

製品稼働情報に基づく サービスパーツの需要予測

齋藤 尋彦, 武田 勝徳, 浅田 克暢

情報通信技術の発展に伴い、製造業が自社製品の稼働情報をリアルタイムに収集し、顧客へのサービスに活用する動きが広がっている。小松製作所では、世界中で稼働する建設機械や鉱山機械に搭載されたセンサーやGPSより稼働時間や位置情報といった製品稼働情報を収集しており、顧客サービスに活用している。さらに製品稼働情報よりサービスパーツの需要を予測するシステムを開発し、需給調整業務に活用している。本稿では、小松製作所が製品稼働情報をサービスパーツ需要予測に活用するアプローチとして採用した平均故障間隔推定モデルおよび部品交換パターン推定モデルについて解説する。

キーワード：サービスパーツ，需要予測，平均故障間隔，部品交換パターン

1. はじめに

近年、製品のコモディティ化が進むに従って、製品に付与されるサービスのクオリティや多様性が、市場における企業の優劣を決する傾向が非常に高まっている[1]。24時間365日といった高い稼働率を要求される製品を生産・販売している製造業においては、修理/交換のためのサービスパーツを迅速に供給できるかが競合他社との差別化要素となっている。

(株)小松製作所(以下コマツ)は、アフターサービス市場における事業基盤強化を狙い、サービスパーツ在庫を適正配置し、迅速に顧客へ供給するために、製品稼働情報に基づくサービスパーツ需要予測システムを構築した。キャノンITソリューションズ(株)は、OR技法の適用分野である需要予測システムの開発経験を生かし、システムの設計・開発に参画した。本稿では、対象問題とアプローチについて述べる。

2. サービスパーツ需要予測の概要

2.1 サービスパーツ需要予測手法

サービスパーツの需要予測は、一般に本体製品の需要予測と比較して次のような特徴がある[2]。特徴の1点目は、本体製品販売量や稼働情報、使用環境に依

存する点である。サービスパーツの需要は、本体製品販売量に比例して増加する。逆に販売されてからの稼働量が少なければ、需要は減少する。また、屋内で使用されるのか屋外で使用されるのかといった使用環境により需要量が異なる。特徴の2点目は、部品故障率に依存することである。同じ製品に使用されている部品でも、部品によって故障率は異なり、需要量が異なる。特徴の3点目は欠品が許されないケースがあることである。サービスパーツは、高い稼働率が要求される製品で代替部品が無い場合、欠品すると顧客のビジネス活動を止めてしまう。

図1は、サービスパーツ需要予測に利用するモデルをインプット情報別にまとめたものである。部品に関する情報のみを使用して予測する部品ベース需要予測として、時系列予測モデルがある。時系列予測モデルは、部品交換実績から将来を予測するスタンダードな手法である。一方、本体製品ベース需要予測は、部品

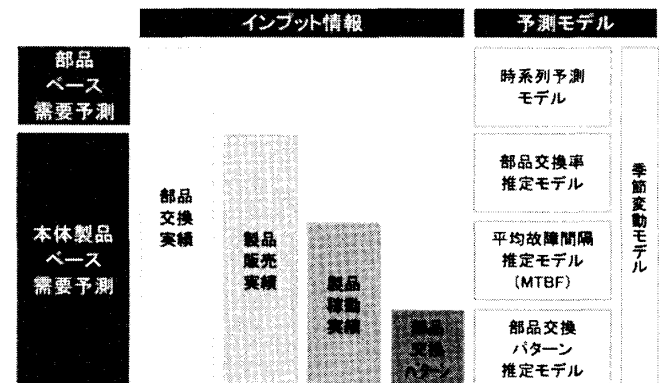


図1 サービスパーツ需要予測モデル

さいとう ひろひこ

(株)小松製作所

〒107-8414 港区赤坂2-3-6

たけだ かつのり, あさだ かつのぶ

キャノンITソリューションズ(株) 数理技術部

〒550-0001 大阪市西区土佐堀2-2-4

に関する情報だけでなく、本体製品の情報も利用する。部品交換率推定モデルは、本体製品の販売実績で部品の需要数を割った部品交換率を推定するモデルであり、本体製品の稼働実績が収集できない場合や部品販売が本体製品の稼働実績によらない場合に利用する。

