

先行需要情報と生産能力の調整を考慮した 在庫システムに関する研究

王 曉 華

1 はじめに

本研究では、先行需要情報 (Advance demand information, ADI) が利用できる状況下で、生産能力および在庫補充水準を動的に調整する在庫システムを分析する。先行需要情報は納入に先行し、事前に受け取る顧客オーダーの情報である[1, 2]。サプライヤーシステムにおけるサプライヤーに示す内示情報やオンライン販売における定期配送便、予約販売の注文情報などが先行需要情報と考えられる。特に近年、電子商取引の市場規模¹が拡大することにもない、先行需要情報の活用が増えつつあると予想される。

先行需要情報をもつ在庫システムに関する研究が多くなされている[4-9]²。上流側のメーカーやサプライヤーが先行需要情報を活用し、生産を延期することで在庫を低減する効果が期待できる。王 [4] では、JIT納入および早期納入を考慮した3段階生産在庫システムに対し、シミュレーション分析を行い、負荷が高いシステムにおいて、先行需要情報と早期納入を活用する効果が大きいと示唆している。しかし、生産能力および在庫補充水準を動的に調整することを考慮していない。本研究では、先行需要情報を有するサプライチェーン在庫システムに対し、不確実な需要に対応するために、生産能力および在庫補充水準を動的に調整し、シミュレーション手法を用いてシステムのパフォーマンスを考察する。

1 経済産業省商務情報政策局情報経済課 [3] の報告書によると、2013年から2020年までの7年間で、物販系分野のBtoC-EC市場規模は約2倍に拡大している。

2 これらの文献研究の詳細は、王 [4] を参照されたい。

本稿の構成は次のとおりである。第2章では対象システムを概観し、第3章ではシミュレーションモデルを構築し、実験計画を立てる。第4章ではシミュレーションの結果を解析し、考察を行う。最後に第5章では結論を述べる。

2 対象システム

2.1 システム概要

対象とするシステムは1種類の製品を扱い、オンライン販売業者、流通センター、サプライヤーから構成すると仮定する。流通センターに在庫を維持し、サプライヤーがその在庫を管理するベンダー管理在庫（VMI, Vendor Management Inventory）[10]³を採用する。顧客は、オンラインで商品を注文する。一部の顧客は最短納期で配送を希望し、もう一部の顧客は一定時間を経過した後に、配送を望む。つまり、後者は先行需要情報を有する。これは顧客が定期配送便のような商品を購入すると考えられる。顧客の注文情報が即座に流通センターとサプライヤーに伝達される。流通センターが在庫から即納希望の注文を準備し、配送を行う。先行需要情報を有する注文に対し、サプライヤーが生産を延期する。ここで、先行需要情報がサプライヤーの生産・輸送時間より長いと仮定する。なお、このシステムでは、需要が変動し、生産能力が制限される。

対象システムには、主に3つのプロセスが含まれる。それぞれは、受注プロセス、在庫補充プロセス、および生産（供給）プロセスである。流通センターでは、定期発注方式を採用し、毎日顧客の需要を満たした後、補充量を定める。在庫補充水準からチェックした時点の在庫水準および生産中の仕掛在庫を引いた量を補充量とする。ただし、この在庫補充水準が動的に過去の需要実績で算出される。また、生産プロセスにおいて、事前に生産能力を決め、不足が発生したら、残業などの措置をとり、当日の生産指示量を完成させる。日々の生産能力も定期的に調整する。例えば、1週

3 VMIとは小売業の店頭の在庫管理・発注業務を、商品提供者（ベンダー、Vendor）であるメーカーや卸売業が行うことである [10,p.42]。

か1ヶ月ごとに行う。本研究では、生産能力および在庫補充水準の調整に注目する。

2.2 使用記号と説明

本稿で使用する記号は次のとおりである。

- ・ t : 時刻
- ・ i : 需要区分 ($i=1$, 先行需要情報あり ; $i=2$, 先行需要情報なし)
- ・ n : 移動平均期間数
- ・ T : シミュレーション期間
- ・ ADI_Rate : 先行需要情報をもつ需要の比率
- ・ $Factor_Cap$: 生産能力を調整する係数
- ・ $Period_AjustCap$: 生産能力を調整する期間
- ・ $Factor_Order$: 在庫補充水準を調整する係数
- ・ ADI_LT : 需要リードタイム。納入に先行し、事前に受け取る顧客オーダーの情報。

