



Title	個別仕様対応製品における製品開発ならびに製品提供の効率化に関する研究
Author(s)	下田, 篤
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2203
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

個別仕様対応製品における製品開発
ならびに製品提供の効率化に関する研究

2010年1月

下田 篤

個別仕様対応製品における製品開発ならびに製品提供の効率化に関する研究

2010年1月

下田
篤

個別仕様対応製品における製品開発
ならびに製品提供の効率化に関する研究

提出先 大阪大学大学院情報科学研究科
提出年月 2010年1月

下 田 篤

研究業績

A. 学術論文誌論文

- [1] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文, 薦田憲久: “見積情報を先行指標として利用した受注生産製品の需要予測方式”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.128, No.4, pp.562-568 (2008).
- 【翻訳版】
- A. Shimoda, H. Kosugi, T. Karino, and N. Komoda: "Demand Forecasting Method for Build-To-Order Products using Quote Information as an Advance Indicator", *Electrical Engineering in Japan* (2010)(掲載決定).
- [2] 久邇朝宏, 下田篤, 岡田公治, 門脇潤, 藪田昭司, 細谷清和, 喜古俊一郎, 毛利守夫: “業種別に見たプロジェクトマネジメントの仕組みと実行レベルの比較分析—品質経営評価技法の開発と適用—”, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.11, No.2, pp.26-31(2009).
- [3] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文, 薦田憲久: “製品の仕様代替性と部品消費バランスを考慮した受注生産製品の推奨方式”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.130, No.5 (2010)(掲載決定).
- [4] 下田篤, 久邇朝宏, 永松陽明, 岡田公治, 門脇潤, 喜古俊一郎, 藪田昭司, 細谷清和, 毛利守夫: “製品実現のための業務の仕組みと実行レベルの評価に基づくプロセス改善手法—品質経営評価技法の適用によるプロセス改善—”, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.12 (2010)(掲載決定).

B. 国際会議

- [1] A. Shimoda, H. Iwata, Y. Shibata, and H. Ikeda: “Thin Film Magnetic Head Wafer Inspection Technique using Geometrical Feature-Based Image Comparison”, in *Proc. of IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA'98)*, pp.531-534 (1998).
- [2] A. Shimoda, K. Watanabe, Y. Takagi, and S. Maeda: “Short Cycle Killer-particle Control based on Accurate In-Line Defect Classification”, in *Proc. of 9th Int. Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM2000)*, pp.199-202 (2000).
- [3] A. Shimoda, H. Kosugi, T. Karino, and N. Komoda: “Demand Forecasting Method for Build-To-Order Products using Quote Information as an Advance Indicator”, in *Innovation in Manufacturing Networks: Proc. of 8th IFIP Int. Conf. on Information Technology for Balanced Automation Systems (BASYS 2008)*, IFIP Vol. 266, Springer, pp.189-196 (2008).
- [4] A. Shimoda, H. Kosugi, T. Karino, and N. Komoda, “Recommendation Method for Build to Order Products Considering Substitutability of Specifications and Stock Consumption Balance of Components”, in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Service Operations, Logistics and Informatics (SOLI 2009)*, pp.347-352 (2009).

C. 国内講演

- [1] 下田篤, 小杉秀則: “製品ライフサイクルに対応した販売計画の最適立案方式”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2005 年春季研究発表会予稿集, pp.142-143 (2005).
- [2] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文: “見積情報を先行指標として利用した受注生産型製品の需要予測方式”, 電気学会情報システム研究会, IS-06-52, pp.55-58 (2006).
- [3] 久邇朝宏, 下田篤, 岡田公治, 門脇潤, 藪田昭司, 細谷清和, 喜古俊一郎, 毛利守夫: “業種別に見たプロジェクトマネジメントの仕組みと実行レベルの比較分析－品質経

営評価技法の開発と適用”，プロジェクトマネジメント学会 2007 年度春季研究発表大会予稿集, pp.149-159 (2007).

[4] 下田篤, 久邇朝宏, 永松陽明, 岡田公治, 門脇潤, 喜古俊一郎, 藪田昭司, 細谷清和, 毛利守夫: “プロジェクトマネジメントの仕組みと実行レベルの評価に基づくプロセス改善手法—品質経営評価技法の適用によるプロセス改善—”, プロジェクトマネジメント学会 2008 年度春季研究発表大会予稿集, pp.308-313 (2008).

[5] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文, 薦田憲久: “受注生産製品の推奨販売方式”, 電気学会情報システム研究会, IS-08-40, pp.73-77 (2008).

[6] 永松陽明, 岡田公治, 下田篤, 久邇朝宏, 門脇潤, 喜古俊一郎, 藪田昭司, 細谷清和, 谷口芳夫: “業務プロセスのベストプラクティス表現方法立案とライブラリ構築”, プロジェクトマネジメント学会 2009 年度春季研究発表大会予稿集, pp.295-300 (2009).

D. その他

[1] 下田篤: “ISO 9000 をベースとしたプロセス改善の取り組み事例”, 標準化と品質管理全国大会 2007 (2007).

内容梗概

本論文は、筆者が 1990 年から現在まで(株)日立製作所生産技術研究所，ならびに 2007 年から現在まで大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻在学中に行った個別仕様対応製品における製品開発ならびに製品提供の効率化に関する研究成果をまとめたものである。

近年，顧客ニーズの多様化により，個別仕様に対応して設計・生産する製品が，従来の一品・少量生産の製品から，中量・大量生産の製品に拡大している．このような個別仕様対応製品は，製品要素を新規に開発する必要がある個別仕様設計製品(ETO:Engineering to Order)と，既存の製品要素の組み合わせで対応可能な個別仕様生産製品(BTO:Build to Order)に分類できる．今後，個別仕様対応製品の一層の普及が見込まれる状況において，企業では，これら異なる形態の製品を効率的に開発・提供してゆくことが重要となる．ETO 製品では，顧客から提示される個別仕様に対して，高い品質の製品要素を開発することが課題となる．従来，製品の品質は試験により確認してきたが，ETO 製品では，開発した製品要素を製品へ搭載する組み合わせパターンが多いため，全てを試験により確認することが難しい．このため，製品開発業務の品質を向上させ，開発を行う過程で品質を作り込む必要がある．一方，BTO 製品では，顧客から提示される個別仕様に対して，既存の製品要素(部品)を在庫しておき，見積提案，受注，製品組立・出荷する形態をとる．このとき，多様な個別仕様に対して部品在庫の欠品・余剰を最小化することが課題となる．しかし，顧客が必要な場合だけ搭載するオプション部品は，出荷数が変化しやすいために需要予測が難しい．また，多数の組み合わせパターンがある製品で部品在庫を消費するために，消費がアンバランスとなりやすい．

このような背景のもと，本論文では，(1)製品開発業務の品質を向上させるために改善対象を抽出する業務の数値評価方式，(2)部品在庫数を適正化するために部品出荷数の不規則な変化を予測する方式，(3)部品在庫の余剰・逼迫のアンバランスを改善するために在庫消費に有利な部品を搭載した製品の推奨構成を生成して販売する方式，を提案する．提案方式により，個別仕様対応製品における製品開発ならびに製品提供の効率化を図り，ETO 製品の品質向上ならびに BTO 製品の在庫ロスコスト低減を実現する．本論文は全 5 章から構成される．

第1章の序論では、個別仕様対応製品の重要性、ならびに、製品を開発・提供するための課題について述べる。また、この課題を解決するための従来研究を概観するとともに、本論文の目的と位置づけを明らかにする。

第2章では、改善対象を抽出するための製品開発業務の数値評価方式を提案する。業務の品質を、業務ルールの評価点と製品開発に従事するプロジェクトによるルールの実行度の組み合わせにより数値化し、改善対象を優先付けして抽出する。改善対象の抽出結果を従来行われて来た実行度のみを用いた方式と比較して、提案方式の有効性を示す。

第3章では、見積情報を先行指標として利用した需要予測方式を提案する。個別仕様生産で特有な見積情報を先行指標として活用し、見積や出荷のデータに含まれる誤差を許容して部品出荷数を予測する。予測誤差を従来方式と比較して、提案方式の有効性を示す。

第4章では、製品の仕様代替性と部品の在庫消費バランスを考慮した推奨方式を提案する。顧客が提示する個別仕様に対して、仕様の変更が許容される範囲で推奨販売を行い、部品在庫の余剰逼迫のアンバランス改善を図る。在庫消費バランスの改善度合いを従来方式と比較して、提案方式の有効性を示す。

第5章では、結論として本研究で得られた成果を要約した後、今後に残された課題について述べる。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 関連研究	3
1.2.1 製品開発業務の評価方式	3
1.2.2 不規則変化を対象とする需要予測方式	4
1.2.3 製品の推奨情報の生成方式	5
1.3 研究の方針	6
1.3.1 改善対象を抽出するための製品開発業務の数値評価方式	6
1.3.2 見積情報を先行指標とする予測方式	6
1.3.3 製品の仕様代替性と在庫消費バランスを考慮した推奨方式	7
1.4 本論文の構成	8
第2章 改善対象を抽出するための製品開発業務の数値評価方式	9
2.1 緒言	9
2.2 製品開発業務における品質阻害要因	10
2.2.1 製品開発業務の概要	10
2.2.2 品質阻害要因の分析	13
2.2.3 従来の業務評価方式の問題点	14
2.3 製品開発業務の数値評価方式	15
2.3.1 数値評価のアプローチ	15
2.3.2 数値評価方式	24
2.4 評価実験	26
2.4.1 評価方法	26
2.4.2 評価結果	28
2.5 提案方式を用いた業務改善の手順	33
2.5.1 業務改善の方法	33
2.5.2 実業務への適用	35

2.6 結言	37
第3章 見積情報を先行指標として利用した需要予測方式.....	39
3.1 緒言	39
3.2 BTO 製品における部品出荷数の予測問題.....	40
3.3 見積情報を先行指標として利用した予測方式	45
3.3.1 見積情報の特徴.....	45
3.3.2 予測方式	48
3.4 提案方式の評価	53
3.4.1 実データを用いた評価	53
3.4.2 シミュレーションによる評価.....	59
3.5 結言	62
第4章 製品の仕様代替性と部品の在庫消費バランスを考慮した推奨方式.....	65
4.1 緒言	65
4.2 BTO 製品における在庫消費の偏り問題	66
4.3 仕様の代替性と部品の在庫消費バランスを考慮した推奨方式	68
4.3.1 推奨販売により在庫消費のバランスを改善する考え方.....	68
4.3.2 仕様代替性と受注確率の関係の定式化	71
4.3.3 部品の在庫消費バランスを考慮した推奨構成の決定方式.....	74
4.4 提案方式の評価	78
4.4.1 実験方法	78
4.4.2 結果と考察.....	82
4.5 結言	91
第5章 結論	93
5.1 本研究のまとめ	93
5.2 今後の課題	94
謝辞.....	97
参考文献.....	99

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

近年、顧客ニーズの多様化により、個別仕様に対応して設計・生産する製品が、従来の一品・少量生産の製品から、中量・大量生産の製品に拡大している[1] [2] [3] [4] [5] [6]. このような個別仕様対応製品は、製品要素を新規に開発する必要がある個別仕様設計製品(ETO:Engineering to Order)と、既存の製品要素の組み合わせで対応可能な個別仕様生産製品(BTO:Build to Order)に分類できる[7][8][9]. これらの製品形態は、製品の種類によって最初から分かれていることもあるが、ETO 製品からより低コストで大量提供可能なBTO 製品へ移行したり、BTO 製品に付加価値を持たせるために ETO 製品メニューを追加したりする事例もある. 今後、個別仕様対応製品の一層の普及が見込まれる状況において、企業では、これら異なる形態の製品を効率的に開発・提供してゆくことが重要となる[10].

図 1.1 は、個別仕様対応製品の開発・提供における課題を示したものである. ETO 製品の開発では、顧客から提示される多様な仕様に対し、高い品質の製品を納期とコストを遵守して開発完了させる必要がある. 近年、製造業ではコスト低減や納期短縮への要求が強まっており、このような制約の下で高い品質の製品を開発することが望まれている[11]. 従来、製品の品質を保証するために、試験により不良を摘出している. しかし、ETO 製品のように、複数の製品要素を組み合わせたシステムとして成り立つ製品では、全ての組み合わせを試験で再現させることは困難である. 従って、従来の試験による不良摘出に加え、製品開発業務の品質を向上させ、開発を行う過程で品質を作り込むことが重要になる[12][13]. ETO 製品の開発業務の形態は、図の上側に示すように、各顧客から提示される個別仕様に対して、個々のプロジェクトチームが製品開発を担当し、これら複数のプロジェクトが並行して開発を進める. このような形態の開発業務の品質を向上させるためには、改善すべき問題が、個々のプロジェクトの問題か、組織として共通した問題かを切り分け、効率的に改善を進める必要がある. さらに、製品開発にかかわる、設計、購買、製造、検査といった多様な業務から、改善を要する業務を絞り込む必要がある. 従って、ETO 製品

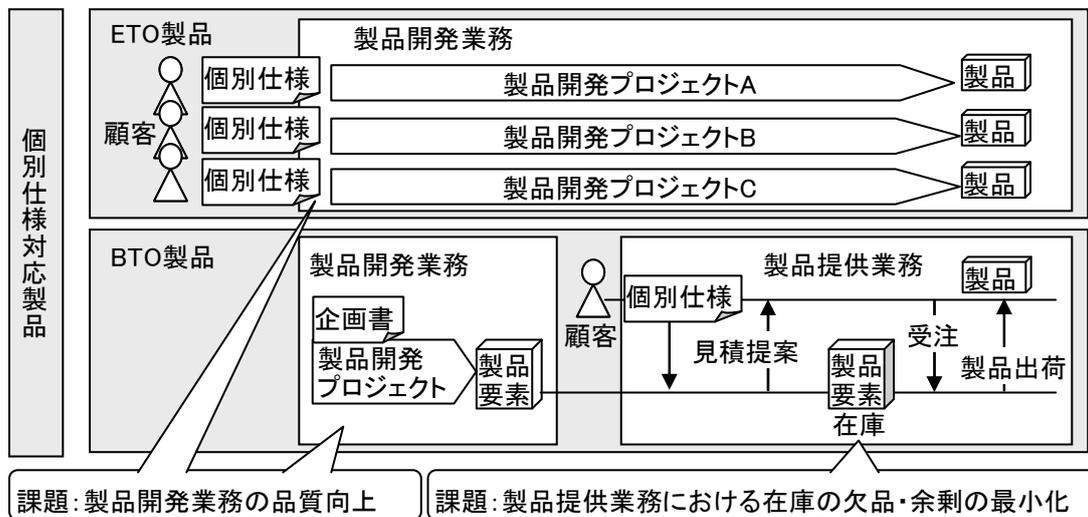


図 1.1 個別仕様対応製品の開発・提供における課題

の開発業務の品質を向上させるためには、改善すべき対象を適切にガイドする情報が必要となる。

一方、BTO 製品では、企画書に基づき標準仕様の製品要素(部品)を開発し、これを大量生産して工場に在庫として持つ。そして、図の下側に示すように、顧客から提示される個別仕様に対して、見積提案、受注、製品組立・出荷する形態をとる。このような形態とすることで、顧客に多品種の製品を短納期で提供できる利点がある。また、メーカーにとっても少品種の部品で多品種の製品を実現できる上に、完成品を在庫として持たず在庫リスクを減らせる利点がある。しかし、部品の組み合わせ数だけある製品の種類で部品在庫を消費するために、部品の搭載確率の予測が難しい上に、在庫の消費がアンバランスとなりやすい[14][15]。従って、BTO 製品の提供業務を効率化するためには、多様な個別仕様に対して在庫の欠品・余剰を最小化することが課題となる。これを解決するには、不要な部品の調達を防止することと、余剰に蓄積した部品の消費を促進することが必要となる。前者のアプローチとして、需要予測を高精度化することが考えられる。しかし、顧客が必要な場合だけ搭載するオプション部品は製品への搭載確率が変化しやすいため、出荷数が不規則に変化し予測が難しい。後者のアプローチとして、キャンペーンや推奨販売、代替販売により、メーカーから積極的に余剰部品を搭載した製品を販売することが考えられる。しかし、製品仕様が多様な BTO 製品において、どの顧客にこういった製品構成で提案すれば、受注確率を維持しつつ効果的な在庫消費ができるかを決定することが難しい。

以上で述べた、個別仕様対応製品における製品開発ならびに製品提供の効率化の課題を解決するために、本論文では、製品開発業務の改善対象を抽出するための評価、BTO 製品の部品出荷数の不規則な変化の予測、BTO 製品において部品在庫の消費を促進するために効果的な製品情報の生成、の 3 つの課題を取り上げる。

1.2 関連研究

1.2.1 製品開発業務の評価方式

製品の品質を向上させるために、製品開発の過程(製造方法の他に、人間の行為も含む)の品質を向上させる考え方が、品質管理分野における TQM(Total Quality Management)[16]として知られている。TQM は、初期の段階では TQC(Total Quality Control)のように製造現場における品質管理に主眼を置いていたが[17]、その後、製品開発の上流である設計プロセスにおける設計行為の品質管理まで対象が広がっている[18]。ここでは、設計者が行う作業をいかに定量的に評価して、製品の品質阻害要因を的確に把握できるかが課題となる。一方、製品開発の行為をプロジェクト運営の視点で捉え、プロジェクトマネジメントの 1 分野である品質マネジメントとして位置づける考え方もある[19][20][21]。

このように、製品開発の過程で品質を作り込む方法は、製品の完成度の把握が困難なソフトウェアの開発において活発に実施されている。例えば、ソフトウェアの開発プロジェクトを対象として、開発の各段階において、要求された業務ルール(この場合、作業項目)をどの程度正確に実行しているかを定量的に測定するプロセス QA(Quality Assurance)が行われている[22][23][24][25]。しかし、この方式では測定対象となる作業項目の定義漏れ等、項目の妥当性自体は評価の対象となっていない。このため、不十分な作業項目に基づく測定により、品質阻害要因の抽出を漏らす可能性がある。

一方、別のアプローチとして、製品開発業務を規定する業務ルールに対して、品質を作り込むための作業項目が漏れなく定義されているかを評価する方法がある。例えば、製品開発に関する国際規格である ISO9001[26][27]を業務のモデルとして利用し、このモデルと評価対象である業務ルールとを対比させて、必要なルールが漏れなく定義されているかを評価する[28][29][30]。特に、この方式を、自動車や半導体製造装置といった完成品メー

カが、部品サプライヤの開発業務の品質を評価するための手段として活発に利用している[31][32]。しかし、評価対象である業務ルールが抽象的であるため、定量的に評価することが難しい。従って、評価結果が定性的な「ことば」として伝えられることが多く、改善の優先付けや改善効果の把握が定量的に行えない問題がある。また、業務ルールの構築度合いの把握に重きを置いており、個々のプロジェクトの実行度合いは評価の対象に含めない。従って、業務ルールとして存在していても、組織全体として実行度が低いルールを識別することは困難である[28][29]。

以上のことから、製品開発業務の品質を向上させるためには業務の評価により改善対象を精度良く抽出することが有効である。しかし、このためには、業務ルールの評価を定量化することに加え、組織全体の実行度を加味して、業務の品質を業務ルールと実行度の両面から定量評価する必要がある。

1.2.2 不規則変化を対象とする需要予測方式

需要予測は SCM(Supply Chain Management)における主要課題の一つであり、従来、多くの研究が報告されている[33][34]。生産管理を目的とした一般的な予測方式は、過去の時系列データの傾向を将来に外挿する時系列分析である[35]。計算が簡単な方式として平滑化[36]がある。特に、本論文の予測対象である急な変化への追従性を向上させる方式として、平滑化の重みに指数関数を用いて直近の情報への重みを増やす指数平滑法[37]がある。しかし、トレンドや周期変動といった変化に対して精度良く追従させることは困難であり、本論文の予測対象に適用することはできない。

トレンドや周期変動といった変化に対しても追従可能な方式として、時系列分析の汎用的な方式である ARIMA モデル[38]がある。自己回帰計算と移動平均計算を組み合わせ、トレンドや周期変動を検出して外挿する機能を有している。また、別のアプローチとして、システムが有する非線形性を不規則な変化の予測に活用する、ニューラルネットワークを用いた研究がある[39]。過去の需要量の実績値を用いて階層型ニューラルネットワークを繰り返し学習させ、システムの有する非線形性を利用して不規則な変化を予測する。さらに、これらの技術をベースとして、予測対象の特徴を利用した各種の予測方式が報告されている[40][41]。

上記の複雑な変化に対応できる予測方式は、過去の傾向を統計的に有意な条件で関数に当てはめるために、長期間のデータを必要とする。従って、多数の部品種類の需要量を個別に予測する本論文の対象では、大量のデータが必要になる。しかし、BTO 製品では、製

品世代が新しくなると部品種類も更新される場合が多く、過去の部品の情報を次の世代の製品に流用することは困難である。

以上のことから、BTO製品の不規則な部品出荷数を予測するために、大量の事前データを必要としない方式が必要となる。

1.2.3 製品の推奨情報の生成方式

部品の在庫消費の促進を目的として製品の推奨情報を生成するためには、推奨する製品がどの程度顧客に許容されるかといった観点と、製品に搭載する部品が在庫消費にとってどの程度有利かといった観点を両立させる必要がある。

部品の組み合わせ情報を生成する技術として、コンフィギュレーションの研究がある[42][43]。BTO製品は、部品の組み合わせが自由にできる一方、組み合わせ数が多く、製品情報を作成するために顧客を支援する仕組みが必要となる。このために、部品同士の組み合わせの制約に基づき、顧客の選定に応じて候補部品の絞込みを行う。このような、コンフィギュレーションで生成される情報は、顧客への許容度は考慮されている一方、在庫消費にとってどの程度有利かといった観点は考慮されていない。

顧客に製品を推奨する技術として、リコメンデーションの研究がある[44]。例えば、協調フィルタリング[45]により、顧客の既知の情報を元に顧客間の類似度を計算し、顧客の未知の情報を推測して、推奨情報を生成する研究の報告がある[46][47]。また、コンテンツ分析法により、製品特徴と顧客関心の対応関係を関数として定義し、顧客関心度が最も高い製品を選定し推奨する研究の報告がある[48][49]。このような、リコメンデーションで生成される情報も、顧客への許容度は考慮されている一方、在庫消費にとってどの程度有利かといった観点は考慮されていない。

推奨販売に類似した方法として代替販売がある。代替販売は、顧客が当初希望した製品が欠品する場合、他の製品を代わりに販売することが許容される問題を扱う。例えば、顧客需要が確率的に変化することを仮定して最適な在庫レベルを設定する研究[50][51]、代替販売を考慮して収益を最適化する値引き率の研究[52]の報告がある。このような、代替販売の研究においては、顧客への許容度に加え在庫の欠品も考慮されているが、余剰する在庫を積極的に消費することは考慮されていない。

また、欠品後のアプローチとして、注文に対して部品在庫が不足する場合、線形計画法[53]を用いることにより限界利益が大きな製品に不足する部品を優先して引き当てる研究の報告がある[54]。しかし、この方式では種類が異なる部品を価格により一元化して単一

目的で評価している。このため、本論文が対象とする部品間の消費バランスは考慮できない。また、線形計画法による最適化は、ある期間の終了時点の目標値に対して行われており、期間途中の個々の商談は対象としていない。

以上のことから、製品の推奨情報の生成では、顧客が仕様を許容する確率に加え、製品に搭載する部品が在庫消費に有利である点を考慮して、個々の商談において推奨構成を生成する方法が必要となる。

1.3 研究の方針

前節までに述べた課題を踏まえ、それぞれの課題に対する研究方針を図 1.2 に示す。

1.3.1 改善対象を抽出するための製品開発業務の数値評価方式

製品開発業務の品質を高めるためには、組織が定める業務ルールの充分性とプロジェクトの実行度の両立が必要であることに着目し、業務ルールの評価点とプロジェクトの実行度を組み合わせて業務の品質を数値評価する方式を提案する。業務ルールの評価を定量化するために、仮説に基づく評価データと製品や業務の品質の両者を結ぶパラメータを教示により決定する。求めたパラメータを用いて、新規な評価データを評価点に換算することにより、製品や業務の品質を推定して改善対象を特定する。また、業務ルールの評価点を計算する過程において実行度の影響を考慮することにより、業務ルールと実行度の両面を考慮した数値評価を行う。

1.3.2 見積情報を先行指標とする予測方式

BTO 製品のオプション部品の出荷数のように、不規則に変化する対象を大量の事前データを用いずに予測するため、個別仕様生産製品に特有な見積情報を先行指標として用いる。個別仕様生産製品の受注プロセスでは、顧客の個別仕様に基づき企業の営業担当者が見積書を作成して顧客に提出する。その後、見積書に基づき営業担当者と顧客の間で価格交渉が行われ、受注が成立した場合に製品が出荷される。このとき、見積書の作成から製品出荷まで時間遅れがあるため、見積書の情報を部品出荷数の先行情報として活用できる。部品の調達リードタイムがこの時間遅れよりも短い条件では、見積書の情報を利用して部品需要量を予測することにより、部品の調達数量をコントロールできる。しかし、見積書を

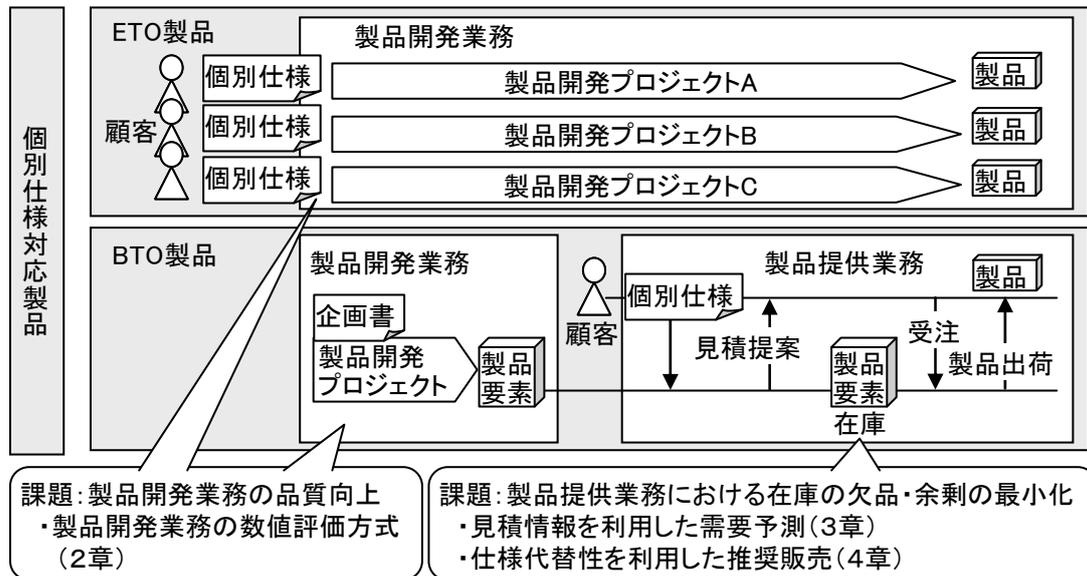


図 1.2 研究方針

作成しても失注する場合もある上に、同一の商談で何度か見積書が作り直される場合がある。このように、出荷と無関係なノイズ情報を補正して、見積書の情報から部品出荷数を正確に予測するための予測方式を提案する。

1.3.3 製品の仕様代替性と在庫消費バランスを考慮した推奨方式

推奨販売により、在庫として過剰に蓄積された部品を販売促進して在庫削減する方式を提案する。製品の仕様は顧客が最初に提示する要求仕様(顧客仕様と呼ぶ)に近接した範囲であれば代替性があることに着目する。顧客仕様が曖昧である場合や、顧客仕様を満たす製品構成の候補が複数存在する場合、仕様に代替性が成り立つことがある。特に、製品仕様の中でも顧客の関心が低い無関心仕様では代替性が成り立つ場合が多い。このとき、逼迫している部品の代わりに余剰している部品を製品に搭載することができれば、部品在庫の余剰、逼迫の状況を改善できる。このように、個々の商談において顧客仕様から乖離し過ぎることなく、できるだけ在庫消費のバランスが有利になる部品を搭載した推奨構成を決定し、推奨販売する方式を提案する。具体的には、望ましい在庫消費の目標に対する達成率を評価指標として、顧客仕様の近傍を探索し、部品搭載条件を決定して推奨構成を生成する。推奨構成を販売することで、部品在庫の余剰逼迫のアンバランスを改善する。

1.4 本論文の構成

本論文では、第2章以降を以下のように構成する。

第2章では、文献[55][56][57][58][59][60]に基づき、改善対象を抽出するための製品開発業務の数値評価方式について述べる。まず、業務の品質を、業務ルールの評価点とプロジェクトの実行度を組み合わせて数値評価する考え方を説明する。次に、業務ルールの評価点を計算するためのパラメータを教示により決定する方式、評価点の計算において実行度の影響を考慮する方式を説明する。16組織の業務データを用いた評価において、実行度を考慮した場合としない場合を比較して、業務ルールと実行度の両面を考慮した数値評価の有効性を示す。

第3章では、文献[61][62][63]に基づき、見積情報を先行指標として利用した需要予測方式について述べる。まず、見積書に記載された部品数が部品出荷数の先行指標として有効であることを示すとともに、両者に誤差(ノイズ)が含まれることを述べる。次に、見積書に記載された部品数と部品出荷数をシステムの入出力と見なすことにより、両者の関係式を定義する。ノイズを含む入出力からシステムパラメータを同定するためにカルマンフィルタを適用する。実データを用いた評価により提案方式の有効性を確認する。また、多数の部品の中には、提案方式に適合しない場合もあるため、モンテカルロ法を用いたシミュレーションにより提案方式の適用可能範囲を明らかにする。

第4章では、文献[64][65][66][67]に基づき、製品仕様の代替性と部品の在庫消費バランスを考慮した推奨方式について述べる。まず、製品仕様の代替性が成り立つ条件について考察を行い、代替仕様の受注確率を定義する。次に、多数の部品の在庫消費バランスを評価するための多目的評価指標を定義するとともに、受注確率を組み合わせた推奨構成の生成方式を提案する。実データを用いたシミュレーション実験により、提案方式の有効性を示す。

第5章では、結論として本研究で得られた成果を要約し、今後の課題を述べる。

第2章

改善対象を抽出するための製品開発業務の数値評価方式

2.1 緒言

本章では、高い品質の製品を開発する製品開発業務の実現を目的とした、業務の数値評価方式を提案する[55][56][57][58][59][60].

