

生産システムの柔軟性評価法に関する研究

平成22年3月

原嶋 茂

# 生産システムの柔軟性評価法に関する研究

平成 22 年 3 月

原嶋 茂

愛知工業大学大学院経営情報科学研究科  
博士（経営情報科学）学位論文

生産システムの柔軟性評価法に関する研究  
Studies on the Flexibility Evaluation Method  
of Production Systems

平成 22 年 3 月

B07807 原嶋 茂  
Shigeru Harashima

指導教員 大野勝久教授

## 目 次

要 約	.....	1
第 1 章	研究の背景と目的	4
第 1.1 節	研究の背景	4
第 1.2 節	研究の目的	7
第 2 章	デンソーにおける生産システム開発	9
第 2.1 節	デンソーについて	9
第 2.2 節	生産システム開発の歴史	11
第 2.3 節	次期型製品研究会活動	15
第 2.4 節	デンソーで開発, 実用化された <i>FMS-F</i>	23
2.4.1	<i>CAC</i> – Circular Assembly Cell –	23
2.4.2	<i>CTL</i> – Clustered Transfer Lines –	25
2.4.3	<i>PPS</i> – The Protean Production System –	27
第 2.5 節	需要量変動対応のための形態変化	30
第 2.6 節	第 2 章のまとめ	32
第 3 章	生産システムの柔軟性評価法	
	– 概念と “Reconfigurability” の提案 –	33
第 3.1 節	従来の柔軟性評価法とその課題	33
第 3.2 節	生産システムの柔軟性評価の概念	34
第 3.3 節	需要量の変動に対する柔軟性評価法	35
3.3.1	製造コストと LCC の定式化	36
3.3.2	需要量変動シナリオの定義	38
3.3.3	柔軟性評価手順	39
3.3.4	評価に用いた各生産システムの柔軟性パラメータ	40
第 3.4 節	柔軟性評価結果と考察	51
3.4.1	<i>CAC</i> の評価結果	51
3.4.2	<i>CTL</i> の評価結果	58
3.4.3	<i>PPS</i> の評価結果	64

3.4.4	各生産システムの柔軟性比較結果	70
第 3.5 節	“Reconfigurability”の定義の提案	72
第 3.6 節	第 3 章のまとめ	74
第 4 章	生産システムの柔軟性評価法	
	－動特性としての柔軟性評価とその実際的な検証－	75
第 4.1 節	動特性評価と検証のステップ	75
第 4.2 節	入力としての需要量変動シナリオの作成	76
第 4.3 節	柔軟性パラメータの設定	80
第 4.4 節	最適化手法の適用	89
第 4.5 節	プログラムの検証	91
4.5.1	シナリオ 1 における従来との結果比較	95
4.5.2	シナリオ 2 における従来との結果比較	97
4.5.3	シナリオ 3 における従来との結果比較	99
4.5.4	シナリオ 4 における従来との結果比較	102
第 4.6 節	柔軟性評価結果と考察	105
4.6.1	<i>CAC</i> の動特性評価結果	105
4.6.2	<i>CTL</i> の動特性評価結果	108
4.6.3	<i>PPS</i> の動特性評価結果	110
4.6.4	“Reconfigurability” の評価	113
第 4.7 節	第 4 章のまとめ	115
第 5 章	結 論	116
謝 辞		119
参考文献		122
付 録	－動特性評価のためのプログラム－	126
研究業績		134

## 要約

本論文は、生産システムの柔軟性評価のための新しい概念と評価法を提案するとともに、実用化されている生産システムに適用して、その妥当性を検証したものである。

本論文の構成とその内容は、以下の通りである。

### 第1章 研究の背景と目的

経営環境の変化は年々グローバル化し且つ速度を増し、製造現場は頻繁に対応を余儀なくされており、生産システムの柔軟性はますます重要となっている。そのため、世界の製造業では、新しい柔軟な生産システムが次々に考え出されている。しかし、その投資判断においては、回収期間法、ROI法、DCF法、原価比較法や経営者の長年の経験に頼っているのが実情であり、生産システムの柔軟性を評価する合理的な方法は未確立である。また国際学術誌においても多くの先行研究があるが、実際の事例を用いた報告は少なく、またあっても有効性が明確でない。

本研究では、生産システムの柔軟性評価のための概念と評価法を提案するとともに、実用化されている生産システムに適用して、その妥当性を検証する。さらに、その評価法を通じて柔軟な生産システムの特徴を抽出して分類する。

### 第2章 デンソーにおける生産システム開発

筆者は、自動車部品メーカーのデンソーで、長年生産システム開発に従事してきた。そこで得られた知見、経験が本研究の重要な下地になっている。

デンソーでは1949年の創業以来、生産システム開発に注力している。時代の変化を予見して立てた経営戦略を具現化するものとして、多くの柔軟な生産システムを開発してきた。それらの開発の母胎となったのが、1972年から始まった次期型製品研究会活動（通称次期型研）である。トップマネジメントの下で、製品開発と生産システム開発が、同時並行且つ共同プロジェクトとして推進されてきたことは、まさにMOT（Management Of Technology）とCE（Concurrent Engineering）のさきがけと言ってもよいであろう。

本研究で事例として扱う、需要量の変動に対して柔軟な生産システム、*FMS-F*（Flexible Manufacturing System-for Fluctuation）を3つ紹介し、それら*FMS-F*を分類するとともに、その柔軟性の本質が再形態変化可能性（Reconfigurability）にあることを示す。

### 第 3 章 生産システムの柔軟性評価法

#### －柔軟性評価の概念と“Reconfigurability”の提案－

需要の変化に対し、常に品質やコスト、納期などの目標値を満足するように対応する生産システムは、一種の制御系とみなすことができる。そこで、柔軟性評価の概念として、「生産システムの柔軟性評価とは、長期にわたる需要の時間的な変化を入力とし、経済性指標を出力とした場合の、生産システムの動特性を評価することである」を提案する。

次に、この概念に基づき、先ず「基本的な 4 つの需要量変動シナリオと LCC (Life Cycle Cost) の計算に基づく評価関数を用いた柔軟性評価法」を提案する。この評価法は、入力となる需要量変動シナリオが単純なパターンで且つ 4 つと少なく、動特性評価法としては不十分であるが、提案する概念の正しさを予測するためのものである。

実際に、デンソーで開発・実用化された *FMS-F* と、比較のために用意した従来システムである *ML* (Manual Line) や *TL* (Transfer Line) に適用して検証した結果、この評価法の妥当性が検証され、提案する概念の正しさも予測された。

さらに、上記の検証結果の考察から、形態変化を特徴とする *FMS-F* の柔軟性を示す“Reconfigurability”を、LCC を用いて定義する。この定義を用いれば、異なる製品を組立・加工する *FMS-F* を相互比較できることもわかった。

### 第 4 章 生産システムの柔軟性評価法

#### －動特性としての柔軟性評価とその実際的な検証－

第 3 章で提案した柔軟性評価の概念に基づき、「需要量変動シナリオを入力とし、最適化手法である DP (Dynamic Programming) を用い、LCC が最小となるように生産システムの形態変化を最適化することで得られた LCC を出力とする動特性評価法」を提案する。

入力となる需要量変動シナリオは、生涯需要量の大きさがほぼ連続的になるように発生させた。生産システムの形態を構成する柔軟性パラメータとして、設備台数や作業員数、稼働時間をきめ細かく設定した。

第 3 章と同様に、*FMS-F*、*ML*、*TL* に適用して検証した結果、この動特性評価によって、需要量の変化の広い範囲にわたる生産システムの柔軟性を把握することが可能となった。すなわち、動特性評価法は、生産システムの一般的柔軟性を表していると考えられる。これにより、提案した概念の正しさも検証された。

さらに、この動特性評価法で得られた LCC を用い“Reconfigurability”を計算することで、*FMS-F* の柔軟性の特徴がより明確になった。需要予測と経営戦略に基づいて、適切な *FMS-F* を選択するための指針になることが期待される。

## 第5章 結論

製造業にとって、経営環境の変化は需要の変化となって現れる。生産システムは製造業の経営戦略を具現化したものであり、需要の変化に対する柔軟性とその評価はきわめて重要である。

本研究では、生産システムを一種の制御系とみなし、その柔軟性を動特性として評価する概念とその方法を提案した。具体的には、DPを用いてLCCが最小となるように最適化することを組み込んだ、需要量の変化に対する動特性評価法を開発した。そして、デンスーで開発・実用化された *FMS-F* に適用して検証した結果、この評価法を用いれば、需要量の変化の広い範囲に対する生産システムの柔軟性を把握できることがわかった。

また、*FMS-F* の柔軟性の本質が“Reconfigurability”にあることを示すとともに、その“Reconfigurability”を評価する方法も提案した。この方法を用いれば、*FMS-F* の相互比較だけではなく、柔軟な生産システム開発の指針も得られよう。

以上のことより、提案した「柔軟性評価の概念」とそれに基づく「動特性評価法」および“Reconfigurability”の考え方は、需要予測があいまいな場合でも、製品はもとより業界をこえて生産システムの柔軟性を評価できる可能性を示唆しているものと考えられる。

需要の変化の予測が困難な時代に突入しているのは事実であり、今後は柔軟性以上にスピードが重要になってくるであろう。スピードは生産システムだけで実現できるものではない。企業活動そのものの柔軟性が問われる。たとえば「スピード経営」である。それを含めた今後の研究の方向性の3つを示す。

本研究により得られた柔軟性評価の概念と評価法が、製造業における投資判断の場はもとより、国や地域をこえて、効率的な経済発展の一助になることを期待している。

最後に、以下の項目が続く。

謝 辞  
参考文献  
付 録  
研究業績



# 第1章 研究の背景と目的

## 第 1.1 節 研究の背景

事業のグローバル展開や、情報化技術の著しい進化と普及などにより、製造業をとりまく経営環境の変化は、近年ますますその規模が大きくなり、且つその速度が増している。

典型的な例としては、賃金レートの低い新興国での生産が拡大して製造原価が下がり価格競争の激化を招いたことや、米国で発生した金融危機がまたたく間に世界各国の実体経済に波及して景況感の悪化を引き起こしたことなどがある。

モノを作る立場からすると、そういった経営環境の変化は、需要の変化として現れ、何らかの対応を迫られる。需要の変化とは、生産品の質の変化（製品に設計変更が加わったり、急に新製品が投入されたりすることなど）や量の変化（想定外の増産や減産）そしてコストの変化（競争力を確保するために大幅な原価低減を強いられることや原材料費の高騰）などである。モノづくりの最前線では、タイムリーに設備を改造したり生産量を調整したりしているが、現場の対応能力には限界がある。

本来は経営戦略的に最初から「需要の変化に対して、迅速且つ柔軟に対応できるモノづくりのシステム」を構築しておくべきである。それができていないと、無駄な追加投資をしたり、不良在庫を増大させたり、逆に新たな仕様追加や注文量の増加に対応できず大きな機会損失を招いたりする。

経営環境の変化が原因で、製造業において実際に起きたモノづくりのシステムの大きな変化がある。家電業界を例にとると、主に質の変化に柔軟に対応するためコンベアラインが姿を消してセル生産が主流になったことや、主にコストの変化に対応するため東南アジアへ生産を海外移転したことは有名である。

ここで、生産の柔軟性について先行研究を少し整理しておく。

生産の柔軟性は、単一の機械からライン、工場、サプライチェーン全体へと拡張されてきた。このことは国際競争に勝ち抜くための1つの重要な鍵である。そういう意味で、生産システムと言うと非常に広い意味を持つが、本研究では一般に工場の中に見られるセルやラインを示すこととする。

生産の柔軟性に関する研究は、(1) コンセプト（フレームワーク）、(2) 設計、(3)

ケーススタディ, (4) 評価技術に大きく分類でき, 非常に多くの研究がある (黒田, 大野, 田村, 中出ほか[2008]). それらの中で, 柔軟性のコンセプトを表現するにはその複雑さからいくつかの着眼が必要であり, 特に生産システムとの関係を示すには工夫を要する.

Koste, Malhotra[1999], 坪根[2000]は柔軟性の次元をヒエラルキー構造で表現している.

図 1-1(坪根[2000])では, 製造の柔軟性の上位に新製品の柔軟性がある. Koste, Malhotra の場合では, 最上位が Strategic Flexibility となっており, いずれも柔軟性が製品戦略や製品競争力と密接な関係があることを示唆している. すなわち, 生産の柔軟性とは直接モノを作る現場の対応能力だけに注目するのではなく, もっと上流を含めた企業活動にも目を向ける必要がある.

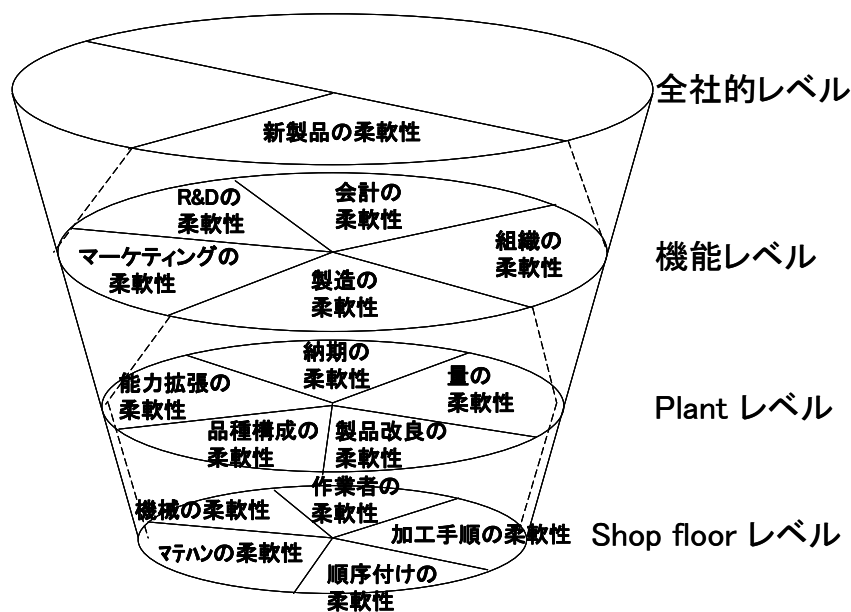


図 1-1 ヒエラルキー構造をもつ柔軟性の次元 (坪根[2000])

一方, Wiendahl et al.[2007]は工場の変化可能性 (Changeability) を, 図 1-2 のように製品レベルと製造レベルに分けて階層構造で表現している. それによれば, 一般に柔軟性と翻訳される Flexibility より上位の概念があり, 最上位に位置しているのが Agility すなわち迅速性である. 逆説的にいえば, どのような変化に対しても時間が無限にあれば対応可能なのは当然であって, 究極の柔軟性は変化にいかにか速く対応できるかということであろう.

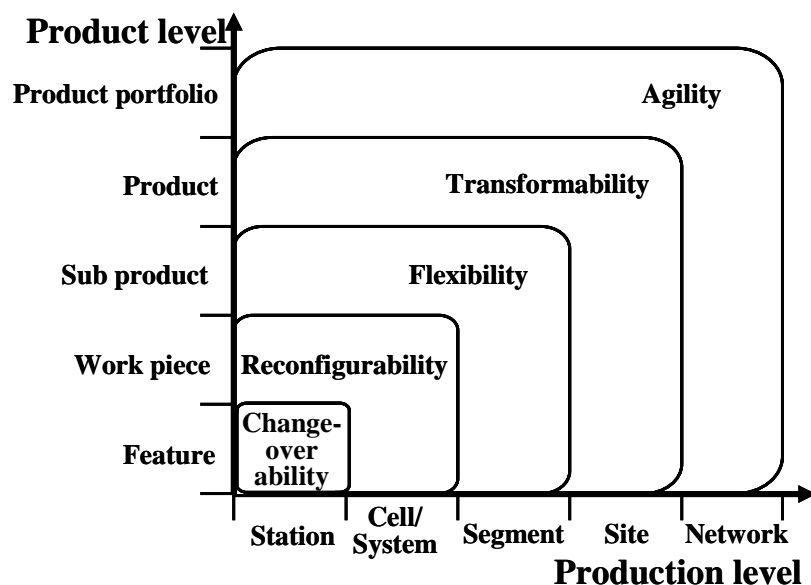


図 1-2 工場の変化可能性の階層(Wiendahl et al.[2007])

また、セルや生産システムの変化可能性を再形態変化可能性 (Reconfigurability) と定義している。これは主に、数値制御やモジュール化が進展した汎用機械加工設備で構成された生産システムを、その構成を再構築することによって新製品の加工に対応できることから *RMS* (Reconfigurable Manufacturing System) と呼ぶことに由来する (Koren et al.[1999])。

柔軟な生産に焦点を当てた国際会議もある。CARV (International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production) といい、現在も活発に続いている。

筆者は、自動車部品メーカーである株式会社デンソー (以下デンソーと略す) において、30 年間、生産システム開発に従事してきた。30 年という時間は、生産システムすべてを理解するには短すぎるが、経営環境の変化と生産システムの関係について、ある程度の議論をするための経験を得るには、最低限必要な時間だったと思われる。

筆者の関係した生産システム開発のほとんどは、柔軟な生産システムの開発であった。経営環境は常に変化するものだからである。そして、30 年間には、大きな経営環境の変化がいくつかあった。

生産システム開発の仕事とは、単に設備やラインを設計・製作し立ち上げること

ではない。先ず、来るべき時代の大きな変化、潮流をとらえる感性が必要である。次に、その変化に対する事業戦略を理解できなければならない。そうして、製品開発戦略と整合した生産システム開発戦略を立て、長期、中期、短期の開発テーマを策定し、プロジェクト推進する。それらの活動の結実したものが生産システムなのである。

さらに、この 30 年間で、経営環境の変化の速度は著しく増大し、それに対応して戦略立案から製品の開発、量産開始までのスピードアップ（期間短縮）もはかられてきた。

以上のように、本研究の背景には、筆者の経験に基づく「経営環境の変化に柔軟に対応する生産システム開発の重要性」、「戦略的な企業活動と生産システム開発の密接な関係」そして「企業活動の迅速化」がある。

## 第 1.2 節 研究の目的

企業経営にとって、経営環境の変化はマイナス要因ばかりではない。むしろ経営環境の変化は、競争に勝ち抜くチャンスとなり得る。他社よりも先に変化を正しく予測して対応すれば、たとえば先行者利益が得られるからである。

ハイリスク・ハイリターンという言葉がある。経営環境の変化が大きいと予測された場合、その対応は大掛かりなものになる傾向がある。複数の企業が同じ予測をしたとしても、すべての企業がその対応を全面的且つ即実施するとは限らない。リスクを考慮して部分的に、あるいは他社の様子もうかがいながらやや遅れて実施することもある。それでも、経営環境の変化と呼べるほどの変化への対応は、ましてその変化が訪れる前の対応着手であれば、トップマネジメントの判断を必要とする。

前節でも述べたように、経営環境の変化は需要の変化となって表れる。需要の変化に対応する生産システムは、製品開発の初期の段階から経営戦略的な視点を盛り込んで開発される。需要の変化の可能性を想定すればするほど、開発テーマは多くなり、生産システムの仕様も増えて大規模なものとなる。デンソーでは、そのような生産システム開発は、全社的なプロジェクトで推進されてきた。

生産システム開発者として最も難しかったのは、その生産システムの投資判断材料の提供である。想定した需要の変化の大きさと、それに対応する（柔軟性を確保する）ための投資の大きさに対し、どのような評価関数を用いてその妥当性を証明したらよいか、ということである。

投資判断には、回収期間法、原価比較法、ROI法（Return On Investment:投資収益率法）、DCF法（Discount Cash Flow:現在価値法）や定性的な項目も含めた評価法などがあるが、生産システムの柔軟性を評価する合理的な方法は未確立だった。実際の投資判断の場では、最後はトップマネジメントの長年の経験に頼ることも少なくなかった。

一方、国際学術誌においては多くの先行研究があるが、柔軟性評価の概念に関するものは少なく、また実際の事例を用いた検証報告も少なく、またあっても有効性が明確でなかった。

幸いにも筆者は、多くの柔軟な生産システムの開発に直接関わるか、あるいは身近なところでそれらを見聞することができた。開発にはすべてトップマネジメントがリーダーシップを発揮する戦略的なものがほとんどであった。

本研究の第1の目的は、柔軟性評価の概念を提唱し、それに基づいて投資判断の場でも使える生産システムの柔軟性評価法を確立することである。そして、デンスーで開発し実用化された生産システムを用いて、その妥当性を検証する。

デンスーで開発された生産システムは、そのシステムで生産される製品の事業に貢献してきた。世界トップシェアを獲得できたもの、10年を超える長期間にわたって量産し続けているもの、また納入先や学会から高く評価されたシステムも多い。

ところが、同じ経営環境の中で似た目的をもって開発された筈の生産システムが、まるで異なったシステムのように見えることがある。それは各製品事業固有の課題から生じた特殊解だからなのか、あるいはそれぞれが最適解でなかったためのばらつきなのだろうか。

本研究の第2の目的は、生産システムの柔軟性評価法の確立だけでなく、その評価法を通じて、開発された生産システムの特徴を抽出し、分類することも目的とする。生産システムの評価や分類は、新たな生産システム開発の指針となるであろう。

## 第2章 デンソーにおける生産システム開発

本研究では、生産システムの柔軟性評価の概念を提案し、具体的な評価法を構築する。そして、その有用性をデンソーで開発・実用化された生産システムを用いて検証する。

デンソーで開発・実用化された生産システムを事例にする場合、前もって説明すべきことがある。後で述べる柔軟性評価法の確立と密接な関係があるからである。それらは2つある。

1つ目は、デンソーにおける生産システム開発活動の特徴である。

デンソーでは、生産システム開発は、トップマネジメントの下で、製品開発と同時並行に共同開発推進される。その活動の象徴として次期型製品研究会活動(以下、次期型研と略す)を取り上げ、その本質的な特徴を示す。

2つ目は、開発された柔軟な生産システムの特徴である。

デンソーで開発された需要量の変化に対応する生産システムを代表例として、工程設計的な視点で分類し、その本質を抽出する。

### 第 2.1 節 デンソーについて

デンソー(当初の社名は日本電装株式会社)が設立されたのは、戦後の混乱が続いていた1949年である。ドッジラインによるデフレの影響などで、経営難から再建整備計画を余儀なくされていたトヨタ自動車工業株式会社から、電装(発電機や始動用モータなど)とラジエータ部門が分離独立してできた会社である。

当初は大きな借金も抱えていて労働争議や大量の従業員解雇もあったが、朝鮮戦争特需によって息を吹き返した。しかし、技術的には世界に大きく立ち遅れていたため、1952年、当時資本金がやっと9000万円になった会社が、1億6000万円もの最新鋭製造設備を、北米や欧州から導入する決断をした。さらに、1953年にはドイツのロバート・ボッシュ社と技術援助契約を締結し、最先端製品技術はもとより、生産技術から経営方法まで学ぶことになった。

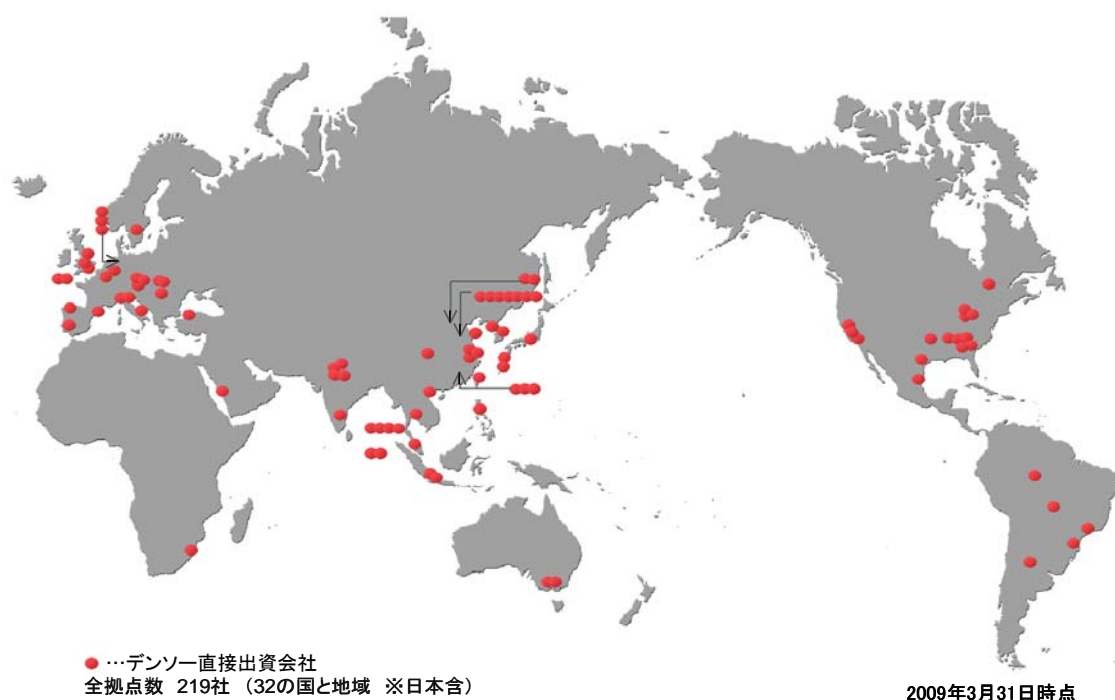
続く高度経済成長時代やモータリゼーションの波に乗って、次々に新工場を建設し、生産設備を高度化させた。1961年には最初のトランスファラインであるダイナモラインが立ち上がった。そのときからPM(保全)を導入し、やがて全員参加の

PM すなわち TPM 活動へと発展した。1971 年には、その TPM 活動が評価されて PM 優秀事業場賞を受賞したが、TPM はデンソーが生みの親なのである。

生産管理にトヨタ生産方式を導入したのも同じ 1971 年である。

品質管理に対する取り組みも早かった。1956 年には SQC (統計的品質管理)、57 年には TQC (総合的品質管理) を導入し、その考え方はモノづくりの現場のみならず会社経営にまで展開し、1961 年にはデミング賞実施賞を受賞した。

今日では、**図 2-1** に示すように、世界 32 の国と地域で事業展開しており、海外製造拠点だけでもおよそ 100 を数える。世界屈指の自動車部品およびシステムのグローバルサプライヤーである (『日本電装 35 年史』[1984], トゥーリー, ヘティンジャー[1998], 『デンソー 50 年史』[2000], DENSO[2002], 津田[2007])。



**図 2-1** デンソーのグローバルネットワーク

## 第 2.2 節 生産システム開発の歴史

自動車はすり合わせ製品と呼ばれる（藤本[2001,2007]）。その影響で、自動車部品は自動車メーカーとの共同開発になることが多く、内製化率が高くなる傾向がある。また自動車部品は、自動車の「走る、曲がる、止まる」という基本機能と密接につながっており、不具合は人命に関わる。したがって、その製造工程からヒューマンエラーを除くため、自動化が望まれる。自動車の開発がプラットフォーム化により標準化とコストダウンが進んだように、自動車部品も標準化を進めることで多くの車種に展開できるようにして生産量を確保している。また、自動車の車種単位での販売期間の長さ、補給品の製造契約から、生産期間が 10 年以上に及ぶことも珍しくはない。

以上のように、内製化率が高い、自動化度が高い、生産量が多い、生産期間が長期に及ぶといったことから、開発した自動車部品の生産設備の投資は、一般に大規模になる。したがって、経営会議に付され、その投資判断は需要予測とともに慎重になされる。

筆者は、自動車部品メーカーであるデンソーで、長年自動車部品のための生産システム開発に従事してきた。生産システム開発という言葉には広い意味があり、製造ラインの開発だけを指しているのではない。比較的大きなものとしては工場全体の FA 化があり、比較的小さなものとしては専用機や IT ツールの開発もある。1990 年代以降加速した海外展開における、グローバルな生産体制構築も、生産システム開発と呼んでいいだろう。

一方、デンソーの生産システム開発は、製品開発と密接な関係がある場合が多い。製品の競争力を確保するためには、生産技術開発も必要だからである。また、事業戦略の狙いを実現するためにも、新たな生産システムのコンセプトが必要になるからである。

いずれにせよ、新しい生産システムを成立させるための個々の技術開発テーマは、基本的には生産技術の進化や革新を目標としているが、その真の目的は高度な製品の成立であり事業目標の達成である。つまるところ生産システムとは、経営環境の将来予測を踏まえた上で、競争力のある製品開発を軸にした、製造企業の経営戦略を具現化したものと言っても過言ではない。

ただし、第 1 章でも述べたように、本研究で扱う生産システムとは、一般に工場の中に見られるセルやライン規模のものとする。



図 2-2 にデンソーにおける生産システム開発の歴史を示す。1949 年の創業以来、生産システムのレベルを向上させてきた。

当初は、欧米の技術を導入して、単一工程の自動化に着手した。以降、加工法から設備、制御システムにいたるまで、そのほとんどを内製化し、グループ会社以外には供与することなく、製品技術と共にデンソーの競争力としてきた。

1960 年代からはそれらの設備を連結して TL (Transfer Line) 化に取り組み、小規模なものから始め、高度成長時代の波にも乗って、1970 年代には部品加工から組立、検査まで自動機で連結した一貫連続 TL を実現した。

なお、忘れてならないのは、開発した生産システムの受け皿である工場、特に現場で働く技能員のレベルの維持・向上である。生産システムのレベル向上には、技能員のレベル向上も必須である。これができたのは、品質管理や安全遵守に関する知識や、加工法、治工具、設備を熟知し、感度の高い五感を有しつつ、たゆまぬ改善の努力を惜しまない技能員を社内で育成し続けてきたからである（生駒[2001]、大河[2004]）。

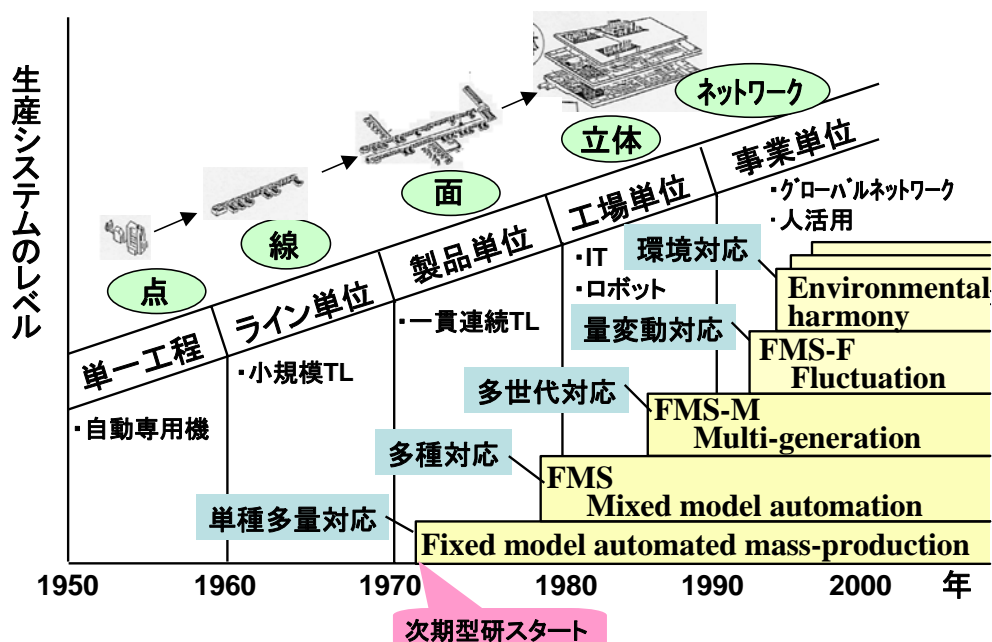


図 2-2 デンソーにおける生産システム開発の歴史(社内資料から)

すり合わせ製品が対象で、国内生産が中心であり、ITの普及がまだそれほどでない時代は、この垂直統合と設備の内製化の取り組みは確実に競争力向上につながった。もちろんビジネスがグローバル、ボーダレス、ネットワーク型になり自動車もHVからEVへとモジュール製品化していけば、当然モノづくり競争力の定義は大きく変わることが予想されるが（西村，西野[2006]），少なくとも90年代半ばまでは、デンソーの発展と生産システムのレベル向上には上記のような明快な関係があった。

一方、1972年に始まった次期型製品研究会活動（以下次期型研と略す）は、トップマネジメントをリーダーとし、製品開発と生産システム開発を共同且つ同時並行に進めるプロジェクト活動である。後述するが、これは、後にMOT（Management Of Technology:技術経営）やコンカレント・エンジニアリング（Concurrent Engineering 以後CEと略す）あるいはサイマルティニアス・エンジニアリング（Simultaneous Engineering 以後SEと略す）と呼ばれる企業活動のさきがけであった。

次期型研はトップマネジメントの経営判断が入るため、時代のニーズを先取りする製品技術と生産技術の研究開発プロジェクトである。その結果、画期的な性能を有する次期型製品と、様々なFMS（Flexible Manufacturing System:柔軟な生産システム）が誕生した。

1980年代には、主に需要の多様化を予測して多種類の製品に対応できるFMSを開発した。1例として、筆者も開発に関わったⅢ型オルタネータの生産システムがある。Ⅲ型オルタネータとは、第3世代の自動車用交流発電機のことである。ワールドワイドでトップシェアを目指した戦略的な開発製品だった。広範囲の発電能力をカバーするため3つの製品サイズでシリーズ化されることが計画されていた。従来技術であれば少なくとも3つの生産システムが必要であった。これを、設備投資額の大幅低減と製品サイズ間の需要量差の吸収を狙い、1つの生産システムで対応するため、きわめて多種類の製品に対応する生産システムを開発する必要があった。

筆者は、主要な部品加工ラインと直結された、最終の総組付ラインを担当した。多種類の部品を安価に確実に組付けるため、自ら設計・試作することで製品設計へ多くの提案をするとともに、柔軟な多種流動制御技術を開発した。

この生産システムは1号ラインがモデルとなり、2号，3号，4号，5号とその柔軟性が伝承された。1号ラインは「自動車用発電機多サイズ共用高速生産システム

の開発」として、1990年に大河内記念会から生産賞を受賞した。

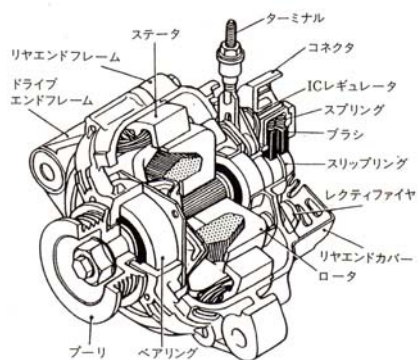
図 2-3 にⅢ型オルタネータの構造と 1 号総組付ラインを示す。

その後、製品の世代交代があっても対応できる *FMS-M* (Multi-generation) の開発がトップマネジメントのリードもあり、社内やグループ会社に普及した。これは主にロボットや IT を多用した生産システムであり、1970年代から社内開発してきたロボットやバーコードなどの技術を応用したものである。

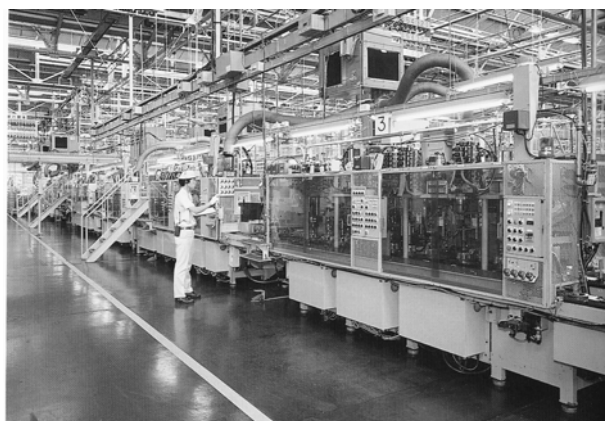
85年のプラザ合意を起点とした円高の進展や、国際競争の激化などにより、1990年代になると、製品の短寿命化や価格競争が激しくなった。こういった背景を受けて、需要量の変動にも対応できる *FMS-F* (Fluctuation) が開発された。

21世紀が近づく頃からは、事業のグローバル展開に対応し、同時に地球環境保全にも配慮する生産システムが必要となった。グローバル展開はその国や地域のインフラや文化に柔軟に対応することであり、地球環境保全も国際情勢に柔軟に対応することなので、大きな意味での *FMS* 開発と言えるだろう。

生産システムに求められる要件は時代とともに高度で多岐にわたってきた。今後もこの傾向は続くものと考えられる。



(a) Ⅲ型オルタネータとその構造



(b) Ⅲ型オルタネータ1号総組付ライン

図 2-3 Ⅲ型オルタネータと1号総組付ライン(日本電装 35 年史から)

## 第 2.3 節 次期型製品研究会活動

ここで、様々な FMS 誕生の母胎となった次期型研について説明しておく。

図 2-4 に示すように、デンソーの次期型研は、1972 年の HE（熱交換器，Heat Exchange の略）研から始まり、様々な製品分野，事業分野へと拡大していった。

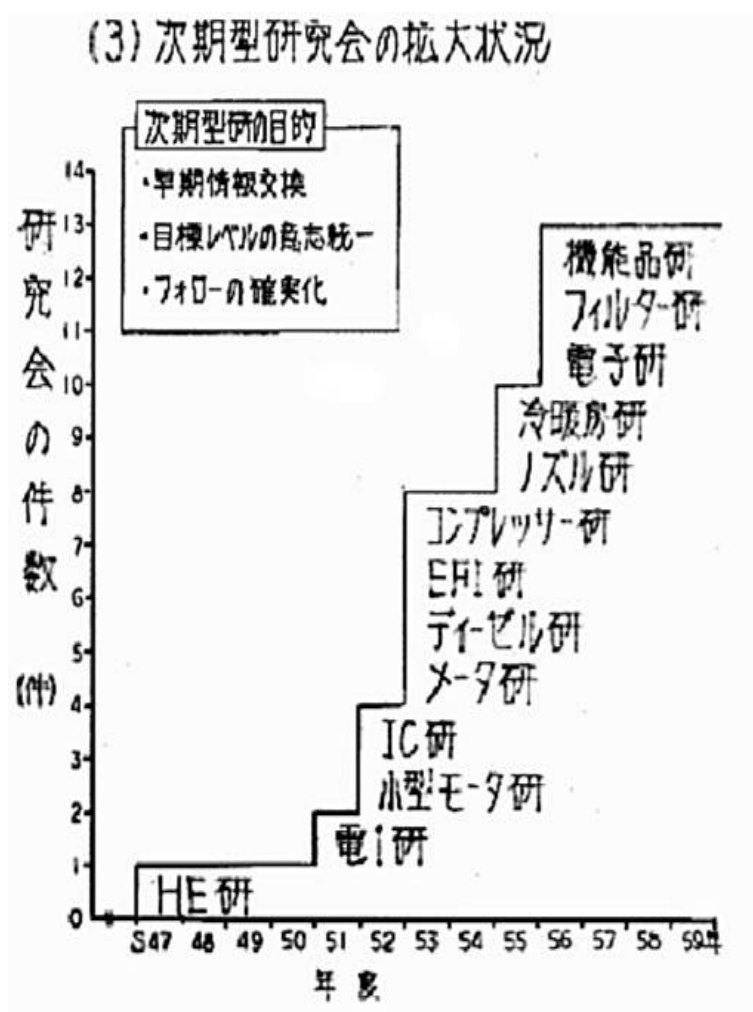


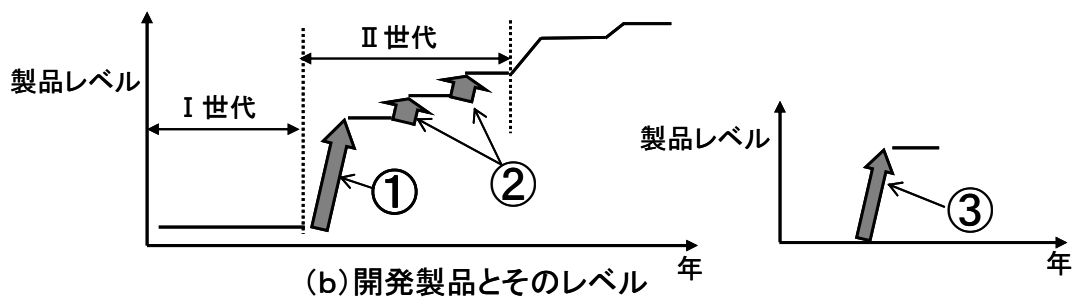
図 2-4 次期型研の拡大状況(1982 年社内資料から)

まず、次期型製品の定義を説明する。

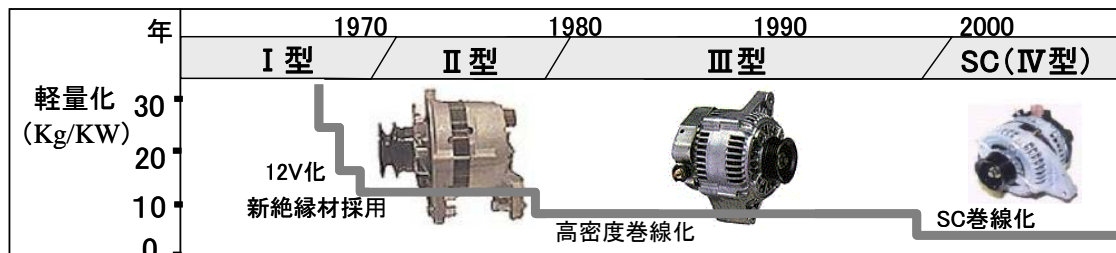
図 2-5(a) に示すように、開発製品には 3 種類ある。その中で、他社製品を凌駕して大幅シェアアップ（売り上げが増加）することを目的に、現号（現在流動している号口製品）の主力製品を画期的に改良する戦略的開発製品を、次期型製品という。製品としては世代交代にあたり、だいたい 10 年に 1 度のことである。次世代製品と呼ぶこともある。顧客から見れば、新型製品である。

開発製品の分類	定義	目的
① 戦略的開発製品 “次期型製品”	現在流動中の主力製品のレベルを画期的に改良した製品	他社製品を凌駕し 大幅シェアアップ
② 改良型開発製品	現在流動中の主力製品のレベルを改良した製品	競争力維持
③ 新規開発製品	初めて市場に投入するために開発した新商品	売上拡大

(a) 開発製品の分類



(b) 開発製品とそのレベル



(c) 開発製品の事例(オルタネータ)

図 2-5 次期型製品の定義(社内資料に筆者が加筆)

競争力維持を目的に、現号の製品に改良を加えたものを改良型製品という。市場の変化に対応して随時実施し、間隔があいたとしても数年に1度のことである。顧客から見れば、類似新製品である。

売上拡大を目的に、初めて市場に投入するために開発する製品を新規開発製品という。競合メーカーから見れば新規参入製品、顧客から見れば新商品であろう。

図 2-5(b)では、3つの開発製品のレベルアップとその発生頻度を模式的に表現している。図 2-5(c)には、開発製品の例として、オルタネータを示している。製品レベルとしては軽量化(Kg/KW)が書いてあるが、これはオルタネータの発電力当りの製品重量を意味している。発電力は高いほど良いが、重量が増えることは自動車の燃費性能を低下させるため、自動車メーカーへの訴求力という点でこの製品レベル

を飛躍的に向上させることを戦略としたのである。そうして、次期型オルタネータを開発した順番に、Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型と呼んだ。

次期型製品開発は会社にとって重要な製品に対しておこなう。デンソーでは世界一製品というものにこだわっている。デンソーにおける世界一製品の定義は、ワールドワイドでシェアがトップの製品のことである。製品によって数値は違うが、ワールドワイドで30%以上のシェアをもっていれば、シェアがトップすなわち世界一製品と呼べる可能性が出てくる。世界一製品を多く有することは、会社の評価を高めることになり、高業績につながる。そのため、ターゲットを絞って世界一製品を作ってきた。トップシェアを他社に譲れない製品、中長期計画でトップシェアを狙う製品、そういった製品に対して次期型を開発してきたのである。その結果、現在では、30前後の世界一製品を保有している。

次期型製品は事業部にとって最重要開発製品である。現在では、次期型研は事業部の中だけで推進されることもある。しかし、次期型研発足当時は、次期型製品は会社にとって最重要製品だったので、会社の総力を挙げて取り組んだ。

画期的な改良をするためには、製品技術開発だけでなく、生産技術開発も必要である。製品設計者が求める材料を開発したり、狙いとする高精度の加工や組立の技術を開発したりしないと、飛躍的な製品のレベルアップができないからである。社内では、製品成立のための生産技術と呼んだりする。

新材料や新加工法を開発する場合は、同時に計測技術や検査技術も開発する必要がある。さらに、そういった生産技術を社内に留保するためには、設備も社内で開発・製作する必要がある。一貫した生産技術開発は、試作、実験、設備製作から生産現場の保全、作業者にいたるまで、その技能や熟練度といった現場力をも飛躍的に向上させることができるのである。

したがって、次期型研における生産技術開発は、本社機能部の生産技術部が取り組んだ。本社機能部の生産技術部には、会社として必要なあらゆる生産技術を開発するエンジニアがいる。除去加工や塑性加工、表面処理や検査技術といった専門技術者だけでなく、生産システム技術者もいる。また、専用加工設備は、工機部で開発し内製（内作とも言う）した。

