

バルクサプライチェーンの生産性と在庫管理

——小ロット化方策によるフレキシビリティの獲得——

佐 藤 亮

1. はじめに

従来の組織とビジネスを変換した超柔軟な組織ともいうべき仕組みのビジネスが躍進している。実際、IoTビッグデータや近年のディープラーニングを用いた人工知能などのITを用いることで、ビジネスモデルを大きく変換し、進化的にモデルを変えながら成長を続けている企業が注目されている。米国のGAF Aや中国のBATといった巨大IT企業のプラットフォーム・ビジネスがそうしたビジネスの一つの典型である（通商白書2016）。また、GEのように製造業がビジネスのサービス化を行っている。市場を構成する顧客との関係が、モノやサービスを売って終わるのでなく、むしろそこからスタートして継続していこうとしているのである（イメルト2017）。

こうした新たな組織とビジネスを分析する方向として、ひとつには、IoTビッグデータについて、市場構造や技術等の変化を含むような需要の不確実性を測定するほどの精密な利用を考えることができる（佐藤2018, 2019）。市場と自社の関係のあり方に注目し、ミクロな顧客行動情報の利用拡大に合わせたマーケティング戦略に関連してプラットフォームを使うビジネスモデルとビジネスの進化をめざすのである。また、もう一つの方向性として、市場を取り込むのではなく、需要の不確実性に対して自社のオペレーションを洗練するという取り組みがある。たとえば自動車産業では、リーン生産方式、あるいはトヨタシステムとして実現されている（ウオマック他1990）。オペレーションのリーン化を戦略レベルの概念でとらえると、自社とそのサプライチェーンの柔軟性を増すことである。柔軟性は特に製造業のデジタルトランスフォーメーションと関連して重要である（シムチレビ2010, クスマノ2010）。ドイツの製造業強化政策であるインダストリー4.0においても、CPSプログラム群（サイバー・フィジカル・システム）を組み入れた自律分散型のネットワークを構築して、柔軟な生産体制を実現することをひとつの目的として設定している（Communication Promotors Group 2013）。オペレーションの柔軟性と戦略の関連は多義的であって多くの議論がある状況となっている。

本稿では、リーン生産方式やMRPやERPといった生産計画情報システムの歴史的発展をサプライチェーンに適用し、バルク・ロジスティクスに対して計画という管理システムを組み入れたプロセスが持つ柔軟性を分析する方法を提案し、サプライチェーンにおける小ロット化による柔軟性の経営戦略的意義を論じる。柔軟性がどのように有効なのか、問題を定式化したうえ

で分析を行い、結論として、いわゆるスマートな生産ネットワークとかIoTビッグデータやAIや最新ITを導入して柔軟性を最大限に実現したとしても、それが自動的にビジネスプロセスの性能を良くすることは保証されないこと、まれには悪化させることがあるということを指摘する。特に、IoTやAIや電子カンバンといったITツールでサプライチェーンの柔軟性を発展させることだけではなく、同時に小ロット化と整合する目標設定と管理を行う方法も発展させる必要がある。

2. 戦略としての柔軟性

柔軟性の獲得と発展は戦略の重要事項である。組織の持つフレキシビリティとして、シムチレビは「運転費用やサプライチェーンの（1個あたりの）コストを上昇させないで、時期を逸することなく、変化に対応する能力」と定義する（Simchi-Levi, 2010）。そして、システム・フレキシビリティ、プロセス・フレキシビリティ、製品デザイン・フレキシビリティの3つの側面を指摘している。プロセス・フレキシビリティとして彼が注目するのはトヨタシステムが特徴でもある、段取り時間、在庫コスト、U字型ライン、多能工化への訓練である。小ロット化はそれらすべてに関係しているので、同時に行われる必要がある。

クスマノは柔軟性のケイパビリティの重要性を指摘し、「自社の目標を実現するために、市場の需要、競争、技術の変化に素早く適応」するような組織や仕組み、ケイパビリティを持つことが、柔軟性を獲得することと定めている（Cusumano, 2010）。クスマノは、企業が繁栄するための6つの法則の一つとしてフレキシビリティを取り上げている。製造業の場合の柔軟性の測定項目として、製品種類の多様性、生産量の変動、新製品の導入、納期やリードタイムを挙げ、そうした柔軟性を持つこととトレードオフしそうな効率性として、製品あたりのコスト、生産性（年間生産量や一人当たり生産量）、在庫水準、品質を指摘した。フレキシビリティは成果とバランスする必要がある。クスマノらは、自動車産業だけでなくPCB製造業界を調べて、柔軟性と生産性やコストとのトレードオフを見出そうとした。つまり、たとえば製品種類数が多かったり生産数量の変化が大きければ大きいほど、工場の準備や人員調整や在庫増につながりうると仮定しうる。しかし、どこのプロセスをどのように柔軟にするのかは単純ではないこと、業績とフレキシビリティの関連もしたがっていろいろありうることを述べている。フレキシビリティが大きい製造企業ほど、段取りや在庫準備や訓練が必要なことが想像されるために、製品1個あたりのコストが高いことが予想されるのであるが、彼らが調査した範囲では、逆に、低い傾向があった。