近年、製品の品質にかかわる重大事故が発生しており、品質に対する社会的な関心が高まっている。従って、高い品質の製品を開発・提供することは、製造業の企業収益を左右するだけでなく、社会的な責務となっている。高品質な製品を開発するために、従来、製品の試験により不良を摘出している。しかし、ETO製品では、開発した製品要素を製品へ搭載する組み合わせパターンが多いため、全てを試験により確認することが難しい。また、製品の多様な使用形態を試験において漏れなく再現することは難しい。このため、従来の試験による不良の摘出に加え、製品開発業務の品質を向上させ、開発を行う過程で品質を作り込むことが重要となっている。このためには、設計、購買、製造、検査といった多様な業務全ての品質を、製品の品質を保証するために必要なある一定レベルに到達させることが課題となる。従って、製品開発にかかわる多様な業務から、改善が必要な業務を特定するとともに、その要因を特定して、改善を効率化するためのガイドとなる情報を提供することが望まれている。

製品開発業務は、組織が定める業務ルールを個々のプロジェクトが実行して推進するため、改善をガイドするための情報は2種類に分類できる。まず、個々のプロジェクトによる業務ルールの実行度がある。これは、ソフトウェア開発の分野で活発に利用されている。例えば、業務ルールの実行度を評価するプロジェクト監査が行われている[22][23][24][25]。業務ルールが定める作業項目について個々のプロジェクトの実行状況を第三者がチェックし、実行度として数値管理する。組織の中には複数のプロジェクトが同時進行しているため、多数の実行度のデータを取得でき、統計手法による管理が行われる。もう一つの情報

として、業務ルールの十分性がある。これを評価するために、ISO9001に基づく業務監査や、自動車や半導体製造装置といった完成品メーカーによる部品サプライヤの業務監査が行われている[26][27][28][29][30][31][32]。例えば ISO の監査では、ISO の要求事項を熟知した監査員が業務ルールの構築度合いを評価し、改善すべき点を指摘する。監査では、実行度についても評価する場合があるが、限られた範囲のサンプル調査であるため、必ずしも組織の実態を反映した結果は得られない[28][29]。また、業務ルールの評価は数値化することが難しいため、評価の結果が「ことば」として伝えられることが多く、指摘への対応や改善結果の把握などが定性的に処理されてしまう問題がある。

本章では、業務ルールを数値評価するとともに、従来から実施されている組織的な実行度の評価と組み合わせることにより業務の品質を数値評価する方式を提案する。数値評価することにより、改善すべき業務を絞り込むことができ、業務の改善活動を効率化できる。

以下、2.2 節では、改善の対象である製品開発業務の品質阻害要因について述べるとともに、従来の製品開発業務の評価方式について説明し、問題点と課題を明らかにする。2.3 節では、数値評価の考え方、および具体的な評価方法について説明する。2.4 節では、実際の業務データを用いた実験により提案方式の有効性を示す。2.5 節では、提案方式を用いた業務改善の手順を説明し、2.6 節で結言を述べる。

2.2 製品開発業務における品質阻害要因

本節では、製品開発業務の品質阻害要因について説明し、従来の業務の評価方式により改善対象を抽出する際の問題点を明らかにする。

2.2.1 製品開発業務の概要

製品開発業務を図 2.1 に示す。本章では、製品開発業務を、製品開発にかかわるルールである業務規準を個々のプロジェクトチームが実行することにより推進する業務と定める。製品開発業務の目的は、成果物である製品を、いわゆる QCD(Quality : 品質, Cost : コスト, Delivery : 納期)の目標に沿って完成させることである[68]。個々のプロジェクトチームは、チームの責任者であるリーダーを中心として、設計、購買、製造、検査といった複数の業務の担当者から構成されており、製品の種類によって数人から数十人の規模まで様々である。図は横方向に時間をとり、ある組織において左から右に製品開発が実施される様

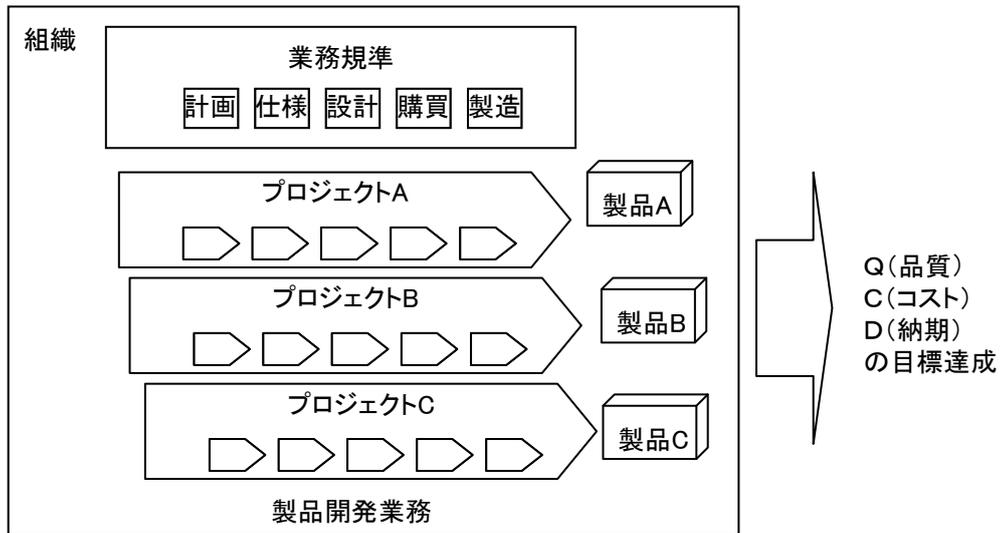


図 2.1 製品開発業務

子を示している。縦方向は製品開発を担当する複数のプロジェクトチーム(以下、プロジェクトと略す)A, B, C が並んでいる。製品開発は、計画作成、仕様分析、設計開発、購買、製造といったフェーズに従って実施する。ここで、フェーズとは製品開発の流れの区切りである。組織では、各フェーズで行うべき業務を、業務規準と呼ばれるルールに定めている。業務規準を実行することにより、個々のプロジェクトの力量にばらつきがあったとしても、一定品質の製品が開発できる。

ここで、業務規準について説明する。図 2.2 に製品開発業務を管理するドキュメント体

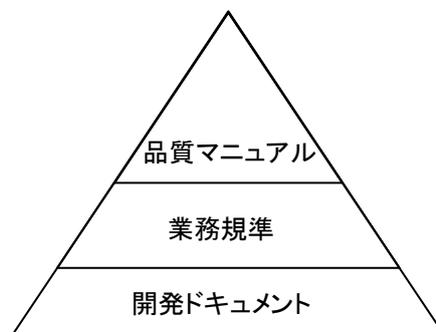


図 2.2 製品開発業務を管理するドキュメント体系

系を示す。図を用いて業務規準の位置づけを説明する。多くの製造業では、図のようにに体系化されたドキュメントを用いて製品開発業務を管理している。上段の品質マニュアルは、ISO9001に基づき製品開発にかかわる大まかな方針を定義したものである。中段の業務規準は、品質マニュアルの方針を実際の製品開発業務で具体的に実行するためのルールとして定義したものである。下段の開発ドキュメントは、業務規準を実際開発業務に適用した結果を記録に残すためのドキュメントである。図 2.3 に製品開発業務にかかわるドキュメントの例を示す。図(a)は業務規準の一例である標準業務フローである。このドキュメントには、縦方向に製品開発の業務の流れが、横方向に各ステップで要求される作業内容、作成すべき開発ドキュメント、業務の担当部署、業務を実施する際に参照すべき業務規準が記載されている。個々のプロジェクトは、この業務フローに従って製品開発を推進する。図(b)は開発ドキュメントの一例であるチェックリストである。図のチェックリストは、業務規準が定める作業を漏れなく実施したかを記録するためのフォーマットである。

業務フロー	作業内容	開発ドキュメント	担当	業務規準
製品企画	市場動向を分析して、製品を企画する	製品企画書	企画	製品企画書作成規準
構想設計	製品の仕様書を作成する	製品仕様書	設計	製品仕様書作成規準
開発計画	製品の開発計画を作成する	開発計画書	設計	開発計画書作成規準
計画設計	製品の計画図を作成する	計画図設計書	設計	設計書作成基準
詳細設計	製品の製作図を作成する	製作図	設計	設計書作成基準
DRの実施	デザインレビューを実施する	チェックリスト DR議事録	設計	デザインレビュー実施基準
購入品認定	新規購入部品の品質を確認する	認定確認書	品証	購入品認定基準
試験仕様作成	試験仕様書を作成する	試験仕様書	設計	試験仕様書作成基準
試験	試験仕様書に基づき試験実施する	試験報告書	品証	試験実施基準

チェックリスト			
プロジェクト名	責任者	担当者	
チェック項目	チェック結果	担当	期限
①顧客の要求仕様は明確か？			
②製品にかかわる関係法規は明確か？			
③製品の使用環境は明確か？			
④安全上の問題は無いのか？			
⑤他社に対する競争力はあるか？			
⑥コスト目標は明確か？			
⑦品質目標は明確か？			
⑧開発スケジュールは明確か？			
⑨開発のための資源は確保しているか？			
⑩リスクの洗い出しと対策を立てたか？			

(a) 業務規準の例(標準業務フロー) (b) 開発ドキュメントの例(チェックリスト)

図 2.3 製品開発業務にかかわるドキュメントの例

2.2.2 品質阻害要因の分析

製品開発業務には図 2.4 に示す品質阻害要因が含まれている。例えば、業務規準に本来実施すべき作業が定義されていない場合、各プロジェクトにおいて作業の漏れが発生する可能性が高くなる(図 2.4 の定義漏れ、作業漏れ)。また、業務規準に作業が定義されている場合であっても、プロジェクトによっては業務規準が要求するレベルまで実行しない場合がある(図 2.4 の実行不足)。例えば、図 2.3(b)のチェックリストを使用した作業漏れのチェックを、本来、規準が定める時点より遅れて実施する場合がある。作業漏れの発見が遅れると、作業の手戻りが発生し別の作業漏れを引き起こす可能性が高くなる。品質阻害要因を含むプロジェクトが開発した製品は、必要な検討や確認が行われないまま開発が進行し、結果として製品不良が発生しやすくなる。

品質阻害要因の中身を把握するため、(株)日立製作所の過去の不具合事例から 99 件を抽出して分析した。各事例データには、不良発生に至った直接原因だけでなく、不良を作り込んだ業務上の問題点および対策内容が記載されている。分析結果を図 2.5 に示す。図(a)は不良の作り込み業務に着目した分析結果であり、図より 91%の不良は設計業務で作り返まれていることがわかる。図(b)は不良の作り込み原因に着目した分析結果である。本章で

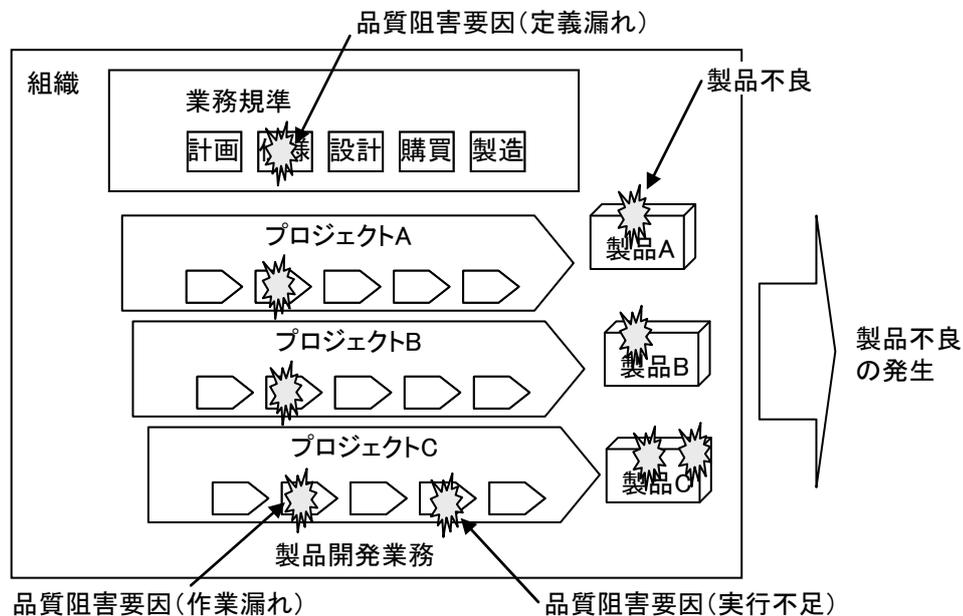


図 2.4 製品開発業務における品質阻害要因

は、製品開発業務を、業務規準を個々のプロジェクトが実行することで推進する業務と定義しているため、不良の作り込み原因を「業務規準の不備」とプロジェクトによる「業務規準の実行不足」に分けて分類する。「その他」には、設計時点の想定を越える原因で発生した不良等が含まれる。分析により、原因の85%は業務規準の不備またはプロジェクトの実行不足に分類できた。このことから、製品の品質を向上させるためには、これらを改善することが課題となる。

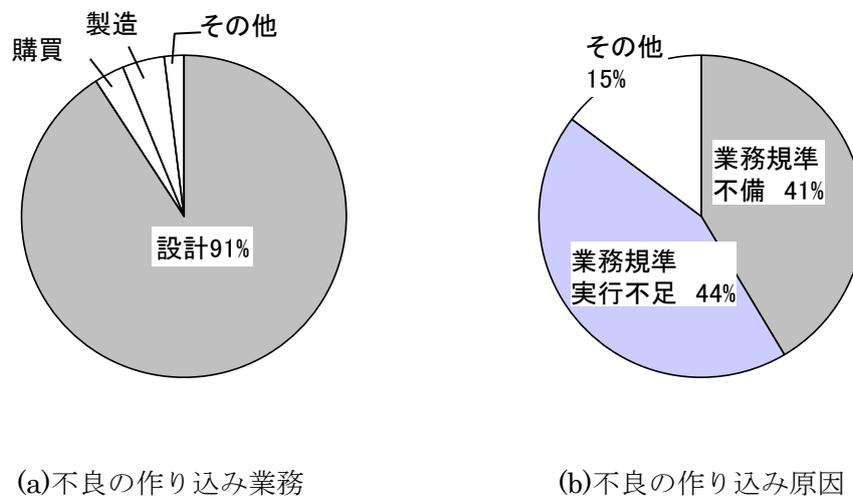


図 2.5 品質阻害要因の分析結果

2.2.3 従来の業務評価方式の問題点

前節で説明した 2 つの改善対象(業務規準の不備と実行不足)は、従来、それぞれ個別の業務評価方式で抽出されて来た。業務規準の実行不足については、例えば、ソフトウェア開発においてプロセス監査が行われて来た。プロセス監査では、業務規準が定める作業項目を第三者がプロジェクトの監査によりチェックし、結果を実行度として数値化する。複数のプロジェクトの結果から平均値を計算することにより、組織全体の傾向が把握できる。一方、業務規準の不備については、ISO9001 の業務監査が行われて来た。業務監査では、ISO の要求事項を熟知した監査員が業務ルールの構築度合いを評価し、改善すべき点を指摘する。ここでは、プロジェクト監査のようにプロジェクトの実行度を正しく反映できるデータは調査せず、サンプリング調査のみを行う。前節で説明した 2 つの改善対象を漏れなく抽出するためには、ここで説明した 2 種類の業務評価方式を組み合わせる必要がある。

要があるが、こうした評価は行われていない。また、業務規準の不備については、評価する対象が抽象的であるため、ことばによる定性的な評価が行われることが多く、定量的な管理ができない問題がある。さらに、業務規準の評価は、1組織で1通りのデータしか取得できず、プロジェクト監査と異なり、多数のデータを収集することが難しく、統計手法による管理が難しい。

以上のことから、改善対象を漏れなく抽出するとともに、数値管理により改善を効率化するためには、以下の課題を解決する必要がある。

- －業務規準の評価の定量化
- －少数の業務規準データに対する数値管理
- －業務規準の評価と実行度を組み合わせた業務品質の数値評価

本章では、これらの課題を解決する方式を提案する。

2.3 製品開発業務の数値評価方式

2.3.1 数値評価のアプローチ

本章で提案する業務の数値評価方式の概要を図 2.6 に示す。図の左側は図 2.1 で説明した製品開発業務である。まず、業務規準に対して業務規準レベルと呼ぶ評価データを付与する。各プロジェクトについて実行度を測定することは、従来一般的に行われている方式と同じである。提案方式では、業務規準レベルと実行度を組み合わせて業務品質の数値評価を行う。評価の狙いは、不良業務の特定(製品開発業務のどの業務を優先して改善すべきか)と、不良要因の特定(改善すべきなのは業務規準の不備か実行不足か)である。

以下、業務規準の数値評価方式、ならびに実行度を組み合わせた業務品質の数値評価方式を説明する。まず、業務の品質といった抽象的な対象を数値評価するためのアプローチを説明する。一般に、未知の対象を数値評価する場合、多様な評価項目について基準となる評価尺度を用いた測定を行い、各評価項目の測定結果を1次元の評点に変換する手順をとる[69]。本章においても、同様な手順を考える。

(1) 評価項目の設定

評価項目を設定するために、業務のどの範囲を、どの程度の細かさで評価するかを定義する。業務の範囲は、図 2.5(a)において約 9 割の不良が作り込まれている設計業務とする。

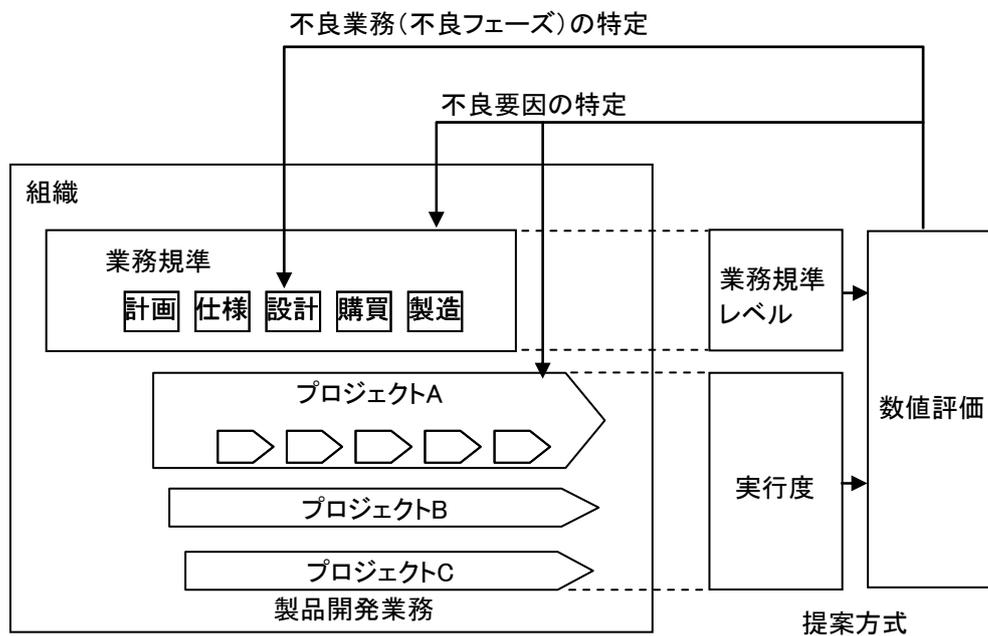


図 2.6 提案方式の概要

評価項目を設定するための指針として、業務のモデルを参照する。本章では、国際的な規格として広く普及している ISO9001 を採用する。ISO9001 の要求事項が評価項目の指針となる。ただし、評価項目の要件として、網羅性に加え、項目間で重複していないことが求められる。そこで、(株)日立製作所の過去の不具合事例から抽出した 100 件と ISO9001 から抽出した要求事項とを突き合わせた調査を行った。この結果、不具合事例がいずれかの要求事項と対応すること、ならびに、要求事項に対して不具合事例がほぼ均等に分布することが確認できた。

以上の検討に基づき、ISO9001 の要求事項から評価項目を抽出した結果を表 2.1 に示す。合計 43 の評価項目を、設計業務の作業の流れに従って「計画立案」、「仕様分析」、「設計・開発」の 3 つのフェーズに分けて評価に用いる。

計画立案フェーズは、製品開発の目標設定、資源確保、リスク評価等、最上流で実施すべき項目で構成され、13 の評価項目からなる。具体例として「達成目標の設定」の評価の質問文を示す。質問文は、表 2.2 で説明する業務規準レベルを判定する際に参照する。

仕様分析フェーズは、顧客の要求仕様を設計の要求項目に変換するフェーズであり、11 の評価項目からなる。具体例として「仕様書の作成」の評価の質問文を示す。

設計・開発フェーズは、19 の評価項目からなる。具体例として「設計者の意図の伝達」の評価の質問文を示す。

表 2.1 評価項目

フェーズ	評価項目数	評価項目と質問文の例
計画立案	13	「達成目標の設定」 製品実現に当たり、対象製品が達成すべき目標（機能、性能、品質、納期、コストなど全て）を明確にし、周知徹底しているか？
仕様分析	11	「仕様書の作成」 製品の要求仕様を策定するに当たって、顧客（製品の直接的な利用者のほか、評価への影響者など）が誰かを意識して臨んでいるか？
設計・開発	19	「設計者の意図の伝達」 設計・開発では、製品仕様、部品購入仕様、製造仕様などの他に、サービス・保守仕様（現地での据付・サービス提供を含む）まで検討し、それを関連部署に確実に伝達しているか？

(2)評価尺度の設定

本節では、業務規準のような抽象的な対象を数値化するための評価尺度と、これに基づく評価基準の定義について説明する。本章では、対象を数値化するためのスケールを評価尺度と呼び、尺度に基づき評価するための基準を評価基準と呼ぶ。評価尺度は、表現できる情報の性質に基づき 4 種類の尺度水準(数学的操作が制限される順に、名義尺度、順序尺度、間隔尺度、比率尺度)[70]に分類できる。一般に、抽象的な対象を自由な数学的操作が許容される比率尺度で直接測定することは難しいため、順序尺度として測定した結果を、ある仮定の下で間隔尺度か比率尺度に変換することが行われる。本章でも、業務規準の品質を順序尺度として測定し、これを比率尺度に変換するアプローチをとる。

評価尺度を選定するにあたり、何段階の尺度段階(以降、レベル数と呼ぶ)とするかを決定する必要がある。例えば、業務規準の有無といった最も簡単な 2 段階から、レベル 0 から $n-1$ までの n 段階まで考えられる。レベル数が多くなるほど評価項目あたりの情報量が増えるが、評価の根拠が曖昧となりやすい。従って、多段階の評価尺度を採用する場合は、評価基準を定義して評価の再現性を高める必要がある。評価基準の要件として、レベルの違いが理解容易である上に、評価項目の間で統一されていることが望ましい。

提案方式では、多段階の評価尺度を採用する。この理由は、2.2.3 節で説明したように、業務規準の評価は 1 組織で 1 通りのデータしか取得できないため、各評価においてデータ

量を増やす必要があるためである。評価の再現性を高めるために、表 2.2 に示す 5 段階の評価基準を設定する。評価基準は、業務規準に対して PDCA(Plan, Do, Check, Action) サイクルをどの段階までルールとして組み込んでいるかを評価する。PDCA サイクルは、ISO9001 が要求する継続的改善の概念であるため評価者が納得しやすい上に、レベル間の相違が理解容易である。表 2.2 の縦方向はレベル 0～4 からなる 5 段階の評価基準である。各レベルの考え方を具体的な業務規準(図 2.3(a)の標準業務フロー)の例で説明する。

表 2.2 業務規準の評価基準

レベル	レベル判定の基準(PDCA)	数値評価の基準
0	必要な業務規準が定義されていない。	—
1	業務規準が定義されているが実行方法が明確でない。(P)	ISO9001の実施 不十分
2	業務規準が定義され実行方法が明確となっている。(PD)	ISO9001実施レ ベル(標準レベル)
3	業務規準の実行結果を測定し改善のために分析している。(PDC)	ISO9001の先を 行く取り組み
4	業務規準を定期的に改善する決まりになっている。(PDCA)	—

- a) レベル 0: 必要な業務規準が定義されていない場合である。標準業務フローの例では、組織の標準的な作業手順が存在しない場合が該当する。
- b) レベル 1: 業務規準が定義されているが実行方法が明確でない場合である。標準業務フローの例では、図 2.3(a)において開発ドキュメント、担当、業務規準の列が記載されておらず、どのドキュメントに基づいて誰が作業を行うのかが不明確な場合が該当する。
- c) レベル 2: 標準業務が定義され実行方法が明確となっている場合である。図 2.3(a)に示すような標準業務フローが定義されている場合が該当する。
- d) レベル 3: 業務規準の実行結果を測定し改善のために分析している場合である。標準業務フローの例では、各プロジェクトの製品開発が完了した時点で、本来必要な作業が業務フローに定義されていない場合が無かったかを確認することが、ルールとして定義されている場合が該当する。
- e) レベル 4: 業務規準を定期的に改善する決まりになっている場合である。標準業務フ

ローの例では、d)で何らかの問題があった場合のみでなく、定期的に細かな改善を積み上げることがルールとして定義されている場合が該当する。

ただし、レベル0とレベル4は限られた組織にしか当てはまらないため、後で説明する数値評価においては、表2.2の右側に示す3段階の評価尺度を採用する。

実行度についても同様に、表2.3に示す5段階の評価基準を設定する。縦方向はレベル0～4の評価基準である。図2.3(b)の開発ドキュメント(チェックリスト)を例に、各レベルの考え方を説明する。

- a) レベル0：業務規準を実行していない場合である。チェックリストの例では、チェックリストそのものの作成を忘れている場合が該当する。
- b) レベル1：重大な不備があるが、実行している場合である。チェックリストの例では、作成自体はされているが、業務規準が定める本来必要な時期に作成されていない場合が該当する。
- c) レベル2：不備があるが実行している場合である。チェックリストの例では、チェック結果で不十分な内容があるにも関わらず、担当と期限が空欄となり対策が決められていない場合が該当する。
- d) レベル3：軽微な不備がある場合である。チェックリストの例では、チェック結果の記載が不足していたり不適切であるにも関わらず、責任者が承認している場合が該当する。
- e) レベル4：業務規準通り実行している場合である。チェックリストの例では、規準が要求する内容が漏れなく記載されている上に、適切な時期に作成され、責任者の承認を得ている場合が該当する。

表 2.3 実行度の評価基準

レベル	評価基準
0	業務規準を実行していない。
1	重大な不備があるが、実行している。
2	不備があるが、実行している。
3	軽微な不備がある。
4	規準通り実行している。

(3)数値評価

表 2.2 の評価基準に基づき得られた業務規準レベルを数値データに変換する。このために、異なるレベルの間でデータを組み合わせるための重み値を決定する。まず、表 2.2 から得られる業務規準レベルの再現性について考察する。表 2.2 を用いる評価者は、製品開発を実施する企業の業務改善の従事者である。業務規準に関して、ある一定レベルの知識を有する集団と考えて良い。このため、評価者の中でレベル判定の結果に大きなずれはないと考えられる。この前提に基づき、数値評価のアプローチを議論する。業務を正しく数値評価できた場合、評価結果と業務の品質または製品の品質との間に相関関係があるはずである。しかし、本来、表 2.2 から決定される業務規準レベルと業務の品質または製品の品質の間に保証された関係はない。従って、両者の間に相関関係を持たせるためには、品質が判明したデータセットから両者を結ぶパラメータを算出するしかない。一方、一度このパラメータが算出できれば、先の再現性の議論により、新規にレベル判定された結果に前記パラメータを適用すれば、抽出した改善対象は大きく外れた結果にはならないはずである。従って、重み値は、業務規準レベルから変換された数値データと改善対象の相関が大きくなるように、教示により決定する。

教示では、インプットである業務規準レベルとアウトプットである改善対象のデータセットを教示データとして使用し、数値化のための重み値を決定する。教示の方法は、パラメトリックな手法[71]である判別分析法[72]や、ノンパラメトリックな手法[73]であるニューラルネットワーク法[74]が知られている。しかし、業務規準レベルのデータは母数を増やすことが難しく、上記のような手法を適用することはできない。このため、以下で説明するヒューリスティックなアプローチを提案する。

提案する数値評価方式を図 2.7 に示す。図は左から右に数値評価の流れを示している。また、図の下段に教示における入出力と改善対象の抽出における入出力の関係を示す。まず、教示について説明する。

(3.1)教示

教示データは、図 2.6 で説明した改善対象の構成要素である不良業務と不良要因について作成する。

不良業務は、図 2.5(a)の不良の作り込み業務であり、改善対象を絞り込むためには細かい単位の業務を教示単位にすることが望ましい。しかし、教示単位を細分化すると、サンプル数が少ない場合に教示精度が低下する、異なる組織のデータをマージできないためにサンプル数が増やせない、教示データを精度良く作成することが難しい、という問題があ

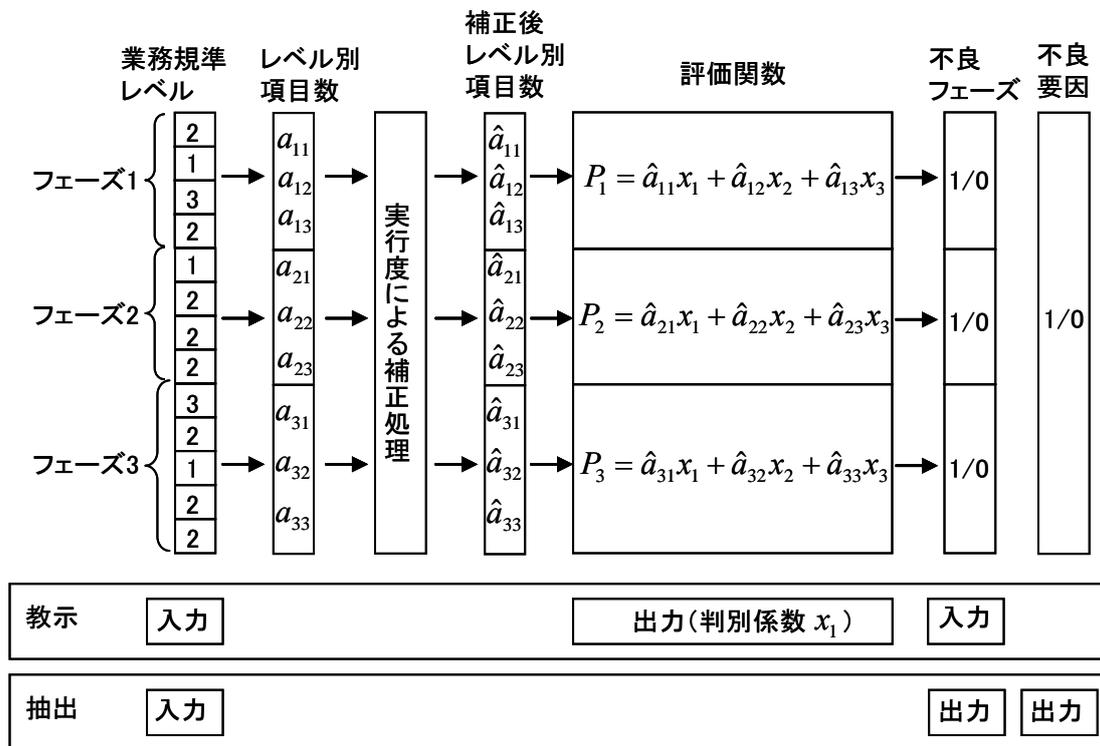


図 2.7 数値評価方式

る。このため、実用においては、サンプルの蓄積度合いと改善すべき業務の詳細度を考慮して、教示単位を適度な粒度に設定する必要がある。例えば、本章では、教示単位を表 2.1 の評価項目からフェーズに広げることにより、後に図 2.8 で説明するレベル 1 と 3 に分類されるサンプル数を確保している。表 2.2 の評価基準では、標準的なレベル 2 に分類される件数が多くなるため、教示単位が小さ過ぎるとレベル 1 と 3 に分類される件数がゼロとなり、提案方式を正しく機能させることができない。一方、改善すべき業務の詳細度の観点でも、改善対象をフェーズ単位まで絞り込むことができれば改善を効率化できるため、教示単位が大きすぎることはない。以降、不良業務を不良フェーズと呼ぶ。

不良要因は、図 2.5(b)の不良の作り込み要因であり、不良業務の場合と同じ理由により適度な粒度のカテゴリであることが望ましい。このため、不良要因を業務規準の不備と実行不足とし、これを教示データとする。

次に、教示手順を説明する。図 2.7 の左側は数値評価のインプットとなる業務規準レベルの測定データである。まず、以下の手順に従いインプットデータを教示単位であるフェーズ毎に集約して未知数の絞り込みを行う。数値評価では、どのフェーズを改善対象とす

べきかを判別する。このため、図 2.8 に示すように各フェーズについてレベル別の評価項目数を集計する。図 2.8 の横軸は業務規準レベル(1~3)であり、縦軸は各レベルに該当する評価項目数である。 a_{i1} はフェーズ i 、レベル 1 の項目数でありレベル別項目数と呼ぶ。このとき、フェーズ i の評価点 P_i を a_{i1} 、 a_{i2} 、 a_{i3} と重み値 x_1 、 x_2 、 x_3 の加重和として定義する。ここで、数値化の目的は、フェーズ i が改善すべきフェーズか否かを判別することであるため、判別効率が最大となるように x_1 、 x_2 、 x_3 を決定すれば良い。さらに、表 2.2 よりレベル 2 は ISO9001 の標準レベルであるため優劣の情報を持たず、レベル 1 とレベル 3 のバランスにより改善対象か否かが決まると考える。具体的には、レベル 3 の重み x_3 を 1.0、レベル 2 の重み x_2 を 0 とし、レベル 1 の重みのみを未知数として判別効率を最大化する。以下 1)~6)により手順を説明する。

- 1)重み値 x_1 をある値に設定する。
- 2)ある組織について、業務規準レベルのデータを入力として評価点 P_i を計算する。評価点が最小となるフェーズを不良フェーズとする。フェーズ 1~3 に対して 1(不良フェーズの識別値)/0(良好フェーズの識別値)を付与する。
- 3)同じ組織の正解データを、フェーズ 1~3 に対して 1(不良フェーズの識別値)/0(良好フェーズの識別値)として与える。
- 4)上記 2)と 3)を比較して不良フェーズが一致する場合を正解、不一致の場合を不正解とする。

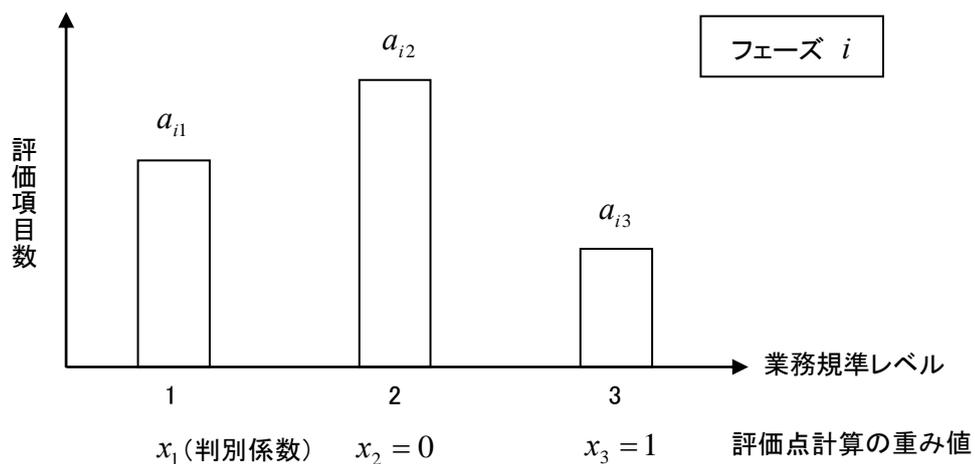


図 2.8 評価点計算の重み値

- 5) 複数の組織について上記 2)~4)を実施し、不良フェーズが正解となった組織数をカウントする。
- 6) 重み値 x_1 を変更して上記 1)~5)を繰り返し、5)で正解となる組織数が最も大きくなる重み値 x_1 を選定する(以降、 x_1 を判別係数と呼ぶ)。

(3.2) 実行度によるレベル別項目数の補正処理

次に、以上で説明した数値評価の計算に実行度の影響を考慮する方法について説明する。表 2.3 で定義した実行度は表 2.2 の業務規準レベルとは異なり、レベル 5 とレベル 0 の状態が明確である。即ち、業務規準に記載された全ての項目を実行している場合がレベル 5 であり、全く実行していない場合がレベル 0 である。また、表 2.3 の基準は具体的であるため、順序の入れ替えや判断の差が生じる可能性は少ない。このため、表 2.3 の評価基準を比率尺度と見なして以降の議論を進める。具体的には、レベル 0 の実行度を 0、レベル 5 の実行度を 1.0 とし、レベル間で実行度を等分して割り当てる。

一方、表 2.2 の業務規準の評価が組織に対する評価であるのに対して、表 2.3 の実行度の評価は個々のプロジェクトを対象としたものであり、両者の単位が異なる。このため、プロジェクトの実行度から組織の平均値を計算し、両者の単位を揃える。このとき求めた実行度は、業務規準に対する組織の追従能力を表す指標と見なせるものであり、フェーズ i の組織実行度 \bar{R}_i と呼ぶ。

ここで、組織実行度の低下は、業務規準レベルの低下と見なすことができる。例えば、10 項目が定義されている規準を 70% の組織実行度で運用した場合、7 項目しか定義されていないケースと同等と見なせる。従って、実行度が低下することによるペナルティーを業務規準の数値評価に考慮するため、次の計算操作を行う。「組織実行度 \bar{R}_i のとき、あるレベルの評価項目数 a_{il} から $(1-\bar{R}_i)a_{il}$ を減じ、同数を 1 つ下のレベルの評価項目数 $a_{i,l-1}$ に加算する。」具体的には、レベル 3 の項目数の内、割合 $1-\bar{R}_i$ をレベル 2 の項目数に、レベル 2 の項目数の内、割合 $1-\bar{R}_i$ をレベル 1 の項目数に置き換える。実行度の影響を考慮したレベル別項目数を \hat{a}_{i1} 、 \hat{a}_{i2} 、 \hat{a}_{i3} とする(補正後レベル別項目数と呼ぶ)。

(3.3) 不良フェーズの抽出

- 1) 業務規準レベルのデータを入力として、上記(3.2)の手続きにより補正後レベル別項目数 \hat{a}_{i1} 、 \hat{a}_{i2} 、 \hat{a}_{i3} を計算する。
- 2) 教示で求めた判別係数 x_1 を用いて評価点 P_i を計算する。
- 3) 評価点が最小となるフェーズを不良フェーズとする。フェーズ 1~3 に対して 1(不良フェーズの識別値)/0(良好フェーズの識別値)を付与する。

(3.4)不良要因の抽出

- 1)上記(3.3)の手続きに従って不良フェーズを抽出する(1回目).
- 2)不良フェーズのみ組織実行度 $\bar{R}_i=1$ として, 再度, (3.3)の手続きに従って不良フェーズを抽出する(2回目).
- 3) 不良フェーズ(1回目)と不良フェーズ(2回目)が一致する場合, 実行度を向上させたとしても不良フェーズの改善には寄与しないことになる. 従って, この場合の不良要因は業務規準とする. 逆に, 一致しない場合は実行度を向上させることにより不良フェーズを変更できるため, 不良要因を実行度とする.

2.3.2 数値評価方式

(1)教示

予め複数の組織から収集した教示データのセット(業務規準レベルと実行レベルの判定結果, 不良フェーズデータ, 不良要因データ)を用いて判別係数 x_i を計算する.