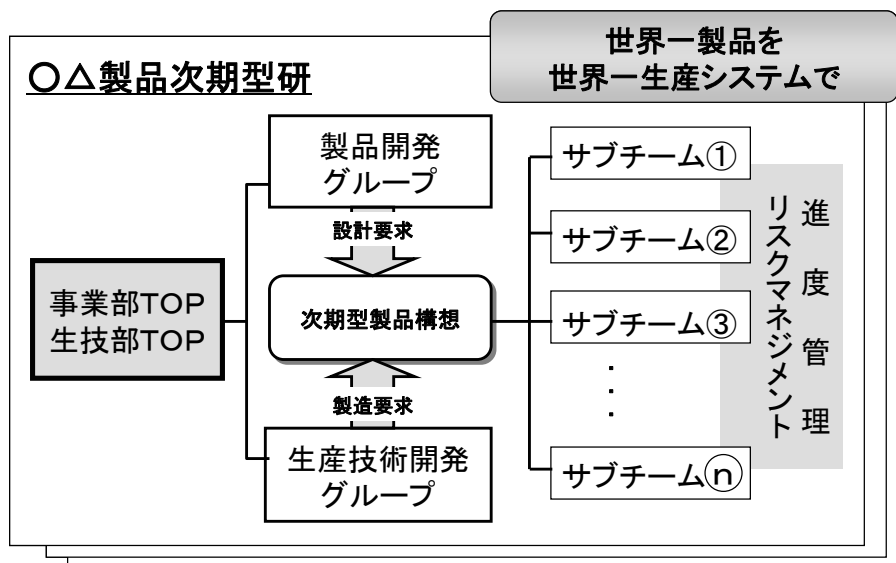


図 2-6 次期型研活動(社内資料に筆者が加筆)

次期型研活動を図 2-6 に示すが、3 つの特徴がある。

1 つ目は、製品開発グループと生産技術開発グループが、次期型製品の開発の初期の段階から、その製品構想（図案）を元に、連携しながら開発することである。生産技術者が設計の初期段階から参画することで、構想はあっても加工法がはっきりしないものや、手作り試作はできても量産できるか分からないものに対して、生産技術者は製品成立テーマを提案することができる。

2 つ目は、次期型製品を運営する事業部トップと本社機能部である生産技術部のトップがリーダーとなっているため、常に経営的視点からの高いレベルでの判断がなされることである。トップマネジメントのリードにより、開発目標値は戦略的で高度なものとなる。それにより開発テーマの難度も高くなるが、課題克服の手段も会社の総力をあげたものとなる。高度な目標を立てながら、その実現性も高まるのである。

3 つ目は、次期型研はプロジェクト体制がとられ、その推進において、機能横断的な体制やリスクマネジメントが早くから取り入れられていたことである。製品開発部署も本社機能部である生産技術部も本社にあり、連携して業務をおこなうには便利だった。また、推進事務局は、生産技術部の生産システム技術者と事業部企画や技術部が担当した。生産システム技術者は、実務上の推進リーダーとなり、図 2-7 に示すような、リスクマネジメントを含む大日程計画表（連携計画日程表とも言う）を作成し、プロジェクトを推進した。





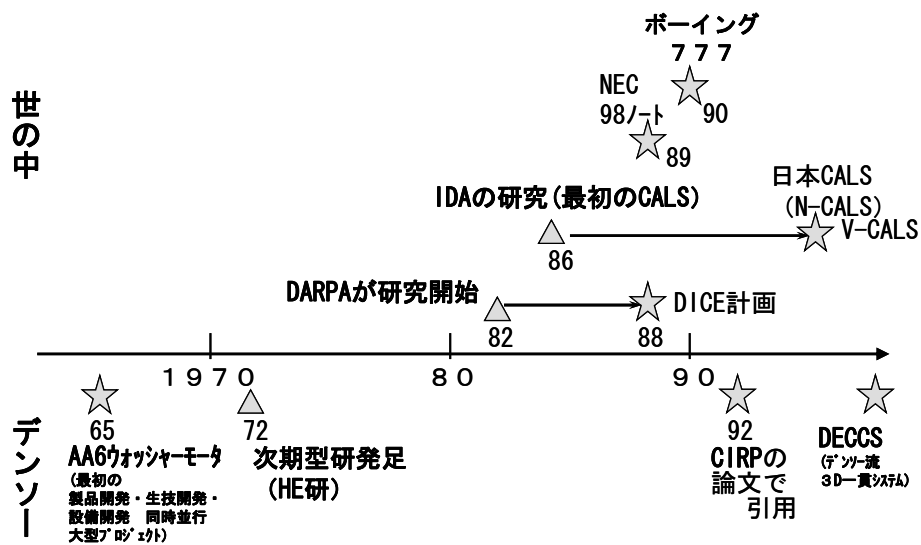


図 2-8 コンカレント・エンジニアリングの歴史(社内資料に筆者が加筆)

CE の歴史を 図 2-8 に示す。

CE は，米国国防総省 高等研究計画局 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) が 1982 年に始めた設計プロセス改善に関する研究に由来する。1986 年に IDA (Institute for Defence Analysis) の報告書「R-338」でその概念が次のように定義された (齊藤[2005])。

「製品のライフサイクルの全てに関わる専門家のチームが，情報とノウハウを共有し，創発的に業務処理する」

DARPA の研究は DICE (DARPA Initiative in Concurrent Engineering) 計画へとつながった。これは 1988 年から 4 年間，GE 社が中心となって Stanford 大学など 5 大学が手法に取り組んだものである。

一方 IDA の成果は，軍のロジスティクス・システムである CALS (Computer Aided Logistics Support) という形で具体化された。すぐそれは，軍事関係に限らず，コンピュータを利用した調達とロジスティクスのシステム Computer-aided Acquisition and Logistics Support として取り組まれ，やがて部品や材料だけを対象とするのではなく，設計から生産，廃棄にいたる製品のライフサイクルを通じた情報の一元化・同期化を対象とする Computer-aided Acquisition and Lifecycle Support と呼ばれるようになった。

その後 CALS は，「高速(光速)商取引」という意味から Commerce At Light Speed の略語とされたり，日本では NCALS (CALS 技術研究組合) によって推進され，

公共事業の取引に適用されたものを特に建設 CALS と呼んだりするなど、次第に、本来のエンジニアリングの色彩が薄れていった。

しかし CE は、**図 2-9** に示す開発期間短縮を目的とするものとして、世の中に広まった。

3次元モデルを導入した CE として有名なのは、ボーイング 777 の開発である。ユニテッド航空からの旅客機の大口発注を受けた際、ボーイング社は、設計情報として、従来の 2次元 CAD から 3次元 CAD データへ進化統合させたことで、バーチャルな事前検証が充実し、製作前の設計の完成度を飛躍的に向上させた。しかし、ボーイング社は 80 年代の日本の製造業の成功を研究し、設計の初期の段階から生産技術や製造の担当者が共同で作業をすることで、手戻りの少ない仕事になることを学んだ。それを日本メーカーと協力して推進した今回のボーイング 777 の開発に適用したことも忘れてはならない（青島[1998]）。

一方デンソーでは、まだ次期型研という名称がない 1965 年に、AA6 ウォッシャーモーターにおいて、最初の製品開発、生技開発、設備開発の同時並行大型プロジェクトを推進し、デンソー初のラインタクトが 4 秒の高速 TL を実現している。

次期型研は、1972 年の HE 研から始まったが、期間短縮だけを目的としているのではない。

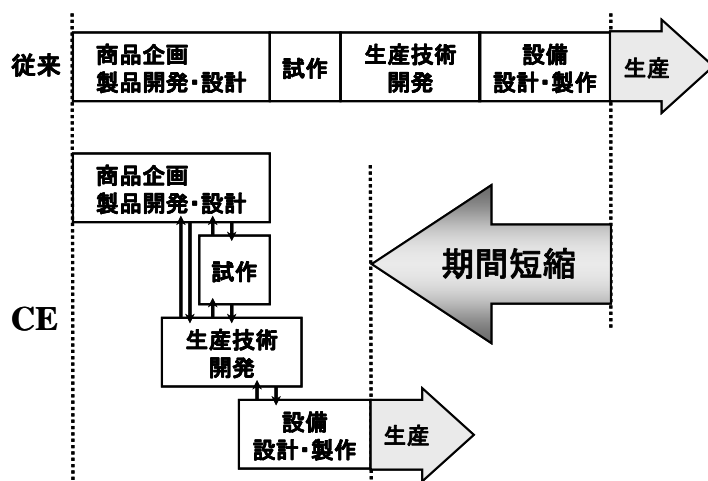


図 2-9 コンカレント・エンジニアリングによる期間短縮

図 2-10 に示すように、次期型研は、商品企画から製品開発・設計、試作、生産技術開発、設備設計・製作にいたるまでがほぼ同時並行に行われると共に、仕事の上流側から下流側へ課題を早めに伝えて研究・開発に早期着手してもらうことと、逆に仕事の下流側は待ちの姿勢ではなく上流側の仕事に専門家の立場から提案する（たとえば作りやすさの提案とか）ことが行われる。たとえばコストダウンという仕事においては、その目標達成のポテンシャルはほとんど構想設計段階に決定されてしまい、詳細設計段階では変更が困難なためポテンシャルが小さい。次期型開発における画期的な性能改良なども同様で、何事も早期着手がポイントなのである。

下流側へ早めに情報を流すことをアーリーソーシングという。また、下流側が上流側へ入り込んで仕事をすると当然上流での仕事の負荷は高まるが、結果として下流での負荷（特に手戻りといった非効率的な仕事）が減りトータルでは仕事量が減って全体の効率が増す。このような上流側での仕事の負荷を高めることをフロントローディングという。

これらのアーリーソーシングおよびフロントローディングという特徴がデンソーの次期型研にあることが、CE を総括した CIRP (College International Research Production : 原名はフランス語) の論文で指摘されている (Sohlenius[1992])。

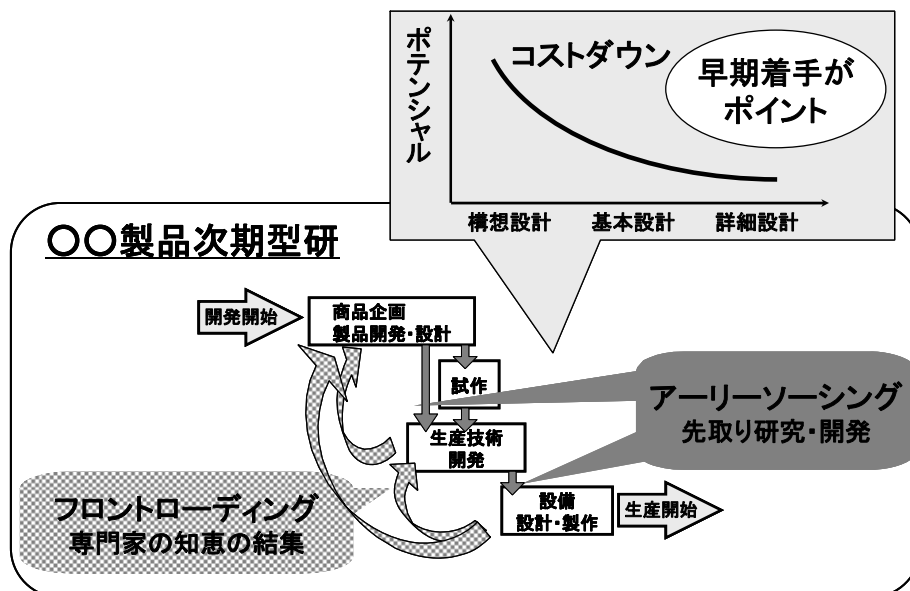


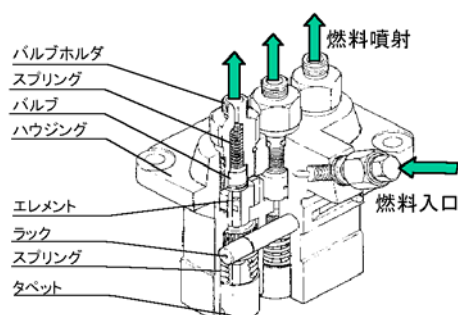
図 2-10 次期型研におけるコンカレントエンジニアリング(社内資料に筆者が加筆)

## 第 2.4 節 デンソーで開発、実用化された *FMS-F*

本論文で事例として扱う，長期にわたる需要量の変動に対して柔軟な生産システムである *FMS-F* を 3 つ紹介し，最後に，それらが再形態変化可能性で分類，整理できることを示す．

### 2.4.1 *CAC* –Circular Assembly Cell–

農業機械や建設機械を主体とする小型ディーゼルエンジン用燃料噴射ポンプ組立のために開発したのが *CAC* (Circular Assembly Cell, 社内呼称「ミニ組立工場」) である(瀧口ら[2001]). 代表的な 3 気筒の D 型ポンプの製品構造を **図 2-11** に示す．



**図 2-11** D 型ポンプ

この製品群は輸出率が高く，また需要量には季節変動もあり，本質的に多種少量生産である．機種ごとの需要量から総需要量まで予測が難しいため，全自動 *TL* の投資はリスクが高く，従来は手作業で組立や検査を行っていた．一種のセル生産方式で対応していたのである．しかし，需要の伸びも期待される中，いつまでも手作業中心の生産体制では，品質確保やコスト競争力の維持は難しくなってくる．

この生産を合理化するため，これまでに開発した自動化技術と混流技術をベースに，1 台の設備で全組立工程を完了する *AC* (Assembly Cell) の考えを導入して新しい生産システムを開発した．

*CAC* は生産管理システムも有する，全自動組立システムである．**図 2-12** に *CAC* の構成を，**図 2-13** に *CAC* の外観を示す．主要開発技術としては，ロット単位に相当する枚数のパレットが設備内を振り子のように往復運動するパレット循環技術，大きさの異なる部品を不当ピッチで収納するミニ自動倉庫，ネジ締付も可能な高剛性ロボットなどがある．

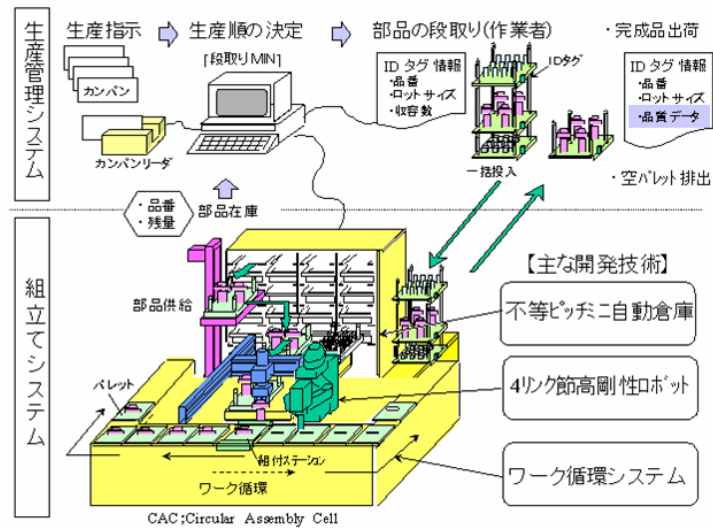


図 2-12 CACの構成(瀧口ら[2001])

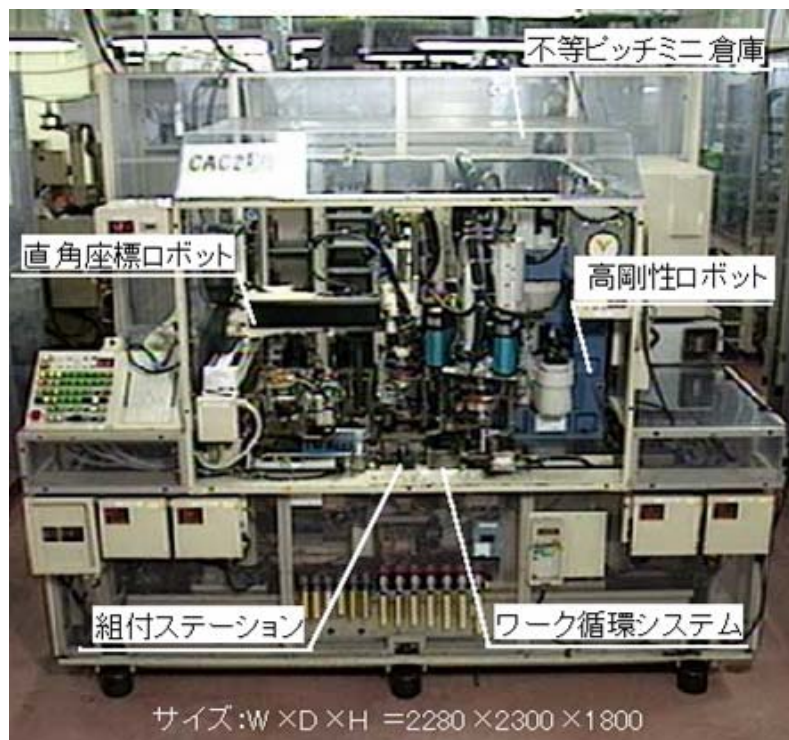


図 2-13 CACの外観(瀧口ら[2001])

CACは、「ミニ組立工場 CACの開発」というテーマで、2000年に日本ロボット学会の実用化技術賞を受賞した。幸い生産量は順調に伸び、CACは6台まで増設し、現在もデンソーの関係会社で稼動中である。

## 2.4.2 CTL –Clustered Transfer Lines–

ABS (Antilock Brake System) は、凍結路のような摩擦係数の低い路面においても、制動性や操舵性を確保する制御システムである。システムの基本的な構成は、車輪の回転速度を測定する車輪速センサーと、車両速度と比較してブレーキのロック状態を判断するコンピュータ、そしてブレーキの制動力を制御するためブレーキフルードの圧力を変化させるアクチュエータからなっている。図 2-14 にアクチュエータの外観を示す。



図 2-14 ABS アクチュエータの外観

今でこそ ABS は自動車に標準装備となっているが、市場に登場した当初はオプション仕様であった。しかし、将来の標準仕様化は確実と判断した多くのメーカーが参入し、シェアの争奪戦を展開していた。したがって、生産数量の読みがきわめて難しく、部品加工から組立、検査まですべての工程を全自動 TL にするにはリスクがあった。

また ABS アクチュエータは、図 2-15 に示すように、自動車の車種（駆動方式やグレードなど）によって製品構造が異なり、そのことは同じ構成部品でも組立部品点数の差になって現れる。その結果、工程数つまり設備台数が異なる。このような特徴を把握した上で、同種の工程群（設備群）で 6 つのブロック（かしめ加工、共通部品加工、専用加工、ケース組立、基板組立、最終組立）を構成し、自動倉庫を共通のバッファとし、搬送コンベアで連結した生産システムが、CTL (Clustered Transfer Lines, 社内呼称「クラスターライン」) である (山崎ら[2004])。



図 2-15 ABS アクチュエータの構造と部品構成 (山崎ら[2004])

図 2-16 に *CTL* のレイアウトを示す. 6つのブロックはそれぞれ多種類に対応しているので, *FMS* を連結したシステムとも言えるが, 物の流れは *TL* のように整流化されている. すなわち「先入れ先出し」が守られている. また, ライントクトは敢えて統一せず, 各設備は経済的に許容される最高速タクトで設計製作されている. これは, 生産量が増えれば, ブロックの中のボトルネックとなっている設備の台数だけを増加させて対応できるようにするためである.

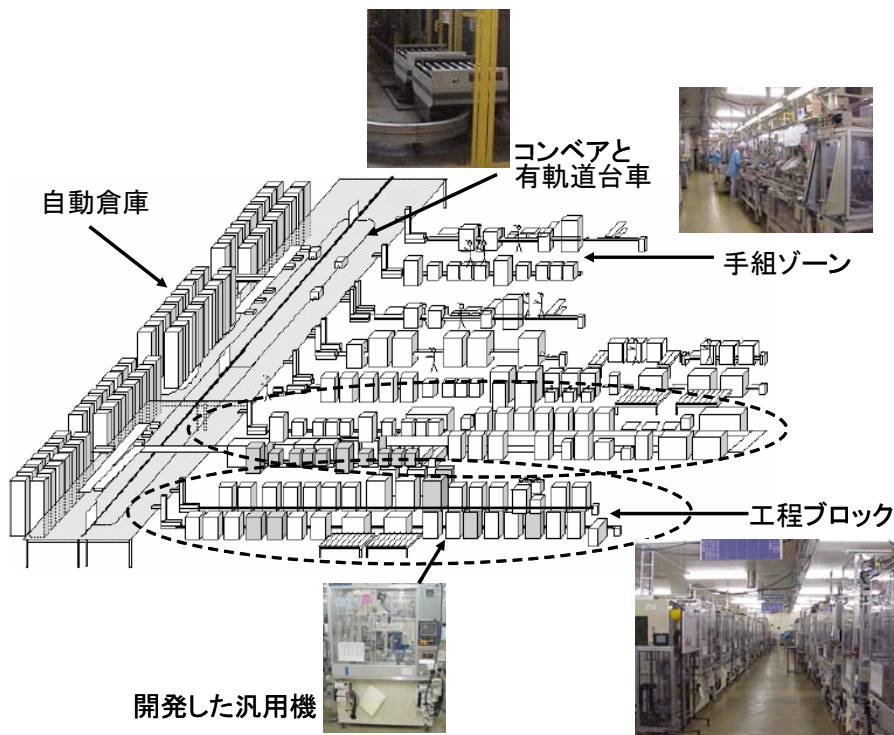


図 2-16 CTL のレイアウト (山崎ら[2004]に筆者が加筆)

CTL は、「生産量・種の変動に強いトランスファライン型生産システムの開発～自動車用 ABS 組立ラインへの適用～」というテーマで、2000 年に日本機械学会 FA 部門の技術業績賞を受賞した。

現在の CTL は、初期能力の倍以上にまで成長した。その状態で、2009 年の世界同時不況の波を受け、需要は最低で 40%程度まで落ち込んだが、複数台ある設備は必要最小限の設備以外は停止させて省エネをはかるなどし、生産性を極力落とすことなく稼働させることができた。また、CTL の生産計画の一部は見込み生産を含んでいたため、急な需要の減少によりリードタイム分の製品在庫の増加があったが、すべて自動倉庫に保管することができ、新たな在庫スペースを確保する必要もなかった。それらは需要の回復に応じて先入れ先出しを守りながら出荷することができた。

### 2.4.3 PPS –The Protean Production System–

カーエアコンは、デンソーの発展に大きく貢献した製品であり、現在も大きな生産規模を有する。

カーエアコンは、エアコンユニット（主要部品はエバポレータ、ヒータ、ブロー）とコンデンサ、コンプレッサ、配管・ホース類から構成されるシステム製品である。

カーエアコンユニットと自動車への装着状態を **図 2-17** に示す。

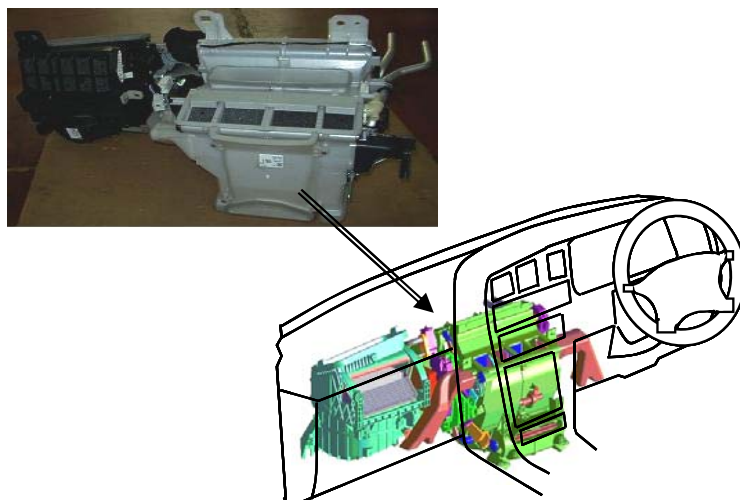


図 2-17 カーエアコンユニットと自動車への装着状態



カーエアコンユニットは、比較的サイズが大きく組立の方向も多いため、ロボットの活用が向いている。また、車種（車体の大きさ、グレード、ハンドル位置など）によって多種類となるため、工場内には車種ごとの専用ラインが複数存在している。自動車全体の売れ行きの変動は小さくても、車種ごとに売れ行きが異なると、車種専用ラインの負荷は大きく変動する。

そこで、各ラインの能力が増加あるいは減少のどちらにも可変となるだけでなく、複数のラインを保有する工場全体で使いまわすことができるという、まさに循環型社会の縮図といったコンセプトで考えられたのが、*PPS* (The Protean Production System, 社内呼称「循環型生産方式」)である(杉戸ら[2004], Sugito et al.[2004])。

*PPS*の外観を図 2-18 に示す。*PPS*はロボットを中心とした組立セルで構成されている。コンベア上の多種に対応できるフレキシブルな搬送パレットに対し、背面から供給される部品をロボットはハンドを交換しながら組み付けていく。

*PPS*の最大の特徴は、需要量の変動に対し、必要なセル数のシステムに短期間で変化できることである。



図 2-18 *PPS*の外観

図 2-19 に PPS の需要量変動対応の様子を示す。図 2-19(a) に示すように、少量生産時は、PPS はロボットを中心にした組立セル 1 台でも対応できる。1 台の PPS は全組立工程をこなすので AC である。多量生産に対応するときは、各組立セルが 1 工程ずつをおこなうので TL と同じである。その途中状態は一般的な FMS と言ってよい。主要開発技術としては、組立用搬送パレットの循環システム、(週末の土日を想定した) 2 日間で設備増減を完了できるロボットオフラインティーチングや機能分割型モジュール設備、設備機器プラグアンドプレイ技術などがある。対応のスピードが柔軟性の高さを示す好例である。

PPS は、1994 年に開発着手し、最初のシステムが稼動したのが 1998 年である。「循環型生産方式」というコンセプトで、2003 年に精密工学会の技術賞を受賞した。

PPS は、現在もエアコン工場内で 10 システムが稼動しており、図 2-19(b) に示すように、減産するラインから余剰セルを増産するラインへ転用するといった相互活用がなされている。

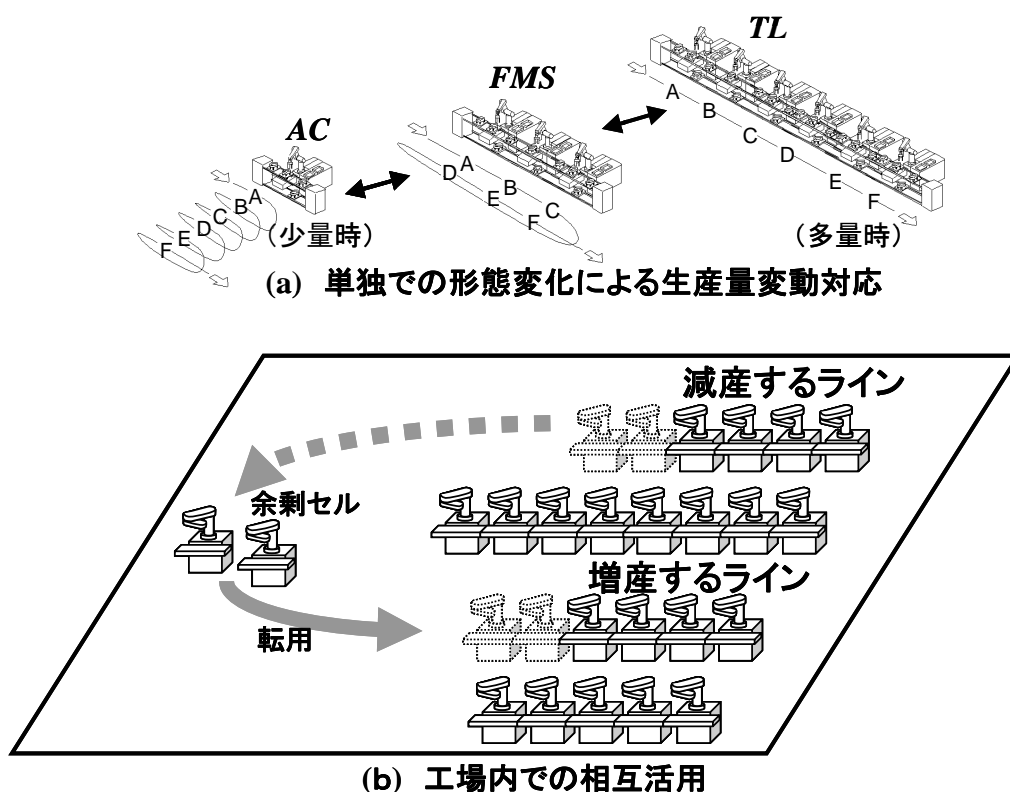


図 2-19 PPS による生産量変動対応 (杉戸 [2004])

## 第 2.5 節 需要量変動対応のための形態変化

従来の生産システムである *TL*, *FMS*, *AC* を、工程設計の視点で分類したものを図 2-20 に示す (小島[2004])。

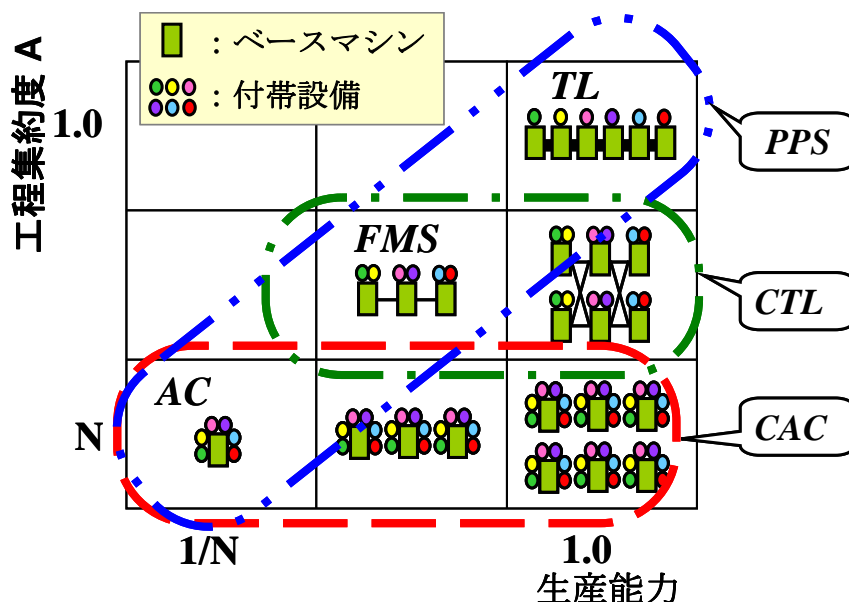


図 2-20 *FMS-F* の分類 (小島[2004]に筆者が加筆)

図 2-20 の中では、生産設備はベースマシン (ロボットや制御装置, 搬送装置のような生産システムを通じて共通な部分) と付帯設備 (部品供給装置やロボットハンド, 位置決め治具といった各工程に専用な部分) の組合せで模式的に表現している。横軸は生産能力を, 縦軸は工程集約度 *A* (the process Aggregation rate) を表している。工程集約度とは, 設備 1 台が受け持つ平均工程数のことである。全工程数を  $N$ , 設備台数を  $n$  とすれば, その生産システムの工程集約度  $A$  は,  $A=N/n$  で表される。設備 1 台で全工程を受け持つ *AC* は  $A=N$  (最大値) となり, 大量生産に向いている典型的な *TL* は  $n=N$  なので  $A=1$  (最小値) となる。 $A=1$  のときの *TL* の生産能力を 1 とすれば, *AC* の生産能力は  $1/N$  である。

*FMS-F* の量変動対応を形態変化でとらえると, 図 2-20 中の破線, 1 点鎖線, 2 点鎖線で囲んだ領域となる。*CAC* は「*AC* の台数の変化」, *CTL* は「*FMS* ブロック数の変化」, そして *PPS* は *AC* から *FMS*, *TL* へと変化するので, 「工程集約度の変化」である。デンソーで開発した *FMS-F* の形態変化は, これら 3 つに分類される。

*FMS-F* の変化可能性を表現するには, 上記の形態変化に加えて, 次の 2 つの能力

も考慮すべきであろう。すなわち生産能力の可変範囲 Ra (the variable Range of capacity) と可変数 Nu (the variable Number of capacity) である。それらの値を一覧にしたのが表 2-1 である。

表 2-1 から分かるように、Ra や Nu の値は、N に依存する。しかしながら、同じ N であっても工程設計者が選択する A によって完成する生産システムのタイプが変わる。形態変化のタイプが変わるのである。そういう意味で、Ra や Nu の値は A のとり得る値から決まるとも言える。

たとえば PPS は、1 台の AC と 1 本の TL の間を形態変化するので、その Ra は  $1/N$  から 1 までの値をとる。表 2-1 から、3 つの FMS-F の中では、CAC は少量から中量向き、CTL は中量から多量向き、PPS は少量から多量まで対応可能なことが分かる。

生産能力が 1 のときの設備台数を n とすれば、Nu の最大値は n なので、Nu の値も A のとり得る値から決まる。なお表 2-1 では、実際の値もカッコ付きで記載した。CAC は 3.1 で述べたように 6 台まで増設したので、これらを使えば、Nu は 1 ~ 6 台までの 6 分割、CTL は本研究でシミュレーションに用いたかしめ加工ブロックの 12 分割、PPS については、同じくシミュレーションに用いた 4 分割であるが、増加も減少も可能なのでプラスマイナスの記号を付加してある。

以上のことから、FMS-F は形態変化の能力を持つ柔軟な生産システムであると言える。すなわち FMS-F の本質は再形態変化可能性にあると考えられる。

表 2-1 FMS-F の変化可能性

FMS-F	形態変化	工程集約度 A	Ra	Nu
CAC	AC 台数変化	$1 \llsim \leq N$	$1/N \leq \sim \ll 1$	$1 \leq \sim \ll N$ (6)
CTL	ブロック数変化	$1 \leq \sim \ll N$	$1/N \ll \sim \leq 1$	$1 \ll \sim \leq N$ (12)
PPS	工程集約度変化	$1 \leq \sim \leq N$	$1/N \leq \sim \leq 1$	$1 \leq \sim \leq N$ ( $\pm 4$ )

## 第 2.6 節 第 2 章のまとめ

本研究では、開発した柔軟性評価法の妥当性をデンソーで開発・実用化された生産システムを用いて検証する。そのため、デンソー創立当時の事情やデンソーにおける生産システム開発の歴史を概略説明した後、第 3 章以降で述べる柔軟性評価法の確立と密接な関係がある事柄について 2 点述べた。

第 1 点は、デンソーの生産システム開発の母胎となった次期型研活動の特徴である。その特徴は、3 つある。

- (1) 製品開発グループと生産技術開発グループが、次期型製品の開発の初期の段階から、その製品構想（図案）を元に、連携しながら開発すること。
- (2) 次期型製品を運営する事業部トップと本社機能部である生産技術部のトップがリーダーとなっているため、常に経営的視点からの高いレベルでの判断がなされること。
- (3) 次期型研はプロジェクト体制がとられ、その推進において、機能横断的な体制やリスクマネジメントが早くから取り入れられていたこと。

これらのことは、時期的には後に CE や MOT と呼ばれるもののさきがけである。ただし、CE は期間短縮を主な目的とする手法であるが、デンソーの次期型研は、フロントローディング、アーリーソーシングを実施し目標の完成度を高めていることに特徴がある。

第 2 点は、開発された柔軟な生産システムの特徴である。

デンソーで開発された需要量の変化に対応する生産システムを代表例として、工程設計的な視点で分類すると、それらは形態変化の可能性に本質があることが分かった。

生産システムは製造業の経営戦略を具現化させたものである。デンソーで開発された生産システムは、次期型製品の競争力と密接な関係がある。製品技術の競争力だけでは、長期間にわたって製品の競争力は維持できない。さまざまな経営環境や需要の変化に柔軟に対応する能力が必要である。形態変化可能性は、その能力を発揮するための本質的な特徴である。

## 第3章 生産システムの柔軟性評価法

### －概念と“Reconfigurability”の提案－

第3章では、生産システムを一種の制御系とみなし、柔軟性評価の概念として、「生産システムの動特性評価」を提案し、基本的な需要量変動シナリオとLCC (Life Cycle Cost) の計算に基づく柔軟性評価法を導く。

この評価法をデンソーで開発した *FMS-F* に適用し、その有効性を詳細に確かめて、柔軟性評価の概念の正しさを予測する。

次に、上記の検証から得られた知見「生涯需要量とLCCの関係」を元に、*FMS-F* の柔軟性を示す“Reconfigurability”を定義する。

### 第3.1節 従来の柔軟性評価法とその課題

投資判断においては、生産システムの経済性が評価される。需要量の変動があれば、製造コストが上昇することが多い。たとえば需要量の増加に比例しない非効率な能力増強投資とか、需要量の減少に比例して作業員数を減らせないことなどのために、想定外の設備費や労務費が発生するからである。したがって、生産システムの柔軟性を評価するためには、柔軟性の違いによって変化する重要項目（設備費や労務費）が評価関数の中に含まれていることが望ましい。

*FMS* の投資の経済性を評価する方法としては、予測が確実な場合は、ある期間のキャッシュフローに関して正味現在価値を積算していく方法、予測が不確実な場合は、発生費用を確率変数で表し、計算機を用いて列挙法により現在価値の分布を評価する方法がある (Tempelmeier, Kuhn[1993]) が、*FMS* に限ったことではないであろうし、やはり経済性がその生産システムの柔軟性を示していることは間違いなさそうである。

自動車部品のように生産が長期間にわたる場合、生産システムの経済性を評価する手法としては、製造コストの累積値となるLCCを用いる方法が実用的であろう。実際、LCCを用いた生産システムの評価については多くの研究報告がある (Schuh et al.[2005], Tosatti[2006], Urbani[2006], Zaeh et al.[2006])。しかしながら、実例を用いて検証した例は少ない (Suarez et al.[1996], 伊東ら[1986], 大場ら[2003])。また、柔軟性のコンセプトとのつながりもその説明が不十分と思われる。

筆者らはこれまで、LCCを用いた生産システムの柔軟性評価法を開発し、デンソーで1990年代に開発し、現在も稼働している3つのFMS-Fに適用して検証してきた(Harashima, Ohno[2008], [2009]).

### 第3.2節 生産システムの柔軟性評価の概念

製造業にとって、経営環境の変化は需要の変化となって現れる。第1.1節でも述べたように、需要の変化とは、生産品の質の変化(製品に設計変更が加わったり、急に新製品が投入されたりすることなど)や量の変化(想定外の増産や減産)そしてコストの変化(競争力を確保するために大幅な原価低減を強いられることや原材料費の高騰)などである。

これらの変化に対し、たとえ技術的に対応できるとしても、採算が悪化すれば、それは対応できているとは言えないであろう。また、近年の需要の変化はますます速くなっている。競争相手に遅れをとれば、採算が悪化しないまでも、機会損失は大きく売上が減少してしまうことになる。

そういう意味で、生産システムが柔軟に対応できなければ、製造業の経営指標は悪化する。一般に経営指標とは、企業の収益性(売上高利益率など)や生産性(労働生産性など)、安全性(固定比率など)をはかる指標であるが、個別の生産システムに焦点を当てれば、そこでの経済性指標としてたとえば製造コストで代表してもそれほど間違いはないと思われる。

一般に生産システムは、需要の変化に対し、製造コストが常に最小となるように、段取りや設備改造、作業員数や稼働時間の増減、改善の積み上げなどあらゆる調整機能を駆使して対応しようとする。その様子は、制御系の働きと似ている。

比較的長期間にわたる需要の変化に対する、生産システムの柔軟性を評価する場合、時間的な評価も重要である。制御系の時間的な応答特性すなわち動特性は、周波数応答や過渡応答における利得や位相で表現される。生産システムの柔軟性も、制御系の動特性と同様の評価ができないだろうか。

そこで図3-1に示すように、生産システムを、需要の時間的変化を入力信号とし、経済性指標を出力信号とする、伝達関数 $G(S)$ を持つ制御系とみなし、その柔軟性を動特性として評価することを考える。



図 3-1 生産システムを制御系に見立てた場合の模式図

すなわち，生産システムの柔軟性評価の概念として，「生産システムの柔軟性評価とは，需要の時間的变化を入力，経済性指標を出力とした場合の，生産システムの動特性を評価することである」を提案する。

### 第 3.3 節 需要量の変動に対する柔軟性評価法

需要の変化の中で量の変化すなわち需要量の変動に対する柔軟性評価法を提案し，需要量の変動に柔軟に対応するように開発された *FMS-F* に適用して，その妥当性を検証することとする。

入力として，需要量の関数を  $V(t)$  とする。ここで  $t$  とは期 (term) たとえば長い方から年，期 (上期，下期の期)，四半期，月，週，日などのことである。 $V(t)$  は  $t$  の関数である。

一般に生産工場では，需要量の変動があると，生産システムの構成要素である，たとえば設備台数や作業者数，稼働時間などを調整する。常に製造コストが最小になるように調整することは現実問題としてなかなか難しい。

この調整結果が，製造コストになるので，製造コストも  $t$  の関数と考えら， $Cost(t)$  と表すことにする。また， $Cost(t)$  の  $t$  期までの積算値を  $LCC_t$  と表すことにする。

調整可能な生産システムの構成要素，たとえば設備台数や作業者数，稼働時間などの種類が多く且つその調整範囲が広いほど，その生産システムは柔軟性が高いことが予想される。したがって，それらを柔軟性パラメータと呼ぶことにする。

もし使える時間が無限にあるならば，柔軟性パラメータの種類は限りなく増えるが (極端な例として，製品競争力不足が原因の需要量の大幅減少に対して，製品開発からやり直し再度生産システムを構築して競争力のある製品を生産するといった方法があるが)，実際は時間が限られているため，柔軟性パラメータは種類も数値も有限である。このことは，需要量変動に対して短期間で対応できる方法を多数持つ



ている生産システムは柔軟性が高いことを示唆している。すなわち生産システムの柔軟性評価には、時間的な応答特性を調べることが重要であろう。

このことも提案した概念の中で動特性と言っている理由である。

図 3-2 に示すように、生産システムを、 $V(t)$  を入力信号、 $Cost(t)$  や  $LCC_t$  を出力信号とする伝達関数と考えれば、生産システムの柔軟性評価は、制御系における動特性の評価と等価であると考えられる。

制御系の動特性は、一般に周波数応答や過渡応答における利得や位相で表現される。これを生産システムの柔軟性に置き換えれば、さまざまな需要量変動（周波数）に対し、 $Cost(t)$  または  $LCC_t$ （利得）が最小となるように柔軟性パラメータを最適化することであり、得られた  $Cost(t)$  または  $LCC_t$ （利得）を評価することが、生産システムの柔軟性評価になると考えられる。

動特性を評価する前に、基本的な需要量変動シナリオに対する  $FMS\cdot F$  の柔軟性を評価する。

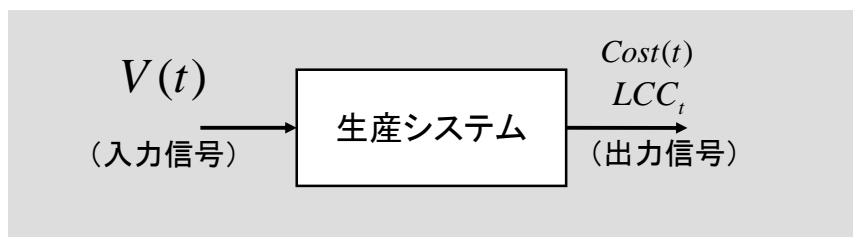


図 3-2 需要量の変動に対する生産システムの柔軟性評価の概念図

### 3.3.1 製造コストと LCC の定式化

製造原価の構成には、「材料費、労務費そして経費」、「直接費と間接費」、「変動費と固定費」などの表現方法がある。生産システムに関わる製造原価を正確に論じるためには、各費目の構成要素を緻密に積み上げる必要がある（高桑[1995]）。しかし、本研究が目的とする  $FMS\cdot F$  の柔軟性を評価するためには、生産方式に関係する費目だけを抽出してもかまわないであろう。たとえば、材料費の中で、製品の一部になる購入部品のような費用は、生産方式と関連が薄いため除外してよいであろう。また、間接費の中でも、配賦の考え方により他の要因が入ってしまうものは、考慮しなくてよいと思われる。

実際、デンソーでは生産方式を選択する場合、コスト比較には、原価企画の観点

から設備償却費，労務費（生産方式と直接関係し工数で計算されるもの）そして間材経費（その生産ラインに必要な副資材や治具，刃具，保全，エネルギーなどの費用）の3つを考慮することを基本としている．開発費用や物流費，品質コスト，環境負荷などを考慮することもあるが，特別な場合である．したがって， $Cost(t)$  または  $LCC_t$  にはこれら3つの値を用いることとする．そして，以下  $Cost(t)$  を組立加工費と呼ぶことにする．

なお，設備償却費について補足説明しておく．自動車部品の生産は，品質確保のため自動化が必要とされ，製造原価に占める設備償却費比率が高い．そこで，投資リスクを低減するため， $FMS\text{-}F$  には，量的能力に関する初期投資は必要最小限に抑制し，その後の需要量の増加には追加投資で対応するという思想が込められている．これが生産システムの形態変化となって現れるのであるが，製造原価的には，以下のように解釈することも可能である．通常，生産設備は初期に一括投資されるため，設備償却費は固定費として扱われる．ところが， $FMS\text{-}F$  は，操業度に応じて追加投資できるように工夫したことで，あたかも変動費のようになっている．必要最小限に抑制した初期投資も生産開始時の数量に対応する投資とみなせば， $FMS\text{-}F$  の設備償却費は全生産期間にわたって変動費的に計算できるようにする必要がある．

第  $t$  四半期における生産システムの組立加工費を式 (3-1) で，また  $t$  四半期までの生産システムの LCC を式 (3-2) で定義する．

$$Cost(t) = \frac{I_t}{V(t)} + mc_t + ex_t \quad (3-1)$$

$$LCC_t = \sum_{j=1}^t \frac{1}{(1+\rho)^j} \{I_j + V(j)(mc_j + ex_j)\} \quad (3-2)$$

ここで，各記号の意味は以下のとおりである．

$I_t$  : 第  $t$  四半期での設備償却費

$V(t)$  : 需要関数

$mc_t$  : 第  $t$  四半期での製品 1 台当りの労務費

$ex_t$  : 第  $t$  四半期での製品 1 台当りの間材経費

$\rho$  : 四半期単位の割引率

四半期ごとの積算値にした理由は，事例として取り上げた  $FMS\text{-}F$  の追加や改造に必要とする期間が，準備を含めておよそ3ヶ月だからである．

減価償却については，自動車部品の生産は，短くても自動車のモデルチェンジま

での期間（3～5年）継続し、たいていは同じ自動車部品が多くのモデルに適用されて長期間に及ぶため、今回は7年定額とした。

また、LCCの評価期間については、補給のための生産まで考慮すればきわめて長期間になってしまうが、現実には作り溜めをして生産システムを廃却することが多いので、減価償却期間を超える10年間（ $t=40$ ）で評価することとした。