また、インダストリー4.0の目標としてスマートな生産のフレキシビリティが挙げられる。さらに、情報共有の方法の多義性も問題となる。

本稿ではこうした状況を踏まえて、次のように具体化してサプライチェーンについて定式化してその解答を得ようとするものである。サプライチェーンの中の企業の戦略としての柔軟性は、「あるスループットを実現するために、可能な種々の組織体制の中で、保持する平均在庫数が少ない組織を選び作り上げていく組織能力」とする。したがって、サプライチェーンのどのような組織の構成が平均在庫数の低減に結びつくかを分析する必要がある。

サプライチェーンの典型例は、製造業の製品倉庫から、在庫型の大手卸（1次卸）の物流センター、2次卸の物流拠点、小売業からなるネットワーク構造である（臼井・田中2011）。本

稿では、そうした4段階の流通段階の構造を持つ例としてスターマンによるビールゲームのサプライチェーン (Sternan, 1989) をビールゲーム・サプライチェーンとして定める。サプライチェーンのフレキシビリティ向上策としての小ロット化の効果に注目し、生産性向上とどのような関連やトレードオフを持つのか、その一端を明らかにする。

河合・佐藤 (2007) では、2段階サプライチェーンにおける計画情報システムによる予測と、結果として生ずる在庫水準の関連を分析し、在庫変動を抑えるためには予測が97%というほぼ実現不可能な正確性を持つ必要があることを指摘した。本稿は、予測に焦点をあてるのではなく、リトルの公式に関連した生産性向上のために計画情報システムとプロセスのフレキシブル化の関係を、4段階のサプライチェーンについて分析する。具体的には、ビールゲーム・サプライチェーンの各社が、各期の需要の変動に適応するようなシンプルな発注計算と出荷計算の情報システムを使用している状況で、チェーンを構成する企業の中のボトルネック企業とその他の企業における小ロット化がどのような効果をもたらすのかについて検討し、若干の興味深い事象を提示する。結論を先に言えば、サプライチェーン全体にわたる各社の小ロット化は各企業の平均在庫を減らす効果があるが、その削減幅は小さい。たとえば、ひとつの典型例として、よく知られた小売り企業の理論的なのこぎり型の独立な在庫変動を想定しロットを半分の大きさにした場合の削減幅は50%であるが、サプライチェーンについての実験では、4%から30%程度にとどまる。さらに、ボトルネックとその改善については次のように言える。サプライチェーンにおけるボトルネックを改善してチェーン全体の性能を上げようとする方策は、ボトルネック改善とチェーンの性能改善との関係が複雑であるため、必ずしも有効ではない。有効なのは、チェーンの中で各社が担っているプロセス全体を小ロット化すること、チェーン全体にわたって小ロット化を行うことである。その場合でも、その効果は限定的であるし、少なくとも現時点では効果規模の予想が困難である。

工場での製造を含むビジネスプロセスの動特性の分析と設計には、定常状態において成立するリトルの公式やそれに関連するボトルネック解析が強力なツールである (Hopp and Spearman 2008; ゴールドラット2004)。リトルの公式はスループット、リードタイム、WIPという3つの動的特性の間の関係を示しておりその重要性が知られている。本稿の分析においては、シミュレーション研究においてリトルの公式における3つの動的性質の利用法を提唱して使用する。また同時に、モデルのシミュレーションプログラムが間違っていないことを示すやり方も述べる。

3. ビールゲーム・サプライチェーンの定義と構造的特徴

戦略の下でモノや情報を使ってビジネスを実行する仕組みが、組織として実現しているビジネスプロセスである。業務取引システム (business transaction system) は組織によるモノの物的変換や移動を伝票や情報システムを使った仕事の依頼や要求によって管理するビジネスプロセスの一般モデルである (Sato and Praehofer, 1997)。スターマンのビールゲームは4つの企業から成るサプライチェーンの中のモノと注文の流れと在庫、それらを計画・管理する働きが組み込まれている。本稿では、業務取引システムをビールゲームに特化したモデルをビールゲーム・サプライチェーンと呼ぶ。

業務取引システムは、ビジネスで行う活動のネットワーク構造である静的構造と、ビジネス

の動的ふるまいを表す動的構造の2つによって定められる。静的構造は活動結合図（アクティビティ・インタラクション・ダイアグラム）と呼ばれ、一連の活動と、活動間をつなぐ結合待ち行列から成る。ビールゲーム・サプライチェーンの活動結合図が図1である。なお、業務取引システムの形式的定義は付録1と2に示した。図1のサプライチェーンを構成する活動は、動作の特徴からみると2種類あって、輸配送活動と、計画と管理活動である。図1では4つの企業があるが、活動として、工場の計画、工場の配送1、工場の配送2、1次卸の計画、配送1、配送2、等々があり、さらにまた顧客（による発注）という活動もある。それぞれの活動は結合待ち行列で結合されており、ある活動の出力が矢印の向きに沿って次の活動の入力として引き取られることを表している。