まず, フェーズ i ($i=1, 2, 3$)の業務品質 P_i を次式により定義する.

$$P_i = \hat{a}_{i1} x_1 + \hat{a}_{i2} x_2 + \hat{a}_{i3} x_3 \quad (2.1)$$

$$\text{ただし, } \hat{a}_{i1} + \hat{a}_{i2} + \hat{a}_{i3} = 1$$

$$x_2 = 0, \quad x_3 = 1$$

ここで, 補正後レベル別項目数 \hat{a}_{i1} , \hat{a}_{i2} , \hat{a}_{i3} は, レベル別項目数 a_{i1} , a_{i2} , a_{i3} を実行度で補正したものであり, 次式で得られる.

$$\hat{a}_{i3} = \frac{a_{i3}}{N_i} \bar{R}_i \quad (2.2)$$

$$\hat{a}_{i2} = \left\{ \frac{a_{i2}}{N_i} + \frac{a_{i3}}{N_i} (1 - \bar{R}_i) \right\} \bar{R}_i \quad (2.3)$$

$$\hat{a}_{i1} = 1 - \hat{a}_{i2} - \hat{a}_{i3} \quad (2.4)$$

ここで, N_i はフェーズ i における評価項目数であり, \bar{R}_i は次式で得られるフェーズ i の組織実行度である.

$$\bar{R}_i = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} R_{ij} \quad (2.5)$$

$$\text{ただし, } R_{ij} = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} r_{nj}$$

ここで、 N_p は実行度を評価したプロジェクト数、 R_{ij} はプロジェクト j のフェーズ i における実行度の平均値、 r_{nj} はプロジェクト j の評価項目 n における実行度である。

以上の前提の下に、 N_i 個の組織から収集した教示データを用いて判別効率 D を最大とする判別係数 x_1 決定する。

$$D = \sum_{k=1}^{N_i} c_k \quad \rightarrow \text{Max} \quad (2.6)$$

$$\text{ただし, } c_k = \begin{cases} 1, & i_e = i_k \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$i_e = \{ i \mid \min(P_i) \}$$

ここで、 N_i は教示データ数、 c_k は判別値(正解を 1, 不正解を 0 とする)、 i_e は業務品質から求めた不良フェーズ、 i_k は教示データ k の不良フェーズ、 P_i は式(2.1)で計算する業務品質のデータである。

(2)改善対象の抽出

上記(1)で計算された判別係数 x_1 を用いて、未知の組織で収集された業務規準レベルと実行レベルのデータを元に、不良フェーズ Ip_i (1 が不良フェーズ, 0 が良好フェーズ)、不良要因 Io_i (1 が業務規準, 0 が実行度)を次式により抽出する。

$$Ip_i = \begin{cases} 1, & i = i_e \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$Io_i = \begin{cases} 1, & \hat{i}_e = i_e \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2.8)$$

ただし、フェーズ $i = 1, 2, 3$ である。 \hat{i}_e は次式で得られる不良フェーズであり、先に i_e として求めた不良フェーズにおいて組織実行度 $\bar{R}_i = 1$ として再計算した結果である。

$$\hat{i}_e = \left\{ i \mid \min(\hat{P}_i) \right\} \quad (2.9)$$

$$\text{ただし, } \hat{P}_i = \begin{cases} (a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3) / N_i, & i = i_e \\ \hat{a}_{i1}x_1 + \hat{a}_{i2}x_2 + \hat{a}_{i3}x_3, & \text{else} \end{cases}$$

2.4 評価実験

2.4.1 評価方法

提案方式の有効性を、実際の業務データを用いて評価する。図 2.9 に評価手順を示す。図の左側は、ある組織の模式図であり、横方向に時間、縦方向にプロジェクトの並びを示す。

1)業務規準レベルデータの収集

16 組織からデータを収集した。各組織の業務規準に対し、表 2.1 の 43 の評価項目について表 2.2 の評価基準を基にレベル判定を行う。レベルは、各組織の業務規準の管理責任者と、筆者を含めた業務改善活動チームのメンバが合議して決定した。

2)実行レベルデータの収集

各組織から代表的なプロジェクトを 10 個選定する。各プロジェクトの責任者に依頼して実行レベルをアンケート形式で回答してもらう。

3)不良要因データの作成

不良要因の正解データを作成するため、各組織に蓄積されている不具合事例を分類する。不良を発生させた要因を、図 2.5 と同じ基準により「業務規準の不備」と「業務規準の実行不足」に分類する。分類結果を集計し、件数が多い方を不良要因とする。ただし、もう一方の要因の件数がほぼ同数である場合は不良要因に含める。データの分離性を考慮し、両者の差が件数が多い要因の 10%以内の場合、両方を不良要因とする。16 組織の不良要因は、7 組織が「業務規準の不備」、8 組織が「業務規準の実行不足」、1 組織が両方該当する結果となった。

4)不良フェーズデータの作成

不良フェーズの正解データを作成するため、業務課題のヒアリングを行う。業務改

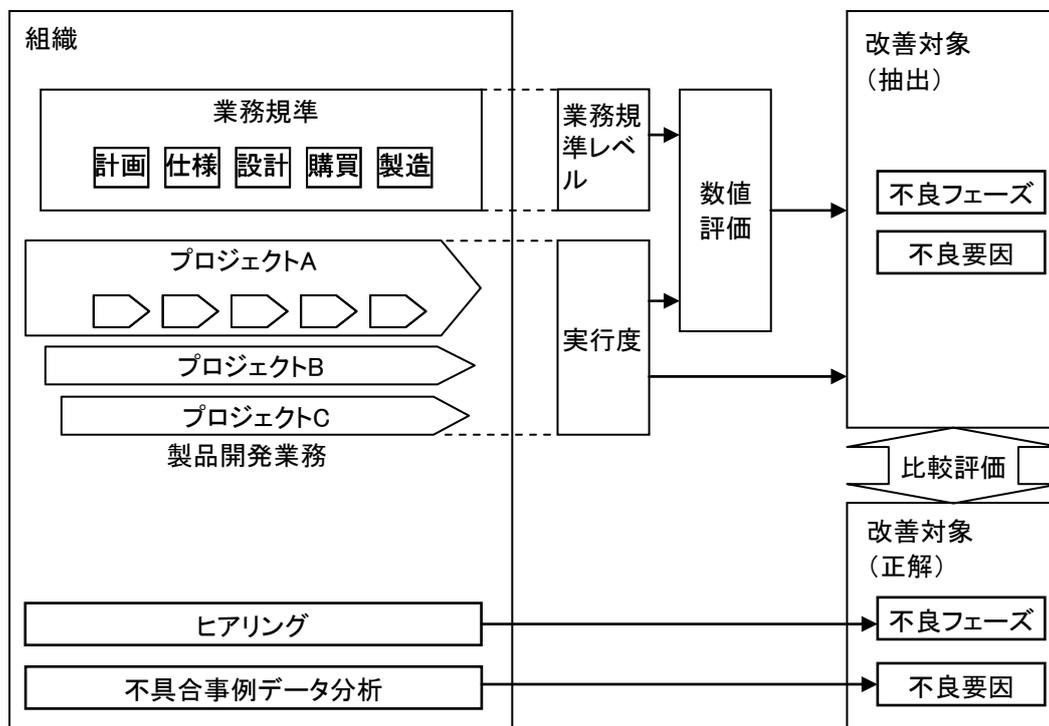


図 2.9 評価手順

善活動チームのメンバが、各組織について 10 個のプロジェクトの責任者と面談し、業務課題について意見交換する。議事録に記載された課題を、各組織について製品開発のフェーズ別に集計する。課題の件数が多いフェーズを当該組織の不良フェーズとする。ただし、上記の不良要因の場合と同様に、取得したデータの分離性を考慮し、最多件数と次点の差が最多件数の 10%以内の場合、該当するフェーズを全て不良フェーズとする。16 組織の不良フェーズは、11 組織が計画立案フェーズ、4 組織が設計開発フェーズ、1 組織はこれらの両者が該当する結果となった。

5) 評価

以上で収集した 16 組織のデータから評価用のデータセットを作成する。データセットは、各組織について、a)業務規準レベルデータ(43 評価項目)、b)実行レベルデータ(43 評価項目×10 プロジェクト)、c)不良要因データ(業務規準の不備、業務規準の実行不足の 2 カテゴリ)、d)不良フェーズデータ(計画フェーズ、仕様分析フェーズ、設計開発フェーズの 3 カテゴリ)からなる。

16 組織のデータを 15 組織の教示データと 1 組織の分類対象に分けて 16 回の

15-fold cross-validation 評価[75]を行う。教示により判別係数 x_1 を決定し、1 組織について改善対象(不良フェーズと不良要因)を抽出し、正解データと比較する。これを 16 回繰り返す。判別係数 x_1 は 0 から -10 までの間を 0.1 刻みで変更し、最適な値を選定する。提案方式を、実行度により不良フェーズを抽出する方式、提案方式において実行度による補正を行わない方式、の 2 方式と正解率を比較する。

ここで、不良フェーズの抽出方法について説明する。評価では 3 つのフェーズから不良フェーズを最大 2 つまで抽出する。まず、評価点が最小となるフェーズを不良フェーズとする。次に、評価点が昇順となるようにフェーズを並べたとき、第一位と第二位の差よりも、第二位と第三位の差が大きくなる場合、不良フェーズの境界が第二位と第三位のフェーズの間にあると考え、第二位のフェーズも不良フェーズとする。

2.4.2 評価結果

表 2.4 に不良フェーズの抽出結果を示す。縦方向は A~P の 16 組織である。横方向に、比較する 3 方式を並べて示す。

左側の列は実行度による抽出結果である。「実行度」列はフェーズ別の組織実行度であり、組織内で昇順にソートしている。「P」列はフェーズ番号である(1 : 計画立案, 2 : 仕様分析, 3 : 設計開発)。「差」列は、フェーズ間の実行度の差(実行度が大きいフェーズ - 小さいフェーズ)である。「T」列は不良フェーズの正解であり、1 が不良フェーズ、0 がその他である。不良フェーズの抽出が正解していると、組織内で「T」列の一番上のフェーズが 1 となる。不正解の組織をハッチングして示す。「N」列は「差」列の最小フェーズを 0, 他のフェーズを 1 としている。「N」列は不良フェーズを 1 つとすべきか、2 つとすべきかを判断する目安である。実行度を昇順で並べたときの第一位と第二位の距離と、第二位と第三位の距離を比較したとき、前者が大きいとき不良フェーズを 1 つ、後者が大きいときは不良フェーズを 2 つとする。表では前者の数値の並びが「110」、後者が「101」となっている。不良フェーズの抽出数が不正解の組織をハッチングして示す(「T」の不正解を含む)。

真ん中の列は提案方式による抽出結果である。実行度の場合と異なるのは「実行度」列の代わりに「評価点」列となっている点のみである。「評価点」列は式(2.1)の業務品質 P_i の計算結果を組織内で昇順にソートしている。

右側の列は提案方式において実行度を考慮しなかった場合である。全てのフェーズで式(2.2)~(2.4)の実行度を 1.0 として抽出した結果である。データの並べ方は上記の方式と同じである。

表 2.4 不良フェーズの抽出結果

組織	実行度による抽出					提案方式					提案方式で実行度考慮せず				
	P	実行度	差	T	N	P	評価点	差	T	N	P	評価点	差	T	N
A	1	0.73	0.00	1	1	1	-1.21	0.00	1	1	1	-2.31	0.00	1	1
	3	0.88	0.15	0	1	3	-0.20	1.01	0	1	3	-0.16	2.15	0	1
	2	0.95	0.07	0	0	2	0.65	0.85	0	0	2	0.73	0.89	0	0
B	1	0.72	0.00	1	1	1	-0.08	0.00	1	1	3	0.42	0.00	0	1
	2	0.82	0.10	0	1	3	0.18	0.25	0	1	1	0.46	0.04	1	0
	3	0.87	0.05	0	0	2	0.22	0.04	0	0	2	0.55	0.08	0	1
C	1	0.74	0.00	1	1	1	0.41	0.00	1	1	3	0.79	0.00	0	1
	2	0.80	0.06	0	1	2	0.50	0.09	0	1	2	0.82	0.03	0	1
	3	0.84	0.04	0	0	3	0.54	0.03	0	0	1	0.85	0.03	1	0
D	3	0.84	0.00	1	1	3	-0.38	0.00	1	1	3	-0.95	0.00	1	1
	1	0.86	0.02	1	0	1	-0.14	0.25	1	0	1	0.15	1.10	1	1
	2	1.00	0.14	0	1	2	0.18	0.32	0	1	2	0.18	0.03	0	0
E	1	0.85	0.00	1	1	1	-0.16	0.00	1	1	2	0.09	0.00	0	1
	3	0.97	0.12	0	1	2	0.07	0.23	0	1	1	0.15	0.06	1	0
	2	0.99	0.02	0	0	3	0.26	0.19	0	0	3	0.32	0.16	0	1
F	1	0.71	0.00	1	1	1	-1.12	0.00	1	1	1	-1.85	0.00	1	1
	3	0.89	0.18	0	1	2	-0.54	0.58	0	1	2	-1.09	0.76	0	1
	2	0.92	0.03	0	0	3	-0.45	0.10	0	0	3	-0.63	0.46	0	0
G	1	0.74	0.00	1	1	1	-0.04	0.00	1	1	3	0.32	0.00	0	1
	2	0.93	0.19	0	1	3	0.19	0.22	0	0	1	0.46	0.15	1	1
	3	0.93	0.00	0	0	2	0.43	0.25	0	1	2	0.55	0.08	0	0
H	1	0.88	0.00	0	1	3	-0.09	0.00	1	1	3	-0.42	0.00	1	1
	3	0.96	0.08	1	1	2	0.13	0.21	0	0	2	0.18	0.60	0	1
	2	0.97	0.01	0	0	1	0.59	0.46	0	1	1	0.77	0.59	0	0
I	1	0.91	0.00	1	1	3	-0.29	0.00	0	1	3	-1.05	0.00	0	1
	2	0.94	0.03	0	0	2	0.06	0.35	0	0	2	0.18	1.23	0	1
	3	0.98	0.04	0	1	1	0.64	0.58	1	1	1	0.77	0.59	1	0
J	1	0.85	0.00	1	1	1	-0.44	0.00	1	1	1	-0.77	0.00	1	1
	2	0.90	0.05	0	1	3	-0.24	0.20	0	0	3	-0.32	0.45	0	0
	3	0.94	0.04	0	0	2	0.18	0.42	0	1	2	0.36	0.68	0	1
K	3	0.86	0.00	0	1	1	-0.22	0.00	1	1	1	0.00	0.00	1	1
	1	0.90	0.04	1	0	3	-0.19	0.03	0	0	2	0.00	0.00	0	0
	2	0.98	0.08	0	1	2	-0.04	0.15	0	1	3	0.11	0.11	0	1
L	3	0.83	0.00	0	1	1	-0.25	0.00	1	1	1	0.00	0.00	1	1
	1	0.90	0.07	1	1	3	-0.24	0.01	0	0	2	0.00	0.00	0	0
	2	0.96	0.06	0	0	2	-0.10	0.14	0	1	3	0.16	0.16	0	1
M	1	0.90	0.00	0	1	3	-0.82	0.00	1	1	3	-1.90	0.00	1	1
	3	0.92	0.02	1	0	1	-0.68	0.14	0	0	1	-1.39	0.51	0	0
	2	0.96	0.04	0	1	2	-0.09	0.59	0	1	2	0.00	1.39	0	1
N	1	0.83	0.00	1	1	1	-0.20	0.00	1	1	1	-0.59	0.00	1	1
	2	0.90	0.07	0	1	2	-0.18	0.02	0	0	2	0.00	0.59	0	1
	3	0.96	0.06	0	0	3	0.15	0.33	0	1	3	0.21	0.21	0	0
O	2	0.91	0.00	0	1	3	-0.52	0.00	1	1	3	-1.26	0.00	1	1
	1	0.94	0.03	0	0	2	0.00	0.52	0	1	2	0.18	1.45	0	1
	3	0.97	0.03	1	1	1	0.36	0.36	0	0	1	0.46	0.28	0	0
P	3	0.89	0.00	1	1	3	-0.01	0.00	1	1	2	0.18	0.00	0	1
	1	0.93	0.04	0	0	2	0.18	0.19	0	1	3	0.21	0.03	1	0
	2	1.00	0.07	0	1	1	0.34	0.16	0	0	1	0.46	0.25	0	1

表 2.5 に不良要因の抽出結果を示す。縦方向は A~P の 16 組織である。横方向に、1 回目と 2 回目の不良フェーズの抽出結果を並べて表示している。「P」列と「T」列は表 2.4 と同じである。「抽出結果」列が 1(不良要因=業務規準)の組織は 1 回目と 2 回目の結果が一致した組織、0(不良要因=実行度)の組織は不一致の組織である。「不良要因」列は正解である(2 は両方とも不良要因を意味する)。「抽出結果」列の不正解の組織をハッチングして示す。

表 2.4 と表 2.5 から改善対象の抽出精度を纏めた結果を表 2.6 に示す。不良フェーズの正解率は、実行度による抽出方式が 68.8%であるのに対して、提案方式は 93.8%と良好な結果を得ている。また、提案方式において実行度を考慮しない場合(実行度を 1.0 とする場合)は 62.5%に低下する。これらの結果は、業務規準の評価値と実行度の両方を考慮して改善対象を抽出することの有効性を示唆している。一方、提案方式で不良要因を抽出した場合の正解率は 75%、不良フェーズと不良要因の両方が正解となる組織の割合は 68.8%の結果を得た。正解率として改善の余地があるが、提案方式の特徴である不良要因を選択する方式が有効に機能することが確認できた。

表 2.6 の内訳を把握するために、適合率、再現率、F 値[76]を計算した結果を表 2.7 に示す。提案方式について、不良フェーズの評価項目を見ると、再現率が高い一方で適合率が低い問題がある(設計フェーズの適合率 0.50, 合計の適合率 0.64)。すなわち、不良フェーズとして第一位のフェーズは正解しているが、他のフェーズとの弁別性能に問題があることがわかる。品質保証において問題となる見逃しは回避できているが、誤抽出により改善効率が低下する可能性があり、改善の余地がある。

次に、教示結果を図 2.10 に示す。図は、判別係数 x_1 の値と式(2.6)の判別効率の関係である。横軸の判別係数 x_1 は 0 から -10 まで 0.1 刻みで変化させている。縦軸は判別効率(教示において正解した組織数)であり、図は組織 A を除いた 15-fold cross-validation 評価における教示結果である。図より、判別係数 x_1 が 0 から減少するに従い正解数が増加し、-1.7 から -2.7 の範囲で最大値 14 となり、-2.7 からは減少した後、一定値となっている。グラフにピーク値が出現していることから、教示により最適な条件が得られていることがわかる。改善対象の抽出に使用する判別係数 x_1 は判別効率がピーク値をとる範囲の中央値(図の例では -2.2)を用いる。また、判別係数 x_1 の絶対値(2.2)がレベル 3 の重み x_3 の絶対値(1.0)より大きいことから、改善対象の抽出において低いレベルの評価項目数を重視すべきであることがわかる。

表 2.5 不良要因の抽出結果

組織	不良フェーズ(1回目)		不良フェーズ(2回目)		抽出結果	不良要因
	P	T	P	T		
A	1	1	1	1	1	1
	3	0	3	0		
	2	0	2	0		
B	1	1	3	0	0	1
	3	0	2	0		
	2	0	1	1		
C	1	1	2	0	0	0
	2	0	3	0		
	3	0	1	1		
D	3	1	3	1	1	1
	1	1	1	1		
	2	0	2	0		
E	1	1	2	0	0	2
	2	0	1	1		
	3	0	3	0		
F	1	1	1	1	1	1
	2	0	2	0		
	3	0	3	0		
G	1	1	3	0	0	0
	3	0	2	0		
	2	0	1	1		
H	3	1	3	1	1	0
	2	0	2	0		
	1	0	1	0		
I	3	0	2	0	0	0
	2	0	3	0		
	1	1	1	1		
J	1	1	3	0	0	0
	3	0	1	1		
	2	0	2	0		
K	1	1	3	0	0	0
	3	0	2	0		
	2	0	1	1		
L	1	1	3	0	0	1
	3	0	2	0		
	2	0	1	1		
M	3	1	3	1	1	1
	1	0	1	0		
	2	0	2	0		
N	1	1	2	0	0	0
	2	0	1	1		
	3	0	3	0		
O	3	1	3	1	1	1
	2	0	2	0		
	1	0	1	0		
P	3	1	2	0	0	0
	2	0	3	1		
	1	0	1	0		

表 2.6 改善対象の抽出精度の比較

方式 \ 比較項目	不良フェーズ の正解率	不良要因 の正解率	両方同時 の正解率
実行度による抽出	68.8 (11/16)	—	—
提案方式	93.8 (15/16)	75.0 (12/16)	68.8 (11/16)
(参考)提案方式で実行度 考慮せず	62.5 (10/16)	62.5 (10/16)	37.5 (6/16)

数値:正解率% (正解数/母数)

表 2.7 適合率, 再現率, F 値の計算結果

評価項目 \ 方式		実行度による抽出	提案方式	(参考)提案方式で 実行度考慮せず	
不良 フェーズ	合計	適合率	0.55 (12/22)	0.64 (16/25)	0.43 (10/23)
		再現率	0.71 (12/17)	0.94 (16/17)	0.59 (10/17)
		F値	0.62	0.76	0.50
	計画	適合率	0.67 (10/15)	0.92 (11/12)	0.67 (6/9)
		再現率	0.83 (10/12)	0.92 (11/12)	0.50 (6/12)
		F値	0.74	0.92	0.57
	仕様	適合率	0.00 (0/2)	0.00 (0/3)	0.00 (0/4)
		再現率	— (0/0)	— (0/0)	— (0/0)
		F値	—	—	—
	設計	適合率	0.40 (2/5)	0.50 (5/10)	0.40 (4/10)
		再現率	0.40 (2/5)	1.00 (5/5)	0.80 (4/5)
		F値	0.40	0.67	0.53
不良 要因	合計	適合率	—	0.75 (12/16)	—
		再現率	—	0.75 (12/16)	—
		F値	—	0.75	—
	規準不備	適合率	—	0.71 (5/7)	—
		再現率	—	0.56 (5/9)	—
		F値	—	0.63	—
	不遵守	適合率	—	0.78 (7/9)	—
		再現率	—	1.00 (7/7)	—
		F値	—	0.88	—

数値:計算結果 (該当数/母数)

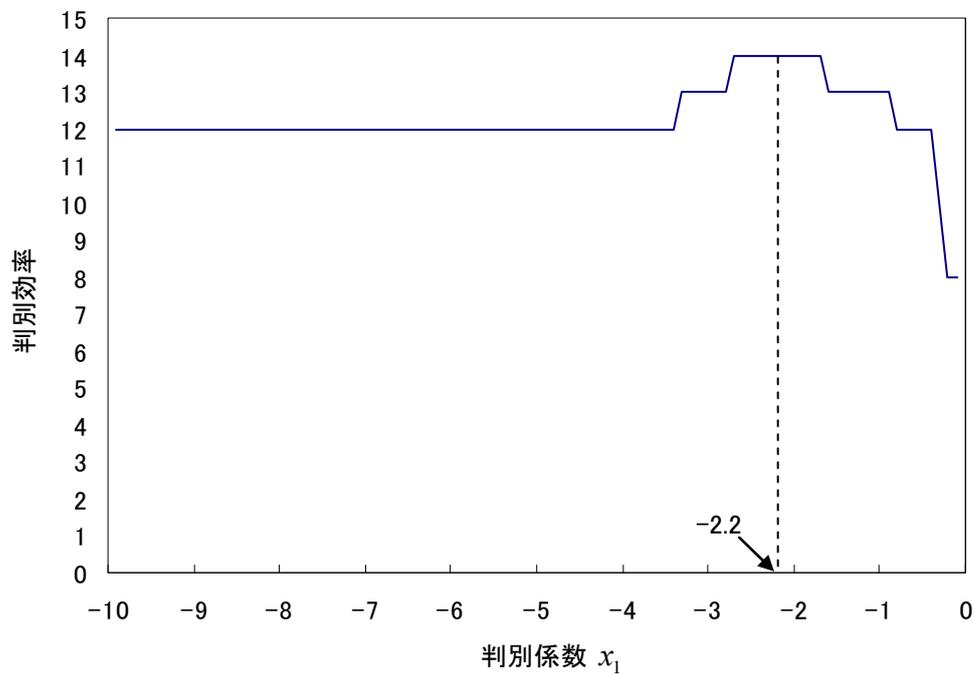


図 2.10 判別係数 x_1 の値と判別効率(正解した組織数)の関係

2.5 提案方式を用いた業務改善の手順

2.5.1 業務改善の方法

提案方式を業務改善に活用する方法を図 2.11 のフローチャートを用いて説明する。

1) 業務規準の定義

組織が、個々の業務について業務規準を定義する。

2) 業務規準を実行した製品開発の推進

各プロジェクトが前記 1) で定義した業務規準を実行して製品開発を推進する。

3) 業務規準レベルの評価

業務規準の管理者が各業務について、表 2.2 の評価基準に基づき業務規準レベルを判

定する。

4) 実行度の評価

プロジェクトの責任者が、担当するプロジェクトについて、表 2.3 の評価基準に基づき実行レベルを判定する。

5) 評価点の計算

業務規準の管理者は、 m 個のプロジェクトの責任者が実行レベルの判定を終了したことを確認すると、式(2.1)に基づき評価点を計算する。

6) 終了判定

業務の品質が目標を達成していることを確認し、改善活動を終了させる。

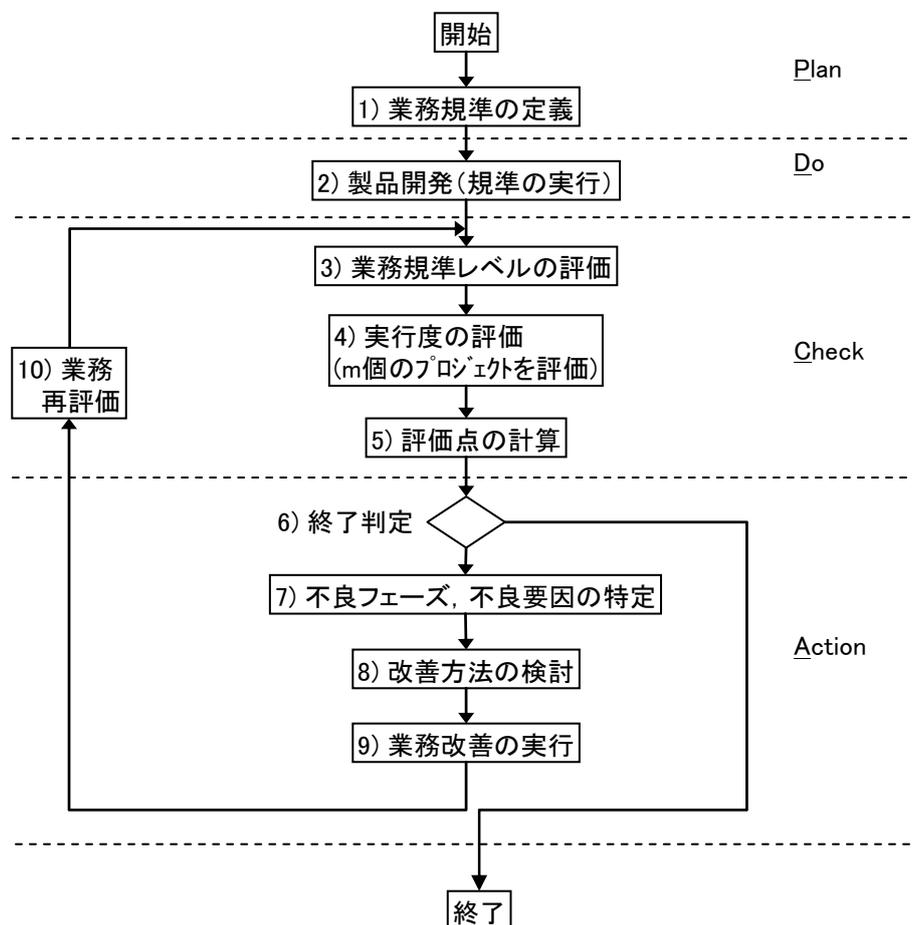


図 2.11 提案方式を業務改善に活用する方法

7) 不良フェーズ，不良要因の特定

5)の評価点に基づき，式(2.7)～式(2.9)から不良フェーズならびに不良要因を特定する。

8) 改善方法の検討

業務規準の管理者は，不良フェーズと不良要因を基に，ベストプラクティスを参照する。ベストプラクティスとは，過去の業務改善の成功例をドキュメントとして纏めた事例集である。該当するベストプラクティスを参考に，自組織の改善方法を検討する。

9) 業務改善の実行

前記 7), 8)の改善指針に基づき業務改善を実行する。

10) 業務の再評価

業務改善の効果を確認するため，業務の評価 3)～5)を再度実施する。

2.5.2 実業務への適用

2.3 節で説明した業務の数値評価方式の内，業務規準の評価と実行度を組み合わせて業務品質を数値評価する方式について，(株)日立製作所における実業務に適用して有効性を検証した。

(1)業務評価ツールの開発

実業務へ適用するために，業務評価ツールを開発した。評価ツールの入出力を図 2.12 に，適用結果の例を図 2.13 に示す。図 2.12 左側の入力は，表 2.1 に示す 43 の評価項目からなるチェックリストである。各評価項目に対して，業務規準および実行度のレベルを入力する。業務規準のレベルは，組織を代表する業務規準の管理者が表 2.2 の評価基準に基づき入力する。実行度は，各プロジェクトの責任者が表 2.3 の評価基準に基づき入力する。これら入力情報から，業務規準の評価点と組織実行度を計算し，図の右側の出力として表示する。出力の縦方向は製品開発業務のフェーズであり，横軸は評価点である。フェーズ毎に業務規準の評価点，組織実行度，業務品質の評価点が出力される。評価ツールでは，業務規準の評価点の計算に，使用者が直感的に理解容易なライカート方式[77]を採用した。

(2)業務評価ツールの適用結果

2.4 節で説明した 16 の組織に対して，(1)で説明した業務評価ツールを適用し，図 2.11 で説明した改善手順に基づき業務改善活動を推進した。従来，それぞれ個別に実施されていた業務規準の評価と実行度の評価を，評価ツールを用いて組み合わせて実施した。この結果，業務改善の従事者から，改善すべき問題に対するアプローチを 2 者択一で検討でき

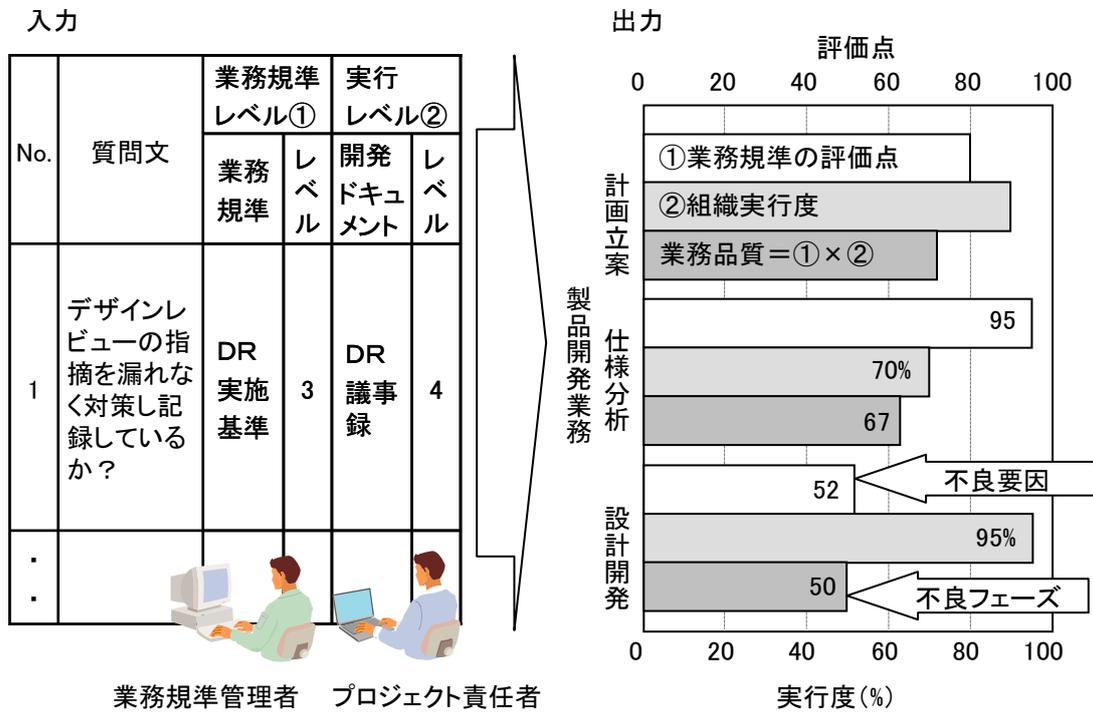


図 2.12 業務評価ツールの入出力

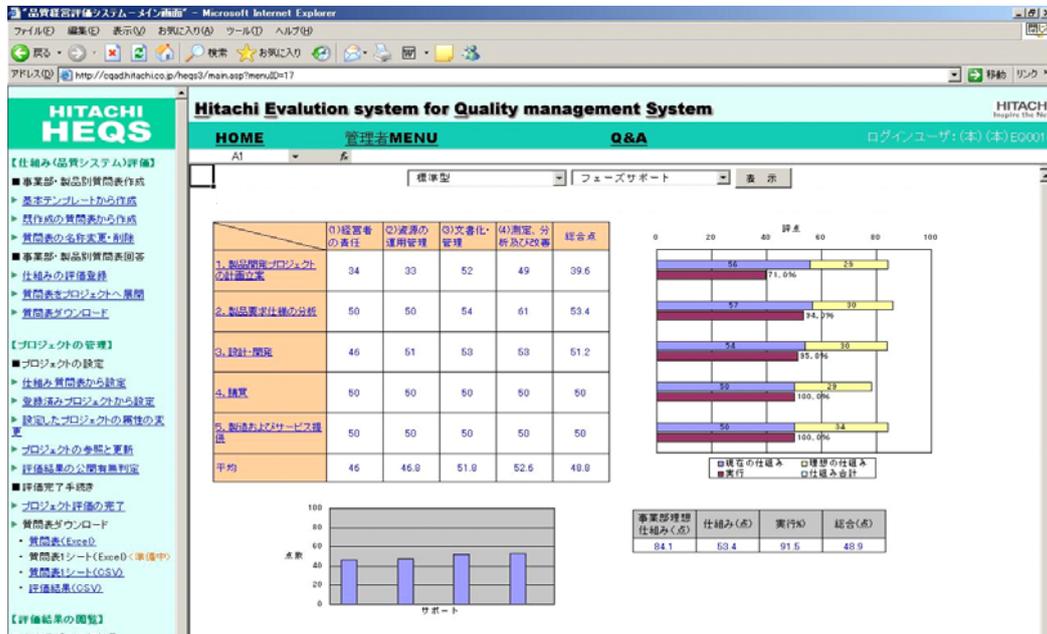


図 2.13 業務評価ツールの適用結果の例

るため、改善の方針が決めやすいといった感想が得られた。一方で、表 2.2 や表 2.3 の評価基準を個々の業務に当てはめるために、ノウハウや慣れが必要との意見も出た。また、数値評価の方法について、納得感がある説明が必要との課題が把握できた。

