このようにして, $D_{total} = \sum_{i=1}^{l+1} D_{t+i}$ における平均と分散が推定される。この値を計算することにより, 小売業者の在庫数量決定の式 (16) における m_t, v_t を求めることができる。なお, 過去の時刻 $t-1, t-2, ...$ における予測誤差は, 観測値が計算に用いられてことから, ゼロであるとしている。ただし, 時刻 t の需要 D_t については, 小売業者と製造業者との間での予測誤差を共有する場合の議論においては, $\varepsilon_t \neq 0$ と仮定し, これ以外では,$\varepsilon_t = 0$ としている。

次に, 小売業者が製造業者に対して出す製品の注文数量について考察する。まず, Y_t については, $S_t - S_{t-1}$ の計算において式 (15) の項は定数であるが, すでに述べたように, 将来の需要予測には誤差が含まれているので, $S_{t+1}, S_{t+2}, ...$ の計算においては, これらの誤差を考慮した計算が必要となる。しかし, これらは数値計算により行なわれるので, 次のような手順で推定が可能である。

式 (15) において, 時刻を進めた場合の $Y_{t+1}, Y_{t+2}, .., Y_{t+L+1}$ の計算を考える。ここでは, 需要予測が関数 $f(.)$ による変換であることを除けば, 式 (15) と同様の関係式が得られることが期待される。関数の引数を, $D_t, D_{t-1}, ...,$ ではなく, $Y_t, Y_{t-1}, Y_{t-2}, ...$ とすることにより, 次に示す関係が得られる。

$$Y_{t+1} = f(Y_t, Y_{t-1}, ..., Y_{t-p}) \tag{25}$$

同様の計算式が,$Y_{t+2}, Y_{t+3}, ..., Y_{t+L+1}$ について成立する。

なお, この計算を具体的に実施するには, 過去の観測データ $D_t, D_{t-1}, ..., D_{t-p}$ だけを入力として関数 $f(.)$ により変換を続け, 将来の時刻 $t+l+L+1$ までの需要の予測値の確定部分を求めてお

き, これとは別に, 予測誤差 ε_{t+i} の影響分を, 同様に関数 $f(.)$ による変換を続け, 時刻 $t+l+L+1$ までの値を推定しておく。

これらの推定値を合計して得られる量として $\sum_{i=1}\ L+1Y_{t+i}$ を計算し, この平均と分散を, M_t, V_t としておく。これらの M_t, V_t を用いると, 製造業者の在庫レベルは式 (17) により与えられる。

次に, 時刻 t における予測誤差が小売業者と製造業者とで共有される場合を考察する。この場合, 式 (24) における計算において, D_t を観測値ではなく, 予測値と予測誤差とからなりたっていると考える。これを用いて, 式 (25) を計算する過程を考察すると, 結局, 誤差からなるベクトル $(\varepsilon, 0, 0, ..., 0)$ を関数 $f(.)$ に通過させることを繰り返すことにより, 予測誤差 ε_{t+i} の効果を推定することができることが分かる。このように, B_t には, 時刻 t における予測誤差 ε_t に関する項を含んでいるので, これを分離して, 次のように表現しておく。

$$B_t = \sum_{i=1}^{p} b_i D_{t+1-i} + c_0\varepsilon_t + \sum_{i=1}^{L+1} c_i\varepsilon_{t+i} \tag{26}$$

ただし, 係数 $b_1, b_2, ..., b_p, c_0,\quad c_1, ..., c_{L+1}$ は定数である。基本的なモデルにおいて示したように, 小売業者と製造業者との間での情報共有のレベルの違いとして, 時刻 t における予測誤差を推定に入れるかどうかで T_t^* は, 次のように推定できる。$T_t^* = M_t + K\sigma\sqrt{V}_t$ とした場合に, M_t と V_t とが, それぞれ, 次のように与えられる。

情報共有をしない場合式 (26) から計算される平均 M_t と分散 V_t を用いて, 式 (4) の在庫レベルを決定する。

情報共有をする場合

$M_t' = M_t - c_0\varepsilon_t$ に修正するとともに, 式 (26) の量の分散を計算する場合に,V_t から $c_0\varepsilon_t$ を除外する。

これらの数値は解析的に求めることができないので, 実際の評価では, シミュレーションをもとにして実施することになる。

5　サプライヤに起因するリスクとオプション

5.1　製品製造とサプライヤに起因するリスク

従来のカンバン方式など, メーカ主導で製造管理がなされている場合には, 部品供給が突然中断されるなどの事態は, 工場の火災や地震などの天災を除いては, 通常は発生しないであろう。しかしながら, モジュール生産の進展など, 製造工程の一部をまるごと他社の製品で置き換える生産方式においては, 協力会社などにおける事故などの発生が, 製造工程全体に大きく影響することが考えられる。

特に, 経営基盤の弱い中小企業をサプライヤとして抱えているサブアセンブラ (メーカであるアセンブラにモジュール製品を納入する企業) などの段階でリスクが発生する危険性がある。リスクとしては, 技術的なリスクすなわち製品に含まれる欠陥のほかに, 資金繰りの悪化による倒産などの, いわゆる金融リスクが大きな問題である。

電子商取引において, オープン型の取引であるが期待されたようには進展しない理由として, このような金融リスクの存在がある。技術的なリスクによる障害は, 他社への置き換えやラインの再編などで再構成することも可能であるが, 協力会社などとの決済が中断することによる損失は, カバーできない可能性がある。

このような金融リスクに関する課題をまとめると, 次のようなことになるであろう。

これらの問題がシステム的に解決できない限り, オープンな環境に, 真の意味で対応した状況は実現できない。しかし, 米国のメーカはこのようなリスクが存在しながらもメーカが自社独自の調達システムを構築する方向にあることは, 国際的なグローバル競合を考慮した場合には, 解決されるべき課題であろう。

5.2 日本の商社モデル

鉄鋼会社などで実施されている代表的な取引形態として, 中間に商社を介在させる方法がある。これは, 海外市場への販売や海外からの調達に限らず, 国内のサプライヤとの間の取引を円滑に進める方法論としても活用されている。具体的には, 例えば, 鉄鋼会社は市場において直接的に鉄鋼製品を販売するのではなく, 製造が終了した段階で, 商社にすべてを売却するという形式をとる。商社に売却された鉄鋼製品は, 商社を経由して鉄鋼を利用して各種の製品を製造する (これらの 2 次加工製品とよぶ) 企業へと販売する。これらの 2 次加工メーカ (サプライヤ) には, 鉄鋼企業の系列会社も存在するが, 鉄鋼会社からこの系列企業へと直接販売されることはなく, あくまでも商社を経由して販売される。