ビールゲーム・サプライチェーンの動的構造は業務取引システムの動的構造であり、それぞれの活動を離散事象システムとするような結合離散事象システムとして動作する。各活動は開始から終了までの所要時間であるリードタイムがかかる。図1のビールゲームのモデルでは活動のリードタイムは、1日間や3日間であり、不確実性はなくて確定的である。動的構造は形式的には付録2のフローチャートで示され、動作の結果としてサプライチェーン全体の状態の時間的な経緯を表形式で示す状態遷移表（状態変化表）が得られる。付録3がひとつの初期状態から始まった場合の図1の動作を示す状態遷移表である。状態遷移表を使って、平均在庫や平均スループットなどの動的特徴を捉えることができる。

状態遷移表を使うことで性能と在庫に関する指標を計算するという方法を用いる。次節で、図1のビールゲーム・サプライチェーンの性能目標とその実現、改善、動作の最適化と構造の最適化を分析する。

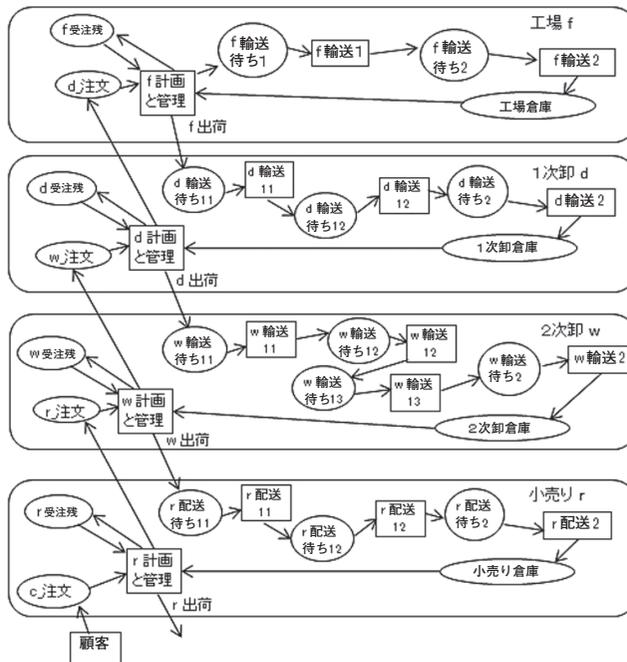


図1 ビールゲーム・サプライチェーンのひとつの例

業務取引システムでは、伝票とかカンバンという要求事項も部品や製品という物的な存在も同じように在庫し動的な性能に大きく影響する。そのため、システム内を流れ蓄積する存在をオブジェクトと呼んで抽象化して扱う。カンバン方式とその変化形であるCONWIPの優劣を分析した際にはシンプル業務取引システムというモデルを用い、その中の活動が開始するときでも終了するときでも、オブジェクトは1つずつ移動するという条件があった (Sato and Khojasteh-Ghamari, 2012)。ビールゲーム・サプライチェーンはシンプルなオブジェクトの移動のモデルではなく、活動の開始時でも終了時でも、オブジェクトがバルクで、つまり、バラ積みで一時に移動する。個数やデータの移動は、活動ごとに決められている。ビールゲーム・サプライチェーンでは2種類の活動があって、4つの企業それぞれにおける、「輸配送」の活動と「計画と管理」の活動である。輸配送の活動では入力時に入力の輸配送待ちのオブジェクトをすべて運送し、終了時にはすべてを出力する (荷卸しする)。この動きがバルクという名称を与えている理由である。輸配送活動のリードタイムは構成によっていろいろである。

一方、計画と管理の活動は、図2のように、上位階層への発注活動と、下位階層への出荷と受注残を計算する活動の2つの活動から成っていて、以下の(1)と(2)の計算を行う。計画と管理の活動のリードタイムは1期(1日)である。

(1) 下流への出荷数の計算

(下流からの受注数+受注残)が当期の下流からの要求である。

もし、倉庫内在庫数 > (下流からの受注数+受注残)であれば、下流からの要求数を出荷する。その分在庫数は減少する。当期の受注残はゼロとなる。また、もし、倉庫内在庫数 ≤ (下流からの受注数+受注残)であれば、倉庫内在庫をすべて出荷する。当期の下流からの要求よりも少なかった分が、当期の受注残となる。

(2) 上流への発注数の計算

下流からの受注数に目標在庫係数を乗じた数を、目標在庫数として設定する。当期出荷後の在庫数が目標在庫数より少ない場合、その差を上流への発注数とする。

図2の計画と管理の活動には実践と破線の矢印がある。実線は輸配送の活動と同様に、バルクオブジェクトが入力から活動へと取り込まれ、リードタイムの経過後に活動から出力へとす