2.6 結言

本章では、改善対象を抽出するための製品開発業務の数値評価方式を提案した。業務の品質を、組織が定める業務規準の評価点と製品開発に従事するプロジェクトによる規準の実行度の組み合わせにより数値化し、改善対象(不良業務、不良要因)を優先付けして出力する。これにより、効率的な改善を可能とする。

業務規準を数値評価するために、評価基準に照らして得られる業務規準レベルのデータを、改善対象との相関が最大となる条件で数値化する。このとき、数値化するためのパラメータは、教示データを用いた相関値の最大化計算により算出する。提案方式を 16 組織の業務データにより評価した結果、不良フェーズを 93.8%、不良要因を含めると 68.8%の精度で特定できる結果を得た。提案方式を、実行度に基づく抽出方式や提案方式で実行度を考慮しない方式と比較した結果、提案方式が優れている結果を得た。このことから、業務規準の評価値と実行度の両方を考慮して改善対象を抽出することの有効性が確認できた。

提案方式の内、業務規準の評価点とプロジェクトの実行度を組み合わせて業務を数値評価する方式は、(株)日立製作所における全社品質保証活動に適用され、製品開発業務の品質向上による製品の品質向上に寄与している[78]。

最後に提案方式の今後の課題について述べる。

まず、一点目の課題として、改善対象の抽出精度の向上に取り組む必要がある。2.4.2 節でも述べたが、不良フェーズの適合率ならびに不良要因の正解率に改善の余地がある。提案方式は、母数が少ないデータであっても正しく教示できることが確認できたが、線形な判別方式であるために、非線形な対象は判別できない。業務規準の品質データが蓄積されつつあり、今後は、より高度な判別方式を適用できる可能性がある。

二点目の課題は、教示の精緻化である。2.4.2 節の評価では、不良業務をフェーズ単位で抽出した。しかし、より細かい単位の業務が抽出できれば、改善を効率化できる。2.3.1(3.1)で述べたように、教示カテゴリを細分化することによる弊害もあるが、教示データ数が増加すれば解消できる可能性がある。従って、不具合事例の詳細な分析により教示を精緻化し、不良業務を細かく抽出することを検討する必要がある。

三点目の課題として、対象とする業務を拡大することがある。2.2.2 節で述べたように、製品不良の作り込みの大半が設計業務であることから、本章の内容は対象を設計業務に絞り検討を行っている。しかし、製品のタイプによっては、製造段階や調達に起因した不良が多い場合もある。また、サービス・ビジネスが活発化している状況から、製造業以外に対しても業務の数値評価の対象を広げる必要がある。

第3章

見積情報を先行指標として利用した需要予測方式

3.1 緒言

本章では、個別仕様生産において特有な見積情報を先行指標として利用した需要予測方式を提案する。部品出荷数の不規則な変化に対する予測精度を向上させて、部品調達の適正化を図る[61][62][63]。

BTO 生産方式[7][8]は、部品の組み合わせの自由度を高めることにより、多品種の製品を実現し、大量生産を個別仕様に基づき行うことを可能としている。また、完成品を在庫として持たずに済むために在庫リスクを低減できる上に、短納期で製品を提供できる利点もある。しかし、顧客が必要とする場合だけ搭載するオプション部品は、製品に搭載される確率が変わるため、部品の出荷数が不規則に変化し、欠品させないためには過剰な在庫を保有する場合が多い。

従来、このような課題に対して、生産計画の見直しサイクルを短期化して小口調達を高頻度に繰り返すことで調整能力を向上させる取り組み[79]、完成品メーカーは在庫を持たず部品サプライヤから必要量のみを調達する VMI(Vendor-Managed Inventory)調達[80]、営業担当者の予測情報を積み上げて予測精度を向上させる取り組み[81]、等が行われているが、いずれの取り組みにおいても急な変化への対応は困難であり、在庫数の低減が課題となっている。特に、部品価格の下落が激しい製品では、在庫の手持ち期間が長くなると部品の購入価格と売却価格の価格差が縮小し、損益悪化の要因となる。在庫数低減の課題を解決するためには、部品の需要量を予測して調達の適正化を図ることが有効である。

生産管理を目的とした需要予測方式として、過去の時系列データの傾向を将来に外挿する時系列分析[35]、特に、各種の平滑化に基づく方式やトレンドや周期変動を検出して外挿する方式が利用されている[36][37][38]。また、ニューラルネットワークによりシステムの非線形性を不規則な変化の予測に利用する研究が報告されている[39]。しかし、平滑化

を用いた方式は、計算が簡単である一方、トレンドや周期変動といった変化に対して遅れて追従する問題がある。また、複雑な変化に対応できる時系列分析や非線形な予測方式は、過去の傾向を統計的に有意な条件で関数に当てはめるため、長期間にわたり大量なデータを必要とする。しかし、本章が対象とする BTO 製品は、製品世代が代わると部品も更新される場合が多く、過去の部品の情報を流用することが難しい。このため、本章の対象に適用することは困難である。

そこで、個別仕様生産において特有な見積情報(見積書に記載された製品に搭載されている部品数)に着目し、これを先行指標として利用する。見積情報は、作成される時期が出荷時点から過去に戻るほど先行指標としての利用価値が高まるが、将来の出荷情報との関係付けが困難となる。このため、見積情報と出荷情報の 1 対 1 の対応関係は利用せず、ある期間に作成された見積書に記載された部品数の集計値と、後に製品に搭載されて出荷された部品数の集計値の関係を定式化する。ただし、見積書は同一の商談で何度も作り直されることがある上、見積から出荷までの期間は商談によりばらつきがある。また、見積とは無関係に出荷される製品もある。このため、上記 2 つの集計値は、それぞれに誤差を含んでいる上に、両者の関係が時間とともに変化する。そこで、両者をシステムへの入出力と見なし、上記の誤差を許容するようにシステムのパラメータを推定する。推定したパラメータを用いて、出荷数の短期予測を行う。

以下、3.2 節では、BTO 製品の部品出荷数の特徴を明らかにする。3.3 節では、提案する見積情報を利用した予測方式の考え方、およびカルマンフィルタを応用したパラメータ推定方式について説明する。3.4 節では、提案方式を実データに適用し従来方式と比較して評価する。また、シミュレーションにより提案方式の適用可能範囲を示す。

3.2 BTO 製品における部品出荷数の予測問題

BTO 製品の構成を図 3.1 に示す。図の右側は製品、左側は製品を構成する部品であり、製品に搭載される部品が線で結ばれている。BTO 製品は、図で示すように、複数の部品グループから選定した部品を組み合わせることにより、多品種の製品を構成できるようにしている。各部品グループには、仕様が異なる複数の種類の部品が用意されており、各部品グループから 1 種類の部品が選定されると、予め決められている数量が製品に搭載される。異なる部品グループの部品同士について任意の組み合わせを可能とすることで、製品の多品種化を実現している。顧客は、製品に要求する仕様に合わせて各部品グループから部品

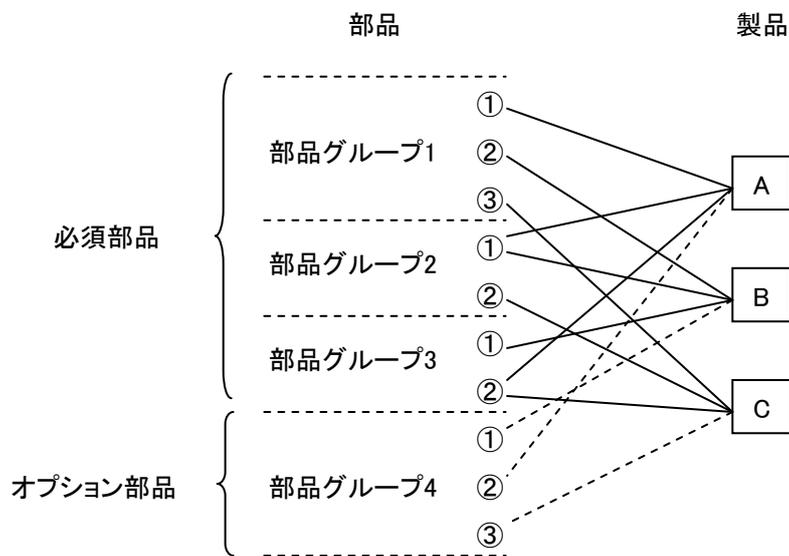


図 3.1 BTO 製品の構成

を選定し、これを組み合わせて製品構成を決定する。例えば、製品 A は、部品グループ 1 の①、部品グループ 2 の①、部品グループ 3 の②、部品グループ 4 の②により構成されている。ここで、部品の種類には、製品に必ず搭載する必要がある必須部品と、顧客の好みに応じて搭載しても、しなくても良いオプション部品がある。図では、部品と製品の間が実線で結ばれている部品グループ 1~3 が必須部品であり、破線で結ばれている部品グループ 4 がオプション部品である。オプション部品は製品への搭載確率が必須部品よりも振れやすく、部品出荷数の変化が大きいため需要量の予測が難しい。

本章では、図 3.2 に示すような受注プロセスを伴う企業間取引を対象とする。図は、横方向に時間、縦方向に関係者を取り、ある商談の受注プロセスの様子を示したものである。まず、顧客が提示した仕様に従って企業の営業担当者が見積書を作成して顧客に提示する。見積書を作成する段階で、どの部品が製品に何個搭載されるかの見通しが得られる。その後、価格交渉を経て受注が確定する。受注が確定すると工場在庫として持つ部品を製品に搭載して出荷する。部品の在庫管理では、月や週といった計画期間毎に生産計画を立て、部品毎に計画期間における出荷数、入荷数、在庫数を把握する。欠品が生じないように調達リードタイムを見込んだ上で部品の追加発注を行う。入荷した部品は在庫として管理され、手持ち期間を経て製品に組み立て出荷される。ただし、出荷には、図に記載するように見積書と無関係なものが含まれる場合がある。例えば、図に示すような通常受注プロセスとは別に価格交渉を行う大口の商談が該当する。

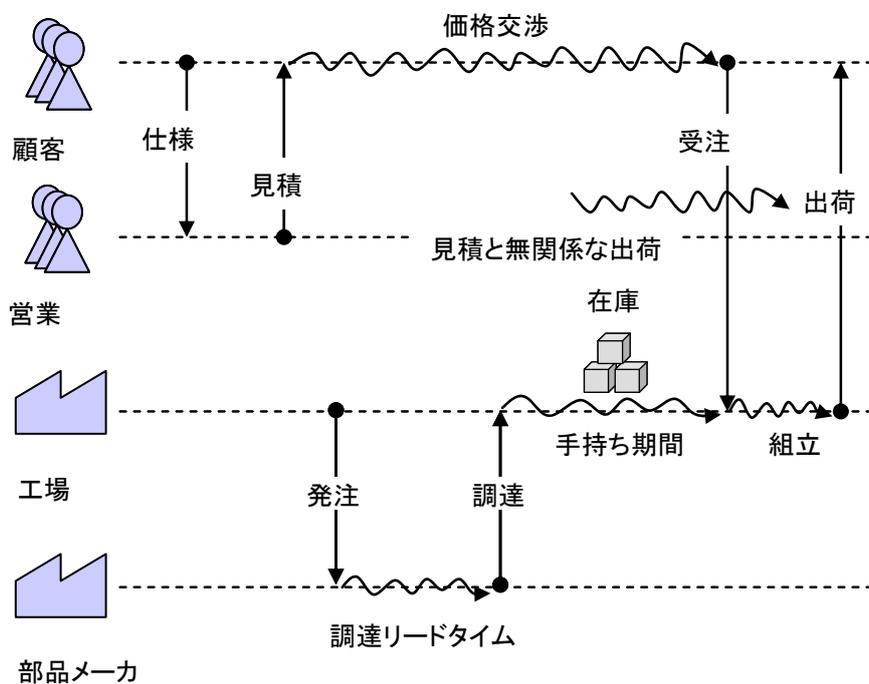


図 3.2 受注プロセス

次に、部品在庫の手持ち期間を短縮することの必要性について、図 3.3 を用いて説明する。図は横軸が時間、縦軸が価格であり、部品の販売価格と購入価格をグラフとして示す。

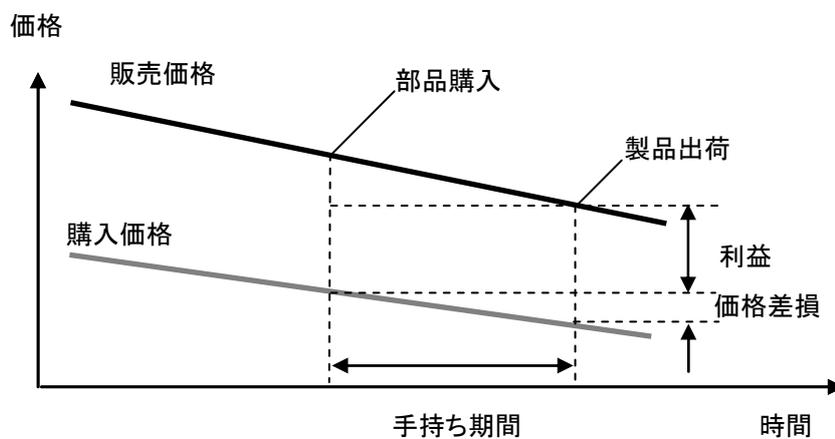


図 3.3 在庫手持ち期間短縮の必要性

このため、太線で示す k 期の出荷数を予測することにより、 k 期末の在庫量を正確に把握することができる。 $k+1$ 期前半は k 期と近接しているため同一ペースで在庫消費が進むと仮定すれば、 $k+1$ 期後半に適切な在庫レベルを維持するために、 $k+1$ 期中に補充すべき部品の発注量を予測結果から正確に把握することができる。以上をまとめると、 $k-1$ 期末に k 期中の部品出荷数を予測できれば、同時期に発注する発注数をコントロールすることにより、 $k+1$ 期後半の在庫レベルを適正化することができる。

予測対象の例を図 3.5 に示す。図の横軸は時間、縦軸は部品数である。グラフで示す部品数は、ある部品種類について、計画期間に製品に搭載されて出荷された台数の合計であり、以後、出荷数と呼ぶ。図は出荷数を製品ライフサイクルの全期間について示したものである。ただし、図 3.2 で説明した見積と無関係な出荷は予め除外している。しかし、見積と関係ある出荷か、無関係な出荷かの識別を正確に行うことは難しいため、グラフは図の上下方向に多少の誤差を有している。横軸の単位は計画期間である。図に示すように、出荷数は製品ライフサイクルの立ち上がりと立ち下りの時期に急激に変化する上に、その間の時期も不規則に変化している。図の例では、ある期間を基準とすると 1 期先の出荷数は平均 22%の割合で変化している。BTO 製品では、部品毎に製品への搭載確率が異なるため出荷数の波形もさまざまであるが、オプション部品については、いずれも図に示す

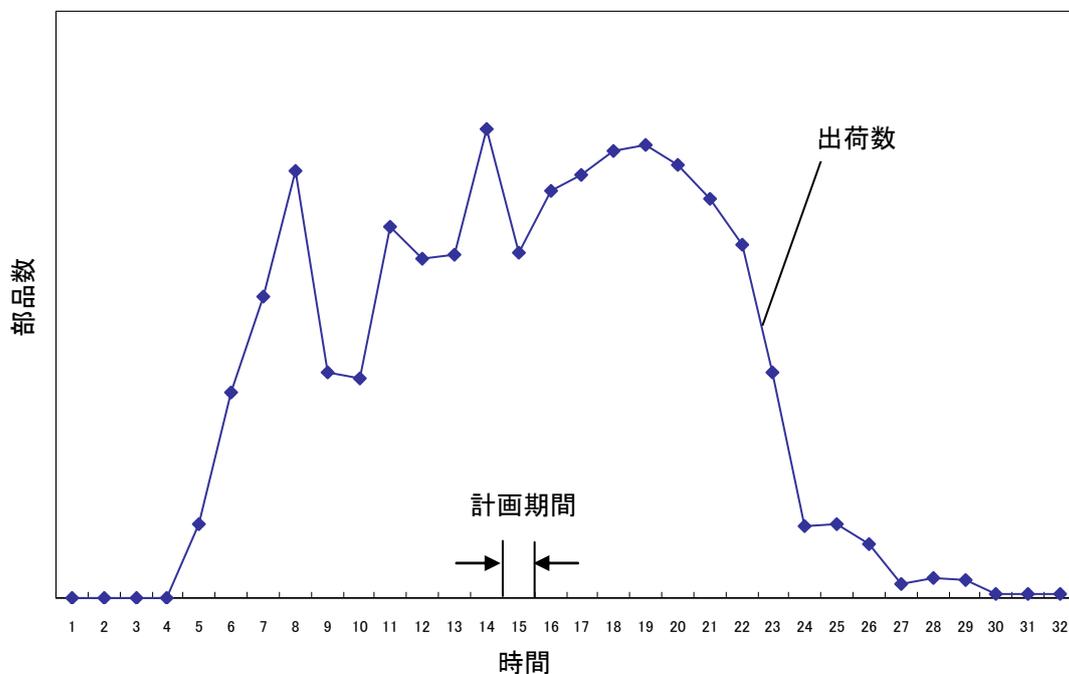


図 3.5 予測対象

ように不規則に変化している。急激な変化のうち、製品ライフサイクルの立ち上がりと立ち下がりの変化については、大まかな時期が推定できるが、製品世代の切り替わりのタイミングは市場動向に左右されやすいため、正確な時期を図の時間軸の1単位で予測することは困難である。また、製品の世代交代に合わせて部品の種類も変更される場合が多く、過去の出荷数のデータを基に次世代の部品の出荷数を予測することは困難である。

3.3 見積情報を先行指標として利用した予測方式

本節では、大量のデータの準備を必要とせず、不規則に変化する予測対象に適用可能な方式を提案する。このために、個別仕様生産製品に特有な見積情報に着目し、これを先行指標として利用する。

3.3.1 見積情報の特徴

(1) 見積情報

見積情報を図 3.6 に示す。図 3.2 で説明したように、企業の営業担当者は顧客から仕様

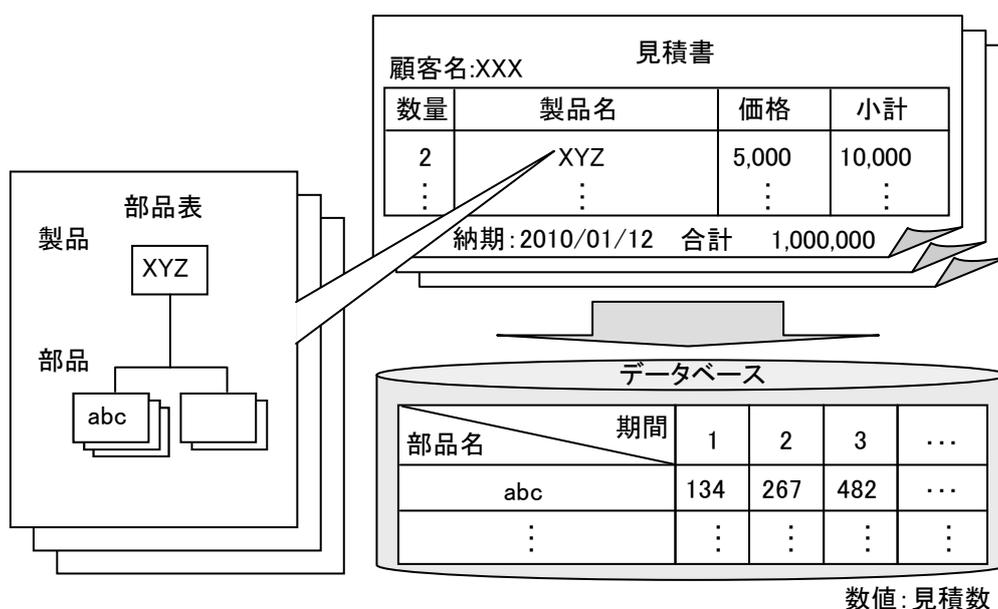


図 3.6 見積情報

を提示されると、仕様を満たす製品の構成を決定し、見積書を作成する。近年、見積書は電子データとして作成されており、容易に集計処理することが可能である。顧客に提出する見積書には、製品名、数量、価格、納期が記載されている。製品にどの部品が何個搭載されるかは部品表として定義されているため、見積書の電子データは部品表のデータを用いて部品数に展開することができる。そこで、ある期間に作成された多数の見積書を部品数に展開し、部品種類毎に集計してデータベースに記録する。図では横方向を期間、縦方向を部品名としたテーブルに、各期間に作成された見積書から抽出された部品数の合計が記録されている。以後、この数値を見積数と呼ぶ。

図 3.7 は、見積数と出荷数の関係を示している。出荷数は図 3.5 で示したものと同じである。見積数は失注するものを含み出荷数よりも多いため、両者を比較しやすいように、見積数の縦軸のスケールを縮小して表示している。見積数は出荷数に対して 1~2 期先行して類似した形状をしており、予測のための先行指標として有用であることがわかる。しかし、波形の細部を比較すると、ピーク位置の高さの関係が時期により異なっていたり、ピーク位置の先行期間が異なっていたりする。これは、次節(2)で説明するノイズが存在するためである。

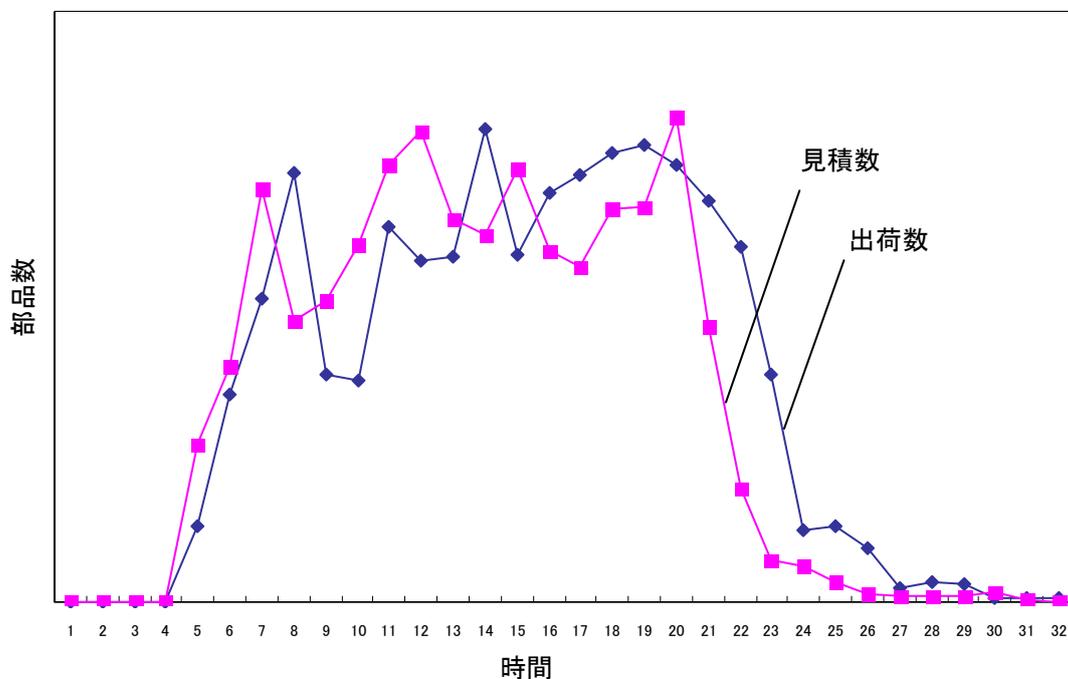


図 3.7 見積数と出荷数の関係

ここで、見積数と出荷数の関係について説明を加える。企業情報システムの構築方法として、見積データと出荷データを関係付け、どの見積データに記録された製品が何時出荷されたのかを把握することも可能である。しかし、見積データは、作成される時期が出荷時点から過去に戻るほど先行指標として利用価値が高くなるが、1件ずつの見積と出荷を明確に対応付けさせることが難しくなる。従って、本章では両者の1対1の対応関係は利用せず、ある期間の集計値の間の関係を利用する。

(2) ノイズ要因

図 3.7 に示す見積数と出荷数は誤差(以下、ノイズと呼ぶ)を含む。その要因を図 3.8 に示す。見積数のノイズには、(a)見積を作成した商談が受注に至らず失注する頻度のばらつき、(b)類似した見積が何度も作り直される頻度のばらつき、(c)見積作成から受注までに要する時間のばらつき、がある。(a)はプレサービスと呼ばれる商談の掘り起こし活動で多く発生する。この活動では、顧客へ製品を紹介することを目的に見積が作成されるため、見積数に対する出荷数の割合は低くなる。プレサービスが活発に行われる時期かそうでないかによって、受注確率の平均値も変動する。(b)は顧客や競合メーカを交えた価格交渉の過程で発生する。作り直しの頻度は予め決まっている訳では無く、商談の事情により異なるため受注確率にばらつきが生じる。これら(a)(b)は受注確率のばらつきであるため、図 3.7 では波形のピーク位置が上下にばらつく要因となる。(c)は商談の規模に関係する場合が多い。高額な商談では見積作成から出荷までに長い期間を要するが、低額な商談では見積作成後に短期間で出荷に至る場合がある。これは、図 3.7 では見積数と出荷数の波形のピーク位置の関係が左右にばらつく要因となる。

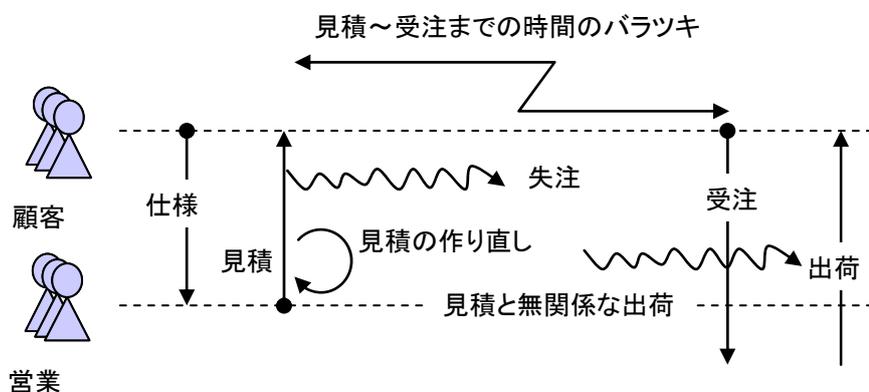


図 3.8 ノイズ要因

上記ノイズ(a)~(c)の分布について考察する。本章が対象とする BTO 製品の受注プロセスでは、互いに関係の薄い多数の商談が独立して進行する。見積数はこれら商談のデータのある期間について集計したものである。このような集計値のばらつき(a)~(c)は、正規分布に収束する[83]。

同様に、3.2 節で説明した出荷数のノイズも正規分布に収束すると考えられる。出荷数は、全ての出荷数から見積と無関係な台数(例：通常の受注プロセスとは別に価格交渉を行う大口の商談に対応した出荷台数)を除外したものである。しかし、多数の商談について計画期間の終了時点で見積と関係ある出荷か無関係な出荷かを識別して除外すべき台数を正確に把握することは難しい。このため、過大評価や過小評価が同程度の確率で発生する。このように、多数の互いに無関係な過大評価や過小評価の誤差の集計値は正規分布に収束する。

以上のことから、見積情報を先行指標として利用するためには、このノイズを補正することが課題となる。

3.3.2 予測方式

(1)受注プロセスにおける予測方式の位置づけ

提案する予測方式の受注プロセスにおける位置づけを図 3.9 に示す。営業担当者が作成する見積情報は、図 3.6 において説明した見積数としてデータベースに蓄積する。一方、出荷される部品台数についても出荷数として集計してデータベースに記録する。出荷時期から組立期間と調達リードタイムの合計だけ過去に戻った時点より前に見積数から出荷数が予測できれば、工場から部品メーカーへの発注量を調整し、欠品を回避した条件で在庫数を極力少なくし、部品在庫の手持ち期間を短縮できる。

(2)アプローチ

図 3.9 で説明した予測方式を実現するために、図 3.10 に示すアプローチをとる。図の左側に示すように先行指標である見積数を個別仕様生産システムに対する入力、予測対象である出荷数を同システムからの出力と考える。このとき、入力を出力に変換するパラメータは図の右側に示す受注確率となる。受注確率は、直接観測することが困難なパラメータであり、製品の競争力、企業の販売戦略、景気動向、等の要因に影響を受ける。これらの要因は長期的には変動するが、短期予測のように短い時間においては状態が保存されると考えられる。従って、入出力の関係から受注確率を推定できれば、任意のインプット波形に対してアウトプット波形を予測できる。以上の方針に基づき、予測方式を提案する。

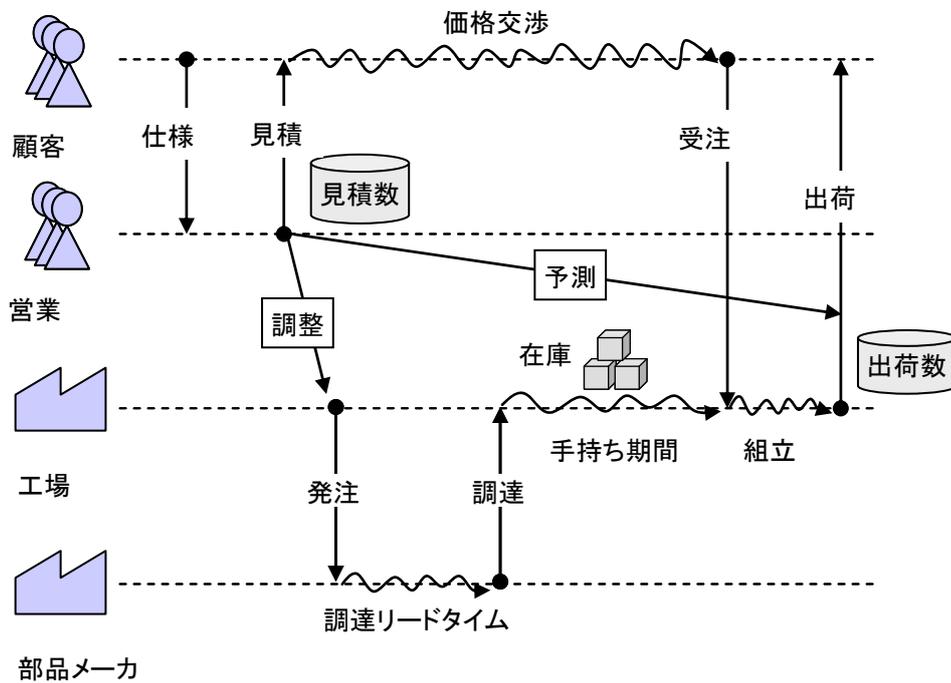


図 3.9 受注プロセスにおける予測方式の位置づけ

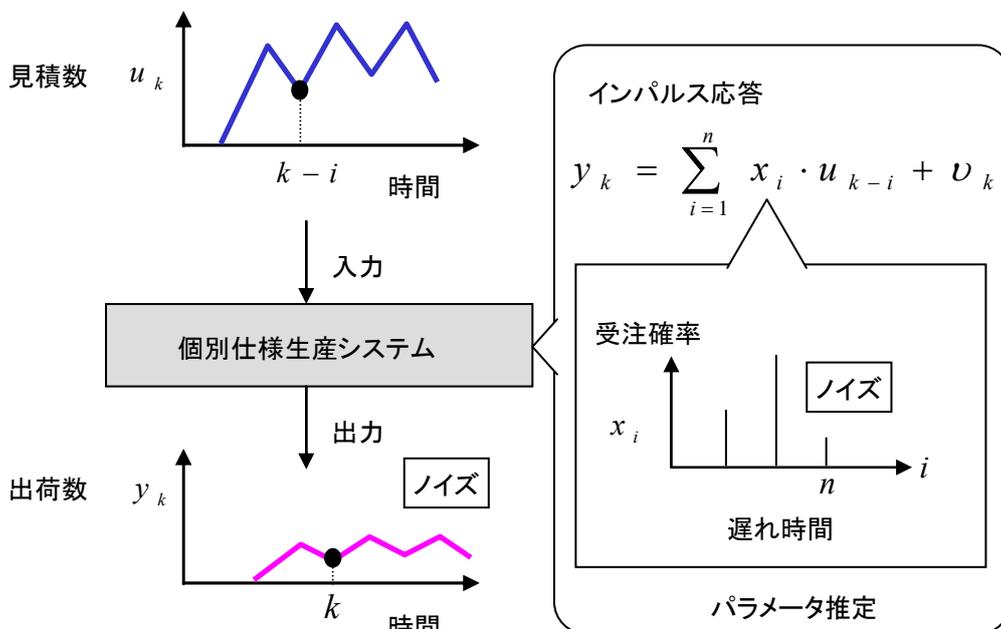


図 3.10 アプローチ

ある時点に作成された多数の見積りに記載された製品が出荷される時期を考える。一般に、見積作成直後に出荷される場合は少なく、見積作成後に長期間を経て出荷される場合も少ない。すなわち、見積作成後ある時間を経過した期間に出荷数が集中すると考えられる。そこで、図の左下に示す出荷数の k 期の値は、過去の $k-i$ 期の見積数に対応する出荷数の重ね合わせだと考える。これは、出荷数を見積数に対するインパルス応答[84]と見なすことになり、出荷数を見積数と受注確率の畳み込みとして次式で記述できる。

$$y_k = \sum_{i=1}^n x_i u_{k-i} + v_k \quad (3.1)$$

ただし、 y_k は k 期の出荷数、 u_{k-i} は $k-i$ 期の見積数、係数 $\{x_i\}$ は見積数を出荷数に変換する受注確率である。受注確率は時間遅れ i の関数であり、時間遅れの最大値を次数 n とする。また、 v_k は出荷数の集計誤差(ノイズ)である。このとき、受注確率 $\{x_i\}$ が得られれば、過去の $k-i$ 期の見積数を式(3.1)に入力することにより k 期の出荷数が予測できる。ただし、同式において部品種類を表す添字は省略している(以降の式においても同様)。また、 $k-i < 0$ のとき $u_{k-i} = 0$ とする。

(3)カルマンフィルタを応用した定式化

図 3.10 の右側の受注確率ならびに左下の出荷数は、図 3.8 で説明したノイズを含む。このようなノイズを含む入出力からシステムのパラメータの真値を推定する方式としてカルマンフィルタ[85]がある。図 3.8 で述べたように、出荷数から見積と無関係な出荷を正確に除外することは難しく、推定困難なノイズが混入している。しかし、カルマンフィルタは、観測値(出荷数が該当する)のノイズの大きさに応じて、予測値に及ぼす観測値のウェイトを自動的に調整する特徴があり、本章の対象に向いている。また、逐次的なデータ処理に基づく推定方式であるため、多変量解析のように事前に教示用の大量データを必要としない。製品の世代交代に合わせて部品種類が変更されるような場合にも適用できる。

以下、カルマンフィルタを適用する手順を説明する。計算手順を図 3.11 に示す。まず、式(3.1)を観測可能な変数と観測不可能な変数に分けて記述する。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\omega}_k \quad (3.2)$$

$$y_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + v_k \quad (3.3)$$

ただし、 \mathbf{x}_k は k 期の受注確率、 $\boldsymbol{\omega}_k$ は受注確率のノイズ、 y_k は出荷数、 \mathbf{H}_k は見積数、 v_k は出荷数のノイズである。見積作成から出荷までの遅れ時間の最大値を n とすると、受注

確率 \mathbf{x}_k , 受注確率のノイズ $\boldsymbol{\omega}_k$, 見積数 \mathbf{H}_k は以下の式で定義される. ただし, T は転置記号である.

$$\mathbf{x}_k = [x_1(k), \dots, x_n(k)]^T \quad (3.4)$$

$$\boldsymbol{\omega}_k = [\omega_1(k), \dots, \omega_n(k)]^T \quad (3.5)$$

$$\mathbf{H}_k = [u_{k-1}, \dots, u_{k-n}] \quad (3.6)$$

ここで, 3.3.1 節で説明した理由により, 出荷数のノイズ ν_k は平均値 0, 分散 σ_ν^2 の, 受注確率のノイズ $\boldsymbol{\omega}_k$ は平均値ベクトル $\boldsymbol{\theta}_n$, 共分散行列 $\sigma_\omega^2 \mathbf{I}_{n \times n}$ ($\mathbf{I}_{n \times n}$ は $n \times n$ の単位行列) の正規分布を仮定する. 以下, $\hat{\cdot}$ は推定値であることを示す記号である.