現在価値計算のための割引率は、リスクを考慮して年率10%とした。さらに、四半期単位でLCCの計算ができるように、四半期単位での割引率 $\rho=0.024114$ を次式から設定した。

$$(1+\rho)^4=1.1 \quad (3-3)$$

実際の割引率は、その企業における資本にかかるコストと負債にかかるコストの加重平均によって決定される。資本にかかるコストとしては、長期国債利回りやリスクプレミアムなどが考慮される。いずれにせよ、経済成長が鈍化した現代の先進国においては、年率10%の割引率には違和感があるが、*FMS-F*を開発したのが80年代後半から90年代半ばであったこと、および*FMS-F*の分割投資効果を確認するため、敢えてこの数値を使うこととする。

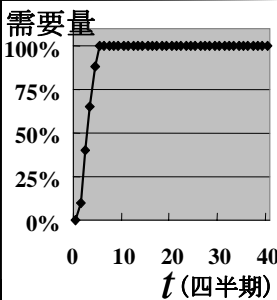
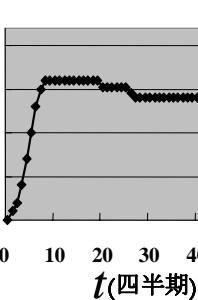
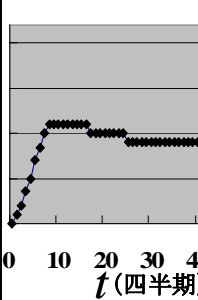
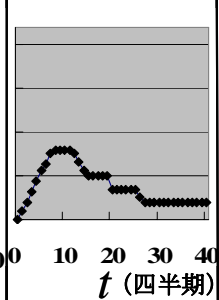
### 3.3.2 需要量変動シナリオの定義

次に、需要量の基本的な変動モデルとして設定した「シナリオ1～4とその関数 $V_1(t) \sim V_4(t)$ 」を表3-1に示す。

次期型研の目的は、競争力のある次期型製品を開発して現状のシェアをアップさせる（売上を増やす）ことと、生産期間中に起こる様々な需要の変化（本研究では需要量の変動に着目）に対応できる生産システムを開発することである。

4つのシナリオは、次期型研で議論される需要量予測のモデルを表している。シナリオ1は、開発した次期型製品は競争力があって、10年間（=40四半期）需要量100%を維持している。ここで100%とは、シェアアップの目標数量である。シナリオ2は、結果として他社が開発してきた製品と同等の競争力で、現状シェアを何とか維持している状態である。ただし、新車効果の減少により需要量は若干低下するものとしている。シナリオ3は、他社の開発品よりも競争力が劣ったため現状シェアを失った状態を、シナリオ4は、品質問題の発生や需要の変化に対応できないことによる機会損失などにより、さらに需要量が減少していく状態を表している。

表 3-1 需要量変動シナリオ

シナリオ $i$	1	2	3	4
需要量関数 $V_i(t)$				
生涯需要量	1.0	0.72	0.47	0.21
製品競争力	他社を凌駕	他社と同等	他社より劣る	他社より劣る
製造競争力				変化に対応できず

なお、生涯需要量（＝10年間の総需要量）は、シナリオ1を1.0として、以下その比率で示している。

### 3.3.3 柔軟性評価手順

自動車部品の生産における従来の代表的な生産システムは、少量であれば  $ML$ （Manual Line:手組ライン）であり、量産であれば  $TL$ であった。需要量の変動に対して、 $FMS-F$ の柔軟性を評価するため、 $ML$ や $TL$ との比較は重要である。

以下に、柔軟性評価の手順を示す。

【手順1】 各  $FMS-F$ で流動する製品と同じ製品を組み立てる仮想  $ML$ （以下単に  $ML$ と呼ぶ）と仮想  $TL$ （以下単に  $TL$ と呼ぶ）を工程設計する。これにより設備投資額や作業員（あるいはオペレータ）数、間材経費が決定される。

【手順2】 式(3-1)から第  $t$  四半期における各生産システムの組立加工費（＝設備償却費＋労務費＋間材経費） $Cost(t)$ を計算する。

【手順3】 式(3-2)から各生産システムの  $LCC_i$ を計算する。

【手順4】 計算した各生産システムの  $Cost(t)$ は、比較対象である  $TL$ の需要量が100%の時の組立加工費  $P_{TL}$ で割って規準化し、 $LCC_i$ も比較対象の  $TL$ の一括投資額  $I_{TL}$ で割って規準化する。

【手順5】 規準化した  $Cost(t)/P_{TL}$ 及び  $LCC_i/I_{TL}$ について、第1から第40四半

期までをグラフ化し、各生産システムの基本的な動的性能を分析するとともに評価法の妥当性を検証する。

【手順 6】  $LCC_{40}/I_{TL}$  を計算し、各シナリオに対する各生産システムの柔軟性を比較する。値が小さいほど柔軟性が高いと判断する。

$ML$ や $TL$ については、次の3.3.4でさらに詳細を述べる。

### 3.3.4 評価に用いた各生産システムの柔軟性パラメータ

手順で述べたように、 $FMS\text{-}F$ の柔軟性を評価するため、各 $FMS\text{-}F$ と同じ製品を組立・加工する $ML$ と $TL$ の仕様を工程設計した。 $ML$ も $TL$ も80年代前半まで当社でよく見られたコンベアラインをベースにした。

始めに、共通事項について述べる。

設備は内製が基本である。投資効果があれば自動化するのが原則である。投資効果を左右するのは技術力と生産量である。技術的に自動化できても、たとえば生産量が30000(台/月)以下の場合には半自動機あるいは治工具有意した $ML$ となることが多い。それ以上なら $TL$ となることが多い。

$ML$ の場合、需要量の増減に対しては、作業員数や稼働時間の増減で対応する。需要量の大幅な増加に対しては、 $ML$ の本数を増やす。

$TL$ の場合は、最初から想定した量産規模の設備構成となる。すなわち一括投資である。専用設備が高速のコンベアで直結されている。専用設備は多種類に対応しており、生産管理は自動でなされ、機種の変更があればタクトタイム内で自動段取りされる。技術が未確立のため自動で組立や検査ができない工程には作業員が入る。他にライン監視、部品や材料の投入に作業員が必要である。これらの $TL$ に必要な作業員をオペレータと呼ぶことにする。

一般に生産現場には、作業員が10名程度いると1名の管理監督者が必要である。管理監督者はその生産現場の仕事以外の仕事(たとえば工場全体に関わる仕事など)もしているため、労務費の計算では0.5人として数えるものとする。したがって、 $ML$ あるいは $TL$ の、1直あたり作業員数またはオペレータ数 $P$ (人/直)は、管理監督者を含めて、その最小単位は0.5とする。

労務費(円/台)は、工数 (Man hour)  $MH$ (人・秒/台)とレート $W$ (円/秒)から、また工数は、稼働率 (Operation Ratio)  $OR$ (% : 計算は比の値を使用)と月間稼働時

間 (Operation time)  $OT$ (時間/月), 月間需要量  $V$ (台/月)などから次式で計算されるものとする.

$$\text{労務費} = MH \times W \quad (3-4)$$

$$\text{工数} = \frac{P \times OT \times 3600}{OR \times V} \quad (3-5)$$

$W$ は, 従業員の種別 (正社員とそれ以外), 稼働シフト (1直か2直か) などによって変わり, 毎年見直される数値である. たとえば, 1直のときを1.00(円/秒)とすれば, 2直のときは約1.15(円/秒)と割高になる. 1直のときでも, 月間稼働時間が増えて休出や残業時間の比率が増せば, 1.00と1.15の中間の数値になる. 次の第4章では, 月間稼働時間の多さによってレートを選択するが, 本第3章では, 提案する評価法の基本的な妥当性を検証するので,  $W$ は中間の1.07に固定する.

$OR$ は, 設備稼働率によって左右されることが多いので, 設備の規模や自動化度, 直結度を考慮し,  $TL$ を85(%),  $FMS-F$ を90(%),  $ML$ を95(%)と仮定する.

$OT$ は, 1直で残業0のとき8(時間/日)×20(日/月)=160(時間/月)とし, 生産能力や工数を決定する標準月間稼働時間は, 2直で残業20(時間/月)を加味した, {8(時間/日)×20(日/月)+20(時間/月)}×2=360(時間/月)とする.

なお, 需要量によっては, 2直では定時割れ (残業0でも時間が余ること), 1直では労働基準法の制限 (80時間/月) を越える残業になってしまうことが起こり得る.  $W$ と同様に, 次の第4章ではそのようなことが極力生じないように柔軟性パラメータの組合せを設定するが, 本第3章では, 提案する評価法の基本的な妥当性を検証するので,  $OT$ としては, 稼働シフト1~2直で必要な月間稼働時間0~360(時間/月)を選択できるものとする.

設備投資額は原則として実績値を用い, 仮想の生産システムについては見積もったが, 手順で述べたように, デンソーで最も実績のある  $TL$ の一括投資額で規準化することで, 各生産システムを相対評価するので詳細は述べない. 間材経費は,  $FMS-F$ ,  $ML$ ,  $TL$ にかかわらずほぼ同額であり, また製造原価に占める割合は数%と低いので, 本研究で考慮してはいるが, 詳細は述べない.

また, 各  $FMS-F$ ,  $ML$ ,  $TL$ における月間稼働時間が360時間のときの生産能力が, 3.3.2で定義した需要量変動シナリオの需要量100%に相当する.

需要量の変動に対して, 可能な限り製造コストが最小となるように, 生産システムの構成要素を変更し, それらを柔軟性パラメータと呼ぶことは, この第3.3節の冒

頭で述べた。本研究で注目する柔軟性パラメータとは、設備台数（セル数や設備の規模）、作業員数やオペレータ数、月間稼働時間のことである。CAC, CTL, PPSとそれぞれの比較対象となるML, TLの柔軟性パラメータを以下順番に説明する。

### (1) CACおよび比較対象となるML, TLの柔軟性パラメータ

需要量に対するCACおよび比較対象となるML, TLの対応方法を表3-2に示す。

CAC1セルの生産能力は月間稼働時間360時間で8000台である。6セル稼働しているため、需要量の変動を8000台単位で最大48000までに設定した。

CACは、需要量に対し、先ず最大能力を確保するためセル数を決め、次にすべてのセルを同時稼働させるのに必要なオペレータ数を決める。セル数に比例してオペレータ数が増えていないのは、直線状にレイアウトせず、オペレータの動線を最適化しているからである。最後に需要量を生産するのに必要な月間稼働時間を、稼働シフトとして1直～2直の範囲（最大360時間）で必要な残業時間と組み合わせて決める。共通事項で述べたように、2直では定時割れ、1直では労働基準法の制限（80時間/月）を越える残業時間になることがあるが、本第3章では無視する。当然、その場合、オペレータ数も変更しない。需要量が減少した場合、必要なセル数を必要なオペレータ数で必要な月間稼働時間だけ稼働させるものとし、余分なセルは残すものとする（減価償却は継続する）。

表3-2 需要量に対するCACおよび比較対象となるML, TLの対応方法

需要量 (台/月)	CAC			ML			TL		
	セル数 (台)	オペレータ数 (人/直)	稼働時間 (時間/月)	ラインの 規模	作業員数 (人/直)	稼働時間 (時間/月)	ライン数 (本)	オペレータ数 (人/直)	稼働時間 (時間/月)
~8000	1	1.0	0~360	1	2.0	0~360	1	1.5	0~360
8001 ~16000	2	2.0	↑	2	3.5	↑	↑	2.5	↑
16001 ~24000	3	2.5	↑	3	5.5	↑	↑	3.0	↑
24001 ~32000	4	3.0	↑	4	7.0	↑	↑	3.0	↑
32001 ~40000	5	3.5	↑	5	8.5	↑	↑	3.5	↑
40001 ~48000	6	4.0	↑	6	10.0	↑	↑	3.5	↑

*ML*は、需要量の増大に対し拡張可能な直線コンベアラインとする。需要量にほぼ比例する形で半自動機や治工具を増やす。表の中でラインの規模を示しているが、これは設備費がほぼ比例して増加することを意味している。次に、必要な作業員数を決める。直線コンベアラインなので、生産能力は作業員数にほぼ比例する。最後に必要な月間稼働時間を、稼働シフトとして1直～2直の範囲（最大360時間）で、必要な残業時間と組み合わせて決める。需要量が減少した場合、必要なライン規模に工程を片寄せし、必要な作業員数で必要な月間稼働時間だけ稼働させるものとし、余分な半自動機や治工具は残すものとする（減価償却は継続する）。

*TL*は、オペレータ数が3.5(人/直)で月間稼働時間が360時間のとき48000(台/月)能力となるラインを1本、一括投資するものとする。需要量の減少に合わせて、先ず稼働時間を減らすが、1直でも定時割れする場合は、表のようにオペレータ数も減らす。稼働時間と異なり、オペレータ数の減少と生産能力の減少は比例しない。その比率は、経験に基づいて決定した。設備の部分的な稼働停止や他への転用はできないものとする（減価償却は継続する）。

オペレータや作業員数は離散値であるが、今回は、月間稼働時間は連続的に設定可能とした。したがって、労務費を決定するための工数は、需要量に対して連続的に設定可能である。本第3章では評価法の基本的な妥当性を検証するのが目的なので、計算を容易にすることも含めて工数近似式を以下のように決定した。

代表的な需要量である8000, 16000, 24000, 32000, 40000, 48000(台/月)に対し、表で設定した各生産システムのオペレータまたは作業員数において、月間稼働時間を360時間としたときの工数を式(3-5)から計算する。次に、それらの点を需要量と工数の関係グラフにプロットし、エクセルのソルバー機能を用いて最小二乗法により、工数の1次近似式を求めた。

求めた工数の1次近似式を、*ML*, *TL*, *CAC*の順に以下に示す。

$$MH = 336.51 - 0.0011572V \quad (3-6)$$

$$MH = 307.27 - 0.0044131V \quad (3-7)$$

$$MH = 196.20 - 0.0017036V \quad (3-8)$$



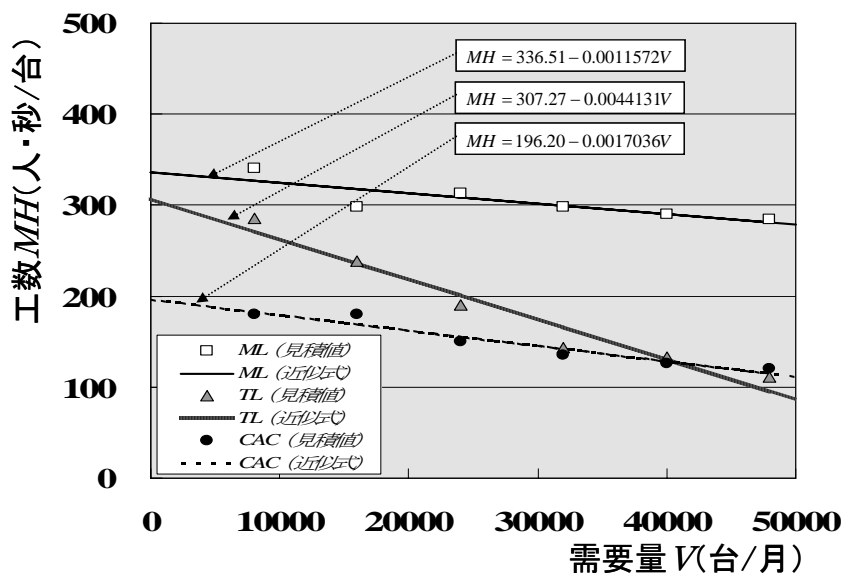


図3-3 需要量に対するCACおよび比較対象となるML, TLの工数近似直線

図3-3に、各生産システムに対する、計算して求めた見積値と、最小二乗法で求めた1次近似式のグラフを示す。

MLにおいては、需要量の減少にしたがって作業員数をアナログ的に減らすことが可能ならば、工数は一定になる筈であるが、実際には過剰な作業員数で対応せざるを得ず、負の傾きをもった直線で近似される。TLにおいては、需要量の減少があっても余剰な設備を撤去して設備の全長を短縮するようなことができないため、MLよりも負の傾きが大きな直線で近似される。一方CACにおいては、需要量の減少にしたがって余剰となるセルを停止させたり、レイアウトを変更したりすることも可能なため、TLよりも負の傾きは小さく、しかも自動化度が高い分MLよりも低い値の直線に近似されている。

## (2) CTLと比較対象となるML, TLの柔軟性パラメータ

CTLは、6本の工程ブロックから成り立っているが、コンセプトはすべて同一なので、評価の便宜を考え、かしめ加工ブロック（以下単純にCTLと表現する）のみを評価対象とした。

かしめは塑性加工の一種である。アルミ製のハウジングに挿入された部品の周囲をかしめパンチで加圧変形させることにより、部品を固定させる加工法である。かしめの対象となる部品としては、ABSの重要機能部品である電磁弁や、外部からハ

ウジングに穴加工した油路を塞ぐためのボールがあり、ABSの種類によって部品点数のバリエーションがさまざまある。すなわち、需要量が増えれば同一加工設備の台数を増加させて対応することになる。

需要量に対するCTLおよび比較対象となるML, TLの対応方法を表3-3に示す。

CTLかしめ加工ブロックの生産能力について説明する。CTLは、立ち上がり初期の設備構成は9台で、その生産能力は月間稼働時間360時間で22000台であった。各設備のサイクルタイムは、意図的に許容設備費内で最速に設計してあるため、全設備統一されているわけではない。需要量の増加に合わせて、ボトルネックとなる設備から順に増設する。最大生産能力は月間稼働時間360時間で84000台である。実際にある時期に到達したレベルである。表に示すように、理論的には12段階の能力設定が可能である。

CTLは、需要量に対し、先ず最大能力を確保するため設備数を決め、次にすべての設備を同時稼働させるのに必要なオペレータ数を決める。最後に需要量を生産

表3-3 需要量に対するCTLおよび比較対象となるML, TLの対応方法

需要量 (台/月)	CTL			ML			TL		
	設備数 (台)	オペレータ数 (人/直)	稼働時間 (時間/月)	設備数 (台)	作業員数 (人/直)	稼働時間 (時間/月)	ライン数 (本)	オペレータ数 (人/直)	稼働時間 (時間/月)
~22000	9	2.0	0~360	6	3.0	0~360	1	2.5	0~360
22001 ~29000	10	2.5	↑	7	4.0	↑	↑	2.5	↑
29001 ~31000	11	3.0	↑	8	4.0	↑	↑	3.0	↑
31001 ~35000	12	3.0	↑	9	4.5	↑	↑	3.0	↑
35001 ~45000	13	3.5	↑	10	5.5	↑	↑	3.5	↑
45001 ~47000	14	3.5	↑	11	6.0	↑	↑	3.5	↑
47001 ~52000	15	4.0	↑	12	6.5	↑	↑	4.0	↑
52001 ~57000	17	4.0	↑	↑	7.0	↑	↑	4.0	↑
57001 ~62000	18	4.0	↑	13	7.5	↑	↑	4.0	↑
62001 ~67000	19	4.5	↑	14	8.0	↑	↑	4.5	↑
67001 ~70000	20	4.5	↑	15	9.0	↑	↑	4.5	↑
70001 ~84000	21	4.5	↑	16	10.0	↑	↑	5.0	↑

するのに必要な月間稼働時間を、稼働シフトとして1直～2直の範囲（最大360時間）で必要な残業時間と組み合わせて決める。共通事項で述べたように、2直では定時割れ、1直では労働基準法の制限（80時間/月）を越える残業時間になることがあるが、本第3章では無視する。当然、その場合、オペレータ数も変更しない。需要量が減少した場合、必要な設備数を必要なオペレータ数で必要な月間稼働時間だけ稼働させるものとし、余分な設備は残す（減価償却は継続する）。実際には、複数台ある設備の中から（設備稼働率の実態やオペレータの動線などを考慮して）任意の設備を停止させた状態で、システム全体を稼働させることができる。

*ML*は、需要量の増大に対し拡張可能な直線コンベアラインとする。かしめ加工ブロックは単純作業が少ないので、需要量にほぼ比例する形で半自動機を増やす。表の中でその設備数を示している。半自動機の設備費はすべて見積もってある。次に、必要な作業員数を決める。直線コンベアラインなので、生産能力は作業員数にほぼ比例する。最後に必要な月間稼働時間を、稼働シフトとして1直～2直の範囲（最大360時間）で、必要な残業時間と組み合わせて決める。需要量が減少した場合、必要なライン規模に工程を片寄せし、必要な作業員数で必要な月間稼働時間だけ稼働させるものとし、余分になった半自動機は残す（減価償却は継続する）。

*TL*は、オペレータ数が5(人/直)で月間稼働時間が360時間のとき84000(台/月)能力となるラインを1本、一括投資するものとする。需要量の減少に合わせて、先ず稼働時間を減らす。さらに減少すれば、表のようにオペレータ数も減らす。稼働時間と異なり、オペレータ数の減少と生産能力の減少は比例しない。その比率は、経験に基づいて決定した。設備の部分的な稼働停止や他への転用はできないものとする（減価償却は継続する）。

オペレータや作業員数は離散値であるが、今回は、月間稼働時間は連続的に設定可能とした。したがって、労務費を決定するための工数は、需要量に対して連続的に設定可能である。本第3章では評価法の基本的な妥当性を検証するのが目的なので、計算を容易にすることも含めて工数近似式を以下のように決定した。

代表的な需要量である22000, 29000, 31000, 35000, 45000, 47000, 52000, 57000, 62000, 67000, 70000, 84000(台/月)に対し、表で設定した各生産システムのオペレータまたは作業員数において、月間稼働時間を360時間としたときの工数を式(3-5)から計算する。次に、それらの点を需要量と工数の関係グラフにプロ

ットし、エクセルのソルバー機能を用いて最小二乗法により、工数の1次近似式を求めた。

求めた工数の1次近似式を、*ML*, *TL*, *CTL*の順に以下に示す。

$$MH = 190.20 - 0.00035286V \quad (3-9)$$

$$MH = 176.76 - 0.0011519V \quad (3-10)$$

$$MH = 155.41 - 0.00092621V \quad (3-11)$$

図3-4に、各生産システムに対する、計算して求めた見積値と、最小二乗法で求めた1次近似式のグラフを示す。

*ML*においては、需要量の減少にしたがって作業員数をアナログ的に減らすことが可能ならば、工数は一定にすることが可能であるが、実際には過剰な作業員数で対応せざるを得ず、負の傾きをもった直線で近似される。*TL*においては、需要量の減少があっても余剰な設備を撤去して設備の全長を短縮するようなことができないため、*ML*よりも負の傾きが大きな直線で近似される。一方*CTL*においては、需要量の減少にしたがって余剰となる設備を停止させることが可能なため、*TL*よりも負の傾きは小さく、しかも自動化度が高い分*ML*よりも低い値の直線に近似されている。ただし、*CAC*のようにレイアウトまで変更することはできないため、負の傾きは*ML*よりも大きい。

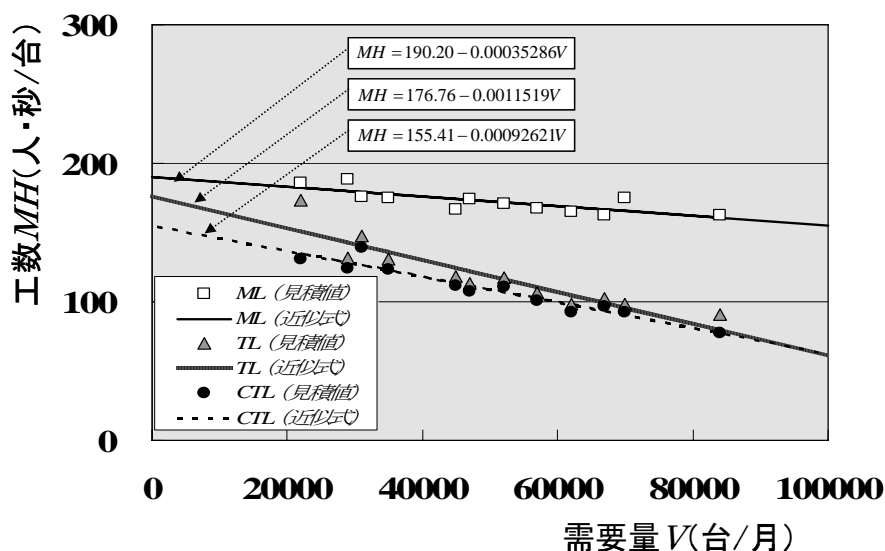


図3-4 需要量に対する*CTL*および比較対象となる*ML*, *TL*の工数近似直線

### (3) PPSおよび比較対象となる ML, TL の柔軟性パラメータ

需要量に対する PPS および比較対象となる ML, TL の対応方法を表 3-4 に示す。PPS にはさまざまなタイプがあるが、今回は 8セルを連結したときに最大生産能力を發揮するシステム（以下これを単に PPS と表現する）を選択した。1セルのとき、生産能力は月間稼働時間 360 時間で 15000 台である。工程集約度を半減させながら、2セル連結、さらに 4セル連結することで能力は 2倍、4倍となる。このシステムは 8セル連結したときに、部品供給など周辺の合理化を加えることで、最大生産能力は 140000 台となった。

PPS は、需要量に対し、先ず最大能力を確保するためセル数を決め、次にそれらセルを連結したシステムを稼働させるのに必要なオペレータ数を決める。最後に需要量を生産するのに必要な月間稼働時間を、稼働シフトとして 1直～2直の範囲（最大 360 時間）で必要な残業時間と組み合わせて決める。CAC や CTL と同様に、2直では定時割れ、1直では労働基準法の制限（80 時間/月）を越える残業時間になることがあるが、本第 3 章では無視する。当然、その場合、オペレータ数も変更しない。

表 3-4 需要量に対する PPS および比較対象となる ML, TL の対応方法

需要量 (台/月)	PPS			ML			TL		
	セル数 (台)	オペレータ数 (人/直)	稼働時間 (時間/月)	ライン数 (本)	作業人数 (人/直)	稼働時間 (時間/月)	ライン数 (本)	オペレータ数 (人/直)	稼働時間 (時間/月)
～15000	1	2.0	0～360	1	3.0	0～360	1	2.5	0～360
15001 ～30000	2	4.5	↑	↑	6.0	↑	↑	4.5	↑
30001 ～60000	4	8.0	↑	2	11.5	↑	↑	8.0	↑
60001 ～90000	8	11.0	↑	3	16.5	↑	↑	11.0	↑
90001 ～140000	↑	14.0	↑	4	23.5	↑	↑	14.0	↑
60001 ～90000	↑	11.0	↑	3	16.5	↑	↑	11.0	↑
30001 ～60000	4※1	8.0	↑	2	11.5	↑	↑	8.0	↑
15001 ～30000	2※2	4.5	↑	1	6.0	↑	↑	4.5	↑
～15000	1※3	2.0	↑	↑	3.0	↑	↑	2.5	↑

※1 減産時は、設備転用により、セル数も 8 から 4 へ低減可能。  
 ※2 減産時は、設備転用により、セル数も 4 から 2 へ低減可能。  
 ※3 減産時は、設備転用により、セル数も 2 から 1 へ低減可能。

表の下に注記で示しているように、いったん8セルを連結した*PPS*は、60000台以下に需要量が減少した場合、必要なセル数だけを残して余分なセルを外すことが可能である。余分なセルは能力増強を必要とする他の*PPS*へ連結させるため、減価償却は他の*PPS*で継続することになる。したがって、柔軟性評価の場合は、ここで負の投資がなされたとする。必要なセル数だけ連結した*PPS*を、必要なオペレータ数で、必要な月間稼働時間だけ稼働させるものとする。再び需要量が増えた場合は、需要量が減少した*PPS*から余剰のセルをもらって連結させることができる。

*ML*は、実績のある生産能力が30000(台/月)の半自動コンベアラインである。設備費も実績値を使用した。*ML*は、需要量に対して、先ずライン数を決める。次に、必要な作業員数を決める。作業員数がライン数に比例していないのは、レイアウトを工夫したり、投入や取り出し部分を共通化したりするなどの改善を加えているからである。最後に必要な月間稼働時間を、稼働シフトとして1直～2直の範囲(最大360時間)で、必要な残業時間と組み合わせて決める。需要量が減少した場合、必要なライン数を、必要な作業員数で、必要な月間稼働時間だけ稼働させるものとし、余分なラインは残す(減価償却は継続する)。

*TL*は、オペレータ数が14(人/直)で月間稼働時間が360時間のとき140000(台/月)能力となるラインを1本、一括投資するものとする。需要量の減少に合わせて、先ず稼働時間を減らすが、1直でも定時割れする場合は、表のようにオペレータ数も減らす。稼働時間と異なり、オペレータ数の減少と生産能力の減少は比例しない。その比率は、経験に基づいて決定した。設備の部分的な稼働停止や他への転用はできないものとする(減価償却は継続する)。

オペレータや作業員数は離散値であるが、今回は、月間稼働時間は連続的に設定可能とした。したがって、労務費を決定するための工数は、需要量に対して連続的に設定可能である。本第3章では評価法の基本的な妥当性を検証するのが目的なので、計算を容易にすることも含めて工数近似式を以下のように決定した。

代表的な需要量である15000、30000、60000、140000(台/月)に対し、表で設定した各生産システムのオペレータまたは作業員数において、月間稼働時間を360時間としたときの工数を式(3-5)から計算する。次に、それらの点を需要量と工数の関係グラフにプロットし、エクセルのソルバー機能を用いて最小二乗法により、工数の1次近似式を求めた。

求めた工数の1次近似式を， $ML$ ， $TL$ ， $PPS$ の順に以下に示す．

$$MH = 281.72 - 0.00036519V \quad (3-12)$$

$$MH = 256.57 - 0.00076984V \quad (3-13)$$

$$MH = 215.96 - 0.00047697V \quad (3-14)$$

図3-5に，各生産システムに対する，計算して求めた見積値と，最小二乗法で求めた1次近似式のグラフを示す．

$ML$ においては，需要量の減少にしたがって作業員数をアナログ的に減らすことが可能ならば，工数は一定になる筈であるが，実際には過剰な作業員数で対応せざるを得ず，負の傾きをもった直線で近似される． $TL$ においては，需要量の減少があっても余剰な設備を撤去して設備の全長を短縮するようなことができないため， $ML$ よりも負の傾きが大きな直線で近似される．一方 $PPS$ においては，需要量の減少にしたがって，余剰となるセルを撤去し，設備の全長を短縮することが可能なため， $TL$ よりも負の傾きは小さく，しかも自動化度が高い分 $ML$ よりも低い値の直線に近似されている．

次の第3.4節で，柔軟性評価の結果と考察を述べる．

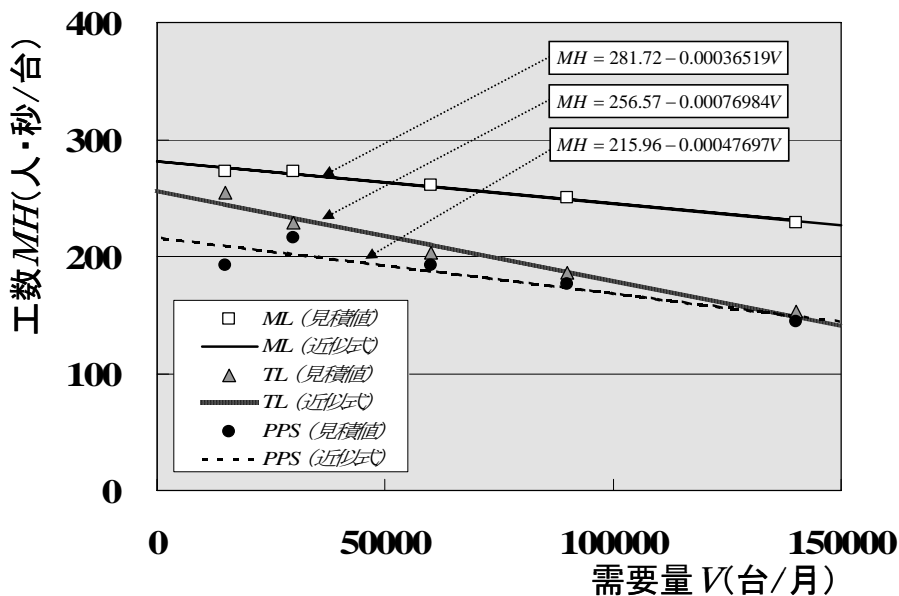


図3-5 需要量に対するPPSおよび比較対象となる $ML$ ， $TL$ の工数近似直線

## 第 3.4 節 柔軟性評価結果と考察

前節の 3.3.2 で述べた 4 つの基本的な需要量変動シナリオに対し、3.3.3 で述べた評価手順に従って、3.3.3 で述べた柔軟性パラメータの範囲での、3 つの *FMS-F* の柔軟性評価をおこなう。

計算するのは、式 (3-1) に基づく各生産システムの  $Cost(t)$  を、比較対象となる  $TL$  の需要量が 100% の時の組立加工費  $P_{TL}$  で割って規準化した  $Cost(t)/P_{TL}$  と、式 (3-2) に基づく各生産システムの  $LCC_i$  を、やはり比較対象となる  $TL$  の一括投資額  $I_{TL}$  で割って規準化した  $LCC_i/I_{TL}$  である。それらの結果を考察することで、今回提案している柔軟性評価法の基本的な妥当性を検証する。

以下、*FMS-F* は *CAC*, *CTL*, *PPS* の順で、また需要量変動シナリオは 1, 2, 3, 4 の順で結果と考察を述べる。

### 3.4.1 *CAC* の評価結果

#### (1) シナリオ 1 に対する結果と考察

シナリオ 1 に対する *CAC* の柔軟性評価結果を図 3-6 に示す。グラフは、第 3.3 節 3.3.3 の【手順 5】で示したように、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_1(t)$ 、 $TL$  の投資額で規準化した各生産システムの LCC である  $LCC_i/I_{TL}$ 、 $TL$  の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t)/P_{TL}$  を示している。

シナリオ 1 は、需要量が 1 年後に計画数量 (100%) に達する望ましいシナリオである。

$Cost(t)/P_{TL}$  の推移を見ても明らかなように、初期投資額の大きな  $TL$  は、最初の 1 年間は設備償却費が大きいため他のシステムに対して不利であるが、需要量が計画数量になれば最も低コストとなる。一方 *CAC* は、自動化度は  $TL$  とほぼ同じであり、段階的に設備台数を増やしている最初の 1 年間は  $TL$  よりもコスト的に有利であるが、計画数量に到達した後で逆転する。これはすべての機能を有する *CAC* は、設備台数が増えるほど過剰な機能が設備費の増大となって  $TL$  よりも不利になるからである。また *ML* は、需要量に関わらずほぼ一定に推移するが、需要量が計画数量に達しているため、自動化度の高い *CAC* や  $TL$  に対しては不利である。

製造コストに需要量をかけて積算したものが LCC である。



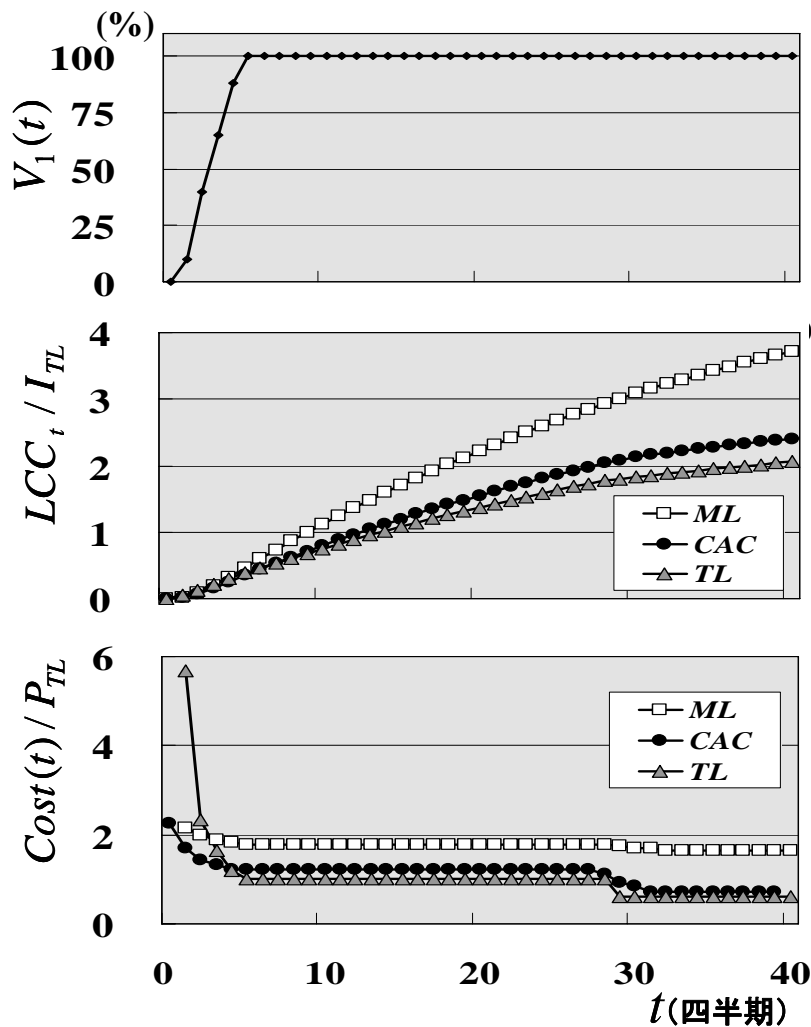


図 3-6 CAC の評価結果 (シナリオ 1 の場合)

$LCC_t / I_{TL}$  の推移から、最初の 2 年間は 3 つのシステムに大きな差は見られない。しかし、計画数量 100% が続くにつれて、製造コストの大小が  $LCC_t / I_{TL}$  の推移にも差となって表れてくる。償却期間である 7 年を過ぎると、その差はさらに顕著になる。40 四半期 (=10 年) 経過した時点で、 $ML$  と  $TL$  の差はほぼ  $TL$  1.7 本分の設備投資額に匹敵する。 $CAC$  と  $TL$  の差は、セルの台数増にともなう過剰機能と初期に必要な開発費用分が  $CAC$  は  $TL$  に対して不利であり、ほぼ設備投資額の差である。

以上のように、需要量変動シナリオ 1 は単純であるが、それに対する評価結果はきわめて妥当であり、今回提案している柔軟性評価法に問題はないと思われる。

## (2) シナリオ2に対する結果と考察

シナリオ2に対するCACの柔軟性評価結果を図3-7に示す。グラフは、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_2(t)$ 、 $TL$  の投資額で規準化した各生産システムのLCCである  $LCC_t / I_{TL}$ 、 $TL$  の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t) / P_{TL}$  を示している。

シナリオ2は、需要量が2年後に計画数量の80%に達し、5年後から徐々に減少し70%程度で推移する。生涯需要量は、シナリオ1の72%である。

$Cost(t) / P_{TL}$  の推移を見ると、シナリオ1の場合と同様に、初期投資額の大きな  $TL$  は、最初の2年間は減価償却費が大きいため他のシステムに対して不利であるが、需要量が80%に到達することで他のシステムとほぼ同等となる。一方  $CAC$  は、需要量が80%では必要セル数は5台であり1台分の節約になる。これにより、

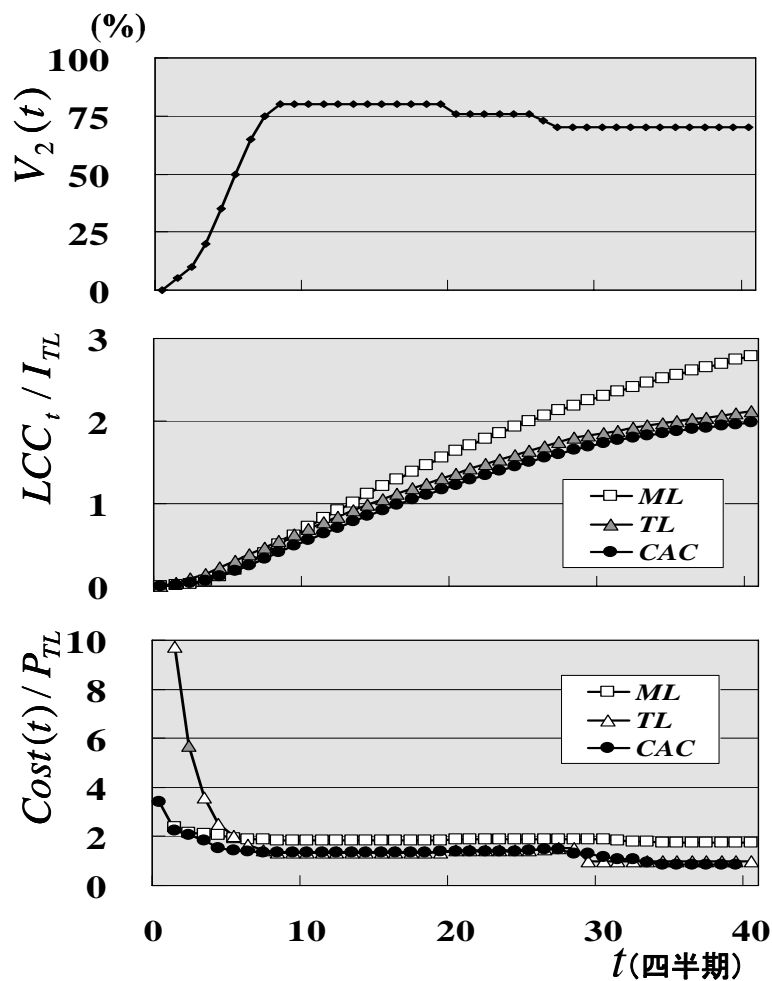


図 3-7 CAC の評価結果 (シナリオ 2 の場合)

シナリオ 1 で不利だった、過剰機能や初期開発投資分が相殺され、*TL* に逆転されることはない。現在価値としての計算の効果もあると思われる。また *ML* は、需要量に関わらずほぼ一定に推移するが、需要量が 80% あるので、自動化度の高い *CAC* や *TL* に対しては不利である。

$LCC_i / I_{TL}$  の推移から、最初の 2 年間は 3 つのシステムに大きな差は見られない。しかし、次第に *CAC* が最も低いことが明らかになってくる。この理由は、5 台のセルを自由にレイアウトすることで *TL* よりもオペレータ数を減らすことができる *CAC* が、工数すなわち労務費的に有利なためと考えられる。減価償却期間の 7 年を経過した後も順位に変わりはない。40 四半期 (= 10 年) 経過した時点で、*TL* と *CAC* の LCC の差は、両者の生涯労務費の差に相当するものと考えられる。

以上のように、需要量が計画に対して、ピークで 20% 程度、生涯需要量で 28% 未達となる場合は、段階投資可能な *CAC* が最終的に採算上最も望ましいという結果になった。*CAC* は自動化度も *TL* に匹敵するため、自動車部品の生産システムとして採用を検討してよいことがわかる。新しい柔軟性評価法が分析にも向いていることが確認された。

### (3) シナリオ3に対する結果と考察

シナリオ3に対するCACの柔軟性評価結果を図3-8に示す。グラフは、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_3(t)$ 、 $TL$  の投資額で規準化した各生産システムの  $LCC$  である  $LCC_t / I_{TL}$ 、 $TL$  の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t) / P_{TL}$  を示している。

シナリオ3は、需要量が2年後に計画数量の55%に達し、その後50%、45%とやや減少する。生涯需要量は、シナリオ1の47%である。

$Cost(t) / P_{TL}$  の推移を見ると、初期投資額の大きな  $TL$  の減価償却費による立ち上がりからの不利さは、シナリオ1、2と同様であるが、2年経過後は、合理化効果で  $ML$  よりやや有利になる。この傾向は、減価償却期間の7年を過ぎると顕著になる。一方  $CAC$  は、需要量が50%しかないため必要セル数は3台であり3台分の節約になる。この効果は大きく、 $TL$  に対して明らかに有利である。

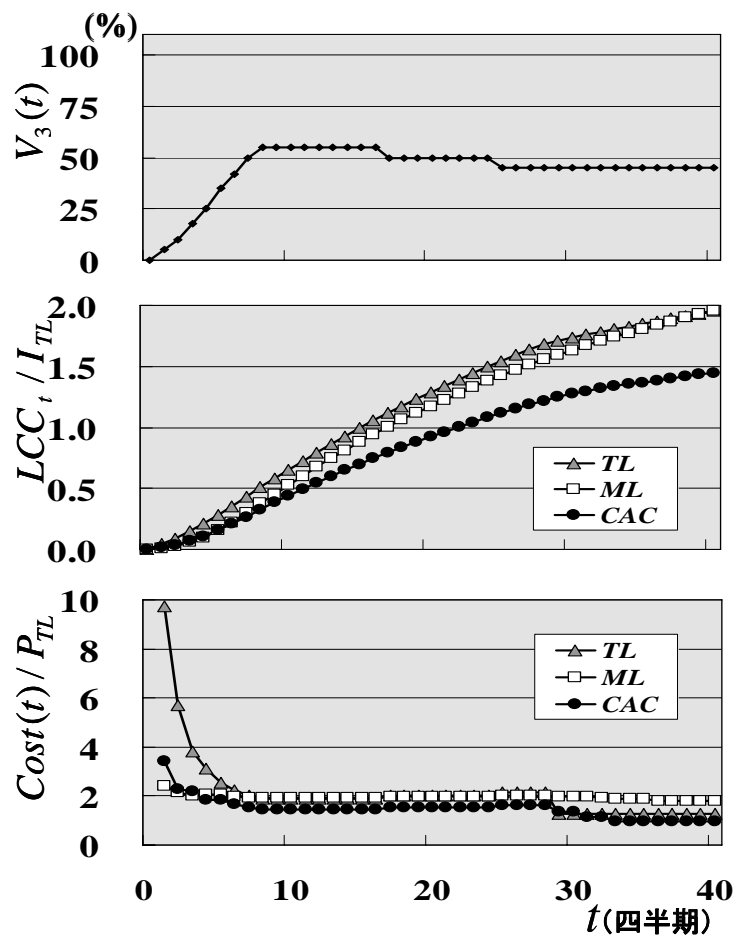


図 3-8 CAC の評価結果 (シナリオ 3 の場合)