このような仕組みを実現するために, 商社は鉄鋼会社の敷地に倉庫を借用するなどの措置をとっており, この倉庫は鉄鋼会社が設置し, 商社に貸している形式になる。このようなシステムの導入により,2 次加工メーカが倒産した場合においても, 鉄鋼会社は鉄鋼製品の売却益を, そのまま手にすることができる。いわゆる, オプションを設定したことに相当する。

このような商社の役割が, 妥当なものであるかどうかの議論はここでは行わないが, 商社がリスクの買い手となっているオプション取引であるとのモデルは, 今後の電子調達などを考察する場合には有効であろう。

現在のところ, メーカとサプライヤの間に介在する企業は商社だけであるが, 今後はオプションの適正な設定により, リスクの買い手企業が進出する可能性がある。

サプライチェーンのモデル分析の範囲ではないが, 天候の変化により, 本来は夏季に販売が期待されているビールなどが冷夏の影響で大幅な減益になった場合に, この損失をカバーするための, いわゆる天候オプションは, 日本でも導入が開始されている。天候オプションの場合には, 平均気温などのリスク要因がオプション評価に用いられるが, サプライヤのサイドにおけるリスクを記述する要因としては, 金融リスクが適しているであろう。

5.3 オプション評価の方法

以下では, サプライチェーン形成におけるリスク回避の仕組みとして, 商社が存在すると仮定し, このオプション価格を評価する方法論について考察してみる。その直接的なモデルとしては, 株

式市場における株式オプション評価のモデルであるブラックショールズモデルを援用することが考えられる。ここでは,詳細な式の記述は省略するが,次のような対応関係をもたせることにより,オプション価格の評価が可能であろう。

しかしながら,鉄鋼企業と商社との関係は,株式オプションの購入のような一時的な関係ではない。鉄鋼会社と商社は,相互に必須の存在であるとも言えよう。従って,経常的な企業の運営とこれに関連して,リスクを回避する方法であることから,現在,米国では導入され,日本でも今後の導入が検討されている,クレジットデリバティブのモデルが適しているであろう。

以下では経験的に用いられている方法を紹介し,後の節でプライシングに直接的に用いられるパラメータを推定するための方法論について述べることにする。アセット・スワップは基本的には固定利付債と変動利付債の交換であり,金利スワップ,あるいは通貨スワップとセットとなってすでに提供されている。アセット・スワップによるデリバティブ評価には,計算が比較的簡単なLIBOR スプレッドが用いられる。LIBOR スプレッドとは,LIBOR に α として表現されるスプレッドを加えて当該債券のキャッシュ・フローを表現する方法である。具体的には,社債から得られる固定金利と変動金利のキャッシュ・フローを,スワップ市場の商品として評価することにより計算される。計算による α の推定方法も,このような2つのキャッシュ・フローが同じになる条件を用いて行われる。

以下では図2に示す2つのケースについて,プレミアム(デリバティブの値段)を評価する式を示す。

図2(a)にはデフォルト・スワップの事例を示す。この場合,銀行Aは企業Cの債券を保有しているが,デフォルトになった場合,これをプロテクションの売り手であるBに引きとってもらい,代わりに額面10億円を受けとることができる。このようなリスクを引き受ける代金として,銀行AはBに対して,例えば毎年デフォルトが発生するまでの期間,あるいは債券の満期まで25bpのプレミアムを支払う。すなわち,毎度の支払は

$$10\text{億円} \times 0.0025 = 250\text{万円} \tag{27}$$

である。

この,25bpに相当するプレミアム率を,x としておく。Bが受けとるキャッシュフローは次のようになる(金額の単位を億円としている)。

$$V_B = \sum_{i=1}^{m} 10d^i[-(1-\gamma)P_i + xQ_i] \tag{28}$$

ここで,i は時刻を表し,m までの数値をとる。d は割引率;γ は回収率(一定であると仮定する)であり,確率 P_i は時刻 i でデフォルトされる確率,Q_i はデフォルトではない確率である。

AはBの対局にあり時刻では,式に示す値の逆,すなわち $-V_B$ をペイオフとして持つ。したがって,どちらも過剰な利益を得ないためには,$V_B = 0$ となる必要がある。これから,プレミアムの推定値として次が得られる。

$$x = \frac{(1-\gamma)\sum_{i=1}^{m} P_i d^i}{\sum_{i=1}^{m} Q_i d^i} \tag{29}$$

なお,上に示した議論では期間の間隔を1年としているが,実際には半年や四半期にとることが多

く, この場合, 多少の変更が必要となる。また, 割引率 d が時間に依存する場合には, d^i などを関数 $d(i)$ とする。

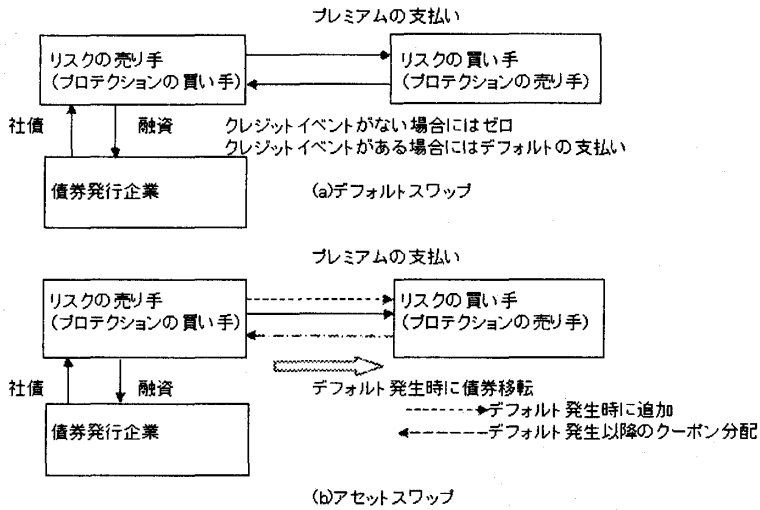

図 2. アセット・スワップによるデリバティブ評価

次に, 図 2(b) に示す例を考える。これは, 現在でも実施されているアセット・スワップを用いたリスク回避である。A 銀行は C 社の社債を所有し, このデフォルトリスクを B 社に移転しようとしている。A 社は, デフォルトが発生するまで B 社に対して 40bp のプレミアムを支払う。デフォルトが発生した場合には,B 社とのやり取りが変更され, LIBOR+40bp のプレミアムを支払う代わりに, 債券のクーポンの支払の一部 (例えば 6%) を B 社から受けとる。債券の所有は B 社に移るので, 債券のクーポンそのものは B 社の収入となる。