まず, 緩やかな変動と見なせる受注確率は, 短い期間である $k-1$ 期から k 期の間には保存されると仮定する.

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \quad (3.7)$$

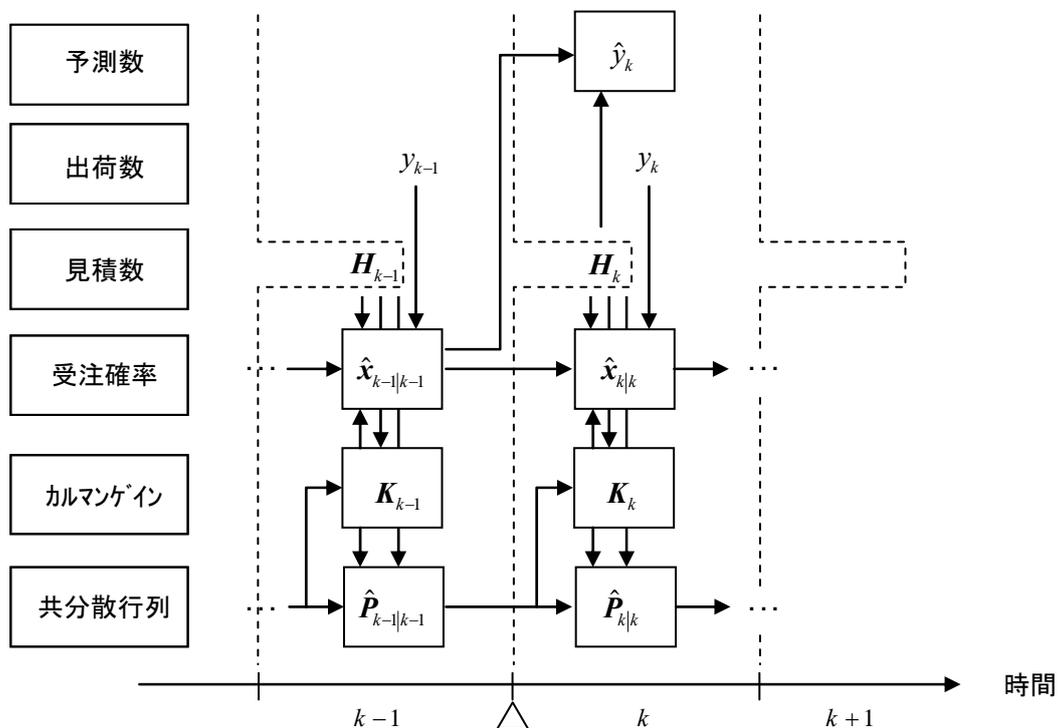


図 3.11 計算手順

次に、 k 期の出荷数 y_k が得られた後の受注確率の推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ は、出荷数が得られる前の受注確率の推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ に対して、出荷数と予測数の誤差 $(y_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$ に係数 \mathbf{K}_k を乗じた項を補正して得られると考える。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (y_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (3.8)$$

ここで、式(3.3)の出荷数の集計誤差 v_k は平均処理を行うことにより正負の分布が打ち消し合いゼロとなっている。係数 \mathbf{K}_k はカルマンゲインと呼ばれ、受注確率の推定誤差 $\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ を要素に持つ共分散行列 $\mathbf{P}_{k|k}$ の最小化計算を行うことにより、以下の式で与えられる。

$$\mathbf{K}_k = \hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (1 + \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T)^{-1} \quad (3.9)$$

ここで、共分散行列 $\hat{\mathbf{P}}_{k|k-1}$ は、 $k-1$ 期から以下の式により更新されたものである。

$$\hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} = \hat{\mathbf{P}}_{k-1|k-1} + \frac{\sigma_\omega^2}{\sigma_v^2} \mathbf{I}_{n \times n} \quad (3.10)$$

また、次期予測に備えて観測値 \mathbf{H}_k に基づき共分散行列 $\hat{\mathbf{P}}_{k|k}$ を更新する。

$$\hat{\mathbf{P}}_{k|k} = \hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} \quad (3.11)$$

ただし、 $\hat{\mathbf{P}}_{k|k} = \hat{\Sigma}_{k|k} / \sigma_v^2$ において $\hat{\mathbf{P}}_{-1|-1} = \varepsilon_0 / \sigma_v^2 \mathbf{I}_{n \times n}$ 、 $\varepsilon_0 > 0$ とした。

以上、式(3.7)~(3.11)を逐次計算することにより受注確率の推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ が得られ、 $k-1$ 期までの見積数 \mathbf{H}_k から k 期の出荷数 \hat{y}_k が予測できる。

$$\hat{y}_k = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^n \hat{x}_i u_{k-i} \quad (3.12)$$

最後に、カルマンゲイン \mathbf{K}_k と出荷数の集計誤差 v_k および受注確率のノイズ ω_k の関係について説明する。出荷数の集計誤差 v_k が充分小さいとき(分散 $\sigma_v^2 \rightarrow 0$)、出荷数が信用できるため式(3.8)において出荷数 y_k のみを用いて推定することが望ましい。このとき式(3.9)は $\mathbf{K}_k = \mathbf{H}_k^{-1}$ に近付き、式(3.8)は受注確率を出荷数 y_k のみを用いて推定する場合に一致する。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{y}_k \quad (3.13)$$

一方，出荷数の集計誤差 ν_k が大きく事前推定の精度が高い場合(分散 $\sigma_\nu^2 \rightarrow 0$)，式(3.9)は $\mathbf{K}_k = \mathbf{0}$ に近づき，式(3.8)は $\mathbf{K}_k = \mathbf{0}$ として事前推定を行うケースに一致する．

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \quad (3.14)$$

このように，観測誤差 σ_ν^2 や推定誤差 σ_ω^2 の大きさに応じてカルマンゲイン \mathbf{K}_k の値が調整され最適な推定ができる．

3.4 提案方式の評価

3.4.1 実データを用いた評価

(1) 評価条件

提案方式を BTO 製品の実データを用いて評価する．ある期までの見積数 u_{k-1} と出荷数 y_{k-1} から次期の出荷数 y_k を予測する短期予測を行う．評価条件を表 3.1 に示す．ある製品において出荷数の多い 78 種類の部品を対象とする．評価に用いた製品は，ほぼ全ての商談で見積後 3 期間の間に出荷されるため，受注確率 $\{x_i\}$ の次数 n を 3 とする．評価期間 m は最大 32 期であり，この中で部品が出荷されている期間を対象とする．受注確率の初期値は部品種類毎に設定することが望ましいが，事前に把握できないため，全ての部品種類で共通の値を仮定し，初期の予測計算で部品種類毎に収束させる．このため，出荷開始から最初の 5 期を収束期間とし，それ以降の期間において予測誤差を評価する．

表 3.1 評価条件

パラメータ	条件
サンプル数(部品種類数)	78
受注確率の次数	$n = 3$
評価期間	$m = 32$

評価指標は次式で示す平均絶対誤差率 M (%) [86][87] とする.

$$M = \frac{100}{m} \sum_{k=1}^m \frac{|\hat{y}_k - y_k|}{y_k} \quad (3.15)$$

ただし, 出荷数 y_k がある程度以上の大きさがある, 統計的に有意な期間で評価を行う. 本章では, 出荷数 y_k が最大値に対して 10% 以上の期間で上記の計算を行う.

また, 予測対象である出荷数について波形の変化の度合いを把握するため, 平均変化率 R と呼ぶ指標を定義する.

$$R = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^{m-1} \frac{|y_{k+1} - y_k|}{y_k}, \quad m > 1 \quad (3.16)$$

一般に, 需要予測が有用となるための平均絶対誤差率 M は 20% 未満であり, 実用上許容できる範囲は 30% 未満との報告がある [88]. このため, 評価においては平均絶対誤差率 M がどの条件で 30% を越えるかに着目する.

(2) 従来方式

提案方式の有効性を確認するため, 以下 2 通りの従来方式と比較する. まず, 先行指標を用いることの有効性を確認するため, 先行指標を用いずに指数平滑法 [37] で予測した結果と比較する. 指数平滑法は, 移動平均に指数型係数を採用することで直近の変化への追従性を向上させており, 時系列分析 [35] の中でも, 本章の予測対象に向いている. 不規則な変化でも係数の同定が容易な定数型モデルを採用し, 平滑化係数 α は過去の予測誤差が最小となるように最小二乗法で決定する.

$$\hat{y}_k = \alpha \cdot y_{k-1} + (1 - \alpha) \cdot \hat{y}_{k-1} \quad (3.17)$$

次に, カルマンフィルタを用いることの有効性を確認するため, 先行指標は用いるがフィルタを採用せず次式により予測した結果と比較する (フィルタ無しと呼ぶ). 具体的には, $k-1$ 期において $k-1$ 期の出荷数 y_{k-1} と $k-1-p$ 期の見積数 u_{k-1-p} の比を求め, $k-p$ 期の見積数 u_{k-p} と前記の比から k 期の出荷数 y_k を予測する. 予備検討の結果から $p=1$ とする. 式 (3.18) は提案方式と比べ, 出荷数のノイズを無視している点 (式 (3.13) と同じ), 見積から出荷までの遅れ時間を p 期に固定している点が異なる.

$$\hat{y}_k = \frac{y_{k-1}}{u_{k-1-p}} u_{k-p} \quad (3.18)$$

(3) 評価結果と考察

結果を表 3.2 に示す。表では、予測対象の波形の変化の度合いと予測誤差の関係を把握するため、78 種類の部品を平均変化率 R の範囲により分類している。各平均変化率の範囲に該当する部品種類について平均絶対誤差率の平均値ならびに最大値を計算し、提案方式と 2 通りの従来方式を比較している。部品種類数の 64%($= (7+27+16)/78$) を占める平均変化率 R が 0.4 以下の範囲について平均絶対誤差率の平均値 \bar{M} を見ると、従来方式 1(指数平滑法)が実用上許容できる 30%を超える 35.8%，従来方式 2(フィルタ無し)も 33.2%であるのに対して、提案方式は 30%未満となっている。さらに、平均絶対誤差率の最大値 M_{\max} では、従来方式 1(指数平滑法)が 30%を大きく越える 60.2%，従来方式 2(フィルタ無し)も 56.0%であるのに対して、提案方式は若干上回る 32.0%である。平均変化率 R が 0.4 を超える範囲では、提案方式も 30%を超える結果となっているが、いずれの条件においても従来方式より優れている。

表 3.2 評価結果

平均変化率 R	部品種類数	平均絶対誤差率の平均値 \bar{M} (%)			平均絶対誤差率の最大値 M_{\max} (%)		
		提案方式	従来方式1 (指数平滑法)	従来方式2 (フィルタ無し)	提案方式	従来方式1 (指数平滑法)	従来方式2 (フィルタ無し)
~0.2	7	21.8	20.4	24.4	25.1	30.3	34.0
~0.3	27	23.2	26.0	29.8	26.9	56.8	41.3
~0.4	16	28.2	35.8	33.2	32.0	60.2	56.0
~0.5	19	34.3	40.2	40.9	40.1	63.8	61.1
~0.6	9	41.5	45.9	44.4	48.0	63.3	63.2

表 3.2 の平均変化率 R と平均絶対誤差率の平均値 \bar{M} の関係を図 3.12 に示す。プロットの横軸の位置は、表 3.2 の平均変化率の範囲に属する部品種類の平均値である。図について考察すると、各方式では R が増加して出荷数 y_k の変化の度合いが大きくなるほど \bar{M} が増加する。実用上許容できる誤差である 30%との関係を見ると、従来方式(指数平滑法とフィルタ無し)は $R = 0.3$ の左側で \bar{M} が 30%を越えている。これに対して提案方式は、 \bar{M} が 30%を越える位置が 0.1 程度右側にシフトした $R = 0.4$ 付近である上、全般に従来方式に比べて \bar{M} が 5~10%程度低い。このため、提案方式は従来方式よりも不規則な変化に対

する予測精度が優れており，平均変化率が 0.4 以下の範囲においては実用上許容できる性能が得られている。

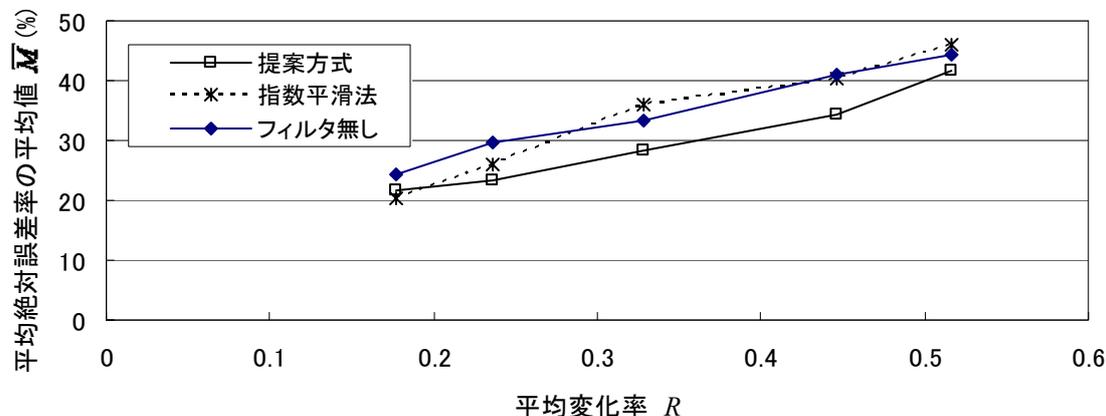
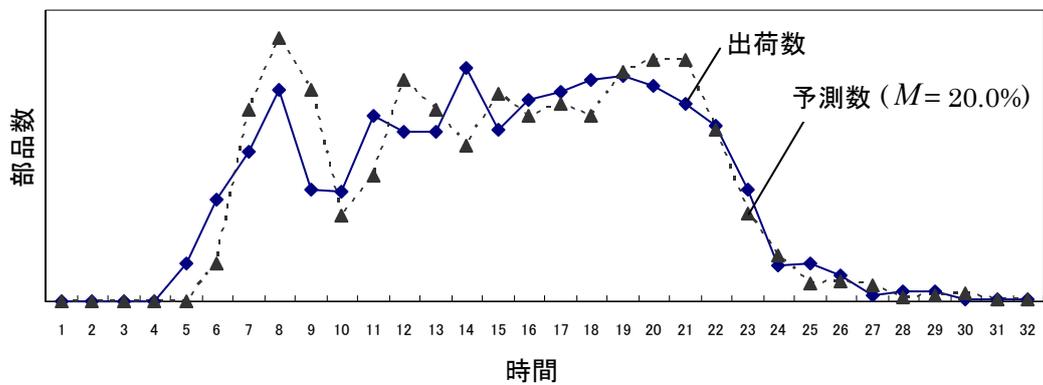
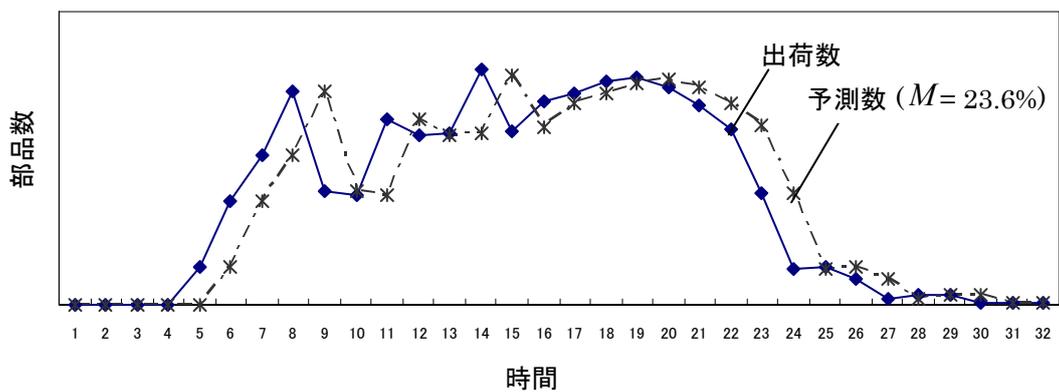


図 3.12 評価結果

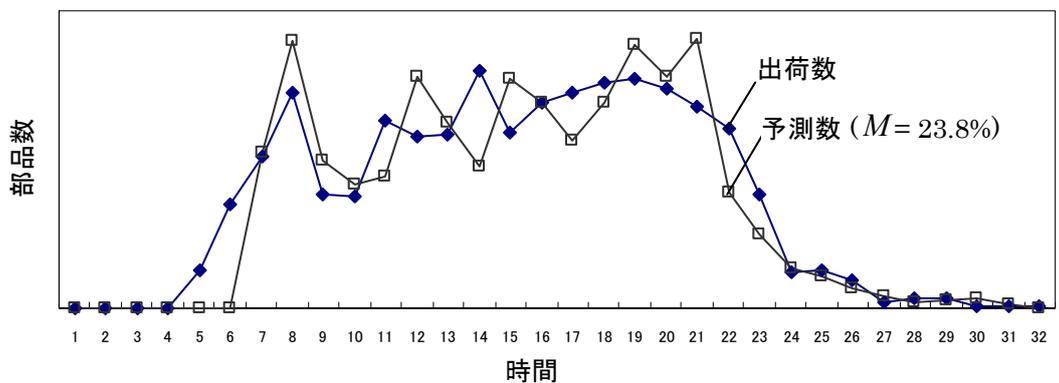
予測結果の波形を図 3.13 と図 3.14 に示す。図 3.13 は図 3.5 と同じ部品(部品 A)について予測した結果であり，図 3.14 は別の部品(部品 B)の予測結果である。各図は(a)提案方式，(b)従来方式 1(指数平滑法)，(c)従来方式 2(フィルタ無し)について出荷数と予測数を重ねて表示している。図 3.13 の(b)従来方式 1(指数平滑法)は，出荷数に対してほぼ 1 期遅れて変化に追従しているため，変化率が大きな製品ライフサイクルの立ち上がりと立ち下りの時期(横軸の 5~8, 22~24)で誤差が大きくなる($M = 23.6\%$)。(c)従来方式 2(フィルタ無し)は，出荷数の変化率が大きな時期でも変化に追従できており，先行指標を利用した効果がある。しかし，見積数が有する変化がそのまま予測数に反映されているため変化の振幅が大きく誤差が増大する要因となっている($M = 23.8\%$)。一方，(a)提案方式は，6 期以降，出荷数の変化に同期して変化する場合が多いため，(b)従来方式 1(指数平滑法)に比べて予測誤差が改善される。また，誤差を最小化して先行指標を利用しているため，変化の振幅が小さく(c)従来方式 2(フィルタ無し)に比べて誤差が改善されている($M = 20.0\%$)。出荷数に見積数の縦軸を縮小して重ねた図 3.7 と図 3.13(a)を比べると，前者では時期によってばらついている見積数と出荷数の間の関係(ピーク位置の高さや間隔)が後者では適切に補正されている。図 3.14 についても図 3.13 と同じ傾向があり，(a)提案方式($M = 28.1\%$)は(b)従来方式 1(指数平滑法， $M = 36.7\%$)や(c)従来方式 2(フィルタ無し， $M = 43.1\%$)に比べて出荷数に対する追従性が向上し，誤差が低減できている。



(a)提案方式

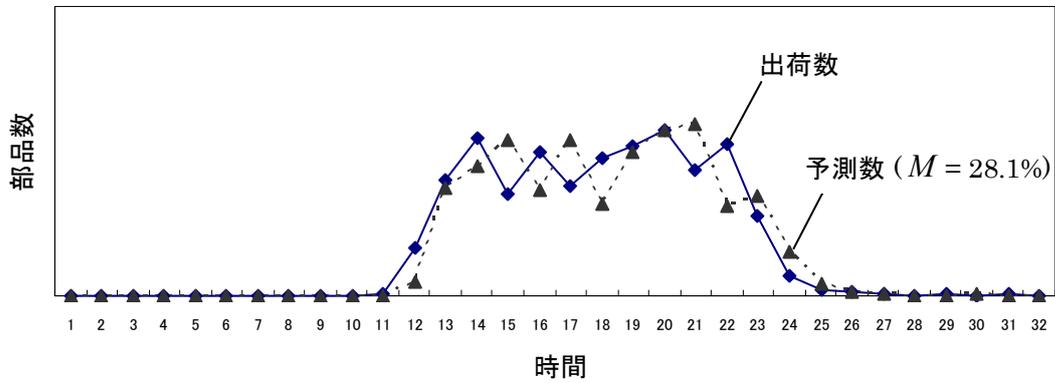


(b)従来方式 1(指数平滑法)

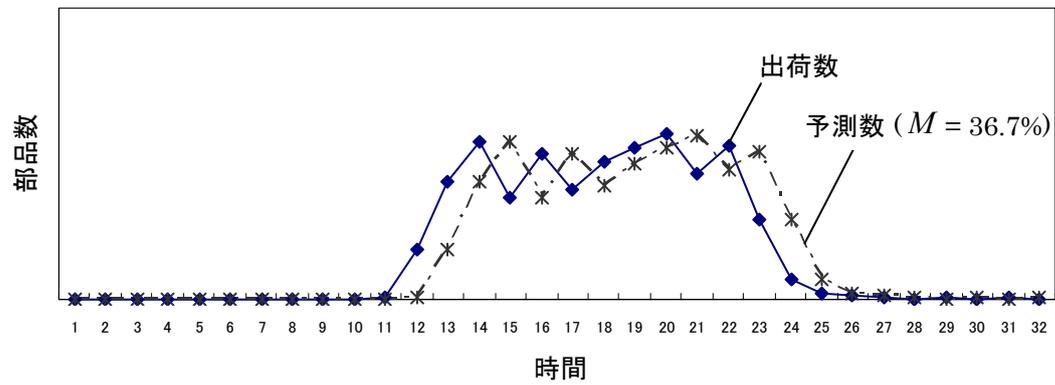


(c)従来方式 2(フィルタ無し)

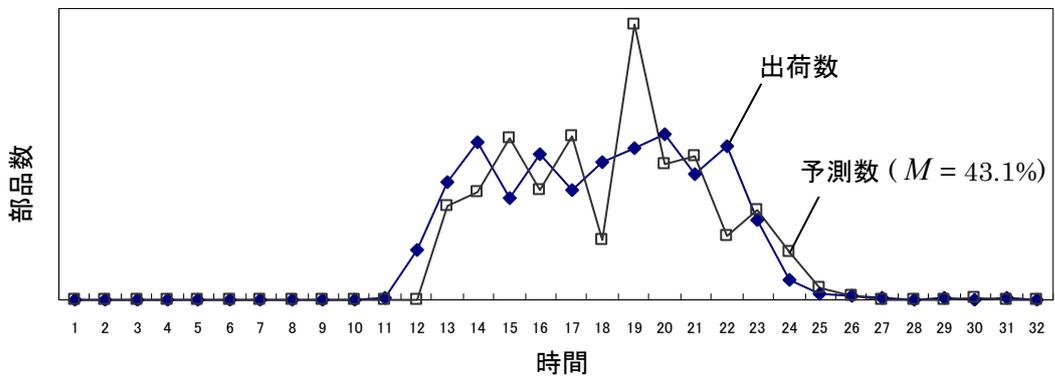
図 3.13 予測結果の波形(部品 A)



(a)従来方式



(b)従来方式 1(指数平滑法)



(c)従来方式 2(フィルタ無し)

図 3.14 予測結果の波形(部品 B)

最後に、評価に用いたデータの受注確率ノイズについて説明する。予測計算の結果から時間遅れの次数($n=3$)毎に受注確率を計算し、正規分布であることの適合度を検定した。この結果、それぞれの有意確率が 0.150 (遅れ次数 $i=1$)、 0.055 ($i=2$)、 0.091 ($i=3$)となり、いずれも有意水準 5% の確率 0.05 を上回り、正規分布に従っていると見て差し支えないとの結果を得た

3.4.2 シミュレーションによる評価

(1)シミュレーション方法

BTO 製品のオプション部品では出荷数の波形の形状が多岐にわたる。そこで、多様な波形に対する予測性能をシミュレーション実験により確認する。予測対象の特徴である、短時間で不規則に変化する波形を模擬するため、モンテカルロシミュレーション[89]による評価を行う。まず、見積数 H_k を $N(\bar{u}, \sigma_u^2)$ 、受注確率ノイズ ω_k を $N(0, \sigma_\omega^2)$ に従う正規乱数の時系列データとして発生させ、これらを式(3.2)、(3.3)に代入して予測対象である出荷数パターン y_k を生成する。次に、先に発生させた見積数 H_k と出荷数パターン y_k を入力として式(3.7)~(3.11)により受注確率 $\hat{x}_{k|k-1}$ を推定し、式(3.12)により出荷数 \hat{y}_k の予測計算を行う。最後に、予測結果 \hat{y}_k と出荷数パターン y_k を比較して式(3.15)により平均絶対誤差率 M を計算する。以上の手続きを、正規乱数の分散 σ_u^2 、 σ_ω^2 を変更して繰り返し実行する。 σ_u^2 により出荷数パターン y_k の変化の度合いを、 σ_ω^2 により見積数と出荷数の相関の度合いを調節できる。 σ_u^2 と σ_ω^2 を増加させた不利な条件において予測誤差を調査することにより、提案方式の適用可能範囲を把握することができる。

(2)シミュレーション条件

表 3.3 にシミュレーション条件を示す。条件は前節で説明した BTO 製品のデータから決定した。受注確率ノイズ ω_k の標準偏差 σ_ω は、前記データから求めた平均値に基づき計算範囲を設定した。表では受注確率の各期の平均値 \bar{x}_i で正規化した値として示す。シミュレーションでは、 R が表に示す範囲内で変化するように見積数 H_k の標準偏差 σ_u を調節する。また、評価期間 m は 32 期であるが、1 期から 5 期までは予測計算で受注確率の初期値を収束させる収束期間とし、6 期から 32 期までを予測誤差の評価期間とする。前節の BTO 製品のデータを用いた評価において実用領域($\bar{M} < 30\%$)で良い結果を得た指数平滑法を提案方式と比較する。

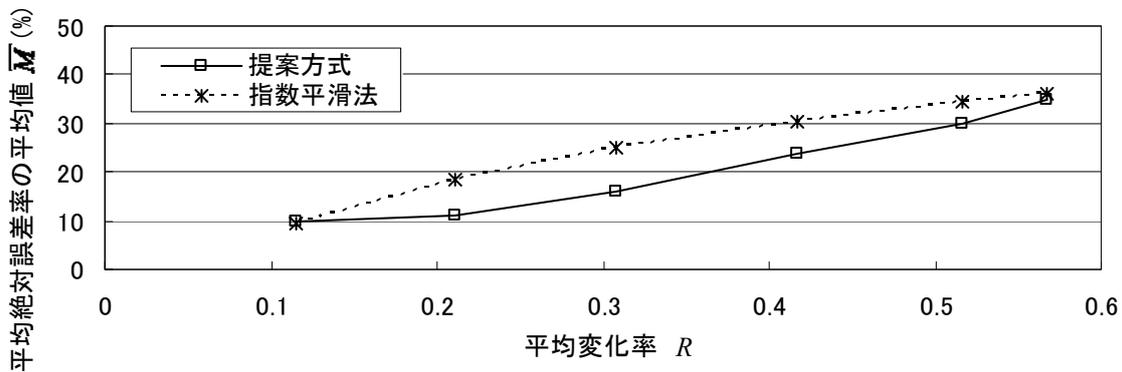
表 3.3 シミュレーション条件

パラメータ	条件
受注確率ノイズ	$\sigma_w/\bar{x}_i = 0.10 \sim 0.20$
出荷数の集計誤差	$\varepsilon_0/\sigma_v^2 = 0.1$
出荷数の平均変化率	$R = 0 \sim 0.6$
受注確率の次数	$n = 3$
評価期間	$m = 32$
繰り返し回数	1000

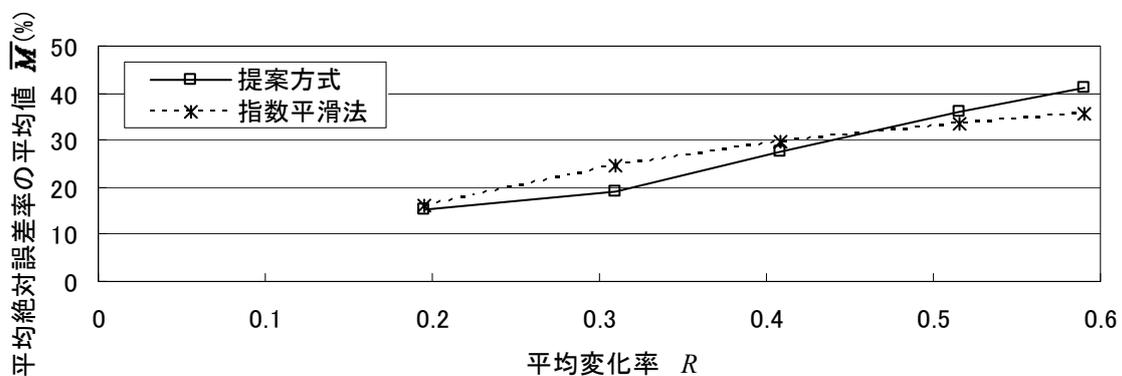
(3)シミュレーション結果と考察

シミュレーション結果を図 3.15 に示す. 図の(a)~(c)は, この順に受注確率ノイズ σ_w/\bar{x}_i を増加させ, 見積数と出荷数の相関の度合いを低下させている. 図の横軸は平均変化率 R であり, 各図の右側ほど出荷数パターン y_k の変化の度合いが大きくなっている. 縦軸は出荷数パターン y_k と予測結果 \hat{y}_k から求まる平均絶対誤差率の平均値 \bar{M} である. 各図のプロットは, ある条件に対して 1000 回予測計算を繰り返した結果の平均値である.

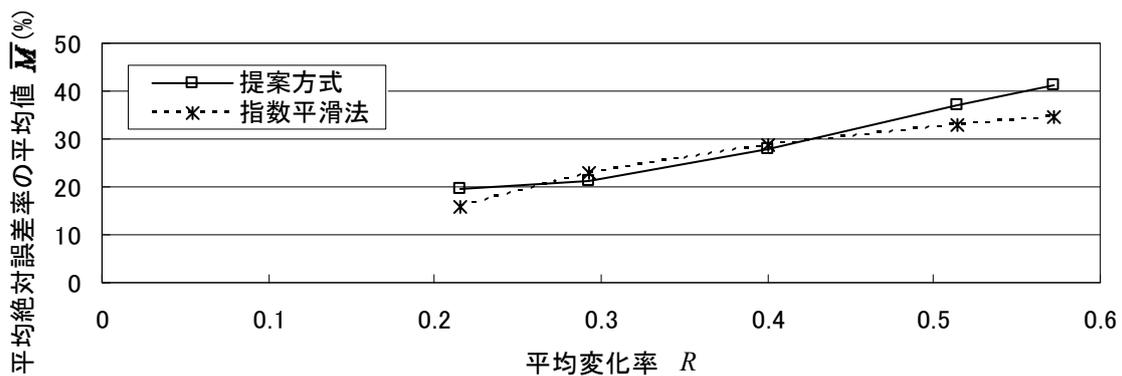
図について考察すると, 図(a)の指数平滑法では, 平均変化率 R が増加して出荷数パターン y_k の変化の度合いが大きくなるほど \bar{M} が増加し, $R = 0.4$ 付近で \bar{M} が 30%を越えている. 図(b)(c)もほぼ同様である. これに対して図(a)の提案方式は, \bar{M} が 30%を越える位置が 0.1 程度右側にシフトした $R = 0.5$ 付近である上, $R = 0.2 \sim 0.4$ では指数平滑法に比べて M が 5~10%程度低い. 図(b)(c)では, 受注確率ノイズ σ_w/\bar{x}_i が増加して見積数と出荷数の相関の度合いが低下するのに伴い, \bar{M} が 30%を超える位置が左側にシフトして指数平滑法との \bar{M} の差も減少している. また, 図(b)を例に提案方式と指数平滑法の間を考察すると, $R = 0.2$ 付近では出荷数の変化の度合いが小さいため両者の差はほとんど無く, R の増加に従い両者の差が広がり $R = 0.45$ 付近で両者の関係が逆転する. これは, 平均変化率 R が大きな場合, 提案方式を用いて予測対象の変化に追従するよりは, 指数平滑法を用いて近傍の平均値を予測値とする方が良い結果が得られることを意味している. すなわち, 図(b)(c)のように受注確率ノイズ σ_w/\bar{x}_i が 0.15 を超えて, かつ平均変化率 R が 0.4 を超える条件では提案方式は従来方式に劣り, 適用限界が存在する.