平均故障間隔推定モデルは、本体製品の稼働実績累計を部品交換実績累計で割った平均故障間隔で部品が交換されるというモデルである。つまり部品の交換数は、本体製品の稼働時間に比例するという考え方である。

部品交換パターン推定モデルは、稼働時間の累計によって部品の交換率が変化するような部品を想定している。例えば、本体製品の稼働時間合計が10,000時間を超えたあたりから部品の交換数が急激に増えるような複雑な故障特性を持つ部品の場合に有効である。

本体製品の稼働情報やメンテナンス記録といった情報は、インストールベース情報と呼ばれ、サービスパーツ需要予測のモデルに組み込むことで、モデルを改良できることが知られている[3]。

2.2 コマツにおける製品稼働情報

コマツは、ショベルカー、ブルドーザー、ダンプカーといった建設・鉱山機械を中心に産業用機械・車両などの製造販売事業をグローバルに展開している。コマツでは、顧客サービスのクオリティ向上を狙い、製品内部に組み込まれているセンサーから製品の稼働情報や全地球測位システム（GPS）から測定した位置情報をリアルタイムに収集し、通信衛星経由で送信、サーバーに蓄積する「KOMTRAX」（コマツ・マシン・トラッキング・システム、略称コムトラックス）システムを開発した（図2）。

KOMTRAXでは、エンジン負荷、エンジン稼働時間、走行距離、残燃料、車両位置、故障状況などをモ

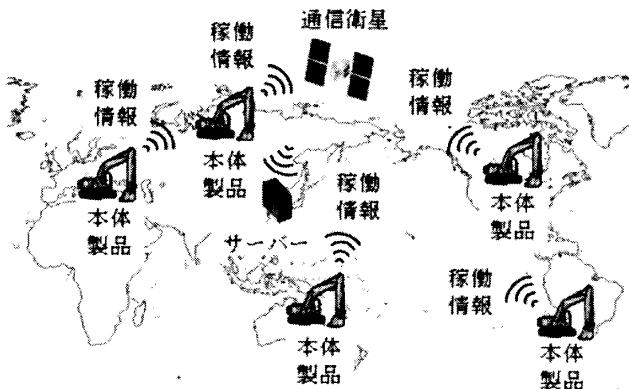


図2 KOMTRAX

ニタリングしており、日々の顧客サービスに活用している。例えば、稼働時間や走行距離に応じて定期的に交換が必要な部品については適切な交換タイミングで交換することで、故障を予防している。また、故障情報をモニタリングしているため、故障した際、故障箇所の特定制や原因究明を迅速に行うことが可能である。さらに本体製品の位置情報が追跡できるため、盗難防止につながっている。以上のようにKOMTRAXの活用は顧客サービスの満足度向上に大きく寄与している。

2.3 コマツにおけるサービスパーツ需要予測

コマツで取り扱うサービスパーツの総数は、100万種類にも及ぶ。サービスパーツは、サイズや価格、性質が異なり、その需要にはトレンドや季節性がある。従来の需要予測システムでは、全てのサービスパーツにおいて過去の受注実績の平均値を使用していた。そのためトレンドや季節変動があるサービスパーツの場合、需要変動に十分に追従できなかった。そこで次の事項を考慮した新しい需要予測方式を検討した。

第1に、サービスパーツ需要は、本体製品の台数や本体製品の稼働時間が増えるに従って、増加する点を考慮することである。

第2に、サービスパーツ需要は、部品交換パターンに左右される点を考慮することである。例えば、本体製品の稼働時間に比例するものや、一定の稼働時間を超過すると交換率が急激に高まるといった傾向である。