この場合のプレミアムの計算は,C 社が倒産しない前, した時点, および倒産後の 3 つのケースのペイオフを計算して, これらの和がゼロになることから得られる。債券の額面を 10 億円とする。B 社のペイオフ V_B は次に示される。プレミアムの率は x である。

$$V_B = \sum_{i=1}^{m} 10d^i x Q_i + \sum_{i=1}^{m} 10d^i (LIBOR_i + x - c)P_i + \sum 10d^i(\gamma - 1)P_i \tag{30}$$

γ は回収率,$LIBOR_i$ は時刻における LIBOR, c は図 2(b) に示す 6%に相当する固定クーポンレートである。

これらの 3 つの項は, それぞれ, 非倒産, 倒産時点, 倒産後に対応している。A 銀行も B 社も特別な余剰利益を生まないので、$V_B = 0$ とすると, x が計算される。

$$x = \frac{\sum_{i=0}^{m} d^i[(1-\gamma)P_i + (c - LIBOR_i)P_i]}{\sum_{i=0}^{m} d^i(P_i + Q_i)} \tag{31}$$

なお, 上に示した議論では期間の間隔を 1 年としているが, 実際には半年や四半期にとることが多く, この場合, 多少の変更が必要となる。また, 割引率 d が時間に依存する場合には, d^i などを関数 $d(i)$ とする。利率を計算するときに, 時刻に対して $xu_i, u_i =$ 運用期間/360 などの変更が必要である。

これまでのクレジットの説明において,LIBORと債券の利回りとの格差, すなわちLIBORスプレッドが用いられている。LIBORスプレッドについて, 以下に計算方法を示す。最初に, 社債のキャッシュ・フローについて, クーポン支払いCがあり, 満期には額面P_0の償還がなされると仮定する。次のような式により, デフォルト・リスクが存在する場合の損失の期待値が計算される。

$$X = \sum_{i=1}^{m} Cd^i + d^m - (P_0 + K) \tag{32}$$

ここで,mはクーポン支払の回数, dは割引率, P_0は償還,Kは経過利息である。Kは, 次の示す式で計算される。

$$K = C \times (\text{運用日数}/360) \tag{33}$$

デフォルト・リスクは償還の値P_0に反映され, リスクが大きいほど小さな値となる。

一方, 変動金利の債券のキャッシュ・フローは,LIBORの予測値を用いて計算される。しかし, 最初に導出した債券は固定金利であり, これを変動金利と一致させることはできない。そこで,LIBOR+αといった変動金利のキャッシュ・フローを調整する変数を導入する。

初期時点で1を投資し, 第1回目の利払い日に発生する変動金利キャッシュ・フローは, 初期時点から満期までのLIBORR金利, プラスαであり, 元本である1を日数で運用した結果に等しいので, 次に示す式で与えられる。

$$Y_i = LIBOR_i + \alpha \times (T_i/360) \tag{34}$$

ただし,$LIBOR_i$は時刻iにおけるLIBORの値であり, T_iはこの期間の長さである。

同様な操作を, 年間を通じて実施すると, 現在価値は次のようになる。

$$Y = \sum_{i=1}^{m} (LIBOR_i + \alpha) \times (T_i/360) d^i + d^m - 1 \tag{35}$$

両式は一致しなければならないので, 次に示す関係式を得る。

$$\sum_{i=1}^{m} Cd^i + d^m - (P_0 + K) = \sum_{i=1}^{m} (LIBOR_i + \alpha) \times (T_i/360) d^i + d^m - 1 \tag{36}$$

これを解くことにより, 調整のパラメータであるαの計算式を得る。

$$\alpha = \frac{-(P_0 + K) + \sum_{i=1}^{m} Cd^i + d^m}{\sum_{i=1}^{m} (T_i/360) d^i} \tag{37}$$

なお, なお, 上に示した議論では期間の間隔を1年としているが, 実際には半年や四半期にとることが多く, この場合, 多少の変更が必要となる。割引率dが時間とともに変化する場合は,d^iなどを時間関数$d(i)$に置き換える。

6 エージェント理論による分析

6.1 マルチエージェント

以下では, この章でとりあつかう企業間連係の基本モデルについて, 文献[30]を参考にして述べていく。なお, 著者らによるエージェント理論の研究は文献[31]-[36]として公表されている。こ

れらのエージェント理論は, 遺伝的プログラミングによる学習を行うエージェントを用いており, この章のシミュレーションでも用いている。

この研究 [30] で用いられている用語では, 製品を製造し市場で販売するメーカと, この製品を供給するサプライヤの両者が存在するケースを仮定する。本来なら, サプライヤは製品製造に必要な部品の供給を行う主体であるが, ここでは問題が簡単化されており, メーカにとって製品を自社で製造するか, サプライヤから購入するかの選択肢だけが与えられていると仮定している。いわゆる, アウトソーシングのモデルである。

しかし, このような簡単な設定ではあるが, このモデルを複数の部品の集合として製品を表現するケースへ拡張することや, これを複数のサプライヤが供給するモデルへと拡張することは難しくない。

メーカとサプライヤとの間での連係関係を考察する上で, 重要なポイントは, 次のようなことである。

(1) メーカはスコアによりサプライヤを選択する
(2) サプライヤも同様にスコアによりメーカを選択する
(3) 選択の基準は利益獲得可能性と信頼性の複合関数である
(4) エージェントは学習により最適な行動を求める
(5) 製品には特別製品と標準製品がある特別製品には開発コストがともなう
(6) パートナーが得られない場合には自社で製造する

最初の設定 (1),(2) は, それぞれをエージェントとみなした場合に, 最も利益獲得に有利なパートナーを選択することに相当している。このパートナー関係について, 数値であるスコアが計算されるので, この値が相対的に大きな連係の相手を選択するように行動する。

次に, このスコアを計算する場合の選好度関数を定義する必要がある。この関数は, 文献ではコブダグラス (Cobb-Douglas) 型の効用関数が仮定されており, 利益を獲得できる可能性の大きさを示す変数と, 相手の信頼度を示す変数とを用いて表現されている。すなわち, パートナーを選ぶことにより得られる直接的な利益とあわせて, このパートナーがどの程度信頼できるかの 2 つの要素でスコアが計算されている。

第 4 番目の設定は, それぞれのエージェントは簡単な学習により自身の最適な行動を選択していくことであり, 具体的には, 前に述べた利益獲得性と信頼度の変数に関連する重みを, 適応的に修正していくことにより実現している。