(a) ノイズレベル低 ($\sigma_\omega/\bar{x}_i = 0.10$)



(b) ノイズレベル中 ($\sigma_\omega/\bar{x}_i = 0.15$)



(c) ノイズレベル大 ($\sigma_\omega/\bar{x}_i = 0.20$)

図 3.15 シミュレーション結果

次に、提案方式と指数平滑法の関係に着目して、前節で報告した実データを用いた評価結果とシミュレーション結果の関係を考察する。実データを用いた評価結果である図 3.12 の R が 0.35 より左側はシミュレーション結果である図 3.15(b)に、図 3.12 の R が 0.35 より右側は図 3.15(a)に類似している。これは、部品種類によって受注確率ノイズ σ_ω/\bar{x}_i に偏りが存在することを意味する。また、同じ平均変化率 R における \bar{M} に着目すると、図 3.12 の結果は図 3.15 の結果に対して約 5~10%だけ \bar{M} が大きい。このシミュレーション結果と実データの間の差異は、予測対象である出荷数の波形の違いに原因があると考えられる。実データでは、図 3.5 に示す様に、製品ライフサイクルの立ち上がりと立ち下がりにおいて変化率が大きな時期が存在する。一方、シミュレーションデータは比較的均一な変化率のみで構成されており、これが有利に働いている。シミュレーション条件に改良の余地がある。しかし、上記のずれを考慮すれば、式(3.16)による平均変化率 R および図 3.15 のシミュレーション結果は提案方式の適用可能範囲を判定する目安として利用できる。

以上のことから、実用においては、部品の出荷数のパターンに応じて提案方式か従来方式を適切に選択して適用することが必要である。このために図 3.15 のシミュレーション結果が利用できる。具体的には、部品の出荷開始とともに平均変化率 R および予測と実績の比較による平均絶対誤差率 M をモニタすることで、予測対象の部品が図 3.15 のどの条件に該当するかを把握する。この結果に基づき、部品種類毎に提案方式か従来方式を選定することができる。

3.5 結言

本章では、不規則に変化する BTO 製品の部品出荷数を予測する需要予測方式を提案した。提案方式は、事前に大量のデータ準備を必要とせず、個別仕様生産製品の受注プロセスで特有な見積情報を先行指標として利用する。見積や出荷のデータに含まれる誤差を許容して、直前の予測誤差が最小となるようにカルマンフィルタにより逐次補正して部品出荷数を予測する特徴を持つ。具体例として、BTO 製品の 78 種類の部品の出荷数を予測する問題に適用し、平均変化率 R が 0.4 以下の変化を有する出荷数を平均絶対誤差率 28.2% と実用上許容できる精度で予測可能であることを示した。また、シミュレーションデータにより、提案方式の予測精度が受注生産システムが有する受注確率のノイズおよび予測対象の変化率に依存することを示し、受注確率ノイズ σ_ω/\bar{x}_i が 0.15 を超えて、かつ平均変化率 R が 0.4 を超える条件では、提案方式は従来方式に劣り適用限界が存在することを明

らかにした。

今後の課題として、以下の2つが挙げられる。

第一の課題は、見積情報の先行指標としての精度を向上させることである。BTO 製品では、多数の見積と出荷を1件ずつ明確に対応付けさせることが難しいため、ある期間に作成された見積情報の集計値を先行指標とした。しかし、全ての見積情報を均等に集計するのではなく、商談 ID、作成者、作成目的、受注見通し、といった情報を組み合わせることにより、出荷と関係が深い情報を絞り込むことが考えられる。この結果、受注確率のノイズを低減させ、予測精度を向上できる可能性がある。

第二の課題は、提案方式の他の製品への適用可能性を確認することである。本章では、BTO 製品を対象として評価を行ったが、製品の種類が異なると、受注確率やノイズ成分、出荷数の平均変化率が異なるはずである。こうした対象に対して、提案方式がどの程度、適用できるのかを確認する必要がある。

第4章

製品の仕様代替性と部品の在庫消費バランスを 考慮した推奨方式

4.1 緒言

本章では、BTO 製品に特有な製品の仕様代替性を利用して、在庫が余剰している部品を搭載した製品を推奨販売することにより、部品の欠品や余剰を低減して在庫の消費バランスを適正化する方式を提案する[64][65][66][67].

前章で説明した BTO 製品は、少品種の部品で多品種の製品が実現できる利点がある。しかし、部品の組み合わせ数だけある多数の種類の商品で在庫を消費するため、在庫の消費に偏りが生じやすく、メーカーでは欠品を恐れて過剰な在庫を保持するケースが多い。市場のニーズと乖離した在庫を抱えると、余剰在庫として蓄積してゆくこととなり、在庫の手持ち期間が増大して、価格差損やキャッシュフローの停滞による収益悪化の要因となる。このため、余剰在庫を顧客に販売促進する手立てが必要となる。一方、顧客の仕様は曖昧な場合があり、製品の仕様が顧客の仕様と完全に一致していなくても許容される場合がある。例えば、製品の性能をアップグレードできる部品が少ない価格差で搭載できる場合、顧客は予算を上積みして搭載する可能性がある。また、逆に、当初希望した仕様の部品より下位グレードの部品を搭載した方が納期を短くできるケースでは、仕様を変更するケースがある。本章では、このような仕様の代替性に着目して推奨販売を行うことを考える。

従来、在庫消費が偏る問題を解決する方法として、納期回答の迅速化が行われている[90]. 部品在庫からどの製品が何時、何台供給できるかを計算し、顧客が購入を希望する製品について、前記の供給可能数と突き合わせ、オンラインで納期回答する。このとき、欠品している部品を含む製品の納期は遅くなり、余剰している部品で構成される製品の納期は早くなる。納期情報を顧客に迅速に提供することにより、顧客が納期が早い製品へ切り替えることを促し、部品の余剰・逼迫のアンバランスの改善を目指すものである。しかし、上記の方法では、納期回答の入力となる製品の仕様を決定する主導権は顧客にあるため、市

場ニーズと乖離している部品が顧客に引き当てられることはなく、余剰在庫を消費することは困難である。また、別のアプローチとして余剰している部品を搭載する製品を値引きすることにより、顧客に販売促進する方法がある[52]。しかし、製品の価格下落のきっかけを作ることとなり、定常的な手段として利用することは困難である。

本章では、製品の仕様に代替性が成り立つ場合があることに着目し、個々の商談において顧客が許容する範囲内で消費が望ましい代替部品を搭載した製品を販売促進する方式を提案する。

以下、4.2 節では、BTO 製品において在庫消費が偏る問題を説明する。4.3 節では、提案方式において製品の代替可能性を確率変数として定義し、この確率変数を考慮した上で多数の部品種類の消費バランスを最適化する方式について説明する。4.4 節では、実データを用いたシミュレーションにより提案方式の有効性を示す。

4.2 BTO 製品における在庫消費の偏り問題

本章では、前章と同じく BTO 製品を対象とする。BTO 製品は、前章の図 3.1 において説明したように、顧客が製品に要求する仕様に合わせて部品グループから部品を選定し、これを繰り返して製品構成を決定する。また、本章が前提とする製品の販売形態についても前章と同じであり、図 3.2 において説明した受注プロセスを伴う企業間取引である。このような前提の下、前章では部品調達に焦点を当てた予測方式を提案したが、本章では、工場に既に存在する部品在庫の削減方法を提案する。

製品出荷数と部品過不足数の関係を図 4.1 に示す。図の左上のグラフ(a)は製品の出荷数を示しており、横軸が製品種類、縦軸が出荷数である。各製品に対しては、図の左下に示す部品表(b)により部品の搭載数が定義されている。部品表の横方向は左上のグラフの横軸と同じ製品種類であり、縦方向は部品種類である。BTO 製品では、図 3.1 を用いて説明したように、製品仕様と部品種類が一对一に対応しており、各部品グループ pg_i から部品 p_{ij} を 1 種類ずつ選定することにより、製品仕様が決定する。例えば製品 A では部品グループ pg_1 で部品 p_{11} が、部品グループ pg_2 で部品 p_{21} が選定され、それぞれ 1 個ずつ製品に搭載されることを意味している。部品表の右側のグラフ(c)は部品出荷数のグラフである。縦軸は部品表と同じ部品種類であり、横軸は出荷数である。さらに右側のグラフ(d)は部品在庫数、さらに右側のグラフ(e)は部品在庫数から部品出荷数を引いた過不足数を表すグラフである。過不足数を表すグラフ(e)がゼロである部品は在庫数を全て出荷数で消費したことを、

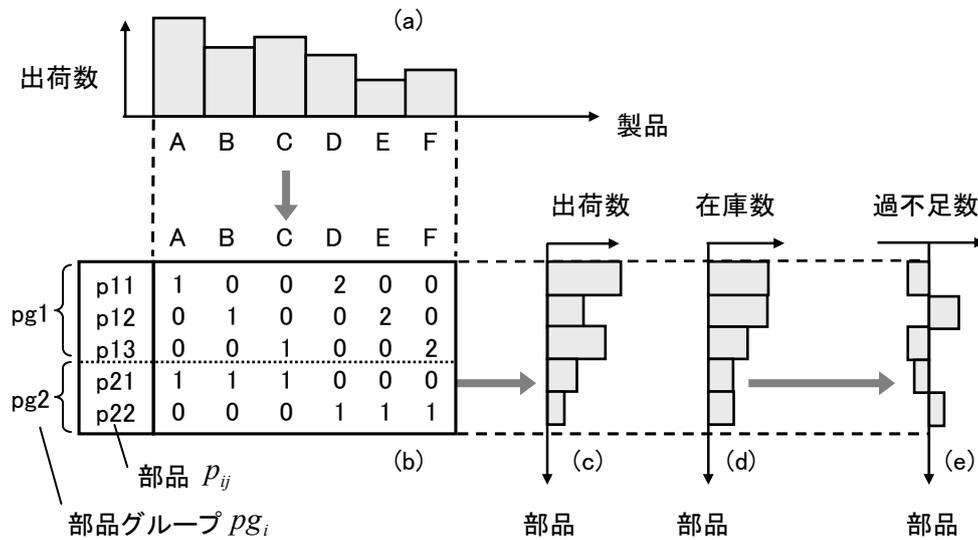


図 4.1 製品出荷数と部品過不足数の関係

正である部品は余剰を，負である部品は欠品を意味している．以上の説明からわかるように，部品の在庫数が所与の場合，図の左上の製品出荷数のグラフ(a)に依存して右下の過不足数を表すグラフ(e)が変化する．従って，製品出荷数の予測が外れると，予測に基づき調達した部品在庫を実際の製品出荷によりバランス良く消費できず，余剰や欠品が生じる．特に，本章が対象とする BTO 製品では，部品の組み合わせ数だけある多数の製品パターンで部品在庫を消費するため，予測に基づき必要量を調達することが難しい上に消費がアンバランスとなり，部品の欠品や余剰が生じやすい．部品は価格の大小にかかわらず欠品すると当該部品を使用する製品が生産できなくなり機会損失の要因となる．一方，需要と乖離した過剰な在庫を抱えると，顧客に露出する頻度が低いため，そのまま在庫が消費されることは稀である．この結果，図 3.3 で説明した在庫の手持ち期間が長期化し，価格差損や償却といった損失の要因となる．特に，製品ライフサイクルの終息期では，追加発注できなくなる部品が発生するために，部品の在庫数に偏りがあると余剰している製品を消費することが難しくなる．

4.3 仕様の代替性と部品の在庫消費バランスを考慮した推奨方式

4.3.1 推奨販売により在庫消費のバランスを改善する考え方

前節で述べた課題を解決するため、BTO 製品における仕様の代替性に着目する。仕様の代替性について、図 4.2 を用いて説明する。この図は BTO 製品を説明した図 3.1 と同じであり、図の右側の製品は、左側の各部品グループから部品を 1 種類ずつ選択し、これを組み合わせて構成している。各部品は仕様が独立しており、顧客が要求する仕様に応じてカスタマイズできるようになっている。一般に、製品の仕様は、顧客が代替を許さない関心仕様と、代替を許容する無関心仕様に分けられる。関心仕様は仕様選定の制約条件となり、図では製品と部品の関係を実線として示している。部品グループ 1 の部品②および部品グループ 2 の①が該当する。一方、無関心仕様は、顧客が当初想定した仕様に近接した範囲であれば、価格や納期の条件を満たす範囲で代替を許容するものであり、図では製品と部品の関係を破線で示す。部品グループ 3 または、部品グループ 4 がこれに該当する。

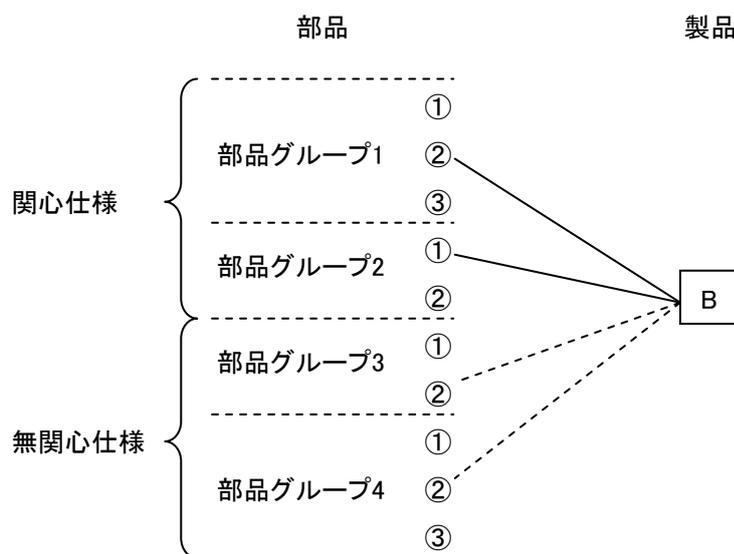


図 4.2 BTO 製品における仕様の代替性

この特徴を、図 4.1 に示す製品出荷数と部品過不足数の関係に適用すると、ある顧客が最初に提示する要求仕様(顧客仕様と呼ぶ)が部品グループ pg_1 の部品 p_{11} を搭載した製品 A であった場合、仕様が近接した部品種類 p_{12} への変更が許容されれば、代わりに製品 B を販売できる。この結果、欠品している部品 p_{11} の代わりに余剰している部品 p_{12} を出荷できる。従って、個々の商談において、顧客仕様から乖離し過ぎることなく、できるだけ在庫消費のバランスが有利となる部品を搭載した推奨構成を生成して推奨販売することができれば、図 4.1 左上の製品出荷数のグラフ(a)を望ましい形状に修正することができる。

本章で提案する推奨販売の受注プロセスにおける位置づけを図 4.3 に示す。この図は、図 3.2 で説明した企業間取引の受注プロセスの一部を示している。従来、左側の図のように、顧客から製品の仕様(A)を提示されると、企業の営業担当者は仕様に基づき BTO 製品の構成を決定し、これをキーとして在庫情報から納期情報を検索している。そして、見積書として仕様(A)の価格と納期を提示する。これに対して、提案方式では、仕様(A)に近接した条件で在庫消費が有利な仕様(A')を生成し、これを推奨販売する。

図 4.4 は推奨販売により個々の商談を通じて在庫消費を望ましい方向へ誘導する考え方を示したものである。図は部品種類数と同次元の空間を 2 次元座標で説明している。図の横軸は部品 p_1 の出荷数、縦軸は部品 p_2 の出荷数であり、各軸には目標出荷数を記載している。需要予測の結果に基づき目標出荷数を設定するが、実際には予測誤差が発生して在庫消費の軌跡が図の実線で示す望ましい軌跡から破線で示す軌跡にずれてゆき、部品 p_2 の

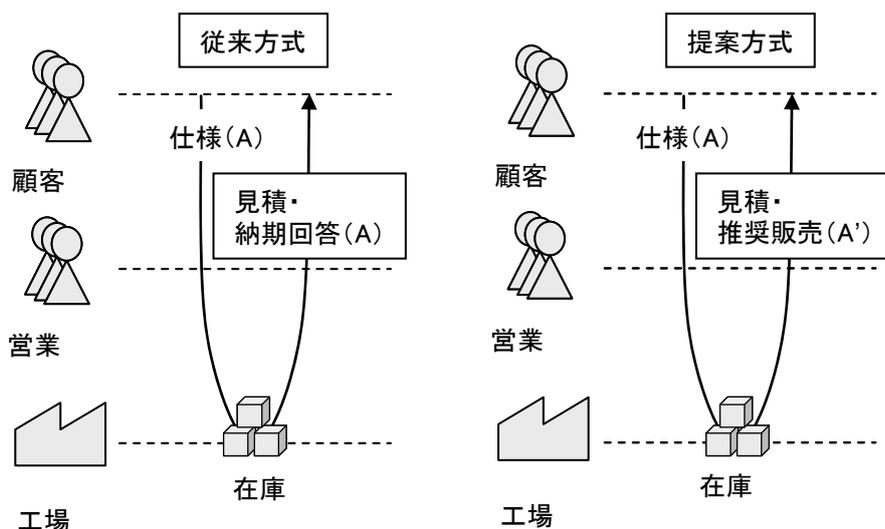


図 4.3 受注プロセスにおける推奨販売の位置づけ

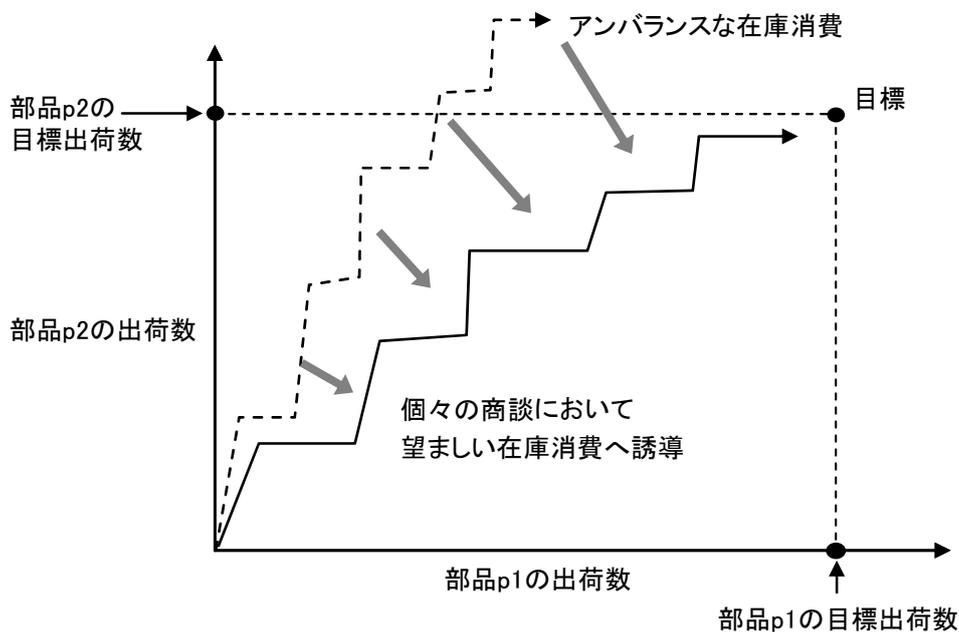


図 4.4 推奨販売により在庫消費を誘導する考え方

欠品や部品 p_1 の余剰が生じる。そこで、破線の軌跡を実線の軌跡に修正することを試みる。ただし、修正の程度については在庫のアンバランスな状態や商談で提示される仕様に依存するため保証できない。しかし、市場のニーズと乖離した部品在庫を消費するためには、こうした個々の商談で修正することの積み重ねが実用的な解となり得る。

本章で提案する方式は、最適化すべき指標として部品数を扱い、金額を含めない。在庫管理の効果は、最終段階では金額に換算して収益への影響を評価することになるが、その前段には様々な種類の在庫管理にかかわる業務があり、これら業務の総合的な評価が金額となる。本章で扱う問題は、在庫管理の部分的な業務にかかわる問題である。図 4.5 は本章で扱う在庫消費のバランスの重要性を説明したものである。図の横軸は時間、縦軸は在庫消費率(初期の在庫数を消費した割合)であり、高額な部品と低額な部品の在庫消費率の推移の一例を示している。簡単のため、 k 期の最初に部品が入荷し、次回入荷は k 期の最後である場合を考え、この期間で欠品と余剰を最小化することを考える。一般に、製品は構成する部品が一つでも欠品するとその製品は成立しなくなる。このため、低額な部品であっても期間途中で欠品すると製品種類の選択の幅が狭まり、他の部品の搭載候補が狭くなり、余剰リスクが高くなる。図は k 期の途中で低額部品が欠品したため、これと組み合わせて使用する高額部品が余剰となる例を示している。特に、製品ライフサイクルの終息

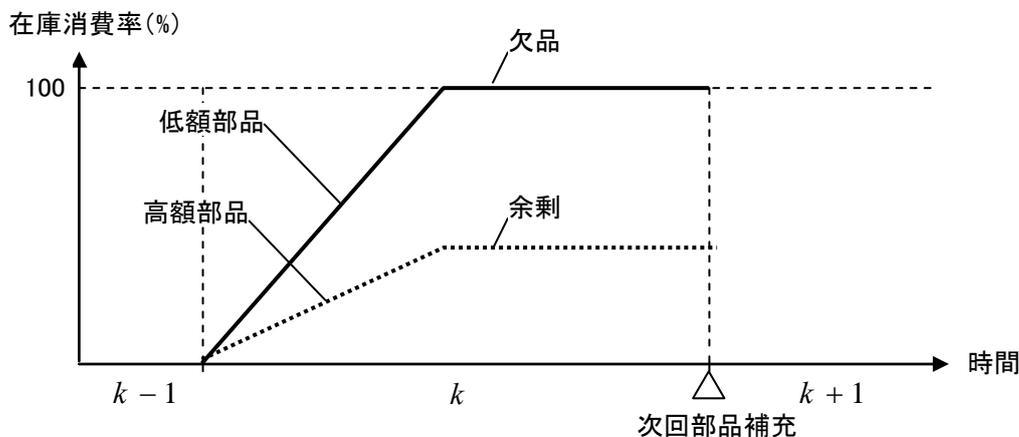


図 4.5 在庫消費のバランスの重要性

期では、欠品した部品の追加発注が難しく、この問題の重要性が増す。

4.3.2 仕様代替性と受注確率の関係の定式化

本節では、推奨する製品の仕様が顧客の当初仕様から乖離する度合いと、受注確率の関係を定式化する。

(1)BTO 製品における機能仕様と価格の関係

製品の仕様は、性能、信頼性、拡張性、等の機能仕様と価格からなる。本章が対象とする BTO 製品は、設計段階の工夫により機能仕様と部品グループを対応付けした上で、異なる機能仕様同士(部品グループ同士)は独立に選定できるようになっている。さらに、同じ部品グループの中には、複数のランクの部品が用意されており、機能仕様のランクを任意に選定可能としている。例えば、BTO 製品として一般的な PC(パーソナルコンピュータ)を例にとると、CPU、メモリ、HDD といった異なる部品グループにおいて、計算速度、動的記憶容量、静的記憶容量といった機能仕様を独立に選定可能である。また、CPU の部品グループの中には、下位ランク CPU、中位ランク CPU、上位ランク CPU といったように、ランクに応じた部品が用意されている。ある部品グループの中で選択可能な部品について考察すると、上位ランクに分類される部品は機能仕様が高機能である一方、価格も高額である場合が多い。同様に、下位ランクに分類される部品は機能仕様が悪くなる一方、価格も安価に設定されている場合が多い。即ち、同じ部品グループ内では、機能仕様のラン

クと価格の間には、ある程度の相関関係が仮定できる。このとき、推奨する代替仕様が顧客の仕様から上位ランク側に乖離した場合、顧客は予算を超過した価格で不必要な機能を購入することとなるため、受注確率が低下する。一方、下位ランク側に乖離した場合、価格が予算を下回るのは良いが、顧客の要求内容を満たさない機能は許容されず、同様に受注確率が低下する。逆に、機能仕様や価格が顧客のニーズに近接していれば、許容される確率が高くなる。

(2)受注確率の定式化

以上の仮定に基づき、代替仕様が顧客仕様から乖離する度合いと受注確率の関係を図 4.6 として定義する。図の横軸は BTO 製品の部品グループ pg_i で選択可能な仕様の並び $\{U_{ij}\}$ を顧客仕様 U_{ij_0} を中心として表示している。BTO 製品では仕様と部品が一对一に対応するため、部品グループ pg_i で選択可能な部品の並び $\{p_{ij}\}$ でもある。また、仕様の並び $\{U_{ij}\}$ は、対応する部品の価格が図の左から右に単調増加するように並べてある。

$$C(U_{ij+1}) \geq C(U_{ij}) \quad (4.1)$$

ここで、仕様 U_{ij} に対応する部品の価格を $C(U_{ij})$ とする。一方、縦軸の受注確率 $P_{r_i}(U_{ij})$ は、顧客仕様 U_{ij_0} で受注できる確率を 1.0 としたときに、代替仕様 U_{ij} で受注できる確率

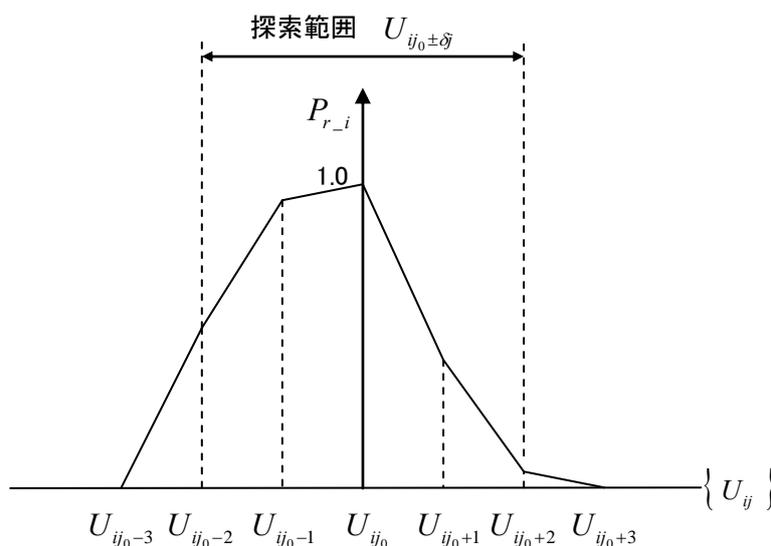


図 4.6 受注確率の定義

を仮定した値である。図 4.6 の横軸で顧客仕様 U_{ij_0} より右側は上位ランク、左側は下位ランクの仕様である。前節(1)の仮定に基づき、顧客仕様から乖離するに従って受注確率は 1.0 より低下する。そして、仕様がある乖離量を超えると受注確率がゼロ、即ち失注に至る。隣接する仕様の乖離量は必ずしも等しくないため、一般に左右不均等な形状となる。

次に、商談 c (ある期間に発生した c 回目の商談) における受注確率 P_{r_c} を考える。BTO 製品は部品グループの間で互いに独立に仕様を変更できるため、仕様変更に伴う受注確率の低下も互いに独立な事象と見なせる。従って、商談 c で部品交換が同時に発生した場合の受注確率 P_{r_c} を、部品グループ pg_i で部品交換が発生した場合の受注確率 P_{r_i} の積として次式で定義する。

$$P_{r_c} = \prod_{i=1}^{N_g} P_{r_i} \quad (4.2)$$

ここで、 N_g は部品グループ数である。式(4.2)より受注確率 P_{r_c} を最大とするのであれば顧客仕様 U_{ij_0} をそのまま推奨することが有利であるが、顧客仕様に該当する部品が欠品する場合や、他の部品の方が在庫数が多いため在庫をバランス良く消費できる場合には、代替仕様を検討する意味がある。

受注確率を定義する具体例を示す。価格と性能の相関が強い部品について、受注確率を定式化する。マーケティング分野では、価格と販売量の関係を以下の式で定義している[91]。

$$\Delta x/x = \eta \cdot \Delta p/p \quad (4.3)$$

ここで、 $\Delta x/x$ は販売量の変化率、 $\Delta p/p$ は価格の変化率、 η は価格弾力性である。式(4.3)から、ある価格の近傍における顧客行動は $\Delta p/p$ の関数として定義できる。このことを図 4.6 に当てはめ、顧客仕様 U_{ij_0} の近傍の受注確率を下記の式で定義する。

$$P_{r_i}(U_{ij_0 \pm \delta j}) = 1 - \alpha \left| \frac{C(U_{ij_0 \pm \delta j}) - C(U_{ij_0})}{C(U_{ij_0})} \right| \quad (4.4)$$

$$\text{ただし、} P_{r_i}(U_{ij_0 \pm \delta j}) \geq 0$$

ここで、 δj は仕様の乖離量、 $P_{r_i}(U_{ij_0 \pm \delta j})$ は製品仕様 $U_{ij_0 \pm \delta j}$ における受注確率、 $C(U_{ij_0 \pm \delta j})$ は推奨する部品価格、 $C(U_{ij_0})$ は顧客仕様の部品価格、 α は調整係数である。 $C(U_{ij_0 \pm \delta j}) < C(U_{ij_0})$ の場合も受注確率が低下する理由は、価格と比例して性能が低下することを仮定しているためである。

(3)探索範囲の定義

提案方式では、図 4.6 に示す探索範囲において代替仕様を探索する。探索範囲は顧客仕様を起点とした仕様の乖離量 δ_j として定義する。図 4.6 は $\delta_j=2$ の場合を示している。BTO 製品は部品グループの間で互いに独立に部品を交換できるため、商談 c における探索回数 k_c は以下の式で求まる。

$$k_c = \prod_{i=1}^{N_g} k_i \quad (4.5)$$

ここで部品グループ i の探索回数を k_i ($k_i = 2\delta_j + 1$) とした。

本節で説明した受注確率 P_{r-i} ならびに探索範囲 δ_j は、販売部門の担当者が推定して値を設定する。

4.3.3 部品の在庫消費バランスを考慮した推奨構成の決定方式

本節では、前節で説明した受注確率に、部品の消費優先度を加味する方法について述べる。まず、基本的な考え方について説明する。

提案方式は、個々の商談で逐次有利な解を探索する方式を採用する。このために、顧客仕様を起点として近接した仕様を局所探索[92]し、評価指標が最大となる仕様を推奨仕様として採用する。近傍の探索であれば、顧客が推奨仕様を許容する確率が高くなる上、計算時間を短縮できる。また、多種の部品の消費バランスを考慮するために、局所探索の指標に多目標最適化の一手法である目標ベクトル法[93]の概念を導入する。望ましい在庫消費の方向を目標ベクトルとして定義し、目標ベクトルの方向に沿うように解を選定する。

まず、図 4.1 で説明した製品構成を次式で定義する。

$$S_l : (\cdots, n_{ij-l} \cdot p_{ij}, \cdots) \quad (4.6)$$

ここで、製品 l ($l = 1, 2, \cdots, N_s$) の製品構成 S_l を、各部品グループで選定された N_g 個の部品の集合として定義する。 i 番目の部品グループ pg_i ($i = 1, 2, \cdots, N_g$) では、 j 番目の部品種類 p_{ij} ($j = 1, 2, 3, \cdots, N_{pi}$) が選定される。また、各部品には部品表で定義されている製品 l への搭載数 n_{ij-l} を乗じる。

提案する部品の在庫消費バランスの評価方式を図 4.7 に示す。図は部品種類数と同次元の空間を 2 次元座標で説明したものである。図の横軸は部品 p_{ij} の出荷数 N_{ij} 、縦軸は部品 p_{ij+1} の出荷数 N_{ij+1} であり、各軸に出荷可能数(在庫数と同じ)を示す。

(1) 目標ベクトル \mathbf{G} の定義

まず、各部品の望ましい消費量を十分レベル G_{ij} として定義し、これを要素として持つ目標ベクトル \mathbf{G} を定義する。

$$\mathbf{G} = (\dots, G_{ij-1}, G_{ij}, G_{ij+1}, \dots) \quad (4.7)$$

ここで、各部品は在庫数に対してどの程度まで消費すべきかの必要性が異なっている。例えば、新規部品であり今後消費が見込める部品については在庫数を全て消費する必要性は低い。一方、旧部品であり今後消費が見込めないにもかかわらず多数の在庫を抱えている場合、全ての在庫数を消費することが必要となる。図 4.7 では縦軸の部品 p_{ij+1} が前者に、横軸の部品 p_{ij} が後者に該当し、目標とすべき十分レベルが部品 p_{ij+1} の出荷可能数より下方に設定されている。各部品に対する十分レベルは、生産部門の担当者が在庫数に対する必要な消費量を推定して設定する。

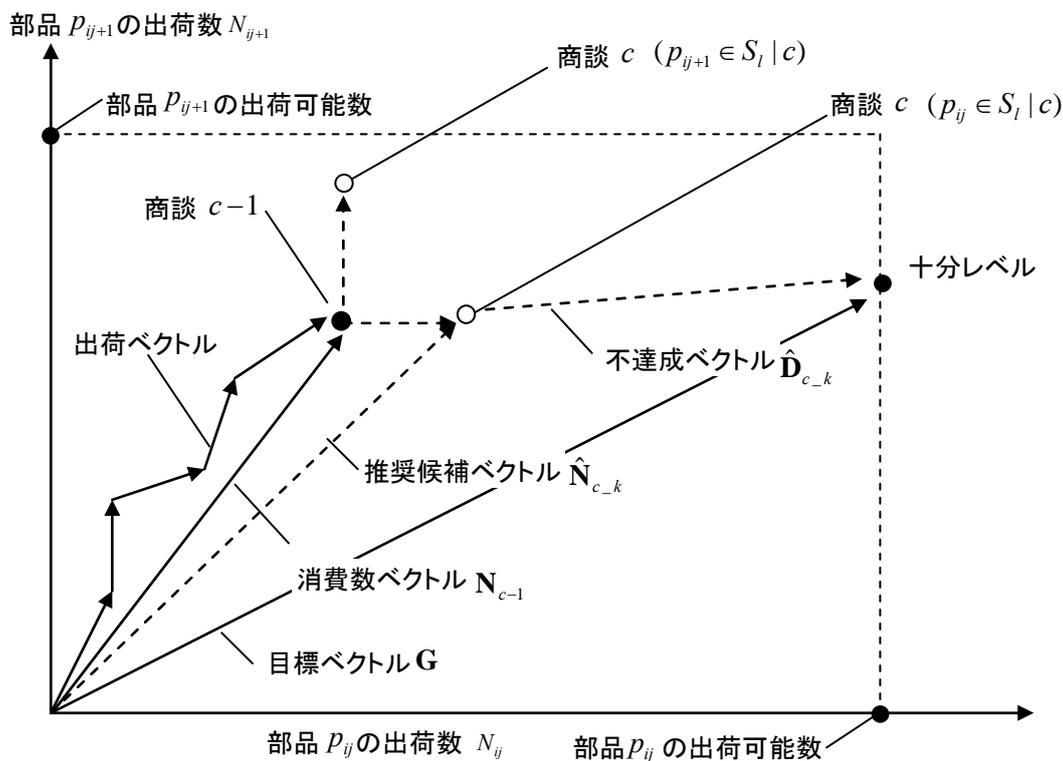


図 4.7 部品の在庫消費バランスの評価方式

(2) 消費数ベクトル \mathbf{N}_{c-1} の定義

消費数ベクトル \mathbf{N}_{c-1} を、ある期間に発生した商談 $c-1$ ($c=1, 2, \dots, N_c$) までの各部品 p_{ij} の消費数 $N_{ij_{c-1}}$ を要素として定義する。図 4.7 において商談 $c-1$ までに消費される部品数は、原点を始点として各商談に対応して出荷される部品数のベクトル和となる。

$$\mathbf{N}_{c-1} = (\dots, N_{ij_{c-1}}, N_{ij_{c-1}}, N_{ij_{c-1}}, \dots) \quad (4.8)$$

$$\text{ただし, } N_{ij_{c-1}} = N_{ij_{c-2}} + \sum_l n_{ij_l} \cdot m_{l_{c-1}}$$

ここで、 $m_{l_{c-1}}$ は商談 $c-1$ における製品 l の出荷数である。

(3) 推奨候補ベクトル $\hat{\mathbf{N}}_{c_k}$ の定義

次に、商談 c における k 番目 ($k=1, 2, \dots, k_c$) の推奨候補ベクトル $\hat{\mathbf{N}}_{c_k}$ を定義する。商談 c では k_c 通り(式(4.5))の推奨構成の候補が生成される。この中には、在庫消費数の条件が有利であっても初期の顧客仕様から乖離した条件のために受注確率が低いものと、在庫消費数の条件は有利でないが初期の顧客仕様に近い受注確率が高いものがある。このため次式では、商談 c の追加消費数の項に前節で説明した受注確率を重みとして乗じることにより、在庫消費の実現可能性を考慮している。ここで、 $\hat{}$ は候補値であることを示す記号であり、 k の値に応じて $\hat{}$ の要素が変化する。

$$\hat{\mathbf{N}}_{c_k} = (\dots, \hat{N}_{ij_{c-k}}, \dots) \quad (4.9)$$

$$\text{ただし, } \hat{N}_{ij_{c-k}} = N_{ij_{c-1}} + P_{r_{c-k}} \sum_l n_{ij_l} \cdot m_{l_{c-k}}$$