$LCC_t/I_{TL}$ の推移から、 $TL$ の不利さはかなり初期の段階から明瞭である。 $CAC$ と $ML$ は当初ほぼ同じ値で推移するが、両者の差が明瞭になるのは立ち上がりから2年経過した後で、減価償却期間が過ぎるとさらに差が開いていく。40四半期(=10年)経過した時点で、 $CAC$ と $ML$ のLCCの差は、 $TL$ の投資額の50%ほどである。

以上のように、需要量が計画に対して、ピークで50%程度、生涯需要量で53%未達となる場合は、 $TL$ はLCC的には選択すべきでないという結論になる。シナリオ3も2に続いて、段階投資可能な $CAC$ が最終的に採算上最も望ましいという結果になった。

しかしながら、シナリオ3はそもそも次期型製品の競争力がなく、他社にシェアを奪われることを想定している。40四半期もの間、このままの生産体制を続けるのではなく、 $CAC$ の投資もせず、製造コストやLCC的にはほぼ同等の $ML$ でつないでにおいて、早期挽回をはかるべきであろう。その挽回ターゲット(目標時期)を決定するために時間的な分析ができるのが、今回の柔軟性評価法の長所の一つである。

#### (4) シナリオ4に対する結果と考察

シナリオ4に対する $CAC$ の柔軟性評価結果を図3-9に示す。グラフは、上から順に、横軸 $t$ (四半期)に対する需要量関数 $V_4(t)$ 、 $TL$ の投資額で規準化した各生産システムのLCCである $LCC_t/I_{TL}$ 、 $TL$ の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト $Cost(t)/P_{TL}$ を示している。

シナリオ4は、需要量は2年後に計画数量のやっと40%に達するが、以後減少し続け、最後は10%で推移する。生涯需要量は、シナリオ1の21%である。望ましくないシナリオである。

$Cost(t)/P_{TL}$ の推移を見ると、初期投資額の大きな $TL$ の減価償却費による不利さは、立ち上がり初期の段階も、また需要量の減少が起こるときも、他のシステムに対し顕著である。その状態は減価償却期間の7年が過ぎるまで続く。 $CAC$ は、シナリオ3と同様に必要セル数が3台であり3台分の節約になる。この効果が明瞭に見られるのは需要量が40%までの期間までである。需要量が25%より減少すると $ML$ よりも不利になるが、減価償却期間の7年を過ぎると逆に $ML$ よりも有利になる。一方 $ML$ は、 $TL$ や $CAC$ に比べて需要量の変動に鈍感である。 $Cost_M/P_{TL}$ の推移を見るだけでは、 $CAC$ と $ML$ のどちらが有利かは判断が困難である。

$LCC_t/I_{TL}$ の推移から、 $TL$ の不利さは一目瞭然であり納得できる。一方、 $CAC$ と $ML$ はほぼ同じ値で推移しているが、 $CAC$ の方がやや小さいことがわかる。

シナリオ4はそもそも次期型製品の競争力がなく、さらに問題発生リスクを感じている場合を想定している。シナリオ3と同様に、 $CAC$ の投資もせず、製造コストやLCC的にほぼ同等の $ML$ でつないでにおいて、早期挽回をはかるべきである。

以上のことは納得できる結果であり、今回の評価法の妥当性を示していると思われる。

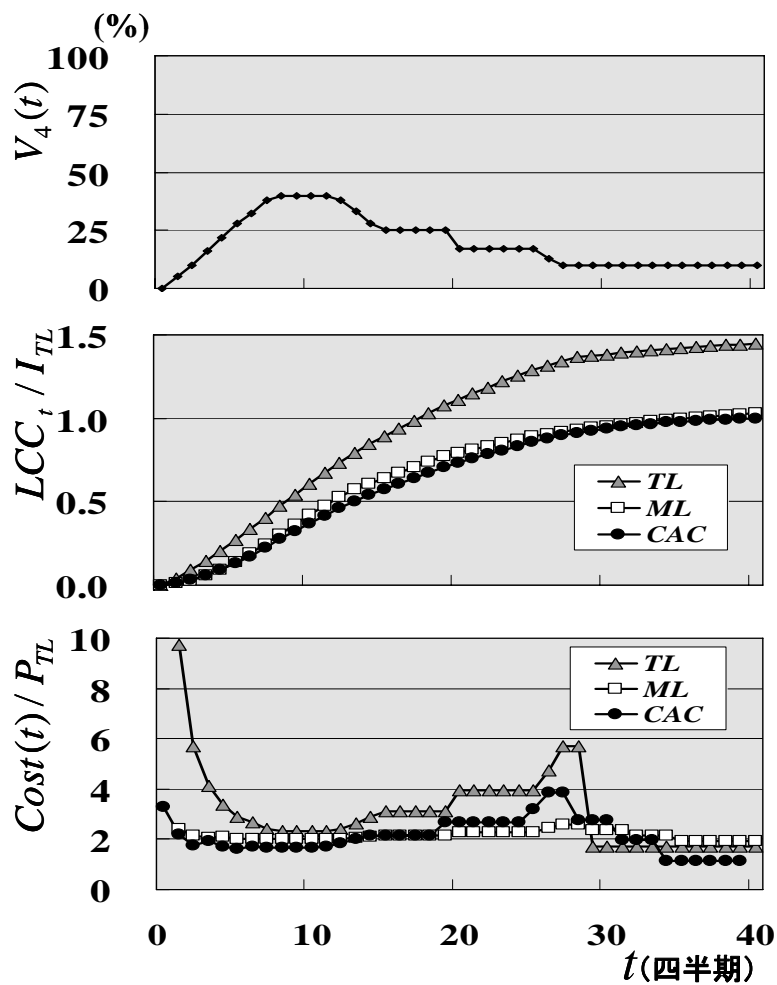


図 3-9  $CAC$ の評価結果(シナリオ4の場合)

### 3.4.2 CTL の評価結果

#### (1) シナリオ1に対する結果と考察

シナリオ 1 に対する CTL の柔軟性評価結果を 図 3-10 に示す。グラフは、第 3.3 節 3.3.3 の【手順 5】で示したように、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_1(t)$ 、 $TL$  の投資額で規準化した各生産システムの LCC である  $LCC_t / I_{TL}$ 、 $TL$  の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t) / P_{TL}$  を示している。

シナリオ 1 は、需要量が 1 年後に計画数量 (100%) に達する望ましいシナリオである。

$Cost(t) / P_{TL}$  の推移を見ても明らかなように、初期投資額の大きな  $TL$  は、最初の 1 年間は設備償却費が大きいため他のシステムに対して不利であるが、需要量が計画数量になれば最も低コストとなる。一方 CTL は、自動化度は  $TL$  とほぼ同じで

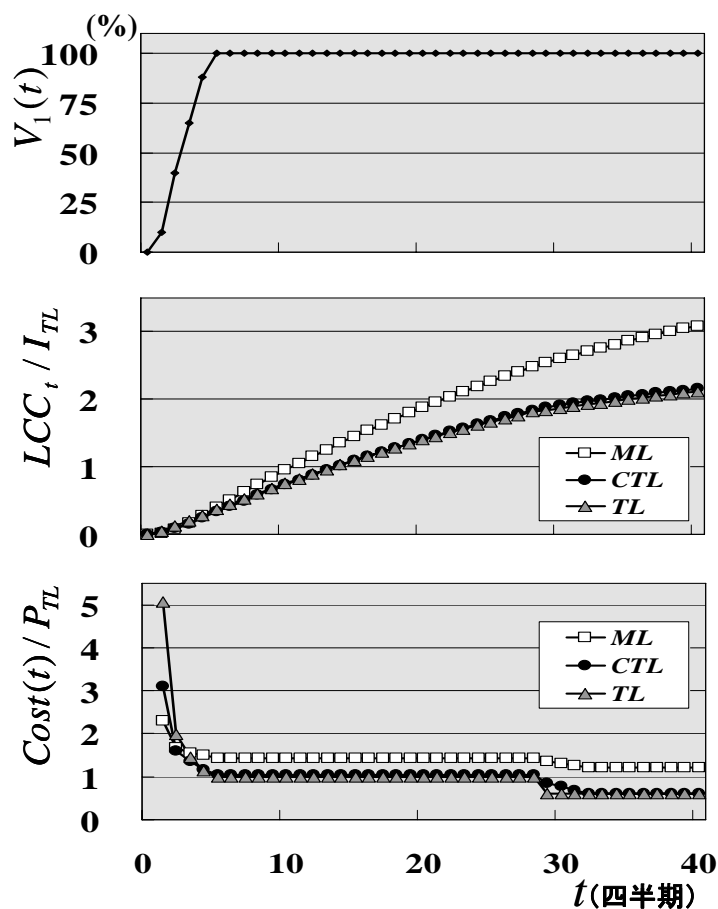


図 3-10 CTL の評価結果 (シナリオ 1 の場合)

あり、段階的に設備台数を増やしている最初の1年間は  $TL$  よりもコスト的に有利であるが、計画数量に到達した後で逆転する。これは最初から計画数量の能力を確保している  $TL$  に比較して、初期開発費があり、さらに能力増強を繰り返すたびに改造費用が発生する  $CTL$  が、設備費総額としては  $TL$  よりも大きいからである。また  $ML$  は、需要量に関わらずほぼ一定に推移するが、需要量が計画数量に達しているため、自動化度の高い  $CTL$  や  $TL$  に対しては不利である。

製造コストに需要量をかけて積算したものが  $LCC$  である。

$LCC_i/I_{TL}$  の推移から、最初の1年間は3つのシステムに大きな差は見られないが、先ず  $ML$  の値が他のシステムよりも増大していく。 $CTL$  と  $TL$  はほぼ同じ値であるがわずかに  $TL$  が小さい。償却期間である7年を過ぎると、その差はようやく明瞭になる。40四半期 (=10年) 経過した時点でも、 $CTL$  と  $TL$  の差はわずかである。計画数量の生産時の  $CTL$  は、 $TL$  と自動化度が同じで工数も等しいため、両者の差は設備投資額の差程度しかない。それは  $TL$  の投資額の10%未満である。以上のように、需要量変動シナリオ1は単純であるが、それに対する評価結果はきわめて妥当であり、今回提案している柔軟性評価法に問題はないと思われる。

## (2) シナリオ2に対する結果と考察

シナリオ2に対する  $CTL$  の柔軟性評価結果を図3-11に示す。グラフは、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_2(t)$ 、 $TL$  の投資額で規準化した各生産システムの  $LCC$  である  $LCC_i/I_{TL}$ 、 $TL$  の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t)/P_{TL}$  を示している。

シナリオ2は、需要量が2年後に計画数量の80%に達し、5年後から徐々に減少し70%程度で推移する。生涯需要量は、シナリオ1の72%である。

$Cost(t)/P_{TL}$  の推移を見ると、シナリオ1の場合と同様に、初期投資額の大きな  $TL$  は、最初の1年間は減価償却費が大きいため他のシステムに対して不利であるが、需要量が80%に到達することで  $ML$  よりも小さく  $CTL$  とほぼ同等となる。一方  $CTL$  は、最初の1年間は段階投資効果があり、需要量が80%になってからは  $TL$  よりも工数的に有利なため、わずかではあるが  $TL$  よりも小さい。また  $ML$  は、需要量に関わらずほぼ一定に推移するが、需要量が80%あるので、自動化度の高い  $CAC$  や  $TL$  に対しては不利である。

$LCC_i/I_{TL}$  の推移は、最初の2年間は3つのシステムに大きな差は見られない。



しかし、次第に *CTL* が最も低いことが明らかになってくる。減価償却期間の7年を経過した後も順位に変わりはない。40 四半期 (=10 年) 経過した時点で、*ML* と *CTL* の *LCC* の差は、*TL* の投資額のほぼ 50% に匹敵する。

以上のように、需要量が計画に対して、ピークで 20% 程度、生涯需要量で 28% 未達となる場合は、段階投資可能な *CTL* が最終的に採算上最も望ましいという結果になった。*CTL* は自動化度も *TL* と同等のため、自動車部品の生産システムとして採用を検討してよいことがわかる。新しい柔軟性評価法が分析にも向いていることが確認された。

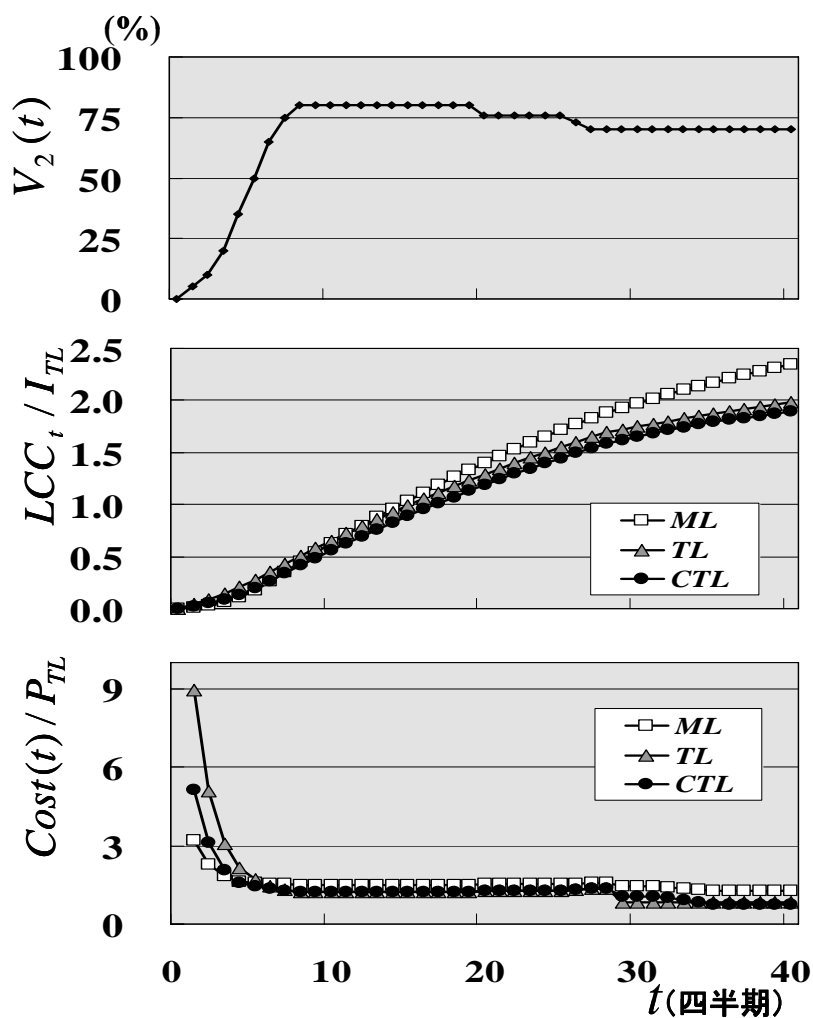


図 3-11 *CTL* の評価結果 (シナリオ 2 の場合)

### (3) シナリオ3に対する結果と考察

シナリオ3に対する *CTL* の柔軟性評価結果を図 3-12 に示す。グラフは、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_3(t)$ 、*TL* の投資額で規準化した各生産システムの *LCC* である  $LCC_t / I_{TL}$ 、*TL* の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t) / P_{TL}$  を示している。

シナリオ3は、需要量が2年後に計画数量の55%に達し、その後50%、45%とやや減少する。生涯需要量は、シナリオ1の47%である。

$Cost(t) / P_{TL}$  の推移を見ると、初期投資額の大きな *TL* の減価償却費による立ち上がりからの不利さは、シナリオ1、2と同様であるが、2年経過後も *ML* に対してさえ明瞭に有利とはならず、減価償却期間の7年を過ぎてようやく最も低コストとなる。一方 *CTL* は、需要量が最大で50%しかないため需要量が100%のときは、12

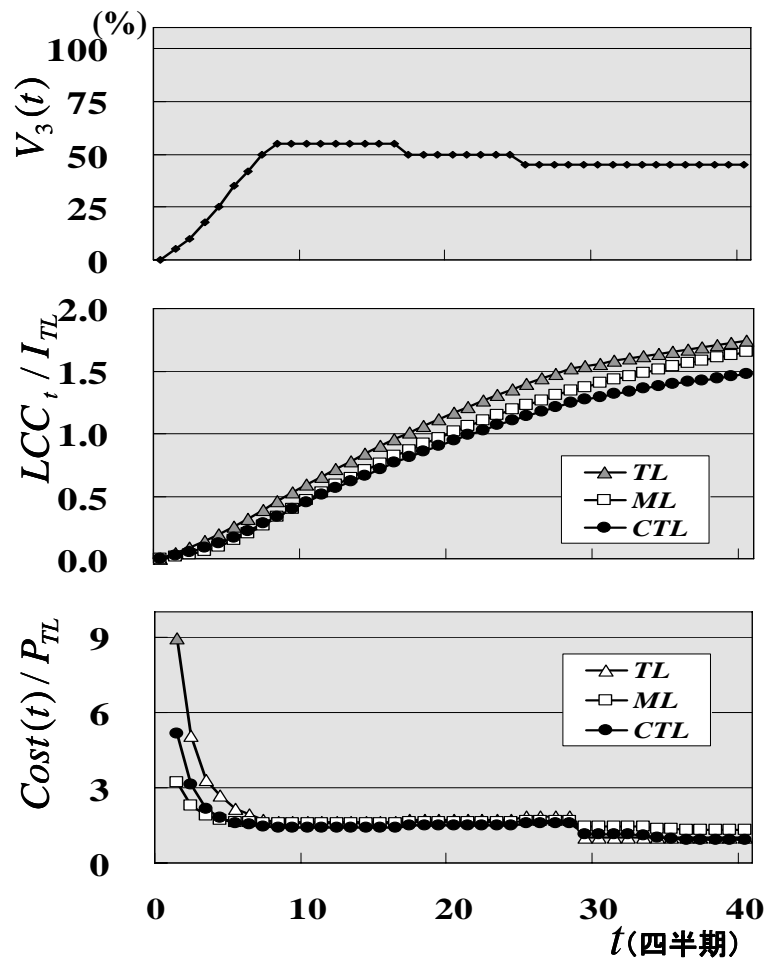


図 3-12 *CTL* の評価結果 (シナリオ3の場合)

台の設備増強が必要なのに対し、4台で済むため8台分を節約できる。これにより、シナリオ2よりさらにTLに対して有利となる。さらにMLよりも工数的に大幅に有利であり、2年経過後は3つの生産システムの中でCTLが最も低い値となっている。

$LCC_t/I_{TL}$ の推移から、TLの不利さはかなり初期の段階から明瞭である。CTLとMLは、最初はほぼ同じ値で推移しているが、2年後からは次第に差が出てくる。40四半期(=10年)経過した時点で、CTLとMLあるいはTLのLCCの差は、TLの投資額のそれぞれ20%あるいは30%ほどである。

以上のように、需要量が計画に対して、ピークで45%程度、生涯需要量で53%未達となる場合は、TLはLCC的には選択すべきでないという結論になる。シナリオ3も2に続いて、段階投資可能なCTLが最終的に採算上最も望ましいという結果になった。

しかしながら、シナリオ3はそもそも次期型製品の競争力がなく、他社にシェアを奪われることを想定している。40四半期もの間、このままの生産体制を続けるのではなく、CTLの投資もせず、製造コストやLCC的にはほぼ同等のMLでつないでにおいて、早期挽回をはかるべきであろう。ただし、自動化度の低いMLなので、品質リスクに対しては特別な処置が必要である。なお、挽回ターゲット(目標時期)を決定するために時間的な分析ができるのが、今回の柔軟性評価法の長所の一つである。

分析から得られたこの考察は、CACの評価結果と同じであり、今回提案している柔軟性評価法の一般性を示唆するものと考えられる。

#### (4) シナリオ4に対する結果と考察

シナリオ4に対する *CTL* の柔軟性評価結果を図 3-13 に示す。グラフは、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_4(t)$ 、*TL* の投資額で規準化した各生産システムの *LCC* である  $LCC_t / I_{TL}$ 、*TL* の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t) / P_{TL}$  を示している。

シナリオ4は、需要量は2年後に計画数量のやっとなら 40%に達するが、以後減少し続け、最後は10%で推移する。生涯需要量は、シナリオ1の21%である。望ましくないシナリオである。

$Cost(t) / P_{TL}$  の推移を見ると、初期投資額の大きな *TL* の減価償却費による不利さは、立ち上がり初期の段階も、また需要量の減少が起こるときも、他のシステムに対し顕著である。その状態は減価償却期間の7年を過ぎるまで続く。*CTL* は、増強

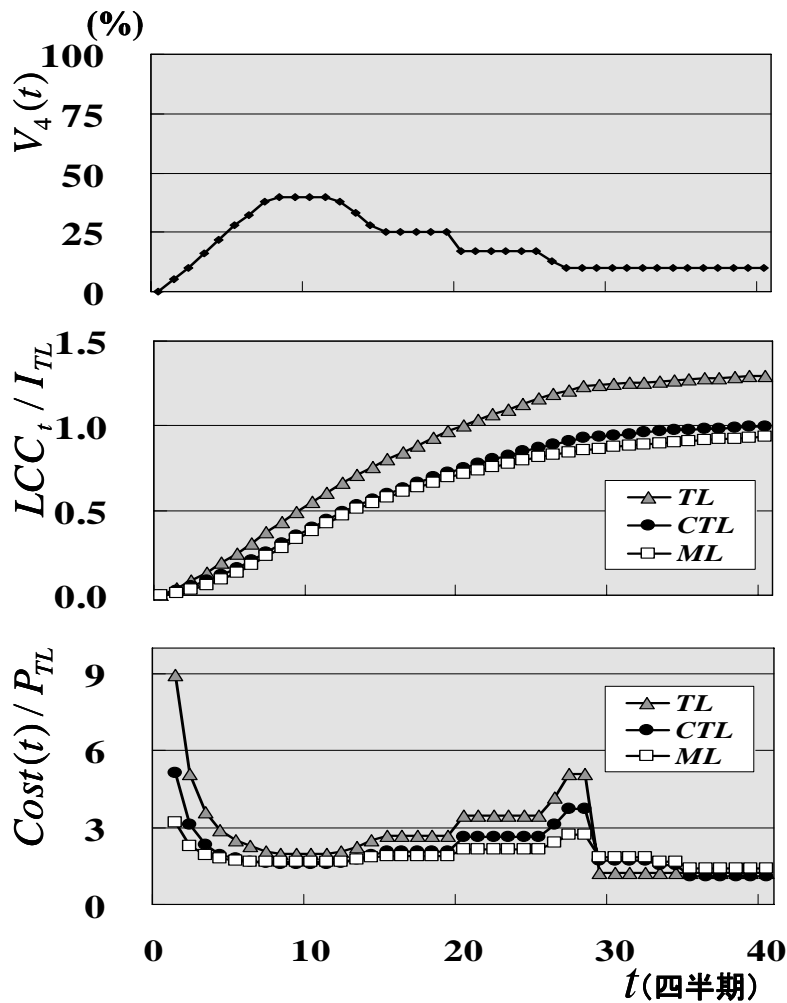


図 3-13 *CTL* の評価結果 (シナリオ4の場合)

予定設備をシナリオ 3 よりもさらに多い 10 台節約できる。この効果が明瞭に見られるのは需要量が 40% の期間までである。需要量が 25% より減少すると *ML* よりも不利になる。減価償却期間の 7 年を過ぎて、ようやく *ML* と同等である。一方 *ML* は、*TL* や *CTL* に比べて需要量の変動に鈍感である。 $Cost_M / P_{TL}$  の推移を見るだけでは、*CTL* と *ML* のどちらが有利かは判断が困難である。

$LCC_i / I_{TL}$  の推移から、*TL* の不利さは一目瞭然であり納得できる。一方、*CTL* と *ML* はほぼ同じ値で推移しているが、わずかに *ML* の方が小さい。減価償却後も順位は変わらない。

シナリオ 4 はそもそも次期型製品の競争力がなく、さらに問題発生リスクを感じている場合を想定している。LCC 的に *ML* が最も有利だからと言って、自動化度の低い *ML* で自動車部品を製造し続けるのは品質のリスクがある。シナリオ 3 以上の重要度と緊急度で挽回をはかるべきである。

以上のことは納得できる結果であり、今回の評価法の妥当性を示していると思われる。

### 3.4.3 PPS の評価結果

#### (1) シナリオ 1 に対する結果と考察

シナリオ 1 に対する *PPS* の柔軟性評価結果を図 3-14 に示す。グラフは、第 3.3 節 3.3.3 の【手順 5】で示したように、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_1(t)$ 、*TL* の投資額で規準化した各生産システムの LCC である  $LCC_i / I_{TL}$ 、*TL* の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t) / P_{TL}$  を示している。

シナリオ 1 は、需要量が 1 年後に計画数量 (100%) に達する望ましいシナリオである。

$Cost(t) / P_{TL}$  の推移を見ても明らかなように、初期投資額の大きな *TL* は、最初の 1 年間は設備償却費が大きいため他のシステムに対して不利であるが、需要量が計画数量になれば最も低コストとなる。一方 *PPS* は、自動化度は *TL* とほぼ同じであり、段階的に設備台数を増やしている最初の 1 年間は *TL* よりもコスト的に有利であるが、計画数量に到達した後で逆転する。これは最初から計画数量の能力を確保している *TL* に比較して、初期開発費があり、さらに能力増強を繰り返すたびに改造費用が発生する *PPS* が、設備費総額としては *TL* よりも大きいからである。ま

た  $ML$  は、需要量に関わらずほぼ一定に推移するが、需要量が計画数量に達しているため、自動化度の高い  $PPS$  や  $TL$  に対しては不利である。

製造コストに需要量をかけて積算したものが  $LCC$  である。

$LCC_t / I_{TL}$  の推移から、最初の 2 年間は 3 つのシステムに大きな差は見られないが、先ず  $ML$  の値が他のシステムよりも増大していく。 $PPS$  と  $TL$  はほぼ同じ値であるがわずかに  $TL$  が小さい。償却期間である 7 年を過ぎると、その差はもう少し明瞭になる。40 四半期 (= 10 年) 経過した時点でも、 $PPS$  と  $TL$  の差はわずかである。計画数量の生産時の  $PPS$  は、 $TL$  と自動化度が同じで工数も等しいため、両者の差は設備投資額の差程度しかない。 $ML$  と  $TL$  の差は  $TL$  の投資額の 1.4 本分になっている。

以上のように、需要量変動シナリオ 1 は単純であるが、それに対する評価結果はきわめて妥当であり、今回提案している柔軟性評価法に問題はないと思われる。

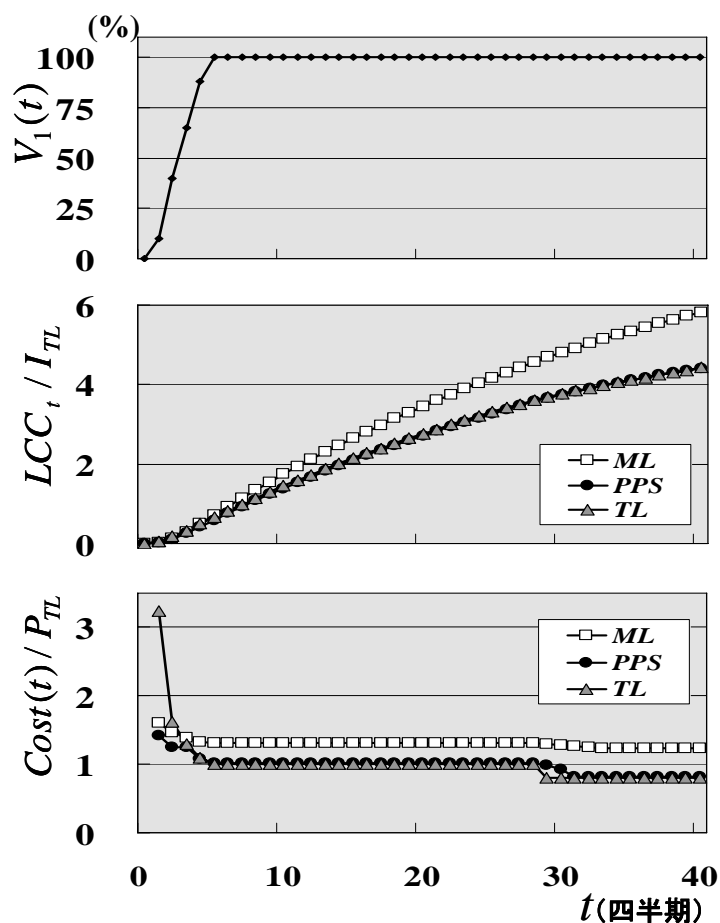


図 3-14  $PPS$  の評価結果 (シナリオ 1 の場合)

## (2) シナリオ2に対する結果と考察

シナリオ2に対する *PPS* の柔軟性評価結果を図 3-15 に示す。グラフは、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_2(t)$ 、*TL* の投資額で規準化した各生産システムの *LCC* である  $LCC_t / I_{TL}$ 、*TL* の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t) / P_{TL}$  を示している。

シナリオ2は、需要量が2年後に計画数量の80%に達し、5年後から徐々に減少し70%程度で推移する。生涯需要量は、シナリオ1の72%である。

$Cost(t) / P_{TL}$  の推移を見ると、シナリオ1の場合と同様に、初期投資額の大きな *TL* は、最初の1年間は減価償却費が大きいため他のシステムに対して不利であるが、需要量が80%に到達することで *ML* や *PPS* とほぼ同等となる。一方 *PPS* は、

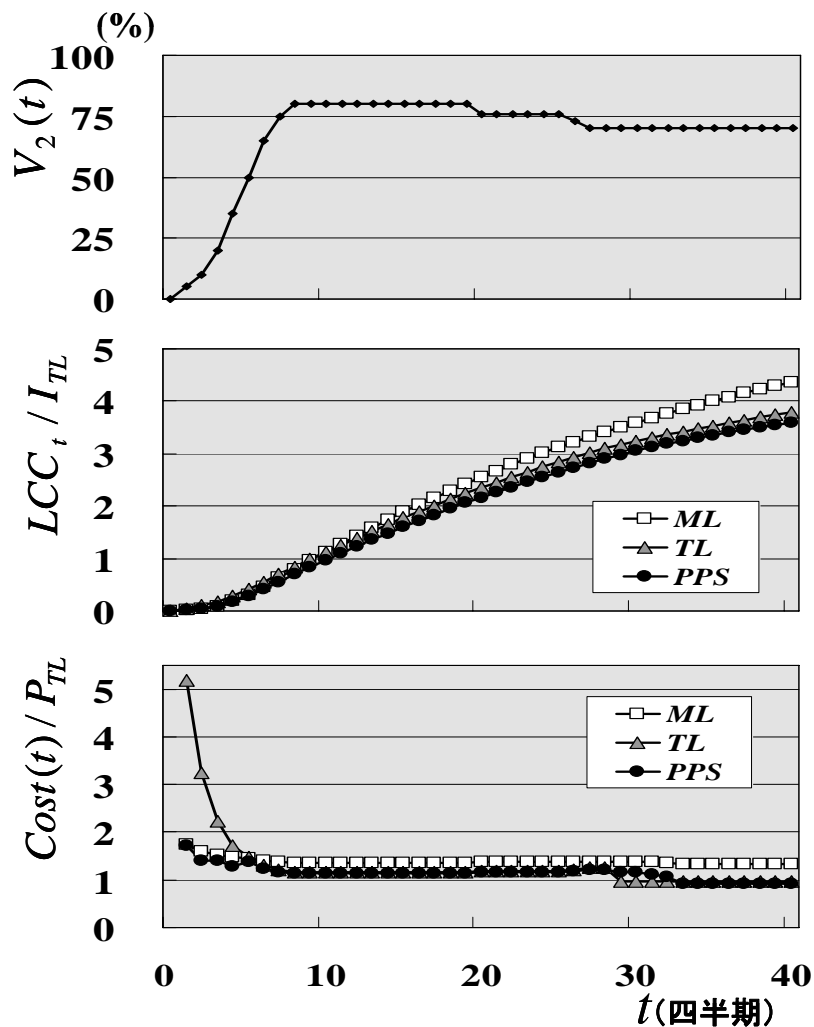


図 3-15 *PPS* の評価結果(シナリオ2の場合)

最初の1年間は段階投資効果があり、需要量が80%になってからもわずかではあるがTLより工数的に有利なため、TLよりも小さい。またMLは、需要量に関わらずほぼ一定に推移するが、需要量が80%あるので、自動化度の高いPPSやTLに対してはやや不利である。

$LCC_t/I_{TL}$ の推移は、最初の2年間は3つのシステムに大きな差は見られない。しかし、次第にPPSが最も低いことが明らかになってくる。減価償却期間の7年を経過するとTLがMLやPPSより低くなるが、PPSも分割投資の償却期間が終わればTLと同等になる。40四半期(=10年)経過した時点で、MLとPPSのLCCの差は、TLの投資額の76%に匹敵する。

以上のように、需要量が計画に対して、ピークで20%程度、生涯需要量で28%未達となる場合は、段階投資可能なPPSが最終的に採算上最も望ましいという結果になった。PPSは自動化度もTLと同等のため、自動車部品の生産システムとして採用を検討してよいことがわかる。

### (3) シナリオ3に対する結果と考察

シナリオ3に対するPPSの柔軟性評価結果を図3-16に示す。グラフは、上から順に、横軸 $t$ (四半期)に対する需要量関数 $V_3(t)$ 、TLの投資額で規準化した各生産システムのLCCである $LCC_t/I_{TL}$ 、TLの製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト $Cost(t)/P_{TL}$ を示している。

シナリオ3は、需要量が2年後に計画数量の55%に達し、その後50%、45%とやや減少する。生涯需要量は、シナリオ1の47%である。

$Cost(t)/P_{TL}$ の推移を見ると、初期投資額の大きなTLの減価償却費による立ち上がりからの不利さは、シナリオ1、2と同様である。一方PPSは、当初は顕著な段階投資効果がある。ところが、需要量は55%だが、その状態が長期に及ぶため、需要量が100%のときの8セル連結が必要となり(4セルでは能力未達なので)、3年目に増設投資があり製造コストが上昇している。MLは全期間にわたりほぼ同じ値で推移している。



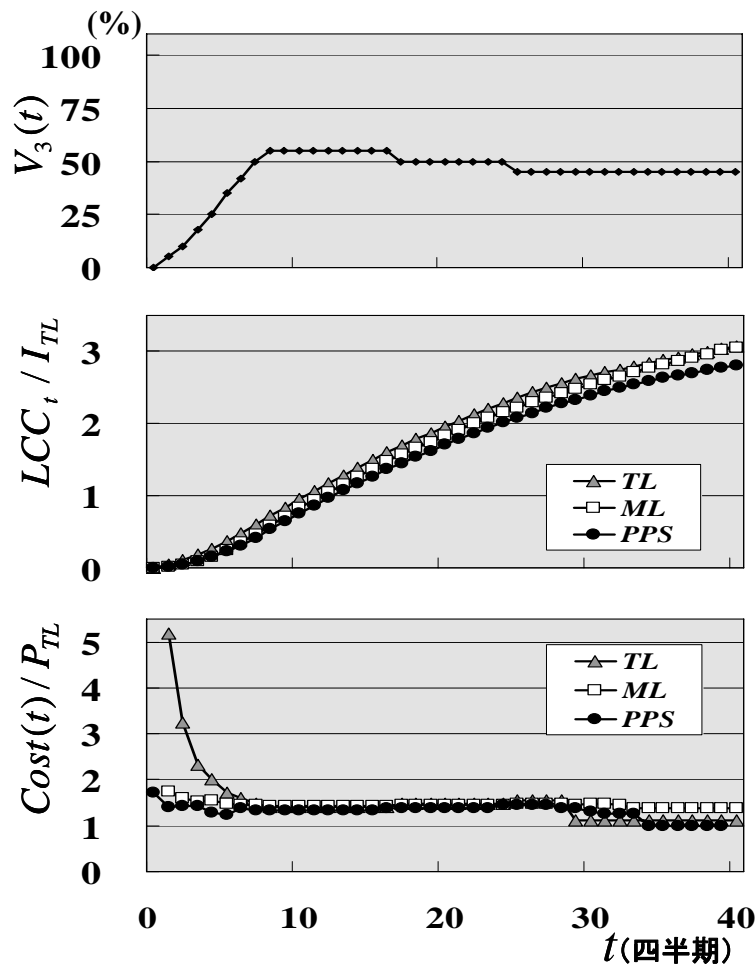


図 3-16 PPS の評価結果 (シナリオ 3 の場合)

$LCC_t / I_{TL}$  の順位は、 $Cost(t) / P_{TL}$  のグラフから、最初の 3 年間と、減価償却期間の 7 年を経過した後の値で決定されることが推定されるが、結局、段階投資効果と合理化効果の両方により PPS が混戦から抜け出して、そのまま最も低い値で終わっている。

以上のように、需要量が計画に対して、ピークで 55% 程度、生涯需要量で 53% 未達となる場合は、TL は LCC 的には選択すべきでないという結論になる。シナリオ 3 も 2 に続いて、段階投資可能な PPS が最終的に採算上最も望ましいという結果になった。

しかしながら、シナリオ 3 はそもそも次期型製品の競争力がなく、他社にシェアを奪われることを想定している。40 四半期もの間、このままの生産体制を続けるのではなく、早期挽回をはかるべきであろう。しかし、それまで ML でつないでいく

ことについては、品質リスクと LCC の観点からあまり望ましいとはいえない。

分析から得られたこの考察は、CACや CTL の評価結果と同様であり、今回提案している柔軟性評価法の一般性を示唆するものと考えられる。

#### (4) シナリオ4に対する結果と考察

シナリオ 4 に対する PPS の柔軟性評価結果を図 3-17 に示す。グラフは、上から順に、横軸  $t$  (四半期) に対する需要量関数  $V_4(t)$ 、TL の投資額で規準化した各生産システムの LCC である  $LCC_t / I_{TL}$ 、TL の製造コストの計画値で規準化した各生産システムの製造コスト  $Cost(t) / P_{TL}$  を示している。

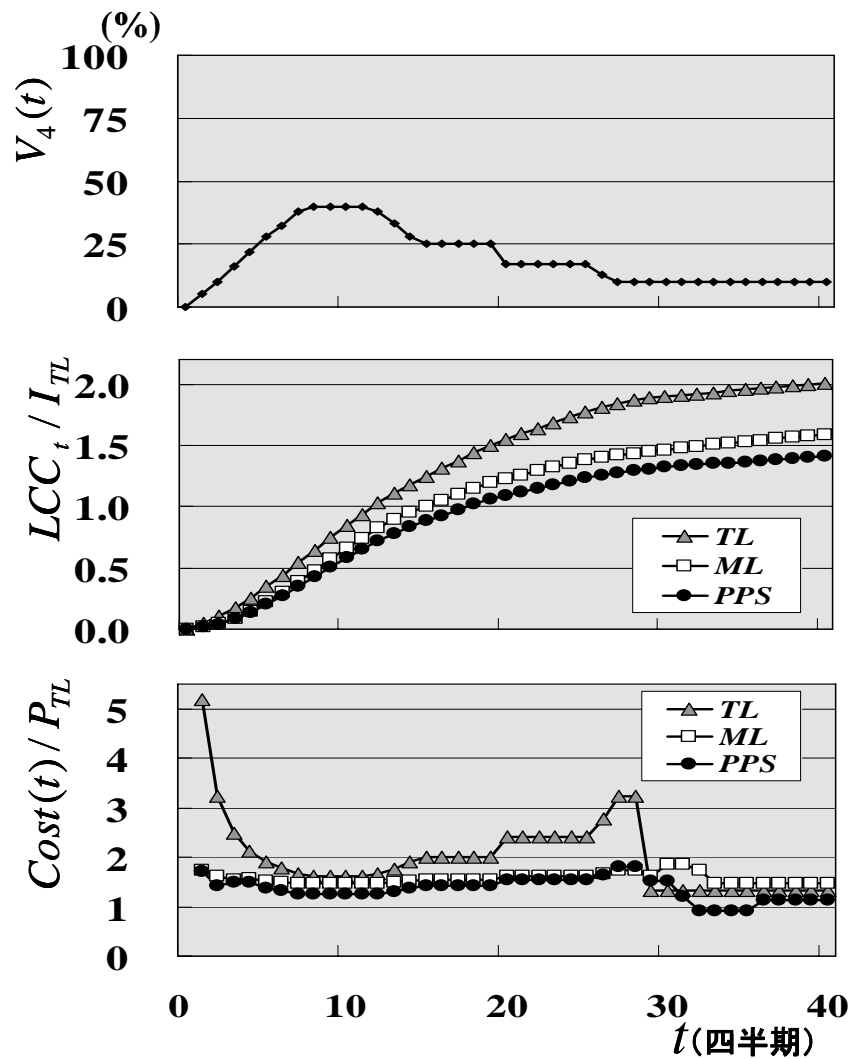


図 3-17 PPS の評価結果(シナリオ 4 の場合)

シナリオ4は、需要量は2年後に計画数量のやっとなら40%に達するが、以後減少し続け、最後は10%で推移する。生涯需要量は、シナリオ1の21%である。望ましくないシナリオである。

$Cost(t)/P_{TL}$ の推移を見ると、初期投資額の大きなTLの減価償却費による不利さは、立ち上がり初期の段階も、また需要量の減少が起こるときも、他のシステムに対し顕著である。その状態は減価償却期間の7年を過ぎるまで続く。一方PPSは、シナリオ3と同様に立ち上がり初期に段階投資効果がある。またその後も最も低コストで推移している。この理由は、需要量が最大で40%のため、シナリオ3と違い、8セル連結を回避できたからである。さらに需要量の減少に合わせて連結セル数を4から2、2から1セルへと減らして設備転用すなわち負の投資効果も得ている。

$LCC_t/I_{TL}$ の推移から、TLの不利さは一目瞭然であり納得できる。一方PPSは、 $Cost(t)/P_{TL}$ で分析した理由から明らかに低い。MLは両者の中間である。40四半期(=10年)経過した時点で、TLとPPSのLCCの差は、TLの投資額のほぼ60%に匹敵する。

シナリオ4はそもそも次期型製品の競争力がなく、さらに問題発生リスクを感じている場合を想定している。シナリオ3以上の重要度と緊急度で挽回をはかるべきである。しかしながら、早期挽回が困難な場合でもPPSを選択すれば、品質リスクも低くLCC的にもダメージが小さいことがわかる。

以上のことは納得できる結果であり、今回の評価法の妥当性を示していると思われる。

### 3.4.4 各生産システムの柔軟性比較結果

第3.4節の結果から、量変動対応システムと言いながら、FMS-Fは、どのシナリオにおいても他のシステムよりLCC的に有利ということにはなかった。すなわち、需要量の変動に対して万能の生産システムを考えることは、かなり難しいと言えそうである。とすれば、製造業においては、想定する需要量の変動に対して、生産システムを使い分ける必要がある。

シナリオごとに見た場合、40四半期経過した時点で自動化度の高い的に最も有利となるシステムには、何か傾向があるだろうか。シナリオ1~4には、到達するピークの需要量や増加および減少の速度といった特徴とともに、40四半期にわたる生涯需要量という特徴もある。LCCで評価しているのであるから、この生涯需要量の

大きさの違いと有利な生産システムに何か関係があるのではないだろうか。

生涯需要量と生産システムの柔軟性の関係を知るために、シナリオ 1~4 の生涯需要量を横軸にして、各生産システムの  $LCC_{40}/I_{TL}$  を図 3-18 に示す。

より値が小さいものが有利な生産システムである。生涯需要量が期待される量 (=1.0) の場合は、どのグラフにおいても  $TL$  が最も小さい。また、生涯需要量が減るに従い、先ず  $FMS-F$  が有利になり、さらに減ると、 $ML$  が有利になってくる。実際には計算していないが、生涯需要量が 0 の  $LCC$  は各生産システムの初期投資額を  $TL$  の初期投資額で割った値にほぼ等しいので、小さい方から  $ML$ ,  $FMS-F$ ,  $TL$  の順に並ぶ筈で、グラフはその傾向を示している。