第 5 番目の設定は, 製品の製造販売における利益獲得の差異が, 販売する製品によっても違いがあることを意味している。すなわち, 標準的な製品を製造販売しても平均的な利益しか得られないが, 特別製品を製造販売することにより, 他社より相対的に大きな利益を獲得することができると仮定している。

同時に, この特別製品を製造するには参入のための投資が必要としており, この投資金額も標準製品の製造の場合より大きなものに設定されている。

第 6 番目の設定は, アウトソーシングにおける基本条件となっており, メーカから見た場合にサプライヤに製造を委託することによる利益がそれほど大きくはなく, 自社で製造, すなわち内製したほうが有利な場合には, 自社で製造する。この場合, 自社を特別に分離するとかえって問題が面倒となるので, シミュレーションではサプライヤの一員にメーカ自身が含まれているような処理

を行っている。

以上のような設定に関して, 以下ではやや詳細に述べていく。

6.2 選好とマッチング

メーカ i は複数のサプライヤ j を調査して, 最も条件にふさわしいサプライヤから製品を購入する。この評価を行う数値であるスコア Sc_{ij} は, 次のようなコブダグラス型の関数で与えられる。

$$Sc_{ij} = P_{ij}^{\alpha_i} Q_{ij}^{1-\alpha_i} \tag{38}$$

ここで, P_{ij}, Q_{ij} はメーカから見たサプライヤの利益獲得性と信頼度であり, α_i は2つの変数における弾力性を調整する, メーカが決めた指数である。この指数である α_i の大きさを調整することにより, 相手のサプライヤからの利益獲得性を重視するか, このサプライヤの信頼性を重視するかの傾向を変更することができる。

基本モデルでは通常のマッチング処理と異なり, メーカは自分自身とのマッチングを行なうことができると仮定している。しかし, このメーカは, 他のメーカのサプライヤにはなれないとしておく。同時に, マッチングを行なう対象であるサプライヤの数は, メーカにより異なっていると仮定する。すなわち, エージェントごとに分け前 (quota) が異なるとしておく。

次に, メーカがサプライヤを選択する場合の手順は, 次のようなアルゴリズムで整理される。

ステップ1

メーカは, 入札に応募して結果的に契約を結ぶことのできるサプライヤの数に関する要求数 (requests) の最大値を提示する。この値を $O_i \geq 1$ とする。

ステップ2

同様に, サプライヤは, 自分が応札できるとするメーカからの提示に関して最大の要求 s_i を受け付ける。これらの数値は, どのメーカサプライヤも知ることができると仮定する。

ステップ3

もし, ステップ1およびステップ2に示す手順で, パートナーとなるエージェントが求まれば, この段階で製品の調達は終了する。しかし, 入札と応札がまとまらない場合には, メーカは入札できた数をから引いた値を新たな要求数として提示し, 2番目に選好されたサプライヤへと割当を行なう。

ステップ4

ステップ3を実行することにより, パートナーが決定できる場合には, この入札と応札のプロセスは終了する。しかし, これでもなお, パートナーが決まらない場合には, ザプライヤは応札するための最高のスコア基準を, やや小さな値に設定する。

以上のアルゴリズムを繰り返し実施し, もはやどのメーカも要求を送らなくなったら終了する。この時点で, 一時的な要求の割り当ては最終値として確定する。

6.3 交易範囲の限定と変動過程の導入

次に, メーカとサプライヤが, やや広域的な範囲でマッチング処理を行うモデルについて, シミュレーションをもとに考察してみる。すなわち, 対立的にメーカとサプライヤの 2 グループが存在するのではなく, 平面上の分布する形で, メーカとサプライヤの存在を仮定する。この仮定に加えて,2 つのグループのエージェントは, 近隣のエージェントの間とだけ交易が可能であるモデルを導入する。その場合, 具体的な応用例として自動車産業や半導体製品市場におけるメーカとサプライヤの関係, あるいは医薬品開発における製薬会社とベンチャー企業との関係の分析を考える。

このモデルでは, 最終的には交易の範囲をセル平面の全体に拡大するが, これに至るまでに徐々に範囲を拡大した場合の傾向を分析する。いくつかの分析結果が得られるが, 次のようなことが特徴的である。

(1) 市場に適合するメーカの出現

市場では, 高利益製品が売れる場合だけではなく, 低利益でも安定した利益が確保される状況をシミュレーションで仮定している。従って, 企業 (具体的にはメーカ) エージェントが, この市場の動向を少ない誤差で予測した場合には, 利益を拡大し, 製造と販売を順調に拡大することができる。これに対して, 予測誤差が大きなケースが発生し, これが容易に改善されない場合には, 利益と企業規模は急速に小さくなる。このような, メーカにおける成長と縮小の発生が見られる。これは, 2 種エージェントの場合のクラスタ形成に相当する現象である。

(2) サプライヤにおける規模の格差の拡大

同様にメーカの発注に応えるサプライヤにおいても, 相手のメーカの能力が大きい (利益を確保するための予測の正確さ) 場合に取引を実施することが可能なケースでは, 企業規模を順調に拡大することができる。サプライヤがメーカを選択する場合においても予測式を用いるので, この予測誤差が小さいことや, GP による学習がスムーズな場合には, 企業は拡大する。しかし, このような予測の改善がうまくいかない場合には, 企業業績の低下が, 次の時期における受注能力に反映されるので, サプライヤ間における格差は拡大する。

(3) 取引がグローバルになると大きなクラスタが形成される

交易の範囲を拡大した場合においても, 上に述べた現象は基本的には変化しない。従って, 徐々にメーカとサプライヤのそれぞれのグループにおいて, 市場での利益を順調に拡大するエージェントと, そうではないエージェントの格差が明確になっていく。この結果, 中間段階まで優位な立場にあったエージェントでも, 交易の範囲が拡大するにつれて, 最終的にはもはや優位ではないエージェントへと以降するケースが発生する。

これらの企業間の連係における特徴は, 優秀なサプライヤや研究開発に調達が集中することであり, 一方では, メーカの要求に応じられないサプライヤや研究機関は, 競争から脱落していく。実際, 米国に自動車産業においてはアウトソーシングが一般化して以降, 従来はメーカの 1 部門でしかなかったなどが急速に成長をとげ従来相対的に資本力が大きかった系列企業を逆に買収して企業規模を拡大するなどの現象が起こっている。また, 医薬品業界では日本や欧州の研究機関が大規模ではあるが, 新しい開発ニーズに適応できない半面で, 米国のベンチャー企業が相対的に小さな規模で, 新しい研究開発に成功している実態が報告されている。しかも, 米国の会社だけでなく, 日本と欧州の薬品会社もこれらのベンチャー企業との関係を強化する動きにある。