第3に、需要の季節変動を考慮することである。例えば、暑い時期に需要が増加する、逆に寒い時期に需要が増加するといったことである。

これらの事項を考慮し、時系列予測モデル、平均故

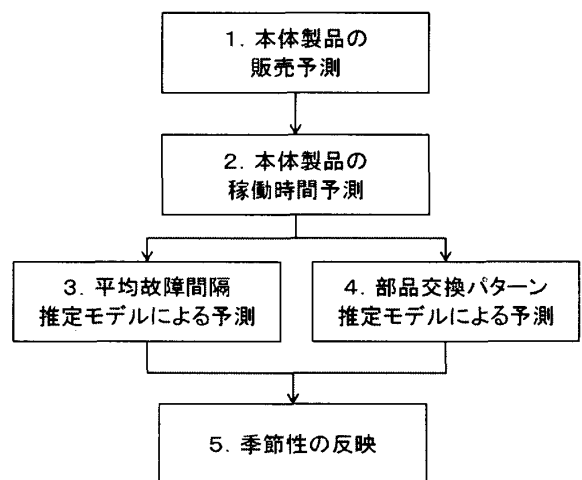


図3 製品稼働情報に基づくサービスパーツ需要予測 概略フロー

障間隔推定モデル，部品交換パターン推定モデル，季節変動モデルを用いた予測方式を採用した。図3は，サービスパーツ需要予測の概略フローである。まず本体製品の販売予測を行い，将来稼働する製品の台数を求め，すでに稼働している製品や将来稼働する製品に対し，稼働時間を予測する。次に，稼働情報の実績と予測を元に，平均故障間隔推定モデルと部品交換パターン推定モデルにより予測を行う。最後に2つのモデルの予測結果に季節性を反映させる。

本稿では，以降，概略フローに示した各要素について詳しく述べる。

3. 製品稼働情報に基づくサービスパーツ需要予測

3.1 本体製品の販売予測

最初に将来のサービスパーツ需要は，将来の本体製品の販売台数にも左右されるため，本体製品の販売予測を行う。コマツの場合，本体製品の機種・型式・地域別に過去1年間の販売台数平均を予測値として，自動で求めている。自動で求める一方で，人間の販売予測結果を利用することも可能となっている。

3.2 本体製品の稼働時間予測

コマツではKOMTRAXで自動的に稼働実績データを収集し，将来の稼働時間は稼働実績データの平均で予測する(図4)。 $g_i(t)$ は，時点 t における本体 i の累積稼働時間関数である。ところでKOMTRAXを搭載していない旧式の本体製品や将来販売予定の本体製品は稼働実績が無いが，あらかじめ機種・型式・地域別に集計された月別標準稼働時間を設定しておき，稼働時間の予測値としている。

3.3 平均故障間隔推定モデルによる予測

ステップ1：平均故障間隔計算

平均故障間隔(MTBF: Mean Time Between Failure)は，機械や情報システムの信頼性を意味する指標として広く利用されている。文字通り，故障から次の故障までの平均的な間隔を意味しており，MTBFの数値が大きいほど信頼性が高いといえる。MTBF

は，機械や情報システムの稼働時間を故障回数で割って求めることができる。コマツでは，(1)式のように本体製品の稼働実績とサービスパーツとして交換された実績からMTBF $M(t)$ を推定している。

$$M(t) = \frac{\sum_{i=1}^m g_i(t)}{z(t)} \quad (t=L-1) \quad (1)$$

m は，予測対象のサービスパーツが使用されている本体製品の台数であり， $g_i(t)$ は，現時点 L よりも1時点前までの本体製品 i の累積稼働時間である。図5は，特定のサービスパーツが使用されている本体製品の稼働時間合計の月別推移である。稼働時間グラフの右で一定になっている年月は，将来の稼働時間予測値であり，過去の稼働実績データの平均としているためである。また $z(t)$ は，本体製品が稼働開始してから現時点 L よりも1時点前までの予測対象部品が交換された実績の累計である。以上のことから(1)式は，予測対象部品が使用されている本体製品の稼働時間の総合計時間を予測対象部品の交換実績の合計で割ったMTBFを意味する。

ステップ2：平均故障間隔から予測

ステップ1で求めたMTBFは過去の実績値である。コマツでは「将来もMTBFは一定」という仮定のもとで，サービスパーツ需要を予測する。図6はMTBFの月別推移である。MTBFはグラフの右側で一定となっているが，将来のMTBFは，前月のMTBFと同じと仮定しているためである。

3.2節で求めた本体製品の稼働時間予測値とMTBFを用いて，将来のサービスパーツの累積交換数 $y(t)$ を推定するのが(2)式である。

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^m g_i(t)}{M(L-1)} \quad (t \geq L) \quad (2)$$