- ・ $Supplier_LT$: 生産リードタイム

- ・ $D(t)$: t 時刻における需要量。次の式に従うとする[11]⁴

$$D(t) = base + slope \times t + season \times \sin\left(\frac{2\pi}{SeasonCycle} \times t\right) + noise \times snormal()$$

- ・ $F(t)$: t 時刻における需要予測値⁵

$$F(t) = \frac{\sum_{i=1}^n D(t-i)}{n}$$

- ・ $S(t)$: t 時刻における在庫補充水準

$$S(t) = Factor_Order \times F(t) \times (1 - ADI_Rate)$$

- ・ $IL(t)$: t 時刻における在庫水準

$$IL(t) = IL(t-1) - D(t) \times (1 - ADI_Rate)$$

4 この需要において、傾向変動、季節変動、不規則変動が含まれている。第1項はベース量（例えば、過去需要の平均値）、第2項は傾向変動、第3項は季節変動、第4項は不規則変動と考えられる。

5 平均移動法を用いて、需要予測値を算出する。

- ・ $Q(t)$: t 時刻における補充量

$$Q(t) = S(t) - IL(t) - WIP(t)$$

- ・ $FG(t)$: t 時刻における製品在庫

$$FG(t) = \max(IL(t), 0)$$

- ・ $BD(t)$: t 時刻における受注残

$$BD(t) = \max(-IL(t), 0)$$

- ・ $WIP(t)$: t 時刻における仕掛在庫

- ・ $Cmax(t)$: t 時刻における生産能力の上限

$$Cmax(t) = \frac{\sum_{i=1}^{Period_AjustCap} D(i)}{Period_AjustCap} \times Factor_Cap$$

- ・ $CS(t)$: t 時刻における生産能力不足

$$CS(t) = \max(-(Cmax(t) - CO(t)), 0)$$

- ・ $CO(t)$: t 時刻における使用した生産能力

2.3 評価尺度

本研究では、平均（製品）在庫、平均受注残、能力の過不足などの平均値を尺度とし、対象システムの性能を解析する。それぞれは以下のとおりである。

1. 平均（製品）在庫 :

$$E(FG) = \int_0^T FG(t) dt / T \quad (1)$$

2. 平均受注残 :

$$E(BD) = \int_0^T BD(t) dt / T \quad (2)$$

3. 平均生産能力不足

$$E(CS) = \int_0^T CS(t) dt / T \quad (3)$$

3 シミュレーション実験計画

3.1 シミュレーションモデル

Simio[12]というソフトウェアを利用し、シミュレーションモデルを構築

した。モデルには次のプロセスが含まれる。

1. モデルの初期化。変数や属性の初期値を与える。
2. 毎日の最初に、その日の需要や生産能力などを更新する。
3. 毎日の最後に、その日の生産能力に関する情報を更新する。
4. 能力を定期的に調整する。例えば、1週間、1ヶ月ごとに受注状況に基づき、能力の上限を決める。この期間をシミュレーション実験の要因の1つとする。
5. 受注、在庫補充、生産に関するプロセスである。この部分のプロセスを図1に示す。