6.4 カオス制御

次に, エージェントの種類が1つで, 相互に囚人のジレンマゲームに従って行動が決定されるモデルを考察する [38]。この分野の研究として, エージェントが周辺のエージェントの利益を参考にして, 自身の状態を切替えるモデルが提案されている。本論文では, これを拡張し, 周辺の状況を入力としてエージェントが次の状態を決定すると同時に, この予測誤差にもとづいて GP 学習を行うモデルを考察する。

(1) 予測式による行動決定

セル x におけるエージェントは協力 (corporation) および非協力 (non-corporation,defection)2つの状態をとり得ると仮定する。これを $\eta(x)=1$, および$\eta(x)=0$ として表現する。セル x のエージェントは, 自己を含めて周辺 R 以内のエージェントの現在の状態 $\eta(y), y \in N_x$ を入力として, 次の時刻における自己の最適な行動パターン $\eta(x)$ を予測式により決定していく。

(2) 市場における決定と GP 学習

それぞれのエージェントは予測により, 次の時刻における状態 (態度)$\eta(x)$ を決定するが, これは実際に, 次の時刻となった場合に, 市場において表1に示すような利益関係 (payoff) により調整される。この利益の大きさが, エージェントの選択した個体の適合度を表すと考えられる。従って, エージェントは, これらの利益の実現値の累積をもとにして個体の適合度を計算しておく。一定の時間 T の経過ののちに GP により最適な学習が実施される。

表1. エージェントの間の利益関係 (payoff)

	1(corporation)	0(defection)
1(corporation)	C,C	L,H
0(defection)	H,L	D,D

1種エージェントモデルにおけるエージェントの実施する GP 学習を仮定した場合には, 得られるセル平面上のパターンに, カオス的な変動が見られることが分かった。次に, この変動パターンに対して制御を加えて, 均衡状態へと移行させることができるかどうかを検討する。

すでに述べたように, 均衡状態への制御において有効な方法と思われるものは, 周辺のエージェントの状態の期待値への接近の状況を参考にすることであり, この方法を用いる。

具体的には, セル x のエージェントが, 次の時刻にとるべき状態を予測に用いる関数 $f(x)$ の値がゼロ以上であるか以下であるかの判断をする場合に, この関数の値に式に示される周辺のエージェントの状態の期待値からのずれ $g(x)$ を加えておく。すなわち, 関数値 $f(x)+g(x)$ がゼロ以上であるか未満であるかに応じて, 次の時刻におけるエージェントが $\eta(x)=1$ とするか $\eta(x)=0$ とするかを決める。

このような制御方法を用いた場合のエージェントの状態の変化を示したものが図3である。この図より分かるように, 時間の経過とともに2種エージェントモデルの場合と同様にクラスタらしきものが形成されていることが分かる。しかし完全なクラスタのパターンではなく部分的に他の状態が混在している状況であることが分かる。

これを確認するため, セル平面上のすべてのエージェントに占める $\eta(x)=1$ の割合の時間的変化を求め, これを描いてみる。これを示したものが図4である。この図4より分かるように, 制御

の結果としてと,$\eta(x)=1$ なるエージェントの比率は急速に一定の値に近づいているが, しかし, 最後の段階でも小さな変動を繰り返している。これは, 制御が完全に実施されたものではなく, 小さな範囲での状態の入れ替わりがおきていることを示している。すなわち, 完全にクラスタが形成され, 時間的に変化することがない理想的な状態ではなく, そのクラスタの周辺で状態が変化し, 続けるエージェントが存在することが示されている。

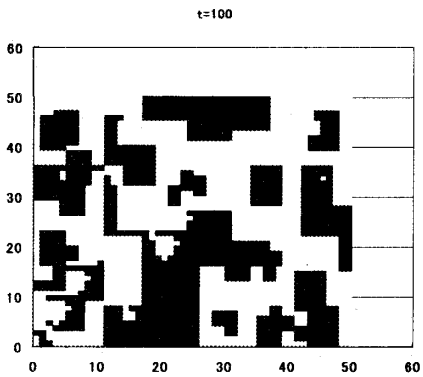

図 3. カオス制御の例

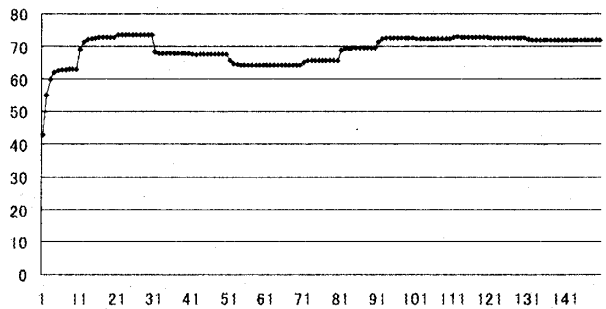

図 4. カオス制御のめやすを示す $\eta(x)=1$ の比率

6.5 1種エージェントモデルとメーカ・サプライヤのリスク分担

これまで述べた1種エージェントシステムと企業間連係の関係については, 自動車産業におけるメーカとサプライヤとの間のリスク分担の分析などに応用できる。80年代後半に入り, 自動車産業ではコスト削減の目的で従来の系列を見直す動きが加速され, 最近ではモジュール生産などの新しい概念で整理されるようになっている。これらは, 企業間関係の柔軟化 (flexibilization) とよばれている。柔軟化のもとでは, 原理的にはメーカとサプライヤがどちらも行動の自由度を獲得できることになるが, 実際にはリスクを回避する能力は大資本であるメーカが優位であり, サプライヤは関係において弱い立場にある。

しかし, 最近の研究で, 日本のメーカとサプライヤの間にリスク分担の関係が存在することが指摘されている。すなわち, 両者の関係は一時的なものではなく, 一般にはサプライヤの側に存在するリスクを, メーカの資本力でカバーする局面が見られる。これを, 上に述べた1種エージェントモデルに当てはめると, 適切なインセンティーブと懲罰を与えながら, 協力関係を維持する行動にでる場合に相当している [39]。しかし, これまでのシミュレーションで分かったように, それぞれのエージェントが独自の最適化行動を GP に基づいてとった場合には, セル平面の状態はカオス的になり安定しない。

これに対して, エージェントが周辺のエージェントの状態を平均と見なし, これに近付く行動を制御として加えた場合には, セル平面には協力関係のクラスタが形成され安定化する。