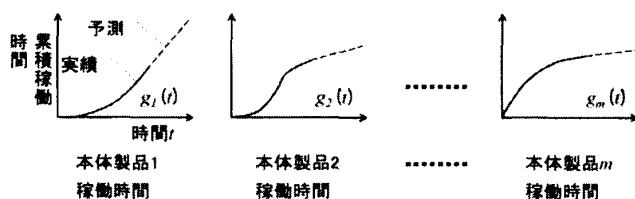


図4 本体製品の稼働時間予測

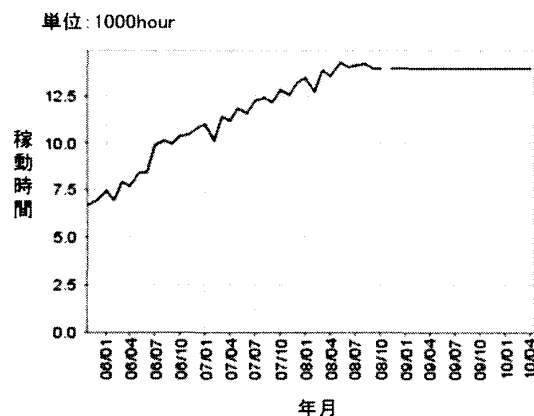


図5 稼働時間月別推移

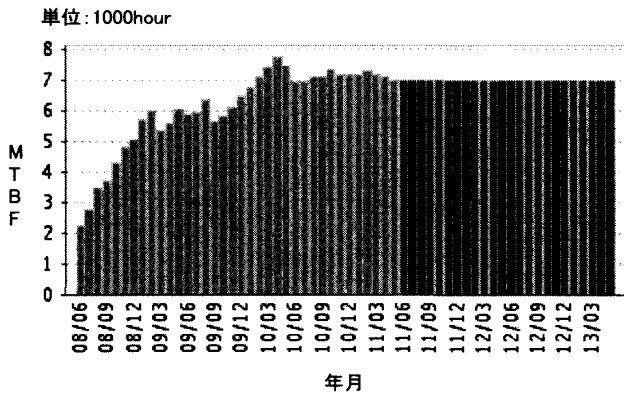


図6 MTBF 月別推移例

(2)式は、(1)式同様、予測対象のサービスパーツが使用されている本体製品の稼働時間の総合計をMTBFで割り、将来の時点 t における部品の累積交換数 $y(t)$ を求めている。

平均故障間隔推定モデルによるサービスパーツ需要予測法は、従来の時系列予測手法と比較すると、サービスパーツの過去需要実績だけでなく、製品本体の稼働時間の大小が加味されており、時系列予測手法よりも高精度の予測となる。

3.4 部品交換パターン推定モデルによる予測

ステップ1：部品交換パターン選択

部品交換パターンとは、本体製品の累積稼働時間と部品の累積交換数との関係を表したものであり、コマツでは100種類以上のパターンを用意している(図7)。なお $f_j(x)$ は、部品交換パターン j における累積稼働時間 x での部品累積交換数関数を意味する。次に予測対象のサービスパーツに対し、どの部品交換パターンを適用するかを決める必要があるが、100万種類以上のサービスパーツに対し、人間が一つ一つ選んでいくのは不可能である。そこで、各部品交換パターンから求めた累積交換数(推定)と累積交換数(実績)の誤差を求め、誤差が最小の部品交換パターンを選択する方式とした。

部品交換パターンによる累積交換数(推定)は(3)式で求める。本体製品1台ごとに累積稼働時間実績から部品累積交換数を推定し、すべての本体製品の部品累積交換数を合計することで累積交換数(推定) $y(t)$ を求めている。