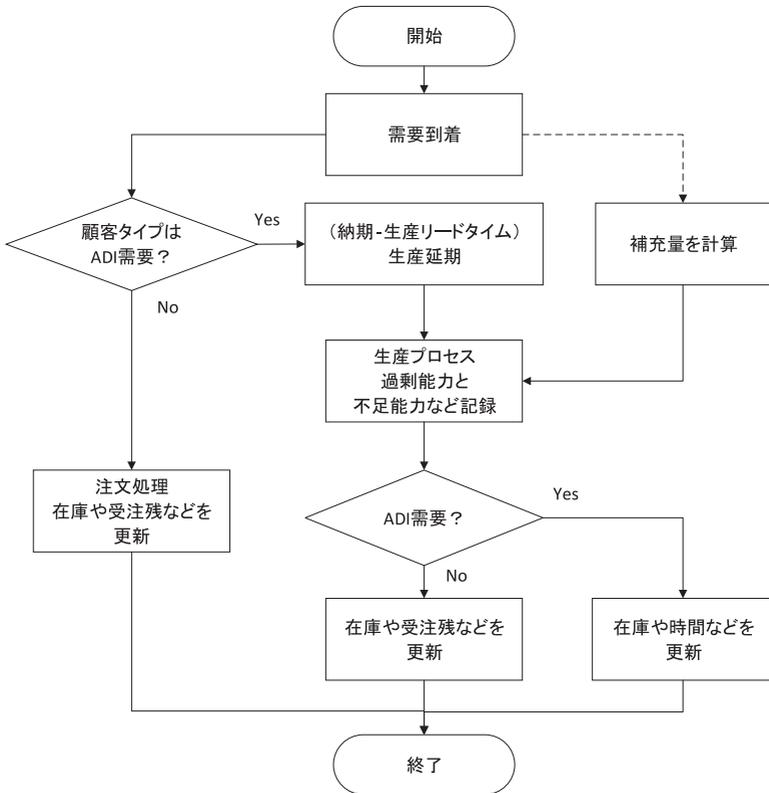


図1 受発注のプロセス

シミュレーションモデルの検証は定数の値をインプットし、ステップごとに確認することや、アニメーションの機能を利用し、時間の変動により、在庫や能力などの推移を観測することなどで行った。

3.2 実験計画

需要データは、 $D(t) = base + slope \times t + season \times \sin\left(\frac{2\pi}{SeasonCycle} \times t\right) + noise \times snormal()$ を用い、表1のパラメータで生成する。それを図2に示す。なお、在庫補充水準を決めるため、3期移動平均法を利用し、需要予測を行う。

表1 需要データに関するパラメータ

パラメータ	値
基準量 (base)	500
傾向係数 (slope)	2
季節係数 (season)	100
周期 (SeasonCycle)	7
不規則係数 (noise)	100

表2に示す4つの因子およびその水準値に対し、完全要因実施計画に基づき、全部36シナリオのシミュレーション実験を実施する。ほかのパラメータの値はそれぞれ、 $ADI_LT=5$, $Supplier_LT=3$, $FG(0)=1,000$ とし、シミュレーション時間は500日間、最初の50日間はウォームアップと設定する。

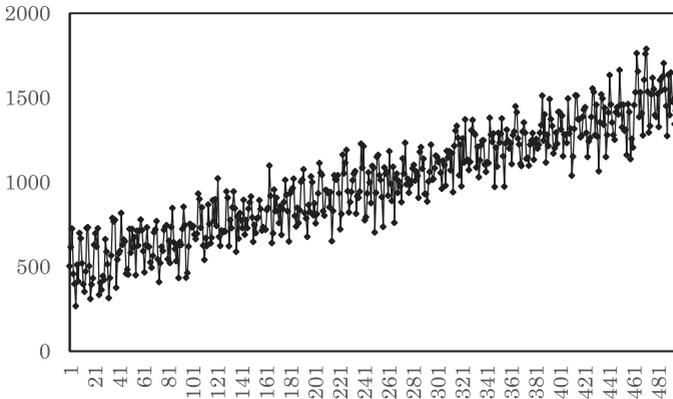


図2 需要データの特徴

表2 実験計画

因子	水準値
<i>ADI_Rate</i>	0.2,0.5,0.8
<i>Factor_Cap</i>	1,1,5
<i>Period_AjustCap</i>	5,15,25
<i>Factor_Order</i>	1,1,5

4 結果考察

前章の実験計画を実施したシミュレーションの結果を、JMP16を用いて分析する。評価尺度は平均製品在庫，平均受注残，平均生産能力の不足である。それぞれの評価尺度に対し，モデルのあてはめを数回行い，効果がない要因を除き，最終的に分散分析でモデルが有意であることを確認したうえで，各要因および要因間の交互作用を考察する。