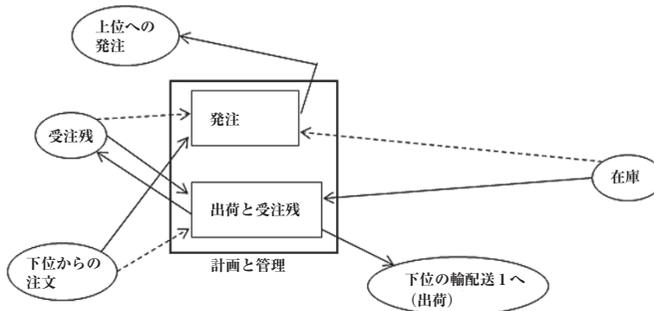


図2. ビールゲーム・サプライチェーンの計画と管理の活動の内部構造としての発注計算活動と出荷と受注残計算活動

表1. サプライチェーンの各階層の小ロット化の効果の分析

構成	c係数H所要時間 f : d : w : r	fWIP	dWIP	wWIP	rWIP	WIP合計	周期
A	c2H1-1 : 2-2 : 3-3 : 2-2	335	292	194	86.1	907.1	128
B	c2H1-1 : 11-2 : 111-3 : 11-2	317.4	288.5	193.7	85.8	885.4	319
C	c2H1-1 : 11-11 : 111-3 : 11-2	277.8	285.3	198.8	85.1	847	256
D	c2H1-1 : 11-2 : 111-111 : 11-2	326.1	281.9	160	90.6	858.6	244
E	c2H1-1 : 11-2 : 111-3 : 11-11	250.1	250.1	187.6	81.9	769.7	807
F	c2H1-1 : 11-11 : 111-111 : 11-11	141.1	203.7	170.8	82.4	598	748
A から F への削減割合		57.9%	30.2%	12.0%	4.3%	34.1%	

べてが移動することを示す。破線は、オブジェクトの個数が参照されるだけで、個数の数値が計算には使われるということを示している。破線を除いた図を描けば、バルクオブジェクトの移動と蓄積を表すネットワークを得ることができる。

なお、工場の場合のみ、上流への発注数ではなく工場階層での生産指示数となる。工場では、生産指示（発注）は即座にリードタイムがゼロで生産されて工場の物流プロセスの輸送に送られる。言い換えると、生産企業にはいつでも必要なだけのビールの在庫があることを想定している。

4. ビールゲーム・サプライチェーンの小ロット化による柔軟性の獲得

ビールゲームのバルクサプライチェーン・プロセスの挙動を分析することにより、小ロット化による柔軟性の向上と在庫コストのバランスについての示唆を得ることができる。

4.1 数量分割による小ロット化

表1はビールゲーム・サプライチェーンの階層である工場（factory）、1次卸（distributor）、2次卸（wholesaler）、小売り（retailer）を小ロット化することの効果と比較したものである。表1ではAからFの6通りのサプライチェーンの構成がある。たとえば、名称Aの構成では表記がc2H1-1 : 2-2 : 3-3 : 2-2である。はじめのc2の意味は図2における発注計算の目標在庫係数が2であることを表す。つまり、下層からの注文数の2倍を直上の層へ発注する。所要時間はバルク・オブジェクトの保持時間（holding time）なのでHという記号をあてている。Hの後の並びはコロン（:）によって4グループにわかれており、最左の1-1は工場の運送プロセスが2つあってそれぞれの所要時間が1日ずつであることを表す。次の2-2は、1次卸に2つの運送プロセスが2つあってそれぞれの所要時間が2日ずつであることを表す。2次卸は2つの運送プロセスがそれぞれ3日ずつの所要時間がかかるし、小売りは2つの運送プロセスが2つあってそれぞれの所要時間が2日ずつである。Bの構成は図1が表すものであり、1次卸、2次卸、小売りそれぞれにおいて、始めの運送プロセスが所要時間が1日の運送プロセスに分解されていることを、c2H1-1 : 11-2 : 111-3 : 11-2という表記で表している。工場はいずれにおいても、1日間の所要時間を要する2つの運送プロセスから成るので1-1である。構成Aのサプライチェーンは、c2H1-1 : 2-2 : 3-3 : 2-2なので構成Bと比べて1次卸、2次卸、小売りの輸送プ

プロセスが、大きくりの輸送となっている。構成Aのサプライチェーンの各階層において、たとえば1次卸において2つの輸送プロセスがあるので、それらをd1, d2と呼ぶと、それぞれに輸送すべき荷物の置き場があり、2日に1回の割合で、置き場にある荷物であるビールケースを2日間かけて輸送する。図1の構成Bでは、構成Aのd1が1日ごとの2つの輸送プロセスに分割されているのでそれらをd11, d12という記号であらわしている。構成Aの輸送プロセスd1は2日間に蓄積した荷物を2日間に1回の頻度でまとめて運ぶのに対して、構成Bの輸送プロセスd11とd12は1日ごとに荷物を輸送する。2日間分の荷物が蓄積するようなことはない。つまり、輸送の単位であるロットが小さくなるようにチェーンが構成されている。輸送の待ち時間を半分にするには、分ける前に比べるとバルク・オブジェクトがおおむね半分の個数で次の輸送活動に移り、そうした細分化した輸送が継続して行われることになる。この意味で、所要時間の短い輸送プロセスにプロセスを変更することは、ロットを小さくする手段である。その他の構成は、構成Aの1次卸、2次卸、小売りの輸送プロセスを小ロット化してあり、それぞれの効果をみるのが期待できる。構成Fは、各層の運送プロセスが最も細かい小ロットに分けられ、それぞれ1日間の所要時間の運送プロセスになっている。