ただし, 正確な意味での制御ではなく, 局所的な交易の範囲ではエージェントの行動は小さな振動繰り返している。しかしながら, この現象は従来の囚人のジレンマゲームとは著しい違いを見せていることに注意する必要がある。従来の囚人のジレンマゲームの枠組では競合する両者が利益を共有し安定することはなく, 常に状態は変動を続ける。上に取り上げた例では, この変動の範

囲が交易範囲に限定されている。

7 製造と品質保証

7.1 製品の品質保証モデル

以下の考察では, 部品を調達するバイヤーと供給を行うサプライヤーにより生産が行われると仮定する。製品は市場にだされる前に検査されると仮定し, 販売できない製品による損失も考慮した最適化を実施する。このような問題について, 文献 [40] では, 以下のような定式化が行われている。

(1) サプライヤの操業状態

サプライヤは 2 つの操業状態, すなわち高い状態である (この場合の確率を π_S とする), あるいは低い (この場合の確率を π_L) を選択し, これに伴うコストを $C_S(\pi_S)$ とする。操業状態が高いとは, 製品の生産管理が相対的に良好なように要員や設備の配置がなされる場合をさしており, 操業状態が低い状態とはこれ以下の状態であることを意味する。高い (低い) 状態における良品の生産確率を $\pi_{SH}(\pi_{SL})$ としておく。ここで, $0 < \pi_{SL} < \pi_{SH} < 1$ である。

(2) バイヤーの投資

サプライヤから供給をうけるバイヤーは製品の品質を保つための投資を行う。製品のケア (例えば製品の補修や手入れ) をすることにより市場での損失を少なくする。このコストを $C(q_J), J = H, L$ とする。すなわち, この記号 J はサプライヤの 2 つの操業状態を 1 つの記号でまとめたものである。分かりやすく書けば, サプライヤの操業状態が H のときには, バイヤーは製品をケアするためにコスト $C(q_H)$ を負担し, サプライヤの操業状態が L のときには, バイヤーは製品をケアするためにコスト $C(q_L)$ を負担する。

(3) 検査の実施

バイヤーは製品を市場に出す前に検査を実施すると仮定し, これを検査の精度により代表し, 不良品を検出できる確率を $\pi_{BJ}, J = H, L$ で表す。検査による不良品検出の精度を確保するためのコストを $C_B(\pi_{BJ})$ とする。この記号もサプライヤの 2 つの操業状態を 1 つの記号でまとめたものであり, サプライヤの操業状態が H のときには不良品を検出できる確率は π_{BH} であり, サプライヤの操業状態が L のときには不良品を検出できる確率は π_{BL} である。 例えば, サプライヤの操業状態が H のときには, バイヤーは不良品検出の精度を確保するためにコスト $C_B(\pi_{BH})$ を負担する。サプライヤの操業状態が L のときには, バイヤーはコスト $C_B(\pi_{BL})$ を負担する。

これにより次の 3 つの場合が発生する。もし, 検査で異常なしと判断すればケアをほどこし (例えば製品に補修を行うなど) 市場へと出荷する。この場合,$1 - q_J$ の確率で製品は欠陥をもつと仮定する。製品が本来は欠陥品であるが検査で検出できない場合には, どのような処理を加えても市場では欠陥ありとなる。検査で検出された場合に, バイヤーが費用を使用してケアを実施して市場へと送りだす場合には, 同様に $1 - q_J$ の確率で市場で欠陥品と見なされる。

(4) 内部欠損と外部欠損

市場にでる前に検出された欠陥についてのコスト I を内部欠損とよぶ。これに対して, 市場に出されたあとの欠陥が発見され, これにともなうコストを外部欠損とよび, E で表す。これらの金

額の設定は製品1単位についてなされると仮定し, 以下では, 製品1単位についての評価式を議論する。従って, 数量がどの位であるかといった問題や, 数量が不足する場合の問題はこのモデルでは仮定しない。

(first best の解)

このような仮定をおいた場合に, バイヤーとサプライヤが情報を完全に共有する場合 (first best) のバイヤーとサプライヤを合計したコストを計算することができる (結果は省略する)。

7.2 情報共有 (契約) とコスト最小化

以下では, バイヤーとサプライヤが独立して生産にあたるケースを仮定する。すなわち, 発生した欠損の原因がバイヤーにあるのかサプライヤにあるのかが明確であるとする。この場合, バイヤーとサプライヤが決められた金額を相手に支払うことにより, 発生する欠損についての責任を担う仕組みである。バイヤーはサプライヤに対して前払い金 P(up-front payment) を支払い, サプライヤはバイヤーに対して保証金 W(warranty) を支払う。

前払い金とは, おおよそ推定される製品の欠損に関して, 前もってバイヤーがサプライヤへ支払う金額であり, 定額であると仮定する。生産への協力をうながすインセンティーブであると解釈される。保証金とは, サプライヤがバイヤーに対して前もって支払う金額であり, 商品の販売状況に関わらず定額を支払うものである。これにより, 欠損が発生してもサプライヤは責任を問われない。

このような条件のもとで, バイヤーは金額 V の以内で生産コストが抑えられれば満足し, この制約を越える生産には契約をしないと仮定する。

一方, サプライヤは, バイヤーに対して支払う金額をできるだけ節約するとともに, バイヤーから受けとる金額はできるだけ目減りしないような行動をとる。この両者の行動は, 一般的には, 逆の方向に最適化を行うことになるので, 両者の利害が均衡したときが最適な契約となる。

なお, 以下の議論では, バイヤーは生産コストが金額 V の以内であれば満足することを考慮し, サプライヤのコスト抑制だけに注目することとし, , バイヤーのコスト削減は評価しない。