4.1 平均在庫への影響

まず，平均在庫に対し，モデルのあてはめを行った結果として，*Factor_Cap* および *Period_AjustCap* は効果がないことがわかる。この2つの要因を除いた分散分析を表3に示す。モデル有意であることを意味する。

表3 平均製品在庫に関する分散分析

要因	自由度	平方和	平均平方	F値
モデル	3	1464778.6	488260	7.366e+9
誤差	32	0.00212125	6.629e-5	p値(Prob>F)
全体 (修正済み)	35	1464778.6		<.0001*

次に、*ADI_Rate* と *Factor_Order*、およびこの2要因間の交互作用を考察する。この2要因が平均在庫に与える影響を図3に示す。

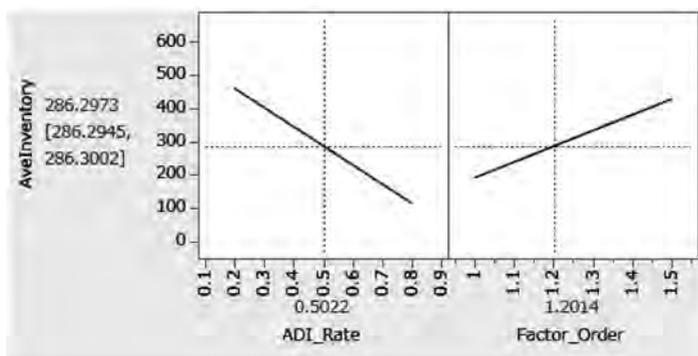


図3 *ADI_Rate* と *Factor_Order* が平均在庫に与える影響

図3から、*ADI_Rate* の増加により、平均在庫が下がり、*Factor_Order* の増加により、在庫が増えることが窺える。*ADI_Rate* は先行需要情報をもつ需要の比率で、この類の需要に対し、生産延期ができ、在庫なしで対応できるため、在庫低減の効果があることを意味する。*Factor_Order* は動的に在庫補充水準を決める要因である。この要因の値が大きいことは、在庫補充水準が高めに設定されるという意味で、毎回の補充量も多いということを表す。

2要因間の交互作用を図4に示す。図4の左下の部分から、*ADI_Rate* の増大により、*Factor_Order* が大きい場合、在庫の低減効果が著しいことがわかる。一方、*Factor_Order* の増大により、*ADI_Rate* が大きい場合、つま

り即納の注文が少ないとき、在庫への影響がより小さい。これらの結果の考察から、在庫に対し、*ADI_Rate* と *Factor_Order* の影響、およびこの2要因間の交互作用が認められるため、先行需要情報が利用可能の場合、それに合わせて在庫補充の調整係数を決めればよいということを示唆する。

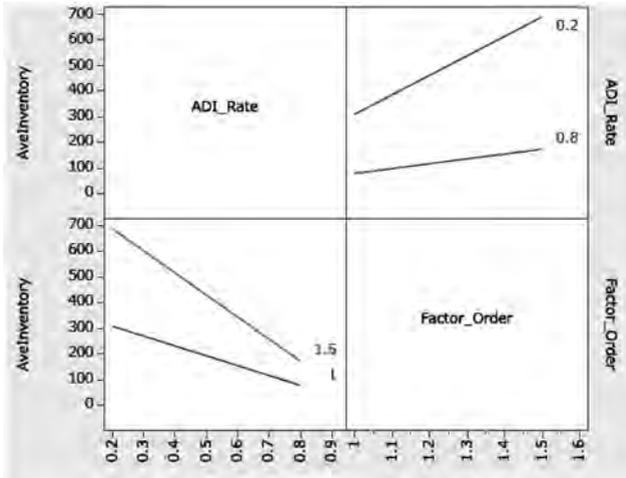


図4 平均在庫における*ADI_Rate* と *Factor_Order* の交互作用

4.2 平均受注残への影響

受注残は注文を受けて、まだ納品していないものである。先行需要情報をもつ注文も受注残の一種といえるが、本稿における受注残は即納商品を希望する注文に対し、手持在庫から満たすことができず、出荷の遅延が発生する注文を意味する。つまり、顧客の満足度に影響を与える。そのため、受注残の発生をなるべく避けるべきである。