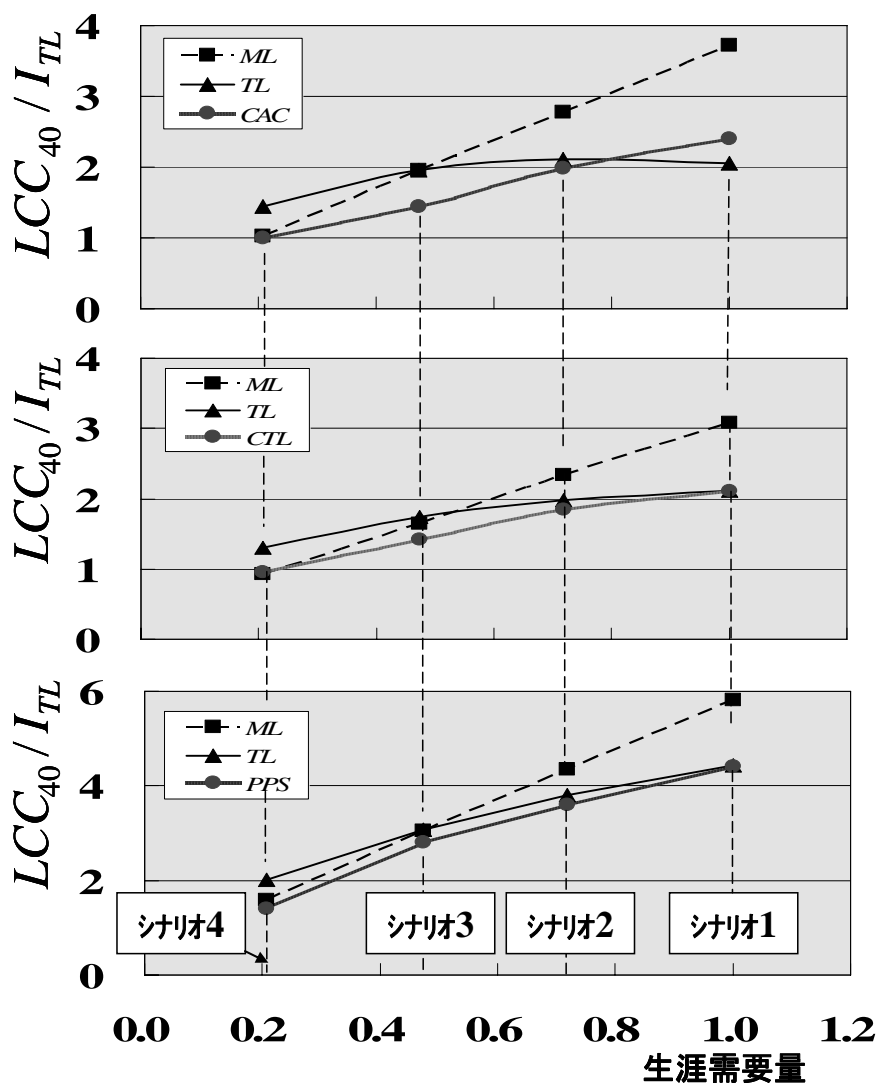


図 3-18 生涯需要量に対する各生産システムの  $LCC_{40}/I_{TL}$

生産システムの構築には投資が必要である。LCC 的に有利とは、すなわち採算的に最も有利ということである。投資判断の大前提は、減価償却期間中の総需要量が十分あることである。生涯需要量の大きさは、その減価償却期間中の総需要量と密接に関係している。

あくまでも計画数量が 100%という前提であるが、生涯需要量が多くなれば、大きな投資をともなって自動化度の高い TL は有利になる。逆に生涯需要量が減少していけば、ML よりも不利になっていく。ML よりも不利になっていくということは、目標製造コストを守れなくなるとともに、自動化度の低下から品質リスクが高まることを意味している。FMS-F は、生涯需要量の中間領域においても有利である。すなわち、TL でカバーできない領域をカバーできるということである。

以上のことから、図 3-18 が示していることは、定性的に納得できる。

### 第 3.5 節 “Reconfigurability” の定義の提案

LCC を用いた評価が、生産システムの柔軟性の評価関数となること、また、それらは生涯需要量と相関があることが分かったので、それぞれ異なった製品に対して開発された 3 つの FMS-F の柔軟性を、定量的に比較評価する方法を提案する。

繰り返しになるが、FMS-F の最大の特徴は、その形態変化の能力すなわち “Reconfigurability” にある。需要量の変動に対して柔軟でない TL と最も違う点である。そして TL は、FMS-F 導入以前において、自動車部品の生産システムとしては最も有利なものであった。FMS-F の柔軟性を “Reconfigurability” と命名し、柔軟でない比較対象の TL を基準にして、LCC を用いて次式で定義する。

$$\text{Reconfigurability} = \frac{LCC_{40,TL}}{LCC_{40,F}} \quad (3-15)$$

ここで、 $LCC_{40,TL}$  : 評価したい FMS-F の比較対象となる TL の  $LCC_{40}$   
 $LCC_{40,F}$  : 評価したい FMS-F の  $LCC_{40}$

このように定義すれば、想定した生涯需要量よりも減少した場合、“Reconfigurability” の値は 1.0 よりも大きくなる筈であり、その値が大きいほど柔軟性が高く経済性で有利な FMS-F であると言える。

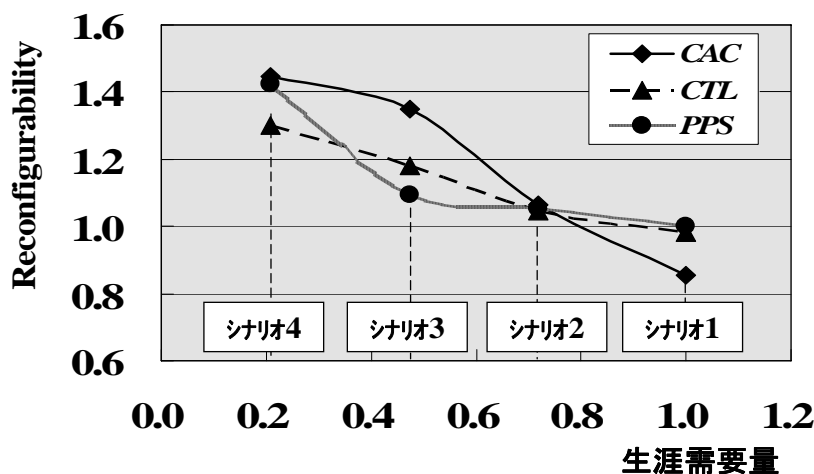


図 3-19 各 *FMS-F* の“Reconfigurability” の比較

図 3-18 の結果 ( $t=40$ ) を元に、各 *FMS-F* の生涯生産量 (シナリオ 1=1.0, シナリオ 2=0.72, シナリオ 3=0.47, シナリオ 4=0.21 の場合) に対する “Reconfigurability” を図 3-19 に示す. 各 *FMS-F* の特徴を分析しやすくするため、マーカーとマーカーの間は、エクセルのスムージング機能を用いて曲線でつないでいる。

最大生産能力時に *TL* と同形態になる *CTL* と *PPS* は、生涯需要量が 1.0 の場合に、“Reconfigurability” はほぼ 1.0 となっている。逆に最小能力時に *AC1* 台になる *CAC* と *PPS* は、生涯生産量が 0.21 の場合にそれぞれ 1.45, 1.42 で 1.30 の *CTL* よりも採算的に有利である。

表 2-1 で各 *FMS-F* の変化可能性を一覧にした。工程集約度が高い *CAC* は少～中量域において、工程集約度がそれより小さい *CTL* は中～多量域において、工程集約度可変の *PPS* は少～多量域において “Reconfigurability” が高いことが予想されたが、図 3-19 の結果はまさにそのことを裏付けている。

なお、今回定義した “Reconfigurability” の *FMS-F* 以外の生産システムへの適用可能性については、要件が 2 つあると考えている。

1 つ目は、適当な比較対象が選定し設計できることである。比較対象は従来方式としてその価値が十分に認められたものでなければならない。また、仮想設計する場合、その精度が高くなければならない。

2 つ目は、*LCC* での評価が妥当であることである。大型投資をとめない、量産期間が長期にわたれば、生産量変動シナリオは様々想定され、*LCC* での評価は意味が

ある。

上記 2 つの要件を満足すれば、*FMS-F*以外の生産システムに対しても、式(3-15)は適用可能と考えられる。しかし、その確認は今後の課題であろう。

### 第 3.6 節 第3章のまとめ

需要の変化に対し、常に品質やコスト、納期などの目標値を満足するように対応する生産システムは、一種の制御系とみなすことができる。そこで、柔軟性評価の概念として、「生産システムの柔軟性評価とは、長期にわたる需要の時間的な変化を入力とし、経済性指標を出力とした場合の、生産システムの動特性を評価することである」を提案した。

次に、この概念に基づき、基本的な手法を提案し、その妥当性を検証した。

基本的な手法とは、以下のもので構成されている。

- (1) 入力信号としての、典型的な需要量変動シナリオ
- (2) 出力信号としての、LCC の考え方に基づく経済指標
- (3) 評価する生産システムの、柔軟性パラメータの定義
- (4) 柔軟性評価手順

実際に、デンスーで開発・実用化された *FMS-F* と、比較のために用意した従来システムである *ML* (Manual Line) や *TL* (Transfer Line) に適用して検証した結果、この評価法の妥当性が検証され、提案する概念の正しさも予測された。

同時に、LCC 評価に基づく生産システムの柔軟性は、生涯需要量との関係が強いこともわかった。

さらに、上記の検証結果の考察から、形態変化を特徴とする *FMS-F* の柔軟性を示す“Reconfigurability”を定義した。生涯需要量を横軸にして整理すると、各 *FMS-F* の特徴がよく表れており、異なる製品に対する生産システムであっても相互比較できる可能性のあることがわかった。

以上のことから、本研究で提案した柔軟性評価の概念について、その基本的な正しさが確認された。

## 第4章 生産システムの柔軟性評価法

### －動特性としての評価とその実際的な検証－

第3章で提案した柔軟性評価の概念に基づき、「需要量変動シナリオを入力とし、最適化手法である DP (Dynamic Programming) を用い、LCC が最小となるように生産システムの形態変化を最適化することで得られた LCC を出力とする動特性評価法」を提案する。

生産システムの形態を構成する柔軟性パラメータとしては、生産現場で調整可能なものをきめ細かく設定し、第3章と同様に、*FMS-F*、*ML*、*TL* に適用して動特性評価法の検証をする。

さらに、この動特性評価法で得られた LCC を用い “Reconfigurability” を計算することで、*FMS-F* の柔軟性の相互比較をする。

### 第 4.1 節 動特性評価と検証のステップ

第3章においては、4つの典型的な需要量変動シナリオに対する LCC を計算し、LCC が最小となる生産システムは生涯需要量の大きさによって変わっていくことを明らかにした。しかし、4つの典型的な需要量変動シナリオと変動のパターンは異なっても同値の生涯需要量を得ることは可能である。LCC が最小となる生産システムは、生涯需要量の大きさでほぼ決定されるのであろうか。

また、第3章においては、需要量の変動に対して、代表的な柔軟性パラメータとして、設備台数、オペレータまたは作業員数、そして稼働時間を調整して対応とした。しかし、需要量変動への対応方法は、現実には他にもある。たとえば需要量の増加に対しては、稼働率の向上活動や設備のサイクルタイムアップ、極端な例としては外部への製造委託といった方法もある。需要量の減少に対しても、加工法の変更（自動組立から手作業化とか、型を用いた一発加工から切削や研削・穴明けなどの逐次機械加工化など）や、極端な例としては休業日の設定や分散している工場・工程の集約といった方法もある。選択できる対応方法が多ければ、広い意味での生産システムは柔軟性が高いと言えるだろう。

本研究では、生産システムの定義を工場内のラインやセルに限定している。第3章で述べた柔軟性評価法をベースに、生産システムを制御系とみなしその動特性を評価する方法を開発することで、柔軟性評価法を一般化する。



そのため、第 3.1 節で提案した、生産システムの柔軟性を動特性として評価する方法を示し、実用化した *FMS-F* を用いて検証する。

まず、入力となる需要量関数として数個の典型的なモデルだけでなく連続的に変化する多くのモデルを用意する必要がある。

また、需要量の変動に対して生産システムが選択できる柔軟性パラメータに関しても、現実的な組み合わせを可能な限り多く用意する必要がある。

出力としては、LCC で十分であろう。比較対象となる *TL* の設備費で規準化すれば、第 3 章の結果が生産システムの動特性の中に含まれるものか、あるいは特殊解や特異解だったのかがわかるだろう。

ところが、たとえば 100 通りの需要量変動シナリオに対し、3 つの生産システムが各四半期にそれぞれ 3 通りの対応方法を有するならば、40 四半期にわたる LCC が最小となる対応方法の組み合わせは、 $100 \times 3 \times 3^{40} \cong 3^{45}$  通りの計算結果の中から見つけることになり、コンピュータを使用するにしても合理的な方法とはいえない。

したがって、最適化手法を応用することにする。

それでは、以下、次のステップで述べていくこととする。

ステップ 1：入力信号とする需要量変動シナリオを生成する。これは第 4.2 節で述べる。

ステップ 2：現実的な柔軟性パラメータの組合せを多く設定する。これは第 4.3 節で述べる。

ステップ 3：最適化手法を応用した LCC の計算方法を構築する。これは第 4.4 節で方法を、第 4.5 節で基本シナリオを用いた検証を述べる。

ステップ 4：生産システムの柔軟性を評価・考察し、動特性評価の検証をする。これは第 4.6 節で述べる。

最後に、第 4 章のまとめを述べる。

## 第 4.2 節 入力としての需要量変動シナリオの作成

まず、入力信号となる需要量変動関数について検討する。

自由に予測した需要量変動を関数で定義するのは難しいが、第 3 章で述べた、基本的な 4 つのシナリオを表す需要量関数  $V_1(t) \sim V_4(t)$  に、それぞれが起こる確率をかけた 1 次結合で表現するなら可能である。また、実際に起こる需要量変動の多くも、4 つのシナリオの組み合わせと考えると大きな間違いはないと思われる。

したがって、式(3-2)は、次式で定義する需要量変動シナリオ $V(t)$ を予測シナリオとしてLCCを計算する場合に適用できる。

$$V(t) = p_1 \cdot V_1(t) + p_2 \cdot V_2(t) + p_3 \cdot V_3(t) + p_4 \cdot V_4(t) \quad (4-1)$$

$$\text{ここで, } 0 \leq p_1 \leq 1.0, 0 \leq p_2 \leq 1.0, 0 \leq p_3 \leq 1.0, 0 \leq p_4 \leq 1.0 \quad (4-2)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1.0 \quad (4-3)$$

シナリオ1~4の生涯需要量は0.21から1.0の値をとるので、その間をほぼ100等分した値を持つ需要量変動関数 $V(t)$ を100通り作成し、それらを入力信号とする。そのためには、式(4-2)、(4-3)を満たす $p_i$  ( $i=1\sim 4$ )をランダムに発生させて式(4-1)の計算をし、その値(生涯需要量)が0.21から1.0を100等分した値になるものを選択していけばよい。

図4-1に、計算に用いたアルゴリズム(Macro9)を示す。計算にはエクセルのVBA機能を利用した。得られた $p_i$  ( $i=1\sim 4$ )は、テーブルに保存しておき、後の第4.4節で説明する最適化手法を用いた計算の中で使用する。

実際のプログラムMacro9は、巻末に付録として添付した。

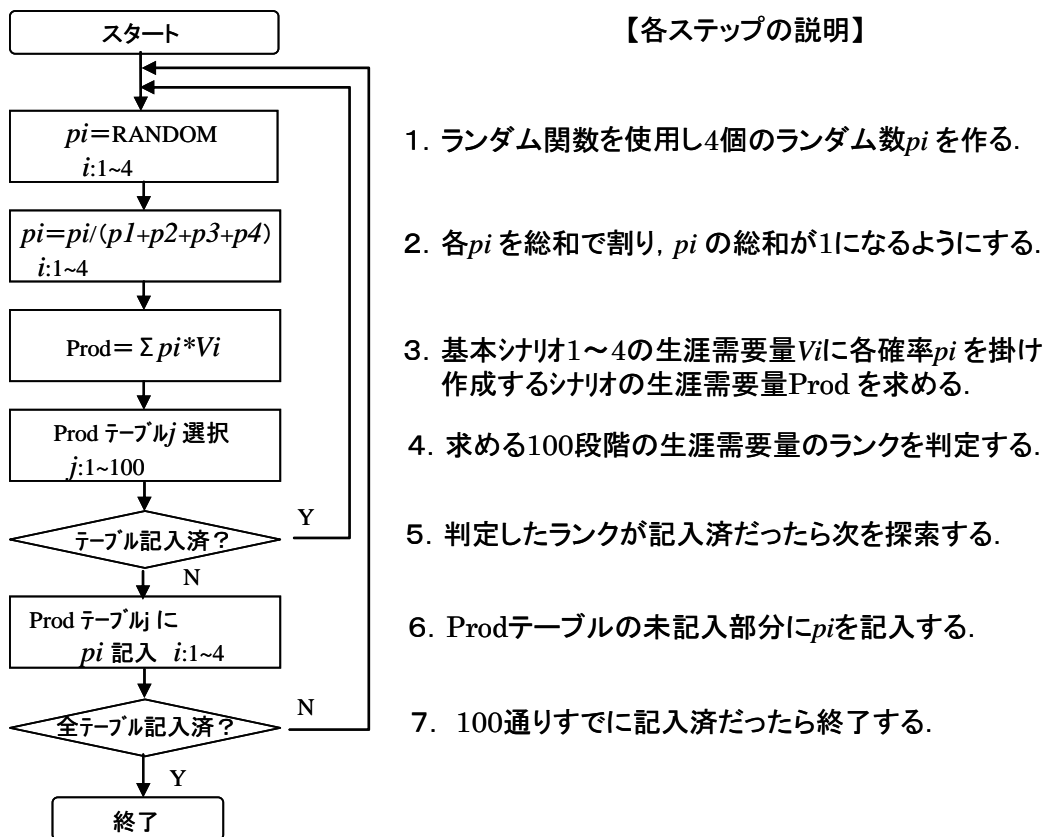


図4-1 確率 $p_i$  ( $i=1\sim 4$ )の計算アルゴリズム(Macro9)とその説明

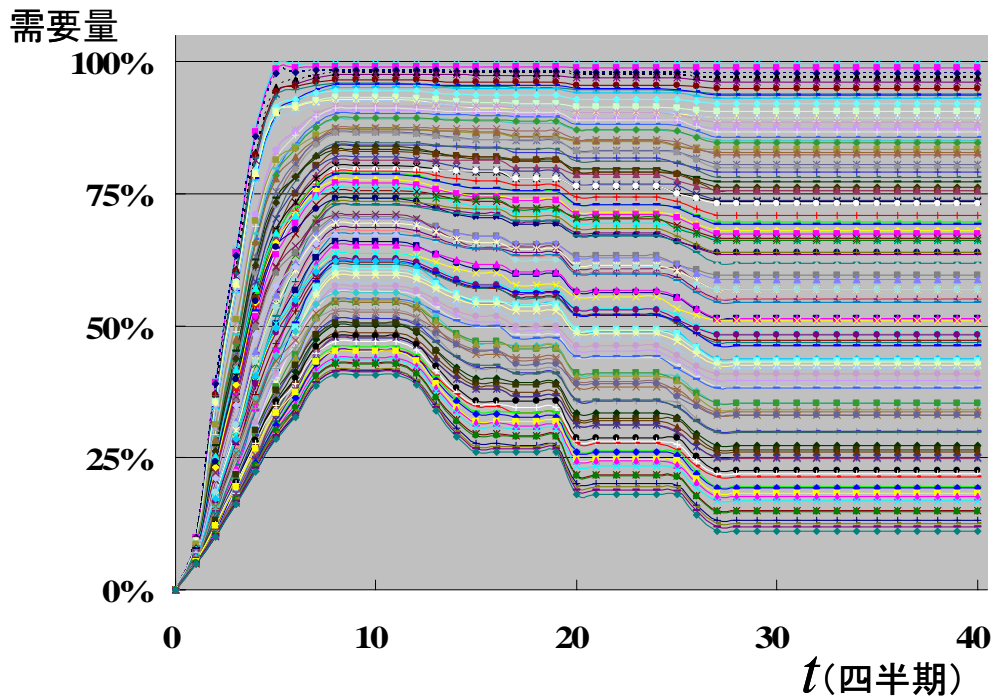


図 4-2 作成した 100 通りの需要量変動関数

また、計算を実行して得られた 100 通りの需要量変動関数を図 4-2 に示す。

ランダム関数を使用したか、実際に得られた 100 通りの関数の形状は、シナリオ 1 の関数とシナリオ 4 の関数の間を、ほぼ連続的に変化するものであった。これは、式 (4-2) の条件において、確率  $p_i$  ( $i=1\sim 4$ ) に負の値を認めなかったからである。

現実の経済状況では、リーマンショックに端を発した 2009 年の不況のように、たとえば需要量が 1.0 (100%) から 0.5 (50%) 以下へ大きく減少することも考えられる。本研究では、製造業が戦略的な (シェア拡大を狙うような) 攻めのビジネスを展開するときに想定するリスクを扱っている。その想定するリスクの中に、需要量が 1.0 (100%) から 0.5 (50%) 以下へ大きく減少することがあるのならば、基本シナリオの 1 つとして想定すればよい。そのシナリオを含めて、同じアルゴリズムで確率  $p_i$  ( $i=1\sim 4$ ) を求め、100 通りの関数をグラフ化すれば、図と同様にほぼ連続的に変化するグラフが得られるだろう。

したがって、今回得られた、需要量変動関数の形状がほぼ連続的に変化していることは問題としない。もちろん、特殊な需要量変動シナリオについては、個別に解けばよいのである。

なお、図 4-2 は、巨視的に見れば連続的に並んでいるように見えるが、図 4-3 に

示すように、一部を拡大して微視的に見れば、生涯需要量が隣り合う3つのグラフの中には交差しているものもある。図4-3は、凡例に示すように、上から生涯需要量がそれぞれ0.8, 0.5, 0.3前後の3つの需要量変動関数のグラフを、重ねて示したものである。最初の2年間(8四半期)の需要量の大きさの順位が、その後の順位と必ずしも一致していないことが容易に見て取れる。生涯需要量にそれほど大きな差がなくても、生産開始後の増加速度の違いは、分割投資可能なMLやFMS-Fの投資時期の違いになる。需要量が比較的安定した期間は、選択された形態の労務費レートによって影響を受けることになる。前半と後半でグラフが交差しているということは、どちらの影響が大きいかを調べるのに都合がよい。数多くのシナリオの用意することは意味があるといえる。

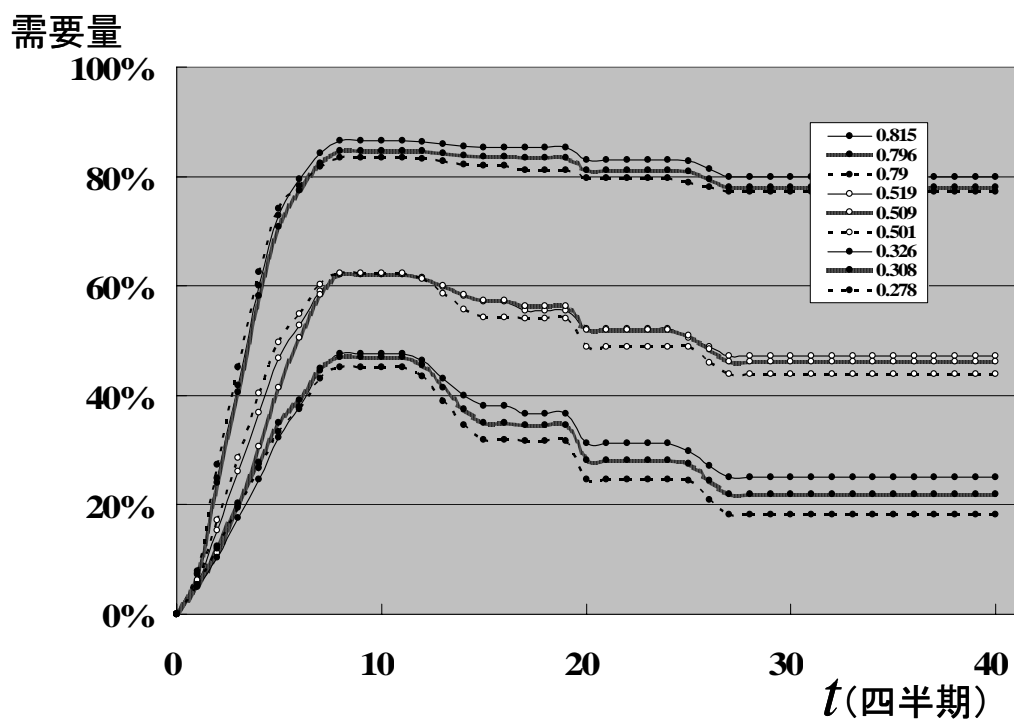


図4-3 生涯需要量の値が隣り合う3つの需要量関数グラフの例

## 第 4.3 節 柔軟性パラメータの設定

需要量の変動に対し、製造コストが計画値から大きく逸脱することなく、ほぼ最小になるように調整可能かどうかは、柔軟性パラメータの設定に大きく影響される。第 4 章で設定する柔軟性パラメータは、第 3 章で設定したものを前提に、生産現場で調整可能なものをより細かく設定する。それらは、オペレータ（または作業員）の人数と月間稼働時間に関するものである。

需要量の変動に対し、生産現場で実際に行われることは、次のような考え方に基づいている。ただし、急激な増加や減少ではなく、事前に予想がつく範囲のゆるやかな増加や減少を対象とする。また、改善活動（稼働率向上、不良率低減、作業改善など）は日常の当然のこととして、ここでは触れない。

まず、需要量が増加する場合、設備投資は固定費の増加になるため、稼働時間を延長することで設備投資を極力回避する。ある水準をこえる残業レベルになってしまう場合は、設備投資（何らかの改造や機能追加、台数の増強など）をすることになる。本論文では設備（ユニットやセルの）台数の増加に代表させる。

需要量が減少する場合は、逆である。自動車部品の生産システムのように自動化度が高いと、設備投資を抑えるため昼夜交代勤務を前提にし稼働時間は長いのが普通である。従って、需要量が減少する場合は、先ず昼夜交代勤務を維持した状態で（オペレータや作業員の数を変えずに）稼働時間を減らす。定時割れしそうになると、直当りの人数を減らして（稼働率が低下するので生産性がいくらか犠牲になるが）、昼夜交代勤務は継続する。それでも定時割れしそうになれば、適当な人数に変更して昼勤のみの稼働とする。

なお、自動化度の高い生産システムには、設備立ち上げ時に余分な時間がかかったり、品質が安定したかどうかチェックしたりすることが多い。俗に寝起きの悪い設備と呼ばれるものである。したがって、設備の稼働と停止を頻繁に繰り返すことは一般に嫌われる。

第 4 章では、上記のことが実現できるように、柔軟性パラメータの組合せを作成した。柔軟性パラメータの設定は、製造コスト見積もりの前提条件と密接に関連している。柔軟性パラメータの組合せを説明する前に、製造コスト見積もりの前提条件に関して、第 3 章と第 4 章の基本的な違いを比較したものを、**表 4-1** に示す。

表 4-1 製造コスト見積もりの前提条件比較一覧

項目		第3章	第4章
設備費関連項目	設備投資額	<i>FMS-F</i> :実績ベース <i>ML, TL</i> :見積もりベース	← ←
	減価償却	7年定額	←
	設備稼働率	<i>FMS-F</i> :90%(想定) <i>ML</i> :95%(想定) <i>TL</i> :85%(想定)	← ← ←
	生産能力(台/月)	基本能力:360時間稼働時 最大能力:基本能力と同じ	← 最大能力:基本能力の1.22倍(440時間稼働時)
労務費関連項目	月間稼働時間	0~360時間 定時割れも容認	160~220, 320~440時間 原則として定時割れは認めない
	人員構成	<i>FMS-F</i> :実績ベース <i>ML, TL</i> :見積もりベース	<i>FMS-F</i> :実績+減少パターン見積もりベース <i>ML, TL</i> :標準+減少パターン見積もりベース
	工数	近似式 (代表的モデルから最小近似)	←
	労務費レート	1.07 (月間稼働時間に関係なく固定)	1.00(月間稼働時間:160~205) 1.03(月間稼働時間:206~220) 1.10(月間稼働時間:320~410) 1.13(月間稼働時間:411~440)
間材経費関連項目		<i>FMS-F</i> :実績ベース <i>ML, TL</i> :見積もりベース	← ←

*FMS-F*と比較する *ML, TL* の仕様は、第 3 章で用意したものと共通である。たとえば、設備投資額や稼働率、月間稼働時間が 360 時間（残業時間として 20 時間/直）で標準的なオペレータまたは作業員数のときの生産能力、そして間材経費は同一である。ただし、第 3 章では、上記の生産能力をこえる需要量になった場合、追加投資が発生するとしたが、第 4 章では、440 時間（残業時間として 60 時間/直）まで現状設備で対応し、それをこえる需要量になったとき追加投資するとした。

工数に関しては、いくつかの需要量に対する代表的な編成人数のモデルを元にした同じ工数近似式を第 4 章でも使用する。ただし、第 3 章では、月間稼働時間を最大 360 時間（残業時間として 20 時間/直）とするとともに定時割れを無視し、労務費レートを一律 1.07(円/秒)と設定したが、第 4 章では、以下のようにする。

月間稼働時間を最大 440 時間（残業時間として 60 時間/直）とし、定時割れを原則として認めない。また、労務費レートを交代勤務や残業手当を反映して 1.00 から 1.13 まで 4 段階で仮定した。この段階は労働基準法の考え方に基づいている。月間残業時間として労使協定を必要とする 45 時間/直を境界にして、1 直から 2 直の間

で4段階としたのである。ただし、計算の都合上、定時割れしか選択できない需要量になってしまう場合は、定時での労務費レートすなわち160時間以下の場合には1.00、221～319時間の場合は1.10を使用することとした。

なお、現在価値計算のための割引率は、第3章と同じ年率10%とした。したがって、四半期単位での割引率は  $\rho = 0.024114$  である。繰り返しになるが、経済成長が鈍化した現代の先進国においては、年率10%の割引率には違和感があると思われる。しかしながら、*FMS-F*を開発したのが80年代後半から90年代半ばまでであったこと、および*FMS-F*の分割投資効果を確認するため、分割投資効果が表れやすいこの数値を敢えて使うこととする。

*FMS-F*や比較対象の*ML, TL*それぞれの、生産現場での現実的な運用方法を考慮して設定した柔軟性パラメータを、以下説明する。

#### (1) *CAC*および比較対象となる*ML, TL*の柔軟性パラメータ

図4-4に、*CAC*の場合の選択可能な柔軟性パラメータの組合せすなわち形態と生産能力（月間稼働時間が360Hの時：図中HはHoursの略）を示す。

柔軟性パラメータは、セル数（1～6台）、オペレータ数（1～4人/直）、月間稼働時間（これにより昼夜交代勤務の有無や残業時間が確定する）の組合せで、全部で21通りの形態を用意した。

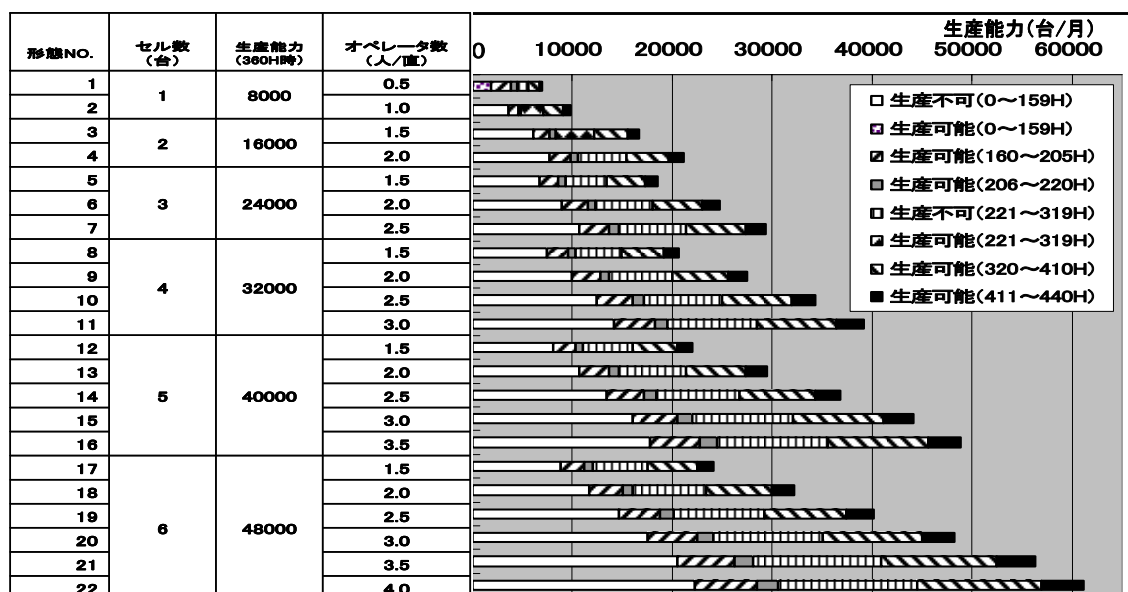


図4-4 *CAC*の柔軟性パラメータの組合せと生産能力

月間稼働時間の最大は 440 時間で、なるべく定時割れが生じないようにした。

図 4-4 の中で、棒グラフは生産能力（カッコ内は月間稼働時間）を表している。基本は、左から生産不可（0～159 時間）、生産可能（160～205 時間）、生産可能（206～220 時間）、生産不可（221～319 時間）、生産可能（320～410 時間）、生産可能（411～440 時間）である。セル数が 1 台単位、オペレータ数は 0.5 単位でしか変更できないため、定時割れにより生産不可になる場合がある。その部分は、生産可能（0～159 時間）、生産可能（221～319 時間）となっている。

同様に、CAC と比較する ML, TL それぞれの柔軟性パラメータの組合せすなわち形態と生産能力（月間稼働時間が 360H の時：図中 H は Hours の略）を図 4-5 および図 4-6 に示す。

ML はコンベアラインの規模（需要量の増加に応じて延長可能だが、短縮はできないものとした）、作業員数（1.5～10 人/直）と月間稼働時間の組み合わせで、合計 10 の形態とした。

TL はオペレータ数（0.5～3.5 人/直）と月間稼働時間の組み合わせで、合計 7 の形態とした。標準でもオペレータ数の少ない TL では、形態 1～3 で定時割れが生じるが生産可能とした。

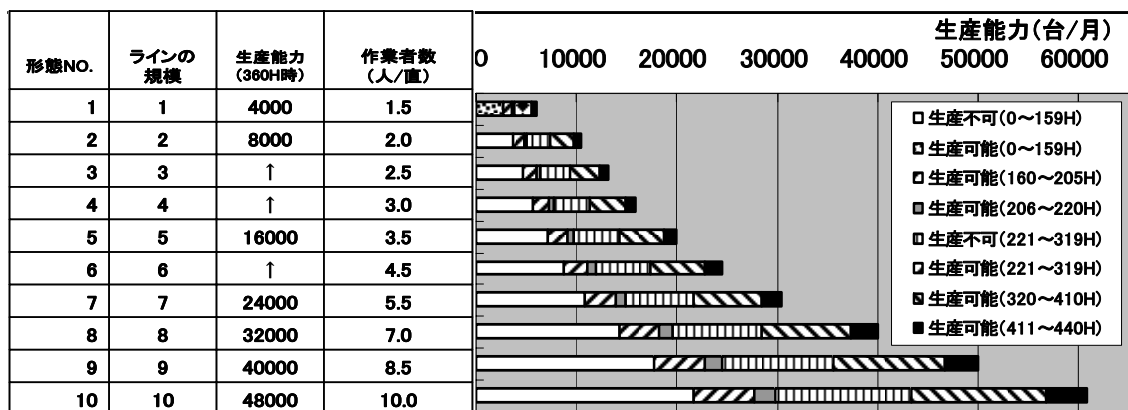


図 4-5 CAC と比較する ML の柔軟性パラメータの組合せと生産能力



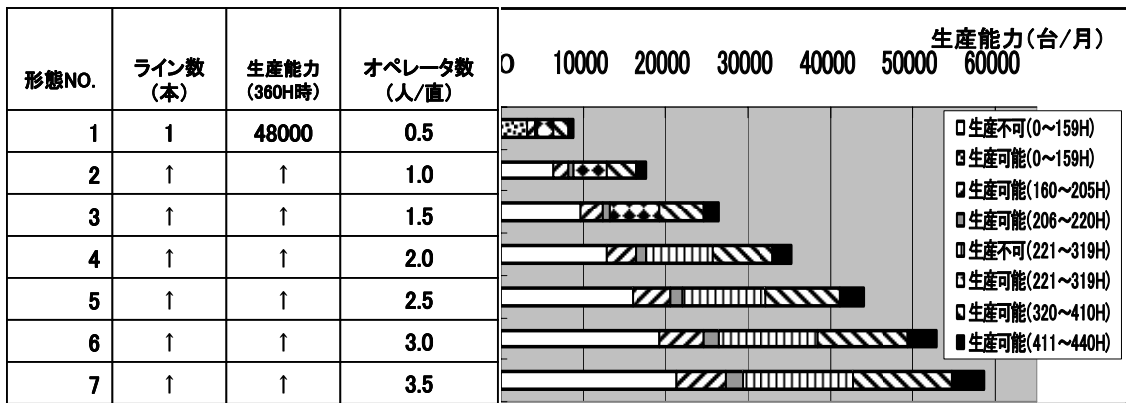


図4-6 CACと比較するTLの柔軟性パラメータの組合せと生産能力

(2) CTL および比較対象となる ML, TL の柔軟性パラメータ

図 4-7 に, CTL の場合の選択可能な柔軟性パラメータの組合せすなわち形態と生産能力 (月間稼働時間が 360H の時: 図中 H は Hours の略) を示す。

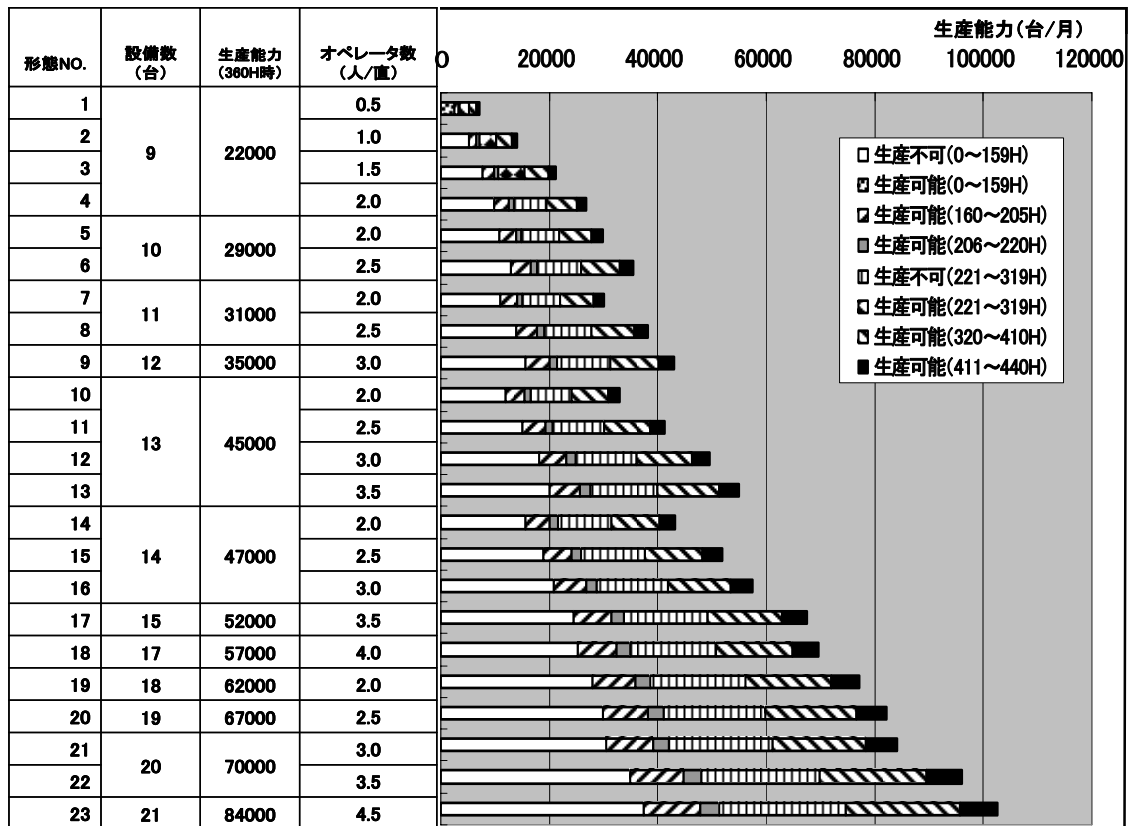


図4-7 CTLの柔軟性パラメータの組合せと生産能力

柔軟性パラメータは、設備台数（9～21 台）、オペレータ数（0.5～4.5 人/直）、月間稼働時間（これにより昼夜交代勤務の有無や残業時間が確定する）の組合せで、月間稼働時間の最大は 440 時間で、なるべく定時割れが生じないように、全部で 23 通りの形態を用意した。

図の中で、棒グラフは生産能力（カッコ内は月間稼働時間）を表している。基本は、左から生産不可（0～159 時間）、生産可能（160～205 時間）、生産可能（206～220 時間）、生産不可（221～319 時間）、生産可能（320～410 時間）、生産可能（411～440 時間）である。セル数が 1 台単位、オペレータ数は 0.5 単位でしか変更できないため、定時割れにより生産不可になる場合がある。その部分は、生産可能（0～159 時間）、生産可能（221～319 時間）となっている。

同様に、CTL と比較する ML, TL それぞれの柔軟性パラメータの組合せすなわち形態と生産能力（月間稼働時間が 360H の時：図中 H は Hours の略）を 図 4-8 および 図 4-9 に示す。

ML はコンベアラインに装備する半自動機の台数（6～16 台。ただし、需要量の増加に応じて増設は可能だが、撤去や転用はできないものとした）、作業員数（2～10 人/直）と月間稼働時間の組み合わせで、合計 14 の形態とした。

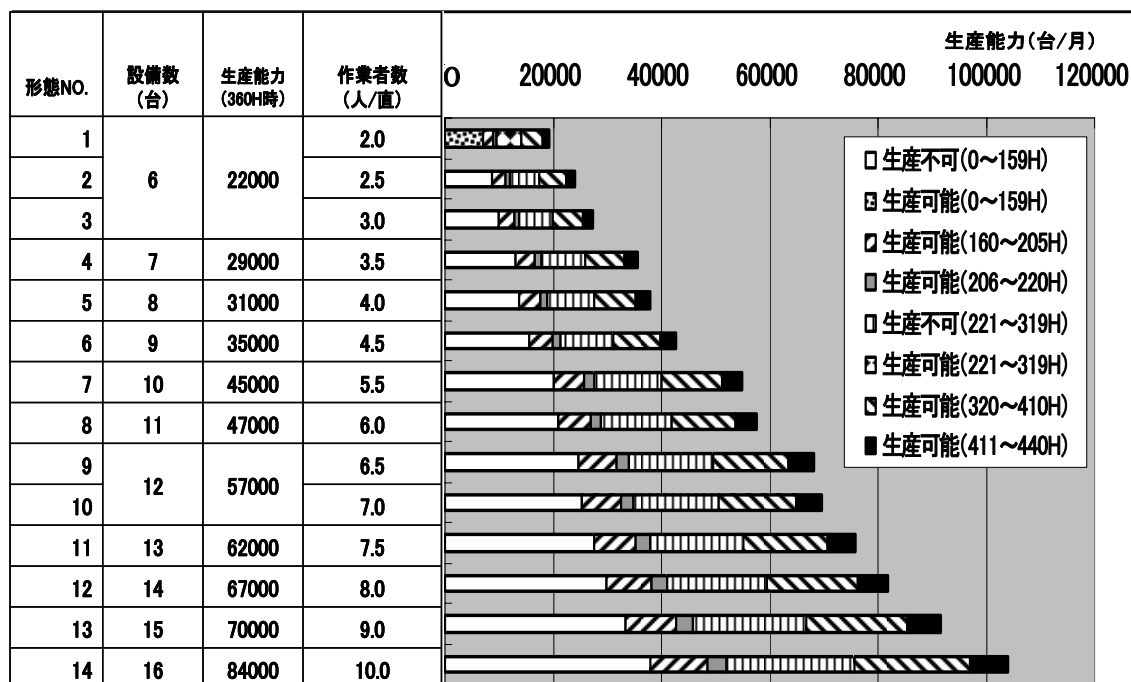


図 4-8 CTLと比較するMLの柔軟性パラメータの組合せと生産能力

TLはオペレータ数（0.5～5人/直）と月間稼働時間の組合せで、合計9の形態とした。標準でもオペレータ数の少ないTLでは、形態1, 2で定時割れが生じるが生産可能とした。

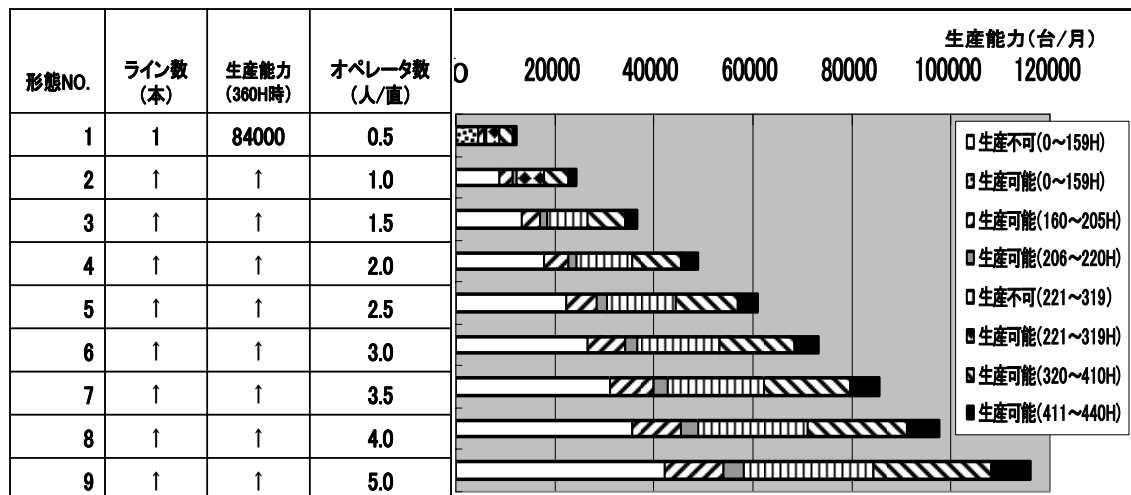


図4-9 CTLと比較するTLの柔軟性パラメータの組合せと生産能力

### (3) PPSおよび比較対象となる ML, TL の柔軟性パラメータ

図 4-10 に、PPS の場合の選択可能な柔軟性パラメータの組合せすなわち形態と生産能力（月間稼働時間が 360H の時：図中 H は Hours の略）を示す。