表1のdWIP, wWIP, rWIPは、ひとつの構成のサプライチェーンを一定の初期値から全部の受発注と運送の活動がスタートし、やがて定常状態になったときの、1次卸、2次卸、小売りのそれぞれの平均WIPである。シミュレーションの初期値として、すべての運送活動の入力在庫変数に、それぞれビール40ケースずつ配置されている。さらに、顧客から毎日8ケースの注文がある。本稿のシミュレーション分析では、各活動のリードタイムは不確実性のない確定値である。そのため、初期状態から始めて、付録1に示したようにサプライチェーンの状態の時間発展が進んで行って長時間が経過すると、ある周期が現れて周期的な時間変化になる。したがって、平均WIPの値は、1周期間での平均WIPと厳密に一致する。つまり、周期がT日間だとすると、注目する在庫変数の無限の長期にわたる平均値は、その変数のT日間の合計値をTで割った値である。付録3において、ひとつの構成と初期状態について、やがて周期的ふるまいとなることで定常状態となっている状態遷移表を示し、その際に各変数の平均WIPを計算する方法を述べた。

サプライチェーンの各企業の平均WIPは、図1のひとつの階層の企業のプロセスの中の四角であらわされる活動の中の在庫と、楕円であらわされる活動間結合在庫と、さらに、直上の階層の出荷計算で決まる各期の出荷数を合計した在庫の1周期間の平均値である。たとえば、図1の場合の1次卸の平均WIPであるdWIPは、d受注残, d輸送待ち11, d輸送11, d輸送待ち12, d輸送12, d輸送待ち2, d輸送2, 1次卸倉庫, 1次卸から2次卸への出荷数の合計の平均値である。同様の平均WIPを2次卸と小売り企業に対して測定する。工場は、ビールゲーム・サプライチェーンでは上位階層がなく、工場にとっての受注数が即時に手に入って、輸送に戻る、という特殊性を持つので、サプライチェーンの合計WIPの測定対象から外している。なお、表1において工場の平均在庫rWIPを追加して各構成のチェーン全体の合計WIPを比べても、表1の合計WIPの大きさの順位は同じである。

表1に示しているビールゲーム・サプライチェーンの構成のちがいは、大きくは3つに分類される。構成Aは小ロット化をしていない構成である。構成Fは完全な小ロット化である。それらの間の構成BからEは、部分的に小ロット化している。チェーン全体の平均WIPである合計WIPを見ると、完全小ロット化したFはAよりも20%の削減となっている。構成BからEも、

構成Aよりは合計WIPが小さくなっているが、次の(2)と(3)のように複雑な削減の様相を呈している。

- (1) チェーン全体の企業が小ロット化すると、各社のWIPは減少し、したがってチェーン全体の合計WIPも削減できる。しかし、半分以下のロットにしても、全体削減と各社における削減は50%削減には程遠い削減である。
- (2) サプライチェーンの1次卸、2次卸、小売りのそれぞれの企業にとって、自社の2つの輸送プロセスの一部だけを小ロット化しても、自社にとっての在庫削減に結びつかないことがある。たとえば、構成BとCの合計在庫の減少は1%以下であり、ほとんど変わらないというべきである。
- (3) サプライチェーン内の他社が小ロット化を実施した場合、自社の平均WIPが減ることもあるし(構成BとEにおける1次卸のWIP)、逆に、増えることもある(構成Aと構成Dにおける小売りのWIP;構成CとDにおける小売りのWIP)。

数量分割による小ロット化に関する以上の観察をまとめて、一般化した表現にすると次のように言える。

『サプライチェーン全体にわたる輸送の小ロット化は、最終顧客への商品提供を果たしている(チェーンの終端に位置する顧客が要求する提供速度としての平均スループットを実現している)定常状況において、チェーン全体の在庫を減少させる。その結果として、チェーン全体のコスト削減につながる。一方、チェーンの中の一つの企業がその輸送プロセスを小ロット化することは、チェーン全体の在庫削減は期待できるが、必ずしも自社の在庫が減るとは限らない。』

4.2 輸送時間短縮による小ロット化

次に、サプライチェーンの中の輸送時間の短縮化という小ロット化方策について観察する。この方策は輸送という活動のリードタイムの削減と言い換えることもできるが、小ロット化として考察する。結果の全体は複雑であって、未だ一定の方向と原理を見出すには至っていないが、表2にまとめたような若干の知見を得ることができる。

表2は目標在庫係数の大きさによって3つのグループに分けられている。係数が1倍の(c1)の構成G、H、Iは、下層からの発注量をそのまま上位層への発注量として発注するので、結果として、最終顧客からの注文がサプライチェーンの中の全ての企業によって共有するひとつの形態である。また、3つのグループそれぞれにおいて、2次卸の輸送時間が最長である。最長の輸送時間をもつボトルネック的に見える2次卸企業のwWIPが最大となるわけではなく、また、ボトルネック的企業の改善だけでなく他企業の輸送時間の多寡によっても、サプライチェーンの各企業のWIPが影響を受けることが観察できる。