このような契約を内部欠損に対してのみ実施した場合には, バイヤーのコストを求めることができる。これを用いて均衡点を推定できる (結果は省略する)。

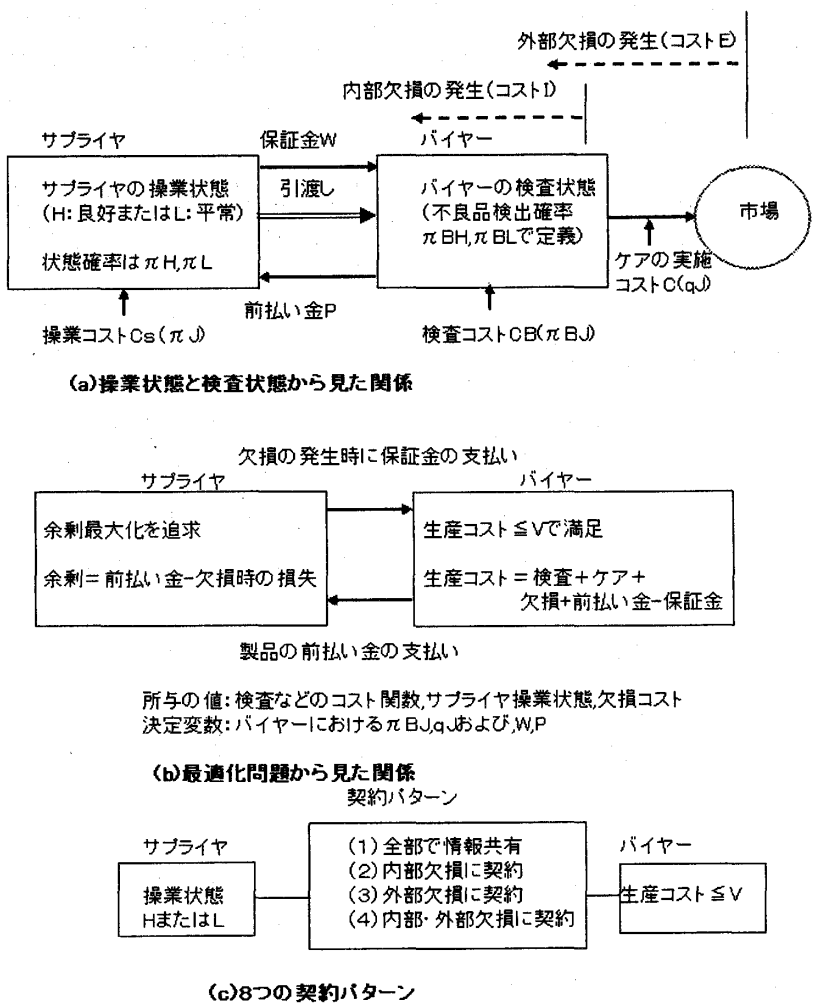

図 5. 契約の概念

(外部欠損に契約したケース)

同様に, 外部欠損に対してだけ契約をした場合のコストの式を求めて, 最適化のための式を導出できる。前払い金 P_J, 保証金 W_J^E を同様に定義して, 最大化問題の解が均衡解を与えている (付録に示す)。(内部欠損と外部欠損の両方に対して契約)

同様に, コストの式を求めて, 最適化のための式を導出できる (結果は省略する)。以下では, シミュレーションをもとに, 企業間の情報共有と, 最適生産の関連について考察する。最初に, パラメータを変化させたときの最適生産への影響を観測するため, 時間的な変動が含まれない場合の定性的な傾向を見ておく [41]。

パラメータを設定する場合に, 次のようなことを考慮する。まず, E や I などの大きさであるが, コスト計算の式からも分かるように, E, I, P, W は相対的に同じオーダーの数値である。コストの項目である $C_B(.), C(.)$ も同程度であることが必要である。次に, 式の変形から, $(1-\pi_{SJ})(qE-I+W) > 0$ などの式が得られるので 4 つの契約パターンに応じて, $E > I, E-I+W^I > 0, E = I+W^E > 0, E-I+W^E-W^I > 0$ であることが必要である。また, 当然, 確率は正で 1 より小さい。

これらのことから, 次のようにシミュレーションのパラメータの初期値を設定する。コスト関数は微分が線形となる 2 次関数とする。

$\pi_{SL} = 0.3, \pi_{SH} = 0.6$
$I = 0.8, E = 1.5$
$C_B(q) = K_q q^2, C_B(\pi_B) = K_B \pi_B^2, K_B = K_q = 1/2$
$V = 1.8$

なお, 変動要因として選択すべきパラメータを決定するため 1 期間のシミュレーションについて最適化への影響の大きな変数を検討した。もし, パラメータ変動によって, シナリオの選択をするごとに大きな差異が見い出せないなら, 時間的な経過を見ながら動的計画法によりシナリオを選択し最適化する意味はない。もし, パラメータの微小な変化がシナリオ選択に影響を及ぼすなら, 時間の経過とともにシナリオを切替えることが有効であると言える。

詳細は省略するが, パラメータである I, E, K_q を変化させた場合にはサプラヤの余剰がシナリオに応じて大小関係が入れ替わる, すなわち, パラメータの選択方法により均衡点が移動するケースが少なくない。同様の挙動であるので, 代表例として I を変化させた場合の図を示す。一方, π_{SH} を変化させても, シナリオの間でサプラヤの余剰の大小関係は入れ替わらないので, シナリオ選択を行うことは有効ではない (結果は省略する)。

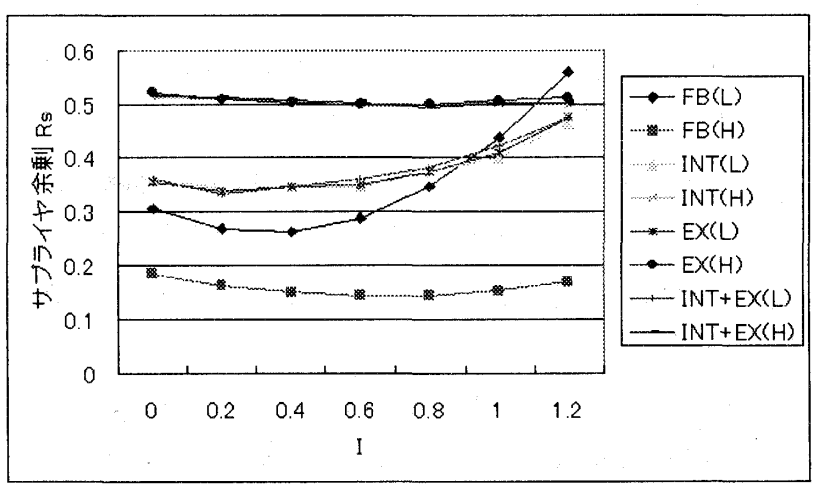

図 5. サプライヤ余剰の変化 (I を変化させる場合)

参考文献

[1] 電子商取引推進協議会, 平成 14 年度電子商取引に関する市場規模・実態調査,2002.

[2] 電子商取引推進協議会, 米国における企業間電子商取引に関する事例調査,2000.

[3] 大串葉子, 時永祥三, " データ 2 次利用と企業間連係からみた EDI の現状と課題", 経営情報学会論文誌,vol.8,no.1,pp.29-45,1999.

[4] 松野 成悟, 時永 祥三, " 企業間連携における情報共有のモデル分析-企業間電子商取引と EDI アンケートを中心として", 経営情報学会論文誌,vol.11,no.4,pp.79-93,2003.

[5] 時永祥三, 譚康融,『電子商取引と情報経済』, 九州大学出版会,212 頁,2001.