(4) 不達成ベクトル $\hat{\mathbf{D}}_{c_k}$ の定義

以上の準備を踏まえて、在庫消費の優先度を評価するための不達成ベクトル $\hat{\mathbf{D}}_{c_k}$ を定義する。不達成ベクトルは、図 4.7 では目標ベクトル \mathbf{G} と推奨候補ベクトル $\hat{\mathbf{N}}_{c_k}$ の差として表記される。不達成ベクトルを最小化することにより、消費優先度を考慮した部品選定が可能となる。

$$\hat{\mathbf{D}}_{c_k} = (\dots, G_{ij} - \hat{N}_{ij_{c-k}}, \dots) \quad (4.10)$$

(5) 探索指標 $E_1 \sim E_3$ の定義

次に、式(4.10)で定義した不達成ベクトル $\hat{\mathbf{D}}_{c-k}$ が最小となる条件を探索し、推奨構成を決定する方式を説明する。式(4.10)の不達成ベクトル $\hat{\mathbf{D}}_{c-k}$ を最小化するために、以下のよ
うな探索指標 $E_1 \sim E_3$ が考えられる。

$$E_1 = \min_k \sum_{ij} (G_{ij} - \hat{N}_{ij-c}) \cdot G_{ij} \quad (4.11)$$

$$E_2 = \min_k \sum_{ij} (G_{ij} - \hat{N}_{ij-c}) / G_{ij} \quad (4.12)$$

$$E_3 = \min_k \left\{ \max_{ij} (G_{ij} - \hat{N}_{ij-c}) / G_{ij} \right\} \quad (4.13)$$

式(4.11)の E_1 は不達成ベクトル $\hat{\mathbf{D}}_{c-k}$ の各要素を目標ベクトル \mathbf{G} で重み付けした線形和の最小化を図るものである。この場合、 \mathbf{G} の要素が大きい部品の不達成の最小化が優先され、多数在庫の消費に偏重して少数在庫の消費機会が減少する問題がある。また、式(4.12)の E_2 は不達成ベクトル $\hat{\mathbf{D}}_{c-k}$ の各要素を目標ベクトル \mathbf{G} で基準化した和の最小化を図るものである。この場合、 \mathbf{G} の要素が小さい部品の不達成の最小化が優先されるため、部品在庫を逼迫させ、欠品が生じやすくなる問題がある。このため、これら線形指標は、目標とする部品のバランス良い消費を実現するためには得策でない。そこで、式(4.13)の E_3 で示すミニマックス基準[94]に基づく非線形な最小化探索を提案する。同式では、想定される最大の不達成が最小化できるため、在庫数の大小に左右されずバランスの良い消費が実現できる。

探索処理は、商談 c では最大 k_c 通りとなるが、全ての部品グループで代替仕様を採用すると式(4.2)の関係により受注確率が微小な値となり、失注のリスクが大きくなる。このため、以下の手続きにより代替すべき仕様を選定する。(1) 各商談において N_g 種類の部品グループの中で欠品するものがあれば、該当する部品グループで探索指標が最も有利となる代替部品を1つ選定して推奨構成を生成する。(2) 欠品するものが無ければ、全部品グループの中で探索指標が最も有利となる代替部品を1つ選定して推奨構成を生成する。ここで、各部品グループで実施する k_i 通りの探索において $P_{r-i}(U_{ij})=0$ の場合は探索範囲から除外する。

4.4 提案方式の評価

4.4.1 実験方法

実際の BTO 製品のデータを用いたシミュレーション実験により，提案方式の有効性を評価する．実験では，ある期間に実施された商談について，提案方式が生成する推奨構成を販売した場合の在庫の消費数を求め，実際の商談の部品所要量と比較して，部品在庫の消費のアンバランスがどの程度改善できるかを評価する．

(1)実験条件

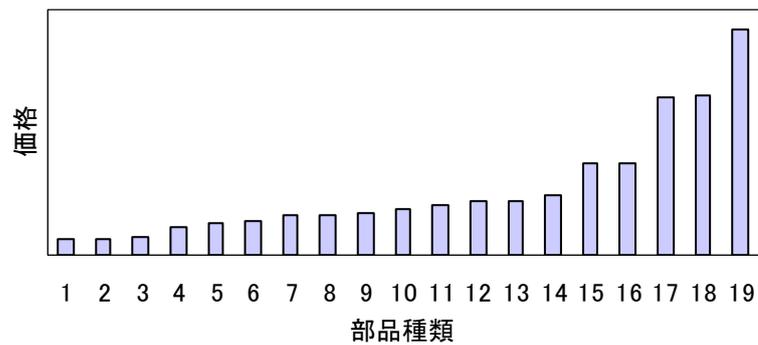
実験条件を表 4.1 に示す．部品グループ数 N_g は 5，部品種類数の合計 N_p は 59 である(各部品グループ i の部品種類数 N_{pi} は 19, 20, 8, 9, 3)．製品種類数は部品種類数 N_{pi} の積となる．実験は，製品ライフサイクルの異なる時期の 3 種類のデータを用いて行う．製品ライフサイクルは，成長期→成熟期→衰退期→終息期の順番で進むが[95]，時期によって部品在庫の消費状況が異なる．成熟期は多くの部品で在庫が余剰している．衰退期は在庫の余剰と逼迫の両方の状態が混在する．終息期は多くの部品で在庫が逼迫している．各条件における商談データの件数 N_c を表に示す．

受注確率は，式(4.4)に基づき計算した結果を用いる．ただし，式(4.4)において $\alpha = 1$ とする．図 4.8 に計算例を示す．図(a)は，横軸に部品種類，縦軸に価格をとり，ある部品グループに所属する 19 部品の価格を示したものである．部品の並びは左側から右側に高額

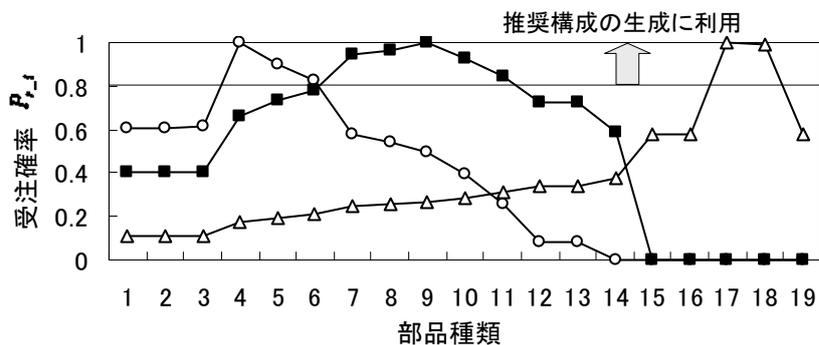
表 4.1 実験条件

パラメータ	条件
部品グループ数 N_g	5
部品種類数 $N_p (= \sum_i N_{pi})$	59 (= 19+20+8+9+3)
商談件数 N_c (成熟期, 衰退期, 終息期)	1,769, 1,324, 1,667
探索範囲 k	$\{ k \mid P_{r-i}(U_{ij}) \geq 0.8 \}$
受注確率 P_{r-i}	式(4.4)により計算

になるように配置してある。図(b)は、式(4.4)に基づき受注確率を計算した結果であり、横軸に図(a)と同じ部品種類の並びをとり、縦軸に受注確率(0~1)を示している。図の横軸の各番号の位置が顧客仕様であるとし、その位置で受注確率は最大値 1.0 となる。各番号の位置から左右の部品に推奨販売すると、価格の上昇や性能の降下に起因して受注確率は低下する。図では、受注確率の計算結果のうち、部品種類 4, 9, 17 が顧客仕様である場合の 3 条件の結果を表示している。各条件において、顧客仕様で受注確率が最大値 1.0 となり、仕様が乖離するに従って低下している。ただし、推奨構成の生成に際しては、受注確率の信頼度が低い範囲を除くため 1.0~0.8 の範囲のみを用い、0.8 を下回る領域はゼロとみなす。このとき、探索範囲は表 4.1 に示す条件となる。



(a) 部品価格の例



(b) 受注確率の計算例

図 4.8 部品価格に基づく受注確率の計算例

(2)実験方法

(2.1)推奨販売の方法

各商談において、5種類の部品グループの中で欠品するものがあれば、該当する部品グループ内で探索指標が最も有利となる代替部品を1つ選定して推奨構成を生成する。欠品する部品グループが無ければ、任意の部品グループから探索指標が最も有利となる代替部品を1つ選定して推奨構成を生成する。各商談において推奨構成を販売し、式(4.2)で説明した受注確率で販売が成立すると仮定する。以上の手続きを、各商談で繰り返し実行する。

(2.2)評価指標

評価指標は、欠品部品率 R_s 、低消費部品率 R_l 、平均在庫消費率 R_a 、部品総数消費率 R_n とする。欠品部品率 R_s とは、59種類の部品の中で商談中に欠品を起こした割合であり、低い方が望ましい。低消費部品率 R_l とは、59種類の部品の中で商談終了後に初期在庫数に対して20%以下しか消費できなかった割合であり、低い方が望ましい。平均在庫消費率 R_a とは、59種類の部品の中で商談中に欠品を起こさなかった部品について初期在庫数に対する消費割合の平均値を計算したものであり、100%が理想である。部品総数消費率 R_n とは、59種類の全部品について、初期在庫数の合計に対して商談を通じて出荷できた部品数の割合であり、100%が理想である。

(2.3)実験1(従来方式との比較)

提案方式を従来方式と比較する。従来方式として、注文に対して部品在庫が不足する場合、線形計画法[53]により総限界利益が最大となるように部品を製品に割り当てる方式[54]を採用する。

ただし、提案方式が期間途中の個々の商談で部品の割り当て計算(推奨構成の生成)を行うのに対して、従来方式は期間終了時点でまとめて部品の割り当て計算を行う。このため、表4.2に示す条件により従来方式を模擬して前提条件を揃える。従来方式が行う期間終了時点の線形計画法による同時決定的な部品割り当てを、期間途中の商談で模擬するために、式(4.11)の線形指標による探索を用いる。また、総限界利益の最大化計算において、余剰部品の在庫保管費用ならびに欠品のペナルティ費用の係数を1と仮定することにより、部品過不足数の最小化計算と見なす。一方、従来方式では、期間終了時点でどの製品を受注したかを把握して部品割り当ての対象となる製品種類を決定していたが、期間途中ではこれを把握できない。このため、全ての製品種類を対象に部品過不足数を最小化できる部品の割り当てを行い、受注確率は考慮しない。

以上、提案方式と従来方式の違いをまとめると、提案方式が受注確率を考慮して顧客仕様から近接した範囲で割り当て部品の選定を限定しているのに対して、従来方式では受注確率を考慮せず、全ての製品種類を対象に部品過不足数を最小化できる部品の割り当てを行う。提案方式が準最適な部品割り当てに留まるが失注し難い推奨構成が生成できるのに対して、従来方式では最適な部品割り当てが可能である一方、失注のリスクが高くなる。また、提案方式が欠品前から推奨構成の生成を開始するのに対して、従来方式は欠品後に開始する。

表 4.2 評価で用いる従来方式の条件

項目 \ 方式	提案方式	評価で用いる従来方式	(参考)従来方式
推奨構成生成頻度	商談毎	商談毎	期間毎
推奨構成生成計算	式(4.13)	式(4.11)	線形計画法
推奨構成生成指標	部品過不足数最小	部品過不足数最小	総限界利益最大
推奨構成生成時の受注確率	考慮する	考慮しない	—
推奨構成販売時の受注確率	考慮する	考慮する	—
推奨構成生成開始	欠品前	欠品後	欠品後

(2.4)実験 2(探索指標の比較)

式(4.13)の非線形な探索指標を採用したことの有効性を評価する。このため、式(4.11)および式(4.12)の2種類の線形指標を採用した場合と評価指標を比較する。

(2.5)実験 3(受注確率の設定誤差の影響評価)

受注確率は、販売部門の担当者が推定して値を設定するため、誤差を有する場合がある。このため、設定誤差の影響を評価する。まず、図 4.8 で説明した受注確率を真値と仮定し、これを推奨構成販売時の受注確率として用いる。一方、図 4.8 に誤差を加算する場合と加算しない場合の、それぞれの条件で推奨構成を生成し、推奨販売した結果を比較する。誤差の有無により、どの程度、在庫消費のバランスに差異が生じるかを評価する。誤差の種類としては、正規分布に従うランダムな誤差(条件 1)と、顧客仕様の近傍で均一な受注確率を設定することによる誤差(条件 2)の2種類を仮定する。

4.4.2 結果と考察

(1) 実験 1(従来方式との比較)

提案方式と従来方式の比較結果を表 4.3～表 4.5, 図 4.9, 図 4.10 に示す.

表 4.3 は製品ライフサイクルの成熟期, 表 4.4 は衰退期, 表 4.5 は終息期に対する結果である. 各表では, 部品在庫を消費する 3 つの方式(商談データの部品所要台数, 従来方式, 提案方式)を, 4 つの評価指標(欠品部品率 R_s , 低消費部品率 R_l , 平均在庫消費率 R_a , 部品総数消費率 R_n)により比較している.

図 4.9 は, 表 4.3～表 4.5 に対応した 59 種部品の平均在庫消費率 R_a に対するヒストグラムである. 横軸が平均在庫消費率 R_a , 縦軸が部品種類数である. 横軸の左側は欠品や在庫の余剰, 右側は在庫の逼迫を意味する. 本章が目標とする在庫消費のバランスが良い状態は, グラフの山が横軸の中央に分布する状態である.

図 4.10 は表 4.3～表 4.5 に対応したシミュレーションデータである. 59 種部品の中で, 図 4.8 と同じ部品グループの 19 種部品の結果を示す. これらは, 同じ部品グループであるため, グループ内で代替販売が可能である. 横軸は部品種類の並びであり左から右に価格順に並んでいる. 各部品種類について左から在庫数, 商談データ(の部品所要台数), 従来方式(の部品出荷数), 提案方式(の部品出荷数)を並べて表示している. 縦軸は部品数である. 各部品種類において, 在庫数より商談データの部品所要台数が下回っている場合は余剰を, 在庫数より部品所要台数が上回っている場合は欠品を意味する.

まず, 成熟期について, 表 4.3, 図 4.9(a), 図 4.10(a)を用いて説明する. 図 4.9(a)では, いずれの条件においても横軸の中央に分布の山があり, 良好な消費状態にある. 特に, 提案方式は, 中央の山が高く, より好ましい分布となっている. これは, 図 4.10(a)において, 例えば在庫消費率が高い部品種類 12 を在庫消費率が低い部品種類 13 や 14 を用いて推奨販売し, 在庫消費バランスを改善しているためである. しかし, 表 4.3 の商談データの評価指標は元々良好な値であるため, 従来方式や提案方式で推奨販売を行っても, ほとんど改善されない. 従来方式と提案方式も差が見られない. 成熟期は多くの部品で在庫が余剰しているため, 部品間で在庫の消費割合を修正しても, 欠品や余剰の大幅な改善には繋がらない.

次に, 終息期について, 表 4.5, 図 4.9(c), 図 4.10(c)を用いて説明する. 図 4.9(c)では, 商談データで多数の欠品が生じているが, 従来方式や提案方式で推奨販売を行うことで解消できている. ただし, 左側の欠品の山が右側へ移動しているだけで, 在庫が逼迫している状況は変わらない. 図 4.10(c)においても, ほとんどの部品で在庫を消費し尽くしており,

表 4.3 提案方式と従来方式の比較結果(成熟期：在庫が余剰)

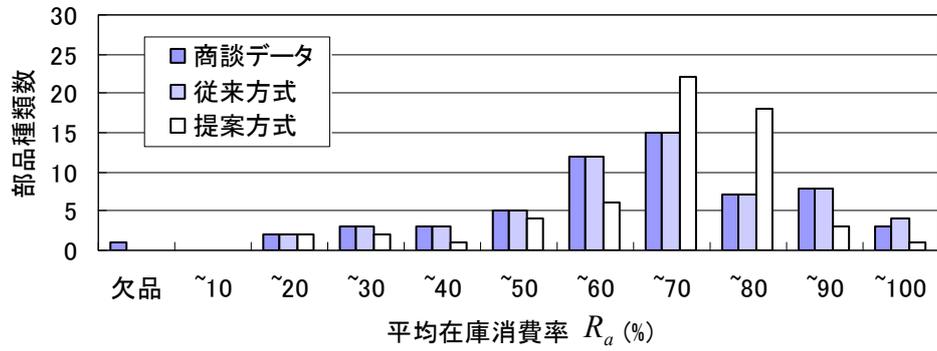
方式 \ 評価指標	欠品部品率 R_s (%)	低消費部品率 R_l (%)	平均在庫消費率 R_a (%)	部品総数消費率 R_n (%)
商談データ	1.7	3.4	62.2	67.6
従来方式	0	3.4	62.7	67.4
提案方式	0	3.4	64.0	66.4

表 4.4 提案方式と従来方式の比較結果(衰退期：余剰・逼迫の状態が混在)

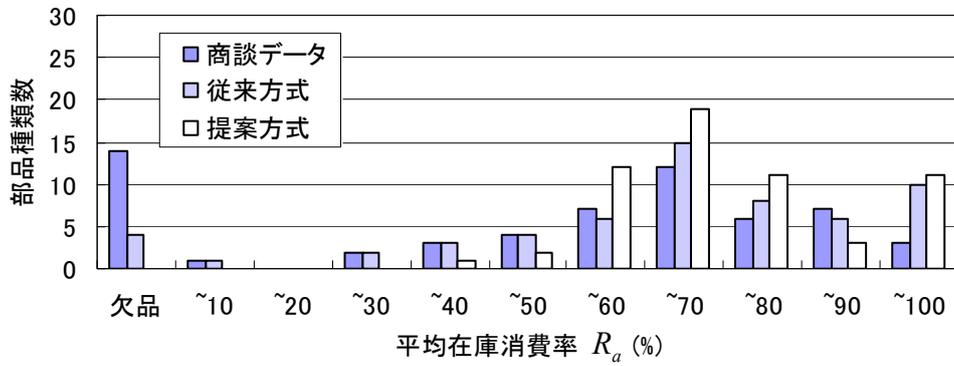
方式 \ 評価指標	欠品部品率 R_s (%)	低消費部品率 R_l (%)	平均在庫消費率 R_a (%)	部品総数消費率 R_n (%)
商談データ	23.7	1.7	62.9	73.4
従来方式	6.8	1.7	66.1	68.0
提案方式	0	0	71.4	77.2

表 4.5 提案方式と従来方式の比較結果(終息期：在庫が逼迫)

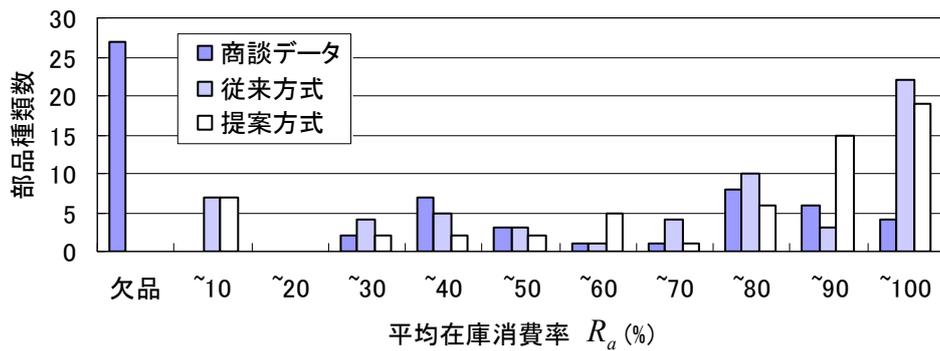
方式 \ 評価指標	欠品部品率 R_s (%)	低消費部品率 R_l (%)	平均在庫消費率 R_a (%)	部品総数消費率 R_n (%)
商談データ	45.8	0	65.2	85.4
従来方式	0	11.9	66.3	81.5
提案方式	0	11.9	70.5	84.1



(a) 成熟期：在庫が余剰

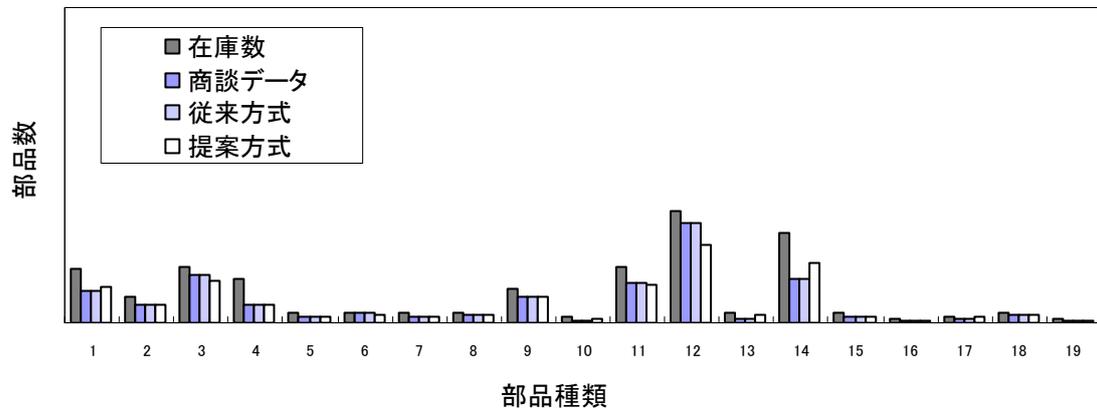


(b) 衰退期：余剰・逼迫の状態が混在

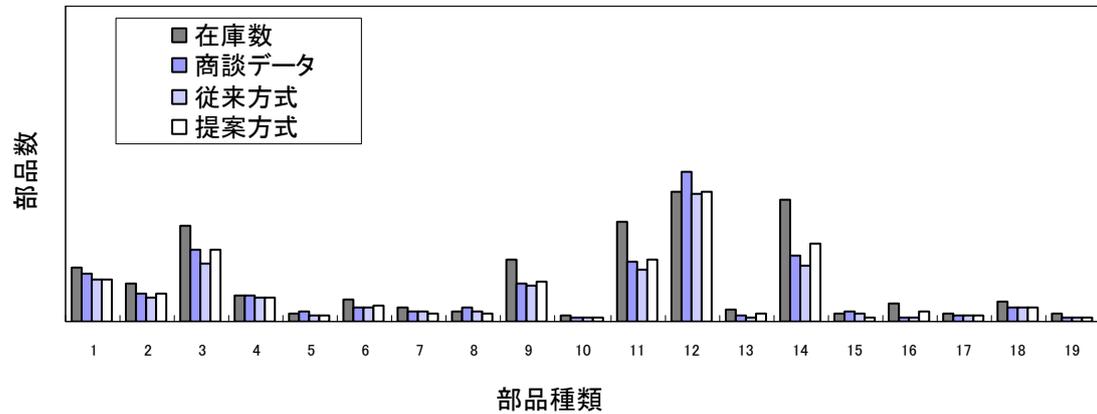


(c) 終息期：在庫が逼迫

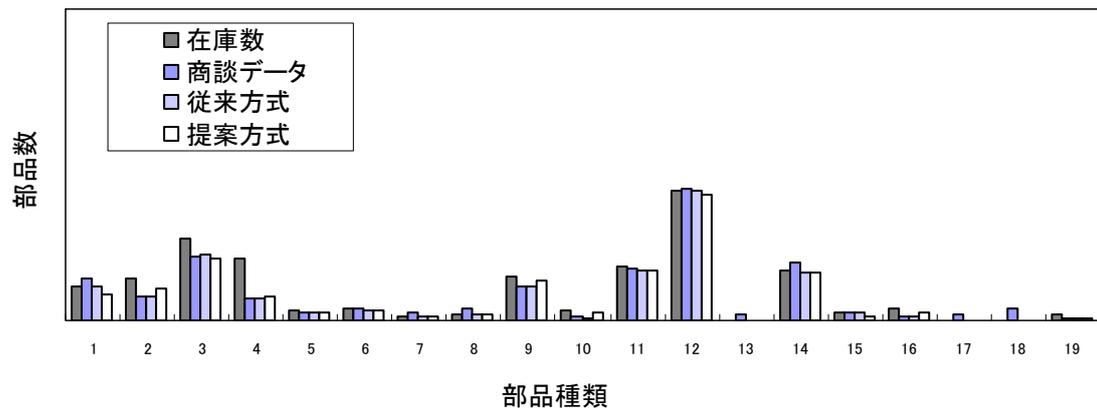
図 4.9 平均在庫消費率に対する部品種類数のヒストグラム(従来方式との比較)



(a) 成熟期：在庫が余剰



(b) 衰退期：余剰・逼迫の状態が混在



(c) 終息期：在庫が逼迫

図 4.10 シミュレーションデータ(従来方式との比較)

本章が狙いとする余剰と逼迫を相殺した消費バランスの改善ができる余地は少ない。この結果、表 4.5 の商談データの評価指標は、欠品部品率 R_s が大幅に改善できているが、他の評価指標は改善が見られず、従来方式と提案方式も差が見られない。

最後に、衰退期について、表 4.4, 図 4.9(b), 図 4.10(b)を用いて説明する。図 4.9(b)では、商談データや従来方式で生じている欠品が、提案方式により解消できている。図 4.10(b)では、例えば商談データで欠品が発生した部品種類 12 を、近傍の部品種類 13 や 14 を用いて推奨販売し、在庫消費の割合を向上させている。この傾向は、従来方式に比べて提案方式が顕著である。従来方式は欠品が発生した場合のみ代替販売を行うが、提案方式は、欠品が生じる前段階のアンバランスも改善するためである。このため、表 4.4 の提案方式の評価指標は、商談データや従来方式に比べて改善している。

図 4.11 は目標不達成率(100 から平均在庫消費率 R_a を引いた値)と欠品部品率について、商談の進行に対する推移を衰退期のデータを用いて示したものである。横軸は商談の回数、

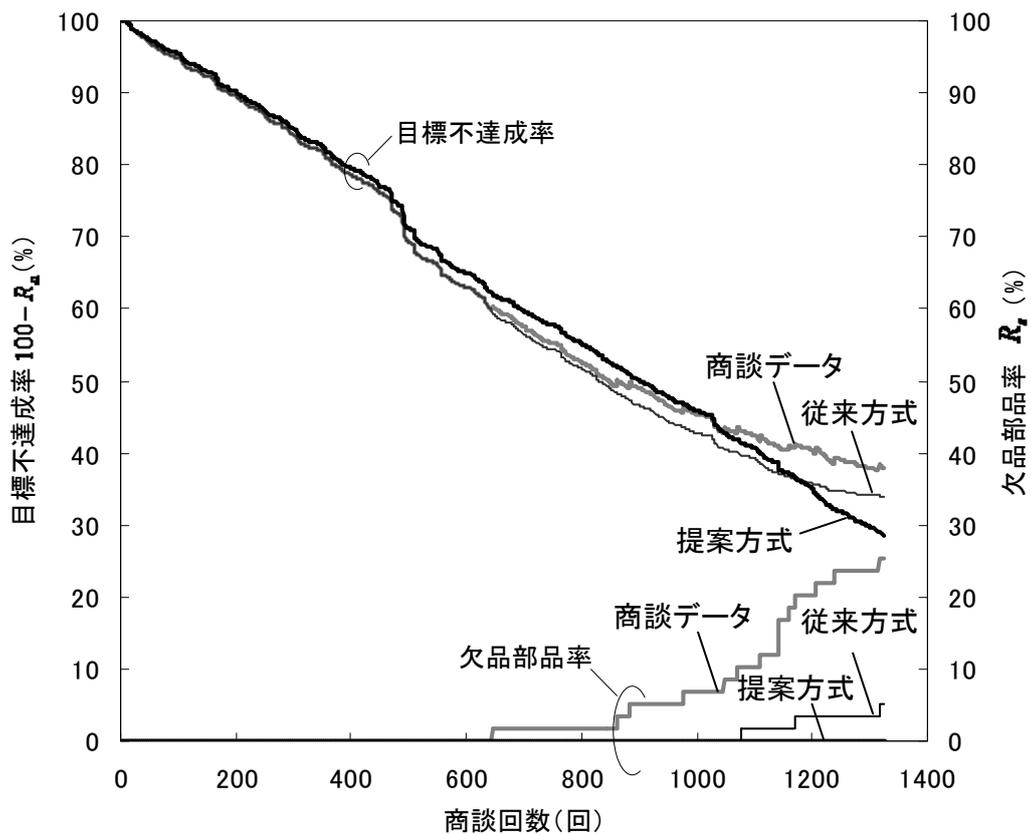


図 4.11 目標不達成率と欠品部品率の推移(衰退期)

左側の縦軸は目標不達成率 $100 - R_a$ ，右側の縦軸は欠品部品率 R_s であり，商談データ，従来方式，提案方式の結果を重ねて表示している．提案方式では，在庫の余剰・逼迫のアンバランスが生じ始める商談回数 500 回付近から推奨販売が開始され，目標不達成率が減少する度合いが一時的に停滞する．しかし，推奨販売により受注確率が低下する影響がありながら，最終的には商談データより良い結果を得ている．欠品も生じない．一方，商談データでは，商談回数が 600 回を越える辺りから欠品する部品が発生し始め，最終的には約 25% 程度まで上昇している．従来方式は，欠品が生じない範囲では通常の販売を行い，欠品が発生した場合に代替販売を行う．受注確率を考慮しないため失注の確率が高くなり，目標不達成率が高止まりしている．提案方式に比べ，欠品が生じた時点から代替販売を開始するため，リカバリが遅れた結果とも言える．

以上のことから，提案方式は，部品在庫の余剰と逼迫の両方の状態が混在する衰退期のような状況において，部品の在庫消費バランスを改善するために有効である．一方，部品の逼迫が生じていない成熟期や，逼迫の度合いが進行する終息期では，提案方式を機能させることが難しく，従来方式との差も生じない．

(2) 実験 2(探索指標の比較)

表 4.6 は，衰退期のデータを用いて，探索指標 $E_1 \sim E_3$ を比較している．図 4.12 は 59 種部品の平均在庫消費率 R_a に対するヒストグラムである．図 4.13 はシミュレーションデータであり，図 4.10 と同じ 19 種部品について左から順に在庫数， $E_1 \sim E_3$ の出荷数を表示している．表 4.6 において，探索指標 E_1 は低消費部品率 R_l が 6.8% と他の探索指標より大きい．これは，図 4.13 に示すように，在庫数が多い部品の消費を優先するため，在庫数が少ない部品の消費機会が減少しているためである．例えば，在庫数が多い部品種類 3, 12, 14 では，探索指標 E_1 の出荷数が最も多い一方，在庫数が少ない部品種類 10, 13, 15 では最も少ない．探索指標 E_2 は，表 4.6 では探索指標 E_3 と同様に欠品部品率 R_s ，低消費部品率 R_l がゼロである上に，平均在庫消費率 R_a が 80.1% と 3 指標の中で最も良い．しかし，図 4.12 において，平均在庫消費率 R_a が 100% の部品の比率が他の探索指標に比べて極端に多い．これは，図 4.13 に示すように在庫数が少ない部品の消費を優先し，在庫の逼迫を加速させるためである．例えば，在庫数が少ない部品種類 5, 6, 7, 10, 13 では探索指標 E_2 の出荷数が最も多い．このように，図 4.12 右側の平均在庫消費率 R_a が 100% の部品種類数の内訳は，在庫数が少ない部品に集中しており，欠品リスクが高くなる．これに対し，探索指標 E_3 は，表 4.6 の平均在庫消費率 R_a は探索指標 E_2 に劣るが，図 4.12 では欠品および在庫消費率が低い部品がない上，平均在庫消費率 100% の部品種類数も探索指標 E_2 ほど

表 4.6 探索指標の比較結果(衰退期)

評価指標 探索指標	欠品部品率 R_s (%)	低消費部品率 R_l (%)	平均在庫消費率 R_a (%)	部品総数消費率 R_n (%)
E_1 式(4.11)	1.7	6.8	62.4	74.9
E_2 式(4.12)	0	0	80.1	74.7
E_3 式(4.13)	0	0	71.4	77.2

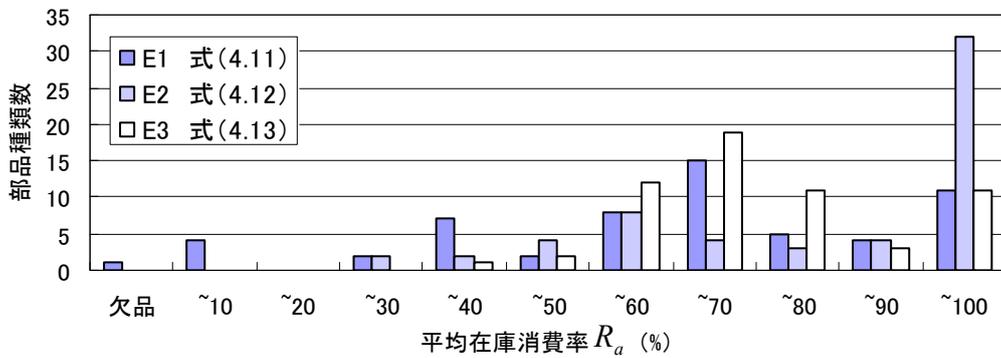


図 4.12 平均在庫消費率に対する部品種類数のヒストグラム(探索指標の比較結果)

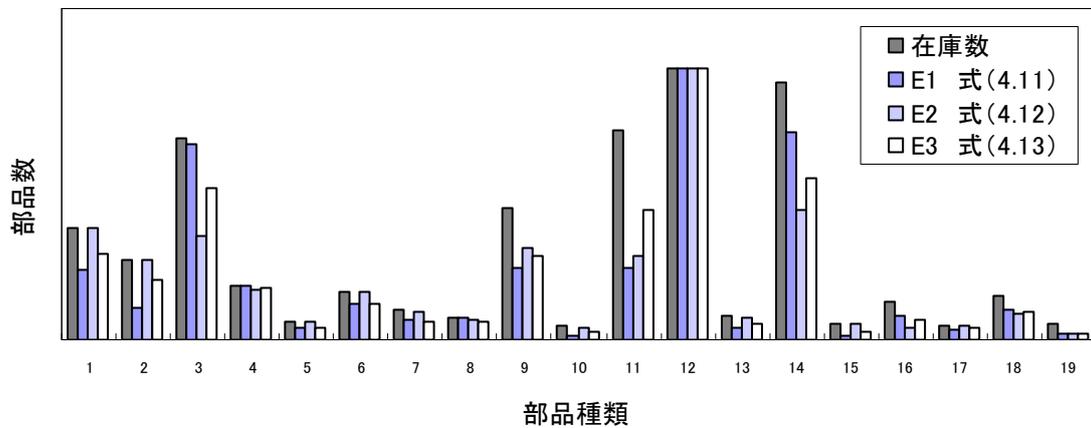


図 4.13 シミュレーションデータ(探索指標の比較結果)

多くない。ヒストグラムが図の中央に分布しており、バランス良い在庫の消費状態にあると言える。また、部品総数消費率 R_n を見ても探索指標 E_3 が最も良い結果を得ている。