- (1) 構成H、K、Nは注文情報の目標在庫係数がそれぞれ1、2、4の場合である。チェーン全体の合計WIPを比較すると、Kが最小となっている。直接的な注文情報の共有を行うこと(構成H)が最小となるわけではない。
- (2) サプライチェーンの各企業は輸送活動と計画管理活動、それらを結合する在庫のネットワークから成る。企業ごとに輸送時間と計画管理活動の合計を比較するとき、合計が最大の企業が、直感的な意味においてボトルネック的な役割をもち、したがって、最大の平均在庫をもつと予想できる。表2においては、すべての構成において2次卸(wholesaler)がボトルネッ

表2. ボトルネックとしての2次卸のリードタイム構成と平均WIPの関係の例

構成	c係数H所要時間 f : d : w : r	dWIP	wWIP	rWIP	WIP合計	周期
G	c1H1-1 : 4-4 : 7-7 : 4-4	176	308	252	736	28
H	c1H1-1 : 2-2 : 7-7 : 2-2	112	336	260	708	14
I	c1H1-1 : 2-2 : 3-3 : 2-2	112	196.0	212	520	6
L	c2H1-1 : 4-4 : 7-7 : 4-4	518.9	392.9	148.5	1060.3	992
K	c2H1-1 : 2-2 : 7-7 : 2-2	145.3	395.4	101.4	642.1	738
J	c2H1-1 : 2-2 : 3-3 : 2-2	292	194	86.1	572.1	128
O	c4H1-1 : 4-4 : 7-7 : 4-4	1290.5	559.5	195.2	2045.2	620
N	c4H1-1 : 2-2 : 7-7 : 2-2	648.4	861.4	146.8	1656.6	1338
M	c4H1-1 : 2-2 : 3-3 : 2-2	1219.5	401.1	116.6	1737.2	597

ク的である。係数がc1の構成G, H, Iについてはその予想通りの挙動を示しwWIPが最大である。しかし、c2の構成J, K, Lとc4の構成M, N, Oのそれぞれのグループでは、1次卸のdWIPと2次卸のwWIPは構成によって大小関係が一定ではなく、削減の原理や傾向を見出すのが困難である。

輸送時間短縮化という小ロット化についての以上の観察を次のようにまとめることができる。『サプライチェーン内で顧客の注文情報を直接に共有することは、チェーン全体にわたる在庫の削減に一定の効果を期待できる。また、バルク・サプライチェーン内のモノの流れの中での上流か下流に位置するかによって、削減の効果は異なる。削減されない場合もある。さらに、そうした現象を理解するためのキー概念であるボトルネックを見出すことは困難である。』

5. MRPやERPによる柔軟性の実現への含意

ビールゲーム・サプライチェーンというバルク・ロジスティクスモデルを分析することで、小ロット化による柔軟性について以下のような示唆を得た。

第1に、少なくとも現時点ではバルク・ロジスティクス・プロセスのボトルネックを定めることや、見出すことが困難である。したがって、現状では小ロット化の効果を計算で求めることはできない。カンバン方式による管理を行うプロセスはシンプル業務取引システム (Sato and Kohojasteh, 2012) によってモデル化することができ、ボトルネックが全体のスループットを決定するという著しい性質を持つ。もっとも遅い活動がボトルネックになるとは限らない。ボトルネックは、定常状態にある活動と在庫で構成されるすべてのサーキットについて、活動時間の合計をオブジェクト数で除した「オブジェクトごとの平均活動時間」が最大のサーキットである。その事実をつかって小ロット化の効果を計算できる。たとえば、あるスループットを実現するための最小在庫を計算できる。ビールゲーム・サプライチェーンというバルク・プロセスでは、定常状態のサーキットごとにオブジェクトごとの活動時間は確定するがそれが全体のスループットと一致するのではないため、サーキットについてのリトルの公式が成立せず、したがって小ロット化の効果を計算につながらないのである。サプライチェーンの在庫積み上がりは各社に分かれて発生するのでわかりにくく、かつ、分かったとしても他社のプロセスはコントロールしにくいので、チェーン全体として在庫過剰に陥りがちになると予想できる。

第2に情報共有への示唆である。一般に、サプライチェーンの性能向上のために企業間の情

報共有を実現する方策が推奨されることが少なくない。しかし、本稿の分析でみるとおり、その効果はサプライチェーン内の各企業に対して一様ではないため、実施にあたっては情報共有の効果を判断するための試行と検討が必要である。現象が複雑であるということは現実的にいろいろな方策を試す余地があるということではある。

6. 結論

サプライチェーンの性能はいくつかの指標がある。各階層の発注や在庫の変動についてのブルウィップ現象が注目されることも多い。本稿では経営戦略としての組織能力として、バルクでモノの流れを扱うプロセスの小ロット化に焦点を当てた。柔軟性の定義として、クスマノやシムチレビを参照したうえで、「あるスループットを実現するために、可能な種々の組織体制の中で、保持する平均在庫数が少ない組織を選び作り上げていく組織能力」とした。バルクでモノを流すプロセスでも、小ロットのFIFOでモノを流すプロセスであっても柔軟性をその定義でとらえることは、意味がある。実際、本稿のビールゲーム・サプライチェーンの分析で示したように、在庫の低減と生産性向上のためのプロセスとコントロールのバランスを達成することは単純ではなく、大きな課題である。また、分析手法として、業務取引システムによるシミュレーションで定常状態を分析する手法を提案した。