$$y(t) = \sum_{i=1}^m f_j(g_i(t)) \quad (t < L) \quad (3)$$

$g_i(t)$ は、現時点 L よりも1時点前までの本体製品 i の累積稼働時間である。累積稼働時間がわかれば、部

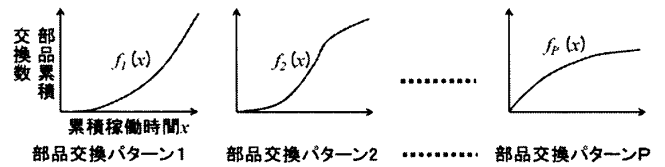


図7 部品交換パターン

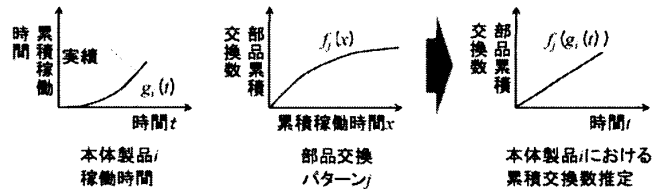


図8 本体製品1台の累積交換数推定

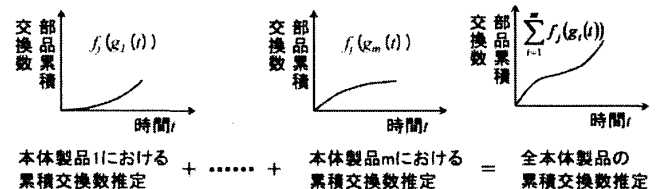


図9 全本体製品の累積交換数推定

品交換パターン $f_j(x)$ から本体製品 i の累積交換数が求まる(図8)。これを予測対象のサービスパーツが使用されている全本体製品について合計すると、過去におけるサービスパーツ需要である累積交換数(推定)が求まる(図9)。

(3)式の計算を全部品交換パターンについて実施する。次に部品交換パターンを選択するための評価指標として、誤差を定義する。誤差は、累積交換数(実績)と累積交換数(推定)から(4)式で示す平均二乗誤差の平方根(RMSE: Root Mean-Square Error)で求める。

$$\min e_j = \sqrt{\frac{\sum (y(t) - z(t))^2}{N}} \quad (4)$$

(4)式をさまざまな部品交換パターンについて計算し、誤差最小の部品交換パターン f_{\min} を選択する(図10)。

ステップ2：本体製品の稼働時間に基づく予測

ステップ1で選択した部品交換パターン f_{\min} を用いて、将来の本体製品の稼働時間から将来の部品累積交換数を(5)式で推定する。

$$y_t = \sum_{i=1}^m f_{\min}(g_i(t)) \quad (t \geq L) \quad (5)$$

$g_i(t)$ は、現時点 L 以降の本体製品 i の累積稼働時間

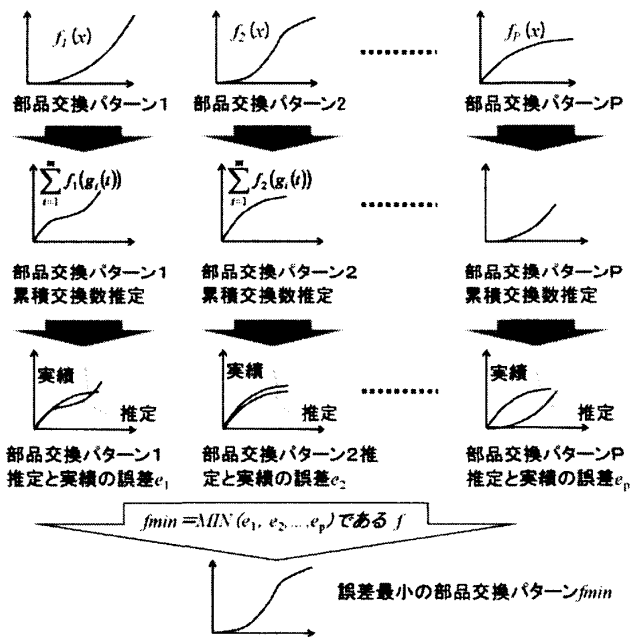


図10 全部品交換パターンで累積交換数を推定

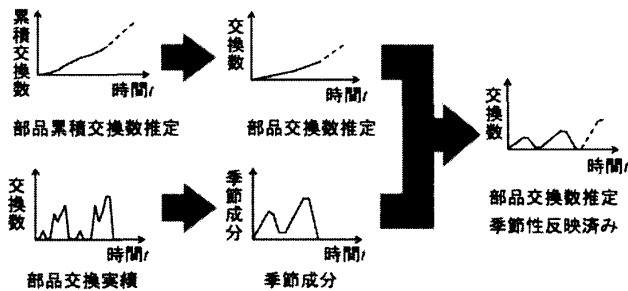


図13 季節性の反映

ンを用いた部品交換パターン推定による予測と等価である。一方、部品交換パターン推定による予測は、複雑な部品交換パターンを定義し、予測することが可能なため、平均故障間隔推定モデルよりも精緻なモデル化が可能である。

3.5 季節性の反映

平均故障間隔推定モデルによる予測や部品交換パターン推定モデルによる予測は、季節性が加味されていない。過去の部品交換実績から季節性の有無を判定し、季節性ありと判断されるサービスパーツについては、季節成分を求め、予測値に反映する(図13)。