以上のことから、非線形な探索指標 E_3 を採用することにより、部品の在庫をバランス良く消費できることがわかる。

(3)実験 3(受注確率の設定誤差の影響評価)

2種類の条件について、衰退期のデータを用いて評価した。結果を、表 4.7 および表 4.8 に示す。

条件 1 として、受注確率の真値に対して正規分布に従う誤差をランダムに加算した受注確率を用いて推奨構成を生成する。受注確率は、図 4.6 に示すように顧客仕様が最大値 1.0 となる凸関数であるため、この条件を満たす範囲でランダムな誤差を加算する。誤差の分

表 4.7 受注確率の設定誤差の評価(条件 1 : 正規分布誤差)

評価指標 誤差分布	欠品部品率 R_s (%)	低消費部品率 R_l (%)	平均在庫消費率 R_a (%)	部品総数消費率 R_n (%)
N(0, 0.3 ²)	0	0	70.3	75.5
N(0, 0.2 ²)	0	0	69.9	74.7
N(0, 0.1 ²)	0	0	70.6	76.0
誤差なし	0	0	71.4	77.2

表 4.8 受注確率の設定誤差の評価(条件 2 : 均一な設定)

評価指標 受注確率	欠品部品率 R_s (%)	低消費部品率 R_l (%)	平均在庫消費率 R_a (%)	部品総数消費率 R_n (%)
$P_{ri}(U_{ij_0 \pm 3}) = 1.0$	0	10.2	41.7	42.4
$P_{ri}(U_{ij_0 \pm 2}) = 1.0$	0	3.4	53.3	55.6
$P_{ri}(U_{ij_0 \pm 1}) = 1.0$	0	0	65.1	69.4
誤差なし	0	0	71.4	77.2

布は、 $N(0, 0.1^2)$, $N(0, 0.2^2)$, $N(0, 0.3^2)$ の3通りとする。受注確率に誤差を加算し、商談において推奨販売を行うことを100回繰り返し、在庫消費率の平均値を求める。この結果と、受注確率の真値を用いた推奨構成を販売した結果との間で、平均在庫消費率を比較する。結果を表4.7に示す。表に示すように、平均在庫消費率 R_a ならびに部品総数消費率 R_n はほとんど変化していない。

条件2として、受注確率の設定を均一とした場合の誤差の影響を評価した。具体的には、図4.6の受注確率のグラフにおいて、顧客仕様の近傍の仕様で受注確率を一定($P_{r_i}=1.0$)とし、他の仕様では受注確率をゼロとした。近傍の条件として顧客仕様からの乖離量を $\delta_j = 1, 2, 3$ として評価した。結果を表4.8に示す。表より、 $\delta_j = 3$ では低消費部品率 R_l が上昇するとともに平均在庫消費率 R_a ならびに部品総数消費率 R_n が減少し、平均在庫消費率 R_a は表4.4の商談データより劣る結果となった。

以上、表4.8の結果から、受注確率の設定に際しては、顧客仕様をピーク値とする凸関数として設定することが重要であることがわかる。この条件を満たしていれば、表4.7の結果から、多少の誤差を含んでも推奨構成を有効な条件で生成できる。一方、受注確率を、顧客仕様の近傍で幅の広い矩形関数とした場合、表4.8の乖離量 $\delta_j = 3$ の結果からわかるように提案方式は正しく機能しない。この理由として、提案方式は商談において欠品が発生しない段階から先行的に推奨販売を行うことで欠品を未然に防止しているが、乖離量 $\delta_j = 3$ のような条件で推奨構成を生成すると、失注が増加するためである。

(4)まとめ

本節の評価で得られた、提案方式を製品ライフサイクルにおいて効果的に活用するための知見を図4.14に示す。提案方式を活用した在庫消費のアンバランスの解消は、欠品した部品の追加発注が難しくなりリカバリが手遅れになる終息期の前段階、すなわち、在庫消費にアンバランスが生じ始める衰退期から開始することが重要である。メーカーでは終息期に向けて欠品を防止しながら在庫の最小化を図る。この過程で欠品が発生すると新製品へ誘導するが、できるだけ旧製品の在庫を完売したい。このため、欠品が発生した場合であっても、顧客仕様を満たす旧製品の構成が提案できれば余剰在庫を有効に消費できる。提案方式は、このような用途に有効である。

また、提案方式を活用するにあたり、探索指標 $E_1 \sim E_3$ を使い分けることができる。製品ライフサイクルの衰退期では、1世代限定の部品と複数世代共通の部品が混在するが、前者の在庫数は少なく、後者の在庫数が多いことが一般的である。この場合、旧製品の在庫を優先して消費するためには、在庫数の少ない部品の消費を優先させる E_2 の指標が有

余剰	欠品	欠品部品少	欠品部品多
余剰在庫少		成長期	終息期
余剰在庫多		成熟期	衰退期 (提案法が有効に機能)

探索指標	優先する在庫消費
E_1	在庫数が多い部品の消費優先
E_2	在庫数が少ない部品の消費優先
E_3	在庫消費のバランス優先

図 4.14 提案方式を効果的に活用するための方法

効である。一方、在庫数が多い余剰部品の消費を優先させたい場合は、 E_1 の指標が有効である。さらに、在庫数に価格を乗じることにより在庫価格と見なすことができるため、在庫価格最小化の場合にも、この指標が有効である。ただし、一般には図 4.5 で説明した在庫消費バランスを優先することが多く、本章で提案した E_3 の指標を用いる。

4.5 結言

本章では、市場の需要と乖離しているために消費が進まない余剰部品の販売促進を図るための推奨販売方式を提案した。BTO 製品では仕様に代替性が成り立つ場合があることに着目し、個々の商談において顧客が許容する範囲内において、消費が望ましい代替部品を搭載した製品を販売促進する。提案方式は、顧客仕様に対する推奨仕様の乖離量を受注確率に変換し、この確率を考慮した上で部品の消費優先度の評価を行う。優先度は、多数の部品の消費バランスを考慮するため、多目標最適化の一手法である目標ベクトル法を導入する。部品在庫の消費目標の達成を最大化するための部品を選定し、推奨構成に搭載する。個々の商談において、顧客仕様に対して推奨構成を生成し販売することで、望ましい在庫消費へ誘導する。実データを用いたシミュレーション実験により提案方式を評価

し、在庫消費のアンバランスが改善できることを示した。

最後に、本章で述べた推奨販売が前章で述べた需要予測に与える影響について考察する。前章で提案した需要予測方式は、受注確率 $\{x_i\}$ が長期的には変動するが、隣接する期においては状態が保存されると仮定した。しかし、本章で述べた推奨販売は受注確率の変動要因となるため、予測誤差を増加させる要因になる。部品の在庫との関係に着目すると、余剰している部品は受注確率が低下しても推奨販売するため、推奨販売しない場合に比べて受注確率は低下する。このため、需要予測においては、前期に余剰していた部品の受注確率は増加方向に補正する必要がある。

今後の課題として、以下の3つが挙げられる。

第一の課題として、多様な製品に対して受注確率を精度良く決定する必要がある。式(4.4)では、価格と性能の相関が強い製品について受注確率を計算した。しかし、この前提が適用できない製品も多い。このような製品に対しては、商談の過程において、複数の仕様を提案した場合の顧客の許容度合いをデータとして蓄積し、受注確率を推定することが考えられる。

第二の課題は、提案方式の適用可能性を事前に評価することである。提案方式を有効に機能させるためには、製品ライフサイクルの衰退期のように、仕様が近接する部品同士で在庫の過不足数の差が大きいといった条件がある。また、製品構成によっては、仕様の代替性が成立しない場合もある。このため、製品の構成や部品在庫のデータを用いて、提案方式が有効に機能するかを事前を評価する必要がある。

第三の課題は、推奨構成の生成において、顧客の情報を考慮することである。販売促進を目的としたリコメンデーションの研究では、個々の顧客の購買履歴や他の顧客との類似性を利用して製品を推奨する研究が進んでいる[44][45][46][47]。一方、今回提案した方式では、顧客が最初に提示する要求仕様に近接した範囲でのみ推奨仕様を探索しているため、仕様選定の範囲が狭い。リコメンデーションの情報を考慮することにより、4.4.2(3)の条件2のように顧客仕様から等方向に推奨範囲を広げて受注確率を低下させるのではなく、顧客の関心に沿った仕様を選定して選択の幅を広げることができる。この結果、より精度の高い推奨構成を生成することができる。

第5章

結論

5.1 本研究のまとめ

本論文では、個別仕様対応製品における製品開発ならびに製品提供の効率化について検討し、改善対象を抽出するための製品開発業務の数値評価方式、見積情報を先行指標として利用する需要予測方式、製品の仕様代替性と部品の在庫消費バランスを考慮した推奨方式を提案した。本論文では、これらの研究成果を以下の4章に分けて報告した。

第1章では、顧客ニーズの多様化により個別仕様対応製品が普及している状況において、製造業では製品開発ならびに製品提供の効率化が課題である背景を述べ、各技術における課題を整理した。そして、それらの課題に対する関連研究について検討し、研究方針を説明した。

第2章では、改善対象を抽出するための製品開発業務の数値評価方式を提案した。製品開発業務の品質を高めるためには、組織が定める業務規準の十分性とプロジェクトの実行度の両立が必要であることに着目し、業務規準の評価点とプロジェクトの実行度を組み合わせることで業務の品質を数値評価し、改善対象を優先付けして抽出する。これにより、業務の効率的な改善を可能とする。提案方式を16組織の業務データにより評価した結果、不良フェーズを93.8%、不良要因を含めると68.8%の精度で特定できる結果を得た。また、提案方式を他の方式と比較し、業務規準の評価値と実行度の両方を考慮して改善対象を抽出することの有効性を示した。

第3章では、不規則に変化するBTO製品の部品出荷数を予測する需要予測方式を提案した。提案方式は、事前に大量のデータ準備を必要とせず、個別仕様生産製品の受注プロセスで特有益な見積情報を先行指標として利用する。見積や出荷のデータに含まれる誤差を許容して、直前の予測誤差が最小となるようにカルマンフィルタにより逐次補正して部品出荷数を予測する特徴を持つ。具体例として、BTO製品の78種類の部品の出荷数を予測する問題に適用し、平均変化率が0.4以下の変化を有する出荷数を平均絶対誤差率28.2%と実用上許容できる精度で予測可能であることを示した。また、シミュレーションデータ

により、提案方式の予測精度が受注生産システムの有する受注確率ノイズおよび予測対象の変化率に依存することを示し、適用可能範囲を明らかにした。

第4章では、市場の需要と乖離しているために消費が進まない余剰部品の販売促進を図るための推奨販売方式を提案した。BTO製品では仕様に代替性が成り立つ場合があることに着目し、個々の商談において顧客が許容する範囲内において、消費が望ましい代替部品を搭載した製品を販売促進する。提案方式は、顧客仕様に対する推奨仕様の乖離量を受注確率に変換し、この確率を考慮した上で部品の消費優先度の評価を行う。優先度は、多数の部品の消費バランスを考慮するため、多目標最適化の一手法である目標ベクトル法の概念を導入する。部品在庫の消費目標の達成を最大化するための部品を選定し、推奨構成に搭載する。個々の商談において、顧客仕様に対して推奨構成を生成し販売することで、望ましい在庫消費へ誘導する。実データを用いたシミュレーション実験により提案方式を評価し、在庫消費のアンバランスが改善できることを示した。

今後、個別仕様対応製品の一層の普及が見込まれる状況において、企業では、本論文の研究成果を活用することにより、個別仕様対応製品における製品開発ならびに製品提供の効率化を図り、製品の品質向上ならびに在庫ロスコスト低減を実現できると考える。

5.2 今後の課題

最後に、本研究の今後の課題について述べる。

(1) 製品開発におけるトレードオフ項目の最適化

2章では業務の高品質化について報告した。しかし、実際の製品開発においては、品質とトレードオフの関係にあるコストや納期との両立が課題となる。また、品質とコストの関係で言えば、予防コストと外部失敗コストのトレードオフを考慮することも求められる[96]。さらに、近年、環境や安全に対する関心の高まりにより、こうした価値観を検討項目に含める必要が生じている[97]。この様に、製品開発にかかわる多くの関心項目がある中で、互いに相反する項目を最適化させながら製品開発を進めることが課題となっている。この課題を解決するためには、的確な意思決定をするための情報を生成して提供することが重要である。

(2) 製品開発と製品提供を融合させた取り組み

今後も、顧客に合わせて製品の仕様をカスタマイズする個別仕様対応製品へのニーズは継続し、BTO生産方式を採用する製品が拡大してゆくと考えられる。BTO製品は、部品

間の組み合わせの自由度を向上させて製品の多品種化を実現させる一方、製品間で部品を共通化することにより部品点数の増加を抑えている。今後、製品提供の効率化を進めるためには、設計段階から在庫管理の観点で部品の共通化を進めることが重要になる[98][99]。しかし、部品共通化と製品多様化は相反する関係にあり、これを最適化する必要がある。従来、この分野では部品共通化[100][101]、製品系列最適化[102][103]に関する多くの研究が報告されているが、実用的な方法論は確立されていない。

謝辞

本研究の全過程を通じて、終始懇切丁寧なるご指導とご鞭撻、格別のご配慮を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 薦田憲久教授に深く感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたり、貴重なお時間を割いて頂き、丁寧なるご教示を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 藤原融教授ならびに原隆浩准教授に深く感謝申し上げます。

大学院博士後期課程において、情報工学全般に関して親切なるご指導とご助言を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 西尾章治郎教授、岸野文郎教授、ならびに秋吉政徳准教授に深く感謝申し上げます。

筆者が大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士後期課程に在学することへのご配慮と援助を賜りました(株)日立製作所 生産技術研究所 前所長 二宮隆典氏(現 (株)日立製作所 日立研究所 所長)、所長 木村勝高博士に感謝申し上げます。

上司として本研究の機会を与えて頂くとともに、研究を進めるにあたりご指導とご配慮を賜りました、(株)日立製作所 生産技術研究所 前部長 築島隆尋博士(現 (株)日立製作所 生産技術研究所 所員 兼 (株)日立グローバルストレージテクノロジーズ 統括部長)、部長 南俊介氏に心より御礼申し上げます。また、筆者が大学院博士後期課程に進学する機会を与えて頂くとともに、研究を進めるにあたりご指導を賜りました、(株)日立製作所 システム開発研究所 主任研究員 谷口洋司博士に感謝申し上げます。

第2章に関して、研究の機会を与えて頂くとともに格別なるご指導、ご支援ならびにご配慮を賜りました(株)日立製作所 品質保証本部 前 QA センタ長 毛利守夫氏、QA センタ長 谷口芳夫氏、日立アプライアンス(株) 品質保証センタ センタ長 巻島文夫氏、(株)日立製作所 品質保証本部 QA センタ 主任技師 門脇潤氏、喜古俊一郎氏(現 (株)日立製作所 電機システム事業部 主任技師)、薮田昭司氏、細谷清和氏、山下進氏に心から御礼申し上げます。

第3章および第4章に関し、研究の機会を与えて頂くとともに格別なるご指導、ご支援ならびにご配慮を賜りました(株)日立製作所 エンタープライズサーバ事業部 生産統括本部 本部長 佐伯祐司氏、元(株)中部ハイテクサービス 神奈川センタ センタ長 狩野隆文氏、

(株)日立製作所 ハードウェアモノづくり統括本部 SCM システム構築本部 本部長 福中秀忠氏，企画開発部 主任技師 小杉秀則氏に心から御礼申し上げます。

研究を進めるにあたり，日々様々なご討論ご助言を頂くとともに多大なるご支援を頂きました(株)日立製作所 生産技術研究所 元客員研究員 久邇朝宏氏，主任研究員 赤坂信悟氏(現 (株)日立製作所 産業・流通システム事業部 チーフプロジェクトマネージャ)，森田浩隆氏(現 (株)日立製作所 産業・流通システム事業部 主任技師)，鈴木辰哉氏，岡田公治博士(現 (株)日立製作所 モノづくり技術事業部 主任技師 兼 モノづくり強化本部 兼 生産技術研究所)，芳賀憲行氏，石田篤宏氏，小池太氏，研究員 永松陽明博士，音田浩臣氏に厚く御礼申し上げます。ならびに格別なるご指導とご配慮を賜りました，(株)日立製作所 生産技術研究所ならびにシステム開発研究所の各位に心から御礼申し上げます。

筆者が研究活動を進めるにあたり，早稲田大学理工学部機械工学科において懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました早稲田大学理工学部機械工学科 山根雅巳 名誉教授，河合素直教授に心から感謝申し上げます。

最後に，研究活動を進める中で，常に体調を気遣ってくれた母ならびに今は亡き父に感謝致します。また，本論文の執筆にあたり，暖かく励まし支えてくれた妻 雅美，息子 鴻太郎に心から感謝致します。

参考文献

- [1] “コストの見える化と情報共有で利益を生み出す”, 日経ものづくり, 2004年12月号, pp.99-104 (2004).
- [2] 村山裕一, 鈴木和夫, 山崎義雄: “事務機のモジュール化”, 精密工学会誌, Vol.66, No.7, pp.1035-1038 (2000).
- [3] 今村聡, 徳永仁史: “工作機械におけるモジュール化設計と再構成”, 精密工学会誌, Vol.66, No.7, pp.1039-1042 (2000).
- [4] 大西良孝: “ロボットのモジュール化”, 精密工学会誌, Vol.66, No.7, pp.1031-1034 (2000).
- [5] 柳原雅彦: “自動車におけるモジュール化 : コックピットモジュールの現状と将来像”, 精密工学会誌, Vol.66, No.7, pp.1016-1019 (2000).
- [6] 田村徹也: “環境調和型製品の開発 : ユニット型パーソナルコンピュータの提案”, 精密工学会誌, Vol.66, No.7, pp.1020-1023 (2000).
- [7] 中根甚一郎: “マスカスタマイゼーションを実現する BTO 生産システム”, 日刊工業新聞社 (2000).
- [8] A. Gunasekarana and E.W.T. Ngai: “Build-to-Order Supply Chain Management: a Literature Review and Framework for Development”, *Journal of Operations Management*, Vol.23, Issue 5, pp.423-451 (2005).
- [9] C. Hicks, T. McGovernb, and C. F. Earla: “Supply Chain Management: A Strategic Issue in Engineer to Order Manufacturing”, *Int. Journal of Production Economics*, Vol. 65, Issue 2, pp.179-190 (2000).
- [10] 山田太郎: “新たな製品ライフサイクルマネジメント(PLM)を目指して”, 経営システム, Vol.15, No.2, pp.82-87 (2005).
- [11] 経済産業省: “2009年版ものづくり白書(ものづくり基盤技術振興基本法第8条に基づく年次報告)”, http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/index_mono.html (2009).
- [12] 立林和夫: “高品質な製品開発のためのプロセス工学技術 : 品質工学の活用”, 精密工学会誌, Vol.72, No.12, pp.1453-1456 (2006).

- [13] 向原益次: “新製品開発における設計審査の仕組み : プロセス重視の仕組みづくり”, 品質, Vol.26, No.4, pp.18-23 (1996).
- [14] 黒川文字子: “受注生産サプライチェーンを効率化する製品アーキテクチャ”, 獨協大学『情報科学研究』第 23 号, pp.65-77 (2006).
- [15] 中村久人: “日本発 MOT 革新としての「セル生産方式」の創成に関する一考察”, 経営力創成研究, Vol.2, No.1, pp.187-199 (2006).
- [16] 飯塚悦功: “TQM による企業目的の実現”, 品質, Vol.28, No.1, pp.84-91 (1998).
- [17] K. Ishikawa: “*What is Total Quality Control? The Japanese Way*”, Prentice Hall (1985).
- [18] S. P. Sharma: “Adaptation of Japanese Style TQM by American Companies”, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.26, No.2, pp.20-24 (1996).
- [19] 横山真一郎: “特集「プロジェクト時代の品質マネジメント」に寄せて”, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.5, No.54, p.2 (2003).
- [20] “*A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) 2000 Edition*”, Project Management Inst. (2000).
- [21] T. Horiuchi and T. Seki: “Applicability of TQC/TQM to Project Management”, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.5, No.5, pp.9-14 (2003).
- [22] 弘藤鈴子, 中村健三: “プロセス QA によるシステム開発作業の品質確保”, 25th ソフトウェア品質シンポジウム, 一般 B-5 (2006).
- [23] M. C. Paulk: “*Key Practices of the Capability Maturity Model Ver 1.1*”, CMU/SEI-93-TR-025 (1993).
- [24] CMMI Product Team: “*Capability Maturity Model Integration (CMMI) Ver 1.1 (CMMI-SE/SW/IPPD/SS, V.1.1) - Continuous Representation*”, CMU/SEI-2002-TR-011 (2002).
- [25] CMMI Product Team: “*Capability Maturity Model Integration (CMMI) Ver 1.1 (CMMI-SE/SW/IPPD/SS, V.1.1) - Staged Representation*”, CMU/SEI-2002-TR-012 (2002).
- [26] 日本規格協会編: “対訳 ISO9001 品質マネジメントの国際規格”, 日本規格協会 (2001).
- [27] 引田邦雄, 眞田史行, 八木裕子, 中條武志: “ISO9000 シリーズの有効性に関する調査研究”, 品質, Vol.25, No.4, pp.395-405 (1995).
- [28] 川崎寿之, 本田勝巳, 小山明美: “アンケートを活用した品質マネジメントの改善への

- 取り組み”, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.5, No.5, pp.25-29 (2003).
- [29] 藤江宏, 丸山幸一, 辛島陽子, 座光寺俊: “ISO9001 監査結果から見た作業標準の遵守状況の変化に関する一考察”, プロジェクトマネジメント学会 2002 年度春季研究発表大会予稿集, pp.109-111 (2003).
- [30] 引田邦雄, 中條武志: “ISO9000 シリーズに基づく効果的な内部品質監査に関する調査研究”, 品質, Vol.29, No.1, pp.111-121 (1999).
- [31] 日本規格協会編: “QS - 9000 品質システム評価(QSA) - 「第 2 版」”, 日本規格協会 (1999).
- [32] J. Schuler: “The SEMATECH SSQA for Supplier Quality Assessment and Continuous Improvement”, in *Proc. of Advanced Semiconductor Manufacturing Conf. and Workshop 1995*, pp.288-292 (1995).
- [33] R. Fildes and C. Beard: “Forecasting Systems for Production and Inventory Control”, *Int. Journal of Operations & Production Management*, Vol.12, Issue 5, pp.4-27 (1992).
- [34] 須賀雅夫: “景気、市場、需要の予測”, 日本機械学会誌, Vol.92, No.842, pp.82-85 (1989).
- [35] 北川源四郎: “時系列解析入門”, 岩波書店 (2005).
- [36] W. D. Nordhaus: “*Forecasting Efficiency: Concepts and Applications*”, The MIT Press (1987).
- [37] R. L. Goodrich: “*Applied Statistical Forecasting*”, Business Forecast Systems (1992).
- [38] J. Contreras, R. Espinola, F. J. Nogales, and A. J. Conejo: “ARIMA Models to Predict Next-Day Electricity Prices”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.18, No.3, pp.1014-1020 (2003).
- [39] 荒木創, 木村有寿, 有菌郁生, 太田宏: “階層型ニューラルネットワークを用いた需要変動量のパターンに基づく需要予測”, 日本経営工学会誌, Vol.47, No.2, pp.59-68 (1996).
- [40] 長谷川淳, 田中英一: “電力の翌日最大需要予測システムの研究開発動向”, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol.114, No.9, pp.835-838 (1994).
- [41] B. Sani and B. G. Kingsman: “Selecting the Best Periodic Inventory Control and Demand Forecasting Methods for Low Demand Items”, *Journal of Operational Research Society*, Vol.48, No.7, pp.700-713 (1997).

- [42] A. Felfernig, G. Friedrich, and D. Jannach: “Conceptual Modeling for Configuration of Mass-customizable Products”, *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.15, Issue 2, pp.165-176 (2001).
- [43] 立野繁之, 松山久義: “PC 生産におけるユーザの利便性を備えた Web-BTO システムの開発”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.105, No.376, pp.9-12 (2005).
- [44] 佐賀亮介, 辻洋: “販売履歴を用いた TPO 商品向け推奨システム”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.126, No.5, pp.661-666 (2006).
- [45] C. Romero and S. Ventura: “*Data Mining in E-learning (Advances in Management Information)*”, Wit Pr/Computational Mechanics (2006).
- [46] J. L. Herlocker, J. A. Konstan, L. G. Terveen, and J. T. Riedl: “Evaluating Collaborative Filtering Recommender Systems”, *ACM Transactions on Information Systems*, Vol.22, Issue.1, pp.5-53 (2004).
- [47] J. L. Herlocker, J. A. Konstan, and J. Riedl: “Explaining collaborative filtering recommendations”, in *Proc. of the 2000 ACM Conf. on Computer Supported Cooperative Work*, pp.241-250 (2000).
- [48] D. Mukhopadhyay, R. Dutta, A. Kundu, and R. Dattagupta: “A Product Recommendation System Using Vector Space Model and Association Rule”, in *Proc. of Int. Conf. on Information Technology 2008*, pp.279-282 (2008).
- [49] 湯本真樹, 呉京錫, 薦田憲久, 森俊彦: “販売促進業務電子化のための提案内容カスタマイズルール自動抽出方法”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.119, No.11, pp.1339-1344 (1999).
- [50] Y. Aviv and A. Federgruen: “Capacitated Multi-Item Inventory Systems with Random and Seasonally Fluctuating Demands: Implications for Postponement Strategies”, *Management Science*, Vol.47, No.4, pp.512-531 (2001).
- [51] G. Mahajan and G. V. Ryzin: “Stocking Retail Assortments under Dynamic Customer Substitution”, *Operations Research*, Vol.49, No.3, pp.334-351 (2001).
- [52] 有馬浩一, 栗山仙之助, 下左近多喜男: “代替販売促進による利益政策に関する研究”, 日本経営工学会誌, Vol.31, No.4, pp.428-433 (1981).
- [53] 今野浩: “線形計画法”, 日科技連出版社 (1987).
- [54] 能勢豊一, 栗山仙之助, 下左近多喜男: “オーダー・エントリー・システムにおける LP による部品引当方法の研究”, 日本経営工学会誌, Vol.32, No.5, pp.340-347 (1981).
- [55] 岡田公治, 久邇朝宏, 鈴木辰哉, 門脇潤, 毛利守夫: “製品開発業務プロセス改善のた

- めの品質経営評価技法の試作”, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.8, No.4, pp.25-30 (2006).
- [56] 久邇朝宏, 下田篤, 岡田公治, 門脇潤, 藪田昭司, 細谷清和, 喜古俊一郎, 毛利守夫: “業種別に見たプロジェクトマネジメントの仕組みと実行レベルの比較分析—品質経営評価技法の開発と適用—”, プロジェクトマネジメント学会 2007 年度春季研究発表大会予稿集, pp.149-159 (2007).
- [57] 下田篤, 久邇朝宏, 永松陽明, 岡田公治, 門脇潤, 喜古俊一郎, 藪田昭司, 細谷清和, 毛利守夫: “プロジェクトマネジメントの仕組みと実行レベルの評価に基づくプロセス改善手法—品質経営評価技法の適用によるプロセス改善—”, プロジェクトマネジメント学会 2008 年度春季研究発表大会予稿集, pp.308-313 (2008).
- [58] 永松陽明, 岡田公治, 下田篤, 久邇朝宏, 門脇潤, 喜古俊一郎, 藪田昭司, 細谷清和, 谷口芳夫: “業務プロセスのベストプラクティス表現方法立案とライブラリ構築”, プロジェクトマネジメント学会 2009 年度春季研究発表大会予稿集, pp.295-300 (2009).
- [59] 久邇朝宏, 下田篤, 岡田公治, 門脇潤, 藪田昭司, 細谷清和, 喜古俊一郎, 毛利守夫: “業種別に見たプロジェクトマネジメントの仕組みと実行レベルの比較分析—品質経営評価技法の開発と適用—”, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.11, No.2, pp.26-31(2009).
- [60] 下田篤, 久邇朝宏, 永松陽明, 岡田公治, 門脇潤, 喜古俊一郎, 藪田昭司, 細谷清和, 毛利守夫: “製品実現のための業務の仕組みと実行レベルの評価に基づくプロセス改善手法—品質経営評価技法の適用によるプロセス改善—”, プロジェクトマネジメント学会誌, Vol.12 (2010)(掲載決定).
- [61] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文: “見積情報を先行指標として利用した受注生産型製品の需要予測方式”, 電気学会情報システム研究会, IS-06-52, pp.55-58 (2006).
- [62] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文, 薦田憲久: “見積情報を先行指標として利用した受注生産製品の需要予測方式”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.128, No.4, pp.562-568 (2008).
- [63] A. Shimoda, H. Kosugi, T. Karino, and N. Komoda: “Demand Forecasting Method for Build-To-Order Products using Quote Information as an Advance Indicator”, in *Proc. of 8th IFIP Int. Conf. on Information Technology for Balanced Automation Systems (BASYS 2008)*, pp.189-196 (2008).
- [64] 下田篤, 小杉秀則: “製品ライフサイクルに対応した販売計画の最適立案方式”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集 2005, pp.142-143

(2005).

- [65] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文, 薦田憲久: “受注生産製品の推奨販売方式”, 電気学会情報システム研究会, IS-08-40, pp.73-77 (2008).
- [66] A. Shimoda, H. Kosugi, T. Karino, and N. Komoda: “Recommendation Method for Build to Order Products Considering Substitutability of Specifications and Stock Consumption Balance of Components”, in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Service Operations, Logistics and Informatics (SOLI 2009)*, pp.347-352 (2009).
- [67] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文, 薦田憲久: “製品の仕様代替性と部品消費バランスを考慮した受注生産製品の推奨方式”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.130, No.5 (2010)(掲載決定).
- [68] 福島利彦, 春日君夫, 山田茂: “QCD 定量化分析によるプロジェクトマネジメントの向上”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集 2007, pp.38-39 (2007).
- [69] 荻野誠哉, 名取剛, 中條武志: “マネジメントシステムの評価・診断法に関する一考察”, 品質, Vol.30, No.3, pp.71-86 (2000).
- [70] 鷺尾隆, 元田浩: “尺度の理論”, 日本ファジィ学会誌, Vol.10, No.3, pp.401-413 (1998).
- [71] L. Simar: “Estimating Efficiencies from Frontier Models with Panel Data: A Comparison of Parametric, Non-Parametric and Semi-Parametric Methods with Bootstrapping”, *Journal of Productivity Analysis*, Vol.3, No.12, pp.171-203 (1992).
- [72] 奥野忠一, 久米均, 芳賀敏郎, 吉澤正: “多変量解析法”, 日科技連出版社 (1971).
- [73] K. Takezawa: “*Introduction to Nonparametric Regression*”, John Wiley and Sons, Inc. (2005).
- [74] 市川紘: “階層型ニューラルネットワーク—非線形問題解析への応用”, 共立出版 (1993).
- [75] R. Kohavi: “A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection”, in *Proc. of the 14th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, Vol.2, No.12, pp.1137-1143 (1995).
- [76] C. T. Meadow: “*The Analysis of Information Systems-A Programmer's Introduction to Information Retrieval*”, John Wiley & Sons, Inc. (2008).
- [77] 西里静彦: “データ解析への洞察—数量化の存在理由”, 関西学院大学出版会 (2007).
- [78] “日立グループ CSR 報告書 2008”, 日立製作所 (2008).

- [79] 石谷重樹, 三森定道: “生産在庫の不安定性と安定化制御”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.123, No. 3, pp.591-600 (2003).
- [80] S. M. Disney and D. R. Towill: “The Effect of Vendor Managed Inventory (VMI) Dynamics on the Bullwhip Effect in Supply Chains”, *Int. Journal of Production Economics*, Vol.85, Issue 2, pp.199-215 (2003).
- [81] 圓川隆夫: “トータル・ロジスティクスー生販物統合化のキーポイント”, 工業調査会 (1995).
- [82] 勝呂隆男: “適正在庫の考え方・求め方”, 日刊工業新聞社 (2003).
- [83] 東京大学教養学部統計学教室: “統計学入門 (基礎統計学)”, 東京大学出版会 (1991).
- [84] 河合素直: “制御工学ー基礎と例題”, 昭晃堂 (1983).
- [85] 片山徹: “応用カルマンフィルタ”, 朝倉書店 (2000).
- [86] A. J. Morgan and S. A. Inks: “Technology and the Sales Force: Increasing Acceptance of Sales Force Automation”, *Industrial Marketing Management*, Vol.30, Issue 5, pp.463-472 (2001).
- [87] P. S. Fader, B. G. S. Hardie, and C. Huang: “A Dynamic Change-point Model for New Product Sales Forecasting”, *Marketing Science*, Vol.23, No.1, pp.50-65 (2004).
- [88] 宗形聡, 斎藤邦夫: “推定マーケットデータを使用した消費財系新製品の需要予測手法”, 日立 TO 技報, Vol.11, pp.34-39 (2005).
- [89] M. H. Kalos and P. A. Whitlock: “*Monte Carlo Methods*”, John Wiley and Sons, Inc. (2008).
- [90] 西岡靖之: “需要動向の変化に即応する計画スケジューリングの同期化技術”, 計測と制御, Vol.46, No.7, pp.529-534 (2007).
- [91] 古川一郎, 守口剛, 阿部誠: “マーケティング・サイエンス入門”, 有斐閣 (2003).
- [92] 柳浦睦憲, 茨木俊秀: “組合せ最適化ーメタ戦略を中心としてー”, 朝倉書店, pp.41-45 (2001).
- [93] 伏見多美雄, 山口俊和, 福川忠昭: “経営の多目標計画”, 森北出版, pp.86-96 (1987).
- [94] 松原望: “意思決定の基礎”, 朝倉書店 (2001).
- [95] 森雅俊, 後藤正幸: “製品切替えにおける生産・販売の統合的意思決定モデルの研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol.54, No.1, pp.26-35 (2003).
- [96] 伊藤嘉博: “品質コストマネジメントー品質管理と原価管理の融合”, 中央経済社 (1999).

- [97] 福岡邦親: “「設計プロセス評価指標」に関する DPAM の取り組み”, *JEITA review*, Vol.8, No.4, pp.28-31 (2007).
- [98] 藤本隆宏, 大鹿隆, 貴志奈央子: “製品アーキテクチャの測定に関する実証分析”, MMRC-J-26 ディスカッションペーパー (2005).
- [99] 青木昌彦, 安藤晴彦: “モジュール化”, 東洋経済新報社 (2002).
- [100] 梶原康博, 大崎紘一, 三輪陽司: “多品種生産のための部品共通化手法に関する研究”, 日本経営工学会誌, Vol.43, No.6, p.464 (1993).
- [101] Y. Gerchak and M. Henig: “Component Commonality in Assemble-to-Order Systems: Models and Properties”, *Navel Logistic Research*, Vol.36, pp.61-68 (2006).
- [102] K. Ishii and M.V. Martin: “Design for variety. A methodology for understanding the costs of product proliferation”, in *Proc. of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conf. and Computers in Engineering Conf.*, pp.18-22 (1996).
- [103] 藤田喜久雄, 石井浩介: “製品系列統合化設計とそのタスク構造”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.65, No.629, pp.416-423 (1999).