前節と同様に、まず平均受注残に対し、モデルのあてはめを実施した。その結果として、*Factor_Cap* および *Period_AjustCap* は効果がなかったため、この2つの要因を除いた分散分析を行い、これを表4に示す。モデルが有意であることがわかる。

表4 平均受注残に関する分散分析

要因	自由度	平方和	平均平方	F値
モデル	3	7569.2381	2523.08	2.243e+9
誤差	32	0.000036	1.125e-6	p値(Prob>F)
全体 (修正済み)	35	7569.2382		<.0001*

次に、*ADI_Rate* と *Factor_Order* が平均受注残に与える効果を考察する。図5は平均受注残がこの2つの要因によって変化するものである。図5から、両要因の値の増大により、平均受注残が下がることがわかる。*ADI_Rate* は先行需要情報をもつ注文であるため、実質上見込生産を意味する。この部分の比率が大きい場合、即納注文が少なくなり、受注残も下がるはずである。一方、*Factor_Order* の増大により、1回あたりの補充量が増え、品切れの可能性が下がる。すなわち、受注残が少なくなる。

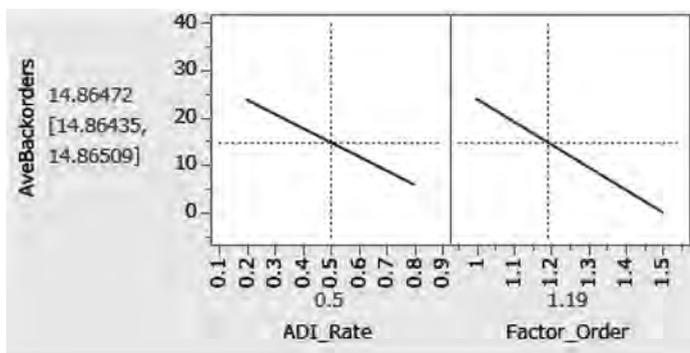


図5 *ADI_Rate* と *Factor_Order* が平均受注残に与える影響

さらに、平均受注残における *ADI_Rate* と *Factor_Order* の2要因間の交互作用を考察する。図6はこの2要因の交互作用を示すものである。図6の左下の部分から、*ADI_Rate* の増大により、*Factor_Order* が大きい場合、受注残がほぼ発生しないが、*Factor_Order* が小さい値をとる場合、*ADI_Rate* の変化が平均受注残に与える影響が著しい。一方、図6の右上の部分から、*Factor_Order* が大きいとき、先行需要情報の有無に関わらず平均受注残は

ほぼ同じであるが、*Factor_Order* が小さい値をとる場合、先行需要情報の影響が大きい。その比率が大きいほど、受注残が少なくなる。

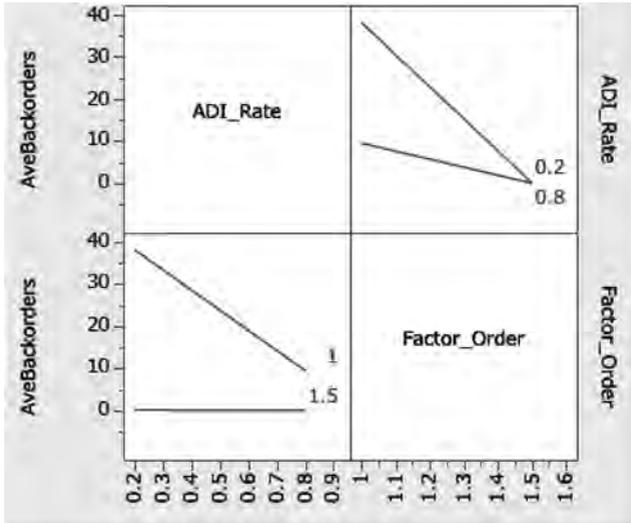


図6 平均受注残における *ADI_Rate* と *Factor_Order* の交互作用

4.3 生産能力への影響

本節では、生産能力不足を評価尺度とし、生産能力における各要因の効果および要因間の交互作用を考察する。前節と同様に、まず、平均生産能力不足に対し、モデルのあてはめを行った。効果のない要因および要因間の交互作用を除いた分散分析およびパラメータの効果検定をそれぞれ表5と表6に示す。モデルが有意であること、表示されている要因および要因間の交互作用が有意であることが見られる。