4. おわりに

本稿では、リアルタイムに収集される製品稼働情報を用いて、サービスパーツ需要を予測する手法として、コマツで採用した平均故障間隔推定モデルおよび部品交換パターン推定モデルと季節性の反映について述べた。従来、製品稼働情報は、予防保全や故障発生時の迅速な対応といった顧客サービスの改善を目的に利用されてきたが、サービスパーツ需要予測にも利用可能である。

コマツにおいて本アプローチに基づく需要予測方式を実装したシステムは、2007年より稼働しており、日々の業務に活用されている。また、予測パラメータのチューニングを通して、予測精度の改善に取り組んでいる。例えば、将来の景気動向を反映するために、本体製品の稼働時間を増減させるパラメータの追加や、予測単位となる地域の細分化といった改良である。さらなる改善策として次の3点が考えられる。

第1に、新製品に使用される新規部品について、合理的に部品交換パターンを決定することである。新規部品は交換実績が無い場合、部品交換パターンの自動選択ができない。そこで部品特性や品質目標から、合理的な部品交換パターンを設定する方式を検討するこ

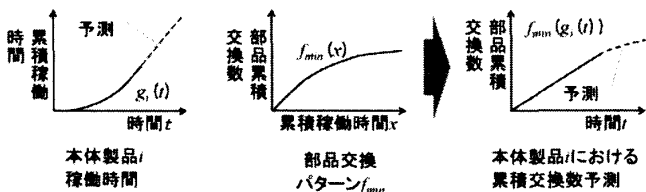


図11 1車両の累積交換数推定
(部品交換パターンは f_{min} 使用)

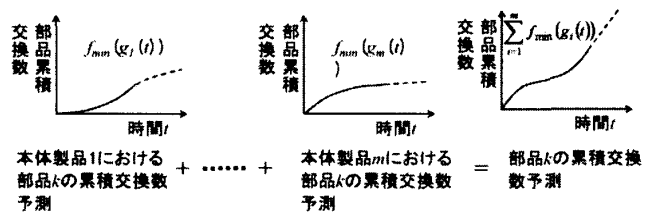


図12 全車両の累積交換数推定
(部品交換パターンは f_{min} 使用)

である。累積稼働時間と、部品交換パターン $f_{min}(x)$ から本体製品 i の累積交換数が求まる(図11)。これを予測対象のサービスパーツが使用されている全本体製品について合計すると、将来におけるサービスパーツ需要である累積交換数(推定)が求まる(図12)。

部品交換パターン推定モデルによるサービスパーツ需要予測法は、平均故障間隔推定モデル同様、サービスパーツの過去需要実績だけでなく、製品本体の稼働時間の大小が加味されており、従来の時系列予測手法よりも高精度の予測となる。また、平均故障間隔推定モデルは、累積稼働時間に正比例する部品交換パター

とで、新部品についての予測精度が改善する。

第2に、交換実績データを特異需要と通常の需要に層別し、予測することである。特異需要を除いて予測することで、本来の需要のパターンを顕在化させることができ、予測精度向上が期待できる。

第3に、部品特性や使用部位（部品が製品でのどの部位に利用されているか）により、エンジンの稼働時間以外の稼働実績データを利用することである。例えば、走行のための駆動系部品（トランスミッションや車軸）は、エンジンの稼働時間よりも走行距離との相関が高いと考えられ、平均故障間隔推定モデルや部品交換パターン推定モデルの精度が向上する。

最後に平均故障間隔や部品交換パターンを利用して、サービスパーツ需要を予測するアプローチにおいて、コマツのように実際の製品稼働情報を基に大規模に実

施された例は筆者の知る限り他に無く、情報通信技術の発展により、ようやく実用の域に達したといえる。本稿が、サービスパーツ需要予測および在庫管理に関わる研究者および実務者の一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] K.Albreht. and R. Zemke, "Service America in the new economy," McGraw-hill, 2002. カール・アルブレヒト, ロン・ゼンケ, 和田正春 (訳), 『サービスマネジメント』, ダイアモンド社, 2003.
- [2] 浅田克暢, 岩崎哲也, 青山行宏, 『在庫管理のための需要予測入門』, 東洋経済新報社, 2005.
- [3] N. Altay and A. Lewis, "Service Parts Management~Demand Forecasting and Inventory Control~, " Springer, 2011.