柔軟性パラメータは、セル数（1～8 台、ただし、PPS の特長である工場内での使い回しが可能なので、需要量の減少に対しては削減・転用できるものとする）、オペレータ数（2～14 人/直）、月間稼働時間（これにより昼夜交代勤務の有無や残業時間が確定する）の組合せで、月間稼働時間の最大は 440 時間で、なるべく定時割れが生じないように、全部で 12 通りの形態を用意した。

図の中で、棒グラフは生産能力（カッコ内は月間稼働時間）を表している。基本は、左から生産不可（0～159 時間）、生産可能（160～205 時間）、生産可能（206～220 時間）、生産不可（221～319 時間）、生産可能（320～410 時間）、生産可能（411～440 時間）である。PPS の特徴で、セル数の増減が倍数となることや、オペレータ数を極端に減らせないため、定時割れにより生産不可になる場合がある。その部分は、生産可能（0～159 時間）、生産可能（221～319 時間）となっている。

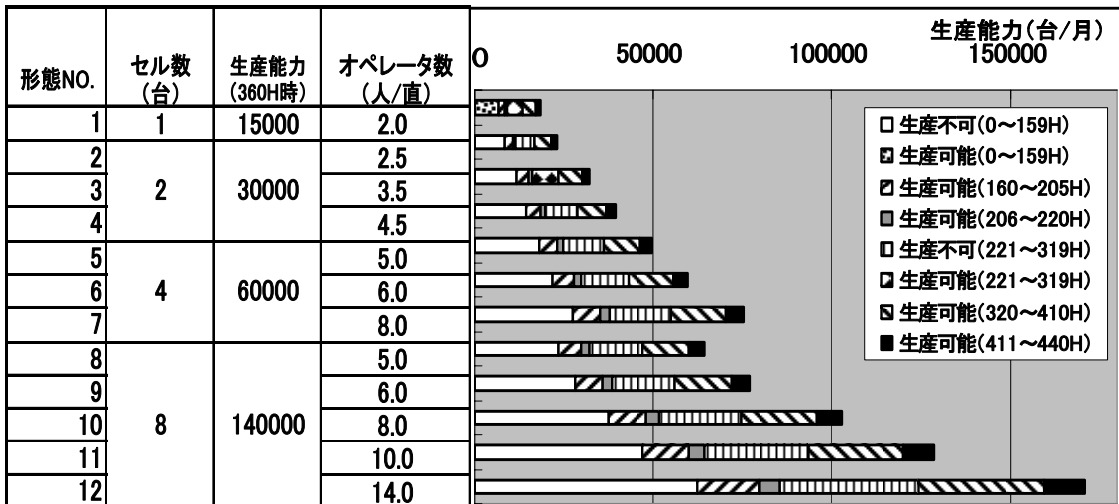


図4-10 PPSの柔軟性パラメータの組合せと生産能力

同様に、*CTL*と比較する *ML*, *TL* それぞれの柔軟性パラメータの組合せすなわち形態と生産能力（月間稼働時間が 360H の時：図中 H は Hours の略）を 図 4-11 および 図 4-12 に示す。

*ML* はコンベアラインの本数（1～4 本、ただし、需要量の増加に応じて増設は可能だが、撤去や転用はできないものとした）、作業員数（3.5～23.5 人/直）と月間稼働時間の組み合わせで、合計 9 の形態とした。

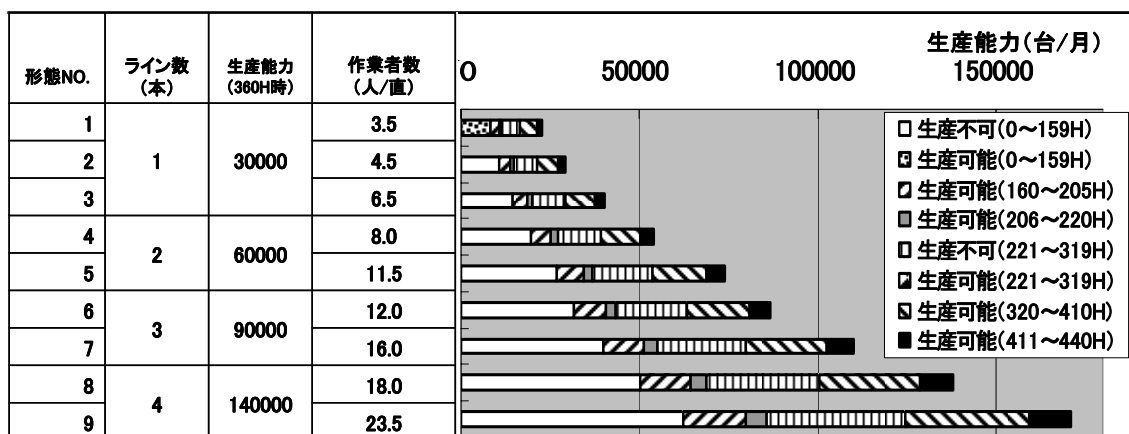


図4-11 PPSと比較する*ML*の柔軟性パラメータの組合せと生産能力

*TL* はオペレータ数（2.5～14 人/直）と月間稼働時間の組み合わせで、合計 9 の形態とした。*ML*, *TL* いずれも、最少人数の形態 1 の 159 時間以下で定時割れが生じるが生産可能とした。

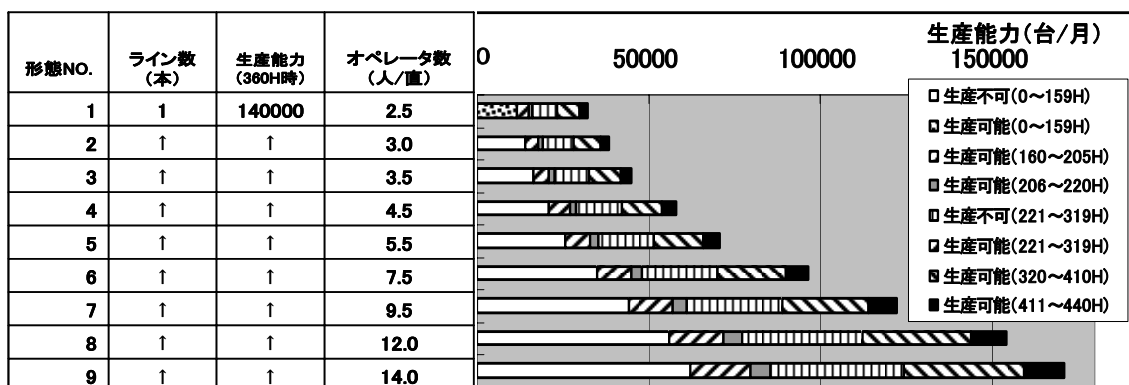


図4-12 PPSと比較する*TL*の柔軟性パラメータの組合せと生産能力

## 第 4.4 節 最適化手法の適用

LCC が最小になるように柔軟性パラメータを選択するため、最適化手法の 1 つである DP (Dynamic Programming:動的計画法) を適用する。

計算時間の短縮化をはかって、DESYMA-Opt 法を参考にしてプログラムを作成した (Alexopoulos et al.[2007])。各四半期で選択可能な柔軟性パラメータの最適解を、先ず最終のステップ第 39 から第 40 四半期の需要量変動であらゆる可能性から計算して決定し、次に、決定した第 39 四半期の柔軟性パラメータは既知のものとして、その直前のステップ第 38 から 39 四半期の需要量変動での最適解を求めていく。これを第 1 四半期の決定まで繰り返していく方法である。

この方法は、以下のように定式化できる。

選択可能な柔軟性パラメータの集合を  $C$  とする。第  $t$  四半期の始めにおける生産システムの形態を  $S_t$  で表す。このとき、第  $t$  から 40 四半期までの LCC が最小になるように選択可能な柔軟性パラメータを最適化して得た LCC の最小値を  $F_t(S_t)$  とすれば、式 (3-2) から次のように表せる。

$$F_{40}(S_{40}) = \min_C \left[ \frac{1}{(1+\rho)} \{I_{40} + V(40)(mc_{40} + ex_{40})\} \right] \quad (4-4)$$

$$\begin{aligned} F_t(S_t) &= \min_C \left[ \sum_{u=t}^{40} \frac{1}{(1+\rho)^{u-(t-1)}} \{I_u + V(u)(mc_u + ex_u)\} \right] \\ &= \min_C \left[ \frac{1}{1+\rho} \{I_t + V(t)(mc_t + ex_t)\} + \sum_{u=t+1}^{40} \frac{1}{(1+\rho)^{u-(t-1)}} \{I_u + V(u)(mc_u + ex_u)\} \right] \\ &= \min_C \left[ \frac{1}{1+\rho} \{I_t + V(t)(mc_t + ex_t)\} + \frac{1}{1+\rho} \sum_{u=t+1}^{40} \frac{1}{(1+\rho)^{u-t}} \{I_u + V(u)(mc_u + ex_u)\} \right] \\ &= \frac{1}{1+\rho} \min_C \left\{ I_t + V(t)(mc_t + ex_t) + \min_C \left[ \sum_{u=t+1}^{40} \frac{1}{(1+\rho)^{u-t}} \{I_u + V(u)(mc_u + ex_u)\} \right] \right\} \\ &= \frac{1}{1+\rho} \left[ \min_C \{I_t + V(t)(mc_t + ex_t) + F_{t+1}(S_{t+1})\} \right], \quad t=39, \dots, 2, 1 \end{aligned} \quad (4-5)$$

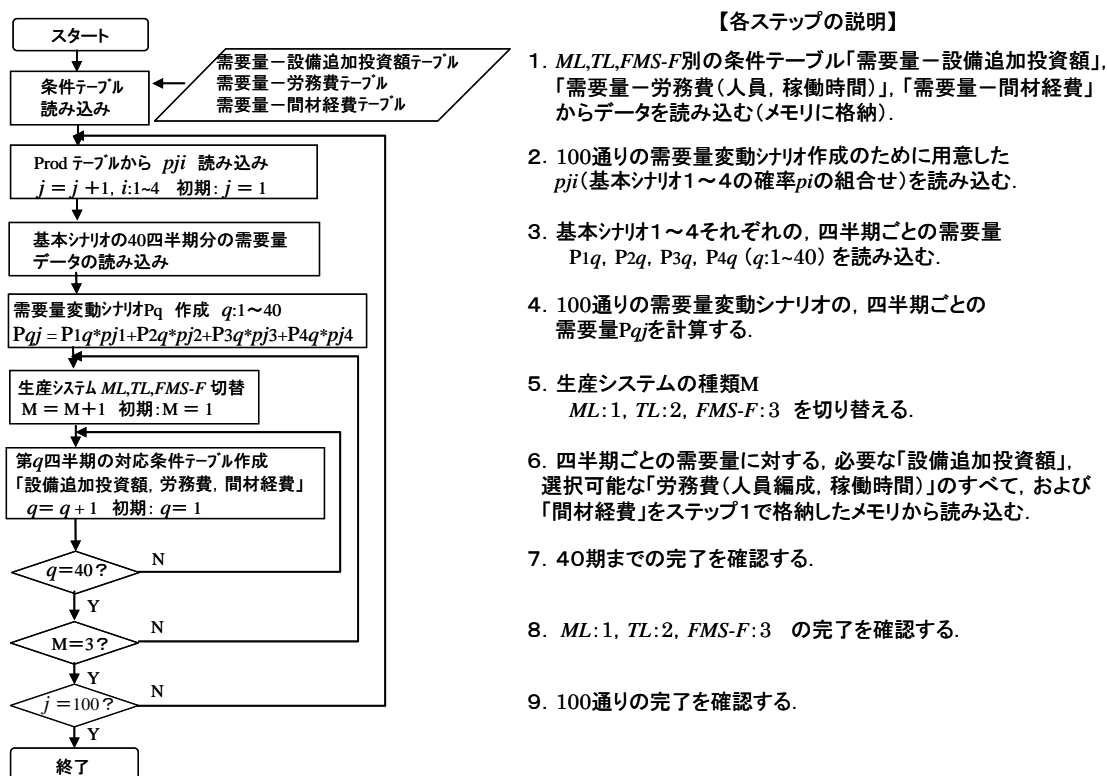
ここで  $S_{t+1}$  は、 $S_t$  と第  $t$  四半期の  $I_t$  から定まる第  $t+1$  四半期の形態である。

なお、上記の方法を用いる場合、減価償却期間を 7 年と設定したため、10 年間の需要量変動に対して LCC を計算するためには、投資時期つまり設備償却の発生した最初の四半期が特定されている必要がある。そこで今回は、稼働時間 440(時間/

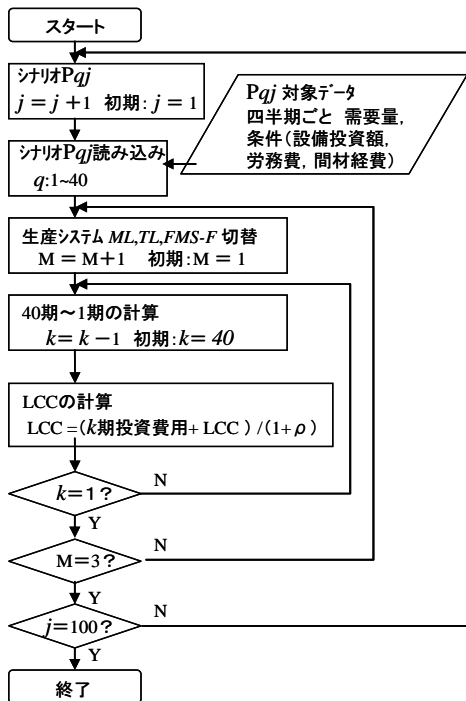
月)換算で生産能力を超えるなら次の設備投資を決定することにし、需要量変動シナリオが与えられたら、40 四半期の間の設備追加投資計画は一意的に決まるものとした。

これらの考え方をプログラミングするためのアルゴリズムを、**図 4-13** および**図 4-14** にフローチャートで示す。

**図 4-13** は、第 4.2 節で作成した 100 通りの需要量変動シナリオに対する、設備追加投資計画と、第 4.3 節で設定した柔軟性パラメータなどを、各生産システムに対する、四半期ごとのデータとして格納する DATA シートを作成するアルゴリズム (Macro3) である。図の中で、 $p_{ji}$  ( $j:1\sim 100, i:1\sim 4$ ) は、100 通りの需要量変動シナリオを作るための、4 つの基本シナリオの確率の組み合わせを表している。そして、 $P_{qj}$  ( $q:1\sim 40, j:1\sim 100$ ) は、得られた 100 通りの需要量変動シナリオの四半期ごとの需要量を表している。



**図 4-13** DATA シート作成のアルゴリズム (Macro3) とその説明



【各ステップの説明】

1. 100通りの需要量変動シナリオ $P_{qj}$   $q:1\sim40, j:1\sim100$ の $j$ を切り替える.
2. DATAシートから  $P_{qj}$ の対象となる 四半期ごとのデータを読み込む(メモリに格納).
3. 生産システムの種類  $ML:1, TL:2, FMS-F:3$  を切り替える.
4. メモリに読み込んだ条件データを使って, 第40四半期から順番にLCCを計算する.
5. 対象となる条件データが複数の場合, LCC計算結果の最小値をリストに記入する.
6. 1期までの完了を確認する.
7.  $ML:1, TL:2, FMS-F:3$  の完了を確認する.
8. 100通りの完了を確認する.

図 4-14 100 通りのシナリオに対する LCC 計算のアルゴリズム (Macro4) とその説明

また, 図 4-14 は, 100 通りの需要量変動シナリオに対して, DATA シートを用いて, 各生産システムに対する LCC を計算するアルゴリズム (Macro4) である.  $P_{qj}$  ( $q:1\sim40, j:1\sim100$ ) の対象となる条件データの中から最小となる LCC を, 第 40 から第 39, 第 38, ……第 1 四半期の順に計算する.

本研究では, マイクロソフトエクセルの VBA 機能を使ってプログラムを作成し, 計算を実行した. なお, 実際のプログラム Macro3 と Macro4 は, 巻末に付録として添付した.



## 第 4.5 節 プログラムの検証

最初に、プログラムが正しいことを確認するため、第 3 章で定義した典型的な需要量変動シナリオ 1~4 に対する各生産システムの  $LCC_{40}/I_{TL}$  と、 $FMS \cdot F$  を相互比較する“Reconfigurability”の計算を行い、従来の計算結果と比較した。

図 4-15 に従来の計算結果と DP を用いた場合の各生産システムの  $LCC_{40}/I_{TL}$  を計算した結果を示す。白抜きのマーカーでプロットした点が、DP を用いて計算した  $LCC_{40}/I_{TL}$  の値である。従来の計算結果はエクセルのスムージング機能によりなめらかな曲線につながってあるが、DP による計算結果は単独の点としてプロットし、従来の計算結果との違いを考察することでプログラムの検証をおこなう。

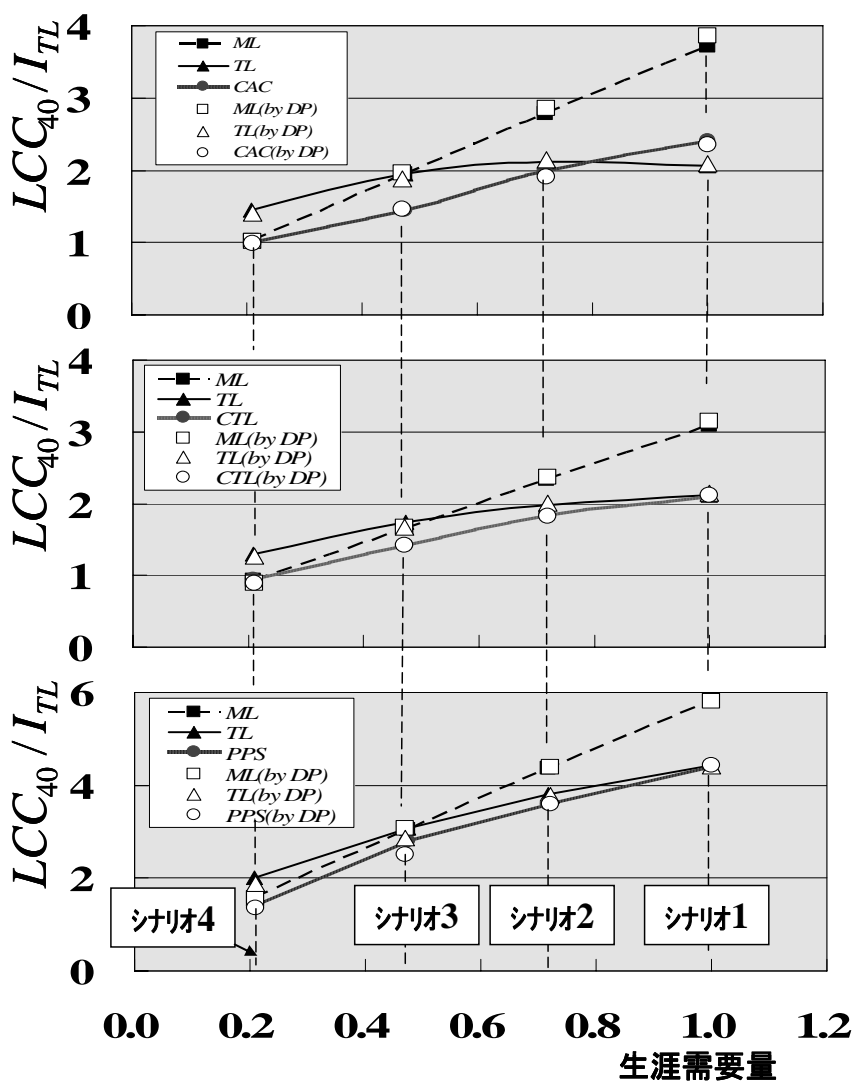


図 4-15 生涯需要量に対する各生産システムの  $LCC_{40}/I_{TL}$

各シナリオに対して、数値の小さいものが有利な生産システムである。

第 3 章では、生涯需要量の減少にしたがって、有利な生産システムは、*TL* から *FMS・F* そして *ML* へと変わっていた。柔軟性パラメータをより実際的にし、*DP* を用いた今回の結果も、有利な生産システムが変わっていく様子は、*CAC*, *CTL*, *PPS* いずれの場合でも一致している。

ところが、数値については、従来 of 計算結果より若干大きく出ているものや小さく出ているものがある。これは、設備費あるいは労務費の計算の前提条件の違いにあると思われる。

たとえば設備費に関しては、従来 of 計算では、設備の追加投資を需要量が生産システムの 360(時間/月)換算能力をこえた場合としたのに対し、今回は 440(時間/月)換算能力としたため、分割投資可能な *ML* や *FMS・F* は追加投資時期が遅れ、現在価値計算効果もあって、*LCC* 計算には有利になる。

また、労務費に関しては、従来 of 計算では、稼働時間の違い(交代勤務の有無や残業時間の違い)に関係なく労務費レートを 1.07 一定としたが、今回は選択可能な形態の中から *LCC* がより小さいものを選択するため、交代勤務のない形態が選択できた場合は、労務費レートとして 1.00 または 1.03 となる。逆に、交代勤務のある形態しか選択できないと、労務費レートは 1.10 または 1.13 となってしまう。需要量に対する工数近似式は同一のため、*LCC* の値がより小さく出たり大きく出たりする。

以上のことから、数値的に異なることはあり得るので、プログラムの検証は多面的におこない、プログラムの正しさの判断は慎重にする必要がある。

そこで、“Reconfigurability” の計算をしてさらにプログラムの検証を試みる。

“Reconfigurability” の定義は次式の通りであった。

$$\text{Reconfigurability} = \frac{LCC_{40,TL}}{LCC_{40,F}} \quad (3-15)$$

ここで、 $LCC_{40,TL}$  : 評価したい *FMS・F* の比較対象となる *TL* の  $LCC_{40}$   
 $LCC_{40,F}$  : 評価したい *FMS・F* の  $LCC_{40}$

定義から明らかなように、**図 4-15** の結果で従来 of 計算結果と *DP* を用いた今回の結果がほぼ一致しているので、“Reconfigurability” も従来とほぼ一致することが予想される。

図 4-16 にその“Reconfigurability”の結果を示す。白抜きのマーカーでプロットした点が、DP を用いて計算した LCC に基づく“Reconfigurability”の値である。従来の計算結果はエクセルのスムージング機能によりなめらかな曲線でつなげてあるが、DP による計算結果は単独の点としてプロットし、従来の計算結果との違いを考察することでプログラムの検証をおこなう。途中の生涯需要量に対する“Reconfigurability”は、次の第 4.6 節で調べることにする。

予想に反して、DP を用いた今回の結果には、従来の計算結果と明らかに異なるポイントがいくつかある。これは、需要量変動シナリオに対して、 $TL$ と  $FMS-F$  それぞれの  $LCC_{40}$  が従来の計算結果とほぼ同じでも、両者の比である“Reconfigurability”は従来の計算結果と異なっている、すなわち、分母と分子の値の異なる方向が逆になっていることを示唆している。

たとえば、 $CAC$ に関しては、シナリオ 1 と 3 の DP の結果を見てみると、シナリオ 1 では従来の結果より大きな結果となり、シナリオ 3 では逆に小さな結果となっている。また、 $PPS$ に関しては、シナリオ 3 と 4 の DP の結果を見てみると、シナリオ 3 では従来の結果より大きな結果となり、シナリオ 4 では逆に小さな結果となっている。

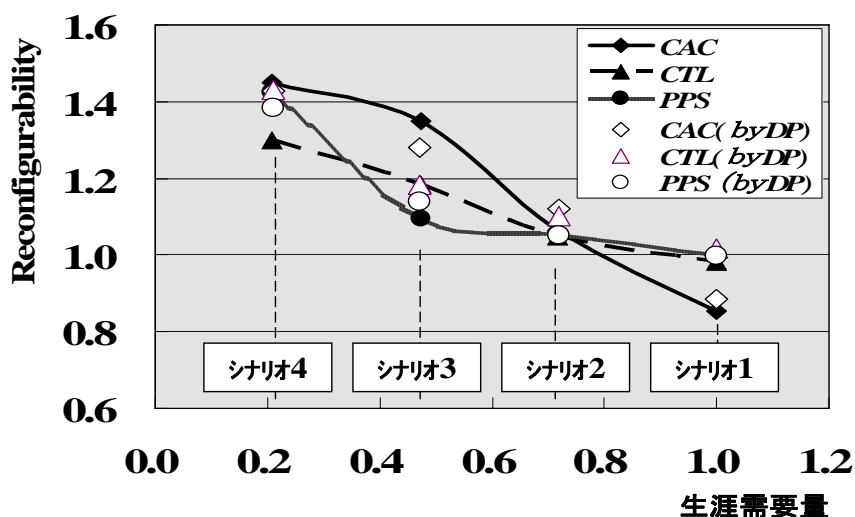


図 4-16 基本シナリオでの DP を用いた結果の確認

そこで、第 3 章と同様に、規準化した  $Cost(t)/P_{TL}$  と  $LCC_i/I_{TL}$  について、シナリオごとに、従来の計算結果と比べ、より詳細に分析することとする。

#### 4.5.1 シナリオ 1 における従来の結果との比較

シナリオ 1 における *PPS* と比較対象の *TL* および *ML* の製造コストと LCC の四半期ごとの推移について、従来の計算結果と DP を用いた計算結果を比較したものを図 4-17 に示す。

図 4-16 の “Reconfigurability” の結果では、両者はほぼ一致しているため、製造コストの推移も LCC の推移もほぼ一致することが予想されたが、確かにその通りであった。シナリオ 1 は 1 年で 100% の計画需要量になる場合である。これでは *PPS* の分割投資効果や減産時の転用効果は発揮されない。また、100% の需要量の安定期は、*PPS* も *TL* もどちらもフル稼働（交代勤務あり）のため、労務費レートにも差が出ない。このことは、*PPS* と同様に 100% 計画需要量で *TL* の形態になる *CTL* も同じと考えられる。実際、図 4-16 の “Reconfigurability” の結果では両者はほぼ一致しているので、同じ詳細分析は省略する。

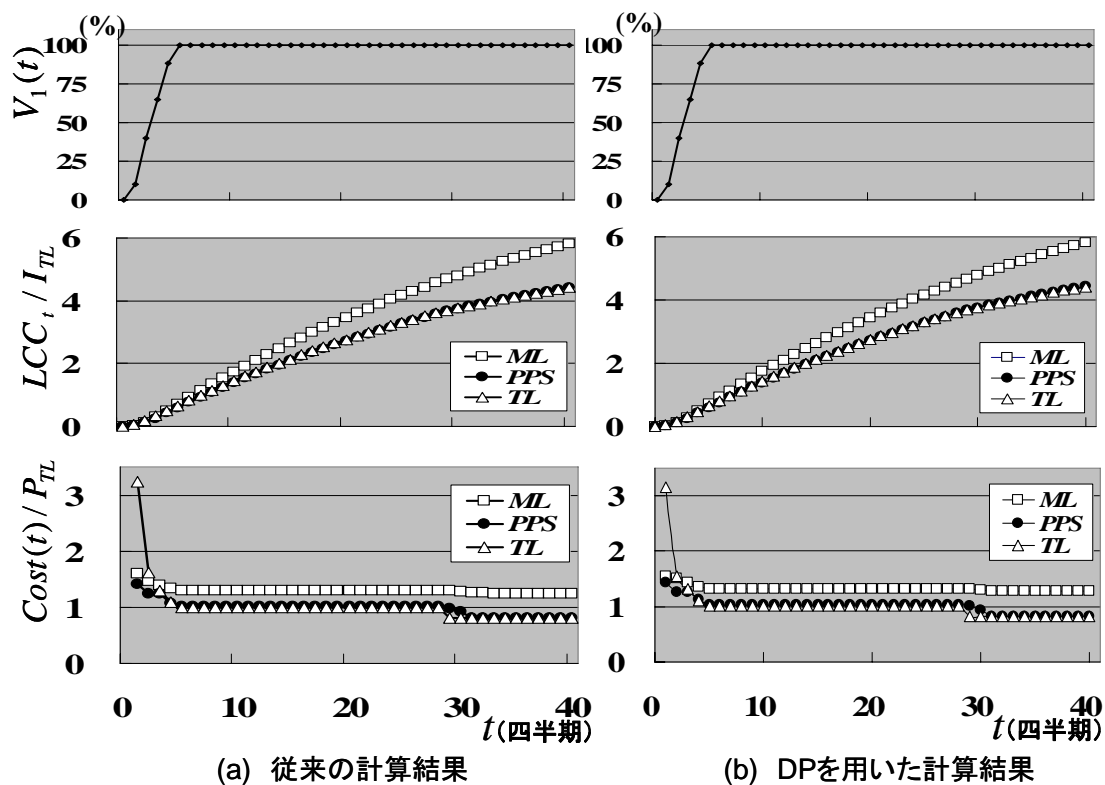


図 4-17 従来の結果と DP を用いた結果の比較 (*PPS* シナリオ 1 の場合)

図 4-16 の “Reconfigurability” の結果では，シナリオ 1 の場合は，CAC だけが従来の結果と差が見られるので，詳細を分析してみる。

シナリオ 1 における CAC と比較対象の TL および ML の製造コストと LCC の四半期ごとの推移について，従来の計算結果と DP を用いた計算結果を比較したものを図 4-18 に示す。

“Reconfigurability” の計算に関係する，TL と CAC の LCC の推移に着目する。従来の計算結果と DP の計算結果はほぼ一致しているが，第 40 四半期になってようやく LCC の値に差が見られる。CAC は従来の計算結果よりわずかに小さく，TL はわずかに大きい。前者の理由は，440(時間/月)までの稼働時間を認めたことによるわずかな分割投資効果であり，後者の理由は，交代勤務をともなう稼働状態による労務費レートの高さによるものと考えられる。製造コストの推移の詳細を観察することにより，それらのことは裏付けられる。

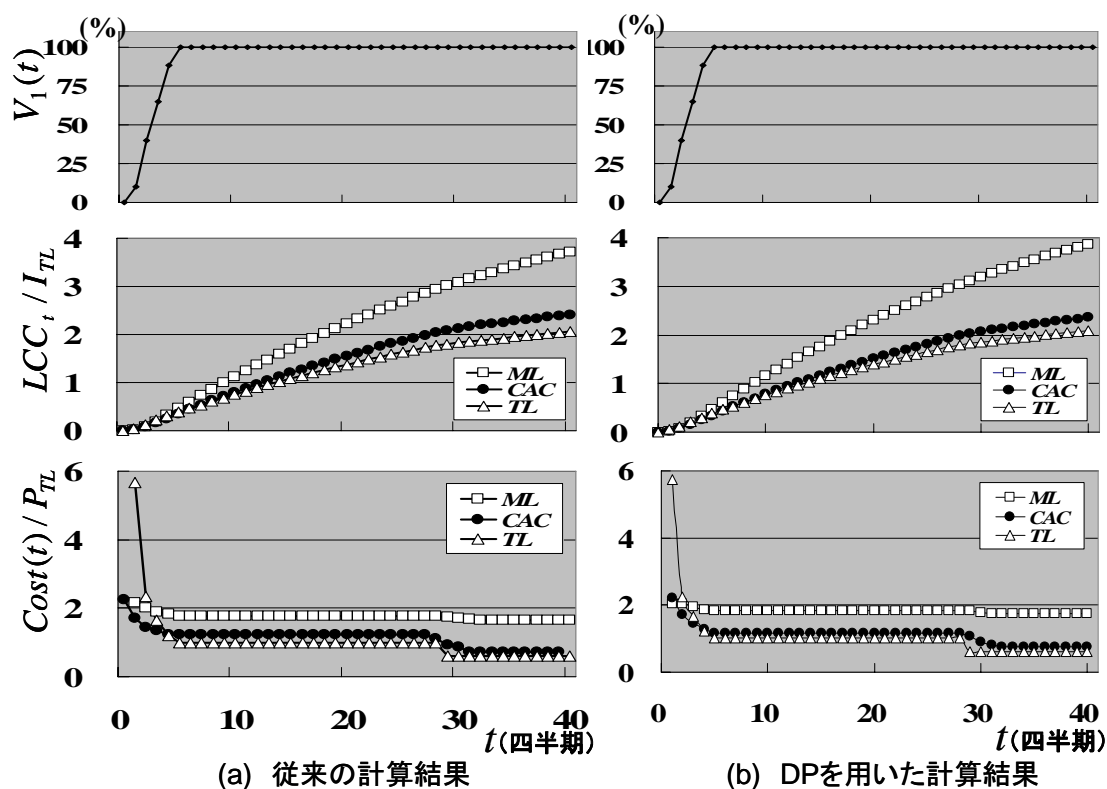


図 4-18 従来の結果と DP を用いた結果の比較 (CAC シナリオ 1 の場合)

#### 4.5.2 シナリオ 2 における従来の結果との比較

シナリオ 2 における  $CAC$  と比較対象の  $TL$  および  $ML$  の製造コストと  $LCC$  の四半期ごとの推移について、従来の計算結果と DP を用いた計算結果を比較したものを図 4-19 に示す。

図 4-16 の“Reconfigurability”の結果では、シナリオ 1 も 2 も、 $CAC$  については、DP の計算結果は従来の結果よりも大きい。シナリオ 2 は生産開始から約 2 年で計画の 80% の需要量になっている。4.5.1 で分析したことと同じ理由が予想されるので、詳細を分析してみる。

“Reconfigurability”の計算に関係する、 $TL$  と  $CAC$  の  $LCC$  の推移に着目する。第 40 四半期における  $LCC$  の値は、従来の結果より、 $CAC$  は小さく、 $TL$  は大きい。そのことは、シナリオ 1 よりも顕著である。前者の理由は、440(時間/月)まで稼働時間を認めたことと生産開始後の需要量増加がシナリオ 1 よりもゆるかなためによる分割投資効果であり、後者の理由は、交代勤務をとまなう稼働状態による労務費レートの高さによるものと考えられる。製造コストの推移の詳細を観察することによっても、それらのことは裏付けられる。

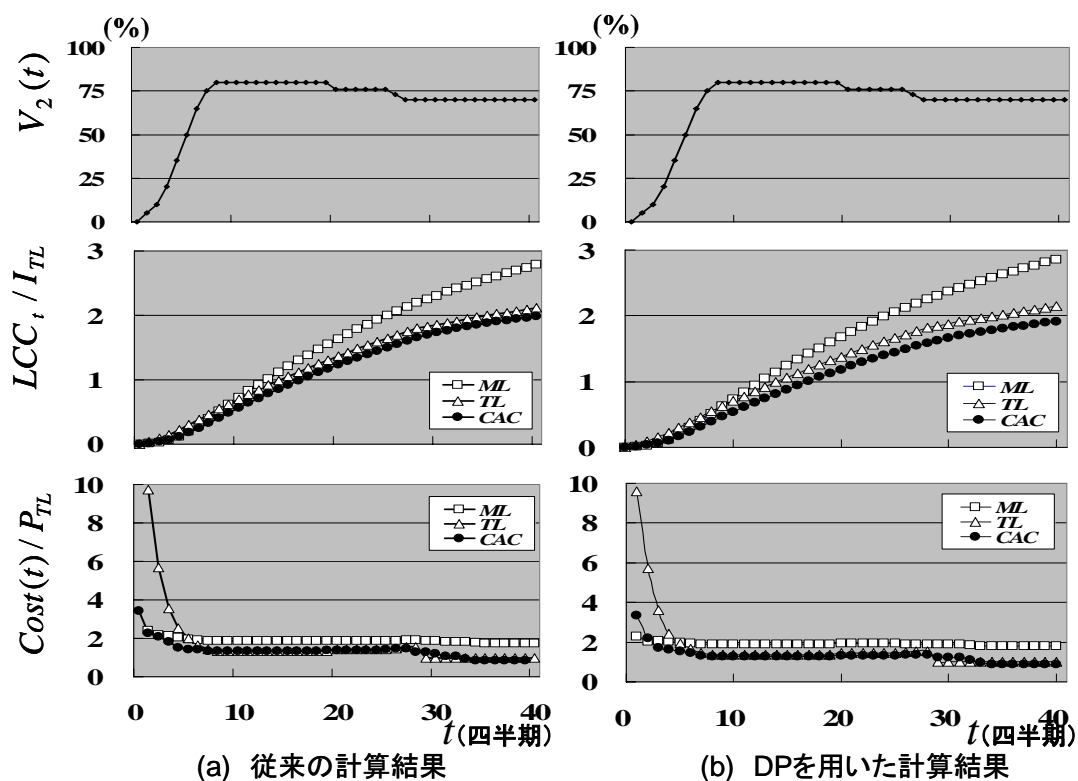


図 4-19 従来の結果と DP を用いた結果の比較 ( $CAC$  シナリオ 2 の場合)

図 4-16 の“Reconfigurability”の結果では、シナリオ 1 でよく一致していた *CTL* が、シナリオ 2 では差が生じているので、詳細分析してみる。

シナリオ 2 における *CTL* と比較対象の *TL* および *ML* の製造コストと LCC の四半期ごとの推移について、従来の計算結果と DP を用いた計算結果を比較したものを図 4-20 に示す。

“Reconfigurability”の計算に関する、*TL* と *CTL* の LCC の推移に着目する。第 40 四半期における LCC の値は、従来の結果より、*CTL* は小さく、*TL* は大きい。そのことは、図 4-19 で分析した *CAC* と同様である。計画の 80% 需要量であれば、図 4-7 で示したように、*CTL* はフル能力に達する 21 台ではなく 17 台の設備で 440(時間/月)稼働させればよいので、*CTL* の分割投資効果が表れるわけである。

一方、*PPS* の場合は、計画の 80% 需要量であれば、たとえ稼働時間が 440(時間/月)許されても、8 セルすべての投資が必要であり、従来の計算結果と DP の計算結果では差はほとんど見られないのである。理由が明確なので、詳細分析は省略する。

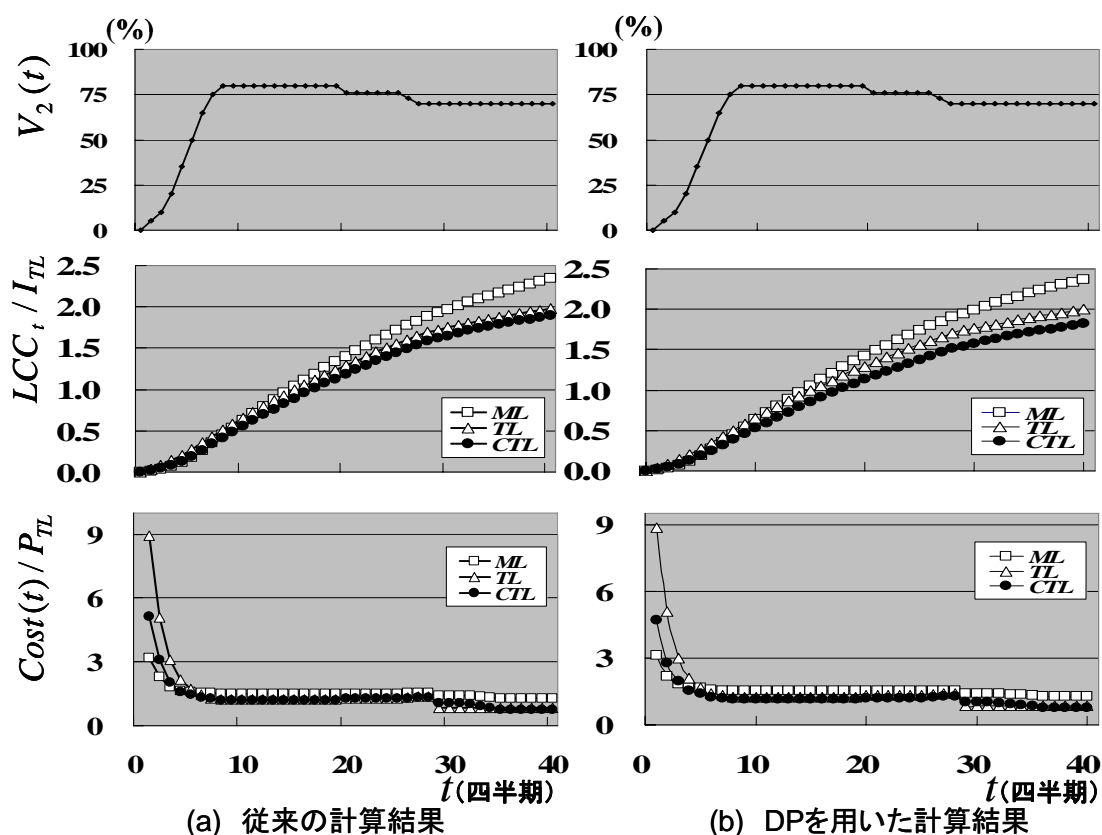


図 4-20 従来の結果と DP を用いた結果の比較 (*CTL* シナリオ 2 の場合)

### 4.5.3 シナリオ 3 における従来の結果との比較

図 4-16 の“Reconfigurability”の結果では、シナリオ 1 も 2 も、CAC については、DP の計算結果は従来の結果よりも大きかったが、シナリオ 3 では逆に小さくなっている。この理由が説明できるか、詳細を分析してみる。

シナリオ 3 における CAC と比較対象の TL および ML の製造コストと LCC の四半期ごとの推移について、従来の計算結果と DP を用いた計算結果を比較したものを図 4-21 に示す。

シナリオ 3 は生産開始から約 2 年で計画の 55% の需要量になっている。稼働時間として 440 (時間/月) 許されても、CAC は 3 セル必要である。ただし、従来よりも投資時期は遅くなる。現在価値計算を考慮すれば、分割投資効果は、従来よりも大きい筈である。

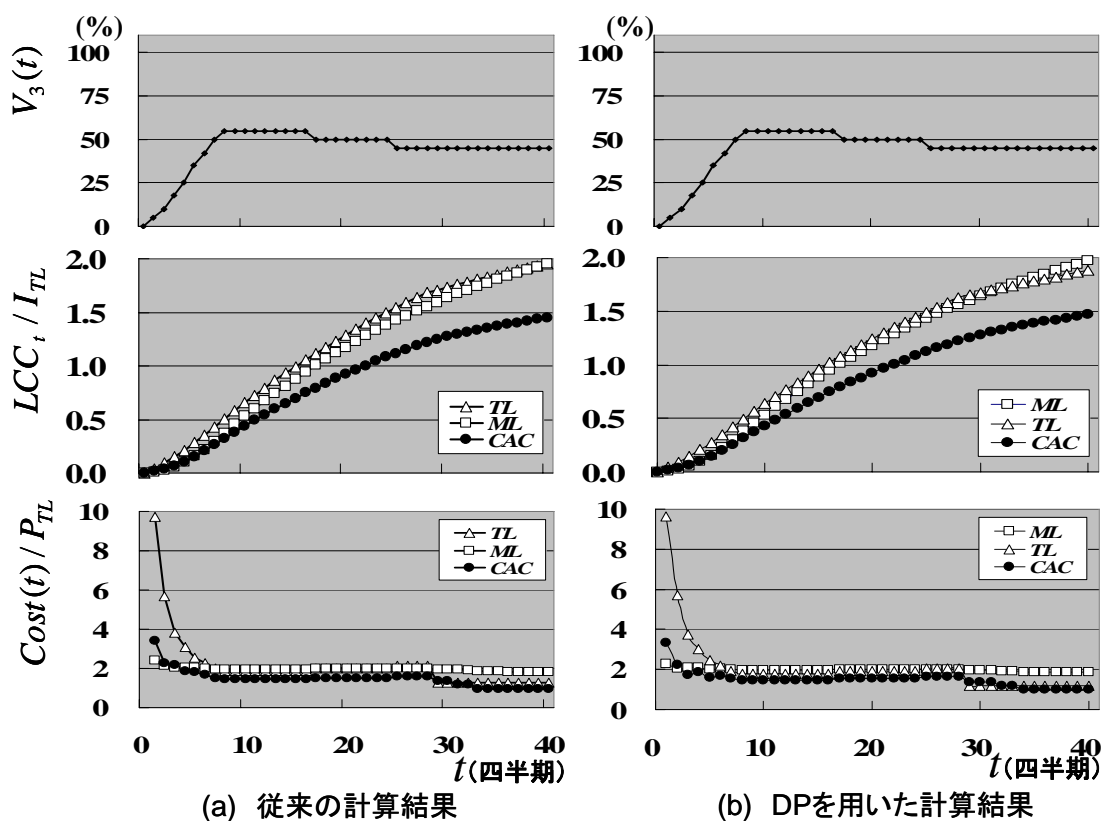


図 4-21 従来の結果と DP を用いた結果の比較 (CAC シナリオ 3 の場合)



“Reconfigurability”の計算に関係する、*TL*と*CAC*のLCCの推移に着目する。第40四半期におけるLCCの値は、従来の結果より、*CAC*はわずかに大きく、*TL*は明らかに小さい。前者についてであるが、分割投資効果が従来よりも大きければ、LCCの値は小さくなる筈だが、そうになっていない。この理由は*TL*が小さくなっていることと関係がある。労務費レートである。ほぼ50%の需要量で推移しているため、3セルでフル稼働の*CAC*は常に交代勤務であり、*TL*は労務費の安い昼勤のみの稼働が選択されていたのである。*CAC*のLCCは設備投資を抑えた代わりに高い労務費レートのためにわずかに大きくなったのである。

したがって、シナリオ3では、*CAC*の“Reconfigurability”は従来の計算結果よりもDPの計算結果は小さくなった。

こういった事情は、*CTL*も同様と考えられる。図4-7で示したように、*CTL*は設備を9~21台と細かく分割投資可能である。計画の55%の需要量であれば、14台編成で対応できる。しかし、フル稼働が必要なため労務費レートが高くなり、LCCとしてはわずかに増加するのである。以上のことより、詳細分析は省略する。

分割投資という点では、*PPS*も同様の筈だが、図4-16の“Reconfigurability”の結果では、DPの方が従来の計算結果よりも大きくなっている。その理由を製造コストとLCCの推移から分析してみる。