表5 平均生産能力の不足に関する分散分析

要因	自由度	平方和	平均平方	F値
モデル	5	42912.829	8582.57	1000.897
誤差	30	257.246	8.57	p値(Prob>F)
全体 (修正済み)	35	43170.075		<.0001*

表6 パラメータの効果の検定

要因	パラメータ数	自由度	平方和	F値	p値 (Prob>F)
ADI_Rate	1	1	498.625	58.1496	<.0001*
Factor_Cap	1	1	40526.726	4726.21	<.0001*
ADI_Rate*Factor_Cap	1	1	484.346	56.4843	<.0001*
Period_AjustCap	1	1	704.402	82.1472	<.0001*
Factor_Cap*Period_AjustCap	1	1	698.731	81.4859	<.0001*

次に、各要因が生産能力不足に与える影響を見てみる。これを図7に示す。図7から、ADI_Rateの増大により、生産能力の不足がやや下がる一方、Period_AjustCapの増大により、生産能力の不足がやや上がる傾向にある。それに対し、Factor_Capの増大により、生産能力の不足が大幅に下降する。Factor_Capは生産能力の上限を設定する係数であるため、大きいほど生産能力の上限値が高いと意味する。十分な能力があれば、不足が生じないことになると考えられる。

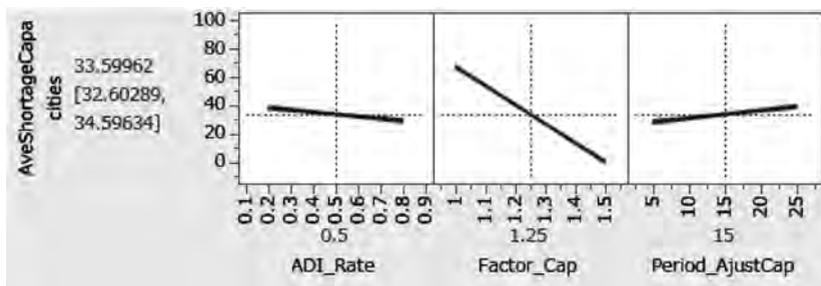


図7 各要因が生産能力不足に与える影響

さらに、各要因間の交互作用を生産能力不足にもたらす効果を考察する。図8は要因間の交互作用を示すものである。表6からADI_RateとFactor_Capの間およびFactor_CapとPeriod_AjustCapの間に交互作用が有意である一方、図8から、これらの要因間の交互作用は顕著でないことが見られる。特に、Factor_Capの値が大きい場合、ADI_RateとPeriod_AjustCapの変化に

より、能力の不足がほぼ変わらない。それにもかかわらず、*Factor_Cap* が小さい値 (=1) をとる場合、*ADI_Rate* の増大により、能力の不足が緩和されることに対し、*Period_AjustCap* の増大により、能力の不足が上がる傾向になる。これらの結果から、先行需要情報および能力の動的調整の利用価値があると考えられる。