バルク・ロジスティクスの計画と管理の歴史的発展と、小ロット化に関する方向性について、本稿での分析に基づいて、次のような考察ができる。

小ロット化は多品種変量生産を低コストで行うために必須であり、組織としての取り組みとしてシングル段取り (SMED) がひとつの重要手段である。SMEDはsingle minutes exchange of dieを表し、10分未満でのプレス用金型交換などから始まった段取り時間の劇的な短縮化運動を意味する (新郷1987)。新郷は大量生産先進国である米国において段取り時間が注目されなかった理由として、個別作業のスピードアップという改善と、作業のネットワークである作業プロセスが混同されていることを指摘している。本稿での観察からみれば、カンバン方式のような一定個数の小ロット単位のオブジェクトを扱う作業プロセスを実現し、それによって小ロット単位ごとにFIFOの動きを実現する取り組みの中でボトルネックをあぶりだして改善していく方針がなければ、バルク・プロセスであるがために、SMEDの重要性が見えにくかったことが推論される。逆にボトルネックが明確でないまま、スループットを上げようとするなら、段取り時間に注目して外段取りなどで短縮するよりも、バルク・ロジスティクスのプロセスとして部品や材料の不足や遅れない流動性を実現することで、狙いとする生産速度 (生産性) の実現を目指すことはある意味で自然な工夫と言えそうである。スループットは生産性の指標としてバルク・プロセスであっても計測・評価が可能であるため、計画システムを使う際の目標として取りやすい。そこで、次期計画における目標在庫と目標生産量に下流からの需要に兆候を組み込むことで需要への対応をはかりつつ目標スループットを実現しようとする運用が可能になる。しかし、サプライチェーンは自社以外の企業があって在庫積み上がりの傾向はわかりにくくかつコントロールしにくいので、スループットに焦点を当てると在庫過剰に陥りがちになると予想できる。このことは、MRP IIをモノの管理の中心メカニズムとしている主要なERPにも当てはまる。さらには、Industry 4.0で指向しているスムーズな生産をいくら高めても、この状況の直接的な解にはならないことを指摘できる。

逆に言えば、一定個数のオブジェクトを小ロット単位で扱う作業プロセスを構成し、MRP IIの能力計画計算を用いてボトルネックを顕在化させる方式を開発して、ボトルネックを改善することでフレキシビリティとコスト削減を両立していくというオペレーション戦略がありうる。

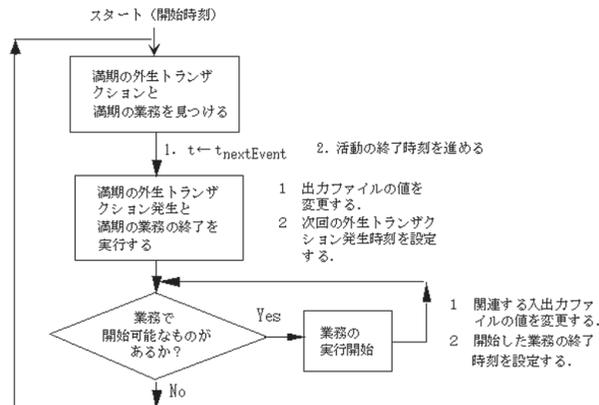
なお、本稿の分析はバルク・プロセスの小ロット化方策に関しての一般命題を提示するには至っていない。シムチレビとクスmanoは、マネジメントにとって有用であるように、フレキシビリティについての一般的言明を用意した。本稿はそうした一般命題に述べられた柔軟性方策を現実に適用する際に、追加して考慮すべき条件の一部を提示しそれによってオペレーションの戦略の一般的言明が成り立つ範囲を具体的にしようとする(佐藤2016) 小さな試みである。

<謝 辞>

本研究はJSPS科研費18H00882の助成を受けており支援に感謝する。横浜国立大学ビジネスシミュレーション研究拠点「超柔軟な立体的業務ネットワーク構造を持つビジネスの経営戦略とオペレーション」の支援と会合での建設的討論に感謝する。