シナリオ3における*PPS*と比較対象の*TL*および*ML*の製造コストとLCCの四半期ごとの推移について、従来の計算結果とDPを用いた計算結果を比較したものを図4-22に示す。

“Reconfigurability”の計算に関係する、*TL*と*PPS*のLCCの推移に着目する。第40四半期におけるLCCの値は、従来の結果より、*PPS*は明らかに小さく、*TL*はわずかに小さい。前者の理由は、製造コストの差を見ても推定できるように、従来の前提条件では55%の需要量に対応するため8セルの投資が必要であるのに対し、DPの場合は、440(時間/月)の稼働時間が許されているため、図4-10から明らかかなように4セルで対応できるのである。投資が1/2に抑制されるということは、 $LCC_t / I_{TL}$ の値が約0.5低く抑えられることを意味しており、労務費レートの増加以上の低減効果があるのである。*TL*のLCCが小さい理由は、昼勤のみで稼働するため、労務費レートが小さいことによる。

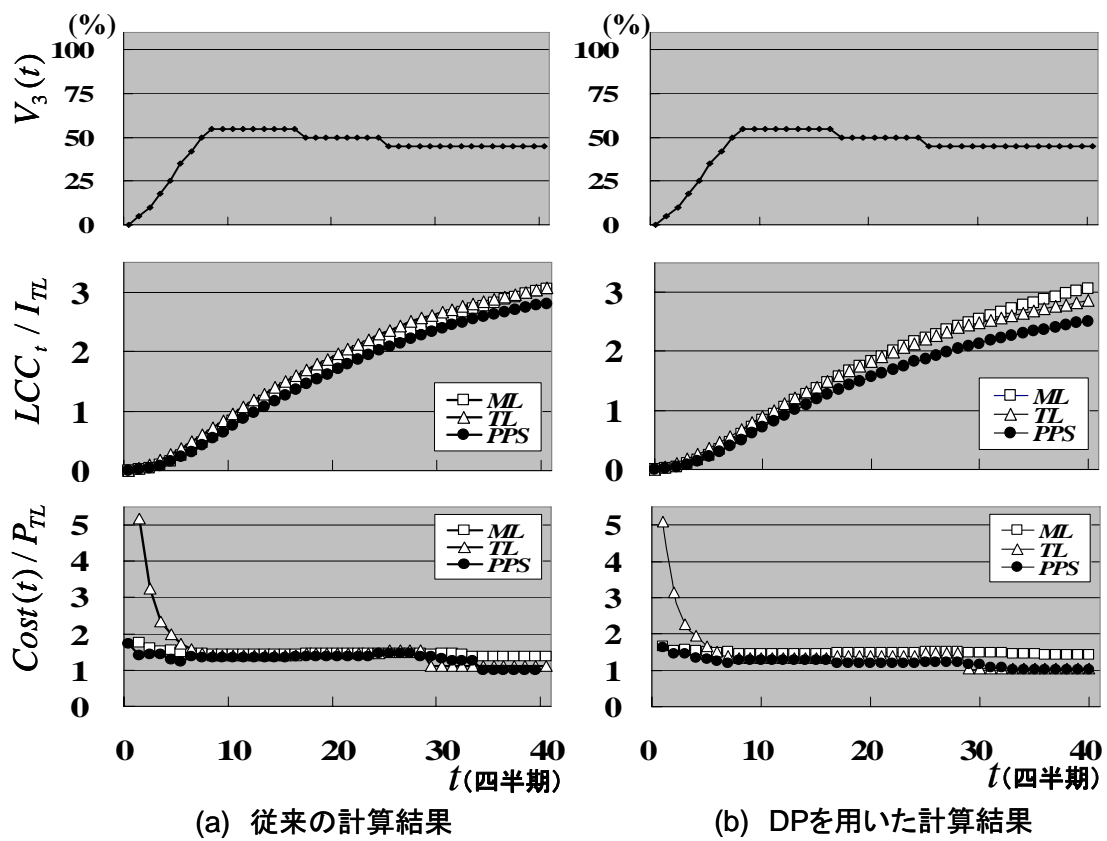


図 4-22 従来の結果と DP を用いた結果の比較 (PPS シナリオ3の場合)

#### 4.5.4 シナリオ 4 における従来の結果との比較

シナリオ 4 における *PPS* と比較対象の *TL* および *ML* の製造コストと *LCC* の四半期ごとの推移について、従来の計算結果と DP を用いた計算結果を比較したものを図 4-23 に示す。

図 4-16 の“Reconfigurability”の結果では、*PPS* については、DP の計算結果は、シナリオ 3 では従来の結果よりも大きかったが、シナリオ 4 では逆に小さくなっている。この理由が説明できるか、詳細を分析してみる。

“Reconfigurability”の計算に関係する、*TL* と *PPS* の *LCC* の推移に着目する。第 40 四半期における *LCC* の値は、従来の結果より、*PPS* はわずかに小さく *TL* は明らかに小さい。前者の理由は、シナリオ 4 では、需要量が計画の 40% までしか伸びないため、従来の計算結果でも 4 セルの投資で十分であり、分割投資効果が小さくなっているのである。また、転用による負の投資効果は、両者は同等である。後者の理由は、需要量が低いため、より小さい労務費レートが選択できるからである。

需要量の増減に対して、セル台数の増減で対応する点では、*CAC* も同様である。したがって、同じ理由で、従来の結果よりも小さくなっているものと考えられる。

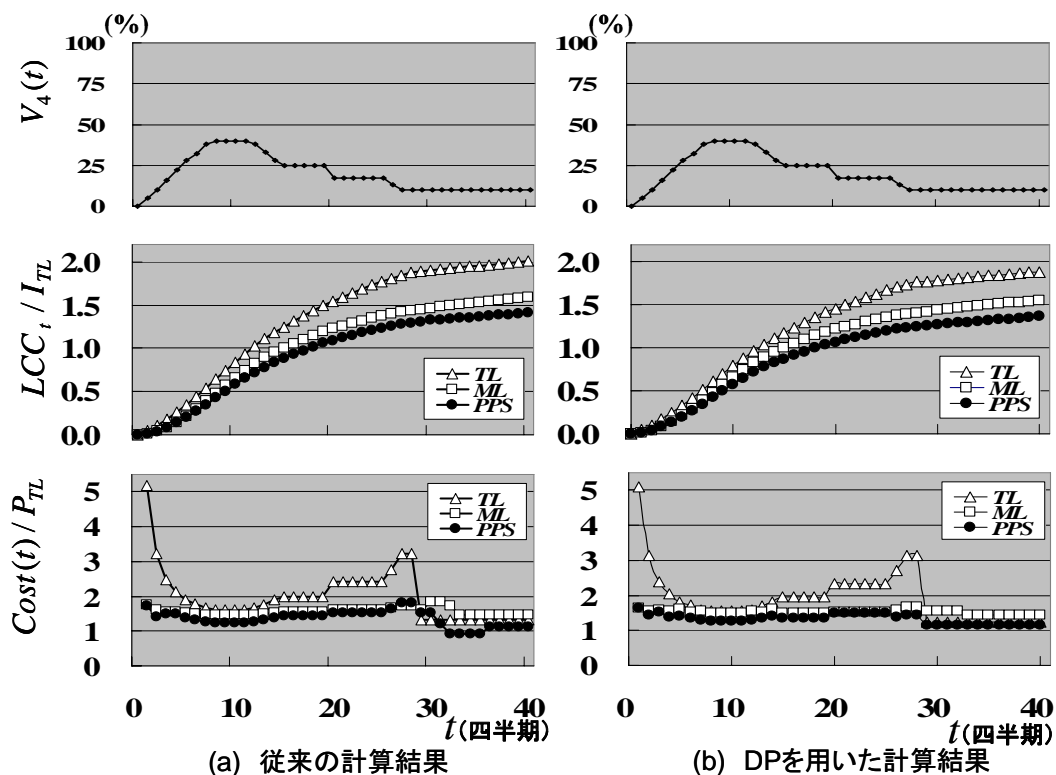


図 4-23 従来の結果と DP を用いた結果の比較 (*PPS* シナリオ 4 の場合)

シナリオ4における *CTL* と比較対象の *TL* および *ML* の製造コストと LCC の四半期ごとの推移について、従来の計算結果と DP を用いた計算結果を比較したものを 図 4-24 に示す。

図 4-16 の “Reconfigurability” の結果では、*CTL* については、DP の計算結果は、シナリオ3 では従来の結果よりも小さかったが、シナリオ4 では逆に大きくなっている。この理由が説明できるか、詳細を分析してみる。

“Reconfigurability” の計算に関係する、*TL* と *CTL* の LCC の推移に着目する。第 40 四半期における LCC の値は、従来の結果より、*CTL* は明らかに小さく、*TL* はわずかに小さい。需要量が 40% まで達した後は 10% まで低下していくため、*CTL* も *TL* も約 6 年間は昼勤のみの対応となり、低い労務費レートが選択できる分、LCC は従来よりも小さくなる。さらに、*CTL* は、440(時間/月)稼働時間のおかげで従来の必要設備台数 12 台に対して 10 台で済む分設備投資が抑制でき、より LCC が小さくなっているのである。

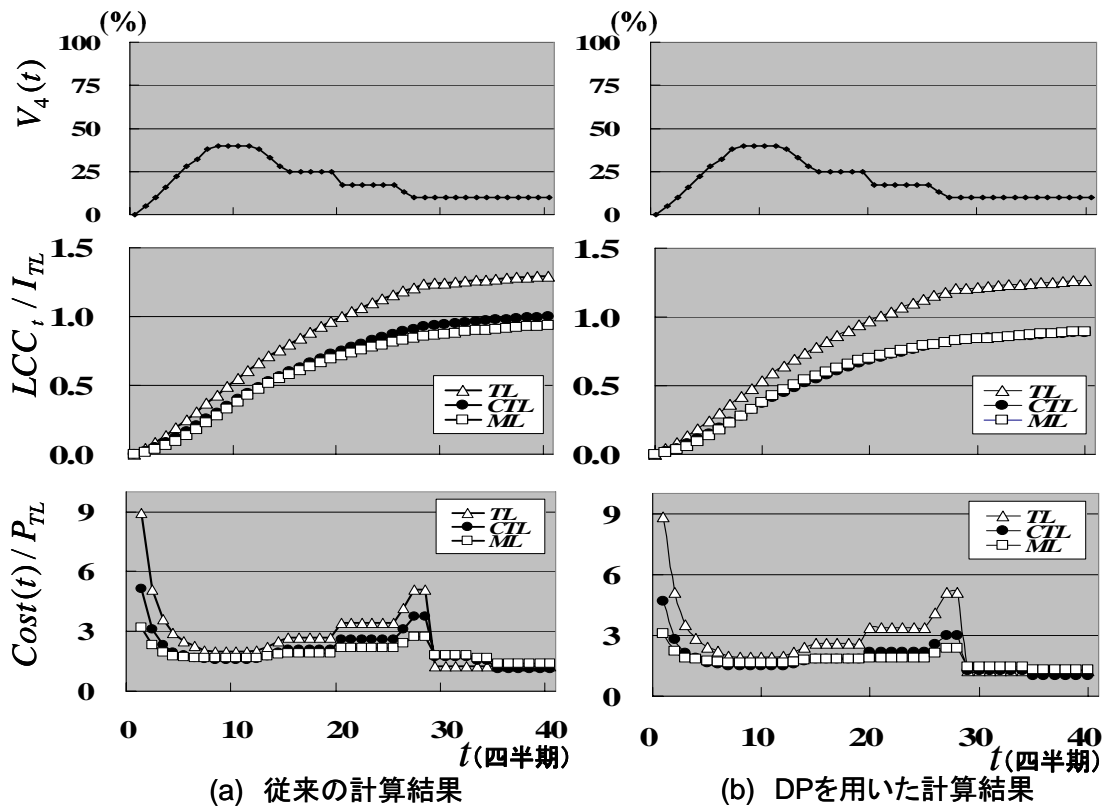


図 4-24 従来の結果と DP を用いた結果の比較 (*CTL* シナリオ4の場合)

以上のように、従来の計算結果と DP を用いた計算結果の違いについて、前提条件の違いを考慮しながら、製造コストや LCC の推移を詳細に分析してみると、それらをすべて合理的に説明できることから、今回のプログラムは、基本的に正しい結果を導いているものと判断できる。

したがって、第 4.2 節で用意した 100 通りの需要量変動シナリオに対する *FMS-F* の動特性評価を実施する。

## 第 4.6 節 動特性としての柔軟性評価結果と考察

第 4.2 節で用意した 100 通りの需要量変動シナリオを入力信号，各  $FMS-F$  と比較対象の  $ML$ ， $TL$  の生涯需要量に対する  $LCC_{40}/I_{TL}$  を出力信号と見て，その動特性評価をした結果と考察を，以下述べる．

### 4.6.1 CACの動特性評価結果

$CAC$  と比較する  $ML$ ， $TL$ ，3 つの生産システムの  $LCC_{40}/I_{TL}$  を，生涯需要量  $D$  で整理したものを図 4-25 に示す．

マーカーは，100 通りの需要量変動シナリオに対し，DP を用いて求めた各生産システムの  $LCC_{40}/I_{TL}$  の値を示している．生涯需要量の増加に対し， $LCC_{40}/I_{TL}$  は直線的あるいは上に凸の増加傾向を示している．そこで，各生産システムの特徴を分析しやすくするため，それらの値からエクセルのソルバー機能を用いた最小二乗法による 2 次近似式を求め，それらを実験式と呼ぶことにする．

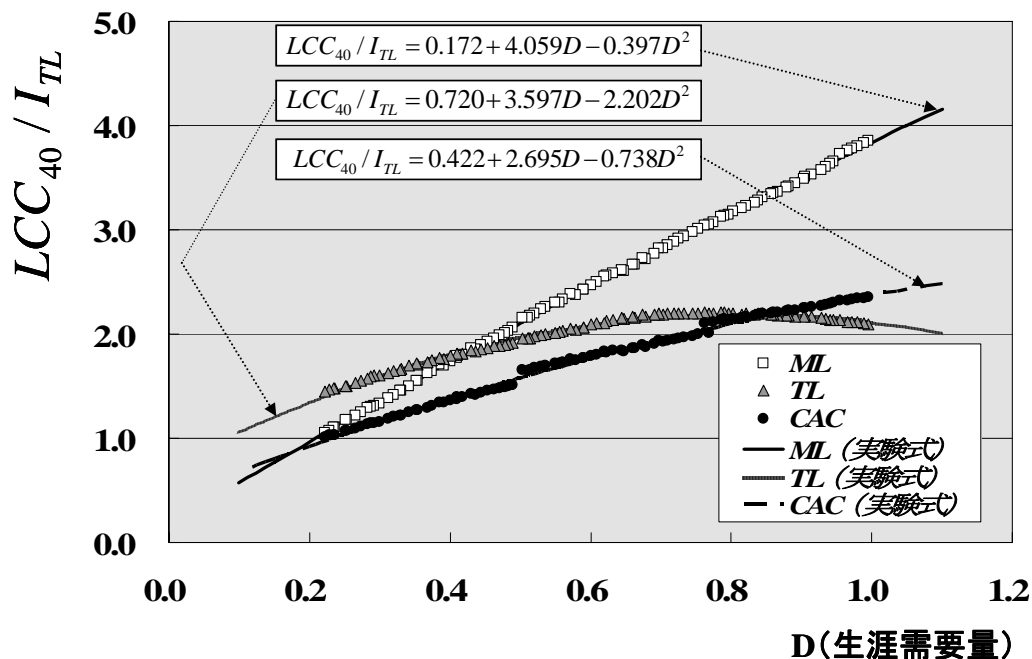


図 4-25 生涯需要量に対する  $CAC$  の柔軟性の動特性評価

$ML$ ,  $TL$ ,  $CAC$ に対する実験式は、以下の通りである。

$$LCC_{40}/I_{TL} = 0.172 + 4.059D - 0.397D^2 \quad (4-6)$$

$$LCC_{40}/I_{TL} = 0.720 + 3.597D - 2.202D^2 \quad (4-7)$$

$$LCC_{40}/I_{TL} = 0.422 + 2.695D - 0.738D^2 \quad (4-8)$$

図 4-25 では、各実験式を、生涯需要量が 0.1 から 1.1 の範囲に対してグラフ化している。実際には計算していないが、生涯需要量が 0 のときの  $LCC_{40}/I_{TL}$  は、各生産システムの初期投資額を  $TL$  の初期投資額で割った値にほぼ等しいので、小さい方から  $ML$ ,  $CAC$ ,  $TL$  の順に並ぶ筈で、実験式はその傾向を示している。

各生産システムとも、生涯需要量に応じてほぼ連続的に結果が並んでおり、バラツキも比較的小さい。バラツキが小さいのは、同じ需要量変動に対して、異なった柔軟性パラメータを選択することがあっても、 $LCC$  への影響が小さいことを示唆している。バラツキが小さい中でも、 $CAC$  だけは生涯需要量に対する  $LCC_{40}/I_{TL}$  の値に大きな不連続点が 2 ヶ所見られる。ここは、基本シナリオで言えば、基本シナリオ 2 と 3 のやや右側（生涯需要量が多い側）にあたる。前節の 4.5.2 および 4.5.3 で  $CAC$  に関して考察した通り、需要量の増加に対して、440 時間まで稼働時間を延長して追加投資を抑制していたが、このあたりで追加投資が発生したと思われる。基本シナリオの 3 と 4 の間の生涯需要量では、途中から需要量の減少が起きるが、追加投資はむしろなく、既に投資した設備を使って労務費が最小となるように、すなわち交代勤務や残業が少なくなる組み合わせで運用するため、その領域には不連続点がないものと思われる。

一方、 $TL$  の  $LCC_{40}/I_{TL}$  において特異な現象が見られる。それは、基本シナリオで言えば 1 と 2 の間の領域で、生涯需要量の増加につれて  $LCC_{40}/I_{TL}$  が減少していることである。 $TL$  は生産開始と同時に設備投資を一括でおこなうため、この特異な現象は、労務費の積算値が減少していることを示している。生涯需要量が 1.0 の近くでは月間稼働時間が多く、交代勤務と残業のため労務費レートも高いが、生涯需要量の減少につれて、先ず工数が悪化して労務費は増大する。さらに生涯需要量が減少すると、月間稼働時間が減少して交代勤務や残業のなくなるため労務費レートが下がるため、工数の悪化を補っているものと考えられる。

$LCC$  が最小となる生産システムの順位が変わる領域を別にすれば、順位は明瞭になっており、予測する生涯需要量の範囲において、有利な生産システムの決定は比較的容易であろう。また、多くの需要量変動シナリオを用意しなくてもよいことも

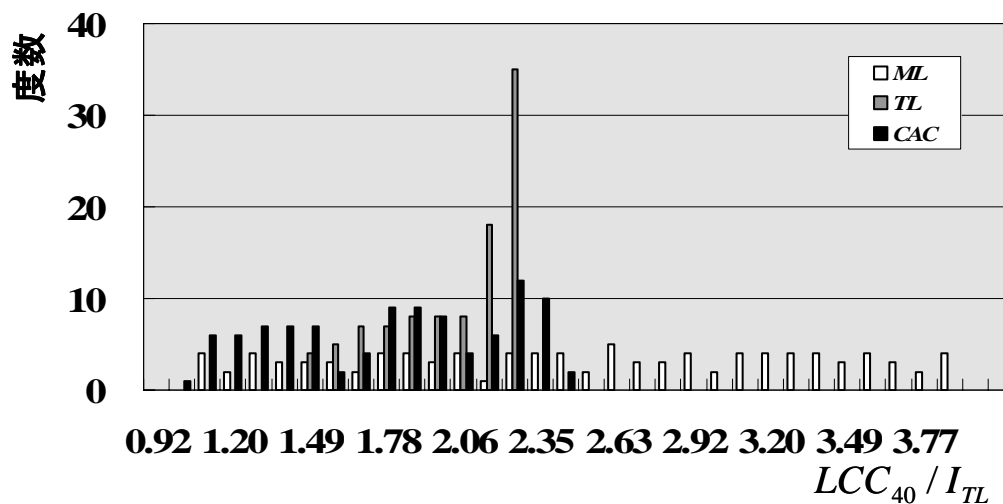
分かる．ということは、 $FMS-F$ の柔軟性すなわち動特性を調べるには、入力として生涯需要量、出力として  $LCC$  を調べれば、ほぼ最適な生産システムを決定できる可能性がある．

出力である  $LCC_{40}/I_{TL}$  の値を、生産システムごとにヒストグラムにしたものを **図 4-26** に示す．

$TL$  の場合は、狭い範囲の分布になっている．これは、生涯需要量が少ない場合は、一括投資の負担が大きいためにある値以下にならないことと、生涯需要量が多い場合は、自動化効果により  $LCC$  の増加が抑えられていることを示している．中央の特定の値が突出しているが、これは偶然だと思われる．

一方、作業者数を増減することで対応する  $ML$  はほぼ一様でブロードな分布となっている．需要量の変動に対して、主に作業者数の増減で対応していることと、たとえ作業者数が変わっても製造コストが大きく変化しないことが原因であろう．

$CAC$  は分割投資と自動化効果により、 $TL$  よりも小さい側に偏っており、生産システムの特徴がよく表れている．



**図 4-26**  $CAC$  および  $ML$ ,  $TL$  の動特性評価で得られた  $LCC_{40}/I_{TL}$  の度数分布



#### 4.6.2 CTLの動特性評価結果

CTLと比較するML, TL, 3つの生産システムの $LCC_{40}/I_{TL}$ を, 生涯需要量Dで整理したものを図4-27に示す.

マーカーは, 100通りの需要量変動シナリオに対し, DPを用いて求めた各生産システムの $LCC_{40}/I_{TL}$ の値を示している. 生涯需要量の増加に対し,  $LCC_{40}/I_{TL}$ は直線的あるいは上に凸の増加傾向を示している. そこで, 各生産システムの特徴を分析しやすくするため, それらの値からエクセルのソルバー機能を用いた最小二乗法による2次近似式を求め, それらを実験式と呼ぶことにする. ML, TL, CTLに対する実験式は, 以下の通りである.

$$LCC_{40}/I_{TL} = 0.246 + 3.177D - 0.250D^2 \quad (4-9)$$

$$LCC_{40}/I_{TL} = 0.778 + 2.455D - 1.051D^2 \quad (4-10)$$

$$LCC_{40}/I_{TL} = 0.428 + 2.668D - 0.911D^2 \quad (4-11)$$

図4-27では, 各実験式を, 生涯需要量が0.1から1.1の範囲に対してグラフ化している.

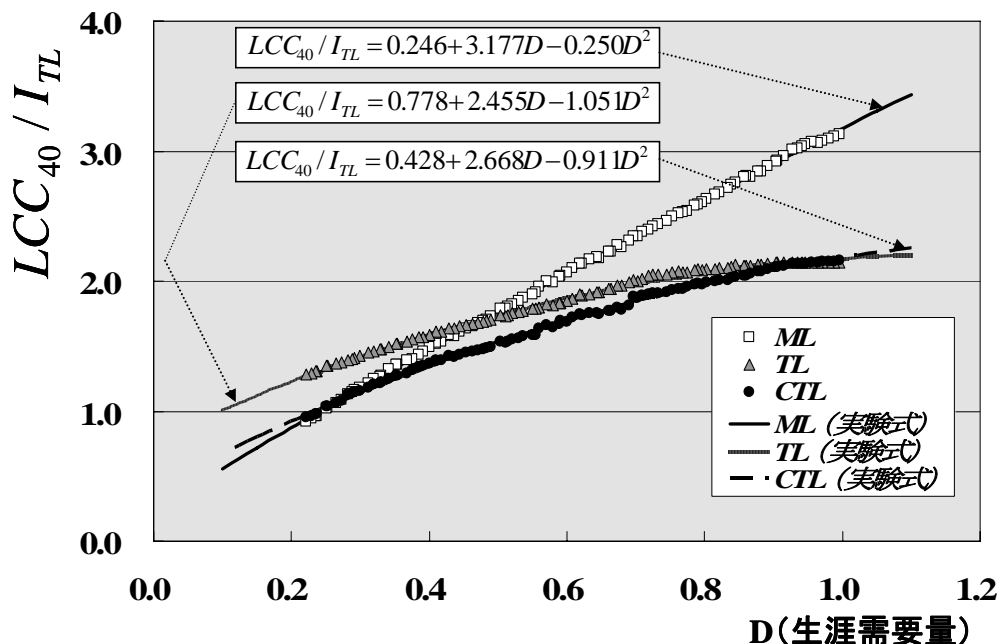


図4-27 生涯需要量に対するCTLの柔軟性の動特性評価

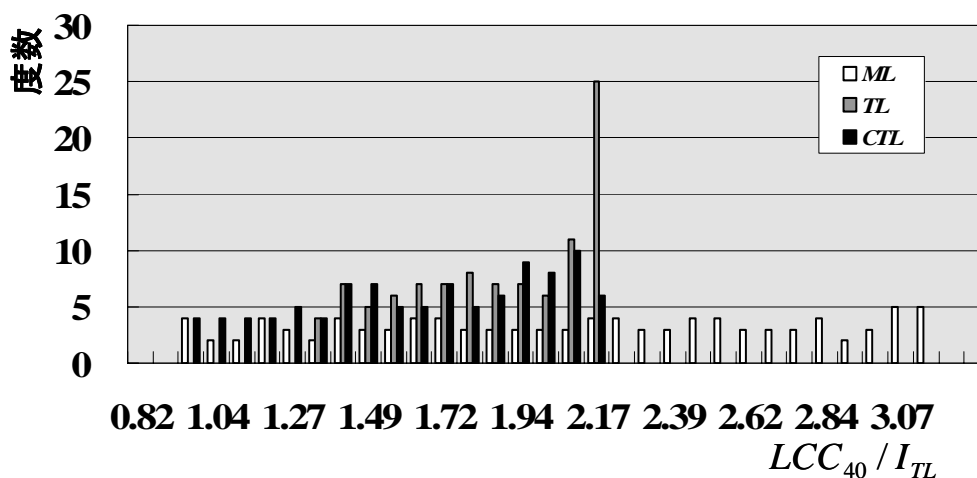
実際には計算していないが、生涯需要量が0のときの  $LCC_{40}/I_{TL}$  は、各生産システムの初期投資額を  $TL$  の初期投資額で割った値にほぼ等しいので、小さい方から  $ML$ ,  $CTL$ ,  $TL$  の順に並ぶ筈で、実験式はその傾向を示している。

$CAC$  の場合と同様に、各生産システムとも、生涯需要量に応じてほぼ連続的に結果が並んでおり、バラツキも比較的小さい。バラツキが小さいのは、同じ需要量変動に対して、異なった柔軟性パラメータを選択することがあっても、 $LCC$  への影響が小さいことを示唆しているものと考えられる。 $CTL$  は、需要量の増加に対し、 $CAC$  と同様に分割投資がなされるが、6分割の  $CAC$  に対し、 $CTL$  は倍の12分割のため、不連続点が目立たないと考えられる。

一方  $TL$  に関しては、4.6.1 の **図 4-25** ほどではないが、生涯需要量が多くなると  $LCC_{40}/I_{TL}$  の値の増加がきわめて緩やかになっている。労務費レートは高くても工数が下がっている領域であると考えられる。

$LCC$  が最小となる生産システムの順位が変わる領域を別にすれば、順位は明瞭になっており、予測する生涯需要量の範囲において、有利な生産システムの決定は比較的容易であろう。また、多くの需要量変動シナリオを用意しなくてもよいことも分かる。 $FMS-F$  の柔軟性すなわち動特性を調べるには、入力として生涯需要量、出力として  $LCC$  を調べれば、ほぼ最適な生産システムを決定できる可能性がある。

出力である  $LCC_{40}/I_{TL}$  の値を、生産システムごとにヒストグラムにしたものを **図 4-28** に示す。



**図 4-28**  $CTL$  および  $ML$ ,  $TL$  の動特性評価で得られた  $LCC_{40}/I_{TL}$  の度数分布

CACの場合とよく似た傾向が見られる。

TLの場合は、狭い範囲の分布になっている。これは、生涯需要量が少ない場合は、一括投資の負担が大きいためにある値以下にならないことと、生涯需要量が多い場合は、自動化効果によりLCCの増加が抑えられていることを示している。

これに対して、作業者数を増減することで対応するMLはほぼ一様でブロードな分布となっている。CTLは分割投資と自動化効果により、TLよりも小さい側に偏っており、CACの場合と同様に生産システムの特徴がよく表れている。

#### 4.6.3 PPSの動特性評価結果

PPSと比較するML, TL, 3つの生産システムの $LCC_{40}/I_{TL}$ を、生涯需要量Dで整理したものを図4-29に示す。

マーカーは、100通りの需要量変動シナリオに対し、DPを用いて求めた各生産システムの $LCC_{40}/I_{TL}$ の値を示している。

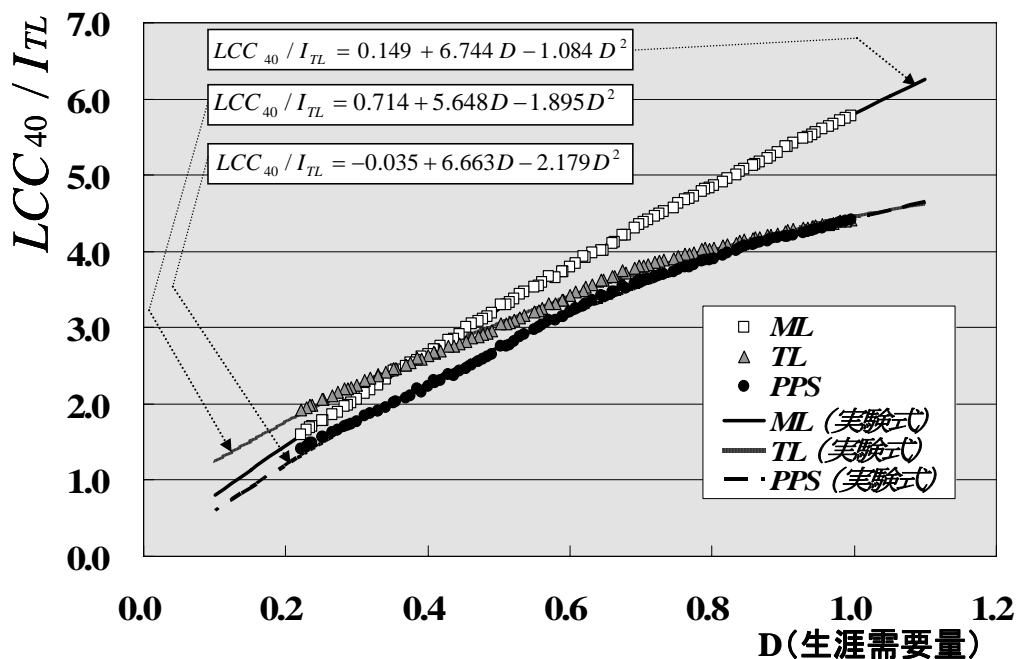


図 4-29 生涯需要量に対する PPS の柔軟性の動特性評価

生涯需要量の増加に対し、 $LCC_{40}/I_{TL}$ は直線的あるいは上に凸の増加傾向を示している。そこで、各生産システムの特徴を分析しやすくするため、それらの値からエクセルのソルバー機能を用いた最小二乗法による2次近似式を求め、それらを実験式と呼ぶことにする。 $ML$ 、 $TL$ 、 $PPS$ に対する実験式は、以下の通りである。

$$LCC_{40}/I_{TL} = 0.149 + 6.744D - 1.084D^2 \quad (4-12)$$

$$LCC_{40}/I_{TL} = 0.714 + 5.648D - 1.895D^2 \quad (4-13)$$

$$LCC_{40}/I_{TL} = -0.035 + 6.663D - 2.179D^2 \quad (4-14)$$

図4-29では、各実験式を、生涯需要量が0.1から1.1の範囲に対してグラフ化している。 $PPS$ の実験式(4-14)には、これまで見てきた動特性の実験式に見られない特徴がある。それは定数項が負の値をもっていることである。 $PPS$ は需要量の減少に対して設備転用が可能のため、負の投資効果がある。生涯需要量が小さくなるほど $LCC_{40}/I_{TL}$ の値の減少の勾配が大きいため、最小二乗法による近似計算において、その傾向が大きく出て定数項が負の値になったものと思われる。生涯需要量が0のときの $LCC_{40}/I_{TL}$ は各生産システムの初期投資額を $TL$ の初期投資額で割った値にほぼ等しいので、小さい方から $ML$ 、 $PPS$ 、 $TL$ の順に並ぶ筈だが、上記の理由により、 $PPS$ 、 $ML$ 、 $TL$ と $ML$ と $PPS$ が逆転している。現実にはあり得ないことである。

$CAC$ や $CTL$ の場合と同様に、各生産システムとも、生涯需要量に応じてほぼ連続的に結果が並んでおり、バラツキも比較的小さい。バラツキが小さいのは、同じ需要量変動に対して、異なった柔軟性パラメータを選択することがあっても、 $LCC$ への影響が小さいことを示唆しているものと考えられる。需要量の変動に対する $PPS$ の投資は4分割と $CAC$ や $CTL$ に比較して少ないが、需要量の減少に対して負の投資すなわち設備転用が可能のため、不連続点が目立たないものと思われる。

$TL$ の場合は、4.6.2の図4-27と同様に、生涯需要量が大い領域では、 $LCC_{40}/I_{TL}$ の増加はゆるやかになっている。需要量の増加につれて $PPS$ は $TL$ と同じ形態に近付くが、この近傍での $PPS$ および $TL$ の $LCC_{40}/I_{TL}$ の値は、よく似た挙動を示して興味深い。

$LCC$ が最小となる生産システムの順位が変わる領域を別にすれば、順位は明瞭になっており、予測する生涯需要量の範囲において、有利な生産システムの決定は比較的容易であろう。また、多くの需要量変動シナリオを用意しなくてもよいことも分かる。

*FMS-F*の柔軟性すなわち動特性を調べるには、入力として生涯需要量、出力としてLCCを調べれば、ほぼ最適な生産システムを決定できる可能性がある。

出力である $LCC_{40}/I_{TL}$ の値を、生産システムごとにヒストグラムにしたものを図4-30に示す。

*CAC*や*CTL*の場合と似た傾向が見られるが、*PPS*の分布の幅がやや大きいように思われる。計画数量では*PPS*は*TL*と同じ形態となる。このことは*CTL*と同じである。しかし、逆に計画数量を大きく下回った場合は、1セルでの稼動が可能であり、その形態は*CAC*と同様である。すなわち、需要量の増減に対し、*CAC*から*CTL*までの形態変化の能力を持っていることが、*ML*とよく似た $LCC_{40}/I_{TL}$ のブロードな分布となっており、柔軟性の高さを示しているものと考えられる。

以上のことから、需要量の変動に対してLCCが最小となる生産システムは、需要量変動関数を増やしても、また、柔軟性パラメータを増やしても、生涯需要量の大きさでほぼ決定されることがあらためて確かめられた。

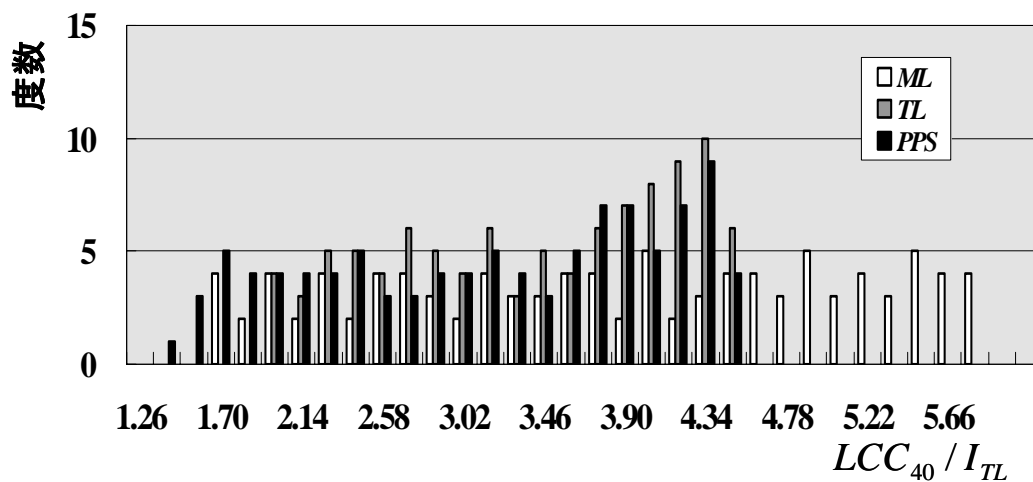


図 4-30 PPSおよびML, TLの動特性評価で得られた $LCC_{40}/I_{TL}$ の度数分布

#### 4.6.4 “Reconfigurability”の評価

第 3.5 節では，“Reconfigurability”を定義し，基本的な需要量変動シナリオに対する“Reconfigurability”の値から，*FMS-F*の柔軟性の相互比較を試みて，その可能性を確認した．本第 4.6 節で得られた動特性評価結果を用いれば，3つの *FMS-F*の柔軟性はより詳細に比較分析できると考えられる．

動特性評価で得られた各 *FMS-F*と比較対象の *TL*の  $LCC_{40}/I_{TL}$ を用いて計算した“Reconfigurability”を 図 4-31 に示す．

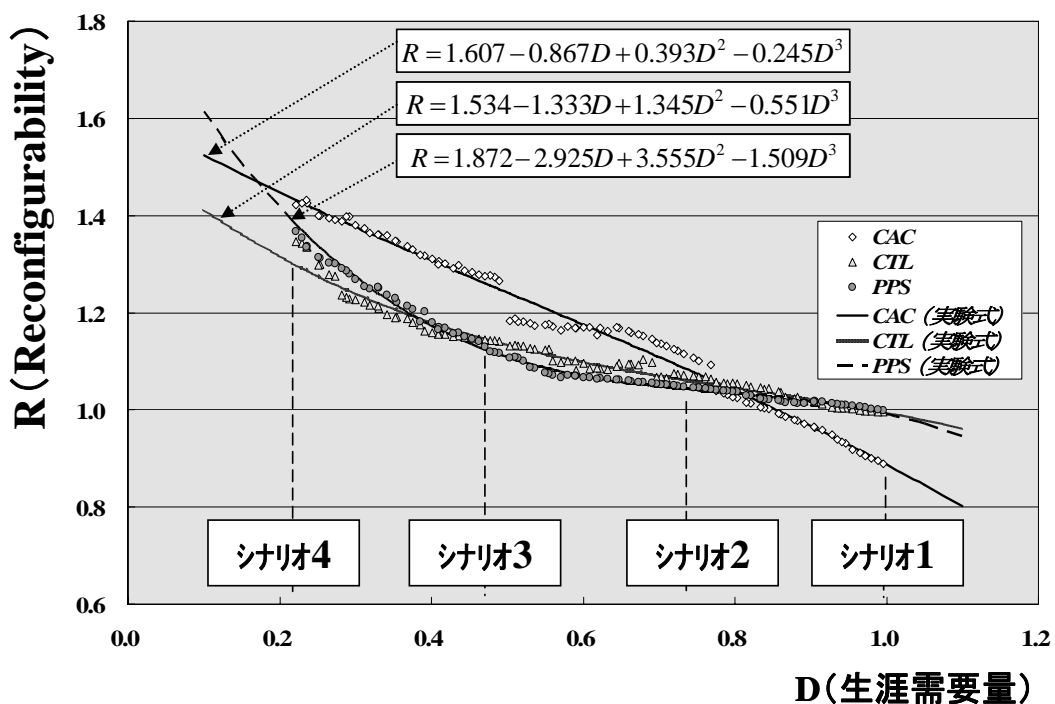


図 4-31 DP を用いて求めた *FMS-F*の “Reconfigurability”

マーカーは，100通りの需要量変動シナリオに対し，DPを用いて求めた各 *FMS-F*の “Reconfigurability”を示している．図 3-19と比較しやすいように，基本シナリオ1～4と同等の生涯需要量の位置を図示してある．生涯需要量 *D*の変動に対し，“Reconfigurability”には，図 3-19と同様に変曲点がおおよそ2個観察される．そこで，各 *FMS-F*の特徴を分析しやすくするため，エクセルのソルバー機能を用いた最小二乗法による3次近似式を求め，それらを実験式と呼ぶことにする．*CAC*，*CTL*，*PPS*に対する実験式は，以下の通りである．

$$R = 1.607 - 0.867D + 0.393D^2 - 0.245D^3 \quad (4-15)$$

$$R = 1.534 - 1.333D + 1.345D^2 - 0.551D^3 \quad (4-16)$$

$$R = 1.872 - 2.925D + 3.555D^2 - 1.509D^3 \quad (4-17)$$

図 4-31 では、生涯需要量が 0.1 から 1.1 の範囲に対してグラフ化してある。

式(3-15)で定義したように、値が 1.0 をこえるものは、比較対象の *TL* よりもより柔軟性が高いことを示している。生涯需要量が 0.8 をこえる領域で、*CAC* だけが 1.0 を下回っており、それ以外はすべて 1.0 をこえている。*CAC* は 1 セルですべての機能を装備しているため、需要量の増加に対してセル台数を増やせば増やすほど余剰機能が設備費の過剰を招き、結果として経済性という点で劣るからである。また、生涯需要量が 1.0 の近傍では、*CTL*、*PPS* ともにほぼ 1.0 となっているが、どちらも需要量が増加した場合の最終形態が *TL* と同等だからである。一方、生涯需要量がシナリオ 4 と同等の値の近傍では、セル 1 台で稼働できる *CAC* と *PPS* が *CTL* を上回っている。各 *FMS-F* の基本的な特徴は、図 3-19 と同じである。

個々のマーカーに着目すると、図 4-31 は図 3-19 を補間したものとはなっていないが、第 4.5 節のプログラムの検証において、図 4-16 で示した“Reconfigurability”の値を補間しているものと考えられる。これは、需要量の変動に対して生産現場で実際にとられる対応方法に近付けるため、月間稼働時間の上限を増やしたり、定時割れを回避するようにしたり、また柔軟性パラメータの組み合わせをよりきめ細かく増やしたりしたからである。このことは第 4.5 節のプログラムの検証で、詳細に分析した図 4-18 から図 4-24 までのグラフからも推定される。

また、*CAC* の“Reconfigurability”についてはプロットされたマーカーにやや大きなうねりが見られる。基本シナリオで言えば 2 と 3 のやや右側 2 ヶ所に不連続点があるように見える。ここは動特性評価結果で考察したように、需要量の増加に対し、440 時間という月間稼働時間の上限までこらえていた設備投資の追加がおこなわれたポイントであろう。追加以前は 2 直フル残業状態で労務費が支配的であり、設備追加と同時に設備償却は始まるものの、稼働時間の減少により労務費レートが下がって総労務費は減少するのである。

このことは、*CTL*、*PPS* についても、詳細に観察すれば見出すことができる。動特性評価において縦軸にした  $LCC_{40}/I_{TL}$  の値の変化する範囲は、それぞれの *FMS-F* で異なる。*CAC* は *CTL*、*PPS* と比較して *TL* の  $LCC_{40}/I_{TL}$  の値との差が大きいため、同じグラフにプロットした場合、変化が大きく見えているのである。そういう意味

で実験式を求めてグラフ化することは、各 *FMS-F* の本質的な特徴を調べる良い方法だと思われる。

生涯需要量のわずかな違いで値がやや大きく変化するポイントもあるが、生涯需要量に関して“**Reconfigurability**”で整理すれば、異なった製品を組立・加工する *FMS-F* も柔軟性という点で相互比較することが可能である。相互比較が可能ということは、ある程度の需要予測ができれば、最適な生産システムを選択することができるということである。たとえば生涯需要量の変動幅を 0.8 から 1.0 と予想した場合、*CTL* か *PPS* を選択すべきで *CAC* を選択すべきではない。また、変動幅を 0.2 から 0.5 と予想した場合は *CAC* が最適である。中間の 0.5 から 0.8 と予想した場合は、*CTL* も選択の候補に入ってくる。

“**Reconfigurability**”による評価は、**図 2-20** や **表 2-1** に加えた新たな *FMS-F* の定量的な分類法であるとも言える。

## 第 4.7 節 第4章のまとめ

第 3 章で提案した柔軟性評価の概念に基づき、「需要量変動シナリオを入力とし、最適化手法である DP を用い、LCC が最小となるように生産システムの形態変化を最適化することで得られた LCC を出力とする動特性評価法」を提案した。

前提条件となる柔軟性パラメータとしては、実際の生産現場において調整される稼働時間、オペレータや作業者の数、設備台数をきめ細かく設定した。最初に、プログラムの検証を入念におこなったところ、プログラムの正しさと同時に、これら前提条件の違いによる LCC の値への影響が大きいことがわかった。

続いて、*FMS-F*、*ML*、*TL* に動特性評価法を適用したところ、需要量の変化の広い範囲にわたる生産システムの柔軟性を把握することが可能となった。すなわち、動特性評価法は、生産システムの一般的柔軟性を表していると考えられる。投資判断の場面で使えば、需要量の予測がある程度あいまいな場合であっても、最適な生産システムを選択できる可能性があるということである。これにより、提案した概念の正しさも検証された。

さらに、この動特性評価法で得られた LCC を用い“**Reconfigurability**”を計算することで、*FMS-F* の柔軟性の特徴がより明確になった。需要予測と経営戦略に基づいて、適切な *FMS-F* を選択するための指針になることが期待される。また、*FMS-F* の新たな定量的な分類法を示すことができた。



## 第5章 結論

情報技術が高度に発達した現代は、経営環境が地球規模で同時に動く、きわめて変化の激しい時代である。しかも、変化の速度は大きく、先の予想はますます困難になってきている。

製造業にとって、経営環境の変化は需要の変化となって現れる。生産システムは製造業の経営戦略を具現化したものであり、需要の変化に対する柔軟性とその評価はきわめて重要である。グローバルな企業活動を展開する製造企業にとって、製造の柔軟性は熾烈な競争を勝ち抜く競争力である。

ところが、投資判断においては、将来需要予測とともに、生産システムの柔軟性評価が必要にもかかわらず、これまで合理的な方法が確立されていなかった。

製造の柔軟性は製品競争力と密接な関係がある。変化に対応するためには、高度な経営判断と開発スピードが必要で、製品開発と生産システム開発は同期し一体となって推進されなければならない。

デンソーでは、製品開発と生産システム開発は事業戦略の両輪であり、「世界一製品を、世界一生産システムで」を合言葉に、トップマネジメントが働く次期型研を展開してきた。1972年から始まった次期型研は、後にCEと呼ばれた活動のさきがけと言ってもよいが、フロントローディング、アーリーソーシングという手法を用いて目標レベルをより高くし、トップマネジメントのリードにより高度なリスクマネジメントを展開することで成功の確率を高めていることに特徴がある。戦略企画の役割をになう本社機能部の生産技術部が実務上の推進役を果たしてきたことから、全体としてMOTを実践してきたとも言える。

次期型研の中で生まれてきたのが、需要量の変動に対して柔軟な生産システム *FMS-F* である。*FMS-F* は初期投資を低く抑え、操業度に応じて意図的に段階投資でき、その形態が自在に変化する。*FMS-F* の柔軟性の本質は再形態変化可能性すなわち “Reconfigurability” にある。

事例として紹介した3つの *FMS-F* すなわち *CAC*, *CTL*, *PPS* は、1990年代に開発され、当初の狙い通り需要量の変動に経済的に対応し、現在も稼動中である。どちらかと言えば成功例であるが、生産システムの柔軟性を一般化する理論が先にあったわけではない。

経営環境の変化が激しくなる中、たとえば投資判断の場面では、将来需要予測とともに、生産システムの柔軟性評価はますます重要になってくると思われる。

本研究では、生産システムを一種の制御系とみなし、その柔軟性を動特性として評価する概念とその方法を提案した。具体的には、DPを用いてLCCが最小となるように最適化することを組み込んだ、需要量の変化に対する動特性評価法を開発した。そして、デンスーで開発・実用化された *FMS-F* に適用して検証した結果、この評価法を用いれば、生涯需要量に対する生産システムの柔軟性を把握できることがわかった。すなわち需要量予測がある程度あいまいな場合でも、最適な生産システムを選択できる可能性があることがわかった。

さらに、LCCとDPを用いて、*FMS-F*の柔軟性を評価する式を提案し、それを“Reconfigurability”と定義した。生涯需要量に対する“Reconfigurability”を調べれば、方式の異なる3つの *FMS-F* を定量的に相互比較することが可能となった。

以上のことより、提案した「柔軟性評価の概念」とそれに基づく「動特性評価法」および“Reconfigurability”の考え方は、需要予測がある程度あいまいな場合でも、また製品の種類はもとより業界をこえて生産システムの柔軟性を評価できる可能性があると考えられる。

なお、今後の研究の方向性として、以下3つのテーマが考えられる。

第1は、他の生産システムへの適用研究である。今回確立した「動特性評価法」や“Reconfigurability”の一般性を確立するため、自動車部品以外の製品や組立以外の加工法を用いた生産システムに適用する。

第2は、さらに自動車部品以外の製造業への適用研究である。事業戦略や対象製品が異なれば、需要量変動シナリオが異なる。本研究でも最適化手法であるDPを用いたが、様々な需要の変動パターンに対する評価ができるように強化する。

第3は、柔軟性の概念を拡張した研究である。柔軟性の概念として、より上位にはスピードを表す *Agility* や製品開発を含めた企業活動そのものがあることは、従来から指摘されている。両者を合体させれば「スピード経営」ということになるだろうか。製造の柔軟性は生産システムだけで決まるものではない。これからは、高度な経営判断を含めた企業活動も柔軟性の鍵になると思われる。

たとえば、想定外の変化に対する処置として、企業買収による増産対応や逆に減産の場合の事業撤退による赤字回避などは、トップマネジメントの範疇であろう。近年は、このような選択肢をリアルオプションとして、LCCに考慮する研究も散見

されるが (Bengtsson[2001], Abele et al.[2006]), 本研究では, 実用化された *FMS-F* を事例にしたため, そこまでは考慮しなかった. しかしながら, デンソーの次期型研も, 本質はトップマネジメントにある.