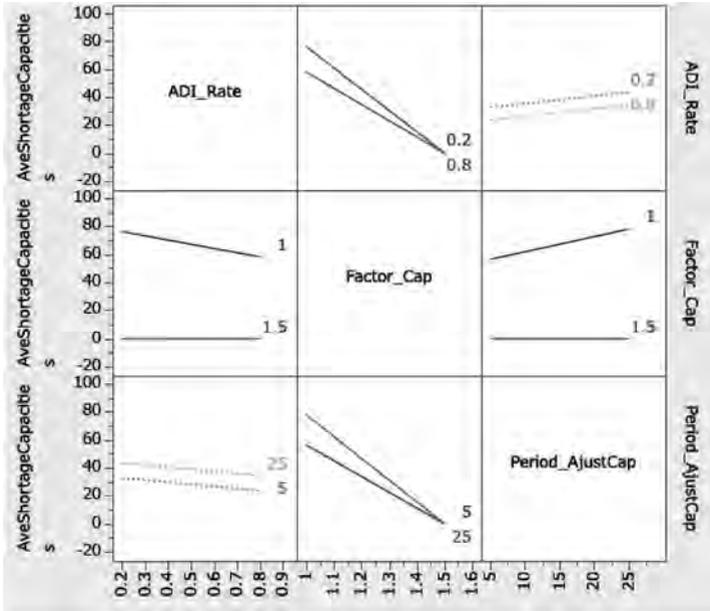


図8 生産能力不足における要因間の交互作用

5 おわりに

本稿では、不確実な需要および先行需要情報をもつサプライチェーン在庫システムを対象に、4つの要因である *ADI_Rate*, *Factor_Cap*, *Period_AjustCap*, *Factor_Order* が平均在庫, 平均受注残, 平均生産能力の不足に与える影響を考察した。4つの要因はそれぞれ、先行需要情報をもつ需要の比率, 生産能力を調整する係数, 生産能力を調整する期間, 在庫補充水準を決める係数である。

結論として、次の4つが挙げられる。①先行需要情報をもつ需要の比率が大きいほど、在庫と受注残の低減効果がよい。ただし、在庫補充水準の係数が大きい場合、受注残にほとんど影響を与えない。②生産能力の不足は主に能力の係数に影響され、この係数を低く設定する場合、動的に能力を調整する期間が短くなったら、不足への改善効果が窺える。先行需要情報において同様な効果が見られる。③在庫補充水準の係数が在庫および受注残に大いに影響を与える一方、生産能力への改善効果が認められない。④3つの評価尺度に対し、先行需要情報をもつ需要の比率がほかの要因との間に交互作用がある。これらの結論を踏まえ、生産能力や在庫補充水準を決めるとき、先行需要情報を有効的に活用する意味がある。また、販売計画を立てる際に、予約販売商品や定期便商品などの販売方式を設計し、なるべく顧客の需要情報を得て活用することが期待できる。

参考文献

1. 上野信行, *内示情報と生産計画—持続可能な社会における先行需要情報の活用—*. 2011. 朝倉書店.
2. 王曉華, *先行需要情報を用いた生産在庫システムのシミュレーション分析*. 西南学院大学商学論集, 2015. **62**(1): pp. 53-74.
3. 経済産業省商務情報政策局情報経済課, *令和2年度産業経済研究委託事業 (電子商取引に関する市場調査) 報告書*. 2021.
4. 王曉華, *早期納入を考慮した生産在庫システムに関する研究*. 商学論集, 2016. **62**(3-4): pp. 353-372.
5. Hariharan, R. and P. Zipkin, *Customer-Order Information, Leadtimes, and Inventories*. Management Science, 1995. **41**(10): pp. 1599-1607.
6. Liberopoulos, G. and S. Koukournialos, *Tradeoffs between Base Stock Levels, Numbers of Kanbans, and Planned Supply Lead Times in Production/Inventory Systems with Advance Demand Information*. International Journal of Production Economics, 2005. **96**(2): pp. 213-232.
7. Claudio, D. and A. Krishnamurthy, *Kanban-Based Pull Systems with*

- Advance Demand Information*. International Journal of Production Research, 2009. **47**(12): pp. 3139-3160.
8. Krishnamurthy, A. and D. Claudio, *Pull Systems with Advance Demand Information, in Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, M.E. Kuhl, et al., Editors. 2005. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers. pp. 1733-1742.
 9. Sarkar, S. and J.P. Shewchuk, *Use of Advance Demand Information in Multi-Stage Production-Inventory Systems with Multiple Demand Classes*. International Journal of Production Research, 2013. **51**(1): pp. 57-68.
 10. 曹徳弼, et al., サプライチェーンマネジメント入門—QCDE戦略と手法. 2008. 朝倉書店.
 11. Zhao, X., J. Xie, and J. Leung, *The Impact of Forecasting Model Selection on the Value of Information Sharing in a Supply Chain*. European Journal of Operational Research, 2002. **142**(2): pp. 321-344.
 12. Smith, J.S., D.T. Sturrock, and W.D. Kelton, *Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications* 2018. Simio LLC.