参 考 文 献

- Communication Promotors Group of the Industry-Service Research Alliance (2013) "Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0" <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e81659931fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf> (2020年5月1日閲覧)
- Cusumano, M.A. (2010) *Staying Power*, Oxford University Press (鬼澤忍訳, 2012, 『君臨する企業の「6つの法則」—戦略のベストプラクティスを求めて』日本経済新聞社)
- Goldratt, Eliyahu (2004) *The Goal*, Gower Publishing (『ザ・ゴール—企業の究極の目的とは何か』三本木亮訳, ダイヤモンド社)
- Hopp, W.J. and M.L. Spearman (2008) *Factory Physics*, 3rd edition., McGraw-Hill /Irwin.
- Immelt, J.R. (2017) 「How I Remade GE」 *Harvard Business Review*, 2017Sep—Oct (有賀裕子訳「GEで切り拓いたデジタル・インダストリアル・カンパニーへの道」ダイヤモンド・ハーバード・ビジネス・レビュー)
- 経済産業省 (2016) 『通商白書2016』経済産業省.
- Sato R. and Herbert Praehofer (1997) "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.
- Sato R. and Yaghoub Khojasteh-Ghamari (2012) "An integrated framework for card-based production control systems", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23-3, pp717-731, 2012
- 佐藤亮 (2016) 「科学としてのダイナミック戦略論におけるケーススタディの意義」『横浜経営研究』37-1, pp195-210.
- 佐藤亮 (2018) 「超柔軟な組織要素を持つビジネスの戦略と組織—ケースとパースペクティブ」『横浜経営研究』38-3&4, pp45-57.
- 佐藤亮 (2019) 「IoTビッグデータを使って組織の環境不確実性を転換する3つの経営戦略」『横浜経営研究』40(1), pp.37-48.
- Simchi-Levi, David (2010) *Operations Rules: delivering customer value through flexible operations*, MIT Press.
- 新郷重雄 (1987) 『ノン・ストック生産方式への展開—トヨタ生産システムの真の意義』日本能率協会
- Sterman, J.D. (1989) "Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment" *Management Science* 35(3):321-339. <https://doi.org/10.1287/mnsc.35.3.321>
- 白井秀彰, 田中彰夫 (2011) 『物流センターのしくみ』同文館出版.
- Womack, James P., Daniel T. Jones, Daniel Roos (1990) *The Machine That Changed The World*, Harper Perennial (沢田博訳『リーン生産方式が、世界の自動車産業をこう変える。』経済界)



付録図1. 業務取引システムの動的構造

(付録)

付録1. 業務取引システムの静的構造：活動結合図 (Sato & Praehofer 1997)

構成要素は3種類あり、活動、結合待ち行列、矢印である。それらによってネットワークが構成される。矢印は活動と結合待ち行列をつなぎ、交代性の規則に従う必要がある。つまり、矢印が活動から始まる場合にはもう一方は結合待ち行列であること、また、結合待ち行列から始まる場合には活動をもう一方の側に持つことである。

付録2. 業務取引システムの動的構造 (Sato & Praehofer 1997)

業務取引システムの動作は付録図1のような動的構造である。この動作を継続していくことから、状態が時間変化していき、結果として状態遷移表として記述できる。

付録3. 図1のビールゲーム・サプライチェーンの状態遷移表

業務取引システムは活動結合図と動的構造で表現される離散事象システムである。業務取引システムへの入力、連続した変化ではなく、商品の到着とか発注伝票の発行のように、階段状に数値が変化する。また、システム内の活動の開始や終了が同時並行的に処理される。図1のビールゲームサプライチェーンは業務取引システムであり、動的構造による時間変化を行う結果として、イベント時刻ごとの状態を記録した状態遷移表 (状態変化表) を生み出す。

付録表1の意味を述べる。

ひとつの初期状態から始めて状態が変化していくようすが状態遷移表である。この状態遷移表はすべての運送活動の入力在庫変数がそれぞれビール40ケースずつ配置された場合である。顧客からの注文は毎日8ケースある。表の最左のtimeの列は経過日数である。2列目のfbから12列目のf_invは工場 (factory) の在庫と活動である。それぞれの列は図1の在庫と活動に対応している。変数fbはf受注残である。以下順に、fs欄の1 (1) は計画と管理の活動が1件計算中でありカッコの内の (1) はあと1日で計算が終わることを表す。fnoはf計画と管理の活動で図2の発注計算の結果のfからの次回注文のオブジェクト個数 (f_new_order), fshはf出荷

オブジェクト個数, $fin1$ は f 輸送待ち 1 のオブジェクト個数, $fd1Q$ は f 輸送 1 の活動が輸送中のオブジェクト個量, $fd1$ 欄の「--」は f 輸送 1 の活動が稼働していないこと, $fin2$, $fd2Q$, $fd2$ は同様であり, f_inv は工場倉庫内のオブジェクト個数である。続く列は, d_ord から d_inv まで 1 次卸の在庫と活動である。それ以外も同様である。したがって, イベントが 1 日ごとにかかるので, 経過日数3067から3386まで 1 日ごとの在庫と活動の変化が示されている。3067日と3386日は同一の状態であり, この後は同一のパターンを無限に繰り返す。つまり, 周期319日 (= 3386-3067) となっている。

各活動や在庫変数の平均在庫は, 周期変動なので 1 周期分の平均と一致する。したがって, 具体的な計算としては, たとえば, fb の場合であれば, 3067日から (3386-1) 日までの個数を総計した数を319で除したものになる。

図 1 のプロセスが定常状態になっているので (周期状態は定常状態である), バルク・プロセスの各活動も定常動作になっている。顧客から毎日 8 ケースの注文が入力され, 平均 8 ケースが出力されている。また, やはり全体が定常なので, 各活動も平均して 8 ケース/日のスループットになっている。このように平均スループットが 8 個/日であることは, ビールゲーム・サプライチェーンのシミュレーション結果の検算として用いられている。

[さとう りょう 横浜国立大学名誉教授]
[2020年7月9日受理]