今後は, 製造の柔軟性に関する研究を, より高い次元や階層へと拡張し, トップマネジメントを含めた企業活動全体へと対象を広げていく必要があると考える.

終わりに, 本研究により得られた柔軟性評価の概念と評価法が, 製造業における投資判断の場はもとより, 国や地域をこえて, 効率的な経済発展の一助となることを期待する.

## 謝辞

本論文は、筆者が 1980 年に日本電装株式会社（現在の株式会社デンソー）に入社して以来、一貫して生産システム開発に従事する中で得た「製造業においてモノづくりは経営そのもの、生産システムは経営戦略を具現化したもの」という信念がベースになっている。

技術開発のためには「高い志」が必要である。企業の中での技術開発では、経営理念や社是が最上位にあり、中長期計画における経営方針やビジョンが次に位置付けられる。こうして次々にブレークダウンされる過程で、技術開発の目的も明確になっていく。大切なのはこのプロセスであり、健全な経営がされている企業では、ごく自然に社会に貢献し後世においても高く評価される企業行動をする。そして、基本的に人間を大切にする企業風土をもつ会社では、社員は個々の役割の中で才能をいかんなく発揮し、大きな成果と喜びを共に味わう。

幸いにして筆者は、その誇るべき企業風土を持つ会社で、あたかも経営者の一人になった気分で使命感に燃え、日々の業務に邁進することができた。それはひとえに、伝統的に引き継がれてきた諸先輩の私利私欲のない御指導と、部門をこえた多くの仲間たちの純粋な開発者魂や改善マインドに刺激されたからに他ならない。その経験は、自慢できる技術を何も開発できなかった筆者の、会社人生での貴重な財産であり、何とかそのことを形にして諸先輩や仲間たちに伝えたいという宿望を抱いていたが、これまで果たせないうでいた。

本論文をまとめるきっかけになったのは、筆者の想いを見抜いた愛知工業大学大学院経営情報科学研究科教授の大野勝久博士から、社会人入学のお誘いがあったからである。大野博士は、筆者が会社での経験を通じて得た信念も、結局は「開発した技術をより洗練した形でまとめることにより表現できる」と教えてくださった。変なたとえだが、町道場を出て武者修行の旅に出た武芸者が俗世を離れた土地で達人に出会い、開眼させられたのである。

その大野博士には、研究の進め方や高度で専門的な技術の御指導はもとより、入学時の手続きから、自費で研究を進める筆者の研究費の心配や、初めての海外での学会発表にも同行していただくなど、そして本論文執筆の最後の最後まで、誠実に寛大かつ懇切丁寧なるご指導をいただいた。また、巻末に、社会人入学していた 3 年間の研究業績を書かせてもらったが、研究者として非力な筆者の実力をこえる成

果は、大野博士の御指導の賜物である。ここに深甚の謝意を表したい。

また、本論文の審査および公聴会においては、大野博士に主査として、また愛知工業大学大学院経営情報科学研究科の鈴木達夫博士ならびに山本勝博士には副査として、大所高所からの御指摘と御指導を多々頂戴した。深謝申し上げたい。

本研究において感謝すべき会社関係の方たちは多い。異動により現在は他社や他部署におられる方たちも、元は生産技術部に所属し上司や同僚だった。

共に生産システムを開発した同僚、杉戸克彦氏、瀧口昌之氏、鈴木伊知郎氏、山崎康彦氏、北野晶之氏には、*FMS-F*の実データの提供および仮想 *ML*、仮想 *TL* のデータ作成に協力してもらった。杉戸氏は *PPS* の開発者、瀧口氏、鈴木氏は *CAC* の開発者、山崎氏、北野氏は *CTL* の開発者であり、本研究に対する専門家の立場からの助言も多々受けた。彼らの開発成果があって初めて本研究は成立したのである。そのことを明記するとともに、深く感謝したい。

また、*DP* を用いた計算のため、マイクロソフトエクセルの *VBA* 機能を用いた計算プログラム作成については、同僚の川口裕司氏に担当してもらった。川口氏は、デンソーにおける生産システム用 *IT* ツールの開発エキスパートであり、プログラムの改良にもその実力を発揮してもらった。本研究の大詰め段階では、プライベートな時間を大幅に割いて図表の作成にも尽力してもらった。川口氏の献身的な協力に感謝したい。

本来なら会社の業務にもっと専念しなければならない立場の筆者に、快く社会人入学を許可してくださった、現在の上司で専務取締役の土屋総二郎博士、そして同じく社会人ドクターの先輩にあたる、花井嶺郎博士、小島史夫博士、光行恵司博士、飯田康博博士からは、会社勤務と並行して進める社会人研究に対する適切なる助言と支援を多々頂戴した。ここに深く感謝の意を表するものである。

筆者の会社での最初の仕事は、Ⅲ型オルタネータ総組付ラインの研究である。それが冒頭の信念を抱くに至った出発点であり、当時の上司にあたる、元副会長の太田和宏氏を始め会長の深谷紘一氏、山田寛氏、小林敏博氏、奥島俊明氏には、生産技術者としてはもちろん、人間としても未熟だった筆者を厳しく指導して下さったことに、心から御礼申し上げたい。

また、今は故人となられたが生前に大きな励ましや助言を頂戴した元副社長の松本和男博士や、元生産技術部部長の河村一明氏に対しては、深い感謝の気持ちとともに哀悼の意を表したい。

今回の社会人学生としての研究は、母校である東北大学大学院での研究以来実に27年ぶりのことだったが、当時の指導教官で現在は同大学名誉教授の、畑中浩博士ならびに猪岡光博士、同じく助手だった佐藤勝俊博士、飯村彥郎博士の研究に対する取り組み姿勢から実験データの取り方、グラフの書き方にいたるまでの徹底した教えが基盤にあったことがきわめて大きく、あらためて師恩に感謝したい。

最後に、家族についても触れさせていただきたい。筆者の学問好きは、生涯を農業教育に捧げた教員で学究肌だった亡き父俊雄の、また創造性を尊ぶ性格は、情緒的な母好子の影響が大きい。そして、本来なら既に天命を知っているべき50歳を過ぎて、突然学生生活を始めた無軌道な夫を、おおらかに見守ってくれた妻喜久代に感謝したい。

なお、本研究の一部は、平成20年度及び21年度愛知工業大学大学院高度化推進経費、また愛知工業大学長瀧奨学基金により実施されたことを付け加えておく。

## 参考文献

- [1] Abele, E., Liebeck, T., Woern, A.: “Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems”, Optimization of Manufacturing Systems (O), Annals of the CIRP, Vol. 55, No. 1, 2006, pp. 433-440.
- [2] Alexopoulos, K., Mourtzis, D., Papakostas, N., Chryssolouris, G.: “DESYMA: assessing flexibility for the lifecycle of manufacturing systems”, International Journal of Production Research, Vol. 45, No. 7, April 2007, pp. 1683-1694.
- [3] Bengtsson, J.: “Manufacturing Flexibility and Real Options: A Review”, International Journal of Production Economics, 74/1-3, 2001, pp. 213-224.
- [4] DENSO: “Proud Past, Strong Future, A History of DENSO’s First 50 years”, 2002.
- [5] Harashima, S., Ohno, K.: “Flexible Production Systems developed and utilized in DENSO CORPORATION and their Evaluation”, Proceedings of the 7th International Conference on Machine Automation, ICMA2008, 2008, pp. 175-180.
- [6] Harashima, S., Ohno, K.: “Reconfigurability of Flexible Manufacturing Systems corresponding to quantitative fluctuation developed in DENSO CORPORATION”, Proceedings of the 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, CARV2009, 2009, pp. 122-131.
- [7] Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G. Brussel, H. V.: “Reconfigurable Manufacturing Systems”, Annals of the CIRP, Vol. 48, No. 2, 1999, pp. 527-540.
- [8] Koste, L., Malhotra, M.: “A Theoretical Framework for Analyzing the Dimension of Manufacturing Flexibility”, Journal of Operation Management, Vol. 18, No. 1, 1999, pp. 75-93.
- [9] Schuh, G., Wemhoener, N., Friedrich, Ch.: “Lifecycle oriented evaluation of automobile body shop flexibility”, 1st International Conference on

- Changeable, Agile, Reconfigurable, and Virtual Production, CARV 2005, 2005, pp. 433-439.
- [10] Sohlenius, G.: “Concurrent Engineering”, *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 2, 1992, pp. 645-655.
- [11] Suarez-FF, Cusumano-MA, Fine-CH.: “An empirical study of manufacturing flexibility in printed circuit board assembly”, *Oper. Res.*, Vol. 44, No. 1, 1996, pp. 223-240.
- [12] Sugito, K. , Takata, S. , Harashima, S. : “The Protean Production System as a Method for Improving Production System Responsiveness”, *Proceedings of the 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, ISMS2004*, 2004, pp. 167-173.
- [13] Tempelmeier, H., Kuhn, H.: “Flexible Manufacturing Systems: Decision Support for Design and Operation”, John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [14] Tosatti, L.M.: “Life Cycle Cost Calculation for Investment Decision in Manufacturing”, *Proceedings of the 13th International Conference on Life Cycle Engineering, LCE2006*, 2006, pp. 723-727.
- [15] Urbani, A.: “Life Cycle Costing Calculation for Manufacturing Systems by Means of Reconfigurability Analysis”, In: A. I. Dashchenko (ed.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Berlin / Heidelberg, Springer Verlag: 2006, pp. 643-658.
- [16] Wiendahl, H.-P., ElMaraghy, H. A., Nyhuis, P., Zaeh, M. F., Wiendahl, H.-H., Duffie, N., Briek, M.: “Changeable Manufacturing-Classification, Design and Operation”, *Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 2, 2007, pp. 763-809.
- [17] Zaeh, M. F., Moeller, N., Mussig, B., Rimpau, C.: “Life cycle oriented valuation of manufacturing flexibility”, *Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, LICE 2006*, 2006, pp. 699-704.



- [18] 青島矢一： “「日本型」製品開発とコンカレント・エンジニアリング：ボーイング777開発プロセスとの比較，一橋論叢，第120巻，5号，1998，pp. 711-735.
- [19] 生駒昇： “モノづくりを支える技能集団”，デンソーテクニカルレビュー，Vol. 6, No. 2, 2001, pp. 120-127.
- [20] 伊東誼，大身孝吉，島吉男： “フレキシブル生産システム（FMS）の評価方法（柔軟性評価ベクトルの概念と二，三の評価例”，日本機械学会論文集（C編），Vol. 52, No. 473, 1986, pp. 191-198.
- [21] 大河 滋： 『デンソー 世界の車を支える最強技能集団』マネジメント社，2004年.
- [22] 大野勝久，玉置光司，石垣智徳，伊藤崇博： 『Excelによる経営科学』コロナ社，2005年.
- [23] 大野勝久，田村隆善，伊藤崇博： 『Excelによるシステム最適化』コロナ社，2007年.
- [24] 大場允晶，新井一貴，坪根斉： “柔軟性を組み込んだ生産座席システムに関する研究 写真用カラーフィルム製造を事例にして”，日本経営工学会論文誌，Vol. 54, No. 3, 2003, pp. 176-183.
- [25] クリス・フロイド： 『経営と技術』英治出版，2008年.
- [26] 黒田充，大野勝久，田村隆善，中出康一ほか： 『サプライチェーンハンドブック』朝倉書店，第4章，2008年.
- [27] 小島史夫： “デンソーにおける生産システム技術の現状と展望”，デンソーテクニカルレビュー. Vol. 9, No. 1, 2004, pp. 8-16.
- [28] 齊藤実： 『成功するコンカレント・エンジニアリング』日科技連，2005年.
- [29] 杉戸克彦，井上保，上島益美，竹田修二，横井俊之： “変化に対応し長期間使える循環型生産方式”，精密工学会誌，Vol. 70, No. 6, 2004, pp. 737-741.
- [30] スタンリー・D・トゥーリー，ジェイムズ・F・ヘティンジャー： 『デンソーと小さな町バトルクリークの挑戦』日本能率協会マネジメントセンター，1998年.
- [31] 高桑宗右エ門： 『FA/CIMの経済性分析』中央経済社，1995年.
- [32] 瀧口昌之，鈴木伊知郎，田中雅三，酒井政彦，小南哲也，大熊学： “ミニ組

立工場 CAC -Circular Assembly Cell-”，自動車技術，自動車技術会，Vol. 55，  
No. 12, 2001, pp. 28-32.

- [33] 津田一孝：『世界へ デンソーの海外展開』中部経済新聞社，2007年.
- [34] 坪根斉：“製造戦略としての柔軟性設計のためのフレームワーク”，日本経営工学会論文誌，Vol. 51, No. 5, 2000, pp. 503-517.
- [35] 『デンソー 50 年史』，2000年.
- [36] 西村吉雄，西野壽一：『大企業における技術経営』丸善，2006年.
- [37] 『日本電装 35 年史』，1984年.
- [38] 藤末健三：『技術経営入門（改定版）』日経BP社，2004年.
- [39] 藤本隆宏：『生産マネジメント入門』日本経済新聞出版社，2001年.
- [40] 藤本隆宏：『ものづくり経営学』光文社新書，2007年.
- [41] 山崎康彦，山中智晴，岩松亮二，北野晶之：“需要の変機種変量に対応した生産システム的设计”，デンソーテクニカルレビュー，Vol. 9, No. 1, 2004, pp. 26-35.

# 付 録

## － 第 4 章の動特性評価で使用したプログラム－

### 【Macro3】

```
Sub Macro3 ()
'
' Macro3 Macro
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer
Application.Calculation = xlManual '自動計算OFF
Sheets("DATA1024").Select '
ActiveSheet.Unprotect 'シート非保護
k = ListCond1024(k)
Application.Calculation = xlAutomatic '自動計算ON
End Sub
Function ListCond1024(iPara As Integer) As Integer
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, l As Integer, m As Integer 'カウント変数
Dim kk As Integer 'カウント変数
Dim MaInStep As Integer '生産量-設備投資段数のMAX
Dim ManExInStep(3) As Integer 'ML,TL,FMSごとでの設備投資段数のMAX
Dim Flag1 As Integer, PPS As Integer '生産量シナリオスキップフラッグ 設備転用可フラッグ
Dim iSear As Integer, iSearM As Integer '対応設備構成検索変数、前期構成記憶
Dim iSys As Integer, iP4 As Integer 'ML,TL,FMS選択変数、
'100+4生産シナリオ選択変数
Dim RowPi As Integer, Rows As Integer 'セル行計算変数
Dim Val As Double '計算変数
Dim VolInCond(3, 5, 15) As Double '生産量-設備投資テーブル読み込みArray
Dim VolInCondM(3, 40) As Double 'ML,TL,FMSの40期ごと追加投資額、
Dim VolInCondDis(3, 40) As Double '40期ごと償却額面
Dim VolM_ECCond(3, 25, 4, 15) As Double 'ML,TL,FMSごとでの設備投資段数テーブル
読み込みArray
Dim VolM_ECCondE(3, 25) As Integer 'ML,TL,FMSごとでの設備投資段数テーブル最終段数
Dim PiA(104, 4) As Double '100+4生産シナリオのための I～IVの加重比率
読み込みArray
Dim ProSType(4, 40) As Double 'I～IVの40期生産量マスター読み込みArray
Dim ProScena(40) As Double '40期の生産シナリオ
Dim MacMax(3, 40) As Integer 'ML,TL,FMSごと期ごと設備投資段数MAXの記憶
Dim SysParMan(3, 2) As Double 'ML,TL,FMSごと工数式の切片、傾き
Dim MaxProd As Double
Flag1 = 0 '生産量シナリオスキップフラッグ
PPS = 0 '設備転用可フラッグ
MaInStep = 15 '生産量-設備投資段数のMAX
MaxProd = 84000
ManExInStep(1) = 14 'MLでの人件費、経費段数のMAX
ManExInStep(2) = 9 'TLでの人件費、経費段数のMAX
ManExInStep(3) = 23 'FMSでの人件費、経費段数のMAX
行数/シナリオ
Rows = (1 + 3 + ManExInStep(1) + 3 + ManExInStep(2) + 3 + ManExInStep(3))
'変数イニシャライズ
For iSys = 0 To 3
For i = 0 To 5
For j = 0 To MaInStep
VolInCond(iSys, i, j) = -1
Next j
Next i
For j = 0 To 40
VolInCondM(iSys, j) = -1
VolInCondDis(iSys, j) = 0
Next j
For k = 0 To ManExInStep(iSys)
For i = 0 To 3
For j = 0 To 10
VolM_ECCond(iSys, k, i, j) = -1
Next j
Next i
VolM_ECCondE(iSys, k) = -1
Next k
Next iSys
'シート「設備費」からML:1,TL:2,FMS:3での設備投資段数表の読み取り
Sheets("設備費").Select
For iSys = 1 To 3
For j = 0 To MaInStep
VolInCond(iSys, 1, j) = ActiveSheet.Cells(6, 4 + j).Value
VolInCond(iSys, 2, j) = ActiveSheet.Cells(5 + (iSys - 1) * 4 + 2, 4 + j).Value '行数/シナリオ
VolInCond(iSys, 3, j) = ActiveSheet.Cells(19 + (iSys - 1), 4 + j).Value '設備台数
Next j
End Sub
```

```

Next iSys
シートの「ML:1,TL:2,FMS:3」から人件費、経費段数表の読み取り
For iSys = 1 To 3
  Select Case iSys
    Case 1
      Sheets("ML").Select
    Case 2
      Sheets("TL").Select
    Case 3
      Sheets("FMS").Select
  End Select
  SysParMan(iSys, 1) = ActiveSheet.Cells(1, 4).Value
  SysParMan(iSys, 2) = ActiveSheet.Cells(1, 5).Value
  '生産数量での人件費レート、経費読み込み
  For k = 1 To ManExInStep(iSys)
    For j = 1 To 8
      VolM_ECond(iSys, k, 1, j) = ActiveSheet.Cells(10 + (k - 1), 3 + j).Value
      VolM_ECond(iSys, k, 2, j) = ActiveSheet.Cells(6, 3 + j).Value
      VolM_ECond(iSys, k, 3, j) = ActiveSheet.Cells(3, 4).Value
      VolM_ECond(iSys, k, 4, j) = ActiveSheet.Cells(10 + (k - 1), 3).Value
      If VolM_ECond(iSys, k, 1, j) > 0 Then VolM_E_CondE(iSys, k) = j
    Next j
  Next k
Next iSys

シートの「生産グラフ」からシナリオ元データの表の読み取り
Sheets("生産グラフ").Select
'生産量シナリオ 100+4 確率表の読み取り
For iP4 = 1 To 104
  For i = 0 To 4
    PiA(iP4, i) = ActiveSheet.Cells(4 + iP4, 1 + i).Value
  Next i
Next iP4

'生産量シナリオ 元の I、II、III、IV (i) の40期 (j) 読み取り
For i = 1 To 4
  For j = 0 To 40
    ProSType(i, j) = ActiveSheet.Cells(i, 10 + j).Value
  Next j
Next i

'生産量シナリオ-投資可能テーブル作成
'シートのクリア
Sheets("DATA1024").Select
Range("B70:F6000").Select
Selection.ClearContents
Range("I70:AX6000").Select
Selection.ClearContents
Range("I70:AX6000").Select
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone

' 100+4 (iP4) 投資タイミングテーブル作成
For iP4 = 1 To 104
  RowPi = 70 + (iP4 - 1) * Rows
  If (iP4 Mod 2) = 1 Then ActiveWindow.ScrollRow = RowPi
  'シナリオ iP4 の確率記入
  For j = 0 To 4
    ActiveSheet.Cells(RowPi, 1 + j).Value = PiA(iP4, j)
  Next j
  '生産量シナリオ40期作成 '代表isys=1
  For j = 0 To 40
    ProScena(j) = (PiA(iP4, 1) * ProSType(1, j) + PiA(iP4, 2) * ProSType(2, j)
+ PiA(iP4, 3) * ProSType(3, j) + PiA(iP4, 4) * ProSType(4, j)) * MaxProd
    ActiveSheet.Cells(RowPi, 10 + j).Value = ProScena(j)
    Range(Cells(RowPi, 10 + j), Cells(RowPi, 10 + j)).Select
    Selection.Interior.ColorIndex = 6
  Next j
  '生産量シナリオ40期に対応する投資、償却費の計算
  For iSys = 1 To 3
    For j = 0 To 40
      VolInCondDis(iSys, j) = 0
    Next j
  Next iSys
  '「ML:1,TL:2,FMS:3」の開始行数計算
  Select Case iSys
    Case 1
      RowTemp = RowPi + 1

```

'工数近似 切片読み込み  
'工数近似 傾き読み込み  
  
'数量  
'レート  
'経費  
'設備台数  
'人件費、経費段数MAX記憶

```

Case 2
  RowTemp = RowPi + 1 + 3 + ManExInStep(1)
Case 3
  RowTemp = RowPi + 1 + 3 + ManExInStep(1) + 3 + ManExInStep(2)
End Select
ActiveSheet.Cells(RowTemp, 9).Value = VolM_ECond(iSys, 1, 3, 1) '経費
'1~40期 投資条件選択
iSearM = 0
For i = 1 To 40
  k = -2
  iSear = 1
  Do
    '各期 対応システム検索パラメータ
    '探索
    If ((VolInCond(iSys, 1, iSear - 1) < ProScena(i)) And (VolInCond(iSys, 1, iSear) >= ProScena(i))) Then
      k = iSear
    Else
      iSear = iSear + 1
      If iSear > MacInStep Then k = -1
    End If
  Loop Until k > -2

  '追加投資額積算(PPS = 1 時 →最大システム縮小変更: iSearM.償却費の減産)
  m = k - iSearM iSearM: 前期システム状態
  Select Case m
    Case Is <= -1
      If ((PPS = 1) And (iSys = 3)) Then
        Val = 0
        For n = iSearM To k + 1 Step -1
          Val = Val - VolInCond(iSys, 2, n)
        Next n
        VolInCondM(iSys, iSear) = Val
      Else
        VolInCondM(iSys, iSear) = 0
      End If
    Case Is = 0
      VolInCondM(iSys, iSear) = 0
    Case Is >= 1
      Val = 0
      For n = iSearM + 1 To k
        Val = Val + VolInCond(iSys, 2, n)
      Next n
      VolInCondM(iSys, iSear) = Val
  End Select
  '今期システム状態の記憶: iSearM
  If ((PPS = 1) And (iSys = 3)) Then
    iSearM = k
  Else
    If iSearM < k Then iSearM = k
  End If

  MacMax(iSys, i) = VolInCond(iSys, 3, iSearM)
  ActiveSheet.Cells(RowTemp, 10 + i).Value = VolInCond(iSys, 1, iSearM) '今期システム状態の記入
  ActiveSheet.Cells(RowTemp + 1, 10 + i).Value = VolInCondM(iSys, iSear) '前期追加投資コストの記入
  '前期追加投資コストからの各期償却費計算
  If VolInCondM(iSys, iSear) <> 0 Then
    If (i + 27) > 40 Then m = 40 Else m = (i + 27)
    For l = i To m
      VolInCondDis(iSys, l) = VolInCondDis(iSys, l) + (VolInCondM(iSys, iSear) / 28)
      If VolInCondDis(iSys, l) < 0 Then VolInCondDis(iSys, l) = 0
    Next l
    ActiveSheet.Cells(2 + RowTemp, 10 + i).Value = VolInCondDis(iSys, l)
  End If
Next i '1~40期:

For i = 1 To 40
  If ActiveSheet.Cells(2 + RowTemp, 10 + i).Value = 0 Then ActiveSheet.Cells(2 + RowTemp, 10 + i).Value = 0
Next i '償却費の空欄を0

'1~40期 投資条件に合った労務費、間材費リスト作成
'生産量シナリオ40期に対応出来る人工パターン探索、人件費の計算
For j = 1 To 40
  If iSys = 2 Then ll = ManExInStep(2) Else ll = MacMax(iSys, j)
  '投資条件に合った労務費、間材費各段数ごとの探索
  For kk = 1 To ll
    For kk = 1 To ManExInStep(iSys)
      iSear = 2
      k = -2
      If (kk = 1 And (VolM_ECond(iSys, 1, 1, 1) >= ProScena(j))) Then '初期1期対応kk = 1 And

```

```

k = iSear
ActiveSheet.Cells(3 + RowTemp + (kk - 1), 10 + j).Value =
(SysParMan(iSys, 1) - SysParMan(iSys, 2) * ProScena(j)) * VolM_ECond(iSys, kk, 2, 1)
'
ActiveSheet.Cells(4 + RowTemp + (kk - 1), 10 + j).Value = VolM_ECond(iSys, 1, 3, 1)
Else
If ((VolM_ECond(iSys, kk, 1, 1) <= ProScena(j)) And (VolM_ECond(iSys, kk, 1, VolM_E_CondE(iSys, kk)) >= ProScena(j))
And (MacMax(iSys, j) >= VolM_ECond(iSys, kk, 4, iSear))) Then '段数範囲内?
Do
If (VolM_ECond(iSys, kk, 1, iSear) > 0 Then 'テーブル探索
If ((VolM_ECond(iSys, kk, 1, iSear - 1) < ProScena(j))
And (VolM_ECond(iSys, kk, 1, iSear) >= ProScena(j))) Then
k = iSear
Sheets("DATA1024").Select
ActiveSheet.Cells(3 + RowTemp + (kk - 1), 10 + j).Value =
(SysParMan(iSys, 1) - SysParMan(iSys, 2) * ProScena(j)) * VolM_ECond(iSys, kk, 2, iSear)
With ActiveSheet.Range(Cells(3 + RowTemp + (kk - 1), 10 + j),
Cells(3 + RowTemp + (kk - 1), 10 + j)).Interior
If VolM_ECond(iSys, kk, 2, iSear) >= 1.1 Then .ColorIndex = 15
If VolM_ECond(iSys, kk, 2, iSear) = 10 Then .ColorIndex = 1
.Pattern = xlSolid
End With
'
ActiveSheet.Cells(4 + RowTemp + (kk - 1) * 2, 10 + j).Value = VolM_ECond(iSys, kk, 3, iSear)
Else
iSear = iSear + 1
End If
Else
k = 0
End If
Loop Until k > -1
End If
End If
Next kk
Next j
Next iSys
'
Flag1 = 1
If Flag1 = 1 Then
Select Case iP4
Case 1
iP4 = 100
Case 27
iP4 = 50
End Select
End If
Next iP4
ListCond1024 = 1
End Function

```

【Macro4】

```

Sub Macro4()
'Macro4 Macro
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer
Dim Val As Double
Application.Calculation = xlManual '自動計算OFF
Sheets("結果1023償却").Select
ActiveSheet.Unprotect 'シート非保護
al = LCCQe1023sk()
Application.Calculation = xlAutomatic '自動計算ON
End Sub
Function LCCQe1023sk() As Double
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer 'カウント変数
Dim l As Integer, m As Integer, n As Integer, iVari As Integer 'カウント変数
Dim Flag1 As Integer '生産量シナリオスキップフラグ
Dim MacInStep As Integer '生産量-設備投資段数のMAX:未使用
Dim ManExInStep(3) As Integer 'ML,TL,FMSごとの設備投資段数のMAX
Dim iSys As Integer, iP4 As Integer 'ML,TL,FMS選択変数、100+4生産シナリオ選択変数
Dim Val As Double '計算変数
Dim Rows As Double '行計算変数
Dim RowSys As Integer, ColSys As Integer '行、列計算変数
Dim RowCal As Integer, ColCal As Integer '行、列計算変数
Dim RowTemp As Integer, ColTemp As Integer
Dim PiA(4) As Double '100+4生産シナリオの為のI~IVの加重比率変数
Dim PiV As Double '加重比率変数
Dim ProScena(40) As Double '40期生産量Array
Dim ItiA(3, 40) As Double '40期償却費Array
Dim MC_EXtiA(3, 25, 2, 40) As Double '人件費、経費Array
Dim LouV As Double '将来価値係数:定数
Dim LCC1Q As Double '1Q将来価値計算
Dim LCC1QSys(3) As Double
Dim LCCBSum(3) As Double
Dim LCC1QSysM As Double
Dim CostMac As Double
Dim CostMan As Double
Dim CostExt As Double
Dim ProductCost As Double
Dim MC_coll(3, 25, 40) As Integer
Dim Coll As Integer
Dim IChCost(3, 15) As Double

Flag1 = 0 '生産量シナリオスキップフラグ
MacInStep = 15 '生産量-設備投資段数のMAX
ManExInStep(1) = 14 'MLでの設備投資段数のMAX
ManExInStep(2) = 9 'TLでの設備投資段数のMAX
ManExInStep(3) = 23 'FMSでの設備投資段数のMAX

'生産量シナリオ対応可能な設備投資、人件費、経費表シートのクリア
Sheets("結果1023償却").Select
Range("B3:AU400").Select
Selection.ClearContents
Range("A3").Select
'行数/シナリオの計算
Rows = (1 + 3 + ManExInStep(1) + 3 + ManExInStep(2) + 3 + ManExInStep(3))
'40各期ごと、ML:1,TL:2,FMS:3のMAXシステム記憶変数などのクリア
For j = 0 To 4
PiA(j) = 0
Next j
For j = 0 To 40
ProScena(j) = 0 '生産シナリオ
Next j
For iSys = 0 To 3
For j = 0 To 40
ItiA(iSys, j) = 0
Next j
Next iSys
For iSys = 0 To 3
For iVari = 0 To 12
For i = 0 To 2
For j = 0 To 40
MC_EXtiA(iSys, iVari, i, j) = -1
MC_coll(iSys, iVari, j) = 2 'コスト表示色クリア
Next j
Next i
Next iVari
Next iSys

```

```

LouV = 0.024114                                '現在価値係数

'コスト表示のための設備費読み込み
Sheets("設備費").Select
For iSys = 1 To 3
  For j = 0 To MacInStep
    IChCost(iSys, j) = ActiveSheet.Cells(7 + (iSys - 1) * 4, j + 4).Value
  Next j
Next iSys
'生産量シナリオ 100+4 の繰り返し
For iP4 = 1 To 104                               'P1 P4
  Sheets("DATA1024").Select
  '生産量シナリオ I ~ IV 確率の読み込み (記入のため)
  For j = 0 To 4
    RowCal = 70 + (iP4 - 1) * Rows
    PiA(j) = ActiveSheet.Cells(RowCal, j + 1).Value
  Next j
  '生産量シナリオ I ~ IV 40期の読み込み (以降計算のため)
  For j = 1 To 40
    ProScena(j) = ActiveSheet.Cells(RowCal, j + 10).Value
  Next j

'設備償却費、人件費、経費の読み込み (以降計算のため)
'記入する先頭行の計算
For iSys = 1 To 3 '(ML, TL, FMS)
  Select Case iSys
    Case 1
      RowCal = 70 + (iP4 - 1) * Rows
    Case 2
      RowCal = 70 + (iP4 - 1) * Rows + 3 + ManExInStep(1)
    Case 3
      RowCal = 70 + (iP4 - 1) * Rows + 3 + ManExInStep(1) + 3 + ManExInStep(2)
  End Select
  Val = ActiveSheet.Cells(RowCal + 1, 9).Value
  For j = 0 To 40
    ColCal = 10 + j
    For l = 1 To ManExInStep(iSys)
      MC_EXTiA(iSys, l, j) = ActiveSheet.Cells(RowCal + 4 + (l - 1), ColCal).Value
    Next l
    Range(Cells(RowCal + 4 + (l - 1), ColCal), Cells(RowCal + 4 + (l - 1), ColCal)).Select
    If Selection.Interior.ColorIndex > 0 Then MC_coll(iSys, l, j) = Selection.Interior.ColorIndex
    MC_EXTiA(iSys, l, 2, j) = Val
  Next l
  ItiA(iSys, j) = ActiveSheet.Cells(RowCal + 3, ColCal).Value '投資
Next j
Next iSys

'1~40期 条件選択
'クリア
For iSys = 0 To 3
  LCCBSum(iSys) = 0
  LCC1QSys(iSys) = 0
Next iSys
Sheets("結果1023償却").Select
ActiveSheet.Unprotect
For iSys = 1 To 3
  For PiV = 0 To 4
    RowSys = 2 + iP4 + (iSys - 1) * 110
    '生産量シナリオ I ~ IV 確率の記入
    ActiveSheet.Cells(RowSys, PiV + 1).Value = PiA(PiV)
    ActiveSheet.Cells(RowSys + 340, PiV + 1).Value = PiA(PiV)
    For i = 2 To 5
      ActiveSheet.Cells(RowSys + 340 * i, PiV + 1).Value = PiA(PiV)
    Next i
  Next PiV
  'ML:1, TL:2, FMS:3の記入
  ActiveSheet.Cells(RowSys, 6).Value = iSys
  ActiveSheet.Cells(RowSys + 340, 6).Value = iSys
  For i = 2 To 5
    ActiveSheet.Cells(RowSys + 340 * i, 6).Value = iSys
  Next i
  '各期LCCの計算
  For j = 40 To 1 Step -1
    LCC1QSys(iSys) = 1E+16
    For l = 1 To ManExInStep(iSys)
      If ((MC_EXTiA(iSys, l, 1, j) > 0)) Then
        LCC1QSysM = 0
      End If
    Next l
  Next j
Next iSys

```



```

For PIV = 1 To 4
    Val = PiA(PIV) * (ItiA(iSys, j) * 1000 + ProScena(j) * 3 * (MC_EXtiA(iSys, 1, 1, j) + MC_EXtiA(iSys, 1, 2, j)))
    LCC1QSysM = LCC1QSysM + Val
Next PIV
If LCC1QSys(iSys) > LCC1QSysM Then '各期MIN値記憶
LCC1QSys(iSys) = LCC1QSysM
CostMac = ItiA(iSys, j) * 1000 / ProScena(j) / 3 'コスト表示用
CostMan = MC_EXtiA(iSys, 1, 1, j)
Coll = MC_coll(iSys, 1, j)
CostExt = MC_EXtiA(iSys, 1, 2, j)
ProductCost = CostMac + CostMan + CostExt
End If
End If
Next I
RowCal = 3 + (iSys - 1) * 110 + (iP4 - 1)
ColCal = 7 + j
ActiveSheet.Cells(RowCal + 340, ColCal).Value = LCC1QSys(iSys)
LCCBSum(iSys) = (LCC1QSys(iSys) + LCCBSum(iSys)) / (1 + LouV)
ActiveSheet.Cells(RowCal, ColCal).Value = LCCBSum(iSys)
ActiveSheet.Cells(RowCal + 340 * 2, ColCal).Value = CostMac 'コスト表示用/
ActiveSheet.Cells(RowCal + 340 * 3, ColCal).Value = CostMan
If Coll = 15 Then
Range(Cells(RowCal + 340 * 3, ColCal), Cells(RowCal + 340 * 3, ColCal)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = Coll
End If
ActiveSheet.Cells(RowCal + 340 * 4, ColCal).Value = CostExt
ActiveSheet.Cells(RowCal + 340 * 5, ColCal).Value = ProductCost
If Coll = 15 Then
Range(Cells(RowCal + 340 * 5, ColCal), Cells(RowCal + 340 * 5, ColCal)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = Coll
End If
Next j
Next iSys
'skip用
If Flag1 = 1 Then
Select Case iP4
Case 1
iP4 = 100
Case 25
iP4 = 50
End Select
End If
Next iP4
LCCQe = 1
End Function

```

## 【Macro9】

```
Sub Macro9()  
Macro9 Macro  
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer  
Sheets("RANDAM").Select '  
ActiveSheet.Unprotect 'シート非保護  
k = ListRnd(k)  
ActiveSheet.Protect DrawingObjects:=True, Contents:=True, Scenarios:=True 'シート保護  
End Sub  
Function ListRnd(iPara As Integer) As Integer  
Randomize  
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, l As Integer, m As Integer  
Dim mm As Double  
Dim Pip(4) As Double  
Dim PiRan(4) As Double  
Dim PP(100, 2, 1) As Double  
Dim Prod As Double  
Dim Sum1 As Double  
  
For i = 0 To 4  
Pip(i) = 0  
Next i  
For i = 0 To 100  
For j = 0 To 2  
For k = 0 To 1  
PP(i, j, k) = 0  
Next k  
Next j  
Next i  
Sheets("RANDAM").Select '  
ActiveSheet.Unprotect  
For i = 1 To 4  
Pip(i) = ActiveSheet.Cells(2, i + 3).Value  
Next i  
For i = 1 To 100 'ランク境界読み込み  
For j = 1 To 2  
PP(i, j, 1) = ActiveSheet.Cells(3 + i, j + 1).Value  
Next j  
Next i  
For i = 100 To 1 Step -1  
mm = 0  
k = 0  
Do  
Sum1 = 0  
For l = 1 To 4  
PiRan(l) = Rnd  
Sum1 = Sum1 + PiRan(l)  
Next l  
For l = 1 To 4  
PiRan(l) = PiRan(l) / Sum1  
Next l  
Prod = Pip(1) * PiRan(1) + Pip(2) * PiRan(2) + Pip(3) * PiRan(3) + Pip(4) * PiRan(4)  
If (PP(i, 1, 1) < Prod) And (PP(i, 2, 1) >= Prod) Then  
PP(i, 2, 0) = 1  
For l = 1 To 4  
ActiveSheet.Cells(3 + i, l + 3).Value = PiRan(l)  
Next l  
End If  
mm = mm + 1  
ActiveSheet.Cells(2, 10).Value = mm  
If (PP(i, 2, 0) = 1) Then k = 1 '終了確認  
If (mm > 500000) Then k = 1 '回数制限  
Loop While k = 0  
Next i  
ListRnd = 1  
End Function
```

## 研究業績

### 1. 論文（掲載時期順）

題 目	収録文献	著 者
【1】 Flexible Production Systems developed and utilized in DENSO CORPORATION and their Evaluation	Proceedings of the 7th International Conference on Machine Automation, ICMA2008, pp. 175-180, Sept. 2008.	Harashima,S. , Ohno,K.
【2】 Reconfigurability of Flexible Manufacturing Systems corresponding to quantitative fluctuation developed in DENSO CORPORATION	Proceedings of the 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, CARV2009, pp. 122-131, Oct. 2009.	Harashima,S. , Ohno,K.
【3】生涯需要量の変動に対する生産システムの柔軟性評価	『経営情報科学』第5巻第1号, pp. 22-37, 2009年10月.	原嶋 茂
【4】 Flexible Production Systems developed and utilized in DENSO CORPORATION and their Evaluation	“ Service Robotics and Mechatronics -Selected Papers of ICMA2008-” edited by Keiichi Shirase and Seiji Aoyagi, Springer-Verlag London Limited., pp. 205-210, Dec. 2009.	Harashima,S. , Ohno,K.
【5】 デンソーで開発・実用化された柔軟な生産システムの再形態変化可能性	『日本経営工学会論文誌』60巻6号, pp. 306-317, 2010年2月.	原嶋 茂, 大野 勝久

2. 学会発表（発表時期順）

題 目	学会（場所）時期	発表者
【1】 製造における柔軟性について ～ 柔軟性の評価研究（第1報）～	日本経営工学会平成19年度秋季 大会（小樽商科大学）2007年10月	○原嶋 茂, 大野 勝久
【2】 製造における柔軟性について ～ 柔軟性の評価研究（第2報）～	日本経営工学会平成20年度春季 大会（電気通信大学）2008年5月	○原嶋 茂, 大野 勝久
【3】 Flexible Production Systems developed and utilized in DENSO CORPORATION and their Evaluation	ICMA2008 -International Conference on Machine Automation（淡路夢舞台国際会 議場）2008年9月	*Harashima, S., Ohno,K.
【4】 生産システムの Reconfigurability とその評価	日本機械学会東海支部第58期 総会・講演会（岐阜大学）2009 年3月	○原嶋 茂, 大野 勝久
【5】 柔軟な生産システムの分類と評 価	精密工学会09年春季大会（中央 大学）2009年3月	○原嶋 茂, 大野 勝久
【6】 製造における柔軟性について ～ 柔軟性の評価研究（第3報）～	日本経営工学会平成21年度春季 大会（城西大学）2009年5月	○原嶋 茂, 大野 勝久
【7】 Reconfigurability of Flexible Manufacturing Systems corresponding to quantitative fluctuation developed in DENSO CORPORATION	CARV2009-International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production（ミュンヘン・マリョッ ト・ホテル）2009年10月	*Harashima, S., Ohno,K.
【8】 需要量の変動に対する柔軟性 評価法	日本機械学会生産システム部門 研究発表講演会（早稲田大学） 2010年3月予定	○原嶋 茂, 大野 勝久

## 筆者紹介

昭和28年10月15日新潟県加茂市生まれ

昭和47年3月 秋田県立秋田高等学校卒業

昭和53年3月 東北大学工学部機械工学第二学科卒業

昭和55年3月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻修了

昭和55年4月 日本電装株式会社（現株式会社デンソー）入社

生産技術部に配属以来、一貫して生産システム開発に従事。この間、次期型製品である、Ⅲ型オルタネータを始め、ABS-3Pソレノイド、スピードセンサ、クラッシュセンサー、積層セラミックセンサや新事業製品（リチウムイオン電池、ELディスプレイ、PALAP基板）など多くの製品の生産システム開発を担当。

平成17年4月 愛知工業大学大学院経営情報科学研究科博士後期課程入学  
会社で担当した生産システム開発業務を、経営的視点で研究。

一方、筆者は、小説家（筆名：鳴海風）としても活躍。

平成2年 第20回池内祥三文学奨励賞受賞

平成6年 第16回歴史文学賞受賞

2006年 日本数学会出版賞受賞

主な著書に、『円周率を計算した男』『算聖伝』『ラランデの星』『怒濤逆巻くも』（以上新人物往来社）  
『和算忠臣蔵』『美しき魔方陣』（以上小学館）  
『和算小説のたのしみ』（岩波書店）などがある。