[6] 時永 祥三, "オープンネットワークによる企業間電子商取引の実施に関する現状と課題", 「経済学研究」(九州大学経済学会),vol.65,no.3-4,pp.79-93,2003.

[7] R.L. McDonald and D.R. Siegel, " Investment and the valuation of firms when there is an option to shut down," Internat. Econ. Rev., 26, pp.31-349, 1985.

[8] R.L. McDonald and D.R. Siegel, " The value of waiting", Quarterly Journal of Economics, 101, pp.707-727 ,1986.

[9] R.S. Pindyck, "Irreversible investment, capacity choice, and the value of the firm",American Economic Review, 78,5, pp.23-34, 1988.

[10] A. Dixit, " Hysteresis, import penetration, and exchange rate pass-through", Quarterly Journal of Economics, 104, pp.205-228 ,1989.

[11] A. Dixit, " Entry and exit decisions under uncertainty",Journal of Polotical Economy, 97, pp.620-638 ,1989.

[12] B.Kogut and N.Kulatilaka, " Operational flexibility, global manufacturing and the option value of a multinational networks", Management Science, vol.40, no.1 ,pp.123-139 ,1994.

[13] A.Huchzermeier and C.H.Loch, " Project management under risk:Using the real options approach to evaluate flexibility in R&D", Management Science, vol.47,no.1, 2001.

[14] 陳 暁栄, 動的システムにおける非線形モデリング手法による分析と最適化に関する研究, 経済学研究院博士論文,pp.94-132,2002.

[15] N.Takagi and S.Tokinaga, "Prediction of chaotic times series by using the multi-stage fuzzy inference systems and its applications to the analysis of operational flexibility", Journal of Operations Research Society of Japan, vol.45,no.3,pp.243-259,2002.

[16] Y.Kishikawa and S.Tokinaga, " Prediction of stock trends by using the wavelet transform and the multi-stage fuzzy inference system optimized by the GA", Trans.IEICE vol.E83-A,no.2,pp.357-366,2000.

[17] Kishikawa,K and Tokinaga,S:Approximation of multi-dimensional chaotic dynamics by using the multi-stage fuzzy inference systems and the GA, Trans.IEICE vol.E84-A,no.9,pp.2128-2137,2001.

[18] B.Kamrad and A.Siddique, " Supply contracts,profit sharing,switching, and reaction options",Management Science,vol.50,no.1,pp.64-82,2004.

[19] F.Bernstein and G.A.DeCroix, " Decentralized pricing and capacity decisions in a multitier system with modular assembly", Management Science, vol.50,no.9,pp.1293-1308,2004.

[20] 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.

[21] F.Chen,F.Drezner,J.K.Ryna 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.5,pp.626-643,2000.

[22] H.L.Lee,K.C.So and C.S.Tang, " The value of information sharing in a two-level suply chain", Management Science, vol.46,no.5, pp.626-643,2000.

[23] S.Gavirneri,R.Kapuscinski and S.Tayur, " Value of information in capacitated supply chains", Management Science, vol.45,no.1,pp.16-24(1999).

[24] S.Raghuntahan, " Information sharing in a supply chain:A note on its value when demand is nonstationary", Management Science, vol.47,no.4,pp.605-610,2001.

[25] 時永祥三, " 企業間電子商取引における情報共有リスクその課題-企業アンケート調査の分析を基礎として", オフィス・オートメーション学会論文誌,vol.23,no.1, pp.28-36,2002.

[26] 岸川 善紀, 時永 祥三, " 企業間連係における情報共有のモデル分析とその応用-予測と情報共有コストを中心として", 経営情報学会論文誌, vol.13,no.1,pp.58-77,2004.

[27] K.Zhu and U.W.Thonemann, " Modeling the benifits of sharing future demand information", Operations Research, vol.52,no.1, pp.136-147,2004.

[28] K.Zhu, " Information transparency of Business-to-Business electronic markets:A game-theoretic analysis", Management Science,vol.50,no.5, pp.670-865, 2004.

[29] G.P.Cachon, " The allocation of inventory risk in a suply chain:Push,pull, and advance-purchase discount contracts", Management Science,vol.50,no.2,pp.222-238,2004.

[30] T.B.Klos and B.Nooteboom, " Agent-based computational transaction cost economics",Journal of Economic Dynamics and Control, vol,25,pp.503-526, 2001.

[31] A.P.Kirmanand N.J.Vriend, " Evolving market structure : An ACE moedl of price dispersion and loyality," Journal of Economic Dynamics and Control, vol,25,pp.459-502, 2001.

[32] 陳暁栄, 時永祥三, " 共進化 GP を用いたマルチエージェントシステムの構成とその人工市場分析への応用" , 電子情報通信学会論文誌 volE86-A, no.10,pp.1038-1048, 2003.

[33] 池田欽一, 時永祥三, " 共進化遺伝的プログラミングによる社会学習を考慮したマルチエージェントシステムの構成とその人工株式市場分析への応用, 経営情報学会論文誌、vol.13,no.3,pp.17-35,2003.

[34] X. Chen and S.Tokinaga, " Approximation of chaotic dynamics for input pricing at service facilities based on the GP and the control of chaos ", Trans. IEICE, vol.E85-A,no.9, pp.2107-2117, 2002

[35] 時永祥三,『複雑系による経済モデル分析』, 九州大学出版会,232 頁,2000 年.

[36] 時永祥三, " サプライチェーンマネジメントにおける要因変動リスクとオプション理論 『経済学研究』(九州大学経済学会) , vol.67,no.1 , pp.33-51,2000.

[37] 時永祥三, " 進化と進歩-ストラテジー形成における比較分析", オフィスオートメーション学会論文誌, 第 vol.23, no.2 ,pp.20-26,2002.

[38] O.Shy and R.Stenbacka, " Strategic outsourcing", Journal of Economic Behavior and Organization, vol,50,pp.203-224,2003

[39] A.Munro and R.Sugden, " On the theory of reference-dependent preferences ", Journal of Economic Behavior and Organization, vol,50,pp.407-428,2003

[40] S.Baiman,P.E.Fischer and M.V.Rajan, " Performance measurement and design in supply chians", Management Scinece, vol.47,no.1, pp.173-188,2001.

[41] 松野成悟, 時永祥三, " 契約関係に注目したモジュール生産におけるトレーサビリティ分析の基本モデル", オフィス・オートメーション, vol.25,no.1,pp.75-81,2004.

時永 祥三 (九州大学大学院経済学研究院・教授)
岸川善紀 (秋田県立大学経営システム工学科・助手)